复配硅酸盐-硫铝酸盐水泥煤基固废注浆材料性能研究*

杨旭[1],胡博[2],王涛[1],刘亚辉[2],孔令宇[1],李俊孟[2]

(1.国能新疆宽沟矿业有限责任公司, 新疆 昌吉回族自治州 831200;
2.中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州市 221116)

摘要:以煤矸石、粉煤灰为原料,辅以硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥为胶凝材料,制备复配硅酸盐-硫铝酸盐水泥煤基固废注浆材料。调整硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥的质量占比,研究不同质量占比水泥对注浆材料力学性能及流动性能的影响,并通过核磁共振分析注浆材料内部孔径特征,借助扫描电镜和能谱分析注浆材料水化产物。研究结果表明:硅酸盐水泥∶硫铝酸盐水泥质量比为3∶7时,试件28 d抗压强度和抗折强度分别为17.05 MPa和5.00 MPa,坍落度为34.83 cm,凝结时间为174 min,综合性能最优;浆液材料主要水化产物为C-A-S-H凝胶,其与矸石粉骨料、粉煤灰、C-S-H凝胶形成的骨架互相加固,有效提高了试件强度;注浆材料内部孔径主要分布在0~0.63 μm、1~4 μm,且0.05~0.4 μm孔径占据主体地位。研究结果可为注浆材料的研发和工程应用提供一定的理论指导。

关键词:煤基固废;硅酸盐水泥;硫铝酸盐水泥;力学性能;流动性能;孔径特征

中图分类号:TD265 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)04-0181-08

Study on the Properties of Compound Portland-Sulphoaluminate Cement Coal-Based Solid Waste Grouting Material

YANG Xu[1], *HU Bo*[2], *WANG Tao*[1], *LIU Yahui*[2], *KONG Lingyu*[1], *LI Junmeng*[2]

(1.CHN Energy Xinjiang Kuangou Mining Co., Ltd., Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang 831200, China;
2.State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources,
China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Compound portland-sulphoaluminate cement coal-based solid waste grouting material was prepared by using coal gangue and fly ash as raw materials, supplemented by portland cement and sulphoaluminate cement as cementitious materials. By adjusting the mass ratio of portland cement and sulphoaluminate cement, the effects of cement with different mass ratios on the mechanical properties and flow properties of grouting materials were studied. The pore size characteristics of grouting materials were analyzed by nuclear magnetic resonance, and the hydration products of grouting materials were analyzed by scanning electron microscope and energy spectrum. The results show that when the mass ratio of portland cement to sulphoaluminate cement is 3∶7, the 28 d compressive strength and flexural strength of the specimen are 17.05 MPa and 5.00 MPa, respectively, the slump is 34.83 cm, the setting time is 174 min, and the comprehensive performance is the best. The main hydration product of the grouting material is C-A-S-H gel, which is mutually reinforced with the skeleton formed by gangue powder aggregate, fly ash, C-S-H gel, which effectively improves the strength of the specimen. The internal pore size of the grouting material is mainly distributed in 0-0.63 μm and 1-4 μm, and the pore size of 0.05-0.4 μm occupies the main position. The research results can provide some theoretical guidance for the development and engineering application of grouting materials.

Key words: Coal-based solid waste, Portland cement, Sulphoaluminate cement, Mechanical property, Flow property, Pore size characteristic

0 引言

煤炭作为我国的主体能源,年产量已超45亿t,生产过程中伴随着大量固体废弃物产出[1-3],主要包括煤矸石、粉煤灰等。煤矸石作为工业固废之首[4-5],年排放量占当年煤炭产量的10%左右,截至

* **收稿日期**:2024-06-21
基金项目:新疆重点研发计划项目(2022B03028-3,2023B303009-1);国家自然科学基金项目(52374245,52104103,52174128)
作者简介:杨旭(1990—),男,新疆奎屯人,助理工程师,主要从事采煤与灾害防治的管理与技术研究。E-mail:497468320@qq.com
通信作者:胡博(2000—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要研究方向为绿色开采。E-mail:TS22020019A31@cumt.edu.cn

目前,已累计堆存煤矸石 30 多亿 t,占地面积约为 1.2 万 hm^2,粉煤灰年排放量已超 7.8 亿 t[6-8]。煤矸石与粉煤灰的堆积严重占用土地资源,造成地表土壤、地表水及地下水的污染,破坏生态环境[9-11],但其内部所含活性组分促使其成为制备注浆材料的优质原材料。近年来,随着绿色矿山理念的兴起及现有注浆材料成本的上升,亟需提出新型煤基固废注浆材料,这种新型材料不仅能高效处置煤矸石、粉煤灰等固体废弃物,实现资源的循环利用,还能解决注浆材料制备成本高昂的问题[12-14]。

