

生活垃圾焚烧炉渣再生集料替代粉煤灰用于道路基层试验研究

张绪国, 何昌轩, 龙俊宇

(上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200031)

摘 要: 主要对生活垃圾焚烧炉渣及再生集料的性质进行了研究, 包括物理性质、化学性质和集料特性等。在此基础上, 对生活垃圾焚烧炉渣替代粉煤灰用于二灰碎石基层的路用性能进行了研究, 包括击实特性、抗压强度、湿胀及干缩特性等。研究表明, 生活垃圾焚烧炉渣替代粉煤灰用于二灰碎石能满足道路要求, 干缩及湿胀性能优于二灰碎石, 但抗压强度有所下降, 为保障路用性能, 需要适当控制炉渣掺量。

关键词: 生活垃圾焚烧炉渣; 二灰碎石; 道路基层; 抗压强度

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)02-0193-04

0 引 言

焚烧炉渣是生活垃圾焚烧之后的剩余物, 包括炉排上的残渣和从炉排间掉落的颗粒物等^[1]。随着焚烧逐渐取代填埋成为生活垃圾的主要处理方式, 焚烧炉渣的量也在快速增长, 焚烧炉渣处理逐渐成为城市废弃物处置新的课题。国外对生活垃圾焚烧炉渣的材料特性进行了大量研究, 试验分析表明, 炉渣的重金属、溶解盐以及有机污染物含量少, 属于一般废弃物, 工程性质与天然的轻质骨料类似, 可用于道路、房建等工程。在欧洲、美国和日本等, 炉渣资源化利用研究与应用已经持续了几十年, 炉渣资源化利用占比较高, 尤其在欧洲, 炉渣资源化利用占比超过了50%, 道路工程应用是目前炉渣资源化利用的最主要的方式^[2]。我国生活垃圾成分与国外差异较大, 厨余垃圾占比很高, 焚烧炉渣性能与国外存在差异。对生活垃圾焚烧炉渣的性质进行专门研究, 并研究其替代粉煤灰用于二灰碎石性能, 以论证其用于道路工程的可行性, 促进炉渣在道路工程领域的资源化利用。

1 焚烧炉渣特性分析

以某焚烧厂的焚烧炉渣为研究对象, 焚烧炉为炉排炉, 炉渣是湿排炉渣, 取样包括原状炉渣(未经选矿处理的炉渣)和处理过的再生炉渣集料, 本

节研究对象为原状炉渣。

1.1 焚烧炉渣物理性质

生活垃圾焚烧炉渣原状炉渣呈黑褐色, 风干后为灰色。是一种不均匀的固体混合物, 主要组分包括陶瓷、砖、石块、玻璃、熔渣、金属和少量可燃物等^[3]。

炉渣的粒径分布比较均匀, 颗粒主要集中在0.6~50 mm之间, 占比达77.6%~91.1%, 小于0.075 mm的粉尘颗粒含量低于2%^[4]。

炉渣的物理组成分布并不均匀, 在不同的粒径范围内分布不同, 5mm以下以熔渣为主; 20mm以上以陶瓷、砖块和金属为主; 5~20mm之间以熔渣、石块和玻璃等为主^[5]。

炉渣中黑色金属以铁为主, 总含量为3.5%~7.1%, 主要为铁罐、铁丝、铁钉和瓶盖等^[6]。有色金属主要为铝和铜, 铝与酸性和碱性液体接触时都会产生 H_2 , 在炉渣资源化利用过程中, 会发生膨胀, 对结构造成不良影响, 在应用前需要进行预处理^[7]。

5mm以上颗粒中的可燃物含量在0.06%~1.34%, 平均只有0.84%, 这说明焚烧炉燃尽率较高, 同时炉渣中的有机质(包括腐殖质)的含量较低。

1.2 焚烧炉渣化学性质

(1) 化学元素分析

炉渣的主要化学元素为Si、Al、Ca、Na、Fe、C、K和Mg, 总体与国外生活垃圾焚烧厂的炉渣是相似的, 但Na则比国外的炉渣高出20~30倍, 这与我国居民的饮食特点相关。

(2) 溶解盐含量

收稿日期: 2020-07-06

作者简介: 张绪国(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程科研、咨询工作。

某焚烧厂炉渣中的溶解盐含量见表 1。

表 1 某垃圾焚烧电厂炉渣中溶解盐含量

试验 编号	含量 /%					
	全盐量	OH ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1	0.94	0.00	0.11	0.19	0.34	0.12
2	1.00	0.15	0.04	0.00	0.29	0.08
3	0.86	0.01	0.04	0.00	0.32	0.12
4	0.66	0.01	0.3	0.00	0.26	0.11
平均值	0.86	0.04	0.06	0.05	0.30	0.11

