

# 砌体结构受爆破地震波作用破坏特征研究

宗 琦, 赵要才

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**在建筑物附近进行爆破作业产生的爆破振动,会引起结构一定程度的损伤,对结构的安全性和耐久性产生影响。根据现场工程情况,采用有限元软件 ANSYS 建立砌体结构的计算模型,对爆破地震波作用下其受力和变形进行数值模拟分析。研究表明,爆破地震波作用时,房屋门、窗户的四角部位和墙角等是易产生应力集中和破坏的关键部位;结构对爆破振动的响应程度随着结构物高度的增加而增大;砌体结构设计施工和在砌体结构附近进行爆破作业时,应采取相应减振措施,以降低爆破振动的危害。

**关键词:**砌体结构;爆破地震波;破坏特征

中图分类号:TU311.3 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0001-05

## Research on Damage Features of Masonry Structures under Blasting Seismic Wave ZONG Qi, ZHAO Yao - cai

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Blasting vibration generated by near buildings blasting operations, can cause a certain degree damage, affect security and durability of structure. According to the engineering case, in this paper the finite element software ANSYS was used to establish calculation model for masonry structure. Its stress and deformation under the action of blasting seismic wave were analyzed based on numerical simulation. The research showed that under impact of blasting seismic wave, the corners of doors, windows and walls are critical parts of stress concentration and destruction.

The extent of blasting vibration response of structures rises with structures height increase. In masonry structure design, construction and blasting operations around masonry structure, measures should be taken to reduce the blasting vibration hazards.

**Key words:** masonry structure; seismic wave; damage feature

爆破技术广泛应用于城市改建、基坑开挖、矿山开采、隧道施工等众多领域,在施工快速、便捷、经济的同时,也带来了一些负面效应,爆破振动便是其中之一,也是爆破公害之首。在抗震性能较差的建筑(如砌体结构)周围进行爆破作业时,若振动强度较大,爆破地震波会引起结构不同程度的损伤,对建筑物的耐久性和安全性将产生影响。目前

较多研究的是通过对爆破时建筑物的振动进行监测分析,而对爆破振动引起建筑物变形破坏的研究很少见到报道。文献[1]研究了露天矿山爆破对混凝土工程的振动影响,通过对某围垦工程拟建混凝土结构水闸附近的采石场爆破振动监测分析,根据各测点峰值振动速度和主振频率及其变化规律,评价了爆破振动对水闸工程的影响;文献[2]对爆

破振动荷载作用下3~4层房屋结构响应测试分析,获得了爆破振动荷载作用下房屋各层结构的响应特性规律;文献[3]对近建筑物基坑岩石松动爆破振动进行了监测分析,得到爆破场地松动爆破地震波的传播规律,给出了施工最大一次同段起爆药量;文献[4]研究了建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的响应特征,结果表明:建(构)筑物对于爆破振动中的不同频率能量成分存在明显的选择放大效应。在爆破地震中,与结构固有频率相一致的能量成分将被最大程度的放大。文献[5]以某露天矿境界边坡近坡肩的1栋3层框架结构建筑为研究对象,建立了频繁爆破震动作用下钢筋混凝土构件和整体结构的疲劳损伤模型,研究了频繁爆破震动作用下,结构位移、应力,刚度变化的规律。文献[6]在分析建筑结构的爆破地震安全判据的不足和爆破地震与天然地震的特点的基础上,研究了爆破参量对爆破地震波反应谱的影响和爆破地震频率对建筑结构破坏的影响。鉴于此,本文借助有限元ANSYS软件,对砌体结构房屋在近距离爆破振动作用下的受力、变形进行模拟分析,探讨砌

体结构在爆破振动作用下易发生变形破坏的关键部位,为砌体结构的抗震设计、施工提供有益参考。

## 1 计算模型与参数

### 1.1 单元模型

为了更好地反映爆破动载作用下砌体结构的变形、破坏特征,采用三维有限元模型进行计算,并作以下2个假设:

1) 砌体本身是单相均质且各向同性材料。因砌体力学性能有较大的差异,一般认为砌体是一种两相材料,即一种弹块体(包括砖或混凝土砌块)嵌入非弹性的灰浆基体的材料。两相非均质有限元模型已被一些学者所采用<sup>[7]</sup>。但,此类模型将使问题复杂化,故一些学者建议采用均质单相材料模型<sup>[8]</sup>;

2) 楼板在其自身平面内无限刚度。

根据假设,采用有限元软件ANSYS建立两层砌体结构房屋的模型,分析其在爆破地震波作用下的响应特征。模型中材料的力学参数如表1所示。

表1 砌体材料力学参数

单元	材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度/ MPa	单轴抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
砌体	普通砌块	2 100	0.17	20	40	0.18

### 1.2 计算模型建立

用来计算的砌体建筑物尺寸:房间宽3.3 m,共3间,进深6 m,每层高度3.3 m,2层;窗户高度为1.2 m,宽为0.9 m,窗台离地面为1.2 m,门洞宽1.76 m。模型结构平面图、建立的计算模型和网格划分如图1~图2所示。

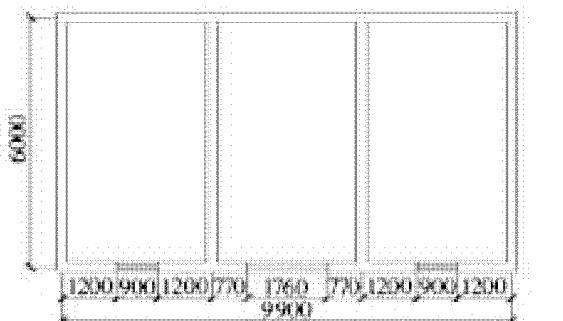


图1 结构平面图(mm)

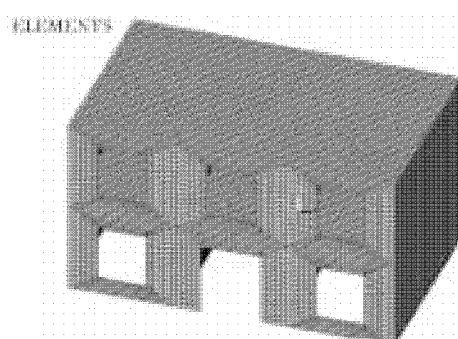


图2 模型与网格划分

## 2 计算结果及分析

### 2.1 自身重力下受力特征

自然情况下,砌体建筑物都受自身重力的作

用,故在模态分析前,先求解其在自身重力作用下的应力和变形特征。计算时,先加约束边界条件,然后施加重力,得到自然状态下结构受力和变形特征(见图3~图4)。可见,在自然重力下,砌体结构X方向的应力与应变最大值均在中间横墙顶部位置,最大应力0.645 MPa,最大变形0.179 mm。

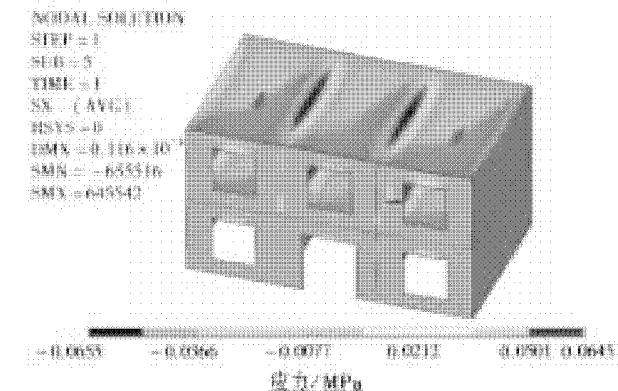


图3 静力时结构X方向应力图

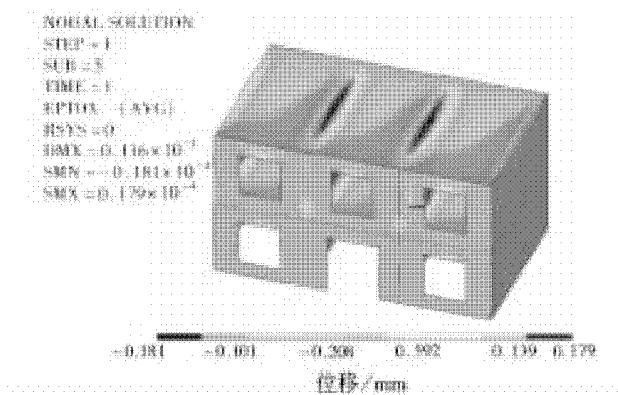


图4 静力时结构X方向位移图

## 2.2 振动作用下结构的受力特征

建立在静力分析的基础上,爆破振动作用下砌体结构的受力特征采用模态分析;以分析和确定结构的振动特性,即结构的固有频率和模态(振型),它们是承受动态荷载结构设计的重要参数,也是瞬态动力分析的基础。ANSYS的模态分析是一个线性分析,它提供了7中模态分析方法,本文选用子空间法(Subspace),得到了结构的固有频率和振型。模拟计算时选用了6振型,其中第一、二、六阶振型的位移和应力云图如图5~图8所示。

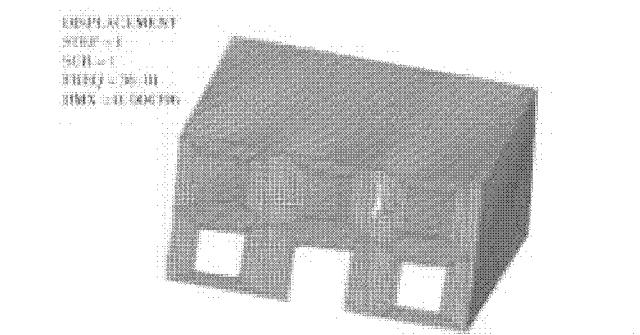


图5 第一阶振型

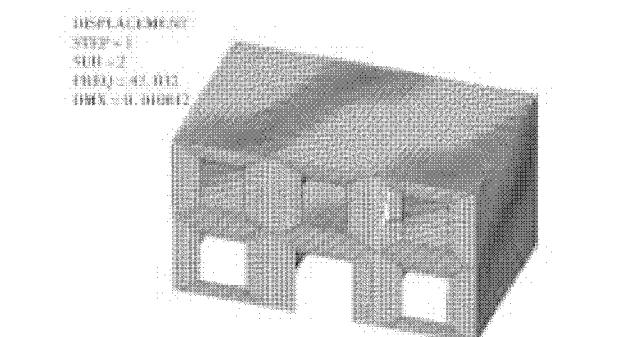


图6 第二阶振型

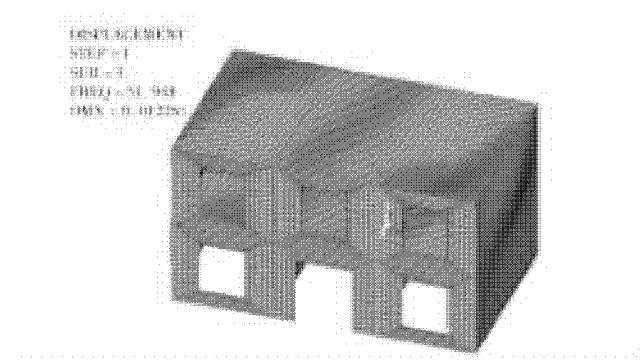


图7 第三阶振型

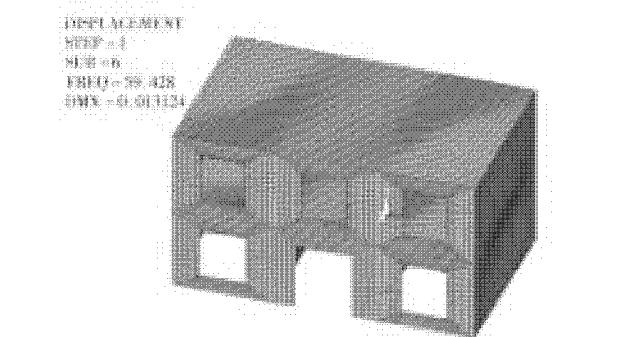


图8 第六阶振型

为了确定砌体结构对爆破动载的动力响应情况,计算采用谱分析代替时间-历程分析,就是将模态分析结果与一个已知的谱联系起来计算振型的位移和应力。传统的谱分析方法多将测试得到的振幅-时间曲线进行傅里叶变换(FFT变换),然后作为荷载输入计算,这种方法没有考虑结构本身的特点。故,本文计算时采用现场测试得到的反应谱,并结合第一阶振型进行分析,得到的位移与应力云图如图9~图12所示。

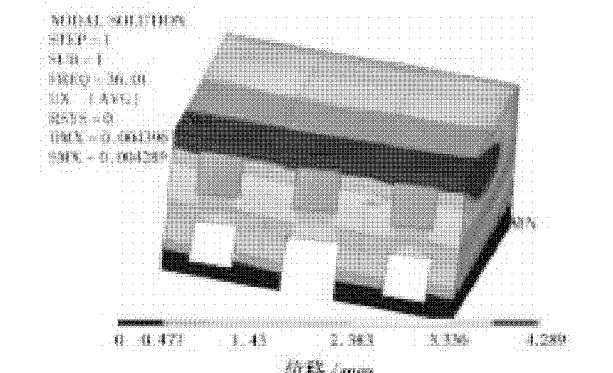


图9 第一阶振型X方向位移云图

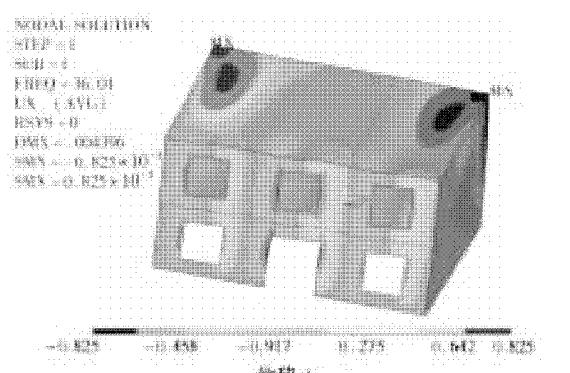


图10 第一阶振型Y方向位移云图

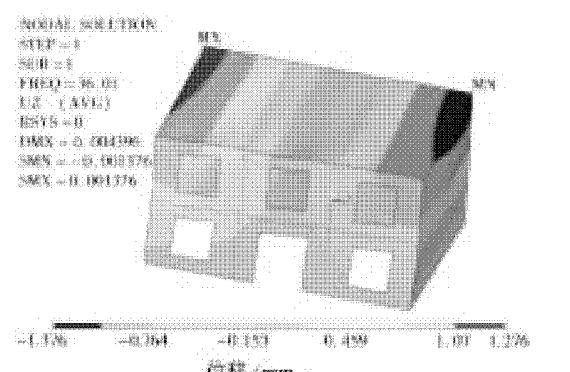


图11 第一阶振型Z方向位移云图

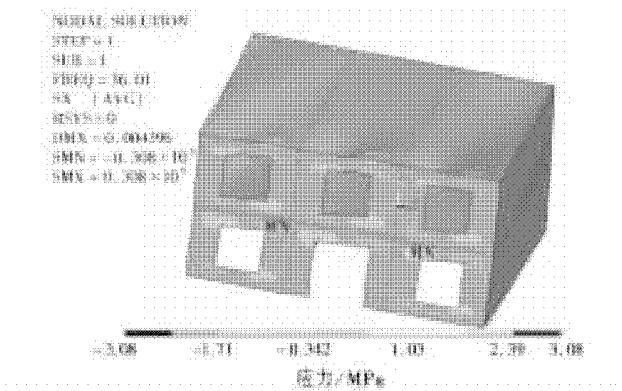


图12 第1阶振方向水平应力云图

### 2.3 结果分析

由以上计算结果可得,砌体结构在爆破动载激励下发生的主要动力响应出现在建筑物二层屋顶部位,且屋顶边角处位移最大,位移量达到4.396 mm。结构的位移响应随着高度的降低而减小;对于砌体建筑物,位移响应主要以顶部的X方向运动为主,垂直方向爆破振动对结构的影响较水平方向小的多,说明二层砌体结构主要受爆破地震波水平分量影响。已知建筑物高度为6.6 m,最大位移与层高的比值 $\frac{4.396}{6600} < \frac{1}{1000}$ <sup>[9]</sup>,故该二层楼房在此次爆破动载作用下仅发生弹性变化。

同时,还可发现:最大应力出现在门与窗户的四角部位,在墙角等拐角处也出现了应力集中现象(见图13)。

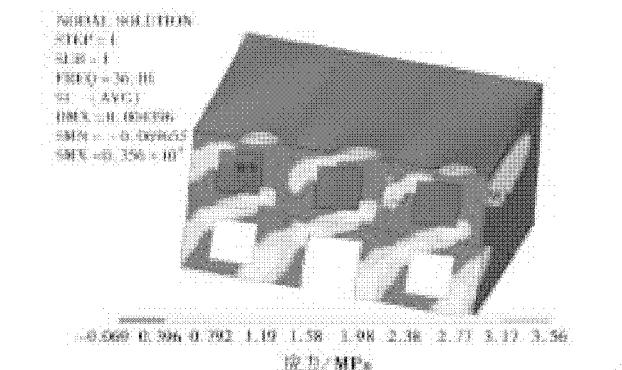


图13 第1阶振主应力云图

在窗台上部X方向的位移突然加大,导致在突然变位处产生了应力集中,使此处的应力响应达到最大,最大应力为31.8 MPa。同样,在门的上部以及下部由于边界效应也产生了应力集中。由于结构受到爆破水平震动激励而产生X方向主体变位,所以结构的应力响应表现为Y方向的主应力。

结构受到爆破震动激励而产生的剪应力小,主要位于结构的左侧下部和结构中部,最大值约5.5 MPa(见图14)。

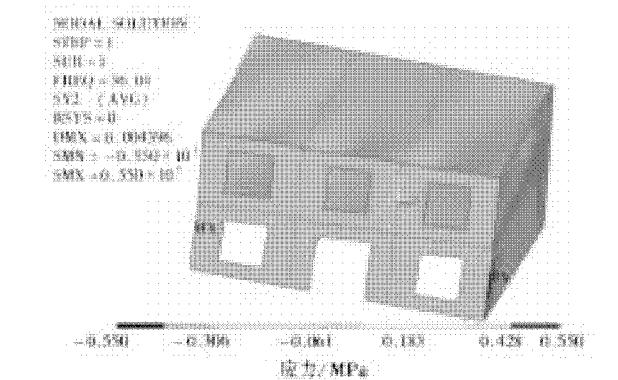


图14 第1阶振方向剪切力云图

由上述计算分析,砌体结构在爆破动载作用下动力响应较其他结构的动力响应大。结构受到的总应力与总位移应为结构受到的静力位移、应力与动力位移、应力之和。相对于动力位移、应力,静力位移与应力数值小,在考虑砌体结构安全时,可以只考虑结构在动力作用下位移变形与应力值。从模拟结果得知,砌体房屋平均应力在7.0 MPa,低于砌体的抗压强度20 MPa,在此爆破振动下结构是安全的。根据爆破现场调查,房屋结构没有出现倾斜、开裂等现象,验证了数值计算结果。

### 3 结论

1) 随着建筑(结构)物高度的增加,其对爆破振动的响应程度增大;最大动力位移响应位于建筑物屋顶部位,最大位移发生在屋顶边角处。

2) 最大应力发生在门与窗户的四角部位,墙角等拐角处也易出现应力集中的现象,这几处可视为受爆破影响的关键部位。

因此,在爆区周围新建砌体结构建筑物时,根据规范要求设置构造柱、圈梁或采用配筋砌体等是必要的;在砌体结构建筑物附近进行爆破作业时,可对门与窗户的四角部位、墙角等关键部位进行补强,以降低爆破振动对建筑物的危害。

### 参考文献:

- [1] 葛双成,刘全忠,章晓桦,等.露天矿山爆破对混凝土工程的振动影响监测分析[J].工程爆破,2010,16(2):70~73.
- [2] 林键,林从谋,林丽群.爆破振动荷载作用下3~4层房屋结构响应测试研究[J].振动与冲击,2010,29(3):48~53.
- [3] 苏贺,汪海波,宗琦.临近建筑物基坑岩石松动爆破振动监测[J].爆破,2009,26(1):99~101.
- [4] 李洪涛,舒大强,卢文波,等.建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的响应特征[J].振动与冲击,2010,29(2):154~159.
- [5] 谭文辉,于森,张鹏飞.频繁爆破震动对框架结构性能的影响研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(9):252~256.
- [6] 刘满堂,陈庆寿.建筑结构对爆破地震的动力响应特性研究[J].爆破,2005,22(4):23~28.
- [7] PAGE A. Finite element model for masonry [J]. J Strict Div, ASCE, 1978, 104(8):1 285~1 367.
- [8] SAMARASINGHE, W PAGE A W, HENDRY A W. Behavior of brick masonry shear wall [J]. The Struct Engng, 1981, 59B(3): 42~48.
- [9] 中国建筑东北设计研究院有限公司. GB 50003~2011 砌体结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 人工冻土单轴抗压强度灰色理论预测

牛连僧<sup>1</sup>, 姚兆明<sup>1,2,3</sup>, 亓燕秋<sup>4</sup>

(1. 安徽理工大学土木建筑学院,安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学冻土力学研究所,安徽 淮南 232001; 3. 中煤矿山建设集团有限责任公司,安徽 合肥 230000; 4. 中煤矿山建设集团有限公司淮南冻结处,安徽 淮南 232001)

**摘要:**人工冻土的物理力学指标是冻结法凿井中冻结壁设计参数和开挖的依据,为提高人工冻土单轴抗压强度预测的精确度与稳定性,利用灰色理论处理小样本数据的独特优势,结合影响人工冻土单轴抗压强度因素,提出了人工冻土单轴抗压强度的预测方法。针对传统的GM(1,1)模型预测产生的较大误差的缺点,增加了原始序列的光滑度,并优化了时间响应函数,建立了改进的GM(1,1)模型。结果表明,利用改进的GM(1,1)模型的预测精度优于传统模型。该模型为人工冻土单轴抗压强度的预测提供了一种新方法。

**关键词:**人工冻土强度;灰色理论; GM(1,1)模型; 单轴强度预测

中图分类号:TU443 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0006-05

## Calculation of Artificial Frozen Soil Uniaxial Strength Based on Grey Theory

NIU Lian-seng<sup>1</sup>, YAO Zhao-ming<sup>1, 2, 3</sup>, QI Yan-qiu<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;  
2. Institute of Artificial Frozen Soil Mechanics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3. China Coal Construction (group) Corporation LTD., Hefei Anhui 230000, China; 4. China Coal Construction (group) Corporation LTD, Huainan Frozen Construction Department, Huainan Auhui 232001, China)

**Abstract:** The mechanical properties of frozen soil in the freezing sinking project are the basis of freezing wall design and excavation. In order to improve accuracy and stability of artificial frozen soil uniaxial strength prediction, the prediction methods of artificial frozen soil uniaxial strength was put forward, which can calculate artificial frozen soil uniaxial compressive strength, based on the artificial permafrost uniaxial compressive strength test and using grey theory which has advantages in small sample processing. The improved GM (1, 1) model was established, which increases smoothness of the original sequence and optimizes time response function to mitigates the prediction error of traditional GM (1, 1) model. The results showed that the prediction accuracy by improved GM (1, 1) model is superior to the traditional model. The improved model is a new method to predict artificial frozen soil uniaxial strength.

**Key words:** artificial frozen soil uniaxial strength; grey theory; GM (1, 1) model; uniaxial strength prediction

冻土的强度一直是冻土力学研究和工程设计、施工所关注的研究课题。冻土是由土矿物颗粒、胶结冰、未冻水、水汽及气所组成的典型的非均匀多

相材料,由于各相之间的相互作用,导致冻土表现出的力学性能非常复杂<sup>[1]</sup>。冻土的单轴抗压强度是有限、离散的,在研究参数的影响因子时,一些重

塑土样也无法准确制作,这就需要在已有资料的基础上进行统计分析,建立相应的数学模型,对未知样本进行判断,并对未来趋势作出预测。

预测是根据已有的实际数据资料,应用现代的科学理论和方法,以及丰富的经验和敏锐的判断力,去探索某事物今后的发展趋势,并作出估计和分析,以指导未来的行动的方向,减少未来事物的不确定性,基于灰色系统理论的动态预测模型,称为灰色预测,其中应用最广泛的是 GM(1,1) 序列预测模型,由于其所需样本数量少,计算简便等优点已被广泛应用于军事、农业、经济、煤炭工业等各个领域。为使 GM(1,1) 预测模型更好的服务于社会的生产实践,许多专家学者进行了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果。

预测的核心问题是预测方法,或者说预测的数学模型建立。目前,适合中长期预测的方法有回归模型法、弹性系数法、人工神经网络法和灰色模型预测法等。灰色模型自创立以来已经得到很大程度上的改善,目前已经建立了多种初始值和背景值的优化方法。但是原有优化方法仍然存在需要加以改进的地方。

文献[2]在基坑边形预测的灰色二次优化模型中,采用对初始值修正的最小二乘法;对时间响应参数添加修正的解决近似指数的序列改进 GM(1,1) 模型;对基坑变形直接建模的二次优化的 GM(1,1) 模型,结果显示再次优化模型有较高的精度。文献[3]在基于 GM(1,1) 改进模型的建筑物沉降预测中,提出了一种同时优化背景值和初始条件的 GM(1,1) 改进模型,并将其应用于对建筑物的沉降变形进行定量分析与即时预报,改进的模型在精度上有了显著的提高。

文献[4]通过 BP 神经网络法、回归分析法、灰色预测法等对冻土强度进行预测,得出 BP 神经网络法预测的结果是可靠的。文献[5]运用神经网络的声波法预测冻土的抗拉、抗压强度,把神经网络预测值与回归方程计算值对比,得出前者优于非线性回归方程计算的结果。文献[6]运用遗传算法与支持向量机相结合的方法对人工冻土单轴抗压强度进行预测,并把 Sigmoid 核函数、高斯径向基核函数、多项式核函数的预测结果进行比较,结果表明,多项式函数的遗传支持向量机预测的结果较为可靠。以上文献中对改进的灰色理论在冻土中研究较少,基于此提出了冻土单轴抗压强度的改进灰色理论预测模型。

在已有实测数据的基础上,应用灰色理论对人工冻土单轴抗压强度进行预测,针对传统的灰色模型预测精度不高的情况;增加原始序列的光滑度,将传统模型的白化方程的时间响应式进行改进;验证了改进的模型预测精度明显优于传统模型的精度,为人工冻土单轴抗压强度试验提供了可靠的理论保证。

## 1 灰色理论

灰色预测模型是灰色系统理论的重要组成部分,灰色系统模型 GM( $m, n$ ) 是以灰色模块概念为基础,以微分拟合为核心建模方法,模型参数中的  $m$  为模型微分方程阶数,  $n$  为参与建模的序列个数,微分方程的阶数越大,计算越复杂,而精度提高则不明显,因此,通常采用 GM(1,1) 作为预测模型。

GM(1,1) 模型的步骤如下,根据最小二乘法原理,设原始序列<sup>[6-10]</sup>

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (1)$$

将序列进行累加生成 AGO (Accumulating Generation Operator) 的递增序列为

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (2)$$

$$\text{其中 } x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i); k = 1, 2, \dots, n.$$

如果  $x^{(1)}$  序列变化过程为指数曲线,则可建立微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (3)$$

式中: $a$  为发展系数,反映系统发展趋势;  $b$  为灰作用量反映数据的变化关系。

$z^{(1)}(k)$  序列,称为白化背景序列。转化得到差分方程组为

$$Y_N = Xa \quad (4)$$

用最小二乘法可得方程组的解为

$$a = (\frac{a}{b}) = (\frac{B^T}{B})^{-1}XY_N, \text{代入原微分方程,可}$$

得到白化响应式为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (5)$$

构造向量  $(a, b)$  称为一级数包,记作  $P_1(a, b)$  的构成成分构成二级数包  $C, D, E, F$  称为 GM(1,1)

二级数包,记作  $P_2(C, D, E, F)$ ,令

$$C = \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) \quad (6)$$

$$D = \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) \quad (7)$$

$$E = \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k)x^{(0)}(k) \quad (8)$$

$$F = \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k)^2 \quad (9)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (10)$$

从而可求得  $X^{(1)}$  序列,再将其累减生成:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (11)$$

这个  $\hat{x}^{(0)}$  序列便为原始序列的模拟值,当  $k \geq n$  时,便是根据原始序列的预测值。

利用灰色理论进行建模时,随着时间的推移,新的数据不断加入到原始数据集中,使得原始数据越来越大,数据处理计算量增大,采用等维建模思想,即当增加一个新的信息时,将其加入原始序列中,同时可以认为最老的信息从一定程度上不能反映模型信息而将其舍去,从而保证序列的维数不变,建立新的序列的灰色模型,建模输出及预测误差将在结论中给出。

## 2 GM(1,1) 模型的改进

传统的灰色 GM(1,1) 模型在短期预测精确度较高,但中长期预测效果并不好,有可能出现预测值偏大的结果,因此出现了各种改进的模型如:新陈代谢 GM(1,1) 模型<sup>[11]</sup>、GM(1,1) 残差模型<sup>[12]</sup>,为增加原始序列的光滑度,在确定发展系数  $a$  和灰作用量  $b$  后,将传统模型的白化方程的时间响应式(5)做下面改进为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = ce^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (12)$$

还原值为

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k) &= \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k-1) = \\ &ce^{-ak}(1-e^a) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $c$  为待求参数。

按照  $x^{(0)}(k)$  与模型的拟合值  $\hat{x}^{(0)}(k)$  之差平方和最小的原则构建函数  $F(c)$  为

$$\begin{aligned} F(c) &= \sum_{i=1}^n [\hat{x}^{(0)}(i) - x^{(0)}(i)]^2 = \\ &\sum_{i=1}^n [ce^{-ai}(1-e^a) - x^{(0)}(i)]^2 \end{aligned} \quad (14)$$

令  $F'(c) = 0$ , 可得

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n x^{(0)}(i)}{\sum_{i=1}^n e^{-2ai}(1-e^a)} \quad (15)$$

将  $c$  代入式(11)得

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \frac{\sum_{i=1}^n x^{(0)}(i)e^{-ai}}{\sum_{i=1}^n e^{-2ai}(1-e^a)}e^{-ak}(1-e^a) \quad (16)$$

## 3 灰色模型检验

灰色模型能否适用于人工冻土单轴强度的预测,还需进行必要的数理统计检验,其检验方法一般有残差检验、关联度检验和后验差检验三种。所谓残差检验是对实测值预测值之间的误差进行的一种逐点检验的方法,通过各点的相对残差值,可以计算出预测模型的精度值  $P$ ,而后查验检验法是根据后验差比值  $C$  和小误差概率  $P^0$  两个参数对所建立的模型划分精度等级(见表1),若精度达到了“良好”或以上指标则可利用灰色理论对后期数值进行预测。

表 1 精度检验等级

指标	优秀	良好	中等	不合格
$P^0$	$>0.95$	$>0.80$	$>0.70$	$\leq 0.70$
$C$	$<0.35$	$<0.5$	$<0.65$	$\geq 0.65$

设  $x_1$  为实际值,  $x_2$  为模型值,  $y$  为残值, 残差为  
 $y = x_1 - x_2$  (17)

相对残差为

$$e^{(0)}(k) = \frac{x_1 - x_2}{x_1} \times 100\% \quad (18)$$

平均残差为

$$e^{(0)}(\text{avg}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |e^{(0)}(k)| \quad (19)$$

精度为

$$p = 1 - e^{(0)}(\text{avg}) \quad (20)$$

残差的均为

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y(i) \quad (21)$$

残差数列的均方差为

$$s_1 = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum [y(i) - \bar{y}]^2} \quad (22)$$

实测值数列均值为

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum x_1(i) \quad (23)$$

实测值数列均方差为

$$s_2 = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum [x_1(i) - \bar{x}_1]^2} \quad (24)$$

后验差检验指标:后验差比值  $c = \frac{s_1}{s_2}$ , 小误差概率

$$p^0 = p\{|y_i - \bar{y}| < 0.674s_2\} \quad (25)$$

分别采取残差检验和后验差两种方法对所建立的模型进行检验。

#### 4 灰色模型预测

对淮南某煤矿的人工冻土单轴抗压强度试验在自行研制的 WDT-100 冻土性能试验机上进行, 试验机由低温箱、自动加载系统、数据采集仪等组成; 试验装置最大加载能力为 10 吨, 精度为 0.01。试验荷载和试验数据全部由计算机根据设定好的参数自动控制和采集。试验分别对 1~10 土层冻土试样进行了 3 个温度水平 (-5℃, -10℃, -15℃) 下的单轴抗压强度试验, 试验结果如表 2 所示, 利用灰色模型对各层的 -10℃, -15℃ 下的强度进行预测。

表 2 人工冻土单轴抗压强度试验结果

序号	土性	含水率/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	塑性指数	抗压强度/MPa		
						-5℃	-10℃	-15℃
1	粘土	19.76	2.05	1.71	19.5	1.58	3.40	5.89
2	粘土	18.22	2.08	1.76	16	1.39	3.65	5.67
3	粘土	17.83	2.11	1.79	20.5	1.51	3.33	5.58
4	钙质粘土	13.12	2.14	1.89	20	1.46	3.38	5.64
5	钙质粘土	7.91	2.15	1.99	16	2.22	3.37	5.62
6	粘土	8.92	2.21	2.03	16	5.14	5.33	6.84
7	粘土	10.62	2.22	2.01	22	5.52	6.76	9.31
8	砂质粘土	10.14	2.27	2.06	21.5	3.88	5.81	9.06
9	粘土	11.67	2.31	2.07	28	3.93	7.12	9.56
10	粘土	12.31	2.28	2.03	16	4.25	7.24	8.46

用预测模型对每层土的 -10℃, -15℃ 下的人工冻土强度进行预测: -10℃, -15℃ 下 10 个土层的单轴强度由式(1)、式(2)累加生成递增序列, 然后把序列代入式(6)~式(9), 求出  $a, b$  的值, 把求得的  $a, b$  值代入(5)式, 得到的白化响应式为

-10℃下的传统强度白化响应式为

$$x^{(1)}(k+1) = 30.044e^{0.106k} - 26.644 \quad (26)$$

-15℃下的传统强度白化响应式为

$$x^{(1)}(k+1) = 125.586e^{0.048k} - 119.696 \quad (27)$$

最后由式(26)或式(27)得到  $X^{(1)}$  序列, 由

式(11)得到预测值。对于改进的预测值, 可把传统白化响应式的  $a, b$  值代入式(12)、式(13)、式(16), 求得改进的灰色理论预测值, 预测结果见表 3 所示。

对该模型的改进前后进行后差检验, 可以得到以下结论: 传统的 GM(1,1) 模型的精度是 0.84, 检验指标为 0.49; 改进的 GM(1,1) 模型的精度是 0.87, 检验指标为 0.43, 且达到了精度等级“良好”; 由此可知, 改进的模型可以应用于人工冻土的单轴强度预测, 与传统的模型相比预测精度明显提高。

表3 -10℃, -15℃下的强度试验值与模型值比较

序号	试验值/ MPa	-10℃				-15℃			
		GM(1,1)模型		改进 GM(1,1)模型		GM(1,1)模型		改进 GM(1,1)模型	
		模型值/ MPa	相对误差/ %	模型值/ MPa	相对误差/ %	模型值/ MPa	相对误差/ %	模型值/ MPa	相对误差/ %
拟合值	1	3.40	3.40	0	3.40	0	5.89	5.89	0
	2	3.65	3.38	7.3	3.70	-1.3	5.67	6.19	-9.2
	3	3.33	3.75	-12.6	3.80	-12.3	5.58	6.50	-16.4
	4	3.38	4.18	-23.6	3.61	-6.8	5.64	6.82	-20.9
	5	3.37	4.64	-38.1	3.82	-13.3	5.62	7.15	-15
	6	5.33	5.16	3.1	5.34	-0.1	6.84	7.51	-9.7
	7	6.76	5.75	14.9	6.14	10	9.31	7.88	15.3
	8	5.81	6.39	9.9	6.59	-13.4	9.06	8.26	8.8
	9	7.12	7.11	0.01	7.28	-2.2	9.56	8.67	9.3
	10	7.24	7.91	-9.2	7.91	-9.2	8.46	9.00	-6.3
	11	8.55	8.79	-2.8	8.75	-2.3	9.40	9.55	-1.5
	12	11.12	9.78	12.1	10.02	8.2	10.14	10.01	1.2
	13	13.8	10.88	21.1	11.69	15.2	11.23	10.51	6.4

## 5 结论

- 1) 改进的灰色模型 GM(1,1) 应用到人工冻土单轴强度预测, 预测精度明显高于传统模型, 可以较真实地对人工冻土单轴强度的预测;
- 2) 利用灰色理论进行人工冻土强度预测, 须有大量的试验数据, 且强度在概率统计的有效范围之内; 从而保证数据的有效性;
- 3) 利用灰色理论对人工冻土强度预测是一种趋势预测, 存在一定的误差, 在实测值序列数值变化幅度较大时, 变得较为凸出, 可以采用加密数据或建立残差 GM(1,1) 的方法对数据进行修正。

## 参考文献:

- [1] 孙星亮, 汪稔, 胡明鉴. 冻土弹塑性各项异性损伤模型及其损伤分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 517–3 523.
- [2] 李莉, 陈鹏宇, 段新胜. 基坑变形的灰色二次优化模型 [J]. 辽宁工程大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 926–929.
- [3] 孙永荣, 胡应东, 陈武, 等. 基于 GM(1,1) 改进模型的建筑物沉降预测 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(1): 107–110.
- [4] 贺俊, 杨平, 董朝文. 基于 BP 神经网络冻土强度预测模型研究 [J]. 路基工程, 2011, 156(3): 54–57.
- [5] 李强, 杨平. 基于神经网络的声波法预测冻土强度的研究 [J]. 建井技术, 2002, 23(6): 26–28.
- [6] 姚兆明, 王璇, 陈军浩, 等. 人工冻土单轴抗压强度 GA-SVM 预测模型 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 1–5.
- [7] 马金山, 杨兆建. 基于灰色理论和 BP 神经网络的多绳摩擦提升机钢丝绳张力不平衡预测 [J]. 煤矿机械, 2011, 32(2): 53–55.
- [8] 褚程程, 杨滨滨. 灰色理论在矿井用水量预测中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(2): 55–58.
- [9] 李宗坤, 乔小琴, 赵庆. 改进的 GM(1,1) 灰色模型在大坝沉降预测中的应用 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2010, 22(2): 1–4.
- [10] 阎岩, 张明义, 王家涛. 灰色理论在快速法载荷试验数据处理中的应用 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 799–802.
- [11] 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德, 等. 边坡变形的灰色预测模型 [J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 244–247.
- [12] 王勇, 胡平, 申莲, 等. GM(1,1) 改进模型在大坝位移预测中的应用 [J]. 云南水力发电, 2011, 27(2): 28–30.

(责任编辑:何学华, 吴晓红)

# 基于表面的 DNA 计算模型解决排课表问题

单静怡, 殷志祥

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**考虑到教师、班级以及课时等的不同要求,复杂的排课表问题就属于 NP 问题。为了使排课表问题更加简捷,方便,提出了基于微量点样技术的表面 DNA 计算模型。在实验中,通过对每次结果进行记录和比较,得到了满足问题要求的可行解。不需要改变问题的初始点列,适于研究规模较大的问题。

**关键词:**DNA 表面模型; 排课表问题; 0-1 规划问题

中图分类号:TP301.6 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0011-04

## The Solution to the Time-table Problem Based on Surface DNA Computing Model

SHAN Jing - yi, YIN Zhi - Xiang

(School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Taking into account the different requirements of teachers, classes and class hours, etc., complex time-table problem belongs to the NP problem. In order to make the time-table problem more simple, and convenient, the surface DNA computing model based on micro-spotting technology was proposed. In the experiment, by comparing the results of tests a feasible solution to meet the requirements of the problem was obtained. This method is suitable for large-scale study of the problem, without changing the initial arrangement of the problem.

**Key words:**DNA surface model; time-table problem; 0-1 programming problem

随着电子计算机的微处理能力接近极限,研究新的计算机结构成为现阶段的研究热点。通过许多学者对 DNA 计算模型和 DNA 计算可行性的研究<sup>[1-4]</sup>,使 DNA 计算从理论到实践成为可能。DNA 计算主要是根据 DNA 结构的特点,将问题变量映射为特定的寡聚核苷酸片段,进行退火杂交反应,利用 DNA 具有存储海量信息的特点,在一定的判断准则和相应的生物操作下,得到问题的可行解。

微量点样技术<sup>[5]</sup>主要是用于制作基因芯片,是指将一些提前设计好的特殊的 DNA 单链片段按照问题的要求依次排列并固定于物体表面上,利用 DNA 的碱基互补配对原则与待测的 DNA 单链片

段进行杂交反应。然后利用相应的检测技术对结果进行观察并记录,通过多次反应,比较结果,最后得到问题的可行解。微量点样技术具有存储量大,并行性好等特点,对于研究规模较大的问题具有一定优势。

## 1 排课表问题

排课表问题是指在一定的条件下,对有限的资源进行合理的分配,使得课时安排在满足问题要求的情况下,使用的课时数最少。在现实中,由于考虑到教师、班级以及课时等的不同情况,这样的排课表问题就是 NP 问题。简单的一些排课表问题

收稿日期:2013-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170172, 61073102)

作者简介:单静怡(1990-),女,河南宜阳人,在读硕士,研究方向:组合优化及 DNA 计算。

与0-1规划问题的思想基本相同。许多学者提出以图的着色算法来解决排课表问题<sup>[6-8]</sup>。周康等在图着色算法的基础上,提出用闭环DNA计算模型解决排课表问题<sup>[9]</sup>。文献[10]提出了用Acrydite<sup>TM</sup>分离技术建立DNA模型解决简单排课表问题,在每次循环的过程中需要重新构建凝胶柱。本文在0-1规划模型<sup>[11-12]</sup>基础上,提出了排课表问题的基于微量点样技术的表面DNA计算模型,在这一过程中,不需要改变问题的初始点列,通过对每次结果进行记录和比较,就可得到满足问题要求的可行解。

根据0-1规划问题的模型,可以用DNA表面计算模型求解一类简单的排课表问题。假设有r名教师和s个班级,教师 $r_i$ 给班级 $s_j$ 上 $t_{ij}$ 节课,要求在一定的约束条件下,用最少的课时设计课程表。

## 2 排课表问题的DNA计算模型

这里,我们以一个简单的排课表实例为例构造DNA计算模型。有3名教师 $r_1, r_2$ 和 $r_3$ ,4个班级 $s_1, s_2, s_3$ 和 $s_4$ ,对应的课时情况 $T = [t_{ij}]$ 为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

在该问题中的条件为:一名教师只能在一个课时给一个班级上课。一个班级在一个课时只能参加一个课程。 $s_1$ 和 $s_4$ 只能在 $x_1$ 上课。 $s_2$ 只能在 $x_2$ 上课。 $r_3$ 只能在第二课时给 $s_4$ 上课。我们约定有足够的教室可用。

### 2.1 生物算法

简单的排课表问题可以用0-1规划的思想来构造模型,其基本算法是:首先构造给定变量的相应的点列。根据问题的每一要求条件得到对应的可行点列,生成剩余的点列,检验剩余的点列,直到所有的点列被检验完,从而得到满足问题要求的可行解。它的生物算法可描述为:

1) 生成对应问题不同变量的单链DNA片段,利用微量点样技术,按照点阵的形式微量点样于物体表面(如玻片),用两种不同颜色的荧光对相应变量的补链进行标记,把经过标记的单链DNA片段制成探针。

2) 在表面加入对应于每个变量的补链。含有该变量的点列将与对应的补链进行杂交并产生不同颜色的荧光,判断荧光的颜色是否符合要求,利

用荧光成像技术记录符合要求的点列。

3) 加热表面恢复单链的形式,用缓冲液冲洗掉被分解的探针。

4) 重复进行(2)、(3)(对于(2)中已经判断为符合要求的点列不予考虑),当所有的点列被检验完时,分析每次结果可得一个符合要求的课时安排。

### 2.2 编码和生物操作

对应于上述的实例,它的编码和生物操作如下:

1) 生成单链DNA片段 $s_1, s_2, s_3, s_4$ ,单链DNA片段 $x_1, x_2$ ,并生成补序列 $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3, \bar{s}_4, \bar{x}_1, \bar{x}_2$ ,如图1所示。并将 $s_i$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ )用绿荧光(ABI)标记,将 $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ 用蓝荧光(CY3<sup>TM</sup>)标记,把经过荧光标记的DNA单链片段制作成探针。

$s_1$ : TCAGGCTA	$\bar{x}_1$ : GTTAGCAC
$s_2$ : ACCATTGG	$\bar{x}_2$ : GATTACGC
$s_3$ : CTAGTCGA	$\bar{s}_1$ : AGTCCGAT
$s_4$ : AGCCTGAT	$\bar{s}_2$ : TGGTAACC
$x_1$ : CAATCGTG	$\bar{s}_3$ : GATCAGCT
$x_2$ : CTAATCGG	$\bar{s}_4$ : TCGGACTA

图1 变量的编码图

2) 用6~9个原子的连接臂将DNA单链 $s_1, s_2, s_3, s_4$ 和 $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ 按照问题的要求,以点阵形式固定到表面上,根据每位教师给不同班级的上课情况,排成8行、3列,当教师不给某班级上课,或班级上课不限制在规定的教室时,该处排列为空,如图2所示,第1,2,3列分别表示教师 $r_1, r_2, r_3$ 的课时情况。因为点样排列是可寻址的,所以该方法在理论上是可行的。

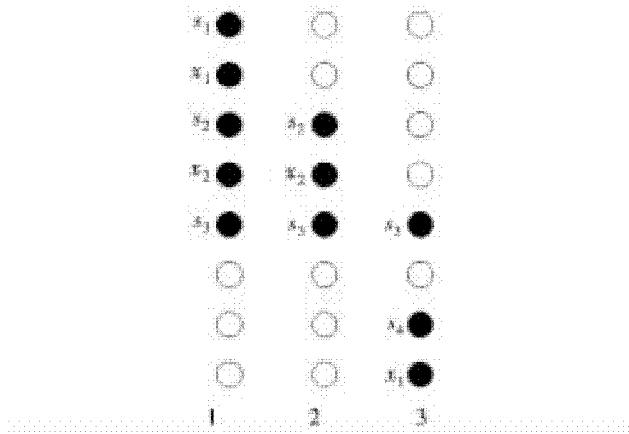
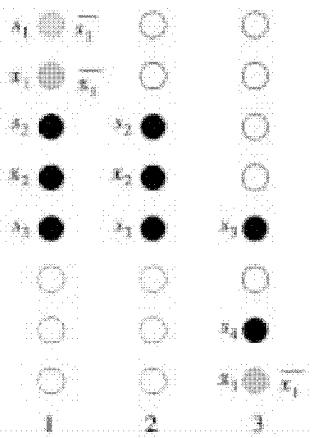
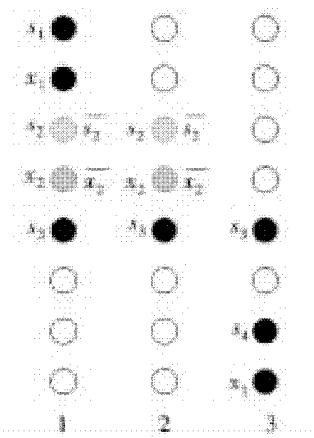
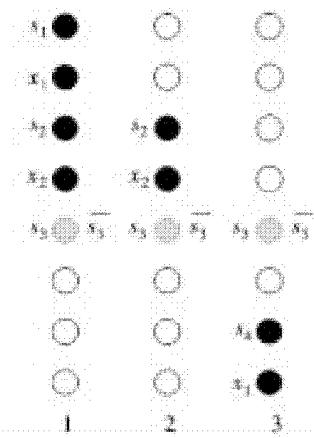


