



奥灰顶部注浆改造材料配比优选试验

樊振丽 曹路通 张风达 尹希文 赵秋阳 张志巍

引用本文:

樊振丽, 曹路通, 张风达, 等. 奥灰顶部注浆改造材料配比优选试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 277–290.

FAN Zhenli, CAO Lutong, ZHANG Fengda. Optimal selection test of material ratio in the top of Ordovician limestone grouting reconstruction[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 277–290.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0375>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究

Study on ratio optimization and performance test of fly ash-based impermeable grouting materials

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 230–239 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/85097874-4e3c-434f-92df-acf35a50101a>

基于RSM的超细水泥注浆材料配比及性能优化模型

Based on Box-Behnken method superfine cement grouting material ratio and performance optimization model

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 146–158 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1391>

华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展

Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f0cc8f96-3df7-402d-9898-315875e369f6>

黄陇煤田厚层砂岩水害精准注浆防治水技术研究

Research on water control technology of precise grouting in thick sandstone water damage in Huanglong coalfield

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 256–264 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1393>

定向区域注浆三维模拟试验系统研制及应用

Development and application of a three-dimensional simulation test system for directional regional grouting

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 179–186 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0349>

橡胶粉煤灰基矿井底板裂隙注浆材料性能的试验研究

Experimental study on performance of rubber-fly ash-based mine floor fissure grouting material

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 1–10 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1153>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

樊振丽, 曹路通, 张风达, 等. 奥灰顶部注浆改造材料配比优选试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 277–290.
FAN Zhenli, CAO Lutong, ZHANG Fengda, *et al.* Optimal selection test of material ratio in the top of Ordovician limestone grouting reconstruction[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 277–290.

奥灰顶部注浆改造材料配比优选试验

樊振丽^{1,2,3}, 曹路通^{1,2}, 张风达^{1,2}, 尹希文^{1,2,3}, 赵秋阳^{1,2}, 张志巍^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013;

3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘要:我国华北型煤田矿井深部承压水上开采前, 对奥灰顶部进行注浆改造并封堵导水通道, 是降低底板突水风险的有效方法。针对桌子山煤田深部中等~强透水灰岩注浆工程需求, 采用正交试验方法对不同配比的粉煤灰-水泥材料基础性能进行了测试, 分析了水固比、固相比以及温度 3 个因素对浆液密度、黏度、析水率、结实率、凝结时间和力学强度 6 项指标的影响规律。试验结果表明: 水固比对浆液的 6 项指标均有相对突出的影响; 固相比对浆液的黏度、凝结时间及力学强度有较大影响; 温度对浆液性能的影响相对较小。将地面注浆钻孔升压过程分为低压充填、中压扩散、高压裂隙延展加固 3 个阶段, 不同注浆阶段适用的注浆材料配比不同。采用综合平衡法优选, 分别得到了适用于不同注浆阶段的 3 个材料配比方案。将优选的注浆材料配比应用于中等~强透水灰岩注浆改造工作中, 工程实践显示浆液能够在地层中有效扩散并充填裂隙, 基本上切断了奥灰顶部所揭露的垂向导水通道, 降低了工作面突水风险, 为奥灰顶部区域性注浆治理工程提供了技术支撑。

关键词: 注浆材料; 正交试验; 浆液配比; 水害区域治理; 底板水害防治

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0277-14

Optimal selection test of material ratio in the top of Ordovician limestone grouting reconstruction

FAN Zhenli^{1,2,3}, CAO Lutong^{1,2}, ZHANG Fengda^{1,2}, YIN Xiwen^{1,2,3}, ZHAO Qiuyang^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: It is an effective method to reduce the risk of floor water inrush by grouting reconstruction and sealing of water channel on top of Ordovician limestone before deep confined water mining in Huabei type coal mine in China. The basic properties of fly-ash cement materials with different ratios were tested using the orthogonal test method, in accordance with the requirements of deep medium to strong pervious limestone grouting project in Zhuozishan coal field. Subsequently, the influences of three factors, water-solid ratio, solid ratio and temperature, on six indexes of slurry density, viscosity, water extraction rate, setting rate, setting time and mechanical strength were analyzed. The results show that the ratio of water to solid has a relatively prominent effect on 6 indexes of slurry. The solid ratio has great influence on the viscosity, setting time and mechanical strength of the slurry. The effect of temperature on the performance of the slurry is relatively small. The pressure boosting process of ground grouting holes is divided into three stages: low-pressure filling, medium-pressure diffusion, and high-pressure fracture extension and reinforcement. The grouting material ratio varies across different stages of grouting. The comprehensive balance method yielded three material ratio schemes tailored for various grouting stages. The optimal grouting material ratio is applied for the grouting renovation of medium-strong pervious limestone. Engineering practice demonstrates that the slurry effectively diffuses and fills cracks in the formation, essentially intercepting the vertical water channel exposed at the top of the Ordovician limestone. It reduces the risk of water inflow on the working face and provides technical support for regional grouting treatment

收稿日期: 2024-03-25

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0375

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4102105); 国家自然科学基金资助项目(51704158); 中煤科工开采研究院有限公司科技创新基金青年资助项目(KCYJY-2023-QN-03)

作者简介: 樊振丽(1983—), 男, 河南郑州人, 研究员, 博士。E-mail: fanzhenli@qq.com

projects targeting the top of the Ordovician limestone.

Key words: grouting material; orthogonal test; slurry ratio; regional control of water damage; floor water damage control

0 引言

我国约 60% 的煤矿不同程度地受到底板岩溶承压水的威胁,华北型石炭二叠纪煤田承压水体上待解放煤量达 570 亿 t,随着矿井开采由上组煤转向下组煤,由浅部转向深部,由非带压区转向带压区,水文地质条件由简单转向复杂,承压水体上采煤的风险逐渐增大,严重制约着新时期矿井安全高效生产^[1-2]。近十余年以来,我国大水矿区采用地面定向钻孔超前区域注浆治理技术对煤层底板进行加固、改造,基本消除了回采工作面突水淹面事故^[3-4]。注浆浆液的性能直接关系到对底板灰岩含水层的改造效果,是注浆工艺选择与优化的重要参考,关系到底板注浆治理工作的成败。

煤矿水害区域治理工程中常采用粉煤灰水泥浆,达到既节约成本又实现处置煤基固废的目的。我国燃煤电厂每年产生超过 6 亿 t 的粉煤灰^[5],其利用主要集中在建材、改良剂、化工、矿物提取等方面,地下工程注浆是粉煤灰大规模利用的新途径。我国学者通过改变水泥基材料的活性、颗粒度或加入矿渣、黏土或其他改性添加剂的形式^[6-12],研究水灰比、固相比、析水率、流动性、抗压强度等参数的变化特征,形成不同性质、不同成本、不同用途的浆液类型^[13-17]。苗贺朝等^[18]优选了低水灰比激发剂作用下粉煤灰基防渗注浆材料配方,在露天矿地面帷幕注浆中成功应用;王皓^[19]研究了粉煤灰—水泥—水玻璃(CFS 浆液)性能,粉煤灰掺量 60%~70% 即可满足煤层底板注浆工程的要求;徐斌等^[20]、张润畦等^[21]的研究表明增加粉煤灰掺量可有效缩短浆液析水时间,提高浆液稳定性;顾明晖等^[22]研究了 CFS 浆液不同成分掺量与浆液黏度、析水率、结实率和抗压强度的关系模型;张曼曼等^[23]研究了高掺量粉煤灰在顶板注浆加固工程中的浆液性能,粉煤灰掺量比例达 80%~90% 可满足加固破碎顶板的需求;刘慧妮等^[24]研究了不同掺量的微米级粉煤灰、减水剂、纳米 CaCO_3 等对水泥浆液性能的影响特征;柳昭星等^[25]对水泥浆、水泥粉煤灰浆以及水泥黏土浆进行了浆液性能选配研究,得到了不同类型浆液性能的主控因素;许延春等^[26]、张嘉凡等^[27]、张二蒙等^[28]等对水泥基浆液黏度特性进行了研究,发现浆液的时变性特征,中等黏度浆液注浆效果相对较好。

综上,我国学者关于注浆浆液性能的研究鲜有考虑受注地层渗透性、可注性特征,特别是针对中等~强透水灰岩岩溶地层,选择在水泥中添加粉煤灰,优选并使用具有良好稳定性、扩散性和经济性的材料配比浆液,可解决底板注浆改造工程中材料消耗量大、成本高、浆液扩散难以控制等问题^[29-31]。笔者以桌子山煤田奥陶系灰岩(简称“奥灰”)顶部注浆改造为背景,对受注地层的渗透性、可注性进行测试,据此提出浆液性能需求,设计正交试验获取适用的注浆材料配比以及影响浆液性能的主控因素,为注浆工艺优化调整提供依据。

