

矿物掺合料对机制砂混凝土性能影响的研究

Study on the Influence of Mineral Admixtures on the Performance of Manufactured Sand Concrete

王 鑫, 易越磊, 孙茂山

(中国轻工业武汉设计工程有限责任公司, 武汉 430060)

摘 要: 为改善机制砂混凝土的性能并推广其应用, 采用单掺和复掺粉煤灰与钢渣粉的方式, 研究了掺合料掺量对机制砂混凝土坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度的影响, 及最优掺合料配合比机制砂混凝土的微观结构机理。结果表明: 单掺粉煤灰或钢渣粉时, 机制砂混凝土的坍落度随掺合料掺量增加先升高后降低; 机制砂混凝土早期 (3、7 d) 抗压强度随粉煤灰掺量的增加逐渐降低, 随钢渣粉掺量的增加先增加后降低; 单掺粉煤灰和钢渣粉分别为 5% 和 10% 时, 机制砂混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度达到最佳; 两者复掺时, 最优掺合料配合比机制砂混凝土的 28 d 抗压、劈裂抗拉强度分别为 62.4、2.0 MPa, 较基准组混凝土分别提升 11.2%、5.3%。单掺适量的钢渣粉或粉煤灰可有效改善机制砂混凝土微观结构, 提升其密实度与力学性能; 当两者复掺时, 优化效应叠加, 进一步增强机制砂混凝土性能。研究成果为机制砂混凝土的工程应用提供了理论依据。

关键词: 混凝土; 粉煤灰; 钢渣粉; 工作性能; 力学性能

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0023-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.005

WANG Xin, YI Yuelei, SUN Maoshan

(China Light Industry Wuhan Design Engineering Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: To enhance the performance and promote the application of manufactured sand concrete, this study employed single and composite incorporation of fly ash and steel slag powder to investigate the effects of admixture content on the slump, compressive strength, and splitting tensile strength of manufactured sand concrete, as well as the microstructural mechanism of the optimal mixture proportion. The results indicate that when fly ash or steel slag powder was incorporated individually, the slump of manufactured sand concrete initially increased and then decreased with increasing admixture content. The early-age (3, 7 d) compressive strength of manufactured sand concrete gradually decreased with higher fly ash content, while it first increased and then decreased with increasing steel slag powder content. The optimal compressive and splitting tensile strengths were achieved at single incorporation rates of 5% for fly ash and 10% for steel slag powder, respectively. Under composite incorporation, the 28 d compressive and splitting tensile strengths of the optimized manufactured sand concrete reached 62.4 and 2.0 MPa, representing improvements of 11.2% and 5.3%, respectively, compared to the reference group. The incorporation of an appropriate amount of steel slag powder or fly ash alone effectively refined the microstructure of manufactured sand concrete, enhancing its compactness and mechanical properties. When both were used together, their optimizing effects synergized, further improving the performance of manufactured sand concrete. This research provides a theoretical foundation for

材料科学

the engineering application of manufactured sand concrete.

Key words: concrete; fly ash; steel slagpowder; working performance; mechanical property

0 引言

水泥基混凝土材料性能优良、成本低廉，被广泛用于各大工程领域^[1-2]。然而，水泥工业的生产对环境污染严重，天然河砂的过度开采导致其资源日益匮乏^[3]。因此，寻找新型材料替代天然河砂和降低水泥用量的研究已经迫在眉睫。

