

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.114



# 城市垃圾焚烧底渣再生微粉强度特性的实验研究

董云<sup>1</sup>, 张国瀛<sup>1,2</sup>, 李伟华<sup>3</sup>, 王琅<sup>3</sup>, 刘畅<sup>1,2</sup>, 邹易君<sup>1,2</sup>

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816; 3. 淮安市住房与城乡建设局, 江苏 淮安 223001)

**摘要:**为实现城市垃圾焚烧底渣的高效再生利用,进行了底渣及其再生微粉的物理、化学性质实验,采用不同比例底渣再生微粉替代水泥进行胶砂强度实验。结果表明:垃圾焚烧底渣再生微粉相比水泥材质更轻、颗粒更小、更均匀;再生微粉中以氧化物形式存在的 Si、Al 和 Ca 约占底渣总质量的 70%,与水泥的化学成分组成类似,但 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高,而 CaO 含量较低。再生微粉内掺替代水泥的胶砂抗压、抗折强度均随替代比例的增加呈下降趋势;内掺 30% 时,再生微粉的强度活性指数可达 55% 以上,说明再生微粉具有一定的凝胶活性。此外,底渣再生微粉的掺入对胶砂早期强度的影响较小,随再生微粉掺量的增加,胶砂强度前期增长速度变慢,后期强度出现较大幅度的降低。

**关键词:**垃圾焚烧底渣;再生微粉;比表面积;强度活性指数;胶砂强度

**中图分类号:** TU521.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2019)06-0174-07

## Experimental analysis of the mortar strength of regenerated powder from municipal solid waste incinerator bottom ash

Dong Yun<sup>1</sup>, Zhang Guoying<sup>1,2</sup>, Li Weihua<sup>3</sup>, Wang Lang<sup>3</sup>, Liu Chang<sup>1,2</sup>, Zou Yijun<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, Jiangsu, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China; 3. Huaian Housing and Urban-Rural Department Bureau, Huaian 223001, Jiangsu, P. R. China.)

**Abstract:** For efficient reuse of municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA), the physical properties and chemical composition test of regenerated powder from MSWIBA, colloidal mortar strength test by substituting cement of different proportion of regenerated powder were carried out. It is shown that the specific density of regenerated powder from MSWIBA is lighter and the particle size is smaller and more

**收稿日期:** 2019-03-25

**基金项目:** 江苏省高校自然科学研究重大项目(17KJA560001);江苏省六大人才高峰高层次人才项目(JZ-011);江苏省住建厅建设系统科技项目(2016ZD21);江苏省经济和信息化委员会扶持项目(2017-21)

**作者简介:** 董云(1974-),男,博士,教授,主要从事固体废弃物再生利用及岩土工程研究, E-mail: hadyun@163.com。

**Received:** 2019-03-25

**Foundation item:** Major Natural Science Research Projects in Universities in Jiangsu Province (No. 17KJA560001); Jiangsu Province Six Talent Peak High-Level Talent Program (No. JZ-011); Science and Technology Planning Project of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province (No. 2016ZD21); Science and Technology Planning Project of Jiangsu Economic and Information Commission (No. 2017-21)

**Author brief:** Dong Yun (1974-), PhD, professor, main research interests: reuse of solid waste recycling and geotechnical engineering, E-mail: hadyun@163.com.

uniform than that of cement. The main chemical composition of the regenerated powder are Si, Al and Ca in the form of oxides, which account for about 70% of the total mass, which is similar to the chemical composition of cement, while the content of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is little higher, and CaO is little lower. The compressive and flexural mortar strength show a decreasing trend with the increase of the substituting proportion. The strength activity index still exceeds 55% when the replacement proportion reaches 30%, which indicated that recycled micro-powder had certain gel activity. In addition, replace cement with the regenerated powder has slight effect on the early mortar strength than long-term strength, but the early intensity increased slower with the increase of replacement proportion, and long-term strength decreased significantly.

