

# AgY 分子筛与甲烷中有机硫化物相互作用研究

何 杰, 王 宾, 司圣元, 李清洁

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 为了探讨在吸附分离过程中吸附剂与吸附质之间的相互作用, 采用溶液离子交换法制备 AgY 分子筛, 研究了动态与静态条件下二甲基硫醚 (DMS) 和乙硫醇 (EM) 在 AgY 分子筛上的吸附作用, 再利用 X 射线光电子能谱 (XPS) 和傅立叶变换红外光谱 (FT-IR) 方法对 AgY 分子筛与 DMS 和 EM 间的相互作用进行了研究。结果表明: DMS 在 AgY 表面的吸附较弱, 在减压条件下即可从 AgY 表面脱除, 而 EM 则通过 -S-Ag 键产生较强的吸附作用。这种差异是由 DMS 与 EM 的分子中 S 元素电荷密度的不同引起的。

**关键词:** AgY 分子筛; 二甲基硫醚; 乙硫醇; 吸附; 相互作用模式

**中图分类号:** O647.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0001-05

## Study on Interaction between AgY Zeolite and Sulfides in Methane

HE Jie, WANG Bin, SI Sheng-yuan, LI Qing-jie

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

**Abstract:** The interaction between adsorbent and adsorbates is an important factor in the process of adsorption separation. AgY zeolite was prepared by a simple ion-exchange method in aqueous solution. Dimethyl sulfide (DMS) and ethyl mercaptan (EM) were used as probes to evaluate the adsorption capacity of the AgY for the sulfides. The interaction between adsorbent and the sulfides was investigated by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The results showed that the relatively weak interaction between DMS and AgY zeolite was detected, which leads to the removal of DMS from AgY zeolite in low vacuum conditions. However, a more strong interaction was observed when EM adsorbed on the AgY zeolite, and it may be the effect of the -S-Ag bond. The difference of the interaction can be explained by the different charge density of S atom in DMS and EM molecules.

**Key words:** AgY zeolite; dimethyl sulfide; ethyl mercaptan; adsorption; interaction mode

能源短缺与环境污染是人类急需解决的两大问题。利用洁净能源和保护环境已成为当今国际社会的共识。燃料电池作为高效无污染能源设备受到广泛重视。

甲烷可通过重整制氢或直接作为电池的燃料使用。甲烷除了具有高的 H/C 比外, 还因为它广泛的来源——天然气、生物气和煤层气等。然而这些燃料气中常含有硫化物, 包括无机硫和有机硫两种形态。它们在燃烧过程中产生的 SO<sub>2</sub> 严重污染

空气, 或作为毒物降低催化剂的活性。在燃料电池中, 要求燃料中硫体积分分数小于  $0.1 \times 10^{-6}$  [1-4]。

在过去几十年, 选择性脱硫技术一直受到重视并被广泛研究。对于燃料中有机硫化物脱除常有二类方法 [5-6]: ① 吸附; ② 催化转化 (加氢或选择性氧化) 后吸附。吸附脱硫技术因操作简单、条件温和以及广泛适用性而用于不同的燃料净化过程, 被认为是最实用和最有前途的方法之一 [7]。过渡金属氧化物、分子筛和活性炭等作为吸附材料被广

收稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21071004)

作者简介: 何杰 (1962-), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士, 从事多相催化与催化新材料教学与研究工作。

泛研究<sup>[8-12]</sup>。对于  $H_2S$ , AgY 分子筛具有非常好的吸附性能<sup>[13]</sup>。但对于有机硫化物,由于受分子极性与结构的影响,目前尚未取得明显效果。本研究选用同分异构体化合物二甲基硫醚(DMS)和乙硫醇(EM)作为探针分子,使用 AgY 分子筛作为吸附剂,以甲烷气作为原料气,采用 XPS 和 FT-IR 技术,并结合密度泛函理论对分子结构分析,探讨吸附剂 AgY 分子筛同硫醚与硫醇之间的相互作用,从而为研究深度脱除燃气中有机硫化物提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 AgY 分子筛的准备

AgY 分子筛吸附剂通过溶液离子交换法制备。NaY (Si/Al 摩尔比 4.54) 同  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $AgNO_3$  溶液接触,固液比为:1:10,323 K 下反应 4 h,洗涤、干燥。此操作在同样条件下重复一次。交换后的样品在 673 K、空气中焙烧 4 h。

### 1.2 分子筛对硫化物的吸附

AgY 分子筛对硫化物的动态吸附在一管式反应器中进行。反应器内吸附剂层高度 5 cm。含有一定浓度的二甲基硫醚(DMS)和乙硫醇(EM)的甲烷气以体积空速  $31\ 500 \text{ h}^{-1}$  通过吸附层。吸附在常压下进行,DMS 和 EM 浓度通过气相色谱分析,FPD 检测器。

静态吸附在室温下进行,0.1 g AgY 置于 50 mL 容器中的玻片上,10  $\mu\text{L}$  的 DMS 或 EM 滴在样品旁,密封,避光,静置 4 h。吸附完成后将样品瓶转移到抽滤瓶内,抽负压,将未被分子筛吸附以及弱吸附的硫化物抽出。

### 1.3 表征

物相结构表征于 XD-3 型 X 射线衍射仪(北京普析通用)上进行。Cu 靶,  $K\alpha$  0.154 06 nm, Ni 滤波片,管压 36 kV,管流 30 mA。FT-IR 在 Vector 33 傅立叶变换红外光谱仪(Bruker 公司,德国)上进行,KBr 压片。分辨率:  $4 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描范围:  $4\ 000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。X-射线光电子能谱(XPS)分析在 JPS-9200 能谱仪(JEOL,日本)上进行,系统真空度优于  $10^{-6} \text{ Pa}$ ,Mg,  $K\alpha$  1 253.6 eV。元素结合能以 C 1s 285.0 eV 为参考。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AgY 物相结构

采用粉末 X-射线衍射对  $Ag^+$  交换的分子筛物相结构进行了表征(见图 1)。

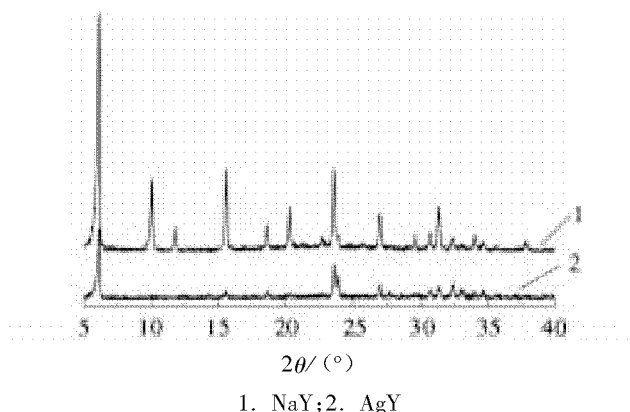


图 1 NaY 和 AgY 分子筛的 XRD 图谱

由图 1 可见,所用分子筛原料具有典型的 NaY 晶相结构<sup>[14]</sup>。 $Ag^+$  交换后,AgY 保持原有的晶相结构,但结晶度有所降低。造成这一现象的原因可能是,在离子交换过程中, $AgNO_3$  溶液的酸性使分子筛骨架脱 Al 所致。

采用 XPS 技术对 AgY 的成分进行全扫描(见图 2)。

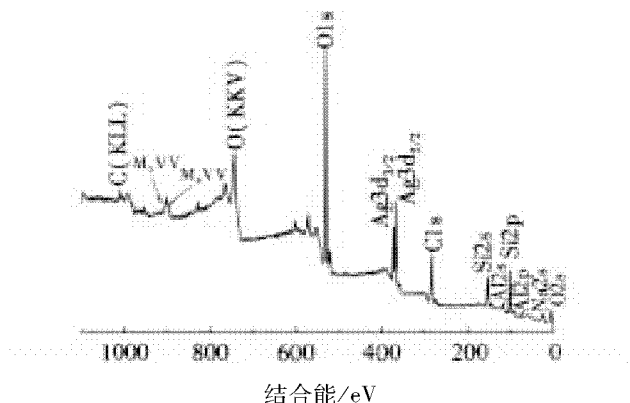


图 2 AgY 新鲜样品 XPS 全扫描谱

结果表明,在 AgY 分子筛表面可观察到 Si、Al、O 和 Ag 元素,  $Ag/(Si + Al)$  摩尔比为 0.12,样品中还有未被交换的  $Na^+$  离子。

### 2.2 DMS 和 EM 在 AgY 上的吸附曲线

甲烷气中 DMS 和 EM 在 AgY 上的吸附穿透曲线如图 3 所示。当吸附 50 h 后,DMS 开始从吸附床层流出,而在吸附 122 h 后,在流出物中仍未检测

出EM。结果表明,AgY对EM的吸附量大于其对DMS的吸附量,即AgY对EM有更好的脱除效果。

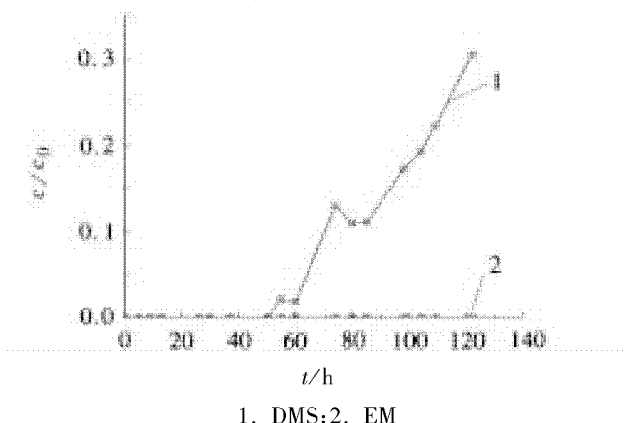


图3 甲烷气中的硫化物在AgY吸附剂上的穿透曲线

### 2.3 吸附剂表面同吸附物种之间的相互作用

在动态吸附实验中,可观察到吸附后的AgY样品明显发暗。取吸附床层顶端样品,减压抽脱表面的弱吸附物种,分别采用FT-IR和XPS方法进行分析,结果如图4~图6所示。

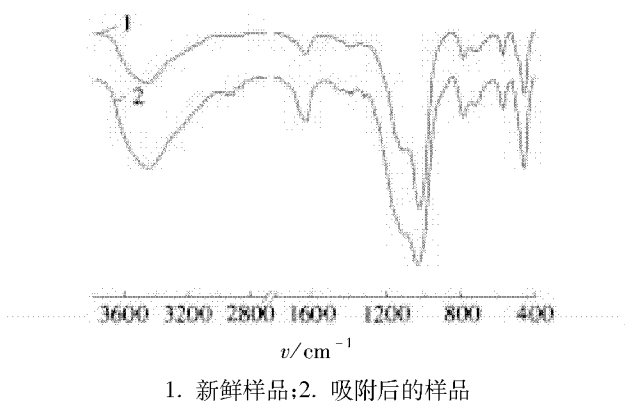


图4 AgY吸附剂使用前后的样品红外光谱图

AgY吸附剂与吸附前相比,吸附后样品在 $2956.3\text{ cm}^{-1}$ 、 $2919.7\text{ cm}^{-1}$ 和 $2856.1\text{ cm}^{-1}$ 出现 $-\text{CH}_3$ 的反对称伸缩振动的峰及 $-\text{CH}_2$ 的反对称伸缩振动与对称伸缩振动的峰(见图4)。位于 $1448.8\text{ cm}^{-1}$ 、 $1385.2\text{ cm}^{-1}$ 和 $1317.1\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰分别对应于 $-\text{CH}_3$ 反对称变形振动, $-\text{CH}_2$ 变形振动和 $-\text{CH}_3$ 中C-H键弯曲振动;而位于 $1257.1\text{ cm}^{-1}$ 和 $652.1\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰分别归属于C-S键的摇摆振动和伸缩振动<sup>[15-16]</sup>。

与图2相比,图5中显示有S 2p的XPS峰,说明样品表面滞留的有机化合物为硫的化合物。而图6显示,吸附前,AgY中Ag 3d<sub>5/2</sub>位于369.2 eV,状态单一<sup>[17]</sup>;处理甲烷气中的硫化物后,Ag 3d轨道XPS峰明显发生分裂。经Gaussian拟合,样品

中Ag<sup>+</sup>有两种状态,其结合能Ag 3d<sub>5/2</sub>分别为369.3 eV和367.4 eV。前者与吸附前AgY样品中的Ag状态相同,归属于样品中尚未与吸附质发生作用的Ag<sup>+</sup>。而后者结合能较低,这可能是Ag<sup>+</sup>离子与硫化物发生相互作用后,S中的电子向Ag转移,在S与Ag之间形成了-S-Ag键,从而导致其3d轨道上电子的结合能降低。

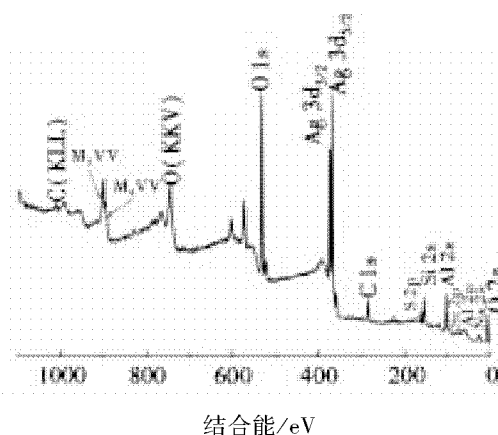


图5 AgY吸附剂使用后的样品XPS全扫描谱

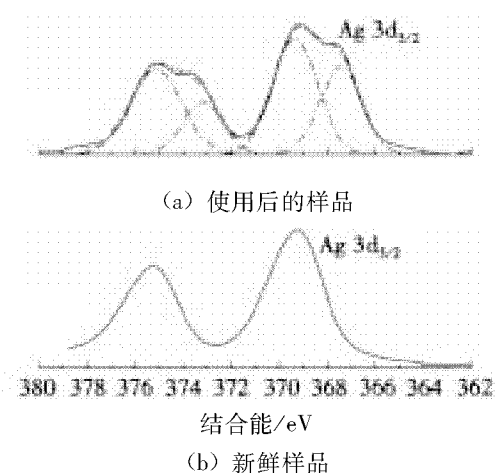


图6 AgY吸附剂使用前后的XPS Ag 3d谱

为了进一步探讨与Ag<sup>+</sup>发生作用的硫物种是来自于DMS或EM,在静态条件下分别考察了AgY对DMS和EM的吸附作用,并采用XPS方法对样品表面的S元素状态进行分析(见图7)。AgY吸附DMS后,在样品表面未观察到S 2p的XPS峰,说明DMS在AgY表面未有滞留,这是由于DMS在AgY上的吸附作用力很弱,在高真空条件下即可从AgY表面上脱除。而AgY在吸附EM后于162.5 eV处出现S 2p的XPS峰,参考有机硫化物在Au上的吸附<sup>[18]</sup>,该峰归属于EM与Ag<sup>+</sup>相结合的S 2p状态。即EM与AgY的作用较强,难以从AgY表面解吸。

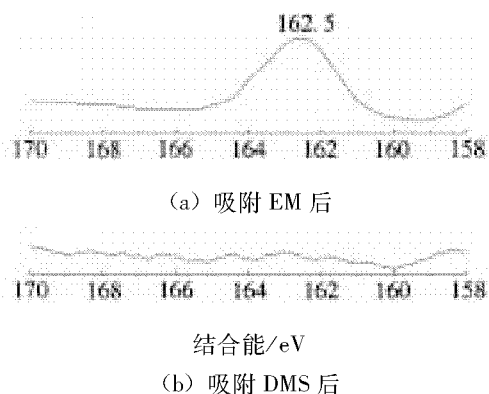


图7 静态条件下 AgY 吸附剂吸附 DMS 和 EM 后的 XPS S 2p 谱

DMS 与 EM 为同分异构体,它们同  $\text{Ag}^+$  作用力的差别可能来自于结构差别。运用密度泛函理论中的 B3LYP 方法,对 DMS 和 EM 进行了结构优化,并计算出优化结构中相应原子上的电荷密度(见图8)。二者最显著的差别是 DMS 中 S 原子上的电荷为正,而 EM 中的 S 电荷为负,负电荷密度的 S 原子更易于同  $\text{Ag}^+$  配位。正是这种差别导致了二者与  $\text{Ag}^+$  作用力不同。

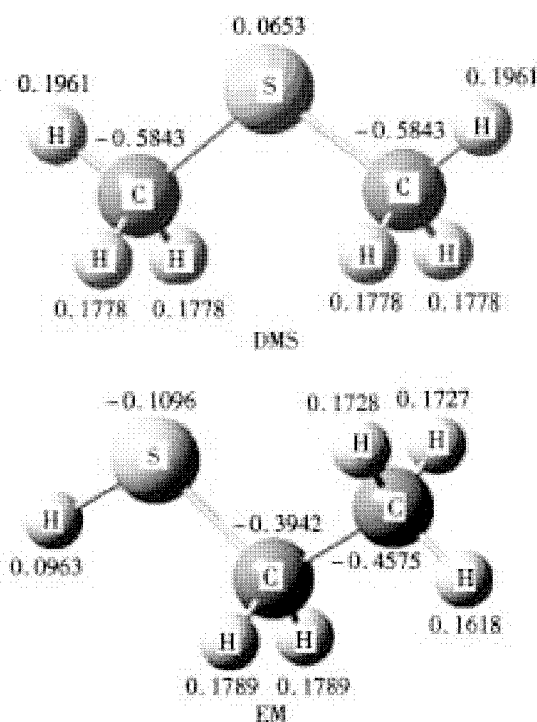


图8 DMS 和 EM 分子中原子电荷密度

### 3 结论

在动态条件下,AgY 分子筛对甲烷气中的 DMS 与 EM 均有吸附作用,但吸附量不同。AgY 对 DMS 的吸附能力较弱,对 EM 的能力较强。AgY

中的  $\text{Ag}^+$  与 DMS 和 EM 的相互作用的差异主要取决于分子中 S 原子的电荷密度。DMS 中的 S 原子上的电荷密度为正,难以同  $\text{Ag}^+$  形成键合作用,它仅依靠物理吸附作用力,在减压下即可将其从吸附剂表面解吸;而 EM 上的 S 原子电荷密度为负,它通过提供电子同 Ag 间形成较强的化学键合作用,这种键合作用使得 AgY 对 EM 具有更强的作用力和更大的吸附容量。

### 参考文献:

- [1] HEMÁNDEZ S, SOLARIN L, ORSELLO G, et al. Desulfurization processes for fuel cells systems [J]. Int. J. Hydrogen Energ., 2008,33 (12): 3 209 - 3 214.
- [2] LEE J, BEUM H T, Ko C H, et al. Adsorptive Removal of Dimethyl Disulfide in Olefin Rich C4 with Ion - Exchanged Zeolites [J]. Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50 (10): 6 382 - 6 390.
- [3] KIM J H, MA X, ZHOU A, et al. Ultra - deep desulfurization and denitrogenation of diesel fuel by selective adsorption over three adsorbents: a study on adsorptive selectivity and mechanism [J]. Catal. Today, 2006, 111 (1): 74 - 83.
- [4] SUNG C Y, HASHIMI S A, McCORMICK A, et al. Density Functional Theory Study on the Adsorption of  $\text{H}_2\text{S}$  and Other Claus Process Tail Gas Components on Copper - and Silver - Exchanged Y Zeolites [J]. J. Phys. Chem. C, 2012, 116 (5): 3 561 - 3 575.
- [5] CRESPO D, QI G S, WANG Y H, et al. Superior sorbent for natural gas desulfurization [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2008, 47 (4): 1 238 - 1 244.
- [6] LAMPERT J. Selective catalytic oxidation: a new catalytic approach to the desulfurization of natural gas and liquid petroleum gas for fuel cell reformer applications [J]. J. Power Sources, 2004,131 (1): 27 - 34.
- [7] XIAO J, SONG C S, MA X L, et al. Effects of Aromatics, Diesel Additives, Nitrogen Compounds, and Moisture on Adsorptive Desulfurization of Diesel Fuel over Activated Carbon [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2012, 51 (8): 3 436 - 3 443
- [8] SONG C. An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra - clean gasoline, diesel fuel and jet fuel [J]. Catal. Today, 2003,86 (1 - 4): 211 - 263.
- [9] SHIGEO S, YUJI K, HIROSHI F. Adsorptive removal of dimethylsulfide and t - butylmercaptan from pipeline natural gas fuel on Ag zeolites under ambient conditions [J]. Appl. Catal. B Environ, 2005,56 (1): 51 - 56.



- [10] VELU S, MA X, SONG C. Selective adsorption for removing sulphur from jet fuel over zeolite - based adsorbents [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2003,42 (21): 5 293 - 5 304.
- [11] BHANDARI V M, KO C H, PARK J G, et al. Desulphurization of diesel using ion - exchanged zeolites [J]. Chem. Eng. Sci, 2006,61 (8): 2 599 - 2 608.
- [12] CUI H, TURN S Q, REESE M A. Removal of sulfur compounds from utility pipelined synthetic natural gas using modified activated carbons [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2009,139 (4): 234 - 239.
- [13] KUMAR P, SUNG C Y, MURAZA O, et al. H<sub>2</sub>S adsorption by Ag and Cu ion exchanged faujasites [J]. Micropor. Mesopor. Mat, 2011,146 (1): 127 - 133.
- [14] RANI V R, KISHAN M R, KULKARNI S J, et al. Immobilization of metalloporphyrin complexes in molecular sieves and their catalytic activity [J]. Catal. Commun, 2005,6 (8): 531 - 538.
- [15] The Sadtler Handbook of Infrared Spectra [M]. Bio - Rad Laboratories Inc., Informatics Division, 2004: 79 - 91.
- [16] GARCIA N G, AYLLON J A, DONENECH X, et al. TiO<sub>2</sub> deactivation during the gas - phase photocatalytic oxidation of dimethyl sulfide [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004,52 (1): 69 - 77.
- [17] TAKAHASHI A, YANG R T, MUNSON C L, et al. Influence of Ag content and H<sub>2</sub>S exposure on 1,3 - butadiene/1 - butene adsorption by Ag ion - exchanged Y - zeolites (Ag - Y) [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2001,40 (18): 3 979 - 3 988.
- [18] HAN T, WILLIAMS J M, BEEBE T P Jr. Chemical bonds studied with functionalized atomic force microscopy tips [J]. Anal. Chim. Acta, 1995,307 (2 - 3): 365 - 376.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

## 关于本刊启用稿件在线处理系统的通知

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况,本刊已开通稿件在线处理系统([http://210.45.144.193/Jweb\\_aust/](http://210.45.144.193/Jweb_aust/)),请作者通过在线处理系统进行投稿、查稿。系统设有作者中心、专家中心、编辑中心和主编中心四部分,实现在线投稿、审稿、编辑一条龙处理。首次作者投稿请先注册,并记住注册的用户名和密码。注册登录后就可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请不要重复注册,否则可能导致您信息查询不完整。从即日起不再接受其它方式的投稿。

《安徽理工大学学报》编辑部

# 狭长空间无线感知节点布置策略及定位算法

李敬兆, 吴学琴

(安徽理工大学计算机科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 因为人们对无线感知节点在一些狭长空间场所的研究较少, 受空间限制, 无线感知节点及其网络在这些场所应用具有与开阔空间不同的特征, 所以对目前应用于开阔环境下的无线感知节点定位算法进行了修正, 给出了应用于狭长空间的无线感知节点定位算法。同时对狭长空间的锚节点布置方法进行了研究, 给出一种较优的锚节点布置策略。理论分析、计算机仿真和实验验证表明: 该算法及其锚节点布置策略在狭长空间应用中对未知节点具有很好的定位精度。

**关键词:** 狭长空间; 无线感知节点; 锚节点布置; 定位算法

**中图分类号:** TP3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0006-04

## Study on Wireless Sensor Nodes' Layout Strategy and Localization Algorithm in the Long and Narrow Space

LI Jing-zhao, WU Xue-qin

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

**Abstract:** The wireless perception node localization algorithm is revised, this localization algorithm is used to open environment at present, and revised proposes algorithm is applied to a wireless perception node localization in long and narrow space. And the anchor node layout method of the long and narrow space is studied, a more optimal anchor node layout strategy is put forward in this article. Theoretical analysis, computer simulation and experiment show that the algorithm and its anchor node layout strategy has the very good location accuracy in the long and narrow space application.

**Key words:** long and narrow space; wireless perception node; anchor node layout; localization algorithm.

“物联网”为各行各业的安全生产监督管理引入了新的理念、技术和方法。目前专家普遍认同的是将人、物识别和各类监控子系统均纳入到一起的大物联网系统中。因此物联网在各行各业中的应用就是通过各种感知技术、信息传输与处理技术, 将人员、物质、环境等物理系统与信息系统的高度整合, 实现对整个系统的智能控制与管理<sup>[1]</sup>。在物联网的许多应用中, 需要确定无线感知节点的位置信息, 如物品的跟踪、设备的管理、人员的定位等。目前在宽阔的环境中, 无线感知网络得到许多

学者的研究和广泛应用。而人们对无线感知节点在一些狭长空间场所的研究较少, 受空间限制, 无线感知节点及其网络在这些场所应用具有与开阔空间不同的特征<sup>[2]</sup>。为此, 本文对狭长空间无线感知节点定位算法及布置策略进行了研究。

### 1 狭长空间定位算法

在无线感知节点的众多算法中, 基于收发信号强度的方法, 更适用于狭长空间<sup>[3]</sup>。对于无线网络感知节点而言, 其收发功率的关系由式(1)表示。

收稿日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170060); 安徽省自然科学基金资助项目(11040606M135); 安徽省高等学校自然科学基金重点项目(KJ2011A083); 淮南市科技计划项目(2011A07904)

作者简介: 李敬兆(1964-), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士, 主要从事智能控制教学与研究工作。

$$P_r = \frac{P_t}{d^n} \quad (1)$$

式中:  $P_r$  为接收信号的功率;  $P_t$  为发射信号的功率;  $d$  为接收节点与发射节点之间的距离;  $n$  为与无线网络环境有关的传播因子或传播系数。

由式(1),就能够得到式(2)计算距离的公式。

$$d = \sqrt[n]{\frac{P_t}{P_r}} \quad (2)$$

然而,由于无线信号的发射功率和接收功率一般用 dBm 表示<sup>[4]</sup>。因此式(2)在实际测试和仿真中不可使用。为了使无线信号的发射功率和接收功率能够用 dBm 表示,对式(2)两边取对数,并在两边同乘 10,得到式(3)。

$$10n \lg d = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} \quad (3)$$

式(3)变换后得式(4)

$$10n \lg d = 10 \lg P_t - 10 \lg P_r \quad (4)$$

一般来说,节点的发射功率是已知的,因此令节点的发射功率  $10 \lg P_t = C$ ,同时考虑节点的发射功率与距离等有关,令节点的接收功率信号强度  $10 \lg P_r = X$ ,将上述参数代入式(4)得式(5)

$$10n \lg d = (C - X) \quad (5)$$

进而得式(6)

$$d = 10^{\frac{(C-X)}{10n}} \quad (6)$$

式(6)中的射频参数  $C$  被定义为用 dBm 表示的距发射器 1 m 时接收到平均能量的绝对值,如平均接收能量为 -40 dBm,那么参数  $C$  被定为 40;与无线网络环境有关的传播因子或传播系数  $n$  反映了信号能量随着到收发器距离的增加而衰减的速率;  $X$  为节点接收功率的信号强度,在实际环境中通过实验测得。

理论分析和实验验证均表明,受狭长空间周围介电系数,两壁环境的反射系数,无线电磁波的传导效应等多种因素影响<sup>[5]</sup>,添加补偿因子  $A$  和  $B$  对式(6)进行修正,才可应用到狭长空间,为此得到应用于狭长空间的无线网络节点的距离计算公式如式(7)所示。

$$d = A \times 10^{\frac{(C-X)}{10n}} + B \quad (7)$$

## 2 三种不同无线感知节点布置方法

首先,对于狭长空间环境  $n$  的取值进行了实验、计算。计算以式(7)为依据,经反复实验,并与实际位置进行比较,得到实验环境下的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和

$n$ ,分别为 0.95、-0.22、-40 和 2.3,以此对不同节点布置情况下定位进行研究。

实验采用 ZIGBEE 开发板,锚节点采用 CC2431、未知节点采用 CC2430(见图1)。实验测试时节点接收信号强度截图如图2所示。

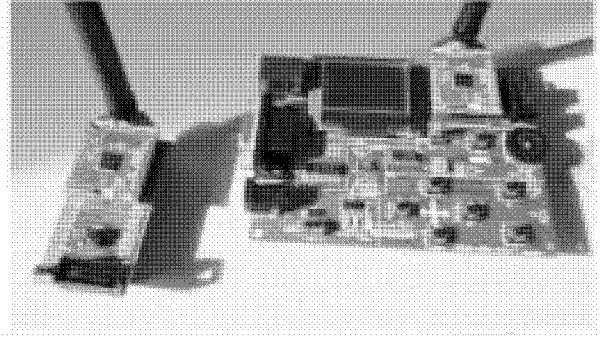


图1 狭长空间信号强度定位实验装置

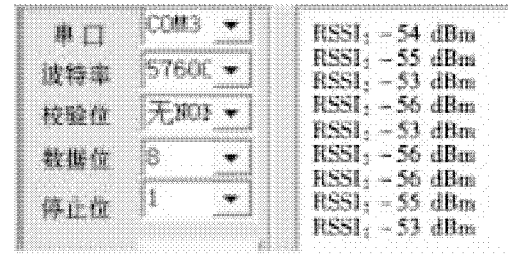


图2 实验测试时节点接收信号强度截图

下面三种节点布置方法均采用未知节点到锚节点的实际距离和锚节点的坐标来估计未知节点的位置,具体实施如下。

首先,将锚节点的位置均匀布放,且每个锚节点的纵、横坐标均已知,随机分布未知节点。其次,用  $Dall(i, j)$  表示第  $i$  个节点到第  $j$  个节点的计算距离,当未知节点生成后,通过计算,得到  $Dall(i, j)$  矩阵。再次,考虑到信号强度值受距离的影响,在实验环境下,经过多次实验,得到无线网络的平均传输半径为 240 m,为了使更多锚节点能够参与定位计算中,通过定位精度,在此采用的是每隔 20 m 设定一个传感器节点,那么对于任意一个未知节点,它到两个锚节点的距离小于  $\sqrt{5^2 + 120^2} \approx 120$  m。这里,将 120 m 作为一个限定阈,每个未知节点寻找与其距离小于这个限定阈的锚节点,找到后通过这两个锚节点到其距离和这两个锚节点的已知位置来实现这个未知节点的定向和定位。对于多于两个锚节点的情况,其它锚节点的收发信号用于对对上述两个锚节点求得距离进行修正,在此,主要关心的是水平距离,也就是横坐标参数。

## 2.1 20 m 范围内布置两个锚节点的未知节点定位

首先在  $120\text{ m} \times 5\text{ m}$  的区域, 设定两个锚节点, 坐标分别为  $(0,0)$  和  $(120,5)$ 。将未知节点随机分布在这个矩形区域内, 在此先随机产生十八个未知节点。这里用圆圈  $\circ$  代表通过测量得到的未知节点位置, 用星号  $*$  代表通过这两个锚节点估计的未知节点的位置。

通过测量得到未知节点的实际位置和通过式 (7) 由实验得到的接收节点的信号强度计算的估计位置分布如图 3 所示。

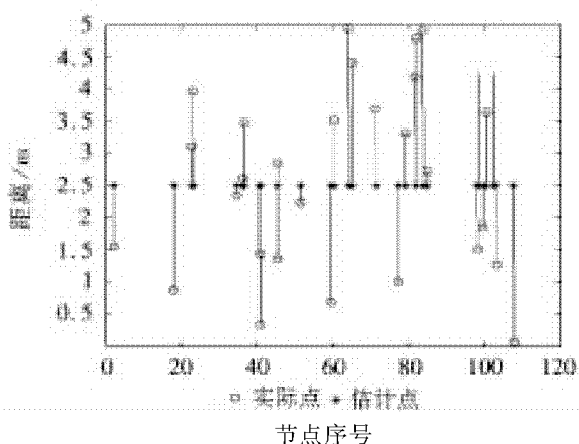


图3 两个锚节点的未知节点实际位置和估计位置分布

每个未知节点的实际位置与计算估计位置之间的误差如图 4 所示。

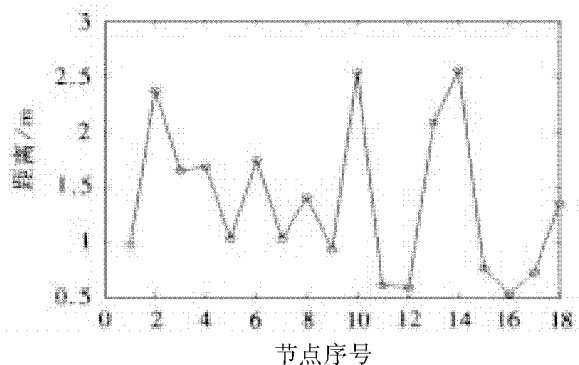


图4 两个锚节点的每个未知节点的误差

在这种锚节点布置情况下, 得到未知节点的平均定位误差为  $1.3679\text{ m}$ 。

## 2.2 40 m 范围内布置三个锚节点的未知节点定位

接着将锚节点的个数增加到 3 个, 这次将定位区域设为  $240\text{ m} \times 5\text{ m}$ , 锚节点的坐标分别为  $(0,0)$ ,  $(120,2.5)$  和  $(240,5)$ 。之所以这样进行布置锚节点, 是基于理论分析和多次实验基础上, 得出狭长

空间沿同一水平布置, 没有沿斜线布置更适合无线信号的传输。

在这种锚节点布置情况下, 通过测量得到未知节点的实际位置和通过式 (7) 由实验得到的接收节点的信号强度计算的估计位置分布如图 5 所示。

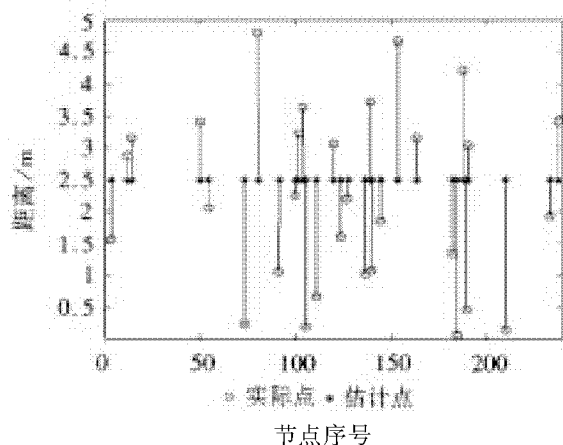


图5 三个锚节点的未知节点实际位置和估计位置分布

每个未知节点的实际位置与计算估计位置之间的误差如图 6 所示。

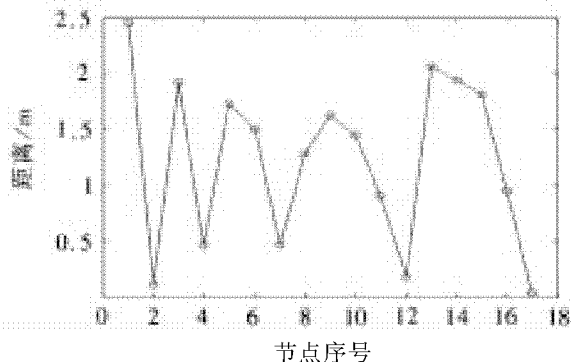


图6 三个锚节点的每个未知节点的误差

这种情况下, 未知节点的平均定位误差为  $1.2279\text{ m}$ 。

## 2.3 200 m 范围内 11 个锚节点的定位

为了反映狭长空间的真实情况, 在  $1200\text{ m} \times 5\text{ m}$  的矩形区域, 11 个锚节点位置已知, 锚节点矩阵如下: Beacon =  $[0, 120, 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960, 1080, 1200; 0, 2.5, 5, 2.5, 0, 2.5, 5, 2.5, 0, 2.5, 5]$ ; 其中第一行为锚节点的横坐标, 第二行为其的纵坐标。锚节点的这种布置策略, 其定位精度远高于其他布置策略。

此实验环境下, 未知节点的实际位置和估计位置的分布如图 7 所示。

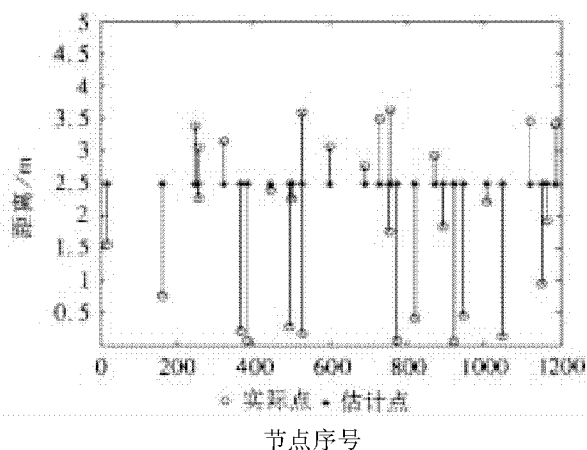


图7 11个锚节点的未知节点实际位置和估计位置分布

其每个未知节点的实际位置与计算估计位置之间的误差如图8所示。

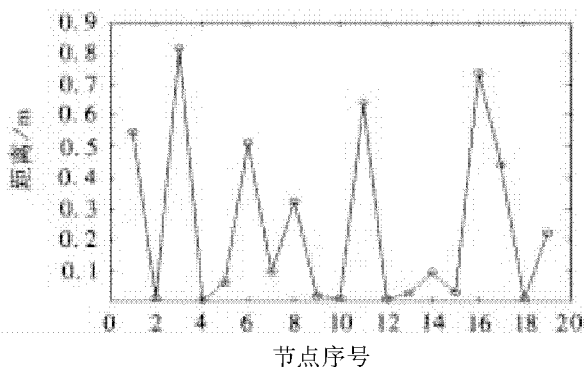


图8 11个锚节点的每个未知节点的误差

在1200m范围布置11个锚节点情况下,未知节点的平均定位误差为0.2412m。

### 3 不同锚节点布置的定位分析

与一般开阔空间的定位不同,对于狭长空间,由于其宽度和高度均有限,一般不超过几m,因此,对其宽度和高度的定位意义不大,实际中主要关注的是长度范围的定位。因此仅对水平距离也就是横坐标定位进行了分析。

三种定位的误差均小于1.4m。第一种情况,由于只使用了两个锚节点来对未知节点定位,因而定位精度较低;第二种情况,增加了120m距离,又增加了一个锚节点。在距离较近的两个锚节点进行定位定向后,还有一个锚节点的计算值对其定位进行修正,因而定位精度得到了提高,误差有所降低;第三种情况,在1200m的狭长空间中均匀布置了11个锚节点,同样在距离较近的两个锚节点进

行定位定向后,在信号接收范围内一般还有两个锚节点的计算值对其定位进行修正,因而定位精度得到了很大提高,只有零点几米的误差。此种情况更符合实际狭长空间锚节点分布和未知节点定位情况,因而具有更大的应用价值。

### 4 结束语

无线感知定位技术在很多领域得到广泛应用,由于狭长空间的特殊性,一般方法难以在此应用。通过理论分析与实验、仿真,本文给出了应用于狭长空间的无线感知节点定位算法。基于此算法,通过反复实验、比较,给出了一种较优的适用于狭长空间的锚节点布置策略。实验表明:该算法及其锚节点布置策略在狭长空间应用中具有很好的定位精度,可广泛应用于煤矿巷道等狭长空间的人员、设备等定位中。

### 参考文献:

- [1] JINGZHAO LI, YU ZHANG, DONGSHENG ZHOU. Design and Application of A New IOT Reader [C]// The 2ND International Conference on Information Engineering and Computer Science, 2010: 1 944 - 1 947.
- [2] JINGZHAO LI, QIAN LIU. Application and Research of ZigBee Technology in the Miner's Lamp Monitoring [C]// 2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering. EI Accession number: 20110313595574, 317 - 320.
- [3] TOMASZ CISZKOWSKI, IGOR DUNAJEWSKI, ZBIGNIEW KOTULSKI. Reputation as optimality measure in Wireless Sensor Network - based monitoring systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2011, 26 (1): 67 - 75.
- [4] 付华, 胡雅馨. 一种改进的无线传感器网络信息融合技术[J]. 计算机系统应用, 2010, 19 (7): 183 - 186.
- [5] DI WU, LICHUN BAO, RENFA LI. A holistic approach to wireless sensor network routing in underground tunnel environments [J]. Computer Communications, 2010, 33 (13): 1 566 - 1 573.

