

阎杰,冯龙辉,梁重阳,等. 碳酸钙晶须对再生骨料混凝土性能影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):52-58. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250199

YAN Jie, FENG Longhui, LIANG Chongyang, et al. Effect of calcium carbonate whiskers on the properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 52-58. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250199

碳酸钙晶须对再生骨料混凝土性能影响

阎杰^{1,2}, 冯龙辉¹, 梁重阳¹, 王晓雨¹, 杨博¹, 谢军^{1,2}, 贺艳^{3*}

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省土木工程诊断改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3. 广西大学 化学与化工学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 为改善再生骨料混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC) 的力学性能和抗氯离子渗透性能, 通过掺入不同掺量 (体积分数) 的碳酸钙晶须 (calcium carbonate whiskers, CW) 制备 RAC 试样, 测试其抗压强度、劈裂抗拉强度及氯离子迁移系数, 并结合扫描电子显微镜 (SEM) 和氮吸附法分析其微观作用机理。研究结果表明: 再生骨料替代率为 25%、CW 掺量为 0.8% 时, RAC 性能提升效果最优; CW 掺入过多会引发团聚效应, 导致 RAC 性能提升效果下降; CW 通过填充、桥联等效应优化 RAC 的微观形貌, 从而改善 RAC 性能。研究结论为 CW 在再生混凝土中的应用提供参考。

关键词: 再生骨料混凝土; 碳酸钙晶须; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 抗氯离子渗透性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0052-07

Effect of calcium carbonate whiskers on the properties of recycled aggregate concrete

YAN Jie^{1,2}, FENG Longhui¹, LIANG Chongyang¹, WANG Xiaoyu¹, YANG Bo¹, XIE Jun^{1,2}, HE Yan^{3*}

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 2. Hebei

Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000,

China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To enhance the mechanical properties and chloride ion penetration resistance of recycled aggregate concrete (RAC), RAC specimens were prepared by incorporating calcium carbonate whiskers (CW) with different content (volume fraction). The compressive strength, splitting tensile strength, and chloride migration coefficient were measured. The underlying mechanisms were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and the nitrogen adsorption method. The results indicate that the optimal performance of RAC is achieved with a 25% recycled aggregate (RA) replacement rate and a 0.8% CW volume fraction. However, excessive CW incorporation leads to agglomeration, which diminishes the improvement in RAC properties. CW optimizes the RAC matrix morphology through mechanisms such as pore-filling and crack-bridging, thereby improving its performance. These findings provide a theoretical foundation for the application of CW in RAC.

Keywords: recycled aggregate concrete (RAC); calcium carbonate whiskers (CW); compressive strength; splitting tensile strength; chloride ion penetration resistance

0 引言

随着城市化进程的加快及建筑行业的快速发展, 日益增多的建筑废弃物占用了大量土地资源,

产生不容忽视的环境问题^[1-2]。再生骨料混凝土 (RAC) 是将建筑废弃混凝土破碎后形成的再生骨料 (RA) 部分或全部替代天然骨料 (natural aggregate, NA) 制备而成的建筑材料。RA 的使用

收稿日期: 2025-05-08 修回日期: 2025-10-05 接受日期: 2025-10-10 责任编辑: 黄琦

基金项目: 河北省建设科技研究指导性计划项目 (2024-2187; 2024-2188)

作者简介: 阎杰 (1980-), 女, 辽宁锦州人, 博士, 教授, 主要从事建筑绿色材料循环再生利用方面的研究。E-mail: yanjie6253@126.com

通信作者: 贺艳 (1980-), 女, 辽宁盘锦人, 博士, 副教授, 主要从事碱激发材料结构调控方面的研究。E-mail: 568158886@qq.com

不仅能有效解决天然骨料资源短缺问题,还能实现建筑废弃物的资源化利用^[3]。但在实际破碎过程中RA会产生许多裂缝,且表面常附着老旧砂浆,多孔结构及薄弱界面会显著劣化其物理、力学及耐久性能,导致RAC性能普遍低于普通混凝土^[4],在实际工程中的推广和应用受到限制。

