

文章编号:1007-9629(2022)11-1185-06

# 碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备

冷 勇<sup>1,2</sup>, 余 睿<sup>1,\*</sup>, 范定强<sup>1,2</sup>, 张学玉<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**提出了一种再生建筑废弃物的高效利用方法,并以此制备了生态型超高性能混凝土(UHPC). 基于改进的颗粒堆积模型(MAA模型),开发了最大粒径为4.75 mm的碳化再生粗骨料(CRCA)超高性能混凝土(CRCA-UHPC),评估了CRCA对UHPC宏观性能及纳微观结构的影响.结果表明:将CRCA掺入UHPC中可以改善UHPC的力学性能和耐久性能,降低UHPC的自收缩,优化骨料与基体间的界面过渡区(ITZ).

**关键词:**再生粗骨料;超高性能混凝土;清洁建筑材料;碳化再生粗骨料

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.011

## Preparation of Environmentally Friendly UHPC Containing Carbonized Recycled Coarse Aggregate

LENG Yong<sup>1,2</sup>, YU Rui<sup>1,\*</sup>, FAN Dingqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xueyu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** An efficient utilization method of recycled construction waste, and a method for preparing ecological ultra-high performance concrete were proposed. First, based on the improved particle packing model MAA model, carbonized recycled coarse aggregate ultra-high performance concrete (CRCA-UHPC) with a maximum particle size of 4.75 mm was developed. Then, the effect of the introduction of CRCA on the macroscopic properties as well as the nano-microstructure of UHPC was evaluated. The results show that by the introduction of CRCA into UHPC, the mechanical properties and durability of UHPC are improved, the autogenous shrinkage of UHPC is reduced, and the interface transition zone (ITZ) between the aggregate and the matrix is optimized.

**Key words:** recycled coarse aggregate (RCA); ultra-high performance concrete (UHPC); clean building material; carbonized recycled coarse aggregate (CRCA)

利用建筑垃圾制备再生粗骨料(RCA),并将其应用于混凝土中,不仅是解决建筑垃圾堆积问题的重要措施之一,并且还有效解决天然骨料(NA)短缺的问题<sup>[1-4]</sup>.然而,RCA吸水率高、压碎值大、界面过渡带弱等特点限制了其在实际工程中的大规模应用<sup>[5]</sup>.

为有效解决上述问题,可采用加速碳化技术进行再生骨料的强化处理.Xuan等<sup>[6]</sup>研究表明,碳化再生粗骨料(CRCA)用于混凝土时,混凝土的力学性能和新拌性能得到改善.此外,CRCA可有效储存二氧化碳,是减少二氧化碳排放的有效途径之一.然而,与采用NA制备的混凝土相比,采用CRCA制成的

收稿日期:2022-05-15; 修订日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178249)

第一作者:冷 勇(1998—),男,江西宜春人,武汉理工大学硕士生.E-mail: 1440988702@qq.com

通讯作者:余 睿(1986—),男,湖北咸宁人,武汉理工大学研究员,博士生导师,博士.E-mail: r.yu@whut.edu.cn

再生混凝土性能不稳定,难以满足许多大型工程应用的要求.因此,需要性能优异的水泥基材料来抵御 CRCA 自身性能不稳定的风险<sup>[7]</sup>.

超高性能混凝土(UHPC)是一种新型建筑材料,由于其优异的力学性能、耐久性能<sup>[8-9]</sup>,已经被成功应用于各种重大工程领域.但 UHPC 的高胶凝材料用量、低水胶比的特点,导致其具有较高的自收缩开裂风险<sup>[10-11]</sup>.适当引入粗骨料可以增加内部约束,从而抑制 UHPC 的自收缩发展<sup>[12-13]</sup>.为此,本文采用 CRCA 来制备低收缩生态型 UHPC,研究了 CRCA 对 UHPC 宏观性能及纳微观结构的影响,以期碳化再生粗骨料超高性能混凝土(CRCA-UHPC)的制备与工程应用提供参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥(C)为华新水泥投资有限公司产 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥,表观密度为 3 144 kg/m<sup>3</sup>;硅灰(SF)由埃肯有机硅有限公司生产;石粉(LP)由新玛特粉

