

岩石动态断裂韧度温度相关性的实验研究

宫能平, 陈明飞

(安徽理工大学应用力学研究所, 安徽 淮南 232001)

摘要:利用 CCCD - SHPB (Central Cracked Circular Disk - Split Hopkinson Pressure Bar) 试验系统对花岗岩试件实施同一加载速率、不同温度下的纯 I 加载试验, 进而研究环境温度对岩石类材料动态断裂性能的影响。实验过程中控制加载脉冲, 使得测试试件的加载速率基本一致, 测得不同温度下试件两端平均载荷 \bar{P} 随时间的变化关系, 将最大 \bar{P}_{\max} 代入中心裂纹圆盘应力强度因子 K_I 公式, 获得不同温度下中心裂纹巴西圆盘岩石试件的动态断裂韧度 K_{Id} 。测试结果表明, 温度处于 $10 \sim 100^\circ\text{C}$ 时, 花岗岩动态断裂韧度 K_{Id} 随着温度的升高逐步下降, 近似呈线性关系。

关键词:断裂韧度; 霍布金森压杆; 中心裂纹圆盘

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 1098 (2013) 04 - 0001 - 03

Experimental Study on Dependence of Toughness against

Dynamic Fracture of Rocks on Temperature

GONG Neng - ping , CHEN Ming - fei

(Institute of Applied Mechanics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study effect of temperature on fracture properties of rock materials, the pure I loading test was carried out for the same granite specimen at the same loading rate and different temperatures by use of test system Central Cracked Circular Disk - Split Hopkinson Pressure Bar. In process of test, stress impulse was regulated to keep consistent loading rate, changing temperature of specimens to observe variation of mean load \bar{P} on the specimen ends with time. The maximum value of \bar{P}_{\max} was introduced into formula of stress intensity factor K_I of central cracked circular disk to obtain toughness K_{Id} against dynamic fracture of rock specimens of Brazilian central cracked circular disk at different temperatures. The test results showed that when temperature increases from 10 to 100°C , the fracture toughness of rocks steadily reduce approximately linearly.

Key words: fracture toughness; split Hopkinson pressure bar (SHPB); central cracked circular disk (CCCD)

岩石的动态断裂性能与加载条件、环境温度密切相关^[1]。工程实践中岩石类材料环境温度不同, 呈现的断裂破坏往往也各异, 因此, 深入研究温度对岩石类材料动态力学性能的影响, 探索岩石在不同温度下的动态断裂韧度, 对结构的安全设计,

防止岩石断裂、破碎、滑移、流变、爆裂等破坏性事故的发生具有重要的理论和实践意义^[2]。

文献[3 - 5]利用 SHPB 技术, 对花岗岩试件实施冲击压缩试验, 依据试验得到的试件两端平均载荷, 推广准静态下中心裂纹圆盘应力强度因子计算

公式,获得了岩石的动态断裂韧度。但由于实验技术上的困难,大多数研究者均未涉及温度对岩石材料动态断裂韧度的影响。文献[6]设计了一套基于霍布金森压杆(SHPB)装置的试件加温系统,研究了岩石试件加热过程中温度场的分布,为研究岩石类材料动态断裂韧度温度相关性提供了加热升温装置。此外,由于 SHPB 实验技术的日趋成熟^[7],实验的数据采集、处理分析等方面也都取得了长足的进步,使得利用 SHPB 系统研究岩石类材料动态性能的温度相关性变得更加方便、可靠。

本文在 SHPB 试验系统上,通过控制加载脉冲幅值,仅改变试件的环境温度,实现了岩石类材料在同一加载速率、不同温度下的动态断裂实验,实施岩石材料动态断裂韧度的温度相关性研究。

1 SHPB 实验系统的测试原理

本试验采用的霍布金森压杆(SHPB)装置工作原理如图 1 所示,子弹撞入射杆,产生一压缩方波。其中,入射波、反射波和透射波分别由贴在入射杆和透射杆的两组电阻应变片记录,并通过超动态应变仪放大后存储于瞬态波形存储器中。

由一维波理论^[8],试件左、右端面的载荷 $P_L(t)$ 、 $P_R(t)$ 及位移 u_L 、 u_R 分别为

$$P_L(t) = EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \quad (1)$$

$$P_R = EA\varepsilon_t(t) \quad (2)$$

$$u_L = c_0 \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) + \varepsilon_r(\tau)] d\tau \quad (3)$$

$$u_R = c_0 \int_0^t \varepsilon_t(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中: E 为杆的弹性模量; A 为杆的横截面积(两杆材料和直径相同); c_0 为杆中弹性波速。

由 $P_L(t)$ 、 $P_R(t)$ 计算试件两端的平均载荷 $\bar{P}(t)$ 。

$$\bar{P}(t) = \frac{P_L(t) + P_R(t)}{2} = \frac{EA}{2} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (5)$$

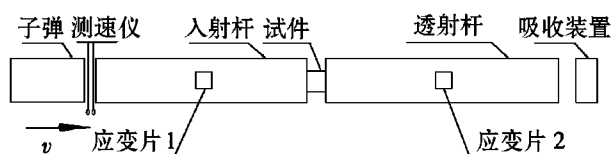


图 1 Hopkinson 压杆实验原理示意图

2 岩石动态断裂温度相关性实验

2.1 岩石试件的制备

试件材料为四川雅安的大理岩。泊松比为 0.26,弹性模量为 21.8 GPa,密度为 2 520 kg/m³。试件的加工首先采用高压水射流切割出直径 50 mm,厚度 13 mm,裂纹长度 23 mm 的中心裂纹圆盘试件,然后对试件进行削边处理,保证实验时试件与压杆接触良好。最后用金刚丝线加工裂纹两端,使其近似成为尖裂纹(见图 2)。

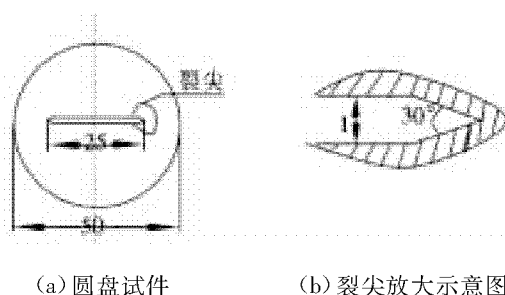


图 2 中心切口圆盘试件示意图 (mm)

2.2 实验过程

试件分成 4 组,每组 5 块,实验的环境温度分别为 10℃、50℃、80℃、100℃,试件加热升温到设定温度后恒温处理 1 个小时后,迅速在 SHPB 实验系统上实施冲击压缩动态断裂实验。SHPB 压杆参数如表 1 所示。

表 1 SHPB 试验系统参数

杆直径/ mm	入射杆长 度/mm	透射杆长 度/mm	弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比 μ
37	2 000	2 000	70	2 700	0.3

3 实验结果分析

根据断裂动力学基本原理^[9],动态断裂韧度在最大载荷处为其失稳点,即将试验得到试件两端最大平均载荷带入准静态公式计算动态断裂韧性。

3.1 实验波形和载荷曲线

利用贴在压杆上的应变片所记录的入射波、反射波和透射波,依据式(1)~式(4)计算试件两端的载荷和位移,典型的入射波、反射波和透射波如图 3 所示, U 为电压。

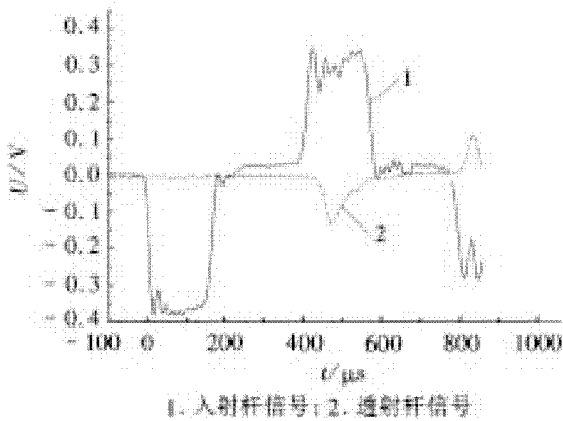


图3 入射波、反射波和透射波波形

根据试件左右两端的载荷 P_1 和 P_2 , 进而可获得试件两端的平均载荷随时间的变化关系如图4所示, 载荷随时间的变化关系曲线比较光滑, 表明测试结果是可靠的^[10]。

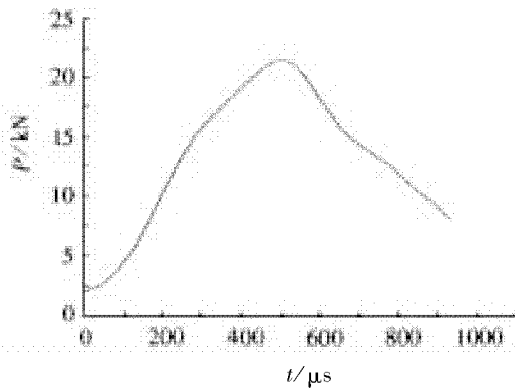


图4 平均载荷与时间关系

3.2 动态断裂韧度

中心切口裂纹圆盘试件的动态断裂韧度计算公式为^[11-12]

$$K_{Id} = \sigma \sqrt{\pi a} F_I = \frac{\bar{P}_{\max}}{\pi B R} \sqrt{\pi a} F_I \quad (6)$$

式中: B 为试件厚度; R 为试件半径; a 为裂纹半长; F_I 为无量纲应力强度因子 (其与裂纹相对长度、加载角以及载荷分布角有关); \bar{P}_{\max} 为试件两端平均载荷的最大值。

根据实验得到的载荷时间曲线, 确定最大平均载荷 \bar{P}_{\max} , 并代入式 (6), 即可计算出动态断裂韧度 K_{Id} 。

加载速率 \dot{K}_I 为

$$\dot{K}_I = \frac{K_{Id}}{t_f} \quad (7)$$

式中: t_f 为岩石试件最大载荷所对应的时间; K_{Id} 为试件的动态断裂韧度。

各组实验的加载速率 \dot{K}_I 、断裂韧度 K_{Id} 如表2所示, 其中, 断裂韧度值是同一环境温度和同一加载速率下同组试件断裂韧度的平均值。

表2 实验结果

测试温度/ ℃	加载速率 \dot{K}_I / (MPa · m ^{1/2} · s ⁻¹)	断裂韧度 K_{Id} / (MPa · m ^{1/2})
10	144 230	7.9
50	142 560	7.5
80	142 420	7.2
100	141 950	6.87

从表2可以看出, 所有动态断裂实验的加载速率接近, 从而获得了同一加载速率下岩石类材料动态断裂韧度随温度变化的关系 (见图5)。在同一加载速率下, 岩石材料动态断裂韧度随着温度的增加近似呈线性下降的趋势。

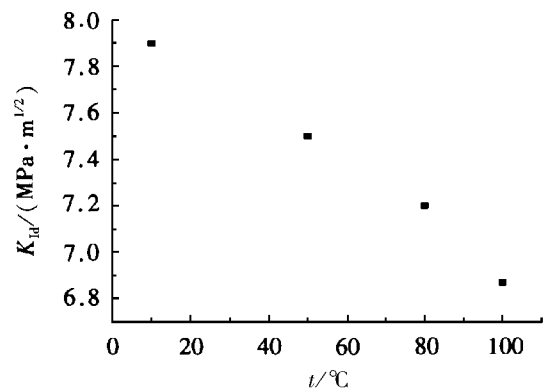


图5 断裂韧度和环境温度的关系

4 结论

利用 SHPB 试验系统, 成功实施了同一加载速率、不同环境温度下的动态断裂实验, 获得了不同温度下岩石材料的动态断裂韧度, 比较系统的研究了环境温度对岩石类材料动态断裂韧度的影响, 即加载速率为 143 000 MPa · m^{1/2} · s⁻¹ 左右、环境温度位于 10 ~ 100℃ 区间时, 断裂韧度随着温度的升高逐步下降, 近似呈线性关系。

参考文献:

- [1] 张志镇, 高峰, 徐小丽. 花岗岩力学特性的温度效应实验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32 (8): 2 346 - 2 352.
- [2] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 176 - 198.

(下转第 31 页)

基于 DNA 自组装模型解决图的最大独立集问题

刘 静, 殷志祥

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了寻找图的最大独立集问题, 先利用 DNA 自组装模型解决可满足性问题, 再把最大独立集问题转化为可满足性问题, 从而解决最大独立集问题。整个过程只用到凝胶电泳操作, 在很大程度上减少了误差。

关键词: DNA 自组装模型; 可满足性问题; 最大独立集

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0004-03

Maximum Independent Set Problem Solution Based on DNA Self - assembled Model

LIU Jing, YIN Zhi - xiang

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

Abstract: In order to find the maximum independent set of graph, DNA self - assembly model was used to solve the satisfiability issue, and the maximum independent set issue was converted to satisfiability issue, so as to solve the maximum independent set issue. In the whole process only gel electrophoresis operation was applied, which considerably reduces the error.

Key words: DNA self - assembly model; satisfiability issue; maximum independent set

在图论中, 最大独立集问题是一类经典问题。在 1979 年被文献[1]证明为 NP - 完全问题。而且还可以证明它与最大团问题、最小覆盖问题等可以转化。因此对于最大独立集问题的研究是很有意义的。

目前对于最大独立集问题的研究已经取得了相当的进展。2002 年, 文献[2]基于图的邻接矩阵寻找图的最大独立集; 2007 年, 文献[3]结合蚁群优化算法和禁忌搜索算法解决最大独立集问题; 2008 年, 文献[4]提出了利用闭环 DNA 计算的最大独立集算法; 同年文献[5]提出了基于一种 DNA 类似物——肽核酸(PNA)的最大独立集解法; 2009 年, 文献[6]利用 DNA 缩短法计算模型求解最大

独立集的问题等。这些方法都一定程度上解决了最大独立集问题, 但是都存在不完善的地方, 没有提出一个通用的解决办法, 而且很多模型使用了許多生物酶, 这给实际操作带来了技术上的困难。

1 DNA 自组装模型研究进展

随着 DNA 技术的不断发展, 这一生物技术有着越来越广泛的应用前景。越来越多的研究者应用 DNA 计算解决实际问题, 在这其中, 自组装 DNA 计算模型也被广泛研究, 成功解决了一些 NP - 完全问题、数据海量存储与数据加密盒解密、智能算法的融合与智能控制、DNA 芯片的合成等问题^[7]。因为其自身的独特优势, 自组装 DNA 计

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170172, 60873144, 61073102, 60973050)

作者简介: 刘静(1988-), 女, 山东临沂人, 在读硕士, 研究方向: DNA 计算、图论等。

算领域必定会成为融合生物学、计算机仿真、应用数学、智能计算等重要的交叉科学。

2 DNA 自组装模型的应用

2.1 最大独立集的相关概念

在图 G 中, V 表示顶点集, E 表示边集。设 S 是 V 的一个子集, 若 S 中任意两个顶点在图 G 中均不相邻, 则称 S 为 G 的一个独立集。 G 的一个独立集 S 称为 G 的最大独立集, 如果 G 不包含适合 $|S'| > |S|$ 的独立集 S' 。如图 1 中, 图 G 中 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$, G 的一个独立集为 $\{v_2\}$, 最大独立集为 $S = \{v_i \in G \mid v_2, v_3\}$ 。

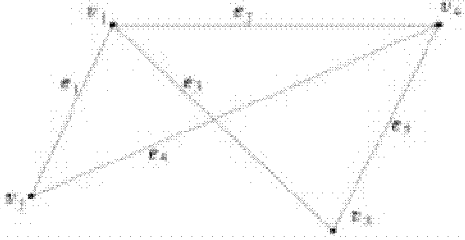


图 1 四个顶点的图 G

2.2 最大独立集问题的基本解法

1) 图的最大独立集问题的转化。设 $G = (V, E)$ 是一个无向简单图, 图中的顶点 v_1, v_2, \dots, v_n 可以看成是可满足问题中的布尔变量。当顶点 v_i 在独立集中时, 布尔变量就为 1, 否则就为 0。令合取范式 $F = \bigwedge_{e_{ij} \in E(G)} (v_i^F \vee v_j^F)$, 则可知, 图 G 的独立集当且仅当 S 中顶点在可满足性问题中取值为 1。仍然以图 1 为例, 可得:

$$F = (v_1^F \vee v_2^F) \wedge (v_1^F \vee v_3^F) \wedge (v_1^F \vee v_4^F) \wedge (v_2^F \vee v_3^F) \wedge (v_2^F \vee v_4^F) \wedge (v_3^F \vee v_4^F)$$

当 $v_2 = v_3 = 1, v_1 = v_4 = 0$ 时, $F = 1$; 反之亦然。由此看出图的最大独立集问题可以转化为可满足性问题。

2) 解决可满足性问题的思路。通过构造范式中每个量的补链, 将其加入反应液, 通过 DNA 自组装成发夹结构, 能够形成发夹结构的 DNA 链就表示子句 $F_i = 1$ (这里定义 F_i 为 $F = \bigwedge_{e_{ij} \in E(G)} (F_i)$, $F_i = v_i^F \vee v_j^F$)。并且通过凝胶电泳将其分离出来。

通过对所有子句的真假判断, 最终得到可满足性问题的解。

3) 具体解法。首先, 要生成可满足性问题的 DNA 链。要生成满足条件的 DNA 链, 就要对合取范式进行编码。这里, 对于含 n 个顶点的图, 子句的个数就为 $\frac{n(n-1)}{2}$ 个。合成 $2n$ 种短的寡聚核苷酸片段, 等分为两组, 记为: v_1, v_2, \dots, v_n 和 v'_1, v'_2, \dots, v'_n (v'_i 为 v_i 的否定形式), 其补链为: $\overline{v_1}, \overline{v_2}, \dots, \overline{v_n}$ 和 $\overline{v'_1}, \overline{v'_2}, \dots, \overline{v'_n}$ 。然后用 DNA 固相合成法^[8]合成可满足性问题的所有 2^n 种组合的线性 DNA 链。再用聚丙烯酰胺凝胶电泳进行纯化, 再进行 PCR 扩增, 得到的每一条 DNA 序列代表可满足性问题的一组解。

然后, 对含有代表范式中的子句的 DNA 链的反应溶液中加入特殊的补链。此补链由三部分组成: 最前端不参加杂交反应、前四个碱基的补、后四个碱基的补。控制好反应条件, 经过充分杂交反应后, 子句值为真的 DNA 链会形成发夹结构; 反之, 没有变化。没有形成发夹结构的 DNA 链的长度与形成的不一样, 所以很容易通过凝胶电泳操作, 将那些没有形成发夹结构的 DNA 链和溶液中可能多余的补链分离, 剩下的 DNA 链就是想要得到的结果。再在里面加入完全补链, 在适当的温度、酸碱度等条件下, 他们会再次发生杂交反应, 发夹结构会被打开, 通过凝胶电泳, 分离所有子句值为真的组合。

不断重复上述过程, 直至所有的子句都检查完, 即可得到满足条件的顶点集。

4) 实例分析。为方便把图 1 中 v_4 去掉, 以三个顶点的图为例。先构造六种短的寡聚核苷酸代表 v_1, v_2, v_3 和 v'_1, v'_2, v'_3 以及 $\overline{v_1}, \overline{v_2}, \overline{v_3}$ 和 $\overline{v'_1}, \overline{v'_2}, \overline{v'_3}$ 。并对其进行编码结果如下:

$$\begin{array}{ll} v_1: \text{GGCCTAGTCACAGG} & \overline{v'_1}: \text{AAA - GCTGGGCC} \\ v'_1: \text{ATGATACGCAGCTC} & \overline{v_1}: \text{AAA - GAGCTCAT} \\ v_2: \text{GCGCAAGTGCTCGA} & \overline{v_2}: \text{AAA - TCGAGCGC} \\ v'_2: \text{ATAGCTCTAAGGCA} & \overline{v'_2}: \text{AAA - TGCCCTAT} \\ v_3: \text{CTAGTGAGACCTCA} & \overline{v_3}: \text{AAA - TGAGCTAG} \\ v'_3: \text{TCGTGCCAAGATCA} & \overline{v'_3}: \text{AAA - TGATACGA} \end{array}$$

此编码均是从 $5' \sim 3'$ 方向进行。对其进行纯化和 PCR 扩增后,可得 DNA 链(见图 2(I))。例如选取 F 中第一个子句 $v_1^F \vee v_2^F$ 进行操作。第一步中得到的 3 种含有 v_1 和 v_2 部分的寡聚核苷酸片段会与其特殊补链进行杂交反应,生成发夹结构,如图 2b(II)所示。适当调整温度,是发夹结构被重新打开(见图 2b(III)),然后再次通过凝胶电泳分离出 DNA 链。同理对 $v_2^F \vee v_3^F$ 和 $v_1^F \vee v_3^F$ 分别进行操作,最终可得 $v_2 = v_3 = 1, v_1 = 0$ 。

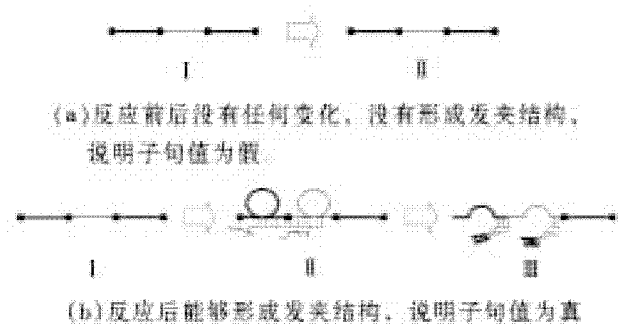


图 2 实例操作

3 结论

本文利用 DNA 自组装模型成功解决图的最大独立集问题。在这个过程中需要注意的是,在初始溶液中,要避免 DNA 链自身发生发夹结构,因此编码的设计就显得尤为重要。整个过程操作过程简单易行,相比其他的算法有一定的优势。

参考文献:

- [1] MICHAEL R GAREY, DAVID S JOHNSON. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP - Completeness [M]. W. H. Freeman & Co, 1979:1 - 90.
- [2] ZHOU YANG, ZI - MING DUAN. An Algorithm Solving the Maximum Independent Set of Graph [J]. Computer Development & Application, 2002, 15 (6): 13 - 14.
- [3] ZHEN - YU PENG, HONG - WEI GU. Hybrid Optimization Algorithm for Solving Maximum Independent Set Problems [J]. Computer Application, 2007, 27 (5): 1 194 - 1 196.
- [4] KANG ZHOU, XIAO - JUN TONG, WEN - BIN LIU, et al. Algorithm of Maximum Independent Set Problem Based on Closed Circle DNA Computing [J]. Computer Engineering, 2008, 23 (3): 501 - 508.
- [5] 殷志祥,崔健中,杨静. 基于 PNA 的最大独立集问题的 DNA 计算模型[J]. 生物数学报, 2008, 23 (3): 501 - 508.
- [6] 张成,杨静,许进,赵东明. DNA 缩短法计算模型求解最大独立集问题[J]. 科学通报, 2009, 54 (24): 3 913 - 3 919.
- [7] ZHEN CHENG. Research Advances and Prospect of DNA Computing by Self - assembly [J]. Computer Science, 2012, 39 (5): 14 - 18.
- [8] YOU - WEI FU, LEI WU. Three Key Steps in Solid Phase Peptide Synthesis [J]. Chemical Industry and Engineering, 2010, 27 (4): 370 - 375.

(责任编辑:何学华)

煤矸石充填复垦对土壤特性影响研究

郑永红¹, 张治国^{1,2}, 姚多喜^{1,2}, 陈孝杨¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省矿山地质灾害防治重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:为实现矿区可持续发展,以潘一矿复垦区土壤为研究对象,选择土壤含水率、容重、pH值、有机碳、速效钾、速效磷和全氮7项指标对煤矸石充填复垦土壤特性及肥力水平进行评价。结果显示:与对照区土壤特性相比,潘一矿复垦区土壤含水量、有机质、速效钾、速效磷、全氮含量偏低。但是土壤容重较大,pH值略高显弱碱性。在土壤剖面上,这7种指标在各层含量差异不大。潘一矿复垦区土壤营养元素中有机质和速效磷比较缺乏,特别是有机质含量严重缺乏。风化后的煤矸石对土壤有一定增肥作用。但是,由于煤矸石偏碱性和含盐量较高特点,容易引起接触层土壤发生盐化现象,应当引起重视。

关键词:煤矸石;复垦土壤;理化特性;肥力水平

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0007-05

Study on Influence of Gangue on Reclaimed Soil Properties

ZHENG Yong-hong¹, ZHANG Zhi-guo^{1,2}, YAO Duo-xi^{1,2}, CHEN Xiao-yang¹

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazard and Control of Anhui Province, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to achieve sustainable development of mining area, the soil in reclamation area of Panyi Coal Mine was taken as research object, selecting soil moisture content, bulk density, pH value, organic carbon, available potassium, available phosphorus and total nitrogen as the seven indicators to evaluate properties of soil reclaimed with gangue backfilling and its fertility levels. The results showed that comparing with the control soil, in the soil in reclamation area of Panyi Coal Mine soil moisture, organic matter, available potassium, available phosphorus, total nitrogen content is lower. But the soil bulk density is bigger, and pH value presents slightly noticeable alkaline. In the soil profile, the contents of the seven indicators have little difference in different layers. In the nutrients in the reclamation soil of Panyi Coal Mine, the organic matter and available phosphorus are relatively lacking, especially organic matter content sorely lacking. After weathering, gangue has some effect of increasing fertility for soil. However, since the gangue is alkaline and has high salt content, easy to cause soil salinization in the contacting layer, which should be paid attention.

Key words: coal gangue; reclaimed soil; physicochemical property; fertility level.

煤矿塌陷区土地复垦是保护耕地资源,实现矿区可持续发展的重要途径之一^[1-2]。人为对塌陷区土壤进行复垦重构,往往由于施工过程的机械碾

压和扰动,破坏了土壤原始结构和剖面层次。重构后的土壤理化特性及肥力水平发生较大变化,土壤的生产力很难达到之前或耕作土壤水平。复垦土

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274013);安徽高校省级自然科学基金资助项目(KJ2011Z102)

作者简介:郑永红(1979-),女,新疆乌鲁木齐人,讲师,硕士,研究方向:环境监测与评价。

壤质量的高低是土地复垦成功与否的关键所在^[3]。以往人们片面注重土地复垦数量面积,而忽视土地复垦的质量,特别是土壤生产力的恢复。与土壤生产力密切相关的土壤理化指标是评价土地复垦效果的重要指标,也是指导塌陷区土地复垦的重要依据。

淮南矿区利用煤矸石填充塌陷地已有几十年历史,主要集中在李郢孜矿区、新庄孜矿区和孔集矿区等,在采煤塌陷区综合治理方面取得了一定成就,为采煤塌陷区治理工程设计和实践提供宝贵经验。2005年以来,淮南矿业集团实施了潘一矿矿山地质环境治理工程,采用剥离表土,回填矸石,上覆1 m粘土工艺,治理塌陷地37.96 hm²,完成土石方 8.59×10^5 m³,2006年12月结束。

论文选择潘一矿塌陷区复垦土壤作为研究对象,以该研究区域附近基本农田作为对照区,通过对复垦后土壤含水量、容重、酸碱度、有机质、速效钾、速效磷和全氮等指标含量特征分析,评价重构后土壤的肥力水平。并重点研究煤矸石充填对接触层土壤的理化特性影响。

通过复垦区土壤特性及肥力水平研究可以为煤矿塌陷区土壤重构和复垦工作,及土壤生产力恢复管理提供重要参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于潘一矿东侧约1.0 km处,地处116°50'E,32°47'N,属暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温15.3℃,7月份气温最高,极端最高气温达41.2℃,1月份气温最低,极端最低气温达-22.2℃;年平均降水量926 mm,夏季降水量最多,占全年降水量的50%,春季次之,秋季较少,冬季最少。土壤类型为砂姜黄土,成土母质为黄土性古河流沉积物。

1.2 样品采集

2009年6月至2010年10月,在潘一矿塌陷复垦区域内划分为三个区域,设置30个采样点,每个采样点上利用土壤重金属分析采样器(XDB0306型),在垂直剖面上以20 cm为一个深度单位,分层采集土壤样品140个。另外选取未受煤矿复垦活动影响区域的土壤作为试验对照区,分析对比复垦活动对土壤理化特性的影响程度(见图1)。

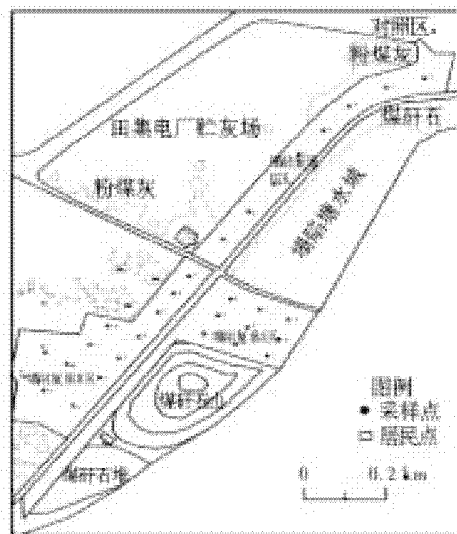


图1 潘一矿复垦区采样点示意图

1.3 样品预处理

土壤及煤矸石样品预处理按照土壤环境监测技术规范(HJ/T 166-2004)规定操作。

1.4 测试方法

土壤含水量采用烘干法测定;容重和孔隙度采用环刀法取样测定;酸碱度采用玻璃电极法;有机质用重铬酸钾容量法-外加热法;全氮采用LECO-TRUSEC碳氢氮分析仪测定;速效磷钼锑抗比色法;速效钾用醋酸氨浸提-火焰光度法。煤矸石样品理化指标测试方法同土壤。

1.5 数据处理与统计分析

原始数据采用Excel和SPSS17.0统计分析软件进行数据处理和分析,图件用MapGIS6.5和Origin8.0软件制图。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化指标

1) 含水量。根据经验,土壤墒情可分为不同的类型,土壤含水量为8%~20%,即田间持水量的30%~70%时适合耕作^[4]。潘一矿复垦区土壤含水量均值在6.01%~7.10%,与对照区土壤含水量相比,潘一矿复垦区土壤含水量比较低。同时,该研究区域含水量分布规律较为明显,表现为自土壤表层至100 cm深度(煤矸石填充深度),含水量逐渐减少(见图2)。这是由于表层土壤植物和微生物的活动较活跃,土壤松散,表层土壤含水

量较大。随着深度的增加,水分由重力作用下渗能力逐渐减弱。另外复垦时对外层土壤的人工压实作用,也减小水分的下渗作用。

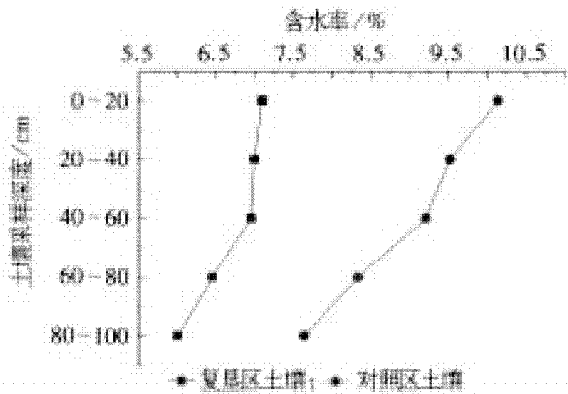


图2 对照区土壤与复垦区土壤含水量变化曲线

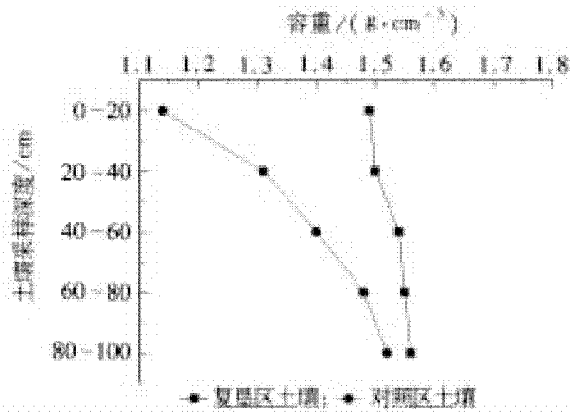


图3 对照区土壤与复垦区土壤容重变化曲线

2) 土壤容重。一般来说,土壤耕作层容重在 $1.05 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 之间,底土和紧实的耕作层容重在 $1.35 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ 之间^[5](见图3)。土壤容重大小受土壤质地、有机质含量、结构性和松紧度的影响较大,还与土壤层次有关,耕层容重一般在 $1.10 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$,随土层加深,容重值也相应变大,在 $1.40 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ 之间^[6]。从图3中可以看出,由于充填复垦机械压实作用,从表层土壤到100 cm 深度处土壤容重逐渐增大,孔隙度减小,土体变得紧密结实。潘一矿复垦区土壤垂直方向上容重在 $1.49 \sim 1.56 \text{ g/cm}^3$ 之间,分层土壤差距不大。复垦区土壤表层土壤容重大于耕作层土壤容重。与对照区土壤容重相比,复垦区土壤容重较大。因此,应对该复垦区表层土壤进行深翻,这样有利于空气、水分、营养成分的下渗,促进农作物、草本植物的生长,促进微生物和小动物的活动,改善复垦区土壤环境。

3) 土壤 pH 值。土壤的酸碱性对土壤重金属

的毒性、土壤微生物的活性和有机质分解等起着重要作用。如果土壤碱性过强,将会破坏土壤结构,导致土壤水、气、热状况恶化,间接影响养分转化及其有效。所有采样点的 pH 分布在 $7.01 \sim 8.61$ 之间,分层土壤 pH 均值在 $7.95 \sim 8.04$ 之间,复垦区土壤 pH 呈弱碱性。与对照区农田土壤相比 pH 略高,但分层变化差异较小(见图4)。

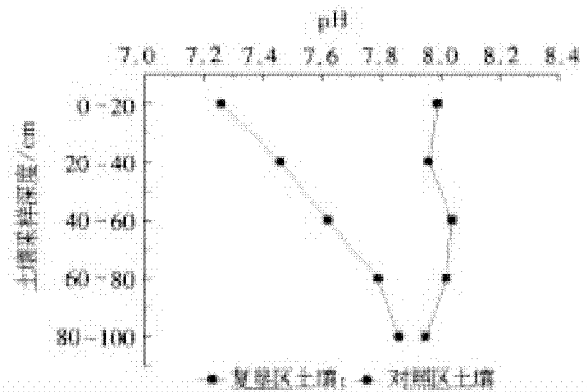


图4 对照区土壤与复垦区土壤 pH 变化曲线

4) 有机质含量。土壤有机质是土壤中各种含碳有机化合物的总称。它与矿物质一起构成土壤的固相部分。土壤有机质含量并不多,一般只占固相总重量的10%以下,耕作土壤多在5%以下,但它却是土壤的重要组成部分,是土壤发育过程的重要标志,对土壤性质的影响重大。分析潘一矿复垦区土壤有机质含量,土壤剖面自上而下有机质含量呈减少趋势,并且表层土壤的有机质含量高于底层土壤,这与农业土壤有机质含量的空间变化特征一致。与对照区比较,复垦区土壤有机质含量偏低(见图5)。

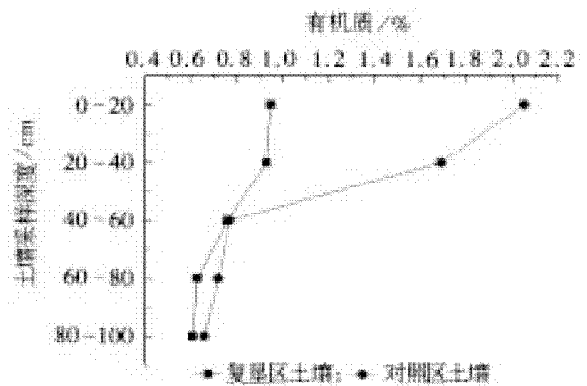


图5 对照区土壤与复垦区土壤有机质变化曲线

5) 速效钾含量。钾是植物必需的营养元素之一,而速效钾是指易被作物吸收利用的钾,包括了水溶性钾和交换性钾。尽管速效钾只占土壤全钾

的 1% ~2%,但由于能被当季作物所吸收,对植物的钾素营养状况有直接影响,其含量高低是判断土壤钾素丰缺的重要指标^[7]。潘一矿复垦区土壤剖面中速效钾含量在 105 ~ 109.14 mg/kg 之间。在土壤剖面上,表层土壤速效钾含量最大,依次减少,且变化差异不大。与对照区土壤速效钾含量相比,明显偏低(见图 6)。

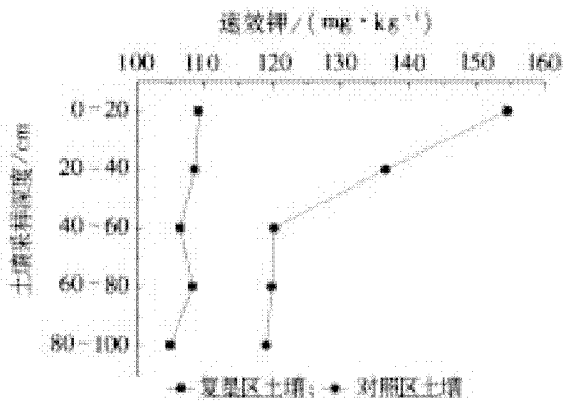


图 6 对照区土壤与复垦区土壤速效钾变化曲线

6) 速效磷含量。速效磷是土壤有效磷贮库中对作物最为有效的部分,能直接供作物吸收利用,因而是评价土壤供磷能力的重要指标^[8]。潘一矿复垦区土壤剖面中速效磷含量都小于 10mg/kg,并且在垂直剖面上含量差异不大。与对照区土壤速效磷相比,复垦区土壤速效磷含量偏低。但在 60 ~ 100cm 深度处,与对照区土壤含量接近(见图 7)。

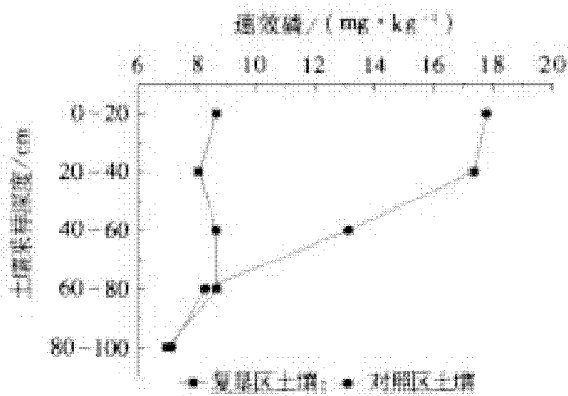


图 7 对照区土壤与复垦区土壤速效磷变化曲线

7) 全氮含量。氮元素是植物生长必需的元素,影响植物生长和产量。氮对植物生命活动以及作物产量和品质均有重要的作用,是植物体内许多重要有机化合物的组分,也是遗传物质的基础。土壤中氮含量通常用于衡量土壤氮素的基础肥力^[9]。中国耕地土壤的全氮含量不高,一般为

0.1% ~0.2%^[10]。潘一矿复垦区土壤在垂直剖面上全氮含量在 0.18% ~0.23% 之间,且分布均匀,60 ~100 cm 深度处全氮含量略低。与对照区土壤相比,复垦区土壤全氮含量偏低,特别是表层土壤(见图 8)。

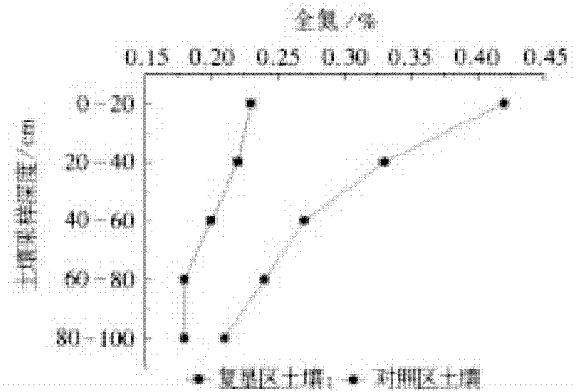


图 8 对照区土壤与复垦区土壤全氮变化曲线

2.2 土壤肥力水平评价

土壤肥力水平高低主要与土壤结构、有机质以及氮、磷、钾等养分含量密切相关。对比全国土壤养分含量分级标准^[11],潘一矿复垦区土壤有机质含量在 1% 以内,达到了全国 V 级缺乏水平;速效钾含量稍大于 100 mg/kg,肥力等级Ⅲ中等水平;速效磷含量 8 mg/kg 左右,肥力等级Ⅳ,较缺乏水平;全氮含量在 0.18% ~0.22% 之间,0 ~ 60 cm 层土壤中全氮含量达到 I 级丰富水平,60 ~ 100 cm 层全氮含量属于 II 级较丰富水平(见表 2)。

表 1 土壤养分分级表

级别	丰缺	有机质 / %	速效钾 / (mg · kg ⁻¹)	速效磷 / (mg · kg ⁻¹)	全氮 / %
I	丰富	>4	>200	>40	>0.200
II	较丰富	3~4	150~200	20~40	0.150~0.200
III	中等	2~3	100~150	10~20	0.100~0.150
IV	较缺	1~2	50~100	5~10	0.075~0.100
V	缺	0.6~1	30~50	3~5	0.050~0.075
VI	极缺	<0.6	<30	<3	<0.05

表 2 潘一矿复垦区土壤肥力等级水平

等级	有机质 / %	速效钾 / (mg · kg ⁻¹)	速效磷 / (mg · kg ⁻¹)	全氮 / %
丰缺	V 缺乏	Ⅲ 中等	Ⅳ 较缺	I / II 丰富/较丰富

总体来看,潘一矿复垦区土壤营养元素中有机质和速效磷比较缺乏,特别是有机质含量严重缺乏。因此,潘一矿复垦区土壤应首先注重提高土壤有机质水平,利用土壤有机质在土壤生产力形成方面的关键作用,促进土壤各肥力因素的提高。

2.3 充填煤矸石理化指标

根据复垦区煤矸石充填的深度,采集潘一矿复垦区 100 cm 左右深度的煤矸石风化样品,进行检测分析。其理化指标测试值如表 3 所示。

表 3 复垦区煤矸石的理化指标统计结果

统计项目	pH	含水量 /%	容重 /(g·cm ⁻³)	有机质 /%	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 /(mg·kg ⁻¹)	全氮 /%
最大值	9.01	3.77	1.33	18.56	281.46	7.78	0.52
最小值	8.58	1.12	1.01	3.10	120.66	3.73	0.06
均值	8.83	2.15	1.16	11.30	193.46	5.53	0.42
偏差	0.17	0.99	0.14	5.61	59.99	1.57	0.06
变异系数/%	1.93	11.95	11.95	49.66	31.01	28.47	14.43

潘一矿复垦区矸石 pH 偏碱性,均值为 8.83,变异系数 1.93%,变化范围较小。分析充填后的煤矸石理化指标,潘一矿复垦区的覆土底部的煤矸石含水量都很小,均值为 2.15%;底部风化的煤矸石孔隙度比较大,都超过了 50%,增加了土壤中空气的含量,减少了土壤的涵水作用。参考土壤养分分级表(见表 1),潘一矿复垦区煤矸石中有机质均值 11.30%,有机质含量非常丰富;速效钾均值含量为 193.46 mg/kg,速效钾均值含量处于较丰富水平;速效磷含量分别为 5.53 mg/kg,速效磷含量比较缺乏,与潘一矿土壤速效磷含量水平较一致;全氮的均值为 0.42%,底部煤矸石中全氮的含量都处于很丰富的水平。

总体上,煤矸石风化产物中营养元素含量较丰富,可以满足植物生长的需要,同时也会对复垦土壤有一定的增肥作用。

3 结论

1) 与对照区土壤特性相比,潘一矿复垦区土壤剖面各层含水量、有机质、速效钾、速效磷、全氮含量偏低。但是土壤容重较大,pH 略高显弱碱性。由于煤矿复垦活动的人为扰动,与对照区土壤特性相比已经产生了较大的变化。在土壤剖面上,这 7 种指标在各层含量差异不大。

2) 潘一矿复垦区土壤营养元素中有机质和速效磷比较缺乏,特别是有机质含量严重缺乏。针对土壤肥力结构不合理的现象,应注意平衡施肥和采取适当的农业措施,充分发挥土壤的生产力,提升土壤肥力水平。

3) 分析用于充填复垦的煤矸石,结果表明,风

化后的煤矸石营养元素含量较丰富,可以满足植物生长的需要,同时会对复垦土壤有一定的增肥作用。但是,由于煤矸石偏碱性和含盐量较高特点,容易引起接触层土壤发生盐化现象,应当引起重视。

参考文献:

- [1] 王卓理,耿鹏旭,刘嘉俊. 平顶山市煤矿塌陷区复垦土壤理化性质研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2009,28(5):665-669.
- [2] 国土资源部土地整理中心. 土地复垦方案编制务实[M]. 中国大地出版社,2011:1-2.
- [3] 胡振琪. 露天煤矿土地复垦研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995:10-100.
- [4] 胡振琪,戚家忠,司继涛. 粉煤灰充填复垦土壤理化性状研究[J]. 煤炭学报,2002,27(6):639-643.
- [5] 朱祖祥. 土壤学[M]. 上册. 北京:农业出版社,1983:191:5-150.
- [6] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2005:85.
- [7] 李贵宝,焦有,孙克刚,等. 河南省耕地土壤速效钾含量与分布[J]. 河南农业科学,1998,(2):27-28.
- [8] 廖菁菁,黄彪,孙维侠,等. 农田土壤有效磷的时空变异及其影响因素分析[J]. 土壤学报,2007,44(4):620-627.
- [9] 刘国栋,崔玉军,谭福成,等. 黑龙江五常地区土壤肥力及环境健康评价[J]. 现代地质,2008,22(6):1 010-1 014.
- [10] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:123-126.
- [11] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社,1992:8-100.

