

软岩矿区地面下沉及其对工业建筑物影响分析

李文秀^{1,2}, 赵胜涛², 梅松华^{1,2}, 翟淑花², 乔金丽²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.河北大学 岩土工程研究所, 河北 保定 071002)

摘 要: 根据鲁中软岩矿区开采引起地面下沉及地面井塔楼等建筑物倾斜变形的工程实际, 采用非确定性研究方法, 将深埋破碎金属矿体开采引起地面沉陷或岩体移动变形这一客观现象视为一随机事件, 建立了开采引起地面沉陷或岩体移动变形的数学模型。利用该模型可对开采引起地面沉陷及其对地表工业建筑物影响进行具体分析评价。通过具体计算分析结果表明, 在软岩地层条件下矿体开采地表移动变形的影响范围有随着采深的增加而逐渐增大的趋势。

关 键 词: 岩石力学; 地下开采; 软岩矿区; 地面下沉; 建筑物

中图分类号: TU 457; TD 325⁺.435

文献标识码: A

Analysis of ground subsidence due to underground mining in soft rock mining areas and its influence on industrial buildings

LI Wen-xiu^{1,2}, ZHAO Sheng-tao², MEI Song-hua^{1,2}, ZAI Shu-hua², QIAO Jin-li²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Based on results of the statistical analysis of a large amount of measured data in mining engineering, the fundamental theoretical model of ground surface movements due to underground mining is established by using the theory of probability. The formulas of rock mass displacements and deformations are developed and applied to the prediction of the ground surface movements due to underground mining. The agreement of the theoretical results with the field measurements shows that our model is satisfactory and the formulae obtained are valid and thus can be effectively used for analyzing and predicting the ground surface movements due to underground mining in soft rock mining areas. The results have shown that the area of rock mass displacements and deformations in overlying strata will extend with the increase in depth.

Key words: rock mechanics; underground mining; soft rock mining area; ground subsidence; building

1 引 言

迄今为止, 地下开采引起地面沉陷或岩体移动变形问题已有部分成功的分析方法和可行的工程技术措施, 无论是在理论研究, 还是在实践经验方面都已取得了许多成果^[1~4]。

许多学者的研究表明, 采矿工程活动以各种方式影响地质环境, 从而产生一系列的环境效应。而地下开采引起的竖井井筒变形破坏现象早已引起人们的关注^[5~12]。据不完全统计, 迄今为止, 我国已有 20 多个煤矿的竖井井筒受开采影响而产生变形和破坏^[9~12]。但由于工程地质条件和岩体介质自身的复杂性, 对地表所产生的影响以及对竖井

的井筒及井塔楼等建筑物构成影响的诸种因素均难以精确确定; 因而开采引起岩体移动变形问题在客观上属于具有“随机性”和“模糊性”的一类非确定性问题的。

针对鲁中软岩地层条件下开采地表移动变形引起的竖井井筒变形破坏问题进行具体分析探讨。该矿竖井包括主井和 1[#], 2[#] 副井, 采区距竖井直线距离约 300 m。主井由地表至地下一 520 m, 井深为 720 m, 井径为 4.7 m; 地表井塔楼高 65.8 m。2[#] 副井由地表至地下一 563 m, 井深为 763 m, 井径为 7.0 m, 在地下 -435 m, -472 m 以及 -520 m 处与主井相通; 地表井塔楼高 44.0 m。由于岩体产生了移动变形, 主副井井筒出现了倾斜和变形, 主、副

收稿日期: 2004-04-20 修改稿收到日期: 2004-05-19

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室资助课题 (No.Z110406)。

作者简介: 李文秀, 男, 1954 年生, 教授, 主要从事工程地质、岩土力学及岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: leewenxiu@yahoo.com.cn

井地面塔楼也发生了倾斜。

随着时间的推移和地下开采的延深，矿区地表移动变形区域将随之扩大，主、副井和矿区地表移动变形量也会进一步增大，矿井安全将受到威胁。因此，如何保证矿山的持续正常开采至关重要。

