

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.016



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



硅酸钠改性再生粗骨料沙漠砂混凝土的 宏观性能

刘海峰, 马龙, 车佳玲, 杨维武
(宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021)

摘要:为探究硅酸钠改性再生粗骨料与沙漠砂掺入对再生混凝土力学性能和界面特性的影响,采用硅酸钠溶液浸泡改性再生粗骨料,利用改性后再生粗骨料替代普通粗骨料、沙漠砂替代机制砂制备再生混凝土,进行其立方体抗压、劈裂抗拉和抗折强度试验,揭示再生粗骨料替代率、沙漠砂替代率及硅酸钠改性对再生混凝土力学性能的影响规律,并结合显微硬度试验分析再生混凝土多重界面过渡区特性。结果表明:再生混凝土立方体抗压、劈裂抗拉和抗折强度均随再生粗骨料替代率的增大而降低;使用硅酸钠溶液浸泡能提升再生粗骨料性能,适量沙漠砂的掺入对再生混凝土基体起到密实作用,二者共同增强再生混凝土的力学性能。沙漠砂替代率40%、改性再生粗骨料替代率25%的再生混凝土性能最优,其28d立方体抗压、劈裂抗拉、抗折强度较未处理组分别提升了13.6%、11.1%和29.7%。硅酸钠改性增强了界面过渡区的密实度,沙漠砂颗粒填充了界面过渡区和砂浆基体的孔隙缺陷,缩减了界面过渡区宽度。

关键词:再生混凝土;硅酸钠改性;再生粗骨料;沙漠砂;力学性能;界面过渡区

中图分类号:TU528.04 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

The macro and micro properties of sodium silicate modified recycled coarse aggregate desert sand concrete

Liu Haifeng, Ma Long, Che Jialing, Yang Weiwu

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China)

Abstract: To explore the influence of sodium silicate modified recycled coarse aggregates and desert sand addition on the mechanical and interfacial properties of recycled concrete, the modified recycled coarse aggregates were soaked into sodium silicate solution. The modified recycled coarse aggregates and desert sand were used partially to replace ordinary coarse aggregates and machine-made sand to make recycled concrete. The cube compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength tests were carried out to analyze the influence of the recycled coarse aggregates replacement rate, desert sand replacement ratio (DSRR) and

收稿日期:2025-12-01

基金项目:国家自然科学基金(52168034);宁夏自然科学基金(2023AAC03039);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科资助项目,NXYLXK2021A03)

作者简介:刘海峰(1975-),男,博士,教授,主要从事材料和结构灾变行为研究,E-mail:liuhaifeng1557@163.com。

Received: 2025-12-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52168034); Natural Science Foundation of Ningxia (No. 2023AAC03039); The Construction of First-Class Disciplines in Ningxia Higher Education Institutions (Funding Project for Water Conservancy Engineering Discipline, No. NXYLXK2021A03)

Author brief: LIU Haifeng (1975-), PhD, professor, main research interest: material and structural disaster behavior, E-mail: liuhaifeng1557@163.com.

sodium silicate modification on the mechanical properties of recycled concrete. The characteristics of multiple interface transition zones of recycled concrete were studied by micro-hardness tests. The results indicated that the cube compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of recycled concrete showed a decreasing trend with recycled coarse aggregates replacement rate. Soaking with sodium silicate solution can enhance the performance of recycled coarse aggregates. Appropriate addition of desert sand can densify the matrix of recycled concrete. The combined use of them can effectively improve the mechanical properties of recycled concrete. When DSRR was 40% and recycled coarse aggregates replacement rate was 25%, the performance of recycled concrete was the best. The 28d cube compressive strength, splitting tensile strength and flexural strengths increased by 13.6, 11.1 and 29.7% respectively in comparison with the untreated group. Sodium silicate modification enhanced the density of the interface transition zone. Desert sand filled in the interface transition zone and mortar matrix pore defects, and reduced the interface transition zone width.

Keywords: recycled concrete; sodium silicate modified; recycled coarse aggregates; desert sand; mechanical properties; interface transition zone (ITZ)

与普通粗骨料(normal coarse aggregate, NCA)相比,建筑固废再生粗骨料(recycled coarse aggregate, RCA)的物理性能较差,具有多重薄弱界面过渡区(interface transition zone, ITZ),用其制备的再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)力学性能与普通混凝土(normal aggregate concrete, NAC)相比有较大差异。硅酸钠具备良好的碱激发与胶凝特性,成本较低、操作简便,兼具技术可行性与经济性。Bui等^[1]使用硅酸钠改性RCA制备的再生混凝土相比未处理时抗压强度提升33.0%~50.0%,劈裂抗拉强度提升33.0%~41.0%,弹性模量提升15.5%~42.5%。Trivedi等^[2]通过机械磨损后硅酸钠浸泡两阶段处理再生粗骨料,利用其制备的再生混凝土力学性能、微观结构与耐久性均得到提升。Astutiningsih等^[3]对再生骨料与天然骨料进行全生命周期评估,二者全球变暖潜能值(GWP)分别为583.95和633.34,再生骨料对气候环境危害较小。故建筑固废资源化利用是当前建材领域低碳可持续发展的应对之策。

机制砂主要由天然岩石破碎、筛分加工而成,生产过程高耗能与碳排放,过度开采将加剧资源消耗与生态破坏。沙漠砂在建材领域的应用已有许多研究^[4]。适量沙漠砂的掺入提高了混凝土致密性并减少了孔隙,抗压强度得到提升^[5-6]。Liu等^[7]通过正交试验探究沙漠砂和再生粗骨料在道路工程中的应用,沙漠砂和再生粗骨料替代率为30%和50%时表现出较好的力学性能,可满足道路工程使用。

将低效能沙漠砂资源进行高值化工业利用,有助于建材领域绿色转型。

现有研究多聚焦单掺沙漠砂或改性再生粗骨料,针对沙漠砂与改性再生粗骨料复掺混凝土宏观性能与微观界面方面研究的相关报道较少。笔者采用硅酸钠溶液对再生粗骨料进行预处理,利用沙漠砂与改性的再生粗骨料分别替代机制砂与普通粗骨料制备再生混凝土,通过立方体抗压、劈裂抗拉和抗折强度试验,结合微观显微硬度测试,分析沙漠砂的掺入和再生粗骨料改性对混凝土宏观力学性能与微观界面性能的影响机理。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥采用宁夏赛马牌P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,性能指标见表1。拌和水来自银川市自来水。NCA为当地生产机械碎石,RCA由银川市某厂路基废弃混凝土破碎筛分而成,性能指标见表2,由粒径4.75~9.5 mm和9.5~19.0 mm粗骨料按质量比3:7混合而成。细骨料采用机制砂和毛乌素沙地沙漠砂,性能指标见表3。粗、细骨料累计筛余量见表4。改性剂选用模数为2.8速溶型硅酸钠固体粉末配制硅酸钠溶液;减水剂采用北京慕湖高效聚羧酸减水剂,减水率达20%以上。