(责任编辑:李 丽)

汾西炼焦煤中硫的赋存形态研究

葛 涛

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 研究煤中硫的结构、赋存形态对有效脱除煤中硫的影响, 节约回收稀缺炼焦煤资源, 为建立煤中硫的高效脱除方法提供科学依据, 提高煤炭综合利用水平, 节约稀缺煤种资源具有重要意义。利用 XPS 测试方法对汾西高硫炼焦煤中硫的赋存形态进行研究, 结果表明, 煤中无机硫含量较低, 以有机硫为主。有机硫的赋存状态共有 3 类, 含量从高到低依次为硫醇(醚)类、亚砷类、噻吩类。

关键词: XPS; 有机硫; 赋存形态; 炼焦煤

中图分类号: TQ54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0012-03

Research on Chemical Speciation of Sulfur in Cooking Coal of Fenxi County GE Tao

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

Abstract: Studying sulfur structure in coal and its chemical speciation has important significance in effective removal of sulfur from coal, saving and recycling scarce resources of coking coal, providing a scientific basis for efficient removal of sulfur from coal, improving comprehensive utilization level of coal, coal saving scarce resources. Sulfur chemical speciation in coking coal of Fenxi was studied with XPS method. The results showed that inorganic sulfur content in coal is small, and organic sulfur content dominates. Three categories of organic sulfur chemical speciation according content order from high to low are thiols (ether), sulfoxides, thiophenes.

Key words: XPS; organic sulfur; occurrence status; coking coal

炼焦煤资源在中国所有煤种的资源总量中所占比例仅约 1/4, 属于稀缺煤种。其中, 以山西省汾西等 9 个矿区炼焦煤资源储量最大, 可采储量约占全国资源储量的一半。据预测, 到 2015 年, 全国炼焦煤需求总量将新增 1.8 亿吨, 山西省炼焦煤产量新增预计仅为 0.8 亿吨, 其他省区炼焦煤增量有限, 导致届时全国炼焦煤约有 1 亿吨供需缺口。煤中硫含量高是多年来制约煤炭综合利用的主要原因, 深入研究煤中硫的结构、赋存形态对有效脱除煤中硫, 节约回收稀缺炼焦煤资源十分必要。

煤中硫结构分析方法很多, 文献[1]利用气相色谱-质谱法对淮北煤田煤中有机硫进行了测定

与分析、文献[2]用红外池吸收法测定了煤粉、焦炭中硫。而作为近年来出现的最有效的元素分析方法之一, X-射线光电子能谱法在煤的表面结构研究中被采用的更为广泛^[3-8]。X-射线光电子能谱(XPS)对材料表面化学特性具有高度识别能力, 且不会破坏样品的结构, 既可用于分析样品中存在的元素, 也可直接检测这些元素的存在形式。其原理是用一束特定能量的 X 射线辐照样品, 在样品表面发生光电效应, 产生与被测元素内层电子能级有关的具有特征能量的光电子, 通过对这些光电子能量分布进行分析, 便得到光电子能谱图^[9]。

收稿日期: 2013-03-26

资助项目: 低品质煤大规模提质利用的基础研究基金资助项目(2012CB214900)

作者简介: 葛涛(1980-), 男, 安徽涡阳人, 讲师, 在读博士, 研究方向: 环境工程。

1 实验部分

1.1 样品选择

样品采自汾西矿业集团新峪选煤厂,称取原煤

表1 样品的工业分析和元素分析

工业分析				元素分析				
M_{ad}	A_d	V_d	FC_d	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	O_{daf}
1.03	18.02	27.81	54.17	84.21	4.45	1.52	2.68	6.55

%

1.2 测试条件

实验在中国科技大学理化分析测试中心完成,仪器是 Thermo ESCALAB 250 型 X 射线光电子能谱仪,X 射线激发源:单色 Al K α ($E = 1486.6 \text{ eV}$),功率 150 W,X 射线束斑 $500 \mu\text{m}$,能量分析器固定透过能为 30 eV,以 Cl s (284.6 eV) 为定标标准,进行校正。

1.3 XPS 图谱拟合方法

目前,XPS 图谱的拟合处理有多种方法可以使用,本文利用 XPS Peak 拟合方法拟合图谱,通过数据的分析处理,得到煤中硫的形态信息。拟合步骤如下:选取试验数据中合适的电子结合能及对应的计数两列数据,复制到记事本中,以 *.txt 格式的文件保存。打开 XPSPEAK4.1 软件,点击 Data—Import (ASCII),引入 *.txt 格式的文件中的数据,则出现相应的 XPS 谱图。点 Background, Type 选择 Shirley 类型,谱图中出现背景线,根据背景线选择硫谱合理的 High BE 和 Low BE 位置。点 Add peak,在 Peak Type 处选择 p 峰类型,在 Position 处选择合理的峰位,本实验选择的是固定峰位,即在 Fix 前的小框中打勾。根据分峰拟合的效果调整峰宽,本实验选择固定峰宽,效果较佳。按照硫形态的不同结合能,依次添加峰值。修改参数后,须点击 Optimise Peak。点 Delete Peak 可去掉此峰。分峰设置完成后,点击 XPS Peak Processing 窗口中的 Optimise all,直到峰型拟合完毕。在 Data 中点击 Export (Spectrum) 可输出 .dat 文件,该文件可以在 Origin 软件中进一步进行修改完善。本实验选择 Data 中的 Export to clipboard 输出硫的 XPS 谱图,并可直接复制保存在 Word 文档中,同时输出分峰个数、峰位、峰面积、半峰宽等参数,简

约 6g,破碎,研磨,过 200 目筛,密封保存。样品的工业分析、元素分析如表 1 所示。由表 1 可知,样品中硫含量为 2.68%,属于中高硫煤。

单明了,并可在后续操作中添加注释。

2 结果与讨论

2.1 XPS 全图分析

煤样的 XPS 谱图如图 1 所示。图谱中出现了 4 个峰,根据峰位置,确定他们分别是 O、C、S、Si 的特征峰。图 1 对应的元素峰范围、最高峰位置、半峰宽及峰面积如表 2 所示。其中,硫的结合能有效分布范围是 173.20 ~ 160.90 eV,最高峰位置出现在 163.81 eV。

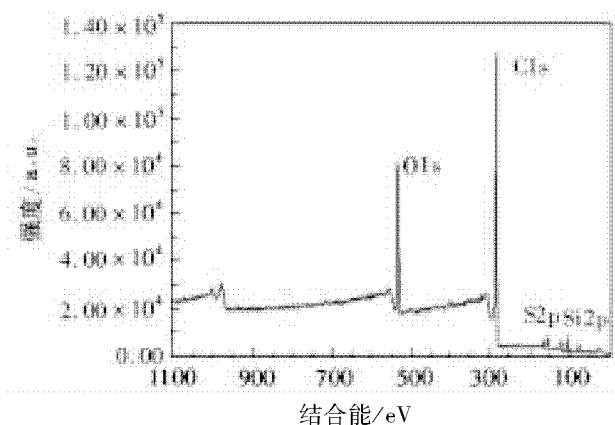


图1 煤样的 XPS 谱图

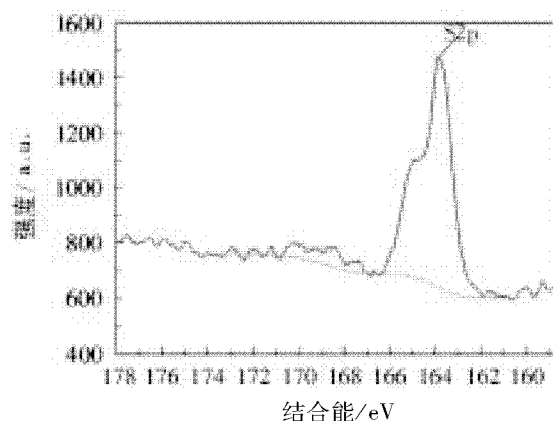


图2 煤样的 S 谱图

表2 煤样中不同元素的分布

元素	起始结合能/eV	中间结合能/eV	终点结合能/eV	半峰宽/eV	峰面积
C1s	294.25	284.58	281.85	1.32	70 555
S2p	173.20	163.81	160.90	1.16	1 600
O1s	536.60	532.82	528.95	2.18	44 292
Si2p	107.55	103.53	99.95	2.01	3 794

2.2 硫谱拟合解析

样品的硫谱图如图2所示。根据XPS Peak拟合方法,选取合理的High BE和Low BE位置分别在170.80 eV和161.00 eV,绘出背景线,即谱图下方的横向曲线。利用XPS Peak4.1软件,拟合出样品中S2p的XPS谱图,最佳拟合效果如图3所示。从图3可以看出,硫谱经分峰拟合共分成5个能量不同的峰,分别标识为S0、S1、S2、S3、S4。其具体参数如表3所示。

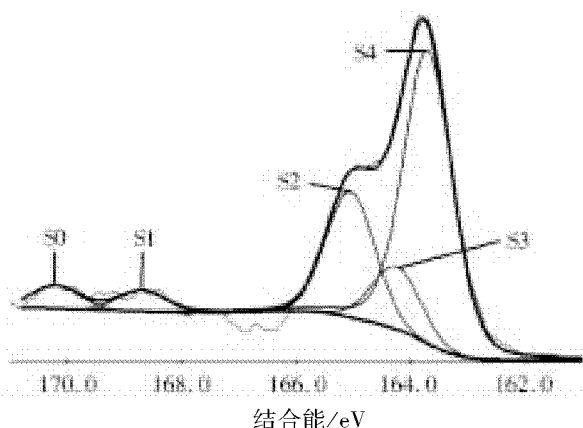


图3 S2p的XPS拟合谱图

表3 样品的XPS参数表

峰号	位置/eV	峰面积/eV	半峰宽/eV	高斯比/%	相对含量/%
S0	170.20	61.62	1.00	0	4.11
S1	168.70	54.41	1.00	0	3.63
S2	165.05	337.34	1.00	0	22.50
S3	164.25	167.71	1.00	0	11.19
S4	163.70	878.22	1.00	24	58.57

根据XPS的原理,通过硫峰位置可以解析样品中硫的形态,根据峰面积计算各种形态硫的相对含量。将煤中硫的峰位置2p结合能数据总结如下:结合能在169.0 eV以上的可以认为是无机硫,167.0~168.0 eV为砷型硫,165.0~166.0 eV属亚

砷型硫,164.0~164.4 eV的范围认为是噻吩型硫,162.2~163.2 eV属于硫醇、硫酚型硫的特征峰^[10]。在运用XPS分析煤中硫形态时,大多被分为四类,即硫醚(醇)类、噻吩类、(亚)砷类以及无机硫类等,其电子结合能分布范围分别为162.2~164 eV、164~164.4 eV、165~168 eV、169~171 eV^[11]。

根据表3给出的峰位置,可以确定S0、S1代表的特征峰是无机硫,S2是亚砷类,S3为噻吩类,S4应该是硫醇(醚)类。根据峰面积比可知,样品中无机硫含量较低,以有机硫为主要赋存形态。从谱图中,可以看出有机硫拟合出3个明显的特征峰,根据峰位置判断,煤中有机硫以硫醇(醚)类、噻吩类、亚砷类为主要存在形态,其在有机硫中的相对含量分别是63.48%、12.13%、24.39%。可见,煤中有机硫以脂肪族硫化物为主,最稳定、最难脱除的噻吩类有机硫含量较低。

3 结论

1) 所提炼焦煤样硫含量较高,达到2.68%。其中,煤中无机硫含量较低,有机硫的赋存形态具有多样性和复杂性。拟合谱图中出现5个比较明显的特征峰,其中3个特征峰对应的电子结合能为有机硫成分,含量从大到小分别为硫醇(醚)类、亚砷类、噻吩硫。其中,硫醇类有机硫是煤中有机硫的主要赋存形式,超过有机硫总量的60%,而最稳定、最难以脱除的噻吩类有机硫含量相对较低。

2) 煤中硫赋存形态的研究重点是有机硫形态,确定无机硫在煤中的赋存形式及无机硫的脱除方法都比较简单。研究认为,黄铁矿对XPS实验结果会有干扰,从拟合谱图中也可以看出,在有机硫区域拟合较好,但在无机硫区域拟合效果不好。因此,如果将样品脱除无机硫后再进行XPS测试,应该效果更佳。

参考文献:

- [1] 高连芬,刘桂建,薛翦,等. 淮北煤田煤中有机硫的测定与分析[J]. 环境化学,2006,25(4):498-502.
- [2] 钱菁. 红外池吸收法测定煤粉、焦碳中硫[J]. 冶金标准化与质量,2010,48(4):26-27.
- [3] 代世峰,任德贻,宋建芳,等. 应用XPS研究镜煤中有机硫的存在形态[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(3):225-228.

(下转第54页)

孙疃矿第四含水层分布特征及富水性评价

李小龙, 姚多喜, 杨金香

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为研究新生界第四含水层“四含”对于第一水平上覆安全煤岩柱留设类型的问题,通过钻探、岩芯取样、土工试验、X-射线衍射、电镜扫描半定量分析、抽(注)水试验等方法手段,研究了孙疃矿7₂11工作面松散层底部第四含水层“四含”岩性特征、矿物成分及其厚度分布和富水性特征,依据《煤矿防治水规定》及抽水试验结果,分析得出了7₂11工作面“四含”为“弱富水性”含水层类型,需留设防砂安全煤岩柱的结论。探明和正确评价工作面松散层底部“四含”的富水性特征,对于确定留设安全煤岩柱类型,提高煤炭资源的回采率,充分开发和利用煤炭资源具有重要的现实意义,也为矿井实现持续正常的安全生产提供可靠依据。

关键词:“四含”;分布特征;富水性;评价

中图分类号:TD12 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0015-05

Distribution Characteristics and Evaluation of the Fourth Aquifer in Kongtong

LI Xiao-long, YAO Duo-xi, YANG Jin-xiang

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

Abstract: By drilling, core sampling, soil test, X-ray diffraction, semi-quantitative analysis with electron microscope scanning, pumping-injecting test, the characteristics of lithology, mineral composition, thickness distribution and watery of the fourth aquifer in loosen layer bottom in working face No. 7₂11 of Suntuan Coal Mine were studied. Based on "Regulation of Coal Mine Water Prevention and Control" and the pumping test results, some conclusions were obtained as the following: "the 4th aquifer" in working face No. 7₂11 belongs to weak watery category and coal and rock pillars protecting against water are necessary. Detection and correct evaluation of water-rich features of "the 4th aquifer" in the loosen layer bottom in the working face has important practical significance in determining the type of pillars, improving recovery rate of coal resources, and developing and utilizing coal resources, and also provides a reliable basis for mine safety.

Key words: "4th aquifer"; distribution characteristics; watery; evaluation

近些年来,一些学者在研究新生界第四含水层“四含”对于第一水平上覆安全煤岩柱留设类型的问题上,充分考虑了新生界的“底含”、风化带水文地质特征,而且还提出运用相似模拟、数值分析、建立耦合模型等方法,来确定不同煤岩柱类型及其高

度的留设方案^[1-5]。文献[6]通过钻孔探放水,对涌水量变化进行分析,以此来评价含水层富水性程度;文献[7]从漏水孔、抽水孔试验资料与下伏地层之间的关系以及富水性与构造的关系四个方面分析含水层的富水性规律等等。以上研究表明,探

收稿日期:2013-4-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174256);“安徽理工大学中青年学术骨干”人才基金资助项目

作者简介:李小龙(1979-),男,新疆奇台人,讲师,硕士,研究方向:矿山环境治理与灾害防治研究。

明和正确评价新生界松散层底部“四含”的厚度分布、岩性组合、富水性等特征,对于确定留设安全煤岩柱类型,提高煤炭资源的回采率,充分开发和利用煤炭资源具有重要的现实意义,也可为矿井实现安全生产提供可靠依据^[8-10]。

1 研究区概况

孙疃井田位于安徽省淮北市濉溪县境内,孙疃集是其中心位置,向北东距宿州市约23km(见图1)。孙疃井田内地势较平坦,地面标高25~27m,一般26m左右。本矿位于童亭背斜东翼,为一单斜构造,含煤地层均被新生界松散层所覆盖,松散层由第四系和上第三系组成,其厚度受古地形控制,两极厚度为153.70~246.00m,由北向南有逐渐增厚的趋势。松散层按其岩性组合特征及区域水文地质剖面对比,自上而下可划分为四个含水层(组)和三个隔水层(组)。7₂11工作面是孙疃煤矿81采区

7₂煤层第一区段的第四个综采面,该工作面原设计上限标高为-250m,下限标高为-315m,高差65m;工作面可采煤层主要为7₂煤;该工作面内断层F₁₀(落差10~120m)、F₁₀₋₁(落差0~5m)、DF₁₀(落差0~8m)呈北东向展布,其中DF₁₀断层斜穿工作面;设计时留设较大的煤岩柱高度,积压了大量的煤炭资源,资源损失严重,技术经济合理性受到严重置疑;由于损失的资源具有勘探程度高、埋藏深度浅、生产系统齐全、开采技术条件好等显著特点。因此,所留煤柱是否合理,成为孙疃煤矿理论上和技术上急待解决的技术难题之一。据7₂11工作面及附近11个钻孔资料表明,工作面上覆新生界松散层厚度为203.00~210.85m,平均厚度为205.97m。基岩面标高-176.70~-184.99m,平均-179.89m,古地形起伏不大,总体上,工作面基岩面标高自西南至东北逐渐降低。



图1 孙疃煤矿交通位置示意图

2 四含分布特及富水性评价

2.1 “四含”岩性特征

7₂11工作面及附近11个钻孔中,有5(25-26₂、26₂、26-27₂、构水3、09水3孔)个钻孔揭露“四含”,统计分析显示:“四含”岩性主要由浅灰

色、灰白色、棕黄色、土黄色粘土质砂、粗砂~粉砂、砾石层、粘土夹砾石、砾石夹钙质粘土组成,如图2所示。26-27₂孔还含有厚层砾石。砾石成分砾石成份主要以石英及灰岩为主,砾径5~7cm,分选性差,磨圆度中等,粘土质充填。从的岩性上看,“四含”一般泥质含量大,多数为残坡积物。

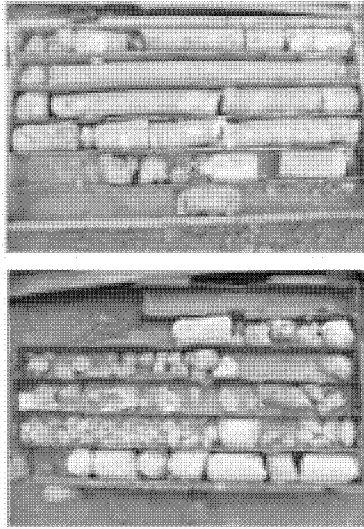
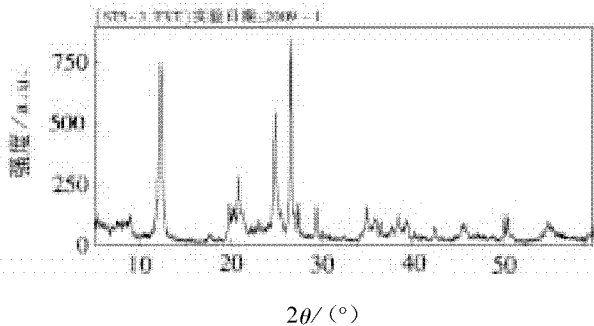


图2 09水3钻孔“四含”岩心照片

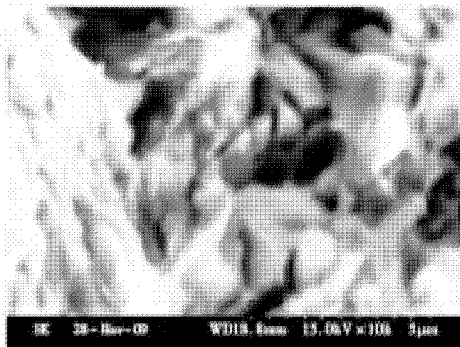
2.2 “四含”矿物成分

通过“四含”的X-射线衍射及电镜扫描半定量分析其矿物成分,如图3~图6所示。表明“四含”粘土矿物成分中主要为石英、高岭土、蒙脱石、绿泥石、方解石等。



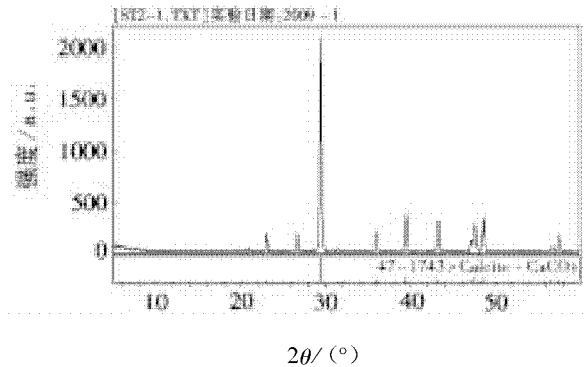
(09水3孔,取样深度191.40~191.60m)

图3 “四含”砂质粘土样XRD成分对应强度图



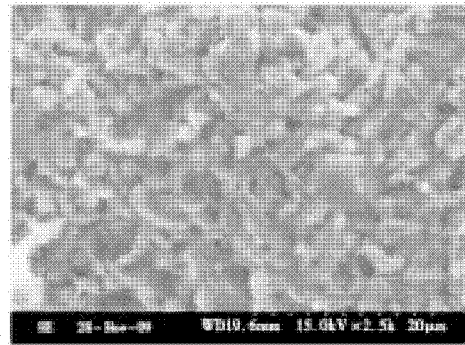
(09水3孔,取样深度191.40~191.60m)

图4 “四含”砂质粘土样扫描电镜图



(09水3孔,取样深度193.80~198.80m)

图5 “四含”钙质粘土样XRD成分对应强度图



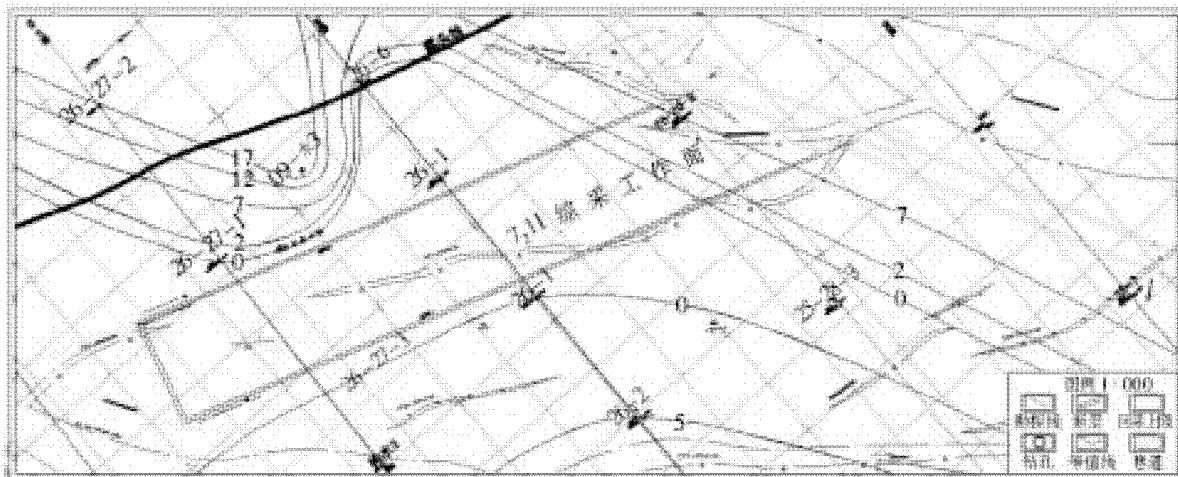
(09水3孔,取样深度193.80~198.80m)

图6 “四含”钙质粘土样扫描电镜

2.3 “四含”厚度分布特征

根据7₂11工作面及附近钻孔资料(11个钻孔)，“四含”底界深度203.00~210.85m,平均205.97m,“四含”层位总厚为0~29.40m,平均6.34m,有效厚度为0~17.80m,平均4.45m,有效厚度岩性主要为砾石层与砂、粘土质砂与粘土夹砾石。工作面及其附近分布极不稳定,工作面内及周边最近处5个钻孔(25-26₂、26₂、26₇、26-27₁、26-27₃),除25-26₂孔有7.40m粘土质砂“四含”沉积外,其余4个孔均缺失“四含”,因此对设计的工作面来说,大部分地区“四含”缺失如图7所示。

本次补充水文勘探孔09水3孔在钻进“四含”及基岩风化带过程中,简易水文地质观测表明,冲洗液仅在“四含”的砾石层中有一定的消耗,如孔深178.21~183.44m的砾石层。根据抽水试验及相关水文地质参数计算,“四含”及基岩风化带厚度33.75m,其中“四含”的砂砾层厚17.75m,风化带砂岩厚16.00m,单位涌水量为0.029L/(s·m),渗透系数为0.089m/d,静止水位埋深115.46m,标高为-89.36m。该孔“四含”及基岩风化带 $q < 0.1\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,属弱富水性,透水性差。

图 7 7₂11 工作面“四含”厚度等值线图

综上所述,7₂11 工作面“四含”岩性主要由粘土质砂、粗砂~粉砂、砾石层、粘土夹砾石、砾石夹钙质粘土组成,一般泥质含量大,多数为残坡积物。粘土矿物成分中主要为石英、高岭土、蒙脱石、绿泥石、方解石等,具有较强的隔水性能。09 水 3 孔抽水试验的水文地质参数表明其为弱含水层。可以看出,“四含”分布极不稳定,大部分地区出现缺失^[11-13]。

2.4 “四含”富水性评价

1) 含水层富水性等级评定依据

根据《煤矿防治水规定》,含水层富水性分类标准为:① 极强富水性,单位涌水量 $q > 5 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; ② 强富水性,单位涌水量 $5 \geq q > 1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; ③ 中等富水性,单位涌水量 $1 \geq q > 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; ④ 弱富水性,单位涌水量 $q \leq 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

根据单位涌水量定义,有

$$q = \frac{Q}{3.6s}$$

式中: q 为单位涌水量, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; Q 为稳定注水量, m^3/h ; s 为水头稳定上升量, m 。

2) 抽水试验分析

09 年施工 09 水 3 补充勘探孔,并进行抽水试验,抽水层位为“四含”与基岩风化带。主要探测“四含”及基岩风氧化带的水文地质及 7 煤赋存情况,探查其富水性、渗透性、稳定水位。在钻进“四含”及基岩风氧化带的砾石层与砂岩层中,冲洗液有一定消耗,如在孔深 178.21 ~ 183.44 m 的“四含”砾石层。“四含”静止水位埋深 115.46 m,水位标高为 -89.36 m,抽水结果如表 1 所示。表中参数 M 为含水层厚度, m ; S 为水位降深, m ; Q 为抽(注)水量, L/s ; q 为单位涌水量, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; K 为渗透系数, m/d ; R 为影响半径, m ;另据精查地质报告,21-22₄ 孔及补勘的 07 观 1 和 07 观 2 孔的“四含”观测孔抽(注)水试验,抽(注)水结果如表 2 所示。

表 1 7₂11 工作面“四含”、风化带层位抽(注)试验水文地质参数计算成果表

钻孔	试验段	M/m	静止水位 /m	S/m	恢复水位 /m	Q / $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	q / $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	K / $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	R/m
09-水 3	四含/风氧化带	33.75	-89.36	39.54	-89.36	1.17	0.029	0.089	113.00

表 2 孙疃矿“四含”水文观测孔统计表

孔号	终孔深度及 层位/m	基岩埋深 /m	含水层 名称	单位涌水量 / $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	渗透系数 / $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	钻孔位置
07-观 1	222.15 基岩面下	210.55	“四含”	0.010 5	0.278	采区南边界
07-观 2	190.04 基岩面下	182.75	“四含”	0.000 85	0.021	采区露头
21-22 ₄	650.50 “四含”	190.30	“四含”	0.001 35	0.022 22	102 采区内

对比表1和2可以发现,“四含”与基岩风化带混合抽水,其水文地质参数与“四含”层位相似,可认为本采区“四含”富水性指标与基岩风化带相似。

3) 富水性评价

根据抽(注)水试验,“四含”及风化带单位涌水量为 $0.029 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,渗透系数为 0.089 m/d ,依据《煤矿防治水规定》,7₂11工作面“四含”为弱富水性含水层类型。

依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与开采规程》(以下简称为“三下”规程),符合水体采动等级Ⅱ第2条描述,即“底界面下为稳定的厚粘性土隔水层或松散弱含水层的松散层中、上部孔隙强、中含水层水体”,确定7₂11工作面采动等级为Ⅱ级;允许采动程度为:允许导水裂隙带顶点波及“四含”,但不允许冒落带波及“四含”;要求留设的安全煤岩柱类型为:防砂安全煤岩柱^[14-18]。

3 结论

1) 孙疃煤矿7₂11工作面松散层底部“四含”不太发育,大部分地段“四含”缺失。工作面及其附近“四含”层位厚度平均为6.34 m,但作为有效含水层厚度平均为4.45 m。“四含”岩性粘土质含量较高,且属复合结构,据抽水试验知单位涌水量 $q=0.029 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,为富水性弱的含水层,渗透系数 $k=0.089 \text{ m/d}$,为弱透水层,径流补给条件较差。

2) 7₂11工作面“四含” $q<0.11 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,为弱富水含水层,根据“三下”规程确定7₂11工作面采动等级为Ⅱ级,可按防砂安全煤岩柱设计回采上限。

3) 孙疃煤矿81采区其他工作面及矿井其他采区、工作面本次没有具体对其研究,如其松散层底部“四含”与7₂11工作面相似,其提高上限开采时留设安全煤岩柱类型可借鉴本工作面研究成果。

综上所述,通过本次研究表明,探明和正确评价工作面“四含”的水文地质条件,对于合理留设安全煤岩柱和提高煤炭资源的回采率,充分开发和利用煤炭资源具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] YANBIN YAO, DAMENG LIU, DAZHEN TANG ETC. Fractal characterization of seepage - pores of coals from China: An investigation on permeability of coals [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35 (6): 1 159 - 1 166.
- [2] J Y CHEN, C Y TANG, Y J SHEN, et al. Use of water balance calculation and tritium to examine the dropdown of groundwater table in the piedmont of the North China Plain (NCP) [J]. Environmental Geology, 2003, 44 (5): 564 - 571.
- [3] A SRINIVASULU, CH SUJANI RAO, G V LAKSHMI, et al. Model Studies on Salt and Water Balances at Konanki Pilot Area, Andhra Pradesh, India [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2004, 18 (1): 1 - 17.
- [4] 周建保, 齐胜春, 王占川. 太平煤矿膏体绿色充填开采技术实践 [J]. 山东煤炭科技, 2009, 10 (13): 41 - 43.
- [5] 高明飞, 邢程, 刘武章, 等. 北皂煤矿4301工作面综放开采煤₄层开采上限的验证 [J]. 煤矿开采, 2000, 43 (S1): 3 - 6.
- [6] 高伯年, 谢瑞斌, 刘中胜. 高压矿区五采区三灰五灰富水性研究与防治 [J]. 煤矿开采, 2003, 18 (03): 23 - 26.
- [7] 夏中扬, 贺进亚, 窦月明. 金庄煤矿侏罗系底砾岩富水规律及突水机理 [J]. 煤矿开采, 2007, 12 (05): 11 - 14.
- [8] 柏杏丽, 李皓. 巨厚松散层下条带开采地表移动规律分析 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (8): 49 - 51.
- [9] 许延春. 深部黏土的工程特性以及在“三下”采煤中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (11): 19 - 21.
- [10] 韩云. 龙东矿7125综放工作面开采上限研究与确定 [J]. 能源技术与管理, 2008, 11 (4): 34 - 36.
- [11] 秦忠诚, 赵枝业, 路光秋. 杨村煤矿薄基岩区提高综放面开采上限试验 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (2): 38 - 40.
- [12] 杨春华. 7144工作面近松散层开采上限研究与实践 [J]. 煤矿开采, 2008, 13 (2): 54 - 57.
- [13] 于永幸, 肖华强. 巨厚松散含水层压煤开采上限研究 [J]. 煤矿开采, 2008, 13 (2): 3 - 6.
- [14] 陈金方, 于景村, 李全, 等. 矿井TEM探测导水陷落柱及检测注浆效果 [J]. 江苏煤炭, 2002, 10 (4): 7 - 8.
- [15] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (2): 49 - 52.
- [16] 王达胜. 导水裂隙带高度确定方法 [J]. 能源与环境, 2008, 6 (6): 34 - 36.
- [17] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放面覆岩导水裂隙带高度的确定 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 32 (2): 22 - 24.
- [18] 戴露, 谭海樵, 胡戈. 综放开采条件下导水裂隙带发育规律探测 [J]. 煤矿安全, 2009, 3 (3): 41 - 43.

(责任编辑: 李 丽)

回采巷道锚注加固浆液渗流规律研究

张华磊, 涂 敏

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了获得回采巷道锚注加固工程中合理的注浆压力, 首先将回采巷道围岩破碎区看作连续介质, 并应用渗流理论得出了浆液在破碎围岩中扩散的基本方程, 并建立了 COMSOL 数值计算模型, 研究了不同注浆压力条件下的浆液流动扩散特征。结果表明: 对于回采巷道锚注支护工程, 浆液在垂直于钻孔方向的扩散深度明显大于浆液在垂直于钻孔方向的扩散半径, 合理的注浆压力约为 1.0 ~ 3.0 MPa, 并将研究成果用于桃园煤矿回采巷道锚注支护设计, 取得了良好的效果。

关键词: 锚注; 浆液渗流; 数值模拟

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)04-0020-06

Study on Slurry Seepage Law in Surrounding Rocks of Roadways Reinforced by Bolt-grouting

ZHANG Hua-lei, TU Min

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

Abstract: In order to get reasonable grouting pressure in roadway bolt-grouting reinforcement engineering, cracking zone in surrounding rocks is regarded as continuous medium, and the basic equations of slurry diffusion in cracked surrounding rocks were obtained based on the seepage theory. The COMSOL numerical calculation model was established to study the slurry flow diffusion characteristics under different grouting pressures. The results showed that for roadway bolt-grouting reinforcement engineering, slurry diffusion depth in the direction perpendicular to the borehole is significantly greater than diffusion radius in the direction perpendicular to the borehole, and the reasonable grouting pressure is about 1.0 ~ 3.0 MPa. The results were applied to design of roadway bolt-grouting reinforcement in Taoyuan Coal Mine, and the good effect was achieved.

Key words: bolt-grouting; slurry seepage; numerical simulation

注浆被广泛地应用于能源、矿业、隧道等许多行业之中, 其在地下工程的应用目的主要有涌水封堵^[1]和围岩加固^[2-3]等。文献[4]研究了巷道围岩破坏机理及锚注加固方法, 文献[5-6]研究了注浆浆液扩散半径的计算方法, 文献[7-9]分别通过物理模拟、数值模拟等手段对注浆扩散特征进行了研究。然而由于地下岩体本身力学性质的复

杂性, 目前对于锚注支护机理仍缺乏全面性、系统性的认识, 本文在当前锚注支护理论及浆液扩散理论研究的基础上, 针对现场工程实践中普遍存在的关于浆液扩散范围、注浆压力等锚注支护参数确定没有合理依据的问题, 运用渗流力学理论, 并借助 COMSOL 数值计算软件, 对巷道围岩破碎区注浆渗流机理进行系统研究, 从而为现场锚注支护

收稿日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074004); 安徽省自然科学基金重点资助项目(11040606M102); 安徽理工大学青年教师科学研究基金资助项目(2012QNZ14)

作者简介: 张华磊(1983-), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 研究方向: 采动岩体力学与工程。

设计提供一定的理论基础依据。

1 注浆渗流基本方程

在回采巷道破碎区围岩加固工程中,巷道围岩破碎区是一种极为发育的“孔隙—裂隙”二重介质,浆液在孔隙和裂隙中主要以注浆压力作用下的渗流运动为主。由于围岩注浆时间短、注浆量小,因此浆液一般都处于非稳定渗流运动状态。同时,考虑到回采巷道围岩破碎区中岩体裂隙十分发育的特点,为了计算方便,可将破碎区中岩体看作等效连续介质,浆液在岩体裂隙中流动基本符合 Darcy 定律,且浆液流动符合各向同性。于是,根据渗流力学中渗流基本方程可得浆液渗流方程为

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: K 为裂隙岩体等效渗透系数; S 为岩体裂隙贮浆系数; H 为注浆渗流压头,与注浆压力 p 之间的换算关系为 $p = H/\gamma$, 其中 γ 为浆液容重。

为确定围岩破碎区中裂隙岩体的等效渗透系数 K , 首先考虑单条裂隙, 假设浆液是在单一光滑的平板裂隙中流动 (见图 1), 于是根据岩体水力学中的立方定理, 并将其写成 Darcy 定律的形式, 则浆液在单条裂隙中流动的渗透系数为

$$k = \frac{\gamma a^2}{12\mu} \quad (2)$$

式中: k 为浆液在单条裂隙中的渗透系数, m/s ; μ 为浆液流动的粘滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; γ 为浆液容重, N/m^3 ; a 为单条裂隙宽度, m 。

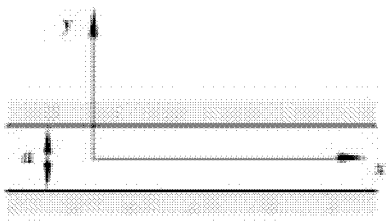


图1 单裂隙浆液流动示意图

假设围岩破碎区中厚度为 M 的岩体中包含有 N 条裂隙 (见图 2), 每一条裂隙的宽度为 a_i , 渗透系数为 k_i , 注浆压力梯度为 J , 于是厚度为 M 的岩体中浆液的总流量 Q 为

$$Q = \sum_{i=1}^N k_i a_i J \quad (3)$$

再考虑该包含 N 条裂隙岩体是均匀的, 等效渗透系数为 K , 于是根据 Darcy 定律有

$$Q = KJM \quad (4)$$

比较式 (3) 与式 (4), 可得围岩破碎区中裂隙岩体的等效渗透系数 K

$$K = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^N k_i a_i \quad (5)$$

它将本来包含多条裂隙的非均匀岩体渗透系数通过“等价”方法得出均匀岩体的等效渗透系数, 但应注意到在式 (5) 中没有考虑裂隙组数、方位等因素影响, 这会造成一定的误差。

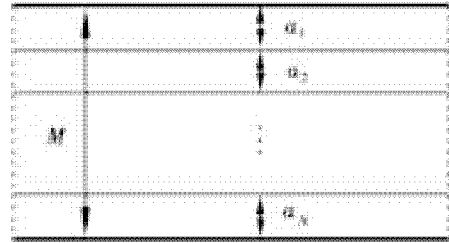


图2 裂隙岩体等效渗透系数

确定出式 (1) 中 K 、 S 系数以后, 结合合适的边界条件和初始条件, 利用式 (1) 就可以解得注浆渗流过程的注浆压力分布、浆液流量以及浆液扩散范围。

2 围岩注浆渗流规律数值模拟

2.1 数值计算模型的建立

在实际巷道锚注施工过程中, 采用内注浆锚杆进行注浆的工艺包括钻孔→安装注浆锚杆→封孔止浆→注浆→安设锚杆托盘等 5 个基本步骤^[10]。为了利用式 (1) ~ 式 (5) 建立的等效连续介质注浆渗流基本方程求解围岩注浆渗流规律, 对实际锚注工程作以下假设:

1) 注浆锚杆中的浆液首先通过出浆孔流入锚杆钻孔中, 当整个锚杆钻孔全部充满浆液以后, 浆液开始向围岩中渗透扩散;

2) 锚杆钻孔中浆液压头处处相等, 且等于注浆泵提供的注浆压力;

3) 巷道表面为不透浆边界, 即巷道表面不会有浆液流出。

根据以上假设, 可以建立基于等效连续介质渗流模型的巷道围岩注浆计算模型 (见图 3)。模型尺寸为 $4\text{m} \times 4\text{m} \times 4\text{m}$, 注浆锚杆规格为 $\phi 20\text{mm} \times 2000\text{mm}$; 锚杆钻孔直径为 $\phi 28\text{mm}$, 止浆塞长度为 100mm 。

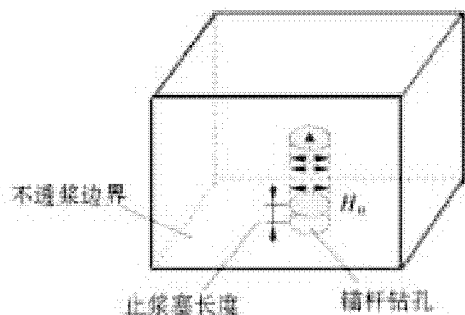


图3 巷道围岩注浆模型

浆液渗流基本方程为齐次抛物线型方程,利用分离变量的方法,求得该问题在给定初始条件和边界条件下的级数解,但解的形式十分庞大且复杂,不便于分析。利用任意多物理场耦合分析软件COMSOL Multiphysics 中的PDE 偏微分方程求解模块来计算浆液渗流方程的数值解,计算模型如图4所示。模型六个外表面上浆液渗流速度为零,满足Neumann 边界条件;模型内部锚杆钻孔表面上作用有相等的浆液压力 H_0 ,满足Diriclet 边界条件,分别模拟注浆压力为0.5 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa 的情况,设浆液密度为 16 kN/m^3 ,即浆液压力头 H_0 分别为31.25 m、62.5 m、125 m、187.5 m、250 m,在止浆塞处的浆液压力头为 $H_0 = 0$;模型中初始浆液压力头为0。岩体裂隙贮浆系数 $S = 0.8$,等效渗透系数 $K = 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。模型共划分为23 339个单元,采用瞬态模式求解,求解总时间为600 s。

