

# 碳化作用对再生混凝土界面显微结构的影响

李秋义,李倩倩,岳公冰,郭远新

(青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033)

**摘要** 目的 研究碳化作用对再生混凝土界面过渡区显微硬度及宽度的影响,从微观层面揭示碳化反应对再生混凝土的作用机理. 方法 通过显微硬度仪来测量碳化前后再生混凝土多重界面的显微硬度. 结果 强度等级相同的再生混凝土,经28 d 碳化后,老骨料-新浆体界面处显微硬度值增大,界面过渡区宽度不同程度减小;老浆体-新浆体界面的显微硬度有所增大,过渡区宽度略有减小;老骨料-老浆体界面显微硬度的影响规律与老骨料-新浆体界面显微硬度的影响规律基本一致. 结论 碳化反应能够提高再生混凝土中水泥浆体和界面过渡区的密实程度和显微硬度;强度等级相同的再生混凝土,界面孔隙率的大小以及碳化作用对老骨料-新浆体界面的影响最大,其次是老骨料-老浆体界面,对老浆体-新浆体界面的影响最小.

**关键词** 再生混凝土;界面过渡区;显微硬度;碳化作用

中图分类号 TU528.01

文献标志码 A

## Effect of Carbonation on the Interfacial Microstructure of Recycled Concrete

LI Qiuyi, LI Qianqian, YUE Gongbing, GUO Yuanxin

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033)

**Abstract:** The effect of carbonation on the micro-hardness and width of interface transition zone of recycled concrete was studied, and the mechanism of carbonation reaction on recycled concrete was revealed from the micro level. The micro-hardness of recycled concrete was measured before and after carbonization by means of micro-hardness tester. The results show that the hardness of the recycled concrete with the same strength grade is increased and the width of the interface transition zone decreases in different degree at the old aggregate-new slurry interface after 28d carbonization; The micro-hardness of the old paste-new slurry interface increases, and the width of the transition zone decreases slightly; The influence of old aggregate-old paste interface micro-hardness is similar to that of old aggregate-new slurry interface. Carbonation can improve the compactness of the cement paste and the micro-hardness of the interface transition zone; In the recycled concrete

收稿日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51378270, 51578297)

作者简介:李秋义(1964—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事固体废弃物资源化利用、高性能混凝土与耐久性研究.

with same strength grade, the effect of the interface porosity and carbonation on the interface of the old aggregate-new slurry were the highest, followed by the interface of the old aggregate-old slurry interface and the old paste-new slurry interface minimal.

**Key words:** recycled concrete; interfacial transition zone; micro-hardness; carbonation environment

混凝土是一种多相、多界面且不均一的复杂碱性材料,其内部存在的碱性孔溶液保护了钢筋表面的钝化膜且使钢筋不易产生锈蚀。而碳化反应能够破坏钝化膜导致混凝土结构中的钢筋发生锈蚀<sup>[1]</sup>,其机理是从空气扩散到混凝土内部孔隙中的CO<sub>2</sub>,与胶凝材料水化生成的Ca(OH)<sub>2</sub>和C-S-H凝胶反应,形成晶体粒子更小的CaCO<sub>3</sub>,导致混凝土内部孔隙溶液的pH值降低,钢筋表面钝化膜被破坏,使得钢筋发生锈蚀<sup>[2]</sup>。

Lyubimove 最先对混凝土界面进行了微观层面的研究,最早提出了关于界面过渡区的概念<sup>[3]</sup>。同样,再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)中也存在界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)。与普通混凝土相比,再生混凝土中界面数量更多,其抗碳化性能的演变规律也变得更加复杂,所以对再生混凝土抗碳化性能微观机理的研究显得尤为重要<sup>[4-6]</sup>。笔者通过显微硬度分析法研究了碳化反应如何影响再生混凝土界面过渡区的显微硬度值以及界面过渡区的宽度,从微观角度揭示碳化反应对再生混凝土的作用机理。

大多数参考文献中对再生混凝土界面结构的研究,基本上是将再生骨料分散于水泥浆体中来直接制备再生混凝土<sup>[7-8]</sup>。这种人为指定再生混凝土界面来进行相关研究的方法存在较大的不确定性,因此需要颠覆以前

