

文章编号: 1000-7598(2009)06-1826-05

# 矿石崩落块度的三维建模技术及块度预测

冯兴隆, 王李管, 毕林, 龚元翔, 尚晓明

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 以金川集团III矿区为研究对象, 根据现场不连续面参数调查结果, 利用Monte Carlo模拟方法, 产生不连续面综合数据库。然后确定构成岩块的节理面数量、建立三维坐标系统中节理面方程、确定构成岩块的顶点和每个顶点的坐标, 并计算岩块的体积、判别岩块的形状特征, 从而对矿石崩落块度进行预测。矿石的崩落块度直接影响采场的底部结构设计、出矿设备的选择、二次破碎、炸药消耗的估算等。经过模拟得出的崩落块度预测结果为: 等效尺寸大于0.9 m的块体筛上累积体积百分比为38.2%, 大于1.3 m的块体筛上累积体积百分比为17.2%。

**关键词:** 自然崩落法; 矿石崩落块度; 块度预测

**中图分类号:** TD 853.36

**文献标识码:** A

## Three-dimensional modeling technology and fragmentation prediction for ore-caved fragmentation

FENG Xing-long, WANG Li-guan, BI Lin, GONG Yuan-xiang, SHANG Xiao-ming

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Jinchuan No.3 mine area is taken as a study object. Based on the field investigation of discontinuity parameters, by adopting Monte Carlo simulation method, a synthetic database of discontinuities is generated. The ore fragmentation for block caving is predicted by determining the number of discontinuities that form a block, establishing the equation of the discontinuities in the 3D coordinate system, determining the actual vertices and the coordinate of each vertex, and the volume of the block is measured; the characteristics of the block shape are identified. The ore fragmentation has a direct influence on the configuration of stope bottom, the selection of loading and handling equipment, secondary crushing method, the estimation of explosive consumption and so on. The simulation results show that the fragmentation with equivalent size of more than 0.9 m account for 38.2 per cent and those more than 1.3 m account for 17.2 per cent of the total fragmentation volume.

**Key words:** block caving method; ore-caved fragmentation; fragmentation prediction

## 1 引言

1977年White根据节理面的空间分布规律, 采用随机模拟技术建立了节理面二维岩石模型, 用以预测矿石组成。随后, Amitabha Mukherjee和Ashrafmahtab等提出了通过采用有效间距考虑岩体力学性质及地应力对矿石块度的影响的平面平行四边形模型<sup>[1-2]</sup>。这些模拟方法的提出为矿石块度预测迈出了可喜的一步。由于矿石块度的形成过程及影响因素的复杂性, 比较系统地预测矿石块度的三维块度预测模型的研究工作进展缓慢。我国自从1984年在铜矿峪引进自然崩落法以后, 为此开展了

比较系统的理论与技术研究工作<sup>[2]</sup>。在自然崩落法可行性研究中, 必须对崩落矿石的块度进行预测, 从而为采场底部结构设计提供依据, 以便顺利地放出矿石<sup>[3]</sup>。在自然崩落法设计阶段, 矿石块度的大小决定于所采用的底部结构类型、尺寸及所使用的出矿方式和设备类型。在生产过程中, 矿石崩落块度的分布决定了大块产出率及二次破碎方法和炸药消耗量, 以及矿石流动性及放矿过程控制<sup>[2]</sup>。因此, 主要取决于矿床地质条件的崩落矿石块度的大小对应用自然崩落法的成败有重要影响。

本文主要介绍基于Monte Carlo模拟技术的矿石块度预测三维模型原理和模型建立过程。并针对

收稿日期: 2007-09-28

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (No. 50490270)。

第一作者简介: 冯兴隆, 男, 1980年生, 博士研究生, 主要从事自然崩落法方面的研究。

金川III矿区的工程实际,进行了块度预测。

## 2 三维矿石块度预测建模技术

三维块体模拟就是连续反复地从模拟的不连续面网络中抽取岩块样本。每个岩块样本由三个链接表组成,它们分别是岩块标识列表、构成岩块多变形面的列表以及每一个面的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 坐标列表。

