

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.022

垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放优化*

李大中¹ 王晨颖¹ 娄云²

(1. 华北电力大学自动化系, 保定 071003; 2. 湖北省电力公司随州供电公司, 随州 441300)

【摘要】 依据山西省某垃圾混燃电厂现场运行数据,建立了垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放过程模型,验证表明模型能够较好地模拟混燃锅炉污染物排放过程。拟合了混燃过程烟气污染物排放多目标优化函数,优化计算得到 Pareto 最优解集。依据混燃温度在 850 ~ 900℃ 时二噁英可被有效分解的工程条件,进一步从 Pareto 最优解集中选取了污染物排放值能够满足工程要求的锅炉混燃运行工况有效解子集,该子集表明当温度大于 850℃ 时,随煤掺混量适当增加及温度升高,锅炉侧出口二噁英排放值已显著降低,最小值达 0.012 8 ngTEQ/m³,远优于烟气最终允许排放国家标准值 1.0 ngTEQ/m³ 及现场烟气经净化处理后测试值 0.026 ngTEQ/m³,且其他污染物排放值也远低于现场锅炉侧出口实际测试值。

关键词: 焚烧垃圾发电 秸秆 混煤燃烧 污染物排放 优化
中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0117-07

Pollutant Emission Optimization of Boiler Burning Waste Mixed with Coal and Straw

Li Dazhong¹ Wang Chenying¹ Lou Yun²

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China
2. Suizhou Power Supply Company, Hubei Electric Power Company, Suizhou 441300, China)

Abstract

According to the actual operation data from a mixed waste fired power plant in Shanxi province, the model of pollutant emission process of boiler burning waste, coal and straw was established. Validation showed the model can better simulate the process of mixed fuel boiler pollutants emissions. The multi-objective optimization function of flue-gas pollutants emission was designed and the Pareto optimal solution set was found. According to the engineering condition of dioxins could be broken down when the mixed fired temperature was in the range of 850 ~ 900℃, the efficient solution subset of boiler mixed burning operating condition that emission values could satisfy the engineering requirements was further selected from Pareto optimal solution set. The subset showed that when the temperature was higher than 850℃, with appropriate increase of the blending amount of coal and temperature, the formation of dioxins of boiler side exit has been significantly reduced, the minimum was 0.012 8 ngTEQ/m³, far better than the national standard value of 1.0 ngTEQ/m³ of eventually allowed emissions gas and test value 0.026 ngTEQ/m³ of the on-site gas after purification. Moreover, the other pollutant emission value is also much lower than the actual test value of side exit of on-site boiler.

Key words Waste incineration power generation, Straw, Mixed coal combustion, Pollutant emission, Optimization

引言

由于垃圾成分复杂、随时间与空间多变,在其焚

烧处理过程中会产生各种形态的二次污染物。主要包括二噁英、酸性气体、飞灰等^[1]。二噁英是目前人类所发现的毒性最强的物质,不仅具有致癌性,还

收稿日期: 2011-07-27 修回日期: 2011-09-26
* 河北省自然科学基金资助项目(F2011502001)
作者简介: 李大中,教授,博士,主要从事生物质能综合利用以及智能优化控制理论研究,E-mail:dzli21cn@126.com

具有生殖毒性、免疫抑制作用等,是评价垃圾发电厂污染物排放的重要依据。

我国城市垃圾热值低、水分大,为保证燃烧的稳定性,国内垃圾焚烧行业普遍添加煤进行混燃。经国内外研究人员的理论和实验研究发现这样处理垃圾不仅浪费了资源,而且运行成本高,经济效益差^[2-4],所以人们不断寻找可再生燃料与煤、垃圾混燃。秸秆作为一种优质燃料,热值高,N、S 含量低,在生物质的再生利用过程中,具有 CO₂ 零排放的作用,特别适合燃烧转化。合理的掺烧量既可以节省煤的使用量,又可以降低各污染物的排放。本文依据山西省某垃圾焚烧发电厂在不同掺混比和温度下所对应的焚烧炉内二噁英和主要酸性气体(HCl、SO_x、NO_x)排放值的现场运行数据,建立混燃过程的LS-SVM 模型,综合考虑 HCl、SO_x、NO_x、二噁英的工程排放要求,给出垃圾与煤、秸秆混燃发电锅炉污染物排放的工程优化方法。