炉渣中含有的溶解盐占比较低,质量百分比不到 1%,炉渣处理处置时,溶解性盐对地下水造成污染的可能性较小。其中硫酸盐的含量约 0.08%~0.12%(以 SO₄²⁻计),能够满足道路中各种稳定土中对硫酸盐含量的要求。

(3)矿物组成

某垃圾焚烧厂炉渣矿物分析见表 2。

由表 2 可知,炉渣的矿物组成主要由 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 等组成的混合物。

2 焚烧炉渣集料性质

焚烧炉渣集料是经过选矿技术剔除金属之后的剩余炉渣,经粉碎、筛选、分级制成细粒径、具有一定级配的炉渣集料。炉渣集料秉承了炉渣材料的性能特性,化学成分基本相近。通过处理,炉渣中含有的部分不利于应用的材料,如金属、有机质等,含量得到明显降低,炉渣集料颗粒性状见图 1。



图 1 集料颗粒性状

对炉渣集料进行筛分试验,试验结果见表 3 和图 2。

表 3 再生炉渣级配

试验 编号	含量 /%					
	全盐量	OH ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1	0.94	0.00	0.11	0.19	0.34	0.12
2	1.00	0.15	0.04	0.00	0.29	0.08
3	0.86	0.01	0.04	0.00	0.32	0.12
4	0.66	0.01	0.3	0.00	0.26	0.11
平均值	0.86	0.04	0.06	0.05	0.30	0.11

表 2 垃圾焚烧后灰烬的化学基本组成

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MeO	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	Cr ₂ O ₃	PbO	SO ₃	C	H ₂ O	其他
含量 /%	43.6	8.76	7.29	13.11	7.74	1.63	3.92	0.08	0.062	0.29	1.89	1.66	2.25	7.1

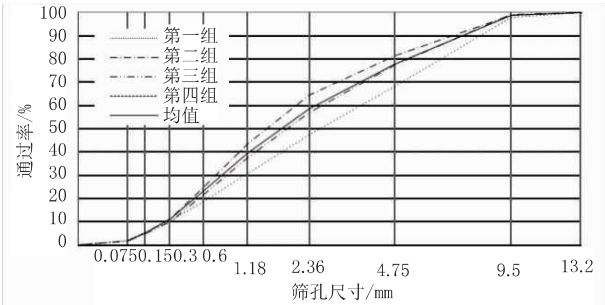


图 2 再生炉渣级配

结果表明,再生炉渣集料具有较稳定的级配,为该集料的应用提供了良好的材料特性。

3 焚烧炉渣集料替代粉煤灰用于道路基层室内试验研究

生活垃圾焚烧炉渣集料是一种与粉煤灰材料在化学组成上相近的材料,如能将此材料应用到二灰碎石基层中,替代部分粉煤灰材料,对缓解炉渣废料处理压力,降低工程建设费用极具现实意义。

3.1 击实试验

(1)试验方案

用生活垃圾焚烧炉渣再生集料替代粉煤灰,替代方案见表 4。

表 4 生活垃圾焚烧炉渣再生集料替代粉煤灰抗压强度试验方案

方案编号	材料比例 /%		
	消石灰	炉渣集料	粉煤灰
1	30	70	0
2	30	50	20
3	30	35	35
4	30	20	50
5	30	0	70

分别进行快速法、7 d、28 d 结合料抗压强度试验研究,考察不同炉渣集料、粉煤灰材料掺配比例对结合料强度的影响。

本研究主要采用了焚烧炉渣集料、消石灰、粉煤灰等三种材料,消石灰为 III 级灰,满足相关规范要求。粉煤灰 SiO₂ 与 Al₂O₃ 的总量为 80.8%,烧失量为 12.3%,满足规范要求。

(2)击实试验

按照表 5 抗压强度试验方案,根据经验分别选择 6 个含水量,采用直径为 10 cm 的击实筒进行标准击实试验,分别测得材料实际含水量,根据不同

含水量对应的干密度绘制干密度、含水量关系图,分析得出最大干密度及对应的最佳含水量,课题共进行了5方案,30次标准击实试验,试验结果见表5和图3。

表5 重型标准击实试验结果

方案 编号	试验项目		
	炉渣集料 /%	最佳含水量 /%	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
1	70	19.9	1.480
2	50	21.2	1.465
3	35	23.0	1.477
4	20	25.2	1.413
5	0	26.4	1.350

