

文章编号: 1000-7598-(2012)09-2650-07

裂隙动水注浆渗流压力与注浆堵水效果的相关分析

湛铠瑜^{1,2,3}, 隋旺华^{1,2}, 王文学^{1,2}

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3.中国煤炭科工集团 重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘 要:采用裂隙动水注浆设备结合正交试验设计进行了裂隙动水注浆模型试验, 获得了渗流压力场与注浆效果和注浆工艺之间的相关关系。结果表明, 裂隙动水注浆的渗流压力场包括单峰型、平台型、多峰型、阶梯型 4 种类型; 出现平台型和多峰型渗流压力场时的注浆堵水效果好, 而出现阶梯型渗流压力场时的注浆堵水效果差; 为了获得好的注浆效果且节约浆液, 在渗流压力场为单峰型时应该适量增加注浆量; 而在渗流压力场为平台型或多峰型时应该适量减小注浆量; 渗流压力场为阶梯型时应该调节浆液配比, 缩短凝胶时间。研究结果对应用压力监测及时控制施工质量和调整注浆工艺有指导作用。

关 键 词:裂隙; 动水注浆; 渗流压力; 注浆效果; 模型试验

中图分类号: TD 265

文献标识码: A

Correlation analysis of seepage pressure and water plugging effect during grouting into a fracture with flowing water

ZHAN Kai-yu^{1,2,3}, SUI Wang-hua^{1,2}, WANG Wen-xue^{1,2}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. Chongqing Design and Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400016, China)

Abstract: A series of experiments of chemical grouting into a fracture with flowing water are carried out by using fracture grouting equipment based on orthogonal test design. The correlation among water plugging effect, seepage pressure variation, and grouting technology is obtained by analyzing the test results. The results show that the seepage pressure curves of grouting into a fracture with flowing water can be divided into four types, including single peak type, platform type, multi-peak type and ladder type. The water plugging effect is good when the seepage pressure curves are platform type and multi-peak type. It is poor for water plugging when the seepage pressure is ladder-type. In order to improve the water plugging effect and save the grout, the grout amount should be increased while the seepage pressure is peak type; but it should be decreased while the seepage pressures are platform type and multi-peak type; and the volume ratio of grout should be regulated to short gel time while the seepage pressure is ladder-type. The results can improve the efficiency and technology of grouting based on seepage pressure monitoring.

Key words: fracture; grouting under condition of flowing water; seepage pressure; grouting effect; model test

1 引 言

矿井水害的主要治理手段有疏干排水、疏堵结合、注浆堵水 3 种。对矿井水进行疏干排水往往会导致地面沉降等工程地质问题, 还会引起一系列环境问题, 同时也是对水资源的一种浪费。因此, 采用注浆堵水手段防治水, 对保护水资源和保证矿区持续发展具有重要的意义^[1-5]。

目前, 有关裂隙注浆的基础理论已经有了大量的研究, 如阮文军^[6]、罗平平^[7]、李哲^[8]、许万忠^[9]等学者研究了裂隙注浆扩散模型, 杨米加^[10]、Funchag^[11]、阮文军^[12]、谷拴成^[13]等研究了裂隙注浆浆液扩散规律, Gothall 等^[14-15]研究了注浆过程中裂缝间的相互作用和变形问题, 来弘鹏^[16]、张戎令^[17]等用不同的方法分析了注浆效果; 叶飞^[18]、孙斌堂^[19]等研究了裂隙注浆过程中的压力分布及其

收稿日期: 2010-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40772192, No. 41072237); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金 (No. SKLGDUEK0903); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (No. 20100095110015)。

第一作者简介: 湛铠瑜, 男, 1984 年生, 硕士, 工程师, 主要从事工程地质和岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhankaiyu@163.com

