

脉动燃烧干燥换热特性分析与实验*

路倩倩 杨德勇 郎芝花 刘相东

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 利用 Helmholtz 型脉动燃烧器,进行了脉动气流与黄铜球间的对流换热实验,应用集总热容法确定了不同频率脉动气流与黄铜间的对流换热系数,探究了脉动频率对脉动燃烧干燥过程中气流与物料间对流换热系数的影响,建立了努塞尔数与脉动频率间的关联式,并对耐火土颗粒在脉动燃烧气流中的干燥过程进行了预测,实验结果与预测值吻合较好。

关键词: 干燥 脉动燃烧 对流换热系数 努塞尔数 脉动频率

中图分类号: S226.6; TQ021.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0123-05

Analysis and Experiment of Heat Transfer in Helmholtz Pulse Combustion Dryer

Lu Qianqian Yang Deyong Lang Zhihua Liu Xiangdong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to further understand the heat transfer characteristics of pulse combustion drying process, a Helmholtz type pulsing burner was used to carry out heat-transfer experiments. Through a convective heat-transfer experiment between pulsing air and brass ball by the method of lumped heat capacity, the convective heat-transfer coefficient in different frequencies pulse air was determined, and the impact of pulse frequency on the convective heat-transfer coefficient between material and airflow was investigated, the criterion correlation between Nu and pulse frequency was also established. By using the established correlation, the drying process of the refractory clay particles in the pulse combustion was forecasted. Compared with the experimental value, the results showed that the predicted values and the experimental results matched well.

Key words Drying, Pulse combustion, Convective heat-transfer coefficient, Nusselt number, Pulse frequency

引言

与传统稳定燃烧相比,脉动燃烧具有燃烧效率高、传热系数大、燃烧排放污染小、脉动燃烧器结构简单等优点。脉动燃烧干燥利用脉动燃烧器产生的高温、高频振荡尾气流以及燃烧过程产生的强声波能进行干燥作业,可强化传热传质过程,提高干燥效率,是一种理想的新型干燥技术^[1-3]。

振荡传热与振荡频率、振幅、振动方式等有关,

大多数研究表明流体脉动可增强换热效率,但也可能会削弱传热效果。Blomquist 等^[4]通过将燃烧器分段冷却发现振荡流动中的传热系数沿轴向呈波动变化,且比非振荡流动的传热系数大 25%~40%。Al-haddad 等^[5]则发现,随雷诺数增大,湍流振荡流动中的传热系数降低,且低于非振荡流动中的传热系数。文献[6~7]发现层流脉动空气的雷诺数和脉动频率既可增强也可减弱换热特性。Moschandreou 等^[8]研究了普朗特数、脉动频率对换

热(努塞尔数)的影响规律。李保国等^[2]利用脉动燃烧器干燥油菜籽时发现,努塞尔数与雷诺数近似呈指数关系变化,脉动燃烧器尾管内干燥的努塞尔数比部分传统干燥器的努塞尔数提高2~5倍。Dec等^[9]测量了脉动燃烧器作为换热器时脉动气流与冷却水间的总传热系数,但该方法仅能反映气流与管壁间的传热特性,而不能反映干燥过程中气流与待干物料间的热量传递特性。由此可见,振荡传热过程相当复杂且受多种因素制约,对其机理的认识制约了脉动燃烧干燥方法的广泛应用。

几乎所有关于脉动对流换热的理论分析或求解都是借助于准稳态理论来实现的,但脉动燃烧实验无法满足准稳态理论的基本前提,且准稳态理论的计算值远小于实测值,无法如实反映脉动燃烧干燥过程。为深入了解脉动燃烧干燥过程的传热特性,本文利用 Helmholtz 型脉动燃烧器,通过黄铜球与脉动气流间的对流传热实验,建立脉动频率与物料对流传热系数间关联式,研究脉动燃烧干燥器中脉动气流与被干燥物料间的热量传递特性,从而预测待干物料的脉动燃烧干燥过程。

