

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.006

粉煤灰对再生混凝土抗压及耐久性能试验研究

张浩博, 任慧超, 寇佳亮

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过再生混凝土压碎指标、抗渗、抗冻和抗硫酸盐侵蚀试验,研究了不同掺量粉煤灰对再生混凝土力学性能和耐久性能的影响。试验结果表明:20 MPa、25 MPa、30 MPa的再生骨料混合比例为1:1:2时压碎值最小;粉煤灰取代10%水泥时其28 d抗压强度比未掺加粉煤灰时高出60%左右;粉煤灰取代10%~20%水泥时其抗渗性能有明显提高;粉煤灰取代10%水泥时,在冻融循环达到100次,其相对横弹模仍大于60%;粉煤灰取代15%左右水泥时其抗硫酸盐侵蚀能力最好;抗侵蚀后质量损失率不明显。研究结果表明:粉煤灰在一定程度上对再生混凝土力学性能和耐久性能有明显提高,对废弃混凝土再利用有着重要意义。

关键词: 再生骨料;再生混凝土;粉煤灰;抗压性能;耐久性能

中图分类号: TU502⁺.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)04-0410-06

Experimental study of the effect of fly ash on compressive performance and durability of the recycled aggregate concrete

ZHANG Haobo, REN Huichao, KOU Jialiang

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper investigates the variable admixture of flyash effecting on the properties and durability of recycled concrete, through crush index, compressive strength, permeability, frost resistance and sulfate corrosion resistance tests. The results indicate that the crushing value reaches to minimum when the mixed proportion of recycled aggregates is 1:1:2 at 20 MPa, 25 MPa and 30 MPa. Besides, the 28-day compressive strength of concrete, when the substitution ratio of flyash for cement is 10%, is about 60% higher than that of concrete without flyash. The impermeability can be significantly improved when the substitution ratio ranges from 10% to 20%. In addition, if 10% of cement is replaced by flyash, after 100 cycles of freezing and thawing, elastic modulus for concrete remains higher than 60% of before. The concrete resistance to sulfate corrosion approaches maximum when the substitution ratio is about 15%. Also, mass loss rate is not significant after the tests of frost resistance and resistance to sulfate corrosion. Thus, flyash can improve the mechanical properties and durability of the recycled aggregate concrete in certain extent. Moreover, it is of significance in recycling waste concrete.

Key words: recycled aggregate; recycled aggregate concrete; flyash; compressive performance; durability

废弃混凝土对自然资源的占用及其对环境造成的负面影响越来越严重,混凝土材料的可持续发展成为了当今社会关注的重点之一^[1]。将废弃的混凝土

土块经过破碎、清洗和分级后,按一定比例与级配混合,部分或全部代替砂石等天然集料(主要是粗集料),再加入水泥、水等配制成一种新型混凝土,即再

收稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408487);中国住建部科学技术资助项目(2014-K2-037);中国博士后科学基金第56批面上资助项目(2014M562437);陕西省自然科学基金资助项目(2014JQ7292);陕西省教育厅专项科学研究计划资助项目(14JK1516);陕西省博士后科研资助项目;西安市建设科技研究资助项目(SJW2015-09);西安理工大学科学研究计划资助项目(118-211403)

作者简介: 张浩博,男,副教授,研究方向为高性能混凝土技术。E-mail: jiancai@xaut.edu.cn

通讯作者: 寇佳亮,男,副教授,研究方向为高层建筑结构抗震性能。E-mail: jlkou@xaut.edu.cn

生混凝土。再生骨料与天然骨料确实存在着一定的差别,例如,再生骨料具有较高的孔隙率,其吸水率比天然骨料高,密度却比天然骨料低。废弃混凝土经过破碎处理,生产出的再生骨料表层含有大量的水泥砂浆,这些水泥砂浆大多都独立成块,只有少量附着在天然骨料之上,而再生骨料表面砂浆的强度及附着率对再生混凝土强度影响较大^[2],配制而成的混凝土表现出吸水率高、密度低、孔隙率大和耐久性差等特征。

