

用于北方满族民居墙体的再生混凝土性能研究

沙东¹, 孙建刚^{2,3}, 郝进锋¹, 王振², 崔利富²

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大连民族大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116605;
3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过试验研究了再生混凝土作为北方满族民居建造材料的可行性。研究重点: 再生骨料的物理性质测定、再生混凝土基本力学性能试验, 以及粉煤灰、聚丙烯纤维以及附加水对其力学性能的影响。通过试验得到, 再生混凝土立方体抗压强度最高应力达 37.1 MPa、轴心抗压强度平均应力 28.4 MPa、静力受压弹性模量平均应力 22 300 MPa、抗折强度平均应力 3.8 MPa、劈裂抗拉强度平均应力 1.68 MPa。结果表明: 在再生混凝土中加入粉煤灰和聚丙烯纤维都对立方体抗压强度有所提高, 但附加水的加入对立方体抗压强度产生了降低作用。整体来说, 再生混凝土各方面的力学指标都能满足一定的强度要求。因此可以作为北方满族民居的建设材料。

关键词: 再生混凝土; 立方体抗压强度; 弹性模量; 抗折强度; 劈裂抗拉强度

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0460 (2017) 01-0042-06

DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2017.01.014

Research on Properties of Recycled Concrete for the Wall of Manchu Houses in the North

SHA Dong¹, SUN Jian-gang^{2,3}, HAO Jin-feng¹, WANG Zhen², CUI Li-fu²

(1. College of Architecture & Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China;
2. College of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Liaoning Dalian 116605, China ;
3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract: The feasibility of using recycled concrete as the construction material for northern Manchu houses was studied by the experiments. This study focused on determination of physical properties of recycled aggregate, recycled concrete basic mechanical properties, as well as impact of fly ash, additional water and fiber polypropylene on mechanical properties. The experiment results show that the highest compressive strength of recycled concrete cube is 37.1 MPa, the average axial compressive stress is 28.4 MPa, the mean stress of static compression modulus of elasticity is 22 300 MPa, flexural strength mean stress is 3.8 MPa, the average stress of splitting tensile strength is 1.68MPa. Adding fly ash and polypropylene fibers can improve recycled concrete cube compressive strength, but adding additional water can decrease the compressive strength. In general, mechanical indexes of all aspects of recycled concrete can meet certain strength requirements. Therefore, it can be used as building materials for northern Manchu houses.

Key words: recycled concrete; cube compressive strength; modulus of elasticity; flexural strength; splitting tensile strength

近年来,随着我国经济发展和城市化进程加快,城市基础设施建设、维修、拆除中产生的废弃混凝土总量与日俱增。废弃混凝土不仅占用土地资源,污染环境,而且有损城市形象。废弃混凝土的妥善处理 and 再生利用^[1],已成为城市发展需要解决的当务之急。再生混凝土作为一种节能环保的新材料,必将对建筑废弃物处理与资源化利用起到非常重要的作用。到目前为止,国内外在该领域进行了一系列的研究并取得了许多成果^[2-7]。以上的研究大部分都是针对再生混凝土用于高强建筑的问题和强度提高的研究,忽略了再生混凝土本身强度较低的事实。

而本文则是根据再生混凝土由于骨料的原因,其强度普遍较低这一现象,将其用于低矮建筑领域,以体现再生混凝土更合适的力学效果。我国北方的满族民居多数是自建,以单层平房为主,其竖向承载力不大,对墙体的力学性能要求不高,材料强度要求较低,再生混凝土完全可以满足其建造要求,可以用于北方满族民居的建造中。此类研究既可以改善当地生活质量、充分利用资源保护环境,又可以对少数民族建筑的文化遗产起到积极促进作用,可谓是利国利民,一举多得。

基金项目: 中央财政部分自主基金项目: 0916/110108/辽宁满族民居节能环保防灾一体化研究。

收稿日期: 2016-07-13

作者简介: 沙东(1990-),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事结构工程研究。E-mail:Shadongmsl@163.com。

