

研究论文

错流旋转填料床气相压降特性

刘有智, 刘振河, 康荣灿, 郭 雨

(中北大学山西省超重力化学工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 旋转填料床的气相压降是旋转填料床应用和设计的一项重要指标。在气液两相错流流动条件下, 利用空气-水系统对错流旋转填充床的气相压降进行分段模型化和实验研究。按照错流旋转填料床气体流动的路径将气相压降分为进口压降、填料层压降、集气段旋转变能转化压降和出气段压降。推导出压降与操作工况的关联式, 其计算值与实测值吻合较好。实验表明错流旋转填料床的气相总压降与气体流量、旋转床转速、液体流量有关。在高转速和小气量的条件下, 气相压降随气量增大先下降后上升; 其他情况随气量增大而上升。错流旋转填料床气相压降随转速上升而下降, 在小气量情况下转速对气相压降有明显影响。气相压降随进液量的增大而增大, 当旋转填料床在低转速时进液量对气相压降有明显影响。

关键词: 旋转填料床; 错流; 压降

中图分类号: TQ 021.1; TQ 050.2

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 04-0869-06

Characteristics of gas pressure drop in cross-flow rotating-packed bed

LIU Youzhi, LIU Zhenhe, KANG Rongcan, GUO Yu

(Technology and Research Centre of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: The gas phase pressure drop in the cross-flow rotating packed bed (RPB) is an important factor in its application and design. The gas phase pressure drop was investigated with air-water system. The total pressure drop was divided into four stages according to gas flow path—gas inlet pressure drop, rotating packed bed pressure drop, transformation of kinetic energy in gas collector and gas outlet pressure drop. The total pressure drop was measured and correlated with experimental values. The simulation result from the model coincide with experimental measurements. The experimental data showed that the total pressure drop of the cross-flow RPB was influenced by rotating speed, gas flow rate and liquid flow rate. The total pressure drop decreased first and then increased with increasing gas flow rate in the case of low gas flow rate and high rotating speed. In other cases the total pressure drop increased with increasing gas flow rate. The total pressure drop decreased with increasing rotating speed, and the change was obvious at a low gas flow rate. The total pressure drop increased with increasing liquid flow rate, and the change was obvious at a low rotating speed.

Key words: rotating packed bed (RPB); cross-flow; pressure drop

引 言

旋转填料床 (rotating packed bed, RPB) 是

20 世纪 80 年代发展起来的一种新型传质和反应设备, 由于其具有处理量高、占用空间小、传质效率高、能耗低、投资少、适用面广等优点在国内外受

2006-04-01 收到初稿, 2006-06-07 收到修改稿。

联系人: 刘振河。第一作者: 刘有智 (1958—), 男, 教授。

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (20051015)。

Received date: 2006-04-01.

Corresponding author: LIU Zhenhe. E-mail: qlzh@126.com

Foundation item: supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province (20051015).

到重视。其中对旋转填料床基础理论研究主要包括流体力学性能和传质性能。而流体力学性能主要针对气体通过设备的气相压降进行研究。旋转填料床根据其内气、液流动方向的差异可以分为逆流旋转填料床、错流旋转填料床、并流旋转填料床。国内外对逆流旋转填料床气相压降的研究较多^[1-5]，但对错流旋转填料床气相压降的研究只有国内北京化工大学和华中北大学^[6-8]对此有相关文献报道。本文针对错流旋转填料床气相压降进行了分析和实验研究。

1 气相压降的分析与模型化

错流旋转填料床结构如图 1 所示。

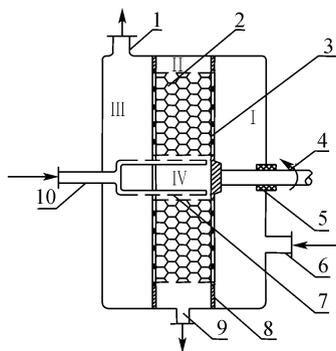


图 1 错流旋转填料床结构

Fig. 1 Structure of cross-flow rotating packed bed

- 1—gas outlet; 2—stainless wire packing;
- 3—packing brace; 4—shaft; 5—shaft seal;
- 6—gas inlet; 7—liquid distributor; 8—gas seal;
- 9—liquid outlet; 10—liquid inlet

