

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.012

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:魏康,李犇,孙娇.替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理研究[J].西安理工大学学报,2023,39(1):110-117.

WEI Kang, LI Ben, SUN Qiao. Study of the micro mechanism for the influence of substitution rate on the compressive strength of recycled concrete[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1): 110-117.

# 替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理研究

魏康<sup>1</sup>, 李犇<sup>2</sup>, 孙娇<sup>1</sup>

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 为研究替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理, 本文对 6 种不同替代率的再生混凝土进行抗压试验、骨料分布试验, 探究了其抗压强度随替代率变化的基本规律, 同时利用 Fourier 变换红外光谱(FTIR)、电镜(SEM)和压汞法(MIP)分析该变化规律的微观机理。结果表明, 随着替代率的增加, 再生混凝土抗压强度呈现逐渐下降的规律。再生混凝土水化产物 C-S-H 凝胶和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  逐渐减少, 阻碍了其水化发展。再生混凝土内部孔洞数量及有害孔累计孔体积百分比增大, 且孔隙率升高, 进而导致其抗压强度降低。基于试验结果建立了适用此类再生混凝土在不同替代率下抗压强度的计算公式。

**关键词:** 再生混凝土; 抗压强度; 微观机理; 孔结构; 水化产物

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)01-0110-08

## Study of the micro mechanism for the influence of substitution rate on the compressive strength of recycled concrete

WEI Kang<sup>1</sup>, LI Ben<sup>2</sup>, SUN Qiao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. School of Transportation and Civil Architecture, Foshan University, Foshan 528000, China)

**Abstract:** In order to study the microcosmic mechanism for the influence of substitution rate on the compressive strength of recycled concrete, this paper carries out compressive tests and aggregate distribution tests on six recycled concrete at different substitution rates, and explores the basic law of the change of its compressive strength at the substitution rate. At the same time, the microcosmic mechanism for the change law is analyzed by the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), the electron microscopy (SEM) and the mercury intrusion method (MIP). The results show that the compressive strength of recycled concrete decreases gradually with the increase of replacement rate. The hydration products of recycled concrete, C-S-H gel and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , decreased gradually, hindering its hydration development. The number of holes in recycled concrete and the cumulative percentage of harmful holes increase, and the porosity increases, leading to the decrease of its compressive strength. Based on the test results, a formula for calculating the compressive strength of this kind of recycled concrete at different replacement rates is established.

**Key words:** recycled concrete; compressive strength; microscopic mechanism; pore structure; hydration products

收稿日期: 2022-02-28; 网络首发日期: 2022-09-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220913.1329.002.html>

基金项目: 广东省教育厅高校科研资助项目(2021KQNCX083); 广东省科技研发专项资助项目(GDKTP2020032800); 大连大学大学生创新创业训练计划资助项目(202111258422)

第一作者: 魏康, 男, 硕士生, 研究方向为再生混凝土力学。E-mail: 1565584243@qq.com

通信作者: 孙娇, 女, 博士, 副教授, 研究方向为混凝土力学。E-mail: 81593946@qq.com

李犇, 男, 博士, 特聘教授, 研究方向为水泥基材料纳米改性及多尺度力学。E-mail: liben89@fosu.edu.cn

随着我国城市化进程迅速发展,城市旧建筑的不断拆除产生了大量建筑垃圾<sup>[1]</sup>。而目前我国建筑垃圾利用率低,只有少部分建筑垃圾资源化利用在路基和非承重结构,而大部分是以在郊区堆放或填埋的传统方式进行处理,这对环境造成了极大的污染<sup>[2]</sup>。再生混凝土<sup>[3]</sup>是将普通混凝土进行破碎筛分的工艺处理后制成再生粗骨料来替换天然粗骨料,不仅可以解决建筑垃圾的堆放和利用问题,同时也符合国家倡导的绿色可持续发展,具有重大的经济及社会意义。

研究再生混凝土的抗压强度是其能被广泛应用的关键环节和决定要素。文献[4-7]通过研究得出再生混凝土抗压强度随替代率的增加而呈现逐渐降低的规律,但并未进一步对再生混凝土抗压强度逐渐降低的微观机理进行研究。另一方面,文献[8-10]利用电镜(SEM)分析了再生混凝土强度变化的微观机理,并得出界面过渡区是影响其强度因素之一。岳公冰<sup>[11]</sup>利用显微硬度计、SEM等测试技术,研究了再生粗骨料强度对再生混凝土多重界面结构特征、显微结构及性能的影响规律。文献[12-13]利用SEM和对复杂环境下替代率对再生混凝土的耐久性的影响规律进行了研究。白雷雷<sup>[14]</sup>利用SEM对骨料强化对再生混凝土抗压强度影响的机理进行了分析。Wang等<sup>[15]</sup>则利用Fourier变换红外光谱(FTIR)从混凝土水化产物的角度对再生混凝土抗冻性能的微观机理进行了研究。文献[16-18]是通过压汞法(MIP)从孔结构的角度研究高温对混凝土孔隙改变的影响及混凝土抗冻性能的微观机理。