### 2.1 三维块度模型的建立步骤

三维块度模型的建立如图1所示。建立步骤为:收集不连续面参数的统计数据,执行 Monte Carlo 模拟<sup>[3]</sup>,产生不连续面综合数据库;确定构成岩块的节理面数量;计算从不连续面到坐标原点的垂直距离;确定构成岩块的节理面半空间类型;建立三维坐标系统中节理面方程;确定构成岩块的顶点和每个顶点的坐标;计算岩块的体积、最大尺寸、中间尺寸和最小尺寸,并判别岩块的形状特征;重复以上步骤,直至达到规定的岩块数量(默认值为5000)。

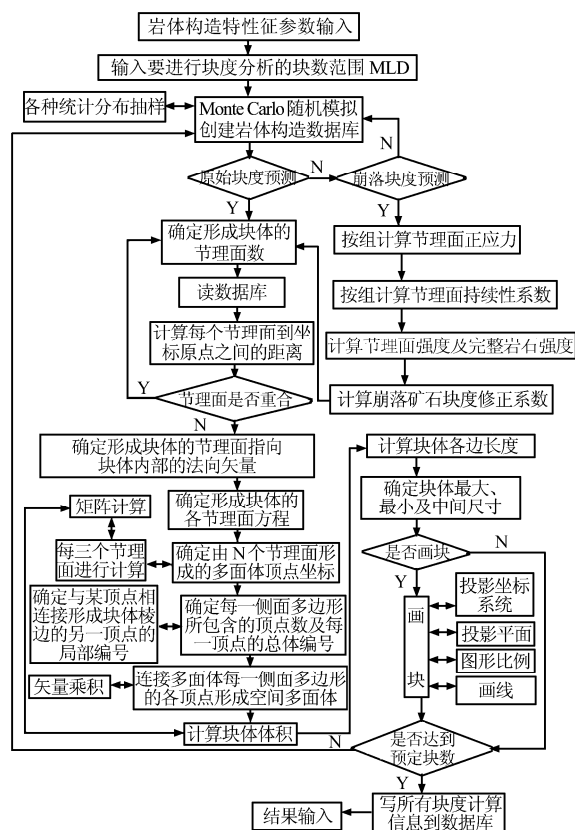


图1 三维块度模型建立流程图

Fig.1 Flow chart of forming a block in 3D modeling

### 2.2 三维块体模拟具体法则

#### 2.2.1 三维块体模拟的坐标系统

在进行三维块体模拟时采用右手坐标系统,如图2所示,以正东方向为 $X$ 轴的正向,正北方向为

$Y$ 轴的正向,垂直向上为 $Z$ 轴的正向。

#### 2.2.2 每次抽样中构成块体的节理面数的确定

根据岩体被节理切割情况的现场调查分析表明:构成单个岩块的节理面数从4~8条不等,一般以6条最为常见<sup>[4]</sup>。对金川III矿区各组节理的统计表明:节理组中第1组约占32.4%,第2组约占23.7%,第3组约占29.2%,零散节理约占14.7%,正常的切割节理数也应在4~8条。

鉴于岩块实际的侧面的数量,通过模拟正态分布(均值和方差的赋值分别为6.8和2.0)产生大小介于4~10之间的随机数来确定形成块体的节理面的数量。接着,从三维节理模拟样本库中一次读形成单个块体所需的全部节理面,同时,数据位置标志符也同步前移。

#### 2.2.3 节理面到坐标原点的垂直距离

图2(a)表示了沿主测线的垂直剖面中节理面的分布情况。在图中,从坐标原点到节理面与主测线交点之间的距离是通过视在间距相加计算出来的。从综合数据库中读取形成岩块的不连续面视在间距 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 。第 $k(1 \leq k \leq n)$ 节理面到坐标原点的垂直距离, $d_k$ 通过以下公式计算:

$$d_k = \sum_{i=1}^k s_i \sin \beta_k \cos \omega_k \quad (1)$$

式中: $s_i$ 为第 $i$ 节理面沿测线方向的视在间距; $\beta_k$ 为是第 $k$ 节理面的的倾角; $\omega_k$ 为第 $k$ 节理面的的倾向与主测线方向所夹角。

