



移动扫码阅读

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.

粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究

苗贺朝^{1,2},王 海^{1,2},王晓东^{1,2},王 皓^{1,2},许刚刚^{1,2}

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710077)

摘 要:防渗注浆是工程实践中用来解决复杂地质条件下突泥涌水问题的一项重要手段,其注浆封堵效果很大程度上取决于目标含水层基本情况、导水通道发育特征、注浆材料及注浆工艺的选取。粉煤灰作为大宗工业固体废弃物,具有特殊的物理和化学性能,将粉煤灰进行资源化利用,不仅可以减少环境污染、还可以提高粉煤灰经济效益。为了掌握粉煤灰基防渗注浆材料的工程性能,采用正交试验方法对粉煤灰-硅酸盐水泥混合胶凝材料进行了基础性能测试。通过极差与方差分析方法研究了水固比、水泥粉煤灰固相比、激发剂及温度 4 个因素对浆液的流动度、密度、结石率、析水率、初凝时间及终凝时间 6 项指标的影响规律。试验结果表明:水固比对浆液 6 项性能指标均有较大影响;固相比主要影响浆液流动度及凝结时间;掺入适量外加剂可以加快浆液凝结速率;升高温度有利于缩短浆液凝结时间、增大结石率和减小析水率。采用综合平衡分析法得到浆液优选方案:水固比为 0.8 : 1.0、固相比为 30 : 70,激发剂掺量为 2%,温度尽量控制在 15 ℃ 以上。将该优选方案在国内某露天煤矿地下帷幕截水综合技术与示范工程进行了初步应用,结果表明:浆液固结后形成连续完整的帷幕,从根本上切断了矿区地下水渗流补给通道,降低了矿坑水输排工作压力,保障了煤矿运行安全,节约了工程成本。

关键词:粉煤灰;注浆材料;浆液性能;正交试验;方案优选

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)09-0230-10

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

MIAO Hechao^{1,2}, WANG Hai^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, XU Ganggang^{1,2}

(1.Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;
2.Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China)

Abstract: Impermeable grouting is an important means to solve the problem of mud and water inrush under complex geological conditions in engineering practice. The sealing effect of grouting largely depends on the basic conditions of target aquifer, the development characteristics of water channel, the selection of grouting materials and grouting technology. As a bulk industrial solid waste, fly ash has special physical and chemical properties. The utilization of fly ash as a resource can not only reduce environmental pollution, but also improve the economic benefits of fly ash. In order to master the engineering properties of fly ash-based impervious grouting materials, the basic properties of fly ash-Portland cement mixed cementitious materials were tested by orthogonal experiment method. The influence law of water-solids ratio, cement-fly ash ratio, activator and temperature on fluidity, density, concretion rate, water precipitation rate, initial setting time and final setting time of fly ash based impermeable grouting materials is analyzed by means of range analysis and variance analysis. The results show that the water-solid ratio has great influence on the six performance indexes of the slurry. The solid ratio mainly affects the flu-

收稿日期:2021-12-01 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1562

基金项目:天地科技创新基金面上资助项目(2019-TD-MS014);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(42007179);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2020XAYJS03)

作者简介:苗贺朝(1990—),男,陕西榆林人,硕士,助理研究员。E-mail:1968908461@qq.com

通讯作者:王 海(1987—),男,江苏睢宁人,硕士,副研究员。E-mail:wanghai3777@163.com

idity and setting time of slurry. The setting rate of slurry can be accelerated by adding activator appropriately. The increase of temperature is beneficial to shorten the setting time, increase the concretion rate and decrease the water extraction rate of slurry. The optimal solution of slurry has been put forward by comprehensive equilibrium analysis method;the water-solids ratio is 0.8 : 1, the cement-fly ash ratio is 30 : 70, the mixing amount of activator is 2%, and the temperature should be above 15 ℃ as far as possible. The optimal scheme has been preliminarily applied in the research and demonstration project of underground curtain water interception technology in an open pit coal mine in China. The results show that a continuous and complete curtain is formed after the slurry consolidation, which fundamentally cuts off the groundwater seepage supply channel in the mining area, reduces the pressure of water transport and discharge in the mine, ensures the safety of the coal mine operation, and saves the engineering cost.

Key words:fly ash; grouting material; orthogonal experiment; slurry property; scheme optimization

0 引 言

“富煤、贫油、少气”的能源结构决定了在未来 30~50 a,煤炭仍然是我国最主要的能源^[1-2]。煤炭作为发电、供暖的主要原料,在燃烧时会带来大宗固体废弃物,如粉煤灰等。有关资料估计,到 2020 年底我国粉煤灰的总堆积量为 30 亿 t 左右^[3]。固废的不妥善处理,随意堆放等不仅会占用大量土地,还会对大气、水源、土壤等造成污染。粉煤灰本身具有一定潜在的化学活性,若能将其进行合理利用,不但能有效地解决环境污染问题,还可以创造更多的经济价值^[4]。

目前,我国粉煤灰利用的最主要方式是将其用于建筑工程材料,如筑路、制砖、做水泥和混凝土的掺合料。随着对粉煤灰性能认识的不断深入,其综合利用正逐步延伸到农业发展(改良土壤、生产肥料等)、环境保护(废液、废气治理)、深度分离、陶瓷生产、化工等领域^[5]。相对来讲,国外对粉煤灰的综合利用研究起步较早,除了在建筑材料、环境保护、化工生产等领域应用以外,部分学者还尝试一些新途径和新工艺拓展粉煤灰利用渠道,如:Groszowice 水泥厂用碱溶法从粉煤灰中提取氧化铝, Kim Chul-Hwan 和 Sumio Horiuchi 等学者将粉煤灰作为一种提高纸张抗拉强度和内部黏结强度的造纸原料等^[6-7]。近年来,随着建材市场逐渐饱和、农用土壤标准提高,国内外粉煤灰综合利用率均受到一定程度影响,且常年累月的积累使得粉煤灰余量较高。目前地下工程水害防治每年消耗大量水泥浆液,如果在水泥浆液中掺入适量粉煤灰,不仅能够有效缓解粉煤灰存放带来的环保压力,提高粉煤灰综

