文章编号:1007-9629(2024)10-0895-09

CO2 矿化再生骨料物理性能影响因素与机理

元 强^{1,2,*}, 张胶玲^{1,2}, 张苏辉^{1,2}, 丁任盛³

(1.中南大学土木工程学院,湖南长沙 410075; 2.中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南长沙 410075; 3.沪杭铁路客运专线股份有限公司,上海 200237)

摘要:对经CO₂矿化后的再生骨料(RA)吸水率和表观密度的影响因素进行分析.结果表明:CO₂矿 化处理能有效改善再生骨料的物理性能,且随着固碳率的增加,RA的物理性能改善愈发显著;当 RA含水率为1.3%时,在环境温度和相对湿度分别为50℃和98%,CO₂体积分数、压力、碳化时间分 别为99%、0.15 MPa、24 h条件下,RA的碳化强化效果最佳,与未经碳化处理的RA相比,其固碳率 为1.77%,吸水率降低33.47%,表观密度增加2.06%.经CO₂矿化处理后,RA中的Ca(OH)₂和水化 硅酸钙(C-S-H)凝胶与CO₂发生碳化反应,在孔隙中生成方解石晶型的CaCO₃,使得界面过渡区变 得致密,孔隙率由22.07%降至12.78%,实现了RA对CO₂的封存,改善了RA的物理性能. 关键词:再生骨料;CO₂矿化;性能提升;微观分析

中图分类号:TU502 文献标志码:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.004

Influencing Factors of Physical Properties of CO₂ Mineralized Recycled Aggregate and Its Mechanism

YUAN Qiang^{1,2,*}, ZHANG Jiaoling^{1,2}, ZHANG Suhui^{1,2}, DING Rensheng³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 3. Shanghai-Hangzhou Railway Passenger Dedicated Line Co., Ltd., Shanghai 200237, China)

Abstract: The influencing factors affecting the water absorption and apparent density of recycled aggregate(RA) after CO_2 mineralization were analyzed. Results show that the physical properties of RA improved significantly after CO_2 mineralization. And as the carbon sequestration increases, the physical properties of RA improve more significantly. The strengthening effect of RA after carbonation is the best, when the water content of RA is 1.3%, the temperature and relative humidity of 50 °C and 98%, CO_2 concentration of 99%, pressure of 0.15 MPa and carbonation time of 24 h. At these conditions, compared with untreated recycled aggregate, the CO_2 uptake of recycled aggregate is 1.77%, the water absorption of RA is reduced by 33.47%, the apparent density of RA is increased by 2.06%. After CO_2 mineralization, $Ca(OH)_2$ and calcium silicate hydrated (C-S-H) gel converted to calcite in the pore makes the interface transition zone dense and the porosity decrease (from 22.07% to 12.78%), which realized the storage of CO_2 by recycled aggregate and the physical properties of RA are improved.

Key words: recycled aggregate(RA); CO₂ mineralization; performance improvement; microstructural analysis

混凝土是应用最为广泛的建筑材料,降低其碳 排放,是建筑材料行业低碳转型的重点任务^[1].中国 每年约产生6亿t废弃混凝土,但利用率不足5%^[2]. 将废弃混凝土回收、破碎和混合,得到再生骨料 (RA),用其部分或完全代替天然骨料来生产混凝 土^[3],不仅能够大幅提升固废循环利用率,还可降低

收稿日期:2024-03-08;修订日期:2024-05-19

基金项目:中国建材集团关键核心技术"揭榜挂帅"项目(2021HX0506);"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFB2602604) 第一作者(通讯作者):元 强(1981—),男,江西乐安人,中南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yuanqiang@csu.edu.cn

混凝土原材料生产过程中的碳排放^[4],是实现混凝土 原材料减碳的重要途径.

RA由于表面附着旧砂浆且因破碎形成了大量 裂隙^[5],与天然骨料相比,其吸水率和表观密度等物 理性能较差^[6].采用CO₂进行矿化处理,可使RA吸水 率降低17.4%~42.9%,表观密度增加0.5%~ 4.7%^[7],是改善RA物理性能的有效方式^[2,8-12].CO₂矿 化RA的反应过程涉及CO₂的扩散、溶解,水化产物 中Ca²⁺的析出,以及孔隙溶液中CO₃²⁻与Ca²⁺的反 应、沉淀等复杂步骤,以上反应的速率均会直接受到 碳化工艺参数的影响^[13].若要实现RA的深度碳化, 显著改善其物理性能,须对不同碳化工艺参数下RA 的碳化效果进行系统研究.

