

深部巷道破碎围岩注浆加固效果综合评价*

王晓蕾^{1,2}, 秦启荣^{1,2}, 熊祖强³, 苏培东^{1,2}, 袁印³

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500; 2.西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500; 3.煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要:为了研究深部巷道破碎围岩注浆加固效果,以山西某矿2301巷道作为试验巷道,采用 $P-Q-t$ 参数法、浆液填充率法、岩体力学参数法、分段注水法、钻孔电视法、物探法对破碎围岩注浆加固效果进行综合评价,并对锚杆、锚索预紧力进行测试和巷道变形进行监测。研究表明: $P-Q-t$ 参数法以定压与定量作为注浆结束依据,注浆压力达到预设压力,且注浆速度小于5 L/min的时间持续一定时间,则结束注浆。注浆后地层注浆填充率为93.2%,岩层整体性得到提高且孔隙率降低了39.35%,地层注水量明显减少,裂隙发育度降低;注浆后,钻孔裂隙被白色浆液填充,围岩完整性得到提高,条纹消失,地层成为连续的整体;锚杆、锚索,预紧力均达到150 kN,巷道变形量较小,满足了工作面回采的要求。

关键词:采矿工程;破碎围岩;注浆加固;效果检测

中图分类号:O319.56

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0576-07

Comprehensive Evaluation for Grouting Effect of Fractured Surrounding Rock in Deep Roadway

Wang Xiaolei^{1,2}, Qin Qirong^{1,2}, Xiong Zuqiang³, Su Peidong^{1,2}, Yuan Yin³

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610050, P.R.China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University Chengdu 610500, P.R.China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Jiaozuo, Henan 454000, P.R.China)

Abstract: In order to study on grouting effect of crushing surrounding rock, taking 2301 roadway of a coal mine in Shanxi as the experimental roadway, by using method of $P-Q-t$, grouting fill rates method, physical exploration method, method of inspection hole, borehole televiewer method, physical exploration method, grouting effect of crushing surrounding rock was evaluated. The results show that: (1) $P-Q-t$ method is with constant pressure and quantitative as a basis for grouting end. When the speed is less than 5 L/min grouting last to a certain time, grouting pressure reaches the preset pressure, and the grouting is ended; (2) Grouting fill rates is 93.2%; (3) The integrity of floor strata is improved and the porosity is reduced by 93.3% after grouting; (4) The strata water injection rate decreases significantly and the degree of fracture decreases after grouting; (5) The fractures in borehole are filled by white grout and improved rock integrity after grouting; (6) The fringes disappeared and strata become a continuous whole after grouting; (7) The pre-tightening force of bolt and anchor cable are 150 kN and roadway deformation is relative less, which meets the mining need of face.

Keywords: mining engineering; fractured surrounding rock; grouting reinforcement; effect evaluation

* 收稿日期:2018-10-18(修改稿)

作者简介:王晓蕾(1986-),男,山东烟台人,博士生,主要从事岩石力学和工程地质试验研究方面的工作。

E-mail:18039172835@126.com

基金项目:国家自然科学基金(51274088,50804013)

0 引言

我国煤炭资源储量丰富,作为一次性能源,在能源结构中占有重要地位,即使“十三五”末,煤炭消费比重仍在60%以上^[1-2]。自改革开放以来,我国已开采煤炭资源160多亿吨,随着煤炭资源的大量回采,浅埋深煤层已趋于殆尽,煤矿不得不向深部开采^[3-5],以每年8~12 m的速度增加,随着开采深度的增加,巷道围岩应力水平逐渐增大^[6-7]。同时,深部“三高一扰动”环境对巷道围岩稳定性影响也越来越明显^[8-9],巷道需要重复翻修,才能满足安全开采的需求。

注浆作为巷道主动支护的主要手段,具有堵水、提高围岩强度及增强围岩抗变形的作用,能大大提高裂隙面的物理力学性质、结构面的黏结力和内摩擦角,从而增强围岩的稳定性和抵抗外力破坏的能力^[10]。然而注浆属隐蔽性工程,目前对注浆效果的检测手段还有限,注浆效果检测技术不够成熟,检测仍是注浆施工中较薄弱的环节,尚无完善的标准可借鉴。目前常用的手段主要有分析法、检查孔法、物探法、开挖取样法等。