合利用附加值,还可以改善水泥浆液的工程性能,同时可大幅减少水泥用量,节约工程成本。而针对粉煤灰基防渗注浆材料性能的系统研究较少,因此有必要开展该方面的工作。

笔者主要针对矿山、隧道和城市地下空间等工程在防治涌水、塌方等地质灾害^[8-10]时,着眼于工程安全可靠,力图寻求经济高效的注浆防渗材料的需求而开展的试验研究工作。采用正交试验方法^[11-12]测试粉煤灰基防渗注浆材料在不同因素水平下几项关键指标的基本特性,进而为注浆工程提供更优的配合比及方案。

1 粉煤灰基防渗材料性能试验方案

1.1 试验材料

粉煤灰基防渗材料性能试验材料包括水泥、粉煤灰、外加剂和水,各材料基本情况如下:

- 1)水泥:采用 P.O 42.5 水泥,各项性能指标详见表 1。
- 2)粉煤灰:F 类Ⅱ级粉煤灰,细度为 9%;需水量比为 91%;烧失量为 1.6%,游离氧化钙质量分数为 0.2%。
- 3)外加剂:外加剂选用某激发剂 D。
- 4)水:拌制浆液用水为自来水,PH 值 7.2。

1.2 试验仪器

为开展粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验,选用的试验仪器及设备主要有:电子秤、水泥净浆搅拌机、泥浆比重计、水泥稠度试模(截锥圆模)、亚克力板、钢尺、玻璃片、恒温恒湿养护箱、维卡仪、量筒等。

表 1 普通硅酸盐水泥性能指标
Table 1 Performance index of cement

比表面积/ (m ² · kg ⁻¹)	ω(SO ₃) /%	ω(MgO)/ %	烧失量/%	安定性	初凝时 间/min	终凝时 间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
							3 d	28 d	3 d	28 d
350	2.09	1.62	2.12	合格	235	319	5.9	8.4	22.8	49.5

1.3 试验内容及方法

1)流动度试验:采用截锥圆模、亚克力板及钢尺测试。

2)密度试验:采用泥浆比重计测试。

3)结石率试验:取体积 V_0 的均匀混合浆液,置于密闭容器内,并将其放于恒温恒湿箱中,待初凝后,用排液法^[13-14]测出结石体的体积 V_1 ,然后根据 $\eta = V_1/V_0 \times 100\%$ 计算结石率 η ,其中, V_0 为混合浆液体积。

4)析水率试验:用带有刻度的量筒取搅拌均匀的混合浆液 V_0 , 盖上玻璃板,并将其放置于恒温恒湿箱中养护。每隔 5 min 读取上部澄清水与下部沉淀胶体之间刻度 V ,直至读数达到稳定为止,稳定标准为连续 3 个读数完全相同,最后根据 $\delta = (V_0 - V)/V_0 \times 100\%$ 计算析水率 δ 。

5)凝结时间试验:参考水泥浆液凝结时间测试方法,即采用维卡仪测试其初、终凝时间^[15-16]。按照设计配比制好浆液,倒入截锥圆形试模,在恒温恒湿箱中养护。从胶凝材料全部加水至维卡仪初凝试针沉至距玻璃底板 3~5 mm 时所需时间为初凝时间。初凝后,立即将试模连同结石体以平移的方式从玻璃板取下,翻转 180°,直径大端向上小端向下放在玻璃板上,放入恒温恒湿箱中继续养护,当维卡仪终凝试针沉入试体 0.5 mm 时,即环形附件开始不能在试体上留下痕迹时,浆液达到终凝状态。从胶凝材料全部加水至终凝状态的时间为浆液的终凝时间。

1.4 方案设计

为了既能充分反应各因素、水平对胶凝材料特性的影响,同时尽量减少试验工作量,采取正交试验设计方法。影响因素设计有水固比 A 、固相比 B 、激发剂 D 、温度 G ,每个因素有 4 种取值水平,见表 2。根据正交试验设计方法,选用 $L_{16}(4^5)$ 型试验表。

表 2 注浆材料正交试验因素水平
Table 2 Factor level of the orthogonal test of grouting material

水平	因素			
	水固比 A	固相比 B	激发剂 $D/\%$	温度 $G/^\circ\text{C}$
1	0.7 : 1	40 : 60	0	5
2	0.8 : 1	30 : 70	1	10
3	0.9 : 1	20 : 80	2	15
4	1 : 1	10 : 90	3	20

注:水固比= $W:(C+F)$;固相比= $C:F$; W 为水; C 为水泥; F 为粉煤灰; G 为温度;水固比、固相比两者中的比值均为质量比;激发剂掺指相对于固相材料(水泥、粉煤灰)总质量的百分数。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

