

再生骨料 CO₂ 碳化强化技术研究进展赵增丰^{1,2}, 姚磊¹, 肖建庄^{1,2}, 姬宸源¹, 段珍华^{1,2}, 王佃超¹

(1. 同济大学土木工程学院建筑工程系, 上海 200092;

2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 利用 CO₂ 碳化强化基于废弃混凝土制备的再生骨料对其品质的提升、再利用以及碳减排有重要意义。分析再生骨料 CO₂ 碳化强化的机理和强化后再生骨料在物理性能以及微观结构上的改善, 对影响 CO₂ 强化再生骨料的因素进行归纳分析, 针对基于 CO₂ 强化后再生骨料制备而成的再生骨料混凝土的物理力学性能、耐久性能和微观结构的改善进行对比分析, 总结和归纳了研究进展和展望。

关键词: 再生骨料; 加速碳化; 再生骨料混凝土; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2296-09

网络出版时间: 2022-07-05



Development on Accelerated Carbonation Technology to Enhance Recycled Aggregates

ZHAO Zengfeng^{1,2}, YAO Lei², XIAO Jianzhuang^{1,2}, JI Chenyuan¹, DUAN Zhenhua^{1,2}, WANG Dianchao¹

(1. Department of Structural Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The accelerated carbonation on the properties of recycled concrete aggregates is important for the recycling of waste concrete, sequestration of CO₂ and reduction of carbon emissions. In this review, the mechanism of accelerated carbonation on the recycled concrete aggregates and the physical properties and microstructure changes of recycled concrete aggregates enhanced by accelerated carbonation were introduced. Some factors for efficient CO₂ treatment on the properties of recycled concrete aggregates were summarized. The physical properties, durability and microstructure improvement of recycled concrete containing CO₂ treated recycled concrete aggregates were analyzed. In addition, the perspectives for future research were also proposed.

Keywords: recycled aggregates; accelerated carbonation; recycled aggregate concrete; mechanical behaviour; durability

目前全球仍然处于一个大量建设与拆除的时期, 混凝土则是世界上使用最多的人工材料和最常用的建筑材料之一, 一方面对于混凝土的大量需求需要消耗大量的自然资源, 另一方面由于施工和拆迁会产生数量庞大的废弃混凝土, 这些废弃混凝土随意堆放造成了巨大的环境污染, 同时还严重影响了工程安全^[1]。研究表明全球每年水泥行业所排放的

CO₂ 占全球 CO₂ 排放量的 7%^[2], 2020 年中国水泥产量 23.77 亿 t, 占全球的 55%, 排放 CO₂ 约 14.66 亿 t, 占全国碳排放总量的 14.3%^[3]。因此通过合理的途径处理利用这些废弃混凝土, 在经济、社会和环境方面都具有重要的意义。龚志起等^[4]基于社会对环境影响的支付意愿确定的气候变化、臭氧层损耗、非生物资源消耗、粉尘等权重因子, 将废弃混凝土

收稿日期: 2022-01-19。 修订日期: 2022-03-09。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178244, 52078358)。

第一作者: 赵增丰(1984—), 男, 博士, 研究员。

通信作者: 肖建庄(1968—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-01-19. Revised date: 2022-03-09.

First author: ZHAO Zengfeng (1984—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zengfengzhao@tongji.edu.cn

Correspondent author: XIAO Jianzhuang (1968—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: jzx@tongji.edu.cn

处理的环境影响状况转化为货币化的影响分值, 废弃混凝土再生骨料利用的环境影响分值为-8.98 元/t (负号表示社会愿意为该过程支付费用), 而原料、基础填料以及填埋的环境影响分值分别为 5.75 元/t、4.94 元/t、61.68 元/t (正号表示社会希望对该过程增加费用), 因此再生骨料利用有助于降低环境的影响, 同时能够充分发挥废弃混凝土的资源价值。杜婷等^[5]对再生骨料进行定性以及定量的经济性分析, 同时结合合宁高速公路工程实例, 该工程路面养护采用再生骨料替代天然骨料, 节约骨料的运输费用为 117 万~130 万元, 同时节省废混凝土占用土地费用 67 万~75 万元, 得出使用再生骨料具有非常好的经济价值。综上所述, 基于再生骨料制备再生骨料混凝土用以解决废弃混凝土处置难题, 符合绿色及可持续发展理念。

再生混凝土中再生骨料的缺陷影响了再生骨料混凝土中界面过渡区和孔隙结构, 微观结构的缺陷导致再生骨料混凝土的力学性能、耐久性能和体积稳定性相较于类似配合比的普通混凝土较差, 使得再生骨料混凝土的工程应用受到限制^[6-13]。本文对国内外关于 CO₂ 碳化强化再生骨料的研究进行归纳分析, 并对基于碳化后再生骨料制备的再生骨料混凝土的性能进行总结, 为再生骨料混凝土的性能优化提供参考。

1 二氧化碳强化再生骨料

1.1 二氧化碳强化再生骨料的机理

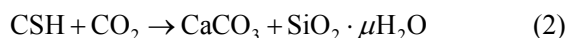
周围环境中的 CO₂ 气体通过混凝土的孔隙向混凝土内部扩散, 并在孔隙水中溶解, 溶解在孔隙水中的 CO₂ 与混凝土中碱性物质发生反应的过程被称为混凝土的碳化。混凝土碳化之后生成的固态物质沉淀在混凝土的孔隙中, 降低混凝土孔隙率, 提升混凝土密实度和强度。这种方法可以被用于再生骨料的强化, 碳化反应生成的产物会填充再生骨料中的裂缝以及孔隙, 改善再生骨料的微观结构, 进而提升再生骨料的物理力学性能^[14-16]。

再生骨料碳化过程最主要的是溶解的 CO₂ 与骨料表面附着砂浆中的氢氧化钙发生反应生成碳酸钙, 如式(1)。反应结束后碳酸钙沉淀的晶型受到动力学和热力学两个因素的影响^[17]。生成方解石、球霏石以及文石 3 种不同晶型, 最终多种晶型的碳酸钙沉淀都会转化为稳定的方解石^[18]。

