

脉动燃烧尾气干燥过程质量传递特性*

牛海霞¹ 刘榴¹ 赵文河² 刘相东¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东天力干燥设备有限公司, 济南 250014)

【摘要】 在 Helmholtz 型脉动燃烧器尾管中进行了耐火土颗粒的干燥实验, 通过干燥法中的简化法确定了不同频率下物料内部的水分扩散系数。应用费克第二定律, 结合适当的初始条件和边界条件, 并根据实验确定不同频率下脉动气流与耐火土颗粒间的对流传质系数, 探讨脉动频率对脉动燃烧干燥过程中气流与物料间的对流传质系数的影响, 建立了修伍德数与脉动频率间的关联式。结果表明, 在干燥过程中气流的脉动可强化物料内部水分扩散, 脉动气流传质的修伍德数远高于相同雷诺数下稳定紊流中的数值。

关键词: 耐火土 脉动燃烧 干燥 传质

中图分类号: S226.6; TQ021.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0129-05

Mass Transfer between Materials and Unsteady Airflow from a Helmholtz Type Combustor

Niu Haixia¹ Liu Liu¹ Zhao Wenhe² Liu Xiangdong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Tianli Drying Equipment Inc., Ji'nan 250014, China)

Abstract

Although pulse combustion drying would exhibit high rate of mass transfer when used in a drying process, there is no numerical research about the mass transfer between materials and unsteady flow generated by pulse combustor. The results of an investigation of the moisture diffusivity in refractory clay and the convection process of moisture between refractory clay and outflow was reported. A Helmholtz type pulse combustion was used to generate an oscillating airflow. The moisture diffusivity in refractory clay was determined by the simplified method of drying methods. The mass transfer coefficient between refractory clay and outflow was evaluated by the results of experiment and Fick's second law with reasonable initial conditions and boundary conditions. The effect of airflow oscillating frequency on mass transfer coefficient was investigated and the correlation was established.

Key words Refractory clay, Pulse combustion, Drying, Mass transfer

引言

脉动燃烧干燥技术是一种利用脉动燃烧器产生的高温、强振荡尾气流对物料进行干燥的新型干燥技术^[1]。与传统干燥相比, 脉动燃烧干燥具有适应物料范围广、蒸发能力强、能耗低和干燥产品质量高

等优点^[2]。已有很多学者对该技术进行了研究^[3-6], 这些研究获得的是特定条件下脉动气流与物料间的传质特性, 不适用于所有的脉动气流情况, 为深入了解脉动燃烧干燥过程的传质特性, 本文对脉动燃烧器产生的尾气流直接干燥物料的传质特性进行研究。

收稿日期: 2010-04-22 修回日期: 2010-05-17

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA05Z217)

作者简介: 牛海霞, 硕士生, 主要从事干燥技术及装备研究, E-mail: niu haixia@126.com

通讯作者: 刘相东, 教授, 博士生导师, 主要从事干燥理论与设备研究, E-mail: xdlu@cau.edu.cn

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

所用实验台是一台膜片阀式 Helmholtz 型脉动燃烧器,由圆柱形的燃烧室(直径 100 mm,长度 250 mm)及尾管组成。尾管包括内径为 40 mm、长 1 m 尾管基段及延长管,通过增加延长管的方法调节尾管长度以改变脉动频率。尾管基段有一同轴的外管,内外管间的环形空间作为冷却水的通道。通过改变冷却水的流量可以调节尾管内脉动气流的温度。在尾管的第 2 部分(即延长管部分)距气流进口 1.4 m 处,开有一个长方形孔(100 mm × 36 mm),放置用来固定作为实验物料的 12 个耐火土球形颗粒的插入块。实验物料分别插在小针上并置于脉动流场中,其中 1 个与热电偶相连以测量其温度并将所得温度视为实验物料的温度,其余物料用于确定在干燥过程中物料含水率的变化。实验设备如图 1 所示。