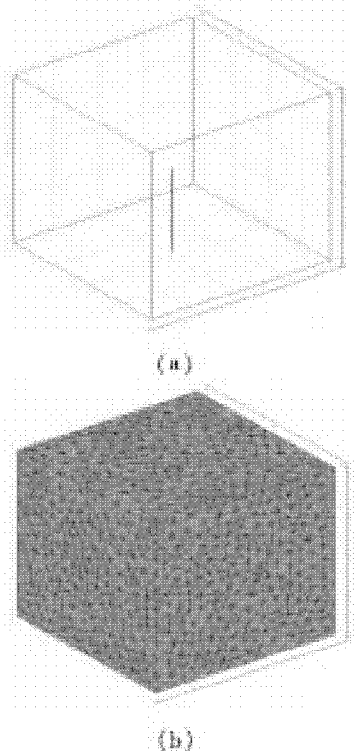


图4 COMSOL 数值计算模型图

2.2 数值模拟结果分析

为分析注浆渗流过程中不同时间内垂直于钻孔方向,以及平行于钻孔方向的浆液流动扩散情况,分别取 $Z = 0.05$ (切面1)、 $Z = 1.0$ (切面2)和 $X = 2.0$ (切面3)三个切面(见图5),并以注浆压力为2.0 MPa,即浆液压力头 H_0 为125 m 情况下的浆液扩散规律为例进行分析,分析切面1(见图6)及切面3内的浆液扩散特征。

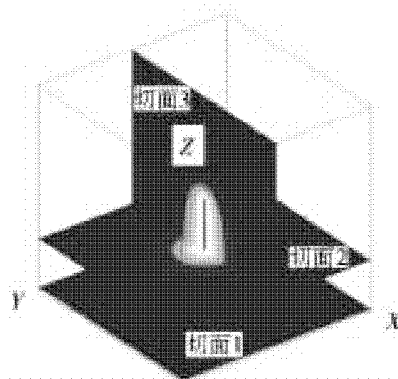
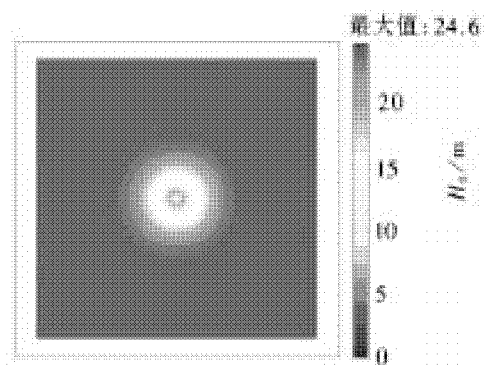
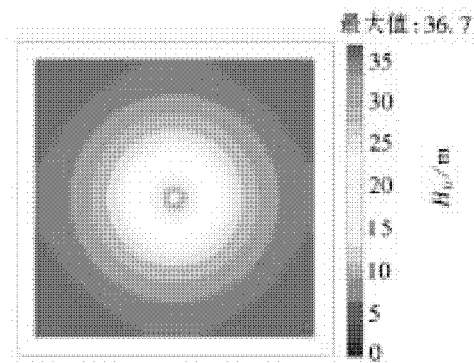


图5 计算模型切面示意图



(a) 100 s

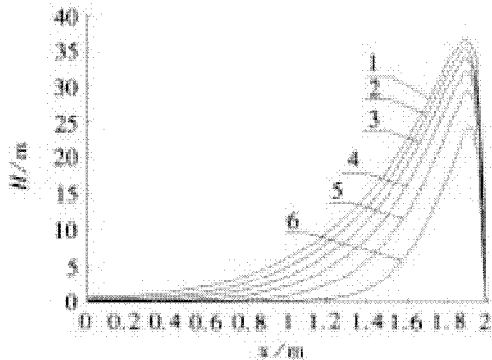


(b) 600 s

图6 切面1 浆液压力头分布特征(垂直于止浆塞中部的平面)

由图6可知,在垂直于止浆塞中部的平面内,注浆时间600 s时的浆液压头分布范围明显大于100 s时的浆液压头分布范围。

浆液压头分布 H 随距离钻孔表面距离 X 变化以及浆液扩散半径 R 随注浆时间 t 变化如图7~图8所示。



1. $t = 600$ s; 2. $t = 500$ s; 3. $t = 400$ s;
4. $t = 300$ s; 5. $t = 200$ s; 6. $t = 100$ s

图7 切面1浆液压头分布 H 变化曲线

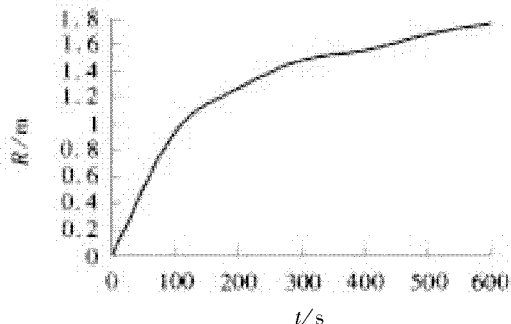


图8 切面1浆液扩散半径变化曲线

由图7~图8可知,在钻孔表面,由于止浆塞的作用,浆液压头为0;随着距离钻孔表面距离的逐渐增加,浆液压头也逐渐增大;当浆液压头达到峰值后,随着距离钻孔表面距离的逐渐增加,浆液压头逐渐减小到0。同时,随着注浆时间的增加,浆液压头峰值也随之增大,浆液扩散流动更远。在注浆前100 s内,浆液扩散半径随着时间增加显著增大,浆液扩散半径由0增大至0.9 m;而后随着注浆时间的延长,浆液扩散范围逐渐趋于平缓,注浆600 s后浆液扩散半径约为1.7 m。

切面3(即平行于钻孔方向的平面)浆液压头分布特征如图9所示。

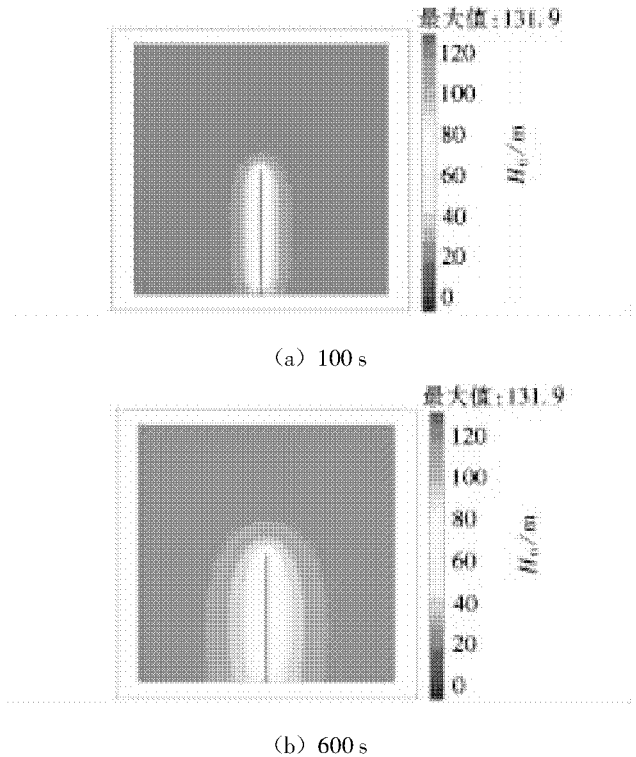
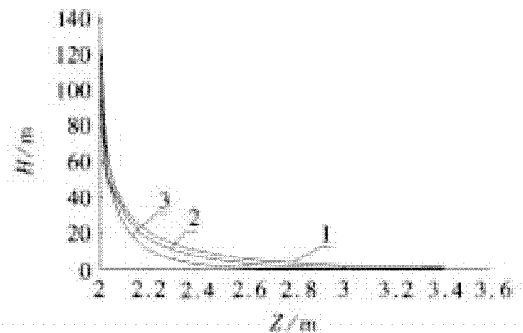


图9 切面3浆液压头分布特征

由图9可知,平行于钻孔的平面内,注浆时间600 s时的浆液压头分布范围与注浆时间为100 s时的浆液压头分布范围相差无几。

浆液压头分布 H 随距离钻孔孔底距离 Z 变化以及浆液在平行于钻孔方向上的扩散半径 R 随注浆时间 t 的变化如图10~图11所示。



1. $t = 600$ s; 2. $t = 300$ s; 3. $t = 100$ s

图10 切面3浆液压头分布 H 变化曲线

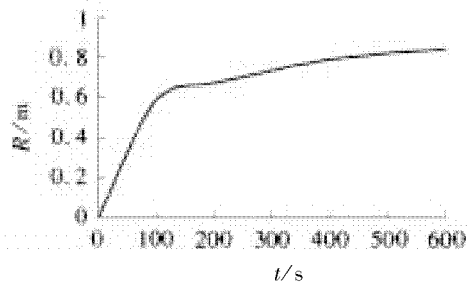
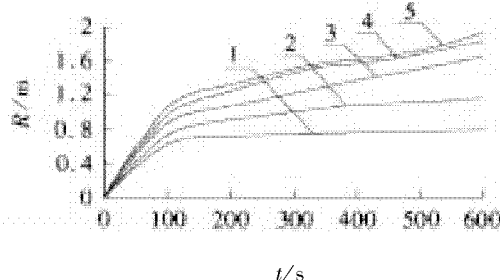


图11 切面3浆液扩散半径变化曲线

由图10~图11可知,在平行于钻孔的方向上浆液扩散形状呈椭圆形;在注浆前100 s内,浆液扩散半径从0迅速增长至0.6 m,100 s后浆液扩散半径曲线逐渐平缓,至600 s时浆液扩散半径为0.9 m,由此可知,开始浆液在平行于钻孔方向的扩散深度比浆液在垂直于钻孔方向的扩散半径小的多,约占50%左右。

当采用不同的注浆压力时,在垂直于钻孔方向上浆液最大扩散范围的变化规律如图12所示。



1 - 0.5 MPa; 2 - 1 MPa; 3 - 2 MPa; 4 - 3 MPa; 5 - 4 MPa

图12 不同注浆压力下浆液随时间扩展曲线图

由图12可知,不同的注浆压力作用下,在注浆前100 s内浆液扩散半径显著增加,其后随着时间的增长,浆液扩散半径增长速度逐渐变缓;注浆压力为0.5 MPa时,浆液最大扩散半径约为0.8 m,扩散范围较小,浆液在围岩中的流动及渗透效果不理想。而当注浆压力为4 MPa时,浆液扩散范围与3 MPa相比较,增长的值很小,可见当注浆压力大于3 MPa时注浆压力对浆液在围岩中的流动及扩散速率影响较小。

目前国内外对注浆压力的大小有两种看法^[11],一是提高注浆压力,有利于浆液在围岩中的流动及渗透;二是注浆压力太大,容易造成煤岩体的劈裂破坏,容易引起片帮等。由于本次锚固试验对象为回采巷道,根据不同压力作用下浆液的扩散规律,认为在回采巷道注浆时合理的注浆压力为1~3 MPa,在此条件下注浆,既有利于浆液在围岩裂隙中的渗透,又不至于漏浆。

3 工程实例

3.1 工程地质概况

桃园煤矿7₂44工作面标高-336.0~-404.0 m,根据钻孔资料,该处7₂煤厚0.7~2.0 m,平均厚1.6 m,含0.2~0.5 m夹矸,煤层倾角28°~35°,平均32°。7₂44工作面构造较简单,未揭露断层,但

顶板破碎,易冒顶。7₂煤直接顶为灰白色粉砂岩、中砂岩、泥岩,往上4.0 m为7₁煤层,直接顶整体性较好,但顶板淋水大,泥岩遇水易膨胀,老顶砂岩裂隙水发育,直接底为1.66 m厚的泥岩,老底为粉砂岩。7₂44轨道顺槽断面为梯形,宽3 200 mm,上帮高度3 100 mm,下帮高度1 600 mm,原设计为锚网支护,由于地压大,顶底板岩石及两帮煤体松软破碎,巷道变形破坏严重。为改变轨道顺槽重复翻修的被动局面,保证工作面安全正常生产,须采用适合本巷道围岩变形特点的新型锚注联合支护体系^[12]。

3.2 锚注支护参数设计与验证

锚注支护所用材料主要包括:普通锚杆、树脂锚固剂、金属网、内注浆锚杆、快硬水泥药卷、旧钢丝绳、水泥、水泥添加剂等。其中注浆锚杆采用螺纹钢注浆锚杆,顶板及上下两帮部注浆锚杆规格为 $\phi 25 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$,底脚注浆锚杆规格同顶板注浆锚杆,底板注浆锚杆位置与底板的距离不大于200 mm,与水平角度呈30°左右向下延伸。顶板注浆锚杆间排距1100 mm \times 1100 mm,上帮注浆锚杆间排距为1300 mm \times 1100 mm,下帮注浆锚杆间排距为1100 mm \times 1100 mm。注浆材料采用普通硅酸盐水泥及添加剂,水泥采用525#普通硅酸盐水泥,添加剂选用ACZ-1水泥添加剂,ACZ-1添加剂是一种新型水泥添加剂,能够提高浆液的和易性、流动性、微膨胀性,提高水泥浆液的结石率和锚注岩体的强度,其用量为水泥重量的4%~6%。浆液水灰比为0.7:1~1:1,注浆压力为1.0~3.0 MPa,单孔注浆时间取为3~5 min,注浆锚杆全断面布置。

桃园煤矿7₂44面轨道顺槽锚注支护试验与应用试验中采用KBY-50/70型注浆泵,平均每孔注浆量为1.5袋水泥。从注浆施工来看,浆液随围岩裂隙发育程度不同,其扩散半径变化较大,平均扩散范围为1.5 m,与理论分析的结果较为接近。从现场支护效果来看,锚注支护巷道两帮移近量最大值为122 mm,顶底板移近量最大值为121 mm,巷道有害变形大为减小。锚注支护较之金属支架支护和锚杆支护巷道变形量和变形速度大大降低,巷道稳定状况良好,这主要是由于浆液在巷道围岩中形成了浆液胶结圈,一方面提高了岩体自身的承载力,另一方面形成的浆液胶结圈也有有效的阻止了上覆砂岩裂隙水的渗透。锚注支护试验取得了良好的效果,这也间接证明了理论计算分析的合理性。

4 结论

1) 回采巷道破碎区岩体裂隙是注浆浆液的主要流动通道,针对裂隙较发育的岩体,基于渗流力学建立了浆液在破碎围岩中扩散的基本方程。

2) 注浆锚杆钻孔中的浆液以椭圆形向周围岩体中渗透扩散,在注浆前 100 s 内,浆液扩散半径迅速增加,而后随着时间的增长,浆液半径扩散速度趋于变缓;浆液在垂直于钻孔方向的扩散范围明显大于平行于钻孔方向的扩散范围。

3) 由回采巷道锚注浆液扩散的数值模拟计算结果可知,合理的注浆压力约为 1.0 ~ 3.0 MPa,并将成果应用于桃园煤矿 7₂44 面轨道顺槽的工业性试验,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 李术才,张霄,张庆松,等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (12): 2 377 - 2 396.
- [2] 曹胜根,刘长友. 高档工作面断层破碎带顶板注浆加固技术[J]. 煤炭学报, 2004, 29 (5): 545 - 549.
- [3] 饶志强,赖文奇,杨建. 软弱破碎围岩回采巷道锚注加固支护技术研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005 (2): 68 - 70.
- [4] 王浩. 回采巷道松软破碎围岩注浆加固与支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 12 - 53.
- [5] 钱自卫,姜振泉,曹丽文. 渗透注浆浆液扩散半径计算方法研究及应用[J]. 工业建筑, 2012, 42 (7): 100 - 104.
- [6] 杨秀竹,雷金山,夏力农,等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26 (11): 1 803 - 1 806.
- [7] MILLER E A, ROYCROFT G A. Compaction grouting test program for liquefaction control [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (4): 355 - 361.
- [8] 杨坪,唐益群,彭振斌,等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (2): 2 134 - 2 138.
- [9] 李哲,仵延卿,张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26 (12): 1 972 - 1 976.
- [10] 李明远,王连国,易恭猷,等. 软岩巷道锚注支护理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2001: 132.
- [11] 张农. 巷道滞后注浆围岩控制理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 103 - 137.
- [12] 王开,田取珍,张小强. 松软破碎带中巷道围岩注浆加固参数研究[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42 (5): 521 - 527.

(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/),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

冻结红层软岩的蠕变特性研究

朱 杰¹, 徐 颖¹, 亓燕秋²

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中煤矿山建设(集团)有限责任公司淮南工程处, 安徽 淮南 232000)

摘 要:为研究第三系红层软岩在低温下的蠕变特性,对冻结红层进行单轴蠕变试验,试验结果表明,在应力水平较低时,软岩只存在衰减蠕变,随着应力水平的增大,当超过流变长期强度时,出现了非稳定蠕变;同时,随着温度的降低,软岩的瞬时应变量和蠕变量都会明显减少,而长期强度则有较大幅度的增长,说明温度对软岩及冻结壁的流变性质影响十分显著。引入与时间和应力相关的非线性黏滞系数和时间开关函数,对西原模型进行改进,得到了可以描述加速蠕变的非线性流变本构模型,通过试验数据对冻结红层软岩的参数进行了辨识。将流变模型嵌入到 abaqus 有限元程序,并对井筒开挖进行数值模拟,获得冻结壁最大位移与时间曲线,通过与实测值进行比较,两者较为吻合。可见,建立的流变模型能够很好的描述冻结红层软岩的蠕变规律。

关键词:红层软岩;流变本构模型;非线性流变;参数辨识

中图分类号:TU458 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0026-06

Research on the Creep Characteristics of Frozen Red - Bed Soft Rock

ZHU Jie¹, XU Ying¹, QI Yan - qiu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. Engineering Department in Huainan, China Coal Mine Construction Group Co. Ltd, Huainan Anhui 232000, China)

Abstract: In order to investigate the creep characteristics of the red - bed soft rock of Tertiary at low temperature, uniaxial creep tests were conducted. The tests results showed that only the attenuation creep can exist under low stress, and the instable creep appears when the stress exceeds the rheological long - term strength. At the same time, with the temperature reducing, the instantaneous strain and creep deformation of soft rock decrease apparently, while there is a substantial increase of the long - term strength. It shows that the influence of temperature on the rheological property of soft rock and frozen wall is very significant. Nonlinear viscosity coefficient related to the time and stress and the time switching function were introduced to improve the Nishihara model, and the nonlinear rheological constitutive model which describes accelerating creep was obtained. The parameters of frozen red - bed soft rock were identified by the tests data. Shaft excavation was simulated with introduction of the model into ABAQUS finite element program, and the curve of maximum displacement of frozen wall with time was obtained. At last the comparison between the numerical solution and the measured value was conducted and the results are consistent relatively. The rheological constitutive model can establish a good description of the creep law of red - bed soft rock.

Key words: red - bed soft rock; rheological constitutive model; nonlinear rheology; parameter identification

收稿日期:2013-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174004, 41301074); 建设部研究开发资助项目(2011-k3-1)

作者简介:朱杰(1981-),男,安徽淮南人,讲师,硕士,研究方向:矿山建设和岩石力学。

随着我国煤矿开采深度的增加,井筒穿越的地层条件也更加复杂,目前淮南矿区部分井筒需穿越特厚的第三系红层,红层为红色陆相沉积的碎屑岩,主要以砂岩、页岩和泥岩为主,岩石多为泥质胶结,胶结质量差,遇水易崩解,具有明显的软岩特征。由于其注浆效果不显著,井筒现多采用冻结法进行凿井。冻结法是立井井筒开凿中重要的施工工法,在矿井建设中已得到广泛的应用,在冻结法中,其冻结壁的流变问题一直是影响矿井安全和正常生产的难题,要解决这一难题,需要对岩石在冻结条件下的流变性能进行大量的试验研究。

目前,在国内外文献中已有许多关于岩石流变力学性质的研究,如文献[1]建立了一个新的岩石非线性黏弹塑性流变模型,可充分反映岩石的加速流变特性,并对锦屏一级水电站坝基岩石进行了流变数值模拟;文献[2]对隧洞围岩进行了压缩蠕变和剪切蠕变试验,引入与时间、应力有关的流变参数和强化函数,建立了非定常参数的蠕变模型;文献[3]对低围压条件下龙口矿区含油泥岩的蠕变特性进行了三轴蠕变压缩试验,分析了围压对岩石蠕变参数的影响,确定了泥岩的起始蠕变应力阈值。文献[4]通过低温冻结条件下高围压固结再卸载的试验方法模拟了白垩系冻结软岩的蠕变性质。尽管岩石流变方面的研究成果较多^[5-9],但有关冻结软岩特别是冻结红层软岩蠕变规律的研究极少。本文对低温下红层软岩进行了单轴蠕变试验,通过对试验结果的分析,结合流变力学理论,建立了能较好的描述冻结红层软岩的非线性蠕变本构模型,并对模型参数进行了辨识。

1 冻结红层软岩的蠕变试验

1.1 试样制备

室内蠕变试样取自淮南某矿深部第三系红层粉砂岩,其平均含水率 $\omega = 3.57\%$,天然密度 $\rho = 2.34 \text{ g/cm}^3$ 。试样密封并在 -5°C 和 -15°C 温度下冻结6h后,置于试验温度下恒温养护24h进行试验。试样在冻土实验室被加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,加工精度满足长度误差 $\nlessgtr \pm 1 \text{ mm}$,直径误差 $\nlessgtr \pm 0.5 \text{ mm}$ 。

1.2 试验方法

试验采用分级增量加载^[10],将拟施加的最大荷载按单轴抗压强度分成5级,在同一试件上从小到

大逐级施加荷载,直至试件最终破坏,蠕变量按照叠加原理计算。试验在自行研制的WDT-100冻土试验机上进行(见图1),试验机的最大竖向加载能力为10t,精度1%,试验结果由计算机自动采集。

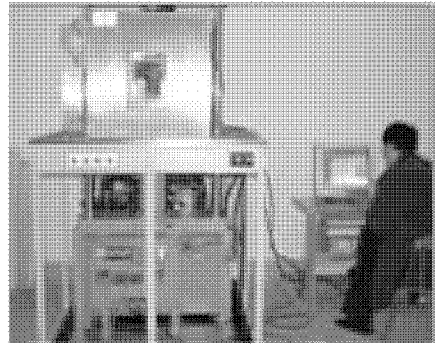
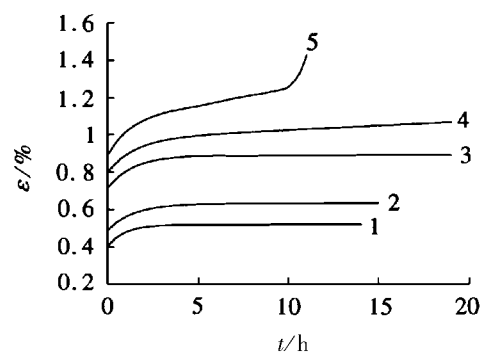


图1 WDT-100 冻土试验机

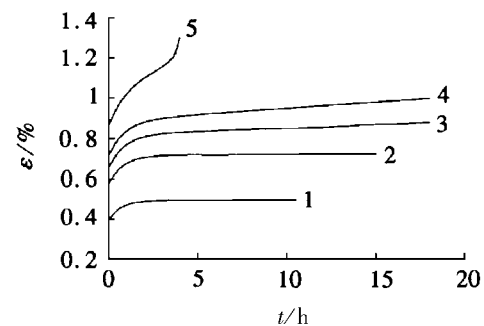
1.3 试验结果及分析

对 -5°C 和 -15°C 温度下的红层软岩进行单轴蠕变试验,得到试验结果如图2~图3所示。



1 - 1.66 MPa; 2 - 2.49 MPa; 3 - 4.15 MPa;
4 - 4.89 MPa; 5 - 5.81 MPa

图2 红层软岩在 -5°C 下的单轴蠕变曲线



1 - 4.16 MPa; 2 - 6.93 MPa; 3 - 8.31 MPa;
4 - 9.70 MPa; 5 - 11.08 MPa

图3 红层软岩在 -15°C 下的单轴蠕变曲线

1) 每级加载瞬间,软岩都会产生瞬时变形,然后位移随时间缓慢增加,当荷载较低时,软岩经历衰减蠕变阶段直至变形速率为0,蠕变形式为稳定

蠕变。荷载增大到一定值后,软岩在衰减蠕变之后出现等速蠕变阶段,这时蠕变速率保持不变,然后在某一时刻蠕变速率急剧增大(即加速蠕变阶段),导致试件发生破坏。当温度在 -5°C ,轴向应力为 5.81 MPa 时,软岩在加速蠕变前有较明显的衰减和等速蠕变阶段;而当温度在 -15°C ,轴向应力为 11.08 MPa 时,软岩在经历瞬时变形后几乎是直接进入加速蠕变阶段的,其等速蠕变阶段持续时间极短。

2) 红层软岩在 -5°C 和 -15°C 下的单轴抗压强度分别为 8.3 MPa 、 13.85 MPa ,而采用非稳定蠕变判别法可确定其流变长期强度分别为 4.15 MPa 、 6.93 MPa ,可见温度降低会使岩石单轴抗压强度和长期强度有明显的增加。

3) 随着温度降低,软岩瞬时变形量和蠕变量明显减小,如 -5°C 下轴向应力为 4.15 MPa 时,软岩瞬时应变量为 0.717% ,蠕应变量为 0.176% ,而 -15°C 下应力为 4.16 MPa 时,软岩瞬时应变为 0.4% ,蠕应变量为 0.095% ,分别降低了 44.2% 和 46% 。可见低温下软岩蠕变量减小幅度较大,说明温度对冻结壁的流变性质和稳定性有非常重要的影响。

2 软岩非线性流变本构模型

2.1 流变本构模型的建立

软岩内部包含有微观到细观尺度的缺陷,在变形过程中,细观裂纹持续的产生并扩展,达到一定程度时,将导致宏观裂纹的起裂,在此过程中,损伤得到不断的演化和累积^[11]。随着加载应力的增加,蠕变曲线会由衰减型转变为非衰减型,这说明岩石的黏滞系数与材料所受应力水平有关,另外,随着荷载作用时间的推移,软岩的蠕变值也相应增大,在相等的时间间隔内蠕变增量增加,即黏滞系数同时是加载持续时间的函数,软岩蠕变存在明显的非线性特征。

根据对冻结红层软岩的试验结果分析,可采用西原模型描述其流变规律,但由于模型中黏滞系数 η_2 为常数,西原模型无法描述岩石的加速蠕变阶段,蠕变到达第三阶段时,黏滞系数为 η_2 会随着时间增加而降低。因此,可以构造一个新的非线性黏滞系数 $\eta_2(\sigma, t)$,并加入一个时间开关函数(见图4)。

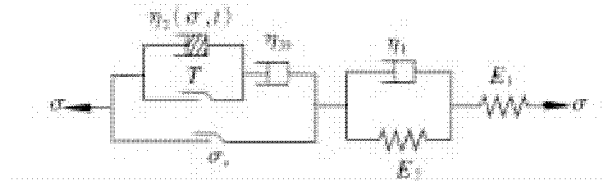


图4 软岩的非线性流变模型

$\eta_2(\sigma, t)$ 的表达式为

$$\eta_2(\sigma, t) = \frac{\eta_{20}}{\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m n \left(\frac{t-t_s}{t_0}\right)^{n-1}} \quad (1)$$

式中: η_{20} 为等速蠕变黏滞系数; m, n 为影响黏滞系数的应力与时间的指数; t_s 为刚进入加速蠕变阶段的起始时间; σ_0, t_0 为单位应力和单位时间,分别取 1 MPa 和 1 h 。

当只考虑某一应力水平下的软岩的蠕变特性时,可取 $m=0$,则式(1)可简化为

$$\eta_2(\sigma, t) = \frac{\eta_{20}}{n \left(\frac{t-t_s}{t_0}\right)^{n-1}} \quad (2)$$

T 为时间开关函数 $H(t-t_s)$,其值为

$$H(t-t_s) = \begin{cases} 0 & t \leq t_s \\ 1 & t > t_s \end{cases} \quad (3)$$

则流变模型的本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 &= \sigma_s + \eta_{20} \dot{\varepsilon}_{31} \\ \sigma_3 &= \sigma_s + H(t-t_s) \eta_2(\sigma, t) \dot{\varepsilon}_{32} \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{31} + \varepsilon_{32} \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\sigma_i, \varepsilon_i (i=1, 2, 3)$ 为弹性、黏弹性、黏塑性的应力和应变; $\varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}$ 分别为等速蠕变和加速蠕变应变变量; E_i, η_i 为岩石的弹性模量和黏滞系数; σ_s 为长期强度。

2.2 蠕变方程

令 $t=0$ 时, $\sigma=\sigma_0$,蠕变过程保持应力不变,流变方程同时满足下列初始条件:

$$\ddot{\sigma}(0) = \dot{\sigma}(0) = 0, \ddot{\varepsilon}(0) = \dot{\varepsilon}(0) = 0 \quad (5)$$

将 σ_0 代入式(4)并进行 Laplace 变换和逆变换,并考虑以上初始条件,得到蠕变方程为

1) 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时,有

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - \exp(-E_2 t / \eta_1)) \quad (6)$$

2) 当 $\sigma > \sigma_s, t \leq t_s$ 时,有

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - \exp(-E_2 t / \eta_1)) + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_{20}} t \quad (7)$$

3) 当 $\sigma > \sigma_s, t > t_s$ 时,有

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - \exp(-E_2 t / \eta_1)) + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_{20}} t + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_{20}} t_0 \left(\frac{t - t_s}{t_0} \right)^n \quad (8)$$

3 蠕变参数的辨识及模型验证

基于给出的蠕变方程,结合红层软岩的试验结果进行参数辨识。

1) 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时,需要确定 E_1 、 E_2 、 η_1 三个参数。

首先,根据软岩 $t = 0$ 时的瞬时应变 ε_e 确定 E_1 , $E_1 = \sigma_0 / \varepsilon_e$ 。其次,由于衰减蠕变趋于一稳定蠕

变值 ε_{ee} ,可利用 ε_{ee} 得到 E_2 , $E_2 = \sigma_0 / \varepsilon_{ee}$ 。再将蠕变过程中的某一时刻应变与时间代入式(6),得到 η_1 。

2) 当 $\sigma > \sigma_s, t \leq t_s$ 时,需要确定 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_{20} 。

参数 E_1 的确定方法同上。然后根据蠕变曲线上的等速蠕变阶段的斜率 $k = (\sigma - \sigma_s) / \eta_{20}$,可以确定 η_{20} ,由式(7)可以得到

$$\varepsilon - \frac{\sigma_0}{E_1} - \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_{20}} t = \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - \exp(-E_2 t / \eta_1)) \quad (9)$$

基于蠕变试验数据,采用最小二乘法对曲线进行非线性回归,得到参数 E_2 、 η_1 。

3) 当 $\sigma > \sigma_s, t > t_s$ 时,需要确定 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_{20} 、 n 。

在 $(0, t_s)$ 范围内,可根据辨识方法(2)确定四参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_{20} 。在 $t > t_s$ 时段,将任意时间 t 代入式(8)求解,可得到参数 n 。当然,也可将 $t > t_s$ 时段的应变与时间数据对式(8)进行最小二乘法回归,这样得到的参数 n 能更准确的反映加速蠕变特征。

通过上述参数辨识方法,得到红层软岩在负温下的流变参数(见表1)。

表1 红层软岩的流变模型参数

温度/ ℃	σ_0 / MPa	E_1 / GPa	E_2 / GPa	η_1 / (GPa · h)	η_{20} / (GPa · h)	σ_s / MPa	t_s / h	n
-5	1.66	0.41	1.47	1.39				
	2.49	0.51	1.75	2.51				
	4.15	0.57	2.36	3.27				
	4.98	0.62	2.78	4.20	17.48	4.15		
	5.81	0.65	3.04	3.66	10.29	4.15	9.2	3.41
	4.16	1.04	4.37	3.09				
-15	6.93	1.19	4.96	4.18				
	8.31	1.26	5.15	4.69	47.78	6.93		
	9.70	1.35	5.73	5.22	46.31	6.93		
	11.08	1.27	4.64	5.46	23.68	6.93	2.5	4.73

由表1可见,随着温度的降低,红层软岩的弹性模量 E_1 、黏弹性模量 E_2 以及黏滞系数 η_{20} 都有较大幅度的增加,这意味着冻结软岩的瞬时弹性应变、黏弹性应变和稳定蠕变速率都有相应幅度的减小,同时,软岩的流变长期强度 σ_s 也随温度降低而

提高,说明温度对软岩和冻结壁流变性质影响极大,温度越低,冻结壁流变量越小,越有利于井筒的开凿和井壁的稳定,进一步证明了冻结工法对矿井井筒施工是十分有效的方法。

根据表1的参数,绘出流变模型的理论曲线

(实线),并与试验结果进行对比(见图5~图6),可见,理论值与试验值能够很好的吻合。

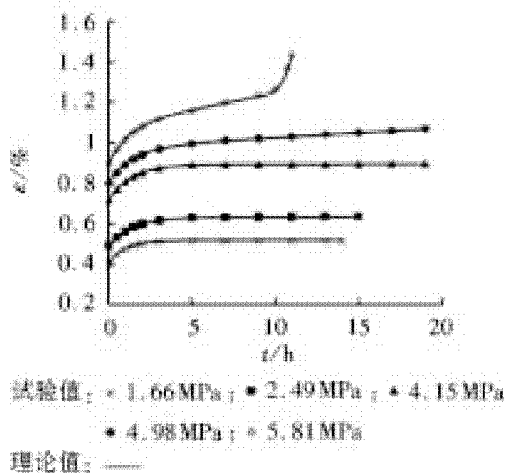


图5 红层软岩在 -5°C 下理论值与试验值的对比

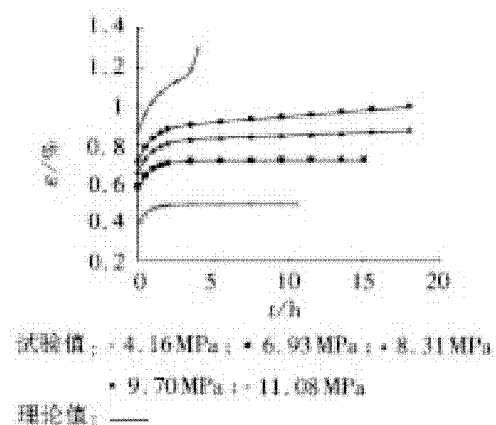


图6 红层软岩在 -15°C 下理论值与试验值的对比

4 工程应用

将式(8)写成三维形式

$$\{\varepsilon_{ij}\} = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - \exp(-E_2 t / \eta_1)) \right] \{\sigma_{ij}\} + \frac{f(t)}{\eta_{20}} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \quad (10)$$

式中: $f(t) = t + \langle t - t_s \rangle^n$; $\langle \rangle$ 为开关函数; F_0 取 1 MPa; F 为岩石屈服函数。

根据试验结果选用 Mises 强度准则,即

$$F = \sqrt{J_2} - k \quad (11)$$

式中: J_2 为应力偏量第二不变量; k 为温度函数,由试验确定。

为便于工程应用,通过 abaqus 软件的用户材料子程序 UMAT,将蠕变模型嵌入到有限元程序中,并对穿越第三系红层的某矿井冻结壁进行数值

模拟(见图7),冻结壁内外有效半径为 $a = 4.5 \text{ m}$, $b = 5 \text{ m}$,掘进段高为 $h = 3 \text{ m}$,取一个段高为研究对象,深度为 $-400.0 \sim -403.0 \text{ m}$,根据重液公式得到地压为 $p = 5.2 \text{ MPa}$,模型底端取固定约束。通过数值计算,得到井筒开挖过程中冻结壁最大位移与时间曲线,并与实测结果进行比较(见图8)。在开挖后 22 h,冻结壁最大位移的数值解为 16.71 mm,而实测值为 17.84 mm,数值解和实测值变化规律一致且误差较小,证明了本模型的合理性。

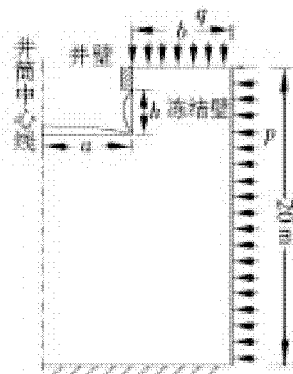
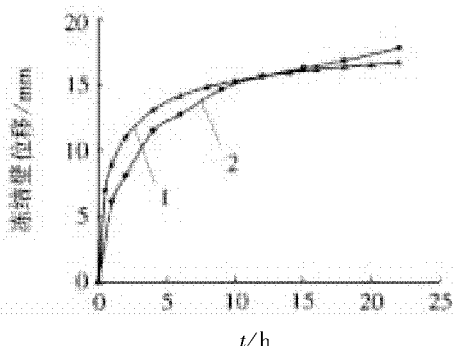


图7 冻结壁计算模型



1. 数值解;2. 实测值

图8 冻结壁最大位移数值解和实测值比较

5 结论

1) 对红层软岩进行低温下的单轴蠕变试验,结果表明,冻结红层软岩具有明显的蠕变性质。当应力水平较低时,岩石只存在衰减蠕变阶段,蠕变速率逐渐减小到 0,变形量不再增加,当应力水平增大并超过岩石长期强度时,出现了等速蠕变阶段,这时材料损伤量不断累积,岩石中细观裂纹逐渐扩展,直到某一时刻蠕变速率急剧增大,即产生加速蠕变阶段,直至软岩破坏。

2) 根据冻结红层软岩的蠕变特性,引入与应力及时间有关的黏滞系数和时间开关函数,建立了

能描述岩石非线性规律的流变本构模型,基于试验数据对模型参数进行了辨识,得到了两种温度下的红层软岩的流变参数。分析可知,随着温度降低,软岩的瞬时变形量和蠕变量有明显的减小,有利于冻结壁的稳定。

3) 将本文的蠕变模型嵌入到 abaqus 有限元程序,对井筒开挖进行数值模拟,获得冻结壁最大位移与时间曲线,通过与实测值进行比较,两者较为吻合,可见,建立的非线性流变模型能够很好的描述冻结红层软岩的流变规律。

参考文献:

- [1] 徐卫亚,杨圣奇,褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(3):433-447.
 - [2] 朱珍德,朱明礼,阮怀宁,等. 深埋长大隧洞围岩非线性蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 27-35.
 - [3] 范庆忠,李术才,高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 381-1 385.
 - [4] 李栋伟,汪仁和,范菊红. 白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(3): 398-403.
 - [5] 杨文东,张强勇,陈芳,等. 辉绿岩非线性流变模型及蠕变加载历史的处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1 405-1 413.
 - [6] 李良权,徐卫亚,王伟. 基于西原模型的非线性黏弹塑性流变模型[J]. 力学学报,2009,41(5):671-679.
 - [7] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(10):2 006-2 011.
 - [8] 李栋伟,汪仁和,范菊红. 软岩屈服面流变本构模型及围岩稳定性分析[J]. 煤炭学报,2010,35(10): 1 604-1 608.
 - [9] 袁海平,曹平,万文,等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(8):1 575-1 581.
 - [10] 张忠亭,罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):218-222.
 - [11] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999:388-405.
- (责任编辑:何兴华,吴晓红)
-
- (上接第3页)
- [3] 高远,宫能平,罗裕繁. 岩石材料动态断裂韧性的实验研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2012, 32(1):13-16.
 - [4] 宫能平,罗裕繁,高远. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的试验[J]. 上海交通大学学报,2012, 46(10): 1 570-1 572.
 - [5] 赵丽霞,宫能平. 脉冲载荷影响岩石动态断裂韧性的有限元分析[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2010,30(1):63-67.
 - [6] 许文君,咎祥,汪洋,等. 用于动态断裂试验的高温炉设计及温度场模拟[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2010,30(1):35-41.
 - [7] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学,2005,20(4):589-594.
 - [8] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:51-60.
 - [9] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:570-609.
 - [10] 李战鲁,王启智. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的实验研究[J]. 岩土工程学报. 2006, 28(12): 2 116-2 120.
 - [11] 董世明,汪洋,夏源明. 中心裂纹圆盘集中载荷作用下的应力强度因子[J]. 中国科学技术大学学报, 2003,33(3):310-317.
 - [12] ZHOU JUN, WANG YANG, XIA YUANMING. Mode I Fracture Toughness of PMMA at high loading rates[J]. Journal of material Science,2006,41:5 778-5 781.
- (责任编辑:何兴华,吴晓红)

不等长工作面覆岩破坏规律的数值模拟分析

高明中, 王新丰

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对不等长工作面煤层开采日渐增多的现状, 采用数值模拟与理论分析相结合的方法, 对采场覆岩的破坏特征及支承压力的分布状态进行系统研究, 并相应模拟出工作面前方应力场与位移场的演化规律。结果表明: 工作面自开切眼开始向前推移, 推进到工作面“见方”期或斜长的整数倍位置时, 顶板活动剧烈, 覆岩空间结构发生新旧更替, 形成了“O”型破断区; 不等长工作面推进过程中岩层运移极不规则, 推进距离在衔接面前后 20~30 m 的范围内, 应力波动较大, 数值变化明显; 回采期间支承压力对覆岩活动产生了重要影响, 其大小约为水平应力的 1.5~2 倍; 就采动过程中竖向位移的变化而言, 巷帮移近量远大于顶底板变形量, 故工程实践中应特别注意对巷帮及顶板的加固和维护。

关键词: 不等长工作面; 覆岩破坏; 数值模拟; 位移场; 演化规律

中图分类号: TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0032-05

Numerical Simulation Analysis of Overburden Failure in Working Face of Unequal Length GAO Ming - zhong, WANG Xin - feng

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

Abstract: In view of the present situation of coal mining working face of unequal length increasing day by day, mining damage characteristics of overlying rocks and the distribution of abutment pressure were systematically studied by using the methods of numerical simulation and theoretical analysis, and the evolution of stress field and displacement field in front of working face were simulated. The results showed that when working face from open-off cut advances to position of equal slope length or an integer multiple of the slope length, roof moves intensively, in overlying strata old and new spatial structure exchanged, and "O" type fracture zone was formed. Strata behaviors were extremely irregular in the process of working face advance, within the range of 20 to 30 meters before and after the contacting surface stress fluctuation was big, and its values changed significantly. During process of mining abutment pressure had a significant impact on the overlying strata behavior, and its value is approximately 1.5 to 2 times of horizontal stress. During the mining process vertical displacement in side-walls of roadway is much larger than the deformation of roof and floor movement to each other, so in engineering practice particular attention should be paid to side-walls of roadway and roof reinforcement and maintenance.

