

文章编号:1673-5005(2022)02-0121-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.012

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土 分离骨料可行性试验

汤积仁^{1,2}, 姚奇^{1,2}, 章文峰³, 卢义玉^{1,2}, 张洋凯^{1,2}, 汪壘^{1,2}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044; 3. 重庆渝湘复线高速公路有限公司, 重庆 408500)

摘要:基于砂浆与骨料不同抗冲击特性,提出逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法,通过开展废弃混凝土分离骨料实验及再生骨料性能测试试验,对该方法的可行性和可靠性进行验证。结果表明:逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法能高效分离骨料与砂浆;与机械破碎法相比该方法制备的再生骨料残余砂浆含量显著下降(降低约80%),表观密度略有增加(增加约5%),吸水率显著降低(降低约75%);制备的再生骨料表观密度及吸水率都达到再生骨料国家I类标准。

关键词:扇形射流; 废弃混凝土; 再生骨料; 残余砂浆

中图分类号: TU 528.041 **文献标志码:** A

引用格式: 汤积仁, 姚奇, 章文峰, 等. 逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料可行性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 121-126.

TANG Jiren, YAO Qi, ZHANG Wenfeng, et al. Experiment on feasibility of separating aggregate from waste concrete by progressive jet impingement[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2): 121-126.

Experiment on feasibility of separating aggregate from waste concrete by progressive jet impingement

TANG Jiren^{1,2}, YAO Qi^{1,2}, ZHANG Wenfeng³, LU Yiyu^{1,2}, ZHANG Yangkai^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Project of Double Track of Chongqing-Yuxiang Expressway, Chongqing 408500, China)

Abstract: On the basis of the different impact resistance characteristics of mortar matrix and mortar, a method of separating the aggregate of waste concrete impacting by progressive jet was proposed. The feasibility and reliability of the method were verified by carrying out waste concrete aggregate separation experiment and recycled aggregate performance test. The results show that the aggregate separation method of progressive jet impact crushing waste concrete can effectively separate aggregate and mortar. Compared with the mechanical crushing method, the residual mortar content of recycled aggregate prepared by this method is significantly reduced by about 80%, the apparent density is slightly increased by about 5%, and the water absorption rate is significantly reduced by 75%. The apparent density and water absorption rate of the recycled aggregate prepared by this method meet the national level I standard of recycled aggregate.

Keywords: fan-shaped jet; waste concrete; recycled aggregate (RA); residual mortar

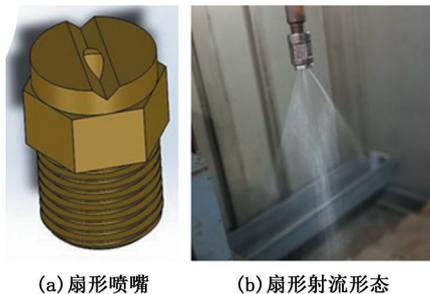
收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51625401); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT17R112); 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-bshX0025)

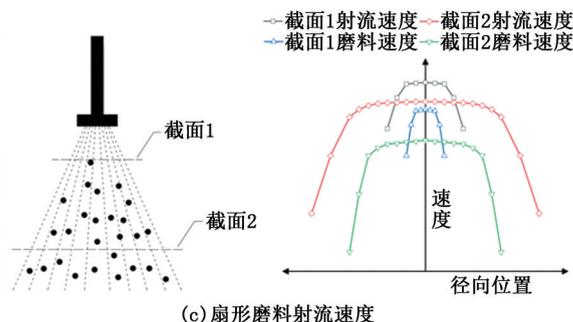
第一作者: 汤积仁(1984-), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为高压水射流理论及技术。E-mail: jrtang2010@163.com。

通信作者: 章文峰(1988-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为磨料射流理论及应用。E-mail: 20077326@cqu.edu.cn。