错流旋转填料床气体不经过填料的内腔和外腔，所以其气相压降可分成 4 部分：进气管路阻力、气体流经填料层压降、气体流经出口集气段周向动能转化静压能、出气管路的阻力损失。

1.1 进、出口管路压降

气体进、出管路损失包括进口管的阻力损失和进口处的局部阻力损失，对于进口管路可以表示为

$$\Delta p_i = \xi_i \frac{u_i^2 \rho}{2} \quad (1)$$

其中

$$u_i = 4V_g / \pi d_i^2$$

式中 V_g 为气体流量； ξ_i 为气体进口阻力系数； d_i 为气体进口管直径。

同理，对于出口管路的压降也可以同样表示。同时为了便于测量，将进、出口的局部阻力合并一起进行计算。

1.2 填料层压降

旋转填料层内气液两相错流流动实际上并不是

气液间垂直流动，在本实验中液体在旋转填料床内超重力最高达到 200 g，所以可以忽略重力加速度的影响，认为液体以放射螺线形状径向向填料外层运动^[9]；而气体在轴向通过填料的过程中，在黏滞力和形体阻力的作用下，会与速度较高的填料产生摩擦（分为径向和切向），气体在摩擦曳力、形体曳力和离心力的共同作用下，沿轴向运动的同时还进行周向和径向运动，填料对气体做功。当旋转填料床稳定运行时，旋转填料床外部与壳体空腔压力与气体由于离心力所产生的压力平衡，此时气体全部是从填料层出气端流出。所以气相在旋转填料床中径向移动量较小，主要是轴向和周向运动。基于以上分析做以下假设：

- (1) 稳定运行时气体在填料运动中视为定常流、不可压缩、轴对称流动；
- (2) 气体在填料运动中无径向流动；
- (3) 忽略填料内、外腔 IV、II 对填料内气体运动的影响；
- (4) 在气液流动过程中忽略重力加速度的影响。

在考虑填料层压降中，首先只考虑气体的压降，然后叠加液相对气体压降的影响。

以旋转填料的轴线为 z 轴建立柱坐标系，稳定运行时填料内气相流动属于定常流，则 $\frac{\partial u_\theta}{\partial t} = 0$ ，

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0; \text{ 流动呈轴对称无径向流动, 所以}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial \theta} = 0; \quad u_r = 0.$$

由连续性方程有：

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

由运动方程有：

r 方向

$$\rho \frac{u_\theta^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

θ 方向

$$\rho u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \quad (4)$$

z 方向

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right] \quad (5)$$

在式 (4)、式 (5) 中， $\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}$

和 $\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right]$ 都是由于气体与填料相对运动的

摩擦而产生, 所以定义

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} = \frac{1}{2} f_{\theta} \rho \frac{u_{\theta r}^2}{d_e} \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right] = \frac{1}{2} f_z \rho \frac{u_z^2}{d_e} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} u_{\theta r} &= r\omega - u_{\theta} \\ d_e &= 4 \frac{\varepsilon}{a_f} \end{aligned} \quad (8)$$

同时将摩擦因数关联成常用表达式形式

$$f = \frac{\alpha}{R_c} + \beta \quad (9)$$

$$R_c = \frac{u_0}{a_f \mu} \quad (10)$$

式中 u 是空填料气速, 则 $u_z = \frac{u}{\varepsilon}$ 。

同时假定速度相等时 $f = f_{\theta} = f_z$; 由于气体与旋转填料床的相对速度较大, 所以忽略 f_{θ} 的黏性摩擦项 α 的影响, 视 f_{θ} 为常数。

将式 (6)、式 (9) 带入式 (4) 中整理得

$$\frac{du_{\theta}}{dz} = \frac{f_{\theta}}{2d_e u_z} u_{\theta r}^2 \quad (11)$$

边界条件

$$\begin{aligned} z = 0, u_{\theta} &= 0 \\ u_{\theta r} &= \frac{2d_e u_z r \omega}{r\omega f_{\theta} z + 2d_e u_z} \end{aligned} \quad (12)$$

$$u_{\theta} = \frac{(r\omega)^2 f_{\theta} z}{r\omega f_{\theta} z + 2d_e u_z} \quad (13)$$

由于旋转填料对气体做功, 其中 $\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) +$

$\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}$ 对气体的旋转做正功, $\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right]$ 对气体的轴向运动做负功。对于旋转填料同一半径 r 的环面上任意气体质点运动流线相同, 符合机械能守恒。