鉴于此,本试验以废弃混凝土资源化利用得到的RA为研究对象,研究骨料含水率、环境温度和相对湿度、CO2体积分数、压力和碳化时间等不同碳化工艺参数对RA物理性能的改善效果和CO2固化能力的影响.并借助微观分析手段,从物相组成、孔结构和微观形貌等方面对RA碳化反应后的微观性能

进行探究.

1 试验

1.1 原材料

将建筑物拆除得到的废弃混凝土(经现场实测 其强度等级为C30),破碎、清洗、筛分后获得粒径为 5~20 mm的RA.测得RA的初始含水率(质量分数, 文中涉及的含水率、吸水率等除特别注明外均为质 量分数)为1.3%、吸水率为6.9%,表观密度为2620 kg/m³. 表面附着砂浆占RA总质量的25.39%,其中Ca(OH)₂ 含量为1.78%,CaCO₃含量为32%,无定形物(主要 为水化硅酸钙(C-S-H)凝胶^[14])含量为41.87%,钙矾 石(AFt)含量为2.20%,单碳铝酸钙水化物(Mc)含 量为1.27%.

1.2 RA加速碳化处理

将RA置于密闭的碳化反应釜中,研究RA含水 率(w),环境温度(θ)、相对湿度(RH),CO₂体积分数 φ (CO₂)、压力(p)和碳化时间(t)对RA碳化反应的影 响.RA碳化试验参数如表1所示.

表 1 RA 碳化试验参数 Table 1 Carbonation parameters of RA

| Carbonation parameter | Value | Other condition |
|--------------------------------------|----------------|--|
| w/% | 0/1.3/3.2/6.8 | φ(CO ₂): 99%; θ: 25 °C; p: 0. 10 MPa; t: 24 h |
| RH/% | 10/30/50/80/98 | |
| $\varphi(\mathrm{CO}_2)/\sqrt[p]{0}$ | 20/50/70/99 | w: 1.3%; RH: 98%; θ: 25 °C; p: 0.10 MPa; t: 24 h |
| <i>θ</i> /°C | 25/50/70/90 | $w{:}\;1.3\%;\mathrm{RH}{:}\;98\%;\varphi(\mathrm{CO}_2{):}\;99\%;p{:}\;0.10,0.15$ MPa; $t{:}\;24$ h |
| p/MPa | 0.10/0.15 | $w{:}\;1.3\%;\mathrm{RH}{:}\;98\%;\varphi(\mathrm{CO}_2{)}{:}\;99\%;\theta{:}\;25,50,70,90~\%;t{:}\;24~\mathrm{h}$ |
| t/h | 2/4/8/12/24 | $w{:}\;1.3\%{;}\;\mathrm{RH}{:}\;98\%{;}\;\varphi(\mathrm{CO}_2){:}\;99\%{;}\;\theta{:}\;25,50\ ^\circ\!\!\!\mathrm{C}{;}\;p{:}\;0.\;10\;\mathrm{MPa}$ |

1.3 测试方法

(1)RA物理性能 依据GB/T 14685—2022《建 设用卵石、碎石》,对碳化前后RA的吸水率和表观密 度进行测试.

(2) RA 固碳率(ζ,%) ζ由碳化前后 RA 中的CaCO₃质量差计算得到,计算式如式(1)~(2) 所示.

$$\zeta = \frac{m(CaCO_3) = 2.27\Delta m(CO_2)}{m(CaCO_3)_a - m(CaCO_3)_b} \times 100\% (2)$$

式中: $m(CaCO_3)$ 为RA中CaCO₃的质量, $g;\Delta m(CO_2)$ 为热重(TG)分析结果中550~950 ℃内由于CaCO₃分解释放CO₂引起的样品质量损失, $g;m(CaCO_3)_a$ 为碳化后RA中CaCO₃的质量, $g;m(CaCO_3)_b$ 为碳化前RA中CaCO₃的质量,g;m(RA)为105℃干燥状态下RA的质量,g.