1.2 试验配合比

混凝土设计强度等级为C40。设置基准组普通混凝土(NAC),水灰比0.43,砂率34%。基于前期

表1 水泥性能指标

Table1 Performance index of cement

细度/%	比表面积/(m ² /kg)	标准稠度用水量/%	安定性	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
6.6	355	26.6	合格	186	238	4.5	6.5	22.0	42.5

表 2 粗骨料性能指标

Table 2 Performance index of coarse aggregate					
类型	堆积密度/ (kg/m ³)	表观密度/ (kg/m ³)	压碎指 标/%	吸水 率/%	含水 率/%
NCA	1 506	2 721	9.12	0.75	0.23
RCA	1 439	2 670	13.02	3.12	0.61

表 3 细骨料性能指标

Table 3 Performance index of fine aggregate				
类型	细度模数	堆积密度/ (kg/m ³)	表观密度/ (kg/m ³)	含泥量/%
机制砂	2.38	1 590	2 646	0.70
沙漠砂	0.19	1 400	2 624	0.14

表 4 骨料粒径分布

Table 4 Particle size distribution of aggregate				
筛孔尺寸/mm	筛分通过率/%			
	沙漠砂	机制砂	NCA	RCA
0.05	0.7			
0.075	8.0			
0.097	36.2			
0.16	93.4	4.7		
0.315	97.3	14.4		
0.63	99.8	30.0		
1.18		48.8		
2.36		67.2	0.2	1.5
4.75		98.2	1.7	2.7
9.5			33.5	32.3
16.0			83.7	87.6
19.0			99.1	98.8

研究^[8-10],沙漠砂替代率(desert sand replacement ratio, DSRR)选取 0 和 40%。RCA 替代率选取 25%、50%、75% 和 100%。立方体抗压和劈裂抗拉强度试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,抗折强度试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。

1.3 粗骨料改性

利用质量分数为 5%、10%、15% 硅酸钠溶液对 RCA 进行预处理,浸泡时间为 1 h、6 h、12 h,自然风干 24 h 后,进行粗骨料压碎指标和吸水率测试。

1.4 力学性能试验

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[11],试件成型后在温度为 (20±5)℃、相对湿度大于 50% 的室内静置 24 h 后拆模,随后放入标准养护室(温度(20±2)℃、相对湿度>95%)养护至试验龄期后进行力学性能测试。通过 MTS 微机控制电液伺服万能试验机进行 7、14、28、56 d 立方体抗压、劈裂抗拉以及 28 d 抗折强度试验。

1.5 显微硬度试验

使用 HVS-1000DT 型数显触屏显微硬度计进行显微硬度测定试验(图 1)。将 28 d 龄期试件切片后进行打磨抛光,制备成光滑平整待测试样。首次压痕点选在骨料(浆体)表面进行,后续压痕点与前次横向间隔 10 μm 进行,竖向距离 15 μm。测试范围包括旧骨料(OA)-旧砂浆(OM)界面过渡区(ITZ₁)、旧骨料(OA)-新砂浆(NM)界面过渡区(ITZ₂)、旧砂浆(OM)-新砂浆(NM)界面过渡区(ITZ₃)。

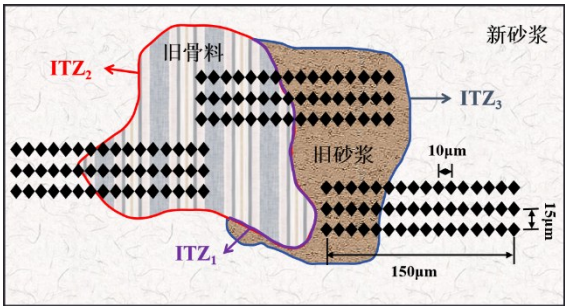


图 1 压痕示意图

Fig.1 Indentation schematic diagram

2 结果与分析

2.1 再生粗骨料改性

RCA 自身性能通常弱于 NCA,这是破碎筛分造成骨料内部产生的连通孔隙与微裂纹等缺陷导致。经硅酸钠溶液改性后,不同质量分数与浸泡时间下 RCA 压碎指标与吸水率均低于改性前(表 5、表 6),说明硅酸钠溶液对提升 RCA 强度、降低吸水率有显著改善作用,质量分数 5%、浸泡时间 1 h 时改性效果最佳。改性后压碎指标由 13.02% 降至 9.68%,下降了 25.7%;吸水率由 3.12% 降至 2.23%,下降了 28.5%。由于硅酸钠溶液具有较好渗透性,可通过毛细作用渗透进入骨料及附着砂浆内部,均匀填充孔隙和微裂缝,提升其致密性。随着水分蒸发,溶液中硅酸钠(Na₂SiO₃)以无定形二氧化硅(SiO₂)凝胶的形式析出,封堵了水分进入骨料内部通道,降低了吸水率^[12]。同时,固化在 RCA 表面的凝胶层使骨料表面结合牢固,显著增强骨料完整性和抗破碎性能。硅酸钠改性原理见图 2。长时

表 5 硅酸钠浸泡后再生粗骨料压碎指标

Table 5 The crushing index of recycled coarse aggregates after the immersion of sodium silicate			
浸泡时间/h	压碎指标/%		
	质量分数 5%	质量分数 10%	质量分数 15%
1	9.68	10.18	9.88
6	10.03	10.47	10.87
12	11.05	11.08	12.26

间浸泡会导致骨料覆盖过厚凝胶层,未完全反应 Na_2SiO_3 在凝胶层干燥收缩后导致骨料表面呈现多孔吸水特征,降低其与界面结合力^[13]。硅酸钠溶液质量分数过高时,流动性下降,渗透效果降低,导致改性效果受到限制。

表 6 硅酸钠浸泡后再生粗骨料吸水率/%

Table 6 The water absorption rate of recycled coarse aggregates after the immersion of sodium silicate

浸泡时间/h	吸水率/%		
	质量分数 5%	质量分数 10%	质量分数 15%
1	2.23	2.31	2.57
6	2.37	2.45	2.73
12	2.53	267	2.86

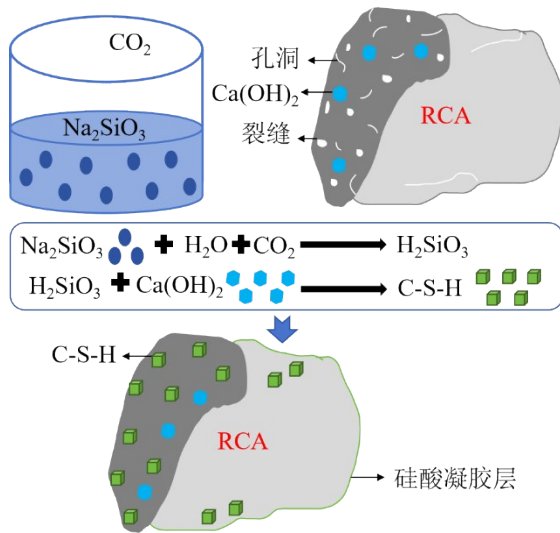


图 2 硅酸钠改性示意图

Fig.2 Schematic diagram of sodium silicate modification

2.2 再生混凝土工作性能

RCA 替代率和 DSRR 对再生混凝土坍落度有显著影响(图 3)。改性前未掺沙漠砂混凝土, RCA 替代率由 0 增至 100% 时坍落度由 170 mm 降至 130 mm,这归因于 RCA 多孔高吸水,消耗自由水导致浆体流动性下降;掺入 40% 沙漠砂后,相同 RCA 替