与注浆时间、扩散半径等因素间的关系。但以往的研究大都是在注浆工程完成后进行注浆效果检测, 由于未深入研究渗流压力与注浆堵水效果和调整注浆工艺间的关系, 所以无法在注浆过程中做到质量控制。在工程实践^[20-24]中裂隙动水注浆非常多见, 注浆量充足, 且往往采用多倍注入方式, 这是一种浪费, 增加了注浆堵水的成本。注浆工程是隐蔽工程, 无法直观看到浆液的扩散规律和注浆堵水效果, 因此, 研究应用渗流压力等参数的监测结果, 及时判断注浆堵水效果和实时调整注浆工艺, 对保证注浆效果具有重要意义。

本文采用自行设计的裂隙动水注浆设备进行了多组裂隙动水注浆试验, 根据试验获得的渗流压力场的特点分析了渗流压力场与注浆堵水效果的关系和渗流压力场与注浆工艺的关系。

2 试验设备与试验设计

2.1 试验设备

试验设备主要包括动水水源设备、注浆系统、模拟裂隙装置和数据采集系统4大部分。

动水水源设备由水源、水箱、水槽、阀门、水管和可调高度的支架组成; 水槽设置在模拟裂隙装置里, 可以将动水水源由管流转成裂隙流。注浆系统由气缸、稳压罐、油泵、高压管和丝杠系统组成。模拟裂隙装置主要由2块有机玻璃板组成, 2块有机玻璃板的边缘布置采用一定厚度的铁皮衬垫来模拟裂隙的不同开度, 用螺栓来固定玻璃板和铁皮, 然后用AB胶和玻璃胶密封有机玻璃板的边缘, 模拟裂隙装置提供的裂隙长为100 cm、宽为50 cm, 模拟裂隙设备的结构示意图如图1所示。

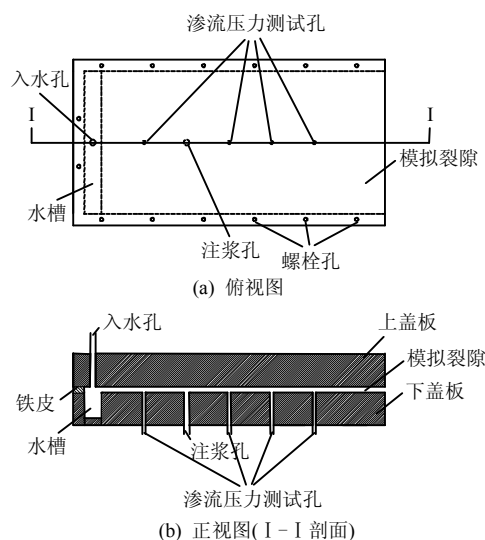


图1 裂隙设备结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fracture equipment

数据采集系统包括图像采集设备、渗流压力采集设备和流量采集设备三部分; 图像采集设备为数码相机, 用于对浆液扩散规律全程摄像; 渗流压力采集设备由水压力传感器和数据采集仪组成; 流量采集设备由容器和电子秤组成, 用于实时测量流出液体重量, 然后反算得出流出液体的流量变化规律。

在模拟裂隙装置中沿模拟裂隙中轴线布置了间距为15 cm的4个水压力传感器, 注浆孔与渗流压力测试孔布置图如图2所示。以注浆孔记为零点, 水流方向记为正向, 则4个传感器的位置分别位于-15、15、30、45 cm处。

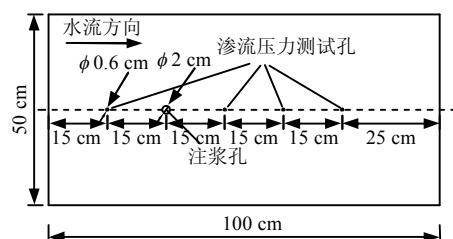


图2 渗流压力测点布置图

Fig.2 Point layout of seepage pressure test

2.2 试验设计

当因子个数较多或因子水平较多时, 全因子试验的次数是很大的, 但由于在很多情况下, 高阶交互效应往往不存在或及其微弱而可以忽略不计, 这就提供了减少试验次数的可能, 利用正交表即可实现析因试验的部分实施^[25]。