机制砂是指岩石、尾矿或废渣经机械破碎后，粒径小于 4.75 mm 的颗粒。它具有来源广泛、生产周期短、资源丰富等优点，可作为天然砂的有效替代品。因此，大量的国内外学者开展了机制砂混凝土配比及力学性能试验。部分研究发现，因机制砂表面粗糙，细度模数大，级配不均匀，易导致混凝土工作性能差，出现离析、泌水现象；并且机制砂混凝土还存在孔隙率高，力学性能差等问题^[4-5]。然而，部分研究指出掺入适量的矿物掺合料可有效改善胶凝体系的颗粒级配，显著提高机制砂混凝土的工作性能和力学性能^[6-11]。常见矿物掺合料，如粉煤灰、矿粉、钢渣粉和硅灰等颗粒细小，具有优异的火山灰效应，可充当辅助性胶凝材料。Tangadagi 等^[12]研究了复掺矿渣粉和铝粉对机制砂混凝土和易性的影响，研究指出适量的掺合料可有效改善机制砂混凝土黏聚性、保水性和流动性。李永鑫^[13]研究了复掺 30%~40% 的钢渣粉和矿渣粉对混凝土性能的影响，结果表明复掺矿物掺合料弥补了混凝土的初始缺陷，优化了混凝土的内部微观结构，提高了混凝土的密实度。孙家瑛等^[14]和刘业金等^[15]研究了不同掺量的钢渣粉对混凝土力学性能和稳定性的影响，研究指出较大掺量的钢渣粉对混凝土强度产生负面影响，并且过量的钢渣粉降低了混凝土稳定性。Celik 等^[16]基于多相掺合料间的超叠加效应，研究了复掺掺合料对机制砂混凝土宏观性能的影响，但忽略了掺合料对机制砂混凝土微观结构及产物的影响机理。

综上所述，尽管国内外学者对机制砂混凝土的配比与性能已开展了大量研究，但针对粉煤灰、钢渣粉的单掺与复掺对其工作性能和力学性能的影响

仍缺乏系统性研究，且相关作用机理尚不明确。因此，采用单掺和复掺粉煤灰、钢渣粉的方式，研究掺合料掺量对机制砂混凝土坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度的影响，并采用扫描电镜（SEM）技术，分析最优掺合料配合比制备的机制砂混凝土微观结构机理，为机制砂混凝土的大量工程应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥；粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰，细度模数小于 20%；钢渣粉为转炉钢渣粉。水泥和掺合料化学成分见表 1。细骨料为机制砂，粒径小于 4.75 mm，细度模数 2.8；粗骨料为玄武岩连续级配碎石，粒径为 5~25 mm。减水剂为复配型高效聚羧酸减水剂，减水率为 25%~27%。

表 1 原材料的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of raw materials

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
水泥	3.96	5.15	61.71	4.46	3.96	4.46	1.19
粉煤灰	40.79	36.75	2.23	3.23	1.40	0.34	0.93
钢渣粉	21.61	8.88	29.85	22.97	0.70	0.57	—

1.2 试验配合比

以机制砂替代天然砂，粉煤灰、钢渣粉替代部分水泥制备混凝土试件，其配合比见表 2。其中，JZ 基准组混凝土强度等级为 C50，F5、F10、F20 分别表示粉煤灰掺量为 5%、10%、20%，G5、G10、G20 分别表示钢渣粉掺量为 5%、10%、20%，F3G7、

表 2 试验配合比
Table 2 Test mix ratio

试验 编号	原材料配比/（kg/m ³ ）						减水剂 /%
	水泥	粉煤灰	钢渣粉	砂	石子	水	
JZ	432			855	1 002	160	2
F5	410.4	21.6		855	1 002	160	2
F10	388.8	43.2		855	1 002	160	2
F20	345.6	86.4		855	1 002	160	2
G5	410.4		21.6	855	1 002	160	2
G10	388.8		43.2	855	1 002	160	2
G20	345.6		86.4	855	1 002	160	2
F3G7	345.6	21.6	64.8	832	1 017	170	2
F5G5	345.6	43.2	43.2	832	1 017	170	2
F7G3	345.6	64.8	21.6	832	1 017	170	2

F5G5、F7G3 分别表示粉煤灰、钢渣粉复掺 3%~7%。

1.3 试件制备与试验方法

将原材料按配合比称量, 倒入混凝土搅拌机搅拌均匀, 将拌合物倒入模具中, 并置于混凝土振动平台上振动密实, 振动时间为 15 s。试件成型 24 h 后拆模, 移至室内自然养护至 3、7、28 d。

参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[17] 开展机制砂混凝土坍落度试验。参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[18] 开展机制砂混凝土压缩和劈裂拉伸试验。采用 RMT—301 岩石与混凝土测试系统, 测试机制砂混凝土各龄期抗压强度和劈裂抗拉强度。采用德国 ZEISS Gemini SEM 300 电子显微镜 (SEM) 观察机制砂混凝土的微观形貌, 加速电压为 20 kV。

