

有机废物气化-焚烧处理尾气排放灰色预测模型研究

高宁博^{1,2}, 李爱民^{*1,2}

(1. 大连理工大学 环境与生命学院 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 由于气化焚烧过程 NO_x 和 SO_2 产生机理的复杂性, 利用动力学方程对其进行预测存在较大的困难, 运用灰色理论及方法建立了固体废弃物气化-焚烧两段处理中 NO_x 、 SO_2 排放的灰色预测模型. 以灰色理论 GM(1, 1) 和 GM(2, 1) 模型为基础, 通过不同工况条件下固体废弃物的实验数据用灰色理论建立了相应的模型方程, 对所建模型进行了误差检验. 计算表明, 所建模型的预测结果与实验值比较接近, 能够很好地预测固体废弃物气化-焚烧两段处理中 NO_x 和 SO_2 排放特性.

关键词: 固体废弃物; 气化-焚烧; NO_x 和 SO_2 ; 灰色预测模型

中图分类号: X511 **文献标志码:** A

0 引言

固体废弃物气化-焚烧两段处理中 NO_x 、 SO_2 排放的预测是降低有害物质排放, 处理工艺选择、设计和运行调整的重要依据. 对固体废弃物处理过程中 NO_x 、 SO_2 的正确预测将直接关系到工艺的实用性能和有效性能, 因此建立垃圾气化-焚烧两段处理的预测模型十分重要^[1~3].

固体废弃物的气化-焚烧处理过程是一个在不同阶段都存在着复杂反应的化学过程, 既包含热解反应, 在气化剂作用下的气化反应, 也包含了可燃气体的氧化反应. 在这一系列的复杂反应中, 存在着能对环境造成严重污染的 NO_x 、 SO_2 等酸性气体的生成反应. 至今, 人们无法对这一气化-焚烧两段处理过程所发生的反应进行精确的数学描述. 尤其是对有机固体废弃物而言, 由于其组分非常复杂, 均一性差, 组分的物理化学性质相差很大, 是典型的高度非均匀混合物, 对其气化-焚烧处理过程的精确描述几乎不可能. 除了物料的物理和化学性质对处理过程中 NO_x 、 SO_2 排放的影响较大以外, 物料的温升特性也是影响气化过程的重要因素, 焚烧过程中的温度控制、气

化剂的选择以及流量的大小等因素, 所涉及的许多复杂的化学反应以及中间过程, 对整个处理过程都有着重要的影响. 因此, 这些因素对气化-焚烧处理的影响是很复杂的, 有时连微分方程式也无法确定, 是典型的灰色过程. 灰色理论及方法无需建立精确的微分方程式, 只要具有实际过程、实际工况的原始数据, 就可以通过灰色理论建立某一过程的模型方程, 并根据所建立的模型对过程进行预测^[4,5].

灰色理论预测模型是利用系统中的已知信息来研究未知信息, 其 GM 模型是基于关联度收敛原则、生成数、灰导数、灰微分方程等观点和方法建立的方程. 灰色系统理论是使系统由“灰”变“白”的过程, 由于在气化过程中存在复杂的化学反应, 且气化系统中存在许多不确定因素, 对系统的精确描述是比较困难的. 灰色理论能够很好地解决这些问题, 有关灰色理论应用于固体废物处理的报道不多^[5,6]. 本文在实验的基础上, 通过建立灰色理论模型对有机废物的焚烧尾气进行预测.

1 实验设备及仪器

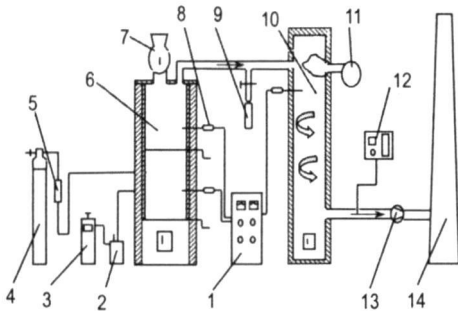
实验台如图 1 所示, 由气化剂发生装置(包括

收稿日期: 2006-10-20; 修回日期: 2007-07-12.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(01101014); 沈阳市科学技术计划资助项目(SK0105).

