

化学注浆防治立井二次涌水透明土试验研究

高岳, 王档良

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了研究立井工作面化学注浆浆液的扩散机理, 采用新型透明土模型及无损光学观测技术, 并设计了化学注浆模拟装置, 利用激光与 CCD 相机完成了透明土模型内部的渗透注浆过程可视化。图像结果显示化学浆液在重力作用下呈“梨形”扩散, 即垂向扩散距离大于横向扩散距离, 与传统“球形”扩散理论有所不同。以在建的核桃峪煤矿立井为例, 依据模型试验结果提出了化学注浆治理立井工作面二次涌水的注浆孔设计方法, 即偏安全考虑减小群孔间距。工程施工结束后, 整个井筒工作面涌水量由施工前大于 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 降到小于 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 堵水率达 90%, 达到了防水堵漏的要求。

关键词: 透明土; 化学浆液; 井筒涌水; 注浆防治水

中图分类号: TD743

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)06-0194-06

Transparent soil experiment study on chemical grouting prevention and control for secondary water inflow occurred in mine shaft

Gao Yue, Wang Dangliang

(School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study the diffusion mechanism of the chemical grouting for the coal mining face in the underground mine, a new transparent soil model and nondestructive optical observation technology were applied. A chemical grouting simulation device was designed and the laser and CCD camera were applied to complete the visualization of the penetration grouting process of the transparent soil model. The image results showed that under the role of the gravity, the chemical grout would be diffused in a pear shape, the vertical diffusion distance would be longer than the lateral diffusion distance and would be different to the conventional ball shape diffusion theory. Based on a mine shaft in construction of Hetaoyu Mine as a case, according to the test results of the model, a grouting borehole design method was provided with the chemical grouting to control the secondary water inflow of the working face in the mine shaft and the space distance between the group boreholes was reduced. After the engineering construction completed, the total water inflow of the mine shaft working face were reduced from over $30 \text{ m}^3/\text{h}$ before the construction to $3 \text{ m}^3/\text{h}$ and the water sealing rate was 90%. The requirements of the water prevention and leakage sealing were reached and could ensure the mine shaft safety.

Key words: transparent soil; chemical grout; water inflow in mine shaft; water prevention and control with grouting

0 引言

随着我国煤矿开采向深部发展, 新建矿井立井的深度不断加深, 井筒直径不断加大。立井建设过程中都会遇到深部地层高地压、高地温、高水压的“三高”问题^[1]。其中的高水压、大涌水量问题是制约立井安全建设的重要方面。工程中通常采用工作

面预注浆的方式进行防治水, 然而, 由于颗粒型水泥浆液的渗透性受到被注地层孔隙大小的制约, 注浆防渗效果常不理想。化学注浆是解决难注地层和低压条件下的矿井突水涌砂灾害防治的有效手段, 针对水泥注浆后的二次涌水有明显的治理效果^[2]。近年来, 化学注浆法在煤矿工程中应用日益增多, 解决了众多工程难题^[3-6]。特别是在立井建设方面,

收稿日期: 2016-04-01; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.032

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41472268); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0946)

作者简介: 高岳(1986—), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生。Tel: 15952161235, E-mail: gaoyue@cumt.edu.cn

引用格式: 高岳, 王档良. 化学注浆防治立井二次涌水透明土试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 194-199.

Gao Yue, Wang Dangliang. Transparent soil experiment study on chemical grouting prevention and control for secondary water inflow occurred in mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 194-199.

