

熔融温度对城市生活垃圾焚烧飞灰 旋风熔融试验特性的影响

王学涛¹, 金保升², 徐斌¹, 仲兆平²

(1. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 河南省 洛阳市 471003;

2. 东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省 南京市 210096)

Effects of Melting Temperature Experimental Property of Fly Ash From Municipal Solid Waste Incinerator During Swirling Melting Process

WANG Xue-tao¹, JIN Bao-sheng², XU Bin¹, ZHONG Zhao-ping²

(1. Vehicle and Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan Province, China; 2. Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The fly ash (FA) was melted in the self-developed swirling melting furnace system. At different temperature, the physical changes of microstructure and behavior of heavy metals were investigated during fly ash melting process. The results show that the design of the experimental system design is reasonable, and the running stability are verified. The swirling melting process technology would effectively immobilize the heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration(MSWI). The sample happened to sintering reaction or part melting reaction at the lower range melting temperature between 1250 to 1300°C. The fly ashes samples would be transformed to the glassy state at the higher melting temperature above 1350°C. The melting temperature range is between 1250 to 1400°C, the fixation rates of Ni, Cr, Cu, Co, and Mn are slowly increased with melting temperature enhancement during melting process. The changes of melting temperature have marked affect on the fixation rates of Ad, Pb, Cd, and Zn. Vitrification of fly ash results in a decrease of the leaching of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Cu, Cd, and Hg) to much below the EPA regulatory limit values.

KEY WORDS: thermal power engineering; incineration; municipal solid waste incineration fly ash; melting; heavy metals; fixation rates

摘要: 采用自行设计的旋风熔融系统对焚烧飞灰进行熔融试验, 研究了不同熔融温度条件下熔渣的微观形貌及熔融过程中重金属行为。结果表明, 旋风熔融处理系统设计合理, 系

统能够协调稳定运行, 使用方便; 旋风熔融可有效地固溶焚烧飞灰中的重金属, 易于焚烧飞灰的大规模处理。在较低熔融温度下(1250~1300°C), 试样仅发生烧结反应或部分熔融; 较高的熔融温度(>1350°C)可使试样完全转化为玻璃态。在1250~1400°C范围内, Ni、Cr、Cu、Co、Mn的固溶率随熔融温度的升高呈缓慢增长趋势, 而熔融温度变化对As、Pb、Cd、Zn的固溶率影响显著。熔融产物中Zn、Cr、Pb、Cu、Cd、Hg等重金属浸出率均非常低, 低于美国EPA标准限值。

关键词: 热能动力工程; 焚烧; 焚烧飞灰; 熔融; 重金属; 固溶率

0 引言

生活垃圾焚烧处理虽可使垃圾得到有效减容化、无害化处理, 但仍可产生15%左右的焚烧灰渣和飞灰, 这些灰渣, 尤其是飞灰, 含有二噁英及大量的重金属等有害物质, 若未经妥善处理, 势必造成严重的二次污染。熔融处理技术是将有害的焚烧飞灰减容化、无害化、资源化处理的主要技术之一。该技术具有熔融处理无害化彻底、熔渣稳定性高、运行费用适中、减量化显著、可资源化利用等诸多优点^[1]。因此, 焚烧飞灰熔融技术已成为近期国内外研究的热点。Kirk等人^[2]探讨飞灰中Cr在热处理过程中的反应, 经过加热熔融处理后, 产生不同种类的Cr的化合物, 包括CaCrO₄、Cr₂O₃。Masahide Nishigaki等人^[3]在处理量为5t·d⁻¹的表面熔融炉和等离子熔融炉上, 对煤与垃圾混合焚烧炉灰渣进行了

基金项目: 教育部高等学校博士点基金项目(20030286005); 江苏省建设系统科技计划项目(JS200311)。

熔融实验,发现熔渣中主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO ;Kwinam Park等人^[4]利用Brown's气对垃圾焚烧飞灰进行了玻璃化处理研究,发现焚烧飞灰在 1450°C 下处理后,熔渣中重金属的浸出率显著降低。李润东等人^[5]研究了飞灰成分和碱度对6种重金属迁移的影响规律。以往的研究多以焚烧过程中^[6-10]、固定床或管式熔融为主,研究焚烧、熔融过程重金属特性^[11-13]。然而关于熔融温度对于焚烧飞灰旋风熔融处理特性的影响仍缺乏系统研究。

