

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.018

掺级配良好再生 PVC 骨料混凝土的力学和吸能性能

胡时¹, 徐颖^{1,2}

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽淮南 232001; 2. 安徽理工大学省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要: 将级配良好的再生聚氯乙烯 (PVC) 颗粒以不同掺量等体积替代天然细骨料后加入混凝土中制成试件, 进行力学性能试验和冲击试验, 得到立方体压缩强度、劈裂抗拉强度、卸载弹性模量、能量吸收率和微观结构图, 用来探究不同掺量的再生 PVC 骨料混凝土的力学和吸能性能。结果表明, 当 PVC 骨料掺量为 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% 时, 其混凝土压缩强度分别为 49.34, 52.44, 45.79, 46.41, 45.6, 43.46 MPa, 劈裂抗拉强度为 2.73, 3.58, 3.2, 2.92, 2.69, 2.44 MPa, 混凝土的压缩强度和抗拉强度均随掺量增加呈先增加后缓慢降低趋势, 并且用级配良好的再生 PVC 颗粒替代天然细骨料加入混凝土的力学性能比单一粒径塑料颗粒优良; 随 PVC 骨料掺量增加, 混凝土脆性得到改善且延性增强; 混凝土的能量吸收能力随再生 PVC 细骨料掺量增加呈直线增加趋势。

关键词: 再生 PVC 细骨料; 级配良好; 力学性能; 能量吸收率; 微观结构

中图分类号: TQ325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0090-05

Mechanical and Energy Absorption Performances of Concrete with Good Gradation Recycled PVC Aggregate

Hu Shi¹, Xu Ying^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The recycled polyvinyl chloride (PVC) granules with good gradation were introduced into concrete to make specimens after replacing natural fine aggregates with different content and equal volume. The mechanical performances test and impact test were adopted to obtain cubic compressive strength, splitting tensile strength, unloading elastic modulus, energy absorption rate and microstructure photos, and the mechanical and energy absorption performances of recycled PVC aggregate concrete with different content were studied. The results show that when the content of PVC aggregate is 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 30%, the compressive strength of concrete is 49.34, 52.44, 45.79, 46.41, 45.6, 43.46 MPa, and the splitting tensile strength is 2.73, 3.58, 3.2, 2.92, 2.69, 2.44 MPa respectively. The compressive strength and splitting tensile strength of concrete increases first and then decreases slowly, and the mechanical performances of concrete introduced into recycled PVC granules with good gradation instead of natural fine aggregates are better than that of plastics granules with single particle size. With the increase of the content of PVC aggregate, brittle and ductility of concrete are improved. The energy absorption capacity of concrete increases linearly with the increase content of recycled PVC fine aggregate.

Keywords: recycled PVC fine aggregate; good gradation; mechanical performance; energy absorption rate; microstructure

随着塑料需求量的快速增长, 安全高效处理塑料废物变得越来越重要, 废物处理不当会引发环境问题, 并且塑料不可生物降解, 焚烧塑料产生的气体也会造成空气污染和健康问题。因此如何高效、环保、简单地回收利用塑料废物成为近十年来的研究

热点, 人们发现具有高消耗能力的建筑工程领域似乎是最适合回收利用塑料废物^[1]。

聚氯乙烯 (PVC) 是常用的热塑性聚合物材料之一, 2018 年全球 PVC 消费量约为 5 130 万 t, 亚太地区占全球 PVC 接近 60% 的市场份额, 未来 10 年

基金项目: 国家自然科学基金海外及港澳学者合作研究基金项目 (51728201)

通讯作者: 徐颖, 教授, 主要从事冲击动力学及建筑材料研究 E-mail: aust_shihu@qq.com

收稿日期: 2019-11-02

引用格式: 胡时, 徐颖. 掺级配良好再生 PVC 骨料混凝土的力学和吸能性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):90-94.

Hu Shi, Xu Ying. Mechanical and energy absorption performances of concrete with good gradation recycled PVC aggregate[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):90-94.

