城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究

吴亚娟，刘红梅，陆胜勇，严建华，李晓东*
(浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室，杭州 310027)

摘要： 对典型城市生活垃圾组分(废纸板、纺织物、瓜果皮和竹木)进行低温干燥实验，研究其在不同温度(40、50、60、70 和 80℃)下的干燥曲线、薄层干燥模型、有效水分扩散系数和干燥活化能，并构建了低温干燥模型. 结果表明，各组分的干燥速率随温度升高不断增加，但增加的幅度逐渐下降；Modified Page 模型能准确地描述 4 种组分水分比 >25% 时的干燥特性；通过 Fick 第二定律求得废纸板、纺织物、瓜果皮和竹木这 4 种垃圾组分的有效水分扩散系数，其值分别为 8.24×10^{-8} ~ 23.67×10^{-8}、7.73×10^{-8} ~ 12.56×10^{-8}、3.57×10^{-8} ~ 14.18×10^{-8} 和 6.51×10^{-8} ~ 23.84×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$；通过 Arrhenius 方程获得 4 种垃圾组分水分扩散的活化能依次为 25.26、10.75、32.16 和 29.49 $kJ\cdot mol^{-1}$；对实际生活垃圾进行相似的干燥实验，发现 Modified Page 模型也可以很好地模拟实际生活垃圾的干燥过程，计算得到其有效扩散系数为 6.78×10^{-8} ~ 18.65×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$，干燥活化能为 22.36 $kJ\cdot mol^{-1}$.

关键词： 城市生活垃圾；有效水分扩散系数；干燥活化能；低温干燥
中图分类号： X705 **文献标识码：** A **文章编号：** 0250-3301(2012)06-2110-08

Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis

WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, YAN Jian-hua, LI Xiao-dong
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The drying behaviors of four typical municipal solid waste (MSW) components (including waste paper, textile, pericarp and wood) were studied under low temperature. Effects of temperature on drying characteristic, thin layer drying models, effective moisture diffusion coefficient and activation energy were investigated in this paper. Experimental results showed that with increasing temperature, the drying rate increased, but the added value reduced gradually. Four mathematical models were used to simulate drying curves of MSW components. Modified Page model was found to give better predictions when moisture content was more than 25%. Based on the Fick's second law, the effective moisture diffusion coefficient for waste paper, textile, pericarp and wood were 8.24×10^{-8}–23.67×10^{-8}, 7.73×10^{-8}–12.56×10^{-8}, 3.57×10^{-8}–14.18×10^{-8} and 6.51×10^{-8}–23.84×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$. The activation energy determined through Arrhenius equation were 25.26, 10.75, 32.16 and 29.49 $kJ\cdot mol^{-1}$, respectively. Carried on the similar dry experiments to practical MSW, It was found that Modified Page model was also suitable for simulating the drying process of practical MSW, its effective moisture diffusion coefficient and activation energy were 6.78×10^{-8}–18.65×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$ and 22.36 $kJ\cdot mol^{-1}$, respectively.

Key words: municipal solid waste(MSW); effective moisture diffusion coefficient; activation energy; low temperature drying

城市生活垃圾焚烧处理具有减容减量的优点，同时还可以回收余热，符合垃圾处理的减量化、无害化、资源化原则. 但是我国城市生活垃圾品位差，具有含水率高、成分复杂和热值低等特点. 垃圾含水率一般为55%~65%，特别是南方城市在夏季高达70%. 高含水率会对城市生活垃圾的焚烧处理产生不利影响，主要表现为：大量水分汽化吸热降低燃烧室温度，增加着火热；同时也增加了烟气中的水蒸气分压，使烟气露点温度升高，对低温设备造成腐蚀；此外，水分还会影响焚烧污染物的排放. 章骥等[1]研究了垃圾焚烧时水分对二噁英总量及毒性当量的影响，发现水分整体上对二噁英从头合成具有促进作用. 如果在焚烧之前对垃圾进行干燥预处理，降低水分，则可以改善上述不利影响.

目前对干燥的研究主要集中在食品、农作物等[2~3]方面，干燥目的是为了除去物质内的水分从而便于储存. 因城市生活垃圾成分复杂、含水率高，且每种成分的物理、化学性质迥异，从而使垃圾的干燥过程不同于食品、农作物等单一组分的干燥. 文献[4~5]利用马弗炉研究了类焚烧炉条件下土豆块和菜帮的干燥过程，并得到相应的干燥动力学参数. 陈梅倩等[6]研究了城市生活垃圾基元在 100 ~

收稿日期：2011-08-17；修订日期：2011-10-14
基金项目：国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB201500)
作者简介：吴亚娟(1987~)，女，硕士研究生，主要研究方向为固体废弃物处理技术，E-mail：wuyajuan@zju.edu.cn
* 通讯联系人，E-mail：lixd@zju.edu.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

200℃下的干燥过程,发现增大垃圾基元的比表面积、提高干燥温度均可以提高干燥速率. 蒙爱红等[7]分析了部分垃圾组分在恒温条件下的失重情况,研究了垃圾组分在炉排-循环流化床复合垃圾焚烧炉干燥床上的干燥过程. 目前,对城市生活垃圾的干燥研究大部分集中在焚烧炉条件下,干燥温度较高,很少看到关于垃圾低温干燥特性的报道.