体化工原料有限公司生产;砂为清洗干净的普通河砂,表观密度为 2 560 kg/m<sup>3</sup>,粒径为 0~0.6 mm、0.6~1.25 mm、1.25~2.36 mm;天然骨料(NA),粒径为 2.36~4.75 mm;再生粗骨料(RCA),粒径为 2.36~4.75 mm,由废弃桥梁混凝土破碎得到;碳化再生粗骨料(CRCA),粒径为 2.36~4.75 mm,由 RCA 碳化处理得到;减水剂为江苏苏博特有限公司产高性能聚羧酸系减水剂,减水率(质量分数,文中涉及的减水率、固含量等均为质量分数)大于 30%,固含量为 20%.胶凝材料的化学组成见表 1. CRCA 处理流程图如图 1 所示.

CRCA 的碳化参数为:气压 0.3 MPa、温度 20 °C、相对湿度 50%、时间 24 h.碳化处理前后 RCA 的微观形貌及能谱分析(EDS)如图 2、3 所示.由图 2 可见:碳化前,RCA 中可观察到大量的 Ca(OH)<sub>2</sub> 晶体;碳化后,在 Ca(OH)<sub>2</sub> 晶体和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶表面发现许多方解石晶须和柱状方解石晶体.图 3 的 EDS 分析也显示碳化处理后 RCA 中的碳元素含量增加.

表 1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	IL
C	64.930	19.200	4.180	3.320	1.610	0.090	0.090	3.350	0.780	2.450
SF	0.360	94.650	0.250	0.150	0.470	0.130	0.170	0.690	0.840	2.290
LP	54.060	0.191	0.083	0.088	2.891		0.012	0.020		42.620

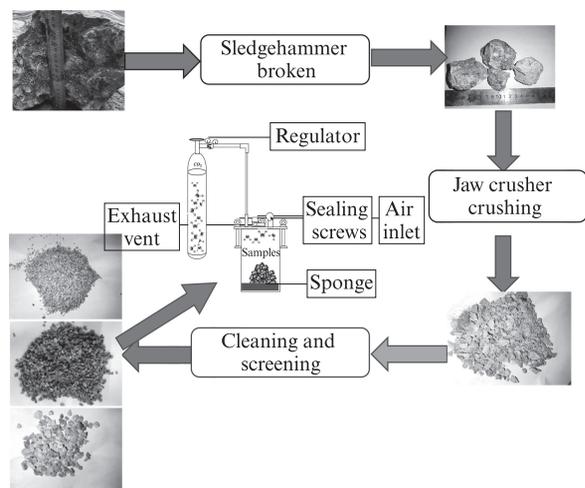


图 1 碳化再生粗骨料处理流程图

Fig. 1 Processing flow chart of CRCA

### 1.2 配合比

通过改进的颗粒堆积模型(MAA 模型)设计 UHPC 的配合比,见表 2.

### 1.3 制备过程

先按照表 2 配合比称取各原材料,在行星搅拌机

中搅拌,制备得到 3 种 UHPC;再在振动台上振动 60 下后刮平,表面覆膜;接着在 20 °C 左右的条件下养护 24 h 后拆模;最后置于 (20±2) °C,相对湿度不小于 95% 的标准养护室养护至相应龄期.

### 1.4 测试项目

(1)粗骨料的表观密度和吸水率 使用排液法和茶包法分别测试 3 种粗骨料的表观密度和吸水率.

(2)UHPC 的抗压强度 将新鲜砂浆混合均匀后,倒入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的模具中,在 20 °C 的喷水养护室内养护至 3、7、28 d.抗压强度试验方法参照 BS-EN 196-1:2005《Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength》.

(3)UHPC 的自收缩 使用半径为 2.5 mm、端距为 42 mm 的波纹管进行 UHPC 的自收缩测试.测试环境温度为 (20±2) °C、相对湿度为 (60±5)%.将 UHPC 的终凝时间定义为其自收缩的起始点.