化学注浆法取得了诸多成功经验。例如,采用化学浆液治理古山立井微孔隙岩体渗漏的成功实施,并采用扫描电子显微镜以及压汞试验等方法,对化学注浆效果进行微观机理解释^[7]。又如,在水文地质条件复杂的赵庄矿斜井采用化学注浆的方式一次性成功治理漏水,单位涌水量降低了90%以上^[8]。破壁化学注浆在治理杨庄矿立井井壁松散层段井壁漏水也取得成功^[9]。在龙固煤矿主井井筒采用了多种注浆材料配合的工作面注浆堵水技术^[10]。

另一方面,随着化学注浆技术的广泛应用,新的化学注浆材料不断涌现。近年来,低黏度、低毒性的化学注浆材料及其堵水机理是主要的研究方向。改性脲醛树脂在煤矿中的应用逐步广泛^[11-13]。采用乙二醇二乙酸酯对水玻璃化学注浆材料的改性,也可以获得较低的初始黏度^[14]。亦有报道多元醇物质和多异氰酸酯构成多组分共同配合使用的新型化学注浆材料^[15]。从环保角度出发,对传统聚氨酯化学注浆加固材料进行了改性^[16],对裂隙岩体动水化学注浆堵水的机理影响因素也取得了新的认识^[17]。同时,许多新型化学注浆材料的不断出现扩展了化学注浆法的应用范围。

笔者以在建的核桃峪煤矿立井为例,介绍了采用透明土模型实现注浆过程可视化的方法以研究浆液扩散机理。依据模型试验结果提出了化学注浆治理立井工作面二次涌水的注浆孔设计方法及施工工序。

1 工程概况

核桃峪煤矿位于甘肃省正宁县周家乡惠家塬村,井筒设计净直径为5.0 m,井筒全深580 m,在203 m时进入基岩段施工。设计壁厚400 mm,采用C30混凝土浇筑。井筒掘进深度至410 m位置时,遇到白垩系洛河组砂岩含水层。根据前期副井和回风井超前探水结果显示:孔深27 m单孔涌水量达到90 m³/h,孔深32 m单孔涌水量达到97.2 m³/h,50 m段高时单孔最大涌水量达到108 m³/h。根据探水情况,在段高50 m范围掘进时涌水量预计将超过200 m³/h。根据《煤矿防治水规定》^[18]要求,对该段进行工作面预注浆处理。目前,虽然采取了传统的工作面水泥预注浆方法,但注浆堵水效果不理想。处理后的井壁仍有淋水约20 m³/h,掘进工作面出水约15 m³/h。针对该情况,需要对工作面二次出水进行治理。

总体上,煤矿区属于鄂尔多斯大盆地中的一个相对独立的盆地,又称陇东盆地。盆地的西部边界是平凉-彭阳一线,为补给边界,东边界在宁县子午岭以东的老地层露头分布区,为补给边界,南边界是灵台-崇信一线,是隔水边界,北边界没有封闭,是一个补给边界。核桃峪煤矿主要的2层含水层特征如下:

1) 环河、华池组孔隙、裂隙承压含水层:岩性特征为暗紫红色泥岩、砂质泥岩及少量粉、细砂岩,局部发育溶蚀空洞,厚度0~297.87 m,平均厚度28.70 m。单孔推算最大涌水量2.79~283.29 m³/d。根据《煤矿防治水规定》将该地层划分为弱富水性。

2) 洛河组、宜君组孔隙、裂隙承压含水层:岩性特征为紫红、棕红色中粗粒砂岩,上部夹薄层泥岩,中下部夹砾岩,胶结欠佳,较疏松。厚度256.86~508.13 m,平均厚度392.06 m。涌水量58~1700 m³/d,单位涌水量为0.023~0.463 L/(s·m),渗透系数0.3~3.0 m/d。根据《煤矿防治水规定》将该地层划分为中等富水性。

综合上述含水层特征分析,可以认为以下3个方面原因造成堵水处理效果不理想:①该井田洛河组含水层具有较好的补给来源,并且属于良好的孔隙储水介质,所造成的涌水量大,给立井施工带来威胁;②以孔隙为主形成的储水介质和导水介质,颗粒型悬浊液注浆困难,这也是前期水泥注浆效果不理想的主要原因;③洛河组含水层,连续砂岩含水层,中间无泥岩隔水层,注浆难度大,注浆工程量大。