如果利用外界热源对垃圾进行高温干燥,无疑会增加垃圾处理的投资和成本,德国的 Herhof 公司开发了机械生物处理(MBT)技术,该技术利用垃圾发酵产生的热能实现低温(<80℃)干燥[8],经过为期 1~2 周的堆酵后,垃圾最终含水量低于 15%,可以有效提高热值. MBT 技术不仅具有低能耗、环保等优点,还可以改变目前垃圾焚烧需要大量辅助燃料的现状,是实现城市生活垃圾大规模干燥的较好途径,这种技术在欧洲已经商业化应用,取得良好效果. 研究垃圾在低温(<80℃)条件下的干燥特性,可以为机械生物处理过程中选择合理参数提供参考,以达到提高干燥效率,减少处理周期的目的.

针对城市生活垃圾的特性,本研究首先选取废纸板、纺织物、竹木和瓜果皮等典型垃圾组分,利用低温热干燥实验研究了这 4 种垃圾组分的干燥特性,分析了温度对干燥特性的影响,并引入薄层干燥模型对垃圾组分的干燥过程进行模拟和实验验证; 分析比较得到一种适用于垃圾低温干燥的模型及其有效水分扩散系数、干燥活化能; 并运用相似的实验方法研究了实际生活垃圾的干燥特性及动力学模型,以期为城市生活垃圾的低温干燥提供借鉴.

1　材料与方法

1.1　垃圾样品

根据城市生活垃圾的组成特性,可将其分为废纸、纺织物、厨余、竹木、塑料、橡胶、金属、泥土和玻璃等九大类,其中厨余含量最高,达到 50% 以上; 废纸、纺织物的含量呈逐年上升趋势. 纸张、纺织物、厨余和竹木的含水率较高. 基于研究目的,首先选取废纸板、瓜果皮(苹果皮: 西瓜皮 = 1∶1)、竹木及纺织类作为典型垃圾组分,分别研究了各组分的干燥特性,并在相同实验条件下,对实际生活垃圾混合样品进行干燥实验研究.

实验所用生活垃圾样品分为两部分,一部分为典型垃圾组分,包括废纸板、瓜果皮、竹木及纺织类,经测定其初始含水率分别为 55%、80%、50% 和 60%(烘干法测定,105℃,烘 12 h); 另一部分为实际生活垃圾的混合样品,采自杭州市某小区的混合收集站,经人工破袋后混匀备用,垃圾的基本物理组成(湿质量分数)为: 厨余 42%、废纸 15%、纺织物 13%、竹木 6%、塑料 14%、泥土 10%,经测定初始含水率约为 58%. 将两部分实验样品破碎至粒径约 10 mm,每次取等量(约为 20 g)样品进行实验.

1.2　实验装置

如图 1 为湿物料低温干燥实验装置示意图,主要由恒温干燥箱(40 cm×30 cm×30 cm)、电子天平(BSA224S-CW,赛多利斯科学仪器有限公司)、电脑、高纯氮气(纯度 > 99.999%)、质量流量计(D07 系列,北京七星华创电子股份有限公司)等组成; 热电阻、温控仪和加热板组成的反馈回路用于维持干燥箱内温度恒定,位于干燥箱中央的电子天平通过数据线与电脑连接,使用 Wedge 软件记录样品的实时质量. 实验样品(约 20 g)被均匀分散以 3 cm 厚度平铺于直径 10 cm 的石英托盘中,通过设定控温装置,使干燥箱内温度从室温(25℃)开始,以 5 ℃·min^{-1}的升温速率分别升至 40、50、60、70 和 80℃,控制质量流量计使通入干燥箱内的氮气流量恒定(600 mL·min^{-1}),由湿度控制器监测干燥箱内的湿度. 每 60 s 采集一次数据,为减少随机和偶然误差,所有实验均进行了 3 次重复. 分析实验数据,绘制样品的失水率曲线、干燥速率曲线,利用数学模型对各样品的干燥过程进行计算和分析.

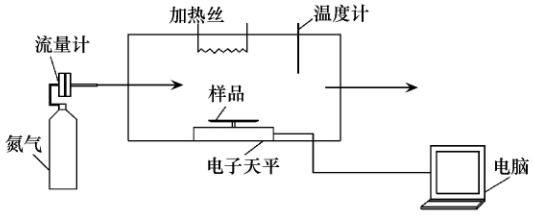

图 1　低温热干燥实验装置示意

Fig. 1　Experimental equipments of low temperature drying

1.3　分析方法

不同时刻样品的水分比(MR)计算公式如下:

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

式中,MR 为物料水分比(%),M_t 为干燥过程中单位干物质含水质量(g·g^{-1}),M_0 为初始单位干物质中含水质量(g·g^{-1}),M_e 为干燥平衡时单位干物质中含水质量(g·g^{-1}),与 M_t、M_0 相比,M_e 的值很小,可以忽略. 因此,上式可以简化为:

$$MR = M_t/M_0 \times 100\% \quad (2)$$

质量干燥速率是指单位质量无水物料、单位时

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间内蒸发的水量,其计算公式如下:

$$DR = \frac{dW'}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

式中,DR 为干燥速率 [g·(g·min)$^{-1}$],W'为汽化的水分量(g),t 为干燥时间(min),$M_{t+\Delta t}$为 $t + \Delta t$ 时刻单位干物料中的含水量(g·g^{-1}).