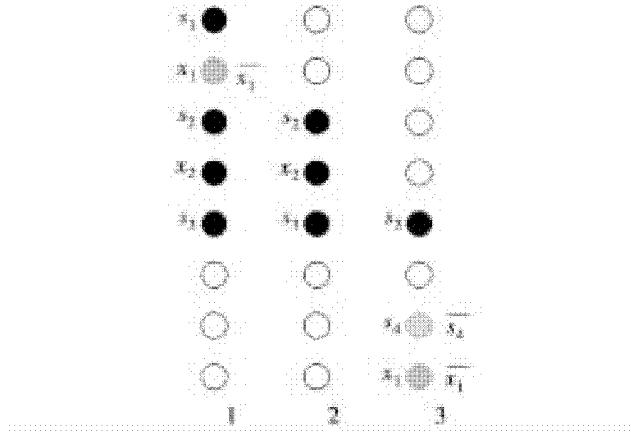
图2 所有课时情况的点样示意图

3) 在表面加入 $\bar{s}_1, \bar{x}_1$ 对应的 DNA 探针, 探针与 $s_1, x_1$ 杂交并产生不同颜色的荧光, 如图 3 所示。由于教师 $r_1$ 只能在教室 $x_1$ 上课, 利用荧光成像技术观察并记录符合条件的解(符合条件的为第 1 列)。即可得教师 $r_1$ 可以在教室 $x_1$ 给班级 $s_1$ 上课。加热表面恢复单链的形式, 用缓冲液冲洗掉被分解的探针。同理, 在表面加入 $\bar{s}_2, \bar{x}_2$ 对应的 DNA 探针, 探针与 $s_2, x_2$ 杂交并产生不同颜色的荧光, 如图 4 所示。利用荧光成像技术观察并记录符合条件的解(符合条件的为第 1, 2 列)。第 1 列已经被考虑过, 不再考虑, 可得教师 $r_2$ 可以在教室 $x_2$ 给

班级 $s_2$ 上课。加热表面恢复单链的形式, 用缓冲液冲洗掉被分解的探针。按照同样的方法, 在表面加入 $\bar{s}_3$ 对应的 DNA 探针, 探针与 $s_3$ 杂交并产生荧光, 如图 5 所示。利用荧光成像技术观察并记录符合条件的解(符合条件的为第 1, 2, 3 列), 第 1、2 列已经被考虑过, 不再考虑, 从而可得教师 $r_3$ 可以给班级 $s_3$ 上课。加热表面恢复单链的形式, 用缓冲液冲洗掉被分解的探针。在这一循环中, 所有的列均被被检验过, 可得第一个课时安排为 $\{r_1 s_1, r_2 s_2, r_3 s_3\}$ 。

图 3 加入 $\bar{s}_1, \bar{x}_1$ 后的反应示意图图 4 加入 $\bar{s}_2, \bar{x}_2$ 后的反应示意图图 5 加入 $\bar{s}_3$ 后的反应示意图

4) 在第二次循环过程中, 为满足问题要求的条件, 先在表面加入 $\bar{s}_4, \bar{x}_1$ 对应的 DNA 探针, 探针与 $s_4, x_1$ 杂交并产生不同颜色的荧光(见图 6)。

图 6 加入 $\bar{s}_4, \bar{x}_1$ 后的反应示意图

由于 $s_4$ 只能在教室 $x_1$ 上课, 利用荧光成像技术观察并记录符合条件的解(符合条件的为第 3 列), 可得教师 $r_3$ 可以在教室 $x_1$ 给班级 $s_4$ 上课。

加热表面恢复单链的形式, 用缓冲液冲洗掉被分解的探针。同理, 检验剩下的点列, 排除第一次循环过程中已经考虑过的点列, 检验剩下的点列, 如图 4~图 5 所示。这一循环, 可以得到第二课时的安排 $\{r_1 s_2, r_2 s_3, r_3 s_4\}$ 。

5) 在第三次循环中, 只剩下第 1 列中的 $s_3$ 没有被安排在课时表中。在表面加入 $\bar{s}_3$ 对应的 DNA 探针, 探针与 $s_3$ 杂交并产生荧光, 如图 5 所示。利用荧光成像技术观察并记录符合条件的解(符合条件的为第 1, 2, 3 列), 由于第 2, 3 列的 $s_3$ 已经在前两次循环中出现, 于是可知教师 $r_1$ 可以给班级 $s_3$ 上课。这样, 所有的点列被检验完。这一循环, 可以得到第三课时的安排 $\{r_1 s_3\}$ 。

## 2.3 实验分析

在该实验中, 根据荧光颜色确定课时安排, 经过 3 次循环可获得一个可行的课程安排, 实验结果如表 1。从表中可以看到, 最少需要 3 个学时完成

课程,课时安排分别为 $\{r_1s_1, r_2s_2, r_3s_3\}$ , $\{r_1s_2, r_2s_3, r_3s_4\}$ , $\{r_1s_3\}$ 。

表1 满足教学要求的课时安排

教师安排	第一课时	第二课时	第三课时
教师 $r_1$	$r_1s_1$	$r_1s_2$	$r_1s_3$
教师 $r_2$	$r_2s_2$	$r_2s_3$	
教师 $r_3$	$r_3s_3$	$r_3s_4$	

在简单排课表问题中,如果  $t_{ij} \geq 2$ ,即教师  $r_i$  需要给班级  $s_j$  上至少两节课时,可添加班级  $s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jm}$ ,使  $m = t_{ij} - 1$ ,将  $T$  增加  $m$  行,使其只含 0,1, 最后用该问题的模型来计算。如果要求教室数量有限,则依据教室的数量限制每个循环的班级数。

### 3 结论与讨论

本文在 0-1 规划模型基础上,提出了排课表问题的基于微量点样技术的表面 DNA 计算模型。该方法具有存储量大,并行性好等特点,将适于研究规模较大的问题。因为排课表模型是用地址阵列来表示的,具有较好的可靠性,理论上是可行的。

### 参考文献:

- [1] ADLEMAN L M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems [J]. Science, 1994, 266 (11): 1 021 – 1 023.
- [2] GARZON M, DEATON R. Codeword design and information encoding in DNA ensembles [J]. Natural Com- puting, 2004, 3: 253 – 292.
- [3] LIU Q H, WANG L M, FRUTO A G, et al. DNA computing on surfaces [J]. Nature, 2000, 403 (13): 175 – 179.
- [4] WU H Y. AN improved surface – based method for DNA computation [J]. Biosystems, 2001, 59 (1): 1 – 5.
- [5] 陈执中. DNA 微阵列技术的研究应用进展 [J]. 药物生物技术, 2001, 8 (6): 357 – 359.
- [6] WERRA D. An introduction to timetabling [J]. European Journal of Operations Research, 1985, 19: 151 – 162.
- [7] ABRAMSON D. Constructing school timetables using simulated annealing: Sequential and parallel algorithms [J]. Management Science, 1991, 37: 98 – 113.
- [8] 李敬文, 于自强. 基于立方体染色的排课表模型 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (24): 281 – 283.
- [9] 周康, 同小军, 刘文斌. 排课表问题的闭环 DNA 计算模型的算法 [J]. 计算机应用, 2007, 27 (4): 991 – 993.
- [10] ZHIXIANG YIN, MIN CHEN. Apply AcryditeTM Gel Separation to Solve Time – Table Problem [C]// TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering 2012, 10 (5): 1 111 – 1 116.
- [11] 殷志祥. 图与组合优化中的 DNA 计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 100 – 105.
- [12] 孙侠, 殷志祥, 李勇, 等. 全错位排列问题的基于芯片的 DNA 计算模型 [J]. 大学数学, 2010, 26 (5): 79 – 81.

(责任编辑:李丽,范君)

# 硬岩体强度弱化范围理论分析与工程验证

付宝杰<sup>1,2</sup>, 涂 敏<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 岩石巷道综合机械化快速掘进有助于改善采掘接续紧张的局面, 而岩石硬度是影响综掘设备快速掘进的关键因素之一。针对硬岩巷道围岩岩性特点, 利用超深孔预裂爆破技术, 对硬岩巷道岩体强度进行弱化, 并通过工程实践检验预裂效果, 结果表明: 硬岩巷道超深孔预裂爆破后, 钻孔周围形成压碎区、裂隙区, 使岩体有效强度降低, 有利于综掘截割机具经济破岩; 理论及数值模拟分析得出钻孔爆破后形成半径为 1.8 m 左右的松动破坏区; 通过对新庄孜矿 -812 m 水平 B4 胶带大巷硬岩进行超深孔预裂爆破, 钻孔窥视及工程验证爆破松动半径能够达到 1.5~2.5 m 之间, 取得了良好的岩体强度弱化效果, 为硬岩巷道机械化快速施工技术研究提供指导。

**关键词:** 硬岩巷道; 深孔预裂; 强度弱化; 机械化开采

中图分类号: TD235 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2014)01-0015-04

## Theoretical Analysis and Engineering Verification of the Range of Hard Rock Strength Weakening

FU Bao-jie<sup>1,2</sup>, TU Min<sup>1,2</sup>

(1. Shool of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. The Key Laboratory of Coal Mine Safety and Efficient Mining of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Fully mechanized rapid excavation in rock roadways is helpful to improve the intensive situation of the mining and driving continuance. One of the key factors is the rock hardness, which affects rapid excavation of fully mechanized equipment. Surrounding rock characteristics of hard rock roadways were concerned, the technology of the pre-splitting blasting in deep boreholes was used to weaken hard rocks in roadways, and the engineering practice was carried out to examine the effect of pre-splitting. The results showed that after pre-splitting blasting in deep boreholes, crushed and fractured zones appear around the boreholes, the effective strength of rocks were reduced in the crushed and fractured zones, which ensures economic breaking rocks by fully mechanized cutting machines. Theoretical analysis and numerical simulation results showed that fractured zone with radius of about 1.8 m appears after blasting. The technology was used to weaken hard rocks in B4 belt conveyor roadway at -812 m level in Xinzhuangzi Coal Mine. The results by observation in boreholes and engineering verification showed that blasting loosen radius reaches 1.5 m to 2.5 m, good weakening results were achieved, which provides important guidance for the mechanized rapid excavation technology research in rock roadways.

**Key words:** hard rock roadway ; deep hole pre-splitting; strength weakening; mechanized mining

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074004); 安徽省自然科学基金资助项目(11040606M102)

作者简介: 付宝杰(1976-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 博士, 研究方向: 矿山压力与岩层控制。

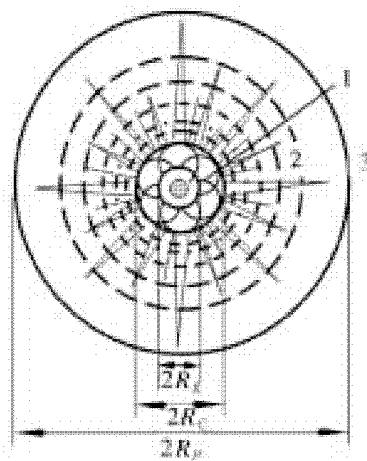
随着综采、综放技术的应用和高产高效矿井建设的迅猛发展,采煤、掘进速度不匹配的问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。为缩短新井的建井期和缓解正在生产矿井的采掘接续,岩巷快速掘进成为影响矿井生产稳定、发展的关键,也是制约矿井水平、采区、采场“三大接替”的瓶颈。因此,寻求一条高效快掘的新路,成为相当现实而重要的工程问题。

对于全岩巷道,当岩石硬度小于6时,综掘进能够较稳定的实现快速掘进;岩石硬度大于8时,一方面综掘机掘进速度低,另一方面对截割端部磨损相当严重。通过超深孔预裂爆破技术,使巷道围岩整体强度降低,从而保证综掘机械能够在全岩巷道中不间断或偶有间断作业,打开高效快掘的局面<sup>[3-5]</sup>。

## 1 硬岩深孔预裂爆破机理

### 1.1 固体介质爆破区域特征分布

炸药在炮孔内爆炸后,产生强冲击波和大量高温高压爆生气体(见图1)。由爆破孔传播出来的强间断冲击波阵面上都是压应力,其强度要高出介质的极限抗压强度的许多倍,致使炮孔周围的介质产生过度粉碎,形成压碎区。



$R_k$ —空腔半径; $R_c$ —压碎区半径; $R_p$ —裂隙区半径

1. 压碎区;2. 裂隙区;3. 震动区

图1 无限介质爆炸作用

冲击波透射到介质内部,以应力波形式向介质内传播,在靠近压碎区的介质中产生径向压缩和切向拉伸。当切向拉伸应力超过介质的动抗拉强度就会产生径向裂隙,形成裂隙区。

当应力波进一步向前传播时,已经衰减到不足以使介质产生破坏,只能使介质质点产生震动,以地震波形式传播,直至消失,故把裂隙区以外的区

域称为震动区。

深孔控制预裂爆破时,在掘进工作面前方的岩体中产生了压碎区和贯穿控制面的爆破裂隙区。压碎区和爆破裂隙区的存在是有效降低岩体强度保证截割机具经济破岩的关键<sup>[6]</sup>。

### 1.2 爆破引起的围岩松动效应

#### 1.2.1 压碎区 爆炸冲击波在岩体内衰减很快,其峰值压力随距离的变化规律<sup>[7]</sup>为

$$p(r) = \frac{2\rho c_p \rho_0 V^2}{r^3 (\rho c_p + \rho_0 V) (1 + \gamma)} \quad (1)$$

式中: $\bar{r}$ 为对比距离, $\bar{r} = \frac{r}{r_b}$ , $r_b$ 为炮孔半径; $\rho$ 、 $\rho_0$ 为岩石和炸药的密度; $c_p$ 分别为岩石中的声速; $V$ 为炸药爆速; $\gamma$ 为爆轰产物的膨胀绝热指数,一般取 $\gamma = 3$ 。

当冲击波到达压缩区边缘时,衰减为应力波,即波速衰变成 $c_p$ ,根据动量守恒求得边缘处压力峰值为

$$p_m = \rho c_p u_r \quad (2)$$

由岩石中冲击波速度和岩石质点移动速度的关系,求得边缘处岩石质点位移速度为

$$u_r = \frac{c_p - a}{b} \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为实验确定的常数(见表1)。

表1 岩石参数(中砂岩)

$\rho /$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$c_p /$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$S_t /$ MPa
2.67	3 400	10
波阻抗/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$a /$ $v$	$b$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$126.1 \times 10^5$	0.24	2 450 1.42

则压碎区半径 $R_0$ 为

$$R_0 = r_b \left( \frac{b p_m}{\rho_0 c_p (c_p - a)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

1.2.2 裂隙区 爆破形成的裂隙区是由拉伸破坏导致的,炮孔周围的压缩区相当于扩大了炮孔直径,则压缩区外应力波峰值随传播距离 $r$ 的变化关系<sup>[8]</sup>为

$$\sigma_{\max} = p_m \left( \frac{R_0}{r} \right)^{\frac{\alpha}{1-D}} \quad (5)$$

式中: $D$ 为损伤变量; $\alpha = 2 - \frac{\nu}{1 - \nu}$ , $\nu$ 为岩石的泊松比。

根据泊松效应,裂隙区的切向拉应力峰值为

$$\sigma_{\theta \max} = p_m \left( \frac{R_0}{r} \right) \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \quad (6)$$

当岩石的抗拉强度为  $S_t$  时,求得爆破后围岩中引起径向裂隙的扩展范围为

$$R_1 = R_0 \left( \frac{p_m}{S_t} \frac{\nu}{1 - \nu} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (7)$$

实际爆破中若炮孔半径  $r_b = 46.5 \text{ mm}$ ,  $\rho_0 = 1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $V = 5124 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 由表 1 相关参数并结合式(7)计算,得出爆破后围岩中引起裂隙扩展半径  $1.831 \text{ m}$ 。

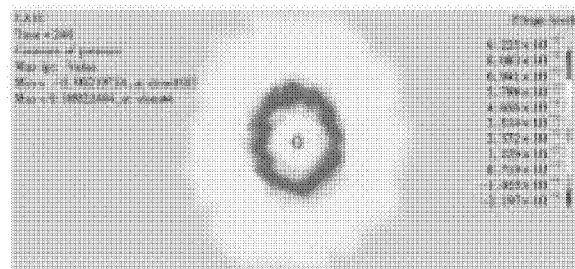
## 2 数值模拟分析

基于 ANSYS 动力分析模块 LS-DYNA, 建立由炸药、空气和岩石三部分组成的数值模型<sup>[9]</sup>, 用以分析水胶炸药爆破对硬岩体强度的弱化效果。在有限元建模时采用平面应变方式, 炸药单元与空气单元、空气单元与岩石单元通过共用节点方式联系起来。炸药采用 JWL 状态方程描述, 空气采用多项式状态方程模拟, 岩体采用弹塑性本构模型。模型宽  $5.0 \text{ m}$ , 高  $3.0 \text{ m}$ , 中心处炸药直径  $\Phi 67 \text{ mm}$ , 钻孔直径  $\Phi 93 \text{ mm}$ 。

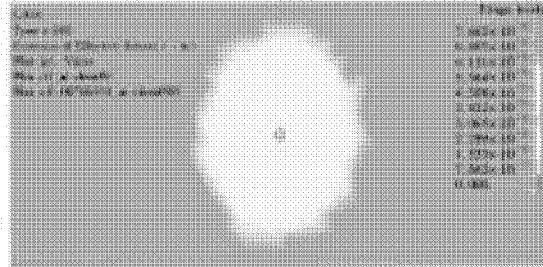
1) 炸药状态方程及参数。炸药爆轰过程压力和比容的关系采用 JWL 状态方程, 即:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (8)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料参数;  $P$  为压力;  $V$  为相



(a) 240 ms 时炮孔围岩中压应力图



(c) 240 ms 时炮孔围岩中 Von mises 应力图

对体积;  $E_0$  为初始比内能。

二级煤矿许用水胶炸药 JWL 状态方程参数如表 2 所示。

表 2 水胶炸药 JWL 状态方程参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
1 100	5 124	213	0.81	4.1	0.9	0.15	4.20

2) 空气采用多项式状态方程。

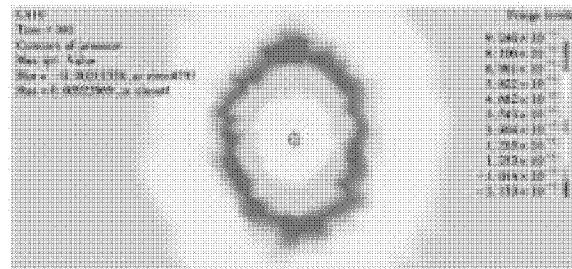
$$P = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E_0 \quad (9)$$

具体参数如表 3 所示。

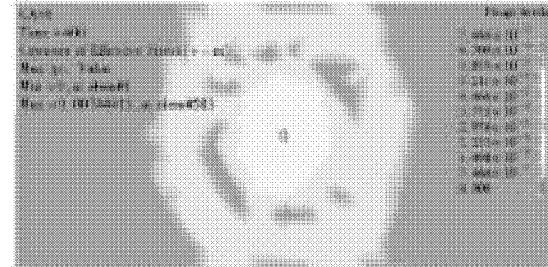
表 3 空气状态方程参数

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0/\text{MPa}$	$C_1/\text{MPa}$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/(J \cdot \text{m}^3)$	
空气	1.1	0.1	0	0	0	0.4	0.4	0	250 000

3) 模拟结果分析。炸药爆炸后不同时刻的炮孔围岩中的压应力和 Von mises 应力变化如图 2 所示。岩石的抗压强度在  $80 \text{ MPa}$  左右, 抗拉强度在  $10 \text{ MPa}$  左右。由于岩石的抗拉强度相对其抗压强度要低的多, 当炮孔附近围岩中的压应力达到  $100 \text{ MPa}$  时, 经过单位换算数值达到 0.002 时, 岩石受到冲击荷载作用引起的拉应力已经达到  $60 \text{ MPa}$  左右, 此时岩石中出现径向拉裂缝。因此, 压应力达到 0.002 即形成岩石的裂隙范围, 以炮孔为中心, 半径  $1.8 \text{ m}$  范围内的岩石已经弱化, 可以通过综掘机进行经济截割。



(b) 360 ms 时炮孔围岩中压应力图



(d) 400 ms 时炮孔围岩中 Von mises 应力图

图 2 爆破应力云图

### 3 工程实践

1) 爆破方案。为了掌握深孔松动爆破裂隙扩展范围,验证理论及数值分析结果,采用单孔松动爆破试验,试验地点为新庄孜矿-812 m水平B4胶带大巷,岩石为细砂岩,平均硬度 $f=8\sim9$ ,炮孔布置如图3所示,炮孔深度15 m,孔径Φ93 mm,药卷直径Φ67 mm,装药长度10 m,炮孔堵塞长度5 m,装药布置如图4所示。

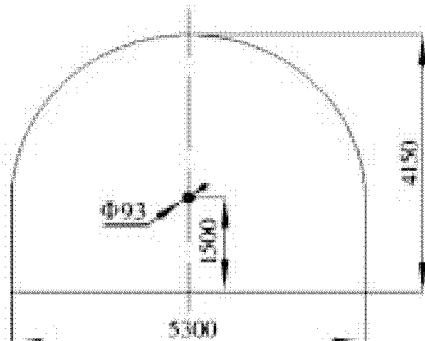


图3 深孔爆破炮孔布置示意图

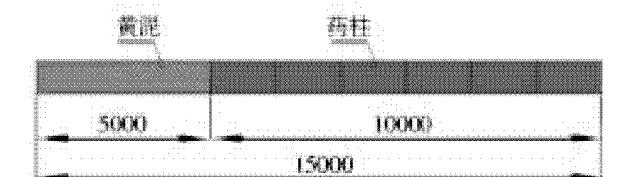


图4 炮孔装药结构示意图

2) 弱化效果分析。为考察大直径深孔爆破对硬岩的弱化程度及范围,深孔爆破前在新庄孜矿-812 m B4胶带大巷及相关巷道施工钻孔,在施工过程中,由于钻机硐室方位与胶带大巷之间形成32°夹角,进而形成如图5所示的钻孔及巷道布置方式。

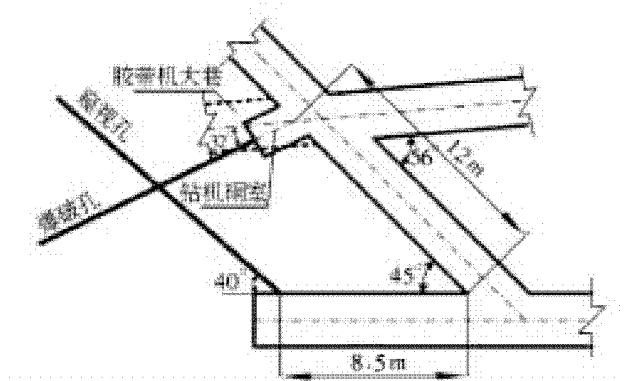
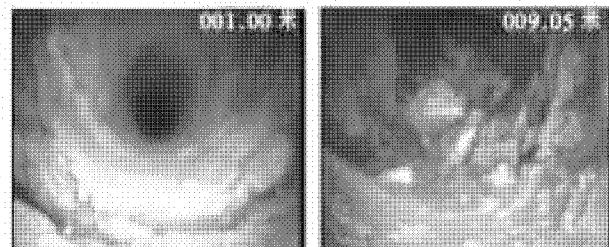


图5 方位改变后的钻孔示意图

通过对窥视孔窥视发现,从孔口位置到1.8 m一段,孔壁破损较严重,1.8 m以后,孔壁保持完整状态。8.12 m开始,发现碎屑及裂痕,到9.05 m位置,孔内塌落岩块过多,镜头无法进入(见图6)。



(a) 1 m 处 (b) 9.05 m 处

图6 爆破前孔内观测照片

窥视孔9 m位置其下部正对应爆破孔,两孔孔口标高相差50 mm,据此计算出爆破孔松动范围1.6 m(见图7)。

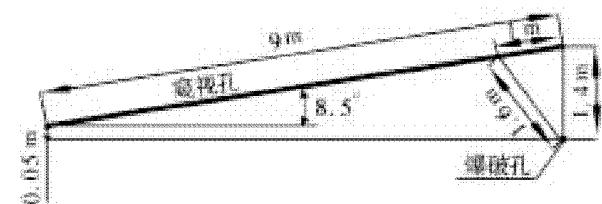


图7 两钻孔位置关系图

另外,在胶带大巷掘进期间对其进行现场观测,当大巷掘进7~9 m一段时,巷道左帮出现卡钎现象,据此推测爆破孔松动半径在1.5~2.5 m之间(见图8)。对于爆破孔而言,该距离正好在过封孔段附近,胶带大巷掘进矸石较破碎,这也与因爆破产生的节理较发育有关。

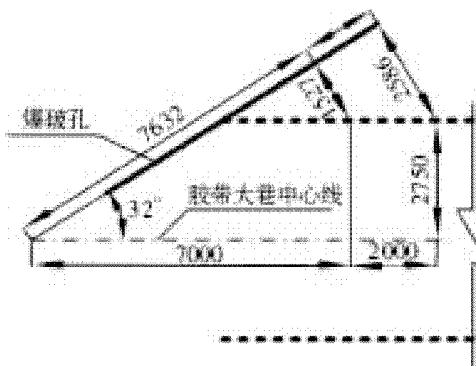


图8 预裂半径分析图

# 子网行为等价的特殊网系统的同步距离

王丽丽, 方贤文, 张苗苗

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 同步距离是刻画事件之间同步关系的一个重要的定量分析手段, 已经有相关文献表明它对系统的设计和分析提供了很大的帮助, 尤其在工作流和工业生产控制系统的协调结构设计方面有着显著的优势。然而目前只有一些特殊的子网中变迁之间的同步距离计算有较简洁的算法, 为了使得更多的网系统其同步距离计算也能够有简洁的算法, 证明了若一个网系统的行为等价与某个特殊的子网, 那么此网系统中变迁之间的同步距离的求解就可以转化为其行为等价的特殊子网的同步距离的求解问题, 并且给出了寻找其行为等价的特殊子网的算法, 最后进行了相应的实验验证。

**关键词:** Petri网; 同步距离; 行为等价; 特殊子网

中图分类号: TP391. 9 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2014)01-0019-05

## Synchronic Distance of A Special Net System with Equivalent Behavior of Subclass Petri Net

WANG Li-li, FANG Xian-wen, ZHANG Miao-miao

(School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** The synchronic distance is an important analyzing method to describe the synchronic relationship between two events. It is demonstrated in many literatures that the synchronic distance is very helpful in the design and analysis of the system, especially in the workflow and the control system of industrial production coordination structure design. However, only the calculation method of the synchronic distance in some special subclass of Petri nets have relatively simple algorithm, in order to make the computation of the synchronic distance in more net system is also simple, the paper proves that if the behavior of a net system is equivalent to that of some special subclass of Petri, the synchronic distance between two transitions in this net system can be transformed into the one in special subclass of Petri nets. The algorithm of determining the behavior equivalent special subclass of Petri net is also given, and the corresponding experiment was done finally.

**Key words:** Petri net; synchronic distance; behavior equivalence; special subnet

Petri网的概念是1962年由德国科学家C. A. Petri首先提出来的, 它是分布式系统的描述和分析工具<sup>[1-5]</sup>, 特别便于描述系统中进度和部件的顺

序、并发、冲突及同步等关系, 广泛的应用于很多实际的系统, 如离散事件系统<sup>[2]</sup>, 柔性制造系统<sup>[3]</sup>, 软件工程<sup>[4]</sup>, 通信协议<sup>[5]</sup>和生物信息学<sup>[6]</sup>等系统。

收稿日期: 2013-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272153, 61170059); 安徽省高校自然科学基金重点资助项目(KJ2011A086); 安徽省自然科学基金资助项目(1208085MF105); 安徽省软科学研究计划资助项目(12020503031); 安徽理工大学青年教师科学基金资助项目(2012QNY36)

作者简介: 王丽丽(1982-), 女, 安徽安庆人, 讲师, 硕士, 研究方向: Petri网理论及应用、算法分析与设计。

文献[7]中最先将“同步距离”的概念引入 Petri 网,它是描述两个事件(或事件集)之间同步的一个重要的系统恒定性质,反映出两个变迁(变迁集)之间相对独立程度,不仅可以对两个(组)事件同步程度给出定量描述,而且也是刻画系统动态行为的工具。已经有大量的文献验证了同步距离对系统设计和分析提供了很大的帮助,譬如在工作流模型中,可以利用同步距离对工作流模型进行分析,从而检验和控制工作流程<sup>[8-14]</sup>。

由于同步距离的求解不仅和网的结构特征有关系而且和网的初始标识也存在关系,所以到目前为止还没有一个很简洁易行的算法来求解一般 Petri 网的同步距离,然而一些特殊的 Petri 网子类如出现网<sup>[15]</sup>、标识 T-图<sup>[1]560</sup>、标识 S-图<sup>[16]</sup>和标识 T-网<sup>[17]</sup>的同步距离的计算已经有了较简洁的求解方法。本文基于此出发证明了若一个网系统的行为等价于某个特殊的子网,那么此网系统中变迁之间的同步距离的求解就可以转化为其行为等价的特殊子网的同步距离的求解问题,同时给出了相应的寻找行为等价特殊子网的算法。

## 2 基本概念

关于 Petri 网的基本概念和结论详细内容见文<sup>[18]</sup>,这里只对与本文有关的基本概念、结论、术语和记号做个简述或约定,以便后面的讨论。

**定义 1** 设  $N = (S, T; F)$  为一个网,若  $\forall s \in S: |s^\bullet| = |s^\circ| = 1$ , 则称  $N$  为一个  $T$ -图( $T$ -graph)。若  $N = (S, T; F)$  为一个  $T$ -图,称  $\Sigma = (N, M_0)$  为一个标识  $T$ -图。

**定义 2** 设  $N = (S, T; F)$  为一个网,若  $\forall t \in T: |t^\bullet| = |t^\circ| = 1$ , 则称  $N$  为一个  $S$ -图( $S$ -graph)。若  $N = (S, T; F)$  为一个  $S$ -图,称  $\Sigma = (N, M_0)$  为一个标识  $S$ -图。

**定义 3** 设  $N = (S, T; F)$  为一个网,若  $\forall s \in S: |s^\bullet| \leq 1$  且  $|s^\circ| \leq 1$ , 则称  $N$  为一个  $T$ -网( $T$ -net)。若  $N = (S, T; F)$  为一个  $T$ -网,称  $\Sigma = (N, M_0)$  为一个标识  $T$ -网。

**定义 4** 设  $\Sigma = (S, T; F, M_0)$  和  $\Sigma' = (S', T; F', M'_0)$  为两个 Petri 网,如果存在满射  $f: R(M'_0) \rightarrow R(M_0)$  使得 1)  $f(M'_0) = M_0$ ; 2) 若  $f(M') = M$ , 对  $\forall \sigma \in T^*$ : 在  $\Sigma'$  中有  $M'[\sigma] >$  当且仅当在  $\Sigma$  中有  $M[\sigma] >$ , 则称  $\Sigma'$  和  $\Sigma$  是行为等价的。

为了统一,后面均采用  $sd(t_i, t_j)$  作为变迁  $t_i$  和变迁  $t_j$  的同步距离记号,当讨论一个网系统  $\Sigma$  中各个变迁之间的同步距离时,一般都假设  $\Sigma$  是一个恰当网系统,即  $\forall t \in T, \exists M \in R(M_0): M[t] >$ 。可见一个恰当网系统  $\Sigma$  必然是一级活的。所以在本文中假设所讨论的网系统均是恰当网系统。

**定义 6** 设  $\Sigma = (S, T; F, M_0)$  为一个 Petri 网,  $t_1, t_2 \in T$ , 那么  $t_1$  和  $t_2$  的同步距离由下面公式给出

$$sd(t_1, t_2) =$$

$$\begin{cases} \infty, & \text{若 } t_1, t_2 \text{ 在 } \Sigma \text{ 中不处于公平关系} \\ \max_{t_i, t_j \in T} \{\#(t_i/\sigma) + \exists M \in R(M_0): M[\sigma] > \wedge \\ \#(t_i/\sigma) = 0 \wedge i, j \in \{1, 2\} (i \neq j)\}, & \text{否则} \end{cases}$$

## 3 两个行为等价网系统的同步距离求解

有些网系统虽然不是特殊的子网(如标识  $S$ -图、标识  $T$ -图和标识  $T$ -网),但其可达标识集同某个特殊子网的可达标识集之间可以建立一一映射,而且在这个映射下两个网系统是行为等价的。对于这样的网系统,可以将其同步距离求解的问题转化为其行为等价的子网的同步距离求解问题。

**定理 1** 设  $\Sigma = (S, T; F, M_0)$  为一个 Petri 网,如果存在某个特殊子网(如标识  $S$ -图或标识  $T$ -图)  $\Sigma_1 = (S_1, T; F_1, M_{01})$ ,使得

1)  $\Sigma$  的可达标识集  $R(M_0)$  和  $\Sigma_1$  的可达标识集  $R(M_{01})$  之间存在一一映射

$$\begin{aligned} f: R(M_0) &\rightarrow R(M_{01}) \\ \text{且 } f(M_0) &= M_{01} \end{aligned}$$

2) 若  $f(M) = M_1$ , 则对  $\forall \sigma \in T^*$ , 在  $\Sigma$  中有  $M[\sigma] > \Leftrightarrow$  在  $\Sigma_1$  中有  $M_1[\sigma] >$

那么,在  $\Sigma$  中  $\forall t_i, t_j \in T$  有  $sd(t_i, t_j)$  等于  $\Sigma_1$  中  $sd(t_i, t_j)$ 。

**证明** 对于网  $\Sigma$  中的任意两个变迁  $t_i, t_j \in T$ ,

1) 若在网  $\Sigma$  中  $t_i, t_j$  处于非公平关系,则  $\exists M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^*$ , 对于任意的正整数  $k$ , 都有  $\#(t_i/\sigma) = 0 \rightarrow \#(t_j/\sigma) > k$ 。由于  $f$  是一一映射,而且在这种映射下网  $\Sigma$  和网  $\Sigma_1$  是行为等价的,因此在  $\Sigma_1$  中也有:  $\exists M_1 \in R(M_{01})$  和  $\sigma \in T^*$ , 对于任意的正整数  $k$ , 都有  $\#(t_i/\sigma) = 0 \rightarrow \#(t_j/\sigma) > k$ 。

故易知,当  $t_i$  和  $t_j$  在  $\Sigma$  中处于非公平关系时,在  $\Sigma_1$  和  $\Sigma$  中均有  $sd(t_i, t_j) = \infty$ 。

2) 若在网  $\Sigma$  中  $t_i, t_j$  处于公平关系, 在  $\Sigma$  中  $\exists M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^*$  使得

$$\#(t_i/\sigma) = \max_{t_i, t_j \in T} \{\#(t_i/\sigma) + \exists M \in R(M_0) : M[\sigma > \wedge \#(t_j/\sigma) = 0]\}$$

由于  $f$  是一一映射,而且在这种映射下网  $\Sigma$  和网  $\Sigma_1$  是行为等价的,因此在  $\Sigma_1$  中也  $\exists M_1 \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^*$  使得  $\#(t_i/\sigma)$  等于网  $\Sigma$  中的  $\#(t_i/\sigma)$ 。

故当  $t_i$  和  $t_j$  在  $\Sigma$  中处于公平关系时,在  $\Sigma_1$  和  $\Sigma$  中  $sd(t_i, t_j)$  的值相等。

证毕。

定理 1 表明两个行为等价的网系统中任意两个变迁之间的同步距离值是相等的。

如果能通过对原网系统  $\Sigma$  作一些保持行为等价的转换,将其变换为另一个结构更加简单的网系统  $\Sigma'$ ,那么只需判断网系统  $\Sigma'$  是否是一个特殊的子网,若是,则对原网  $\Sigma$  中任意两个变迁的同步距离求解就可以转化为对网系统  $\Sigma'$  中变迁之间的同步距离的求解。

#### 4 与网 $\Sigma$ 行为等价的网系统 $\Sigma'$ 计算

算法 1 给出了如何寻找一个和原网  $\Sigma$  行为等价的网系统  $\Sigma'$

**算法 1:**

输入:一个网系统  $\Sigma = (S, T, F, M_0)$

输出:一个与  $\Sigma$  行为等价的网系统  $\Sigma' = (S', T', F', M'_0)$

Step1: If 在  $\Sigma$  中  $\exists s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik} \in S$  满足  $s_{i1}^\bullet = s_{i2}^\bullet = \dots = s_{ik}^\bullet$  且  $s_{i1}^\bullet = s_{i2}^\bullet = \dots = s_{ik}^\bullet$ ,

Step2: Then 将  $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}$  合并为一个库所  $S_I$ , 并且满足  $s_I^\bullet = s_{i1}^\bullet, s_I^\bullet = s_{i2}^\bullet, \dots, s_I^\bullet = s_{ik}^\bullet, M_0(s_I) = \min\{M_0(s_{i1}), M_0(s_{i2}), \dots, M_0(s_{ik})\}$ , 同时将  $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}$  及其关联的弧从网  $\Sigma$  中删去;

Step3: If 在  $\Sigma$  中  $\exists s_1, s_2 \in S$  满足  $s_1 \subseteq s_2, t \in s_1^\bullet \cap s_2^\bullet$  且  $M_0(s_1) \leq M_0(s_2)$ ;

Step4: Then 将弧  $(s_2, t)$  从网  $\Sigma$  中删去;

Step5: If 在  $\Sigma$  中  $\exists s_i \in S$  满足  $s_i^\bullet = \varphi$ ;

Step6: Then 将  $s_i$  及其关联的弧从网  $\Sigma$  中删去;

Step7: 输出一个与  $\Sigma'$  行为等价的网系统  $\Sigma' = (S', T', F', M'_0)$

说明:① 算法 1 中的 step3 表明如果库所  $s_1$  能得到标识时,则  $s_2$  一定也能够得到标识;但是  $s_2$  得到标识时,  $s_1$  不一定能够得到标识,又由于  $M_0(s_1) \leq M_0(s_2)$ , 所以此时当  $s_1, s_2$  同时作为变迁  $t$  的前集时,  $t$  的引发其实主要受到  $s_1$  中拥有的标志数的影响 ( $M_0(s_2) - M_0(s_1)$  个标志对  $t$  的引发不起作用), 故在 step4 中可以将弧  $(s_2, t)$  从网  $\Sigma$  中删去。

② 算法 1 中的 step5 表明  $s_i$  对网  $\Sigma$  中各个变迁的行为不产生影响,可视  $s_i$  为冗余库所,因此在 step6 中可以将  $s_i$  及其关联的弧从网  $\Sigma$  中删去

不难发现,上述算法中每个步骤均在保持原网行为不变的前提下进行的,通过对网  $\Sigma$  按照算法 1 步骤进行化简我们可以得到另一个结构更加简单且行为等价的网  $\Sigma'$ 。此时若  $\Sigma'$  为一个特殊的子网,我们则可以将求解网系统  $\Sigma$  中变迁之间的同步距离转化为求解  $\Sigma'$  中变迁之间的同步距离。

下面通过一个具体的例子来说明如何利用算法 1 对已知的网系统进行化简,然后通过判断化简以后的网系统是否等价于某一特殊子网来求其变迁之间的同步距离。

例 图 1 给出的网系统  $\Sigma_1$  中,  $|s_7^\bullet| = 2$  且  $|s_7^\bullet| = 2$ , 所以  $\Sigma_1$  不是一个标识  $T$ -图,运用上述算法可以得到一个行为与之等价的标识  $T$ -图  $\Sigma'$ , 如图 2 所示。

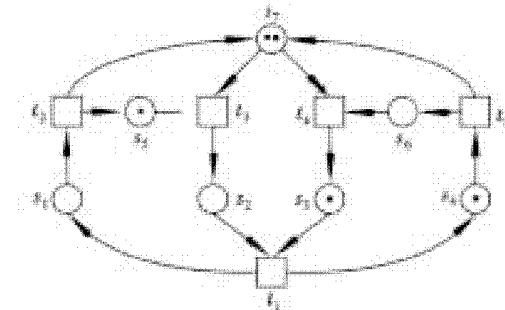


图 1 一个网系统  $\Sigma_1$ , 其中  $|s_7^\bullet| = 2$  且  $|s_7^\bullet| = 2$

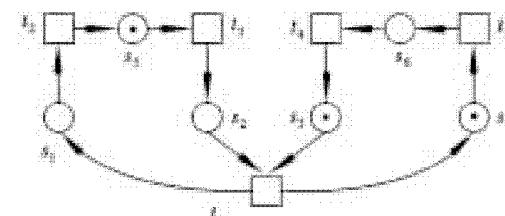


图 2 与  $\Sigma_1$  行为等价的标识  $T$ -图  $\Sigma'$

在  $\Sigma_1$  中由于  $s_7 = \{t_2, t_5\}$ ,  $s_5 = \{t_2\}$  有  $s_5 \subseteq s_7$ , 且  $s_7 \cap s_5 = \{t_3\}$ , 同时  $M_0(s_5) < M_0(s_7)$ , 应用算法中的 step2 可以将弧  $(s_7, t_3)$  从  $\Sigma_1$  中删去; 同理应用 step2 也可以将弧  $(s_7, t_4)$  从  $\Sigma_1$  中删去;

经过 step2 操作之后又有  $s_7^* = \varphi$ , 所以接着应用算法中的 step6 将  $s_7$  及其关联的弧均从网  $\Sigma_1$  中删去, 最后得到网系统  $\Sigma'_1$ 。易知  $\Sigma'_1$  为一个标识  $T$ -图。因此网系统  $\Sigma_1$  中变迁之间的同步距离求解就转变为网系统  $\Sigma'_1$  中变迁之间的同步距离求解, 从而可以得到  $\Sigma_1$  中变迁之间的同步距离值为

$$\begin{aligned}sd(t_1, t_i) &= 1, i = 2, 3 \\sd(t_1, t_i) &= 2, i = 4, 5 \\sd(t_2, t_3) &= 1 \\sd(t_2, t_i) &= 3, i = 4, 5 \\sd(t_3, t_i) &= 3, i = 4, 5 \\sd(t_4, t_5) &= 2\end{aligned}$$

通过编程计算得到的同步距离矩阵如下

```
请输入原网系统中变迁和库所的个数
5,7
n=5,m=7
请输入原网系统的 5 * 7 维关联矩阵
1 -1 -1 1 0 0 0
-1 0 0 0 1 0 1
0 1 0 0 -1 0 -1
0 0 1 0 0 -1 -1
0 0 0 -1 0 1 1
原网系统的关联矩阵为
1 -1 -1 1 0 0 0
-1 0 0 0 1 0 1
0 1 0 0 -1 0 -1
0 0 1 0 0 -1 -1
0 0 0 -1 0 1 1
化简以后网系统的关联矩阵为
1 -1 -1 1 0 0
-1 0 0 0 1 0
0 1 0 0 -1 0
0 0 1 0 0 -1
0 0 0 -1 0 1
求得同步距离矩阵为
0 1 1 2 2
1 0 1 3 3
2 1 0 3 3
2 3 3 0 2
2 3 3 2 0
请按任意键继续 . . .
```

通过对比可知我们求得的同步距离值和采用文献[18]中方法得到的结果相同。

**推论:** 设  $\Sigma = (S, T; F, M_0)$  和  $\Sigma' = (S', T; F', M'_0)$  为两个 Petri 网, 如果这两个网系统是行为等价的, 则网系统  $\Sigma$  和网系统  $\Sigma'$  中变迁之间的同步

距离值是相等的。

**证明:** 由于网  $\Sigma$  和网  $\Sigma'$  是行为等价的, 故满足定理1中的(1)(2)条件, 又从定理1可知若两个网系统  $\Sigma$  和  $\Sigma'$  满足(1)(2)条件, 那么对网  $\Sigma$  中  $\forall t_i, t_j \in T$  有  $sd(t_i, t_j)$  等于网  $\Sigma_1$  中  $sd(t_i, t_j)$ 。

故网系统  $\Sigma$  和网系统  $\Sigma'$  中变迁之间的同步距离值是相等的。证毕。

## 5 结束语

本文证明了一些与某个特殊子网行为等价的网系统的同步距离的求解可以转化为与其行为等价的特殊子网的同步距离的求解。同时给出了如何寻找到一个与原网系系统行为等价且结构更加简洁的另一个网系统的求解算法, 然后通过判断与其行为等价的网系统是否属于某个特殊的子网, 若是, 就将此网的同步距离求解变换为与其行为等价的特殊子网同步距离的求解, 最后结合实例对算法进行了阐述。

## 参考文献:

- [1] MURATA T. Petri Nets: Properties, analysis and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77 (4): 541 – 568.
- [2] HOLLAY L E, KROGH B H, GIUA A. A survey of Petri net methods for controlled discrete event systems[J]. Discrete Event Systems: Theory and Applications, 1997, 7 (2): 151 – 190.
- [3] LI ZHI – WU, ZHOU MENG – CHU, WU NAI – QI. A survey and comparison of Petri net – based deadlock prevention policies for flexible manufacturing systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2008, 38 (2): 173 – 188.
- [4] HONG JANG – EUI, BAE DOO – HWAN. Software modeling and analysis using a hierarchical object – oriented Petri net [J]. Information Sciences, 2000, 130 (1 – 4): 133 – 164.
- [5] OSAMA S YOUNESS, WAIL S EI – KILANI, WAIEL F ABD EI – WAHEDA. A behavior and delay equivalent petri net model for performance evaluation of communication[J]. Computer Communications, 2008, 31 (10): 2210 – 2230.
- [6] 林闯, 杨宏坤, 单志广. Petri 网在生物信息学中的应用[J]. 计算机学报, 2007, 30 (11): 1889 – 1900.
- [7] PETRI CA. Interpretations of Net Theory[M]. Second Edition, St Augustin: Gesellehaft fur Mathematik und

- Datenverarbeitung Bonn, 1976:8 – 20.
- [8] 袁崇义. Petri 网原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005:1 – 15.
- [9] 闫哲,赵文,袁崇义,等. 基于同步网的工作流过程变动问题研究 [J]. 电子学报, 2006, 34 (2): 226 – 231.
- [10] 王斌,章云,王晓红. 基于 Petri 网的工作流模式建模与应用 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44 (13): 238 – 241.
- [11] ZHAO WEN, HUANG YU, YUAN CHONG YI. Synchronic Distance Based Workflow Logic Specification [C]// Proceedings of the 2008 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. Dalian: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 2008: 819 – 824.
- [12] YUAN CHONG – YI, HUANG YU, ZHAO WEN, et al. A study on fairness of place/transition systems – to make fairness fairer [J]. Transactions of the institute of measurement and control, 2011, 33 (1): 50 – 58.
- [13] 方欢,陆阳等. 混杂 Petri 网系统中同步距离的确定及同步控制器的设计 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (7): 884 – 892.
- [14] 候春龙,齐新战,卫翔. 基于 Petri 网建模的互斥问题优化方案 [J]. 系统仿真技术, 2012, 8 (3): 238 – 243.
- [15] 袁崇义. 出现网的同步距离 [J]. 应用数学学报, 1984, 7 (4): 459 – 466.
- [16] 张军明,吴哲辉. 标识 S – 图中同步距离的计算 [C]//中国计算机学会 PETRI 网学术会议论文集. 南京, 1995:61 – 67.
- [17] 王丽丽,吴哲辉,方欢. 标识 T – 网中同步距离的计算 [J]. 计算机科学, 2008, 35 (10): 100 – 103.
- [18] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006:285 – 301.

