

文章编号: 1673-3363-(2012)06-0821-06

高性能注浆材料研究与围岩改性试验

刘彦伟^{1,2}, 程远平¹, 李国富²

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省安全生产科学研究院, 江苏 南京 210042)

摘要 为满足矿井工程高压突水及加固治理的需求, 研制一种新型高性能注浆材料。根据注浆材料强度影响因素试验成果, 优化设计高性能注浆材料配比。通过改装的固结仪进行注浆材料膨胀力、膨胀率、侧限条件下应力-应变关系试验以及渗透试验, 结合试验结果分析新型注浆材料用于巷道围岩改性增强的可行性。结合工业性试验进一步验证高性能注浆材料在巷道围岩增强改性以及涌水封堵治理上的实用性与优越性, 研究结果表明新型注浆材料能够满足防渗、防水、动压和变形的要求, 为潮湿环境下矿井软岩巷道壁后填充和围岩注浆加固技术的实施提供了有效途径。

关键词 高性能; 注浆材料; 力学特征; 围岩; 工业性试验

中图分类号 TD 353

文献标识码 A

Research on High Performance Grouting Material and Improving Surrounding Rock Mass Strength

LIU Yan-wei^{1,2}, CHEN Yuan-ping¹, LI Guo-fu²

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Jiangsu Academy of Safety Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract In order to meet the project demands of controlling mine water flooding with high pressure and reinforcement, a new high performance grouting material has been researched. Firstly, according to the factors affecting the strength of grouting material test results, a kind of optimized grouting material ratio is designed. Secondly, a series of indoor tests are developed by the improved consolidation apparatus, including grouting material expansion force, expansion ratio and unconfined condition stress strain relationship test, as well as the permeability test. Combined with the test results, the feasibility of the new grouting material to modify and reinforce roadway surrounding rock is analyzed. Finally, combined with the industrial experiment, the practicability and superiority of high performance grouting material in roadway surrounding rock reinforcing and modifying are further verified. Test results show that the new grouting material can well meet the requirements such as anti-seepage, water-proof, dynamic pressure and deformation, which could offer effective method to the enforcement of the strengthening technology of backfilling for soft rock tunnel and grouting for surrounding rock in condition that a mine is with a wet surrounding rock mass.

Key words high performance; grouting material; mechanical characteristics; surrounding rock; industrial test

收稿日期: 2011-10-28

基金项目: 江苏省重大基金项目 (BM2009911)

作者简介: 刘彦伟 (1965-), 男, 河南省商丘市人, 研究员级高工, 博士, 从事矿山安全技术方面的研究。

E-mail: guofuli1962@sina.com

Tel: 13951680007

围岩注浆强化是巷道支护，特别是软岩巷道支护的有效方法之一^[1-3]。目前，国内常用的注浆材料是以水泥为主剂，加入石英砂、粉煤灰等填料以及早强速凝剂，形成的一种混合材料。注浆后可以提高围岩的 c ， ϕ 等力学参数，使围岩强度和力学性能得到提高^[1-3]。研究和实践证明，常用的注浆材料虽然能够提高围岩的力学性能，但也存在一些缺陷，如注浆材料收缩率大，细微裂隙难以充填密封；刚性注浆材料难以适应围岩的扩容、剪胀和流变特征；在湿度大、温度高和膨胀岩体中会造成围岩软化，降低注浆支护强化能力。国外学者开展化学注浆强化软岩土体材料，注浆材料主要以聚氨酯类等有机化学材料为主^[4-7]。该方法一定程度上能够改良软岩土体，但由于注浆材料成本较高，难以推广应用。

作者经过多年的研究实践，对国内现有注浆材料进行改进，开发了集吸能、防渗与强化功能一起的高性能注浆材料，该材料能够满足矿井潮湿环境和复杂应力下软化巷道长期强化的要求。本文针对这一注浆材料开展相关力学特性研究以及介绍工程应用效果，以便该技术得到进一步推广应用。

