

旋转床填料内径向温度分布实验分析

徐春艳¹ 刘承斌¹ 施力田² 郑冲¹ 郭锴^{1*}

(1. 北京化工大学教育部超重力工程研究中心 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 为了精确描述旋转床填料内的温度分布关系,文中对旋转床的径向温度分布进行了实验测定,结果发现:在实验范围内,旋转床填料内的径向温度分布与转子的转速有关,与液体流量有关,但气体流量的变化对温度分布的影响很小。文中推导出传热系数公式,并结合实验数据计算出传热系数,有力地证明了传热端效应的存在。

关键词: 旋转填充床; 温度分布; 径向传热系数; 传热端效应

中图分类号: TQ051

旋转床(超重机)的混合特性导致了流体之间的良好的传质、传热特性。旋转床的传热过程由于旋转的填料对流体流动的影响、流体之间的接触传热,导致热流体与冷流体在转子填料内的两相流动与传热十分复杂,二者之间相互联系,相互影响。现有的旋转填充床方面的资料中还没有此方面的实验研究。随着应用研究的深入,对基础研究的要求也越来越高。了解旋转床的传热特性,显得非常重要。

本研究的目的是通过实时测量旋转床转子内冷热流体逆流接触时的温度数据,分析液相在转子填料中的热量传递情况。

1 实验流程

本实验采用了空气和水系统对逆流旋转填充床填料内的温度分布进行研究。实验考察范围:气体流量为 $0 \sim 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$; 气体温度为 $10 \sim 90$; 液体流量为 $0 \sim 225 \text{ m}^3/\text{h}$; 液体温度 $11 \sim 22$; 旋转床的转速 $100 \sim 800 \text{ r/min}$ 。实验流程见图1。

2 数据处理及分析

2.1 探头的布置及示数处理

在探头布置时应尽量将探头布置在填料的轴向中心处,因为中心处填料的轴向温度梯度为零。这一点在探头的设计过程中已经加以考虑,并且在空白实验中根据探头温度的一致性将位置进行调整

(见图2)。

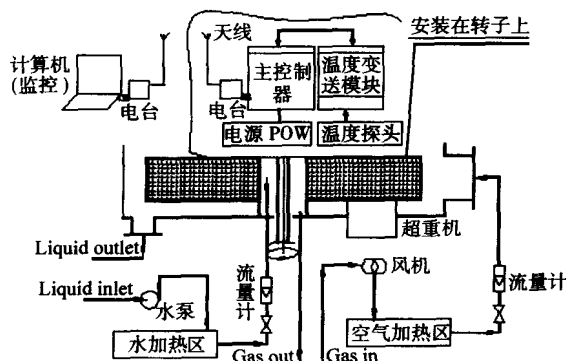


图1 实验流程图

Fig. 1 Sketch of experimental flow chart

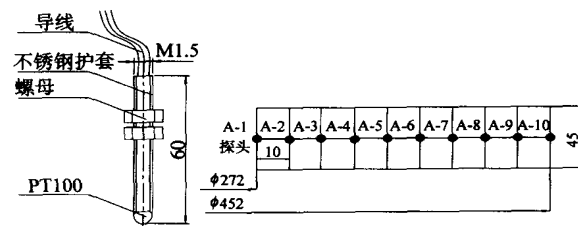


图2 探头及其布置图

Fig. 2 Schematic diagram of probe and its disposal

根据前人对旋转床的流动情况的观测实验文献[1-3]可知,填料被液体湿润后呈液膜覆盖,那么置于填料中的探头也同样可以认为是被液膜覆盖。这样探头所测量的温度可以近似认为是液体的温度。

2.2 各因素的影响

在旋转床的径向温度分布测量数据中,因为操作条件(转速、气量、液量及进口气、液体温度)不同,温度数据的区间不同,导致数据难以比较,故引入无量纲量 $(t - t_1)/(t_2 - t_1)$, 它表示某一点的温度变

收稿日期: 2004-03-19

第一作者: 女, 1980年生, 硕士生

*通讯联系人

E-mail: guok@mail.buct.edu.cn

化 ($t - t_1$) 与物料在旋转床内全程温度变化 ($t_2 - t_1$) 的比值。此无因次量表示某一点温度变化的强弱程度。

2.2.1 转子转速对径向温度分布的影响 从图 3 可以看出转速对径向温度分布的影响比较大。实验气量为 $225 \text{ m}^3/\text{h}$ 、液量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 转子转速在