作者简介: 高宁博(1978-), 男, 博士生; 李爱民*(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: leeam@163.com.

鼓风机、氧气瓶、水蒸气发生器、调压器和流量计)、气化炉、二次燃烧室、检测控制系统构成。气化剂发生装置的作用是为气化提供流量稳定、成分可控、供应量可调的气化剂。该实验中所用的气化剂分为两种:空气和氧气。空气、氧气的流量由流量计调节。气化炉和二次燃烧室是主反应炉体,外接温控仪。二次燃烧室用功率为 6.97 kW 的燃烧器焚烧气化产物,燃烧室炉膛呈矩形,气化产物从上部进入,燃烧后的气体从下部排出。气化剂(空气和氧气)经过流量计从气化炉底部的气化剂输入口输入,与气化炉中的物料进行反应,炉渣从底部的炉门排出。



1 温控箱; 2 水蒸气发生器; 3 调压器; 4 氧气瓶;
5 流量计; 6 气化炉; 7 绞笼; 8 热电偶; 9 集气袋;
10 二次燃烧室; 11 燃烧器; 12 烟气分析仪;
13 引风机; 14 排烟道

图 1 实验系统图

Fig 1 Schematic of the experiment apparatus

2 实验测定

2.1 实验方法

向气化炉内输入一定流量的气化剂,使系统中的其他气体成分排出,待各项参数稳定后,打开燃烧器,用绞笼连续送入待测的固体废物组分,记录各项实验数据,同时用烟气分析仪进行排气成分在线分析。

2.2 实验物料准备

本研究对可燃固体废弃物木屑、稻壳、废煤渣、废橡胶进行实验。由于物料的性质不同,将其按照一定比例均匀混合。物料破碎的仪器是德国产的 SM-2000 型粉碎机,加工后木屑、稻壳、废煤渣的粒度在 1 cm 以下。橡胶的破碎采用人工方法剪成不大于 2 cm 宽、5 cm 长的长条状。物料组成见表 1。物料的工业及元素分析见表 2。

表 1 物料组成

Tab 1 The composition of materials

物料	m/kg	w/%
稻壳	2.9	19
木屑	7.5	50
废煤渣	2.3	15
废橡胶	2.5	16
总重	15.2	100

3 灰色模型的建立

用灰色理论建立 GM(1, 1)、GM(2, 1)模型,用各参数的实验值作为模型的原始数列,即

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

对式(1)作一次累加得 1-AGO 数列

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} + \{x^{(0)}(1), x^{(1)}(1) + x^{(0)}(2), \dots, x^{(1)}(n-1) + x^{(0)}(n)\} \quad (2)$$

其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{r=1}^k x^{(0)}(r) (k=1, 2, \dots, n)$ 。

对数列 $X^{(0)}$ 做准光滑性和准指数规律检验,若满足准光滑性和准指数规律,则可对 $X^{(1)}$ 用 GM(1, 1)模型进行建模预测。对于不满足上述两规律的,则可以尝试建立 GM(2, 1)模型进行预测。

$X^{(1)}$ 的紧邻均值生成数列可以写成

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad (3)$$

其中

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1);$$

$$k=2, 3, \dots, n$$

对 $X^{(1)}$ 建立灰色微分方程

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (4)$$

根据灰色系统的建模方法,通过建立 $X^{(1)}$ 灰色微分方程(4)的白化方程,可以得到一个一阶动态微分方程式

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (5)$$

对式(5)进行离散化求解,得到参数的预测模型。

根据最小二乘法解得式(5)的最小二乘估计参数数列

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 B 为紧邻均值生成矩阵,即

$$B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$Y = (x^{(0)}(2) \quad x^{(0)}(3) \quad \dots \quad x^{(0)}(n))^T \quad (8)$$