(责任编辑:李丽)

(上接第 18 页)

## 4 结论

1) 硬岩巷道超深孔预裂爆破后会形成压碎区、裂隙区、震动区三个区域,压碎区和裂隙区的存在是有效降低岩体强度、保证截割机具经济破岩的关键;

2) 基于围岩爆破后松动效应理论分析,爆破后钻孔周边引起裂隙扩展范围 1.831 m;

3) 通过对新庄煤矿 -812 m 硬岩巷道进行深孔爆破有限元数值模拟分析发现,在压应力达到 0.002 时,形成弱化裂缝范围,其弱化范围半径能够达到 1.8 m;

4) 通过对新庄孜矿 -812 m 水平 B4 胶带大巷硬岩进行超深孔预裂爆破,钻孔窥视发现爆破松动半径能够达到 1.5 ~ 2.5 m 之间,取得了良好的弱化效果。

## 参考文献:

- [1] 赵宏伟. 我国煤矿岩巷快速掘进技术现状及展望

- [J]. 煤炭科学技术, 2012 (1): 5 – 7.
- [2] 傅菊根,徐颖,郝飞,等. 硬岩巷道掘进的中深孔爆破试验研究 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (4): 24 – 27.
- [3] 郑福良. 深孔预裂爆破技术在煤矿井下的应用 [J]. 爆破, 1997 (4): 58 – 60.
- [4] 祖贺军,杨玉辉,侯玉亭. 深孔预裂爆破技术在突出危险掘进工作面的应用 [J]. 煤炭技术, 2011 (3): 83 – 85.
- [5] 陈秋宇,黄文尧,袁胜芳,等. 煤矿深孔预裂爆破技术应用研究 [J]. 工程爆破, 2011 (2): 37 – 39.
- [6] 王文龙. 钻眼爆破 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984:240 – 246.
- [7] 张奇. 岩石爆破的粉碎区及空腔膨胀 [J]. 爆炸与冲击, 1990, 10 (1): 68 – 75.
- [8] 宗琦. 岩石内爆炸应力波破裂区半径的计算 [J]. 爆破, 1993 (2): 15 – 17.
- [9] 王志亮. 煤层深孔预裂爆破裂隙扩展机理与应用研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2010.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 层状岩体受压力学特征结构面效应数值分析

鲁海峰<sup>1,2</sup>, 姚多喜<sup>1</sup>, 沈丹<sup>1</sup>, 温亮<sup>1</sup>, 王康<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学), 北京 100083)

**摘要:**煤层底板岩体是沉积岩, 具有显著的层状结构特点。为研究层状岩体压缩强度的结构面效应, 通过 FLAC<sup>3D</sup>数值软件, 结合改进的遍布节理本构模型, 建立层状岩体压缩数值模型, 分析单轴、三轴压缩情况下的应力应变响应以及强度特征。研究结果表明: 层状岩体压缩强度具有显著的结构面倾角效应。随着倾角的增大, 层状岩体的压缩强度呈现先减小后增大的趋势。当结构面倾角为 40°~80°时, 岩体强度整体较低, 破裂面主要沿结构面展开。数值试验和理论分析反映的岩体强度随结构面倾角变化规律一致。层状岩体弹性模量沿平行于结构面方向最大, 而垂直于结构面方向最小, 并随结构面与水平面之间夹角的增加而增大。

**关键词:**层状岩体; 数值模拟; 压缩破坏; 结构面

**中图分类号:**TD821    **文献标志码:**A    **文章编号:**1672-1098(2014)01-0024-06

## Numerical Simulation of Structure Plane Effect for Mechanical Characteristics of Layered Rock Mass Subjected to Compression

LU Hai-feng<sup>1,2</sup>, YAO Duo-xi<sup>1</sup>, SHEN Dan<sup>1</sup>, WEN Liang<sup>1</sup>, WANG Kang<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Coal seam floor rock mass is sedimentary rock and has obvious characteristics of layered structure. In order to study the structural plane effect on compressive strength of layered rock mass, the stress-strain response and strength characteristic of layered rock mass under uniaxial compression and triaxial compression were analyzed by numerical simulation with FLAC<sup>3D</sup>. The results showed that compressive strength of layered rock mass has remarkable effect of layer plane dip. The compressive strength of rock mass first decreases and then increases with the increase of structure plane dip angle. When the structure plane dip angle is 40°~80°, the strength of rock mass is low and the fracture plane develops in the structure plane. Numerical experiments and theoretical analysis gave the consistent regularity of rock strength with structural plane dip variation. The maximum elastic modulus of layered rock mass is parallel to structural plane and the minimum in the direction perpendicular to the structural plane, and increases with the angle rise between the structural plane and the horizontal plane.

**Key words:** layered rock mass; numerical simulation; compressive failure; structural plane

---

收稿日期:2013-3-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174256);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM13KFB01);2012年安徽理工大学硕博基金资助项目(201211160);2012年国家大学生创新创业计划项目基金资助(201210261006);2013年安徽理工大学青年教师科学资助项目(QN201308)

作者简介:鲁海峰(1983-),男,安徽肥东人,讲师,博士,研究方向:煤矿工程地质与水文地质。

煤层底板岩体是沉积岩,其形成过程中的沉积作用和矿物颗粒的择优取向,具有显著的层状结构特点。由于分布有一组占绝对优势的结构面(层面),层状岩体的变形和强度特性具有明显的各向异性。在承压水上采煤突水预测分析中,底板层状岩体的变形和强度是其重要的输入参数。由于层状岩体强度不仅与完整岩块的性质有关,还与结构面方向和性质有很大的关系,表现出复杂的力学性质,国内外学者作了很多的研究工作。Jaeger 针对节理岩体沿着节理面滑动破裂提出了相应的破坏准则<sup>[1]</sup>,Tien 等用 2 种不同的材料人工预制了 3 组不同倾角的层状岩石,研究了横观各向同性体倾角对岩石强度和弹性模量的影响,并针对横观各向同性岩石破坏的 2 种不同模式提出了相应的破坏准则<sup>[2]</sup>。何沛田等从岩石在单轴应力状态下的性质和岩石工程问题的应用出发,论述了黑灰色钙质页岩岩块层理结构面夹角  $\theta$  对其破坏特征、强度和变形的影响<sup>[3]</sup>。苏志敏等在分析大量试验数据的基础上,探讨了页岩的层状结构面倾角和围压对其强度的影响<sup>[4]</sup>。张玉军等分析了层状岩体强度异向性对地下洞室稳定性的影响,并提出了相应经验公式<sup>[5]</sup>。

以上研究主要通过理论分析和室内试验来进行。近年来,随着计算机技术的不断发展,采用数值模拟方法分析岩石力学问题成为新的发展趋势<sup>[6-8]</sup>,作为理论分析和试验研究的辅助工具,采用数值分析方法能直观地得到岩体的力学行为特性,从而可为层状结构底板岩体采动破坏分析提供借鉴。为此,本文将层状岩体等效为横观各向同性连续体,运用 FLAC3D 数值模拟软件,利用改进的遍布节理模型对层状岩体进行了大量的单轴和三轴压缩试验模拟,并将模拟结果与理论分析结果进行对比,验证数值模拟方法的有效性。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 横观各向同性弹塑性本构模型

FLAC3D 自身携带的遍布节理模型可作为层状岩体的各向异性屈服准则,但其本构关系仍然是各向同性的,不能够反映层状岩体的变形特征。为此,本文将横观各向同性本构关系引入到遍布节理模型中。在图 1 所示的横观各向同性体中,以结构面为

$x'-z'$  平面,法向为  $y'$  轴,则在局部坐标系  $x'y'z'$  中横观各向同性线弹性本构关系采用式(1)表示。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \varepsilon'_z \\ \gamma'_{xy} \\ \gamma'_{yz} \\ \gamma'_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & a_{11} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & a_{44} & 0 & 0 \\ & & & & a_{55} & 0 \\ & & & & & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \\ \tau'_{xy} \\ \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11} = \frac{1}{E_1}, a_{12} = -\frac{\mu_1}{E_1}, a_{13} = -\frac{\mu_2}{E_2} \\ a_{33} = \frac{1}{E_2}, a_{44} = \frac{2(1+\mu_1)}{E_1}, a_{55} = \frac{1}{G_2} \end{array} \right\} \quad (1b)$$

式(1b)中,  $E_1, \mu_1$  为横观各向同性面 ( $x'oz'$  平面) 内的弹性模量和泊松比;  $E_2, \mu_2$  为垂直横观各向同性面 ( $y'$  轴方向) 内的弹性模量和泊松比;  $G_2$  为垂直横观各向同性面 (与  $x'oz'$  平面垂直) 内的剪切模量。

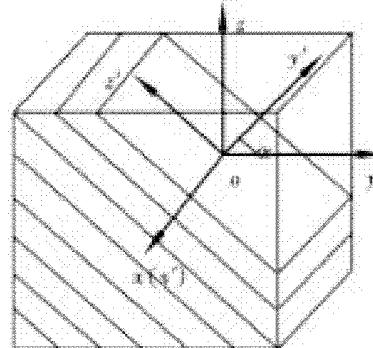


图 1 局部坐标与整体坐标关系

局部坐标系  $x'y'z'$  和整体坐标系  $xyz$  下的应力关系可由式(2)表示,即

$$[\sigma'] = [\mathbf{C}]^T [\sigma] [\mathbf{C}] \quad (2)$$

$$\text{式中, } [\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} \cos(x', x) & \cos(x', y) & \cos(x', z) \\ \cos(y', x) & \cos(y', y) & \cos(y', z) \\ \cos(z', x) & \cos(z', y) & \cos(z', z) \end{bmatrix}$$

$(x', x)$  为局部坐标轴  $x'$  与广义坐标轴  $x$  之间的夹角;  $[\mathbf{C}]^T$  为  $[\mathbf{C}]$  的转换矩阵。

遍布节理模型的破坏准则包含 Mohr – Coulomb 体内特殊方向上的弱面,根据应力状态、结构面产状以及模型体和结构面的材料特性的不同,屈服可能发生在岩块内,或者发生在结构面上,或者在两个部分都发生。岩块采用 Mohr – Coulomb 屈服准则,对于结构面,独立设置局部坐标系,其方位

分别用结构面倾角 dip 和方位角 dd 来表达, 同样采用 Mohr – Coulomb 屈服准则。

为反映层状岩体的峰后力学性质, 本次在横观各向同性弹塑性本构模型中考虑了岩体的硬化 – 软化特性。根据 FLAC3D 模拟应变软化分段线性原则, 预先定义软化参数, 在塑性应变产生后, 部分或所有单元的屈服参数, 如粘结力、内摩擦角、剪胀角和抗拉强度都可发生变化, 并通过引入塑性参数来实现。对于岩块分别定义塑性参数  $k^s$  和  $k^t$  来描述塑性剪切软化行为和塑性拉伸软化行为, 它们主要与岩块的塑性剪切应变和塑性拉伸应变密切相关。建议的增量型数学表达式采用如下形式<sup>[9]2-46</sup>

$$k^s = \sqrt{\frac{[(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_m^{ps}) + (\Delta\varepsilon_m^{ps})^2 + (\Delta\varepsilon_3^{ps} - \Delta\varepsilon_m^{ps})^2]}{2}} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\varepsilon_m^{ps}$  为塑性剪切应变增量, 其值为  $\Delta\varepsilon_m^{ps} = (\Delta\varepsilon_1^{ps} + \Delta\varepsilon_3^{ps})/3$ ;  $\Delta\varepsilon_1^{ps}$ 、 $\Delta\varepsilon_3^{ps}$  为第 1、3 主应力方向的塑性剪切应变增量。

拉伸硬化增量则由塑性拉伸应变增量

$$k^t = |\Delta\varepsilon_3^{pt}| \quad (4)$$

根据  $k^s$  和  $k^t$  的具体表达式, 则可定义岩块的力学参数为塑性参数  $k^s$  和  $k^t$  的函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} c = c(k^s) \\ \varphi = \varphi(k^s) \\ \psi = \psi(k^s) \\ \sigma^t = \sigma^t(k^t) \end{array} \right\} \quad (5)$$

对于结构面, 和岩块相同, 同样引入塑性参数  $ksj$  和  $ktj$  来描述结构面的塑性剪切软化行为和塑性拉伸软化行为。结构面的这两个塑性参数也采用与岩块同样的建议方法, 它们主要与结构面的塑性剪切应变和塑性拉伸应变密切相关, 其表达式为<sup>[10]</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} k_j^s = \frac{\sqrt{2(\Delta\varepsilon_{1'3'}^{ps})^2 + (\Delta\varepsilon_{1'3'}^{ps})^2 + (\Delta\varepsilon_{2'3'}^{ps})^2}}{3} \\ k_j^t = \Delta\varepsilon_{3'3'}^{pt} \end{array} \right\} \quad (6)$$

式中:  $\Delta\varepsilon_{1'3'}^{ps}$ 、 $\Delta\varepsilon_{2'3'}^{ps}$  和  $\Delta\varepsilon_{3'3'}^{ps}$  均为结构面局部坐标系内塑性剪切应变增量;  $\Delta\varepsilon_{3'3'}^{pt}$  为结构面的塑性拉应变增量。

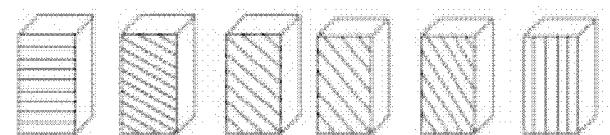
同理可定义结构面的力学参数为塑性参数  $k_j^s$  和  $k_j^t$  的函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} c_j = c_j(k_j^s) \\ \varphi_j = \varphi_j(k_j^s) \\ \psi_j = \psi_j(k_j^s) \\ \sigma_j^t = \sigma_j^t(k_j^t) \end{array} \right\} \quad (7)$$

调用商业软件的源代码, 采用 C++ 语言, 将横观各向同性的弹性本构关系、Mohr – Coulomb 屈服准则及岩石应变硬化 – 软化实现, 生成 dll 文件后嵌入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件中, 实现过程见文献 [9]<sup>(4-1,4-18)</sup>。

## 1.2 层状岩体压缩数值模型建立

单、三轴数值模型中存在一组优势软弱结构面, 试件采用长方体模型, 模型底部长宽为 5 cm, 高度为 10 cm; 结构面倾角  $\alpha$  为  $0^\circ \sim 90^\circ$ , 变化梯度为  $5^\circ$ 。建立三维试件计算模型, 部分倾角模型如图 2 所示。试件加载方式为位移加载, 加载速度为 0.002 mm/步, 分别记录加载过程中试件应力 – 应变的关系, 数值计算中所用的力学参数见表 1。



$\alpha = 0^\circ \quad \alpha = 30^\circ \quad \alpha = 45^\circ \quad \alpha = 60^\circ \quad \alpha = 75^\circ \quad \alpha = 90^\circ$

图 2 数值计算模型

表 1 数值试验中的层状岩体力学参数

变形参数				强度参数					
$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$\mu_1$	$\mu_2$	$c$ /MPa	$\varphi$ /(°)	$\sigma_t$ /MPa	$c_j$ /MPa	$\varphi_j$ /(°)	$\sigma_t$ /MPa
10	5	0.35	0.25	2	45	1.5	0.6	30	0.5

根据分段线性原则, 预先定义粘聚力和内摩擦角的软化参数。本文根据所研究岩体特征并参考 FLAC3D 对于软化模型参数的建议, 当其发生塑

性变形后, 定义相应的  $c_s$ 、 $\varphi_s$ 、 $c_{sj}$ 、 $\varphi_{sj}$  和原始  $c$ 、 $\varphi$ 、 $c_j$ 、 $\varphi_j$  值与塑性参数  $k_s$ 、 $k_j^s$  的关系如表 2 所示。

表2 岩块与结构面抗剪强度参数与塑性参数关系

塑性参数 $k_s, k_j$	$c, c_j$ 折减系数	$\varphi, \varphi_j$ 折减系数
0	0	0
0.000 5	0.8	0.9
0.002	0.4	0.7
>0.002	0.4	0.7

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 压缩强度与结构面倾角关系

单、三轴压缩计算机模拟试验得到的层状岩体压缩强度与结构面倾角  $\alpha$  的关系如表 2 和图 3 所示。从中可看出,岩样的压缩强度受结构面倾角的变化而变化。岩体的压缩强度随结构面倾角呈现先减小后增大的趋势;当结构面倾角  $\alpha$  为  $60^\circ$  时,岩样的压缩强度最小,该角度为层状岩体最不利的结构面倾角;当结构面倾角在  $\alpha = 35^\circ \sim 50^\circ$  或  $\alpha = 75^\circ \sim 85^\circ$  时,岩样压缩强度的变化梯度最大,说明岩样的压缩强度受此结构面倾角范围影响较大,该结果与文献[2]<sup>10</sup>中的室内试验结果相同。

同时,由 Mohr – Coulomb 准则可得,试件沿结构面发生剪切破坏时,结构面破坏(极限平衡)时的主应力应满足的条件

$$\sigma_1 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (8)$$

式中: $c_j, \varphi_j$  为结构面的粘结力和内摩擦角。

从式(8)可看出,  $c_j, \varphi_j$  均为常数, 固定  $\sigma_3$  不变, 当  $\alpha$  趋于  $90^\circ$  以及当  $\alpha$  趋于  $\varphi_j$  时,  $\sigma_1$  趋于无限大,当然,  $\sigma_1$  不可能无限大, 当其达到一定值时岩石材料发生破坏。由此得知, 当结构面倾角  $\alpha$  满足  $\varphi_j < \alpha < 90^\circ$  时, 岩体沿结构面发生破坏, 当  $\alpha$  不满足上述条件时, 破坏沿岩石材料内部发生。

对式(8)倾角  $\alpha$  求导, 并令导数等于 0, 可以求得当倾角  $\alpha = 45^\circ + \varphi_j/2$  时  $\sigma_1 - \sigma_3$  有最小值, 相应的  $\sigma_1$  的最小值  $\sigma_{1,\min}$  为

$$\sigma_{1,\min} = \sigma_3 + \sigma_3(N_{\varphi_j} - 1) + 2\varphi_j \sqrt{N_{\varphi_j}} \quad (9)$$

式中:  $N_{\varphi_j} = \tan^2(45^\circ + \varphi_j/2)$

同理岩块破坏时满足如下表达式

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (10)$$

$$\text{其中, } N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中: $c, \varphi$  分别为岩块的黏聚力、内摩擦角。

当试样沿结构面发生剪切破坏时,按式(8)可得压缩强度,当试验不沿结构面破坏时,可由式(10)计算得压缩强度,计算结果如表 3 所示。

表3 层状岩体压缩强度数值计算与理论计算结果对比

倾角/(°)	围压 0 MPa		围压 1 MPa		围压 6 MPa		围压 11 MPa		围压 16 MPa		MPa
	数值解	理论解	数值解	理论解	数值解	理论解	数值解	理论解	数值解	理论解	
0	9.62	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
5	9.62	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
10	9.62	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
15	9.62	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
20	9.62	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
25	9.59	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
30	9.59	9.66	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
35	9.19	9.11	15.50	15.48	44.55	44.62	73.69	73.78	102.45	102.91	
40	4.75	4.88	9.71	9.64	33.38	33.44	56.78	57.23	80.06	81.02	
45	3.52	3.55	7.21	7.28	25.65	25.94	43.85	44.60	63.12	63.26	
50	2.87	2.95	6.22	6.23	23.00	22.60	37.95	38.97	55.23	55.34	
55	2.71	2.68	5.73	5.74	22.12	21.06	36.70	36.37	51.54	51.68	
60	2.61	2.61	5.57	5.59	21.00	20.60	35.00	35.60	49.87	50.60	
65	2.71	2.68	5.73	5.74	22.12	21.06	36.70	36.37	51.54	51.68	
70	2.88	2.95	6.22	6.23	23.00	22.60	37.95	38.97	55.23	55.34	
75	3.51	3.55	7.21	7.28	25.65	25.94	43.85	44.60	63.12	63.26	
80	4.76	4.88	9.71	9.64	33.38	33.44	56.78	57.23	80.06	81.02	
85	9.57	9.66	14.89	15.49	42.75	44.62	70.87	73.78	100.25	102.91	
90	9.62	9.66	15.50	15.49	44.55	44.62	73.15	73.78	101.87	102.91	

从表3可以看出,对于不同的结构面倾角,数值计算结果与理论分析的结果基本相同,仅在 $\alpha=85^\circ$ 时,二者存在一定的差别,最大差别为在围压11 MPa时,数值解为70.87 MPa,理论解为73.78 MPa,相差2.91 MPa,但两者之间的差别小于4%,其余工况两者之间的差别大都在2%以下。另外从表2中可看出,层状岩体的力学行为具有显著的围压效应。在围压一定时,压缩强度与倾角 $\alpha$ 的关系曲线呈U型,压缩强度随着 $\alpha$ 的增加先减小后增大;对于相同倾角的试件,随着围压的增大,岩石三轴压缩强度不断增大。

计算机模拟试验得到的结论验证了前人的试验及理论推导<sup>[10]</sup>,同时也说明本文建立的横观各向同性弹塑性模型可以很好的反映层状岩体的强度各向异性。

## 2.2 压缩变形特征

层状岩体压缩试验得出的等效弹性模量与结构面倾角 $\alpha$ 间的关系如图3所示。由图3可见,层状岩体弹性模量 $E$ 一般沿平行于结构面方向最大,而沿垂直于结构面方向最小,并随结构面与水平面(或最大主应力)之间夹角的增加而增大(减小),这一规律与一些试验结果是一致的<sup>[11]</sup>,表明本文的数值方法在描述层状岩体的变形方面是可行的。

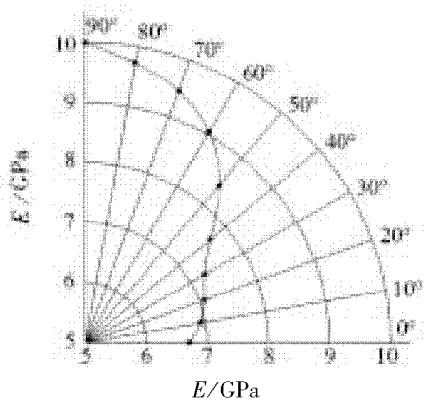


图3 弹性模量与结构面倾角关系

图3是倾角60°的岩样在1 MPa、6 MPa、11 MPa和16 MPa围压作用下模拟得出的应力-应变全程曲线。由图3可以看出,随着围压的增加岩样的屈服应力和峰值强度以及残余强度均逐渐增大;另外可看出,随着围压的增大,岩样破裂特性逐渐由脆性破坏向延性破坏转变。为了更清楚地说明围压和倾角的变化对峰值强度和全程曲线峰后段的影响,图5给出了围压1 MPa、不同倾角岩样的应力-

应变全程曲线。从图中可以看出,由于岩样结构面倾角不同,压缩曲线的斜率表现不同,岩样可发生沿结构面的剪切破坏,也可发生穿切结构面的剪切破坏,此时,岩体的抗压强度达到最大值,由于结构面倾角不同,导致该最大值也不同。同时从图5中看出,所有的压缩曲线皆存在较为明显的尖点,说明岩样的脆性特征明显。围压相同时,压缩曲线随倾角的变化,峰后曲线呈现出不同的特性,且对峰值强度以及残余强度都有显著影响。峰值强度相同,残余强度也接近;峰值强度大的,残余强度大。

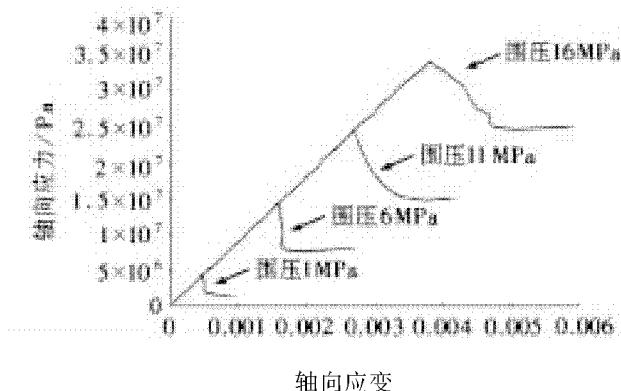


图4 倾角60°层状岩体压缩应力-应变曲线

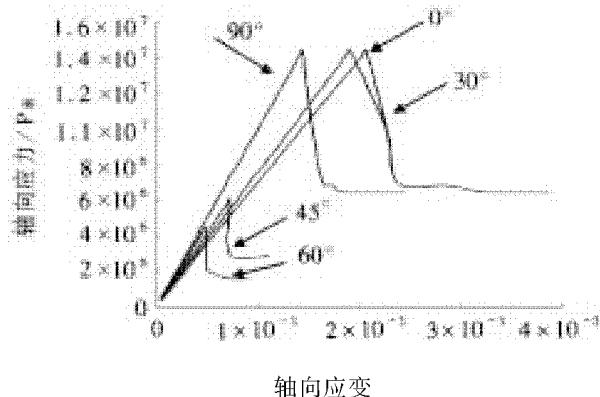


图5 围压1 MPa层状岩体压缩应力-应变曲线

## 2.3 破坏模式

图6显示的是模拟单轴压缩情况下试件最终破裂时候的位移矢量分布图。从图6中可以清楚看出,岩石试件各点最终时的位移情况,最大的位移量都出现在破裂面上。另外结合表3分析,当结构面倾角小于40°和大于85°时,岩体强度基本上由岩块控制,整体较高,岩样在其中央发生鼓胀破坏,且主控破裂面穿越结构面;当倾角在40°和80°之间时,岩体强度整体较低,基本上由结构面控制,呈剪切滑移状,且主控破裂面主要沿结构面展开。

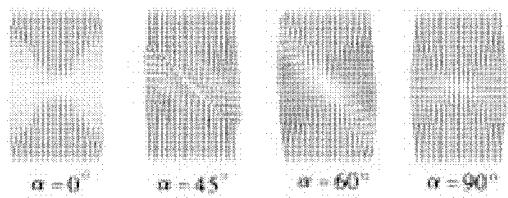


图 6 试样破坏位移矢量图

### 3 结论

通过 FLAC3D 数值软件,结合改进的遍布节理本构模型,建立了层状岩体压缩数值模型,分析了单轴、三轴压缩情况下的应力应变响应以及强度特征,通过全文研究,可得出以下结论:

1) 数值分析表明,层状岩体压缩强度具有显著的结构面倾角效应。随着倾角的增大,层状岩体的压缩强度呈现先减小后增大。当结构面倾角为 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 时,岩体强度整体较低,破裂面主要沿结构面展开,数值试验和理论分析反映的岩体强度变化规律一致,表明本文提出的数值模拟方法是有效的,可用来对层状岩体压缩特征进行分析。同时模拟发现,对于相同倾角的试件,随着围压的增大,岩石三轴压缩强度不断增大。

2) 数值分析表明,层状岩体的等效弹性模量沿平行于结构面方向最大,而垂直于结构面方向最小,并随结构面与水平面之间夹角的增加而增大。

3) 数值分析表明,随着围压的增加,岩样的屈服应力和峰值强度以及残余强度均逐渐增大,同时岩样破裂特性逐渐由脆性破坏向延性破坏转变。同时随着结构面倾角  $\alpha$  的增大,压缩曲线斜率逐渐增大。

### 参考文献:

- [1] JAAGER J C. Shear failure of anisotropic rocks [J]. Geology Magazine, 1960 (97) :65 - 72.
- [2] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock [J]. International Journals of Rock Mechanics&Mining Science, 2000, 37 (6) :1 001 - 1 012.
- [3] 何沛田,黄志鹏.层状岩石的强度和变形特性研究 [J].岩土力学,2003,24 (S1) :1 - 5.
- [4] 苏志敏,江春雷,Ghafoori M.页岩强度准则的一种模式[J].岩土工程学报,1999,21 (3) :311 - 314.
- [5] 张玉军,刘谊平.层状岩体的三维弹塑性有限元分析 [J].岩石力学与工程学报,2002,21 (11) :1 615 - 1 619.
- [6] 梁正召,唐春安,李厚祥,等.单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟 [J].岩土力学,2005,26 (1) :57 - 62.
- [7] 尹立明,张培森.双结构面对岩体强度影响的模拟分析 [J].采矿与安全工程学报,2010,4 (27) :600 - 603.
- [8] 周科峰,李宇峙,柳群义.层状岩体强度结构面特征的数值分析 [J].中南大学学报:自然科学版,2012, 43 (4) :1 424 - 1 428.
- [9] ITASCA CONSULTING GROUP Inc. FLAC3D (Version 2. 1) users manual [M]. USA. Itasca Consulting Group Inc. ,2003:1 - 18.
- [10] 黄书岭,徐劲松,丁秀丽,等.考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究 [J].岩石力学与工程学报,2010, 29 (4) :743 - 756.
- [11] 席道瑛,陈林,张涛.砂岩的变形各向异性 [J].岩石力学与工程学报,1995,14 (1) :49 ~ 58.

(责任编辑:李丽)

# 煤矿带式输送机双驱动理论与设计研究

程 刚<sup>1</sup>,胡 坤<sup>1</sup>,董祖伟<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学机械工程学院,安徽 淮南 232001,2. 中煤科工集团南京设计研究院,江苏 南京 210031)

**摘要:**针对水平运载的煤矿带式输送机头部双滚筒与头尾单滚筒两种双驱设计方式进行理论计算与分析,结果表明:在运行条件相同的情况下,采用最大限度利用驱动滚筒围包角设计计算时,头尾单滚筒驱动方式计算得到的输送带最大张力值相对要小;采用等功率配比设计计算时,两种驱动方式在等功率配比2:1情况下围包角利用率均达到最大,且滚筒摩擦系数 $\mu \geq 0.15$ 时,头尾单滚筒驱动方式计算得到的输送带最大张力值相对要小,通过工程案例计算,进一步验证了理论推导的正确性。

**关键词:**煤矿;带式输送机;驱动理论

中图分类号:TH222 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0030-04

## Research on Dual Drive Theory and Design of Belt Conveyor

CHENG Gang<sup>1</sup>, HU Kun<sup>1</sup>, DONG Zu-wei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Nanjing Design and Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Nanjing Jiangsu 210031, China)

**Abstract:** For dual - drive design method of horizontal transportation belt conveyor with double roller and single roller at head and tail, theoretical calculation and analysis were conducted. The results showed that under the same operational conditions, when the wrap angle utilization is taken as maximum for design calculation, the maximum belt tension value of the driving method with single roller at head and tail is relatively small. Wrap angle utilization rate of the two driving modes reached their maximum value when the power mix ratio is 2:1, and when the roller friction coefficient is  $\mu \geq 0.15$ , the maximum belt tension of the driving with single roller at head and tail is relatively small. The engineering example calculation further validates the theoretical analysis.

**Key words:** coal mine; belt conveyor; drive theory

长距离、高带速和大运量的带式输送机常采用多滚筒来进行驱动,多滚筒驱动方式较多,最为普遍的就是头部双滚筒与头尾单滚筒两种双滚筒分别驱动方式,对此设计计算方法有三种,一是按驱动滚筒圆周力任意分配(基本不用,除利用旧设备外),二是按最大限度利用传动滚筒围包角方式即理想状态的最小张力法,三是按等功率配比方法,配比值一般为2:1,1:1和1:2<sup>[1]</sup>。对带式输送机多驱动理论进行研究,筛选出最佳的驱动方式将有利于减少输送带最大张力,减少相应投资成本,具

有很高的经济价值意义。本文将针对头部双滚筒与头尾单滚筒两种双滚筒分别驱动方式进行理论计算与分析对比。

## 1 传动滚筒围包角计算及分析

### 1.1 头部双滚筒驱动

输送带最大张力点在驱动滚筒Ⅰ的绕入点1点处,假定驱动滚筒Ⅰ、Ⅱ之间距离较短,忽略2-3之间的沿程阻力(见图1)<sup>[2-3]</sup>。

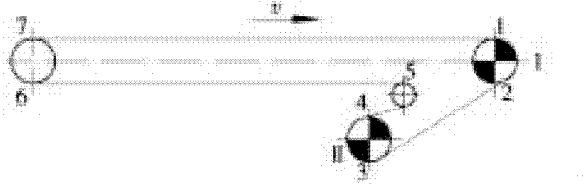


图1 头部双滚筒驱动

$$F_1 = F_{\max} = F_2 \cdot e^{\mu\alpha_1}$$

$$F_2 = F_3 = F_4 \cdot e^{\mu\alpha_2} \approx F_5 \cdot e^{\mu\alpha_2}$$

$$F_6 = (F_5 + W_{RU}) \approx F_7$$

$$F_1 = F_7 + W_{RO}$$

$$F_{U_1} = F_1 - F_2$$

$$F_{U_2} = F_3 - F_4$$

$$i = \frac{F_{U_1} P_1}{F_{U_2} P_2}$$

式中: $\mu$ 为驱动滚筒的摩擦系数(假设驱动滚筒I与滚筒II摩擦系数相等); $\alpha_1, \alpha_2$ 为驱动滚筒I与滚筒II的围包角,rad; $F_{U_1}, F_{U_2}$ 为驱动滚筒I与滚筒II的驱动力,N; $P_1, P_2$ 为驱动滚筒I与滚筒II的驱动功率,kW; $W_{RO}$ 为负载输送线路的阻力,N; $W_{RU}$ 为空载输送线路的阻力,N; $i$ 为驱动滚筒I与滚筒II的驱动功率配比; $F_{\max}$ 为输送带最大张力大小,N。

计算得

$$F_1 = F_{\max} = \frac{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1} \quad (1)$$

$$F_2 = F_3 = \frac{e^{\mu\alpha_2} (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_4 = \frac{W_{RO} + W_{RU}}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_{U_1} = \frac{e^{\mu\alpha_2} (e^{\mu\alpha_1} - 1) (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_{U_2} = \frac{(e^{\mu\alpha_2} - 1) (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$i = \frac{e^{\mu\alpha_2} (e^{\mu\alpha_1} - 1)}{e^{\mu\alpha_2} - 1} \quad (2)$$

通过上述计算所得到 $F_2$ 大小假定满足输送带悬垂度要求。

## 1.2 头尾单滚筒双驱

输送带最大张力点亦在驱动滚筒I的绕入点1点处。式中字母含义与前面诠释相同(见图2)。

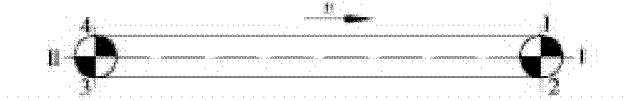


图2 头尾单滚筒双驱

$$F_1 = F_{\max} = F_2 \cdot e^{\mu\alpha_1}$$

$$F_3 = F_2 + W_{RU}$$

$$F_3 = F_4 \cdot e^{\mu\alpha_2}$$

$$F_1 = F_{\max} = F_4 + W_{RO}$$

$$F_{U_1} = F_1 - F_2$$

$$F_{U_2} = F_3 - F_4$$

$$i = \frac{F_{U_1} P_1}{F_{U_2} P_2} = \frac{P_1}{P_2}$$

$$F_1 = F_{\max} = \frac{W_{RO} e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} + W_{RU} e^{\mu\alpha_1}}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{e^{\mu\alpha_2} W_{RO} + W_{RU}}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_3 = \frac{W_{RO} e^{\mu\alpha_2} + W_{RU} e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)}}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_4 = \frac{W_{RO} + W_{RU} e^{\mu\alpha_1}}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_{U_1} = \frac{(W_{RO} e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}) (e^{\mu\alpha_1} - 1)}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$F_{U_2} = \frac{(W_{RO} e^{\mu\alpha_1} + W_{RO}) (e^{\mu\alpha_2} - 1)}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1}$$

$$i = \frac{(W_{RO} e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}) (e^{\mu\alpha_1} - 1)}{(W_{RO} + W_{RU} e^{\mu\alpha_1}) (e^{\mu\alpha_2} - 1)} \quad (4)$$

通过上述计算所得到 $F_2$ 大小假定满足输送带悬垂度要求。

## 1.3 两种方式的最大张力比较

假设运行条件相同,则由式(1)和(3)可知

$$F_{\max(\text{头部})} - F_{\max(\text{头尾})} = \frac{W_{RU} e^{\mu\alpha_1} (e^{\mu\alpha_2} - 1)}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)} - 1} \geq 0 \quad (5)$$

$\alpha_2 = 0$ 时,等号成立,即双滚筒驱动变为单滚筒驱动特殊状态。从式(5)可知,按最大限度利用传动滚筒围包角方式即理想状态分配功率时,头尾单滚筒双驱方式下输送带最大张力值相对要小,因而,此时选择头尾单滚筒双驱方式较好。且当 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 时,进一步可得

$$[(F_{\max(\text{头部})} - F_{\max(\text{头尾})}) = \frac{W_{RU}}{1 + \frac{1}{e^{\mu\alpha}}}] \in (\frac{W_{RU}}{2}, W_{RU})$$

## 2 按等功率配比原则计算

上述按最大限度利用围包角计算所得到的功率配比不利于驱动装置的选型,难以达到推算的巧合配比,为了有利于装置的安装、维护和维修等,往往将功率按一定的整数进行配比,但此时会导致传

动滚筒围包角不能充分利用问题。按等功率配比设计方法的计算实际上可以转换成已知功率配比而反求传动滚筒围包角的问题。设驱动滚筒Ⅰ与滚筒Ⅱ实际工作围包角为 $\alpha_1^*$ 和 $\alpha_2^*$ ,假设两驱动滚筒在工作时其中之一围包角达到理想设计状态,设驱动滚筒Ⅱ工作时达到设计围包角,令 $\alpha_2^* = \alpha_2$ 。

## 2.1 头部双滚筒驱动

由式(2)可知

$$(e^{\mu\alpha_2} - 1) = e^{\mu\alpha_2} (e^{\mu\alpha_1^*} - 1) i$$

令 $H_{(i)} = e^{\mu\alpha_1^*}$ ,则

$$H_{(i)} = e^{\mu\alpha_1^*} = \frac{(e^{\mu\alpha_2} - 1) i}{e^{\mu\alpha_2}} + 1 \quad (6)$$

除去 $\alpha_2 = 0$ 特殊情况,所以: $e^{\mu\alpha_2} - 1 > 0$

可得 $i \uparrow \rightarrow e^{\mu\alpha_1^*} \uparrow \rightarrow \alpha_1^* \uparrow$

显然 $H_{(i)}$ 是关于*i*的单调增函数,因此理论上*i*越大,驱动滚筒Ⅰ工作时围包角利用率越高。同时由式(1)计算输送带的最大张力为

$$\begin{aligned} F_{\max(\alpha_1^*)} &= \frac{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} - 1} = \\ &\frac{(W_{RO} + W_{RU})}{1 - \frac{1}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)}}} \end{aligned} \quad (7)$$

可得 $\alpha_1^* \uparrow \rightarrow e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} \uparrow \rightarrow F_{\max(\alpha_1^*)} \downarrow$

很明显 $F_{\max(\alpha_1^*)}$ 是关于 $\alpha_1^*$ 的单调减函数,理论上 $\alpha_1^*$ 越大即*i*越大,输送带的最大张力值就越小。双滚筒驱动等功率配比常采用2:1,1:1和1:2三种形式,因此,采用2:1功率配比相比较最好。

## 2.2 头尾单滚筒双驱

由式(4)可知

$$\begin{aligned} i &= \frac{(W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU})(e^{\mu\alpha_1^*} - 1)}{(W_{RO} + W_{RU}e^{\mu\alpha_1^*})(e^{\mu\alpha_2} - 1)} \\ &= (W_{RO} + W_{RU}e^{\mu\alpha_1^*})(e^{\mu\alpha_2} - 1)i \\ &= (W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU})(e^{\mu\alpha_1^*} - 1) \end{aligned}$$

令 $H_{(i)} = e^{\mu\alpha_1^*}$ ,则

$$\begin{aligned} H_{(i)} &= \frac{W_{RO}(1 - e^{\mu\alpha_2}) - \frac{W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}}{i}}{W_{RU}(e^{\mu\alpha_2} - 1) - \frac{W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}}{i}} \end{aligned} \quad (8)$$

令 $P_{(\alpha_2)} = e^{\mu\alpha_2} - 1$

$$Q_{(i)} = \frac{W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}}{i}$$

除去 $\alpha_2 = 0$ 特殊情况,所以: $P_{(\alpha_2)} > 0$

可得

$$\begin{aligned} H_{(i)} &= \frac{-P_{(\alpha_2)}W_{RO} - Q_{(i)}}{P_{(\alpha_2)}W_{RU} - Q_{(i)}} = \frac{Q_{(i)} + P_{(\alpha_2)}W_{RO}}{Q_{(i)} - P_{(\alpha_2)}W_{RU}} \\ H_{(i)} &= \frac{1 + W_{RO}\frac{P_{(\alpha_2)}}{Q_{(i)}}}{1 - W_{RU}\frac{P_{(\alpha_2)}}{Q_{(i)}}} \end{aligned}$$

因 $Q_{(i)} > 0$

则 $Q_{(i)} \uparrow \rightarrow F_{(i)} \downarrow$

很明显 $H_{(i)}$ 是关于 $Q_{(i)}$ 的单调减函数,又因为 $Q_{(i)}$ 是关于*i*的单调减函数,所以*i*↑→ $Q_{(i)}$ ↓→ $H_{(i)}$ ↑→ $e^{\mu\alpha_1^*}$ ↑→ $\alpha_1^*$ ↑,结果同头部双滚筒驱动相同,*i*越大时,另一驱动滚筒的围包角利用率越高,同时由式(3)计算输送带的最大张力为

$$\begin{aligned} F_{\max(\alpha_1^*)} &= \frac{W_{RO}e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} + W_{RU}e^{\mu\alpha_1^*}}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} - 1} = \\ &\frac{W_{RO} + \frac{W_{RU}}{e^{\mu\alpha_2}}}{1 - \frac{1}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)}}} \end{aligned} \quad (9)$$

可得 $\alpha_1^* \uparrow \rightarrow e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} \uparrow \rightarrow F_{\max(\alpha_1^*)} \downarrow$

很明显 $F_{\max(\alpha_1^*)}$ 亦是关于 $\alpha_1^*$ 的单调减函数,综上可得 $\alpha_1^*$ 越大即*i*越大,输送带的最大张力值就越小。因此,和头部双滚筒驱动效果一样采用*i*=2:1功率配比形式相比较最好。

## 2.3 两种驱动方式的最大张力比较

假设运行条件相同,设两种双驱方式的驱动滚筒Ⅱ实际工作围包角为 $\alpha_2^*$ ,为区别两种驱动方式的滚筒Ⅰ实际工作围包角,设头部双滚筒驱动滚筒Ⅰ实际工作围包角为 $\alpha_1^*$ ,头尾驱动滚筒Ⅰ实际工作围包角为 $\alpha_1^{**}$ ,均采用最佳功率配比*i*=2:1,由式(7)和(9)可得

$$\begin{aligned} F_{\max(\text{头部})} &= \frac{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} - 1} \\ F_{\max(\text{头尾})} &= \frac{W_{RO}e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} + W_{RU}e^{\mu\alpha_1^{**}}}{e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} - 1} = \\ &\frac{e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} (W_{RO} + \frac{W_{RU}}{e^{\mu\alpha_2}})}{e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} - 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\max(\text{头部})} - F_{\max(\text{头尾})} &= \\ \frac{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} (W_{RO} + W_{RU})}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)} - 1} - \frac{W_{RO}e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} + W_{RU}e^{\mu\alpha_1^{**}}}{e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)} - 1} &= \end{aligned}$$

$$\frac{(W_{RO} + W_{RU})}{1 - \frac{1}{e^{\mu(\alpha_1^* + \alpha_2)}}} - \frac{(W_{RO} + \frac{W_{RU}}{e^{\mu\alpha_2}})}{1 - \frac{1}{e^{\mu(\alpha_1^{**} + \alpha_2)}}} \quad (10)$$

$$\text{因 } (W_{RO} + W_{RU}) > (W_{RO} + \frac{W_{RU}}{e^{\mu\alpha_2}})$$

为便于比较计算,令

$$M_{(x)} = \frac{e^{\mu(x+\alpha_2)}}{e^{\mu(x+\alpha_2)} - 1}$$

代入(10)式得

$$M_{(x)} = \frac{e^{\mu(x+\alpha_2)} - 1 + 1}{e^{\mu(x+\alpha_2)} - 1} = 1 + \frac{1}{e^{\mu(x+\alpha_2)} - 1}$$

可知  $x \uparrow \rightarrow M_{(x)} \downarrow$ ,  $M_{(x)}$  是关于  $x$  的减函数,因此可得  $\alpha_1^* \uparrow \rightarrow M_{(\alpha_1^*)} \downarrow$ ,  $\alpha_1^{**} \uparrow \rightarrow M_{(\alpha_1^{**})} \downarrow$ 。

由式(6)可知

$$e^{\mu\alpha_1^*} = \frac{3e^{\mu\alpha_2} - 2}{e^{\mu\alpha_2}}$$

由式(8)可知

$$\begin{aligned} e^{\mu\alpha_1^{**}} &= \frac{W_{RO}(1 - e^{\mu\alpha_2}) - \frac{W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}}{2}}{W_{RU}(e^{\mu\alpha_2} - 1) - \frac{W_{RO}e^{\mu\alpha_2} + W_{RU}}{2}} = \\ &= \frac{W_{RO}(3e^{\mu\alpha_2} - 2) - W_{RU}}{W_{RU}(3 - 2e^{\mu\alpha_2}) + W_{RO}e^{\mu\alpha_2}} = \\ &= \frac{(3e^{\mu\alpha_2} - 2) + \frac{W_{RU}}{W_{RO}}}{e^{\mu\alpha_2} - \frac{W_{RU}(2e^{\mu\alpha_2} - 3)}{W_{RO}}} \end{aligned}$$

因此当  $2e^{\mu\alpha_2} - 3 \geq 0$  时,得出

$$\begin{cases} e^{\mu\alpha_1^{**}} > e^{\mu\alpha_1^*} \\ \alpha_1^{**} > \alpha_1^* \\ M_{(\alpha_1^*)} < M_{(\alpha_1^{**})} \\ F_{max(\text{头部})} > F_{max(\text{尾部})} \end{cases}$$

在  $2e^{\mu\alpha_2} - 3 < 0$  时,对不同输送参数要具体分析。因  $\alpha_2$  为驱动滚筒 II 设计的围包角,一般情况下,  $\alpha_2 \geq 170^\circ$ ,因而进一步可计算出:  $\mu \geq 0.15$  时,  $2e^{\mu\alpha_2} - 3 > 0$ 。

### 3 案例演算与对比分析

已知带式输送机输送工况:水平输送线路,输送量  $Q = 1700 \text{ t/h}$ ,原料颗粒  $0 \sim 100 \text{ mm}$ ,堆积密度  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ,机长  $L = 300 \text{ m}$ ,设计带宽  $B = 1400 \text{ mm}$ ,带速  $v = 2 \text{ m/s}$ ,模拟摩擦系数  $f = 0.03$ 。设计双滚筒驱动,理想设定围包角均为  $\alpha = 200^\circ$ ,传动滚筒摩擦系数  $\mu = 0.35$ 。

通过选型计算后,按最大限度利用驱动滚筒围包角和按等功率配比法分别计算头部双滚筒驱动和头尾单滚筒双驱两种方式,等功率配比法取配比为 2:1 计算,并假设传动滚筒 II 达到理想围包角  $200^\circ$ (此时  $2e^{\mu\alpha_2} - 3 \geq 0$ ),其他条件均认为相同。计算结果如表 1 所示,很明显可以看出,本例带式输送机在水平运载时,无论采取什么样的设计方法,综合对比来讲头尾单滚筒双驱形式均比较占优势,输送带最大张力值最小。

表 1 案例计算结果

	最大限度利用 围包角方式		等功率配比方式	
	头部双滚筒	头尾单滚筒	头部双滚筒	头尾单滚筒
$\alpha_1^*/(^\circ)$	200	200	143	198
$\alpha_2^*/(^\circ)$	200	200	200	200
$i$	3.40	2.02	2.0	2.0
$F_{max}/\text{N}$	43 755	37 882	45 552	37 925

### 4 结论

1) 基于带式输送机驱动理论,对水平运载工况的带式输送机按最大限度利用驱动滚筒围包角和按等功率配比两种驱动设计方法进行了研究,理论上推导了输送带最大张力值表达式,通过比较发现:按最大限度利用驱动滚筒围包角设计,采用头尾单滚筒驱动方式,输送带的最大张力值将会最小;按等功率配比设计且当  $\mu \geq 0.15$  时,选择头尾单滚筒驱动方式,输送带的最大张力值仍会最小;

2) 通过实例计算,结果验证了理论推导的正确性,因而,推导结果将为带式输送机双驱方式的设计和选用提供了重要的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 北京起重运输机械研究所. DT II 型带式输送机设计手册 [M]. 北京:冶金工业出版社,2003:31~32
- [2] 郭永存. 多电机传动带式输送机功率配比的研究 [J]. 煤炭科学技术,2003,31 (1):46~48.
- [3] 黄学群,唐敬麟,栾桂鹏. 运输机械选型设计手册 (上) [M]. 北京:化学工业出版社,2011:166~169
- [4] 杨复兴. 胶带输送机结构原理与计算 (上) [M]. 北京:煤炭工业出版社,1993:105~110
- [5] 洪致育,林良明. 连续运输机 [M]. 北京:机械工业出版社,1982:45~48

(责任编辑:李丽,范君)

# PAM絮凝剂对钻孔粘土废弃泥浆脱水性能的影响

张 煜<sup>1</sup>, 庞建勇<sup>1</sup>, 孙林柱<sup>2</sup>, 杨 芳<sup>2</sup>, 朱 锋<sup>3</sup>

(1. 安徽理工大学土木与建筑学院,安徽 淮南 232001; 2. 温州大学建筑与土木工程学院,浙江 温州 325000; 3. 江西理工大学建筑与测绘工程学院,江西 赣州 341000)

**摘要:**为了提高废弃泥浆的压滤脱水效率,选用PAM作为絮凝剂,采用物理—化学联合的方法,研究不同类型、不同分子量和不同加药量对钻孔粘土泥浆压滤脱水性能的影响规律。试验结果表明,阴离子型PAM絮凝剂能明显改善钻孔粘土泥浆的脱水性能;相对分子量为1 000万的阴离子型PAM絮凝剂效果最优,并确定不同加药量对钻孔粘土泥浆压滤脱水的影响规律;在此基础上建立最优PAM絮凝剂压滤脱水的数学模型,为指导钻孔粘土废弃泥浆的处理提供一定的参考价值。

**关键词:**PAM絮凝剂;钻孔粘土废弃泥浆;压滤脱水;数学模型

中图分类号:X799.1 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0034-05

## The Effects of PAM Flocculant on Drilling Waste Clay Slurry Dewatering Performance

ZHANG Shuo<sup>1</sup>, PANG Jian-yong<sup>1</sup>, SUN Lin-zhu<sup>2</sup>, YANG Fang<sup>2</sup>, ZHU Feng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang 325000, China; 3. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

**Abstract:**In order to improve the filter press dewatering efficiency of waste mud, PAM was selected as flocculant. The influence of PAM with different kinds, different molecular weights (MW) and different doses on the filter press dewatering performance of drilling clay mud was studied by the physical – chemical method . The results was studied. The results showed that anionic PAM (APAM) flocculant improves the drilling clay mud dewatering performance. The optimal flocculant is APAM with MW of 10 MDa, and the influencing rule of different doses on the filter press dewatering performance of drilling clay mud was determined. On the basis of the above results the mathematical model of optimal PAM filter press dewatering flocculant was established, which provides some reference to guiding drilling waste mud clay processing .

