

广州地区生活垃圾干燥特性与动力学分析*

陈 姝^{1,2} 马晓茜¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 仲恺农业工程学院机电工程学院, 广州 510225)

摘要:以广州地区生活垃圾为对象在干燥箱内进行了模拟焚烧炉内干燥过程的实验研究。分析了温度对生活垃圾干燥特性的影响,采用实验数据对7种薄层干燥数学模型进行非线性拟合,获得了描述实验过程的最优干燥模型。结果表明:干燥温度越高,干燥时间越短,极值干燥速率越大。温度从100℃升高到160℃,干燥时间由322 min降至102 min,最大干燥速率由0.009 g/(g·min)升高到0.027 g/(g·min);Page, Modified page 和 Weibull Distribution 模型可较准确地描述实验过程;通过菲克扩散模型计算出实验范围内有效扩散系数从 $2.212 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 变化到 $8.044 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,由阿乌尼斯方程得出生活垃圾的活化能为27.035 kJ/mol。

关键词:生活垃圾 干燥特性 干燥模型 扩散系数 活化能

中图分类号: X705; TK09 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0208-06

引言

随着生活垃圾排放量日益增大,原有被广泛采纳的垃圾填埋法面临土地资源紧张、污染地下水资源、土壤资源等问题。减量化、无害化、资源化是有效处理垃圾的原则,垃圾焚烧发电逐渐被广泛认同。垃圾含水率是影响燃烧效率、点火难度、CO、NO_x和二噁英等有害气体排放、残余碳燃烧、火焰稳定性等主要因素之一^[1],目前依赖进口的垃圾焚烧设备应用于国内遭遇难以适应高水分垃圾品质、焚烧效率降低等问题。

国内外学者对食品和农林产品的干燥过程进行了大量的实验研究,奠定了薄层物料干燥性能的研究方法和动力学分析方式^[2-7],以此为基础,很多学者通过实验分析和数值模拟手段,研究了白菜茎、稻谷、湿生活用纸、土豆片、湿木块和果蔬皮等生活垃圾单一组分在马弗炉、炉排固定床等焚烧炉内的干燥过程,探索了加热温度对干燥过程的影响规律并进行相应的机理分析,获取了有效扩散系数和活化能等基础数据^[8-16]。而关于生活垃圾混合物干燥过程的研究鲜有报道。

本文以广州地区生活垃圾混合物为研究对象,模拟焚烧炉内干燥工况,研究不同温度下的干燥过程,为进一步研究生活垃圾混合物的干燥特性积累

数据,为改进和设计适于当地生活垃圾热值和含水率的焚烧发电设备提供参考。

1 实验方法与材料

1.1 实验设备和方法

实验装置如图1所示,用于模仿焚烧炉固定床内的干燥过程。实验样品在SXZ-5-12型鼓风干燥箱内实现加热和保温,箱体内温度由K型热电偶采集并由干燥箱温度调节器控制,干燥箱下部钻孔以置入JJ600型精密电子天平的托盘,电子天平通过数据线与计算机相连接。生活垃圾样品铺薄层置于托盘上,干燥过程中电子天平将样品质量减小数

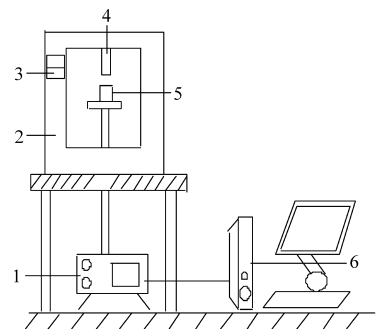


图1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1. 精密电子天平 2. 干燥箱 3. 温度调节显示器 4. 热电偶
5. 样品 6. 计算机

收稿日期: 2013-08-31 修回日期: 2013-09-27

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201500)、广东省大气环境与污染控制重点实验室资助项目(2011A060901011)、广州市重大科技专项资助项目(2008-A1-D0011)和广东高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(LYM09092)

作者简介: 陈姝, 博士生, 仲恺农业工程学院副教授, 主要从事生活垃圾燃烧发电技术研究, E-mail: weilachen@163.com

通讯作者: 马晓茜, 教授, 博士生导师, 主要从事高效低污染燃烧研究, E-mail: epqxma@scut.edu.cn

据实时传送到计算机并直接显示于屏幕上。

因实际焚烧炉运行稳定,炉排运动速度缓慢,来自炉拱和烟气的辐射热、一次风的热量稳定,所以可假设垃圾在炉内干燥阶段温度基本恒定,因而设定实验温度分别为 100、120、140、160℃,维持干燥箱内鼓风速率不变。实验时待干燥箱内温度达到设定值,将样品置于托盘中,随即关闭干燥箱门,启动数据采集系统,每 30 s 采集一次数据,直至样品质量维持恒定。

