

基于薄层干燥模型的褐煤干燥动力学研究

王涛, 于才渊, 孟敏

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 在不同颗粒直径和不同的干燥介质温度下, 对褐煤进行干燥动力学实验研究。得到了褐煤的干燥曲线和干燥速率曲线, 采用薄层干燥模型对实验数据进行模拟, 得到了褐煤的干燥方程和干燥速率方程。提出了褐煤干燥速率常数的经验公式 $k = A \exp\left[\frac{-E_v(1+C_d \ln d)}{RT}\right]$, 其中指前因子 $A=5.819\text{min}^{-1}$, 界面蒸发活化能 $E_v=21347.5\text{KJ/mol}$, 经验常数 $C_d=0.0409\text{m}^{-1}$, 干燥时间指数 $n=1.516$ 。

关键词 褐煤 薄层干燥 干燥动力学 干燥速率常数

Drying Kinetics of Lignite Based on Thin-layer Drying Model

WANG tao, YU cai-yuan

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract experiments were performed to study the drying kinetics of lignite, and the drying curves, as well as the drying rate curves were obtained under different drying medium temperatures and different lignite particles diameters, respectively. The experimental data of drying kinetics of lignite satisfied well with Page(1) model on that the drying equation and the drying rate equation were derived. Empirical equation of the drying rate constant k was proposed,

which is given as $k = A \exp\left[\frac{-E_v(1+C_d \ln d)}{RT}\right]$ in that the pre-exponential factor $A=5.819\text{min}^{-1}$, the activation energy of interface evaporation $E_v=21347.5\text{KJ/mol}$, the experimental constant $C_d=0.0409\text{m}^{-1}$ and the drying time index $n=1.516$.

Key words lignite thin-layer drying drying kinetics drying rate constant

引言

能源是国民经济和社会发展的重要保障。在我国能源生产、消费结构中均以煤炭为主, 石油、天然气等优质能源应用比例偏低。预计到 2020 年, 煤炭在国家能源构成中仍将在 60% 左右, 煤炭仍是主要消耗的能源。我国煤炭资源相对丰富, 占化石燃料储量的 95.4%, 但煤炭毕竟是不可再生资源, 特别是近几年来, 随着中高等变质程度的煤的大量开采, 煤炭资源的需求缺口越来越大。所以开发利用劣质煤成为各国解决能源问题的重要途径。

褐煤作为一种低变质程度的煤, 在全球储量约为 4 万亿吨, 约占煤炭总储量的 40%^[1]。褐煤在地质层中埋藏较浅, 易于开采, 相比高质量煤, 价格低廉, 有巨大的开采利用价值。但褐煤具有水分含量高, 含氧官能团发达, 易于风化自燃等缺点, 使其难于有效洁净利用。特别是高水分含量不仅严重降低了褐煤的热值而且增加了运输费用, 所以干燥/脱水是褐煤有效利用中的关键过程。而干燥动力学的研究对于认识干燥过程、干燥机理、节省能源、以及干燥器的设计极为重要^[2]。

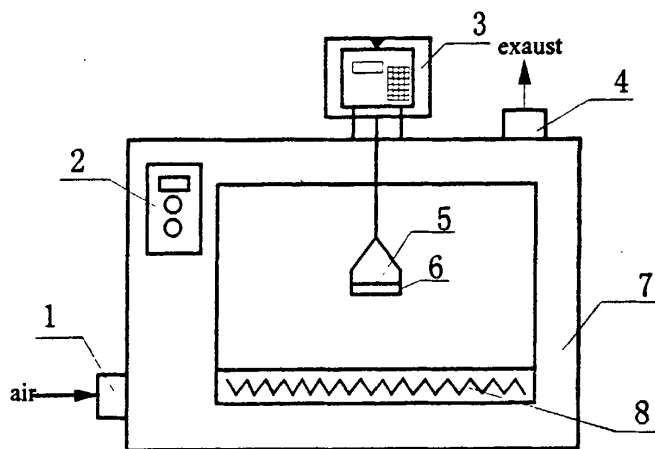
薄层干燥模型的应用范围广泛, 大量应用在蔬菜、水果、粮食等的干燥机理研究中^[3-7]。而基于薄层干燥模型的褐煤干燥动力学研究很少。本文通过对褐煤干燥动力学的研究, 得到褐煤的干燥方程、干燥速率方程、活化能、指前因子等参数, 为后续的气固两相干燥实验提供一定的理论依据。