通讯作者: 孙建刚(1959-),男,黑龙江安达人,教授,博士,主要从事防灾减灾工程研究。E-mail:sjg728@163.com。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验中所用的废弃混凝土来源于大连市开发区金石滩附近的民居拆迁。再生粗骨料和再生细骨料是将废弃混凝土回收后经过破碎、分级等处理而制得的, 粗骨料粒径大于 5 mm 小于 31.5 mm, 细骨料粒径小于 5 mm。试验所用水泥是大连本地水泥厂生产的 42.5R 普通硅酸盐水泥。试验中所用粉煤灰是大连华能电厂的一级粉煤灰。为了提高再生混凝土强度而掺入的聚丙烯纤维的性质如表 1, 再生粗骨料的各项物理特征参数如表 2, 再生细骨料的各项物理特征参数如表 3, 骨料的含泥量: 1.7%, 附加水含量: 137.5 kg/m³。

表 1 聚丙烯纤维性质

Table 1 Properties of polypropylene fiber

规格/mm	直径/ μm	抗拉强度/MPa
12~19	31	≥ 400

表 2 再生粗骨料的各项物理特征参数

Table 2 Physical characteristic parameters of recycled coarse aggregate

表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	松散堆积度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	骨料吸水率, %
2 620	1 228	6.6

表 3 再生细骨料的各项物理特征参数

Table 3 Physical characteristic parameters of recycled fine aggregate

表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	松散堆积度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	骨料吸水率, %
2 652	1 395	13.8

1.2 再生混凝土配合比设计

本文中再生混凝土的配合比按照普通混凝土 C30 强度来设计。根据再生骨料的物理性质试验的结果等确定再生混凝土以水胶比的不同分为 A、B、C 三组, 在这三个大组中含有五个不同材料的配合比。在 A、B、C 三组中水胶比分别为 0.5、0.55、0.6。考虑到经济、环保和提高强度等因素, 在混凝土中分别掺入粉煤灰、聚丙烯纤维和附加水。试验中粉煤灰的掺合量为水泥用量的 20%, 聚丙烯纤维的掺入量为 1.2 kg/m³。具体配合比如表 4。

1.3 试件的制作和养护

试验第一批制作 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块 45 个(立方体抗压强度试验), 第二批分别制作 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块 3 个(劈裂抗拉强度), 300 mm × 150 mm × 150 mm 的棱柱体试块 6 个(3 个用于轴心抗压强度试验, 3 个用于弹性模量试验), 550 mm × 150 mm × 150 mm 的棱柱体试块 3 个(抗折试验)。混凝土搅拌振捣后,

装模, 然后抹平静置 24 h 后拆模, 在标准条件下养护至 28d 后取出进行试验。

表 4 配合比

Table 4 Recycled concrete ratio

组号	水胶比	水	水泥	再生细骨料	再生粗骨料	粉煤灰	聚丙烯纤维	附加水
A1	0.5	220.8	441.7	642.7	1194.8	0	0	0
A2	0.5	220.8	353.4	642.7	1194.8	88.3	0	0
A3	0.5	220.8	441.7	642.7	1194.8	0	1.2	0
A4	0.5	220.8	353.4	642.7	1194.8	88.3	1.2	0
A5	0.5	220.8	353.4	642.7	1194.8	88.3	1.2	137.5
B1	0.55	234.9	427.6	643.8	1193.6	0	0	0
B2	0.55	234.9	340.7	643.8	1193.6	86.9	0	0
B3	0.55	234.9	427.6	643.8	1193.6	0	1.2	0
B4	0.55	234.9	340.7	643.8	1193.6	86.9	1.2	0
B5	0.55	234.9	340.7	643.8	1193.6	86.9	1.2	137.5
C1	0.6	248.3	414.6	643	1194.1	0	0	0
C2	0.6	248.3	330.2	643	1194.1	81.9	0	0
C3	0.6	248.3	414.6	643	1194.1	0	1.2	0
C4	0.6	248.3	330.2	643	1194.1	81.9	1.2	0
C5	0.6	248.3	330.2	643	1194.1	81.9	1.2	137.5