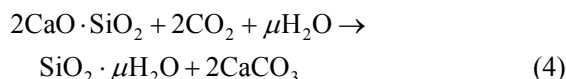
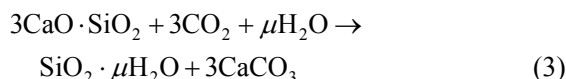


除了氢氧化钙的反应之外, 水化硅酸钙

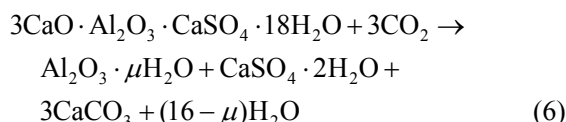
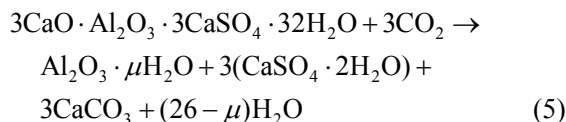
(C-S-H)也会和孔隙水中溶解的 CO₂ 发生反应, 如式(2)。C-S-H 碳化之后和氢氧化钙碳化类似生成方解石、球霏石以及文石 3 种不同晶型的碳酸钙和硅胶^[19]。



再生骨料表面附着砂浆中未水化的水泥颗粒同样可以和 CO₂ 发生碳化反应, 其中的硅酸三钙(C₃S)和硅酸二钙(C₂S)和 CO₂ 的反应如式(3)和(4)所示^[20-22]。



骨料表面附着的硬化水泥浆体中的钙矾石(Aft)以及单硫型水化硫铝酸钙(AFm)也会与 CO₂ 反应^[23], 如式(5)和式(6)所示。



反应(1)固相体积增加 11.5%, 反应(2)固相体积增加 23.1%, 反应(3)固相体积增加 108.7%, 反应(4)固相体积增加 92.5%; 反应(5)固相体积减少 44.9%, 反应(6)固相体积减少 31.8%, Aft 和 AFm 的碳化导致固相体积的减少, 对碳化加强骨料性能有不利影响。在完全水化地水泥浆体中, 氢氧化钙约占 20%, C-S-H 约占 70%, 钙矾石 Aft 以及单硫型水化硫铝酸钙 AFm 约占 10%, 与 CO₂ 反应后, 水泥浆体的体积增加 13%左右。反应产物固相体积增加导致再生骨料表面附着硬化水泥浆体结构更加致密, 同时填充再生骨料中的孔隙, 改善其微观结构。另外, 氢氧化钙相对于反应产物碳酸钙和硅胶, 强度较弱。因此, 碳化能够提升再生骨料的强度和其他物理力学性能^[24]。

1.2 碳化对于再生骨料的影响

1.2.1 表观密度 研究表明再生骨料在经过碳化之后表观密度会有有一定的提高, 其提高的幅度有所差别, 如表 1 所示。Liang 等^[25]利用原砂浆水灰比 0.5 制备的再生粗骨料经过碳化处理之后表观密度由 2 388 kg/m³增加至 2 402 kg/m³, 增长率为 0.58%, 而再生细骨料的表观密度增长率为 0.50%。高越青等^[26]研究同样得出了碳化会增加再生骨料

的表观密度的结论,与此同时实验中原砂浆水灰比 0.55、0.45 以及 0.35 制备的再生骨料的表观密度增

长率分别为 0.46%、1.19%和 3.86%,证明了碳化有助于增加再生骨料的表观密度,但增幅不明显。

表 1 碳化前后再生骨料的表观密度

Table 1 Physical properties of recycled concrete aggregates before and after carbonation

Reference	Carbonation condition	Apparent density/(kg·m ⁻³)		
		Before carbonation	After carbonation	Change rate
[25]	w=20, T=20, R=70	2 588	2 597	0.35%
[26]	w=20, T=20, R=70, t=14	2 609	2 640	1.19%
[29]	w=100, T=23, R=70, σ=10, t=1	2 602	2 661	2.27%
[33]	w=20, T=20, R=60, t=7	2 530	2 650	4.70%
[34]	w=100, σ=500, t=3	2 520	2 550	1.19%
[28]	w=100, σ=100, t=3	2 326	2 351	1.07%

w, T, R, σ, t represent mass fraction of CO₂ (%), temperature (°C), relative humidity (%), pressure (kPa), time (d) respectively.

再生骨料的粒径越小,碳化后表观密度提升越大^[27]。Kou 等^[28]发现粒径为 10 mm 的再生骨料经碳化处理表观密度由 2 355 kg/m³ 增至 2 379 kg/m³, 表观密度增长 1.01%, 同条件碳化处理的粒径 20 mm 的再生骨料表观密度由 2 355 kg/m³ 增至 2 371 kg/m³, 表观密度增长 0.68%, 这表明再生骨料的粒径小, 有助于碳化处理后表观密度的增加。

Zhan 等^[29]研究表明, 再生骨料原生混凝土的强度会影响再生骨料碳化后表观密度。原生混凝土为 C60 和 C80 的再生骨料碳化后表观密度增加分别为 1.9%和 2.3%, 而原生混凝土为 C30 的再生骨料表观密度由碳化前的(2 639±3.7) kg/m³, 变为碳化后的(2 619±3.45) kg/m³, 变化仅为 0.76%; 而原生混凝土为 C45 的再生骨料表观密度由碳化前的(2 623±7.1) kg/m³, 变为碳化后的(2 606±7.71) kg/m³, 变化仅为 0.65%, 不是很明显。碳化后原生混凝土为 C30 和 C45 的再生骨料表观密度变化不明显(可能密度的测量误差有影响), 这一现象有可能是硬化水泥浆体的含量较少, 其碳化反应产物对整个再生骨料的表观密度影响不大, 同时测量误差也有可能致该结果^[29]。

