

过热蒸汽干燥凝结段的干燥动力学特性

史勇春^{1,2}, 李捷^{2*}, 李选友², 王成运², 赵改菊², 尹凤交²

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 山东省科学院工业节能研究中心, 济南 250103)

摘要: 为了深入了解过热蒸汽干燥过程的机理, 进而优化干燥操作, 开展了褐煤热空气干燥和过热蒸汽干燥对比试验, 结果表明: 在过热蒸汽干燥的初始阶段存在明显的蒸汽凝结现象, 其干燥动力学特性与热空气干燥存在明显不同。通过对过热蒸汽干燥动力学过程的理论分析, 研究了过热蒸汽凝结对干燥过程初始阶段的影响。在热空气干燥过程数学模型的基础上, 结合过热蒸汽的凝结现象, 对过热蒸汽干燥的数学模型进行了改进。经试验结果验证, 改进的数学模型具有很好的拟合精度, 决定系数大于 0.97。研究为优化干燥设备设计和操作条件提供了依据。

关键词: 干燥, 动力学, 模型, 过热蒸汽干燥, 凝结

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.034

中图分类号: TD849+.2; TQ028.6+72

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-13-0211-06

史勇春, 李捷, 李选友, 等. 过热蒸汽干燥凝结段的干燥动力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 211-216.

Shi Yongchun, Li Jie, Li Xuanyou, et al. Drying kinetics of condensation stage in super-heated steam drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 211-216. (in Chinese with English abstract)

0 引言

干燥是很多工、农业生产中的重要工艺过程之一, 一些学者针对干燥进行了大量研究^[1-7]。过热蒸汽干燥 (super-heated steam drying) 是指利用过热蒸汽直接与物料接触而去除水分的一种干燥方式, 具有节能效果显著、干燥品质好、传热传质效率高、无失火和爆炸危险等特点^[8], 特别适合于粮食、蔬菜、水果等高湿物料的干燥, 是一种具有较大潜力的新型干燥技术。近年来, 过热蒸汽干燥技术被广泛用于各种物料如食品^[9-11]、木材^[12-13]、纸张^[14-15]、褐煤^[16-18]和污泥^[19]等的干燥过程, 应用研究取得了较大的进展。

虽然过热蒸汽并不改变干燥过程的一般特性^[20], 但过热蒸汽干燥与热风干燥存在一些显著的区别。在过热蒸汽干燥的初始阶段, 由于干燥物料为室温, 远低于过热蒸汽的温度, 过热蒸汽会在湿物料表面产生凝结现象^[21]。虽然过热蒸汽在湿物料表面的凝结现象十分普遍, 但很多学者^[22-23]认为存在的时间短、精确的数学描述不可行, 因而在研究均忽略了该现象。Fyhr 和 Rasmuson^[12, 24]在研究中考虑了凝结过程, 但把凝结水作为额外的表面因素来处理, 与试验结果相比精度差距较大。Kittiworrawatt 和 Devahastin^[25]在生物材料的过热蒸汽干燥模型中加入了

初始水蒸汽冷凝的影响, 在一定程度上提高了对物料含水率和温度的预测结果, 但温度预测结果仍比实际低, 且在高温和低压下该模型无法预测, 需要进一步深入研究。Sa-adchom 等^[26]对猪肉片的过热蒸汽干燥建立了模型, 并加入了初始蒸汽冷凝过程, 得出了蒸汽冷凝量, 但并没有分析蒸汽冷凝量与干燥时间的关系。总的来说, 虽然干燥初始阶段蒸汽冷凝对过热蒸汽干燥存在影响, 但目前关于该现象的研究较少且不深入。

因此, 本文针对过热蒸汽干燥过程中蒸汽凝结现象进行理论分析, 并对干燥过程的数学模型进行了修正, 完善了过热蒸汽干燥动力学过程的理论描述, 为深入理解过热蒸汽干燥过程机理、优化干燥设备设计与干燥操作条件提供了理论依据。