同时因 $\frac{\partial u_z}{\partial \theta} = 0$, $\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$, 将式 (7) 带入式

(5) 中写成常微分形式, 即

$$dp_{tz} = \frac{1}{2d_e} f_z \rho u_z^2 dz \quad (14)$$

$$dp_{t\theta} = \frac{1}{2d_e} f_{\theta} \rho u_{\theta r}^3 dt \quad (15)$$

其中

$$dt = \frac{dz}{u_z} \quad (16)$$

将式 (16) 带入式 (15)

$$dp_{t\theta} = \frac{1}{2d_e} f_{\theta} \rho \frac{u_{\theta r}^3}{u_z} dz \quad (17)$$

$$dp_{tz} = dp_tz - dp_{t\theta}$$

$$dp = \frac{\rho}{2d_e} \left(f_z u_z^2 - f_{\theta} \frac{u_{\theta r}^3}{u_z} \right) dz \quad (18)$$

因为旋转填料床内各点压力是 r 、 z 的函数与 θ

无关, 所以有

$$dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial z} dz \quad (19)$$

将式 (3)、式 (18) 带入式 (19) 整理得

$$\begin{aligned} \Delta p \approx & \frac{f_z \rho u_z^2 z}{2d_e} - \frac{4f_{\theta} \rho (d_e u_z)^2 (r\omega)^3 z}{(r\omega f_{\theta} z + 2d_e u_z)^3} + \\ & \frac{\rho r^3 \omega^4 (f_{\theta} z)^2}{(r\omega f_{\theta} z + 2d_e u_z)^2} (r - r_1) \\ & (r_1 \leq r \leq r_2; 0 \leq z \leq h) \end{aligned} \quad (20)$$

从式 (20) 可以看出 Δp_b 随径向是变化的, 为简化计算 r 取平均值。

1.3 出口集气段

气体在填料出气端气体带有周向速度, 所以气体会绕起重机的圆形筒壁旋转, 部分气体动能在旋转过程中因摩擦而损失。一部分动能转换为静压能, 填料床出气侧的周向速度 u_{θ} 沿径向逐渐增大, 则周向的动能积分式为

$$\sum_{r_1}^{r_2} m_r \frac{u_{\theta}^2}{2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho V_{\theta}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} 2\pi r dr \quad (21)$$

则

$$\sum_{r_1}^{r_2} \frac{u_{\theta}^2 \rho}{2} = \frac{\omega^2 \rho}{(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} r^5 \left(r + \frac{2d_e u_z}{\omega f_{\theta} h} \right)^{-2} dr$$

将 $\left(r + \frac{2d_e u_z}{\omega f_{\theta} h} \right)^{-2}$ 用 Maclaurin 公式展开为 r 的

2 次表达式, 积分整理得

$$\begin{aligned} \sum_{r_1}^{r_2} \frac{u_{\theta}^2 \rho}{2} &= \frac{\omega^4 \rho}{4(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{f_{\theta} h}{d_e u_z} \right)^2 \times \\ & \left[\frac{1}{6} r^6 - \frac{\omega f_{\theta} h}{7 d_e u_z} r^7 + \frac{3}{32} \left(\frac{\omega f_{\theta} h}{d_e u_z} \right)^2 r^8 \right]_{r_1}^{r_2} \end{aligned} \quad (22)$$

其旋转动能转化为静压能的分率 k 由实验数据拟合。则

$$\Delta p_v = k \sum_{r_1}^{r_2} \frac{u_{\theta}^2 \rho}{2} \quad (23)$$

则错流旋转填料床总气相压降可以表示为

$$\Delta p_t = \Delta p_i + \Delta p_o + \Delta p_b - \Delta p_v \quad (24)$$

1.4 各段气相压降的测定、各参数的计算

1.4.1 进、出口局部阻力系数 气体进、出口的直径已知, 为了便于测量和计算, 以进口管路气速为基准。当起重机内不放旋转填料床时测定不同气量下的气相压降, 计算局部阻力系数, 由实验数据拟合。