1.2.2 吸水率 再生骨料经过碳化之后吸水率可以得到显著降低^[30–31]。如图 1 所示, 大量的研究表明再生骨料碳化后吸水率降低 10%~30%。Zhan 等^[29]研究测试表明, 原生混凝土抗压强度分别为 C30、C45、C60 和 C80 时, 再生骨料的 CO₂ 强化处理可分别降低吸水率 20.2%、21.2%、22.5%和 24.1%。高越青等^[26]研究发现水灰比分别为 0.55、0.45、0.35 的碳化再生骨料的吸水率分别降低了 16.27%、21.85%和 23.36%, 在吸水率的变化上呈现出再生骨料的原生混凝土强度越高, 碳化再生骨

料吸水率降低越明显的规律。这可能再生骨料原生混凝土强度越高, 再生骨料中的硬化水泥石含量越高, 可以用于碳化反应的量越多, 碳化过程中生成更多的碳酸钙产物, 填充再生骨料的孔隙, 故有部分学者得出再生骨料的原生混凝土强度越高吸水率降低越明显的结论。

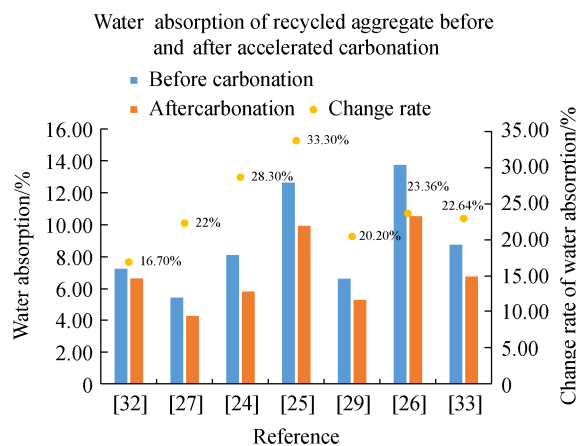


图 1 再生骨料碳化前后吸水率变化

Fig. 1 Water absorption of recycled aggregate before and after accelerated carbonation

再生骨料的品质越差, 碳化对吸水率的影响就越明显, Liang 等^[25]测得水灰比分别为 0.3、0.4 和 0.5 的再生骨料吸水率降低为 15.2%、21.4%和 45.3%, 碳化处理对低品质再生骨料的增强效果更加显著。Liang 等^[25]试验中二氧化碳碳化时间为 10 d, 水灰比分别为 0.3、0.4 和 0.5 的再生骨料碳化最终的吸水率分别为 8.9%、9.9%和 7.6%, 长时间碳化后不同品质的再生骨料吸水率处于一个相近的程度, 这时再生骨料的品质越差, 碳化对吸水率的影响就越明显。

1.2.3 压碎值 Xuan 等^[32]测得 10–20 mm 的天

然骨料压碎值为 18%，再生粗骨料的压碎值为 27.8%，经过碳化之后新制备的再生粗骨料的压碎值降低至 20.6%，其性能提高了 25.9%，但是可以发现碳化之后的压碎值依旧高于天然骨料。Pan 等^[35]对再生细骨料依据 GB/T14684—2011 进行压碎指标测定，再生细骨料的压碎值为 18%，碳化之后压碎值最低降至 10%。这些试验都表明碳化明显增强了再生骨料的压碎性能。

1.2.4 微观结构 碳化后再生骨料固相体积增加，碳酸钙沉淀能够有效的填充再生骨料的孔隙，改善骨料的孔隙结构^[36]，碳化之后再生骨料中骨料和附着砂浆之间界面过渡区的结构也得到明显的改善^[37]。由文献[38]显示的废弃混凝土中砂浆碳化前后的扫描电镜图，可以看出碳化之后表面生成了大量的碳酸钙晶体，使得废弃水泥块微观结构更加致密^[38]。

Liang 等^[25]在实验中利用扫描电镜研究再生骨料的微观结构发现再生骨料由于表面附着的水泥石，使得其结构松散，表面存在较多的微裂缝，然而碳化之后的再生骨料观察到的微裂缝较少结构更加致密。此外，Zhao 等^[16]通过 MIP 压汞法对再生细骨料碳化前和碳化后的再生细骨料孔结构进行对比，碳化处理细化了再生骨料的孔隙结构，碳化之后再生骨料的 0.01~0.10 μm 的孔隙体积降低了很多。碳酸钙沉淀先发生在较小的孔隙中使得微孔体积的降低比大孔更明显。

Liang 等^[39]研究结果显示再生骨料 200 nm 以上的孔隙被完全消除了，同时减小了 50~200 nm 的孔隙体积，平均孔径由 8.6 nm 降至 7.2 nm，下降了 16%。Fang 等^[40]的试验得出了相近的结果，平均孔径由 187.3 nm 降至 48.4 nm，下降了 74.2%。Jang 等^[41]对水泥块的研究也得到了碳化后平均孔径减小的结果。平均孔径的降低改善了孔隙结构，微观上碳化产物填充了再生骨料的孔隙，就是其宏观性能改善的根本原因。

还有学者对碳化前后再生骨料中骨料和附着砂浆之间的界面过渡区进行研究，发现碳化之前界面过渡区附近结构松散，存在宽度较大的裂纹。经过碳化处理之后，在界面过渡区附近生成大量碳酸钙晶体，骨料和老砂浆接触位置结构致密，裂纹宽度明显降低^[37]。Zhang 等^[33]的研究结果同样证明了碳化后再生骨料中的界面过渡区微观结构更加致密，而未碳化的再生骨料的表面孔隙更多且孔径更大。

1.3 影响再生骨料强化的因素

1.3.1 相对湿度 碳化湿度对于再生骨料的碳化改性程度，以及强化后的性能有着一定程度的影响。有学者通过试验研究和计算模型得出了 40%~65%的相对湿度是最佳的碳化相对湿度条件^[42-43]。