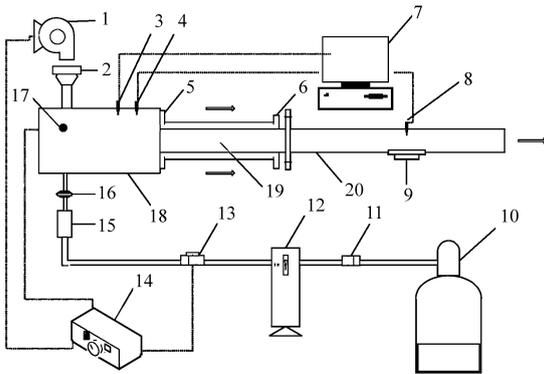


图 1 实验主要装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

1. 吹扫风机 2. 空气阀 3. 压力传感器 P1 4. 温度传感器 T1
5. 冷却水进口 6. 冷却水出口 7. 数据采集系统 8. 温度传感器 T2
9. 实验装置(其上有温度传感器 T3) 10. 液化气罐
11. 压力控制阀 12. 燃气流量计 13. 电磁阀 14. 控制系统
15. 燃气去耦室 16. 燃气阀 17. 火花塞 18. 燃烧室 19. 尾管 I
20. 尾管 II

1.2 测量装置

压力传感器 P1 和温度传感器 T1 用来测量燃烧室内的压力和温度,温度传感器 T2 和 T3 分别用于测量尾管内气流和物料的温度。为了研究工作的需要开发了一套计算机数据采集系统。压力和温度的采样频率分别为 11 kHz 和 0.5 Hz。使用 U 形管装置检测燃气流量。

1.3 实验方法

脉动燃烧器所用燃料为液化石油气,实验过程中燃气流量约为 0.8 m³/h。用于干燥实验的耐火土颗粒(其中 SiO₂ 质量分数 45%, Al₂O₃ 质量分数

37%,其他 18%)初始含水率为 0.32(干基),直径近似为 6 mm。将实验物料置于脉动流场中,进行了脉动频率分别为 55.48、44.90、38.55 和 36.17 Hz 下的干燥实验。将热电偶插入 12 个颗粒之一以测量其温度变化。其他颗粒在气流干燥 10、20、30、50 及 80 s 各时间段依次取下一个物料称量,以确定物料的含水率变化,共进行 20 次实验。通过调节冷却水的流量,将各频率下实验位置尾气温度控制在 300℃ 左右。

2 理论分析

2.1 物料内部水分扩散系数

干燥过程中,用费克第二定律模拟降速干燥阶段。将耐火土颗粒视为各向同性、均质的理想球体;干燥开始时物料内部水分和温度均匀分布,忽略干燥过程中物料的收缩和干物质密度的变化;假设水分扩散系数与物料当前含水率无关,得到的费克第二定律形式为

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \nabla^2 X \quad (1)$$

式中 X ——局部含水率 t ——时间, s
 D ——水分的质量扩散系数, m²/s

对球体的解析解为

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 Dt}{R^2}\right) \quad (2)$$

式中 X^* ——无因次含水率
 \bar{X} —— t 时刻下湿物料的平均含水率
 X_o ——物料的初始含水率
 X_e ——平衡含水率

R ——物料的特征尺度,此处为球体半径, m

当式(2)左侧小于 0.6 时,公式右侧只取第 1 项即可得到合理的精度,故可忽略其余各项,得到^[7]

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{R^2}\right) \quad (3)$$

将实验所得无因次含水率与时间画在半对数坐标上,所得曲线在初期为直线,后期有所偏离。认为直线段的斜率为 $\pi^2 D/R^2$,由此确定水分扩散系数。对质量扩散系数受水分影响较大的情况采用求解水分扩散系数的 Perry 修正公式,即

$$D = (dX_{\text{exp}}^*/dt) / (dX_{\text{th}}^*/dF_o) R^2 \quad (4)$$

其中 $X_{\text{exp}}^* = e^{-bt}$ $X_{\text{th}}^* = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 F_o}$

$$F_o = Dt/R^2$$

式中 X_{exp}^* ——实验无因次含水率
 X_{th}^* ——理论无因次含水率
 F_o ——傅里叶准数

2.2 脉动燃烧干燥过程的传质模型

视耐火土颗粒为球体,假定物料在干燥过程中只在半径方向上存在水分梯度,干物质密度、水分扩散系数不变,根据费克第二定律,得到物料内部水分分布方程为

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X^*}{\partial r^2} \quad (5)$$

$$\text{初始条件} \begin{cases} 0 < r < R \\ t = 0 \\ X^* = 1 \end{cases}$$

$$\text{边界条件} \begin{cases} r = R \\ t > 0 \\ D \frac{\partial C_A}{\partial r} = -k_c (K C_{AW} - C_{A\infty}) \end{cases}$$

$$\text{在颗粒轴心,由对称性有} \begin{cases} r = 0 \\ t > 0 \\ \frac{\partial X^*}{\partial r} = 0 \end{cases}$$