(责任编辑:李 丽,范 君)

# 一种新型煤炭产量监测系统的设计

陈辉<sup>1,2</sup>, 田子建<sup>2</sup>, 李敬兆<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学计算机科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了能够有效监测煤炭生产企业的煤炭产量, 依据煤炭产量远程监测系统的需求, 设计出基于 C/S 和 B/S 混合结构的软件架构。结合煤炭产量远程监控系统的功能需求, 划分出具体的功能模块并设计完成了符合煤炭行业标准《MT1082-2008 煤炭产量远程监测系统通用技术要求》和《MT1080-2008 煤炭产量远程监测系统使用与管理规范》的新型煤炭产量监测主站和电子皮带秤。系统可实现对出煤井口皮带输煤量的计量、统计、上报与监管等功能, 能够从源头上防止了瞒报产量数据的违规行为, 有利于上级煤管部门对各煤矿企业监督管理。

**关键词:** 煤炭产量; 监测系统; 电子皮带秤; 主站; 控制器局域网

**中图分类号:** TP274.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0010-04

## Design of a Novel Coal Output Monitoring System

CHEN Hui<sup>1,2</sup>, TIAN Zi-jian<sup>2</sup>, LI Jing-zhao<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, 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:** In order to effectively monitor coal output of coal enterprises, the software architectures with C/S and B/S are design based on the requirements of coal output remote monitoring system. According to functional requirements of the system, the monitoring master station and electronic belt scales are designed, which comply with the coal industry standards - MT1082-2008 and MT 1080-2008. This system can implement the measurement, statistics, reporting and monitoring of the output of the coal mine. Hence, it can effectively prevent the coal enterprises from hiding the real output intentionally, and help the superior departments to supervise and manage the coal enterprises.

**Key words:** coal output; monitoring system; electronic belt scale; master station; CAN

煤炭是我国的主要能源, 在我国的能源需求结构中占主导地位。煤炭生产的安全问题是我国采煤业几十年发展过程中长期伴随的问题。许多煤炭生产企业只顾追求企业利益, 不遵守国家相关的法律法规、行业规定以及操作规程, 不顾井下工人的安危, 偷采、盗采、超能力生产现象严重, 将安全生产的观念抛在脑后, 从而导致了許多煤矿事故的

发生<sup>[1]</sup>。煤矿产量的信息采集是我国的工矿企业和各级政府的一项重要工作, 而我国比较传统的信息采集方式是通过手工报表、电话报表或发送 E-mail 等方式。即使是煤炭产量计量系统也只是纯粹的计量煤炭产量, 仅仅是为企业服务, 不具备监督和控制功能, 很难保证其数据的真实性。产量计量不准确, 税务部门就很难掌握其真实生产情况。

收稿日期: 2012-10-11

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(61170060); 安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2012A077); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802900008)

作者简介: 陈辉(1973-), 男, 安徽庐江人, 副教授, 博士, 从事计算机监控与通信、嵌入式系统、矿井电磁兼容等方面的教学与研究工作。

为了有效监测煤炭产量,保证我国煤矿企业的生产安全和国家税收,科学开发、利用和保护煤炭资源,促进煤炭工业的可持续发展,煤炭产量监测系统便应运而生<sup>[2]</sup>。

## 1 煤炭产量监测系统总体设计

本设计要求能够解决各个煤矿企业产量精确

计量和数据汇总统计的问题,具有产量数据测量精度高、数据传输率高、数据传输误码率低、传输距离远、施工简便、软件操作简单和数据库表内容统一等特点。系统的整体设计方案可划分为硬件系统设计和软件系统设计,系统结构图如图1所示。

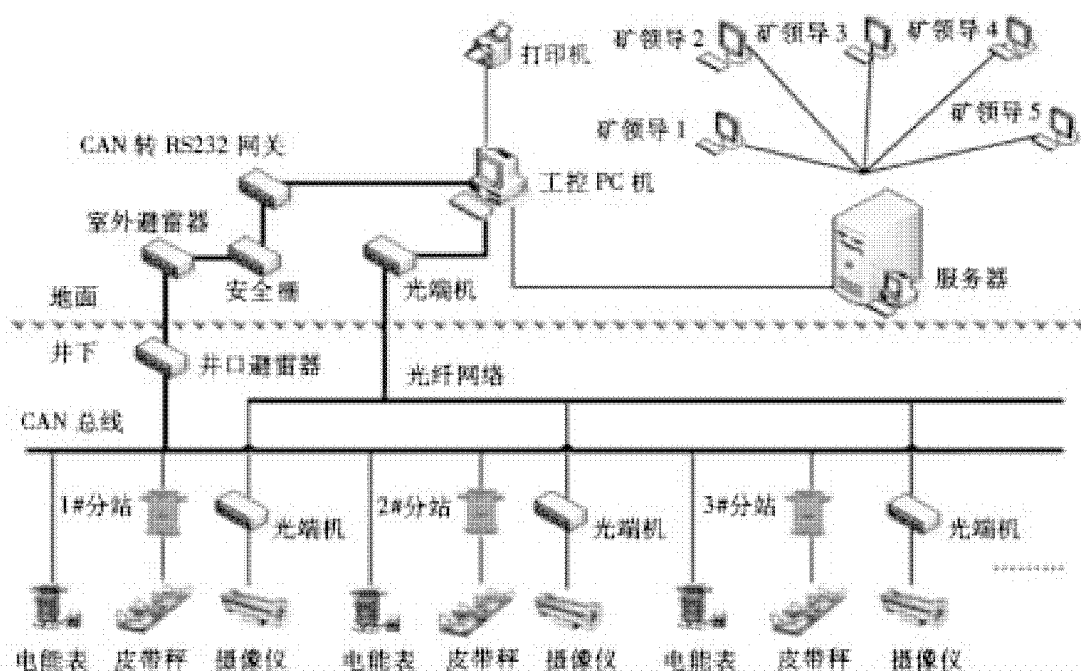


图1 煤炭产量监测系统结构图

硬件系统主要包括工控PC机、普通PC机、打印机、局域网服务器、电子皮带秤、矿用电能表、矿用摄像仪、CAN转RS232网关、光端机、本安电源、矿用隔爆兼本安型中继器、矿用一般兼本安型安全栅、避雷器等。井下有两个数据来源:一路是CAN总线网络中设备的数据,主要是各个井口的电能表和电子皮带秤数据,井下的CAN总线电缆通过井口处和室外两个避雷器串联到矿用一般兼本安型安全栅(用以将井下的本安信号与地面的非本安信号隔离开)中,再通过一个CAN转RS232网关,将CAN协议的报文转换为RS232协议的报文,最后通过串行接口与工控PC机相连;另外一路是井下的摄像仪视频数据,考虑到视频数据需要带宽大,所以在井下采用光纤网络传输,但摄像仪是电信号,这就需要在摄像仪和光纤网络之间增加一个光端机,将电信号转换成光信号,在到达地面控制室后,再使用一个光端机,将光信号转换为电信号,连接到工控PC机的视频采集卡,从而实现把视频

信号传输至工控PC机。在以上两种数据中,CAN总线采用的是总线型网络拓扑结构,而光纤网络采用的是星型网络拓扑结构。

软件部分可分为主站端软件和管理中心端软件,两套软件运行于不同的平台之上,通过内部局域网将两个平台互联,使用TCP/IP协议实现报文的通信。主站端软件完成产量监测的主要工作,管理中心端软件的主要作用是上级主管单位提供可视化界面,实时了解各生产企业的生产情况。本文重点介绍主站端软件的设计开发。

## 2 煤炭产量监测主站设计

煤炭产量监测主站软件分为三个模块:主线程模块、公共区模块和数据采集模块。主线程模块包括登录、初始化引导配置、用户管理、查询、打印、报表、柱状图、设备管理和报警等模块;公共区模块包括全矿信息结构体、数据库和设备信息链表等内容;数据采集模块包括采集配置、数据采集、数据处

理、时产量入库和异常信息入库等内容<sup>[3]</sup>。

主站软件主线程模块中各功能模块划分为(1)登录模块:访问数据库查询登录信息是否正确,用户是否有权限访问系统;(2)初始化引导配置模块:初始化全矿信息结构体和设备信息链表,并将设备信息存入数据库;(3)用户管理模块:对数据库中的用户表操作,完成用户信息的添加、删除和修改等功能;(4)查询、报表、打印、柱状图模块:到数据库取出用户所需数据并显示或者打印相关信息;(5)设备管理模块:与数据库中设备信息和设备信息链表交互信息;(6)报警模块:接收数据采集线程的报警消息弹出窗口并播放报警声音;(7)采集配置模块:由设备信息链表配置采集信息;(8)数据采集模块:分为两个模块,一是根据采集配置对电子皮带秤和电能表设备进行数据采集,第二个是对视频设备数据采集;(9)数据处理模块:对采集到的报文进行数据处理,获得有用信息,同时将产量和异常信息存入数据库,在需要主线程异常报警情况下,发送消息通知主线程报警。

### 3 电子皮带秤的设计

电子皮带秤是能够检测皮带输煤机上输送煤流累计重量的动态计量装置。当原煤在称重传感器上通过时,原煤的重量通过皮带与称重托辊作用于波纹管式称重传感器上,测量出单位重量信号,同时经交流接触器常开触点产生皮带的开停信号,并将两个信号输入电子皮带秤中加以运算而得到瞬时输煤量。对瞬时输煤量进行积分累计,获得累计输煤量。再经 CAN 总线电缆、避雷器、CAN 总线与 RS232 数据转换接口送到地面工控机的主站端软件中。在电子皮带秤的 LCD 显示器上可实时监测瞬时输煤量、累计输煤量、皮带速度和皮带秤的当前工作状况等信息,采集信息可存储汇总,并随时查询日、月、年及总累计量。电子皮带秤通过检测相关信号,由式(1)~(3)进行运算得到皮带输送机上的煤流重量。

$$F_1 = K(U_1 - U_0) \quad (1)$$

$$F = F_1 \cdot L \quad (2)$$

$$P = \sum F \cdot dt \quad (3)$$

式中: $F_1$ 为负载,kg/m; $U_1$ 为称重传感器瞬时信号,mA; $U_0$ 为零点信号,mA; $K$ 为量程,kg/(m·mA); $F$ 为流量,kg/s; $L$ 为皮带速度,m/s; $P$ 为累计量,kg。

电子皮带秤硬件系统设计采用微处理器 dsPIC30F6014a 作为核心芯片,其最小系统主要由晶振电路、复位电路、供电电路和编程电路组成。电子皮带秤通信采用 CAN 总线方式,具有数据传输灵活方便、可靠性高等特点。

### 4 电子皮带秤的测试与检验

系统的测试在实验室进行,受测试条件限制,本测试限于两台电子皮带秤与移动 PC 通信测试,测试环境如图 2 所示。两台电子皮带秤挂载在 CAN 总线上,CAN 总线与移动 PC 之间经过了 CAN 转 RS232 和 RS232 转 USB 两个网关,最终通过 USB 接口连接电脑。

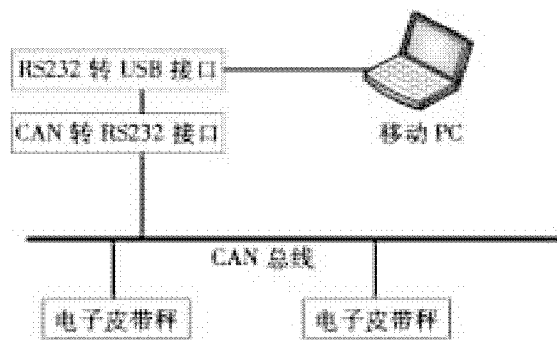


图 2 电子皮带秤 CAN 通信测试环境

为单独测试电子皮带秤与电脑之间的通信,使用 VB6.0 开发了一个电子皮带秤 CAN 通信测试软件<sup>[4-5]</sup>,其界面如图 3 所示。在测试时,将电子皮带秤地址设置为 1,在电子皮带秤 CAN 通信测试软件中将所要采集的电子皮带秤地址写为 1,按下采集数据的按钮,软件发送采集指令“01H 02H 00H 00H 00H 00H 00H 03H”。皮带秤接收到采集指令后返回一条 91 个字节的报文,报文中的流量、累计量和皮带速度等数据在软件左侧显示,报文全文在软件右侧显示。

本次测试进行了 30 min,共采集了 50 组数据,即移动 PC 向电子皮带秤发送了 50 次采集指令,共 400 个字节,25 次对地址为 1 的电子皮带秤发送,另 25 次对地址为 2 的电子皮带秤发送,两台电子皮带秤接收到采集指令后分别向移动 PC 返回了 25 条数据,共 4 550 个字节。两台电子皮带秤接收到全部的 50 条指令,无误码;移动 PC 接收到了全部 50 条返回数据,无误码。测试结果表明系统工作可靠。





图3 上位机软件数据接收截图

## 5 结论

煤炭产量监测系统是一个较为复杂的系统,需要符合相关的技术要求,本文综合运用了计算机技术、电子技术和 CAN 总线技术,设计了一种新型的符合《MT1082-2008 煤炭产量远程监测系统通用技术要求》的稳定性高、兼容性强、数据传输率高、

传输距离远、成本低、操作简便的煤炭产量监测系统。该系统可广泛应用于我国的各煤矿生产企业,防止企业超能力生产和保障国家税收。

### 参考文献:

- [1] 孙继平. 煤矿安全生产理念研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 313-316.
- [2] 孙继平. 煤炭产量远程监测方法[J]. 煤矿安全, 2009(S1): 113-115.
- [3] 孙继平. 中华人民共和国煤炭行业标准 MT 1082-2008: 煤炭产量远程监测系统通用技术要求[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 8-90.
- [4] 赵建周, 韩庆妙. 用 Visual Basic 实现 PC 机与单片机之间的串行通信[J]. 安阳大学学报, 2003(1): 38-40.
- [5] 李朝青. PC 机及单片机数据通信技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000: 10-200.

(责任编辑: 李丽, 范君)

## 专著中的析出文献著录格式

析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标志]. 析出文献其他责任者//专著主要责任者. 专著题名: 其他题名信息. 版本项. 出版地: 出版者, 出版年: 析出文献的页码[引用日期]. 获取和访问路径.

示例:

- [1] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策[M]//许厚译, 赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32-36.
- [2] 陈晋镛, 张惠民, 朱士兴, 等. 蓟县震旦界研究[M]//中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980: 56-114.
- [3] 白书农. 植物开花研究[M]//李承森. 植物科学

进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.

- [4] 马克思. 关于《工资、价格和利润》的报告札记[M]//马克思, 恩格斯. 马克思恩格斯全集: 第 44 卷. 北京: 人民出版社, 1982: 505.
- [5] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用: 中国运筹学会第五届大会论文集. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996: 468-471.
- [6] WEINSTEIN L, SWERTZ M N. Pathogenic properties of invading microorganism[M]//SODEMAN W A, Jr., SODEMAN W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.

摘自《文后参考文献著录规则(GB/T7714-2005)》

# 含瓦斯煤体机械振动增透的应力机制初探

李建楼<sup>1,2</sup>, 严家平<sup>3</sup>

(1. 宿州学院地球科学与工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 安徽省煤矿勘探工程技术研究中心, 安徽 宿州 234000;  
3. 安徽理工大学测绘学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 基于我国大部分煤层渗透率低、煤层瓦斯抽采效率低的现状, 对增加煤体渗透能力的多种技术进行了应力机制分析; 分析表明, 采用的多种技术的共同特点是降低煤体的有效应力, 从而提高煤体的孔隙和裂隙发育程度, 提高煤体的渗透能力。在理论分析和实验研究的基础上提出了声频振动波增透煤体的新思路, 对防治煤矿瓦斯灾害和提高煤层气抽采率具有重要的参考价值。

**关键词:** 瓦斯; 渗透率; 声波

**中图分类号:** TD712      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0014-04

## Preliminary Research of Stress Mechanism of Increased Permeability of Coal Body Containing Gas by Mechanical Vibration

LI Jian-lou<sup>1,2</sup>, YAN Jia-ping<sup>3</sup>

(1. Suzhou University, Suzhou Anhui 234000, China; 2. Coal mine Exploration Engineering Center of Anhui province, Suzhou Anhui 234000, China; 3. School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Aiming at the current status of low permeability of coal body and low efficiency of coal gas extraction in China, techniques of coal body permeability increase were analyzed in terms of stress mechanism. The results showed that the common feature of the techniques is to decrease the effective stress of coal body, and then to increase development degree of porosity and cracks in coal body, and to improve permeability of coal body at last. Based on theoretical analysis and experimental study, a new idea of using mechanical vibration of sound waves to increase permeability of coal body was brought forward. It has important reference value to prevention of gas disaster and improvement of CBM exploitation efficiency.

**Key words:** gas; permeability; sound wave

中国目前的能源结构仍以煤炭为主, 煤炭分别占一次能源生产和消费总量的 77% 和 70%。即使考虑技术进步和节能工艺的推广应用, 全国煤炭消费总量仍将呈现增长态势, 到 2020 年国内煤炭消费需求总量将超过 25 亿 t。然而, 随着煤层开采深度的增加和开采速度的加快, 煤矿安全事故时有发生, 尤其是煤矿瓦斯灾害严重。煤矿瓦斯灾害给国

家和人民的生命财产安全带来巨大威胁, 煤矿瓦斯灾害防治始终关系到煤矿的安全高效生产。

煤矿瓦斯事故的发生与煤田地质条件密切相关。我国大部分煤田构造煤发育, 原生孔隙和割理系统遭到破坏, 后经长期的地应力和地温共同作用下重新压实固结, 构造运动活动期产生的大量裂隙闭合, 煤层透气性降低, 造成瓦斯抽采困难。因此,

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972105); 安徽省高校自然科学研究资助项目(KJ2011B181); 宿州学院教授(博士)科研启动基金资助项目(2011jb05)

作者简介: 李建楼(1973-), 男, 安徽宿州人, 讲师, 博士, 从事煤地质与瓦斯地质方面的研究。

解决煤层透气性的问题是瓦斯地质灾害防治和煤层气开采的关键。

目前我国采用的煤层增透技术主要包括开采解放层、水力压裂和深孔松动爆破,其它的增透技术仍处于试验研究阶段。

## 1 煤体增透技术应力机制

### 1.1 开采解放层提高渗透率的增透技术

煤矿开采煤层时,首先开采解放层,使被解放层煤体得到卸压,煤体渗透性提高,从而促进瓦斯解吸。文献[1]针对低透气性、高吸附性、高瓦斯煤层群的安全高效开采技术难题,以淮南矿区为主要试验基地,研究了卸压开采采场内岩层移动及应力场分布规律、裂隙场演化及分布规律、卸压瓦斯运移规律等科学规律。现场资料表明,煤层开采后,周围的煤岩层向采空区移动,采空区下方岩体向采空区膨胀开裂成裂隙,使得采空下方煤岩体应力释放产生位移、透气性增加、瓦斯压力减小,煤体中瓦斯解吸。利用煤层群多层开采后对底板煤岩层产生重复卸压膨胀增透效应。

该技术理论依据在实验室中也得到了验证,煤层瓦斯的渗透率与煤层压力呈负相关关系,且按指数规律变化;随着煤体固体骨架有效应力的降低,固体骨架发生显著变形,通气的有效裂隙和孔隙张开度增大,渗透率显著增大<sup>[2-5]</sup>。

开采解放层是最经济的方法,在一定程度上增加了被解放层的渗透性,两煤层之间的间距越大,其增透效应越为缓慢,在时效上可能满足不了煤矿高效生产的要求。

### 1.2 水力压裂增透技术

水力压裂技术是国内外煤层气井增产的主要手段,美国14 000余口煤层气井中90%以上的煤层通过水力压裂改造获得商业化产量;中国20余年的煤层气勘探开发实践中,几乎所有产气量1 000 m<sup>3</sup>/d以上的煤层气井均经过压裂改造<sup>[6]</sup>。

新集煤层气开发试验区采用水力压裂技术进行增透,获得了单井最大日产气量3 278 m<sup>3</sup>/d<sup>[7]</sup>。一些煤矿为防治煤与瓦斯突出,采用了水力压裂技术增加含瓦斯煤体的渗透能力,在低透气性突出煤层中起到了明显的增透、消突、降尘作用。

新义矿西区首采工作面采用了水力冲孔卸压增透措施,结果使瓦斯抽放率达到50%以上,煤层

透气系数扩大了近10倍<sup>[8]</sup>。义安矿某工作面采用水力压裂后,抽放浓度达到压裂前的19倍多,且压裂后多个孔的总平均浓度是压裂前的总平均浓度的5倍<sup>[9]</sup>。贵州省水城县晋家冲煤矿采用高压水射流技术进行了增透试验,煤层瓦斯含量得到了降低<sup>[10]</sup>。四川某煤矿松软煤层进行了高压脉冲水射流增透试验,大大提高了瓦斯抽采率<sup>[11]</sup>。

文献[12]建立了煤层气井水力压裂压力曲线分析模型,研究了有效应力影响下渗透率和孔隙度的变化对动态滤失系数的影响,结果表明:综合滤失系数随有效应力的减少而呈指数形式增加。

然而水力压裂煤层气开采法具有双重作用,一方面增加了煤层的渗透性,便于瓦斯由吸附态转为游离态沿着渗流通道被采出;另一方面由于高压水对煤层瓦斯的封堵作用,使得游离态转为吸附态,并且渗流通道被水“封闭”,不利于瓦斯的采出,且已有的工业试验证实注水后会降低煤层瓦斯的解吸率,对瓦斯的抽采产生负面的影响<sup>[13-16]</sup>。

### 1.3 深孔松动爆破增透技术

深孔松动爆破增透技术利用煤层瓦斯压力、炸药爆炸产生的能量及控制孔的导向和补偿作用,使煤体在预定的几个方向形成能量和应力集中,使煤体原有裂隙得以扩展并产生新的裂隙,释放煤体应力和瓦斯压力。

爆破后,炮眼周围煤体破裂、松动形成卸压圈,工作面前方集中应力带向煤体深部移动,消除了煤体结构不均匀性,降低了能量梯度,从而达到治理煤层瓦斯突出的目的;同时,炮孔附近煤体瓦斯的排放及迁移进一步降低了煤体的应力水平,使得瓦斯的排放成为一个由近区到远区的连续过程,煤层透气性系数大大增加,提高了煤层瓦斯抽放效率<sup>[17-20]</sup>。

深孔松动爆破技术不仅适用于煤巷掘进,也可用在回采工作面<sup>[21]</sup>。

### 1.4 超声波增透技术

声震法提高煤层气抽采率的思想提出于二十世纪九十年代后期<sup>[22]</sup>,并在实验室采用超声波增加煤体渗透性、促进瓦斯解吸方面取得了创新性的理论成果。

试验研究表明,功率超声影响煤岩裂隙发育、发展、应力状态的改变以及煤岩力学性能,煤岩在功率超声振动作用下抗压强度、弹性模量具有降低

趋势<sup>[23]</sup>。超声波能够增加煤的孔隙体积,提高煤层的渗透率;其主要作用机理有机械作用、激波作用、定向作用、热效应、空化作用,使煤体产生微裂隙,改变煤体的孔隙结构,降低甲烷气体的粘度<sup>[24]</sup>。超声波机械振动和热效应的综合作用降低了煤体有效应力,提高了煤体的渗透性,促进了瓦斯解吸和放散,且渗透率与平均有效应力呈负指数关系<sup>[25-26]</sup>。

分析认为,超声波增透的力学机制是降低煤体有效应力,增加煤体裂隙,从而提高煤体的渗透能力。然而,超声波是高频机械波,在煤体这种低频黏弹性介质中传播时,传播距离短,振动能量损失大,在实际应用时存在很大的局限性。

## 2 声频机械振动增透技术

综合前述的煤体增透技术认为,裂隙的发育特征是决定煤体渗透性能的内在因素,煤体的裂隙发育特征在应力场改变时产生相应的变化,通过改变煤体所在的应力场环境,有望改善煤体的渗透性能。顺此思路,声频机械振动增透煤体的试验研究得到开展。

声波频率(20~20000 Hz)的机械振动增透技术与理论研究是一个新型的研究课题,它借鉴了地面低频振动采油技术<sup>[27-29]</sup>和超声波振动增透方面的研究成果。通过对煤体施加一定频率周期性应力波,记录振动过程中有效应力变化特征和测量煤体渗透速度大小等一系列过程,探讨了有效应力和渗透速度之间的关系。试验表明,声波振动可以降低煤体有效应力、增加煤体渗透率,促进了瓦斯的解吸和放散<sup>[30-32]</sup>。声频机械振动采用的试验装置如图1所示。

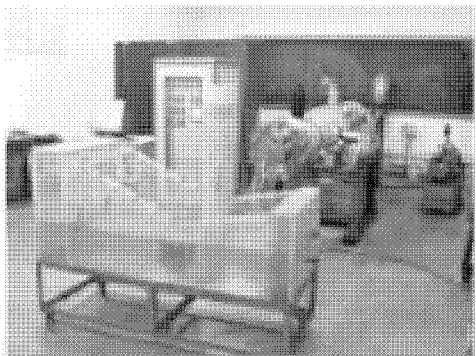


图1 实验装置

试验采用的声频振动参数主要包括频率、振幅以及振动持续时间,不同的振动条件对煤体产生不

同的增透效果,从而产生不同的瓦斯解吸和放散效果。振动频率与煤体固有频率一致时,煤体可能发生“共振”,煤体将可能产生最佳的增透效果;声波传播过程中,能量发生衰减,频率越高,衰减越快,传播距离越短,不同频率振动对煤层增透的空间范围不同。高振幅的振动使质点产生相对大的位移,能产生更强的振动效应。不同的振动持续时间,煤体裂隙发育的程度也可能不同。

煤矿大量微振监测、瓦斯监测和现场调查也表明,冲击地压伴随着瓦斯的异常涌出<sup>[33]</sup>,这为声频机械振动增透技术理论提供了现实案例。

声频机械振动增透技术的优势是作用时间长度可人为控制,在周期性动荷载作用下,煤体不断产生疲劳损伤,煤体裂隙持续发育,大大增加了煤体渗透率。

利用声频机械振动增加煤体渗透能力、促进瓦斯解吸与放散的研究目前仍局限于实验室内研究,工业性试验研究刚刚起步。该基础试验研究对于煤矿井下开展声频振动波场增加煤体渗透能力的工业性试验具有先导意义,对于提高瓦斯抽采效率、减少煤矿瓦斯灾害、保障煤矿安全高效开采具有重要的现实意义。

## 3 结语

综合分析前述多种煤层增透技术认为,其共同的力学机制是通过降低煤体的有效应力,提高煤体的孔隙和裂隙发育程度,实现煤体渗透能力的提高。另外,随着煤体增透技术理论研究的不断深入,煤体增透技术的应用将可能由单一技术应用过渡到多种技术的综合应用,煤层瓦斯抽采效率将不断提高。

### 参考文献:

- [1] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8.
- [2] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(S1): 1801-1804.
- [3] 彭守建, 许江, 陶云奇, 等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 303-307.
- [4] 范家文, 冯增朝. 瓦斯解吸过程中煤体有效应力规律的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(4): 397-399.
- [5] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸

- 渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 563 - 1 568.
- [6] 李安, 启姜海, 陈彩虹. 我国煤层气井水力压裂的实践及煤层裂缝模型选择分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 91 - 93.
- [7] 宋生印, 韩宝山. 新集煤层气开发试验井水力压裂增产改造[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(1): 27 - 30.
- [8] 李家彪, 刘明举, 赵发军. 水力冲孔在新义矿瓦斯抽放中的应用[J]. 煤炭工程, 2011, 2(7): 36 - 38.
- [9] 王念红, 任培良. 单一低透气性煤层水力压裂技术增透效果考察分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(2): 109 - 112.
- [10] 杨凯, 李绍泉, 吴桂义. 高压水射流技术在低透气性松软煤层瓦斯抽放中的实验研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30(6): 110 - 112.
- [11] 刘勇, 卢义玉, 李晓红, 等. 高压脉冲水射流顶底板钻孔提高煤层瓦斯抽采率的应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1 115 - 1 119.
- [12] 徐刚, 彭苏萍, 邓绪彪. 煤层气井水力压裂压力曲线分析模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 173 - 178.
- [13] 吴晓东, 席长丰, 王国强. 煤层气井复杂水力压裂缝裂模型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 124 - 126.
- [14] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 547 - 555.
- [15] 郭红玉, 苏现波. 煤层注水抑制瓦斯涌出机理研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 928 - 931.
- [16] 杜春志, 茅献彪, 卜万奎. 水力压裂时煤层缝裂的扩展分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 231 - 234.
- [17] 吴新华. 深孔松动爆破技术在防治瓦斯煤层突出中的应用[J]. 煤矿开采, 2007, 12(2): 76 - 77.
- [18] 方昌才. 突出煤层深孔预裂控制松动爆破防突技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(2): 21 - 23.
- [19] 陈浩. 深孔松动预裂爆破增透技术在边抽边掘进工作面的应用[J]. 煤炭技术, 2008, 27(7): 92 - 94.
- [20] 李建新, 林柏泉, 李国旗, 等. 深孔松动控制爆破卸压增透理论与实践[J]. 煤矿安全, 2010, 41(11): 52 - 54.
- [21] 王佰顺, 戴广龙, 童云飞, 等. 深孔松动爆破提高瓦斯抽放率的应用研究[J]. 煤矿安全, 2002, 33(11): 5 - 7.
- [22] 姜永东, 鲜学福, 易俊, 等. 声震法促进煤中甲烷气解吸规律的实验及机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 675 - 680.
- [23] 任伟杰, 袁旭东, 潘一山. 功率超声对煤岩力学性质影响的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(6): 773 - 776.
- [24] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 功率声波影响煤层甲烷储运的初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 23 - 26.
- [25] 姜永东, 鲜学福, 刘占芳. 声震法提高煤储层渗透率的实验与机理[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(S): 236 - 239.
- [26] 徐龙君, 鲜学福. 煤层气赋存状态及提高煤层气采收率的研究[J]. 中国煤层气, 2005, 2(3): 19 - 22.
- [27] 邵长金, 罗荣章, 孙仁远, 等. 利用物理场提高原油产量的基础应用[J]. 石油学报, 1997, 18(3): 63 - 69.
- [28] 徐英娜, 赵贵金, 孙爱军, 等. 自振采油技术的理论分析与应用[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3): 58 - 61.
- [29] 王江, 王恒贵, 汪海龙. 振动采油机理及影响因素研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 49 - 50.
- [30] 李建楼, 严家平. 声波作用下煤层瓦斯解吸效应物理实验装置[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 54 - 57.
- [31] 严家平, 李建楼. 声波作用对煤层瓦斯渗透性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S): 81 - 85.
- [32] 李建楼, 严家平, 王来斌, 等. 煤体瓦斯在声波场作用下的放散特征研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 264 - 267.
- [33] 李铁, 蔡美峰, 王金安, 等. 深部开采冲击地压与瓦斯的相关性探讨[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 562 - 567.

(责任编辑: 何学华, 范 君)

# 强度应力比在软质岩围岩分类中的应用

刘 通<sup>1,2</sup>, 赵 维<sup>3</sup>

(1. 四川金广实业(集团)股份有限公司, 四川 广汉 618300; 2. 云南盛天投资有限公司, 云南 曲靖 655700; 3. 重庆建工集团工程总承包分公司, 重庆 400013)

**摘 要:**结合某水电站地下厂房工程实例,通过现场地质调查,分析厂房区挤压性围岩大变形破坏机理,定性的阐述强度应力比与围岩变形状态对应关系。参考类似隧道的经验把这一关系数量化,在此基础上,对水电围岩分类 HC 法的强度应力比降级进行修正,并运用它对地下厂房的软岩大变形程度进行预测。

**关键词:**挤压性围岩;变形破坏机理;强度应力比;围岩分类

**中图分类号:**TD311 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0018-05

## Application of Stress – intensity Ratio in Soft Surrounding Rock Classification

LIU Tong<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei<sup>3</sup>

(1. Sichuan Jinguang Industrial (Group) Co., Ltd., Guanghan Sichuan 618300, China; 2. Yunnan Shengtian Investment Co., Ltd., Qujing Yunnan 655700, China; 3. EPC Branch, Chongqing Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400013, China)

**Abstract:** Based on a practical project of the underground powerhouse in a hydropower station, the essential deformation and destruction characteristics of squeezing ground were analyzed according to on – site investigation in geological features, and the stress intensity ratio and the corresponding relationship between the ground deformation were described qualitatively. Reference to the experience of similar tunnels to quantify this relationship, On the basis, for water and electricity intensity of rock classification HC Act to amend stress ratio degradation, and use it to predict the large deformation of soft – rock of the underground powerhouse.

**Key words:** squeezing ground; mechanism of deformation and destruction; stress – intensity ratio; rock classification

隧道(隧洞)作为地下洞室的重要组成部分,随着地下空间的开发利用和工程技术的不断提高完善,隧道规模由原先的数量少、长度短、小断面、浅埋深,逐渐向“多、长、大、深”发展<sup>[1]</sup>,成洞对象由选择硬质岩岩体到相对较软的软质岩。高地应力作用下的软弱围岩挤压大变形现象变得越来越突出,成为类似岩爆、坍塌的主要围岩变形破坏类型。分析挤压性围岩大变形破坏过程,合理的评价

地应力对围岩稳定性影响对隧道围岩的正确分类有重要的意义。

围岩分类方法多采用强度应力比来描述应力对围岩稳定性的影响,如水电围岩分类 HC 法、以围岩强度应力比为限定判据,来控制各类围岩的变形破坏特性; $Q$  系统引用  $\sigma_c/\sigma_1$ 、 $\sigma_\theta/\sigma_c$  判别应力折减系数的大小。本文结合某水电站厂房平硐实例,结合理论计算,并参考以往类似隧道经验,分析了挤压性

收稿日期:2002-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50874124;10772205)

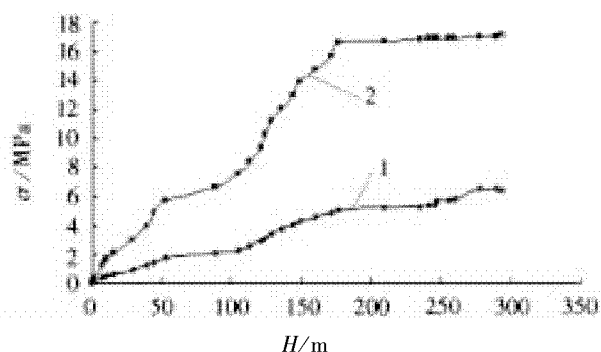
作者简介:刘通(1989-),男,四川广安人,学士,助理工程师,主要从事矿山安全生产方面的研究与管理工。

围岩隧道大变形的变形破坏过程,提出了强度应力比与大变形分级间对应关系,修正围岩分类方法中应力因素项,并对厂房可能变形程度进行预测。

## 1 某水电站工程概况

某水电站为混合式开发,总装机容量约 1 100 MW。地下厂房拟定位于小金河入河口右岸,厂房底板高程约 1 824.5 m,顶拱高程 1 880 m,上覆岩体厚度为 271 ~ 291 m。

厂房探硐 CPD1 位于其下游侧,长 293 m,最大埋深 233 m。通过应力测试,厂区地应力场是区域构造应力场与自重应力场叠加的结果(见图 1),且以区域构造应力为主。244 m 硐深处最大主应力约为 17 MPa,具中等偏高地应力量级。岩性主要为石榴二云片岩,饱和抗压强度 16 ~ 24 MPa,按岩质类型划分表,围岩岩体属于较软岩。厂区具有岩性软,地应力高的特点。



1. 自重应力;2. 最大主应力

图1 自重应力、最大主应力与硐深分布关系

根据野外现场调查,CPD1 平硐 0 ~ 6 m 硐段围岩稳定性较差,混凝土衬砌;6 ~ 293 m 硐段开挖后未进行支护,经历两年多时间,围岩仍可保持基本稳定,仅局部有掉块。参照文献[2]中的水电围岩工程地质分类和文献[3]中的岩体分级可知,CPD1 平硐 0 ~ 6 m 硐段围岩类别为Ⅳ类围岩,6 ~ 293 m 硐段围岩类别为Ⅱ ~ Ⅲ类围岩。

但根据 HC 法(水力发电围岩工程地质分类)对该平硐进行围岩分类,围岩强度应力比( $S$ )多小于 2 (见图 2),大部分硐段Ⅲ围岩要产生大变形,类别降一级,围岩类别以Ⅳ类为主,可利用程度低,导致厂房结构设计非常困难,分类方法的  $S$  限定条件安全裕度过高。如何更精准的表述强度应力比与围岩大变形程度之间的对应关系,对 HC 法在软岩围岩分类中的应用具有重要的意义。

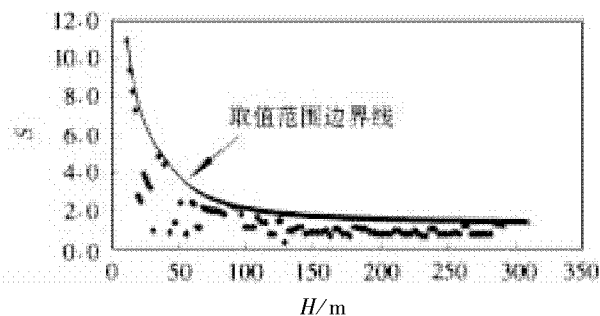


图2 强度应力比  $S$  与硐深分布关系

## 2 挤压性围岩大变形破坏特征、机理

二云(英)片岩中含有片状云母矿物,粘土矿物含量不显著,为挤出性岩石,在地下水不发育或轻度发育时,岩石膨胀性很小,围岩大变形机制主要为围岩挤出<sup>[4]</sup>。由于片岩岩体结构主要受片理面控制,在高应力作用下,岩体容易弯折,发生弯曲型围岩挤出。厂区地应力场是以区域构造应力为主,故围岩的挤出主要受构造应力作用,表现出一定方向性,一般洞室两帮破坏尤其明显。

根据现场地质调查,受构造应力和自重应力作用限制,CPD1 平硐围岩变形程度属于轻微挤压大变形,表现为硐壁岩体沿片理面轻微片状向外剥落(见图 3)。从现场看,对于基本岩体质量为Ⅱ的围岩需降一级,但对于Ⅲ的围岩不需降级。

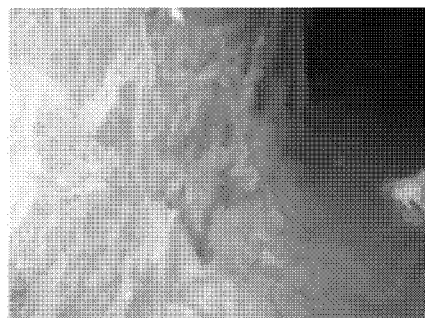


图3 硐壁岩体沿片理面轻微片状向外剥落

对该处围岩洞壁垂直钻孔岩心取样发现,岩体完整程度从洞壁的较破碎到深部的较完整~完整,完整程度呈渐变过程。这与理论上研究是一致的<sup>[5]23</sup>。洞室开挖后,洞壁岩体应力状态发生改变,产生应力集中,岩体向临空方向变形并发生破坏,一般由外向内形成 4 个区域(见图 4):Ⅰ松动区、Ⅰ~Ⅱ塑性区、Ⅲ~Ⅳ弹性区、Ⅳ原岩应力区。当围岩进入塑性状态时,切向应力的最大值从洞壁周边转移到弹、塑区的交界处。随着往岩体内部延伸,围岩应力逐渐恢复到原岩应力状态。在塑性区

内,由于塑性区的出现,切向应力从弹塑性区的交界处向洞室周边逐渐降低,松动区内应力和强度都有明显的下降,裂隙扩展,产生新的微裂隙,出现了明显的塑性滑移。整个过程是围岩通过自身的变形调整所处应力状态,趋于稳定的历程。Ⅱ~Ⅲ区起主要的承载作用,Ⅰ区在变形趋于收敛的情况下,为Ⅱ区提供三向的围岩应力状态,最终协调自适用稳定。

