

魏小林, 盛宏至, 刘典福, 等. 流化床中 RDF 焚烧时 CO、SO₂ 和 HCl 的生成[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 34 - 38

WEI Xiaolin, SHENG Hongzhi, LIU Dianfu, et al. Formation of CO, SO₂ and HCl during RDF incineration in a fluidized bed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(1): 34 - 38

流化床中 RDF 焚烧时 CO、SO₂ 和 HCl 的生成

魏小林¹, 盛宏至¹, 刘典福¹, 田文栋², 秦 成², 肖云汉²

1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080

摘要:在非均匀布风流化床中进行了垃圾衍生燃料(RDF)与煤的混烧试验,测量了 H₂O、CO、CO₂、NO、N₂O、HCl、SO₂ 等污染物质的排放特性.结果表明与单纯燃烧 RDF 相比,混烧时的 CO 生成量大大下降,SO₂ 生成浓度较低,而 HCl 的生成量比单纯烧煤时明显增加.

关键词:流化床; 混烧; RDF; 污染物

文章编号:0253-2468(2005)01-0034-05 中图分类号:X705 文献标识码:A

Formation of CO, SO₂ and HCl during RDF incineration in a fluidized bed

WEI Xiaolin¹, SHENG Hongzhi¹, LIU Dianfu¹, TIAN Wendong², QIN Cheng², XIAO Yunhan²

1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract: The refuse-derived fuels-RDF has the advantage of high heating value and is easily combusted. The potential application of RDF is cofiring with coal and instead of some coal in the boiler. The heating value of RDF may attain 24 MJ kg⁻¹, similar with that of coal. Due to the high content of volatiles in RDF (more than 70%), a large quantity of volatiles is likely to release during RDF incineration. If the pollutant emissions can not be controlled very well, the limit of environmental standard will not be guaranteed. On the other hand, the contents of harmful elements in coal or RDF are very different. For coal, the content of nitrogen or sulfur is higher and the content of chlorine is very lower, on contrary, to those in RDF (normally with a higher content of chlorine and lower sulfur content). Therefore, during cofiring RDF with coal, the interaction of pollutants NO_x, SO_x, HCl and ash may occur and the combustion properties of cofiring cannot be predicted only by the results of burning pure coal or pure RDF.

The internally circulating fluidized bed (ICFB) is applied to investigate the pollutant emissions during cofiring RDF with coal. In the ICFB, the air plenum is separated as two equal boxes. Then the primary air separately enters the bed from air boxes with high or low air velocity. Unevenly distributed fluidized air induces a large-size internal circulating flow of solid particles in the dense bed which may improve the properties of lateral diffusion. The cross section of the furnace is 500 mm × 240 mm in the dense phase zone and 800 mm × 280 mm in the freeboard. The total height of the furnace is 4500 mm. Concentrations of pollutants in the flue gas were measured by Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrometry (Gasetm DX-3000). In the tests, the concentrations of the species, such as H₂O, CO, CO₂, NO, NO₂, N₂O, HCl, SO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ and C₆H₆ were measured online with 2% error. The concentration of oxygen was measured by an oxygen analyzer (TEMET 19) with 0.2% error.

The results indicated that when cofiring RDF with coal, the formation of H₂O was relatively higher than burning pure coal because of the higher content of hydrogen. The average concentration of H₂O attains 8% during pure RDF incineration, compared with 4.5% during pure coal combustion. The concentration of CO emission during firing pure RDF was relatively higher and fluctuates sharply. During cofiring RDF with coal, the formation of CO decreased rapidly and the fluctuation of CO concentration became smaller because of the lower content of volatiles in coal. In pure RDF incineration, the concentration of N₂O was relatively higher, about 100 mg m⁻³. But it was only half of this value during cofiring. The concentration of SO₂ was relatively low because calcium and alkali metals in the ash of coal could absorb SO₂. Due to the higher content of chlorine in RDF, the formation of HCl significantly increased compared with the combustion of pure coal.