2 化学注浆透明土模型试验

2.1 透明土配制

透明土(Transparent soil)是与天然岩土工程性质相似的透明材料统称^[19]。笔者选用我国东海县某石英厂家生产的粒径为0.1~1.0 mm的熔融石英为透明砂土颗粒。选用矿物油混合物配制孔隙流体,对透明土颗粒进行饱和。透明土的性质测试与配制方法介绍参见文献[19],在此不再赘述。

2.2 透明土模型制作

采用内径200 mm×200 mm×200 mm(长×宽×高)的正方体有机玻璃作为模型容器,壁厚8 mm。

采用的化学浆液材料为脲醛树脂与草酸双液材料,通过空气压缩机提供压力驱动将容器中的2种液体注入透明土模型。在注浆管路中安装比例调节

阀,达到调整液体流量的目的。液体流量比在1~10连续可调,使液体达到设计的混合比例。最大注浆压力为空压机极限压力0.8 MPa,最大流量根据管路直径而变化。试验采用外径6 mm、内径4 mm PU管为注浆管路,注浆针头为外径2 mm、内径1.8 mm不锈钢针头,埋入模型深度约为50 mm。模拟立井工作面注浆,模型整体布置如图1所示。考虑注浆口径远小于模型尺寸,边界效应有效减小。以透明砂土代表多孔介质模拟含水层。

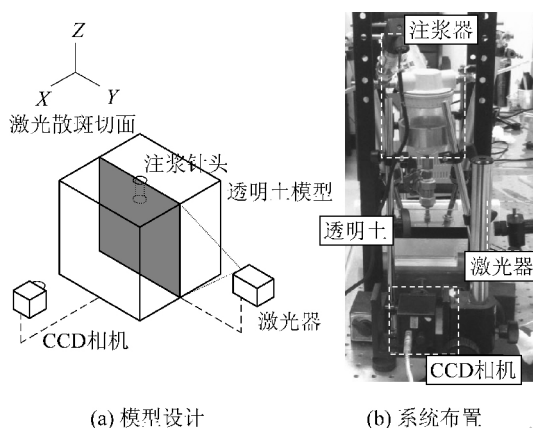


图1 透明土试验模型

Fig. 1 Transparent soil model

2.3 透明土模型试验步骤

试验操作主要步骤如下:

1) 模型台架支撑与固定: 根据透明土模型尺寸,在光学平台上选择合适位置固定模型台架和相机位置。

2) 透明土模型配制: 制备好与透明颗粒折射率相同的矿物油并注入透明土容器中。按设计的相对密度计算所需透明土颗粒质量,采用落砂法均匀制样。模型内部土体设计相对密度为0.7,对应渗透系数 k 约为 $6.39 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

3) 轴压补偿: 为满足地应力模拟条件,采用气缸和反力支架提供垂直应力。模型上部设计补偿压力为300 kPa。

4) 注浆管路排气: 由于空气将导致透明土透明性质变化,在注浆前需对注浆管路中进行排气处理。采用反复抽吸的方式进行排气。

5) 注浆试验: 提前开始图像采集,目的是采集背景图像。开始气压注浆,调整注浆压力为设计值。压力传感器采集注浆管路压力信息。设计注浆压力为60 kPa,凝胶时间60 s。