**Keywords:** solid waste incinerator bottom ash; regenerated powder; specific surface area; strength activity index; colloidal mortar strength

随着中国城镇化进程的快速发展,城市生活垃圾的产生量不断增加,2016年全国城市垃圾清运量突破20 000万t,且每年仍以6%~8%的速度增长。目前,最常用的城市垃圾处理方式为无害化填埋和焚烧,其中,垃圾焚烧发电处理因具有减量化、无害化、资源化等优势,且伴随着机械炉排炉和流化床技术的崛起,已经成为城市垃圾处理的主要方式,垃圾焚烧处理接近城市垃圾处理总量的40%。垃圾焚烧底渣是指垃圾焚烧后从炉床尾端排出的残留物,虽然体积、质量只有原先垃圾的20%左右,但由于城市垃圾体量巨大,如何将城市生活垃圾焚烧底渣(以下简称“底渣”)进一步无害化处理和资源化利用,解决垃圾包围城市及其造成的环境污染问题已经成为目前亟待解决的问题。

在欧美、日本等发达国家,底渣的资源化利用已有几十年的发展历史,日本、瑞士、美国、法国和荷兰等国家都制定了底渣再生利用的相关法规。常见的底渣再生利用方式主要有:与其他骨料混合作为石油沥青铺面的混合物、预制混凝土砖中作为再生骨料部分替代天然骨料、作为填埋场覆盖材料及路基填料等<sup>[1-6]</sup>,这些利用方式均为粗放型的直接破碎作为再生集料或填料使用,没有考虑垃圾焚烧底渣可能具有的高效再生利用价值。目前,中国城市垃圾焚烧炉渣大多采用填埋方式处理,不但占用大量土地资源,也产生了巨额填埋费用。为最大限度地资源化利用底渣,学者们进行了相关研究,已有研究发现,底渣具有一定的与水泥类似的水化活性,可以将底渣用作水泥混合物等<sup>[7-20]</sup>。

为实现底渣的高效再生利用,本文进行了底渣及其再生微粉物理、化学性质测试和将底渣再生微

粉按不同比例等量替代水泥的胶砂强度试验,以探究底渣再生微粉的强度活性及其对胶砂强度的影响。

## 1 底渣的物理性质和化学成分分析

所用底渣来源于江苏圣元环保电力有限公司盱眙生活垃圾焚烧发电厂。底渣运输到预处理厂后,首先进行筛选,剔除块状颗粒、未充分燃烧的有机物以及可直接分拣的铁丝等金属材料;然后进行水洗和磁选,进一步回收类似螺钉、螺帽大小的金属;主要研究的对象即为经筛选、分离后的底渣。现场从料场随机取样的样品总体呈灰黑色,烘干后呈浅褐色(如图1所示),有轻微异味。

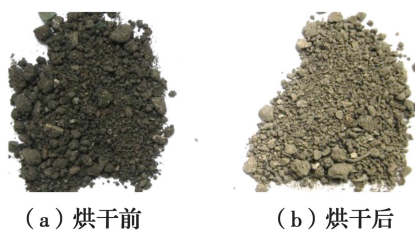


图1 底渣烘干前后的试样

Fig. 1 Bottom ash samples before and after drying

在室内进行进一步的筛分、密度和吸水率试验(网篮法),结果表明:底渣的主要物相组成物包括熔渣、黑色金属、陶瓷碎片及其他不燃物质;底渣的其他物理特性表明,底渣相较于天然集料材质较轻,密度仅约1.2~1.3 g/cm<sup>3</sup>,吸水能力较强,吸水率约为6%~8%;底渣颗粒粒径分布曲线如图2所示,其中C<sub>u</sub>=7.5, C<sub>c</sub>=1.3,说明底渣颗粒粒径分布连续、级配均匀。

底渣晶相种类较复杂,主要有硅酸盐、氧化物、

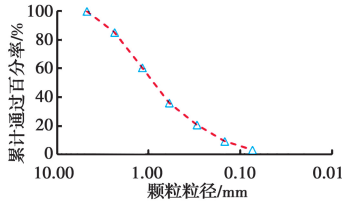


图 2 底渣颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution of bottom ash

碳酸盐和其他盐类。采用 XRD 荧光分析检测底渣的化学成分,结果如表 1 所示。

表 1 底渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical constituents of the bottom ash

成分	百分含量/%
SiO <sub>2</sub>	48.41
CaO	14.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.99
Na <sub>2</sub> O	3.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.86
K <sub>2</sub> O	1.42
MgO	1.78
TiO <sub>2</sub>	0.76