1 实验装置及实验设计

1.1 实验工作装置

脉动气流与黄铜球间的传热实验、物料干燥实验均在膜片阀式 Helmholtz 型脉动燃烧器中进行。Helmholtz 型脉动燃烧器由圆柱形燃烧室及尾管组成,燃烧室直径 100 mm,长 250 mm;尾管由基段管和延长管构成,基段管长 1.0 m,调节延长管长度可将尾管长度延长至 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m,相应的气流脉动频率分别为 50、47、43、36 和 75 Hz,尾管直径 40 mm。尾管基段管为同轴环形套管,内外管间的环形空间为冷却水通道,通过改变冷却水的流量可以调节尾管内脉动气流的温度。在距尾管基段管末端 0.4 m 处的延长管上开有一个 100 mm × 36 mm 的长方形孔,可根据需要放置不同的支撑块。支撑块 1 用于固定铜球与传感器以测量对流传热系数。支撑块 2 用于固定作为实验物料的 12 个耐火土球形颗粒。实验工作装置示意图如图 1 所示。图中压力传感器 P1 用于测量燃烧室压力;P2 由皮托管和微压计组成,用于测试尾管气流压力;U 形管 P3 用于检测燃气压力;温度传感器 T1、T2、T3 分别用于测量燃烧室、尾管内气流和物料的温度;流量计 U 用于检测燃气流量。为保证完整采集数据,计算机数据采集系统中压力和温度的采样频率分别为 11 kHz 和 0.5 Hz。

用于测量对流传热系数的铜球直径为 10 mm,

球上开有直径 2 mm、深 5 mm 的盲孔,用于插入铠装的热电偶温度传感器。

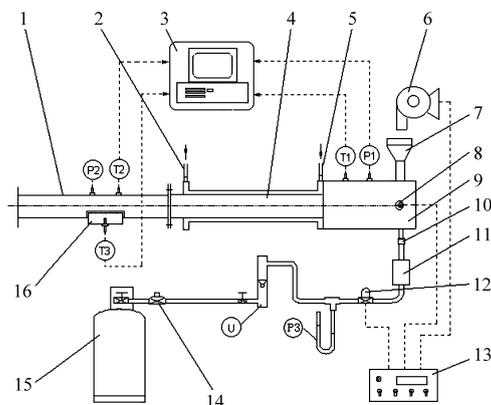


图 1 实验工作装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facilities

1. 尾管 II 2. 冷却水出口 3. 数据采集系统 4. 尾管 I 5. 冷却水进口 6. 吹扫风机 7. 空气膜片阀 8. 火花塞 9. 燃烧室 10. 燃气膜片阀 11. 去耦室 12. 电磁阀 13. 电控箱 14. 减压阀 15. 燃气瓶 16. 支撑块

1.2 实验设计

黄铜具有良好的导热性能,因此可将所测黄铜球温度作为黄铜球的表面温度。通过测量黄铜球与脉动气流间的对流传热系数,建立脉动频率与努塞尔数间的关联式。努塞尔数仅与气流条件及物料的特征尺度有关,而与物料内部特性及传热特性无关,因此可将所获努塞尔数与脉动频率的关联式用于研究耐火土颗粒的干燥及其热量传递特性。

(1) 燃气流量:黄铜球对流传热实验和耐火土颗粒干燥实验过程中脉动燃烧燃气流量不变,均为 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(2) 脉动频率:脉动燃烧频率随燃烧器尾管长度的增加而降低,但当尾管长度增长到某一临界值时,燃烧器脉动频率会从基波型振荡频率跃迁到二次谐波振荡频率,脉动频率大大增加。实验所用脉动燃烧器在尾管长度为 4 m 时频率发生跳变。尾管长度分别为 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m 时,相应的脉动频率分别为 50、47、43、36 和 75 Hz。实验过程中调整尾管长度,需先使脉动燃烧器停止工作、尾管冷却后,再进行调整。

(3) 对流传热实验:将支撑块 1 装于尾管长方形孔处。在上述燃气流量下,尾管长度分别为 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m 时进行 5 次对流传热实验(对应脉动频率分别为 50、47、43、36 和 75 Hz),脉动燃烧器开始工作后,每隔 2 s 温度传感器自动采集黄铜球温度。尾管中气流温度通过调节冷却水的流量进行控制,各脉动频率下支撑块处尾气温度控制在 400°C 左右。

(4)耐火土颗粒干燥实验:为检测耐火土颗粒(其中 SiO_2 质量分数45%, Al_2O_3 质量分数37%,其他18%)含水率随干燥过程的变化,在支撑块2上安装有11根细针及一个直径为2 mm的温度传感器,每根细针及温度传感器上均插有一个耐火土颗粒,温度传感器置于耐火土颗粒中心,以测量物料温度变化并将其温度视为实验物料的温度。支撑块2装于尾管长方形孔处,干燥实验分别在脉动气流频率为36、50和75 Hz时进行。干燥实验开始后,在前30 s每隔10 s依次取出一个耐火土颗粒测量其质量变化,30 s后取样时间间隔为30 s,温度传感器上的耐火土颗粒最后取出。调节冷却水流量使支撑块处尾气温度控制在300℃左右。耐火土颗粒直径7 mm,初始干基含水率为0.32。