2 结果与分析

2.1 4 种垃圾组分的干燥特性

2.1.1 温度对干燥过程的影响

图 2 是废纸板、纺织物、竹木和瓜果皮分别在 40、50、60、70 和 80℃下干燥时得到的失水率曲线. 可以看出,4 种垃圾组分失水率曲线的总体变化趋势相似,温度越高,干燥到相同水分比所需的时间就越短,相应的干燥速率也越大,原因是温度越高,空气与物料之间的湿度差也会越大,使传热动力(温度梯度)、传质动力(湿度梯度)增加,从而导致干燥速率上升. 由图 2 还可看出,各条干燥曲线之间的间隔并不相等,当温度从 40℃升至 50℃时,干燥曲线间的间隔要明显大于其他温度间隔,随着温度的上升,曲线间的间隔逐渐变小,这说明在干燥过程中即使增加相同热量,所取得的干燥效果也并不相同,低温区干燥温度对垃圾干燥过程的影响较大,而高温区对其影响较小. 以废纸板为例,当温度从 40℃升至 50℃时,干燥到恒重所需时间从 448 min 降至 218 min,缩短了 51.3%,而当温度从 50℃升至 80℃时,干燥时间仅缩短了 32.1%. 因此,在干燥过程中,仅靠提高温度是不经济的,还应该辅助其他方法,如增加通风量、减小粒径等来增强干燥效果.