2 工程地质及开采条件

2.1 采区工程地质情况

由矿山工程地质勘察资料可知，矿体上覆岩层是第三系红板岩，为粘土岩和砂岩互层，厚度为 400~700 m，顶部 10 余米属强风化带，其下部逐步变为稍或未风化带。其稳固性较差，具有遇水膨胀的特性，浸水后岩石膨胀松散易碎。随着时间延长，岩石含水量增加而强度降低。第三系下面为约 300 m 厚的闪长岩，顶部风化程度属强到中等。根据矿区水文地质资料，闪长岩内的这些发育的构造裂隙含水性和导水性好，在闪长岩顶板及以下 100 m 均可遇到裂隙充水。

2.2 竖井地段工程地质情况

竖井位于矿体的下盘，岩层出露情况主要为：0~10 m 为第四系人工填土及粘性土，质地松散，具可塑性，因此，塔基在施工过程中采取了开挖或桩基基础；10~470 m 为第三系粘土层及砂层互层出现，顶部属强风化带，向下逐步稍风化或未风化。位于矿体的上盘，为粘土质砂岩（红板岩）、砂质粘土岩、粉砂岩、砂砾岩，岩石呈紫色、黄褐色，其成份有灰岩、大理岩、变质闪长岩块，强度一般为 20~30 MPa，节理不发育、稳固性较差、透水性差，但遇水容易崩解泥化，具遇水膨胀的特性；470~750 m 全部为闪长岩，顶部风化程度属强烈中等，下部为致密块状，主要成份为长石、角闪石、透辉石黑云母等，岩石坚硬。

该矿区现有东、南、西、北 4 个采区，均采用无底柱分段崩落法进行回采。

3 地表移动变形及对地表建筑物的影响

随着地下采矿掘进的深入，采空区范围不断扩大，1989 年东区地表出现了下沉和塌陷，且日趋严重，目前观察到的最大沉陷坑深 13 m，直径达 21 m。采区出现下沉后地表形成大面积的积水（图 1）。

由于地面沉陷或岩体移动变形的不断扩展，已对矿区竖井的地表井塔楼等建筑物构成了一定的影响。积累了部分观测资料（如图 2 和表 1 示）。为了生产和生活安全，从 2000 年 3 月后又开始观测。

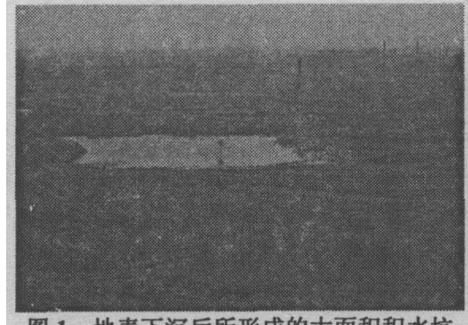


图 1 地表下沉后所形成的大面积积水坑

Fig.1 A typical pool due to ground subsidence

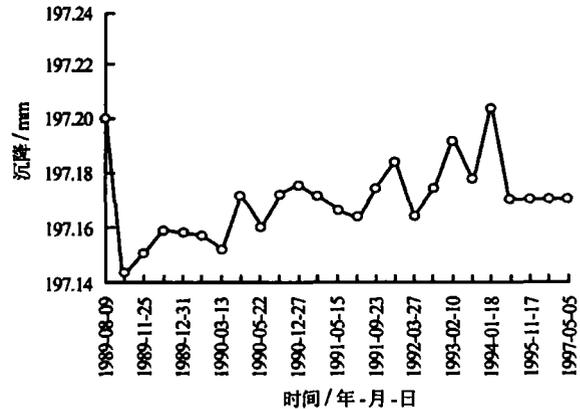


图 2 矿区地表 1# 测点下沉值与时间关系

Fig.2 Relationship between the values of ground subsidence and times (ground measuring point #1)

