

煤矸石粉制备混凝土用复合掺合料的性能研究

Study on the Properties of Composite Admixture for Concrete Prepared by Partially Substituting Coal Gangue for Fly Ash

王建华¹, 赖益梁¹, 刘刚¹, 杨枫², 刘建新¹, 李广生¹

(1. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建福州 361005; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建福州 350108)

摘要: 用煤矸石粉部分替代粉煤灰制备混凝土用复合矿物掺合料, 通过正交实验研究煤矸石粉、粉煤灰、磷渣掺量对受检胶砂抗折强度、抗压强度、活性指数和抗压强度增长比的影响。结果表明: 由于火山灰效应和微集料效应, 煤矸石粉、粉煤灰、磷渣对水泥的水化存在较强相互作用, 设计配合比适宜时, 受检胶砂的7和28 d活性指数及强度增长比均达到普通Ⅲ级复合矿物掺合料指标要求, 表明用煤矸石粉部分替代粉煤灰制备混凝土用复合矿物掺合料完全可行, 最优方案为煤矸石粉掺量25.0%、粉煤灰掺量62.5%、磷渣掺量12.5%。

关键词: 煤矸石粉; 粉煤灰; 复合掺合料; 混凝土; 磷渣; 性能

中图分类号: TU528.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2024)01-0018-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.004

WANG Jianhua¹, LAI Yiliang¹, LIU Gang¹, YANG Feng², LIU Jianxin¹, LI Guangsheng¹

(1. East China Survey and Design Institute (Fujian) Co., Ltd., Fuzhou 361005, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The composite mineral admixtures for concrete were prepared by partially replacing fly ash with coal gangue powder. The effects of coal gangue powder, fly ash and phosphorus slag on the flexural strength, compressive strength, activity index and strength growth ratio of the tested mortar were studied through orthogonal experiments. The results showed that there was a strong interaction between gangue powder, fly ash and phosphorus residue on the hydration of cement, and when the design mix ratio is appropriate, the 7-day and 28-day activity index and strength growth ratio of the tested gum sand reached the requirements of the ordinary grade III composite mineral admixture of composite admixture for concrete, indicating that it was completely feasible to prepare composite mineral admixture for concrete by replacing fly ash with gangue powder, and the optimal scheme is to add 25.0% coal gangue powder, 62.5% fly ash, and 12.5% phosphorus slag.

Keywords: gangue powder; fly ash; composite admixtures; concrete; phosphorus residue; property

0 引言

混凝土掺合料是为改善混凝土性能, 节约用水, 调节混凝土强度等级, 在混凝土拌和时掺入天然的或人工的能改善混凝土性能的粉状矿物质^[1]。常用的混凝土掺合料有粉煤灰、粒化高炉矿渣、火山灰

质材料等活性掺合料, 或磨细石灰石粉和砂岩粉等非活性掺合料, 其中以粉煤灰应用较多^[2-4]。但具有活性的粉煤灰成本较高, 而非活性的石粉在混凝土中只起填充作用, 不利于强度增长^[5]。

煤矸石是煤炭开采、挖掘等生产过程中混入的岩石和选煤过程中洗排出来的矸石^[6]。据统计, 我国积存煤矸石已超过45亿t, 每年仍持续排放约7.5亿t。目前, 煤矸石综合利用的主要途径是矸石经热活化激发火山灰活性后应用于建材方面^[7-8], 但

作者简介: 王建华, (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 市政、建筑工程及建筑新材料。

收稿日期: 2023-01-10

热活化过程浪费能源, 环境污染大, 工作环境恶劣, 制约了煤矸石的综合利用。因此, 无需煅烧的机械活化技术逐渐引起了煤矸石科研工作者的关注。机械活化煤矸石使得颗粒尺度减小, 比表面积增大, 颗粒结构遭到破坏, 表面出现错位, 点缺陷和结构缺陷、颗粒表面自由能增加, 原料在颗粒细化时得到微均匀化, 反应活性大大提高^[9]。贵州省是我国重要的磷矿及磷化工基地, 其黄磷产量仅次于云南, 位居全国第二, 每年产生磷渣 200 万 t^[10]。由于磷渣利用率较低, 大量废渣露天堆放, 占用土地, 污染环境^[11]。利用磷渣的火山灰效应和填充效应, 能提高混凝土强度, 减少水泥用量。因此, 用煤矸石粉和磷渣与部分粉煤灰复配制成混凝土掺合料, 可减少粉煤灰用量, 节约成本, 不仅解决了煤矸石和磷渣污染环境问题, 还具有较大市场竞争力和推广应用前景^[12-15]。

