

阎杰,庄永程,杨博,等.煅烧纳米凹凸棒土对再生混凝土钢筋锈蚀及黏结特性的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):43-51.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240017

YAN Jie,ZHUANG Yongcheng,YANG Bo,et al.Effect of calcined nano-attapulgit on corrosion and bond characteristics of recycled concrete reinforcement[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):43-51.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240017

煅烧纳米凹凸棒土对再生混凝土钢筋锈蚀及黏结特性的影响

阎杰^{1,2},庄永程¹,杨博¹,翁维素^{1,2},谢军^{1,2*},李鸿伟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.张家口中合智业电力建设有限公司,河北张家口075000)

摘要:为提高再生混凝土中钢筋的抗锈蚀能力,采用煅烧纳米凹凸棒土(CNAT)改善再生混凝土性能,通过电化学加速锈蚀试验和钢筋拉拔试验,研究不同锈蚀时间下CNAT掺量和再生骨料替代率对钢筋锈蚀率、黏结特性及氯离子迁移系数的影响规律,并结合孔径测量结果及扫描电镜表征工具分析再生混凝土的微观结构。研究表明:钢筋锈蚀率随再生骨料替代率的增加而增大,随CNAT掺量的增加先减小后趋于稳定;钢筋-混凝土之间的黏结强度和氯离子迁移系数随CNAT掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势;CNAT掺量为6%时,再生混凝土的各项性能最佳;掺入适量的CNAT可改善再生混凝土内部孔隙、裂缝及钢筋-再生混凝土之间的黏结滑移性能。研究结果为提高再生混凝土结构性能提供理论参考。

关键词:煅烧纳米凹凸棒土;再生混凝土;钢筋拉拔;钢筋锈蚀;黏结滑移

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)01-0043-09

Effect of calcined nano-attapulgit on corrosion and bond characteristics of recycled concrete reinforcement

YAN Jie^{1,2}, ZHUANG Yongcheng¹, YANG Bo¹, WENG Weisu^{1,2}, XIE Jun^{1,2*}, LI Hongwei³

(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. Zhangjiakou Zhonghe Zhiye Electric Power Construction

Company Limited, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: In order to improve the corrosion resistance of steel bars in recycled concrete, calcined nano-attapulgit (CNAT) was used to improve the performance of recycled concrete. The effects of CNAT content and recycled aggregate replacement rate on the corrosion rate, bonding characteristics and chloride ion migration coefficient of steel bars under different corrosion times were investigated through electrochemical accelerated corrosion tests and steel bar drawing tests. The microstructure of recycled concrete was also analyzed by combining the results of pore size measurement and scanning electron microscope characterization tools. The research results show that the corrosion rate of steel reinforcement increases with the rise in the proportion of recycled aggregate substituted, and first decrease and then stabilizes with the increase in CNAT dosage. The bond strength and chloride migration coefficient of reinforcement-concrete demonstrated an initial upward trajectory, followed by a decline with the increase of CNAT dosage. The optimal properties of recycled concrete were achieved at a dosage of 6% CNAT. The addition of an appropriate quantity of CNAT can enhance the internal pore structure, reduce the prevalence of cracks, and improve the bonding and sliding properties between rebar and

收稿日期:2024-01-16 修回日期:2024-04-11 接受日期:2024-05-06 责任编辑:黄琦

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(ZC2024136);张家口市科技发展计划项目(2322145D);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:谢军(1979-),男,辽宁营口人,博士,教授,主要从事再生混凝土结构优化设计方面的研究。E-mail:xiejun79@hebiace.edu.cn

recycled concrete. The research results provide a theoretical foundation for enhancing the structural performance of recycled concrete.

Key words: calcined nano-attapulgite; recycled concrete; steel drawing; corrosion of steel bars; bond-slip

0 引言

随着“双碳”目标的推进,再生钢筋混凝土结构的应用愈加广泛。氯离子、二氧化碳和水分是导致钢筋锈蚀的主要因素。LIANG等^[1]研究表明氯离子超标、再生骨料替代率提高均会导致混凝土结构的抗腐蚀能力减弱。与普通混凝土相比,再生混凝土中骨料的杂质和氯离子含量较高,因此,其钢筋锈蚀问题更严重。钢筋锈蚀会引发裂缝,导致结构强度降低甚至坍塌,严重影响结构的安全性和耐久性。