本文采用自行设计、构建的旋风熔融炉,通过对焚烧飞灰(FA)熔融处理的试验,分析熔渣的微观形貌及熔融过程中重金属行为,为焚烧飞灰无害化、减容化、资源化处理提供参考。

1 试验装置及方法

1.1 焚烧飞灰熔融试验装置

焚烧飞灰旋风熔融试验系统流程图如图 1 所示,主要包括:旋风熔融炉本体、加料系统、点火装置、气路、油路、气体收集系统、液态排渣系统、测温系统等。垃圾焚烧飞灰为机械炉排焚烧炉布袋除尘器飞灰,粒径较细。本试验采用星形加料器进行加料。加料系统主要由调速电机、变频器和星形加料器三部分组成。焚烧飞灰熔融炉本体是一个旋风熔融炉,分为上下两部分。旋风熔融炉本体炉膛内径为 300mm,高 1500mm,熔融炉壁厚 45mm,采用燃油喷燃系统加热,通过调节燃烧风、雾化风、燃油量来控制熔融温度,熔融温度可控制在 $600\sim 1600^\circ\text{C}$ 之间的设定温度运行。详见图 1,熔融炉本体上还设有加料口、点火器插孔、视镜观察孔、熔融后烟气出口、排渣口、测温孔。

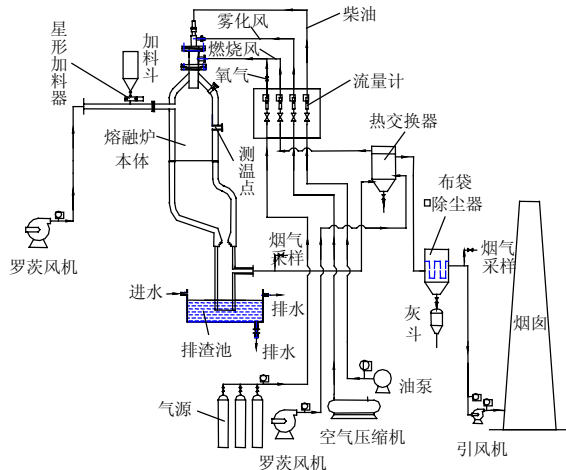


图 1 试验装置系统图

Fig. 1 Schematic of experimental facility

1.2 试验工况及试验过程

试验中设计了不同的试验工况,熔融温度控制在 $1250\sim 1400^\circ\text{C}$ 之间,飞灰熔融试验条件见表 1。首先打开循环水,并将排渣水箱中的水注满,控制进水、出水流速;启动熔融炉,待熔融炉达到设定温度后,准备各工况的热态试验。试验步骤如下:①调节给飞灰进料量使其达到试验需要值;②调节燃烧风、雾化风、冷却风风量及受热面积,使炉内温度达到试验所需的数值;③经过 60min 稳定燃烧后,记录燃烧风、雾化风、给油量值,待开始正式试验,记录风量、电机转速、各测点温度、炉膛压差,同时对烟气、灰渣中的重金属进行采样;④试验结束后,停止加飞灰、燃油,调小燃烧风冷却熔融炉,使床温降至 250°C 后,停止供风,同时关闭引风机,停炉。

表 1 焚烧飞灰熔融试验工况参数表

Tab.1 Parameters for different experiments of fly ash melting process

工况	熔融温度/ $^\circ\text{C}$	燃烧风/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	雾化风/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	输送风/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	燃油量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	加料量/kg	加料时间/min
1	1251	33	3.3	13.6	8.0×10^{-3}	3	30
2	1300	33	3.3	13.6	8.0×10^{-3}	3	30
3	1352	33	3.3	13.6	8.0×10^{-3}	3	30
4	1401	33	3.3	13.6	8.0×10^{-3}	3	30

