

文章编号:1007-9629(2022)11-1143-08

预浸石灰水碳化再生粗骨料混凝土的力学性能

张春生, 李雅婧, 丁亚红*, 武 军, 宁 威

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要:采用预浸石灰水碳化法对再生粗骨料进行强化处理,对强化前后再生粗骨料物理性能进行检测,研究了碳化再生粗骨料对混凝土力学性能的影响.同时结合微观测试手段,分析碳化对再生粗骨料的增强机理.通过立方体抗压、劈裂抗拉及抗折强度试验,研究强化后混凝土各龄期强度变化.结果表明:预浸石灰水碳化法能够显著改善再生粗骨料的物理性能,其吸水率降低 15.2%~22.9%,压碎值降低 15.2%~17.7%;碳化后粗骨料的界面过渡区更加密实,有利于再生粗骨料品质的提升;7、28 d 的混凝土强度随粗骨料取代率的增大而降低;当粗骨料取代率为 50% 时,预浸石灰水碳化再生混凝土强度与普通混凝土相当.

关键词:再生粗骨料;碳化强化;石灰水预浸泡;微观结构;力学性能

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.006

Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete with Pre-soaking in Lime Water and Carbonated Aggregates

ZHANG Chunsheng, LI Yajing, DING Yahong*, WU Jun, NING Wei

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The recycled coarse aggregates were strengthened by pre-soaking lime water combined with accelerated carbonation, the physical property of recycled coarse aggregates were tested. The effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical properties of recycled concrete was investigated, and the strengthening mechanism of carbonation was also analyzed by microscopic testing means. The strength changes of modified recycled concrete at various ages were studied by cubic compressive, splitting tensile and flexural strength tests. The results show that the physical properties of recycled coarse aggregates are significantly improved by pre-soaking lime water combined with carbonation, with 15.2%–22.9% reduction in water absorption and 15.2%–17.7% reduction in crushing index; the interfacial transition zone of recycled concrete is more compact after strengthening, which is beneficial to the quality of recycled coarse aggregates; the strengths at 7, 28 d decrease with the increases of replacement rate; the strength of recycled concrete with coarse aggregates strengthened by pre-soaking in lime water and carbonation is comparable to that of ordinary concrete with 50% replacement rate.

Key words: recycled coarse aggregate(RCA); carbonation reinforcement; pre-soaking lime water; microstructure; mechanical property

当前,天然资源的开发与建筑固废大量排放存在矛盾关系,而再生混凝土(RAC)有利于缓和两者关系.与天然骨料(NA)相比,再生骨料随机性和差

异性较大,强化再生骨料和拓宽 RAC 的应用已成为近年来的热点^[1-4].现有强化方式主要是对再生骨料表面的旧砂浆进行去除和强化^[5],其中碳化处理再生

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U190H88)

第一作者:张春生(1974—),男,河南临颍人,河南理工大学副教授,硕士生导师,硕士.E-mail:zhangchunsheng405@163.com

通讯作者:丁亚红(1973—),女,河南商丘人,河南理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:dingyahong@hpu.edu.cn

骨料被认为是一种有效的强化方式^[6]。

Zhan等^[5]采用循环碳化法,将再生骨料进行石灰水预浸泡,发现再生骨料的吸水率降低55%,RAC的抗压强度和抗折强度分别提高22.8%和42.4%。Xuan等^[7]研究发现,在0.1、0.5 MPa条件下碳化处理后的再生粗骨料(RCA)吸水率降低1.6%~5.5%。应敬伟等^[8]采用直接碳化法处理RCA,发现碳化RCA的表观密度和堆积密度均增大1.2%,吸水率减小27.3%,压碎值降低10.5%。Wang等^[9]采用复合碳化法将RCA进行Ca(OH)₂预浸泡,研究发现RCA的压碎值和吸水率分别降低14.7%和20.7%,氯离子迁移系数降低9.4%~26.0%。

综上,采用直接碳化法和复合碳化法均能有效改善RCA品质。然而,对于复合碳化法处理RCA的宏微观性能研究还有待进一步完善。鉴于此,本试验采用超饱和石灰水预浸泡复合碳化处理RCA,对RCA的物理性能、微观性能和再生粗骨料混凝土的基本力学性能进行探究。

1 试验

1.1 原材料

试验采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥、细度模数为3的河砂、聚羧酸减水剂、自来水、再生粗骨料(RCA)、饱和石灰水及CO₂等原材料。其中RCA为实验室废弃混凝土梁经破碎并筛选得到的5~10、10~20 mm骨料。另外,为了对比,试验选取相同粒径范围内的天然骨料(NA)。NA和RCA的物理性能如表1所示。

