

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.04.001

# 露天矿边坡注浆帷幕止水效应数值模拟

姜立新

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 以某南方富水石灰石矿为工程背景, 研究了注浆帷幕的止水效应。取该石灰石矿某典型边坡横剖面, 建立了FLAC<sup>3D</sup>流固分析数值模型, 研究了开挖和渗流作用下边坡应力、边坡变形及孔隙水压力的变化特征。数值模拟分析结果表明: 边坡应力、边坡水平位移和孔隙水压力均随着高程的降低而减小; 在同一高程下, 边坡开挖侧的孔隙水压力相对较小, 说明注浆帷幕可有效减少水的渗入量, 这对于露天矿业的安全开采和控制周边环境具有重要意义。

**关键词:** 流固分析; 露天矿边坡; 注浆帷幕; 孔隙水压力; 边坡应力

**中图分类号:** TD824.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)04-0001-06

**引文格式:** 姜立新. 露天矿边坡注浆帷幕止水效应数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(4): 1-6.

## Numerical Simulation of Water-Proof Effect of the Grouting Curtain for Open-Pit Slopes

JIANG Lixin

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** With a hydrous limestone mine in South China as the engineering background, a study has been carried out on the water-proof effect of the grouting curtain. With a typical cross section of a limestone mine slope as the research sample, a numerical model of FLAC<sup>3D</sup> fluid-solid analysis has been established, followed by a study on the variation characteristics of slope stress, slope deformation and pore water pressure under excavation and seepage. The numerical results show that the slope stress, horizontal displacement and pore water pressure decrease with the decrease of elevation. At the same elevation, the pore water pressure on the excavation side of the slope is relatively small, which indicates that the grouting curtain can effectively reduce the water infiltration, a great significant indicator for the safe mining of open pit mining and the control of surrounding environment.

**Keywords:** fluid-solid analysis; open-pit mine slope; grouting curtain; pore pressure; slope stress

### 1 研究背景

我国南方地区的雨量较为丰富, 地下水的水位较高, 因而土木工程施工中需要考虑地下水的作用问题, 可以采用排水、止水等方式或同时采用上述措

施进行施工控制。由于地下水可被作为生产生活用水来源, 且由于排水可能造成地表建筑物或构筑物开裂等问题, 导致止水有时成为施工的主要控制措施。较多学者对土木工程施工中地下水的止水机理等进行了研究。如徐润等<sup>[1]</sup>研究了黏土水泥浆液的稳定

收稿日期: 2018-05-31

作者简介: 姜立新(1966-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教师, 硕士, 主要从事岩土工程及滑坡灾害治理,

E-mail: jiang13017335795@163.com

性等,分析了其堵水机理,得出黏土水泥浆液具有连续演变的黏性、塑性、弹性特征,这一特性既能保证浆液有良好的流动性,又能防止浆液的超扩散,形成密实的堵水帷幕。徐加夫等<sup>[2]</sup>对某铁矿近矿体注浆帷幕治水工程的钻孔涌水量、注浆量、注浆压力、矿区地下水位变化、矿井水压动态观测及帷幕体下围岩内部位移等进行了综合分析。腾永波<sup>[3]</sup>根据徐楼铁矿施工前期钻孔时的涌水量、注浆后的检测孔出水量,及帷幕注浆后的井下涌水量,分析了该矿区帷幕注浆的堵水效果。