1.2 实验材料

实验对象取自广州城市生活垃圾,采用点面结合的方式确定取样点,对实验样品由人工分选,用四分法取样。样品采集后在分选坪上通过手工分拣方式对垃圾进行分类称重,煤炭、渣土用 15 mm 网目分选筛筛分,分类组成如表 1 所示。实验生活垃圾工业分析和元素分析的送检分析结果如表 2、表 3 所示。

表 1 广州城市生活垃圾的组成

Tab.1 Composition of Guangzhou MSW %

有机物质量分数						无机物质量分数	
厨余 尘土	木竹	织物	塑料 橡胶	纸类	果叶茎	金属	砖瓦 陶瓷
54.43	7.08	7.70	12.59	8.96	7.14	0.30	1.80

表 2 广州城市生活垃圾的工业分析

Tab.2 Proximate analysis of MSW

容积 密度/ (kg·m ⁻³)	含水 率/ %	灰分和可燃物质量 分数/%		发热量/(kJ·kg ⁻¹)	
		干基灰分	干基可 燃物	干基高位 发热量	湿基低位 发热量
300.5	49.38	34.00	66.00	14 241	5 632

表 3 广州城市生活垃圾的元素分析(干基质量分数)

Tab.3 Elemental analysis of MSW %

C	H	O	N	S	Cl
32.98	3.345	25.26	1.165	0.085	0.69

1.3 生活垃圾含水率

生活垃圾含水率计算公式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_R ——生活垃圾含水率, %

M_0 ——初始干基含水率, g/g

M_e ——平衡时干基含水率, g/g

M_t ——实时干基含水率, g/g

与 M_0 和 M_t 相比较, M_e 的值非常小以至于可以被忽略,因此式(1)可简化为

$$M_R = M_t / M_0 \quad (2)$$

干燥速率 D_R (g/(g·min)) 可表示物质中水分的丢失程度,其表达式^[17]为

$$D_R = -(M_{(t+\Delta t)} - M_t) / \Delta t \quad (3)$$

式中 $M_{(t+\Delta t)}$ ——(t + Δt)时刻干基含水率, g/g

1.4 干燥模型

薄层干燥模型一般分为理论模型、半理论模型、半经验模型和半理论半经验模型^[17],拟合薄层干燥实验数据,后 3 种较常用,如表 4 所示。

表 4 薄层干燥数学模型

Tab.4 Thinner-layer drying mathematic models

类型	模型	表达式
半理论型	Two-term	$M_R = A \exp(-k_1 t) +$
	exponential ^[18]	$B \exp(-k_2 t)$
半经验型	Lewis ^[19]	$M_R = \exp(-kt)$
	Page ^[20]	$M_R = \exp(-(kt)^n)$
	Modified page ^[20]	$M_R = A \exp(-(kt)^n)$
经验型	Weibull distribution ^[9]	$M_R = A - B \exp(-(kt)^n)$
	Logarithmic ^[21]	$M_R = A + B \exp(-kt)$
	Quadratic equation ^[22]	$M_R = A + Bt + Ct^2$

采用软件 Origin 对薄层干燥模型进行非线性拟合,决定系数 R^2 和方差 γ^2 用于选出最优干燥模型, R^2 越接近于 1, γ^2 越小则拟合结果越能准确地描述实际干燥过程。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{Rpre,i} - M_{Rexp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{M}_{Rpre} - M_{Rexp,i})^2} \quad (4)$$

$$\gamma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{Rpre,i} - M_{Rexp,i})^2}{N - P} \quad (5)$$

式中 $M_{Rpre,i}$ ——模拟值 $M_{Rexp,i}$ ——实验值

N ——实验测点个数 P ——模型参数个数

2 实验结果分析

2.1 干燥特性曲线

图 2 为广州地区生活垃圾在不同干燥温度下含水率随干燥时间的变化关系。可见,干燥温度为 100℃ 时,干燥时间达 322 min;干燥温度升至 120℃,所需干燥时间缩短至 169 min;干燥温度达 160℃,干燥时间降至 102 min。干燥温度越低,将样品干燥至相同含水率所需干燥时间越长。对于相同干燥温升,高温区引起干燥时间的减少量则在降低。这是由于干燥温度越高,传热温差越大,物料表面水分蒸发速度和内部水分向表面迁移速度越快,导致干燥时间越短;随着干燥温度的升高,表面水分蒸发以致物料表面紧密,引起内部水分向外部迁移难度增大,因此提升干燥温度促进干燥时间减少的效果在下降。不同温度区间曲线间隔没有随着温度呈现有规律的变化,最大曲线间隔出现在 100℃ 和 120℃ 两条

