

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.061



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 城市生活垃圾焚烧渣工程特性试验研究

郭晓静<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>, 何肖<sup>2</sup>, 蒲诃夫<sup>2</sup>

(1. 北京涇渭环境科技有限公司, 北京 100020;

2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 焚烧法减量效果显著, 已成为生活垃圾的主要处理方法, 然而城市生活垃圾焚烧会产生大量底渣, 底渣如何处置利用是当前一个重要且亟待解决的难题。以武汉地区底渣为例, 借助微观观测技术和室内测试试验, 较为全面地分析武汉底渣的物理、化学及工程特性, 与不同地区底渣特性进行对比, 并进一步探讨武汉底渣在道路工程中作为路基填料、垃圾填埋场中用作防渗层的可行性。结果表明, 底渣颗粒形状各异, 表面光滑且有细小孔洞, 是一种塑性较低、比重较高的级配不良砂性粗粒土; 底渣重金属元素浸出浓度均未超过国家相关标准的规定限值; 底渣的击实性与中细砂相似, 有一定的压缩性, 但其固结特性不明显; 底渣的渗透系数略大于细砂, 经掺和膨润土后可考虑用作垃圾填埋场防渗材料; 底渣内摩擦角接近中细砂取值, 同时还具有一定的黏聚力; 在承载变形能力上, 底渣的 CBR 测定值较高, 满足路基工程材料对承载力的要求。

**关键词:** 城市生活垃圾; 焚烧底渣; 微观形貌; 工程特性; 浸出特性

中图分类号: X799.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2024)04-0120-09

## Experimental study on engineering characteristics of incineration bottom ash of municipal solid waste

GUO Xiaojing<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, HE Xiao<sup>2</sup>, PU Hefu<sup>2</sup>

(1. Beijing Jingwei Environmental Engineering Co., Ltd., Beijing 100020, P. R. China; 2. School of Civil and

Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** Incineration method has remarkable reduction effect and has become the main treatment method for municipal solid waste. However, incineration would produce a large amount of slag, for reuse of municipal solid waste incineration bottom ash, this paper investigated the bottom ash from a Wuhan incineration plant, and comprehensively analyzed the physical, chemical and engineering characteristics of the bottom ash by experiments and testing. Then the characteristics of bottom ash in different areas were summarized and compared with the present study. Furthermore, the feasibility of using the bottom ash as subgrade material in road engineering was discussed. The results show that, the bottom ash particles are various and randomly arranged, and the surface is smooth and distributed with obvious fine pores. The bottom ash is classified as a

收稿日期: 2023-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1806003)

作者简介: 郭晓静(1984-), 女, 主要从事固体废物处理与处置, E-mail: gtyguoxiaojing@126.com。

蒲诃夫(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: puh@hust.edu.cn。

Received: 2023-01-03

Foundation item: The National Key R & D Program of China (No. 2019YFC1806003)

Author brief: GUO Xiaojing (1984-), main research interests: solid waste treatment and disposal, E-mail: gtyguoxiaojing@126.com.

PU Hefu (corresponding author), PhD, professor, E-mail: puh@hust.edu.cn.

poorly graded coarse-grained sandy soil with low plasticity and high specific gravity. The leaching concentration of heavy metals from this bottom ash does not exceed the threshold value specified in the relevant national standards. The compaction characteristics of this bottom ash are similar with those of sand or gravel, it has relatively low compressibility, and its consolidation characteristics are not obvious. The permeability coefficient of the bottom ash is slightly greater than that of fine sand, and it can be considered as a landfill impermeable layer after being mixed with bentonite. The internal friction angle of bottom ash is close to that of gravel and has certain cohesion. In terms of the bearing capacity, the relatively high CBR reveals that the bearing capacity of this bottom ash meets the requirement of subgrade materials in road engineering.

**Keywords:** municipal solid waste; incineration bottom ash; micromorphology; engineering characteristics; leaching characteristics

随着中国城镇化进程的推进,城市生活垃圾的年产量持续维持高位,巨量的垃圾给城市管理带来了严峻的挑战。由于焚烧法的减量效果显著,现已成为中国处理生活垃圾的主要手段。然而,垃圾焚烧会产生大量的底渣,约占生活垃圾焚烧灰渣总量的80%<sup>[1-2]</sup>。因此,如何处理底渣,实现资源化利用成为当前学者们关注的热点。

一些学者从底渣的颗粒级配、击实特性及强度特性等角度出发,发现底渣作为道路材料具有良好的抗变形能力<sup>[3-6]</sup>,拌和黏土可以改善底渣级配,进一步强化混合土的抗剪强度<sup>[7-8]</sup>。也有一些学者<sup>[9-12]</sup>研究了底渣重金属浸出毒性特征,得出底渣作为道路材料无重金属污染的结论。另外,Le等<sup>[13]</sup>通过三轴压缩试验分析出底渣的力学特性与密实砂土相似。Izquierdo等<sup>[14]</sup>研究了底渣的击实和浸出特性,结果表明,重型击实试验所测最佳含水率和最大干密度满足道路骨料替代物的规定要求,底渣不仅具有高透水性,而且满足当地浸出毒性标准。这些研究结果表明,底渣具有资源化利用的潜力。然而,各地区的垃圾在组分及焚烧技术上存在差异,使得底渣的化学组成、工程性质不尽相同<sup>[15]</sup>。因此,在考察底渣资源化利用时,应考虑地域差异带来的影响。