**Key words:**PAM flocculant; drilling waste clay mud; press dewatering; mathematical model

淤泥质粘土在世界各地分布广泛,在我国主要分布在天津、上海、浙江、福建等沿海地区。

钻孔灌注桩广泛应用于建筑、交通、水利等基础工程,钻孔泥浆用量一般为成孔体积的3~5倍<sup>[1]</sup>。泥浆中可加化学药剂,使泥浆成为一种不

易失水干结,成分复杂,稳定性好的胶体体系<sup>[2]</sup>,因此,施工后会产生大量的废弃泥浆。目前处理废弃泥浆的一般方法是将其直接填埋,但很多泥浆被排放到田地、河道,严重污染土壤、河流,破坏城市生态环境,危害人的身体健康。处理废弃泥浆成为

收稿日期:2013-04-13

基金项目:浙江省重大科技专项基金资助项目(2011C13013);温州市社会发展重大基金资助项目(S20090001);温州市建筑节能财政专项资金资助项目;安徽省高校省级自然科学重点研究资助项目(KJ2011A099);安徽省淮南市科技专项资金资助项目(2011A07911)

作者简介:张煜(1988-),女,安徽亳州人,在读硕士,研究方向:岩土与地下工程。

了当前工程建设一大难题。

国内外对油田钻井泥浆、矿山钻井泥浆、城市污泥、河湖污泥和淤泥处理方法的研究较多,主要有物理、化学和物理—化学联合等处理方法。目前,基于钻孔废弃泥浆的压滤脱水研究很少,主要面临是以下问题,①钻孔粘土废弃泥浆粘度大,颗粒细小,若直接采用物理的方法脱水,泥浆会堵塞脱水机滤孔,使泥浆固液难以分离;②若直接固化,钻孔粘土废弃泥浆含水率高,需加入大量的固化剂,成本较高;③由于每个地区土性差别较大,成分复杂,针对钻孔粘土废弃泥浆脱水处理使用的絮凝剂适应性研究较为缺乏。

针对以上问题,本文采用物理—化学联合的方法,研究PAM絮凝剂对钻孔粘土废弃泥浆脱水性能的影响规律。在此基础上,提出符合压滤脱水规律的数学模型,为钻孔粘土废弃泥浆的处理提供科学依据。

## 1 试验

### 1.1 絮凝剂

选用PAM絮凝剂,分别是相对分子量1 000万的阳离子型PAM絮凝剂(记为C<sub>1</sub>PAM)、相对分子

量1 000~1 800万的阴离子型PAM絮凝剂(记为A<sub>1</sub>PAM~A<sub>5</sub>PAM)和相对分子量1 000万的非离子型PAM絮凝剂(记为N<sub>1</sub>PAM)。

### 1.2 试验设备

量筒、烧杯(1 000 mL)、秒表、搅拌器、精密电子天平、自制的液压压滤设备(见图1)。

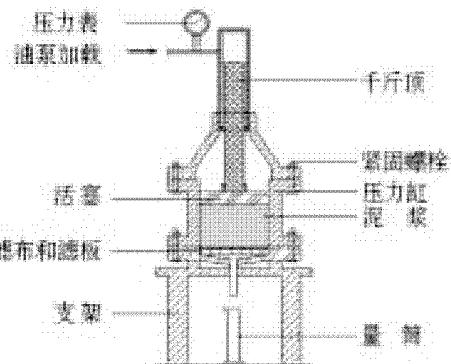


图1 自制的液压压滤设备

### 1.3 试验方案

为了研究PAM絮凝剂的类型、相对分子量和加药量对钻孔粘土泥浆脱水性的影响规律,设计了三个试验方案(见表1~表3),并在试验结果的基础上建立符合压滤脱水规律的数学模型。

表1 PAM絮凝剂类型的优选

试验序号	絮凝剂	加药量/g	泥浆/mL	絮凝时间/h	压滤厚度/cm	压滤时间/min	压力值/MPa	温度/℃	相对湿度/%
1	C <sub>1</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
2	C <sub>1</sub> PAM	1.00	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
3	C <sub>1</sub> PAM	1.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
4	A <sub>1</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
5	A <sub>1</sub> PAM	1.00	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
6	A <sub>1</sub> PAM	1.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
7	N <sub>1</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
8	N <sub>1</sub> PAM	1.00	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
9	N <sub>1</sub> PAM	1.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80

表2 阴离子型PAM絮凝剂相对分子量的优择

试验序号	絮凝剂	加药量/g	泥浆/mL	絮凝时间/h	压滤厚度/cm	压滤时间/min	压力值/MPa	温度/℃	相对湿度/%
1	A <sub>1</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
2	A <sub>2</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
3	A <sub>3</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
4	A <sub>4</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
5	A <sub>5</sub> PAM	0.50	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80

表3 相对分子量1 000万的阴离子型PAM絮凝剂的加药量的优化

试验序号	絮凝剂	加药量/g	泥浆/mL	絮凝时间/h	压滤厚度/cm	压滤时间/min	压力值/MPa	温度/℃	相对湿度/%
1	N <sub>1</sub> PAM	0.04	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
2	N <sub>1</sub> PAM	0.06	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
3	N <sub>1</sub> PAM	0.08	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80
4	N <sub>1</sub> PAM	0.10	500	2	4	180	0.8	22~28	70~80

#### 1.4 试验步骤

按试验所需,用精密电子天平称取PAM絮凝剂,分别于1 000 mL烧杯中加入500 mL搅拌均匀的钻孔泥浆,投加絮凝剂,搅拌均匀,至有明显絮体出现后停止;待静置絮凝2 h后,将泥浆倒入自制的液压压滤设备,设定压力值为0.8 MPa,泥浆厚度为4 cm,对泥浆进行压滤脱水处理;每5 min读1次脱水量,30 min后,每15 min读1次,压滤时间持

续180 min;记录泥浆压滤脱水量随着压滤时间的变化。按照以上步骤,即可得到每组试验的泥浆压滤脱水量随着压滤时间的变化。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 泥浆的物理性质和矿物组成

通过仪器测得钻孔泥浆的物理性质和主要矿物成分(见表4~表5)。

表4 泥浆的初始各项性质指标

比重	含水率/%	含砂量/%	pH值	固体含量/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	固体密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	粘度/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	电导率/ $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$	Zeta电位/mV
375.139	1.25	71.53	1.8	8.91	0.31	1.52	2 270	1.711

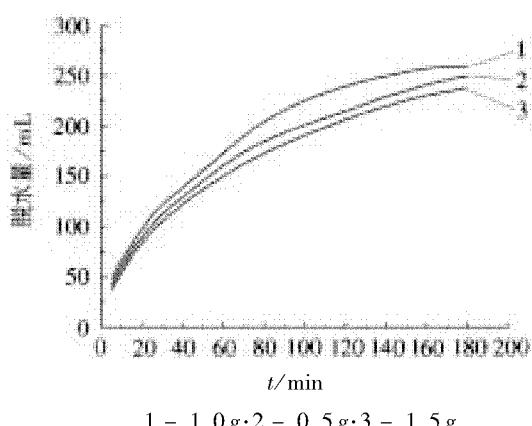
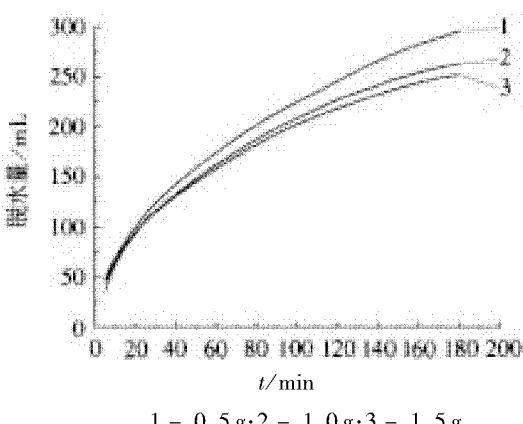
表5 钻孔泥浆的主要矿物成分 (%)

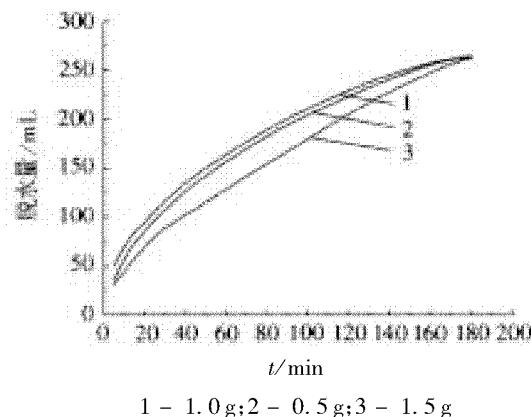
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$S_{\text{LOI}}$ (烧失量)	有机质
59.3	9	3	12.7	0.6	6.9	6.9	6

#### 2.2 不同类型PAM絮凝剂的影响

1) 不同加药量PAM絮凝剂的影响。试验选

择3种加药量,分别研究了不同加药量的C<sub>1</sub>PAM、A<sub>1</sub>PAM和N<sub>1</sub>PAM对钻孔粘土泥浆压滤脱水性能的影响规律,结果如图2~图4所示。

图2 C<sub>1</sub>PAM不同加药量的泥浆压滤脱水曲线图3 A<sub>1</sub>PAM不同加药量的泥浆压滤脱水曲线

图4  $N_1$ PAM不同加药量的泥浆压滤脱水曲线

从图2~图4可以看出,随着压滤时间的增加,泥浆的压滤脱水量越来越高,压滤脱水速度逐渐降低,泥浆的压滤脱水曲线呈非线性增加的趋势。三种不同类型的PAM絮凝剂在加药量不同时,对泥浆的压滤脱水效果的影响也不同。

泥浆压滤脱水效果随着 $C_1$ PAM、 $N_1$ PAM加药量的增加先提升后下降(见图2和图4),脱水效果最好的加药量均为1.0 g;随着 $A_1$ PAM加药量的增加呈下降趋势(见图3),加药量为0.5 g时泥浆的压滤脱水效果最好,在45 min以后,脱水速率变快。

总之,随着压滤时间的延长,泥浆的压滤脱水曲线呈非线性增大的趋势;从脱水效果来看,阴离子型的PAM絮凝剂效果最好。

2) 最佳加药量不同类型PAM絮凝剂的影响。对比分析最佳加药量不同类型PAM絮凝剂对泥浆脱水性能的影响,结果如图5所示。

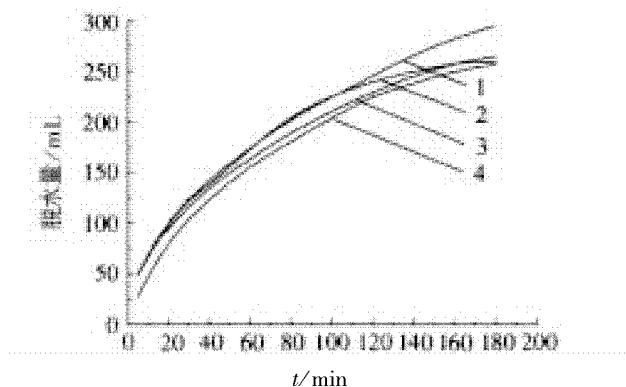


图5 三种类型PAM絮凝剂最佳加药量时泥浆压滤脱水曲线

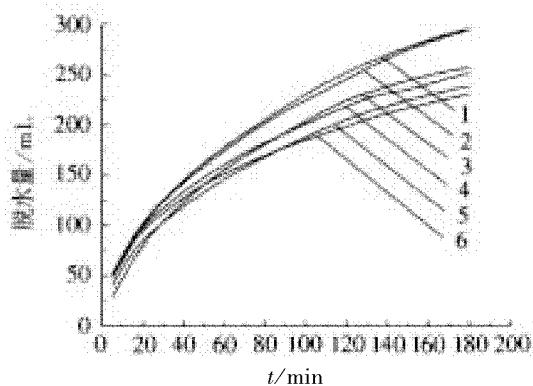
由图5可以看出,在均为最佳加药量的情况下,三种不同类型PAM絮凝剂的添加均能改善泥浆的压滤脱水性能。 $A_1$ PAM的添加加快了泥浆的脱水速率,对泥浆压滤脱水性能改善效果最好,最终的压滤脱水量也明显高于纯泥浆, $C_1$ PAM和

$N_1$ PAM对泥浆压滤脱水性能改善效果不明显,最终的压滤脱水量与纯泥浆基本相等。

以上分析得出,适用于钻孔粘土泥浆絮凝脱水的最优PAM絮凝剂是 $A_1$ PAM。

### 2.3 不同相对分子量的阴离子型PAM絮凝剂的影响

在确定了最优PAM絮凝剂的基础上,为了进一步优选阴离子型PAM絮凝剂的相对分子量,选用 $A_1$ PAM~ $A_5$ PAM,加药量均为0.5 g,泥浆压滤脱水量随压滤时间的变化曲线如图6所示。

图6 添加 $A_1$ PAM~ $A_5$ PAM时泥浆的压滤脱水曲线

由图6可知,随着阴离子型PAM絮凝剂相对分子量的增加,泥浆的压滤脱水效果先提升后下降。

当阴离子型PAM絮凝剂相对分子量小于1 200万时,阴离子型PAM絮凝剂的添加对泥浆的脱水性能有所改善;当相对分子量大于1 200万时,随着相对分子量的增加,泥浆的脱水效果反而越来越差。

分析原因,当絮凝剂的相对分子量过小时,会造成泥浆不絮凝或者絮凝团较小,会降低脱水的速度;当絮凝剂的分子量过大时,PAM包裹泥浆微粒,絮团间相互排斥造成絮凝效果差,其次泥浆粘度值过大,在压滤过程中水分子通道堵塞,使絮团束缚较多水难以通过泥浆絮凝团,压滤脱水效果也比较差。

分别添加 $A_1$ PAM和 $A_2$ PAM的泥浆压滤脱水效果都有明显提高,改善效果也基本相同,考虑到经济效益,最终确定相对分子量1 000万的阴离子型PAM絮凝剂为最优。

### 2.4 最优PAM絮凝剂加药量的优化及模型建立

1) 最优PAM絮凝剂加药量的优化。 $A_1$ PAM对于钻孔粘土泥浆的压滤脱水改善效果较为理想,

最佳加药量为下限 0.5 g, 为了进一步优选 A<sub>1</sub>PAM 的最佳加药量, 进行加药量细化的工作, 试验结果如图 7 所示。

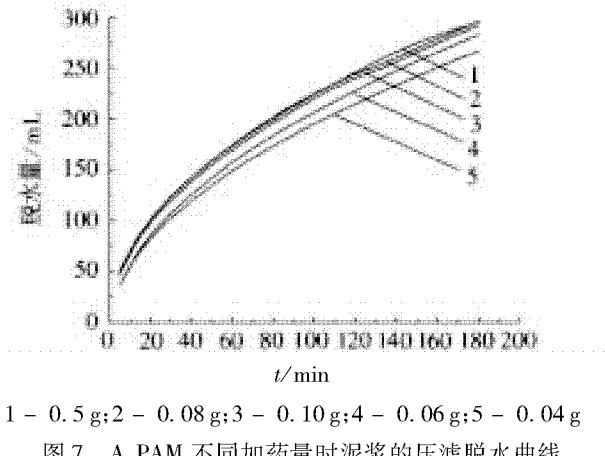


图 7 A<sub>1</sub>PAM 不同加药量时泥浆的压滤脱水曲线

由图 7 可知, 当 A<sub>1</sub>PAM 的加药量小于 0.08 g 时, 泥浆的脱水效果随着加药量的增加越来越好; 当加药量大于 0.08 g 时, 随着加药量的继续增加, 泥浆的脱水效果没有继续得到改善, 而是维持在一个较小的范围内波动。根据试验结果, 考虑工程应用中的实际效益, A<sub>1</sub>PAM 最佳加药量为 0.08 g, 泥浆的体积为 500 mL, 即 160 g/m<sup>3</sup>。

2) 最优 PAM 絮凝剂压滤脱水模型的建立。采用脱水率和时间的关系建立相应的模型, 试验数据点及模型曲线如图 8 所示。

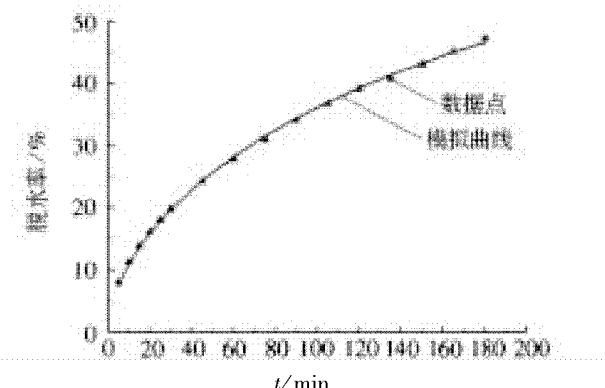


图 8 A<sub>1</sub>PAM 加药量为 0.08 g 时泥浆的试验数据点及模型曲线图

根据压滤脱水试验数据及曲线形状, 泥浆的压滤脱水规律可以用数学模型表达:

$$w = a \times (1 - e^{-bt})^c \quad (1)$$

当  $t$  趋于无穷大,  $e^{-bt}$  等于 0,  $w$  等于  $a$ , 即为泥浆的最初含水率 71.53%; 当  $t$  等于 0 时,  $w$  等于 0。表明此模型符合泥浆的压滤脱水规律和泥浆的特性, 根据最优压滤脱水的试验数据进行非线性拟

合, 系统参数  $b$  和  $c$  分别为 -0.00345, 0.55336。其模型表达为

$$w = 71.53 \times (1 - e^{-0.00345t})^{0.55336} \quad (2)$$

式中:  $w$  为脱水率;  $t$  为压滤时间, min。

由图 8 可见, 式(2)能准确表达脱水率与压滤时间之间的关系, 模型曲线与试验数据点的拟合精度很高, 较好地反映泥浆的压滤脱水规律。研究结果为泥浆的处理提供了可靠的科学依据。

### 3 结论

PAM 絮凝剂适用于钻孔粘土泥浆并能够有效改善泥浆脱水性能, 最优 PAM 絮凝剂为相对分子量 1 000 万的阴离子型 PAM 絮凝剂; 泥浆的体积为 500 mL 时最佳加药量为 0.08 g, 即 160 g/m<sup>3</sup>。

根据最优 PAM 絮凝剂泥浆压滤脱水曲线, 提出了脱水率与压滤时间的表达式, 建立相应的模型, 模型表达式能准确表达脱水率与压滤时间之间的关系, 模型曲线与试验数据点的拟合精度很高, 能较好地反映泥浆的压滤脱水规律。

以上研究结果, 为钻孔粘土废弃泥浆的高效处理提供了可靠的科学依据。

### 参考文献:

- [1] 吴波, 马希河, 杨中喜, 等. 油田污泥固化研究进展 [J]. 国外建材科技, 2003 (4): 66-67.
- [2] 谭蔚, 于真真, 高晓冲, 等. 钻井废弃盐水泥浆无害化脱水处理研究 [J]. 油田化学, 2011 (2): 126-129.
- [3] 范英宏, 潘智, 刘建华, 等. 高速铁路桥梁施工废弃泥浆处理工艺研究 [J]. 铁道建筑, 2009 (12): 21-23.
- [4] 王树芹, 罗松涛, 李国忠, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺相对分子质量和水解度对污泥脱水性能影响的研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31 (8): 1 706-1 712.
- [5] BORAN J, HOUDKOVA L, ELSASSER T. Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54 (5): 278-282.
- [6] JIAPING WANG, SHIJIE YUAN, YI WANG, et al. Synthesis, characterization and application of a novel starch-based flocculant with high flocculation and dewatering properties [J]. Water Research. Water Research, 2013, 47 (8): 2 643-2 648.
- [7] 丁明, 王海波, 郭学峰, 等. 钻井废弃泥浆无害化、资源化处理技术 [J]. 建井技术, 2012, 33 (3): 32-34.

(责任编辑:何学华, 吴晓红)

# 高性能双组分环氧树脂浇注体系的热性能研究

胡海霞<sup>1</sup>, 袁长颂<sup>1</sup>, 陈向阳<sup>1</sup>, 张 明<sup>2</sup>, 益小苏<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学机械工程学院,安徽 淮南 232001; 2. 北京航空材料研究院,北京 100095)

**摘要:**为不降低环氧树脂的力学性能和热性能而实现增韧,近年来人们又发展了用耐热性高和力学性能良好的热塑性树脂增韧环氧树脂。采用聚芳醚酮树脂(PAEK)粉末为改性剂,制备高性能双组分环氧树脂材料,并利用扫描电子显微镜(SEM)和热重/差热分析仪对材料的脆断断口形貌和碎末进行了观察与分析。结果表明,纯环氧树脂的升温 DSC 曲线表现为放热反应,而环氧树脂共混体系的升温 DSC 曲线表现为吸热反应;同时 PAEK 粉末的加入显著提高了环氧树脂浇注体系的热分解温度,提高了其热稳定性。SEM 分析结果表明,PAEK 粉末的加入,提高了基体材料的韧性。

**关键词:**环氧树脂;合成;热性能;断口形貌

**中图分类号:**TB324    **文献标志码:**A    **文章编号:**1672-1098(2014)01-0039-04

## Study on the Thermal performance of a Bicomponent High Performance Epoxy Resin for Advanced Composites

HU Hai-xia<sup>1</sup>, YUAN Chang-song<sup>1</sup>, CHEN Xiang-yang<sup>1</sup>  
ZHANG Ming<sup>2</sup>, YI Xiao-su<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In order to toughen and don't reduce the mechanical properties and thermal properties of epoxy resin, in recent years thermoplastic resin is used for toughen epoxy resin because of its high heat resistance and excellent mechanical properties. In this paper, a bicomponent high performance epoxy resin for advanced composites, filled with PAEK powders were prepared. The fracture morphologies and scraps were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and differential scanning calorimetry. The experimental results showed that DSC curves of pristine bicomponent epoxy resin were exothermic reaction, and those of BE/PAEK-5 specimens were endothermic reaction. With the addition of PAEK powders, the thermal decomposition temperature and its thermal stability of the modified epoxy resin system were improved significantly. The results of SEM analysis also indicated that toughness was improved due to the addition of PAEK powders.

**Key words:** epoxy resin; preparation; thermal performance; fracture morphology

环氧树脂是一类性能优良的热固性树脂,具有强度高、模量高、粘接性强、化学稳定性好等良好的综合性能<sup>[1]</sup>,在化工、电子和航空航天等领域有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>,被认为是目前发展最快且最有前途的一种复合材料基体树脂,引起复合材料界的广泛重视。

但由于纯环氧树脂具有较高的交联结构,其固化物的弹性模量较高,冲击韧性低,质脆、易产生裂

纹、耐疲劳性和耐热性差等缺点,使其进一步扩大应用受到了限制。为此国内外学者开展了大量的研究工作,主要通过物理和化学手段对其进行改性,以改善环氧树脂的综合性能。业已发现,各种纳米级、微米级无机填料增强环氧树脂可以显著提高其力学性能,如纳米粒子  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、MMT 和碳纤维<sup>[4-10]</sup>等。为不降低环

氧树脂的力学性能和热性能而实现增韧,近年来人们又发展了用耐热性高和力学性能良好的热塑性树脂,如聚醚砜(PESU)、聚碳酸酯、聚醚醚酮和聚酰亚胺来增韧环氧树脂。国内外的学者于20世纪80年代开始采用热塑性树脂增韧改性环氧树脂<sup>[11]</sup>。聚芳基醚酮(PAEK)是耐高温热塑性树脂,它们可以承受250℃的连续使用温度,连续使用温度明显高于传统工程塑料的热塑性树脂,某些类型的PAEK短时间可承受的最高温度达350℃。PAEK在室温下的弹性模量、断裂应力、断裂延伸率和冲击强度达到了与其他热塑性聚合物材料相同的数值,但它在高温下仍能保留良好的机械性能<sup>[12]</sup>。已有的研究表明<sup>[13~14]34~35</sup>,采用PAEK增韧环氧树脂时,双连续相结构的形成有利于韧性的提高。

本文考察了PAEK粉末改性双组分环氧树脂体系的热物理性能;同时研究了双组分环氧树脂体系的脆断断口形貌,分析了PAEK粉末的加入对环氧树脂材料的热稳定性和断口形貌的影响。

## 1 实验部分

采用双酚A型环氧树脂(DGEBA,E-54)和四官能团环氧树脂(TGDDM,AG80),分别由无锡树脂厂和上海合成树脂研究所提供;固化剂为4,4'二氨基二苯酚(DDS),由北京化工厂提供;增韧剂为改性聚芳醚酮树脂(PAEK),由北京航空材料研究院提供。

将E-54和AG80树脂按质量2:3的比例混合后加热到指定温度,加入PAEK粉末,搅拌至完全溶解透明后加入固化剂DDS,固化剂与E-54树脂的质量比为1:1,每100g混合树脂中添加PAEK0g或5g。混合均匀后倒入金属模具中,在加热条件下抽真空排除气泡后按180℃/2 h + 200℃/2 h的工艺加热固化。固化后的环氧树脂样品分别记为BE和BE/PAEK-5。

将环氧树脂浇注体系在液氮中脆断后,放入四氢呋喃中刻蚀48h,干燥后对断口表面喷金处理,利用日本HITACHIS-4800型冷场发射扫描电子显微镜(SEM)对其进行表征,加速电压为5kV;采用Q600SDT型热重/差热分析仪测定环氧树脂材料的热稳定性,氮气气氛,测量温度范围为50~800℃,升温速率为10℃/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环氧树脂浇注体系的差热分析

图1为PAEK粉末和环氧树脂浇注体系的

DSC曲线。可以看出,在N<sub>2</sub>气中,纯环氧树脂的升温DSC曲线表现为放热反应(图1(b)),而环氧树脂浇注体系的升温DSC曲线表现为吸热反应,在260℃附近有一强的吸热峰(图1(c))。表1为PAEK粉末和双组分环氧树脂浇注体系的升温及降温过程的DSC数据。可见,当PAEK含量为5g时,熔融峰的起始温度( $T_i$ )、峰顶温度( $\Delta T$ )和熔融焓( $\Delta H$ )最高,分别为226.3℃、273.6℃和165.1J·g<sup>-1</sup>。随着热塑性PAEK粉末的加入,BE/PAEK-5样品在第一降温台阶处的起始温度( $T_i$ )和峰顶温度( $\Delta T$ )比双组分环氧树脂要高,但低于PAEK粉末。

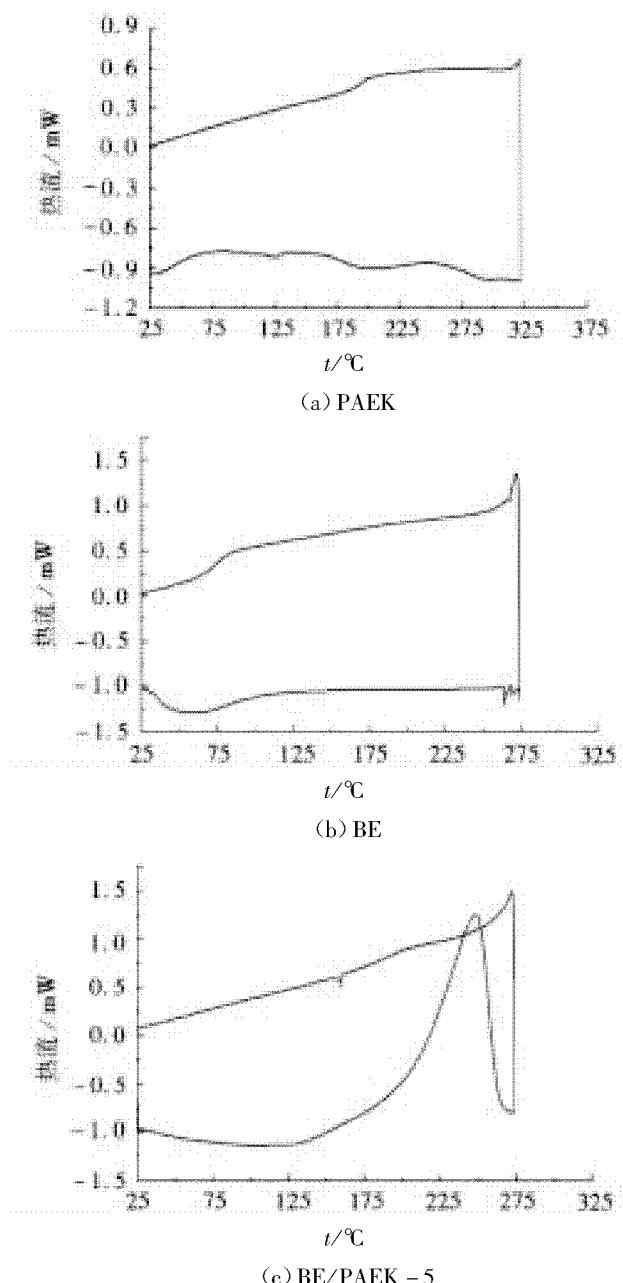


图1 PAEK粉末和环氧树脂浇注体系的DSC曲线

表1 PAEK 粉末和环氧树脂材料的等速升温和等速降温的 DSC 数据

样品	升温			第一降温台阶		
	$T_g/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(J \cdot g^{-1})$	$T_g/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(J \cdot g^{-1})$
PAEK	—	—	—	211.0	219.7	—
BE	—	—	—	90.6	98.8	—
BE/PAEK - 5	226.3	273.6	165.1	184.5	184.6	0.3574

## 2.2 环氧树脂浇注体系的降解过程

图2为N<sub>2</sub>气氛中,升温速率为10℃/min时,PAEK粉末和双组分环氧树脂浇注体系的TG-DTG曲线图。由图2(a)可见,PAEK粉末在506.51℃附近开始出现重量急剧减小,表明材料开始快速分解。其微分热重(DTG)曲线上有一个较强的失重峰,说明N<sub>2</sub>气氛中PAEK粉末的热降解过程为一步反应,较强的失重峰为PAEK粉末的热降解峰。纯环氧树脂在364.41℃附近开始出现重量急剧减小,表明材料开始快速分解。其微分热重(DTG)曲线上也只有一个峰,说明N<sub>2</sub>气氛中纯环氧树脂的热降解过程为一步反应(见图2(b))。图2(c)是BE/PAEK-5共混体系的TG-DTG曲线图。与纯环氧树脂相比,PAEK的加入使得材料的TG-DTG曲线向高温方向移动,失重点的温度提高到391.24℃。可见PAEK粉末的加入提高了各失重点的温度,也即表明PAEK粉末的加入显著提高了环氧树脂浇注体系的热分解温度。聚芳醚酮是一类亚苯环通过醚键和羟基连接而成的聚合物,与环氧树脂相容性差,其分子链中的羟基在环氧树脂固化过程中可与环氧分子侧链上的羟基形成氢键作用,从而加强了热塑性树脂与环氧树脂的界面作用,限制了环氧树脂分子链的运动,从而提高了其热稳定性。

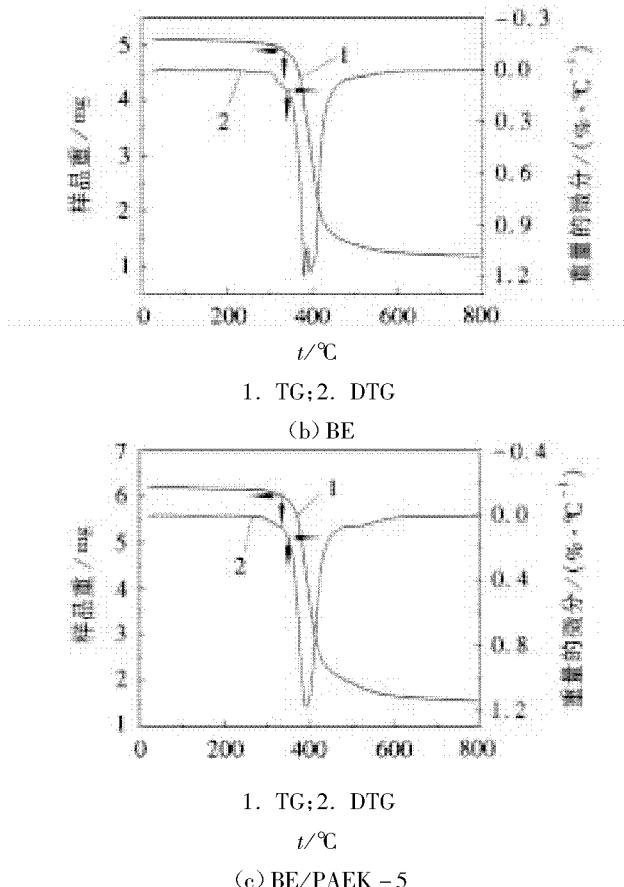
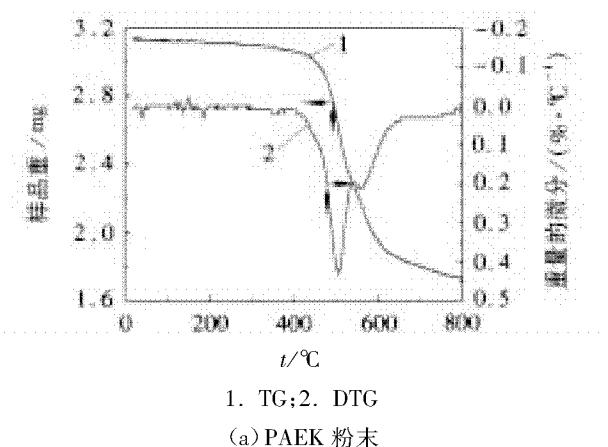


图2 PAEK粉末和双组分环氧树脂浇注体的TG-DTG曲线

## 2.3 断口形貌的扫描电镜分析

图3为纯双组分环氧树脂和环氧树脂浇注体系的断口形貌的SEM照片。可见,双组分环氧树脂的断裂表面有大量的犁沟,表明纯环氧树脂以脆性断裂为主要的失效形式(见图3(a));而环氧树脂共混体系的断裂表面比较粗糙,有大量细小的刻蚀坑,断口形貌由脆性断裂转为韧性断裂(见图3(b))。这主要是由于热塑性树脂与热固性树脂在热力学上是不相容的,因此采用热塑性PAEK粉末增韧环氧树脂时必然产生分相行为。当PAEK粉末的含量为5g时,热塑性树脂以球形颗粒分散在环氧树脂连续相中,从而将环氧树脂固化物均相体系变成一个多相体系,提高了基体材料的韧性,这



与文献中报道的研究结果一致<sup>[13]36</sup>。

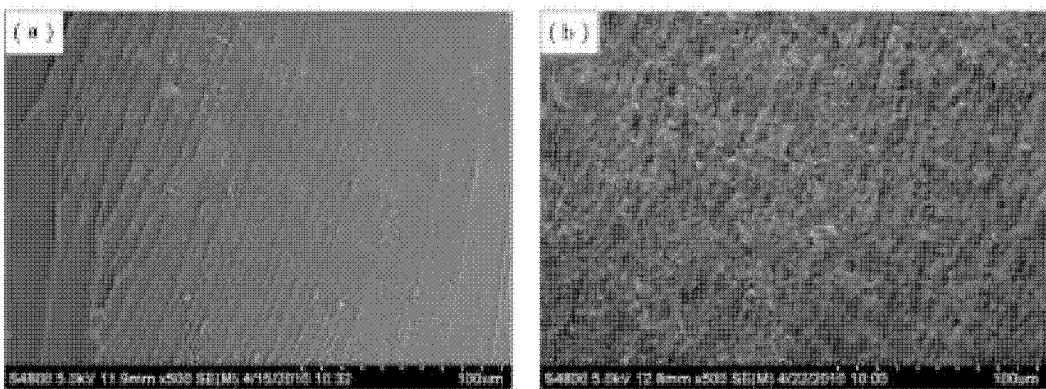


图3 双组分环氧树脂浇注体系的断口形貌的SEM照片

### 3 结论

纯环氧树脂的升温 DSC 曲线表现为放热反应,而环氧树脂共混体系的升温 DSC 曲线表现为吸热反应;同时 PAEK 粉末的加入显著提高了环氧树脂浇注体系的热分解温度,提高了其热稳定性。SEM 分析结果表明,PAEK 粉末的加入使得双组分环氧树脂浇注体系的韧性有所提高。

### 参考文献:

- [1] J R FRIED. Polymer Science and technology [M]. Englewood cliffs, NJ: Prentice - Hall, 1995, 4: 255 – 256, 272 – 275, 327 – 330.
- [2] P CHEN, S P LIU. Epoxy Resins [M]. Chemical Industry Press, Beijing, 1997:272.
- [3] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. ASM Handbook [M]. ASM International, Materials Park, USA, 1992:18, 829.
- [4] GUANG SHI, MING QIU ZHANG, MIN ZHI RONG, et al. Friction and wear of low nanometer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled epoxy composites [J]. Wear, 2003, 254:784 – 796.
- [5] F LI, K HU, J LI, et al. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene [J]. Wear, 2002, 249: 877 – 882.
- [6] NG CB, SCHADLER LS, SIEGEL RW. Synthesis and mechanical properties of TiO<sub>2</sub> – epoxy nanocomposites [J]. Nanostructured Materials, 1999, 12: 507 – 510.
- [7] GUANG SHI, MING QIU ZHANG, MIN ZHI RONG, et al. Sliding wear behavior of epoxy containing nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles with different pretreatments [J]. Wear, 2004, 256:1 072 – 1 081.
- [8] C J HUANG, S Y FU, Y H ZHANG, et al. Cryogenic properties of SiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites [J]. Cryogenics, 2005, 45: 450 – 454.
- [9] AIJUAN GU, GUOZHENG LIANG. Thermal degradation behaviour and kinetic analysis of epoxy/montmorillonite nanocomposites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 80: 383 – 391.
- [10] TIEJUN WANG. Matrix and interface modification of short carbon fiber – reinforced epoxy [J]. Polymer Testing, 2005, 24: 455 – 462.
- [11] 卫朋,艾静,王青松.环氧树脂的增韧改性研究进展 [J].材料导报,2011,25(18):394 – 397.
- [12] 陈祥宝.聚合物基复合材料手册, [M].北京:化学工业出版社,2004:105 – 121.
- [13] 黄汉生.多用途的热塑性塑料 – 聚芳基醚酮 [J].化工新型材料,1990,12:34 – 36.
- [14] 张明,李旭东,安学峰,等.聚芳醚酮增韧环氧体系相结构的冲击韧性及模拟计算研究 [J].热固性树脂,2012,27 (2):1 – 5.
- [15] 张明,安学峰,唐邦铭,等.增韧环氧树脂相结构 [J].复合材料学报,2007,24 (2):13 – 17.

(责任编辑:李丽,范君)

# 1,2 - 二氯乙烷裂解制备氯乙烯的模拟及分析

王君, 冯培良, 严丽, 李多松, 邹春华, 胡青松

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 1,2 - 二氯乙烷裂解制备氯乙烯是一种可行的方法, 对该过程进行模拟计算及灵敏度分析, 可为节能降耗、提高过程经济性提供依据。在对某过程设计方案基础工况模拟计算的基础上进行了灵敏度分析, 考察裂解反应转化率变化对裂解炉和激冷器热负荷、精馏塔再沸器热负荷及氯乙烯产品纯度的影响, 结果表明, 1,2 - 二氯乙烷转化率控制在 0.55 附近为最优。

**关键词:** 氯乙烯; 1,2 - 二氯乙烷; 模拟; 灵敏度分析

中图分类号:TQ222 文献标志码:A 文章编号:1672 - 1098 (2014) 01 - 0043 - 03

Simulation and Sensitivity Analysis for the Process of Vinyl Chloride Production via Pyrolysis of 1,2 - dichloride Ethane  
WANG Jun, FENG Pei - liang, YAN Li, LI Duo - song  
ZOU Chun - hua, HU Qing - song

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Preparation of Vinyl chloride by pyrolysis of 1,2 - dichloride ethane is a technically feasible method. Simulation and sensitivity analysis of the process provide a basis for energy saving and consumption reduction. The sensitivity analysis was conducted on the basis of performance simulation of a process at a given operation condition. The effects of conversion of the pyrolysis reaction on heat duty of crack, quench, reboilers as well as the purity of vinyl chloride product were investigated. The results showed that maintaining the conversion at the vicinity of 0.55 is optimal.

