

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.022

再生细骨料及其混凝土的微观结构特征

耿 健¹, 孙家瑛¹, 莫立伟^{1,2}, 张国良^{1,2}

(1. 浙江大学宁波理工学院 绿色建材与废弃物资源化研究中心, 浙江 宁波 315100;

2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:采用扫描电镜、能谱分析、X 射线衍射、显微硬度和氮吸附等微观测试方法研究了再生细骨料及其混凝土的微观结构特征。研究表明:再生细骨料是一种组成复杂的、具有一定水化活性的和高渗透性的人造骨料,其主要矿物相为 SiO₂、CaCO₃ 以及少量的 C₂S。再生细骨料混凝土内部水泥石孔隙较多,结构密实性较差,同时其与再生细骨料间存在较为明显的界面过渡区,该界面过渡区宽度较大,且界面过渡区两侧的骨料和水泥石的显微硬度均较低。再生细骨料的多孔结构,以及再生细骨料混凝土内部水泥石和界面过渡区微观结构缺陷是导致其大孔增多的主要原因,大孔的增多会对混凝土抗渗性产生不利影响。

关键词:再生细骨料;再生细骨料混凝土;水化产物形貌;界面过渡区;微观结构

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0135-06

Micro-structure Characteristics of Recycled Fine Aggregate and Its Concrete

Geng Jian¹, Sun Jiaying¹, Mo Liwei^{1,2}, Zhang Guoliang^{1,2}

(1. Research Center of Green Building Materials and Waste Resources Reuse, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: The characteristics of recycled fine aggregate (RFA) and its concrete (RFAC) were analyzed by SEM, EDXA, XRD, Micro-hardness and nitrogen absorption. The results show that RFA is an artificial aggregate with complex compositions, certain hydration activity and high permeability. The mineral compositions of RFA include SiO₂, CaCO₃ and a small quantity of C₂S, which has a certain hydration activity and can form hydration productions. The compaction rate of cement paste in RFAC is low because of pores in it. There is obvious interfacial transition zone (ITZ) between RFAC and cement paste, and its width is bigger than that in ordinary concrete. In addition, the values of micro-hardness of the interfacial transition zone on both sides of RFA and cement paste are lower. The porous structure of the recycled fine aggregates and defects of ITZ are main reasons for big pores in RFAC, which has bad effect on impermeability of RFAC.

Key words: recycled fine aggregate; recycled fine aggregate concrete; morphology of hydrated products; interfacial transition zone; micro-structure

对于再生骨料混凝土,特别是再生粗骨料混凝土微结构特征,学者们借助各种现代测试技术已对

其有了比较清晰的认识:Nobuaki 等^[1]和 Tam^[2]证明了再生骨料与新水泥石基体之间同样存在一个界

收稿日期:2012-07-20

基金项目:宁波市创新团队项目(2011B81005)

作者简介:耿健(1978-),男,副教授,博士,主要从事固体废弃物综合利用研究,(E-mail)gengjian@whut.edu.cn。

孙家瑛(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)jakys@163.com。

面过渡区(Interfacial Transition Zone,简称 ITZ),而且旧水泥与骨料周围孔隙率较高;Poon 等^[3]发现用高性能混凝土再生骨料配制的再生混凝土的骨料-水泥石界面过渡区内水化产物密实,而用普通混凝土再生骨料配制的再生混凝土的骨料-水泥石界面过渡区主要由一些松散的水化产物组成,该区域呈现多孔状态;Butler 等^[4]、水中和等^[5]、刘树华等^[6]、肖建庄等^[7]、张金喜等^[8]对再生粗骨料混凝土微观结构以及特征进行了研究,水中和等^[5]通过光学显微镜、扫描电镜和电子探针测定了再生骨料中元素与化合物在 ITZ 的特征。此外还有些学者对再生骨料混凝土的宏观性能进行了研究^[9-13],分析了其与普通混凝土之间的差异,以上研究成果为再生骨料混凝土微结构特征及其与宏观性能之间关系的研究奠定了坚实的理论基础,但是对于再生细骨料混凝土目前还缺少此方面的系统研究。再生细骨料和再生粗骨料相比,尽管二者来源相同,但由于细骨料颗粒尺寸小,裂缝多,往往含有大量旧水泥浆体颗粒,使得其组成结构,特别是微观结构要远复杂于后者,而这种复杂的组成结构势必影响混凝土微观结构,从而对其宏观性能产生不利的影响。因此本文在研究再生细骨料微观结构特征基础上,分析其与混凝土微观结构之间的关系,从微观角度探讨再生细骨料混凝土宏观性能劣化原因。