施工中,由于现场工程地质、水文条件以及工况条件较为复杂,因而导致现场试验研究较为困难,但室内试验又成本高昂。随着科技的发展,数值仿真技术被广泛应用于复杂工程三维结构受力特性模拟和塑性流动分析中。FLAC<sup>3D</sup> (fast lagrangian analysis of continua 3D) 建模技术更是备受较多科研工作者的尊崇,已经被应用于对地下水止水作用机理与处理方法的数值研究中<sup>[4]</sup>。高学通等<sup>[5]</sup>将岩溶裂隙根据产状的不同分为水平、斜向和垂直3种形式,并且分析了浆液在3种不同产状裂隙中的扩散机理,评价了帷幕线与裂隙之间的组合形式对注浆施工及堵水效果的影响。张金娟<sup>[6]</sup>基于FLAC<sup>3D</sup>建立了沙砾石和卵石地层条件下黏土固化浆液的注浆渗透模型,并研究了注浆过程中土体中的压应力和孔隙水压力变化规律。金解放等<sup>[7]</sup>以某一露天矿山工程为例,将地表水和地下水对边坡的影响方式分为了静水压力、动水压力、软化作用3个方面。姚鹏飞等<sup>[8]</sup>基于流固耦合理论分析了露天矿山边坡土体力学参数及地下水位等因素对地下连续墙变形特性的影响。李庆文等<sup>[9]</sup>考虑了流固耦合作用,分析了露天矿山边坡开挖对高边坡稳定性的影响。白国良<sup>[10]</sup>以立方定律为基础,导出以应变为参数变量的采动岩体等效渗透系数,并基于FLAC<sup>3D</sup>建立了采动岩体流固耦合模型。王祖强等<sup>[11]</sup>基于FLAC<sup>3D</sup>流固耦合模块建立了坝体流固耦合模型,并且研究了冲抓回填前后坝体的渗透稳定性。

综观已有研究,未见关于岩石高边坡止水帷幕止水效果的数值模拟研究,因此本研究拟以南方某石灰石矿开采和水治理工程为背景,基于FLAC<sup>3D</sup>建立流固分析模型,分析注浆帷幕的止水效果,以期为南方的地下水治理工程施工提供理论参考依据。

## 2 流固分析原理

FLAC<sup>3D</sup>运用流固分析模块模拟地下水渗流时,将地层岩体视为均质孔隙介质<sup>[11]</sup>,并假定流体在岩体中流动符合Darcy定律,且满足Biot方程。

流固耦合作用下分析边坡帷幕体变形特性,应符合式(1)所示平衡方程:

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad (1)$$

式中:  $q_{i,i}$  为某一地下水水质点渗流流量;

$q_v$  为地下水流体源强度;

$\zeta$  为单位体积的岩体内流体体积改变量。

单位质量流体的动量平衡方程如下:

$$\sigma_{ij,i} + \rho g = \frac{\partial v_i}{\partial t}. \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流固体密度;

$g$  为重力加速度;

$\frac{\partial v_i}{\partial t}$  为速度对时间的导数;

$\sigma_{ij,i}$  为某一流体质点某一状态的应力张量。

假定地下水在裂隙中流动符合Darcy定律,可表达为

$$\mathbf{q}_i = -k[p - \rho_f x_j g_j]. \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{q}_i$  为单位流量向量;

$p$  为孔隙水压力;

$k$  为渗透系数;

$\rho_f$  为流体密度;

$g_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 为重力加速度的3个分量。

体积应变会引起流体孔隙压力变化,孔隙压力变化也会导致体积应变变化。孔隙介质本构方程的增量形式为

$$\Delta \sigma_{ij} + \alpha \Delta p \delta_{ij} = H_{ij}^* (\sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}). \quad (4)$$

式中:  $\Delta$  为增量;

$\alpha$  为Biot系数;

$H_{ij}^*$  为给定函数;

$\varepsilon_{ij}$  为总应变;

$\sigma_{ij}$  为应力。

应变率和速度梯度之间的关系为

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i}) / 2. \quad (5)$$

FLAC计算中,有给定孔隙水压力、给定边界外法线方向流速分量、透水边界和不透水边界4种类型的边界条件。其中,透水边界由式(6)给出:

$$q_n = h(p - p_e). \quad (6)$$

式中:  $q_n$  为边界外法线方向流速分量;

$h$  为渗漏系数;