针对武汉地区城市生活垃圾焚烧底渣工程特性系统性报道的匮乏,笔者较为全面地测试了武汉地区底渣的物理特性、化学特性及工程特性,探讨底渣在工程上的应用场景,为实现其资源化利用提供相关技术参数的支撑。具体包括:采用扫描电子显微镜(SEM)分析底渣微观形貌,通过筛分试验与基础物理参量标定试验来完成底渣土体分类;采用波长色散型X射线荧光光谱仪(WD-XRF)和X射线衍射(XRD)分析技术测定底渣化学和矿物组成;采用室内浸出毒性试验分析底渣浸出特性及对环境的影响;以《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)作为参考,通过室内土工试验获得重要工程

特性力学参数值,为底渣作为路基材料、防渗材料的工程应用提供理论依据。

## 1 物理特性分析

### 1.1 微观形貌

通过SEM可以观察到底渣的微观尺寸、形状、内部微结构和空隙分布,如图1所示。从图1可以看出,在放大250倍时,底渣颗粒呈无规律分布,其形状不规则,颗粒间无明显黏结和咬合。在放大500倍时,底渣单颗粒表面呈现出形状各异、分布不均的细小孔洞,该特征可能是因为垃圾在高温煅炼过程中空气未排尽。在放大1 000倍时,可以看到单颗粒部分表面光滑且无角状突起,这是底渣颗粒间发生摩擦所致。在放大10 000倍时,可观察到单颗粒内部多附着团聚或颗粒状晶体。

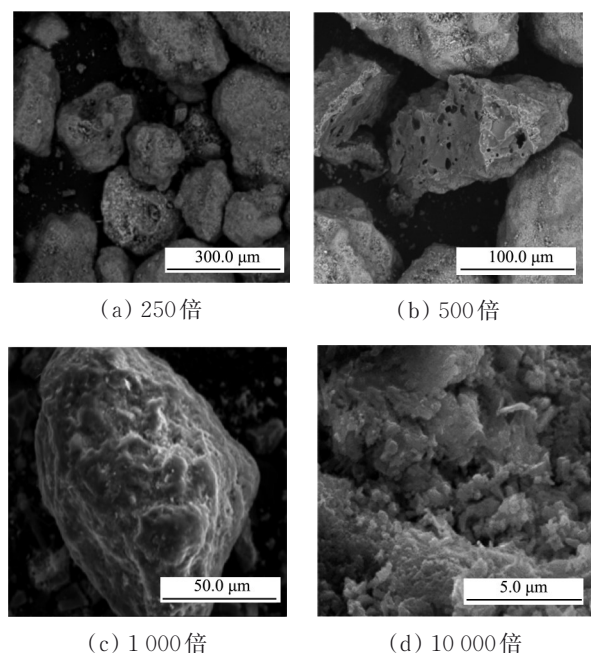


图1 不同放大倍数下底渣的微观形态

Fig. 1 Micromorphology of bottom ash at different magnifications

## 1.2 颗粒级配

通过筛分试验测得底渣的颗粒级配曲线,并与其他现有研究成果进行对比,如图 2 所示。根据图 2 可进一步计算出不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  分别为 15 和 0.42,根据  $C_u > 5$ 、 $C_c > 1$  及粒径小于 2 mm 的颗粒含量占比约为 55%,可知试验底渣分类为级配不良砂性粗粒土。

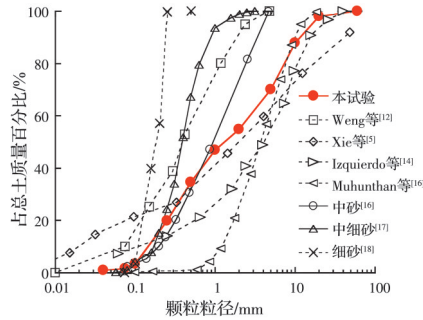


图 2 底渣的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain distribution curve of bottom ash

从图 2 可以看出,底渣粒径小于 2 mm 的部分与中砂<sup>[16]</sup>的级配曲线基本重合,粒径小于 0.5 mm 的部分与中细砂<sup>[17]</sup>的级配曲线基本重合,只有粒径小于 0.1 mm 的极少部分底渣与细砂<sup>[18]</sup>的级配曲线重合。因此,粒径小于 2 mm 和粒径小于 0.5 mm 的这部分底渣可考虑分别作为中砂、中细砂骨料替代材料。而粒径大于 2 mm 的底渣可采取一定的预处理措施强化级配分布,如水洗、机械研磨及掺和骨料等。Izquierdo 等<sup>[14]</sup>对西班牙底渣进行了颗粒级配分析,其曲线与本文曲线很接近,与 Xie 等<sup>[5]</sup>所得曲线也较为接近。同时,试验底渣粒径分布在文献<sup>[15]</sup>描述的范围之内。总的来说,不同地区的底渣级配区间分布情况相似,但由于部分粒径组含量存在差异,故筛分曲线也存在一定的不同。