提高钢筋混凝土结构抗侵蚀性能的关键是减少侵蚀性介质的传输。虽然降低水胶比、添加掺合料^[2]和金属缓蚀剂等方法可提高结构的抗侵蚀能力,但这些方法存在一定的缺点,例如增加裂缝风险、降低早期强度、含有有害物质等,寻找经济环保的替代方法具有重要的现实意义。肖建庄等^[3]、鲍玖文等^[4]研究表明纳米材料可改善再生混凝土的性能,例如降低孔隙率、提高强度和抗侵蚀能力等,常被用来解决钢筋锈蚀问题。YING等^[5]研究表明纳米SiO₂和纳米TiO₂可细化再生混凝土的孔隙结构,改善再生混凝土的抗氯离子扩散性能。朱哲等^[6]研究表明水化响应纳米材料(SBT-TIA)可显著改善海工混凝土的抗腐蚀性能,降低氯离子扩散系数,提高整体耐蚀性。CABALLERO等^[7]研究表明在砂浆中添加癸二酸酯改性纳米层状双金属氢氧化物(LDHs),可显著减少水的吸收量,尤其在抑制氯化物引发的腐蚀方面,效果显著。虽然纳米材料可解决混凝土中钢筋的锈蚀问题,但大部分纳米材料价格较高,经济性较差。相对而言,纳米凹凸棒土(NAT)价格低廉,具有较好的吸附能力和离子交换能力,可提高水泥基材料的性能^[8]。LINDGREEN等^[9]研究表明纳米凹凸棒土可填充混凝土中的孔隙,增强结构的致密性,提高混凝土的力学性能和耐久性。潘钢华等^[10]研究表明煅烧后纳米凹凸棒土(CNAT)的火山灰活性更强,对混凝土强度的提升效果更佳。阎杰等^[11]研究表明500℃煅烧后的纳米凹凸棒土对改善再生混凝土的力学性能和耐久性能效果最佳。

目前,对于纳米凹凸棒土改善混凝土性能方面的研究较多,但对于纳米凹凸棒土改善再生混凝土中钢筋抗锈蚀及黏结性能方面的研究较少。本文将煅烧后的纳米凹凸棒土掺入再生混凝土中,通过电化学加速腐蚀试验和钢筋拉拔试验,研究500℃煅烧后的纳米凹凸棒土掺量和再生骨料替代率对再生混凝土的钢筋锈蚀、黏结特性和氯离子迁移系数的影响规律,结合孔径测量和扫描电镜表征工具分析再生混凝土的微观结构,为提高再生混凝土结构性能提供理论支撑。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

采用金隅牌普通硅酸盐水泥,型号为P·O42.5。将张家口建设工程质量检测中心废弃的混凝土试块进行破碎,作为再生粗骨料,其物理性能见表1。细骨料采用水洗中级河砂,细度模数为2.69。纳米凹凸棒土产地为江苏省常州市,主要化学成分见表2。NAT和CNAT的形貌见图1。由图1可知,煅烧后纳米凹凸棒土颜色由灰白色变为黄色。NAT和CNAT的扫描电镜结果见图2。由图2(a)可知,NAT结晶呈棒状,棒晶的粒径为20~70 nm,长为0.1~1.5 μm,排列不规则,烧失量为19.91%(质量分数)。由图2(b)可知,CNAT长条形晶段显著变短,细小的束状晶体较多^[12]。钢筋物理参数见表3。

表1 粗骨料物理性能

Tab.1 physical properties of coarse aggregate

骨料类型	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	24 h 吸水率/%	压碎指标/%
天然粗骨料	1 546	2 780	0.5	6.9
再生粗骨料	1 350	2 365	3.4	13.4

表2 NAT主要化学成分

Tab.2 main chemical composition of NAT

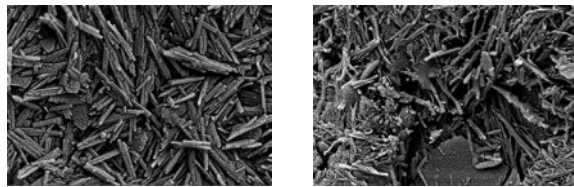
成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
SiO ₂	52.31	CaO	1.71
Al ₂ O ₃	9.61	Na ₂ O	1.00
MgO	8.99	Fe ₂ O ₃	5.87



(a) NAT (b) CNAT

图 1 NAT 与 CNAT 形貌

Fig.1 NAT and CNAT topography



(a) NAT (b) CNAT

图 2 NAT 与 CNAT 的扫描电镜结果

Fig.2 scanning electron microscope results of NAT and CNAT

表 3 钢筋物理参数

Tab.3 physical parameters of reba

钢筋型号	直径 /mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	拉伸率/%
HRB400	18	460	660	13

1.2 试验方案

再生混凝土设计强度为 C30, 水胶比为 0.5, CNAT 掺量分别取 0、3%、6%、9%, 再生骨料替代率分别取 0、50%、100%, 制备 CNAT 再生混凝土试件。配合比设计见表 4。

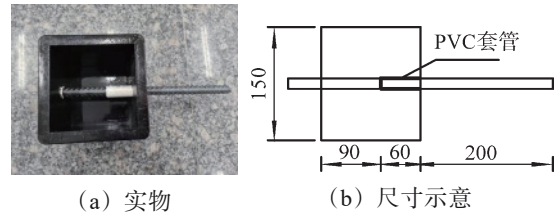
表 4 煅烧纳米凹凸棒土再生混凝土配合比

Tab.4 mix proportion of calcined nano-attapulgite recycled concrete

试件编号	各物质掺量/(kg·m ⁻³)						附加水
	水泥	砂	CNAT	天然骨料	再生骨料	拌合用水	
RC-0-0	420.0	621	0	1 154	0	210	0
RC-3-0	407.4	621	12.6	1 154	0	210	0
RC-6-0	394.8	621	25.2	1 154	0	210	0
RC-9-0	382.2	621	37.8	1 154	0	210	0
RC-0-50	420.0	621	0	577	577	210	16.7
RC-3-50	407.4	621	12.6	577	577	210	16.7
RC-6-50	394.8	621	25.2	577	577	210	16.7
RC-9-50	382.2	621	37.8	577	577	210	16.7
RC-0-100	420.0	621	0	0	1 154	210	33.4
RC-3-100	407.4	621	12.6	0	1 154	210	33.4
RC-6-100	394.8	621	25.2	0	1 154	210	33.4
RC-9-100	382.2	621	37.8	0	1 154	210	33.4