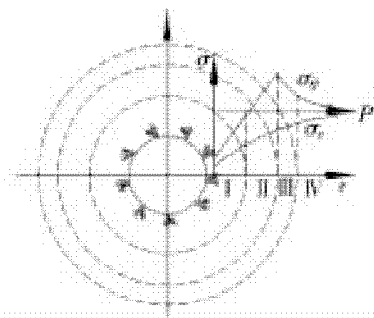


图4 塑性区围岩应力分布状态

对于硬质岩,岩石主要以弹性变形为主,塑性变形很短;围岩洞壁切向应力达到岩体弹性极限时,围岩开始屈服破裂,由于硬质岩变形能力很差,形成很小的围岩塑性区和松动区,围岩通过自身的变形调整所处应力状态能力相对较差,承载区主要为弹性区,一般采用岩石单轴抗压强度与最大主应力比值来描述硬质围岩塑性变形的开始。而对于软质岩,以塑性变形为主;围岩洞壁切向应力达到岩体弹性极限时,围岩产生屈服变形,微裂隙扩展,当达到长期强度时,该变形变得显著,岩体应力状态随强度的降低而降低,围岩能够通过自身变形来大幅度调整自身应力状态。但在高地应力状态下,由于调整后的洞壁围岩变形过大,强度降低导致其长期强度始终低于切向应力,松动区围岩产生累进破坏,而不能给承载区提供很好的三向应力状态,导致承载区向内转移,最终围岩产生大变形破坏。

继续沿用岩石单轴抗压强度与最大主应力比值来描述软质围岩塑性变形的开始就显得不合理。首先,洞壁围岩切向应力达到岩体长期强度就可以产生明显的塑性变形,而不用达到峰值强度;其次,即使岩体产生塑性变形,围岩也可以通过位移使应力状态调整。故找到围岩洞壁累进性破坏的强度应力比描述,以及可能产生某一变形程度的强度应力比描述(即对强度应力比与围岩大变形程度之间的对应关系的描述)使之与现场评价一致,对水电围岩分类HC法在挤压性围岩稳定性评判中应

用有重要意义。

### 3 强度应力比判据的建立及其应用

理论上,不同侧压系数 $\lambda$ 圆形洞室弹性阶段巷道周边应力理论解<sup>[5]64</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \tau_{r\theta} = 0 \\ \sigma_\theta = P_0 [(1 + \lambda) + 2(1 - \lambda) \cos 2\theta] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$ 为径向应力; $\tau_{r\theta}$ 为剪应力; $\sigma_\theta$ 为切向应力; $P_0$ 为最大外加应力,这里指外加垂直应力。

令 $\lambda = 1$ ,则 $\sigma_\theta = 2P_0$ ,当 $R/\sigma_\theta < 1$ ,即 $R/P_0 < 2$ 时,围岩将产生塑性破坏, $R$ 为岩体强度。

对于硬质岩岩体强度 $R$ ,取岩石的单轴抗压强度 $R_c$ ,工程上考虑到结构面和地下水的影响,一般取饱水岩体单轴抗压强度 $K_v \cdot R_b$ , $P_0$ 取研究区段最大主应力 $\sigma_1$ 。有

$$\frac{K_v \cdot R_b}{\sigma_1} < 2 \quad (2)$$

情况下,硬质围岩产生塑性破坏。

但对于软质岩,岩体在达到长期强度时就会产生显著的塑性变形。软弱岩石的长期强度和单轴抗压强度比可以达到0.4~0.8,浸水后变得更低。选用单轴抗压强度就过于保守,建议岩体强度 $R$ 宜选取软岩的长期强度,设 $K$ 为长期强度与峰值强度的比值,则有 $R = K_v \cdot K \cdot R_b$ 。式(2)化简成水电围岩分类HC法强度应力比的形式,就有

$$\frac{K_v \cdot R_b}{\sigma_1} < \frac{2}{K} \quad (3)$$

情况下,软质岩产生塑性破坏。当 $K$ 取0.5,则 $K_v \cdot R_b/\sigma_1 < 4$ ,这与水电围岩分类HC分类强度应力比 $S$ 的Ⅰ、Ⅱ类围岩限定条件是一致的。水电围岩分类HC法对软质岩、硬质岩统一采用该限定判据,具有较高的安全裕度。但随着工程进行大量的实验,地质资料的丰富,可以取更合理的 $K$ 值。对于研究区段的二云片岩,这里 $K$ 取0.6,则 $K_v \cdot R_b/\sigma_1 < 3.3$ 时,地下厂房围岩可能产生显著塑性变形。

由于Ⅱ类围岩基本稳定,不会产生塑性变形,上述式(3)可以作为其限定判据。

围岩在弹性变形的基础上发展成塑性变形,巷道周边岩体会屈服形成塑性区,围岩的峰值应力也会由原来在洞壁转移到深部,围岩应力进一步调整,以形成新的平衡,当洞壁的变形趋于收敛,围岩将保持稳定,否则围岩将产生累进性大变形。



塑性区  $r = R_0$ , 巷道周边应力<sup>[5]108</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_{rp} = 0 \\ \tau_{r\theta p} = 0 \\ \sigma_{\theta p} = \frac{2R_c}{\varepsilon - 1} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $R_c$  为岩石的单向抗压强度, MPa;  $\varepsilon = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ,  $\varphi$  为岩石内摩擦角; 下标  $p$  为塑性区中的应力。

把  $\varepsilon = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$  带入式(4), 并化简得

$$\frac{R_c}{\sigma_{\theta p}} = \frac{\varepsilon - 1}{2} = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

式(5)是一个递增函数, 随着内摩擦角  $\varphi$  的减小,  $R_c / \sigma_{\theta p}$  减小。当内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$  时,  $R_c / \sigma_{\theta p} = 1$ , 故内摩擦降低至小于  $30^\circ$  时, 岩体将产生累进破坏, 不容易收敛。同时, 可以看出洞壁的稳定性主要取决于变形后的岩体力学参数, 与初始应力状态无直接关系。

但如前面的塑性区围岩应力分布状态所揭示的那样, 应力状态、岩体变形程度、岩体强度三者互相作用, 又互相影响: 应力调整导致围岩变形, 围岩变形导致岩体强度降低, 根据式(5)可以看出, 岩体强度降低导致应力进一步调整。洞壁的的稳定状况、变形程度以及其岩体强度都与围岩的应力状态有重要的联系。描述应力和位移的理论方法很多, 但同时考虑强度折减的尚没有较成熟的理论。本文主要结合类似隧道的经验<sup>[6~8]</sup>, 以隧道工程地质特征为基础, 给出岩体大变形及累进破坏时, 岩体变形程度与强度应力比的关系(见表1)。

表1 软岩变形与强度应力比分级标准

变形程度	无挤压	轻微	中等	严重	极严重
围岩应变/%	<1	1~2.5	2.5~5	5~10	>10
强度应力比	>1.15	1.15~0.45	0.45~0.25	0.25~0.15	<0.15

#### 4 强度应力比在工程中的应用

工程上强度应力比主要用在围岩类别的修正上, 根据工程需要, 依据水电围岩工程地质分类中围岩类别的变形限定, 对其做如下修改:

$$S = \frac{K_v \cdot R_b}{\sigma_1}$$

式中:  $K_v$  为岩体完整性系数;  $R_b$  为岩石饱和单轴抗压强度, MPa;  $\sigma_1$  为围岩的最大主应力, MPa。

Ⅱ类:  $S > 3.3$ ; Ⅲ1 围岩:  $1.15 < S < 3.3$ ; Ⅲ2 围

岩:  $0.45 < S < 1.15$ ; Ⅳ1 围岩:  $0.25 < S < 0.45$ ; Ⅳ2 围岩:  $0.15 < S < 0.25$ ; V 类围岩:  $S < 0.15$ <sup>[2]</sup>, 当其强度应力比小于规定时, 围岩类别宜相应降低到其强度应力比对应的围岩类别。

参照图2可知, 平硐强度应力比多在  $1.15 < S < 3.3$  范围内, 少部分在  $0.45 < S < 1.15$  范围内, 平硐围岩为无挤压~轻微挤压变形, 这与野外实际调查的片状剥落现象是相吻合的。

利用其对厂房围岩进行预测。厂房位于 CPD1 平硐末端偏向坡内, 最大主应力约 20 MPa, 根据平硐 290 m 硐深微新岩体饱和抗压强度  $R_b$  约为 23.4 MPa, 岩体完整性系数 0.8。可知, 厂房围岩强度应力比为  $R_b \cdot K_v / \sigma_1 \approx 23.4 \cdot 0.8 / 20 = 0.94$ , 对应围岩类别为Ⅲ2 类, 岩体处于轻微挤压变形状态。

上述只根据 CPD1 平硐末端微新岩体考虑围岩可能挤压状态, 当岩体完整性较差时, 岩体仍可能发生较大的变形。同时这里主要基于近均质软岩进行讨论, 由于片岩的片理面是弱面, 且厂房跨度较大, 始终有一墙壁与片理面相交角度较小, 容易产生更大的变形破坏。综上, 厂房应基于围岩可能产生中等挤压大变形进行设计。

#### 5 小结

1) 地下厂房岩性主要为二云片岩, 受片理面控制, 在地应力作用下, 围岩可能表现出弯曲型围岩大变形挤出, 目前从 CPD1 平硐看, 围岩产生轻微挤压变形, 表现为片状剥落。

2) 在高地应力下, 挤压性围岩随着开挖进行, 初始应力状态产生调整, 并自外向内形成四个变形区, 其中Ⅰ~Ⅱ塑性区相对硬质岩要大的多, 围岩能够通过自身变形来大幅度调整其应力状态。

3) 应力调整导致围岩变形, 围岩变形导致岩体强度降低, 岩体强度降低导致应力进一步调整, 三者互相作用, 又互相影响。本文只是从经验角度给出对应关系, 从理论上给出合理模型, 将是一个重要探索方向。

4) 通过理论分析, 引入长期强度到判据中, 结合类似隧道的经验, 对水电围岩分类 HC 法的强度应力比降级进行修正, 可以更好的评价挤压性围岩的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 王广德, 石豫川, 刘汉超, 等. 水利水电地下洞室围岩分类[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 123-127.

- [2] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. GB50287 - 2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [3] 国家技术监督局,中华人民共和国建设部. GB50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社,1994.
- [4] 徐则民,黄润秋. 深埋特长隧道及其施工地质灾害[M]. 成都:西南交通大学出版社,2000:5.
- [5] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004: 23, 64, 108.
- [6] 刘志春,朱永全,李文江,等. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(5):690 - 697.
- [7] 喻渝. 挤压性围岩支护大变形的机理及判定方法[J]. 世界隧道,1998(1):81 - 83.
- [8] AYDAN O, AKAGI T, KAWAMOTO T. The Squeezing potential of rocks around tunnels: Theory and Prediction [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993(26):137 - 163.

(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人,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,本刊还是《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,本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)天津市河西區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 SA - GSO 的小波加权多模盲均衡算法

高 敏<sup>1,2</sup>, 郭业才<sup>2,3</sup>

(1. 淮南职业技术学院信息与电气工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 南京信息工程大学电子与信息学院, 江苏 南京 210044)

**摘 要:**为解决传统多模盲均衡算法(MMA)在均衡高阶 QAM 信号时存在的收敛速度慢、稳态误差大等问题,提出了一种基于模拟退火萤火虫优化的小波加权多模盲均衡算法(SA - GSO - WT - WMMA)。该算法在 MMA 的基础上增加了加权项,并引入了模拟退火萤火虫优化(SA - GSO)算法和正交小波变换(WT),利用加权项自适应地调整算法中代价函数的模值,利用 SA - GSO 算法极强的全局寻优能力来优化均衡器的初始权向量,利用正交小波变换降低信号的自相关性,有效提高了均衡效果。水声信道仿真实验表明,该算法在降低稳态均方误差和加速收敛速度两方面表现卓越。

**关键词:**盲均衡;水声通信;正交小波变换;人工萤火虫群;模拟退火;加权多模

**中图分类号:** TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2012) 04 - 0023 - 07

## An Orthogonal Wavelet Transform Weighted Multi - Modulus Blind Equalization Algorithm Based on SA - GSO

GAO Min<sup>1,2</sup>, GUO Ye - cai<sup>2,3</sup>

(1. Department of Information and Electronic Engineering, Huainan Vocational and Technical College, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3. College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** When MMA (Multi - modulus Algorithm) is used to equalize high - order QAM, it has many disadvantages, such as slow convergence rate, large mean square error, and so on. In order to overcome the problems, an orthogonal wavelet transform weighted multi - modulus blind equalization algorithm based on simulated annealing optimization glowworm swarm algorithm (SA - GSO - WT - MMA) was proposed. In the proposed algorithm, the weighted item was increased to the traditional multi - modulus blind equalization algorithm (MMA), and the simulated annealing glowworm swarm optimization algorithm and the wavelet transform were also introduced in. The proposed algorithm can adjust the modulus value of the cost function value by using the weighted item, it can optimize the initial weight vector of the equalizer by using the strong global optimization ability of SA - GSO, and reduce the signal autocorrelation by using the de - correlation ability of WT. The results from computer simulation show that the proposed algorithm was excellence in improving the convergence rate and reducing the steady - state error.

收稿日期: 2012 - 10 - 26

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助(200753); 安徽省高等学校自然科学基金(KJ2010A096); 安徽高校省级科研项目(KJ2011B162); 江苏省“六大人才高峰”培养资助项目(2008026)资助课题; 淮南职业技术学院院级科研项目(HKJ10 - 3)

作者简介: 高敏(1981 -), 女, 安徽蚌埠人, 讲师, 在读硕士, 研究方向: 智能信息处理与通信系统。

**Key words:** blind equalization; underwater acoustic communication; orthogonal wavelet transform; artificial glowworm swarm; simulated annealing; weighted multi-modulus

目前,水声通信是人们普遍接受的水下通信方式,水声信道中的多径传播、高背景噪声等因素会使信号在传输过程中产生严重的码间干扰<sup>[1-5]</sup>(Inter-symbol Interference, ISI),通信质量无法得到保证。为解决这一问题,各种均衡技术应运而生。盲均衡技术不需要像传统的均衡技术那样通过发送序列来调整均衡滤波器的参数,仅通过接收信号本身的高阶统计信息就能实现均衡器参数的实时调整,不仅保证了通信质量,还提高了通信效率<sup>[1]</sup>。高阶 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 调制是现代通信的重要手段,但调制阶数的提高会减小信号星座点间的距离和相位差,相同条件下,系统产生的符号间干扰就会增加,增大了盲均衡的难度,如何提高这类信号的盲均衡性能成为这一领域的研究热点<sup>[2]</sup>。文献[3]中的常模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)简单易实现、稳定性强,但无法克服受到干扰的信号在解调后存在的相位旋转问题;文献[4]中提到的多模盲均衡算法(Multi-Modulus Blind Equalization Algorithm, MMA),将接收信号的实部和虚部分开均衡,有效克服了相位旋转问题,但仍存在收敛速度慢,稳态误差大等问题;文献[5]中提出的改进多模盲均衡算法(Triple M Algorithm, TMA),引入两个先验常数重新构造了算法的代价函数,并将星座匹配误差函数(Constellation Matched Error, CME)与代价函数相结合,形成一种瞬时双模切换的混合算法,但收敛速度仍较慢;文献[6]中提出的基于多模软判决引导盲均衡算法仅对星座图有 45° 旋转的 QAM 信号效果较好,不适合其他形状星座图的信号,且软判决需要在大量的区域判决,引入的指数运算也大大增加了计算的复杂度;文献[7]将正交小波变换引入 MMA,降低了信噪比,只能一定程度上提高均衡效果;文献[8]提出的加权多模算法(Weighted Multi-Modulus Algorithm, WMMA)利用判决符号的指数幂构成加权项,可以自适应调制模值,能有效降低模型误差,但在获取算法非凸性代价函数的全局最优解时,仍沿用了梯度下降的思想,无法克服算法易陷入局部极值的问题,难以进一步提高均衡效果。

萤火虫群优化算法<sup>[9]</sup>(Glowworm Swarm Optimization, GSO)具有良好的全局随机搜索能力,但局部搜索能力不够强,结合具有极强局部搜索能力的模拟退火优化算法(Simulated Annealing, SA),可提高算法全局和局部意义下的搜索能力。

为提高盲均衡器的性能,将模拟退火萤火虫群优化算法(Simulated Annealing Optimization Glowworm Swarm Algorithm, SA-GSO)和正交小波变换(Wavelet Transform, WT)融入 WMMA 中,提出了基于模拟退火萤火虫群优化的正交小波加权多模盲均衡算法(An Orthogonal Wavelet Transform Weighted Multi-modulus Blind Equalization Algorithm Based on Simulated Annealing Optimization Glowworm Swarm Algorithm, SA-GSO-WT-WMMA),用 SA-GSO 算法来寻找 WMMA 代价函数的全局最优解,优化均衡器的初始权向量,用小波变换来降低信号的自相关性。水声仿真实验证明,SA-GSO-WT-WMMA 不仅大大降低了均衡器的稳态均方误差,收敛速度也明显加快。

## 1 模拟退火萤火虫群优化算法

### 1.1 GSO 算法

GSO 算法<sup>[10]</sup>不要求目标函数可微可导,也不依赖于目标函数的梯度信息和全局信息,是一种具有较强鲁棒性的无记忆的全局随机搜索方案,能获得非凸性函数的全局最优解或近似全局最优解。

GSO 算法的基本思路是:将目标函数的最优解作为萤火虫群搜索空间中的“食物源”,在搜索空间中随机分配每只萤火虫的位置,萤火虫离“食物源”越近,该萤火虫的适应度函数值相应地就越大(这里的适应度函数与待优化的目标函数之间有确定的函数关系),意味着它所携带的荧光素就越多,发出的光芒就越明亮,吸引其他萤火虫向它靠拢的能力就越强。在整个寻找“食物源”的迭代过程中,每只萤火虫不断调整自身的位置,更新荧光素值、移动概率、邻域,逐步逼近“食物源”,最终获得全局最优解或近似全局最优解。

GSO 算法的实现步骤基本如下:

第一阶段:初始化及寻优目标的确定。

在  $n$  维搜索空间中,创建种群规模为  $D$  的萤火虫群,初始化算法中的所有相关参数,令每只萤火虫的初始荧光素值都为  $l_i(0) = l_0$ ,初始动态决策范围都为  $R_i(0) = R_0$ ,初始位置  $W_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}]$  在  $[0, 1]$  范围内随机分配,其中  $0 < i \leq D$ 。萤火虫群的寻优目标就是寻找搜索空间中“食物源”的位置,这个位置对应着目标函数的全局最优解。假设目标函数与适应度函数  $F$  一致,则“食物源”位置  $W^*$  满足下式:

$$F(W^*) = \max F(W) \quad (1)$$

式中:  $W$  为萤火虫的位置向量;  $W^*$  为最大适应度值对应的萤火虫位置,即“食物源”位置。

第二阶段:萤火虫的移动阶段。

1) 荧光素值的更新。萤火虫所在位置与“食物源”的距离决定了它的荧光素值,在未开始搜索时,假设每只萤火虫的荧光素值是相同的,一旦萤火虫被随机分配了位置后,每只萤火虫与“食物源”的距离就不一样了,荧光素值也就不再一样了。荧光素值的更新公式为

$$l_i(t) = (1 - \rho)l_i(t-1) + \beta F(W_i(t)) \quad (2)$$

式中:  $t$  为算法的迭代次数;  $l_i(t)$  为第  $i$  只萤火虫的荧光素值;  $\rho \in (0, 1)$  为控制参数;  $\beta$  为适应度函数值的评价参数;  $W_i(t)$  为第  $i$  只萤火虫在第  $t$  次迭代中的位置;  $F(W_i(t))$  为该位置对应的函数适应度值。

2) 萤火虫的运动。萤火虫算法的寻优过程中就是萤火虫向着荧光素值高的位置以一定的规律运动的过程。萤火虫会将其邻域内荧光素值最高的同伴位置作为它的移动目标,并按一定规律向目标移动。每只萤火虫都有自己的邻域,所谓邻域就是其动态决策范围内所有的荧光素值比它高的同伴的集合。

邻域确定公式为

$$N_i(t) = \{j: \|W_j(t) - W_i(t)\| < R_i(t); l_i(t) < l_j(t)\} \quad (3)$$

路径概率选择公式为

$$p_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{q \in N_i(t)} l_q(t) - l_i(t)} \quad (4)$$

位置更新公式为

$$W_i(t+1) = W_i(t) + e * \left[ \frac{W_j(t) - W_i(t)}{\|W_j(t) - W_i(t)\|} \right] \quad (5)$$

动态决策域更新公式为

$$R_i(t+1) = \min \{R_s, \max \{0, R_i + \gamma(n_i - |N_i(t)|)\}\} \quad (6)$$

式中:  $N_i(t)$  为第  $t$  次迭代过程中第  $i$  只萤火虫的邻域;  $\|\cdot\|$  为范数;  $R_i(t)$  为第  $i$  只萤火虫的动态决策域;  $p_{ij}(t)$  为第  $i$  只萤火虫向邻域中第  $j$  只同伴移动的概率,  $j \in N_i(t)$ ;  $e$  为萤火虫的移动步长;  $W_i(t+1)$  为萤火虫  $i$  移动后的位置;  $W_j(t)$  为萤火虫  $i$  所选择的移动目标(该方向是根据轮盘赌选择法选出的),若邻域为空,则保持原有位置,不移动;  $\gamma$  为邻域变化率。

萤火虫的动态决策域在迭代寻优过程是自适应调整的,萤火虫每完成一次运动,会将其邻域内邻居的个数  $|N_i(t)|$  与邻居阈值  $n_i$  进行比较,并根据比较结果调整自身的动态决策范围 ( $0 < R_i(t) \leq R_s$ ,  $R_s$  为萤火虫的感知范围),将自身的邻居个数始终控制在合理范围内。

第三阶段:确定全局最优解。

萤火虫位置更新后,适应度值随之变化。重新计算每只萤火虫的适应度值,并将当前最优适应度值和  $F(W^*)$  进行比较。若当前最优适应度值大于  $F(W^*)$ ,则用当前最优位置和最优适应度值更新  $W^*$  和  $F(W^*)$ 。判断迭代次数是否已经达到,若达到,算法的寻优过程结束,输出最优位置  $W^*$  及最优适应度值  $F(W^*)$ ;若未达到,  $t = t + 1$ , 转至第二阶段。

## 1.2 SA-GSO 算法

GSO 算法在运行后期,会出现萤火虫在峰值附近振荡徘徊的现象,局部搜索能力不高,搜索到的解精度较低;SA 作为一种启发式随机搜索方法,在捕获最优解的过程中,不仅能接受优化解,还能有限度地接受恶化解,可从概率意义上找到目标函数全局最优或近似全局最优的解,在寻优过程中能有效避免陷入局部最优,具有较强的局部搜索能力,将两种算法有机结合,能提高算法全局和局部意义下的搜索能力。算法实现的流程如图 1 所示。



度,  $L = 2^J$ ;  $k_j = L/2^j - 1$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) 为在尺度  $j$  下小波函数的最大平移;  $\phi_{j,m}(k)$  为小波函数;  $\varphi_{j,m}(k)$  为尺度函数,  $d_{\text{Re},m}$ 、 $d_{\text{Im},m}$ 、 $v_{\text{Re},m}$  和  $v_{\text{Im},m}$  分别为均衡器权系数的实部和虚部。

根据小波变换理论,若设  $\mathbf{Q}$  为正交小波变换矩阵,则经过小波变换后均衡器的输入信号  $\mathbf{R}(k)$  可以表示为

$$\mathbf{R}(k) = \mathbf{R}_{\text{Re}}(k) + i \cdot \mathbf{R}_{\text{Im}}(k) = y_{\text{Re}}(k) \mathbf{Q} + i \cdot y_{\text{Im}}(k) \mathbf{Q} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Re}}(k) = [r_{\text{Re},1,0}(k), r_{\text{Re},1,1}(k), \dots, r_{\text{Re},J,k_J-1}(k), s_{\text{Re},J,0}(k), s_{\text{Re},J,1}(k), \dots, s_{\text{Re},J,k_J-1}(k)]^T \quad (13a)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Im}}(k) = [r_{\text{Im},1,0}(k), r_{\text{Im},1,1}(k), \dots, r_{\text{Im},J,k_J-1}(k), s_{\text{Im},J,0}(k), s_{\text{Im},J,1}(k), \dots, s_{\text{Im},J,k_J-1}(k)]^T \quad (13b)$$

$$r_{\text{Re},m}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} y_{\text{Re}}(k-l) \cdot \phi_{j,m}(l) \quad (14a)$$

$$r_{\text{Im},m}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} y_{\text{Im}}(k-l) \cdot \phi_{j,m}(l) \quad (14b)$$

$$s_{\text{Re},m}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} y_{\text{Re}}(k-l) \cdot \varphi_{j,m}(l) \quad (15a)$$

$$s_{\text{Im},m}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} y_{\text{Im}}(k-l) \cdot \varphi_{j,m}(l) \quad (15b)$$

式中:  $r_{\text{Re},m}(k)$ 、 $r_{\text{Im},m}(k)$ 、 $s_{\text{Re},m}(k)$ 、 $s_{\text{Im},m}(k)$  分别为相应的小波和尺度变换的实部和虚部。均衡器输出为

$$z(k) = z_{\text{Re}}(k) + j \cdot z_{\text{Im}}(k) = \mathbf{f}_{\text{Re}}^T(k) \mathbf{R}_{\text{Re}}(k) + j \cdot \mathbf{f}_{\text{Im}}^T(k) \mathbf{R}_{\text{Im}}(k) \quad (16)$$

WMMA 代价函数为

$$J_{\text{WMMA}} = E \{ (z_{\text{Re}}^2(k) - |\hat{z}_{\text{Re}}(k)|^{\lambda_{\text{Re}}} R_{\lambda_{\text{Re}} \text{WMMA}}^2)^2 + (z_{\text{Im}}^2(k) - |\hat{z}_{\text{Im}}(k)|^{\lambda_{\text{Im}}} R_{\lambda_{\text{Im}} \text{WMMA}}^2) \} \quad (17)$$

式中: 加权因子  $\lambda_{\text{Re}}, \lambda_{\text{Im}} \in [0, 2]$ 。

对方形 QAM 信号星座图,选择  $\lambda = \lambda_{\text{Re}} = \lambda_{\text{Im}}$ ,  $\lambda_{\text{Re}}$  和  $\lambda_{\text{Im}}$  分别是信号实部和虚部的加权因子,仿真实验中  $\lambda$  因子的值是根据仿真实例中经验得到。 $R_{\lambda_{\text{Re}} \text{WMMA}}^2 = E(a_{\text{Re}}^4(k)/E(|a_{\text{Re}}(k)|^{2+\lambda_{\text{Re}}}))$ ,  $R_{\lambda_{\text{Im}} \text{WMMA}}^2 = E(a_{\text{Im}}^4(k)/E(|a_{\text{Im}}(k)|^{2+\lambda_{\text{Im}}}))$ 。 $\hat{z}_{\text{Re}}(k)$  和  $\hat{z}_{\text{Im}}(k)$  分别是判决信号  $\hat{z}(k)$  的实部与虚部。

WT-WMMA 均衡器误差为

$$e_{\text{Re WMMA}}(k) = z_{\text{Re}}(k) (z_{\text{Re}}^2(k) - |\hat{z}_{\text{Re}}(k)|^{\lambda_{\text{Re}}} R_{\lambda_{\text{Re}} \text{WMMA}}^2) \quad (18a)$$

$$e_{\text{Im WMMA}}(k) = z_{\text{Im}}(k) (z_{\text{Im}}^2(k) - |\hat{z}_{\text{Im}}(k)|^{\lambda_{\text{Im}}} R_{\lambda_{\text{Im}} \text{WMMA}}^2) \quad (18b)$$

WT-WMMA 均衡器权向量迭代公式为

$$\mathbf{f}_{\text{Re}}(k+1) = \mathbf{f}_{\text{Re}}(k) - \mu \hat{\mathbf{R}}_{\text{Re}}^{-1}(k) e_{\text{Re WMMA}}(k) \mathbf{R}_{\text{Re}}^*(k) \quad (19a)$$

$$\mathbf{f}_{\text{Im}}(k+1) = \mathbf{f}_{\text{Im}}(k) - \mu \hat{\mathbf{R}}_{\text{Im}}^{-1}(k) e_{\text{Im WMMA}}(k) \mathbf{R}_{\text{Im}}^*(k) \quad (19b)$$

以上,式(10)~式(19b)构成了小波加权多模盲均衡算法(WT-WMMA)的基本思想。

## 2.2 SA-GSO-WT-WMMA

虽然 WMMA 较 MMA,在均衡效果上有了很大改善,但该算法的代价函数仍是多模态的,获取代价函数极值采用的也仍是梯度下降思想,很容易陷入局部极值,影响收敛效果。将 SA-GSO 算法引入 WT-WMMA 中,利用 SA-GSO 算法超强的全局搜索能力来获取 WT-WMMA 中多模态代价函数的极值,能获得代价函数的全局最优或近似最优解,优化了均衡器的初始权向量,提高了均衡性能。

## 2.3 适应度函数的确定

在 WTMMMA 中,代价函数取得最小值时对应的均衡器权向量即为均衡器最佳的初始权向量,而萤火虫优化算法的特点是萤火虫总是向荧光素值高的地方移动,荧光素值越高意味着其适应度值越大,故 WTMMMA 中的代价函数  $J_{\text{WMMA}}$  和萤火虫的适应度函数  $F$  之间的关系为

$$\frac{1}{\min J_{\text{WMMA}}(\mathbf{W})} = \max F(\mathbf{W}) \quad (20)$$

则均衡器的最佳初始权向量  $\mathbf{W}^*$  应满足:

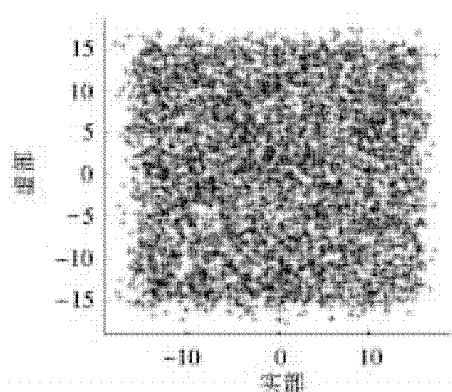
$$F(\mathbf{W}^*) = \frac{1}{J_{\text{WMMA}}(\mathbf{W}^*)} = \frac{1}{\min J_{\text{WMMA}}(\mathbf{W})} = \max F(\mathbf{W}) \quad (21)$$

显然,式(21)将寻找均衡器的最佳初始权向量的问题转化成了寻找最大适应度值所对应的萤火虫位置问题。

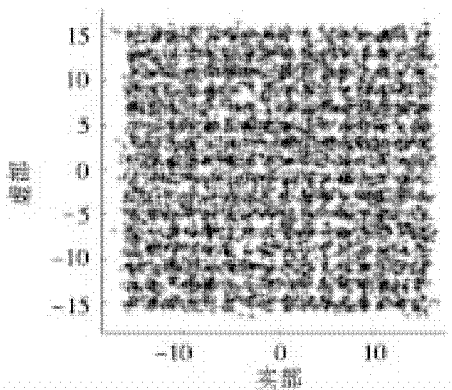
## 3 仿真实验

为了验证 SA-GSO-WT-WMMA 的有效性,

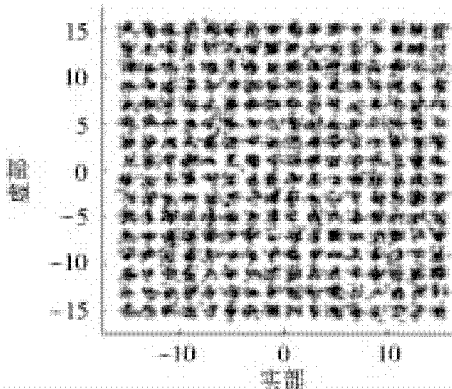
以 WT-MMA、WT-WMMA 算、GSO-WT-WMMA 为比较对象,进行仿真实验。仿真中,混合相位水声信道  $\mathbf{h} = [0.3132, -0.1040, 0.8908, 0.3134]$ , 发射信号为 256QAM 信号, 信号采样点均为 10 000 点, 盲均衡器的权长均为 16, 信噪比均 30dB; 对信道的输入信号采用 DB2 正交小波进行分解, 分解层次是 2 层, 功率初始值设置为 4, 遗忘因子  $\beta = 0.99$ ; 加权因子  $\lambda = 1.2$ , 其步长  $\mu_{\text{WT-MMA}} = 0.000\ 008$ ,  $\mu_{\text{WT-WMMA}} = 0.000\ 05$ ,  $\mu_{\text{GSO-WT-WMMA}} = 0.000\ 005$ ,  $\mu_{\text{SA-GSO-WT-WMMA}} = 0.000\ 004\ 5$ , 400 次蒙特卡诺仿真结果如图 3 所示。



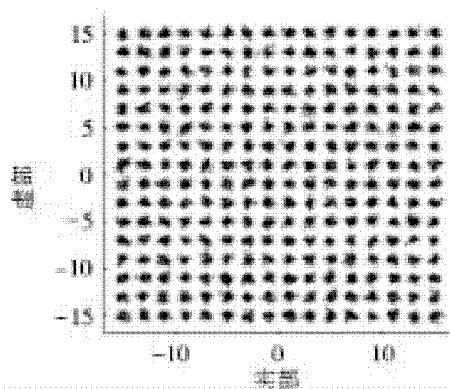
(a) WT-MMA 均方误差输出



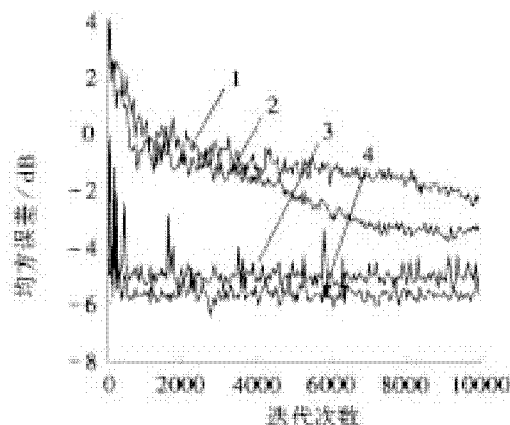
(b) WT-WMMA 均方误差输出



(c) GSO-WT-WMMA 均方误差输出



(d) SA-GSO-WT-WMMA 均方误差输出



1. WT-MMA; 2. WT-WMMA; 3. GSO-WT-WMMA;  
4. SA-GSO-WT-WMMA

(e) 4 种算法的稳态均方误差

图 3 仿真结果

从图 3(e) 中明显看出, SA-GSO-WT-WMMA 的稳态均方误差 (MSE) 比 GSO-WT-WMMA 小近 1dB, 比 WT-WMMA 小近 3dB, 比 WT-MMA 小近 4dB, MSE 得到了有效控制; SA-GSO-WT-WMMA 的收敛速度比 WT-WMMA 和 WT-MMA 明显加快。由图 3a~图 3d 可知, SA-GSO-WT-WMMA 的输出星座图最为清晰、紧凑, 恢复出的传输信号最准确。

## 4 结束语

WMMA 中的加权项在均衡器系数的迭代更新过程中, 能够自适应地改变, 同等条件下均衡效果更好, 结合 WT 降低信号自相关性后, 均衡效果进一步提高。GSO 算法与 SA 有机结合后, 提高了算法的寻优能力, 提高了寻优结果的精度, 用该算法来搜寻 WT-WMMA 中代价函数的全局最优解, 能有效逃离局部极值, 均衡器性能再一次得到提高。从仿真结果中, 能明显看出 SA-GSO-WT-WM-



MA 的卓越性,收敛速度加快的同时稳态均方误差也得到了有效的控制,这点对水声通信的研究有着重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 高成志. 浅海环境下的水声信道辨识技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学. 2011.
- [2] 王彬, 葛临东, 霍亚娟. 适用于高阶 QAM 信号的多模混合盲均衡算法 [J]. 数据采集与处理, 2011, 26 (1): 9 - 14.
- [3] OZEN A, KAYA I, SOYSAL B. Variable step - size constant modulus algorithm employing fuzzy logic controller [J]. Wireless Personal Communications, 2010, 54 (2): 237 - 250.
- [4] SHAFAYAT A, ASOKE K N. Blind Equalization of Square - QAM Signals: A multi - modulus Approach. IEEE Transaction on Communications [J]. 2010, (58) 6: 1 674 - 1 685.
- [5] 阮秀凯, 蒋啸, 李昌. 一种适用于高阶 QAM 系统 Bussgang 类盲均衡新方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34 (8): 2 018 - 2 022.
- [6] 窦高奇, 高俊. 适用于高阶 QAM 系统的多模盲均衡新算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30 (2): 388 - 391.
- [7] 郭业才, 廖娟. 基于模拟退火遗传优化的正交小波盲均衡算法 [J]. 系统与仿真学报, 2011, 23 (8): 1 579 - 1 582.
- [8] 许小东, 戴旭初, 徐佩霞. 适合高阶 QAM 信号的加权多模盲均衡算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29 (6): 1 352 - 1 355.
- [9] K N KRISHNANAND, D GHOSE. Glowworm swarm optimization for simultaneous capture of multiple local optima of multimodal functions [J]. Swarm Intell, 2009 (3): 87 - 124.
- [10] 黄正新, 周永权. 变步长自适应萤火虫群多模态函数优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (8): 43 - 47.
- [11] 于斌, 尹成友, 黄冶. 基于模拟退火算法校正天线阵列方向性误差 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (2): 174 - 177.
- [12] Y D ZBANG, L N WN, Y K HUO, et al. A novel global optimization method - genetic pattern search [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44 (4): 3 240 - 3 244.

(责任编辑: 何兴华, 吴晓红)

# 正交法在冻结井壁砼复合外加剂试验中的应用

宗翔<sup>1</sup>, 徐颖<sup>1</sup>, 李寅珺<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省煤田地质局, 安徽 合肥 230001)

**摘要:**为了使冻结施工井壁混凝土能够在负温条件下凝结与硬化, 并满足其各项性能要求, 采用引气剂+防冻剂+早强减水剂复合的技术路线, 通过正交试验设计复配了适应冻结施工早强流态井壁混凝土的复合外加剂。通过试验分析最终确定各组分掺量之间的最佳配比。复合外加剂的掺量为2.1%, 可起到流态、早强、防冻及抗冻的作用。

**关键词:**外加剂; 冻结施工法; 正交试验; 复合

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0030-04

## Application of Orthogonal Experiment in Compound Admixture of Freezing Mine Shaft Lining Concrete

ZONG Xiang<sup>1</sup>, XU Ying<sup>1</sup>, LI Ying-jun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;

2. Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei Anhui 230001, China)

**Abstract:** In order to achieve the setting and hardening of mine shaft lining concrete under the minus temperature in freezing construction and to meet the demands of every performance of concrete, the technique of compounding air entraining admixture and antifreezing admixture and early strength water reducing admixture was applied in this research. Based on the Orthogonal experimental design, several mix proportions of compound admixture for early strength liquid mine shaft lining concrete were developed in the laboratory. The data collected in this research provide reference for the optimum mix proportion of the adulteration quantity of the concrete admixture. The results show that the 2.1% amount of compound antifreezing admixture achieves favorable effects of liquid, early strength, freezing prevention and antifreezing.