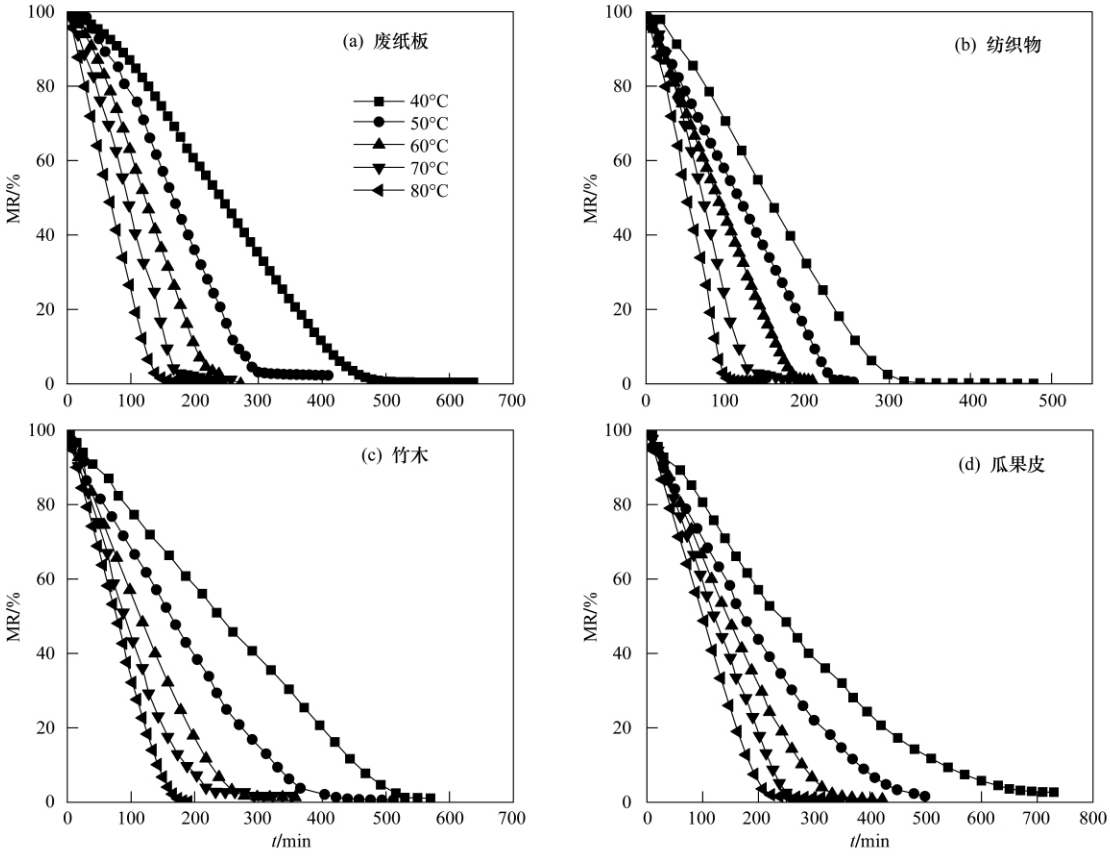

图 2 不同温度下各垃圾组分的失水率曲线

Fig. 2 Moisture content curves of MSW matrix at different temperatures

图 3 以 40℃为例,分析了废纸板、纺织物、竹木和瓜果皮干燥速率随含水率的变化曲线. 从中可以看出,在实验初始阶段,干燥速率逐渐加快,原因是此时物料湿度较大,物料表面被自由水湿润,随着干燥箱内温度从室温上升到恒定温度(40℃),水分的蒸发速率不断增加; 在经历短暂的加速过程后,干燥进入恒速阶段,此时物料中水分的蒸发与干燥箱内气体的吸湿达到动态平衡,干燥速率达到最大值,从图 3 中可以看出,恒速阶段纺织物的干燥速率最大,约为 0.009 8 g·(g·min)$^{-1}$,瓜果皮的干燥速率

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

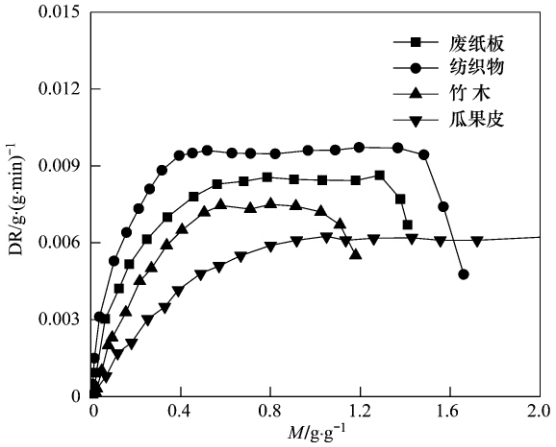

图 3　40℃下 4 种垃圾组分的干燥速率曲线

Fig. 3　Dry rate of four components of MSW at 40℃

最小，约为0.005 7 g·(g·min)$^{-1}$，说明在同一干燥温度下，纺织物的干燥比瓜果皮容易；当含水率降到一定程度后，垃圾内部湿度不断减小，垃圾表面的水分不再形成连续的湿润薄膜，导致加热蒸发层向垃圾内部延伸，蒸发阻力增加，干燥速率减慢，干燥进入减速阶段.

2.1.2　干燥曲线模型分析

建立薄层干燥模型对探索干燥规律、预测不同工艺下的干燥参数具有重要意义. 物料干燥是一个复杂的非稳态传热、传质过程，它不仅受干燥条件影响，而且随物料种类、结构、物理化学性质的不同而有所差异. 许多学者通过实验研究，总结了干燥数学模型来定量描述物料的干燥过程. 表 1 给出了 4 种常见薄层干燥模型的表达式及线性化处理后的计算公式.

Lewis 模型是描述物料薄层干燥的最简单模型，该模型忽略了湿组分移动的内部阻力，往往低估了初始阶段的干燥速率，而又高估了接近平衡含水率时的干燥速率. 因此，该模型仅适用于简单粗略分析，不能对物料整个干燥过程进行准确的描述.

Henderson and Pabies 模型是根据液态扩散理论，经过简化后推导出的、用于描述物料干燥的近似模型. 干燥过程中，如果水分扩散系数随物料含水率和温度的变化而改变、或物料发生收缩变形等情况时，Henderson and Pabis 方程的拟合不够精确，或只能分阶段拟合.

Page 模型在 Lewis 模型的基础上，考虑了平衡含水率与湿物料种类的相关性、干燥方法和工艺参数的相关性，其描述的范围广泛，尤其适合于组成成分和结构复杂的生物质材料. Overhults 等[12] 对 Page 模型中的干燥参数 k 进行了修正，提出 Modified Page 模型，这 2 种模型的理论依据相似.

城市生活垃圾结构复杂，且在干燥过程中会发生收缩、龟裂等变化，从 4 种薄层干燥模型的适用范围看，Page 模型和 Modified Page 模型比其他 2 种模型更适用于模拟城市生活垃圾的干燥过程.

表 1　薄层干燥模型表达式[1)]

Table 1　Thin-layer drying curve models considered

模型名称	模型表达式	线性化表达式
Lewis [9]	$MR = \exp(-kt)$	$\ln MR = -kt$
Page [10]	$MR = \exp(-kt^N)$	$\ln(-\ln MR) = \ln k + N\ln t$
Henderson and Pabies [11]	$MR = A\exp(-kt)$	$\ln MR = \ln A - kt$
Modified Page [12]	$MR = \exp[-(kt)^N]$	$\ln(-\ln MR) = N\ln k + N\ln t$

1) k、N、A 为干燥常数

采用 4 种薄层干燥模型对不同垃圾组分在 40、50、60、70 和 80℃下的干燥过程进行拟合，以废纸板为例，表 2 列出了 4 种模型的拟合结果，从中可知 Page 模型与 Modified Page 模型的相关性系数 R^2 大且方差 X^2 小，对其他 3 种组分进行拟合也得到了相似结论，说明这 2 种模型都能较好地模拟垃圾组分的干燥过程，本研究选用 Modified Page 模型，并对该模型拟合的准确性进行验证.

