

研究论文

离心流化床中强制对流换热的实验研究

王 海 施明恒

(东南大学动力工程系, 江苏 南京 210096)

摘 要 对离心流化床干燥器中气体与被干燥颗粒物料之间的强制对流换热进行了实验研究, 获得了各主要运行参数对气固换热系数的影响规律, 并利用场协同原理分析了对流换热强化的机理. 实验证明, 在一定转速范围内, 在气流速度方向和热流方向 (温度梯度方向) 一致时, 换热的准则关联式具有 $Nu = CRePr$ 的形式. 获得了满足 $Nu \sim RePr$ 呈直线关系的 $Pe (Pe = RePr)$ 数变化范围和临界 Pe 数, 当 Pe 数大于临界值后, 离心流化床中对流换热强度随 Pe 数增加而增大的趋势会明显减缓并偏离线性区.

关键词 离心流化床 颗粒 强制对流换热 强化**中图分类号** TQ 128**文献标识码** A**文章编号** 0438-1157 (2003) 05-0596-05EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FORCED CONVECTION
HEAT TRANSFER IN CENTRIFUGAL FLUIDIZED BED

WANG Hai and SHI Mingheng

(Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract An experimental study of heat transfer between gas and solid particles in the centrifugal fluidized bed (CFB) was carried out. Influences of bed thickness, rotating speed of the bed and particle diameter on gas-solid two-phase heat transfer coefficient were examined. Based on the field synergy principle, the mechanism of convection heat transfer enhancement in CFB was analyzed and discussed. The experimental results indicated that when the flow direction coincided with the direction of heat flux at a given rotating speed in the centrifugal fluidized bed, the gas-solid heat transfer would be enhanced and heat transfer equation was in the form of $Nu = CRePr$. The ranges of $Pe (= RePr)$ number satisfying a linear relationship between Nu and Pe at different rotating speeds were obtained. It showed that when Pe number was larger than the critical Pe number the relationship between Nu and Pe in the CFB would depart from the linear region.

Keywords centrifugal fluidized bed, particle, convection heat transfer, heat transfer enhancement

引 言

离心流化床 (CFD) 干燥是近年来发展起来的一种新型高强度干燥技术, 在离心流化床干燥器中颗粒状湿物料只需要较短的时间就可以实现干燥,

远远快于普通流化床干燥器. 一般认为流化床中气流与固体物料之间强烈的搅拌和混合是造成物料与气流之间高强度传热传质的主要原因, 但是在普通流化床中湿物料干燥仍需要较长的时间, 尤其是蔬菜、水果类等食品物料. 有时为了加速干燥过程而

2002-01-06 收到初稿, 2002-06-06 收到修改稿.

联系人: 施明恒. 第一作者: 王海, 男, 27 岁, 博士.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No. G2000026303).**Received date:** 2002-01-06.**Corresponding author:** Prof. SHI Mingheng. E-mail: mhshi@seu.edu.cn**Foundation item:** supported by the Special Fund for the Major State Basic Research Projects of China (No. G2000026303).

过分提高热风温度, 则会导致被干燥物料表层焦化而破坏干燥产品的品质. 而离心流化床则可以采用较低的风温和大风量操作, 通过调节转速来控制床层流化状态, 使物料层能保持在良好的流化和传热传质状态, 从而达到很高的干燥速率. 但文献中对于离心流化床干燥器为何能强化物料的传热传质过程尚未进行过深入的研究. Brown^[1] 和 Lazar^[2] 等曾对片状和块状物料等在离心流化床中的干燥特性进行过研究, 获得了一些基本的传热数据. Carlson 等^[3] 还用离心流化床对大米的快速干燥进行了研究. 但是这些工作仅停留在研究具体物料在离心流化床中的干燥特性, 尚未涉及到离心力场作用下气体和多孔物料层之间传热传质过程本身. 显然, 弄清离心流化床干燥器中传热传质强化的机理, 对于优化离心流化床干燥器的设计和离心流化床干燥器的工程化具有特别重要的意义. 本文根据文献[4] 中提出的对流换热强化的新理论, 对离心流化床中空气通过多孔物料层的强制对流换热进行了实验研究, 并分析了离心流化床强化传热传质的机理.