1 实验

1.1 原材料

水泥(Cement):海螺 42.5 级普通硅酸盐水泥。
河砂(Sand):普通河砂,细度模数 2.7;再生细骨料(Recycled fine aggregate-RFA):由中冶天工上海十三冶建设有限公司提供,骨料物理性能如表 1 所示。配合比为:普通混凝土 LS0(cement:water:sand=300:180:900),再生细骨料混凝土 LS14(cement:water:sand:RFA=300:180:540:360)。

表 1 再生细骨料的物理性能

试样	级配/%						吸水率/%	粉体含量/%
	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16		
RFA	0.6	22.4	36.4	53.0	73.0	86.0	7.2	34.0

1.2 方法

将成型好的试样标准养护 7、28 d 后,放入无水乙醇中 3~5 d 终止水化,然后放入密闭容器中,准备测试用。X 射线衍射(XRD)测试采用德国布鲁克公司(Bruker AXS)公司生产的 D8 Advance 型 X 射线粉末衍射仪定性分析水化产物,XRD 测试采用铜

靶,电压 40 kV,电流 30 mA,扫描范围 5~60°(2 θ),扫描速度 10°/min,步长 0.02°。扫描电镜(SEM)测试采用日本日立生产的 S-4800 型场发射扫描电子显微镜观察样品形貌,仪器加速电压为 20 kV。同时采用与该仪器配套的美国 EDXA 公司生产的 X 射线能谱仪,进行微区元素的定性和半定量分析,EDXA 分辨率为 129.92 eV,测量时间为 50 s。采用上海伦捷 HVT-1000 显微硬度计测试界面显微硬度。采用麦克 ASAP 2020 分析仪测试再生细骨料和混凝土微孔。

2 实验结果及讨论

2.1 再生细骨料的微观结构特征

由图 1 单颗再生细骨料的 SEM 测试结果可知,再生细骨料表面非常粗糙,附着有一些不规则的、大小不一的块状颗粒,并含有大量孔洞,以及一些由于机械破碎损伤而形成的微裂缝,这些缺陷的存在势必对其性能产生不利影响。对其进一步放大($\times 3\ 000$),可以明显发现在块状颗粒表面附着许多类似水泥水化产物的物质,这些物质结构疏松,孔径尺寸较大,且彼此之间并无紧密联系。为进一步判断这些物质的矿物组成,本文对其进行了 EDXA 分析,其测试结果如图 2 和表 2 所示。由其可知,这些物质主要组成元素为 C、O、Si、Ca、Al 和 Mg 等,其组成特点与硅酸盐水泥水化相相似。

