

# 医疗垃圾焚烧飞灰处理研究进展

魏国侠<sup>1</sup>, 刘汉桥<sup>2</sup>, 徐 仙<sup>2</sup>, 王承智<sup>3\*</sup>

(1. 天津城建大学理学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384)

**摘要:**介绍了水泥固化、熔融、氯化焙烧及分步浮选等几种飞灰处理技术,着重分析了各项技术应用于医疗飞灰的可行性及局限性。水泥固化法因飞灰中高含量的活性炭和氯盐会阻碍水泥的水化作用,使水泥掺量过高,该方法不适合;熔融处理因飞灰量小、高氯、高碳会引起耐火材料的侵蚀及石墨电极的烧损等不利影响,不适合采用电弧炉熔融处理。医疗垃圾焚烧飞灰适宜采用残余炭式熔融炉;鉴于医疗垃圾焚烧飞灰中氯含量较高,直接焙烧处理是分离重金属的有效方法;分步浮选法是针对飞灰中碳组分含量高且二噁英在碳组分中富集的特性,通过两步浮选分离医疗垃圾焚烧飞灰中二噁英和重金属等毒害物,同时可脱氯。

**关键词:**医疗垃圾焚烧飞灰;水泥固化;熔融;焙烧;浮选

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)11-0046-05

## Research progress in treatment of hospital solid waste incinerator (HSWI) fly ash

WEI Guo-xia<sup>1</sup>, LIU Han-qiao<sup>2</sup>, XU Xian<sup>2</sup>, WANG Cheng-zhi<sup>3\*</sup>

(1. School of Science, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. School of Energy and safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

**Abstract:** The treatment technologies of hospital solid waste incinerator (HSWI) fly ash such as cement solidification, melting, chlorination roasting and two-step flotation were introduced. The application limitations and the feasibility of these technologies in HSWI fly ash were focused on. Cement solidification was not suitable for the treatment of HSWI fly ash because that high chlorine and high carbon in HSWI fly ash would hinder the hydration of the cement and bring the increasing of cement consuming. Melting by electronic arc furnace was not suitable for the treatment of HSWI fly ash because high chlorine and high carbon will cause adverse effects of erosion of graphite electrode and refractory material loss. Melting furnace using carbon combustion heat could be recommended for HSWI fly ash. Given the high chlorine content in HSWI fly ash, direct roasting treatment was an effective method for separation of heavy metals. Based on high content of PCDD/Fs and carbon in HSWI fly ash, lipophilic and hydrophobic nature of PCDD/Fs and characteristic of PCDD/Fs enrichment in carbon, a two-step flotation way of HSWI fly ash was developed. The flotation process could simultaneously deal with two toxic matter both PCDD/Fs and heavy metals in HSW incinerator fly ash. At the same time, chloride would be washed out, which made it be a promising solution.

**Key words:** HSW incinerator fly ash; cement solidification; melting; roasting; flotation

医疗垃圾是头号危险废物, SARS 爆发之后, 我国先后投资 150 亿元建立了 31 个危险废物和 300 个医疗垃圾集中处置中心<sup>[1]</sup>, 焚烧处理是这些医疗垃圾处置的主要方法, 国内现有医疗垃圾焚烧设施的年处置能力已超过 58 万 t。医疗垃圾经焚烧后将产生 3% ~ 5% 的飞灰, 这些焚烧飞灰中含有相当量的重金属、二噁英 (PCDD/Fs) 等毒性物以及氯化物等, 已被列入我国《国家危险废物名录》。根据国标 (GB 18484—2001) 之规定, 医疗垃圾焚烧飞灰应送危废填埋场安全处置。但我国已有的危废填埋场数量和容量难以满足处理需求, 国内大多数医疗垃圾焚烧飞灰仍然是临时堆放或简单填埋, 存在巨

大安全隐患。国标 (GB 16889—2008) 给出了一个暂行的处置方法<sup>[2]</sup>, 允许医疗垃圾焚烧飞灰经过稳定化、固化后进入生活垃圾填埋场共处置, 此权宜之计无法从根本上消除其带来的环境污染和环境安全问题。