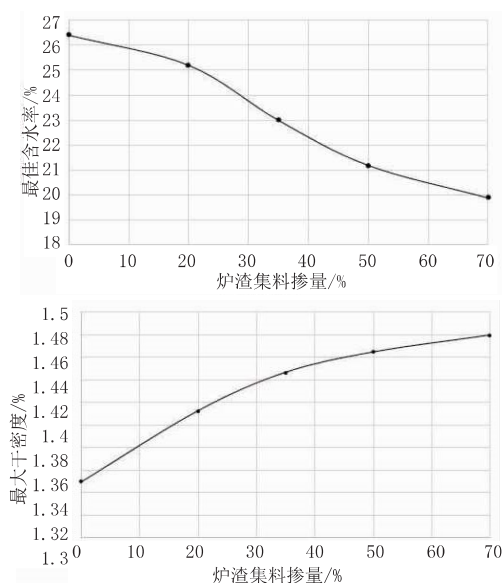


图3 最佳含水量、最大干密度与焚烧炉渣掺量关系图

由试验结果可知,随着焚烧炉渣集料掺量的增加,最佳含水量逐渐降低,最大干密度逐渐增大,表明掺焚烧炉渣材料参加后,对混合料性能压实性能有一定影响。

3.2 抗压强度试验

根据击实试验结果,静压成型抗压强度试验试件,分别进行快速养生、7 d、28 d 抗压强度试验,快速抗压强度是将试件放在 $65^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ 的恒温箱内保温 24 h 后,取出冷却至室温,再将其置入水浴中常温 24 h。快速法、7 d、28 d 各龄期试验结果见表 6。

表6 快速法强度试验结果

方案 龄期	抗压强度 /MPa			变异系数 /%		
	快速法	7 d	28 d	快速法	7 d	28 d
1	1.33	1.14	1.37	7.85	8.7	12.0
2	1.59	1.27	1.70	5.37	11.1	6.4
3	1.63	1.32	2.68	6.13	11.3	7.9
4	1.60	1.30	2.91	3.36	6.1	6.4
5	1.67	1.07	2.74	6.79	2.2	4.5

根据试验结果,随着粉煤灰材料掺配比例的增加,快速法强度有增长趋势,进一步表明在采用焚烧炉渣替代粉煤灰用于二灰碎石基层时宜适当控制掺量,以确保满足快速法抗压强度要求。

7 d、28 d 抗压强度试验结果显示,随着龄期的增加,各方案抗压强度均随龄期的延长均有增长,但增长情况不尽相同。

混合料 28 d 抗压强度在 7 d 抗压强度基础上增长的情况见图 4。

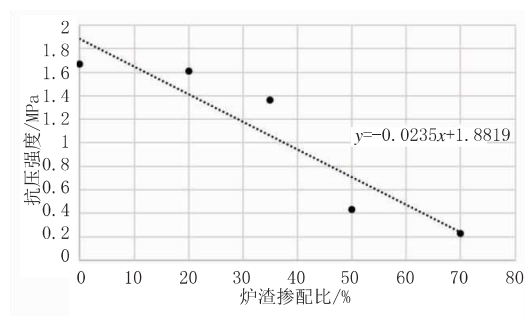


图4 7~28 d 强度增长率随炉渣集料掺配比变化情况

随着炉渣集料掺配比的增加,混合料强度增长幅度逐渐降低,表明掺焚烧炉渣集料后二灰碎石材料表现出一定的早强趋势。

据此,本研究分析认为对于早强类材料不宜按快速法抗压强度,确定焚烧炉渣材料掺量。而应在确保二灰碎石基层材料强度的前提下,控制炉渣集料掺量,以期获得良好的结构长期强度。

3.3 干缩湿胀性能试验

本文主要针对石灰+粉煤灰、石灰+粉煤灰+焚烧炉渣集料等结合料进行试验研究。

(1) 试验方案

本研究选择炉渣集料对粉煤灰不同的替代比:0%、40%、60%三种配比进行湿胀干缩性能对比试验,具体方案见表 7。

表7 结合料抗压强度试验方案

方案编号	材料比例 /%		
	消石灰	炉渣集料	粉煤灰
1	30	0	70
2	30	28	42
3	30	42	28

本试验方案最佳含水量按表 5 最佳含水量试验结果,采用内插法确定,三方案最佳含水量依次为 26.4%、23.6%、20.6%,最大干密度依次为 1.350、1.447、1.473 g/cm^3 。采用重型击实成型法,分别成型 CBR 试件,浸水 1 个月,空气中常温搁置 2 个月,测定材料变形,以了解材料湿胀干缩性能。

