

垃圾焚烧炉受热面结渣实验研究

张衍国, 王亮, 蒙爱红, 李清海

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

Experimental Study on the Slagging of Power Station Incinerator

ZHANG Yanguo, WANG Liang, MENG Aihong, LI Qinghai

(Key laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The fly ash in the flue gas during waste incineration deposits on and fouls the superheater, which leads to abnormal operation and emergency shutdown of power station. In order to study the fouling and slagging process the fly ash taken from the on-site waste incinerator was mixed with the oil combustion exhaust gas to investigate the influences of temperature, heating surface arrangement and dimension on the slagging and fouling. The scanning electron microscopy (SEM)/energy dispersive X-ray (EDX), X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffractometer (XRD) analytical methods were also employed to determine the chemical composition of slagging. The experimental results showed that high temperature favor slagging formation. The fouling occurs as the flue gas temperature exceeds 450 °C, and slagging occurs as temperature rises above 460 °C. The heating surface wall temperature directly affects the slagging so that decrease in wall temperature can retard the slagging formation. The diameter of tubes has a significant influence on the slagging. The less the diameter the slagging more likely occurs. Stagger arrangement is prone to be fouled compared with in-line arrangement. The sticky fly ash of low melting point with Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}_9(\text{Al}_6\text{O}_{18})$, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$, Fe_2O_3 is easy to deposit and foul. The low melting point compounds, such as KCl and CaCl_2 serve as bond during slagging initiation. The effects of temperature and heating surface arrangement on slagging discovered in the experiments coincide with the retrofitting and operating results of the commercial incinerators.

KEY WORDS: waste incineration; heating surface; superheater; slagging experiment

摘要: 垃圾焚烧烟气中的飞灰在焚烧炉过热器区域结渣, 可能导致焚烧炉停机, 影响焚烧发电的经济性。为探索焚烧炉受热面结渣机制, 采用燃油产生的烟气和工业焚烧炉的飞灰混合模拟垃圾焚烧烟气, 研究了过热器的运行工况、温度、布置形式、几何尺寸等对结渣过程的影响。利用扫描电镜/能谱分析、X射线荧光分析和X射线衍射等方法分析了渣的成分与物相。结果表明: 高温烟气有利于渣块的形成, 在实验过程中当温度高于450 °C时, 开始形成黏结性积灰, 当温度高于460 °C时, 受热面开始结渣。管子壁面温度对结渣有直接影响, 降低管壁温度可以抑制结渣过程。几何因素(管径)对结渣影响较大, 直径较小的管子更容易结渣。另外, 含有低熔点、高黏结性物质较多的颗粒更容易沉积形成结渣。渣中主要物相为: Ca_2SiO_4 、 $\text{Ca}_9(\text{Al}_6\text{O}_{18})$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ 、 Fe_2O_3 。低熔点化合物如 KCl 、 CaCl_2 在结渣的初始层起到了黏合剂的作用。几何因素、温度对结渣过程的影响与实际垃圾焚烧炉改造和运行状况吻合。

关键词: 垃圾焚烧; 受热面; 过热器; 结渣实验

0 引言

我国城市固体废弃物的污染已相当严重, 对其进行处理势在必行。焚烧方法是处理固体废弃物的有效手段之一, 市场上常见的焚烧炉有炉排炉和循环流化床两种炉型, 这两种炉型各有优点, 炉排-循环床复合垃圾焚烧炉将这两种焚烧方式有机结合在一起, 为适应我国高水分、低热值的垃圾焚烧提供了有效手段。关于其内的燃烧、污染排放已经开展过深入研究^[1-4], 但无论针对何种炉型, 受热面结渣一直困扰着垃圾焚烧炉正常稳定运行。由于垃圾焚烧炉的掺煤比(只添加部分煤助燃)低, 结渣特性与燃煤锅炉有显著不同^[5-6], 导致垃圾焚烧发电系统的可用率严重低于常规燃煤电站。垃圾焚烧炉内对流受热面的结渣, 主要表现为高温过热器管壁上

基金项目: 北京市科委研究项目(H020620330120)。

Beijing Science and Technology Commission Program (H020620330120).