不严谨的研究方法,重新建立更加科学的再生混凝土界面的研究方法。基于以上因素,笔者通过建立再生混凝土多重界面重构模型来解决老骨料-老浆体(LG-LJ)、老浆体-新浆体(LJ-XJ)和老骨料-新浆体(LG-XJ)界面的准确定位问题;利用显微硬度仪(型号:HX-1000T,厂商:上海蔡康光学仪器有限公司)(见图1)测量碳化前后再生混凝土多重界面的显微硬度,从而得到碳化作用对再生混凝土界面显微硬度及过渡区宽度的影响规律。



图1 显微硬度仪

Fig. 1 Micro vickers hardness tester

1 试验设计方案

1.1 试验的原材料

采用山水水泥厂的P·O 42.5水泥,性能指标见表1。

表1 水泥的各项基本性能指标

Table 1 Cement of the basic performance indicators

水泥类型	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		安定性(煮沸法)
	3 d	28 d	3 d	28 d	
P·O 42.5	17.80	47.30	4.82	7.34	合格

采用连续级配为5~20 mm的石灰岩碎石粗骨料,技术指标见表2。

表2 粗骨料的各项技术指标

Table 2 Coarse aggregate of the technical indicators

吸水率/%	含水率/%	针片状质量分数/%	压碎指标/%	堆积密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	表观密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1.63	0.44	3.82	12.30	1449	2589

采用细度模数为 2.5 的中粗天然河砂作为细骨料,砂率的大小为 40%. 采用外加剂减水率为 30% 的聚羧酸高性能减水剂,掺量为 1.2%. 采用饮用自来水作为拌和水.

1.2 试验设计的配合比

试验设计的原混凝土(芯样)配合比及抗压强度如表 3 所示.

表3 原混凝土(芯样)配合比及抗压强度

Table 3 Original ratio of concrete(core sample) with compressive strength

强度等级	水泥体积质量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	细骨料体积质量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	粗骨料体积质量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	水胶比
C30	310	770	1160	0.38
C40	435	714	1076	0.32
C50	540	663	1006	0.30

将原混凝土配合比去除粗骨料后,灰水比减少 0.02 配制得到外裹砂浆.

1.3 试验设计方案

具体的试验方案在王忠星的《硫酸盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响》中已提出,将长宽高为 515 mm × 100 mm × 100 mm 的原混凝土标准养护 18 个月,取芯得到圆柱体芯样. 浇筑不同等强度等级的水泥砂浆(见图 2),试件成型后 24 h 拆模,在标准养护室中继续养护. 依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),试件标准养护达到相应龄期后取出并切片,切片尺寸为 100 mm × 100 mm × 20 mm(见图 3),然后将切片放到烘箱中,在 60 ℃ 下烘 48 h. 将切片四周的表面用石蜡密封放入混凝土碳化试验箱中,碳化 28 d 后取出. 经过打磨、抛光等一系列工序后的切片满足显微硬度打点的要求后,分别对再生混凝土切片中 LJ - XJ 界面、LG - XJ 界面和 LG - LJ 界面进行显微硬度打点测试.

