

碳化钢渣对低碳胶凝材料自流平砂浆的性能影响研究

张亚鹏¹, 王一茗¹, 王会涛¹, 桑志文²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邢台襄建建设工程股份有限公司, 河北 邢台 054001)

摘要: 试验采用新型低碳胶凝材料, 以钢渣砂等体积替代部分机制砂, 制备钢渣低碳胶凝材料自流平砂浆, 分析钢渣碳化及其掺量对自流平砂浆工作性能、力学性能和体积稳定性的影响。结果表明, 碳化处理 24 h 可显著改善钢渣砂安定性不良的问题, 碳化处理生成碳酸钙在钢渣表面形成的致密外壳提升了碳化钢渣砂浆的宏观性能; 当碳化后钢渣砂掺量为 45% 时, 砂浆 24 h 及 28 d 的抗压、抗折强度最高, 分别提高了 12.4%、9.3% 和 11.6%、6.5%。与用全机制砂制备的砂浆相比, 采用碳化钢渣砂替代部分机制砂制备的自流平砂浆具有强度高及生产成本低等优点。

关键词: 钢渣; 碳化; 自流平砂浆; 力学性能

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0064-07

自流平砂浆因具有施工简单、平整度高、抗裂耐磨等优点而广泛应用于各种地面工程。同时, 由于建筑业消耗大量天然砂石, 天然砂等可开发资源越来越少, 而钢渣自身的硬度大、耐磨性好、各项物理力学性能良好, 且堆存量 and 年排放充足, 是天然砂的理想替代源。孙小巍等^[1]使用陈化超过 12 月的钢渣作为耐磨骨料, 验证了钢渣砂制备水泥基耐磨材料的可行性; 徐风广等^[2]使用低活性钢渣砂替代天然石英砂, 制备出后期力学性能更优、耐磨性更好的水泥基自流平砂浆。上述研究表明, 低活性钢渣砂能够作为骨料制备水泥基自流平砂浆。

然而, 钢渣中的游离氧化钙(f-CaO)和游离氧化镁(f-MgO)水化导致的安定性不良问题限制了其在建筑材料中的大规模使用。降低钢渣内不安定组分的处理方式主要有冷弃法、热闷法、水淬法、掺入矿物掺合料、表面改性等^[3-6], 这些方法普遍效率低或成本较高。近年来有研究发现钢渣具有较高的碳化活性, 通过加速碳化钢渣形成稳定碳酸盐不仅能解决其安定性问题, 有效实现钢渣资源化利用^[7-8], 同时能够固定 CO₂, 为减少 CO₂ 的排放提供了一种新途径。但碳化处理后的钢渣骨料在自流平砂浆中的应用研究较为空白, 其对自流平砂浆性能及体积稳定性的影响也尚不明确。此外, 以工业固体废弃物为原料替代水泥熟料制备胶凝材料, 具有低碳环保的显著优势。基于此, 本研究以使用低碳环保的胶凝材料、实现钢渣可再生利用以及减少环境中的 CO₂ 为出发点, 采用碳化处理后的钢渣作为骨料等体积替代机制砂, 结合新型低碳胶凝材料制备钢渣自流平砂浆, 为碳化钢渣在自流平砂浆中的应用提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 试验材料

(1) 胶凝材料。试验选用河北清峰绿能固废处置有限公司生产的新型低碳胶凝材料, 各项技术指标符合《用于混凝土中的新型低碳胶凝材料》(T/GBMEA 01—2023)的要求, 其物理性能见表 1。

收稿日期: 2024-09-24 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzh.20240243

作者简介: 张亚鹏(1977—), 女, 副教授, 研究方向为土木工程。E-mail: 1214048803@qq.com

张亚鹏, 王一茗, 王会涛, 等. 碳化钢渣对低碳胶凝材料自流平砂浆的性能影响研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 64-70.