1.4 试验方法

再生混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量、抗折强度和劈裂抗拉强度试验均按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)^[8,9]进行。

2 试验结果与讨论

2.1 再生混凝土表观密度

经试验测得的再生混凝土表观密度如表 5。

表 5 再生混凝土密度

Table 5 Recycled concrete density

组号	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2
密度	2 127	2 134	2 105	2 096	2 060	2 072	2 069
	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4
	2 079	2 061	2 021	2 012	2 050	2 079	2 086
							2 011

由以上试验结果可以看出: 本文所研究的以废弃混凝土为原料的再生混凝土的密度比同等级的普通混凝土的密度要低, 具有轻质的特点。

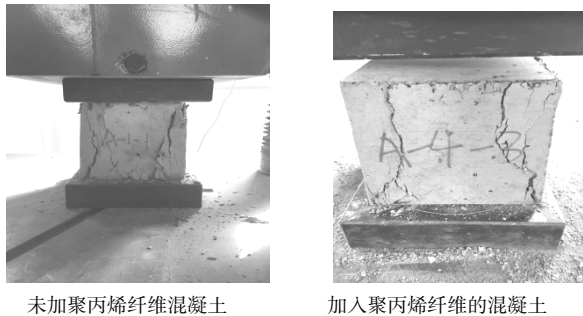
2.2 再生混凝土立方体抗压强度

混凝土的立方体抗压强度是混凝土最基本的力学性能指标, 所以, 再生混凝土的立方体抗压强度也是非常重要的一项性能指标^[10]。然而国内外有许多试验研究, 再生混凝土的立方体抗压强度值不尽相同^[5]。Frondisto-Yannas^[6]、肖建庄^[7]等一些国内外学者做出的研究认为再生混凝土抗压强度比普通

混凝土要低。与上述结论相反, Ridzuan^[11]、Salem^[12]经试验后得到再生混凝土的抗压强度较普通混凝土高。

2.2.1 再生混凝土立方体抗压强度试验现象及结果

本文对 15 组 45 块标准立方体试件 (150 mm × 150 mm × 150 mm) 进行抗压强度试验。破坏过程如下: 在竖向荷载作用下, 试件受到液压万能试验机上下表面约束, 期初试件受压没有任何明显的变化, 当加载荷载到达一定值时, 混凝土试件发生了竖向的压缩变形和水平方向的延伸变形, 在试件中部也有明显的膨胀产生, 试件的各个侧面开始有碎片掉落。随着荷载的进一步增大, 试件被压坏。试件最终破坏时成正、倒相接的“八”字型四角锥。从破坏的形态来看, 再生混凝土的破坏基本上均为粗骨料和胶凝材料之间的粘结破坏, 未发现骨料被劈开的情况 (图 1)。



未加聚丙烯纤维混凝土

加入聚丙烯纤维的混凝土

图 1 再生混凝土的立方体抗压强度

Fig.1 Cube compressive strength of recycled concrete

表 6 再生混凝土的立方体抗压强度结果

组号	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3
应力	35.0	36.2	37.1	35.1	28.2	33.6	33.9	34.8
组号	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	B4
应力	30.6	18.5	15.8	24.7	30.7	27.6	26.0	30.6

2.2.2 试验结果分析

由表 6 可以看出在水胶比分别为 0.5 (A 组)、0.55 (B 组)、0.6 (C 组) 中, 第三小组配合比的混凝土立方体抗压强度值最高分别为 A3: 37.1 MPa、B3: 34.8 MPa、C3: 30.7 MPa。与普通混凝土立方体抗压强度 (30 MPa) 相比, 水胶比为 0.5 的 A 组里, 除了 A5 组 (降低了 6%) 以外, 其他四组的立方体抗压强度值均比普通混凝土立方体抗压强度 (30 MPa) 高。水胶比为 0.55 的 B 组里, 除了 B5 组 (降低了 38.3%) 以外, 其他四组的立方体抗压强度值均比普通混凝土立方体抗压强度 (30 MPa) 高。而在水胶比为 0.6 的 C 组里, 除了 C3 组 (30.7 MPa, 提高