1 实验部分

1.1 样品与仪器

样品：粒度分布为 0-8mm 的马来西亚褐煤。

仪器：202-2 型电热恒温干燥烘箱，上海锦屏仪器仪表有限公司通州分公司；BL-410S 美国西特 setra 电子天平，东莞广鑫称重仪器仪表经营部；热电偶。实验装置如图 1 所示。



1-空气进口；2-温度控制系统；3-电子天平；4-废气出口；5-褐煤样品；6-玻璃器皿；7-烘箱箱体；8-加热电阻丝

图 1 实验设备

1.2 实验方法

将 0-8mm 粒径的褐煤筛分出 0~1、2~3、4~5、6~7mm 四种不同粒径范围的样品，分别放入图 1 所示的实验装置中，在介质温度为 100、120、140、160、180℃下进行干燥，干燥过程中褐煤的质量变化采用电子天平测量，间隔一定时间记录，直到质量不发生变化为止。实验介质温度采用热电偶测定。

2 结果与讨论

2.1 褐煤的初始含水量

四种不同粒径范围下，褐煤的初始含水量不尽相同，但差别不大，如表 1 所示，平均含水量为 37%。

表 1 不同粒径下个实验样品的初始含水量

粒径 d/mm	0~1	2~3	4~5	6~7
$W_0/\%$	36.4	36.7	37.2	37.8

2.2 无因此变量水分比 MR 表示褐煤干燥曲线及干燥曲率曲线

水分比 MR，是某时刻待除去的自由水含量与初始水含量之比，是一个无因此变量。表达式如下：

$$M_R = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

X_c 与 X 、 X_0 相比很小, 可以忽略, 上式简化为

$$M_R = \frac{X}{X_0} \quad (2)$$

所以干燥速率表达式变为

$$R_D = -M_c \frac{dX}{dt} = -M_c X_0 \frac{dM_R}{dt} = -M_w \frac{dM_R}{dt} \quad (3)$$

由于不同颗粒直径下物料的初始水分含量不同, 会对 R_D 的比较产生一定的影响, 而以 M_R 表示的干燥曲线、干燥速率曲线与干基湿含量表示的干燥曲线、干燥速率变化趋势相同, 且与初始水分含量无关, 这就为干燥动力学及实验数据的分析带来了方便^[8]。

本实验考察了不同颗粒直径, 不同介质温度下褐煤的干燥特性, 根据实验数据, 描绘出干燥曲线及干燥速率曲线, 图 2 和图 3 分别是颗粒直径 2~3mm, 介质温度 100、120、140、160、180℃ 下褐煤的干燥曲线和干燥速率曲线。由图 2 可见干燥介质温度越高, 干燥时间越短, 干燥曲线斜率越大。图 3 中发现干燥介质温度越高, 干燥速率越大。其他粒径在不同温度下的干燥曲线及干燥速率曲线也有相同的现象。图 4 和图 5 分别是在干燥介质温度为 160℃ 下, 颗粒直径为 0~1mm、2~3mm、4~5mm、6~7mm 下褐煤的干燥曲线和干燥速率曲线。由图 4 可见, 随着颗粒直径增大, 干燥时间增长, 但当粒径大于 3mm 时, 干燥曲线出现交叉甚至重叠现象, 粒径的增大对干燥曲线影响不大, 从图 5 中 2~3、4~5、6~7mm 的干燥速率曲线交叉也能说明这一现象, 其他温度下的干燥曲线也出现了类似结果。综合图 2—5, 发现褐煤干燥过程先经过短暂的升速干燥阶段, 然后进入恒速干燥阶段(此阶段干燥速率有一定的波动, 但变化程度不大), 最后进入降速干燥阶段, 且在图 3 中, 随着温度的升高, 恒速干燥阶段有缩小的趋势。