(3)RA物相组成 首先,将碳化前后的RA进行 破碎,剔除原生骨料并保留附着砂浆;然后,将其置

于研钵中研磨,得到粒径不大于75.00µm的粉末;最后,将粉末样品在35℃的真空干燥箱中干燥72h,取出冷却至室温,即可进行TG分析和X射线衍射(XRD)测试.

(4)RA孔结构 采用压汞法(MIP)对碳化前后 RA的孔结构变化进行表征.测试前,选取粒径约为 4.75 mm的RA,置于真空干燥箱中干燥72h;之后采 用 AutoPore IV 9500型全自动压汞仪进行 MIP测 试,研究碳化前后 RA的孔隙率(体积分数)变化.

(5) RA 微观结构和形貌 采用 JSM-IT 500 型 扫描电镜(SEM)中的背散射电子(BSE),分析碳化 前后 RA 的界面过渡区(ITZ)和孔隙结构等微观结 构的变化^[15],并使用 Image-Pro Plus (IPP)软件进行 图像处理,确定原生骨料与附着砂浆的边界;之后 对附着砂浆区域进行阈值处理,以分析孔隙与微裂 缝变化情况.采用 SEM 观察碳化前后 RA 的微观 形貌,工作电压设定为 20 kV. 第10期

2 结果与讨论

2.1 RA碳化反应影响因素

2.1.1 RA含水率与环境相对湿度相互作用对RA碳 化反应的影响

根据RA含水率与环境相对湿度的不同,将RA的碳化湿度划分为4个区:"内干外干区"(w<2.0%、RH<40%)、"内干外湿区"(w<2.0%、RH>70%)、 "内湿外湿区"(w>4.0%、RH>70%)和"内湿外干 区"(w>4.0%、RH<40%).RA含水率与环境相对 湿度相互作用对RA碳化反应的影响如图1所示.由 图1可见:碳化反应后,当RA处于"内干外湿区"和 "内湿外干区"时,其吸水率和表观密度显著改善,固 碳率较高;当RA处于"内干外干区"和"内湿外湿区" 时,其吸水率和表观密度改善效果较差,固碳率较低.

RA 孔隙内的水分是其碳化反应的基础.当RA 孔隙中的水分较少时,碳化反应所需水分不足,碳化 效果较差;而当RA的孔隙被水填满时,CO2向内部 反应区的扩散被阻碍,同样也会限制RA的碳化反 应^[2].RA 孔隙水饱和度的大小与其含水量、环境相对 湿度密切相关,碳化反应时,RA内部与碳化环境之 间会发生水分交换^[16].当RA含水率较低、环境相对 湿度较高时,碳化环境中的水分会迅速渗透到RA内 部,然后在RA孔隙中扩散,使得RA内部湿度利于 碳化反应的进行;当RA含水率较高、环境相对湿度 较低时,碳化反应时,水分迁移的方向是由RA内部 到碳化环境中的,RA中被水填满的孔隙得到疏通, CO₂扩散未受阻.因此,若要实现RA物理性能的显 著改善和固碳能力的提升,在RA含水率小于2.0% 条件下,环境相对湿度应大于70%;而在RA含水率 大于4.0%条件下,环境相对湿度应小于40%. **2.1.2** CO₂体积分数对RA碳化反应的影响

CO₂体积分数对RA碳化反应的影响如图2所示.由图2可见,随着CO₂体积分数的增加,RA吸水率逐渐降低,表观密度逐渐增大,固碳率逐渐增加.表明随着CO₂体积分数的增加,RA的物理性能得以改善,CO₂固化能力增强.碳化反应过程中, CO₂由外部环境通过RA附着砂浆中的毛细孔和凝胶孔,溶解到孔隙溶液中,与孔隙溶液中的毛细孔和凝胶孔,溶解到孔隙溶液中,与孔隙溶液中的Ca²⁺进行反应^[10].根据Fick第一定律,CO₂由体积分数高的区域向体积分数低的区域扩散^[10]时,CO₂体积分数的增加可以提高CO₂的扩散速率,进而促进RA



Fig. 1 Effect of interaction between water content of RA and environmental relative humidity on RA carbonation reaction





的碳化反应效率.同时,随着CO₂体积分数的增加, 足够多的CO₃²⁻与Ca²⁺结晶生成CaCO₃,使得RA 附着砂浆中的孔隙和微裂缝被大量CaCO₃晶体填 充^[17],其微观结构得以细化,RA的物理性能显著

898

改善.