### 1 医疗垃圾焚烧飞灰的特点

医疗垃圾中含有化学性废物、药物、解剖废物、传染性废物和病菌等毒害物, 其成分比生活垃圾复杂得多, 致使其焚烧飞灰也相对复杂。国内外学者在研究医疗垃圾焚烧飞灰特性时发现: ①医疗垃圾焚烧飞灰中氯含量和二噁英含量均较高。医疗垃圾

收稿日期: 2014-05-27; 修回日期: 2014-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378332); 住房和城乡建设部科学技术计划项目 (2014-K4-014); 中国博士后科学基金资助项目 (2013M530872)

作者简介: 魏国侠 (1973-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为固体废弃物无害化处理及资源化利用, 022-23085199, wgxkx@aliyun.com; 王承智 (1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体废弃物无害化处理及资源化利用, 通讯联系人, czwang9123@163.com。

中含有大量聚氯乙烯等含氯物质,氯元素含量通常高达 1.1% ~ 2.1%,这不仅使医疗垃圾焚烧产物中氯含量增高,还使部分焚烧产物中二噁英(PCDD/Fs)生成量高达 63.3  $\mu\text{g}/\text{t}$ ,提高了数倍甚至数十倍<sup>[1]</sup>。产物中二噁英 50% ~ 90% 富集于飞灰中<sup>[3]</sup>,致使部分飞灰中二噁英毒性当量超过 10  $\text{ng}/\text{g}$ 。②重金属含量高且移动性强。医用塑料多以重金属作为稳定剂和着色剂,部分医疗垃圾焚烧飞灰中的重金属 Zn、Pb 含量高达 10 761、1 147  $\text{mg}/\text{kg}$ <sup>[4]</sup>,明显高于其在生活垃圾焚烧飞灰中的含量<sup>[5]</sup>,且移动性强。③碳组分(活性炭和未燃残碳)含量高,是二噁英等有机污染物的富集源。我国部分医疗垃圾焚烧飞灰的热灼减率高达 30% 以上<sup>[4]</sup>。目前国内外常用活性炭喷射与布袋除尘技术来去除烟气中的二噁英。医疗垃圾焚烧厂的大气污染排放物浓度标准(GB 18484—2001)比生活垃圾焚烧厂更加严格,为降低排放尾气中二噁英、重金属等污染物,在布袋除尘器前喷入了大量活性炭,这些吸附二噁英、重金属的活性炭大部分转移到布袋飞灰中。此外,从焚烧炉带出的少量未燃残碳也进入布袋飞灰中,以上两方面导致医疗垃圾焚烧飞灰中碳组分含量较高<sup>[6]</sup>。表 1<sup>[4]</sup>对 2 种医疗垃圾焚烧飞灰(FA1、FA2)进行了分析,与生活垃圾焚烧飞灰(FA3 ~ FA6)相比,从表 1 中可以看出,医疗垃圾焚烧飞灰中氯和碳组分明显高于生活垃圾焚烧飞灰。

表 1 医疗垃圾飞灰的化学成分与热灼减率 %

成分	FA1	FA2	FA3 <sup>[7]</sup>	FA4 <sup>[8]</sup>	FA6 <sup>[9]</sup>	FA7 <sup>[10]</sup>
SiO <sub>2</sub>	20.60	18.85	22.01	30.38	30.40	19.40
CaO	15.30	18.68	30.71	19.25	29.70	19.70
Na <sub>2</sub> O	11.00	10.30	4.57	5.50	5.80	8.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.54	6.26	7.27	10.20	13.10	10.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.73	5.10	3.62	4.91	3.10	1.80
MgO	3.43	2.84	2.41	2.23	3.80	2.80
K <sub>2</sub> O	2.97	4.78	4.51	5.51	5.20	8.10
SO <sub>3</sub>	12.10	12.76	6.53	7.09	8.00	—
Cl	12.31	14.60	—	—	6.00	—
LOI	31.20	34.60	7.38	1.68	28.51	16.00

## 2 医疗垃圾焚烧飞灰处理技术

### 2.1 水泥固化技术处理医疗垃圾焚烧飞灰及其局限性

飞灰的水泥固化主要是将飞灰和水泥混合,经水化反应形成坚硬的水泥固体,从而达到阻止飞灰中危害成分浸出的目的。水泥固化虽具有工艺设备简单、操作方便的优点,但需要消耗大量的水泥,导致水泥/飞灰比增加。生活垃圾焚烧飞灰经水泥固化后,体积、质量分别增加 40%、30%<sup>[11]</sup>。通常,国内外要求生活垃圾焚烧飞灰的水泥固化体中水泥掺量应占 13% ~ 40%<sup>[11-12]</sup>。

(上接第 45 页)

[14] Luo J, Cao W, Ding L H, *et al.* Treatment of dairy effluent by shear-enhanced membrane filtration; The role of foulants [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 96: 194 - 203.