而目前通过FTIR和MIP研究替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理的试验较少,因此,为了更进一步揭示其变化规律的微观机理,本文针对6种不同替代率(0%、20%、40%、60%、80%、100%)的再生混凝土展开了抗压强度试验及对其进行骨料分布观测,探究替代率对再生混凝土抗压强度的影响规律,同时利用FTIR、SEM和MIP进一步研究替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理,并建立其抗压强度的计算公式。期望研究成果可以进一步推广再生混凝土的应用。

## 1 试验概括

### 1.1 原材料

试验所用水泥为广州石井牌P.O 42.5 R级水泥,水是工业蒸馏水,外加剂选用聚羧酸高效减水剂,减水剂为淡黄色液体,减水率为30%。再生粗骨料来自佛山市某建筑材料有限公司,其中包括建

筑碎石、少量红砖与瓷砖碎块。天然粗骨料采用连续级配的天然碎石。天然粗骨料与再生粗骨料见图1,天然粗骨料与再生粗骨料的级配组成见表1,级配曲线见图2。天然砂、天然粗骨料和再生粗骨料的基本物理性能见表2。

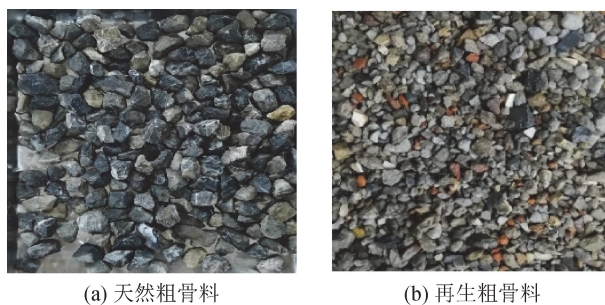


图1 天然粗骨料和再生粗骨料图片

Fig. 1 Pictures of natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate

表1 天然粗骨料和再生粗骨料的级配组成  
Tab. 1 Grading composition of natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate

粒径范围/mm	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25
天然粗骨料/%	2	17	50	16	15
再生粗骨料/%	3	22	37.8	27.4	9.8

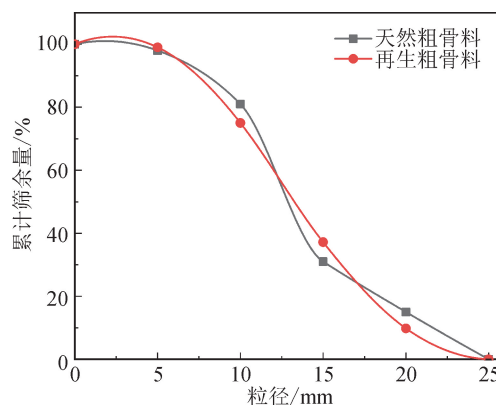


图2 天然粗骨料和再生粗骨料的级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate

表2 天然砂、天然粗骨料和再生粗骨料的基本物理性能  
Tab. 2 Basic physical properties of natural sand, natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate

物理性能	天然砂	天然粗骨料	再生粗骨料
粒径范围/mm	—	5~25	5~25
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.46	2.55	2.36
堆积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.05	1.65	1.45
吸水率/%	0.87	1.21	12
压碎指标/%	—	14	20
细度模数/%	2.3	—	—

## 1.2 配合比设计

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)配制 C30 再生混凝土,不同替代率的再生混凝土水灰比均为 0.59,砂均为  $712.3 \text{ kg/m}^3$ ,水均为  $222 \text{ kg/m}^3$ ,减水剂均为  $1.9 \text{ kg/m}^3$ ,水泥均为  $376.5 \text{ kg/m}^3$ ,配合比见表 3。替代率分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100%,试件编号分别为  $\text{RAC}_0$ 、 $\text{RAC}_{20}$ 、 $\text{RAC}_{40}$ 、 $\text{RAC}_{60}$ 、 $\text{RAC}_{80}$ 、 $\text{RAC}_{100}$ 。

表 3 再生混凝土试验配合比  
Tab. 3 Experimental mix proportion of recycled concrete 单位:  $\text{kg/m}^3$

编号	替代率/%	天然粗骨料	再生粗骨料
$\text{RAC}_0$	0	1 162.2	0
$\text{RAC}_{20}$	20	929.8	232.4
$\text{RAC}_{40}$	40	697.3	464.9
$\text{RAC}_{60}$	60	464.9	697.3
$\text{RAC}_{80}$	80	232.4	929.8
$\text{RAC}_{100}$	100	0	1 162.2