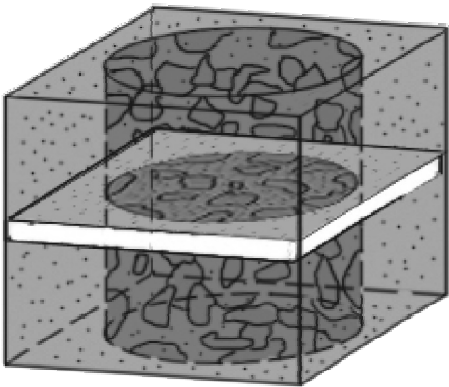


图2 芯样混凝土试件

Fig. 2 Sample of core concrete

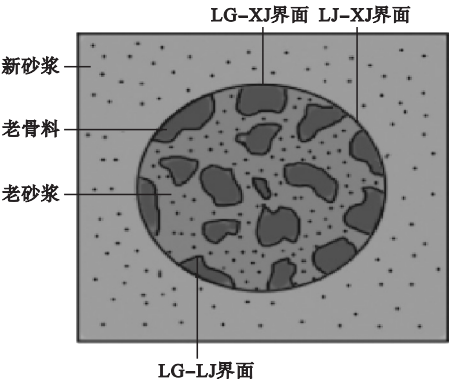


图3 芯样混凝土切片

Fig. 3 Section of core concrete

2 试验结果与分析

碳化反应不仅会引起再生混凝土 pH 值的下降,而且还会改变水泥浆体自身以及 LG-XJ 界面、LJ-XJ 界面、LG-LJ 界面的微观结构.利用显微硬度仪测量再生混凝土三种界面过渡区的显微硬度值,以此来表征再生混凝土不同界面过渡区的性能特征.

2.1 碳化作用对再生混凝土 LG-XJ 界面显微硬度的影响

强度等级相同的再生混凝土,经 28 d 碳化后,LG-XJ 界面处硬度值增大,界面过渡区宽度不同程度减小.以 C40 的 LG-XJ 界面为例,碳化作用对再生混凝土 LG-XJ 界面显微硬度的影响如图 4 所示.由图可知,碳化前,过渡区显微硬度为 125.5 ~ 171.5 MPa,过渡区宽度为 70 ~ 80  $\mu\text{m}$ ;碳

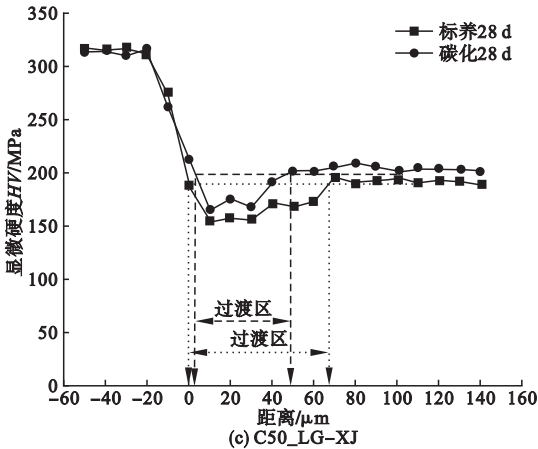
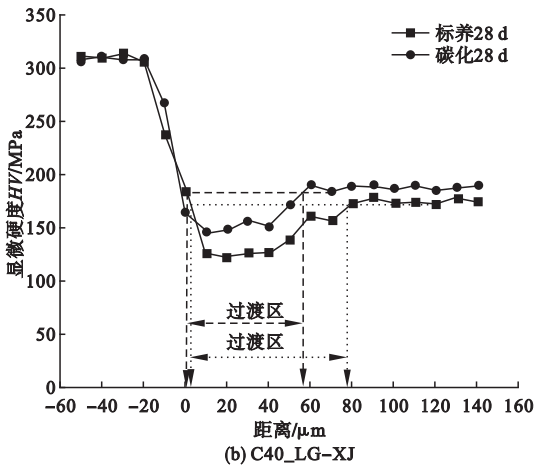
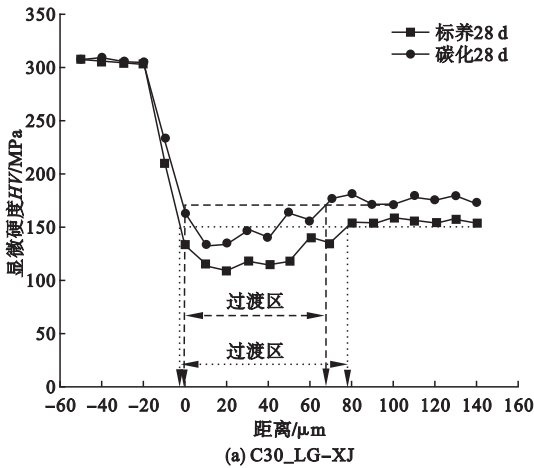
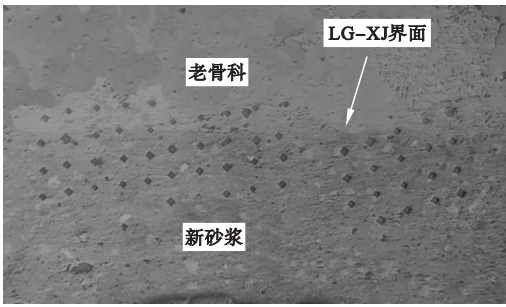