试验考察了4个影响因子, 对每个影响因子分别设计3个水平。注浆工艺、浆液性能、裂隙特性和动水水源特性都影响着注浆堵水效果。因此, 本试验分别在4个特性中各选取一个因素作为试验的考察因子。在注浆工艺中选取注浆量作为因子, 3个水平分别取注浆量1 500、2 000、2 500 mL; 在浆液性能中选取浆液配比作为因子, 3个水平分别取浆液配比中乙液浓度4%、6%、8%, 对应的凝胶时间分别为70、57、48 s; 在裂隙特性中选取裂隙开度作为因子, 3个水平分别取裂隙开度1、2、3 mm; 在动水水源特性中选取水流流速作为因子, 3个水平分别取水流流速1、2、3 cm/s (浆液的初始黏度为0.02 Pa·s)。在浆液配比这个因子中, 为了试验操作方便和减少试验造成的误差, 固定稀释后甲液: 乙液=7:5, 用改变乙液的浓度取值即可实现浆液原液配比的3个水平, 正交试验所需的试验次数及每次试验中各因子的取值如表1所示。

表 1 正交试验取值
Table 1 Values of orthogonal test

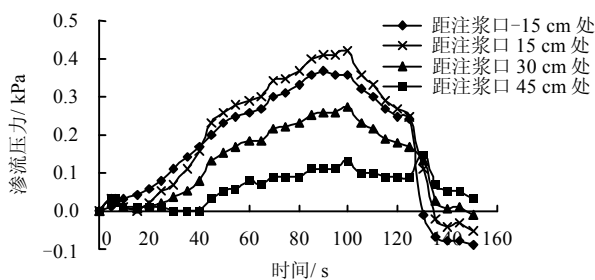
试验号	因素符号	裂隙开度 A /mm	水流流速 B /(cm/s)	乙液浓度 C /%	注浆量 D /mL
1	$A_1B_1C_1D_1$	1	1	4	1 500
2	$A_1B_2C_2D_2$	1	2	6	2 000
3	$A_1B_3C_3D_3$	1	3	8	2 500
4	$A_2B_1C_2D_3$	2	1	6	2 500
5	$A_2B_2C_3D_1$	2	2	8	1 500
6	$A_2B_3C_1D_2$	2	3	4	2 000
7	$A_3B_1C_3D_2$	3	1	8	2 000
8	$A_3B_2C_1D_1$	3	2	4	1 500
9	$A_3B_3C_2D_3$	3	3	6	2 500

注: 符号 A 、 B 、 C 、 D 分别代表裂隙开度、流速、乙液浓度和注浆量 4 个影响因子; 下标 1~3 分别代表影响因子的水平 1~3。

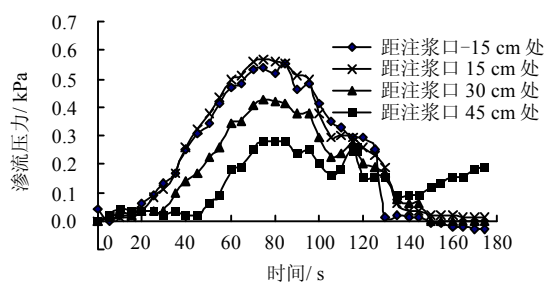
3 试验结果及分析

3.1 渗流压力场类型

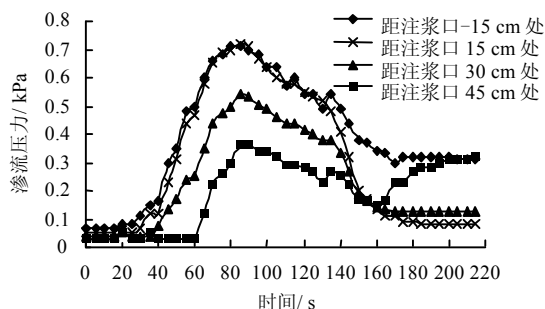
根据正交试验中各试验号在注浆过程中水压力传感器读数所绘制曲线的变化规律, 可以将裂隙动水注浆的渗流压力场分成单峰型、平台型、多峰型、阶梯型 4 种不同类型的渗流压力场分别如图 3~6 所示。