2.1.3 环境温度和压力对RA碳化反应的影响

环境温度和压力对 RA 碳化反应的影响如图 3 所示.





由图 3 可见:(1) 在压力为 0.10 MPa 条件下,当 环境温度由 25 ℃升至 50 ℃时, RA 吸水率降低,表观 密度增加,固碳率增加,这表明升高温度能够促进 RA 物理性能的改善和 CO₂固化能力的提高;但当环境温 度由 50 ℃进一步升至 90 ℃时, RA 的吸水率增加,表 观密度降低,固碳率降低,这表明环境温度进一步升 高反而不利于 RA 物理性能的改善和固碳率的提高. (2) 在压力为 0.15 MPa 条件下,当环境温度由 25 ℃ 升至 50 ℃时, RA 吸水率降低,表观密度增加,固 碳率增加;但当环境温度由 50 ℃升至 90 ℃时, RA 吸 水率增加,表观密度降低,固碳率降低.这表明 RA 的 碳化反应存在最佳温度区间,温度过低或过高均不 利于 RA 碳化反应的进行.

升高环境温度可提高 CO₂的扩散速率^[18],使 CO₂ 能够突破堆积的 CaCO₃和硅胶产物层,深入到 RA 内 部,与水化产物接触并发生反应,生成更多的 CaCO₃ 和硅胶,从而使得 RA 中的更多孔隙被填充,微观结 构更加致密^[19],物理性能得到显著改善;但当环境温 度过高时,并不能持续改善RA的物理性能.一方面 是因为过高的环境温度导致RA孔隙内部的水分被 蒸发出来,没有充足的水环境提供碳化反应的场所, 同时还抑制了CO₂在孔隙液中的溶解^[20],导致碳化反 应速率降低;另一方面,当环境温度较高时,CaCO₃呈 亚稳态球霰石晶型^[21],不利于RA微观结构的改善, 从而导致RA物理性能变差.

由图3还可见,在任意环境温度下,升高压力均 可使RA吸水率降低,表观密度增大,固碳率提高.一 方面,压力主要影响CO₂的溶解,由Henry定律可知, 随着压力的增加,CO₂的溶解速率增大^[10],使得孔溶 液中CO²⁻含量增加,CO²⁻与孔溶液中的Ca²⁺充分 结合,促进了碳化产物的生成;另一方面,随着CO²⁻ 含量的增加,孔溶液中的PH值降低,诱导RA中 Ca(OH)₂进一步溶解和C-S-H凝胶的脱钙^[22],促进 了Ca(OH)₂和C-S-H凝胶与CO₂完全反应.因此, 将压力由 0.10 MPa 增至 0.15 MPa 时,可促使 RA 中 生成大量的 CaCO₃和硅胶,提高了 RA 对 CO₂的固化 能力并实现了其物理性能的改善.

2.1.4 碳化时间对RA碳化反应的影响

碳化时间对 RA 碳化反应的影响如图 4 所示.

由图4可见:当环境温度为25、50℃时,随着碳化 时间的延长,RA的吸水率逐渐降低,表观密度逐 渐增大,固碳率逐渐增加.这表明,延长碳化时间 可促进RA的碳化反应,进一步增强RA的碳化 效果.



RA中水化产物的碳化反应包括3个阶段^[23]: 第1阶段为Ca(OH)₂的碳化阶段,随着碳化反应 的进行,Ca(OH)₂与CO₂完全反应生成CaCO₃;第 2阶段为高钙硅比(*n*(Ca)/*n*(Si))C-S-H凝胶的碳 化阶段,待Ca(OH)₂完全消耗后,C-S-H凝胶进行 碳化反应并发生脱钙,形成CaCO₃和低钙硅比 C-S-H凝胶;第3阶段为低钙硅比C-S-H凝胶的碳 化阶段,当C-S-H凝胶的钙硅比降低到一定值时, 凝胶骨架分解,C-S-H凝胶几乎被完全碳化,形成 CaCO₃和硅胶^[24],两者填充于RA的孔隙和微裂缝 中^[25].随着碳化时间的延长,更多的CO₂渗透到 RA内部,与RA表面附着砂浆中的水化产物进行 以上3个阶段的持续碳化反应,促进了RA的深度 矿化.