图 4 碳化作用对再生混凝土 LG-XJ 界面显微硬度的影响

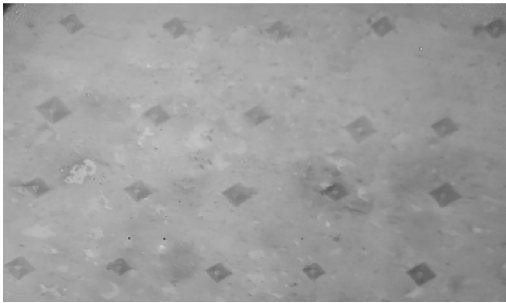
Fig. 4 Effect of carbonization conditions on micro-hardness of LG-XJ interface of re-generated concrete

化 28 d 后,过渡区显微硬度为 144.9 ~ 182.5 MPa,过渡区宽度为 50 ~ 60  $\mu\text{m}$ .由于骨料本身不会受碳化作用的影响,因此碳化前后骨料的硬度值维持相对稳定.

图 5 为再生混凝土 LG-XJ 界面经显微硬度仪打点后的点群样貌.



(a) 100倍



(b) 400倍

图 5 再生混凝土 LG-XJ 界面显微硬度光学显微照片

Fig. 5 Photoelectric micrograph of microstructure of LG-XJ interface

再生粗骨料表面存在微细裂缝,吸水率较大,初期会吸收大量水分.但水化一段时间后,再生骨料又将释放一部分水分,这部分水在参与水化反应的同时,也改变了界面过渡区内  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的富集程度和生长发育的空间<sup>[9-10]</sup>.该区域形成疏松多孔的结构且强度较低,从而造成显微硬度偏低.再生混凝土在碳化过程中, $\text{CO}_2$  极易通过相对薄弱的界面过渡区扩散,并与此处富集的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应,将大颗粒晶体转变为小颗粒的碳酸钙,填充了界面处结晶的孔隙<sup>[11-12]</sup>.从而降低了 LG-XJ 界面过渡区的孔隙率,并且改善了内部孔结构,使得该界面过渡区更为密实.因此,碳化后,该界面过渡区的显微硬度值提高,过渡区宽度减小.

2.2 碳化反应对再生混凝土 LJ-XJ 界面显微硬度的影响

强度等级相同的再生混凝土,随着碳化反应的进行,LJ-XJ 界面的显微硬度有所增大,过渡区宽度略有减小;随着强度等级的提高,浆体本身的密实度增加,同时低强度等级再生混凝土新老浆体碳化后的显微硬度值的提高程度较为明显.以 C40 的 LJ-XJ 界面为例,碳化作用对再生混凝土 LJ-XJ 界面显微硬度的影响如图 6 所示.

由图 6 可知,碳化前,LJ-XJ 界面过渡区显微硬度为 170~180 MPa,界面过渡区宽度为 40~50  $\mu\text{m}$ ;碳化 28 d 后,LJ-XJ 界面