2 试验结果与分析

2.1 掺合料对混凝土坍落度的影响

由于机制砂的材料特性, 混凝土的工作性能差, 且易出现离析、泌水现象。单掺和复掺粉煤灰、钢渣粉对机制砂混凝土工作性能的影响结果如图 1 所示。

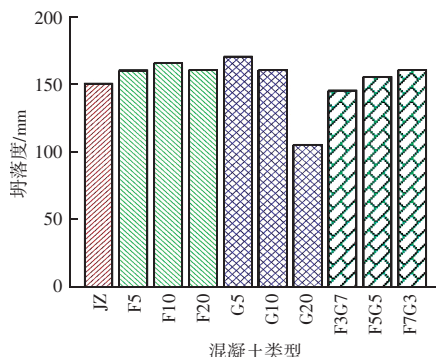


图 1 掺合料对混凝土坍落度的影响

Fig. 1 Influence of admixture on slump of concrete

由图 1 可知, 粉煤灰和钢渣粉的掺入对机制砂混凝土的坍落度影响显著。单掺粉煤灰或钢渣粉时, 混凝土的坍落度随着掺合料掺量的增加呈现先增加后降低的趋势。两者掺量分别为 10%、5% 时, 机制砂混凝土的坍落度达到峰值, 分别为 165、170 mm, 较基准组混凝土坍落度 150 mm 分别提升 10.0%、13.3%。但当钢渣粉掺量为 20% 时, 机制砂混凝土坍落度降至 105 mm, 较基准组降低 30.0%。复掺粉煤灰和钢渣粉时, 随着粉煤灰掺量的增加, 混凝土坍落度逐渐提高。结果表明, 适量的掺合料单掺或

复掺均可有效改善机制砂混凝土坍落度。主要原因是粉煤灰和钢渣粉颗粒细小, 具有优异的形态效应。适量掺入时可起到稀释、分散水泥颗粒作用, 并且能够起到润滑和减小混凝土内部各组分间摩擦作用。此外, 掺入适量的掺合料能够降低胶凝材料的需水量, 起到减水剂的作用, 从而增大了混凝土坍落度和流动性; 但粉煤灰和钢渣粉掺入过量时, 则会增加体系水化的需水性, 导致浆体黏稠, 混凝土坍落度降低, 和易性变差。

2.2 掺合料对混凝土力学性能的影响

2.2.1 单掺粉煤灰

粉煤灰掺量为 5%、10%、20% 的机制砂混凝土抗压、劈裂抗拉强度结果如图 2 所示。

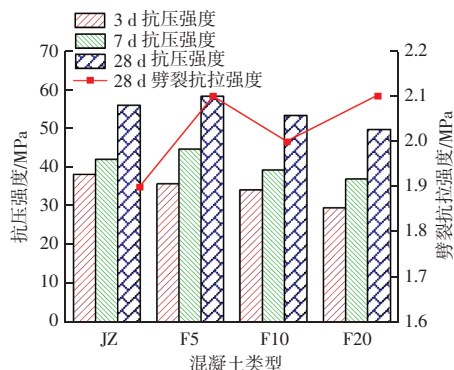


图 2 粉煤灰单掺对混凝土强度的影响

Fig. 2 Influence of single mixing of fly ash on strength of concrete

掺入粉煤灰对机制砂混凝土抗压、劈裂抗拉强度有明显影响。随粉煤灰掺量的增加, 机制砂混凝土 3 d 抗压强度逐渐降低, 7、28 d 抗压强度呈先增加后降低的趋势。当粉煤灰掺量为 5% 时, 混凝土 3 d 抗压强度为 35.8 MPa, 较基准组混凝土抗压强度 38.2 MPa 降低 6.3%; 当粉煤灰掺量增加到 20% 时, 混凝土 3 d 抗压强度降低至 29.6 MPa, 降幅最大, 为 29.1%。随着水化反应的进行, 粉煤灰掺量为 5% 的机制砂混凝土 28 d 抗压和劈裂抗拉强度分别为 58.4、2.1 MPa, 较基准组 28 d 抗压、劈裂抗拉强度 56.1、1.9 MPa 分别提升 4.1%、10.5%。结果表明, 掺入粉煤灰延缓了机制砂混凝土早期强度的提升, 并且掺量越高影响越显著, 但适量的粉煤灰可有效提升混凝土的后期强度。主要原因是粉煤灰的掺入降低了体系中水泥的掺量, 从而延缓了早期水化产物的形成, 降低了混凝土早期抗压强度。粉煤灰因颗粒