$p_e$  为渗流出口处的孔隙水压力。

## 3 工程情况及FLAC<sup>3D</sup>数值模型

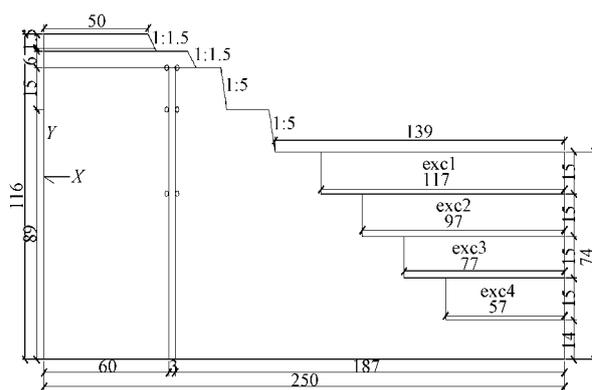
### 3.1 工程概况

南方某石灰石矿所处地区属亚热带湿润季风气

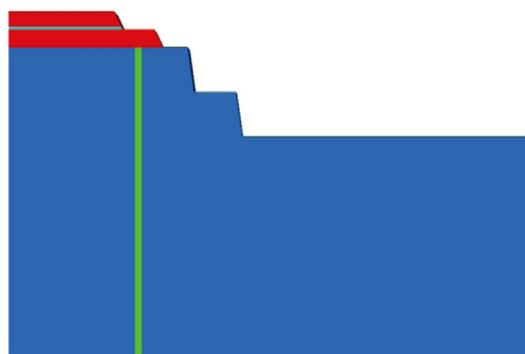
候, 年平均降雨量为 1 327.2 mm, 最大为 2 020.4 mm, 最小为 927 mm, 雨季为 5~8 月份。区内地表水体发育, 河流、池塘和水库等星罗棋布。矿区东北方向有一已填平的废弃矿坑; 矿区东北紧邻一条小河, 经过改造已于矿北边界上游截断, 用于矿坑排水; 在矿区西北向约 4 km 处和北东向约 3.75 km 处分别为丰盈水库和龙门水库。矿区断层破碎带地下水含量丰富, 主要为第四系松散岩类孔隙水和碳酸岩类岩溶裂隙水, 局部为强岩溶且节理裂隙发育。矿区地下水类型第四系松散岩类裂隙水和碳酸盐类岩溶裂隙水。矿区整体位于武陵山隆起与洞庭湖沉降带的过渡段, 基地底层整体北西向东南倾斜, 属于残丘坡地貌。

### 3.2 数据模型

通过分析矿区的工程地质资料和水文地质资料, 筛选出矿山开采过程中边坡涌水点的位置, 确定选取该矿区南侧涌水点附近某剖面进行研究。基于 FLAC<sup>3D</sup> 流固分析模块研究止水帷幕的堵水效果时, 仅考虑地下水渗流和矿山开挖的影响, 而不考虑地表水入渗的影响。边坡上层为土层, 下层为岩层, 土质边坡系数为 1.0:1.5, 岩质边坡系数为 1:1.5, 并将岩土层简化为水平地层, 边坡模型尺寸及数值网格剖分模型如图 1 所示, 其中网格划分主要采用岩土体为六面体网格及边坡体为楔形体网格。



a) 模型尺寸



b) 数值网格模型

图 1 边坡模型尺寸及其数值网格剖分

Fig. 1 Slope model size and its numerical mesh generation

模型参数设置和本构模型详见表 1。

表 1 模型物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the model

材料	体积模量 $K/\text{GPa}$	剪切模量 $G/\text{GPa}$	黏聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	干密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	本构模型
灰岩 (帷幕体)	22.600 00	11.100 000	30 000	40.00	2 090	Mohr
粉砂质黏土	0.001 30	0.000 709	23	25.00	1 850	Mohr
黏土	0.002 89	0.001 650	40	15.54	1 800	Mohr

本研究对边坡变形进行计算时, 不考虑模型周围的静水压力场, 并假设土体颗粒为不可压缩的, 且将渗透系数转化为 FLAC 规定的形式, 渗透系数取为  $10^{-12} \text{ m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ , 水位面位于灰岩的顶部位置, 并且将孔隙率取为默认值 0.5, 分别在帷幕体和灰岩、帷幕体和粉质黏土处建立接触面, 其法向刚度  $k_n=5.89 \times 10^{11} \text{ Pa/mm}$ , 切向刚度  $k_s=5.89 \times 10^{11} \text{ Pa/mm}$ , 为简化起见, 灰岩和帷幕体均采用相同的力学参数。