2.2 RA物相转化及微观结构演变

当RA含水率为1.3%时,在环境温度和相对湿度分别为50℃和98%,CO₂体积分数为99%、压力为0.15 MPa、碳化时间为24 h的条件下,RA的物理性能改善最为显著,固碳率最高.与未经处理的RA相比,其吸水率降低33.47%,表观密度增加2.06%,固碳率达1.77%.对未经处理的RA和碳化效果最佳的RA进行微观分析,以研究碳化处理对RA物相组成及微观结构的影响.

2.2.1 TG与XRD分析

碳化前后RA的热重(TG)分析结果如图5所示.

由图 5(a)可见,在温度处于 35~200、410~450、 550~950 ℃区间内均有明显的放热峰,分别对应 C-S-H凝胶、AFt及 Mc中结合水的脱去,Ca(OH)₂的 脱水,以及CaCO₃的分解.

由图 5(b)可见:与未碳化 RA 相比,碳化后 RA 在 35~200 ℃区间结合水含量由 5.57%降至 3.42%, 说明 C-S-H、AFt 和 Mc 在碳化过程中被大量消耗; Ca(OH)₂含量由 1.78%降至 0%,说明 Ca(OH)₂与 CO₂进行了充分反应;CaCO₃含量显著增加,说明碳 化反应后 RA 中生成了大量 CaCO₃.

为进一步确定碳化后 RA 的物相变化,进行了 XRD分析,结果见图 6. 由图 6(a)可见:碳化前 RA 中 的主要物相为 Ca(OH)₂、AFt、Mc和 CaCO₃;经碳化 处理后,RA 中 Ca(OH)₂的衍射峰消失,Mc和 AFt衍 射峰强度降低,CaCO₃的衍射峰强度显著增加.由图 6(b)可见:碳化后 RA 中的 Ca(OH)₂含量由 1.80%降 至 0%,Mc含量由 1.27%降至 0.39%,AFt含量由 2.20%降至 0.87%,无定形物含量由 41.87%降至 25.92%,而 CaCO₃含量由 30.56%增至 50.32%.

由上述 TG与 XRD 分析可知:(1) RA 中可碳化 成分为 Ca(OH)₂、AFt、Mc和 C-S-H凝胶.(2) RA 碳 化前,其中的 Ca(OH)₂和 AFt含量较少; RA 碳化后, Ca(OH)₂和 Mc 几乎完全反应^[21],而 AFt仍有部分未 反应.C-S-H凝胶作为 RA 中主要的碳化反应物,碳 化反应后生成 CaCO₃和无定形硅胶^[26],实现了 RA 对 CO₂的封存和利用.说明在 RA 中 Ca(OH)₂含量较低 的情况下, RA 中的 C-S-H凝胶仍有极大的固碳潜 力;且 C-S-H凝胶反应后,固相体积增加 23.1%^[2],提 高了 RA 的密实度,从而改善了 RA 的物理性能.

2.2.2 MIP分析

为区分碳化处理对不同类型孔隙的影响,统计











了气孔(孔径d>1000 nm),毛细孔(10 nm $\leqslant d \leqslant$ 1000 nm),凝胶孔(d < 10 nm)^[27]变化情况.碳化前后RA的MIP测试结果见图7.由图7可见:碳化后RA的累计孔隙体积V降低;碳化后RA中10~1000 nm的孔隙体积降低最显著;碳化后RA的整体孔隙率由22.07%降至12.78%,其中气孔孔隙率由2.10%降至1.17%,毛细孔孔隙率由17.29%降至10.43%,凝胶孔孔隙率由2.68%降至1.18%.碳化反应后,RA中各类孔隙均被碳化产物填充.