基于此, 本研究以机械活化煤矸石粉代替部分粉煤灰, 研发由煤矸石粉、粉煤灰、磷渣构成的低成本混凝土用掺合料, 探索其 7、28 和 90 d 的抗压强度、抗折强度、活性指数、强度增长比等变化规律, 以获得较佳的配合比和工艺参数。

1 试验

1.1 原材料

煤矸石粉的主要化学成分见表 1, 细度为 45 μm , 筛余 11.6%; 粉煤灰的主要化学成分见表 2, 细度为 45 μm , 筛余 6.4%; 磷渣的主要化学成分见表 3, 细度为 45 μm , 筛余 11.4%; 水泥为市场购买的普通硅酸盐水泥, 强度等级为 P·O 42.5; 标准砂购自厦门艾思欧标准砂有限公司; 拌合水为自来水。

表 1 煤矸石粉的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of gangue powder /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	TiO ₂
45.86	20.80	15.09	2.14	0.31	5.46	4.46

表 2 粉煤灰的主要化学成分
Table 2 Main chemical composition of fly ash /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	烧失量
43.56	25.37	16.12	5.80	0.89	0.34	0.81	3.45

表 3 磷渣的主要化学成分
Table 3 Main chemical composition of phosphorus residue /%

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂
50.41	3.54	38.17	0.39	1.10	2.86	0.34

1.2 试验方案

采用 4 因素 3 水平正交表 L₉ (3⁴) 安排试验, 混凝土用复合掺合料配料正交表见表 4。表 4 中, A 因素为煤矸石粉, 3 水平编号为 1、2、3, 分别代表掺量 20%、30%、40%; B 因素为粉煤灰, 3 水平编号为 1、2、3, 分别代表掺量 30%、40%、50%; C 因素为磷渣, 3 水平编号为 1、2、3, 分别代表掺量 5%、10%、15%; D 因素为空白列。按照表 4 中 1#~9#换算为 100%后的配合比将煤矸石粉、粉煤灰及磷渣混合搅拌均匀后制备复合掺合料, 然后依据 JG/T 486-2015 《混凝土用复合掺合料》标准测定所配制复合掺合料的性能指标, 具体胶砂配合比见表 5。

表 4 混凝土用复合掺合料配料正交表

Table 4 Orthogonal table of composite admixture ingredients for concrete

试验 编号	设计配合比				换算为 100%后的 配合比		
	A(煤矸 石粉/%)	B(粉煤 灰/%)	C(磷 渣/%)	D(空 白列)	煤矸石 粉/%	粉煤 灰/%	磷渣 /%
1#	1	1	1	1	36.36	54.55	9.09
2#	1	2	2	2	28.57	57.14	14.29
3#	1	3	3	3	23.53	58.82	17.65
4#	2	1	2	3	42.86	42.86	14.29
5#	2	2	3	1	35.29	47.06	17.65
6#	2	3	1	2	35.29	58.82	5.88
7#	3	1	3	2	47.06	35.29	17.65
8#	3	2	1	3	47.06	47.06	5.88
9#	3	3	2	1	40.00	50.00	10.00

注: 表 4 中设计配合比总量不等于 100%, 需换算为 100%。

表 5 胶砂配合比

Table 5 Mix ratio of glue sand

胶砂种类	水泥/g	复合 掺合料/g	标准 砂/g	加水 量/mL
对比胶砂	450	—	1350	225
试验胶砂	315	135	1350	225

1.3 试验方法

(1) 试件制备 由表 5 胶砂配合比分别配制对比胶砂和试验胶砂, 其中, 对比胶砂编号为 0#, 受检胶砂依据所用复合矿物掺合料配比 (表 4) 分别编号为 1#~9#; 然后按照 GB/T 17671-2021 《水泥胶砂强度检验方法》规定进行胶砂搅拌、成型和养护, 试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm。