考虑到边坡外侧地下水补给, 故设置边坡外侧为透水边界, 其底部以及内侧为不透水边界, 并且将注浆帷幕作为止水材料不考虑渗透, 即将其视作不透水材料。

## 4 数值模拟结果与分析

### 4.1 边坡变形分析

开挖与渗流耦合条件下, 边坡的水平方向位移如图 2 所示, 图中位移单位为 m。由图 2 可知, 当第 1 步开挖完成至 -6 m 平台后, 边坡 X 方向上的位移最大值为 11.858 mm, 最大位移位置发生在粉砂质黏土层边坡的坡面处, 但渗流和开挖过程中边坡的最不利位置并未发生变化; 第 2 步开挖完成至 -21 m 平台时, 最不利坡面的最大位移为 11.921 mm; 第 3 步开挖完成至 -36 m 平台时, 最不利坡面的最大位移为 11.964 mm; 第 4 步开挖完成至 -51 m 平台时, 最不利坡面的最大位移为 12.007 mm。

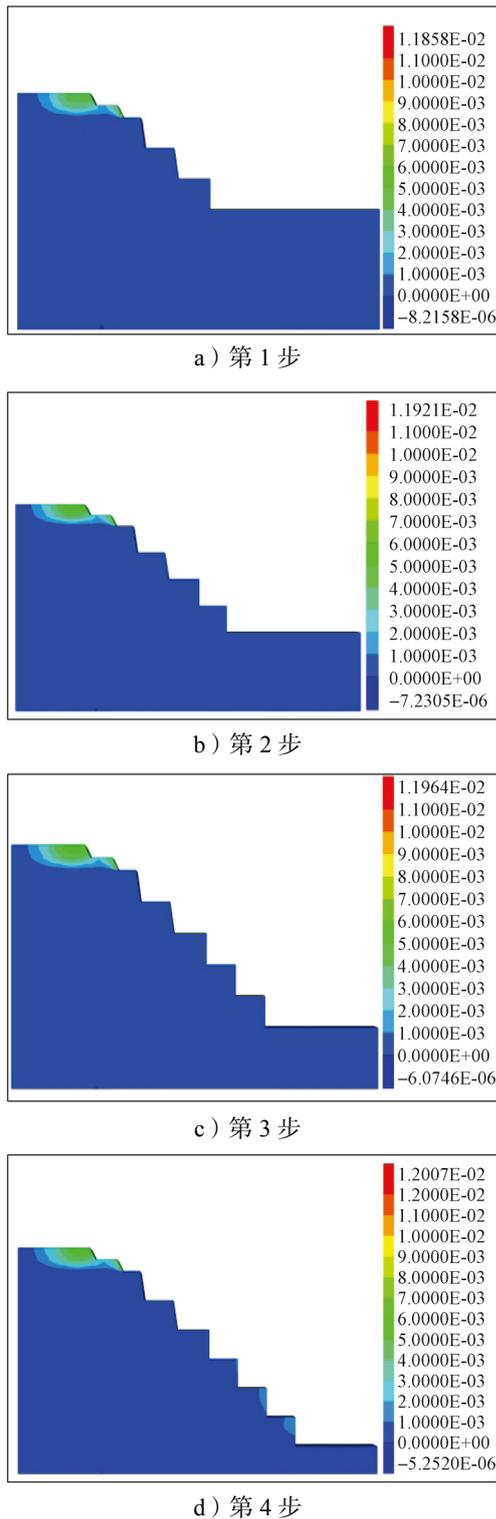


图2 开挖与渗流耦合条件下的水平方向位移

Fig. 2 Horizontal displacement variation cloud map under excavation and seepage coupling