1.3 样品分析方法

1.3.1 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜为 JSW-5610LV 型,将熔融后的试样放在玛瑙研钵中捣成块状颗粒,并将其固定在金属圆盘上进行喷金处理。加速电压:1.0kV;放大倍数: $\times 3000$;焦点距离:10~15mm。

1.3.2 重金属采集与分析

重金属总量消化分析:参照 USEPA SW846-3050b^[14]对试样进行测定。试样采用 POEMS(II)型电感耦合等离子体光谱质谱联用仪进行分析,ICP 仪器工作参数:高频发射功率:1.15 kW;冷却气流量:15 L/min,辅助气流量:0.50 L/min;雾化气:0.45 L/min;试液提升量:1.5 mL/min;泵速:100 r/min。

1.4 试验物料成分分析

本试验采集的城市垃圾焚烧飞灰来自国内华东某地区的垃圾焚烧发电厂布袋除尘灰,垃圾焚烧发电厂的日处理能力为 1095t 生活垃圾,选用的是法国焚烧设备,采用倾斜往复推力炉排焚烧工艺,烟气净化采用半干式洗涤塔与滤袋式除尘器组合工艺;飞灰试样的成分用 ARL9800XP+ 型 X 射线荧光光谱仪进行分析,结果如表 2 所示。飞灰试样主要成分包括 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,以及大量碱金属氧

化物、氢氧化物、氯化物，还含有少量重金属，如Cd、Cr、Cu、Pb、Zn等，其中Pb、Zn等重金属严重超出危险废物鉴别标准GB5085.3-1996。

表2 城市生活垃圾焚烧飞灰的基本成分分析
Tab.2 Composition analysis of MSWI fly ash

主要成分	质量分数/%	重金属	元素含量/(mg/kg)
SiO ₂	28.91	Zn	4981.00
CaO	24.85	Cu	831.80
Al ₂ O ₃	13.34	Cr	468.40
Fe ₂ O ₃	6.26	Pb	2048.00
MgO	2.38	Ni	78.54
Na ₂ O	10.68	Cd	5.04
K ₂ O	9.42	As	38.35
P ₂ O ₅	1.52	Hg	21.67
—	—	Co	233.75
—	—	Mn	195.65

焚烧飞灰进行微观形貌分析，如图2所示。飞灰颗粒间孔隙较大且结构较为疏松，多以30~40μm的球形、不规则形颗粒居多，有极少数飞灰颗粒粒径大于100μm；粒径较大颗粒多以不规则棱角分明的块状、片状为主，粒径较小的颗粒以球状、椭球状存在，平均粒径在20~30μm之间。

由于焚烧飞灰采自布袋除尘器，其粒径一般均不超过1000μm，焚烧飞灰的粒径分布如图3所示。焚烧飞灰粒径基本呈近似的正态分布。飞灰主要粒径范围在44~88μm之间，约占总重量的62%，小于0.1μm或大于1000μm的颗粒总量几乎接近于0。

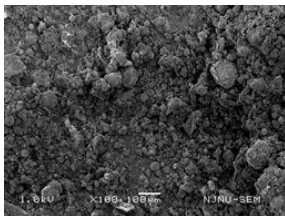


图2 飞灰未经熔融处理前的SEM照片(×100)

Fig. 2 SEM image of fly ash before melting treatment (×100)

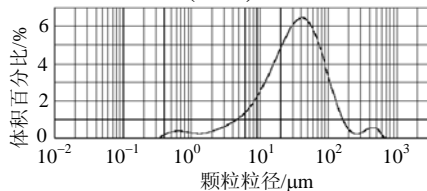


图3 垃圾焚烧飞灰粒径分布

Fig. 3 Particles size distribution of fly ash

2 结果与讨论

2.1 熔融后焚烧飞灰的SEM分析

焚烧飞灰在不同温度下熔融处理后的SEM照片见图4。在1250℃时，试样中产生大量块状晶体，外观无玻璃光泽，表面结构凹凸不平，经放大3000倍后发现明显的局部(颈部)致密化现象，又因为