Asghar Gholizadeh-Vayghan 等^[44]通过对养护室的相对湿度进行加强和不加强来区分高相对湿度和低相对湿度，对碳化后得到的再生骨料进行测试发现，在高湿度的环境中进行强化，不仅不能改善再生骨料的性能，甚至使得再生骨料的吸水率和孔隙率进一步增加。低相对湿度得到的碳化再生骨料，性能则有着明显的增强。碳化深度测定也证明了高相对湿度条件下强化的再生骨料其中仅有不完全和不显著的碳化，低相对湿度的再生骨料则是呈现完全碳化。Zhan 等^[45]在对含有再生骨料的混凝土进行碳化时同样发现在相对湿度为 50%的环境养护混凝土的强度以及碳化深度都要优于 80%相对湿度强化的再生骨料混凝土。在高相对湿度中进行碳化时水分在再生骨料表面形成径流，同时钙离子随水流出，使得浸出率和孔隙率增加。在低相对湿度的环境中碳化，水分在再生骨料表面蒸发，使得钙离子以碳酸钙的形式在表面沉淀，从而改善再生骨料的性能。

1.3.2 二氧化碳浓度 Cui 等^[46]对二氧化碳浓度对混凝土的碳化和扩散机理进行研究，结果显示在 CO₂ 浓度在 2%~10%提升浓度碳化深度增长率最高，在浓度为 50%~100%时在 28、56 d 进行测试碳化深度都几乎相同。Thiery 等^[47]研究表明 50%的 CO₂ 浓度可以获得最高的碳化效率。Pan 等^[35]在 CO₂ 强化再生细骨料的研究中发现了同样的规律，碳化时间相同，CO₂ 浓度在 20%~50%之间时，碳化程度随着 CO₂ 浓度的增加而增加，CO₂ 浓度增加至 100%时碳化程度并未进一步增加。这些研究认为，在低浓度进行碳化时，再生骨料的 CO₂ 渗透率与 CO₂ 浓度无关，在这种情况下提高 CO₂ 浓度，更多的 CO₂ 进入再生骨料内部进行碳化，而高浓度的 CO₂ 使得再生骨料表面快速形成的致密结构降低了扩散率，从而影响了再生骨料的碳化。

1.3.3 碳化压力 不同的压力也会影响再生骨料的碳化进程^[48]。Asghar Gholizadeh-Vayghan 等^[44]利用 0.5 MPa 压力进行碳化时，1 h 后，再生骨料的吸水率和孔隙率的降低与 0.1 MPa 压力条件下 24 h 碳化得到的再生骨料相近，适当提升的压力能够提升碳化的速率。但是唐薇等^[49]利用热重分析仪

对 0.01 MPa、0.05 MPa 以及 0.1 MPa 条件下强化得到的再生骨料进行固碳能力分析发现在碳化时长 28 d 时 1 kPa 的压力下 CO_2 吸收量最大, 为 22.40%, 在碳化时长 90 d 时 0.05 MPa 压力下 CO_2 吸收量最大, 为 14.89%, 0.1 MPa 的压力情况下碳化时长在 28 d 和 90 d 时, 骨料的碳化程度都是最低的, 过高的压力反而阻碍了再生骨料的碳化。Tam 等^[50]在 150 和 75 kPa 条件下碳化, 结果 150 kPa 所得试件强度均低于 75 kPa 强度。对以上学者的研究结果总结发现当压力在 0.1 MPa 以内时, 加压有利于碳化反应的进行, 以及再生骨料的强化, 但是过高的压力会使得再生骨料中脆弱的部分被破坏, 从而严重降低再生骨料的性能。

1.3.4 碳化温度 升高温度使得 CO_2 在混凝土中扩散的速率加快, 但是随着温度的提升 CO_2 在水中的溶解度降低^[51], 同时钙的溶解度降低, 对碳化产生不利影响^[52], 因此温度对混凝土碳化的影响是复杂。Wang 等^[53]发现在 20~300 °C 之间进行碳化时, 水泥水化净浆的碳化程度呈现先增后减的趋势。控制碳化时间为 1 h, 结果显示在 20~100 °C 之间时, 碳化程度随温度升高而升高, 在 100 °C 达到碳化程度最高, 为 16.4%。在 100~300 °C 之间碳化程度大幅降低, 最终大约降至 5%。Zhan 等^[45]也有类似发现, 在碳化温度从 20 °C 提升至 80 °C 时混凝土的碳化程度由 52.6% 增至 55.0%。这些研究结果显示在 100 °C 内进行碳化时, 提升温度有利于促进碳化速度。

1.3.5 碳化时间 Asghar Gholizadeh-Vayghan 等^[44]研究表明在其他条件相同时, 随着时间的延长碳化程度也会相应的提高。但是实验中 0.1 MPa 压力养护的再生骨料 1 h 到 4 h 之间碳化程度的增长率要高于 0.5 MPa 压力养护的再生骨料 1 h 到 4 h 的增长率。

Zhan 等^[45]在对混凝土进行碳化时也发现随着时间的增加碳化率虽然上升但是增长率却是不断降低, 24 h 的碳化率为 64.1%, 到 72 h 碳化率增至 84.7%, 碳化速率不断地下降。这主要是因为随着碳化反应的进程, 在再生骨料表面生成的碳酸钙使得再生骨料微观结构愈发致密, CO_2 渗透率降低, 碳化速度也因此降低^[54]。即使延长碳化时间可以获得更高的碳化率, 也需要选择最合适的碳化时间以获得最大的碳化效率, 现有研究表面碳化时间在 24~72 h 就能够获得较高的碳化程度, 较高碳化效率。