为改善RAC性能,学者对纤维增强RAC技术开展了广泛研究。目前常用于提升RAC性能的纤维有钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等,这些纤维通过在混凝土中桥接裂缝及削弱裂纹尖端应力等方式,提高RAC的力学性能和耐久性能^[5-6]。此外,剑麻纤维、竹原纤维、椰壳纤维等植物纤维也被用于强化RAC性能,但在混凝土碱性环境下植物纤维易水解和矿化^[7],导致性能退化,降低对RAC性能的优化效果。近年来,晶须作为一种稳定的微米级单晶纤维材料,成为水泥基增强材料领域的研究热点。牛旭婧等^[8]研究发现,碳化硅晶须可通过成核效应、填充效应及桥接阻裂作用,显著提升混凝土28d抗压强度与抗拉强度。汪小庆等^[9]研究表明,硫酸钙晶须在混凝土基体中可被水泥浆体包裹形成空间骨架结构,并通过填充微孔优化基体的致密性,从而显著提高混凝土的力学性能。ZHONG等^[10]研究表明,硫酸钙晶须(CW)最佳掺量为2%,与同类型未掺加晶须的RAC相比,抗压强度提高15%、劈裂抗拉强度提高38.75%。CAO等^[11-12]、LI等^[13]研究表明,CW通过填充、裂纹偏转及桥联效应提升材料的力学性能和抗裂性能。张卓森等^[14]研究表明,CW掺入的体积分数为0.15%~0.2%时,可显著提高各龄期风积沙混凝土的力学性能。研究发现,通过湿法碳化技术,利用细再生混凝土废料即可制备CW^[15]。CW来源广泛,机械性能优异,且制备成本低廉。将CW用于增强RAC性能,为RAC性能优化提供了新思路。

鉴于此,本文以RAC为研究对象,探究不同CW掺量及RA替代率对RAC抗压强度、劈裂抗拉强度及抗氯离子渗透性能的影响。通过力学性能试验、快速氯离子迁移系数法(RCM法)及微观测试,揭示CW对RAC性能的优化机理,以期推动绿色建筑材料的研发与工程应用。

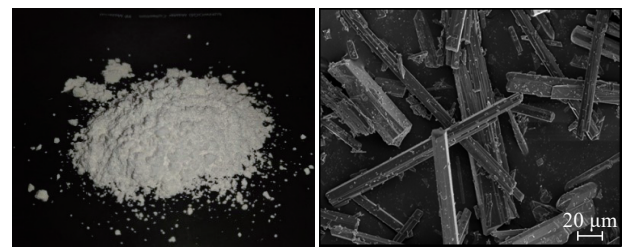
1 原材料及试验方法

1.1 原材料

胶凝材料采用张家口市金隅牌P·O42.5普通硅酸盐水泥。粗骨料采用天然骨料和再生骨料,连续级配碎石粒径均为5~25mm。粗骨料的物理性能见表1。细骨料采用细度模数为2.69的天然水洗河砂(Ⅱ区中砂),晶须采用市售文石型CW,其宏观及微观形貌见图1,物理性能指标见表2(其中24h吸水率为质量分数)。采用减水率大于25%的高效聚羧酸减水剂。试验拌合用水和RA附加用水均为自来水。

表1 粗骨料的物理性能
Tab.1 physical properties of coarse aggregates

骨料类型	表观密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎指标 /%	24h吸水率 /%
NA	2 880	1 738	14	0.38
RA	2 686	1 352	16	5.50



(a) 宏观形貌 (b) 微观形貌

图1 CW宏观及微观形貌

Fig.1 macro and micro morphology of CW

表2 CW物理性能指标
Tab.2 physical properties of CW

密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	莫氏硬度	长度/ μm	直径/ μm	长径比
2.8	3	20~150	5~20	2~12

1.2 CW再生骨料混凝土的制备

为了探究CW对RAC力学及抗氯离子渗透性能的影响,开展碳酸钙晶须-再生骨料混凝土(CW-RAC)力学及抗氯离子渗透性能试验。水胶比为0.47,砂率为37%,RA替代率分别为0、25%、50%、100%。根据文献[12]和文献[13],晶须掺量约为1.6%时,水泥基复合材料性能最佳,故本文CW掺量取0、0.8%、1.6%、2.4%。依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)设计配合比,见表3,制备不同CW掺量的RAC试样。