对于破碎围岩注浆效果的评价,秦江江^[11]对赵庄二号井破碎围岩进行了加固,并通过实施效果(粘结性、凝结速度、扩散半径)对注浆效果进行了综合评价;李飞等^[12]对火铺矿松软破碎围岩巷道进行了注浆加固,注浆后通过两帮移近量和顶板下沉量对围岩注浆加固效果进行了评价;刘猛等^[13]采用FLAC软件对软弱围岩条件下隧道的注浆效果进行了研究,分析了注浆前后围岩塑性区的变化情况;乔卫国等^[14]采用数值模拟对注浆加固后的塑性区变化特征进行了研究,研究结果表明注浆对松软破碎的煤岩体有很好的加固效果,能大范围提高围岩力学参数,从而提高锚杆的可锚性,抑制围岩塑性区向深部发展,控制围岩变形。

以上学者在进行注浆效果检测时手段单一,没有多种手段相互印证,效果评价的准确性大打折扣。同时,缺少对注浆前后岩石力学性能以及裂隙特征的研究。裂隙特征是岩石变形的内因和决定岩石物理力学性质的主要因素,渗透率和弹性模量与裂隙变化特征有紧密的联系,是评价注浆效果的重要依据^[15]。

本文以山西某煤矿破碎围岩注浆加固作为分析对象,采用 P - Q - t 参数法、浆液填充率法、岩体力学参数法、分段注水法、钻孔电视法、物探法对破碎围岩注浆加固效果进行综合评价,对类似工程具有一定的借鉴作用。

1 工程概况和注浆方案

1.1 工程概况

山西某矿主采15#煤层,试验巷道2301巷作为联合出煤的行人通道,巷高2.62 m,顶板为坚硬灰岩,厚约9.3 m,底板为铝质泥岩,坚硬顶板强烈采动造成巷道变形破坏严重,巷道在掘出1 000 m后出现已掘巷道底鼓、两帮变形、顶板断裂等强变形特征,底鼓达1 600 mm,两帮移近达1 400 mm,煤帮极其破碎,锚杆难以有效锚固,锚索钻孔塌孔严重,难以施工,顶板内部出现较大离层。巷道经过多次起底扩帮工作,成本高昂,拟通过注浆加固的方式,对巷道煤帮进行加固,从而对巷道整体起到维护作用。

1.2 注浆方案

1.2.1 注浆流程

起底工作与注浆加固协同进行,其工序为:起底→两帮喷浆→注浆加固→锚索补强。滞后起底一定距离进行两帮喷浆,喷浆过后2~3 d对两帮进行注浆加固,注浆加固1 d之后进行锚索补强。

1.2.2 注浆材料和钻孔布置

采用新型无机注浆加固材料(力学强度曲线如图1所示),巷道围岩破碎状况,确定材料水灰比为0.8:1,钻孔形式采用三花眼布置,孔深6.0 m;孔径42 mm;仰角0°,如图2所示。