表 1 新型低碳胶凝材料物理力学性能指标

原材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝结时间/min		抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
			初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
胶凝材料	2.87	585	349	523	5.5	7.1	—	19.1	—	—

(2) 细集料。机制砂为市售机制砂,筛取粒径为 0~1.18 mm 的颗粒;钢渣取自邯郸钢铁厂未陈化的转炉钢渣,通过破碎筛分选取粒径区间为 0~1.18 mm。物理性能指标如表 2 所示。

表 2 砂物理特性

细集料	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	松散堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和面干吸水率/%	细度模数
机制砂	2 682	1 647	1.71	1.6
原状钢渣砂	3 074	1 873	3.89	1.6
碳化钢渣砂	3 179	1 901	3.63	1.6

(3) 外加剂。粉状西卡 540P 聚羧酸减水剂,黏度为 400 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的羟丙基甲基纤维素醚,瓦克 5 044 N 乳胶粉,德国明凌 AGITANR P803 型粉体消泡剂,北京凯立化工生产的早强剂。

1.2 试验方法

(1) 钢渣碳化试验方法。将钢渣砂平铺于托盘,用钢渣质量 7% 的水预喷湿后放入碳化养护箱,注入纯度为 99% 的 CO_2 。碳化条件:碳化箱(HC-HTX12) CO_2 浓度为 $(20 \pm 3)\%$,湿度 $(70 \pm 5)\%$,温度 20°C ,碳化时长分别设为 8、24 h。

(2) 试件制备。根据《地面用水泥基自流平砂浆》(JC/T 985—2017)的规定,砂浆搅拌设备采用行星式砂浆搅拌机(符合 JC/T 681 规定),实验环境温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。

(3) 砂浆性能试验方法。工作性能依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)和《地面用水泥基自流平砂浆》(JC/T 985—2017)要求测试;砂浆的抗压强度和抗折强度根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)要求测试;钢渣用作砂浆骨料的各项指标按《钢渣应用技术要求》(GB/T 32546—2016)测试;砂浆体积稳定性通过对尺寸为 $10\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的砂浆试件进行 80°C 恒温水浴,并观测其 49 d 体积膨胀率及外观变化,从而评价钢渣骨料代砂对砂浆体积稳定性的影响。

2 结果与分析

2.1 钢渣砂碳化处理

通过对比不同碳化时间对钢渣砂碳化程度、碳化增重率及压蒸膨胀率的影响,研究钢渣砂的碳化效果,并对其进行 XRD(X 射线衍射)分析,最终确定合适的碳化时长。

2.1.1 碳化时长对钢渣砂碳化效果的影响

图 1 显示了碳化处理后钢渣砂颗粒喷洒酚酞指示剂的显色照片。由图 1(1)~(4)可看出未碳化钢渣砂呈现明显颜色;碳化 8 h 后(图 1(5)~(8))钢渣砂颜色变淡;碳化 24 h 后(图 1(9)~(12))钢渣基本不显色,表明碳化较为充分。可见,延长碳化时间可以有效提高钢渣颗粒碳化程度。

图 2 显示了不同碳化时长下各粒径钢渣砂碳化增重率,可以看出,碳化处理前 8 h 钢渣质量增加最多,24 h 后钢渣质量增加较少,



图 1 不同碳化时间钢渣砂的酚酞显色图片

随着碳化时间延长,钢渣碳化增重速率逐渐降低。主要原因是钢渣表面孔隙较多,碳化前期钢渣中的 $f\text{-CaO}$ 等可碳化组分与 CO_2 充分接触导致碳化速率较高;随着钢渣表面的孔隙被碳化产物填充,钢渣中可碳化组分不断减少,后期碳化效果较差。此外,碳化时长一致时,钢渣碳化增重率随粒径减小而增大,这是因为较大的比表面积能够为钢渣提供更多反应位点,碳化反应更充分。