的黏结性结渣,这一问题在混烧煤较少的垃圾焚烧炉中表现得更为突出^[7]。长春某垃圾焚烧电站,从2005年4月试运行到2006年10月,多次出现过热器结渣现象,导致流动阻力增大、传热系数降低,蒸汽参数无法保证,必须定期停炉清渣。非计划和非常停炉严重影响了垃圾焚烧发电系统的社会效益和经济效益。以深圳某日处理量为250t/d的垃圾焚烧炉为例,其垃圾热值约为6400kJ/kg,每吨垃圾焚烧可发电约360kW·h,结渣停炉1d将导致少处理250t垃圾,少发电9万kW·h,直接导致发电企业日损失8.1万元(上网电价按照0.65元/(kW·h),垃圾处理费按照90元/t计算)。研究垃圾焚烧炉受热面的结渣问题,提高焚烧炉的可用率已势在必行。与垃圾焚烧炉相比,燃煤锅炉已积累一定的运行经验和科研基础^[8-9],炉内结渣受局部空气动力场、气氛条件和温度水平等控制,烟气浓度增加可以抑制结渣过程,结渣沉积物以硅酸钠、氧化铝和硬石膏为主^[6,10-11]。采用软化温度、硅铝比、酸碱比、硅比等可预测燃煤灰分的结渣特性^[12-13],然而这些方法对预测垃圾燃烧结渣问题效果均不佳,碱金属、碱土金属的存在可降低灰渣的熔点,从而增加结渣的倾向性^[5,13]。对垃圾焚烧炉受热面积灰、结渣问题,当前国内外鲜有研究报道^[14-15],本文针对垃圾焚烧炉过热器结渣进行了热态实验,研究了“与设计相关”的过热器的运行工况、温度、布置形式、几何尺寸等对结渣过程的影响,而与垃圾特性紧密相关的烟气中HCl含量、H₂O蒸汽含量等对结渣过程的影响尚未进行研究。通过与实际垃圾焚烧炉的设计、改造数据进行比较,探索避免或者减轻积灰结渣的规律,以期指导工程实践。

1 热态实验装置及其系统

热态实验装置及其系统见图1和图2,实验系统由烟气发生系统、实验段、测量装置等构成。烟气发生系统由油燃烧器、飞灰给进系统、燃烧室构成,油通过燃烧器喷入燃烧室内燃烧,然后与垃圾飞灰混合,形成高温模拟垃圾焚烧烟气。燃烧室为圆柱空腔,内径0.8m、高1m、容积0.53m³。燃烧室设计工作温度550℃、实验段烟气温500℃。飞灰取自长春垃圾焚烧厂布袋除尘器收集的飞灰,其中100μm下的颗粒含量较多,飞灰的粒径分布见图3。由于实际焚烧炉运行时飞灰浓度在10~20g/m³(标准状态),因而对本实验飞灰浓度调节为15g/m³的飞灰浓度均值。尽管实际焚烧炉烟气与模



图1 模拟结渣热态实验台

Fig. 1 Experimental setup for slagging simulation

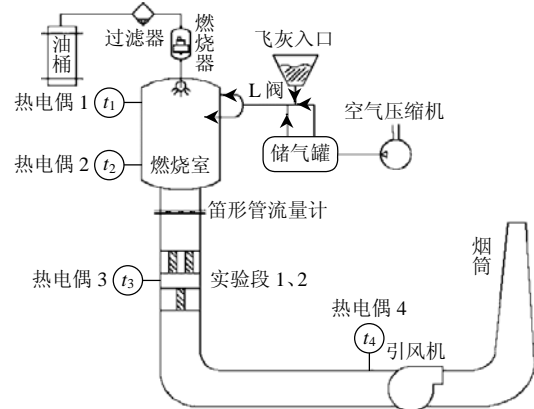


图2 模拟结渣热态实验台系统示意图

Fig. 2 Experimental system for slagging simulation

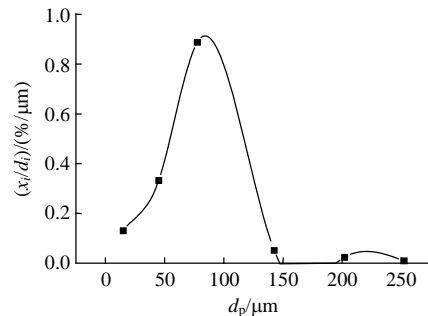


图3 垃圾焚烧飞灰粒径分布

Fig. 3 Fly ash particle size distribution

拟烟气在烟气成分上也存在一定差异,例如HCl、H₂O蒸汽含量可能并不一致,且其可能影响结渣过程,鉴于本文研究目标侧重于灰的成分对结渣的影响,因而未采取进一步的措施来保证模拟烟气与真实垃圾焚烧炉烟气成分的一致性,作为本实验研究的补充,笔者同时也对实际的垃圾焚烧炉的过热器进行了结渣工业实验^[7]。图2所示布置管束的实验段截面尺寸为10cm×10cm,长度为25cm。在实验段悬挂不同管径和排列方式的管束进行实验,可采用空冷或者水冷。测量仪表包括K型热电偶、笛形管和微差压计,分别测量燃烧室内温度 t_1 、 t_2 、实验段内温度 t_3 以及模拟垃圾烟气的流速。K型热电偶的测量精度为 $\pm 3^\circ\text{C}$,测量笛形管压差的微差压计