目前关于煤基固废制备注浆材料的研究颇多,郭凌志等[15]以煤基固废为原材料,加入碱激发剂,制备地聚物注浆材料,研究了各配比下浆液的流动性及力学强度。YU 等[16]以脱硫石膏、气化渣、炉底渣为原材料制备注浆材料,分析了注浆材料的泌水率、致密性、黏度、凝固时间和强度等参数,同时采用 XRD、SEM/EDS 等手段研究了其微观界面结构及增强机制。徐先杰等[17]以粉煤灰、炉渣及矿粉为原材料,利用碱激发剂激发粉煤灰活性,进而制备碱激发注浆材料,研究了碱激发剂掺量及粉煤灰-炉渣掺量对注浆材料性能的影响,并对其水化产物进行了物理化学表征。王波等[18]以粉煤灰和矿渣为前驱体,外加碱激发剂制备注浆材料,同时通过加入纤维来优化注浆材料的性能,最终得出纤维掺量为 3%时,注浆材料性能最优。贾东秀等[19]研究了碱激发剂掺量、碱固比、水灰比等因素对注浆材料性能的影响,并利用矩阵分析法得到最优配比。曹巍巍等[20]研究发现,当碱激发剂模数为 1、掺量为 8%时,注浆材料性能最优。周梅等[21]研究了煤矸石及粉煤灰掺量、碱激发剂模数及掺量对注浆材料性能的影响,并分析了其强化机理。

综上所述,煤基固废制备注浆材料领域的研究成果丰硕,其中,碱激发剂扮演着至关重要的角色,它能够有效激发煤基固废的活性,进而制备性能较优的注浆材料,然而,以复配水泥体系为胶凝材料的研究则相对较少。本文以煤矸石、粉煤灰为原材料,复配硅酸盐水泥及硫铝酸盐水泥为胶凝材料,辅以减水剂制备注浆材料,研究两种水泥复配下注浆材料的流动性、力学强度、内部孔径分布及其水化产物。研究成果可为煤基固废注浆材料的制备提供理论指导。

1 试验

1.1 试验原材料

1.1.1 煤矸石

本次试验所用细骨料为煤矸石,选自宽沟煤矿排矸场,主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3 和 Fe_2O_3。

1.1.2 水泥

本次试验复配的水泥为普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥,硫铝酸盐水泥选用 62.5 白水泥,具有快凝、快硬、高强度的特征,且其体积变化率很小。

1.1.3 粉煤灰

本次试验选用的粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰,主要化学成分为 CaO 和 SiO_2,属于高钙粉煤灰。

上述原材料主要化学成分见表 1。

表 1 原材料主要化学成分

Table 1 Main chemical components of raw materials %

原材料	CaO	Al_2O_3	SO_3	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2
煤矸石	—	25.7	—	63.6	0.4	4.3	2.2	2.1	0.8
粉煤灰	55.2	8.8	2.4	24.5	2.2	4.6	1.3	—	—
硅酸盐水泥	55.4	8.7	2.6	24.3	2.2	4.7	—	—	—
硫铝酸盐水泥	42.6	28.7	20.6	5.3	2.0	0.2	—	—	—

1.2 试验设计

本试验所用煤矸石、粉煤灰及水泥掺量分别占总灰量的 45%、10%及 45%,固定水灰比为 0.45,同时掺入 0.5%的减水剂,调整两种水泥的质量占比,设计硅酸盐水泥∶硫铝酸盐水泥质量比分别为9∶1,7∶3,1∶1,3∶7,1∶9,以全硅酸盐水泥作为对照组,测试各配比下注浆材料的力学性能及流动性能。具体试验设计方案见表 2。

表 2 试验设计方案

Table 2 Experimental design schemes

方案	煤矸石质量占比/%	粉煤灰质量占比/%	硅酸盐水泥质量占比/%	硫铝酸盐水泥质量占比/%	水灰比	减水剂/%
FP-1	45	10	40.5	4.5	0.45	0.5
FP-2	45	10	31.5	13.5	0.45	0.5
FP-3	45	10	22.5	22.5	0.45	0.5
FP-4	45	10	13.5	31.5	0.45	0.5
FP-5	45	10	4.5	40.5	0.45	0.5
对照组	45	10	45.0	0	0.45	0.5