由图2a~d可知,在渗流和开挖卸荷作用下,最大位移位于坡顶面边角处,随着向下开挖的进行,位移逐渐增加,但增加量不明显。

#### 4.2 边坡最大剪应力分析

边坡在开挖过程中的最大剪应力变化情况如图3

所示,图中剪应力单位为Pa。

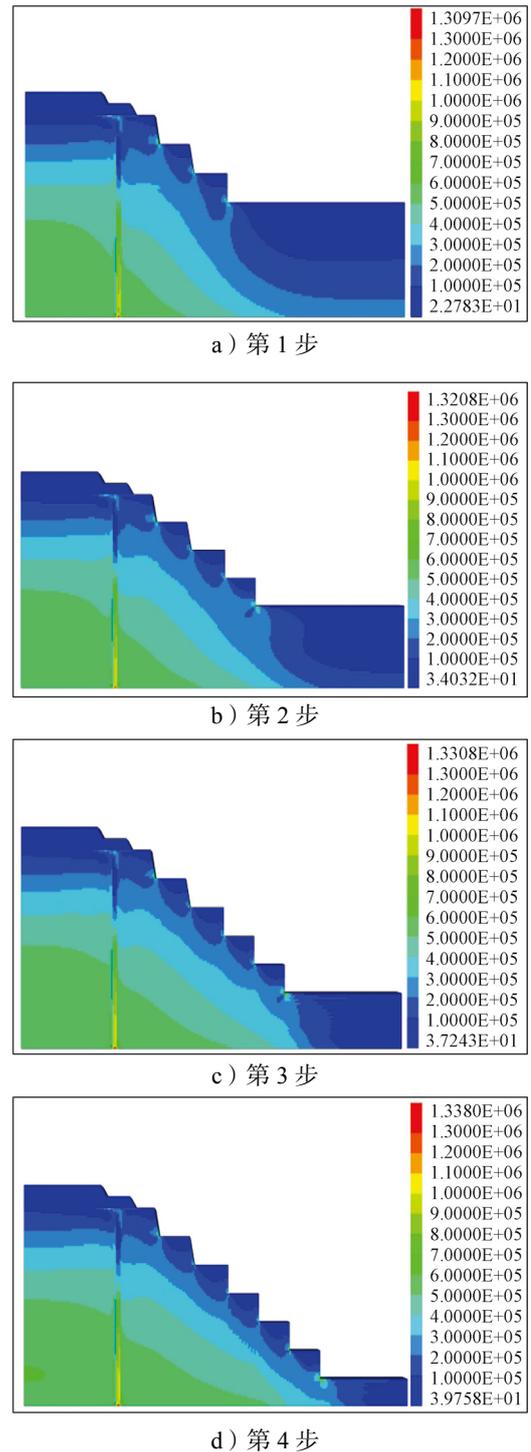


图3 边坡最大剪应力分布

Fig. 3 Distribution of maximal shear stress due to excavation and seepage

由图3可知,边坡开挖过程中的剪应力在第1、2、3和4步开挖完成时,其最大值分别为1.3097、1.3208、1.3308、1.3380 MPa。由图3还可以发现,最大剪应力主要集中于帷幕与边坡岩土体交界部位和每级边坡坡脚,前者反映了边坡开挖导致帷幕体与周界的相对变位导致剪应力增加,说明帷幕与岩土体咬合的重