的精度为 ±1 Pa。笛形管在高温区直接对烟气流速进行测量，可避免利用燃油量和燃烧空气量计算烟气流速而产生的误差。

2 实验过程

实验程序如下：1) 开引风机、空气压缩机和数字温度表开关，然后开启燃烧器；2) 分别调节油压和风门改变燃烧室温度和烟气流速，调节储气罐与 L 阀连接管的阀门调节进灰流量，以便形成需要的模拟垃圾烟气；3) 当燃烧室温度(t_1 、 t_2)、实验段温度(t_3)和笛形管输出压差稳定时后，开始进行实验；4) 每隔 30 min 记录一次烟气温度、流速等数据。实验中采用的烟气速度为 5、8、12、16、20 和 25 m/s。每完成一个实验工况需要 6 h，实验后将实验段取下，观察其积灰和结渣情况，如果积灰或者结渣，称量其增重并取样进行后续的扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM)/能谱分析 (energy dispersive X-ray, EDX)、X 射线荧光分析 (X-ray fluorescence, XRF) 和 X 射线衍射 (X-ray diffractometer, XRD) 等分析。

3 实验结果与分析

3.1 烟气温度对结渣的影响

实验段都是双管结构，上下两排管垂直距离为 20 cm，“管间距与管径之比”上排为“12/7”，下排为“9/11”。对于燃煤锅炉结渣问题，烟气温度是判断结渣的依据之一，温度直接影响烟气中碱金属蒸汽和飞灰中低熔点化合物的凝结、熔融或半熔融的过程，当烟气温度升高到一定程度时，飞灰表面的低熔点化合物才可能具有黏性，此时才可能出现结渣。根据本实验，不同温度下，模拟垃圾焚烧烟气对结渣的影响见表 1 和图 4，可以看出实验段烟气温度(t_3)的升高对结渣有促进作用，燃烧室温度(t_1 、 t_2)对结渣过程没有明显、单调的影响趋势。结渣和

表 1 烟气温度对结渣的影响

Tab. 1 Effects of temperature on slagging

实验编号	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$	流速/(m/s)	上排结渣量/g	下排结渣量/g
1	508	493	448	6.3	—	积灰*
2	503	488	451	12.5	—	积灰*
3	495	472	443	16.0	2.21	积灰*
4	585	534	511	12.6	2.13	—
5	627	602	536	16.0	2.24	1.43**
6	718	605	598	11.8	2.35	积灰
7	675	699	658	12.7	2.66	1.65**
8	713	724	726	8.5	2.63	—
9	739	826	805	8.4	3.07	2.05**

注：*为松散积灰；**为黏结性积灰。

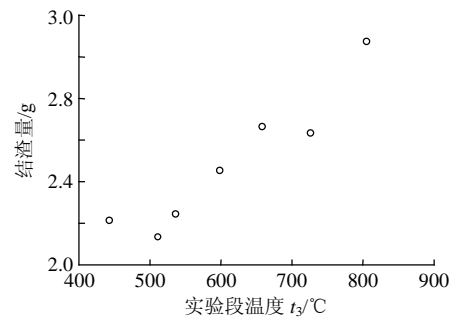


图 4 烟气温度对结渣的影响

Fig. 4 Effects of temperatures on slagging

积灰情况如图 5 所示，其中上排管的结渣较疏松，且表面光滑，出现了烧结的特征，说明结渣的生长已基本结束。并且结渣的性质更类似于黏结性积灰，硬度比实际的渣低，下排管以积灰为多，只有当温度较高、流速较高时(5、7、9)生成黏结性积灰。



(a) 实验段上排管结渣 (b) 实验段下排管积灰

图 5 实验段上、下排管结渣积灰照片

Fig. 5 Slagging and ash deposition on pipe

3.2 管壁温度对结渣的影响

为研究管壁温度对结渣的影响，实验段采用了风冷管和水冷管，风冷管可维持较高的管壁温度，而水冷管的管壁温度较低，风冷和水冷管直径均为 16 mm。壁温对结渣的影响见表 2，实验 5 中风冷管出现了类似于结渣的黏结性积灰，水冷管也出现了积灰，积灰情况见图 6。表 3 给出了水冷管和风

表 2 壁温对结渣的影响

Tab. 2 Effects of wall temperatures on slagging

实验编号	$t_3/^\circ\text{C}$	流速/(m/s)	风冷管壁温/ $^\circ\text{C}$	水冷管壁温/ $^\circ\text{C}$	风冷管结渣/g
1	532	12.9	431	182	—
2	554	12.5	453	178	积灰
3	594	13.2	446	193	—
4	692	12.7	472	210	积灰
5	721	13.5	524	216*	2.64**

注：*水冷管出现积灰；**黏结性积灰。



图 6 风冷管(上)、水冷管(下)积灰情况

Fig. 6 Ash deposition on air and water-cooled pipe (top for air and bottom for water-cooled)

表3 风冷管、水冷管结渣渣积灰 XRF 分析
Tab. 3 XRF analysis for ash deposition on air and water-cooled pipe

管道	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	%
风冷管	30.22	4.25	23.06	11.24	12.62	
水冷管	18.08	3.87	37.77	10.28	16.77	
管道	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	%
风冷管	7.39	2.83	4.07	2.09	1.34	
水冷管	1.94	3.58	1.72	2.27	0.91	