2 CO_2 碳化强化对再生骨料混凝土的影响

2.1 流动性

Zhang 等^[33]依据 GB/T2419—2005 对新制砂浆进行流动度测定, 发现天然骨料砂浆的流动度约为 240 mm, 碳化前以及碳化后再生骨料制备的砂浆流动度分别约为 180 mm 和 190 mm。Tam 等^[50]得到了类似的结果, 在同水灰比且不添加任何外加剂的情况下, 采用碳化再生骨料制备的混凝土坍落度为 220 mm, 而采用未经碳化处理的再生骨料的混凝土坍落度为 140 mm, 碳化再生骨料制备的混凝土相对未碳化骨料制备的混凝土坍落度增加了 57%。当拌合水用量相同时, 再生骨料表面附着的旧水泥石具有高吸水性, 部分的拌合水被再生骨料吸走, 减少了游离的自由水含量, 从而降低了砂浆的流动性能; 经过碳化处理之后, 再生骨料的吸水率下降, 总的用水量不变的情况下, 游离水的含量上升, 使得碳化再生骨料制备的砂浆流动性能得到改善。

2.2 力学性能

应敬伟等^[34]研究发现将再生骨料通过 CO_2 强化之后, 再生骨料取代率为 100% 的再生混凝土的 28 d 抗压强度和由天然骨料制备的对照组相比降低了 10.1%, 与未经强化的再生骨料制备的混凝土相比 28 d 抗压强度上升了 8.3%。此外研究发现了取代率低于 50%, CO_2 强化后的骨料制备的再生混凝土抗压强度和天然骨料混凝土相比没有显著的降低^[34]。Xuan 等^[32]研究发现使用碳化再生骨料的再生混凝土抗压强度提升了 22.6%, 抗弯强度提升 28.7%, 最终碳化再生骨料的取代率增加到 60%, 抗压强度以及抗弯强度都不会有显著降低。高越青等^[26]采用了不同的水灰比制备原生砂浆试块, 得到不同品质的再生骨料研究发现原生砂浆水灰比为 0.55, 0.45, 0.35 的再生骨料, CO_2 强化之后, 其相应的再生混凝土抗压强度提高分别为 28.4%, 10.5%, 19.6%。抗压强度有显著提高, 同时表明再生骨料品质越差, CO_2 强化的提升就越大。Zhang 等^[33]通过将砾石再生骨料和碎石再生骨料的进行碳化, 制备两种再生骨料混凝土, 碳化的砾石再生骨料混凝土 90 d 抗压强度提升 18%, 然而碎石再生骨料混凝土 90 d 抗压强度提升为 8%, 同样得出了再生骨料品质越差, CO_2 强化更有效的结果。如

表 2 所示, 碳化再生骨料的取代率对其相对抗压强度(含碳化再生骨料混凝土与未碳化处理再生骨料混凝土的抗压强度比值)的影响, 100%取代率下其改善幅度在 6.5%~32.9%。

表 2 碳化再生骨料的取代率对其相对抗压强度的影响
Table 2 Effect of replacement ratio of carbonated RCAs on relative compressive strength

Replacement ratio of carbonated RCA	Relative compressive strength	Reference
20%	1.006	[32]
30%	1.052	[50]
	1.025	[56]
40%	1.108	[32]
50%	1.241	[55]
	1.074	[56]
60%	1.110	[32]
70%	1.111	[56]
80%	1.166	[32]
	1.226	[32]
100%	1.065	[50]
	1.329	[55]
	1.131	[56]

Kou 等^[28]发现对于劈拉强度, 碳化再生骨料制备的再生混凝土 90 d 养护后的劈拉强度甚至超过了天然骨料混凝土, 水灰比 0.55 和 0.45 砂浆制备的再生骨料提升分别为 5%和 11%。

由原生砂浆水灰比分别为 0.55 和 0.45 制成的两种再生骨料, 强化后制成的再生混凝土 90 d 弹性模量相比普通混凝土降低分别为 6%和 2%, 和未强化的再生骨料制成的再生混凝土相比提升分别为 10.6%和 10.1%^[28], CO₂ 强化的再生骨料能够有效地改善再生骨料混凝土的弹性模量。

2.3 体积稳定性

Kou 等^[28]发现由原生砂浆水灰比分别为 0.55 和 0.45 制成的两种再生骨料, 制备而成的再生骨料混凝土的干缩也得到了改善, 测试养护 112 d 的再生混凝土试件, 使用碳化后再生骨料的混凝土试件与未碳化再生混凝土相比干燥收缩率降低了 10%~15%^[28]。

Xuan 等^[32, 58]还对两种存放不同时间的再生骨料进行强化, 两种碳化的再生骨料混凝土的干缩都有所降低, 弹性模量也都有所提高。CO₂ 碳化处理降低了再生骨料表面附着的老砂浆的孔径同时也减小了毛细孔的孔径, 从而降低了再生骨料混凝土的干燥收缩^[49]。

2.4 耐高温性能

有学者对再生骨料混凝土的耐高温性能进行研究, 再生骨料的置换率对 600 ℃高温处理后的残余抗压强度与初始抗压强度比值的影响显示: 在任意取代率时, 碳化后再生骨料的混凝土的比值都是高于相应的含未碳化处理的再生骨料的混凝土。对再生骨料进行碳化能有效改善再生骨料混凝土的耐高温性能^[59]。

2.5 耐久性能

CO₂ 强化的再生骨料对混凝土耐久性能也有一定的提升^[57]。Xuan 等^[58]对碳化再生骨料混凝土的耐久性能的研究发现, 再生混凝土的导电率相比未碳化处理的再生骨料混凝土降低 15.1%, 氯离子渗透率降低 36.4%, 气体渗透率下降了 42.4%, 但是这些数值仍然高于天然骨料制备的参照混凝土。此外研究发现了其耐久性和吸水率的相关性, Xuan 认为吸水率可以作为一个渗透性的判断指标。

高越青等^[26]利用原生砂浆水灰比制备不同的再生骨料, 试验发现强化后水灰比为 0.55 的氯离子渗透系数降低了 79.9%, 高于水灰比 0.35 和 0.45。这也意味着再生骨料品质越低, 其再生骨料混凝土的氯离子扩散系数降低越明显^[26, 39]。