## 1.3 试件制作及养护

按照标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)制作了 6 组试件尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的标准立方体试块 54 个,每组包含 6 个再生混凝土试件进行抗压强度、微观分析试验和 3 个再生混凝土试块进行骨料分布观测。室内自然养护 1 d 后拆模,在标准养护箱(温度为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $\geq 95\%$ )中养护 28 d。

## 1.4 试验方法

抗压强度试验按照国家规范《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)进行,利用电液式压力试验机进行抗压试验。

骨料分布观测是利用切割机从浇筑面中间部位进行切割,观察切割面的骨料分布情况。

FTIR 试验是首先将抗压试验压碎后的水泥石样品放在  $50^\circ\text{C}$  真空干燥箱中干燥 48 h,同时将溴化钾放于  $120^\circ\text{C}$  真空干燥箱中进行干燥。选取 1 mg 干燥后的再生混凝土样品与干燥后的 100 mg 溴化钾置于玛瑙研钵中进行研磨 5 min。然后将研磨后的混合物放入压片模具,将模具放入压力机中压片,压力选用 15 MPa,时间为 1.5 min。最后将压出的透明锭片放入 Fourier 变换红外光谱仪中进行测试<sup>[19]</sup>。

SEM 试验是将水泥石样品进行喷金干燥处理后,利用电镜对样品进行观测。

MIP 试验是首先将水泥石样品收集在试管中并立即用无水乙醇浸泡 24 h 以停止水化,然后将再生混凝土样品放到  $60^\circ\text{C}$  真空干燥箱中干燥 48 h,干

燥结束后利用压汞孔径分析仪中进行测试。

本文采用了 DYE-3000 型电液式压力试验机,真空干燥箱型号为 DZF-6050AB,型号为天光 FT-IR-960 的 Fourier 变换红外光谱仪,电镜型号为 SU-8020/X-MAX80,型号为安东帕 PoreMaster 60 的压汞孔径分析仪,试验设备见图 3。



图 3 试验设备

Fig. 3 Test equipment

## 2 结果与讨论

### 2.1 破坏形态

试件受压初期,不同替代率的再生混凝土的破坏形态相似。随着加载力值逐步增加,再生混凝土试件的内部应力不断增加,试件外表面逐渐出现了竖向微小裂缝,随后竖向微小裂缝迅速向上和下两侧延伸,相邻的微小裂缝开始汇集并合成连续裂缝且呈现逐渐变宽的态势。随着加载力值的持续增加,裂缝开始迅速由外表面向内部扩展,竖向裂缝逐步变多、变宽,试件表面出现外鼓、并开始剥落。最后加载力值达到最大值并稳定,加载结束,试件完全破坏,最终破坏形态为四角锥形。替代率为 0%、60% 和 100% 的再生混凝土抗压强度试验后破坏形态照片见图 4。

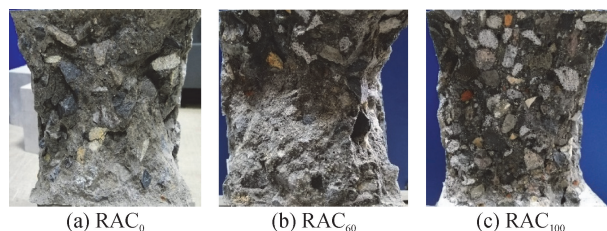


图 4 不同替代率的再生混凝土破坏形态

Fig. 4 Failure morphology of recycled concrete at different replacement ratios

当替代率为 0% 时,混凝土的断裂面在天然粗骨料和新砂浆粘结界面出现,天然粗骨料并没有破坏。替代率为 60% 时,再生混凝土的断裂面开始在新旧砂浆与天然粗骨料以及再生粗骨料的粘结面出

现,砂浆与粗骨料形成的界面过渡区成为此时抗压强度的薄弱区域。替代率为 100% 时,再生粗骨料自身开始发生贯穿性断裂,再生混凝土的断裂面不仅在新旧砂浆和再生粗骨料粘结面出现,而且出现在再生粗骨料之中,此时再生粗骨料的骨架强度成为抗压强度的薄弱区域。

## 2.2 抗压强度分析

不同替代率再生混凝土抗压强度见图 5,图 5 中抗压强度为 6 个试件的平均值。从图 5 中可以看出,随着替代率增加,再生混凝土抗压强度整体呈现逐渐降低的态势,且当替代率从 0% 增加到 60% 时,为抗压强度下降缓慢阶段,而当替代率大于 60% 时,为抗压强度下降快速阶段。这是由于再生粗骨料的孔隙率大,强度低等自身缺陷会降低再生混凝土的强度。当少量的再生粗骨料加入时,对再生混凝土强度的负面影响相对较小,所以当替代率从 0% 增加到 60% 时,再生混凝土抗压强度随着替代率的增加呈现缓慢下降的趋势。而当替代率从 60% 增加到 100% 时,再生粗骨料的加入对再生混凝土强度的负面影响较大,使得其抗压强度随替代率的增加而快速降低。