1 材料与方法

自行研制搭建的过热蒸汽干燥机理试验台架流程图如图 1 所示, 该台架主要由空气压缩机 (型号 Z-0.12/10, 济南市气体压缩机厂)、流量计 (型号 LZB-6, 上海荣华仪表厂, 精度 1 L/h)、电加热器 (自制)、蒸汽发生器 (自制)、气体混合室 (自制)、电子天平 (型号 PL3002, 瑞士 METTLER TOLEDO 公司, 精度 0.01 g)、干燥装置 (自制)、水槽 (自制) 及热电偶 (K 型, 江苏省苏科仪表有限公司, 精度 0.1℃) 等组成。

水槽中的纯水被泵抽出, 进入蒸汽发生器中被加热变成蒸汽, 之后再经过电加热器被加热成过热蒸汽, 然后进入干燥装置中对褐煤样品进行干燥。为了能对过热蒸汽干燥和空气干燥的试验进行比较, 本试验台架采用空气压缩机吸入空气, 经过电加热器加热后进入干燥装置。褐煤粉放置在托盘中, 托盘的底部材料为孔径 0.1 mm 的石棉网, 一方面使气流均匀地流过托盘中的褐煤颗粒,

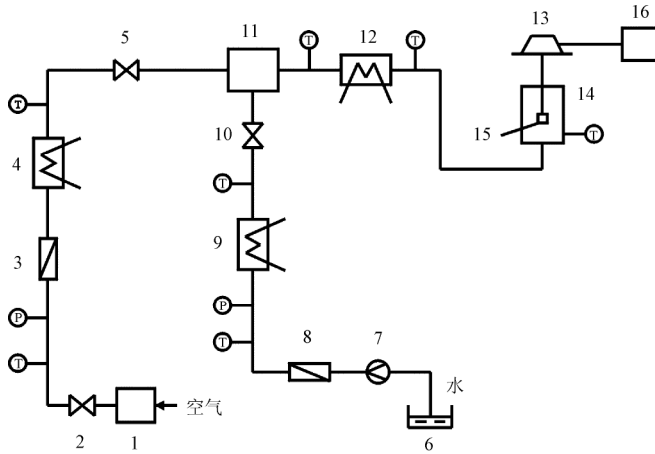
收稿日期: 2011-10-16 修订日期: 2012-05-02

基金项目: 山东省成果转化专项资助项目 (2009ZHGX1A0204); 山东省科学院博士资助项目

作者简介: 史勇春 (1961-), 男, 山东章丘人, 研究员, 主要从事干燥理论和技术的研究。济南 山东大学能源与动力工程学院, 250061。Email: shiyc-tl@hotmail.com

*通信作者: 李捷 (1982-), 男, 湖北蕲春人, 博士, 主要从事干燥理论、洁净煤技术的研究。济南 山东省科学院工业节能研究中心, 250103。Email: jeff_lee@foxmail.com

另一方面保证褐煤不发生泄漏。托盘通过线吊挂在电子天平上,通过电子天平实时记录干燥过程中褐煤的质量值。电子天平与计算机连接,将数据值传输到计算机中存储。采用流量计和压力计对气体流量和压力进行监测,采用热电偶对气体温度进行监测。



1.空气压缩机 2.阀门 3.流量计 4.电加热器 5.阀门 6.水槽 7.泵
8.流量计 9.蒸汽发生器 10.阀门 11.气体混合室 12.电加热器 13.电子天平 14.干燥装置 15.托盘 16.计算机; T 为热电偶; P 为压力计

图 1 过热蒸汽干燥机理试验台架流程图

Fig.1 Schematic diagram of super-heated steam drying system

试验物料为赤峰平庄褐煤,其初始湿基含水率为 27.80% (干基含水率 38.50%)。对褐煤原煤进行粉碎、筛分,选取粒径 0.1~2 mm 的 3 g 褐煤样品进行试验。在相同的试验条件 (室温 20℃、相对湿度 40%) 和采样时间下,对褐煤分别在热空气 (相对湿度 40%) 和过热蒸汽 (干燥温度均为 160℃) 条件下进行了干燥试验。

当热空气从湿物料表面流过时,由于空气与物料之间存在着温差,空气将以对流方式把热量传递给湿物料,湿物料吸收热量后其内部的水分汽化,蒸汽不断地由物料表面扩散到热气流中,物料的含水率也相应地下降。当物料的含水率降低到平衡含水率时,干燥过程达到平衡状态。

