

文章编号: 1004-4353(2018)04-0369-06

C40 玻璃自密实再生混凝土 配合比的设计研究

王宗强, 方光秀*, 薛白杨, 贺小婷, 王永
(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为研究废弃玻璃与粉煤灰在自密实再生混凝土中的最佳取代率,在再生粗骨料取代率为 20% 的基础上,利用废弃玻璃取代天然细骨料(比例分别为 0%、10%、20%、30%),同时等梯度增加粉煤灰取代水泥的比例(分别为 20%、30%、40%).通过测定混凝土坍落扩展度判定混凝土的流动性,并测定混凝土的 7、14、28、56 d 抗压强度.试验结果表明,当废弃玻璃与粉煤灰的最佳取代率分别为 20% 和 30% 时,自密实再生混凝土的力学性能和经济性达到最佳.

关键词: 废弃玻璃; 自密实混凝土; 再生混凝土; 粉煤灰

中图分类号: TU528.041

文献标识码: A

The study and design of C40 waste glass self-compacting recycled concrete mix

WANG Zongqiang, FANG Guangxiu*, XUE Baiyang, HE Xiaoting, WANG Yong
(*Institute of Technology of Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: In order to study the optimal substitution rate of waste glass and fly ash in self-compacting recycled concrete, the paper substitutes the rate of replacement of natural fine aggregate by 20% on the basis of controlling the replacement ratio of recycled coarse aggregate to 0%, 10%, 20%, 30%. At the same time, the proportion of fly ash instead of cement is equal to 20%, 30%, 40%. The fluidity of concrete was determined by measuring the slump expansion of concrete and the compressive strength of concrete at 7 d, 14 d, 28 d and 56 d was measured. The experimental results show that: when the optimum substitution rates of waste glass and fly ash are 20% and 30%, respectively, the mechanical properties and economic performance of recycled concrete from the close chamber are optimal.

Keywords: waste glass; self-compacting concrete; recycled concrete; fly ash

0 引言

随着我国经济的快速发展,废弃玻璃也日益增多.资料显示,我国每年产生的废弃玻璃为 450~750 万 t,约占城市商业废料量的 6%~11%,但得到回收利用的仅有 2%^[1].文献[2]显示,我国每年产生的废弃混凝土达 1 亿 t.目前,由于废弃玻璃和

废旧混凝土缺乏有效利用途径,通常采用填埋方式对其进行处理.该方式不仅占用宝贵的土地资源,而且极易破坏生态环境;因此,研究废弃材料的回收利用对社会的可持续发展具有重要意义.

混凝土是一种多相人工复合材料.文献[3]的研究表明,当再生骨料取代率小于 30% 时,再生混凝土与普通混凝土的力学性能差别不大;当取

代率超过 30%时,再生混凝土将不能按普通混凝土设计. I. B. Topcu 等^[4]对废弃玻璃(尺寸 4~16 mm)取代天然骨料制成的混凝土的物理力学性能进行了研究,结果表明新拌混凝土的坍落度随废弃玻璃取代率(0%~60%)的增加而降低,而工作性与流动性能随废弃玻璃取代率的增加而增强. 刘光焰^[5]研究了以废弃玻璃为粗骨料配制的混凝土,结果表明新拌废弃玻璃骨料混凝土的和易性优于天然骨料混凝土,且和易性随着玻璃骨料取代率的增加而提高;另外,各个龄期所对应的混凝土的抗压强度随着玻璃骨料取代率的增加而降低. 王海娟等^[6]研究了玻璃颜色对混凝土抗压强度的影响,结果表明玻璃颜色对混凝土抗压强度无明显影响. 王凤池等^[7]将废弃玻璃以 0%、20%、40%、60%、80%、100%的质量比分别取代了天然骨料,并分别掺入了粉煤灰、矿渣粉(以 20%的质量比取代水泥),结果表明当废弃玻璃的取代率在 20%~40%区间时,该方法配制的玻璃再生混凝土的抗压强度均略低于普通玻璃混凝土. 在文献^[7]研究的基础上,本文以废弃玻璃取代天然骨料的比率、粉煤灰取代水泥的比率为主要双变量,研究不同配合比的玻璃自密实再生混凝土的工作性及抗压性能.