由表 1 可知,底渣中的主要化学元素为 Si、Ca、Al 等,此外,还含有少量的 Fe、Na、P、K、Mg 等元素,这些元素大多以氧化物的形式存在。其中, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 含量约占底渣总质量的 70%,属于典型的 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 化学体系,具有与水泥、粉煤灰等类似的水化活性。

## 2 底渣再生微粉的基本物理性质

实验室采用长沙天创粉末技术有限公司生产的 SK-2 型球磨机对烘干的底渣试样进行球磨工艺研究。以转速、研磨时间以及 80 目筛通过率为主要控制指标进行了粉磨工艺对比,获得合理研磨工艺(80 目通过率≥85%、转速 350 r/min、研磨时间 30 min)对应的生活垃圾焚烧底渣再生微粉,如图 3 所示。



图 3 垃圾焚烧底渣再生微粉

Fig. 3 Regenerated powder from municipal solid waste incinerator bottom ash

底渣再生微粉呈深灰色,与水泥颜色接近。采用 bettersize 2000 激光粒度仪进行颗粒分析,颗粒分析结果如表 2、图 4 所示。

表 2 再生微粉颗粒组成

Table 2 Particle distribution of regenerated powder

粒径/ $\mu\text{m}$	累计通过百分率/%
100	100
75	98.83
45	96.78
20	89.04
10	65.79
5	47.26
2	30.88
1	15.94
0.5	8.46
<0.5	2.42

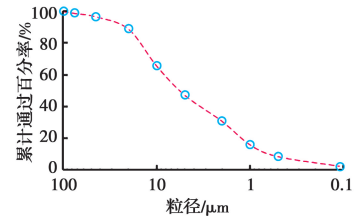


图 4 底渣微粉粒径分布曲线

Fig. 4 Particle size distribution curve of regenerated powder

结合表 2 和图 4 的颗粒分析测试结果和水泥颗粒特征比可见:普通硅酸盐水泥要求比表面积应大于 300 m<sup>2</sup>/kg,且 80  $\mu\text{m}$  的筛余不高于 10% 或 45  $\mu\text{m}$  的筛余不大于 30%。在一般条件下,水泥颗粒在 0~10  $\mu\text{m}$  时,水化最快;在 3~30  $\mu\text{m}$  时,水泥的活性最大;大于 60  $\mu\text{m}$  时,活性较小,水化缓慢。采用的再生微粉颗粒中 10  $\mu\text{m}$  以下颗粒约占总量的 65%,30  $\mu\text{m}$  以下颗粒约占总质量的 92%,60  $\mu\text{m}$  以上颗粒较少,仅占总量的约 1.5%;同时,3  $\mu\text{m}$  以下颗粒较多,约占总量的 36%;再生微粉的比表面积约为 700~800 m<sup>2</sup>/kg;相较于水泥颗粒及其活性特征,再生微粉颗粒粒径总体较为均匀,60  $\mu\text{m}$  以上活性较低的颗粒含量和 30  $\mu\text{m}$  以下活性较高的颗粒含量控制较好,但 3  $\mu\text{m}$  以下颗粒含量明显偏高。因此,再生微粉的比表面积远大于水泥,也有可能造成需水量的显著增加和浇筑性能的显著降低,进而可能影响再生微粉的胶砂强度。

### 3 底渣再生微粉的胶砂强度实验

#### 3.1 实验原材料

实验采用的水泥为淮安海螺水泥有限责任公司生产的 P.O 42.5 硅酸盐水泥,砂为标准砂;水泥的物理性质和力学性能测试结果如表 3、表 4 所示。

表 3 实验用水泥的物理性质

Table 3 Physical properties of experimental cement

数据项	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	凝结时间		安定性/mm (富士法)
		初凝	终凝	
国家标准	300	$\geq 45 \text{ min}$	$\leq 6.5 \text{ h}$	$\geq 5$
实测值	355	97 min	3.01 h	合格

表 4 水泥的力学性能

Table 4 Mechanical properties of cement

数据项	抗压强度/MPa		抗折强度	
	3 d	28 d	3 d	28 d
标准要求	$\geq 17$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$
实测值	28.6	57.6	4.5	9.0

#### 3.2 试验方案

为探讨不同掺量底渣再生微粉胶砂强度的变化特征,根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB 17671—1999),在保持水灰比不变的前提下,采用底渣再生微粉内掺加等量替代水泥,进行 9 组不同替代比例的试验,再生微粉替代水泥的质量百分比分别为 10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%、25%、27.5%、30%。