了 2.3%) 以外, 其他四组的立方体抗压强度值均比普通混凝土立方体抗压强度 (30 MPa) 低。

在合理水胶比 (经过试验可知水胶比 0.5、0.55 较为合理) 的情况下, 粉煤灰和聚丙烯纤维的掺入都使再生混凝土的立方体抗压强度有所提高。这是因为: 在再生混凝土中掺加适量的优质粉煤灰, 能够改善其力学性能这是因为作为活性掺合材料, 粉煤灰在水泥水化产物的碱激发作用下发生化学反应, 会生成具有胶凝性能的水化产物, 从而提高了抗压强度值^[13]; 在再生混凝土中掺加适量的聚丙烯纤维, 聚丙烯纤维的掺入, 使立方体受压时出现的应力集中得以缓和, 从而得到更好连续性, 强度的提高比未掺纤维得到了较为显著的提高。其主要体现在以下两个方面: (1) 混凝土中微裂缝的扩张得到了有效阻止; (2) 提高了基体的变形能力^[14]。此外与普通再生混凝土相比, 掺入聚丙烯纤维的再生混凝土的破坏形态与之有所不同。掺入聚丙烯纤维的混凝土试件, 受力破坏开裂, 但未出现剥落破碎的现象, 始终保持着试件的整体性, 而且在裂缝处可以清楚地看到聚丙烯纤维连接着已经开裂的混凝土。因此, 在混凝土中添加聚丙烯纤维, 可以提高混凝土的抗压强度值。但加入附加水后, 立方体抗压强度值却降低了, 其原因可能是因为加入附加水后, 混凝土的用水量增大, 流动性增强太多, 胶凝材料的粘结性降低从而使立方体抗压强度降低了。

总结: A、B、C 三类混凝土相比而言, A 组混凝土的立方体抗压强度较好, 而且均高于普通 C30 混凝土的立方体抗压强度值, 其中 A3 组混凝土为最优, 因此后续试验的配合比采用 A3 组混凝土的配合比。

2.3 轴心抗压强度

经计算, 结果如表 7。

表 7 再生混凝土轴心抗压强度值
Table 7 Axial compressive strength of recycled concrete

组号	最大荷载/N	长/mm	宽/mm	应力/MPa	平均应力/MPa
A-3-1	616 688	151.28	149.92	27.2	
A-3-2	612 167	150.5	150.1	27.1	
A-3-3	700 723	150.7	150.64	30.9	28.4

普通混凝土的轴心抗压强度与立方体抗压强度存在如下关系^[15]

$$f_{cp} = 0.76 f_{cu}$$

式中: f_{cp} ——轴心抗压强度;

f_{cu} ——立方体抗压强度。

经计算 $f_{cp} = 28.2\text{MPa}$, 得出再生混凝土的轴心抗压强度的试验值与理论值几乎相等。

2.4 弹性模量

弹性模量试验见图 2, 经计算, 结果如表 8。

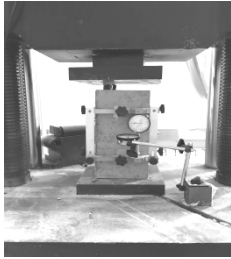


图 2 弹性模量试验
Fig.2 Elastic modulus

表 8 再生混凝土的弹性模量
Table 8 Elastic modulus of recycled concrete

编号	E/MPa	均值/ MPa
1	22 200	
2	21 200	22 300
3	23 600	

现行混凝土结构设计规程^[15]中采用下式计算混凝土的弹性模量:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}}$$