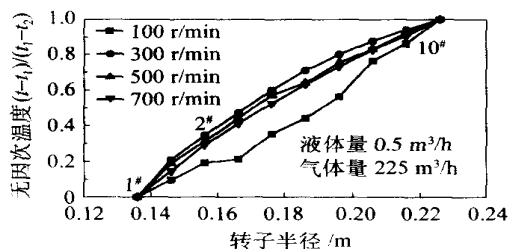


图 3 转速对径向温度分布的影响

Fig. 3 Effect of rotor speed on radial temperature distribution

500 r/min 以上温度分布变化趋势基本相同。气量不变, 对不同的液量作同样的实验, 发现都存在一个转速, 当转子转速大于这个转速时, 温度变化的趋势基本相同。这与张军等^[3]的流体流动状况与转速的关系吻合: 在低转速下填料间隙的液体主要呈液膜和液滴两种形式; 在高转速下, 旋转床填料间隙液体主要以液滴的形式存在。流动状况的不同导致温度分布的变化。

2.2.2 液量对径向温度分布的影响 如图 4 所示, 在相同的转速下, 不同的液体量 ($0.5, 1.0, 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$) 对填料内的径向温度分布都有影响。而且转子转速越高, 液量对填料内径向温度分布的影响越小。

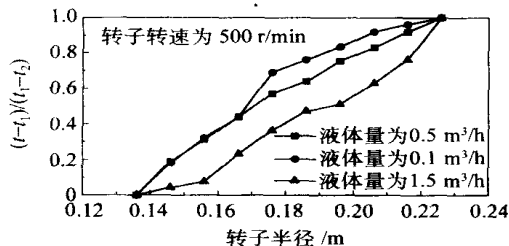


图 4 液量对径向温度分布的影响

Fig. 4 Effect of liquid flow rate on radial temperature distribution

2.2.3 气量对径向温度分布的影响 从图 5 发现: 在实验范围内, 转速和液量相同的情况下, 不同气量下 ($150, 225 \text{ m}^3/\text{h}$) 的温度分布线几乎重合, 这说明气量的变化对液体的温度分布影响很小。这是气量

对流动的影响不大的原因, 这与张军等^[3]的结论吻合。

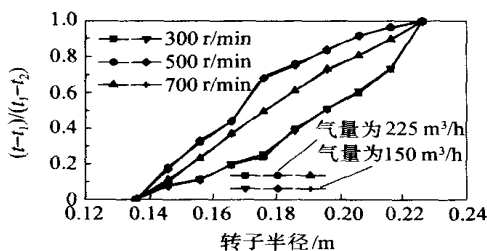


图 5 气量对径向温度分布的影响

Fig. 5 Effect of gas flow rate on radial temperature distribution

综上所述, 在实验范围内, 气量的变化对温度分布的影响很小, 而转子转速显著影响填料内液体的温度分布情况, 由于填料内液体的温度分布与液体的流动特性直接相关, 转子转速影响了旋转床液体的流动特性, 这与张军等^[3]的结论吻合。本文通过改变液量还发现, 液量对温度分布也有明显的影响, 也就是说液量影响旋转床填料内流体的流动情况。

3 旋转床内气液传热过程的描述

从旋转床的传热传质实验中观察到, 旋转床空腔内的气相中有大量的雾滴存在, 本次实验中也发现气体进入旋转床内, 气相的温度有显著降低。本文这样认为: 气体进入旋转床外空腔中, 气体的热量先使部分液态水汽化形成水蒸气, 水蒸气进入气相, 使气相的湿度增加。形成空气-水蒸气体系, 认为气相的水-水蒸气系统达到平衡, 此时产生了热量交换和质量传递。气相进入旋转床填料内, 气相与填料内的液体产生了质量和热量交换, 使填料内液体的温度升高, 气相温度降低。气相离开旋转床时, 认为气相的水-水蒸气系统达到平衡。本文依照上述描述对填料内径向传热系数做出近似推导。