为探究底渣再生微粉胶砂强度的增长规律,进行了 3、7、14、28 d 不同龄期的胶砂强度实验。

#### 3.3 实验结果与分析

3.3.1 底渣再生微粉胶砂抗压强度结果 底渣再生微粉不同替代比例的抗压强度测试结果如表 5、图 5 所示。

表 5 再生微粉胶砂抗压强度

Table 5 Mortar compressive strength of regenerated powder

再生微粉 替代比例/%	抗压强度/MPa				强度活性 指数/%
	3 d	7 d	14 d	28 d	
10.0	23.32	34.65	42.17	45.53	79.04
12.5	22.79	34.12	41.93	43.89	76.20
15.0	19.37	31.59	40.14	42.18	73.23
17.5	19.15	28.01	40.58	41.34	73.51
20.0	18.56	27.41	34.62	36.33	63.08

续表 5

再生微粉 替代比例/%	抗压强度/MPa				强度活性 指数/%
	3 d	7 d	14 d	28 d	
22.5	18.02	27.05	34.26	35.66	61.91
25.0	17.44	26.02	34.20	35.29	61.27
27.5	15.19	22.93	30.94	32.89	57.11
30.0	15.03	22.83	30.18	32.13	55.78

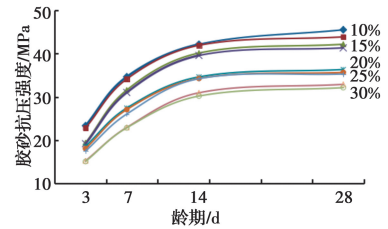


图 5 再生微粉胶砂抗压强度曲线

Fig. 5 Curve of mortar compressive strength of regenerated powder

由表 5 和图 5 可知:1)总体上,随着底渣再生微粉替代量的增加,各龄期的胶砂抗压强度均呈下降趋势。再生微粉替代比例为 30% 时,对应的强度活性指数略大于 55%。2)对比不同龄期的胶砂强度可知,随再生微粉掺量的增加,3 d 龄期的强度降低明显小于 7、14、28 d,说明再生微粉的掺加对早期强度影响较小,对长期强度影响较大。3)从胶砂强度的增长趋势可知,随再生微粉掺量的增加,3~7 d 强度增长速率明显减小,而 14 d 后强度增长速率基本都趋于平缓、一致,说明再生微粉的掺加对前期强度增长影响较大,而对后期强度增长速率影响较小。分析认为,造成上述结果的主要原因可能与前述的再生微粉颗粒组成相关,即 30  $\mu\text{m}$  以下的活性颗粒总体含量较高,因此,其前期强度下降并不明显,但由于 3  $\mu\text{m}$  以下的细颗粒过多,反而容易在硬化过程中形成孔隙,影响后期强度的增长。

综上所述,在未添加其他活性激发材料的前提下,底渣再生微粉的强度活性指数仍达 55% 以上,说明底渣再生微粉具有高效再生利用的潜在活性。底渣再生微粉的掺加虽会影响早期强度及其强度增长速率,但再生微粉掺量较小时,其胶砂早期强度降低较小而强度增长速率较快,因此,可采用适量的生活垃圾焚烧底渣再生微粉替代水泥用于预拌砂浆和预拌混凝土。

3.3.2 底渣再生微粉胶砂的抗折强度结果分析 不同替代比例的底渣再生微粉 28 d 胶砂抗折强度



测试结果如表6、图6所示。

表6 再生微粉胶砂抗折强度

Table 6 Mortar flexural strength of regenerated powder

微粉掺量/%	抗折强度 /MPa	强度等级 /%
10.0	5.22	58.0
12.5	5.12	56.9
15.0	4.99	55.4
17.5	5.01	55.7
20.0	4.97	55.2
22.5	4.92	54.7
25.0	4.80	53.3
27.5	4.61	51.5
30.0	4.47	49.7