冷管的积灰的 XRF 分析结果, 风冷管结渣的 SiO₂、Na₂O、K₂O 含量较高, 这是由于在 721 °C 的实验段温度下, 采用风冷则管壁温度高, 有利于 SiO₂、Na₂O、K₂O 和 CaO 生成熔点只有 710~720 °C^[8]的低熔点共晶化合物。从实验可以看出, 降低管壁温度, 则可以阻止渣的形成和生长。

3.3 管束排列对结渣的影响

实验采用错列布置的管束, 管束布置如图 7 所示, 管直径 14 mm, 上排管间距为 11 mm, 下排管间距为 16.5 mm, 纵向间距 14 mm。上、下排管的不同间距可代表不同的管束排列。



图7 实验段管束布置

Fig. 7 Bundle arrangement

管束排列对结渣的影响见表 4。与表 1 比较, 错列管束布置的结渣比单排双管布置的结渣量大, 而且错列管束的结渣还有继续生长的趋势, 可见错列管束排列有利于结渣产生, 尤其是第 2 排管。在流速基本相同的情况下, 结渣随着烟气温度的提高而略有增加。

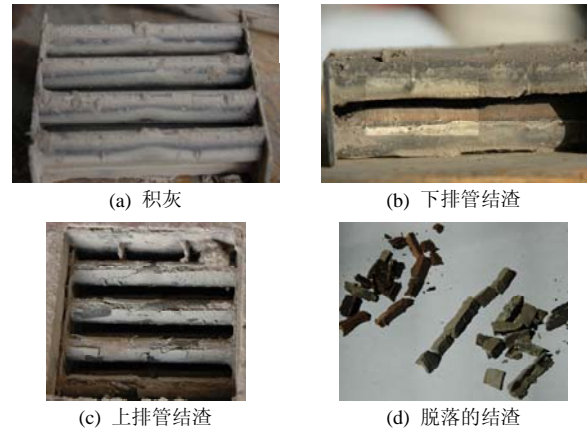
管束上的结渣状况如图 8 所示, 实验中上排管

表4 管束排列对结渣的影响

Tab. 4 Effects of bundle arrangement on slagging

实验编号	t ₃ /°C	流速/(m/s)	下排管结渣量/g	上排管结渣量/g
1	416	11.68	—	—
2	462	12.60	* ¹	—
3	532	12.90	1.42	—
4	554	12.50	1.35	积灰
5	566	16.50	1.87	* ²
6	629	13.20	1.68	—
7	692	12.70	1.80	1.22
8	721	13.50	1.92	1.35
9	765	9.20	—	积灰

注: *¹ 结渣部分黏结在壁面; *² 形成结渣, 但取出实验段时剥落。



(a) 积灰

(b) 下排管结渣

(c) 上排管结渣

(d) 脱落的结渣

图8 管束结渣情况

Fig. 8 Bundle slagging

出现结渣的次数并不多, 而且结渣性质类似黏结性积灰, 渣的硬度也比下排管小, 且在管束从实验台上取出时因热应力作用而容易破碎。

利用 XRF 分析的结渣氧化物组成见表 5, 表 5 中编号分别对应表 4 中的实验条件。这 4 个实验工况的差别主要是烟气温度的不同, 结渣成分对烟气温度、炉膛温度的变化比较敏感, SiO₂ 的含量随着温度升高而减少, Fe₂O₃ 没有显著变化, CaO 随着温度的升高而增加, 而 Al₂O₃、SO₃、K₂O、Na₂O 等呈现先增加后降低的变化趋势。烟气温度升高, 有利于低熔点化合物的沉积。CaO 对飞灰熔点的影响较 SiO₂ 和 Fe₂O₃ 大, 飞灰的主要成分中, CaO 随烟气温度的变化也最敏感。结渣成分的酸碱比 B/A^[9] 随温度升高分别为 0.55、0.73、1.61 和 2.61, 可见温度升高时更容易产生碱性结渣。烟气温度达到气流中出现的最低熔点成分的熔融温度时, 碰撞到管壁的灰粒将几乎全部黏结在上面。本实验的最高烟气温度已接近 800 °C (表 5 中为平均温度), 接近或超过垃圾焚烧飞灰中 SiO₂、Na₂O、K₂O、CaO 等生成的低熔点的共晶化合物的熔点。

表5 典型结渣的氧化物 XRF 分析

Tab. 5 XRF analysis for oxides of typical slagging

编号	t ₃ /°C	流速/(m/s)	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	%
5	566	16.5	42.29	16.58	5.18	6.42	10.92	
6	629	13.2	35.64	23.65	4.42	10.46	11.12	
7	692	12.7	30.77	20.22	2.79	11.92	14.37	
8	721	13.5	13.85	51.14	3.27	9.14	10.51	
编号	t ₃ /°C	流速/(m/s)	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	%
5	566	16.5	1.89	3.04	0.84	3.13	1.69	
6	629	13.2	1.34	4.21	1.04	3.65	1.38	
7	692	12.7	5.39	3.75	5.61	2.34	1.07	
8	721	13.5	0.26	2.77	0.16	1.91	0.98	

