

粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能分析

Analysis of Mechanical Properties of Fly Ash - Steel Slag Fine Aggregate Concrete

王敬东¹, 詹新建²

(1. 浙江江南工程管理股份有限公司, 杭州 311100; 2. 海宁市中胜建材有限公司, 嘉兴 314422)

摘要: 为研究粉煤灰、钢渣细骨料对混凝土力学性能影响, 采用正交试验分析粉煤灰取代水泥率、钢渣取代河砂率、水灰比 3 种因素, 在 3 种不同水平下对混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折强度的影响规律。研究结果表明: 极差分析各因素对混凝土力学性能影响程度从高至低依次为钢渣取代率、粉煤灰取代率、水灰比; 方差分析认为钢渣取代率对混凝土力学性能存在显著相关性, 粉煤灰取代率与力学性能存在一定相关性, 水灰比对力学性能影响不敏感; 粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土三种力学指标随粉煤灰取代率、水胶比增加先增大后减小, 粉煤灰取代率为 20%、水灰比为 0.4 时力学性能最佳, 三种力学指标随钢渣取代率增加力学而增大, 且近似呈线性增长关系; 建议粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土最佳配合比粉煤灰取代率为 20%、钢渣细骨料取代率为 60%、水灰比为 0.4。研究成果可为钢渣混凝土配合比设计提供理论依据。

关键词: 混凝土; 钢渣细骨料; 粉煤灰; 水胶比; 正交试验; 力学性能

中图分类号: U528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0060-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.012

WANG Jingdong¹, ZHAN Xinjian²

(1. Zhejiang Jiangnan Project Management Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2. Haining Zhongsheng Building Materials Co., Ltd., Jiaxing 314422, China)

Abstract: In order to study the effect of fly ash and steel slag fine aggregate on the mechanical properties of concrete, orthogonal test was used to analyse the influence of three factors, namely, fly ash substitution rate of cement, steel slag substitution rate of river sand and water - cement ratio, on the compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete at three different levels. The research results show that the degree of influence of each factor on the mechanical properties of concrete by extreme variance analysis is steel slag substitution rate, fly ash substitution rate, and water - cement ratio in the order of high to low; analysis of variance suggests that there is a significant correlation between the substitution rate of steel slag on the mechanical properties of concrete, there is a certain correlation between the substitution rate of fly ash and the mechanical properties, and water - cement ratio is not sensitive to the influence of the mechanical properties; the three mechanical indexes of fly ash - steel slag fine aggregate concrete are different from the three different levels. Fly ash substitution rate, water - cement ratio increase first increased and then decreased, fly ash substitution rate of 20%, water - cement ratio of 0.4 when the mechanical properties of the best, the three mechanical indicators with the steel slag substitution rate increased mechanics and increase, and approximate linear growth relationship; suggested that the optimal ratio of fly ash - steel slag fine aggregate

作者简介: 王敬东 (1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 超长结构大体积混凝土施工相关, 跳仓法综合施工技术, 地理污水处理厂建设管理相关。

收稿日期: 2025-04-22

concrete mix fly ash substitution rate of 20% , 60% of steel slag fine aggregate substitution rate , water - cement ratio of 0.4. The research results can provide theoretical basis for the design of steel slag concrete proportion.

Key words: concrete; steel slag fine aggregate; fly ash; water cement ratio; orthogonal test; mechanical properties

0 引言

随着我国基础设施建设规模不断扩大，混凝土需求量不断攀升，同时天然河砂资源成本高昂且日益匮乏；在国家大力推动“碳中和”背景下，采用废弃钢渣制备细骨料部分取代河砂生产混凝土，即可实现固体废弃物资源化利用、保护环境，也具有良好的经济效益。

