doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.032

过热蒸汽流化床干燥流动特性实验*

肖志锋[1]　吴南星[1]　刘相东[2]

(1. 景德镇陶瓷学院机械电子工程学院,景德镇 333403; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 在对过热蒸汽流化床干燥过程中干燥室内过热蒸汽和颗粒物料之间流动特性的理论分析基础上,以油菜籽颗粒为实验物料,在小型实验装置上进行了过热蒸汽和热空气的流态化对比实验。实验结果分析表明,相同条件下过热蒸汽流化床干燥的操作速度比传统热空气流化床干燥的操作速度更大,在给定的实验工况条件下,油菜籽过热蒸汽流化床干燥的临界流化速度为 1.26 m/s。

关键词: 油菜籽　过热蒸汽流化床干燥　流态化　临界流化速度

中图分类号: TQ028.6+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)07-0183-04

Experiment on Flow Characteristics of Fluidized Bed Drying with Superheated Steam

Xiao Zhifeng[1]　Wu Nanxing[1]　Liu Xiangdong[2]

(1. *School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen* 333403, *China*
2. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Based on the theoretical analysis of flow characteristics between superheated steam and granules materials in the fluidized bed drying chamber, the fluidization experiment with superheated steam and hot air was conducted by using the dried rapeseed particles as the experimental material. A small experimental device was established. The experimental results showed that the operating velocity of superheated steam fluidized bed drying was faster than the traditional hot air fluidized bed dying under the same conditions. Under the given conditions, the critical fluidization velocity of the rapeseed particles was 1.26 m/s during superheated steam fluidized bed drying.

Key words: Rapeseed　Fluidized bed drying with superheated steam　Fluidization　Critical fluidization velocity

引言

过热蒸汽流化床干燥是一项以过热蒸汽为干燥介质和流化介质的新型高效干燥技术,它结合了过热蒸汽干燥和流化床干燥的各自优点,具有节能环保、干后产品品质好和操作经济等特点[1~2]。在流化床干燥过程中,干燥室内气体和物料之间的流动特性影响传热传质效率和干燥均匀度,对于流化床干燥过程的顺利进行至关重要。过热蒸汽由于蒸汽分子之间的作用力和分子本身所占用的体积都不能忽略,具有明显的可压缩性和可凝结性[3]。过热蒸汽的基本热力学特性与热空气有很大差别,因此,过热蒸汽流化床干燥的流动特性远不同于传统的热空气流化床干燥[4]。为分析过热蒸汽流化床干燥室内的传热传质特性,了解过热蒸汽流化床干燥机理,必须首先对过热蒸汽流化床干燥的流动特性进行实验研究。目前,许多研究者利用计算机数值模拟方法来研究气固两相流[5~8],但由于非稳态流动过程复杂,影响因素多,数值求解过程繁琐,需要大量的假设,模拟结果一般不精确,与实际情况有一定的误

收稿日期: 2012-07-16　修回日期: 2012-08-16

*2013 年江西省青年科学基金计划资助项目(20132BAB216010)

作者简介: 肖志锋,讲师,主要从事干燥理论与技术研究,E-mail: cauxiao@126.com

差。本文在流化床气体动力学特性理论分析的基础上,通过搭建小型流化床干燥实验装置,以油菜籽为物料,进行过热蒸汽和热空气的流态化对比实验,研究过热蒸汽流化床干燥的流动特性。

1 流动特性理论分析

在流化床干燥过程中,当高温气体经气体分布孔板通过干燥室物料颗粒层时,随着气体速度的不断增大,干燥室物料颗粒层分别表现为固定床阶段、流化阶段和气流输送阶段。图 1 所示的干燥室理论流化曲线描述了干燥室物料床层压降 Δp 与气体表观速度 u 的关系[2]。在流化阶段,颗粒物料悬浮在气体中运动,床层将随气体表观速度的增加而不断膨胀,但床层的压降却保持不变,此阶段 B' 点的气体表观速度为最小流化气速,即临界流化速度。临界流化速度是反映流化特性的一个关键参数[9]。