要性,帷幕体两侧的剪应力分布有一定差异,对应力传递有一定的阻隔效应。

#### 4.3 边坡帷幕体对孔隙水压力阻隔效应分析

帷幕体的主要作用是控制补给水源,减小进入矿坑的水量,帷幕体导致的孔隙水压力分布差异情况如图4所示,图中水压力单位为Pa。

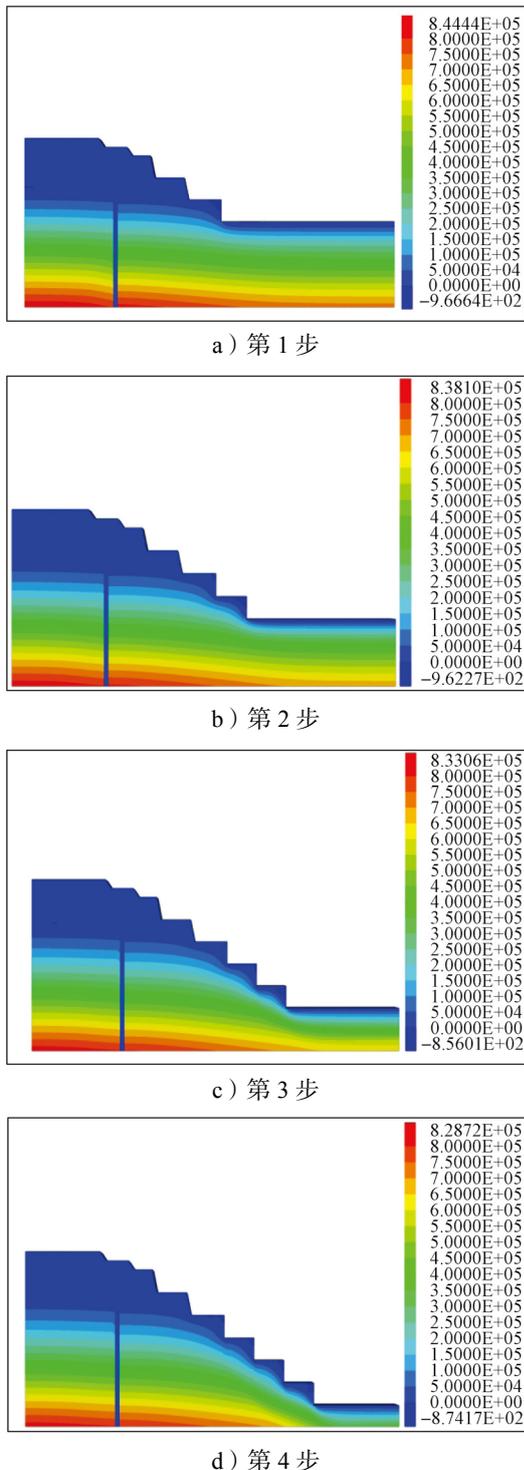


图4 帷幕体导致的孔隙水压力分布差异

Fig. 4 Discrepancy of pore pressure due to grouting curtain

由图4可知,帷幕两侧孔隙水压力存在明显的差

别,孔隙水压力等值线在帷幕体两侧存在落差,靠近开挖侧孔隙水压力明显低于外侧的,可见帷幕体的止水效果明显。然而由图所示自第一步开挖至第四步开挖,计算范围内孔隙水压力最大值从0.844 44 MPa降低至0.828 72 MPa,由此可见边坡帷幕体仅起部分封堵作用,以降低矿坑周围地下水渗流趋势。随着矿坑开挖深度的增加,帷幕体封堵效果呈现出持续减弱的趋势。

## 5 结论

本研究以南方某石灰石矿开采和水治理工程为背景,在分析了流固耦合作用下边坡帷幕体变形特性与机理的基础上,利用FLAC<sup>3D</sup>建立了边坡渗流与开挖耦合的流固分析数值模型,分析了在边坡设置灌浆帷幕带对渗流与开挖条件下的应力和位移响应特征,并以数据模拟研究了注浆帷幕的止水效果,得到如下结论:

1) 在渗流和开挖卸荷作用下,边坡的水平方向最大位移位于坡顶面边角处,随着向下开挖的进行,位移逐渐增加,但增加量不明显。

2) 在渗流和开挖卸荷作用下,边坡开挖过程中的最大剪应力主要集中于帷幕与边坡岩土体交界部位和每级边坡坡脚,说明边坡开挖导致帷幕体与周界的相对变位会导致剪应力增加,且帷幕与岩土体的咬合作用会导致帷幕体两侧的剪应力分布出现差异,可阻隔一定的应力传递。

3) 在渗流和开挖卸荷作用下,帷幕两侧孔隙的水压力存在明显差别,靠近开挖侧的孔隙水压力明显低于外侧的。

可见,开挖过程中注浆帷幕的止水效果明显,露天矿山开采时在矿坑外围设置灌浆帷幕带可有效减小帷幕体外侧地下水渗流,节约排水成本,降低矿坑四周的农田沉降。同时注浆帷幕的设置解决了矿坑地下水渗流涌水问题,使得本无法开采的露天矿山可以继续开采,且开采深度较之前更深,可开采量增大,经济效益显著。