$$\xi_{i_0} = 0.108 u_i^{-0.249} \quad (25)$$

1.4.2 旋转填料床摩擦因数 在旋转填料床不转的条件下, 测量不同气量下的压降减去相同气量下的进、出口局部阻力压降计算旋转填料床的摩擦因

数。旋转填料床的摩擦因数由实验数据拟合。

$$f = \frac{215.1}{Re} + 1.052 \quad (26)$$

1.4.3 旋转填料床动能转化率 k 由实验中测得的气相总压降减去进、出口局部阻力压降和填料床层压降即在不同气量下由旋转动能转化为静压能压降。根据不同的气量和旋转填料床不同转速情况下由实验数据拟合 k 。

$$k = 0.735V_g^{0.126}n^{-0.110} \quad (27)$$

湿床孔隙率与持液量 V 、湿床有效比表面积 a_d 、液膜厚度 δ 和液滴直径 d 计算方法见文献 [5-6]。其中 r_a 是旋转填料床的几何半径，在本实验中 $r_a = 0.057 \text{ m}$ 。

2 气相压降的实验研究

利用空气与水体系对错流旋转填料床的气相压降进行研究。

2.1 各项参数

旋转填料床的转子外半径 $r_2 = 75 \text{ mm}$ ，填料层内半径 $r_1 = 60 \text{ mm}$ ，填料层轴向厚 $h = 30 \text{ mm}$ ，丝网填料孔隙率 $\epsilon = 94.8\%$ ，填料比表面积 $a_t = 729.8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2 实验流程

如图 2 所示，新鲜水通过转子流量计后，由进液管进入旋转填料床内空腔的液体分布器，经液体分布器喷淋到旋转填料内缘上；来自鼓风机的空气经过气体流量计后，由位于旋转填料床侧面的进气口垂直进入填料床。在压力作用下，气体在填料层中与液体错流接触后，气体由出口管排出设备，放空。液体汇集到旋转填料床底部，由出液口排出。

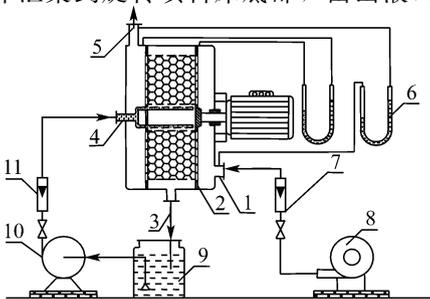


图 2 实验流程简图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

- 1—gas inlet; 2—gas seal; 3—liquid outlet;
- 4—liquid inlet; 5—gas outlet; 6—manometer;
- 7—gas flowmeter; 8—air blower; 9—liquid tank;
- 10—pump; 11—liquid flowmeter

气体流量 V_g 为 $1 \sim 95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ；液体流量 V_l 为 $0 \sim 150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ；旋转填料床转速为 $0 \sim 1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3 实验结果与讨论

3.1 气体流量对压降的影响

如图 3 所示，错流旋转填料床在低转速或大气量情况下，干床气相压降随气流量的增大而增大；在旋转填料床高转速、小气量下，气相压降随气流量的增大先减小，当气流量增大到一定值后，气相压降开始随气量的增大而上升。

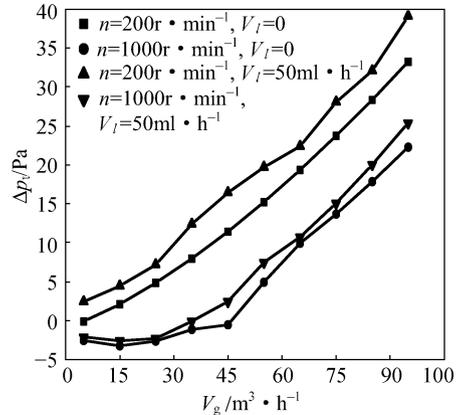


图 3 气体流量对压降的影响

Fig. 3 Total pressure drop vs gas flow rate

错流旋转填料床湿床压降的变化与干床相同。主要原因是气体在穿过填料层时填料对气体做功，当旋转填料床低速运行时，主要表现为轴向摩擦阻力，填料对气体的切向运动做功较小，所以气相压降随气流量的增大而上升。当旋转填料床高速运行、气流量较小时，填料对气体切向运动做功大于气体穿过填料的轴向摩擦阻力，填料进出气端的压降可能呈负值，同时还有出气端Ⅲ区旋转动能转化为静压能，从而使旋转填料床的气相压降表现为随气量的增大而下降；随着气量的增大，填料对气体轴向运动摩擦阻力增大，而气体穿越填料层时间随气量的增大而缩短，填料对单位质量气体的切向运动做功减小，旋转动能也降低，气相的总压降由进、出口气的局部阻力和气体穿过填料层的摩擦压降来控制。故随气量的增大气相压降上升。