3.1 气相温度计算

在 r_i 与 r_j 区域, 湿空气的湿度分别为 H_i 和 H_j , 则湿空气的焓分别为 I_i 和 I_j , 温度为 T_{iG} 和 T_{jG} , 利用湿空气的焓变与液体吸收的热量相等作热量衡算, 在实验中液体的温度变化将液体的定压比热容取为常数, 则有

$$Q = G(I_j - I_i) = L_j C_{PL}(t_{iL} - t_{jL}) - G(H_j - H_i) C_{PL}(T_{iG} - T_{jL}) \quad (1)$$

$$L_j = L_i + G(H_j - H_i) \quad (2)$$

对于空气-水系统有^[4]

$$I = (1.01 + 1.88 H) t + 2500 H \quad (3)$$

在任意半径处则有

$$G(1.01 + 1.88 H_r) T_{rG} + 2500 H_r - (1.01 + 1.88 H_i) T_{iG} - 2500 H_i =$$

$$[L_i + G(H_r - H_i)] C_{PL}(t_{iL} - t_{rL}) - G(H_r - H_i) C_{PL}(T_{iG} - t_{jL}) \quad (4)$$

其中 H 以饱和焓计算有

$$H_r = H_s = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (5)$$

其中, p_s 是气体温度为 T_{rG} 下 r 处水的饱和蒸气压。

假定流体的黏性系数为常数, 且为不可压缩流体, 填料中只有沿径向向中心处的流动, 且所有变量只是半径的函数, 其中, $r = r_i$ 处, $p = p_i$; $r = r_j$ 处, $p = p_j$ 。则在柱坐标系中, 拉普拉斯方程变为如下简单形式

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dp}{dr} \right) = 0 \quad (6)$$

积分得

$$p(r) = p_i + \frac{p_j - p_i}{\ln \frac{r_j}{r_i}} \ln \frac{r}{r_i} \quad (7)$$

这里 i, j 分别取填料内端与填料外端处, 可以依据实验中测得的两端压力求得填料内任意处的压力。

气量 $225 \text{ m}^3/\text{h}$, 液量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 转速 $700, 800 \text{ r/min}$ 下的气液温度如图 6。

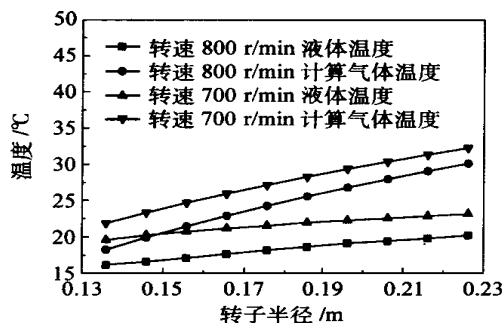


图6 转子内气液温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution in the packing

求解过程如下: 已知气体出口压力 p_1 , 温度 T_{1G} , 查水蒸气的饱和蒸气压值 p_{s1} , 根据湿度公式 (5) 求出饱和湿度 H_1 ; 在任意半径 r 处, 根据压力公式 (7) 求出压力 P_r , 试差气体温度 T_{rG} , 查水蒸气的饱和蒸气压 p_{sr} , 利用湿度公式 (5) 求出湿度 H_r 后应用式 (4) 求出 T_{rG} , 比较 T_{rG} 与 T_{rG} 直到两值在误差允许范围之内来确定气体温度 T_{rG} 。

3.2 径向传热系数的计算

在 r_i 与 r_j 区域内的对数平均温差为^[5]

$$t_m = \frac{(T_{jG} - t_{jL}) - (T_{iG} - t_{iL})}{\ln \frac{T_{jG} - t_{jL}}{T_{iG} - t_{iL}}} \quad (8)$$

在 r_i 与 r_j 区域内的传热面积为

$$A = a h (r_j^2 - r_i^2) \quad (9)$$

假定传热系数在 r_i 与 r_j 之间为常数, 由

$$Q = KA t_m \quad (10)$$

则

$$K = \frac{Q}{A t_m} \quad (11)$$

对气量为 $225 \text{ m}^3/\text{h}$, 液量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, $500, 600, 700, 800 \text{ r/min}$ 下按式 (11) 计算径向传热系数如图 7。