将钢渣用作骨料制备钢渣混凝土在工程界已得到广泛关注与研究，并取得了一定成果。贺希茂等^[1]采用正交试验分析了钢渣粗骨料掺量、细骨料掺量、砂率的变化对混凝土性能的影响，钢渣粗、细骨料掺量均为 20%，砂率为 0.38 时可制备 C40 强度混凝土；张忠哲等^[2]研究钢渣、河砂细骨料级配曲线对混凝土抗压强度的影响，认为增大钢渣细骨料细度模数可提高混凝土抗压强度；叶洪东等^[3]将未陈化钢渣替代粗集料碎石，研究了混凝土力学及抗冻性能变化规律，发现钢渣替代率为 50% 时性能最佳；朱建华等^[4]采用 10%、20%、30% 钢渣粉替代水泥，分析了对混凝土力学和耐久性变化规律；薛刚等^[5-6]建立钢渣粗、细骨料混凝土单轴受压分段式应力 - 应变本构模型，掺入钢渣骨料可提高混凝土的抗压强度，同时也提高了混凝土的脆性破坏特征；胡良鹏等^[7]研究了钢渣骨料粒径对透水混凝土抗压、劈裂抗拉强度影响，并采用 PFC 3D 软件分析了颗粒尺寸对混凝土破坏形态及过程的影响；王晨霞等^[8]进行钢渣粗骨料混凝土单轴受压试验，对不同钢渣粗骨料取代率时强度性能进行分析，混凝土峰值应力随取代率增加而增大，弹性模量受取代率的影响较小；王成刚等^[9]、樊俊江等^[10]研究了双掺钢渣粗骨料、细骨料时混凝土性能变化规律，提高粗、细骨料掺入比例可增强混凝土的力学性能，降低抗氯离子渗透性能及混凝土体积安定性能；王浩等^[11]制备 20% 钢渣取代率的细骨料泡沫混凝土，基于分形维数 D 建立抗压强度与孔隙率的关系式，可准确预测钢渣泡沫混凝土抗压强度。上述研究对钢

渣骨料混凝土应用起到了有利推动作用，但陈化不充分的钢渣骨料中存在游离氧化钙，对钢渣骨料混凝土体积安定性存在一定影响^[12-13]，易引起混凝土开裂降低混凝土强度；谢智超等^[14]通过聚合物防水砂浆、环氧树脂砂浆等防护措施抑制钢渣膨胀反应，发现不能根本上改善体积安定性；袁正国等^[15]根据钢渣水化膨胀模型，采用不同掺量、不同细度粉煤灰抑制 f-CaO 膨胀，取得了良好效果。

综上所述，钢渣细骨料相比天然河砂骨料混凝土可提高混凝土力学性能，但存在体积安定性风险，粉煤灰可在一定程度抑制钢渣膨胀效应，但当前对粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能的研究较少。拟采用室内试验，基于正交试验分析方法，研究粉煤灰取代水泥、钢渣取代河砂细骨料、水灰比三种因素对粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能影响的规律，旨在找出粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能最佳的配合比方案。

1 试验部分

1.1 试验材料

水泥采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥，强度等级 C35；粉煤灰采用 I 级粉煤灰，密度 2.36 g/cm³，细度 8.6%，平均粒径 19.8 μm，比表面积 648 m²/kg，烧失量 4.2%；钢渣细骨料采用陈化不小于 1 年钢渣，钢渣、粉煤灰主要化学成分见表 1；将钢渣采用颚式破碎机破碎后筛分，剔除大于 4.75 mm，细度模数 2.82，为中砂；天然细骨料采用河砂，细度模数 2.89，为中砂；钢渣、河砂细骨料颗粒级配曲线如图 1 所示，符合连续级配要求。粗骨料采用本地中风化石灰岩机械碎石，粒径 4.75 ~ 26.5 mm，级配良好；试验用水采用洁净自来水，减水剂为聚羧酸高效减水剂。

表 1 粉煤灰、钢渣主要化学成分

Table 1 Fly ash, steel slag main chemical composition /%

化学成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O
粉煤灰	4.75	34.62	51.41	2.71	0.44	0.49	1.63
钢渣	17.83	3.34	16.16	42.79	0.27	4.23	0.42

材料科学

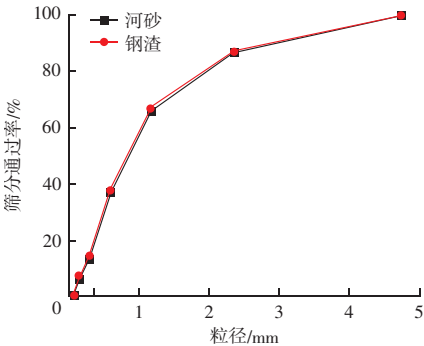


图1 钢渣、河砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of steel slag and river sand