(4)UHPC 的抗氯离子渗透性能 参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验

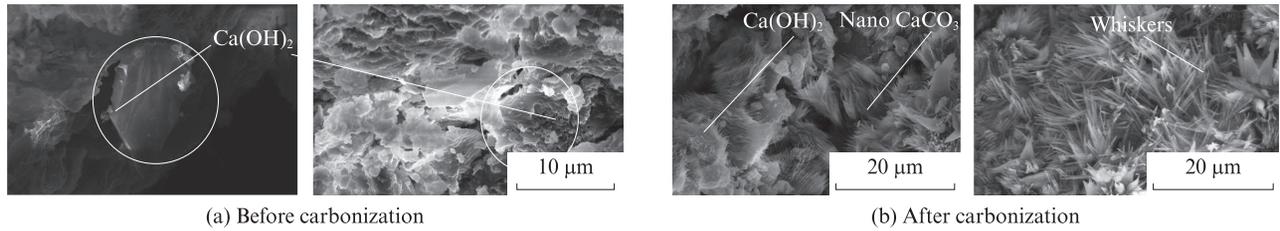


图 2 碳化前后再生粗骨料的微观形貌

Fig. 2 Microscopic morphology of RCA before and after carbonization

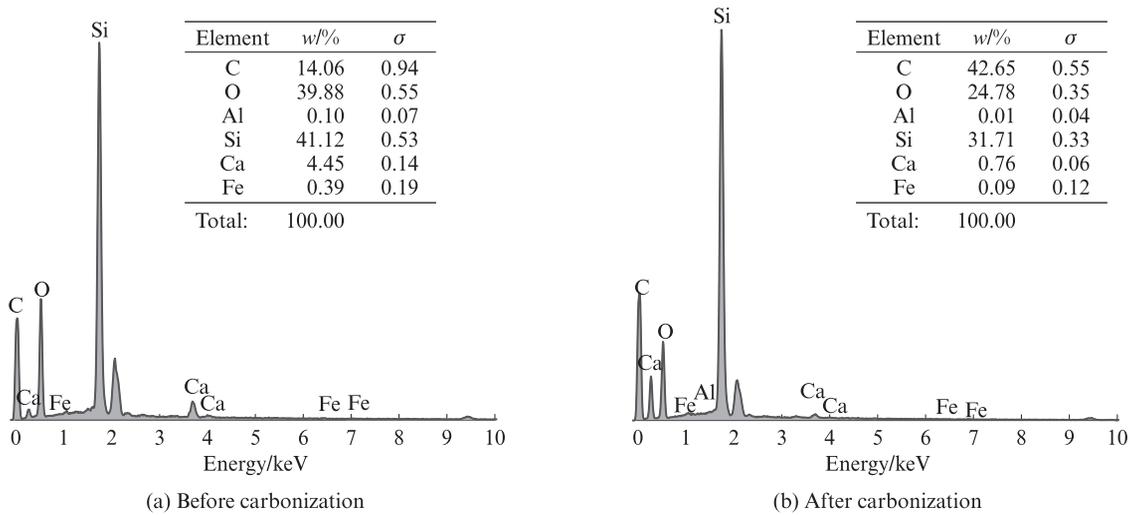


图 3 碳化前后再生骨料的 EDS 分析

Fig. 3 EDS analysis of RCA before and after carbonization

表 2 UHPC 的配合比  
Table 2 Mix proportions of UHPC

Type of UHPC	C	SF	LP	NA				RCA	CRCA	Water	SP
				0-0.60 mm	0.60-1.25 mm	1.25-2.36 mm	2.36-4.75 mm				
NA-UHPC	721	168	103	145	324	83	554	0	0	170	35
RCA-UHPC	721	168	103	145	324	83	0	554	0	170	35
CRCA-UHPC	721	168	103	145	324	83	0	0	554	170	35

方法标准》，对 UHPC 的耐久性进行评价。试样固化时间为 128 d。

(5)UHPC 的微观结构 采用 QUANTA FEG 450 分析 UHPC 的微观结构,并获得扫描电子显微镜(SEM)照片。为进一步研究 CRCA 对 UHPC 中骨料和基体间界面的影响,对试样进行纳米压痕测试。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 粗骨料的基本性能

3 种粗骨料的基本性能如表 3 所示。由表 3 可见:经碳化处理后,RCA 的吸水率由 6.95% 降至 4.05%,而表观密度由 2.54 g/cm<sup>3</sup> 增至 2.59 g/cm<sup>3</sup>,与 NA 相似。这可能归因于新生成的 CaCO<sub>3</sub> 在加压碳化过程