**Key words:** admixture; freezing construction; orthogonal experimental design; compounding method

冻结施工法是煤矿特殊凿井的施工方法之一, 在复杂的软弱含水地层建设地下结构物中冻结施工法是最重要, 也是最安全可靠的施工方法。冻结施工法的特殊性决定着冻结井壁在零摄氏度以下的环境中, 进行井壁混凝土的施工和混凝土硬化, 要求混凝土在低温下具有一定的强度增长率和耐久性, 也即混凝土应具有良好的抗冻、抗渗性能。同时, 现场施工条件和井壁设计要求混凝土具有流态和高强的要求<sup>[1-2]</sup>。

淮南地区刘庄煤矿的井筒施工采用的就是冻结施工法。由于常用的外加剂只具备单一功能, 不能满足现场对外加剂的多种功能的要求, 需要对外加剂进行复配以满足冻结井壁混凝土施工流态、早强、抗冻和抗渗的多种性能要求。

正交试验设计是利用一种规格化的表——正交表来合理地安排试验, 利用数理统计的原理科学地分析试验结果的、处理多因素试验的科学方法。这种方法的优点是: 能够通过代表性很强的少数次

收稿日期: 2012-06-08

基金项目: 安徽省优秀青年人才基金资助项目(2009SQRZ064); 安徽理工大学青年科研基金资助项目

作者简介: 宗翔(1976-), 男, 安徽淮南人, 讲师, 在读博士, 主要从事结构工程和高性能混凝土等方面的教学和研究工作。

试验,搞清各个因素对试验指标的影响情况;同时它又可以通过直观分析方法以及方差分析试验结果,确定出因素的主次顺序,找出较好的生产条件或最优参数组合<sup>[3]</sup>。本文采用正交试验设计方法对引气减水组分、防冻组分、高效减水组分、早强组分来复配,复配的重点是解决防冻、早强、减水、引气组分的合理掺量以及相互之间的相容性。

## 1 复合多功能外加剂的组分

在配制复合外加剂时,必须按照要求选择合适的各个组分,以达到最佳的效果,单一组分达不到要求的效果,必须采用多元复合。按照从早强、减水、抗冻和引气这四个方面加以考虑的原则,本课题选择了效果较好的、复配时相容性较好且本地较易得到的三种外加剂组分进行试验。它们分别为:A引气剂(木钙粉);B防冻剂( $\text{NaNO}_2$ );C早强减水剂(含有 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 的NF高效减水剂)。

A组分是一种阴离子型高分子表面活性剂,具有减水、引气的特点。其适宜掺量应为水泥重量的0.20%~0.30%,当掺量超过4%水泥用量时,混凝土强度就会损失。在与不掺外加剂的混凝土保持相同坍落度的情况下,减水率为8%~15%。在保持相同用水量时,可使坍落度增加6~8cm。A组分能减少混凝土的泌水,对混凝土有一定的缓凝作用;有一定的引气性,可提高混凝土的抗冻性和抗渗性。

B组分是以降低液相中的冰点为目的的一种纯化学物质,它能够有效地降低混凝土中液相的冰点,使得混凝土在负温环境下,仍然能够得到强度的增长。

C组分主要成分为高效减水剂,因其含有 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,故其在具有减水效果的同时还有提高混凝土早期强度的性能。早强减水组分C的适宜掺量为0.5%~1.2%,一般减水率为15%~25%,早期强度显著。掺加0.5%的C组分使混凝土坍落度提高10cm,掺加1%的C组分减水率为10%~25%。若水泥用量相同,坍落度相近,则混凝土3d强度提高50%左右,28d强度提高15%~30%,一年后强度可提高30%左右。混凝土抗渗、抗冻、徐变等耐久性能均有所改善。

## 2 正交设计试验

### 2.1 井壁混凝土的原材料

水泥采用巢湖产42.5级普通硅酸盐水泥,试

验测得的各项性能指标符合标准要求。细集料采用本地河砂,细度模数2.67,属Ⅱ区中砂。粗集料采用九龙岗地区石灰岩碎石,粒径5~25mm,连续级配,压碎指标为8.14。混凝土拌和用水采用本地自来水。外加剂按正交设计的9种试验方案添加。

### 2.2 确定因素和水平

首先对拟采用的外加剂组分进行试验分析,初步组合,并借助相关试验将次要成分的品种、掺量范围固定。

根据冻结井壁施工对混凝土的要求和拟采用的三种外加剂组分试验指标分析,外加剂的组分种类和掺量是影响混凝土性能的主要因素。各个组分的掺量先进行单组分试验后再确定该组分在本试验中的合理用量范围,在比较小的用量范围内选择考察因素的水平进行正交试验设计,将主要的3种外加剂组分按照 $L_9(3^4)$ 设计方案进行混凝土性能试验。正交设计试验的因素与水平如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 因素和水平

水平	因素(掺量/%)		
	A	B	C
1	0.1	0.5	0.2
2	0.2	1.0	0.4
3	0.3	2.0	0.8

### 2.3 试验情况及结果分析

按照文献[5]<sup>5-6</sup>的要求来配料、拌和、浇筑、振捣混凝土,同时控制混凝土入模温度在12℃左右,坍落度(120±10)mm,以 $f_{-3d}^{AT}$ ,  $f_{-7d}^{AT}$ ,  $f_{-28d}^{AT}$ ,  $f_{-28+28d}^{AT}$ ,  $f_{28d}^{CA}$ 作为试验指标,其中 $f_{-3d}^{AT}$ ,  $f_{-7d}^{AT}$ ,  $f_{-28d}^{AT}$ 分别表示受检混凝土在-5℃养护3d,7d,28d后从低温箱中取出,并常温化冻5h后进行抗压试验的实测强度(MPa); $f_{-28+28d}^{AT}$ 为受检混凝土在-5℃养护28d后再转入标准条件下(20±3)℃养护28d的抗压实测强度(MPa); $f_{28d}^{CA}$ 为基准混凝土标准条件下养护28d后的实测强度(MPa);以上上标中,CA表示受检标养混凝土,是指掺有外加剂且标准养护的混凝土;AT表示受检负温混凝土,是指掺有外加剂且在规定负温条件养护的混凝土。

根据正交设计安排得到的试验方案,试验结果和极差分析结果如表2和表3所示。

表 2 试验结果

编号	因素			强度/MPa				
	A	B	C	$f_{-3d}^{AT}$	$f_{-7d}^{AT}$	$f_{-28d}^{AT}$	$f_{-28+28d}^{AT}$	$f_{28d}^{CA}$
1	1	1	1	4.1	9.8	15.2	40.4	45.8
2	1	2	2	6.1	12.4	20.0	43.2	46.5
3	1	3	3	6.4	12.3	19.8	43.1	47.9
4	2	1	2	5.5	11.6	18.2	44.9	49.8
5	2	2	3	7.6	14.9	22.9	47.3	51.8
6	2	3	1	5.9	12.2	19.0	40.6	45.7
7	3	1	3	7.0	14.1	22.4	50.7	54.8
8	3	2	1	6.8	14.7	22.6	46.2	48.6
9	3	3	2	6.4	13.2	20.5	45.8	50.3

表 3 各指标极差分析结果

指标		因素		
		A	B	C
$f_{-3d}^{AT}$	$K_1$	16.6	16.6	16.8
	$K_2$	19.0	20.5	18.0
	$K_3$	20.2	18.7	21.0
	$R$	3.6	3.9	4.2
$f_{-7d}^{AT}$	$K_1$	34.5	35.5	36.7
	$K_2$	38.7	42.0	37.2
	$K_3$	42.0	37.7	41.3
	$R$	7.5	6.5	4.6
$f_{-28d}^{AT}$	$K_1$	55.0	55.8	56.8
	$K_2$	60.1	65.5	58.7
	$K_3$	65.5	59.3	65.1
	$R$	10.5	9.7	8.3
$f_{-28+28d}^{AT}$	$K_1$	126.7	136.0	127.2
	$K_2$	132.8	136.7	133.9
	$K_3$	142.7	129.5	141.1
	$R$	16.0	7.2	13.9
$f_{28d}^{CA}$	$K_1$	140.2	150.4	140.1
	$K_2$	147.3	146.9	146.6
	$K_3$	153.7	143.9	154.5
	$R$	13.5	6.5	14.4

由表3极差分析后可知,对 $f_{-3d}^{AT}$ 和 $f_{28d}^{CA}$ 强度影响最大的因素是C组分掺量;而影响其他指标 $f_{-7d}^{AT}$ 、 $f_{-28d}^{AT}$ 、 $f_{-28+28d}^{AT}$ 的主要因素是A组分掺量。从试验结果来看,优化设计和复合外加剂主要从改善混凝土的结构来提高其抗冻能力,同时适量的抗冻组分能保证混凝土在负温条件下的水化作用,对提高混凝土的抗冻能力也有作用。负温条件下各个强度指标都与A引气减水组分的掺量有较大关系,故要想提高低温混凝土的强度,选择能引入细小、闭合、稳定气泡的引气剂尤为重要。影响标准养护强度指标和负温养护强度指标的因素有所不同。按照冻结并壁施工对混凝土的要求,即混凝土在低温下开始养护,达到一定强度后转入常温养护,其后期强度满足设计要求且具有早强、抗渗等性能。综合上述性能要求,本课题根据以上正交试验以及极差分析结果,确定主次要因素,最终按照 $A_3C_3B_2$ 的复合方案进行优化,复配成SA-H型复合高效外加剂。

### 3 SA-H型复合外加剂检验

将SA-H型复合外加剂按文献[5]<sup>4-8</sup>的要求进行技术性能检验。试验混凝土的配合比参照文献[6]、文献[7]和文献[5]<sup>5-6</sup>来设计后确定。水泥用量为330 kg/m<sup>3</sup>,砂率为38%,单位用水量应使混凝土坍落度达(80±10) mm。外加剂掺量为2.1%水泥用量。

经过试验,测得基准混凝土标准养护28 d强度 $f_{28d}^C = 42.2$  MPa,C表示基准混凝土,是指不掺外加剂且标准养护的混凝土;掺有SA-H型复合外加剂的受检各龄期混凝土强度值如下: $f_{28d}^{CA} = 52.8$  MPa、 $f_{-7d}^{AT} = 15.1$  MPa、 $f_{-7+28d}^{AT} = 47.5$  MPa、 $f_{-7+56d}^{AT} = 51.2$  MPa;文献[5]<sup>6-7</sup>中规定检测的抗压强度比为受检混凝土规定龄期强度与基准混凝土标养28 d的强度之比,即 $R_{28} = \frac{f_{28d}^{CA}}{f_{28d}^C} \times 100$ 、 $R_{-7+28} = \frac{f_{-7+28d}^{AT}}{f_{28d}^C} \times 100$ 、 $R_{-7} = \frac{f_{-7d}^{AT}}{f_{28d}^C} \times 100$ 、 $R_{-7+56} = \frac{f_{-7+56d}^{AT}}{f_{28d}^C} \times 100$ 。

SA-H型复合外加剂的试验结果如表4所示。

表 4 SA-H 型复合外加剂试验结果

试验项目		性能指标						检验情况
		一等品			合格品			
减水率/%		≥8			/			30
泌水率比/%		≤100			≤100			54.7
含气量/%		≥2.5			≥2.5			5.0
凝结时间差/min	初凝	- 120 ~ + 120		- 150 ~ + 150		- 65		
	终凝					- 45		
规定温度/℃		- 5	- 10	- 15	- 5	- 10	- 15	- 10
抗压强度比/ %	$R_{28}$	≥95	≥95	≥90	≥90	≥90	≥85	125
	$R_{-7}$	≥20	≥12	≥10	≥20	≥12	≥10	35
	$R_{-7+28}$	≥95	≥90	≥85	≥95	≥85	≥80	112
	$R_{-7+56}$	≥100			≥100			121
90 天收缩比/%		≤120			≤120			105
抗渗压力比/%		≥100			≥100			≥100

SA-H 型复合外加剂主要通过改善混凝土的内部结构来提高混凝土的抗冻性能,它与单一的抗冻剂相比,具有早期强度高、后期强度损伤小、有较好的耐久性等特点。SA-H 型复合外加剂对改善混凝土拌和物的和易性,提高低温混凝土的早期强度和 提高其抗冻性、抗渗性均具有明显作用。通过系统的试验可以确定 SA-H 型复合外加剂适用于冻结井壁施工的低温高强流态混凝土。

4 结论

采用正交试验法对复合外加剂进行复配试验,先确定影响因素和水平,科学分析测试数据后,得到了可靠的研究结果,减少了试验量,缩短了试验周期,找出了相应性能要求的最优复配方案,降低了试验成本,提高了工作效率。

本试验研制的 SA-H 型复合多功能外加剂由 3 种组分构成,可以满足冻结井壁混凝土早强、防冻、流态的要求,改善了混凝土内部结构,形成了细小、密闭的孔结构,从而阻断了连通混凝土内部毛细管的通道,提高其抗渗性、抗冻性等耐久性,对钢筋无锈蚀作用。在淮南地区刘庄煤矿的井筒施工

的应用中,获得很好的使用效果,且经济性较好。

参考文献:

[1] 姚直书,程桦,杨俊杰.深表土中高强钢筋混凝土井壁力学性能的试验研究[J].煤炭学报,2004,29(2):167-171.

[2] 熊大玉,王小虹.混凝土外加剂[M].北京:化学工业出版社,2002:1-152.

[3] 刘数华,冷发光,罗季英.建筑材料试验研究的数学方法[M].北京:中国建材工业出版社,2006:28-65.

[4] 闵凡飞,朱金波,张明旭.正交法在高泥化煤泥水沉降试验中的应用[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2010,30(4):52-56.

[5] 国家质量监督检验检疫总局.JC 475-2004 混凝土防冻剂[S].北京:中国标准出版社,2004.

[6] 国家质量监督检验检疫总局.GB 8076-2008 混凝土外加剂[S].北京:中国标准出版社,2008.

[7] 中国建筑科学研究院.JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 地面预注浆技术在朱集主井井筒基岩破碎带的应用

韩晓静, 庞建勇, 桑普天

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 淮南矿业集团朱集矿主井在掘进过程中遇到基岩破碎带, 该破碎带在距地表 400 ~ 442 m 的位置。由于破碎带厚度大且含水丰富, 采用地面预注浆加固破碎带岩体, 使用分支孔对注浆孔进行施工; 根据注浆深度、段高的划分、注浆压力等确定注浆量。在地面预注浆施工技术应用后, 朱集矿主井破碎带堵水率达到 99.2%, 起到了很好的加固堵水效果。

**关键词:** 基岩破碎带; 地面预注浆; 注浆压力; 堵水率

**中图分类号:** TD265.47      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0034-04

## Application of Surface Pre-grouting Technology in Base Rock Rupture Zone in Main Shaft of Zhuji Coal Mine

HAN Xiao-jing, PANG Jian-yong, SANG Pu-tian

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

**Abstract:** In process of main shaft excavation of Zhuji Coal Mine, Huainan Mining Group, bedrock fracture zone was encountered, the fracture zone located at the level of 400 ~ 442 m under the surface. Because of the fracture zone with big thickness and enriched water, surface pre-grouting technology was used to consolidate rocks in the fracture zone. Branch holes were used for grouting boreholes. Grouting quantity was determined according to depth of grouting, division of section height, and grouting pressure. After application of the technology, water shutoff rate in rupture zone of main shaft reached at above 99.2%. Reinforcement and water shutoff effect are very good.

**Key words:** basic rock rupture zone; surface pre-grouting; grouting pressure; water shutoff rate

随着矿井开采规模的加强和开采深度不断加深, 在巷道掘进中经常遇到破碎带的岩体, 当岩体发生破碎时, 岩心破碎致使岩层失去坚固性异常松软, 巷道变形较大, 支护困难。而且地下含水层多, 在遇到破碎岩体时, 井内会大量涌水, 严重影响煤矿安全建设和生产。采用地面预注浆技术一方面可以对破碎带的基岩进行加固, 同时又能提高了井筒注浆堵水的效果。

### 1 地面预注浆技术

地面预注浆技术是指当井筒通过较大的裂隙含水层或流砂层时, 在井筒开凿以前, 用钻机沿井筒的周围钻孔, 然后将配好的浆液靠设在地面的注浆泵经过各注浆孔注到地层内的裂隙或孔隙中充填固结, 在未开挖的井筒周围形成不透水的注浆隔水帷幕, 最后再进行井筒开凿。

地面预注浆技术优点有: ① 全部工作均在地面上进行, 工作条件好、效率高、钻进速度快; ② 可

收稿日期: 2012-10-12

基金项目: 安徽省高校省级自然科学基金重点资助项目(KJ2011A099)

作者简介: 韩晓静(1987-), 女, 河南洛阳人, 在读硕士, 研究方向: 结构工程。

以根据裂隙方向布置钻孔,钻孔偏斜影响小,且钻孔、注浆工程量较小;③ 钻孔和注浆工作可在井筒掘进前进行,不影响工程进度,可连续施工;④ 使用生产效率高的大型钻机使注浆孔孔径加大,钻孔可以交叉更多的含水层裂缝,提高充填效果;⑤ 不需修筑止水垫或预留保护岩柱,避免了注浆时止水垫跑浆等复杂情况的发生;⑥ 注浆效果可以从后期注浆孔和检查孔的涌水量直接观察到。地面预注浆堵水主要适用于井筒穿过厚度较大的裂隙含水层,或含水层厚度不大但层数多并与不透水层互层,或多层裂隙含水层,或大的断层构造带加固,一般要求预计涌水量超过  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  时采用地面预注浆。

## 2 工程水文地质概况

淮南矿业集团朱集矿位于安徽省淮南市潘集区境内,该区域地质构造位置属华北板块南缘,东起郯庐断裂带,西至阜阳断层,北接蚌埠隆起,南以老人仓—寿县断层与合肥拗陷相邻。煤田构造形式为近东西向的对冲构造盆地,南北两侧均为推覆构造组成的叠瓦扇,盆地内部则为较简单的复向斜构造。南北边缘发育走向逆冲断层,内部发育北—北东向正断层。

多为花斑状泥岩、砂质泥岩和粉砂岩,上部风化较强烈,岩芯较破碎,下部岩芯较完整。裂隙发育,岩体破碎,富含水和瓦斯。瓦斯地质、水文地质和工程地质条件较为复杂。

## 3 地面预注浆方案

### 3.1 注浆深度及段高的划分

主井断层破碎带的加固范围  $400 \sim 442 \text{ m}$ 。为使浆液渗透均匀,注浆段长不宜太长。岩体注浆一般采用  $5 \text{ m}$  左右的段长,在孔口附近可采用  $2 \sim 4 \text{ m}$  的段长。注浆段高原则上采用小段高,这样可以缩短钻孔的暴露时间,避免塌孔等事故;另外,采用小段高便于把注浆压力集中于泥质断层破碎带的软弱层面上,浆液呈挤压、脉状扩散,以达到改良泥质软层物理力学性能的目的。

采用小段高,定量注入单液水泥浆进行加固。当井底为含水层时,为防止井底涌水,注浆深度应大于  $10 \text{ m}$  以上。当注浆深度较大时,由于各土层的裂隙发育不同及静水压力随深度增加而增大,所以,在一定压力下浆液扩散距离不相同。上部扩散

远,下部扩散较近;大裂隙扩散远,而小裂隙扩散近,应采用分段注浆。而主井断层破碎带现场实际情况采用先注粘土浆,再注入水泥浆。水泥浆注浆加固段高原则上  $10 \sim 20 \text{ m}$  一个段高,以不塌孔和埋钻为原则。

### 3.2 固管注浆段造孔

在注浆施工中,依据注浆的目的不同及注浆地层的不同,采用不同的钻孔方法及钻孔要求。

主井地面预注浆钻孔分两级结构。

开孔直径  $191 \text{ mm}$ ,钻进至套管深度  $382 \text{ m}$ ,下入直径  $168 \text{ mm}$  套管;套管以下用直径  $130 \text{ mm}$  钻头钻进。

井筒直孔固管段终孔偏斜率不大于  $0.2\%$ ,注浆段终孔偏斜率不大于  $0.5\%$ 。

为防止钻孔偏斜,在钻进过程中,严格遵守技术操作规程,注意钻具的同心度与垂直度,根据岩层软硬的变化调整钻压、钻速,保证钻具呈垂直状态。

固管段表土层段采用牙轮钻头钻进,直孔钻至  $382 \text{ m}$ 。护壁管中用单液水泥浆固管;养护后换  $\text{A}130 \text{ mm}$  牙轮钻头,无芯钻进至终孔。朱集主井地面预注浆,共完成固管安装  $2\,292 \text{ m}$ ,完成注浆段造孔  $4\,018 \text{ m}$ 。

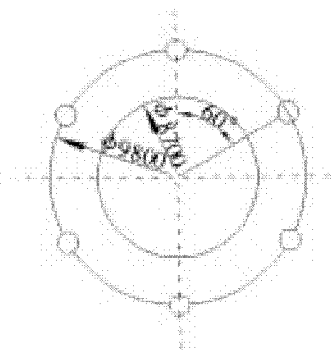


图1 注浆孔布置图

### 3.3 分支孔施工

因断层破碎带加固的需要,在  $382 \sim 442 \text{ m}$  增加了6个分支孔。1#孔在完成全孔注浆任务后从  $382 \text{ m}$  开始到  $442 \text{ m}$ ,先向2#孔施工一个分支孔,注浆结束后再向6#孔施工一个分叉孔,注浆结束后完成注浆任务;2#孔在全孔注浆结束后从  $382 \text{ m}$  开始到  $442 \text{ m}$ ,向3#孔方向施工一个分支孔,分支孔注浆结束后完成注浆任务;4#孔  $382 \text{ m}$  至  $1\,028 \text{ m}$  注浆结束后,在  $382 \text{ m}$  开始定向至  $442 \text{ m}$  结束,向3#孔方向施工一个分支孔,分支孔注浆结束后完成

注浆任务;5#孔在 382 ~ 1 028 m 注浆结束后,从 382 m 开始先向 4#孔方向施工一个分支孔,注浆结束后再向 6#孔方向施工一个分支孔,分支孔注浆结束后完成注浆任务。各分支孔终孔落点均在相邻两孔 442 m 中间部位附近,满足偏斜要求。

### 3.4 注浆压力

注浆压力是浆液在地层中扩散的动力,它直接影响注浆加固效果,但是注浆压力受注浆地层条件、注浆方法和注浆材料等因素的影响和制约。注浆压力高有利于浆液更好地注入地层,增加浆液的扩散范围,能使浆液中水分更快、更多地析出,而使结石密实、饱满。如果注浆压力过高可使浆液过度脉状扩散和浪费,会使建筑物地基固结不均匀,使得受力不均,产生不均沉降。

选择注浆压力要综合考虑土层的埋深、孔隙度及静水压力等因素。目前注浆界还没有统一的计算标准,但主要遵循随注浆深度增加而增大的原则。一般来说,注化学浆比注水泥浆时的注浆压力要小得多;浅部注浆比深部地层注浆压力要小;渗透系数大比渗透系数小的地层注浆压力要小。

注浆压力可用下式来计算:

$$P = k \cdot H \quad (1)$$

式中: $k$  为由深度决定的压力系数,MPa/m,在埋深较浅的土层注浆时可取  $k = 0.023 \sim 0.021$ ;  $H$  为注浆深度,m。

由于是对断层破碎带进行堵水加固,地质条件非常复杂,所以式(1)可确定终压为静水压力值的 2.5 ~ 3.0 倍,且根据注浆施工中的实际情况进行调节。

### 3.5 注浆材料与配比

注浆材料也称浆液,它是注浆成败的基础。注浆材料之所以能起到堵水和加固的作用,主要是由于注浆材料在注浆过程中发生由液相到固相再转变成结石体的结果。

断层破碎带堵水注浆以粘土水泥浆为主,加固以单液水泥浆为主,并注入部分塑性早强水泥浆(主要成分水泥、粉煤灰、早强剂、塑性剂)。

塑性单液水泥浆比常规的单液水泥浆吸水率低,悬浮性好,早期强度高,可以适当提高注浆段高,减少重复注浆次数,提高施工效率。具体单液水泥浆配比如表 1 所示。

表 1 单液水泥浆主要材料配比表

水灰比	水泥/ kg	三乙醇胺/ kg	食盐/ kg	水/ L	制成浆量/ m <sup>3</sup>
0.50:1	1 800	0.90	9.00	900	1.5
0.60:1	1 650	0.83	8.25	990	1.5
0.75:1	1 425	0.71	7.13	1 068	1.5
1.00:1	1 125	0.56	5.60	1 125	1.5
1.25:1	975	0.49	4.88	1 218	1.5
1.50:1	825	0.41	4.13	1 238	1.5
2.00:1	675	0.34	3.38	1 350	1.5

### 3.6 注浆量

浆液注入量根据浆液有效径向扩散距离和注浆段平均裂隙率,可用下式进行计算:

$$Q = A\pi R^2 H n \beta / m \quad (2)$$

式中: $Q$  为浆液注入量, m<sup>3</sup>;  $A$  为浆液超扩散消耗系数,取 1.5;  $R$  为距中心的浆液有效扩散半径,m,  $R = r + L$ ,  $r$  为注浆孔布孔半径,m,取 6 m,  $L$  为浆液扩散距离,取 10.8 m;  $H$  为注浆总段高,m,断层破碎带 400 ~ 442 m,厚度 42 m;  $n$  为岩层平均裂隙率,断层破碎带取 3%;  $\beta$  为浆液充填系数,取 0.95;  $m$  为浆液结石率,取 0.85。

利用式(2)计算得:断层破碎带加固应以水泥浆为主,少量多次方式注入,防止浆液扩散过远,每次注入量以 30 ~ 40 m<sup>3</sup> 为宜,达不到加固效果时,应采用多次复注的方式,单液水泥浆液注入量为 1 873 m<sup>3</sup>,其中注入塑性单液水泥浆 500 m<sup>3</sup>。

## 4 注浆堵水效果

### 4.1 注浆结束标准

主井破碎带加固注浆,单液水泥浆加固注入量实行定量控制,达到设计的注浆终压(静水压力的 2.5 ~ 3 倍),终量不大于 60 L/min,并继续以同样的压力注入较稀的浆液 20 min 以上。

### 4.2 注浆效果

井筒剩余涌水量和注浆堵水率是检验评价注浆质量的重要标准,通过注浆质量检查孔的压水试验来预计井筒剩余涌水量和注浆堵水率,进而定量评价井筒注浆效果。主井注浆工程对 3#孔 382 ~ 705 m 段进行了压水试验,试验成果如表 2 所示。



表2 主井破碎带注浆工程压水试验成果表

次序	1	2
试验段起止深度/m	382 ~ 705	382 ~ 705
试验段长度/m	323	323
压水压力/MPa	11	12
压水流量/(L · min <sup>-1</sup> )	48.4	59.8
稳定时间/min	30	30
静止水位/m	6.91	6.91
作用于静止水位上的水头高度/m	1 106.91	1 106.91
钻孔半径/m	0.065	0.065
单位吸水率/ (L · min <sup>-1</sup> · m <sup>-1</sup> · m <sup>-1</sup> )	0.000 14	0.000 15
压水渗透系数/(m · d <sup>-1</sup> )	0.000 25	0.000 28
含水层水头高度/m	705	705
井筒荒半径/m	4.35	4.35
井筒影响半径/m	111.65	118.86
含水层厚度/m	76.21	76.21
预计井筒涌水量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	1.03	1.14

根据表2中计算结果,结合主井其它段注浆结果计算,主井井筒涌水量为2.26 m<sup>3</sup>/h。

矿井井筒涌水量的预计一般采用稳定流完整井承压无压井的裘布依公式计算出的涌水量作为参考水量。主井井筒地面预注浆工程设计钻孔6个,浆液注入量22 118 m<sup>3</sup>,钻孔工程量6 310 m。实际完成钻孔6个,浆液注入量224 606 m<sup>3</sup>,注入11.2%;钻控工程量6 331.1 m,共增加浆液注入量

2 488 m<sup>3</sup>,全井筒平均注入量达到38.1 m<sup>3</sup>/m时,该井注浆后注浆段井筒剩余涌水量预计为2.26 m<sup>3</sup>/h,达到小于4 m<sup>3</sup>/h的质量标准,与注前井筒检查孔提供的基岩段井筒涌水量297.57 m<sup>3</sup>/h相比,堵水率达99.2%。压水试验后,进行了局部复注和全孔封孔,进一步提高了井筒注浆堵水的效果。

## 5 结论

通过在工程的成功应用,证明了采用地面预注浆技术对破碎带基岩进行处理,技术上是可行的。不仅很好的对基岩破碎带进行加固,基本消除了掘进工作面突水、大涌水量等隐患,同时又能提高井筒的堵水效果。为相似条件下基岩破碎带的加固处理开辟了新途径,并且取得显著的经济效益和社会效益,具有较高的推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] 刘斌. 地下工程特殊施工[M]. 北京:冶金工业出版社,1991:30-36.
- [2] 黄德发,王宗敏,杨彬. 地层注浆堵水与加固施工技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:142-148.
- [3] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999:58-79.
- [4] 陈轲,王曾光. 地面注浆堵水技术在矿山建设中的应用[J]. 中国矿山工程,2009,38(1):35-40.
- [5] 董方庭,姚玉煌,黄初,等. 井巷设计与施工[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004:260-268.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 巷道非对称底鼓的力学解析

高明中<sup>1</sup>, 井欢庆<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**探讨深部开采条件下非对称底鼓现象的影响因素和形成机制, 为巷道底鼓的防治提供理论依据。根据郎肯土压力理论, 建立了非对称底鼓的力学模型及分析计算简图, 得到了4种非对称底鼓的破坏形式, 导出了巷道底压的计算公式。通过给定部分参数, 得到了极限破坏深度、底压、底压偏移角分别与松散岩体折算摩擦角和巷道宽度的关系。研究表明, 岩性较差或者较为破碎的围岩以及宽度较大的巷道受非对称荷载比值的影响较大, 且巷道底压会有一定的偏转。研究结果对于控制深井非对称底鼓有一定的参考作用。最后介绍了1个防治巷道底鼓的实例。

**关键词:**深部开采; 巷道底鼓; 非对称; 力学解析

**中图分类号:**TD327.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0038-06

## Mechanical Analysis of Asymmetric Floor Heave of Roadway

GAO Ming-zhong<sup>1</sup>, JING Huan-qing<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** In the conditions of deep mining, the phenomenon of asymmetric floor heave is more and more common, the safety and high efficiency production of coal mine is seriously restricted. Discussion on affecting factors and forming mechanism of the floor heave, it has important academic value and practical significance for the prevention of floor heave. According to Rankine earth pressure theory, mechanical model and analysis diagram of asymmetric floor heave is established. 4 kinds of destruction forms of asymmetric floor heave are got, the calculation formula of bottom pressure of roadway is derived. Given some parameters, the relationship of critical failure depth, bottom pressure, offset angle of bottom pressure with translated friction angle of friable rock and width of roadway are obtained respectively. Research shows that the influence of ratio of asymmetric load for roadway is very big when surrounding rock is broken up or lithology is poor, and bottom pressure will have a certain deflection, which has certain reference in control of asymmetric floor heave. Finally, a example of roadway floor heave prevention are presented.

**Key words:** deep mining; roadway floor heave; asymmetric; mechanical analysis

随着我国煤矿开采深度的不断加大, 开采强度的增加和无煤柱开采的大量使用, 加之部分矿井资源枯竭开始回收边角煤柱, 导致巷道围岩应力恶化, 巷道底鼓现象日趋普遍, 严重影响了此类巷道的运输和正常使用。在两帮压模效应、原岩应力、采动支承应力、水及底板岩性等单个或多个因素综

合影响下, 底板岩层向巷道内压曲、扩容、膨胀, 形成底鼓。巷道所处的地质条件、底板围岩性质和应力状态各不相同, 底鼓的方式及其机理也有所不同, 一般可分为以下4类: 挤压流动性底鼓、挠曲褶皱性底鼓、剪切错动性底鼓及膨胀性底鼓<sup>[1]</sup>。依巷道与回采工作面的空间位置关系, 采动巷道可分

为实体煤巷道、煤柱巷道、沿空巷道,而在相同条件下,煤柱巷道的底鼓最严重<sup>[2]</sup>,维护难度最大。因此,针对回采巷道的挤压流动性底鼓机理进行深入研究,寻求经济有效的控制技术,对巷道底鼓的控制具有一定的参考价值。

## 1 巷道底板应力的分布

巷道底鼓不但与巷道围岩的物理力学性质有关,而且和围岩的应力分布有关,特别是底板岩层的应力分布有关。采空侧巷道底鼓比相同条件下的实体煤巷道的底鼓量要大得多,而且巷道底鼓呈现不对称性。这些差异是由于巷道的应力重新分布的特殊性造成的。对于挤压流动性底鼓,将围岩视为松散体,即忽略底板岩层的内聚力,可以引入郎肯土压力理论<sup>[3]</sup>来解释软岩巷道底鼓的原因。

为了便于计算,假设巷道底板两侧在均布荷载  $p$  和  $q$  的作用下发生破坏,巷道底板两侧的应力分布如图1所示。

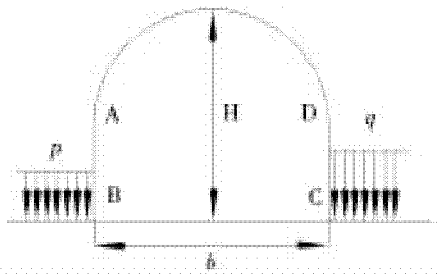


图1 巷道底板所加载荷的简化图

## 2 巷道非对称底鼓力学解析

先取巷道右侧底板进行分析,底板岩体在均布荷载  $q$  的作用下,CIJ 区域岩体处于主动塑性压力状态,而 MCJ 区域岩体处于被动塑性压力状态,当 MCJ 区域岩体达到了被动塑性压力状态,会产生向上的底板围岩压力,当其超过了岩体的极限强度时,就会导致底板 MC 范围的破坏,向上隆起或者挤入巷道,造成底鼓(见图2)。

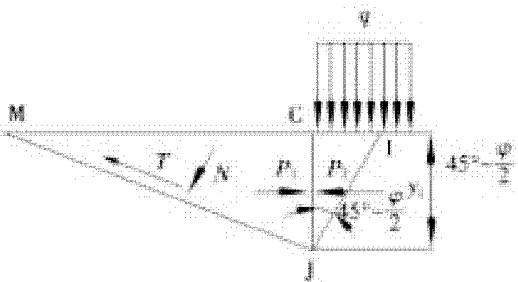


图2 荷载  $q$  作用下底板破坏计算图

当巷道岩体处于极限平衡状态时,滑动面 MJ 与水平线的夹角为  $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ ,滑动面 IJ 与水平线的

夹角为  $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ 。假定 CJ 为理想中的挡土墙,则

CJ 各点上所受的主动压力和被动压力分别为

$$\sigma_a = (q + \gamma y) K_a \quad (1)$$

$$\sigma_p = \gamma y K_p \quad (2)$$

式中: $\gamma$  为上覆岩层的平均容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $y$  为底鼓深度,  $\text{m}$ ;  $\sigma_c$  为岩石的单轴抗压强度;  $q$  为均布荷载,  $\text{kPa}$ ;  $K_a$  为主动土压力系数,  $K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$ ;  $K_p$  为被动土压力系数,  $K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ ;

$\varphi$  为松散岩体的折算摩擦角,  $(^\circ)$ ,  $\varphi = \arctan \frac{\sigma_c}{10}$ 。

在 J 点以上的 CJ 范围内,因为  $\sigma_a > \sigma_p$ ,底板岩体处于塑性状态;在 J 点以下,  $\sigma_a < \sigma_p$ ,底板岩体处于弹性状态;在 J 点处,  $\sigma_a = \sigma_p$ ,底板岩体处于极限平衡状态。

将式(1)和式(2)代入,可以得到巷道右侧的极限破坏深度  $y_1$ :

$$y_1 = \frac{q}{\gamma} \frac{K_a}{K_p - K_a} \quad (3)$$

由式(3)可知,在底板下部  $y_1$  以上岩体将向上鼓起,而  $y_1$  以下岩体不会出现移动。

由图2可知,当极限平衡状态破坏后,CIJ 滑移体处于主动状态,而 MCJ 滑移体处于被动状态,CJ 上所受的主动压力  $P_1$  和被动压力  $P_2$  分别为之差即为推动 MCJ 向左滑动的实际推力  $P_{12}$ 。

$$P_{12} = P_1 - P_2 \quad (4)$$

$$P_1 = (\frac{1}{2} \gamma y_1^2 + q y_1) K_a \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{\gamma y_1^2}{2} K_p \quad (6)$$

再将推力  $P_{12}$  沿滑动面 MG 分解为法向力  $N$  和切向力  $T$ 。

$$N = P_{12} \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (7)$$

$$T = P_{12} \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (8)$$

则沿滑动面 MG 的有效滑动力为

$$T_1 = T - N \tan \varphi \quad (9)$$

分别代入式(4)~式(8)可得

$$T_1 = \frac{(\frac{1}{2}\gamma y_1^2 + qy_1)K_a - \frac{\gamma y_1^2}{2}K_p}{2\cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \quad (10)$$

再按照上述方法分析巷道左侧底板,破坏变形的部分如图3所示。

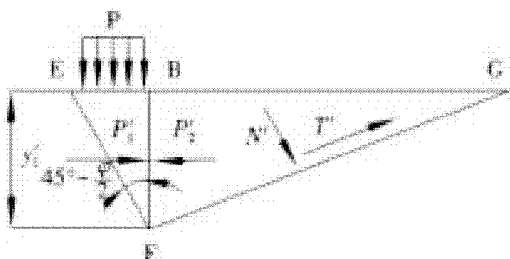


图3 荷载 $p$ 作用下底板破坏计算图

巷道左侧底板破坏的极限深度 $y'_1$ 为

$$y'_1 = \frac{p}{\gamma} \frac{K_a}{K_p - K_a} \quad (11)$$

沿滑动面FG的有效滑动力为

$$T'_1 = \frac{(\frac{1}{2}\gamma y_1^2 + py_1)K_a - \frac{\gamma y_1^2}{2}K_p}{2\cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \quad (12)$$

假设 $q$ 大于 $p$ ,故右侧的极限破坏深度以及底板破坏面都是大于左侧的,底板两侧在外力作用下产生的滑移体向巷道内部挤压,除了造成底鼓以外,还会产生底压(见图4)。

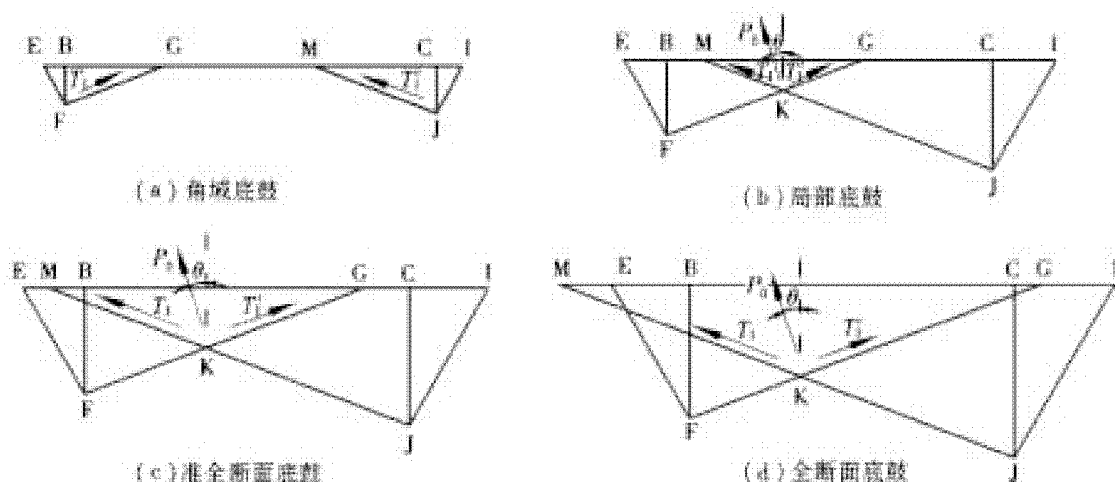


图4 巷道底鼓破坏形式

1) 当 $y_1 + y'_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) < b$ 时, $b$ 为巷道宽度,底鼓主要发生巷道两侧,底压也分布在两侧,底压值分别为两侧的有效滑动力(见图4a)。

2) 当 $y_1 + y'_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) > b$ ,且 $y_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) < b$ 时,块体MGK在两侧载荷的挤压作用下向上鼓起,底压沿底板中部MG段均匀分布(见图4b)。

3) 当 $y_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) > b$ ,而 $y'_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) < b$ 时,块体MGK在两侧载荷的挤压作用下向上鼓起,底压沿底板BG段均匀分布(见图4c)。

4)  $y_1 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) > b$ 时,块体BCK在两侧载荷的挤压作用下向上鼓起,底压沿巷道全宽均匀分布(见图4d)。

为了分析非对称性底鼓时的底压大小和底鼓

偏移方向,进行如下计算:

巷道底板滑动面以上有效滑动力 $T_1, T'_1$ 的合力 $P_0$ 即为巷道的底压, $T_1, T'_1$ 在 $x$ 和 $y$ 轴上的合力分别为 $P_x$ 和 $P_y$ ,即

$$\begin{cases} P_x = (T_1 - T'_1) \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \\ P_y = (T_1 + T'_1) \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \end{cases} \quad (13)$$

则底压为

$$P_0 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (14)$$

$P_0$ 与 $y$ 轴的夹角 $\theta$ 为

$$\theta = \arctan \frac{P_x}{P_y} \quad (15)$$

关于图4c和图4d中的巷道底压,虽然滑移体受到巷道帮部的阻碍,但是依然可以按照图4b的底压计算方法来获取,其结果比实际结果会略大一些。

### 3 底板破坏参数分析

根据普氏理论可知,巷道开挖以后,巷道顶部会形成压力拱,其高度  $a$  为

$$a = \frac{\frac{b}{2} + H \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{\tan \varphi} \quad (16)$$

式中:  $b$  为巷道宽度, m;  $H$  为巷道高度, m。

则在压力拱的保护下,巷道一侧的荷载可以简化为  $\gamma(a+H)$ , 令  $P = \gamma(a+H)$ ,  $n = q/p'$ , 通过给定巷道宽度  $b$ , 直墙高度  $h$ , 岩石容重  $\gamma$ , 和  $n$  的值, 变换松散岩体的折算摩擦角  $\varphi$ , 通过式 (3) 和