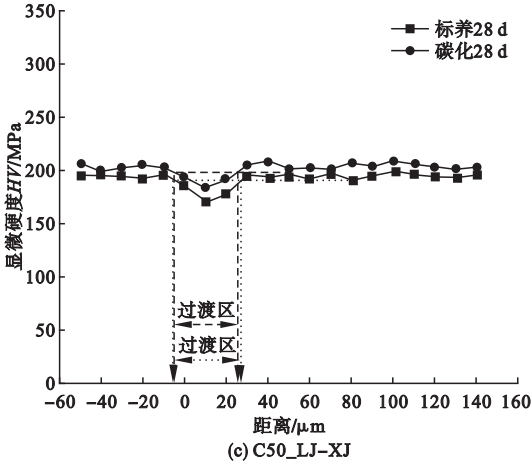
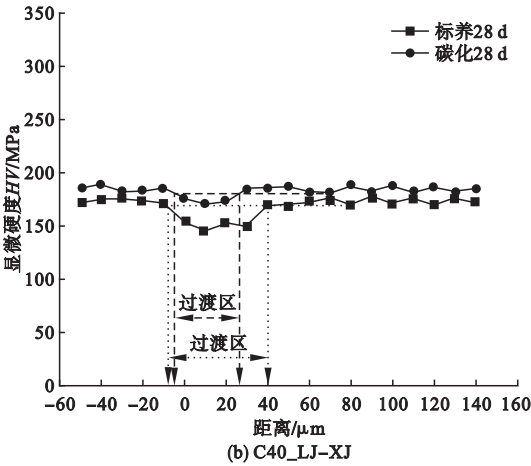
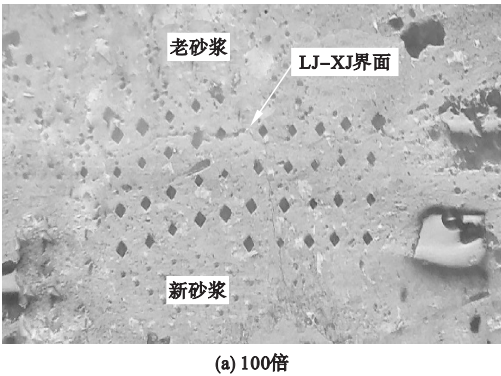
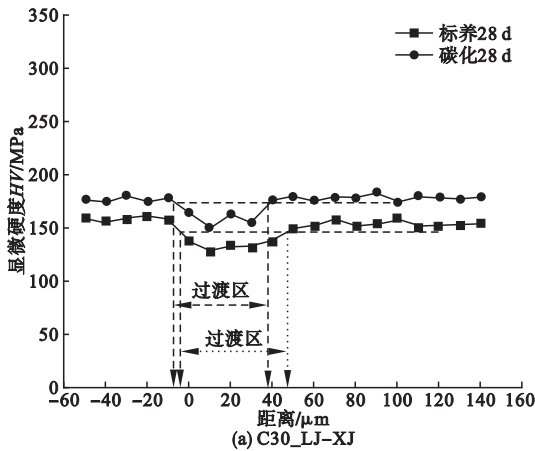


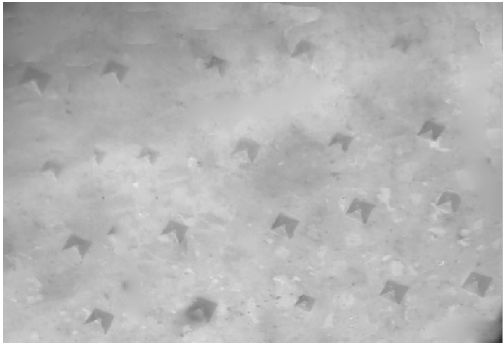
图 6 碳化作用对再生混凝土 LJ-XJ 界面显微硬度的影响

Fig. 6 Effect of carbonation on micro-hardness of LJ-XJ interface in recycled concrete  
过渡区显微硬度为 171.3~182.5 MPa,界面过渡区宽度为 30~40  $\mu\text{m}$ .

图 7 为再生混凝土 LJ-XJ 界面经显微硬度仪打点后的点群样貌.







(b) 400倍

图7 再生混凝土 LJ - XJ 界面显微硬度的光学显微照片

Fig. 7 Optical micrographs of microscopic hardness of LJ-XJ interface in recycled concrete

由图7可知,与LG - XJ界面相比,碳化作用对再生混凝土 LJ - XJ 界面过渡区的显微硬度和宽度的影响并不明显,浆体受碳化作用的影响效果要低于过渡区. 出现上述现象是因为新砂浆中的水泥颗粒被老砂浆吸收,新老砂浆界面镶嵌咬合,使得再生混凝土的 LJ - XJ 界面变得更为密实坚固,同时界面过渡区的孔隙率降低;老砂浆表面所吸收的新砂浆水分在保证界面周围水泥颗粒充分水化的前提下,又不会产生大面积的充水空间,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在这种空间下不能充分生长,同样也能够使 LJ - XJ 界面显微结构得到改善<sup>[13-14]</sup>. 由于新老砂浆弹性模量和热膨胀系数较为接近,温度和湿度变化几乎不会促使 LJ - XJ 界面微细裂缝的发展,这也是其对碳化作用效果不明显的重要原因,同时由于边界效应的存在,导致浆体中微小颗粒的密度和孔隙率明显低于界面过渡区<sup>[15-17]</sup>. 因此,在碳化作用相同的情况下,浆体显微硬度的提高程度不如界面过渡区.