2 理论分析

实验中所用黄铜经过抛光,发射率 ε 很小(高度抛光电解铜 $\varepsilon = 0.02$,轻微抛光的铜 $\varepsilon = 0.12$)^[10],即辐射换热对铜的传热过程的影响不大,因此在对铜球加热时不考虑气流辐射对传热过程的影响。而耐火土的发射率很高,在100℃时可达0.91,因此耐火土颗粒干燥时辐射换热不能忽略。

耐火土颗粒干燥时,因物料粒度较小,假定物料内部温度分布均匀,气流与物料间的热平衡方程为

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A_c (h_{g,c} + h_{g,R})(T_a - T_c) - w_D \Delta H}{V_c \rho_{c,s} c_{c,s} + c_w X} \quad (1)$$

式中 A_c ——耐火土颗粒表面积, m^2

$\rho_{c,s}$ ——耐火土颗粒密度, kg/m^3

V_c ——耐火土颗粒体积, m^3

$h_{g,c}$ ——耐火土颗粒对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$h_{g,R}$ ——耐火土颗粒热辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

T_a ——气流温度, K t ——时间, s

T_c ——耐火土颗粒温度, K

$c_{c,s}$ ——耐火土颗粒中干物质比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

c_w ——水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

w_D ——单位表面积干燥速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

X ——平均干基含水率, %

ΔH ——蒸发潜热, J/kg

耐火土颗粒的干燥速率 w_D 由实验所得干燥动力学曲线估算,计算公式为

$$w_D = -\frac{V_c \rho_{c,s} dX}{A_c dt} \quad (2)$$

干燥过程的热平衡方程中涉及物料含水率、温

度、干燥速率等参数,直接依据干燥实验结果求解气流与物料间的对流换热系数会产生较大的误差。在稳定紊流场中,球体与绕流气流间传热的努塞尔数与平均雷诺数及普朗特数间的关联式^[11]为

$$Nu = 2.0 + 0.6Re_D^{1/2}Pr^{1/3} \quad (3.5 < Re_D < 76\,000) \quad (3)$$

式中 Nu ——努塞尔数 Pr ——普朗特数

Re_D ——基于平均气流速度和球体直径的平均雷诺数

式中 Nu 只与气流参数及物料的特征尺度有关,而与物料的传热特性无关,因此可以采用不含水分物料研究脉动燃烧干燥过程的热量传递特性。通常,气流压力的脉动频率和振幅是影响传热速率的主要因素,而本文中脉动燃烧室内压力变化范围很小,仅为9.7~11.6 kPa,近似为常数,因此只考虑脉动频率对传热特性的影响。

由于黄铜具有较高的导热系数,即使在物料尺寸、物料与气流间对流换热系数较大的情况下,物料内部的温度梯度依然较小。本文中黄铜球与脉动气流间传热的毕渥数 Bi 为 $0.389 \times 10^{-4} h_{g,b}$,即当 $h_{g,b}$ 达到1 000时,毕渥数仍小于0.1,满足集总热容法的应用条件,因此可以应用集总热容法估算黄铜球的对流换热系数 $h_{g,b}$,公式为

$$\frac{T_b - T_a}{T_o - T_a} = \exp\left(-\frac{h_{g,b} A_b t}{\rho_b V_b c_b}\right) \quad (4)$$

式中 T_b ——黄铜球温度, K

T_o ——黄铜球初始温度, K

$h_{g,b}$ ——黄铜球对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

A_b ——黄铜球表面积, m^2

ρ_b ——黄铜球密度, kg/m^3

V_b ——黄铜球体积, m^3

c_b ——黄铜球比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

因此,本文以黄铜球为实验物料,利用集总热容法计算气流与黄铜球间的对流换热系数和努塞尔数,建立努塞尔数与气流参数及物料尺寸间的关联式,再将耐火土颗粒干燥实验中的相关参数代入该关联式,求出干燥实验中气流与耐火土颗粒间的对流换热系数,据此预测干燥实验中耐火土颗粒的温度变化。

3 实验结果和分析

3.1 脉动频率对黄铜球对流换热系数的影响

图2为脉动频率为75 Hz、雷诺数为14 607时黄铜球的对流换热系数和温度随干燥时间的变化情况,在黄铜球升温及趋于平衡温度过程中,对流换热系数在很小范围内波动,近似为一常数,因此取其平