1 高性能注浆材料

根据注浆材料强度影响因素试验^[8]，注浆材料强度的主要因素为：水泥加早强剂>抗裂剂>配置添加剂>膨胀兼防水剂>抗动压吸能剂规律；影响防渗防潮湿的主要因素为：膨胀兼防水>水泥加早强剂>抗裂剂>配置添加剂>抗动压吸能剂。

考虑到注浆强度为主要因素，其次为防渗防潮湿及抗动压吸能因素，优化设计出高性能注浆材料的配比如表 1 所示^[8]。

表 1 高性能注浆材料规格及主要参数
Table1 Specification and main parameters of high performance grouting material

材料名称	规格及主要性能	含量/%
水泥加早强剂	525#水泥，高强与早强，低收缩率，降低注浆引起的膨胀软化。	70
膨胀兼防水剂	钠基膨润土，特征是吸水吸湿膨胀，以阻止水分子的通过，实现膨胀、扩充微裂隙、防渗水及防潮湿。	10
抗动压吸能剂	废橡胶微粒组成，直径小于 1 mm，具有弹性，抗动压、扩容与吸能。	10
抗裂剂	短纤维，长度小于 2~3 mm，具有抗裂、轻质、抗裂、增强特征。	5
配置添加剂	配置而成，增加材料速膨胀和可注性。	5

以上材料组合后在围岩中充填注浆，具有膨胀、防渗、防潮、增强和抗动压吸能作用，达到防水、防潮湿及抗动压支护的目的。

2 高性能注浆材料力学特征试验

2.1 材料吸水与膨胀力试验

材料膨胀力实验在改装的固结仪上进行，试验装置如图 1 所示。

试验时，首先将制备试样压入特制的钢模具内，试件上下均设置滤纸，并用透水石覆盖，然后放下加压导环和传压活塞，使各部密切接触，保持平稳。试样增湿采用滴定法进行，即从透水石排气孔内均匀滴入水滴，改变含水率至预定状态。同时采用液压锚索千斤顶加载保持试样的体积不变直至稳定，测定维持体积不变对应的最大压力，即自然膨胀力。

根据表 1 中的材料配比进行高性能注浆材料膨胀力实验，试验结果见图 2 所示。

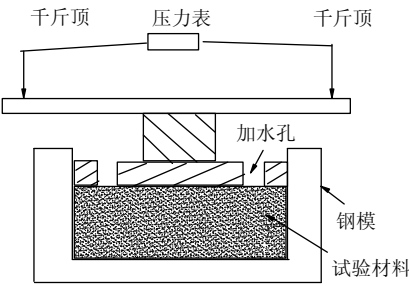


图 1 高性能注浆材料膨胀力试验装置

Fig.1 Experimental device of high performance grouting material for expansive force

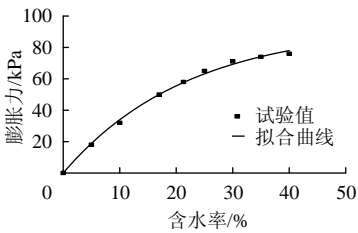


图 2 膨胀力与吸水率关系

Fig.2 Relationship between expansive force and moisture content

由图2看出, 高性能注浆材料膨胀力与试样含水率密切相关, 当含水率位于0~35%, 随着吸水量增大, 膨胀力增加明显; 当含水率 $w > 35\%$, 膨胀力增加趋势减缓, 最大可达到80 kPa。膨胀力与含水率关系可以近似采用复合指数函数拟合, 拟合方程如下:

$$E = 93.27 \times (1 - e^{-0.045w}) \quad (1)$$

式中: E 为膨胀力, kPa; w 为含水率, %。

2.2 材料吸水率与膨胀率关系试验

采用图1所示改进装置, 进一步研究注浆材料侧限条件下吸水后膨胀变形特性。试验考虑3种工况: 上覆荷载分别为 $P=0, 30, 60$ kPa。试验测得不同工况下, 试样膨胀率(δ)与吸水率(w)关系如图3所示。