3.4 模拟结渣实验的结渣区域

飞灰向受热面的沉积与烟气流速、管束的几何

尺寸等有关，在计算飞灰向受热面的碰撞率时，需考虑飞灰颗粒直径 d_p 和绕流管道的直径 D 等^[16]。另外，260 t/d 炉排循环床垃圾焚烧炉的现场结渣实验也表明：受热面管径越细，越容易结渣。鉴于此，本文作为一种尝试，采用烟气流速、管径、烟气流速 v 与管径 D 之比 v/D 与烟气温度等一起判定结渣区域。

实验采用 ϕ_{22} 、 ϕ_{38} 单管和双管分别进行，以温度、 v/D 表示的是否结渣区域见图 9，从图 9 可以看出：出现黏结积灰的起始温度约为 450 °C，出现结渣的起始温度约为 460 °C，开始出现结渣时的烟气流速与管径比 v/D 约为 75 s^{-1} ，且温度越高， v/D 越高则越容易形成结渣。

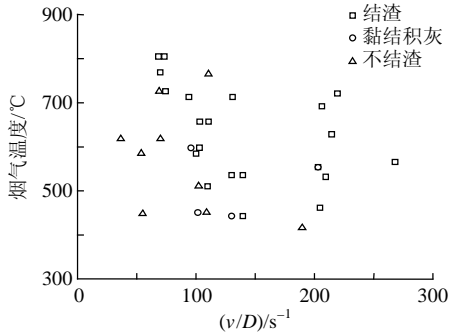


图 9 模拟结渣实验结渣区域

Fig. 9 Criterion of slagging at experimental conditions

实际垃圾焚烧炉运行时，高温过热器烟气温度的约 550~650 °C，烟气流速 3~10 m/s，过热器管径一般为 $\phi_{38} \text{ mm}$ ，烟气流速与管径之比为 $80\sim 250 \text{ s}^{-1}$ ，过热器的管径、烟气流速、温度等参数恰好落入积灰结渣区域，这就意味着为了避免过热器积灰和结渣，必须采取相应的技术措施，例如：1) 增加辐射受热面面积，降低对流过热器入口烟温；2) 降低过热器入口烟气流速至 $3\sim 4 \text{ m/s}$ ；3) 采用大直径的受热面管等。

3.5 结渣的微观结构和成分分析

XRD 分析表明，结渣中主要化合物的物相组成有 Ca_2SiO_4 、 $\text{Ca}_9(\text{Al}_6\text{O}_{18})$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ 、 Fe_2O_3 等，与飞灰中的成分 $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ 、 SiO_2 等相比，结渣后的物相主要组成发生了相应变化。根据 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元相图^[8]，渣中含有的化合物 $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ 等熔点相对较低，这是由于结渣过程对飞灰颗粒具有选择性，含有低熔点、高黏结性物质较多的颗粒更容易沉积下来形成结渣的缘故。

对不同工况的渣样分别进行了 SEM-EDX 分析，发现其微观结构和表面元素组成基本相似。

图 10—13 是 721 °C，13.5 m/s 实验条件下不同处结渣的 SEM-EDX 分析结果，可以看出，结渣各层显现了不同的结构和成分特征。初始层靠近管壁处(图 10 和图 11 分别给出了 A、B 两处的 SEM-EDX 分析，EDX 分析还对应给出了元素的质量百分含量)主要为 Ca、Cl、Fe、O 元素居多，可能存在的化合物是 CaCl_2 、 Fe_2O_3 。由于 CaCl_2 熔点只有 780 °C，可能覆盖在飞灰颗粒的外层，当飞灰受热时在表面产生