2.2.3 BSE分析

采用原位观测手段,对碳化前后 RA 的微观结构进行图像分析,其 BSE 图像见图 8. 由图 8 可见: (1) RA 由天然骨料、表面附着砂浆和界面过渡区 (ITZ)组成.碳化前 RA 的 ITZ 中存在贯穿型裂缝, 宽度约为2 μm;碳化反应后,RA 的 ITZ 中贯穿型裂 缝消失.(2)对 BSE 图像进行阈值处理后,可明显观 察到碳化前 RA 附着砂浆中存在孔径约为10 μm 的 大孔及较多的小孔和微裂缝;而碳化后 RA 附着砂 浆中的大孔孔径降为5 μm,其他小孔和微裂缝被大 量填充. 碳化前RA的微观结构松散多孔,为有害离子传输和水分进入提供了通道,导致RA吸水率和表观密度等物理性能较差.而碳化反应后RA中的Ca(OH)。 生成了CaCO3,C-S-H凝胶生成了CaCO3和硅胶,反应生成物填充在孔隙和裂缝处,对RA的微观结构起到了良好的填充效应,使得RA的微观结构由疏松变得致密,进而改善了RA的物理性能.

2.2.4 SEM分析

图9为碳化反应前后 RA的 SEM 照片.由图9可 见:由于天然骨料的边壁效应^[28],RA中可观察到裂隙 明显的 ITZ,裂隙宽度约为20 μm;碳化反应后,ITZ中 生长出无定形硅胶,加强了天然骨料和附着砂浆的联 结,裂隙宽度降至12 μm.碳化前 RA 附着砂浆中存在 孔径约为30 μm 的大孔和大量的小孔;碳化反应后,大 孔中生长出碳化产物,小孔几乎消失.碳化前在 RA 中 观察到无定形 C-S-H凝胶和针棒状 AFt;碳化反应后, C-S-H凝胶被碳化,表面生长出大量的方解石 晶型 CaCO₃,形状为立方体,尺寸为1~3 μm,且针棒状 AFt仍然存在,与XRD结果相符,说明AFt碳化反应 活性较低.





(a) Before carbonation



(b) After carbonation 图 8 碳化前后 RA 的 BSE 图像 Fig. 8 BSE images of RA before and after carbonation



(a) Before carbonation



(b) After carbonation 图 9 碳化前后 RA 的 SEM 照片 Fig. 9 SEM images of RA before and after carbonation

3 结论

(1)随着固碳率的增加,再生骨料(RA)的物理 性能改善越显著.RA 经 CO₂ 矿化处理后,附着砂浆 中的 Ca(OH)₂和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等组分与 CO₂反应生成 CaCO₃,其沉淀并填充于微裂缝和孔隙 处,使 RA 孔隙率降低,骨料与附着砂浆之间的界面 过渡区更加密实,进而实现了 RA 对 CO₂的封存和自 身物理性能的改善.

(2)CO₂体积分数、压力和碳化时间的提高有利 于RA固碳率的增加.RA含水率和环境相对湿度具 有协同作用,当RA含水率较低且环境相对湿度较高 或RA含水率较高且环境相对湿度较低时,均利于固 碳率的增加.温度过低或过高均不利于RA固碳率的 增加,即再生骨料存在最佳温度区间.

(3)当RA含水率为1.3%时,在环境温度和相对 湿度分别为50℃和98%,CO₂体积分数、压力、碳化 时间分别为99%、0.15 MPa、24 h时,RA的物理性能 最佳,固碳率最高.与未经碳化处理的RA相比,其吸 水率降低33.47%,表观密度增加2.06%,固碳率为 1.77%.

参考文献:

[1] 蒋正武,高文斌,杨巧,等.低碳混凝土的技术理念与途径思考[J].建筑材料学报,2023,26(11):1143-1150.

JIANG Zhengwu, GAO Wenbin, YANG Qiao, et al. Technical principles and approaches for low carbon concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1143-1150. (in Chinese)

- [2] 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]. Cement and Concrete Composites, 2019, 105:103446.
- [3] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018:65-98.
- [4] 王佃超,肖建庄,夏冰,等.再生骨料碳化改性及其减碳贡献 分析[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(11):1610-1619.
 WANG Dianchao, XIAO Jianzhuang, XIA Bing, et al. Carbonation modification of recycled aggregate and carbon dioxide sequestration analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(11):1610-1619. (in Chinese)
- [5] 崔正龙,路沙沙,汪振双.再生骨料特性对再生混凝土强度和 碳化性能的影响[J].建筑材料学报,2012,15(2):264-267.
 CUI Zhenglong, LU Shasha, WANG Zhenshuang. Influence of recycled aggregate on strength and anti-carbonation properities of recycled aggragate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2):264-267. (in Chinese)
- [6] 张春生,李雅婧,丁亚红,等.预浸石灰水碳化再生粗骨料混 凝土的力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(11):1143-1150.
 ZHANG Chunsheng, LI Yajing, DING Yahong, et al. Mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete with pre-soaking in lime water and carbonated aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1143-1150. (in Chinese)
- ZHOU C H, CHEN Z P. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:497-506.
- [8] 姜义,马梓涵,申培亮,等.废弃混凝土碳化资源化技术研究