由表 1 可见，地表下沉一直在继续且仍在不断增大，只是有些测点下沉速度变化平缓。由于岩体产生了移动变形，主、副井井筒出现了倾斜和变形，主、副井地面塔楼也发生了倾斜。1999 年发现主井提升系统的主转动轴出现东高西低，高差达 15.68 mm，到 2000 年主井塔楼已发生水平位移约为 90 mm，2# 副井水平位移约为 30 mm。主、副井沉降观测表明，随着采区井下开采水平下降，必将影响地表塌陷区的变化。事实上的确如此。矿区地表的迹象表明，塌陷区特别是西区 and 南区变动仍然活跃。

表 1 地表移动观测结果

Table 1 The field measurements of ground movements

| 测点编号 | 1997 年 3 月下沉值 / mm | 月平均下沉值 / mm | 2000 年 7 月下沉值 / mm |
|------|--------------------|-------------|--------------------|
| E12 | -7 | -0.18 | -65 |
| E13 | -10 | -0.26 | -79 |
| E14 | -30 | -0.78 | -213 |
| E16 | -188 | -4.82 | -1 101 |
| E21 | -1 463 | -37.5 | -3 244 |
| E02 | -57 | -1.46 | -207 |
| E05 | -157 | -4.02 | -1 740 |
| E11 | -562 | -14.41 | -1 411 |
| N49 | -1 021 | -26.18 | -3 252 |
| N50 | -847 | -21.72 | -3 368 |
| N54 | -481 | -12.33 | -5 317 |
| N55 | -183 | -4.69 | -3 905 |
| N56 | -85 | -2.18 | -1 393 |
| N57 | -8 | -0.20 | -324 |
| N18 | -238 | -6.10 | -841 |

注：表中月平均下沉值系指观测期内的月平均下沉值。

4 地表移动预测分析

4.1 理论分析模型

实测资料表明, 地下开挖引起地表移动变形现象可以看作是一种随机现象, 据此即可建立数学模型。下面导出地下开挖地表下沉的计算公式^[4]。

当地下开挖宽度 L 大于主要影响半径 R 的 2 倍, 即开挖宽度 $L > 2R$ 时, 称之为“充分开挖”。此时, 若挖出的矿层厚度为 k_2 , 开挖深度为 H , 则开挖后在 x_0 处, 其顶板下沉为

$$W(x_0) = k_1 k_2 \tag{1}$$

式中 k_1 为下沉系数, 为待定常数; k_2 为开挖厚度。

假设在 x_0 处挖出宽度为 dx_0 , 深为 $W(x_0)$ 的微小的一段土层, 则地表土体的下沉为

$$\left. \begin{aligned} dw &= W(x_0) \frac{1}{R} \exp\left[-\frac{\pi}{R^2}(x-x_0)^2\right]; \\ R &= \frac{H}{\tan\beta} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中 R 为主要的影晌半径; H 为开采深度; β 为主要影响范围角, 为与岩层性质有关的待定参数(对于本矿区而言, β 值在 $50^\circ \sim 68^\circ$ 之间变化, 不是某一定值)。

当开挖宽度为 L 时, 有:

$$\left. \begin{aligned} W(x, z) &= \int_0^L \frac{W(x_0)}{R} \exp\left\{-\frac{\pi}{R^2}(x-x_0)^2\right\} dx_0, \\ x &\in (-\infty, \infty) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)为水平地面 x 方向最终稳定下沉表达式。同样, 可得 y 方向最终稳定下沉表达式。

$$\left. \begin{aligned} W(y, z) &= \int_0^L \frac{W(y_0)}{R} \exp\left\{-\frac{\pi}{R^2}(y-y_0)^2\right\} dy_0, \\ y &\in (-\infty, \infty) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

当在水平地表条件下开采并形成空区以后, 上覆地层不仅在垂直方向上产生移动(即下沉)和变形, 而且, 在水平方向亦将产生移动和变形。对于水平移动公式的推导, 假定岩土体的体积不变, 即岩土体是不可压缩的。因而在平面的情况下, 对于连续的无穷小的变形而言, 体积不变公式可表示成如下形式:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = 0 \tag{5}$$