表1 NA和RCA的物理性能
Table 1 Physical properties of NA and RCA

Physical property	RCA		NA	
	5-10 mm	10-20 mm	5-10 mm	10-20 mm
Water absorption (by mass)/%	4.8	4.6	0.6	0.6
Apparent density/(kg·m ⁻³)	2 583	2 549	2 703	2 703
Crushing value(by mass)/%	18.6	15.8	10.4	8.1

1.2 试验过程

1.2.1 再生粗骨料预浸处理

将RCA置于容器中,倒入石灰水并稳定搅拌;浸润24 h后将骨料沥出,移至(22±2)℃、相对湿度为60%~70%的恒温恒湿箱中,确保骨料达到最佳含水率。研究表明,当RCA的含水率(质量分数,文

中涉及的取代率、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比)为60%~70%时有利于碳化反应的进行^[8]。为保证清水浸泡与石灰水浸泡后的RCA含水率一致,将对照组RCA洗涤后在清水中浸泡24 h,取出后放入相同条件的恒温恒湿箱中。

1.2.2 再生粗骨料的碳化强化

图1为碳化设备示意图。图中碳化反应釜体积为50 L,最大可承载50 kg骨料。将处理后的骨料置于反应釜内进行碳化,CO₂体积分数为99.9%、碳化压力为0.3 MPa、碳化时间24 h。碳化完成后,向骨料上喷涂1%的酚酞指示剂,看其是否变红,不变红表明已完全碳化。

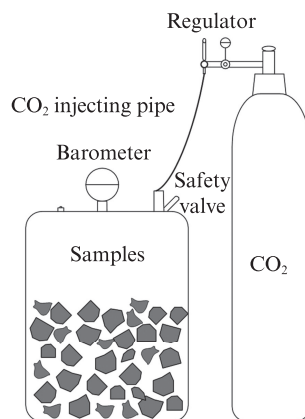


图1 碳化设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbonization equipment

1.2.3 试件设计及制备

本试验研究碳化方式及RCA取代率(0%、50%和100%)对再生混凝土性能的影响。为避免RCA较高吸水率对混凝土性能产生影响,浇注前进行预湿处理。试件制备完成后,先置于(20±1)℃养护室中,同时覆盖塑料薄膜,24 h后拆模;再将试件放入恒温水箱内继续养护。需要说明的是,进行7、28 d强度测试的试件须于试验前取出,晾至饱和面干后再进行测试。

1.3 试验方法

1.3.1 物理性能

根据GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》,分别对碳化处理前后RCA的吸水率、表观密度和压碎值进行测试。

1.3.2 微观测试

(1) 转靶X射线衍射仪(XRD) 碳化后的RCA在烘箱(65℃)中干燥24 h。先通过锤击、研磨和筛分获得粒径小于80 μm的黏附砂浆样品,再用XRD进行扫描,扫描范围为5°~70°,速率为10(°)/min。

(2)扫描电子显微镜(SEM) 对小于10 mm的骨料样品进行打磨和修整,并在65℃的烘箱中干燥至恒重,然后通过SEM观察样品的微观形貌。

1.3.3 力学性能

根据GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,采用万能压力机测试混凝土的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度。每组设置3个试件,试验值取其平均值。

2 结果与分析

2.1 碳化后再生粗骨料性能

2.1.1 物理性能

(1)碳化对RCA吸水率的影响 碳化前后RCA的吸水率如图2所示。由图2可见:与未处理的再生粗骨料(U-RCA)相比,粒径为5~10、10~20 mm直接碳化再生粗骨料(C-RCA)的吸水率分别降低14.6%和8.7%,粒径为5~10、10~20 mm预浸石灰水碳化再生粗骨料(LC-RCA)的吸水率分别降低22.9%和15.2%。由图2还可见,骨料粒径越小,其吸水率降低幅度越显著。这是因为粒径越小,砂浆含量越高,比表面积越大,可用于碳化的水泥水化产物就更多^[10],进而能够与CO₂充分接触,提高反应速率。这与Zhan等^[11]得到的结论一致。此外,研究表明,未水化水泥熟料矿物(硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S))可与CO₂发生反应,生成稳定的CaCO₃和硅胶^[12],能够有效填充再生骨料,粘结旧砂浆中的孔隙和裂缝,使骨料更加密实,从而降低吸水率。

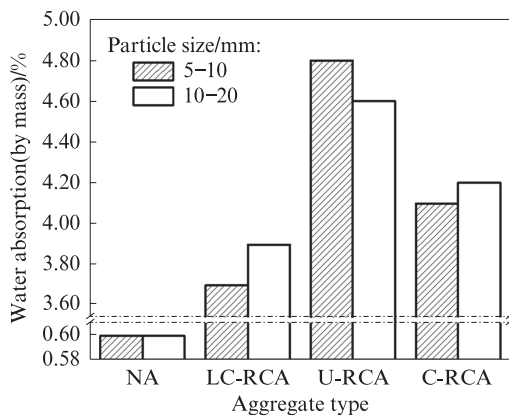


图2 碳化前后RCA的吸水率

Fig. 2 Water absorption of RCA before and after carbonation

(2)碳化对RCA压碎值的影响 碳化前后RCA的压碎值如图3所示。由图3可见:与U-RCA相比,粒径为5~10、10~20 mm的C-RCA压碎值分别降低了13.4%和10.1%,粒径为5~10、10~20 mm的