2.3 碳化反应对再生混凝土 LG - LJ 界面显微硬度的影响

LG - LJ 界面与 LG - XJ 界面性质上都属于骨料 - 浆体的界面,碳化作用对再生混凝土 LG - LJ 界面显微硬度的影响如图8

所示.

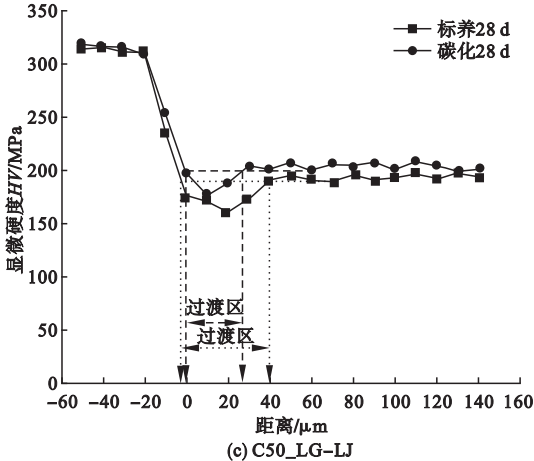
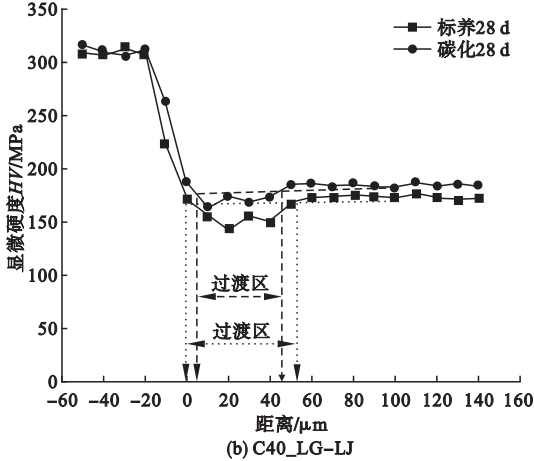
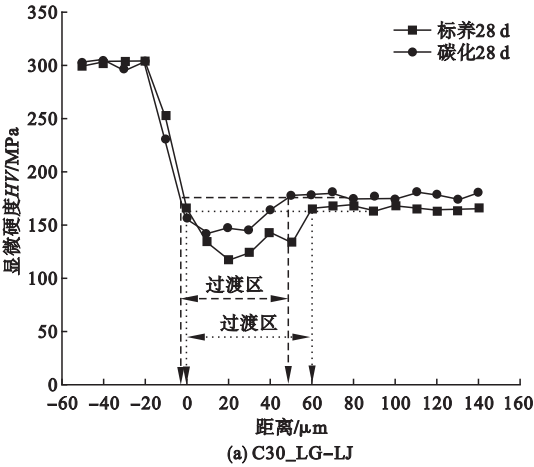


图8 碳化作用对再生混凝土 LG - LJ 界面显微硬度的影响

Fig. 8 Effect of carbonation on micro-hardness of LG-LJ interface of recycled aggregate concrete