Keywords: fluidized bed; cofiring; RDF; pollutants

目前,我国的垃圾综合处理技术日益受到重视,正在建设集于焚烧、堆肥和填埋各自优势的垃圾处理厂.在综合处理过程中,一般先将垃圾进行分类,

有机物采用湿解或生物方法生产垃圾肥料;塑料、布和纸张类制备垃圾衍生燃料(Refuse-Derived Fuels-RDF)或直接焚烧处理;砖瓦等无机物填埋处理,金

收稿日期:2004-02-10;修订日期:2004-04-27

基金项目:国家自然科学基金(50376068)

作者简介:魏小林(1967—),男,研究员(博士),xlwei@imech.ac.cn

属回收利用.与单纯的焚烧、堆肥或填埋相比,综合处理具有收益高的优点,可以降低垃圾的处理费用.

RDF 的一个潜在应用是作为辅助燃料在现有的锅炉中与煤混烧. RDF 的热值可达 24 MJ·kg⁻¹ 以上,相当于优质煤的热值;挥发份含量相当高,可达 70% 以上.在 RDF 的燃烧过程中,会释放出大量的挥发份,如果控制不当,就可能造成有害的污染物排放超标.另一方面,由于煤中 N、S 的含量一般较高、Cl 含量较低,而 RDF 中 N、S 含量较低,Cl 含量高,因此煤燃烧的排放特性与 RDF 不同.此外,由于煤与 RDF 组成不同,灰分与污染物 NO_x、SO_x 和 HCl 等会发生相互作用与影响,因此,混烧时的排放特性也不能由单纯烧煤或 RDF 的排放结果来预测.

国外开展 RDF 与煤混烧的研究和应用较早,已经有一些煤与 PDF 或者其它废弃物混烧的试验和理论研究,得到了混烧过程中的污染物、二噁英类和微量金属等的排放特性^[1~10].美国和欧洲已在一些锅炉中燃烧 RDF,主要采用链条炉排炉或粉状燃料炉与煤混烧,RDF 在燃料中的份额占 5%~40% (以发热量为计算的基准)^[11,12].

近几年,我国也开展了 RDF 热解动力学以及燃烧特性的试验研究^[13~16].但是,在燃烧 RDF 方面的研究还较少,主要是因为我国发展废弃物焚烧技术的时间较晚,同时 RDF 的制作工艺比较复杂,因此其研制和应用的投资较大.由于 RDF 的组成与原生垃圾中塑料、纸张、包装盒和木头等可燃成分的份额有关,因此根据产地的不同,RDF 的热值和 N、S、Cl 的含量等也会有较大的差异,因此,有必要研究 RDF 焚烧时污染物的排放规律.

1 试验装置和试验条件

图 1 为非均匀布风流化床热态试验台结构示意图,主要分为自由空间和浓相床区两部分^[17,18].浓相床区横截面和底部倾斜布风板尺寸相同,为 500 mm×240 mm,浓相床区高度 1.0 m;布风板之下的风室被分割为大小相等的 2 部分,一次风根据风量的大

小分为高速风和低速风进入不同的风室;在不同速度的气流作用下,流化床内的床料颗粒形成大尺度的内旋流;高速风上方的颗粒剧烈运动,为流动区,低速风上方的颗粒缓慢下降,为移动区;浓相床区内的床料颗粒是粒径为 0~1.5 mm 的河砂;流化床布风装置为风帽式,风帽开孔率平均为 0.6%.试验装置从浓相区向上开始渐扩进入自由空间,自由空间截面尺寸为 800 mm×280 mm,高度为 3.5 m,在稀相区底部为二次风入口.