式中 r ——径向坐标, m

C_A ——水分的局部摩尔浓度, kmol/m³

k_c ——对流传质系数, m/s

K ——平衡分配系数

C_{AW} ——物料表面处的内部水分摩尔浓度, kmol/m³

$C_{A\infty}$ ——边界层外主流的摩尔浓度, kmol/m³

求解上述偏微分方程过程中,需要确定对流边界条件中的对流传质系数 k_c ,该系数由实验数据平均无因次水分 \bar{X}^* 与计算无因次水分 X^* 拟合获得。平均无因次水分与计算无因次水分的关系为

$$\bar{X}^* = \frac{1}{V} \int X^* dV \quad (0 < r < R, t > 0)$$

式中 V ——物料体积, m³

由以上偏微分方程求出耐火土颗粒内部的水分分布与对流传质系数的关系,根据实验结果用数值法求出对流传质系数。再选用适当的稳定紊流场中的努塞尔数关联式,根据热、质传递的比拟理论,建立伍德数与气流脉动频率间的关联式。

3 实验结果与分析

3.1 耐火土颗粒在脉动气流下的干燥动力学特性

实验测量了 4 个脉动频率下尾气流干燥耐火土过程中物料质量、物料温度和气流温度随时间的变化,绘制出相应的干燥动力学曲线,得到的曲线具有相同的走势。图 2 为脉动频率 55.48 Hz 下气流温度维持在 300℃ 左右时耐火土颗粒的干燥动力学曲线,由干燥曲线可以看出物料在干燥前 10 s 水分下

降很快,同时从对应的温度曲线看出干燥 5 s 后物料开始升温,所以可能在干燥 5 s 后常速段即已结束,之后进入降速干燥阶段。但由于初期干燥时间很短(20 s),无法增加取样数目,在干燥曲线上未能反映出来,所以可采用费克第二定律描述实验涉及的干燥过程。

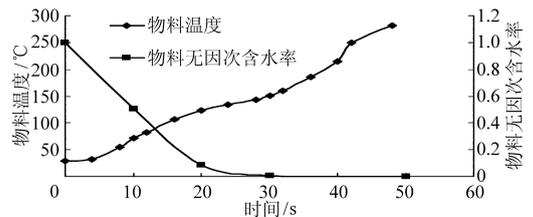


图 2 耐火土颗粒干燥动力学曲线

Fig. 2 Drying curves of refractory clay

3.2 干燥过程中脉动气流对质量传递的影响

同一频率下干燥不同时间段的耐火土颗粒为同一次制备,并将其置于密封塑料袋中保存在冰箱冷藏室内,以便在等待实验过程中物料水分不致散失,保证实验物料初始含水率一致,认为物料具有相同的初始含水率 0.32。在脉动燃烧尾气中干燥 80 s 时物料含水率变化已经很小,在计算时假定干燥 80 s 后物料中的含水率梯度为零、物料中水分与气流中水分达到平衡,此时的含水率即为物料的平衡含水率。由物料的初始含水率和实验得到不同时间下物料质量(每种频率条件下平行重复 3 次实验,取算术平均值),得到物料无因次含水率随时间的变化,如图 3 所示。

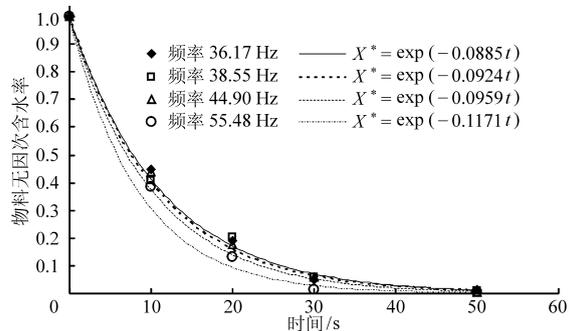


图 3 无因次含水率-时间关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between dimensionless water content and time