各材料按设定比例配置并混合均匀，取部分浆液测试其坍落度和凝结时间，分析其流变性能，其余浆液装入模具中，分别制备成 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱形抗压试件和 160 mm×40 mm×40 mm 的长方体抗折试件，放入养护箱养护 24 h 后脱模，将脱模后的试件分别养护 3 d、7 d 和 28 d，测试试件的抗压强度和抗折强度。

1.3　测试方法

1.3.1　抗压、抗折强度测试

参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)进行抗压强度测试，利用 WDW-300 试验机，设定初始试验力为 100 N，加载速率为 0.5 mm/min，断裂比达到 50%时停止加载，每个方案在各龄期下测试 3 个试样，取平均值作为最终强度值。

1.3.2　坍落度测试

按照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077—2012)进行坍落度测试，利用截锥圆模(Φ36 mm×Φ60 mm×60 mm)、玻璃板(400 mm×400 mm×5 mm)、卷尺、刮刀、烧杯及搅拌器，将浆液置于截锥圆模中，用刮刀刮平表面，垂直提起截锥圆模，待浆液停止流动后，用卷尺测量两垂直方向上浆液的长度，求平均值。

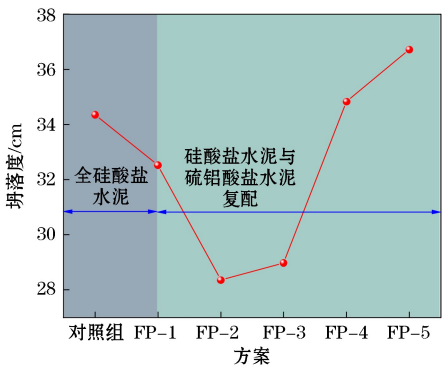
1.3.3　凝结时间测试

参照《水泥标准稠度用水量凝结时间安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)进行凝结时间测试，采用维卡仪进行检测，当水与干料混合时开始计时，将配置好的浆液浇入试模中，试模小口朝上置于底座中心，每隔 1 min 测定一次，当初凝针距离底部 3～5 mm 时达到初凝并记录时间，随后将试模大口朝上，更换终凝针，当终凝针不能在材料表面留下痕迹时记为终凝时间。

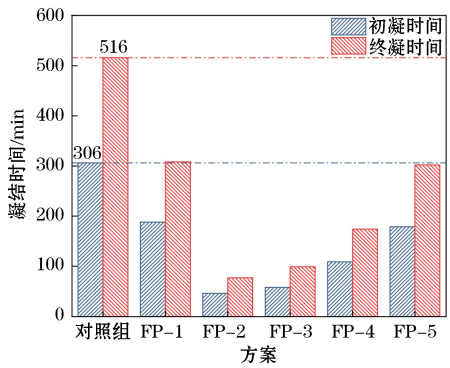
2　结果与分析

2.1　坍落度及凝结时间

各试验组及对照组的坍落度和凝结时间结果如图 1 所示。由图 1(a)可知，全硅酸盐水泥浆液的坍落度为 34.38 cm，随着硫铝酸盐水泥掺量的增加，浆液坍落度呈先减小后增大的变化趋势，FP-2 试验组的坍落度最小，仅为 28.35 cm，比对照组降低了 17.54%；FP-3 试验组的坍落度为 28.98 cm，较对照组降低了 15.71%，当硫铝酸盐水泥质量占比大于 22.5%时，浆液坍落度明显增长；FP-5 试验组的坍落度达到最大，约为 36.7 cm，相比对照组提高了 6.75%。



(a) 坍落度



(b) 凝结时间

图 1　不同水泥配比的注浆材料的坍落度及凝结时间

Fig.1　Slump and setting time of grouting materials with different cement ratios

由图 1(b)可知，复配水泥材料的凝结时间较全硅酸盐水泥材料凝结时间短，且随着硫铝酸盐水泥质量占比的增大，复配水泥体系的初凝时间及终凝时间变化趋势相同，均为先减小后增大。当硫铝酸盐水泥质量占比为 13.5%时，注浆材料的凝结时间相较于全硅酸盐水泥急剧下降，凝结时间达到最短，初凝时间为 46 min，较对照组缩短了 260 min，终凝时间为 77 min，较对照组缩短了 439 min，当硫铝酸盐水泥质量占比为 22.5%，即复配比为 1∶1 时，注浆材料凝结时间略高于硫铝酸盐水泥质量占比为 13.5%注浆材料的凝结时间，当硫铝酸盐水泥质量占比高于 22.5%时，凝结时间增长趋势较明显。