LC-RCA压碎值分别降低17.7%和15.2%;相同粒径下,LC-RCA的压碎值降低幅度更加显著。

上述数据表明,经碳化处理后RCA的压碎值明显降低,说明碳化后RCA的品质得到有效改善,这与Lu等^[10]研究结果一致。Xuan等^[7]研究表明,碳化后老砂浆的显微硬度高于碳化前。这是因为旧界面过渡区(ITZ)和RCA表面的老砂浆被碳化产物填充或附着,ITZ中较大的裂纹及疏松多孔的老砂浆碳化后变得更加密实,从而提高了RCA的微观硬度,使得压碎值降低。

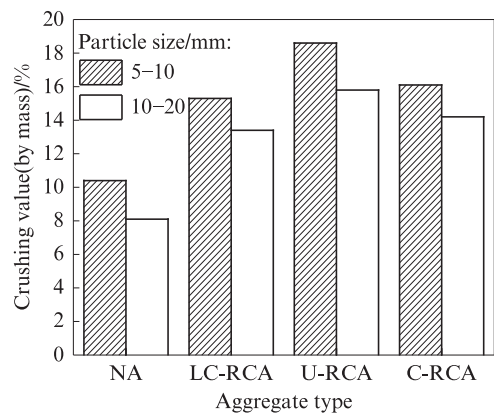


图3 碳化前后RCA的压碎值

Fig. 3 Crushing value of RCA before and after carbonation

(3)碳化对RCA表观密度的影响 碳化前后RCA的表观密度如图4所示。由图4可见:与U-RCA相比,C-RCA和LC-RCA的表观密度略有提升,粒径为5~10、10~20 mm的C-RCA表观密度分别提高2.3%和1.7%,粒径为5~10、10~20 mm的LC-RCA表观密度分别提高4.1%和3.5%。

图4数据表明,碳化后,RCA的表观密度提高幅度较小。这是由于碳化效率随着渗透深度的增加而逐渐降低。碳化反应产生的CaCO₃和硅胶等碳化产物细化了RCA的裂隙,一定程度上阻碍了水分和CO₂向骨料内部渗透^[13]。因此,骨料表层的CaCO₃含量明显增加,而内层的CaCO₃含量基本不变。

2.1.2 微观性能

(1)微观组分 图5为碳化前后RCA的微观组分变化。由图5(a)可知:碳化前RCA中确定的结晶相有典型的水泥水化产物Ca(OH)₂,但Ca(OH)₂衍射峰较低,说明用于碳化的反应物较少,这与破碎后在露天场地长时间放置有关,进一步说明了外加钙源的必要性;碳化后,当2θ为29.6°时,C-RCA和LC-RCA的CaCO₃衍射峰强度增加,其中,LC-RCA的CaCO₃衍射峰强度高于C-RCA。由图5(b)可知,LC-RCA的CaCO₃质量损失率高于C-RCA。根据式