依据实验结果建立的无因次平均含水率与耐火土颗粒干燥时间回归方程为

$$\bar{X}^* = X_{\text{exp}}^* = e^{-bt} \quad (6)$$

频率为 36.17、38.55、44.90 和 55.48 Hz 时回归方程中的参数 b 的对应值分别为 0.0885、0.0924、0.0959 和 0.1171。

3.2.1 水分扩散系数的确定

由回归方程看出,物料含水率近似服从指数规

律,通过干燥法中的简化法确定物料内部的水分扩散系数。图4为脉动频率55.48 Hz下物料水分扩散系数 D 随无因次含水率的变化。在一定的脉动频率下物料的水分扩散系数基本与物料含水率无关,在误差范围内可近似看作常数,这可能是由耐火土颗粒的物料特性决定的^[8]。但是不同脉动频率下物料内部的水分扩散系数不同,如图5所示。频率为36.17、38.55、44.90和55.48 Hz时物料内部水分扩散系数分别为 8.08×10^{-8} 、 8.45×10^{-8} 、 8.75×10^{-8} 和 $1.07 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

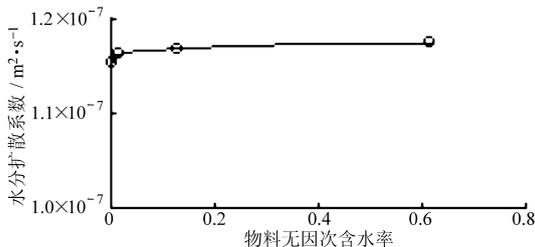


图4 水分扩散系数-无因次含水率关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between moisture diffusivity and dimensionless water content

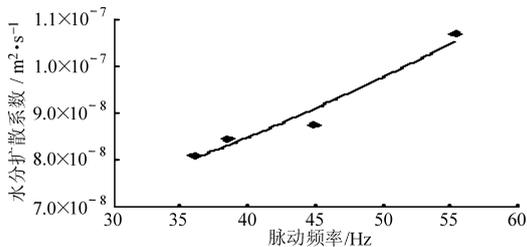


图5 水分扩散系数-脉动频率

Fig. 5 Relationship curve between moisture diffusivity and frequency

建立耐火土颗粒内部水分扩散系数与脉动频率的回归方程为

$$D = 5 \times 10^{-8} e^{0.0141f} \quad (7)$$

式中 f ——燃烧室内气流脉动频率, Hz

根据所得回归方程,得到当脉动频率为零,即无气流脉动时,水分扩散系数为 $5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,实验结果表明气流脉动频率对耐火土颗粒内部水分扩散系数有较大影响。

3.2.2 对流传质系数的计算

在一定脉动频率下,耐火土颗粒的水分扩散系数近似为常数。根据费克第二定律,结合脉动燃烧干燥过程中的相关初始条件和边界条件,再由实验得到的物料无因次平均水分的变化情况,求解式(5)。假设 K 为1、气流与物料间的对流传质系数与温度无关,用数值法求出各脉动频率下耐火土颗粒与脉动气流间的对流传质系数 k_c 。使用毕托管和

微压计测量尾气流的动静压之差,据此确定实验过程中的气流流速。根据对流传质系数和气流流速确定相应的修伍德数和雷诺数。选用表示球体在稳定紊流流场中的努塞尔数关联式——Frossling公式^[9],根据热、质传递的比拟理论,建立修伍德数与气流脉动频率间的关联式为

$$Sh = (2.0 + 0.6Re_d^{1/2}Sc^{1/3})(1+f)^{0.29} \quad (3.5 < Re_d < 76000) \quad (8)$$

式中 Sh ——修伍德数

Sc ——施密特数

Re_d ——基于气流平均速度的雷诺数

通常认为脉动气流压力脉动的振幅及频率是影响传质的主要因素,由于在本文中,脉动燃烧器燃烧室内压力变化范围很小,仅为9.7~11.6 kPa,可以近似认为是一常数,因此该关联式中只考虑频率的影响。图6为不同脉动频率,以及对应雷诺数下通过式(8)计算(曲线)以及实验条件下测定(4个点)获得的修伍德数。稳定紊流中的修伍德数根据式(8),取脉动频率 $f=0$ 求得,脉动流场中的修伍德数约为相同雷诺数下稳定紊流中修伍德数的3倍多,反映出脉动流场的对流传质系数远大于稳定流场的对流传质系数,与传热过程相类似^[10]。