式中: E_c ——混凝土弹性模量, MPa ;

f_{cu} ——混凝土立方体抗压强度, MPa 。

经计算得: $E_c = 31895\text{MPa}$

根据按上式得到的再生混凝土弹性模量的计算值与试验值相比较, 可以看出, 两值相差较大, 不能用于再生混凝土弹性模量的计算。

在以往的研究中, Mellmann^[16]、Ravindrarajah^[17]、Dhir^[18]分别建议了再生粗骨料取代率为 100%时混凝土弹性模量与抗压强度关系式, 如(1)–(3)式所示^[9]:

$$E_c = 378f_{cu} + 8242 \quad (1)$$

$$E_c = 7.77 \times 10^3 \times f_{cu}^{0.33} \quad (2)$$

$$E_c = 13100 + 370f_{cu} \quad (3)$$

计算结果见表 9。

表 9 混凝土弹性模量经验公式值
Table 9 Empirical value of elastic modulus MPa

试验值	式(1)计算值	式(2)计算值	式(3)计算值
22 300	22 265.8	25 604.4	26 827

由表 9 可知式(2)、式(3)的计算值都高于试验值, 只有式(1)的计算值与试验值相近。因此本

文试验用的混凝土的弹性模量可以用式(1)校正。

总体而言, 以废弃混凝土为原料的再生混凝土的弹性模量, 较普通 C30 混凝土的弹性模量相比要低一些。其原因是因为: (1) 用于再生混凝土中的再生骨料本身强度较低, 使再生混凝土承受变形的能力较小从而影响了弹性模量的大小; (2) 再生混凝土的孔隙率较高, 易于发生非弹性变形。

2.5 抗折强度

再生混凝土抗折试验中(图 3), 若试件下边缘断裂位置处于两个集中荷载作用线之间, 则试件的抗折强度 (MPa)按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)中的要求计算, 结果见表 10。

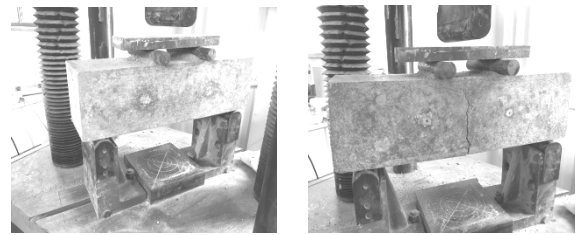


图 3 抗折试验
Fig.3 Flexural strength

表 10 再生混凝土抗折强度
Table 10 Flexural strength of recycled concrete

组号	最大荷载 F/N	l/mm	b/mm	h/mm	应力/ MPa	平均应力/ MPa
1	27 067	450	150	150	3.6	
2	30 928	450	150	150	4.1	
3	27 173	450	150	150	3.6	3.8

随着竖向荷载逐渐增加, 试件底部表面出现裂缝, 裂缝的位置位于所施加的两个集中荷载之间。持续增加荷载, 裂缝竖向延伸继而贯穿试件而被折断。

对于再生混凝土的抗折强度, Kawamura 等^[19] Ahmad^[20]和 Ikeda^[21]的试验表明再生混凝土的抗折强度和普通混凝土几乎相同。而 Ravindrarajah 和 Tam^[22]的试验表明, 再生混凝土的抗折强度均较普通混凝土低 10%^[23]。在 CEB 规范^[24]和 ACI 规范^[25]中, 普通混凝土抗折强度 $f_f(\text{MPa})$ 和抗压强度 $f_{cu}(\text{MPa})$ 经验公式为: CEB: $f_f = 0.81f_{cu}^{0.5}$

$$\text{ACI: } f_f = 0.54f_{cu}^{0.5}$$

经计算得出, CEB: $f_f = 4.9\text{MPa}$; ACI: $f_f = 3.3\text{MPa}$ 。再生混凝土抗折强度的试验值居于 ACI 规范、CEB 规范中经验公式的计算值之间。出现这一现象的原因是, 虽然再生粗骨料在其处理破碎过程中产生了大量的微裂纹以及再生混凝土内部存在一定的缺陷, 但由于再生粗骨料表面被一定的胶凝材料和砂所包裹, 从而增大了骨料的表面积, 再加上骨料表面粗糙, 均有利于增大界面粘结力^[23];