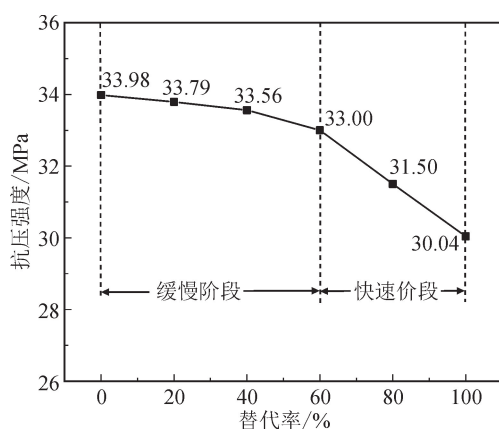
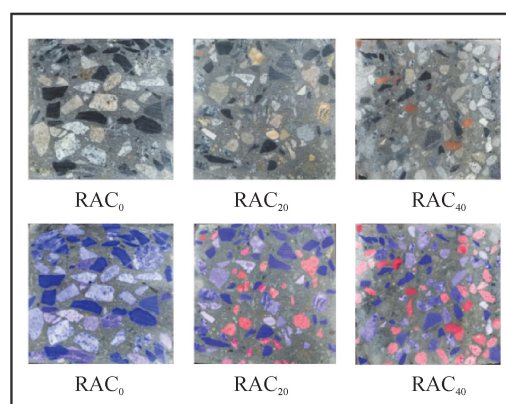


图 5 不同替代率再生混凝土抗压强度  
Fig. 5 Compressive strength of recycled concrete at different replacement ratios

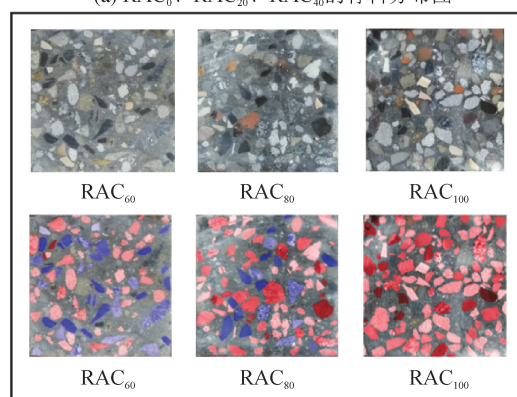
## 2.3 骨料分布分析

再生混凝土骨料分布见图 6,其中图 6(a)为 RAC<sub>0</sub>、RAC<sub>20</sub>、RAC<sub>40</sub> 的骨料分布图,图 6(b)为 RAC<sub>60</sub>、RAC<sub>80</sub>、RAC<sub>100</sub> 的骨料分布图。由于再生粗骨料特征较为明显:周围包裹着旧砂浆的碎石、红砖与瓷砖碎块。所以图 6 是先将再生粗骨料用红色进行标记,再将余下的天然粗骨料用蓝色标记而成。由图 6(a)可知,随着替代率从 0% 增加到 40% 时,再生混凝土试件骨料分布逐渐不均匀,图中出现的空白砂浆区域有所增加。在对试件进行抗压强度试验时,砂浆相较于粗骨料属于强度较弱材料,所以空

白砂浆区域是混凝土的强度薄弱面积<sup>[20]</sup>。所以当替代率逐步增加到 40% 时,其强度薄弱面积有所增加,对其抗压强度产生不利影响。由图 6(b)可知,随着替代率继续增加到 60%、80%、及 100% 时,再生混凝土的强度薄弱面积因骨料分布均匀反而有所减少。然而,此时粗骨料的骨架强度已经成为影响再生混凝土抗压强度的主要因素,由于再生粗骨料本身缺陷的原因,造成其骨架强度低于天然粗骨料的骨架强度。所以当替代率大于 60% 时,再生混凝土的抗压强度也逐渐降低。



(a) RAC<sub>0</sub>、RAC<sub>20</sub>、RAC<sub>40</sub> 的骨料分布图



(b) RAC<sub>60</sub>、RAC<sub>80</sub>、RAC<sub>100</sub> 的骨料分布图

图 6 不同替代率的再生混凝土骨料分布  
Fig. 6 Aggregate distribution of recycled concrete at different replacement ratios

## 2.4 微观机理分析

为进一步探究替代率对再生混凝土抗压强度的影响规律,本文选取了 0%、60% 和 100% 三种替代率,利用 Fourier 变换红外光谱(FTIR)对再生混凝土的水化产物进行分析,同时利用电镜(SEM)对其微观全貌进行分析,并通过压汞法(MIP)对再生混凝土的孔结构进行分析以揭示替代率对其抗压强度影响的微观机理。