[15] Akoum O, Jaffrin M Y, Ding L H, *et al.* An hydrodynamic investigation of microfiltration and ultrafiltration in a vibrating membrane module [J]. Journal of Membrane Science, 2002, 197(1): 37 - 52.

[16] Ahmed S, Rasul M G, Hasib M A, *et al.* Performance of nanofiltration membrane in a vibrating module (VSEP-NF) for arsenic removal [J]. Desalination, 2010, 252(1/2/3): 127 - 134.

[17] Kertesz, Laszlo Z, Forgacs E, *et al.* Dairy wastewater purification by vibratory shear enhanced processing [C]. Desalination and water treatment. Slovakia, 2011: 195 - 201.

[18] Subramani, Arun D, James P, *et al.* Vibratory shear enhanced process (VSEP) for treating brackish water reverse osmosis concentrate with high silica content [J]. Desalination, 2012, 291(1/2): 15 - 22.

[19] Vaneeckhaute C, Meers E, Michels E, *et al.* Fate of macronutrients in water treatment of digestate using vibrating reversed osmosis [J]. Water Air Soil Pollut, 2012, 223(4): 1593 - 1603.

[20] Zouboulis A I, Petala M D. Performance of VSEP vibratory membrane filtration system during the treatment of landfill leachates [J]. Desalination, 2008, 222(2): 165 - 175.

[21] Chan G Y S, Chang Jie, Kurniawan T A, *et al.* Removal of non-biodegradable compounds from stabilized leachate using VSEPRO membrane filtration [J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3): 310 - 317.

[22] Nurra C, Clavero E, Salvadó J, *et al.* Vibrating membrane filtration as improved technology for microalgae dewatering [J]. Bioresource Technology, 2014, 157: 247 - 253.

[23] 张彦斌. 振动剪切流过滤过程及其强化性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[24] 王瑶, 杨德武, 王瑜, 等. 膜振动过滤通量的实验研究 [J]. 过滤与分离, 2009, 19(1): 14 - 17.

[25] 张伟军, 张明. 震动膜处理乳化液废水研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 222 - 225.

[26] Zhang Weijun, Xiao Ping, Wang Dongsheng. Central treatment of different emulsion wastewaters by an integrated process of physico-chemically enhanced ultrafiltration and anaerobic-aerobic biofilm reactor [J]. Bioresource Technology, 2014, 159: 150 - 156. ■

医疗垃圾焚烧飞灰中高含量碳组分在水泥固化过程中会带来凝结时间延长、抗压强度降低以及重金属迁移性增强等诸多问题。首先, 不仅医疗垃圾焚烧飞灰中高浓度的氯盐和硫酸盐会明显阻碍水泥的水化作用<sup>[13]</sup>, 而且飞灰中高含量的碳组分容易将水泥熟料包裹在未燃物的炭孔内部, 阻碍水分与水泥熟料充分接触, 使水化反应延缓, 从而延迟水泥固化的凝结时间, Poona 等<sup>[14]</sup>发现含炭量高的飞灰的水泥固化体在养生初期的水化速率较低。刘汉桥等<sup>[15]</sup>发现水泥配比为 40% 时水泥固化体终凝时间长达 63 h, 超出 48 h 的限值。其次, 飞灰中高含量的活性炭不仅减少了起连接作用的水泥水化产物数量, 而且会破坏水化产物的结构, 使固化体的抗压强度降低; 第三, 碳组分的存在使得水泥固化体中对重金属起固化作用的钙矾石 (AFt) 和水化硅酸钙 (C-S-H 凝胶) 2 种水化产物数量减少<sup>[16]</sup>, 从而重金属不易被稳定, 同时碳组分使得其水泥固化体孔隙率增高, 浸出液越容易进入固化体内, 固化体孔隙中重金属浸出越多。为使各项固化指标能达到填埋要求, 医疗垃圾焚烧飞灰水泥固化中水泥掺量宜在 70% 左右, 远超过目前国内生活垃圾焚烧飞灰水泥掺量的上限值 (40%)。