针对这一问题,胡琼等^[3]通过对再生混凝土界面显微结构的分析,提出添加粉煤灰等矿物掺合料可以改善再生混凝土的强度和耐久性能。粉煤灰属于活性掺合料,首先,它具有微骨料效应,其内部含有的微细颗粒在水化反应时可以填充水泥浆中的孔隙和毛细孔;再次,粉煤灰中包含有大量非晶态的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,通过二次反应能大幅增加胶凝物质(C-S-H)的数量,改善水泥石与集料间的界面结构,降低混凝土内部结构中水泥石的孔隙率,增强混凝土密实性,对再生混凝土抗压强度以及耐久性有着很好的改良作用^[4]。

基于上述研究,本课题组通过再生混凝土中掺加不同比例粉煤灰,研究不同粉煤灰掺量对再生混凝土抗压性能及耐久性能的影响程度,对废弃混凝土再利用有着重要意义。

1 试验原材料及配合比

试验原材料分别为:水泥采用P.O 42.5秦岭牌水泥;粉煤灰采用铜川热电厂二级粉煤灰,45 μm 筛余为13.5%,需水量比为99%,烧失量为4.3%,用粉煤灰超量(超量系数 $K=1.5$)取代水泥(取代率分别为0%、10%、15%、20%);天然粗骨料采用泾河天然碎石,10 mm~40 mm连续级配;再生粗骨料:30%取代天然粗骨料,采用混凝土试块经破碎加工而成,10 mm~40 mm连续级配,骨料强度采用25 MPa,经压碎指标测试由等级三配制而成^[5],详见表1和表2;细集料采用渭河天然河砂,细度模数为2.5;水采用自来水;外加剂采用宇超牌UNFJW-1萘系高效减水剂,掺量为水泥质量的1.0%;配合比^[6]:配制C25混凝土时,理论水灰比计算值为0.596,结合再生混凝土本身性质,以及加入了1%的减水剂,试验所用配合比取为0.52。故 $m_c:m_s:m_g:m_w=1:2.31:3.77:0.52$ (其中 $m_c:m_s:m_g:m_w$ 表示水泥、砂、石和水的质量比)。考虑再生骨料本身特性,用再生集料替代天然集料会致使混凝土用水量增加,故取 $m_w=195\text{ kg}$, $S_p=38\%$ (其中 m_w 为水的质量; S_p 表示砂率,即砂与砂加石的质量比),各组分含量如表1所示。

表1 再生骨料混凝土各组分含量

Tab.1 The content of recycled aggregate concrete components

组别	水泥/ (kg/m^3)	粉煤灰/ (kg/m^3)	粗骨料/(kg/m^3)		细骨料(砂)/ (kg/m^3)	减水剂/ (kg/m^3)
			天然粗骨料	再生粗骨料		
0%	375	0	990	424.28	866.82	3.75
10%	337.5	56.25	990	424.28	843.81	3.38
15%	318.75	84.38	990	424.28	837.81	3.19
20%	300	112.50	990	424.28	827.88	3.00

2 试验内容

2.1 再生骨料级配试验

再生骨料的压碎指标一般要大于天然骨料的压碎指标,压碎指标越小再生骨料混凝土强度越接近天然骨料混凝土。试验中笔者选择20 MPa、25 MPa、30 MPa三个强度等级的再生粗骨料压碎试样,并把三种强度骨料用方孔筛10 mm、40 mm筛析,存储足够骨料。之后以不同比例把三种再生粗骨料混合起来,通过压碎指标实验(每组骨料总量取为3 kg)^[7],观察各强度骨料不同混合比例下的压碎指标,最后取最小筛余值(压碎指标)组作为再生粗骨料来源,结果如表2、表3所示。

表2 再生骨料级配

Tab.2 The gradation of recycled aggregate

等级	不同强度等级下的级配		
	20 MPa	25 MPa	30 MPa
等级一	25%	25%	50%
等级二	25%	50%	25%
等级三	50%	25%	25%

表3 压碎值

Tab.3 Crushing value

等级	2.5 mm 筛余/kg	压碎值/kg	筛余百分数/%
等级一	2.522	0.478	15.9
等级二	2.440	0.560	18.7
等级三	2.464	0.536	17.9

