

# 废弃混凝土再生水泥熟料的配制与性能

万朝均<sup>1a</sup>, 李 腾<sup>1a,1b</sup>, 陈 旭<sup>1a</sup>, 邓天明<sup>1a</sup>, 张廷雷<sup>1a,2</sup>, 范菁菁<sup>1a,3</sup>

(1. 重庆大学 a. 材料科学与工程学院; 1b. 建设管理与房地产学院, 重庆 400045;  
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 3. 重庆广播电视大学 南岸区华夏分校, 重庆 400060)

**摘 要:**以完全不用天然石灰石、粘土、页岩和砂岩, 废弃混凝土在生料中的质量百分含量高达 95%~99% 和普通煅烧工艺制备出了水泥熟料(以下简称再生熟料)。将再生熟料与用天然石灰石和砂岩制备的水泥熟料进行了对比试验与分析, 结果表明: 2 种熟料具有完全相同的 XRD 特征峰位, 再生熟料的熟料矿物形成正常; 2 种熟料化学成分相近, 再生熟料的率值设计中更倾向于高钙低硅; 再生熟料的 f-CaO 含量满足安定性要求; 再生熟料制备的水泥的 3 d 强度达到 42.5 级硅酸盐水泥的要求, 28 d 强度达到 52.5 级硅酸盐水泥的要求。

**关键词:**废弃物; 化学成分; 水泥; 熟料矿物; 抗压强度

**中图分类号:** TQ172.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)02-0143-06

## Manufacture and Property of Recycled Cement Clinker by Demolition Concrete

WAN Chao-jun<sup>1a</sup>, LI Teng<sup>1a,1b</sup>, CHEN Xu<sup>1a</sup>, DENG Tian-ming<sup>1a</sup>, ZHANG Ting-lei<sup>1a,2</sup>, FAN Jing-jing<sup>1a,3</sup>

(1a. College of Material Science and Engineering; 1b. Faculty of Construction Management and Real Estate,  
Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, P. R. China;

3. Huaxia Campus of Nan'an District, Chongqing University of Broadcast and Television, Chongqing 400060, P. R. China)

**Abstract:** Without natural lime stone, clay, shale and sandstone, with the mass fracrion of demolition concrete in raw meal up to 95%~99%, along with ordinary calcining process, the cement clinkers (hereinafter called recycled clinkers for short) were produced. Experiments and analysis were employed to compare these recycled clinkers with the cement clinker which was manufactured by natural lime stone and sandstone. It is shown that the two types of clinkers have completely the same positions of characteristic peaks of XRD; the clinker minerals of recycled clinkers are formed normally; the two clinkers have similar chemical composition, and the rate value design of recycled clinkers are more likely to higher calcium and lower silicon; the content of f-CaO of recycled clinkers meets the requirements of soundness; the 3d strength of cements produced by recycled clinkers reaches the requirements of 42.5 grade Portland cement, and the 28d strength reaches the requirements of 52.5 grade.

**Key words:** waste materials; chemical composition; cement; clinker mineral; compressive strength

收稿日期: 2011-10-24

基金项目: 重庆市建委科技计划资助项目(城科字 2006 第 44 号); 中央高校基本科研业务费科研专项研究生科技创新基金资助项目(CDJXS11031122); 重庆市重大科技专项子课题(CSTC, 2008AB7113)

作者简介: 万朝均(1970-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事高性能水泥基材料的制备、机理与性能研究及建筑节能、地方资源与工业固体废弃物的建材资源化利用等研究, (E-mail) cjwan@cqu.edu.cn.

据测算,2011 年中国废弃混凝土总量超过 2.58 亿 t,并以每年超过 8%的速度快速增长<sup>[1]</sup>,废弃混凝土的回收利用日益迫切。对废弃混凝土的传统利用方式为制备再生集料生产再生混凝土<sup>[2-4]</sup>。已有研究表明,与天然集料相比,废弃混凝土抗压强度和弹性模量低,坚固性差<sup>[5]</sup>,用以生产再生集料表面会严重粘结硬化水泥浆<sup>[6]</sup>,导致吸水率高、吸水快<sup>[3-4,6-11]</sup>,压碎指标大<sup>[3-4]</sup>,所以,制备的再生混凝土施工性能差<sup>[12]</sup>,强度低<sup>[5,8-9,13-21]</sup>,弹性模量低<sup>[5,8,10,13-15]</sup>,收缩、徐变大<sup>[8,21-23]</sup>,抗渗、抗碳化、抗硫酸盐腐蚀等耐久性差<sup>[8-9,11,13,20,23]</sup>,往往只能部分取代天然集料,需要使用新的配合比设计方法<sup>[9,24]</sup>、加强潮湿养护<sup>[19]</sup>、添加矿物外加剂进行强化处理<sup>[20,25-26]</sup>等才能满足工程需要,生产再生粗集料时产生的大量水泥砂浆尤其难以用作再生细集料使用<sup>[6,11-12,21]</sup>。因此,尚需开发除再生集料技术外综合利用废弃混凝土的新的技术途径。