注: 试件编号中, 第 1 组数字代表 CNAT 掺量(百分比), 后一组数字表示再生骨料的替代率。

采用尺寸为 150 mm 的立方体试件, 未配箍筋。试件制成 24 h 后拆模, 标准养护 28 d。钢筋的有效锚固长度取钢筋直径的 5 倍, 钢筋自由端外露, 长为 50 mm, 加载端长为 200 mm, 在加载端一侧设置非黏结端, 长为 60 mm, 采用 PVC 套管进行保护。用于钢筋锈蚀试验的试件见图 3。



(a) 实物 (b) 尺寸示意

图 3 钢筋锈蚀试验的试件(单位:mm)

Fig.3 reinforcement corrosion test specimens (unit: mm)

设计 12 组钢筋锈蚀试验, 将养护好的试件置于浓度为 5% 的氯化钠溶液中浸泡, 液面不高于钢筋底表面。通电加速锈蚀, 控制锈蚀时间分别为 24 h 和 48 h, 电流为 60 mA, 电压为 25 V。钢筋锈蚀装置见图 4。

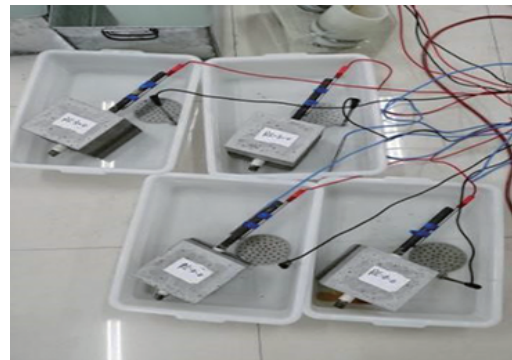


图 4 钢筋锈蚀装置

Fig.4 steel corrosion device

采用 500 kN 的万能试验机进行钢筋拉拔试验, 位移计分别固定在钢筋的自由端和固定端。通过位移控制加载方式, 首先进行 2 kN 的预加载, 然后将位移计归 0, 正式开始试验, 加载速率为 1 mm/min。采用失重法描述钢筋锈蚀率。将拔出后的钢筋浸入浓度为 12% 的稀盐酸溶液中, 去除表面锈迹并擦拭干净, 通过比较处理前后的质量差, 确定钢筋的锈蚀质量。

依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) [13] 开展氯离子迁移试验。试验中采用 3H-2000PM1 型孔径分析仪(见图 5), 并利用 BJH 法对再生混凝土试件的孔体积-孔径分布进行测试。



图5 孔径分析仪

Fig.5 pore analysis instrument

采用蔡司 Sigma300 型扫描电子显微镜观察试件的微观结构, 见图6。为获取高分辨率、高灵敏度的原位图像, 观察前对样品进行表面镀层处理。



图6 扫描电子显微镜

Fig.6 scanning electron microscope

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

钢筋锈蚀试验试件的表现如图7所示。从图中可以看出, 自由端钢筋与混凝土接触面出现溢锈现象。同时, 混凝土表面逐渐出现结晶, 钢筋先出现红锈, 随后逐渐产生黑锈。



(a) RC-0-0 试件 (b) RC-3-0 试件

图7 钢筋锈蚀试验试件的表现

Fig.7 appearance of steel bar corrosion test specimen

钢筋拉拔试验试件的破坏形态见图8。由图8可知, 试件主要发生劈裂破坏, 且分裂成2~3块。



图8 钢筋拉拔试验试件的破坏形态

Fig.8 failure mode of steel bar pull-out test specimen

钢筋锈蚀状态见图9。由图9可知, 时间越长, 钢筋锈蚀越严重。与混凝土中钢筋相比, 自由端处钢筋锈蚀更严重, 这是由于钢筋的自由端暴露在空气中, 在氧气、湿气和其他物质的影响下, 锈蚀反应更剧烈。



(a) RC-0-50-未锈蚀试件



(b) RC-3-50-锈蚀 24 h 试件



(c) RC-6-50-锈蚀 48 h 试件

图9 钢筋锈蚀状态

Fig.9 corrosion of rebar

2.2 钢筋锈蚀率结果分析

钢筋锈蚀率的变化见图10。由图10可知, 钢筋锈蚀率随再生骨料替代率和锈蚀时间的增加而增大。

未掺CNAT且锈蚀24 h的条件下, 与普通混凝土(再生骨料替代率为0)相比, 全再生骨料混凝土(再生骨料替代率为100%)的钢筋锈蚀率增大了58%, 这是由于再生骨料会增加混凝土中的孔隙和裂缝, 导致氯离子更易渗入混凝土, 钢筋锈蚀更严重。再生骨料替代率相同的条件下, 钢筋锈蚀率随CNAT掺量的增加先减小后趋于稳定。CNAT掺量为6%时, 钢筋的锈蚀率最小或接近最小值。再生骨料替代率为50%且

