

# 旋转填充床中两种填料压降特性与传质特性的对比

李振虎 郭 锴 翁南梅 冯元鼎 郑 冲

(北京化工大学超重力工程技术研究中心, 北京 100029)

**摘 要:** 利用空气-水-SO<sub>2</sub> 系统研究了逆流旋转床的气相压降及传质特性。结果表明, 填料 A (普通丝网) 比填料 B (RS 钢波纹丝网) 的气相压降大 30 % 左右, 体积传质系数小 15 % 左右, 即填料 B 比填料 A 的流体力学性能和传质性能好。

**关键词:** 逆流; 旋转床; 压降; 传质; 填料

**中图分类号:** TQ 051.82

## 引 言

旋转床 (RPB 即 Rotating Packed Bed) 能利用离心力极大地强化传递过程。在相同的操作条件下, 与重力场的设备相比, 旋转床的体积可以大大地缩小, 操作弹性明显地提高, 体积传质系数可提高 1 ~ 2 个数量级<sup>[1]</sup>, 可广泛地应用于传质过程以及受传质控制的反应过程。目前, 旋转床的理论与应用研究已有了很大的发展, 但尚未完善。从文献[2~5]来看, 旋转床所用填料基本上是金属丝网、泡沫金属、碟片、玻璃珠和螺旋型填料。其中金属丝网填料比表面积大 (约为 200 ~ 5 000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), 孔隙率高 (90 % ~ 97 %), 气相阻力小, 且体积传质系数高, 因此在旋转床的工业应用中广泛采用。在研究中发现, 金属丝网填料的结构对旋转床的传质性能和流体力学性能有非常大的影响。这方面目前尚无文献报道。本文研究两种结构不同的金属丝网填料, 对逆流旋转床的压降特性和传质特性的影响。这将对旋转床的设计和填料的选型有非常重要的意义。

## 1 实 验

实验采用空气-水系统对逆流旋转床的气体压降特性进行研究。利用空气-水-SO<sub>2</sub> 体系研究逆流旋转床的传质特性。

### 1.1 主要设备结构

旋转床结构见文献[6]中的图 1。

旋转床机壳内径 450 mm; 气体进、出口管内径

80 mm; 转子外径 300 mm; 转子内径 180 mm; 轴向装填宽度 100 mm; 液体进口管内径 20 mm。

### 1.2 两种填料的特性参数

填料 A 为普通金属丝网, 填料丝径  $d_A = 0.278\ 7\ \text{mm}$ ; 孔隙率  $\epsilon_A = 88.1\ %$ ; 比表面积  $a_A = 852\ \text{m}^2/\text{m}^3$ ; 材料密度  $\rho_A = 7\ 147\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

填料 B 为波纹形 RS 钢金属丝网, 填料丝径  $d_B = 0.225\ \text{mm}$ ; 孔隙率  $\epsilon_B = 97.0\ %$ ; 比表面积  $a_B = 266\ \text{m}^2/\text{m}^3$ ; 材料密度  $\rho_B = 7\ 293\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。对同一转子, 填料的装填密度分别为: A 填料, 848 kg/m<sup>3</sup>; B 填料, 219 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 实验范围

实验范围: 气量  $q_v$  为 200 ~ 400 m<sup>3</sup>/h; 液量  $q_v$  为 0.2 ~ 1.0 m<sup>3</sup>/h; 转速  $n$  为 0 ~ 1 420 r/min。

采用 U 型管压差计测量经过旋转床的压降; 利用二氧化硫传感器在线测量气体进出口浓度, 计算机采样。

### 1.4 实验流程

文献[6]图 2 的流程图中增加 SO<sub>2</sub> 钢瓶和 SO<sub>2</sub> 流量计, SO<sub>2</sub> 传感器及计算机采样系统。流程描述如下:

来自罗茨鼓风机的空气经孔板流量计计量后与计量后的二氧化硫气体 (由液态 SO<sub>2</sub> 钢瓶减压后逸出的气体) 混合, 从逆流旋转床外壳的切向入口进入床内。在压力差的作用下, 由高速旋转的转子外缘进入填料层, 由填料层内缘经气体出口管排空。在气体出口管安装有 SO<sub>2</sub> 传感器, 用计算机采样分析 SO<sub>2</sub> 含量; 来自液体储槽的水经液体转子流量计计量后, 经旋转床中心处的液体分布器均匀喷洒在旋

转的填料层内缘上,在离心力作用下流过填料层,在填料层中与气体逆流接触传质后,被甩出填料层,由旋转床的外壳收集后,通过旋转床下端的液体出口管,经液封槽溢流至排液室。再经液体出口泵送至液体储槽循环使用或者排掉。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 填料 A、B 的压降对比

图 1~3 是两种结构不同的填料的旋转填料床气体压降对比。从图中看出,填料 B 的压降比填料 A 的压降不论在何种操作条件(气量、液量或转速的影响)下都要小 30 % 左右。