2.6 微观结构

混凝土中骨料和砂浆之间的界面过渡区对于混凝土的性能有很大的影响, 改善混凝土中的界面过渡区, 就能有效的提升混凝土的各项力学性能^[60-61]。肖建庄等^[62]认为, 再生骨料表面存在的老砂浆, 是再生骨料混凝土区别于普通混凝土的主要原因, 再生骨料混凝土的界面过渡区可以分为: 天然骨料和老砂浆; 天然骨料和新砂浆; 老砂浆和新砂浆 3 种。利用扫描电镜对新老界面过渡区进行了测试, 发现界面过渡区表现出结构较疏松, 孔隙率较高的特征。再生骨料经碳化后能够有效改善再生骨料混凝土界面过渡区的显微硬度。Zhang 等^[33]研究碳化处理再生骨料制备的再生混凝土和未碳化处理再生骨料制备的再生混凝土, 发现未碳化处理的再生混凝土有松散的 C-S-H 以及针状钙矾石, 结构中有较多的孔隙, 而强化后的再生骨料混凝土结构更加致密, 其中几乎没有大孔。Xuan 等^[58]同样发现碳化再生骨料混凝土中的大孔明显减少的现象。

Zhan 等^[63]发现碳化再生骨料混凝土中, 碳化再生骨料和新砂浆的摩擦得到增强以及抗拉粘结强度都得到了提升。在碳化的再生骨料混凝土受拉破坏不一定发生在界面过渡区断裂, 而是可能

发生在新砂浆和再生骨料中强度较低的位置。此外界面过渡区显微硬度也表明碳化再生骨料混凝土界面过渡区得到了加强,但强化对界面过渡区厚度几乎没有影响。

2.7 钢筋锈蚀

再生骨料本身的性能较差使得再生骨料混凝土中的钢筋更容易受到腐蚀^[65]。碳化后再生骨料的性能虽然得到提升,但是碳化之后再生骨料中的羟基离子减少碱性降低,再生骨料混凝土的 pH 值也因此降低,削弱了混凝土中钢筋的钝化,降低了钢筋抗锈蚀的能力^[66–67]。碳化后再生骨料对于钢筋锈蚀的影响是复杂的。

郑建岚等^[68]通过测定钢筋混凝土自腐蚀电位的方式来判断钢筋的锈蚀程度,发现混凝土的自腐蚀电位随着再生骨料取代率的增加而增加,再生骨料经过碳化之后,再生混凝土的自腐蚀电位明显下降。Zhan 等^[69]的研究也得到了同样的结果,通过 RAC 和 CRAC 中钢筋在干燥和润湿循环中的抗极性测试,发现虽然碳化再生骨料在初期会影响钢筋钝化层的生成,经过一段时间后钢筋表面仍能够形成有效的钝化保护层抵抗锈蚀,在干湿循环 10 周以后含碳化再生骨料的混凝土中钢筋的抗极性没有明显降低,而未碳化的样本抗极性迅速降低。

因此尽管碳化再生骨料会影响钢筋钝化层的生成,但是碳化降低了再生骨料的孔隙率,改善了骨料的界面过渡区,最终降低了再生混凝土的孔隙率,使界面过渡区结构致密,大大降低了气透性,提升了抗氯离子渗透能力,相较于一般再生骨料能够有效保护钢筋不受侵蚀。

2.8 碳化强化再生骨料与其他强化方式的协同

除了对碳化条件进行研究之外,还有其他的强化方式,Mukharjee 等^[70]研究表明喷涂纳米硅溶液能够有效提升再生骨料的力学性能。还有学者专注于将碳化和其他强化方式组合,研究多种强化方法之间的协同作用的可能性。Li 等^[71]尝试将碳化和喷涂纳米硅溶液强化的方法结合,结果显示碳化+纳米硅的方法改善程度要大于两种方式单独作用的和,证明了碳化和喷涂纳米硅协同作用的可行性。纳米硅强化可以有效的改善新的界面过渡区性能,而碳化强化方式可以有效的强化再生骨料,弥补了单独使用纳米硅强化的不足。

3 结论与展望

通过对已有碳化强化再生骨料的研究成果进

行归纳总结,得出以下结论:

1) CO₂ 碳化强化再生骨料的根本原因是碳化反应生成的 CaCO₃ 晶体填充了再生骨料内部孔隙,减少了微裂缝,使得再生骨料微观结构更加致密,提升了骨料表面附着的水泥石的性能。

2) 微观结构的改善使得再生骨料的物理性能得到了改善,如表观密度提升 0~5%、压碎指标降低 0~30%以及吸水率降低 10%~30%。

3) 再生骨料性能的强化也改善了再生骨料混凝土的界面过渡区性能,从而基于碳化后的再生骨料的混凝土相应的力学性能和耐久性能也得到了提升,如采用 100%碳化强化后再生骨料的混凝土的抗压强度提高 6.5%~32.9%,而耐久性重要参数之一氯离子渗透率降低 30%~80%。

虽然碳化强化再生骨料的研究取得了一定的成果,以下问题仍需深入研究:

1) 在对再生骨料进行碳化的过程中,需要考虑 CO₂ 浓度、压力以及相对湿度等多个因素耦合作用,从而寻求最佳碳化条件组合。

2) CO₂ 碳化强化后再生细骨料混凝土的钢筋锈蚀规律以及黏结-滑移本构等。

参考文献:

- [1] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)[J]. Constr Build Mater, 2012, 31: 364–383.
- [2] KALIYAVARADHAN S K, LING T C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste—an overview[J]. J CO₂ Util, 2017, 20: 234–242.
- [3] 丁美荣. 水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J]. 中国水泥, 2021(7): 46–49.
DIND Meirong. Chin Cem(in Chinese), 2021 (7): 46–49.
- [4] 龚志超, 丁锐, 陈柏昆, 等. 基于生命周期评价的废弃混凝土处理系统评估[J]. 建筑科学, 2012, 28(3): 29–33.
GONG Zhiqi, DING Rui, CHEN Bokun, et al. Archit Sci (in Chinese), 2012, 28 (3): 29–33.
- [5] 杜婷, 李惠强, 郭太平, 等. 废弃混凝土再生骨料应用的经济性分析[J]. 新型建筑料, 2006(6): 30–33.
DU Ting, LI Huiqiang, GUO Taiping, et al. New Build Mater (in Chinese), 2006(6): 30–33.
- [6] 肖建庄, 马旭伟, 刘琼, 等. 全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2): 1–15.
XIAO Jianzhuang, MA Xuwei, LIU Qiong, et al. J Archit Civ Eng (in Chinese), 2021, 38(2): 1–15.
- [7] 刘锟, 陈宣东, 黄达. 再生混凝土的研究现状及未来研究趋势分析[J]. 混凝土, 2020(10): 47–50.
LIU Kun, CHEN Xuandong, HUANG Da. Concrete (in Chinese), 2020(10): 47–50.
- [8] 张金喜, 张建华, 郭长森. 再生混凝土性能和孔结构的研究[J]. 建筑材料学报, 2006 (2): 142–147.

- ZHANG Jinxi, ZHANG Jianhua, WU Changsen. Build Mater(in Chinese), 2006(2): 142–147.
- [9] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1554–1558.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. J Tongji Univ (Nat Sci, in Chinese), 2004, 32(12): 1554–1558.
- [10] 段珍华, 侯少丹, 潘智生, 等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S2): 420–426.
DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, PAN Zhisheng, et al. J Build Struct (in Chinese), 2020, 41(S2): 420–426.
- [11] 耿健, 孙家瑛, 莫立伟, 等. 再生细骨料及其混凝土的微观结构特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(2): 135–140.
GENG Jian, SUN Jiaying, MO Liwei, et al. J Civ Environ Eng (in Chinese), 2013, 35(2): 135–140.
- [12] ZHAO Z F, REMOND S, DAMIDOT D, et al. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars[J]. Constr Build Mater, 2015, 81: 179–186.
- [13] ZHAO Z F, COURARD L, GROSLAMBERT S, et al. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study[J]. Resour, Conserv Recycl, 2020, 157: 104786.
- [14] 孙跃东, 王涛. 再生骨料强化对再生混凝土基本力学性能的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 212–215.
SUN Yuedong, WANG Tao. Sichuan Build Sci (in Chinese), 2010, 36(4): 212–215.
- [15] 程亚卓, 孟美丽. 碳化增强再生骨料对混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(5): 57–60.
CHENG Yazhuo, MENG Meili. New Build Mater (in Chinese), 2021, 48(5): 57–60.
- [16] ZHAO Z F, REMOND S, DAMIDOT D, et al. Improving the properties of recycled concrete aggregates by accelerated carbonation[J]. Proc Instit Civ Eng-Constr Mater, 2018, 171(3): 126–132.
- [17] HAN Y S, HADIKO G, FUJI M, et al. Effect of flow rate and CO₂ content on the phase and morphology of CaCO₃ prepared by bubbling method[J]. Cryst Growth, 2005, 276(3/4): 541–548.
- [18] ARANDIGOYEN M, BICER-SIMSIR B, ALVAREZ J I, et al. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes[J]. Appl Surface Sci, 2006, 252(20): 7562–7571.
- [19] 常钧, 房延凤, 尚小朋, 等. 加速碳化对水化硅酸钙显微结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8): 1055–1060.
CHANG Jun, FANG Yanfeng, SHANG Xiaopeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(8): 1055–1060.
- [20] LIANG C F, PAN B H, MA Z M, et al. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review[J]. Cem Concr Compos, 2020, 105: 103446.
- [21] SHI C J, LI Y K, ZHANG J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review[J]. J Cleaner Prod, 2016, 112(1): 466–472.
- [22] YOUNG J F, BERGER R L, BREESE J. Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂[J]. J Am Ceram Soc, 1974, 57: 394–397.
- [23] HYVERT N, SELLIER A, DUPRAT F, et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(11): 1582–1589.
- [24] 李亚可. 二氧化碳强化再生骨料改进其性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- LI Yake. Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by CO₂ Curing(in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2014.
- [25] LIANG C F, LU N, MA H W, et al. Carbonation behavior of recycled concrete with CO₂-curing recycled aggregate under various environments[J]. J CO₂ Util, 2020, 39: 101185.
- [26] 高越青, 潘碧豪, 梁超锋, 等. CO₂强化再生骨料的特性及其对再生混凝土性能的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(6): 95–102.
GAO Yueqing, PAN Bihao, LIANG Chaofeng, et al. J Civ Environ Eng (in Chinese), 2021, 43(6): 95–102.
- [27] 曹芷杰. 碳化再生骨料混凝土性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
CAO Zhijie. The effect of recycled aggregate treated by carbon dioxide on properties of recycled concrete(in Chinese, dissertation), Changsha: Hunan University, 2016.
- [28] KOU S C, ZHAN B J, POON C S. Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2014, 45: 22–28.
- [29] ZHAN B J, POON C S, LIU Q, et al. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties[J]. Constr Build Mater, 2014, 67: 3–7.
- [30] FANG X L, ZHAN B J, POON C S. Enhancing the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates by using reclaimed wastewater from concrete batching plants[J]. Constr Build Mater, 2020, 239: 117810.
- [31] REIS G S, CAZACLIU B G, ARTONI R, et al. Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process[J]. J CO₂ Util, 2020, 39: 101181.
- [32] XUAN D X, ZHAN B J, POON C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2016, 65: 67–74.
- [33] ZHANG J, SHI C J, LI Y, et al. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar[J]. Constr Build Mater, 2015, 98(15): 1–7.
- [34] 应敬伟, 蒙秋江, 肖建庄. 再生骨料CO₂强化及其对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材学报, 2017, 20(2): 277–282.
YING Jingwei, MENG Qiujiang, XIAO Jianzhuang. J Build Mater (in Chinese), 2017, 20(2): 277–282.
- [35] PAN G H, ZHAN M M, FU M H, et al. Effect of CO₂ curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking[J]. Constr Build Mater, 2017, 154: 810–818.
- [36] KADDAH F, RANAIVOMANANA H, AMIRI O, et al. Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales[J]. J CO₂ Util, 2022, 57: 101885.
- [37] LI Y, FU T H, WANG R J, et al. An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of recycled concrete aggregates cured by CO₂[J]. Constr Build Mater, 2020, 236: 117543.
- [38] YOU K S, LEE S H, HWANG S H, et al. Effect of CO₂ carbonation on the chemical properties of waste cement: CEC and the heavy metal adsorption ability[J]. Mater Trans, 2011, 52(8): 1679–1684.
- [39] LIANG C F, MA H W, PAN Y Q, et al. Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate[J]. Constr Build Mater, 2019, 218: 506–518.
- [40] FANG Y F, CHANG J. Microstructure changes of waste hydrated

