

再生粗骨料改性试验研究

倪杨洲^{1,2}

1.青海大学土木水利学院 青海 西宁 810016

2.青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室 青海 西宁 810016

【摘要】：将建筑和拆迁垃圾作为骨料回收再利用，不仅可以保护环境，还可以缓解自然资源的短缺。但由于再生骨料破碎值和吸水率较高、表观密度较低等缺点，限制了其在实际工程中的应用。为了拓展再生骨料的应用，本次研究采用沸石粉（Zeolite powder, ZP）、硅灰（Silica fume, SF）和聚乙烯醇（Polyvinyl alcohol, PVA）改性再生粗骨料（Recycled coarse aggregate, RCA）：沸石粉-水泥一次改性、硅灰-水泥一次改性、水玻璃一次改性、沸石粉-水泥+聚乙烯醇二次改性、沸石粉-水泥+水玻璃二次改性、硅灰-水泥+水玻璃二次改性、水玻璃+硅灰-水泥二次改性七种处理方法。结果表明，七种处理方法均能在一定程度上改善 RCA 的性能。同时，通过扫描电镜观察，处理后的 RCA 界面过渡区和水泥基体的裂缝宽度也减小。七种处理中，沸石粉复合水泥裹浆结合 10%浓度水玻璃溶液二次强化的 RCA 性能最优，压碎指标为 8.03%，较未改性降低了 36.5%；吸水率为 4.18%，较未改性降低了 32.1%。

【关键词】：再生粗骨料；二次改性

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.051

作为土木工程领域应用最为广泛的建筑材料之一，混凝土凭借其原材料丰富、加工便捷、成型性能优异及服役寿命长等优势，在现代工程建设中占据重要地位。伴随我国城市化进程的加速推进与交通强国战略的深入实施，基础设施新建及改扩建工程持续增长，导致建筑骨料市场需求持续处于高位运行状态。随着生态环境保护政策的日益严格，传统开山采石作业受到显著制约，导致区域性天然砂石供需矛盾日益凸显。值得注意的是，伴随着我国城镇化进程的加速推进，由此产生的工程固体废弃物总量呈现持续增长态势。据行业统计数据显示^[1]，至 2021 年底我国建筑领域年固废产生量已突破 30 亿吨大关，这一数值较历史同期呈现显著上升趋势。在此背景下，发展机制砂石制备技术及探索替代性建筑材料已成为行业亟待解决的关键课题。

当前，建筑废弃混凝土处置仍以填埋和露天堆存为主要方式，这类粗放型处置模式不仅造成土地资源低效占用，更对城市固废消纳系统形成显著压力。针对这一现状，构建基于再生骨料制备技术的资源化处理体系成为破解混凝土固废治理难题的关键路径之一^[2]。Jing^[3]研究表明通过科学回收建筑拆除物生产的再生混凝土兼具经济效益与环境友好特性，其本质是以技术手段实现自然资源代际储存的可持续发展范式。特别是在全球主要城市群普遍遭遇天然骨料资源紧缺

的背景下^[4]，推进再生骨料规模化制备技术的工程化应用，对于缓解生态环境压力、优化资源利用效率以及推动建筑行业绿色转型具有多维度的战略价值。

综上所述，推进建筑固体废弃物资源化利用已成为现代建筑业绿色转型的必然选择，其中废弃混凝土的高效再生利用更是实现双碳目标的重要技术路径。根据国际实践进展，主要工业化国家在拆除废料再生技术领域已形成系统化解决方案，并设计了相应的工艺和施工规范^[5-6]。以美国为例，在 1982 年制定了建筑垃圾再生利用专项法规框架，系统推进拆除废料转化为混凝土制备用骨料的技术转化^[8]。而日本在该领域的研究探索更为超前，经过数十年发展，该国已构建分类收集-加工处理-循环利用的全流程体系，其建筑废弃物的资源化利用率已达到 95%以上的高水平^[7]。我国自“十一五”规划将建筑固废资源化纳入循环经济重点工程以来，大量高校和科研院所进行了相关研究，并取得了一定的研究成果^[9]。我国建筑行业资源循环利用技术研究对于实现双碳战略目标具有重要现实意义，其中再生混凝土制备技术作为关键研究方向备受瞩目。现阶段该技术的工程应用主要集中于道路基层填筑等低强度场景，而在房屋建筑等砂石骨料需求量大、强度要求高的领域尚未实现规模化应用。制约其推广的核心因素在于再生粗骨料的材料性能缺