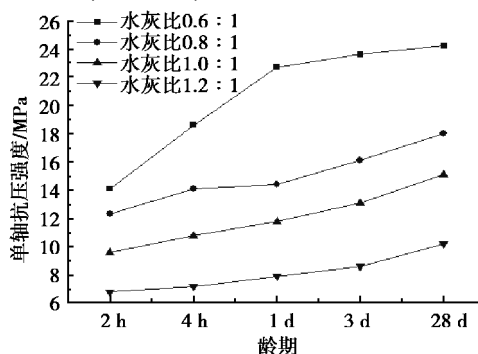


图1 新型无机注浆材料强度曲线

Fig. 1 Intensity curves of new inorganic grouting material

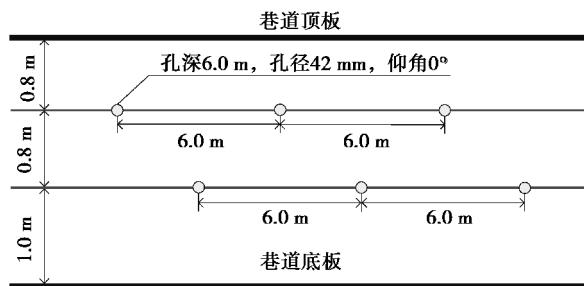


图2 钻孔布置示意图

Fig. 2 Layout of boreholes

1.2.3 封孔长度和注浆压力

封孔长度可以改变浆液往浅部扩散的轨迹,浆液向浅部扩散大致呈雨伞状,封孔越长,浆液扩散迹线越长,到达巷道表面时固化速度越快,漏浆越少,但是浅部注浆效果越差。反之,漏浆会严重,但是浅部注浆效果好。由于巷道存在锚杆难以锚固问题,因此需对浅部0~3 m的范围进行强化注浆加固,封孔长度尽量取小,设计封孔长度为0.2~0.5 m,使用该材料0.6:1水灰比封孔,封孔后20 min浆液硬化可以注浆,设计注浆终止压力为3~4 MPa。

1.2.4 制浆和注浆设备

注浆工艺及注浆压力、流量等参数需根据围岩破碎情况无机、便携调节,要求注浆设备轻便、机动灵活、参数可调、运行可靠,双液浆要求两种材料出浆均匀一致,基于此,研发了一套气动注浆设备,能够满足对不同破碎程度围岩注浆的需求。如图3所示。

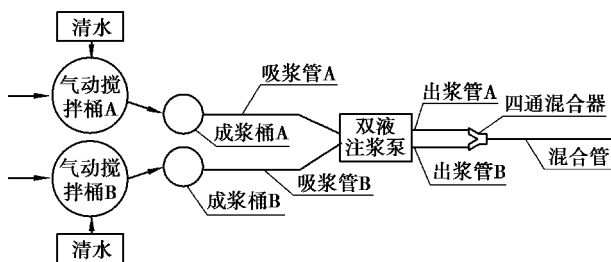


图3 气动注浆系统

Fig. 3 Pneumatic grouting system

注浆设备采用2ZBQ型煤矿用气动注浆泵,它使用压缩空气作动力,可以在大淋水、高瓦斯场合安全使用,可以长时间堵转而无发热问题。该泵利用工作介质(浆液,压缩空气)传递压力信号,组成闭环自动调控性能,因此结构简单,使用可靠,无超压问题。该泵换向机构具有气压自动定位性能,决

无“自停”现象。泵可以无级调节排浆量,排浆压力,并具有按照预定的注浆压力自动调节泵排浆量的性能。本泵有双液浆比调节器,可注单液浆、双液浆以及化学浆,在注浆过程中可以随时无级调节两种浆液的配比,并有标杆指示配比值,在泵随注浆压力变化而自动调节排浆量时,浆比调节器能自动保持两种液的配比不变,如图4所示。搅拌机采用QB系列气动搅拌桶,质量较小,易于移动,适用于经常变换地点的注浆施工,如图5所示。