热空气干燥通常可分为 3 个阶段:预热阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段。典型的热空气干燥的示意图如图 2 所示。

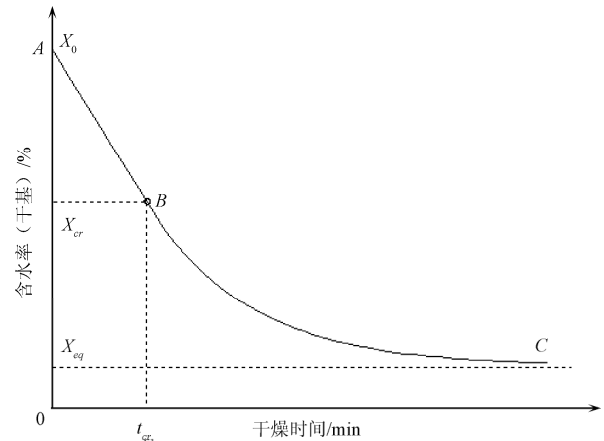
1) 预热阶段:热空气介质的部分热量用于加热物料,物料的表面温度上升至湿球温度。由于预热阶段持续的时间较短,且对物料的含水率值影响不大,因此该阶段通常可以忽略。

2) 恒速干燥阶段:图 2 中的 AB 段。该阶段内物料表面温度维持在湿球温度。物料表面的水分吸收热空气的热量汽化,于是物料表面和内部出现湿度梯度。湿度梯度是一种推动力,使物料内部的水分扩散到表面,物料的表面保持充分的润湿。恒速干燥阶段的干燥速率大小取决于物料表面水分的汽化速率,亦即取决于物料外部的干燥条件,故又被称为表面汽化控制。在该阶段,物料水分的汽化也可认为是近似于纯水表面的汽化,干

燥曲线可以通过式 (1) 进行数学描述^[27]

$$X = X_0 - (X_0 - X_{cr}) \times t / t_{cr} \quad (1)$$

式中, X 为物料干基含水率, %; t 为干燥时间, min。 X_0 、 X_{cr} 和 X_{eq} 分别为物料原始干基含水率、临界干基含水率和平衡含水率, %; t_{cr} 为物料含水率降低到临界干基含水率所对应的干燥时间, min。



注: X_0 、 X_{cr} 和 X_{eq} 分别为物料原始干基含水率、临界干基含水率和平衡含水率, %; t_{cr} 为物料含水率降低到临界干基含水率所对应的干燥时间, min。

图 2 热空气干燥曲线图

Fig.2 Drying curve for hot air drying

3) 降速干燥阶段:图 2 中的 BC 段。在等速干燥阶段末期,物料表面的蒸汽分压将小于饱和蒸汽压,因而推动力就减小,干燥速率即开始下降,从而进入降速干燥阶段。由于干燥速率逐渐减小,空气传给物料的热量,除作为汽化水分用之外,还有一部分将使物料的温度升高,最后物料的温度接近于空气的温度。在这期间,物料表面与中心的温度差也逐渐减小,直至消失。在降速干燥阶段,干燥速率的变化规律已与物料性质及内部结构有关,总的表现为水分自物料内部向表面转移的速率低于物料表面向空气的汽化速率,蒸发已由表面汽化控制转变成内部扩散控制。该阶段,干燥曲线可以通过式 (2) 加以描述^[27]

$$X = X_{eq} + (X_{cr} - X_{eq}) \times \exp \left[-\frac{X_0 - X_{cr}}{t_{cr}} \times \frac{t - t_{cr}}{X_{cr} - X_{eq}} \right] \quad (2)$$