水泥固化方法处理医疗垃圾焚烧飞灰主要缺陷在于: ①要达到预期的固化效果, 必须采用很高的水泥/飞灰比, 消耗大量的水泥, 增容、增质严重, 无法实现废物处理的减量化要求; ②水泥固化需要足够的操作时间; ③水泥固化以稳定飞灰中的重金属为主要目标, 无法分解或稳定飞灰中的二噁英, 是其又一致命弱点; ④水泥固化后重金属最终积累在环境中, 其长期稳定性不能保证, 不能实现彻底的无害化; ⑤稳定后的产物是无用的、不可再生资源, 不能实现医疗垃圾焚烧飞灰的资源化。

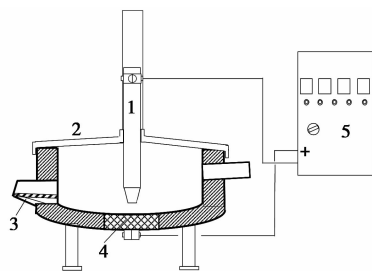
## 2.2 熔融技术处理医疗垃圾焚烧飞灰

熔融是将焚烧飞灰加热到灰熔点以上, 该方法在固化重金属的同时有效分解二噁英, 熔融得到的玻璃熔渣还可进行高附加值利用。熔融炉按热源分为电热型熔融炉和燃料型熔融炉 2 类, 电热型熔融炉主要包括电弧熔融炉、等离子体熔融炉、电阻熔融炉等; 燃料型熔融炉主要包括反射面式熔融炉、旋转面式熔融炉、涡流式熔融炉、残余炭式熔融炉等<sup>[17]</sup>。大型生活垃圾焚烧厂的处理能力一般达到 1 000 t/d 以上, 飞灰量较大, 而且自身发的电难于并网, 适合配套建设电弧炉等电热型熔融炉<sup>[18]</sup>。

电弧炉熔融技术处理医疗垃圾焚烧飞灰存在的

问题: 首先, 医疗垃圾焚烧厂的规模较小, 设施较为分散, 处理能力一般为 15 ~ 30 t/d, 飞灰产生量相对较小, 电弧炉熔融技术能耗大且设备费用昂贵, 不适合医疗垃圾焚烧飞灰产量相对较小的特点; 其次, 医疗垃圾焚烧飞灰中碳组分含量高, 即使掺入适量的底灰, 飞灰中的活性炭在高温下氧化燃烧也容易烧损石墨电极的侧面, 从而加速电极烧损<sup>[19]</sup>, 而且飞灰中  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_3$  含量较高, 容易腐蚀耐火材料; 第三, 医疗垃圾焚烧飞灰中氯含量高, 金属氯化物在熔融过程中易高温挥发, 不能被有效固定在玻璃质产物中而引起二次污染<sup>[20]</sup>。因此, 从经济和技术角度医疗垃圾焚烧飞灰均不适于电弧炉熔融处理。

残余炭式熔融炉 (见图 2) 主要是利用焚烧灰中含碳物质的燃烧热来减少熔融炉辅助燃料消耗, 熔融炉为水平圆柱型, 炉的周围布置有几个辅助油燃烧器, 飞灰经推灰器送进炉内, 依靠飞灰自身含碳物质自燃放出的热和燃烧器产生的漩涡气流的对流和辐射加热熔融, 熔融前灰中一般适当掺煤或焦炭提高灰中可燃物。鉴于医疗垃圾焚烧飞灰中碳组分含量较高, 较适宜采用残余炭式熔融炉。



1—顶电极; 2—水冷炉盖; 3—出口; 4—底电极; 5—直流电源

图 1 电弧熔融炉

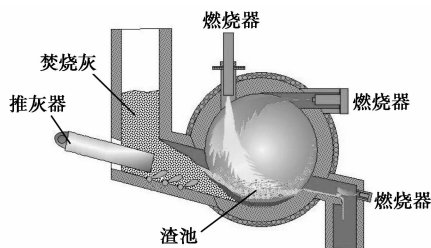


图 2 残余炭式熔融炉

## 2.3 焙烧法处理医疗垃圾焚烧飞灰

氯化焙烧法是通过在生活垃圾焚烧飞灰中添加氯化剂 ( $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  等) 后进行热处理, 使得易渗沥的重金属从飞灰中分离出来。在热处理过程中氯化剂与重金属及其氧化物发生氯化反应, 形成低沸点的重金属氯化物, 在降低残余灰中重金属渗沥性的