从而可得微分方程(5)的解. 对上式进行离散化求解, 得到预测模型, 即

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

对预测值进行还原检验, 与实验值进行对比, 进行误差分析并计算相对误差^[7,8]. 本文中对于

不适合 GM(1, 1)建模的, 尝试用 GM(2, 1)建模, 同时分析误差. 最终所得模型如下:

对于 GM(1, 1)模型方程为

$$x(k+1) = A \cdot e^{-Ck} + B \quad (10)$$

对于 GM(2, 1)模型为

$$x(k+1) = A \cdot e^{-\alpha k} + B \cdot e^{\beta k} + E \quad (11)$$

表 2 有机固体废物工业及元素分析结果

Tab 2 Proximate analysis and ultimate analysis of samples %

废弃物	工业分析				元素分析(ad)				
	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C	H	O	N	S
木屑	12.00	75.05	0.54	12.41	50.40	5.97	42.37	0.15	0.05
稻壳	17.18	38.98	17.38	26.46	46.18	5.96	36.43	4.46	0.42
内胎	1.02	64.92	6.55	27.51	49.10	6.80	5.90	0.10	1.50
橡胶	1.15	67.03	29.74	2.08	53.22	7.09	7.76	0.50	1.34

4 灰色模型对气化焚烧过程的预测

应用灰色理论对气化焚烧过程中的污染物生成规律进行预测, 分别计算温度、气化剂及其流量, 以及燃烧器供给风量对模型参数的影响. 根据部分实验值确定模型方程中的系数, 再用不同的时间序列计算出相应时间的预测值, 将预测值与实验值进行比较, 计算出各气体成分的灰色模

型预测值的平均相对误差. 一般来说, 温度对气化反应过程有很大的影响, 在很多学者的气化机理分析中, 温度增高, 反应向正方向移动, 气化速度加快^[9]. 温度影响的预测相对误差不超过 9% (误差见表 3). 图 2 为在不同温度下氮氧化物和 SO₂ 浓度的实验值与预测值. 实验过程中, 不同气化介质(空气和氧气)对 NO_x 和 SO₂ 的生成有较

表 3 灰色预测模型参数表

Tab 3 The parameters of gray predict model

建模工况	模型参数					平均相对误差	备注
	A	B	C	D	E		
790 °C时 NO	986.208 2	-0.063 7	-924.430 1			0.011 1	
760 °C时 NO	573.342 3	-0.097 4	-516.001 5			0.012 9	
790 °C时 NO _x	4 818.5	0.000 7	-4 732.7			0.008 9	
760 °C时 NO _x	-1.2	-4 431.3	1.4	0	4 509.8	0.086 8	GM(2, 1)
790 °C时 SO ₂	-149.581 2	0.293 9	189.892 9			0.032 0	
760 °C时 SO ₂	-274.653 9	0.190 8	395.536 7			0.079 6	
通空气时 NO	-2 981.6	0	3 049.3			0.000 3	
通 O ₂ 时 NO	3 794.6	0	-3 714.0			0.086 7	
通空气时 NO _x	5 835.2	0	-5 764.5			0.005 3	
通空气时 SO ₂	-22.163 4	0.375 0	36.925 7			0.116 1	
通 O ₂ 时 SO ₂	-215.729 1	0.221 0	265.098 9			0.076 5	
流量 1 m ³ 时 NO	1 906.6	-0.000 5	-1 830.6			0.035 6	
流量 3 m ³ 时 NO	-0.004 8	1.796 2	0.000 6	0	-1.711	0.101 0	GM(2, 1)
流量 6 m ³ 时 NO	11 223	0	-11 144			0.015 6	
流量 1 m ³ 时 NO _x	2 894.9	0	-2 818.0			0.011 9	
流量 3 m ³ 时 NO _x	6 739.6	0.000 3	6 826.4			0.042 1	
流量 6 m ³ 时 NO _x	5 984.3	0.000 1	-5 904.8			0.008 3	
流量 1 m ³ 时 SO ₂	11.308 8	-0.178 7	-9.333 8			0.068 3	
流量 3 m ³ 时 SO ₂	-96.648 7	0.123 2	109.091 3			0.107 8	
流量 6 m ³ 时 SO ₂	1 156.7	-0.1	-1 094.9			0.046 8	
调整风量前 NO	1.240 5	0.001 9	0.000 4	-0.001 2	-1.187 1	0.005 9	GM(2, 1)
调整风量后 NO	1.325 6	0.000 2	-1.318 8			0.002 1	
调整风量前 NO _x	2 598.8	0.000 1	-2 542.2			0.002 1	
调整风量后 NO _x	-2.026 9	0.010 4	0	-0.001 8	2.089 5	0.009 3	GM(2, 1)
调整风量前 SO ₂	4.959 3	4.959 3	0.888 2	0.888 2	-2.993 6	0.162 1	GM(2, 1)
调整风量后 SO ₂	-155.767 7	0.095 9	168.703 6			0.030 3	

