垃圾焚烧飞灰柴油炉熔融固化过程的特性分析

田书磊^{1,2},王 琪²,汪群慧¹,李敬苗³,李润东⁴,梁佳莉²

(1. 哈尔滨工业大学环境科学与工程系,哈尔滨 150090;2. 中国环境科学研究院,北京 100012;

3. 中国环境管理干部学院环境工程系,秦皇岛 066000;4. 沈阳航空工业学院清洁能源与环境工程研究所,沈阳 110034)

摘 要:采用柴油炉,对杭州某生活垃圾焚烧厂的焚烧飞灰连续进行了6个多月、日处理规模为500 kg的熔融固化 中试实验,探讨了在1260~1350 熔融过程中,原灰(未经处理的飞灰)、水洗灰的减容减重、成分变化、物相组成 以及熔渣浸出毒性的变化规律,同时对烟气中的二恶英和常规污染物进行了测试.结果表明,原灰和水洗灰的减容 减重率均随着温度的升高而增大,在1350 时,减容率分别为83.7%和81.5%,减重率分别为28.6%和21.9%.由 于水洗灰中以氯化物形式挥发的成分减少,使之在相同温度下的减容减重率均小于原灰.随着温度的升高,原灰和 水洗灰中 CaO、A1₂O₃和 SiO₂的相对百分含量均增大,其中以 SiO₂最为显著.根据相关浸出毒性鉴别标准测得溶渣中 的重金属浸出浓度低于该标准限值,可作为一般废物填埋.烟气中二恶英总毒性当量浓度远低于标准限值,常规污 染物也均符合我国 2001 年颁布的《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484—2001).

关键词:垃圾焚烧飞灰;熔融固化;减容减重;浸出毒性
 中图分类号: X705
 文献标志码: A ______文章编号: 1006-8740(2007)03-0253-06

Characteristic Analysis During Vitrification of MSWI Fly Ash by Diesel-Fuel Furnace

TIAN Shu-lei^{1,2}, WANG Qi², WANG Qun-hui¹, LI Jing-miao³, LI Run-dong⁴, LIANG Jia-li²

Department of Environmental Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
 Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China;

3. Department of Environmental Engineering, Environmental Management College of China, Qinhuangdao 066000, China;

4. Institute of Clean Energy and Environmental Engineering, Shenyang Institute

of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China)

Abstract: A diesel fuel furnace was used to heat treat the municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash and its washed ash from a MSWI plant in Hangzhou city for more than 6 months. In this pilot scale experiment, the parameters including volume reduction and weight loss, composition change, characteristic of crystalline phases and the leach toxicity of molten slag were investigated at $1 \ 260 \ -1 \ 350$. The results indicate that the volume reduction of fly ash and washed ash was 83.7% and 81.5%, respectively, and the weight loss fraction was 28.6% and 21.9%, respectively at $1 \ 350$. During the vitrification, the contents of CaO, $A1_2O_3$, SiO₂ in fly ash increased as the temperature went up, especially of SiO₂. After melt solidification, the leaching concentrations of all selected heavy metals were lower than standard value. The concentration of dioxin in flue gas was investigated by National Research Center for Environmental Analysis and Measurements to be $0.053 \ ng/m^3$, which is much lower than the nar tional total emissions, and the other pollutants in flue gas also meet the national standard (B18484 -2001).

Keywords: municipal solid waste incineration fly ash; vitrification; volume reduction and weight loss; leach toxicity

收稿日期: 2006-11-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20577047);国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2002AA644010).

作者简介:田书磊(1979—),男,博士研究生,tslljl@126.com.

通讯作者:汪群慧,wangqh59@163.com.

垃圾焚烧技术因具有减容减量化、无害化以及可 资源化等优点,近年来在国内外得到了广泛的推广.垃 圾焚烧产生的飞灰中,含有高浸出浓度的有毒重金属 Pb、Zn、Cd和Cr等^[1],以及持久性有机污染物二恶英, 这些重金属具有的不可降解性和在生物体内可富集效 应,被普遍认为是一种危险废物,需妥善处理^[2→].熔 融固化技术是国内外较为先进的垃圾焚烧飞灰无害化 处理技术,相对于水泥固化和化学浸提而言,熔融固化 具有减容减量程度高、无害化彻底、产品性能稳定并可 资源化再利用的特点,因此,近年来熔融固化成为国内 外环保工作者研究的新焦点^[4].