1 桌子山煤田深部奥灰顶部可注性分析

桌子山煤田位于华北地台鄂尔多斯盆地西缘,祁—吕—贺山字形构造北部,沉积石炭二叠系煤层^[32]。区内地质构造复杂,其构造形态为近南北向的背斜,其间发育若干近南北向逆断层以及东西向正断层,构造控水特征明显^[33-34](图 1)。煤层底板奥陶纪岩溶含水层为连续海盆沉积环境,厚度大于 200 m,灰岩多为泥晶或微晶结构,传统观点认为其富水性和补给条件一般。2010 年 3 月 1 日骆驼山煤矿发生了隐伏岩溶陷落柱特别重大突水事故,峰值突水量达 60 036 m^3/h ,说明矿区内构造区富水性强,受埋深、地应力、地质构造等因素影响,奥灰富、导水性不均一的差异特征明显^[35-36]。

桌子山煤田某深部矿井受西来峰逆断层(落差大于 500 m)、SF10 正断层(落差大于 150 m)影响,井田西翼最大埋深达 710 m,井田内落差大于 5 m 的断层达 40 余条,断层分布密度大于 20 条/ km^2 ,是桌子山煤田埋深最大,受构造控水影响最突出的矿井之一。该矿深部奥灰顶界面承受水压达 6.2 MPa,煤层开采前需对奥灰顶部进行区域性超前注浆治理,注浆治理前施工 T1、T2、T3 三个科学试验孔,对钻孔奥灰顶部 50 m 范围内灰岩进行了裂隙开度统计并开展了分段注水试验,以分析奥灰顶部的可注性。将各钻孔在垂向上分为 0~20、20~35、35~50 m 三段进行岩心裂隙开度的统计(表 1、图 2、图 3),T1、T2、T3 三个钻孔分别统计了 209、105 和 221 条裂隙,其中 T1 和 T3 钻孔受构造应力和地下水溶蚀影响明显,T2 孔则相对致密,表现出裂隙分布的不均一特征;垂向上各段代表中等透水(裂隙开度 0.1~0.5 mm)

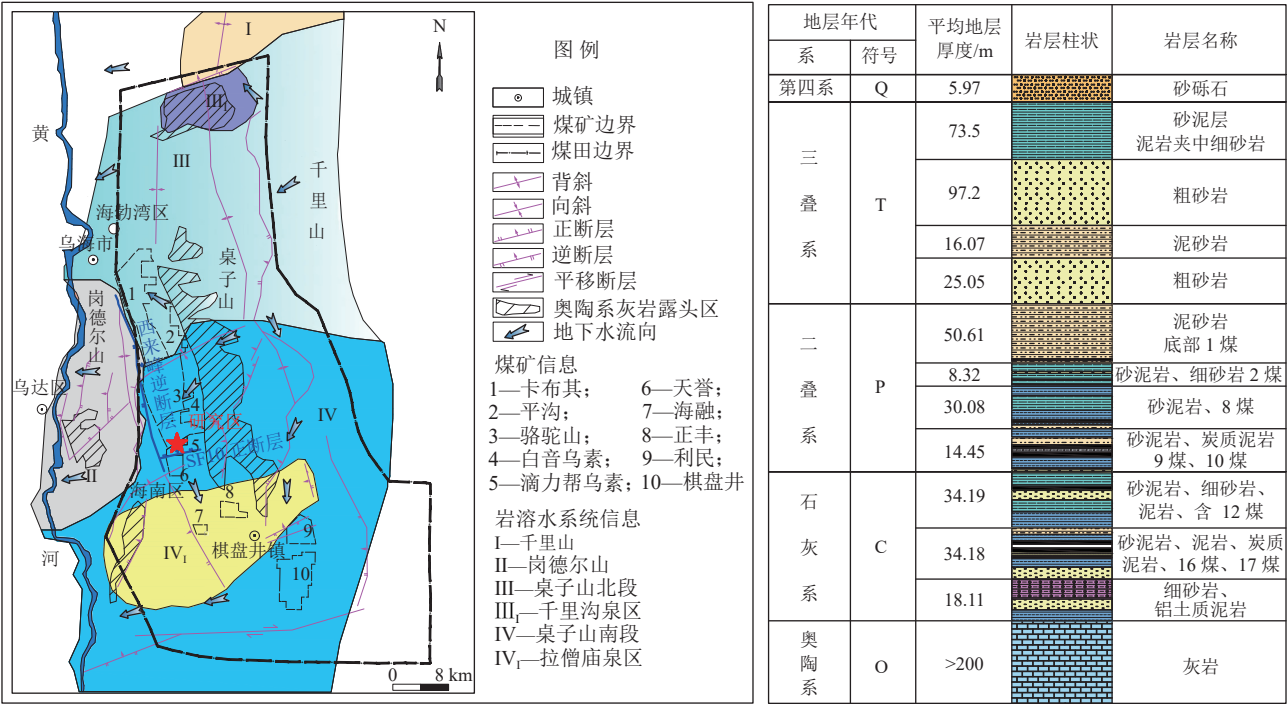


图 1 桌子山煤田地质构造平面和地层柱状图

Fig.1 Outline of geological structure and stratigraphic column of Zhuozishan Coalfield

和强透水(裂隙开度大于 0.5 mm)的裂隙数量大于弱透水(裂隙开度小于 0.1 mm)的裂隙数量,且由浅至深裂隙占比逐渐减小,说明浅部裂隙相对发育、中等~强透水裂隙占比较大的特征。

表 1 奥灰顶部钻孔岩心裂隙开度统计

Table 1 Statistics of crack opening of borehole core in the top of Ordovician limestone

垂向层位/m		0~20	0~20	0~20	20~35	20~35	20~35	35~50	35~50	35~50
裂隙开度/mm		<0.1	0.1~0.5	>0.5	<0.1	0.1~0.5	>0.5	<0.1	0.1~0.5	>0.5
渗透性等级		弱透水	中等透水	强透水	弱透水	中等透水	强透水	弱透水	中等透水	强透水
T1孔	数量/条	27	38	12	19	47	9	24	28	5
	不同裂隙开度占比/%	13	18	6	9	23	4	12	13	2
	分段占比/%	—	37	—	—	36	—	—	27	—
T2孔	数量/条	19	17	9	16	12	4	17	8	3
	不同裂隙开度占比/%	18	16	9	15	11	4	16	8	3
	分段占比/%	—	43	—	—	30	—	—	27	—
T3孔	数量/条	23	43	19	24	32	11	29	31	9
	不同裂隙开度占比/%	10	19	9	11	15	5	13	14	4
	分段占比/%	—	38	—	—	31	—	—	31	—

注：裂隙开度按照《水利水电工程地质勘察规范》中岩土渗透性分级标准进行统计。

采用自行研发的岩体原位分段注水测试系统(图 4),对封隔器胶囊注水起胀对奥灰顶部进行分段分隔,采用大流量泵站在奥灰顶部 50 m 范围内每 5 m 进行一组原位注水试验,分别获取 T1、T2 和 T3 钻孔奥灰顶部的渗透系数(K)和透水率(W),测试结果见表 2 和图 5。

试验表明奥灰顶部地层渗透性具有垂向分段特点,即受到风化壳充填影响的区域渗透性相对较差,10~35 m 渗透系数和透水率相对较大,35 m 以深则开始变小,奥灰顶部整体上表现为中等~强透水岩层特征。具体地,T2 孔 0~10 m 受风化壳泥质矿物充填应表现为弱透水层段,但 T1、T3 孔奥灰测试段