该温度低于飞灰的熔流点，故可推断在1250℃温度下试样仅发生了体积收缩、密度升高等显微结构变化，属于烧结反应或局部熔融，部分熔融物质可能是碱金属盐类相互作用而形成的低熔点的化合物；随着熔融温度的升高，试样中熔融部分比例急剧增大，当升温至1300℃时，熔渣中块状晶体逐渐减少，试样已融为一体，但仍可观察到小颗粒或晶体附着在熔渣断面，试样熔流后填充气孔形成高低不平的表面结构；熔融温度若达到1350℃时，试样大部分组分已玻璃化，外观产生玻璃光泽，熔渣多以无定形玻璃态物质为主，产生少量硅酸盐晶体，此时熔渣中的晶体结构多转变为非晶体结构，内部结构变得更为致密，已达到较好的熔融效果；继续提高温度进行试验，发现在1400℃温度条件下，由于焚烧飞灰在高温空气气氛下发生了熔融，熔渣由于快速冷却，大部分试样形成非晶相玻璃态物质，且反应温度越高，非晶相物质越多。飞灰熔渣质地更为均匀，结构紧凑致密，表面平整且有光泽，说明熔融炉内的熔融温度(1400℃)已高于飞灰熔融温度，熔融温度越高对熔融处理效果越有利。

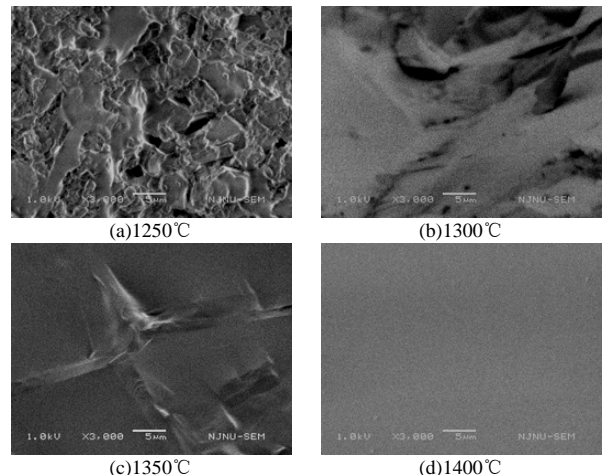


图4 焚烧飞灰在不同温度下经熔融处理后的SEM照片(×3000)

Fig. 4 SEM images of melting treatment at different temperature(×3000)

2.2 熔融温度对焚烧飞灰熔融过程中重金属行为的影响

为了更清晰地表示熔融前后重金属分布特性，对各种重金属元素的变化采用固溶率表示： $R_f = [(c_a \times m_a) / (c_b \times m_b)] \times 100\%$ ，式中 R_f 为固溶率，%； c_a 为重金属在熔融产物中的浓度， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； m_a 为熔融产物的质量，kg； c_b 为重金属在熔融前试样中的浓度， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； m_b 为熔融前试样的质量，kg。

在1250~1400℃温度范围内，焚烧飞灰的熔融

温度与重金属固溶率关系见图 5。可以发现，对于难挥发性重金属而言，当熔融温度超过 1300℃时，固溶率几乎均达到 50%以上，Co对熔融温度不太敏感，固溶率在 1400℃时最高，仅为 41.7%，在 1350℃时略有减少；而重金属Cr、Ni在不同熔融温度下固溶率均大于 90%，这是由于在该熔融温度区间内二者的蒸气压较低的缘故，致使其挥发率很低，固溶率较高^[15]；同时，由于Cr属于难挥发性重金属，其在飞灰中可能存在的形态为：氯化铬(沸点 1200-1500℃)及氧化铬(熔点 1900℃)，因此熔融温度对其影响较小。也有研究表明：在 1300℃时飞灰试样开始出现玻璃化现象，而多数重金属的熔点低于其氧化物的熔点^[16]。