表3 CW-RAC配合比
Tab.3 CW-RAC mix ratios

试样编号	CW 掺量/%	水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	天然粗骨料/(kg·m ⁻³)	再生粗骨料/(kg·m ⁻³)	附加用水/(kg·m ⁻³)
RC0CW0	0	217.5	463	655	1 115	0	0
RC25CW0	0	217.5	463	655	836	279	15.3
RC50CW0	0	217.5	463	655	558	558	30.7
RC100CW0	0	217.5	463	655	0	1 115	61.0
RC25CW0.8	0.8	217.5	463	655	836	279	15.3
RC25CW1.6	1.6	217.5	463	655	836	279	15.3
RC25CW2.4	2.4	217.5	463	655	836	279	15.3
RC50CW0.8	0.8	217.5	463	655	558	558	30.7
RC50CW1.6	1.6	217.5	463	655	558	558	30.7
RC50CW2.4	2.4	217.5	463	655	558	558	30.7
RC100CW0.8	0.8	217.5	463	655	0	1 115	61.0
RC100CW1.6	1.6	217.5	463	655	0	1 115	61.0
RC100CW2.4	2.4	217.5	463	655	0	1 115	61.0

注:试样编号RC_xCW_y表示RA替代率(质量分数)为x%、CW掺量为y%的CW-RAC。

1.3 试验方法

(1) 力学性能试验

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),采用WHY-2000型万能试验机开展混凝土28 d抗压强度和劈裂抗拉强度试验。综合考虑实际应用情况及试验成本,力学性能试验均采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的非标准试样,每种配比包含两组共6个非标准试样。

(2) 氯离子渗透试验

依据《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024),采用高为(50±2) mm、直径为(100±1) mm的圆柱体试样,通过RCM法测定氯离子在混凝土中的迁移系数,确定其抗氯离子渗透性能。氯离子渗透试验显色剂采用0.1 mol/L的硝酸银溶液。

(3) 微观结构试验和孔隙结构试验

为了保证试验结果的准确性和可靠性,在混凝土立方体试样中心部位取样,分别采用TESCAN MIRA LMS型扫描电子显微镜、贝仕德3H-2000PM1型高性能微孔分析仪开展混凝土微观结构试验、孔隙结构试验。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能试验结果与分析

混凝土28 d抗压强度及劈裂抗拉强度见表4。

随着RA替代率的增加,RAC抗压强度逐渐降低。随着CW掺量的增加,RAC抗压强度先升后降。CW掺量为0.8%时,RAC抗压强度达到峰值。随着RA替代率的变化,CW掺量对RAC抗压强度的影响存在差异。RA替代率为25%时,3种CW掺量下RAC抗压强度均高于试样RC25CW0,其中,试样RC25CW0.8、试样RC25CW1.6、试样RC25CW2.4相较试样RC25CW0分别提高9.83%、6.40%、2.10%,且试样RC25CW0.8和试样RC25CW1.6的抗压强度甚至超过了天然骨料混凝土(试样RC0CW0)。RA替代率为50%时,试样RC50CW0.8、试样RC50CW1.6相较试样RC50CW0,抗压强度分别提高10.99%和8.99%,但CW掺量提高至2.4%时,RAC抗压强度有所下降。RA替代率为100%的情况下,仅当CW掺量为0.8%时,对RAC抗压强度表现出增强效果。与试样RC100CW0相比,试样RC100CW1.6、试样RC100CW2.4的抗压强度分别降低了6.77%、8.39%。产生这种现象的原因是随着RA替代率的增加,RAC拌合流动性下降,基体缺陷密度增大,CW的分散效率降低,界面优化能力减弱,RAC基体的孔隙结构发生了劣化^[16]。

与抗压强度变化趋势类似,随着RA替代率的增加,RAC劈裂抗拉强度逐渐降低。随着CW掺量的增加,RAC劈裂抗拉强度呈先升后降的变化趋势。CW掺量为0.8%时,RAC劈裂抗拉强度达

到峰值。与抗压强度变化趋势不同的是, RA 替代率为 25% 时, 3 种 CW 掺量下 RAC 劈裂抗拉强度均高于天然骨料混凝土。与试样 RC25CW0 相比, 试样 RC25CW0.8、试样 RC25CW1.6、试样 RC25CW2.4 劈裂抗拉强度分别提高了 11.47%、7.14%、3.95%。RA 替代率为 50%、100% 时, CW 掺量对 RAC 劈裂抗拉强度的提升效果较弱。与试样 RC50CW0、试样 RC100CW0 相比, 试样 RC50CW0.8 和试样 RC100CW0.8 劈裂抗拉强度分别提高了 4.42% 和 2.26%。随着 RA 替代率的变化, CW 掺量对 RAC 劈裂抗拉强度的影响也存在差异。当 RA 替代率较低时, 对 CW 增强 RAC 劈裂抗拉强度效果的影响较小, 而当 RA 替代率持续增加, CW 分散不均匀, 无法在 RAC 内部充分发挥桥联、控制微裂缝延伸等作用, 导致 RAC 劈裂抗拉强度降低。