#### 2.2.4 节理面半空间类型表示法

构成岩块的节理面半空间类型采用数值编码表示:“1”表示节理面上半空间构成块体,“-1”表示节理面下半空间构成块体,见图2(a)。

#### 2.2.5 构成块体的各侧面节理的平面方程

若第 $k$ 节理面的倾向是 $\alpha_k$ ,那么节理面的单位法向量可以表示成以下形式:

$$\left. \begin{aligned} n_{kx} &= \sin \beta_k \sin \alpha_k \\ n_{ky} &= \sin \beta_k \cos \alpha_k \\ n_{kz} &= \cos \beta_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则该节理面的平面方程为

$$n_{kx} m_k x_k + n_{ky} m_k y_k + n_{kz} m_k z_k + d_k = 0 \quad (3)$$

式中: $m_k$ 为表明用节理面的上半空间还是下半空间形成去块体的标志;当用第 $k$ 个节理面的上半空间形成块体时, $m_k=1$ ;当用第 $k$ 节理面的下半空间形成块体时, $m_k=-1$ 。

### 2.2.6 块体顶点坐标计算及顶点总体编号

岩块顶点坐标的计算是通过求解形成岩块侧面节理面方程组。在对一个岩块进行计算的过程中,要不断地对岩块顶点进行编号,岩块中顶点的连续编号用于决定这些顶点之间的连接。

在判断某个顶点和节理面(对形成岩块)是否有效的过程中必须遵循两条原则<sup>[5]</sup>。首先,某岩块的每个顶点必须由 3 个或更多的平面相交组成,其次,组成岩块的每个平面必须至少包含 3 个或更多的顶点。如果某个不连续面包含的顶点数少于 3 个,则该不连续面将被剔除。

### 2.2.7 块体体积计算

图 2(b)表示三维空间坐标系统中节理面的交切状态,图 2(c)表示由节理面  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  和  $D_5$  形成块体的一部分侧面。基于高斯通量定理来计算块体体积,每个块体的体积  $V$  计算公式如下:

$$V = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N (\bar{r}_i \bar{n}_i) \sum_{j=1}^M (\bar{r}_j \bar{n}_j) L_j \quad (4)$$

式中:  $N$  为单个块体侧面的数量;  $\bar{n}_i$  为第  $i$  侧面的单位法向量;  $\bar{r}_i$  为从坐标原点到第  $i$  侧面任何一个顶点的向量;  $M$  为单个侧面边的数量;  $L_j$  为该侧面第  $j$  边的长度;  $\bar{r}_j$  为从坐标原点到该侧面任何一个顶点的长度;  $\bar{n}_j$  为第  $j$  边的单位法向量。

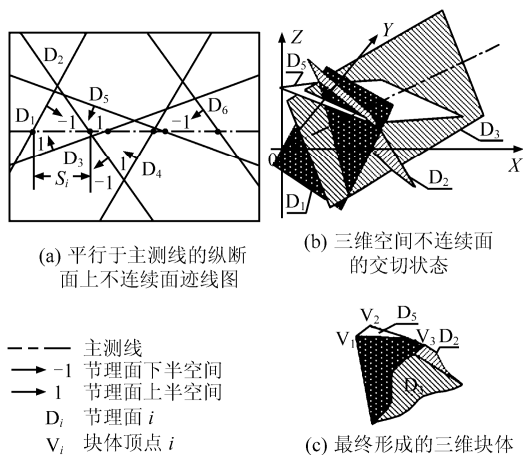


图2 三维块体模型形成过程

Fig.2 Process for forming a block in 3D modeling

### 2.2.8 块体尺寸的表达

块体的尺寸用 3 个长度来表达,它们分别是最大尺寸、中间尺寸和最小尺寸。如图 3 所示,最大尺寸就是指块体顶点之间距离的最大值。岩块的中间和最小尺寸从垂直于最大尺寸的投影面得到。岩块的中间尺寸定义为岩块剖面投影图中任意两顶

之间的最大距离,它通过岩块剖面投影图的几何中心。岩块的最小尺寸定义为岩块剖面投影图中通过几何中心并且垂直于中间尺寸方向的线段的长度。中间尺寸和最小尺寸的计算法则如下:

(1) 设定最大尺寸的方向作为投影方向,计算块体的顶点的投射坐标。(见图 3(b));

(2) 计算块体顶点在投影面上的所有投影点的中心点的坐标,并把该中心点作为投影面上局部坐标的原点,接着计算  $Y$  轴负轴和投影点与局部坐标原点之间的连线沿逆时针方向形成的角的大小,把所形成的角最小的点作为第 1 个点,根据所形成的角的大小对所有的点按顺序重新排序;

(3) 假设  $i$ ,  $j$  和  $k$  代表投影面上三个相邻的投影点的序号,若  $i < j < k$ ,那么分别对  $i$ ,  $j$  和  $k$  赋阈值为:  $i=1$ ,  $j=2$  和  $k=3$ ;

(4) 棱边  $p'_i p'_j$  和  $p'_j p'_k$  所形成的内角计算公式为

$$\omega_{ijk} = \cos^{-1}[(r_{ij}^2 + r_j^2 - r_i^2)/2r_{ij}r_j] + \cos^{-1}[(r_{jk}^2 + r_j^2 - r_k^2)/2r_{jk}r_j] \quad (5)$$

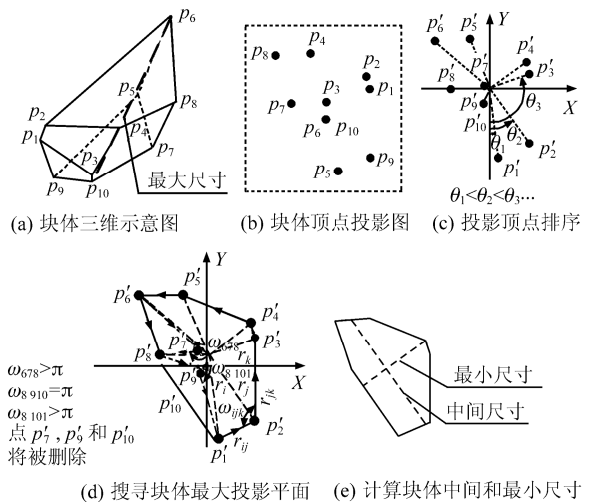


图3 块体投影及三维尺寸计算法则示意图

Fig.3 Algorithm for projecting a block to a projective plane and for calculating the three-dimensional size of sampled block

(5) 如果  $\omega_{ijk} < \pi$ , 则令  $i$ ,  $j$  和  $k$  代表紧接着相邻的点,当  $k > N$  时( $N$  为块体顶点个数的总数),令  $k=1$ 。否则,删除  $j$  点,令  $i$ ,  $j$  和  $k$  代表以前的点;

(6) 重复第 4 步和第 5 步,直到  $j > N$  时,按顺序连接现有的点,就是块体在投影面上最大的断面;

(7) 作一条通过块体最大投影面中心的直线, 并绕该中心沿逆时针方向从  $0^\circ$  旋转到  $360^\circ$ , 每次旋转  $1^\circ$ , 计算该直线与最大投影面轮廓线的两交点之间线段的长度, 最大长度就是前面所定义的块体的中间尺寸, 和最大线段垂直的线段的长度就是块体的最小尺寸。

### 2.2.9 块体形状的表达

用三维块体模型参数 (块体形状系数) 来表示块体形状, 该参数定义如下<sup>[6]</sup>: 块体的实际体积  $V$  与以块体最大尺寸为直径  $l_{\max}$  的球体的体积的比率。三维块体模型参数  $\gamma$  的计算公式如下:

$$\gamma = \frac{6V}{\pi l_{\max}^3} \quad (6)$$

根据三维块体模型参数的值, 可以把块体的形状粗略地分为 5 种类型: 条状块体、板状块体、块状块体、立方体状块体和球状块体, 不同的几何形状所对应的三维块体模型参数值的范围如图 4。

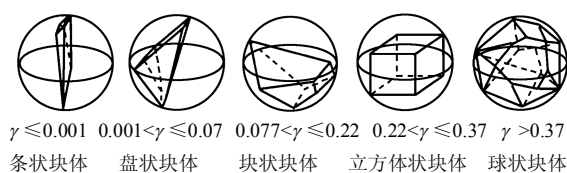


图 4 块体三维形状系数和块体三维形状对照示意图

Fig.4 Evolution of 3D shape index vs. function of various geometrical shapes of blocks