中沉淀在 RCA 表面的孔隙和裂缝中,优化了 RCA 表面并使其更加致密。

表 3 3 种粗骨料的基本性能

Table 3 Basic properties of three kinds of coarse aggregate

Basic property	NA	RCA	CRCA
Water absorption(by mass)/%	4.40	6.95	4.05
Apparent density/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.56	2.54	2.59

### 2.2 抗压强度

图 4 显示了不同粗骨料对 UHPC 抗压强度的影响。由图 4 可以看出,与 NA-UHPC 相比,RCA-UHPC 和 CRCA-UHPC 的 3 d 抗压强度分别提高了 2.7% 和 5.0%,7 d 抗压强度分别提高了 3.3% 和 6.5%,28 d 抗压强度分别提高了 3.8% 和 9.1%。此外,图 4 中的误差棒显示,RCA-UHPC 的抗压强度值波动比

CRCA-UHPC更大,这说明与未碳化的RCA相比,CRCA不仅可以降低抗压强度值的不稳定性,还可以进一步提高UHPC的抗压强度.其原因为:碳化后,CRCA孔隙率降低,使得其吸水率有所下降,改善了RCA与新砂浆的过渡区,且旧砂浆与CRCA之间的过渡区得到加强,从而提高了RCA的整体力学性能<sup>[5]</sup>.

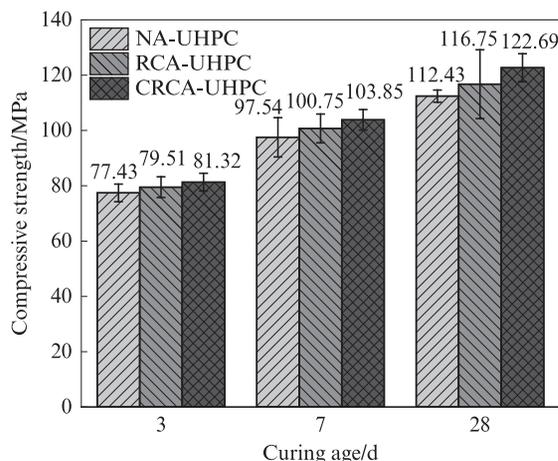


图4 不同粗骨料对UHPC抗压强度的影响  
Fig. 4 Effect of different coarse aggregates on compressive strength of UHPC

### 2.3 体积稳定性

图5为CRCA和RCA对UHPC自收缩的影响.由图5可见:CRCA-UHPC自收缩值最低( $621 \mu\text{m}/\text{m}$ ),而RCA-UHPC的自收缩值最大(约 $790 \mu\text{m}/\text{m}$ );当使用RCA替代NA时,UHPC早期自收缩提高13%,主要原因是本研究中使用的RCA的高吸水率使得相对水胶比降低,最终导致UHPC自收缩率增加;与未碳化RCA相比,掺入CRCA时,UHPC早期自收缩减少了21%,这是因为碳化处理优化了RCA的孔隙率,从而降低了吸水率并最终增加了相对水胶比;与NA相比,掺入CRCA时,UHPC的早期自收缩减少近11%,这可能是CRCA颗粒的互锁效应降低了早期自收缩所致.

### 2.4 抗氯离子渗透性能

图6为不同粗骨料对UHPC抗氯离子渗透性能的影响.图中以快速氯离子迁移系数(DRCM)来表征UHPC的抗氯离子渗透性能.由图6可见:NA-UHPC、RCA-UHPC和CRCA-UHPC的DRCM分别为 $0.56 \times 10^{-13}$ 、 $1.01 \times 10^{-13}$ 、 $0.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ;与NA相比,掺入RCA可使UHPC的DRCM增加80%,而掺入CRCA后,UHPC的DRCM仅增加9%.上述现象表明,RCA的高孔隙率导致UHPC的氯离子渗透性增大<sup>[17]</sup>,而RCA进行碳化处理后孔隙率降低,从而使得UHPC的氯离子渗透性降低.