(a) 试验号 5



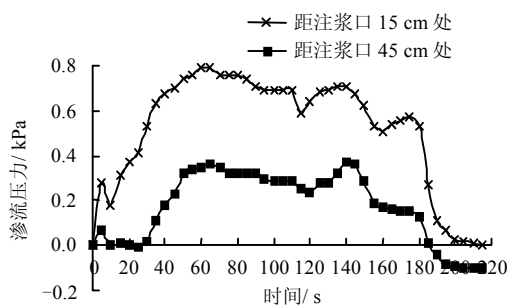
(b) 试验号 8



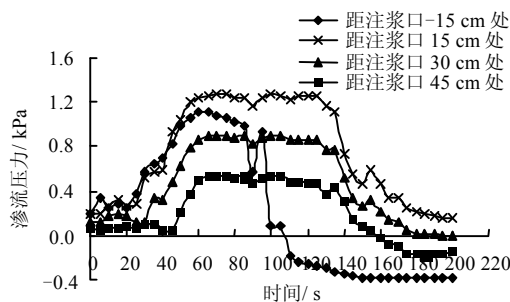
(c) 试验号 9

图 3 单峰型渗流压力场

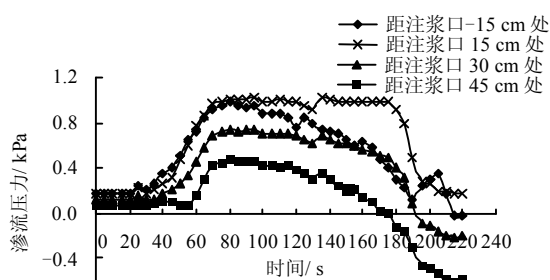
Fig.3 Seepage pressure field of single peak type



(a) 试验号 1



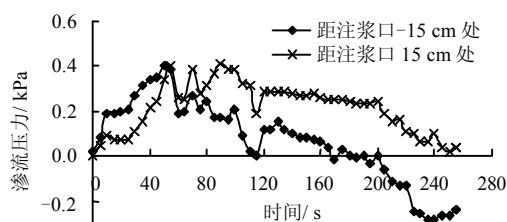
(b) 试验号 2



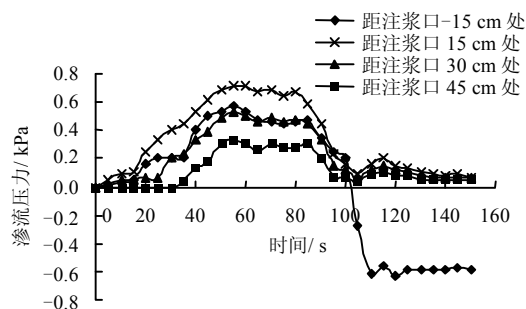
(c) 试验号 3

图 4 平台型渗流压力场

Fig.4 Seepage pressure field of platform type



(a) 试验号 4



(b) 试验号 7

图 5 多峰型渗流压力场

Fig.5 Seepage pressure field of multi-peak type

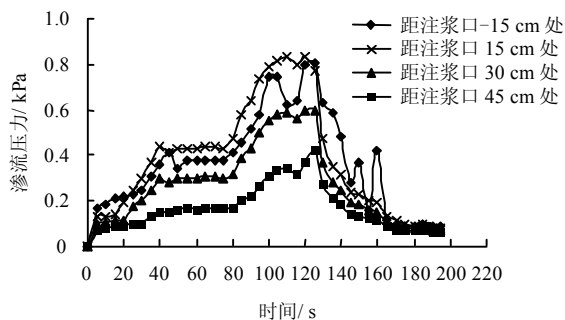


图6 阶梯型渗流压力场 (试验号6)

Fig.6 Seepage pressure field of ladder type (test No.6)

试验号5、8、9获得的渗流压力场属于单峰型渗流压力场。由图3可以得出单峰型渗流压力场的基本特性如下:在注浆过程中各测点处渗流压力的增大及减小趋势完全一致;渗流压力先逐渐增大至最大值,达到峰值后再逐渐减小,在曲线中呈现波峰形状;注浆结束时,各测点处的渗流压力都降低并趋于同一渗流压力;距注浆口15 cm半径范围内受注浆的影响程度基本一致;沿水流方向离注浆口距离越远渗流压力越小;渗流压力受注浆影响存在滞后性,沿水流方向离注浆口距离越远,受注浆影响的起始时间越长。