1 对流换热基本关系式

离心流化床床体是一个具有多孔壁的圆筒形容器, 多孔壁又作为气体分布板, 如图 1 所示. 运行时, 床体绕其中心轴旋转, 置于其中的颗粒物料受离心力作用紧靠分布板形成一圆环状物料床层. 干燥气体从气体分布板中流入, 穿过物料层, 从中部出口处排出. 气体流速达到初始流化速度时, 物料床层开始流化, 形成离心流化床. 实验证明, 离心流化床中气固之间传热强度大大超过一般边界层流动时的对流换热, 也超过普通流化床.

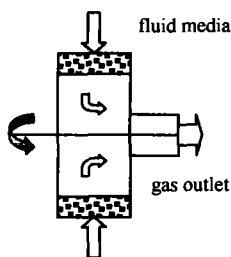


Fig. 1 Principle map of CFB

根据离心流化床床体结构的实际情况, 离心流化床中流化介质和被干燥的湿物料之间的对流换热可以简化为气体通过多孔物料层时的气固两相强制对流换热. 其物理模型和坐标系统如图 2 所示. 在

稳定浅床的情况下, 干燥气体以速度 U_0 穿过床层, 气体的入口温度为 $T_{f,in}$, 出口温度为 $T_{f,out}$. 假定由于物料颗粒之间的碰撞和混合充分, 物料层温度维持为 T_{sr} . 根据该简化模型, 文献[5]中作者已经导出, 在离心力场作用下, 多孔介质中的对流换热满足下列准则关系式

$$Nu_p = C Re_p Pr_t = C Pe \quad (1)$$

式中

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{\lambda_p}, \quad Re_p = \frac{d_p U_0 \rho_t}{\mu_t}, \quad Pr_t = \frac{c_{pt} \mu_t}{\lambda_t}, \quad Pe = Re_p Pr_t, \\ C = \frac{1}{aL} \ln \frac{T_{f,in} - T_{sr}}{T_{f,out} - T_{sr}} = \frac{1}{aL} \Delta T_{ln} = f\left(\frac{d_p}{L}, \frac{\omega^2 r_0}{g}\right)$$

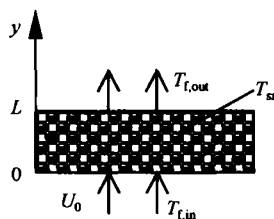


Fig. 2 Flow and heat transfer model

相比之下, 对于普通流化床, 流化介质和物料之间对流换热的准则关联式中 $RePr$ 的指数均小于 1.

为了进一步阐明离心力场作用下对流换热的强化机理, 下面做进一步的讨论. 实际上, 由于离心力场的压缩作用, 离心流化床中颗粒物料床层较薄, 所以在离心力场作用下所形成的气流与物料床层之间的对流换热问题可以等效为气体流过等壁温多孔物料层的强制对流换热问题.

文献[5]利用对流换热中速度场和温度场的协同原理得到对流换热的准则关系式为

$$Nu_x = Re_x Pr \int_0^1 (U \cdot \nabla T) dy \quad (2)$$

从上式可知, 如果流体速度矢量 U 和温度梯度 ∇T 矢量平行同向时, 换热系数达到最大值, 即

$$Nu_x \propto Re_x Pr \quad (3)$$

对比式 (1) 可以看出: 离心流化床中, 在一定的转速范围内, 由于离心力场与强烈紊流的双重作用, 使得经离心力场压缩后的薄层颗粒床内颗粒温度随时满足均匀的条件, 此时从宏观看来相当于气流垂直冲刷一等温多孔平板, 满足了温度梯度与气流的速度矢量方向相平行的条件, 使气固对流换热得到大幅度强化. 显然, 满足物料层温度均匀是有一定条件的, 因此公式 (1) 有一定的适用范围. 当离心力场和气流流速以及物料层厚度等运行参数

不能满足要求时, 对流换热将偏离公式 (1). 为了进一步验证上述理论分析的可靠性, 本文在文献 [5] 工作的基础上进一步扩大实验参数范围, 以期获得准则关系式 (1) 的适用条件.