锈蚀24 h的条件下, CNAT掺量从0增至6%时, 钢筋锈蚀率减小了34.2%, 这是由于CNAT具有强大的吸附能力和火山灰活性^[4], 可减少混凝土的孔隙率并提高其密实性, 有效阻碍氯离子的渗透。CNAT掺量超过6%后, 钢筋锈蚀率小幅度增大, 这是由于CNAT掺量过多, 搅拌过程中不易均匀分散, 部分CNAT发生团聚^[5], 无法振捣密实, 导致混凝土内部产生较多孔隙, 钢筋的抗锈蚀能力下降。

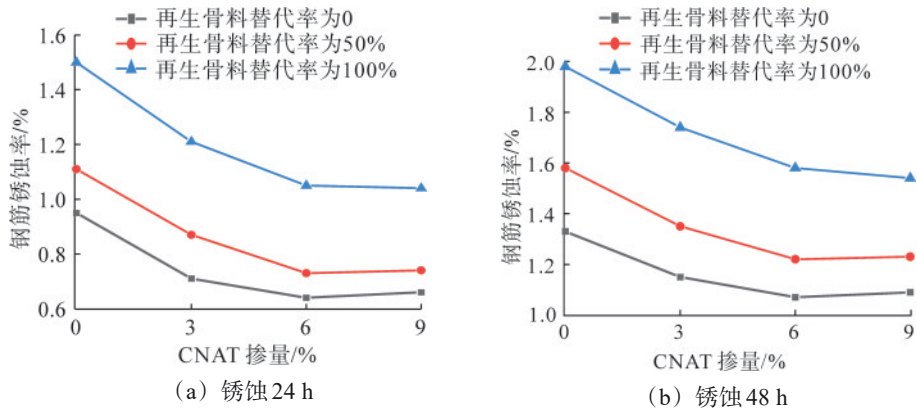


图 10 钢筋锈蚀率的变化

Fig.10 steel corrosion rate of concrete

2.3 再生骨料和CNAT掺量对黏结强度的影响

混凝土-钢筋之间黏结强度的变化见图 11。

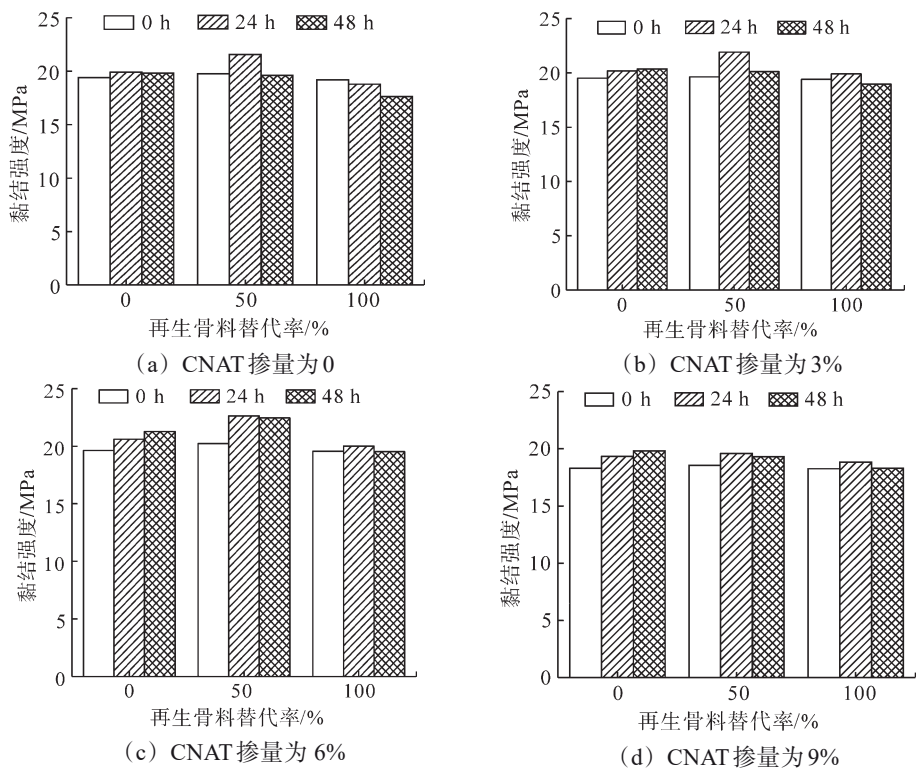


图 11 混凝土-钢筋之间黏结强度的变化

Fig.11 variation of bond strength between concrete and steel bar

由图 11 可知,再生骨料替代率相同的条件下,随着 CNAT 掺量的增加,不同锈蚀时间下混凝土-钢筋之间的黏结强度几乎均呈先增大后减小的变化趋势。CNAT 掺量为 6% 时,黏结强度相对最大。对于普通混凝土, CNAT 掺量相同的条件下,混凝土-钢筋之间的黏结强度随锈蚀时间的增加而增大。锈蚀 48 h 情况下, RC-6-0 试件的黏结强度最大,为 21.28 MPa,与未锈蚀时相比,黏结强度增大了 9.8%,这是由于在锈蚀过程中, CNAT 持续水化会产生较多的凝胶,可增大混凝土-钢筋之间的黏结强度^[6]。