**Key words:** vinyl chloride; 1,2 - dichloride ethane, simulation; sensitivity analysis

## 1 基础工况模拟计算

### 1.1 工艺流程

1,2 - 二氯乙烷裂解制备氯乙烯流程如图 1 所示。其裂解反应:  $\text{CH}_2\text{Cl} - \text{CH}_2\text{Cl} \rightarrow \text{HCl} + \text{CHCl} = \text{CH}_2$

1,2 - 二氯乙烷进料流量 0.252 kmol/s, 温度 294.3 K, 压力 2 688 955.25 N/m<sup>2</sup>; 裂解炉温度

755.4 K, 压力 2 688 955.25 N/m<sup>2</sup>, 单程转化率 55%; 激冷器压力降 -34 473.79 N/m<sup>2</sup>, 过冷度 5.556 K; 氯化氢脱除塔: 塔板数 17 (包括冷凝器和再沸器), 回流比 1.082, 馏出物与进料比 0.354, 进料板位置 8, 板上进料, 全塔压力取 2 530 375.74 N/m<sup>2</sup>, 采用全凝器; 氯乙烯塔: 塔板数 12 (包括冷凝器和再沸器), 回流比 0.969, 馏出物与进料比 0.55, 进料板位置 7, 板上进料, 全塔压力取 792 896.997 N/m<sup>2</sup>, 采用全凝器; 循环泵: 出口压力 2 688 955.25 N/m<sup>2</sup>。

收稿日期: 2013 - 05 - 22

基金项目: 安徽省教育厅基金重点资助项目(kj2012A084)

作者简介: 王君(1971 - ), 男, 安徽金寨人, 教授, 博士, 研究方向: 生物质资源利用与化工模拟。

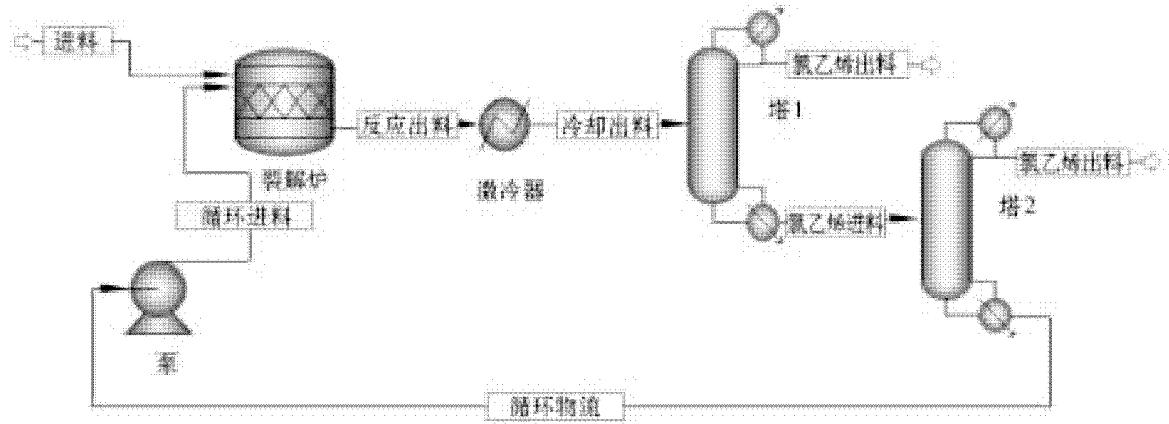


图1 1,2-二氯乙烷裂解制备乙烯流程

## 1.2 物性方程选取

计算物性中 RKS 方程相比于其它状态方程大大提高了表达纯物质汽 - 液平衡的能力, 并且能用于混合物汽 - 液平衡的计算, 工业应用范围广。故选取 RKS 方程进行汽 - 液平衡计算。形式如下<sup>[1-3]</sup>

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V(V + b)}$$

$$\text{式中: } a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} [1 + f_\omega (1 - T_r^{0.5})]^2,$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}, a \text{ 是分子间作用力的度量, } b \text{ 与分子大小有关, } T_c, P_c \text{ 为临界温度和临界压力, } f_\omega = 1 + 0.48 + 1.574\omega - 0.176\omega^2, \text{ 偏心因子 } \omega = [-\log(\frac{P_s}{P_c})]_{T_r=0.7} - 1.000.$$

计算混合物的混合规则如下

$$a = \sum_{i=1}^c \left[ \sum_{j=1}^c y_i y_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij}) \right],$$

$$b = \sum_{i=1}^c y_i b_i$$

式中:  $k_{ij}$  为二元交互作用参数。

## 1.3 模拟计算结果

对该过程流程在基础工况下进行了模拟计算, 主要计算结果如表 1 所示。计算结果表明: 目标产物氯乙烯的物质量纯度达到 99.8%, 满足生产要求, 主要能耗是裂解炉与精馏塔再沸器所消耗的热公用工程和激冷器和精馏塔冷凝器消耗的冷公用工程。下面在基础工况模拟计算的基础上, 考察 1,2-二氯乙烷裂解转化率变化时主要能耗及氯乙烯纯度的灵敏度分析。

表1 基础工况的模拟计算结果

裂解炉热负荷 /W	激冷器热负荷与 出口温度/(W·k <sup>-1</sup> )	冷凝器热负荷/W	再沸器热负荷 /W	氯乙烯物质量纯度 /%
50 859 413.1	-35 863 787 320.939 309	-6 295 317.2 (塔1) -9 049 369.6 (塔2)	11 071 932 (塔1) 7 049 932.2 (塔2)	99.8

## 2 主要能耗的灵敏度分析

各项主要能耗随着转化率的变化如图 2 ~ 图 4 所示。

裂解炉热负荷与转化率的关系图 2 所示, 可见转化率从 0.5 增加到 0.55 时, 裂解炉热负荷线性增加, 这是因为裂解反应为吸热反应, 转化率增加, 单位时间绝对反应量增加, 需要提供更多的热量维持反应; 同样的原因导致激冷器的热负荷也随转化

率的增加线性增加(见图 3, 注意冷公用工程用量用负值表示); 精馏塔再沸器热负荷总和随转化率增加呈下降趋势, 这是因为转化率增大后, 精馏塔进料中重组分减少, 轻组分增加的原因造成的。以上分析表明, 热公用工程主要消耗在裂解炉和再沸器单元, 在所研究的转化率范围类, 裂解炉热负荷变化比再沸器热负荷变化更敏感, 而且裂解炉所需的热公用工程等级也更高, 因此在优化过程中需要把裂解炉热负荷作为主要的目标函数<sup>[4-5]</sup>。

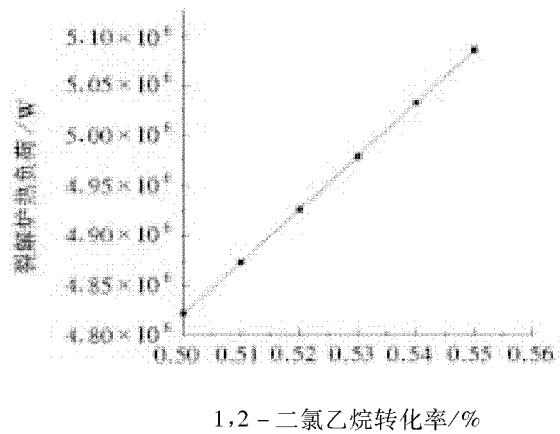


图2 热解炉热负荷与转化率的关系

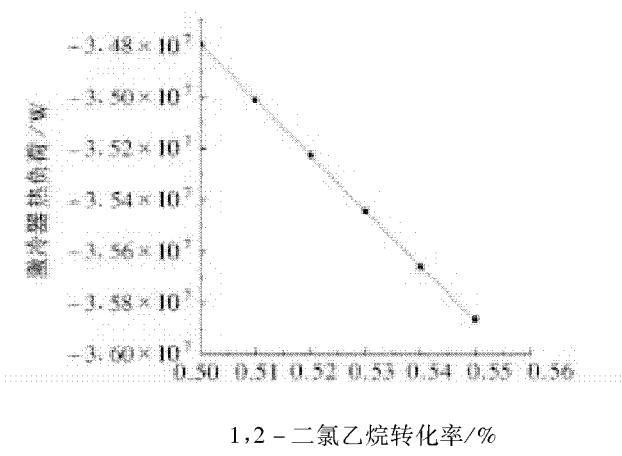


图3 冷却器热负荷与转化率的关系

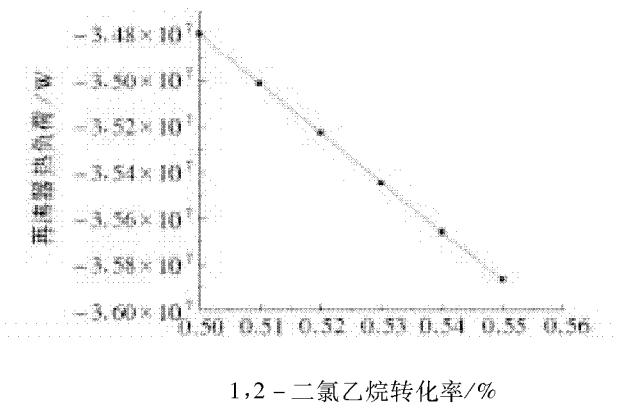


图4 再沸器热负荷总和与转化率的关系

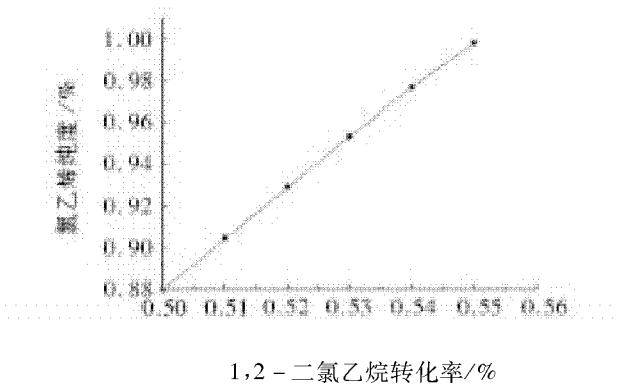


图5 氯乙烯产品纯度与转化率的关系

### 3 产品纯度的灵敏度分析

图5给出了氯乙烯产品纯度与EDC转化率的关系，可见转化率从0.5增加到0.55时，氯乙烯产品的纯度也是线性增加的，这是由于反应量增加，产物的量也会随之增加，经过后序的分离提纯，氯乙烯产品的纯度增加。在转化率为基础工况的0.55时，产品氯乙烯的纯度达到0.98以上，此时若降低转化率，则产品纯度会呈线性下降；若提高转化率，产品纯度已经没有多少上升的空间，并且增大反应器体积，因此，基础工况的转化率为较优的转化率。

### 4 结论

对某过程设计方案基础工况模拟计算的基础上进行了灵敏度分析，结果表明当前基础工况控制1,2-二氯乙烷转化率为0.55较优，降低转化率虽然可以降低裂解炉能耗，但当转化率低于0.55后产品氯乙烯的纯度几乎线性下降，达不到客户要求；如果转化率高于0.55，裂解炉热负荷将增加，而产品纯度增加非常有限，并且需要增大反应器体积，所以控制转化率为0.55附近，可在满足产品纯度的情况下能耗最小。

### 参考文献：

- [1] J D SEADER, ERNEST J HENLEY. Separation process principles [M]. John Wiley&Sons, Inc. 1988:54 – 55.
- [2] J M SMITH, H C VAN NESS, M M ABBOTT. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics [M]. The McGraw – Hill Companies, Inc. 2005:58 – 59.
- [3] JOHN M PRAUSNITZ, RUDIGER N LICHTENTHALER, EDMUNDO GOMES DE AZEVEDO. Molecular Thermodynamics of Fluid – Phase Equilibria (3rd) [M]. Pearson Education, Inc. 1999:28 – 30.
- [4] WARREN D SEIDER, J D SEADER, DANIEL R LEWIN. Process Design Principles (Synthesis, Analysis, and Evaluation) [M]. John Wiley&Sons, Inc. 1999:32 – 34.
- [5] 姚平经. 工程系统分析与综合 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2004:202 – 204.

(责任编辑:李丽,范君)

# DMF回收系统闭环控制的实现方案及算法分析

袁清萍

(铜陵职业技术学院电气工程系,安徽 铜陵 244000)

**摘要:**为了得到较高纯度的二甲基甲酰胺(DMF),针对DMF回收系统参数特性,提出一种压力、流量的单闭环控制系统和精馏塔串级温度控制方案。单闭环控制系统由上位机、PLC、压力传感器、流量计和电动阀组成。精馏塔温度串级控制系统中,主环是模糊自适应PID温度控制,副环是常规PI流量控制。现场测试及仿真结果表明,FM355C闭环控制和模糊自适应PID串级控制具有良好的稳定性、响应快和超调量小的特性。

**关键词:**DMF回收控制;FM355C;模糊自适应PID;串级控制

**中图分类号:**TP273    **文献标志码:**A    **文章编号:**1672-1098(2014)01-0046-05

## Implementation of Closed - loop Control in DMF Recovery System and Its Algorithm Analysis

YUAN Qing - ping

(Department of Electrical Engineering, Tongling Polytechnic, Tongling Anhui 244000, China)

**Abstract:** In order to obtain dimethyl formamide (DMF) of high purity , based on the parameter characteristics of DMF recovery system, a kind of single closed - loop control system of pressure , flow and a cascade temperature control scheme of distillation column were proposed. The single closed - loop control system consists of PC, PLC control block, pressure sensor, flow meters and electrically operated valve. In cascade temperature control scheme of distillation column, the main control loop is based on fuzzy adaptive PID temperature control, and the secondary control loop is a flow controller based on conventional PI. Field test and the simulation results showed that FM355C closed - loop system and fuzzy adaptive PID cascade controller have good stability, fast response and small overshoot.

**Key words:** DMF recovery control; FM355; Fuzzy Self - Adaptive PID; cascade control

在湿法合成树脂生产线或其他化工产品生产线上,二甲基甲酰胺(DMF)溶在水中,作为废水排出会给人类环境造成严重的危害。同时,废液中的DMF作为重要原料和优良溶剂被化工生产过程大量使用<sup>[1]</sup>。因此生产线排出的DMF废液需要进行专门的回收处理。

DMF回收工艺一般采用一级浓缩塔、二级浓缩塔和精馏塔三塔蒸馏的方法得到较高纯度的DMF。回收工艺中,浓缩塔的压力、出料流量和精馏塔的温度对产品质量起到关键的作用。浓缩塔的结构比较简单,采用常规的PID控制即可达到工艺控制要求,而精馏塔是一类具有非线性及参数时

变性的控制对象,用常规的控制方法很难达到控制要求。

针对精馏塔参数特点,本文提出一个精馏塔温度模糊自适应PID串级控制方案。在主控制器设计中,将PID控制方法引入模糊控制器,运用模糊推理,自动实现对PID参数 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 的最佳调整,从而使系统具有良好的静态和动态特性。

## 1 压力、流量闭环控制设计

### 1.1 控制方案设计

以FM355C为控制中心的浓缩塔压力、出料流

收稿日期:2013-08-30

基金项目:安徽省教育厅教研课题一般基金资助项目(2012jyxm683)

作者简介:袁清萍(1963-),女,安徽铜陵人,副教授,硕士,研究方向:电气自动化技术。

量闭环控制系统如图1所示,图中的虚线部分是由FM355C实现,包括信号采集、控制器设定、输出回路三个子回路。FM355C模块中共有4个控制通道,每个通道可以单独工作,因此本系统只需要一块FM355C模块即可。设定控制通道1为一级

浓缩塔压力控制,控制范围为-100~0 kPa;通道2为一级浓缩塔出料流量控制,控制范围为0~20 m<sup>3</sup>/h;通道3为二级浓缩塔压力控制,控制范围为-100~0 kPa;通道4为二级浓缩塔出料流量控制,控制范围为0~12 m<sup>3</sup>/h。

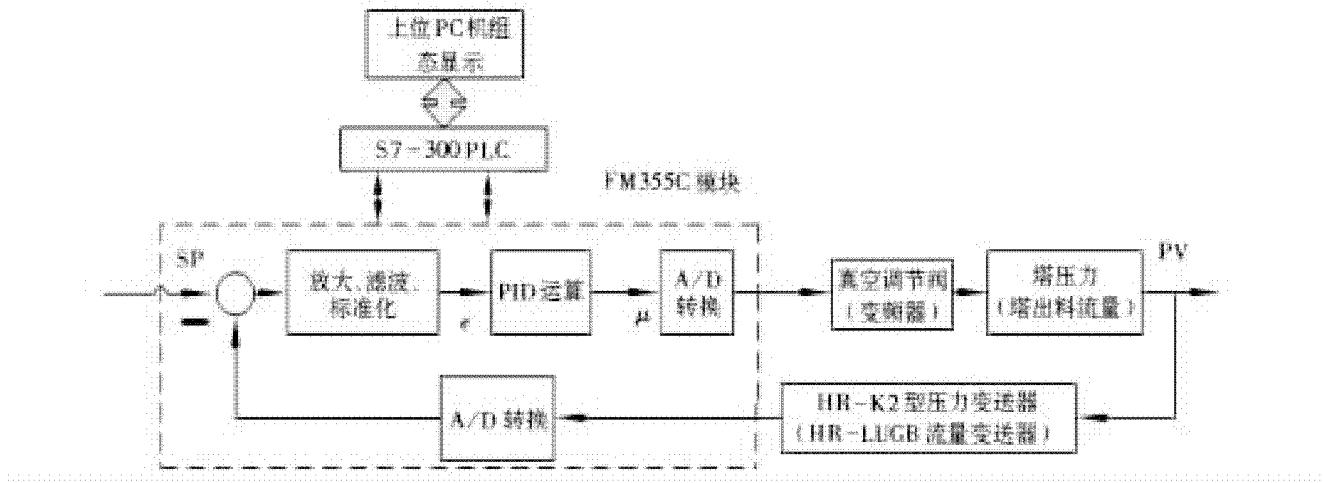


图1 FM355C闭环控制框图

检测元件将被控量实际值PV测量转换为4~20 mA电流信号,该模拟信号通过AO5041输入安全栅接至FM355C的输入端。压力、流量模拟信号进入FM355C经过A/D转换、放大、滤波和标准化与设定值相减计算出偏差值,再经过控制运算将结果输出,输出信号经AO5045输出安全栅输出到实际控制器上。

控制器输出有两种,一种输出到变频器,变成变频器输出的频率,来控制电机的运转;另一种是输出到阀门,通过输出值来控制阀门的实际开度。系统中,一级和二级浓缩塔的压力控制是由真空调节阀来调节,当塔顶压力升高,减小真空调节阀的阀位;压力降低,加大真空调节阀的阀位。两浓缩塔的出料流量由变频器输出频率控制,当出料流量升高,减小变频器输出频率;出料流量降低,增大变频器输出频率。

## 1.2 控制算法分析

FM355C闭环控制模块提供两种控制器算法:温度控制器、带死区的PID-action控制器。根据现场环境和客户需求,本系统选用带死区的PID控制运算。PID控制为3个环节叠加,动作规律为

$$\mu = \frac{1}{\delta} (e + \frac{1}{T_I} \int_0^t edt + T_D \frac{de}{dt}) \quad (1)$$

式中:e为误差;μ为PID控制器的输出;δ为比例

带;T<sub>I</sub>为积分时间常数;T<sub>D</sub>为微分时间常数。

PID控制器将输入变量ER按比例映射至输出信号,并添加通过对ER差分和积分生成的组件,该差分和积分是按照梯形法则使用双精度计算得出。FM355C闭环控制模块PID作用控制器的等式为

$$y = GAIN \times X_w \times (1 + \frac{1}{T_I \times t} + \frac{T_D}{TM\_LAG} \times e^{\frac{-t}{TM\_LAG}}) \quad (2)$$

式中:GAIN为比例作用因子,  $GAIN \approx 0.83V_{max} \times T_u$ ,  $V_{max}$ 为上升时间,  $T_u$ 为延迟时间;  $X_w$ 为受控变量设定值;  $T_I \approx 2T_u$ ;  $T_D \approx 0.4T_u$ ;  $TM\_LAG \approx 0.5T_D$ 。

当控制器稳定时,死区可抑制负偏差信号中的噪声,从而避免不必要的控制器输出振动。

## 1.3 PID程序模块配置

FM355C模块的参数设置是以STEP7为平台,安装FM355C软件包后,在STEP7硬件组态中对其进行设置即可。根据用户提供的控制器PID参数以及实验结果,一级浓缩塔压力、出料流量PID参数均设定: $K_p=3$ ,  $T_I=100$ ,  $T_D=20$ ;二级浓缩塔压力PID参数设定: $K_p=3$ ,  $T_I=100$ ,  $T_D=20$ ;出料流量PID参数设定: $K_p=5$ ,  $T_I=100$ ,  $T_D=20$ 。

采用FM355C程序进行PID算法控制,算法函

数为了方便调用采用结构化编写封装在 FB31(FM355C PID 控制程序功能块)中, 模块通道参与模拟量采集、控制和输出。每个通道进行模拟量处理时需要调用 FB31, 程序执行过程中还需要配合功能块的背景数据中的参数来执行不同的控制方案<sup>[2]</sup>。本系统用了一块 FM355C 模块, 背景数据块按顺序和通道命名为 DB11、DB12、DB13、DB14, FM355C PID 功能块的背景数据块共 44 个字节, 调用时对背景数据块参数中函数形参赋值, 赋值后 FB31 进行运算并给出输出来控制被控对象, 从而

形成一个闭环控制。

背景数据块部分参数如表 1 所示。数据块中, 地址为 56.4 的参数为一个布尔量, 内容决定了系统的手动/自动状态, 地址为 52.0 的实型数据代表计算外部输出。当手动/自动状态为自动时, 系统利用 PID 算法计算输出, 并写在 DB 块中, 当手动/自动状态为手动时, 功能块中程序会自动切掉 PID 算法计算部分, 只运行采集信号部分, 而输出直接由 DB 块中外部输出值给定, 即手动输出。

表 1 PID 功能块背景数据块参数

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0	MOD_ADDR	INT	256	FM355 module address
2.0	CHANNEL	INT	1	Channel number
56.4	COM_RST	BOOL	FALSE	Read control parameters from FM355C
52.0	LMN_RE	REAL	0	External Manipulated value
108.0	GAIN	REAL	3	Proportional gain
112.0	TI	REAL	100	Reset time(sec)
116.0	TD	REAL	20	Derivative time(sec)
120.0	TM_LAG	REAL	10	Time lag of the derivative action(sec)

## 2 温度模糊 PID 串级控制

### 2.1 串级控制系统结构

精馏塔工艺要求温度偏差为  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , 而在生产

过程中, 回流系统会有剧烈的压力波动, 若采用常规单闭环控制难以适应被控对象动态特性的改变, 控制品质欠佳。鉴于此, 提出一种模糊自适应 PID 串级控制系统(见图 2)。

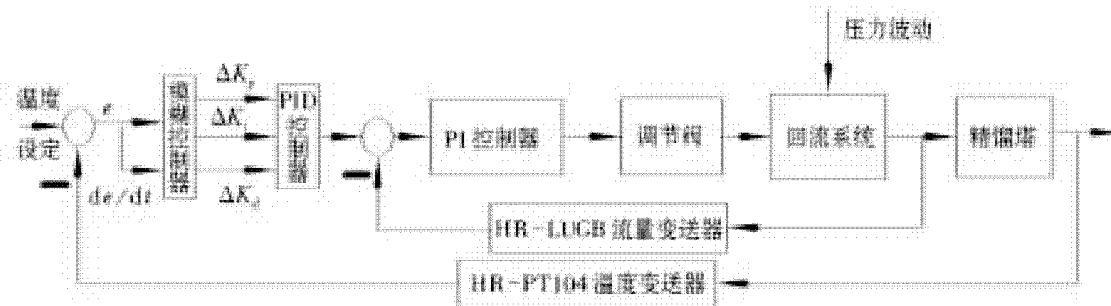


图 2 精馏塔温度串级控制结构图

串级温度控制系统采用两套测量变送和控制器。副环为回流流量自稳定系统, 采用常规 PI 调节规律, 根据回流流量信号控制回流调节阀, 这样就可以在回流罐内压力有波动的情况下, 仍能保持回流流量稳定。副环的二次扰动为系统的主要干扰, 该扰动量来自冷却剂的压力变化。当副环中有扰动发生, 由于有副环控制回路的存在, 回流调节阀能及时地调节, 从而快速消除扰动的影响<sup>[3]</sup>。

主控制器为温度控制系统, 采用模糊自适应 PID 控制规律, 它根据精馏塔温度来改变回流罐流量给定值, 从而保证在发生进料方面的扰动的情况下, 仍能保持塔温度满足要求。

### 2.2 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制器由模糊推理参数校正部分和常规 PID 控制部分组成, 运行中通过不断检测偏差

绝对值  $e$  和偏差变化率绝对值  $ec$ , 进行模糊运算, 对 PID 三个参数进行在线修改, 从而使系统具有良好的动静态性能<sup>[4]</sup>。模糊控制器的输入变量为偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$ , PID 参数调整值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为模糊控制器的输出。模糊 PID 控制周期的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ , 公式为

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  为 PID 参数的初始值。

根据精馏塔的温度变化特点, 选取温度偏差  $e$  的基本论域为  $\{-5, 5\}$ , 温度偏差变化率  $ec$  的基本论域为  $\{-3, 3\}$ ,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  基本论域均为  $\{-4, 4\}$ 。输入、输出变量的隶属函数选用三角形来定义<sup>[5-6]</sup>。

输入、输出的每一个变量都对应 7 个模糊取值 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。所以模糊语言规则有  $7 \times 7 = 49$  条, 采用 IF - THEN 模糊规则来实现<sup>[7]</sup> (见表 2)。

表 2  $K'_p$ 、 $K'_i$ 、 $K'_d$  控制规则

E							
EC	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	PB	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	PS	NS	NB	NM	NM	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PM	ZO	PS	NS
	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	NS
	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	ZO						
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	ZO	ZO	PS	NM	PM	PB	PB
	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

确定模糊规则后, 运用最大隶属度法对整定的三个参数进行去模糊化, 从而得到输出量的精确值。

### 3 实验及仿真结果

#### 3.1 压力、流量闭环控制实验结果

本系统中, 压力和流量的工艺控制界面采用组态王软件进行设计, 控制器界面如图 3 所示。

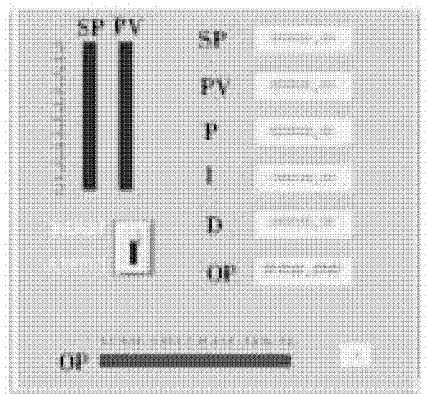


图 3 PID 控制器界面

SP 为模拟量的设定值(期望值), PV 为控制量的过程值, P、I、D 为参与输出运算的 PID 算法的参数值, OP 为系统输出值, 左下角显示手自动操作按钮, 直接与 PLC 的 DB 块联通控制 FM355C 功能块的运作。自动状态下, PID 算法参与控制, 输出为经算法后自动生成的内部输出, 外部输出显示隐藏; 手动状态下, PID 算法被隔离, 系统直接输出外部输出(即手动输入的输出), 内部输出显示隐藏。自动状态下, P、I、D 参数可修改, 手动状态下 OP 值可修改, SP 手自动状态下均可修改。

为了便于工作人员实时观测到现场压力和流量控制值, 在组态王中将以仪表总貌的形式呈现控制值(见图 4)。

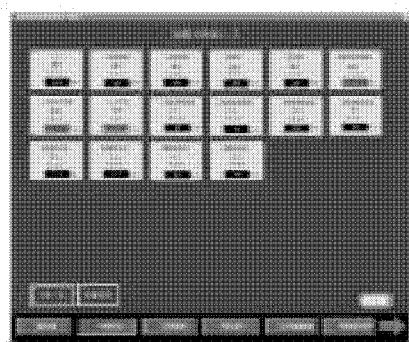


图 4 压力监测画面

### 3.2 模糊 PID 控制器仿真研究

模糊自适应 PID 串级控制中,以精馏塔温度为主变量,回流罐流量为副变量的串级控制系统。理想条件下,回流模块的传递函数可表示为一阶惯性环节:

$$G_{p1}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (4)$$

式中: $K_1$  为系统放大倍数; $T_1$  为系统时间常数;本系统中,取  $K_1 = 3, T_1 = 10$ 。

实际工程中,精馏塔是一个具有非线性和参数时变的受控对象,使得传递函数不易获取。但在一定理想化条件下,可根据传递函数矩阵的理论推导出精馏塔温度控制通道的传递函数表示为<sup>[8]</sup>

$$G_{P2}(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} e^{-\tau s} \quad (5)$$

式中: $K_a$  为放大倍数; $T_a$  为惯性时间; $\tau$  为滞后时间。

串级系统中,副调节器 PI 参数设定为  $K_p = 10, K_i = 1/33$ , 主调节器初始参数设定为  $K_p = 0.294, K_i = 1/60, K_p = 20$ 。工况 1: $\tau = 30, K_a = 8, T_a = 60$ ;工况 2: $\tau = 30, K_a = 10, T_a = 75$ , 分别对串级控制和简单回路控制进行仿真比较,验证系统的鲁棒性能(见图 5)。

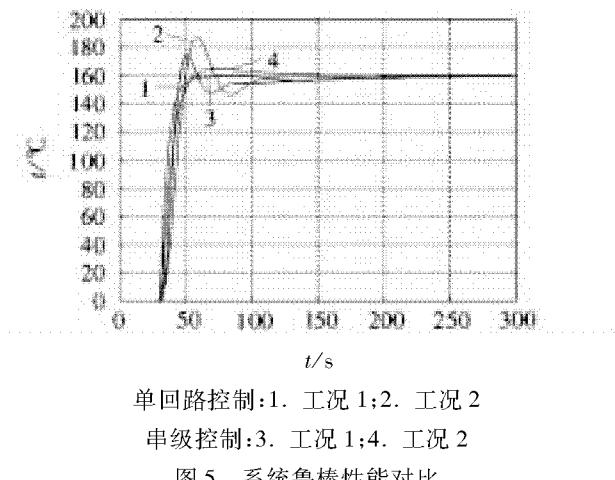


图 5 系统鲁棒性能对比

由仿真结果可以看出,串级控制的控制效果明显优于单回路控制。为分析串级系统的抗干扰性能,在串级控制系统的副控制回路加入扰动信号,抗干扰特性曲线如图 6 所示。对比两条曲线可知,在相同干扰作用下,串级控制系统的超调明显比等效的简单控制系统要小的多,可见串级控制系统对二次干扰具有很好的抑制能力。

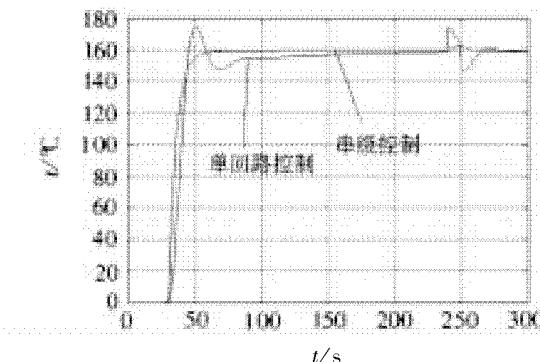


图 6 抗干扰特性

### 4 结束语

本文设计的 FM355C 压力、流量闭环控制,经现场测试,系统具有响应速度快,调节精度高的特性。MATLAB 仿真结果表明,模糊自适应 PID 串级精馏塔温度控制方案具有超调小、无振荡、控制精度高的特点,该控制方案可以实现较为准确的温度控制要求。

### 参考文献:

- [1] 杨德明,郭新连.多效精馏回收 DMF 工业的研究[J].计算机与应用化学,2008,25(10):2-5.
- [2] 潘峰,刘红兵.西门子 PLC 控制技术实践[M].北京:中国电力出版社,2009:2.
- [3] 梁昭峰,李兵,裴旭东.过程控制工程[M].北京:北京理工大学出版社,2010:8.
- [4] 范卫刚,袁冬莉.基于模糊自适应 PID 的无人机纵向姿态控制研究[J].计算机测量与控制,2011,19(3):586-588.
- [5] 诸静.智能预测控制及其应用[M].杭州:浙江大学出版社,2003:11.
- [6] 温阳东,高震宇,刘思邦.基于模糊控制的总线型温度监控系统的设计[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2010,9(33):1 325-1 328.
- [7] 王建平,邵威,金铁江.基于自适应 PID 控制器及其在电子万能试验机中的应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,9(32):1 343-1 347.
- [8] 黄克谨,钱积新,孙优贤,等.一种精馏塔传递函数矩阵的理论推导方法[J].浙江大学学报:自然科学版,1994,28(3):253-261.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 水库坝基综合地球物理勘察技术与应用

江晓益<sup>1</sup>, 陈兴海<sup>2</sup>, 胡雄武<sup>2</sup>, 张平松<sup>2</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020;2. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:**水库坝基地质条件关系到大坝建设质量,其前期的勘察工程至关重要。目前,利用物探与钻探工程相配合,可以获得坝基土岩介质较为丰富的勘察资料。结合地震折射波和并行电法对新建水库坝基进行勘察,确定了土层埋深、岩体风化带等特征参数,为坝基处理与施工提供可靠的依据。应用实践表明,利用综合物探方法可以提高对地质异常的判断能力,效果良好。

**关键词:**坝基勘察;折射波法;并行电法;综合分析;水库

中图分类号:P631.3 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0051-05

## Integrated Geophysical Prospecting Technology of Reservoir Dam Foundation and Its Application

JIANG Xiao - yi<sup>1</sup>, CHEN Xing - hai<sup>2</sup>, HU Xiong - wu<sup>2</sup>, ZHANG Ping - song<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou Zhejiang 310020, China; 2. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** The geological conditions of dam foundation refer to the construction quality of dam for reservoir, and the early prospecting engineering is very important. At present, combining with geophysics and drilling engineering, the rich exploring data of the soil and rocks in dam foundation can be gained. In the research the exploration of the new construction was done by the integrated method of refracted wave and parallel resistivity method. The characteristic parameters, such as the cover depth of soil, zone of weathering of rock, and so on, were confirmed, and it can provide the reliable basis for the processing and construction of dam foundation. The testing results showed that the integrated geophysics method can improve the judging ability for the geological abnormality in dam foundation, and it has good effect in the dam foundation prospecting.

**Key words:** dam foundation prospecting; refracted wave method; parallel resistivity method; integrated analysis; reservoir

水库作为一种抗洪防旱、保障供水和改善生态环境的水利工程,已经成为改善民生、保障民安、促进经济发展的重要基础设施,在国民经济建设中发挥的作用巨大。随着我国基础建设的迅猛发展,水电站、风电站等建设的投入不断加大,水库建设工程也快速发展<sup>[1]</sup>。对于新建水库来说,其坝基的地质条件是建设者首先要考虑的问题。坝基勘

察中采用物探与钻探相结合的方式可以科学探查潜在的地质灾害,物探先行,为钻探提供重点勘察区域,所获得的勘察结果较为及时可靠。目前用于坝基测试的物探方法有地震类、电法类,以及测井等方法,由于受单一方法条件所限,其探测结果的影响因素及结果各有特点,很难对坝基岩性做出准确判断,为了进行资料有效对比与解释,通常选用

收稿日期:2013-06-04

基金项目:浙江省公益技术研究社会发展基金资助项目(2011C23049)

作者简介:江晓益(1973-),男,安徽桐城人,高级工程师,硕士,研究方向:水利水电工程地质。

两种方法进行综合勘探与对比,对地质异常体的分辨能力增强,综合物探方法相互对比验证与综合分析,进一步提高坝基岩性判断的准确性和可靠性<sup>[2-10]</sup>。文章结合某水库坝基勘察条件,选择地震和电法综合进行勘探,分析其效果,为同类条件坝基勘探提供参考。

## 1 震电综合探测方法

### 1.1 浅层折射波法探测原理

地震勘探中折射波法要求探测介质的上一层震波速度小于下一层介质的波速,水库坝基勘察中通常利用它来获得基岩埋藏深度值,其表层的松散层与下部基岩层之间波速差异较大,有利于进行折射波勘探。当地震波被激发传播时,遇到地层波速界面会产生波的折射、反射,通过在地表不同位置检波器接收最先到达的折射波,分析计算折射波到达地表的时间同时结合相关的参数来达到划分基岩风化带、测定低速破碎带等的目的。其现场分为单边折射和相遇折射波法,现场根据地表条件以及基岩面起伏形态进行试验,选择合适的观测系统进行数据采集。

本次采用相遇折射波法进行观测(见图1),测线AB两端各放置一个传感器,在AB间每隔 $\Delta x$ 锤击一次,A、B点同时接收, $\Delta x$ 常取固定值。测线长度X应足够长,以保证折射波能够出现。如果估计的覆盖层厚度为H,层内波速为 $v_1$ ,下覆岩层内波速为 $v_2$ ,那么X应该满足如下关系式

$$X \geq 2H \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}} + L \quad (1)$$

其中L至少要有3~4个道间距才能确定折射界面的速度。在山区工作时,采用重锤作为震源。为能激发高频信号,锤重以10磅左右为宜。由于直达波和折射波的频率较高,而面波等干扰波的频率较低,为消除低频干扰,采样时频带取200~1 000 Hz为宜。采样间隔的选取由记录长度和测线长度以及界面深度来决定。

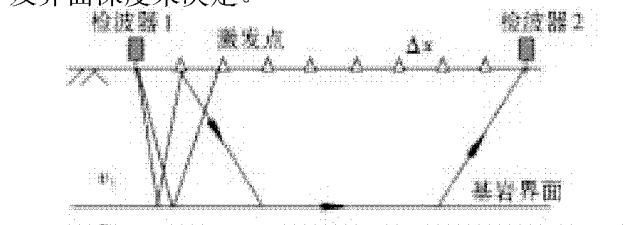


图1 折射波观测系统布置图

由于堤坝渗水通道一般是细长的通道或者裂缝,尺寸相对较小,所以在进行折射波法进行现场探测时,应尽量减小道间距之间的距离,以提高探测结果的分辨率。由于其受分辨率的影响,目前在堤坝隐患探测中应用较多的地震方法还是面波法。

### 1.2 并行电法探测原理

电法探测是以不同介质的电性差异为基础,由于基岩段岩石与上部松散介质之间存在较大的电性差异,因此可以采用电法探测技术划分测线下方基岩界面的展布情况。本次探测中采用并行电法技术进行数据采集,该方法是在高密度电法勘探基础之上发展起来的一种新技术。它既具有集电测深和电剖面法于一体的多装置、多极距的高密度组合功能;同时,还具有多次覆盖叠加的优势,大侧向探测距离为电极控制段的长度。并行电法数据采集时具有同时性和瞬时性,使得电阻率分布图像更加真实合理,大大提高了时间分辨率<sup>[11]</sup>。

根据电极观测装置的不同,并行电法数据采集方式分为两种:AM法和ABM法。通过获得的瞬时电场参数进行视电阻率计算与反演,即可获得地下介质的电阻率剖面,依据剖面中电性差异分析异常位置及特征,并与地质条件对应解释。

目前直流电阻率法已广泛应用于堤坝隐患探测实践中,但是由于其纵向分辨率还没有很好的提高,探测的有效深度和异常体大小的界定还没有很明确的定量。所以,直流电阻率法在实际探测中还有待进一步的发展探索。

### 1.3 电磁法探测

电磁法勘探主要包括瞬变电磁法、探地雷达法、频率域电磁法、甚低频电磁法等,瞬变电磁法主要是根据电磁感应原理,通过向地下发射一次脉冲场,激励地下低阻体产生二次感应场,然后通过线圈接收,从而进行地下的地质体判断分析;探地雷达主要是向地下发射高频电磁波,经地下的地层或异常体反射回地面,然后通过线圈进行接收,根据波形的旅行时间和强度及波形的变化判断地下介质的内部情况。总的来说,电磁法勘探在实际现场应用过程中受到探测深度的限制,瞬变电磁法较适合探测坝体深部的异常情况,对埋深浅、体积小的异常体探测效果较差;探地雷达法适合探测浅部的异常体,往深部的电磁衰减较大,所以其发展也受到一定的限制。电磁法探测还受到其的探测分辨

率的影响,导致其在堤坝隐患探测中需要进一步的发展完善。

#### 1.4 其他探测方法

在堤坝隐患探测中,还有示踪法、温度场法、流场法等方法,示踪法是利用放射性同位素作为标记物,根据其在地下水中的迁移变化来研究地下水渗漏的运动规律,在某些情况下,其探测深度和分辨率相比于电磁法和地震要大,是一种理想的探测方法;温度场法可视为一种天然的示踪方法,是通过测量水面温度差、地层温度差等确定渗漏通道,是示踪法的一个发展和延伸;流场法是根据无渗流时的正常场和有渗漏时产生的异常场之间的差异,利用水流场和电流场之间数学物理上的相似性,研究“伪随机”电流场和渗流场之间的联系,建立电流场和异常水流场之间的分布规律,确定渗漏水流场<sup>[12]</sup>。

### 2 水库坝基探查实践

#### 2.1 工程区地质概况

安徽某拟建水库规划为防洪和城区的供水水源工程,水库集水面积 30.5 km<sup>2</sup>,总库容 2 628 万 m<sup>3</sup>,为一中型水库。其最大坝高约 30 m,坝顶长度约 200 m。水库工程区以低山为主,山间发育峡谷,山地组成的岩性差异较大。区内植被茂盛,两岸岸坡较为陡峭,岸坡岩基局部裸露,覆盖层厚度不大。工程区以深厚沉积岩为主,地层较为复杂,主要有志留系下统安吉组、大白地组,上中统太平群及燕山晚期第二次侵入岩。坝址区主要岩性以细粒岩屑石英砂岩为主,局部与泥质粉砂岩互层;库区主要以燕山晚期侵入之二长花岗岩及花岗闪长斑岩。河床以粉细砂、含粘性土细砂、粉质粘土及砂卵石为主。为了解坝址区覆盖层厚度和岩体风化分带,采用综合方法进行现场勘察,控制全区岩土介质分布特征。

#### 2.2 数据采集

根据现场实际地形地质条件、地面作物等情况,现场利用并行直流电法和折射波法探查坝址区内第四系覆盖层厚度;利用并行电法探查坝址区内基岩风化程度并划分风化带。根据已收集地质资料,工程区以低山为主,山间发育峡谷,山地组成的

岩性差异较大,为了提高探测结果的准确性,现场分不同测线进行数据采集。

其中折射法探测选用 KDZ1114-3 型地震探测仪以及高频检波器 12 只;电法探测使用 WBD 型并行电法系统 2 台以及配套铜电极。根据实际地形地质条件,探查完成并行电法测线 10 条,编号依次为 ML1 ~ ML10,其中东西横测线 7 条,南北纵测线 3 条;地震测线 2 条,编号为 SL1 和 SL2。施工测线总长度达 900 m,测试点间距 1.0 ~ 2.5 m,总勘察数据点数达 581 个。

### 3 结果分析

对浅层折射波法数据处理,主要结合相遇实测折射波记录,对所采集到的信号进行初至拾取,绘制出时距曲线图后,根据哈尔斯法作图原理,描绘出地下界面的形态图。处理时采用自编的 KDZ 震波处理软件来完成,其自动绘制时距曲线图,可直接对基岩界面深度进行读取。

电法数据处理时主要采用温纳三极数据体,进行二维电阻率反演,获得测线剖面。根据已收集地质资料,利用探测区域内部分钻孔资料进行电阻率值标定,以及电阻率剖面对比与解释。其中电阻率值均匀,变化缓慢部分,反映地下介质较均匀或层面连续;其阻值越大则岩性完整程度相对较好。若在高阻或是变化均匀电阻率介质层中出现相对低阻异常区,表明局部岩层破碎或含水。通过对区内河床测试剖面整体分析,认为松散层电阻率值与下伏基岩段存在明显差异,其中松散层电阻率值小于 200 Ω · m,而基岩段岩层在 200 Ω · m 以上,且弱风化与微风化岩层之间电阻率也存在区别,两者电阻率分界值基本上为 400 Ω · m 左右。河床两岸山坡上测线岩层电阻率值与河床基岩段存在差别,其覆盖层较薄,整体电阻率值较大,基本在 350 Ω · m 以上,局部存在相对低电阻率区。由于测线内容较多,这里选择其中两条进行说明与分析。

#### 3.1 测线 3 解释

位于坝址区下坝线面板坝河床趾板位置,测线起点 1 号至终点 64 号电极长度 64.5 m,探测结果如图 2 所示。图中岩层电阻率特征分布明显,易于判定覆盖层厚度为 0 ~ 3.5 m,而弱风化带界限在 5 ~ 16 m 左右。

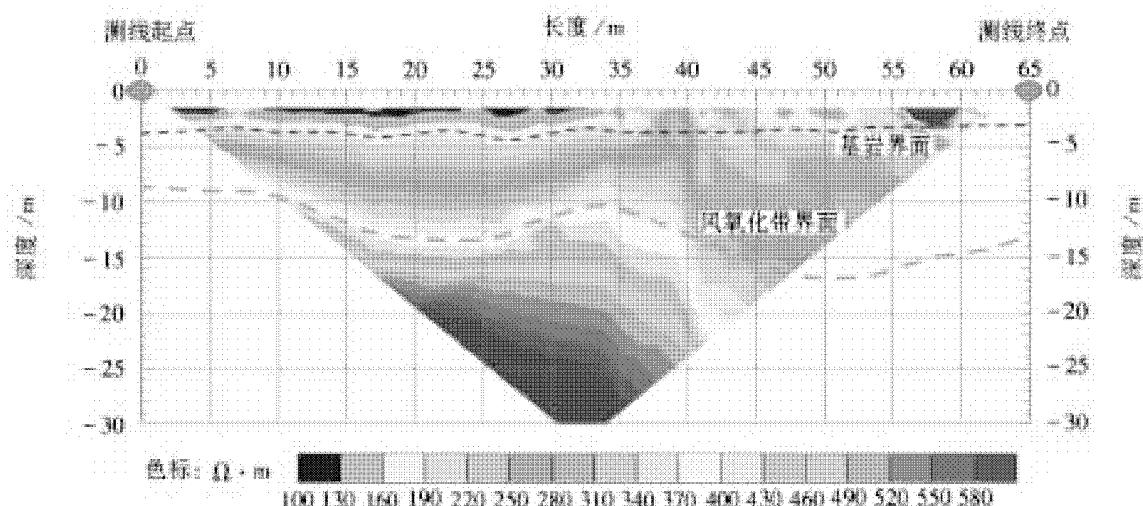
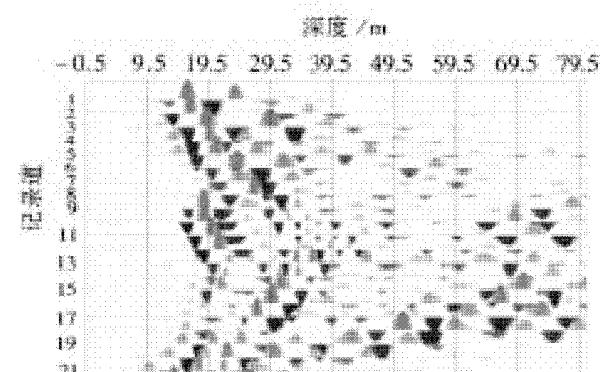
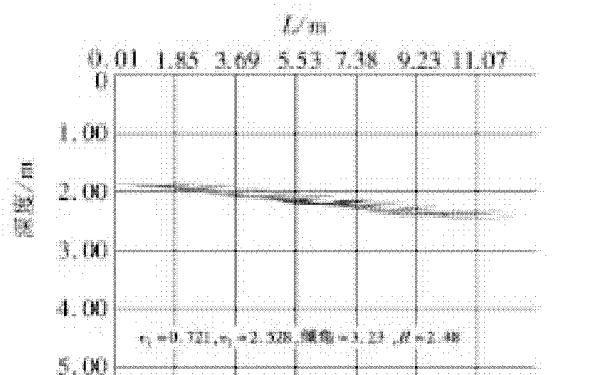


图2 测线3电法探测剖面图

测线3相遇折射波记录及其解析剖面如图3所示,该剖面对应位置近于测线3中的0~40 m段。覆盖层纵波波速为720~740 m/s,基岩弱风化层纵波波速为2 500 m/s左右。可以看出,覆盖层厚度为2.0~3.0 m左右,与电法探测结果近于一致。



(a) 波形记录



(b) 结果剖面

图3 测线3折射波勘探结果

### 3.2 测线10解释

位于坝址区上坝线左岸岸坡,测线1号至终点22号电极长度52.5 m,探测结果如图4所示。左右岸山坡上测线岩层的整体视电阻率值较高。受现场地理条件所限,电极间距选择为2.5 m,且山坡覆盖层较薄,因此未能对其厚度值进行解释。但剖面中视电阻率值分带特征明显,局部为低电阻率区,分析可能为不同岩性的分界面或局部含水。根据图4可知,对于电阻率值小于500 Ω·m的区域多为岩层弱风化影响结果,其界限在5~11 m左右。

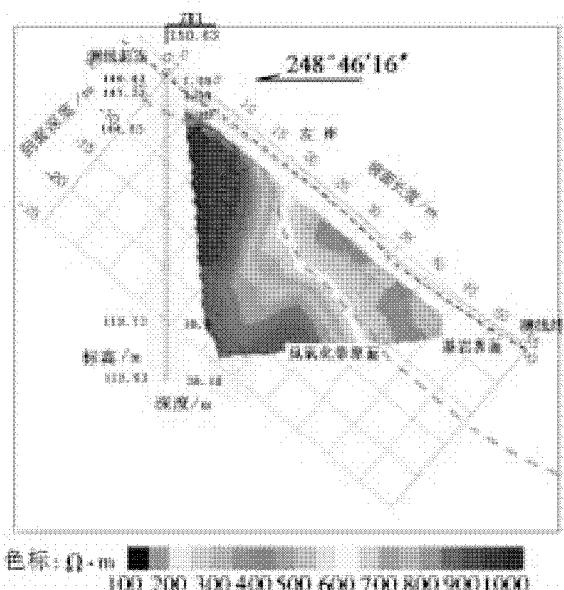


图4 测线10电法探测剖面图

## 4 结论

1) 在水库坝基勘察中利用震电两种方法综合,可以相互验证与分析,提高对基岩界面深度及异常判断的准确率和效果。

2) 探查获得了坝址浅层岩土介质的地质参数,其中河床部位覆盖层厚度在0~5.5 m,厚度相对均匀,局部较深应为古河床位置迹象。左右岸山坡覆盖层厚度较薄,基本上在0.5 m左右。其中覆盖层松散介质视电阻率值在 $200 \Omega \cdot m$ 以下,而纵波波速为600~750 m/s。

3) 探查揭示了基岩段弱风化层电阻率值具有明显特征,结合钻探控制判定视电阻率值在 $200 \sim 600 \Omega \cdot m$ 区间的岩体为弱风化特征,且其纵波波速为 $2500 \sim 2900 m/s$ 。其中河床部位岩层弱风化深度在5.0~16.0 m,而左右岸山坡基岩段风化特征具不均一性,局部在4.0~17.0 m左右。

4) 今后对于水库坝基探查中精细解释还需结合区域地质条件特点,研究其地震属性和电性参数差异,选取合理的判断标准,提高对控制位置及深度等值的判断准确率。

## 参考文献:

- [1] 朱建业.中国水电工程地质勘测技术的发展与展望[J].水力发电,2004,30(12):81~86.

