煤 炭 学 报 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Vol. 34 No. 7 July 2009

文章编号:0253-9993(2009)07-0887-05

包头壕赖沟铁矿开采沉陷规律预测

武 雄1,徐能雄1,田 红1,于 沭1,岳茂华2,杨锦华3,房利民2

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境工程北京市重点实验室,北京 100083; 2. 内蒙古自治区地质环境监测院包头分院,内蒙古包头 014010; 3. 包头市国土资源局,内蒙古包头 014010)

摘 要:采用自行开发的 ROCK MODEL 程序建立了研究区三维地质模型,然后根据现场实际情况进行反演分析,确定矿体开采范围和岩土体物理力学参数;其次对塌陷坑现状进行流变分析; 最后对二次塌陷进行弹塑性和流变计算,预测塌陷坑最终的发育范围,并提出相应防治措施.研 究结果表明,塌陷坑在考虑流变情况下不会对外围公路产生影响,在二次塌陷情况下,会影响外 围公路的安全运行,建议尽快进行处理.

关键词:开采沉陷;弹塑性分析;流变分析;二次塌陷

中图分类号: TD325.4 文献标识码: A

Forecast of mining subsidence regular at the Haolaigou iron ore mine in Baotou

WU Xiong¹, XU Neng-xiong¹, TIAN Hong¹, YU Shu¹, YUE Mao-hua², YANG Jin-hua³, FANG Li-min²

Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environment Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
 Baotou Branch, Institute of Geological Environmental Monitoring of Inner Mongolia, Baotou 014010, China;
 Bureau of Land and Resources Baotou, Baotou 014010, China;

Abstract: A 3D geological model in the study area with the ROCK MODEL software was developed. Then according to in-situ conditions, the range of orebody mining and the physical and mechanical parameters of rock and soil mass were confirmed by inversion analysis. The creep analysis of the pit actuality was done. The elas-plasticity and creep of the second collapse were computed, and the final range of the pit was forecasted. Also, corres-ponding control measures were advanced. The results demonstrate that the collapse pit will not affect the road even though considering creep, but it will affect the road safety on the condition of second collapse. So the collapse pit should be deal with as soon as possible.

Key words: mining subsidence; elastic-plastic analysis; creep analysis; second collapse

内蒙古自治区包头市东河区壕赖沟铁矿 I 号矿段于 2007 -01 -17 零时发生特大突水事故, 经有关部 门全力抢救,仍有 29 名矿工遇难. 突水事故造成严重的地面塌陷地质灾害,给当地造成巨大的经济损失, 损坏房屋 10 余间,高压塔架 1 座, 360 V 电杆歪斜 2 根,损坏果园 2 hm²,直接经济损失约 500 万元^[1]. 事故调查专家组认为:塌陷区矿体顶板的基岩层较薄,有些地段甚至没有基岩,矿体开采以后,未按照设 计要求及时充填,上覆很厚的第四系堆积物大量进入采空区,由于第四系发育含水层,从而使水、泥石、 黏土混合物一并进入采空区,进而在地表形成一个直径约为 150 m、可见深度约为 30 m、面积约

收稿日期: 2008-08-07 责任编辑: 柴海涛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40602036);水利部科技创新项目(Sexc2005-11)

作者简介:武 雄(1973—),男,内蒙古清水河人,副教授,博士后. E-mail: wuxiong@ cugb. edu. cn

888 煤 发 学 报 2009 年第 34 卷

17 663 m²的巨型塌陷坑^[1]. 塌陷坑周围约 80 m 范围内分布有裂缝,多呈以塌陷坑为中心的环状,裂缝宽度为2~20 cm,长度 0.5~20.0 m. 塌陷坑边缘距离包头市北绕城公路最近处约 60 m,其西南部分布有大量基本农田,塌陷坑周边还布设有数个高压塔架、电杆及房屋.

截至目前,监测资料表明,塌陷坑仍有微量的变形趋势.鉴于塌陷坑周边设施的重要性,塌陷坑的继续变形是否会对附近公路、农田、电力设施及房屋造成影响;如果不及时处理,在暴雨作用下,水流顺着裂缝不断向下渗透,塌陷区内的土体受水流冲刷,顺着采空区移动,导致的二次塌陷是否会对上述重要设施产生影响,这2方面是本文研究的重点.

1 地质条件

I 矿段地层主要由前震旦纪深变质岩及新生界第四系组成.深变质岩系属于太古界桑干群第三含铁片 麻岩组中的第四亚组;第四系主要由更新统及全新统土黄、褐黄色的冲洪积砂砾石、中粗砂组成,地表有 腐植土及黄土,厚度 25~30 m^[2].

矿区构造简单,呈北东一南西走向、倾向南东的单斜构造.对于 I 矿段而言,对其开采有影响的主要 是 F₁ 断裂, F₁ 走向近东西,倾向北,倾角 35~70°,局部直立,断裂北盘上升,属于陡倾斜的逆冲断层, 垂直断距 200 m,破碎带最宽达 140 m^[2].