1 原材料与配合比的设计

本文参照文献^[2]和文献^[5]的自密实混凝土与再生混凝土的配合比计算方法进行设计. 首先确定再生粗骨料取代天然粗骨料的比率,为 20%;其次,用废弃玻璃按等质量取代天然细骨料,取代率分别为 10%、20%、30%. 用废弃玻璃部分取代天然细骨料的同时,选取粉煤灰按等质量取代部分水泥,取代率分别为 20%、30%、40%. 按上述方法设计出废弃玻璃自密实再生混凝土的 12 种配合比,并测试各配合比的工作性能与力学性能,以此得出最佳取代率和配合比.

1.1 原材料的选用

水泥选用按照国家现行标准检验合格的吉林亚泰水泥有限公司生产的低水化热的亚泰牌 PO 42.5 普通硅酸盐水泥. 粗骨料为延吉市产的 5~25 mm 连续级配的花岗岩碎石;细骨料为河砂(延吉市产),细度模数 $M_x=2.5$,级配区为Ⅱ区.

粉煤灰来自坤盛建材公司,为Ⅰ级. 聚羧酸高效减水剂为方胜建材有限公司生产的聚羧酸减水剂母液,减水率为 20%. 废弃玻璃为延吉市废品收购站回收的平板玻璃,经过筛选、清洗、晾干后用锤式破碎机破碎并筛分,细度模数 $M_x=3.2$,级配区为Ⅰ区. 水为延吉市生活用自来水. 再生粗骨料为延吉市住建检测中心的废弃混凝土试块,经颚式破碎机破碎后,筛分成 5~15 mm 和 16~20 mm 的粒径.

1.2 配合比设计

研究^[8]显示,用废弃玻璃取代部分天然细骨料、再生粗骨料取代部分天然粗骨料,会导致混凝土的强度降低. 在保证混凝土设计强度的前提下,本试验的废弃玻璃自密实再生混凝土的设计强度为 C40,试验的基准配合比参照《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)进行. 由于玻璃自身吸水性极差,因此新拌混凝土易出现泌水现象. 搅拌时若加入增黏剂等添加剂,虽然可防止泌水,但会增加成本. 为此,本试验选用Ⅰ级粉煤灰按等质量取代部分水泥,这样不仅可有效控制泌水,降低成本,而且能够提高混凝土的后期强度.

废弃玻璃自密实再生混凝土的参数为:胶体总量为 527 kg/m³,水胶比为 0.31,粉煤灰取代水泥的比例为 20%、30%、40%,废弃玻璃取代天然细骨料的比例为 10%、20%、30%,减水剂掺量为 1.6%~2.7%,坍落扩展度不小于 550 mm. 各试样的配合比如表 1 所示.

表 1 废弃玻璃自密实再生混凝土配合比表 kg/m ³							
试样	水泥	粉煤灰	砂	玻璃	石子	再生石	水
基准组 1	421.6	105.4	805	0	704	176	163
BL1-2	421.6	105.4	724.5	80.5	704	176	163
BL2-2	421.6	105.4	644	161	704	176	163
BL3-2	421.6	105.4	563.5	241.5	704	176	163
基准组 2	368.9	158.1	805	0	704	176	163
BL1-3	368.9	158.1	724.5	80.5	704	176	163
BL2-3	368.9	158.1	644	161	704	176	163
BL3-3	368.9	158.1	563.5	241.5	704	176	163
基准组 3	316.2	210.8	805	0	704	176	163
BL1-4	316.2	210.8	724.5	80.5	704	176	163
BL2-4	316.2	210.8	644	161	704	176	163
BL3-4	316.2	210.8	563.5	241.5	704	176	163