## 1.3 液限和塑限

通过室内试验测出底渣的塑限  $w_p$ 、液限  $w_L$  及液性指数  $I_L$ ,见表 1。根据结果可判断底渣为硬塑状态,可塑性较差。另外,表 1 还汇总了美国底渣<sup>[19]</sup>及相关国家规范要求值。可以看出,相较于美国底渣,试验底渣  $I_L$  值偏小;显然, $w_p$  (22.9%) 不能满足中国公路路基水泥稳定土的规范要求,使用前需采取一定的预处理;但满足公路路基级配砾石施工规范要求,可考虑作为公路路基级配砾石的替代材料。同时,根据中国公路路基施工规范的填料要求,底渣的  $w_p$ 、 $w_L$  均满足作为路基填料的条件。

## 1.4 颗粒比重

通过比重瓶法测得底渣颗粒比重  $G_s = 2.71$ ,在文献<sup>[15]</sup>报道的范围 (1.2~2.8) 内,并与其他土体

表 1 底渣的塑液限参数

Table 1 Liquid and plastic limits of bottom ash

类别	液限/ %	塑限/ %	液性指 数/%
本试验	26.5	22.9	0.1
美国底渣 <sup>[19]</sup>	33.0	27.0	6.0
公路路基水泥稳定土施工规范要求 <sup>[20]</sup>	$\leq 40.0$	$\leq 17.0$	$\leq 12.0$
公路路基级配砾石施工规范要求 <sup>[21]</sup>		$< 28.0$	$< 9.0$
公路路基施工规范填料要求 <sup>[22]</sup>	$\leq 50.0$	$< 26.0$	

及相关底渣研究值进行比较,结果如图 3 所示。试验底渣颗粒比重与粉土 (2.70~2.71) 和粉质黏土 (2.71~2.74) 接近,略大于砂土 (2.65~2.69)。Zekkos 等<sup>[19]</sup>测定出底渣飞灰混合渣的颗粒比重范围为 2.1~2.6, Siddique<sup>[23]</sup>和 Pandeline 等<sup>[24]</sup>测得的比重范围分别为 2.4~2.6 和 1.7~1.8,均小于本试验结果,这可能主要与底渣包含的杂质(玻璃碎片、金属颗粒)有关。

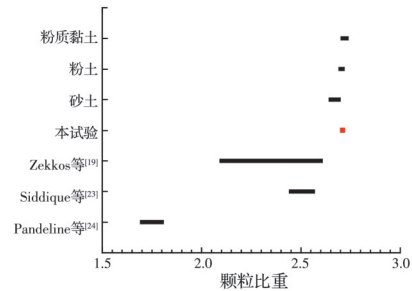


图 3 底渣颗粒比重的对比

Fig. 3 Comparison of the specific gravity of bottom ash particles

## 2 化学特性分析

### 2.1 WD-XRF 测试分析

采用 WD-XRF 对底渣进行测试,并将结果与其他地区底渣进行比较,见表 2。由表 2 可见,底渣主要化学元素有: Si、Ca、Al、Fe、P、S、Mg、Na 和 Cl,其中 Si 含量为 36.24%, Si、Ca、Al、Fe 四种元素之和占总含量的 80%,这与 Dou 等<sup>[25]</sup>研究并统计的亚洲底渣、Xie 等<sup>[5]</sup>研究的天津底渣、荷兰底渣及西班牙底渣<sup>[26-27]</sup>中 4 种元素占比结果相近。这主要是因为高温焚烧过程中,这几种元素均极难挥发,因而富集于底渣中。另外,试验底渣中的  $SO_3$ 、 $P_2O_5$  和有机质的含量分别为 2.34%、3.69% 和 2.04%,而 Na、Mg 等碱金属元素的含量均低于 2%,且 Na 元素含量远低于亚洲底渣的平均含量,此现象可能与底渣组分的差异性相关。



表 2 底渣的化学成分  
Table 2 Chemical compositions of bottom ash

来源	成分/%										
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	LOI	其他
本研究	36.24	25.51	13.34	5.95	1.69	1.84	2.34	3.69	0.71	2.04	0.58
亚洲 <sup>[25]</sup>	43.68	42.63	13.16	17.89	4.12	17.37					7.37
天津 <sup>[5]</sup>	55.20	15.90	5.70	9.60	2.60	5.10	0.90			1.80	7.54
中国台湾 <sup>[9]</sup>	27.60	30.60	3.60	8.50	4.10	2.30		3.10		16.00	5.50
荷兰 <sup>[26]</sup>	12.29	27.90	9.48	7.87	1.75	0.99	5.28	1.06	1.78	3.00	3.41
西班牙 <sup>[27]</sup>	45.00	4.20	2.70	2.90	1.30	8.60	1.10		0.23	4.10	1.30

