

垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性

阎常峰, 林伯川, 陈恩鉴, 陈勇

(中国科学院广州能源研究所 热流过程实验室, 广东 广州 510070)

摘要: 在垃圾焚烧余热锅炉中, 垃圾灰熔融特性是决定灰沉积危害程度的最重要特性之一。本研究通过测定垃圾灰的成分、灰熔点, 系统分析垃圾灰熔融特性与其成分的关系, 以及垃圾灰与低熔点煤灰在熔融特性与成分之间的区别, 并以此对垃圾燃烧提出一些建议。

关键词: 垃圾; 焚烧灰渣; 成分分析; 熔融特性

中图分类号: X784; TQ533.2 文献标识码: A

1 引言

为发展我国的垃圾焚烧处理事业, 在引进、消化和吸收国外垃圾焚烧技术的基础上, 根据我国城市垃圾焚烧性质、经济承受能力, 研究开发垃圾焚烧余热利用技术及其设备。本研究针对垃圾焚烧余热利用技术中目前存在的一些问题, 从垃圾焚烧灰渣的研究着手, 探讨垃圾焚烧处理的方法和资源化处理的安全、高效及长寿命有效利用途径。

2 试验过程和测试结果

珠江三角洲地区投产的热解焚烧炉、炉排焚烧

炉、旋转窑焚烧炉三种不同的垃圾焚烧炉, 采用不同焚烧技术, 焚烧所产生的灰沉积于不同的受热面或以渣的形式排出炉外, 本研究对这三种焚烧技术 5 台炉产生的灰渣进行现场收集取样, 将垃圾灰加湿制成角锥体, 在氧化气氛下利用硅钼棒高温加热炉测定各垃圾灰的熔融特性, 并利用全自动 X 射线荧光光谱仪对各垃圾灰进行成分分析。灰渣样品分析和灰熔点见表 1, 其中 A、B、C 分别为热解焚烧炉、炉排焚烧炉、旋转窑焚烧炉取样的垃圾灰渣。焚烧垃圾以生活垃圾和工业垃圾为主, 旋转窑焚烧炉以皮革制品为主要燃料, 搀混部分生活垃圾, 以减容为主要目的, 无受热面布置, 由于旋转窑焚烧炉形成的灰渣未燃尽, 因此灰渣含碳量很高, 测定前, 在 800 °C 烧灼后进行实验。灰渣形成位置依次为高温过热器迎风面 A1, 过热器挂片 A2, 高温过热器前的下部排灰 A3, 对流管前入孔门 A4, 炉排上方炉墙 B1, 过热器管壁 B2, 对流管壁 B3, 空预器上孔板 B4, 炉渣 B5, 过热器管壁 B6, 除尘器排灰 B7, 热管空气预热器管 B8, 旋转燃烧室出口 C1, 燃尽室底部 C2。

表 1 垃圾灰渣的成分分析和灰熔点

%	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2
CaO	25.76	23.94	21.90	28.30	30.89	27.75	26.75	20.81	32.77	14.24	24.01	12.50	15.59	25.77
SiO ₂	14.94	19.90	13.18	19.63	33.28	10.04	7.98	11.14	33.07	39.40	33.24	17.80	47.01	39.62
Al ₂ O ₃	6.12	7.95	5.03	7.49	9.55	4.66	3.36	4.15	10.47	11.57	13.29	8.16	14.78	11.49
Fe ₂ O ₃	4.76	7.41	4.12	5.24	3.59	1.82	1.63	5.82	5.95	6.08	6.42	7.90	7.28	4.90
Na ₂ O	2.95	2.09	11.61	5.64	4.73	7.58	8.01	10.44	1.30	6.90	2.12	6.73	1.40	1.78
K ₂ O	4.29	2.55	5.24	4.65	2.29	6.91	7.88	7.48	1.97	4.81	2.72	5.23	1.68	1.66
MgO	4.98	4.26	3.19	3.69	3.49	3.62	2.97	2.92	1.14	1.61	2.77	2.02	1.30	2.35
P ₂ O ₅	1.40	1.47	1.00	1.32	3.96	3.54	2.65	2.38	3.40	2.18	3.32	0.92	1.96	0.75
TiO ₂	1.91	2.36	1.64	2.03	2.13	1.36	1.16	0.99	1.22	1.26	2.10	1.25	1.46	2.97
SO ₃	20.80	21.83	20.74	8.99	2.34	24.40	30.42	26.33	1.44	1.91	3.90	18.93	1.32	3.32
Cl	2.56	0.41	8.08	9.23	0.42	5.06	4.03	3.79	0.67	6.66	0.88	6.73	1.53	1.76
总含量	89.5	94.2	95.8	96.2	96.7	96.8	94.8	96.3	93.4	96.7	94.8	88.1	95.3	96.4
<i>t</i> /°C	695	450	587	458	800	575	410	220	850	500	230	250	800	800
<i>t</i> ₁ /°C	1 160	1 151	1 198	1 165	1 151	1 241	1 162	1 138	1 178	1 155	1 170	1 181	1 154	1 149
<i>t</i> ₂ /°C	1 180	1 161	1 206	1 170	1 165	1 275	1 184	1 167	1 190	1 187	1 174	1 194	1 160	1 155
<i>t</i> ₃ /°C	1 201	1 184	1 212	1 184	1 176	1 285	1 218	1 191	1 201	1 218	1 197	1 210	1 180	1 171