陷：再生骨料普遍存在孔隙率偏高、抗压强度偏低等特性，直接导致再生混凝土材料的力学性能和耐久性指标难以满足结构工程要求。因此，如何通过骨料强化工艺改善再生骨料的物理力学性能，突破再生混凝土在承重结构中的应用瓶颈，已成为当前固体废弃物资源化利用领域亟待解决的关键技术难题。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

采用的胶凝材料：P.O 42.5 普通硅酸盐水泥、硅灰、矿渣（S90）、沸石粉，其主要成分见下表 1。再生粗骨料（Recycled Concrete Aggregate, RCA）：来自青海省西宁市湟中区多巴镇吕大林砂石厂，粒径范围为 5mm~20mm 连续级配。天然粗骨料（Natural Coarse Aggregates, NCA）为破碎卵石，粒径范围为 5mm~20mm 连续级配，其质量均符合 GB/T 14685-2011《建设用卵石、碎石》。NCA 表面致密、光滑，而 RCA 表面疏松多孔，较为粗糙，二者的表各项性能见下表 2。

表 1 胶凝材料的主要成分

名称	化学组成							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
水泥	20.80 %	7.44 %	3.74 %	51.10 %	0.83 %	3.22 %	1.02 %	0.41 %
硅灰	84.70 %	0.29 %	2.57 %	0.82 %	2.89 %	0.32 %	1.65 %	0.91 %
沸石粉	70.10 %	14.50 %	1.10 %	1.45 %	1.04 %	0.04 %	4.07 %	1.28 %
矿渣	31.00 %	10.90 %	0.42 %	39.70 %	6.20 %	2.20 %	0.46 %	0.37 %

表 2 粗骨料的主要指标

名称	表观密度	含水率	吸水率	压碎指标
RCA	2537	3.52%	6.16%	12.64%
NCA	2714	0.18%	0.40%	3.82%

1.2 再生粗骨料的改性处理

为了改善 RCA 的性能，本次研究设计了八种不同的处理方法，分别为沸石粉-水泥（ZP-C）一次改性（A1）、硅灰-水泥（SF-C）一次改性（B1）、水玻璃一次改性（C1）、沸石粉-水泥+聚乙烯醇二次改性（A2）、沸石粉-水泥+5%水玻璃二次改性（A3）、沸石粉-水泥+10%水玻璃二次改性（A4）、硅灰-水泥+5%水玻璃二次改性（B2）、5%水玻璃+硅灰-水泥二

次改性（C2）。

再生粗骨料裹浆前应清洗干净，以避免附着在上面的杂质粉尘等与水泥硅灰浆液发生反应，影响改性效果。将洗净后的再生骨料放入烘箱中烘干后取出并冷却至室温。

1.2.1 沸石粉-水泥浆体裹浆

制备水泥-沸石粉浆液时，首先精确称量 P·O 42.5 水泥与天然沸石粉（质量比 19:1），拌匀后置于容器中，然后按质量 1:1 的比例加入足量的水，充分搅拌直至容器底部没有沉淀的水泥和沸石粉。将预处理骨料完全浸入制备好的水泥-沸石粉浆液中进行充分搅拌。搅拌 120s 后将再生骨料取出，放在筛子上沥去多余的水泥-沸石粉浆液，置于恒温恒湿标准养护环境（控制温度 20±2℃、相对湿度不低于 90%）中养护 28d。

1.2.2 硅灰-水泥浆体裹浆

制备水泥-硅灰浆液时，首先精确称量 P·O 42.5 水泥与硅灰（质量比 9:1），拌匀后置于容器中，然后按质量 1:1 的比例加入足量的水，充分搅拌直至容器底部没有沉淀的水泥和硅灰。将预处理骨料完全浸入制备好的水泥-硅灰浆液中进行充分搅拌。搅拌 120s 后将再生骨料取出，放在筛子上沥去多余的水泥-硅灰浆液，置于恒温恒湿标准养护环境(控制温度 20±2℃、相对湿度不低于 90%)中养护 28d。