## 参考文献:

- [1] 徐润,左永江.粘土水泥浆性能及其堵水机理的研究[J].煤炭学报,1996,21(6):613-617.  
XU Run, ZUO Yongjiang. Properties of Clay-Cement Grout and Mechanism of Water Control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(6): 613-617.
- [2] 徐加夫,辛小毛,王亮,等.某铁矿近矿体注浆帷

- 幕效果分析[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(6): 88-91.
- XU Jiafu, XIN Xiaomao, WANG Liang, et al. Effect Analysis on Grouting Curtain of Nearly Orebody in Iron Mine[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(6): 88-91.
- [3] 腾永波. 徐楼铁矿注浆效果分析[J]. 采矿技术, 2010, 10(4): 89-90.
- TENG Yongbo. Effect Analysis of Grouting Curtain in Xulou Iron Mine[J]. Mining Technology, 2010, 10(4): 89-90.
- [4] 周斌, 张超, 邵迟, 等. FLAC<sup>3D</sup>在建筑边坡稳定性分析中的应用[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 13-18.
- ZHOU Bin, ZHANG Chao, SHAO Chi, et al. Application of FLAC<sup>3D</sup> in the Stability Analysis of Building Slopes[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 13-18.
- [5] 高学通, 刘殿风, 蒋鹏飞. 岩溶裂隙产状对帷幕注浆施工及堵水的影响[J]. 金属矿山, 2013(3): 25-28.
- GAO Xuetong, LIU Dianfeng, JIANG Pengfei. Influence of the Karst Fissure Occurrence on Construction and Water Plugging of Curtain Grouting[J]. Metal Mine, 2013(3): 25-28.
- [6] 张金娟. 粘土固化浆液渗透注浆理论与数值模拟在砾砂、卵石土层中的应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- ZHANG Jinjuan. Theory of Permeation Grouting About Clay-Cement Grout and Application of Numerical Simulation Among the Soil Including of Sands and Pebbles[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.
- [7] 金解放, 赵奎, 许振华, 等. 水对某露天矿边坡的危害分析及治理措施研究[J]. 露天采矿技术, 2006, 21(5): 7-9.
- JIN Jiefang, ZHAO Kui, XU Zhenhua, et al. Hazard Analysis of Water on a Surface Mine Slope and Study on Harnessing Measure[J]. Opencast Mining Technology, 2006, 21(5): 7-9.
- [8] 姚鹏飞, 高永涛, 金爱兵, 等. 基于流-固耦合的露天矿山边坡地下连续墙变形特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(6): 49-53.
- YAO Pengfei, GAO Yongtao, JIN Aibing, et al. Research on the Deformation Characteristics of Diaphragm Wall of Mine Slope Based on the Fluid-Solid Coupling Theory[J]. Mining Research & Development, 2015, 35(6): 49-53.
- [9] 李庆文, 郭奇峰. 基于流固耦合的高陡边坡开挖稳定性研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(4): 100-104.
- LI Qingwen, GUO Qifeng. Study on the Stability of Deep and Deep Slope Excavation Based on the Fluid-Solid Coupled[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(4): 100-104.
- [10] 白国良. 基于FLAC<sup>3D</sup>的采动岩体等效连续介质流固耦合模型及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 106-110.
- BAI Guoliang. Fluid-Solid Coupling Model of Equivalent Continuous Medium in Overburden Rock Based on FLAC<sup>3D</sup> and Its Application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1): 106-110.
- [11] 王祖强, 张贵金, 王明, 等. 用FLAC<sup>3D</sup>模拟流固耦合评价病险土坝防渗加固效果[J]. 湖南水利水电, 2009(2): 41-43.
- WANG Zuqiang, ZHANG Guijin, WANG Ming, et al. Evaluation of Seepage Control and Reinforcement Effect of Dangerous Earth Dams by FLAC<sup>3D</sup> Simulation of Fluid-Solid Coupling[J]. Hunan Hydro & Power, 2009(2): 41-43.

(责任编辑: 廖友媛)