### 2.4.1 Fourier 变换红外光谱(FTIR)分析

不同替代率的再生混凝土红外光谱图如图 7 所

示,其中图 7(a)为  $455\text{ cm}^{-1}$  波数的 Si-O 平面内弯曲振动吸收峰红外光谱图。图 7(b)为  $3\ 643\text{ cm}^{-1}$  波数的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中 O-H 振动吸收峰红外光谱图。由图 7(a)可以看出,在 3 种不同替代率下的再生混凝土均发生了 Si-O 平面内弯曲振动,且随着替代率从 0% 增加到 100%, Si-O 平面内弯曲振动吸收峰的强度逐渐减弱,这表明随着替代率的增加,再生混凝土内部水化产物 C-S-H 凝胶的生成量逐渐减少。

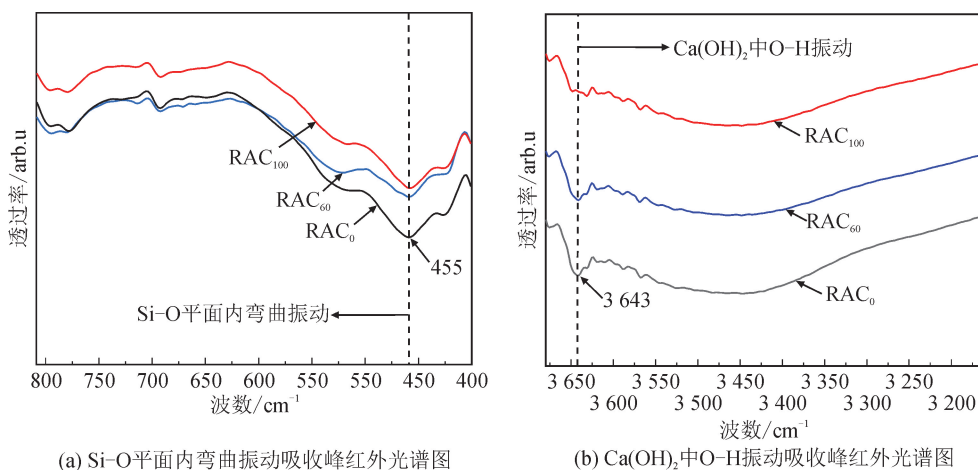


图 7 不同替代率的再生混凝土红外光谱图  
Fig. 7 Infrared spectra of recycled concrete at different replacement ratios

#### 2.4.2 电镜(SEM)分析

不同替代率下再生混凝土在  $1\ \mu\text{m}$  尺寸下的 SEM 电镜图见图 8。从图 8 中可以看出,在替代率为 0% 时,再生混凝土内部孔洞较少,结构较为密实。而当替代率增加到 60% 时,可以看到孔洞数量有所增加。当替代率达到 100% 时,从图 8 中可

由图 7(b)中可以发现,当替代率由 0% 增加到 100% 时,再生混凝土的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中 O-H 振动吸收峰的强度逐渐减弱,这意味着水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的生成量逐渐减少。而水化产物 C-S-H 凝胶和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的减少会阻碍再生混凝土的水化发展,降低其水化程度和微结构的致密程度,从而降低强度。所以,随着替代率的增加,再生混凝土的抗压强度呈现了逐渐降低的规律。

观察到内部孔洞数量大幅度增加,其内部密实度显著降低。究其原因可能是随着替代率的增加,再生混凝土内部水化程度逐渐降低,水化产物减少,对其内部孔隙的填充效果逐渐降低,因而使其内部孔洞逐渐增多,密实度下降,所以会导致再生混凝土的抗压强度逐渐降低。

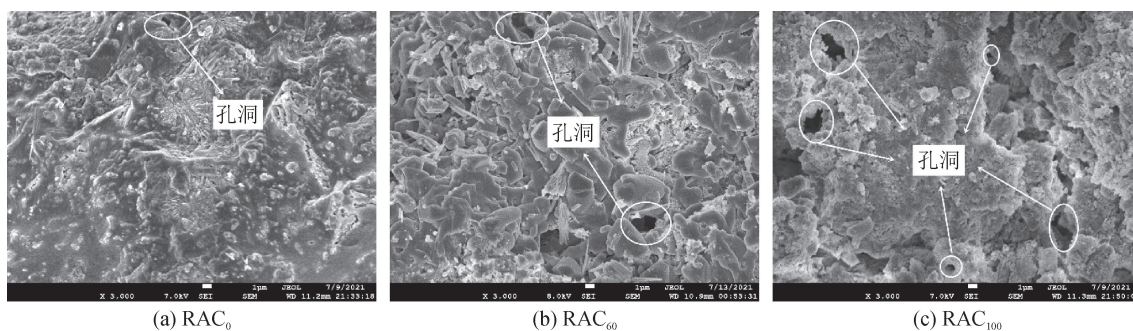


图 8 不同替代率的再生混凝土 SEM 电镜图  
Fig. 8 SEM of recycled concrete at different replacement ratios