(2) 抗折强度和抗压强度的测定 将制备的试件养护至规定龄期后, 按 GB/T 17671-2021 《水泥胶砂强度检验方法》规定, 分别用抗折强度试验机 and 抗压强度试验机测量抗折强度和抗压强度。

(3) 活性指数及强度增长比 复合掺合料的活

材料科学

性指数 H 和抗压强度增长比 P 按 JG/T 486-2015 《混凝土用复合掺合料》(以下简称“《规范》”)附录公式计算:

$$H = \frac{R_1}{R_0} \times 100 \tag{1}$$

$$P = \frac{(R_{90}/R_{28})}{(R_{0,90}/R_{0,28})} \tag{2}$$

2 结果与分析

2.1 复合掺合料的抗折强度

表 6 为不同配合比、不同龄期复合掺合料的抗折强度,表 7 为抗折强度极差分析。

表 6 不同龄期的抗折强度
Table 6 Flexural strength at different ages /MPa

试件编号	7 d	28 d	90 d
0#	8.53	9.01	9.69
1#	6.48	7.74	9.59
2#	6.71	7.71	8.98
3#	6.80	8.24	9.25
4#	5.85	7.43	9.15
5#	5.87	7.26	8.74
6#	6.19	8.15	7.65
7#	5.77	7.83	7.60
8#	6.18	8.24	9.11
9#	5.89	7.81	9.41

表 7 不同龄期抗折强度的极差分析
Table 7 Range analysis of flexural strength at different ages /MPa

龄期/d	项目	因素			
		A	B	C	D
7	k_1	6.66	6.03	6.28	6.08
	k_2	5.97	6.25	6.15	6.22
	k_3	5.94	6.29	6.14	6.28
	极差	0.72	0.26	0.14	0.20
28	k_1	7.90	7.67	8.04	7.60
	k_2	7.61	7.73	7.65	7.89
	k_3	7.96	8.07	7.78	7.97
	极差	0.35	0.4	0.39	0.37
90	k_1	9.27	8.78	8.78	9.25
	k_2	8.51	8.94	9.18	8.08
	k_3	8.71	8.77	8.53	9.17
	极差	0.76	0.17	0.65	1.17

分析表 7 中不同龄期的极差可知,煤矸石粉对 7 和 90 d 抗折强度影响较大,粉煤灰对 7 和 28 d 抗折强度影响较大,磷渣主要影响后期强度,空白列对 90 d 抗折强度影响较大。为节约能源、降低成本,本研究用煤矸石粉未采用活化效果最好的热活化,而采用机械活化,对 7 d 抗折强度影响大表明煤矸石

细粉存在较多错位和缺陷,反应活性较高,在初期即发生水化反应;对 90 d 抗折强度影响大表明粗粉活性较低,主要在后期发生水化反应。煤矸石粉、粉煤灰、磷渣都存在形态效应、火山灰效应和微集料效应,对水泥的水化相互影响,空白列极差较大也证实存在明显交互作用。

由表 7 可知,7 d 抗折强度的影响因素顺序为 $A > B > D > C$,较优方案为 A1B3C1D3;28 d 抗折强度的影响因素顺序为 $B > C > D > A$,较优方案为 A3B3C1D3;90 d 抗折强度的影响因素顺序为 $D > A > C > B$,交互作用影响最大,较优方案为 A1B2C2D1。综合考虑各因素对 7、28 和 90 d 抗折强度的影响,确定整体较优方案为 A1B3C1D3,即最优设计配合比为煤矸石粉掺量为 20%、粉煤灰掺量为 50%、磷渣掺量为 5%,换算成 100% 后配合比为煤矸石粉掺量为 26.67%、粉煤灰掺量为 66.66%、磷渣掺量为 6.67%。