注: 未注明模型类型者均为 GM(1, 1)模型

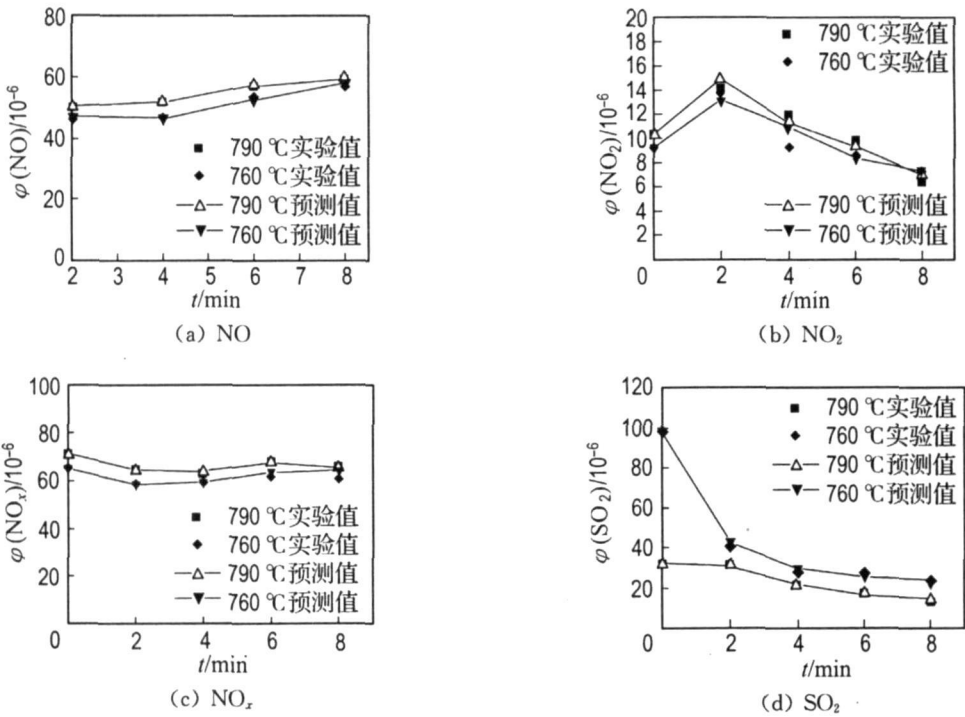


图 2 不同温度下实验值与预测值的比较

Fig 2 Comparison of experiments and prediction data in different temperature

大影响. 在以氧气作为气化介质时, NO₂ 的生成曲线表现出类似于抛物线的走势, 这对灰色预测带来了较大的误差, 达到 8.76% (图 3). 气化剂流量也直接对 NO_x 和 SO₂ 的排放产生影响. 图 4 是气化剂都为氧气, 流量依次为 1、3 和 6 m³/h 时