这是由于填料 A 的装填量比填料 B 的装填量大,对同一转子填料 A 的孔隙率(88 %)比填料 B 的小(97 %),从而造成气体通过填料 A 的截面积比填料 B 小,使得气相的压降增大。且由于填料 A 的孔隙率小,所以丝网填料 A 所造成的抵抗气体流动的旋转功和旋转摩擦阻力也大于填料 B。从而使气体通过填料 A 的压降比通过填料 B 的压降要大。

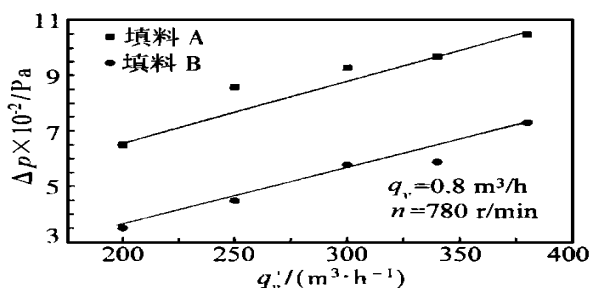


图 1 同液量、同转速时填料 A、B 压降的对比

Fig. 1 Comparison of the effects of gas flow rate on pressure-drop between two packings

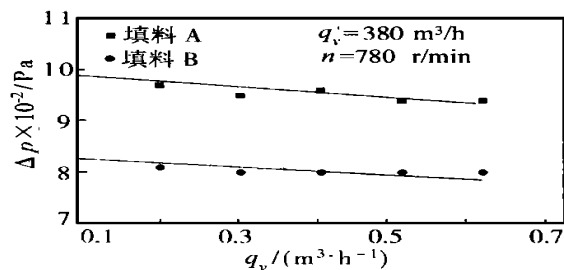


图 2 同气量、同转速时填料 A、B 压降的对比

Fig. 2 Comparison of the effects of liquid flow rate on pressure-drop between two packings

从图中还看出,旋转填料床的气相压降随气量

和转速的增大而增大;随液量的增大而减小。这与文献[6]的研究结果一致。

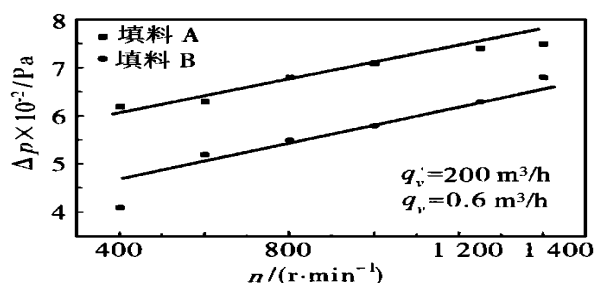


图 3 同气量、同液量下填料 A、B 压降的对比

Fig. 3 Comparison of the effects of rotating speed on pressure-drop between two packings

### 2.2 填料 A、B 体积传质系数的对比

图 4~6 是气量、液量及转速对两种填料体积传质系数( $K = k_y a$ )影响的对比。从图中看出,在 3 种操作条件下,填料 B 的体积传质系数比填料 A 的体积传质系数大 15 % 左右。