表 4 混凝土 28 d 抗压强度及劈裂抗拉强度
Tab.4 28 d compressive strength and splitting tensile strength of concrete

试样编号	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
RC0CW0	42.46	5.41
RC25CW0	41.41	5.32
RC50CW0	38.95	5.20
RC100CW0	35.76	4.86
RC25CW0.8	45.48	5.93
RC25CW1.6	44.06	5.70
RC25CW2.4	42.28	5.53
RC50CW0.8	43.23	5.43
RC50CW1.6	42.45	5.26
RC50CW2.4	35.95	5.13
RC100CW0.8	36.99	4.97
RC100CW1.6	33.34	4.64
RC100CW2.4	32.76	4.61

2.2 抗氯离子渗透性能试验结果与分析

以 RA 替代率为 25% 的 RAC 为例, 在其表面喷涂硝酸银溶液, 渗透区域呈银白色, 见图 2。与试样 RC25CW0 相比, CW 掺量为 0.8% 试样的渗透深度明显更小。随着 CW 掺量的增加, 氯离子的渗透深度逐渐增加, 表明掺入适量 CW 可提升 RAC 的抗氯离子渗透性能, 过量掺入 CW 反而会降低 RAC 的抗氯离子渗透性能。

以 RA 替代率为 25% 的 RAC 为例, 不同 CW 掺量下 RAC 的氯离子迁移系数和渗透深度见图 3。随着 CW 掺量的增加, 氯离子迁移系数和渗透深度呈

现相同的变化趋势。CW 掺量为 0.8% 时, 氯离子迁移系数和渗透深度最小, 与试样 RC25CW0 相比, 氯离子迁移系数减小了 24.14%。随着 CW 掺量的增加, 氯离子迁移系数和渗透深度有所增大, 总体呈先减后增的变化趋势。CW 掺量为 1.6%、2.4% 时, 与试样 RC25CW0 相比, 氯离子迁移系数分别减小了 23.28% 和 17.24%, 表明 RA 替代率为 25% 时, CW 的填充效应降低了 RAC 基体的孔隙率, 结构更密实, 阻碍了氯离子在孔隙中的迁移^[17]。CW 掺量超过 0.8% 后, 在 RAC 内部 CW 分散不均匀, 影响对 RAC 氯离子通道的阻断效果, 导致氯离子迁移系数有所增大。

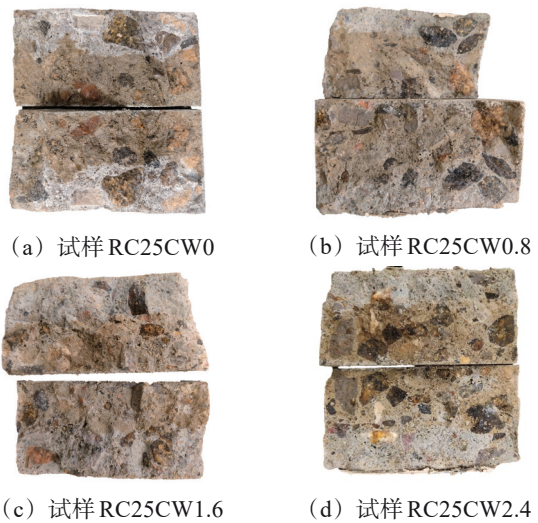


图 2 RAC 氯离子渗透显色结果

Fig.2 colorimetric results of chloride ion penetration in RAC

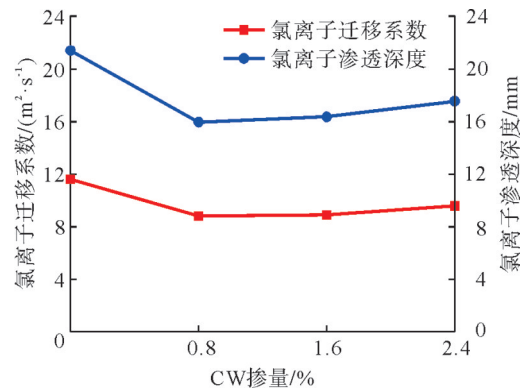


图 3 CW 掺量对 RAC 氯离子渗透性能的影响

Fig.3 effect of CW fraction on chloride ion permeability of RAC

3 CW-RAC 微观结构分析

为了探究 CW 对 RAC 性能的作用机理, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 对 CW-RAC 的微观形貌进行观测, 结果见图 4。