1 垃圾混燃中二噁英及污染物产生机理

垃圾焚烧过程二噁英的形成可概括为^[5]:①垃圾自身含有二噁英。②焚烧时,C、H、O、Cl 等元素在飞灰表面通过基元反应生成二噁英。③焚烧过程中,当垃圾含有含氯前体物时,前体物分子通过重排、自由基缩合、脱氯及其他化学反应生成二噁英。垃圾中的塑料、含氯化物焚烧,碱金属氯化物(如 NaCl)与烟气中 SO₂、O₂、H₂O 反应都可生成 HCl 气体^[6]。SO_x 通常由垃圾中含硫化合物焚烧氧化生成,另外,在掺煤燃烧时也会生成 SO_x,主要成分为 SO₂^[5]。垃圾中的氮氧化物分解转化和空气中氮气高温氧化可生成 NO_x,NO 为主要成分^[6]。

2 垃圾混燃锅炉污染物排放过程模型建立

2.1 模型参数确立

在垃圾混燃发电过程中,影响炉膛内污染物生成的因素很多,如垃圾成分、添加燃料种类、混烧燃料的掺混比、炉膛温度、停留时间、给风量等。混燃温度和掺混比是影响二噁英、HCl、SO_x、NO_x 生成的重要因素,尤其对二噁英影响很大。飞灰中重金属含量主要取决于生活垃圾中重金属及其化合物的含量,以及各重金属的蒸发点^[7],与焚烧过程垃圾、煤和秸秆的掺混比无直接关系。粉尘随秸秆掺混量的增加而增加,但粉尘脱除主要由布袋除尘器完成,脱除率高达 99.9%^[8-9],适当增加秸秆对烟气粉尘影响不大。所以重金属含量及粉尘将不作为模型考虑的指标。

本文基于表 1 现场运行数据建立模型,其中燃

料特性要求挥发分较高,低硫,焦渣特性不大于 3;烟气在循环流化床炉内高温段停留时间为 3 s;锅炉采用两级配风,一次风从炉膛底部水冷风室风帽进入炉膛,风量为 65 000 m³/h;二次风从燃烧室前后侧进入炉膛,风量为 35 000 m³/h,其中一次风和二次风温度为 200~230℃;垃圾颗粒度小于 150 mm,煤颗粒度为 0~10 mm,最大 15 mm,大于 10 mm 颗粒不超过 8%。秸秆一般小于 150 mm。模型以燃烧温度、煤、秸秆、垃圾为输入量,以锅炉侧出口烟气中二噁英、HCl、SO_x、NO_x 排放值为输出量。垃圾、煤、秸秆工业分析与元素分析、垃圾组成成分如表 2、表 3(表中为质量分数)所示。锅炉主要技术参数如表 4 所示。

表 1 垃圾与煤、秸秆混燃电厂锅炉侧出口
污染物排放值现场实际运行测试数据

Tab. 1 Actual operating test data of pollutant emissions
of side exit of boiler of mixed fuel power wastes,
coal and straw

煤、秸秆、垃圾 掺混质量比	温度/ ℃	二噁英 排放量/ ngTEQ·m ⁻³	SO _x 排放量/ mg·m ⁻³	HCl 排放量/ mg·m ⁻³	NO _x 排放量/ mg·m ⁻³
5:20:75	750	0.103	438	89	215
	800	0.089	518	80	220
	850	0.034	458	95	224
	900	0.024	478	78	260
10:10:80	750	0.086	980	96	218
	800	0.055	1 099	106	230
	850	0.022	1 039	86	226
	900	0.019	989	110	266
15:5:80	750	0.079	1 507	95	210
	800	0.049	1 608	89	227
	850	0.020	1 404	105	229
	900	0.017	1 508	100	280
20:0:80	750	0.077	2 098	86	211
	800	0.045	1 988	99	221
	850	0.020	2 069	92	231
	900	0.013	2 008	97	266