2.2 复合掺合料的抗压强度

表 8 为不同配合比、不同龄期复合掺合料的抗压强度,表 9 为抗压强度极差分析。

表 8 不同龄期的抗压强度
Table 8 Compressive strength at different ages /MPa

试件编号	7 d	28 d	90 d
0#	39.72	51.30	60.51
1#	26.21	33.84	44.19
2#	26.52	36.53	44.28
3#	26.51	36.70	46.01
4#	25.63	34.63	43.88
5#	23.72	34.72	42.09
6#	24.85	34.61	43.18
7#	21.32	31.40	37.57
8#	23.76	33.25	40.08
9#	22.47	34.71	43.07

表 9 不同龄期抗压强度的极差分析
Table 9 Range analysis of compressive strength at different ages /MPa

龄期/d	项目	A	B	C	D
7 d	k_1	26.41	24.39	24.94	24.13
	k_2	24.73	24.67	24.87	24.23
	k_3	22.52	24.61	23.85	25.30
	极差	3.89	0.28	1.09	1.17
28	k_1	35.69	33.29	33.90	34.42
	k_2	34.65	34.83	35.29	34.18
	k_3	33.12	35.34	34.27	34.86
	极差	2.57	2.05	1.39	0.68
90	k_1	44.83	41.88	42.48	43.12
	k_2	43.05	42.15	43.74	41.68
	k_3	40.24	44.09	41.89	43.32
	极差	4.59	2.21	1.85	1.64

分析表 9 中不同龄期的极差可知，掺煤矸石粉对 7 和 90 d 抗折强度影响较大，与对不同龄期抗压强度的影响一致；掺粉煤灰和磷渣对 28 和 90 d 抗压强度影响较大；空白列对 7 d 抗压强度影响较大、说明煤矸石粉、粉煤灰、磷渣对早期抗压强度存在明显交互作用。

由表 9 可知，7 d 抗压强度的影响因素顺序为 A>D>C>B，煤矸石粉影响最大、交互作用影响次之，较优方案为 A1B2C1D3；28 d 抗压强度的影响因素顺序为 A>B>C>D，较优方案为 A1B3C2D3；90 d 抗压强度的影响因素顺序为 A>B>C>D，较优方案为 A1B3C2D3。综合考虑各因素对 7、28 及 90 d 抗压强度的影响，确定整体较优方案为 A1B3C2D3。

2.3 复合掺合料的活性指数和强度增长比

表 10 为复合掺合料活性指数和抗压强度增长比，表 11 为活性指数和抗压强度增长比极差分析。

表 10 活性指数及抗压强度增长比
Table 10 Activity index and compressive strength growth ratio

试件编号	7 d 活性指数 /%	28 d 活性指数 /%	90 d 抗压强度 增长比
1#	66.24	65.93	1.11
2#	66.77	71.21	1.03
3#	66.74	71.54	1.06
4#	64.53	67.50	1.07
5#	59.72	67.68	1.03
6#	62.56	67.47	1.06
7#	53.68	61.21	1.01
8#	59.82	64.81	1.02
9#	56.57	67.66	1.05

表 11 活性指数及抗压强度增长比的极差分析
Table 11 Range analysis of activity index and compressive strength growth ratio

指标	项目	因素			
		A	B	C	D
7 d 活性指数/%	k ₁	66.58	61.48	62.87	60.84
	k ₂	62.27	62.10	62.62	61.00
	k ₃	56.69	61.96	60.05	63.70
	极差	9.89	0.62	2.82	2.86
28 d 活性指数/%	k ₁	69.56	64.88	66.07	67.09
	k ₂	67.55	67.90	68.79	66.63
	k ₃	64.56	68.89	66.81	67.95
	极差	5.00	4.01	2.72	1.32
90 d 抗压强度 增长比	k ₁	1.07	1.06	1.06	1.06
	k ₂	1.05	1.03	1.05	1.03
	k ₃	1.03	1.05	1.03	1.05
	极差	0.04	0.03	0.03	0.03