材料科学

细小,具有优异的火山灰效应。适量掺入时,它不仅能够消耗水泥水化体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,降低因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富集而产生裂缝和孔隙的风险,还能够水化生成致密的 C-S-H 凝胶,填充混凝土内部孔隙,提高密实度,从而提升混凝土的后期强度。当粉煤灰掺入过量时,易导致体系水泥掺量降低,体系充分水化的需水量增加。因此,固定水灰比情况下混凝土强度大幅度降低。

2.2.2 单掺钢渣粉

钢渣粉掺量为 5%、10%、20% 机制砂混凝土各龄期抗压、劈裂抗拉强度结果如图 3 所示。

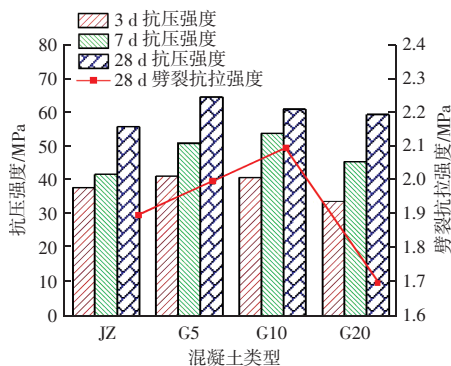


图3 钢渣粉单掺对混凝土强度的影响

Fig. 3 Influence of single mixing of steel slag powder on strength of concrete

由图 3 可知,钢渣粉的掺入对混凝土早期抗压、劈裂抗拉强度的影响明显。随钢渣粉掺量的增加,机制砂混凝土的抗压和劈裂抗拉强度呈先增加后降低的趋势。与基准组混凝土抗压强度相比,当钢渣粉掺量为 10% 时,混凝土 3、28 d 抗压强度分别为 41.1、64.9 MPa,最大增幅分别为 7.6%、15.7%;混凝土 28 d 劈裂抗拉强度达到最大值 2.1 MPa,较基准组提升 4.1%。当钢渣粉掺量增加到 20% 时,混凝土 3 d 抗压强度为 34.1 MPa,较基准组降低 10.7%;混凝土 28 d 抗压强度为 59.7 MPa,较基准组强度提升 6.4%。结果表明掺入适量的钢渣粉可有效改善机制砂混凝土的抗压和劈裂抗拉强度,钢渣粉过量时会导致混凝土早期强度的降低。主要原因是在混凝土内掺入适量的钢渣粉可起到填充和胶凝作用,这种作用不仅能够改善胶凝体系颗粒级配,填充混凝土结构的微观孔隙,提高混凝土密实度,而且能够消耗体系富余的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成致密的 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶,进一步提升混凝土的密实度,

从而提高了混凝土的力学性能。当掺入钢渣粉过量时,降低了体系水泥的掺量,延缓了早期胶凝体系水化产物的生成,导致机制砂混凝土早期强度降低。

2.2.3 复掺粉煤灰和钢渣粉

图 4 为复掺粉煤灰和矿渣粉(复掺为总量的 10%,比例为 3:7、5:5、3:7)的机制砂混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度结果。

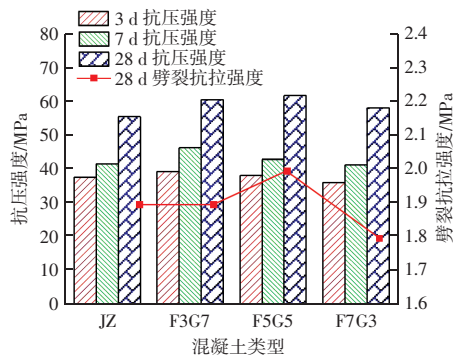


图4 粉煤灰、钢渣粉复掺对混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of fly ash and steel slag compressive strength of concrete