- cement paste induced by accelerated carbonation[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 76: 360–365.
- [41] JANG J G, LEE H K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 82: 50–57.
- [42] GALAN I, ANDRADE C, CASTELLOTE M. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 49: 21–28.
- [43] PAPADAKIS V G, VAYENAS G G, FARDIS M N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation[J]. *Aichet J*, 2010, 35: 1639–1650.
- [44] ASGHAR G-V, ANNELIE B, RUBEN S, et al. The effects of carbonation conditions on the physical and micro-structural properties of recycled concrete coarse aggregates[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 257: 119486.
- [45] ZHAN B J, XUAN D X, POON C S, SHI C J. Effect of curing parameters on CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 71: 122–130.
- [46] CUI H Z, TANG W C, LIU W, et al. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 93: 522–527.
- [47] THIERY M, DANGLA P, BELIN P, et al. Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 46: 50–65.
- [48] ZHAN M M, PAN G H, WANG Y P, et al. Effect of presoak-accelerated carbonation factors on enhancing recycled aggregate mortars[J]. *Mag Concr Res*, 2017, 69(16): 838–849.
- [49] 唐薇, 寇世聪. 压力对再生骨料固碳能力的影响研究[J]. *四川建材*, 2019, 45(8): 8–10.
TANG Wei, KOU Shicong. *Sichuan Build Mater* (in Chinese), 2019, 45(8): 8–10.
- [50] TAM V W Y, BUTERA A, LE K N. Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production[J]. *J Cleaner Prod*, 2016, 133: 672–680.
- [51] DROUET E, POYET S, BESCOP P L, et al. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 115: 445–459.
- [52] GLASSER F P, PEDERSEN J, GOLDTHORPE K, et al. Solubility reactions of cement components with NaCl solutions: I. Ca(OH)₂ and C-S-H[J]. *Adv Cem Res*, 2005, 17(2): 57–64.
- [53] WANG D C, NOGUCHI T, NOZAKI T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials[J]. *J Cleaner Prod*, 2019, 238: 117980.
- [54] AHMAD S, ASSAGGAF R A, MASLEHUDDIN M, et al. Effects of carbonation pressure and duration on strength evolution of concrete subjected to accelerated carbonation curing[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 136: 565–573.
- [55] LU B, SHI C J, CAO Z J, et al. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete[J]. *Cleaner Prod*, 2019, 233: 421–428.
- [56] LUO S R, YE S C, XIAO J Z, ZHENG J L, et al. Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 956–965.
- [57] KAZMI S M S, MUNIR M J, WU Y F, et al. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 264: 120284.
- [58] XUAN D X, ZHAN B J, POON C S. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 84: 214–221.
- [59] XUAN D X, ZHAN B J, POON C S. Thermal and residual mechanical profile of recycled aggregate concrete prepared with carbonated concrete aggregates after exposure to elevated temperatures[J]. *Fire Mater*, 2018, 4(1): 134–142.
- [60] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates[J]. *Constr Build Mater*, 2004, 18(6): 461–468.
- [61] LIU S H, SHEN P L, XUAN D X, LONG L, et al. A comparison of liquid-solid and gas-solid accelerated carbonation for enhancement of recycled concrete aggregate[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 118: 103988.
- [62] 肖建庄, 刘琼, 李文贵, 等. 再生混凝土微观结构和破坏机理研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 24–30.
XIAO Jianzhuang, LIU Qiong, LI Wengui, et al. *J Qingdao Univ Technol* (in Chinese), 2009, 30(4): 24–30.
- [63] ZHAN B J, XUAN D X, POON C S, et al. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 136: 106175.
- [64] SHI C J, WU Z M, CAO Z J, et al. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 86: 130–138.
- [65] 孙平平, 叶良. 再生骨料混凝土内钢筋锈蚀影响因素试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2013(3): 19–22.
SUN Pingping, YE liang. *New Build Mater* (in Chinese), 2013(3): 19–22.
- [66] POURSAEE A, HANSSON C M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(7): 1127–1133.
- [67] WEERDT K D, PLUSQUELLEC G, BELDA REVERT A, et al. Effect of carbonation on the pore solution of mortar[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 118: 38–56.
- [68] 郑建岚, 胡伟, 王雅思. CO₂强化再生粗骨料对混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(3): 225–231.
ZHENG Jianlan, HU Wei, WANG Yasi. *Eng J Wuhan Univ* (in Chinese), 2020, 53(3): 225–231.
- [69] ZHAN B J, XUAN D X, ZENG W L, et al. Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 104: 103360.
- [70] MUKHARJEE B B, BARAI S V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 55: 29–37.
- [71] LI L, XUAN D X, SOJOBI A O, et al. Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 308: 125080.