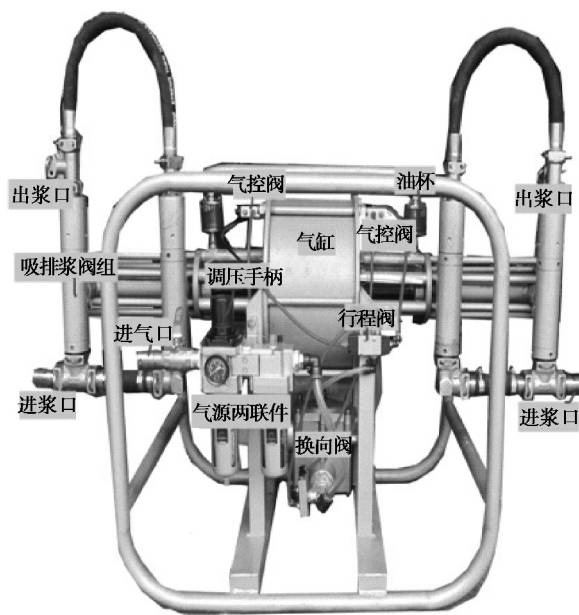


图4 气动注浆泵

Fig. 4 Pneumatic injection pump



图5 气动搅拌桶

Fig. 5 Pneumatic stirring cask

2 注浆效果综合评价

2.1 P-Q-t 曲线法

2.1.1 评价标准

该法通过注浆过程中的压力和流量评价注浆效果,只有当压力达到设计终压、注浆速度达到设计速度,才能证明地层充满浆液,达到注浆加固作用。

2.1.2 注浆记录曲线

注浆速度和压力与时间变化曲线如图 6 所示。

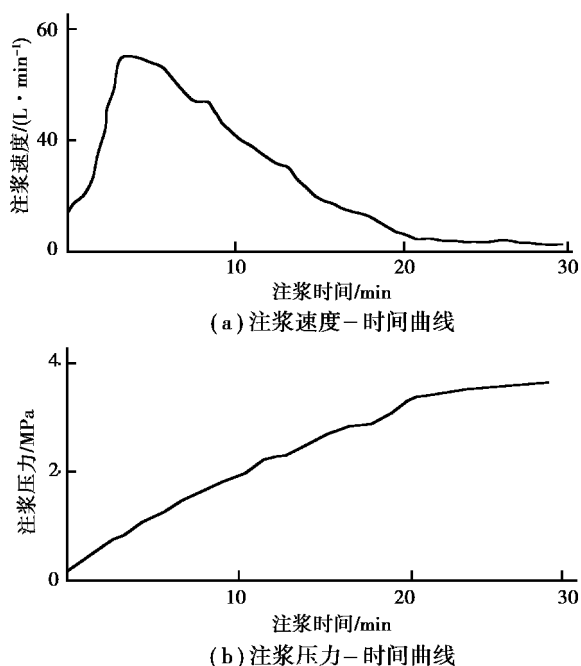


图 6 注浆压力-速度-时间曲线

Fig. 6 The curve of grouting pressure-speed-time

由图 6 可知,当注浆进行加固达到 19 min 时,注浆压力达到 3 MPa,达到了预设注浆压力;当进行到 21 min 时,注浆速度降低到 5 L/min 以下,并持续了一定时间,基本可以判定此钻孔注浆结束;当所有注浆孔注浆达到设计要求时,方可结束注浆。

2.2 浆液填充率法

2.2.1 评价标准

浆液填充率法是通过注浆量反算地层的充填率,通过充填率评价注浆效果,只有当浆液填充率达到 90% 以上才能保证地层的填充效果,达到注浆加固作用。

2.2.2 注浆填充率

浆液填充率法是通过总注浆量,通过式(1)反

算其充填率即 n ,通过此评价其注浆效果。

$$\sum Q = \frac{VnD'}{1+\beta} \quad (1)$$

式中: $\sum Q$ 为总注浆量, m^3 ; V 为加固体积, m^3 ; n 为孔隙度; D' 为填充率; β 为注浆液损失率。

注浆过程中最大单孔注浆干料 1.2 t、浆料 2.1 t,平均每孔注浆干料 0.6 t、浆料 1 t,根据式(1)计算得注浆填充率 93.2%。

2.3 力学参数法

2.3.1 评价标准

岩石力学参数是进行注浆效果评价的重要指标,它是量化参数,通过数据评价注浆效果,注浆后力学参数(抗压强度、抗折强度等)要提高到完整岩层的 80% 以上,才能保证地层的加固作用。

2.3.2 力学测定结果

对注浆后岩石力学参数进行测试,测试数据如表 1 所示。注浆前难以取到完整岩芯,无法得到相关测试数据。

表 1 力学参数

Table 1 Mechanical parameters

状态	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	孔隙率/%	泊松比	取芯率/%
注浆前	3.25	0.32	72.6	0.31	15.2
注浆后	16.8	2.63	3.25	0.24	92.1

由表 1 可知,注浆后抗压强度增大达到 16.8 MPa,抗压强度较高,达到完整岩芯抗压强度的 86.7%,取芯率达到 92.1%,完整性较好,抗折强度增大到 2.63 MPa,耐折性大大增强,达到完整岩芯抗折强度的 83.4%,孔隙率由 72.6% 降到 3.25%,说明浆液填充了大部分的裂隙,注浆效果良好。

2.4 分段注水法

2.4.1 评价标准

对于破碎围岩注浆,其注浆主要是将地层裂缝填充,因此注浆后地层裂隙的充填情况是检验其注浆效果最适合的手段。裂隙充填情况的测定采用钻孔分段注水试验,注浆后的钻孔稳定流量要降低到注浆前的 10% 以下,才能保证裂隙充填效果,达到注浆加固作用。