随着中国城镇化进程发展,拆除、扩建等建筑活动产生了大量废弃混凝土,专家预计中国废弃混凝土年产量将超过 6.38 亿 t^[1]。目前废弃混凝土主要采取运往郊外露天堆放或填埋等方式处理,不仅占用土地资源,还产生有害成分造成地下水和土壤污染,严重危害生态环境和人民健康。同时,随着混凝土用量的逐年增长,对骨料的需求也在逐年增加,专家预计在未来 20~30 a 内,全球每年需要消耗 400 亿 t 骨料^[2]。天然骨料属于不可再生资源,一直以来被随意开采,导致天然骨料资源枯竭,造成山体滑坡、河床改道等生态环境破坏问题。Guo 等^[3]研究表明,利用废弃混凝土制备再生骨料生产再生混凝土可节省约 60% 的石灰石资源,减少 15%~20% 的 CO₂ 排放量。因此将废弃混凝土制成再生骨料,不仅有助于减少对天然骨料的开采,降低大量开采天然骨料对生态环境的破坏,还可以从源头上解决废弃混凝土堆放、占地及由此带来的生态环境问题,是提高废弃混凝土利用层次与利用率的最有效途径^[4-6]。目前,再生骨料主要通过机械破碎法得到^[7],但由于机械破碎法无法有效分离固化为一体的骨料与砂浆,导致砂浆大量残留于骨料表面,研究^[8-9]表明,再生骨料残余砂浆含量高达 25%~60%。残余砂浆的存在导致再生骨料存在吸水率高、表观密度低等固有缺陷^[10-11],使得大部分再生骨料只能作为道路基层材料或路面填充材料^[12],这大大降低了再生骨料的应用价值,不利于提高废弃混凝土资源化率。针对机械破碎法制备再生骨料的不足,笔者基于废弃混凝土内骨料与砂浆基质不同力学特性,以及扇形射流速度分布均匀、作用面积大等特点,提出逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法,借助逐级递进射流破碎废弃混凝土分离骨料试验对该方法的可行性进行验证,通过测定



(a) 扇形喷嘴 (b) 扇形射流形态



(c) 扇形磨料射流速度

图 2 扇形喷嘴、扇形射流形态及扇形磨料射流速度分布示意图

Fig. 2 Sketch map of fan-shaped nozzle, morphology of fan-shaped jet and velocity distribution of fan-shaped abrasive jet

再生骨料残余砂浆含量、吸水率及表观密度等性能验证该方法的可靠性。

1 逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法提出

1.1 废弃混凝土特点

从微观角度来看,废弃混凝土是由砂浆基质、骨料、孔隙等组成的复合材料,其组成如图 1 所示。砂浆基质是一种典型的多孔脆性材料,而骨料则是一种相对致密的均质材料,《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52-2006 中规定,骨料抗压强度是混凝土强度的 1.2 倍,因此在宏观力学性质方面,骨料的抗冲击破碎能力比砂浆基质的强。

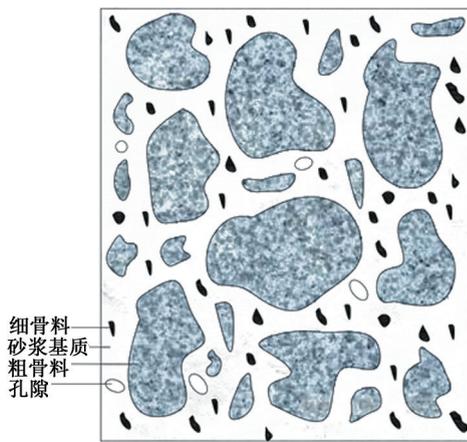


图 1 废弃混凝土组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waste concrete composition

1.2 扇形射流特点

扇形水射流是高压水经扇形喷嘴(图 2(a))喷出之后形成的形态类似于扇形的纯水射流,属于异形水射流,其外部形态如图 2(b)所示,具有形态扁平、速度分布均匀、作用面积广等特点^[13-14]。

往扇形水射流中添加一定数量的磨料后形成的扇形水射流,即为扇形磨料水射流。在扇形磨料水

射流内,磨料速度的获取是通过与水进行动量交换之后得到的,因此磨料速度应该具有与扇形水射流相似的速度分布规律(图 2(c))^[15-16]。经过加速后,磨料颗粒具备较高的动能,由于磨料颗粒通常为不规则、具有棱角、有一定硬度的材料,扇形磨料水射流切割破碎能力主要依靠磨料颗粒的冲蚀作用,因此与扇形水射流相比扇形磨料水射流可在较低压力下对材料进行高效破碎。

1.3 逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法原理

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法利用扇形磨料水射流冲蚀固化为一体的砂浆基质与骨料,由于骨料较砂浆基质抗冲击特性强,骨料具有更强的抵抗磨料冲蚀能力。基于砂浆基质与骨料不同的抗冲击特性,即可通过控制压力,在尽量避免骨料损伤的前提下,利用磨料颗粒的冲蚀作用冲击破碎砂浆基质,通过剥离大部分包裹骨料的砂浆基质,将砂浆基质对骨料的全方位立体黏接作用减弱为部分砂浆基质对骨料黏接作用;利用扇形水射流冲击被扇形磨料水射流冲蚀后的废弃混凝土,扇形水射流内高压水的冲击作用产生的准静态压力克服剩余部分砂浆基质对骨料的黏接作用,从而实现骨料与砂浆基质有效分离。