干燥曲线之间,说明在此温度区间,生活垃圾含水率变化大,干燥效果明显(图2)。最小曲线间隔并非在140℃和160℃两条干燥曲线之间,而是出现于120℃和140℃之间。说明干燥温度越高,物料表面越致密导致含水率变化越不明显;同时可推测由于生活垃圾成分复杂多样,水分的蒸发过程体现出不同于单一物料的不稳定性。但随着干燥温度的提高,曲线间隔的总体趋势在缩小。

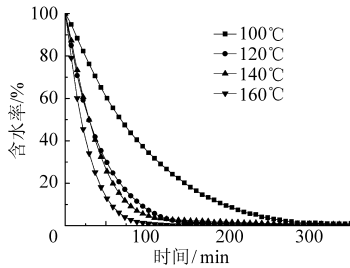


图2 不同温度下生活垃圾含水率随时间变化曲线

Fig. 2 Effect of temperature on moisture ration of MSW

图3为不同温度下广州地区生活垃圾干燥速率随时间变化曲线。可知,在干燥初始阶段,干燥速率迅速升至最大值后逐渐下降,干燥温度越高,最大干燥速率越大,之后下降幅度也越大,干燥温度由100℃升至160℃,最大干燥速率由0.009 g/(g·min)升至0.027 g/(g·min),上升达3倍。干燥初始阶段,干燥温度对干燥速率的影响比较大,随着干燥进行到中后期,干燥温度的影响逐渐减弱。原因在于干燥初期,物料表面孔隙较大,干燥温度是水分扩散的主要驱动力,而随着水分不断扩散促进物料表面孔隙减小、硬化效应明显,致使进一步水分扩散难度增大,导致干燥温度驱动水分扩散的效果减小。

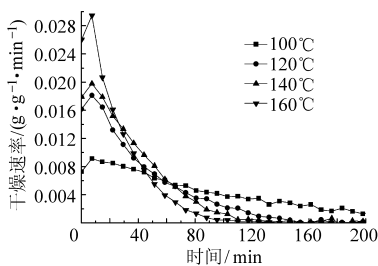


图3 不同温度下生活垃圾干燥速率随时间变化曲线

Fig. 3 Effect of temperature on drying rate of MSW as function of time

图4为干燥速率随含水率的变化曲线。干燥温度为100℃时干燥过程的升速段、恒速段和降速段都很明显,随着干燥温度增加,恒速段逐渐消失;当干燥温度升至160℃时,曲线中恒速段几乎消失,由升速段直接过渡到降速段。干燥速率在干燥初期升至极大值后迅速下降,且随着温度的升高最大干燥速率对应的含水率在减小。原因在于升速段发生在干燥初始阶段,主要是样品表面水分蒸发过程,时间

很短,样品内水分梯度大且变化剧烈,促使干燥速率迅速攀升至极大值,干燥温度升高促使样品内、外温差增大,驱动水分蒸发的深入进行;恒速段样品表面水分蒸发速度和内部水分向外扩散速度相同,只发生在低温干燥区;降速段样品外部组织已经向内收缩,以内部水分扩散蒸发为主,因此干燥速率逐渐下降,这个过程对干燥效果起主导作用。

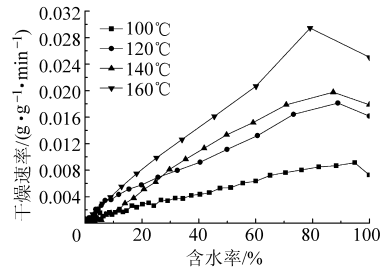


图4 不同温度下生活垃圾干燥速率随含水率变化曲线

Fig. 4 Effect of temperature on drying rate of MSW as function of moisture content

2.2 干燥模型拟合

干燥模型对实验数据的拟合结果如表5所示。可见,Page、Modified page和Weibull distribution 3个模型的拟合结果 R^2 均大于或接近0.999, γ^2 在 10^{-5} ~ 10^{-6} 数量级,拟合度最优。同时可看出,随着干燥温度从100℃逐渐升高,拟合度有所下降,至140℃时最低,随着温度提升,拟合度又逐渐升高。