由图4和图8可知,碳化作用对再生混凝土 LG - LJ 界面和 LG - XJ 界面显微硬度的影响规律基本一致. 图9为再生混凝土

LG-LJ界面经显微硬度仪打点后的点群样貌。

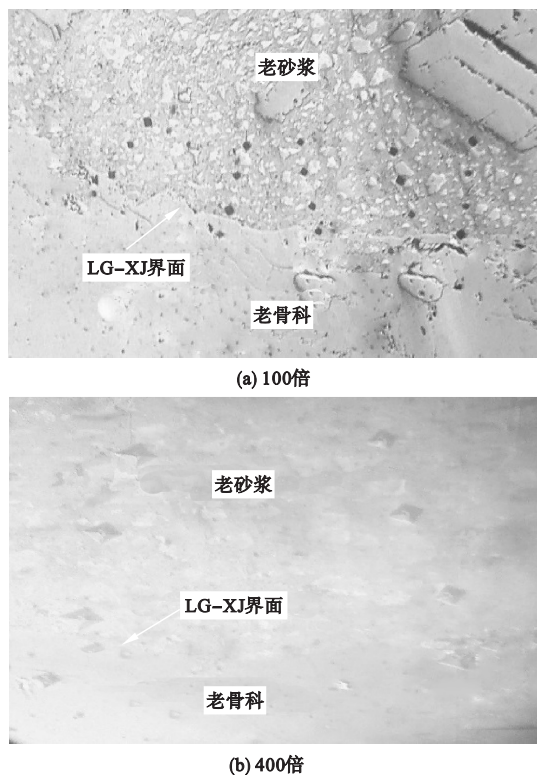


图9 再生混凝土 LG-LJ 界面显微硬度的光学显微照片

Fig.9 Optical micrographs of microscopic hardness of LG-LJ interface of recycled concrete

以 C40 的 LG-LJ 界面作为例子进行分析,碳化前,过渡区显微硬度为 146.3 ~ 170.3 MPa,过渡区宽度为 50 ~ 60  $\mu\text{m}$ ;碳化 28 d 后,过渡区显微硬度为 171.3 ~ 182.5 MPa,过渡区宽度为 40 ~ 50  $\mu\text{m}$ 。由于再生骨料的制备工艺以及骨料和砂浆弹性模量、热膨胀系数的不同,导致了 LG-LJ 界面过渡区产生较多的微细裂缝以及原始裂缝的生长和扩展<sup>[18-20]</sup>。但与 LG-XJ 界面比较, LG-LJ 界面过渡区密实程度相对较高,孔隙率较低,富集的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的数量相对较少,因此后者对碳化作用的效果低于前者。

### 3 结 论

(1)随着再生混凝土强度等级的提高,水

泥浆体的密实度也提高,同时低强度等级再生混凝土新老浆体碳化后的显微硬度值的提高程度较为明显。

(2)强度等级相同的再生混凝土,界面孔隙率的大小以及碳化作用对老骨料-新浆体界面的影响最大,其次是老骨料-老浆体界面,对老浆体-新浆体界面的影响最小。

(3)碳化反应能够提高再生混凝土水泥浆体和界面过渡区的密实程度,使得 LG-XJ 界面、LG-LJ 界面和 LJ-XJ 界面的显微硬度增大,相应地过渡区宽度有着不同程度的减小。

### 参考文献

- [1] 李文贵,肖建庄,黄靓,等.再生混凝土界面过渡区纳观力学性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(12):31-39.  
(LI Wengui, XIAO Jianzhuang, HUANG Liang, et al. Experimental study on mechanical properties of interfacial transition zone in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2014, 41(12): 31-39.)
- [2] 耿欧,陈辞,顾荣军,等.再生粗集料混凝土界面微观结构的发展规律[J].建筑材料学报,2012,15(3):340-344.  
(GENG Ou, CHEN Ci, GU Rongjun, et al. Development law of interfacial microscopic structure in recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of building materials, 2012, 15(3): 340-344.)
- [3] 李秋义,高嵩,薛山.绿色混凝土技术[M].北京:中国建材工业出版社,2014.  
(LI Qiuyi, GAO Song, XUE Shan. Green concrete technology[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2014.)
- [4] KENNY A, KATZ A. Influence of the interfacial transition zone properties on chloride corrosion in reinforced concrete-characterization of ITZ[J]. Advanced materials research, 2010, 95:69-72.
- [5] MONDAL P. Nanomechanical properties of cementitious materials[D]. USA: Northwest University, 2008.
- [6] ZHANG J X, SUN H H, WAN J H, et al. Study on microstructure and mechanical property of