2.2 抗压强度试验

再生混凝土抗压试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体,每 3 个为 1 组,4 个掺量共 4 组。本试验搅拌机采用 HJW-60 型搅拌机,将成型好的试件放置 1 天后拆模,之后送入标准养护室养护至 28 d 龄期^[8]。最后,采用 WAW-1000D 微机电液伺服万能试验机测定再生混凝土抗压强度^[9]。试件劈裂面如图 1 所示。



图 1 抗压试验试件劈裂面

Fig. 1 The cleaving surface of compression test

2.3 抗渗试验

再生混凝土抗渗试件采用上口内部直径为 175 mm、下口内部直径为 185 mm 和高度为 150 mm 的圆台体,1 组为 6 个试件,4 组掺量共 24 个试件。密封材料用水泥加黄油按质量比 3:1 进行配制,时间达到 28 d 龄期后在侧面涂抹密封材料,之后用 Y67-1 液压式数显压力机采用螺旋加压方式将试件压入试件套。抗渗试验采用 HP-40 型自动加压混凝土渗透仪进行测试。此次试验采用逐级加压法,设定下限为 0.2 MPa,上限为 1.2 MPa,记录第 3 个试件出现渗水现象时的水压,计算抗渗等级。抗渗试件如图 2 所示。

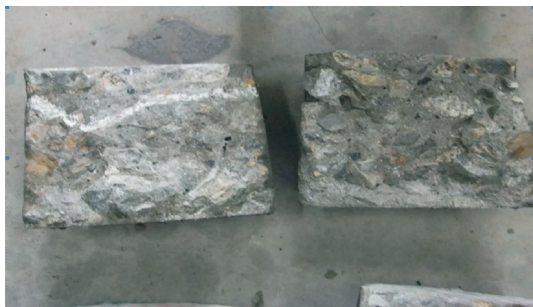


图 2 抗渗试验试件渗透面

Fig. 2 The seepage surface of impermeability test

2.4 抗冻试验

抗冻试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,每组 3 个,4 个掺量加上 1 个测温试件共 13 个试件。达到 28 d 龄期的前 4 d 将试件放入 (20±2) °C 的水中养护四天,在达到 28 d 龄期

后放入 HDK-9 型快速冻融循环试验机^[10]。试件如图 3 所示。抗冻试验采用快速冻融法,每个冻融循环设定为 2.5 h,以相对横向动弹性模量和质量损失率作为衡量标准,每 25 个冻融循环测试一次,当相对横向动弹性模量下降至初始值的 60% 时停止试验。



图 3 抗冻试验试件

Fig. 3 The specimen of frost resistance test

2.5 抗硫酸盐侵蚀试验

抗硫酸盐侵蚀试验溶液采用无水硫酸钠与自来水配制,配制 5% 硫酸钠溶液, $\rho_{\text{溶液}} = 1.04 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,全部溶解,未出现结晶,配制完成后将溶液倒入 NJW-LS 型电脑控制混凝土硫酸盐干湿循环试验机。试件采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体,各粉煤灰掺量试件共制成 5 组,标准强度测试试件 1 组,对比测试试件 2 组,抗硫酸盐侵蚀试件 2 组,每组 3 个试块,4 个掺量共 60 个试件。试件如图 4 所示。在达到 28 d 龄期的前 2 天将试件取出放入烘箱, (80±2) °C 温度下持续烘烤 48 h,之后取出试件放入干湿循环试验机内进行测试,每个干湿循环时间为 24 h^[12],分别测试 15 次干湿循环后试件质量变化率及耐侵蚀系数。

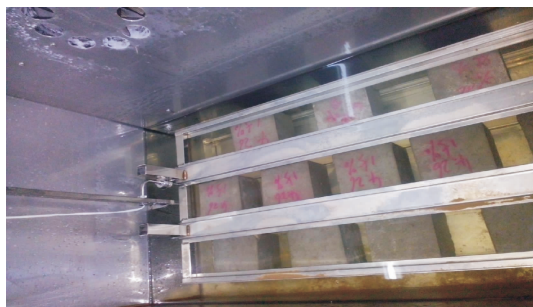


图 4 抗硫酸盐侵蚀试验试件

Fig. 4 The specimens of corrosion resistance test

3 试验结果与分析

3.1 抗压强度

由图 5 可知,再生混凝土试件的抗压强度在一定程度上随粉煤灰掺量的增加呈现出先增后减的趋

势;在粉煤灰取代 10%左右水泥时,其抗压强度最高,达到 40.4 MPa,高出未掺粉煤灰再生混凝土抗压强度 60%左右,并且在掺量达到 20%时其强度仍高于未掺粉煤灰混凝土。