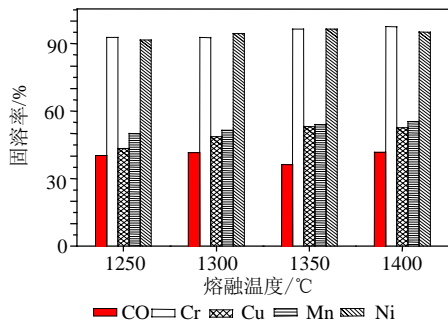


图 5 熔融温度与难挥发性重金属固溶率的关系
Fig. 5 Relationship between melting temperature and fixation rates of non-volatile heavy metals

对于易挥发性重金属As、Hg、Cd、Zn、Pb，熔融温度对其固溶率的影响较显著，见图 6。As的固溶率随熔融温度的升高呈下降趋势，在 1400℃时降至最低 15.1%。而Zn恰好相反，在 1400℃时上升至 34.1%，说明熔融温度较高时有利于提高Zn的固溶率。Cd、Pb有着相似的固溶规律，在不同熔融温度条件下，呈先增后减的复杂趋势；固溶率在 1300℃时最高，Pb的固溶率为 18.7%，Cd的固溶率为 7.2%，这是由于在该温度生成CdAl₂O₄，从而限制了Cd的挥发^[17-18]，部分Pb、Cd等多以硅铝酸盐的形式被有效地固溶硅酸盐网状基体当中。文献[19-20]研究了焚烧飞灰在 1450℃的玻璃化特性，发现Cu、Fe、Zn、Pb、Cr、As、Cd替代飞灰中Al³⁺、Ca²⁺而存在于硅酸盐基体中，且随碱基度的降低，替代率升高。Hg的固溶率对熔融温度最为敏感，熔融温度超过 1300℃时，甚至完全挥发。在此过程中Hg的固溶率最低，其次是Cd，然后是Pb、As、Zn，这一点也证实了Kuen-Sheng Wang等人^[21-22]的结论。

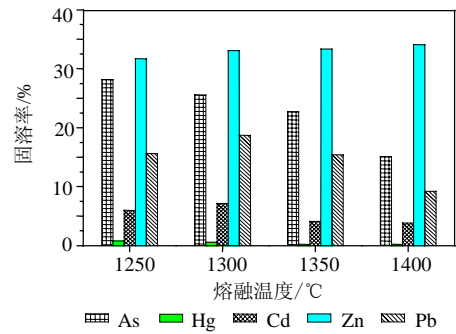


图 6 熔融温度与易挥发性重金属固溶率的关系
Fig. 6 Relationship between melting temperature and fixation rates of volatile heavy metals

飞灰试样熔融后的浸出毒性试验(TCLP)测定结果如表 3 所示。试验结果表明熔融处理可降低重金属的浸出毒性，Ni、Cr、Zn、Pb、Cu、Cd等重金属浸出率均非常低，甚至几乎低于检测线。熔融过程中，Ni、Zn、Cr、Pb、Cu、As、Cd取代硅酸盐类中的Ca²⁺、Al³⁺而被固溶在硅酸盐网状基体当中，从而使熔融试样的浸出率明显降低^[19-23]。试验结果同时表明，采用美国EPA的测试方法^[14]测试熔融试样的重金属浸出浓度均低于其规定限值。熔渣中重金属的浸出浓度均低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》中所规定的标注值，表明焚烧飞灰熔渣中重金属以稳定的化合物形态存在，且无毒害作用，熔融处理后的熔渣可以按照普通固体废弃物填埋，也可以作为建筑和路基材料。

固体燃料燃烧、特别是固体废弃物焚烧会产生大量含有有害重金属的飞灰，对其进行妥善的处置，是飞灰得以无害化和资源化利用的重要途径。本文采用自行设计的旋风熔融系统对焚烧飞灰进行熔融试验，对于熔融过程挥发性重金属所形成的新的烟气等二次污染问题，需要进一步处理，例如：烟气中Hg采用活性炭吸附，吸附后的试样用 10%的双氧水、5%的HNO₃、4%的K₂MnO₄等为吸收液做进一步化学处理。该问题也是熔融法处理飞灰的不可避免的问题。