2 实验研究

2.1 实验设备和方法

实验设备如图 3 所示. 床体为一旋转轴水平放置、内径 200 mm、长 80 mm 的圆筒. 其周壁为开有直孔的分布板, 孔径 3 mm, 孔心距 6 mm, 错列布置, 开孔率 22.7%, 内侧敷设有 0.08 mm (200 目) 不锈钢网, 以防物料漏出. 气体出口位于一端壁中心, 直径 80 mm, 出口导管长 100 mm. 床体由同轴刚性联接的三相异步电动机驱动, 电动机转速由 NPG92 变频器变频调节. 床体转速用 LZ-45 转速表测量. 外罩与床体相接部位装有密封圈.

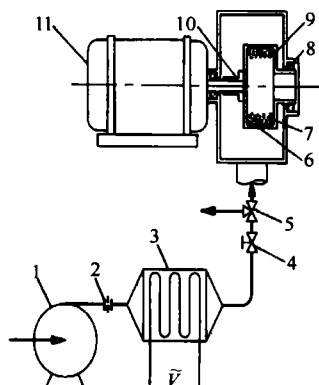


Fig. 3 Experimental system of CFB

- 1—fan; 2—flow meter; 3—heater; 4—regulate valve;
5—triple valve; 6—distributor; 7—granule material;
8—airproof; 9—rotating bed;
10—axes coupling; 11—electromotor

实验物料为稻米颗粒和土豆块. 实验采用间歇操作. 用孔板流量计测量干燥气体质量流量. 气流入口和出口处的温度和床层温度用裸露镍铬-镍硅 (EU-2) 热电偶探头测量, 各探头热电势由 HY-6040 数采板和 HY-812 热电偶组成的数据采集系统测量记录. 气体通过床层时的压降由 U 形管差压计测量, 其一端压力取自床体外罩上的取压孔, 另一端取自由气体出口沿床中心轴伸入距另一端壁 10 mm 处的测压探头. 将实验测得的总压降减去相同流速、转速条件下的空床压降即得床层压降.

在实验时, 先让干燥空气不进入床层, 而是经三通阀放空, 在气体流量和气体温度达到稳定后,

转动三通阀使气体流通, 进入床层, 开始实验. 在实验中, 调节床体转速使物料紧靠分布板形成一圆环状物料层. 风机送入的空气通过孔板流量计后经过加热器加热到预定温度, 然后由分布板进入床体, 在干燥物料后从出口排出.

2.2 实验结果和分析

2.2.1 温度分布曲线 图 4 给出了干燥稻米颗粒时典型的气体入口温度、出口温度和颗粒温度随时间的变化曲线. 由图可见, 在经过不长的初始阶段 (约 20 s) 以后, 气体入口温度达到稳定值, 为 90 °C, 在约 100 s 后出口温度达到稳定值, 约为 73 °C; 颗粒温度则缓慢上升. 测量显示, 在大部分的实验范围内, 虽然在间歇式操作实验中颗粒温度随时间而变, 但由于颗粒的激烈运动与混合, 在每一时刻床层内颗粒温度基本上能维持均匀. 在进行对流换热计算时, 颗粒温度则取时间的平均值.

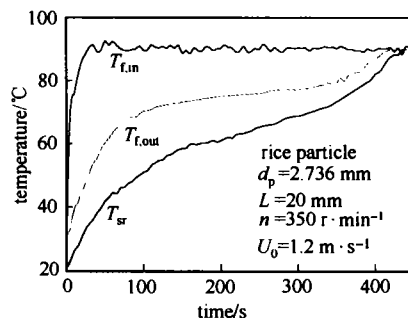


Fig. 4 Inlet and outlet gas temperatures, bed temperature

2.2.2 运行参数对气固换热系数的影响 图 5 给出了床层厚度对气固对流换热系数 h_p 的影响. 床层厚度的变化反映了床内物料量的变化. 由图可见, 随着床层厚度的增加, 换热系数随之减小. 这是由于, 随着床层厚度的增加, 床内物料量增多,

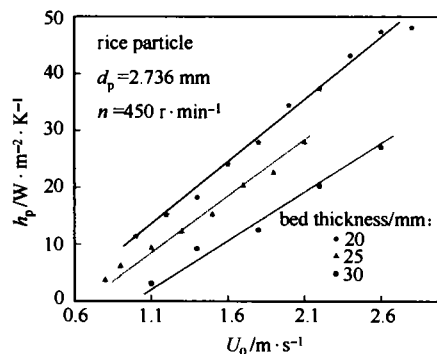


Fig. 5 Influence of bed thickness on convection heat transfer

物料床厚度逐渐从浅层向深层过渡，颗粒间的混合状况变差，所以床内物料温度不易维持均匀，颗粒层内出现了明显的自下而上的温度梯度，而传热条件就会更接近于气流通过静止颗粒床的情况。这时，由于增加了气流与颗粒层之间的侧向换热，使气流速度场与热流密度场之间的夹角大于零度，由公式 (2)，此时的换热系数必然相应下降。