目前,国内外许多学者对垃圾焚烧飞灰熔融固化 技术做了大量的研究,如 Sakail 等^[5-6]研究了飞灰熔渣 中重金属的浸出特性,Chan 等人^[7-8]分别研究了熔融 温度、时间、氯化物种类与含量等参数对焚烧飞灰中重 金属挥发特性的影响,Jakob^[9]在 670~1 300 区间内 重点考查了温度对重金属挥发特性的影响;在国内,李 润东等^[10]研究了气氛、添加剂等对飞灰熔融的影响. 但这些成果仅限于实验室规模研究,对于飞灰中试规 模熔融处理过程的特性研究,国内鲜有报导.

本文采用沈阳航空工业学院设计的燃料式表面熔 炉,对杭州某垃圾焚烧厂焚烧飞灰进行了连续6个月 的日处理量为500kg的中试研究,着重研究了高温熔 融过程中飞灰减容减重、成分变化、熔渣中重金属的浸 出浓度等熔融特性,并对烟气中二恶英等污染物进行 了监测分析,为飞灰熔融处理的工业化推广提供了宝 贵的中试实验数据.

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

中试实验研究采用了燃料式表面熔炉,其系统工艺流程如图1所示.整个熔融系统由燃烧系统、换热系统、喷淋系统、布袋除尘系统以及引风系统组成.

实验前打开燃烧器,同时开启换热系统、喷淋系统 以及引风系统.熔融炉最高设计温度1400 ,从室 温升至900 仅需1.5h左右,在900~1230 升温速 度较慢,约3.5~4.0h.通过调节燃烧器喷油量及压力 等参数可有效控制炉温,燃烧器利用了换热器所排出 的热空气助燃,以减少冷空气所消耗的能量.同时,燃 烧器尝试性地采用了富氧燃烧技术,在燃烧器的进气 通道通入了一定量的氧气,保证了燃料充分燃烧,提高 了燃烧效率.为保证熔融炉能顺畅排渣以及二恶英的 有效分解,在1230 时进料,其进料速度和进料量由 变频器控制,分别在1260 、1320 和1350 ,分



析了减容减重、成分变化、熔渣浸出毒性以及烟气中污 染物浓度等飞灰熔融特性.其中,实验中所涉及的熔渣 取自图1的排渣水箱,挥发物采集于布带除尘器,在烟 气测样孔监测烟气中的污染物浓度.

燃料式表面熔炉主要工作参数:燃油为0号柴油, 取油量为5L/h,最高温度为1400 ,进料量为20~ 25 kg/h.

1.2 样品采集与制备

飞灰样品采自杭州某垃圾焚烧厂的布袋除尘器, 颜色呈灰白色,平均粒径主要分布在 30~150 μ m 范围 内,堆积密度 0.664 g/ cm³,含水率为 2.5%.为了研究 水洗预处理工艺对熔融固化的影响,对飞灰进行了水 洗处理(水洗后飞灰简称水洗灰).水洗过程中,液固质 量比为 10,时间 t = 0.5 h.

1.3 减容减重率计算方法

1) 减重率计算

每一次实验完毕后,无论停留时间如何加长,仍有 部分熔渣残留在炉膛内,为了减少这部分误差,未经任 何处理的飞灰(简称原灰)和水洗灰在每个测试温度进 行了连续2天的实验,处理量达1000 kg.飞灰减重率 *R*_m为

$$R_{\rm m} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \% \tag{1}$$

式中 : *m*1为原灰和水洗灰样品的质量 ,g; *m*2为熔渣质 量 ,g.

2) 减容率计算

中试实验不宜直接通过测量飞灰熔融处理前后体 积/容积的变化得到减容率,因此,采用粉尘堆积密度 的测试方法(GB/T16913.3—1997),分别测定了原灰、 水洗灰以及各种灰样的熔渣的堆积密度,然后通过公 式换算得到减容率.