矿体围岩容重 27 kN/m³,单轴抗压强度 90 MPa 以上,普氏系数为 8~19,属中硬 - 坚硬岩石;矿体 容重 34 kN/m³,单轴抗压强度 170 MPa 以上,普氏系数为 17~19,属坚硬岩石,但由于破碎带和节理裂 隙的影响,破坏了岩体的完整性,矿床的工程地质条件属中等类型^[2].

2 计算参数及开采范围的反演分析

壕赖沟铁矿开采方法为浅孔留矿嗣后充填采矿法,该方法根据我国部分矿山实测资料和设计资料^[3-4],结合壕赖沟铁矿地形地貌、地质条件、围岩强度、矿体埋深条件及开采方式,本次研究确定地表移动参数如下:上盘表土移动角 β_1 =35°,下盘表土移动角 δ_1 =45°,端部表土移动角 γ_1 =45°;上盘岩石移动角 β =65°,下盘岩石移动角 δ =70°,端部岩石移动角 γ =70°.

根据地质资料可以圈定壕赖沟铁矿 I 矿段矿体 分布范围,如图 1 所示,可以看出,其4 个端点的 埋深分别为 50,44,73 及 270 m,采用上述参数计 算可以得出.假设铁矿体被全部采出后,其地表塌 陷范围要远远大于现状的实际塌陷范围,这说明在 矿体开采了一部分后就发生了地表塌陷,这一点在 紧急抢险救灾时就得到了证实.

由于铁矿采掘管理制度不健全,无法弄清楚在 塌陷时井下的开采情况,为了使地表塌陷预测结果 更加合理,就必须弄清楚井下的开采情况和采场围 岩的力学参数,本次研究采用 FLAC^{3D}软件对其进行 反演分析^[5-6].



图 1 概率积分法计算铁矿全部开采后地表塌陷范围 Fig. 1 Surface sedimentation area caused by mining totally based on probability integral method

采用课题组自主开发的三维建模系统 ROCK- Dased on probability integral method MODEL^[7-8],结合各种曲面插值、曲面求交、曲面重构与搜块等技术实现了矿区岩体结构三维地质模型,如图 2 所示.在此基础上进行网格剖分,计算模型共划分了 321 195 个单元,56 502 个结点.

本次反演分析计算参数最初相关地质报告和设计报告^[9],本构模型采用理想弹塑性模型,破坏准则 采用摩尔 - 库仑准则,断层采用实体单元.反演最终计算结果如图 3 (a)所示,地表沉降最大值为 28.827 m,塌陷坑直径约 172.487 m,开采矿体范围如图 2 (b)所示,最终计算参数见表 1. 武 雄等: 包头壕赖沟铁矿开采沉陷规律预测



图 3 铁矿开采后地表沉降云图

Fig. 3 Surface subsidence figures caused by iron ore mining

表 1

Table 1 Calculation parameters of rock and soil after inversion											
	岩层名称	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN・m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚强度/MPa					
	第四系覆盖层	6	0.30	19.6	22	0					
	铁矿	30 000	0.25	32.7	50	4. 50					
	岩层	25 000	0.26	26.8	42	4.00					
	断层	1 280	0.27	22. 5	25	0.06					

Table 1	Calculation	parameters	of	rock	and	soil	after	inversi	on

反演后的岩土体计算参数

地表塌陷规律预测 3

3.1 现状情况下地面塌陷流变分析

本次研究对现状塌陷进行了流变分析,流变模型采用诺顿双指数组合模型,其标准形式^[10-11]为 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{er}$ = $A \bar{\sigma}^n$,其中, $\dot{\epsilon}_n$ 为流变率; A 为材料特性参数,一般取 A = 1.0 × 10⁻²⁵ Pa⁻³/a; n 为材料特性参数,一般取 n = 3.

计算结果如图 3 (b) 所示,可以看出,1 a 后的地表沉降最大值为 30.633 m,比刚塌陷时增加了 1.806 m, 公路位置仍未发生塌陷.

3.2 二次塌陷分析

如果目前的塌陷坑不及时处理,在暴雨情况下,经水流下渗、冲刷,采空区的坍塌物很可能被搬运, 产生二次塌陷。笔者对其塌陷范围进行了弹塑性和流变计算分析,弹塑性计算结果表明,地表塌陷最大值 为56.301 m, 公路处最大塌陷值为0.2 m; 流变计算分析结果表明, 1 a 后地表塌陷最大值达57.572 m, 比二次塌陷刚发生时增加了1.271 m, 公路的最大塌陷值为0.45 m. 地表塌陷云图如图4 所示, 地表塌陷 等值线如图5所示.