#### 2.4.3 压汞法(MIP)分析

不同替代率下再生混凝土的孔径分布见图 9。由图 9 可知,随着替代率从 0% 增加到 60%, 孔径在  $100\sim 1\ 000\text{ nm}$  的孔径分布曲线向上偏移,这意味着在  $100\sim 1\ 000\text{ nm}$  范围内的孔径分布逐渐增多。当替代率从 60% 增加到 100% 时,孔径在  $100\sim 1\ 000\text{ nm}$  的孔径分布曲线再次向上偏移,表明此范

围内孔径分布明显再次增多。由于此范围内的孔结构对混凝土强度有害,所以替代率的增加对其抗压强度产生不利影响。由图 9 中累计孔体积分布图可以发现,随着替代率的增加,再生混凝土内部的累计孔体积也在增加,按照累计孔体积从高到低排序为  $\text{RAC}_{100} > \text{RAC}_{60} > \text{RAC}_0$ 。综合分析可发现,随着替代率的增加,再生混凝土内部  $100\sim 1\ 000\text{ nm}$  的有

害孔结构数量逐渐增加,其内部累计孔体积逐渐增多,密实度逐渐降低,造成其抗压强度逐渐下降。

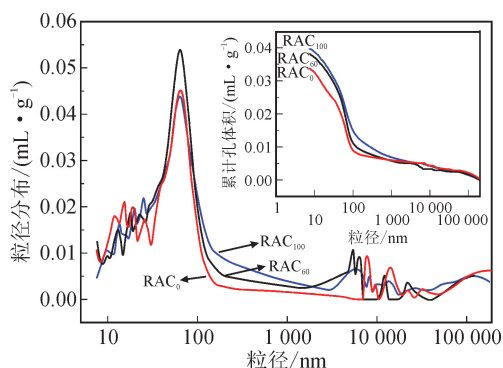


图9 不同替代率的再生混凝土孔径分布图  
Fig.9 Pore size distribution of recycled concrete at different replacement ratios

再生混凝土孔隙率、总孔体积和总孔面积见表4。由表4可知当替代率从0%增加到60%时,孔隙率从12.80%上升到13.02%,升高了0.22个百分点。当替代率从60%增加到100%时,孔隙率从13.02%上升到14.53%,升高了1.51个百分点。这是由于再生粗骨料附着砂浆的孔隙较大,随着替代率的增加,再生混凝土中的附着砂浆也随之增多,从而导致其孔隙率逐渐升高。另外,随着替代率增加,再生混凝土的水化过程中的水化产物C-S-H和Ca(OH)<sub>2</sub>逐渐减少,再生混凝土的水化程度降低,最终造成再生混凝土

的孔隙率逐渐升高,使其抗压强度逐渐降低。

表4 再生混凝土的孔隙率、总孔体积、总孔面积  
Tab.4 Porosity, total pore volume and total pore area of recycled concrete

编号	孔隙率/%	总孔体积/(mL·g <sup>-1</sup> )	总孔面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
RAC <sub>0</sub>	12.80	0.100	6.450
RAC <sub>60</sub>	13.02	0.108	8.33
RAC <sub>100</sub>	14.53	0.110	9.58

不同替代率再生混凝土孔体积分布见表5。由表5可知,随着替代率从0%增加到60%,再生混凝土无害孔的累计孔体积百分比从21.04%下降到14.62%,下降了6.42个百分点,其有害孔的累计孔体积百分比从78.96%升高到85.38%。而当替代率从60%增加到100%时,再生混凝土无害孔的累计孔体积百分比从14.62%下降到14.13%,下降了0.49个百分点,其有害孔的累计孔体积百分比从85.38%上升到85.87%。这是因为水化产物C-S-H中的凝胶孔对再生混凝土抗压强度无害,当C-S-H填补了再生混凝土有害的孔隙时,可以增加无害孔的累计孔体积百分比,减少有害孔的累计孔体积百分比,优化其孔结构。所以随替代率从0%增加到100%时,再生混凝土的有害孔累计孔体积百分比逐渐增多,其抗压强度逐渐降低。

表5 再生混凝土的孔体积分布  
Tab.5 Pore volume distribution of recycled concrete

编号	无害孔		有害孔		
	< 20 nm	> 20 nm	20~100 nm	100~1 000 nm	> 1 000 nm
RAC <sub>0</sub>	21.04%	78.96%	54.52%	9.06%	15.38%
RAC <sub>60</sub>	14.62%	85.38%	60.43%	10.86%	14.09%
RAC <sub>100</sub>	14.13%	85.87%	50.06%	21.95%	13.86%