Key words: unequal length working face; overburden failure; numerical simulation; displacement field; evolution law

随着矿井开采深度的增加和采掘机械化程度的加大, 回采工作面常因地质构造、褶皱断层、水文

瓦斯、开采方式等条件的限制, 造成面长的不断变化, 从而影响综采的正常应用和效益发挥^[1-3]。鉴

收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20103415110002)

作者简介: 高明中 (1957-), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 矿山压力与岩层控制。

于不等长工作面覆岩结构的特殊性和复杂性,找出采场覆岩破断的力学特征,研究工作面覆岩运动与支承压力之间的关系,构建不规则采场岩层运移与矿压显现的数值模型变得愈加重要。

本文采用有限差分软件 FLAC^{3D}对不等长工作面覆岩破坏及支承压力的分布特征进行系统研究,并相应模拟出工作面前方应力场与位移场的演化规律,为不规则采场的顶板管理和矿压控制提供理论依据,保证工作面的高产高效。

1 工程背景

淮南潘三煤矿 1622 (3) 工作面是典型的不等长工作面,斜长由 120 m 逐渐过渡到 240 m,属于斜长由小变大的工作面。工作面走向长 1 415 m,其中长 120 m 的小面走向长 300 m,衔接的斜长 240 m 的大面走向长 1 115 m。工作面位于西三上部采区,东起西三采区上山,西至潘三 - 丁集矿井井田边界,北至 F20 - 1 断层,南至 F20 - 1 断层以南 350 m。该面煤层以 13 - 1 煤为主,煤层总厚 3.1 ~ 5.0 m,平均煤厚 3.9 m。煤层倾角 2° ~ 15°,平均倾角 7°,为近水平煤层,赋存稳定。工作面直接顶为泥岩、13 - 2 煤等组成的复合顶板,均厚 3.7 m;老顶为细砂岩,均厚 10.6 m。工作面采用综合机械化开采、单一走向长壁采煤法,一次采全高,全部垮落法管理顶板。

2 数值模型设计

采用计算机显式有限差分程序 FLAC^{3D},利用拉格朗日有限差分原理,以牛顿第二定律为基础,模拟三维岩体、土体或其他材料体达到屈服极限时的强

度破坏和塑形流动的力学行为,应用于边坡稳定性评价、地下硐室开发、隧道工程、矿山工程等领域,尤其适用于模拟巷道开挖过程中的大变形问题。

本次建模以淮南潘三矿 1622 (3) 工作面的原型为基准,结合作业面岩层的地质构造和力学参数来模拟水平煤层的开采问题。模型共分 80 × 50 × 40 个单元,模型尺寸为 800 m × 500 m × 160 m。模型四侧为单约束位移边界,取 x 方向的位移为 0, y 方向的位移不为 0;模型底部边界定义为全约束边界, x 、 y 方向的位移均为 0;模型顶部考虑岩体运动的复杂性,定义为自由边界, x 、 y 方向的位移不予约束。模型以上的岩层重量以均布荷载代替^[4-5]。

工作面斜长由 120 m 逐渐过渡到 240 m,两边各留 100 m 的保护煤柱。其中斜长 120 m 的工作面走向长按 280 m 布置,240 m 的衔接面按 320 m 布置,斜长由小变大沿走向推进(见图 1)。

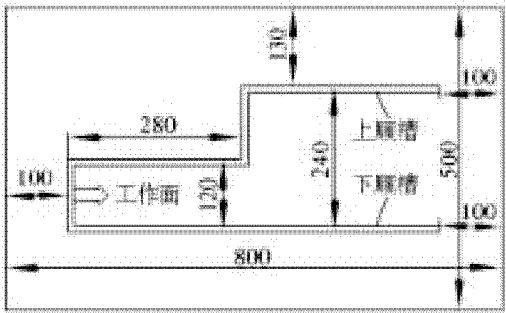


图 1 不等长工作面平面模型图

模型采用 Mohr - Coulomb 屈服准则来判断岩石的破坏,并且计算过程中不考虑塑性流动和剪胀破坏。根据研究区域的煤层产状和岩石力学实验结果,确定各层位岩石的具体参数(见表 1)。

表 1 岩石力学参数

岩层 序号	岩石 名称	厚度 h / m	密度 d / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量 S / GPa	体积模量 B / GPa	内聚力 C / MPa	内摩擦角 f / ($^{\circ}$)	抗拉强度 T / MPa
1	中砂岩	55	2 550	0.31	0.54	7.5	40	3.9
2	砂质泥岩	34	2 550	0.24	0.43	3.2	33	2.6
3	细砂岩	11	2 520	0.28	0.51	7.2	38	3.7
4	砂泥岩	6	2 540	0.26	0.50	4.5	36	3.2
5	煤 层	4	1 300	0.13	0.40	2.4	18	2.0
6	泥 岩	9	2 530	0.25	0.48	3.5	29	2.4
7	泥页岩	8	2 550	0.21	0.45	3.6	30	3.0
8	粉砂岩	33	2 590	0.37	0.56	8.7	46	3.9

3 模拟结果及分析

煤层开采活动打破了原岩应力场的平衡状态,

必然引起应力集中和重新分布,导致覆岩失稳变形和垮落破坏。随着工作面的不断推进,采场围岩应力场和位移场时刻处于动态的变化过程,通过追踪

记录支承压力和垂直位移的演变云图,可以从总体上研究采场应力随开采活动的时空演化规律。

3.1 覆岩破断的演化过程

不等长工作面推进过程中覆岩破断特征的演化过程如图2所示,工作面从开切眼开始向前推移,直接顶暴露面积不断增大,当推进到120 m的工作面“见方”(推进长度与工作面斜长相等,两者在平面上的投影近似为正方形板)时,顶板来压加剧,应力过度集中,小面开始出现“O”型破断区,随着推进距离的增加,当工作面推进到235 m的位置时,“O”型破断区更加明显。根据薄板理论分析,“O”型圈的产生是顶板岩层达到强度极限时发生断裂破坏的必然结果。若将顶板看作是四周固支的薄板结构,弯矩最大值出现的位置最初发生在薄板长边的中心部位,因而首先在长边中心两侧发生断裂,形成裂隙;接着应力分布向短边扩散,近而在短边中央形成裂缝,待四周裂缝贯通后呈现出“O”型破断区^[6]。

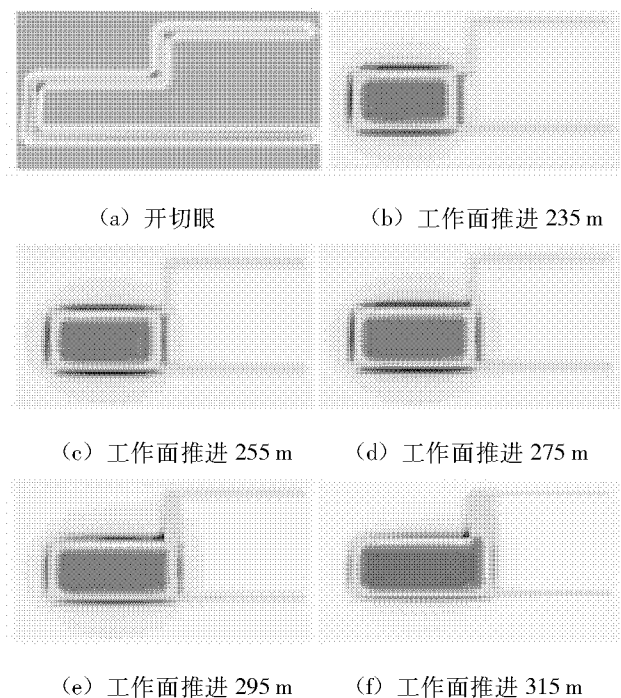


图2 工作面覆岩破断特征演化图

由图2可以发现,随着工作面的不断推进,“O”型圈区域逐渐增大,破断范围不断增加,工作面推进到275 m的衔接面附近时,周边应力急剧增大,应力集中现象明显,覆岩活动剧烈,支架荷载增加,容易引发顶板事故。当工作面推进到280 m以后,越过小面进入大面时,“O”型圈上部的破断范围开始加大,应力增加幅度提高,覆岩破断极不稳

定,需要加强支护效果。

3.2 支承压力的分布特征

采场前方支承压力随工作面推进距离增加的演化关系如图3所示,当工作面推进235 m、255 m、275 m、295 m、315 m时,对应的支承压力峰值分别为39 MPa、30 MPa、29 MPa、31 MPa和36 MPa。可见,当工作面推进到235 m时,支承压力的峰值相对较大,这是因为此时的推进长度约为小面斜长的2倍(但与大面的斜长近似相等),根据已知的覆岩破坏理论^[7-8]:当工作面推进长度到达工作面“见方”期或工作面斜长的整数倍位置时,覆岩活动加剧,顶板岩层的空间结构发生新旧更替,即第一次形成的空间结构被第二次形成的空间结构所代替,动压数倍于静压,高位岩层积聚的弹塑性能量大量释放,局部层位发生离层,导致应力急剧增大。

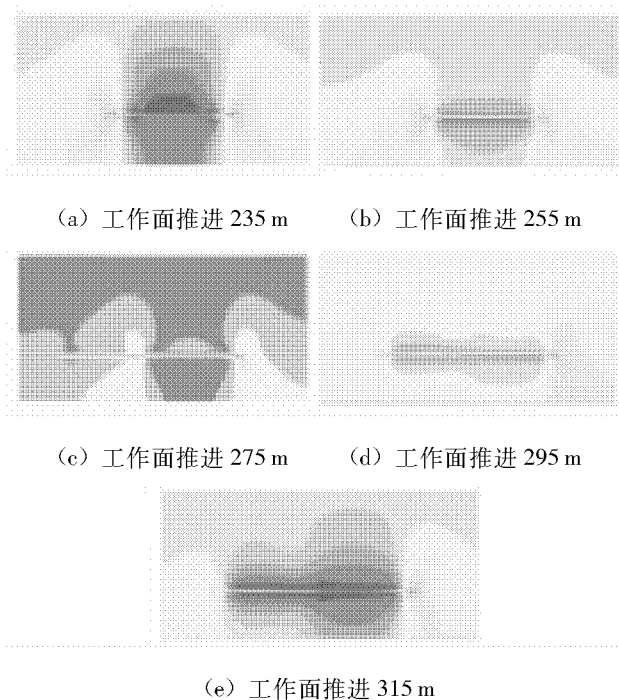


图3 工作面支承压力演化过程图

工作面推进到275 m以前,覆岩活动呈现一定的规律性,煤壁前方支承压力呈“拱形”分布,并关于工作面中轴线对称。但当工作面推进到275 m以后,到达不等长工作面的衔接处时,应力开始增大,覆岩破断形式多样化,岩层运移极不规则。支承压力的分布也出现明显的不对称性,分布形状呈现前小后大的“花生状”。工作面推进距离在衔接面前后各20~30 m的范围内,应力波动较大,数值变化明显,顶板来压剧烈,巷道极难维护,容易引发冲击地压和煤壁片帮事故。

对工作面推进过程中煤壁前方支承压力和水平应力的演化过程进行统计分析,得出支承压力的形成曲线(见图4)及工作面前方1m处煤体中双向应力的变化趋势(见图5)。

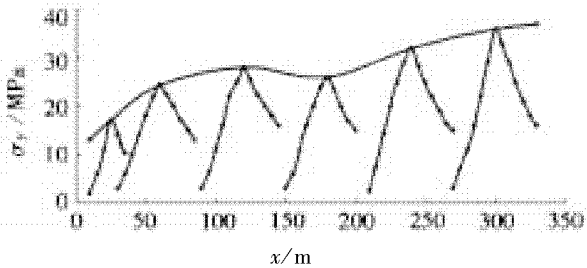
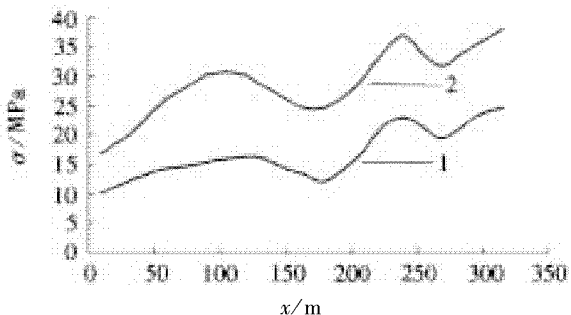


图4 支承压力形成趋势图

从图4可以看出,随着工作面推进度的增加,采场前方的支承压力经历了形成、发展、稳定的动态演变过程。自开切眼开始,应力峰值逐渐增大,垂直位移同步增加,影响范围不断扩大,支承压力逐步形成。但当工作面推进到180 m左右出现了应力峰值的减小,这是因为120 m和240 m的位置为工作面“见方”期或工作面斜长整数倍的位置,这两处的应力峰值普遍较大,180 m的位置充当了应力变化的缓冲区,覆岩活动加剧的现象在此区域内出现了一定程度的减弱。而后随着工作面的继续推进,支承压力趋于稳定,应力变化渐趋缓和。



1. 水平应力;2. 垂直应力

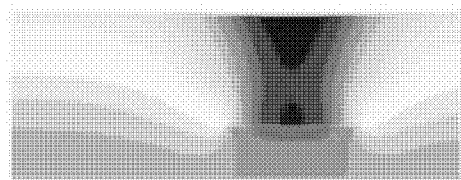
图5 工作面推进度与应力分布关系曲线

图5揭示了工作面推进度与采场前方支承压力和水平应力分布特征的变化关系,支承压力和水平应力时刻处于动态的变化过程,两者的变化趋势具有一定的相关性,支承压力的数值相对较大,其大小约为水平应力的1.5~2倍,对覆岩活动的影响至关重要。支承压力和水平应力的分布特征随工作面推进距离的增加大体经历了以下五个发展阶段:工作面自开切眼推进到120 m时,双向应力都随推进度的增加而增大,推进到120 m的“见方”位置时,应力首次达到峰值;而后应力出现一定程

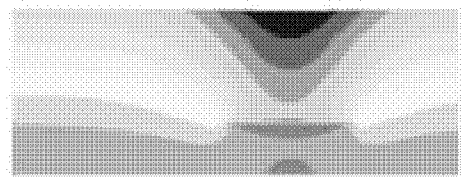
度的减小,当工作面推进到180 m的缓冲区位置时,应力数值最小;接着工作面推进到180~240 m的应力回升阶段,垂直应力和水平应力开始同步增大,到达240 m的工作面斜长整数倍位置时,应力再次达到峰值;随后双向应力不断减小,直至推进到280 m的衔接面位置;而后工作面继续向前推进,越过衔接面后双向应力开始迅速回升,数值变化较大。双向应力这一周而复始的变化过程和覆岩运移的规律相一致,每一次应力峰值的出现都将引起覆岩活动的加剧,矿压显现异常,容易引发冲击地压、煤与瓦斯突出等突发性灾害事故,必须加强顶板管理和巷道维护工作。

3.3 垂直位移的演变过程

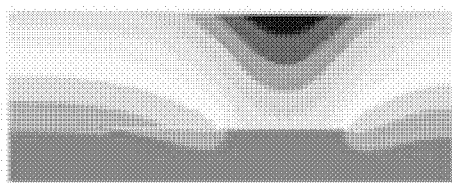
工作面回采过后必然形成采空区,采场覆岩在自重和荷载作用下发生下沉,产生竖向位移。图6为采面斜长对称线上的剖面图,反映出不等长工作面自235 m推进到315 m过程中垂直位移的演变趋势。竖向位移随着工作面的不断推进数值逐渐增大,覆岩上部开始向下凹陷,并向两边辐射,形成“曲拱”效应。工作面推进到280 m的衔接面区域时,顶板下沉量增大,巷帮变形量增加,底臃现象严重,一方面需要加大支护强度,充分利用围岩自身稳定性的同时,采取联合支护的措施实现全断面连续支护;另一方面采用切实有效的卸压方法降低衔接面肩窝处的围岩应力,防止应力过度集中,必要时可在巷帮中部开设卸压槽、底板深部实行松动爆破,促使应力峰值向远离巷道周边的围岩深部转移,避开应力升高区,使巷道处于应力降低区内,以此达到维护巷道稳定的目的。



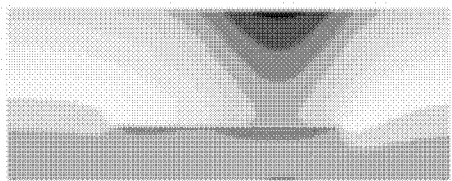
(a) 工作面推进 235 m



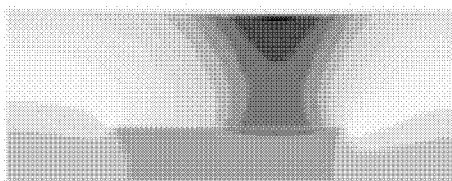
(b) 工作面推进 255 m



(c) 工作面推进 275 m



(d) 工作面推进 295 m



(e) 工作面推进 315 m

图6 垂直位移的演化过程图

不等长工作面煤壁前方 5m 处的下顺槽围岩移近量随推进度的变化关系如表 2 所示,工作面推进距离直接影响着围岩移近量,一定范围内顶、底板移近量随工作面推进距离的增加而增大,竖向位移的增减变化与覆岩运移的活动规律相一致。巷帮移近量较顶、底板变形量而言数值较大,两帮处的竖向位移变化更加明显,顶板变形量次之,巷道底臃量变化最小。因此,对于此类不等长工作面的巷道维护,应特别注意对两帮及顶板的加固,以防止冒顶和片帮事故的发生。

表2 不同推进度的围岩移近量

工作面推进度/m	235	255	275	295	315
顶板变形量	312.8	287.3	369.2	410.3	454.9
巷帮移近量	635.6	591.2	676.3	713.4	761.5
巷道底臃量	239.7	213.4	271.6	308.7	342.8

4 结论

1) 工作面自开切眼开始向前推移,推进到工作面“见方”期或工作面斜长的整数倍位置时,顶板活动加剧,覆岩空间结构发生新旧更替,动压数倍于静压,形成了“O”型破断区。当工作面推进到衔接面区域时,“O”型圈区域逐渐增大,破断范围

增加,周边应力急剧增大,应力集中现象明显,容易引发顶板事故。

2) 工作面在等长面推进过程中,覆岩活动呈现一定的规律性,煤壁前方支承压力呈“拱形”分布,并关于工作面中轴线对称。但当工作面进入斜长由小变大的衔接面后,覆岩破断形式出现多样化,岩层运移极不规则,支承压力的分布形状呈现前小后大的“花生状”。工作面推进距离在衔接面前后各 20 ~ 30 m 的范围内,应力波动较大,数值变化明显,顶板来压剧烈,巷道极难维护。

3) 不等长工作面前方的支承压力和水平应力相互联系、相互影响,两者的共同作用导致了煤岩体的破坏。工作面回采过程中支承压力的数值变化较大,约为水平应力的 1.5 ~ 2 倍,对覆岩活动产生了重要影响。

4) 通过分析采动影响下的位移场得知,工作面推进距离直接影响着围岩移近量,一定范围内顶、底板移近量随工作面推进距离的增加而增大。就采动过程中竖向位移的变化而言,巷帮移近量最大,顶板变形量次之,巷道底臃量最小。因此,工程实践中应特别注意对两帮及顶板的加固,以确保巷道安全。

参考文献:

- [1] 孙玉福,赵敬炜. 不等长轻放工作面回采不规则块段煤的研究与实践[J]. 煤炭工程,2008(2):53-54.
- [2] 徐洪涛,叶飞,黄超慧,等. 不等长综采工作面多切眼支架零对接技术[J]. 煤矿开采,2008,13(1):27-28.
- [3] 王峰. 不规则工作面高产高效实践[J]. 煤炭技术,2011,30(6):93-94.
- [4] 高明中. FLAC 在放顶煤开采顶煤变形与移动特征研究中的应用[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(2):9-12.
- [5] 廖学东,高明中. 开采方案对地表移动影响的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(2):226-230.
- [6] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:74-75.
- [7] 王存文,姜福兴,孙庆国,等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报,2009,34(2):150-155.
- [8] 孔令海,齐庆新,姜福兴,等. 长壁工作面采空区见方形成异常来压的微震监测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3 889-3 896.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

基于 SolidWorks 掘进巷道支护作业平台仿真设计

王开松, 陈 凯, 马齐江

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:为了解决掘进巷道支护作业平台研发和试制周期较长的问题,开展了掘进巷道支护作业平台结构的仿真设计。利用 SolidWorks 三维建模软件,完成了支护作业平台的三维模型绘制、虚拟装配及干涉检查、运动性能仿真和工程图的生成等四个步骤,可及时、尽早地发现和修改设计中的错误,缩短设计周期,提高了产品的研发质量,使设备的研发得到成功实现。

关键词:掘进巷道;支护作业平台;仿真设计

中图分类号:TH322 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0037-03

Simulation Design of Supporting Operation Platform in Roadway Excavation Based on SolidWorks

WANG Kai - song, CHEN Kai, MA Qi - jiang

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

Abstract: In order to solve the long R&D period of supporting operation platform in roadway excavation, simulation design of the platform was carried out. Based on SolidWorks, the 3D modeling software, 3D model drawing of the platform, virtual assembly and interference inspection, motion performance simulation, and engineering drawing generation were completed. By which design errors can be found out and timely corrected, design cycle shortened, product development quality improved, resulted to successful development of the equipment.

Key words: roadway excavation; supporting operation platform; simulation design

仿真技术现在已成为机械系统分析、研究、设计中不可缺少的重要手段,在降低系统的研制成本、缩短产品试验周期方面起着越来越重要的作用。凭借计算机在可视化方面的优势,仿真研究对机械系统进行交互式探索设计,研究人员可将自己的经验和想象结合在计算机仿真设计中,让想象力和创造力得以充分发挥^[1]。与仿真设计研究方法相比,传统的掘进巷道支护作业平台的样机实物研究,有几个明显缺点:1) 试验所消耗的材料价格昂贵。因为只有部分消耗材料是可以重复使用的,多数材料只是一次性的;2) 试验研究方法受外界因素的影响较大;3) 有些部件是由国外购买或者是

厂家自己生产,导致试验周期较长。因此,通过计算机仿真求解是经常被采用的一种较为理想的方法。对于制造费用和试验费用都十分昂贵的掘进巷道支护作业平台而言,计算机仿真研究的优点就更加突出。

1 仿真设计流程

应用 SolidWorks 进行仿真设计,设计步骤包括:首先要分析计算零部件的尺寸,对零件建模;其次对零件进行虚拟装配,形成完整的装配体,并检查结构件之间的干涉性;然后对模型实体各零部件结构性能进行运动特性的仿真分析,检验是否能实

收稿日期:2013-04-14

基金项目:安徽省教育厅产学研重点项目“煤矿采掘工作面无动力除尘装置的研制”基金资助项目(KJ2012A100)

作者简介:王开松(1969-),男,安徽合肥人,教授,博士,硕士研究生导师,发表论文40多篇,研究方向:机械设计及理论。

现相关功能;最后输出所有零部件的二维工程图。其设计流程如图1所示。

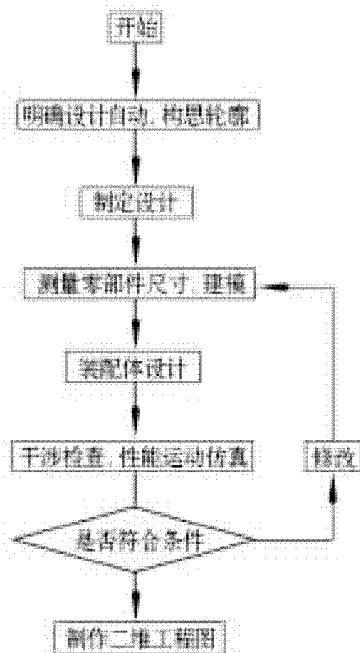


图1 设计流程图

2 掘进巷道支护作业平台建模与装配

2.1 作业平台实体的建模

掘进巷道支护作业平台的建模一般采用自下向上的方法,即先依据各零件的结构形状和尺寸建立其三维模型,然后再按照它们彼此之间的装配和约束关系逐个进行组装,最后完成整体设备的虚拟装配^[2]。对掘进巷道支护作业平台各部件的精确建模和正确定义各部件之间的装配关系,是掘进巷道支护作业平台建模的关键。

特征建模过程就是分析建模对象的主要特征,绘制相应零部件草图,然后利用软件提供的拉伸、旋转、扫描等体特征建模方法以及圆角、倒角等工程特征建模方法,通过对特征的组合、切挖和相交等方式完成零件的建模。例如工作平台、平台支护臂、防护盾、架棚梁等由板材组成的零部件建模主要依靠拉伸命令来完成,而液压缸、抱闸的建模主要由旋转命令完成主要特征的建模^[3]。绘制后的平台结构如图2所示,该设备主要由主梁、迎头防护盾、平衡梁、行驶驱动系统、行驶操作台、检修台、泵站、带有控制台的操作台、工作平台、架棚梁、架棚梁支护臂、工作平台支护臂等组成。

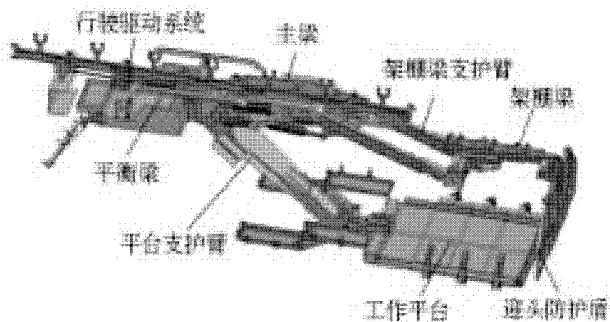


图2 掘进巷道支护作业平台模型图

2.2 作业平台实体的装配

基于SolidWorks的作业平台虚拟装配过程,首先确定主梁为固定件,然后依次调入工作平台、防护盾、架棚梁、抱闸等部件及其他附属零件。调入的零部件放置在模型空间中的一个集中区域,不要太分散,便于接下来的装配操作。装配时,首先将平台支护臂、架棚梁支护臂按与主梁的装配关系,通过“重合”、“平行”、“垂直”、“距离”、“同轴心”等配合命令装配起来。然后再将其他的零部件按一定的规律顺序,依相互间的装配关系装配起来。由于主梁两侧存在对称结构,装配时可先装配好一侧的零部件,再利用插入“镜像零部件”的方法,选中需要镜像的零部件及为镜像零部件重新添加配合,完成另外一侧的装配。装配过程中,通过“移动零部件”、“旋转零部件”将零部件拖到合适的位置,便于添加配合关系。最终完成整个设备的虚拟装配。图2为虚拟装配完成后的掘进巷道支护作业平台模型。

3 掘进巷道支护作业平台运动仿真

3.1 作业平台的相关性能

对图2所示的掘进巷道支护作业平台模型,用SolidWorks动力学分析软件对其进行性能分析。通过对设备的主要工况进行研究,运动仿真分析要对以下各部件的工作过程进行仿真模拟:

1) 防护盾能从竖直位置摆动到与竖直方向成70°夹角的位置处,且在整个摆动过程中无干涉和卡滞现象;

2) 架棚梁可实现上下摆动 $\pm 30^\circ$ 、前后伸缩距离+400 mm、左右伸缩距离+200 mm,可控制防护盾向前伸出450 mm,保证整个移动过程中无干涉和超程现象;

3) 行走驱动系统能实现整个设备的直线行走

和转弯,每次行走距离保持在 1 m 左右,且整个过程无干涉、卡滞以及制动力不足现象产生;

4) 工作平台可以完成上下摆动 $\pm 30^\circ$ 、左右摆动 $\pm 45^\circ$ 以及其可以单向展开 800 mm,整个过程中无干涉现象产生;

5) 整个设备可沿着坡度为 20° 或转弯半径最小为 6 mm 的单轨吊吊轨运动,保证整个运动过程中与巷道无干涉现象。

以控制防护盾向前伸出 400 mm 进行运动性能仿真模拟为例,其具体分析过程如下:先确定架棚梁安装臂为固定件,随后插入防护盾推移装置的三维装配模型,此推移装置就可实现相对于架棚梁安装臂的运动;其次使用高级配合中的宽度配合,将推移装置安装至安装臂内部居中位置处,再采用距离配合使推移装置的后端面与安装臂前端面相距 100 mm;最后选中运动算例,进行运动学性能仿真。在此过程将运动时间设置为 10 秒,在 0 秒时将两个端面距离设置为默认的 100 mm,10 秒时将此距离设置为 500 mm。如图 3 和图 4 所示分别为 0 秒和 10 秒时端面距离对比图。

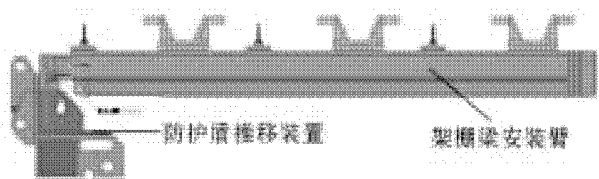


图3 0秒时端面距离图

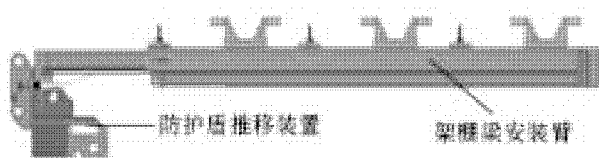


图4 10秒时端面距离图

利用仿真技术可以模拟出防护盾向前伸出运动 400 mm 过程中不存在干涉现象。

4 掘进巷道支护作业平台工程图

三维模型不能将结构所有的设计参数表达清楚,有些信息如加工要求的精度、形位公差和表面粗糙度等仍然需要借助二维的工程图将其表达出来。因此,工程图的创建仍是产品设计中较为重要的环节,是产品信息传递的媒介。

SolidWorks 可以利用模型文件快速自动转换成工程图文件。和传统的计算机辅助绘图相比,利用模型文件生成工程图只需指定模型的投影方向,插入模型的尺寸或添加其他的工程图细节就可完成工程图的操作。经过转换的图形准确、完整,并且可生成各种视图,如剖视图、轴测图、局部放大图等。通过设置图纸大小、填写标题栏等操作,可生成符合我国机械制图标准的二维工程图^[4]。而且在工程图方面 SolidWorks 与 AutoCAD 具有很好的兼容,可以将 SolidWorks 所生成的工程图导入到 AutoCAD 中,进一步完善工程图,得到可用于加工的工程图。

5 结束语

基于功能强大的 SolidWorks 的掘进巷道支护作业平台的仿真设计,实现对掘进巷道支护作业平台的仿真设计,为探索作业平台新的设计方法提供了良好的途径^[5-6]。应用此技术可及时、尽早地发现和修改设计中的错误,缩短设计周期,降低设计成本,提升产品质量,使设备的研发得到成功实现。实践表明基于 SolidWorks 软件的仿真设计技术在产品研发中有着良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 王少纯,邓宗全,杨涤,等.月球着陆器新结构的 ADAMS 仿真研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007(9): 92-93.
- [2] 上官林建.SolidWorks 三维建模及实例教程[M].北京:北京大学出版社,2005:8-150.
- [3] 詹迪维.SolidWorks 高级应用教程[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [4] 上官林建,孔垂雨.基于 SolidWorks 的机械式剪板机的虚拟设计[J].机械设计与制造,2011(1):172-173.
- [5] 陈玉博.基于 Pro/E 三维建模综采工作面三机配套的研究[J].煤矿机械,2010(12):74-75.
- [6] 朱增宝,潘地林.往复泵 CAD 系统的开发与研究[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2003,23(2): 29-34.

(责任编辑:李 丽)

煤矿砂岩 SHPB 动态压缩力学性能试验与分析

平 琦^{1,2}, 马芹永^{1,2}, 袁 璞¹

(1. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为研究煤矿砂岩冲击载荷作用下的动态力学特性, 利用分离式 Hopkinson 压杆对皖北矿区祁东煤矿的砂岩试件进行冲击压缩试验, 得到了试件应变率变化时程曲线和动态应力-应变曲线。试验结果表明: 采用3种冲击气压加载, 入射波形均近似为梯形波; 试件应变率随冲击气压提高而增大, 应变率曲线中有一段近似恒应变率平台, 可实现恒应变率加载; 试件动态破坏形态在低应变率下为径向外围剥落式拉伸破坏模式, 在高应变率下则为颗粒状粉碎破坏模式。随应变率增加, 碎块尺寸减小且碎块数量增加, 具有明显的应变率效应; 试件动态抗压强度与平均应变率近似乘幂关系, 显示出较强的相关性。

关键词: 煤矿砂岩; 动态力学性能; 冲击载荷; 分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB)

中图分类号: TD 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0040-05

Dynamic Compression Properties Tests of Sandstones from Coalmine by SHPB Apparatus

PING Qi^{1,2}, MA Qin-yong^{1,2}, YUAN Pu¹

(1. Research Center of Mine Underground Engineering of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. The Key Laboratory of Coal Mine Safety and Efficient Exploitation of Ministry of Education; Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic mechanical characteristics of coalmine sandstone under impact loads, split Hopkinson pressure bar apparatus is adopted to conduct impact compression test for sandstone from Qidong mine in Wanbei Mining Area. Strain rate history curve and dynamic stress-strain curve are obtained. Test results showed that when three different impact pressures are loaded with incident wave in trapezoidal shape, strain rate of sandstone specimens increases with the impact pressure increasing. And there is an approximate platform in strain rate history curve which can be regarded as constant strain rate loading. At small strain rate, the dynamic failure of sandstone specimen shows a tensile failure mode by radial peripheral spalling, while at big strain rate, it shows a crushing failure mode by granular powder. With the strain rate increases, size of fragments reduces and number of fragments increase, and the strain rate effect is significant. There is an approximated relationship by a power law between dynamic compression strength and average strain rate in sandstone specimens, which shows a strong correlation.

Key words: coalmine sandstone; dynamic mechanical properties; impact load; split Hopkinson pressure bar (SHPB)

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重点资助项目 (KJ2013A085); 住房和城乡建设部科学技术计划资助项目 (2012-K4-2); 安徽省建设行业科学技术计划资助项目 (2012YF-20)

作者简介: 平琦 (1975-), 男, 安徽淮南人, 讲师, 在读博士后, 研究方向: 岩石动力学和爆破理论与技术。

煤炭是我国的主体能源,在未来相当长时期内其地位不会改变;随着工业化和城镇化进程加快,煤炭消费量还将持续增加^[1]。目前,我国每年巷道掘进量超过 12 000 公里^[2],煤矿岩石巷道施工仍以钻爆法为主^[3-4]。煤矿岩石巷道掘进和硐室开挖过程中的爆破冲击和机械扰动,以及冲击地压和矿震等诸多研究领域,都涉及岩石材料动态力学性能^[5-8]。因此,开展煤矿岩石动态力学性能研究具有十分重要的理论意义和深远的实用价值。

凿岩和爆破等工程实践中,岩石材料的应变率通常为 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ^[9]。目前对这一区域应变率的研究试验装置主要是采用分离式 Hopkinson 压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 试验装置^[10-11]。由于该装置具有设计思想巧妙、结构装置简单、操作使用方便、采用间接方法测量、加载波形易控易测等诸多优点,已成为研究高应变率材料动态力学性能中最基本的一种试验装置^[12-14]。

岩石材料在动载荷作用下力学响应与静态相比存在显著不同。利用 SHPB 试验装置对岩石材料动态力学性能已开展了大量的试验研究^[15]。但众多研究成果主要集中在金属矿山和水利水电等方面,而对煤矿岩石动态力学性能研究成果相对较少。

本文以煤矿巷道开挖工程中最常见的砂岩为研究对象,岩样采自皖北矿区祁东煤矿南部井南一轨道巷 - 466 m 水平深度。利用 RMT - 150B 岩石力学试验系统和 $\phi 50 \text{ mm}$ 变截面杆 SHPB 试验装置,分别进行静态力学试验和 3 种冲击气压加载速率动态压缩试验,以研究煤矿砂岩动态压缩力学性能和应变率效应。试验结果可为皖北矿区煤矿巷道的爆破掘进优化和巷道抗动力破坏性能研究等提供参考。

1 砂岩的基本物理力学性能

1.1 试件的加工与制备

根据文献[16]的规定,试验岩石试件直径选用 50 mm。在静态物理力学试验中,采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 和 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 圆柱体试件,分别用于单轴压缩试验和劈裂拉伸试验;SHPB 试验中,试件尺寸选用 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,长径比控制在 0.5 左右,以减少试件惯性效应和端部效应^[17]。

鉴于岩石内部存在大量随机分布的裂隙等天然缺陷,组织结构极为不均匀,为增强试验结果的可比性,试验所用试件均取自同一岩块。经取芯、

切割和两端面研磨抛光加工制成圆柱体试件,应保证试件两端不平行度小于 $\pm 0.05 \text{ mm}$,轴线偏差小于 $\pm 0.25^\circ$,以满足规范要求。

1.2 基本物理力学性能

砂岩试件静态力学性能试验利用 RMT - 150B 岩石力学测试系统进行,并采用量积法测试砂岩试件密度。砂岩试件静态基本物理力学参数如表 1 所示,单轴压缩试验试件破坏形态如图 1 所示。

表 1 砂岩试件静态基本物理力学参数

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	弹性模量/ GPa	应变率/ s^{-1}	单轴抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
2.64	29.55	1×10^{-4}	144.20	9.15

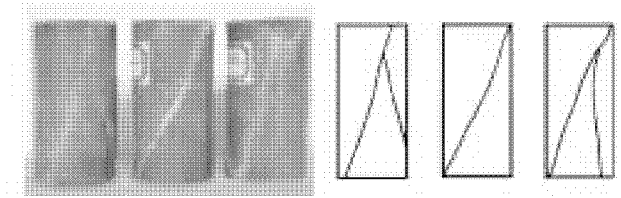


图 1 静态单轴压缩砂岩试件破坏形态

从图 1 可以看出,砂岩试件的破坏形态是以单面剪切形式和“人”字形破坏形式为主,是剪切破坏起主导作用。

2 砂岩试件 SHPB 试验结果与分析

2.1 SHPB 试验方案

$\phi 50 \text{ mm}$ 变截面杆 SHPB 试验装置如图 2 所示,撞击杆、入射杆和透射杆均采用同一种高强度合金钢加工而成,材料密度为 $7\,580 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $198\,646 \text{ MPa}$,纵波速为 $5\,120 \text{ m/s}$ 。

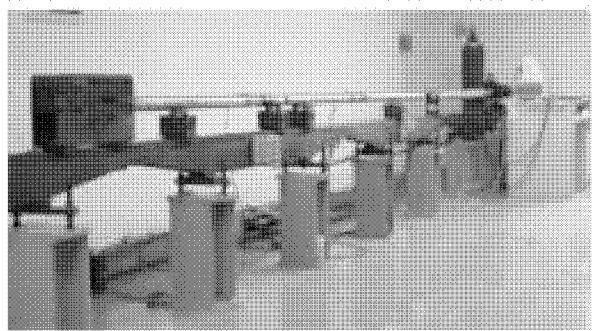


图 2 变截面杆 SHPB 试验装置系统

撞击杆直径 37 mm, 长度 800 mm; 入射杆采用锥形过渡变截面形式, 直径由 37 mm 增至 50 mm, 即小端与撞击杆等径, 大端与透射杆等径; 入射杆总长度 2 400 mm, 其中, 过渡段长度为 200 mm; 透射杆直径 50 mm, 长度 1 400 mm。

试验分 3 组进行, 每组选取 3~6 个砂岩试件。采用调整加载冲击气压的方法来实现不同加载速率, 试验加载冲击气压 p 分别选用 0.6、0.9、1.2 MPa 等 3 种, 实施不同加载速度的冲击压缩试验。

试件安装之前, 在试件与压杆端面接触处均匀涂抹薄薄一层凡士林作为润滑剂, 以减少砂岩试件与压杆端面之间的摩擦作用, 从而降低加载端面约束对试件应力分布状态的影响。

试验时, 将砂岩试件紧夹在入射杆和透射杆之间, 并确保试件与压杆共轴 (见图 3)。

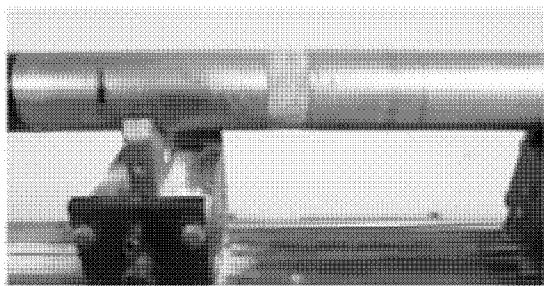


图3 砂岩 SHPB 单轴冲击压缩试验试件安装

对每个试件进行试验时, 应将撞击杆置于发射腔中相同位置, 保证撞击杆的初始位置和冲击行程相同, 实现同加载气压能获得相同的冲击速度。

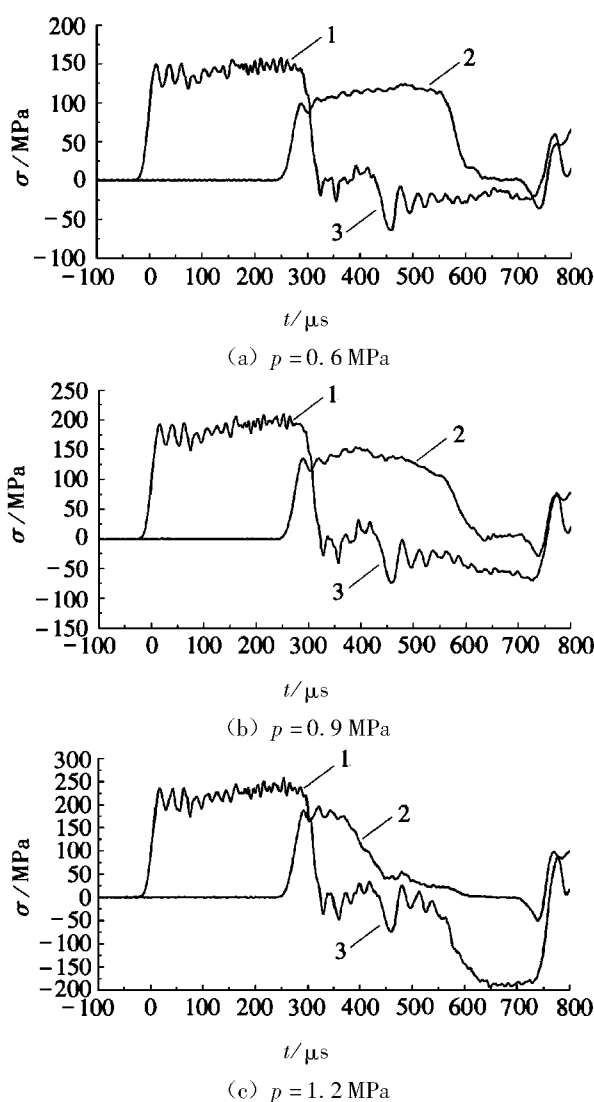
2.2 试验结果与分析

根据文献 [18] 分析可知, $\phi 50$ mm 变截面杆 SHPB 试验装置, 由于入射杆采用了锥形过渡变截面形式, 实现了入射加载波前沿的缓慢上升, 对减缓岩石类脆性材料过早破坏、提高试件应力均匀性起到较为积极的作用。砂岩试件中应力波经 5~6 次反射后就可以达到应力平衡, 满足 SHPB 试验的有效性条件。