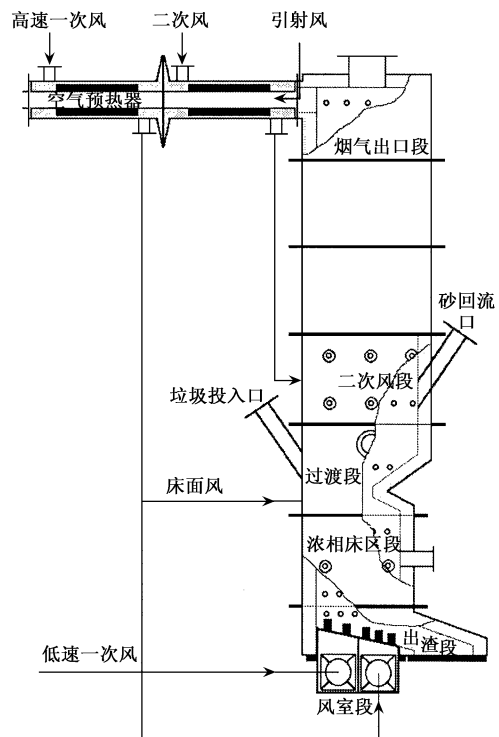


图 1 非均匀布风流化床示意图

Fig. 1 Schematic of the fluidized bed with uneven air distribution

试验中流动区流化速度为 6.0 u_{mf} (u_{mf} 为床料的初始流化速度,单位: $m \cdot s^{-1}$),移动区流化速度为 2.0 u_{mf} ,根据此供风量,焚烧实验台的额定处理量为 15 kg·h⁻¹ (焚烧系统过量空气系数为 1.5~2.0).试验中浓相床区的温度为 1123~1173 K,自由空间的气体温度为 923~1073 K.

表 1 燃料特性

Table 1 The properties of fuel

燃料 (应用基)	燃料成份分析									低位发热量 (MJ·kg ⁻¹)
	挥发分/%	含水量/%	含灰量/%	Car/%	Har/%	Oar/%	Nar/%	Sar/%	Clar/%	
RDF	73.48	0	17.17	57.24	9.09	20.33	0.21	0.26	1.64	24.1
煤	25.37	13.20	10.59	61.99	3.49	9.72	0.78	0.24	0.006	23.5

表 1 为燃料特性数据,可见,RDF 的热值很高,由于制作过程进行了干燥,几乎不含水分;元素分析表明氢、氧含量较高,远远超出通常煤中的量;而氮、硫含量较低;但是氯的含量很高,甚至超过了有些垃圾的氯含量,这可能是由于 PVC 塑料和纸张中的氯等引起的.RDF 呈细长圆柱状,其直径为 15 mm,长度为 30~45 mm (参见图 2).

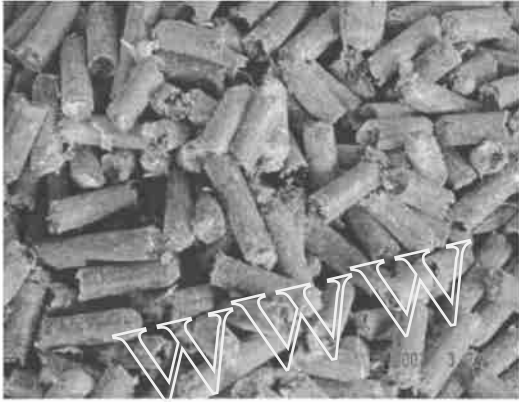


图 2 RDF 形状图

Fig.2 The shape of RDF

烟气取样点设在炉膛顶部转折处,该处温度为 773~923 K,烟气取样管线的加热温度为 453 K.使用 Gasetm DX-3000 便携式多组分红外气体分析仪测量烟气中的污染物(生产商为芬兰 Temet 仪器公司).该仪器利用傅立叶变换红外原理(FTIR),可以实时在线测量 30 种气体组分,精度为 2%.本次试验中测量了 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 HCl 、 SO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_6H_6 等. O_2 量采用 TEMET 19 氧气分析仪,测量精度为 0.2%.

2 试验结果及分析

图 3 是 RDF 与煤混烧过程中一个典型工况下的 H_2O 、 CO_2 和 O_2 生成浓度随时间的变化曲线,试验中按照纯 RDF、75%、50%、25% RDF 和纯煤的顺序进行试验(混合比例为质量比),每种混和燃料的燃烧试验时间为 30 min.燃烧过程中 CO_2 的平均量为 9%,而 O_2 平均量在 7.5%左右.燃烧 RDF 时 CO_2 和 O_2 值的脉动较大,而烧煤时的脉动值较小,这是因为燃烧 RDF 时有大量的挥发份析出,而 RDF 的挥发份组成和释放速率会有较大波动,因此造成了挥发份燃烧的脉动.当 RDF 与煤混烧时, CO_2 和 O_2 值的脉动仍较大,这是混烧时应该考虑的一个因素.采用更加先进的燃烧主动控制技术,可以解决该问题.