由表 10 可知，1#、2#、3# 三组试件的 7 d 抗压

强度活性指数 $H \geq 65\%$ ，达到《规范》的普通Ⅲ级复合矿物掺合料指标要求；4#~9# 六组试件的 7 d 抗压强度活性指数 $H < 65\%$ ，不满足复合矿物掺合料任何等级的指标要求。2#、3# 二组试件的 28 d 抗压强度活性指数 $H \geq 70\%$ ，达到《规范》的普通Ⅲ级复合矿物掺合料指标要求；其余试件的 28 d 抗压强度活性指数 $H < 70\%$ ，均未达到复合矿物掺合料任何等级的指标要求。结合 7 和 28 d 抗压强度活性指数来看，2# 和 3# 试件达到《规范》的普通Ⅲ级复合矿物掺合料指标要求。由表 10 可见，受检胶砂 1#~9# 的抗压强度增长比都大于 0.95，全部达到《规范》抗压强度增长比的指标要求。

由表 11 可知，7 d 抗压强度活性指数的影响因素顺序为 A>D>C>B，较优方案为 A1B2C1D3；28 d 抗压强度活性指数的影响因素顺序为 A>B>C>D，较优方案为 A1B3C2D3。对比 7 和 28 d 活性指数的极差与不同龄期抗压强度的极差，发现两者影响因素和较优方案均一致。90 d 抗压强度增长比受因素 A 的影响较大，而因素 B、C、D 的影响程度相同，较优方案为 A1B1C1D1。综合考虑各因素对 7 和 28 d 抗压强度活性指数及 90 d 抗压强度增长比的影响，确定整体较优方案为 A1B3C2D3。

综上所述，2# (A1B2C2) 和 3# (A1B3C3) 试件的 7 和 28 d 活性指数及抗压强度增长比均达到《规范》的普通Ⅲ级复合矿物掺合料指标要求。综合对抗折强度、抗压强度、活性指数及抗压强度增长比分析而得的各整体较优方案，确定最优方案为 A1B3C2D3，即最终设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 10%，换算成 100% 后，配合比为煤矸石粉掺量 25%、粉煤灰掺量 62.5%、磷渣掺量 12.5%。

3 结论

(1) 煤矸石粉对 7 d 和 90 d 抗折强度影响较大，粉煤灰对 7 d 和 28 d 抗折强度影响较大，磷渣主要影响后期强度，空白列对 90 d 抗折强度影响较大，对水泥水化产生相互影响；分析各龄期抗折强度的极差，得整体较优设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 5%。

(2) 煤矸石粉对 7 d 和 90 d 抗压强度影响较大，与对不同龄期抗折强度的影响一致；(下转第 51 页)

(3) 熟石灰与煤气化灰渣混合料强度试验表明, 与未活化的煤气化灰渣相比, 活化后的煤气化灰渣与熟石灰混合物材料的净浆抗压强度可提高 140%~300%, 证明了活化技术的可行性。

(4) 熟石灰与活化煤气化灰渣混合料在碱激发条件下表现出地质聚合物特性, 在 3 mol/L 的碱溶液激发下, 熟石灰与活化煤气化灰渣比例为 2:3 时, 其强度最大, 28 d 抗压强度可达 14.43 MPa, 抗折强度达到 3.5 MPa, 是未活化的煤气化灰渣在水化反应下的抗折(压)强度的 12 倍。

参 考 文 献

- [1] GB 18599—2001, 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准[S].
- [2] LIU W, OUYANG Z Q, CAO X Y, NA Y J. The influence of air-stage method on flameless combustion of coal gasification fly ash with coal self-preheating technology [J]. Fuel, 2019, 235 (1): 1368-1376.
- [3] GEETA K, PRABU V. CO₂-air based two stage gasification of

low ash and high ash Indian coals in the context of underground coal gasification, Energy [J]. 2018, 143 (15): 822-832.