- [2] 孙渊,吴迪,张良.弹性波法在水库坝基检测中的应用[J].长安大学学报:地球科学版,2003,25(4):76~79.
- [3] 冷元宝,黄建通,张震夏,等.堤坝隐患探测技术研究进展[J].地球物理学进展,2003,18(3):370~379.
- [4] 高勇,方玉满.工程物探方法在探测坝体隐患中的应用[J].地质找矿论丛,2004,19(1):39~42.
- [5] 杨坤彪,杨文明.地球物理无损探测法在水利工程中的应用探讨[J].水利科技,2001(2):7~10.
- [6] 陈忠宪,石明.地震波速法和声波法在银盘水电站坝基检测中的综合应用[J].水文地质工程地质,2012,39(5):78~83.
- [7] 屈昌华.中小型水库坝基岩溶管道渗漏勘察与处理实例[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2007(10):60~61.
- [8] 杨良权,李波,高焕芝,等.综合物探技术在大宁调蓄水库防渗墙检测中的应用[J].科学技术与工程,2012,12(15):3 657~3 661.
- [9] 余东.土石坝电阻率成像诊断试验研究[D].重庆交通大学,2010.
- [10] 赫健,孙从炎,陈夷.自然电场法和高密度电阻率法在天子岗水库副坝渗漏隐患探测中的应用[J].浙江水利科技,2007(5):45~47.
- [11] 胡雄武,张平松,江晓益.并行电法技术快速检测水库渗漏通道[J].水利水电技术,2012,43(11):51~54.
- [12] 张辉,杨天春.堤坝隐患无损探测研究应用进展[J].大坝与安全,2013(1):29~34.

(责任编辑:李丽,范君)

# 基于人工鱼群遗传算法的 DNA 编码优化

胡 娟<sup>1</sup>, 李 冬<sup>2</sup>, 张丽丽<sup>3</sup>

(1. 淮南职业技术学院基础部,安徽 淮南 232001;2. 淮南工业学校电子组,安徽 淮南 232001;3. 安徽理工大学理学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对DNA计算中的编码序列设计问题,分析DNA编码序列设计的目标和需要满足的约束条件,从中选择适当的约束条件,给出评估公式,提出人工鱼群遗传算法生成有效的DNA编码序列。经实验结果表明,所述算法比遗传算法及遗传粒子群算法产生的DNA编码序列质量更加稳定可靠。

**关键词:**DNA计算;DNA编码;组合优化;人工鱼群遗传算法

中图分类号:TP301.5 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0056-05

## Optimization of DNA Encodings Based on GAFSA/ GA Algorithm

HU Juan<sup>1</sup>, LI Dong<sup>2</sup>, ZHANG Li-li<sup>3</sup>

(1. Department of Fundamental Course, Huainan Vocational Technical College, Huainan Anhui 232001 , China; 2. Department of Electronics, Huainan Industrial School, Huainan Anhui 232001 , China; 3. Department of Mathematics and Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001 , China)

**Abstract:** Concerning the coding sequence design problems in DNA computing, the objective and constraints of DNA encoding sequence was analyzed, from which the appropriate constraints were selected, and the evaluation formulas of the selected constrained terms are proposed, then a Global Artificial Fish Swarm algorithm /Genetic Algorithm (GAFSA/ GA ) was proposed to generate DNA encoding sequences. The results showed that the DNA sequences generated by GAFSA/GA have better quality than that generated by the genetic algorithm and Genetic Algorithm/Particle Swarm Optimization.

**Key words:**DNA computing; DNA encoding; combinational optimization; artificial fish swarm

1994年,当文献[1]用DNA计算成功地解决了有向Hamilton路问题,人类已经进入了借助DNA分子通过生化反应来进行计算的崭新时代。从此越来越多的学者用DNA计算模型解决了许多NP完全问题,然而早期DNA计算中所用的序列都需要在设定编码长度的基础上随机产生,这就会导致生物化学反应不可控制性。因此寻找高质量

DNA序列及合适的DNA序列库变得尤为重要。通常为了满足DNA序列可靠性的要求,就会利用约束条件来筛选序列,决定序列编码的约束条件主要有Gibb自由能增量约束、解链温度约束 $T_m$ 、H-measure约束、生物酶和DNA分子的生物特异性等,要想找到好的编码就需要充分考虑这些约束条件。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是20世纪

70年代初文献[2]<sup>[6]</sup>首先提出来的。它常用来处理很复杂的非线性问题,具有非常好的鲁棒性。但它最大的缺点就是进化过程盲目性,常会陷入局部极值。尤其在编码问题中,当约束条件较多时,它有可能会搜索不到符合要求的编码。而全局人工鱼群算法是模仿鱼群觅食的一种算法,算法简单,又有避免陷入局部极值的良好能力。

本文在深入研究传统遗传算法的基础上,为了克服其盲目搜索的缺点,提高进化效率,给出了一种基于遗传算法和全局人工鱼群算法的混合优化算法(GAFSA/GA),用于DNA的编码问题,经实验结果表明,所述算法比遗传算法产生的DNA编码序列质量更加稳定可靠。

## 1 DNA编码序列设计及约束项分析

### 1.1 DNA编码问题

DNA计算中的编码问题一般都描述为:设由四个字母组成的集合 $\Sigma = \{A, T, C, G\}$ ,若DNA分子长度为n,其编码集合为S,很明显有 $|S| = 4^n$ ,求 $C \subseteq S$ 使 $\forall x_i, x_j \in C, \tau(x_i, x_j) \geq k$ ,其中 $\tau$ 为评价标准, $k \in \mathbb{Z}^+$ 。然而 $\tau$ 越严格,可供选择的编码数 $|C|$ 就会越小。编码问题,主要是编码质量和数量问题。因为编码质量越高,可靠性就会越好;而编码数量越大,就会扩大应用范围。然而,在现实中,他们是相互矛盾的。这就希望在保证质量的前提下能最大限度的得到编码集合。

### 1.2 约束项及评价函数

影响DNA计算的因素<sup>[3-7]</sup>有很多,结合众多约束条件,给出本文的DNA编码的约束条件。

1) H-measure约束。H-measure是一种通过移位比较两个DNA序列汉明距离的最小值而获得的有效约束,移位后的互补碱基对的数目可以有效防止杂交,定义公式如下:

$$f_{H\text{-measure}}(x_i) = n - \max_{0 \leq j < m} \max_{-n < k < n} \{n - H(x_i, \sigma^k(x_j))\}$$

式中: $\sigma^k(x_j)$ 为 $x_j$ 序列经移位k位后的序列Hamming约束。

2) Similarity约束。相似度是计算2个正相序列移位后的序列的相同碱基对的数目,来度量序列在集合中的差异性。

$$f_{\text{Similarity}}(x_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n \text{Similarity}(x_i, x_j)$$

3) Continuity约束。如果DNA序列中某一字母连续重复出现,那么结构将会变得不稳定。

$$f_{\text{Con}}(x_i) = - \sum_{j=1}^n (j-1) N_j^{(i)}$$

式中: $N_j^{(i)}$ 为同一字母在指定*i*序列中出现*j*次的次数。

4) Hairpin约束。发夹结构会引起DNA序列的自杂交,一般情况下应加以限制。

$$f_{\text{Hairpin}}(x_i) = \sum_{r=5}^{n-2*pinlen} \sum_{c=pinlen+\lceil r/2 \rceil}^{n-pinlen-\lceil r/2 \rceil} \text{Hairpin}(x_i, c)$$

式中:*r*为形成发夹的最小的环长度;*pinlen*为形成发夹茎所应有的最小长度。

5) GC Content约束。

$$f_{\text{GC}}(x_i) = -|GC(x_i) - GC(x_i)_{\text{defined}}|$$

式中: $GC(x_i)$ 为 $x_i$ 序列中字母G,C在序列中的比例; $GC(x_i)_{\text{defined}}$ 为所指定的GC含量。

6)  $T_m$ 约束。温度是实现DNA计算的一个重要因素。在这里采用最近邻模型近似表达式:

$$f_{T_m} = \sum_{i=1}^m (T_m^{(i)} - T_{mud}^{(i)})^2$$

式中: $T_{mud}^{(i)}$ 为 $x_i$ 序列的期望反应温度[0,100]。

### 1.3 适应度函数

本文定义的优化问题其实是最大值问题,因此采用加权平均值法来处理每个DNA个体各约束的评估函数。

$$\text{Fitness}(x_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j f_j$$

式中:*m*为约束项个数; $\omega_j$ 为各个约束项 $f_j$ 的权重。

并且有 $f_j \in \{f_{H\text{-measure}}(x_i), f_{\text{Similarity}}(x_i), f_{\text{Con}}(x_i), f_{\text{Hairpin}}(x_i), f_{\text{GC}}(x_i), f_{T_m}(x_i)\}$

## 2 人工鱼群遗传算法

### 2.1 基本遗传算法

遗传算法是模拟生物进化过程中适者生存规则,并将其与种群内部染色体的随机信息进行交换,是一种很好的局部优化搜索方法<sup>[2][14]</sup>。它的主要思想是:随机生成DNA序列;计算DNA序列的适应度函数值,满足约束条件;利用遗传算子生成满足约束条件的新的DNA序列,从而获得DNA序列的集合(见图1)。

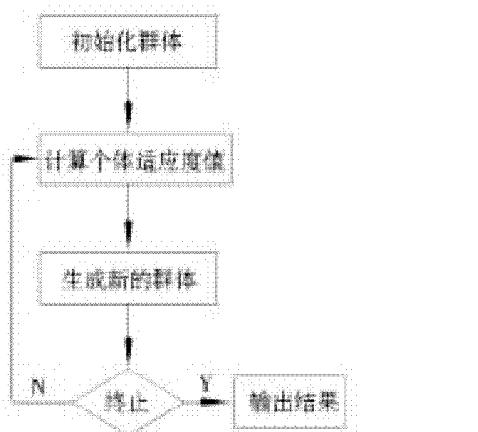


图1 算法流程图

### 2.2 人工鱼群算法(GAFSA)

人工鱼群算法就是模拟鱼群的觅食,聚首及追尾行为而生成的全局优化算法。通过观察鱼觅食会发现在一片水域中,鱼最多的地方就是食物最多的地方,鱼有自行或尾随其他鱼找到食物最多的地方特点。人工鱼群算法就是根据鱼群的这一特点,来构造人工鱼群来模仿鱼群行为,从而实现寻优。

- 1) 确定鱼群规模  $N$ ,随机产生  $N$  个人工鱼个体,组成初始群体,同时设置相关参数;
- 2) 计算初始鱼群的个体适应函数值,并将最优人工鱼状态记录到公告板;
- 3) 个体通过觅食行为,聚首行为,追尾行为<sup>[8]</sup>生成新的鱼群;
- 4) 选最优个体与公告板进行比较,若比公告板优,则以自身状态更新公告板;
- 5) 根据文献[8]对视野和步长进行调整;
- 6) 判断是否满足终止条件,若满足,则输出公告板记录,算法终止;若不满足,则执行步骤3。

### 2.3 人工鱼群遗传算法(GAFSA/GA)

该算法是以基本遗传算法为基础,将人工鱼群算法作为遗传算法的一个重要算子,具体步骤如下:

- 1) 设定相关参数,并产生初始种群;
- 2) 计算个体的适应度函数值,按照适应度函数值进行排序;
- 3) 判断是否满足目标,若满足,输出结果,结束进程;否则进行下一步;
- 4) 更新个体种群,根据适应度函数值的确定一部分个体直接进入下一代种群,剩余个体通过GAFSA算法优化过后进入下一代种群;
- 5) 对下代种群执行遗传算法的复制、交叉和变异等操作,转步骤2。

流程图如图2所示。

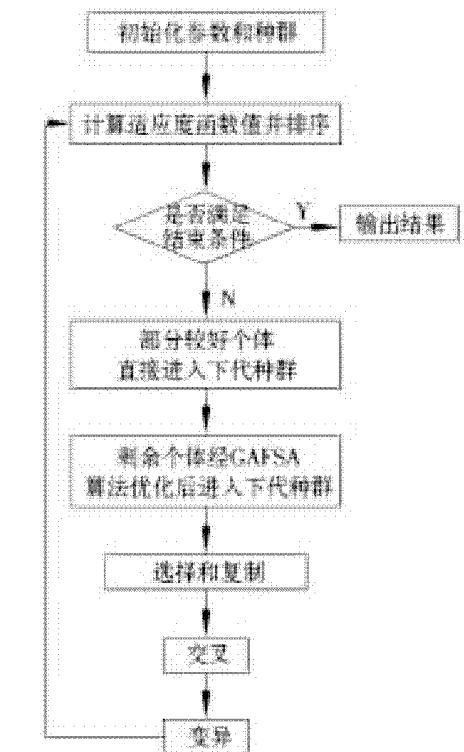


图2 算法流程图

## 3 算法仿真结果及分析

### 3.1 与遗传算法的实验比较

用全局人工鱼群遗传算法产生的DNA序列与文献[9]的遗传算法的编码序列进行了比较,并给出了好的有向哈密尔顿路问题的DNA序列。比较结果如表1和图3所示。

表1 本文算法和GA序列比较

DNA coding sequence	Hairpin	S	C	H	GC/%	Tm
GAFSA/GA						
GCTGTGCACATCTGACTATG	0	45	0	54	50	56.574 6
TGTACATCTCTGACCCTGCT	3	51	9	54	49	56.203 6
AGACGTCAGCAGTGATCACT	0	38	0	56	49	57.712 0
TTGCCTAGCAGTACCGAGTCA	0	43	0	48	50	56.379 1
ATGGAGTCTGTCGAGTAGTG	0	54	16	51	50	56.573 2
AGACGTCCACATACCGCATAG	3	48	0	48	49	56.543 2
AGTGTGACGTCCCTCGAGATT	0	50	0	51	50	56.701 2
GA						
TTGTAAGCCTACTGCGTGAC	3	57	0	75	50	56.705 5
TGTATCTCGTTAACATCC	4	59	16	61	35	48.445 1
GATGGTGGTTAGAGAAAGTGG	0	54	0	58	50	55.305 6
GAAAAAGGACCAAAAGAGA	0	56	41	58	40	52.711 1
CTTGTGACCGCTTCTGGGA	0	63	16	60	60	60.856 3
CATTGGCGGCCGCGTAGGCTT	0	60	0	69	65	69.200 9
ATAGAGTGGATAGTTCTGGG	3	64	9	55	45	52.652 2

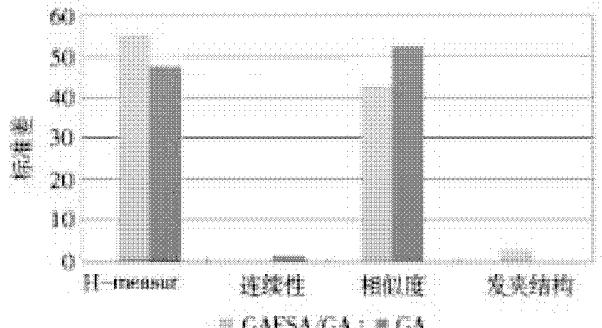


图3 GAFSA/GA与遗传算法的比对结果

从图3可以看出, GAFSA/GA 算法生成的DNA编码序列在 Hairpin、GC 含量方面比 GA 算法生成的 DNA 编码序列更优, 并且可以看出 GAFSA/GA 生成的序列解链温度变化更小, 这意味着 GAFSA/GA 算法具有较低的不完全匹配双链产生的概率。同时 GAFSA/GA 算法大大降低了计算的难度, 在解决 DNA 编码问题方面效果很好, 而且依靠群体人工鱼并行计算, 其收敛速度较快, 如(见图4)横轴为进化代数; 竖轴为每代群体经排序后最差个体的适应度值。从图4中可以看出, 算法具

有较好的收敛性。

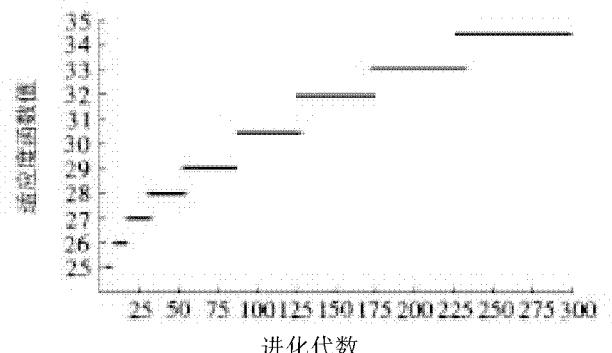


图4 GAFSA/GA 算法的进化收敛图

### 3.2 与遗传粒子群算法的实验比较

虽然文献[10]遗传粒子群算法(GA/PSO)与 GAFSA/GA 选择的约束条件不同, 但鉴于实验结果的比对应建立在相同约束条件的基础上进行, 采用 GAFSA/GA 的评价方法进行实验比对。比较结果如表2 和图5 所示。

从表2 和图5 可以看出, GAFSA/GA 算法生成的 DNA 编码序列在解链温度、发夹结构等约束方面优于遗传粒子群算法生成的 DNA 编码序列。

表2 本文算法和GA/PSO序列比较

DNA coding sequence	Hairpin	S	C	H	GC/%	Tm
GAFSA/GA						
GCTGTGCACATCTGACTATG	0	45	0	54	50	56.574 6
TGTACATCTCTGACCCTGCT	3	51	9	54	49	56.203 6
AGACGTCAGCAGTGATCACT	0	38	0	56	49	57.712 0
TTGCCTAGCAGTACCGAGTCA	0	43	0	48	50	56.379 1
ATGGAGTCTGTCGAGTAGTG	0	54	16	51	50	56.573 2
AGACGTCCACATACCGCATAG	3	48	0	48	49	56.543 2
AGTGTGACGTCCCTCGAGATT	0	50	0	51	50	56.701 2
GA/PSO						
ATGGAGTCTGTCGAGTAGTG	1	52	0	58	50	47.607
CGATGTTGGCAGTGCTCACT	0	50	9	58	50	47.846 4
TTCGCTAGACGTACAGGTCA	1	52	16	57	50	50.620 4
GCTGTGCACATCTGACTATG	0	48	0	57	50	50.462 8
AAGCGTCACCATAGCCATGA	0	53	9	59	50	49.810 3
AGTGGTACGTCCCTGAGTAT	4	50	0	59	50	48.399 5
TGTACATCTCTGACCCTGCT	3	53	0	54	50	51.347 1

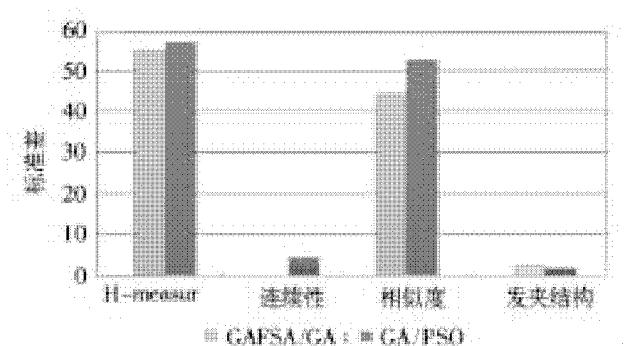


图5 GASFA/GA与遗传粒子群算法的比对结果

## 4 结论

从DNA编码的多个约束条件选取合适的约束,提出了GAFSA/GA算法对DNA计算中的编码序列实现了优化,产生了很好的DNA序列,验证了该算法的可行性和有效性。

## 参考文献:

- [1] ADLEMAN L M. Molecular computation of solution to combinatorial problems [J]. *Science*, 1994, 66 (11) : 1 021 – 1 024.
- [2] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975:1 – 153.
- [3] DEATON R, GARZON M. The Rmodynamic Constraints on DNA – based Computing [C]// Computing with Bio Molecules: Theory and Expirements. ed. G. Paun, Springer – Verlag: Singapore, 1998:138 – 152.
- [4] DEATON R, FRANCESCHETI D R, GARZON M, et al. Information transfer through hybridization reaction in DNA based computing [C]// Proceedings of the Second Annual Conference, 1997, July 13 – 16, Stanford University, . Morgan Kaufmann, San Francisco:463 – 471.
- [5] DEATON R. A DNA Based Implementation of an Evolutionary Computation [C]// Proceedings IEEE Conference on Evolutionary Computation. Indianapolis, 1997: 267 – 271.
- [6] MARATHE A. On combinatorial DNA word design [J]. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 1999, 44: 75 – 88.
- [7] ROSE J A. The Fidelity of DNA computation [D]. Ph. D thesis, The University of Memphis, 1999: 11.
- [8] 付媛媛, 张大方, 向旭宇. 基于人工鱼群的DNA编码序列组合优化算法研究 [J]. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2011, 20 (2) : 55 – 56.
- [9] ARITA M, NISHIKAWA A, HAGIVA M, et al. Improving sequencedesign for DNA computing [C]// In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO – 2000) , 2000:875 – 882.
- [10] CUI G Z, NIU Y Y, WANG Y F, et al. A new approach based onPSO algorithm to findgood computational encoding sequences [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17 (6) : 712 – 716.
- [11] Feldkamp U, Raube H, Banzhaf W. Software tools for DNA sequence design [J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2003, 4 (2) : 153 – 171.
- [12] 张凯, 肖建华. 基于汉明距离的DNA编码约束研究 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44 (14) : 24 – 26.
- [13] XIAO J H, JIN X, CHEN Z H, et al. A hybrid quantum chaotic swarm evolutionary algorithm or DNA encoding [J]. *Computers& Mathematics with Applications*, 2009, 57 (11/12) : 1 949 – 1 958.
- [14] CUI GUANGZHAO, LI XIAO GUANG, ZHANG XUN CAI, et al. The Optimization of DNA Encodings Based on Modif ied PSO/GA Algorithm [J]. *CHINESE JOU RNAL OF COMPUTERS* Vol, 2010, 33 (2) : 312 – 313.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 汽轮机带冠叶片阻尼振动特性的有限元分析

赵亚英,陈长秀,赵熹

(陕西国防工业职业技术学院,陕西 西安 710300)

**摘要:**根据汽轮机叶片外形特点,在3D建模软件Solidworks中建立Z型叶冠单叶、成组叶片及整圈叶片的实体模型,通过ALGOR软件的机械运动仿真(MES)功能,计算带冠叶片组在不同冠间间隙、不同激励频率和幅值下的碰摩减振规律特性,并对所得结果进行分析。结果表明:通过冠间相互碰摩可有效减小叶片振动,当冠间间隙介于0.2 mm到0.5 mm之间时,碰摩减振效果最好;外部激振力对旋转产生的动应力影响较小,在特定的间隙值下,随激振力的变化叶片应力峰值变化较小。这些结论对汽轮机末级叶片的设计有重要的指导意义。

**关键词:**带冠阻尼叶片;阻尼减振;冠间间隙;优化设计

中图分类号:TK262 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0061-06

## The Finite Element Analysis on Damping Vibration Dynamic Characteristics for Shrouded Blades of Steam Turbine

ZHAO Ya - ying, CHEN Chang - xi, ZHAO Xi

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi Institute of Technology, Xi'an Shaanxi 710300, China)

**Abstract:** The solid models of single blade, grouped blade and whole circle blade with Z-shaped shroud are established in 3D software Solidworks based on the features of steam turbine blade profile. By using the mechanical exercise simulation (MES) functions of the ALGOR software, the laws of rub - impact vibration reduction characteristic for grouped blade under different shroud interval, different amplitude of exciting force and different frequency of exciting force were calculated, and the results analyzed. The study results showed that the blade vibration is reduced by using shroud rub - impact structural, when the shroud interval between 0.2 mm to 0.5 mm, the rub - impact effect is best. The dynamic stress generated by rotation is not sensitive to the external force. The change of peak stress is small with the change of external exciting force at a certain shroud interval. These conclusions have important guiding significance in design of turbine blades.

**Key words:** damping shrouded blades; damping vibration; shroud clearance; optimization design

运行中的汽轮机末级叶片受到交变激振力的作用,产生振动响应和动应力。为有效避免叶片与激振力发生共振,通过拉筋将叶片连接,形成组叶片或整圈叶片有效避开共振。随着汽轮机负荷的大幅提高,拉筋结构有时多达3道,严重影响了蒸汽的流动,产生了很大的流动损失。带冠叶片利用冠间间隙对叶片进行限幅、调频。当前,含间隙运

动副的结构减振研究受到人们的重视,已有的研究结果表明,通过碰撞能大大减小叶片的振动幅值,起到限幅作用,同时消耗和分散碰撞能量,防止激振力输入能量过大<sup>[1-2]</sup>。

目前,针对碰摩减振机理和减振效果的研究还处于初步探索阶段。基于此,本文在已有研究成果的基础上,以弹性力学、振动力学为理论基础,建立

碰撞运动的力学模型，并对建立的组叶片冠间接触非线性动力学模型进行数值计算，分析冠间碰撞的非线性动力学特性。将所得结论与已有的研究结果进行对比，证明了该方法的有效性，并为带冠叶片的改型设计提供了方法<sup>[3]</sup>。

## 1 带冠叶片碰撞的力学模型

### 1.1 冠间接触的力学模型

在汽轮机运行过程中，离心力会使叶片发生扭转恢复，使得相邻冠面相互贴合，形成碰摩面，防止叶片振幅过大。摩擦面间的滑移力学模型分两种，即整体滑移和局部滑移。整体滑移将滑移面作为一个点来处理，计算量小，适用于非线性问题的迭代求解。

对于Z型带冠阻尼叶片，叶片的振动方向与摩擦面成 $\alpha$  ( $0 < \alpha < 90^\circ$ ) 角，假设带冠叶片接触面的运动为简谐运动，表达如下<sup>[4-6]</sup>：

$$\Delta u = B \cos(\omega t - \varphi) = B \cos \theta \quad (1)$$

式中： $B$  为摩擦面间稳态相对振幅； $\omega$  为激励频率； $\varphi$  为相位差。

冠叶片主振动方向上的稳态位移可表示为：

$$u = A \cos(\omega t - \varphi) = A \cos \theta \quad (2)$$

式中： $A$  为叶片主振动振幅。

当叶冠接触面发生碰撞时，接触面上法向正应力为冠间法向相对位移的线性函数，表示为：

$$N = N_0 + \lambda_p B \cos \theta \quad (3)$$

式中： $N_0$  为初始正压力； $\lambda_p$  为正压力增长系数。

在接触碰撞后，假设冠间接触的运动为简谐运动，正压力变化时切向接触力与位移迟滞回线之间的关系如图1所示。

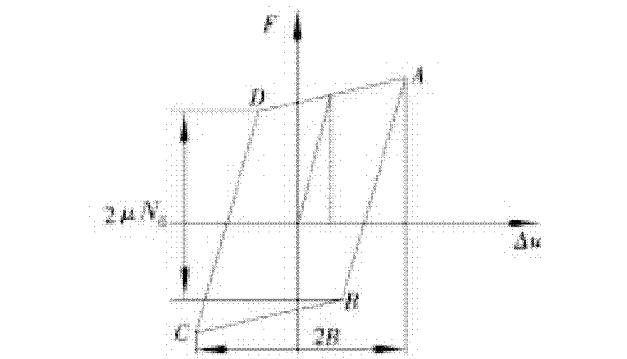


图1 正压力变化时切向力与相对位移滞迟回线

其中  $A, B, C, D$  四点分别表示  $\theta = 0$ ,  $\theta = \theta^*$ ,  $\theta = \pi$  和  $\theta = \theta^* + \pi$ 。因此，接触面间的摩擦力为

$$F = \begin{cases} K_d (\Delta u - B) + \mu (N_0 + \lambda_p B \cos \theta) & 0 \leq \theta < \theta^* \\ -\mu (N_0 + \lambda_p B \cos \theta) & \theta^* \leq \theta < \pi \\ -K_d (\Delta u - B) - \mu (N_0 + \lambda_p B \cos \theta) & \pi \leq \theta < \theta^* + \pi \\ \mu (N_0 + \lambda_p B \cos \theta) & \theta^* + \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta^* = \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{2\mu (N_0 + \lambda_p B)}{(K_d + 2\mu \lambda_p) B} \right] \quad (5)$$

式中： $K_d$  为接触面剪切刚度。

用HBM(谐波平衡法)对摩擦力进行处理，在保证精度的情况下取一阶谐波经傅立叶展开，取前两项得：

$$F = F_k \cos \theta + F_c \sin \theta = f_k \Delta u + f_c \Delta u \quad (6)$$

$$f_k = \frac{F_k}{B} = \frac{2}{\pi B} \int_0^\pi F \cos \theta d\theta = \frac{1}{2\pi} (K_d + 2\mu \lambda_p) \times (2\theta^* + \sin 2\theta^*) - \frac{2}{\pi B} (\mu N_0 + K_d B) \sin \theta^* - \mu \lambda_p \quad (7)$$

$$f_c = \frac{F_c}{(-B\omega)} = -\frac{2}{B\omega\pi} \int_0^\pi F \sin \theta d\theta = -\frac{1}{\pi\omega} (K_d + 2\mu \lambda_p) \times \cos^2 \theta - \frac{2}{B\omega\pi} (2\mu N_0 + K_d B) \cos \theta^* + \frac{2K_d}{\pi\omega} \quad (8)$$

### 1.2 阻尼叶片有限元动力学方程

取旋转叶片上任意一点为研究对象(见图2)， $OXYZ$  为固定直角坐标系， $oxyz$  是与叶片一起以角速度 $\omega$  转动的运动坐标系。设叶片上一点  $A_0(x_0, y_0, z_0)$  变形后移至  $A(x_0 + u, y_0 + v, z_0 + w)$ ，使用  $\vec{r}_0$ ,  $\vec{r}$  和  $\vec{U}$  表示该点位置，有：

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} = \vec{r}_0 + \vec{U} = (x_0 + u)\vec{i} + (y_0 + v)\vec{j} + (z_0 + w)\vec{k} \quad (9)$$

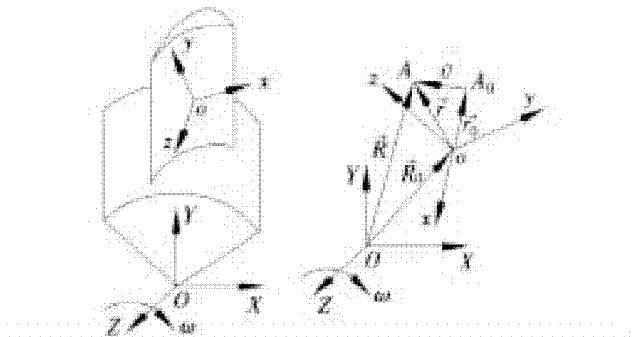


图2 叶片转动时的旋转向量图

由有限元一般方程,得整个转动叶片的运动方程:

$$\sum_e \int_{v^e} [B]^T \{\sigma\} dv^e - \sum_e \int_{v^e} [N]^T \{p\} dv^e = \sum_e \{F\}^e + \sum_e \{Q_p\}^e \quad (10)$$

式中:  $\{F\}^e$  单元集中节点力;  $\{Q_p\}^e = \int_{s^e} [N]^T \{q\} ds^e$  为单元气动力向量。

由叶片小应变变形得:

$$[K_0]^e \{\delta\}^e = \int_{v^e} [B]^T \{\sigma\} dv^e = \int_{v^e} [B_0]^T [D] [B_0] dv^e \{\delta\}^e \quad (11)$$

结合以上各式,得到有限单元体的运动方程:

$$[\mathbf{M}]^e \{\ddot{\delta}\}^e + [\mathbf{M}_c]^e \{\dot{\delta}\}^e - [\mathbf{K}_c]^e \{\delta\}^e + [\mathbf{K}_0]^e \{\delta\}^e = \{F\}^e + \{Q_c\}^e + \{Q_p\}^e \quad (12)$$

其中单元质量矩阵为

$$[\mathbf{M}]^e = \int_{v^e} \rho [N]^T [N] dv^e \quad (13)$$

单元哥氏力矩阵为

$$[\mathbf{M}_G]^e = 2\omega \int_{v^e} \rho [N]^T [H] [N] dv^e \quad (14)$$

单元离心力矩阵为

$$[\mathbf{K}_c]^e = \omega^2 \int_{v^e} \rho [N]^T [H]^T [H] [N] dv^e \quad (15)$$

单元离心力向量为

$$[\mathbf{Q}_c]^e = \omega^2 \int_{v^e} \rho [N]^T [H]^T [H] \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} dv^e \quad (16)$$

集合各单元,求得整个叶片的平衡方程:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\delta}\} + [\mathbf{M}_c] \{\dot{\delta}\} - [\mathbf{K}_c] \{\delta\} + [\mathbf{K}_0] \{\delta\} = \sum_e \{F\}^e + \sum_e \{Q_c\}^e + \sum_e \{Q_p\}^e \quad (17)$$

## 2 带冠叶片的实体造型

### 2.1 带冠叶片有限元模型的建立

在有限元分析中,首先应建立实体模型,借助3D设计软件Solidworks完成“Z”型带冠叶片的实体建模,然后导入ALGOR中进行离散化处理,得到单叶(见图3)。其中,带冠叶片的主要参数为:叶身高1029 mm,叶冠厚度10 mm,叶根部截面半径为800 mm,整圈共77个,绕X轴的额定转速3 000 r/min。

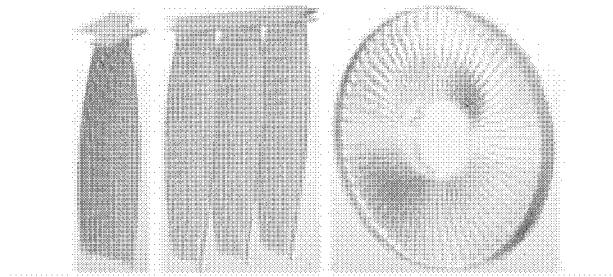


图3 单叶、成组叶片及整圈叶片的有限元模型

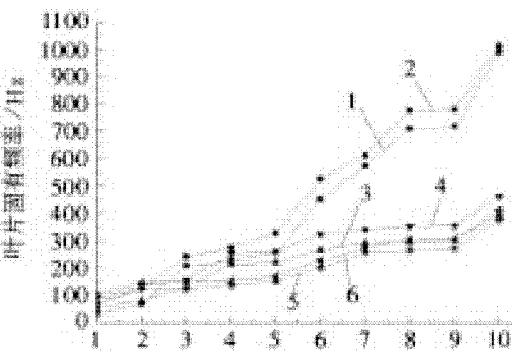
### 2.2 边界条件及载荷

根据叶片装配时的受力特点及工作时的转动特性,在每个叶根部施加全约束,实际上每个叶片根部截面在径向、轴向及圆周方向被约束,而并非X、Y和Z向,所以在施加边界条件时应先在根部截面建立局部坐标系。对于冠间边界条件,在额定转速下计算冠间接触面正压力时,应设置面接触,并考虑按摩擦系数模拟接触边界,接触方向按接触节点单元面法向确定。在模拟碰撞减振动力特性时,冠间接触面才用罚函数保证接触面协调性,同时设置动静摩擦系数,并通过单元自动更新确定每个时间步的接触区域。

## 3 带冠叶片的动力特性分析

### 3.1 固有频率及振型的计算

带冠单叶片的固有特性是一系列计算分析的基础,首先对单叶片、成组叶片及整圈叶片,在静止和额定转速下的前10阶模态频率进行了计算,得到固有频率随阶数的变化关系(见图4),同时提取整圈叶片的前6阶模态振型(见图5)。



叶片固有频率阶次

1. 单叶片静频;2. 单叶片动频;3. 三叶片静频;4. 三叶片动频;5. 整圈叶片静频;6. 整圈叶片动频

图4 单叶、组叶片及整圈叶片在静止和额定转速下的前10阶固有频率

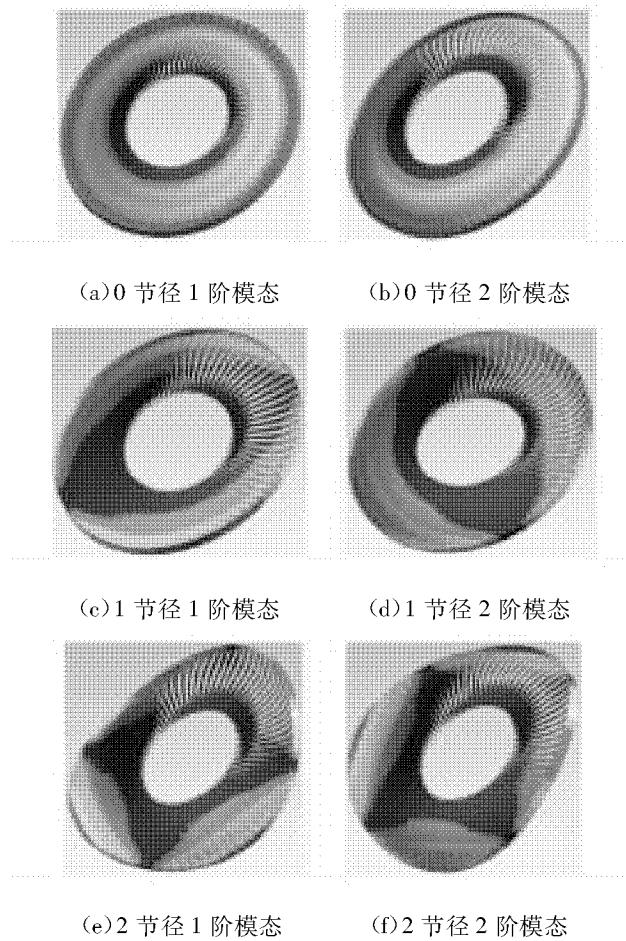


图5 整圈叶片的前6阶模态振型

由单叶片模态频率对应的振型可以看出,其振动类型有弯曲振动、轴向振动和扭转振动,并且动、静频率均随阶次的增大而增大,动频总大于静频。1阶模态频率随转速的变化率较大,这是因为离心力对1阶模态的刚度矩阵影响较大。轴向弯曲振动及轴向扭转振动频率随转速的变化较小,并且随着振动阶次的增加,转速对叶片振动频率的影响越来越小。

### 3.2 冠间间隙对碰撞减振效果的影响

当冠间间隙大于某一特定值时,冠叶片做自由振动且冠间不会发生碰撞。当冠间间隙较小时,叶片的振动情况较为复杂<sup>[7]</sup>。为了分析不同冠间间隙对组叶片固有频率的影响规律,对不同间隙下的组叶片进行了模态分析,结果如图6所示。

对于带冠组叶片,叶冠的相互接触会产生使组叶片刚性增强的耦合刚度,从而改变系统本身的动力学特性。

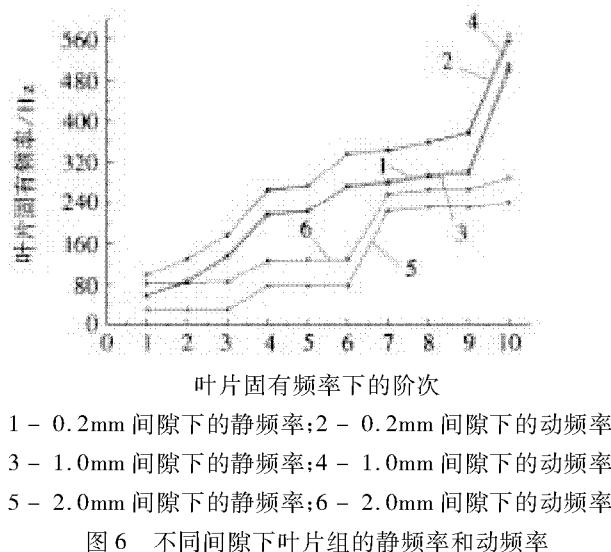
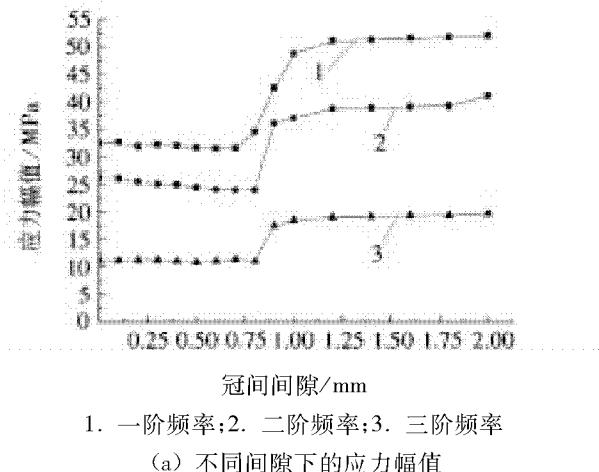


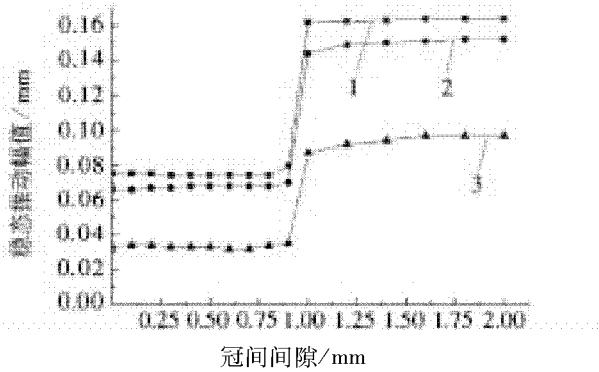
图6 不同间隙下叶片组的静频率和动频率

从图6中可以看出,离心力产生的动力刚度使得叶片的动频总高于静频,对比不同模态频率下的振型(见图5)可知,当冠间距小于某一特定值时,冠间接触起约束作用,且振动模态频率不同于单叶的模态频率。在冠间接触约束起作用的冠间间隙内,其固有频率对冠间间隙的变化不敏感,仅随着振动阶次的增加增大。

在带冠叶片碰撞减振结构中,冠间初始间隙是对叶片的碰撞减振响应有重要影响<sup>[8]</sup>。为研究在碰撞状态下,组叶片冠间间隙对其切向振动的影响,在ALGOR中对组叶片进行频率响应分析,计算成组叶片的稳态受迫振动,对计算所得的最大应力和最大位移进行分析,得到冠间间隙-应力幅值关系(见图7)。



1. 一阶频率;2. 二阶频率;3. 三阶频率  
(a) 不同间隙下的应力幅值



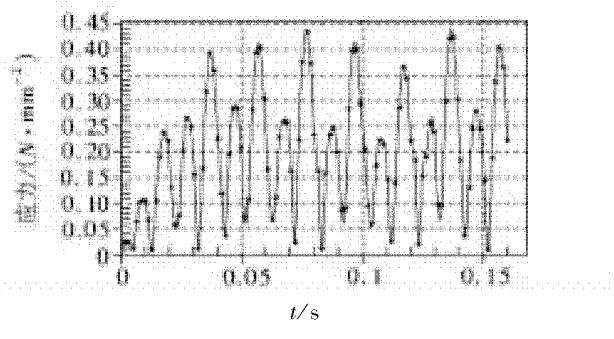
1. 一阶频率;2. 二阶频率;3. 三阶频率

(b) 不同间隙下的稳态振动幅值

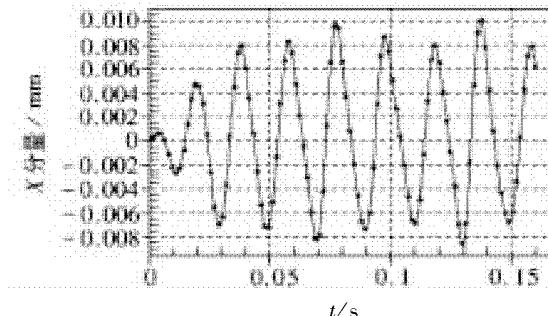
图7 成组叶片在不同间隙下的最大应力与最大稳态振幅

从图7中可以看出,在冠间间隙小于0.8 mm时,成组叶片的前三阶共振时的最大应力与最大振幅的变化趋势基本相同,且基本保持不变。当冠间间隙大于0.8 mm时,随着冠间间隙的增大,成组叶片的最大应力与最大振幅迅速增大,当冠间间隙达到1.2 mm时,振幅和应力趋于定值,查看冠间间隙为1.2 mm下叶片的各阶振型,可以看出叶片作自由振动。由此可知,在冠间间隙较小时,碰摩减振效果较好,当冠间间隙较大时,叶片作自由振动,碰摩减振效果差,这也说明碰摩减振效果明显好于单纯的碰撞减振效果。因此,对于该带冠叶片,间隙值应介于0.1 mm到0.75 mm之间,发生振动时最大应力和最大幅值趋于平缓,碰撞减振效果较好。

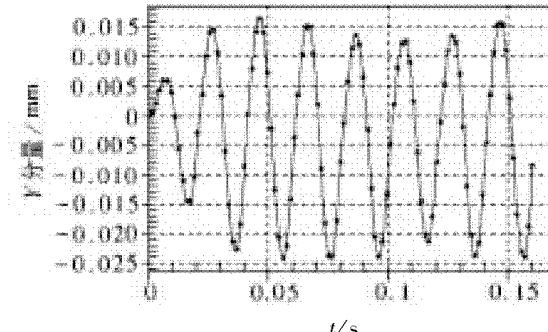
为了模拟真实带冠组叶片的碰撞阻尼振动特性,利用ALGOR的MES模块对1029 mm扭叶片组进行了接触非线性动力学分析,在叶片组的一号叶片上施加 $F = 15 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{4})$ 的谐波激励,获得8个周期内的瞬态衰减特性(见图8)。



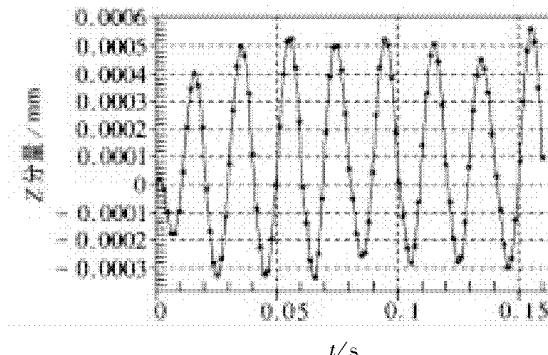
(a) 应力时间历程曲线



(b) x 方向位移时间历程曲线



(c) y 方向位移时间历程曲线



(d) z 方向位移时间历程曲线

图8 间隙为0.2 mm成组叶片叶顶应力、位移时间历程曲线

由图8可知,带冠叶片冠间存在碰摩约束时,叶片的位移要比带冠自由叶片小的多。当叶冠间发生碰摩时,振动的位移和速度都发生改变,不再是规则的简谐曲线,而出现跳跃现象。在不同的冠间间隙下,成组叶片的最大振幅不同,当冠间间隙小于某一特定值时,组叶片间叶冠的相互碰撞使得振幅衰减很快,并且间隙越小减振效果越好。