由上述试验可知,由于试验所用钢渣砂的粒径较小,各粒径钢渣砂均能获得较好的碳化效果;碳化 24 h 所得钢渣砂碳化较充分,24 h 后碳化速率降低,碳化效果变差。

2.1.2 碳化钢渣稳定性

将不同碳化时长的钢渣采用压蒸法测试其稳定性,钢渣压蒸膨胀率结果如表 3 所示。

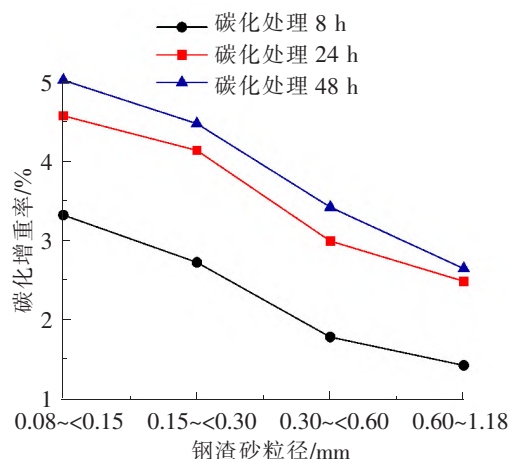


图 2 钢渣砂的碳化增重率

表 3 钢渣用作砂浆细骨料的压蒸膨胀率试验结果

碳化时长/h	压蒸膨胀率/%	备注
0	—	试件断裂
8	—	试件断裂
24	0.63	试件有破损和剥落

未碳化和碳化处理 8 h 的钢渣制备砂浆,试件压蒸后均出现断裂;碳化 24 h 后,钢渣砂浆试件压蒸膨胀率为 0.63%,满足 $\leq 0.80\%$ 的技术要求,可以用作砂浆细骨料。因此综合考虑碳化效果及成本,将后续试验中钢渣碳化时长确定为 24 h。

2.1.3 碳化钢渣的化学组成及 XRD 分析

图 3 展示了碳化处理不同时间后钢渣的 XRD 图。由图 3 可知,试验钢渣主要含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C_2S 、 C_3S 、 CaCO_3 、 $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ 、 C_3A 等矿物,经 CO_2 处理后,与对照组相比,碳化后的钢渣细骨料的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰明显减弱,而 CaCO_3 的衍射峰变强,随着碳化时间的增加,碳化 24 h 后, CaCO_3 衍射峰显示更强,碳化反应程度增加。说明碳化处理能够将钢渣中 $f\text{-CaO}$ 等膨胀组分固化生成稳定的碳酸盐^[9]。

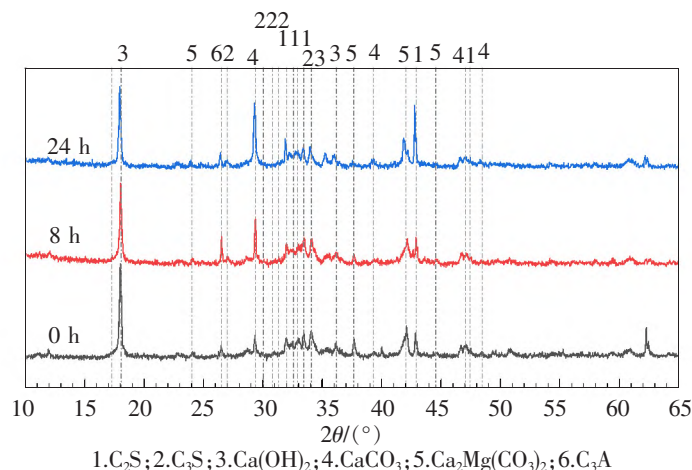


图 3 碳化处理不同时间后钢渣的 XRD 图

2.2 钢渣砂对砂浆性能的影响

通过探究未碳化钢渣与碳化钢渣对低碳胶凝材料自流平砂浆主要工作性能、力学性能及体积稳定性的影响规律,确定低碳胶凝材料自流平砂浆中钢渣骨料的最优替代率。

通过前期实验,确定低碳胶凝材料自流平砂浆基准配合比,其水灰比为 0.49,集灰比为 1.3,外加剂掺

量为占胶凝材料质量百分比:早强剂 0.25%、减水剂 0.3%、可再分散性乳胶粉 1.2%、纤维素醚 0.05%、消泡剂 0.15%。未碳化钢渣砂和碳化钢渣砂分别等体积取代机制砂作为砂浆细骨料,取代率为 0、15%、30%、45%、60%,钢渣自流平砂浆试验配合比见表 4。