复配水泥体系中硫铝酸钙水化生成钙矾石与铝胶，硅酸钙水化生成的 $Ca(OH)_2$ 与铝胶继续反应生成钙矾石，加快了硫铝酸钙的水化进程，同时 $Ca(OH)_2$ 的消耗也进一步促进了硅酸钙的水化，因此，复配水泥体系中硫铝酸钙与硅酸钙相互促进，水的消耗速度增加且消耗量大，致使凝结时间缩短，且水的减少导致浆液坍落度下降。当硫铝酸盐水泥质量占比为 0～22.5%时，随着质量占比的增大，复配水泥体系中硫铝酸钙含量逐渐增多，由于硫铝酸钙

与硅酸钙的水化促进作用,使得水化反应随着硫铝酸盐水泥质量占比的增加愈加剧烈,凝结时间逐渐缩短。当硫铝酸盐水泥质量占比大于22.5%时,复配水泥体系水化反应更加剧烈,在短时间内生成大量钙矾石晶体,附着在水泥颗粒表面,水泥水化进程受阻,凝结时间增加,同时部分水不能及时参与水化反应,变成了自由水,导致浆液的坍落度增加。

2.2 力学性能分析

2.2.1 抗压强度

试件养护3个龄期(3 d、7 d、28 d)后的抗压强度测试结果见表3。由表3可知,试件3 d抗压强度在3.05～10.05 MPa之间,7 d抗压强度在5.50～12.98 MPa之间,其中FP-5试验组3 d和7 d抗压强度最大,分别为10.05 MPa和12.98 MPa,FP-2试验组3 d和7 d抗压强度最小,分别为3.05 MPa和5.50 MPa;试件28 d抗压强度在9.13～18.73 MPa之间,对照组28 d抗压强度最大,为18.73 MPa,FP-2试验组试件28 d抗压强度仍最小,为9.13 MPa。

表3 试件3 d、7 d、28 d抗压强度测试结果

Table 3 Test results of 3 d, 7 d and 28 d compressive strength of specimens MPa

龄期	统计值	对照组	FP-1	FP-2	FP-3	FP-4	FP-5
3 d	均值	6.17	6.26	3.05	5.15	7.61	10.05
	标准差	0.135	0.155	0.17	0.14	0.201	0.185
7 d	均值	11.07	9.54	5.50	8.96	11.24	12.98
	标准差	0.21	0.272	0.171	0.186	0.272	0.246
28 d	均值	18.73	16.84	9.13	12.76	17.05	18.45
	标准差	0.225	0.191	0.17	0.216	0.192	0.180

根据表3绘制试件养护3 d、7 d、28 d平均抗压强度柱状图,如图2所示。

由图2可知,试验组试件抗压强度随着硫铝酸盐水泥质量占比的增加整体呈先下降后上升的趋势,当硫铝酸盐水泥质量占比为40.5%时,各龄期试件抗压强度均达到最大值,这是由于硫铝酸盐水泥中的无水硫铝酸钙会生成大量钙矾石晶体,这些晶体与矸石粉骨料、粉煤灰、C-S-H凝胶形成的骨架互相加固,从而有效提高了试件强度;当硅酸盐水泥∶硫铝酸盐水泥质量比为7∶3时,各龄期试样抗压强度最低,这可能是因为硫铝酸盐水泥水化生成少量钙矾石晶体,致使体系内部钙矾石发生不均匀膨胀,最终使试件内部产生微裂隙,整体强度进一步降低。较对照组而言,当硫铝酸盐水泥质量占比达到31.5%以上时,试件3 d和7 d抗压强度均高于对照组,28 d抗压强度较对照组相对较低,这可能是因为对照组硅酸盐水泥水化生成的大量$Ca(OH)_2$,与CO_2反应生成$CaCO_3$,进一步提高了试件强度。