2.4.2 稳定注水量

注浆前后分段注水量数据如表 2 所示。

表2 钻孔注水数据表

Table 2 Data of pouring water into borehole

注浆前钻孔 编号	稳定注 水量/L	注浆后检测 钻孔编号	稳定注 水量/L
C1	424	J1	19
C2	398	J2	21
C3	413	J3	15
C3	375	J3	22
C4	416	J4	18
C5	425	J5	19
C6	431	J6	14

由表2可知,注浆前地层注水量较多,裂隙发育度较高,而注浆后,地层注水量明显降低,注浆后钻孔稳定注水量均在6%以下,地层裂隙被浆液填充,裂隙发育度降低,达到注浆加固的目的。

2.5 钻孔电视法

2.5.1 评价标准

钻孔电视技术能够获得钻孔内部岩芯图像,经过数字化处理得出裂隙特征,通过注浆后裂隙填充情况对注浆效果进行评价,注浆后注浆孔裂隙明显被浆液填充,且钻孔完整,无塌孔,不缩孔,从而保证注浆效果。

2.5.2 钻孔裂隙特征

注浆后裂隙填充情况如图7所示。由图7可知,注浆后,钻孔裂隙被白色浆液填充,几乎未发现未被浆液填充裂隙,且经过一段时间放置,无塌孔,不缩孔,证明浆液具有较好的流动性,注浆工艺合理,浆液扩散良好,围岩完整性得到提高,对于打锚杆和锚索能够起到有效锚固,达到注浆加固的目的。

2.6 物探法

2.6.1 评价标准

物探法是通过对比注浆前后地层的视电阻率或者电磁变化特征评价注浆效果,注浆后地层电阻率或电磁要有明显变化,地层不连续区域变为连续区,地层阴影区域明显消失。

2.6.2 探测结果

注浆前后地质雷达探测数据图如图8所示。

注浆前,地层地质雷达探测图出现了许多不连

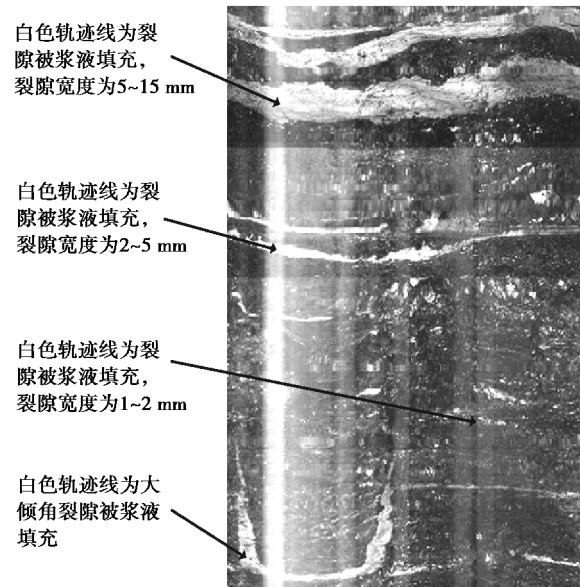
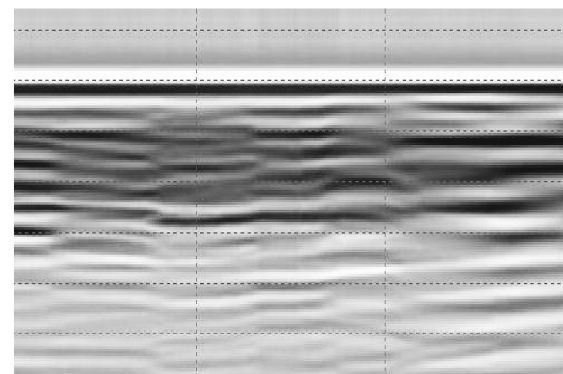
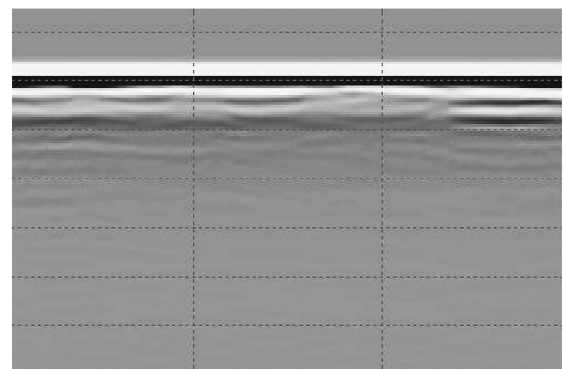