表 4 自流平砂浆配比

碳化与否	编号	钢渣掺量/%	集灰比	水泥/g	水/g	钢渣/g	砂/g
基准	JZ-0	0	1.300	900	441	0	1 170
未碳化	Y-15	15	1.328	900	441	201	995
	Y-30	30	1.357	900	441	402	819
	Y-45	45	1.385	900	441	603	644
	Y-60	60	1.414	900	441	805	468
碳化	C-15	15	1.337	900	441	209	995
	C-30	30	1.375	900	441	418	819
	C-45	45	1.412	900	441	628	644
	C-60	60	1.450	900	441	837	468

2.2.1 钢渣砂对砂浆流动性的影响

钢渣对低碳胶凝材料自流平砂浆流动性影响的试验结果如图 4 所示。

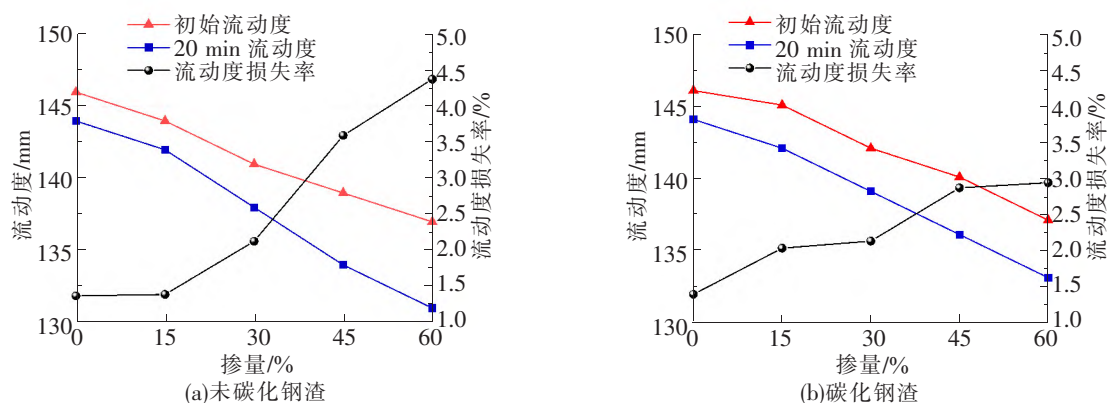


图 4 钢渣砂对砂浆流动性的影响

钢渣掺量为 0 时,JZ-0 组初始流动度为 146 mm,随钢渣掺量增加,未碳化与碳化钢渣自流平砂浆初始流动度不断降低,且两者数值接近,钢渣掺量为 60% 时,Y-60、C-60 组初始流动度均降至 137 mm,说明掺入未碳化钢渣与碳化钢渣均会降低自流平砂浆流动性能,且两者影响程度基本一致;砂浆的 20 min 流动度损失率分别由 JZ-0 组的 1.4% 增至 Y-60 组的 4.4% 和 C-60 组的 2.9%,说明流动度经时损失率随着钢渣砂掺量的增加而增大,且碳化钢渣对砂浆流动度经时损失率的影响低于未碳化钢渣。

与机制砂相比,钢渣砂表面多棱角,骨料间的摩擦力较大,阻碍了浆体带动细集料扩展,导致自流平砂浆流动度降低;此外,钢渣砂表面粗糙多孔,吸水率较高,故砂浆浆体中自由水含量减少,颗粒间润滑作用减弱,导致砂浆流动性受损。与未碳化钢渣砂相比,钢渣砂碳化后其表面形成一层致密外壳,部分孔隙被碳化产物填充,使得骨料从浆体中吸附的自由水减少,故砂浆 20 min 流动度经时损失率降低。