1.2 试验配合比

为系统分析粉煤灰、钢渣粉、水灰比对混凝土力学性能的影响，选用三因素三水平正交设计表，减水剂掺量为胶凝材料质量的1%。试验因素及水平见表2，混凝土配合比见表3。

表2 试验因素及水平
Table 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	A 粉煤灰取代率/%	B 钢渣取代率/%	C 水灰比
1	10	20	0.35
2	20	40	0.40
3	30	60	0.45

表3 混凝土配合比
Table 3 Concrete mix ratio / (kg/m³)

正交组合	水泥	粉煤灰	钢渣	河砂	碎石	水
A1B1C1	432	48	145.2	580.8	1 124	168
A1B2C2	432	48	290.4	435.6	1 124	192
A1B3C3	432	48	435.6	290.4	1 124	216
A2B1C2	384	96	145.2	580.8	1 124	192
A2B2C3	384	96	290.4	435.6	1 124	216
A2B3C1	384	96	435.6	290.4	1 124	168
A3B1C3	336	144	145.2	580.8	1 124	216
A3B2C1	336	144	290.4	435.6	1 124	168
A3B3C2	336	144	435.6	290.4	1 124	192

1.3 试验方法

将水泥、粉煤灰、天然骨料加入强制式搅拌机中混合搅拌1 min，放入钢渣细骨料搅拌30 s，加入80%质量的水，缓慢搅拌1 min，使其混合均匀，最后加入减水剂和剩余的水，搅拌2 min。将搅拌完成的混合料倒入模具中，放置于振动台振捣密实，将试件表面抹平，采用保鲜膜覆盖；室温下放置24 h后拆模，将试块放置于温度(20±1)℃、相对湿度≥95%的标准养护室中养护28 d。

根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能

试验方法标准》规定进行混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折强度测试。抗压强度试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm立方体试件，每组试验3个试件；劈裂抗拉强度试验采用直径100 mm、高度200 mm圆柱体试件，每组试验3个试件；抗折强度采用150 mm×150 mm×550 mm棱柱体试件，采用三点弯曲试验，每组试验3个试件；试件养护龄期均为28 d，采用YAW-3000B压力机进行力学性能试验。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

采用极差分析法对试验数据进行分析，由图2可知，随粉煤灰取代率、水灰比两因素增加，混凝土抗压强度先增大后减小；混凝土抗压强度随钢渣取代率增加而增大；钢渣取代率越大，抗压强度增长越快；由极差结果 R_j 可知，各因素对28 d龄期抗压强度影响程度从高至低依次为钢渣取代率>粉煤灰取代率>水灰比，钢渣取代率极差值超出粉煤灰取代率极差值2倍，超出水灰比极差值3倍，说明增大钢渣细骨料取代率，对提升抗压强度最为显著。根据各因素对混凝土抗压强度影响程度，可得出粉煤灰-钢渣细骨料混凝土最佳抗压强度的配比为A2B3C2。

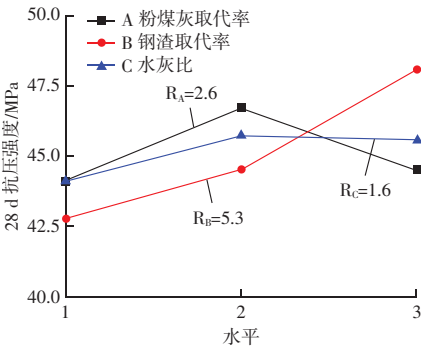


图2 各因素水平对抗压强度影响
Fig. 2 The influence of various factors on compressive strength

与钢渣取代河砂率为20%相比，取代率为40%、60%时，抗压强度分别增加4.1%、12.4%，可见抗压强度增幅随钢渣掺量增加而增大；与粉煤灰取代水泥率为10%相比，取代率为20%、30%时，抗压强度分别增加5.9%、0.9%，过大粉煤灰掺量不利于提高混凝土抗压强度；适宜水灰比有助于提高胶凝材料水化反应程度，提高水泥浆体与骨料之间的

胶结性能，过大水灰比时多余水分将赋存于混凝土中，增大了结构的孔隙率，由此降低了混凝土抗压强度。

混凝土 28 d 龄期抗压强度方差分析结构见表 4，因素 B 钢渣取代率的 F 值为 19.97 > 19，因素 A 粉煤灰取代率、因素 C 水灰比的 F 值均 < 19，说明钢渣取代细骨料对抗压强度存在显著相关性，可信度最大，A、C 两种因素对抗压强度影响不敏感。