此外,再生混凝土中聚丙烯纤维的掺入,有效的提高了混凝土整体的抗拉性能,从而使再生混凝土抗裂能力得到了一定的提升。笔者经过计算找出与再生混凝土抗折强度试验值较吻合的计算公式:

$$f_r = 0.62f_{cu}^{0.5}$$

由此可见,以废弃混凝土为骨料的再生混凝土的抗折强度与普通混凝土的抗折强度相差无几。甚至高于国内一些学者^[14]研究的再生混凝土的抗折强度,因此此类再生混凝土的可行性和实用性较高。

2.6 立方体劈裂抗拉强度

劈裂抗拉试验见图 4,混凝土劈裂抗拉强度试验结果如表 11。

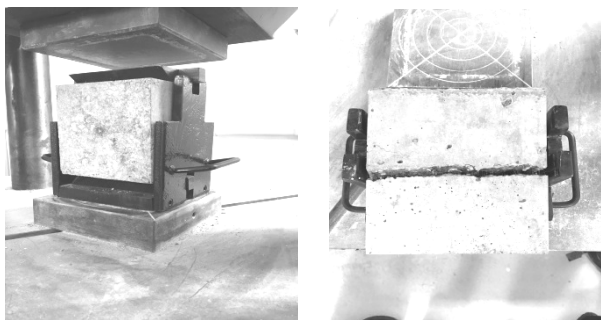


图 4 劈裂抗拉试验
Fig.4 Splitting tensile test

表 11 劈裂抗拉强度
Table 11 Splitting tensile strength

组号	最大荷载/kN	长/mm	宽/mm	应力/MPa	平均应力/MPa
1	58.117	150.12	149.96	1.64	
2	63.988	150.92	149.78	1.80	
3	56.297	150.40	150.32	1.59	1.68

在《混凝土结构设计规范 GB50010—2010》^[15]中,给出了普通混凝土的劈裂抗拉强度 f_{ts} (MPa)与抗压强度 f_{cu} (MPa)的换算关系式:

$$f_{ts} = 0.19f_{cu}^{0.75}$$

经计算得 $f_{ts} = 2.86$ MPa,观察再生混凝土试件劈裂抗拉破坏的断裂面发现,再生混凝土大多为胶凝材料和粗骨料拉脱破坏,但少数有再生粗骨料被拉断。笔者经过计算找出与再生混凝土劈裂抗拉强度试验值较吻合的计算公式: $f_{ts} = 0.11f_{cu}^{0.75}$ 。

由以上结果可以看出,本文中再生混凝土的立方体劈裂抗拉强度值比理论值要低。原因可能有:

(1)再生粗骨料与胶凝材料粘结力相对较小,在混凝土受到拉力时易发生开裂,(2)再生骨料本身就存在一些缺陷(例如裂缝等),使得混凝土试块收拉时容易产生破坏。该再生混凝土的劈裂抗拉强度虽然比相同等级的普通混凝土的劈裂抗拉强度低,但

仍然高于一部分学者^[2]所研究的再生混凝土的劈裂抗拉强度。因此可以使用。

3 结论

(1)从破坏的形态来看,再生混凝土与普通混凝土较为相似。而且在掺入聚丙烯纤维后,再生混凝土在受压破坏后仍保持一定的整体性。

(2)在合理水胶比(经过试验可知水胶比 0.5、0.55 较为合理)的情况下,粉煤灰和聚丙烯纤维的掺入都使再生混凝土的立方体抗压强度有所提高。但加入附加水后,立方体抗压强度值却有所降低。

(3)再生混凝土棱柱体抗压强度与其立方体抗压强度的比值为 0.77,与《混凝土结构设计规范》中的公式,吻合较好。

(4)再生混凝土抗折强度的试验值,正好处于 ACI 规范、CEB 规范中经验公式的计算值之间,可靠性较高。笔者经过计算找出与再生混凝土抗折强度试验值较吻合的计算公式: $f_r = 0.62f_{cu}^{0.5}$ 。