注:LOI为烧失量,表示底渣加热分解的气态产物和有机质含量。

2.2 XRD 测试分析

采用 XRD 分析底渣的晶相,得到底渣衍射图谱,如图 4 所示。由图 4 可知,试验底渣的物相组成主要有 SiO<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>、CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> 及 Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>,所含的主要化学元素为 Si、Ca、Al、Fe,与 WD-XRF 测试结果相符。与文献[28-29]对比可知,SiO<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>、CaCO<sub>3</sub>是广泛存在于底渣中的 3 种基本晶相。

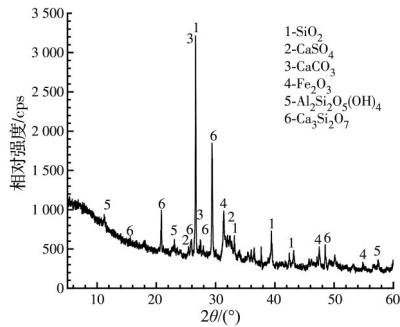


图 4 底渣的 XRD 衍射图谱

Fig. 4 XRD diffraction pattern of bottom ash

2.3 浸出毒性试验

试验底渣浸提液的提取操作流程依照《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》(HJ/T 300—2007)进行,采用电感耦合等离子体质谱仪测定浸提液中重金属元素的浓度,见表 3。可以看出,8 种重金属元素的浓度由低到高依次为: Cd<As<Ba<Pb<Cr<Ni<Cu<Zn。根据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)可知,底渣重金属毒性浸出浓度均未超标。

另外,还可以看出,8 种重金属均未超标,也未超过澳大利亚固体废物作填料标准的环境背景值<sup>[30]</sup>。表 3 还给出了与其他地区底渣浸出浓度值的比较结果,可以看出,澳门地区 Pb 浓度超过 TCLP 和危废鉴别标准限值,天津地区 Pb 浓度是武汉地区的 2 倍,但武汉地区 Zn 和 Cu 浓度远大于天津和澳门。同时,与亚洲地区相比,除了 Ba 元素外,试验底

渣中其余 7 种重金属元素浓度均远低于其区间下限,其中 Pb 浓度更是不到下限值的百分之一。这可能与各地区在垃圾组分、垃圾分类标准及垃圾焚烧技术上的差异有关。

3 工程特性分析

3.1 击实性

通过重型击实试验测得干密度与含水率关系曲线,如图 5 所示。可以看出,底渣最佳含水率  $w_{opt}=10.6\%$ ,最大干密度  $\rho_{d,max}=2.00\text{ g/cm}^3$ 。

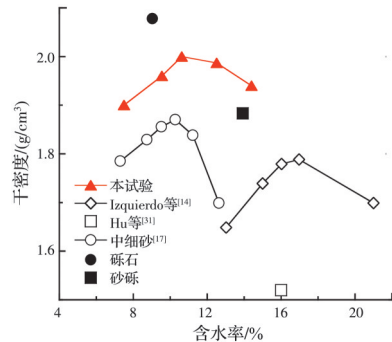


图 5 底渣的击实曲线

Fig. 5 Compaction curve of bottom ash

图 5 还给出了与其他现有成果的比较。由图 5 可见,试验底渣  $\rho_{d,max}$  大于砂砾且小于砾石,最佳含水率  $w_{opt}$  小于砂砾且大于砾石,其击实曲线的变化情况与中细砂<sup>[17]</sup>类似。Izquierdo 等<sup>[14]</sup>测定的西班牙底渣  $\rho_{d,max}=1.79\text{ g/cm}^3$ ,小于试验底渣,而  $w_{opt}$  大于试验底渣,Hu 等<sup>[31]</sup>测得的底渣击实性与试验底渣也不相同。击实参数的差异性可能与底渣颗粒级配和含水率的不均匀分布相关。

3.2 压缩性

通过固结试验得到底渣孔隙比与竖向压力关系曲线,如图 6 所示,计算得到压缩系数  $a_{1-2}=0.19\text{ MPa}^{-1}$ ,压缩指数  $C_c=0.06$ ,卸载阶段回弹指数在 0.007 左右。在较低应力(小于 400 kPa)下,压缩指数范围为 0.01~0.08,而再加载阶段进行到 400~800 kPa 时压缩指数最大,为 0.12。此外,根据时间平方根法计算出试验底渣的固结系数  $C_v$  为  $0.24\text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 3 底渣重金属毒性浸出浓度的对比

Table 3 Comparison of toxic leaching concentrations of heavy metals in bottom ash

来源	重金属浓度/(mg/kg)							
	铜Cu	锌Zn	铅Pb	铬Cr	镍Ni	镉Cd	砷As	钡Ba
本研究	10.76	45.31	0.35	0.55	0.83	0.06	0.09	0.17
TCLP 规定值			5	5		1	5	100
EPA 填料规定值 <sup>[30]</sup>	100	200	300	1	60	3	20	
《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》 (GB 5058.3—2007)规定值	100	100	5	15	5	1	5	100
《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)第一类用地筛选值	2 000		400	3	150	20	20	
天津 <sup>[5]</sup>	0.93	12.03	0.70	0.07	0.26	0.06	0.01	
澳门 <sup>[32]</sup>	0.10	1.71	19.06	0.13		> 0.01	0.12	0.41
亚洲 <sup>[25]</sup>	100~10 000	100~10 000	100~10 000	10~1 000	10~1 000	1~100	1~100	