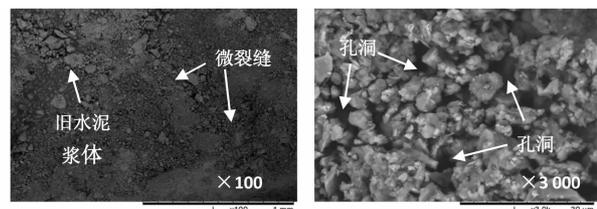


图 1 再生细骨料微观形貌的 SEM 图

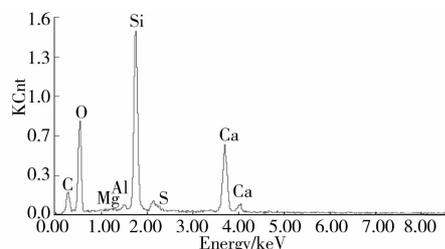


图 2 再生细骨料表面块状颗粒的 EDXA 分析结果

表 2 单颗再生细骨料表面块状颗粒的组成元素质量分数

元素	ω	元素	ω	元素	ω	元素	ω
C	18.31	Mg	0.25	Si	25.02	Ca	20.24
O	35.02	Al	0.84	S	0.32		

为了更准确的判定再生细骨料的矿物组成特点,对其进行XRD分析,结果如图3所示。由图3可知,RFA的主要衍射峰为低温型石英(α -SiO₂, $d=4.26, 3.34, 1.84$),这表明再生细骨料的主要矿物相仍为SiO₂,与天然河砂相同。此外,在 2θ 为 29.5° , $d=3.02$ 附近处有一较强峰,该峰形较高,且峰面相对较宽,说明该成峰矿物在再生细骨料中含量较高,结合SEM-EDXA的分析结果,可以判定该峰矿物为方解石(CaCO₃, $d=3.86, 3.03, 2.28$)。从图3还可知,在 $d=2.49, 2.09$ 处有2个明显的衍射峰,这与硅酸二钙的特征峰相似,只是 d 值偏小,结合SEM-EDXA结果,认为该峰矿物是水泥熟料矿物硅酸二钙(C₂S),但其含量较低。根据以上结果,可以判定本文所研究的再生细骨料主要矿物相为SiO₂、CaCO₃以及少量的C₂S。

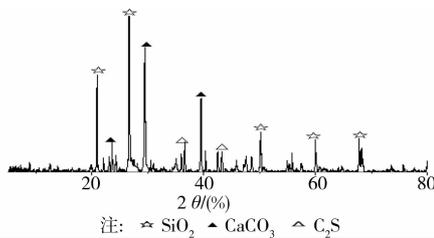


图3 再生细骨料的X射线衍射图

Poon、Gualtieri、水中和以及田芳等人也曾通过

XRD研究了不同来源的再生骨料矿物组成特点,在他们的测试结果中均发现了C₂S的存在^[14-17],这说明尽管再生细骨料矿物组成与废弃混凝土品状和来源有一定关联,但C₂S是其共性矿物组成。分析原因,C₂S硅酸二钙是硅酸盐水泥和硫酸盐水泥熟料的重要组成矿物,其水化速度很慢,在混凝土内部往往能够存在较长的时间,故易于再生骨料中。同时,与再生粗骨料相比,再生细骨料中的旧水泥组分更多,因此C₂S更易存在于再生细骨料中。C₂S由于水化速度较慢,因此其水化反应过程将持续较长的时间,故它的存在将对再生细骨料的性能产生一定的影响,进而影响再生细骨料混凝土的性能。C₂S的水化反应持续时间较长,它对再生细骨料以及混凝土的影响将是长期性的,而目前关于此方面的研究内容较少,故还难以对其影响效果做出明确判断,还需对相关内容进行更为深入的、长久的、系统性的研究。

由表3中RFA的孔径分布特征可知,再生细骨料的孔径变化范围较大,其含有一定数量的凝胶孔和毛细孔,同时其少害孔级(20~50 nm)、有害孔级(50~200 nm)的数量分别为36.3%、36.5%,占总孔隙率的73.8%,这表明再生细骨料是一种具有高渗透性的人造骨料,这将对混凝土的性能产生明显的影响。

表3 再生细骨料的孔结构特征

试样	总孔隙率/ (mL·g ⁻¹)	平均孔径/nm	孔径分布/%				
			<10/nm	10~20/nm	20~50/nm	50~100/nm	>100/nm
RFA	0.017	23.87	11.3	15.9	36.3	25.2	11.3

2.2 再生细骨料混凝土的微观结构特征

2.2.1 微观形貌特征 LS0和LS14在28d养护龄期时的微观形貌SEM测试结果如图4和图5所示,由其可知,LS0的内部微观结构较为致密,除少量孔隙外,未见明显的缺陷,水化产物以C—S—H凝胶为主,呈层状分布,同时其有明显的六角形片状Ca(OH)₂晶体存在。观察LS14的微观形貌可知,LS14内部存在有明显的孔洞,说明其微观结构的致密性要逊于LS0。LS14中的C—S—H凝胶形貌与LS0相似,也呈现板层状,但是在凝胶内部和表面均存在着一些尺寸较大(30~80 μm)的颗粒状物质,由于实验未掺入任何矿物掺合料,同时结合图1再生细骨料和图4中LS0的微观形貌SEM测试结果,可判定这些颗粒状物质应为再生细骨料中的旧水泥浆体颗粒。对这些旧水泥浆体颗粒的表面形貌