试验号1~3获得的渗流压力场属于平台型渗流压力场。由图4可以得出平台型渗流场的基本特性如下:在注浆过程中各测点的渗流压力变化规律基本一致,但局部出现异常;渗流压力先逐渐增大直至最大值,达到峰值后稳定一段时间后才逐渐减小,在曲线上呈现平台形状;渗流压力上升期,距注浆口±15 cm处的渗流压力基本相等,但达到峰值后距注浆口-15 cm处的渗流压力出现逐渐下降趋势,而距注浆口15 cm处的渗流压力趋于稳定,距注浆口15 cm处的渗流压力大于距注浆口-15 cm处的渗流压力;沿水流方向离注浆口距离越远,渗流压力越小;当注浆结束时,渗流压力未达0值或负压的测点处的渗流压力同步下降至0值附近;渗流压力受注浆影响存在滞后性,沿水流方向离注浆口距离越远,受注浆影响的起始时间越长。

试验号4、7获得的渗流压力场属于多峰型渗流压力场。由图5可以得出多峰型渗流场的基本特性如下:各测点处的渗流压力变化规律基本一致;渗流压力先增加达到最大值,达到峰值后会逐渐减小甚至减小至0值,然后增加达到比前一个峰值小的另一个峰值,再逐渐减少,在曲线中呈现多个峰值形状;在渗流压力达到第1个峰值后,距注浆口15 cm处的渗流压力始终大于距注浆口-15 cm处的

渗流压力;沿水流方向离注浆口距离越远,渗流压力越小;渗流压力受注浆影响存在滞后性,沿水流方向离注浆口距离越远,受注浆影响的起始时间越长。

试验号6获得的渗流压力场属于阶梯型渗流压力场。由图6可以得出阶梯型渗流场的基本特性如下:各测点处的渗流压力变化规律基本一致;渗流压力先逐渐增加达到一个峰值,稳定在此值一段时间后渗流压力继续增加达到最大值并稳定在这个渗流压力值直至注浆结束,在曲线中呈现2个或多个上升台阶形状;沿水流方向离注浆口距离越远,渗流压力越小;当注浆结束时,渗流压力未达0值或负压的测点处的渗流压力同步下降至0值附近;渗流压力受注浆影响存在滞后性,沿水流方向离注浆口距离越远,受注浆影响的起始时间越长。

3.2 基于渗流压力场判断注浆效果

根据在模拟裂隙出口处流出液体重量变化,将注浆前流出水体重量减去注浆结束后稳定的流出水体重量的差值除以注浆前流出水体的重量作为堵水率。各试验号的渗流压力场曲线类型和堵水率如表2所示。

表2 各试验渗流压力场类型和堵水率
Table 2 Results of seepage type and water plugging rate

试验号	堵水率/%	渗流压力场类型	试验号	堵水率/%	渗流压力场类型	试验号	堵水率/%	渗流压力场类型
1	97.0	平台型	4	95.0	多峰型	7	98.0	多峰型
2	97.0	平台型	5	50.5	单峰型	8	16.7	单峰型
3	66.7	平台型	6	14.0	阶梯型	9	97.7	单峰型

由表2中可以看出,当渗流压力场为多峰型时,堵水率都在90%以上,因此,该渗流压力场的堵水效果好;当渗流压力场为平台型时,试验1、2的堵水率都在90%以上,而试验3的堵水率为66.7%。结合试验录像可知,试验3的堵水率较低是由于水流流速太大,导致浆液扩散半径未能布满模拟裂隙,实际工程中只要减小注浆孔布置间距就能达到堵水效果,因此,该类型渗流压力场的堵水效果好;当渗流压力场为单峰型时,试验5、8、9的堵水率分别为50.5%、16.7%、97.0%,因此,该渗流压力场有可能堵水效果好,也可能堵水效果中等和堵水效果差;当渗流压力场为阶梯型时,堵水率仅有14.0%,为所有试验号中堵水率最低值,因此,该渗流压力场类型的堵水效果差。