注: *t* 为受热面积灰渣所处的烟气温度

收稿日期: 2001-06-15; 修订日期: 2001-07-29

基金项目: 广东省团队基金资助项目(003045); 所长基金资助项目(07-980305); 广州市科委重点基金资助项目(02-990302)

作者简介: 阎常峰(1969—)男, 内蒙古五原人, 广州能源研究所助理研究员, 博士研究生。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

3 垃圾灰渣熔点与积灰位置工作温度的关系

从图 1 中可以发现, 垃圾焚烧后的灰渣样品 A 和 B, 根据沉积区域烟气温度分布区间分为三段, 沉积于烟气温度为 250 °C 以下的受热面上时, 其灰流动温度较低, 低于 1 200 °C; 沉积于烟气温度为 250 °C~600 °C 处的受热面上时, 其灰流动温度大部分在 1 210 °C~1 220 °C, 有极少数样品灰熔点偏离较大。其中样品 B1 灰流动温度为 1 176 °C, 取样于炉排上方的炉墙, 有形成低熔点共熔体的趋势, 从而降低了灰流动温度; 样品 B2 的垃圾灰流动温度为 1 285 °C, 偏离较大, 取样于马丁炉排焚烧炉的高温过热器管壁迎风面上, 长期处在高温烟气中, 烧结成类似于干燥的粘土, 但很疏松, 性质与别的样品有较大差异。沉积于烟气温度高于 600 °C 的受热面上时, 灰流动温度略高于 1 200 °C。而样品 C 由于含碳量太大, 在实验室内 800 °C 的高温下灼烧 5 h, 垃圾灰流动温度类似样品 B1 较低。对于样品 A2 和 A4, 由于分别取样于过热器挂片和对流管前入孔门, 没有工质的冷却, 长期经高温烟气烧灼, 也有形成共熔体的趋势而导致熔点温度降低。垃圾焚烧灰成分变化不大, 而灰熔点差异很大, 说明垃圾灰的成分存在形态有较大差别(由于样品 A2、A4、B1、B2 和 C 取样及外观的特殊性, 下列分析中如不特别说明, 数据不再采纳)。

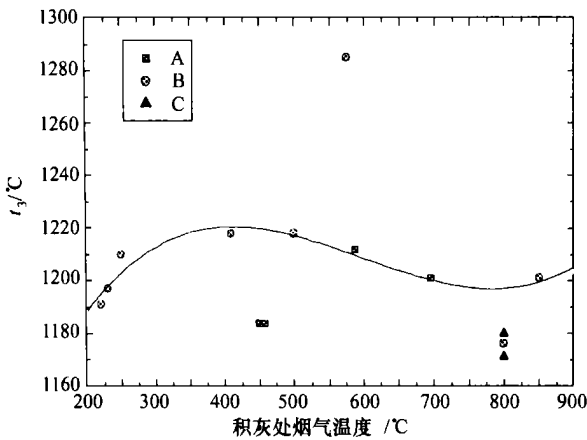


图 1 垃圾灰流动温度随积灰处烟气温度变化

4 垃圾灰熔融特性分析

从图 2 看出, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 增大时 t_3 下降, 这种趋势与煤灰相同。因为作为单独的组分, 二氧化硅