### 2.2.10 等效尺寸

矿石的块度通常是用通过某一尺寸的格筛的可能性来衡量的。在矿石块度预测中人们大多以大于某一单向尺寸 (块体的最大尺寸) 的矿石所占体积或重量的百分比来确定矿石块度组成。这种方法所确定的矿石块度组成可能造成较大尺寸的矿石所占百分比升高。因此, 在对矿石块度组成进行统计时, 有必要利用块体形状系数的概念, 引入矿石等效尺寸的概念。

矿石块度等效尺寸:

(1) 当  $0.22 < \gamma < 1.00$  时,  $S_e = S_{\max}$ ; (2) 当  $\gamma < 0.22$  时, 若  $R_i > 0.7$ , 则  $S_e = S_{\max}$ , 若  $R_i \leq 0.7$ , 则  $S_e = S_{\max}$ 。

式中:  $S_e$  为矿石块体等效尺寸;  $S_{\max}$  为矿石块体的最大尺寸;  $S_{\max}$  为矿石块体的中间尺寸;  $R_i$  为 [0,1] 均匀分布随机抽样值。

## 2.3 三维模型的主要特点

采用三维模型对块度预测的主要特点为: 模型中考虑了前述影响崩落矿石块度的节理系统空间几

何参数及力学参数; 模型中不仅考虑了优势节理面对岩体的切割作用, 而且考虑了对岩体切割起一定作用的零散节理; 模型可以进行原始矿石块度的预测, 也可以进行崩落矿石块度的预测, 但不能考虑研磨作用对块度的影响; 采用三维模型及单块多次抽样方法, 解决了二维模型无法考虑零散节理的切割作用及了解块体真实形状与大小的缺点, 克服了 Dagama<sup>[3]</sup>模型受限于微机容量及节理而连续假设而带来的模拟上的偏差; 采用“-1”、“1”表示参加切割的节理面的半空间类型来确定指向块体内部的法向矢量, 方便地确定了由几条节理面所切割成的块体。

采用三维模拟预测的块度大小结果, 为采场底部结构设计提供依据, 可用来确定所采用的底部结构类型、尺寸及所使用的出矿方式和设备类型。在生产过程中, 根据预测的矿石崩落块度的分布, 可以确定大块产出率及二次破碎方法和炸药消耗量以及矿石流动性及放矿过程控制。

## 3 块度分布预测

本研究中应用等效尺寸大于某个值所占的体积的百分比来确定矿石的块度组成。金川III矿区整体应用上述建模技术的块度预测结果如表1示。

表1 整体块度预测结果统计表

Table 1 Statistics of overall block forecast result

| 等效尺寸/m | 筛上累积百分比/% | 形状系数 | 百分比/% |
|--------|-----------|------|-------|
| 0.0    | 100.0     | 0.01 | 0.7   |
| 0.1    | 99.9      | 0.02 | 0.6   |
| 0.2    | 97.8      | 0.03 | 1.7   |
| 0.3    | 91.4      | 0.04 | 5.4   |
| 0.4    | 81.2      | 0.05 | 8.1   |
| 0.5    | 70.4      | 0.06 | 10.6  |
| 0.6    | 60.2      | 0.07 | 11.4  |
| 0.7    | 52.0      | 0.08 | 11.6  |
| 0.8    | 43.1      | 0.09 | 9.3   |
| 0.9    | 38.2      | 0.10 | 9.3   |
| 1.0    | 32.4      | 0.11 | 6.7   |
| 1.1    | 25.6      | 0.12 | 5.6   |
| 1.2    | 20.4      | 0.13 | 4.2   |
| 1.3    | 17.2      | 0.14 | 3.5   |
| 1.4    | 16.6      | 0.15 | 2.8   |
| 1.5    | 13.6      | 0.16 | 2.0   |