由表 1 可以看出,随着煤添加比例的增加,温度逐渐升高,二噁英毒性当量降低,SO_x 含量明显增加,其他污染物含量未有明显变化。

2.2 模型建立

以最小二乘支持向量机^[10-11]建立垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放过程 LS-SVM 模型为

$$(y_F, y_S, y_H, y_N) = \sum_{i=1}^d a_i k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \quad (b \in \mathbf{R})$$

(1)

表 2 垃圾、煤、秸秆工业分析与元素分析

Tab.2 Industrial analysis and elemental analysis of wastes, coal and stalk

燃烧物	工业分析(质量分数)/%					元素分析(质量分数)/%						收到基低位发 热量/kJ·kg ⁻¹
	水分	灰分	挥发分	固定碳	可燃物	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	Cl _{ar}	
垃圾	45.08	25.77			29.15	13.50	2.45	12.23	0.66	0.04	0.27	4 826
煤	9.25	23.92	23.48	43.35		57.11	3.70	4.05	1.12	0.85		17 410
秸秆	9.90	3.60	64.79	21.71		42.90	5.00	37.70	0.68	0.12	0.01	15 300

注:元素符号下标 ar 均指收到基。

表 3 垃圾组分含量

Tab.3 Components of wastes

有机物类		无机物类		可回收废弃物						其他
动物	植物	灰土	砖瓦陶瓷	纸张	塑料	纺织物	玻璃	金属	竹木	
2.64	50.87	30.6	0.51	5.36	5.52	0.91	2.42	0.46	0.48	0.23

表 4 垃圾与煤、秸秆混燃电厂锅炉主要技术参数

Tab.4 Main technical parameters of boiler of mixed fuel power plant wastes, coal and straw

参数	数值
日处理垃圾量/t·d ⁻¹	500
锅炉额定蒸发量/t·d ⁻¹	75
汽包工作压力/MPa	4.22
过热蒸汽压力/MPa	3.82
过热蒸汽温度/℃	450
减温器减温幅度/℃	36
给水温度/℃	150
冷风温度/℃	28.5
热风温度/℃	174
排烟温度/℃	162
锅炉热效率/%	≥85
锅炉本体烟气阻力/Pa	2 411.5
锅炉本体空气阻力: 一次风/Pa	12 000
	二次风/Pa 1 605.8

其中 $x_i = (T, x_1, x_2, x_3)$

式中 $K(x_i, x_j)$ ——核心函数 d ——训练次数

a_i ——待定系数 b ——偏差

y_F ——二噁英排放值, ngTEQ/m³

y_S ——SO_x 排放值, mg/m³

y_H ——HCl 排放值, mg/m³

y_N ——NO_x 排放值, mg/m³

T ——燃烧温度, ℃

x_1 ——煤质量分数

x_2 ——秸秆质量分数

x_3 ——垃圾质量分数

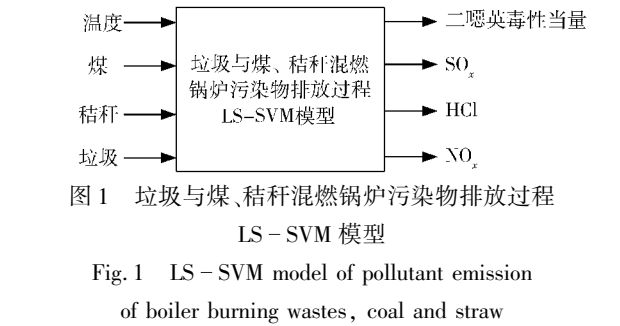
二噁英类毒性当量与二噁英毒性同类物关系为^[12]