2 试验方案

2.1 流动性检测试验

混凝土搅拌完成后,立即对混凝土进行流动性检测.本文主要利用坍落拓展度来评价新拌混凝土的工作性.试验方法为:①先用湿布润湿坍落度桶和拌板;②将已经搅拌好的混凝土一次性(不分层)注入坍落度桶内,不振捣;③在 5~10 s 内提起坍落度桶;④待混凝土静止时,用卷尺测出混凝土扩展后能达到的最大直径,并测出与该直径垂直的直径,然后取两者平均值作为测量结果;⑤目测混凝土拌合物的粘聚性和保水性.

2.2 抗压性能检测试验

参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),按表 1 配制出 12 组混凝土,同时每组制作 12 个 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试块(在混凝土装模时,一次性将混凝土注入试模内,不振捣).试块用塑料布覆盖后在室温(20±5)℃环境中静置 24 h 后脱模.拆模后的试件立即放在标准养护室内养护,养护龄期分别为 7、14、28、56 d.采用 10 000 N/s 的加载速度测试混凝土试件的抗压强度.

3 试验结果与分析

3.1 废弃玻璃自密实混凝土的工作性

利用数值分析软件 Origin 9.0 对试验检测结果进行拟合.废弃玻璃自密实再生混凝土坍落扩展度与废弃玻璃取代率之间的关系,如图 1 所示.

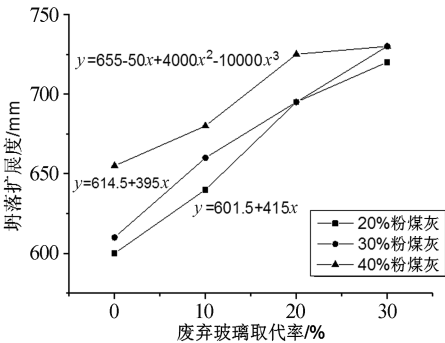


图 1 废弃玻璃取代率与坍落扩展度的关系

由图 1 可知:3 种粉煤灰取代率(20%、30%、40%)下,混凝土的坍落扩展度随废弃玻璃取代率的增加而增大;当废弃玻璃取代率为 30%时,3 种粉煤灰取代率(20%、30%、40%)的混凝土的坍落

扩展度比废弃玻璃取代率为 0%时分别提高了 20.0%、19.7%、11.5%.当废弃玻璃取代率为 10%时,粉煤灰取代率为 30%的混凝土的坍落扩展度比粉煤灰取代率为 20%的提高了 20 mm;当废弃玻璃取代率为 30%时,粉煤灰取代率为 30%的混凝土的坍落扩展度比粉煤灰取代率为 20%的提高了 10 mm;当废弃玻璃取代率为 10%时,粉煤灰取代率为 40%的混凝土的坍落扩展度比粉煤灰取代率为 30%的提高了 20 mm;当废弃玻璃取代率为 20%时,粉煤灰取代率为 40%的混凝土的坍落扩展度比粉煤灰取代率为 30%的提高了 40 mm.这是因为废弃玻璃表面比天然细骨料光滑,且流动性更好.另外,从粉煤灰材料本身来看,由于粉煤灰内含大量玻璃体,能够减少混凝土各物质之间的摩擦力,从而改善其和易性.因此,选用废弃玻璃和粉煤灰分别取代部分天然细骨料和水泥,能够改善混凝土的和易性.同时,这种取代还可节约水泥,增强可泵性,符合自密实混凝土的泵送要求.

3.2 废弃玻璃取代率对抗压强度的影响

不同粉煤灰取代率下,废弃玻璃取代率与混凝土立方体试件不同龄期抗压强度之间的关系如图 2—图 4 所示.