同时,还可有效分解飞灰中的二噁英,处理后的残余灰可直接进行安全填埋。目前,国内外对生活垃圾焚烧飞灰氯化焙烧进行了大量尝试,Chanchris<sup>[21]</sup>利用CaCl<sub>2</sub>作为氯化介质,在600~1 050℃下处理生活垃圾焚烧飞灰,发现重金属的有效分离与其氯化反应的自由能之间存在线性关系。Jakob等<sup>[22]</sup>研究发现,生活垃圾焚烧飞灰中加入过量的氯化物,在一定条件下重金属氧化物能转变为重金属氯化物而完全蒸发。

医疗垃圾焚烧飞灰自身含有较高氯盐,可考虑不用添加氯化剂直接进行焙烧处理。笔者<sup>[23]</sup>前期发现,医疗垃圾焚烧飞灰中Pb、Zn、Cd等挥发性重金属主要以可交换态(氯盐等)和碳酸盐结合态(碳酸盐、氢氧化物等的)的形式存在,其中重金属的碳酸盐结合态热稳定性差,加热过程中极易分解而转化为重金属氧化物,重金属氧化物在灰中氯盐的作用下又易转变成沸点低的重金属氯化物,从而容易蒸发。刘汉桥等<sup>[24]</sup>开展了医疗垃圾焚烧飞灰焙烧实验,结果发现,在1 000℃时,医疗垃圾焚烧飞灰中Pb、Cd的蒸发率已经达到90%以上,焙烧时间以为20 min左右为宜。

## 2.4 分步浮选法处理医疗垃圾焚烧飞灰

泡沫浮选技术是20世纪初发明的一种新型分离技术,具有设备简便、浓缩分离快、富集倍数高、耗能低等特点。该技术最初用于矿物加工。近年来,逐渐应用于焚烧飞灰或重金属污染的固体废物治理方面。Huang等<sup>[25]</sup>对生活垃圾焚烧飞灰中未燃残碳进行浮选分离,结果表明,64%的未燃残碳、41.9%的PCDD/Fs和40.8%的PCBs被同时移除,TEQ从飞灰中的6.2 ng/g减小到残灰中的4.2 ng/g。Atsushi等<sup>[26]</sup>通过浮选脱除污染土壤中未燃残碳来降低土壤中二噁英的浓度,结果发现土壤中二噁英浓度从15 ng/g降低到0.68 ng/g。Vanthuyne等<sup>[27]</sup>证明硫化预处理有利于沉积物中Pb、Cu、Cd等重金属的移除。

Liu等<sup>[28-29]</sup>对医疗垃圾焚烧飞灰进行了浮选实验研究,在最佳浮选工况下可将原灰中92%的碳组分分离到富集碳中,同时二噁英毒性当量从原灰中5.61 ng/g降低到残灰中1.47 ng/g,并进一步提出医疗垃圾焚烧飞灰两步浮选去毒新工艺,工艺流程见图3<sup>[30]</sup>。通过第一步浮选实现二噁英与碳组分的共分离,降低飞灰中二噁英等有机污染物毒性,同时洗脱可溶性重金属;尾浆第二步浮选采用硫化沉淀浮选法脱除并回收Pb、Zn等重金属,消除重金属

危害。分离后最终产物主要包括富集碳、残灰、重金属沉淀盐等。其中,浓集二噁英、碳组分及捕收剂的富集碳送入二燃室焚烧,实现碳组分燃料化利用和二噁英高温分解,而且富集碳中极低的氯盐和重金属可有效减少二噁英在尾部烟道的二次合成;剩余残灰中碳组分、二噁英、重金属及氯含量都非常低,体积减小,可考虑送生活垃圾填埋场安全处置或资源化利用,可节省大量填埋空间,使处理费用大大降低;经硫化浮选分离后的重金属沉淀盐可作为冶炼厂原料,实现Pb、Zn等重金属的回收;第二步浮选过滤后的废液可经中和处理后送焚烧厂废水系统安全排放,从而在低成本低投入条件下实现医疗垃圾焚烧飞灰的无害化处理和资源化利用,一个工艺解决多个问题,一举多得,不需要洗涤和稳定等程序,具有操作简单、成本低、处理效果好且不存在二次污染等优点。