(2) 试验结果与分析

对各方案进行了长达 3 个月龄期条件下的浸水膨胀、干燥收缩试验,试验结果见表 8。

项目		累计变形量 /%		
		方案 1	方案 2	方案 3
浸水膨胀试验	3 d	2.28	2.37	2.42
	7 d	2.62	2.55	2.57
	14 d	2.78	2.65	2.62
	28 d	2.90	2.74	2.67
干缩试验	33 d	2.81	2.67	2.62
	37 d	2.73	2.62	2.58
	44 d	2.62	2.54	2.51
	58 d	2.58	2.51	2.49
	75 d	2.58	2.50	2.47
	90 d	2.57	2.50	2.47

试件变形量统计见图 5。

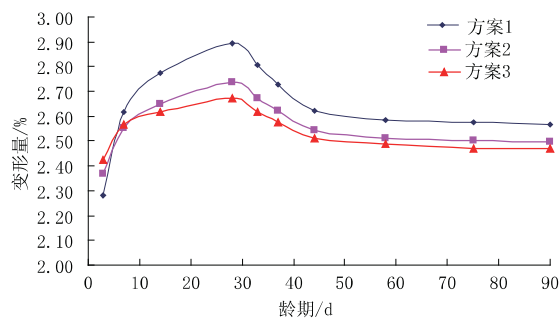


图 5 3 个月龄期干缩试验

由以上试验结果得出结论：

- (1)各方案无论是浸水还是干燥条件下,膨胀量或收缩量均随着龄期的增长而趋于稳定；
- (2)浸水 3 d 后各方案膨胀量自小到大依次为方案 1、方案 2、方案 3,表明随着炉渣集料掺量的增大膨胀量增大,但浸水 28 d 后各方案膨胀量自小到大依次为方案 3、方案 2、方案 1,表明随着炉渣集料掺量的增大总膨胀量逐渐变小,可见焚烧炉渣集料替代粉煤灰材料后,可较大程度上减少膨胀变形量,

对结构强度形成有利；

(3)干燥 60 d 后各方案变形量由大到小依次为方案 1、方案 2、方案 3,表明焚烧炉渣集料部分替代粉煤灰材料后,材料收缩变形明显降低。试验结果表明,焚烧炉渣集料二灰碎石材料干缩性能明显低于普通二灰碎石。

5 结 语

- (1)生活垃圾焚烧炉渣的物理、化学及力学特性与天然集料类似,炉渣再生集料级配均匀,可用于道路基层。
- (2)根据击实试验结果,随着炉渣掺量的增加,最佳含水率随之下降,最大干密度随之增加。
- (3)根据抗压强度试验,随着炉渣集料掺量的增加,二灰碎石的抗压强度逐步下降,且后期强度增长幅度随之下降,为了保证二灰碎石的路用性能,需要对炉渣集料的用量进行控制。
- (4)根据干缩湿胀性能试验,炉渣集料替代粉煤灰二灰碎石的干缩及湿胀随着炉渣掺量的增加而降低。

参考文献：

[1] 邱德斌,李勇,潘继征,等.城市生活垃圾焚烧炉渣对水体中磷的去除效果[J].广东农业科学,2013,40(13):165-168.

[2] 范宇杰,陈萍,马文欣,等.城市生活垃圾焚烧炉渣作为土木工程材料的资源化应用探讨[J].环境与可持续发展,2012,37(6):97-99.

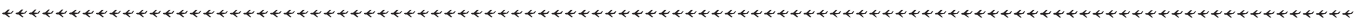
[3] 何晶晶,宋立群,章骅,等.垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景[J].中国环境科学,2003(4):60-63.

[4] 陆卫民,尹立新,闫晶,等.垃圾焚烧炉渣用作路面基层凝固剂及工程应用[J].环境卫生工程,2014,22(1):78-80.

[5] 陈家坚.新型耐热炉排材质的组织和性能研究[D].广东广州:华南理工大学,2012.

[6] 王朝,杨洋.生活垃圾炉渣资源化利用技术探讨[J].环境与发展,2016,28(4):42-44.

[7] 章骅.生活垃圾焚烧炉渣再生集料利用[C]// 同济大学、中国土木工程学会.首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会论文集,2008.



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com