3.2 旋转填料床转速对压降的影响

气相压降随填料床转速变化关系如图 4 所示。在小气量的情况下，干、湿床的气相压降都随旋转填料床转速的增大而下降；在大气量运行情况

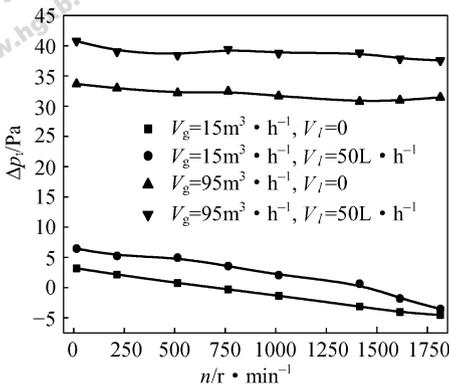


图 4 旋转填料床转速对压降的影响

Fig. 4 Total pressure drop vs rotating speed

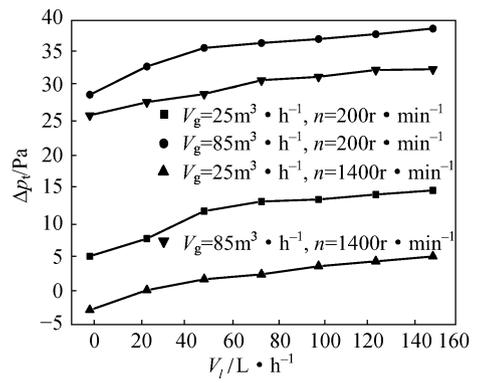


图 5 液体流量对压降的影响

Fig. 5 Total pressure drop vs liquid flow rate

下，气相压降随转速的升高变化并不明显。特别是旋转填料床在高速、小气量运行时，气相压降可能小于零；在相同气量下，旋转填料床低速运行时气相压降略高于旋转填料床高速运行时的压降；在相同转速和气量的情况下湿床压降要大于干床压降。

主要原因是：在低转速情况下，旋转填料对气体旋转做功较少，主要表现为气体通过填料层的摩擦压降。大气量的情况下，气体通过旋转填料层的时间较短，填料对单位质量气体的切向运动做功较少，气相总压降主要表现为进、出口的局部阻力和垂直通过填料层的摩擦阻力降；当旋转填料床在高速、小气量时，气体经过填料层的时间较长，填料对气体摩擦曳力对气体切向运动做功较多而轴向的能量损失较少，故气相压降都随旋转填料床转速的增大而下降。

3.3 液体流量对压降的影响

液体流量对压降的影响见图 5，从图中可以看出气相总压降随液体流量增大而增大。但是旋转填料床低速运行时，气相压降随液量的增大压降明显增大，但是液量增大到一定值后气相压降随液量的增大而上升得较为缓慢；当旋转填料床高速运行时，气相压降随液量的增大而缓慢上升，但是整体变化并不大。主要原因是旋转填料床在运行时填料层的持液量大约与液量的 0.7 次方呈正比、与转速 1 次方呈反比。旋转填料床在低速运行时床层的空隙率随液量的增大而减小而导致压降上升；旋转填料床在高速运行时床层空隙率随液量增大变化不大，故压降上升幅度也较小。

3.4 实验结果与模型计算结果对比

旋转填料床气相压降实验值与模型计算值的对比如图 6 所示。

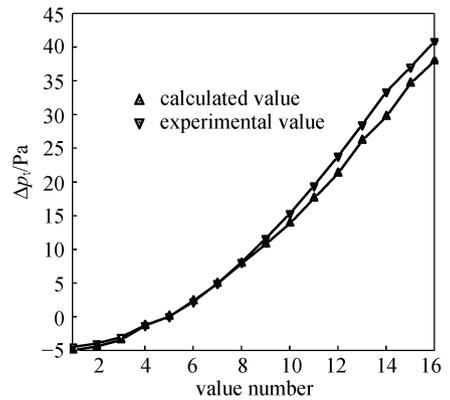


图 6 实验值与计算值的对比

Fig. 6 Comparison of experimental and calculated value

图中旋转填料床气相压降的实验值与理论计算值之间相差不大，所计算的压降数据和实测值的相对误差在 13% 以内，故可认为所建立的模型很好地反映了错流旋转填料床气相压降规律。