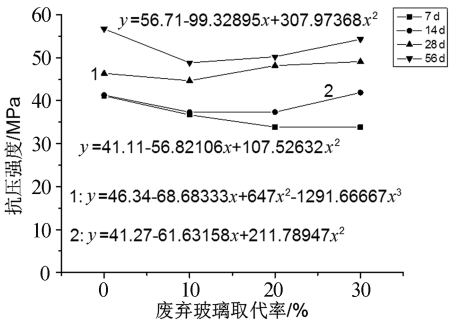


图 2 粉煤灰取代率为 20%时,废弃玻璃取代率与试件不同龄期抗压强度的关系

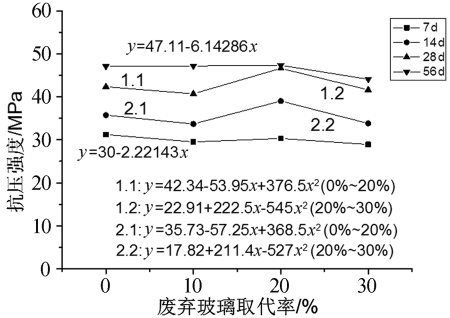


图 3 粉煤灰取代率为 30%时,废弃玻璃取代率与试件不同龄期抗压强度的关系

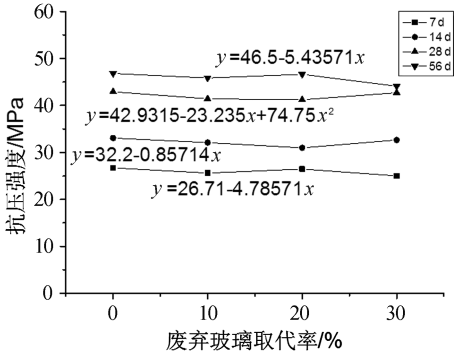


图 4 粉煤灰取代率为 40% 时, 废弃玻璃取代率与试件不同龄期抗压强度的关系

由图 2 可知: 试件的 7 d 抗压强度拟合方程为 $y=41.11-56.82x+107.53x^2$ ($R^2=0.99$). 随着废弃玻璃取代率的增加, 抗压强度呈下降的趋势. 试件的 14、28、56 d 抗压强度拟合方程分别为 $y=41.27-61.63x+211.79x^2$ ($R^2=1$)、 $y=46.34-68.68x+647x^2-1291.67x^3$ ($R^2=1$)、 $y=56.71-99.33x+307.98x^2$ ($R^2=0.99$). 试件 BL3-2 (废弃玻璃取代率为 30% 的试件) 的抗压强度与基准组 1 相比, 7 d 抗压强度低于基准组 1 17.8%, 但 14、28 d 抗压强度分别高于基准组 1 1.5%、5.9%; 与同组的 BL1-2、BL2-2 相比, 除 7 d 抗压强度低于 BL1-2、BL2-2 以外, 14、28、56 d 抗压强度均高于 BL1-2、BL2-2 同龄期的抗压强度. 因此, 当粉煤灰取代率为 20% 时, 最佳废弃玻璃取代率为 30%.

由图 3 中可知: 当粉煤灰取代率为 30% 时, 试件的 7 d 抗压强度拟合方程为 $y=30-2.22x$ ($R^2=0.99$). 试件的 14 d 抗压强度, 当废弃玻璃取代率为 0%~20% 时, 其拟合方程为 $y=35.73-57.25x+368.5x^2$ ($R^2=0.99$); 当废弃玻璃取代率为 20%~30% 时, 其拟合方程为 $y=17.82+211.4x-527x^2$ ($R^2=0.99$). 试件的 28 d 抗压强度, 当废弃玻璃取代率为 0%~20% 时, 其拟合方程为 $y=42.34-53.95x+376.5x^2$ ($R^2=1$); 当废弃玻璃取代率为 20%~30% 时, 其拟合方程为 $y=22.91+222.5x-545x^2$ ($R^2=1$). 试件的 56 d 抗压强度拟合方程为 $y=47.11-6.15x$ ($R^2=0.99$). 试件 BL2-3 (废弃玻璃取代率为 20% 的试件) 的抗压强度与基准组 2 相比, 7 d 抗压强度降低了 0.05%, 但 14、28 d 抗压强度分别提高了 9.2%、10.1%; 与同组的 BL1-3、BL3-3 相比, 7、

14、28、56 d 抗压强度均高于 BL1-3、BL3-3 同龄期的抗压强度. 因此, 当粉煤灰取代率为 30% 时, 最佳废弃玻璃取代率为 20%.