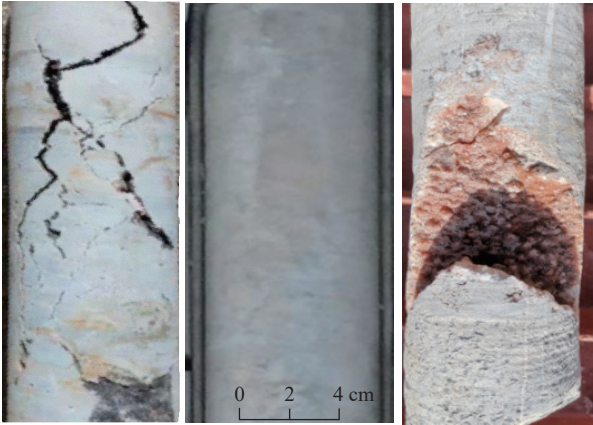


图 2 钻孔岩心裂隙溶隙发育形态

Fig.2 Development of crack (solution) gap in borehole core

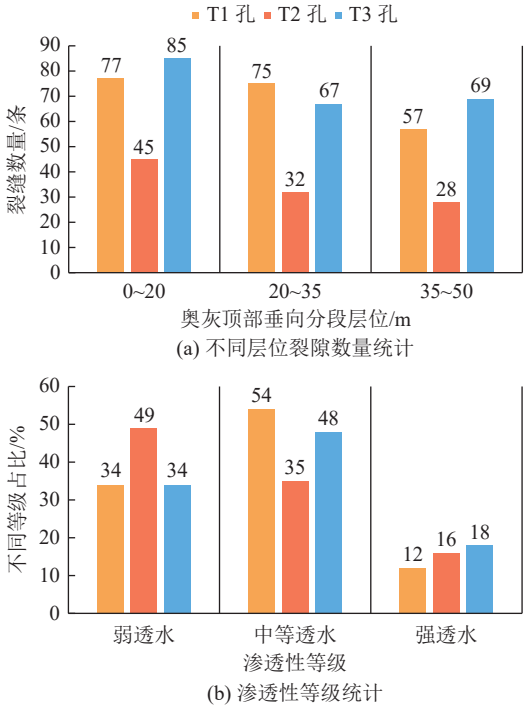


图 3 奥灰顶部不同层位裂隙数量与渗透性等级占比统计对比

Fig.3 Statistical comparison of the number of cracks and the proportion of permeability grade at different layers in the top of Ordovician limestone

的渗透系数和吕荣值均反映该钻孔区域的地层为中等~强透水岩层,这与 T1 和 T3 孔处于井田西翼深部区且受构造影响的特征相一致。

裂隙开度统计和压水试验成果分析表明,受构造和地下水溶蚀作用影响,井田西翼奥灰顶部具有良好的渗透性和可注性。针对中等~强透水灰岩良好的可注性,综合考虑经济性和治理效果,选择粉煤灰水泥浆作为此类地层的注浆浆液类型,测定浆液密度、黏度、析水率、结实率、凝结时间、力学

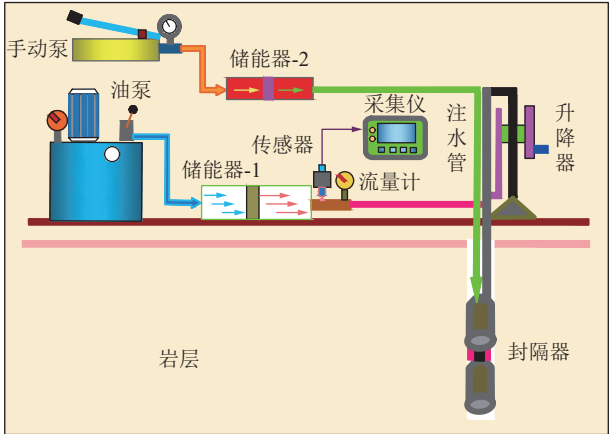


图 4 岩体原位分段注水测试系统

Fig.4 In-situ segmented water injection test system for rock mass

强度,设计了正交试验方案,分析不同因素水平下的各指标影响规律,优选适用于该地层条件下的浆液配比。

2 粉煤灰水泥浆性能试验方案

2.1 浆材特征

水泥选用鄂尔多斯棋盘井地区 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,性能指标见表 3;粉煤灰采用 F 类 II 级粉煤灰,性能指标见表 4;搅拌液为滴力帮乌素煤矿矿井水,pH 值 7.1。

2.2 试验内容及仪器

对粉煤灰水泥浆材料的密度、黏度、析水率、结实率、凝结时间以及力学强度等指标进行试验测试,主要的仪器设备有密度计、马氏漏斗、电子秒表、台式定速搅拌器、恒温恒湿养护箱、维卡仪、量杯、量筒、铸铁磨具等(图 6),参考文献 [14,18-19] 试验方法开展测试工作。

2.3 正交试验方案设计

为了获取浆液配比和工程施工环境对浆液性能的影响,采取正交试验方法分析不同因素对浆液性能的影响程度[18-19,37-38]。本次选择水固比(A)、固相比(B)和温度(C)3 个影响因素,每个因素设定 4 个水平,构建 $L_{16}(4^3)$ 型正交试验表(表 5)。

3 试验结果及分析

3.1 浆液材料配比正交试验结果

根据正交试验设计组合,共统计 16 批 48 组不同配比及环境参数条件下的密度、黏度、析水率、结实率、初凝时间、终凝时间,及 7、14、28 d 的单轴抗压强度数据,试验结果见表 6。

表 2 奥灰顶部渗透性指标实测值

Table 2 Measured values of the permeability index of the top of Ordovician limestone

压水层位/m	T1		T2		T3	
	$K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$W/(\text{L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}))$	$K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$W/(\text{L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}))$	$K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$W/(\text{L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}))$
5	9.2×10^{-4}	0.7	7.9×10^{-5}	0.06	9.2×10^{-3}	7
10	6.6×10^{-3}	5.0	9.2×10^{-5}	0.07	2.2×10^{-2}	17
15	8.6×10^{-2}	65.0	2.6×10^{-3}	2.00	3.7×10^{-2}	28
20	4.6×10^{-2}	35.0	9.2×10^{-3}	7.00	1.3×10^{-1}	102
25	3.0×10^{-2}	23.0	1.3×10^{-2}	10.00	7.5×10^{-2}	57
30	6.5×10^{-2}	49.0	1.1×10^{-2}	8.00	3.3×10^{-2}	25
35	3.0×10^{-2}	23.0	1.5×10^{-2}	11.00	2.2×10^{-2}	17
40	2.0×10^{-2}	15.0	9.2×10^{-3}	7.00	4.5×10^{-2}	34
45	9.2×10^{-3}	7.0	4.0×10^{-3}	3.00	2.9×10^{-2}	22
50	1.5×10^{-2}	11.0	6.6×10^{-3}	5.00	2.0×10^{-2}	15

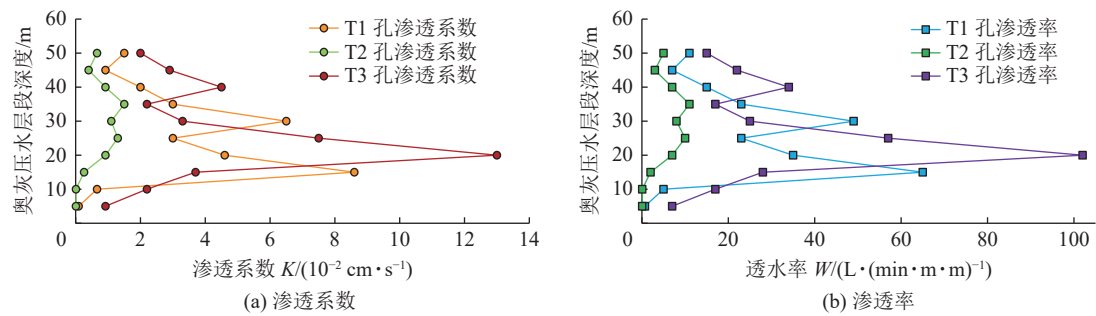


图 5 奥灰顶部渗透性测试曲线

Fig.5 Permeability test curves of the top of Ordovician limestone

表 3 水泥材料主要物质成分及性能参数

Table 3 Primary material composition and performance parameters of cementitious materials

成分质量分数/%						比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	初凝时间/min	终凝时间/min	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO					
50.1	18.4	7.05	3.29	2.32	0.51	340	185	250	7.4	44.5

表 4 粉煤灰材料主要物质成分及性能参数

Table 4 Primary composition and performance parameters of fly ash material

成分质量分数							细度	含水量	活性指数	烧失量
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O				
44.95	32.56	4.03	0.56	4.05	0.52	1.03	1.8	0.1	74	3.9

3.2 正交试验结果分析

根据注浆材料正交试验测定结果,对注浆材料 9 项指标分别进行极差分析和方差分析。

1)极差分析:极差分析是计算单因素在各水平下均值的极差,确定各影响因素的权重并排序。极差计算按照式(1)计算:

$$R_j = \max_i \{ \overline{T_{ij}} \} - \min_i \{ \overline{T_{ij}} \} \quad (1)$$

式中: $\overline{T_{ij}}$ 为影响因素 j 水平 i 下的指标均值。

极差越大则说明该因素对测试成果的影响越大,一般用各因素水平作为 X 轴,指标均值作为 Y 轴,形成均值主效应图进行分析(图 4—图 13)。

2)方差分析:将总变差平方和分解为各因素的



图 6 浆液性能试验主要仪器设备
Fig.6 Slurry performance testing equipment

表 5 正交试验因素水平
Table 5 Levels of factors in the orthogonal test

水平	因素		
	水固比W : (C+F) 因素A	固相比(C : F) 因素B	温度/℃ 因素C
1	0.8 : 1	30 : 70	10
2	0.9 : 1	40 : 60	15
3	1 : 1	50 : 50	20
4	2 : 1	60 : 40	25