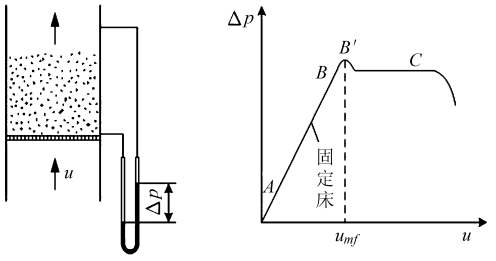

图 1 干燥室理论流化曲线

Fig. 1 Theory fluidized curves of drying chamber

为确保流化床干燥过程有效进行,设定的气体表观速度应介于临界流化速度和挟带速度之间。此时的气体表观速度称为流化床干燥的操作速度,其与临界流化速度之比称为流化数 K,即

$$K = u/u_{mf} \tag{1}$$

式中 u——气体表观速度,m/s

u_{mf}——临界流化速度,m/s

流化床实际干燥过程中,为了保证气体和固体颗粒之间的混合和传热传质效果良好,避免勾流和腾涌,一般 K 取值 1.5 ~ 5 之间[2]。

干燥室内气体和颗粒物料处于临界流化状态时,忽略颗粒之间以及颗粒和器壁之间的碰撞和摩擦,床层压降应等于颗粒的浮重,即

$$\Delta p = h_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \tag{2}$$

式中 h_{mf}——临界床层高度,m

ε_{mf}——临界床层空隙率

ρ_p——颗粒物料密度,kg/m^3

ρ_g——气体密度,kg/m^3

g——重力加速度,m/s^2

临界流化状态也可以理解为固定床的一种极限,通过 Ergun 方程计算其压降[10],即

$$\frac{\Delta p}{h_{mf}}g = 150\frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3}\frac{\mu u_{mf}}{\phi^2 d_p^2} + 1.75\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3}\frac{\rho_g u_{mf}^2}{\phi d_p} \tag{3}$$

式中 ϕ——颗粒物料的球形度

μ——气体的粘度,Pa·s

d_p——颗粒物料的粒径,m

联立式(2)和(3)得

$$\frac{1.75}{\phi\varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p u_{mf}\rho_g}{\mu}\right)^2 + 150\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\phi^2\varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p u_{mf}\rho_g}{\mu}\right) = \frac{d_p^3\rho_g(\rho_p-\rho_g)g^2}{\mu^2} \tag{4}$$

式(4)即为临界流化速度的理论计算方程。由式(4)可以看出,临界流化速度与气体的粘度、密度,颗粒的密度、球形度、粒径,以及床层高度、床层空隙率和重力加速度等参数相关。若颗粒物料以及干燥室工况条件相同,即颗粒物料的密度、球形度、粒径,以及床层高度、床层空隙率和重力加速度等参数不变,则临界流化速度只取决于气体的粘度和密度。气体的粘度、密度越小,则临界流化速度越大;气体的粘度、密度越大,则临界流化速度越小。常压下过热蒸汽的粘度、密度都分别小于同样温度下热空气的粘度、密度,所以过热蒸汽充当流化介质时,临界流化速度要更大。因此,过热蒸汽流化床干燥的操作速度比传统热空气流化床干燥也要更大。

2 流动特性实验

2.1 实验装置

图 2 为常压下工作稳定可靠的小型过热蒸汽流化床干燥装置示意图,可分别进行过热蒸汽和热空气的流态化对比实验,获得实际流化曲线。

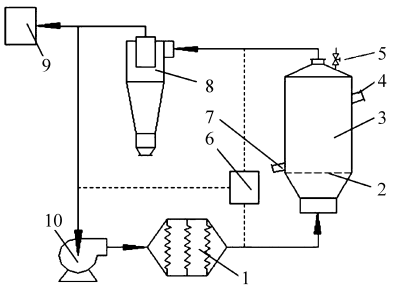

图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

1. 电加热器 2. 气体分布孔板 3. 干燥室 4. 进料口 5. 安全阀 6. 测控系统 7. 出料口 8. 旋风分离器 9. 冷凝器 10. 循环风机

该实验装置高 1.5 m,占地面积约 0.3 m^2,其中:直热式电加热器放置于控制柜内左侧,加热功率可采用 PID 模糊逻辑控制调节,额定功率为 9 kW;循环风机安装在控制柜的后侧,叶轮转动频率可调