1.2.3 水玻璃强化

用 5%（10%）的水玻璃溶液对其进行改性。将准备好的再生骨料均匀的浸泡在 5%(10%)的水玻璃溶液中 10h，中途每 2h 搅拌一次，使骨料与水玻璃溶液充分反应，浸泡完成后取出骨料，沥去表面多余溶液，摊铺于干燥通风处 24h 使其自然晾干。

1.2.4 聚乙烯醇强化

本次试验使用 10%的 PVA 溶液对再生骨料进行二次改性。Kou 等^[10]试验中发现用 PVA 溶液浸泡再生骨料可以很好的改善其憎水性并提升再生混凝土耐久性，且 PVA 溶液浓度 10%时效果最佳。

试验先将再生骨料用水泥-沸石粉浆液裹浆处理，并在标准条件下养护 28d 后取出备用。晾晒 24h 后用 10%的 PVA 溶液对其进行二次处理。将一次改性处理后的再生骨料浸入 10%PVA 溶液中 24h，中途每 4h 搅拌一次，使骨料得到充分浸泡。浸泡完成后，清除表面多余的 PVA 凝胶，把粘在一起的骨料分离开。最后将清理后的骨料摊铺于干燥通风处 24h 使其自然晾干。

1.3 测试方法

RCA 的宏观试验方法及具体步骤参照 GB/T 14685-2011《建筑用卵石、碎石》进行,包括 RCA 的压碎指标、吸水率、表观密度。

2 结果与讨论

2.1 宏观性能实验结果

从表 3 结果可以看出,通过不同浆液和溶液的预涂覆和预浸泡,RCA 的宏观性能得到了一定程度的改善。

表 3 不同改性方法处理再生粗骨料的宏观性能

名称	表观密度 (Kg/m ³)	吸水率 (%)	压碎指标 (%)
RCA	2537	6.16	12.64
A1	2650	5.06	9.54
A2	2633	3.95	8.85
A3	2623	4.36	8.23
A4	2631	4.18	8.03
B1	2617	5.58	9.96
B2	2654	4.75	9.12
C1	2642	4.47	10.4
C2	2646	5.13	8.78

2.2 试验结果分析

图 1、图 2 为 RCA 经过不同方法处理后的吸水率、压碎指标。通过压碎指标和吸水率这两个表征再生骨料力学性能与耐久性的关键参数,系统评价各改性方法的处理效果。压碎指标直接反映骨料抵抗破碎的能力,而吸水率则影响混凝土工作性和长期耐久性。从结果可以看出,通过不同浆液和溶液的预涂覆和预浸泡,RCA 的宏观性能得到了一定程度的改善。