由图 2 和图 3 可知, 试件的 14、28、56 d 抗压强度均随废弃玻璃取代率的增加而呈先降低后增加的趋势. 这是由于在早期混凝土试件中存在较多的毛细孔隙, 且水泥中的碱与废弃玻璃中的活性 SiO_2 反应生成复杂的碱-硅酸凝胶 (ASR); 生成的凝胶不断吸水, 使凝胶体积不断膨胀, 进而填充毛细孔隙. 凝胶的膨胀值随着玻璃取代率的增加而增大, 当凝胶的膨胀值较小时, 凝胶填满试件内的空隙; 而凝胶的膨胀值较大时, 凝胶使试件裂缝增多, 从而降低混凝土试件的强度^[9]. 因此, 当粉煤灰取代率为 20% 时, 废弃玻璃取代率为 30% 的试件的膨胀值最佳; 当粉煤灰取代率为 30% 时, 废弃玻璃取代率为 20% 的试件的膨胀值最佳.

另外, 由图 2 和图 3 还可知, 废弃玻璃可降低混凝土的抗压强度, 而且会减缓早期强度的提高. 但当粉煤灰取代率为 20% 时, 混凝土的抗压强度随着废弃玻璃取代率的增加 (10%~30% 范围内) 而增大. 废弃玻璃取代率为 30% 的试件, 其 14、28 d 抗压强度高于基准组. 减缓混凝土早期强度的原因是: ①废弃玻璃表面光滑, 与水泥浆体的结合能力弱于天然骨料, 因此界面结合强度低. ②废弃玻璃的主要成分是 SiO_2 , 其在混凝土中的作用类似于火山灰, 能够降低混凝土中水泥水化热, 推迟水化热峰值. 混凝土后期强度得到提高的原因是: 废弃玻璃中的活性物质对碳铝酸盐的生成有催化作用, 而对硫铝酸盐的生成起抑制作用, 水化碳铝酸盐能够与其他水化物发生反应, 加强水泥结构的密实程度.

由图 4 可知: 当粉煤灰取代率为 40% 时, 混凝土的 7、14、28、56 d 抗压强度值分别为 25.95、32.2、42.06、45.845 MPa. 该值比粉煤灰取代率为 20% 的同龄期混凝土的抗压强度分别降低了 28.7%、18.4%、10.6%、18.9%, 该值比粉煤灰取代率为 30% 的同龄期混凝土的抗压强度分别降低了 13.5%、9.2%、1.8%、1.2%. 另外, 试件各龄期的抗压强度并未随废弃玻璃取代率的增加而发生明显变化, 即废弃玻璃取代率的变化对试件抗压强度的影响较小.