由图 4 可知,复掺适量的粉煤灰和钢渣粉时,可有效降低单掺粉煤灰对混凝土早期强度产生的不利影响,并且可大幅度提升混凝土的后期强度。当复掺粉煤灰和矿渣粉比例为 5:5 时(F5G5),机制砂混凝土的 3 d 抗压强度为 38.6 MPa,较基准组提升 1.1%,较单掺 10% 粉煤灰的机制砂混凝土提升 12.5%。此外, F5G5 组混凝土 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度达到峰值 62.4、2.0 MPa,较基准组(56.1、1.9 MPa)分别提升 11.2%、5.3%。这是因为钢渣粉含有大量的 Al_2O_3 和 CaO ,有利于混凝土早期钙矾石的生成,削弱粉煤灰掺入对混凝土强度产生的不利影响。此外,复掺适量的粉煤灰和钢渣粉易产生叠加效应,不仅能够有效改善机制砂混凝土胶凝体系的颗粒级配,填充了混凝土内部孔隙,而且掺合料之间梯度水化,生成致密的水化产物,各水化产物之间相互填充、搭接,进一步提升混凝土密实度,从而提升机制砂混凝土力学性能。

2.3 混凝土微观形貌及机理分析

图 5 为 JZ 组、F5 组、G10 组及 F5G5 组机制砂混凝土试件养护 28 d 的微观结构及产物形貌。由图 5 (a) 可知, JZ 组混凝土内部存在大量的针棒状钙矾石(Aft)和絮状水化硅酸钙凝胶(C-S-H)等

水化产物, 各水化产物之间相互搭接, 填充密实, 呈空间网状结构。此外, 混凝土内部存在大量的孔洞、微裂缝以及少量板状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 易对混凝土的力学性能产生不利影响。由图 5 (b) 和图 5 (c) 可知, 掺入适量的粉煤灰或矿渣粉可有效改善机制砂混凝土的内部微观形貌。掺入粉煤灰时, 混凝土内部主要为絮状 C-S-H 凝胶和部分未反应的球状粉煤灰颗粒, 两者紧密包裹在一起, 并且混凝土内部未发现明显 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。这是因为掺入适量的粉煤灰可填充混凝土内部孔隙, 消耗富集的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体; 并且粉煤灰水化能够生成致密的 C-S-H 凝胶, 提升各组分之间的黏结性能, 优化界面过渡区, 从而增加混凝土的致密性。同理, 掺入钢渣粉, 混凝土内部同样含有大量的致密性水化产物, 但较单掺粉煤灰时混凝土内钙矾石晶体的含量有所增加。主要原因是钢渣粉含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 , 水化反应时, 钢渣粉在碱性条件下可生成一定量的 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶, 并且各水化产物之间相互搭接紧密, 提升了混凝土的密实度。此外, 钢渣粉内大量的 Al_2O_3 和 CaO 也促进了钙矾石晶体的大量形成。由图 5 (d) 可知, 复掺适量粉煤灰和钢渣粉时, 机制砂混凝土内部水化产物凝胶联结成团, 较为密实, 并且未见明显裂缝。这是因为两者复掺时, 掺合料之间易产生叠加效应。这种效应不仅有效改善了机制砂混凝土胶凝体系的颗粒级配, 填充

了混凝土内部孔隙, 而且掺合料水化生成致密的水化产物紧紧附着在集料表面, 使内部聚合成为一个整体结构, 进一步增加机制砂混凝土的致密性。

3 结论

通过对粉煤灰与钢渣粉在单掺及复掺条件下对机制砂混凝土性能影响的系统试验研究, 揭示了不同掺合料、掺量及掺加方式对机制砂混凝土坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度及微观结构的作用规律, 得到以下主要结论:

(1) 粉煤灰和钢渣粉的掺入对机制砂混凝土坍落度的影响显著。单掺粉煤灰或钢渣粉时, 机制砂混凝土坍落度随着掺合料掺量的增加呈现先增加后降低的趋势。两者单掺分别为 10%、5% 时, 机制砂混凝土坍落度达到最优; 两者复掺时, 粉煤灰掺量占比对机制砂混凝土坍落度影响幅度更加明显。

(2) 单掺 5%~20% 粉煤灰或钢渣粉时, 机制砂混凝土的 3 d 抗压强度随粉煤灰掺量的增加逐渐降低, 而随钢渣粉掺量的增加先增加后降低。随着水化反应的进行, 机制砂混凝土 28 d 抗压和劈裂抗拉强度随掺合料掺量的增加出现先增加后降低的趋势。其中, 粉煤灰或钢渣粉掺量分别为 5%、10% 时, 机制砂混凝土强度达到最优。

(3) 复掺粉煤灰和钢渣粉时, 两者在机制砂混凝土内部可产生协同效应, 可有效改善机制砂混凝土早期强度。当粉煤灰和矿渣粉比例为 5:5 时, 机制砂混凝土 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度较基准组混凝土分别提升 11.2%、5.3%。

(4) 粉煤灰和钢渣粉材料颗粒细小, 适量掺入时可有效填充机制砂混凝土内部孔隙, 消耗机制砂混凝土内部富集的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 并且一定条件下水化生成致密的水化产物, 优化界面过渡区的微观形貌, 提升机制砂混凝土内部各组分的黏结性能, 进一步提高机制砂混凝土的密实度。

参 考 文 献

- [1] 王鹏刚, 莫芮, 隋晓萌, 等. 混凝土中氯盐-硫酸盐耦合侵蚀的化学-损伤-传输模型研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50 (2): 512-521.
- [2] 杨永敢. 高性能混凝土表层硬度与强度的相关性及其机理研究