进一步放大(×5 000)可以发现,在孔洞间存在有针棒状的AFt晶体,此外在部分旧水泥浆体颗粒表面也有针刺状物质形成,但是其长度(1~3 μm)和细度均明显要小于AFt晶体(3~5 μm),根据Diamond等^[18]的研究结果,这些物质应当为I型C—S—H凝胶,由于I型C—S—H凝胶仅存在水泥早期水化颗粒中,这说明再生细骨料中的部分旧水泥浆体参与了水化反应,显然该反应与C₂S的存在有关(再生细骨料中旧水泥浆体对水泥水化的影响将另附文讨论)。分析原因,再生细骨料是一种高吸水性材料,这一方面源于骨料本身存在的裂缝和孔隙,另一方面则源于其含有的旧水泥浆体(或附着,或以颗粒形式存在)。在混凝土拌合初期,再生细骨料将吸水,从而使混凝土的和易性变差,在一定程度上将影响混凝土内部微观结构的密实性。

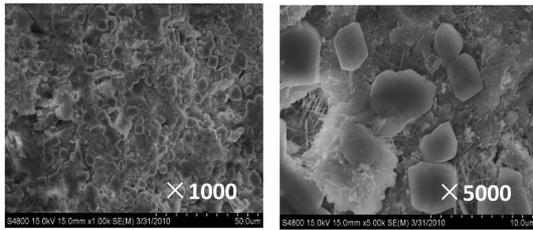


图 4 LS0 在 28 d 养护龄期时的微观形貌

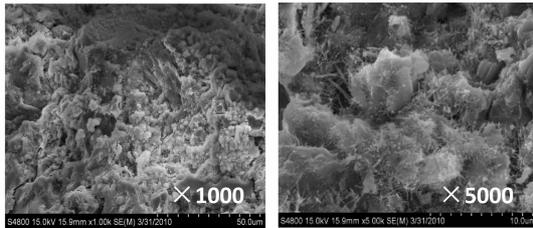


图 5 LS14 在 28 d 养护龄期时的微观形貌

2.2.2 ITZ 特征 LS0 在 28 d 养护龄期时水泥石与天然河砂 ITZ 的微观形貌如图 6(a) 所示,由其可知,LS0 中水泥石与天然河砂界面过渡区存在明显的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富集现象,集料附近的水泥石结构也较为致密,此外,除存在一宽度 $10\ \mu\text{m}$,长度 $150\ \mu\text{m}$ 的裂隙外,ITZ 整体发育良好。LS14 在 28 d 养护龄期时水泥石与 RFA 的 ITZ 微观形貌如图 6(b) 所示,与 LS0 相比,在其 ITZ 内未发现有明显 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富集现象,且集料周围水泥石存在较多的孔洞,其密实性要明显差于 LS0,此外,尽管在 ITZ 的部分区域可以看到水泥石中的水化产物与 RFA 之间形成搭接,但是这种搭接并不牢固,在水泥石和 RFA 的 ITZ 中仍可见明显的裂隙,其长度和宽度均要大于 LS0 中 ITZ 的裂隙,同时在界面过渡区还存在一些如图 5 所示的旧水泥浆体颗粒。

为了进一步研究再生细骨料混凝土 ITZ 的特征,分别对 LS0 和 LS14 的 ITZ 进行显微硬度测试。以骨料和水泥石交界处为 0 距离点,从左向右,由骨料向水泥石,每隔 $20\ \mu\text{m}$ 测一次显微硬度,每个样品随即测个 3 个 ITZ 的显微硬度,其测试结果如图 7 所示。由该图可知,LS0 和 LS14 界面过渡区的显微硬度尽管变化趋势相同,但是差异仍然较为明显:1) LS0 中骨料的显微硬度要明显高于 LS14,这显然与 RFA 表面附着有较多旧水泥浆体有关;2) LS0 中水泥石的显微硬度也要明显大于 LS14,这与 LS14 中水泥石结构密实性差有关;3) LS0 的 ITZ 宽度要小于 LS14(前者 $60\ \mu\text{m}$,后者 $80\ \mu\text{m}$)。

以上这些结果说明再生细骨料混凝土中水泥石和再生细骨料之间的界面过渡区存在着较多缺陷,

其一方面为有害离子进入混凝土内部提供了快速通道,另一方面也会导致材料力学性能的下降。分析原因,再生细骨料中旧水泥浆体表面极易被水泥所包裹,由于具有较高的吸水率,势必会对其周围水泥水化进程产生不利的影响,即水化速度变缓,水化程度降低,水化产物数量减少,同时由于再生细骨料也是高吸水性材料,在其表面不会像天然河沙一样形成水膜层^[19],在上述因素影响下,界面过渡区内会出现水分匮乏现象,导致界面过渡区水化产物数量明显减少,因此未在其界面过渡区见到明显的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富集,同时由于水分的匮乏,也使得界面过渡区水泥石微观结构进一步劣化,界面过渡区的范围进一步增大,从而形成导致再生细骨料混凝土微观结构缺陷形成的一个重要原因。