原灰、水洗灰以及各种熔渣经研磨后,在105 下 干燥4h,放置室内自然冷却后,通过178µm标准筛进

%

行筛分.测定时,将一支漏斗放在水平实验支架上,漏 斗锥度 60°±0.5°,漏斗流出口径 ϕ 12.7 mm,漏斗中心 与下部圆形量筒中心一致,流出口底与量筒上沿距离 (115±2) mm,量筒内径 ϕ 39 mm,容积 100 cm³.用塞棒 塞住漏斗流出口,将灰样装入盛样量筒,用刮片刮平后 倒入漏斗中,拔出塞棒使灰样自由落至下部量筒中,待 漏斗中灰样全部流出后,用刮片将堆积于量筒上部灰 样刮去,然后把装有灰样的量筒放到天平上称重.连续 3 次测量灰样,质量最大值与最小值之差应小于1g, 否则进行第4(第5、第6)次测试,直至两者差值小于1 g,而后得到测定结果.此方法测定堆积密度范围小于 8.4 g/cm³.测量误差为±0.1 g/cm³.

堆积密度的计算式为

$$=\frac{m_1 + m_2 + m_3}{3V}$$
(2)

式中: 为堆积密度, g/cm^3 ; m_1, m_2 和 m_3 分别为测量 3次样品的质量,g; V为校正后的量筒容积, cm^3 .

用式(2)的结果,经计算即可获得飞灰减容率

$$R_V = \frac{m_{\rm f g} - m_{\rm g f}}{m_{\rm f g}} \times 100 \%$$
 (3)

式中: $m_{\rm f}$ 为原灰及水洗灰质量,g;_f为原灰及水洗灰 的测量密度,g/cm³; $m_{\rm g}$ 为熔渣质量,g;_g为熔渣的测 量密度,g/cm³.

1.4 测试方法

重金属含量采用德国 Finnigar-MAT 公司的电感耦 合等离子体质谱仪(HR-ICP-MS)测定,利用飞利浦 X 射线荧光光谱仪 PW-2404 对飞灰和熔渣主要成分进行 分析,物相鉴定采用飞利浦 X 射线衍射议 PW-1700.由 表1可知,原灰主要含有 CaO、SiO₂、Al₂O₃、SO₃、K₂O、 Na₂O和 Cl等,占总质量的 80%左右;水洗预处理后, 原灰的成分发生了很大的变化(见表 1),水洗可洗脱 飞灰中绝大部分可溶性氯盐,水洗后飞灰中 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃总含量由原灰的 49.56%增大到 61.92%,而 Cl、K₂O、Na₂O则由原飞灰的 23.07%降为 4.93%.

熔渣浸出毒性实验采用 2005 年国家环保总局《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》征求意见稿——硫酸硝酸法^[11].称取 100 g试样置于 2 L 聚乙烯瓶中,按液固比为 10 1 的比例加入浸提剂,盖紧瓶盖后固定在旋转振荡器上,以(30 ±2) r/min 振荡(18 ±2) h,提取过程的环境温度应保持在(23 ±2) .在过滤器上安装好 0.6~0.8 μm滤膜,过滤并收集浸出液,于4 下保存以待分析.浸取剂的配制是将质量比为 2 1 的硫酸和硝酸混合液加入去离子水中,调节其 pH 值为 3.20 ±0.05.

表 1 预处理前后飞灰化学成分变化

组成	CaO	SiO ₂	а	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	密度/ (g cm ⁻³)
原灰	22.78	19.81	10.16	4.00	6.97	6.68	6.23	8.74	2.54	3.78	1.21	0.664
水洗灰	23.63	28.46	1.28	5.33	9.83	1.56	2.09	6.63	3. 59	5.35	1.60	0. 705
挥发物	1.27	3.24	35.00	1.02	2.01	23.73	19.62	13.38	0.07	0.01	0.01	_

2 实验结果与分析

2.1 减容率与减重率

减容是飞灰熔融处理的主要特点之一,中试实验 通过计算高温熔融处理前后飞灰的密度变化推算减容 率.从图 2 中可知,飞灰和水洗灰的密度及减容率均随 着温度的升高而增大,经高温熔融处理后,两种灰样的 减容率基本可达 80%,在1 350 时,减容率分别为 83.7%和 81.5%.高温熔融处理后的飞灰可以当作普 通废物进行安全填埋,不但大大减轻了填埋场的负担, 而且减少了处理费用.由于熔渣的理化特性与一些建 材原料相似,可考虑资源再利用.因此,从这一角度来 讲,高温熔融处理很可能成为飞灰将来处理的主流 方向.