2 结果与分析

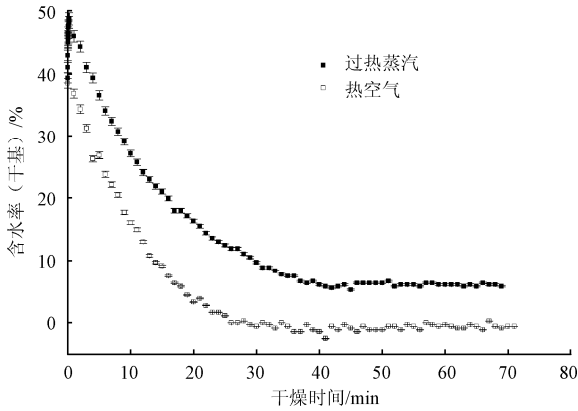
2.1 干燥曲线

通过试验得出干燥曲线如图 3 所示。通过比较可以看出,热空气和过热蒸汽下的干燥曲线明显存在不同。在过热蒸汽环境下,由于初始阶段的凝结作用褐煤的含水率较初始含水率有明显增加。尽管冷凝阶段的持续时间很短,但却导致初始含水率提高了近 25% (由 38.5% 增加至 49%),这显然会极大影响到后续的干燥动力学过程。

2.2 过热蒸汽干燥动力学特性分析

当干燥介质为过热蒸汽时,在预热阶段过热蒸汽迅速在物料的表面形成凝结水,物料的含水率增加。通过

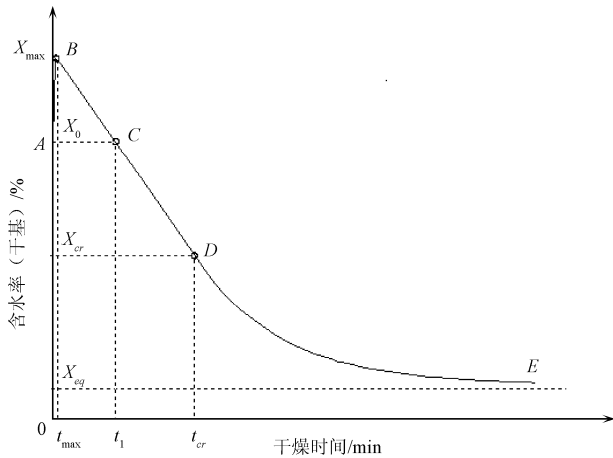
前述分析，该过程对后续干燥过程影响很大，不应忽略。因此，过热蒸汽干燥过程的数学模型应同时考虑上述 2 个阶段，对式 (1) 和 (2) 加以修正。典型的过热蒸汽干燥曲线的示意图如图 4 所示。



注：干燥温度均为 160℃。

图 3 褐煤热空气和过热蒸汽下的干燥曲线

Fig.3 Drying curves of hot air drying and super-heated steam drying for lignite



注： X_0 、 X_{max} 、 X_{cr} 和 X_{eq} 分别为物料原始干基含水率、蒸汽凝结结束时物料的干基含水率、临界干基含水率和平衡含水率，%； t_{max} 、 t_1 和 t_{cr} 为蒸汽凝结结束时对应的干燥时间、物料干燥过程中其干基含水率等于初始含水率时对应的干燥时间、物料含水率降低到临界干基含水率所对应的干燥时间，min。

图 4 过热蒸汽干燥曲线图

Fig.4 Drying curve of super-heated steam drying

AB 段：在物料过热蒸汽干燥的初始阶段，由于物料的温度通常均为环境温度，远低于于过热蒸汽温度，过热蒸汽会在湿物料的表面产生凝结。其凝结产生的汽化潜热被物料吸收，物料迅速上升到沸点温度。该阶段的时间虽然较短，但由于凝结水导致物料表面含水率的增加，因此不可忽略。该阶段的理论分析如下：

① 物料温度与干燥时间的关系

由于试验所用的样品较少，且物料与干燥介质接触良好，因而假设忽略其内部的温度梯度，即在干燥中满足集总参数法的条件。在初始阶段，物料的密度和比热

容变化不大，可认为不变。根据集总参数法，物料温度与干燥时间的关系如式 (3) 所示

$$\frac{T - T_{steam}}{T_0 - T_{steam}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \quad (3)$$

式中， T 为物料温度，℃； T_0 为物料初始温度，℃； T_{steam} 为蒸汽温度，℃； h 为换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； A 为物料表面积， m^2 ； ρ 为物料密度， kg/m^3 ； c 为物料比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ ； V 为物料体积， m^3 。

对式 (3) 加以整理，可得出式 (4)

$$T = T_{steam} + (T_0 - T_{steam}) \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) \quad (4)$$