再生骨料替代率为 50%、锈蚀时间相同的条件下,不同 CNAT 掺量下再生混凝土-钢筋之间的黏结强度基本上均大于普通混凝土-钢筋之间的黏结强度,且随着锈蚀时间的增加,黏结强度呈先增大后减小的变化趋势。锈蚀 24 h 情况下,与未锈蚀时相比, RC-6-50 试件的黏结强度增大了 11.97%,高达

22.64 MPa,这是由于再生骨料的表面更粗糙,可增大骨料与水泥石的咬合力,且再生骨料与水泥石的弹性模量相近,有利于增大再生骨料与水泥石之间的相互作用力^[17]。CNAT 掺量、锈蚀时间相同的条件下,全再生骨料混凝土-钢筋之间的黏结强度最小,且整体上随锈蚀时间的增加呈先增大后减小的变化趋势。未参加 CNAT 的条件下,全再生骨料-钢筋之间的黏结强度随锈蚀时间的增加而减小,这是由于全再生骨料的孔隙和裂缝较多,导致再生混凝土的弹性模量发生变化,黏结强度减小。

2.4 黏结应力-滑移量的变化分析

黏结应力-滑移量的变化见图 12。因试验条件与采集方式的限制,仅采集到该曲线的上升段,但曲线整体变化趋势与普通混凝土-钢筋的黏结应力-滑移量曲线基本一致。

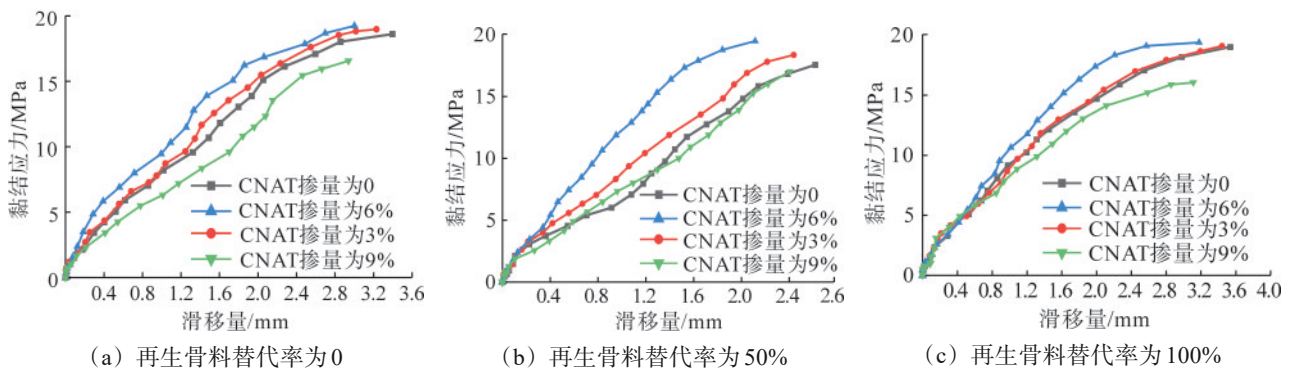


图 12 黏结应力-滑移量的变化

Fig.12 change of bond stress-slip amount

由图 12 可知,再生骨料替代率相同的条件下,黏结应力-滑移量曲线与 x 轴所围面积随 CNAT 掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势。CNAT 掺量从 0 增至 6% 时,曲线前段变陡,滑移量的增幅越来越小,黏结应力越来越大。当试件接近破坏阶段时,曲线变化较平缓,且 CNAT 掺量越大,各试件破坏阶段曲线越平缓。再生骨料替代率为 0 和 100% 时,试件破坏时的滑移量随 CNAT 掺量的增加而减小。再生骨料替代率为 50%、CNAT 掺量为 9% 时,与 CNAT 掺量为 6% 时相比,虽然试件破坏时的滑移量有所增大,但黏结强度减小约 10%。由黏结应力-滑移量曲线与 x 轴所围面积可知, CNAT 掺量为 6% 时,混凝土-钢筋可更好地吸收变形过程中产生的能量,耗能能力更佳。通过以上分析可知, CNAT 掺量为 6%、再生骨料替代率为 50% 时,再生混凝土与钢筋