的 NO_x、SO₂ 灰色模型预测, 在气化反应中, 以氧气为气化剂, 可以大幅提高气化产气的热值, 但是, 如果氧气流量过大, 则有可能造成燃气品质的降低. 相应地, 氧气流量的变化可直接影响到污染物的生成浓度. 图 4 为气化过程生成的

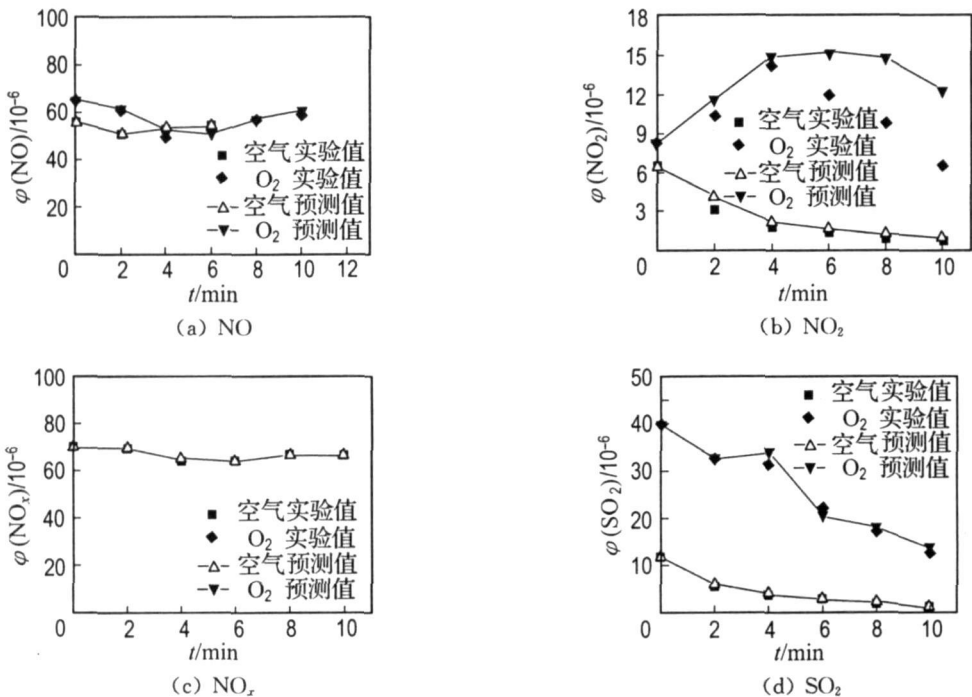


图 3 不同气化介质下实验值与预测值的比较

Fig 3 Comparison of experiments and prediction data in different gasification agent

污染物的灰色预测曲线, 平均相对误差均较小, 为了表示方便直观, 这里只画出了预测曲线. 在气化焚烧过程中, 气化产气的转化过程使用燃烧器对气化生成气体进行引燃, 实验表明, 当产气热值较高时, 气化产气完全可以达到自燃的状态, 这对气化技术的工业化应用非常重要. 图 5 为由燃烧

器风量调大前后的烟道中各种物质的浓度绘出的实验及预测曲线. 燃烧器风量的大小, 关系着单位时间提供给气化产气进行焚烧的氧量大小. 灰色模型预测结果与实际测量值非常接近, 预测效果良好. 所有模型参数及相对误差见表 3.