② 物料吸收的热量与干燥时间的关系

$$dQ = cmdT = cm(T_0 - T_{steam}) \left(-\frac{hA}{\rho c V}\right) \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) dt \quad (5)$$

式中， dQ 为物料吸收热量的增量， kJ ； m 为物料湿质量， kg ； dT 为物料温度的增量，℃； dt 为干燥时间的增量， min 。

③ 过热蒸汽释放的热量与蒸汽凝结量的关系

$$dQ_{steam} = c_{steam} dm_{steam} (T_{steam} - T_{cond}) + dm_{steam} \gamma + c_w dm_{steam} (T_{cond} - T) \quad (6)$$

式中， dQ_{steam} 为过热蒸汽释放热量的增量， kJ ； c_{steam} 为过热蒸汽比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ ； dm_{steam} 为蒸汽凝结量的增量， kg ； T_{cond} 为蒸汽冷凝温度（即水的沸点温度），℃； γ 为蒸汽潜热， kJ/kg ； c_w 为水的比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ 。

由于物料吸收的热量等于过热蒸汽释放的热量，将式 (5) 代入式 (6)，可得蒸汽凝结量与干燥时间的关系如式 (7) 所示

$$dm_{steam} = \frac{cm(T_0 - T_{steam}) \left(-\frac{hA}{\rho c V}\right) \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) dt}{c_{steam} (T_{steam} - T_{cond}) + \gamma + c_w (T_{cond} - T)} \quad (7)$$

水的比热容约为 $4.2 kJ/(kg \cdot K)$ ，蒸汽冷凝温度为 T_{cond} 约为 $100^\circ C$ 。物料温度 T 是与时间有关联的变化值（约从 $20^\circ C$ 变化到 $100^\circ C$ ），直接对式 (7) 积分较为复杂。物料温度 T 按平均值 $60^\circ C$ 计算，式 (7) 分母中 $c_w (T_{cond} - T)$ 这一项的值约为蒸汽潜热 γ 的 $1/10$ ，因而作简化忽略 $c_w (T_{cond} - T)$ 这一项，然后对式 (7) 进行积分，得出蒸汽凝结量如式 (8) 所示

$$m_{steam} = \int_0^t dm_{steam} = \frac{cm(T_0 - T_{steam}) \left[\exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} t\right) - 1 \right]}{c_{steam} (T_{steam} - T_{cond}) + \gamma} \quad (8)$$

式中， m_{steam} 为蒸汽凝结量， kg 。

如前所述，干燥前物料湿质量为 m ，干基含水率为 X_0 ，因此干燥前物料中水分质量为 $mX_0/(1+X_0)$ ，绝干物料的质量为 $m/(1+X_0)$ 。因此，在干燥的预热阶段物料的干基含水率与干燥时间的关系如式 (9) 所示

$$X = \frac{\frac{mX_0}{1+X_0} + m_{steam}}{\frac{m}{1+X_0}} \quad (9)$$

$$= X_0 + \frac{c(T_0 - T_{steam}) \left[\exp\left(-\frac{hA}{\rho cV}t\right) - 1 \right] (1 + X_0)}{c_{steam}(T_{steam} - T_{cond}) + \gamma}$$

当物料温度达到蒸汽的凝结温度即 $T=T_{cond}$ 时, 蒸汽的凝结过程结束, 将 $T=T_{cond}$ 代入式 (3) 可以得出此时的干燥时间为

$$t_{max} = -\frac{\rho cV}{hA} \ln\left(\frac{T_{cond} - T_{steam}}{T_0 - T_{steam}}\right) \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8), 得出此时的蒸汽凝结量为

$$m_{steam-max} = \frac{cm(T_{cond} - T_0)}{c_{steam}(T_{steam} - T_{cond}) + \gamma} \quad (11)$$

式中, $m_{steam-max}$ 为蒸汽凝结结束时的凝结量, kg。

将式 (10) 代入式 (9), 得出此时物料的含水率为

$$X_{max} = X_0 + \frac{c(T_{cond} - T_0)(1 + X_0)}{c_{steam}(T_{steam} - T_{cond}) + \gamma} \quad (12)$$