之间的黏结滑移性能最佳。

2.5 氯离子迁移系数的变化分析

氯离子迁移系数的变化见图 13。

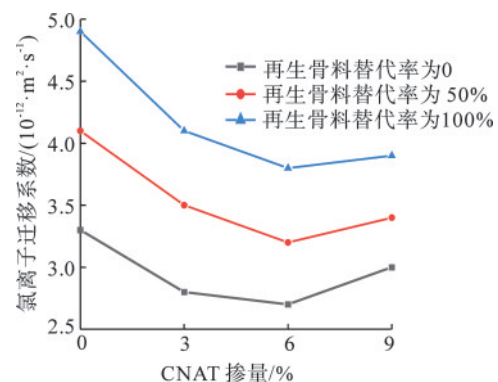


图 13 氯离子迁移系数的变化

Fig.13 variation of chloride ion migration coefficient

由图 13 可知, 再生骨料替代率与氯离子迁移系数正相关。CNAT 掺量为 0、再生骨料替代率为 50% 和 100% 时, 与普通混凝土相比, 氯离子迁移系数分别增大了 24.2% 和 48.5%, 与赵隆柳等^[18]的研究结论一致。再生骨料替代率相同的条件下, 随着 CNAT 掺量的增加, 氯离子迁移系数呈先减小后增大的变化趋势, 且 CNAT 掺量为 6% 时, 氯离子迁移系数最小。CNAT 掺量为 6% 的条件下, 再生骨料替代率为 0、50% 和 100% 时, 与未掺加 CNAT 的试件相比, 氯离子迁移系数分别减小了 18.2%、22.0% 和 22.4%, 表明 CNAT 能有效阻止氯离子在基体内的迁移, 改善混凝土的抗渗性能。此外, CNAT 具有火山灰活性, 可以起到填充孔隙及表面改性作用, 增强混凝土的内部致密性。CNAT 掺量为 9% 时, 氯离子迁移系数不减反增, 且普通混凝土的氯离子迁移系数增量最大。CNAT 掺量为 9% 的条件下, 再生骨料替代率为 50% 和 100% 时, 与 CNAT 掺量为 6% 时相比, 氯离子迁移系数分别增大了 0.2 和 0.1, 但始

终低于 CNAT 掺量为 3% 时的氯离子迁移系数。通过以上分析可知, 掺入适量的 CNAT 可提高再生混凝土的抗氯离子侵蚀能力, 有效防止钢筋发生锈蚀。

2.6 微观分析

为深入分析 CNAT 掺量对混凝土抗锈蚀性能的影响, 采用 SEM 和孔体积-孔径仪器研究混凝土的微观结构和孔结构。采用 CNAT 掺量为 0~6%、再生骨料替代率为 50% 的试件, 利用 BET 多点法研究混凝土比表面积随 CNAT 掺量的变化情况, 利用 BJH 法分析相应孔径的分布特征, 孔体积-孔径积分、微分分布曲线见图 14, 其中, $\Delta v/\Delta d$ 表示孔体积分布密度, $\Delta v/\Delta d$ 越大, 则该孔径范围内孔体积分布越密集。由图 14 可知, 不同 CNAT 掺量下, 再生混凝土孔结构的分布规律相似, 均主要集中在小于 50 nm 的孔径范围内, 吸附气体体积随 CNAT 掺量的增加而减小。孔体积-孔径微分分布曲线在 3~5 nm 处达到峰值, 表明在结构内部存在较多孔径为 3~5 nm 的孔隙。

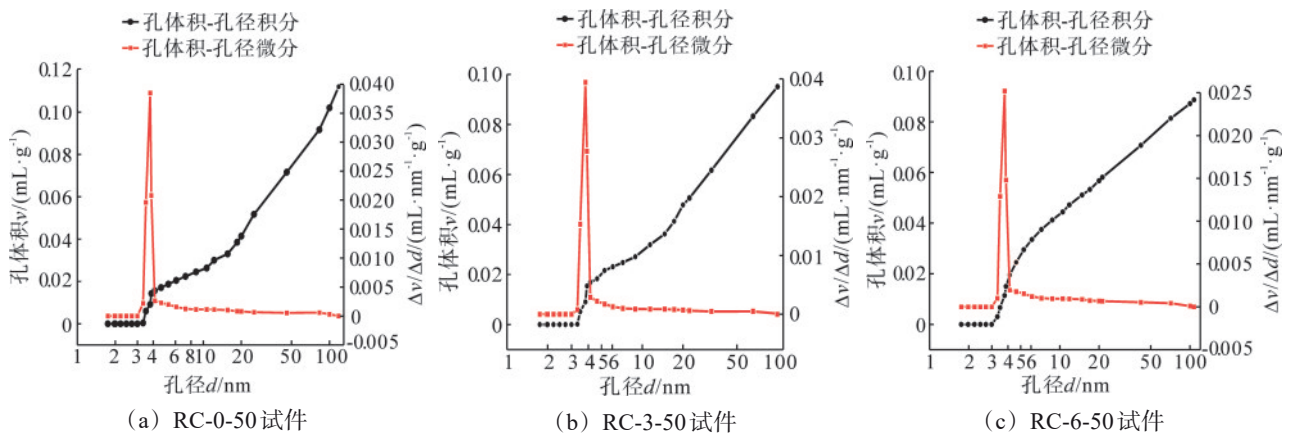


图 14 孔体积-孔径积分、微分分布曲线

Fig.14 pore volume-pore diameter differential integral distribution curve

为更直观地反映 CNAT 掺量对孔隙的影响, 计算得到 2~50 nm 的中孔体积和大于 50 nm 的大孔体积占总孔体积的比例, 见图 15。由图 15 可知, 再生混凝土的总孔体积、中孔及大孔体积均随 CNAT 掺量的增加而减小。与未掺加 CNAT 的试件相比, CNAT 掺量为 6% 时, 总孔体积、中孔体积和大孔体积分别减小了 34.7%、26.8% 和 57.3%, 表明掺加 CNAT 可填充再生混凝土的微观孔隙和裂隙, 降低孔隙率, 阻碍氯离子的渗透^[9], 增强再生混凝土的密实性以及内部钢筋的抗锈蚀能力。