内,亚太地区还将继续引领全球 PVC 需求量增长。目前国内外主要研究在混凝土中加入聚丙烯 (PP)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料等,关于 PVC 塑料的研究较少。并且高强混凝土工程对脆性破坏更敏感,所以需要改善混凝土脆性^[2];同时在军工防护、机场道面、深部巷道支护等冲击荷载经常作用的工程采用抗冲击性、能量吸收能力强的混凝土^[3]。

A. Mohammed 等^[4]将粉碎 PVC 板得到的 PVC 骨料替代混凝土中砂子,当掺量 85% 时,压缩强度降低了 60%,对应的弹性模量也急剧下降;梁炯丰等^[5]发现压缩强度随 PP 塑料掺量增加直线下降,但提高了其混凝土的延性;刘锋等^[6]发现随着塑料掺量增加,压缩强度及拉压比都比普通混凝土高,压缩强度先提高后降低,当掺量为 5% 时达到最大值。单一粒径下,他们试验的强度都下降较大,甚至随着掺量增加,强度远低于设计强度。还有很多学者将塑料颗粒加入混凝土来提高抗冲击性能, M. M. Al-Tayeb 等^[7]将车辆废塑料作为替代骨料,在低速冲击荷载下,掺量 5% 时,其抗冲击性增加了 21%,并随着掺量增加,抗冲击性继续提高,增强的原因是添加塑料骨料增强了混凝土的柔韧性。R. Saxena 等^[8]研究了将聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 瓶切碎用来代替混凝土中天然粗细骨料,虽然含有 PET 骨料的混凝土压缩强度较低,但随着 PET 塑料掺量增加,混凝土的抗冲击性能得到改良,同时能量吸收能力增加。但他们测试能量吸收能力的方法大都是自制落锤梁冲击,试验装置复杂且数据处理麻烦。

因此笔者将物理回收得到级配良好的再生 PVC 颗粒 (粒径 0.3~5.0 mm) 等体积替代河砂掺到混凝土中,再对其力学性能和吸能性能进行了试验研究,得到立方体压缩强度、劈裂抗拉强度、卸载弹性模量、能量吸收率和微观结构图。研究结论提供了解决塑料混凝土强度剧烈下降、改善脆性、提高延性和增强能量吸收能力的方法,为环境治理、工程应用、安全生产提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

水泥: P·O 42.5 级,安徽淮南海螺水泥厂;

细骨料: 淮河河砂,最大粒径 4.75 mm,细度模数 2.4,密度 2.41 g/cm³;

粗骨料: 最大粒径小于等于 16 mm 的级配碎石,密度 2.63 g/cm³;

水: 试验室自来水;

PVC 细骨料: 从东莞市樟木头塑胶市场购得再生 PVC 颗粒,该公司将回收的废弃 PVC 板物理回收制成颗粒,得到粒径 0.3~5.0 mm、密度 1.4 g/cm³ 的颗粒,再进行筛分,得到符合 GB/T 14685-2011 要求的级配良好再生 PVC 细骨料。

1.2 主要设备及仪器

电液伺服万能试验机: WAW-2000 型,深圳三思纵横科技股份有限公司;

高速摄像机: HX-3 型,日本 NAC 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Supra55 型,德国 Carl Zeiss 公司;

简易冲击试验装置: 自制,如图 1 所示。

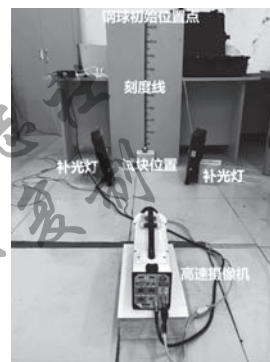


图 1 试验装置

1.3 混凝土试件制备

按 JGJ 55-2011 进行配合比设计,水灰比为 0.48,并采用内掺法将再生 PVC 细骨料等体积取代河砂,替代率分别为 0,5%,10%,15%,20%,30%。详细配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

编号					kg/m ³
	水泥	细骨料	粗骨料	水	PVC 细骨料
NC	438	596	1156	210	0
FA5%	438	566.3	1156	210	17.3
FA10%	438	536.6	1156	210	34.6
FA15%	438	506.9	1156	210	51.9
FA20%	438	477.2	1156	210	69.2
FA30%	438	417.8	1156	210	103.8

上述 6 组配方各制备 6 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件、3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件。试件制作的流程如下: 先将砂、石、PVC 细骨料依次倒入搅拌机干拌 2 min,然后加入水泥再干拌 2 min,接着将水倒入搅拌机中,湿拌 2 min;之后将新拌混凝土浇注至模具中,再放在振动台上振捣成型;待试件 24 h 后拆模转入混凝土标准养护室中养护 28 d 后进行试验。

1.4 性能测试

(1) 力学性能试验。

使用电液伺服万能试验机按 GB/T 50081-2002 以 2.5 mm/min 的加载速率对 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件进行压缩强度试验;再通过试件上下放置夹具,以 0.5 mm/min 的加载速率对立方体试件进行劈裂抗拉强度试验。