### 3.3 激振力幅值对碰撞减振效果的影响

为了研究激振力幅值对成组叶片碰撞减振效果的影响,选取间隙为0.25 mm的带冠叶片作为研究对象,对激振力幅值分别为20 N、40 N、60 N和80 N时的成组叶片进行了瞬态响应分析,得出叶顶处的位移随时间历程的响应曲线(见图9)。

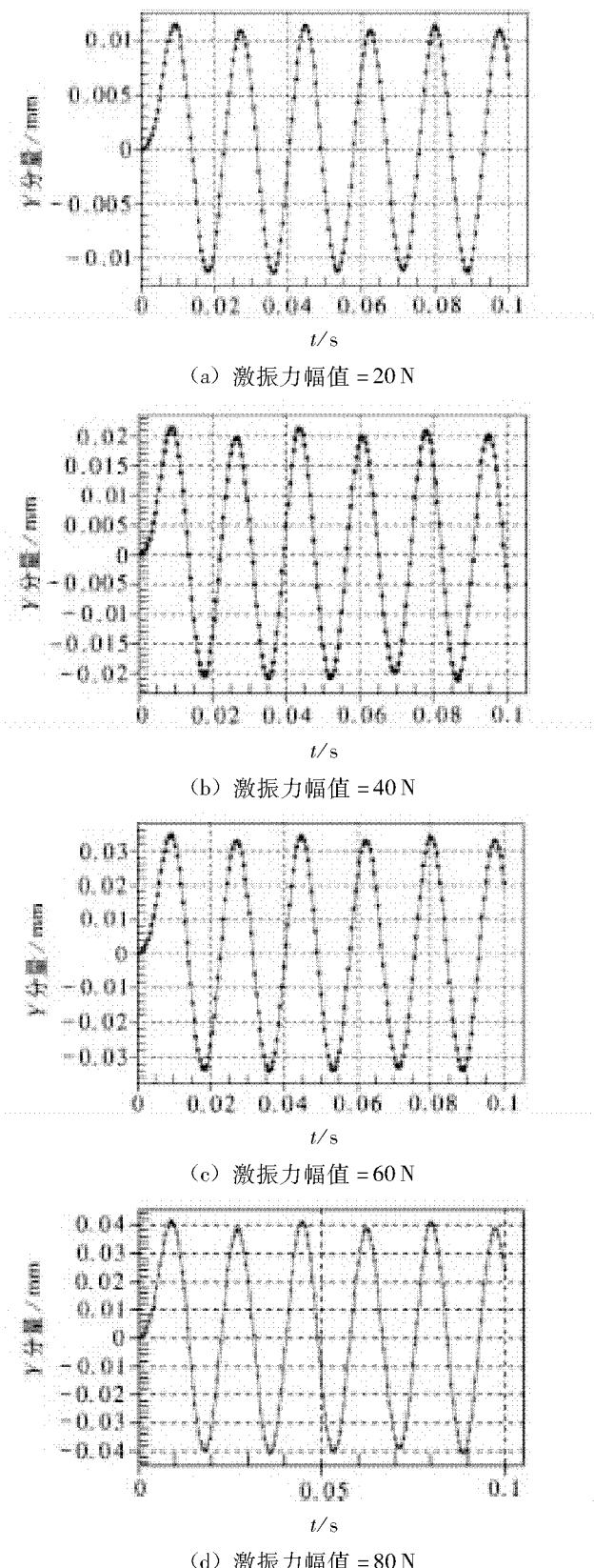


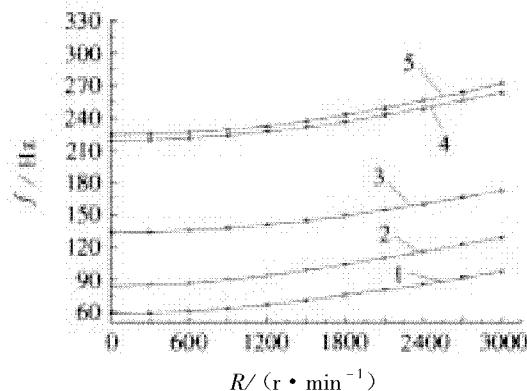
图9 不同激振力幅值下的叶顶节点位移时间历程曲线

由图9可以看出,叶片的振动幅值随激振力的增加呈线性增加趋势,较大的激振力将产生较大的振动幅值及动应力。但是碰撞减振效果对激振力的变化不敏感,当激振力较大时,减小冠间间隙也

可获得较好的减振效果。对于碰撞而言,激振力的改变使得叶冠的碰撞速度发生变化,且碰撞过程中产生的能量与振幅成正比,因此引起碰撞的能量消耗与振幅的变化成线性关系。

另一方面,激振力大小的改变对碰撞振动时叶片的共振频率几乎没有影响。随着激振力的增加,叶片的碰撞减振效果较好,因为较大激振力会引起叶冠碰撞振动强度增强,使得叶片的相对动应力和相对振幅有所减少,这一点充分体现了带冠叶片碰撞减振结构的优点。

因为激振力频率与叶片的旋转频率成正比,故通过改变旋转速度可以模拟不同激励频率下作用于叶片的激振力。本文对不同转速下间隙值为0.5 mm的成组叶片进行动频计算,并提取前5阶模态频率进行分析,其结果如图10所示。



1. 一阶频率;2. 二阶频率;3. 三阶频率;4. 四阶频率;  
5. 五阶频率

图10 叶片共振转速图(或Campbell图)

从图10看出,由于冠间间隙小于0.8 mm,冠间的碰撞使得成组叶片的各阶模态频率均高于叶片的激励频率,很好的避开了前5阶激励频率,这说明带冠叶片的设计是安全的。

## 4 结论

1) 整圈叶片的振动特性与单个叶片振动特性不同,整圈叶片通过冠间自锁提高了叶片刚度,使叶片固有频率提高,改善叶片的动力特性,并有效避开了叶片的共振频率。

2) 叶冠间隙太大时,冠叶片做自由振动不会发生碰撞;当冠间隙小于0.8 mm时,冠间碰撞使得振幅迅速衰减,起到很好的减振效果,同时固有频率随冠间间隙的变化较小,仅随着振动阶次的增加而增大。

(下转第75页)

# 响应面分析法优化蛭弧菌生长条件

李春霞

(安徽理工大学医学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**为了优化蛭弧菌的生长条件,在前期研究确定适于蛭弧菌BD1生长的最佳pH、盐度、二价金属离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )、谷氨酸钠的浓度范围的基础上,综合考虑4个因子对蛭弧菌BD1生长的影响,利用Design Expert 6.0软件进行响应面分析,优化菌体生长条件,得到该菌株生长模型,并在模型最优值时得到各因子的水平。结果表明:BD1的最优培养条件为盐度( $\text{NaCl}$ 浓度)为2.9%,培养液pH值为7.4, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度为6.4 mmol,谷氨酸钠浓度为4.2 mmol。菌体生长过程中,盐度和二价金属离子,谷氨酸钠和二价金属离子,谷氨酸钠与盐度交互作用不显著,pH与盐度,pH与谷氨酸钠,pH与二价金属离子交互作用显著。菌体生长模型达到显著水平,可以对BD1在不同条件下的生长情况进行分析和预测。

**关键词:**响应面; 蛭弧菌; 生长条件

中图分类号:Q93 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2014)01-0067-05

## Optimization of Growth Condition of Bdellovibrio sp. via Response Surface Methodology

LI Chun-xia

(School of Medicine, Auhui University of Science and Technology, Huinan Anhui 232001, China)

**Abstract:** In order to optimize the growth conditions of Bdellovibrio, the optimum pH, salinity, divalent cations ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) and sodium glutamate for BD1 growth were determined by single-factor analysis respectively and the Response Surface Methodology (RSM). The multivariate non-linear model was applied to study the interactions and optimization of the growth parameters for BD1 which were explored by experiments. The experimental results showed that the optimum conditions as follows: pH 7.4, Divalent cations ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 6.4 mmol, salinity 2.9% and sodium glutamate 4.2 mmol. Significant interactions between pH and salinity, pH and sodium glutamate, as well as pH and Divalent cations were found during the germination respectively, otherwise the relationship between salinity and Divalent cations, sodium glutamate and Divalent cations, sodium glutamate and salinity was relatively unapparent. The experimental results indicated that the proposed model is reasonably accurate and can be used for describing and predicting the growth feature of BD1 in different outside environmental factors.

**Key words:** response surface; Bdellovibrio sp; growth condition

蛭弧菌(Bdellovibrio)是一类寄生于其它细菌并导致其裂解的寄生性细菌<sup>[1]</sup>。蛭弧菌具有类似噬菌体的功能,对自然环境中的细菌具有很强的裂解作用,其与宿主间并没有严格的特异性,有研究

表明,蛭弧菌能裂解大多数科属的革兰氏阴性菌和少数革兰氏阳性菌<sup>[2]</sup>,能对导致人类食物中毒和渔业养殖病害的致病菌具有良好的裂解清除效果,且对动植物无毒副作用<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2013-07-01

基金项目:海洋性蛭弧菌的生物学特性研究基金资助项目(2012QNY50)

作者简介:李春霞(1980-),女,山东菏泽人,实验师,硕士,研究方向:微生物学。

响应面方法(Response Surface Methodology)是解决多变量问题的一种统计方法,其首先进行合理的试验设计,通过实验得到相应数据,运用多元二次回归方程拟合各因素与响应值的函数关系,通过对回归方程的显著分析来寻求最优的条件参数<sup>[4]</sup>。应用 Design - Expert 软件系统对试验数据进行统计分析,拟合曲线,建立数学模型,检验模型的合适性,利用三维立体图形,观察响应曲面,寻求最佳组合条件<sup>[5]</sup>。

本文在研究影响蛭弧菌 BD1 生长的 pH、盐度( $\text{NaCl}$ )、二价金属离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )和谷氨酸钠 4 个单因素实验的基础上,运用响应面分析法,以 pH 值、盐度、二价金属离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )和谷氨酸钠为响应因素,以菌体浓度的对数值为响应值,用 Design - Expert 6.0 的中心组合实验设计(Central Composite Design, CCD)建立响应曲面模型,优化蛭弧菌 BD1 的生长条件。

## 1 材料和方法

菌种:蛭弧菌 BD1、宿主菌由本实验室分离保存

培养基:DNB 双层平板培养基等均按照参考文献[6]配制。

### 1.1 宿主菌培养

宿主菌接种于灭菌的 2216E 液体培养基中,置于转速为  $200(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ ,温度为  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温摇床中培养  $14\sim15\text{ h}$ ,使其处于对数生长期。

### 1.2 蛭弧菌的培养

将悬浮好的蛭弧菌与宿主菌以体积比 2:5 均匀混合并静置 30 min,取 0.7 mL 混合液与 3.5 mL  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的 DNB 上层培养基均匀混合并倾注于 DNB 下层平板中。将 DNB 双层平板倒置于温度为  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温培养箱中连续培养  $48\sim72\text{ h}$ 。

### 1.3 实验设计

中心组合实验设计(Central Composite Design, CCD)是最常用的响应面分析法,适用于 2~5 个因素的优化实验。采用该法能够在有限的试验次数下,对因子及其交互作用进行评价,而且还能对各因子进行优化,以获得影响过程的最佳条件。根据中心组合实验设计原理,本实验选取对蛭弧菌的生长繁殖能力具有明显影响的 4 个因素,包括二价离子( $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ )( $x_1$ )、盐度( $x_2$ )、谷氨酸钠( $x_3$ )和

$\text{pH}(x_4)$ ,每个因素选取 5 个水平,分别以 -2, -1, 0, 1 和 2 进行编码(见表 1),根据中心组合实验设计(见表 2)进行相应的实验,研究蛭弧菌的最佳培养条件,为蛭弧菌的发酵培养提供理论基础。

表 1 中心组合实验中的变量及其水平

因素	水平				
	-2	-1	0	+1	+2
$x_1$ $\text{Ca}^{2+}$ $\text{Mg}^{2+}$ 浓度/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	3	5	7	9	11
$x_2$ 盐度/%	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$x_3$ 谷氨酸钠/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1	3	5	7	9
$x_4$ pH	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0

表 2 中心组合实验设计及其结果

试验序号	因素				每毫升蛭弧菌浓度对数值	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	观测值	预测值
1	-1	-1	-1	-1	3.35	3.41
2	+1	-1	-1	-1	2.59	2.53
3	-1	+1	-1	-1	3.34	3.37
4	+1	+1	-1	-1	2.25	2.23
5	-1	-1	+1	-1	3.59	3.64
6	+1	-1	+1	-1	3.81	3.60
7	-1	+1	+1	-1	4.21	3.86
8	+1	+1	+1	-1	3.51	3.57
9	-1	-1	-1	+1	4.71	4.59
10	+1	-1	-1	+1	3.59	4.01
11	-1	+1	-1	+1	4.79	5.08
12	+1	+1	-1	+1	4.35	4.23
13	-1	-1	+1	+1	4.06	4.15
14	+1	-1	+1	+1	4.51	4.42
15	-1	+1	+1	+1	4.91	4.90
16	+1	+1	+1	+1	4.89	4.91
17	-2	0	0	0	2.56	2.55
18	+2	0	0	0	1.67	1.67
19	0	-2	0	0	2.96	2.89
20	0	+2	0	0	3.29	3.34
21	0	0	-2	0	3.02	2.78
22	0	0	+2	0	3.45	3.68
23	0	0	0	-2	5.68	5.91
24	0	0	0	+2	8.67	8.43
25	0	0	0	0	8.92	8.79
26	0	0	0	0	8.86	8.79
27	0	0	0	0	8.64	8.79
28	0	0	0	0	8.91	8.79
29	0	0	0	0	8.59	8.79
30	0	0	0	0	8.81	8.79

## 1.4 培养方法

取30个150mL的三角瓶,每瓶中精确地分装50mL新配置的DNB液体培养基,根据中心组合实验设计(见表2)调节液体培养基的pH、盐度、谷氨酸钠和Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度,高压灭菌后待用。向每瓶培养基中添加蛭弧菌和宿主菌,使其浓度分别达到2×10<sup>2</sup>PFU/mL和2×10<sup>10</sup>CFU/mL。在恒温摇床中(250r·min<sup>-1</sup>)培养24h,采用DNB双层平板法检测瓶中蛭弧菌的浓度。中心组合实验需进行三次平行实验以减少实验误差,实验结果取平行实验的平均值。

## 1.5 验证实验

以响应面分析法得到的BD1的最佳生长条件,做3次平行实验,验证试验结果。通过实验结果与预测结果的相符性验证响应面分析方法的可靠性。

## 2 结果与分析

中心组合实验结果如表2所示,经Design Expert 6.0软件用标准多项式回归法对实验数据分析拟合后得到如下二次回归方程

$$y = 8.79 - 0.22x_1 + 0.11x_2 + 0.22x_3 + 0.63x_4 - 1.67x_1^2 - 1.42x_2^2 - 1.39x_3^2 - 0.40x_4^2 - 0.065x_1x_2 + 0.21x_1x_3 + 0.075x_1x_4 + 0.066x_2x_3 + 0.13x_2x_4 - 0.17x_3x_4$$

模型的方差分析结果如表3所示,在置信度水平 $\alpha=0.01$ 时,该回归模型极显著,方程确定系数 $R^2=0.9949$ ,失拟项不显著,说明对数据进行很好的拟合,代表性较好,进而可用该方程代替真实试验点对结果进行分析和预测。同时,变差系数 $C_v=4.75\%$ 相对较低,说明整个试验具有良好的精密度和可靠性。

模型回归方程系数的显著性检测结果如表4所示,pH对蛭弧菌生长活性有极显著的影响( $P<0.0001$ ),谷氨酸钠浓度、盐度和二价金属离子浓度则对蛭弧菌的生长繁殖能力具有显著的影响( $P<0.05$ )。二次项( $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$ 和 $x_4^2$ )均极显著,且交互项( $x_2x_3$ 和 $x_3x_4$ )显著( $P<0.05$ ),说明各因素对响应值的影响不仅仅是简单的线性关系,而是存在一定的交互作用,模型响应面如图1~图6所示。

表3 二次多项模型方差分析表

变异源	平方和	自由度	均方	F	P>F
模型	158.15	14	11.30	209.68	<0.0001
误差	0.81	15	0.054		
失拟项	0.71	10	0.071	3.58	0.0860
纯误差	0.099	5	0.020		
总和	158.96	29			

$$R^2=0.9949 \quad R=0.9975 \quad C_v=4.75\%$$

表4 二次多项模型中回归系数的估计值

模型项	系数 估计值	自由度	标准 误差	F	P>F
截距	8.79	1	0.095		
$x_1$	-0.22	1	0.047	21.24	0.0003
$x_2$	0.11	1	0.047	5.64	0.0314
$x_3$	0.22	1	0.047	22.38	0.0003
$x_4$	0.63	1	0.047	177.27	<0.0001
$x_1x_2$	-0.065	1	0.058	1.25	0.2803
$x_1x_3$	0.21	1	0.058	13.10	0.0025
$x_1x_4$	0.075	1	0.058	1.67	0.2157
$x_2x_3$	0.066	1	0.058	1.30	0.2715
$x_2x_4$	0.13	1	0.058	5.12	0.0390
$x_3x_4$	-0.17	1	0.058	8.21	0.0118
$X_1^2$	-1.67	1	0.044	1419.49	<0.0001
$X_2^2$	-1.42	1	0.044	1022.65	<0.0001
$X_3^2$	-1.39	1	0.044	983.35	<0.0001
$X_4^2$	-0.40	1	0.044	83.42	<0.0001

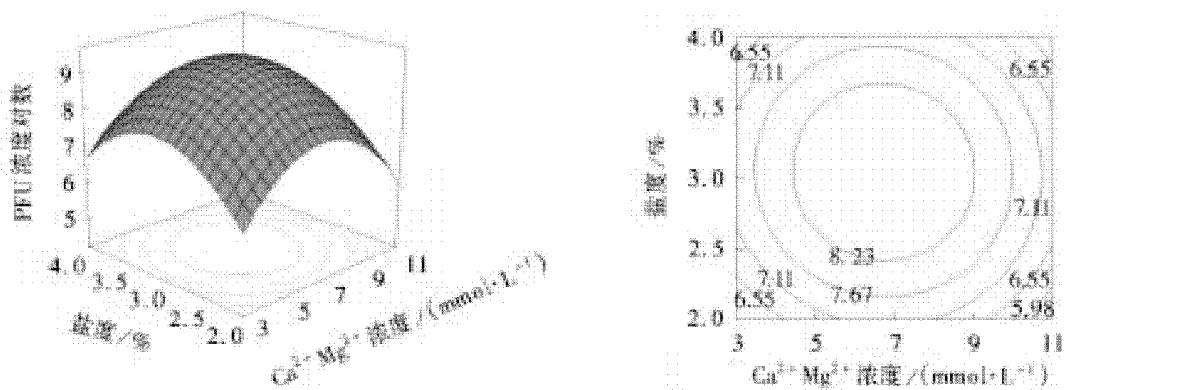


图1 盐度与Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

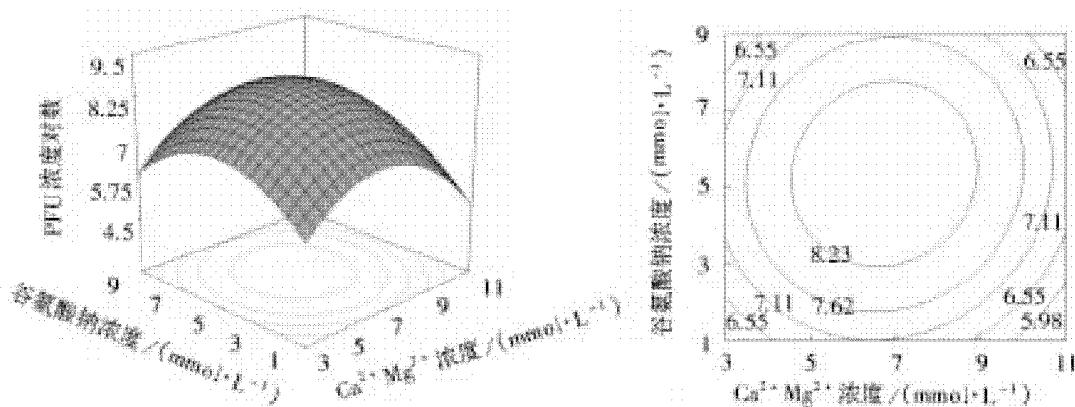


图2 谷氨酸钠与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

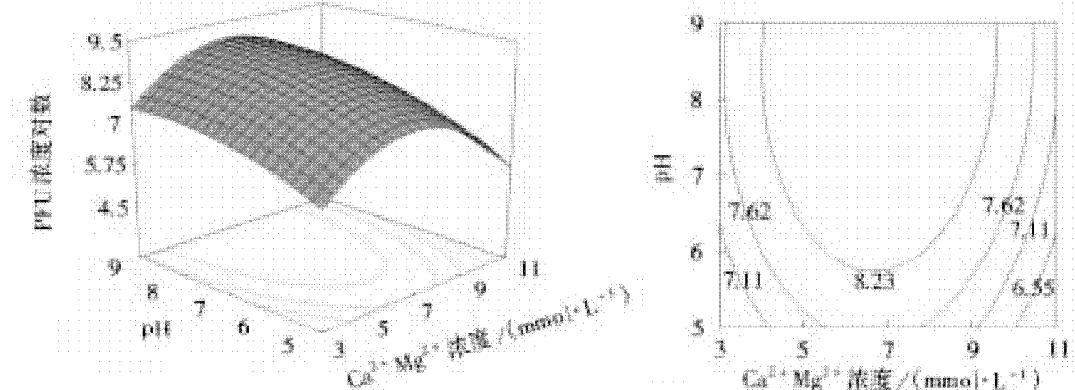


图3 pH值与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

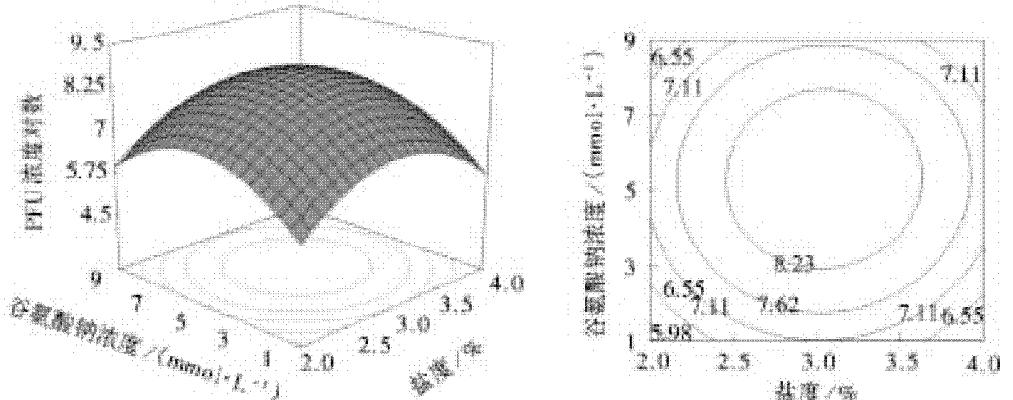


图4 谷氨酸钠与盐度间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

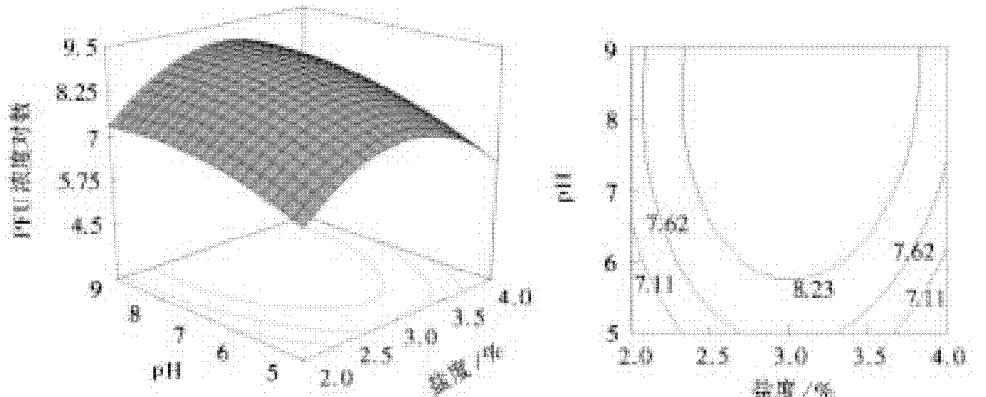


图5 pH与盐度间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

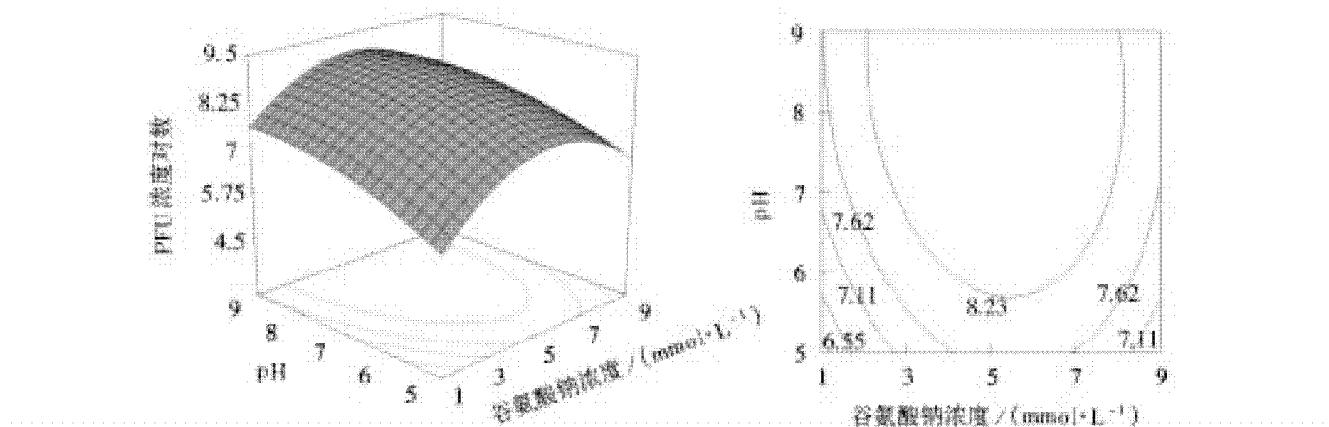


图 6 pH 与谷氨酸钠间交互作用对蛭弧菌生长繁殖能力的影响曲面图和等高线图

等高线的形状反映交互效应的强弱大小,圆形表示两个因素交互作用不显著,椭圆形表示两个因素交互作用显著<sup>[7]</sup>。从图 1~图 6 可以直观地看出,盐度和二价金属离子,谷氨酸钠和二价金属离子,谷氨酸钠与盐度交互作用不显著;pH 与盐度,pH 与谷氨酸钠,pH 与二价金属离子交互作用显著。

模型优化结果显示,当  $x_1 = -0.31$ ,  $x_2 = -0.24$ ,  $x_3 = -0.41$ ,  $x_4 = 0.38$ , 即  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度为 6.38 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 盐度为 2.88%, 谷氨酸钠浓度为 4.18 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), pH 为 7.38 时, 蛭弧菌的生长繁殖能力最强, 此时模型预测蛭弧菌浓度对数值达到 8.46。

为检验模型的可靠性,采用上述优化条件培养蛭弧菌,考虑到实际操作的便利,将优化条件修正为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度为 6.4 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 盐度为 2.9%, 谷氨酸钠浓度为 4.2 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), pH 为 7.4, 实际测得的蛭弧菌的浓度对数值为 8.95, 与理论预测值相对误差为 5.8%, 因此通过该模型优化得到的蛭弧菌 BD1 的最佳培养条件准确可靠, 具有一定的理论价值。

### 3 结论

本实验采用响应面分析方法,根据中心组合设计原理设计了四因素五水平实验,采用 Design – Expert 软件处理实验数据,得到了菌体生长模型,以及模型最优时各因素的水平。实验结果显示: BD1 的最佳生长条件为:  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度为 6.4 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 盐度为 2.9%, 谷氨酸钠浓度为 4.2 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), pH 为 7.4。在该培养条件下,菌

体生长模型达到显著水平,模型可以对蛭弧菌 BD1 在不同条件下的生长情况进行分析和预测,为蛭弧菌的培养和应用提供理论参考。

### 参考文献:

- [1] STOLP H, PETZOLD H. Untersuchungen über einen obligat parasitischen Mikroorganismus mit lytischer Aktivität für *Pseudomonas* - Bakterien [J]. Journal of Phytopathology, 1962, 45 (4): 364 – 390.
- [2] 张昕,蔡俊鹏.噬菌体在水产养殖中的应用[J].粮食与饲料工业,2004 (6): 38 – 39.
- [3] LENZ R W, HESPELL R B. Attempts to grow bdellovibrions micurgically – injected into animal cells [J]. Archives of microbiology, 1978, 119 (3): 245 – 248.
- [4] THOMPSON D. Response surface experimentation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1982, 6 (3): 155 – 188.
- [5] 陶有俊, TAO D, 赵跃民, 等. 采用 Design – Expert 设计进行优化 Falcon 分选试验 [J]. 中国矿业大学学报:自然科学版, 2005 (3): 343 – 348.
- [6] JURKEVITCH E, MINZ D, RAMATI B, et al. Prey range characterization, ribotyping, and diversity of soil and rhizosphere *Bdellovibrion*spp. isolated on phytopathogenic bacteria [J]. Applied and environmental microbiology, 2000, 66 (6): 2365 – 2371.
- [7] 刘代新, 宁喜斌, 张继伦. 响应面分析法优化副溶血性弧菌生长条件 [J]. 微生物学通报, 2008, 35 (2): 306 – 310.

(责任编辑:李丽,范君)

# 基于 N - 最短路径的中文分词技术研究

吴晓倩<sup>1,2</sup>, 胡学钢<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽医学高等专科学校公共卫生与卫生管理系, 安徽 合肥 230061)

**摘要:**中文分词技术是中文信息处理的基础,快速、准确的中文分词方法是进行中文信息搜索的关键。基于N - 最短路径的分词算法,需要计算有向图中从起点到终点的所有路径值,分词效率低,将动态删除算法与最短路径算法结合,通过从最短路径中删除部分节点的策略减少搜索路径范围,从而提高分词效率。

**关键词:**信息处理;中文分词;N - 最短路径;删除算法

中图分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1672 - 1098 (2014) 01 - 0072 - 04

## Research on Chinese Word Segmentation Based on N - shortest Path

WU Xiao - qian<sup>1,2</sup>, HU Xue - gang<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Information Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China; 2. School of Public Health and Health Management, Anhui Medical College, Hefei Anhui 230061, China)

**Abstract:** Chinese word segmentation is the basis of information processing, rapid and accurate Chinese word segmentation method is the key for information search. Segmentation algorithm based on N - shortest paths, need to calculate the directed graph from the starting point of all the path to the end, the word segmentation efficiency is low, the dynamic deletion algorithm combined with the algorithm of the shortest path, by removing part of the node from the shortest path strategy to reduce the search path, so as to improve the efficiency of segmentation.

**Key words:** information processing; Chinese word segmentation; N - shortest path; deletion algorithm

中文分词是信息处理的基础,中文信息是由句子组成的,句子又是由词组成的,词是最小的能够独立活动的有意义的语言成分,但汉语是以字为基本的书写单位,词语之间没有明显的区分标记。如何在这些由连续的文字组成的语句中把一个具有独立意义的词汇切分出来就是一个很有挑战的问题。

## 1 现有的分词算法及难点

### 1.1 现有的分词算法

现有的分词算法分为三大类:基于词典的分词方法、基于统计的分词方法和基于理解的分词方法。

1) 基于词典的分词。这种方法要事先有一个词典,词典尽量囊括所有的词汇,然后将待切分的句子按照一定的规则扫描,与词典中的词条进行匹配,如果匹配成功,则将该词条切分出来,否则进行其他处理。按照扫描方向和不同长度优先匹配的情况,基于字符串匹配分词方法又分为正向最大匹配法、逆向最大匹配法、最少切分法和双向最大匹配法四种。大多数的系统是以该方法为主来实现的。

文献[1]提出了一种改进的正向最大匹配算法,改进后的算法采用类似 TRIE 索引树的逐字匹配算法,消除了正向最大匹配算法的切分盲点,同时,避免二分查找,提高分词效率;文献[2]提出了

一种基于双词典机制的中文分词方法;文献[3]提出了全二分最大匹配快速分词算法,分词词典存放在内存,在查找时,不用进行I/O操作,减少了匹配次数。

2) 基于统计的分词。此方法认为,中文中的词组是固定的,所以在文章中,相邻的字出现的频率越高,就有可能是一个词,用字与字之间相邻出现的概率反映成词的可信度,通过统计文本中各个字的组合的频度,计算它们之间的互现信息,从而判断汉字之间的紧密程度,当紧密程度达到一个阈值,就认为可能构成一个汉字。

3) 基于理解的分词。基于理解的分词结合文本的句法、语法分析和语义分析,通过对上下文内容所提供信息的分析对词进行界定,通常由总控部分、分词子系统和句法语义子系统三部分组成。但是由于汉语言的复杂性,难以将各种语言知识组织成机器可以直接读取的形式。因此,这种方法并没有普及应用,还处于试验阶段。

4) 难点。目前虽有中科院、微软等研究机构推出的一些实验系统(如CSW、WB2000等);但分词效果仍不尽如人意。中文分词的难点主要体现在歧义现象、对未定义词的识别和词性的多重性几个方面。

## 1.2 N-最短路径算法简介

N-最短路径的分词算法的基本思想是根据词典,顺序匹配出在中文字串中所有可能的出现的词的集合,所有词语作为一个节点构造成为一个有向无环图。在该图中起点到终点的所有路径中,求出每个节点的所有到源节点的路径值,每个路径值对应一个路径集合,作为相应的分词结果集。

设待分字串  $S = c_1 c_2 \cdots c_n$ , 其中  $c_i = (i = 1, 2, \dots, n)$  为单个的字,  $n$  为串的长度,  $n \geq 1$ . 建立一个结点数为  $n + 1$  的切分有向无环图  $G$ , 各结点编号依次为  $V_0, V_1, V_2, \dots, V_n$ 。

通过以下两种方法建立  $G$  所有可能的词边。

1) 相邻结点  $V_{k-1}, V_k$  之间建立有向边  $< V_{k-1}, V_k >$ , 边的长度值为  $L_k$ , 边对应的词默认为  $c_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ )。

2) 若  $w = c_i c_{i+1} \cdots c_j$  是一个词, 则结点  $V_{i-1}, V_j$  之间建立有向边  $< V_{i-1}, V_j >$ , 边的长度值为  $L_w$ , 边对应的词为  $w$  ( $0 < i < j \leq n$ )。

这样待分字串  $S$  中包含的所有词与切分有向无环图  $G$  中的边一一对应(见图1)。

这样, 对句子的最短切分问题就转化为找出图1中从开始节点到结束节点的最短路径问题<sup>[4]</sup>。

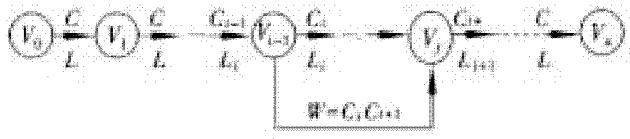


图1 分词路径图

基于N-最短路径的分词算法,需要计算有向图中从起点到终点的所有路径值,分词效率低。

## 2 改进的N-最短路径算法

正确、快速的中文分词算法,会提高排歧、未登录词的识别、词性标注的最终效果,提高中文词语分析质量。本文在对多种算法的优劣进行分析之后,在N-最短路径算法的基础上,采用动态算法在旧的最短路径的基础上,删除某条弧,并寻找替换的弧来寻找下一条可选的最短路径,即通过在有向图中增加附加节点和相应的弧来实现,减少了搜索路径范围,计算速度快,分词效率高。

### 2.1 对算法的改进

将动态删除算法<sup>[5-8]</sup>与最短路径算法结合起来,可以改进分词的效率。动态删除算法的原理是建立一个最短路径树更新队列,将所有将被删除节点的子孙节点保存到该队列;从原最短路径树中删除需要被删除的节点和其所有子孙节点;从队列中选取与根节点距离最短的节点进行更新,已更新节点不再被插入队列,从而减少节点更新次数。

改进后的算法描述如下:

1) 根据N-最短路径算法构造分词路径图1所示的图  $G(E, R)$ , 计算从开始节点  $V_0$  到结束节点  $V_n$  的最短路径为  $L_j, j = 1$ 。

2) IF ( $j <$  最短路径数) and (候选路径存在)  
Then 更新当前路径  $L$  为  $L_j$ . 否则,程序结束。

3) 删除当前路径中第一个节点开始的入度大于1的第一个节点,记为  $H_m$ , 如果被删除节点的子孙节点不在集合  $E$  中,则转4);否则从  $G$  中删除  $H_m$  节点和其所有的子孙节点,转5)。

4) 计算从开始节点  $V_0$  到  $H_m$  的最短路径,记最短路径的结束节点为  $H'_m$ 。

5) 对于从  $H_m$  之后的所有节点,重复过程3)。

6) 更新当前路径树,求得从节点  $V_0$  到所有结

点  $H'_m$  的最短路径,  $j = j + 1$ , 转 2) 继续。

## 2.2 算法示例

以“他说的确实有用”为例, 假设  $N = 3$ , 看一下求解的过程。图 2 是构造的有向图。

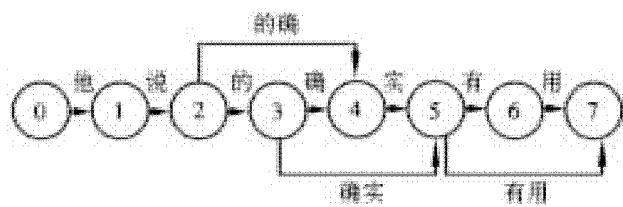


图 2 初始构造的有向图

利用上述算法计算最短路径, 求其第  $j$  条最短路径, 算法的执行过程中, 图 1 的变化如图 3~图 6 所示。其中粗线表示当前状态下的最短路径, 虚线圈删除某一节点更新后生成的节点。

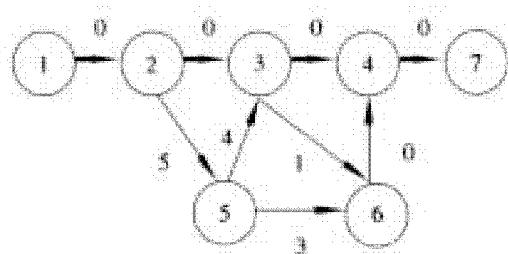


图 3  $j=1$  时的最短路径

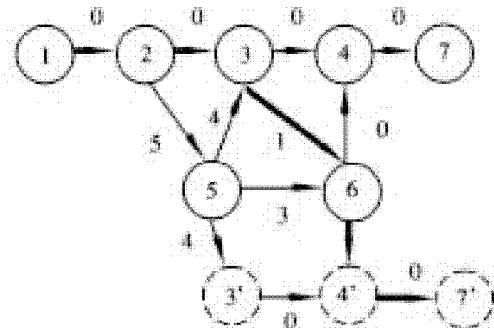


图 4  $j=2$  时的最短路径

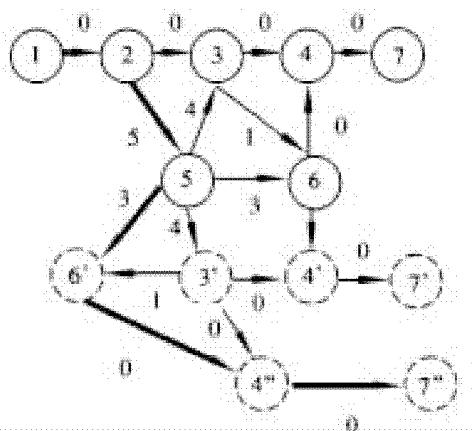


图 5  $j=3$  时的最短路径

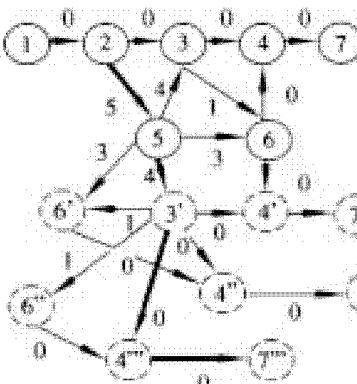


图 6  $j=4$  时的最短路径

在算法求解过程中, 还可以继续对  $j$  值增加, 继续寻找最优路径, 寻找方法同上, 由于篇幅有限, 不再进行描述。实际上,  $N -$  最短路径算法的路径搜索过程, 就是在最短路径和最大路径的折中方法。在求解的过程中, 通过保留前  $j$  个最优路径,  $j$  的取值应该选择一个适中的值, 取值过大会影响搜索的速度, 取值过小, 又会影响分词的准确性。

## 3 实验与结果分析

基于 Java 开发平台, 对上述的分词算法进行了实现, 针对从网易、新浪、腾讯等网站的监测内容进行对比实验, 测试的文本总量为 300 篇。实验采用统计的方法, 对不同的  $K$  值, 首先统计出每一文章的句子字节总数  $SUM$ , 根据算法系统的运行时间和结果, 统计每一篇文章分词所用时间  $T$ , 从分词结果中计算出分词正确的词的数量  $FSUM$ , 分词的正确率 = (正确粗分的句子数量  $FSUM$  / 句子总数  $SUM$ ) \* 100%; 分词的速度 = (句子字节总数  $SUM$  / 分词所用时间  $T$ )。通过多次测试实验, 并参照同行公布的试验数据, 本文改进的算法与其他算法的性能对比如表 1 所示。

表 1 业界公布的数据与本文的分词系统对比

算法	正确率	分词速度
	/%	/(kb · s <sup>-1</sup> )
本文改进的算法	97.27	380
基于词频词典的分词系统 PSCWS4	95	160
基于统计的分词算法	96.252	133

本文的数据来源于实验数据, 由于测试结果与系统的实际运行环境有关, 在实际应用时, 分词速度可能与本实验有一定的误差。

## 4 总结

本文对N-最短路径算法进行了改进,将动态删除算法与最短路径算法结合起来,可以改进分词的效率。通过对从网站上监测的内容进行分词实验测试,将测试结果与业务公布的算法的效率进行比较,结果表明此方法的分词速度得到了一定的改善。

### 参考文献:

- [1] 叶继平,张桂珠. 中文分词词典结构的研究与改进[J]. 计算机工程与应用,2012,48(23):139-142.
- [2] 李玲. 基于双词典机制的中文分词系统设计[J]. 机械工程与自动化,2013,176(1):17-19.
- [3] 李振星,徐泽平,唐卫清,等. 全二分最大快速分词算
- 法[J]. 计算机工程与应用,2002,38(11):106-109.
- [4] 苗夺谦. 中文文本信息处理的原理与应用[M]. 北京清华大学出版社,2008:26.
- [5] 梁德恒,姚国样,官全龙. 基于路由最短路径树的动态多节点删除算法[J]. 计算机工程,2011,37(5):121-123.
- [6] 刘代波,侯孟书,武泽旭,等. 一种高效的最短路径树动态更新算法[J]. 计算机科学,2011,38(7):96-99.
- [7] 韩月阳,邓世昆,贾时银,等. 基于字分类的中文分词的研究[J]. 计算机技术与发展,2011,21(7):29-31.
- [8] 孙知信,高艳娟,王文鼐. 更新最短路径树的完全动态算法[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(4):860-864.

(责任编辑:李丽,范君)

(上接第66页)

3) 当冠间隙小于0.8 mm时,组叶片前三阶共振时的最大应力与最大振幅的变化趋势基本相同。当冠间隙大于0.8 mm时,最大应力与最大振幅随冠间隙的增大迅速增大,当冠间隙达到1.2 mm时,振幅和应力趋于定值。

4) 叶片振幅随激振力的增大而增大,较大的激振力将产生较大的振动幅值及动应力。当激振力较大时,可通过减小冠间间隙也可获得较好的减振效果。对于纯碰撞,激振力与振幅成正比,其减振效果不如碰摩减振效果。

### 参考文献:

- [1] 徐大懋,李录平,须根发,等. 自带冠叶片碰撞减振研究[J]. 电力科学与技术学报,2007,22(1):1-6.
- [2] 谢永慧,张荻. 带摩擦阻尼器长叶片振动特性优化研

究[J]. 机械强度,2007,29(4):548-552.

- [3] 李剑钊,闻雪友,林志鸿. 船用汽轮机带冠叶片动力特性研究[J]. 热能动力工程,2002,17(98):126-129.
- [4] 季葆华,王乐天,李辛毅,等. 带阻尼结构长叶片振动响应的研究[J]. 西安交通大学学报,1996,30(12):53-59.
- [5] 李剑钊,张文平,李国镔. 带冠叶片碰撞减振机理研究[J]. 热能动力工程,2008,23(6):601-605.
- [6] 刘东远,孟庆集. 汽轮机叶片激振力分析及优化[J]. 动力工程,1998,18(1):12-18.
- [7] 武新华,李卫军. 自带冠叶片冠间接触碰撞减振研究[J]. 汽轮机技术,2005,47(1):41-44.
- [8] 李剑钊,张文平,李国镔. 带冠叶片碰撞减振机理研究[J]. 热能动力工程,2008,23(6):601-605.

(责任编辑:何学华,范君)

# 张集新副井地面预注浆及监测技术研究

曾松春, 庞建勇

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**为了实现张集煤矿新副井的快速施工, 缩短工期, 采用了地面预注浆技术, 并将其与信息化技术相结合, 建立了新型的动态监测监控系统, 实现了对预注浆参数实时准确的获得和处理, 大大提高了注浆分析效率, 减少了材料浪费, 确保了注浆质量。证明信息化技术的引入在确保技术质量和降低经济成本方面作用显著。

**关键词:**地面预注浆; 动态监测监控系统; 分析效率

**中图分类号:**TD265    **文献标志码:**A    **文章编号:**1672-1098(2014)01-0076-04

## Study on Surface Pre-grouting in Auxiliary Shaft of ZhangJi Coal Mine and Its Monitoring System ZENG Song-chun, PANG Jian-yong

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** In order to speed up construction of ZhangJi Coal Mine's new auxiliary shaft and shorten its project time, surface pre-grouting technology with information technology was adopted to build a new type of dynamic monitoring and control system. It can gain and process real-time and accurate pre-grouting parameters. The analysis efficiency was greatly improved and materials waste reduced. It proved that the information technology has great influence on improvement of quality and reduction of costs.