注: TCLP 规定值参照 *Hazardous Waste Characteristics* 中毒性特征最大浓度值。

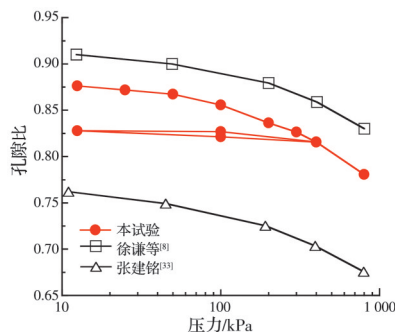


图 6 底渣的压缩曲线

Fig. 6 Compressibility curves of bottom ash

表 4 为几种底渣压缩参数研究结果的对比。从表 4 中可见,徐谦等<sup>[8]</sup>测得的压缩模量  $E_{s1-2}$  大于本试验结果,但两者均小于 20 MPa,故可判定底渣为中等压缩性土体。

张建铭<sup>[33]</sup>分别对 0.90 和 0.95 这两个压实系数下的底渣进行了研究,从表 4 中可以看出,试验底渣的压缩参数与其在压实系数为 0.90 时基本相同。进一步比较两者的固结系数发现,试验底渣的固结系数在加载阶段更大,但在再加载阶段与之接近。这可能是底渣的固结特性不明显造成的,也说明了试验底渣在道路工程应用中基本能够满足荷载作用下路基填料的要求。

### 3.3 渗透性

通过变水头渗透试验,得到武汉底渣渗透系数为  $3.2 \times 10^{-3}$  cm/s,与 Muhunthan 等<sup>[16]</sup>测得的美国

底渣及相对密实度为 55% 的细砂<sup>[18]</sup>结果接近(见表 5),与图 1 中粗颗粒形态及图 2 中的粒径分布吻合。

根据文献报道<sup>[15]</sup>,掺入少量的低渗透性材料(例如高岭土、膨润土等)可将底渣的渗透系数降低至  $10^{-7}$  数量级,从而作为垃圾填埋场防渗材料。在 18% 含水率下,对试验底渣掺和 10% 钠化钙基膨润土、过筛的试验底渣(即去除 1 mm 以上粒径的粗粒)掺和 10% 钠化钙基膨润土的混合料进行标准击实,测得的渗透系数分别为  $1.2 \times 10^{-6}$ 、 $8.1 \times 10^{-8}$  cm/s,后者低于  $1 \times 10^{-7}$  cm/s,由此可见,去除粗颗粒并掺和少量膨润土的试验底渣可作为渗材料。

### 3.4 抗剪强度

采用 ZJ 型应变控制直剪仪,对底渣进行剪切试验。图 7 给出了不同垂直压力荷载下底渣水平位移与剪应力的关系曲线。由图 7 可见,在不同垂直压力作用下,剪应力-水平位移曲线的变化情况相似,可分为 3 个阶段:1)当水平位移较小时,随着水平位移的增加,剪应力增大;2)当剪应力增至峰值时,试样发生破坏,剪应力逐渐减小;3)当剪应力减小到某一值后,呈现一定的残余应力,剪应力不再随水平位移的增大而发生明显变化。

剪切强度和正应力的关系曲线如图 8 所示,计算得到底渣内摩擦角  $\varphi = 31.8^\circ$ ,黏聚力  $c = 41.2$  kPa。与其他相关底渣研究结果进行比较,见表 6。由表 6 可见,Weng 等<sup>[12]</sup>、Muhunthan 等<sup>[16]</sup>和 Lin 等<sup>[34]</sup>

表 4 底渣压缩性参数比较

Table 4 Comparison of compression parameters in bottom ash

来源	压实系数	压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩指数 $C_c$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	固结系数 $C_v/(\text{m}^2/\text{s})$
本试验	0.95	0.19	0.06	9.46	0.24
徐谦等 <sup>[8]</sup>	0.90	0.10	0.03	18.90	
张建铭 <sup>[33]</sup>	0.90	0.20	0.07	9.14	0.04
张建铭 <sup>[33]</sup>	0.95	0.13	0.04	13.18	0.03

表 5 底渣渗透系数对比

Table 5 Comparison of permeability coefficient of bottom ashes

类型	渗透系数/(cm/s)
试验底渣	$3.2 \times 10^{-3}$
试验底渣+10%膨润土	$1.2 \times 10^{-6}$
过筛试验底渣+10%膨润土	$8.1 \times 10^{-8}$
细砂 <sup>[18]</sup>	$2.1 \times 10^{-3}$
美国底渣 <sup>[16]</sup>	$2.5 \times 10^{-3}$
欧美底渣 <sup>[15]</sup>	$2.0 \times 10^{-7} \sim 6.8 \times 10^{-2}$