6) 卸载: 完成注浆试验后卸载拆除仪器支架等

备用。

2.4 透明土模型试验结果分析

采用CCD相机,获得了65 s图像,图像分辨率为1 024像素 \times 768像素,鉴于篇幅限制,取其中代表性时刻图像16幅,如图2所示。

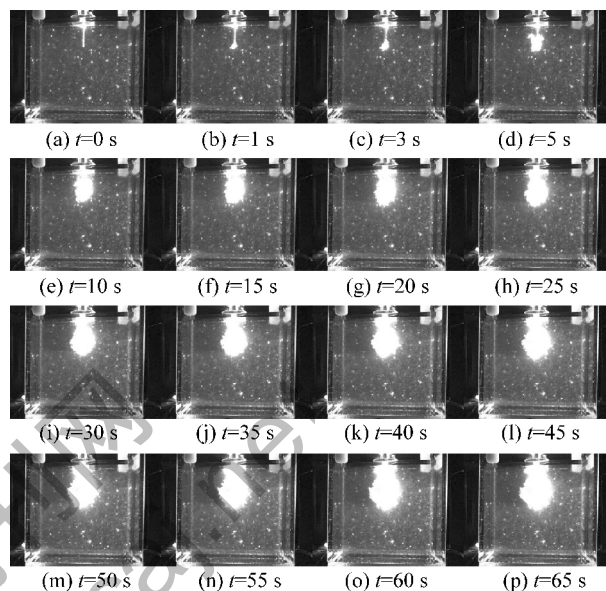


图2 典型化学浆液在透明土中扩散的激光散斑图像

Fig. 2 chemical grouting in transparent soil illuminated by laser

从获取的图像中可以清楚看到所采用的化学浆液在透明土模型中的扩散形态为“梨形”。这与传统的Maag球形扩散理论有所不同。Maag浆液扩散方程是基于达西定律推导而来,并进行了诸多假定,得出浆液的扩散界面呈球形^[20]。

通过本次试验,可以认为化学浆液在渗透性良好的多孔介质中扩散还会受到重力的影响,透明土模拟试验为顶部注入,其浆液的加速度与重力加速度一致,浆液扩散界面在空间中向下扩散速度快。因此,向下方向比向上方向与横向扩散范围大(图3),呈现出“梨形”形态。在工程实际中,假定注浆流量一定的情况下,浆液的“梨形”扩散形态将导致浆液横向扩散距离小于采用传统球形扩散理论设计值。

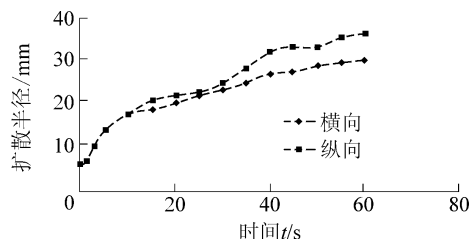


图3 化学浆液横向与纵向扩散半径

Fig. 3 Vertical and horizontal penetration radius of chemical grouting

综上所述,在本次立井工作面注浆孔孔位设计时,采用透明土模型试验结果得出的“梨形”扩散结论,注浆孔间隔距离应偏安全考虑,设计间距需小于传统 Maag 公式计算的群孔间距。

3 化学注浆治理

3.1 化学注浆设计

1) 止浆垫: 止浆垫通常由混凝土浇筑而成,主要受注浆压力和承压水压力。因此,止浆垫设计应满足强度和变形外还应有一定的安全系数。止浆垫厚度 H 计算方法见式(1)。

$$H \geq \frac{(P_w + P_c) D}{2\tau} \times 1.5 \tag{1}$$

式中: P_w 为承压水压力; P_c 为注浆压力; D 为井筒直径; τ 为混凝土抗剪强度; 1.5 为安全系数。通过上述计算方法得出本项目止浆垫设计厚度为 3.5 m,如含水层上部 0.5 m,止浆垫设计如图 4 所示。

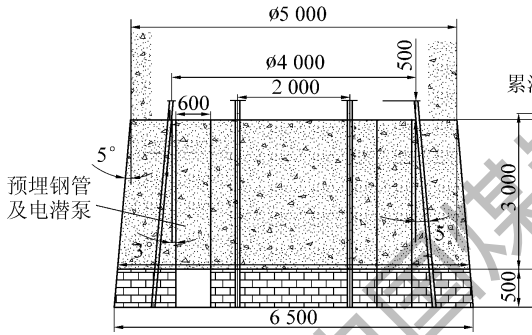


图 4 止浆垫设计

Fig. 4 Structural design of grouting curtain

2) 注浆段高: 本次注浆段标高距离井筒口 410 ~ 460 m。掘进段距离井筒口 410 ~ 450 m。

3) 注浆孔布置原则: 浆液在岩石裂隙孔隙中扩散凝胶后,能起到堵水和加固作用范围,通常用扩散半径来表示。但浆液裂隙岩体内的扩散是不规则的,即各个方向上,浆液扩散的远近各不同。所以扩散半径的大小难以确定。