胡曙光和何永佳<sup>[27]</sup>、Shui 等<sup>[28]</sup>、Fridrichova<sup>[29]</sup>将从废弃混凝土中分离出的水泥石(约占废弃混凝土总重量的 20%~25%)经煅烧热处理制备出了再生胶凝材料。万惠文等<sup>[30]</sup>利用废弃混凝土以约 60%的比例替代天然石灰石制备出了水泥熟料,废弃混凝土在生料中的比例达到 50%~55%,因未分离出废弃混凝土中的水泥浆体,生料既难烧又难磨,

熟料中 f-CaO 含量过高。万朝均等<sup>[31-32]</sup>利用破碎、分离后的废弃混凝土粗颗粒作为主要配料煅烧水泥熟料,废弃混凝土在生料中的比例提高到 65%。用废弃混凝土制备水泥熟料日益成为继再生集料后又一条综合利用废弃混凝土新的技术途径。而且,随着废弃混凝土在生料中比例的提高,一方面提高了废弃混凝土在水泥工业中的资源化利用率,同时也进一步减少了水泥工业对天然石灰石、粘土、页岩、砂岩等天然材料的消耗,意义重大。以至于王立久等<sup>[33]</sup>提出了全新的水泥生料组分混凝土的概念和设计理论,使混凝土的化学成分与水泥生料相同,进而在废弃后可直接作为水泥生料回收利用。本文以比王立久等更为简单的方法,完全不用天然石灰石和粘土(或页岩、砂岩),用废弃混凝土在生料占 95%~99%的比例制备了水泥熟料。

1 试验原料及方法

1.1 原材料

1.1.1 废弃混凝土 从不同建筑物拆除现场选取 7 个典型废弃混凝土样品,编号 F1—F7。用颚式破碎机破碎至粒径在 20 mm 以下,筛分出粒径为 5~20 mm 的颗粒,经球磨机粉磨至 0.08 mm 方孔筛筛余不大于 10%后进行化学成分全分析,结果如表 1 所示。

表 1 废弃混凝土化学成分											%
样品编号	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	烧失量	合计
F1	14.65	1.14	2.70	0.26	44.41	0.43	0.22	0.52	0.82	32.13	97.28
F2	13.43	1.39	3.65	—	44.91	0.70	0.21	0.43	0.35	34.76	99.83
F3	15.13	1.43	3.60	—	44.81	0.43	0.25	0.45	0.37	31.85	98.32
F4	17.37	2.01	3.43	0.17	42.35	1.21	0.20	0.56	0.80	30.86	98.83
F5	23.07	1.82	3.09	0.19	39.25	1.28	0.14	0.57	1.03	27.10	97.54
F6	18.66	1.51	2.85	0.17	42.25	2.29	0.20	0.56	0.34	31.09	99.92
F7	18.11	1.83	3.36	0.17	40.79	1.48	0.20	0.72	0.30	31.30	99.66

由表 1 可知,不同来源废弃混凝土的主要成分为 CaO 且含量相近,并低于天然石灰石中 CaO 的含量, SiO<sub>2</sub> 含量高于天然石灰石,这是由于废弃混凝土颗粒表面粘结的少量砂浆引入了河砂,该少量河砂正好提供作为烧制水泥熟料的必需元素硅。

1.1.2 其他原料、参比熟料及参比水泥 其他原料有硫酸渣、铁粉、天然二水石膏,均由重庆拉法基水泥厂提供,化学成分如表 2 所示。

参比熟料为重庆拉法基水泥厂用天然石灰石和砂岩制备的用于配制 42.5 级普通硅酸盐水泥的熟料,设计率值为:KH=0.91±0.02,IM=1.4±0.1,

SM=2.6±0.1,化学成分如表 4 所示。参比水泥为拉法基 42.5 级普通硅酸盐水泥。

表 2 其他原料化学成分									%
原料	烧失量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	合计	
硫酸渣	4.83	19.95	6.36	22.82	29.56	10.68	0.60	94.20	
铁粉	—	20.00	12.00	55.00	4.16	0.10	—	92.37	
二水石膏	—	5.00	—	—	30.00	5.00	45.00	85.00	