注：W为水，C为水泥，F为粉煤灰；水固比和固相比的比值均为质量比。

表 6 注浆材料配比正交试验结果
Table 6 Results of orthogonal testing for the grouting material ratio

编号	水固比	固相比	温度/℃	密度/(g · cm ⁻³)	黏度/s	析水率/%	结实率/%	凝结时间/h		不同时间的抗压强度/MPa		
								初凝	终凝	7 d	14 d	28 d
①	0.8 : 1	30 : 70	10	1.46	29.16	12	88	9.50	9.81	3.37	4.69	8.61
②	0.8 : 1	40 : 60	15	1.47	27.57	14	86	9.33	9.67	4.58	6.74	10.62
③	0.8 : 1	50 : 50	20	1.48	26.67	15	85	8.67	9.25	6.64	9.15	14.47
④	0.8 : 1	60 : 40	25	1.51	24.96	16	84	8.33	9.33	8.82	12.56	18.54
⑤	0.9 : 1	30 : 70	15	1.43	23.96	14	86	9.50	10.09	2.81	3.77	7.88
⑥	0.9 : 1	40 : 60	25	1.43	22.94	15	85	8.50	9.05	3.54	5.09	9.65
⑦	0.9 : 1	50 : 50	20	1.46	22.17	15	85	8.02	8.58	4.45	6.67	12.13
⑧	0.9 : 1	60 : 40	10	1.48	21.25	16	84	8.05	8.52	6.87	9.36	15.79
⑨	1 : 1	30 : 70	20	1.42	20.93	17	83	10.67	11.33	2.02	2.90	5.40
⑩	1 : 1	40 : 60	10	1.42	19.95	18	82	9.42	10.16	2.53	3.77	6.80
⑪	1 : 1	50 : 50	15	1.44	19.77	19	81	9.16	10.00	2.83	4.38	7.59
⑫	1 : 1	60 : 40	25	1.45	19.63	19	81	8.33	8.83	3.46	5.47	8.60
⑬	2 : 1	30 : 70	25	1.25	16.60	52	48	12.07	12.52	0.80	1.02	1.61
⑭	2 : 1	40 : 60	15	1.25	16.58	50	50	11.06	11.53	0.88	1.57	2.80
⑮	2 : 1	50 : 50	10	1.26	16.46	49	51	10.60	11.24	2.17	2.80	4.21
⑯	2 : 1	60 : 40	20	1.26	16.38	49	51	10.75	11.25	2.32	3.27	5.60

变差平方和,构建 F 统计量,设置 $F_{0.01}$ 、 $F_{0.05}$ 和 $F_{0.1}$ 三种显著性水平,将各因素 F 值与各显著水平进行比较,进行显著性检验。

设各因素显著性为 F_m ,若 $F_m > F_{0.01}(f_1, f_2)$,则表示该因素对试验结果有极显著影响;若 $F_{0.01}(f_1, f_2) > F_m > F_{0.05}(f_1, f_2)$,则表示该因素对试验结果有显著影响;若 $F_{0.05}(f_1, f_2) > F_m > F_{0.1}(f_1, f_2)$,则表示该因素对试验结果影响一般;若 $F_m < F_{0.1}(f_1, f_2)$,则表示该因素对试验结果无显著影响。注浆材料配比 9 项指标方差分析结果见表 7。

3.2.1 密度

浆液密度随水固比、固相比和温度的变化如图 7 所示,呈现出以下特征:

1)浆液密度随着水固比的增大而减小,主要原因在于浆液随着水分占比的增加而被稀释。

2)浆液密度随着固相比的增大而增大,是由于单位体积水泥的密度大于粉煤灰,随着水泥掺量的增加、粉煤灰掺量的减少,浆液密度呈增大趋势。

3)试验温度的改变对浆液密度的影响不明显。

由方差分析可知,各影响因素中,水固比对密度具有显著影响,而固相比、温度对其影响较小,3 个因素的主次关系是:水固比(A)>固相比(B)>温度

表 7 注浆材料配比试验各指标方差分析

Table 7 Analysis of variance for each index in grouting material ratio test

指标	方差分析						
	方差源	平方和S	自由度f	均方	F	临界值 F_{α}	显著性/排序
密度	A	0.124	3	0.041	184.850	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	★★★/1
	B	0.002	3	0.001	3.467		○/2
	C	0	3	0	0.477		○/3
	误差	0.001	6	0			
	修正后总计	0.128	15				
黏度	A	237.578	3	79.193	95.742	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	★★★/1
	B	7.435	3	2.478	2.996		○/2
	C	1.872	3	0.624	0.754		○/3
	误差	4.963	6	0.827			
	修正后总计	251.847	15				
析水率结实率	A	3 538.250	3	1 179.417	707.650	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	★★★/1
	B	2.250	3	0.750	0.450		○/3
	C	7.250	3	2.417	1.450		○/2
	误差	10.000	6	1.667			
	修正后总计	3 557.750	15				
初凝时间	A	15.580	3	5.193	31.670	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	★★★/1
	B	5.013	3	1.671	10.191		☆☆/2
	C	0.473	3	0.158	0.961		○/3
	误差	0.984	6	0.164			
	修正后总计	22.050	15				
终凝时间	A	15.110	3	5.037	23.908	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	☆☆/1
	B	1.360	3	1.453	6.899		●/2
	C	0.410	3	0.137	0.649		○/3
	误差	1.264	6	0.211			
	修正后总计	21.145	15				
7 d抗压强度	A	43.055	3	14.352	7.065	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	●/1
	B	13.185	3	4.395	2.164		○/2
	C	4.278	3	1.426	0.702		○/3
	误差	12.189	6	2.031			
	修正后总计	72.707	15				
14 d抗压强度	A	83.675	3	27.892	8.139	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	●/1
	B	30.045	3	10.015	2.922		○/2
	C	7.860	3	2.620	0.765		○/3
	误差	20.562	6	3.427			
	修正后总计	142.142	15				
28 d抗压强度	A	220.650	3	73.550	11.536	$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.1}(3,3)=5.39$	☆☆/1
	B	55.343	3	18.448	2.893		○/2
	C	13.900	3	4.633	0.727		○/3
	误差	38.254	6	6.376			
	修正后总计	328.147	15				

注：★★★为极显著影响；☆☆为显著影响；●为一般影响；○为无显著影响。

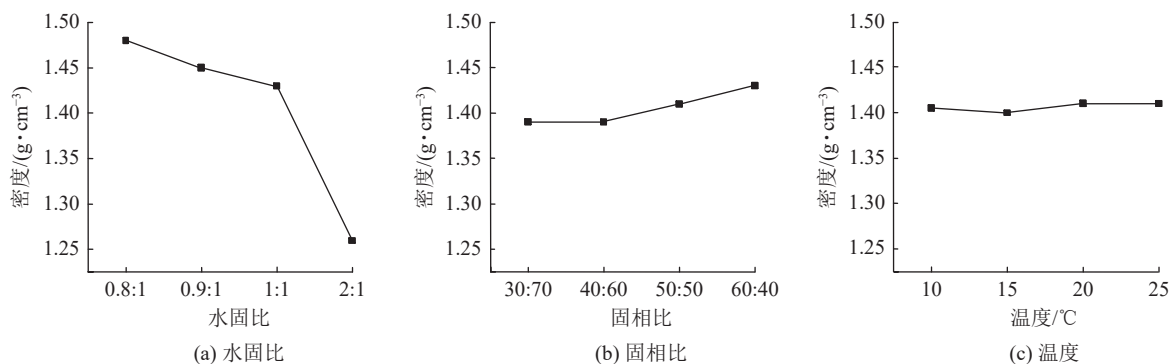


图 7 各因素对浆液密度的影响

Fig.7 Impact of different factors on the density of slurry

(C)。从有利于浆液在地层中扩散的角度讲,密度指标的最佳组合为 $A_4B_1C_j$, 即: 水固比取第 4 水平, 为 2 : 1; 固相比取第 1 水平, 为 30 : 70; 温度在设计水平 j 范围($10^{\circ} \sim 25^{\circ}$)内取值均可。

3.2.2 黏 度

黏度随水固比、固相比和温度的变化如图 8 所示, 呈现出以下特征:

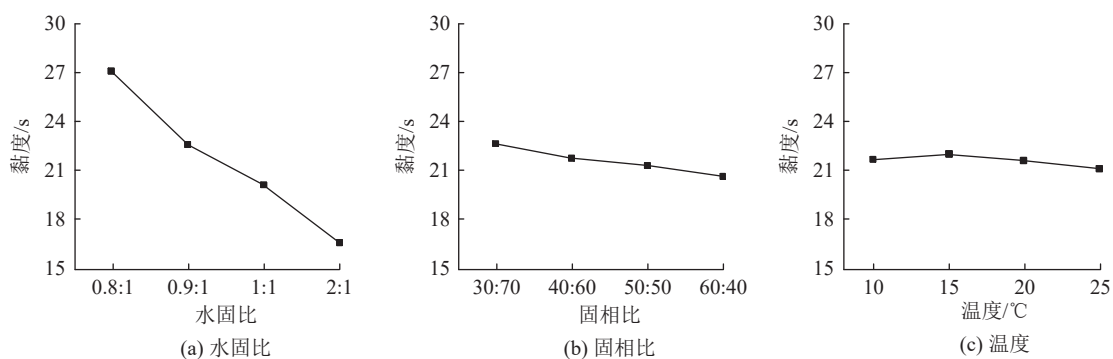


图 8 各因素对浆液黏度的影响

Fig.8 Impact of different factors on the viscosity of slurry

由方差分析可知, 各影响因素中, 水固比、固相比、温度均对黏度具有显著影响, 3 个因素的主次关系是: 水固比(A)>固相比(B)>温度(C)。从控制性注浆角度讲, 黏度指标的最佳组合为 $A_1B_1C_2$, 即: 水固比取第 1 水平, 为 0.8 : 1; 固相比取第 1 水平, 为 30 : 70; 温度取第 2 水平, 即 15 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.3 析水率与结实率

浆液的析水率与结实率随水固比、固相比和温度的变化如图 9 所示, 呈现出以下特征:

1) 浆液析水率和结实率呈负相关互补关系, 这是由于本次试验未添加其他添加剂, 结实率越大, 析水率越小。

2) 析水率随着水固比的增大而减小, 浆液越稀析水率越大, 结实率越小。

3) 固相比的改变对浆液析水率和结实率的改变

1) 黏度与水固比呈负相关关系, 即水固比越大, 浆液流动性越好, 黏度越低。

2) 浆液黏度随着固相比的增大而减小, 即水泥掺量越大, 浆液黏度越小, 流动性越好。粉煤灰掺量增大, 浆液的扩散范围变小。

3) 试验设定的温度对浆液黏度的影响较大, 黏度一般随温度的增高而降低, 浆液扩散性好。

幅度有限, 说明仅考虑浆液结石性时, 可在试验设计的范围内调整粉煤灰的掺量。

4) 试验设定的温度对浆液析水率和结实率影响不太显著, 但也显现出随着温度的增高, 结实率有小幅增大的趋势。

由方差分析可知, 各影响因素中, 水固比对析水率和结实率具有显著影响, 而固相比、温度对其影响有限。从有利于加固地层裂隙空间的角度讲, 结实率指标的最佳组合为 $A_1B_1C_j$, 即: 水固比取第 1 水平, 为 0.8 : 1; 固相比在设计水平 j 范围(30 : 70 ~ 60 : 40)内取值均可; 温度在设计水平 j 范围($10^{\circ} \sim 25^{\circ}$)内取值均可。

3.2.4 凝结时间

浆液的初凝和终凝时间随水固比、固相比和温度的变化如图 10 所示, 呈现出以下特征:

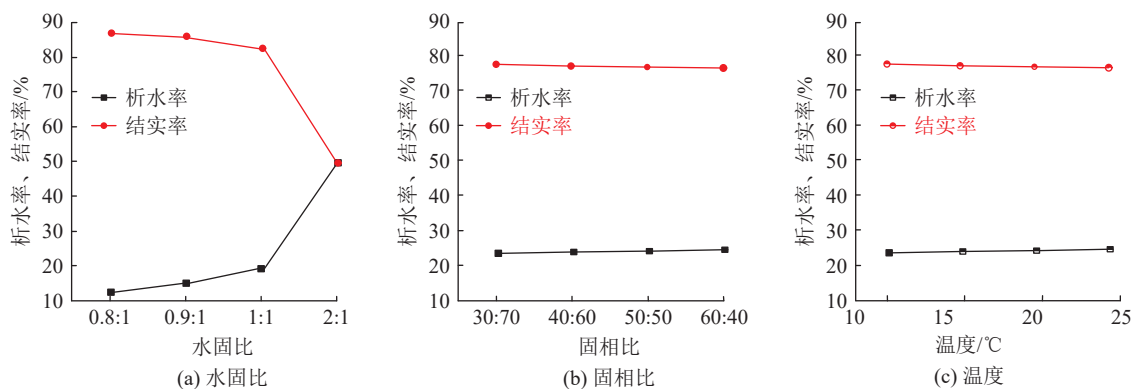


图 9 各因素对析水率和结实率的影响

Fig.9 Impact of diverse factors on the rate of water extraction and setting

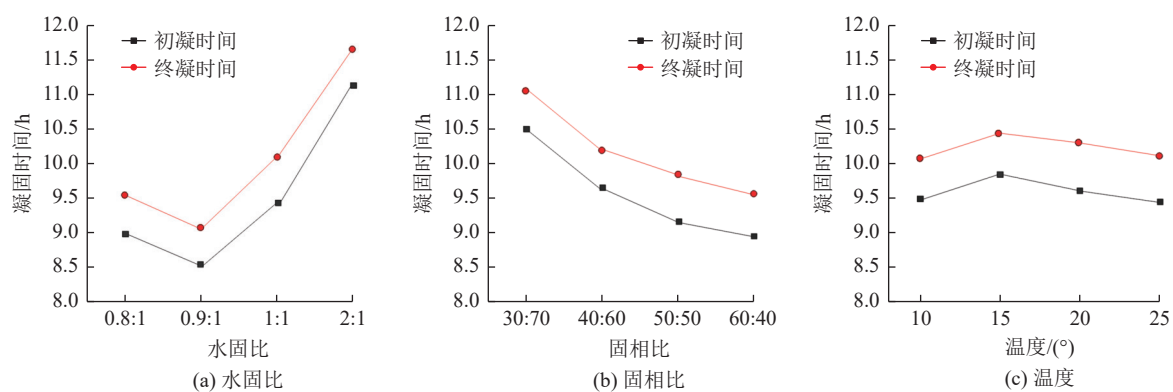


图 10 各因素对浆液凝结时间的影响

Fig.10 Impact of different factors on the setting time of grout

1) 凝结时间与水固比呈正相关关系, 一般浆液越稀, 凝结时间越长。水固比较小时, 水泥等胶结类注浆材料占比越大, 相对密集的材料颗粒越易发生水硬性反应, 浆液凝结时间随之缩短。

2) 凝结时间与固相比呈负相关关系, 水泥掺量越小、粉煤灰掺量越大, 浆液凝结时间越长。

3) 凝结时间与温度呈负相关关系。温度越高, 浆液反应速率相应提高, 凝结时间则会缩短。

由方差分析可知, 3 个因素均对凝结时间有显著

影响, 主次关系是: 水固比(A)>固相比(B)>温度(C)。从控制注浆施工工期角度讲, 凝结时间指标的最佳组合为 $A_2B_4C_4$, 即: 水固比取第 2 水平, 为 0.9 : 1; 固相比取第 4 水平, 即 60 : 40; 温度取第 4 水平, 即 25°。

3.2.5 力学强度

选取 7、14、28 d 单轴抗压强度进行分析, 力学强度随水固比、固相比和温度的变化如图 11 所示, 呈现出以下特征:

1) 力学强度与水固比呈负相关关系, 即水固比

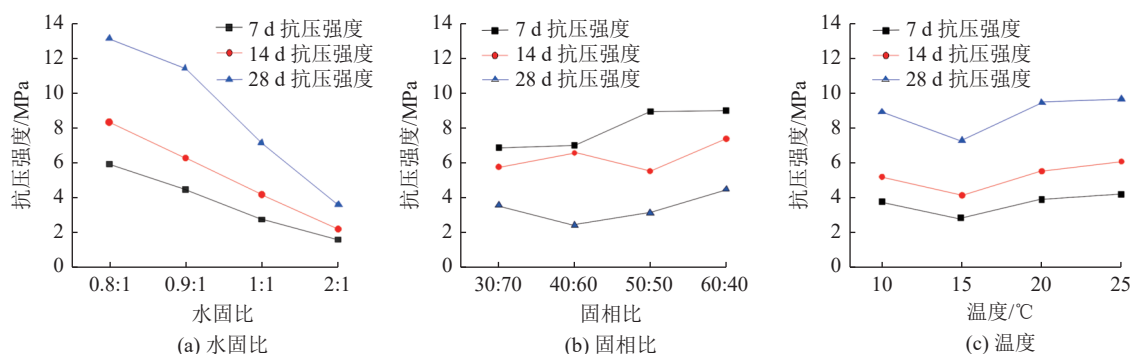


图 11 各因素对浆液力学强度的影响

Fig.11 Impact of different factors on the mechanical strength of grout

越大,相应凝结时间试块的力学强度越低。由于水固比越大,试块含水率越大,水分的增加削弱了浆液固结试块的抗压能力。

2)力学强度与固相比呈正相关关系,即随着水泥掺量的增大,相应凝结时间试块的力学强度呈增大趋势。水泥成分的增加使得结实体中的水化产物增多,试块的抗压能力随之增大。

3)力学强度与温度呈正相关关系。温度越高,水化反应速度加快,水分消耗量大,相应时间内试块的抗压强度随之增大。

由方差分析可知,3个因素均对力学强度有显著影响,主次关系是:水固比(A)>固相比(B)>温度(C)。从对地层有效加固的角度讲,力学强度指标的最佳组合为 $A_1B_4C_4$,即:水固比取第1水平,为0.8:1;固

相比取第4水平,即60:40;温度取第4水平,即25°。

3.3 浆液配比优选综合分析

注浆材料配比的选择与浆液在溶隙—裂隙型岩体中充填、扩散运移等规律息息相关。奥灰水害地面区域治理钻孔注浆压力呈阶梯式分布特征,一般可分为“低压充填→中压扩散→高压裂隙延展加固”3个阶段,地面注浆钻孔孔口压力典型曲线如图12所示。注浆孔不同的压力显现阶段反映了裂隙的充填程度,相应阶段的注浆材料配比也会有所不同。结合桌子山煤田深部矿井奥灰顶部以中等~强透水灰岩为主、低透水灰岩为辅的岩层渗透性特征,利用材料配比正交试验结果,采用综合平衡法分析比较,优选出适合于该区域的地面钻孔注浆治理全过程的浆液配比方案。

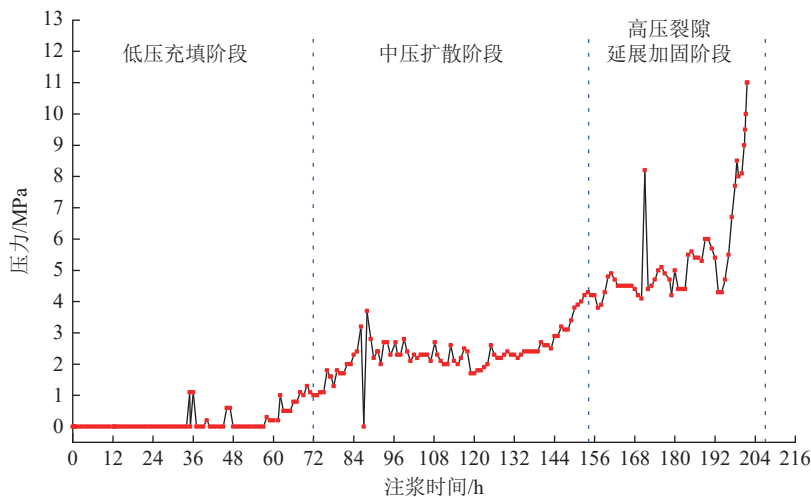


图 12 地面钻孔注浆压力阶梯式变化曲线

Fig.12 Curve depicting the pressure variation during surface hole grouting undergoes a step change

该地层条件下注浆材料各指标需满足以下优选原则和标准:①密度:与溶裂型灰岩地层相匹配,存在动水时,选择相对较大的浆液密度,全过程注浆密度一般取 $1.1 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$,中低压阶段注浆密度一般取 $1.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$,高压加固阶段注浆密度一般取 $1.4 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$;②黏度:与注浆压力相应阶段匹配,黏度小时易造成无效注浆,黏度区间主要在 $19 \sim 29 \text{ s}$,充填、扩散注浆阶段一般不超过 20 s ,高压注浆阶段一般大于 20 s ,一般按照“小一大一小”的原则进行黏度调整;③结实率:低透水岩体注浆时结实率相对较低,中等~高透水岩体扩散注浆阶段浆液结实体不低于80%,高压加固注浆阶段浆液结实率不低于85%;④凝结时间:根据工程实际要求,充填、扩散注浆阶段初凝时间一般不小于9 h,高压充填注浆阶段

初凝时间可小于9 h,终凝时间一般不超过36 h;⑤力学强度:各注浆阶段要求不同,充填注浆阶段力学强度要求相对较低,扩散注浆阶段28 d结实体强度要达水压1倍以上,工程要求高压加固注浆阶段28 d结实体强度要达水压2~3倍以上;⑥温度:试验温度均可满足工程施工要求,优选配比时以适应温度范围最大者为优。

依据不同注浆阶段注浆压力显现特征、材料配比试验结果以及上述浆液指标优选原则,不同注浆阶段浆液配比优选结果见表8。经综合平衡优选,低压充填注浆阶段材料配比为③号样品,即水固比2:1,固相比30:70,温度为25℃时为优选配比;中压扩散注浆阶段材料配比为⑩号样品,即水固比1:1,固相比40:60,温度为15℃时为优选

配比；高压裂隙延展加固注浆阶段材料配比为③号样品，即水固比 0.8 : 1，固相比 50 : 50，温度为 20 ℃ 时为优选配比。工程实际中，注浆材料应用配

比一般大于设计配比范围，例如，高压加固注浆阶段末段一般采用 1.6 g/cm³ 的纯水泥浆液进行注浆封孔等。

表 8 不同注浆阶段材料配比优选

Table 8 Optimum selection of the material ratio for various stages of grouting

注浆阶段	密度/(g · cm ⁻³)		黏度/s	结实率/%	凝结时间/h	力学强度/MPa	温度/℃
	优选配比	满足要求的样品					
低压充填 注浆阶段	⑬	① ~ ⑯	⑩ ~ ⑯	⑬ ~ ⑯	⑬	① ~ ⑯	① ~ ⑯
		1.25	16.6	48	12.07、12.52	1.61	25
中压扩散 注浆阶段	⑩	⑤⑥、⑨ ~ ⑯	⑩ ~ ⑫	① ~ ⑫	①②⑤、⑨ ~ ⑪、⑬ ~ ⑯	① ~ ⑧、⑩ ~ ⑫	① ~ ⑯
		1.42	19.95	82	9.42、10.16	6.78	10
高压裂隙延展 加固注浆阶段	③	① ~ ⑫	① ~ ⑨	① ~ ③、⑤ ~ ⑦	① ~ ⑯	③④⑧	① ~ ⑯
		1.48	26.67	85	8.67、9.65	14.47	20

注：①—⑯为样品编号。

4 工程应用

依据注浆材料配比优选结果和区域治理注浆工程的实际需求，地面注浆孔不同升压阶段采取不同的材料配比，研究成果在桌子山深部矿井得到了应用。奥灰顶部可注性试验表明，该区奥灰顶部 10 ~ 35 m 具有相对良好的渗透性，矿井为倾向北西的单斜构造，奥灰顶界面东浅西深，东西两翼注浆改造厚度不同，西翼深部奥灰顶界面采用了多层治理，进入奥灰 40 m 以深，整体上分支钻孔注浆层位控制在奥灰顶部 10 ~ 40 m，分支孔水平间距为 45 ~ 55 m，孔口注浆结束压力大于 12 MPa。注浆材料配比方面，遵守定向水平孔注浆压力阶段性规律，浆液水固比按照“先稀后浓、稀浓结合”，固相比按照裂隙充填→浆液扩散→高压加固的要求，粉煤灰掺量由大到小、水泥掺量由小到大的原则实施注浆工作，各注浆阶段材料配比依次围绕⑬、⑩、③号样品的配比执行或根据地质情况进行调整。浆液扩散的示踪试验表明，非构造发育区浆液平面扩散范围可达 45 m，垂向扩散范围可达 35 m。每个注浆段结束后进行压水试验，测试透水率 q 为 0.000 01 ~ 0.003 5 L/(min · m · m)，均达到了小于 0.01 L/(min · m · m) 的设计要求。

注浆治理后检验孔的取心结果表明，注浆浆液可在灰岩裂隙中良好充填、凝固(图 13)，起到了封堵导水通道、改造灰岩含水层的效果。SEM 扫描电镜

显示(图 14)，在地层裂隙中固化后的浆液表面多为水化硅酸钙胶凝产物(C—S—H)，在微裂缝处及不同凝胶界面处有较多针状钙矾石(Aft)、六方片状氢氧化钙(Ca(OH)₂)等矿物生成，水化作用后浆液具有较强的黏聚力，使得地层整体性、抗压能力显著增强，起到了封堵裂隙、加固地层的作用。目前，矿井工作面正在安全回采中，说明了注浆材料配比的可靠性，验证了根据钻孔升压阶段进行材料配比动态优化的可行性和有效性。