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法分离骨料的过程如图 3 所示,该方法包含两个过程,第一个过程是砂浆基质在扇形磨料水射流内磨料颗粒的冲击作用下被破碎剥离,骨料与砂浆基质黏接面积减少,砂浆基质对骨料黏接作用减弱过程

(图 3(a)、(b)和(c));第二个过程是在扇形水射流冲击作用下高压水进入废弃混凝土的孔隙、裂隙内,产生准静态压力,克服剩余砂浆基质对骨料的黏接作用,骨料从砂浆基质分离过程(图 3(d))。

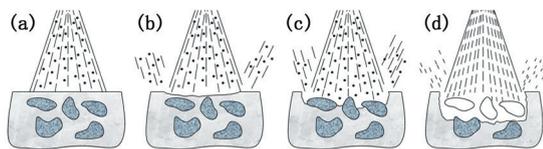


图 3 逐级递进射流破碎废弃混凝土分离骨料过程
Fig. 3 Process of aggregate separation by progressive jet crushing waste concrete

2 试验

2.1 逐级递进射流破碎废弃混凝土分离骨料试验

本试验是在重庆大学煤灾害动力学与控制国家重点实验室完成的,该系统主要由扇形喷嘴(图 4)、高压泵、高压磨料罐、电机、高压胶管等组成,试验系统如图 5 所示。

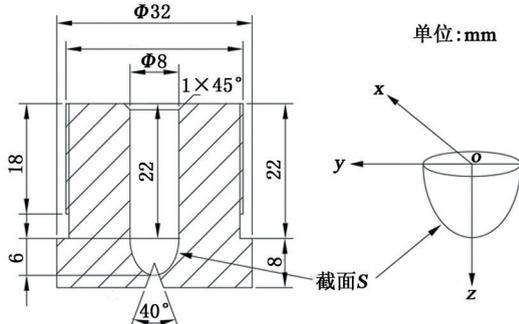


图 4 扇形喷嘴结构参数

Fig. 4 Structural parameters of fan-shaped nozzle

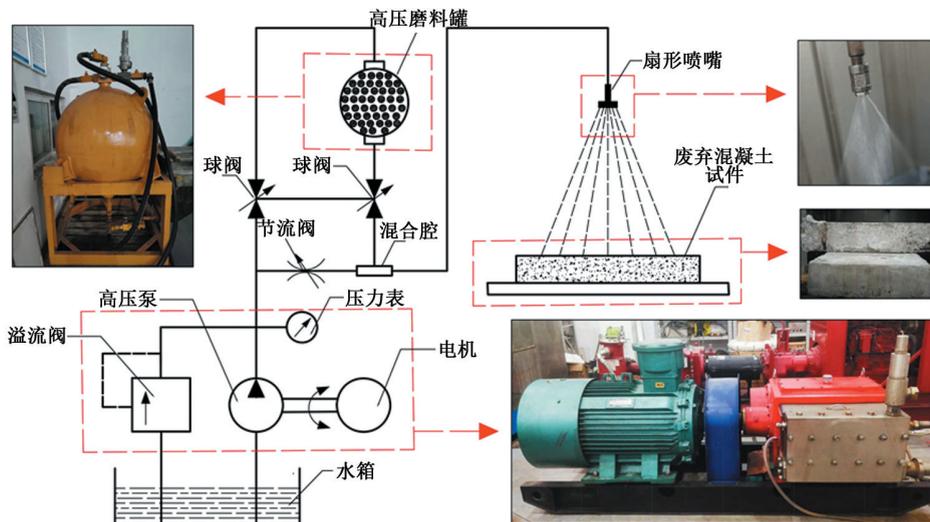


图 5 逐级递进射流破碎混凝土分离骨料试验系统

Fig. 5 Experimental system of progressive jet crushing concrete to separate aggregate

废弃混凝土试件来自重庆大学 A 区废弃房屋的混凝土支撑梁,强度约为 40 MPa,尺寸约为 800 mm×500 mm×150 mm。磨料选用粒径为 0.198~0.350 mm 陶粒,磨料密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磨料质量浓度约为 10%,靶距为 200 mm,扇形喷嘴移动速度为 10 mm/s;扇形磨料射流工作压力为 15 MPa,扇形水射流工作压力为 25 MPa。

2.2 再生骨料性能测定试验

再生骨料(RA)性能好坏直接决定了再生骨料的使用价值,在评价再生骨料性能方面,残余砂浆含量被认为是影响再生骨料性能的最主要因素^[17],而表观密度和吸水率是评价再生骨料性能的重要指标。因此,为了评价逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法的可靠性,开展再生骨料残余砂浆含量、表观密度和吸水率测定试验。