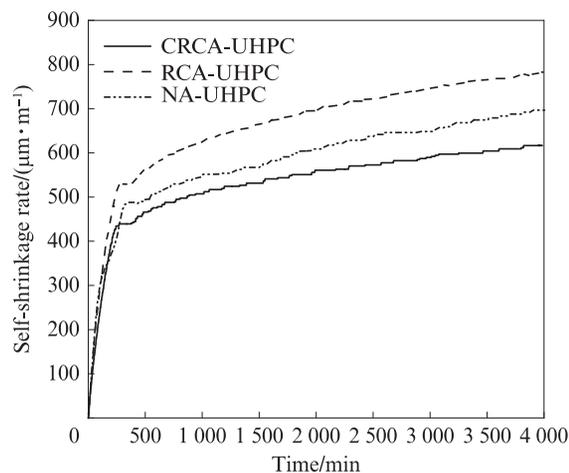


图5 CRCA和RCA对UHPC自收缩的影响  
Fig. 5 Effect of CRCA and RCA on autogenous shrinkage of UHPC

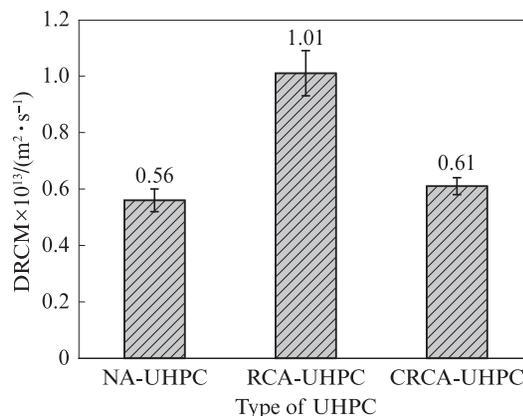


图6 不同粗骨料对UHPC抗氯离子渗透性能的影响  
Fig. 6 Effect of different coarse aggregates on durability of UHPC

### 2.5 微观结构

图7为3种UHPC的扫描电镜-背散射电子成像(SEM-BSE)照片.由图7可见:CRCA与UHPC基体结合非常紧密,CRCA-UHPC试样中没有明显的界面过渡区(ITZ);NA-UHPC和RCA-UHPC的界面过渡区(ITZ)则更为明显,且其中的孔隙率更大.因此,进一步说明碳化处理可以优化RCA表面并减少其对UHPC微观结构和力学性能的负面影响.

图8为CRCA和RCA对UHPC界面过渡区(ITZ)硬度的影响.由图8可见:NA的硬度为5.5~10.0 GPa,与RCA和CRCA相比,NA与UHPC基体之间的ITZ平均硬度显著降低,这与BSE的结果相吻合;CRCA与UHPC基体间ITZ的平均硬度比RCA与UHPC基体间ITZ的平均硬度高46%,明显消除了旧砂浆造成的界面缺陷.这是因为旧砂浆表面的碳化可以产生纳米碳酸钙,该活性物质可以促