1.2 试验方法

1.2.1 生料配制 将废弃混凝土破碎、筛分后,粉磨至 0.08 mm 方孔筛筛余不大于 10%,按参比熟料

率值为目标率值配制水泥生料,编号 S1—S6。配料结果见表 3。

所需原料在生料中的重量百分含量/%						按原料化学成分分析结果计算出的率值				
生料编号	废弃混凝土样品代号及用量					铁粉	硫酸渣	KH	IM	SM
S1	F1	F3	F4	F5	小计	0	4.24	0.911	1.340	2.666
	50.03	20.31	8.50	12.93	95.76					
S2	F1	F2	F4	F6	小计	0	4.32	0.911	1.343	2.697
	40.07	17.53	5.48	32.60	95.68					
S3	F1	F4	F7	—	小计	0.96	0	0.911	1.403	2.747
	42.92	25.82	30.30	—	99.04					
S4	F1	F2	F4	F7	小计	1.23	0	0.915	1.486	2.580
	31.00	28.60	21.18	18.01	98.77					
S5	F2	F3	F4	F7	小计	0.96	0	0.890	1.497	2.543
	27.36	35.94	18.91	16.83	99.04					
S6	F1	F4	F5	F7	小计	1.20	0	0.913	1.407	2.734
	17.72	52.89	8.32	19.88	98.80					

注:每组生料中所用废弃混凝土样品均为随机选取

从表 3 可以看出,通过多个废弃混凝土样品的混合配料,各生料样品率值均满足目标率值的设计要求,废弃混凝土含量达到 95%~99%。2010 年中国熟料产量 11.52 亿 t,假设其中的 10%改用表 3 的配料技术生产,则每年消耗废弃混凝土 1.9 亿 t,并同时减少使用天然石灰石 1.45 亿 t、粘土(或页岩、砂岩)0.236 亿 t。由此可见,表 3 所示用废弃混凝土配制水泥生料对提高废弃混凝土利用率,减少使用天然石灰石、粘土质原料等自然资源具有重要意义。

- 1.2.2 熟料煅烧 将硅钼棒高温电炉升温到 800 ℃左右后,放入装有成球后水泥生料的刚玉坩埚,继续升温并控制升温速度为 4~5 ℃/min。升温至 1 450 ℃后保温 30 min 取出,在空气中快速冷却。
- 1.2.3 水泥配制 在煅烧好的水泥熟料中掺入质量分数为 3%(内掺)的天然二水石膏,经球磨机粉磨 40 min 后制得硅酸盐水泥。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 再生熟料的 XRD 分析

图 1 为参比熟料及生料 S1—S6 煅烧出的再生熟料 Z1—Z6 的 XRD 图谱。

从图 1 可以看出:再生熟料的 C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF 特征峰清晰,特征峰位置与参比熟料无差异。