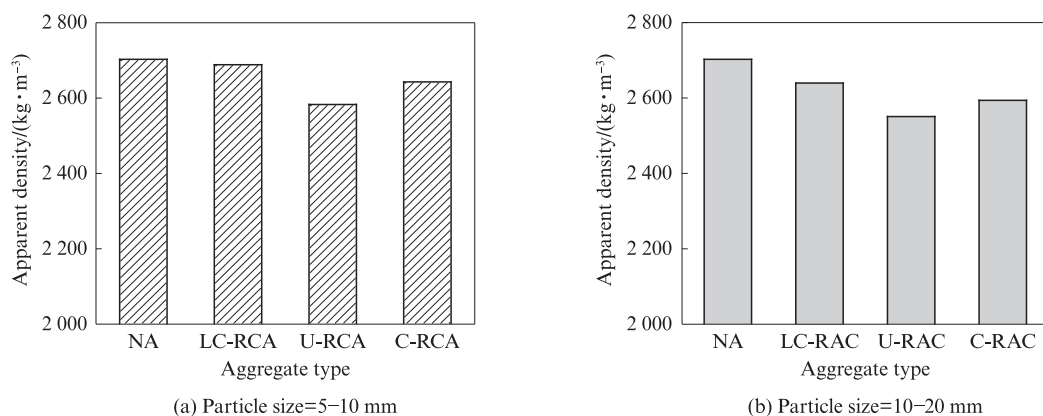


图4 碳化前后RCA的表观密度变化

Fig. 4 Apparent density of RCA before and after carbonation

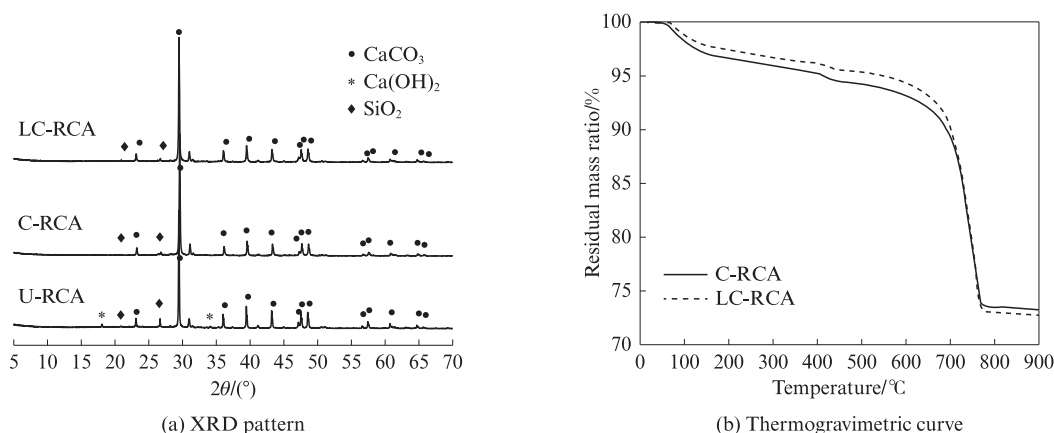


图5 碳化前后RCA的微观组分变化

Fig. 5 Change in micro-component of RCA before and after carbonation

(1)、(2)对碳化后RCA的CO₂吸收率(β)和CaCO₃质量损失率(m_{CaCO_3})进行定量分析,结果如表2所示.由表2可知,LC-RCA的 β 和 m_{CaCO_3} 均高于C-RCA,与XRD结果一致.这说明预浸石灰水碳化能够提高RCA的碳化程度,碳化生成物相互堆嵌至骨料的微裂纹和孔隙中,从而使RCA更加密实.

$$\beta = \frac{w_{550} - w_{800}}{w_{150} - (w_{550} - w_{800})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_{150} 、 w_{550} 和 w_{800} 分别为样品在150、550、800℃时的质量分数.

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{w(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)} M(\text{CaCO}_3) \quad (2)$$

式中: $w(\text{CO}_2)$ 为样品在500~800℃下的脱碳质量分数; $M(\text{CO}_2)$ 和 $M(\text{CaCO}_3)$ 分别为CO₂和CaCO₃的相对分子质量.

(2) 微观形貌 碳化前后RCA与所粘结砂浆间ITZ及水化产物的微观形貌如图6所示.由图6可见:U-RCA的裂纹较为疏松(图6(a)),这是由于在破碎过程中对骨料进行多次锤击,在骨料内部产生损伤

表2 碳化后RCA的CO₂吸收率和CaCO₃质量损失率
Table 2 CO₂ absorption rate and CaCO₃ mass loss rate of RCA after carbonation

Type of RCA	$\beta/\%$	$m_{\text{CaCO}_3}/\%$
C-RCA	26.37	47.10
LC-RCA	28.96	50.75

并不断累积,导致骨料劣化;C-RCA的裂纹宽度明显变窄,并有相当一部分CaCO₃附着并填充在缝隙内(图6(b)),起到了微集料填充作用;LC-RCA与旧砂浆粘结得更加紧密(图6(c)),说明碳化增强了骨料与老砂浆间的黏结强度,提高了结构的致密性;RCA的ITZ中典型水化产物包括片状的Ca(OH)₂(CH)和针棒状的钙矾石(Aft)(图6(d)),这些水化产物是导致再生骨料品质较差及结构疏松的主要原因;C-RCA的ITZ中可观察到立方体形状的CaCO₃产物(图6(e)),这些紧密堆积的CaCO₃是碳化后骨料显微硬度提高和微观结构致密的主要原因.