2.2.1 再生骨料残余砂浆含量

目前对于再生骨料砂浆含量的测量没有标准测试方法,根据参考文献[18]中使用的热处理方法,可测得再生骨料残余砂浆含量。

2.2.2 再生骨料表观密度及吸水率

再生骨料表观密度和吸水率可以按照 GBT25177-2010《混凝土用再生粗骨料》中的方法测量得到。

3 结果与讨论

3.1 废弃混凝土破坏形貌分析

扇形磨料水射流冲蚀后的废弃混凝土表面形貌如图 6 所示。从图 6 中可以看出,废弃混凝土表面的砂浆基质被破碎分离,原本被砂浆基质完全包裹住的骨料已经暴露出来,而且骨料表面较为光滑,无砂浆基质残留;同时骨料完整性较好,未出现断裂情况。这说明逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法对骨料的损伤较小。



图 6 扇形磨料水射流冲蚀后废弃混凝土形貌
Fig. 6 Morphology of waste concrete eroded by fan-shaped abrasive water jet

3.2 再生骨料外观形貌

利用逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法获得的再生骨料见图 7。从图 7 中可以明显看出,利用逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法获得的再生骨料附着砂浆明显比机械破碎法制备的再生骨料附着砂浆少。



图 7 再生骨料外观形貌对比

Fig. 7 Comparison of morphology of recycled aggregate

3.3 再生骨料残余砂浆含量、表观密度和吸水率

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法制备的再生骨料残余砂浆含量测试结果如图 8 所示。从图 8 中可知,与参考文献[18]~[20]中的再生骨料残余砂浆含量相比,利用逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法得到的再生骨料残余砂浆质量分数显著降低,约为 6.53%,分别降低了 83.1%、86.2%及 74.4%。

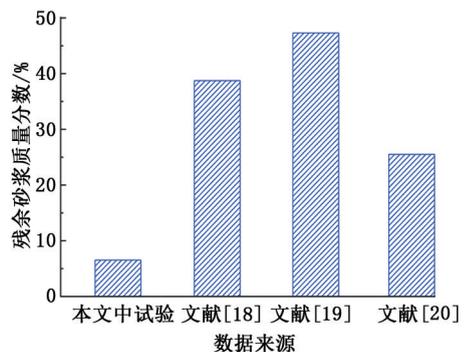


图 8 再生骨料残余砂浆含量对比

Fig. 8 Comparison of RA residual mortar content

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法得到的再生骨料表观密度如图 9 所示。从图 9 中可以看出,与参考文献[20]和[21]中再生骨料表观密度以及国家标准《混凝土用再生粗骨料》(GBT25177-2010)相比,利用逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法得到的再生骨料表观密度为 $2\,723 \text{ kg/m}^3$,分别增加了 7.63%和 3.78%,表观密度有所增加,而且明显高于国家 I 类标准。

逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法制备的再生骨料吸水率测试结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,与参考文献[18]、[20]和[21]中的再生骨料吸水率以及国家标准《混凝土用再生

粗骨料》(GBT25177-2010)相比,利用逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法得到的再生骨料吸水率显著降低,约为1.13%,分别降低了84.41%、76.46%和74.72%,而且明显低于国家I类标准。

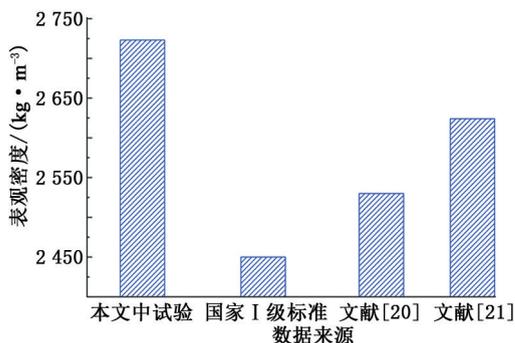


图9 再生骨料表观密度对比

Fig. 9 Comparison of RA apparent density

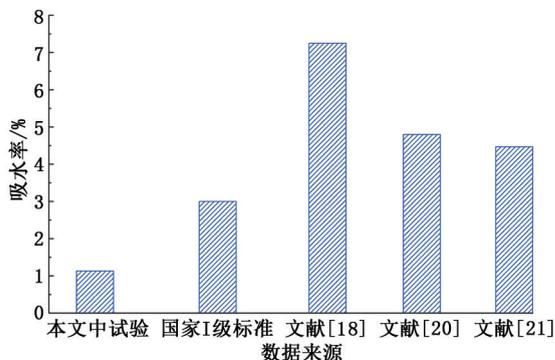


图10 再生骨料吸水率对比

Fig. 10 Comparison of RA water absorption

综上所述,与机械破碎制备再生骨料法相比,逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法能够高效分离骨料与砂浆,而且得到再生骨料残余砂浆含量明显减少,再生骨料品质明显提高。由于逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法制备的再生骨料品质较高,应用该法破碎废弃混凝土制备再生骨料将有助于再生混凝土技术的推广,提高废弃混凝土资源化率。