图5~7分别表示Page、Modified page和Weibull distribution 3个模型的拟合含水率曲线。可见,这3个模型都可以比较准确地模拟实验干燥过程,模型方程的常数值如表6所示。

2.3 扩散系数和活化能

对于长时间干燥过程,假设干燥物料内部水分均匀并可忽略外部阻力,菲克定律可用于计算干燥过程中不同温度下生活垃圾内水分的扩散系数^[23]

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / (4L^2)) \quad (6)$$

式中 D_{eff} ——有效扩散系数, m^2/s

L ——干燥物料厚度的一半, m

式(6)两边取对数后转换为线性方程

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (7)$$

扩散系数 D_{eff} 可由斜率表达式计算得出

$$S_{slope} = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (8)$$

图8为不同实验温度生活垃圾 $\ln M_R - t$ 线性关系图。对应求出在不同温度下拟合决定系数和扩散系数如表7所示。可见干燥温度越高,水分有效扩

表 5 生活垃圾干燥模型拟合结果
Tab. 5 Fitting results of MSW with drying models

模型	温度/°C							
	100		120		140		160	
	γ^2	R^2	γ^2	R^2	γ^2	R^2	γ^2	R^2
Two-term exponential	8.566×10^{-5}	0.998 9	1.489×10^{-5}	0.999 7	1.629×10^{-4}	0.996 3	2.271×10^{-5}	0.999 3
Lewis	3.919×10^{-4}	0.994 5	3.622×10^{-5}	0.999 1	2.394×10^{-4}	0.994 3	8.075×10^{-5}	0.997 5
Page	5.163×10^{-5}	0.999 3	1.683×10^{-5}	0.999 6	7.275×10^{-5}	0.998 3	3.974×10^{-6}	0.999 9
Modified page	4.097×10^{-5}	0.999 3	1.690×10^{-5}	0.999 6	7.346×10^{-5}	0.998 3	4.007×10^{-6}	0.999 9
Weibull distribution	4.544×10^{-5}	0.999 4	1.713×10^{-5}	0.999 6	3.855×10^{-5}	0.999 1	4.030×10^{-6}	0.999 9
Attenuaion Index	1.605×10^{-4}	0.997 8	2.896×10^{-5}	0.999 3	1.664×10^{-4}	0.996 1	5.821×10^{-6}	0.998 2
Quadratic equation	2.980×10^{-3}	0.959 2	1.126×10^{-2}	0.737 1	1.342×10^{-2}	0.688 5	1.463×10^{-2}	0.554 8

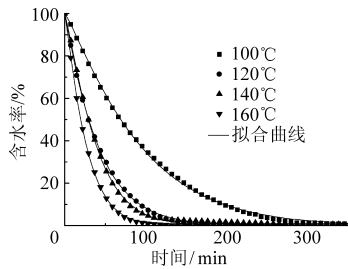


图 5 Page 模型拟合 $M_R - t$ 曲线

Fig. 5 Fitting $M_R - t$ curves of MSW with Page model

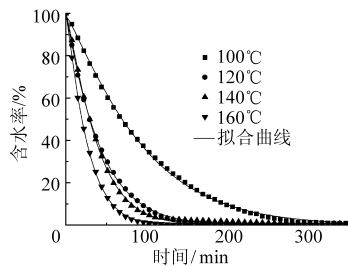


图 6 Modified page 模型拟合 $M_R - t$ 曲线

Fig. 6 Fitting $M_R - t$ curves of MSW with Modified page model

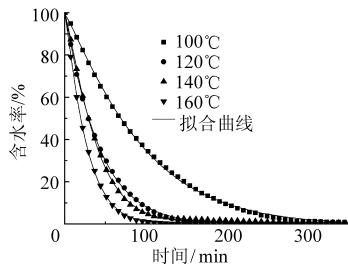


图 7 Weibull distribution 模型拟合 $M_R - t$ 曲线

Fig. 7 Fitting $M_R - t$ curves of MSW with Weibull distribution model

散系数越大,因此干燥时间随着干燥温度的升高而减少。

阿乌尼斯方程可建立有效扩散系数和活化能之间的关系,用于求解活化能^[23]