2.2.2 钢渣砂对砂浆力学性能的影响

钢渣砂对低碳胶凝材料自流平砂浆 1、3、28 d 力学性能影响的试验结果如图 5 所示。

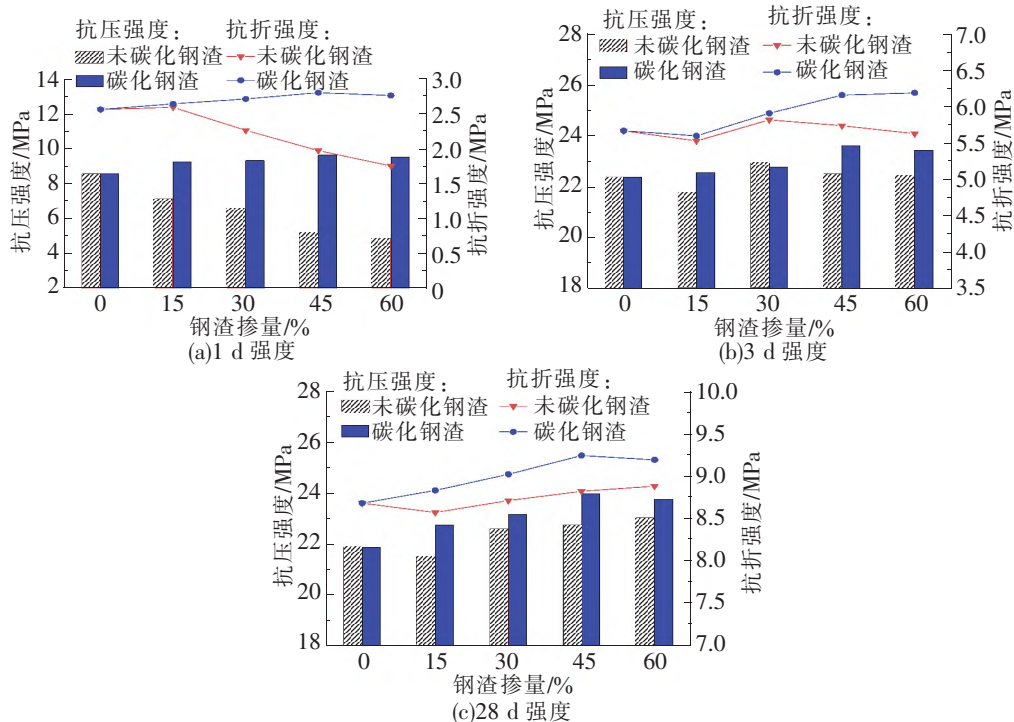


图 5 钢渣砂对砂浆力学性能的影响

由图5(a)、图5(b)可知,掺入未碳化钢渣会显著劣化砂浆的早期强度,而掺入碳化钢渣能小幅度提升砂浆早期强度。随未碳化钢渣掺量的增加,砂浆早期强度不断降低,其中 Y-60 砂浆 1 d 抗压、抗折强度最低 (4.85、1.76 MPa),较 JZ-0 (8.59、2.57 MPa) 分别降低了 43.5%、31.5%;砂浆 3 d 抗压、抗折强度与 JZ-0 基本持平。而碳化钢渣的掺入提高了砂浆早期强度,其中 C-45 砂浆 1 d 抗压、抗折强度最高 (9.66、2.81 MPa),较 JZ-0 分别提升了 12.4%、9.3%,较 Y-45 分别提升 86.8%、42.0%。这可能是由于试验所用钢渣砂颗粒较细且表面附着较多微粉,钢渣微粉的掺入延缓了水泥浆体初凝,抑制了钙矾石晶体和 C-S-H 凝胶形成,不利于产生早期强度^[10];而碳化后钢渣对水泥早期水化几乎没有延缓作用^[11],钢渣经过碳化处理后表面覆盖有大量碳化产物,这些产物的“成核效应”促进了水泥浆体的早期水化^[12],宏观表现为砂浆早期强度有所提升。