图 2 温度对减容率的影响

从图 3 中可知,原灰和水洗灰的减重率均随着温度的升高而增大,在1 350 时,原灰和水洗灰的减重 率分别为 28.6%和 21.9%.为了更好理解飞灰减重的 特性,用 X 射线荧光光谱仪和 X 射线衍射仪对所收集 的挥发物进行了成分和物相分析.结果表明,挥发物主



.256 .

图 3 温度对减重率的影响

要成分为 Cl、Na₂O 和 K₄O,约占总量的 78.35% (见表 1),同时,物相分析也表明(见图 4),挥发物主要以 KCl 和 NaCl 为主.这进一步证明飞灰的减重主要是由于飞 灰中 Na、K₄Cl 的挥发所导致.另外,飞灰中硫酸盐的分 解、水分的蒸发以及某些重金属(Pb、Cd 等)的挥发也 会导致飞灰减重^[12].对图 3 中进行分析还发现,相同 温度下水洗灰的减重率都低于原灰,其原因可能是经 水洗后,水洗灰中易挥发的成分(主要是氯化物)减少 所致.由表1可知,飞灰经水洗预处理后,Cl 的含量由 原灰的 10.16%降至 1.28%,而在高温熔融过程中易 以氯化物形式挥发的 Na₂O、K₄O 的含量也分别从原灰 的 6.68%和 6.23%降低到 1.56%和 2.09%.





2.2 成分变化

从表 1 中可以看出,构成焚烧飞灰的主要元素有 Ca、Si、Na、K、Al、Fe、S 和 Cl 等,约占总量的 80%左右. 垃圾焚烧飞灰的成分比较复杂,而且其成分含量与垃 圾种类、垃圾焚烧前处理工艺、焚烧炉炉型、焚烧工艺 参数以及烟气处理工艺等多种因素有关.中试实验在 1 320 和 1 350 对飞灰和水洗灰熔渣的主要成分 进行了分析,从图 5 中可以看出,熔渣中 CaO、Al₂O₃和 SiO₂的含量随熔融温度的增加有不同程度增大,其中 以 SiO₂最为显著,而其他成分变化较小.这主要是因为 Si 在熔融过程中形成了 Si —O 结构的玻璃前体物或者 其他不易挥发的硅酸盐物质,而其他物质如 Ca、Na 和 K,在高温熔融过程中,或者分解或者挥发,从而造成 质量含量的减少^[12].



图 5 温度对飞灰、水洗灰主要成分变化的影响

2.3 物相分析

图 6 分别为未经熔融处理的原灰、熔融过程中熔 炉排渣以及熔融后熔渣的现场情况. 飞灰在熔融过程 中发生了非常复杂的物理化学变化,最终形成了致密 的 Si — 0 结构的玻璃体.为了更好地了解飞灰熔融过 程,对飞灰及熔渣的物相进行了分析,从图 7 中可知, 原灰中主要物相为 NaCl、KCl、CaCO₃和 SiO₂,但经高温 熔融后,原灰中的晶体或者挥发或者分解,最终形成玻 璃体.



图6 飞灰熔融处理过程



图 7 飞灰及熔渣物相图

2.4 浸出实验

熔渣的浸出毒性直接影响熔渣的处置方法问题. 实验采用我国 2005 年国家环保总局《危险废物鉴别标 准 浸出毒性鉴别》征求意见稿 ——硫酸硝酸法^[11],

对飞灰熔渣进行了测试,主要分析了7种重金属元素

(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn),实验结果见表 2.