### 2.5 不同替代率下再生混凝土抗压强度计算公式

依据本试验所得出不同替代率下再生混凝土的抗压强度对其进行多项式拟合,拟合曲线见图10,图10中曲线y为本研究的拟合曲线,曲线y'为文献<sup>[7]</sup>中的数据拟合曲线。根据拟合曲线y,可以提出不同替代率下再生混凝土抗压强度的计算公式为:

$$f_u = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

式中: $x$ 为再生粗骨料替代率,%; $f_u$ 为再生混凝土抗压强度的计算值,MPa; $A = -5.10268E-4$ , $B = 0.01227$ , $C = 33.9025$ 。拟合曲线的相关系数为0.99313。

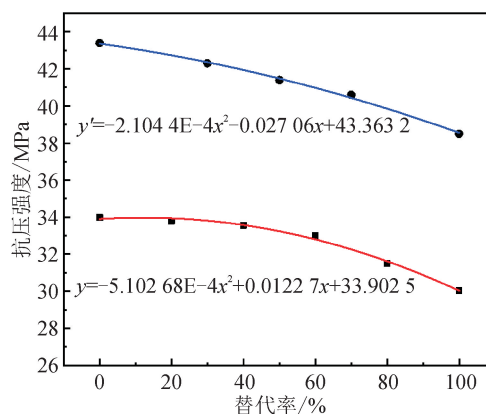


图10 不同替代率再生混凝土抗压强度多项式拟合曲线  
Fig.10 Polynomial fitting curve of compressive strength of recycled concrete at different replacement ratios

将利用计算公式得到的再生混凝土抗压强度计算值  $f_u$  与试验值  $f_{cu}$  进行对比,对比结果见表 6。由表 6 可知再生混凝土抗压强度的计算值与试验值比值的平均值为 1.000 1,利用计算公式得出的再生混凝土抗压强度计算值与试验值吻合较好。

表 6 再生混凝土抗压强度的计算值与试验值对比  
Tab. 6 Comparison of calculated and experimental values of compressive strength of recycled concrete

编号	$f_u/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_u/f_{cu}$
RAC <sub>0</sub>	33.98	33.90	1.002 4
RAC <sub>20</sub>	33.79	33.94	0.995 6
RAC <sub>40</sub>	33.56	33.58	0.999 4
RAC <sub>60</sub>	33.00	32.80	1.006 1
RAC <sub>80</sub>	31.50	31.62	0.996 2
RAC <sub>100</sub>	30.04	30.02	1.000 7

从图 10 中可知,当替代率为 0%时,曲线  $y$  的截距值 33.902 5 MPa,曲线  $y'$  的截距值为 43.363 2 MPa,导致两条拟合曲线截距值相差较大的原因可能是再生粗骨料的来源不同。曲线  $y$  与曲线  $y'$  都表现出随着替代率的增加,再生混凝土的抗压强度逐渐下降的趋势,并且在替代率大于 40%时,下降规律相似。

### 3 结 论

1) 当替代率从 0%增加到 100%时,再生混凝土的抗压强度呈现出逐渐降低的规律。

2) 基于微观分析得出,随着替代率的增加,再生混凝土的水化产物 C-S-H 凝胶和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的生成减少,阻碍了其水化发展,增加了内部的孔洞数量,提高了其孔隙率,孔结构逐渐劣化,进而造成其抗压强度逐渐降低。

3) 提出了适用此类再生粗骨料的替代率对再生混凝土抗压强度影响的计算公式,通过计算公式得到再生混凝土抗压强度的计算值与试验值吻合较好。

#### 参考文献:

[1] 侯莉娜,何梦迪,黄炜,等. 纤维增强再生混凝土力学性能研究现状及展望[J]. 西安理工大学学报,2021,37(3):403-413.  
HOU Lina, HE Mengdi, HUANG Wei, et al. Research status and prospect of mechanical properties of fiber reinforced recycled concrete[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021,37(3):403-413.

[2] 周静海,吴迪,赵庭钰,等. 废弃纤维再生混凝土受压徐变及预测模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):143-151.  
ZHOU Jinghai, WU Di, ZHAO Tingyu, et al. Pressure and creep and characteristics of waste fiber recycled concrete and estimation model[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019,41(6):143-151.

[3] 孟二从,余亚琳,袁军,等. 温度对全再生混凝土三轴受压性能及破坏准则影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(6):1370-1380.  
MENG Ercong, YU Yalin, YUAN Jun, et al. Influence of temperature on the triaxial compressive behavior and failure criterion of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019,27(6):1370-1380.