上述对换热过程和蒸汽冷凝的机制的理论分析结果 (式 (3) ~ (12)) 可用于描述考虑了冷凝现象的过热蒸汽干燥过程。但该数学模型对如图 3 的试验数据进行分析拟合不是十分方便。本文将公式 (9) 进行简化, 得出该过程干燥曲线的数学描述如式 (13) 所示

$$X = X_0 + a[\exp(bt) - 1](1 + X_0) \quad (13)$$

式中, $a = \frac{c(T_0 - T_{steam})}{c_{steam}(T_{steam} - T_{cond}) + \gamma}$, $b = -\frac{hA}{\rho cV}$

BC 段: 由于过热蒸汽热量的传递, 物料表面的凝结水吸收热量后开始汽化, 直至凝结水汽化完毕, 物料表面的温度始终维持在冷凝温度。该阶段相当于纯水表面的自由汽化, 其干燥速率是恒定的。

CD 段: 物料表面的凝结水汽化完毕, 其内部的水分开始汽化。在该阶段, 过热蒸汽的热量传递也是通过蒸汽膜到物料的表面。由于只有一种气体成分存在, 水分从物料表面的汽化主要是通过压力差产生的体积流。物料内部的水分向其表面转移的速率与水分从物料表面汽化的速率相适应, 使物料表面能始终维持润湿状态, 物料表面的温度保持在沸点温度。在该过程中, 物料的干燥速率恒定, 同样物料水分的汽化也可认为是近似于纯水表面的汽化。

由于 BC 段和 CD 段均可认为是纯水表面的自由汽化, 干燥曲线可以采用水滴自由蒸发模型来进行数学描述^[27]。该阶段数学描述公式与热空气的恒速干燥段数学描述公式(1)相似, 但由于此阶段的起点为蒸汽冷凝结束

的时刻, 此时物料的干基含水率为 X_{max} 而非 X_0 , 对应的干燥时间为 t_{max} 而非 0。此外, 在该阶段中的某时刻经历的恒速干燥的时间为 $t - t_{max}$, 且在该阶段的干燥强度为 $(X_{max} - X_{cr}) / (t_{cr} - t_{max})$ 。因此, 本文认为该阶段任意时刻物料的干基含水率由 (14) 描述

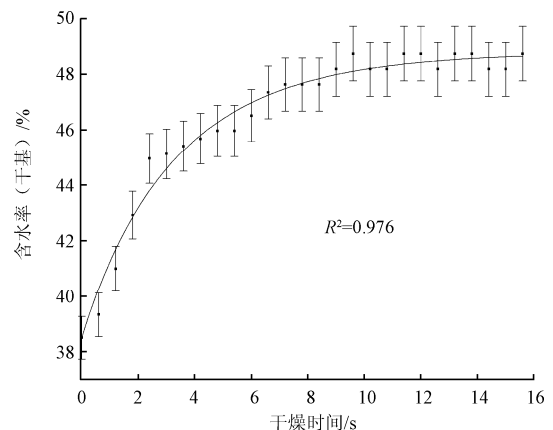
$$X = X_{max} - (X_{max} - X_{cr}) \times (t - t_{max}) / (t_{cr} - t_{max}) \quad (14)$$

DE 段: 干燥过程中物料表面不再保持湿润, 干燥速度就开始下降, 进入降速干燥阶段。降速干燥阶段干燥的水分主要为结合水, 这种水分主要是属于物化结合方式, 与物料的结合力较强, 因此结合水的特点是产生低蒸汽压, 即其蒸汽压低于同温度下纯水的饱和蒸汽压, 致使干燥过程的传质推动力降低, 所以结合水分较难除去。与热空气干燥一样, 过热蒸汽的降速干燥阶段, 物料内部的水分和热量的传递为干燥速率的主要影响因素。如前所述, 过热蒸汽恒速干燥段干燥强度为 $(X_{max} - X_{cr}) / (t_{cr} - t_{max})$ 而非 $(X_0 - X_{cr}) / t_{cr}$, 因此需要将热空气降速干燥段的数学描述公式(2)进行改动, 本文得出过热蒸汽降速干燥段的干燥曲线可以采用式(15)来进行数学描述

$$X = X_{eq} + (X_{cr} - X_{eq}) \times \exp\left(-\frac{X_{max} - X_{cr}}{t_{cr} - t_{max}} \times \frac{t - t_{cr}}{X_{cr} - X_{eq}}\right) \quad (15)$$