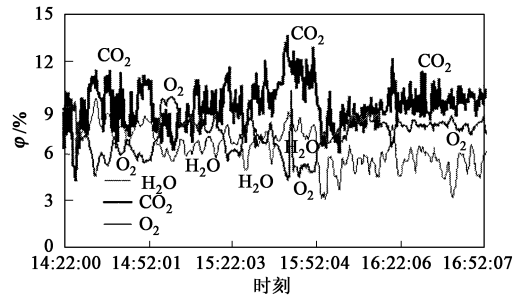


图 3 典型工况下 RDF 与煤混烧时的 H_2O 、 CO_2 和 O_2 生成量曲线

Fig.3 Curves of the typical concentrations of H_2O , CO_2 , O_2 during co-combustion with RDF and coal

由图 3 中可见, H_2O 汽的生成量在 3%~9% 之间,单纯燃烧 RDF 的 H_2O 汽生成量最大,平均可达 8%以上,而单纯烧煤的 H_2O 汽生成量约 4.5%,这是因为 RDF 中的氢含量很高,虽然 RDF 中并没有水分,但是其中的氢燃烧后生成了很多的 H_2O 汽,因此 RDF 与煤混烧过程中将排放较多 H_2O 汽.

试验中还测量了 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_6H_6 等碳氢类物质的生成量,其中在单纯燃烧 RDF 时, CH_4 和 C_2H_2 有较大的波动,最大体积分数可达 250×10^{-6} 或 100×10^{-6} ;而 C_2H_4 和 C_6H_6 的生成量也有小的波动,最大体积分数约为 50×10^{-6} ; C_2H_6 的波动很小,基本保持 10×10^{-6} 以下的生成量.在混烧过程中,除 50% RDF 工况外,其它工况(包括纯烧煤)下, CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_6H_6 等的生成量很小,波动也小,测量值一般小于 20×10^{-6} .

图 4 是混烧时一个典型工况的 CO 生成量随时间的变化曲线.燃烧 RDF 时 CO 生成量最大,而且波动值特别大,这与上面的分析是一致的,但是混烧时 CO 的生成量变得较为稳定,排放值也较低,只略大于单纯烧煤时的 CO 排放量.由于在燃烧过程中床

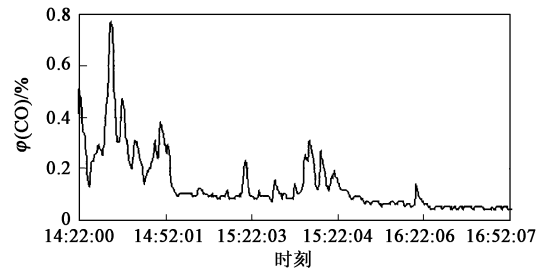


图 4 典型工况下 RDF 与煤混烧时的 CO 生成量曲线

Fig.4 Curve of the typical concentration of CO during co-combustion of RDF and coal

内温度、进料量和漏风量等均会有一定波动,因此在混烧过程中,仍存在一些 CO 的较大波动。

图 5(a) 是不同 RDF 混烧份额时 CO 的生成浓度,为了方便,计算时采用 O₂ 为 0 的基准,即燃烧当量比为 1 时的工况。显然,燃烧纯 RDF 时,CO 生成

量最大,约为 5000×10^{-6} ,而混烧时 CO 生成量大大下降,平均为 1500×10^{-6} 。单纯烧煤时,CO 量比混烧时小一些,约为 1000×10^{-6} 。由于煤中的挥发份少、碳含量较大,而 RDF 中的挥发份高、碳含量较小,因此煤与 RDF 混烧时可以减少 CO 的生成量。