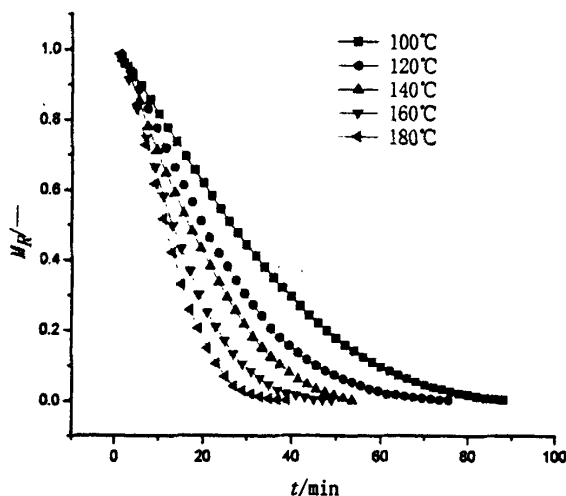


图 2 不同介质温度下褐煤的干燥曲线

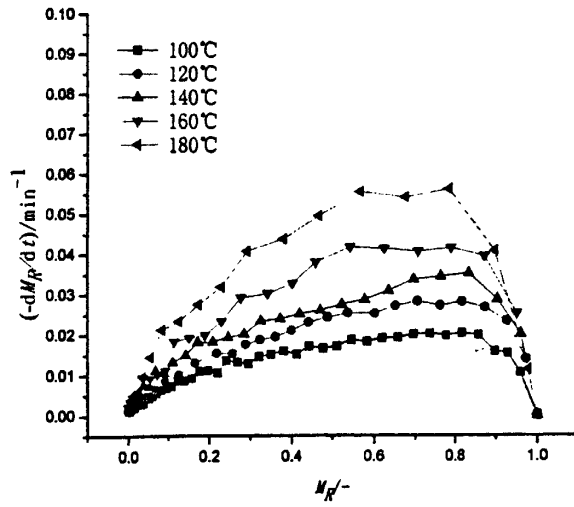


图 3 不同介质温度下褐煤的干燥速率曲线

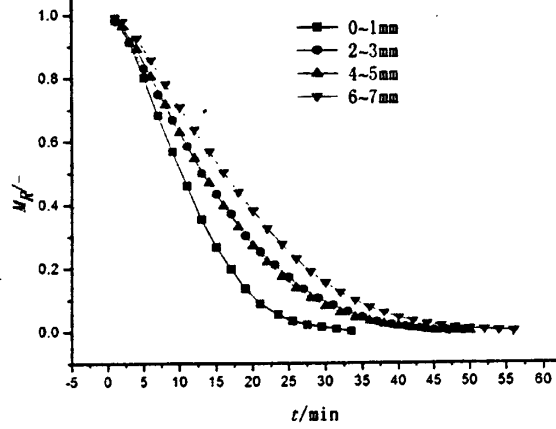


图 4 不同颗粒直径下褐煤的干燥曲线

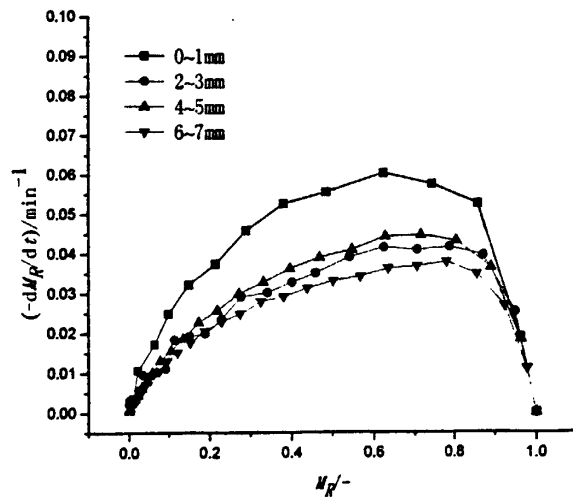


图 5 不同颗粒直径下褐煤的干燥速率曲线

2.3 MR 表示的干燥方程及干燥速率方程

薄层干燥是指 20mm 以下的物料完全暴露在相同的实验环境下的干燥过程^[8]。薄层干燥方程一般分为理论、半理论、经验、半经验方程。常用的薄层干燥模型有 9 种（参见文献 8 中的表 1）。