均值作为该脉动频率下的对流换热系数,为 $287 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

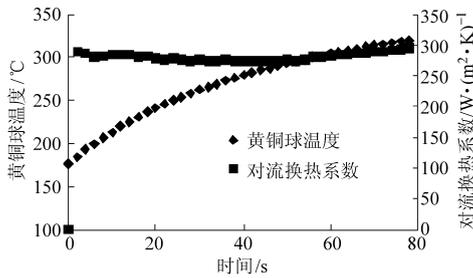


图2 脉动频率为75 Hz时的对流换热系数

Fig. 2 Convective heat-transfer coefficient at the pulse frequency of 75 Hz

利用不同脉动频率下的实验结果,计算黄铜球的对流换热系数、气流流速和相应的努塞尔数、雷诺数,建立的努塞尔数与气流脉动频率间的关联式为

$$Nu = (2.0 + 0.6Re_D^{1/2}Pr^{1/3})(1.0 + f)^{0.15} \quad (3.5 < Re_D < 76\,000) \quad (5)$$

式中 f ——燃烧室内气流脉动频率, Hz

图3所示为不同脉动频率和雷诺数下获得的努塞尔数。由图中可知,稳定紊流中的努塞尔数随脉动频率的增加而略有增加,其增加的趋势与 Dec、Keller^[8]等得到的内流换热过程一致。脉动流场中的努塞尔数随脉动频率的增加而显著增大,约为相同雷诺数下稳定紊流中努塞尔数的2倍多,反映出脉动流场的对流换热系数远大于稳定流场的对流换热系数。雷诺数越小,努塞尔数随脉动频率增加而增大,但增幅较缓;雷诺数越大,随脉动频率增加,努塞尔数的增幅加快;随着雷诺数的增大,相同脉动频率下的努塞尔数增加较快,反映出脉动流场的紊流度和脉动频率对传热性能有较大影响。

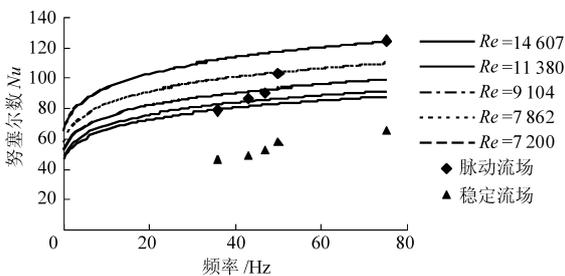


图3 努塞尔数与脉动频率间的关系

Fig. 3 Relationship between different pulse frequencies of air and Nu number

3.2 努塞尔数用于耐火土颗粒干燥过程的预测

黄铜球在脉动流场干燥实验中所获得的努塞尔数,可通过代入耐火土颗粒干燥过程的相关参数,计

算耐火土颗粒在不同脉动频率下的对流换热系数,用于耐火土颗粒干燥过程的模拟预测。

耐火土颗粒干燥过程的温度变化可根据式(1)进行计算,所涉及的干燥速率可根据耐火土颗粒干燥实验获得。图4为脉动频率为50 Hz,气流温度为300°C时耐火土颗粒的干燥动力学曲线。由图中可知,耐火土颗粒的预测温度与实验结果基本一致,从而证明黄铜传热实验建立的努塞尔数经验关联式可以用于计算被干燥物料与气流间的对流换热系数。

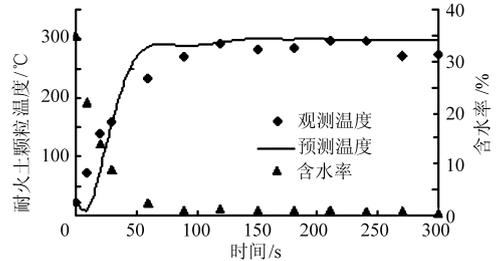


图4 脉动频率为50 Hz时耐火土颗粒的干燥动力学曲线

Fig. 4 Drying dynamics curve of the refractory clay particles at the pulse frequency of 50 Hz

不同脉动频率下的干燥实验中,耐火土颗粒温度随干燥时间的变化相接近。不同脉动频率下的预测结果与实测值仅在温升阶段略有差异,如图5所示。

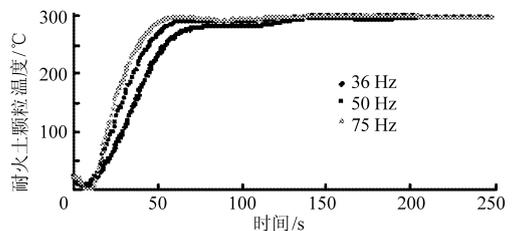


图5 不同脉动频率下耐火土颗粒干燥过程温度预测值
Fig. 5 Temperature prediction during the refractory clay particles drying process at different pulse frequency