表 4 抗压强度方差分析
Table 4 Anova for compressive strength

因素	平方和	自由度	均方差	F 值	F _{0.05} (2, 2)
因素 A	11.77	2.00	5.88	5.40	19
因素 B	43.57	2.00	21.78	19.97	
因素 C	4.85	2.00	2.43	2.22	
误差	2.18	2.00	1.09		

2.2 劈裂抗拉强度

对 28 d 龄期混凝土劈裂抗拉强度结果进行极差分析，由图 3 可知，随粉煤灰取代率、水灰比增加，混凝土劈裂抗拉强度先增大后减小；随钢渣取代率增加而增大，钢渣取代率与劈裂抗拉强度近似呈线性增长关系；由极差结果 R_i 可知，各因素对 28 d 龄期劈裂抗拉强度影响程度从高至低依次为钢渣取代率 > 粉煤灰取代率 > 水灰比，钢渣取代率极差值约为粉煤灰取代率极差值 1.5 倍，约为水灰比极差值 2.9 倍，表明增大钢渣细骨料掺量，对提升劈裂抗拉强度最为显著，水灰比相比对劈裂抗拉强度影响较弱。根据各因素对混凝土劈裂抗拉强度影响程度，可得出粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土最佳劈裂强度的配比同样为 A2B3C2。

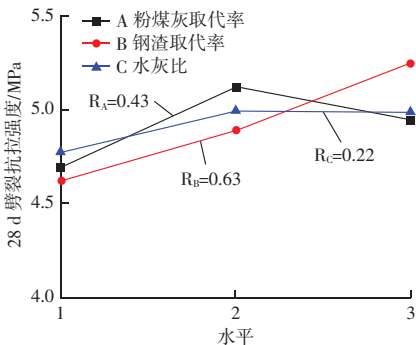


图 3 各因素水平对劈裂抗拉强度影响

Fig. 3 Effect of various factors on splitting tensile strength

与钢渣取代河砂率为 20% 相比，取代率为 40%、60% 时，劈裂抗拉强度分别增加 5.8%、13.6%；与粉煤灰取代水泥率为 10% 相比，取代率为 20%、

30% 时，抗压强度分别增加 9.2%、5.4%，掺入粉煤灰可提高混凝土的劈裂抗拉强度，取代水泥量为 20% 时效果最佳；粉煤灰活性低于水泥，部分取代水泥后可减小早期水化放热量，降低温度裂缝风险，同时粉煤灰中活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应，生成 N-A-S-H 凝胶，增强胶凝材料与骨料的胶结强度；但大掺量粉煤灰时因水泥掺量不足导致长期强度增长有限，进而影响混凝土的劈裂抗拉强度。与水灰比为 0.35 相比，水灰比为 0.40、0.45 时，劈裂抗拉强度分别增加 3.7%、3.3%，说明增大水灰比对混凝土劈裂抗拉强度影响较小。

混凝土 28 d 龄期劈裂抗拉强度方差分析结果见表 5，因素 B 钢渣取代率的 F 值为 23.04 > 19，因素 A 粉煤灰取代率、因素 C 水灰比的 F 值均 < 19，且因素 A 的 F 值大于因素 C，这与极差分析结果相同；说明钢渣取代细骨料对劈裂抗拉强度存在显著相关性，可信度最大，因素 A 粉煤灰取代率的 F 值为 10.88，对混凝土劈裂抗拉强度存在一定相关性，因素 C 结果较小，对劈裂抗拉强度影响不敏感。

表 5 劈裂抗拉强度方差分析
Table 5 Analysis of variance for split tensile strength

因素	平方和	自由度	均方差	F 值	F _{0.05} (2, 2)
因素 A	0.28	2.00	0.14	10.88	19
因素 B	0.59	2.00	0.30	23.04	
因素 C	0.09	2.00	0.05	3.65	
误差	0.03	2.00	0.01		