图 6 显示了转速对气固换热系数的影响。由图可见，在 $u_0 < 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以前，由于离心流化床运行在较低的气流量条件下，随着转速的增大，物料颗粒所受的离心力加大，导致物料颗粒的流化运动减弱，颗粒不能充分混合，使得床内流动方向和热流方向的一致性条件变弱，从而导致换热强度增加缓慢。但是当 $u_0 > 2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后，离心流化床运行在较高的风量条件下，床体转速不再造成流化运动减弱，此时整个床层处在稳定流化状态，物料混合均匀，使得流速和热流方向趋向一致，满足上述对流换热强化的边界条件，从而使换热系数随流速呈线性增加。这表明，在离心流化床中离心力场对于对流换热的强化存在一个最佳的转速范围或者最佳的流化状态范围。

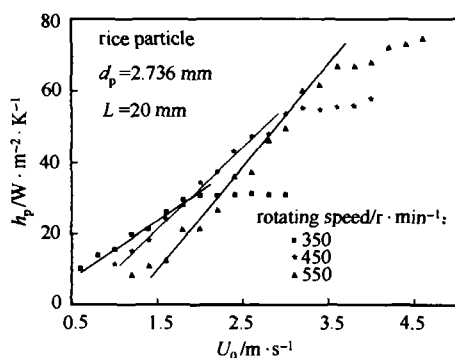


Fig. 6 Influence of bed rotating speed on convection heat transfer

2.2.3 物料颗粒粒径对气固换热强度的影响 图 7 给出了不同粒径的物料颗粒在离心流化床中的对流换热系数。由图可以看出，由于粒径较大的颗粒在离心力场的作用下具有较大的滑动速度，造成气体湍动增强，颗粒混合相对容易，再加上大颗粒时稳定流化后的物料层较薄，从而容易使床层具有比较均匀的温度，较好地满足传热强化的条件。

2.2.4 计算结果和实验值的比较 图 8 给出了由式 (1) 计算的 Nu 数随 $RePr$ 的变化曲线和实验结果的比较。由图可见，对于给定的其他操作条

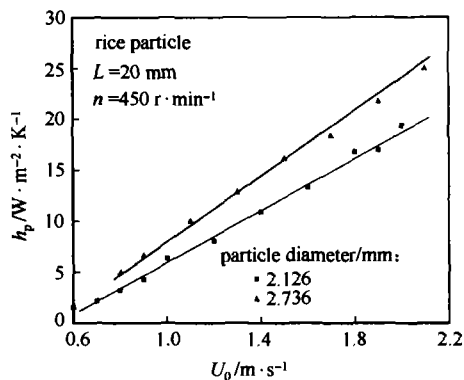


Fig. 7 Influence of particle diameter

件，对于不同的床体转速，式 (1) 中满足 $Nu \sim RePr$ 为直线关系的 $RePr$ 数范围有所不同。例如：在床体转速为 $400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，实验得出的 Nu 数与 $Pe (Pe = RePr)$ 数之间呈线形关系的 Pe 数范围为 $20 \sim 100$ ；而在床体转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，实验得出的 Nu 数与 Pe 数之间呈线形关系的 Pe 数范围为 $80 \sim 200$ 。把满足 $Nu \sim Pe$ 为直线关系的 Pe 数最大值定义为临界 Pe 数，则当 Pe 数大于临界 Pe 数以后，离心流化床中对流换热系数随 Pe 数增加而增大的趋势明显减缓。这说明，为了强化离心流化床中的传热传质过程，离心流化床的操作条件应做优化选择。一般来讲，对于给定的被干燥物料，床层厚度、流速和转速的选择应尽量满足床内颗粒充分混合，温度场保持均匀状态，使离心流化床在最佳的 Pe 数范围内运行。实验也进一步证明，场协同理论对强化气固两相对流换热过程有指导作用，即与单相对流换热一样，可以通过改变流场和热流场之间的协同关系使气固两相对流换热强度发生相应的变化。