表 2　废纸板薄层干燥模型拟合结果

Table 2　Fitting results obtained from thin-layer models of waste paper

模型	温度	R^2	X^2
Lewis	40	0.901 4	0.004 575
	50	0.897 9	0.007 821
	60	0.863 3	0.001 141
	70	0.894 6	0.001 851
	80	0.852 3	0.001 951
Henderson and Pabies	40	0.911 3	0.006 843
	50	0.914 7	0.001 256
	60	0.907 1	0.005 271
	70	0.890 8	0.000 847
	80	0.885 4	0.006 672
Page	40	0.997 1	0.000 188
	50	0.998 1	0.000 198
	60	0.990 4	0.004 537
	70	0.990 6	0.005 775
	80	0.988 7	0.000 494
Modified Page	40	0.997 3	0.000 174
	50	0.998 8	0.003 761
	60	0.991 9	0.000 793
	70	0.990 1	0.000 496
	80	0.987 3	0.001 394

图 4 对 4 种组分的实验 MR 值与 Modified Page 模型的理论 MR 值进行了比较. 从中可以看出，当 4 种组分的水分比大于一定值(20% ~25%)时，理论

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

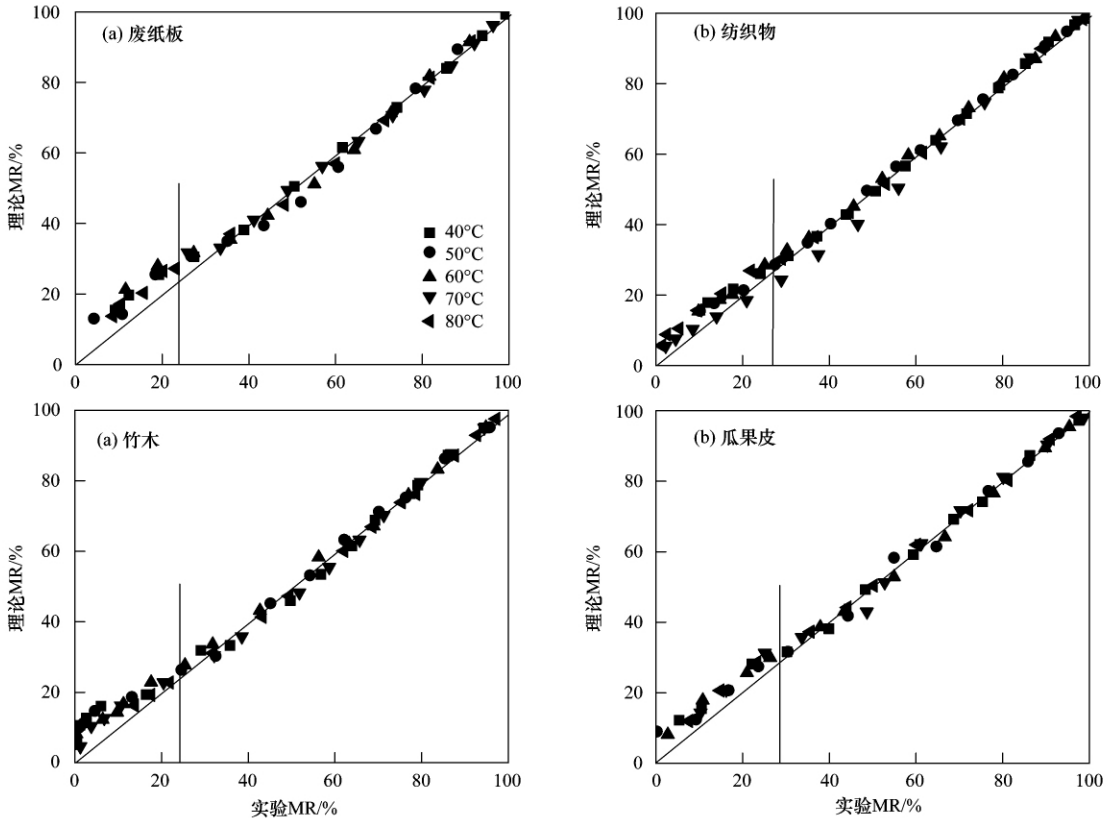

图 4 不同温度下垃圾组分水分比的实验值和 Modified Page 拟合值间的关系

Fig. 4 Relationship between experimentally determined and Modified Page model predicted moisture ratio values of MSW matrix at different temperatures

MR 值和实际 MR 值分布在 45°斜线周围，即两值近似相等，这说明 Modified Page 模型能较好地描述城市生活垃圾高含水率阶段的干燥过程. 但当水分比小于此值时，理论值偏高，这可能与垃圾组分中水分的结合形式有关.