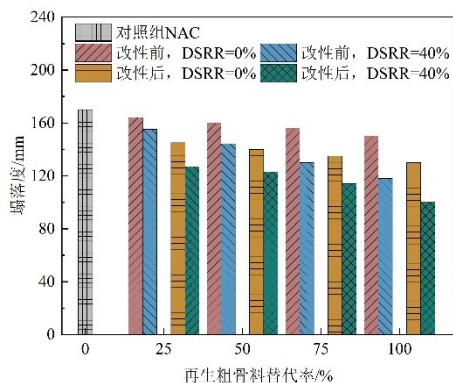


图 3 再生混凝土坍落度

Fig.3 Slump of recycled concrete

代率再生混凝土坍落度均降低,这是由于沙漠砂粒径小、比表面积大,吸附过多水分减少了拌制过程中自由水。硅酸钠改性后,各组坍落度均显著提升,DSRR 为 40%、RCA 为 100% 组坍落度从 100 mm 升至 118 mm,原因是硅酸钠改性改善了 RCA 表观形貌与活性、降低吸水率,优化浆体黏聚性与流动性,缓解了骨料缺陷的不利影响。

2.3 立方体抗压强度

再生混凝土抗压强度随 RCA 替代率增加呈线性下降趋势(图 4)。相比基准组,DSRR 为 0%、RCA 替代率为 25%、50%、75%、100% 的再生混凝土改性前 7d 抗压强度分别下降 6.9%、11.3%、14.7%、16.7%;14 d 时降幅分别为 8.4%、13.3%、17.5%、19.1%;28 d 时分别为 8.4%、12.8%、17.9%、20.2%,56 d 时分别为 10.4%、15.0%、19.1%、21.3%。RCA 原始孔隙、微裂纹等缺陷导致其与表面附着砂浆及新水泥砂浆之间黏结性能较弱^[14],承受荷载时易形成应力集中点,使其率先破坏。随着 RCA 替代率增大,内部缺陷越明显,抗压强度下降幅度越大。

适量沙漠砂的掺入可提升再生混凝土的抗压强度。DSRR 由 0% 增至 40% 时, RCA 替代率为 25%、50%、75%、100% 的再生混凝土改性前 28 d 抗压强度分别提升 2.5%、3.4%、4.4%、3.2%,56 d 强度分别提升 2.0%、4.3%、2.2%、4.7%;改性后再生混凝土 28 d 抗压强度分别提升 3.2%、4.1%、3.2%、3.6%,56 d 抗压强度分别提升 1.8%、1.9%、3.9%、4.0%。这是由于沙漠砂中细小颗粒可对 RCA 孔隙缺陷、再生混凝土水泥砂浆基体或骨料间孔隙进行有效填充,提升试件整体密实度^[15],从而提高承载能力。

硅酸钠改性后再生混凝土抗压强度明显提升。以 RCA 替代率 100% 为例,改性后 DSRR 为 0% 的再生混凝土 7、14、28、56 d 抗压强度相比改性前分别提升 11.2%、10.9%、10.8%、19.3%;改性后 DSRR 为 40% 再生混凝土相应的提升幅度分别为 11.0%、8.5%、11.3%、19.0%。硅酸钠与 RCA 附着砂浆中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶,增加旧砂浆结构密实度;同时,硅酸钠溶液与空气中 CO_2 反应在 RCA 表面固化形成凝胶网络^[16],提升了旧界面区域黏结性能和骨料结构整体性,再生混凝土表现出更优性能。

改性后再生混凝土后期强度提升幅度高于改性前。以 RCA 替代率为 50%、100% 为例,当 DSRR 为 0% 时,改性前再生混凝土 28 d 至 56 d 抗压强度提升幅度分别为 4.3%、5.1%,改性后相应

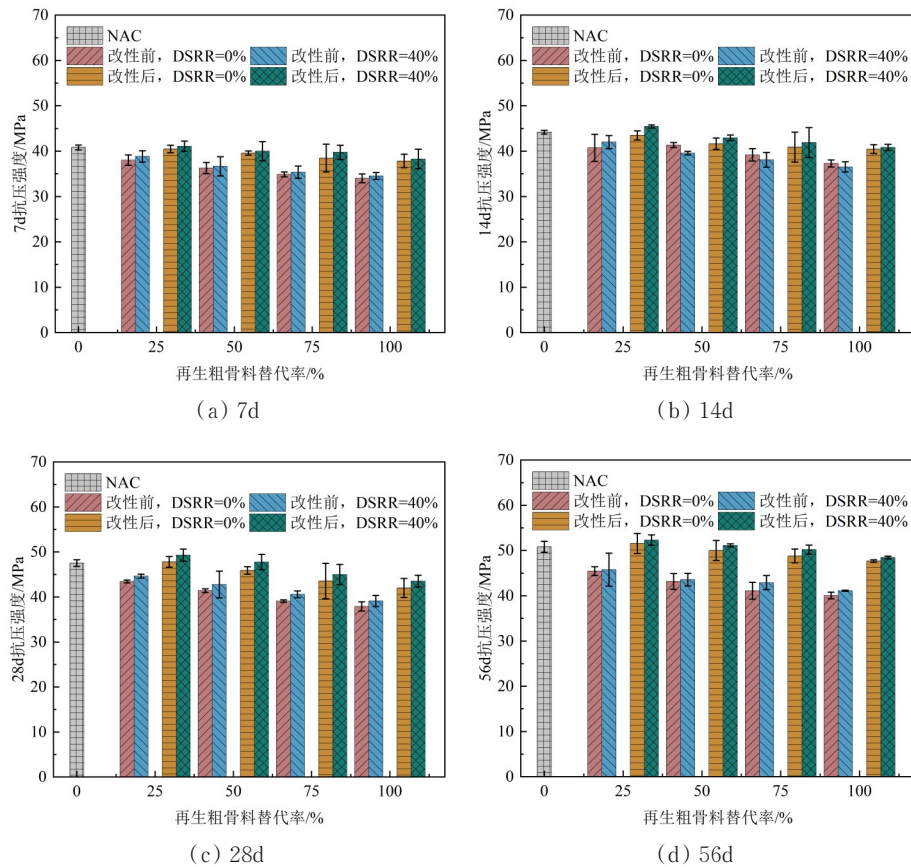


图4 再生混凝土各龄期抗压强度

Fig.4 The compressive strength of recycled concrete at different curing ages

提升幅度为8.9%、12.4%。这是由于改性前RCA表面存在孔隙裂缝,吸水率偏高,拌和物制备阶段部分自由水被骨料吸附,无法充分参与水泥水化反应,造成水化进程缓慢,水化产物生成量不足^[17],砂浆密实度降低,后期强度增长乏力;硅酸钠改性后RCA表面缺陷被改性产物填充,形成致密防护层,降低了骨料吸水率,更多自由水参与水化反应,确保水化反应的充分性。同时,硅酸钠溶液形成的碱性环境促进二次水化进程,进一步密实砂浆基体,提升混凝土后期强度增长幅度。