(2) 钢球自由落体冲击试验。

由于混凝土试件具备能量吸收能力,因此当钢球撞击试件后会发生回弹现象,运用高速摄像机捕捉回弹瞬态现象,用于计算试件在动态冲击下能量吸收能力。采用 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件,参考 ACI544 和 CECS02-2005 的规定自制简易冲击试验装置如图 1 所示,重力加速度取 9.81 m/s^2 ;钢球质量为 0.5 kg;初始下落点高度取 1.0 m,离刻度线距离 7.5 cm(试块的中心点)。

2 结果与讨论

2.1 力学性能试验

混凝土立方体压缩强度、抗拉强度与 PVC 骨料掺量的关系见图 2,同掺量 PVC 骨料混凝土的应力应变曲线及对应的卸载弹性模量 E_0 见图 3。图 2 中将刘锋等^[6]研究的 2~3.5 mm 的 PP 塑料混凝土的抗压、抗拉强度用来对比。当 PVC 骨料掺量为

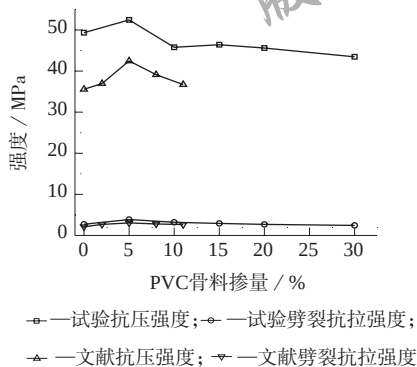
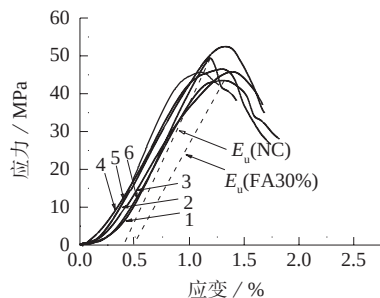


图2 抗压、抗拉强度变化过程

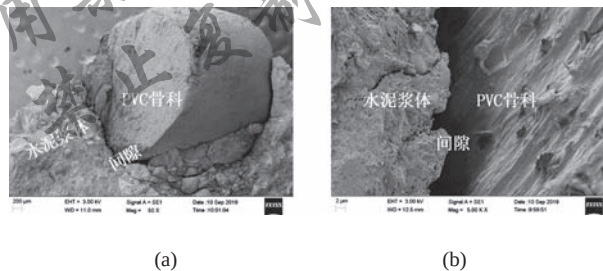


1—NC; 2—FA5%; 3—FA10%; 4—FA15%; 5—FA20%; 6—FA30%

图3 PVC骨料混凝土的应力-应变曲线

0%,5%,10%,15%,20%,30%时,其压缩强度分别为 49.34,52.44,45.79,46.41,45.6,43.46 MPa;劈裂抗拉强度为 2.73,3.58,3.2,2.92,2.69,2.44 MPa。掺量 5% 时,其压缩强度提高了 6.08%,抗拉强度提高了 31.14%,之后随着掺量增加强度均下降,但压缩强度下降不超过 11.92%,抗拉强度下降不超过 10.62%。而 PP 塑料混凝土当掺量达到 15% 时,其压缩强度就下降了 12.25%。

压缩强度先增加后降低是由于混凝土中掺入少量 PVC 骨料后,有效填补了内部石子砂子之间的微缺陷,混凝土变得致密^[9],通过图 4 FA30% 不同放大倍数的 SEM 照片可发现,随着掺量增加,水泥和 PVC 骨料的界面过渡区由于边壁效应,粘结效果差且疏松多孔,从而强度降低^[4-6],对比刘锋等^[6]单一粒径再生 PVC 颗粒填充混凝土的强度变化率,级配良好的再生 PVC 颗粒力学性能优势明显。