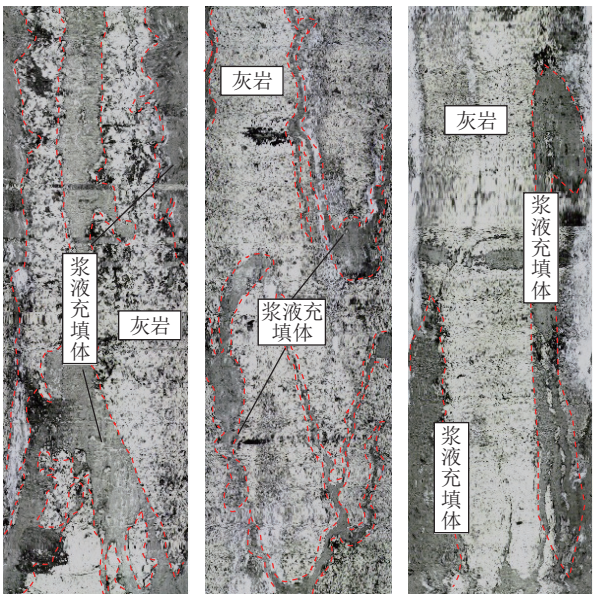
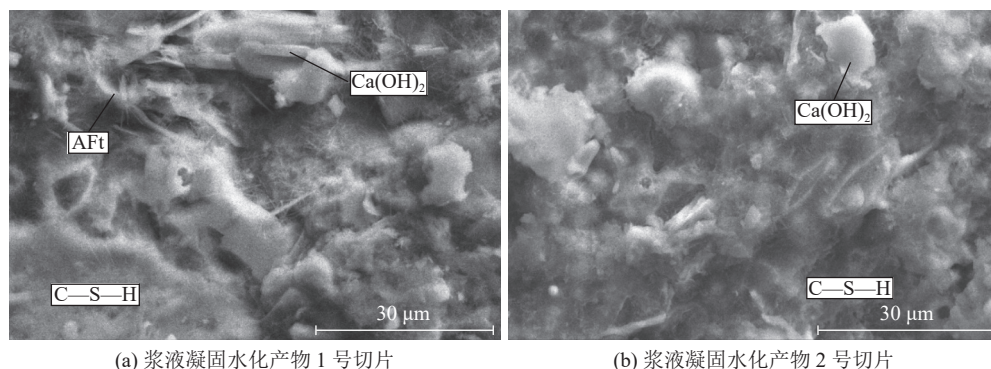


图 13 浆液充填裂缝情况

Fig.13 Photos of grout filling cracks



(a) 浆液凝固水化产物 1 号切片

(b) 浆液凝固水化产物 2 号切片

图 14 岩层中浆液微观形态

Fig.14 Micromorphology of slurry in rock strata

5 结 论

1) 岩心裂隙开度统计和压水试验成果表明, 桌子山煤田深部矿区奥灰顶部渗透性具有垂向分段特点, 风化壳充填影响的区域渗透性相对较小, 10~35 m 渗透系数和透水率相对较大, 35 m 以深又开始变小, 奥灰顶部受构造和地下水溶蚀作用影响, 整体上表现为中等~强透水岩层特征, 具有良好的渗透性和可注性。此类地层条件下, 采用水泥基粉煤灰浆液可兼顾工程治理效果和经济性的要求。

2) 采用正交试验方法对不同配比的粉煤灰—水泥材料基础性能进行了测试, 分析了浆液的密度、黏度、析水率、结实率、凝结时间和力学强度 6 项指标在 3 个因素 4 个水平下的变化特征, 与其他学者进行的浆液试验发现的趋势性规律基本一致。试验发现水固比对浆液的 6 项指标均有相对突出的影响, 对扩散性注浆或控制性注浆, 调整水固比可起到立竿见影的效果; 固相比对浆液的黏度、凝结时间及力学强度有较大影响, 充填注浆或控制浆液扩散范围时, 可加大粉煤灰的掺量; 温度对浆液性能的影响相对较小, 在试验设定的范围内均可满足实际需求。

3) 采用综合平衡法, 低压充填注浆阶段选择低密度、低黏度、粉煤灰掺量高(低固相比)的材料配比, 即水固比 2 : 1, 固相比 30 : 70, 温度为 25 ℃ 时为优选配比; 中压扩散注浆阶段选择逐步提高浆液的密度、黏度以及水泥掺量的配比, 即水固比 1 : 1, 固相比 40 : 60, 温度为 15 ℃ 时为优选配比; 高压裂隙延展加固注浆阶段需要高密度、高黏度以及高水泥掺量, 即水固比 0.8 : 1, 固相比 50 : 50, 温度为 20 ℃ 时为优选配比。工程实践中, 低压充填和中压扩散阶段是单孔注浆总量的主体控制阶段, 高压注浆阶段对有限的延展裂隙进行加固, 水泥掺量要逐步增加, 封孔时一般采用高密度单液水泥浆液。

4) 桌子山煤田深部矿井奥灰顶部注浆工程表明, 根据不同注浆阶段调整注浆材料配比可实现浆液在中等~强透水灰岩中的扩散、充填, 实测浆液非构造区平面扩散可达 45 m, 垂向扩散可达 35 m, 浆液可有效充填地层裂隙, 水化反应生成的硅酸钙等胶凝产物有效提高地层的整体性和抗压性。根据钻孔不同升压阶段裂隙状态特征动态调整注浆材料配比, 有效封堵了奥灰顶部所揭露的垂向导水通道, 减低了工作面的突水危险。

参考文献(References):

- [1] 董书宁, 刘其声, 王皓, 等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 185-195.
DONG Shuning, LIU Qisheng, WANG Hao, et al. Theoretical framework and key technology of advance regional control of water inrush in coal seam floor[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 185-195.
- [2] 樊振丽, 张玉军, 张风达, 等. 承压水弱面突破与控水采煤[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 65-72.
- [3] 虎维岳, 赵春虎, 吕汉江. 煤层底板水害区域注浆治理影响因素分析与高效布孔方式[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 134-143.
HU Weiyue, ZHAO Chunhu, LYU Hanjiang. Main influencing factors for regional pre-grouting technology of water hazard treatment in coal seam floor and efficient hole arrangement[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 134-143.
- [4] 郑士田, 马荷雯, 姬亚东. 煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 167-173.
ZHENG Shitian, MA Hewen, JI Yadong. Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 167-173.
- [5] 尹希文, 于秋鸽, 甘志超, 等. 高钙粉煤灰固碳降碱反应特性及煤矿井下规模化利用新途径[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2717-2727.
YIN Xiwen, YU Qiuge, GAN Zhichao, et al. Reaction characteristics of carbon fixation and alkali reduction in high calcium fly ash