2.4 劈裂抗拉强度

随着RCA替代率增加,再生混凝土劈裂抗拉强度持续下降(图5)。相比基准组,DSRR为0%、RCA替代率为25%、50%、75%、100%的再生混凝土改性前7d劈裂抗拉强度分别下降14.0%、18.6%、20.9%、23.3%,14d时相应降幅分别为8.7%、10.9%、13.0%、17.4%,28d时降幅分别为8.2%、10.2%、12.2%、14.3%,56d时降幅分别为15.5%、20.7%、22.4%、25.9%。这是由于劈拉破坏主要发生在骨料与水泥砂浆界面处,RCA与新旧砂浆形成的ITZ孔隙率较高、粘结强度较低。与普通混凝土相比,受拉时再生混凝土在界面处更容易开裂。随着RCA替代率升高,再生混凝土内部薄弱

界面数量增加,劈裂抗拉强度降低。

掺入沙漠砂后再生混凝土劈裂抗拉强度小幅提升。当DSRR由0%增至40%时,RCA替代率为25%、50%、75%、100%的再生混凝土改性前28d劈裂抗拉强度提升2.2%~2.4%,56d强度提升2.0%~4.3%;改性后28d劈裂抗拉强度提升2.0%~2.3%,56d强度提升1.8%~4.0%。细小沙漠砂颗粒有效填充旧骨料砂浆界面区域及新砂浆基体中孔隙,提升试件整体均匀性,增强骨料与砂浆基体之间黏结,降低裂纹扩展概率,提高整体抗拉性能。

硅酸钠改性对再生混凝土劈裂抗拉强度提升明显。DSRR为0%再生混凝土28d劈裂抗拉强度相比改性前提升4.8%~9.1%;DSRR为40%再生混凝土28d劈裂抗拉强度相比改性前提升6.8%~8.9%。这是由于硅酸钠溶液浸泡生成的C-S-H凝胶有效填充RCA与旧界面区域孔隙和微裂缝,增强旧界面黏结性能。改性后RCA表面凝胶层增大新水泥砂浆附着力,提升新界面区域密实性,使受载过程应力传播路径更加均匀,贯通裂缝的形成遭受更大阻力,抗拉能力增强。

2.5 抗折强度

再生混凝土28d抗折强度随RCA替代率升高

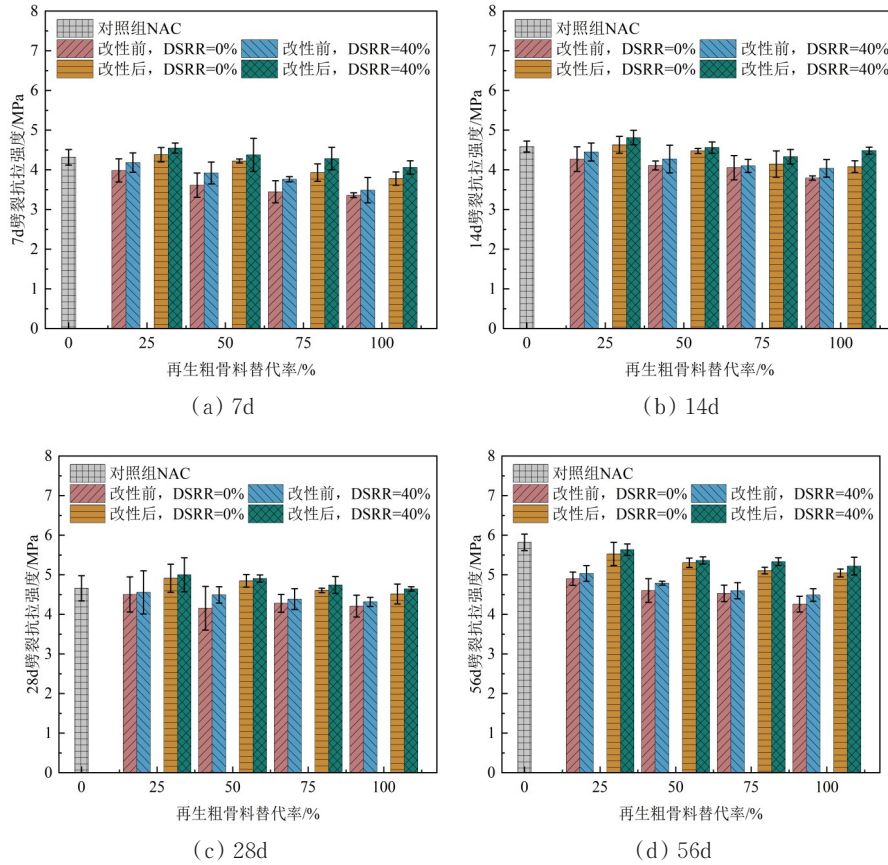


图5 再生混凝土各龄期劈裂抗拉强度

Fig.5 The splitting tensile strength of recycled concrete at different curing ages

呈现明显下降趋势(图6)。相比基准组, RCA替代率为25%、50%、75%、100%的再生混凝土改性前抗折强度下降22.9%、29.2%、33.3%、37.5%。骨料与砂浆基体之间黏结性能是抗折强度决定因素^[18]。旧骨料孔隙率高、旧界面区域黏结力薄弱,受弯时易发生砂浆剥落,从而破坏骨料与水泥浆体协同受力,更易发生脆性断裂。

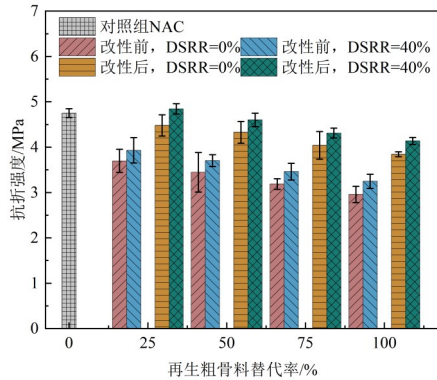


图6 再生混凝土28d抗折强度

Fig.6 The 28d flexural strength of recycled concrete

沙漠砂的掺入对抗折强度提升有积极作用。RCA替代率为25%、50%、75%、100%时,与DSRR为0%再生混凝土相比,DSRR为40%的再生混凝土改性前抗折强度分别提升5.4%、8.8%、9.4%、