2.3 抗折强度

对 28 d 龄期混凝土抗折强度结果进行极差分析，由图 4 可知，随粉煤灰取代率、水灰比两因素增加，混凝土抗折强度先增大后减小，粉煤灰掺量为 20%、水灰比为 0.40 时抗折强度最大，水灰比为 0.45 时抗折强度最小；随钢渣取代率增加抗折强度而增大，两者近似呈线性增长关系；由极差结果 R_i 可知，各因素对 28 d 龄期抗折强度影响程度从高至低依次为钢渣取代率 > 粉煤灰取代率 > 水灰比，表明增大钢渣细骨料掺量对提升抗折强度最为显著。根据各因素对混凝土抗折强度影响程度，可得出粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土最佳抗折强度的配比为 A2B3C2。

与钢渣取代河砂率为 20% 相比，取代率为 40%、60% 时，抗折强度分别增加 6.2%、13.9%；钢渣骨料增强混凝土抗折强度机理与劈裂抗拉强度类似，

材料科学

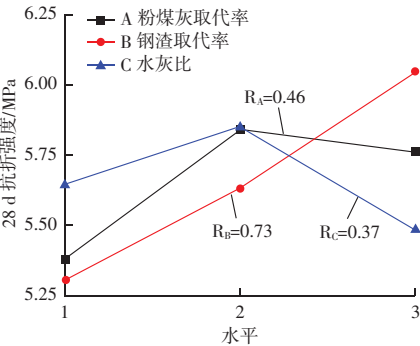


图 4 各因素水平对抗折强度影响

Fig. 4 The effect of various factors on flexural strength

掺入钢渣可提高胶凝材料与骨料之间的黏结力，进而可提高混凝土的韧性和抗断裂能力。与粉煤灰取代水泥率为 10% 相比，取代率为 20%、30% 时，抗压强度分别增加 8.6%、7.1%，粉煤灰掺量在 20%~30% 时对混凝土抗折强度影响不大。与水灰比为 0.35 相比，水灰比为 0.40、0.45 时，抗折强度分别增加 3.6%、-2.8%，说明增大水灰比对混凝土抗折强度影响较大，大水灰比时未参与水化反应水分蒸发后形成毛细孔，提高了结构体孔隙率，易形成弯曲变形下裂缝诱发薄弱点，削弱了混凝土结构抗折强度。

28 d 龄期混凝土抗折强度方差分析结果见表 6，因素 B 钢渣取代率的 F 值为 25.5 > 19，因素 A 粉煤灰取代率、因素 C 水灰比的 F 值均 < 19，且因素 A 的 F 值大于因素 C，这与极差分析结果相同；说明钢渣取代细骨料对抗折强度存在显著相关性，可信度最大，因素 A 粉煤灰取代率的 F 值为 11.37，相对混凝土抗折强度存在一定相关性，因素 C 结果相比最小，同比对抗折强度影响敏感性一般。

表 6 抗折强度方差分析

Table 6 Analysis of variance for flexural strength

因素	平方和	自由度	均方差	F 值	F _{0.05} (2, 2)
因素 A	0.37	2.00	0.18	11.37	19
因素 B	0.83	2.00	0.41	25.50	
因素 C	0.20	2.00	0.10	6.27	
误差	0.03	2.00	0.02		

3 结论

为推动废弃钢渣在建筑工程中合理化应用，采用废弃钢渣制备钢渣细骨料，选取粉煤灰取代水泥率、钢渣取代河砂率、水灰比三种因素，采用正交试验方法分析粉煤灰、钢渣细骨料、水灰比对粉煤

灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能的影响规律，得出以下结论：

(1) 粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学强度随粉煤灰取代水泥量、水灰比增加，呈先增大后减小趋势，粉煤灰取代率为 20%、水灰比为 0.40 时力学性能最佳；粉煤灰取代率为 30% 时力学性能降低，但仍大于 10% 粉煤灰取代率；水灰比增加至 0.45 时，抗压强度、劈裂抗拉强度仅略有降低，抗折强度降幅最大，已小于水灰比为 0.35 试件组。

(2) 粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学强度随钢渣细骨料取代河砂量增加而增大，抗压强度增幅随取代率增加而增大，劈裂抗拉强度、抗折强度与钢渣取代率近似呈线性增长关系。

(3) 粉煤灰、钢渣细骨料、水灰比均对粉煤灰 - 钢渣细骨料混凝土力学性能均在一定影响，极差分析显示，28 d 龄期混凝土力学性能影响程度从高至低依次为钢渣取代率、粉煤灰取代率、水灰比；方差分析结果显示，钢渣取代率对混凝土力学性能影响存在显著相关性，粉煤灰取代率对混凝土力学性能影响存在一定相关性，水灰比对混凝土力学性能影响不敏感。

(4) 根据粉煤灰、钢渣细骨料、水灰比 3 种因素对混凝土力学性能影响规律，力学性能最佳的配合比建议为粉煤灰取代率为 20%、钢渣细骨料取代率为 60%、水灰比为 0.40。

参 考 文 献

[1] 贺希茂, 葛序尧, 张波. 钢渣骨料混凝土基本力学性能研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (3): 37-43.