由图5(c)可知,随着钢渣砂掺量的增加,砂浆后期抗压、抗折强度均有所提升,且碳化钢渣砂浆后期强度明显优于未碳化钢渣砂浆,其中 C-45 砂浆抗压、抗折强度均达到最优 (39.91、9.24 MPa),较 JZ-0 (35.75、8.68 MPa) 分别提高了 11.6%、6.5%。其主要原因有 3 方面,一是钢渣砂本身硬度高,力学性能更优;二是钢渣砂表面粗糙、不规则,与硬化后水泥浆体间结合能力更强;三是碳化钢渣表面大量孔隙及微裂缝被碳化产物填充使其更为致密,加强了界面过渡区的黏结力,从而改善了强度。

2.2.3 钢渣砂对砂浆体积稳定性的影响

未碳化钢渣和碳化 24 h 钢渣分别按 0%、15%、30%、45%、60% 等体积替代机制砂制成钢渣自流平砂浆试件,并且 80 ℃ 恒温水浴加速砂浆试件中钢渣骨料的体积膨胀。砂浆成型过程中钢渣骨料会轻微沉底,砂浆底面将最先出现破坏,在恒温水浴 49 d 后,观察砂浆试块底面破坏情况并记录其线性膨胀率。

图 6 为砂浆试件 80 ℃ 恒温水浴 49 d 后底面破坏情况。可知随未碳化钢渣掺量的增加,砂浆表面起皮、破损越来越多,Y-45 砂浆底面开始出现细小裂缝,Y-60 砂浆底面开裂并出现明显变形。碳化钢渣掺量不超过 45% 时,C-45 砂浆表面基本无破坏;掺量 60% 时,C-60 砂浆表面出现少量起皮和爆裂。

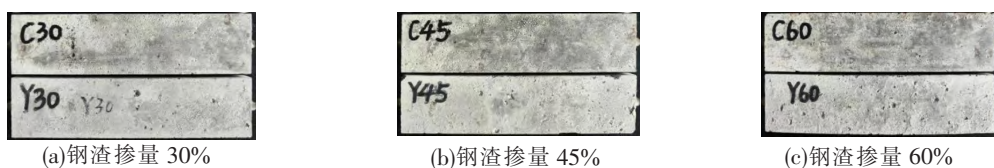


图 6 钢渣砂浆底面破坏

图 7 为砂浆试件 80 ℃ 恒温水浴 49 d 后的体积膨胀率,可知钢渣掺量对砂浆的体积稳定性有显著影响。随未碳化钢渣掺量增加,砂浆试件的体积稳定性越来越差;而碳化后处理后的钢渣制成的砂浆试件安定性得到明显的改善,钢渣掺量小于 45% 时,80 ℃ 恒温水浴条件下砂浆试件的线性膨胀率随时间增长较稳定。

综上,未碳化钢渣制成的砂浆试件 80 ℃ 恒温水浴后外观出现明显破坏;碳化后钢渣制成的砂浆试件中体积不安定组分分布均匀且整体体积稳定性较好,砂浆外观破坏较少,可以考虑钢渣最大掺量为 45%。

2.3 微观结构分析

图 8 展示了不同骨料的微观形貌。可以看出,机制砂表面较为平整,而未碳化的钢渣砂表面粗糙且存在较多孔隙,因此钢渣表现出较高的吸水性。钢渣砂经 CO_2 处理后,反应生成的 CaCO_3 可以填充钢渣表面的孔隙,并在钢渣表面形成一层碎石状外壳,使钢渣更加致密。