SHPB 试验中, 砂岩试件采用 3 种不同加载冲击气压进行试验时的典型应力波形 (见图 4)。

从图 4 可以看出, 采用不同加载冲击气压进行 SHPB 冲击压缩试验时, 入射波形基本相同, 均近似为梯形波, 且入射波应力幅值随着冲击气压提高而增大。

透射波形和反射波形不定, 与砂岩试件的破坏形态密切相关。透射应力幅值较大, 约占入射应力



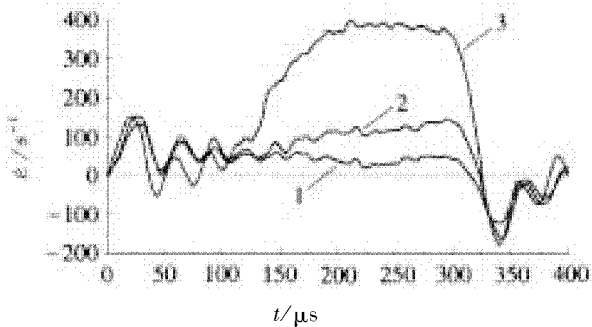
1. 入射应力波; 2. 透射应力波; 3. 反射应力波

图4 砂岩试件 SHPB 冲击压缩试验应力波形

的 80%~90%, 这说明在砂岩试件冲击压缩试验中, 入射波穿透试件后有相当一部分进入透射杆中; 而反射应力波形曲线前期比较相似, 且应力幅值明显小于透射应力, 但曲线后期变化较大。

从能量角度分析其原因^[19], 当冲击加载气压较小时, 入射应力幅值也相对较小, 试件在入射加载前期吸收能量较少不足以使试件发生破坏, 随着试件吸收能量的不断增加, 试件开始发生破坏, 试件与压杆有效接触面积逐渐减小, 从而造成透射应力波减小 (见图 4a); 当冲击加载气压较大时, 入射应力幅值也相应较大, 试件在入射加载很短的时间内吸收能量较大, 试件就开始发生破坏, 试件与压杆有效接触面积急剧减小, 从而引起透射应力波下降较快, 反射应力波快速增加 (见图 4c)。反射波前期产生波动的原因是由于在加载初期试件与压杆的接触并十分紧密所造成。

砂岩试件在 SHPB 冲击压缩试验中的应变率变化时程如图 5 所示。



1. 0.6 MPa; 2. 0.9 MPa; 3. 1.2 MPa

图5 SHPB 冲击压缩试验砂岩试件应变率变化时程

从图 5 可以看出,砂岩试件应变率随冲击加载气压的提高而增大,试验加载过程中应变率变化可分为增大、恒值、减小三阶段。

应变率增大阶段(约 0 ~ 220 μs)的前期存在一定波动,冲击加载气压越高波动幅值越大,但总体呈增加趋势;应变率恒值阶段(约 220 ~ 300 μs)为近似的恒应变率平台,说明采用变截面杆 SHPB 试验装置可以实现恒应变率加载;应变率减小阶段(约 300 ~ 320 μs)表明加载速度降低,但仍为加载过程。而在应变率后期(约 320 ~ 350 μs)出现了负值现象,是由于回弹效应出现的卸载情况。

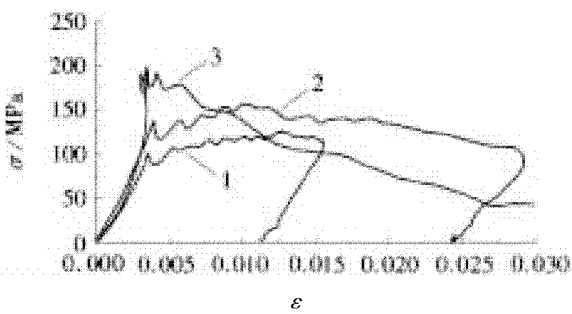
若选取试件达到应力均匀性时刻至试件破坏(即应力峰值)时刻之间应变率的均值作为试件平均应变率^[20],根据 SHPB 试验技术二波法数据处理公式^[21],可得到砂岩试件 SHPB 冲击压缩试验结果。

每组试验获得了 2 个有效试验数据,试验结果如表 2 所示。

表2 砂岩试件 SHPB 冲击压缩试验部分试验结果

冲击气压/ MPa	试件编号	试件尺寸		长径比	透射杆端载荷/ kN	动态单轴抗压 强度/MPa	平均应变率/ s ⁻¹
		直径/mm	高度/mm				
0.6	QD1-060-D-3	49.52	24.98	0.50	243.59	126.48	49
	QD1-060-D-4	49.62	24.92	0.50	250.37	129.47	35
0.9	QD1-090-D-3	49.46	24.78	0.50	301.36	156.85	90
	QD1-090-D-6	49.48	25.44	0.51	278.24	144.70	89
1.2	QD1-120-D-1	49.48	25.04	0.51	366.12	190.40	232
	QD1-120-D-3	49.46	25.10	0.51	383.92	199.82	222

图 6 为 SHPB 试验中砂岩试件在不同应变率下的动态应力-应变曲线。



1. 49 s⁻¹; 2. 90 s⁻¹; 3. 222 s⁻¹

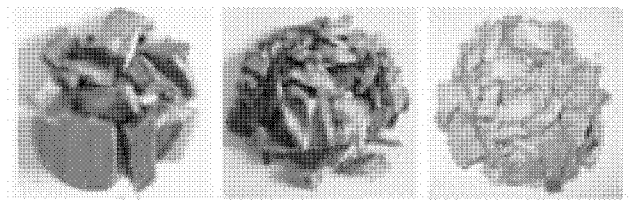
图6 砂岩试件动态应力-应变曲线

从图 6 可以看出,砂岩试件的动态抗压强度随冲击气压提高和应变率增大而增大。

这主要是因为随冲击气压提高和冲击速度增大,应力波在砂岩试件中的传播波速随之加快,而砂岩试件内部原有微裂纹未能及时起裂贯通,出现

了试件变形滞后现象,且滞后现象也将随冲击加载气压的提高会越来越明显,从而使得试件抗压强度增大。

SHPB 试验中,砂岩试件在不同平均应变率下破坏形态如图 7 所示。



(a) $\dot{\epsilon} = 49 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 90 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 222 \text{ s}^{-1}$

图7 砂岩试件 SHPB 压缩试验中典型破坏形态

从图 7 可以看出,砂岩试件在冲击载荷作用下破坏形态与静态破坏形态相比有所不同。当应变率较低时,试件为径向外围剥落式拉伸破坏模式

(见图7a);当应变率较高时,试件为颗粒状粉碎破坏模式(见图7c)。随应变率增加表现出碎块尺寸明显减小而碎块数量增加,显示较强的应变率效应。

砂岩试件动态单轴抗压强度 σ_d 与平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的数据点拟合曲线如图8所示;拟合关系表达式如式(1)所示。

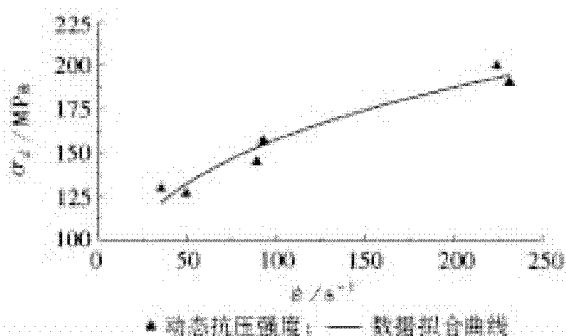


图8 砂岩动态抗压强度-平均应变率拟合曲线

$$\sigma_d = 51.409\dot{\varepsilon}^{0.243} \quad (R^2 = 0.9412) \quad (1)$$

式中: σ_d 为砂岩动态单轴抗压强度,MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为砂岩试件平均应变率, s^{-1} 。

从式(1)可以看出,砂岩试件动态单轴抗压强度与平均应变率近似为乘幂关系,呈现出较强的相关性。这与文献[22-24]中采用 SHPB 试验装置所得到几种不同类型岩石动态抗压强度和应变率之间的关系式(2)比较相似。

$$\sigma_d = a\dot{\varepsilon}^{1/3} \quad (2)$$

式中: a 为岩石动态抗压强度相关参数。

3 结论

1) 采用不同冲击加载气压对砂岩试件进行 SHPB 冲击压缩试验时,入射波形近似为梯形,应力幅值随着冲击气压提高而增大。透射和反射波形不定,与试件破坏形态密切相关。透射应力幅值较大,约为入射应力的 80%~90%,而反射应力波形曲线前期比较相似,且应力幅值明显小于透射应力,而曲线后期变化较大。

2) 砂岩试件应变率随冲击加载气压的提高而增大,应变率变化可分为增大、恒值、减小三阶段。应变率前期存在一定的波动,冲击气压越高波动越大;随后一段时间内应变率出现了近似恒值平台,实现了恒应变率加载;但应变率后期还出现了部分负值现象。

3) 砂岩试件在冲击载荷作用下的破坏形态与静态相比有所不同。应变率较低时试件为径向外围剥落式拉伸破坏模式,应变率较高时为颗粒状粉

碎破坏模式;随着应变率增加表现出碎块尺寸明显减小而碎块数量增加,显示较强的应变率效应。

4) 砂岩试件动态单轴抗压强度随冲击气压提高而增大。动态单轴抗压强度与平均应变率近似为乘幂关系,呈现出较强的相关性。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 煤炭工业发展“十二五”规划[EB/OL]. 发改能源[2012]640号, 2012-03-18, [2012-03-18] http://zfxgk.nea.gov.cn/aut085/201203/t20120322_1456.htm.
- [2] 钱七虎. 中国岩石工程技术的新进展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(8): 37-48.
- [3] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2006-2013.
- [4] 王继峰. 岩石爆破技术的现状与发展[J]. 煤矿爆破, 2005(3): 25-28.
- [5] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 70-104.
- [6] 李铁, 张建伟, 吕毓国, 等. 采掘活动与矿震关系[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2127-2132.
- [7] 齐庆新, 李晓璐, 赵善坤. 煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 1-5.
- [8] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [9] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980, 17(3): 147-157.
- [10] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society, Section B, 1949, 62(11): 676-700.
- [11] CAI M, KAISER P K, SUORINENI F, et al. A study on the dynamic behavior of the Meuse/Haute-Marne argillite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(8-14): 907-916.
- [12] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学, 2005, 20(4): 589-594.
- [13] MA Q Y. Experimental analysis of dynamic mechanical properties for artificially frozen clay by the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2010, 51(3): 448-452.
- [14] 代仁平, 郭学彬, 宫全美, 等. 隧道围岩爆破损伤防护的霍普金森压杆试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 77-83.

(下转第82页)

基于 WLAN 的无线通信异步快速切换机制研究

张友能¹, 洪 炎², 黄文全¹, 丁 莉¹

(1. 安徽工贸职业技术学院电气与信息工程系, 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)

摘 要:在高速移动环境下, 无线通信的数据传输存在丢包现象, 通过研究 WLAN 的链路层协议切换步骤, 提出了采用减少扫描信道数量和选择扫描信道的策略来解决无线通信高速切换时的数据丢包现象, 并通过构建高速无线通信切换系统进行了仿真测试。测试结果表明, 采用减少扫描信道数量和选择扫描信道的异步无线通信切换机制可以将切换链路中断的时间由 6 s 左右缩短至不到 2 s。

关键词:无线局域网; 异步切换; 信道; 延迟

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0045-05

Research on Fast Asynchronous Switching Mechanism of Wireless Communication Based on WLAN

ZHANG You-neng¹, HONG Yan², HUANG Wen-quan¹, DING Li¹

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Anhui Trade and Industry 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)

Abstract: In the high-speed mobile environment, the phenomenon of packet loss exists in wireless data transmission. Based on the research of WLAN link layer protocol switching steps, the strategy was put forward that reduce the scanning channel number and scanning channel selection to solve the data packet loss phenomenon in wireless communication at high speed switching. The simulation tests were conducted based on constructed high-speed wireless communication switching system. The test results showed that by the method the link interrupt time reduces from about 6 s to less than 2 s.

Key words: WLAN; asynchronous switching; channel; delay

近年来全世界范围内信息技术迅猛发展, 公共互联网越来越普及, 人们习惯于从互联网上获取各种信息。特别是随着无线宽带接入技术的发展, 人们越来越希望无线网络信号能够覆盖生活的每个角落, 甚至是在高速铁路列车上。但是在高速移动的环境下, 移动切换会导致无线通信的中断, 给人们的生产、生活带来诸多不便。在高速移动环境下, 如何采用合理、快速、平滑的通信切换机

制, 实现无缝实时的数据通信是亟待解决的关键问题, 本文就这一问题展开研究。

1 WLAN 的切换过程

无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 是在局部区域内用无线媒体或介质进行通信的无线网络, 是计算机网络和无线通信技术相结合的产物。WLAN 要由接入终端 (Station, STA)、

无线媒介(Wireless Medium, WM)、接入点(Access Point, AP)和分布式系统(Distribution System, DS)等几部分组成。采用单元结构,每个单元称为一个基本服务组(Basic Service Set, BSS)。为了扩展无线局域网的覆盖范围,增加终端的移动性,多个 BSS 可以联合组成多区网络,也称扩展服务集(ESS)。WLAN 的网络结构在快速移动环境中,最关键的问题就是如何在各 AP 覆盖区域内进行快速切换,即最大限度的缩短延迟时间。在 ESS 网络中,切换延迟由探测延迟,认证延迟和关联/重新关联延迟组成^[1-2](见图 1)。

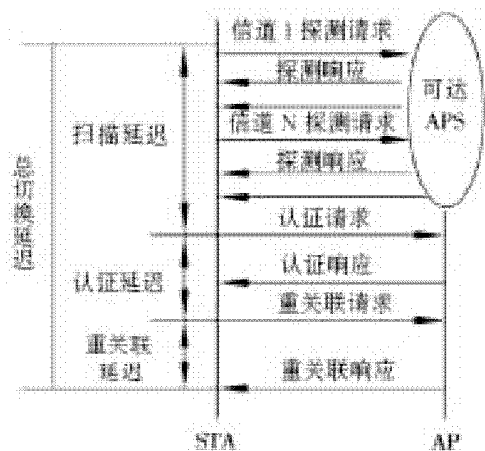


图 1 切换延迟流程图

2 WLAN 的探测延迟

WLAN 切换的探测过程是 STA 搜索空闲 AP 的过程,分为主动扫描和被动扫描,探测过程一般占到切换时间的 90% 以上^[3]。

在主动扫描过程中,STA 在每个信道上主动发送探测帧,如果在某一信道有空闲的 AP,则会收到其探测应答帧,STA 记录其信息,待全部信道扫描完毕后,根据 RSSI 选择好的 AP 进行认证及重关联(见图 2)。

图 2 中指向 AP 的箭头表示 STA 向 AP 发送探测消息,指向 STA 的箭头表示该 AP 是否回应 STA 回复消息。探测延时一般可用如下公式进行计算^[4-5]:

$$N \times T_b \leq t \leq N \times T_s$$

式中: N 为扫描的信道数; T_b 为 MinChannelTime 的值; T_s 为 MaxChannelTime 的值,一般来讲 MinChannelTime 为 $1\,024\,\mu\text{s}$, MaxChannelTime 为 $10\,\text{ms}$ 。

由于物理层的限制,减小 MinChannelTime 与 MaxChannelTime 难度比较大,但根据不同的国家与应用环境,减少 N 的信道值是可能的,很多减小 WLAN 切换时间的算法都把减少扫描信道的数量做为主要方式^[6]。

被动扫描机制是 STA 在每个信道轮流等待 AP 的信标帧,在高速移动环境下可以自行设定信道,采取主动扫描方式缩短切换延迟时间。

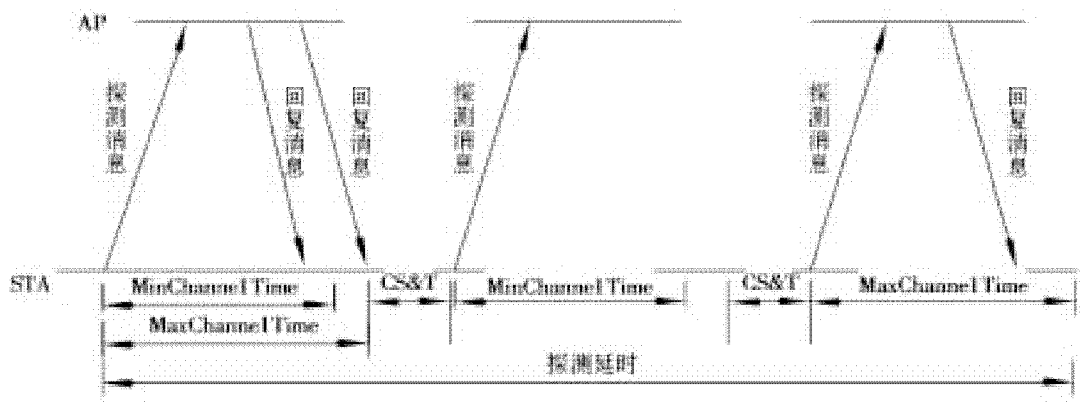


图 2 主动扫描过程

3 无线网卡信道扫描的改进

无线网卡在同一时间只能工作在一个无线信道上,在网卡扫描过程中,数据链路无法建立连接。Linux 网络体系中,物理层和 MAC 层是在网卡驱动程序中实现,逻辑链路控制(Logic Link Control,

LLC)子层及网络层在操作系统中实现^[7]。由于无线切换发生在数据链路层,在 MAC 层对网卡驱动程序进行改进,使优化切换机制成为可能。

在无线网卡的驱动中,信道扫描结构体类型的数据结构如下:

```
CHANNEL_TX_POWER Channe_lList[MAX_
```

NUM_OF_CHANNELS]

/* MAX_NUM_OF_CHANNELS 为扫描的最大信道数 */

```
typedef struct CHANNEL_TX_POWER
{
    UCHAR channel; //扫描的信道号
    CHAR power; //其对应的发射功率
} Channel_List
```

其中,定义了信道的编号及各信道对应的发射功率,从硬件寄存器中读取^[8]。为避免相邻信道的干扰,两个信道间至少有 25MHz 的频率间隔^[9],这样在 13 个信道中完全不相交的信道只有 1, 6, 11 三个。在高速移动环境下,避免干扰的同时,为了尽量减少扫描信道的数量,减小切换延时,可设为 1 与 11 两个信道的 AP 互相交错排列,避免干扰。

为此,修改 Channel_List 结构体中相关参数,让其只扫描 1 和 11 两个信道(见表 1)。

表 1 Channel_List 结构体相关参数修改前后对照表

	修改前	修改后
MAX_NUM_OF_CHANNELS	13	2
Channel_List[0]	channel = 1 Power = 17	channel = 1 power = 17
Channel_List[1]	Channel = 2 Power = 16	Channel = 11 Power = 15
Channel_List[2] ~ Channel_List[12]	信道 3 ~ 13	空白

可见,驱动代码修改后的扫描只在设定的 1 与 11 信道发生,大大减少了扫描时间,大约控制在 1 s 左右。

4 无线通信的异步切换机制

以高速移动的列车作为研究载体,在同一辆列车上安装 2 个具有不同 MAC 地址的 STA,分别位于列车的头部和尾部,并行工作。在不需要进行越区切换时,列车可以同时利用 2 个网络接口收发数据,在与不同的轨旁 AP 切换的过程中,2 个网络接口在不同的时间完成与旧 AP 解除联结、与新 AP 重新联结的操作,从而保证列车上至少有一个网络接口与轨旁 AP 连接,使车载服务器发往地面控制系统的数据流可以不间断地通过旧 AP 或新 AP 转发^[10]。

列车车头 STA 进入切换区域,而车尾 STA 此时与接入点连接中,两路数据到达轨旁服务器,弥补了车头 STA 切换时产生的丢包,两路数据到达轨旁服务器后,服务器内部多路整合算法将重复的包丢弃;列车车头 STA 经过与 AP 的验证,与其连接,而同时车尾 STA 也与其本身轨旁 AP 连接,在这段距离中不存在丢包现象;车尾 STA 进行切换区域,产生数据丢失,而车头 STA 与 AP 传递数据,在服务器端进行数据整合(见图 3)。

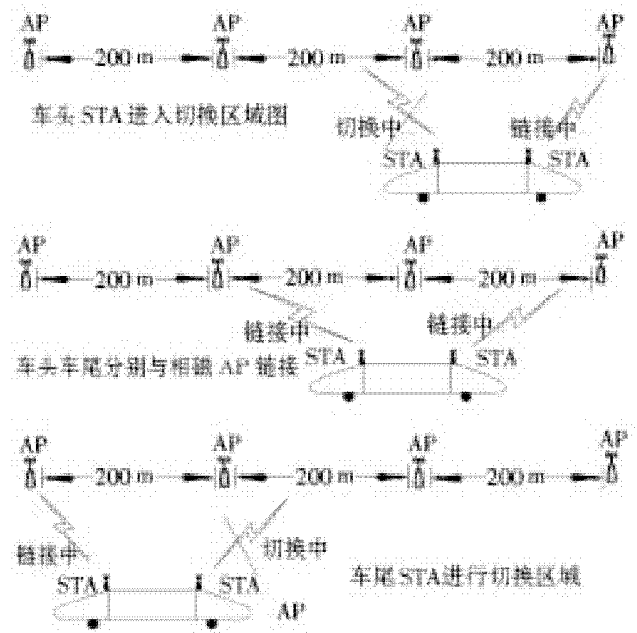


图 3 高速移动列车上 STA 与 AP 的数据切换流程图

2 个网络接口使用相同的越区切换算法,切换算法描述如下:

```
receive_frame_from_phy(packet);
IF (packet_type == mgmtFrame AND
    mgmtFrame_type == newAP)
{
    new_AP_addr = pk_infor_get(packet, "ap_address");
    IF ! exist(new_AP_addr)
        new_ap_infor_add(new_AP_addr);
    soft_state_refresh(new_AP_addr);
    receive_frame_from_high(pk);
    IF pk_dest_addr == STA
    {
        new_pk = pk_copy(pkt);
        new_pkt = encap(new_AP_addr, new_pk);
```

```
forward_packet(new_pkt);
```

```
}
```

```
Pk_send_to_phy(pk);
```

```
...
```

STA 端的处理:

```
IF find(new_ap) send_to_AP(new_ap);
```

新 AP 端的处理:

```
receive_forward_pk(forward_pkt);
```

```
Pkt = de_encap(forward_pkt);
```

```
IF full(Q) delete(head_pkt);
```

```
enqueue(Q, pk);
```

```
...
```

```
IF received(wlan_reassoc) from STA
```

```
{
```

```
pk_send_to_phy(wlan_reassoc_ACK);
```

```
wlan_arp_request();
```

```
}
```

```
IF associate(STA)
```

```
{
```

```
delete(head_pkt);
```

```
Pk_send_to_phy(head_pkt);
```

```
}
```

当列车开始远离当前 AP、接近目的 AP、尚处在当前 AP 的服务区时,车头接口远离当前所连 AP,开始切换过程,此时车尾 STA 还处于与其当前 AP 联结的状态,列车可以通过车尾接口与轨旁服务器通信。当列车驶离车尾接口当前 AP 的服务区,进入目标 AP 的服务区后,车头接口已经完成与目的 AP 的联结过程,开始使用车头 STA 与目的 AP 转发数据。此时车尾接口开始切换,当车尾接口完成与目的 AP 的联结操作后,结束整个切换过程。

5 仿真测试

利用工业控制机,嵌入式系统,无线网卡, Linux 网络编程完成基于 PC 架构和嵌入式架构的高速移动环境下数据通信系统的测试。

测试使用测试工具 DUMETER 来对比带宽的下降,利用 WIRESHARK 来监测切换的时延。使两个 AP 覆盖区域良好交叉, AP1、AP2 分别工作在互不干扰的 1, 11 信道。在 STA 一侧连接摄像头,采用 640 × 480 分辨率, Motion JPEG 的标准编码方

式,模拟高速移动环境下数据通信系统中对带宽要求最高的视频业务,将两个 AP 通过交换机相连, AP 上安装衰减器,用来减小 AP 的发射功率。用电脑通过 AP 及 STA 之间的无线链路与连接摄像头,模拟轨旁系统。

切换测试拓扑如图 4 所示,为了观察扫描过程中的延时,测试采用开放式认证方式。测试过程中,让 STA 与其中一个 AP 相连,通过调节衰减器,让其发射功率减小,触发 STA 的切换过程,自动扫描其它信道,找到另一个 AP 与其相连。在轨旁电脑上用 DUMETER 及 WIRESHARK 观察全扫描过程与选择性扫描中带宽及时延的对比变化情况。对比全扫描与选择性扫描过程中带宽的变化,及延时的区别。

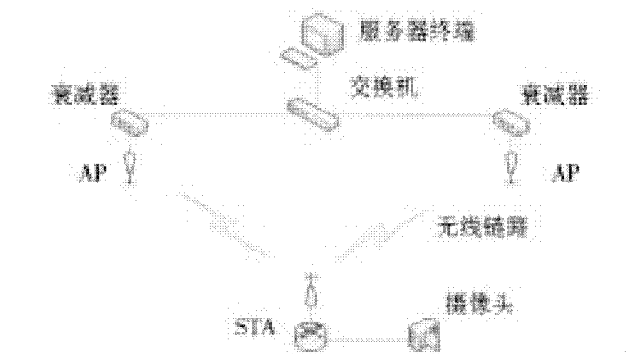


图 4 切换测试拓扑图

带宽及延时的测试如下:

1) 网卡默认的全扫描方式。在切换之前带宽稳定在 11mbps 左右,视频流畅(见图 5)。AP 之间切换时发生了数据丢失,视频中断,待 STA 与新 AP 重新建立连接后,链路状态重新稳定。

DUMETER:

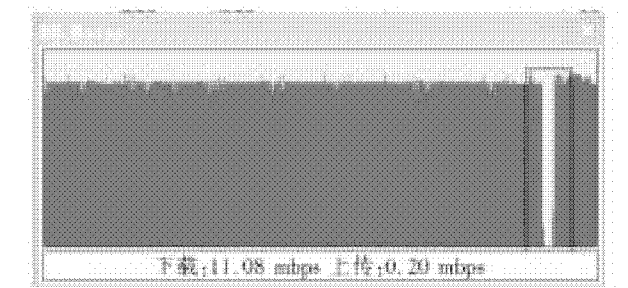


图 5 全扫描方式时的数据切换丢失

在 STA 与两 AP 切换时,链路中断的时间大约为 6s 左右,这对于快速运动的环境中会产生严重的丢包(见图 6)。

WIRESHARK:

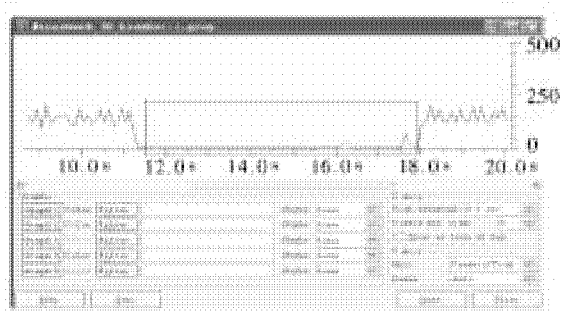


图6 全扫描方式时的链路中断时间

2) 网卡采用选择性扫描方式。在切换发生的时候,采用选择性信道扫描方式,切换中断时间明显缩小,但带宽在切换前后还是稳定在 11mbps 左右(见图7)。

DUMETER:

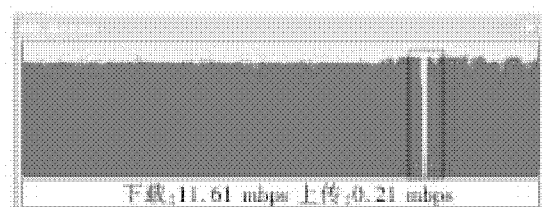


图7 选择性扫描方式时的数据切换丢失

在选择扫描性信道后,在切换时链路中断的时间明显减小,大约在 2s 左右(见图8)。

WIRESHARK:

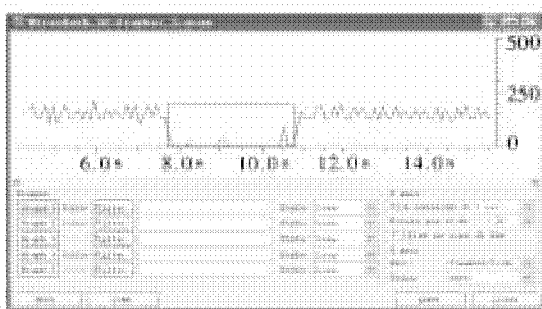


图8 选择性扫描方式时的链路中断时间

6 结束语

由仿真测试结果可知,在 STA 在 AP 间切换的时候,全扫描信道扫描 13 个信道的的时间大约为 6s 左右,进行驱动代码更改后,只进行 1 与 11 两个信

道的扫描,切换时间明显缩短,大约在 2s 左右。但 WIRESHARK 是一个网络层的软件,是通过 IP 地址来建立连接,所以在此软件中的数据中断时间包括一小部分的路由更新时间,还有认证及重关联的时间。实际切换应该比仿真测试时间还要短一些。这为有效解决高速列车的车地通信的可靠性、实时性提供了一种工作思路,但本文还没有就通信带宽的拓展等问题展开研究,这将是下一步需要重点落实的研究工作。

参考文献:

- [1] 严宏,何晨.一种无线局域网的快速安全切换方案[J].上海交通大学学报,2004,38(11):1 827-1 831.
- [2] 高杰,杨卫东.一种 WLAN 环境下新的快速安全切换方法[J].计算机与网络,2009,35(13):73-75.
- [3] 陈兵,王寿国,钱红燕. WLAN 环境下移动点切换时机选择算法[J].电子科技大学学报,2009,38(2):245-248.
- [4] 赵立芳,陈兵.高速移动环境下 IEEE 802.11 MAC 层切换方案[J].应用科学学报,2010,28(2):123-128.
- [5] MUSTAFA N, MAHMOOD W, CHAUDHRY A A. Ibrahim C M. Pre-scanning and dynamic caching for fast handoff at MAC layer in IEEE 802.11 wireless LANs [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005:122-129.
- [6] SUN H M, LIN Y H, CHEN S M, et al. Secure and fast handover scheme based on preauthentication method for 802.16/WiMAX infrastructure networks [C]//TENCON 2007, IEEE Region10 Conference, Taipei, Taiwan, 2007:1-4.
- [7] 杨仁忠,侯紫峰.基于 AP 预先转发的 802.11 无线局域网切换机制研究[J].计算机研究与发展,2004,41(8):1 376-1 381.
- [8] 蒋海林,步兵,郜春海.基于位置的 CBTC 系统无线局域网切换机制[J].铁道学报,2011,30(10):51-56.
- [9] 王新建,施化吉,陈继明.无线局域网下一种基于预处理的切换模式[J].计算机应用研究,2010,27(3):1 130-1 132.
- [10] 张辉.无线局域网技术分析及在轨道交通建设中的应用[J].铁路通信信号工程技术,2009,6(2):44-46.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

一种改进的 OFDM 系统定时估计方法

王志杨¹, 刘金龙²

(1. 安徽电子信息职业技术学院信息工程系, 安徽 蚌埠 233030; 2. 淮海工学院电子工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: OFDM 定时同步的准确性是影响 OFDM 技术使用的关键问题之一, 只有定时准确, 才能正确解调。在讨论了几种基于训练序列的符号同步方法的基础上, 分析其存在的问题, 并针对这些缺点, 提出了改进的方法。新方法采用延时相关技术, 找出训练序列前后各个部分的最大相关点, 作为 OFDM 符号的定时起点。该方法不仅消除了施密德方法的平台区, 也消除了明和朴方法的副峰, 定时更为精确。仿真的结果也表明在相同信道条件下, 新方法均方误差更小, 性能更好, 能够成为 OFDM 系统符号定时同步的满意的选择。

关键词: 均方误差; 正交频分复用; 定时估计; 训练序列; 离散傅里叶变换

中图分类号: TN914.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0050-05

An Improved Timing Estimation Method for OFDM Systems

WANG Zhi-yang¹, LIU Jin-long²

(1. Department of Information Engineering, Anhui Vocational College of Electronics and Information Technology, Bengbu Anhui 233030, China; 2. School of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang Jiangsu 222005, China)

Abstract: The accuracy of timing synchronization of OFDM is one of key problems that affect the application of OFDM technology. Only when timing synchronization is accurate can it be modulated correctly. In the paper several timing estimation methods based on training sequences were discussed, and problems analyzed. In order to overcome the disadvantages, an improved timing estimation method for OFDM system was proposed. In the new method delay correlation technology was adopted, finding out the maximum correlation point of the front and back parts of training sequences, which is treated as the beginning of OFDM timing estimation. The new method not only eliminates the plateau of Schmidl's, but also avoids subsidiary peaks of Minn's and Park's. It has a more accurate timing estimation than others. The results of simulations showed that the new method has smaller MSE and better performance than other estimators in the same channel. It can be a more favorable choice for the initial timing synchronization for OFDM system.

Key words: MSE; OFDM; timing estimation; training sequences; DFT

任何系统都需解决同步问题, OFDM 系统也不例外。OFDM 系统的同步包含符号定时同步、载波频率同步和采样时钟同步。由于样值同步对 OFDM 系统影响较小, 所以针对同步问题的研究主要集中在频率偏差和符号定时偏差对系统的影响上^[1]。

本文主要研究符号同步。符号同步是由于信

道时延的不确定性致使接收数据的起始位置的不确定而造成的。而且由于多径的存在造成前后符号之间的部分数据相互重叠, 引起了符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI)。为了得到较好的系统性能, 就必须找到正确的定时位置, 即 FFT 窗的起始位置, 以便能正确地进行 FFT 解调。在

收稿日期: 2013-03-12

基金项目: 安徽电子信息职业技术学院自然科学研究资助项目 (ADZX1007)

作者简介: 王志杨 (1982-), 男, 回族, 安徽蚌埠人, 讲师, 硕士, 研究方向: OFDM, 扩频通信, 移动通信。

OFDM 系统中有关定时的同步方法常采用基于导频符号或者训练序列的方式来实现估计^[2]。

最流行的导频方法是由文献[3]提出的。他的方法所使用的训练序列(前同步码)包含相同的两部分,分别估计符号定时和频率偏移。施密德的估计器可以对 OFDM 符号定时和载波频率偏移进行简单和鲁棒估计。可是施密德的方法的定时度量有一个平台,使得在定时估计上存在较大方差。

为了减少由于定时度量上的不确定性,文献[4-5]对施密德的方法提出了修正。明的训练序列相对于施密德的可以产生更加尖锐的定时度量和更小的方差。虽然明的估计器可以进行精确估计,但是估计的方差在 ISI 信道中相当大。

文献[6]分析了施密德方法与明方法性能不佳的原因,根据明的方法对训练序列进行了修改,提出一种新的训练序列结构,并设计了新的定时度量函数,符号同步性能有一定的提高,但仍存在多个同步尖峰的问题。

针对施密德定时度量存在平台,明和朴定时度量存在副峰,以及以上方法都存在均方误差较大的问题,本文提出一种改进的基于训练序列的定时估计方法,该方法的关键是在前半个时域内找到一个样本值及该样本值的反对称序列,复制前半个序列到后半半个时域,这个序列经过信道后,前后两个相同部分除了由频偏引起的相位差别外依然相同,所以最大相关点就是所要估计的起始点。最后的仿真也证明了新方法能克服以上方法所存在的问题,并且均方误差较小^[7-8]。

1 OFDM 定时同步方法

在介绍新方法前,先简要介绍一下流行的几种定时偏移估计方法。

1.1 施密德的方法

施密德提出的时间域训练序列形式如下

$$P_{Sch} = [A_{N/2} \quad A_{N/2}] \quad (1)$$

在构造频域训练序列时,只在偶数子载波上发送有效的数据序列,而奇数子载波上不发送信息(即发送0)。为了使训练序列具有良好的相关性,在偶数子载波上传输的是一个复 PN 序列,序列长度为 $N/2$,即为 OFDM 符号长度的一半。这样在经过 IDFT 处理之后,时域训练序列的前后两半部分是完全相同的。其中 $A_{N/2}$ 表示复伪随机序列 PN 进行 $N/2$ 点 IDFT 变换后得到的符号序列^[3]。

这种方法的定时估计是通过寻找接收信号的相关函数 $M_{Sch}(d)$ 的最大值位置点作为 OFDM 符号的起始点。假设 N 为子载波个数, L 为循环前缀长度,时域接收信号为 $r(k)$,则定时估计器的定时度量为

$$M_{Sch}(d) = \frac{|P_1(d)|^2}{(R_1(d))^2} \quad (2)$$

这里,

$$P_1(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(d+k) \cdot r(d+k+\frac{N}{2}) \quad (3)$$

$$R_1(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(d+k+\frac{N}{2})|^2 \quad (4)$$

式中: $P_1(d)$ 为窗内前 $N/2$ 和后 $N/2$ 个样点的相关运算; $R_1(d)$ 为后半半个符号的能量,用作对 $P_1(d)$ 的能量归一化。

定时度量有一个平台区,这会造成 OFDM 符号起始点的不确定性。为了减少这种效应,建议采用一种平均的方式,即将两个最大定时度量点的 90% 的平均值作为定时估计。然而该估计器的均方误差相当大。

1.2 明的方法

为了减小由于定时度量的平台所造成的不确定性,明改进了定时偏移估计。他提出了一种改进的训练序列,形式如下:

$$P_{minn} = [B_{N/4} \quad B_{N/4} \quad -B_{N/4} \quad -B_{N/4}] \quad (5)$$

这里 $B_{N/4}$ 代表一个长度为 $N/4$ 的 PN 序列进行 $N/4$ 点 IDFT 变换后得到的序列^[4]。可以看到,在训练序列的前后两半部分中引入了符号的差别。利用训练序列前后两半部分各自的相关性,符号定时度量可以表示为

$$M_{minn}(d) = \frac{|P_2(d)|^2}{(R_2(d))^2} \quad (6)$$

这里,

$$P_2(d) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(d+\frac{N}{2}m+k) r(d+\frac{N}{2}m+k+\frac{N}{4}) \quad (7)$$

$$R_2(d) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} |r(d+\frac{N}{2}m+k+\frac{N}{4})|^2 \quad (8)$$

式中: $P_2(d)$ 为窗内前 $N/2$ 个样值内,前 $N/4$ 和后 $N/4$ 个样点的相关运算与后 $N/2$ 个样值内前 $N/4$

和后 $N/4$ 个样点的相关运算之和; $R_2(d)$ 为半个 OFDM 符号的能量。

在施密德的方法中, 定时度量在循环前缀的整个时间间隔上有峰值。由于明的训练序列时域结构的特殊性, 相隔 $N/4$ 点的样点的相关值在某些位置会出现负值, 因此明的方法消除定时度量的峰值平台, 所以均方误差更小^[5]。

1.3 朴的方法

尽管明的定时度量的平台减小了, 但是从文献[5]的结果可以看到, 明的估计器的均方误差在 ISI 信道中相当大。所以为了改进估计器的性能, 需要一种方法能够扩大定时度量的峰值和其他值的差异。

观察两个相邻的定时度量值可以很清楚的发现: 除了仅有的两对结果以外, 每对结果都有相同的和。这个情况使得在峰值和随后的值的差别很微小。所以为了增大两个相邻的定时度量值的差异, 需要使不同对的和最大化。这要依靠训练序列的结构和定时度量的精确度。基于此, 朴提出一种新的训练序列和相关方法去获得一个脉冲形状的定时度量^[6]。

朴的训练序列采样点形式设计如下:

$$P_{Park} = [C_{N/4} \quad D_{N/4} \quad C_{N/4}^* \quad D_{N/4}^*] \quad (9)$$

这里 $C_{N/4}$ 代表由一个 PN 序列的 IFFT 产生的长度为 $N/4$ 的采样点, $C_{N/4}^*$ 代表 $C_{N/4}$ 的共轭。为了得到脉冲形状的定时度量, $D_{N/4}$ 被设计成 $C_{N/4}$ 的对称, 即

$$C(n) = D^*(N/4 + 1 - n) \quad 1 \leq n \leq N/4 \quad (10)$$

通过使用 FFT 的性质, 这种序列模式很容易获得。通过在偶数频率上传输实值 PN 序列, 在奇数频率上传零就可以获得训练序列。这意味着 BPSK 星座点之一在每个偶数频率上都被传输。于是 IFFT 的结果将产生式 (9) 的时域序列。

利用性质 $D_{N/4}$ 是 $C_{N/4}$ 的对称, 定义一个新的定时度量如下:

$$M_{Park}(d) = \frac{|P_3(d)|^2}{(R_3(d))^2} \quad (11)$$

这里,

$$P_3(d) = \sum_{k=0}^{N/2} r(d-k) \cdot r(d+k) \quad (12)$$

$$R_3(d) = \sum_{k=0}^{N/2} |r(d+k)|^2 \quad (13)$$

从图 1 中可以明显的看出朴的方法中, $P_3(d)$ 与 $P_3(d+1)$ 中所有的相关项都完全不同, 可以证明 $P_3(d)$ 是最大的值。因此定时度量函数在正确的符号定时位置能够产生一个尖峰。

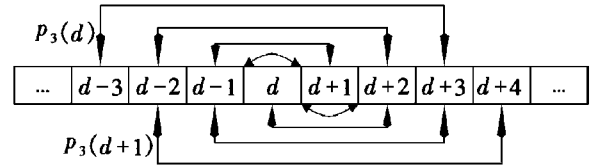
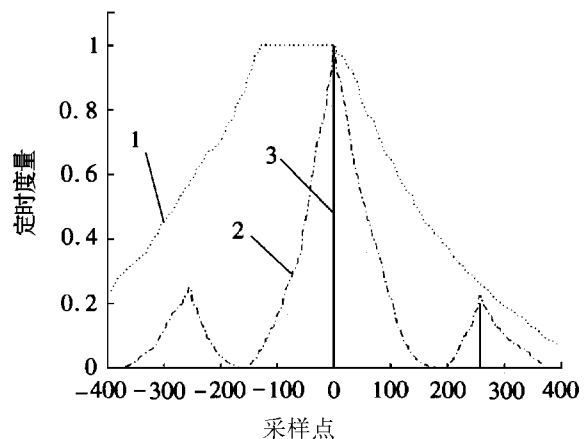


图 1 朴方法中的 $P_3(d)$ 求和结构示意图

图 2 展示了一个在没有噪声、没有信道失真下的三种定时度量的例子。共 1 024 个载波和 128 点的循环前缀。正确的定时点在图中被编号 0。正如图 2 所示, 施密德的方法在整个循环前缀的间隔里产生了平台区。明的方法的定时度量减小了平台, 并产生了一个尖锐的定时度量。朴的方法有一个脉冲形状的定时度量, 依靠它实现更精确的定时偏移估计。但是明和朴的方法都有副峰。



1. 施密德的方法; 2. 明的方法; 3. 朴的方法

图 2 估计器定时度量比较

2 改进的符号定时方法

在已有的方法的基础上, 改进的方法对 OFDM 的训练序列重新进行设计。采用延时相关的方法, 通过找出前后各个部分的最大相关点, 把其作为 OFDM 符号的起始点。方法的关键是在前半时域内找到一个样本值及该样本值的反对称序列, 复制前半序列到后半时域, 这个序列经过信道后, 前后两个相同部分除了由频偏引起的相位差别外依然相同, 所以最大相关点就是所要估计的起始点。