### 2.2 再生熟料化学成分分析及率值检验

上述再生熟料 Z1—Z6 和参比熟料 LFJ 的化学成分分析结果和由此计算出的实际率值如表 4 所示。

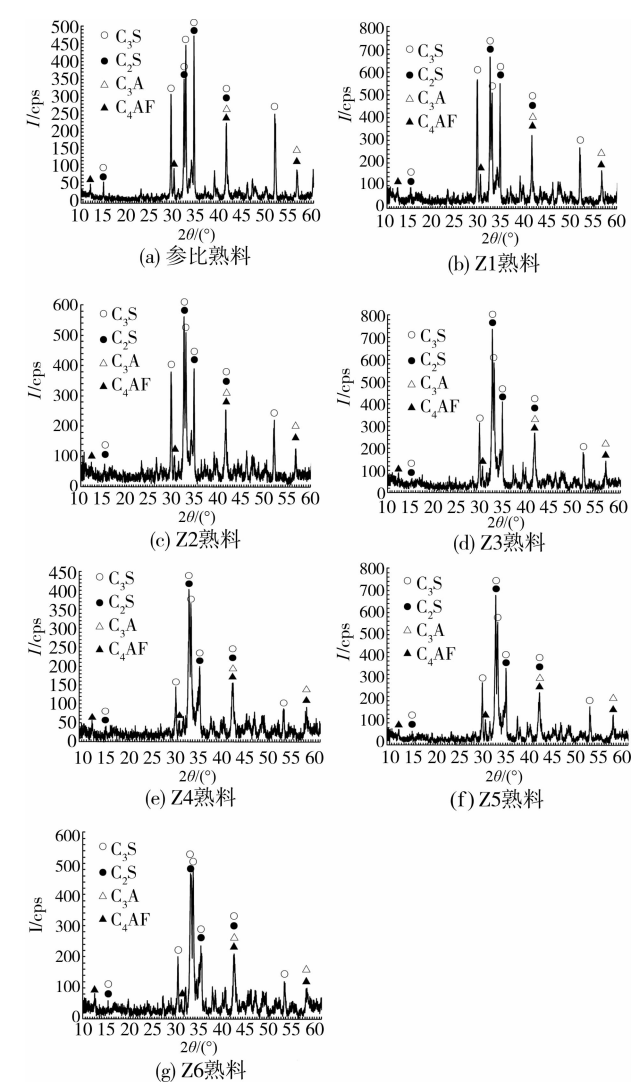


图 1 参比熟料与再生熟料的 XRD 图谱

表 4 再生熟料化学成分分析结果和率值

熟料编号	熟料化学成分/%						按熟料化学成分计算的率值		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	合计	KH	IM	SM
Z1	26.46	4.70	3.22	63.10	1.35	98.83	0.732	1.460	3.341
Z2	25.83	3.69	2.81	63.04	1.70	97.07	0.774	1.313	3.974
Z3	24.08	4.84	3.15	62.60	1.95	96.62	0.867	1.537	3.014
Z4	25.29	4.40	3.57	60.94	2.01	96.21	0.800	1.232	3.173
Z5	27.41	4.47	2.83	58.82	1.75	95.28	0.717	1.580	3.755
Z6	26.36	4.63	3.30	60.36	1.77	97.15	0.731	1.403	3.450
LFJ	21.85	5.19	3.50	64.97	1.90	97.41	0.902	1.483	2.514

由表 4 可知,再生熟料 Z1—Z6 的化学成分与参比熟料相近。其中 SiO<sub>2</sub> 含量略高,CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量略低。

为了进一步分析表 4 熟料率值与表 3 生料率值和设计率值之间的差异,分别作出 KH、IM、SM 率值比较图,如图 2—图 4 所示。

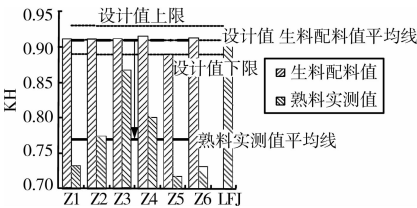


图 2 KH 比较图

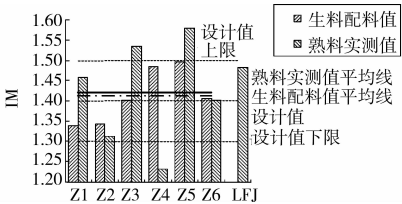


图 3 IM 比较图

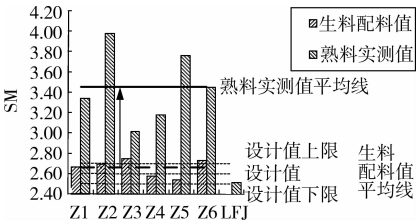


图 4 SM 比较图

从图 2—图 4 可以看出,表 3 中生料率值均在设计率值允许范围内,生料率值的平均值与设计率值几乎重合,说明生料配料满足设计要求;同时可以看出,表 4 中 Z1—Z6 熟料的 KH 值明显小于生料设计的 KH,二者的平均值相差约 0.14,SM 值明显大于生料设计的 SM 值,二者的平均值相差约 0.8,IM 值与生料设计的 IM 基本相符。作者们从现有研究结果中反复分析,暂未找到再生熟料率值与生料化

学成分分析结果计算的率值相差甚至相差较大的确切原因,有待在后续研究中寻找答案。在尚未找到确切原因之前,作者们对上述问题提出如下解决方案:即在今后的配料中,将配制生料时的 KH 设计值从既定的 0.91 提高到 1.05,同时 SM 设计值从既定的 2.6 降低至 1.8,就可以使制得的再生熟料率值与设计目标率值相符,即与用天然石灰石和砂岩制备的熟料的率值接近。该做法可以简单地概括为“高钙低硅法”。从后面的试验结果可以看出,表 4 中再生熟料 Z1—Z6 的 KH 值尽管较低,但仍是性能正常的水泥熟料。