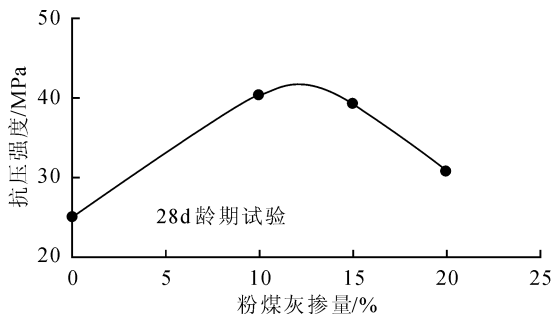


图 5 再生骨料混凝土抗压强度曲线

Fig. 5 The curve of recycled aggregate concrete strength values

3.2 抗渗试验

抗渗试验采用逐级加压法,混凝土的抗渗等级根据每组 6 个试件中有 4 个未发现渗水状况时的最大水压力来表示,其抗渗试验结果如图 6 所示。

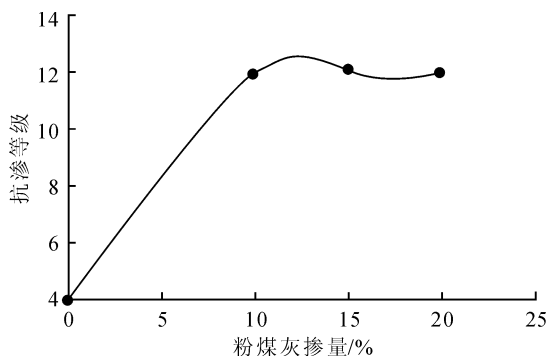


图 6 再生混凝土的抗渗等级曲线

Fig. 6 The curve of level of permeability of recycled concrete

由图 6 可知,当粉煤灰掺量分别为 0%、10%、15%、20%时,再生混凝土的抗渗等级分别为 P4、P12、P12、P12,并且在一定程度上随粉煤灰掺量的增加其抗渗等级有所提高,在粉煤灰掺量为 10%~20%时,其抗渗等级均达到 P12,相比未掺加粉煤灰试件其抗渗性能有明显提高。

3.3 抗冻试验

抗冻试验采用快冻法,试验过程中,分别用动弹仪和天平测试了冻融循环次数为 0、25、50、75 和 100 次时试件的横向自振频率(详见表 4),根据表 4 测出的横向自振频率,可计算出各掺量的相对横向动弹性模量,并绘制出各组相对横向动弹性模量变化曲线,如图 7 所示。由表 4 和图 7 可知,再生凝

土的相对横向动弹性模量随着冻融循环次数的增加而降低。在冻融循环达到 40 次之前时,掺量 10%的一组减小趋势最小,0%和 20%的两组减小趋势最大且曲线基本重合;而在 60 次冻融循环之后,掺量 10%的一组减小趋势仍最小,20%那一组减小趋势最大,而 10%和 15%两组曲线较为接近且变化趋势居两者之间。冻融循环达到 50 次时,4 个掺量的再生混凝土的相对横向动弹性模量均大于 60%;当达到 75 次冻融循环时,粉煤灰掺量为 20%的试件相对横向动弹性模量为 54%;当循环次数达到 100 次时,粉煤灰掺量为 0%的试件相对横向动弹性模量为 59.9%,粉煤灰掺量为 15%的试件相对横向动弹性模量为 58.1%;100 次循环过后粉煤灰掺量为 10%的试件相对横向动弹性模量为 81.3%,仍大于 60%。

表 4 再生混凝土横向自振频率

Tab. 4 Recycled concrete horizontal natural frequency of vibration

粉煤灰掺量/%	N 次冻融循环后横向自振频率/Hz				
	N=0	N=25	N=50	N=75	N=100
0	721	610	598	573	558
10	681	650	663	638	614
15	743	669	625	593	566
20	758	642	619	558	527