6.7%;改性后提升幅度为6.7%、7.0%、7.5%、7.9%。适量沙漠砂的掺入可以优化骨料级配,减少因级配失衡导致的局部应力集中,延缓裂缝扩展速度,提升界面抗裂能力。同时,细小的沙漠砂颗粒填充再生混凝土界面缺陷,可以优化孔隙结构,提升荷载传递效率,增强整体协同性。

硅酸钠溶液改性对再生混凝土抗折强度提升效果显著。RCA替代率为25%、50%、75%、100%时,DSRR为0%再生混凝土改性后抗折强度相比改性前分别提升21.6%、26.5%、25.0%、26.7%,DSRR为40%的再生混凝土改性后抗折强度相比改性前分别提升23.1%、24.3%、22.9%、28.1%。这是因为改性过程中生成的C-S-H凝胶对旧界面区域缺陷进行了有效修复,增加界面结构均匀性,固化后形成的硅酸凝胶层增强骨料整体性,降低了开裂风险,从而提升抗折强度。

3 显微硬度分析

3.1 显微硬度标准区域确定

界面过渡区是混凝土最薄弱环节,再生混凝土多重界面过渡区显著影响其力学性能^[19]。在新旧砂浆基体区域随机标记50个点,利用Origin软件对测

得显微硬度值进行箱型图统计分析,通过上四分位数和下四分位数确定砂浆基体显微硬度标准区域,箱型统计图中下四分位数值为标准区域下限值,将显微硬度值低于标准区域下限值的区域确定为界面区域,分别测定普通混凝土(NAC)、再生混凝土(RAC)、DSRR 为 40% 的沙漠砂再生混凝土(DSRAC)、改性再生混凝土(MRAC)、改性且 DSRR 为 40% 的沙漠砂混凝土(DSMRAC)显微硬度标准区域值。图 7 为箱型统计结果。

基准组普通混凝土显微硬度值显著高于再生混凝土。相比 RAC 组,MRAC 组 OM 基体标准区域显微硬度下限值提升 7.1%、NM 基体下限值提升 2.4%,DSRAC 组 NM 基体下限值提升 5.2%,DSMRAC 组 NM 基体下限值提升 6.9%。砂浆基体显微硬度与其微观结构致密性相关^[20]。沙漠砂的掺入和硅酸钠溶液改性再生粗骨料能够增强混凝土微观结构致密性,从而提升显微硬度值。

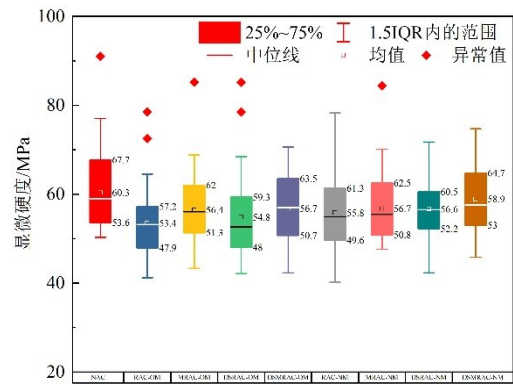
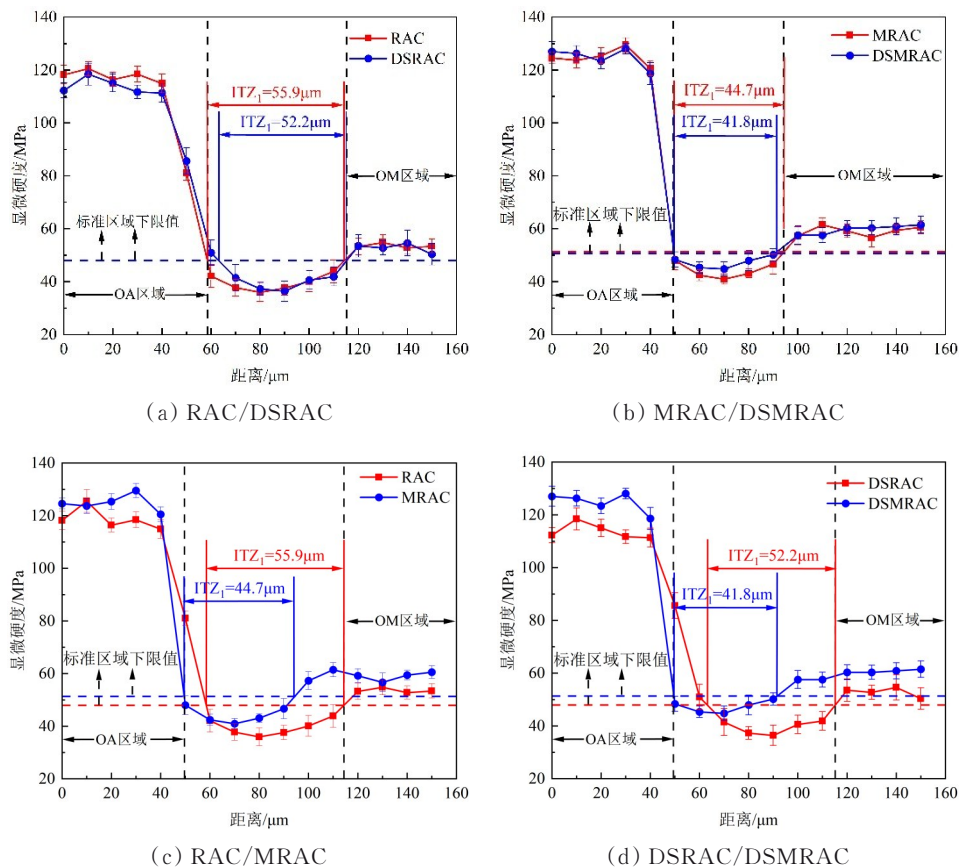


图 7 显微硬度箱型图统计

Fig.7 Box statistics of micro-hardness

3.2 OA-OM界面(ITZ₁)

图 8 为 ITZ₁显微硬度值变化情况。显微硬度值在 OA 区域内变化幅度较小,靠近界面时逐渐减小并在界面内达到最低,进入 OM 区域后逐渐上升。RAC、DSRAC、MRAC 和 DSMRAC 组 ITZ₁宽度分别为 55.9、52.2、44.7、41.8 μm 。

图 8 沙漠砂和硅酸钠改性对 ITZ₁显微硬度影响Fig.8 The influence of desert sand and sodium silicate modification on the micro-hardness of ITZ₁

沙漠砂的掺入一定程度上对 ITZ₁进行了优化。相比 RAC 组,DSRAC 组 ITZ₁宽度下降 6.6%;相比 MRAC 组,DSMRAC 组 ITZ₁宽度下降 6.5%。这是由于沙漠砂中粒径小于 75 μm 的细颗粒可对 RCA 与表面黏附旧砂浆中较明显的结构缺陷进行