式 (11) 分别得到极限破坏深度  $y_1, y'_1$ , 通过式 (14) 计算底压  $P_0$ , 通过式 (15) 计算底压偏移角  $\theta$ ; 再通过给定  $\varphi, h, \gamma$  和  $n$  的值, 又可以分别得到  $y_1, y'_1, P_0, \theta$  与巷道宽度  $b$  的关系。

当  $n=1$  时, 巷道两侧荷载相同, 为对称底鼓, 当  $n>1$  的时候, 则形成了非对称底鼓。根据普氏理论的假设,  $\phi$  的范围取  $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

1) 分别给定参数值。  $b=4\text{ m}$ ,  $h=1.6\text{ m}$ ,  $\gamma=25\text{ kN/m}^3$ ,  $n$  取 2 个值, 依次为 1.2 和 1.6, 则可以分别得到  $y$  与  $\varphi$ ,  $P_0$  与  $\varphi$ , 以及  $\theta$  与  $\varphi$  的关系 (见图 5)。

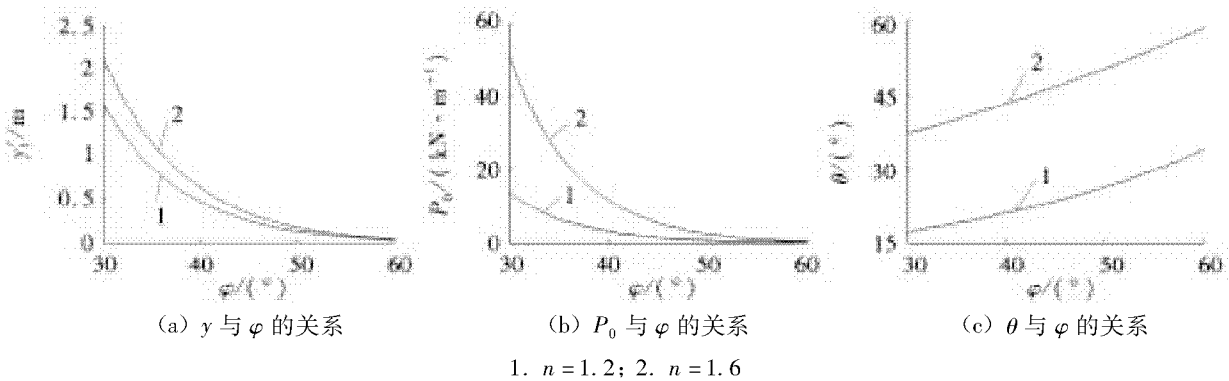


图5 底鼓参数与  $\varphi$  的关系

当  $n=1$  时, 极限破坏深度即为  $y_1$ , 当  $n>1$  时, 极限破坏深度为  $y'_1$ 。

由图 5a 可知,  $y$  与  $\varphi$  的关系: 从总体趋势上看, 随着  $\varphi$  的增大, 极限破坏深度是在不断减小的, 随着荷载比值的增大, 相同的  $\varphi$  所对应的破坏深度也是不断增大的。

由图 5b 可知,  $P_0$  与  $\varphi$  的关系: 从变化趋势上来看, 基本同破坏深度与  $\varphi$  的关系一致。但是当  $\varphi$  较小时, 底压是随  $\varphi$  的减小而增大的幅度非常剧烈, 底压的比值最大可以达到 10 倍以上, 可见在岩体较为破碎的时候, 如果不能及时有效的支护, 随

着岩体的进一步破坏, 底压会急剧增大, 从而造成难以控制的剧烈底鼓。

由图 5c 可知,  $\theta$  与  $\varphi$  的关系: 两侧荷载相同时,  $\theta$  为 0, 底压方向是垂直与巷道底板向上的, 不会受  $\varphi$  的影响; 当荷载不同时,  $\varphi$  会使得  $\theta$  增大, 随着荷载比值的增大, 相同的  $\varphi$  所对应的  $\theta$  是不断增大的, 只是增加的幅度有所减小。

2) 根据现场实际情况, 巷道宽度  $b$  的范围取 2~6 m, 分别给定下述参数的值:  $\varphi=40^\circ$ ,  $h=1.6\text{ m}$ ,  $\gamma=25\text{ kN/m}^3$ ,  $n$  依然取如上所述的 2 个值, 则可以分别得到  $y$  与  $b$ ,  $P_0$  与  $b$ , 以及  $\theta$  与  $b$  的关系 (见图 6)。

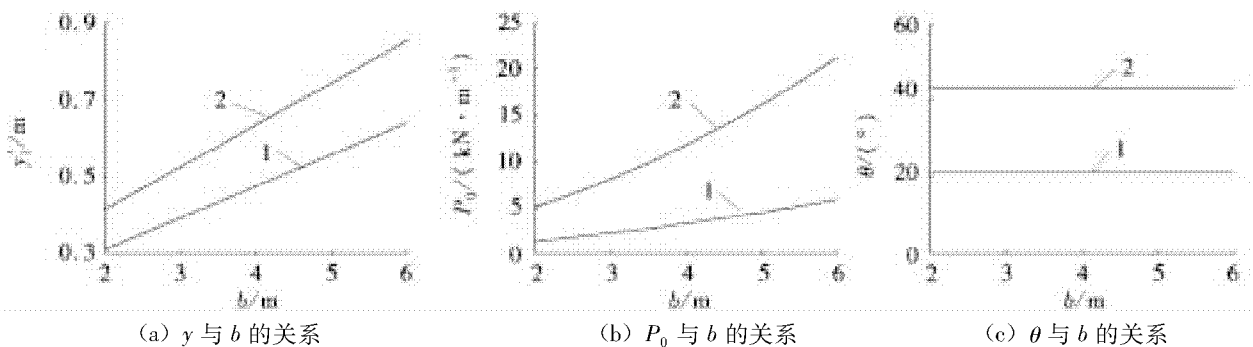


图6 底鼓参数与  $b$  的关系

由图 6a 可知,  $y$  与  $b$  的关系: 随着  $b$  的增大, 极限破坏深度是在不断增大的, 随着荷载比值的增大, 相同的巷道宽度所对应的破坏深度也是不断增大的。

由图 6b 可知,  $P_0$  与  $b$  的关系: 两侧荷载相同时, 随着  $b$  的增大, 底压变化略有增大; 两侧荷载不同时, 随着  $b$  的增大, 底压越来越大, 同时, 荷载比值的增大, 使得同等宽度下的巷道的底压变得更大, 在宽度较大的情况下, 增长的幅度相对于宽度较小时是非常大的。

由图 6c 可知,  $\theta$  与  $b$  的关系: 巷道宽度的变化, 并不会改变底压的偏移角, 而两侧荷载不同才会影响  $\theta$ , 荷载比值的越大,  $\theta$  越大, 但是相对于荷载比值增大的幅度,  $\theta$  增大的幅度减缓了。

#### 4 非对称底鼓控制对策及应用效果

1) 非对称底鼓的控制方法<sup>[4-6]</sup>。从力学模型中可以看出, 为了减小底压, 减轻底鼓的程度, 应通过以下 4 个途径: 一是加固巷道肩、帮部这样的关键部位, 改善巷道围岩结构的力学性能, 减小帮部荷载; 二是主动控制底鼓, 即采用足够长的扎脚锚杆或者锚索穿透巷道底板破坏的主动区, 并固结在稳定岩层中, 不仅可以阻碍底板两侧载荷向下传递以及主动破坏区向下挤压移动, 同时相当于增大了内摩擦角  $\varphi$ , 减小了主动压力, 从而降低底压, 减轻巷道底鼓的程度; 三是被动控制底鼓, 即采用足够长的底板锚杆, 将底板松散岩体固结在稳定岩层中, 阻碍被动区向上运动, 增大被动区的  $\varphi$ , 减小滑块的有效滑动力, 从而减小和平衡底压; 四是固结松散岩体, 即注浆加固巷道围岩, 实际是也就是增大了围岩的  $\varphi$ 。

2) 非对称底鼓的控制对策。某矿第一水平大巷垂深 830 m, 由于煤层埋藏较深、地质构造的影响以及巷道布置方面的原因, 造成围岩松软破碎, 风化或遇水泥化现象严重, 巷道维护难度很大。

2009 年施工以来, 由于其附近综采工作面开采, 虽然留设了 80 m 的保护煤柱, 但是巷道还是发生严重的非对称底鼓破坏, 相对底鼓量可达 0.7 ~ 1.5 m。其主要破坏形式为下肩顶板开裂、帮部鼓出、上帮底板鼓出变形较下帮严重。

在修复设计中, 除了采用了以上述控制方法为基础的组式支护措施, 结合现场实际施工情况, 针对非对称底鼓, 采用了不对称的支护形式(见图 7)。

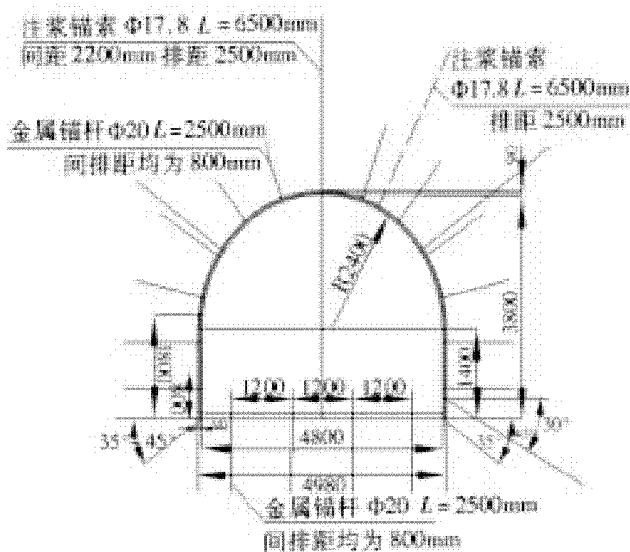


图 7 支护设计参数

3) 支护效果。根据修复后 3 个月的连续监测数据, 两帮累积移近量 80 mm, 顶底板累积移近量 65 mm, 最大底鼓量 50 mm, 收敛面积 0.82 m<sup>2</sup>, 收敛率为 6.61%, 支护有效的控制了围岩变形速率和变形量。

#### 5 主要结论

1) 松散岩层的折算摩擦角, 即岩石的岩性及破碎程度对于巷道的稳定极为重要。总的来说, 折算摩擦角越大, 即岩性较好或者围岩较完整时, 极限破坏深度和底压都较小, 受非对称荷载的影响也不会过大。但是如果巷道围岩的岩性较差或者非常破碎, 在受非对称荷载影响时, 底压值会增大的非常剧烈。

2) 对称荷载作用下, 底压的方向是垂直于巷道底板向上的。不对称荷载作用下, 底压偏移的角度主要和松散岩层的折算摩擦角动压影响有关系, 随着他们的增大而不断偏向受采动的巷道一侧。

3) 随着巷道底板宽度的增大, 会使得极限破坏深度和底压都增大。不对称荷载作用下, 相对于宽度较小的巷道, 宽度较大的巷道底压增加的幅度非常大。

4) 岩性较差或者较为破碎的围岩, 巷道宽度较大的巷道, 它们受荷载比值的影响非常大, 底压增大幅度较大, 会造成剧烈的底鼓。

5) 从理论上来说, 为了控制底鼓, 应从其源头入手, 综合采用下述手段: 加固肩部, 提高围岩强度和整体性, 降低荷载大小; 补打扎脚锚索, 斩断荷载

传递的路径;底板锚杆加固,阻碍被动区运动;注浆固结松散岩体。在底鼓程度较严重时,可以适当采取不对称支护方式,补强荷载大的一侧。

#### 参考文献:

- [1] 陈炎光,陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994:463-473.
- [2] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):1-5.
- [3] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994:114-115.
- [4] 高明中. 巷道压曲性底鼓的机理与控制[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2008,28(1):20-24.
- [5] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2396-2401.
- [6] 李开学,王宏图,刘正海. 巷道底鼓理论与防治技术[J]. 矿业安全与环保,2008,35(3):86-88.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

## 连续出版物著录项目及著录格式

连续出版物是一种载有卷期号或年月顺序号、计划无限期地连续出版发行的出版物。它包括以各种载体形式出版的期刊、报纸等。

#### 著录项目

主要责任者

题名项

题名

其他题名信息

文献类型标志(电子文献必备,其他文献任选)

卷、期、年、月或其他标志(任选)

出版项

出版地

出版者

出版年

引用日期(联机文献必备,其他电子文献任选)

获取和访问路径(联机文献必备)

#### 著录格式

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 年,卷(期)-年,卷(期). 出版地:出版者,出版年[引用日期]. 获取和访问路径.

示例:

- [1] 中国地质学会. 地质论评[J]. 1936,1(1)-. 北京:地质出版社,1936-.
- [2] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京:北京图书馆,1957-1990.
- [3] American Association for the Advancement of Science. Science[J]. 1883,1(1)-. Washington, D. C.: American Association for the Advancement of Science,1883-.

摘自《文后参考文献著录规则(GB/T7714-2005)》

# 基于 SolidWorks 新型 59 把截齿截割头研究

唐琼, 范学群, 徐丰

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**掘进机的截割头作为关键部件, 直接影响机器的整体性能。截齿分布、截齿数目等因素对截割效率、截齿的寿命及截割性能影响很大。采用 SolidWorks 建立截割头模型并使用仿真对新型 59 把截齿截割头的建模以及结构进行有限元分析研究, 找出截割头的应力分布规律, 并不断改进模型, 使其在正常工作状态下所受的应力较小, 且安全系数较大, 满足材料的强度条件, 能够适应工作要求。新型 59 把截齿截割头掘进机具有较强的实用价值, 在开发应用方面具有一定的前景市场, 可以有效节约设计成本和提高设计效率。

**关键词:**截割头; 截齿; SolidWorks; 仿真; 有限元分析

**中图分类号:**TD421 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0044-03

## Research on A Novel Cutting Head with 59 Cutting Teeth Based on SolidWorks

TANG Qiong, FANG Xue-qun, XU Feng

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

**Abstract:** The road header cutting head as key components, directly influence the overall performance of the machine. cutting teeth distribution, the number of teeth, and other factors to efficiency of cutting, cutting teeth life and cutting performance have very great influence. The established cutting head model by SolidWorks and use the finite element analysis by simulation, find out cutting head of the stress distribution law, and constantly improved model, can effective economy design cost and improve the design efficiency.

**Key words:** cutting head; cutting tooth; SolidWorks; simulation; finite element analysis

截割头的工作性能在一定程度上决定了掘进机的整体性能, 截割头的截齿分布、截割深度等因素对截割效率、截齿的寿命及截割性能影响很大。随着掘进机的功率增大, 截割头的体积增大, 截齿数目也有所增大。从现有的掘进机截齿数目来看, 三一重工集团生产的 EBH200S 型号掘进机其截齿数有 42 把, 凯盛公司生产的 EBH160 型号掘进机截齿数有 35 把。

本次设计的新型掘进机截齿总数为 59 把, 齿数较多, 与其他型号的掘进机差异较大, 对其进行分析和研究是很有必要的。可以为研究掘进机的相关人员提供一定的参考和指导作用。

### 1 截割头的结构与截齿布置

掘进机的截割头体外形主要是由几段不同曲

线“球冠+圆锥+圆柱”组成。整体光滑过渡, 可避免产生应力集中现象。

截齿为镐形, 截齿通过齿套安装在齿座上, 可自由旋转。采用 SolidWorks 绘制的三维实体如图 1 所示。

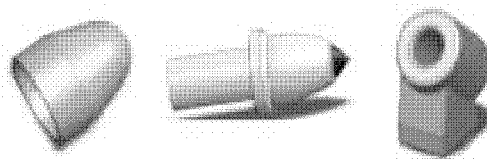


图1 头体、截齿和齿座三维模型

通过 SolidWorks 绘制的截割头其截齿分布三维图如图 2 所示。



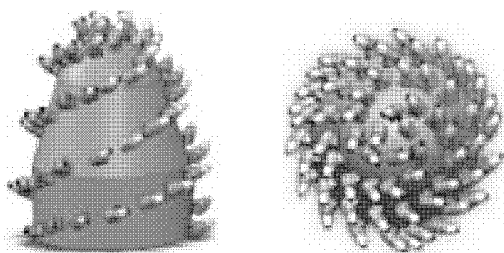


图2 59把截齿截割头分布三维图

## 2 截齿受力计算

在掘进机截割头截割的工作过程当中,掘进机的截割头是以绕其自身轴线旋转以及其悬臂的水平摆动产生的复合运动来截割煤岩的。研究表明,掘进机截割头旋转一圈时,截齿在参与截割的时间大约只有半周左右,并且在截齿截割的过程当中,通常其切屑厚度也是在不断变化的(见图3)。

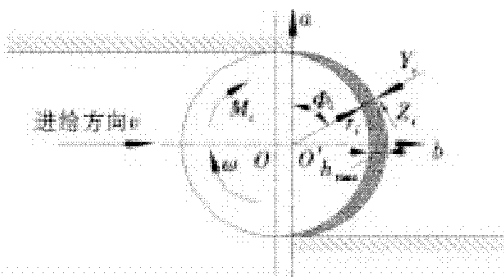
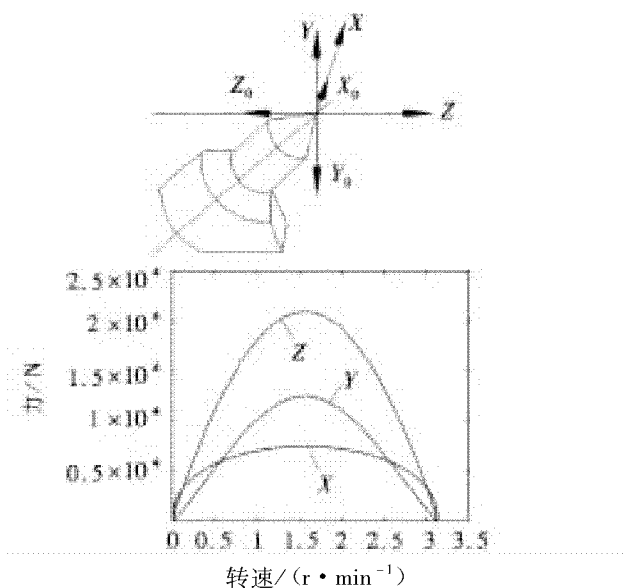


图3 截割头截割煤岩受力图

掘进机截割头在工作时其中截割头上的截齿只有一部分处于截割状态,大部分处于摆动截割状态。因此,对单个截齿在  $0 \sim \pi$  位置时的  $X$  向侧向阻力、 $Y$  向牵引阻力和  $Z$  向截割阻力的模拟如图4所示。

图4 单个截齿在  $0 \sim \pi$  范围内的三个方向的分力变化图

假设掘进机工况较为恶劣,实际工况下,在  $0 \sim \pi$  范围内掘进机工作的截齿齿数为 30 个,通过图4可以看出,工作过程中单个截齿的受力是由切屑厚度来决定的,切屑厚度又和截齿在工作时的截割状态位置有关联,同时,截齿在  $\pi/2$  处时受到的力最大:其中截割阻力为 21.2 kN,侧向阻力为 7.62 kN,牵引阻力为 11.9 kN。其它位置上截齿的受力大小也是通过图4计算出来的,表1是其中一条螺旋线截齿三个力的大小<sup>[1]</sup>。

表1 螺旋线 Y 截齿三个力值 kN

序号	X 向侧向阻力	Y 向牵引阻力	Z 向截割阻力
Y1	0	0	0
Y2	5.21	3.92	7.32
Y3	6.42	7.71	13.9
Y4	7.01	10.6	18.2
Y5	7.34	13.9	21.2
Y6	6.63	10.6	18.8
Y7	6.41	7.21	16.9
Y8	5.36	4.16	10.7
Y9	4.22	1.26	3.96
Y18	4.92	2.56	6.46
Y19	5.81	5.76	12.1
Y20	6.37	8.16	16.1

## 3 截割头有限元分析

### 3.1 PLC 定义材料和约束

首先,定义材料:截齿其刀头的材料为硬质合金钢 YG28,弹性模量  $E_x = 640$  GPa、泊松比  $\mu = 0.21$ ;截割头上的齿座和刀杆材料选用高强度合金结构钢 20CrNiMo,其弹性模量  $E_x = 200$  GPa、泊松比  $\mu = 0.3$ 。头体材料为铸钢 ZG230-430,其弹性模量  $E_x = 206$  GPa、泊松比  $\mu = 0.29$ 。

因为截齿通过齿套安装在截齿上,且可以 360 度旋转,因此需要定义它们的接触面性质。在定义相接触面组时,齿套安装在齿座时,需要借助 Simulation 管理器中的“接触/缝隙”,在“接触类型”选项中,选择为“结合”,加摩擦系数为 0.15。截齿与齿套之间在定义它们之间的相接触面组时,也需要借助 Simulation 管理器中的“接触/缝隙”,在“接触类型”选项中,选择为“无穿透”;最后对其进行约

束,在截割头头体和传动轴位置进行全约束<sup>[2]</sup>。

### 3.2 PLC 截齿网格划分载荷施加

网格划分前首先简化模型,把不受力的截齿压缩,这样可以节约运算时间,同时还可以节约计算机资源,更加细化关键部位如截齿和齿座。对一些相接处的面也可以细化,比如截齿和齿座的接触面,这样结果更加准确。共划分 118 872 个单元、29 689 个节点。

截齿载荷按一般的研究方法分为侧向阻力  $X$ 、牵引阻力  $Y$  和截割阻力  $Z$ ,按前面的计算方法计算出这三个力之后对应施加在截齿上。

### 3.3 求解和结果分析

通过 Simulation 运算算例得出截割头的应力和安全系数如图 5。

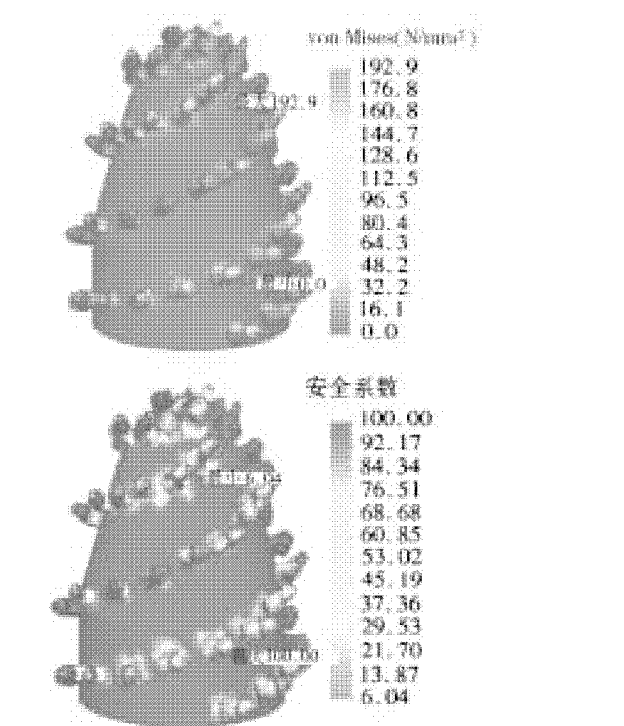


图5 截割头加载后应力和安全系数图

从图 5 中可以看出,整个截割头的应力均较小,主要的应力集中在截齿尖侧面的受压位置上。头体应力较小均在 100 MPa 以下,齿座应力均在 160 MPa 以下。最大应力在截齿尖侧面,约为 192.9 MPa,安全系数最小为 6.04,满足设计要求。且通过参阅材料并与其它现有的截割头受力分析的研究材料相比较,新型设计的 59 截齿截割头最大应力相对较小,安全系数较大,整体性能较其它齿数的截割头更为优越<sup>[3]</sup>。

## 4 结语

通过对新型 59 把截齿截割头的建模以及结构有限元分析研究,可以得出其在正常工作状态下所受的应力较小,且安全系数较大,满足材料的强度条件,能够适应工作要求。同时通过与现有其它齿数的截割头应力和安全系数对比,可以看出 59 把截齿更加安全可靠,具有很大的开发生产价值。

不足点在于齿数较多,制造和安装难度均比截齿数较少的截割头大。因此,该产品可以考虑在开采条件恶劣,岩石煤层硬度大的场合应用。总体而言,新型 59 把截齿截割头掘进机具有较强的实用价值,在开发应用方面具有一定的前景市场,能够为掘进机行业的开发研制提供一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 潘先锋,张安宁,徐刚. 截齿与齿座装配体的有限元分析[J]. 煤矿机械,2010(9):76-78.
- [2] 江洪. SolidWorks 有限元分析实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2007:8-200.
- [3] 叶修梓,陈超祥. SolidWorks Simulation 基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2006:35-100.

(责任编辑:李 丽,范 君)

# 最大匹配问题的三链 DNA 计算模型

杨 静<sup>1,2</sup>, 殷志祥<sup>1</sup>, 陈明强<sup>3</sup>, 黄凯峰<sup>4</sup>

(1. 安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001; 4. 淮南职业技术学院信电系, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 三螺旋结构的 DNA 链具有稳定性, 在一定条件下易分解等特点, 因此得到的三链模型具有错解率低的优点。利用三链模型来讨论最大匹配问题, 拓展了 DNA 计算解决问题的方法 and 应用领域。

**关键词:** DNA 计算; 三链 DNA; 最大匹配

**中图分类号:** Q523: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0047-03

## Triple-stranded DNA Computing Model of Maximum Matching Problem

YANG Jing<sup>1,2</sup>, YIN Zhi-xiang<sup>1</sup>, CHEN Ming-qiang<sup>3</sup>, HUANG Kai-feng<sup>4</sup>

(1. School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 4. Department of Information and Electrical Engineering, Huainan Vocational and Technical College, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** Triple-stranded DNA has the features of stability, and under certain conditions can be easily decomposed. Triple-stranded DNA model has advantages of low rate of wrong solutions. The triple-stranded DNA model was used to discuss the maximum matching problem, which expands method for solving the problem and application field of DNA computation.

**Key words:** DNA computing; triple-stranded DNA; maximum matching

DNA 计算是一种以 DNA 与相关某些生物酶等作为最基本材料的、基于某些生化反应原理的一种新型的分子生物计算方法。DNA 计算的优势是利用 DNA 分子具有海量的存储能力及生化反应的巨大并行性等特点进行计算。但 DNA 计算目前还在实验室阶段, 研究的 DNA 计算模型还很不成熟。在已有的 DNA 计算模型中, 大多数是应用于图与组合优化中的 NP-完全问题<sup>[1-7]</sup>。建立 DNA 模型首先考虑的就是 DNA 分子结构, 开发和研究新的分子结构也是目前研究的热点。目前常用的有单链的、双链的、单双链混合的、环状的、半环状的及三螺旋等结构的 DNA 分子结构。本文将用三链 DNA 计算模型解决最大匹配问题。

## 1 三链 DNA

1957 年, 文献[8]首次提出了三链核酸的概念, 即在经典的 W-C 双螺旋中含有多聚嘌呤那条链, 通过 Hoogsteen 或反 Hoogsteen 氢键与大沟中的第三条链结合, 从而形成三螺旋结构即三链 DNA。2004 年, 文献[9]发现寡聚脱氧核苷酸在 RecA 蛋白及 ATP<sub>γ</sub>S 的存在下, 与线性双螺旋 DNA 可形成稳定的三链结构。在形成的过程中, 首先寡聚脱氧核苷酸在 ATP<sub>γ</sub>S 的存在下与 RecA 蛋白结合, 然后在目标双螺旋 DNA 上寻找同源序列, 这一过程非常迅速并且不打开 DNA 双链。同源的双链找到后, 寡聚脱氧核苷酸在 RecA 蛋白的介导下与

目标双螺旋 DNA 形成三链 DNA。经证实由 RecA 蛋白介导形成的三链 DNA 是相当稳定的<sup>[10]</sup>。

利用三链模型解决最大匹配问题,需要用到下面几种分子操作:① 连接。将编码好的 DNA 链通过连接酶连接成一条 DNA 链;② 复制。将 DNA 链利用 PCR 扩增技术进行复制;③ 内切。利用内切酶在指定位置进行切割;④ 提取测序。对凝胶电泳中得到的最长的 DNA 链进行提取测序,已得到所求解。这里所需要的生物操作技术都已经十分成熟,在生物实验上是可行的。

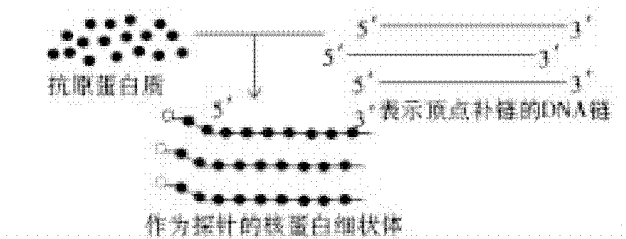


图 1 三链中第三条链的形成

## 2 最大匹配问题

### 2.1 问题描述

给定无向图  $G = (V, E)$ , 对边集  $E$  的任一子集  $M \subseteq E$ , 如果  $M$  中任意两条边在  $G$  中都没有公共端点, 则称  $M$  是  $G$  的一个匹配。一般地,  $G$  的匹配不是惟一的。若  $G$  中没有另外的  $|M'| \geq |M|$ , 则称  $M$  为  $G$  的最大匹配。如果  $M$  是  $G$  的最佳匹配, 显然  $M$  是  $G$  的最大匹配; 反过来不成立。但是  $G$  的最佳匹配也有可能不是惟一的 (见图 2),  $M_1 = \{e_2, e_3, e_7\}$ 、 $M_2 = \{e_2, e_6, e_7\}$ 、 $M_3 = \{e_1, e_4, e_7\}$  和  $M_4 = \{e_1, e_6, e_7\}$  为该图的最大匹配, 并且均是最佳匹配。

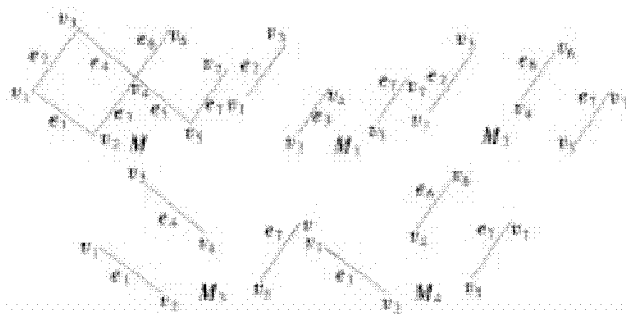


图 2 无向图  $G$  与其最大匹配  $M_1, M_2, M_3, M_4$

### 2.2 DNA 算法

**步骤 1:** 将图  $G$  的顶点和边进行编码, 将所有边的编码两端加上限制性内切酶, 然后把边所对应的寡聚核苷酸片段与连接酶一起加入缓冲液, 在特

定温度下使其连接成一条长链, 根据 W - C 配对原则, 在形成稳定的双链, 把此时得到的结果进行提取、纯化、PCR 扩增放在一试管中, 作为最初的数据池  $T_0$ 。

**步骤 2:** 将  $T_0$  分为两个试管  $T_1, T_2$ 。选取图  $G$  的一条边  $e_1$  (一般从  $e_1$  开始), 检查与  $e_1$  相关联的边。将边  $e_1, e_2$  的补链分别制作成探针  $P_1, P_2$ 。利用  $P_1$  将含有边  $e_1$  的链分离出来, 切掉  $e_1$  从新连接起来, 这时得到的  $T_1$  试管不含有  $e_1$ 。同理利用  $P_2$  得到不含有边  $e_2$  的试管  $T_2$ 。这时将得到的新的试管  $T_1, T_2$  再混合一起作为试管  $T_0$ 。

**步骤 3:** 检查是否有两边关于顶点关联, 若有重复步骤 1, 直到任两边都没有顶点关联。这样得到的试管中就含有需要的解。

**步骤 4:** 利用凝胶电泳技术测出最长的 DNA 片段 (可能不止一条) 读出其解, 既是所求的最大匹配。

### 2.3 DNA 编码

**步骤 1:** 将图  $G$  的顶点和边进行编码, 顶点用含 20 个碱基对的 DNA 片段表示。边的编码可用 20 个碱基对的 DNA 片段表示, 将所有边的编码两端加上限制性内切酶, 然后把边所对应的寡聚核苷酸片段与连接酶一起加入缓冲液, 在特定温度下使其连接成一条长链。加入聚合酶、引物, 利用 Watson - Crick 互补原则, 在 3' 端不断地扩增 DNA 分子, 从而使所有单链 DNA 链都以双链的形式存在, 以增加 DNA 链的稳定性。在反应后的产物中加入底物 DNA 分子, 适量的引物 (图  $G$  的顶点所对应的寡聚核苷酸片段的补链), DNA 聚合酶及缓冲液进行 PCR - 扩增, 对这些产物进行纯化, 然后对于纯化后的产物进行分离。把这些双链 DNA 作为最初的数据池  $T_0$ 。 $T_0$  中含有 DNA 链  $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$ 。

$e_1$ : ATGCCTCATACGGCTTTCAG  
 $e_2$ : GGCTTATGCAAAGCTTTCTA  
 $e_3$ : CCATATAGCTAACCTGCTAG  
 $e_4$ : TTGACTCTAGAATTCTCGAT  
 $e_5$ : GTAGACTAGCTAGGTTTCTA  
 $e_6$ : GATCTAGCTTACTAGTCCCC  
 $e_7$ : AAAATTGCCTTGCATATACA

图 3 边的编码

**步骤 2:** 将  $T_0$  分为两个试管  $T_1, T_2$ 。选取图  $G$  的一条边  $e_1$  (一般从  $e_1$  开始), 检测到  $e_1$  与  $e_2$  关于顶点  $v_1$  关联, 将边  $e_1, e_2$  的补链分别制作成探针  $P_1$ 、

$P_2$ 。在表示  $e_1$  的寡聚核苷酸片段的补链 DNA 单链的 5'端添加一个聚酯纤维 A,在标记上生物素。使这些 DNA 单链和抗原蛋白质在含有 ATP <sub>$\gamma$</sub> S 溶液混合,在一定条件下生成核蛋白细状体,把这些核蛋白细状体的 DNA 链作为模板构造探针  $P_1$ 。将第一个探针混合到数据池中,在一定条件下根据 Hoogsteen 配对原则,这个探针将与含有  $e_1$  的双链 DNA 结合生成三螺旋结构的 DNA,再利用生物操作中的分离操作将没有生成三链的双链 DNA 除去。利用内切酶的作用将  $e_1$  边的编码从链上连同探针一起切除。加热解链,冲洗掉补链,得到的探针可以再用。这时得到的 DNA 链不再含有边  $e_1$ ,还作为试管  $T_1$ 。利用同样的方法可以得到不含有边  $e_2$  的 DNA 链,作为试管  $T_2$ ,将两个试管混合作为试管  $T_0$ 。这时  $T_0$  试管中含有 DNA 链  $\{e_1, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$  和  $\{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$ 。

**步骤 3:**检测图  $G$  中是否还有边关联,若有,重复上述步骤,得到最终的试管  $T_0$ 。必将含有所需的解。

**步骤 4:**利用凝胶电泳技术测出最长的 DNA 片段,用 PCR 扩增和纯化后,提取这些链。采用非放射性标记 DNA 测序的方法,进行测序,可得到最长的 DNA 链的碱基排序,也即知道了图的最大匹配,  $M_1 = \{e_2, e_3, e_7\}$ 、 $M_2 = \{e_2, e_6, e_7\}$ 、 $M_3 = \{e_1, e_4, e_7\}$  和  $M_4 = \{e_1, e_6, e_7\}$ 。

### 3 结论

利用三链模型来解决最大匹配问题相对其他模型计算时错解率要低一些,因为生成数据池时,存在的都是双螺旋结构的 DNA 链,而双链 DNA 的稳定性较单链 DNA 的稳定性强,在数据池中就不会出现由于编码问题而出现的“发夹”结构,从而使生物化学反应更为充分,效率更高。而对于三链 DNA 的分离也相对双链 DNA 的分离较容易些。当然对于实际问题的求解,还存在着一些生物技术上的问题,需进一步研究。另外,此模型的复杂度与顶点的度有关。作为有  $n$  个顶点和  $m$  条边的无向图,利用三链模型计算它的最大匹配。根据模型分析,编码及生物操作的复杂度仅随顶点和边的增

加而增加,且呈线性关系  $O(n)$ 。模型中由于需要利用内切酶把某条边对应的 DNA 片段切除,可能会因为生物技术或是问题规模的扩大,而产生伪解或错解。随着生物技术的发展,这些问题会得到解决。目前,在理论上用三链模型已经解决了不少问题,更加体现了这种模型得优点。随着分子生物学技术的发展,这种 DNA 计算模型的生物操作将会得以更好的实现,模型的通用性将进一步提升。

### 参考文献:

- [1] LIU QINGHUA, LIMAN WANG, ANTHONY G FRUTOS, et al. DNA computing on surfaces [J]. Nature, 2000, 403 (13): 175 - 178.
- [2] GAO LIN, XU JIN. DNA solution of vertex cover problem based on sticker model [J]. Chinese Journal of Electronics, 2002, 11 (2): 280 - 284.
- [3] KARL HEINZ ZIMMERMANN. Efficient DNA sticker algorithms for NP complete graph problems [J]. Computer Physics Communications, 2002, 144: 297 - 309.
- [4] BRAICH R S, CHELYAPOV N JOHNSON, et al. Solution of a 20 - variable 3 - SAT problem on a DNA computer [J]. Science, 2002, 296: 499 - 502.
- [5] BENENSON Y, TAMAR P, ADAR R, et al. Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules [J]. Nature, 2001, 414 (22): 430 - 434.
- [6] 许进,董亚非,魏小鹏. 粘贴 DNA 计算机模型 (I): 理论 [J]. 科学通报, 2004, 49 (3): 205 - 212.
- [7] 许进,李三平,董亚非,等. 粘贴 DNA 计算机模型 (II): 应用 [J]. 科学通报, 2004, 49 (4): 299 - 307.
- [8] S TYAGI, F R KRAMER. Molecular beacon: probes that fluoresce upon hybridization [J]. Nat Biotechnol, 1996, 14: 303 - 308.
- [9] SHIGEMORI Y, OISHI M. Specific cleavage of DNA molecules at RecA - mediated triple - stranded structure [J]. Nucleic Acids Research, 2004, 32 (15): 4 563 - 4 575.
- [10] RAO B J, DUTREIX M, RADDING C M. Stable three - stranded DNA made by RecA protein [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1991, 88 (8): 2 984 - 2 988.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 松软突出煤层钻孔护壁力学作用机理分析

王永龙, 翟新献, 孙玉宁

(河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**为了解决松软突出煤层钻进问题,提高钻进深度,为了有效阻止松软煤层抽采钻孔塌孔的情况,在讨论了不同钻孔护壁方法的技术原理的基础上,结合弹塑性“围岩-支护”理论,建立钻孔护壁力学模型,采用数值分析的方法,分析钻孔在不同内压条件下,钻孔周围煤体应力、变形量变化规律。研究结果表明,伴随孔壁内压增大,钻孔变形量呈减小趋势,最大主应力 $\sigma_1$ 峰值位置左移,塑性松动区呈缩小趋势;次主应力 $\sigma_3$ 对应曲线整体上移,钻孔周边的应力集中现象有增长趋势。通过钻孔护壁力学作用机理分析,应用钻孔护壁技术,可有效减小或阻止钻孔变形,预防塌孔,保证钻孔的最大排渣空间,有利于施工较深的瓦斯抽采钻孔。

**关键词:**钻孔护壁;松软煤层;瓦斯抽采

**中图分类号:**TD823.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0050-06

## Analysis of Mechanism of Borehole Wall Protection in Soft Coal Seams with Outburst Threat

WANG Yong-long, ZHAI Xin-xian, SUN Yu-ning

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

**Abstract:** Borehole wall protection technology is an effective tool to prevent the soft coal seam borehole collapse. Based on discusses of technical principles of borehole wall protection methods, combined with elasto-plastic surrounding rock and support theory, borehole wall protection mechanics model was created, by using numerical analysis method, under different internal stress the parameters were analyzed, such as stress in coal body around borehole, and deformation changes regulation. The research results showed that with the internal stress increase within the borehole wall, borehole deformation shows decreasing trend, the peak position of maximum principal stress  $\sigma_1$  moves to the left, plastic loosen area shows shrinking trend; curve corresponding to the secondary principal stress  $\sigma_3$  moves up; stress concentration phenomenon surrounding the borehole shows growth trend. Based on the analysis of mechanical effect mechanism of borehole wall protection, application of borehole wall protection technology can effectively reduce or prevent borehole from deformation, and borehole collapse, so as to ensure the maximum slagging space in borehole, which is conducive to construction of deeper gas drainage borehole.