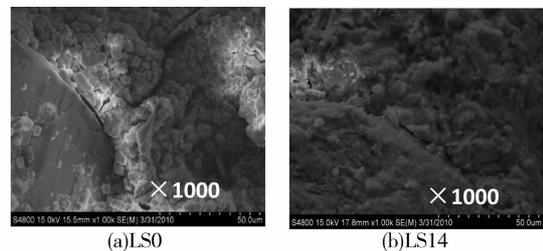


图 6 LS0 和 LS14 在 28 d 时的 ITZ 微观形貌

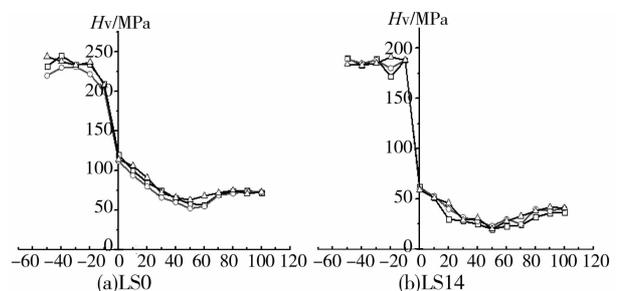


图 7 LS0 和 LS14 的 ITZ 显微硬度

2.2.3 孔结构特征 表 4 为 LS0、LS14 在 28 d 养护龄期时的孔结构测试结果。由该表的结果可知,LS14 的总孔隙率和平均孔径均高于 LS0,同时由孔径分布特征还可知,LS14 中孔径尺寸 $<10\ \text{nm}$ 的凝胶孔数量仅为 16.1%,小于 LS0 的 19.7%,凝胶孔是水泥石中凝胶的重要组成部分,其约占增个凝胶体积的 28%,由于其尺寸太小,且与水具有很强的亲和力,因此凝胶孔不会对水化水泥浆体的强度和抗渗性产生不良的影响。由表 5 中的结果可知,LS14 中影响混凝土抗渗性、孔径尺寸 $>20\ \text{nm}$ 的孔的数量与 LS0 相当,分别为 68.1%和 66.2%,但是孔径尺寸为 $50\sim 100\ \text{nm}$,以及 $>100\ \text{nm}$ 的孔数量要明显多于 LS0,这在一定程度上与再生细骨料的

多孔结构有关,同时再生细骨料混凝土不密实微观结构也是导致其大孔增多的主要原因,显然大孔的增多会对混凝土抗渗性产生不利影响。因此,提升再生细骨料混凝土抗渗性关键在于再生细骨料性能的改善。针对此问题,刘星伟等^[20]通过物理方式对

再生细骨料进行颗粒整形,从而使骨料性能得到了明显的改善,混凝土的抗渗(碳化)性能有明显的提升。此外,寇世聪、张李黎、施惠生、张剑波等^[21-24]的研究结果表明减小混凝土拌合物的水灰比以及掺入矿物掺合料同样可以改善再生骨料混凝土的抗渗性。

表4 再生细骨料混凝土的孔结构特征

试样	总孔隙率/ (ml·g ⁻¹)	平均孔径/ nm	孔径分布/%				
			<10/nm	10~20/nm	20~50/nm	50~100/nm	>100/nm
LS0	0.037	11.76	19.7	14.1	29.5	23.1	13.6
LS14	0.053	14.98	16.1	15.8	23.4	26.9	17.8

3 结论

1)再生细骨料是一种组成复杂的、具有一定水化活性的和高渗透性的人造骨料,其主要矿物相为SiO₂、CaCO₃以及少量的C₂S,其具有一定水化活性,能形成少量的水化产物。

2)再生细骨料混凝土内部水泥石孔隙较多,结构密实性较差,同时其与再生细骨料粘结较弱,存在较为明显的界面过渡区。与普通混凝土水泥石与骨料的界面过渡区相比,该界面过渡区宽度较大,且界面过渡区两侧的骨料和水泥石的显微硬度均较低。上述缺陷的存在,是导致再生细骨料混凝土宏观性能劣化的一个主要原因。