填充,优化旧界面区域孔隙结构,提升结构致密性与完整度,降低界面宽度。

硅酸钠改性对 ITZ₁显微硬度值提升较为明显。相比 RAC 组,MRAC 组 ITZ₁宽度下降 20.0%;相比 DSRAC 组,DSMRAC 组 ITZ₁宽度下降 19.9%。

DSMRAC 相比 RAC 组 ITZ_1 宽度下降 25.2%。硅酸钠溶液通过毛细作用渗透进入骨料与旧砂浆孔隙裂缝中,对原始缺陷进行了有效修复^[21]。同时,硅酸钠溶液与界面区域中 $Ca(OH)_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶和少量 C-A-S-H 凝胶,将原本松散的界面颗粒胶结牢固,有效提升了界面结合力与结构均匀性。

3.3 OA-NM 界面(ITZ_2)

图 9 为 ITZ_2 显微硬度值变化情况。骨料至新砂浆区域显微硬度值呈现先降低后升高趋势,OA 区域显微硬度最大,NM 区域次之, ITZ_2 显微硬度最小。RAC、DSRAC、MRAC、DSMRAC 组 ITZ_2 宽度分别为 63.9、58.0、52.6、46.4 μm 。

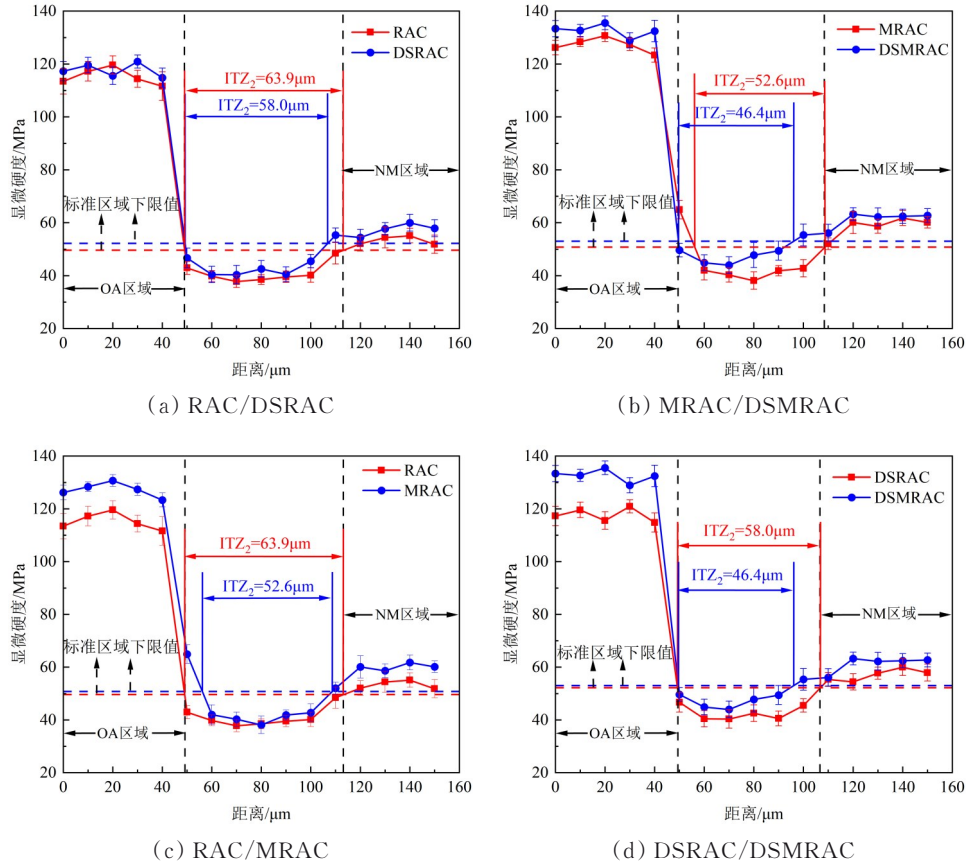


图 9 沙漠砂和硅酸钠改性对 ITZ_2 显微硬度影响

Fig.9 The influence of desert sand and sodium silicate modification on the micro-hardness of ITZ_2

沙漠砂的掺入对再生混凝土 ITZ_2 性能提升有积极作用。与 RAC 组相比,DSRAC 组 ITZ_2 宽度下降 9.2%;与 MRAC 组相比,DSMRAC 组 ITZ_2 宽度下降 11.8%。 ITZ_2 性能提升一方面源于沙漠砂颗粒分散填充在新拌水泥砂浆内部毛细孔隙与界面孔隙处,提升基体密实度,减少界面缺陷;另一方面,分散的沙漠砂颗粒在砂浆基质中形成骨架网络,抑制砂浆过度收缩变形,降低界面开裂风险,从而提升了 ITZ_2 结构完整性。

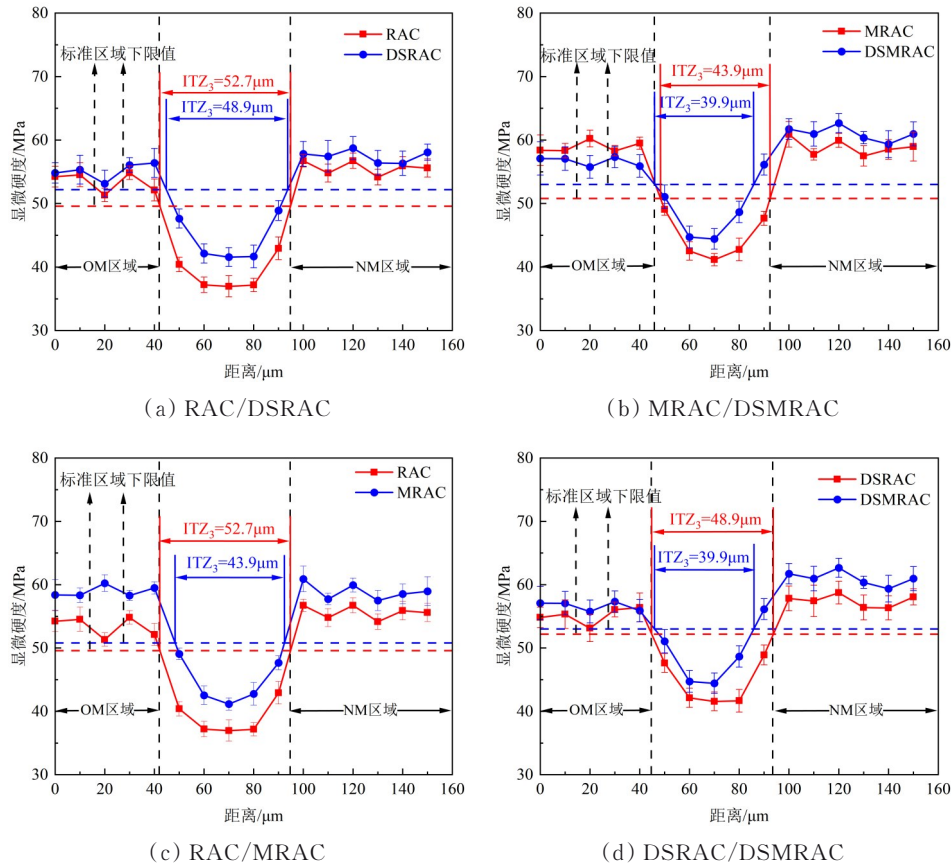
硅酸钠溶液改性后 RCA 与 ITZ_2 显微硬度值均提高,界面宽度显著减小。相比 RAC 组,MRAC 组 ITZ_2 宽度下降 17.7%;相比 DSRAC,DSMRAC 组 ITZ_2 宽度下降 20.0%。DSMRAC 相比 RAC 组 ITZ_2 宽度下降 27.4%。这主要是由于硅酸钠与空气中 CO_2 反应,固化在 RCA 表面硅酸凝胶层对骨料进行密实化,提升其表面粗糙度,提高旧骨料与新