训练序列形式设计如下:

$$P_{pro} = [-K_{N/4} \quad J_{N/4} \quad -K_{N/4} \quad J_{N/4}] \quad (14)$$

式中: $K_{N/4}$ 为 $N/4$ 点时域 PN 序列; $J_{N/4}$ 为 $K_{N/4}$ 对称序列; N 为子载波数目。

$K_{N/4}$ 也是通过在频域上的偶数频率点上传输一个 QPSK 的符号,而在奇数频率点上不传输信号,经过 IFFT 变换,可以得到具有 P_{pro} 特性的训练序列。定义该方法的定时度量为

$$M_{Pro}(d) = \frac{|P_4(d)|^2}{(R_4(d))^2} \quad (15)$$

$$P_4(d) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(d + \frac{N}{2}m + k)r(d + \frac{N}{2}(m+1) - k) + \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(d + \frac{N}{2}m + k)r(d + \frac{N}{2}m - k) + \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(d + \frac{N}{4}m + k)r(d + \frac{N}{4}(m+2) + k) \quad (16)$$

$$R_4(d) = 6 \sum_{k=0}^{N/4-1} |r(d + \frac{N}{2} + k)|^2 \quad (17)$$

在与图 2 相同的信道条件下,也采用 1 024 个载波和 128 点的循环前缀,对改进的方法进行仿真,结果如图 3 所示。

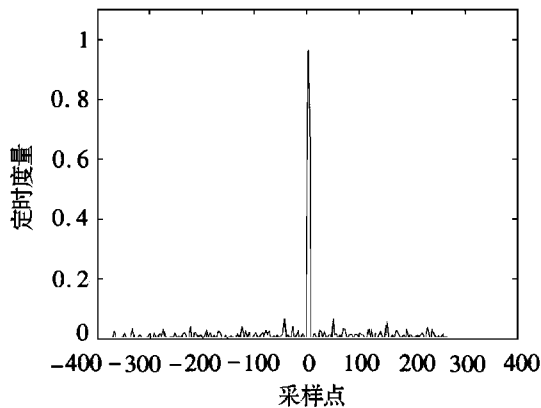


图 3 改进的定时同步方法的定时度量曲线

从图 3 中可以看到,改进的定时同步方法消除了明和朴方法中的副峰值,通过对训练序列相关性进行处理,使其在正确定时点具有比较尖锐的相关峰。这是由于定时度量式(15)在训练序列的各个点均进行了相关运算,消除了不正确定时点的累加峰值,所以新方法不仅能够准确地找出正确定时点的位置,而且具有更高的定时精度^[9]。

3 仿真及性能对比

对改进方法的均方误差-信噪比进行仿真,并与前几种方法进行比较,OFDM 系统仿真参数为子载波数 1 024,循环前缀 128 点,采用 QPSK 映射方

式,分别在 AWGN 信道和多径信道下仿真均方误差曲线(见图 4~图 5)。

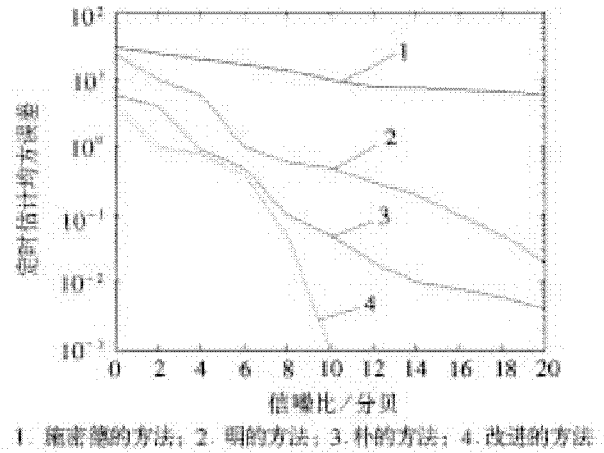


图 4 AWGN 信道下定时估计均方误差比较图

从图 4 中可以看出,随着信噪比的增加,施密德、明和朴的定时估计方差都有所下降,但改善并不明显,均方误差仍较大。施密德的方法存在着一个门限效应,当信噪比大于 10 分贝时,均方误差几乎不再随信噪比的提高而下降。而改进的方法在 AWGN 信道下,信噪比大于 10 分贝情况下均方误差几乎接近于 0。

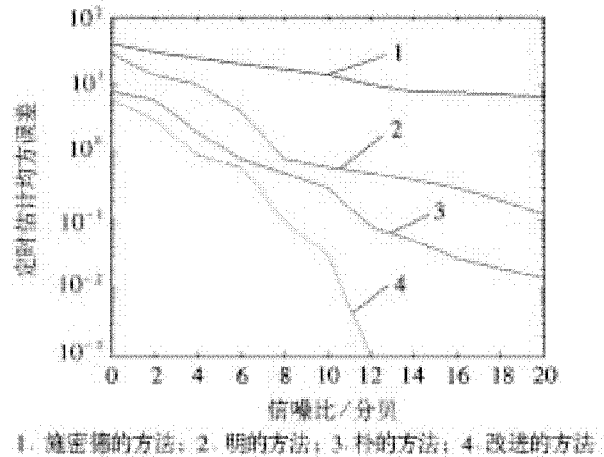


图 5 多径信道下定时估计均方误差比较图

从图 5 中可以看出,在多径信道下,这几种方法的均方误差较 AWGN 信道下有一定的恶化,但改进的方法均方误差明显优于其他三种方法^[10]。

4 结论

通过对一系列基于训练序列的符号同步方法展开讨论,深入研究了前人的工作,发现了前人方法中的一些不足,并针对这些缺点,提出了改进方

法。新方法不仅消除了施密德方法的平台区,也消除了明和朴方法的副峰。仿真的结果也表明在相同信道条件下,新方法均方误差更小,性能更好,能够成为 OFDM 系统符号定时同步的满意的选择。

参考文献:

- [1] 尹长川,罗涛,乐光新.多载波宽带无线通信技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2006:118-139.
- [2] J J VAN DE BEEK, M SANDELL, P O Borjesson. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems [J]. IEEE Trans. Signal Processing, Aug. 1997, vol. 43: 761-766.
- [3] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions, Dec. 1997, Volume 45, Issue 12: 1 613-1 621.
- [4] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On timing offset estimation for OFDM systems [J]. IEEE Transactions, July 2000, Volume 4, Issue 7: 242-244.
- [5] MINN H, BHARGAVA V K, LETAIEF K B. A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems [J]. IEEE Transactions, Jul 2003, Volume 2, Issue 4: 822-839.
- [6] BYUNGJOON PARK, HYUNSOO CHEON, CHANGEON KANG, et al. A novel timing estimation method for OFDM systems [J]. IEEE Transactions, May 2008, Volume 7, Issue 5: 239-241.
- [7] 王文博,郑侃.宽带无线通信 OFDM 技术[M].北京:人民邮电出版社,2006:108-110.
- [8] 石峰,王晨,周柱.一种新的基于重复共轭对称构前导的 OFDM 同步算法[J].国防科技大学学报,2010,32(3):103-108.
- [9] 李旭,曹磊,刘桓.一种在 OFDM 系统中同步训练序列结构优化方法[J].北京交通大学学报,2010,34(2):24-25.
- [10] 李艳苹,张礼勇.新训练序列下的改进 OFDM 符号定时算法[J].哈尔滨理工大学学报:自然科学版,2012,17(2):19-21.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

(上接第 14 页)

- [4] 刘艳华,车得福,徐通模.利用 X 射线光电子能谱确定煤及其残焦中硫的形态[J].西安交通大学学报,2004,38(1):101-104.
- [5] 常海洲,王传格,曾凡桂,等.不同还原程度煤显微组分表面结构 XPS 对比分析[J].燃料化学学报,2006,34(4):389-394.
- [6] 赵鹏,史士东.用 XPS 研究胜利褐煤中有机氧的赋存形态[J].煤炭科学技术,2004(7)32:51-52.
- [7] 杨志远,周安宁,张泓,等.神府煤不同密度级组分光催化氧化的 XPS 研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):98-103.
- [8] 段旭琴,王祖讷.煤显微组分表面含氧官能团的 XPS 分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2010,29(3):498-501.
- [9] 俞宏坤.X 射线光电子能谱(XPS)[J].上海计量测试,2003,30(4):45-47.
- [10] 陈鹏.用 XPS 研究兖州煤各显微组分中有机硫存在形态[J].燃料化学学报,1997,25(3):238-241.
- [11] 朱应军,郑明东.炼焦用精煤中硫形态的 XPS 分析方法研究[J].选煤技术,2010,38(3):55-57.

(责任编辑:李 丽,范 君)

基于 LabVIEW 和物联网的分布式家庭智能监控系统

杨洪涛, 牛明强, 王岚晶

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为了解决现有家庭监控系统的不足, 基于 ZigBee 无线自组网技术, 利用“软件代替硬件”的设计理念, 设计了一种分布式家庭智能监控系统。该系统以采用 CC2530 作为主控芯片, 选择合适的硬件设计了用于门窗防盗、视频监控、温湿度监控、智能控制和 USB 数据传输的接收机等模块, 编制了相应的下位机监控程序, 利用 LabVIEW 软件开发了上位机网络远程智能监控软件。该系统硬件安装在现场, 通过运行上述监控软件和无线通讯, 可以实现燃气浓度、温湿度、门窗状态的实时监测、视频实时监控和数据的无线传输, 并可以实现通过互联网通信进行远程监控。通过实验测试可知, 该系统还可以实现现场报警、历史记录存储和远程网络智能监控等功能, 具有体积小、成本低、无需开槽安装、便于扩展、智能化程度高和性能稳定可靠等优点。

关键词: 分布式系统; ZigBee; LabVIEW; 智能控制; 远程监控

中图分类号: TP391.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0055-07

Home Distributed Intelligent Monitoring System Based on LabVIEW and Internet of Things

YANG Hong-tao, NIU Ming-qiang, WANG Lan-jing

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

Abstract: In order to solve the shortage of the existing home monitoring systems, a distributed intelligent monitoring system is designed based on ZigBee wireless and hoc network technique and the design concept of software replacing hardware. CC2530 was selected as master control chip in this system, and other appropriate hardware were chosen to design function modules, which include doors and windows monitoring module, video monitoring module, temperature and humidity monitoring module, intelligent control module and USB data transmission module and so on. The network remote intelligent monitoring software operating in upper computer was developed based on LabVIEW, and the corresponding monitoring program operating in slave computer was also developed. When the hardware of this system was installed in the field, the video real-time monitoring data and the data of gas density, temperature and humidity, doors and windows state were acquired by the above monitoring software and function modules and were transmitted to the PC through wireless communication and USB interface. All function modules and the operating states could be monitored and controlled by using the Internet communication. The experiment results showed that the functions of field alarming, historical records storing and remote network intelligent monitoring can be achieved effectively by using this system. The designed system has other advantages, including small volume, low cost, no groove installation, easy to expand, high intelligent degree, stable and reliable performance and so on.

Key words: Distributed system; ZigBee; LabVIEW; Intelligent control; remote monitoring

随着生活水平的不断发展和电子信息技术的不断进步,越来越多的家庭开始使用家庭监控系统对家里的情况进行监控。目前市场上主流的家庭监控系统可以根据处理器的不同分成两部分,一种是以普通单片机为处理机的监控系统^[1],如国产的家庭店铺防盗有线红外探测器报警系统 KS-300DLT/KB-A130 和科立信 KS-518 家用家庭店铺门面仓库红外防盗系统等。该类系统以 MCS-51 单片机作为处理机,存在功能单一,智能化程度低,难以根据用户的不同需求进行灵活的调整和升级改造。另一种是以 ARM 等嵌入式系统为中央处理机,利用 Linux 等软件平台开发监控系统,实现对家庭各项情况的监控,如美国 ACETOOL 硬盘录像机系统和国产星网锐捷安星工程监控系统。该类系统由于需要不同的模块安装于家中不同的位置完成监控,很多系统需要开槽完成布线,导致安装不方便,配置成本高。部分使用无线传输的系统存在无法根据用户需求,自由添加或拆除监控模

块的问题^[2-3]。由于有监控需求的家庭大都购买了电脑和安装了家庭宽带,现有的家庭监控系统很少利用该资源对功能进行扩展,实现基于网络的远程监控。因此本文利用 LabVIEW 软件开发监控软件,应用单片机和物联网技术,充分利用家庭现有电脑和宽带网络资源,设计了一种分布式家庭智能监控系统,可以实现体积小型化、信号无线远距离传输、便于扩展和基于网络的远程智能监控等功能。

1 系统的结构和工作原理

分布式家庭智能监控系统是由各个功能模块、接收机模块、PC 机、远程监控软件组成(见图 1)。其中各个功能模块主要包括用于门窗防盗的热释电感应模块,光幕传感器模块和视频模块,用于监测家庭温湿度的温度、湿度检测模块,用于监控泄漏的燃气检测模块和执行控制命令的反馈控制模块^[4]。

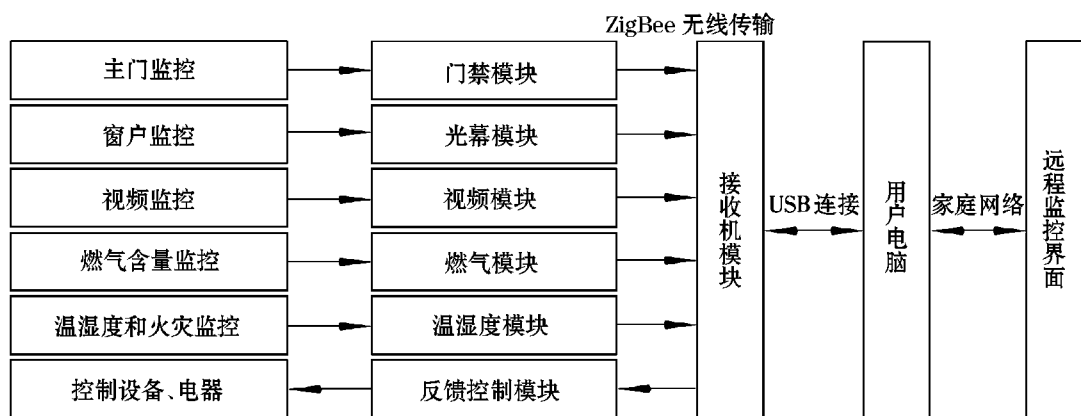


图 1 系统组成框图

各个功能模块以单片机为核心处理器,安装在合适的监控位置上,实现对燃气浓度、门窗安防情况、视频图像、各个房间的温湿度等进行实时采集、处理以及现场显示和报警。所采集的信号通过物联网无线技术,发送给接收机模块,因此各功能模块与接收机之间无需开槽布线安装传输信号。同时采用 ZigBee 自组网技术实现各功能模块的自由扩充,最多可以扩展至 256 个功能模块,满足一般家庭的监控需要。接收机所接收的数据通过 USB 接口传输给 PC 机,在 LabVIEW 开发的智能监控软件实时显示、报警和控制,同时可以利用互联网远程登陆进行实时监控。

2 硬件模块的设计

分布式家庭智能监控系统的硬件模块包括反馈控制模块、燃气监控模块、视频模块、温湿度检测模块、门禁监测模块和接收机模块(见图 2)。所有模块以支持 ZigBee 协议的 CC2530 芯片为核心芯片。CC2530 芯片具备 MCS-51 内核、EEPROM、非易失性存储器和多种 IO 接口,可以完成普通单片机的所有工作,包括采集和转换、驱动控制模块完成相关的动作和进行复杂的逻辑处理。在 ZigBee 网络中通讯时,CC2530 芯片仅使用片内的无线收发组件就能完成所有有关 ZigBee 网络传输的工作。因此利用 CC2530 芯片可以完成所有测控

功能,设计的模块体积小,容易安装。所有功能模块都通过市电电源和干电池共同供电,在市电断电

时自动切换至电池供电,避免了发生断电时监控系统不能继续工作的情况^[5-7]。

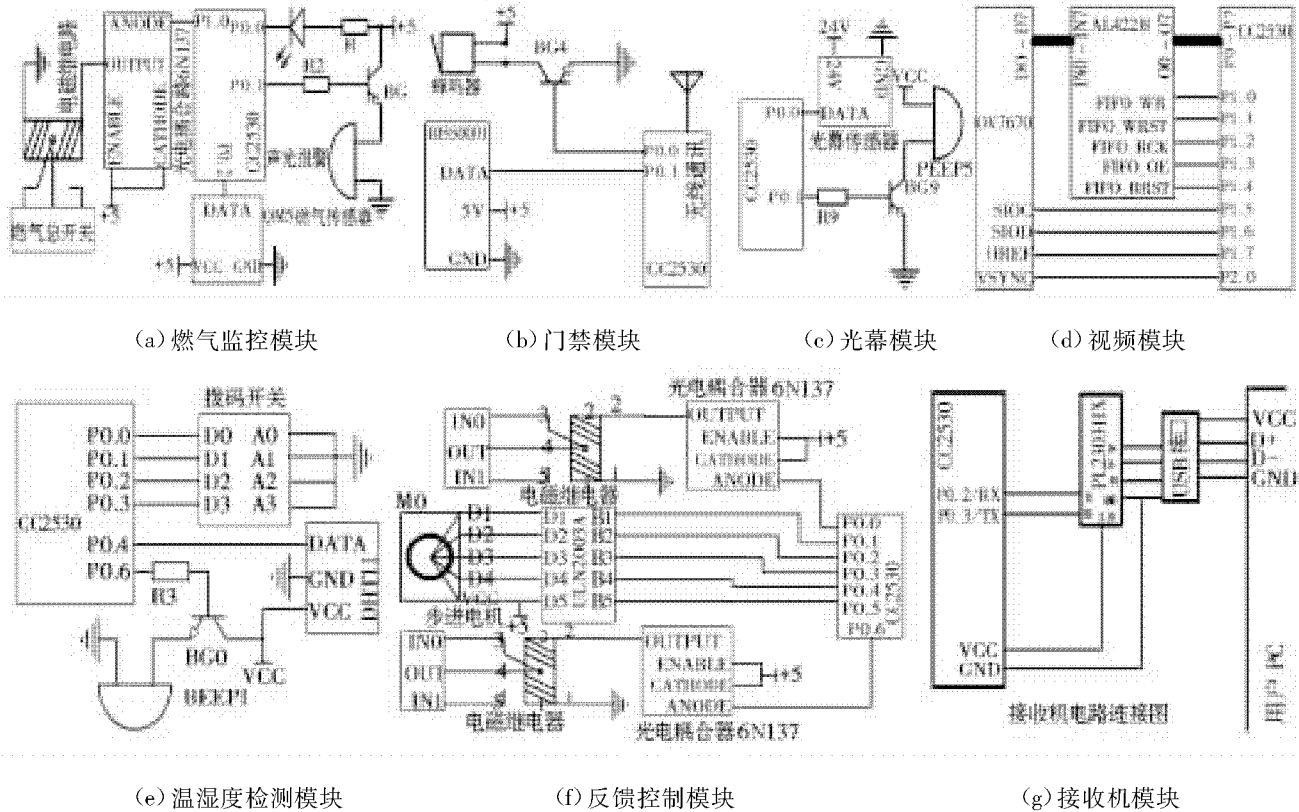


图2 功能模块的电路图

燃气监控模块主要由核心芯片、燃气传感器QM5、光电耦合器6N137、控制燃气总开关的电磁阀门和声光报警装置组成(见图2a)。主要安装于厨房中检测燃气含量,燃气传感器会不断将采集到的燃气浓度数据传输给核心芯片。当燃气浓度超过设定值时,燃气模块会发出报警信号并关闭电磁阀门以切断燃气来源,并通过无线网络控制反馈控制模块开启排风扇排气。其中的光电耦合器6N137用于放大芯片发出的控制信号,并隔离电磁阀门的脉冲电压保护核心芯片不会损坏。

红外线监控模块包括门禁监测模块和监测窗户的光幕模块,其中门禁模块主要安装于主门上,用于监控人员通过情况,模块由核心芯片、热释电红外线传感器BISS0001和报警装置组成(见图2b~图2c)。如果有人通过主门,红外线传感器会检测到人体发出的红外线并报告给单片机,进而发出警报,并通过无线网络传输给上位机。光幕模块主要安装于窗户两侧以检测是否有人破窗入室,模块由光幕传感器和声光报警装置组成。光幕传感器通过对射的红外线对窗户进行监控,当发生破窗进入室内时,红外线会被挡住而引起监控模块的报警。

视频采集模块用于拍摄家中关键区域的图像,主要包括OV7670摄像头及处理电路(见图2d),可以拍摄640×480分辨率图像,并通过ZigBee网络发送给上位机。其中AL422B芯片用于缓存一张完整照片的信息,以解决高速摄像头的IO口与低速无线网络之间的速度不匹配问题,保证图像能被正确采集到有足够的时间传输。

温湿度检测模块用于检测用户家中各个房间的温度和湿度,并判断家中是否发生了火灾,DHT11是温湿度传感器(见图2e)。由于在同一个监控系统中往往会有多个房间同时监控,因此利用设置拨码开关识别编码附加在通讯信号中以区分不同房间的温湿度数据。当模块检测到过高的温度时会认定为发生火灾而报警。

反馈控制模块主要由核心芯片、电磁继电器、步进电机、放大芯片ULN2003A和光电耦合器6N137组成(见图2f)。其中核心芯片CC2530接收从上位机发出的控制指令信息并进行分析,然后控制相应的步进电机和电磁继电器完成相应的动作。图2f中的ULN2003芯片用于将核心芯片发出的微弱电平信号放大以驱动步进电机,光电耦合器

用于放大电信号驱动电磁继电器。这里步进电机可以进行行程控制如打开或关闭用户的家中窗帘,百叶窗或自动衣架等设施。电磁继电器用于控制用户家中的电器如排风扇、电灯、空调或电加热设备等。

接收机模块电路用于接收从各个功能模块发出的数据信息(见图2g),并通过USB接口传输给上位机,还可将上位机发出的指令通过ZigBee网络发送给指定的模块。图2g中PL2303芯片用于将CC2530的串口信号转变成USB通讯信号传输给上位机,接收机模块由电脑USB接口直接供电,利用CC2530芯片组建的ZigBee智能网络系统可以不间断搜索新加入的功能模块,自动配置模块并建立专用数据通道。

3 软件设计与实现

3.1 上位机监控软件

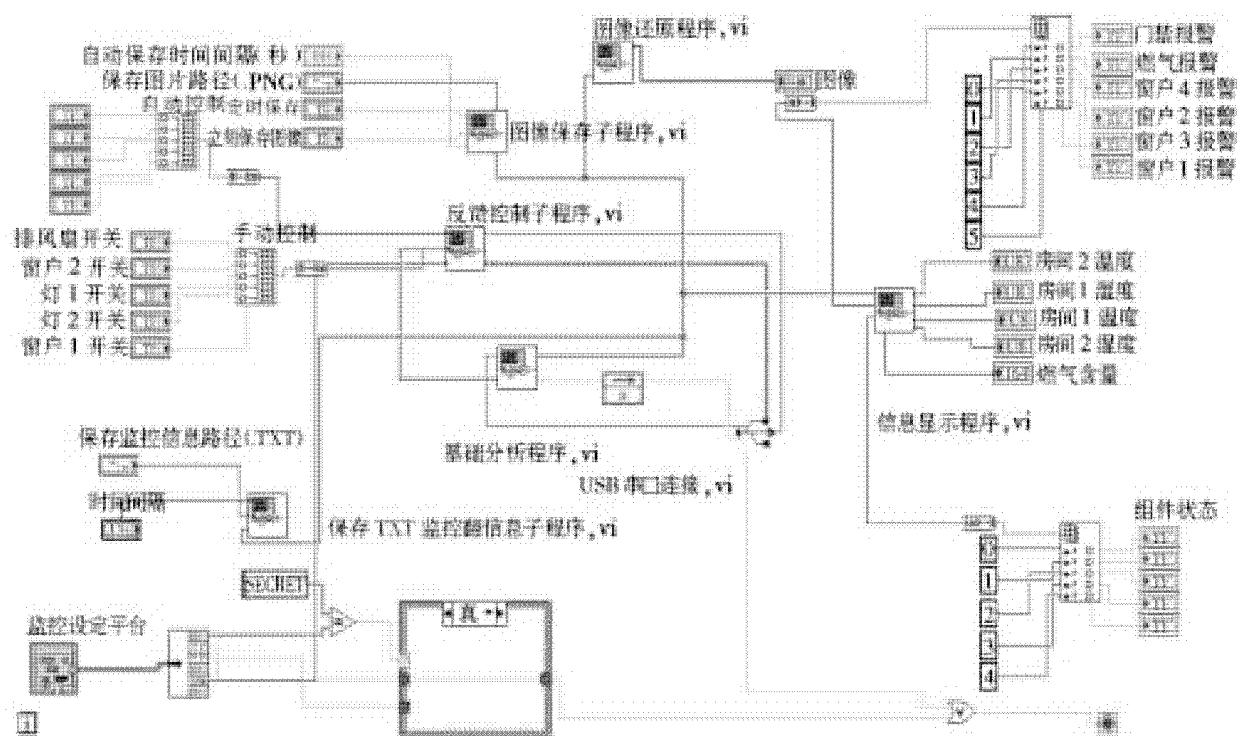
分布式家庭智能监控系统上位机监控软件是利用LabVIEW平台编程开发的,在用户电脑上运行,用于将接收机通过USB接口传输来的各种数据进行汇总分析,在监控主界面上显示、保存和进行逻辑

判断,并根据用户的指令和逻辑判断结果发出反馈控制指令。该软件创建一个远程监控平台,允许用户通过互联网远程登录访问,实现实时监控。

监控软件主界面如图3所示,图3a为上位机监控界面,不仅显示各功能模块所采集到的视频图像、燃气浓度及报警情况、门窗监控情况和各个房间的温湿度值,还可以实现对家里的排风扇、灯开关和窗帘等设备进行控制。主监控软件可以实现利用密码设置进行系统的布防和撤防,开启或关闭声光报警。还能定时进行所采集的历史数据保存,便于用户查询。图3b为LabVIEW监控软件的程序,其中USB连接程序用于读取接收机传输来的各路功能模块数据,并将控制指令发送给接收机。该软件用于对接收到的数据进行逻辑判断和自动发出反馈指令,协调其余各个功能模块的工作,并根据ZigBee模块的组成自动区分判断每一路输入、输出的信号,正确处理各路信号。监控系统的远程监控功能是利用LabVIEW软件中的Web发布工具完成的。该发布工具能够创建一个用户定义的网址,并将监控界面链接到该网页上。用户在户外时,通过联网连接到监控界面,并进行实时控制,从而实现远程登录和实时监控的功能^[8-9]。



(a) 监控系统前面板



(b) 程序框图

图3 监控系统前面板和程序框图

3.2 功能模块下位机程序设计

各功能模块下位机程序主要为烧录在 CC2530 中的嵌入式程序, 括一个多任务系统、IO 扩展单元程序、ZigBee 通讯程序、传感器的初始化程序、执行程序和分析处理程序组成 (见图 4)。

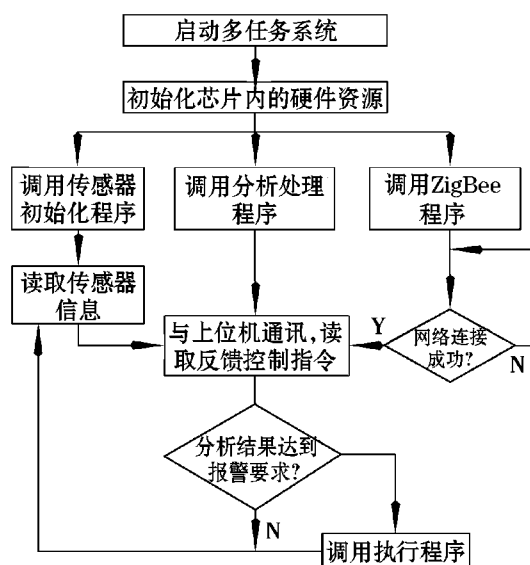


图4 下位机程序的主要结构示意图

当 CC2530 芯片启动时, 首先启动多任务系统, 多任务系统会初始化所有芯片内的硬件资源, 然后调用传感器初始化程序、分析处理程序和 Zig-

Bee 通讯程序。其中 ZigBee 通讯程序用于连接无线网络, 与上位机通讯, 如果网络连接失败, 系统会重新尝试连接网络直到网络连接成功。分析处理程序用于对从传感器采集到的数据进行分析 and 判断, 并接收从上位机发送来的反馈控制指令信息。如果分析结果符合报警要求或接收到了反馈控制指令, 系统会调用执行程序完成声光报警和反馈控制操作。在完成操作后系统重新分析传感器的数据和与上位机通讯, 重新循环。

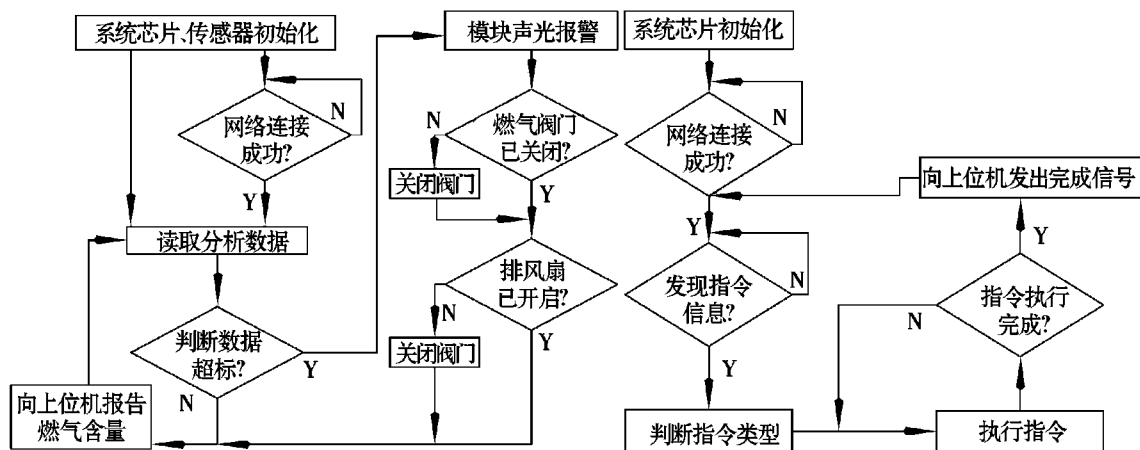
3.2.1 燃气模块软件的工作流程 燃气模块软件流程如图 5a 所示, 在模块上电初始化芯片后, 同时尝试连接网络和初始化燃气传感器并读取相应的值, 当 ZigBee 网络连接失败时模块会继续尝试重新连接。将读取出的燃气含量与设定的值进行比较, 判断燃气含量是否超出了标准, 如果燃气含量没有超标, 模块会延时并再次读取燃气含量, 并实时将燃气含量传输给上位机; 如果燃气含量超出标准, 模块会自动将报警信息发送给接收机模块并自动执行报警、关闭燃气阀门和启动排气扇的动作。接收机主芯片在接收到报警信息后, 通过 PL2303HX 芯片将信息通过 USB 口传输输入上位机软件中, 被上位机软件中的基础程序分析后在监控界面上显示报警信息。

3.2.2 反馈控制系统工作流程 反馈控制模块的

运行流程如图5b所示,模块上电初始化后首先尝试连接网络,如果连网成功,模块会不断检索从主机发送来的信息,如果检测到合法的指令信息,就分析其中的内容并将信息转换为步进电机的转动或电磁继电器的动作。当一系列的动作执行完成后,模块主动向上位机发送完成信号,并重新检索新指令,上位机可以通过完成指令的信息判断指令是否已经被成功执行。

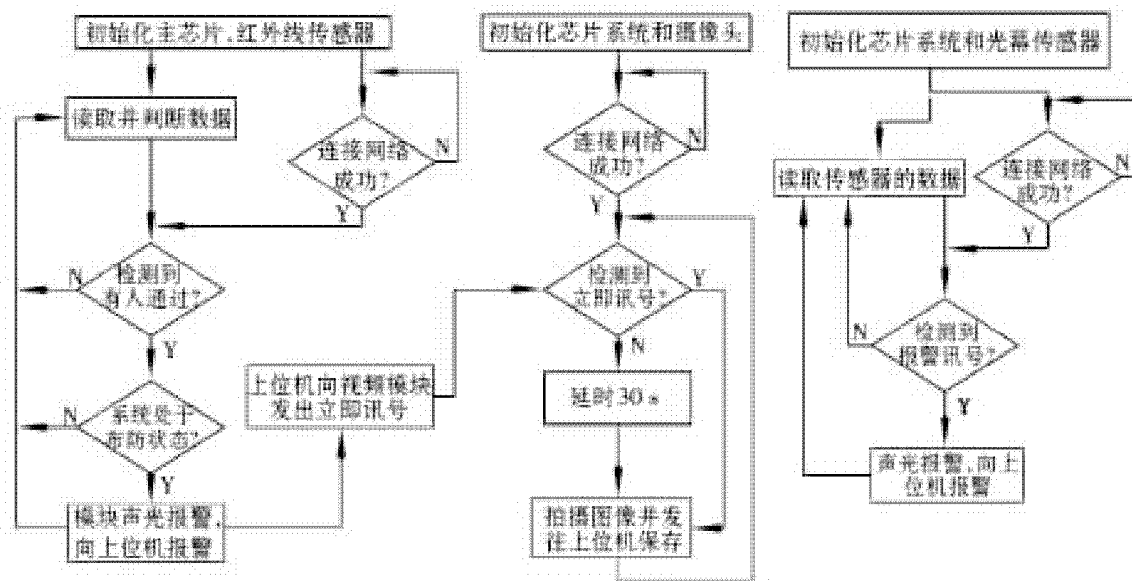
3.2.3 安防系统的工作流程 安防系统中包含红外线门禁模块、光幕模块、温湿度检测模块和视频模块,其主要运行流程如图5c所示。所有模块在完成初始化后都会自动搜索 ZigBee 网络。其中门

禁模块和光幕模块中的核心芯片不断检测传感器传输来的数据,并实时报告给上位机。视频模块每隔30s中自动拍摄一张图像并发往上位机保存。当门禁模块的红外线传感器检测到有人通过主门时,系统还会自动过检测系统状态,如果设定为布防状态,门禁模块会发出声光报警并向上位机传输指令,电脑在接受到报警信息后会向视频模块发出一个立即指令,视频模块则立刻拍摄主门的图像后传输给上位机并保存。光幕模块在发生破窗入室时报警,温湿度模块实时检测家中的温湿度并判断家中是否发生火灾,其工作流程与光幕模块类似,这里不再赘述。



(a) 燃气监控流程图

(b) 反馈控制监控流程图



(c) 安防系统的监控流程图

图5 模块的工作流程图

4 实验和结论

为了验证所设计的分布式家庭智能监控系统的有效性,将本所设计的系统应用于家庭实际检测环境中,人为设置各种场景,进行实时检测(见图6)。从图6的监控界面中可以看出,监控软件实时显示了从各个功能模块采集传送来的信息,包括燃气浓

度、不同房间的温度和湿度、视频模块采集到的图像。对相关模块的各种功能的测试中,燃气报警器、窗户报警器和门禁报警成功,并被上位机接收到,及时显示在界面上。从图6上的组件状态中的排风扇开关、灯开关和窗帘开关状态可知,所设计的相应控制系统实时动作,进行了正确的处理。整个监控系统运行正常稳定,达到了设计效果。



图6 监控实验结果

5 结束语

本文设计的分布式家庭智能监控系统以 ZigBee 物联网技术为基础,以用户电脑、互联网为基本平台,利用“软件代替硬件”的设计理念,采用 CC2530 作为主控芯片,开发各种功能模块,利用 LabVIEW 软件开发监控软件,实现燃气浓度、温湿度检测、门窗监控、视频监控、数据无线传输、智能控制、现场报警、历史记录存储和远程网络智能监控等功能,具有体积小、成本低、无需开槽安装、便于扩展、远程监控、智能化程度高和性能稳定可靠等特点,具有较高的应用价值和良好的市场前景。

参考文献:

- [1] 段晓雪,景新幸,赵家友. 基于单片机的智能家庭信息传输与安全防范系统[J]. 电讯技术,2000(6): 36-38.
- [2] 黄理军,郭焕银. 基于 ARM 和 Linux 智能家居安防系统之视频设计[J]. 宿州学院学报,2009,24(3):79-80.
- [3] 杨靖,林益,李捍东. 基于 ARM 和 WSNS 的智能家居安防系统设计[J]. 自动化仪表,2012(3):37-40.
- [4] 周游,方滨,王普. 基于 ZigBee 技术的智能家居无线网络系统[J]. 自动化与仪器仪表,2005(9):37-40.
- [5] 兰西柱,李海鹏,颜文婧. 基于 ZigBee 的高压开关柜无线测温系统的设计[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2011(3):45-50.
- [6] 刘礼建,张广明. 基于 ZigBee 无线技术的智能家居管理系统设计[J]. 计算机技术与发展,2011(12):251-252.
- [7] 裘超,孟宪超,常帅. 基于 ZigBee 的智能家居系统[J]. 电子设计工程,2011(11):14-17.
- [8] 王旭升. 基于 ZigBee 的智能建筑灯光控制系统设计[J]. 机电工程技术,2011(12):22-25.
- [9] 翟燕磊,陈磊,何祥宇. 基于 LabVIEW 的远程家庭监控系统设计[J]. 电子测试,2010(6):37-40.

(责任编辑:何学华,范 君)

煤样粒径对煤低温氧化影响的实验研究

张树川^{1,2}

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

摘要: 基于测试耗氧速率和氧化动力学参数研究煤样粒径对煤低温氧化的影响。利用煤低温氧化测试系统, 测算在供应气体流量、氧含量等给定条件下四类不同粒径范围煤样升温氧化耗氧速率, 同时依据基于耗氧量建立的数学模型来测算煤低温氧化时不同粒径煤样活化能和指前因子等动力学参数, 结果表明不同粒径煤样低温氧化耗氧速率变化分为缓慢耗氧、浅度耗氧和深度耗氧等三个阶段, 在实验条件下煤样粒径小于 0.198 mm 的煤样更适合煤低温氧化。

关键词: 煤低温氧化; 煤样粒径; 耗氧速率; 活化能; 指前因子

中图分类号: TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0062-05

Study on Influence of Coal Particle Size on Low Temperature Oxidation of Coal

ZHANG Shu - chuan^{1, 2}

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

Abstract: Influence of coal particle size on low temperature oxidation of coal was studied by means of testing the rate of oxygen consumption and kinetics parameters. In the paper coal low - temperature oxidation test system was used to estimate the oxygen consumption rate of low temperature oxidation of 4 coal samples with different particle size range under the given conditions of gas flow supply and oxygen content. Based on the mathematical model of oxygen consumption to measure the kinetic parameters including activation energy and pre - exponential factor of the different particle size of coal during low temperature oxidation. The results showed that oxygen consumption rate in low temperature oxidation of coal samples with different particle size can divided into three stages as slow, small and intensive oxygen consumption. Under the experimental conditions coal sample of less than 0.198 mm particle size is more suitable for low temperature coal oxidation.