表 2 飞灰熔渣中重金属浸出毒性

mg/	I

熔融温度	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1 260	_	_	0.07 ±0.015	_	0.08 ±0.011	0.09 ±0.018	0.16 ±0.010
1 320	_	_	0.09 ±0.005	_	_	0.01 ±0.003	0.12 ±0.028
1 350	_	—	0.12 ±0.020	—	_	0.08 ±0.001	0.10 ±0.036
标准值[11]	1.50	0.3	10.0	50.0	10	3.0	50.0
饮用水标准	0.01	0.003	0.05	1.0	_	0.01	1.0

从表中可以看出,熔渣中重金属As、Cd和Cu的浸 出浓度基本均未检出,其他金属的浸出浓度也远小于 标准值;同时,与2005年生活饮用水卫生标准征求意 见稿(C/T206-2005)中相关重金属离子浓度限值进 行对比,发现浸出液中重金属离子浓度基本与饮用水 的标准限值相当或略高,这也可以证明飞灰经高温熔 融处理得到的熔渣性能比较稳定.因此,熔渣可以作为 一般废物进行安全填埋.另外,考虑到熔渣的物理特性 可以满足某些建材的标准,因此可作为路基材料、建筑 骨料以及堤坝填充物等,实现废物资源化再利用^[13].

2.5 烟气监测

1) 二恶英

熔融炉可有效分解飞灰中二恶英类物质.本熔融 炉采用烟气急冷技术,使熔融过程中产生的大量高温 烟气经烟气冷却塔冷却后,温度瞬间即可从 600 以 上降至 200 以下,避免了此阶段二恶英的再次合成, 同时布袋除尘器对烟气中残余二恶英等污染物进行了 有效吸附.国家环境分析测试中心对烟气中的二恶英 含量进行了监测,测试过程中熔融炉在 1 320 进行 了连续高温熔融,整个过程熔炉运行稳定,处理量为 22 kg/h.测试结果表明:二恶英总毒性当量浓度为 0.053 ng/m³,远低于国家规定的 0.5 ng/m³的标准,熔 融炉实现了对尾气中二恶英的有效控制,避免了对环 境的二次污染.

2) 常规污染物

烟气中,不但含有重金属和二恶英等物质,同时燃油燃烧还会释放一定量的常规污染物,若烟气处理不当,则很容易对环境造成污染.中试熔融系统利用烟气冷却塔和布袋除尘器对这些常规污染物进行了有效的控制.杭州市环境监测中心站根据《固定污染源排气颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T16157—1996)对烟气中各污染物浓度进行了测试,其结果均符合国家规定的排放限值(GB18484—2001),测试工况及测试结果见表3及表4.

表 3 烟气测试工况

测试工况	监测结果
工况负荷/%	100
管道截面积/m ²	0.031 4
测点废气温度/	60
废气含湿率/%	6.5
测点废气流速/(m-s ⁻¹)	3.1
废气中氧含量/%	12.3
过剩空气系数	2.41
烟气黑度(林格曼级)	< 1
实测废气量/(m ³ h ⁻¹)	353
标干态废气量/(m ³ h ⁻¹)	271

注:表中皆为现场测定值.

	表 4 测试结果	mg/m ³
测试项目	监测结果 ¹⁾	标准限值2)
颗粒物质量浓度	33. 1	100
砷排放质量浓度	3.47 ×10 ⁻²	1.0
镍排放质量浓度	2.17 ×10 ⁻²	1.0
汞排放质量浓度	5.23 ×10 ⁻⁴	0.1
镉排放质量浓度	6.37 ×10 ⁻²	0.1
铅排放质量浓度	0.870	1.0
锰排放质量浓度	7.18 ×10 ⁻²	4.0
铜排放质量浓度	0.142	4.0
铬排放质量浓度	0.035 3	4.0
SO_2 排放质量浓度	264	400
NO_x 排放质量浓度	111	500
HCI 排放质量浓度	3.23	100
CO 排放质量浓度	1.57	100

注:1) GB/TI6157—1996《固定污染源排气颗粒物测定与气态污染物采样 方法》;2)《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484—2001)中危险废 物焚烧炉大气污染物排放限值.

3 结 论

(1) 当熔融炉温度为1350 时,原灰和水洗灰的 减重率分别为28.6%和21.9%,而减容率为83.7%和 81.5%,由于水洗灰中以氯化物形式挥发的成分减少, 使之在相同温度下的减容减重率均小于原灰.