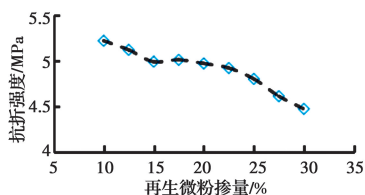


图6 再生微粉胶砂抗折强度曲线

Fig. 6 Curve of mortar flexura strength of regenerated powder

由表6和图6可知,底渣再生微粉胶砂抗折强度与抗压强度具有相似的变化趋势,即:1)抗折强度总体上随再生微粉替代水泥比例的增加而降低。2)底渣再生微粉替代量为30%时,对应的强度等级约50%,略低于抗压强度。3)从再生微粉不同掺量对应的抗压强度和抗折强度对比分析可见,相同再生微粉掺量对应的胶砂抗折强度降低均大于抗压强度,分析认为,这是由于微粉的细度远大于水泥细度,使得胶砂试件收缩增大、内部孔隙增加所致。

### 3.3.3 底渣再生微粉胶砂强度的实验结果分析

在凝胶材料水化反应过程中,主要是4种矿物成分与水反应,分别是:硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙以及铁相固溶体,前二者水化速度较慢,生成水化硅酸钙(C—H—S凝胶)和氢氧化钙;后两者水化速度快,先生成介稳状态的水化铝酸钙,最终转化为水石榴石( $C_3AH_6$ )。对底渣矿物组成分析揭示出底渣微粉中含有与水泥熟料、粉煤灰类似的化学成分,这使得生活垃圾焚烧底渣有一定水化活性,胶砂强度实验也证明了底渣微粉强度活性指数大于55%。

与普通硅酸盐水泥成分对比,底渣微粉中的 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 含量远高于普通水泥,但CaO的含量则

远低于普通水泥,因此,即使再生微粉的颗粒更细、有效颗粒成分的水化反应更快、活性更大,但水化反应产生的硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等有效晶体相比于水泥要少,使得底渣再生微粉的胶砂强度较水泥低;当再生微粉掺量适中时,底渣微粉中的铝酸根离子、硅酸根离子仍有可能与水泥中的游离CaO再次结合,促进后期强度的增长。但再生微粉掺量超过一定比例后,再生微粉中的铝酸根离子、硅酸根离子已无法水化形成有效的晶体,导致后期强度出现较大的降低。

实验采用的底渣再生微粉细度远大于水泥,当再生微粉掺量小于15%时,对胶砂工作性能和胶砂强度的影响较小,而随着再生微粉替代量的增加,再生微粉细度大引起的需水量变化、胶砂试件体积收缩增大及其引起的内部孔隙增加等,也可能导致水化反应变缓、胶砂强度降低。

另外,底渣来源及成分的复杂性、多变性也会导致再生微粉本身的烧失量较高,用于部分替代水泥可能对水泥胶砂强度产生一定的影响。

## 4 结论与讨论

进行了城市生活垃圾焚烧发电底渣及再生微粉的基本物理、化学性质测试,并按照不同比例内掺替代水泥进行胶砂强度实验,可得到如下结论:

1) 城市垃圾焚烧底渣相比普通集料材质较轻,吸水率较高,底渣再生微粉具有与水泥类似的化学成分,但 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 含量较高,而CaO含量较低;在未掺加其他添加材料的前提下,按照30%的比例内掺等量替代水泥时,其强度活性指数略大于55%。

2) 随着底渣再生微粉掺量的增加,胶砂抗压强度和抗折强度均呈下降趋势,对应的抗折强度降低大于抗压强度。底渣再生微粉的掺加对早期强度的影响较小,但对早期强度增长速率影响较大,随着再生微粉掺量的增加,前期强度增长变缓,后期强度增长基本一致,随着再生微粉掺量增加,后期强度出现较大的降低。

3) 分析认为,造成上述特征的主要原因是再生微粉中CaO含量较低、再生微粉细度较大以及由此造成的需水量变化等。

研究成果证明了垃圾焚烧底渣再生微粉具有火

山灰活性,部分替代水泥用于混凝土中在技术、经济上是可行的,也有利于减小城市生活垃圾焚烧尾渣带来的环境问题,符合绿色、可持续发展的理念。

实验结果仅囿于一个垃圾焚烧发电厂的不同样本,为进一步推动生活垃圾焚烧底渣的高效再生利用,以下几方面需进一步深入研究:一是不同地区、不同焚烧厂的底渣成分及活性的对比分析;二是进行粉磨过程中加入不同剂量、不同添加材料(围绕CaO、氢氧化钙)和不同细度再生微粉的对比分析;三是结合底渣再生微粉标准稠度用水量进行胶砂强度试验,探究用水量对再生微粉活性及胶砂强度的影响。