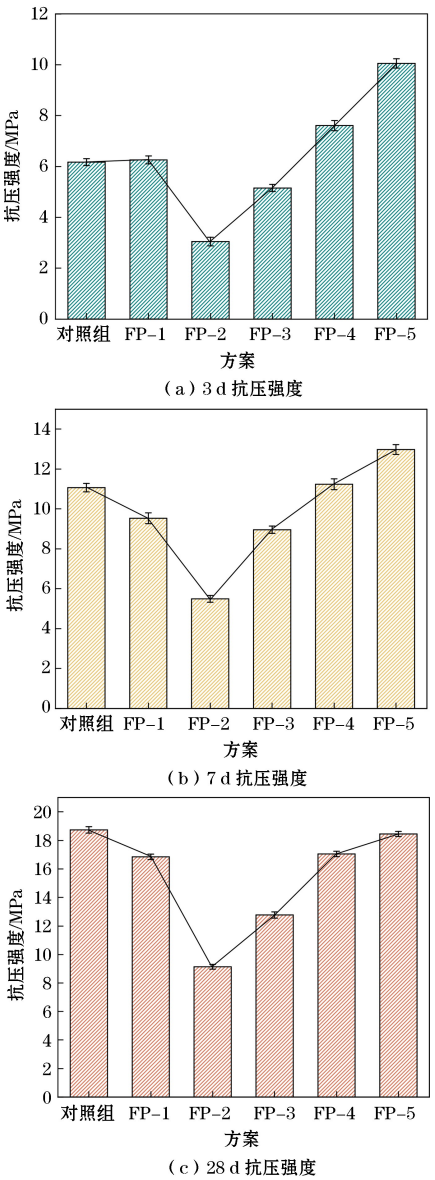


图2 养护试件3 d、7 d、28 d单轴抗压强度

Fig.2 3 d, 7 d and 28 d uniaxial compressive strength of curing specimens

2.2.2 抗折强度

试件养护3个龄期(3 d、7 d、28 d)后的抗折强度测试结果见表4。由表4可知,试件养护3 d抗折强度在1.10～2.44 MPa之间,对照组试件3 d抗折强度最大,为2.44 MPa,FP-1试验组3 d抗折强度最小,为1.10 MPa;试件养护7 d抗折强度在2.41～4.34 MPa之间,对照组抗折强度最大,为4.34 MPa,FP-4试验组7 d抗折强度最小,为2.41 MPa;试件养护28 d抗折强度在4.24～5.26 MPa之间,其中FP-1试验组28 d抗折强度最大,为5.26 MPa,FP-5试验组28 d抗折强度最小,为4.24 MPa。

表 4 试件 3 d、7 d、28 d 抗折强度测试结果

Table 4 Test results of 3 d, 7 d and 28 d flexural strength of specimens MPa

龄期	统计值	对照组	FP-1	FP-2	FP-3	FP-4	FP-5
3 d	均值	2.44	1.10	1.18	2.02	2.42	2.41
	标准差	0.083	0.085	0.072	0.036	0.065	0.051
7 d	均值	4.34	3.11	3.02	4.09	2.41	3.07
	标准差	0.14	0.056	0.106	0.144	0.137	0.147
28 d	均值	4.30	5.26	4.42	4.86	5.00	4.24
	标准差	0.056	0.127	0.091	0.105	0.135	0.086