由此, 可以导出水平移动公式^[4]:

$$U(x) = b_1 k_1 k_2 \exp\left(-\frac{\pi x^2}{R^2}\right) \tag{6}$$

$$U(y) = b_2 k_1 k_2 \exp\left(-\frac{\pi y^2}{R^2}\right) \tag{7}$$

式中 b_1, b_2 分别为 x, y 方向的水平移动系数, 为待定常数。

4.2 地表移动分析

按上述理论模型, 可对该矿岩体移动变形进行定量预计, 再根据岩体移动变形量判断岩体宏观开裂破坏程度, 从而确定采空区上部地面沉陷或岩体移动变形破坏程度。

根据岩体移动表达式, 利用 QBASIC 语言编制了计算机程序, 对某矿一矿块剖面开采影响进行了计算。该矿块长度为 151 m, 采深为 776 m, 开采厚度为 2.30 m, 地表为水平, 经实测资料统计分析后定出主要影响范围角 $\beta = 55^\circ, \tan\beta = 1.428 2$ 。计算结果与实测资料对比, 二者吻合较好(见图 3)。

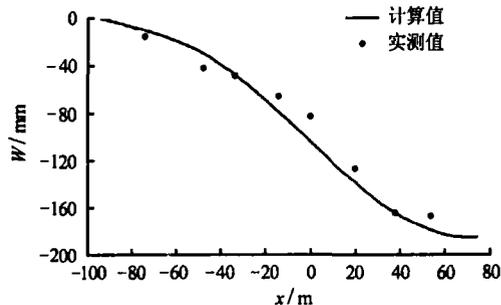


图 3 理论预计结果与实测资料对比图
Fig.3 Comparison between the data points and the theoretical curve (ground surface subsidences)

通过计算结果与实测资料对比, 可见本文给出的理论模型是符合工程实际的。因此, 可采用该理论模型对矿区今后的开采影响进行预测分析。

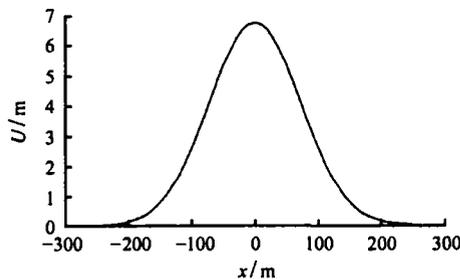


图 4 水平移动理论预计结果
Fig.4 The theoretical curve of horizontal displacements

现有观测资料分析结果表明, 主、副井所处地表随着地下开采工作的不断扩展和延深, 将继续产生水平向移动和变形, 其中, 水平向移动最大值将超过 6 m, 距采空区边界 240 m 以外仍会产生水平

向移动（见图 4），这意味着采空区上覆岩体的水平向移动对主、副井井筒将继续产生影响，这一点应予以高度重视。

结果还表明，在软岩地层条件下，对深埋破碎金属矿体，开采后地表移动变形影响范围有随着采深的增加而逐渐增大的趋势。这是此类矿区地表移动变形的一个新特点。

4.3 地质条件及岩石性质影响

采区矿体上覆岩层中的大多岩种都属于软岩，如砂卡岩、红板岩、角岩、蚀变闪长玢岩等，其突出的特征为强度低，孔隙率大，含有大量粘土矿物，具有较强的蚀变性。尤其是竖井所处地层，红板岩厚度大于 400 m。实验结果表明，此处所涉及到的上覆岩岩体对外部环境条件的变化极为敏感，当温度、湿度、应力、水、风等环境条件改变时，岩石的胀缩和软化反应极其明显，原来具有较高强度的岩石，经过一段时间即软化为泥状体。这种现象在砂卡岩、红板岩及蚀变闪长玢岩中尤为突出。力学实验结果表明，矿区岩石的单轴抗压强度的平均值一般低于 50 MPa，最低的不足 10 MPa。

另外，矿岩中粘土矿物的存在是软岩的一大特征，过去的研究表明，岩体中粘土矿物含量与岩石强度之间是一种互反的关系，粘土矿物的存在不仅使岩体的强度和摩擦角降低，而且也使岩体变的易膨胀、易软化。