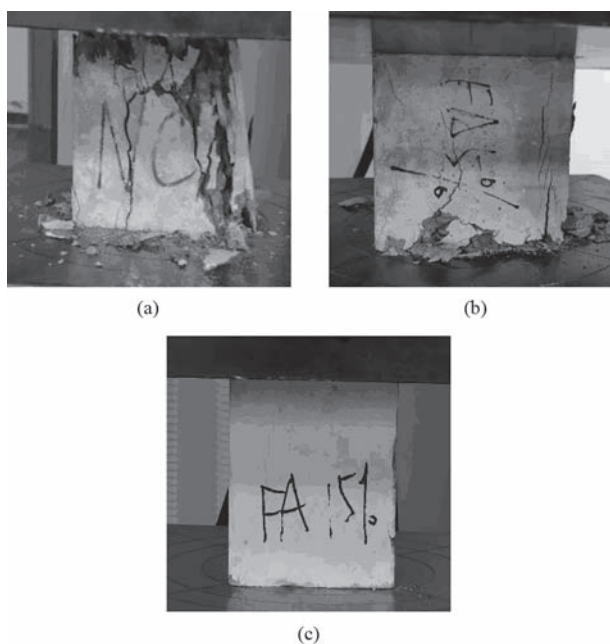


(a) (b)
放大倍数: a—50 倍; b—5 000 倍

图4 FA30%混凝土在不同放大倍数下的微观结构

另外 PVC 骨料混凝土的抗压、抗拉强度与刘锋等^[6]试验结果变化趋势相似,但 PVC 混凝土压缩强度提高率、抗拉强度降低率均优于 PP 混凝土,所以使用的再生 PVC 骨料代替天然细骨料,对未来环境治理提供了有效方法^[10-12]。

卸载弹性模量 E_0 是指卸载曲线的斜率,可反映试件破坏形式,谢和平等^[13-14]发现试验中,由于没有进行卸载过程,因此在计算中使用初始弹性模量 E_0 来代替 E_0 ,图 3 中示出 FA30% 和 NC 混凝土的卸载弹性模量。通过对比,发现掺量增加,混凝土卸载弹性模量随着降低,卸载阶段能量释放速度减小。同时通过图 5 不同掺量 PVC 骨料混凝土的破坏形态可发现,随着掺量增加,试件表面宏观贯通破裂面变少,同样说明混凝土脆性得到改善,延性增强^[5]。这是因为 PVC 颗粒作为弹性材料加入混凝土后,提高了抵抗压缩变形能力,因此破坏形态不同^[10]。



a—NC ; b—FA5% ; c—FA15%

图5 典型破坏形式

2.2 钢球自由落体冲击试验

在试验过程中忽略其它外力的影响和钢球落地位置不同的影响。笔者定义能量吸收率 EAR 用来更直观对比不同试件的能量吸收能力,计算公式见式(1)、式(2)。

$$EAR1 = \frac{E_{a1}}{E_{p0}} \quad (1)$$

$$E_{a1} = E_{p0} - E_{p1} \quad (2)$$

式中: $EAR1$ ——第一次冲击的能量吸收率;

E_{a1} ——第一次冲击的能量吸收值;

E_{p0} ——初始位置的重力势能;

E_{p1} ——第一次回弹最高点的重力势能。

通过高速摄像机捕捉钢球回弹最高点的瞬态现象如图6所示。由于刻度尺位置摆放问题,所以实际回弹高度将图中对应刻度尺数值减去14 cm即可,因此当PVC骨料掺量为0%,5%,10%,15%,

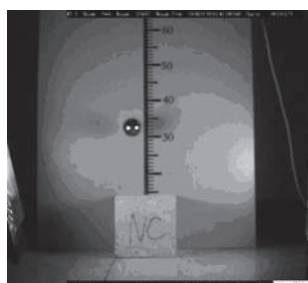


图6 试验回弹最高点瞬态现象

20%,30%时,对应的回弹最高点高度分别为16.5,15.06,13.89,12.57,11.38,8.89 cm。用公式(1)、公式(2)计算试件能量吸收值和能量吸收率,详细数据见图7。

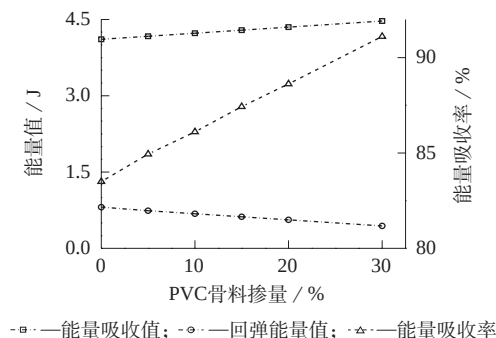


图7 不同掺量PVC骨料混凝土能量值及能量吸收率

通过图7可发现,不同掺量下钢球自由落体冲击下能量吸收值为4.11,4.17,4.23,4.29,4.35,4.47 J,随着掺量增加,回弹高度降低,但能量吸收值增加,能量吸收率分别为83.5%,84.94%,86.11%,87.43%,88.62%,91.11%,因此能量吸收能力显著提高,这是因为PVC颗粒具有良好的变形、弯曲性能,作为细骨料加入混凝土中生成的塑料-水泥复合材料柔韧性较好^[15]。该材料可用于军工防护、机场道面等冲击荷载经常作用的工程。