粉煤灰基防渗注浆材料正交试验结果见表 3,其包含了 6 项指标分别在不同因素及不同水平下的测试结果。

表 3 注浆材料正交试验结果
Table 3 Results of the orthogonal test of grouting material

编号	水固比	固相比	激发剂/ $\%$	温度/ $^\circ\text{C}$	流动度/ mm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	结实率/ $\%$	析水率/ $\%$	凝结时间/h	
									初凝	终凝
1	0.7 : 1	40 : 60	0	5	289	1.570	95.1	9.2	40.3	50.0
2	0.7 : 1	30 : 70	1	10	285	1.560	95.8	7.2	32.0	34.9
3	0.7 : 1	20 : 80	2	15	280	1.550	97.7	5.3	33.6	36.5
4	0.7 : 1	10 : 90	3	20	279	1.545	97.2	4.2	36.4	47.5
5	0.8 : 1	40 : 60	1	20	301	1.535	92.5	11.5	8.7	12.2
6	0.8 : 1	30 : 70	0	15	299	1.530	90.9	11.0	40.4	44.0
7	0.8 : 1	20 : 80	3	10	293	1.525	89.1	12.1	45.6	50.1
8	0.8 : 1	10 : 90	2	5	287	1.510	86.8	14.1	75.2	80.3
9	0.9 : 1	40 : 60	2	10	307	1.510	83.4	17.7	25.7	35.0
10	0.9 : 1	30 : 70	3	5	301	1.500	81.8	19.6	55.6	64.2
11	0.9 : 1	20 : 80	0	20	298	1.490	91.6	14.9	48.8	55.0
12	0.9 : 1	10 : 90	1	15	296	1.480	88.9	14.8	72.0	74.1
13	1 : 1	40 : 60	3	15	311	1.450	84.3	24.7	25.5	29.4
14	1 : 1	30 : 70	2	20	309	1.440	86.3	24.5	17.5	25.6
15	1 : 1	20 : 80	1	5	302	1.420	77.3	26.9	84.0	88.1
16	1 : 1	10 : 90	0	10	298	1.405	81.2	24.7	89.3	102.4

2.2 结果分析

根据粉煤灰基防渗注浆材料正交试验数据,对流动度、密度、结石率、析水率、初凝时间和终凝时间进行直观分析(极差分析)与方差分析^[17]。

1)极差分析:分别计算 6 项指标在各因素水平下均值的极差,根据极差大小确定影响因素的主次顺序,极差越大表明该因素对试验结果影响越大。为了更直观起见,用各因素的水平作横坐标,指标均值作纵坐标,做出均值主效应图(图 1—图 6)。R_j 的计算式如下:

$$R_j = \max_i \{ \overline{T_{ij}} \} - \min_i \{ \overline{T_{ij}} \} \tag{1}$$

式中: R_j 为极差; $\overline{T_{ij}}$ 为各因素水平下的指标均值; i 为行,代表正交试验影响因素; j 为列,代表每个影响因素的水平。

2)方差分析:将总变差平方和分解为各因素的变差平方和与误差平方和,然后构造 F 统计量,将各因素 F 与其临界值 F_α 进行大小比较,检验各因素是否对试验指标具有显著性影响,显著性水平 α 取

0.01,0.05,0.10 这 3 种。总变差平方和 S_T、总自由度 f_T 和各因素统计量 F_m 计算公式分别如下所示:

$$S_T = S_A + S_B + S_D + S_G + S_e \tag{2}$$

$$f_T = f_A + f_B + f_D + f_G + f_e \tag{3}$$

$$F_m = \frac{S_m/f_m}{S_e/f_e} \tag{4}$$

式中: S_T 为总变差平方和, S_A、S_B、S_D、S_G 分别为因素 A、B、D、G 的变差平方和, S_e 为误差的变差平方和; f_T 为试验的总自由度, f_A f_B f_D f_G 分别为因素 A、B、D、G 的自由度, f_e 为误差的自由度; F_m 为各因素的 F 值, m 可取 A、B、D、G;

其中, F_m > F_{0.01}(f₁, f₂) 表示该因子水平的改变对试验结果有高度显著的影响; F_{0.01}(f₁, f₂) > F_m > F_{0.05}(f₁, f₂) 表示该因子水平的改变对试验结果有显著的影响; F_{0.05}(f₁, f₂) > F_m > F_{0.10}(f₁, f₂) 表示该因子水平的改变对试验结果有一定的影响; F_m < F_{0.10}(f₁, f₂) 表示该因子水平的改变对试验结果无显著影响。方差分析结果见表 4。

表 4 注浆材料试验 6 项指标方差分析
Table 4 Variance analysis of grouting material test on 6 indexes

指标	方差分析						
	方差来源	平方和 S	自由度 f	均方	F	临界值 F _α	显著性
流动度	A	1 059.2	3	353.1	99.1	F _{0.01} (3,3) = 29.46 F _{0.05} (3,3) = 9.28 F _{0.1} (3,3) = 5.39	* * *
	B	343.2	3	114.4	32.1		* * *
	D	0.2	3	0.1	0		⊙
	G	9.7	3	3.2	0.9		⊙
	误差	10.7	3	3.6			
	总计	1 422.9	15	94.9			
密度	A	0.036	3	0.012	406.143	F _{0.01} (3,3) = 29.46 F _{0.05} (3,3) = 9.28 F _{0.1} (3,3) = 5.39	* * *
	B	0.002	3	0.001	25.286		* *
	D	0.000 11	3	0.000 04	1.286		⊙
	G	0.000 02	3	0.000 01	0.286		⊙
	误差	0.000 09	3	0.000 03			
	总计	0.038	15	0.003			
结实率	A	431.1	3	143.7	23.5	F _{0.01} (3,3) = 29.46 F _{0.05} (3,3) = 9.28 F _{0.1} (3,3) = 5.39	* *
	B	0.4	3	0.1	0		⊙
	D	5.5	3	1.8	0.3		⊙
	G	107.8	3	35.9	5.9		*
	误差	18.3	3	6.1			
	总计	563.1	15	37.5			
析水率	A	750.7	3	250.2	3 064.0	F _{0.01} (3,3) = 29.46 F _{0.05} (3,3) = 9.28 F _{0.1} (3,3) = 5.39	* * *
	B	4.7	3	1.6	19.3		* *
	D	0.4	3	0.1	1.7		⊙
	G	34.8	3	11.6	142.0		
	误差	0.2	3	0.1			* * *
	总计	790.9	15	52.7			