- interfacial transition zone between limestone aggregate and Sialite paste [J]. Construction and building materials, 2009, 23 (11): 3393 – 3397.
- [7] 徐文冰, 水中和, 马军涛, 等. 基于显微硬度分析的粉煤灰混凝土碳化性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(1): 7 – 12.  
(XU Wenbing, SHUI Zhonghe, MA Juntao, et al. Carbonation of fly ash concrete investigated with micro-hardness analysis [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2011, 30 (1): 7 – 12.)
- [8] LIZARAZO-MARRIAGA J, HIGUERA C, CLAISSE P. Measuring the effect of the ITZ on the transport related properties of mortar using electrochemical impedance [J]. Construction and building materials, 2014, 52: 9 – 16.
- [9] MAGHSOODI V, RAMEZANIANPOUR A. Effects of volumetric aggregate fraction on transport properties of concrete and mortar [J]. The Arabian journal for science and engineering, 2009, 34(2B): 327 – 335.
- [10] 张玲峰, 韩建德, 刘伟庆, 等. 碳化导致水泥基材料微观结构演变的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(2): 85 – 95.  
(ZHANG Lingfeng, HAN Jiande, LIU Weiqing, et al. Microstructure evolution of cement-based materials caused by carbonation reaction [J]. Materials review, 2015, 29(2): 85 – 95.)
- [11] 王忠星, 李秋义, 曹瑜斌, 等. 硫酸盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 443 – 448.  
(WANG Zhongxing, LI Qiuyi, CAO Yubin, et al. Effect of sulfate erosion on multiple interface microstructure of recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(2): 443 – 448.)
- [12] 王忠星, 李秋义, 岳公冰, 等. 氯盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 27 – 32.  
(WANG Zhongxing, LI Qiuyi, YUE Gongbing, et al. Effect of chlorine salt erosion on multiple interface microstructure of recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(1): 27 – 32.)
- [13] 施惠生, 孙丹丹, 吴凯. 混凝土界面过渡区微观结构及其数值模拟方法的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 678 – 685.  
(SHI Huisheng, SUN Dandan, WU Kai. Development on microstructure and numerical simulation of interfacial transition zone [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2016, 44(5): 678 – 685.)
- [14] YAO Y, WU H, WANG L. The microstructure research on interfacial transition zone of filling material containing FA and coal gangue [J]. Advanced materials research, 2011, 287 – 290: 1125 – 1129.
- [15] 董淑慧, 张宝生, 葛勇. 轻骨料 – 水泥石界面区微观结构特征[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 737 – 740.  
(DONG Shuhui, ZHANG Baosheng, GE Yong. Microstructure characteristics of interfacial transition zone (ITZ) between lightweight aggregate and cement paste [J]. Journal of building materials, 2009, 12(6): 737 – 740.)
- [16] KOU S C, POON C S, AGRELA F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures [J]. Cement & concrete composites, 2011, 33(8): 788 – 795.
- [17] 雷斌, 肖建庄. 再生混凝土抗碳化性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 605 – 611.  
(LEI Bin, XIAO Jianzhuang. Research on carbonation resistance of recycled aggregate concrete [J]. Journal of building materials, 2008, 11(5): 605 – 611.)
- [18] JIANG J Y, SUN G W, WANG C H. Numerical calculation on the porosity distribution and diffusion coefficient of interfacial transition zone in cement-based composite materials [J]. Construction and building materials, 2013, 39: 134 – 138.
- [19] 陈伟, 田亚坡, 周紫晨. 粉煤灰混凝土抗碳化性能及显微硬度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(11): 48 – 51.  
(CHEN Wei, TIAN Yapao, ZHOU Zichen. Carbonation of fly ash concrete and micro-hardness analysis [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2009, 31 (11): 48 – 51.)
- [20] 黄秀亮, 王成刚, 柳炳康. 再生混凝土抗碳化性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(11): 1343 – 1346 + 1408.  
(HUANG Xiuliang, WANG Chenggang, LIU Binggang. Research on carbonation resistance of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2013, 36(11): 1343 – 1346 + 1408.)