2.2 力学性能

2.2.1 立方体抗压强度

再生混凝土立方体抗压强度随RCA取代率、

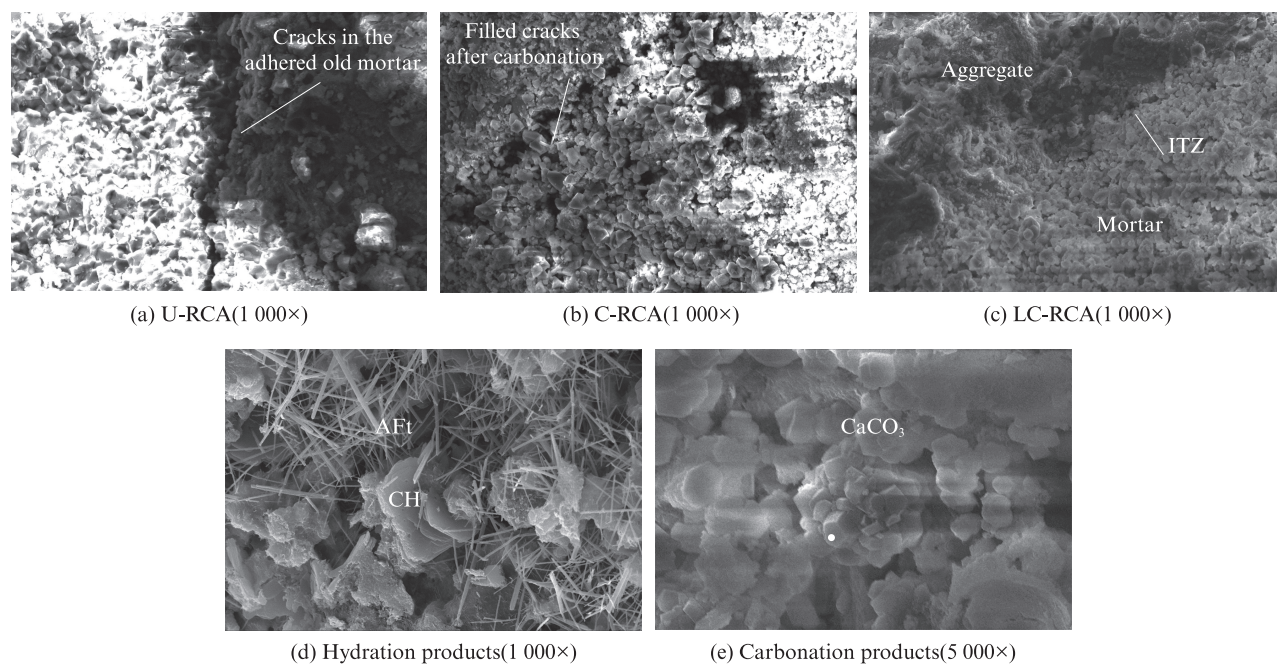


图 6 碳化前后 RCA 与所黏结砂浆 ITZ 及水化产物的微观形貌

Fig. 6 Change of ITZ and hydration products of RCA before and after carbonation

碳化处理方式和养护龄期的变化如图 7 所示. 由图 7 可知: (1) 随着 RCA 取代率的增加, 试件立方体抗压强度呈下降趋势. 这是 RCA 孔隙率较高, 旧砂浆疏松多孔, 骨料与旧砂浆间的 ITZ 黏结强度较弱所致. (2) RCA 经碳化处理后, 试件的立方体抗压强度显著提高, 且预浸石灰水后再碳化的效果更好, 与掺未碳化再生粗骨料的再生混凝土 (U-RAC) 相比, 养护龄期为 7 d 时, 直接碳化再生混凝土 (C-RAC) 的抗压强度提高 18.1%~23.1%, 预浸石灰水碳化再生混

凝土 (LC-RAC) 的抗压强度又比 C-RAC 提高 3.9%~4.7%; 与 U-RAC 相比, 养护龄期为 28 d 时, C-RAC 的抗压强度提高 15.2%~18.9%, LC-RAC 的抗压强度又比 C-RAC 提高 7.2%~7.6%. 由上述数据可知, 养护龄期为 28 d 时, 碳化处理后再生混凝土的抗压强度提升幅度低于 7 d. 这是因为碳化后 RCA 的吸水率和孔隙率降低, 制备混凝土时骨料吸收的水分较少, 内养护作用较弱, 导致水泥基质后期的水化作用减缓, 混凝土后期强度提升幅度降低^[14].

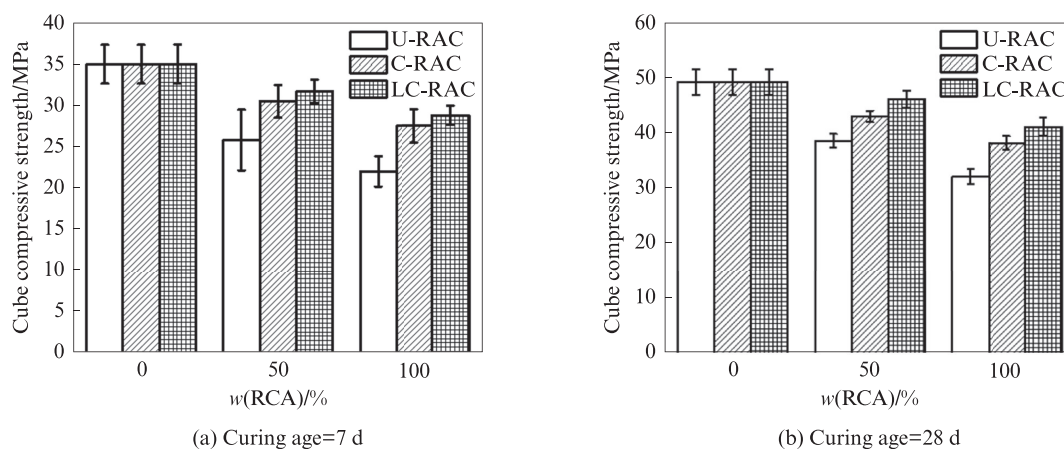


图 7 再生混凝土立方体抗压强度随 RCA 取代率、碳化处理方式和养护龄期的变化

Fig. 7 Change of cube compressive strength of recycled concrete with RAC substitution rate, carbonation treatment method and curing age