节，额定风量为 180 m^3/h；参数测控系统可在线测控和调节风机叶轮转动频率以及干燥室进口、出口风温等；干燥室主要由硼硅玻璃和耐酸不锈钢组成，气体分布孔板置于锥顶。圆柱段内壁直径 120 mm，高 250 mm；置于圆柱段底端的气体分布孔板开孔率约 10%，孔径 1.5 mm。干燥室出口部分接旋风分离器。冷凝器安装在循环风机进风管的前端旁路，用于冷凝干燥中湿物料蒸发出来的多余蒸汽，使整个系统的操作压力基本维持恒定。干燥室进风温度的可控制调节范围为 20 ~ 300℃，蒸汽循环管道外壁缠绕保温隔热的石棉带。

2.2　实验材料

选用油菜籽颗粒作为实验材料。油菜籽粒径小、比表面积大、球形度好，能经受较高的热风温度，容易实现流态化。从准备好的干油菜籽中随机抽取 200 粒样品，经游标卡尺测量，油菜籽粒径主要在 1.4 ~ 2.1 mm 之间，平均粒径为 1.76 mm。油菜籽的颗粒密度对于干燥室内气固两相流动性有重要影响，一般来说，要使颗粒密度大的固体颗粒物料流态化需要更高的气体流动速度。油菜籽颗粒密度采用体积排测法测定。随机抽取部分近似绝干的油菜籽，通过数字天平测得其质量，之后采用排液法测得这部分油菜籽所占的体积，采用密度公式计算得到结果；重复以上步骤，共测量 5 次，计算结果的平均值即为油菜籽颗粒密度，见表 1。

表 1　物料参数及实验工况条件

Tab.1　Material parameters and test conditions

参数	数值
油菜籽颗粒密度/$kg\cdot m^{-3}$	817
油菜籽平均粒径/mm	1.76
物料静止床层高度/mm	80
操作压力/Pa	1.01×10^5
进气温度/℃	120
静止床层空隙率	0.43
流化床干燥室尺寸/mm × mm	$\phi120\times250$
鼓风机额定风量/$m^3\cdot h^{-1}$	180
加热器额定功率/kW	9

2.3　实验过程

油菜籽的过热蒸汽流化床干燥流动特性实验过程如下：关闭干燥室出料口阀门，打开干燥室进料口阀门，按顺序开启循环风机和电加热器，循环预热干燥装置，当整个干燥器的循环热空气温度被空转加热到约 180℃时，从进料口连续缓慢滴入水至干燥室内，水将不断汽化，约 15 min 后，蒸汽逐渐把干燥室内的热空气全部排出[7]。此时，整个干燥室内循环的热气流为过热蒸汽；停止注水，将近似绝干的油菜籽从干燥室进料口迅速加入，关闭进料口阀门，设置进口过热蒸汽温度为 120℃。调节风机转动频率，首先将过热蒸汽的鼓入速度尽可能提高至使得部分油菜籽物料被带出干燥室；然后再采用降速方法，逐步减小风机的转动频率，依次分别记录 U 形压力计和风速计的读数，同时观察干燥室内气固两相流状态。具体实验工况条件如表 1 所示。在以上相同的工况条件下，再以 120℃的热空气为流化介质，进行流化床干燥流动特性实验。

3　实验结果及分析

干燥室内油菜籽在热空气和过热蒸汽中的流化实验结果如图 3 所示。

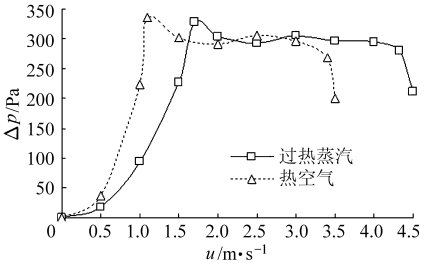

图 3　绝干油菜籽的流化实验曲线

Fig.3　Fluidized curves of dried rapeseed

从图 3 可以看出，油菜籽在常压下进气温度为 120℃的过热蒸汽流化床中的临界流化速度约为 1.6 m/s，此时的床层压降最大，为 331 Pa。过热蒸汽流速低于临界流化速度时，床层压降随过热蒸汽流速的增大而增大。挟带速度约为 4.3 m/s，当过热蒸汽流速高于挟带速度时，油菜籽颗粒物料随蒸汽一起被带出干燥室，因而床层压降迅速减小。同时，通过观察实验时床层内的气固流化状态可知，适宜于常压下油菜籽过热蒸汽流化床干燥的操作流化速度范围为 2.1 ~ 3.5 m/s。而对于相同工况条件下，热空气流化床中油菜籽的临界流化速度为 1.1 m/s，挟带速度为 3.4 m/s。通过实验观察，得到适宜于常压下油菜籽热空气流化床干燥的操作流化速度范围为 1.5 ~ 3.0 m/s。