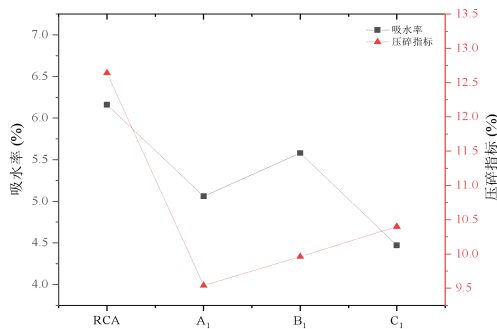


图 1 一次改性处理

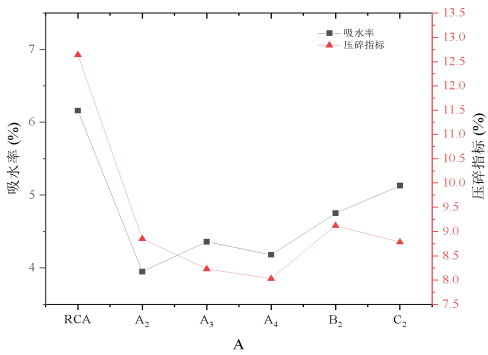


图 2 二次改性处理

2.2.1 一次改性处理

由图 1 可知,不同水泥基浆体改性处理对再生粗骨料性能提升效果存在差异。其中,沸石粉-水泥复合浆体改性体系表现出最为显著的力学性能提升效果,其压碎值指标较未处理基准组降低达 24.5%,同时骨料 24h 吸水率下降 17.9%。该体系通过火山灰二次水化反应生成 C-S-H 凝胶体,有效填充了骨料表面微裂纹及内部孔隙结构,从而提升了骨料机械性能并降低其亲水特性。硅灰-水泥复合浆体体系同样表现出良好的改性效果,其压碎指标和吸水率分别实现 21.2%和 9.4%的降幅。值得注意的是,虽然硅灰有较强的孔隙填充能力,但其在浆体中的团聚效应可能限制了渗透深度,这可能是导致吸水率改善幅度相对较低的关键因素。相比之下,水玻璃一次改性在改善压碎指标(降低 17.7%)的同时,实现了吸水率 27.4%的显著降低,展现出独特的双重改善效果,这种“双改善”效应可能源于水玻璃在骨料表面形成的致密硅酸凝胶层,既增强了界面过渡区(Interfacial Transition Zone,ITZ)强度,又有效封闭了表面孔隙。

2.2.2 二次改性处理

沸石粉-水泥+PVA 二次改性:实验结果表明,采用聚乙烯醇溶液对沸石粉-水泥裹浆改性后的骨料进行二次处理,其综合性能得到显著提升,压碎指标较一次改性骨料降低 7.2%,较未改性骨料降幅达 30.0%。吸水率较一次改性降低 21.9%,较未改性降低了 35.9%。这表明 PVA 有效强化了骨料界面结构。PVA 的疏水特性使其在骨料表面形成致密保护层,显著改善了孔隙结构。

沸石粉-水泥+水玻璃二次改性:在沸石粉-水泥裹浆的基础上进行水玻璃二次改性处理,显著降低了骨料的压碎指标和吸水率,且显示出明显的浓度梯度效应:(1) 5%水玻璃溶液处理:压碎指标较一次改性

降低了 13.7%，较未改性降幅达 34.9%；吸水率较一次改性降低 13.8%，较未改性降低了 29.2%。(2) 10% 水玻璃溶液处理：压碎指标较一次改性降低了 15.8%，较未改性降低了 36.5%；吸水率较一次改性降低 17.4%，较未改性降低了 32.1%。

硅灰-水泥+水玻璃二次改性：压碎指标较一次改性降低了 8.4%，较未改性降低 27.8%；吸水率较一次改性降低 14.9%，较未改性降低了 22.9%。这主要得益于水玻璃与裹浆层中的氢氧化钙发生二次水化反应，生成了 C-S-H 凝胶，改善了裹浆层的孔隙结构。

水玻璃+硅灰-水泥二次改性：压碎指标较一次改性降低了 15.6%，较未改性降低 30.5%；吸水率较未改性降低了 16.7%，较一次改性增加了 14.8%。压碎指标的降低，主要得益于水化反应生成的 C-S-H 凝胶体填充骨料表面微裂纹。

2.3 微观分析

为了研究 RCA 的微观性能，观察了不同处理的试样和对照试样的微观结构，ITZ 和 RCA 粘附的旧水泥基体的微观形态如图 3 所示。图 3 显示，RCA 的 ITZ 具有明显的微裂纹，RCA 中的水泥基质具有一些较大的孔隙。主要原因可能是 RCA 在制备的过程中，由于机械的破碎工艺致使 ITZ 与水泥基质（Cement matrix, CM）发生结构性损伤，形成具有连通特征的微裂纹网络和孔隙缺陷，这些裂缝与孔洞是导致 RCA 性能较差的主要因素^[11-12]。

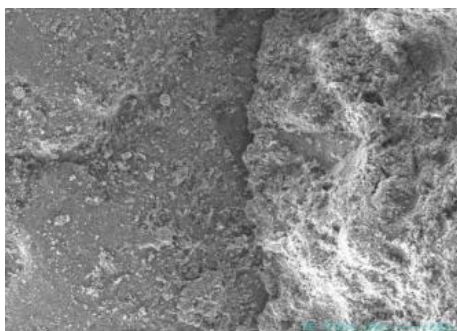


图 3 RCA (×200)