$$TEQ = \sum_{i=0}^{17} C_i (I - TEF)_i \tag{2}$$

式中 C_i ——第 i 种 2,3,7,8-氯取代二噁英的浓度

$(I - TEF)_i$ ——第 i 种 2,3,7,8-氯取代二噁英的国际毒性当量因子

建立垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放过程模型如图 1 所示。



2.3 模型验证

选取表 1 中每组不同掺混比工况下 750℃、850℃、900℃ 对应的 12 组数据进行模型训练;用 800℃ 对应的 4 组数据进行模型测试。测试结果如表 5 所示,最大相对误差为 8.95%,可以看出该模型具有较好的泛化能力和拟合效果,能够较好地模拟垃圾与煤、秸秆混烧污染物排放过程。

3 混燃过程污染物排放优化

3.1 方案确立

基于所建 LS-SVM 模型,采用并列遗传算法^[13~14]对混燃过程污染物排放进行优化,即寻求当二噁英 TEQ、SO_x、HCl、NO_x 分别达到最优值时,锅炉混燃的温度、掺混比(煤、秸秆、垃圾)应满足的优化目标值。

该优化需要多个目标同时满足,其实质上是多目标优化问题(multiobjective optimization problems,

表 5 模型预测值与锅炉侧出口现场实际排放值比较

Tab. 5 Comparison of model predictions of boiler side and actual emissions on-site

煤、秸秆、垃圾 掺混质量比	二噁英/ $\text{ngTEQ}\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{SO}_x/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{HCl}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{NO}_x/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$		
	实际值	模型值	相对误差	实际值	预测值	相对误差	实际值	预测值	相对误差	实际值	预测值	相对误差
5:20:75	0.089	0.082 9	0.068 2	518	481.1	0.071 3	80	86.3	0.078 5	220	216.0	0.018 4
10:10:80	0.055	0.052 7	0.041 5	1 099	1 022.5	0.069 6	106	99.1	0.065 2	230	209.5	0.089 1
15:5:80	0.049	0.047 5	0.030 7	1 608	1 482.9	0.077 8	89	95.6	0.074 6	227	206.7	0.089 5
20:0:80	0.045	0.046 7	0.038 4	1 988	2 086.7	0.049 6	99	90.1	0.089 4	221	210.0	0.049 9

简称 MOP^[15])。多目标优化问题的解通常不是唯一的,而是存在一个 Pareto 最优解集,其中每个解彼此不可比较,都是非劣最优解,所以求解多目标优化问题的关键是求出 Pareto 最优解集。

3.2 约束条件

(1) 燃烧温度

二噁英热分解温度为 700℃ 以上,随着温度的升高二噁英逐渐分解,大于 850℃ 停留时间超过 2 s 时可有效分解^[16]。在实际运行中炉膛燃烧温度一般控制在 850 ~ 900℃^[17],如果燃烧稳定,在 750℃ 时循环流化床也可正常运行。本文选取温度范围为 750 ~ 900℃。

(2) 煤、秸秆、垃圾混燃比

现场试验表明,煤对二噁英生成具有抑制作用,若垃圾与煤混燃,随掺煤量增加,二噁英生成量急剧下降,当掺煤量大于 16% 后,二噁英生成量下降不明显^[18]。若垃圾与秸秆混燃,随秸秆掺入量增多,混合物热值相应增大,炉膛温度逐渐升高,当秸秆质量分数为 15% 左右时,锅炉燃烧状况最佳^[19~20]。依据以上分析,选取煤寻优范围为 5% ~ 20%^[18],秸秆寻优范围为 0 ~ 20%^[19~20],垃圾寻优范围为 75% ~ 80%。