根据前述透明土模型试验,可以得到浆液在垂向上受重力影响,扩散范围大于横向浆液扩散范围。针对传统的 Maag 公式计算出的浆液扩散范围,应考虑岩土体的各向异性。

考虑到拟注浆岩层为孔隙-微裂隙双重介质的实际情况。因此,采取循环加孔注浆方法,即先按一定的孔距布置一定数量的注浆孔,待全部注浆满足停注封孔标准后,再在已注孔间补孔检查浆液扩散

效果。如加孔涌水超过 2 m³/h,则可能先期注浆未达到预期的效果,须在孔间补孔进行补充注浆,直至达到预期的封水要求。

4) 注浆孔布置: 根据传统 Maag 公式可以初步得到初始周边注浆孔布置按孔间距 0.8 m。根据式(2)确定初始注浆孔数量:

$$N = \frac{\pi(D - 2A)}{L} \tag{2}$$

式中: N 为注浆孔数,个; A 为注浆孔与井壁距离, m; L 为注浆孔间距, m。

通过式(2)计算得出需注浆孔 16 个。1—16 号注浆孔倾角为 5°,切向角 2°~3°。

5) 检查补孔: 根据施工经验,在施工完 16 个孔之后,需要在 16 个孔中间加孔 1'—16' 进行探水检查兼注浆孔。1'—16' 号孔倾角为 3°,切向角 2°~3°,其作用为探水孔兼注浆孔。同时,为了防止水从帷幕下部涌出,需在井筒中间位置布置注浆孔 7 个,编号 Z0—Z6,其中 Z0 为中心孔。

立井掘进工作面注浆孔布置如 5 所示,施工组织顺序见表 1。



图 5 立井掘进工作面注浆孔布置

Fig. 5 Grouting boreholes arrangement at working face

表 1 注浆孔施工注浆顺序

注浆顺序	1	2	3	4
孔号	1—16	1'—16'	Z0 Z1—Z6	b1—b16
孔深/m	10~50	20, 50	25, 50	7, 15
角度/(°)	5	3	0	9

3.2 施工设计

1) 注浆孔及孔口管: 采用 $\phi 73$ mm 钻头钻进成孔,孔口管用材要求采用外径 $\phi 108$ mm 的无缝

钢管。

2) 注浆方式: 为提高浆液扩散渗透效果, 注浆采取分段套孔注浆方法。

3) 压力控制: 根据目前地层属于孔隙水和微裂隙水的情况和其他地区经验, 应选用小流量小压力的注浆方式进行注浆, 注浆压力, 单液浆控制在 7 MPa 以内, 第一段高 10 m 双液浆控制在 11 MPa 以内; 以后每增加 10 m 注浆压力增加 0.2 ~ 0.5 MPa。当注浆压力升高过快, 应调低注浆流量, 降低注浆压力保持注浆继续进行。在注浆过程中应派专人监视上部混凝土井壁在注浆期间的变化, 以防注浆压力过高造成井壁的破裂。

4) 注浆工艺要点: 要充分重视岩体孔隙水和微裂隙注浆的技术难度, 钻孔要尽量横穿裂隙, 必要时可适当使注浆孔保持一定的偏斜度; 布孔、注浆要协调进行, 即随钻随注, 各分段停注与套孔要有一定的间隔时间, 即尽量保证浆液凝固后再套孔注浆; 钻孔—注浆要循合理顺序, 应采取间隔相向注浆方式。

5) 薄弱位置加强孔: 根据图 3 注浆孔位置, 解决注浆孔倾角与注浆孔间距之间的矛盾, 利用长短腿方式布置 b1—b16 号注浆孔, 加强在孔深 7 ~ 15 m 段注浆薄弱段。