将图 1、图 3 中的实验数据带入上述模型中，结果如表 2 所示。由表可见，三项扩散模型及 Page 模型（I）、（II）的 R^2 的平均值都较高，且均方差的平均值 RMSE 都较小。从模型的复杂程度及表达精度来看，选用 Page 模型（I）作为褐煤的干燥方程，求得的干燥速率方程，如式（1）、（2）所示。

表 2 不同温度和颗粒直径下的模拟结果

模型名称	R_d^2	$RMSE_d$	R_T^2	$RMSE_T$
单项扩散模型	0.976	0.0400	0.981	0.044
两项扩散模型	0.992	0.012	0.997	0.016
三项扩散模型	0.998	0.003	0.999	0.003
Lewis 模型	0.968	0.059	0.989	0.060
Page 模型	0.997	0.007	0.998	0.014
修正 Page 模型（I）	0.998	0.007	0.999	0.014
修正 Page 模型（II）	0.998	0.015	0.998	0.009
Thompson 经验模型	0.992	0.007	0.990	0.013
Wang 经验模型	0.989	0.007	0.998	0.013

$$M_R = \exp[-(kt)^n] \quad (4)$$

$$-\frac{dM_R}{dt} = knM_R(-\ln M_R)^{\frac{n-1}{n}} \quad (5)$$

2.4 干燥动力学参数的确定

将不同温度、不同粒径范围下的实验数据按照式 1 的形式进行非线性拟合，可以求得不同介质温度、不同颗粒直径下的 k, n 值，如表 3、4。

表 3 不同介质温度和颗粒直径下的 k 值

温度 粒径	373K	393K	413K	433K	453K
0~1mm	0.041	0.056	0.065	0.079	0.122
2~3mm	0.030	0.039	0.047	0.059	0.070
4~5mm	0.028	0.032	0.042	0.060	0.074
6~7mm	0.026	0.035	0.044	0.049	0.059

表 4 不同介质温度和颗粒直径下的 n 值

温度 粒径	373K	393K	413K	433K	453K
0~1mm	1.359	1.361	1.327	1.678	1.762
2~3mm	1.422	1.424	1.436	1.463	1.685
4~5mm	1.454	1.475	1.686	1.540	1.679
6~7mm	1.460	1.471	1.508	1.578	1.580

由表 3 可以看出,褐煤的干燥速率特征常数 k 不仅与干燥介质温度 T 有关,还与煤颗粒的直径 d 有关。在相同粒径下, k 随着温度的升高逐渐增大,在相同温度下,粒径从 0 到 3mm, k 的变化较明显,在颗粒直径大于 3mm 时, k 基本保持不变。由表 4 可知,不同干燥介质温度 T 和粒径 d 对 n 的影响不大,因此,本文取其平均值 $n=1.516$ 。

参照文献 2、9、10 中分析干燥速率常数的方法做 $\ln k \sim 1/T$ 和 $\ln k \sim d$ 的关系曲线,图 6、7 所示。图中发现 $\ln k$ 与 $1/T$ 呈较好的线性关系,与 Arrhenius 关系式一致,而 $\ln k$ 与 d 呈对数函数关系,相关性较好。所以本文将文献 10 中的式 6 变形为