和氧化铝分别都增大垃圾灰熔点的效果, 但当硅的氧化矿物群和硅酸盐矿物群与其它组分形成低熔点共熔体, 较铝酸盐共熔体灰熔点还要低, 其垃圾灰熔点将更低。垃圾焚烧灰 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量远远低于大多数煤灰中的含量, 在 10%~50% 之间, 垃圾灰熔点随含量增加略呈下降趋势, 这与大多数煤灰

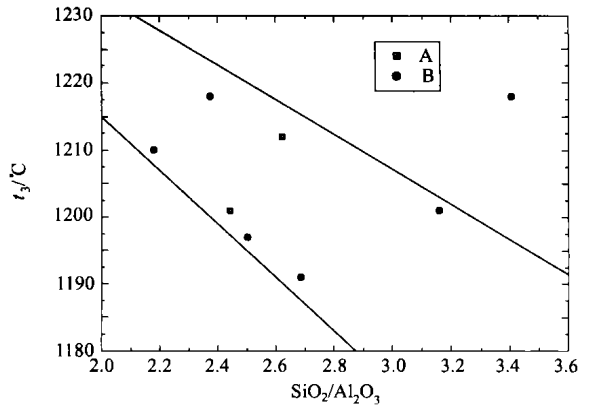


图 2 垃圾焚烧灰中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对 t_3 的影响

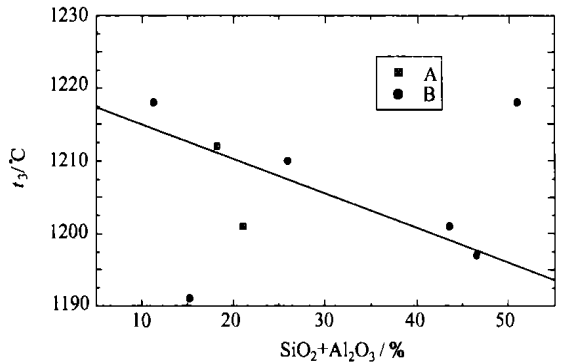


图 3 垃圾焚烧灰中 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 对 t_3 的影响

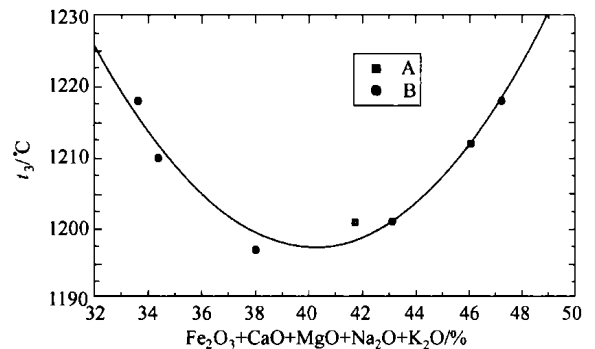


图 4 垃圾焚烧灰中总碱性氧化物对 t_3 的影响

有所区别, 如图 3。在垃圾焚烧灰渣中, 总碱金属氧化物含量与煤灰大致相同, 从图 4 中可以发现, 当总碱性氧化物 ($\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 百分比小于 38% 时, 随着总碱性氧化物百分比的增加,

垃圾灰的流动温度下降,当总碱性氧化物百分比大于38%时,随着总碱性氧化物百分比的增加,垃圾灰的流动温度增高,这与煤灰特性类同。向一般酸性灰渣中每添加1%的K₂O和Na₂O,可使t₃下降15.6℃^[1],就K₂O和Na₂O含量而言,垃圾灰的含量远远大于煤灰的含量,这也是垃圾灰的流动温度大幅度下降原因之一。由于垃圾灰的特殊性,其氯重量百分比远大于煤灰的重量百分比,随着氯百分比的增加,垃圾灰的流动温度呈略微下降趋势,如图5。硫重量百分比对垃圾灰的流动温度影响与氯类似。