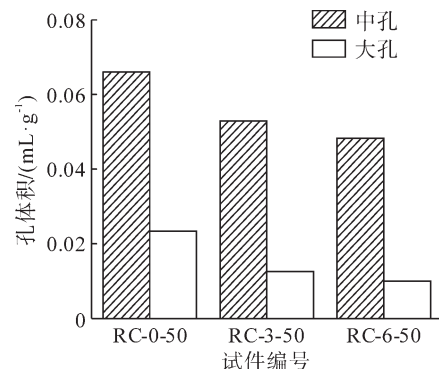


图 15 再生混凝土孔隙分布情况

Fig.15 pore distribution of recycled concrete

试件内部的微观形貌见图 16。由图 16 (a) 和图 16 (c) 可知, 硬化水泥砂浆中存在大量的裂缝和孔隙, 且水化物之间的连接较为疏松。由图 16

(b) 和图 16 (d) 可知, 硬化水泥砂浆内部存在的大量 C-S-H 凝胶可填充裂缝和孔隙, 增大钢筋与再生混凝土之间的黏结力^[20]和结构密实度。

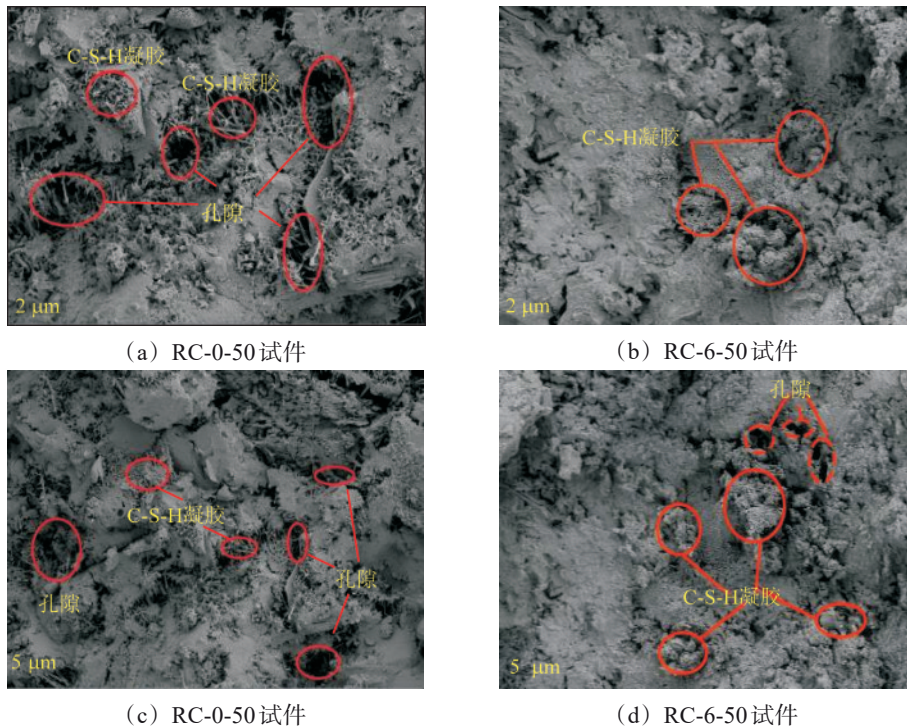


图 16 试件内部的微观形貌

Fig.16 internal microstructure of the specimen

界面过渡区形态见图 17。通过对比可知, 未掺加 CNAT 时, 再生混凝土界面过渡区存在裂缝, 砂浆区较为松散且存在大量孔隙。CNAT 掺量为

6% 时, 再生混凝土界面过渡区黏结更为紧密, 孔隙较少, 砂浆区更密实, 表明 CNAT 可增大界面过渡区的黏结度, 提高再生混凝土的性能。

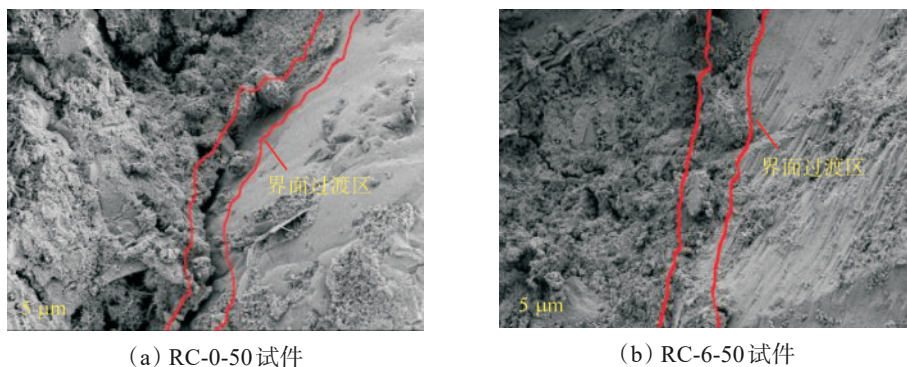


图 17 界面过渡区形态

Fig.17 interface transition zone morphology

3 结论

本文聚焦再生混凝土性能优化, 探讨煅烧的纳米凹凸棒土掺量及再生骨料替代率对钢筋锈蚀与性能演变规律的影响, 并结合微观结构特征, 深入分析其改善机制, 得出如下结论。