$$k=A\exp(\frac{-E_v(1+C_d\ln d)}{RT}) \tag{6}$$

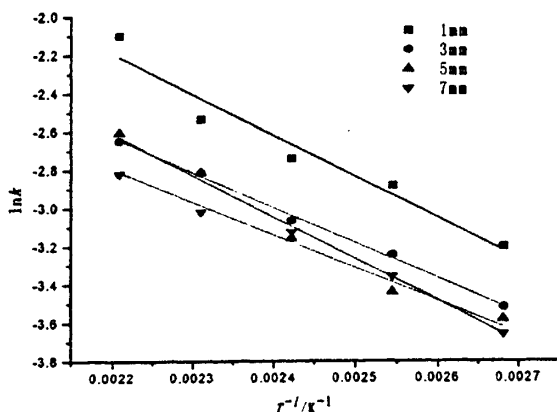


图 6 $\ln k$ 与 $1/T$ 的关系

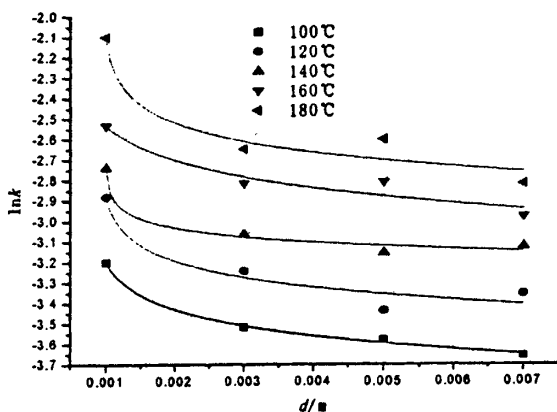


图 7 $\ln k$ 与 d 的关系曲线

将不同介质温度和粒径下的 k 值, 按上述函数形式进行非线性拟合, 线性相关系数 $R=0.98$, 拟合得到指前因子 $A=5.819\text{min}^{-1}$, 界面蒸发活化能 $E_v=21347.5\text{KJ/mol}$, 经验常数 $C_d=0.0409\text{m}^{-1}$ 。

2.5 干燥方程和干燥速率方程预测值和实验值的比较

将上述 A 、 E_v 、 C_d 值代入 (6) 式, 得到 k 的关系式, 再将干燥时间指数 n 和 k 代入方程式 (4)、(5) 得到褐煤的干燥方程和干燥速率方程, 将方程预测值和实验值进行比较, 结果如图所示。其中, 干燥方程预测平均误差在 $\pm 23.2\%$, 干燥速率方程预测平均误差在 $\pm 16.2\%$, 预测值和实验值吻合程度较好。

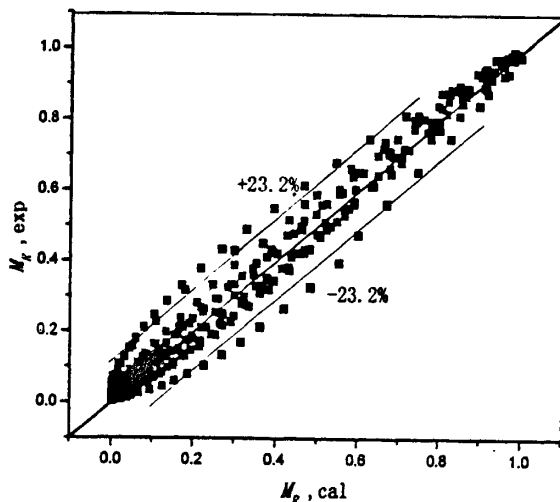


图 8 水分比的预测值和实验值的比较

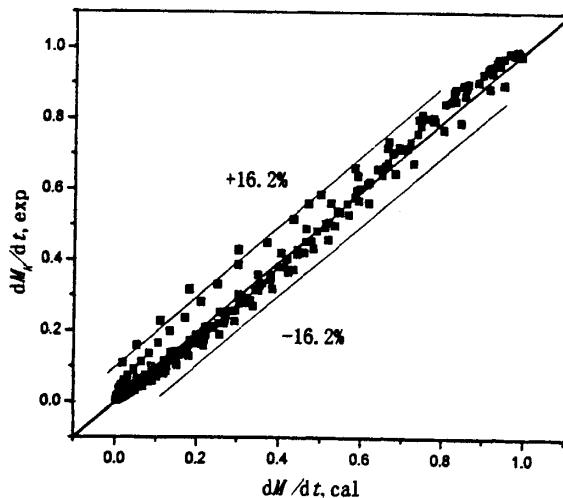


图 9 干燥速率预测值和实验值的比较

3 结论

褐煤的干燥动力学实验研究, 得出以下结论:

(1) 随着介质温度的升高, 干燥时间缩短, 干燥速率增大。在粒径 $0\sim 3\text{mm}$ 时, 随着粒径的增加, 干燥速率增加明显, 当粒径大于 3mm 时, 粒径对干燥速率的影响不明显。