(5)再生混凝土的劈裂抗拉强度和弹性模量均低于普通混凝土。其中笔者经过计算找出与再生混凝土劈裂抗拉强度试验值较吻合的计算公式:

$$f_{ts} = 0.11f_{cu}^{0.75}$$

(6)整体来说,再生混凝土各方面的力学指标都能满足一定的强度要求。因此可以作为北方满族民居的建设材料。

参考文献:

- [1] 王周松. 再生混凝土力学性能及其计算方法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013-10-25.
- [2] 周静海. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 03-0464-05: 1671-2021.
- [3] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术最新研究进展与评述[J]. 混凝土, 2003(6): 17-20.
- [4] 杜婷. 建筑垃圾再生混凝土的基本性能及再生骨料强化试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学土木工程学院, 2001.
- [5] 刘数华. 高性能再生骨料混凝土试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25 (2): 262-266.
- [6] S.Frondistou Yannis. Using waste concrete as aggregate[J]. ACI Journal, 1977 (74): 373-376.
- [7] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土抗压强度研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32 (12): 1558-1161.
- [8] GB/T50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [9] 徐蔚. 再生粗骨料取代率对混凝土基本性能的影响[J]. 混凝土, 2006-09-27.
- [10] 黄文锋. 再生骨料及掺合料对再生混凝土力学性能影响试验研究[M]. 哈尔滨工业大学, 2007-07-01.
- [11] Ridzuan A R M, et al. The influence of recycled aggregate concrete on the early comprehensive strength and drying shrinkage of concrete [A]. Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation [C]. Cape Town, South Africa, 2001: 1415-1421.

(下转第 50 页)

3 结论

(1) 通过对工艺条件的研究获得了微波辐射制备纤维素基 Cu^{2+} 吸附树脂的最佳反应条件。当纤维素含量为 AA 的 10%, AM: AA=3: 1, 交联剂和引发剂用量分别为 AA 的 1.0% 和 0.65%, AA 中和度为 70% 时, 经 280 W 微波 300 s, 可制得对 Cu^{2+} 饱和和吸附度为 $65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的吸附树脂。

(2) 与前期工作^[17]相比, 所制备的吸附树脂对 Cu^{2+} 的吸附量提高了 30%, 且无须后期的沉淀及干燥等工序。

(3) 与传统的吸附树脂制备方法相比, 微波辐射明显缩短了反应时间、极大地简化了工艺流程, 降低了成本, 具有显著的优势。

参考文献:

- [1] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等, 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2017 (3): 1-14.
- [2] 尚二萍, 张红旗, 杨小映, 等, 我国南方四省集中连片水稻田土壤重金属污染评估研究. 环境科学学报[EB/OL]. 2016-10-20 10:35:25.
<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1843.X.20161020.1035.001.html>
- [3] 张洛红, 范芳, 蒋炜炜, 等, 珠三角地区大气 PM_{2.5} 中重金属污染水平及健康风险评估. 环境科学学报[EB/OL]. 2016-05-16 08:15:29.
<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1843.X.20160516.0815.001.html>
- [4] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等, 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学, 2016 (1): 325-334.
- [5] Li Y. H., Wang S., Wei J., et al. Lead adsorption on carbon nanotubes [J]. Chemical Physics Letters, 2002, 357 (3-4): 263-266.
- [6] Ding, Z., Hu, X., Morales, V. L., et al. Filtration and transport of heavy metals in grapheme oxide enabled sand columns[J]. Chemical Engineering Journal, 2014(257): 248-252.