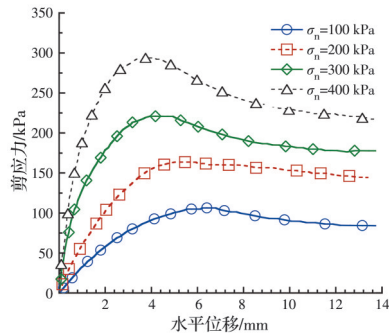


图 7 底渣剪应力与水平位移的关系曲线

Fig. 7 Shear stress versus horizontal displacement relation curve of bottom ash

通过直剪试验测得底渣内摩擦角取值范围为  $20.8^\circ \sim 52.7^\circ$ , 本文结果与上述范围一致。Xie 等<sup>[5]</sup>、Le 等<sup>[13]</sup>、Zekkos 等<sup>[19]</sup>及 Becquart 等<sup>[35]</sup>经三轴试验得到的底渣内摩擦角均不小于  $36.9^\circ$ 。可见, 相比直剪试验, 采用三轴剪切试验获得的底渣强度参数更大。范广等<sup>[36]</sup>通过大型直剪试验所测强度参数结果大于本研究, 而徐谦等<sup>[8]</sup>通过快剪试验测得的强度参数又偏小, 这可能与试样的尺寸效应及围压等影响因素有关。

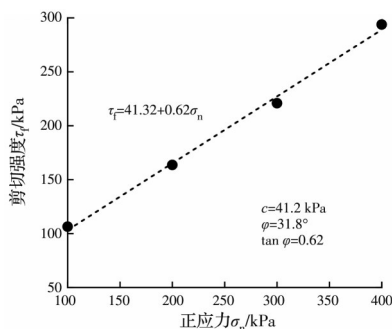


图 8 底渣剪切强度与正应力的关系曲线

Fig. 8 Shear strength versus normal stress relation curve of bottom ash

另外, 从表 6 中还可以看出, 底渣不仅具有与中细砂、细砂近似的内摩擦角, 还存在一定的黏聚力, 其强度特性并不与砂性土完全相同, 产生差异的主要原因在于底渣的密实度和含水率分布。

表 6 底渣强度参数对比

Table 6 Comparison of strength parameters of bottom ash

强度试验类型	试验结果		数据来源
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	
直剪试验	41.2	31.8	本试验
		26~37.2	Weng 等 <sup>[12]</sup>
		44.6~52.7	Lin 等 <sup>[34]</sup>
直剪试验	3~13.8	20.8~50.2	Muhunthan 等 <sup>[16]</sup>
	20.1	42	Zekkos 等 <sup>[19]</sup>
CD 三轴	51.2	44.5	张健铭 <sup>[33]</sup>
直剪试验	2.4	20	
CU 三轴	8	39	Xie 等 <sup>[5]</sup>
CD、CU 三轴	30~56	36.9~47.8	
CD 三轴试验	100~600 (CD)	60~177 (CD)	Becquart 等 <sup>[35]</sup>
	100~500 (CU)	90~145 (CU)	
大型直剪试验	38.4~59.9	38~42.8	Le 等 <sup>[13]</sup>
快剪试验	7	7.9	范广等 <sup>[36]</sup>
		39	徐谦等 <sup>[8]</sup>
		35.8	细砂 <sup>[18]</sup>
		45	中细砂 <sup>[17]</sup>
			中砂 <sup>[16]</sup>

注: CD 表示固结排水; CU 表示固结不排水。

### 3.5 CBR 测定

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020), 测得底渣 CBR 取值范围为  $70\% \sim 172\%$ 。图 9 为不同击实次数下底渣的贯入量与单位压力的关系曲线。由图 9 可知, 当贯入量相同时, 底渣的单位压力随击实次数的增加而逐渐增大。因此, 在实际工程应用中, 可通过调整底渣的密实度而改变其 CBR 值。

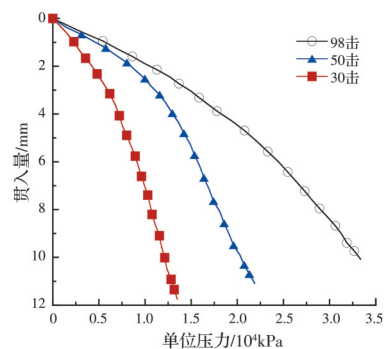


图 9 底渣贯入量与单位压力的关系曲线

Fig. 9 Penetration depth versus unit pressure relation curve of bottom ash

图 10 给出了不同击实次数下底渣 CBR 与含水率的关系曲线。可见, CBR 随含水率的增大先增大后减小。在最佳含水率  $w = 10.9\%$  处, CBR 取值最大, 与击实试验相差  $0.3\%$ , 这可能与含水率不均匀分布有关。另外, 当击实次数从 30 击升到 98 击时, CBR 最大取值从  $120\%$  增至  $172\%$ 。

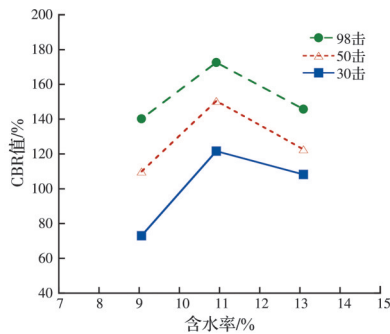


图 10 底渣 CBR 与击实含水率的关系曲线

Fig. 10 CBR versus compaction water content curve of bottom ash

根据文献[37-38],试验底渣作为路基填料的 CBR 满足规范要求。图 11 为试验底渣与其他研究结果的比较。由图 11 可知, Lynn 等<sup>[15]</sup>所测底渣 CBR 取值范围为 50%~150%, 包含文献[13-14, 31, 35]所测得的 CBR 值, 且与试验底渣 CBR 取值区间接近。Forteza 等<sup>[27]</sup>测得西班牙底渣在不同击实功作用下的 CBR 取值范围为 20%~100%, 小于本研究结果, 但满足相应地区规范标准要求, 产生差异可能与底渣存放周期及外部环境等因素有关。