3.3 多目标优化函数建立

建立锅炉混燃烟气污染物排放优化目标函数的目的是为了寻求锅炉混燃适宜的温度,以及煤、秸秆、垃圾适合的混燃比,使二噁英、SO_x、HCl、NO_x 的排放值达到最小。为此建立多目标优化目标函数为

$$\begin{cases} \min Y \\ \text{s. t.} & 750^{\circ}\text{C} \leq z_1 \leq 900^{\circ}\text{C} \\ & 5\% \leq z_2 \leq 20\% \\ & 0 \leq z_3 \leq 20\% \\ & 75\% \leq z_4 \leq 80\% \end{cases} \quad (3)$$

其中 $Y = (Y_1(Z), Y_2(Z), Y_3(Z), Y_4(Z))$

$$Z = (z_1, z_2, z_3, z_4)^T$$

式中 z_1 ——混燃温度 z_2 ——煤质量分数

z_3 ——秸秆质量分数 z_4 ——垃圾质量分数

$Y_1(Z)$ ——二噁英排放值

$Y_2(Z)$ ——SO_x 排放值

$Y_3(Z)$ ——HCl 排放值

$Y_4(Z)$ ——NO_x 排放值

3.4 优化结果分析

基于并列选择遗传算法^[13~14]实现的优化流程如图 2 所示。

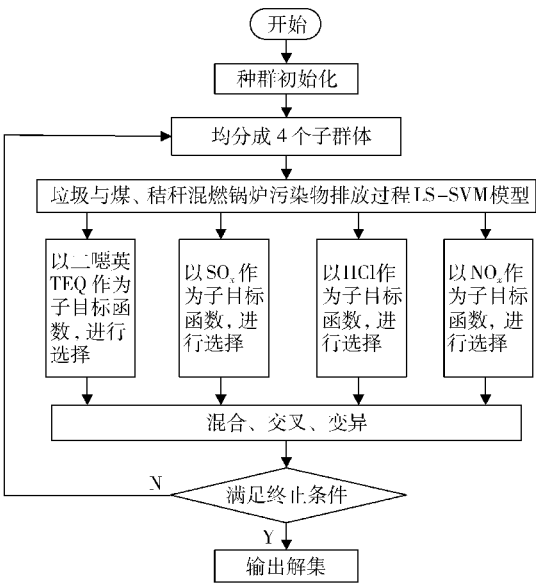


图 2 垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放过程优化流程图

Fig. 2 Optimal process of pollutant emission of boiler burning wastes, coal and straw

经寻优计算得到 Pareto 最优解集,如表 6 所示,其中二噁英及主要污染物含量较表 1 现场实际测试值有明显减小,寻优结果整体优于现场实际测试值。

4 工程有效解选取

从多目标优化角度看,表 6 中每组解都是非劣最优解,而工程应用中,还需考虑二噁英及其他污染物能够有效分解的工况条件。当垃圾混燃炉膛燃烧温度控制在 850 ~ 900℃ 之间时,重要污染物二噁英可被有效分解^[16~17]。为此本文以二噁英为主要考核指标,从 Pareto 最优解集(表 6)中选出燃烧温度大于 850℃ 的有效解子集,如表 7 所示,该子集即可满足垃圾与煤、秸秆混燃在不同运行工况下,对二噁

表 6 垃圾与煤、秸秆混燃锅炉侧出口污染物排放量优化结果

Tab.6 Optimized results of pollutant emission of side exit of boiler burning wastes, coal and straw