从图 7 可以看出, 在液体进入填料的初始阶段也就是 $1^\#$ 与 $2^\#$ 探头之间的平均传热系数显然高出其它各填料段的平均传热系数, 说明了旋转床气液逆流中传热端效应的存在。对其它液量下的数据进行分析也得到类似的情况。

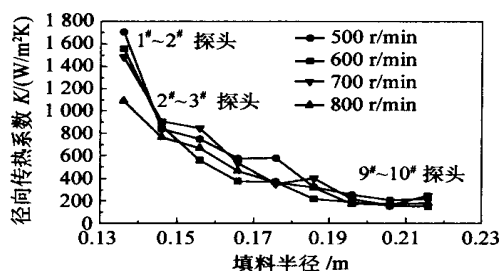


图7 径向平均传热系数分布图

Fig. 7 Distribution of radial average heat-transfer coefficients

4 结论

(1) 在实验考察范围内, 旋转床填料内的径向温度分布与转子的转速有关, 而气量对温度分布的影响不大。这与以前的文献是基本相符的。本文通过实验研究还发现, 旋转床填料内液体的径向温度分布还与液量有关。

(2) 本文利用传热系数公式, 并结合实验数据计算传热系数, 有力地证明了传热端效应的存在。

(3) 由于填料内液体的温度分布与液体的流动特性直接相关, 液量和转子转速影响了旋转床填料内的温度分布, 那么对于旋转床内液体流量对流动特性的影响, 需要做进一步分析。

符 号 说 明

t ——任意点温度, K
 t_1, t_2 ——进、出口温度, K
 r ——填料半径, m
 A ——传热面积, m^2
 a ——填料的比表面积, m^{-1}
 h ——填料层高度, m
 L ——液体流量, m^3/s
 G ——干空气流量, m^3/s
 C_{pL} ——液体定压比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
 T_{rG} ——任意点处的气体温度, K
 t_{rL} ——任意处的液体温度, K
 I ——气体的热焓, kJ/kg
 H_r ——任意处气体湿度, kg/kg
 H_s ——气体在水温下的饱和湿度, kg/kg
 p ——总压, kPa

p_s ——饱和蒸汽压, kPa
 t_m ——气液温差, K
 K ——传热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

参 考 文 献

- [1] Guo Kai, Guo Fen. Synchronous visual and RTD study on liquid flow in rotating packed-bed contactor[J]. Chem Eng Science, 2000, 55(9): 1699 - 1706
- [2] Keyvani M, Gardner N C. Operating Characteristics of Rotating beds[J]. Chem Eng Pro, 1989 (9): 48 ~ 52
- [3] 张 军, 郭 锴, 郭 奋, 等. 旋转床内液体流动的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2000, 14(4): 378 - 381
- [4] 陈敏恒, 从德滋, 方图南. 化工原理(下册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1995, 226 - 257
- [5] 谭天恩, 麦本熙. 化工原理(上册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996, 204 - 225

Experimental analysis for the temperature distribution in the packing of RPB

XU Chun-yan¹ LIU Cheng-bin¹ SHI Li-tian² ZHENG Chong¹ GUO Kai¹

(1. Research Center of the Ministry of Education for High Gravity Engineering and Technology,

2. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The radial temperature distributions in the packing of Rotating Packed Bed (RPB) were experimentally investigated. The results reveal that the radial temperature distribution is related with the rotor speed and the liquid flow, but the influence of the gas flow is very little. On the basis of calculation and analysis of the radial heat-transfer coefficients, the end effect of heat-transfer is proposed.

Key words: rotating packed bed (RPB); temperature distribution; radial heat-transfer coefficient; the end effect of heat-transfer

(责任编辑 云志学)

(上接第 22 页)

Material balance for slurry HDPE production process

ZHAO Jian-guo WANG Zi-hao PEI Yong-xin WEI Shou-peng

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The material balance for HDPE (high density polyethylene) production process is based on calculations of the concentrations of catalyst, live polymer and dead polymer at a given moment. The reaction mechanism, dynamics and the moment of the chain length distribution for the live and dead polymers were proposed for establishing the material balance and calculating the properties of the polymer. The simulated results are good consistent with the real operation data.

Key words: moment of molecular weight distribution; HDPE; slurry polymerization; material balance

(责任编辑 云志学)