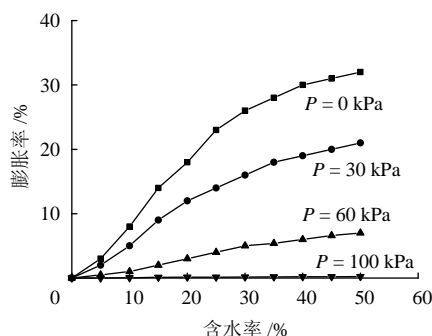


图3 无侧限与侧限条件下吸水膨胀率关系

Fig.3 Relationship between expansion ratio and moisture content under different lateral restraint condition

实验结果表明, 上覆荷载对围岩变形有限制作用, 随着上覆荷载增加, 围岩的膨胀率显著降低。当含水率位于0~50%, 随着吸水量增大, 膨胀率逐渐增大, 侧限条件下, 吸水自由膨胀率能够达到30%; 上覆荷载30 kPa时, 吸水膨胀率达到20%; 上覆荷载60 kPa时, 吸水膨胀率达到8%; 当上覆盖荷载达到100 kPa时, 超过膨胀力时, 吸水膨胀不明显。

软岩注入高性能注浆材料后, 浆液进入细微裂隙产生的膨胀力与阻力或抗力成线性关系, 注浆材料吸水产生膨胀, 进一步增加了围岩的压密性和封闭能力, 提高围岩的抗渗透能力。

2.3 高性能注浆材料侧限应力-应变试验

进一步采用上述改装的固结仪进行注浆材料侧限应力-应变试验, 研究工程应用条件下注浆材料在受限空间的力学特性。试验测得高性能注浆材料固化前后侧限应力-应变试验结果见图4所示。

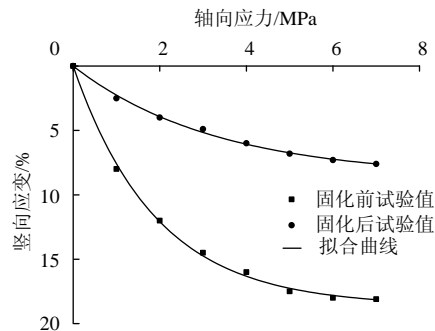


图4 注浆材料侧限应力-应变关系

Fig.4 Stress-strain curve of grouting material under lateral restraint condition

由试验结果可见, 在侧限状态, 高性能注浆材料固化前最大应变达到侧限长度的18%, 固化后最大应变达到侧限长度的8%, 说明材料注浆固化后具有较好的弹塑性, 以适应抗动压与吸能要求。

注浆材料固化前后侧限应力-应变试验曲线可采用复合指数函数拟合, 拟合方程分别为:

$$\varepsilon_1 = 18.63 \times (1 - e^{-0.52\sigma}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = 8.63 \times (1 - e^{-0.30\sigma}) \quad (3)$$

注浆材料侧限应力-应变试验本构模型为:

$$\varepsilon = a \times (1 - e^{-b\sigma}) \quad (4)$$

式中: ε 为应变; σ 为应力; a, b 为试验拟合材料应变系数。

2.4 高性能注浆材料渗流试验

高性能注浆材料饱水固化后放入固结仪上做加载(加载应力1.5 MPa)渗流试验, 渗流系数为 1.9×10^{-6} cm/s, 为黏土渗流系数的40%。实验表明材料具有较好的抗渗性能^[9-11], 能够满足潮湿环境下的围岩防渗及抗膨胀要求。

3 试验成果分析应用

3.1 材料吸水与膨胀力及膨胀率关系试验的应用分析

由膨胀力试验看出, 材料含水率与膨胀力呈复合指数函数关系, 当材料含水率位于0~45%, 膨胀力随着含水率提高, 增加速率明显; 当 $w > 45\%$, 膨胀力增加速率减缓, 最终膨胀力可达到80 kPa左右。通常条件下, 巷道围岩支护强度达到150~300 kPa可以满足支护要求。文中高性能注浆材料对巷道围岩注浆后, 产生的膨胀力小于围岩支护强度, 能够满足围岩在允许范围内膨胀改善其力学性能。