根据表 4 绘制试件养护 3 d、7 d、28 d 平均抗折强度柱状图,如图 3 所示。

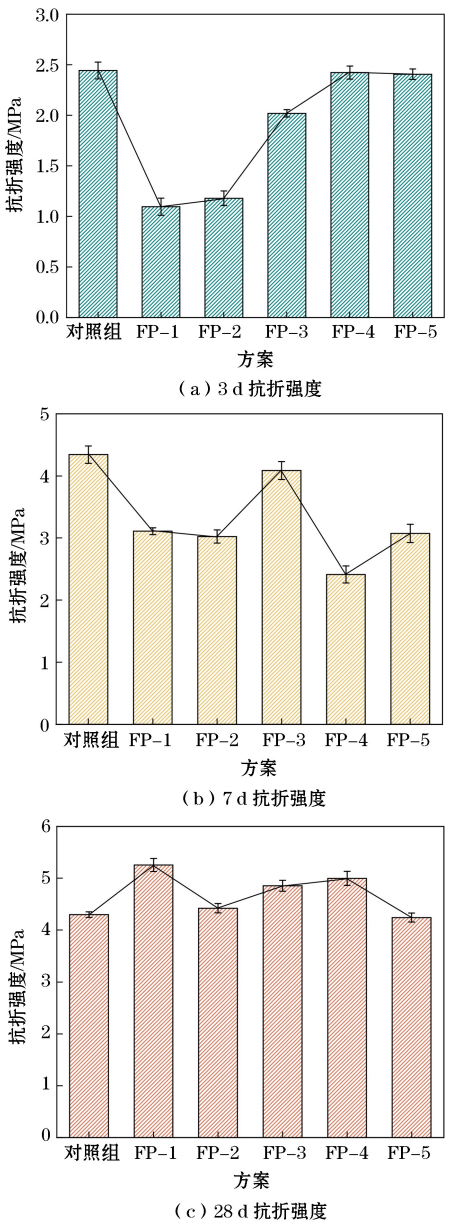


图 3 养护试件 3 d、7 d、28 d 单轴抗折强度

Fig.3 3 d, 7 d and 28 d uniaxial flexural strength of curing specimens

由图 3 可知,全硅酸盐水泥情况下试样 28 d 抗折强度为 4.30 MPa,当硫铝酸盐水泥质量占比分别为 4.5%、13.5%、22.5%、31.5%、40.5%时,试样 28 d 抗折强度分别为 5.26 MPa、4.42 MPa、4.86 MPa、5 MPa、4.24 MPa,相较于对照组的变化量分别为 0.96 MPa、0.12 MPa、0.56 MPa、0.70 MPa、0.06 MPa,变化量较小,表明硫铝酸盐水泥质量占比改变对试件抗折强度不敏感。相较于对照组可知,全硅酸盐水泥情况下试样 7 d 抗折强度和 28 d 抗折强度几乎相同,仅相差 0.04 MPa,随着硫铝酸盐水泥质量占比的增加,试件 7 d 和 28 d 抗折强度出现明显差异,其差值分别为 2.15 MPa、1.4 MPa、0.77 MPa、2.59 MPa、1.17 MPa。因此,硫铝酸盐水泥延缓了试件水化反应的速率,且当硫铝酸盐水泥质量占比为 31.5%时,延缓效果最为明显。

2.3 微观结构及元素占比分析

2.3.1 注浆材料孔隙分布

注浆材料的孔隙结构间接反映了其微观结构和密实度,影响其力学性能与渗透特性[17]。本文以浆液结实体孔径标准为例,即胶凝孔(<0.01 μm)、过渡孔(0.01~0.1 μm)、毛细孔(0.1~1 μm)、宏观孔(>1 μm)[22]。由于 FP-2 与 FP-3 试验组材料的强度及流动性大致相同,只绘制其中一组孔径分布曲线。不同水泥配比注浆材料的孔径分布特征如图 4 所示。

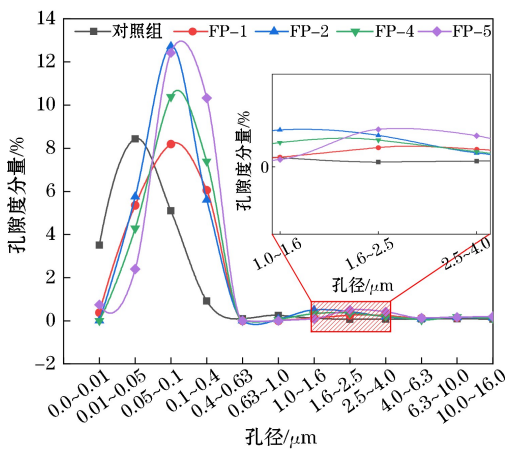


图 4 不同水泥配比的注浆材料孔径分布特征

Fig.4 Pore size distribution characteristics of grouting materials with different cement ratios

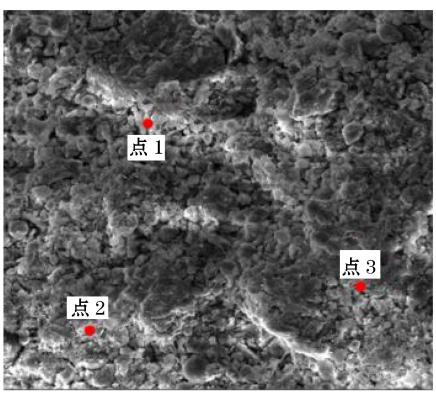
由图 4 可知,不同水泥配比注浆材料的孔径主要集中在 0~0.63 μm、1~4 μm。随着硫铝酸盐水

泥质量占比的增加,0～0.63 μm 及 1～4 μm 间的孔径占比呈先增后减再增的趋势;当硫铝酸盐水泥质量占比为 40.5%时,0～0.63 μm 孔径占比最多,主要集中在 0.05～0.4 μm 之间,1～4 μm 之间的孔径也较多,主要集中在 2.5～4 μm 之间;质量占比为 4.5%时,试件内部各孔径占比同对照组大致相同;当硫铝酸盐水泥质量占比为 31.5%时,0～0.63 μm 与 1～4 μm 范围内的孔径占比较小,仅高于质量占比为 4.5%的孔径占比。