4 结 论

- (1) 错流旋转填料床气相总压降在高转速和小气量的操作条件下，随气量的增大先下降后上升。其他情况随气量的增大而上升。
- (2) 错流旋转填料床的转速在小气量操作情况下对气相压降有明显的影响，而对大气量下的气相压降影响不大。
- (3) 旋转填料床气相压降随液体流量的增大而增大。
- (4) 错流旋转填料床的湿床压降大于干床压降。

符 号 说 明

a_d ——液滴的比表面积， $m^2 \cdot m^{-3}$

a_t ——干填料比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
 d ——液滴直径, m
 d_c ——填料当量直径, m
 f ——摩擦因数
 f_z, f_θ ——分别为气体与填料的轴向、切向磨擦因数
 h ——填料层轴向厚度, m
 k ——填料出口动能转化系数
 n ——旋转床转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
 p_b ——气相填料床层压降, Pa
 p_i ——气相入口阻力降, Pa
 p_o ——气相出口阻力降, Pa
 p_t ——气相总压降, Pa
 p_v ——气相动能转化静压能, Pa
 r_1, r_2 ——分别为填料内、外缘半径, m
 u ——空填料气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 u_z, u_θ ——分别为气体轴向、切向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 V ——填料层持液量
 V_g ——气体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 V_l ——液体体积流量, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$
 α, β ——常数
 δ ——液膜厚度, m
 ϵ ——填料孔隙率
 μ ——空气黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 τ ——表面应力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
 ξ ——局部阻力因数
 ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ω ——旋转角速度, s^{-1}

下角标

g ——气体
 l ——液体

References

[1] Zheng Chong, Guo Kai, Feng Yangding, Yang Cun, Nelson C Gardner. Pressure drop of centripetal gas flow

through rotating beds. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, **39** (3): 829-834

[2] Kumar M P, Rao D P. Studies on a high-gravity gas-liquid contactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1990, **29**: 917-920

[3] Liu Hwaishen, Lin Chiachang, Wu Shengchi, Hsu Hsienwen. Characteristics of a rotating packed bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, **35**: 3590-3596

[4] Chandra A, Goswami P S, Rao D P. Characteristics of flow in a rotating packed bed (HIGEE) with split packing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44**: 4051-4060

[5] Li Zhenhu (李振虎), Guo Kai (郭锴), Chen Jianming (陈建铭), Zhou Xumei (周绪美), Zheng Chong (郑冲). Research into characteristics of gas pressure drop of a rotating packed bed. *Journal of Beijing University of Chemical Technology* (北京化工大学学报), 1999, **26** (4): 5-10

[6] Guo Fen, Zheng Chong, Guo Kai, Feng Yangding, Nelson C Gardner. Hydrodynamics and mass transfer in cross-flow rotating packed bed. *Chemical Engineering Science*, 1997, **52** (21): 3853-3859

[7] Zhao Haihong (赵海红), Liu Youzhi (刘有智), Shi Guoliang (石国亮), Jiao Weizhou (焦纬洲), Xie Wuxi (谢五喜), Guo Yu (郭雨), Zhang Deyu (章德玉). Studies on gas pressure drop characteristics of cross flow rotating packed bed. *Science & Technology in Chemical Industry* (化工科技), 2004, **12** (2): 12-15

[8] Jiao Weizhou (焦纬洲), Liu Youzhi (刘有智), Diao Jinxiang (刁金祥), Kang Rongcan (康荣灿), Liu Zhenhe (刘振河). Hydrodynamic characteristics of cross-flow rotating bed with protruded ripple plate packing. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2005, **24** (10): 1162-1166

[9] Guo Fen (郭奋), Zhang Jiyao (张纪尧), Guo Kai (郭锴), Chen Jianfeng (陈建峰), Zheng Chong (郑冲). The advance of theoretical research about hydrodynamics characteristics and mass transfer of rotating packed bed. *Chemistry* (化学通报), 2003, **9**: 587-591