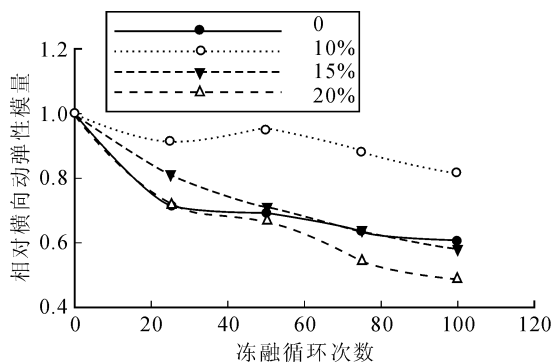


图 7 冻融试验相对横向动弹性模量变化曲线图

Fig. 7 The curves of relative transverse elastic modulus

3.4 抗硫酸盐侵蚀试验

抗硫酸盐侵蚀试验采用完全浸泡法,经 15 次干湿循环后其质量损失率及耐蚀系数变化如表 5、6 所示。

由表 5 可知,随粉煤灰掺量增加,质量损失率呈现出先减后增之后又减小的变化趋势,且在掺量为 10%~15%之间存在最小值,但总体上 4 组质量变化都不是很大,减小最大的 0% 掺量组亦未超过 3%。

表5 再生混凝土试件侵蚀前后质量

Tab. 5 Quality of recycled concrete specimens before and after erosion

粉煤灰掺量/%	侵蚀前/kg	侵蚀后/kg	质量损失率/%
0	2.403	2.335	2.80
10	2.328	2.317	0.47
15	2.455	2.439	0.65
20	2.387	2.376	0.46

表6 再生混凝土试件侵蚀试验强度

Tab. 6 The strength of recycled concrete erosion test specimens

粉煤灰掺量/%	28 d 标准/MPa	侵蚀后强度/MPa	对比组强度/MPa	耐蚀系数
0	28.5	27.5	34.03	0.898
10	40.6	47.78	52.03	0.918
15	42.4	49.27	49.5	0.995
20	29.5	32.95	35.13	0.938

注:对比组强度为28 d龄期后浸在清水中试件的强度。

在表6可知,15次干湿循环过后,四组掺量的耐蚀系数表现出先增后减的变化趋势。

通过以上分析可知,再生混凝土的质量损失率和耐蚀系数随粉煤灰掺量的增加不呈现同比变化。其中耐蚀系数随粉煤灰掺量的增加而呈现出先增后减的趋势,粉煤灰掺量在15%左右时,其耐蚀系数最高,抗侵蚀性能最好。

3.5 粉煤灰对再生混凝土抗压及耐久性能影响程度分析

粉煤灰具有微集料效应,并且包含有大量非晶态(或称玻璃态)的 SiO_2 、 Al_2O_3 ,掺入粉煤灰后,活性二氧化硅(SiO_2)可以和水水泥水化反应中产生的游离氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)发生二次反应,生成稳定和强度高的水化硅酸钙,明显改善再生骨料混凝土内部的孔隙结构,增强混凝土密实性。

其次,粉煤灰颗粒经过高温燃烧形成,大部分是玻璃微珠,它的外表比较光滑,由硅铝玻璃体组成,球形颗粒的显著特点就是表面光滑,进入混凝土内部起到很好的润滑作用。混凝土内部破坏往往不在粉煤灰颗粒界面发生,而在水泥凝胶部分发生。恰好粉煤灰颗粒在水泥浆体中有良好的分散状态,从而有助于混凝土的均匀性改善,还能充填和细化混凝土中的孔隙和毛细孔,从而提高再生混凝土的强度和耐久性。

最后,由于粉煤灰混凝土前期强度发展缓慢,后期强度发展速度有所提高。当粉煤灰过量时,其内部大部分活性二氧化硅在早期来不及与混凝土内部氧化铝等一些物质反应,不能有效降低混凝土孔隙

率,反而会降低再生混凝土的抗压强度和耐久性。

4 结论

1) 再生骨料混凝土内部加入粉煤灰后,能有效减小其内部孔隙和毛细孔数量,改善混凝土均匀性,进而增强再生混凝土的密实性,从而提高其强度和耐久性。

2) 在一定范围内,再生骨料混凝土抗压强度随粉煤灰掺量的增加呈现出先增后减的趋势,并且掺量为10%~15%时其强度最高。

3) 掺入一定程度的粉煤灰后再生混凝土的抗渗性能有了明显的提高,并且抗渗性能随其掺量的增加有很大提高,在粉煤灰掺量为10%~20%时,其抗渗性能最好,达到P12。