**Key words:** borehole wall protection; soft coal seam; gas drainage

本煤层深孔钻进技术是井下瓦斯抽采的关键技术之一。钻孔深度决定着瓦斯抽采的范围和效率,同时也间接影响回采的效率。由于我国煤层条件复杂多变,本煤层深孔钻进的难易程度差别很大,有很多技术难题和技术矛盾并没有得到根本解决。在我国,河南平煤集团、郑煤集团、义煤集团,

山西晋煤集团、阳煤集团,安徽淮南矿业集团,许多矿区煤层为松软突出煤层,煤坚固性系数为0.2~0.5,煤体松软,且瓦斯压力波动较大,施工钻孔难度大。在施工过程中,钻孔在地应力、瓦斯压力和钻杆扰动力的作用下,钻孔变形量大,在钻孔深部易出现塌孔,卡钻、断钻事故频发,严重影响钻进深

度和钻进效率。

多年来,国内外科研人员进行了各种技术途径的研究,取得了一些成果。钻机方面,引进了国外的千米钻机<sup>[1]</sup>;国内钻机逐步趋于大扭矩,如ZDY3200、ZDY4000、ZDY6000等系列钻机<sup>[2]</sup>;同时,近几年煤炭科学研究总院西安研究院开发研制了ZDY6000LD(A)型履带式全液压千米定向钻机<sup>[3]</sup>。钻具方面,先后提出扒孔降温钻具<sup>[4-5]</sup>、低螺旋钻杆<sup>[6-7]</sup>和三棱钻杆<sup>[8]</sup>。上述钻进装备方面的研究,对于提高松软煤层钻进深度,缓解松软煤层的钻进问题具有一定的推动作用。

为解决松软突出煤层的钻进难题,科研人员将钻孔护壁技术应用于松软煤层钻进,如研制套管,配合钻机,实现跟管钻进;应用保压钻进技术,在孔内形成高压流体,即,孔壁形成内压,预防塌孔;在钻进过程中,向孔壁喷涂泥浆,提高孔壁强度等一系列措施。

上述系列钻孔护壁措施,其根本原理是在钻孔内壁形成预防钻孔塌孔的内压,因此,钻孔护壁技术中孔壁内压是一个极为重要的参数。本文通过系统分析常用钻孔护壁技术的原理,基于弹塑性“围岩-支护”体系理论分析,建立相应数学模型;通过设置不同的钻孔内压,对比分析钻孔孔壁施加内压后,对钻孔变形、应力的影响,让工程技术人员更加清晰的认识钻孔护壁技术的作用机理,同时,也可为钻孔护壁技术提供可参考的技术参数及分析方法。

## 1 常用钻孔护壁技术

根据常用钻孔护壁技术特点,将钻孔护壁技术分为主动式钻孔护壁和被动式钻孔护壁。

### 1.1 主动式钻孔护壁方法

主动式钻孔护壁,是指成孔与钻孔护壁同步进行。

1) 国外专用套管钻机。主动式钻孔护壁方法的应用较早,同时应用也较为广泛。国外套管钻机的研制与应用也是套管护壁技术的一种体现,套管钻机为法国贝诺脱首创,随后在日本、英国等国引进并改进,已有60多年的历史。套管钻机主要应用于钻孔灌注桩的各类施工,但也有应用于煤矿钻孔施工的,如日本太平洋兴发株式会社研制的双重管钻机,2004年该钻机在鹤煤业集团六矿进行了试验。该钻机的原理是:套管护孔钻进,钻屑由套

管与钻杆之间的夹层排出,防止钻孔塌孔和堵塞。在本煤层打钻的过程,由于地质构造(断层、构造煤)的因素使得深孔钻进难以实现,多数钻孔深度50~100 m。该钻机配套设备庞大,需要较大钻场,难以适应井下条件,钻套去除困难,钻进工艺复杂,钻进效率偏低。

2) 国内跟管钻进技术。在我国,松软突出煤层,煤体松散,钻孔变形严重,施工时钻孔随钻随垮,出现卡钻、抱钻等钻孔事故,钻孔长度难以达到设计要求,无法实现成孔退钻后,再下套管护孔。考虑到顶钻、卡钻只在塌孔地段发生,如在该区段内考虑拖埋护孔钢管或塑料管,就能防止喷孔塌孔后钻孔堵塞。湖南省煤炭科学研究所研制了采用拖动式下套管方式,有针对性地对煤孔缩径区段进行下套护孔<sup>[9]</sup>,通过工业性试验取得了不错的效果。

3) 孔内水压护壁技术。孔内水压护壁技术主要应用于钻进工程中,在钻孔中通入一定压力的水或泥浆,即可排出钻屑,同时可预防孔壁失稳形成塌孔。文献[10]提出突出煤层保压钻进切缝设备及其方法可以防止在钻进过程中发生喷孔或者塌孔,实现松软突出煤层深孔钻进。

### 1.2 被动式钻孔护壁方法

被动式钻孔护壁的重要技术特点是先成孔,后护壁。钻孔完成后,通过钻杆内部向已成孔的煤层中下入筛管,筛管为钢管或塑料管(钢化管),防止煤层塌孔后钻孔堵塞。延长瓦斯的抽采时间。下筛管的方法有两种:一种是钻孔打到位后,先起出钻杆再下套管;另一种是从钻杆内直接下套管。钻杆内直接下套管近几年应用较为广泛,具体方法是钻孔到达预定孔深后,将抗静电阻燃可碎性筛管通过大通孔钻杆的内孔下到钻孔内,并将钻头顶脱,然后将钻杆提出孔外,将筛管留在孔内并成为瓦斯排出煤层或抽采瓦斯的通道<sup>[11]</sup>。

该方法也可归类于护壁技术的应用,是被动式钻孔护壁方法最为被动的一种方式,由于不能与钻进过程同步,因此,它只能是钻孔施工完成后,为防止钻孔变形量过大造成塌孔而影响瓦斯抽采,也就是说它对于后期抽采具有不错的效果,但对于成孔过程遇到的卡钻、塌孔无任何预防作用。

综上分析,无论主动式钻孔护壁方法,还是被动式钻孔护壁方法,其基本原理都是通过向钻孔内部加支撑管或直接加内压形式,由于采取的方式不同,内压形成的时间和方式有所不同,支撑管对孔壁形

成的支护压力,时间上滞后于钻孔变形,直接加内压形式可与钻进同步,但需要解决的技术问题较多。

## 2 钻孔护壁力学模型

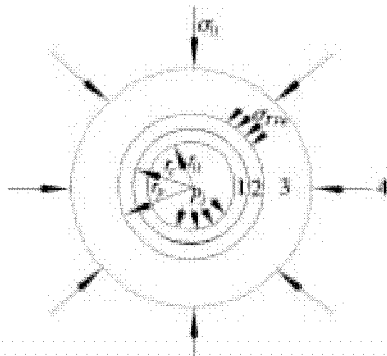
### 2.1 基本假设

瓦斯抽采钻孔可视为微型圆形巷道,基于钻孔护壁原理及其采用的技术手段,相当于在钻孔内壁形成内压,减少或阻止钻杆变形的进一步扩大。设煤层围岩为均质,各向同性弹塑性材料服从 Mohr - Coulomb 强度准则。钻孔断面为圆形,且钻孔沿轴向长度较长,当埋深远大于或等于 20 倍开挖巷道半径时,可忽略巷道影响范围内岩石的重力,从而可将此开挖问题简化为平面应变模型进行分析<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 钻孔模型的弹塑性分析

钻孔成孔后,由于应力重新分布,钻孔周围煤岩中形成塑性区和弹性区,在考虑内压的情况下,可应用弹塑性支护理论,将“支护 - 围岩”作为一个体系,通过对围岩的弹塑性分析,获得围岩应力、变形和塑性区半径的计算方法<sup>[14]</sup>(见图 1)。

随着距孔壁距离增大,径向应力  $\sigma_r$  由零逐渐增大,应力状态由孔壁的单向应力状态逐渐转化为双向应力状态,围岩也就由塑性状态逐渐转化为弹性状态。围岩中形成塑性区 1、2,弹性区 3,原岩应力区 4。塑性区 1 为应力降低区,一般称之为“松动圈”,设其半径为  $r_c$ ,塑性松动圈的出现,使圈内一定范围内的应力因释放而明显降低,而最大应力集中由原来的洞壁移至塑性圈、弹性圈交界处,使弹性区的应力明显升高。塑性区 2 与弹性区 3 相当于原岩应力为应力升高区,一般称之为“承载区”。



1. 塑性区 - 松动区(松动圈); 2. 塑性区 - 承载区; 3. 弹性区 - 承载区; 4. 原岩应力区

图1 钻孔周围应力分布

基于上述假设条件,开挖半径为  $r_0$  钻孔,处于自然变形状态,设岩体中的初始应力区为  $\sigma_H = \sigma_V = \sigma_0$ ,圈内岩体强度服从莫尔直线强度条件,塑性圈以外围岩体仍处于弹性状态,在轴对称条件下进行围岩应力及变形的弹塑性求解。

1) 塑性区应力、位移求解方程。

塑性区半径

$$R_p = r_0 \left( \frac{(\sigma_0 + c \cot \varphi) (1 - \sin \varphi)}{p_i + c \cot \varphi} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

塑性区应力

$$\sigma_r^p = (p_i + c \cot \varphi) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (2)$$

$$\sigma_\theta^p = (p_i + c \cot \varphi) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - c \cot \varphi \quad (3)$$

塑性区位移

$$u_{pr} = \frac{(\sigma_0 \sin \varphi + c \cos \varphi) R_p^2}{2Gr} \quad (4)$$

式中:  $R_p$  为塑性区半径;  $u_{pr}$  为塑性区位移;  $c$  为粘聚力, MPa;  $p_i$  为钻孔壁内压;  $r_0$  为钻孔半径, m;  $r$  为到钻孔中心的距离, m;  $\varphi$  为内摩擦角;  $G$  为剪切模量, MPa。

2) 弹性区与塑性区交界面应力求解方程。

$$\sigma_{rpe} = \sigma_0 (1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta pe} = \sigma_0 (1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi \quad (6)$$

3) 弹性区应力、位移求解方程式(适用范围:  $R_p \leq r \leq \infty$ )。

$$\sigma_r^e = \sigma_0 - (\sigma_0 \sin \varphi + c \cos \varphi) \left( \frac{R_p}{r} \right)^2 \quad (7)$$

$$\sigma_\theta^e = \sigma_0 + (\sigma_0 \sin \varphi + c \cos \varphi) \left( \frac{R_p}{r} \right)^2 \quad (8)$$

弹性区位移

$$u_{er} = \frac{(\sigma_0 - p_i) r}{2G} \quad (9)$$

由式(7) ~ 式(8)可知,弹塑性圈交界面上的重分布应力仅与  $\sigma_0$  和  $c, \varphi$  有关。

4) 钻孔壁应力求解方程。塑性圈内钻孔壁围岩重分布应力与岩体天然应力  $\sigma_0$  无关,而取决于岩体强度  $c, \varphi$  值,其求解方程为

$$\sigma_r = p_i \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = p_i \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$



3 钻孔护壁力学原理数值计算

3.1 计算模型及材料参数

基于弹塑性“支护-围岩”体系理论分析,采用有限元方法,对钻孔开挖进行数值计算。设钻孔平均直径为0.2m,煤层埋深为600m。基于钻孔护壁原理,通过在钻孔内壁设置内压的形式进行数值计算,钻孔内壁设置内压方式为 $k\gamma H$ , $k$ 为内压系数, $\gamma H$ 为原始地应力。

本计算建立 $k=0.12$ 、 $k=0.08$ 、 $k=0.04$ 、 $k=0.01$ 、 $k=0$ 五种模型(见图2)。

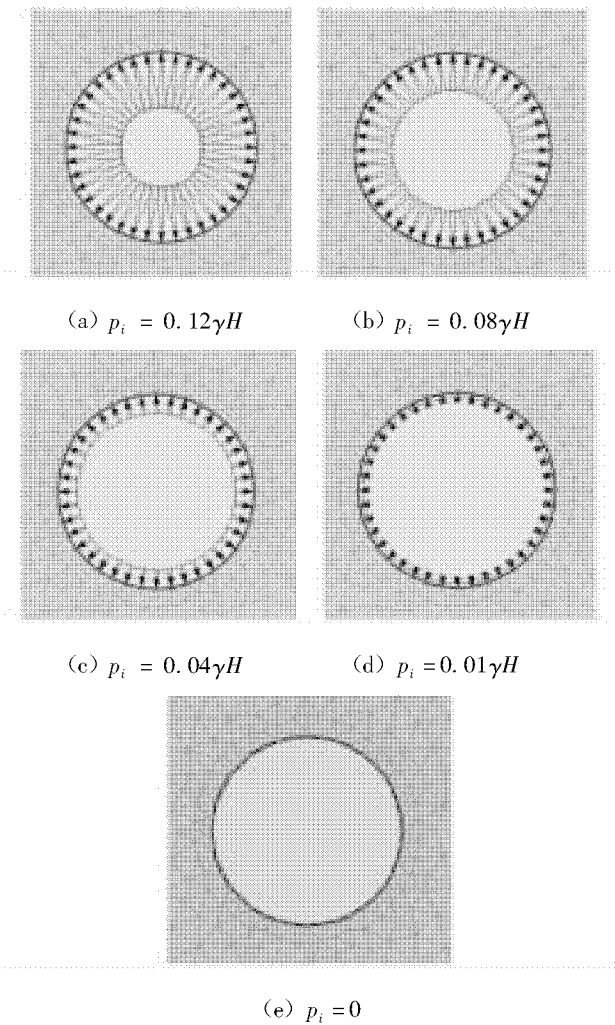


图2 钻孔计算模型

本数值模拟计算钻孔护壁技术应用于较为松软煤层情况,因此,对于煤体力学参数的设定,参照文献[15-16]对煤体力学参数的研究和选择,煤体材料力学参数如表1所示。

表1 材料力学参数

	弹性模量/ MPa	岩体抗压强度/ MPa	内摩擦角/ (°)	粘结力/ MPa
软煤	2104	2.31	26.52	0.91

3.2 内压作用机理初步分析

首先将图2b和图2e计算结果进行对比分析,即考虑有内压和无内压时,孔壁变形量、应力变化情况。

为分析钻孔在不同内压作用下,钻孔变形及应力变化情况(见图3),将OA线作为计算结果数据提取观测线,起点为O,终点为A。

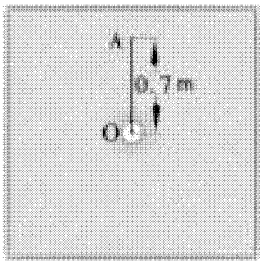


图3 钻孔计算模型观测线

钻孔变形量、应力沿观测线长度变化趋势如图4所示。坐标以钻孔中心为坐标圆点,沿钻孔观测线长度方向,对照图2钻孔周围弹塑性应力分布,同样分为四个区域:Ⅰ塑性松动区、Ⅱ塑性承载区、Ⅲ弹性承载区和Ⅳ原岩应力区。钻孔周边虚线代表当 $k=0$ 时钻孔周围弹塑性应力分布区域,实线表示当 $k=0.08$ 时钻孔周围弹塑性应力分布区域。

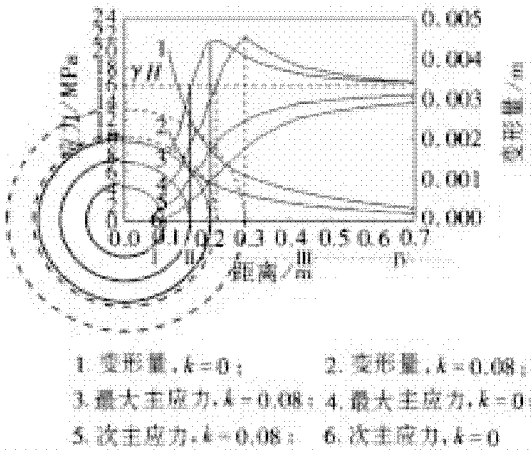


图4 钻孔变形量、应力沿观测线长度变化趋势图

孔壁施加内压后,基于图4结果,进行如下分析:

1) 内压系数由 $k=0$ 到 $k=0.08$ ,塑性松动区Ⅰ与塑性承载区Ⅱ交界线、塑性承载区Ⅱ与弹性承

载区Ⅲ交界线由虚线位置收缩到实线位置,在孔壁内压作用下,塑性松动区呈缩小趋势,最大主应力 $\sigma_1$ 的初值上移增大,峰值位置左移。

2) 内压系数由 $k=0$ 到 $k=0.08$ ,次主应力 $\sigma_3$ 的初值上移增大,在钻孔周边的应力区域, $\sigma_3$ 对应曲线整体上移。

3) 内压系数由 $k=0$ 到 $k=0.08$ ,孔壁最大变形量减小了接近 1 倍,沿观测线长度方向钻孔变形量逐渐减小。

### 3.3 孔壁变形量、应力变化规律分析

1) 钻孔变形量。钻孔变形量沿观测线长度变化趋势如图 5 所示。当 $k=0$ 时,即,未采取孔壁支护技术,孔壁变形量达到最大值,煤孔的变形量接近 4.5 mm,根据钻孔的对称性,钻孔底部凸起变形也将达到 4.5 mm,排渣空间平均高度缩小 9 mm,由于钻孔空间缩小,排渣阻力增大,易出现钻孔堵塞、卡钻等现象,使钻进难以进行;当在钻孔内壁加内压时,随着内压的逐渐增大,钻孔壁的变形量逐渐缩小,这也证明采用钻孔护壁技术,可有效的减小或阻止钻孔变形量,保证钻孔上部有较大的排渣空间,相应保障了排渣顺畅。

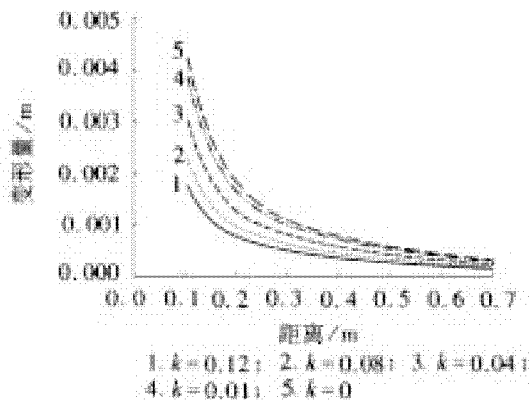


图 5 变形量沿观测线长度方向分布图

2) 钻孔应力分析。提取最大主应力 $\sigma_1$ 沿观测线 OA 的应力值(见图 6), $\sigma_1$ 在本计算中为切向应力,伴随孔壁内压逐渐增大,即内压系数由 $k=0$ 增长到 $k=0.12$ ,最大主应力曲线整体向钻孔中心线移动。随着孔壁内压增大,钻孔周边最大主应力峰值也呈增大趋势,可见,随着内压的增大,塑性承载区Ⅱ与弹性承载区Ⅲ交界处的应力集中程度也明显增高。

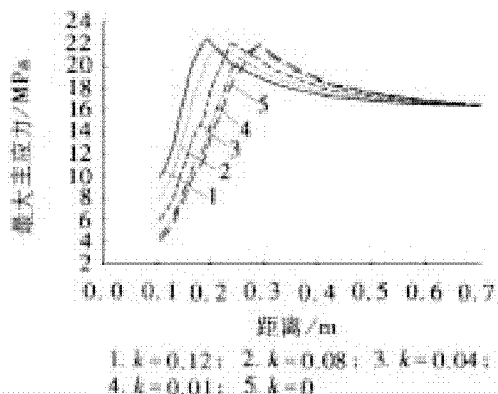


图 6 最大主应力沿观测线长度方向分布图

通过提取次主应力 $\sigma_3$ 沿观测线 OA 的应力变化对比图(见图 7), $\sigma_3$ 在本计算中为径向应力,伴随孔壁内压逐渐增大, $\sigma_3$ 曲线整体上移。在钻孔的内壁,当 $k=0$ 时,孔壁的径向应力为 0,伴随孔壁内压逐渐增大,孔壁的径向应力值与内压值相等,结合图 7,这与式(10)的理论计算结果保持一致。

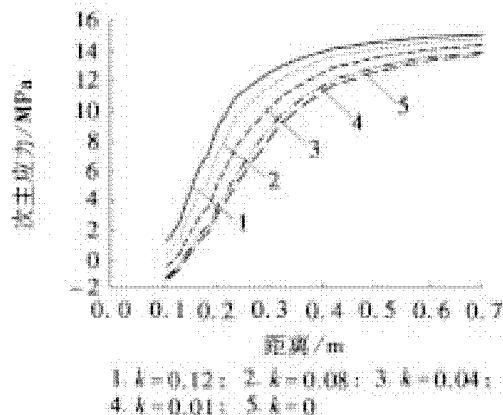


图 7 次主应力沿观测线长度方向分布图

3) 钻孔塑性范围分析。当孔壁未施加内压时,即当 $k=0$ 时,钻孔周边屈服百分比为 100%,表明该范围之内,煤体受剪切破坏或拉伸破坏影响,形成塑性松动区(见图 8),未施加内压时,形成的松动圈半径约为 0.3 m,从该位置向煤体深处延伸,煤体的屈服百分比逐渐降低,即煤体进入塑性承载区,到接近 0.4 m 处,屈服百分比为 0,表明煤体由塑性承载区向弹性过渡。当孔壁内压逐渐增大时,钻孔周边的塑性松动区半径逐渐减小,当 $k=0.12$ 时,塑性松动区半径已缩小到 0.2 m 以内。

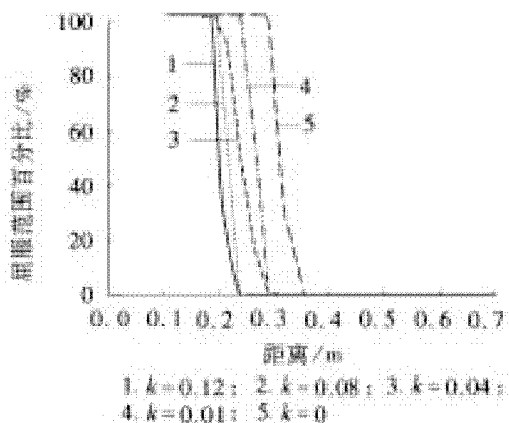


图8 钻孔屈服范围百分比沿观测线长度方向分布图

## 4 结论

1) 基于弹塑性“围岩-支护”体系理论,结合Mohr-Coulomb强度准则,对钻孔开挖进行数值计算,通过设置不同的钻孔内压,对比分析钻孔孔壁施加内压后,对钻孔变形、应力的影响。计算结果表明钻孔孔壁施加内压后,伴随孔壁内压增大,可有效减小钻孔变形量,本计算中,钻孔变形量减小了近1倍;塑性松动区呈缩小趋势,最大主应力 $\sigma_1$ 的初值上移增大,峰值位置左移;次主应力 $\sigma_3$ 对应曲线整体上移,钻孔周边的应力集中现象有增长趋势,且应力集中区域向钻孔中心靠近。

2) 孔壁施加内压后,通过对钻孔周边变形量的分析可知,采取钻孔护壁技术方案后,当采用的方案能够在孔壁形成主动内压时,可有效减小钻孔变形量,预防塌孔,保证钻孔的最大排渣空间,有利于施工较深的瓦斯抽采钻孔;当采用的方案未能在孔壁形成主动内压时,也可预防钻孔松动区失稳并形成塌孔,有利于后期的瓦斯抽采。

3) 孔壁施加内压后,通过对钻孔周边 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 变化规律的分析可知,在实际工程中,采取钻孔护壁技术后,钻孔周边的应力分布发生了明显的变化,内压越大,在钻孔周边的应力集中现象越明显,考虑钻孔周边煤体流变效应,如采用套管护孔时,套管材料要有一定的耐压能力,同时要有一定的韧性,不宜采用脆性材料。因此,结合实际煤层地质条件,匹配最佳护壁方案,可采用本文阐述的分析手段,计算钻孔形成后的应力分布特点,根据计算结果科学的选择护孔方案及材料。

4) 对于较为松软煤体,钻孔形成后,钻孔未采取钻孔护壁技术方案时,钻孔周边煤体存在着较大范围的松动区,该区域的煤体,在外界扰动作用下,随时有可能发生失稳、塌孔,影响钻孔或后期瓦斯

抽采,因此,深入开展松软煤层瓦斯抽采护孔技术,具有重要的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 林柏泉,李庆钊,杨威,等.基于千米钻机的“三软”煤层瓦斯治理技术及应用[J].煤炭学报,2011,36(12):1968-1973.
- [2] 姚宁平,殷新胜,姚克.ZDY4000S型全液压钻机及救援钻孔配套钻具的研制[J].煤炭科学技术,2005,33(4):70-72.
- [3] 方鹏,田宏亮,郭迪,等.ZDY6000LD(A)型履带式全液压定向钻机及其应用[J].煤田地质与勘探,2011,39(2):74-77.
- [4] 孙玉宁.突出煤层扒孔降温钻具及其钻进方法:中国,CN101131069[P].2008-02-27.
- [5] 王永龙,翟新献,孙玉宁.刻槽钻杆应用于突出煤层钻进的合理参数研究[J].煤炭学报,2011,36(2):304-307.
- [6] 王永龙,孙玉宁,翟新献,等.松软突出煤层新型钻进技术研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):289-294.
- [7] 孙玉宁,王永龙,翟新献,等.松软突出煤层钻进困难的原因分析[J].煤炭学报,2012,37(1):117-121.
- [8] 凌标灿,戴世鑫,曹承平,等.三棱钻杆在中软煤层顺层瓦斯抽排钻孔的应用[J].煤炭科学技术,2009,37(10):44-46.
- [9] 周松元,赵军,刘学服,等.严重喷孔松软煤层成孔工艺与装备研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2011,26(4):11-16.
- [10] 刘玉洲,孙玉宁.突出煤层保压钻进切缝设备及其方法:中国,200510059889.1[P].2009-02-18.
- [11] 殷新胜,凡东,姚克,等.松软突出煤层中风压空气钻进工艺及配套装备[J].煤炭科学技术,2009,37(9):72-74.
- [12] 尤明庆.岩石强度准则的数学形式和参数确定的研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2173-2184.
- [13] 张黎明,王在泉,石磊.硬质岩石卸荷破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2012-2018.
- [14] 赵阳升,邵保平,万志军,等.高温高压下花岗岩中钻孔变形失稳临界条件研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):865-874.
- [15] 姚向荣,程功林,石必明.深部围岩遇弱结构瓦斯抽采钻孔失稳分析与成孔方法[J].煤炭学报,2010,35(12):2073-2081.
- [16] 申卫兵,张保平.不同煤阶煤岩力学参数测试[J].岩石力学与工程学报,2000(S1):860-862.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 高强钢筋混凝土井壁水平极限承载特性实验

吴娟, 钱魏魏

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对西部地区某煤矿冻结井筒的支护问题, 根据相似理论, 采用模型实验方法研究了高强混凝土井壁的水平极限承载特性。实验结果表明: 井壁结构在水平荷载达到 10 MPa 后, 钢筋应力进入屈服应力阶段, 表现出明显的塑性流动; 井壁破坏荷载达 18.4 MPa, 破坏前混凝土的最大环向应变可达  $-3\,400 \times 10^{-6}$ 。实验结果可为井筒支护参数优选和工程监测提供参数。

**关键词:** 高强井壁; 水平极限承载; 模型试验

**中图分类号:** TD262      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0056-04

## Horizontal Ultimate Bearing Capacity Test of High Strength Reinforced Concrete Shaft Lining

WU Juan, QIAN Wei-wei

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

**Abstract:** Aiming at the retaining problem of the freezing shaft lining of coal mines in the west areas of China, model test was conducted to study the horizontal ultimate bearing and deformation characteristics of high strength reinforced concrete shaft lining, based on the similarity theory. The results show that reinforcement stress goes into yield stress stage and shows obvious plastic flow when the shaft lining is under horizontal load greater than 10 MPa; The breaking load of shaft lining can reach 18.4 MPa, and the shear strain values of concrete can reach  $-3\,400 \times 10^{-6}$  when shaft lining is damaged. The test results can make parameter optimization and provide parameters for engineering monitoring of shaft lining.

**Key words:** high strength shaft lining; horizontal load-bearing; model experiment

近些年来西部大开发战略的大力实施, 西部煤炭的开发也在大规模的进行。西部矿井的井筒直径较大, 且所处的白垩系和侏罗系地层成岩晚、强度低。以内蒙古红庆河煤矿为例, 其主井筒的设计净值是 9.5 m, 在累深 495.71 m 处需穿过白垩系及侏罗系地层, 地层岩性以细砂、粉细砂为主。井筒穿过的三个主要含水层中, 第一含水层位于白垩系地层中, 第二、第三含水层位于侏罗系地层。采用冻结法施工时, 地层的冻结特性及水文地质条件与中、东部地区的差异较大, 地层冻胀性能等不确定因素多, 因此井壁多采用高强钢筋混凝土结构进行

支护。

对于高强钢筋混凝土井壁结构的力学特性研究方面, 国内已有较多的研究成果, 如对深表土中高强钢筋混凝土井壁力学性能的研究<sup>[1-2]</sup>, 这些研究成果对高强井壁结构设计及应用方面有重要指导意义。鉴于东、西部地区工程地质等方面的差异, 井壁设计参数并不能完全通用, 因此针对高强混凝土井壁在西部地区的应用开展相应井壁结构实验, 对优选支护参数和为工程监测提供参数等方面有重要意义。

1 实验模型设计

1.1 井壁原型

红庆河矿主井井筒深 786.0 m, 其井筒设计净值 9.5 m, 井壁采用双层钢筋混凝土结构, 井壁厚度 1.8 m, 采用的混凝土强度等级 C60 ~ C70。

1.2 相似模型设计

为弄清井壁的力学特性, 模型设计不仅需要满足应力和变形相似条件, 还应满足强度相似条件。依据相似理论和弹性力学的基本方程, 采用方程分析法, 推导出井壁模型相似准则<sup>[3]</sup>。

由几何方程得  $C_\delta C_l / C_\delta = 1$ ; 由边界方程得  $C_p / C_\sigma = 1$ ; 由物理方程得  $C_E C_\delta / C_\sigma = 1, C_\nu = 1$ 。其中  $C_l$  为几何常数;  $C_p$  为荷载(面力)相似常数;  $C_E$  为弹性模量相似常数;  $C_\delta$  为位移相似常数;  $C_\sigma$  为应力相似常数;  $C_\nu$  为泊松

比相似常数。

为使模型和原型井壁各部分的破坏荷载和破坏形态与原井壁完全相似, 不仅要满足上述弹性状态下应力、应变相似条件, 还应满足以下强度相似条件: 井壁模型与原型材料在加载全过程中应力 - 应变曲线相似; 井壁各部分材料的强度相似; 井壁破坏的强度准则相似。故试验模型采用原井壁结构材料, 有  $C_E = C_\sigma = C_p = C_R = 1; C_\delta = 1; C_\mu = 1; C_R$  为强度相似常数;  $C_\mu$  为配筋率相似常数。该情况下, 只需确定合适的几何相似常数即可。为使研究结果更具广泛性, 试验中不以某个具体井筒作为模拟对象, 而是考虑厚径比(即壁厚与内半径之比)的应用范围, 则相似常数  $C_K = 1$ 。根据冻结井壁的设计参数, 使通常井壁的厚径比都包括在内并结合试验加载装置尺寸, 确定的井壁模型参数如表 1 所示, 混凝土强度等级设计为 C60 ~ C70。模型试件的外径和高度分别为 925 mm 和 562.5 mm, 井壁模型结构如图 1 所示。

表 1 井壁试验模型参数

模型编号	模型外径/ mm	模型壁厚/ mm	模型内径/ mm	几何相似 常数	厚径比/ $\lambda$	配筋率/ %	混凝土强度 等级
HN-1	925	86.0	753	13.946	0.228 4	0.4	C60
HN-2	925	86.0	753	13.946	0.228 4	0.4	C70
HN-3	925	100	725	14.486	0.275 8	0.46	C60
HN-4	925	100	725	14.486	0.275 8	0.46	C70
HN-5	925	108	709	14.81	0.304 7	0.5	C60
HN-6	925	108	709	14.81	0.304 7	0.5	C70
HN-7	925	118	689	15.243	0.342 5	0.6	C60
HN-8	925	118	689	15.243	0.342 5	0.6	C70
HN-9	925	127.6	669.8	15.675	0.381 0	0.6	C70
HN-10	925	134.0	657.0	15.861	0.407 9	0.6	C70

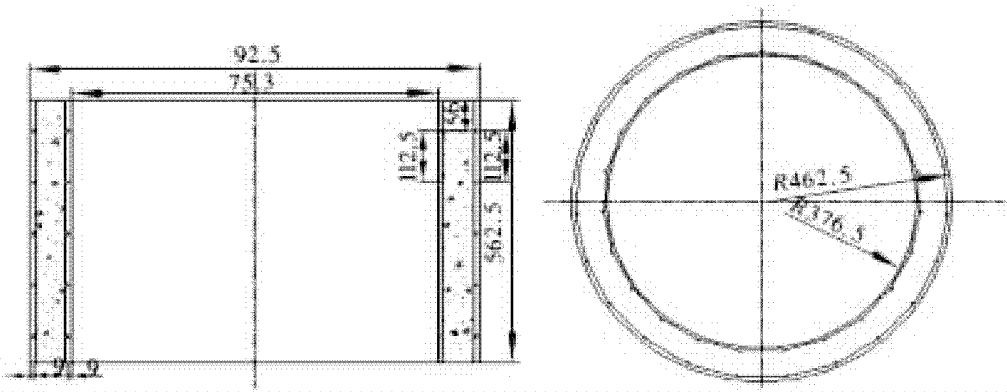


图 1 模型设计图

### 1.3 试验加载与测试方法

为了进行试验应力分析,试验前在每一模型试件的内外混凝土表面和钢筋上沿圆周方向布置4个点并粘贴电阻应变片(见图2~图3),并采用精密压力表和油压传感器测量施加的油压值,井壁加载装置如图4所示。试验时,先预加压6.0 MPa,然后分级稳压加载,并记录下每级荷载下的应变及最终的破坏荷载。

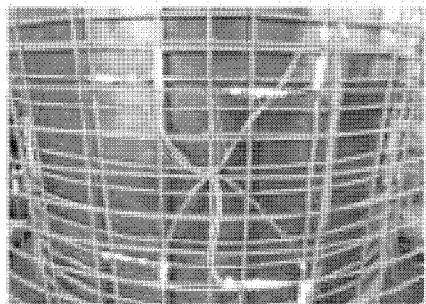


图2 钢筋测试元件布置



图3 混凝土测试元件布置

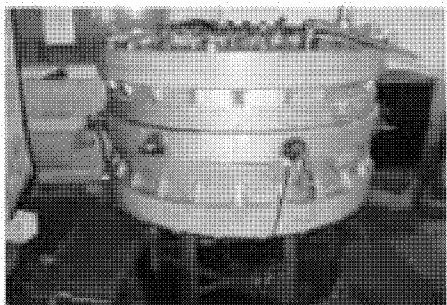


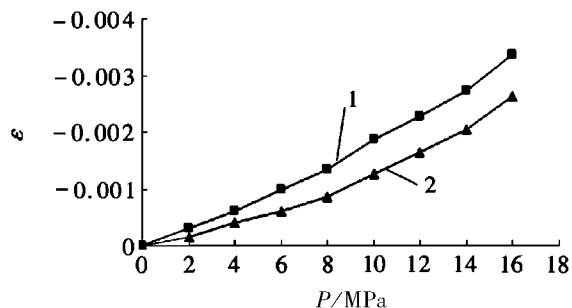
图4 高强井壁加载装置

## 2 实验结果分析

### 2.1 应变变化规律

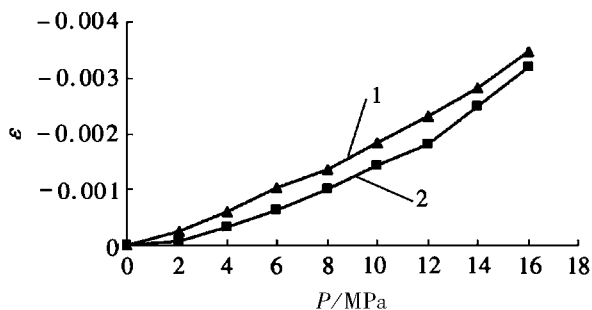
水平加载过程得到的荷载与应变曲线如图5~图6所示,钢筋与混凝土的竖向应变曲线形状较为一致,说明钢筋与混凝土的复合协调作用良好。在加载初期水平荷载不大于8 MPa时,混凝土与钢筋的变形主要表现为线弹性变形,且其内侧的应变

明显大于外侧应变。随着水平荷载增大到10 MPa,钢筋达到应力屈服,其应变值为 $-1\,400 \times 10^{-6}$ 。高强井壁的破坏荷载为18.4 MPa,破坏前混凝土达到的最大环向应变为 $-3\,400 \times 10^{-6}$ 。



1. 混凝土内缘;2. 混凝土外缘

图5 模型的混凝土荷载-环向应变曲线

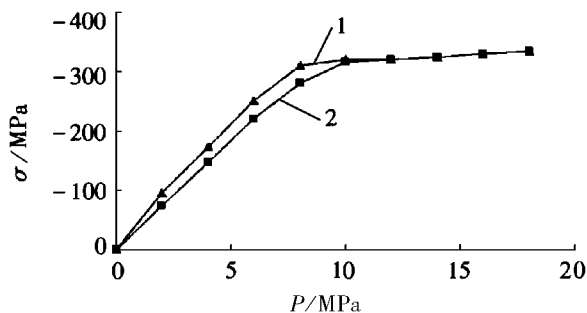


1. 内钢筋;2. 外钢筋

图6 模型的钢筋荷载-环向应变曲线

### 2.2 破坏特征与极限荷载

钢筋在水平荷载达到10 MPa进入塑性流动阶段,将不在分担井壁的外荷载(见图7)。因而,均匀侧压下钢筋能增加高强混凝土的延性,但不能提高井壁的承载能力。

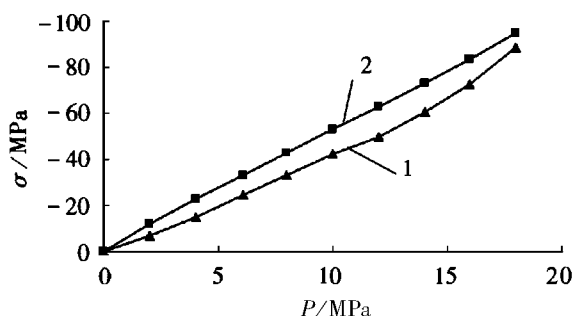


1. 内钢筋;2. 外钢筋

图7 模型的钢筋荷载-环向应力曲线

加载初期即水平荷载不大于8 MPa时,井壁的混凝土表现为近似的线弹性特征(见图8),截面的应力符合弹性厚壁筒应力分布规律。试验得到井壁极限承载力为18.4 MPa,破坏前井壁内缘混凝土的最大应力约为100 MPa。在受力全过程中,混凝土

土没有明显的弹塑性阶段,这表明高强混凝土井壁具有明显的脆性特征,故结构破坏时没有明显的变形特征。



1. 混凝土外缘;2. 混凝土内缘

图8 模型的混凝土荷载-环向应力曲线

当井壁承受较大的外荷载时,井壁内缘混凝土环向应力首先达到极限强度,由于内侧方向为自由方向,因此内侧混凝土将出现微小斜裂纹,且局部有脱皮现象(见图9)。随外荷载的继续增加,超过极限强度的高应力区由井壁内侧迅速向外侧发展,最终会在井壁混凝土质量较差处发生压剪破坏,形成一个贯穿整个厚度的破坏面(见图10)。井壁破裂时,有大块的脱落,并出现斜向的断裂裂纹,环向钢筋沿破坏面发生塑性弯曲,破坏面与最大主应力方向的夹角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ (见图11),且由于高强钢筋混凝土井壁在破坏前内部积聚了大量能量,所以试件破坏时发生的破裂声比普通钢筋混凝土井壁大。

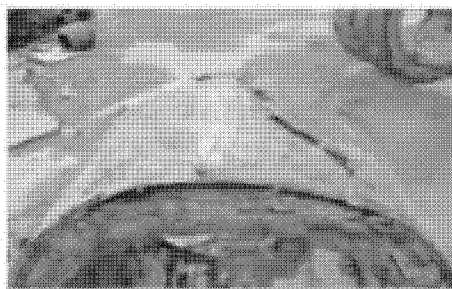


图9 井壁模型外侧破坏形态

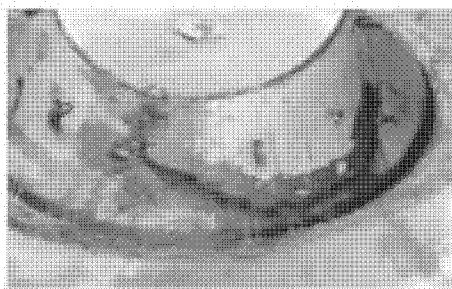


图10 井壁模型内侧破坏形态

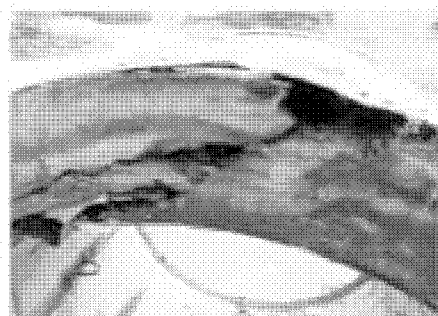


图11 井壁模型破裂面局部图

### 3 结论

针对红庆河矿井冻结井筒的支护问题,依据相似理论,通过采用模型实验方法来研究高强钢筋混凝土井壁的水平极限承载特性。实验结果表明:

- 1) 井壁结构在水平荷载达10 MPa后,钢筋进入屈服应力阶段,表现出明显的塑性流动;
- 2) 井壁破坏荷载达18.4 MPa,破坏时混凝土的环向应变可达 $-3\ 400 \times 10^{-6}$ ,混凝土的最大环向应力约为100 MPa;
- 3) 井壁发生压剪破坏,且破坏面与最大主应力方向的夹角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ;
- 4) 实验结果可为井筒支护参数优选和工程监测提供参数,且该试验方案及试验参数可作此类井壁结构设计参考。

### 参考文献:

- [1] 姚直书,程桦,杨俊杰.深表土中高强钢筋混凝土井壁力学性能的试验研究[J].煤炭学报,2004,29(2):167-171.
- [2] 荣传新,王秀喜,程桦,等.深厚冲积层高强钢筋混凝土井壁力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2 841-2 847.
- [3] 姚直书,程桦,荣传新.深冻结井筒内层钢板高强钢筋混凝土复合井壁试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):153-160.
- [4] 崔云龙.简明建井工程手册[M].北京:煤炭工业出版社,2003:1 423-1 429.
- [5] 黄小飞.特厚表土层冻结井壁的受力机理及设计理论研究[D].淮南:安徽理工大学,2006.
- [6] 韩涛,杨维好,任彦龙,等.钢管混凝土井壁水平极限承载特性的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):181-186.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

# 基于模糊层次分析的合成氨装置安全现状评价

刘 维<sup>1</sup>, 吕 品<sup>1</sup>, 薛益龙<sup>2</sup>, 吕祖鹏<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001 2. 滁州市安平安全工程技术有限公司, 安徽 滁州 239000)

**摘 要:**以合成氨装置安全现状评价为目的,结合“人—机—环境—管理”系统思想将影响合成氨装置安全现状的因素,分为工艺条件、员工素质、设备安全可靠度、职业卫生和安全管理等5大类和21小类。运用模糊数学方法对层次分析法进行改进,确定各指标因素的权重,构建合成氨装置安全现状综合评价模型,并运用该模型对某合成氨装置安全现状进行综合评价。结果表明:该评价方法可以有效地对合成氨装置安全现状进行综合评价。

**关键词:**模糊层次分析;安全现状;模糊综合评价;合成氨

**中图分类号:**X937 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0060-07

## Comprehensive Evaluation of Safety State of Synthetic Ammonia

### Device Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process

LIU Wei<sup>1</sup>, LV Pin<sup>1</sup>, XUE Yi-long<sup>2</sup>, LV Zu-peng<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001 China; 2. Chuzhou Anping Safety Engineering and Technical Co., Ltd, Chuzhou Anhui 239000, China)

**Abstract:** For comprehensively evaluating the safety state of Synthetic Ammonia Device, and according to the "human-machine-environment-management" system thinking, the impact factors of the safety state of Synthetic Ammonia Device were measured by 5 major indicators, and 21 sub-indicators. Based on the method of fuzzy mathematics, the study of analytic hierarchy process (AHP) was improved, and the weight sets are determined. A comprehensive model for evaluating the safety state of Synthetic Ammonia Device is proposed, where the weight of each indicator is determinate based on FAHP. The actual case was evaluated using this model and the result show that this model is feasible for evaluating the safety state of Synthetic Ammonia Device.