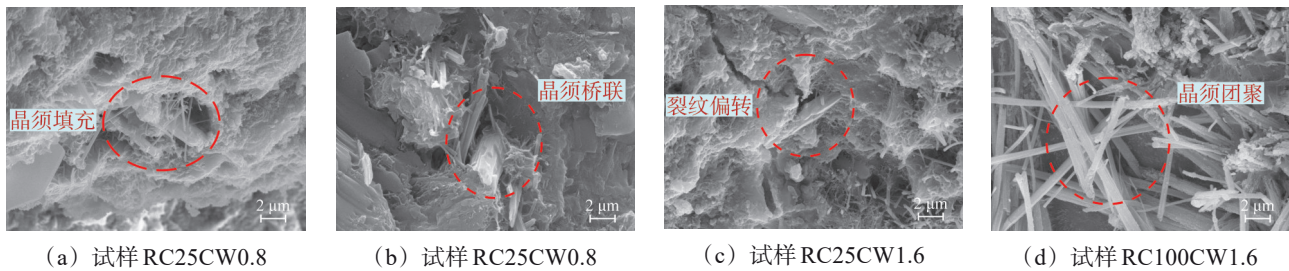


图4 CW-RAC的SEM微观形貌

Fig.4 SEM microscopic morphology of CW-RAC

由图4可以看出, CW通过填充孔隙、桥接裂缝、裂纹偏转等微观机制^[18-19], 提高RAC的密实度和整体结构完整性。由于CW尺寸较小, 因此可通过填充效应细化RAC内部孔隙结构^[20], 从而提高RAC的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗氯离子渗透能力^[14], 见图4(a)。此外, CW在RAC内部可形成桥联结构, 见图4(b)。通过与水泥基体紧密结合, CW将裂缝两侧紧密联系在一起, 阻碍裂缝的进一步扩展^[21-22], 从而提高RAC的抗裂能力, RAC劈裂抗拉性能显著提升。当RAC内部裂纹扩展至CW, 受CW与基体界面黏结力的约束, 裂纹无法沿初始方向持续发展, 进而发生偏转, 见图4(c)。此时, 裂缝需更多的能量才能继续扩展, 生长速度变慢^[23], 导致RAC性能有所提升。高RA替代率下, RAC基体初始缺陷密度大幅提高, 导致CW分散困难, 发生团聚, 见图4(d)。此时, 局部发生应力集中, 这会削弱CW对RAC性能的增强效果, 加剧RAC基体损伤, 导致RAC力学性能下降。

4 CW对RAC孔隙结构的影响

4.1 CW-RAC吸附-脱附等温线分析

以RA替代率为25%的试样为例, 不同CW掺量下RAC氮气吸附-脱附等温线见图5。其中, P 为吸附平衡后的压力; P_0 为吸附质在吸附温度下的饱和蒸气压; P/P_0 为相对压力。

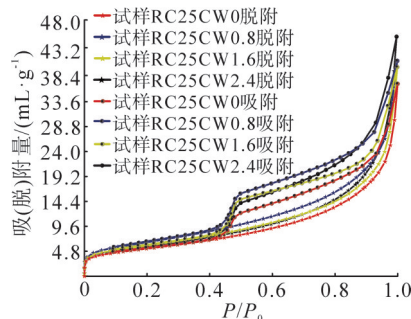


图5 RAC吸附-脱附等温线

Fig.5 adsorption and desorption isotherms of RAC

由图5可以看出, 试样吸附曲线均为“S”型II类吸附等温线, 且存在明显的回滞环。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)的分类标准^[24], 回滞环均属于“H3”型, 其形状和大小表征了试样孔结构的类型和孔径特征。相对压力较小时, 氮在微孔表面表现为单分子层吸附(主要为不透气微孔吸附和较细孔吸附)。当吸附质逐渐覆盖整个吸附剂表面并形成单分子层时, 曲线趋于平缓。此时, 单分子层吸附趋于饱和。当相对压力进一步增大($P/P_0 > 0.4$), 在0.4~0.6的相对压力区间内, 曲线出现明显拐点, 表明RAC内部存在两端开放的毛细孔。相对压力接近饱和气压($P/P_0 \approx 1$)时, 吸附量无明显上限, 表明试样内部存在平行狭缝结构和裂缝^[25]。随着CW掺量的增加, 在其填充效应的影响下, RAC内部微孔和介孔数量增多, 比表面积增大, 吸附量上升, 曲线上移, 与CW-RAC力学及抗氯离子渗透性能试验结果一致。