由膨胀率试验看出, 注浆材料含水率位于0~50%, 膨胀率与含水率近似呈线性增加关系, 随

着上覆载荷增加,膨胀率逐渐降低。实验成果应用在注浆工艺中,初期注浆,围岩空洞、节理、裂隙发育,注浆压力较低,注浆后可按照侧限自由膨胀试验成果分析,膨胀率较大,随着注浆的密实,注浆压力增大,膨胀率逐渐降低,达到注浆过程动态变化密实充填空洞、节理、裂隙的最佳效果。

围岩注入高性能注浆材料后,膨胀浆液能吸水后产生一定的膨胀率,充填到围岩密封的空洞、节理、层理和裂隙,浆液最终进入细微裂隙并产生较大的膨胀力,增加了围岩的压密性,封闭了围岩的裂隙面,从而提高了围岩的高密实性、抗渗透、抗水性及潮湿环境下围岩的抗膨胀变形能力。

3.2 高性能注浆材料侧限应力-应变试验的应用分析

从注浆材料侧限应力-应变试验看出,注浆材料侧限状态固化前最大应变达到侧限长度的 18%,固化后最大应变达到侧限长度的 8%。围岩注入高性能注浆材料固化后具有较好的弹性,注浆固结后,当围岩发生动压变形时,产生弹性压缩或膨胀,达到吸收和释放变形能的效果,保持注浆材料的强度、密封性的弹塑性,从而提高了围岩的吸能、抗动压与抗变形能力。

3.3 高性能注浆材料渗流试验的应用分析

围岩注入高性能注浆材料后,抗裂防渗剂在注浆固化后具较好柔韧性、抗裂性,增加注浆材料的长期防水和防渗效果,阻止了水流和水分子侵入,以满足潮湿环境下围岩的防渗及抗膨胀能力。

3.4 注浆材料本构模型分析

巷道开挖围岩应力释放,围岩压密注浆后,随着注浆时间的推移,注浆材料经历流态—初凝态—凝固态的变化,同时围岩压力缓慢卸载到地基初始应力。围岩材料在高性能注浆材料注浆固化后具有流变特性,计算注浆围岩材料应力应变时,可以采用广义 Maxwell 模型(即弹簧黏壶组合模型)表达应力松弛模量 $G(t)$ 。广义 Maxwell 模型^[12]由多个 Maxwell 单元并联在一起,每个 Maxwell 单元包括一个弹性模量为 G_i 的弹性应变弹簧和一个对应黏度为 η_i 的黏性应变黏壶。广义 Maxwell 模型可以直观反映出注浆围岩材料的应力松弛规律,分析预测围岩的力学行为。

4 工业性试验

4.1 工程背景

朱村矿某运输大巷顶板为粉砂岩,底板为泥

岩、粉砂岩互层。巷道底板有一层灰岩,含水层厚度 8~10 m,距煤层底板 20~30 m。大巷延伸中,经地质勘测预测,要揭露 4 处较大的出水点,其中最大动水水压达 2 MPa,水量最大达 3 t/min。为控制巷道掘进地区突水,并防止巷道掘进后在该区域产生的动压、围岩吸水吸湿所造成的后期软化现象发生,保证注浆区域的长期稳定,在大巷出水点前后 30~50 m 范围内的围岩及混凝土支护体壁后进行高性能注浆材料加固强化试验。

4.2 巷道围岩注浆方案

采用一次临时注浆防水和二次高性能注浆防渗强化方案进行试验^[13]。

一次临时注浆防水方案工艺:水泥+水玻璃+添加剂→搅拌机→双液注浆泵→混合器→注浆管→围岩→凝固→防突水。

二次高性能注浆强化方案工艺:高性能注浆材料+水→搅拌机→双液注浆泵→注浆管→围岩及混凝土支护体壁后→凝固→防渗、吸能与长期强化。

4.3 注浆参数

合理的注浆参数包括:注浆压力、注浆时间、注浆量及注浆材料等参数。

4.3.1 注浆压力

注浆压力受围岩特性、注浆性能、注浆方式等因素的影响。注浆压力过小,浆液难以向围岩中扩散,达不到预期注浆效果;若注浆压力过大,会导致在注浆过程中巷道表面冒顶、片帮或喷体开裂。研究表明无机注浆时设计注浆压力为 3.5 MPa。