3 模型验证

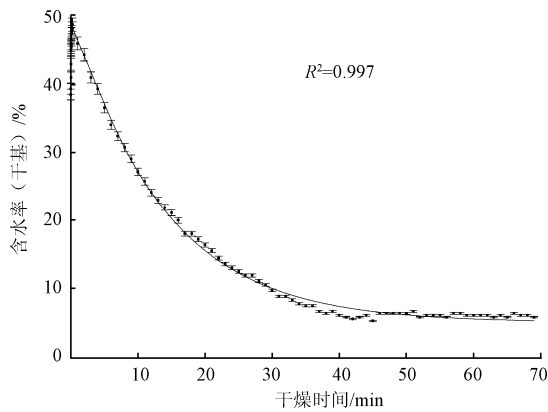
采用本文对过热蒸汽干燥曲线的数学描述公式 (13) ~ (15) 对试验得出的图 3 的褐煤过热蒸汽干燥曲线进行拟合, 得出的拟合曲线图如图 5 和图 6 所示。其中图 5 是凝结段曲线的拟合结果, 图 6 是整个过热蒸汽干燥曲线的拟合结果。可以看出, 拟合值和实际数据值的吻合程度较高, 决定系数 R^2 均达到了 0.97 以上, 这表明本文的数学模型可以用于过热蒸汽干燥曲线的拟合。



注: 干燥温度为 160℃。

图 5 过热蒸汽干燥凝结段曲线的拟合结果

Fig.5 Fitting curve of condensation stage of super-heated steam drying



注: 干燥温度为 160℃。

图 6 过热蒸汽干燥曲线的拟合结果

Fig.6 Fitting curve of super-heated steam drying

4 结 论

针对热空气干燥和过热蒸汽干燥动力学特性进行了理论分析和比较, 着重分析了过热蒸汽干燥初始阶段因蒸汽凝结对干燥过程的影响。得出了过热蒸汽干燥曲线各阶段的数学模型, 并将这些模型公式用于褐煤过热蒸汽干燥的试验曲线拟合, 结果表明与实际数据值的吻合程度较高, 决定系数 R^2 均达到了 0.97 以上。

本文对蒸汽凝结换热影响的分析是基于物料满足集总参数法的条件, 即物料的整体温度一致, 但在实际过热蒸汽干燥过程中如物料尺寸较大不满足温度梯度相同的情况下, 即物料不满足集总参数的条件, 则上述模型则需要进一步完善。

[参 考 文 献]