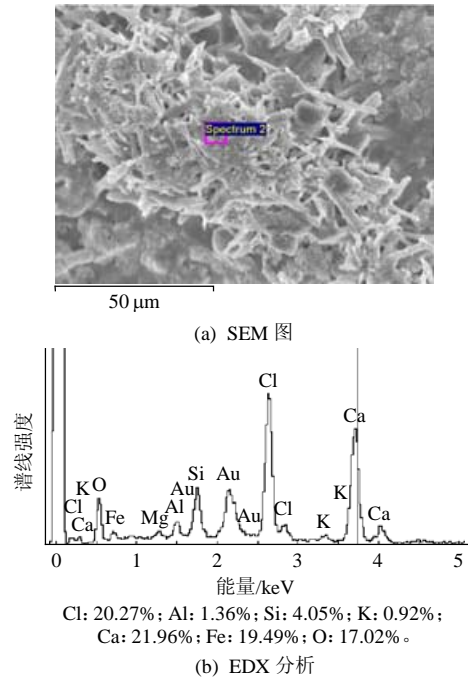


图 10 初始层靠近壁面处 A 的结渣微观图
Fig. 10 Microstructure of slagging on inner layer A

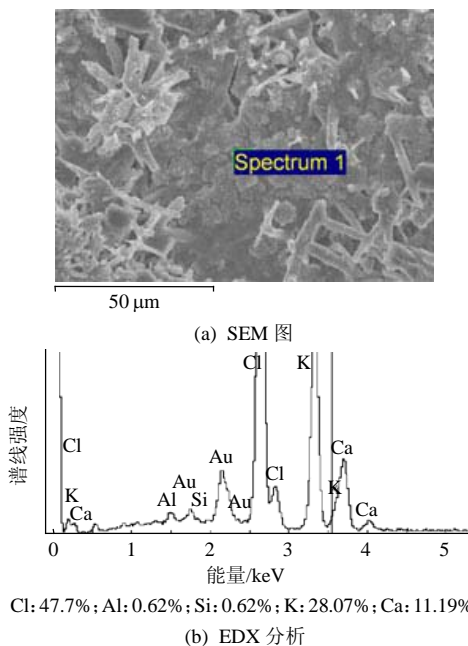


图 11 初始层靠近壁面处 B 的结渣微观图
Fig. 11 Microstructure of slagging on inner layer B

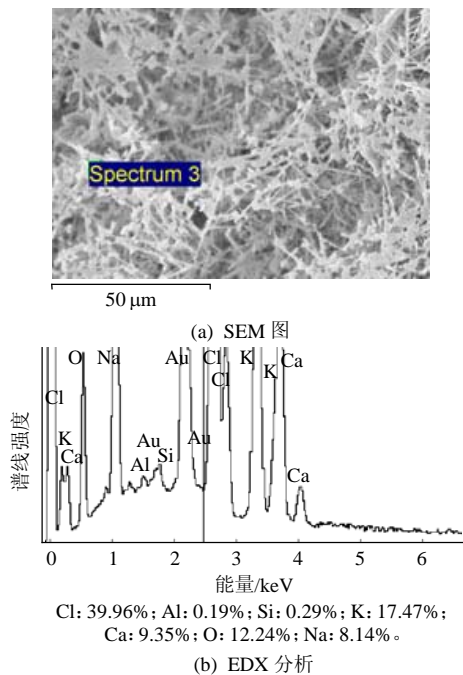


图 12 中间层的结渣的微观结构

Fig. 12 Microstructure of slagging on intermediate layer

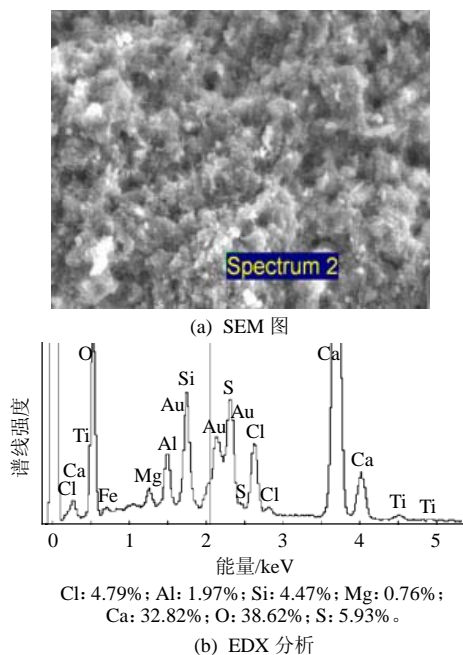


图 13 外壳层结渣的微观结构

Fig. 13 Microstructure of slagging on outer layer

黏结外层，碰撞到管壁时大部分被捕捉，而 Fe_2O_3 则可能是管壁氧化层或者飞灰中的含铁颗粒。由于在其余的两层没有发现大量的 Fe_2O_3 存在，因而判断这里的 Fe_2O_3 是管壁的 Fe 元素氧化形成的。初始层靠近壁面处是初始层较平滑部分的微观结构，从能谱的结果来看，主要是 K、Ca、Cl 元素，化合物可能是 KCl 、 CaCl_2 ，而 KCl 的熔点更低，只有 $776\text{ }^\circ\text{C}$ ^[8]，在高温条件下容易在受热面表面上熔融。

低熔点的化合物在结渣的初始层起到了黏合剂的作用，这些物质可能是局部飞灰颗粒表面成分，也可能是某些飞灰颗粒的主要组成部分，具有这种性质的飞灰颗粒在结渣过程中起着决定性的作用。

中间层主要含有 K、Na、Cl、Ca、O 等元素，以 NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 、 CaO 、 Na_2O 等物质形式存在。微观结构呈网格状、结构疏松，大部分颗粒呈针状或者细长片状，这样的微观结构易于吸收烟气中的 SO_2 、 HCl 等气体进行反应，反应后疏松的空隙结构将有所改变。