2.1.3 有效水分扩散系数

垃圾干燥过程中的传质现象主要是外部水分蒸发和内部水分的迁移扩散，可以使用 Fick 第二定律来描述干燥过程中水分的扩散规律，其计算公式如下[13]：

$$\mathrm{MR} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-\frac{(2n+1)^2\pi^2 D_{\mathrm{eff}}}{4L^2}t\right] \tag{4}$$

式中，D_{eff}为有效水分扩散系数($\mathrm{m^2\cdot s^{-1}}$)，L 取干燥薄层的厚度(m)，本次实验中物料厚度 $L = 3\times10^{-2}$ m; n 为实验采样数量; t 为干燥时间(s). 由于干燥时间比较长，公式(4)可以近似简化为公式(5)[14].

$$\mathrm{MR} \approx \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\mathrm{eff}}}{4L^2}t\right) \tag{5}$$

对式(5)两边取自然对数得公式(6)

$$\ln \mathrm{MR} = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\mathrm{eff}}}{4L^2}t \tag{6}$$

由公式(6)可知：在干燥过程中水分比 MR 的自然对数 lnMR 与干燥时间 t 呈线性关系. 而 MR 和 t 都是已知的，所以可以画出 lnMR 随干燥时间 t 的变化曲线，并可通过线性回归求其斜率 m. 将 m 代入公式(7)就可以求出有效水分扩散系数 D_{eff}.

$$D_{\mathrm{eff}} = -\frac{4L^2}{\pi^2}m \tag{7}$$

4 种垃圾组分在不同干燥温度下的有效水分扩散系数如表 3 所示. 垃圾组分干燥过程中的有效水分扩散系数随温度的升高而增加，废纸板、纺织物、瓜果皮和竹木的有效水分扩散系数依次为：8.24×10^{-8} ~ 23.67×10^{-8}、7.73×10^{-8} ~ 12.56×10^{-8}、3.57×10^{-8} ~ 14.18×10^{-8}和 6.51×10^{-8} ~ 23.84×10^{-8} $\mathrm{m^2\cdot s^{-1}}$，温度从 40℃ 增至 80℃ 时，上述 4 种组分的有效水分扩散系数分别增加了 1.87、0.62、2.97 和 2.66 倍，可见，温度变化对瓜果皮有效水分扩散系数的影响最大，对纺织物的影响最小.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　4 种垃圾组分在不同温度下的有效水分扩散系数

Table 3　Values of effective moisture diffusion coefficients for MSW matrix at different temperatures

组分	温度/℃	$D_{eff}\times10^{-8}/m^2\cdot s^{-1}$	R^2
废纸板	40	8.24	0.982
	50	11.76	0.981
	60	19.13	0.981
	70	20.98	0.975
	80	23.67	0.992
纺织物	40	7.73	0.984
	50	9.93	0.968
	60	10.86	0.982
	70	11.53	0.991
	80	12.56	0.987
瓜果皮	40	3.57	0.991
	50	6.28	0.995
	60	9.62	0.973
	70	12.78	0.967
	80	14.18	0.984
竹木	40	6.51	0.989
	50	9.89	0.954
	60	11.48	0.978
	70	18.31	0.959
	80	23.84	0.949

2.1.4　干燥活化能

干燥活化能是表示干燥过程中脱除单位摩尔水分需要的能量，物料的干燥活化能越大说明其干燥越困难. 有研究者通过实验研究并在 Van't Hoff 的工作基础上，提出物料有效水分扩散系数与干燥温度、活化能之间存在如下指数关系[15]：

$$D_{eff} = D_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{8}$$

式中，D_0 为指前因子($m^2\cdot s^{-1}$)，E_a 为水分扩散的活化能($J\cdot mol^{-1}$)，T 为实验温度(K)，R 为摩尔气体常数，8.314 3 $J\cdot(mol\cdot K)^{-1}$.

对式(8)线性化处理得到:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R}\cdot\frac{1}{T} \tag{9}$$

由公式(9)可知有效水分扩散系数的自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 T^{-1} 呈线性关系，4 种垃圾组分的 $\ln D_{eff}$–T^{-1} 关系如图 5 所示，拟合后得到废纸板、纺织物、瓜果皮和竹木的干燥活化能、指前因子，结果见表 4，从中可知瓜果皮的干燥活化能最大，纺织物的干燥活化能最小，说明脱除等量水分，纺织物所需能量比瓜果皮低.