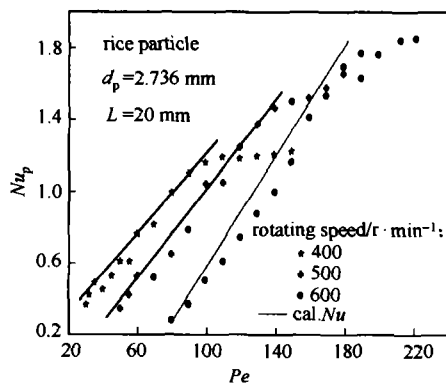


Fig. 8 Comparison between calculated Nu number and experimental value

3 结 论

离心流化床是一种新型高效、适用于松散湿物料的干燥技术。本文的实验研究表明,当离心流化床中物料处于均匀流化状态且物料层温度维持均匀时,气流与固体颗粒之间的对流换热可以强化。由此,人们可以控制离心流化床干燥器的操作参数,使其在最佳的条件下运行。本文的工作也证明了场协同理论可以对气固两相对流换热过程的强化起指导作用。

符 号 说 明

a ——单位容积中颗粒的表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
 C ——系数
 c_p ——空气的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 d_p ——颗粒直径, m
 g ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 h_p ——气流和颗粒之间的对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 L ——床层厚度, m
 n ——床体转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
 Nu ——Nusselt 数
 Pr ——Prandtl 数
 Pe ——Peclet 数
 r_0 ——床层半径, m
 Re ——Reynolds 数
 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 或 K
 U_0 ——气体表观流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

λ ——热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 μ ——动力黏度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
 ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ω ——床层角速度, $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$

下角标

f ——流化床内气体
 in ——入口
 out ——出口
 p ——颗粒

References

- 1 Brown G E, Farkas D F, DeMarchena E S. Centrifugal Fluidized Bed. *J. of Food Technol.*, 1972, **26** (12): 23—30
- 2 Lazar M E, Farkas D F. The Centrifugal Fluidized Bed; 2. Drying Studies on Piece-form Foods. *J. of Food Sci.*, 1971, **36**: 315—319
- 3 Carlson R A, Roberts R L, Farkas D F. Preparation of Quick-cooking Rice Products Using a Centrifugal Fluidized Bed. *J. of Food Sci.*, 1976, **41**: 1177—1179
- 4 Guo Zengyuan (过增元). Physical Mechanism of Convective Heat Transfer and Its Control; the Synergy of Velocity Field and Temperature Field. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45** (19): 2118—2122
- 5 Shi Mingheng (施明恒), Wang Hai (王海), Hao Yingli (郝英立). Study on the Mechanism of Heat Transfer Enhancement of Porous Media in Centrifugal Fluidized Bed. In: Proceedings of the Tenth National Annual Conference on Engineering Thermophysics (中国工程热物理学会第十届年会论文集). Qingdao: 2001, 1. 439—443

信息与交流

野马追糖浆可预防“非典”

中国疾病预防控制中心病毒病预防控制研究所病毒资源中心日前提供的药效试验报告证实,野马追糖浆药物具有预防冠状病毒的作用。专家称这是首次发现可用于预防 SARS 病毒的中药。上述试验所采用的冠状病毒 9 号是从 SARS 患者咽喉部病菌中分离出来的,其试验结果具有直接的临床应用价值。此项试验是受野马追糖浆研制与生产单位江苏安格药业有限公司委托进行的。

安格公司有关负责人称,野马追糖浆作为抗流感病毒的中药投放市场已有两年。据受聘于安格公司的药学专家、湖南省新药审评专家、原湘雅医科大学附属医院药剂科主任柯铭清介绍,野马追糖浆为菊科植物轮叶泽兰全草经现代技术提炼而成的制剂。安格公司研制开发的这种新型中药具有抗甲型流感病毒和乙型流感病毒(同属 RNA 型病毒)的功效,用于治疗呼吸道感染疾病如肺炎、咳嗽等。冠状病毒亦属 RNA 型病毒,非典型性肺炎疫情流行以来,野马追糖浆的研制者预测此种中药可能对预防 SARS 有效,为此安格公司于 4 月委托上述机构进行了药效试验。

(摘自“中国化工信息网”)