**Key words:** fuzzy analytic hierarchy process; safety status; fuzzy comprehensive evaluation; synthetic ammonia

安全现状评价是掌握企业生产安全状况综合等级的一种有效方法。近年来,为使得安全现状评价结果更客观、更准确,相继提出一些安全现状综合评价方法。文献[1]提出了“安全检查表—危险指数的计算、分级与评估—系统安全分析”的评价模式,对安全状况的等级采用危险指数法确定。文献[2]针对石化企业提出了一种基于熵技术的安

全模糊综合评价模型。文献[3]介绍了一种石化企业在役装置的安全评价方法——美国达信风险评价,该方法能够确定装置的风险等级。文献[4]运用基于层次分析—模糊综合评判的方法对电解车间安全现状评价进行了研究。

合成氨工艺被列为首批重点监管的危险化工工艺,合成氨生产过程具有高压、高温、深冷、连续



化、大型化的特点,原料和产品大多为易燃、易爆、有毒、有害物质,与其他行业生产相比,合成氨生产过程涉及的危险有害因素较多,如果操作失误或设备管理不善、年久失修等,这些危险有害因素就会转变为各种事故,危及人们的生命安全同时会造成财产损失,甚至会造成严重的环境污染。

合成氨生产工艺复杂,涉及的危险因素多,因此影响合成氨装置安全因素是多方面的,涵盖员工素质、工艺过程、生产设备、职业卫生和安全管理,每个因素的权重决定了对装置安全现状的影响程度,而各种因素又受其隶属因素的影响,因素相互关联、相互制约构成了一个复杂系统,具有一定的模糊性和随机性。

基于模糊层次分析的安全现状综合评价方法,适应了合成氨装置安全状况模糊性和随机性的特点。本文在分析合成氨装置安全现状综合评价指

标体系的基础上,运用模糊层次分析的指标权重确定方法和模糊综合评判理论,提出了一种合成氨装置安全现状综合评价方法,并应用于本地某合成氨装置的安全现状综合评价中,取得了较好的效果。

1 安全现状综合评价模型构建

通过对本地某化工企业合成氨装置的调查,并参考大量化工企业安全评价文献<sup>[4-8]</sup>,建立了合成氨装置安全现状综合评价模型。

1.1 评价流程

根据模糊层次分析法确定各指标因素对于装置安全的影响权值,采用模糊数学方法构建各影响因素对合成氨装置安全现状评价的隶属函数,然后进行综合评判,判断分析安全现状(见图 1)。

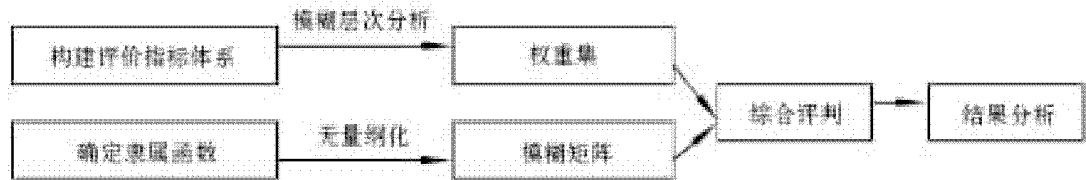


图 1 安全现状综合评价流程

1.2 评价指标体系的确立

建立安全现状综合评价指标体系时,要借鉴和参考系统理论和已有研究者的研究成果,反复研究,形成比较科学的评价指标体系。本文将合成氨

装置安全现状指标体系分为两个层次。第一层包括工艺条件、员工素质、设备安全可靠、职业卫生和安全管理,第二层次由第一层次指标分解组成(见图 2)。

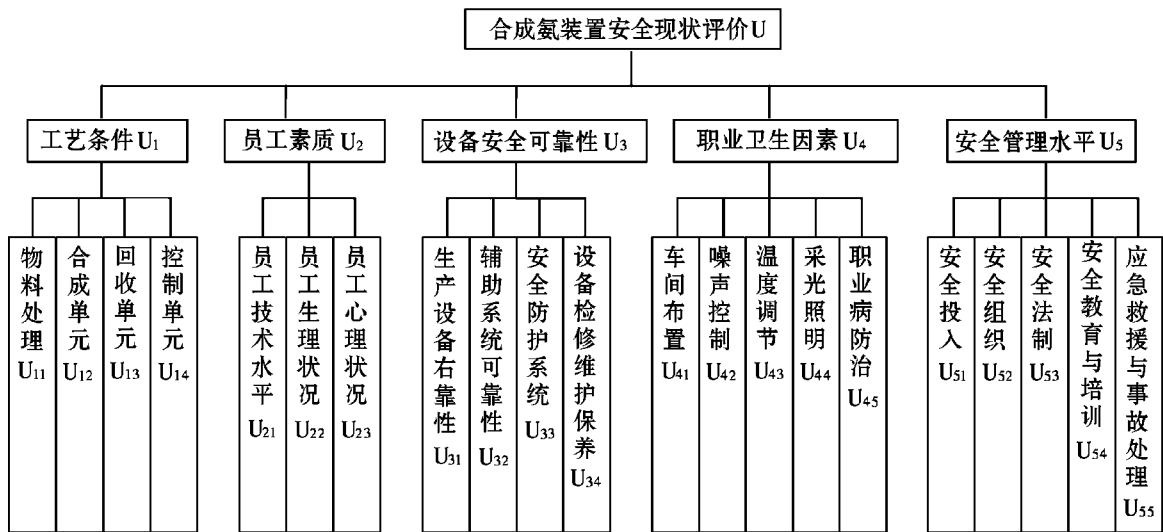


图 2 合成氨装置安全现状评价指标体系

### 1.3 模糊层次分析确定各指标权重

指标权重的确定方法有很多,如德尔菲法、相对比较法、最优权法、熵值法等<sup>[9]</sup>,每种方法都有各自的适用范围和优缺点。但这些都不能直接用于合成氨装置安全现状评价指标权重的确定,因为它不能直接通过定量计算确定,需要经过一个从定性到定量的转换过程。层次分析法就是一种很好的选择,但是其应用有一定的局限性。层次分析法采用1~9的整数及其倒数作为标度来构造判断矩阵,确定的数字表示评价者的主观判断,因此忽略了主观判断的模糊性。而且层次分析法建立判断矩阵后,对判断矩阵的一致性检验困难<sup>[10]</sup>。

为了克服上述困难和局限性,文献[11]将模

表1 模糊标度及其含义

	$a_2$ 决定 目标状况	$a_1$ 绝对没有 $a_2$ 重要	$a_1$ 明显没有 $a_2$ 重要	$a_1$ 与 $a_2$ 同等重要	$a_1$ 明显比 $a_2$ 重要	$a_1$ 绝对比 $a_2$ 重要	$a_1$ 决定 目标状况
元素 $a_1, a_2$ 重要性之比	0:10	1:9	3:7	5:5	7:3	9:1	10:0
标度值	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1

有了定量的标度,就容易通过比较得出模糊评判矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

模糊判断矩阵的一致性反映了人们思维判断的一致性,但在实际决策分析中,由于所研究问题的复杂性和人们认识上可能产生的片面性,使初步得到的判断矩阵常常是不一致的,这时需要进行变换以获得模糊一致矩阵。变换的原则是以符合专家的判断习惯为前提,在尽可能多地保留原判断矩阵信息的基础上,使变换过程尽可能简便、易操作和计算量小。

利用文献[14]提出的经过文献[13]参数修正后的转换公式把模糊互补矩阵变换为模糊一致矩阵。即:若存在模糊互补矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 其中,  $a_{ij}$  代表  $a_i$  相对于  $a_j$  的重要程度, 则  $\forall e \geq n$ , 使矩阵  $C = (c_{ij})_{n \times n}$  为模糊一致矩阵, 其中

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n a_{ik} - \sum_{k=1}^n a_{jk}}{e} + 0.5 \quad (1)$$

模糊互补矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  是模糊一致矩阵的充要条件是:任意指定行(列)和其余各行(列)对

糊理论与层次分析法结合起来,提出了模糊层次分析方法。该方法具有简单、实用、系统性强的特点。在构造判断矩阵时,利用模糊化得到模糊权重,再将模糊判断的不确定性转换为确定性<sup>[12]</sup>。

模糊矩阵和模糊一致矩阵及其相关定义为:若矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  满足  $0 \leq r_{ij} \leq 1, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$  则称  $R$  是模糊矩阵;若模糊矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  满足  $r_{ij} + r_{ji} = 1, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$  则称模糊矩阵  $R$  是模糊互补矩阵;若模糊矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  满足  $\forall i, j, k$  有  $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5$ , 则称模糊矩阵  $R$  是模糊一致矩阵。

为了考虑极限情况,采用11个等级的“0~1”标度<sup>[13]</sup>(见表1)。

应元素之差为某一个常数,或者存在一  $n$  阶非负归一化的向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  及一正数  $a$  使得

$$r_{ij} = a(w_i - w_j) + 0.5, \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

则有方程组

$$\begin{cases} w_1 - w_2 = r_{12}/a - 1/2a \\ w_2 - w_3 = r_{23}/a - 1/2a \\ \cdots \\ w_{n-1} - w_n = r_{(n-1)n}/a - 1/2a \\ w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1 \end{cases}$$

解方程可得

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

由  $0 < w_i < 1$ , 可解得  $a > (n-1)/2$ , 其中  $a$  表示因素间权重的区分度, 当  $a$  越大时,  $(w_i - w_j)$  就越小, 各因素权重间的区分度就越小; 反之, 区分度就越大。

### 1.4 建立评语集与模糊关系矩阵

评语集是评价者对评价对象做出的各种总的评价结果的集合。评价等级分为:很安全、较安全、一般安全、较不安全、不安全。设  $V$  为评价等级构成的评价集合:  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_p\}$  分别表示由高到低的各级。

获得各层次权重后,分别对各底层指标进行专家打分和无量纲化处理,利用隶属函数进行模糊化,然后形成模糊关系矩阵  $D$ 。

然而指标因素既有定性因素,也有定量因素,对于不同因素,应采取不同的方法确定各自的隶属度<sup>[15]</sup>。

1) 定量指标的隶属度确定。求解定量指标隶属度的思路是选定各指标的合理取值范围,应用模糊数学的方法来建立各个指标具体的隶属函数,将各指标的具体值带入相应的隶属函数得到隶属度<sup>[16]</sup>。

评价体系中的噪声 ( $u_{42}$ )、温度 ( $u_{43}$ ) 和照明 ( $u_{44}$ ) 3 个二级指标属于定量指标,运用模糊数学方法分别构建隶属函数如下:

$$f_{421} = \begin{cases} 1 & u_{42} < 60 \\ \frac{68 - u_{42}}{8} & 60 \leq u_{42} \leq 68 \\ 0 & u_{42} > 68 \end{cases}$$

$$f_{422} = \begin{cases} \frac{u_{42} - 60}{8} & 60 \leq u_{42} \leq 68 \\ \frac{75 - u_{42}}{7} & 68 < u_{42} \leq 75 \\ 0 & u_{42} > 75 \text{ 或 } u_{42} < 60 \end{cases}$$

$$f_{423} = \begin{cases} \frac{u_{42} - 68}{7} & 68 \leq u_{42} \leq 75 \\ \frac{82 - u_{42}}{7} & 75 < u_{42} \leq 82 \\ 0 & u_{42} > 82 \text{ 或 } u_{42} < 68 \end{cases}$$

$$f_{424} = \begin{cases} \frac{u_{42} - 75}{7} & 75 \leq u_{42} \leq 82 \\ \frac{90 - u_{42}}{8} & 82 < u_{42} \leq 90 \\ 0 & u_{42} > 90 \text{ 或 } u_{42} < 75 \end{cases}$$

$$f_{425} = \begin{cases} 1 & u_{42} > 90 \\ \frac{u_{42} - 82}{8} & 82 \leq u_{42} \leq 90 \\ 0 & u_{42} < 82 \end{cases}$$

$$f_{431} = \begin{cases} \frac{u_{43}}{22} & 0 \leq u_{43} \leq 22 \\ \frac{40 - u_{43}}{18} & 22 < u_{43} \leq 40 \\ 0 & u_{43} > 40 \text{ 或 } u_{43} < 0 \end{cases}$$

$$f_{432} = \begin{cases} \frac{u_{43}}{20} & 0 \leq u_{43} \leq 20 \\ \frac{24 - u_{43}}{4} & 20 < u_{43} < 22 \\ \frac{u_{43} - 20}{4} & 22 \leq u_{43} \leq 24 \\ \frac{40 - u_{43}}{16} & 24 < u_{43} < 40 \end{cases}$$

$$f_{433} = \begin{cases} \frac{u_{43}}{18} & 0 \leq u_{43} \leq 18 \\ \frac{23 - u_{43}}{5} & 18 < u_{43} < 22 \\ \frac{u_{43} - 21}{5} & 22 \leq u_{43} \leq 26 \\ \frac{40 - u_{43}}{14} & 26 < u_{43} < 40 \end{cases}$$

$$f_{434} = \begin{cases} \frac{u_{43}}{16} & 0 \leq u_{43} \leq 16 \\ \frac{22 - u_{43}}{6} & 16 < u_{43} < 22 \\ \frac{u_{43} - 22}{6} & 22 \leq u_{43} \leq 28 \\ \frac{40 - u_{43}}{12} & 28 < u_{43} < 40 \end{cases}$$

$$f_{435} = \begin{cases} 1 & u_{43} \leq 14 \text{ 或 } u_{43} \geq 30 \\ \frac{22 - u_{43}}{8} & 14 < u_{43} < 22 \\ \frac{u_{43} - 22}{8} & 22 \leq u_{43} < 30 \end{cases}$$

$$f_{441} = \begin{cases} 0 & u_{44} \leq 108 \\ \frac{u_{44} - 108}{32} & 108 < u_{44} < 140 \\ 1 & u_{44} > 140 \end{cases}$$

$$f_{442} = \begin{cases} \frac{u_{44} - 92}{16} & 92 \leq u_{44} \leq 108 \\ \frac{140 - u_{44}}{32} & 108 < u_{44} \leq 140 \\ 0 & u_{44} > 140 \text{ 或 } u_{44} < 92 \end{cases}$$

$$f_{443} = \begin{cases} \frac{u_{44} - 84}{8} & 84 \leq u_{44} \leq 92 \\ \frac{108 - u_{44}}{16} & 92 < u_{44} \leq 108 \\ 0 & u_{44} > 108 \text{ 或 } u_{44} < 84 \end{cases}$$

$$f_{444} = \begin{cases} \frac{u_{44} - 80}{4} & 80 \leq u_{44} \leq 84 \\ \frac{92 - u_{44}}{8} & 84 < u_{44} \leq 92 \\ 0 & u_{44} > 92 \text{ 或 } u_{44} < 80 \end{cases}$$

$$f_{445} = \begin{cases} 0 & u_{44} > 84 \\ \frac{84 - u_{44}}{4} & 80 \leq u_{44} \leq 84 \\ 1 & u_{44} < 80 \end{cases}$$

2) 定性指标的单因素评价方法。对于定性指标,通常采用专家打分再综合取值的办法,然后采用5个档次的评语集。一些已经量化分析的指标也可能因为统计数值等原因而降低评价的准确性,可采用定性与定量相结合的办法<sup>[16]</sup>。

3) 确定单因素模糊评价矩阵。综合上述定量与定性指标的评判结果,可得到模糊关系矩阵  $D = [d_1 \ d_2 \ \cdots d_n]^T$

### 1.5 模糊综合评价

在求出因素权重集  $W$  和评价因素隶属度评价矩阵  $D$  后,即可求出综合评价结果  $B = W * D = (b_1, b_2, \cdots, b_p)$ , 即:

$$B = (w_1, w_2, \cdots, w_n) * \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{np} \end{bmatrix} \quad (3)$$

评价结果  $B$  是  $V$  的一个模糊子集,而  $b_j$  的大小反映了评价对象属于评语集  $V_j$  的程度。其中“\*”表示模糊变换算子符号,在这里采用加权平均算子  $M(*, \oplus)$ , 该算子的优点是体现权重明显,综合度高,利用  $R$  信息充分。

得到评价结果之后,可以按照最大隶属原则确定评价对象的具体等级,即取与最大的评价指标  $\max b_j$  相对应的评语集  $V_j$  为评价结果。

## 2 应用实例

结合本地一合成氨车间实际情况,运用模糊层次分析的综合评价方法对其安全现状进行综合评价。

### 2.1 评价数据的收集

某化工企业拥有两套合成氨装置,总氨年生产能力达到36万t。生产工序采用焦煤、白煤以及焦炉气为原料联产粗甲醇和合成氨。主要设备有氨合成塔、脱硫、脱碳精炼系统,机泵和压缩机等。搜集的相关数据如表2所示。

表2 评价指标的原始数据

噪声/dB(A)	温度/℃	照度/lx
81	23.5	121

### 2.2 权重计算

结合合成氨装置安全现状评价指标体系,运用模糊层次分析计算确定各因素重要性的权重。

U层相对于一级指标( $U \sim U_i$ )的模糊判断矩阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.7 & 0.9 & 0.6 \\ 0.6 & 0.5 & 0.8 & 0.9 & 0.7 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0.7 & 0.4 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.6 & 0.8 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$R$  不是模糊一致矩阵,所以利用式(1)将其变换为相应的模糊一致矩阵,变换后的模糊一致矩阵

$$R' = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.42 & 0.70 & 0.88 & 0.60 \\ 0.58 & 0.50 & 0.78 & 0.96 & 0.68 \\ 0.30 & 0.22 & 0.50 & 0.68 & 0.40 \\ 0.12 & 0.04 & 0.32 & 0.50 & 0.22 \\ 0.40 & 0.32 & 0.60 & 0.78 & 0.50 \end{bmatrix};$$

再求解得相应权重为  $w = [0.26, 0.3, 0.16, 0.07, 0.21]$ 。同理,其他模糊矩阵计算结果如表3所示。

### 2.3 模糊评判矩阵

结合表2数据运用定量指标隶属函数求出各定量指标的隶属度。运用专家打分再综合取值的办法确定各定性指标的隶属度,结果如表3所示。

表3 合成氨装置安全现状评价指标体系各指标权重及隶属度

目标层	准则层(权重)	指标层	权重 $w_i$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
合成氨装置 安全现状评价	工艺条件 0.26	物料处理	0.333	0.3	0.5	0.1	0.1	0
		合成单元	0.283	0.6	0.3	0.1	0	0
		回收单元	0.150	0.6	0.2	0.2	0	0
		控制单元	0.233	0.4	0.4	0.2	0	0
	员工素质 0.30	员工技术水平	0.500	0.1	0.4	0.3	0.1	0.1
		员工生理状况	0.283	0.2	0.5	0.2	0.1	0
		员工心理状况	0.217	0.2	0.4	0.3	0.1	0
	设备安全可靠度 0.16	生产设备可靠性	0.367	0.2	0.3	0.4	0.1	0
		辅助系统可靠性	0.300	0.3	0.4	0.2	0.1	0
		安全防护系统	0.233	0.2	0.3	0.5	0	0
		设备检修与维护	0.100	0.2	0.4	0.3	0.1	0
	职业卫生因素 0.07	车间布置	0.213	0.1	0.5	0.3	0.1	0
		震动与噪声控制	0.180	0	0	0.143	0.875	0
		温度调节	0.107	0.336	0.321	0.183	0.092	0.069
		采光照明	0.133	0.406	0.594	0	0	0
		职业病防治	0.267	0.1	0.1	0.5	0.2	0.1
	安全管理水平 0.21	安全投入	0.230	0.2	0.3	0.4	0.1	0
		安全组织	0.110	0.1	0.3	0.4	0.2	0
		安全法制	0.320	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1
		安全教育与培训	0.200	0.1	0.3	0.5	0.1	0
		应急救援与事故处理	0.140	0	0.2	0.4	0.3	0.1

2.4 模糊综合评价

1) 单因素评模糊评价结果。运用相关公式,计算工艺条件模糊评价结果。

$$B_1 = w_1 * d_1 = (0.333, 0.283, 0.150, 0.233) * \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.4529, 0.3746, 0.1382, 0.0333, 0);$$

同理,员工素质模糊评价结果  $B_2 = w_2 * d_2 = (0.15, 0.4283, 0.2717, 0.10, 0.05)$ ;设备安全可靠度模糊评价结果  $B_3 = (0.23, 0.34, 0.3533, 0.0767, 0)$ ;职业卫生模糊评价结果  $B_4 = (0.1380, 0.2465, 0.2427, 0.2420, 0.0341)$ ;安全管理因素模

糊评价结果  $B_5 = (0.109, 0.254, 0.452, 0.139, 0.046)$

2) 模糊综合评价。由总排序权重值分配  $W$  和单因素评判矩阵  $B' = [B_1; B_2; B_3; B_4; B_5]^T$ , 可得到模糊层次评价结果  $B = W * B' = (0.2321, 0.3509, 0.2859, 0.0971, 0.0270)$

2.5 安全现状综合评价结果分析

由模糊综合评价结果可以看出,该合成氨装置安全现状对应的各安全等级的隶属度最大值为 0.3509, 根据最大隶属原则确定该合成氨装置安全现状等级属于较安全级别。

1) 在影响合成氨装置安全现状的因素中,员工素质影响最为显著,其次是工艺条件、安全管理水平和设备安全可靠度,相比较而言职业卫生影响

较小。

2) 由模糊综合评价分析可知,该合成氨企业员工素质因素总体上属于较安全级别,其隶属度高达42.83%;工艺条件因素属于很安全级别,隶属度高达45.29%;该企业安全管理水平和设备安全可靠度总体上属于一般安全级别,隶属度分别为45.2%、35.33%。职业卫生方面属于较安全级别,但隶属度只有24.65%。

3) 对于安全等级属于一般安全级别的安全管理水平和设备安全可靠度,在整个评价系统中占据重要位置,因此注重针对这些因素提出合理的安全对策措施。应加强管理,完善规章制度,加大对员工的技术培训力度,构建企业安全文化,提高设备安全可靠度,改善企业职业卫生系统,这些对于提高合成氨装置安全现状等级有重要意义。

### 3 结论

1) 建立合成氨装置安全现状综合评价指标体系,并提出相应的安全现状模糊综合评价方法,能比较客观地反映合成氨装置的安全现状。

2) 采取模糊层次分析评价方法,将主观判断与客观计算相结合,增加了权重的可信性,从而提高了安全现状评价的科学性和可靠性。

3) 根据合成氨装置安全现状模糊综合评价的结果,不仅可以了解装置的安全现状,而且可以通过对安全等级较差的指标的进一步分析提出合理的安全对策措施,实现改善装置安全状况的目标。

#### 参考文献:

- [1] 王广亮. 化工石化生产装置安全评价的模式与方法[J]. 化工劳动保护, 1998, 19(5): 6-13.
- [2] 郑贤斌, 陈国明. 基于熵技术的石化企业安全模糊综合评价方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(2): 109-112.
- [3] 马祖建. 石油化工企业在役装置的又一种安全评价方法[J]. 安全、健康和环境, 2003, 3(8): 31-34.
- [4] 肖红飞, 彭斌, 李树清. 基于层次分析-模糊综合评判的电解车间安全现状评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(11): 152-157.
- [5] 姚雁, 王淑兰, 丁信伟, 等. 环氧乙烷生产装置的安全分析与评价[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(1): 92-96.
- [6] 李树清, 谢正文, 王鹏飞. 石化生产装置安全现状模糊综合评价方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 121-125.
- [7] 梁缙, 李志宪, 王海燕. 加油站模糊数学安全评价模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(8): 106-109.
- [8] 杨军, 戴世山, 丁以斌. 模糊综合评价法在火电厂安全生产中的应用[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(5): 50-52.
- [9] 王靖, 张金锁. 综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2): 52-57.
- [10] 胡文发, 姚伟, 周明. 基于模糊层次分析法的既有住宅性能综合评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 785-790.
- [11] BUCKLEY J J. Fuzzy Hierarchical Analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1985, 17(3): 233-247.
- [12] 崔海燕, 李长云, 张军, 等. 基于模糊层次分析法的业务流程管理软件的可信性评估[J]. 湖南工业大学学报: 自然科学版, 2012, 26(1): 91-95.
- [13] 王阳, 李延喜, 郑春艳, 等. 基于模糊层次分析法的风险投资后续管理风险评估研究[J]. 管理学报, 2008, 5(1): 54-58.
- [14] 徐泽水. 一种改进的模糊一致性判断矩阵构造方法[J]. 应用数学与计算数学学报, 1997, 11(2): 62-67.
- [15] 景国勋, 施式亮, 程卫民, 等. 系统安全评价与预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 232-236.
- [16] 吕叶, 俞添. 应用模糊综合判断法评价直通运输实施条件[J]. 铁道工程学报, 2011(8): 126-129.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

# C#与 Matlab 在任意工作面沉陷预计中的应用

周浪<sup>1</sup>, 王列平<sup>1</sup>, 杨春燕<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学测绘学院, 安徽 淮南 232001; 2. 重庆同丰工程管理咨询有限公司, 重庆 401121)

**摘要:**分析了任意形状工作面提出的开采沉陷预计方法,以概率积分法为基础,探讨了任意形状煤层预测模型,采用了对工作面坐标数据进行数值拟合和利用面积积分方法对预测模型进行预计的方法。利用C#面向对象技术和Matlab的交互式程序设计和图形显示分析功能,给出了对任意形状工作面任意方向线和单点或网格点的下沉,倾斜,曲率,水平移动,水平变形等的预计及其结果的可视化输出。能够实现曲线图,等值线图,三维图的绘制,并通过调用Matlab能把预测值与实测值显示对比分析。

**关键词:**开采沉陷;任意形状;面积积分;Matlab

**中图分类号:**TD88 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0067-04

## Application of C Sharp and Matlab in Subsidence Prediction of Working Face with Arbitrary Shape

ZHOU Lang<sup>1</sup>, WANG Lie-ping<sup>1</sup>, YANG Chun-yan<sup>2</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Chongqing Tongfeng Engineering Management Consulting Co. Ltd., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** After analysis of arbitrary shape working face, mining subsidence prediction method was proposed. Based on probability integral method, arbitrary shape seam prediction model was studied, using working face coordinate data for numerical fitting and area integration method for model prediction. Using design and graphic display and analysis functions of C# object-oriented technology and Matlab interactive program, sinking of arbitrary shape face at any direction lines and single point or grid point, tilt, curvature, horizontal movement, horizontal deformation etc. were predicted and the predicted results can visually display. It can perform graph, contour maps, three-dimensional mapping, and by using Matlab the predicted and measured values can be displayed to do comparative analysis.

**Key words:** mining subsidence; arbitrary shape; area integration; Matlab

煤炭不仅是我国的基本燃料,而且是重要的工业原料,这些产品都是我国社会主义经济建设和人民生活所必须的<sup>[1]</sup>。到二十一世纪中叶,我国煤炭在能源消费结构中的比重仍达四成以上,而且以后很长的一段时间,煤炭仍将是我国的主体能源<sup>[2]</sup>。在我国实现工业、农业、国防和科学技术的现代化的工程中,由于有用矿物的采出,开采区域内岩层和地表遭到破坏,引起了开采沉陷。纵观国

内外,研究开采沉陷对国民经济的发展和人民生活具有及其重要的意义。

随着现代科学的飞速发展和工程技术的日新月异,数学计算在自然科学,工程学科,经济,医学和人文等领域中广泛应用并不断发展。Matlab是由美国mathworks公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非

线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能,尤其是图形高层次的作图包括二维和三维的可视化、图象处理结合数据分析功能。为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案,代表了当今国际科学计算软件的先进水平。具有功能丰富的应用工具箱和应用程序接口(API),为用户提供了方便实用的处理工具,使 Matlab 语言能与 C、C++、C#、Fortran 等其它高级编程语言通过调用动态链接库(DLL)实现进行交互和数据交换。但是它也有源代码公开性,不利于算法和数据的安全性;开发效率低,速度慢;开发功能差,不能开发商业软件等<sup>[3-4]</sup>。C#是微软公司在 2000 年 7 月发布的一种全新且简单,安全,面向对象的程序设计语言。它吸收了 C++, Visual Basic, Delphi, Java 等语言的有点,体现了当今最新的程序设计技术的功能和精华<sup>[5]</sup>。但是 C#的在工程计算领域里的编程就显得相当复杂,数据计算分析,工程作图,建模与仿真方面的功能就不及 Matlab。针对上述情况的分析,本文将探讨应用 C#与 Matlab 在任意工作面开采沉陷预计分析可视化中的应用实践。

## 1 预计模型

目前我国很多学者都在研究矿山开采沉陷这方面,对于任意形状工作面,秋兴国提出任意形状工作面变形预计沿煤层上山方向进行分割,分割完成后按照计算矩形工作面的方法,对标量数据简单算术叠加,对矢量数据按照矢量叠加方法进行迭加的方法<sup>[6]</sup>;李永树提出了任意分布形式煤层开采地表移动,不同构造形式的工作面分布形式的煤层的理论模型,尤其是对工作面开采线和停采线进行拟合的方法本文中将引用此方法<sup>[7]</sup>;唐建荣提出将多边形开采区域 D 划分为若干个三角形,然后采用多重积分的高斯方法按逆时针方向在每个三角形上进行积分等。对于任意形状工作面的开采沉陷预计,将非矩形工作面划分为若干个矩形工作面的形式,然后按矩形工作面预计的方法分别预计,然后再进行叠加计算。这样增加到工作量,计算结果带有近似性<sup>[8]</sup>。本文的各个数值的计算主要进行的是二重积分运算,因而程序中可采用函数的直接积分,这样只要给出被积函数的形式及积分上下限就可以了。本文采用的变步长 Simpson 积分方法,被积函数就是预计计算公式,积分上下限于开采区域 D 有关,对于开采区域工作面的处理

本文采用开采线停采线工作面坐标数据拟合的方法进行处理。

### 1.1 概率积分简介

概率积分法是由我国学者刘宝琛、廖国华等提出的概率积分预计法,就是根据随机介质理论,把开采引起的地表移动看作随机事件,用概率积分(或其导数)来表示微小单元开采引起地表移动和变形的预计公式(影响函数),从而用叠加原理计算出整个开采引起的地表移动和变形<sup>[9]</sup>。目前,在我国矿区开采沉陷预计中广泛应用。该方法已经成为我国较成熟的、应用最为广泛的预计方模型之一。

### 1.2 开采单元下沉盆地预计

地下煤炭资源开采,首先破坏的是直接顶、老顶,随着开采工作面的推进,破坏逐渐向上层覆岩和地表传递,当开采工作面推进的距离达到 $(1/4 - 1/2)H_0$  ( $H_0$  为平均采深)时,采动影响波及地表;当开采范围不断扩大,地表影响范围和下沉值也继续增加;在开采面积达到临界尺寸时,地表最大下沉值达到极限,而地表影响范围继续增大并最终形成一个比开采范围大得多的下沉盆地(即动态移动盆地)<sup>[10]</sup>。

在开采过程中,煤层中某开采区域 D 的开采所引起地表任意点的下沉值为<sup>[11]</sup>

$$W_e(x, y) = \iint_D \left( \frac{1}{r_i^2} \right) \cdot e^{\{-\pi \cdot [(x-x')^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha}$$

式中:  $r_i$  为  $i$  开采单元处的主要影响半径,  $r_i = H_i/\tan \beta$ ;  $H_i$  为  $i$  开采单元处的采深;  $\tan \beta$  为主要影响正切;  $\theta$  最大下沉角;  $\alpha$  为煤层倾角;  $l_i = H_i/\tan \theta$ ;  $(x', y')$  为煤层开采单元的坐标;  $(x, y)$  地表任意一点的坐标。

针对文献[11],文献[12]和文献[13]关于地表任意点  $A(x, y)$  沿任意方向  $\psi$  (由  $X$  轴正向沿逆时针方向转到计算方向的水平角) 的倾斜变形  $I$ , 曲率  $K$ , 水平移动  $U$ , 水平变形  $E$  的计算公式进行了完善,如下

倾斜变形

$$I(x, y, \phi) = \frac{\partial W_e(x, y)}{\partial y} \cos \phi + \frac{\partial W_e(x, y)}{\partial x} \sin \phi$$

$$\text{式中: } \frac{\partial W_e(x, y)}{\partial y} = W_0 \iint_D \frac{2 \cdot \pi \cdot (y' - y)}{r_i^4} \cdot$$



$$e^{\{-\pi \cdot [(x-x'_i)^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha};$$

$$\frac{\partial W_e(x, y)}{\partial x} = W_0 \iint_D \frac{2 \cdot \pi \cdot (x' - x)}{r_i^4} \cdot$$

$$e^{\{-\pi \cdot [(x-x'_i)^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha}, W_0 \text{ 为最大下沉值};$$

曲率

$$K(x, y, \phi) = \frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial y^2} \cos \phi^2 +$$

$$\frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial x^2} \sin \phi^2 + \frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial x \partial y} \sin 2\phi$$

式中:  $\frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial y^2} =$

$$W_0 \iint_D \frac{2 \cdot \pi}{r_i^4} \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot (y' - y - l_i^2)}{r_i^2} - 1 \right] \cdot$$

$$e^{\{-\pi \cdot [(x-x'_i)^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha} \frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial x^2} =$$

$$W_0 \iint_D \frac{2 \cdot \pi}{r_i^4} \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot (x' - x)^2}{r_i^2} - 1 \right] \cdot$$

$$e^{\{-\pi \cdot [(x-x'_i)^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha} \frac{\partial^2 W_e(x, y)}{\partial x \partial y} =$$

$$W_0 \iint_D \frac{4 \cdot \pi^2}{r_i^4} \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot (y' - y - l_i) (x' - x)}{r_i^6} - 1 \right] \cdot$$

$$e^{\{-\pi \cdot [(x-x'_i)^2 + (y-y'_i+l_i)^2]/r_i^2\}} \frac{dx'dy'}{\cos \alpha};$$

水平移动

$$U(x, y, \phi) = b \cdot r_i \cdot I(x, y, \phi),$$

式中:  $b$  为水平移动系数;

水平变形

$$E(x, y, \phi) = b \cdot r_i \cdot K(x, y, \phi)。$$

### 1.3 利用 Matlab 的 Deploytool 生成 DLL 文件

在文献[14]中提到了 C# 与 Matlab 混合编程目前主要有三种方法: (1) 在 VS (VS2008, Matlab2010a) 中直接执行 Matlab; (2) C# 函数调用 Matlab 工作空间; (3) 使用 Matlab Deploytool 生成. NET 组件或 COM 组件。在上述三种方法中目前比较流行的是第三种, 可以高效的利用 Matlab 强大的科学计算功能和丰富的工具箱, 并能从分发挥 C#. NET 编程灵活, 界面友好, 易于维护, 升级, 发布的优点; 提高了软件的开发效率<sup>[15]</sup>, 优化了软件的性能, 增强了算法和数据的保密性, 可广泛用于科学计算和工程应用。

下面简述一下怎样利用 Matlab Deploytool 工

具箱生成 DLL 文件, 本文使用的是 Matlab R2010a 版本。以生成三维等值线图为例, 首先打开新建一个 M 文件 (mysurf. m) 然后在 Matlab Command Window 中输入 Deploytool, 在弹出所示的对话框中输入工程名字, 并选择生成. NET Assembly 单击 OK, 接着单击 Add Class 添加类, 单击 Add Files 添加文件, 最后点击 build 按钮即可生成 DLL 文件。对于等值线图, 曲线图, 预测实测对比图等 M 文件代码主要参阅了文献<sup>[16]</sup>编写, 在此不再叙述。

## 2 功能结构设计

在本文主要以 C# 开发工具, 调用 Matlab 生成的动态链接库文件实现下沉, 实现单点或多点下沉值预测, 查询, 并生成下沉, 曲率, 倾斜, 水平移动, 水平变形的曲线图, 二维等值线图和三维图的绘制<sup>[17]</sup>。本文中的参数及数据采用数据文件的格式存储。功能结构图如图 1 所示。

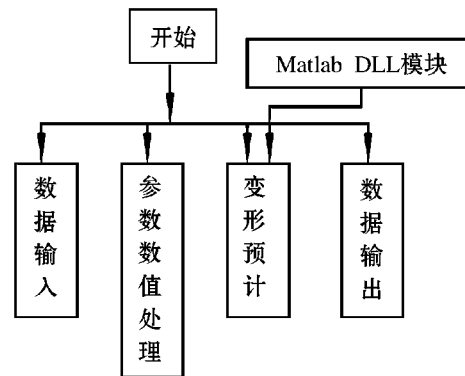


图1 功能结构图

## 3 应用实例

某矿区某工作面的采矿条件为: 下沉系数为 1.1, 主要影响正切为 1.7, 拐点偏距为 0 m, 水平移动系数为 0.3, 主要影响传播角为 85°, 开采厚度为 3 m, 煤层倾角为 6°, 上山采深为 174 m, 下山采深为 190 m, 工作面坐标如下表。

表1 工作面开采线坐标 m

点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X 坐标	400	450	480	550	600	670	700	800	900
Y 坐标	600	550	530	500	500	510	520	550	600

表2 工作面停采线坐标 m

点号	1	2
X 坐标	400	900
Y 坐标	300	300

根据本文提出的任意形状工作面沉陷预计方法,将工作面地址采矿参数即可计算出下沉预计数据,然后利用 C#调用个功能模块即可实现图形分析显示功能。本文以曲线图三维图形显示为例,如图 2 所示。

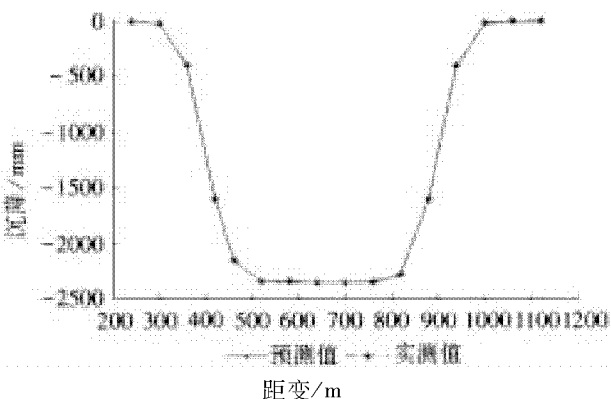


图2 二维对照图

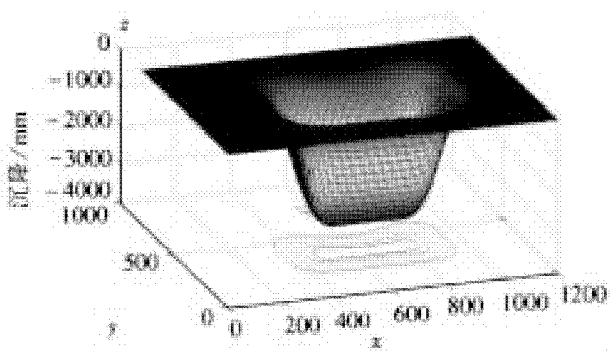


图3 三维等值线图

## 4 结论

1) 本方法采用概率积分为理论基础,并结合概率积分修正模型进行修正,预计效果满足要求,简单易用。

2) 本文采用 Matlab 与 C#混合编程,有机地将两者结合在一起,使得编程比较简单,设计界面更加美观,降低了编程难度,提高了开发效率,具有很好的应用前景。

3) 本文的计算方法能够预计任意形状工作面的地表任意点任意方向的移动和变形值。

## 参考文献:

- [1] 徐永圻. 煤矿开采学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999:1-4.
- [2] 杨逾,刘文生,缪协兴. 我国采煤沉陷及其控制研究现状与展望[J]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007:43-46.
- [3] 周品,何正风. MATLAB 数值分析[M]. 北京:机械工业出版社,2009:1-122.
- [4] 赵士伟,赵明波,陈平. 基于 COM 的 Matlab 与 C#.NET 混合编程的实现与应用[J]. 山东理工大学学报,20(4):26-29.
- [5] 杨树林,胡洁萍. C#程序设计与案例教程[M]. 北京:清华大学出版社,2007:1-85.
- [6] 秋兴国,刁瑞明,龚尚福. “三下”采煤地表变形预计体系的开发及应用[J]. 工矿自动化,2008(5):4-8.
- [7] 李永树,王金庄,邢安仕. 任意分布形式煤层开采地表移动预计方法[J]. 煤炭学报,1995,20(6):619-624.
- [8] 唐建荣,王金庄,温泽民. 任意形多工作面多线段开采沉陷预计系统(MSPS)[J]. 矿山测量,2000(1):24-27.
- [9] 汪桂生. 矿区开采沉陷观测数据处理研究[D]. 西安:西安科技大学,2011:28-37.
- [10] 何国清,杨伦,凌赓娣. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991:1-219.
- [11] 吴侃,葛家新,王铃丁. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998:28-39.
- [12] 国家煤炭工业部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2000:78-117.
- [13] CAI LAILIANG, WU KAN, ZHENG RUYU, et al. Mining subsidence calculation system [C]// 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science - Proceedings, 2010, ICIECS 2010:1-3.
- [14] 吴焕瑞,车紫辉. C#.NET 调用 Matlab 进行混合编程[J]. 电脑学习,2010(4):93-94.
- [15] 罗述全. 基于 COM 的 Matlab 与 C#混合编程应用[J]. 湖北工业大学学报,2007,22(3):22-24.
- [16] 王世香. 精通 MATLAB 接口与编程[M]. 北京:电子工业出版社,2007:1-284.
- [17] ZHAO YAHONG, HAO YANJIN, REN LUYANG, et al. Research for visualization of mining subsidence prediction based on matlab [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(90-93):3 222-3 226.