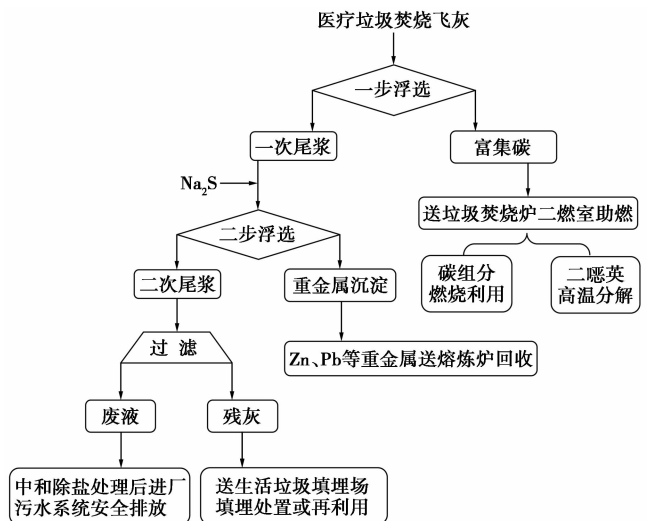


图3 医疗垃圾焚烧飞灰分步浮选去毒工艺

## 3 结语

医疗垃圾焚烧飞灰的处理必须结合其高氯、高碳的组成特点,不宜直接套用生活垃圾焚烧飞灰处理技术。以目前应用最为广泛的飞灰水泥固化为例,水泥固化过程中,医疗垃圾焚烧飞灰中高含量的活性炭和氯盐会阻碍水泥的水化作用;飞灰熔融等高温热处理技术能在固化重金属的同时有效分解二噁英,但电弧炉熔融技术能耗大且设备昂贵,不适合医疗垃圾焚烧飞灰产量相对较小的特点;另外,飞灰中高含量的氯盐和活性炭易引起耐火材料的侵蚀、重金属再挥发,鉴于医疗垃圾焚烧飞灰中碳组分含量较高,适宜采用残余炭式熔融炉处理。医疗垃圾

焚烧飞灰自身含有的较高氯盐,适宜不用添加氯化剂直接进入焙烧的方法来处理,实现重金属的有效分离和二噁英的分解。分步浮选通过两步浮选分别降低二噁英等有机污染物和重金属的毒性,同时可结合焚烧厂的现有设施将飞灰中碳组分燃料化利用和二噁英高温分解、废液安全处置,例如,将浮选分离后的碳组分、二噁英及捕收剂的混合物送入二燃室焚烧,不仅可将碳组分进行燃料化回收利用,而且可实现二噁英等有机污染物的高温分解;两步浮选后废液可进入排污系统与厂内废水一并处理。浮选后残灰的体积和毒性将大幅度降低,可直接送生活垃圾填埋场填埋处置或进一步资源化利用,极大减少了飞灰的后续处理费用。