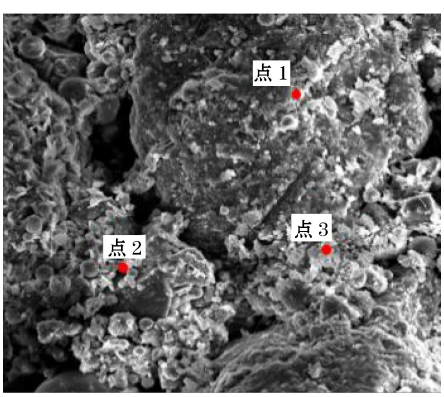
综上所述,结合力学性能、流动性能及孔径分布特征分析可得,当硅酸盐水泥∶硫铝酸盐水泥为 3∶7 时,所得材料性能最优。

2.3.2 元素占比分析

选取性能最优的 FP-4 试验组和对照组的试件进行电镜扫描试验,分析复配水泥煤基固废注浆材料的水化产物。SEM 测试结果如图 5 所示,各点对应元素占比见表 5。



(a) 对照组



(b) FP-4 试验组

图 5 对照组和 FP-4 试验组试件的 SEM 图像

Fig.5 SEM images of control group and FP-4 test group

表 5 SEM 图像上各点对应元素占比分析

Table 5 Analysis of the proportion of corresponding elements at each point on the SEM image %

方案	位置	O	C	Ca	Si	Al	Fe
对照组	点 1	34.66	—	3.43	45.64	15.44	0.82
	点 2	36.03	11.83	1.37	25.44	13.19	6.18
	点 3	40.62	17.08	14.52	13.65	8.46	1.32
	面	37.58	22.38	14.83	13.92	6.07	1.83
FP-4	点 1	38.76	15.12	14.38	14.48	14.01	1.23
	点 2	45.85	13.25	3.24	18.02	14.37	0.62
	点 3	41.61	—	1.95	43.86	10.85	—
	面	40.06	19.37	13.98	12.24	11.94	1.65

由图 5 和表 5 可知,对照组和 FP-4 试验组水化产物中元素相似,主要元素为 O、Ca、Si、Al,其中 O 元素占比分别为 37.58%和 40.06%,Ca 元素占比分别为 14.83%和 13.98%,Si 元素占比分别为13.92%和 12.24%,Al 元素占比分别为 6.07%和 11.94%,C 元素占比分别为 22.38%和 19.37%、Fe 元素占比分别为 1.83%和 1.65%。FP-4 试验组中 Al 元素含量显著提高,说明复配硅酸盐-硫铝酸盐水泥煤基固废注浆材料水化产物主要为 C-A-S-H凝胶。

3 结论

(1) 本文研究了硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥不同配比下,煤基固废注浆材料的流变性能、力学性能及孔隙分布特性。研究结果表明,硫铝酸盐水泥质量占比为 13.5%时,由于硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥水化相互促进,自由水消耗速度及消耗量大,浆液坍落度及凝结时间均最小;当质量占比高于 22.5%时,由于水化反应剧烈,短时间内生成大量的钙矾石晶体并附着于水泥颗粒表面,水化反应受阻,自由水增多,坍落度及凝结时间明显增大。

(2) 随着硫铝酸盐水泥质量占比的增加,试件抗压强度整体呈先下降后上升的趋势,这是因为硫铝酸盐水泥中的无水硫铝酸钙发生反应,生成大量钙矾石晶体,这些晶体与矸石粉骨料、粉煤灰、C-S-H 凝胶形成的骨架互相加固,有效提高了试件强度。而硫铝酸盐水泥质量占比改变对试件抗折强度影响较小。

(3) 孔隙分布特征结果表明,浆液结石体内部孔径主要分布在 0～0.63 μm 和 1～4 μm 之间,其中 0.05～0.4 μm 孔径占据主体地位。元素占比结果表明,掺入硫铝酸盐水泥的试件中,Al 元素含量显著提高,说明复配硅酸盐-硫铝酸盐水泥煤基固

废注浆材料水化产物主要为C-A-S-H凝胶。研究成果可为注浆材料的研发及工程应用提供一定的理论指导。

参考文献(References):

[1] 侯玉春.化工用煤基本情况及未来发展趋势[J].煤炭技术,2018,37(9):354-356.
HOU Yuchun. Basic situation and future development trend of chemical coal[J]. Coal Technology,2018,37(9):354-356.

[2] 岳福斌.煤炭蓝皮书:中国煤炭工业发展报告(2019)[M].北京:社会科学文献出版社,2020.
YUE Fubin. Coal blue book: China coal industry development report (2019)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press,2020.

[3] YANG F, DIAN J. Macro-economic impact of policies for controlling fossil energy consumption in China[J]. Energies, 2022,15(3):1051.