温度/℃	煤含量/%	秸秆含量/%	垃圾含量/%	二噁英排放量 /ngTEQ·m ⁻³	SO _x 排放量 /mg·m ⁻³	HCl 排放量 /mg·m ⁻³	NO _x 排放量 /mg·m ⁻³
891.6	18.6	1.5	79.9	0.0128	1793.1	94.5	244.4
874.8	16.1	4.1	79.8	0.0144	1487.0	99.9	243.0
890.9	13.1	6.9	80.0	0.0158	1324.4	96.3	239.6
891.3	11.7	9.7	78.6	0.0169	989.8	99.4	236.1
886.2	8.8	12.8	78.4	0.0191	916.1	98.2	239.7
861.4	10.5	11.5	78.0	0.0225	942.5	93.3	226.5
840.9	16.2	5.8	78.0	0.0240	1521.6	98.4	225.7
893.0	6.3	18.7	75.0	0.0241	498.4	90.4	248.2
835.7	18.6	2.1	79.3	0.0260	1892.4	95.6	222.8
847.8	9.1	12.4	78.5	0.0287	898.2	88.0	225.4
818.5	16.7	4.0	79.3	0.0352	1547.2	95.8	213.5
821.2	9.7	11.3	79.0	0.0399	955.8	87.0	214.5
810.3	14.4	5.8	79.8	0.0420	1269.9	94.7	209.5
818.6	5.7	18.2	76.1	0.0486	569.7	79.6	218.1
802.7	11.9	8.9	79.2	0.0489	1100.1	91.8	208.4
812.2	5.4	18.0	76.6	0.0527	562.4	80.8	217.5
785.3	16.1	5.5	78.4	0.0580	1456.4	95.2	205.9
768.6	15.5	4.8	79.7	0.0681	1542.7	95.0	206.4
762.3	18.2	1.9	79.9	0.0703	1794.0	90.9	207.0
756.9	14.3	6.4	79.3	0.0757	1478.2	95.6	208.6
771.2	5.7	18.8	75.5	0.0776	547.6	82.8	205.5
762.4	8.4	11.8	79.8	0.0794	900.2	89.5	216.3
753.9	6.4	18.1	75.5	0.0849	514.7	88.1	223.4

表 7 可满足工程实际运行工况的有效解子集

Tab.7 Efficient solution subset satisfying the real engineering operating condition

温度/℃	煤含量/%	秸秆含量/%	垃圾含量/%	二噁英排放量 /ngTEQ·m ⁻³	SO _x 排放量 /mg·m ⁻³	HCl 排放量 /mg·m ⁻³	NO _x 排放量 /mg·m ⁻³
891.6	18.6	1.5	79.9	0.0128	1793.1	94.5	244.4
874.8	16.1	4.1	79.8	0.0144	1487.0	99.9	243.0
890.9	13.1	6.9	80.0	0.0158	1324.4	96.3	239.6
891.3	11.7	9.7	78.6	0.0169	989.8	99.4	236.1
886.2	8.8	12.8	78.4	0.0191	916.1	98.2	239.7
861.4	10.5	11.5	78.0	0.0225	942.5	93.3	226.5
893.0	6.3	18.7	75.0	0.0241	498.4	90.4	248.2

英及主要污染物的工程排放要求。

垃圾混燃锅炉侧出口污染物排放值无明确的国家标准,表 8 为表 1 现场实际运行数据经烟气净化处理后各污染物排放值与国家排放标准^[21]。由于锅炉侧出口污染物含量是整个烟气中污染物的源

头,其将对最终排放烟气中污染物含量产生直接影响。因此本文重点对锅炉侧出口污染物含量做了优化,结果明显优于表 1 的现场实际测试值,由此可以看出若将表 7 优化后的污染物经烟气净化处理后,各污染物排放值会远远优于表 8 监测值。

表 8 山西省某垃圾与煤、秸秆混燃电厂
烟气监测结果(以干基、O₂ 11%计)

Tab.8 Monitoring results of flue gas of a garbage
incineration power of wastes, plant and coal of Shanxi

污染物含量	GB18485—2001	烟气监测值
HCl/mg·m ⁻³	75	15
SO _x /mg·m ⁻³	260	35
NO _x /mg·m ⁻³	400	120
二噁英类/ngTEQ·m ⁻³	1.0	0.026
汞/mg·m ⁻³	0.2	0.002 22
镉/mg·m ⁻³	0.1	0.005 59
铅/mg·m ⁻³	1.6	0.041 4
烟尘/mg·m ⁻³	80	7.2