由文献[11]可知，常压下 120℃过热蒸汽的密度为 0.557 kg/m^3、粘度为 1.29×10^{-5} Pa·s；热空气的密度为 0.898 kg/m^3、粘度为 2.05×10^{-5} Pa·s。根据式(4)，假设油菜籽为球形颗粒，有 $\varepsilon_{mf}=0.4$、$\phi=1$，计算得到油菜籽在 120℃过热蒸汽中的临界流化速度为 1.26 m/s，在 120℃热空气中的临界流化速度为 0.95 m/s。可以看出，理论计算出来的临界流化速度值都分别小于实验所测得的 1.6 m/s 和 1.1 m/s。显然过热蒸汽为流化介质时，临界流化速度的理论计算结果与实验结果相差较大，这可能是

由于实验中具有很高温度的过热蒸汽接触室温状态下的物料时发生冷凝,导致干燥室内部分油菜籽颗粒结块,造成油菜籽密度增大和床层局部空隙率减小。而当热空气为流化介质时,不会发生冷凝,因而误差相对较小。

图 3 还表明,同等条件下过热蒸汽的临界流化速度比热空气的临界流化速度更大,与理论分析的结果一致。因此,相比于传统的热空气流化床干燥,过热蒸汽流化床干燥操作速度更大,须选用风量和风压更大的风机。

4 结论

(1) 过热蒸汽流化床干燥颗粒物料时,过热蒸汽的密度和粘度对操作速度有重要影响。在工况条件以及颗粒物料相同时,气体介质的粘度、密度越小,则临界流化速度和操作速度越大;反之,则临界流化速度和操作速度越小。

(2) 由于常压下过热蒸汽的粘度、密度都分别小于同等温度热空气的粘度、密度,因此在相同条件下,过热蒸汽流化床干燥的操作速度比传统热空气流化床干燥更大。

(3) 在本文给定的实验工况条件下,油菜籽在过热蒸汽中的临界流化速度为 1.26 m/s,而在热空气中的临界流化速度为 0.95 m/s,分别比理论计算得到的 1.6 m/s 和 1.1 m/s 要更小,实验结果为过热蒸汽流化床干燥过程传热传质研究提供了参考。

参 考 文 献

1 Kudra T, Mujumdar A S. Advanced drying technologies [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

2 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.

3 斯米特 E, 格里古尔 U. 国际单位制的水和水蒸汽性质 [M]. 赵兆颐,译. 北京:水利电力出版社, 1983.

4 肖志锋. 过热蒸汽流化床干燥过程数值模拟及试验 [D]. 北京:中国农业大学, 2008.
Xiao Zhifeng. Numerical simulation and experimental study on fluidized bed drying process with superheated steam [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)

5 刘鑫, 陈文义, 范晓旭, 等. 小型生物质循环流化床气化炉内流动整体三维模拟 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 112~116.
Liu Xin, Chen Wenyi, Fan Xiaoxu, et al. 3-D numerical simulation of flow structure in miniature biomass circulating fluidized beds gasifier [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 112~116. (in Chinese)

6 Zhou Z Y, Yu A B, Zulli P. A new computational method for studying heat transfer in fluid bed reactors [J]. Powder Technology, 2010, 197(1~2): 102~110.

7 Xiao Zhifeng, Yang Deyong, Yuan Yuejin, et al. Fractal pore network simulation on the drying process of porous media [J]. Drying Technology, 2008, 26(6): 651~665.

8 Parinya K, Archwit A, Sunun L, et al. Axial gas and solids mixing in a down flow circulating fluidized bed reactor based on CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73: 8~19.

9 国井大藏. 流态化工程 [M]. 北京: 中国石油化工出版社, 1977.

10 金涌, 祝京旭, 汪展文, 等. 流态化工程原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

11 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化工物性算图手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.