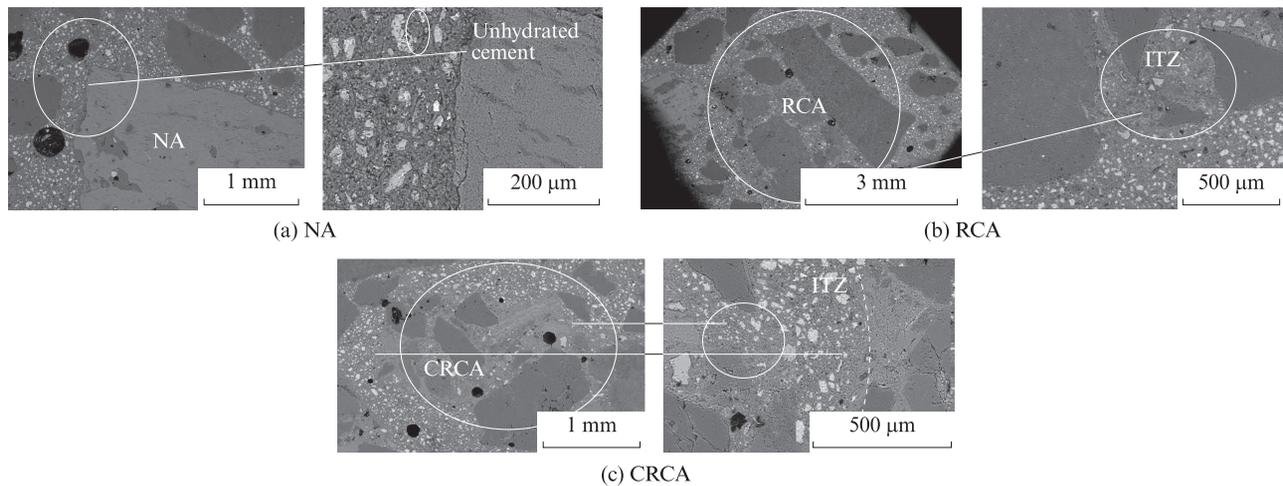


图7 3种UHPC的SEM-BSE照片  
Fig. 7 SEM-BSE images of three kinds of UHPC

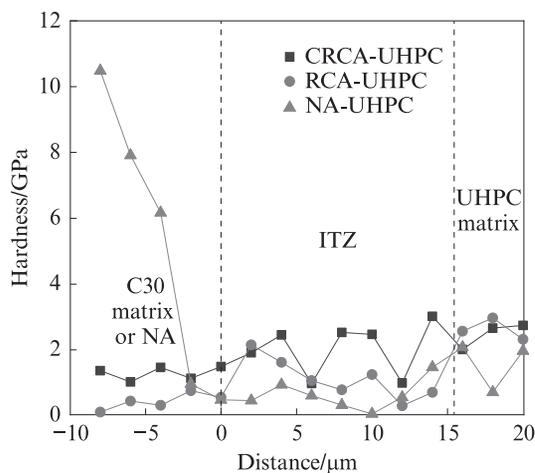


图8 CRCA和RCA对UHPC界面过渡区(ITZ)硬度的影响  
Fig. 8 Effect of CRCA and RCA on hardness of interface transition zone(ITZ) of UHPC

进旧砂浆表面水泥的水化,增加旧砂浆与新砂浆间ITZ的平均硬度<sup>[14]</sup>,CRCA的平均硬度提高了近29%,大大缩小了旧砂浆与UHPC基体的硬度差距,增加了它们的相容性.

### 3 结论

(1)采用粒径为2.36~4.75 mm的CRCA替代NA制备了UHPC.通过使用MAA模型,可保证CRCA-UHPC致密的堆积结构.

(2)相较于对照组,CRCA-UHPC的抗压强度提高9.1%,达到122.66 MPa;CRCA-UHPC的抗氯离子迁移能力提高65%.

(3)RCA经碳化处理后,改善了附着在RCA上的砂浆力学性能,提高了CRCA与基体间ITZ的平均硬度,减少了CRCA对UHPC微观结构产生的明显负面影响.

### 参考文献:

- [ 1 ] 张家广,陈景琦,孟庆玲,等. 混菌矿化增强再生混凝土粗骨料物理力学性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(10):1027-1033. ZHANG Jiaguang, CHEN Jingqi, MENG Qingling, et al. Mixed bacteria mineralization to enhance physical and mechanical properties of recycled concrete coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1027-1033. (in Chinese)
- [ 2 ] WANG X, YU R, SHUI Z, et al. Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete[J]. Journal of Cleaner Production. 2019;221:805-16.
- [ 3 ] 陈守开,刘洋,赵云鹏,等. 废玻璃颗粒对再生骨料透水混凝土的改性作用[J/OL]. 建筑材料学报[2022-05-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20220117.1101.008.html. CHEN Shoukai, LIU Yang, ZHAO Yunpeng, et al. Modification effect of waste glass particles on recycled aggregate pervious concrete[J]. Journal of Building Materials[2022-05-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20220117.1101.008.html. (in Chinese)
- [ 4 ] COELHO A, BRITO J D. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal-part I: Location, materials, technology and economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2013,39(5):338-52..
- [ 5 ] BEHERA M, BHATTACHARYYA S K, MINOCHA A K, et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete-A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68(15):501-516.
- [ 6 ] XUAN D, ZHAN B, POON C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 67-74.
- [ 7 ] FAN D, YU R, FU S, et al. Precise design and characteristics prediction of ultra-high performance concrete (UHPC) based on