**Key words:** surface pre-grouting; dynamic monitoring and control system; analysis efficiency

淮南张集煤矿煤层埋藏深, 基岩段地层跨度大、变化大、断层多、裂隙发育, 涌水量大。而井筒是整个矿井的咽喉, 断面大, 井筒深, 施工条件复杂, 虽然工程量少, 但工期长。地面预注浆技术是实现井筒快速施工的主要技术手段。注浆过程中能否及时有效地监测直接关系到注浆质量和堵水效果。通过运用信息化技术获得注浆数据, 据以分析注浆情况, 采取及时有效的应对措施, 保证工程质量。

## 1 工程概况

张集煤矿区间地层平缓, 地层走向由北西转向

东西, 即 N60°W 转为 EW 向, 倾向南, 全弧形展布的单斜构造, 地层倾角 3°~6°, 平均 4.5°, 构造条件较好。新副井检查孔煤层间距正常, 未见明显的破碎带或断层构造, 但 6 煤变薄, 顶底板泥岩中滑面发育, 受构造影响。井筒基岩段共有 8 个含水层, 累计厚度 135.27 m, 岩性以细砂岩和中砂岩为主。新副井井筒 500 m 以上水文地质较复杂, 500 m 以下地下水补给迳流, 富水性较差。

## 2 工程预注浆技术设计

1) 注浆深度。鉴于基岩段多含水层, 注浆不应过浅, 以避免井底涌水事故的发生。根据工程资

料,注浆段与冻结段重叠 30 m,而冻结深度暂定 400 m,因此从地面下 370 m 开始,到地面下 942 m 结束,注浆深度确定为 942 m。

2) 注浆孔布置。根据地质资料和技术要求,注浆孔设计采用直孔+Y型钻孔,与冻结孔同步施工。采用平行作业,使各个工序一起进行,相互之间不产生干扰,大大节约了时间。

新副井布置直孔和 Y 型孔各 8 个注浆孔,直孔布孔圈径  $\Phi 15\text{ m}$ , Y 孔在井架基础附近,距井中距离约为 20~22 m。Y 孔在 610 m 进入设计靶域与直孔重叠 10 m,靶心圈径  $\Phi 13\text{ m}$ ,靶域半径 2 m,断面落点位于 11.0~15.0 m 的环状带内大体匀布,610 m 以下为直孔(见表 1)。

表 1 钻孔布置

	孔数/个	孔深/m	固管段/m	布孔圈径/m
直孔	8	620	370	15
Y 孔		942	405	地面 40~44

3) 注浆段高。在地下较深处,静水压力逐渐增加且各岩层裂隙发育不一,导致浆液上部扩散远,下部扩散较近,大裂隙扩散远,而小裂隙扩散近,因而应分段注浆。段高划分以水文地质性质相近划在同一段高,裂隙发育、开度相近的划在同一段高为原则(见表 2)。

表 2 注浆段高及设计终压值

	直孔 /m		Y 孔 /m		设计终压值 MPa	备注
	起止深度	段高	起止深度	段高		
岩帽	370~380	10			5.7~6.8	单液浆
1	380~425	45			8.5~10.6	
2	425~490	65	405~610	205	9.8~12.0	
3	490~555	65			11.1~13.7	粘
4	555~620	65			12.4~15.5	土
5			620~680	60	13.6~15.0	水
6			680~745	65	14.9~16.4	泥
7			745~810	65	16.2~17.8	浆
8			810~875	65	17.5~19.25	
9			875~942	67	18.8~20.7	
合计		250		322		

4) 注浆压力。注浆压力设计按地下水静水压力设计,岩帽段取 1.5~1.8 倍静水压力,基岩段注

浆终压直孔为静水压力的 2~2.5 倍,Y 孔为静水压的 2~2.2 倍。第一轮孔取低值,新一轮取高值。新副井筒地面预注浆压力较高,不能忽视对主、副、风井筒井壁构成的威胁,注浆时要加强观测。根据水文地质条件和附近巷道注浆后变化进行调整,确保注浆质量和井筒、巷道的安全,具体各段注浆压力如表 2 所示。

5) 注浆方式。分段注浆的类型有下行,上行以及上下混合三种。根据当地的水文地质资料,经过综合分析决定选择分段下行式。

6) 注浆有效扩散半径。凿井爆破影响带经验数据一般为 2.5 m 左右,防水帷幕有效厚度为 6 m,基岩段井筒最大半径为 5.0 m,所以注浆安全帷幕半径为 13.5 m,考虑到马头门和煤层加固,本次注浆有效扩散距离综合为 16.0 m。

7) 注浆材料。注浆材料主要是粘土、水泥以及水玻璃;经测定,周边地表大部分土细腻无杂物,为工程性质良好的粘土,故就地取材,选用矿井附近耕土 4 m 以上土层作为注浆材料;水泥为 42.5 号普通硅酸盐水泥,含矿渣 <15%;水玻璃的模数为 3.0~3.4,浓度 38~40 波美度。

8) 浆液配合比设计。单液水泥浆水灰比为 0.6:1,外加剂三乙醇胺占水泥重 0.05%,氯化钠占水泥重 0.5%;粘土水泥浆中,水灰比为 1:1,水泥浆与水玻璃体积比为 2:1,水泥浆与粘土体积比为 1:5。

9) 浆液注入量。浆液注入量依据浆液的有效扩散半径和注浆的平均裂隙率,依据矿山井巷工程施工及验收规范公式计算。

$$Q = \frac{A\pi R^2 H n \beta}{m} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为浆液注入量,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为浆液损耗系数,取 1.2~1.5;  $R$  为浆液有效扩散半径,  $\text{m}$ ;  $H$  为注浆段高,  $\text{m}$ ;  $n$  为岩层裂隙率,根据岩芯和抽水试验及经验确定,可取 0.5%~3%,在破碎带中取 10%;  $\beta$  为浆液在裂隙内的有效充填系数,取 0.8~0.95;  $m$  为浆液结石率,与浆液性质、水灰比等有关,一般取 0.60~0.99。

通过计算,岩帽注浆量为  $510\text{ m}^3$ ,其它段注入量为  $16\ 036\text{ m}^3$ 。固管采用水灰比为 0.6:1 的单液水泥浆,直孔固管量为  $2.8\text{ m}^3/100\text{ m}$ ,“Y”型定间孔段固管量为  $4\text{ m}^3/100\text{ m}$ ,固管水泥浆需用  $138\text{ m}^3$ 。材料用量如表 3 所示。

表3 注浆材料用量

	单液水泥浆		粘土水泥浆	合计
	固管段	岩帽段	380~942m注浆段	
浆量/m <sup>3</sup>	138	510	16 036	16 684
水泥/t	152	363	3 207	3 722
盐/kg	760	1 615		2 375
三乙醇胺/kg	76	162		238
水玻璃/m <sup>3</sup>			530	530
粘土/m <sup>3</sup>			5 346	5 346

### 3 注浆信息化监测监控

#### 3.1 检测仪器

主要有浆液流量计和注浆自动记录仪。

流量计选择低频矩形二值波励磁,具有适应性优良,整合性好,配件稳固,运行平稳的特点,口径大小DN20~DN200,精度达到1.0%,工作温度-25℃~+1 000℃;采用CJ-G3型注浆自动记录仪,能准确记录通过的浆液量,利用主机处理使信息的获得、研究和转换很好结合成一体,此外还能将所得结果简单直观地显示和打印。

#### 3.2 工作原理

把流量传感器安装在注浆泵和注浆孔的中间,这样可测量流过的浆量,然后传感器将浆液的流量转换成电信号,经过电缆线输入主机(见图1)。压力传感器可测量出浆泵输出浆液的压力,然后将物理量转换成电信号,经过电缆线输入主机。CJ-G3型注浆自动记录仪把来自压力传感器和流量计的信号转换成数据信号,通过显示器让操作者直观的看到数据。

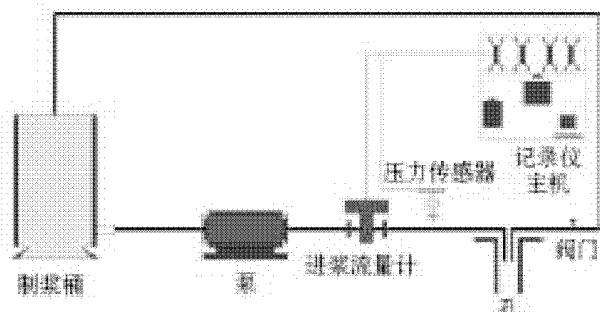


图1 仪器布置

#### 3.3 检测结果分析

根据Y3孔2012年3月1号9:00:00到11:00:00生成数据的流量数据图(见图2)和压力数据(见图3)可知,注浆速度维持在211~217 L/min,基本上可以认为没有变化;注浆压力稍有降低,但表现不明显,分析认为注浆区域内可能存在大量孔隙,浆液阻力小,表现为填充扩散方式进行加固。

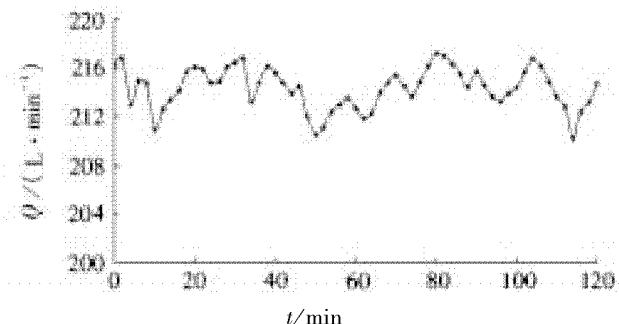


图2 注浆量与时间关系

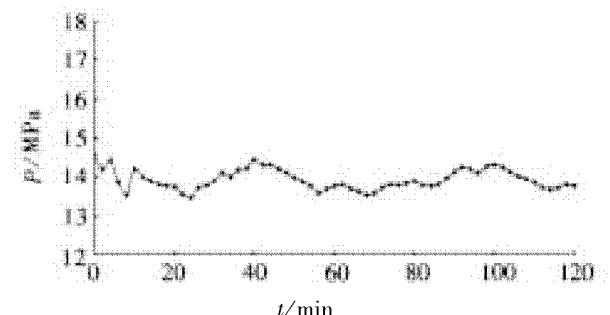


图3 注浆压力与时间关系

Y3孔在2012年4月1号9:00:00到11:00:00生成数据(见图4)和压力数据(见图5)中,  $Q-t$ 曲线虽有波动,但整体上呈下降趋势,最终达到204 L/min附近;  $P-t$ 曲线呈缓慢上升趋势,最终达到17 MPa。注浆速度和注浆压力均达到设计值。裂隙充填效果良好。

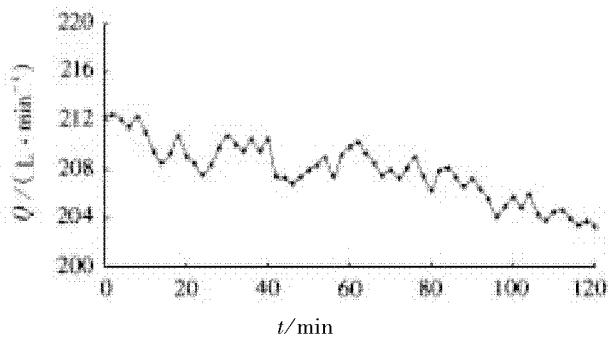


图4 注浆量与时间关系

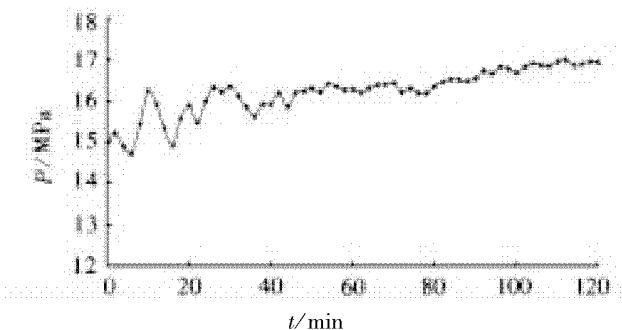


图 5 注浆压力与时间关系

注浆过程中监测设备自动每隔 50 s 监测流量和压力一次,同时生成累积流量,时间间隔短,细化了注浆中变化的整个过程,施工单位的注浆质量能够通过数据反映并控制,注浆流量随时间变化的幅度较小,说明注浆速度趋于平缓,这样能够保证注浆的填充率和较高的经济性,注浆压力随时间变化幅度也较小,未出现明显的突出点,对裂隙能够有效的渗透,避免了浆液流失,浆液扩散可以达到设计的扩散半径,可以通过调整注浆压力、注浆量和注浆时间来调整注浆扩散半径,如果注浆过程出现跑浆窜浆和注浆管路堵塞等安全事故时,监测数据会出现较大幅度的变化,保证了注浆过程中的安全性。

## 4 结论

本文以淮南张集煤矿新副井基岩段地面动态信息化预注浆为研究对象,研发了精度高、功能齐全、界面友好的实时注浆参数监测监控系统,确保注浆质量和注浆堵水工程质量,建立了孔隙性岩层可注性评价体系,为今后指导地面预注浆工程提供了重要的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 王涛,张海娇,牛贯非.井筒基岩段地面预注浆关键影响因素分析与应对措施[J].中国西部科技,2012,11(8):40-41.
- [2] 谢同礼,魏树林.S形钻孔井筒地面预注浆技术研究[J].中小企业管理与科技.2010(6):142-143.
- [3] 赵树德,廖红建,王秀丽.土力学[M].北京:高等教育出版社,2001:24-35.
- [4] 中华人民共和国煤炭工业部.GBJ213-90矿山井巷工程施工及验收规范[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,1990:8-11.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

## 欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿

《安徽理工大学学报(自然科学版)》1981 年创刊,季刊,每期定价 5.00 元,全年定价 20.00 元。《安徽理工大学学报(自然科学版)》为安徽理工大学主办的综合性学术刊物,主要刊载地质工程、环境工程、测绘工程、采矿工程、安全工程、信息管理与信息系统、土木工程、建筑学、机械工程、测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、计算机科学与技术、矿物加工工程、化学工程与工艺、弹药工程与爆炸技术、制药工程、信息与计算科学、应用物理学、医学以及相关基础学科的学术论文和最新研究成果等。

本刊国内外公开发行,侧重体现本校特色,面向国内外组稿。本刊是《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊,美国《化学文摘》(CA) 源期刊,美国《剑桥科学文摘》(CSA) 源期刊,俄罗斯《文摘杂志》(VINITI) 源期刊,《中国科技论文统计》源期刊,《中文科

技期刊数据库》源期刊,《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊,此外,我刊还是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊和《万方数据——数字化期刊群》上网期刊。另外,我刊和全国各高校学报、科研院所出版的刊物均有学术交流,凡被本刊发表的研究成果及论文,能很快地传播并及时为国内外同行专家引用。

本刊参加全国非邮发报刊联合征订,请读者向天津市大寺泉集北里别墅 17 号(邮编 300385) 天津市河西区联合征订服务部直接汇款订阅,不必先索取订单,由本刊负责将刊物寄给订户。也可直接向本刊订阅,由邮局汇款到安徽省淮南市安徽理工大学学术出版中心。

邮政编码: 232001

电 话: 0554-6668044

E-mail: xbzrb@aust.edu.cn

# 基于 DNA 自组装的全错位排列问题模型

唐新玉, 殷志祥

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 针对全错位排列这类 NP 完全问题, 提出了一种基于 DNA 自组装的全错位排列问题计算模型。该模型利用了 DNA 分子间的自组装能力, 在具体操作时只用到凝胶电泳技术, 在一定程度上减少了实验误差。

**关键词:** 全错位排列问题; 可满足问题; DNA 自组装

中图分类号: O29 文献标志码: A 文章编号: 1672 - 1098 (2014) 01 - 0080 - 03

## The Whole Error Permutation Problems Model Based on DNA self - assembly

TANG Xin - yu, YIN Zhi - xiang

(School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** For the whole error permutation such as NP - complete problem, a computing model for whole error permutation problems based on DNA self - assembly was proposed. The model utilizes the self - assembling ability among DNA molecules, in the specific operation only gel electrophoresis was used, which to some extent reduces the experimental error.

**Key words:** full dislocation permutation problem; satisfiability problem; DNA self - assembly

自文献[1]利用 DNA 计算方法解决了哈密尔顿路径问题以后, 越来越多的学者开始关注 DNA 计算并提出解决图论问题的方法, 如 0 - 1 规划问题, 图着色问题, 最小生成树问题等。

DNA 自组装是依赖分子间非共价键作用力自发的完成由小分子形成较大且复杂的结构。文献[2]、文献[3]首次利用 DNA 分子构成了自组装 Tile 结构, 并利用其中一种瓦片结构建立了多种复杂的算法模型。2000 年, 文献[4]通过实验给出了自组装 DNA 计算模型求解累积异或运算的实现过程和方法。2002 年, 文献[5]将自组装 DNA 计算的基本思想用于求解布尔逻辑表达式并将其实现逻辑电路。2004 年, 文献[6]利用 DX Tile 结构实现了一维元胞自动机, 在此基础上分析证明了用 DNA Tile 自组装结构实现任何元胞自动机的可行性。Tile 自组装还被用来解决组合优化问题<sup>[7-8]</sup>,

2008 年, 文献[9]在前任的基础上提出了求解可满足性问题的非确定性自组装模型。

全错位排列是组合数学中常见的一类问题, 文献[10 - 11]给出了基于表面、基于芯片以及基于三链的 DNA 计算模型, 与以往模型相比, 本文给出的模型操作更为简单, 更易得出可行解。

## 1 全错位排列问题

全错位排列问题即“装错信封问题”, 可用数学语言描述如下:

对于  $n$  元集合  $\{1, 2, \dots, n\}$ , 当满足条件  $i_j \neq j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 时, 得到的全排列  $i_1, i_2, \dots, i_n$  称为全错位排列。

本文以 3 元集合  $\{1, 2, 3\}$  为例具体说明。即求数字 1, 2, 3 都不在各自的自然位置上的全排列。经分析知, 存在 3 个原子命题: ①数字 1 排在第二

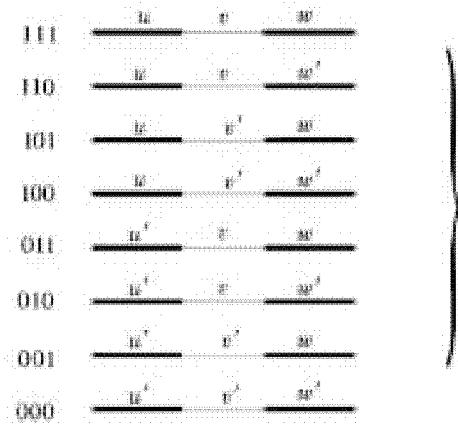
位, 记为  $u$ ; ②数字 2 排在第一位, 记为  $v$ ; ③数字 3 排在第一位, 记为  $w$ 。它们的否命题分别为:  $u'$  表示数字 1 在第三位;  $v'$  表示数字 2 在第三位;  $w'$  表示数字 3 在第二位。问题需满足条件: ①若数字 1 在第二位, 则数字 3 不在第二位; ②若数字 2 不在第一位, 则数字 3 不在第一位; ③若数字 1 在第三位, 则数字 2 不在第三位。上述问题可以转化为

$$F = (u' \vee w) \wedge (v' \vee w') \wedge (u \vee v) \quad (1)$$

## 2 操作过程

### 步骤 1

1) 给出 6 种短的寡聚核苷酸来代表  $u, v, w$  和  $u', v', w'$  (其中  $u, v, w$  对应的寡聚核苷酸取值为 1,  $u', v', w'$  对应的寡聚核苷酸取值为 0), 并把它们的补链记为  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  和  $\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$  (其中第一段不参加反应, 第二段为  $u, v, w$  和  $u', v', w'$  的前四个碱基的补, 第三段为  $u, v, w$  和  $u', v', w'$  的后四个碱基的补) (见表 1)。由此,  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  和  $\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$  的完全补链  $\bar{\bar{u}}, \bar{\bar{v}}, \bar{\bar{w}}$  和  $\bar{\bar{u}}', \bar{\bar{v}}', \bar{\bar{w}}'$  也可以确定。



(a) 初始数据池中的所有 DNA 组合

图 1 初始 DNA 链与补链杂交图

### 步骤 3

在步骤 2 得到的产物中, 加入  $\bar{u}, \bar{w}$  的完全补链  $\bar{\bar{u}}, \bar{\bar{w}}$ , 把温度调整到适当范围内,  $\bar{u}'$  和  $\bar{\bar{u}}, \bar{\bar{w}}$  和  $\bar{w}$  杂交, 即发夹打开 (见图 2)。在此利用凝胶电泳得到 DNA 单链。

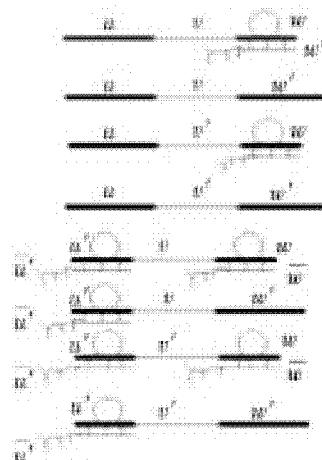
表 1 所有变量和其补链的编码

所有 DNA 序列 (5'→3')	特殊补链 (5'→3')
$u: CGGCTACTCACACG$	$\bar{u}: AAA - GCCGGTGC$
$v: GGCCAACTGCCTGA$	$\bar{v}: AAA - CCGGGACT$
$w: GCCAATGAGAACTC$	$\bar{w}: AAA - CGGTTGAG$
$u': GCTCTACGCAATGC$	$\bar{u}': AAA - CGAGTACG$
$v': ATAGCTCTAAGGCA$	$\bar{v}': AAA - TATCCCCT$
$w': TTCGGCGAAGATCA$	$\bar{w}': AAA - AAGCTAGT$

2) 合成所需的 8 种 DNA 链放入数据池中, 然后进行纯化和 PCR 扩增 (见图 1a)

### 步骤 2

首先判断子句  $(u' \vee w)$ , 往数据池中加入足量的  $u', w$  的补链  $\bar{u}', \bar{w}$ , 数据池中含有  $u', w$  的 DNA 序列将与补链  $\bar{u}', \bar{w}$  发生杂交反应形成发夹结构 (见图 1b), 与此同时, 使式 (1) 中子句  $(u' \vee w)$  为假的组合不形成发夹结构, 通过凝胶电泳, 将不符合条件的 DNA 链分离出去, 剩余的 DNA 链即为使  $(u' \vee w)$  为真的链。



(b) 加入补链 DNA 后形成发夹结构

### 步骤 4

重复步骤 2、步骤 3, 检查式 (1) 中的剩余子句, 提出  $F$  中所有不满足条件的 DNA 链后, 最后剩余的 DNA 链满足  $F$  式的所有子句, 也就得出了全错位排列的排列顺序。通过测序知为 101 和 010, 所以 231 和 312 即为所求的全错位排列。

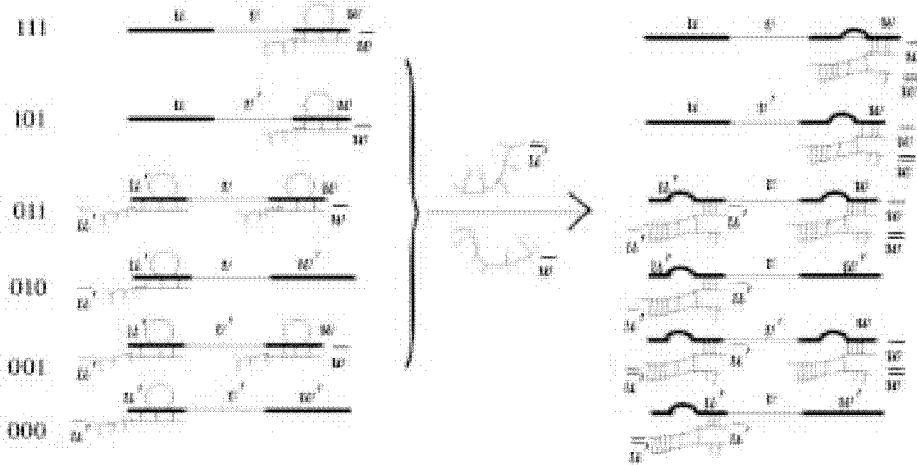


图2 发夹结构打开过程

### 3 结论

通过把全错位排列问题转化为可满足问题,利用自组装的方法最终得到三元全错位问题的具体排列顺序。这种方法在实现过程中只用到凝胶电泳操作,在一定的程度上减少了因生物操作过多而引起的各种实验误差,便于计算三元以上的全错位排列问题。

#### 参考文献:

- [1] LEONARD ADLEMAN. Molecular computation of solution to combinatorial problems [J]. *Science*, 1994, Z66 (11) : 1 021 – 1 024.
- [2] SEEMAN N C. DNA nanotechnology: novel DNA constructions [J]. *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, 1998, 27:225 – 248.
- [3] MAO C, SUN W, SEEMAN N C. Designed two dimensional DNA Holliday junction arrays visualized by atomic force microscopy [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1999, 121 (23) : 5 437 – 5 443.
- [4] MAO C, LABEAN T H, RIEF J H, et al. Logical computation using algorithmic self – assembly of DNA tri – crossover molecules [J]. *Nature*, 2000, 407 (6803) : 493 – 496.
- [5] CARBONE A, SEEMAN N C. Circuits and programmable self – assembling DNA [J]. *Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99 (20) : 12 577 – 12 582.
- [6] ROTHEMUND P W K, PAPADAKIS N, WINFREE E. Algorithmic self – assembly of DNA Sierpinski triangles [J]. *PloS Biology*, 2004, 2 (12) : 2 041 – 2 053.
- [7] MICHAIL G L, LABEAN T H. 2D DNA self – assembly for satisfiability [J]. *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, 1999, 44:139 – 152.
- [8] BRUN Y. Solving NP – complete problems in the tile assembly model [J]. *Theoretical Computer Science*, 2008, 395 (1) : 31 – 36.
- [9] BRUN Y. Solving satisfiability in the tile assembly model with a constant – size tile set [J]. *Journal of Algorithms*, 2008, 63 (4) : 155 – 156.
- [10] 孙侠, 殷志祥, 李勇, 等. 全错位排列问题的基于芯片的DNA计算模型 [J]. 大学数学, 2010, 26 (2) : 79 – 82.
- [11] 孙侠, 殷志祥, 赵前进, 等. 基于三链DNA结构的全错位排列问题算法 [J]. 滁州学院学报, 2012, 2 (14) : 18 – 20.
- [12] RAVINDERJIT S BRAICH, NICKOLAS CHELYAP – OV, CLIFF JOHNSON, et al. Solution of a 20 – variable 3 – SAT problem On a DNA computer [J]. *Science*, 2002, 296 (5567) : 499 – 502.
- [13] XU JIN, QIANG XIAO – LI, FANG GANG, et al. A DNA computer model for solving vertex coloring problem [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (20) : 2 541 – 2 549.
- [14] 方刚, 张社民, 朱岩, 等. 基于三链核酸的DNA计算 [J]. 生物信息学, 2009, 7 (3) : 181 – 185.
- [15] 孙侠, 殷志祥, 张家秀. 全错位排列问题的基于表面的DNA计算模型 [J]. 生物数学学报, 2009, 24 (3) : 513 – 517.
- [16] 宋勃生, 殷志祥, 甄诚, 等. DNA自组装的可满足性问题模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 9 (32) : 1 872 – 1 875.

(责任编辑:何学华)

# 潘三矿立井揭煤瓦斯抽采模拟研究

马忠, 石必明, 穆朝民

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 瓦斯抽采对于立井揭突出煤层起到重要的作用, 准确的确定钻孔瓦斯有效抽采半径和合理的在待抽煤层中布置抽采钻场对煤层消突具有关键性作用。基于多孔介质中流体流动达西定律理论, 采用 COMSOL Multiphysics 软件对该煤层瓦斯抽采进行了模拟。模拟结果表明, 此煤层的瓦斯有效抽采半径为 3 m, 随着抽采时间的增加, 煤层瓦斯压力逐渐的降低, 但降低的速率会逐渐的减小。瓦斯抽采 30 天后, 其残余的瓦斯压力为 0.18 MPa, 这与现场实测的最大残余瓦斯压力 0.2 MPa 相接近, 这说明了模型的可行性, 其模拟结果可为瓦斯抽采设计提供参考。

**关键词:** 立井揭煤; 抽采半径; 瓦斯压力; COMSOL Multiphysics

中图分类号: TD713.37 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2014)01-0083-04

## Simulation of Methane Drainage during Coal Seam Uncovering in Pansan Coal Mine

MA Zhong, SHI Bi-ming, MU Chao-min

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Methane drainage has a very important effect on uncovering outburst coal seam. Accurate determination of the effective drainage radius and reasonable arrangement of boreholes in coal seams plays a key role in elimination of coal and methane outburst. On the basis of Darcy's law in porous media, the gas pressure under different extraction time was simulated by COMSOL Multiphysics. The results showed that the drainage radius is 3 m. With increase of extraction time, gas pressure reduces gradually and the reduce rate gradually gets smaller. After 30 days, the simulated residual gas pressure was 0.18 MPa, which is close to gas pressure measured in-situ 0.2 MPa. Difference between the results are small, the model is feasible and the results can be used as a reference to gas drainage design.

**Key words:** uncovering coal seam; drainage radius; gas pressure; COMSOL Multiphysics

我国煤矿煤与瓦斯突出灾害比较严重, 特别是在石门或井筒揭煤的过程中<sup>[1]</sup>。对于立井揭突出煤层, 需要在揭穿煤层前采取相应的防治煤与瓦斯突出措施<sup>[2]</sup>, 而瓦斯抽采便是其中一项重要工作。瓦斯抽采设计需考虑待抽煤层有效抽采半径和抽采钻场中瓦斯压力的动态演化规律<sup>[3]</sup>。本文借助 COMSOL Multiphysics 软件, 结合现场实测的数据, 通过计算数学模型, 模拟了瓦斯在单个抽采钻孔和

抽采钻场条件下的流动情况, 得出了该煤层的有效抽采半径, 并且对多钻孔抽采条件下瓦斯的赋存和运移进行了分析, 这对立井揭煤过程中瓦斯抽采设计具有一定指导意义。

### 1 几何模型

以潘三矿立井揭 13-1 煤为研究对象, 根据煤层特性参数计算此煤层的有效抽采半径, 结合现场

施工情况,设定计算区域如图1所示。煤层长宽各为50 m,钻孔半径为0.05 m,各钻孔间距离为6 m。

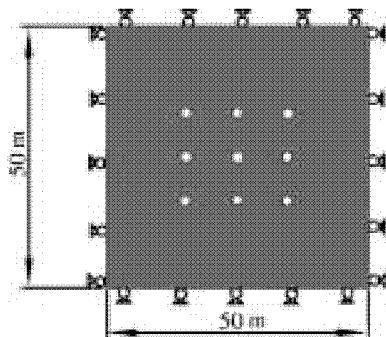


图1 几何模型

## 2 瓦斯流动模型

### 2.1 基本假设

为了模拟出钻孔抽采煤层瓦斯,需建立描述瓦斯运移的方程,瓦斯流动方程是煤层瓦斯流动模型的核心,假设如下:

- 1) 认为钻孔穿透煤层,钻孔抽采形成的流场为径向流场。
- 2) 认为吸附瓦斯含量符合朗格缪尔方程。
- 3) 认为瓦斯在煤层中的流动符合达西定律。
- 4) 认为瓦斯为理想气体,渗流过程按等温过程处理。
- 5) 认为煤层各向同性,煤层渗透率为定值。
- 6) 认为煤层透气性系数和孔隙率不受煤层压力的变化。
- 7) 认为煤层瓦斯流动不受水的影响。

### 2.2 建立方程

在煤层中,渗流的为游离瓦斯。吸附瓦斯对渗流场来说是质量源,吸附瓦斯含量由朗格缪尔方程计算得到。

达西定律:

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

朗格缪尔方程:

$$Q = \frac{100 - A - M}{100(1 + 0.31M)} \cdot \frac{abp}{1 + bp} \gamma \quad (2)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = -\nabla(\rho v) - \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (3)$$

瓦斯密度方程:

$$\rho = \frac{p}{p_0} \cdot \rho_0 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: $v$ 为瓦斯渗流速度, m/s;  $k$ 为煤层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$ 为瓦斯动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $p$ 为煤层瓦斯压力,  $\text{Pa}$ ;  $Q$ 为煤层吸附瓦斯含量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $A$ 为煤的灰分, %;  $M$ 为煤的水分, %;  $a$ 为吸附常数,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $b$ 为吸附常数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\gamma$ 为煤的密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $\rho$ 为瓦斯压力  $p$  时瓦斯密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p_0$ 为原始瓦斯压力,  $\text{Pa}$ ;  $\rho_0$ 为原始瓦斯密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 3 数值模拟及结果分析

本次模拟使用 COMSOL 中的多孔介质渗流模块,结合潘三矿立井揭煤实测的煤层及瓦斯参数完成钻孔抽采瓦斯模拟。

### 3.1 模拟参数

模拟应用潘三矿揭煤中所取煤样测得的煤层特性参数(见表1)。

表1 煤层参数

名称	值
吸附常数 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	21.17
吸附常数 $b/(\text{MPa}^{-1})$	0.658
煤的假密度 $r/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	1.35
灰分 $A$	0.2157
水分 $M$	0.0173

### 3.2 单钻孔抽采瓦斯流场

煤体距离钻孔越远,所含的瓦斯压力越大,直至接近原始瓦斯压力(见图2)。从钻孔中心到模型边缘这条直线上,瓦斯压力随着时间的变化,随着抽采时间的增加,煤层瓦斯压力逐渐的降低,钻孔抽采瓦斯所影响的范围逐渐增大。距离钻孔1 m 处瓦斯压力随时间的变化如图3所示,瓦斯抽采的最初阶段瓦斯压力下降明显,随着时间的推移,瓦斯压力变化逐渐放缓,直到保持稳定。根据文献[4]的规定,在钻孔有效抽采半径内,需将煤层瓦斯压力降至0.74 MPa 以下。此煤层在抽采30 d 后可知,距钻孔3 m 处的煤体的瓦斯压力约为0.74 MPa,如仅依据

抽采钻孔周围残余瓦斯压力值判定有效抽采半径,那么可认为此煤层的有效抽采半径为3 m。

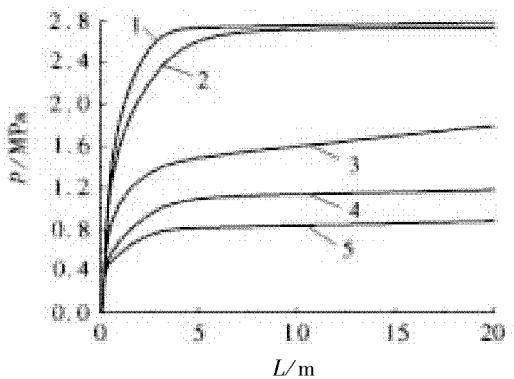


图2 不同抽采时间瓦斯压力分布  
1 - 0 s; 2 -  $2.5 \times 10^4$  s; 3 -  $8.64 \times 10^5$  s; 4 -  $1.728 \times 10^6$  s;  
5 -  $2.592 \times 10^6$  s

图2 不同抽采时间瓦斯压力分布

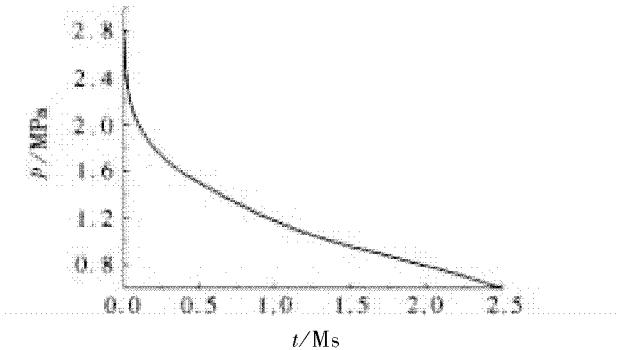
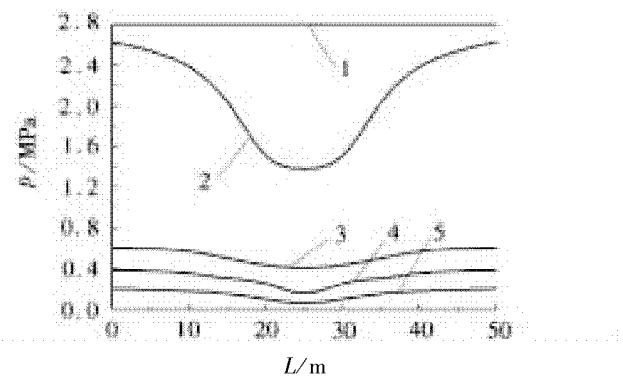


图3 瓦斯压力随时间变化

### 3.3 多钻孔抽采瓦斯流场

通过对单个钻孔的模拟,得出了瓦斯有效抽采半径,但是揭煤过程中,是通过多钻孔来抽取瓦斯的,那么各钻孔之间必然会相互影响,可以推测抽采一段时间后,钻场中某钻孔周围瓦斯压力分布必与单个钻孔周围瓦斯压力分布不同。

在9个钻孔所形成的正方形区域内瓦斯压力明显低于此区域外的瓦斯压力,说明在由钻孔所构成的钻场内,瓦斯压力下降明显,其抽采效果好。钻场中瓦斯压力随着抽采时间的增加而逐渐减小(见图4)。当煤层瓦斯抽采到25 000 s这个时刻时,从图4中可以看出钻场周围瓦斯压力梯度大,说明此时瓦斯流动迅速,大量的瓦斯流向钻孔,而在抽采末期( $2.592 \times 10^6$  s),瓦斯压力梯度小,此时瓦斯缓慢的流向钻孔,如此时继续增加抽采时间则无任何意义。



1 - 0 s; 2 -  $2.5 \times 10^4$  s; 3 -  $8.64 \times 10^5$  s; 4 -  $1.728 \times 10^6$  s;  
5 -  $2.592 \times 10^6$  s

图4 不同抽采时间瓦斯压力分布

距钻孔3 m处煤体瓦斯压力随时间变化从2.8 MPa下降到0.2 MPa以下(见图5),比单一钻孔抽采条件下的瓦斯压力下降的幅度明显增大,这说明各钻孔在抽采过程中产生了相互产生的影响,对瓦斯抽采起到了强化作用。

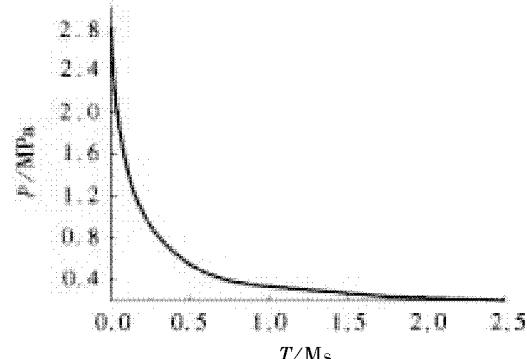


图5 瓦斯压力随时间变化

### 4 模拟结果与现场实测对比分析

根据测压钻孔设计参数(见表2),在距13-1煤顶板最小法距10 m前施工6个测压孔(2-1#、2-2#、2-3#、2-4#、2-5#、2-6#),测定13-1煤原始瓦斯压力,钻孔穿透13-1煤进入13-1煤底板0.5 m,其中2-4#孔控制到井筒轮廓线15 m外。

表2 深部进风井揭13-1煤前探、测压钻孔设计参数表

孔号	孔径/mm	与正北夹角/(°)		孔深/m
		倾角/顺时针方向	(°)	
1 测压孔2-1#	113	210	-41.1	29.5
2 测压孔2-2#	113	180	-90	18.7
3 测压孔2-3#	113	0	-48	22.5
4 测压孔2-4#	113	120	-35.4	23.9
5 测压孔2-5#	113	90	-41.5	16.7
6 测压孔2-6#	113	180	-38.7	19.8

测压孔4瓦斯压力最高,其最大的残余瓦斯压力为0.2 MPa(见表3),而根据数值模拟结果图4所示,在9个钻孔所形成的正方形抽采区域内,煤层瓦斯压力最大值为0.18 MPa,与实际相比误差仅为1%,比较符合实际,说明了所建立的模型的正确性,适用于现场实际。

表3 13-1煤组残余瓦斯压力

孔号	残余瓦斯压力/MPa
1	0.02
2	0.04
3	0.14
4	0.2
5	0.02

## 5 结论

1) 煤层内的瓦斯分为吸附瓦斯和游离瓦斯两种状态,吸附瓦斯随游离瓦斯压力的下降而解吸出来,进入裂隙系统,参与瓦斯的流动。模拟结果与现场实测相近,验证了吸附瓦斯量可通过朗格缪尔方程求得。

2) 通过建立钻孔瓦斯流动模型,结合现场实测煤层相关参数,模拟得出了瓦斯抽采半径为3 m,为煤层抽采瓦斯钻场提供参考。

3) 模拟了多钻孔抽采煤层瓦斯过程中,瓦斯压力在空间和时间上的变化规律,并且这一变化规律可量化研究,对预测抽采瓦斯量具有重要意义。

4) 瓦斯抽采过程中,各钻孔之间会产生相互影响,可起到强化瓦斯抽采的作用。

## 参考文献:

- [1] 雷文杰.千米埋深特厚煤层井筒揭煤综合防突技术[J].煤炭科学技术,2011,39(8):50-53.
- [2] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992:66.
- [3] 唐兵.钻孔瓦斯抽采半径的确定方法及实践[J].矿业安全与环保,2012,39(4):44-48.
- [4] 国家安全生产监督管理总局.AQ1026-2006煤矿瓦斯抽采基本指标[S].北京:煤炭工业出版社,2007.
- [5] 陆占金.潘三矿下保护层开采条件下地面钻孔瓦斯抽采技术及效果[J].煤矿开采,2012,17(6):89-91.
- [6] 吴厚华.“渐进式”揭煤法在立井近水平突出煤层的实践[J].煤炭工程,2012,12(3):45-47.
- [7] 韩颖.缓倾斜突出煤层石门揭煤瓦斯灾害治理模式[J].煤矿安全,2012,43(10):128-130.
- [8] 周国平.考虑基质收缩效应的煤层气应力场-渗流场耦合作用分析[J].岩土力学,2010,31(7):2317-2323.
- [9] 王兆丰.基于COMSOL的顺层钻孔有效抽采半径的数值模拟[J].煤矿安全,2012,43(10):4-6.
- [10] 韩云龙.顺层钻孔抽放瓦斯数值模拟与应用研究[D].淮南:安徽理工大学,2003.
- [11] 杨胜来,崔飞飞,杨思松.煤层气渗流特征实验研究[J].中国煤层气,2005,2(1):36-39.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 安徽理工大学学报(自然科学版)

第34卷第1期(总第131期)2014年3月

## 目 次

- 砌体结构受爆破地震波作用破坏特征研究 ..... 宗 琦,赵要才(1)  
人工冻土单轴抗压强度灰色理论预测 ..... 牛连僧,姚兆明,亓燕秋(6)  
基于表面的DNA计算模型解决排课表问题 ..... 单静怡,殷志祥(11)  
硬岩体强度弱化范围理论分析与工程验证 ..... 付宝杰,涂 敏(15)  
子网行为等价的特殊网系统的同步距离 ..... 王丽丽,方贤文,张苗苗(19)  
层状岩体受压力学特征结构面效应数值分析 ..... 鲁海峰,姚多喜,沈 丹,等(24)  
煤矿带式输送机双驱动理论与设计研究 ..... 程 刚,胡 坤,董祖伟(30)  
PAM絮凝剂对钻孔粘土废弃泥浆脱水性能的影响 ..... 张 炳,庞建勇,孙林柱,等(34)  
高性能双组分环氧树脂浇注体系的热性能研究 ..... 胡海霞,袁长颂,陈向阳,等(39)  
1,2-二氯乙烷裂解制备氯乙烯的模拟及分析 ..... 王 君,冯培良,严 丽,等(43)  
DMF回收系统闭环控制的实现方案及算法分析 ..... 袁清萍(46)  
水库坝基综合地球物理勘察技术与应用 ..... 江晓益,陈兴海,胡雄武,等(51)  
基于人工鱼群遗传算法的DNA编码优化 ..... 胡 娟,李 冬,张丽丽(56)  
汽轮机带冠叶片阻尼振动特性的有限元分析 ..... 赵亚英,陈长秀,赵 熹(61)  
响应面分析法优化蛭弧菌生长条件 ..... 李春霞(67)  
基于N-最短路径的中文分词技术研究 ..... 吴晓倩,胡学钢(72)  
张集新副井地面预注浆及监测技术研究 ..... 曾松春,庞建勇(76)  
基于DNA自组装的全错位排列问题模型 ..... 唐新玉,殷志祥(80)  
潘三矿立井揭煤瓦斯抽采模拟研究 ..... 马 忠,石必明,穆朝民(83)  
欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿 ..... (79)  
期刊基本参数:CN34-1220/N \* 1981 \* q \* A4 \* 86 \* zh \* P \* ¥5.00 \* 1000 \* 19 \* 2014 - 03

## Contents

Research on Damage Features of Masonry Structures under Blasting Seismic Wave .....	ZONG Qi, ZHAO Yao - eai (1)
Calculation of Artificial Frozen Soil Uniaxial Strength Based on Grey Theory .....	NIU Lian - seng, YAO Zhao - ming, QI Yan - qiu (6)
The Solution to the Time - table Problem Based on Surface DNA Computing Model .....	SHAN Jing - yi, YIN Zhi - Xiang (11)
Theoretical Analysis and Engineering Verification of the Range of Hard Rock Strength Weakening .....	FU Bao - jie, TU Min (15)
Synchronic Distance of A Special Net System with Equivalent Behavior of Subclass Petri Net .....	WANG Li - li, FANG Xian - wen, ZHANG Miao - miao (19)
Numerical Simulation of Structure Plane Effect for Mechanical Chaiacteristics of Layered Rock Mass Subjected to Compression .....	LU Hai - feng, YAO Duo - xi, SHEN Dan, et al (24)
Research on Dual Drive Theory and Design of Belt Conveyor .....	CHENG Gang, HU Kun, DONG Zu - wei (30)
The Effects of PAM Flocculant on Drilling Waste Clay Slurry Dewatering Performance .....	ZHANG Shuo, PANG Jian - yong, SUN Lin - zhu, et al (34)
Study on the Thermal performance of a Bicomponent High Performance Epoxy Resin for Advanced Composites .....	HU Hai - xia, YUAN Chang - song, CHEN Xiang - yang, et al (39)
Simulation and Sensitivity Analysis for the Process of Vinyl Chloride Production via Pyrolysis of 1,2 - dichloride Ethane .....	WANG Jun, FENG Pei - liang, YAN Li, et al (43)
Implementation of Closed - loop Control in DMF Recovery System and Its Algorithm Analysis .....	YUAN Qing - ping (46)
Integrated Geophysical Prospecting Technology of Reservoir Dam Foundation and Its Application .....	JIANG Xiao - yi, CHEN Xing - hai, HU Xiong - wu, et al (51)
Optimization of DNA Encodings Based on GAFSA/ GA Algorithm .....	HU Juan, LI Dong, ZHANG Li - li (56)
The Finite Element Analysis on Damping Vibration Dynamic Characteristics for Shrouded Blades of Steam Turbine .....	ZHAO Ya - ying, CHEN Chang - xiu, ZHAO Xi (61)
Optimization of Growth Condition of Bdellovibrio sp. via Response Surface Methodology .....	LI Chun - xia (67)
Research on Chinese Word Segmentation Based on N - shortest Path .....	WU Xiao - qian, HU Xue - gang (72)
Study on Surface Pre - grouting in Auxiliary Shaft of ZhangJi Coal Mine and Its Monitoring System .....	ZENG Song - chun, PANG Jian - yong (76)
The Whole Error Permutation Problems Model Based on DNA self - assembly .....	TANG Xin - yu, YIN Zhi - xiang (80)
Simulation of Methane Drainage during Coal Seam Uncovering in Pansan Coal Mine .....	MA Zhong, SHI Bi - ming, MU Chao - min (83)