(1) 再生骨料替代率对钢筋锈蚀率影响显著。

掺入 CNAT 可减小再生混凝土的钢筋锈蚀率, 其中, 再生骨料替代率为 0、CNAT 掺量为 6% 时, 钢筋锈蚀率最小。

(2) 钢筋与再生混凝土之间的黏结强度随再生骨料替代率和 CNAT 掺量的增加先增大后减小。锈蚀 24 h 的条件下, 再生骨料替代率为 50%、

CNAT 掺量为6%时,黏结强度最大。

(3) CNAT 可填充再生混凝土孔隙和裂缝,并生成更加稳定的硅酸盐凝胶,抑制氯离子渗透,减小钢筋与再生混凝土之间的滑移量及氯离子迁移系数,提高水泥基质的强度和耐久性。

参考文献(References):

- [1] LIANG C F, CAI Z D, WU H X, et al. Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282: 122547.
- [2] XIE X L, FENG Q G, CHEN Z, et al. Effect of the electric field on the distribution law of chloride ions and microstructure in concrete with the addition of mineral admixtures[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1380.
- [3] 肖建庄, 陈祥磊, 李标, 等. 纳米 SiO₂ 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(1): 26-32.
XIAO Jianzhuang, CHEN Xianglei, LI Biao, et al. Effect of mixed nano-SiO₂ and fly ash on properties of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(1): 26-32.
- [4] 鲍玖文, 张洪锐, 方晓龙, 等. 纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(8): 2045-2053.
BAO Jiuwen, ZHANG Hongrui, FANG Xiaolong, et al. Properties of recycled coarse aggregate concrete modified by silica nanoparticles: a short review[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(8): 2045-2053.
- [5] YING J W, ZHOU B, XIAO J Z. Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO₂ and nano-TiO₂[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 150: 49-55.
- [6] 朱哲, 蔡景顺, 洪锦祥, 等. 水化响应纳米材料对钢筋混凝土整体耐蚀性能影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2021, 41(5): 732-736.
ZHU Zhe, CAI Jingshun, HONG Jinxiang, et al. Effect of hydration response nanomaterials on corrosion resistance of reinforced concrete[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2021, 41(5): 732-736.
- [7] CABALLERO D, BELTRÁN-COBOS R, TAVARES F, et al. The inhibitive effect of sebacate-modified LDH on concrete steel reinforcement corrosion[J]. *ChemEngineering*, 2022, 6: 72.
- [8] 王玉倩, 潘钢华, 张菁燕. 凹凸棒粘土在建材中的应用研究[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(6): 1353-1357.
WANG Yuqian, PAN Ganghua, ZHANG Jingyan. Research on application of attapulgite in building material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(6): 1353-1357.
- [9] LINDGREEN H, GEIKER M, KRØYER H, et al. Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(8): 686-699.
- [10] 潘钢华, 夏艺, 王然良, 等. 煅烧凹凸棒石粘土对干粉砂浆性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(1): 129-133.
PAN Ganghua, XIA Yi, WANG Ranliang, et al. Influence of calcined attapulgite clay on properties of dry-mixed mortar[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2006, 36(1): 129-133.
- [11] 阎杰, 于旭涛, 刘兴隆, 等. 煅烧纳米凹凸棒土对再生混凝土性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(23): 10059-10066.
YAN Jie, YU Xutao, LIU Xinglong, et al. Effect of nano attapulgite on properties of recycled aggregate concrete[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(23): 10059-10066.
- [12] YAN J, LIU X L, WANG X T, et al. Influence of nano-attapulgite on compressive strength and microstructure of recycled aggregate concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 134: 104788.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 32-39.
- [14] 严金生, 季军荣, 刘翠, 等. 煅烧凹凸棒土对水泥砂浆力学及抗氯离子渗透性能的影响[J]. *科技通报*, 2022, 38(4): 45-51.
YAN Jinsheng, JI Junrong, LIU Cui, et al. Effect of calcined attapulgite on the mechanics and anti-chloride ion permeability of cement mortar[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2022, 38(4): 45-51.
- [15] 蔡素梅, 周加静, 穆畅道, 等. 凹土分散团聚行为研究[J]. *皮革科学与工程*, 2010, 20(1): 21-25.
CAI Sumei, ZHOU Jiajing, MU Changdao, et al. Study on the dispersion and aggregation behavior of attapulgite[J]. *Leather Science and Engineering*, 2010, 20(1): 21-25.
- [16] 闫宏生. 再生混凝土结构的氯离子侵蚀试验[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(12): 1673-1676.
YAN Hongsheng. Experimental on recycled concrete structure erosion by chloride ions and its control[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2013, 32(12): 1673-1676.
- [17] XIAO J Z, FALKNER H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 395-401.
- [18] 赵隆柳, 谢军, 林鑫, 等. PVA 对改善再生混凝土抗氯离子渗透性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7): 2127-2133.
ZHAO Longliu, XIE Jun, LIN Xin, et al. Experimental study on improvement to chloride ion impermeability of recycled aggregate concrete by mixing PVA[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(7): 2127-2133.
- [19] 王永贵, 牛海成, 范玉辉. 改性再生混凝土抗压性能与微观结构[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 1012-1019.
WANG Yonggui, NIU Haicheng, FAN Yuhui. Compressive properties and microstructure of modified recycled aggregate concrete[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 1012-1019.
- [20] 蒋晨辉, 周长顺, 吉红波, 等. 纳米偏高岭土在水泥基材料中的应用研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(12): 3861-3867.
JIANG Chenhui, ZHOU Changshun, JI Hongbo, et al. Research progress on the application of nano-metakaolin in cement-based materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(12): 3861-3867.