续表

指标	方差分析						
	方差来源	平方和 <i>S</i>	自由度 <i>f</i>	均方	<i>F</i>	临界值 <i>F</i> _α	显著性
初凝时间	<i>A</i>	825.3	3	275.1	36.9	<i>F</i> _{0.01} (3,3) = 29.46 <i>F</i> _{0.05} (3,3) = 9.28 <i>F</i> _{0.1} (3,3) = 5.39	* * *
	<i>B</i>	4 296.2	3	1 432.1	192.2		* * *
	<i>D</i>	706.5	3	235.5	31.6		* * *
	<i>G</i>	2 637.2	3	879.1	118.0		* * *
	误差	22.4	3	7.5			
	总计	8 487.5	15	565.8			
终凝时间	<i>A</i>	950.8	3	316.9	16.3	<i>F</i> _{0.01} (3,3) = 29.46 <i>F</i> _{0.05} (3,3) = 9.28 <i>F</i> _{0.1} (3,3) = 5.39	* *
	<i>B</i>	4 478.3	3	1 492.8	76.9		* * *
	<i>D</i>	775.5	3	258.5	13.3		* *
	<i>G</i>	2 732.5	3	910.8	46.9		* * *
	误差	58.2	3	19.4			
	总计	8 995.3	15	599.7			

注：* * * 为高度显著影响；* * 为显著影响；* 为有一定影响；⊙ 为无显著影响。

2.2.1 流动度

流动度随水固比、固相比、激发剂掺量和温度 4 个因素的变化如图 1 所示,由图 1 可知,浆液流动度具有如下规律:

- 1)流动度随着水固比的增大而增大。这是由于水的掺入使得胶凝材料细微颗粒更为分散,浆液稠度降低、扩散更远。
- 2)随着粉煤灰掺入比例增大、水泥掺入比例减小,浆液的流动度呈减小趋势。这是因为试验所用粉煤灰为二级灰,相较于粉煤灰而言,水泥的磨圆度更好,粒度更细且均匀,因此粉煤灰掺量的增加减弱了浆液的流动性。

3)激发剂掺量增减、温度变化对浆液的流动度的影响很微弱。

由极差与方差综合分析结果可知,以流动度为指标,在该试验条件下时,水固比因素的极差最大,表明水固比对浆液流动度的影响最大。各因素影响程度大小依次为:*A*(水固比)、*B*(固相比)、*G*(温度)、*D*(激发剂),且 *A*、*B* 两项因素对浆液流动度均具有高度显著的影响。从注浆操作方便性来讲,以流动度为指标时的最佳组合为 *A4B1DjGj*,即:水固比取第 4 种水平,为 1 : 1;固相比取第 1 种水平,为 40 : 60;激发剂掺量在其水平 *j* 范围(0~3%)内取值均可;温度在其水平 *j* 范围(5~20 ℃)内取值均可。

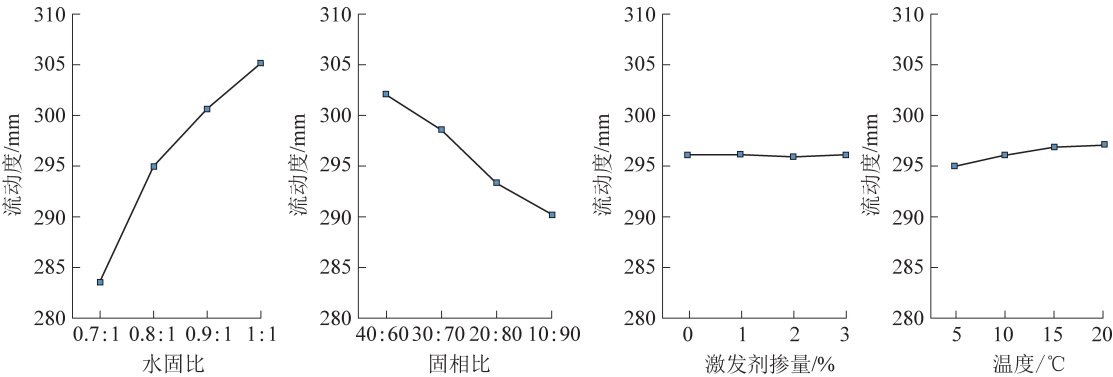


图 1 各因素对流动度均值的影响

Fig.1 Influence of various factors on the mean value of fluidity

2.2.2 密 度

密度随水固比、固相比、激发剂掺量和温度 4 个因素的变化如图 2 所示,由图 2 可知,浆液密度具有如下规律:

- 1)随着水固比的增大,浆液密度在逐渐减小。即水固比增大时浆液被逐步稀释,密度就减小。
- 2)随着粉煤灰掺入比例增大、水泥掺入比例减小,浆液的密度略微减小。这是由于水泥的密度大