(2) 在高温下,由于飞灰中氯化物的挥发以及硫 化物的分解,导致原灰熔渣和水洗灰熔渣中的 CaO、 A1₂O₃ 和 SiO₂相对质量分数有不同程度的增加,其中 SiO₂增加最为明显,而其他元素的质量分数变化较小; 从烟尘的收集物的成分和物相分析可知,挥发物主要 由 NaCl、KCl 组成.

(3) 飞灰经高温熔融后,变成了惰性玻璃体.

(4) 熔渣中重金属的浸出浓度均小于规定的标准 限值,同时与2005年饮用水标准相比,浸出液中重金 属离子浓度基本与饮用水的标准限值相当或略高,这 足以证明飞灰经高温熔融处理后得到的熔渣性能比较 稳定,可作为一般废物处理或者资源化再利用.

(5) 烟气中二恶英总毒性当量浓度为 0.053 ng/ m³,远低于国家规定的 0.5 ng/m³,同时,烟气中常规污 染物也均符合国家规定的排放限值.

参考文献:

 [1] 李润东,聂永丰,王 雷,等.垃圾焚烧飞灰中重金属和二
 恶英等痕量污染物分析[J].燃烧科学与技术,2004, 10(6):479-483.

Li Rundong, Nie Yongfeng, Wang Lei, et al. Trace pollutant in MSW incinerator fly ash: Heavy metals and dioxins[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2004, 10(6): 479-483 (in Chinese).

- Yang G C C, Tsai C M. A study on heavy metal extractability and subsequent recovery by electrolysis for a municipal incinerar tor fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, 58(1/2/ 3): 103-120.
- [3] Johannessen KM. The regulation of municipal waste incineration ash: A legal review and update[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 47(1/2/3): 388-393.
- [4] Katsunori N, Yoshikazu N, Hitoshi O. Melting and stone production using MSW incinerated ash [J]. Waste Management, 2001,21: 443-449.
- [5] Sakai S, Hiraoka M. Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes [J]. Waste Management, 2000,

20:249-258.

- [6] Young J , Jong H. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 91B: 83-93.
- [7] Chan C C Y, Kirl D W. Behaviour of metals under the conditions of roasting MSW incinerator fly ash with chlorinating agents
 [J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 64(1): 75-89.
- [8] Stucki S, Jacob A. Thermal treatment of incinerator fly ash : Factors influencing the evaporation of ZnCl₂ [J]. Waste Management, 1997, 17(4) : 231-236.
- [9] Jakob A, Stucki S, Kuhn P. Evaporation of heavy metals during the heat treatment of municipal solid waste incinerator fly ash
 [J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29 (9): 2429-2436.
- [10] 李润东,聂永丰,李爱民,等.LC添加剂对垃圾焚烧飞灰熔
 融过程重金属迁移特性的影响[J].环境科学,2004,25
 (5):168-171.

Li Rundong, Nie Yongfeng, Li Aimin, et al. Influence of liquid ceramic additive on binding of heavy metal during the vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(5): 168-171 (in Chinese).

[11] 国家环境保护总局. HJ/T299-2007 固体废物浸出毒性 浸出方法 硫酸硝酸法[S].

State Environmental Protection Administration of China. HJ/ T299—2007 Solid Waster Extraction Procedure for Leaching Tox icity—Sulphuric Acid and Nitric Acid Method [S]. (in Chinese).

- [12] 王 琪,田书磊,汪群慧,等. CaCl₂ 对垃圾焚烧飞灰热处 理特性的研究[J].环境科学研究, 2006, 19(5): 180-183.
 Wang Qi, Tian Shulei, Wang Qunhui, et al. The effect CaCl₂ on the heat treatment of MSWI fly ash[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 180-183 (in Chinese).
- [13] 黄本生,刘清才,王里奥. 垃圾焚烧飞灰综合利用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(9): 12-15.
 Huang Bensheng, Liu Qingcai, Wang Li ao. The research progress in comprehensive utilization of MSWI fly ash[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(9): 12-15(in Chinese).