$$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a / (R_g T)) \quad (9)$$

式中 D_0 ——指前因子, m^2/s

E_a ——活化能, kJ/mol

表 6 生活垃圾干燥模型模型常数

Tab. 6 Constants of MSW with drying models

模型	温度/°C	常数值	
Page	100	$k = 0.00533$	$n = 1.150$
	120	$k = 0.0198$	$n = 1.051$
	140	$k = 0.0132$	$n = 1.175$
	160	$k = 0.0237$	$n = 1.133$
Modified page	100	$A = 0.989$	$k = 0.00485$ $n = 1.167$
	120	$A = 0.997$	$k = 0.00194$ $n = 1.054$
	140	$A = 1.004$	$k = 0.0135$ $n = 1.171$
	160	$A = 0.999$	$k = 0.0235$ $n = 1.135$
Weibull distribution	100	$A = -0.00402$ $B = -0.997$	$k = 0.00530$ $n = 1.147$
	120	$A = -0.000284$ $B = -0.998$	$k = 0.0196$ $n = 1.052$
	140	$A = -0.00700$ $B = -0.993$	$k = 0.0122$ $n = 1.202$
	160	$A = -0.000210$ $B = -0.999$	$k = 0.0235$ $n = 1.137$

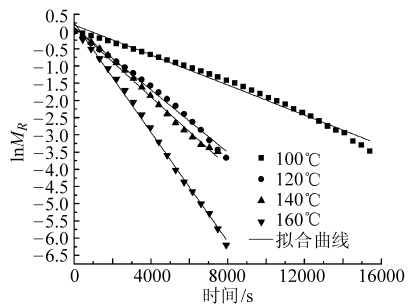


图 8 $\ln M_R - t$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship figure between $\ln M_R - t$

R_g ——通用气体常数, $kJ/(mol \cdot K)$

T ——温度, K

式(9)两边取对数后,得

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R_g T} \quad (10)$$

表7 生活垃圾拟合相关系数值和扩散系数值

Tab.7 R^2 and D_{eff} of MSW

温度/°C	R^2	$D_{eff}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
100	0.987	2.212×10^{-9}
120	0.992	4.600×10^{-9}
140	0.995	5.122×10^{-9}
160	0.997	8.044×10^{-9}

可见 $\ln D_{eff}$ 和 $1/T$ 呈线性关系,其斜率 $-\frac{E_a}{R_g}$ 可确定活化能值,计算出实验生活垃圾的干燥活化能为 $27.035 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。这个结果接近生活垃圾中高水分组分桔皮 ($25 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)^[8]、土豆片 ($23.995 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)和西瓜皮 ($22.39 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)^[10]等,远低于易燃组分纸屑 ($113 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)和布屑 ($150 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)^[8]。

3 结论

(1) 干燥温度的升高可减少干燥时间,但对干燥时间的影响逐渐下降; $\ln M_R - t$ 曲线间隔总体变化趋势是随着干燥温度的升高而减小。

(2) 干燥速率在干燥初始阶段迅速升至极大值后降低;干燥温度 100°C 升至 160°C 对应最大干燥速率由 $0.009 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 升至 $0.027 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{min})$;干燥温度越高,最大干燥速率对应含水率越低。

(3) Page、Modified page 和 Weibull distribution 模型对实验干燥过程拟合决定系数 R^2 均大于 0.9983 ,方差 γ^2 介于 $1.683 \times 10^{-5} \sim 3.974 \times 10^{-6}$ 之间,拟合度最优。

(4) 干燥温度 $100 \sim 160^\circ\text{C}$,广州地区生活垃圾水分有效扩散系数为 $2.212 \times 10^{-9} \sim 8.044 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$;生活垃圾活化能为 $27.035 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