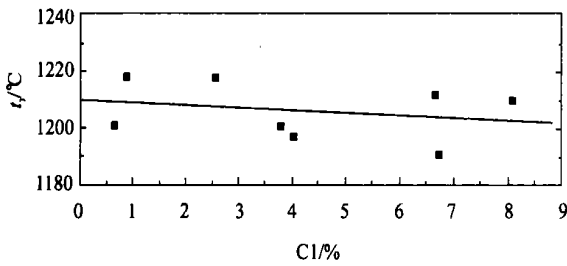


图5 垃圾焚烧灰中氯对t₃的影响

5 垃圾灰渣与低灰熔点煤灰的比较

垃圾灰渣的成分除硫、氯和磷含量相对较高外,其主要成分与低灰熔点煤灰的主要成分所占百分比大体一致,低灰熔点煤灰(文献[2])的成分分析和熔融特性如表2。垃圾灰渣熔点较低,在熔融态时均呈现玻璃状液滴,属玻璃体渣,这可以从垃圾焚烧灰渣成分和渣型的关系图6看出,与文献[3]介绍的一致,图中数据包括所有垃圾灰和低灰熔点煤灰,图中还表明,低熔点煤灰与垃圾灰在渣型上几乎无区别。垃圾焚烧灰与部分低灰熔点煤灰的灰熔点比较接近,但煤灰灰熔点分布的规律性更差,从图7可以看出。垃圾的复杂成分决定垃圾焚烧灰的成分复杂,垃圾灰的矿物质组成主要为硅酸盐类、氯化物、硫酸盐、碳酸盐、氧化物、金属相及其它成分^[3],因此垃圾

灰熔点可以表达为垃圾灰中各种矿物质及其低熔点共熔体的熔点的加权平均值, $t_3 = \sum \alpha \cdot t_3^i$, 其中, α 为各种矿物质及其低熔点共熔体的重量百分比。用此方法计算文献中的电除尘器分离出来的灰流动温度,误差在4%左右,但由于垃圾灰的主要物相组成分析困难,不能普遍采用,有待进一步研究。

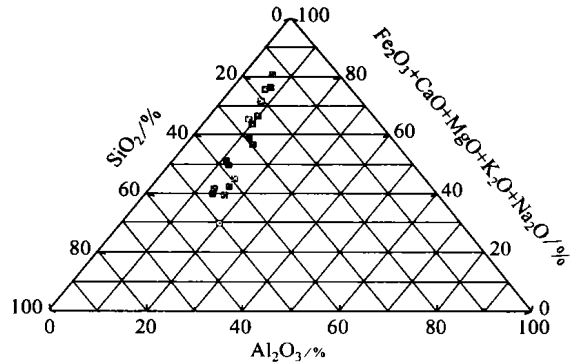


图6 垃圾焚烧灰渣成分和渣型的关系

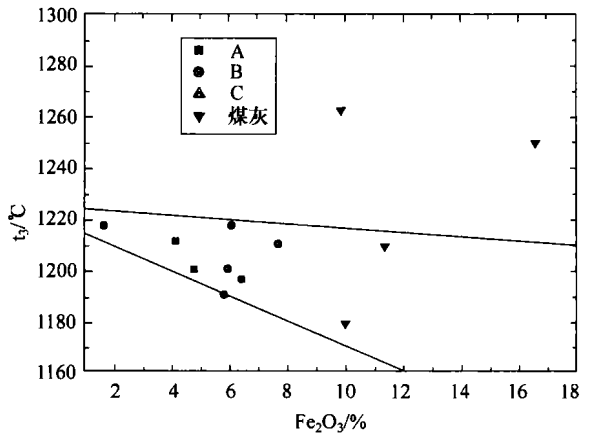


图7 垃圾焚烧灰和煤灰中Fe₂O₃对t₃的影响

6 结论

垃圾焚烧成分复杂,成分分布比较分散,除氧化硅和氧化铝外,硫、氯、磷、氧化钙、氧化钠和氧化钾等的含量普遍较煤粉灰的含量高。垃圾灰熔点普遍

表2 低熔点煤灰

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₂	总含量	t ₁ /°C	t ₂ /°C	t ₃ /°C
A	36.71	13.99	11.36	1.23	0.73	22.92	1.28	9.30	97.5	1130	1160	1210
B	44.99	18.07	9.98	1.80	1.02	11.79	2.21	9.80	99.7	1120	1150	1180
C	23.00	7.28	16.60	0.88	0.30	37.24	2.30	9.64	97.2	1200	1210	1250
D	39.25	14.48	9.86	1.27	0.68	22.23	0.86	8.55	97.2	1197	1221	1263