综上所述,在工程实践中,如果测得的渗流压力场为平台型或多峰型,则表明堵水效果好;如果

测得的渗流压力场为单峰型, 需要结合裂隙口流出液体重量变化规律^[26]、探放水、钻孔取样、声波检测等手段来判断堵水效果是否良好; 如果测得的渗流压力场为阶梯型, 则表明堵水效果差。

3.3 基于渗流压力场调整注浆工艺

为了研究渗流压力场与注浆量的关系, 本文采用有效注浆量来分析。水流流速越大或浆液中乙液浓度越低, 则沿模拟裂隙出口流出的浆液越多^[26], 因此, 本文假定有效注浆量受水流流速、裂隙开度从小到大, 与乙液浓度从高到底的影响系数分别为 1.1、1.2 和 1.3, 则有效注浆量等于注浆量除以水流流速影响系数、裂隙开度影响系数和乙液浓度影响系数。各试验号的渗流压力场类型和有效注浆量如表 3 所示。

表 3 各试验渗流压力场类型和有效注浆量

Table 3 Seepage types and availability of grout amounts

试验号	有效注浆量 / mL	渗流压力场类型	试验号	有效注浆量 / mL	渗流压力场类型	试验号	有效注浆量 / mL	渗流压力场类型
1	953.6	平台型	4	1 578.3	多峰型	7	1 271.5	多峰型
2	1 262.6	平台型	5	947.0	单峰型	8	739.6	单峰型
3	1 589.3	平台型	6	986.2	阶梯型	9	1 232.7	单峰型

由表 3 可以看出, 除试验号 1 的有效注浆量异常外, 平台型和多峰型渗流压力场的有效注浆量都比较大, 说明注浆量过多时会出现平台型和多峰型渗流压力场, 此时对浆液造成了浪费; 除试验号 9 的有效注浆量异常外, 单峰型渗流压力场的有效注浆量最少, 说明注浆量相对较少时会出现单峰型渗流压力场。因此, 在实际工程中, 当渗流压力场为单峰型时应该适量增加注浆量, 而当渗流压力场为平台型或多峰型时应该适量减小注浆量。

结合试验录像可知, 试验号 6 因出现了严重的冲刷现象而使渗流压力场呈阶梯型。试验号 6 中冲刷现象如图 7 所示。



图 7 试验号 6 的冲刷现象

Fig.7 Scouring phenomenon of test No. 6

结合正交试验中的参数取值 (表 1) 可知, 当

浆液配比中乙液浓度太低使浆液凝胶时间太长且水流流速很大时, 会出现严重的冲刷现象。因此, 在实际工程中, 当出现阶梯型渗流压力场时应该调节浆液配比缩短凝胶时间。

4 结 论

(1) 裂隙动水注浆的渗流压力场可出现单峰型、平台型、多峰型、阶梯型 4 种类型。

(2) 当出现平台型和多峰型渗流压力场时, 注浆堵水效果好; 当出现单峰型渗流压力场时, 需要结合裂隙口流出液体重量变化规律、探放水、钻孔取样、声波检测等手段来判断堵水效果是否良好; 当出现阶梯型渗流压力场时, 注浆堵水效果差。因此, 可以根据渗流压力场特点来判断注浆效果和控制施工质量。

(3) 为了获得好的注浆堵水效果且节约浆液, 当出现单峰型渗流压力场时, 应该适量增加注浆量; 当出现平台型或多峰型渗流压力场时, 应该适量减小注浆量; 当出现阶梯型渗流压力场时, 应该调节浆液配比缩短凝胶时间。因此, 这一结论为注浆质量过程控制奠定了基础, 可以根据渗流压力场的特点来实时调整注浆工艺。