3.3 粉煤灰取代率对抗压强度的影响

3 种粉煤灰取代率(20%、30%、40%)下,混凝土试件的各龄期抗压强度与废弃玻璃取代率的关系,如图 5—图 8 所示。

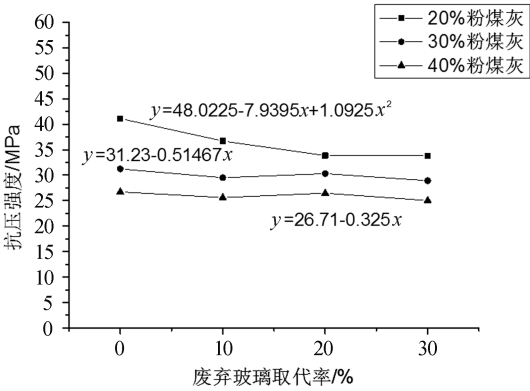


图 5 试件的 7 d 抗压强度

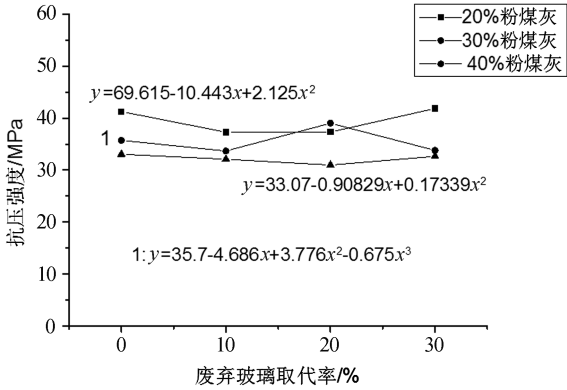


图 6 试件的 14 d 抗压强度

由图 5—图 8 可以看出,随着粉煤灰取代率的增加,各龄期废弃玻璃自密实再生混凝土的抗压强度总体呈降低的趋势,其中 7 d 抗压强度的降低趋势最为明显。这是因为,当粉煤灰掺量过高时,水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不足以充分激发粉煤灰的活性,使得由粉煤灰的密实效应和活性效应所带来的混凝土强度不足以补偿因水泥用量减少而引起的强度下降。通过拟合方程可知,粉煤灰取代率为 20%、30%、40%时,方程截距分别为 26.71、31.23、48.02。由图 6 和图 7 可以看出,当粉煤灰取代率为 20%时,混凝土的 14、28 d 抗压强度与废弃玻璃取代率均满足 3 次函数关系,拟合方程式分别为 $y = 35.7 - 4.69x + 3.78x^2 - 0.68x^3$ ($R^2 = 0.99$)、 $y = 42.34 + 5.06x + 4.2x^2 - 0.739x^3$ ($R^2 = 0.99$)。试件 BL3-2 的抗压强度显著高于试件 BL3-3 和 BL3-4。