### 参考文献:

- [1] ALLEGRINI E, VADENBO C, BOLDRIN A, et al. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 151: 132-143.
- [2] SONG Y M, LI B L, YANG E H, et al. Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 56: 51-58.
- [3] YANG E H, LIU Y Q, CHEN Z T. Environmental sustainability through recycling incineration bottom ash for the production of autoclaved aerated concrete [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 650: 51-70.
- [4] KEULEN A, VAN ZOMEREN A, HARPE P, et al. High performance of treated and washed MSWI bottom ash granulates as natural aggregate replacement within earth-moist concrete [J]. *Waste Management*, 2016, 49: 83-95.
- [5] VERBINNEN B, BILLEN P, VAN CANEGHEM J, et al. Recycling of MSWI bottom ash: A review of chemical barriers, engineering applications and treatment technologies [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8(5): 1453-1466.
- [6] SORMUNEN L A, KOLISOJA P. Construction of an interim storage field using recovered municipal solid waste incineration bottom ash: Field performance study [J]. *Waste Management*, 2017, 64: 107-116.
- [7] 胡艳军,李国建,宁方勇,等.城市垃圾焚烧底灰资源化处理的可行性研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(12): 42-47,69.
- HU Y J, LI G J, NING F Y, et al. Study on the feasibility of municipal solid waste incineration bottom ash reutilization [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(12): 42-47,69. (in Chinese)
- [8] 徐谦,肖衡林.城市生活垃圾焚烧底渣特性试验研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(10): 104-107.
- XU Q, XIAO H L. Experimental study on properties of municipal solid waste incineration bottom ashes [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(10): 104-107. (in Chinese)
- [9] 孙路石,李敏,向军,等.城市生活垃圾焚烧灰渣的特征[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(8): 77-79.
- SUN L S, LI M, XIANG J, et al. Characteristics of the ash deposits from incinerated municipal solid waste [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2009, 37(8): 77-79. (in Chinese)
- [10] 李越,孙德安.垃圾焚烧炉渣的力学特性和破碎特性试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(25): 279-283.
- LI Y, SUN D A. Experimental study on mechanical property and breakage characteristic of waste incineration slag [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(25): 279-283. (in Chinese)
- [11] 谢燕,吴笑梅,樊粤明,等.生活垃圾焚烧炉渣用作水泥混合材的研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(12): 37-43.
- XIE Y, WU X M, FAN Y M, et al. Investigation into incineration bottom ash of municipal solid waste used as cement admixture [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(12): 37-43. (in Chinese)
- [12] 张涛,赵增增.城市生活垃圾焚烧底灰混凝土耐久性研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2014(5): 84-87.
- ZHANG T, ZHAO Z Z. Research on durability of concrete with municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2014(5): 84-87. (in Chinese)
- [13] 刘栋,李立寒.生活垃圾焚烧炉渣集料的胶凝特征[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 377-383.
- LIU D, LI L H. Cementitious properties of municipal

- solid waste incineration bottom ash aggregate [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(3): 377-383. (in Chinese)
- [14] 张涛, 赵增增. 城市生活垃圾焚烧炉渣在混凝土中的应用研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 65-69.  
ZHANG T, ZHAO Z Z. Reutilization of municipal solid waste incinerator bottom ash as concrete aggregates [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(4): 65-69. (in Chinese)
- [15] SAIKIA N, MERTENS G, VAN BALEN K, et al. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 76-85.
- [16] KUO W T, LIU C C, SU D S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 328-335.
- [17] REITERMAN P, HOLČÁPEK O, KRAUSOVÁ A, et al. High-volume municipal solid waste incineration bottom ash concrete [J]. Key Engineering Materials, 2017, 722: 181-186.
- [18] ŠULC R, FORMÁČEK P. CFBC Bottom ash as fine active filler for high performance composite building materials [J]. Key Engineering Materials, 2017, 755: 90-95.
- [19] LEE J B, KIM S S, LEE J Y, et al. Study on the pozzolanic activity of finely ground bottom ash for cement replacement [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2017, 18(4): 291-300.
- [20] LYNN C J, DHIR R K, GHATAORA G S. Municipal incinerated bottom ash use as a cement component in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(10): 1-14.

(编辑 王秀玲)