4 结论

(1)应用集总热容法研究了黄铜球与绕流气体间的对流换热系数,该换热系数与气流脉动频率和紊流度有关。脉动流场的努塞尔数约为稳定流场的努塞尔数的2倍。

(2)建立了脉动流场的努塞尔数与气流脉动频率间的数关联式,并用于预测耐火土颗粒的干燥过程,实验结果与预测结果基本吻合,表明该数关联式可用于被干燥物料与气流间对流换热系数的计算。

参 考 文 献

- 1 Mujumdar A S. Handbook of industrial drying[M]. Marcel Dekker Inc. , 1995.
- 2 李保国,刘相东,曹崇文. 脉动燃烧干燥及传热特性研究[J]. 农业工程学报,2000,16(6):11~14.
Li Baoguo, Liu Xiangdong, Cao Chongwen. Research on pulse combustion drying and its characteristics of heat transfer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(6): 11~14. (in Chinese)
- 3 杨德勇,谢翔燕,刘相东. 料液脉动燃烧尾气雾化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):90~92.
Yang Deyong, Xie Xiangyan, Liu Xiangdong. Experiment on atomizing properties of Helmholtz pulse combustor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):90~92. (in Chinese)
- 4 Blomquist C A, Clinch J M, Chiu H H. Operational and heat transfer results from an experimental pulse-combustion burner [C]// Proceedings of Symposium on Pulse Combustion Applications, 1982(1): 1~22.
- 5 Al-Haddad A A, Coulman G A. Experimental and theoretical study of heat transfer in pulse combustion heaters [C]// Proceedings of Symposium on Pulse Combustion Application, 1982(5): 1~15.
- 6 Habib M A, Attya A M, Eid A L, et al. Convective heat transfer characteristics of laminar pulsating pipe air flow[J]. Heat and Mass Transfer, 2002, 38(3): 221~232.
- 7 胡玉生,曾丹苓,李友荣,等. 恒温下管内流体脉动流动对流换热的数值模拟[J]. 工业加热,2006,35(1):3~6.
Hu Yusheng, Zeng Danling, Li Yourong, et al. A numerical simulation on the influence of pulsating flow on convective heat transfer at constant wall temperature[J]. Industrial Heating, 2006, 35(1): 3~6. (in Chinese)
- 8 Moschandreu T, Zamir M. Heat transfer in a tube with pulsating flow and constant heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(10): 2461~2466.
- 9 Dec J E, Keller J O. Pulse combustor tail-pipe heat-transfer dependence on frequency, amplitude and mean flow rate[J]. Combustion and Flame, 1989, 77(3~4): 359~374.
- 10 肖斌安,龚烈航,曾锐. 金属红外发射率的分析和仿真研究[J]. 红外技术,2008,30(6):105~112.
Xiao Bin'an, Gong Liehang, Zeng Rui. Analysis and simulation of metallic infrared emissivity[J]. Infrared Technology, 2008, 30(6): 105~112. (in Chinese)
- 11 Knudsen J G, Katz D L. Fluid dynamics and heat transfer[M]. N. Y. : McGraw Hill Co. , 1958.

~~~~~

(上接第 116 页)

- 9 杨薇,欧又成,张付杰,等. 蘑菇热风、微波对流和微波真空干燥的对比试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 102~104,112.  
Yang Wei, Ou Youcheng, Zhang Fujie, et al. Comparative experiment on hot-air, microwave-convective and microwave-vacuum drying of mushroom[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):102~104, 112. (in Chinese)
- 10 邓云,张庆钢,Zhao Yanyun. 脉冲真空和超声波对苹果渗透动力学和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 89~93.  
Deng Yun, Zhang Qinggang, Zhao Yanyun. Effects of pulsed vacuum and ultrasound on mass transfer and quality of apples during osmodehydration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 89~93. (in Chinese)
- 11 达道安,肖正祥. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1991: 558.
- 12 晁无疾,管仲新,路苹,等. 我国葡萄干质量分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2005(6): 49~52.
- 13 张英丽,江英,沈卫强,等. 无核紫葡萄太阳能干燥技术的研究[J]. 食品科技, 2008, 33(8): 39~41.  
Zhang Yingli, Jiang Ying, Shen Weiqiang, et al. Study on dry technology of solar dryer for seedless grape of purple[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(8): 39~41. (in Chinese)