5 结论

(1)基于现场运行数据,建立了垃圾与煤、秸秆

混燃锅炉污染物生成过程 LS-SVM 模型,验证结果表明,模型值与现场测试值最大相对误差为 8.95%,对锅炉混燃污染物生成过程有较好的模拟效果。

(2)基于所建模型,拟合了混燃锅炉污染物排放过程多目标优化函数,优化计算得到 Pareto 最优解集。

(3)依据重要污染物二噁英工程有效分解条件,进一步选取了污染物排放值能够满足工程要求的运行工况有效解子集,该子集可实现当燃烧温度大于 850℃时,锅炉侧出口二噁英最小值达 0.012 8 ngTEQ/m³,远优于烟气最终允许排放国家标准值及现场烟气经净化处理后测试值,且其他污染物生成量也远低于现场锅炉侧出口实际测试值。

参 考 文 献

1 钟瑾,朱庚富. 垃圾焚烧发电过程中的二次污染物控制处理技术[J]. 污染防治技术,2007,20(3):56~60.
Zhong Jin,Zhu Gengfu. Control and disposal technology of secondary pollutant from power generation by incineration of rubbish [J]. Pollution Control Technology,2007,20(3):56~60. (in Chinese)

2 Lawrence A Ruth. Energy from municipal solid waste a comparison with coal combustion technology[J]. Progress in Energy & Combustion Science,1998,24(6):545~564.

3 Estelle Destroches Ducame, Eric Marty. Co-combustion of coal and municipal solid waste in a circulating fluidized bed[J]. Fuel,1998,77(12):1311~1315.

4 蒋旭光,李香排,池涌,等. 流化床中典型垃圾组分与煤混烧时 HCl 排放和脱除研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):210~214.
Jiang Xuguang,Li Xiangpai,Chi Yong,et al. Experimental study of emission of HCl on incinerating of typical MSW components and coal in fluifized bed[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(8):210~214. (in Chinese)

5 王莹,李红彪,周春林. 垃圾焚烧污染物的形成机理及控制[J]. 电站系统工程,2004,20(3):33~34.
Wang Ying,Li Hongbiao,Zhou Chunlin. Formation mechanism and control of pollutant from a MSW incinerator[J]. Power System Engineering,2004,20(3):33~34. (in Chinese)

6 张金成,姚强,吕子安. 垃圾焚烧二次污染物的形成与控制技术[J]. 环境保护,2001(5):17~18.
Zhang Jincheng,Yao Qiang,Lü Zian. Generation and control technology of secondary pollutants for incinerator [J]. Environmental Protection,2001(5):17~18. (in Chinese)

7 宋立杰,赵由才. 垃圾焚烧飞灰中重金属的形成机理[J]. 上海环境科学,2003(2):140~142.
Song Lijie,Zhao Youcai. Mechanism of heavy metals formation in MSW incinerated [J]. Shanghai Environmrntal Sciences,2003(2):140~142. (in Chinese)

8 傅立珩. 生活垃圾焚烧烟气污染物的控制与处理工艺[J]. 环境卫生工程,2005,13(2):55~58.
Fu Liheng. Control and treatment techniques of flue gas pollutants in MSW incinerated [J]. Enviromental Sanitation Engineering,2005,13(2):55~58. (in Chinese)

9 康大友. 垃圾焚烧发电布袋除尘器系统的研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
Kang Dayou. Study on baghouse dust-removing system in waste to energy field [D]. Chongqing: Chongqing Universtiy,2008. (in Chinese)

10 李大中,王臻. 基于最小二乘支持向量机的生物质气化过程模型建立[J]. 系统仿真学报,2009,21(3):629~633.
Li Dazhong,Wang Zhen. Modeling of biomass gasification process based on least squares SVM [J]. Journal of System Simulation,2009,21(3):629~633. (in Chinese)

11 李大中,韩璞,王臻. 基于支持向量机和粒子群算法的生物质气化过程建模与优化[J]. 华北电力大学学报,2009,36(2):74~79.
Li Dazhong,Han Pu,Wang Zhen. The biomass gasification process modeling and optimization based on SVM and PSO [J].

Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(2): 74 ~ 79. (in Chinese)

- 12 陈彤. 垃圾焚烧过程飞灰中二噁英的分布特性及控制技术初步研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- 13 de Toro F, Ortega J, Fernandez J, et al. PSFGA: a parallel genetic algorithm for multiobjective optimization [C]. Proceedings 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 2002: 384 ~ 391.
- 14 姜健, 赵杰, 臧希喆. 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1 218 ~ 1 221.
Jiang Jian, Zhao Jie, Zang Xizhe. Coordinated multi-robot exploration based on parallelism selection genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(5): 1 218 ~ 1 221. (in Chinese)
- 15 Carlos A, Coello Coello. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques [R]. Technical Report Lania-RD-98-08, Laboratorio Nacional de Informatica Avanzada (LANIA), 1998.
- 16 周泽宇, 刘书敏, 蔡德耀, 等. 垃圾焚烧中二噁英脱除方法及机理 [J]. 能源与环境, 2009(1): 80 ~ 81.
- 17 丁历威, 李凤瑞. 城市垃圾焚烧发电技术及其污染物控制策略 [J]. 浙江电力, 2010, 29(2): 55 ~ 58.
Ding Liwei, Li Fengrui. Technology features and pollution control strategy of MSW incineration [J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(2): 55 ~ 58. (in Chinese)
- 18 石谊双. 硫对垃圾焚烧过程中二噁英生成的抑制作用的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Shi Yishuang. Experimental study on inhibitory effect of sulfur on the formation of poly-chlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans during waste incineration process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- 19 李永华, 胡小翠, 郭建, 等. 生活垃圾混烧生物质特性研究 [J]. 华东电力, 2009, 37(2): 324 ~ 325.
Li Yonghua, Hu Xiaocui, Guo Jian, et al. Study of characteristics of MSW combustion with biomass [J]. East China Electric Power, 2009, 37(2): 324 ~ 325. (in Chinese)
- 20 解海卫. 城市生活垃圾与生物质混烧发电及烟气净化的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
Jie Haiwei. Study on co-combustion power generation of municipal solid waste with biomass and flue gas purification [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- 21 GB18485—2001 生活垃圾焚烧污染控制标准 [S]. 2001.

(上接第 135 页)

- 4 Koutsoumanis K, Tassou C C, Taoukis P S, et al. Modelling the effectiveness of a natural antimicrobial on *Salmonella enteritidis* as a function of concentration, temperature and pH, using conductance measurements [J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 84(6): 981 ~ 987.
- 5 Neumeyer K, Ross T, McMeekin T A. Development of a predictive model to describe the effects of temperature and water activity on the growth of spoilage *pseudomonads* [J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 38(1): 45 ~ 54.
- 6 Nerbrink E, Borch E, Blom H, et al. A model based on absorbance data on the growth rate of *Listeria monocytogenes* and including the effects of pH, NaCl, Na-lactate and Na-acetate [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 47(1 ~ 2): 99 ~ 109.
- 7 Heo S K, Lee H S, Ha S D. A predictive model for the growth rate of *Bacillus cereus* in broth by response surface methodology [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 14(2): 202 ~ 206.
- 8 Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M. Modeling of the bacterial growth curve [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1990, 56: 1 875 ~ 1 881.
- 9 Koutsoumanis K, Nychas G J E. Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions [J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 60(2 ~ 3): 171 ~ 184.
- 10 Valeroa A, Pérez-Rodríguez F, Carrasco E, et al. Modelling the growth boundaries of *Staphylococcus aureus*: effect of temperature, pH and water activity [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 133(1 ~ 2): 186 ~ 194.
- 11 Mellefont L A, McMeekin T A, Ross T. Performance evaluation of a model describing the effects of temperature, water activity, pH and lactic acid concentration on the growth of *Escherichia coli* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 82(1): 45 ~ 58.