[4] 赵志青,余振鹏,孙雪,等. 不同取代率再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土,2019(3):86-89, 93.  
ZHAO Zhiqing, YU Zhenpeng, SUN Xue, et al. Experimental study on basic mechanical properties of recycled aggregate concrete with different substitution rate [J]. Concrete, 2019(3):86-89, 93.

[5] 刘婷,刘京红,张仕桦,等. 粉煤灰掺量和再生骨料替代率对再生混凝土强度影响研究[J]. 河北农业大学学报,2020,43(1):148-152.  
LIU Ting, LIU Jinghong, ZHANG Shihua, et al. Study on the effect of fly ash content and recycled aggregate substitution rate on the strength of recycled concrete[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020,43(1):148-152.

[6] 张健,张述雄,杜鹏,等. 建筑垃圾对混凝土强度的影响试验研究 [J]. 硅酸盐通报,2019,38(9):3004-3009, 3014.  
ZHANG Jian, ZHANG Shuxiong, DU Peng, et al. Influence of construction waste on concrete strength[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019,38(9):3004-3009, 3014.

[7] 王绎景,李珠,秦渊,等. 再生骨料替代率对混凝土抗压强度影响的研究[J]. 混凝土,2018(12):27-30, 33.  
WANG Yijing, LI Zhu, QIN Yuan, et al. Effect of replacement rate of recycled coarse aggregate on compressive strength of concrete[J]. Concrete, 2018(12):27-30, 33.

[8] 乔宏霞,彭宽,陈克凡,等. 陶瓷再生混凝土力学性能及微观结构分析[J]. 兰州理工大学学报,2020,46(3):122-126.  
QIAO Hongxia, PENG Kuan, CHEN Kefan, et al. Analysis of mechanical properties and microstructure of recycled ceramic concrete[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020,46(3):122-126.

- [9] 刘超,余伟航,刘化威,等.再生砖骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J].材料导报,2021,35(13):13025-13031.  
LIU Chao, YU Weihang, LIU Huawei, et al. Study on mechanical properties and failure mechanism of recycled brick aggregate concrete[J]. Materials Review, 2021, 35(13):13025-13031.
- [10] 仝宵,王社良.铁尾矿砂再生骨料混凝土力学性能及微观结构分析[J].混凝土,2021(1):91-93, 97.  
TONG Xiao, WANG Sheliang. Mechanical properties and microstructure analysis of recycled aggregate concrete with iron tailings[J]. Concrete, 2021(1):91-93, 97.
- [11] 岳公冰.再生混凝土多重界面结构与性能损伤机理研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.  
YUE Gongbing. Study on multi interface structure and performance damage mechanism of recycled concrete [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [12] 王建刚.复杂环境条件下再生混凝土耐久性衰变规律及改善机理[D].北京:北京工业大学,2020.  
WANG Jiangan. Durability decay law and improvement mechanism of recycled concrete under complex environmental conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [13] 王建.再生粗骨料混凝土抗氯盐-冻融性能研究[D].银川:宁夏大学,2021.  
WANG Jian. Study on chloride salt freeze-thaw resistance of recycled coarse aggregate concrete[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [14] 白雷雷.粗骨料强化的再生混凝土抗压强度及微观性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.  
BAI Leilei. Experimental study on compressive strength and micro properties of recycled concrete strengthened with coarse aggregate[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [15] WANG Zhongrui, LI Ben, LIU Hongbo, et al. Degradation characteristics of graphite tailings cement mortar subjected to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020,234: 117422.
- [16] 申嘉荣,徐千军.高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究[J].材料导报,2020,34(2):46-51.  
SHEN Jiarong, XU Qianjun. Characteristics of pore structure change and compressive strength reduction of concrete under elevated temperatures [J]. Materials Review, 2020,34(2):46-51.
- [17] 赵世颖,李滢,康晓明,等.再生微粉混凝土抗冻性能试验研究[J].工业建筑,2020,50(11):112-118, 96.  
ZHAO Shiyong, LI Ying, KANG Xiaoming, et al. Experimental study on frost resistance of recycled fine powder concrete[J]. Industrial Construction, 2020,50(11):112-118, 96.
- [18] 彭勇军.再生混凝土性能影响因素分析及耐久性研究[J].建筑结构,2021,51(9):74-78, 62.  
PENG Yongjun. Analysis of influencing factors on performance of recycled concrete and research on its durability[J]. Building Structure, 2021, 51(9): 74-78, 62.
- [19] 史才军,元强.水泥基材料测试分析方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [20] 周静海,郭易奇,王晓天,等.骨料分布对再生混凝土抗压强度的影响[J].混凝土,2017(4):25-28.  
ZHOU Jinghai, GUO Yiqi, WANG Xiaotian, et al. Aggregate distribution effect on the compressive strength of recycled concrete[J]. Concrete, 2017(4): 25-28.

(责任编辑 王绪迪)