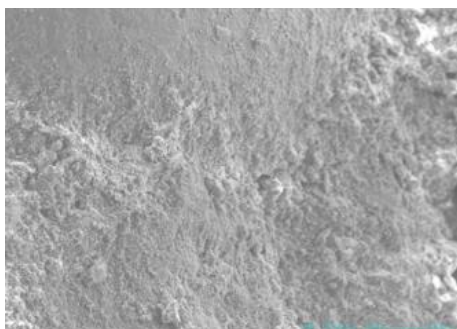


图 4 ZP-C 改性 (×200)

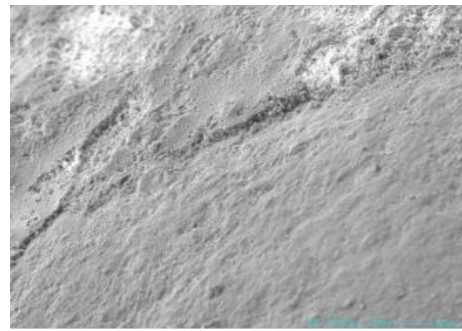


图 5 SF-C 改性 (×200)

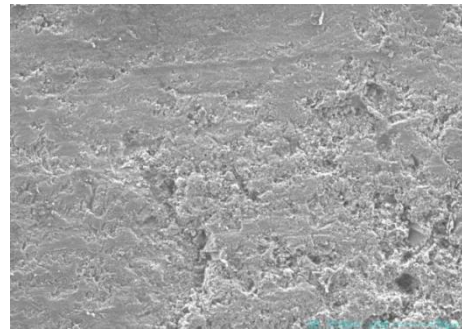


图 6 水玻璃改性 (×200)

由图 6 可见，用 5% 水玻璃溶液浸泡的 RCA，其 CM 与 ITZ 区域的微观缺陷虽有所改善，但孔隙闭合程度仍存在局限。相较而言，硅灰复合水泥包覆（SF-C）工艺使 CM-ITZ 界面处生成大量水化硅酸钙凝胶，有效填充了裂隙并缩减孔隙尺寸，如图 5 所示。而沸石粉复合水泥改性（ZP-C）体系展现出更优的微观修复效果，由图 4 可见，大部分的裂缝与孔洞被大量水化产物填充，裂缝宽度与孔径得到明显的减小。

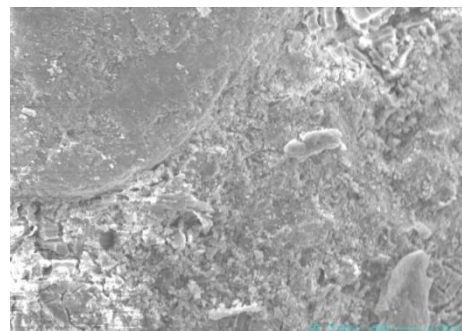


图 7 ZP-C+PVA 二次改性 (×500)

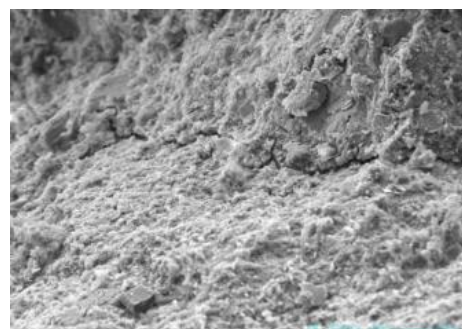


图 8 ZP-C+10%水玻璃二次改性

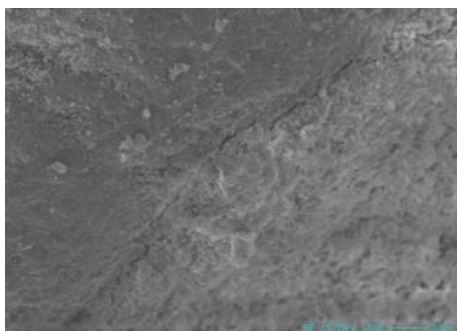


图9 SF-C+5%水玻璃二次改性 (×500)