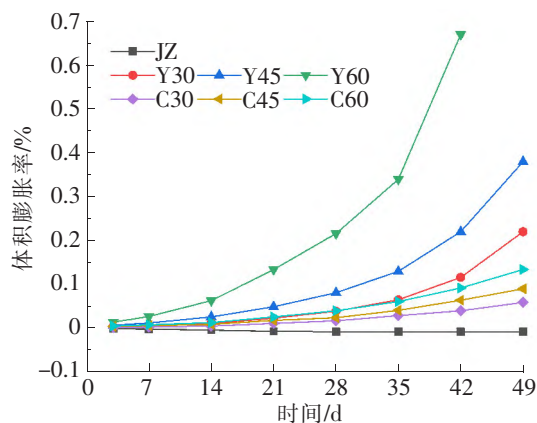
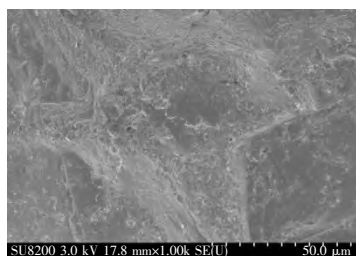
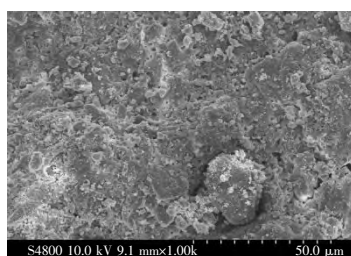


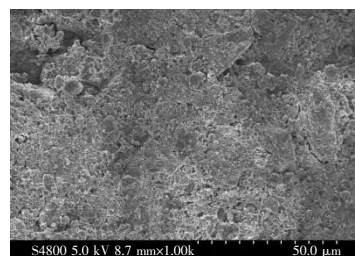
图 7 钢渣砂浆体积膨胀率



(a) 机制砂



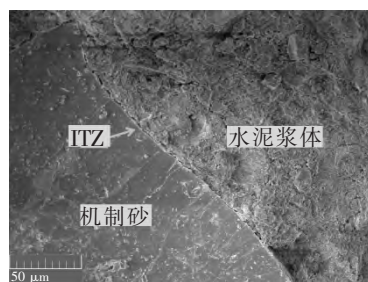
(b) 未碳化钢渣砂



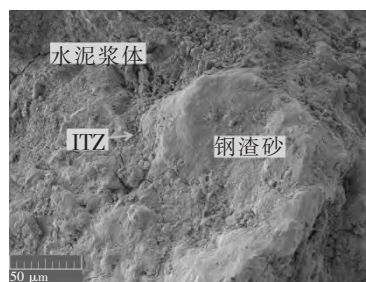
(c) 碳化钢渣砂

图 8 骨料 SEM 图像

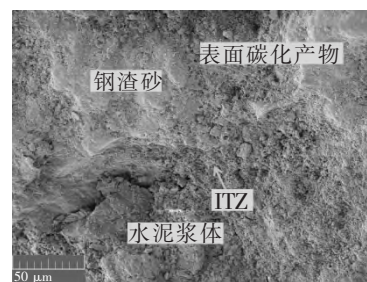
图 9 展示了不同骨料与水泥浆体的界面过渡区。由图 9(a)、图 9(b) 可以看出,机制砂与水泥浆体间存在明显缝隙,而钢渣砂粗糙的表面和不规则的外形使其与水泥浆体间黏结良好,这是钢渣砂浆后期力学性能更优的原因之一。由图 9(c) 可以看出,钢渣碳化后其表面的碳化产物使得钢渣与水泥的界面过渡区更为致密,因此,宏观表现为碳化后钢渣制成的砂浆具有更好的力学性能。



(a) 机制砂



(b) 未碳化钢渣砂



(c) 碳化钢渣砂

图 9 界面过渡区 SEM 图像

3 结论

(1) 碳化处理能够显著改善钢渣骨料的安定性问题。碳化处理 24 h 后,试验所用粒径的钢渣砂碳化较充分,能够满足用作自流平砂浆骨料的技术要求,碳化钢渣掺量小于 45% 时,砂浆体积稳定性良好。

(2) 钢渣砂与硬化水泥浆体间黏结较机制砂更紧密,钢渣自流平砂浆后期抗压、抗折强度均随钢渣砂掺量增加而提高,而钢渣自流平砂浆的流动性能和体积稳定性与钢渣掺量呈反比。