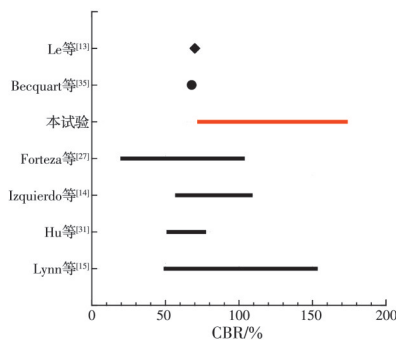


图 11 底渣 CBR 值的比较

Fig. 11 Comparison of CBR in bottom ash

## 4 结论

通过一系列室内试验和微观测试,对武汉地区城市生活垃圾焚烧底渣的物理、化学及工程特性进行了较全面的分析,并与大量其他研究结果进行了比较,主要结论如下:

1) 微观测试结果表明,试验底渣颗粒呈不规则形状,表面光滑且分布有细小孔洞,颗粒间无明显黏结和咬合;分类为级配不良砂性粗粒土,经强化级配分布,可考虑作为砂骨料替代材料;自然状态下为硬塑态,满足路基填料对塑、液限要求;比重为 2.71,与粉土比重接近。

2) 底渣主要化学组成元素为 Si、Ca、Al 和 Fe, 4 种元素含量总占比超过 80%, 主要矿物成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaSO}_4$  等;室内浸出毒性试验测得重金属浓度

均未超过中国和美国相应危险废物鉴定标准规定限值, 相较其他地区, 铅离子浓度偏小, 不会对环境造成明显危害。

3) 试验底渣最佳含水率为 10.6%, 最大干密度为  $2 \text{ g/cm}^3$ , 击实特性接近中细砂; 压缩指数  $C_c = 0.06$ , 压缩模量  $E_{s,1-2} = 9.46 \text{ MPa}$ , 属于中等压缩性土体; 渗透系数为  $3.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 与细砂相似, 当掺入少量膨润土等低渗透黏土后可用作垃圾填埋场防渗材料; 内摩擦角  $\varphi = 31.8^\circ$ , 黏聚力  $c = 41.2 \text{ kPa}$ ; CBR 取值范围为 70%~172%, 满足中国公路地基承载力要求, 在实际工程项目中可通过调整击实含水率或压实度提高 CBR 值。