表 3 用TCLP测定焚烧飞灰熔融后试样的浸出毒性
Tab. 3 Results of the fly ash from MSWI by TCLP mg/L

试验工况	Cr	Ni	Pb	Cu	Zn	Cd	As	Hg
1250℃	0.9565	0.2776	0.0834	1.0676	1.5745	0.1502	0.0675	0.00291
1300℃	0.7923	0.2545	0.0791	0.9724	1.5455	0.1432	0.0568	0.00267
1350℃	0.6798	0.2432	0.0589	0.9351	1.3741	0.1393	0.0487	0.00175
1400℃	0.6147	0.2312	0.0565	0.9215	1.3214	0.1324	0.0434	0.00073
标准限值 ^[14]	5	-	5	-	-	1	5	0.2
危险废物浸出毒性鉴别标准	10	10	3	50	50	0.3	1.5	-

3 结论

(1) 旋风熔融处理系统的结构设计合理, 整个系统能够协调稳定运行, 使用方便; 旋风熔融可有效地固溶焚烧飞灰中的重金属, 易于焚烧飞灰的大规模处理。

(2) 在较低熔融温度下(1250-1300℃), 试样仅发生烧结反应或部分熔融; 较高的熔融温度(>1350℃)可使飞灰试样完全转化为玻璃态, 熔渣多以无定形玻璃态物质为主, 此时熔渣中的晶体结构多转变为非晶体结构, 内部结构致密, 已达到较好的熔融效果。

(3) 在 1250~1400℃范围内, 难挥发性重金属 Ni、Cr、Cu、Co、Mn 的固溶率随熔融温度的升高而呈缓慢增长趋势, 而熔融温度变化对易挥发性重金属 As、Pb、Cd、Zn 固溶率有显著影响, 且差别较大; 熔融温度变化对 Hg 的挥发影响甚微。

(4) 各种试验工况条件下, 熔融产物中 Zn、Cr、Pb、Cu、Cd、Hg 等重金属浸出率均非常低, 熔融体中重金属的浸出率均低于美国 EPA 的标准限值, 同时也低于危险废物浸出毒性鉴别标准限值, 说明熔融处理可有效地降低重金属的浸出毒性。熔融后的飞灰具有再次资源化利用的前景。