进展[J]. 硅酸盐学报,2023,51(9):2433-2445.

JIANG Yi, MA Zihan, SHEN Peiliang, et al. Research progress on carbonation technologies for valorising waste concrete: A review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023,51(9): 2433-2445. (in Chinese)

- [9] 冷勇,余睿,范定强,等.碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备[J].建筑材料学报,2022,25(11):1185-1189,1218.
 LENG Yong, YU Rui, FAN Dingqiang, et al. Preparation of environmentally friendly UHPC containing carbonized recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1185-1189,1218. (in Chinese)
- [10] ZHANG T, CHEN M, WANG Y T, et al. Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138:104994.
- [11] LI L K, LIU Q, HUANG T Y, et al. Mineralization and utilization of CO₂ in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 298:121512.
- [12] 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].建筑材料学报,2017,20(2):277-282.
 YING Jingwei, MENG Qiujiang, XIAO Jianzhuang. Effect of CO₂-modified recycled aggregate on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):277-282. (in Chinese)
- [13] WANG D C, XIAO J Z, DUAN Z H. Strategies to accelerate CO₂ sequestration of cement-based materials and their application prospects[J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125646.
- [14] SHI Z G, LOTHENBACH B, GRIKER M R, et al. Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 88:60-72.
- [15] ZHANG S H, YUAN Q, LI Q Y, et al. Microstructural characteristics of bonding interfacial transition zone of concrete and magnesium ammonium phosphate cement[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76:107208.
- [16] WU L J, ZHANG W X, JIANG H, et al. Synergistic effects of environmental relative humidity and initial water content of recycled concrete aggregate on the improvement in properties via carbonation reactions[J]. Materials, 2023, 16(15):5251.
- $[\,17\,]~$ ZHANG S H, YUAN Q, NI J, et al. $\rm CO_2$ utilization and

sequestration in ready-mix concrete—A review[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 907:168025.

- [18] LU Z, TAN Q H, LIN J L, et al. Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341:127813.
- [19] 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]. Construction and Building Materials, 2017, 154:810-818.
- [20] ASHRAF W, OLEK J. Carbonation behavior of hydraulic and non-hydraulic calcium silicates: Potential of utilizing low-lime calcium silicates in cement-based materials [J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(13):6173-6191.
- [21] DÜNDAR B, TUĞLUCA M S, İLCAN H, et al. The effects of various operational- and materials-oriented parameters on the carbonation performance of low-quality recycled concrete aggregate [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106138.
- [22] PHUNG Q T, MAES N, JACQUES D, et al. Modelling the carbonation of cement pastes under a CO₂ pressure gradient considering both diffusive and convective transport [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:333-351.
- [23] LI L, ZIYABEK N, JIANG Y, et al. Effect of carbonation duration on properties of recycled aggregate concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19:e02640.
- [24] LIU X, FENG P, CAI Y X, et al. Carbonation behavior of calcium silicate hydrate (C-S-H): Its potential for CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431:134243.
- [25] FANG X L, ZHAN B J, POON C S. Enhancement of recycled aggregates and concrete by combined treatment of spraying Ca²⁺ rich wastewater and flow-through carbonation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 277:122202.
- [26] LU B, DRISSI S, LIU J H, et al. Effect of temperature on CO₂ curing, compressive strength and microstructure of cement paste
 [J]. Cement and Concrete Research, 2022, 157:106827.
- [27] SILVA D A, JOHN V M, RIBEIRO J L D, et al. Pore size distribution of hydrated cement pastes modified with polymers[J].
 Cement and Concrete Research, 2001, 31(8):1177-1184.
- [28] 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]. Cement and Concrete Research, 2020, 136:106175.