由表 1 可见, 矿石块体的形状系数分布差别不大, 主要集中在 0.02~0.16 之间, 根据形状系数与块体形状的对照标准, 块体形状以盘状块体和块状块体占绝大多数。等效尺寸大于 0.9 m 的块体筛上累积体积百分比为 38.2%, 大于 1.3 m 的块体筛上累积体积百分比为 17.2%。

## 4 结 论

(1) 模型中不仅考虑了优势节理面对岩体的切割作用, 而且考虑了对岩体切割起一定作用的零散节理。

(2) 模型可以进行原始矿石块度的预测, 也可以进行崩落矿石块度的预测, 但不能考虑研磨作用对块度的影响。

(3) 采用三维模型及单块多次抽样方法, 解决了二维模型无法考虑零散节理的切割作用及了解块体的真实形状与大小的缺点, 克服了 Dagama 模型受限于微机容量及节理而连续假设而带来的模拟上的偏差。

(4) 采用“-1”、“1”表示参加切割的节理面的半空间类型, 来确定指向块体内部的法向矢量, 方便地确定了由几条节理面所切割成的块体。

(5) 崩落块度预测结果表明, 等效尺寸大于 0.9 m 的块体筛上累积体积百分比为 38.2 %, 大于 1.3 m 的块体筛上累积体积百分比为 17.2 %。

## 参 考 文 献

- [1] 王英学, 高波. 节理岩体的块体尺寸特征分析及其可靠度评价[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 397—400.  
WANG Ying-Xue, GAO Bo. The block dimension and stability analysis in the joint rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 397—400.
- [2] 董卫军. 矿石崩落块度的三维模型与块度预测[J]. 矿冶, 2002, 11(2): 1—3.  
DONG Wei-jun. Three-dimensional model and prediction of ore fragment size for block caving[J]. **Mining and Metallurgy**, 2002, 11(2): 1—3.
- [3] 王李管. 矿块崩落法崩落矿石块度预测技术研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1988.
- [4] BROWN E T. Block caving geomechanics[M]. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Centre, 2003.
- [5] TSAI V J D. Delaunay triangulations in TIN creation[J]. **International Journal of GIS**, 1993, 7(6): 501—524.
- [6] EADI B A. Modelling primary and secondary fragmentation for block caving[D]. Brisbane: University of Queensland, 2002.
- [7] 朱岳明, 刘勇军. 确定温度特性多参数的立方体试验及反演分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 175—177.  
ZHU Yue-ming, LIU Yong-jun. Determination of thermal parameters of concrete by reverse analysis of test results [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 175—177.
- [8] 朱岳明, 刘望亭. 土石坝中复杂渗流场的反分析研究[J]. 河海大学学报, 1991, 19(6): 49—56.  
ZHU Yue-ming, LIU Wang-ting. Back analysis of complicated seepage flow in an earth-rock dam[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 1991, 19(6): 49—56.
- [9] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 144—159.
- [10] 马跃峰, 肖志乔, 朱岳明. 基于遗传算法的泵站混凝土热学参数反演分析[J]. 水电能源科学, 2005, 23(6): 31—34.  
MA Yue-feng, XIAO Zhi-qiao, ZHU Yue-ming. Back analysis of concrete thermal parameters in pump station based on genetic algorithms[J]. **Water Resources and Power**, 2005, 23(6): 31—34.
- [11] 章国美, 朱岳明. 基于快速模拟退火算法的混凝土热学参数反演分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 56—58.  
ZHANG Guo-mei, ZHU Yue-ming. Inverse analysis on concrete thermal parameters based on fast simulated annealing algorithm[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2007, 38(1): 56—58.
- [12] 黎军, 朱岳明, 何光宇. 混凝土温度特性参数反分析及其应用[J]. 红水河, 2003, 22(2): 33—36.  
LI Jun, ZHU Yue-ming, HE Guang-yu. Back analysis of thermal characteristics parameters of concrete and its application[J]. **Hongshui River**, 2003, 22(2): 33—36.
- [13] 赵同彬, 谭云亮, 刘传孝. 基于遗传算法的巷道位移反分析研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 107—109.  
ZHAO Tong-bin, TAN Yun-liang, LIU Chuan-xiao. Research on back-analysis of roadway displacement based on genetic algorithms[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 107—109.
- [14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

上接第 1825 页