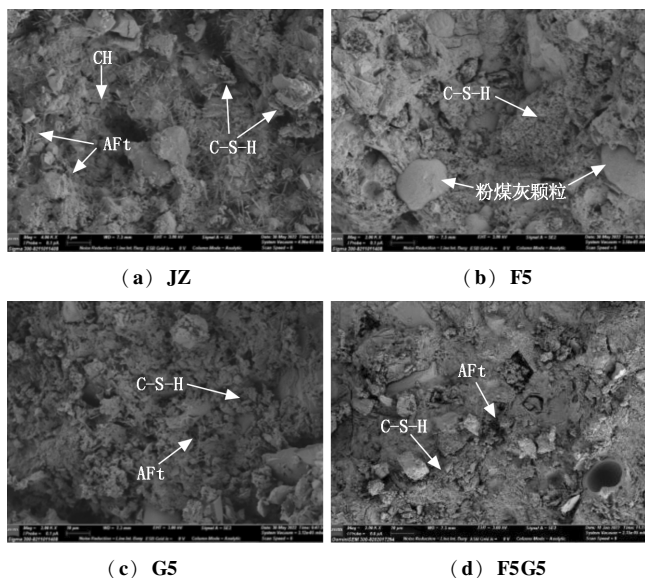


图 5 微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology

材料科学

- [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 丁沙. 过硫磷石膏矿渣水泥混凝土抗海盐侵蚀性能及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [4] MARTINS P, DIANE G, ROBERT L. An investigation into the use of manufactured sand as a 100% replacement for fine aggregate in concrete [J]. *Materials*, 2016, 9 (6): 440.
- [5] JOHN D B, GLENN M. The effects of particle shape on the yielding behaviour of crushable sand [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60 (2): 520–532.
- [6] BLISETT R S, ROWSON N A. A review of the multi-component utilization of coal fly ash [J]. *Fuel*, 2012, 97: 1–23.
- [7] 赵彬宇, 赵志曼, 全思臣, 等. 矿物掺和料对磷建筑石膏砂浆强度的影响 [J]. *非金属矿*, 2019, 42 (6): 45–48.
- [8] WANG S. Application of solid ash based catalysts in heterogeneous catalysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (19): 7055–7063.
- [9] KRISHNYA S, HERTH C, ELAKNESWARAN Y. Modeling of hydration products and strength development for high-volume fly ash binders [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 320: 126228.
- [10] 吴凯, 施惠生, 徐玲琳, 等. 矿物掺合料调控界面过渡区微结构对混凝土力学性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45 (5): 623–630.
- [11] HANG Y. A binder of phosphogypsum – ground granulated blast furnace slag – ordinary portland cement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2011, 26 (3): 548–551.
- [12] TANGADAGI R B, MANJUNATHA M, DINESH S, et al. Role of mineral admixtures on strength and durability of high strength self compacting concrete: An experimental study [J]. *Materialia*, 2021, 18: 101144.
- [13] 李永鑫. 含钢渣粉掺合料的水泥混凝土组成、结构与性能的研究 [D]. 北京: 中国建筑材料材料科学研究院, 2003.
- [14] 孙家瑛, 黄成华. 矿渣钢渣复合超量替代水泥的高性能混凝土性能研究 [J]. *建筑石膏与胶凝材料*, 2004 (7): 13–15.
- [15] 刘业金, 周长顺. 钢渣粉 – 偏高岭土再生混凝土力学性能及微观结构的研究 [J]. *工业建筑*, 2022, 52 (2): 133–138, 157.
- [16] CELIK K, MERAL C, PETEK G A, et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015 (56), 59–72.
- [17] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [18] 中华人民共和国建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(上接第 11 页)

- [3] 罗晓洪, 张世俊, 郭荣鑫, 等. 电石渣替代水泥作碱激发剂对过硫磷石膏胶凝材料性能和微观结构的影响 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (增刊 2): 298–304.
- [4] 乔龙腾, 宋志峰. 碱激发粉煤灰基胶凝材料的水化过程及力学性能 [J]. *金属矿山*, 2023 (11): 179–185.
- [5] 李胜辉, 郭斌, 温震江, 等. 矿渣基胶凝材料开发和充填体强度与流变特性研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41 (10): 40–43.
- [6] 李鑫, 杜惠惠, 倪文, 等. KR 脱硫渣碱激发矿渣的配比优化及水化特性 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (1): 170–179.
- [7] ZHANG W, HAO X S, WEI C, et al. Activation of lowactivity calcium silicate in converter steelmaking slag based on synergy of multiple solid wastes in cementitious material [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 351: 128925.
- [8] ZHU C F, TAN H B, DU C, et al. Enhancement of ultrafine slag on compressive strength of solid waste – based cementitious materials: Towards low carbon emissions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105475.
- [9] 李琳琳, 李晓阳, 苏兴文, 等. 钢渣制备高强度人工鱼礁混凝土 [J]. *金属矿山*, 2012 (3): 158–162.
- [10] 崔孝伟, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应机理 [J]. *材料研究学报*, 2017, 31 (9): 687–694.
- [11] 李树峰, 邓凯, 阎胜利, 等. 多元固废地聚物干粉砂浆制备与性能研究 [J]. *建筑技术*, 2025, 56 (1): 117–121.
- [12] 汤畅. 含精炼渣全固废胶凝材料协同超细尾砂制备胶结充填材料 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [13] 张艳佳, 汤畅, 刘生玉, 等. 精炼渣基矿山充填胶凝材料制备及水化机理 [J]. *金属矿山*, 2022 (6): 230–236.
- [14] 王应富, 张树光, 黄啸, 等. 磷石膏 – 钢渣 – 矿渣固化低液限粉质黏土力学性能及耐久性能研究 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56 (增刊 1): 12–23.
- [15] 肖杰, 刘财壮, 刘志勇, 等. CFB 灰 – 钢渣粉 – 矿渣 – 脱硫石膏全固废公路下伏采空区注浆材料特性研究 [J]. *中国公路学报*, 2024, 37 (6): 193–206.
- [16] 曹文斌, 刘明亮, 廖国伟, 等. 多元固废基胶凝材料制备高强路面砖试验研究 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50 (7): 142–145.
- [17] 高健, 王晓磊, 李军, 等. 高炉矿渣制备免烧砖强度的试验研究 [J]. *新型建筑材料*, 2022, 49 (11): 165–168.