图 5 二次塌陷弹塑性及流变计算结果等值线 Computing results of elastic-plastic and creep analysis of second collapse Fig. 5

-200

200

400

600

1 0 0 0

800

1 000

语 4 结

200

0

-200

400

600

800

数值计算结果表明,现状条件和1a后的地表塌陷不会影响公路的安全运行,但会在地表产生大量的 台阶状和水平拉伸裂缝,会对房屋、电力设施等造成损坏,这一点已被实践所证实.考虑流变的计算结果 比刚塌陷时的塌陷深度要深,但塌陷范围变化不大,说明产生的台阶状和水平拉伸裂缝情况更为严重.在 暴雨作用下产生的二次塌陷和1a后的地表塌陷会对公路安全运行造成影响,公路不但会发生塌陷,还会 产生台阶状和水平拉伸裂缝.考虑流变的计算结果比刚发生二次塌陷时的塌陷深度要深,但塌陷范围变化 不大,说明产生的台阶状和水平拉伸裂缝情况更为严重.

根据上述计算结果可以看出,如果发生二次塌陷将危及到公路的安全运行,而研究区地处干旱半干旱 气候区, 年降水量平均 322.3 mm, 年蒸发量大于降水量 9~10 倍, 但降雨比较集中, 6—9 月间的降水量 约占全年的70%, 目多暴雨, 因此, 现在的塌陷坑在降水的作用下完全可能发生二次塌陷, 这就要求必 须尽早对塌陷坑进行处理,处理方式宜采用填筑工艺,施工顺序应为先外后里,注意塌陷区一定要填实; 另外,要建立长期地表塌陷观测站,并建立紧急预案.

参考文献:

- $\begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$ 内蒙古自治区地质环境监测院. 包头市东河区壕赖沟铁矿1·17 突水事故引发地面塌陷应急调查报告 [R]. 2007. Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Geological Environment Monitoring. Survey report that the round subsidence of the november 11th by mine water accident in the Haolaigou iron mine of the East river district, Baotou city $\lceil R \rceil$. 2007.
- [2] 内蒙古地质局一零六地质队.内蒙古包头市东河区壕赖沟铁矿地质勘探报告 [R]. 1979. Inner Mongolia Bureau of Geological 106 Branch. Geological survey report of the Haolaigou iron mine of the East river district, Baotou city [R]. 1979.

- [3] 采矿手册编辑委员会. 采矿手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. Editorial Committee. Mining Handbook [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [4] 长沙有色冶金设计研究院.东河区壕赖沟铁矿(I矿段)采矿工程方案设计[R]. 2004.
 Changsha Non-ferrous Metallurgy Design and Research Institute. Mining engineering design of the Haolaigou iron mine(I) of the East river district, Baotou city [R]. 2004.
- [5] 宋卫东,杜建华,谢正平,等.大冶铁矿深凹露天开采最终边坡稳定性分析 [J].北京科技大学学报,2005,27
 (4):385-389.

Song Weidong, Du Jianhua, Xie Zhengping, et al. Stability analysis of a terminal slope in daye deep open-pit mine of China [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27 (4): 385 - 389.

- [6] 宋卫东,郭廖武. 程潮铁矿 2#主溜井加固工程稳定性数值分析 [J]. 北京科技大学学报, 2001, 23 (3): 193-195.
 Song Weidong, Guo Liaowu. Stability in reinforcement on No. 2 main ore-pass of Chengchao iron mine by numerical simulation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23 (3): 193-195.
- [7] 徐能雄,何满潮,景海河.非连续型非褶皱岩体三维可视化构模技术及应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23
 (15): 2 534 2 538.

Xu Nengxiong, He Manchao, Jing Haihe. 3D visual modeling technique of non-continuous non-folded rock-mass and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (15): 2534-2538.

[8] 徐能雄,何满潮,景海河.岩体结构三维构模技术及其可视化系统研制 [J].岩土工程学报,2004,26 (3):373-377.

Xu Nengxiong, He Manchao, Jing Haihe. A study on 3D modeling techniques and visual system of rock mass structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (3): 373 – 377.

[9] 武 雄, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 工程岩体抗剪强度确定综合方法——GMEM 研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (2): 246-251.

Wu Xiong, Jia Zhixin, Chen Zuyu, et al. Research of a synthetical method gmem on ascertaining shear strength for engineering rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (2): 246 - 251.

[10] 武 雄, 汪小刚, 段庆伟, 等. 重大水利工程下矿产开采对其安全影响评价及加固措施研究 [J]. 岩石力学与工程 学报, 2007, 26 (2): 338-346.

Wu Xiong, Wang Xiaogang, Duan Qingwei, et al. Study on safety impact assessment and reinforcement measures of coal mining under important hydraulic engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanils and Engineering, 2007, 26 (2): 338 – 346.

[11] 武 雄,于青春,汪小刚,等. 地表水体下煤炭资源开采研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):1029-1036.

Wu Xiong, Yu Qingchun, Wang Xiaogang, et al. Exploitation of coal resources under surface water body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (5): 1 029 - 1 036.

重要启事

为提高本刊刊登论文的质量,禁止抄袭、伪造、剽窃、不当署名、一稿多投等学术不端行为在本刊的 出现,《煤炭学报》编辑部从2009-01-01 正式启用"科技期刊学术不端文献检测系统"对投稿到本刊 的论文进行检测,如发现存在以上现象的论文,编辑部将进行严肃处理.

本刊编辑部