在上述地质条件下，由于地下开采工作的不断扩展和延深，岩体的蠕变特性产生了明显的地面效应；从而导致了地表移动变形影响范围的不断扩大。

5 结论

根据现有观测资料分析，可得以下初步结论：

(1) 由于该采区岩石性质复杂，上覆岩层中以软岩为主，因而本矿区的主要影响范围角 β 值不可能太大；分析时取 $\beta = 55^\circ$ 较为适宜；而适合于该采区岩石性质的 β 值变化区间还有待于今后进一步深入研究探索。

(2) 矿体上覆岩层中软岩的存在不容忽视，尤其是竖井所处地层，红板岩厚度大于 400 m。岩体的蠕变特性将继续产生作用。由于主、副井处于软岩地层中，地表移动变形影响范围有随着采深的增加而逐渐增大的趋势。随着时间的推移和采矿区域的扩大，主、副井变形可能会增大，将威胁到竖井及井塔楼的安全。

(3) 由于观测点布设时间较长，现存的观测点

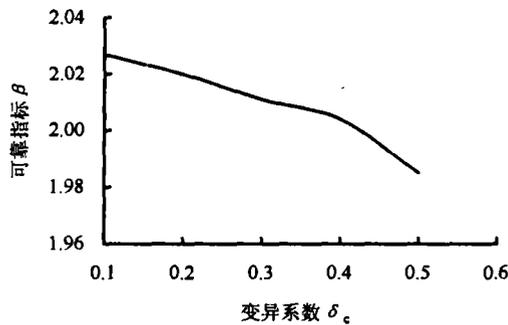
已经很难满足沉降观测的要求，建议在加强测量力量的同时补设观测点。

(4) 建议在竖井井塔楼周围一定距离范围内，建立地表移动观测线。应该连续观测，观察位移随时间变化趋势，分析井区、矿区岩体移动规律和地下采矿对岩体移动变形的影响因素，评估地下采对矿岩体移动变形的影响。

(5) 进行主、副井、矿区巷道的应力量测，采场至井塔之间的岩体应力量测；同时进行主、副井筒四周的围岩应力观测。为分析和预测主、副井、矿区的应力分布状态及发展趋势提供实测数据。

参考文献

- [1] 煤炭科学研究院北京开采研究所，煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 煤炭工业出版社，1981. Beijing Mining Institute, Coal Science Research Institute. The Laws of Ground Movements and Overburden Failure in Coal Mines and Their Applications[M]. Beijing, The Press of Coal Industry, 1981.
- [2] 任伟中，白世伟，葛修润. 厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(10):1715—1719. REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, GE Xiu-run. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 583—587.
- [3] 张向东，徐峥嵘，苏仲杰，等. 采动岩体分形裂隙网络计算机模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，2001，20(6): 809—812. ZHANG Xiang-dong, XU Zhengrong, SU Zhong-jie, et al. Research of the imitation about the fractal crack in overburden rock stratum by computer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 809—812.
- [4] 李文秀. Fuzzy数学理论在采矿及岩土工程中的应用[M]. 北京：冶金工业出版社，1998. LI Wen-xiu. Applications of Fuzzy Mathematics in Mining and Geotechnical Engineering[M]. Beijing: The Press of Metallurgy Industry, 1998.
- [5] 李定龙，周治安. 深厚表土层建井的渗透稳定性模型模拟研究[J]. 煤炭学报，1996，21(6): 607—612. LI Ding-long, ZHOU Zhi-an. Stimulation model for studying infiltration stability of shaft foundation in thick

图 8 变异系数 δ_c 与可靠指标 β 关系曲线Fig. 8 The curve of variation coefficient δ_c versus reliability index β