4.2 比表面积及孔径分布特征分析

以RA替代率为25%的试样为例, RAC比表面积及孔径分布特征见表5。与试样RC25CW0相比, 掺入CW后, 试样RC25CW0.8的比表面积增大, 累积孔体积、 D_{90} 、 D_{10} 和最可几孔径减小, 表明掺入CW会细化RAC孔径, 减少孔数量, 与RAC氮气吸附-脱附曲线的分析结果一致。 D_{90} 、 D_{10} 分别为累积孔体积达到总孔体积90%、10%时所对应的孔径; 最可几孔径为吸附剂孔径分布最集中的孔径。

为了更清晰地展示孔径范围, 采用对数坐标, 根据脱附等温线, 计算得到RAC微分积分孔体积孔径分布曲线, 见图6。其中, D 为孔径; V 为孔体积; dV/dD 为孔体积分布密度。 dV/dD 越大, 表示孔径范围内孔体积分布越密集。孔体积-孔径微分曲线在 D 为3~5 nm处达到峰值, 表明在结构内部存在较多3~5 nm的孔隙。 D 大于7 nm后, 试样RC25CW0.8的孔体积-孔径积分曲线变缓。同时, 其 D_{90} 和最可几孔径小幅度减小, 表明CW掺量为0.8%时, 可改善RAC内部孔隙分布。随着CW掺

量的增加, 孔体积-孔径积分曲线斜率逐渐增大, 表明掺加过多 CW, RAC 内部孔隙结构会发生劣

化, 导致累积孔体积增大, 与 RAC 氮气吸附-脱附曲线的分析结果一致。

表 5 RAC 比表面积及孔径分布特征

Tab.5 characteristics of specific surface area and pore size distribution of RAC

试样编号	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	累积孔体积/(mL·g ⁻¹)	D ₉₀ /nm	D ₁₀ /nm	最可几孔径/nm
RC25CW0	18.822 6	0.080 0	29.895 9	3.738 0	3.880 3
RC25CW0.8	20.435 9	0.056 4	28.330 3	3.563 9	3.717 0
RC25CW1.6	20.387 6	0.076 3	29.057 3	3.625 8	3.892 1
RC25CW2.4	23.354 8	0.078 6	29.518 1	3.730 6	3.907 5