于粉煤灰的密度,故不同固相比的浆液在体积相同

时,粉煤灰掺入比例越大,浆液密度越小。

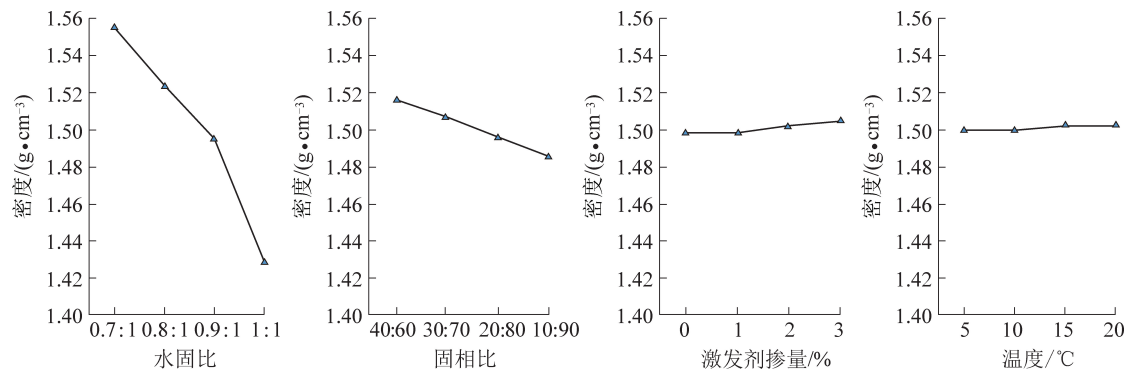


图 2 各因素对密度均值的影响

Fig.2 Influence of various factors on the mean value of density

3) 激发剂掺量改变、温度变化对浆液的密度影响比较微弱。

以密度为指标,在该试验条件下时,水固比因素的极差最大,表明水固比对浆液密度的影响最大。各因素影响程度大小依次为:A(水固比)、B(固相比)、G(温度)、D(激发剂),其中,A 因素对浆液密度具有高度显著影响,B 因素对浆液密度具有显著影响。从结石体强度及耐久性来讲,以密度为指标时的最佳组合为 A1B1DjGj,即:水固比取第 1 种水平,为 0.7 : 1;固相比也取第 1 种水平,为 40 : 60;激发剂掺量在其水平 j 范围(0~3%)内取值均可;温度在其水平 j 范围(5~20 °C)内取值均可。

2.2.3 结石率

结石率是指浆液凝固后结石体的体积占原浆液体积的百分比^[18]。结石率随水固比、固相比、激发剂掺量和温度 4 个因素的变化如图 3 所示,由图 3 可知,结石率具有如下规律:

1) 随着水固比增大,浆液结石率在逐渐减小。水固比增大时,单位体积的浆液里固相材料掺入量就会减小,因此凝固后结石体就减小。

2) 粉煤灰(水泥)掺入比例改变对浆液的结石率影响很小。说明适量掺入粉煤灰部分取代水泥,对注浆充填率影响不大。

3) 激发剂掺量增加时,浆液结石率略微减小,说明该激发剂促进了材料的水化反应程度,对结石体起到了致密作用。

4) 随着温度增加,浆液结实率有小幅增长。这是由于在 5~20 °C 范围内时,温度越高,浆液早期水化速率越快,硬化结石体中越容易产生孔隙。以结实率为指标,在该试验条件下时,水固比因素的极差最大,表明 4 个因素中水固比对浆液结石率的影响最大。各因素影响程度大小依次为:A(水固比)、G(温度)、B(固相比)、D(激发剂),其中,A 因素对浆液结石率具有显著影响,G 因素对浆液结石率具有一定影响,B、D 因素对浆液结石率无显著影响,从有效充填或加固效果来讲,以结石率为指标时的最佳组合为 A1BjDjG4,即:水固比取第 1 种水平,为 0.7 : 1;固相比在其水平 j 范围(40 : 60~10 : 90)内取值均可;激发剂掺量在其水平 j 范围(0~3%)内取值均可;温度取第 4 种水平,为 20 °C。