2.3 熟料 f-CaO 含量分析

利用 GB/T 176—2008 规定的乙二醇法对所制备再生熟料的 f-CaO 含量进行测定,并与参比熟料进行对比分析,结果如图 5 所示。

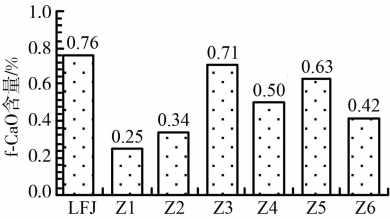


图 5 再生熟料 Z1—Z6 与参比熟料 LFJ f-CaO 含量对比

从图 5 可知,再生熟料 Z1—Z6 的 f-CaO 含量略低于参比熟料,满足安定性要求。

2.4 水泥力学性能试验结果及分析

2.4.1 强度对比试验 将再生熟料 Z1—Z6 及参比熟料按 1.2.3 所述方法配制水泥,对应编号为 SN1—SN6、LFJ,以拉法基 42.5 普通硅酸盐水泥 L42.5 作为参比水泥。将此 8 个水泥样品分别按水灰比 0.5 搅拌成水泥净浆,成型为直径 27 mm、高 27 mm 的圆柱体试件后浸泡在 20±1 ℃ 饱和石灰水中养护,分别测试 3 d 和 28 d 强度,结果如图 6、图 7 所示。

由图 6 可知,除 SN4、SN6 外,其余各组 3 d 抗

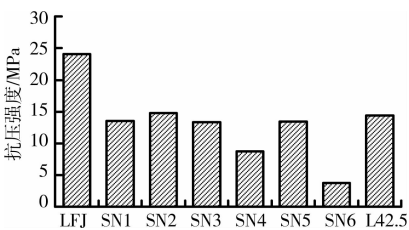


图 6 水泥 3 d 抗压强度对比

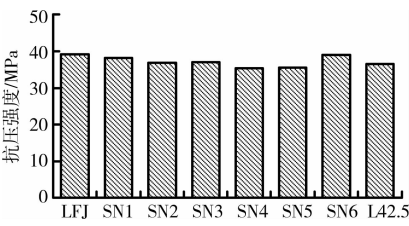


图 7 水泥 28 d 抗压强度对比

压强度与拉法基 42.5 普通硅酸盐水泥相当,但低于用拉法基熟料配制的水泥 LFJ 的 3 d 抗压强度。由表 4 可知,Z1—Z6 的 KH 值均低于生料设计值,结合图 1 的 XRD 图谱,这造成熟料中 C<sub>3</sub>S 含量有所减少,从而导致早期强度偏低。同时,SM 值高于生料设计值使熟料易磨性变差,水泥颗粒相对较粗,从而也导致早期强度降低。

由图 7 可知,SN1—SN6 与由拉法基熟料配制的水泥 LFJ 以及市售拉法基 42.5 普通硅酸盐水泥 L42.5 的 28 d 抗压强度相当。这说明用废弃混凝土制备的水泥,其 3 d 强度虽然相对偏低,但 28 d 强度发展良好。

2.4.2 水泥强度等级标定 根据 2.4.1 中的强度对比测试结果,选取有代表性的 SN1 样品按照 GB/T 17671—1999 标准对其进行胶砂强度测试,并将测试结果与国家标准中 P. I 硅酸盐水泥的强度标准值进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 SN1 水泥胶砂强度试验结果及对比 MPa				
水泥	抗压强度		抗折强度	
	3 d	28 d	3 d	28 d
SN1	18.0	55.6	3.6	7.1
P. I 42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
P. I 42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
P. I 52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
P. I 52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0

从表 5 可以看出,SN1 水泥样品 3 d 和 28 d 强度达到了 42.5 级 P. I 硅酸盐水泥的强度要求,28 d 强度达到了 52.5 级 P. I 硅酸盐水泥的强度标准。综合判定 SN1 水泥样品的强度等级为 P. I 42.5 级。

3 结 论

通过上述废弃混凝土再生水泥熟料的配制与性能研究,得到以下结论。

1)利用多个来源的废弃混凝土混合配料,可以在完全不用天然石灰石、粘土、页岩和砂岩等天然材料的情况下,配制出满足水泥熟料率值范围要求的水泥生料,废弃混凝土在生料中的重量百分含量高达 95%~99%,且无需改变水泥熟料的煅烧工艺。

2)XRD 分析结果表明,用占生料重量百分含量达 95%~99%的废弃混凝土煅烧的熟料中,4 种熟料矿物的特征峰明显,与参比熟料的 XRD 图谱具有相同的特征峰位,化学成分与参比熟料相似。

3)f-CaO 含量测试表明,利用废弃混凝土制备的水泥熟料能满足水泥安定性对该项指标的要求。

4)利用废弃混凝土制备的水泥,3 d 强度相对偏低,28 d 强度发展良好,强度等级达到 42.5 级。

参考文献:

[1] SHI J G, XU Y Z. Estimation and forecasting of concrete debris amount in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 49(2): 147-158.