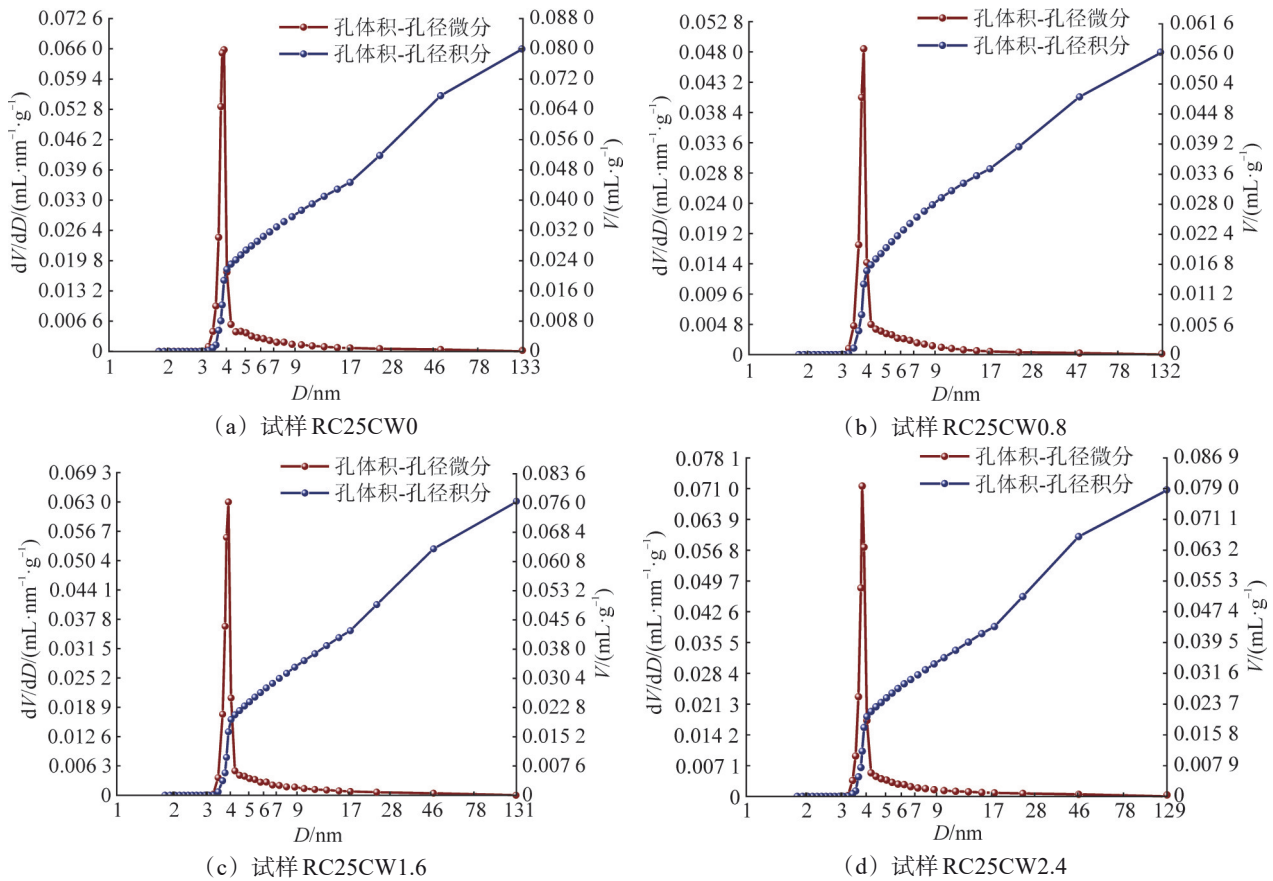


图 6 RAC 微分积分孔体积孔径分布

Fig.6 differential integral pore volume pore size distribution of RAC

5 结论

(1) RA 替代率的增加会显著降低 RAC 的力学性能和抗氯离子渗透性能, 掺加 CW 可有效改善 RAC 性能。当 RA 替代率为 25%、CW 掺量为 0.8% 时, 对 RAC 性能的提升效果最显著。

(2) 过量掺入 CW 会对 RAC 性能产生负面效应。CW 掺量超过 0.8%, RAC 性能发生劣化。RA 替代率为 50%、100%, CW 掺量为 1.6%、2.4% 时, CW 发生团聚, 形成局部应力集中, 导致 RAC 抗压强度及劈裂抗拉强度降低。

(3) CW 掺量为 0.8% 时, RAC 比表面积增大, D₉₀ 减小, 表明 CW 可通过细化孔隙减少有害大孔

(大于 50 nm) 数量, 使 RAC 内部结构更为致密, 进而提升 RAC 的力学性能和抗氯离子渗透性能。CW 掺量为 1.6%、2.4% 时, 会导致累积孔体积增大, 孔隙连通性变差, 降低 RAC 的力学与抗氯离子渗透性能。

参考文献(References):

[1] WU L, SUN Z, CAO Y. Modification of recycled aggregate and conservation and application of recycled aggregate concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2024, 431: 136567.

[2] 肖建庄, 张航华, 唐宇翔, 等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J]. 科学通报, 2023, 68(5): 510-523.

XIAO Jianzhuang, ZHANG Hanghua, TANG Yuxiang, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of