4.3.2 注浆时间

为了防止围岩注浆泄漏,注浆时在控制注浆压力和注浆量的同时,还要控制注浆时间,注浆时间不宜过长,本次试验每孔注浆的时间控制为 15~20 min。

4.3.3 注浆量

以达到注浆终压 3.5 MPa 后,保压 5~10 min,所统计的注浆量即为实际注浆量。试验中,无机注浆量控制为 2~3 t/m,特殊地区加大注浆量。

注浆参数的控制是围岩加固实现强化的关键技术,研究表明,优化注浆压力、注浆量和注浆时间 3 个指数作为终止注浆的标准,可以起到较好的围岩强化效果。

4.4 注浆工艺

采用双液注浆泵,泵压不小于 6 MPa,注浆锚杆采用金属厚皮注浆管制作。

施工工艺:打眼→安装注浆锚杆→封孔(里用棉纱,外用快硬水泥)→连接注浆泵→注浆→封孔保压。

4.5 试验与防水强化效果

4.5.1 围岩力学性能

注浆加固后,巷道围岩不同深处的物理力学性质得到不同程度的改善。单轴抗压强度由 29.8 MPa 增加到 69.7 MPa;抗拉强度 1.8 MPa 增加到 2.38 MPa,提高 30%;围岩黏聚力由 3 MPa 增加到 10.6 MPa,提高 270%,内摩擦角由 26.9°增加到 36.8°提高 37%,静弹性模量由 2.35×10^4 MPa 增加到 2.41×10^4 MPa 提高 45%,泊松比由 0.26 降低到 0.2,围岩抗剪强度提高到 141%以上。参照《工程岩体质量标准》,注浆加固前为极软岩,支护难度大;锚注加固后提高到中硬岩,易支护。巷道注浆后单轴抗压强度提高了两倍,岩体分类由工程 V 级极软岩改性为工程 III 级中硬岩^[14]。

4.5.2 抗变形与防水效果

巷道围岩注浆强化后,注浆支护体经过采动、高温与潮湿季节气候影响,突水点围岩发生不同程度的变形,未出现巷道的突水和渗水事故,巷道支护体在动压下基本能够保持稳定,经受了巷道的动压、潮湿和变形考验,基本满足动压下围岩强化和防渗水的要求^[10]。

5 结 论

1) 根据注浆材料强度影响因素试验成果,优化设计高性能注浆材料。材料配比为 70% 的 525[#] 水泥以及早强剂,10% 钠基膨润土组成的膨胀兼防水剂,10% 废橡胶微粒组成的抗动压吸能剂,5% 短纤维组成的抗裂剂以及 5% 提高可注性的添加剂。

2) 针对设计的高性能注浆材料进行力学特征试验。通过改装的固结仪进行注浆材料膨胀力、膨胀率、侧限条件下应力-应变关系试验以及渗透试验。研究表明,注浆材料膨胀力与含水率呈复合指数函数关系;侧限条件下,吸水自由膨胀率能够达到 30%,当存在上覆荷载时,膨胀变形受到限制;侧限条件下,注浆材料竖向应力-应变关系仍可以采用复合指数函数拟合,固化前材料最大应变可达 18%,固化后约 8%;注浆材料渗透性约黏性土的 40%。

3) 根据注浆材料力学特征,分析其应用于巷道围岩改性增强的可行性以及注浆材料力学行为预测方法。工业性试验表明,高性能注浆材料满足

防渗、防水、动压和变形的要求,为矿井潮湿环境下软岩巷道壁后充填和围岩注浆加固技术的有效实施提供了有效途径。

参考文献:

- [1] 杨米加,陈明雄,贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839-841. YANG Mi-jia, CHEN Ming-xiong, HE Yong-nian. Current research state of grouting technology and its development direction in future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839-841.
- [2] MODONI G, CROCE P, MONGIOVI L. Theoretical modeling offset grouting[J]. Geotechnique, 2008, 58(6): 533-535.
- [3] 张民庆. TSS型注浆管及其注浆技术的研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2000(2): 50-57. ZHANG Min-qing. Research and application of TSS-type pipe for grouting and the grouting technique[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000(2): 50-57.
- [4] 李国富,戴铁丁,吕芳礼,等. 膨胀岩变形机理与注浆强化技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 444-448. LI Guo-fu, DAI Tie-ding, LV Fang-li, et al. Deformation mechanism of swelling rock and its grouting reinforcement techniques[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 444-448.
- [5] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程地质研究进展[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 46-63. HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Research progress of soft rock engineering geomechanics in China coal mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1): 46-63.
- [6] HEGGHEIM T, MADLAND M V, RISENES R, et al. A chemical induced enhanced weakening of chalk by seawater [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 46(3): 171-184.
- [7] MOLENAAR M M, HUYGHE J M. Conceive model for swelling shales[C]//International Society of Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference, SPE/ISRM 47332, 1998: 127-132.
- [8] 李国富. 高温岩层巷道主动降温支护结构技术研究[D]. 太原:太原理工大学土木工程学院, 2010.
- [9] 刘光廷,胡昱,李鹏辉. 软岩遇水软化膨胀特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1729-1734. LIU Guang-ting, HU Yu, LI Peng-hui. Behavior of soaking rock and its effects on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1729-1734.

- [10] 李国富, 李珠, 戴铁丁. 膨胀岩力学性质试验与巷道支护技术的预测研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 96-101.
LI Guo-fu, LI Zhu, DAI Tie-ding. Mechanical properties test of swelling rock and research on prediction of roadway support parameters[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 96-101.
- [11] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394-400.
ZHOU Cui-ying, TAN Xiang-shao, DENG Yi-mei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394-400.
- [12] 帅词俊, 段吉安, 王炯. 关于黏弹性材料的广义Maxwell模型[J]. 力学学报, 2006, 38(4): 565-569.
SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, WANG Jiong. A method of establishing generalized Maxwell model for viscoelastic material[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(4): 565-569.
- [13] 李国富, 贾安立, 单智勇, 等. 极软岩巷道锚注支护技术的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊): 2574-2578.
LI Guo-fu, JIA An-li, SHAN Zhi-yong, et al. Study and application of bolting and grouting support technique soft rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp): 2574-2578.
- [14] 陆士良, 汤雷. 锚固支护技术研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.

(上接第796页)

- [15] 周华强. 巷道支护限制与稳定作用理论及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 56-90.
- [16] 梁晓丹, 刘刚, 赵坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报, 2005, 33(3): 314-317.
LIANG Xiao-dan, LIU Gang, ZHAO Jian. Definition and analysis of arching action in underground rock engineering[J]. Journal of Hohai University, 2005, 33(3): 314-317.
- [17] DIEDERICHS M S, KAISER P K. Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(1): 97-117.
- [18] 杜晓丽, 宋宏伟, 陈杰. 煤矿采矿围岩压力拱的演化特征数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 863-867.
DU Xiao-li, SONG Hong-wei, CHEN Jie. Numerical simulation on pressure arch evolution of coal mining rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 863-867.
- [19] 冯志强. 破碎煤岩体化学注浆加固材料研制及渗透扩散特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007.
- [20] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰, 等. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 56-107.
- [21] HUANG Z. Stabilizing of rock cavern roofs by rock bolts[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [22] 侯朝炯, 周华强, 张连信, 等. ZKD 型高水速凝材料的生产及应用[J]. 煤炭科学技术, 1993, 21(1): 16-20.
HOU Chao-jiong, ZHOU Hua-qiang, ZHANG Lian-xin, et al. Produce and application of ZKD high moisture rapid setting material[J]. Coal Science and Technology, 1993, 21(1): 16-20.
- [23] 李磊, 柏建彪, 王襄禹, 等. 松软破碎煤巷注浆加固技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(8): 5-14.
LI Lei, BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, et al. Grouting reinforcement technology and application in soft and broken seam gateway[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(8): 5-14.