(下转第369页)

速和折算液速的变化规律。从图中可以看出,当折算气速较小时,截面含气率随折算液速的增加迅速增加;当折算气速较大时,截面含气率增加缓慢。图5给出了分层流截面含气率随油水混合物含油率变化的规律,随着含油率单调增加,分层流的截面含气率单调减小。当油水混合物从水包油态转变为油包水态时,即液相物性变化明显时,截面含气率减小明显。

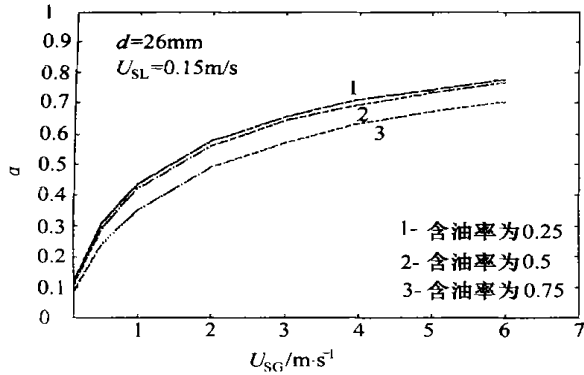


图5 分层流截面含气率随油水混合物含油率的变化规律

5 结论

(上接第358页)

低于大部分煤粉灰熔点,与低灰熔点煤灰熔点较接近,垃圾灰熔点与成分的相互关系基本与煤粉灰的分布规律一致,垃圾灰熔点可以表达为垃圾灰中各种矿物质及其低熔点共熔体的熔点的加权平均值。垃圾焚烧灰在受热面上的沉积与其受热面的工作温度和烟气温度有关,由于垃圾灰中的低熔点共熔体含量较高,在燃烧时易挥发或分解形成气溶胶,在遇到相对低温的尾部受热面便冷却进而沉积下来,因此沉积灰熔点与沉积位置受热面和烟气温度有关。

几种炉型不同程度都存在着受热面积灰或腐蚀问题,腐蚀与积灰相互作用导致对受热面的破坏加剧,蒸汽吹灰由于耗汽量较大,垃圾焚烧炉不易采用。就目前而言,还没有完善的吹灰设施彻底解决垃圾焚烧炉受热面的积灰问题,有待进一步开发新一代的吹灰装置。热解焚烧炉在热解时携带大量固体颗粒,即使燃烧温度达到1000℃也有相当一部分未完全燃烧的固体颗粒进入余热利用的尾部受热面,造成受热面积灰严重,以至在运行期间一个月停炉清灰一次,严重影响了机组的正常运行,相当一部

(1)以双流体模型为基础,通过对水平管内油气水三相混合物分层流动的简化动力学分析,得到了水平管内分层流动截面含气率的理论模型,计算值与实验值符合良好。

(2)研究表明,影响水平管内截面含气率的因素不仅包括折算气速和折算液速,油水混合物的含油率对其也有一定影响。

参考文献:

- [1] ANDRENSI P, BENDIKSEN K H, NYDAL O J. Void distribution in slug flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(5): 817-828.
- [2] REINECKE N, PETERISCHY G, BODDEM M, et al. Tomographic imaging of the phase distribution in two-phase slug flow [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1998, 24(4): 617-634.
- [3] 韩洪升. 水平管内油气水混输的持液率和压降计算方法[A]. 第四届全国多相流非牛顿物理化学流学会论文集[C]. 西安: 中国力学学会, 1993.
- [4] 蔡辉. 水平管内油气水三相流动特性的研究[D]. 吉林: 东北电力学院, 2000.
- [5] 蔡继勇, 陈听宽, 罗毓珊. 垂直下降管内油气水三相间歇-环状流转移的研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(11): 44-48.