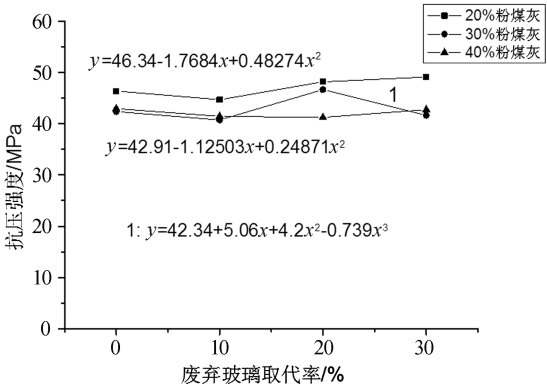


图 7 试件的 28 d 抗压强度

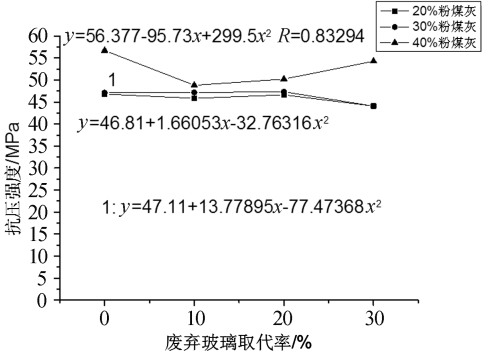


图 8 试件的 56 d 抗压强度

4 结论

- 1) 以废弃玻璃和再生骨料复掺等量取代天然骨料,并且以等梯度增加粉煤灰等量取代水泥而配制的混凝土,可提高混凝土的坍落扩展度,其中废弃玻璃的作用效果相对明显。当废弃玻璃的取代率超过 30% 以后,易产生泌水的现象,同时增加粉煤灰取代率对坍落扩展度的影响不大。因此,在玻璃自密实再生混凝土中,废弃玻璃对天然细骨料的取代率不宜超过 30%。
- 2) 当再生粗骨料取代天然粗骨料的比率为 20%、废弃玻璃取代天然细骨料的比率为 30%、粉煤灰取代水泥的比率为 20% 时,玻璃自密实再生混凝土的 28 d 抗压强度得到显著提高。当废弃玻璃的取代率超过 30% 时,增加粉煤灰取代率不仅降低 28 d 的抗压强度,而且不利于后期强度的增加。
- 3) 通过正态分布得出,本文提出的废弃玻璃自密实再生混凝土的最佳粉煤灰取代率为 20%、废弃玻璃取代率为 30%。该结果可为今后玻璃自密实再生混凝土的配合比设计与应用提供参考。

4)按本文得出的粉煤灰最佳取代率计算,每制备 1 万 m³ 混凝土,可以节约 1 054 t 水泥,节约资金约 484 840 元(依据延吉市 2017 年的水泥和粉煤灰价格),同时分别可减少 SO₂、NO₂、氟化物的排放约 1 264.8、2 529.6、31.62 kg. 另外,用废弃玻璃代替天然砂,每 1 万 t 可节约垃圾处理费用约 6 000 元. 由此可以看出,双掺粉煤灰和废弃玻璃的混凝土不仅具有良好的经济效益,而且十分有利于环境的保护.

参考文献:

[1] 刘连新. 利用玻璃研制轻骨料及轻混凝土[J]. 新型建筑材料,2002(4):16-17.
[2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] 张绩. 自密实再生混凝土性质及力学研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
[4] Topçu İ B, Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass[J]. Cement and Concrete Research, 2004,34(2):267-274.
[5] 刘光焰. 废弃玻璃骨料混凝土性能的实验与理论研究[D]. 广西:广西大学,2010.
[6] 王海娟,张义顺,赵继芬,等. 利用废弃玻璃粉细掺料制备混凝土试验研究[J]. 河南理工大学学报, 2012,31(5):608-612.
[7] 王凤池,王振伟,张霓,等. 废玻璃集料对混凝土强度的影响[J]. 新型建筑材料,2011(11):12-14.
[8] 虞春龙,袁勇,水口裕之,等. 自密实再生混凝土试验研究[J]. 低温建筑技术,2011(6):6-7.
[9] 阮雪琴. 利用废弃玻璃制备自密实混凝土的研究[J]. 工业建筑,2015,45(10):126-131.
[10] 黄冈,宋奕臻. 废弃玻璃在水泥混凝土中的应用[J]. 房地产周刊,2015(25):433-435.

~~~~~  
(上接第 368 页)

参考文献:

[1] 周卓然,徐道连,吕凤飞,等. 基于 FPGA 的 VGA 图像显示系统的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2012(7):90-92.  
[2] 王亮,李正,宁婷婷,等. VGA 汉字显示的 FPGA 设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2009,30(2):275-281.  
[3] 杜宗展,王振河,冯迎春. 基于 FPGA 的 VGA 图像显示系统的设计[J]. 现代电子技术,2015,38(16): 95-99.  
[4] 郑争兵,赵峰. 基于 FPGA 的 LED 显示屏控制系统的设计与实现[J]. 陕西理工大学学报(自然科学

版),2015,31(2):25-29.  
[5] 袁堂青,张玉璘. 基于 FPGA 的 VGA 汉字显示系统设计及实现[J]. 济南大学学报(自然科学版),2011, 25(1):36-39.  
[6] 韩团军,赵峰. 基于 FPGA 的 M4K 块配置 ROM 字符数据存储 VGA 显示[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2016,32(5):22-27.  
[7] 陈权,朱卫华,曹亮,等. 基于 FPGA 的图像叠加及 VGA 显示设计[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2017,31(3):55-59.  
[8] 郑争兵. 基于 FPGA 的 VGA 波形显示系统设计与实现[J]. 液晶与显示,2014,29(1):88-93.