拌水泥砂浆间粘结强度。同时,硅酸钠改性后骨料表层化学活性得到提升,碱性离子通过激活新砂浆基体中 C_3S 、 C_2S 等矿物生成更多 C-S-H 凝胶,促进二次水化进程,使 ITZ_2 更加坚固。

3.4 OM-NM 界面(ITZ_3)

图 10 为 ITZ_3 显微硬度值变化情况。显微硬度值自 OM 区域逐渐减小,至 ITZ_3 达到最小值,随后增大至 NM 区域,进入 NM 区域后基本不变。旧砂浆区域历经破碎、拆除等工序,导致内部结构损伤,故显微硬度略低于新砂浆区域。RAC、DSRAC、MRAC、DSMRAC 组 ITZ_3 宽度分别为 52.7、48.9、43.9、39.9 μm 。

沙漠砂的掺入提升了 ITZ_3 性能。相比 RAC 组,DSRAC 组 ITZ_3 宽度下降 7.2%;相比 MRAC,DSMRAC 组 ITZ_3 宽度下降 9.1%。沙漠砂颗粒中活性 SiO_2 、 Al_2O_3 等组分在旧砂浆表层碱性环境区域

图 10 沙漠砂和硅酸钠改性对 ITZ₃ 显微硬度影响Fig.10 The influence of desert sand and sodium silicate modification on the micro-hardness of ITZ₃

与新砂浆基体水化产物反应生成-Si-OH-、-Al-OH-等化学键,在细骨料周边交织形成网状或片层状结构^[22],强化了界面区域整体性能。致密的界面结构与均匀的水化产物可维持界面长期黏结性能,延缓界面劣化。

硅酸钠溶液改性对于提升 ITZ₃ 性能有积极作用。相比 RAC 组,MRAC 组 ITZ₃ 宽度下降 16.7%;相比 DSRAC 组,DSMRAC 组 ITZ₃ 宽度下降 18.4%。硅酸钠溶液与旧砂浆中遗留的活性组分反应生成的 C-S-H 凝胶产物有效填充旧砂浆缺陷,

增强其与新砂浆基体的结合程度。同时,覆盖在旧砂浆表面的凝胶层具备高反应活性,可以与新砂浆基质中水化后期产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,持续产生 C-S-H 凝胶,进一步密实界面结构,提升新旧砂浆界面密度与整体性。

图 11 为再生混凝土微观多界面过渡区宽度与抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度关系曲线。微观多界面宽度与宏观力学性能之间呈现线性负相关关系,即随着抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度增大,多界面过渡区宽度呈减小趋势。模型相关系

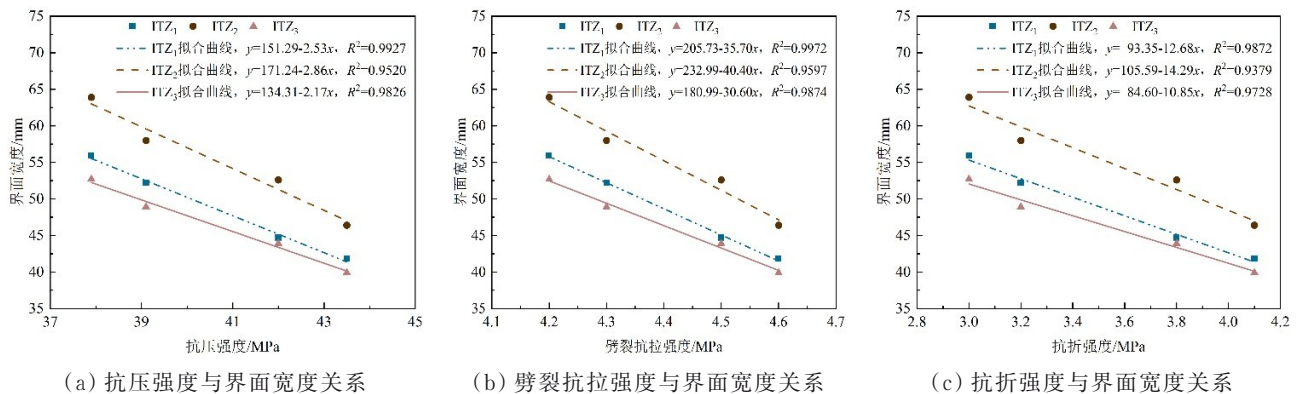


图 11 再生混凝土微观界面宽度与力学性能关系

Fig.11 The relationship between the micro-interface width of recycled concrete and its mechanical properties

数 R^2 均大于 0.95, 表明拟合效果良好。

回归方程显著性检验是保障回归分析结论严谨性的关键环节, 通过统计学方法验证模型是否真实反映变量间内在关联, 可确定模型的有效性与可靠度^[23]。针对构建的再生混凝土微观多界面宽度与宏观力学性能回归模型, 采用 F 检验结合 p 值开展显著性检验(表 7), p 值均小于 0.05 的显著性水平, 表明在 95% 置信水平下, 再生混凝土微观多界面宽度与宏观力学性能之间的负相关关系具有显著性。通过 Shapiro-Wilk 对常规残差进行正态性验证, 模型残差的正态性 p 值均大于 0.05, 在 95% 置信水平下接受“残差服从正态分布”的回归假设, 模型误差符合线性回归基本要求, 进一步验证了模型的可靠性。