参 考 文 献

- [1] HANG YUAN, ZHANG GAILING, YANG GUOYONG. Numerical simulation of dewatering thick unconsolidated aquifers for safety of underground coal mining[J]. *Mining Science and Technology*, 2009, 19(3): 312—316.
- [2] SUI WANGHUA, LIU JINYUAN, YANG SIGUANG, et al. Hydrogeological analysis and salvage of a deep coalmine after an underground water inrush[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 735—749.
- [3] WANG DANGLIANG, JIANG ZHENQUAN. Characteristics of water inflow and chemical grouting treatment of a Liu Yuanzi coal mine shaft in the Ordos Basin[J]. *Mining Science and Technology*, 2010, 20(4): 607—610.
- [4] SUI WANGHUA, ZHANG GAILING, WANG WENXUE, et al. Chemical grouting for seepage control through a fractured shaft wall in an underground coalmine[C]// *Geologically Active-Proceedings of the 11th IAEG Congress*. London: Taylor & Francis Group, 2010: 3617—3623.
- [5] 隋旺华, 李永涛, 李冠田, 等. 煤矿立井微孔隙岩体注

- 浆防渗及机理分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 214—218.
- SUI Wang-hua, LI Yong-tao, LI Guan-tian, et al. Seepage prevention grouting in coalmine shaft wall and mechanism analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 214—218.
- [6] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709—2714.
- RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709—2714.
- [7] 罗平平, 李志平, 范波, 等. 倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型理论研究[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(1): 43—47.
- RUO Ping-ping, LI Zhi-ping, FAN Bo, et al. Theoretical study on flow model for tilted single fracture Binghamian grout[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology**, 2010, 29(1): 43—47.
- [8] 李哲, 仵彦卿, 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): 1972—1976.
- LI Zhe, WU Yan-qing, ZHANG Jian-shan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1972—1976.
- [9] 许万忠, 潘进兵, 周治平, 等. 节理裂隙岩体注浆渗透模型分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 47—51.
- XU Wan-zhong, PAN Jin-bing, ZHOU Zhi-ping, et al. Model analysis of the grouting seepage in the jointed and fractured rock mass[J]. **China Railway Science**, 2010, 31(3): 47—51.
- [10] 杨米加, 贺永年, 陈明雄. 裂隙岩体网络注浆渗流规律[J]. 水利学报, 2001, (7): 41—46.
- YANG Mi-jia, HE Yong-nian, CHEN Ming-xiong. Law of grouting penetrating through fracture network of rock mass[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, (7): 41—46.
- [11] FUNEHAG J, GUSTAFSON G. Design of grouting with silica sol in hard rock – New methods for calculation of penetration length. Part I[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(1): 1—8.
- [12] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69—73.
- RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 69—73.
- [13] 谷拴成, 苏培莉, 王建文, 等. 烧变岩体特性及其注浆扩散行为研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 60—63.
- GU Shuan-cheng, SU Pei-li, WANG Jian-wen, et al. Study of peculiarity of burnt rock mass and its grouting spreading behavior[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Sup. 2): 60—63.
- [14] GOTHALL R, STILLE H. Fracture dilation during grouting[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(2): 126—135.
- [15] GOTHALL R, STILLE H. Fracture-fracture interaction during grouting[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(3): 199—204.
- [16] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2309—2315.
- LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2309—2315.
- [17] 张戎令, 王起才, 张见. 铁路湿陷性黄土路基劈裂注浆浆液配比研究[J]. 路基工程, 2010, (4): 58—61.
- ZHANG Rong-ling, WANG Qi-cai, ZHANG Jian. Study of mix proportion of fracture grouting for railway collapsible loess subgrade[J]. **Subgrade Engineering**, 2010, (4): 58—61.
- [18] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307—1312.
- YE Fei, ZHU He-hua, HE Chuan. Backfilled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1307—1312.
- [19] 孙斌堂, 凌贤长, 凌晨, 等. 渗透注浆浆液扩散与注浆压力分布数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 37(11): 1402—1407.
- SUN Bin-tang, LING Xian-zhang, LING Chen, et al. Numerical simulation for diffusion and pressure distribution of permeation grouting[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 37(11): 1402—1407.