3 结论

(1) 混凝土的压缩强度随PVC骨料掺量增加呈先增加后缓慢降低趋势,掺量5%时,相比基准组,强度增加了6.08%,从5%到30%,强度最高仅降低了11.92%;抗拉强度随PVC骨料掺量增加也呈先增加后缓慢降低趋势,掺量5%时,相比基准组,强度增加了31.14%,从5%到30%,强度最高仅降低了10.62%,因此用级配良好的再生PVC颗粒替代天然细骨料加入混凝土的力学性能较单一粒径塑料颗粒优良。

(2) 混凝土的卸载弹性模量随掺量增加而降低,并且掺适量PVC骨料混凝土脆性得到改善,延性增强。

(3) 随PVC骨料掺量增加混凝土的能量吸收能力呈直线增加趋势,掺量30%时,最大能量吸收率为91.11%,比基准组高9.11%,能量吸收能力显著提高。

参考文献

- [1] Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review[J]. Waste Manag, 2008, 28(10):1835-1852.

- [2] 姜从盛. 轻质高强混凝土脆性机理与改性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Jiang Congsheng. Research on brittleness and modification of high strength light weight concrete[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2010.
- [3] 何东升, 殷术明. 中厚煤层柔模混凝土沿空留巷矿压规律与围岩控制技术 [J]. 煤炭工程, 2018(9):35-38.
- He Dongsheng, Yin Shuming. Study on mine pressure law and surrounding rock control of gob-side entry retaining with flexible-formwork concrete in medium-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2018(9):35-38.
- [4] Mohammed A A, Mohammed I I, Mohammed S A. Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets[J]. Constr Build Mater, 2019, 201:232-245.
- [5] 梁炯丰, 陈浩, 肖烨, 等. 再生 PP 塑料混凝土受压性能研究 [J]. 混凝土, 2017, 39(5):79-81.
- Liang Tongfeng, Chen Hao, Xiao Ye, et al. Research on of compressive performance modified concrete with recycled PP powder[J]. Concrete, 2017, 39(5):79-81.
- [6] 刘锋, 黄海滨, 夏晓舟, 等. 再生塑料改性混凝土力学性能研究及数值模拟 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2):173-179.
- Liu Feng, Huang Haibing, Xia Xiaozhou, et al. Mechanical test on modified concrete with recycled plastic particles and its numerical simulation[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2):173-179.
- [7] Al-Tayeb M M, Ismail H, Dawouda O. Ultimate failure resistance of concrete with partial replacements of sand by waste plastic of vehicles under impact load[J]. Int J Sustainable Built Environment, 2017, 6:610-616.
- [8] Saxena R, Siddique S, Gupta T. Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste[J]. Constr Build Mater, 2018, 176:415-421.
- [9] Kou S C, Lee G, Poon C S, et al. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes[J]. Waste Manage, 2009, 29:621-628.
- [10] 黄海滨, 刘锋, 李丽娟. 塑料回收利用与再生塑料在建材中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2009, 37(7):56-59.
- Huang Haibing, Liu Feng, Li Lijuan. The application of plastics recycling and recycled plastic in building materials[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(7):56-59.
- [11] 郁小强. 废旧 PVC 塑料的循环利用 [J]. 聚氯乙烯, 2006(11):45-46.
- Yu Xiaoqiang. The recycle of waste PVC plastics[J]. Polyvinyl Chloride, 2006(11):45-46.
- [12] 孙亚明. 废旧塑料回收利用的现状与发展 [J]. 云南化工, 2008, 35(2):37-42.
- Sun Yaming. Present status and development on the recycling use of waste and worn plastic[J]. Yunnan Chem Technol, 2008, 35(2):37-42.
- [13] 朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(9):2 569-2 573.
- Zhu Guosheng, Zhang Jiafa, Chen Jingsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2 569-2 573.
- [14] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21):3 565-3 570.
- Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy mechanism of deformation and failure of Rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21):3 565-3 570.
- [15] 李赞成, 许金余, 罗鑫, 等. 橡胶混凝土的基本力学特性的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(12):2 589-2 594.
- Li Zancheng, Xu Jinyu, Luo Xin, et al. Experimental study on the basic mechanical properties of rubber powder concrete[J]. Bulletin of the Ceramic Society, 2013, 32(12):2 589-2 594.