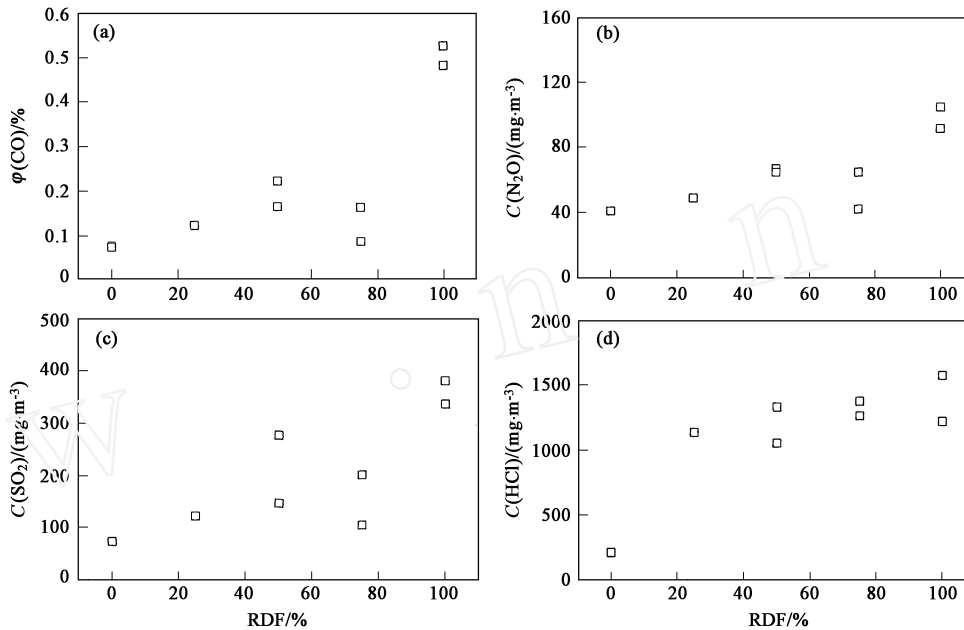


图 5 混烧时 CO, N₂O, SO₂, HCl 的体积分数

Fig. 5 CO, N₂O, SO₂ and HCl volume fraction during co-firing, respectively

随着 RDF 份额的增加,NO 的生成量增加,但增加量并不大;另外,NO₂ 的测量结果非常小。图 5 (b) 是不同 RDF 混烧份额时 N₂O 的生成浓度。N₂O 的产生浓度较低,除纯烧 RDF 时的生成浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 外,其它情况下的生成浓度约为 $60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,可见混烧可以减少 N₂O 的生成。

图 5(c) 是不同 RDF 混烧份额时 SO₂ 的生成浓度。SO₂ 的生成浓度较低,除纯烧 RDF 时的生成浓度为 $350 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 外,其它情况下的生成浓度约为 $150 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,由于试验采用的是一种低硫煤,因此单纯烧煤时的 SO₂ 生成量很小,而混烧时煤中灰分的钙、碱等物质可以吸收 SO₂,因此混烧时 SO₂ 的生成量几乎没有增加。

图 5(d) 是不同 RDF 混烧份额时 HCl 的生成浓度。单纯烧煤时,HCl 的生成浓度较低,而混烧时,HCl 的生成量明显增加,纯烧 RDF 的 HCl 生成量最大。由于 RDF 的氯含量较大,且混烧时 HCl 的生成量也较高,因此可能会带来炉膛腐蚀、增加二噁英类生成等危害。一个解决的方法是:在制作 RDF 时加

入含钙物质,从而 HCl 可以在燃烧过程中被部分吸收。初步的试验表明 RDF 中的含钙物质可以降低至少一半的 HCl 生成量,而在燃烧过程中添加的钙质,脱氯效果却没有如此明显。由于利用钙质脱氯时生成的 CaCl₂ 在流化床燃烧温度下还会与 SO₂、O₂、H₂O 等气体发生反应,并重新释放出 Cl₂ 和 HCl,因此炉内脱氯的研究还有待深入。

3 结论

进行了在非均匀布风流化床中 RDF 与煤的混烧试验,测量了 H₂O、CO、CO₂、NO、N₂O、HCl、SO₂ 等污染物质的排放特性。由于 RDF 中的氢含量很高,因此燃烧后生成了很多的 H₂O 汽;燃烧 RDF 时 CO₂ 和 O₂ 值的脉动较大,而纯烧煤时的脉动值较小,当 RDF 与煤混烧时,CO₂ 和 O₂ 值的脉动仍较大;燃烧 RDF 时 CO 生成量很多,而且脉动值很大,但混烧时 CO 的生成量变得较为稳定,排放值也大大下降;单纯燃烧 RDF 时 N₂O 的生成浓度较高,约为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而混烧时的生成浓度约为此值的一半;混

烧时煤中灰分的钙、碱等物质可以吸收 SO_2 , 因此, 混烧时 SO_2 生成量较少; 由于 RDF 的氯含量较大, 混烧时 HCl 的生成量明显增加, 制作 RDF 时加入的含钙物质可以在燃烧过程中吸收部分 HCl.