3.3 堵水效果

目前, 注浆工程中常用的注浆效果检查方式有: 注浆全过程中注浆压力—注浆量—注浆时间控制法 (PQT)、物探法 (TPS)、检查孔法和数字钻孔摄像法^[20]。本项目因为处于立井施工期间, 工期紧张, 因此, 只有在注浆工程施工结束后的一段时期内观测整个井筒的涌水量来评价注浆效果。工程施工结束后, 整个井筒涌水量由原来的大于 30 m³/h 降到 3 m³/h, 堵水率达 90%。达到了防水堵漏的要求, 保障了建井安全, 取得了理想的工程效果。

4 结 论

1) 采用透明土模型可实现注浆过程可视化, 从而便于研究浆液扩散机理。可以认为化学浆液在渗透性良好的多孔介质中扩散还会受到重力的影响, 浆液扩散界面在空间中向下扩散速度快。因此, 向下方向比向上方向与横向扩散范围大。这与传统的 Maag 球形扩散理论有所不同。

2) 深立井二次涌水问题的治理需要遵从科学的方法, 透明土化学浆液扩散的试验结果与工程实

际相结合, 提出了新的注浆孔设计思路, 即偏安全考虑, 设计间距需小于传统 Maag 公式计算的群孔间距。最终, 获得了较为满意的堵水效果。

3) 深立井建设过程中的二次涌水问题是由于多种因素造成的。颗粒型的浆液在处理此类问题时具有一定的局限性。化学浆液测试表明堵水效果好, 适于煤矿立井工作面二次涌水的防渗漏漏。

参考文献 (References):

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803—2813.
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803—2813.
- [2] 隋旺华, 张改玲, 姜振泉, 等. 矿井溃砂灾害化学灌浆治理技术现状及关键问题研究途径探讨[J]. 工程地质学报, 2008, 16(S1): 73—77.
Sui Wanghua, Zhang Gailing, Jiang Zhenquan, et al. The State-of-the-art of chemical grouting treatment for quicksand hazards in coal mines and the prospect of several key problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(S1): 73—77.
- [3] 吴爱祥, 刘超, 韩斌, 等. 软弱破碎矿体化学注浆浅孔留矿法试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 150—155.
Wu Aixiang, Liu Chao, Han Bin, et al. Experimental research on chemical grouting short hole shrinkage for weak-broken ore-body[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 150—155.
- [4] 李钊, 金兆涛, 聂利亚, 等. 极软煤层大采高综采化学注浆控制片帮冒顶技术[J]. 煤矿开采, 2010, 15(6): 57—60.
Li Zhao, Jin Zhaotao, Nie Liya, et al. Technology of roof falling and coal sliding prevention of large mining face in soft coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(6): 57—60.
- [5] 冯志强, 康红普. 破碎煤岩体化学注浆堵水技术研究及示范工程[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(7): 60—65.
Feng Zhiqiang, Kang Hongpu. Technology research of Chemical grouting for cracked coal-rock mass and demonstration project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(7): 60—65.
- [6] 于宪阳, 张农, 张海韦, 等. 高分子化学注浆材料处理巷道大范围冒顶研究[J]. 煤矿安全, 2010, 41(6): 10—13.
Yu Xianyang, Zhang Nong, Zhang Haiwei, et al. The study on treating large roof fall accident by polymer chemical grouting[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(6): 10—13.
- [7] 隋旺华, 李永涛, 李贵田. 煤矿立井微孔隙岩体注浆防渗及机理分析[J]. 2000, 22(2): 214—217.
Sui Wanghua, Li Yongtao, Li Guantian, et al. Seepage prevention grouting in coal mine shaft wall and mechanism analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 214—