(责任编辑:姚多喜,李 丽)

# 排烟量和送风比对地下街烟气控制的模拟研究

刘晓洁<sup>1</sup>, 吕品<sup>1,2</sup>, 刘维<sup>1</sup>, 王璇<sup>1</sup>, 李跃通<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 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:**以淮南市某地下商业街其中一防火分区为研究对象,采用模拟软件FDS进行了火灾烟气控制的数值模拟,对顶棚机械排烟条件下,排烟量和送风比对室内火灾烟气有效控制的影响进行了研究,模拟分析结果表明,在顶棚机械排烟时,排烟量对室内烟气控制的影响较大。当排烟量为 $115\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,可以达到很好的烟气控制效果,送风比对此的影响较小;当排烟量和送风比过大时,使室内烟气紊流加剧,火场情况混乱。研究结果为此类狭长型地下建筑火灾的控制和人员疏散提供参考。

**关键词:**顶棚机械排烟;FDS数值模拟;烟气控制;排烟量;送风比

**中图分类号:**X924.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)04-0071-04

## Numerical Simulation of Smoke Control in an Underground Street with Regulation of Extraction Volume and Mechanical Ventilation – extraction Ratio

LIU Xiao-Jie<sup>1</sup>, LV Pin<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, LI Yue-Tong<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The software FDS was applied to the simulation of the fire smoke control in an underground shopping street in Huainan. The present study explores the effects of extraction volume and mechanical ventilation – extraction ratio on the effectiveness of smoke control. For the mechanical exhaust vents at ceiling, the simulation results indicate that extraction volume and mechanical ventilation – extraction ratio had some effect on smoke control. It will be reached a good effect of smoke controlling when smoke exhaust rate are suitable. But the indoor smoke turbulence will be intensified and the fire – ground situation will be in chaos when smoke exhaust rate and air supply proportion are too big. It can be make a good effect of smoke controlling when smoke exhaust rate is  $115\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ . The research results make some references for fire control and personnel evacuation with long and narrow type underground building.

**Key words:** mechanical exhaust vents at ceiling; FDS numerical simulation; smoke control; extraction volume; mechanical ventilation – extraction ratio

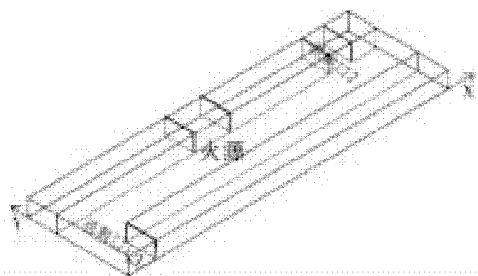
随着我国城市化进程发展和人口增长,地下建筑得到了广泛开发和充分利用。地下商业建筑向地面开口面积小,人员密集,通常处于通风不良的状态。火灾发生时温度升高和火灾蔓延传播快,生成大量的烟气和有毒有害气体。因此必须对火灾烟气实施有效的控制措施。

目前针对地下空间火灾烟气运动和控制的研

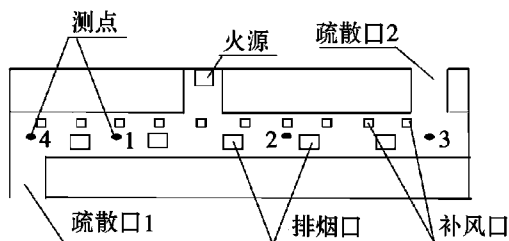
究,大多针对排烟口位置和排烟量对烟气分布规律的研究<sup>[1-2]</sup>,而关于排烟量和送风比对烟气分布规律影响的研究尚较少。本文采用FDS5.4软件,对不同排烟量和送风比对地下商业街火灾烟气控制效果进行模拟对比和研究,以期为此类建筑的火灾预防和烟气控制提供指导。

## 1 物理模型

选取淮南市某地下商业街的一个防火分区为对象建立模型(见图1)。该防火分区长75m,宽21m,高3.5m,设有两个大小相同的疏散口,宽3m,高3.5m,排烟口设为5个,每个排烟口长0.8m,宽0.6m,高3.5m;补风口设为10个,每个补风口长0.4m,宽0.4m,高3.5m。



(a) 防火分区立体示意图



(b) 防火分区平面示意图

图1 地下商业街的一个防火分区示意图

## 2 火灾场景及工况参数设定

考虑较为不利的火灾场景,取火灾荷载密度 $q = 600 \text{ MJ/m}^2$  [3]。采用 $t^2$ 增长模型,火源最大热释放速率为8 MW,火源面积为 $4 \text{ m}^2$ ,距离地面0.3 m,火灾增长系数由下式[4]确定。计算得 $\alpha = 0.1145$ ,即 $Q = 0.1145t^2$ 。

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_m \quad (1)$$

$$\alpha_f = 2.6 \times 10^{-6} q_1^{5/3} \quad (2)$$

式中: $q_1$ 为不同房间的可移动火灾荷载密度,取 $q_1 = 600 \text{ MJ/m}^2$ ;  $\alpha_m$ 为由墙面内装修材料的可燃等级来确定,采用不燃性装饰材料,取 $\alpha_m = 0.0035 \text{ kW/s}^2$ 。

设计模拟工况6个,各工况的排烟量、送风量如表1所示,其中总排烟量=最大防烟分区面积 $\times 60$ (或115、150) ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ )。相关规范要求排烟口风速不大于 $10 \text{ m/s}$ ,单位面积排风量不小于 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,补风量不小于排烟量的50% [5],各工况参数均符合要求。网格大小 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ,总数 $(377 \times 115 \times 22)$ 个。计算时间 $600 \text{ s}$  [6]。

表1 工况计算参数表

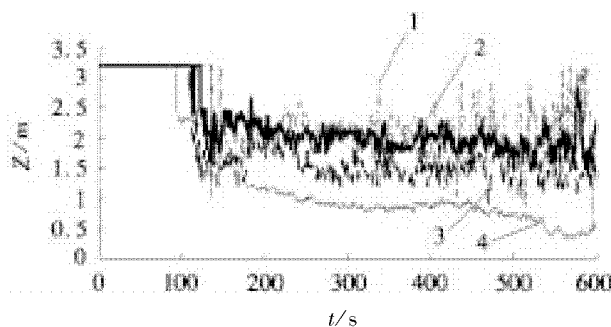
工况	机械排烟	补风方式	总排烟量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	送风比/ %
1	无	疏散口1、2	0	0
2	顶棚排烟	全部补风口	51 840	60
3	顶棚排烟	全部补风口	51 840	70
4	顶棚排烟	全部补风口	51 840	80
5	顶棚排烟	全部补风口	69 120	60
6	顶棚排烟	全部补风口	27 000	60

采用模拟软件FDS5.4进行计算,对墙壁、地面与顶棚均采用厚壁假设,环境温度取 $20^\circ\text{C}$ 。对于有疏散口或机械排烟的工况,假设在起火时刻即 $t=0$ 时即开始工作。

## 3 模拟结果与分析

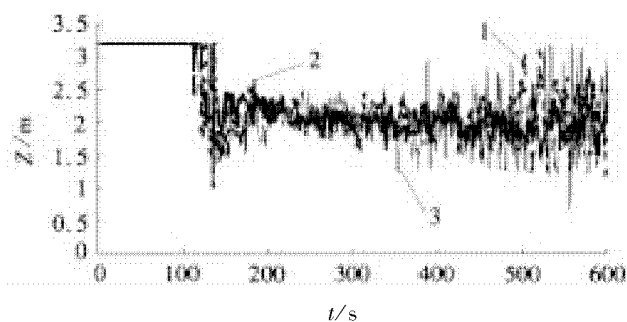
1) 烟气层高度分析。室内发生火灾时,室内环境分为上部空间热浮力作用下的烟气层和下部空间的冷空气层。火源上方形成向上流动的火羽流不断卷吸冷空气层中的新鲜空气,并将其运输到烟气层中,烟气层界面将不断下降。烟气层只有保持在人群头部以上,才能保证人员不受到烟气热流辐射的威胁。当烟气层高度保持2 m以上时,人员可以安全疏散 [7]。

工况1时,烟气层高度在起火时间为100 s时开始下降,400 s后稳定在0.5 m;工况6时,烟气层高度在起火时间为120 s时开始下降,250 s后高度稳定在1.5 m;工况2时,烟气层高度在起火时间为150 s时下降并最终稳定在1.9 m;工况5时,烟气层高度控制效果不明显,烟气紊流加剧,火灾现场混乱程度加重;当送风比为60% (工况2)时,曲线图分析如上所述;工况3时,120 s时烟气层高度开始下降,300 s后趋于稳定,控制在1.8 m。工况4时,130 s时烟气层高度开始下降,但是波动很大,基本可以控制在1.9 m (见图2)。说明排烟量为 $115 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时烟气层高度控制效果最好,送风比对烟气层高度的影响不如排烟量明显。



1. 工况5; 2. 工况2; 3. 工况6; 4. 工况1

(a) 排烟量对烟气层高度随时间变化的影响



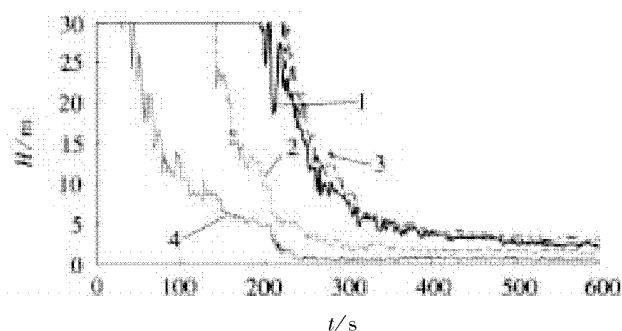
1. 工况3;2. 工况2;3. 工况4

(b) 送风比对烟气层高度随时间变化的影响

图2 排烟量和送风比对烟气层高度随时间变化的影响

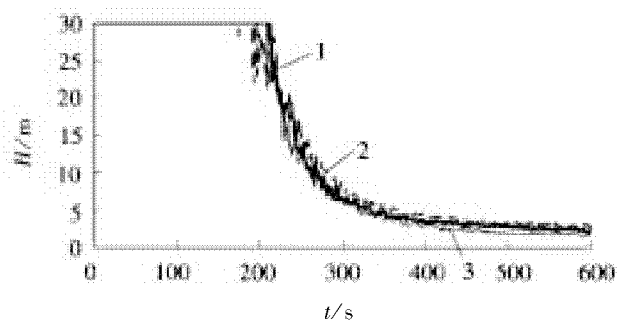
2) 能见度分析。火灾产生的烟气中含有大量的固体颗粒和水蒸汽,这些成分对光线有减弱作用,使火场内的能见度降低。能见度的降低使人不能迅速辨识方向逃离火场,严重影响了火灾中人员的安全疏散。人们处于不熟悉的环境时,能见度不小于10m为安全状态<sup>[8]</sup>。

工况1没有实施机械排烟,火场内能见度在100s时降至10m以下,工况6实施机械排烟,能见度在200s时降至10m以下。继续增大排烟量(即工况2),能见度高度270s时下降到10m以下。工况5时,排烟量增大至 $150\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,这时可以发现,能见度在290s时下降到10m以下,不如工况2影响明显(见图3a),工况2、工况3能见度基本都在280s左右降至10m以下,工况4能见度在290s时降至10m,工况2~工况4的能见度最终分别稳定在2.5m、3.2m、3.4m(见图3b)。说明送风比对能见度的影响大大小于排烟量对其的影响。



1. 工况2;2. 工况6;3. 工况5;4. 工况1

(a) 排烟量对室内能见度随时间变化的影响



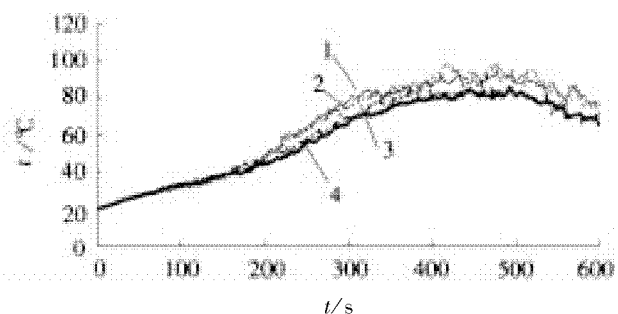
1. 工况3;2. 工况4;3. 工况2

(b) 送风比对室内能见度随时间变化的影响

图3 排烟量和送风比对室内能见度随时间变化的影响

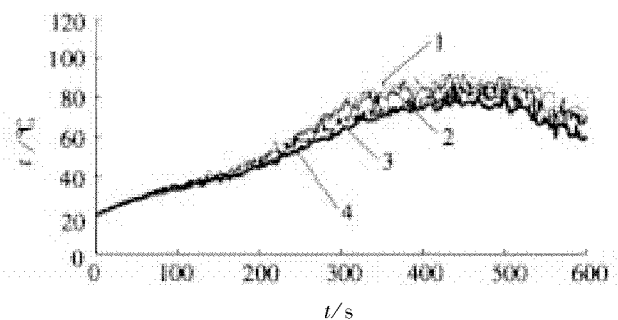
3) 温度分析。室内火灾发生时,大量可燃物质在燃烧产生烟气的同时,放出大量的热,导致烟气温度急剧上升。对人员造成伤害。取2m以下空间内的烟气温度不超过 $60^\circ\text{C}$ 为相对安全状态<sup>[9]</sup>。

工况6在180s时测点温度达到 $60^\circ\text{C}$ ,最高温度 $140^\circ\text{C}$ ;工况2在220s时测点温度达到 $60^\circ\text{C}$ ,最高温度 $94^\circ\text{C}$ ;工况5在260s时测点温度达到 $60^\circ\text{C}$ ,最高温度 $80^\circ\text{C}$ ,但是在模拟时间的最后100s内温度变化较大(见图4)。这说明在送风比相同时,适当增大排烟量,可使烟气温度得到有效控制。工况2~工况4测点温度随时间变化趋势大致相同,各工况中测点温度达到 $60^\circ\text{C}$ 的时间和最高温度相差不大。这说明送风比对温度随时间变化影响很小。



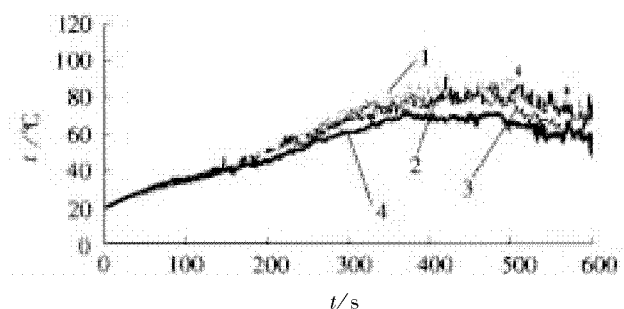
1. 测点3;2. 测点1;3. 测点2;4. 测点4

(a) 工况2

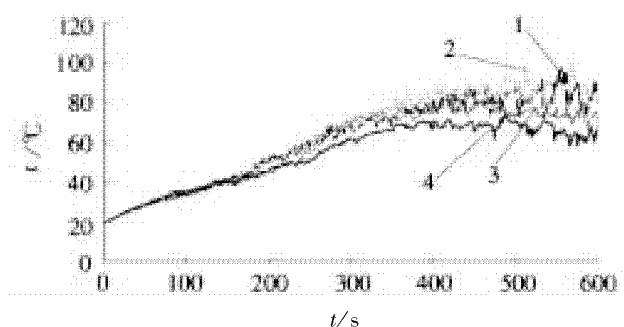


1. 测点1;2. 测点3;3. 测点2;4. 测点4

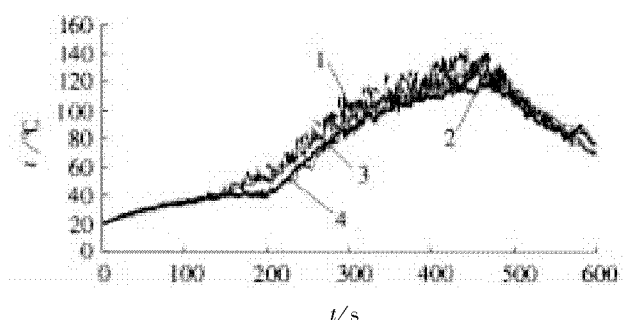
(b) 工况3



1. 测点 2; 2. 测点 2; 3. 测点 3; 4. 测点 4  
(c) 工况 4



1. 测点 2; 2. 测点 1; 3. 测点 3; 4. 测点 4  
(d) 工况 5



1. 测点 2; 2. 测点 4; 3. 测点 1; 4. 测点 3  
(e) 工况 6

图4 各种工况下室内温度对时间变化的影响

## 4 结论

1) 顶棚机械排烟条件下,机械排烟量对室内烟气控制影响明显。适当增加排烟量对室内烟气

层高度、能见度及烟气温度有很好的控制效果。但是当排烟量过大时,对三者影响较小,反而会使火场内紊流更加混乱,当机械排烟量为  $115 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时可以取得较理想的烟气控制效果。

2) 顶棚机械排烟条件下,送风比对于室内烟气控制影响并不明显,提高送风比可以使能见度有  $0.7 \text{ m}$  左右的提升,但是对室内烟气层高度控制和温度控制并没有良好的效果。在同等条件下,建议使用不大于  $70\%$  的送风比。

## 参考文献:

- [1] 袁书生, 张健. 地下商场内火灾烟气运动及控制的大涡模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(1): 61-69.
- [2] 杜杨, 杨小凤, 郭春, 等. 地下狭长受限空间火灾实验及大涡数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(7): 167-170.
- [3] 马千里, 倪照鹏, 黄鑫, 等. 大型商业建筑室内步行街商铺火灾荷载调查研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(4): 52-56.
- [4] 宋文华, 刘子萌, 王鹏. 公共聚集场所防火设计中的火灾场景设计研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 85-90.
- [5] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50016-2006 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [6] 赵江平, 冯文兴, 武来喜. 建筑火灾烟气中 CO 迁移规律的 FDS 模拟[J]. 中国安全科学学报, 2008: 16-20.
- [7] 程远平, 李增华. 消防工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 16-20.
- [8] 霍然, 袁永宏. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003: 216-222.
- [9] 李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 6-8.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

# 基于 Matlab 采空区自燃“三带”数据处理的研究

张发亮, 何启林, 李跃通

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 为了更好的划分采空区“三带”宽度, 采用 Matlab 软件对束管检测数据进行处理, 在基于氧浓度指标法前提下采用残差图剔除不可靠点后二维曲线的精确拟合计算方法以及采空区走向、倾向、氧浓度的三维等值线法直接观测“三带”范围。两种方法相互验证, 最终通过应用 Matlab 软件的精确处理, 得出采空区最大氧化带宽度为: 30.4 ~ 158.95 m; 最小氧化带宽度为: 32.17 ~ 158 m。

**关键词:** 采空区“三带”; 氧浓度指标法; 二维曲线; 精确拟合; 等值线

**中图分类号:** TD752.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1098(2012)04-0075-04

## Research on Data Processing for Spontaneous Combustion Three Zones in Goaf Based on Matlab

ZHANG Fa-liang, HE Qi-lin, LI Yue-tong

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

**Abstract:** In order to better divide "three zones" width in goaf, detection data from bundle tubes were processed with software Matlab. Removing the unreliable points with the residual case order plot, employ precise fitting calculation method of two dimensional curves based on the oxygen index method, and adopt three dimensional contour method based on the strike orientation, tendency orientation and oxygen concentration of goaf, then observing three zones range directly. With the two ways to mutual authentication, finally, process the data precisely through the application of Matlab software, it is concluded that the maximum oxidation zone width: 30.4 ~ 158.95 m and the minimum oxidation zone width: 32.17 ~ 158 m.

**Key words:** "three zones" of goaf; oxygen index method; two dimensional curves; precise fitting; contour

随着煤矿开采的机械化程度的提高,综采放顶煤这种高产高效的工艺得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是,在煤矿产量提高的同时,采空区的遗煤、漏风等危险因素给工作面的安全开采带来了自燃发火的隐患。因此,对于采空区“三带”的准确预测和划分将对预防煤矿采空区的自燃发火和保障工作面的安全开采有着非常重要的意义。

“三带”的划分指标主要可分为3类,即以采空区内的氧气浓度、漏风风速和温度分布来划分<sup>[2-3]</sup>。目前,对于采空区“三带”的划分以氧浓

度为标准的应用方式最为普遍<sup>[4]</sup>,根据煤炭科学总院重庆分院的试验研究<sup>[5-6]</sup>,不同氧化性的煤在供氧浓度大于等于5%~6%时,还可能在其着火温度前激烈氧化升温,有发火危险性,因此将氧化带划分的氧指标定为18%~6%。在此前提下,试验针对山西正株煤矿1511工作面进行研究,运用 Matlab 软件对束管检测的试验数据进行剔除甄别<sup>[7-8]</sup>,找出最佳的二维拟合曲线并进行三维立体成像,最终确定精确的“三带”范围。

# 1 采空区自燃“三带”的现场试验

## 1.1 工作面概况

1511 工作面回采走向长度为 990 m, 倾斜长 150 m; 主采 15 煤的煤层倾角  $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$ , 煤层灰分 8.58%, 挥发分 26.05%, 属于 II 类易自燃煤层, 煤厚最小 5.12 m, 最大 6.37 m, 平均 5.74 m。工作面采用长壁式综合机械化低位放顶煤全部垮落采煤法。工作面采高确定为 2.3 m, 根据煤层实际厚度, 考虑留设一定厚度底煤以利于拉架, 确定顶煤厚度为 2.9 m, 故平均采放比为 1:1.26。

## 1.2 测点布置

沿工作面倾向布置 5 个测点, 且测点由下顺槽进风巷向上顺槽回风巷依次为: 1#测点, 距进风巷外帮 5 m; 2#测点, 距 1#测点 35 m; 3#测点, 距 2#测点 35 m; 4#测点, 距 3#测点 35 m; 5#测点, 距回风巷外帮 5 m (见表 1)。在回风巷安置抽气泵, 通过束管抽取气样, 收集气体后将其进行色谱分析, 用 MATLAB 处理所得的原始数据, 从而研究并分析综放面采空区氧化“三带”的分布规律。

表 1 各结点氧浓度检测分析表 %

距工作面 距离/m	1#氧 浓度	2#氧 浓度	3#氧 浓度	4#氧 浓度	5#氧 浓度
7.5	20.8	20.9	20.5	20.4	20.6
14.5	20.1	20.2	19.9	19.7	20.0
23.8	19.2	19.4	19.0	18.9	19.2
30.5	18.4	18.4	17.9	18.0	18.1
35.9	17.7	17.9	17.1	17.1	16.9
42.8	17.1	17.3	16.5	16.6	16.6
55.1	16.2	16.3	16.0	15.9	16.1
60.6	15.5	15.7	15.2	15.1	15.3
70.9	14.4	14.8	14.1	13.9	14.6
82.8	13.6	13.9	13.3	13.1	13.5
90.5	12.7	13.1	12.6	12.3	12.5
102.5	11.8	12.1	12.1	11.6	11.7
113.9	10.9	10.8	11.1	10.5	10.8
125.8	10.1	10.2	9.9	9.8	10.0
132.2	9.3	9.5	9.1	9.1	9.2
137.9	8.3	8.7	8.2	8.3	8.5
144.1	6.9	7.5	7.3	7.3	7.2
150.5	6.2	6.4	6.0	5.9	6.1
166	5.3	5.5	5.1	5.0	5.2

# 2 基于 Matlab 的二维数据处理

## 2.1 最小二乘法数据预处理

在所给出的 5 个检测点的数据中, 随着工作面的前移, 每个测点各得出 19 组氧浓度数据, 共有 95 组样本点, 在这些数据中可能存在有瑕疵的点, 由于这些样本点会影响着实际拟合函数的结果, 因此采用最小二乘法的算法方式将他们剔除<sup>[9]</sup>, 实验运用多元线性回归函数  $\text{regress}(Y, X, \alpha)$  和残差及其置信区间画图函数  $\text{replot}(r, \text{rint})$  进行数据处理分析, 其中  $Y, X$  为所要处理的样本数据,  $\alpha$  是显著性水平 (取默认数值 0.05),  $r, \text{rint}$  为残差及其置信区间, 这 2 个值将由  $\text{regress}$  直接返回提供, 这样, 就能建立回归分析模型, 主程序伪代码如下:  $\alpha = 0.05$ ;  $X = [95 \text{ 个样本点对应的距工作面距离的数值}]$ ;  $Y = [95 \text{ 个样本点氧浓度数值}]$ ;  $X = [\text{ones}(\text{size}(Y))]$ , 自定义矩阵  $Q$ ;  $[b, \text{bint}, r, \text{rint}, \text{stats}] = \text{regress}(Y, X, 0.05)$ ; 最终画出残差图 (见图 1)。

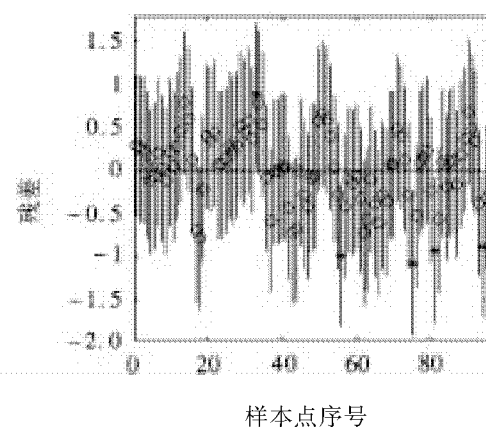


图 1 置信区间及其残差图

从图 1 中可以得出第 33、56、75、81、94 号这 5 个样本点的残差偏离了置信区间, 且这 5 个结点对应的样本点为 2# (125.8, 10.2), 3# (150.5, 6.0), 4# (150.5, 5.9), 5# (35.9, 16.9), 5# (150.5, 6.1), 为了更精确的分析数据, 应该将这 5 个样本点去除以后再进行曲线回归拟合。

## 2.2 拟合曲线的选取

在剔除偏离置信区间的样本点后, 选用  $\text{polytool}$  多项式拟合工具拟合, 拟合时分别选取 3、4、5 次多项式进行拟合, 从而得到他们的拟合自由度



$R^2$  分别为 0.938, 0.962, 0.969, 显然 4 次拟合的自由度要优于 3 次, 由于高次多项式容易产生 Runge 现象<sup>[10]</sup>, 亦即当次数变高时, 插值多项式会逐渐偏离正常趋势线, 使得拟合不精确, 正常情况下一般多项式次数不高于 6 次, 将三种拟合进行对照可看到 5 次拟合并不理想, 因此本次试验选取 4 次拟合。为了不用计算直接动态观测采空区氧浓度的变化趋势, 利用软件自带的 polytool (**xx**, **yy**, 4) 函数得出 4 次拟合图像, 其中 **xx**, **yy** 分别是以上程序中 **Q** 与 **Y** 剔除 5 组数据后的剩余的 90 组数据, 由此得出拟合的 4 次动态多项式 (见图 3), 其中曲线两侧的区间为曲线的置信半径, 由此也会发现筛选后的样本点均落在置信区间内 (直接选用原始点会出现有样本点偏离置信区间的情况, 会降低拟合曲线精度), 从而提高了曲线拟合的精度, 拖动图像中所指向的十字光标, 可以便捷的读出曲线上任意一点工作面推进距离与氧浓度变化的横、纵坐标值, 也可以利用  $p = \text{polyfit}(\mathbf{xx}, \mathbf{yy}, 4)$  函数, 得出拟合曲线函数  $M = (0.074346N^4 - 257.78N^3 + 59757N^2 - 13170000N + 2171330000) \times 10^{-8}$ , 可得出“三带”宽度: 散热带  $< 32.17 \text{ m}$ ;  $32.17 \text{ m} \leq$  氧化带  $\leq 158.95 \text{ m}$ ; 窒息带  $> 158.95 \text{ m}$ 。

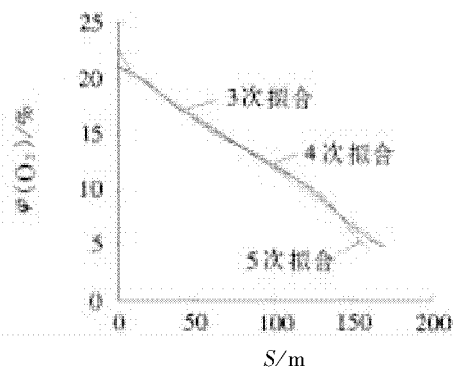


图2 三种多项式函数对照拟合曲线

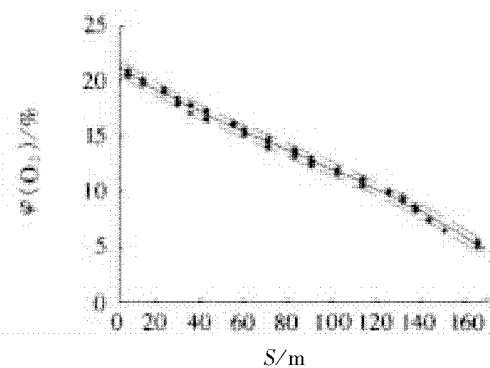


图3 四次多项式拟合曲线

### 3 基于 Matlab 的三维数据处理

利用 Matlab 三维图像处理时, 其主要数据的误差主要通过 Matlab 所提供的插值方法来减少误差, 软件自带的插值方法总共有 5 种: ‘v4’, 即 Matlab4.0 自带的插值算法; ‘linear’, 双线性插值算法; ‘nearest’, 最临近插值算法; ‘spline’, 三次样条插值法以及 ‘cubic’, 双三次插值算法。针对“三带”分布的实际情况, 分析数据时采用双三次插值算法, 一方面, 它对于无规律的随机数据插值效果好, 此外, 利用它是建立在三次插值多项式基础上的特点, 使得插值的结果比较平滑。在确定算法后, 使用 meshgrid 和 griddata 函数建立算法模型, 对原始数据进行平面差分, 随后再使用 surf 和 contour 函数绘出“三带”分布立体图形与等值线图, 算法主程序伪代码如下:

```
[aa, bb] = meshgrid(x, y); cc = griddata(xx, yy, zz, aa, bb 'cubic'); surf(aa, bb, cc), figure; contour(aa, bb, cc, n);
```

其中 **xx**, **yy**, **zz** 为原始采空区走向、倾向、氧浓度三维构造数值矩阵, **x**, **y** 为自定义插值后的一维矩阵, **aa**, **bb**, **cc** 则为经过插值后的二维数值矩阵, **n** 为自定义等值线条数, 从而可以直观的得到三维图像 (见图 4) 以及氧浓度分布的等值线图 (见图 5)。结合图 4 和图 5 不难看出, 随着工作面的推进, 氧气浓度值总体呈现下降趋势, 在距离工作面 30.4 m 时, 其氧气浓度进入 18% 氧化带范围内, 在距离工作面 158 m 时, 其氧气浓度低于 6% 逐渐进入窒息带范围, 此时的“三带”范围: 散热带  $< 30.4 \text{ m}$ ;  $30.4 \text{ m} \leq$  氧化带  $\leq 158 \text{ m}$ ; 窒息带  $> 158 \text{ m}$ 。

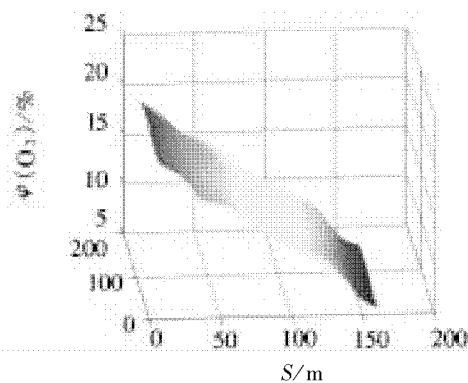


图4 氧浓度分布三维立体图

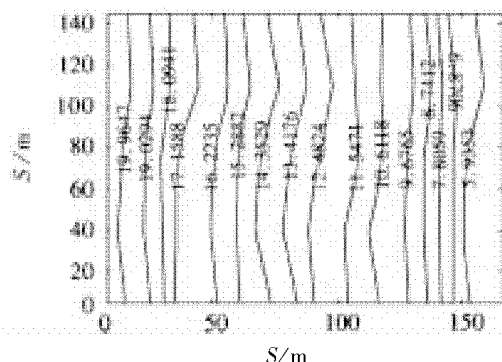


图5 采空区氧浓度分布等值线图

## 4 结论

1) 通过二维和三维模型的数据处理最终得出“三带”范围分别为: 散热带  $< 32.17 \text{ m}$ ,  $32.17 \text{ m} \leq$  氧化带  $\leq 158.95 \text{ m}$ , 窒息带  $> 158.95 \text{ m}$ ; 散热带  $< 30.4 \text{ m}$ ,  $30.4 \text{ m} \leq$  氧化带  $\leq 158 \text{ m}$ , 窒息带  $> 158 \text{ m}$ 。不难看出这两种方式的误差范围较小, 属于正常范围, 从而也相互印证了这两种方式的可靠性。

2) 在用传统的 Excel 软件处理时候, 只是做普通的拟合, 无法剔除不可靠点, 而试验采用 Matlab 残差图的方式剔除了影响拟合效果的瑕点, 使得所得函数更加可靠, 提高了曲线拟合的精确性。

3) 使用 polytool 函数动态的读取拟合函数上的任意一点的函数值, 为以后研究其余曲线各点值的动态变化提供了便利。

4) 在原始数据的基础上, 运用三维模型, 清晰的表现出采空区气体浓度与工作面推进距离以及

工作面倾向三者之间的联系, 并且利用等值线函数直观的表现出氧浓度在采空区的分布情况, 直接利用观测法就能大致确定“三带”范围。

## 参考文献:

- [1] 杜计平. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 165 - 169.
- [2] 张国枢, 戴广龙. 煤炭自燃理论与防治实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 68 - 70.
- [3] 陈丽霞, 张人伟, 谭艳春, 等. 综放工作面采空区三带实测分析与模拟[J]. 煤矿安全, 2011, 42 (1): 130 - 132.
- [4] 宋万新, 杨胜强, 徐全. 基于氧体积分数高瓦斯采空区自燃“三带”划分[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29 (2): 271 - 276.
- [5] 卢平, 张士环. 高瓦斯煤层综放开采瓦斯与煤自燃综合治理研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14 (4): 69 - 74.
- [6] 何启林, 袁树杰, 王新建, 等. 徐庄煤矿综放采空区“三带”宽度的确定[J]. 煤矿安全, 2001, 2 (2): 6 - 7.
- [7] 余明高, 常绪华, 贾海林, 等. 基于 Matlab 自燃“三带”的分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35 (4): 600 - 604.
- [8] 彭信山, 景国勋. 基于 Matlab 采空区自燃发火数值模拟[J]. 煤炭技术, 2011, 30 (4): 103 - 104.
- [9] 唐家德. 基于 Matlab 的非线性曲线拟合[J]. 计算机与现代化, 2008, 15 (5): 15 - 19.
- [10] 李强, 赵伟. Matlab 的数据处理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 110 - 113.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)