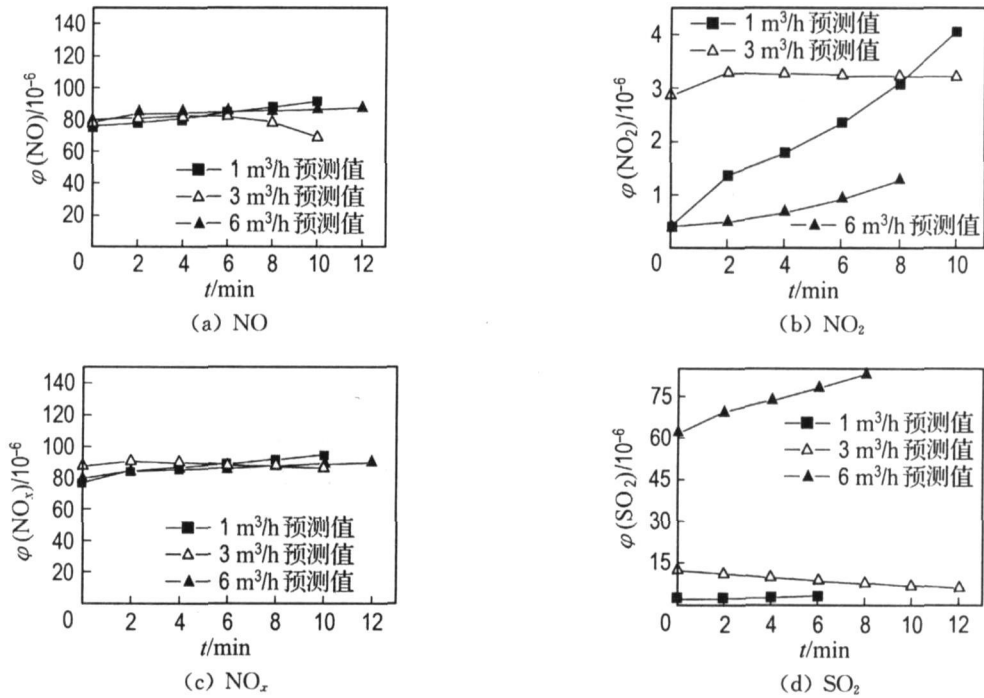


图 4 不同流量下 NO_x 与 SO₂ 的预测值

Fig 4 The prediction data of NO_x and SO₂ in different gas fluxes

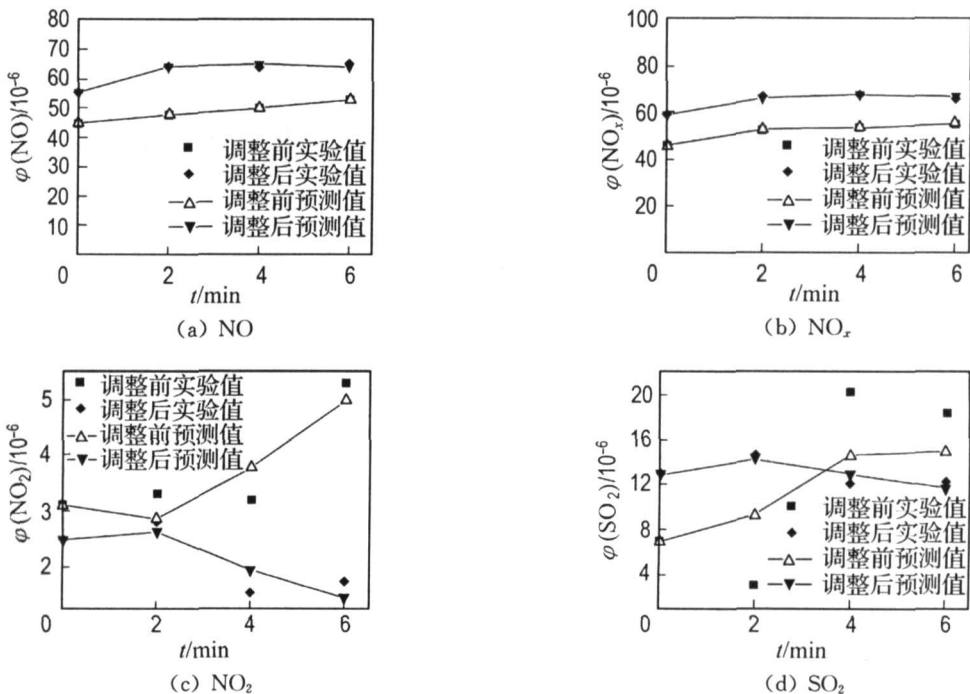


图 5 不同工作状态下实验值与预测值的比较

Fig 5 Comparison of experiments and prediction data in different work conditions

5 结 语

气化过程是一个比较复杂的反应过程, 涉及很多可变因素, 对其过程的模拟和数学表达还不成熟, 本文用灰色理论及方法对固体废弃物气化-焚烧两段处理中 NO_x 、 SO_2 排放规律建立了数学预测模型. 在全面考虑气化-焚烧两段处理过程中运行特性及气化-焚烧装置特性的同时, 灰色理论方法使气化-焚烧两段处理模型建立的复杂程度大大降低. 模型预测的相对误差较小, 预测效果理想.

将灰色理论及方法应用到固体废弃物气化-焚烧两段处理中 NO_x 、 SO_2 排放特性研究中, 为建立此过程中的 NO_x 、 SO_2 排放的模型进行了积极的探索, 随着气化实验的不断发展, 以及气化装置的日趋完善, 采用更为精确的实验数据建立灰色模型, 将会使模型的预测能力和通用性有更大的提高. 需要注意的是, 根据灰色模型应用的经验以及实际计算结果可见, 在灰色模型的预测过程中, 时间不能太长, 由于灰色模型适用于小样本时间, 在进行预测时应及时补充新的实测数据加以修正, 这样才能保证模型的实时性和准确性. 总之, 灰色模型不失为一种良好的建模工具.

参考文献:

[1] BJÖRKLUND A, MELAINA M, KEOLEIAN G.

Hydrogen as a transportation fuel produced from thermal gasification of municipal solid waste: an examination of two integrated technologies [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2001, 26(11): 1209-1221

- [2] DEMIRBAS A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals [J]. *Energy Conversion Manage*, 2001, 42(11): 1357-1378
- [3] 新井纪男. 燃烧生成物发生和抑制技术[M]. 赵黛青, 等译. 北京: 科学出版社, 2001
- [4] SCHUSTER G, LOFFLER G, WEIGL K, *et al.* Biomass steam gasification—an extensive parametric modeling study [J]. *Bioresour Technol* 2001, 77: 71-79
- [5] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- [6] 秦肖生, 曾光明. 非线性灰色模型在污染物总量预测中的应用[J]. 江苏环境科技, 2000, 13(4): 18-21
- [7] 高宁博, 李爱民, 李润东, 等. 灰色理论在垃圾气化过程中 NO_x 排放定量预测的应用[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2003, 20(2): 64-66
- [8] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [9] LIU G S, NIKSA S. Coal conversion submodels for design applications at elevated pressures. Part II. Char gasification [J]. *Progress in Energy and Combustion Sci* 2004, 30: 679-717

Gray prediction model of exhaust emission characteristics of solid waste in gasification and incineration treatment

GAO Ning-bo^{1,2}, LI Ai-min^{*1,2}

(1. Key Lab. of Ind. Ecol. and Environ. Eng., School of Environ. and Biol. Sci. and Technol., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2. School of Energy and Power Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: Due to the complexity of the production mechanism of NO_x and SO_2 in gasification treatment, it is difficult to predict the concentration of NO_x and SO_2 by kinetic model. Based on gray theory GM(1, 1) and GM(2, 1) model, gray prediction model is studied on the NO_x and SO_2 emission characteristics in gasification and incineration process. The methods of gray model are presented in detail. The parameters of model equations were computed according to the solid waste experimental data in different runs, including temperatures, gasification media and running conditions of combustor. The results show that computed values are in good agreement with experimental ones, and these gray models can precisely predict the processes of synthesis gases emission of gasification.

Key words: solid waste; gasification and incineration; NO_x and SO_2 ; gray prediction model