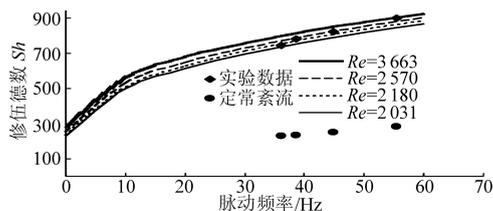


图6 修伍德数与脉动频率间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between Sherwood number and frequencies

4 结束语

本文对脉动燃烧器产生的脉动气流和耐火土颗粒间的传质过程进行了研究。通过对耐火土颗粒进行干燥动力学实验,应用简化法确定了物料内部的水分扩散系数,在一定脉动频率下该水分扩散系数近似为一常数,随脉动频率的增大水分扩散系数增大,表明在干燥过程中气流的脉动可强化物料内部水分扩散。根据费克第二定律,结合相关初始条件、边界条件及实验数据,得到了耐火土颗粒与脉动气流间的对流传质系数,并建立了修伍德数与气流脉动频率间的关联式。结果表明,与脉动气流传热的努塞尔数类似,脉动气流传质的修伍德数也远高于相同雷诺数下稳定紊流中的数值。

参 考 文 献

- 1 刘相东. 介绍一种新技术——脉动燃烧干燥[J]. 化工进展,1999(1):71~72.
- 2 Zinn B T. 脉动燃烧[M]. 程显辰,译. 北京:中国铁道出版社,1994.
- 3 Jangi M, Kobayashi H. Heat and mass transfer of a fuel droplet evaporating in oscillatory flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(4):729~740.
- 4 Drummound C K, Lyman F A. Mass transfer from a sphere in an oscillating flow with zero mean velocity[J]. Computational Mechanics, 1990, 6(4):315~326.
- 5 Fan Zhongliang, Mao Zhuoxiong, Chen Jiayong. Mass transfer in turbulent pulsating flows[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1993,1(3):127~140.
- 6 Sujith R I, Zinn B T. A theoretical investigation of enhancement of mass transfer from a packed bed using acoustic oscillations [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78(6):1145~1150.
- 7 Zogzas N P, Maroulis Z B, Marinos-Kouris D. Moisture diffusivity methods of experimental determination a review [J]. Drying Technology,1994, 12(3):483~515.
- 8 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 9 Knudsen J G, Katz D L. Fluid dynamics and heat transfer[M]. N. Y.: McGraw-Hill Co., 1985.
- 10 陈有庆,刘相东. 干燥过程中脉动气流与物料间的热量传递特性[J]. 干燥技术与设备,2007,5(2):89~92.
Chen Youqing, Liu Xiangdong. Heat transfer between material and unsteady airflow from a Helmholtz type combustor[J]. Drying Technology & Equipment, 2007, 5(2):89~92. (in Chinese)
- 11 路倩倩,杨德勇,郎芝花,等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):123~127.
Lu Qianqian, Yang Deyong, Lang Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in helmholtz pulse combustion dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(3):123~127. (in Chinese)

~~~~~

(上接第89页)

- 18 李爱平,汪春. 苜蓿段长度对干燥速度与悬浮速度影响的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(8):168~170.  
Li Aiping, Wang Chun. Experimental study on the effect of alfalfa's length on drying rate and floating velocity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8):168~170. (in Chinese)
- 19 赵艳忠,郑先哲,韩永俊,等. 苜蓿干燥过程中临界速度测定试验研究[J]. 农机化研究,2003(3):134~135.
- 20 王佳玮. 基于茎叶分离的苜蓿悬浮速度实验研究[D]. 北京:中国农业大学,2008.  
Wang Jiawei. Experimental research on the suspension velocity of alfalfa for leaf-stem separation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 21 罗小燕,王德成,王光辉,等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报,2009,40(10):71~74,85.  
Luo Xiaoyan, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Simulation and optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):71~74,85. (in Chinese)
- 22 曹崇文,朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- 23 商景泰. 通风机实用技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 24 高扬,王德成,王光辉,等. 紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化[J]. 农业机械学报,2010,41(6):113~117,162.  
Gao Yang, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Effect prediction model and process optimization of the drying and separating for leaf-stem of fresh chopped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):113~117,162. (in Chinese)