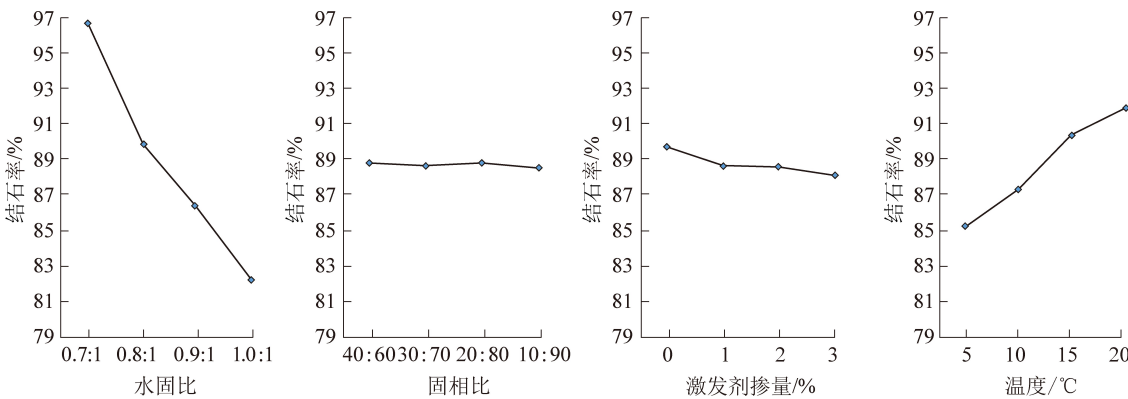


图 3 各因素对结石率均值的影响

Fig.3 The influence of various factors on the mean value of concretion rate

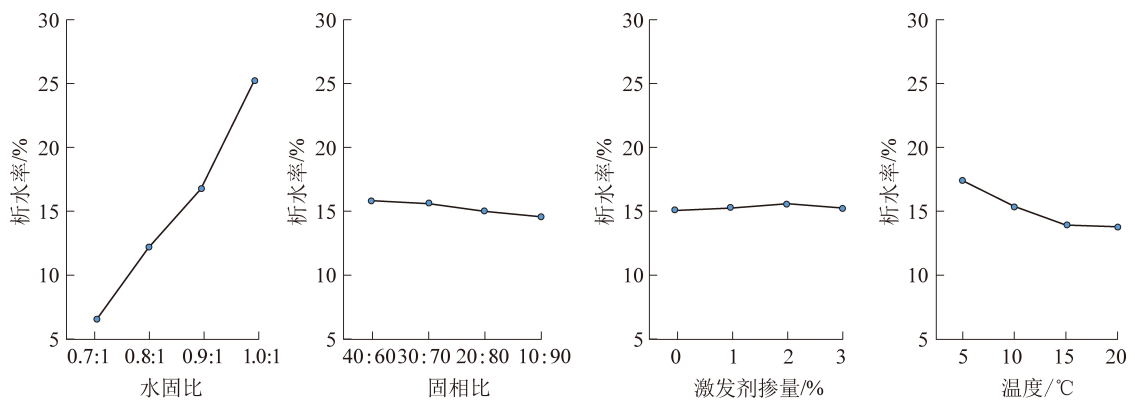


图 4 各因素对析水率均值的影响

Fig.4 Influence of various factors on the mean value of water precipitation rate

2.2.4 析水率

析水率是指浆液在静止状态下由于颗粒的沉淀作用而析出水的比率,主要用于表征浆液的稳定性^[19-20]。析水率随水固比、固相比、激发剂掺量和温度 4 个因素的变化如图 4 所示,由图 4 可知,析水率具有如下规律:

- 1)随着水固比增大,浆液析水率在增大。这是由于胶凝材料数量及外部条件确定时,参与水化反应所需水量也基本不再增大。
- 2)粉煤灰(水泥)掺入比例、激发剂掺量的改变对浆液的析水率影响很微弱。说明适量掺入粉煤灰、激发剂基本没有改变胶凝材料混合浆液的稳定性。
- 3)随着温度增加,浆液析水率有小幅减小。主要是由于温度的提升促进了胶凝材料在浆液中的水化反应速率,且使得水化反应更加充分,参与水化反应所需水量也会增多。

以析水率为指标,在该试验条件下时,水固比因素的极差最大,表明 4 个因素中水固比对浆液析水率的影响最大。各因素影响程度大小依次为:A(水固比)、G(温度)、B(固相比)、D(激发剂),其中,A、

G 因素对浆液析水率具有高度显著影响,B 因素对浆液析水率具有显著影响,D 因素对浆液析水率无显著影响。以析水率为指标时,应使析水率尽量降低,故最佳组合同样为 A1BjDjG4,代表的实际意义同上。

2.2.5 初凝/终凝时间

初凝和终凝时间随水固比、固相比、激发剂掺量和温度 4 个因素的变化分别如图 5 和图 6 所示,由图 5 与图 6 可知,在该试验条件下,初凝/终凝时间具有如下规律:

- 1)随着水固比增大,浆液初凝/终凝时间都在延长。产生这一现象主要是由于该胶凝材料属于水硬性材料,当水灰比较小时,则胶凝材料颗粒间距离较小,容易形成骨架结构;当水灰比增大时,材料颗粒间距离增大,浆液凝结时需要水化产物填充的结构孔隙也增多,故将造成凝结硬化时间的延长。
- 2)随着粉煤灰掺入比例增大、水泥掺入比例减小,浆液初凝/终凝时间都有较大延长,两者变化幅度基本一致。这是由于水泥与粉煤灰的主要化学成分存在差异,水泥中可参与水化反应的有效成分更多,其参与水化反应更易形成凝聚网状结构。故水