### 参考文献

- [1] Simone pascucci. Soil contamination[M]. Published by In Tech, 2011:1-15.
- [2] 海景,张刚,程江. 城市生活垃圾焚烧飞灰处理研究进展[J]. 现代化工,2011,31(8):31-34.
- [3] Everaert K, Baeyens J, Degreve J. Entrained-phase adsorption of PCDD/Fs from incineration flue gases[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37:1219-1224.
- [4] 刘汉桥,蔡九菊,齐鹏飞,等. 两种医疗垃圾焚烧炉的灰渣特性研究[J]. 环境科学学报,2006,26(12):2026-2032.
- [5] Zhao L J, Zhang F S, Wang K S, et al. Chemical properties of heavy metals in typical hospital waste incinerator ashes in China[J]. Waste Management, 2008, 29:1114-1121.
- [6] Kakuta Y, Matsuto T, Tojo Y, et al. Characterization of residual carbon influencing on de novo synthesis of PCDD/Fs in MSWI fly ash[J]. Chemosphere, 2007, 68:880-886.
- [7] 金保升,王学涛,仲兆平,等. 两种不同焚烧飞灰熔融特性实验研究[J]. 锅炉技术,2005,36(1):38-42.
- [8] Li Min, Xiang Jun, Hu Song, et al. Characterization of solid residues from municipal solid waste incinerator[J]. Fuel, 2004, 83(1):1397-1405.
- [9] Poletti A, Pomi R, Trinci L, et al. Engineering and environmental properties of thermally treated mixtures containing MSWI fly ash and low-cost additives[J]. Chemosphere, 2004, 56:901-910.
- [10] Cheng T W. Combined classification of EAF dust and incinerator fly ash[J]. Chemosphere, 2003, 50:47-51.
- [11] Ecke H, Sakanakura H, Matsuto T, et al. State-of-the-art treatment processes for municipal solid waste incineration residues in Japan[J]. Waste Management, 2000, 18:41-51.
- [12] 蒋建国,赵振振,王军,等. 焚烧飞灰水泥固化技术研究[J]. 环境科学学报,2006,26(2):230-235.
- [13] Katsuura H, Inoue T, Hiraoka M, et al. Full-scale plant study on fly ash treatment by the acid extraction process[J]. Waste Management, 1996, 16:491-499.
- [14] Poona C S, Qiao X C, Linb Z S. Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33:1857-1865.
- [15] 刘汉桥,魏国侠,张曙光,等. 活性炭对医疗垃圾焚烧飞灰水泥固化的影响[J]. 过程工程学报,2008,8(5):953-956.
- [16] Remond S, Bentz D P, Pimienta P. Effects of the incorporation of municipal solid waste incineration fly ash in cement pastes and mortars II modeling[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32:565-576.
- [17] 刘汉桥,蔡九菊,邵春岩. 我国垃圾焚烧灰熔融炉的应用前景[J]. 工业炉,2006,28(5):7-11.
- [18] Liu H Q, Wei G X, Liang Y. Glass-ceramics made from arc-melting slag of waste incineration fly ash[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(6):1945-1952.
- [19] 刘汉桥,魏国侠,蔡九菊. 垃圾焚烧灰电弧熔融炉的热工特性研究[J]. 工业炉,2010,32(3):24-27.
- [20] Wang Q, Yan J H, Chi Y, et al. Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators[J]. Chemosphere, 2010, 78:626-630.
- [21] Chanchris Chi-Yet. Behaviour of metals in MSW incinerator fly ash during roasting with chlorinating agents[D]. Ottawa: University of Toronto, 1997.
- [22] Jakob A, Stucki S, Kuhn P. Evaporation of heavy metals during the heat treatment of municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30:3275-3283.
- [23] 魏国侠,刘汉桥,张曙光,等. 医疗垃圾焚烧飞灰重金属形态分析[J]. 环境污染与防治,2009,31(1):5-9.
- [24] 刘汉桥,魏国侠,张曙光,等. 医疗垃圾焚烧飞灰中重金属蒸发特性研究[J]. 过程工程学报,2009,9(5):892-896.
- [25] Huang Y, Takaoka M, Takeda N, et al. Partial removal of PCDD/Fs, coplanar PCBs, and PCBs from municipal solid waste incineration fly ash by a column flotation process[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(26):257-262.
- [26] Atsushi S, Younghun K, Sri H, et al. Remediation of contaminated soil by fly ash containing dioxins from incineration by using flotation[J]. Materials Transactions, 2005, 46(5):990-995.
- [27] Vanthuyne M, Maes A, Cauwenberg P. The use of flotation techniques in the remediation of heavy metal contaminated sediments and soils: An overview of controlling factors[J]. Minerals Engineering, 2003, 16:1131-1141.
- [28] Liu H Q, Wei G X, Zhang R. Removal of carbon constituents from hospital solid waste incinerator fly ash by column flotation[J]. Waste Management, 2013, 33:168-174.
- [29] Liu H Q, Wei G X, Zhang R, et al. Simultaneous removal of heavy metals and PCDD/Fs from hospital waste incinerator fly ash by flotation assisted hydrochloric acid[J]. Separation Science and Technology, 2014, 49:1-10.
- [30] 刘汉桥,魏国侠. 一种医疗垃圾焚烧飞灰处理方法:CN, 101797575B[P]. 2012-01-04. ■