- recycled concrete[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(5): 510-523.
- [3] XING W Q, TAM V W, LE K N, et al. Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: a critical review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125950.
- [4] BAI G L, ZHU C, LIU C, et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117978.
- [5] AHMED W, LIM C W, AKBAR A. Influence of elevated temperatures on the mechanical performance of sustainable-fiber-reinforced recycled aggregate concrete: a review[J]. Buildings, 2022, 12(4): 487.
- [6] 许金校, 肖建庄, 罗素蓉, 等. 纤维再生混凝土的研究进展与展望[J]. 工业建筑, 2022, 52(2): 10-17, 31.
XU Jinxiao, XIAO Jianzhuang, LUO Surong, et al. Research progress and prospect of fiber-recycled concrete[J]. Industrial Construction, 2022, 52(2): 10-17, 31.
- [7] 赵丽, 李书进, 宋杨, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1021-1026.
ZHAO Li, LI Shujin, SONG Yang, et al. State-of-art of natural fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1021-1026.
- [8] 牛旭婧, 郭晨怡, 吴家奕, 等. 碳化硅晶须对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(15): 120-127.
NIU Xujing, GUO Chenyi, WU Jiayi, et al. Influence of silicon carbide whiskers (SiCw) on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Materials Reports, 2025, 39(15): 120-127.
- [9] 汪小庆, 刘明辉, 丁晓, 等. 硫酸钙晶须混凝土力学性能发展试验研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(7): 87-91.
WANG Xiaoqing, LIU Minghui, DING Xiao, et al. Experimental research on the development of the mechanical properties of calcium sulfate whisker concrete with age[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(7): 87-91.
- [10] ZHONG C H, CHEN X Y, MAO W Q, et al. Carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete reinforced by calcium sulfate whiskers[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92: 109476.
- [11] CAO M L, KHAN M, AHMED S. Effectiveness of calcium carbonate whisker in cementitious composites[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020, 64(1): 265-275.
- [12] CAO M L, ZHANG C, LV H F, et al. Characterization of mechanical behavior and mechanism of calcium carbonate whisker-reinforced cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 89-97.
- [13] LI L, CAO M L, YIN H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103350.
- [14] 张卓森, 李昊, 于淑玉, 等. 碳酸钙晶须对风积沙混凝土力学性能影响研究[J/OL]. 重庆大学学报, 2024: 1-10[2025-03-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20240715.1254.002.html>.
- ZHANG Zhuosen, LI Hao, YU Shuyu, et al. Experimental study on the effect of calcium carbonate whisker on the mechanical properties of aeolian sand concrete[J/OL]. Journal of Chongqing University, 2024: 1-10[2025-03-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20240715.1254.002.html>.
- [15] SHEN P L, JIANG Y, ZHANG Y Y, et al. Production of aragonite whiskers by carbonation of fine recycled concrete wastes: an alternative pathway for efficient CO₂ sequestration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173: 113079.
- [16] WANG C Y, GUO T D, LIU L, et al. Fracture properties and reinforcement mechanisms of multi-scale hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113436.
- [17] ZHANG J Z, JIN J Y, GUO B L, et al. Effect of mixed basalt fiber and calcium sulfate whisker on chloride permeability of concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105633.
- [18] ZHAO J, WANG A G, ZHANG Z H, et al. Design and evaluation of alkali-activated slag-calcined coal gangue cement and the shrinkage control by calcium carbonate whisker[J]. Construction and Building Materials, 2024, 443: 137753.
- [19] WANG S F, GAO Y Y, LIU K N. Mechanical properties and sulfate freeze-thaw resistance of calcium carbonate whisker-reinforced iron ore tailings concrete[J]. Buildings, 2024, 14(4): 1004.
- [20] ZHANG J Z, WANG Y M, LI X X, et al. Enhancing concrete mechanical properties through basalt fibers and calcium sulfate whiskers: optimizing compressive strength, elasticity, and pore structure[J]. Materials, 2024, 17(7): 1706.
- [21] 王博, 丁庆军, 王君, 等. 复掺碳酸钙晶须增强轻质ECC材料力学性能研究[J]. 混凝土, 2024(7): 133-137.
WANG Bo, DING Qingjun, WANG Jun, et al. Study on the mechanical properties of lightweight EcC materials reinforced by composite calcium carbonate whiskers[J]. Concrete, 2024(7): 133-137.
- [22] 刘巧会, 黄海峰, 薛苗苗, 等. 碳纤维掺量对超高性能混凝土轴压力学性能影响研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 454-462.
LIU Qiaohui, HUANG Haifeng, XUE Miaomiao, et al. Research on the influence of steel fiber content on the axial compression properties of ultra high performance concrete[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(4): 454-462.
- [23] MA F J, HUANG C Z, NIU J H, et al. Toughening mechanisms of Al₂O₃-matrix composites with SiC whiskers[J]. Ceramics International, 2022, 48(12): 17556-17563.
- [24] THOMMES M, KANEKO K, NEIMARK A V, et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 2015, 87(9-10): 1051-1069.
- [25] 辛勤, 罗孟飞, 徐杰. 现代催化研究方法新编[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 18-25.