(2) 褐煤干燥过程先经过短暂的升温干燥阶段, 然后进入减速干燥阶段, 基本不出现恒速干燥阶段。

(3) 采用薄层干燥模型模拟得到的褐煤干燥方程为 $M_R = \exp[-(kt)^n]$, 干燥速率方程为 $-\frac{dM_R}{dt} = knM_R(-\ln M_R)^{\frac{n-1}{n}}$, 预测值和实验值的吻合程度较好。

(4) 拟合得到的干燥速率常数为 $k = A \exp\left(\frac{-E_v(1+C_d \ln d)}{RT}\right)$, 其中指前因子 $A=5.819\text{min}^{-1}$, 界面蒸发活化能 $E_v=21347.5\text{KJ/mol}$, 经验常数 $C_d=0.0409\text{m}^{-1}$, 干燥时间指数 $n=1.516$ 。

符号说明

M_R ——水分比, $M_R = (X - X_f)/(X_0 - X_f)$;

X ——任意时刻湿物料的干基湿含量, kg/kg;

X_0 ——湿物料的初始干基湿含量, kg/kg;

X_f ——干燥产品的最终干基湿含量, kg/kg;

M_C ——绝干物料质量, kg;

M_w ——水分含量, kg;

$-dM_R/dt$ ——干燥速率, min^{-1} ;

t ——干燥时间, min;

T ——干燥介质温度, K;

A ——指前因子, min^{-1} ;

C_d ——经验常数, m^{-1} ;

E_s ——表观活化能, kJ/mol;

E_v ——界面蒸发活化能, kJ/mol;

k ——干燥速率常数, min^{-1} ;

d ——褐煤颗粒直径, m;

n ——干燥时间指数;

R ——气体常数, $\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$;

R_d^2 ——不同颗粒直径下水分比的线性相关系数的平方;

R_T^2 ——不同干燥介质温度下水分比线性相关系数的平方;

$RMSE_d$ ——不同颗粒直径下水分比的均方差;

$RMSE_T$ ——不同干燥介质温度下水分比的均方差;

参考文献

- [1] 戴和武, 谢可玉. 褐煤利用技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [2] 穆小玲, 王宝和. 碱式碳酸镁纳米棒的干燥动力学研究 [J]. 干燥技术与设备, 2009, 7 (4): 159-163.
- [3] Omid M, Baharlooei A, Ahmadi H. Modeling drying kinetics of pistachio nuts with multilayer feed-forward neural network [J]. Drying Technology 2009, 27(10): 1069-1077.
- [4] Rajkumar P, Kulanthaisami S, Raghavan G.S.V, Garipey Y, Orsat V. Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods [J]. Drying Technology 2007, 25(7-8): 1349-1357.
- [5] Abud-Archila M, Courtois F, Bonazzi C, Bimbenet J.J. A compartmental model of thin-layer drying kinetics of rough rice [J]. Drying Technology 2007, 25(7-8): 1389-1414.
- [6] Doymaz I. Drying characteristics and kinetics of okra [J]. Journal of Food Engineering 2005, 69, 275-279.
- [7] Pardeshi I.L, Arora S.P, Borker A. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model [J]. Drying Technology 2009, 27(2): 288-295.
- [8] 邹积琴, 王宝和. 碱式碳酸镁纳米花的干燥动力学研究 [J]. 干燥技术与设备, 2008, 6 (4): 194-198.
- [9] 王宝和. 干燥动力学综述 [J]. 干燥技术与设备, 2009, 7 (1): 51-56.
- [10] 王宝和. 相变动力学和热分析动力学在干燥动力学研究中的应用的可能性 [J]. 干燥技术与设备, 2009, 7 (3): 103-109.
- [11] 何昌斌, 王宝和. 基于薄层干燥模型的碱式碳酸镁纳米化干燥动力学研究 [J]. 干燥技术与设备, 2010, 8 (6): 264-270.

作者简介: 王涛 (1985—), 男, 硕士研究生; 通讯作者: 于才洲, 男, 教授, E-mail: yucaiyuan@dlut.edu.cn.