参 考 文 献

- 1 Yang Y B, Goh Y R, Zakaria R, et al. Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed[J]. Waste Management, 2002,22(4):369-380.
- 2 Meziane S, Mesbahi N. Determination of moisture diffusivity and activation energy in thin layer drying of olive pomace [J]. International Journal of Food Engineering,2012,8(3):1556-3758.
- 3 Nishiyama Y, Cao W, Li B M. Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3):272-279.
- 4 Bains R, Langrish T A G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1):330-343.
- 5 Roberts J S, Kidd D R, Padilla-Zakour O. Drying kinetics of grape seeds [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 460-465.
- 6 何新益,程莉莉,刘金福,等.苹果片变温压差膨化干燥特性与动力学研究[J].农业机械学报,2012,43(5):130-135.
He Xinyi, Cheng Lili, Liu Jinfu, et al. Drying characteristics and dynamics of apple slices by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(5):130-135. (in Chinese)
- 7 关志强,王秀芝,李敏,等.荔枝果肉热风干燥薄层模型[J].农业机械学报,2012,43(2):152-158.
Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):152-158. (in Chinese)
- 8 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 and Technology,2008,48(5):824-827. (in Chinese)
- 9 陈梅倩,陈允轩,贾力,等.马弗炉中高水分城市生活垃圾干燥过程的试验[J].环境科学学报,2008,28(5):951-955.
Chen Meiqian, Chen Yunxuan, Jia Li, et al. Experimental study on the drying of the high moisture MSW [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,28(5):951-955. (in Chinese)
- 10 陈梅倩,张衍国,蒙爱红,等.典型垃圾基元高温干燥过程的动力学特性[J].工程热物理学报,2010,31(1):133-135.
Chen Meiqian, Zhang Yanguo, Meng Aihong, et al. Kinetic analysis of a drying process of typical MSW matrix at high temperature[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010,31(1):133-135. (in Chinese)
- 11 Chen M Q, Chen Y X, Jia L. Kinetic analysis on the drying of high moisture MSW[J]. Heat Transfer—Asian Research,2009,38(4):216-222.
- 12 Chen M Q, Jia L, Zhang T T. Evaluation of heat transfer coefficient during drying of typical municipal solid waste matrices with significant shrinkage at medium temperature[J]. Experimental Heat Transfer,2012,25(3):238-253.
- 13 Chen M Q, Xu X X, Jia L, et al. Analysis of moisture migration of typical MSW matrices at medium temperature [J]. Chemical Engineering Communications, 2013, 200(5):628-637.
- 14 宋莉媛.城市生活垃圾干燥过程的数值模拟研究[D].北京:北京交通大学,2008.
Song Liyuan. Numerical simulation study of the drying process of MSW [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2008. (in

Chinese)

- 15 孙振刚, 马晓茜, 卢苇. 农产品加工剩余物焚烧过程的干燥热解特性研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 49-51.
Sun Zhen'gang, Ma Xiaoqian, Lu Wei. Study on drying and pyrolysing characteristics in a burning process of agricultural residues [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 49-51. (in Chinese)
- 16 卢苇, 马晓茜. 热带城市垃圾典型组分的热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(3): 357-360.
Lu Wei, Ma Xiaoqian. Pyrolysis of typical compositions of tropical municipal waste [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(3): 357-360. (in Chinese)
- 17 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(1): 51-56.
Wang Baohe. Review of drying kinetics [J]. Drying Technology & Equipment, 2009, 7(1): 51-56. (in Chinese)
- 18 Sharaf-Eldeen Y I, Blaisdell J L, Hamdy M Y. A model for ear corn drying [J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(5): 1261-1265.
- 19 Lewis W K. The rate of drying of solid materials [J]. Industrial Engineering Chemistry, 1921, 13(5): 427-432.
- 20 Babalis S J, Papanicolaou E, Kyriakis N, et al. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(2): 205-214.
- 21 Pathak P K, Agrawal Y C, Singh B P N. Thin-layer drying model for rapeseed [J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(6): 2505-2508.
- 22 Senadeera W, Bhandari B R, Young G, et al. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(3): 277-283.
- 23 Madamba P S, Driscoll R H, Buckle K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices [J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75-97.

Drying Characteristics and Kinetic Analysis on Municipal Solid Waste in Guangzhou

Chen Shu^{1,2} Ma Xiaoqian¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. College of Electromechanical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Technology, Guangzhou 510225, China)

Abstract: A series of drying experiments on municipal solid waste (MSW) in Guangzhou were conducted in air dry oven, simulating the drying process in incineration. The influence of temperature on drying characteristics of MSW was analyzed. Seven different drying models were fitted to the experimental data as comparing the correlation coefficient and chi-squared value. The optimal drying models were obtained to predict experimental drying process. The results showed that drying time was shorter and the maximum drying rate was higher with the higher drying temperature. The drying time decreased from 322 min to 102 min and the maximum drying rate increased from 0.009 g/(g·min) to 0.027 g/(g·min) as the drying temperature rising from 100°C to 160°C. The experimental drying process could be described accurately by page, Modified page and Weibull distribution models. The effective diffusivity of MSW changed from $2.212 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ to $8.044 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ with fick's diffusivity model. The MSW activation energy of 27.035 kJ/mol was determined through Arrhenius equation.

Key words: Municipal solid waste Drying characteristics Drying model Diffusivity Activation energy