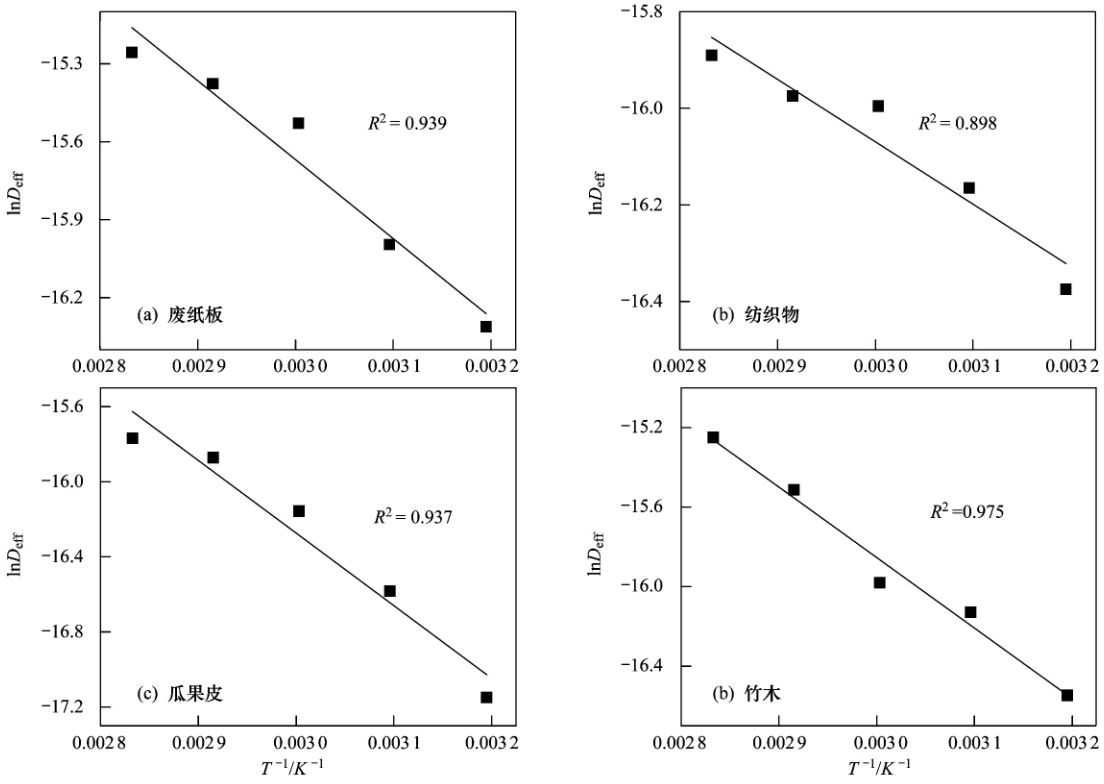

图 5　垃圾组分温度与有效水分扩散系数的 Arrhenius 方程拟合图

Fig. 5　Arrhenius-type relationship between effective moisture diffusion coefficient and temperatures for MSW matrix

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 4 种垃圾组分的动力学参数

Table 4 Kinetics parameters of four MSW matrix

组分	废纸板	纺织物	瓜果皮	竹木
E_a /kJ·mol^{-1}	25.26	10.75	32.16	29.49
D_0 /m^2·s^{-1}	1.43×10^{-3}	5.13×10^{-6}	9.47×10^{-3}	5.46×10^{-3}
R^2	0.939	0.898	0.937	0.975

2.2 实际生活垃圾的干燥特性

实际生活垃圾样品的干燥速率曲线如图 6 所示. 可以看出,实际垃圾与 4 种垃圾组分的干燥速率曲线相似,随着干燥温度上升,干燥速率不断增加,但相邻干燥曲线间的间隔变化比垃圾组分间的小,说明温度变化对实际垃圾干燥过程的影响要比对垃圾组分的影响小.

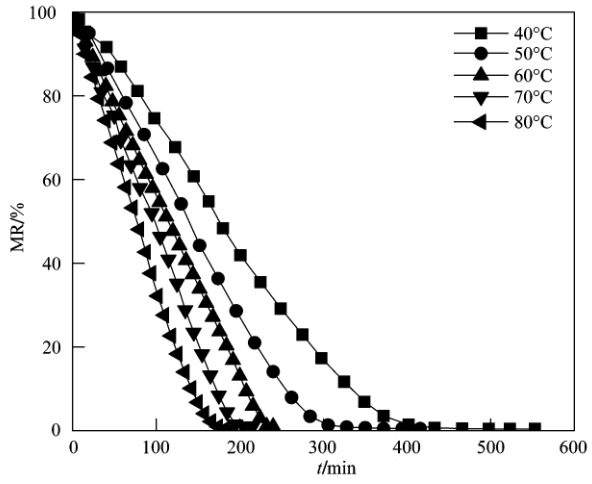

图 6 不同温度下实际垃圾的失水率曲线

Fig. 6 Moisture content curves of practical MSW at different temperatures

运用 Modified Page 模型对实际垃圾样品在不同温度下的干燥过程进行拟合,模型的相关性系数 R^2 均大于 0.95,垃圾的实际水分比 MR 与模型理论值 MR 之间的关系如图 7 所示,可以看出 Modified Page 模型也能很好地模拟实际垃圾的干燥过程.

实际垃圾样品在 40、50、60、70 和 80℃下干燥时的有效扩散系数如表 5 所示,由此得到的干燥活化能为 22.36 kJ·mol^{-1},与垃圾组分相比,实际垃圾的干燥活化能仅大于纺织物,而比其他 3 种组分都小,原因可能是实际垃圾中存在塑料、玻璃等易干燥物质.