[2] 张忠哲, 薛繁龙, 吴阴星, 等. 钢渣细骨料级配混凝土抗压强度影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (1): 61-66.

[3] 叶洪东, 何育鹏, 朱立华. 未陈化钢渣粗集料用于混凝土的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (6): 54-59.

[4] 朱建华, 王道领, 柴广灿. 钢渣粉掺量对混凝土力学性能及耐久性能影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 97-101.

[5] 薛刚, 付乾, 周海峰, 等. 钢渣细骨料混凝土单轴受压应力 - 应变关系试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (6): 1165-1174.

[6] 薛刚, 赵玉杰, 周海峰, 等. 钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力 - 应变关系试验研究 [J]. 工程力学, 2022, 39 (5): 86-95.

- Journal of thermal analysis, 1989, 35 (2): 429-441.
- [4] MASI G, RICKARD W, BIGNOZZI M, et al. The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 76: 218-228.
- [5] SANJAYAN J G, NAZARI A, CHEN L, et al. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 236-244.
- [6] MENNA C, ASPRONE D, FERONE C, et al. Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45 (1): 1667-1676.
- [7] BAI T, SONG Z, WANG H, et al. Performance evaluation of metakaolin geopolymer modified by different solid wastes [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 114-121.
- [8] 唐力军, 刘卫东, 陈凯伦. 超细活性粉煤灰对碱激发矿渣体系的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 92-97.
- [9] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58-66.
- [10] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (3): 74-84.
- [11] 梁永宸, 石膏爽, 张聪, 等. 粉煤灰地聚物混凝土性能与环境影响的综合评价 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 82-87.
- [12] 方明伟, 王丹, 周枫桃, 等. 碱激发剂对粉煤灰地聚物混凝土的性能影响 [J]. 功能材料, 2023, 54 (11): 11170-11176.
- [13] 刘刚, 丁明巍, 刘金军, 等. 碱激发矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物水化行为和力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (6): 2106-2114.
- [14] 原元, 赵人达, 占玉林, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (6): 1275-1282.
- [15] 姜天华, 莫定聪, 万聪聪, 等. 玄武岩橡胶混凝土基本力学性能及受压应力-应变曲线 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4063-4071, 4121.
- [16] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 31-35.

(上接第 64 页)

- [7] 胡良鹏, 陈徐东, 朱祥意, 等. 不同骨料粒径钢渣透水混凝土力学性能分析及离散元模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 69-75, 132.
- [8] 王晨霞, 刘军, 曹芙波, 等. 钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (6): 1096-1103.
- [9] 王成刚, 刘耀伟, 王帅, 等. 钢渣双掺混凝土力学与耐久性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2846-2855.
- [10] 樊俊江, 於林锋, 王林. 钢渣骨料水工生态框混凝土制备方法 & 性能研究 [J]. 金属矿山, 2022 (1): 28-34.
- [11] 王浩, 项国圣, 李华健. 钢渣细骨料泡沫混凝土制备及抗压强度计算 [J]. 混凝土, 2024 (3): 171-176, 181.
- [12] 叶雁飞, 马伟克, 申振伟, 等. 钢渣对混凝土安定性的影响及评价 [J]. 化工矿物与加工, 2024, 53 (2): 40-46.
- [13] 房延凤, 王淦宁, 佟钰, 等. 碳酸化预处理对钢渣-水泥复合胶凝材料体积安定性及水化活性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (3): 1001-1007.
- [14] 谢智超, 汪保印, 蒋正武. 钢渣骨料混凝土体积安定性及其抑制效果评价 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (10): 1077-1085.
- [15] 袁正国, 陶智忠. 基于水化特性的钢渣膨胀抑制机理研究 [J]. 金属矿山, 2025 (2): 263-269.