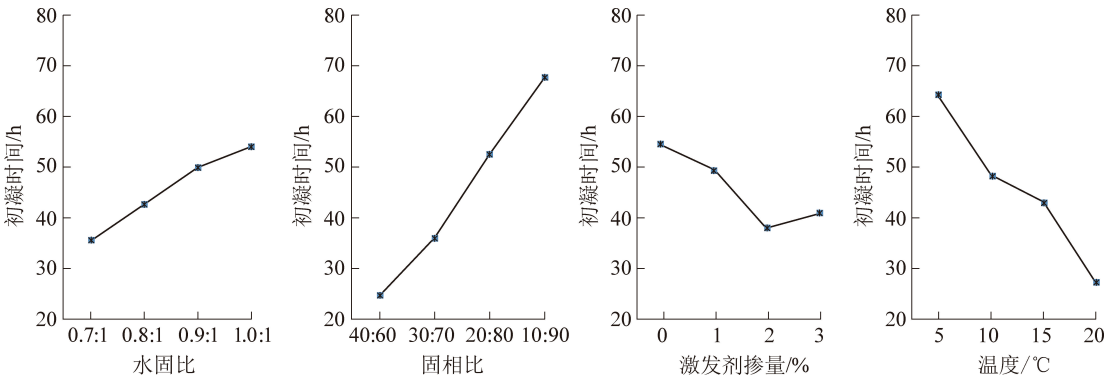


图 5 各因素对初凝时间均值的影响

Fig.5 Influence of various factors on the mean value of initial setting time

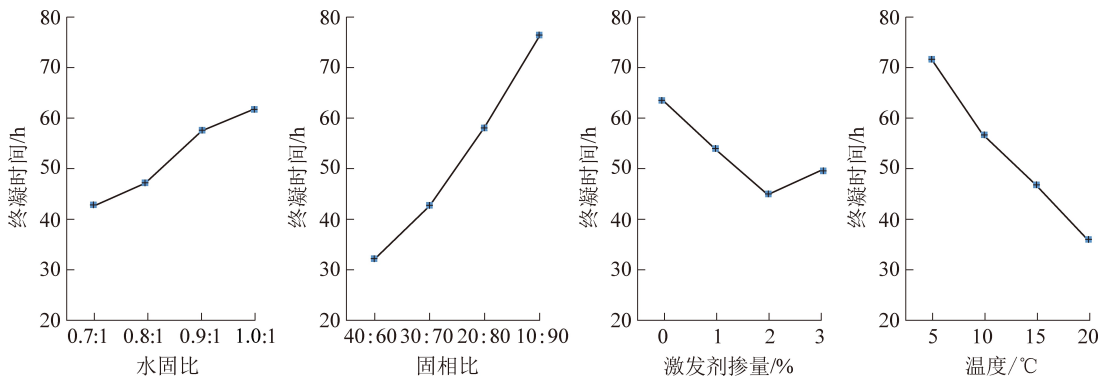


图 6 各因素对终凝时间均值的影响

Fig.6 Influence of various factors on the mean value of final setting time

泥掺量较多时浆液凝结时间较短;反之,则会延长浆液凝结时间。

3)随着激发剂掺量增加,浆液初凝/终凝时间都在缩短。主要是由于激发剂促进了浆液的水化反应速率,增加了水化产物数量,加快了水化产物凝聚速率。

4)随着温度升高,浆液初凝/终凝时间都在缩短。说明温度升高改善了浆液的水化环境,提高了水化速率,促进了浆液凝结硬化。

凝结硬化时间长短主要由胶凝材料水化产物产生速度和数量决定,水化产物凝聚后将形成网状结构,使得浆体塑性降低并逐步硬化^[21]。

以初凝/终凝时间为指标,固相比因素的极差最大,表明 4 个因素中固相比对浆液凝结时间的影响最大。各因素影响程度大小依次为:*B*(固相比)、*G*(温度)、*A*(水固比)、*D*(激发剂),且 4 个因素对浆液初凝时间均具有高度显著影响;*B*、*G* 对终凝时间具有高度显著影响,*A*、*D* 对终凝时间具有显著影响。以凝结时间为指标时,既要考虑浆液的施工可操作性,还需兼顾注浆施工进度,即要求凝结时间不宜过短也不能太长,故最佳组合为 *A1B1D3G4*,即:水固比取第 1 种水平,为 0.7 : 1;固相比取第 1 种水平,为 40 : 60;激发剂掺量取第 3 种水平,为 2%;温度取第 4 种水平,为 20 ℃。

2.2.6 综合平衡法分析

利用综合平衡法^[17]对 6 项指标的条件综合比较,找出兼顾每项指标并满足注浆工程要求的最优方案。试验中要考察的指标有:①流动度:越大越易于施工;②密度:越大越利于工程质量;③结石率:越大越好,一般要求不低于 85%;④析水率:越小越好,这样浆液性能更稳定;⑤初凝/终凝时间:根据某注浆工程施工现场要求,初凝时间不得小于 12 h,终凝时间不得超过 48 h。

结合图 1—图 6,综合考察 6 项指标可以看出:4

个因素各水平都满足初凝时间要求;满足终凝时间的各因素水平取值分别为水灰比 0.7 : 1 与 0.8 : 1,固相比 40 : 60 与 30 : 70,激发剂掺量 2%,温度 15 ℃ 与 20 ℃。考察结石率发现,满足终凝时间的各因素水平,都可以保证浆液具有 85% 以上的结石率。考察流动度与密度可知,水固比从 0.7 : 1 调整为 0.8 : 1 时,浆液密度稍有降低,而流动度却有较大改善,因此水固比取值 0.8 : 1 更为合理;进一步考察流动度则有,固相比从 40 : 60 调整为 30 : 70 时,浆液流动度及密度虽都减小,但减小幅度较小,且固相比为 30 : 70 时浆液各项指标均满足工程需求,兼顾工程经济性,宜提高粉煤灰的掺入量,因此固相比的最佳取值为 30 : 70。由结石率与终凝时间可以看出,养护温度越高,越有利于浆液性能改善。经过上述综合平衡分析后,得到兼顾浆液性能及成本的最佳方案为:水固比取 0.8 : 1,固相比取 30 : 70,激发剂掺量取 2%,温度尽量在 15 ℃ 以上,即施工作业尽量挑选在合适的季节及天气较好的时段,或采取其他保温措施。

3 工程应用

某露天矿位于内蒙古东部草原区,自 2017 年以来,矿坑水位保持在较高水平,矿坑疏排水量远大于初步设计方案预计的水量,其严重影响着煤矿的稳定运行。将地质勘探数据、疏排水试验及水位观测结果等资料综合分析,结果表明:矿坑疏排水量主要来源为海拉尔河通过第四系砂砾石层,沿煤层隐伏露头形成补给^[22],砂砾石层平均埋深在地表以下 6 m,最大厚度约 37 m。本工程旨在通过封堵煤层露头处砂砾石层渗流补给通道,从根本上解决矿区水害威胁问题。针对矿区截排减渗的需求,利用前文试验优选方案,于 2019 年在该矿区开展了地下连续墙防渗注浆工程,帷幕注浆深度为 21~56 m。工期内当地平均气温为 15~25 ℃,地层温度梯度按照

每向下延伸 100 m,地层温度升高 3 ℃。由此可得,浆液浇筑后的环境温度在 15~27 ℃,该浆液初始温度对浆材浇筑后性能影响较小。在注浆结束后 7、28 和 90 d,采用钻孔取芯力学测试、围井抽水试验及超声波检测等手段对墙体防渗效果进行验证,注浆体在 3 个龄期对应抗压强度分别为 2.7、5.9 和 8.5 MPa,渗透系数分别为 9.8×10^{-6} 、 1.2×10^{-6} 和 8.6×10^{-7} cm/s,测试结果表明防渗墙体连续、完整。工程实施后矿坑疏排水量显著减少,该方案既满足便捷施工的要求,又保障了煤矿的安全运行,同时节约了工程成本,在相关工程领域中可推广应用。

4 结 论

1)通过正交试验手段开展了粉煤灰基防渗注浆材料性能室内试验,采用极差与方差方法分析了浆液 6 项关键性能指标在 4 个因素 4 个水平下的变化规律,利用综合平衡法优选出一种既能兼顾浆液各项指标又可以满足注浆工程要求的配比及方案:水固比取 0.8 : 1,固相比取 30 : 70,激发剂掺量取 2%,施工温度尽量保持在 15 ℃以上。