(3) 未经碳化处理钢渣会延缓水泥浆体初凝,显著劣化自流平砂浆的早期强度;碳化处理后钢渣能够改善砂浆早期强度,C-45 组砂浆 24 h 抗压、抗折强度较 Y-45 组分别提升 86.8%、42.0%。同等掺量下,

碳化钢渣砂浆工作、力学性能明显优于未碳化砂浆,且 C-45 组砂浆各性能最佳。

参 考 文 献

- [1] 孙小巍, 郜森, 孙泽铭, 等. 陈化钢渣制备水泥基耐磨材料的试验研究[J]. 混凝土, 2022(8):153-157.
- [2] 徐风广, 杨凤玲, 李红伟, 等. 低活性钢渣在地面用水泥基自流平砂浆中的应用研究[J]. 矿产综合利用, 2019, 40(6): 84-88.
- [3] 吴少鹏, 崔培德, 谢君, 等. 钢渣集料膨胀抑制方法及混合料体积稳定性研究现状[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 166-179.
- [4] 余浩, 孟秀元, 林顺, 等. 浸水环境下钢渣骨料体积胀裂与强度劣化试验研究[J]. 建材世界, 2022, 43(1):5-9.
- [5] 朱光源, 王元纲, 黄凯健, 等. 矿物细掺料对钢渣集料膨胀性的抑制作用[J]. 森林工程, 2019, 35(1):87-92.
- [6] 肖文斌, 李兰兰, 赵凤清. 钢渣体积稳定性处理及应用研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12):194-198.
- [7] HUMBERT P S, JOÃO C G. CO₂ activated steel slag-based materials: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:448-457.
- [8] HOU G, YAN Z, SUN J, et al. Microstructure and mechanical properties of CO₂-cured steel slag brick in pilot-scale [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121581 [2024-09-24]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121581>.
- [9] 张丰, 莫立武, 邓敏, 等. 碳化对钢渣-水泥-CaO-MgO 砂浆强度和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 854-861.
- [10] ZHUANG S Y, WANG Q. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement [J/OL]. Cement and Concrete Research, 2021, 140:106283[2024-09-24]. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106283>.
- [11] ZHUANG S Y, WANG Q, LUO T. Effect of C₁₂A₇ in steel slag on the early-age hydration of cement [J/OL]. Cement and Concrete Research, 2022, 162:107010[2024-09-24]. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107010>.
- [12] RUI Y F, ZHANG X, MA Z Y. Different carbon treatments for steel slag powder and their subsequent effects on properties of cement-based materials[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2022, 362(15):132407[2024-09-24]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132407>.

Study on the Effect of Carbonized Steel Slag on the Performance of Low Carbon Cementitious Material Self-leveling Mortar

ZHANG Yapeng¹, WANG Yiming¹, WANG Huitao¹, SANG Zhiwen²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Xingtai Xiangjian Construction Engineering Co. Ltd., Xingtai 054001, China)

Abstract: The steel slag low carbon cementitious material self-leveling mortar was prepared by adopting a new type of low-carbon cementitious material, and partially replacing machine-made sand with steel slag sand in equal volume in this test. The effect of carbonization and replacement rate of steel slag on the workability, mechanical properties and volume stability of low carbon cementitious material self-leveling mortar was investigated. The results show that the carbonization treatment for 24 h can significantly enhance the poor soundness of steel slag sand and the dense calcium carbonate shell formed on the surface after carbonization improves the macro performance of carbonized steel slag mortar. When the proportion of carbonized steel slag sand is 45%, both compressive strength and flexural strength of mortar at 24 h and 28 d achieve their peak values, increasing by 12.4%, 9.3% and 11.6%, 6.5%, respectively. In comparison to mortar prepared with entirely machine-made sand, the self-leveling mortar formulated using carbonized steel slag sand instead of partially mechanized sand has the advantages of high strength and low production cost.

Key words: steel slag; carbonization; self-leveling mortar; mechanical property