3)再生细骨料的多孔结构,以及再生细骨料混凝土内部水泥石和界面过渡区微观结构缺陷是导致其大孔增多的主要原因,大孔的增多会对混凝土抗渗性产生不利影响。

参考文献:

- [1] Otsuki N, Miyazato S. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation [J]. *Material in Civil Engineering*, 2003, 15(5):443-451.
- [2] Tam V W Y. Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6):1180-1186.
- [3] Poon C S, Chan D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2007, 50(3):293-305.
- [4] Butler L, West J S, Tighe S L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(10):1037-1049.
- [5] 水中和,潘智生,朱文琪,等.再生集料混凝土的微观结构特征[J]. *武汉理工大学学报*, 2003, 25(12):99-102.
- [6] 刘树华,同培渝.高性能再生骨料混凝土的性能与微观结构[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(4):456-460.
- [7] 肖建庄,刘琼,李文贵,等.再生混凝土细观结构和破坏机理研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4):24-30.
- [8] 张金喜,张建华,邹长森.再生混凝土性能和孔结构的研究[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(2):142-147.
- [9] Kwan W H, Ramli M, Kam K J, et al. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1):565-573.
- [10] Zega C J, di Maio Á A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements [J]. *Waste Management*, 2011, 31(11):2336-2340.
- [11] Corinaldesi V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9):1616-1620.
- [12] 寇世聪,潘智生.不同强度混凝土制造的再生骨料对高性能混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2011, 1(3):7-11.
- [13] Kou S C, Pan Z S. Effect of quality of parent concrete on

- the mechanical properties of high performance recycled aggregate concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 1(3): 7-11.
- [13] 胡琼, 陈伟伟, 邹超英. 再生混凝土粘结性能试验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(12): 1849-1854.
Hu Q, Chen W W, Zou C Y. Experimental study on bonding properties of recycled concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(12): 1849-1854.
- [14] Poon C, Qiao X C, Chan D. The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base [J]. *Waste Management*, 2006, 26(5): 1166-1172.
- [15] Gualtieri A F, Boccaletti M. Recycling of the product of thermal inertization of cement-asbestos for the production of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(8): 3561-3569.
- [16] Shui Z, Xuan D, Wan H, et al. Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8): 1723-1729.
- [17] 田芳, 叶青, 章天刚. 废弃混凝土磨细粉作水泥混合材的试验研究 [J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(4): 23-25.
Tian F, Ye Q, Zhang T G. Research on compound performance of waste concrete pulverized admixture [J]. *Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition*, 2010, 27(4): 23-25.
- [18] Diamond S, Lachowski E E. On the morphology of type III C-S-H gel [J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(5): 703-705.
- [19] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven Piet. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二): 界面微观结构的形成—劣化机理及其影响因 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(1): 70-79.
Chen H S, Sun W, Stroeven P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (II): mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(1): 70-79.
- [20] 刘星伟, 李秋义, 李艳美, 等. 再生细骨料混凝土碳化性能的试验研究 [J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 159-161.
Liu X W, Li Q Y, Li Y M, et al. The experimental study on the carbonation of the recycled fine aggregate concrete [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2009, 30(4): 159-161.
- [21] Kou S, Poon C, Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(8): 788-795.
- [22] 张李黎, 柳炳康, 胡波. 再生混凝土抗渗性试验研究 [J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(4): 508-510.
Zhang L L, Liu B K, Hu B. Experimental study on the impermeability of recycled concrete [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2009, 32(4): 508-510.
- [23] 施惠生, 刘金为. 再生混凝土微观结构特征及其耐久性改善技术 [J]. *水泥工程*, 2009(4): 67-71.
Shi H S, Liu J W. Microscopic structural features and durability improvement measures of recycled aggregate concrete [J]. *Cement Engineering*, 2009(4): 67-71.
- [24] 张剑波, 吴勇生, 孙可伟, 等. 再生骨料混凝土孔隙结构的试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(1): 239-244.
Zhang J B, Wu Y S, Sun K W, et al. Experiment and study on pore structure of recycled aggregate concretes [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 30(1): 239-244.

(编辑 王秀玲)