- and new way of large-scale utilization in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2717–2727.
- [6] 许兴亮, 刘为民, 宋志坚, 等. 单裂隙模型水泥浆液渗透扩散规律研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 103–106.
- XU Xingliang, LIU Weimin, SONG Zhijian, et al. Study on permeation and diffusion law of cement slurry in single fracture model[J]. Coal Engineering, 2018, 50(12): 103–106.
- [7] 李泽荃, 杜萌洲, 孟秀峰, 等. 低成本注浆材料研制及其改性试验研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(11): 108–111.
- LI Zequan, DU Mengzhou, MENG Xiufeng, et al. Development of low-cost grouting material and its modification test[J]. Coal Engineering, 2018, 50(11): 108–111.
- [8] 郭东明, 谭霁爽, 肖正星, 等. 超细水泥浆液最优配比及注浆效果研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 1–8, 34.
- GUO Dongming, TAN Jishuang, XIAO Zhengxing, et al. Study on the optimum proportion and grouting effect of superfine cement slurry[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(5): 1–8, 34.
- [9] 袁克阔, 王义杰, 徐拴海, 等. 强触变性水泥基浆液研发及基本性能测定[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 75–80.
- YUAN Kekuo, WANG Yijie, XU Shuanhai, et al. Development of strong thixotropic cement slurry and determination of its basic properties[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 75–80.
- [10] 王义杰, 徐拴海, 王刚, 等. 触变性水泥浆液材料配比实验及其特性[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 35–37, 43.
- WANG Yijie, XU Shuanhai, WANG Gang, et al. Matching experiment and its characteristics of thixotropic cement paste material[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 35–37, 43.
- [11] 张毅, 马有宝, 左志昊, 等. 低黏度超细水泥浆液单裂隙注浆试验效果分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 55–60.
- ZHANG Yi, MA Youbao, ZUO Zhihao, et al. Analysis on experimental results of single crack grouting for low viscosity ultra-fine cement slurry[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 55–60.
- [12] 吕文玉, 李世杰, 伍永平, 等. “膏体-矸石”复合承载结构的力学特性试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 47–53.
- LYU Wenyu, LI Shijie, WU Yongping, et al. Experimental study on mechanical properties of “paste-gangue” composite bearing structure[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 47–53.
- [13] 冯旭海. 深井高压地面预注浆水泥基浆材料改性研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 91–94.
- FENG Xuhai. Modification study on high pressure surface pre-grouting reinforced cement base material for deep mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 91–94.
- [14] 曹晓毅, 王玉涛, 刘小平, 等. 陕北采煤沉陷区黄土基注浆材料性能试验及配比优选[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 8–16.
- CAO Xiaoyi, WANG Yutao, LIU Xiaoping, et al. Performance test and proportioning optimization of loess-based grouting materials in coal mining subsidence area of northern Shaanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 8–16.
- [15] 王苏健, 陈通, 李涛, 等. 承压水体上保水采煤注浆材料及技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 134–139.
- WANG Sujian, CHEN Tong, LI Tao, et al. Grouting material and technique in water protection mining above confined water[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 134–139.
- [16] 朱世彬, 王晓东, 武博强. 采煤沉陷区治理时高浓度浆液流变时效特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 122–127.
- ZHU Shibin, WANG Xiaodong, WU Boqiang. Study on time-dependent characteristics of rheological parameters on high-concentration slurry in treatment of coal mining subsidence area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 122–127.
- [17] 杨三萍, 刘鹏珍, 卢卫永. 不同黏结剂掺量条件下型煤试样三轴压缩试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 46–54.
- YANG Sanping, LIU Pengzhen, LU Weiyong. Study on triaxial compression tests on briquette coal specimens with different binder contents[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 46–54.
- [18] 苗贺朝, 王海, 王晓东, 等. 粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 230–239.
- MIAO Hechao, WANG Hai, WANG Xiaodong, et al. Study on ratio optimization and performance test of fly ash-based impermeable grouting materials[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 230–239.
- [19] 王皓. 煤层底板注浆改造粉煤灰基材料性能实验研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(7): 48–53.
- WANG Hao. Experimental study on fly-ash based material performance in coal floor grouting modification[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(7): 48–53.
- [20] 徐斌, 董书宁, 徐路路, 等. 水泥基注浆材料浆液稳定性及其析水规律试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 24–31.
- XU Bin, DONG Shuning, XU Lulu, et al. Stability of cement-based grouting slurry and test of its bleeding law[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 24–31.
- [21] 张润畦, 徐斌, 尹尚先, 等. 水泥基注浆材料析水时变特性量化试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 153–161.
- ZHANG Runqi, XU Bin, YIN Shangxian, et al. Quantitative experimental study on time-varying characteristics of bleeding of cement-based grouting materials[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 153–161.
- [22] 顾明晖, 黄金坤, 庞建勇, 等. 掺粉煤灰水泥基浆液性能关系模型研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 96–99, 104.
- GU Minghui, HUANG Jinkun, PANG Jianyong, et al. Relational model for property of cement-based grout mixed with ultrafine fly ash[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 96–99, 104.
- [23] 张曼曼, 鲁海峰, 年宾, 等. 地面注浆加固顶板高掺量粉煤灰水泥浆液材料性能研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(6): 60–65.
- ZHANG Manman, LU Haifeng, NIAN Bin, et al. Study on performance of cement slurry material with high fly ash content for roof reinforcement by grouting on the ground[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(6): 60–65.
- [24] 刘慧妮, 李训刚, 李彦志, 等. 煤矿巷道围岩注浆堵水新型水泥浆液性能研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(10): 57–63.
- LIU Huini, LI Xungang, LI Yanzhi, et al. Research on perform-

- ance of new type cement slurry for water shutoff in coal mine roadway[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(10): 57–63.
- [25] 柳昭星, 董书宁, 王皓. 奥陶系灰岩顶部超前区域注浆浆液选配分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 910–924.
- LIU Zhaoxing, DONG Shuning, WANG Hao. Analysis on grout selection and control of reformation grouting material in advance area of Ordovician limestone top[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(3): 910–924.
- [26] 许延春, 张二蒙, 赵霖, 等. 黏度对浆液在裂隙岩体中扩散与充填规律的影响[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(1): 71–81.
- XU Yanchun, ZHANG Ermeng, ZHAO Lin, et al. Study on the law of influence by slurry viscosity on the fractured aquifer grouting and diffusion[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(1): 71–81.
- [27] 张嘉凡, 黄思聪, 刘洋, 等. 基于黏度时变性的裂隙动水注浆扩散规律分析[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(4): 119–125.
- ZHANG Jiafan, HUANG Sicong, LIU Yang, et al. Analysis of diffusion law of dynamic water grouting in crack based on time-varying viscosity[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(4): 119–125.
- [28] 张二蒙, 沈星宇, 苗葳, 等. 奥灰顶部含水层注浆改造浆液扩散主要影响因素试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3536–3549.
- ZHANG Ermeng, SHEN Xingyu, MIAO Wei, et al. Experimental study on the influence of grouting diffusion in fissure aquifer at the top Ordovician limestone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3536–3549.
- [29] 陈军涛, 朱君, 张呈祥, 等. 不同渗透率灰岩裸孔注浆浆液扩散特性[J]. *西安科技大学学报*, 2023, 43(4): 667–674, 742.
- CHEN Juntao, ZHU Jun, ZHANG Chengxiang, et al. Slurry diffusion characteristics of open hole grouting in limestones with different permeability[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2023, 43(4): 667–674, 742.
- [30] 郭艳, 桂和荣, 魏久传, 等. 煤层底板区域注浆浆液扩散数值模拟及影响因素分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(6): 30–39.
- GUO Yan, GUI Herong, WEI Jiuchuan, et al. Numerical simulation of grout diffusion under coal seam floor and analysis of influencing factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(6): 30–39.
- [31] 许良发, 姚维, 黄腾龙, 等. 杨家沟铝土矿充填材料配比优化研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(2): 92–99.
- XU Liangfa, YAO Wei, HUANG Tenglong, et al. Research on optimization of filling material proportion in Yangjiagou Bauxite Mine[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(2): 92–99.
- [32] 杨志斌. 桌子山煤田下组煤开采底板水害防治问题及对策探讨[J]. *煤矿开采*, 2015, 20(4): 133–135, 45.
- YANG Zhibin. Prevention and countermeasures of floor water disaster in lower-group coal seam mining in Zhuozishan coal field[J]. *Coal Mining Technology*, 2015, 20(4): 133–135, 45.
- [33] 王世东. 桌子山煤田奥灰水化学特征及成因分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 180–188.
- WANG Shidong. Hydrogeochemical characteristics and cause analysis of Ordovician limestone groundwater in Zhuozishan Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 180–188.
- [34] 刘生优. 桌子山煤田棋盘井矿区奥灰水防治技术研究[J]. *神华科技*, 2011, 9(2): 17–19, 23.
- LIU Shengyou. Study on control technology of Ordovician limestone water in Chizhijing mining area of Zhuozishan Coalfield[J]. *Shenhua Technology*, 2011, 9(2): 17–19, 23.
- [35] 彭岩岩, 周崇, 程啸, 等. 不同节理倾角下灰岩应变场演化及裂纹发展规律[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(4): 54–64.
- PENG Yanyan, ZHOU Chong, CHENG Xiao, et al. Evolution of strain field and crack development of limestone under different joint inclination angles[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(4): 54–64.
- [36] 王世东, 朱开鹏, 汤红伟. 桌子山煤田奥陶纪灰岩水演化机理和循环特征[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(2): 116–120.
- WANG Shidong, ZHU Kaipeng, TANG Hongwei. Evolution mechanism and circulation characteristics of ordovician limestone water in Zhuozishan Coalfield[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, 44(2): 116–120.
- [37] 李涛, 常岩军, 何凯. 基于正交试验的合成纤维及橡胶颗粒对湿喷混凝土力学性能的影响[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(3): 77–86.
- LI Tao, CHANG Yanjun, HE Kai. Effects of synthetic fibers and rubber particles on the mechanical properties of wet shotcrete based on orthogonal test[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(3): 77–86.
- [38] 许茜, 王彦明, 张雯超. 基于正交试验的充填体力学及微观特性研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(6): 90–98.
- XU Qian, WANG Yanming, ZHANG Wenchao. Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(6): 90–98.