2.2.2 劈裂抗拉强度

再生混凝土劈裂抗拉强度随 RCA 取代率、碳化

处理方式和养护龄期的变化如图 8 所示. 由图 8 可知, 随着 RCA 取代率的增加, 混凝土的劈裂抗拉强度

逐渐降低.与普通混凝土相比,7 d时 U-RAC 下降 19.8%~32.5%, C-RAC 下降 13.8%~25.4%, LC-RAC 下降 7.1%~19.1%; 28 d 时 U-RAC 下降 21.5%~34.6%, C-RAC 下降 12.6%~22.3%, LC-RAC 下降 6.3%~16.4%, 说明碳化后试件劈裂

抗拉强度得到有效改善.这是因为混凝土的劈裂抗拉强度主要与其基质间的黏结作用有关^[15], 碳化反应生成的硅胶和 CaCO_3 附着并填充在 RCA 中, 改善了其品质, 增强了黏结砂浆的强度, 提高了基质间的黏结作用.

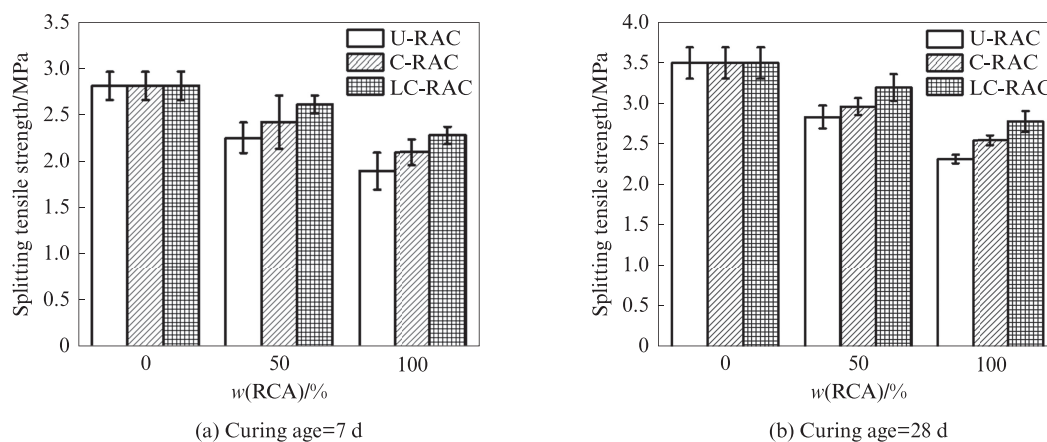


图8 再生混凝土劈裂抗拉强度随RAC取代率、碳化处理方式和养护龄期的变化

Fig. 8 Change of splitting tensile strength of recycled concrete with RCA substitution rate, carbonation treatment method and curing age

2.2.3 抗折强度

再生混凝土抗折强度随 RCA 取代率、碳化处理方式和养护龄期的变化如图 9 所示. 由图 9 可知: 随着 RCA 取代率的增加, 试件的抗折强度呈下降趋势. 这是因为 RCA 的压碎值较大, 内部的裂纹及孔隙较多, 表面附着的旧砂浆较松散, 造成再生混凝土中新旧水泥浆体间的黏结较差, 受到外部荷载时, 易发生折断; 碳化处理后, 与 U-RAC 相比, 7、28 d 时 C-RAC 的抗折强度分别提高 10.6%~

12.6% 和 9.1%~10.7%, LC-RAC 的抗折强度分别提高 15.3%~20.9% 和 13.6%~17.2%. 上述数据表明, 经碳化处理后的 RCA 能够有效提升 RAC 的抗折强度, 且预浸石灰水再碳化的改善效果更加显著. 此外, 试件的抗折强度提升幅度随着 RCA 取代率的增大而增大, 这是由于 RCA 取代率越高, RCA 吸收周围新拌基质间的水分就越多, 降低了 RAC 的有效水灰比, 增强了水泥间的黏结强度, 形成更加密实的混凝土结构.