2)将粉煤灰基防渗注浆材料优选后,应用于露天煤矿地下连续墙防渗工程中,保障了矿区的安全稳定运行,减轻了粉煤灰堆存造成的环境问题,节约了注浆工程成本,对矿山水害防治、隧道不良地质处理、地下空间基础改良等类似工程起到了一定的指导作用。

3)水固比对粉煤灰基注浆材料的工程性能影响很大,固相比主要影响浆液流动度及凝结时间,掺加适量的外加剂可以促进浆液凝固、提升浆液性能,做好注浆工程保温防控措施有利于缩短凝结时间、增大结石率及减小析水率。在开展注浆防渗工程时,可以结合实际情况,灵活调整这几项关键因素、水平的取值,以期满足工程需求。

参考文献(References):

[1] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
 XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
 [2] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.
 WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during 13 th Five-Year Plan period and future prospects [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
 [3] 王建新,李 晶,赵仕宝,等.中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景[J].硅酸盐通报,2018,37(12):3833-3841.

WANG Jianxin, LI Jing, ZHAO Shibao, et al. Research progress and prospect of resource utilization of fly ash in China [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (12): 3833 -3841.
 [4] 黄 根,王 宾,徐宏祥,等.粉煤灰综合利用与提质技术研究进展[J].矿产保护与利用,2019(4):32-37.
 HUANG Gen, WANG Bin, XU Hongxiang, et al. Research progress on comprehensive utilization and upgrading technologies of fly ash [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 32-37.
 [5] 汤 倩.粉煤灰利用研究现状及其在环境保护中的应用[J].中国资源综合利用,2020,38(5):41-43.
 TANG Qian. Research status of fly ash utilization and its application in environmental protection[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(5): 41-43.
 [6] 张金山,李彦鑫,曹永丹.粉煤灰的综合利用现状及存在问题浅析[J].矿产综合利用,2017,10(5):22-26.
 ZHANG Jinshan, LI Yanxin, CAO Yongdan. Current situation of comprehensive utilization of fly ash and analysis of existing problems [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, 10(5): 22-26.
 [7] 张耀辉,熊祖强,李西凡,等.复杂水文地质条件下矿井水害综合防治技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(3):167-174.
 ZHANG Yaohui, XIONG Zuqiang, LI Xifan, et al. Study on technology of mine water disaster prevention and control in underground mine under complex hydrogeological conditions [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 167-174.
 [8] 董书宁.对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J].煤炭学报,2010,35(1):66-71.
 DONG Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China's coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 66-71.
 [9] 张耀辉,熊祖强,李西凡,等.复杂水文地质条件下矿井水害综合防治技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(3):167-174.
 ZHANG Yaohui, XIONG Zuqiang, LI Xifan, et al. Study on technology of mine water disaster prevention and control in underground mine under complex hydrogeological conditions [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 167-174.
 [10] 苗贺朝,邵生俊,李 骏,等.隧道穿越非饱和黄土场地浸水试验初探[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):1066-1072.
 MIAO Hechao, SHAO Shengjun, LI Jun, et al. Primary investigation of infiltration field tests on unsaturated loess tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1066-1072.
 [11] 郭晓山.用回归正交试验设计优化注浆堵水材料配方[J].煤田地质与勘探,1997,25(4):42-45.
 GUO Xiaoshan. THE optimization of the prescription of block up water grouting material by orthographic regression [J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(4): 42-45.
 [12] 董金玉,杨继红,杨国香,等.基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):44-49.
 DONG Jinyu, YANG Jihong, YANG Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on

- orthogonal design [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (1): 44-49.
- [13] 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 Shanxi [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 8-16.
- [14] 李召峰,李术才,刘人太,等.富水破碎岩体注浆加固材料试验研究与应用[J].岩土力学,2020,37(7):1937-1946.
LI Zhao Feng, LI Shucai, LIU Rentai, *et al.* Development of the grouting material for reinforcing water-rich broken rock masses and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 37(7): 1937-1946.
- [15] 尚宏波,靳德武,柳昭星,等.地下含水层帷幕注浆单液水泥浆扩散规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):134-141.
SHANG Hongbo, JIN Dewu, LIU Zhaoxing, *et al.* Research on diffusion law of pure liquid cement slurry for curtain grouting in underground aquifer [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (11): 134-141.
- [16] 沙 飞,李术才,刘人太,等.富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1420-1433.
SHA Fei, LI Shucai, LIU Rentai, *et al.* Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout (EMCG) for water-rich sand strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1420-1433.
- [17] 何 为,薛卫东,唐 斌.优化试验设计方法及数据分析[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [18] 阮文军,王文臣,胡安兵,等.新型水泥复合浆液的研制及其应用[J].岩土工程学报,2001,23(2):212-216.
RUAN Wenjun, WANG Wenchen, HU Anbing, *et al.* Development and application of new kind of cement composite grout [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 212-216.
- [19] 王晓晨,刘人太,杨为民,等.考虑水泥浆液析水作用的水平裂隙注浆扩散机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):1005-1017.
WANG Xiaochen, LIU Rentai, YANG Weimin *et al.* Study on grouting mechanism of horizontal fractures considering the bleeding of cement slurry [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 1005-1017.
- [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] 曹海东,苗贺朝,迟 赞,等.基于低强度抗渗混凝土的露天煤矿帷幕截水技术[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):61-67.
CAO Haidong, MIAO Hechao, CHI Zan, *et al.* Water cutoff curtain technology of open-pit coal mine based on low strength impermeable concrete [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48 (4): 61-67.