表 7 回归结果显著性检验

Table 7 Significance test of regression results

自变量	回归系数	标准误差	F 值	显著性 p 值	正态性 p 值
抗压强度(ITZ ₁)	-2.53	0.13	407.94	0.002 4	0.190 0
抗压强度(ITZ ₂)	-2.86	0.37	60.51	0.016 1	0.581 7
抗压强度(ITZ ₃)	-2.17	0.17	170.27	0.005 8	0.414 1
劈裂抗拉强度(ITZ ₁)	-35.70	1.09	1 057.67	0.000 9	0.806 3
劈裂抗拉强度(ITZ ₂)	-40.40	4.75	72.36	0.013 5	0.684 9
劈裂抗拉强度(ITZ ₃)	-30.60	1.99	235.86	0.004 2	0.640 6
抗折强度(ITZ ₁)	-12.68	0.83	233.04	0.004 3	0.171 3
抗折强度(ITZ ₂)	-14.29	2.09	46.32	0.020 9	0.356 5
抗折强度(ITZ ₃)	-10.85	1.04	108.45	0.009 1	0.456 5

4 结论

利用沙漠砂替代中砂、硅酸钠改性再生粗骨料替代普通粗骨料制备再生混凝土, 开展其力学性能与微观界面显微硬度试验, 分析 DSRR 和硅酸钠改性再生粗骨料替代率对再生混凝土宏观力学性能和微观界面特性的影响。主要结论如下:

1) 硅酸钠溶液改性可显著优化 RCA 自身性能。相比改性前, 骨料压碎指标和吸水率分别降低 25.7% 和 28.5%。

2) 再生混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均随 RCA 替代率增大呈线性下降趋势, 沙漠砂的掺入与硅酸钠改性联合作用可有效提升其力学性能。当 RCA 替代率为 25%、DSRR 为 40% 时, 改性后的再生混凝土性能最优, 其 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度分别较基准组提升 4.0 和 2.0%, 28 d 抗折强度与基准组持平。

3) 沙漠砂的掺入与硅酸钠改性对再生混凝土 ITZ 性能具有协同强化作用, 不仅提升界面显微硬度, 同时能够缩减界面宽度。与 RAC 组相比, 沙漠

砂与改性再生粗骨料复合作用下 DSMRAC 组 ITZ₁、ITZ₂、ITZ₃ 宽度分别下降 25.2%、27.4%、24.3%, 界面结构密实度与整体性均得到改善。

参考文献

- [1] Bui N K, Satomi T, Takahashi H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 496-507.
- [2] Trivedi S S, Sarangi D, Das B B, et al. Influence of multi-stage processing and mechano-chemical treatments on the hydration and microstructure properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133993.
- [3] Astutiningsih S, Ospaman D A, Handika N, et al. A comparative study of the life cycle assessment of natural, recycled, and oil palm shell aggregate concretes [J]. Cleaner Waste Systems, 2025, 12: 100397.
- [4] 牛景行, 王缘, 赵红艳, 等. 沙漠砂在水泥基材料中的应用综述与展望[J/OL]. 材料导报. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20250731.1528.011>.
NIU J H, WANG Y, ZHAO H Y, et al. Review and outlook on utilization of desert sand in cement-based materials [J/OL]. Materials Reports. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20250731.1528.011..> (in Chinese)
- [5] Hamada H M, Abed F, Al-Sadoon Z A, et al. The use of treated desert sand in sustainable concrete: A mechanical and microstructure study [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107843.
- [6] 孟浩, 杨维武, 刘海峰. 沙漠砂替代率对冻融环境下混凝土抗压性能的影响[J]. 宁夏工程技术, 2023, 22(1): 49-55.
Meng H, Yang W W, Liu H F. Influence of desert sand replacement rate on compressive performance of concrete in freeze-thaw environment [J]. Ningxia Engineering Technology, 2023, 22(1): 49-55. (in Chinese)
- [7] Liu F C, Qin Y J, Yang Y H. Investigation on cement-stabilized base with recycled aggregate and desert sand [J]. Materials, 2024, 17(17): 4262.
- [8] Liu H F, Ma J R, Wang Y Y, et al. Influence of desert sand on the mechanical properties of concrete subjected to impact loading [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2017, 30(6): 583-595.
- [9] 刘海峰, 马映昌, 张润奇, 等. 冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3): 101-109, 117.
Liu H F, Ma Y C, Zhang R Q, et al. Influence of desert sand on axial compression behavior of concrete under freezing and thawing environment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(3): 101-109, 117. (in

- Chinese)
- [10] 刘海峰,姜彦杰,孙竞鹏,等. 硫酸盐冻融下沙漠砂混凝土抗冻性能及基于 GM(1, 1)模型强度预测[J]. 功能材料, 2024, 55(12): 12151-12161.
Liu H F, Jiang Y J, Sun J P, et al. Research on frost resistance of desert sand concrete under sulphate freeze-thawing and prediction model of strength based on GM (1, 1) model [J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(12): 12151-12161. (in Chinese)
- [11] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S].
- [12] Yin J M, Kang A H, Xiao P, et al. Influences of spraying sodium silicate based solution/slurry on recycled coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2023, 377: 130924.
- [13] 刘国涛,熊枫. 建筑垃圾再生骨料吸水性能改善试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 970-973.
Liu G T, Xiong F. Research on modifying water absorption of construction waste recycled aggregate [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 970-973. (in Chinese)
- [14] 郭樟根,陈晨,范秉杰,等. 再生粗细骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊 2): 94-102.
Guo Z G, Chen C, Fan B J, et al. Experimental research on mechanical behavior of concrete made of coarse and fine recycled aggregates [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Sup 2): 94-102. (in Chinese)
- [15] Ren Z Q, Dong W, Dong X R. Analysis of fractal and erosion characteristics of aeolian sand concrete pore structure under capillary absorption [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 104: 112258.
- [16] Qiu J S, Wang J W, Feng Z P, et al. Study on the modification mechanism of recycled brick-concrete aggregate concrete based on water glass solution immersion method [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108303.
- [17] Fallahnejad H, Davoodi M R, Nikbin I M. The influence of aging on the fracture characteristics of recycled aggregate concrete through three methods [J]. Structural Concrete, 2021, 22(S1): E74-E93.
- [18] Akbarnezhad A, Ong K C G, Zhang M H, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3469-3479.
- [19] Jalilifar H, Sajedi F. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121041.
- [20] Guan X, Gao Y, Chen J X, et al. Deterioration mechanism of coal gangue concrete under the coupling action of bending load and freeze-thaw [J]. Construction and Building Materials, 2022, 338: 127265.
- [21] 宋学锋,白超. 化学强化剂对再生骨料及再生混凝土性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1748-1754.
Song X F, Bai C. Effect of chemical enhancing agents on the properties of recycled aggregate and recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1748-1754. (in Chinese)
- [22] Li Y G, Zhang H M, Liu G X, et al. Multi-scale study on mechanical property and strength prediction of aeolian sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118538.
- [23] 胡菊华. 基于残差分析的线性回归模型的诊断与修正[J]. 统计与决策, 2019, 35(24): 5-8.
Hu J H. Diagnosis and correction of linear regression model based on residual analysis [J]. Statistics & Decision, 2019, 35(24): 5-8. (in Chinese)

(编辑 XXX)