[4] 程芳琴.煤基产业废弃资源循环利用[M].北京:冶金工业出版社,2022.
CHENG Fangqin. Recycling of waste resources in coal-based industry[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2022.

[5] 程芳琴,廖洪强,郭彦霞.煤基固废资源化利用技术原理及工艺[M].北京:科学出版社,2016.
CHENG Fangqin, LIAO Hongqiang, GUO Yanxia. Principle and technology of coal based solid waste resource utilization[M]. Beijing:Science Press,2016.

[6] 王鹏涛.煤矸石综合利用的现状及存在的问题研究[J].科学技术创新,2019(16):182-183.
WANG Pengtao. Research on present situation and existing problems of comprehensive utilization of coal gangue[J]. Scientific and Technological Innovation,2019(16):182-183.

[7] 陈仁朋,王朋飞,刘鹏,等.路基煤矸石填料土-水特征曲线试验研究[J].岩土力学,2020,41(2):372-378.
CHEN Renpeng, WANG Pengfei, LIU Peng, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of subgrade coal gangue filler[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(2):372-378.

[8] 张吉雄,缪协兴,郭广礼.矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):395-401.
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(4):395-401.

[9] HE Y, LUO Q M, HU H L. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 690-696.

[10] DING J, MA S H, SHEN S, et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash:a concise review[J]. Waste Management, 2017, 60: 375-387.

[11] 武飞乐,李世春.粉煤灰中铝、镓、锂回收技术研究进展[J].中国有色冶金,2023,52(2):116-125.
WU Feile, LI Shichun. Research progress of aluminum, gallium and lithium recovery technologies for fly ash[J]. China Nonferrous Metallurgy,2023,52(2):116-125.

[12] 钱鸣高.煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2010,35(4):529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):529-534.

[13] 缪协兴,钱鸣高.中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):1-14.
MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009,26(1):1-14.

[14] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007(1):1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society,2007(1):1-7.

[15] 郭凌志,周梅,王丽娟,等.煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J].建筑材料学报,2022,25(10):1092-1100.
GUO Lingzhi, ZHOU Mei, WANG Lijuan, et al. Preparation and properties of coal-based solid waste geopolymer grouting materials[J]. Journal of Building Materials,2022,25(10):1092-1100.

[16] YU K P, MA L Q, HUO B B, et al. Study on the fluidity and mechanical properties of multi-source coal-based solid waste (MCSW) filling material[J]. Journal of Materials Research and Technology,2024,28:2924-2934.

[17] 徐先杰,朱志敬,王孟,等.固体$NaOH/Na_2SiO_3$激发矿粉/粉煤灰-炉渣基注浆材料性能研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):628-637.
XU Xianjie, ZHU Zhijing, WANG Meng, et al. Study on properties of solid $NaOH/Na_2SiO_3$ activated slag/fly ashbottom ash based grouting material[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2024,55(2):628-637.

[18] 王波,文华.矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料的制备及性能优化研究[J].金属矿山,2023(3):274-278.
WANG Bo, WEN Hua. Research on preparation and performance optimization of slag-fly ash geopolymer grouting material[J]. Metal Mine,2023(3):274-278.

[19] 贾东秀,唐道增,窦江海,等.矿渣-粉煤灰注浆材料的性能与微观结构研究及优化[J].矿业研究与开发,2023,43(10):43-50.
JIA Dongxiu, TANG Daozeng, DOU Jianghai, et al. Research and optimization on properties and microstructure of slag-fly ash grouting material[J]. Mining Research and Development,2023,43(10):43-50.

[20] 曹巍巍,雷涛,闵召辉,等.固体碱激发矿粉/粉煤灰注浆材料性能及机理研究[J].硅酸盐通报,2021,40(12):4037-4043.
CAO Weiwei, LEI Tao, MIN Zhaohui, et al. Performance and mechanism of solid alkali-activated slag/fly ash grouting material[J]Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(12):4037-4043.

[21] 周梅,白金婷,郭凌志,等.基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化[J].材料导报,2023,37(20):123-131.
ZHOU Mei, BAI Jinting, GUO Lingzhi, et al. Optimization of grouting material proportion of coal gangue geopolymer based on response surface methodology [J]. Materials Reports,2023,37(20):123-131.

[22] HUO Wangwen, ZHU Zhiduo, ZHANG Jie, et al. Utilization of OPC and FA to enhance reclaimed lime-fly ash macadam based geopolymers cured at ambient temperature [J].Construction and Building Materials,2021,303:124378.