- 217.
- [8] 徐冰寒,高 岳,徐亚飞.改进型化学浆液在钱营孜煤矿副井井筒防水堵漏中的应用[J].煤田地质与勘探,2012,40(3):55-58.
- Xu Binghan, Gao Yue, Xu Yafei. Application of transformed chemical slurry in water prevention and leakage blocking of the auxiliary shaft in Qianyingzi Coal Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 55-58.
- [9] 王档良,童培国,武善元.化学注浆治理巨厚表土层立井井壁漏水[J].水文地质工程地质,2007,34(3):107-109.
- Wang Dangliang, Tong Peiguo, Wu Shanyuan. Chemical Grouting for Preventing Leakage in huge thick overburden shaft wall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 107-109.
- [10] 李海燕,王 琦,江 贝,等.深立井大水工作面注浆堵水技术[J].煤炭学报,2011,36(S2):444-448.
- Li Haiyan, Wang Qi, Jiang Bei, et al. Technology of grouting and blocking water on workign face with massive water in deep vertical shaft [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 444-448.
- [11] 隋旺华,姜振泉,王档良.一种矿用化学注浆材料:中国,200810123239[P].2008-12-03.
- [12] 洪晓东,杨东旭,周 莹.改性脲醛树脂注浆材料的制备及性能研究[J].材料导报,2013,27(8):117-119.
- Hong Xiaodong, Yang Dongxu, Zhou Ying. Study on preparation and performance of modified Urea-formaldehyde resin grouting materials [J]. Materials Review, 2013, 27(8): 117-119.
- [13] 曹晨明,冯志强.低黏度脲醛注浆加固材料的研制及应用[J].煤炭学报,2009,34(4):482-486.
- Cao Chenming, Feng Zhiqiang. Development and application of low viscosity urea formaldehyde resin grouting material [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 482-486.
- [14] 郑先军,王新锋,段存业.煤矿用聚氨酯灌浆加固材料性能研究及应用[J].聚氨酯工业,2015(5):34-37.
- Zheng Xianjun, Wang Xinfeng, Duan Cunye. Performance and application study on polyurethane grouting reinforcement material for coal mines [J]. Polyurethane Industry, 2015(5): 34-37.
- [15] 张虎仕,向剑飞.新型矿用化学注浆材料的研制与应用[J].煤炭科学技术,2012,40(2):36-39.
- Zhang Hushi, Xiang Jianfei. Development and application of new mine chemical grouting material [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 36-39.
- [16] 许明路,何小芳,李杰飞,等.矿用聚氨酯注浆材料的应用研究[J].材料导报,2014,28(17):96-100.
- Xu Minglu, He Xiaofang, Li Jiefei, et al. Research on application of polyurethane grouting material for mining [J]. Materials Review, 2014, 28(17): 96-100.
- [17] Sui Wanhua, Liu Jinyuan, Wei Hu, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting rock fracture with flowing water [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 239-249.
- [18] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [19] 隋旺华,高 岳, Liu Jinyuan.透明土试验技术现状与展望[J].煤炭学报,2011,36(4):577-582.
- Sui Wanhua, Gao Yue, Liu Jinyuan. Status and prospect of transparent soil experimental technique [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577-582.
- [20] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.
- [14] 袁瑞甫,李怀珍.含瓦斯煤动态破坏模拟实验设计的研究与应用[J].煤炭学报,2013,38(S1):117-123.
- Yuan Ruifu, Li Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 117-123.
- [15] Xu Tao, Tang Chunan, Yang Tianhong, et al. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 905-919.
- [16] Zhu W C, Liu J, Sheng J C, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(7): 971-980.
- [17] 徐 涛,唐春安,杨天鸿.含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- (上接第122页)
- 出危险程度预测[J].中国安全生产科学技术,2015,11(7):129-134.
- Liang Bing, Qin Bing, Sun Weiji, et al. Prediction on dangerous level of coal and gas outburst based on comprehensive evaluation model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(7): 129-134.
- [12] 胡千庭,孟贤正,张永将,等.深部矿井综掘面煤的突然压出机理及其预测[J].岩土工程学报,2009,31(10):1487-1492.
- Hu Qianting, Meng Xianzheng, Zhang Yongjiang, et al. Mechanism and forecast of coal sudden extrusion of fully mechanized driving face in deep mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1487-1492.
- [13] 马玉林.煤与瓦斯突出渗滤机理与演化规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011.