- [4] 李小宇, 李广宇, 许世森, 等. 液态排渣煤气化炉内灰渣的流动和换热研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (14): 12-17.
- [5] YE I, OH J, RYU C. Effects of design/operating parameters and physical properties on slag thickness and heat transfer during coal gasification [J]. Energies, 2015, 8 (5): 3370-3385.
- [6] 杨帅, 石立军. 煤气化细渣组分分析及其综合利用探讨 [J]. 煤化工, 2013, 41 (4): 29-31+38.
- [7] 方军良, 陆文雄, 徐彩宣. 粉煤灰的活性激发技术及机理研究进展 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2002 (3): 255-260.
- [8] LU GUANGHUA, BAI YONGHUI, LV PENG, et al. Insights into the role of calcium during coal gasification in the presence of silicon and aluminum [J]. Fuel, 2021, 302: 121134.
- [9] ZHOU SHANGKUN, WANG MENG, TAN HOUZHANG, et al. Evaluation of aluminum ash in alleviating the ash deposition of high-sodium and high-iron coal [J]. Fuel, 2020, 273: 117701.
- [10] JTG3420—2020, 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].

(上接第 21 页)

粉煤灰和磷渣对 28 d 和 90 d 抗压强度影响较大; 煤矸石粉、粉煤灰、磷渣对早期抗压强度存在明显交互作用; 分析各龄期抗压强度的极差, 得整体较优设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 10%。

(3) 设计配合比适宜时, 受检胶砂 7 d 和 28 d 活性指数及强度增长比均可达到 JG/T 486-2015《混凝土用复合掺合料》的普通 III 级复合矿物掺合料指标要求, 表明用机械活化煤矸石粉部分替代粉煤灰制备混凝土用复合矿物掺合料完全可行。

(4) 综合考虑各整体较优方案, 确定最优设计配合比为煤矸石粉掺量 20%、粉煤灰掺量 50%、磷渣掺量 10%, 换算成 100% 后配合比为煤矸石粉掺量 25.0%、粉煤灰掺量 62.5%、磷渣掺量 12.5%。

参 考 文 献

- [1] 刘应应. 谈混凝土掺合料应用的必要性[J]. 山西建筑, 2002 (3): 87-88.
- [2] 姜天华, 管建成, 张秀成. 超高性能混凝土掺合料应用综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (14): 5528-5538.
- [3] 王倩, 王丽花, 张豪. 污泥焚烧灰与粉煤灰混合后用作混凝土掺合料的研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (4): 73-75, 140.
- [4] 姚源, 王敏, 张凯峰, 等. 循环流化床固硫灰与磨细灰渣用作

混凝土掺合料的关键技术研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (2): 88-91.

- [5] 陈先明, 罗小平, 朱丹, 等. 辉绿岩人工砂中石粉作为碾压混凝土掺合料的试验研究[J]. 水力发电, 2020, 46 (1): 20-23.
- [6] 吴红, 徐立飞, 吴习, 等. 煤矸石活化的研究现状与展望[J]. 广州化工, 2017, 45 (1): 7-8, 43.
- [7] 金阳, 毋存粮, 陈小羊, 等. 自然煤矸石作矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2021 (9): 86-89, 93.
- [8] 白春, 麻凤海, 刘书贤, 等. 煅烧煤矸石粉掺合料制备及对混凝土性能影响[J]. 非金属矿, 2017, 40 (2): 38-41.
- [9] 任卫国. 超(亚)临界水热活化煤矸石制备白炭黑及其表面改性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [10] 李甫, 沈毅. 贵州省黄磷渣资源化利用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007 (4): 18-20.
- [11] 吴红, 卢香宇, 罗忠竞, 等. 活化煤矸石免烧砖制备及机理分析[J]. 非金属矿, 2018, 41 (1): 30-33.
- [12] 程光福. 超细砖粉和石粉对水泥粉煤灰砂浆性能影响的试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [13] 刘庆涛, 岑国平, 吴和盛, 等. 机场道面再生混凝土干缩性能研究与应用[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39 (1): 174-177.
- [14] 周梅, 沈梦阳, 吴景昊, 等. 煤矸石掺合料的制备及对混凝土碱-骨料反应影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (5): 1713-1717.
- [15] 杨秋宇, 景严谊, 张东生. 纤维及矿物掺合料对煤矸石混凝土力学性能的改性研究[J]. 功能材料, 2022, 53 (7): 7150-7156.