- [7] Abdel-Halim E. S., Al-Deyab S. S. Removal of heavy metals from their aqueous solutions through adsorption onto natural polymers[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(1): 454-458.
- [8] Grimshaw P., Calo J. M., Hradil G. Cyclic electrowinning/precipitation (CEP) system for the removal of heavy metal mixtures from aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 175:103-109.
- [9] Pal P., Banat F. Comparison of heavy metal ions removal from industrial lean amine solvent using ion exchange resins and sand coated with chitosan[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014(18): 227-236.
- [10] 周普雄, 严颢, 余震, 等, 生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果[J]. 2016 (9): 3575-3581.
- [11] 汪理科, 曾光明, 杨朝晖, 等, 电絮凝法处理重金属底泥清淤尾水[J]. 环境工程学报, 2016, (9): 4628-4634.
- [12] A. S. El-Khouly, Y. Takahashi, A. A. Saafan, et al. Study of Heavy Metal Ion Absorbance by Amidoxime Group Introduced to Cellulose-Graft-Polyacrylonitrile[J]. J Appl Polym Sci, 2011(120): 866-873.
- [13] Soylak M., Divirikli U., Elci L. Preconcentration of Cr(III), Co(II), Cu(II), Fe(III) and Pb(II) as calmagite chelates on cellulose nitrate membrane filter prior to their flame atomic absorption spectrometric determinations[J]. Talanta, 2002, 56: 565-570.
- [14] 王晓佳, 王百田, 李德宁, 等, 聚丙烯酰胺高吸附树脂与重金属离子的相互作用[J]. 北京林业大学学报, 2016 (3): 81-88.
- [15] 温国华, 王丹, 单娜, 等, 淀粉黄原酸酯基高吸水树脂吸附重金属离子研究[J]. 安全与环境学报, 2015 (3): 221-227.
- [16] 谢建军, 姚庆鑫, 韩心强, 等, 木粉/壳聚糖接枝丙烯酸-丙烯酰胺吸附树脂对二元重金属离子溶液中 Pb^{2+} 的吸附[J]. 环境工程学报, 2013 (8): 2947-2955.
- [17] Zhao Bao-Xiu, Wang Peng, Zheng Tong, et al. Preparation and Adsorption Performance of a Cellulosic-Adsorbent Resin for Copper(II)[J]. J Appl Polym Sci, 2006, 99: 2951-2956.
- [18] 吴文娟. 纤维素系高吸水性树脂的研究进展[J]. 纤维素科学与技术, 2006 (4): 57-62.
- [19] Shu Jing, Li Xiaojing, Zhao Dabiao. Microwave-Irradiated Preparation of Super Absorbent Resin by Graft Copolymerization of Cellulose and Acrylic Acid/Acrylamide[J]. Advanced Materials Research, 2011(148-149): 799-802.

(上接第 46 页)

- [12] Salem R M. Strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete [D]. University of Tennessee, Knoxville, 1996.
- [13] 仝小芳, 杨鼎宜, 王欣, 等. 粉煤灰再生混凝土基本性能研究[J]. 混凝土, 2014-07-27.
- [14] 赵涛. 再生混凝土和再生纤维混凝土力学性能试验研究[M]. 西安建筑科技大学, 2014.
- [15] GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [16] Mellmann G. Processed concrete rubble for the reuse as aggregate. Proceedings of the International Conference on Exploiting Waste in Concrete[J]. Dundee, 1999:171-178.
- [17] Ravindrarajah. R., Tam. C. T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of Concrete Research. 1985,37(130): 29-38.
- [18] Dhir R.K., Limbachiya M.C. Suitability of recycled aggregate for use in BS 5328 designated mixes[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1999,134: 257-274.
- [19] Kawamura M et al. Reuse of recycled concrete aggregate for pavement. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on

Demolition and Reuse of Concrete and Masonry [C]. Tokyo, Japan, 1988: 726-735.

- [20] Ahmad S H. Properties of concrete made with North Carolina recycled coarse and fine aggregates [R]. Department of Civil Engineering, North Carolina State University, June 2004.
- [21] Ikeda T., Yamanc S. Strengths of concrete containing recycled aggregate. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry [C]. Tokyo, Japan, 1988: 585-594.
- [22] Ravindrarajah R., Tam C T. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1987, 39 (141): 214-220.
- [23] 冯玲. 聚丙烯纤维再生混凝土的力学性能试验研究[M]. 西安建筑科技大学, 2012.
- [24] CEB-FIP. Mode code for concrete structures design (Paris) [M]. 1990.
- [25] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02) (American Concrete Institute, Detroit) [C]. 2002.