4) 再生混凝土的抗冻性能较弱,添加一定量的粉煤灰对再生混凝土的抗冻性能有一定的影响。试验结果表明,当粉煤灰掺量10%左右时,对再生混凝土抗冻性能有明显提高,随着粉煤灰掺量的提高,对再生混凝土的抗冻性能的影响不显著。

5) 在5% Na_2SO_4 溶液环境下,随着粉煤灰掺量的变化,侵蚀外观无太大变化,但从再生混凝土劈裂破坏的断裂界面和侵蚀面来看,未侵蚀混凝土破坏均匀性较好,侵蚀混凝土内粘结性恶化,破坏面不平整。且在粉煤灰掺量为15%左右时其抗硫酸盐侵蚀效果最好。

参考文献:

- [1] 邹超英, 范玉辉, 胡琼. 冻融循环后再生混凝土基本力学性能试验[J]. 建筑结构学报, 2010, 40(S1): 434-438.
ZHOU Chaoying, FAN Yuhui, HU Qiong. Experimental study on the basic mechanical property of recycled concrete after freeze-thaw[J]. Building Structure, 2010, 40(S1): 434-438.
- [2] 崔正龙, 路沙沙, 汪振双. 再生骨料特性对再生混凝土强度和碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 264-267.
CUI Zhenglong, LU Shasha, WANG Zhenshuang. Influence of recycled aggregate on strength and anti-carbonation properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 264-267.
- [3] 胡琼, 宋灿, 邹超英. 再生混凝土力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 33-36.
HU Qiong, SONG Can, ZHOU Chaoying. Experimental research on the mechanical properties of recycled concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 33-36.

- [4] 宋少民, 杨柳, 徐国强. 石灰石粉与低品质粉煤灰复掺对混凝土耐久性能的影响[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S2): 368-372.
SONG Shaomin, YANG Liu, XU Guoqiang. Influence of limestone powder and low quality fly ash on the durability of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 368-372.
- [5] 寇世聪, 潘志生. 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, 2010, 40(1): 7-11.
KOU Shicong, POON Chisun. Effect of quality of parent concrete on the mechanical behavior of high performance recycled aggregate concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic society, 2010, 40(1): 7-11.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程:JGJ55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [7] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准:JGJ52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [8] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法:GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- (责任编辑 王绪迪, 王卫勋)

(上接第 402 页)

- [8] 李钊, 李鸿. 几种去噪方法的比较与改进[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(8): 9-10.
LI Zhao, LI Hong. Comparison and several de-noising methods[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(8): 9-10.
- [9] 张雅兰. 扫描图象二值化处理的研究[J]. 广西光学院学报, 2002, 13(3): 26-28.
ZHANG Yalan. A study of binarization processing of scanning image [J]. Journal of Guangxi Institute of Light, 2002, 13(3): 26-28.
- [10] 陈杰, 王振华, 窦丽华. 一种尺度自适应 Canny 边缘检测方法[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 79-84.
CHEN Jie, WANG Zhenhua, Dou Lihua. Scale adaptive canny edge detection method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 79-84.
- [11] OHTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. Systems Man & Cybernetics IEEE Transactions on, 1979, 9(1): 62-66.
- [12] 于亚龙, 穆远彪. 插值算法的研究[J]. 现代计算机, 2014, 007(05): 32-35.
YU Yalong, MU Yuanbiao. Research on interpolation algorithms[J]. Modern Computer, 2014, 007(05): 32-35.
- [13] 毛永明, 祁宁, 张东伟, 等. 智能交通系统车牌字符分割研究[C]//第十二届沈阳科学学术年会, 第十二届沈阳科学学术年会论文集, 沈阳, 2015.
MAO Yongming, QI Ning, ZHANG Dongwei, et al. Intelligent transportation system character segmentation study [C]//The Twelfth Annual Conference of Science and Technology in Shenyang, Shenyang Science Twelfth Annual Conference Proceedings, Shenyang, 2015.
- (责任编辑 周 蓓)