- [1] 陈怡群, 常春, 胡志超, 等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 255—259.
Chen Yiqun, Chang Chun, Hu Zhichao, et al. Simulation and analysis of drying process for recirculating grain dryer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 255—259. (in Chinese with English abstract)
- [2] 娄正, 高振江, 肖红伟, 等. 板栗气体射流冲击干燥特性研究和工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 368—373.
Lou Zheng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 368—373. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李书红, 王颀, 宋春风, 等. 不同干燥方法对即食扇贝柱理化及感官品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 373—377.
Li Shuhong, Wang Jie, Song Chunfeng, et al. Effects of different drying methods on physicochemical and sensory characteristics of instant scallop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 373—377. (in Chinese with English abstract)
- [4] 黄艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362—367.
Huang Yan, Huang Jianli, Zheng Baodong. Microwave vacuum drying properties and kinetics model of white fungus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 362—367. (in Chinese with English abstract)
- [5] Guiné R P F, Barroca M J, Lima M J R. Comparative study of the drying of pears using different drying systems[J]. International Journal of Fruit Science, 2011, 11(1): 55—73.
- [6] Reyes A, Mahn A, Huenlaf P. Drying of apple slices in atmospheric and vacuum freeze dryer[J]. Drying Technology, 2011, 29(9): 1076—1089.
- [7] Phungamngoen C, Chiewchan N, Devahastin S. Effects of food topographical features on attachment and heat resistance of salmonella during drying[J]. Drying Technology, 2011, 29(12): 1378—1385.
- [8] 潘永康, 王忠喜, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 773—775.
- [9] Nathakaranakule A, Kraiwanchikul W, Soponronnarit S. Comparative study of different combined superheated steam drying techniques for chicken meat[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(4): 1023—1030.
- [10] 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 等. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 351—356.
Gong Yingzhen, Niu Haixia, Xiao Zhifeng, et al. Simulation on rapeseed drying in superheated steam fluidized bed at atmosphere pressure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 351—356. (in Chinese with English abstract)
- [11] Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, et al. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15): 2483—2494.
- [12] Fyhr C, Rasmuson A. Some aspects of the modeling of wood chips drying in superheated steam[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(12): 2825—2842.
- [13] Bjork H, Rasmuson A. Moisture equilibrium of wood and bark chips in superheated steam[J]. Fuel, 1995, 74(12): 1887—1890.
- [14] Van Deventer H C. Feasibility of energy efficient steam drying of paper and textile including process integration[J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(8/10): 1035—1041.
- [15] Douglas W J M. Drying paper in superheated steam[J]. Drying technology, 1994, 12(6): 1341—1355.
- [16] Bongers G D, Jackson W R, Woskoboenko F. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals. Part 2. Shrinkage and physical properties of steam dried coals, preparation of dried coals with very high porosity[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 64(1/3): 13—23.
- [17] Chen Z, Wu W, Agarwal P K. Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle[J]. Fuel, 2000, 79(8): 961—973.

- [18] Chen Z, Agarwal P K, Agnew J B. Steam drying of coal. Part 2. Modeling the operation of a fluidized bed drying unit[J]. *Fuel*, 2001, 80(2): 209—223.
- [19] Fitzpatrick J. Sludge processing by anaerobic digestion and superheated steam drying[J]. *Water Research*, 1998, 32(10): 2897—2902.
- [20] 刘玉容. 杨木真空过热蒸汽干燥规律的研究[D]. 北京: 北京林业大学材料科学与技术学院, 2008.
Liu Yurong. Study on Poplar Drying Characteristic Under Vacuum Superheat Steam[D]. Beijing: College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [21] Tang Z, Cenkowski S, Izydorczyk M. Thin-layer drying of spent grains in superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(4): 457—465.
- [22] Markowski M, Cenkowski S, Hatcher D W, et al. The effect of superheated-steam dehydration kinetics on textural properties of Asian noodles[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 389—395.
- [23] Perre P, Moser M, Martin M. Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(11): 2725—2746.
- [24] Johansson A, Fyhr C, Rasmuson A. High temperature convective drying of wood chips with air and superheated steam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(12): 2843—2858.
- [25] Kittiworrawatt S, Devahastin S. Improvement of a mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(11): 2644—2650.
- [26] Sa-adchom P, Swadisevi T, Nathakaranakule A, et al. Mathematical model of pork slice drying using superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4): 499—507.
- [27] Zbicinski I, Li X. Conditions for accurate CFD modeling of spray-drying process[J]. *Drying Technology*, 2006, 24(9): 1109—1114.

Drying kinetics of condensation stage in super-heated steam drying

Shi Yongchun^{1,2}, Li Jie^{2*}, Li Xuanyou², Wang Chengyun², Zhao Gaiju², Yin Fengjiao²

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Industrial Energy Conservation Research Center, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250103, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of the drying process and to optimize the drying operation, the comparative test was conducted with hot air drying and super-heated steam drying for lignite. The results showed that the steam condensation happened obviously in the initial stage of the super-heated steam drying, which resulting the obvious different drying kinetics compared to the hot air drying. The effect of the steam condensation on the initial stage of the drying process was studied through theoretical analysis of drying kinetics of super-heated steam drying. The mathematical model of super-heated steam drying was improved by combining the steam condensation on the basis of the mathematical model of the hot air drying. The experimental results verified that the fitting precision of the improved mathematical model was well and the determination coefficient was above 0.97. The study can provide a basis for optimizing the design and operating conditions of the drying equipment.

Key words: drying, kinetics, models, super-heated steam drying, condensation