(渠源 编辑)

分工作日运行负荷不足,降低了运营商的经济效益,同时减少了垃圾的处理量。从燃烧角度分析,由于垃圾灰的灰熔点相对较低,在热解焚烧炉或采用二次燃烧的垃圾焚烧炉中,高温燃烧可以采用旋风炉、液态排渣炉,让垃圾灰以液体的形式排出,从而减少由于热解的燃烧方式造成的受热面严重积灰问题;同时由于液态排渣炉的燃烧温度较高,对抑制二恶英的排放有一定的作用。

参考文献:

- [1] 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] LUO S. Effect of low ash fusion temperature on boiler design and operation [A]. Xuchang Xu, Lixing Zhou. *The 3rd International Symposium on Coal Combustion Science and Technology* [C]. Beijing: Science Press, 1995: 208-216.
- [3] LYDIE LE FORESTIER, GUY LIBOUREL. Characterization of flue gas residues from municipal solid waste combustor [J]. *Environmental Sciences and Technology*, 1998, 32(15): 2250-2256.

(渠源 编辑)

action mechanism of wet calcium base sorbent. The test results indicate that as compared with traditional single-level water spray the multi-level water spray can result in a more uniform temperature distribution in the fluidized bed, a relatively large reduction of the approach saturation temperature ΔT , a marked increase in desulfurization efficiency and a more stable and reliable operation of the system. A mass spectrographic analysis and an electronic microscope analysis have shown that after the reaction of SO_2 with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a reaction product layer was formed on the surface of the desulfurizing agent, which alleviates the further reaction between SO_2 and the desulfurizing agent. **Key words:** circulating fluidized bed, flue gas desulfurization, multi-level water spray, approach saturation temperature ΔT , desulfurization efficiency, electronic microscope analysis

大型电站锅炉煤种适应性分析实例 = **Analysis of the Adaptability of Large-sized Power Plant Boilers to Various Kinds of Coals** [刊, 汉] / SUN Lu-shi, LU Ji-dong, ZENG Li, et al (State Key Laboratory for Coal Burning Research under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 353 ~ 355

Combustion characteristics of 12 kinds of coal, intended for an existing 670 t/h boiler, have been analyzed. A correlation of these characteristics with the boiler construction features was conducted to evaluate the adaptability of these coals to the above-mentioned boiler. This evaluation aims at providing a basis for deciding on and exploring new sources of coal in order to ensure the safe and economical operation of the boiler. **Key words:** combustion characteristics, boiler constants, adaptability of various kinds of coal to boilers

垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性 = **Component Analysis of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Ash and Its Melting Characteristics** [刊, 汉] / YAN Chang-feng, LIN Bo-chuan, CHEN En-jian, CHEN Yong (Thermo-fluid Process Lab of Guangzhou Energy Conversion Research Institute under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 356 ~ 358, 369

For a municipal solid-waste incineration (MSWI) boiler the ash melting characteristics of municipal solid waste (MSW) are one of the most important factors, which have a decisive influence on the harmful effect of ash deposited on heating surfaces. Through the measurement and determination of MSW ash components and the ash melting point a systematic analysis was performed of the relation between the MSW ash melting characteristics and ash components. Furthermore, the difference between MSW ash and coal ash of low-melting point in respect of melting characteristics and components is also identified. On the above basis some proposals are put forward to improve MSW combustion in general. **Key words:** municipal solid waste, ash burning, component analysis, melting characteristics

径向分层旋流燃烧器燃烧可视化研究 = **Visualization Study of Coal Combustion in a Radially Stratified Swirl-type Burner** [刊, 汉] / HE Lei, FAN Wei-dong, ZHANG Ming-chuan, WU Jiang, et al (Department of Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 359 ~ 362, 374

With the help of an image acquisition and processing system a visualization study was conducted of the coal gas flame of a radially stratified swirl-type burner. The quantitative analysis of a separated flame front was then performed through the use of a fractal theory. The results of analysis indicate that it is possible to truthfully describe the spatial and geometric characteristics of the flame front by using a fractal dimension, thus providing an effective means for an in-depth study of the effect of flame structural shape on the mixing of fuel and air. **Key words:** image processing, swirl-type burner, fractal dimension, visualization

不同热天平煤粉燃烧特性试验差异的原因分析 = **An Analysis of the Factors Causing Differences in the Test Results of Pulverized coal Combustion Obtained from Using Different Thermobalances** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIN Yu-kun, WU Shao-hua (School of energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), XU Yan (Heilongjiang Provincial Electric Power School, Harbin, China, Post Code: 150020) //