[2] WINKLER G. Recycling construction and demolition waste: a LEED-based toolkit [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2010: 19-22.

[3] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 3-7, 19-24.

[4] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 11-16, 30-39.

[5] PADMINI A K, RAMAMURTHY K, MATHEWS M S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 829-836.

[6] DE JUAN M S, GUTIERREZ P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 872-877.

[7] TEGGUER A D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 112-116.

[8] LI X P. Recycling and reuse of waste concrete in China: part I. material behaviour of recycled aggregate concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 53(1/2): 36-44.

[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] GAYARRE F L, SERNA P, CABO A D, et al.

- Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties [J]. *Waste Management*, 2009, 29(12): 3022-3028.
- [11] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(1): 9-14.
- [12] ZEGA C J, MAIO A A D. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements [J]. *Waste Management*, 2011, 31(11): 2336-2340.
- [13] LOVATO P S, POSSAN E, MOLIN D C C D, et al. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1): 437-447.
- [14] KOU S C, POON C S. Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60(1): 57-64.
- [15] CORINALDESI V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9): 1616-1620.
- [16] MAS B, CLADERA A, DEL OLMO T, et al. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1): 612-622.
- [17] TABSH S W, ABDEL FATAH A S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 1163-1167.
- [18] GULL I. Testing of strength of recycled waste concrete and its applicability [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(1): 1-5.
- [19] KOU S C, POON C S, ETXEBERRIA M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(2): 286-291.
- [20] 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 and Concrete Composites*, 2011, 33(8): 788-795.
- [21] KHATIB J M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(4): 763-769.
- [22] CABO A D, LAZARO C, GAYARRE F L, et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2545-2553.
- [23] 李秋义, 全洪珠, 秦原. 再生混凝土性能与应用技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2010: 46-66, 83-101.
- [24] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10): 1026-1037.
- [25] ANN K Y, MOON H Y, KIM Y B, et al. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials [J]. *Waste Management*, 2008, 28(6): 993-999.
- [26] KONG D Y, LEI T, ZHENG J J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalamics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(5): 701-708.
- [27] 胡曙光, 何永佳. 利用废弃混凝土制备再生胶凝材料 [J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(5): 593-599.
- HU SHU-GUANG, HE YONG-JIA. Preparation of regenerated binding material using waste concrete [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(5): 593-599.
- [28] SHUI Z H, XUAN D X, WAN H W, et al. Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8): 1723-1729.
- [29] FRIDRICHOVA M. Hydration of belite cement prepared from recycled concrete residues [J]. *Ceramics-Silikaty*, 2007, 51(1): 45-51.
- [30] 万惠文, 钟祥凤, 水中和. 利用废弃混凝土生产绿色水泥的研究 [J]. *国外建材科技*, 2005, 26(2): 1-2, 11.
- WAN HUI-WEN, ZHONG XIANG-HUANG, SHUI ZHONG-HE. Study on the use of recycled concrete in the manufacture of green cement [J]. *Science and Technology of Overseas Building Materials*, 2005, 26(2): 1-2, 11.
- [31] 万朝均, 袁启涛, 刘立军, 等. 废弃混凝土代替天然石灰石煅烧水泥熟料实验 [J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(9): 1012-1017.
- WAN CHAO-JUN, YUAN QI-TAO, LIU LI-JUN, et al. Using waste concrete as a replacement for natural limestone to produce cement clinker [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science*, 2008, 31(9): 1012-1017.
- [32] 万朝均, 彭小芹, 李利, 等. 水泥熟料及其制备方法: 中国, ZL200810069676.0 [P]. 2010-08-25.
- [33] 王立久, 郑芳宇, 迟耀辉. 水泥生料组分混凝土设计理论及试验研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(2): 222-227.
- WANG LI-JIU, ZHENG FANG-YU, CHI YAO-HUI. Theoretical and experimental studies on CCRM concrete [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(2): 222-227.