外壳层的结构类似实际垃圾焚烧炉的结渣，主要成分是 Ca、O、Si、Al、Cl 等，与焚烧炉内实际结渣的成分相似，微观结构上表现出被烧结了的特征。

用 XRF 进行的氧化物分析时，并没有发现 K、Na、Cl 元素的大量存在，而在 EDX 扫描中却发现大量的 K、Na、Cl 元素。这可能是由于：1) 初始层比较薄，而且 K、Na、Cl 元素所处部位的结构疏松，总体组成中 3 种成分含量不大；2) EDX 扫描位置位于颗粒的表面，K、Na、Cl 化合物熔点较低，主要分布在颗粒表面。

表 6 给出了实际焚烧炉结渣氧化物成分的对比如分析。表 5 与表 6 对比可以看出，高过原渣中 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 等的含量要高于实验工况， SiO_2 含量则低于实验工况(个别实验点除外)。这种差异主要是烟气成分、灰成分、结渣时间等产生的。从模拟实验来看：结渣具有迎流生长、管径越小越易生成的性质，这与实际焚烧炉结渣过程相似，说明尽管结渣成分上存在着差异，但模拟实验仍能够较好的模拟实际的结渣过程。

表 6 焚烧炉高过原渣的氧化物 XRF 成分对比分析

Table 6 XRF analysis for oxides of superheater slagging of incinerator					%
SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	
27.29	21.61	4.71	8.60	22.60	
K_2O	MgO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	
2.43	2.26	1.83	1.47	0.76	

3.6 焚烧炉改造对结果的验证

本实验研究结果，已分别在垃圾焚烧炉的空气预热器和过热器设计、改造上得到了验证。

深圳某垃圾焚烧厂采用 4 台 250t/d 的链条炉排垃圾焚烧炉，自 2006 年投入运行后，空气预热器一直存在积灰问题。原设计空气预热器的管径为 $\phi 40\text{ mm}$ ，烟气流速 $3\sim 4\text{ m/s}$ ， $v/D = 75\sim 100\text{ s}^{-1}$ ，大于本文实验结果 75 s^{-1} 。为解决空气预热器积灰、

堵灰的问题, 2007 年 3 月将空气预热器的管径增大到 $\phi 89 \text{ mm}$, 改造后的空气预热器烟气流速与管径比例 v/D 为 $34\sim 45 \text{ s}^{-1}$, 远小于 75 s^{-1} 。

长春某垃圾焚烧厂采用 2 台炉排循环床垃圾焚烧炉, 2004 年投入运行后, 经常出现过热器结渣堵灰的问题, 平均每 10 d 左右要停炉清渣一次, 严重影响生产。后经设计单位和研发单位分析, 过热器的节距过小可能是产生结渣堵灰的主要原因。2006 年 10 月对过热器进行了改造, 加大过热器管排节距。过热器管排节距由原来的 90 mm 增加到 180 mm。

为了降低温度对结渣的影响, 上述 2 台垃圾焚烧炉过热器入口烟气设计和运行温度均低于 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

以上 2 厂改造后运行效果均较好, 平均连续运行时间超过 3 个月, 在 3 个月内不需要停炉清渣。由于因结渣导致的故障率降低等原因, 2009 年均提前 1 个月完成了发电任务, 创造了良好的社会效益和经济效益。

2 厂垃圾焚烧炉受热面的成功改造, 验证了本文的研究成果对工程应用的指导价值和意义。

4 结论

通过模拟结渣实验, 分析了烟气流速、温度、管径、管束布置等因素对结渣过程的影响, 给出了模拟结渣实验的结渣区域。主要结论如下:

1) 烟气温度高有利于形成结渣, 当烟气温度高于 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 开始形成黏结性积灰; 当高于 $460 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 开始倾向于形成结渣。受热面壁面温度对结渣有直接影响, 降低管壁温度可以抑制结渣过程。

2) 几何因素对结渣影响较大, 细的管子更容易结渣, 烟气速度 v 与管径 D 之比 v/D 可初步作为一项参数判定结渣区域, 实验发现: v/D 大于 75 s^{-1} 是产生结渣的必要条件之一, 这与实际焚烧炉的设计改造数据一致。为避免高温区受热面的结渣, 应尽量降低受热面的 v/D 值。

3) 结渣过程对飞灰颗粒具有选择性, 含有低熔点、高黏结性物质较多的颗粒更容易沉积下来形成结渣, 其中主要物相为: Ca_2SiO_4 、 $\text{Ca}_9(\text{Al}_6\text{O}_{18})$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ 、 Fe_2O_3 等。EDX 扫描显示, 结渣颗粒表面的 K、Na、Cl、Ca 较高, 形成结渣的飞灰具有低熔点化合物的表面结构。低熔点化合物(如 KCl、 CaCl_2 等)在结渣的初始层可起到黏合剂的作用。