参考文献

- [1] Yoshiie R. Influence of ash composition on heavy metal emissions in ash melting process[J]. *Fuel*, 2002, 81(10): 1335-1340.
- [2] Kirk D W, Chan C C Y, Marsh H. Chromium behavior during thermal treatment of MSW fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 90(1): 39-49.
- [3] Nishigaki M. Reflecting surface-melt furnace and utilization of the slag[J]. *Waste Management*, 1996, 16(5-6): 431-443.
- [4] Park K, Hyun J, Maken S, et al. Vitrification of municipal solid waste incinerator fly ash using brown's gas[J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(1): 258-262.
- [5] 李润东, 聂永丰, 王雷, 等. 成分对垃圾焚烧飞灰熔融过程重金属迁移的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(9): 1180-1183.
Li Rundong, Nie Yongfeng, Wang Lei, et al. Heavy metal migration during vitrification of municipal solid waste incinerator fly ash [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2004, 44(9): 1180-1183(in Chinese).
- [6] 陆胜勇, 李晓东, 严建华, 等. 异重介质循环流化床焚烧炉多环芳烃排放特性的测定[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(10): 130-135.
Lu Shengyong, Li Xiaodong, Yan Jianhua, et al. PAHs emission from a fluidized-bed MSW incinerator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(10): 130-135(in Chinese).
- [7] 仲兆平, 金保升, 兰计香, 等. 城市生活垃圾与煤混烧过程中二噁英的排放与净化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12): 184-188.
Zhong Zhaoping, Jin Baosheng, Lan Jixiang, et al. Dioxins emission and purification during co-combustion of municipal solid waste and coal mixture[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 184-188(in Chinese).
- [8] 陆胜勇, 严建华, 李晓东, 等. 废弃物焚烧飞灰中从头合成二噁英的试验研究—氧、碳、催化剂的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 178-183.
Lu Shengyong, Yan Jianhua, Li Xiaodong, et al. Experimental study on PCDD/Fs formation on waste incinerator fly ash via de novo synthesis-effects of oxygen, carbon and catalyst[J]. *Proceedings of the CSEE*, 23(11): 178-183(in Chinese).
- [9] 黄亚继, 金保升, 仲兆平. 痕量元素在煤粉炉中排放特性的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 205-210.
Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping. Emission features of trace elements in a pulverized coal boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 205-210(in Chinese).
- [10] 李建新, 严建华, 池涌. 利用流化床实验台研究生活垃圾焚烧重金属分布规律[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(17): 100-104.
Li Jianxin, Yan Jianhua, Chi Yong. The partitioning of heavy metals during MSW incineration on fluidized bed furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(17): 100-104(in Chinese).
- [11] 李建新, 严建华, 池涌, 等. 异重流化床垃圾与煤混烧重金属的排放特性[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12): 179-183.
Li Jianxin, Yan Jianhua, Chi Yong, et al. Heavy metals emission from a fluidized bed MSW incinerator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 179-183(in Chinese).
- [12] 王学涛, 金保升, 仲兆平, 等. 气氛对焚烧飞灰熔融过程中重金属行为的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 47-52.
Wang Xuetao, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Influence of atmospheres on behavior of heavy metals during melting process of fly ashes from municipal solid waste incinerator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 47-52(in Chinese).
- [13] 孙路石, 陆继东, 李敏, 等. 垃圾焚烧中 Cd, Pb, Zn 挥发行为的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 157-161.
Sun Lushi, Lu Jidong, Li Min, et al. Volatilization of Cd, Pb and Zn during incineration of municipal solid waste[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 157-161(in Chinese).
- [14] 美国环境保护局固体废物办公室. 固体废物试验分析评价手册 [M]. 中国环境检测总站, 中国科学院生态环境研究中心, 北京市环境检测中心, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [15] Robert G. Barton, Clark W D, Seeker W R. Fate of metals in waste combustion systems. *combust[J]. Sci. and Tech.* 1990, 74(1): 327-342.
- [16] Ryo Y, Makoto N, Hiroshi M. Influence of ash composition on heavy metal emissions in ash melting process[J]. *Fuel*, 2002, 81(10): 1335-1340.
- [17] Durlak S K, Biswas P, Shi J. Equilibrium analysis of the affect of temperature, moisture and sodium content on heavy metal emission from municipal solid waste incinerators[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 56(1-2): 1-20.
- [18] Verhulst D, Buekens A. Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incineration furnaces [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(1): 50-56.
- [19] Park Y J, Heo J. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, B91(1-3): 83-93.

- [20] Thipse S S, Dreizin E L. Metal partitioning in products of incineration of municipal solid waste[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(6): 837-849.
- [21] Wang K S, Chiang K Y, Ming L S, et al. Effect of chlorides on emissions of toxic compounds in waste incineration: study on partitioning characteristics of heavy metal[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(8): 1833-1849.
- [22] Wang K S, Chiang K Y, Tsai C C, et al. The effects of FeCl_3 on the distribution of the heavy metals Cd, Cu, Cr, and Zn in a simulated multimetal incineration system[J]. *Environment International*, 2001, 26(4): 257-263.
- [23] Polettini 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(10): 901-910.

收稿日期: 2007-01-28。

作者简介:

王学涛(1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事洁净煤燃烧及固体废弃物资源化利用等方面的研究, wxt7682@163.com;

金保升(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤发电及固体废弃物资源化科研与教学工作;

徐 斌(1964—), 男, 教授, 主要从事清洁代用燃料燃烧技术和流动传热研究工作;

仲兆平(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤发电及固体废弃物资源化科研与教学工作。

(编辑 王庆霞)