图7 数字式探测结果

Fig. 7 Detecting results of digital



(a) 注浆前



(b) 注浆后

图8 地质雷达检测图

Fig. 8 Geological radar detection map

续的条纹,这些条纹是由于高频电磁波遇到孔隙后形成的,注浆前裂隙发育度高,而注浆后,条纹已消失,说明裂隙被浆液充填,使地层成为连续的整体,注浆效果良好。

3 锚固与巷道变形观测

3.1 锚杆、锚索锚固效果

注浆后钻孔成功率高,经试验,钻孔成孔后,放置 20 d 钻孔内部无明显变化,与注浆加固之前难以成孔相比,有了极大的改进,锚固情况得到改善,锚杆、锚索,预紧力均可达到 150 kN 以上。

3.2 巷道变形观测

采用十字布点法对巷道进行观测,观测时间为 22 d,观测期内,两帮最大移近量 37 mm,平均变形速度低于 2 mm/d,平均变形量 24 mm,平均约 1 mm/d,顶底板最大移近量 30 mm/d,平均移近速度 1.4 mm/d,顶底板平均移近量 23 mm,平均 1 mm/d,如表 3 所示。

表 3 巷道变形特征

Table 3 Characteristic of roadway deformation

位置	最大变形量 /mm	最大变形速度 /(mm·d ⁻¹)	平均变形量 /mm	平均变形速度 /(mm·d ⁻¹)
两帮	37	2	24	1
顶底板	30	1.4	23	1

4 综合分析

巷道破碎煤岩围岩注浆效果评价主要有以上几种方法,在实际注浆加固技术中选择合理的评价手段,不能采用单一手段进行评价,应选用 3 种以上,做到相互印证。其中 $P-Q-t$ 参数法是必测的,它是保证注浆是否达到设计标准的关键。对于其他几种根据现场实际情况选择最优评价方案。

5 结论

采用 $P-Q-t$ 参数法、浆液填充率法、岩体力学参数法、分段注水法、钻孔电视法、物探法对破碎围岩注浆加固效果进行综合评价,根据评价标准判断评价效果,并对锚杆、锚索预紧力进行测试和巷道变形进行监测,得到以下结论:

(1) $P-Q-t$ 参数法以定压与定量作为注浆结束依据,注浆压力达到预设压力,且注浆速度小于 5 L/min 的时间持续一定时间,则结束注浆。在注浆过程中对注浆标准控制是提高注浆效果的有效

途径。

(2) 根据浆液填充率法,计算得出地层注浆填充率为 93.2%。

(3) 力学参数法表明,注浆后抗压强度增大达到 16.8 MPa,抗压强度较高,取芯率达到 92.1%,完整性较好,抗折强度增大到 2.63 MPa,耐折性大大增强,孔隙率由 72.6% 降到 3.25%,说明浆液填充了大部分的裂隙,注浆效果良好。

(4) 注浆前地层注水量较多,裂隙发育度较高,而注浆后,地层注水量明显降低,地层裂隙被浆液填充,裂隙发育度降低。

(5) 注浆后,钻孔裂隙被白色浆液填充,几乎未发现未被浆液填充裂隙,证明浆液具有较好的流动性,注浆工艺合理,浆液扩散良好,围岩完整性得到提高,

(6) 地质雷达探测表明,注浆前,地层地质雷达探测图出现了许多不连续的条纹,注浆前裂隙发育度高,而注浆后,条纹已消失,说明裂隙被浆液充填,使地层成为连续的整体,注浆效果良好。

参考文献(References)