参考文献

- [1] 李清海, 张衍国, 党文达, 等. 炉排-循环床复合垃圾焚烧炉中垃圾模拟干燥实验[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(5): 824-827.
Li Qinghai, Zhang Yanguo, Dang Wenda, et al. Experimental investigation of simulated waste drying in a grate-CFB incinerator[J]. Journal of Tsinghua University.: Science. & Technology., 2008, 48(5): 824-827(in Chinese).
- [2] 陈昌和, 李清海, 张衍国, 等. 炉排-循环床复合垃圾焚烧炉燃烧过程模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(5): 832-835.
Chen Changhe, Li Qinghai, Zhang Yanguo, et al. Model for waste combustion in a grate-CFB[J]. Journal of Tsinghua University.: Science. & Technology, 2008, 48(5): 832-835(in Chinese).
- [3] Li Qinghai, Zhang Yanguo, Chen Meiqian, et al. Study on drying and combustion process in grate-CFB incinerator[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(5): 1153-1160.
- [4] 李清海, 张衍国, 陈昌和, 等. 水分对垃圾焚烧燃烧影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 58-64.
Li Qinghai, Zhang Yanguo, Chen Changhe, et al. Experimental study of moisture impact on municipal solid waste incineration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 58-64(in Chinese).
- [5] 王学涛, 焦有宙, 金保升, 等. 城市垃圾与煤混烧飞灰的熔融特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 35-39.
Wang Xuetao, Jiao Youzhou, Jin Baosheng, et al. Melting characteristics of fly ashes from co-firing of municipal solid waste and coal incinerator[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(1): 35-39(in Chinese).
- [6] 兰泽全, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 灰特性对燃煤炉内灰沉积行为的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(1): 28-32.
Lan Zequan, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. Influence of ash characteristics on ash deposition in coal fired boiler[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(1): 28-32(in Chinese).
- [7] 王亮. 循环流化床垃圾焚烧炉结渣特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Wang Liang. Study on slagging characteristics in circulating fluidized bed incinerator for MSW[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007(in Chinese).
- [8] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 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, 1994: 1-69.
Cen Kefa, Fan Jianren, Chi Zuohe, et al. Principle and calculation for slagging, erosion and abrasion in boiler and heat exchanger[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-69 (in Chinese).
- [9] 撒应禄. 锅炉受热面外部过程[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994: 92-142.
Sa Yinglu. Fouling process on boiler heating surface[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994: 92-142 (in Chinese).
- [10] 兰泽全, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 炉内灰渣沉积物中矿物元素分布的电子探针分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 114-119.
Lan Zequan, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. The electron probe analysis of mineral elementary distribution at ash deposition from furnace[J]. Proceedings of the CSEE 2005, 25(2): 114-119(in Chinese).
- [11] 周武, 庄正宁, 刘泰生, 等. 切向燃烧锅炉炉膛结渣问题的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 131-135.

- Zhou Wu, Zhuang Zhengning, Liu Taisheng, et al. Study on slagging problem in the furnace of a tangential fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 131-135(in Chinese).
- [12] 徐志明, 文孝强, 孙媛媛, 等. 基于最小二乘支持向量回归机的燃煤锅炉结渣特性预测[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 8-13. Xu Zhiming, Wen Xiaoqiang, Sun Yuanyuan, et al. State prediction of slagging on coal-fired based on leased squares-support vector machine for regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 8-13(in Chinese).
- [13] 周俊虎, 张传名, 刘建忠, 等. 220 t/h 锅炉燃烧低挥发分水煤浆结渣特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 81-85. Zhou Junhu, Zhang Chuanming, Liu Jianzhong, et al. Experimental study on slagging characteristics of low-volatile coal water slurry in a 220 t/h boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 81-85(in Chinese).
- [14] 张衍国, 蒙爱红, 梁静, 等. 灰渣组分对灰渣熔点影响的实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(11): 2010-2013. Zhang Yanguo, Meng Aihong, Liang Jing, et al. Experimental investigation of slag melting points influenced by additional chemical components[J]. Journal of Tsinghua University: Science. & Technology, 2007, 47(11): 2010-2013(in Chinese).
- [15] Jensen P A, Frandsen F J, Hansen J, et al. SEM investigation of superheater deposits from biomass-fired boilers[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(2): 378-384.
- [16] 姜剑锋, 钱静. 锅炉受热面的结灰机理和吹灰器的设置[J]. 锅炉制造, 2003(4): 25-27. Jiang Jianfeng, Qian Jing. Cause of slagging on furnace and sootblower arrangement[J]. Boiler Manufacturing, 2003(4): 25-27(in Chinese).



张衍国

收稿日期: 2010-01-20。

作者简介:

张衍国(1968), 男, 博士, 教授, 主要从事工业节能减排的研究与应用, 包括固体废弃物焚烧、废热综合利用以及低品位热能清洁利用的研究工作, zhangyg@tsinghua.edu.cn;

王亮(1983), 男, 硕士研究生, 在读期间主要从事垃圾焚烧炉积灰、结渣问题研究, 现从事金融投资等工作;

蒙爱红(1976), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事节能减排研发工作;

李清海(1972), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事工业节能减排的研究与应用, 工业锅炉研发、炉内结渣过程、固体废弃物焚烧、废热综合利用以及低品位热能清洁利用的研究工作、技术开发以及工程项目实施与管理等, liqh@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)