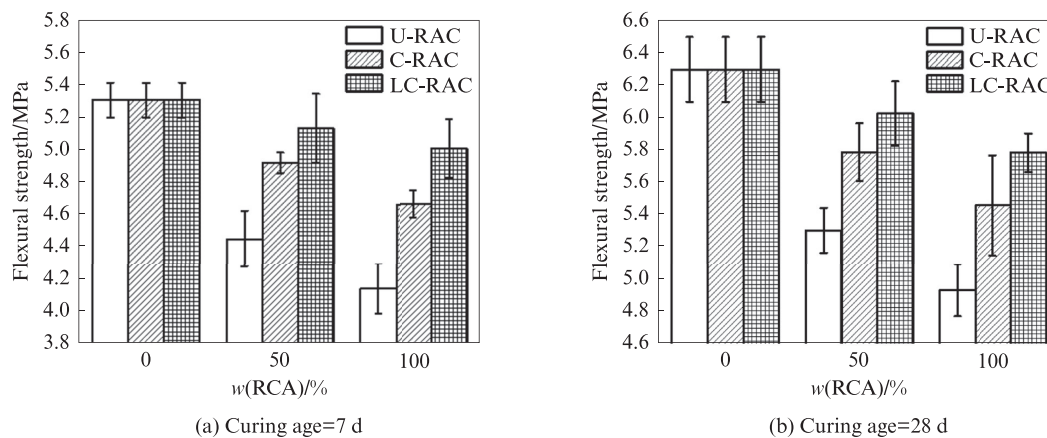


图9 再生混凝土抗折强度随RAC取代率、碳化处理方式和养护龄期的变化

Fig. 9 Change of flexural strength of recycled concrete with RCA substitution rate, carbonation treatment method and curing age

2.3 碳化增强机理

与 NA 相比, RCA 具有较高的吸水率和压碎值,

主要原因是 RCA 在破碎过程中产生大量的微裂纹; 且 RCA 表面附着的旧砂浆疏松多孔, 导致骨料的品

质较差^[16].研究发现,RCA中伴有CH晶体的沉淀和积累^[17],CH含量及孔隙率的增加也会降低骨料结构的密实性.碳化反应后, CO_2 与水泥的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化硅酸钙(C-S-H)发生反应^[2](反应式见式(3)、(4)),生成 CaCO_3 和硅胶,反应后固相体积分别增加11.8%和23.0%^[18-19].由于反应产物具有较好的稳定性和填充效应,提高了骨料的密实性和强度^[20],使得碳化处理后的RCA物理性能得到提升.此外,由于本试验采用的是加压碳化装置,加压碳化后形成的碳化产物是分层分布的^[21], CaCO_3 聚集在一起并填充于孔隙中,形成更加致密的微观结构.



由此可见,碳化能够有效提升RAC的力学性能.RAC的CH层间联结较弱是发生受力破坏的主要根源,经碳化反应后,CH转化为热稳定性较好的无机碳酸盐,起到了良好的填充效应,有效提升了RAC的强度.研究发现, C_2S 和 C_3S 是硅酸盐水泥中的主要矿物组分,但 C_3S 具有较高的水化活性,其早期与 CO_2 反应

生成C-S-H和 CaCO_3 ;随着反应的进行,C-S-H与 CO_2 发生脱钙反应,生成无定型硅胶填充在孔隙中,从而提高了混凝土早期力学强度^[22].由上文结果可知,LC-RAC的力学性能提升效果更为明显,其增强机理如图10所示.由图10可见:(1)U-RCA中存在大量的水化产物CH和AFt,且在前期破碎过程中产生了大量的微裂纹和孔隙(图10(a));经过石灰水预浸泡后,为骨料提供了大量外加钙源,这些 Ca^{2+} 游离在骨料表面和内部,从而提高了后续碳化反应程度(图10(b));碳化处理后,所生成的大量方解石和硅胶被填充于骨料的孔隙、微裂纹和ITZ中(图10(c)).(2)RAC制备完成后,方解石与新拌基质中的水泥接触,缓慢溶解,释放出 CO_3^{2-} ,同时水泥基质中的铝酸盐离子迁移至方解石附近,二者发生反应生成单碳铝酸盐(Mc),为C-S-H在RCA表面的生长提供更多的成核点^[23],使骨料周围发生局部致密化,从而提高了RAC的力学性能;另外,水泥基质中含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 等能够渗透到ITZ中,通过与 CO_2 发生反应,以无机碳酸盐的形式沉积在ITZ中(图10(d)).