## 参考文献

- [1] CHENG H F, HU Y A. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 3816-3824.
- [2] LAM C H K, IP A W M, BARFORD J P, et al. Use of incineration MSW ash: A review [J]. *Sustainability*, 2010, 2(7): 1943-1968.
- [3] TANG P, BROUWERS H J H. Integral recycling of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines (0-2 mm) and industrial powder wastes by cold-bonding palletization [J]. *Waste Management*, 2017, 62: 125-138.
- [4] ABDULAH M. Municipal solid waste incineration bottom ash as road construction material [J]. *AU Journal of Technology*, 2009, 13: 121-128.
- [5] XIE R F, XU Y F, HUANG M, et al. Assessment of municipal solid waste incineration bottom ash as a potential road material [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18(4): 992-998.
- [6] 蔡吉圣, 黄铭, 徐永福. 城市生活垃圾焚烧炉渣的三轴试验研究[J]. *山西建筑*, 2016, 42(13): 195-197.  
CAI J S, HUANG M, XU Y F. Triaxial tests on Municipal Solid Waste Incinerator (MSWI) bottom ash [J]. *Shanxi Architecture*, 2016, 42(13): 195-197. (in Chinese)
- [7] 肖衡林, 徐谦. 垃圾焚烧灰性质分析及控制方法[J]. *环境工程*, 2012, 30(Sup2): 313-316.  
XIAO H L, XU Q. Analysis of properties of municipal solid waste incineration ashes and its controlling methods [J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(Sup2): 313-316. (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] LIND B B, NORRMAN J, LARSSON L B, et al. Geochemical anomalies from bottom ash in a road construction: Comparison of the leaching potential between an ash road and the surroundings [J]. Waste Management, 2008, 28(1): 170-180.
- [10] 李磊. 武汉地区城市生活垃圾焚烧底渣工程特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- Li L. Experimental study on engineering properties of municipal solid waste incineration bottom ash in Wuhan [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] OLSSON S, KÄRRMAN E, GUSTAFSSON J P. Environmental systems analysis of the use of bottom ash from incineration of municipal waste for road construction [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 48(1): 26-40.
- [12] WENG M C, LIN C L, HO C I. Mechanical properties of incineration bottom ash: The influence of composite species [J]. Waste Management, 2010, 30(7): 1303-1309.
- [13] LE N H, ABRIAK N E, BINETRUY C, et al. Mechanical behavior of municipal solid waste incinerator bottom ash: Results from triaxial tests [J]. Waste Management, 2017, 65: 37-46.
- [14] IZQUIERDO M, QUEROL X, VAZQUEZ E. Procedural uncertainties of Proctor compaction tests applied on MSWI bottom ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1639-1644.
- [15] LYNN C J, GHATAORA G S, DHIR OBE R K. Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017, 10(2): 185-201.
- [16] MUHUNTHAN B, TAHA R, SAID J. Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(8): 985-991.
- [17] SAID S, RAHHAL M E. Improving the compaction properties and shear resistance of a sand reinforced with COVID-19 waste mask fibers [J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12129.
- [18] 文一多. 砂土/粉土-膨润土防污隔离墙渗透性的室内和现场试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- WEN Y D. Laboratory and field experimental study on permeability of sand/silt-bentonite anti-fouling wall [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [19] ZEKOS D, KABALAN M, SYAL S M, et al. Geotechnical characterization of a municipal solid waste incineration ash from a Michigan monofill [J]. Waste Management, 2013, 33(6): 1442-1450.
- [20] 王李宛. 水泥石灰综合稳定类道路基层的探讨[J]. 华东公路, 1997(4): 23-25.
- WANG L W. Discussion on cement lime comprehensive stability road base layer [J]. East China Highway, 1997 (4): 23-25. (in Chinese)
- [21] 付智, 李红. 纤维混凝土路面与桥面施工技术《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTGF30—2012)解读[J]. 混凝土世界, 2012(11): 20-31.
- FU Z, LI H. Construction technology of fiber concrete pavement and bridge deck interpretation of technical specification for construction of highway cement concrete pavement (JTGF30—2012) [J]. China Concrete, 2012 (11): 20-31. (in Chinese)
- [22] 公路路基施工技术规范: JTGF/T 3610—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Technical specification for construction of highway subgrades: JTGF/T 3610—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [23] SIDDIQUE R. Use of municipal solid waste ash in concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 55(2): 83-91.
- [24] PANDELIN D A, COSENTINO P J, KALAJIAN E H, et al. Shear and deformation characteristics of municipal waste combustor bottom ash for highway applications [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1577(1): 101-108.
- [25] DOU X M, REN F, NGUYEN M Q, et al. Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 24-38.
- [26] CAPRAI V, SCHOLLBACH K, BROUWERS H J H. Influence of hydrothermal treatment on the mechanical and environmental performances of mortars including MSWI bottom ash [J]. Waste Management, 2018, 78: 639-648.
- [27] FORTEZA R, FAR M, SEGUÍ C, et al. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base [J]. Waste Management, 2004, 24(9): 899-909.
- [28] YU J, SUN L S, XIANG J, et al. Physical and chemical characterization of ashes from a municipal solid waste incinerator in China [J]. Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2013, 31(7): 663-673.
- [29] ZHU Y T, ZHAO Y, ZHAO C, et al. Physicochemical characterization and heavy metals leaching potential of municipal solid waste incinerated bottom ash (MSWI-



- BA) when utilized in road construction [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(12): 14184-14197.
- [30] Solid industrial waste hazard categorisation and management [S]. *Industrial Waste Resource Guidelines. The Environment Protection (Industrial Waste Resource) Regulations 2009*, 2009.
- [31] HU Y J, LI G J, ZHONG Y J. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as road construction materials [C]//2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. June 26-28, 2010, Wuhan. IEEE, 2010: 1370-1373.
- [32] FENG S L, WANG X M, WEI G J, et al. Leachates of municipal solid waste incineration bottom ash from Macao: Heavy metal concentrations and genotoxicity [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(6): 1133-1137.
- [33] 张建铭. 垃圾焚烧灰渣特及其在路基工程中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.  
ZHANG J M. Study on the characteristics of refuse incineration ash and its application in subgrade engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [34] LIN C L, WENG M C, CHANG C H. Effect of incinerator bottom-ash composition on the mechanical behavior of backfill material [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 113: 377-382.
- [35] BECQUART F, BERNARD F, ABRIAK N E, et al. Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use for road construction [J]. *Waste Management*, 2009, 29(4): 1320-1329.
- [36] 范广, 肖衡林, 马强, 等. 垃圾焚烧炉渣混合土大型直剪试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 111-114.  
FAN G, XIAO H L, MA Q, et al. Large direct shear test of soil mixed with bottom ash from municipal solid waste incineration [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 111-114. (in Chinese)
- [37] 杨群, 李晓霞. 试论公路建设中实施路基土CBR(承载比)试验的必要性[J]. 交通标准化, 1999, 27(3): 10-11.  
YANG Q, LI X X. On the necessity of carrying out CBR test of subgrade soil in highway construction [J]. *Transport Research*, 1999, 27(3): 10-11. (in Chinese)
- [38] 杨广庆, 高民欢, 张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 97-100.  
YANG G Q, GAO M H, ZHANG X Y. Study on influence factors of California Bearing Ratio (CBR) of expressway subgrade materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 97-100. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)