表 5 实际垃圾在不同温度下的有效水分扩散系数

Table 5 Values of effective moisture diffusion coefficients for practical MSW at different temperatures

温度/℃	$D_{eff}\times10^{-8}$ /m^2·s^{-1}	R^2
40	6.78	0.986
50	10.85	0.991
60	12.87	0.982
70	16.09	0.988
80	18.65	0.975

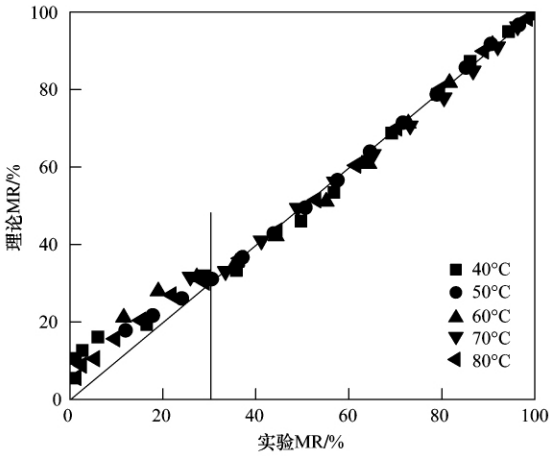

图 7 不同温度下实际垃圾水分比的实验值与 Modified Page 拟合值间的关系

Fig. 7 Relationship between experimentally determined and Modified Page model predicted moisture ratio values of practical MSW at different temperatures

3 结论

(1) 当温度从 40℃升至 80℃时,4 种垃圾组分失水率曲线的总体变化趋势相似,干燥速率随温度的升高而增加,但增加的幅度逐渐下降.

(2) Modified Page 模型能较好地描述 4 种垃圾组分水分比 > 25% 时的干燥过程. 当水分比小于此值时,Modified Page 模型的拟合值偏高.

(3) 实验工况下废纸板、瓜果皮、竹木颗粒和纺织物的有效水分扩散系数均随干燥温度的升高而增大,其中温度变化对瓜果皮有效水分扩散系数的影响最大,对纺织物的影响最小.

(4) 通过 Arrhenius 方程建立干燥温度与有效水分扩散系数的关系,获得了研究工况下废纸板、瓜果皮、竹木颗粒和纺织物低温干燥时所需的干燥活化能,得出瓜果皮的干燥活化能最大,最难干燥.

(5) 对实际生活垃圾在相同条件下进行类似干燥实验,得到的干燥速率曲线与垃圾组分的干燥速率曲线相似,经验证 Modified Page 模型能很好地模拟实际垃圾的干燥过程,干燥活化能为 22.36 kJ·mol^{-1}.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 章骥，李晓东，严建华，等. 水对垃圾焚烧飞灰二噁英从头合成的影响 [J]. 工程热物理学报，2006，**27**(Sup.2)：191–194.

[2] Doymaz İ. Air-drying characteristics of tomatoes [J]. Journal of Food Engineering，2007，**78**(4)：1291–1297.

[3] Goyal R K，Kingsly A R P，Manikantan M R，*et al*. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer [J]. Journal of Food Engineering，2007，**79**(1)：176–180.

[4] 陈允轩. 焚烧炉条件下典型城市生活垃圾干燥过程的试验研究 [D]. 北京：北京交通大学，2007.

[5] Zhang Y G，Chen M Q，Meng A H，*et al*. Experimental study on drying of typical MSW under incinerator-like conditions [J]. Science in China Series E-Technological Sciences，2007，**50**(5)：636-643.

[6] 陈梅倩，蒙爱红，阮仔龙，等. 高水分垃圾基元中温干燥特性的实验研究 [J]. 清华大学学报（自然科学版），2010，**50**(11)：1838–1842.

[7] 蒙爱红，李清海，张衍国，等. 垃圾焚烧炉干燥床垃圾干燥过程研究和分析 [J]. 燃烧科学与技术，2008，**14**(6)：518–525.

[8] Velis C A，Longhurs P J，Drew G H，*et al*. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes：a review of process science and engineering [J]. Bioresource Technology，2009，**100**(11)：2747–2761.

[9] Bruce D M. Exposed-layer barley drying：three models fitted to new data up to 150℃ [J]. Journal of Agricultural Engineering Research，1985，**32**(4)：337–348.

[10] Akgun N A，Doymaz I. Modelling of olive cake thin-layer drying process [J]. Journal of Food Engineering，2005，**68**(4)：455–461.

[11] Henderson S M，Pabis S. Grain drying theory Ⅱ Temperature effects on drying coefficients [J]. Journal of Agricultural Engineering Research，1961，**6**(3)：169–174.

[12] Overhults D G，White G M，Hamilton H E，*et al*. Drying soybeans with heated air [J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers，1973，**16**(1)：112–113.

[13] Crank J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford：Clarendon Press，1975. 47–58.

[14] Tütüncü M A，Labuza T P. Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient [J]. Journal of Food Engineering，1996，**30**(3-4)：433-447.

[15] 韩德刚，高盘良. 化学动力学基础 [M]. 北京：北京大学出版社，2001. 94–102.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net