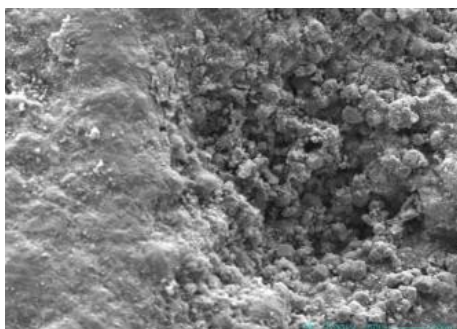


图10 5%水玻璃+SF-C 二次改性 (×500)

相较于一次改性,二次改性的改善效果更加明显,如图7和图8所示,在沸石粉-水泥裹浆的基础上,PVA分子通过交联作用强化了骨料界面结构,同时其疏水特性在骨料表面形成致密保护层,改善了孔隙结构;相较于前者,水玻璃处理后的骨料 ITZ 与 CM 更加密实。图9和图10显示了用 SF-C+水玻璃二次改性和水玻璃+SF-C 二次改性后再生骨料的微观形态。前者在 SF-C 处理的基础上,进一步降低了水泥基体的孔隙率,而后者,虽然 ITZ 和旧水泥基体更加致密,但 SF-C

裹浆层的孔隙仍然存在,极大影响的 RCA 的性能。两者相比, SF-C+水玻璃二次改性处理具有更明显的改善作用。

3 结论

本试验采用八种不同化学方法处理 RCA,对处理前和处理后的 RCA 分别进行宏观试验和微观试验分析。主要结论如下:

(1) 宏观试验结果表明:各化学改性工艺均能有效改善骨料物理性能指标。强化效果顺序为:沸石粉-水泥+10%水玻璃二次改性>沸石粉-水泥+5%水玻璃二次改性>沸石粉-水泥+聚乙烯醇二次改性>硅灰-水泥+水玻璃二次改性>水玻璃+硅灰-水泥二次改性>沸石粉-水泥一次改性>硅灰-水泥一次改性>水玻璃一次改性。以沸石粉复合水泥裹浆结合 10%浓度水玻璃溶液二次强化的 RCA 性能最优,压碎指标为 8.03%,较未改性降低了 36.5%;吸水率为 4.18%,较未改性降低了 32.1%。

(2) 微观试验结果表明:硅灰、沸石粉复合水泥裹浆(SF-C、ZP-C)工艺使 CM-ITZ 界面处生成大量水化硅酸钙凝胶,有效填充了裂隙并缩减孔隙尺寸,增强了 RCA 的密实度。

(3) 硅灰-水泥+水玻璃二次改性的 RCA 压碎指标较未改性降低 27.8%,吸水率较未改性降低了 22.9%;而水玻璃+硅灰-水泥二次改性的 RCA 压碎指标较未改性降低 30.5%,吸水率较未改性只降低了 16.7%。这一现象表明改性顺序对最终性能具有决定性影响。

参考文献:

- [1] Oikonomou N. Recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 315-318.
- [2] Marinkovic S, Radonjanin V, Malesev M, et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete[J]. Waste Management, 2010, 30(11): 2255-2264.
- [3] Ma J. Study on the economic feasibility of recycled concrete[C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 573: 203-206.
- [4] Cabral A E B, Schalech V, Dal Molin D C C, et al. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 421-430.
- [5] 李惠强, 杜婷, 吴贤国. 建筑垃圾资源化循环再生骨料混凝土研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 83-84.
- [6] SOARES D, BRITO J D, FERREIRA J, et al. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: mechanical and durability performance[J]. Construction & Building Materials, 2014, 71(71): 263-272.
- [7] BROTO J D, FERREIRA J, PACHECO J, et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2016(6): 1-16.

- [8] 刘锬,陈宣东,黄达.再生混凝土的研究现状及未来研究趋势分析[J].混凝土,2020,6:47-50.
- [9] 蒋正武,尹军.可持续混凝土发展的技术原则与途径[J].建筑材料学报,2016,19(06):957-963.
- [10] Kou S C,Poon C S.Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates[J].Cement and Concrete Composites,2010,32(8):649-654.
- [11] Topcu I B.Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete[J].Cement and Concrete Research,1997,27(12):1817-1823.
- [12] Poon C S,Shui Z H,Lam L.Strength of concretes prepared with natural and recycled aggregates at different moisture conditions[M].Advances in Building Technology.Elsevier,2002:1407-1414.