4 结论

(1)与机械破碎法相比,逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料方法能够高效分离骨料与砂浆,显著降低再生骨料残余砂浆含量,提高再生骨料表观密度,降低再生骨料吸水率。

(3)试验结果验证了逐级递进射流冲击破碎废弃混凝土分离骨料的可行性和可靠性,利用该法能够获得高品质再生骨料,将有助于提高再生混

凝土技术的推广,提高废弃混凝土资源化率。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,2008:2-3.
- [2] ROOHOLAMINI H, HASSANI A, ALIHA M R M. Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159:517-529.
- [3] GUO Hui, SHI Caijun, GUAN Xuemao, et al. Durability of recycled aggregate concrete-a review[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 89:251-259.
- [4] HOSSAIN M U, POON CS, LO I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA[J]. Resources Conservation and Recycling, 2016, 109:67-77.
- [5] HOSSAIN M U, WU Z Z, POON C S. Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong[J]. Waste Management, 2017, 69:325-335.
- [6] 董艳,徐建华. 工厂热拌再生沥青混合料配比设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 152-154, 159.
DONG Yan, XU Jianhua. Proportional design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3): 152-154, 159.
- [7] TOSIC N, MARINKOVI S, DASIC T, et al. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87:766-776.
- [8] LI Xuping. Recycling and reuse of waste concrete in China part I. material behaviour of recycled aggregate concrete[J]. Resources Conservation and Recycling, 2008, 53(1/2):36-44.
- [9] XIAO Jianzhuang, MA Zhiming, DING Tao. Reclamation chain of waste concrete: a case study of Shanghai[J]. Waste Management, 2016, 48:334-343.
- [10] XIE Jianhe, FANG Chi, LU Zhongyu, et al. Effects of the addition of silica fume and rubber particles on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete with steel fibres [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197(1):656-667.
- [11] 朋改非,黄艳竹,张九峰. 骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 80-84.
- [12] ALEXANDRIDOU C, ANGELOPOULOS G N, COUTE-

- LIERIS F A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from greek construction and demolition waste plants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 745-757.
- [13] 管志川, 陈庭根, 蔡镜仑. 用矩形出口喷嘴改善 PDC 钻头水力结构的研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1992, 16(2): 20-28.
- GUAN Zhichuan, CHEN Tinggen, CAI Jinglun. Research on improving the hydraulic structure of PDC bit with rectangular outlet nozzle[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1992, 16(2): 20-28.
- [14] 康灿, 王蔚峰, 张峰, 等. 扇形自由水射流流场的 PDPA 实验研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2010, 25(6): 822-829.
- KANG Can, WANG Weifeng, ZHANG Feng, et al. Experiment study of fan free water jet flow by using PDPA [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, 25(6): 822-829.
- [15] 左伟芹, 王晓川, 郝富昌, 等. 基于迭代算法的磨料颗粒加速机制研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(4): 104-109.
- ZUO Weiqin, WANG Xiaochuan, HAO Fuchang, et al. Research on acceleration mechanism of abrasive in pre-mixed abrasive water-jet based on iterative algorithm [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(4): 104-109.
- [16] 王明波, 王瑞和. 磨料水射流中磨料颗粒的受力分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(4): 47-49, 74.
- WANG Mingbo, WANG Ruihe. Analysis of forces acting on abrasive particles in abrasive water jet[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2006, 30(4): 47-49, 74.
- [17] ULSEN C, KAHN H, HAWLITSCHKE G, et al. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand[J]. *Waste Management*, 2013, 33(3): 656-662.
- [18] DEJUAN M S, GUTIERREZ P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 872-877.
- [19] BONIFAZI G, PALMIERI R, SERRANTI S. Evaluation of attached mortar on recycled concrete aggregates by hyperspectral imaging [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169: 835-842.
- [20] FAN Yuhui, XIAO Jianzhuang, TAM V W Y. Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete [J]. *Structural Concrete*, 2014, 15(2): 169-178.
- [21] LI Yang, ZHANG Shuai, WANG Ruijun, et al. Effects of carbonation treatment on the crushing characteristics of recycled coarse aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 408-420.

(编辑 沈玉英)