Key words: low temperature oxidation of coal; particle size; oxygen consumption rate; activation energy; preexponential factor

在煤层开采过程中, 我国大约有 50% 的矿井存在自然发火的危险^[1], 据对我国 84 个矿务局煤矿的统计, 由煤自燃引起煤矿井下火灾约占煤矿井下火灾的 70%^[2]。煤自燃的发生和发展是一个极其复杂的动态物理化学过程, 该过程由煤体内在自

燃性和外界条件共同决定, 是煤体与空气中的氧接触发生煤氧复合反应, 放出的热量聚积使煤体温度升高发生热着火的过程, 煤氧复合主要经历三个阶段, 分别为物理吸附, 化学吸附和化学反应阶段^[3-4]。煤低温氧化可导致煤的自燃^[5]。

煤氧复合及热效应是导致煤自燃过程发展的最主要因素。煤自燃难易程度可以通过煤氧复合反应速率来反映,煤氧复合速率越大,表明煤氧复合反应越剧烈。煤氧复合反应速率通常用单位时间内单位体积煤样消耗的氧气来表示,其主要与煤样的粒径分布、供应气体流量及供应气体中氧气浓度、环境温度、煤化学结构等因素有关^[6-10]。本文主要考察在供应气体流量、氧浓度等给定条件下四类不同粒径煤样升温氧化耗氧速率,利用基于耗氧

量建立的数学模型来测定煤升温氧化时不同粒径煤样活化能和指前因子等参数,从而确定在此实验条件下最适合煤低温氧化的煤样粒径。

1 实验测试系统

本次实验的测试系统主要包括供氧系统、煤低温氧化反应装置和气体分析装置等三部分组成(见图1)。

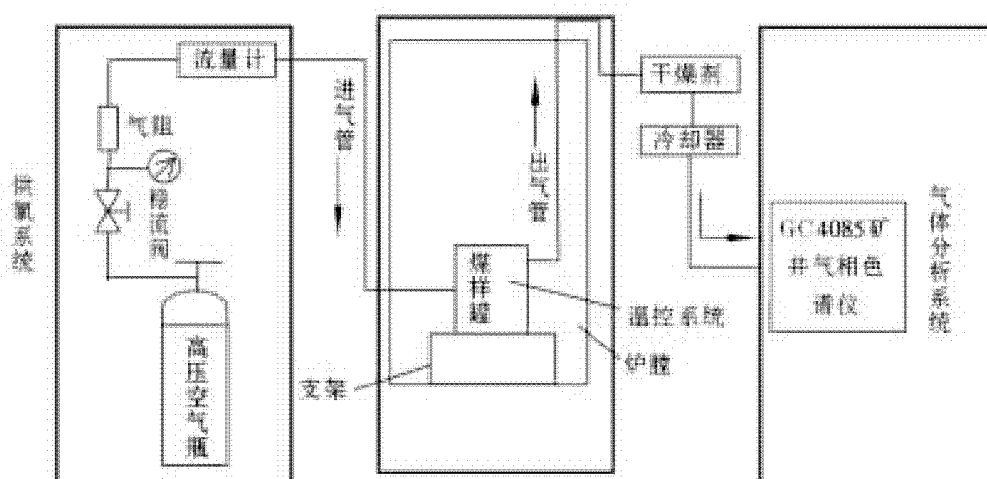


图1 煤低温氧化测试系统

供氧系统由高压空气瓶和管路构成,氧气通过稳压阀、流量传感器和管路进入氧化炉。煤低温氧化反应装置是安徽理工大学自主研制开发的实验设备(见图2),该装置主要包括程序控温炉、煤样罐、温度测量、显示和控制系统、流量传感器及气路系统稳压、稳流等部分。气体分析装置采用北京东西电子GC4085矿用气相色谱仪(见图3),该色谱仪由热导检测器(TCD)、甲烷转化装置及柱预切换系统、气路控制系统和电气测量系统及自动进样阀组成,其中TCD检测器分析氧气精度为0.01%。实验测试系统具有自动化控制程度高,测试数据精确等相关优点^[11]。

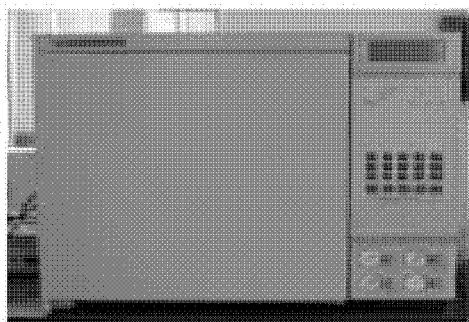


图2 煤低温氧化反应装置

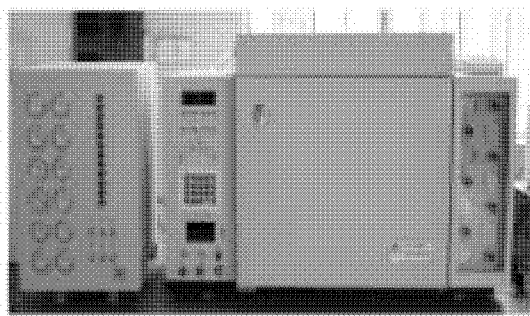


图3 GC4085气相色谱仪

2 测试参数模型

假定煤氧复合反应是一级反应,煤低温氧化耗氧速率与温度关系可用阿伦尼乌斯定律表示,即

$$\frac{d_c}{d_t} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C \quad (1)$$

式中: C 为低温氧化装置出口氧气体积浓度,%; t 为反应时间, s; A 为指前因子, s^{-1} ; E 为活化能, $kJ \cdot mol^{-1}$; T 为煤样绝对温度, K; R 为通用气体常数, $8.314 J/(k \cdot mol)$ 。

根据各种粒径煤样在不同温度时氧气浓度变化,可求得煤样在新鲜风流耗氧速率

$$V_0(T) = \frac{QC_0}{V_m(1-n)} \ln \frac{C_0}{C} \quad (2)$$

式中: V_m 为实验煤样体积(含空隙), cm^3 ; Q 为供气系统新鲜空气流量, mL/min ; C_0 为新鲜空气中氧气体积浓度, 20.96%; C 为低温氧化装置出口氧气体积浓度; n 为煤样空隙率。

本次实验在一定氧气流速下分析不同粒径煤样低温氧化规律, 令 $K' = \frac{QC_0}{V_m(1-n)}$, 即

$$V_0(T) = K' \ln \frac{C_0}{C} \quad (3)$$

式(1)等于式(3):

$$A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C = K' \ln \frac{C_0}{C} \quad (4)$$

式(4)两端求对数, 整理得:

$$\ln A - \frac{E}{RT} = \ln(K' \ln \frac{C_0}{C}) - \ln C \quad (5)$$

由实验实测数据, 按式(5)对 $\ln(K' \ln \frac{C_0}{C}) - \ln C$ 进行一元线性回归分析, 回归线性方程的斜率是煤氧复合反应的活化能, 由在 $\ln(K' \ln \frac{C_0}{C}) - \ln C$ 轴上的截距取自然对数即为煤氧复合反应

的指前因子。

3 实验条件

煤样取自祁南煤矿 3 煤层, 实验时按照需求将煤样破碎筛分出 1# (0.833 ~ 0.350 mm)、2# (0.350 ~ 0.245 mm)、3# (0.245 ~ 0.198 mm) 和 4# (小于 0.198 mm) 四类粒径范围煤样各约 90 g; 新鲜空气流速 Q 取 100 mL/min; 煤样罐是圆柱体不锈钢筒体, 高 10 cm, 直径 5 cm; 煤样的粒径较小, 最大煤样粒径 0.833 mm, 全部煤样在松散堆积状态下空隙较小, n 取 0.05; 新鲜风流氧气浓度 C_0 取 20.96%。由相关实验参数求得 $K' = 0.34$ 。煤低温氧化的升温速率控制为 3 $^{\circ}\text{C/min}$, 低温氧化温度范围 30 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$, 每次升温步距 10 $^{\circ}\text{C}$, 达到设定温度后进行恒温稳定 3 min, 然后取低温氧化装置出口气体进行色谱分析, 检测出口气体氧气浓度。

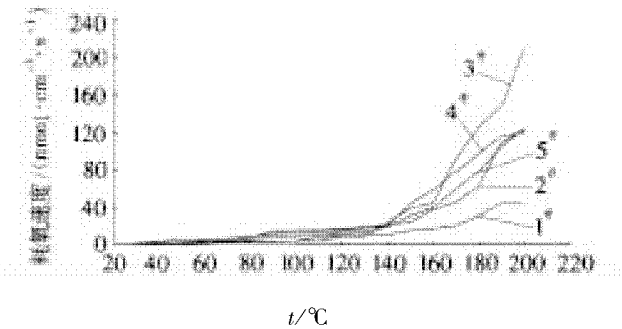
4 实验结果

4.1 不同粒径煤样耗氧速率

将不同粒径煤样在不同温度时低温氧化装置出口氧气浓度代入式(3), 可知煤样复合反应的耗氧速率大小(见表 1、图 4)。

表 1 不同粒径煤样不同温度下耗氧速率

温度/ $^{\circ}\text{C}$	1#煤样		2#煤样		3#煤样		4#煤样	
	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	耗氧速率/ ($\text{pmol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	耗氧速率/ ($\text{pmol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	耗氧速率/ ($\text{pmol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	耗氧速率/ ($\text{pmol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
30	20.94	241.5	20.93	362.3	20.88	967.4	20.84	1 452.5
40	20.92	483.2	20.89	846.3	20.80	1 938.5	20.66	3 647.0
50	20.91	663.5	20.87	1 099.5	20.77	2 303.7	20.43	6 489.0
60	20.83	1 542.3	20.56	4 874.5	20.75	2 542.5	20.58	4 664.1
80	20.76	2 425.5	20.29	8 218.6	20.65	3 769.5	20.33	7 684.3
90	20.69	3 256.7	20.01	11 734.0	20.65	3 770.7	19.78	14 615.1
100	20.59	4 505.6	19.93	12 747.4	20.61	4 260.0	19.75	15 042.6
110	20.25	8 764.1	19.80	14 402.9	20.59	4 485.9	19.71	15 574.7
120	20.16	9 844.7	19.75	15 042.6	20.21	9 213.0	19.59	17 077.1
130	20.13	10 221.4	19.58	17 229.5	20.31	8 008.0	19.49	18 395.0
140	20.04	11 355.0	19.27	21 266.8	19.14	22 976.6	19.47	18 696.3
150	19.72	15 427.1	19.11	23 376.0	17.98	38 775.7	17.62	43 970.8
160	19.60	16 971.2	18.08	37 446.9	17.55	44 976.6	16.67	57 899.5
170	19.35	20 187.4	17.48	45 880.8	14.62	91 145.8	15.44	77 323.3
180	18.60	30 265.3	16.37	62 455.9	12.78	125 068.9	14.31	96 597.9
190	17.59	44 322.9	13.66	108 295.4	11.71	147 310.4	13.30	115 066.7
200	17.49	45 744.8	12.94	122 080.9	9.24	207 077.6	13.08	119 321.1



注:5# 曲线为不同阶段(30 ~ 80℃, 80 ~ 140℃ 和 140 ~ 200℃ 三个阶段)不同煤样粒径平均耗氧速率

图4 不同粒径煤样不同温度下耗氧速率

不同粒径煤样不同温度耗氧速率基本符合指数变化规律,对耗氧速率和温度进行指数回归拟合分析,拟合关系式和相关系数如表2所示,四份煤样指数相关系数均大于0.95,说明相关性较好,实

验结果和拟合预测结果基本一致。

低温氧化煤氧复合反应主要包括物理吸附、化学吸附和化学反应等三个阶段,温度较低条件下以物理吸附氧为主,随着煤样低温氧化时间增长和温度的升高,物理吸附氧速率降低且趋于饱和而进入化学吸附和化学反应为主阶段。从表1和图4可以看出,不同粒径煤样耗氧速率分为三阶段变化(三阶段拟合趋势线斜率分别为9.41、18.94和178.91),即30~80℃缓慢耗氧阶段,80~140℃浅度耗氧阶段和140~200℃深度耗氧阶段。缓慢耗氧和浅度耗氧两阶段耗氧平均速率较低,耗氧量较小,不同粒径煤样的耗氧速率和耗氧量差别不大,而深度耗氧阶段耗氧平均速率较高,耗氧量较大,不同粒径煤样的耗氧速率和耗氧量差别较大,故煤样粒径对煤氧复合反应的影响存在阶段性。

表2 煤样耗氧速率和温度关系指数拟合关系式及相关系数

	煤样			
	1#	2#	3#	4#
拟合关系式	$y = 20.174e^{0.0287x}$	$y = 40.968e^{0.0291x}$	$y = 31.853e^{0.031x}$	$y = 122.17e^{0.0234x}$
相关系数 R	0.978 9	0.957 1	0.970 3	0.976 1

4.2 煤氧复合反应动力学参数测算

由实验实测数据,按式(5)对 $\ln(K' \cdot \ln(C_0/C)) - \ln C \sim -1/RT$ 进行一元线性回归分析(见图5),拟合关系式和相关系数如表3所示,四份煤样相关系数均大于0.95,说明相关性较好,实验结果和拟合预测结果基本一致。不同粒径煤样煤氧复合反应的活化能是一元线性回归方程的斜率,指前因子A可由纵轴上截距取自然对数求得(见表4)。

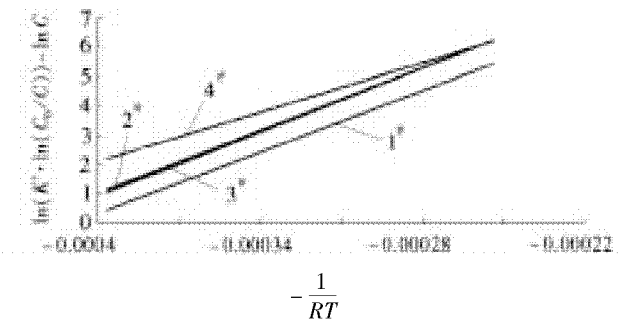


图5 煤样复合反应 $\ln(K' \cdot \ln(C_0/C)) - \ln C \sim -1/RT$ 关系

表3 煤氧复合反应 $\ln(K' \cdot \ln(C_0/C)) - \ln C \sim -1/RT$ 线性拟合及相关系数

关系线性拟合	煤样			
	1#	2#	3#	4#
拟合关系式	$y = 34938x + 14.301$	$y = 35529x + 15.243$	$y = 36042x + 15.372$	$y = 27884x + 13.263$
相关系数 R	0.992 8	0.973 3	0.950 7	0.969 8

表4 不同粒径煤样动力学参数

煤样	指前因子 A/s^{-1}	活化能/(kJ·mol ⁻¹)
1#	1.62×10^6	34.938
2#	4.17×10^6	35.529
3#	4.74×10^6	36.042
4#	5.76×10^5	27.884

由表4可以看出,不同粒径煤样煤氧复合反应动力学参数指前因子和活化能各不相同,其中4#煤样(粒径小于0.198 mm)活化能和指前因子最小,1#煤样(0.833~0.350 mm)、2#煤样(粒径0.833~0.350 mm)、3#煤样(粒径0.245~0.198 mm)活化能和指前因子依次增大且增加量

较小,4#煤样活化能和指前因子与1#、2#和3#差别较大,可以认为活化能和指前因子在4#煤样粒径范围发生了突变。故在本次实验条件下,4#煤样(粒径小于0.198 mm)更适合煤低温氧化。

5 结论

1) 煤氧复合反应符合阿伦尼乌斯定律,由阿伦尼乌斯定律建立的数学模型,测算的活化能和指前因子实验数据拟合关系式相关系数均大于0.95,具有较好的相关性,拟合结果和实验结果相符合。

2) 煤样粒径对煤氧复合反应的影响存在阶段性,不同粒径煤样低温氧化耗氧速率变化分为三阶段变化,即30~80℃缓慢耗氧阶段,80~140℃浅度耗氧阶段和140~200℃深度耗氧阶段。

3) 在实验条件不变情况下,通过不同粒径煤样低温动力学参数综合测算,确定煤样粒径小于0.198 mm的煤样更适合煤低温氧化。

参考文献:

- [1] 徐精彩. 煤自燃危险区域判断理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001:1.
- [2] 李学诚. 中国煤矿安全大全[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998:228-230.
- [3] 程远平,李增华. 煤炭低温吸氧过程及其热效应[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(4):310-313.
- [4] 张树川,戴广龙,蔡政委,等. 氧气流量对煤物理吸附氧量的实验研究[J]. 矿业安全与环保,2010,37(1):10-11.
- [5] 李文,李保庆. 煤的低温氧化与自燃[J]. 煤炭转化,1995,18(1):10-18.
- [6] 李增华,齐峰,杜长胜,等. 基于吸氧量的煤低温氧化动力学参数测定[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(2):137-140.
- [7] 张辛亥,徐精彩,邓军,等. 煤的耗氧速率及其影响因素恒温实验研究[J]. 西安科技学院学报,2002,22(3):243-246.
- [8] 邓军,徐精彩,李莉,等. 煤的粒径与耗氧速率关系的实验研究[J]. 西安交通大学学报,1999(12):106-107.
- [9] 张辛亥,徐精彩,杜娟,等. 煤低温氧化动力学参数与粒径关系实验研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2005,25(6):9-12.
- [10] 谢应明,张国枢,戴广龙,等. 烟煤低温氧化规律的实验研究[J]. 淮南工业学院学报:自然科学版,2001,21(3):7-9.
- [11] 唐明云,张国枢,戴广龙,等. 空气流量对煤升温氧化影响的实验研究[J]. 煤矿安全,2008(5):12-13.

(责任编辑:何兴华,吴晓红)

注意正确使用“百分点”

百分点(1百分点=1%)的使用现在越来越多,但不少媒体用错了。例如某期刊中说:“2007年产量为100万t,2008年达112万t,增加了12个百分点。”

百分点是一个新的基础数学概念,它只用于比较采用百分数形式表示的数值的增减,例如个人存款的年利率从3.25%降至2.25%,可以说降了1

百分点,但决不能说降了1%。如果是降了1%,则新利率应为 $3.25\% - 3.25\% \times 0.01 = 3.2175\%$ 。可见,上述年产量的增加应该用百分数表示,即说“增加了12%”。

百分点是一个单位,书写时其前面的“个”应删去,正如“5小时”“10厘米”不应写作“5个小时”“10个厘米”一样。

摘自《编辑学报》2010年第5期

铜官山铜(铁)矿地质特征及找矿方向预测

王西荣¹, 李绍侠²

(1. 安徽省地质实验研究所, 安徽 合肥 230000; 2. 六安职业技术学院招生办公室, 安徽 六安 237000)

摘要: 矿区位于中生代溧阳火山盆地南西部, 郎溪中生代红层盆地北侧, 在东西向拗陷带和北北东向断裂带的交汇部位处, 现已发现小型铜、铁矿床和多个铜铁矿化点。经过先期勘查, 区内已圈定铜矿体3个, 矿体平面形态为S形, 矿体主要赋存于北北东断裂中, 产状与断裂一致。矿石有益组分主要为铜、铁、铅、锌、金等。在铜官山矿床外围及深部具有较好的找矿潜力, 铜铁矿找矿潜力较大。

关键词: 铜(铁)矿; 地质特征; 找矿方向

中图分类号: P61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)04-0067-05

Geological Features of Copper (Iron) Ore in Tongguanshan and Its Prospecting Direction Prediction

WANG Xi-rong¹, LI Shao-xia²

(1. Geological Experiment Institute of Anhui Province, Hefei Anhui 230000, China; 2. Admissions Office, Lu'an Vocational and Technical College, Lu'an Anhui 237000, China)

Abstract: The mine is located in the southern west of Mesozoic volcanic basin in Liyang, and in the north of Mesozoic red bed basin in Langxi. At intersections of the east-west depression and NNE-trending fault zone, a small scale of copper, iron ore deposits and a number of copper and iron mineralization were found. After a preliminary investigation, in the area 3 copper ore deposits were delineated, the ore deposits in morphology are S-shaped, mainly occur in the NNE-trending fault zone, their occurrence is consistent with the fault strike. Main useful components in the ore are copper, iron, lead, zinc, gold, etc. In the peripheral and deep parts of Tongguanshan deposits prospecting is potential, and copper ore prospecting potential is big.

Key words: copper (iron) ore; geological features; prospecting direction

矿区位于苏皖(溧阳、郎溪)交界处, 处于中生代溧阳火山盆地南西部, 郎溪中生代红层盆地北侧。在社渚-张渚-湖滢东西向拗陷带, 东亭-庙西-白茅岭北北东向断裂带的交汇部位, 铜多金属矿成矿条件较好。

地层小区。区内出露的地层主要有: 志留纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪地层组成基底, 在断陷盆地内发育有侏罗系中上统、白垩系火山岩地层组成盖层, 第四系分布于区域西部。区内地层总体走向北东向* 如图1所示。

1 区域成矿地质背景

区内地层属扬子地层区下扬子地层分区广德

收稿日期: 2013-03-06

作者简介: 王西荣(1970-), 男, 安徽铜陵人, 工程师, 本科, 研究方向: 区域地质、地质矿产勘查。

* 1:20 万广德幅区域地质调查报告. 安徽省地质调查研究院. 合肥, 1970.

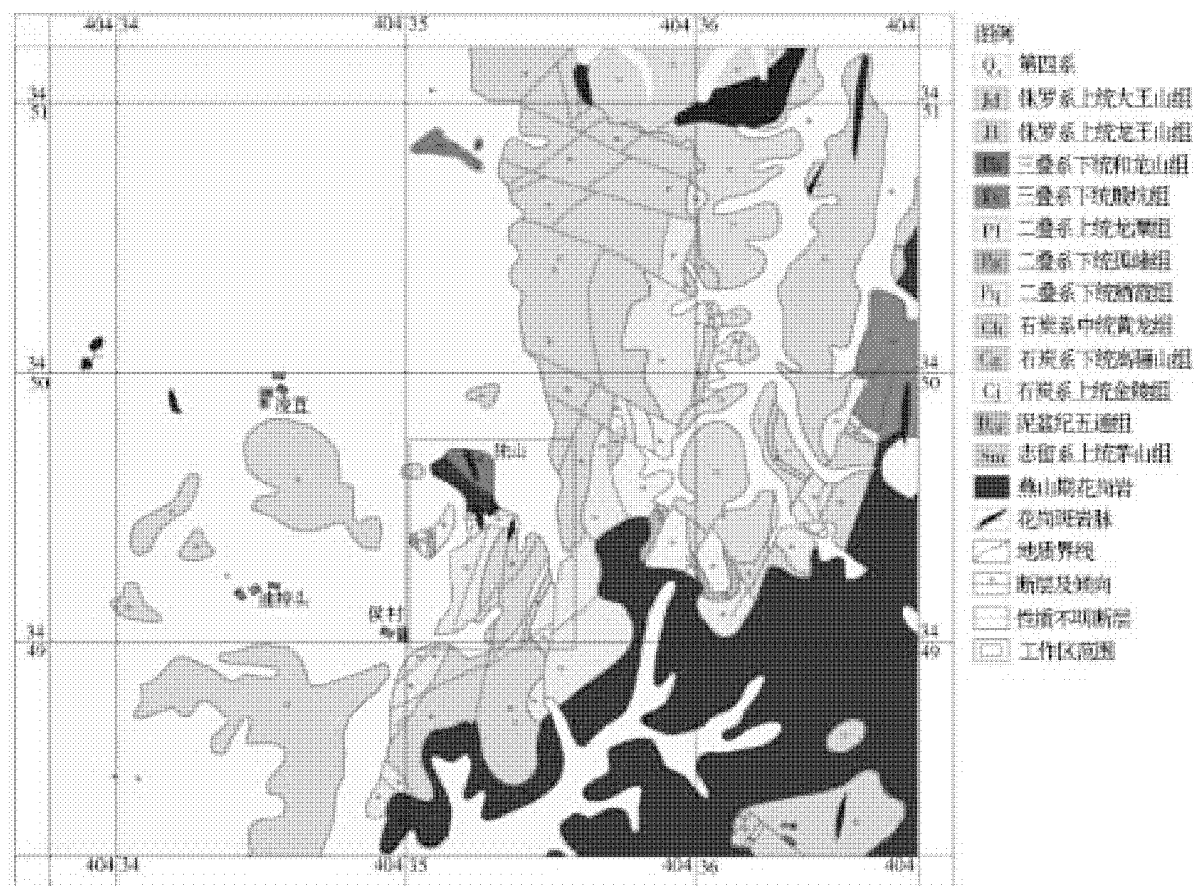


图1 安徽省郎溪县铜官山地区区域地质示意图

区内为一轴向北东的复背斜,由轴向一致的次一级背斜和向斜组成。褶皱为独山背斜。区内断裂构造发育,以北东向压剪性断裂为主,北西向张剪性断裂次之,另区内尚发育有近南北向的及近东西向断层,并具有多期活动之特点。

区内岩浆活动频繁,主要呈北东向沿断裂构造带分布,且具多期(次)性,种类较全,以燕山晚期的酸性——中酸性侵入岩体为主,主要有施村花岗岩、花岗斑岩体。区域北东溧阳火山盆地发育一套酸至基型火山岩。

区内岩体接触带附近岩石普遍遭受蚀变。主要蚀变为硅化、角岩化、高岭土化等。

硅化与本区铜铁矿化密切相关,地表可以分布的铁矿体均产于硅化破碎带中。

2 矿床地质特征

2.1 矿化带特征

铜铁矿(化)体主要发育在铜官山背斜核部及

其北西侧,破碎带沿铜官山顶呈S型向南北延伸,北端止于花岗斑岩脉。图幅长约1300m,宽6~18m,产状不详。在破碎带两侧地层倾角变化较大,南端倾向SE,倾角 $58^{\circ} \sim 59^{\circ}$,中间变缓,倾向SW,倾角 36° ,北端变陡,倾向E,倾角 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。矿化带沿破碎带发育,以硅化为主。

矿化岩石为铜赤铁矿化石英砂岩,矿化体围岩主要是志留系茅山组细碎屑岩、碎裂岩、角砾岩等。围岩蚀变有硅化、角岩化、绢云母化等、褐铁矿化。

2.2 矿体特征

圈定铜铁矿体3个,其中分布于铜官山顶端的I号矿体为主矿体。其产出于古生代志留系茅山组地层之北北东向断裂中(铜官山破碎带),反映出明显的断裂控矿特征*。

地表赤铁矿多已氧化成褐铁矿,形成铁帽。

1) 矿体分布规律

空间分布规律。平面上,矿体平面上总体呈S形延展,矿体自南向北走向依次变为北北东向,转

* 安徽省郎溪县铜官山铁矿预查地质报告,安徽地质局322地质队,马鞍山,1960。

为北北西向,再转为北北东向。铜(铁)矿体分布于纵张断裂——铜官山北北东向断裂带中,北西向断裂对矿脉的形成起一定的影响和控制作用,使矿

脉总体形成“S”形。

剖面上,矿脉或矿体深部有变缓的趋势,显示成铲状(犁状),深部矿体主要受铲状构造控制(见图2)。

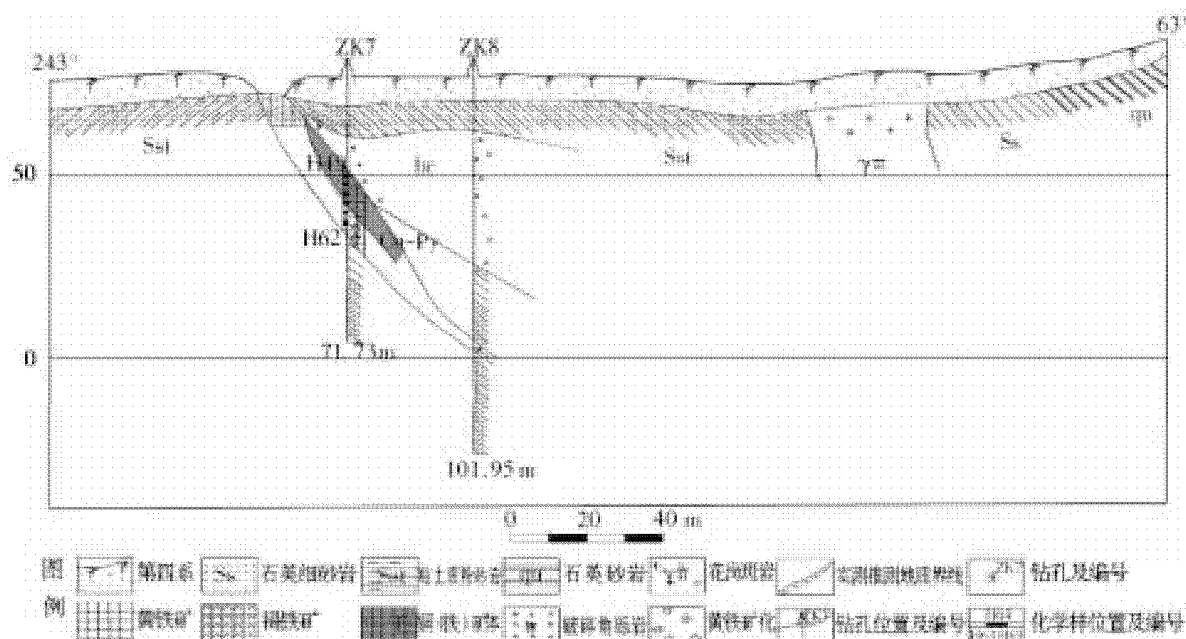


图2 铜官山铜(铁)矿1号勘探线地质剖面图

2) 矿体形态、规模及产状

矿体呈脉状、透镜状,倾向上膨大、分枝、狭缩明显。断续出露,总长 449.68 m,厚度 3.77 ~ 19.47 m,平均厚 11.62 m,厚度变化较大,控制矿体赋存标高为 +83 ~ +3.3 m。矿体沿走向往往膨大,具尖灭再现、分叉复合之特征。矿体走向 5° ~ 20°左右,倾向东,倾角 60° ~ 70°之间,有至深部变缓的趋势。

3) 矿石质量

结构构造。矿石主要为粒状结构,黄铜矿半自形——他形粒状,结晶形态视结晶空间和矿物质含量而定。在较宽松环境,黄铜矿局部富集成团块状。

矿石构造主要为团块状构造、星点网脉状构造、角砾状构造。

矿物成分。矿石矿物为黄铜矿,呈铜黄色颗粒状,粒径多在 0.1 mm 以下,晶形完好者较少。黄铜矿半自形——他形粒状,集合体多呈不规则小团块状、网脉状分布于矿石中。

除黄铜矿外,还有方铅矿、孔雀石、赤铁矿、黄铁矿、金等。

矿石化学成分。矿石中主要有用组分为 Cu,其品位为 0.35% ~ 3.80%, Cu 品位一般 0.35% ~ 3.80%, 平均 0.578%, 铜品位变化标准偏差 $\sigma =$

0.709,品位变化系数 122.7%,变化较均匀。地表出露硅化破碎带,矿化较差,旧矿坑处可见铜的氧化物孔雀石。铜(铁)矿体地表含铜较低,铜品位在 0.09% ~ 0.12%,以铁为主,铁品位在 22.98% ~ 56.15%,至深部 +69.29 m 向下,铜品位则相应提高,在 +40.26 处,铜品位可达 3.64%。

伴生 Pb、Zn、Ag 等伴生有益组分有铅 0.18% ~ 0.21%; 锌: 0.19% ~ 0.31%; 银 $42 \times 10^{-6} \sim 75 \times 10^{-6}$ 。据地表取样结果分析,金品位最高可达 8.98 克/吨。

矿石类型: 矿区内矿石按矿物共生组合和结构构造,矿石类型为石英含铜赤铁矿矿石。

矿体的顶底板围岩与夹石。矿体顶板围岩是呈角砾状泥岩或粘土类岩石,角砾状泥岩中的角砾成分为泥岩或粘土质岩,胶结物为粘土质。底板围岩的岩性为泥质页岩等。夹石为石英砂岩。

3 控矿规律与找矿标志

3.1 控矿规律

1) 成矿物质来源。根据钻孔中铜矿体中分析结果资料(见表1)。

表 1 深部铜与硫化学分析结果表(利用 313 地质队钻探取样分析结果)

序号	计量单位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cu (x)	$\omega \times 10^{-2}$	0.14	0.38	0.39	0.41	0.37	0.36	0.40	0.35	0.36	0.39	0.45	0.46	0.39
S (y)	$\omega \times 10^{-2}$	0.01	0.72	23.26	21.35	2.38	37.92	19.05	27.47	35.80	43.29	39.74	32.12	37.42
序号	计量单位	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Cu (x)	$\omega \times 10^{-2}$	0.25	0.55	0.42	0.29	3.80	0.68	0.50	0.32	0.38	0.58	0.71	3.64	
S (y)	$\omega \times 10^{-2}$	0.38	8.84	13.49	1.54	4.20	16.07	15.71	35.65	31.32	32.88	20.02	8.94	

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \times l_{yy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: r 为相关系数; x_i, y_i 为铜、硫两种元素的分析数据; \bar{x}, \bar{y} 为样品平均值。

通过给定的样品个数 $n = 25 - 2 = 23$, 可查相关系数检验表, 相应的相关系数为 0.505 (1%)

$$\text{按上式计算 } r = \frac{128.31}{\sqrt{71.24 \times 249.68}} = 0.96$$

所以 $r = 0.96 > 0.505$, 可见矿体中铜与硫关系显著。

志留系地层中岩石与区内出露的花岗斑岩中有用元素铜的含量经取样分析结果显示, 有明显差异(见表 2)。

表 2 不同岩性中有用组分铜含量表 $\omega \times 10^{-6}$

岩石类型	分析结果								均值
花岗斑岩	147.8	71.6	121.8	33.9	62.6	75.2	86.7	85.7	
石英砂岩	22.8	12.9	20.0	49.3	16.6	15.5	11.4	21.2	
粘土质岩	15.0	13.6	17.8	16.8	20.2	19.1	19.8	17.5	
石英砂岩	10.7	10.4	13.4	10.8	13.4	14.2	12.4	12.2	

从上表易知, 铜的平均含量在花岗斑岩中均比在地层中要高 4 倍左右, 志留系地层中铜的相对含量要比泥盆系石英砂岩要高。据此可推断出有用元素铜组分主要与区内的花岗斑岩有一定的联系。

1) 构造控制

区内铜(铁)矿(化)体主要产于铜官山背斜核部, 与铜官山背斜具同生成因的破碎带是在形成背斜的同时, 受东西向挤压与南北向的拉张作用, 形成纵张断裂。北西向构造是区内控岩构造, 区内的花岗斑岩脉分布、形态及产状均受北西向构造控制, 该组方向的构造具多期活动性, 并对后期的矿脉形成起影响与控制作用, 在两组构造交汇部位最

有利于成矿。

2) 矿床成因类型

根据矿石的结构构造及围岩的物理化性质, 成矿元素与围岩无交代作用发生, 主要以充填方式为主, 矿床的成因类型应属热液充填矿床。

3.2 找矿标志

断裂标志。断裂为容矿构造, 与背斜具成因联系的北北东向纵张断裂——铜官山破碎带是控制区内铜(铁)矿化带的主要构造, 北西向构造往往对矿脉具影响作用, 使矿脉在走向上突然发生移位, 在交汇部位可使矿体产生膨大等, 两组构造的交汇部位最有利于成矿。

围岩蚀变标志。在构造破碎带内, 地表发育的蚀变有硅化、高岭土化、碳酸盐化等。

地球物理及地球化学特征。从铜官山激电测量与自然地场测量数据看, 铜(铁)矿体与电法异常关系不大, 激电异常及自然地场的方向明显受北西向构造控制, 走向呈北西向。矿体与高激化值关系不大, 高激化、高电场位往往未发现铜(矿)矿体, 一般激化率在 $\eta_s = 2\% \sim 2.5\%$, $V = 200 \sim 500$ v 之间是矿体分布范围。

Cu、Pb、Zn 化探异常, 特别是套合较好的异常亦为良好的找矿依据。

4 找矿方向分析

4.1 铜官山破碎带深部

1 号勘探线剖面控制的矿体, 深部有变缓的趋势, 显示成铲状(犁状), 可以类比于山东七宝山金矿体及邻近矿区矿体, 七宝山矿体形态呈铲状, 深部有厚层矿体存在。据铜官山钻探资料, 矿体控制均较浅, 最大控深 55.5 m, 矿体产于角砾岩中, 明显受构造控制, 构造向深部延深较大, 深部仍有成矿的可能。

4.2 铜官山破碎带外围

独山地带:该地段出露的地层由老至新依次为志留系、石炭系、二叠系、三叠系地层,岩性主要有石英砂岩、粉砂岩、黑色硅质岩、泥岩、页岩、灰岩等。该地段的构造也是以北北东向和北西为主,断层面性质表现为张扭性,该破碎带内见有矿化蚀变之特征,并见有花岗斑岩体贯入,两组构造并汇部位往往是成矿最为有利部位。该地段从地层、构造、岩浆岩三者均有利成矿。

5 结论

综合以上分析,郎溪县铜官山一带铜(铁)矿矿床成因类型属中温热液充填矿床,成矿物质主要与花岗斑岩有成因联系;矿体主要受北北东向构造控制并产于其中,北西向构造对矿体有影响,往往在北北东向与北西构造交汇部位,是矿体的膨大部位。另外矿体在深部及铜官山外围均具有良好的找矿前景。

总之郎溪县铜官山地区有较好的铜(铁)、金、铅找矿潜力,经进一步地质工作,有望发现一定规模的铜金多金属矿床。

参考文献:

- [1] 李曙光. 长江中下游中生代岩浆岩及铜铁成矿带的深部构造背景[J]. 安徽地质, 2001(2): 118-122.
- [2] 储国正. 长江中下游地区成矿地质背景分析[J]. 安徽地质, 2003(1): 34-43.
- [3] 李振生, 刘德良, 孙岩, 等. 断裂疏导-封闭性能的研究进展[J]. 安徽地质, 2003(4): 241-247.
- [4] 陈江峰, 喻刚, 杨刚, 等. 安徽沿江江南晚中生代岩浆-成矿年代学格架[J]. 安徽地质, 2005(3): 161-169.
- [5] 孙莉, 楚之潮. 安徽省铁帽型金银矿床地质特征、成矿条件及其评价准则研究[J]. 安徽地质, 2006(2): 94-100.

(责任编辑:李 丽, 范 君)

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

本刊参加全国非邮发报刊联合征订,请读者向天津市大寺泉集北里别墅17号(邮编300385)天津市河西区联合征订服务部直接汇款订阅,不必先索取订单,由本刊负责将刊物寄给订户。也可直接向本刊订阅,由邮局汇款到安徽省淮南市安徽理工大学学术出版中心。

邮政编码:232001

电 话:0554-6668044

E-mail:xbzrb@aust.edu.cn

人行激励下大跨度钢结构连廊舒适度分析

陈 刚, 周 杰

(浙江杭萧钢构股份有限公司, 浙江 杭州 310003)

摘 要:针对大跨度钢结构连廊的特点,采用有限元和自编程序相结合的方法,模拟不同工况,单人、多人有序和随机人群荷载模式,计算该结构的自振特性和动力加速度响应,并进行了不同工况下结构舒适度评价。结果表明,人行荷载频率的影响最大,其次是荷载类型、人群同步概率及人群的集度。

关键词:人行荷载模型;蒙特卡罗模拟;峰值加速度;舒适度

中图分类号:TU393.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0072-06

Comfort Analysis of Long-span Steel Corridor Stimulated by Pedestrian

CHEN Gang, ZHOU Jie

(Zhejiang Hangxiao Steel Structure Co. Ltd., Hangzhou Zhejiang 310003, China)

Abstract: Dynamic response and human comfort were studied using finite element software combining with self-compiling program for long-span steel corridor under different pedestrian load conditions. The load models simulating single person walking, regular or random crowd walking were developed to calculate self-vibration characteristics of the structure and dynamic acceleration response, and evaluate comfort of the structure under different conditions. The results showed that among all the factors affecting dynamic response, step frequency is the most significant, the next ones are load model, probability of pedestrian synchronization and crowd density.

Key words: pedestrian load model; monte carlo simulation; peak acceleration; comfort

材料科学及结构设计理论的迅速进步使得建筑结构向大跨度、轻质方向发展,由此导致的结构人致振动问题受到越来越多的重视。大跨结构在人群行走作用下不能出现过大的加速度,特别是不能超过行人的舒适度要求。为了防止结构振动过大,主要采取对基频进行控制:即基频控制在3 Hz以上,避开人的步行频率[1.5~2.5] Hz共振频段^[1],从而控制加速度响应。大跨度复杂结构中,因为建筑外观等各种因素的综合要求,无法避开共振频率。本文针对某园区不同功能区间大跨度钢结构过人连廊,综合引用各种相关指标,对其在人行荷载激励下的行走舒适度进行了评估,探讨各种不同指标的影响规律。该过人连廊最大跨度65 m,最大横向宽度12.6 m,走廊弧形内侧用于观景,两侧桥塔结构采用钢管混凝土+钢支撑形式,增强支

座的刚度,结构计算模型如图1所示。结构1阶竖向自振频率1.77 Hz,非常接近行人正常行走频率,人行激励下会引起较大振动,超过人体的生理承受标准后,产生人行恐慌,影响正常使用。

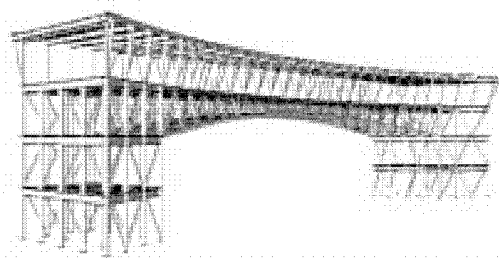


图1 结构有限元模型

人行连廊的荷载本身极为复杂,不仅是时间的函数,还需要考虑空间位置的随机性,涉及到多种

因素,采用一般有限元程序分析,难以模拟荷载的复杂性。为了克服上述困难,采用自编程序模拟随机的人行荷载模型和荷载的随机空间分布,采用通用结构有限元程序进行结构的人致振动分析。

1 人行荷载模型及舒适度评价标准

1.1 人行荷载模型及工况

1) 单足落步荷载模型。典型的单足落步曲线如图2所示,从O点开始随着足跟逐渐接触地面,身体重心的转移而升高,曲线高度达到人体重的(1.2~1.25)倍时,达到其第一个峰值点A,然后随着人屈膝、摆动另一条腿和重心的转移,该曲线将逐步下降至点B,B点作用力一般要小于人体重,接着人的脚掌蹬地,使得曲线再次升高至点C,此时C点作用力的大小约为人体重1.15倍,然后曲线迅速下降至D点,此时人的足尖完全脱离地面。

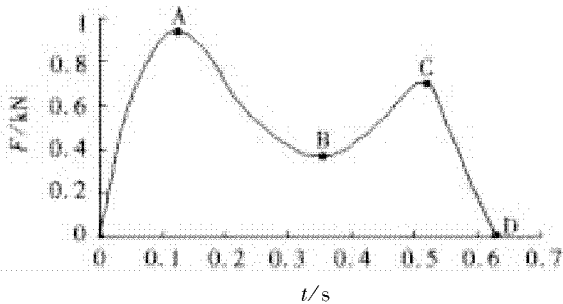


图2 典型单足落步曲线

2) 行走荷载模型。人行行走荷载模型(见图3)取 IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) 提供的连续步行荷载,公式如下:

$$F_p(t) = G \left[1 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sin(2i\pi f_s t - \Phi_i) \right] \quad (1)$$

式中: F_p 为行人激励荷载; t 为时间; G 为人体重量; f_s 为人步行频率; $\alpha_1 = 0.4 + 0.25(f_s - 2)$, $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$; $\Phi_1 = 0$; $\Phi_2 = \Phi_3 = \pi/2$ 。

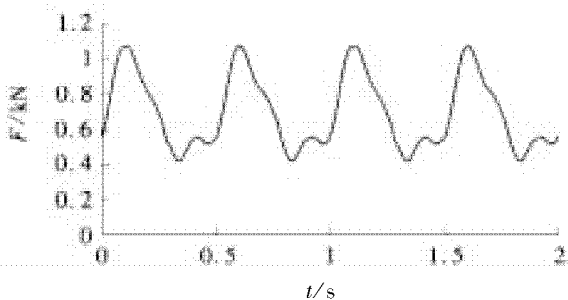


图3 连续行走荷载模型曲线

3) 起立荷载模型。考虑连廊内侧观景幕墙沿线所有座位上坐满人一起起立,假定①起立动作的持续时间为1s;②起立时的冲击荷载曲线为一个正弦波。人体重心运动的加速度时程是人体起立荷载为行人质量乘以加速度,人体重量取70 kN/人^[2]。起立荷载模型曲线如图4所示。

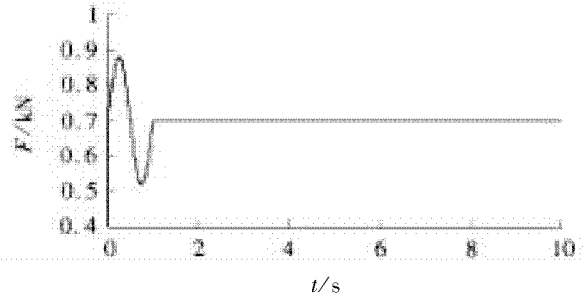


图4 起立荷载模型曲线

4) 跳跃荷载模型。人的跳跃活动对连廊楼面的冲击荷载曲线按文献[3]假定,将曲线理想化为半正弦波(见图5)。当人脚与结构接触时,产生动荷载;人脚与结构脱离接触时,荷载变为0。公式为

$$F_p(t) = \begin{cases} K_p G \sin\left(\frac{\pi}{t_p} t\right) & 0 < t \leq t_p \\ 0 & t_p < t \leq f_p \end{cases} \quad (2)$$

式中: $K_p = \frac{F_{\max}}{G}$ 为单人动荷载系数, G 为人体重, F_{\max} 为单人跳动的峰值动荷载; f_p 为人跳动周期; t_p 为单位周期中人与结构的接触时间。

将接触时间 t_p 与周期 f_p 合并为一个变量,即接触比 $\alpha = \frac{t_p}{f_p}$ 。正常跳动的接触比是1/3^[4]。

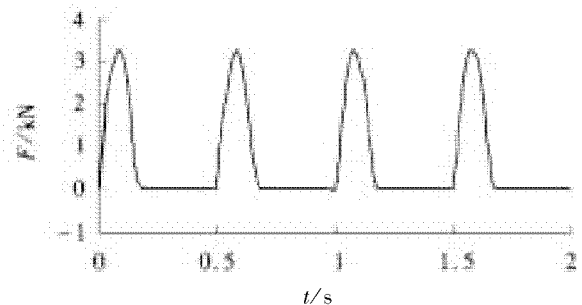


图5 跳跃荷载模型曲线

5) 人行侧向荷载模型。文献[5]对于单个行人引发的侧向周期性荷载采用了傅立叶级数表示,选取动力荷载前两阶谐波对其进行定义。人体重量取70 kN/人,荷载模型曲线如图6所示。

$$F_{ph}(t) = 0.1G\sin(2\pi f_{s,h}t) + 0.1G\sin(4\pi f_{s,h}t) \quad (3)$$

式中: $f_{s,h}$ 为侧向步行激励频率。

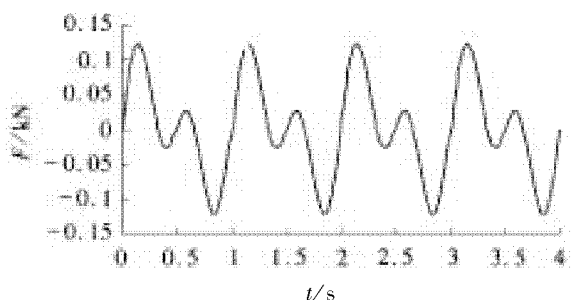


图6 人行侧向荷载模型曲线

6) 分析工况定义及参数选择。为全面考虑不同荷载模型、不同荷载类型及荷载参数对结构的影响,结合上述5种荷载模型,将人致振动分析考虑为8种工况。工况与人行荷载模型的对应关系如表1所示。