5 结语

尾矿坝的自身性质就决定了尾矿坝坝体材料有较大的变异性, 故笔者认为, 在尾矿坝的稳定性分析中引入可靠度分析是必要和必须的。尾矿坝的可靠度分析是以定性分析为基础, 可克服传统定性分析方法的缺陷, 使尾矿坝的稳定性计算分析更加合理, 其结果应该作为安全系数定值法的修正和补充, 从而更加科学和准确的分析尾矿坝的稳定性。本文分析结果表明, 在尾矿坝稳定性可靠分析中, 尾矿材料的内摩擦角的变异性将显著的影响尾矿坝稳定性分析的可靠指标; 重度的变异性也较粘聚力的变异性对计算的可靠指标影响大, 故不能忽略尾矿材料重度的变异性对尾矿坝可靠性分析的影响。建议在以后的尾矿坝可靠度分析中, 将尾矿材料的抗剪强度指标 c , ϕ 和土体的重度 γ 作为基本随机变量, 其概率分布类型均采用正态分布。

上接第 1705 页

and deep surface soil[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(6): 607-612.

- [6] Bruneau G, Tyler D B, Hadjigeorgiou J, Potvin Y. Influence of faulting on a mine shaft a case study: part I Background and instrumentation[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, 40: 95-111.
- [7] Bruneau G, Hudymab M R, Hadjigeorgiou J, Potvin Y. Influence of faulting on a mine shaft a case study: part II Numerical modeling[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, 40: 113-125.
- [8] 蒋斌松, 张平, 柏雪云. 立井井壁的计算理论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(增 1): 2 183-2 186.
JIANG Bin-song, ZHANG Ping, BOU Xue-yun. Calculating theory of shaft lining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(supp.1): 2 183-2 186.
- [9] 于保华. 大黄山矿井筒偏斜原因合析与治理措施, 矿山测量[J]. 1997,(1): 17-19.

参考文献

- [1] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
GAO Da-zhao. Principle of Soil Mechanics Reliability [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.
- [2] 郑铎, 吴世伟. 土坝稳定可靠度分析方法初探[A]. 全国第三届工程结构可靠性学术会议论文集[C]. 南京: [s.n.], 1992. 612-617.
- [3] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [5] 张超, 杨春和, 孔令伟. 某铜矿尾矿坝的尾矿砂力学特性研究及该坝的稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2003, (5): 858-862.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, KONG Ling-wei. Study on mechanical characteristics of tailing dam of a copper mine and stability analysis of tailing dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, (5): 858-862.
- [6] 包承纲. 关于岩土工程的可靠度问题[J]. *岩土工程师*, 1992, (3): 6-14.
BAO Cheng-gang. Some Problems of Reliability of Geotechnical Engineering[J]. *Geotechnical Engineer*, 1992, (3): 6-14.
- [7] Carson M A, Kirkby M J. Hillslope Form and Process[M]. Cambridge: Cambridge at the University Press, 1972.
- [8] 徐茂其, 张大泉. 斜坡稳定性综合评价探讨[A]. 自然边坡稳定性分析暨华蓥山边坡变形研讨会论文集[C]. 北京: [s. n.], 1992. 112-117.
- YU Bao-hua. Inclination of the shaft of dahuangshan coal mlue-cause aud countermeasures[J]. *Mine Surveying*, 1997,(1): 17-19.
- [10] 王渭明. 千米立井井壁应力分析及设计问题的探讨[J]. *煤炭学报*, 1993, (5): 63-72.
WANG Wei-ming. Stress analysis of shaft lining and design of the kilometer shaft[J]. *Journal of China Coal Society*, 1993, (5): 63-72.
- [11] 崔广心. 特殊地层条件竖井井壁破坏机理及防治技术[J]. *建井技术*, 1998, 19(1): 28-32.
CUI Guang-xin. Mechanism and the prevention and cure of the failure for shaft lining in special stratum[J]. *Mine construction technology*, 1998, 19(1): 28-32.
- [12] 毕思文, 王思敬, 杨志法. 煤矿竖井变形破坏三维数值模拟分析[J]. *建井技术*, 1997, 18(4): 35-37.
BI Si-wen, WANG Si-jing, YANG Zhi-fa. Three-dimensional model analysis of deformation failure for the shaft in coal mine[J]. *Mine Construction Technology*, 1997, 18(4): 35-37.