- [1] 王晓蕾,秦启荣,熊祖强,等. 层次注浆工艺在松软巷道破碎围岩加固中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 206-212. (Wang Xiaolei, Qin Qirong, Xiong Zuqiang, et al. Applications of level grouting process in soft roadway to reinforce broken surrounding rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 206-212. (in Chinese))
- [2] 熊祖强,王晓蕾. 承压水上工作面破坏及裂隙演化相似模拟试验[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1114-1120. (Xiong Zuqiang, Wang Xiaoli. Similar simulation for breakage law and cracks evolution of working face in coal mining above aquifer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1114-1120. (in Chinese))
- [3] 何祥,杨科,刘文军,等. 坚硬顶板厚煤层卸压开采覆岩运移特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1559-1594. (He Xiang, Yang Ke, Liu Wenjun, et al. Experimental investigation into overlying strata movement characteristics in thick coal seam stress-relief mining in hard-thick roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 12(6): 1559-1594. (in Chinese))

- [4] 窦礼同, 杨科, 闫书缘. 近距离煤层卸压开采围岩力学特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1177-1182. (Dou Litong, Yang Ke, Yan Shuyuan. Experimental investigation into mechanical characteristics of surrounding rock in close distance coal seams with relieving mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1177-1182. (in Chinese))
- [5] 许振浩, 李术才, 张庆松, 等. TSP 超前地质预报地震波反射特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 640-644, 716. (Xu Zhenhao, Li Shucai, Zhang Qingsong, et al. Reflection characteristic of seismic wave in TSP advanced geological prediction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 640-644, 716. (in Chinese))
- [6] 王连国, 韩猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 317-322. (Wang Lianguo, Han Meng, Wang Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of mining floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 317-322. (in Chinese))
- [7] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 松散承压含水层特征对其载荷传递特性的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 499-505. (Wang Xiaozhen, Xu Jialin, Zhu Weibing, et al. Study on the influence of the characteristic of unconsolidated confined aquifer on its property of load transfer[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 499-505. (in Chinese))
- [8] 刘泉声, 卢超波, 刘滨, 等. 深部巷道注浆加固浆液扩散机理与应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 333-339. (Liu Quansheng, Lu Chaobo, Liu Bin, et al. Research on the grouting diffusion mechanism and its application of grouting reinforcement in deep roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 333-339. (in Chinese))
- [9] 陈登红, 华心祝. 地应力对深部回采巷道布置方向的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1122-1129. (Chen Denghong, Hua Xinzhu. Impact of in-situ stress on layout direction of deep typical gateways[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 1122-1129. (in Chinese))
- [10] 苏华友, 蒋滨, 张康宁, 等. 高应力破碎巷道仿根系围土支护与控制对策[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1338-1344. (Su Huayou, Jiang Bin, Zhang Kangning, et al. Support and control countermeasure of imitation roof soil in high stress broken tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1338-1344. (in Chinese))
- [11] 秦江江. 破碎围岩加固注浆工艺研究[J]. 煤矿现代化, 2015(3): 89-90. (Qin Jiangjiang. Study on grouting technology of broken surrounding rock reinforcement[J]. Coal Mine Modernization, 2015(3): 89-90. (in Chinese))
- [12] 李飞, 周泽, 赖笼, 等. 松软破碎围岩巷道注浆参数试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(4): 7-11. (Li Fei, Zhou Ze, Lai Long, et al. Study on grouting parameters with soft broken surrounding rock mine[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(4): 7-11. (in Chinese))
- [13] 刘猛, 胡焕校, 吴高权, 等. 软弱围岩隧道塑性区注浆效果研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 201-205. (Liu Meng, Hu Xiaohuan, Wu Gaoquan, et al. Research on grouting effect of plastic zone of tunnel with soft and weak rock[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(5): 201-205. (in Chinese))
- [14] 乔卫国, 程少北, 林登阁, 等. 巨厚煤层全煤巷道破坏机理及注浆效果数值模拟[J]. 金属矿山, 2014(2): 26-29. (Qiao Weiguo, Cheng Shaobei, Lin Dengge, et al. Numerical simulation research of failure mechanism and grouting effects[J]. Metal Mine, 2014(2): 26-29. (in Chinese))
- [15] 雷进生, 刘非, 王乾峰, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2245-2253. (Lei Jinsheng, Liu Fei, Wang Qianfeng, et al. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2245-2253. (in Chinese))