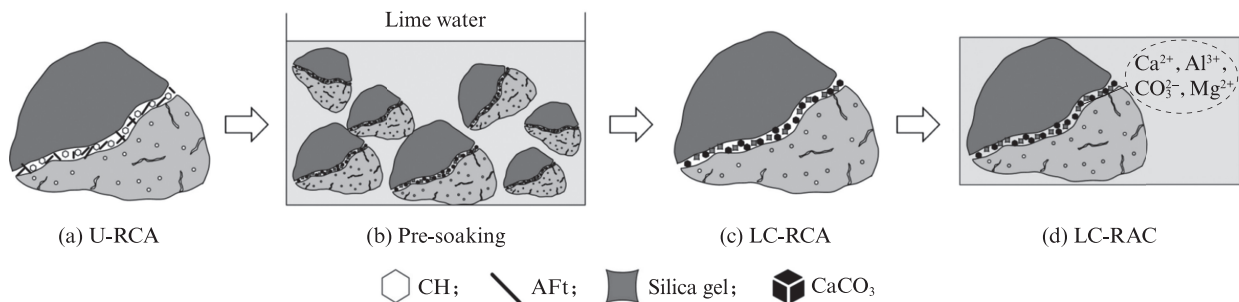


图10 预浸石灰水碳化增强机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of mechanism of pre-soaking in lime water and carbonation

3 结论

(1)碳化能够有效改善RCA的品质,且预浸石灰水碳化对RCA的物理性能提升效果更加显著.与未碳化RCA相比,LC-RCA的吸水率降低15.2%~22.9%,压碎值降低15.2%~17.7%.

(2)RCA的粒径越小、砂浆含量越高、比表面积越大,其碳化反应效率越高,碳化后骨料品质提升效果越明显.碳化处理可提高RCA的 CaCO_3 衍射峰强度,反应产物 CaCO_3 和无定型硅胶有效改善了骨料与旧砂浆间ITZ的密实性,对旧砂浆中的孔隙和微裂纹具有充填作用.

(3)预浸石灰水碳化比直接碳化对RAC抗压强度的提升幅度更大,LC-RAC的抗压强度比C-RAC提高了3.9%~7.6%.随着RCA取代率的增加,

RAC的抗压强度呈下降趋势.预浸石灰水碳化改善了较高取代率下RCA对混凝土抗压强度的不利影响.

(4)碳化有利于强化旧砂浆的强度,增强基质间的黏结作用,形成更加密实的混凝土结构.预浸石灰水碳化处理后,RAC的劈裂抗拉强度和抗折强度均有明显提升.

参考文献:

- [1] MANZI S, MAZZOTTI C, BIGNOZZI M C. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 312-318.
- [2] SHI C J, LI Y K, ZHANG J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review[J]. Journal of Cleaner

- Production, 2016, 112:466-472.
- [3] 陈春红, 刘荣桂, 朱平华, 等. 黏附砂浆含量对再生混凝土抗氯离子侵蚀性能影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1216-1223. CHEN Chunhong, LIU Ronggui, ZHU Pinghua, et al. Effect of attached mortar content on chloride ion erosion resistance of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1216-1223.(in Chinese)
- [4] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018:39-41.
- [5] ZHAN B J, XUAN D X, POON C S. Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO₂ curing coupled with limewater soaking process[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 89:230-237.
- [6] OUYANG K, SHI C J, CHU H Q, et al. An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263(1):1-17.
- [7] XUAN D X, ZHAN B J, POON C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 67-74.
- [8] 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)
- [9] WANG J G, ZHANG J X, CAO D D, et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234:117366.
- [10] 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]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 421-428.
- [11] ZHAN B J, POON C S, LIU Q, et al. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67:3-7.
- [12] JANG J G, LEE H K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 82:50-57.
- [13] 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]. Construction and Building Materials, 2020, 239:117810.
- [14] ABATE S Y, SONG K, SONG J K, et al. Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2018, 165:64-71.
- [15] MEDINA C, ZHU W Z, HOWIND T, et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical—Mechanical properties of recycled concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 216-225.
- [16] 王震, 王新杰, 朱平华, 等. 基于力学性能的吸附砂浆界限含量分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):483-491. WANG Zhen, WANG Xinjie, ZHU Pinghua, et al. Limit content analysis of adhesion mortar based on mechanical properties [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):483-491. (in Chinese)
- [17] SÁEZ DEL BOSQUE I F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 81:25-34.
- [18] FERNANDEZBERTOS M, SIMONS S, HILLS C, et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 112(3):193-205.
- [19] ZHANG J K, SHI C J, LI Y K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11):04015029.
- [20] ZHANG J K, SHI C J, LI Y K, et al. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98:1-7.
- [21] LIU S H, ZHANG H B, WANG Y L, et al. Carbon-dioxide-activated bonding material with low water demand [J]. Advances in Cement Research, 2021, 33(5):193-196.
- [22] 李林坤, 刘琦, 黄天勇, 等. 基于水泥基材料的CO₂矿化封存利用技术综述[J]. 材料导报, 2022, 36(19):1-16. LI Linkun, LIU Qi, HUANG Tianyong, et al. Review on CO₂ mineralization and utilization of cement-based materials [J]. Materials Reports, 2022, 36(19):1-16. (in Chinese)
- [23] OUYANG X W, WANG L Q, XU S D, et al. Surface characterization of carbonated recycled concrete fines and its effect on the rheology, hydration and strength development of cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103809.