表1 人致振动荷载工况

序号	工况	荷载模型
1	单人行走	单足落步荷载
2	多人同排同步行走	单足落步荷载
3	集体起立	起立荷载
4	三人跳跃	跳跃荷载
5	自由状态人群随机行走	行走荷载
6	非常稠密状态人群随机行走	行走荷载
7	拥挤状态人群随机行走	行走荷载
8	侧向人群随机行走	人行侧向荷载

工况1中单人步频取结构1阶基频,一个人从左至右正常行走,步幅0.75m;工况2假定7人并排正步行走,步频、步幅相同,同工况1取值;工况4假定跳跃频率按最不利考虑,步率取结构基频,作用位置在跨中挠度最大点;

每个人的步频、行走方式、起步相位和所处位置等条件参数具有很大的随机性,对结构的激励力有相互抵消的作用,不可以用单人行走荷载激励线性叠加方式模拟,需要从概率角度对这些因素加以分析。最为常用的是 Monte Carlo 模拟,该方法结合随机影响因素的概率分布,模拟大量人行荷载随机样本。人群空间分布依据文献[6]给出的五种分布状态,为了较为真实的模拟该结构的振动性能,分为下列3种工况考虑:

工况5:按行人自由行走状态的上限0.3人/m²,行人数量取170人,人的正常行走频率服从均值2.0Hz,标准差0.173Hz的正态分布^[7],初始相位角(即两人之间滞后时间)服从 $[0, \pi]$ 之间均匀分布;

工况(6-7):首先进行大量试验,在其试验数据的基础上拟合了人的行走速度和步频之间的关系^[8],表达式为

$$v = 0.175 - 0.0575f + 0.349f^2 \quad (4)$$

式中: v 为人行速度, m/s; f 为人的步频, Hz。

文献[9]综合考虑结构、交通、生物力学等领域的相关研究,得到人流速度和人流集度的关系(见图7)。

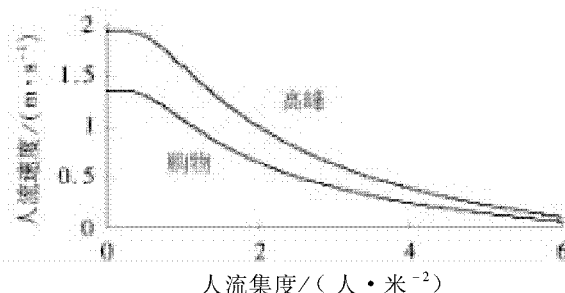


图7 人流速度和人流集度关系曲线

非常稠密状态的人流密度上限1.4人/m²,工况6行人数量取700人,根据式(4)、式(5)计算行人步频在1.5~1.9Hz之间,假定工况6步频服从1.8Hz附近的正态分布。

工况7行人在拥挤状态随机行走,按人流密度2.6人/m²行人数量取1300人,根据式(4)、式(5)计算步频服从1.4Hz附近的正态分布。行人初始相位角服从 $[0, \pi]$ 之间均匀分布。

工况8:行人数量取700人,随机侧向荷载按最不利状态假定同频率、不同初始相位角,频率0.85Hz。

1.2 结构舒适度评价标准

国内除文献[1]有竖向频率的规定外,尚无人行活动动力响应舒适度的评价标准,国际上关于结构舒适度的有关规定如下:

1) 国际标准化组织(ISO10137-2007)。制定了适用于建筑物和人行桥的国际通用标准,评价指标采用频率计权加速度均方根(R. M. S)或振动剂量值(vibration dose value,简称VDV)。

频率计权均方根加速度为

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2}$$

式中: $a_w(t)$ 为瞬时频率计权加速度值, m/s^2 。

振动剂量值: 当波峰因子(频率计权加速度的最大瞬时峰值与其均方根值的比的模)大于6时, 采用四次方振动剂量值(VDV)作为评价指标:

$$\text{VDV} = \left\{ \int_0^T a_w^4(t) dt \right\}^{\frac{1}{4}}$$

式中: $a_w(t)$ 为瞬时频率计权加速度值, m/s^2 ; T 为测量时间长度。

2) 美国规范(AISC-11: Floor Vibrations Due to Human Activity)。主要用于人类自身活动引起建筑物振动的舒适度评价, 评价指标为峰值加速度; ATC: Minimizing Floor Vibration (1999), 适用对象为轻框架结构, 钢结构与混凝土框架结构; 评价指标为峰值加速度(钢结构与混凝土框架结构), 挠度(轻框架结构)。

3) 英国规范(BSI5400)。最早提出考虑人行桥舒适度的规范之一, 评价指标: 峰值加速度。BS6472-2008: 基于ISO标准使用类似的基本倍数表; 评价指标为VDV(振动剂量值)。

4) Euro Code。适用对象为人行天桥, 评价指标采用峰值加速度, 包括竖向振动、一般使用时的水平振动以及满布人群时的水平振动限值。

5) 瑞典国家规范(Bro2004)。瑞典用于桥梁设计施工的通用规范, 采用均方根加速度作为舒适度评价指标。

由于连廊是钢结构人行天桥, 根据其使用和结构特点, 采用峰值加速度作为评价指标较为简单; 结构竖向振动舒适度评价标准采用美国规范AISC-11中推荐的室外人行天桥峰值加速度限值0.05g, 即0.5 m/s^2 ; 侧向振动舒适度指标参考Euro Code峰值加速度限值取0.2 m/s^2 。

2 人致振动分析与舒适度评价

2.1 动力特性分析

结构的固有频率和振型是承受动态荷载结构设计的重要参数, 也是其他动力分析问题的起点。模态分析时恒荷载全部转化为振动质量源, 活荷载20%转化为振动质量源, 考虑动力特性, 混凝土材料弹性模量提高1.2倍^[10]。

通过模态分析得到该结构前几阶主频依次为1.7724 Hz、2.2149 Hz、2.6138 Hz、2.8875 Hz等, 对应振型如图8~图11所示, 第1~2阶振型均以竖向振动为主, 第3阶振型是水平横向振动。结构

固有频率较低, 且第1阶竖向振动频率落在人行步频范围[1.5~2.5]Hz之间, 会引起结构的共振。



图8 结构第1阶振型

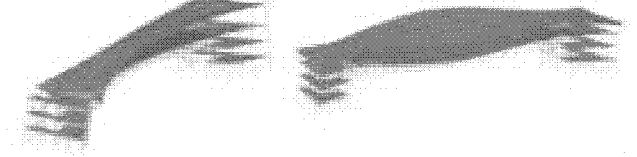


图9 结构第2阶振型

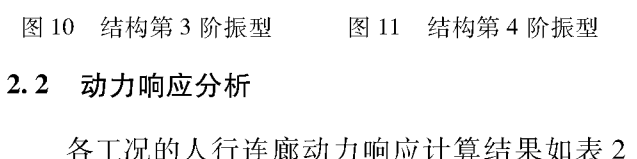


图10 结构第3阶振型

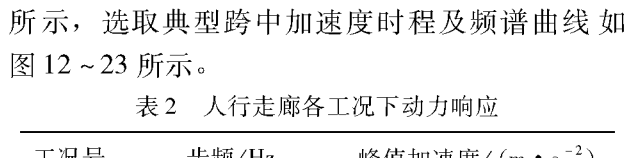


图11 结构第4阶振型

2.2 动力响应分析

各工况的人行连廊动力响应计算结果如表2所示, 选取典型跨中加速度时程及频谱曲线如图12~23所示。

表2 人行走廊各工况下动力响应

工况号	步频/Hz	峰值加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	结构基频	0.056
2	结构基频	0.283
3	冲击荷载	0.380
4	结构基频	0.494
5	随机分布	0.564
6	随机分布	0.809
7	随机分布	0.691
8	0.85Hz	0.081

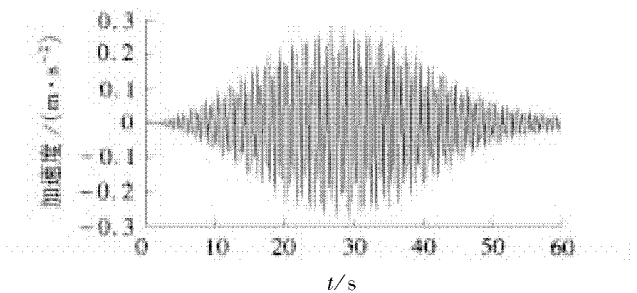


图12 跨中控制点加速度时程曲线(工况2)

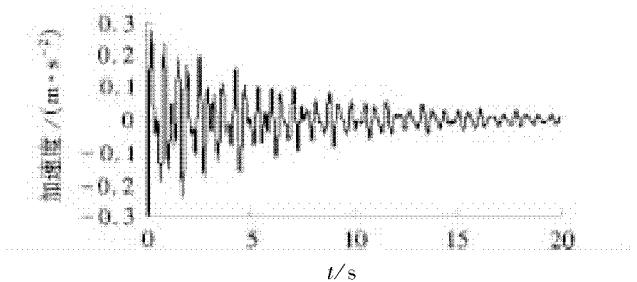


图13 跨中控制点加速度时程曲线(工况3)

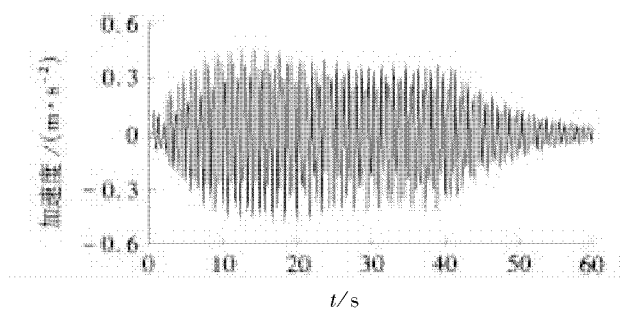


图14 跨中控制点加速度时程曲线(工况4)

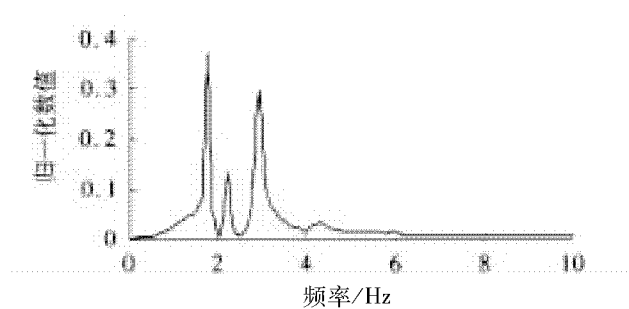


图19 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况3)

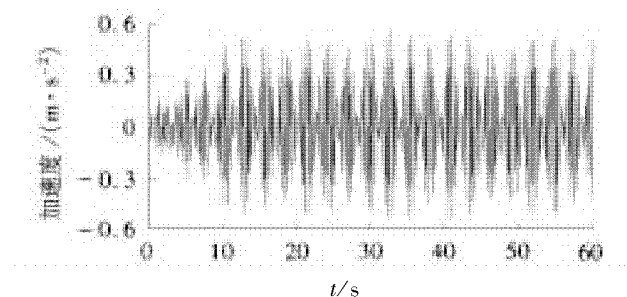


图15 跨中控制点加速度时程曲线(工况5)

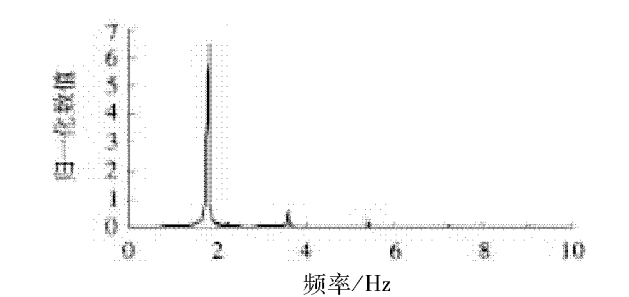


图20 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况4)

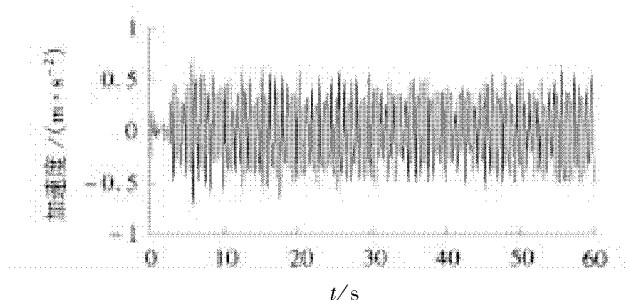


图16 跨中控制点加速度时程曲线(工况6)

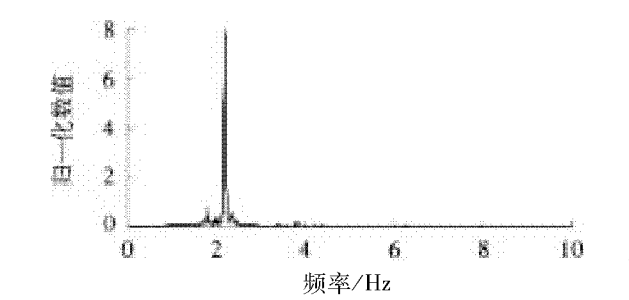


图21 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况5)

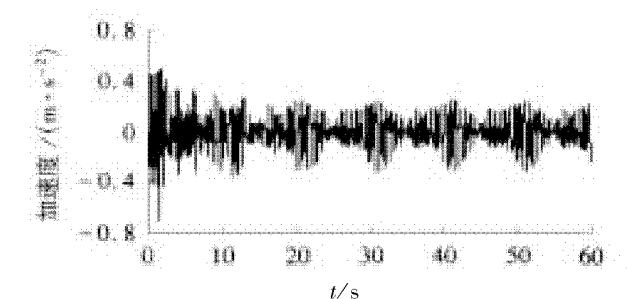


图17 跨中控制点加速度时程曲线(工况7)

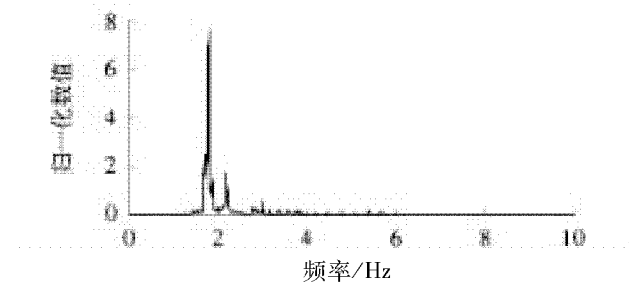


图22 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况6)

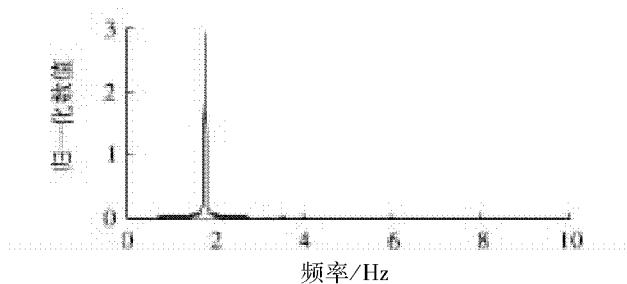


图18 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况2)

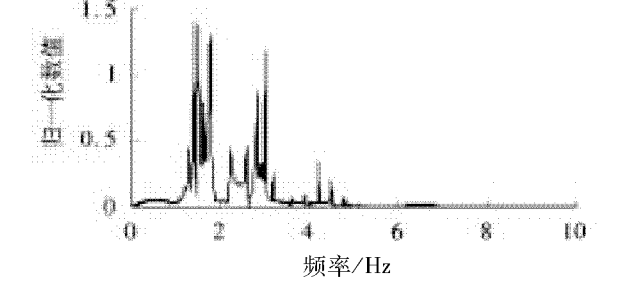


图23 跨中控制点加速度响应谱(FFT)(工况7)

分析表2可以发现:

1) 对比工况1、工况2。随着人数的成倍增加,峰值加速度也相应的成倍增加,两者没有完全成正比,主要是因为挠度最大点在跨中内侧,从内向外跨中不同位置处动力响应逐渐减弱;

2) 结构对跳跃荷载的动力响应很大。可以看到3人同频率、同时跳跃引起的峰值加速度比7人同频率、同时行走引起的峰值加速度要大得多,主要是因为跳跃荷载的动载因子比行走荷载大很多;

3) 结构的响应加速度首先取决于步频与结构基率的接近程度。如工况6、工况7,工况6的人群的步频主要在1.8 Hz附近,非常接近结构基频,而工况7人群集度虽然是后者的7.6倍,由于人群的步频主要在1.4 Hz附近,远离结构的基频,其峰值加速度反而较小;

4) 随机人群荷载激励引起的结构动力响应加速度与人群数量并不是成正比例关系。对比工况5~工况7可以看到,人群数量逐渐增加,步频接近结构基频,峰值加速度相应增加,但是随着人流速度的降低,当步频远离结构基频时,峰值加速度反而有一些下降;

5) 满布人群荷载作用下,水平横向振动加速度不大,主要是因为结构横向振动频率2.613 8 Hz远离人群横向步频区间[0.8~1.2]Hz。

2.3 人行连廊舒适度评价

根据结构舒适度评价标准,各工况下人行连廊舒适度评价如表3所示,在人群随机行走激励下,结构的舒适度不满足时,需要进行减振处理。

表3 人行走廊各工况下的舒适度评价

工况号	峰值加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	舒适度评价
1	0.056	舒适
2	0.283	舒适
3	0.380	舒适
4	0.494	舒适
5	0.564	感到不舒适
6	0.809	感到不舒适
7	0.691	感到不舒适
8	0.081	舒适

3 结语

1) 由于人致荷载的多变量随机性,需要采用自编程模拟各影响参数的随机性,与通用有限元程

序相结合,可以解决人致荷载动力响应计算问题。

2) 结构人致动力加速度响应首先取决于人行荷载的频率与结构频率的接近程度。其次取决于人行荷载类型和人群荷载的同步概率,最后取决于人群的集度。

3) 人群荷载模式应充分考虑人致荷载的多变量随机性,同时考虑人流集度与人行频率、速度之间的关系,避免人致振动分析中选取各参数值的任意性。

4) 在人致振动的计算中,应适当考虑特殊人行荷载,如人的跳跃等情况,其动载因子大,而且存在着步调一致的可能性。

参考文献:

- [1] 北京市市政工程研究院. CJJ69-95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996.
- [2] 李爱群,陈鑫,张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 160-170.
- [3] WHEELER J E. Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1982, 108(ST9): 2 045-2 065.
- [4] TUAN C Y, SAULW E. Review of live loads due to human movements [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1986, 112(5): 995-1 004.
- [5] ISO. ISO/CD 10137 Base for design of structures Serviceability of buildings and Pedestrian Walkways against vibration [S]. International Standardization Organization, Geneva, Swizealand, 2005.
- [6] 廖顺痒. 人行天桥的设计与施工[M]. 上海:同济大学出版社, 1995: 28-30.
- [7] Y. MATSUMOTO, T NISHIOKA, H SHIOJIRI, et al. Dynamic design of footbridges [J]. IABSE Proceedings, 1978: 1-15.
- [8] BERTRAM J E, RUINA A. Multiple walking speed - frequency relations are predicted by constrained optimization [J]. Journal of Theoretical Biology, 2001, 209(5): 445-453.
- [9] VENUTI F, BRUNO L. An interpretative model of the pedestrian fundamental relation [J]. Computes Rendus Mecanique, 2007, 335(4): 194-200.
- [10] 徐培福. 复杂高层建筑结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005: 44-54.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

地表沉降的双洞体叠加 peck 公式及数值分析

任 强¹, 杨春英², 徐 薇³

(1. 中兵勘察设计研究院, 北京 100053; 2. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300; 3. 中国矿业大学北京, 北京 100083)

摘 要:为解决地下隧道开挖引起地表沉降, 结合广州某采用盾构推进形式地铁隧道实例, 运用常规理论算法与数值模拟方法计算地表沉降, 研究地表变形特性。结果表明:双孔平行隧道开挖中地层损失是引起地表沉降的主要因素;土体位移的叠加原理适用,地表沉降槽以两隧道中间位置为轴线基本对称分布在其两侧;地层损失率控制在 1.5% ~ 2% 时,理论值较为接近模拟计算值。

关键词:双孔平行隧道; peck 公式; 地表沉降; 数值模拟

中图分类号:U455.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)04-0078-05

The Peck Formula and Numerical Analysis of Surface Subsidence Caused by Tunnel Excavation

REN Qiang¹, YANG Chun-ying², XU Wei³

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute, Beijing 100053, China; 2. Technical Center, China State Construction Engineering Corporation Ltd., Beijing 101300, China; 3. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of surface subsidence caused by underground tunnel excavation, taking Guangzhou subway tunnel excavation with shield construction as an example, the conventional theoretical calculations and numerical simulation method were used to calculate surface subsidence, and study surface deformation properties. The results showed that ground loss is the main factor causing surface subsidence in the double parallel tunnels excavation process; Soil displacement superposition principle can be applied to double parallel tunnels, using middle position of double parallel tunnels as axis, surface settlement curve distribution is symmetrical; When ground loss rate is 1.5% ~ 2%, the theoretical values are closer to the numerical simulation values.

Key words: double parallel tunnels; peck formula; ground subsidence; numerical simulation

地下隧道开挖引起地表沉降基本因为施工引起的地层损失及隧道周围受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结^[1],地层损失是隧道开挖的土体体积与隧道体积之差^[2],隧道体积包括外围包裹的压入浆体体积。地表沉降的预测方法主要有经验公式法、随机介质理论法、弹塑粘性理论解,数值方法(有限元、边界元法、有限差分法、数值半解析法)等^[3]。在大量学者提出的预测地面沉降的公式中,peck 公式是经验公式法中的典型代表,成为研究地表沉降的先河,peck 公式是根据大量隧

道开挖引起地表沉降的观测数据提出的。根据文献[4]对世界范围内 51 条地铁施工沉降曲线的拟合结果,58%的实测结果与正态分布的相关系数在 0.9 以上,相关系数在 0.8 以上的则接近 80%。而数值方法能直观给出地层力学性状,一定程度上弥补了经典解析法的不足。

1 经典 peck 公式计算地表沉降

经典 peck 公式认为地表沉降槽呈正态分布^{[5]226-227}(见图 1),从经验-数学角度出发给出

不同地层条件、隧道直径及埋深等参数间沉降槽计算的无量纲关系式,表达式为

$$S_x = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi \tan(45^\circ - \phi/2)}} \quad (2)$$

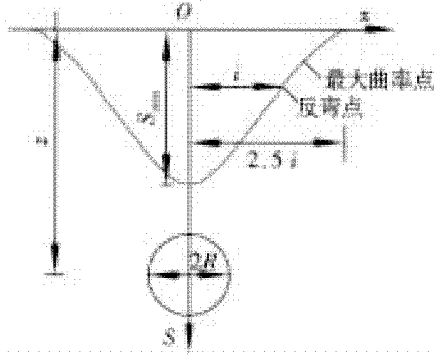


图1 peck 公式沉降槽

式中: S_x 为横截面上与 S 轴线距离为 x 地面点的沉降量; i 为沉降槽宽度系数,为地表沉降曲线反弯点与原点的水平距离; z 为隧道中心点起算的覆土厚度; ϕ 为土体内摩擦角加权平均值; V_l 为由于隧道开挖引起的地层损失量。

2 双孔平行隧道施工引起地表沉降

绝大多数地铁隧道开挖,需要修建两条双向平行隧道,两隧道开挖对地表沉降的影响较单一隧道更为复杂,但考虑到开挖会扰动周边岩土体,形成扰动区,因而第二条隧道往往是滞后建设,因此产生的地表土体沉降可近似看作两隧道单独施工的叠加,公式(3)双洞体叠加 peck 公式。当两条隧道中心相隔较近时(例如双圆隧道, d 值小),或 i 值较小(即隧道埋深较浅或 ϕ 值小),拟合地表沉降如图 2(a), S_x 仍近似服从正态分布,计算地表沉降可利用 peck 公式将双圆隧道等代成大圆,此方法可用于预测盾构过车站的基础上暗挖地铁车站所引起的地表沉降^[6]。文献[7]等也运用土体位移叠加法,得出双圆隧道地表沉降槽的形态与单圆形隧道相似的结论。而实际工程中隧道间距一般情况下较大(d 值大)或在 i 值较大(即隧道埋深较深或 ϕ 值大)情况下,根据公式(3)拟合地表沉降如图 2(b)所示,双孔平行隧道开挖的相互影响不可忽略,但考虑地表最终的叠加变形,首先假定叠加原理适用。

$$S_x = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} + \frac{V_l}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{(x+d)^2}{2i^2}} \quad (3)$$

式中: d 为两隧道中心间距。

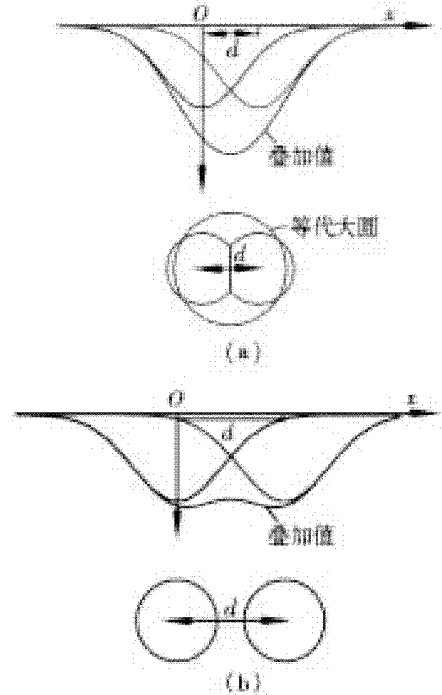


图2 双孔隧道开挖地表沉降槽

3 工程实例

以广州某采用盾构推进形式地铁隧道为例,计算开挖引起的地表沉降。隧道洞径为 5.0 m,两隧道净间距 12 m,埋深 9 m。地层层序自上而下依次为:①层人工填土(Q_4^m),层厚度 1.2~3.6 m。②层粘土(Q_4^{al+pl}),层厚 1.2~3.0 m。③层粉细砂(Q_4^{al+pl}),层厚 7.6~8.2 m。④层中粗砂(Q_4^{al+pl}),层厚 4.8~5.0 m。⑤层卵石层,层厚 1.9~3.2 m。⑥全风化层花岗岩。土层特性指标如表 1 所示。

3.1 采用双洞体叠加 peck 公式计算地表沉降

地层损失量受盾构种类、操作方法、地层条件等多种因素影响,文献[5]²⁹⁰认为地层损失主要由盾构掘进引起的开挖面土体移动、盾构后退使开挖面土体坍塌或松动、土体计入盾尾空隙、改变推进方向等多因素引起。开挖断面的具体形状和支护的具体情况就会明显影响到地面沉降曲线的形状,采用 peck 公式尚无法考虑这个因素的影响^[8]。开挖圆形盾构单位长度地层损失为

$$V_L = V_l \times \pi \gamma_0^2 \quad (4)$$

式中: V_l 为地层损失率, γ_0 为盾构外径。

表 1 土层特性指标表

指标 地层名称	泊松比 μ	内摩擦角 $/(^{\circ})$	内聚力 c/kPa	变形模量 E_0/MPa	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
人工填土①	0.3	10	8	8.5	1.75
粘土②	0.3	20	15	13	1.9
粉细砂③	0.32	25	/	18	2.0
中粗砂④	0.35	25	/	25	2.1
卵石⑤	0.2	40	/	50	2.1
花岗岩⑥	0.3	45	45	50	1.95

现代盾构的技术水平,地层损失率大体可控制在 1% ~ 3% 之间,地层损失率分别取 0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%;土体内摩擦角加权平均值 $\phi=22^{\circ}$,根据公式(2)计算得 $i=5.32$,依据公式(3)计算地表最大沉降依次为:5.20 mm、10.40 mm、15.84 mm、20.80 mm、26.00 mm,最大值发生位置为 $x=1.62\text{ m}$ 及 $x=10.38\text{ m}$ 。得出地表沉降曲线如图 3 所示。

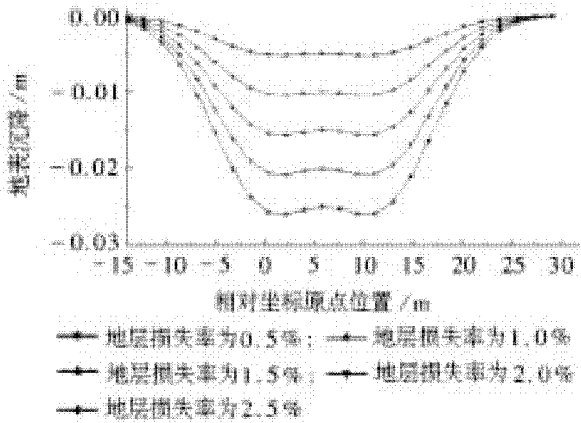


图 3 地表沉降曲线图

根据经典 peck 公式计算的单隧道地表沉降槽影响范围约为 $5i$,根据双洞体叠加 peck 公式计算得到的地表沉降槽影响范围受隧道间距影响大,约为 $5i+d$,本例沉降槽宽度约为 38.6 m。

地层损失率是影响地表沉降的重要因素,地层损失率越大,地表沉降值越大。

3.2 数值计算

采用有限差分软件 FLAC^{3D}对隧道施工进行数值模拟,分析隧道施工引起地表沉降的规律。根据地质条件及经验选取土层参数,模拟范围为南北向、东西向各 120 m,深度为 60 m,模拟范围可消除边界效应的影响。模型图如图 4 所示,计算中设置 17 个监控点如图 5 所示。

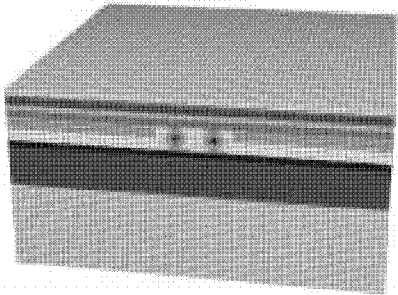


图 4 数值计算模型图

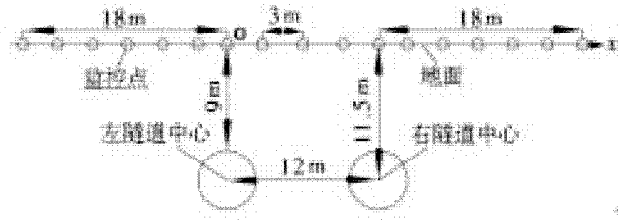


图 5 数值计算监控点示意图

以左隧道中心对应地表位置为原点 0 (见图 5),监控点相对原点位置及模拟计算出的地表沉降数值如表 2 所示。数值计算出的土体沉降如图 6 所示,隧道周边土体水平位移如图 7 所示。图 8 为隧道洞身截面上土体沉降等值线图,数值计算出地表沉降曲线如图 9 所示。

表 2 隧道开挖引起的地表沉降数值计算

相对原点位置/m	-18	-15	-12	-9	-6	-2	0	3	6
沉降/mm	-0.52	-1.44	-3.11	-5.82	-9.59	-13.69	-16.69	-17.7	-17.45
相对原点位置/m	9	12	14	18	21	24	27	30	
沉降/mm	-17.7	-16.68	-13.68	-9.58	-5.81	-3.10	-1.44	-0.51	

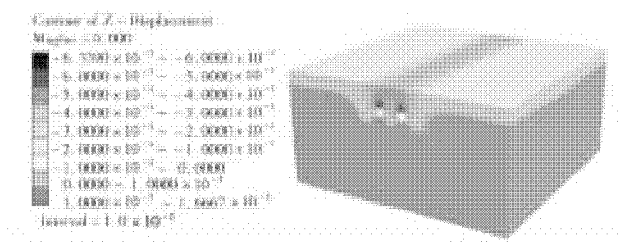


图6 隧道周边土体沉降

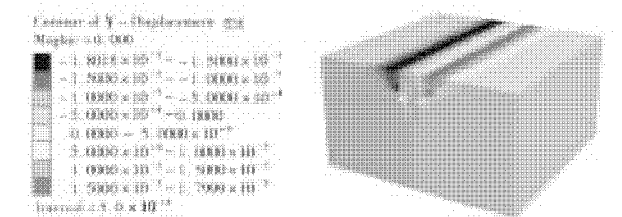


图7 隧道横向周边土体位移

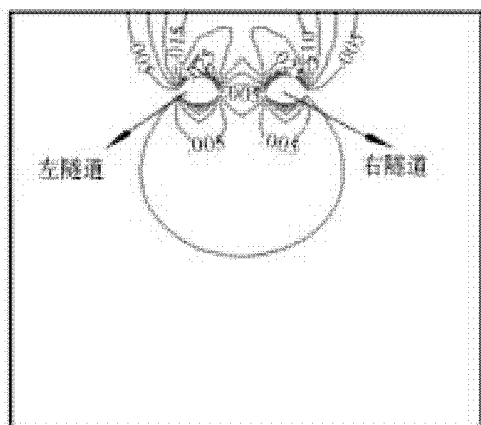


图8 隧道周边土体沉降等值线图

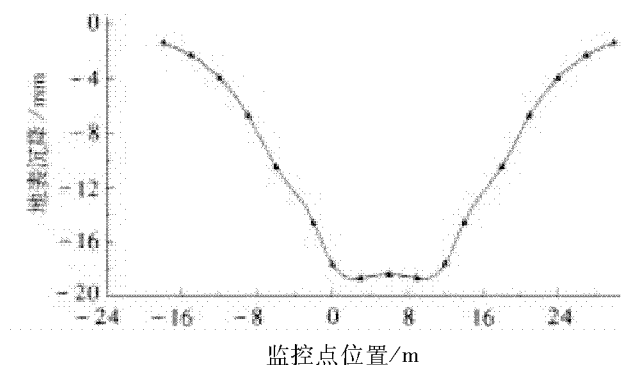


图9 地表沉降的数值计算结果

根据图6及图7,隧道周边土体变形均匀对称,且土体沉降槽在隧道周边对称分布。且图8进一步表明,在洞身横截面上,沉降等值线对称分布,表明FLAC^{3D}模拟双孔平行隧道开挖引起的地表沉降是符合实际且适用的。由图9表明,数值计算得到的地表沉降曲线形态与双洞体叠加 peck 公式计

算近似,沉降槽以两隧道中间位置为轴线,对称分布其两侧,但模拟出沉降槽宽度较大,约为48 m。

3.3 比较分析

理论计算与数值模拟的地表沉降槽比较曲线如图10所示。曲线表明两种方法得到的曲线形态近似,在地层损失率控制在1.5%~2%时,理论值较为接近模拟计算值,可作为预测地表变形的依据。

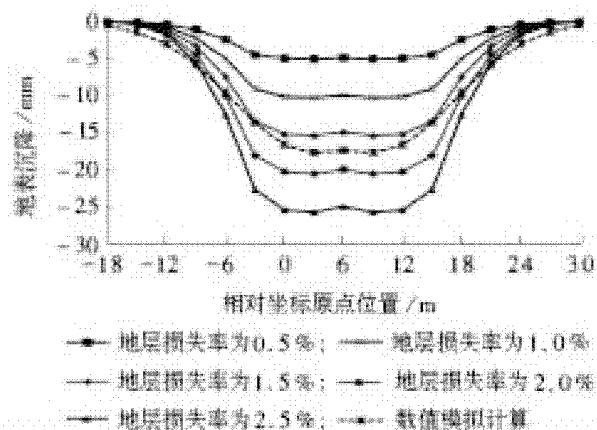


图10 理论计算与数值模拟值比较

4 结论

1) 一般情况下的双孔平行隧道开挖引起的地表沉降槽不完全呈正态分布,而是呈两正态分布的地表沉降槽的叠加。即 peck 经验公式对双孔隧道适用,本文中称之为双洞体叠加 peck 公式,地表沉降槽以两隧道中间位置为轴线基本对称分布在其两侧。

2) 采用FLAC^{3D}模拟隧道开挖引起的地表沉降拟合出对称地表沉降槽与实际相符,通过数值模拟出的地表沉降曲线与双洞体叠加 peck 公式结果相近,进一步表明 peck 公式适用于双孔平行隧道开挖引起的地表土体位移叠加原理。

3) 双孔平行隧道地表沉降槽宽度受隧道间距影响较大,采用双洞体叠加 peck 公式计算约为 $5i + d$ 。

4) 地层损失是引起地表沉降的主要因素,地层损失越大,地表沉降越大。不同地层损失率下的地表沉降槽变形趋势一致,即均近似成两正态分布叠加状,但地层损失率控制在1.5%~2%时,理论值较为接近模拟计算值,可作为预测地表变形的依据。

参考文献:

- [1] 刘建航. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991: 329 - 330.
- [2] 章慧建, 仇文革, 王庆. 城市地铁盾构施工引起的地表沉降分析[J]. 铁道建筑, 2010(9): 64 - 67.
- [3] 侯公羽. 岩土加固理论的数值实现及地下工程应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 290 - 293.
- [4] CELESTINO T B, GOMES R A M P, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15 (1): 97 - 100.
- [5] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico: State of the Art Report, 1969: 225 - 290.
- [6] 陈军, 刘波, 陶龙光. 暗挖地铁车站引起地表沉降拟合分析与 peck 法比较研究[J]. 岩土工程技术, 2005, 19 (1): 1 - 4.
- [7] 朱洪高, 郑宜枫, 陈昊. 双圆盾构隧道土体地表沉降特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23 (2): 62 - 67.
- [8] 韩焯, 李宁, J. R. Standing. peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的使用性分析[J]. 岩土力学, 2008, 28 (1): 23 - 28.
- (责任编辑: 李 丽, 范 君)
-
- (上接第 44 页)
- [15] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32 (10): 2 889 - 2 900.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23561—2010 煤和岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2010.
- [17] 陶俊林, 陈裕泽, 田常津, 等. SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应分析[J]. 固体力学学报, 2005, 26 (1): 107 - 110.
- [18] 平琦, 马芹永, 袁璞. SHPB 试验岩石试件应力平衡时间预估分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32 (12): 55 - 60.
- [19] 平琦, 马芹永, 袁璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30 (3): 401 - 407.
- [20] 许金余, 范建设, 吕晓聪. 围压条件下岩石的动态力学特性[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 19 - 33.
- [21] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 5 - 64.
- [22] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 2 - 50.
- [23] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (3): 526 - 533.
- [24] 高富强, 杨军, 刘永茜, 等. 岩石准静态和动态冲击试验及尺寸效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (4): 19 - 22, 68.
- (责任编辑: 何学华, 吴晓红)

安徽理工大学学报(自然科学版)

第 33 卷第 4 期(总第 130 期)2013 年 12 月

目 次

岩石动态断裂韧度温度相关性的实验研究	宫能平,陈明飞 (1)
基于 DNA 自组装模型解决图的最大独立集问题	刘 静,殷志祥 (4)
煤矸石充填复垦对土壤特性影响研究	郑永红,张治国,姚多喜,等 (7)
汾西炼焦煤中硫的赋存形态研究	葛 涛 (12)
孙疃矿第四含水层分布特征及富水性评价	李小龙,姚多喜,杨金香 (15)
回采巷道锚注加固浆液渗流规律研究	张华磊,涂 敏 (20)
冻结红层软岩的蠕变特性研究	朱 杰,徐 颖,亓燕秋 (26)
不等长工作面覆岩破坏规律的数值模拟分析	高明中,王新丰 (32)
基于 SolidWorks 掘进巷道支护作业平台仿真设计	王开松,陈 凯,马齐江 (37)
煤矿砂岩 SHPB 动态压缩力学性能试验与分析	平 琦,马芹永,袁 璞 (40)
基于 WLAN 的无线通信异步快速切换机制研究	张友能,洪 炎,黄文全,等 (45)
一种改进的 OFDM 系统定时估计方法	王志杨,刘金龙 (50)
基于 LabVIEW 和物联网的分布式家庭智能监控系统	杨洪涛,牛明强,王岚晶 (55)
煤样粒径对煤低温氧化影响的实验研究	张树川 (62)
铜官山铜(铁)矿地质特征及找矿方向预测	王西荣,李绍侠 (67)
人行激励下大跨度钢结构连廊舒适度分析	陈 刚,周 杰 (72)
地表沉降的双洞体叠加 peck 公式及数值分析	任 强,杨春英,徐 薇 (78)
关于本刊启用稿件在线处理系统的通知	(25)
注意正确使用“百分点”	(66)
欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿	(71)
期刊基本参数:CN34-1220/N*1981*q*A4*82*zh*P*¥5.00*1000*17*2013-12	

(第 33 卷卷终)

Contents

Experimental Study on Dependence of Toughness against Dynamic Fracture of Rocks on Temperature	
..... GONG Neng - ping , CHEN Ming - fei (1)	
Maximum Independent Set Problem Solution Based on DNA Self - assembled Model	
..... LIU Jing, YIN Zhi - xiang (4)	
Study on Influence of Gangue on Reclaimed Soil Properties	
..... ZHENG Yong - hong, ZHANG Zhi - guo, YAO Duo - xi, et al (7)	
Research on Chemical Speciation of Sulfur in Cooking Coal of Fenxi County	GE Tao (12)
Distribution Characteristics and Evaluation of the Fourth Aquifer in Kongtong	
..... LI Xiao - long, YAO Duo - xi, YANG Jin - xiang (15)	
Study on Slurry Seepage Law in Surrounding Rocks of Roadways Reinforced by Blot - grouting	
..... ZHANG Hua - lei, TU Min (20)	
Research on the Creep Characteristics of Frozen Red - Bed Soft Rock	
..... ZHU Jie, XU Ying, QI Yan - qiu (26)	
Numerical Simulation Analysis of Overburden Failure in Working Face of Unequal Length	
..... GAO Ming - zhong, WANG Xin - feng (32)	
Simulation Design of Supporting Operation Platform in Roadway Excavation Based on SolidWorks	
..... WANG Kai - song, CHEN Kai, MA Qi - jiang (37)	
Dynamic Compression Properties Tests of Sandstones from Coalmine by SHPB Apparatus	
..... PING Qi, MA Qin - yong, YUAN Pu (40)	
Research on Fast Asynchronous Switching Mechanism of Wireless Communication Based on WLAN	
..... ZHANG You - neng, HONG Yan, HUANG Wen - quan, et al (45)	
An Improved Timing Estimation Method for OFDM Systems	WANG Zhi - yang, LIU Jin - long (50)
Home Distributed Intelligent Monitoring System Based on LabVIEW and Internet of Things	
..... YANG Hong - tao, NIU Ming - qiang, WANG Lan - jing (55)	
Study on Influence of Coal Particle Size on Low Temperature Oxidation of Coal	ZHANG Shu - chuan (62)
Geological Features of Copper (Iron) Ore in Tongguanshan and Its Prospecting Direction Prediction	
..... WANG Xi - rong, LI Shao - xia (67)	
Comfort Analysis of Long - span Steel Corridor Stimulated by Pedestrian	CHEN Gang, ZHOU Jie (72)
The Peck Formula and Numerical Analysis of Surface Subsidence Caused by Tunnel Excavation	
..... REN Qiang, YANG Chun - ying, XU Wei (78)	