致谢: 作者十分感谢陈凡女士在仪器使用方面的帮助, 另外, 研究生王峰、张哲巛、乔春珍、王玮和郭淑青等人也参加了部分试验工作.

参考文献:

- [1] Frankenhaeuser M, Hiltunen M, Manninen H, *et al.* Emissions from Cocombustion of used packaging with Peat and Coal [J]. *Chemosphere*, 1994, 29 (9—11): 2057—2066
- [2] Lu R, Purushothama S, Yang X, *et al.* TG/FTIR/MS study of organic compounds evolved during the cofiring of coal and refuse-derived fuels [J]. *Fuel Processing Technology*, 1999, 59 (1): 35—50
- [3] Manninen H, Peltola K, Ruuskanen J. Co-combustion of refuse-derived and packaging-derived fuels (RDF and PDF) with conventional fuels [J]. *Waste management research*, 1997, 15 (2): 137—147
- [4] Manninen H, Perkio A, Vartiainen T, *et al.* Formation of PCDD/PCDF - Effect of fuel and fly ash composition on the formation of PCDD/PCDF in the co-combustion of refuse-derived and packaging-derived fuels [J]. *Environ Sci Pollut R*, 1996, 3 (3): 129—134
- [5] Huotari J, Vesterinen R. PCDD/F emissions from co-combustion of RDF with peat, wood waste, and coal in FBC boilers [J]. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 1996, 13 (1): 1—10
- [6] Gullett BK, Dunn JE, Bae SK, *et al.* Effects of combustion parameters on polychlorinated dibenzodioxin and dibenzofuran homologue profiles from municipal waste and coal co-combustion [J]. *Waste Management*, 1998, 18 (6—8): 473—483
- [7] Gullett B K, Dunn J E, Raghunathan K. Effect of cofiring coal on formation of polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans during waste combustion [J]. *Environ Sci Tech*, 2000, 34 (2): 282—290
- [8] Manninen H, Perkio A, Palonen J, *et al.* Trace metal emissions from co-combustion of refuse derived and packaging derived fuels in a circulating fluidized bed boiler [J]. *Chemosphere*, 1996, 32 (12): 2457—2469
- [9] Kouvo P, Backman R. Estimation of trace element release and accumulation in the sand bed during bubbling fluidised bed co-combustion of biomass, peat, and refuse-derived fuels [J]. *Fuel*, 2003, 82 (7): 741—753
- [10] Fernandez A, Wendt JOL, Wolski N, *et al.* Inhalation health effects of fine particles from the co-combustion of coal and refuse derived fuel [J]. *Chemosphere*, 2003, 51 (10): 1129—1137
- [11] Norton GA, Levine AD. Cocombustion of refuse-derived fuel and coal [J]. *Environ Sci Technol*, 1989, 23 (7): 774—783
- [12] Marton C, Alwast H. Report: Operational experiences and legal aspects of co-combustion in Germany [J]. *Waste Management Research*, 2002, 20 (5): 476—483
- [13] 董长青, 金保升, 仲兆平. 废物衍生燃料 (RDF) 加压热解特性及其动力学研究 [J]. *热能动力工程*, 2001, 16(4): 586—590
- [14] 郭小汾, 杨雪莲, 陈勇, 等. 垃圾衍生燃料 (RDF) 的燃烧特性研究 [J]. *太阳能学报*, 2001, 22 (3): 286—290
- [15] 吴家正, 汪雄平, 朱彤, 等. RDF 预处理对热解动力学的影响 [J]. *太阳能学报*, 2002, 23 (1): 61—65
- [16] 王志奇, 李海滨, 吴创之, 等. 喷流-移动床 RDF 热解燃烧温度和气体分布 [J]. *化工学报*, 2003, 54 (1): 74—79
- [17] TIAN Wendong, WEI Xiaolin, LI Jun, *et al.* Internal circulating fluidized bed incineration system and design algorithm [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2001, 13(2): 185—188
- [18] SHENG Hongzhi, WEI Xiao-lin, LI Jun, *et al.* The Heat Transfer Study of External Super-Heater of CFB Incinerator [J]. *Environmental Engineering Science*, 2004, 21(1): 39—44