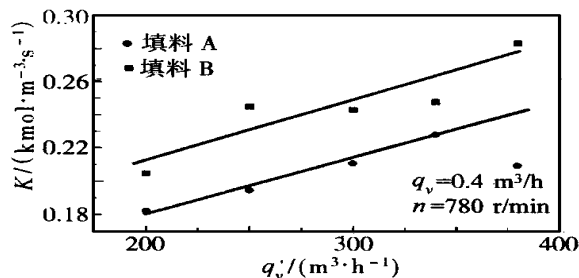


图 4 同液量、同转速下填料 A、B 的 K 的对比

Fig. 4 Comparison of the effects of gas flow rate on K between two packings

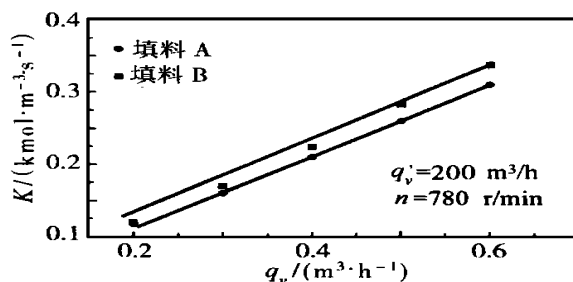


图 5 同气量、同转速下填料 A、B 的 K 的对比

Fig. 5 Comparison of the effects of liquid flow rate on K between two packings

利用同步摄像技术<sup>[7]</sup>和高频摄影技术<sup>[8,9]</sup>研究旋转床内液体的流动状态时发现,在旋转填料床内

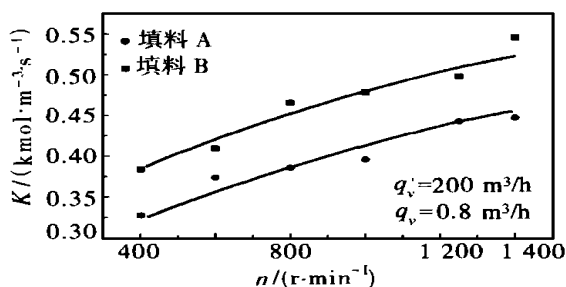
图6 同气量、同液量下填料A、B的 $K$ 的对比

Fig. 6 Comparison of the effects of rotating speed on  $K$  between two packings

液体以液膜、液丝及液滴的形式流动。其中液丝和液滴占相当大的份额。在旋转填料床中,由于大的离心力使液体分散成细小的液丝和液滴。这些细小的液丝及液滴具有很大的比表面积,极大地提高气液的有效比表面积。从研究所用的两种填料的结构来看,填料A表面平整,编织较为规整;填料B是带有立体感波纹丝网填料,表面凹凸不平。液体在填料A上流动时,容易从填料丝的连接处沿填料丝流到下一层填料。因此在填料层内形成的液丝和液滴较少;对填料B来说,由于是立体的波纹填料,上一层填料丝与下一层填料丝之间的连接较少,液体在离心力的作用下,沿填料丝汇集到填料的弧形顶端被甩向下一层填料,容易形成较多的液滴;再由于气液两相在不规则的填料B中流动时,不断地改变方向,从而造成的湍动程度比在表面平整的填料A要大,所以在填料B中气液两相的分传质系数较填料A的高。

综上所述,在填料B中气液两相的有效传质比表面积和分体积传质系数都比填料A的大,从而使得填料B比填料A具有更大的总体积传质系数。

从图中看出,旋转填料床的体积传质系数随气量、液量及转速的增大而增大。这与文献[8]的研究结果相符。

### 3 数据回归及回归结果与实验结果的对比

#### 3.1 数据回归

3.1.1 旋转床气相压降的回归 分别将填料A和填料B的总床压降对转速、气量及液量进行多元非线性回归得:

$$\text{填料 A} \quad p_{\text{total}} = 0.035 q_v^{0.91} q_v^{-0.039} n^{0.38} \quad (1)$$

$$\text{填料 B} \quad p_{\text{total}} = 0.023 q_v^{0.91} q_v^{-0.039} n^{0.38} \quad (2)$$

由于两方程中 $q_v$ 、 $q_v$ 、 $n$ 的指数均相同,即在操作条件 $q_v$ 、 $q_v$ 、 $n$ 相同的条件下,填料A的气体压降比填料B的气体压降大34%左右,与实验数据基本一致(关联式本身的误差对用这些关联式对实验结果的分析影响不大)。

3.1.2 体积传质系数的回归 对填料A和填料B的体积传质系数进行多元线性回归得:

$$\text{填料 A} \quad K = k_y a = 40 q_n^{0.18} q_n^{0.95} n^{0.23} \quad (3)$$

$$\text{填料 B} \quad K = k_y a = 46 q_n^{0.18} q_n^{0.95} n^{0.23} \quad (4)$$

由于两方程中 $q_n$ 、 $q_n$ 、 $n$ 的指数均相同,则在操作条件 $q_n$ 、 $q_n$ 、 $n$ 相同的条件下,填料B的体积传质系数较填料A的体积传质系数大15%左右,与实验数据基本一致。

#### 3.2 回归结果与实验结果对比

图7、8是填料A和填料B的旋转床压降的回归结果与实验结果的对比图。从图中可见,所有的点基本上都落在对角线附近,回归结果与实验结果比较吻合。平均相对误差分别为:13%和21%。

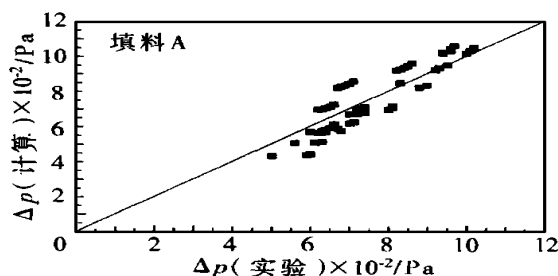


图7 填料A气相压降的回归结果与实验结果的对比

Fig. 7 Comparison of pressure drop between regressive and experimental results for packing A

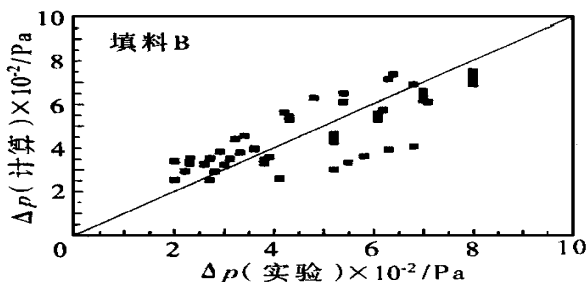


图8 填料B气相压降的回归结果与实验结果的对比

Fig. 8 Comparison of pressure drop between regressive and experimental results for packing B

图9、10是二种填料体积传质系数的计算结果与实验结果的对比图,从图中可见,所有的点都落在

对角线附近,计算结果与实验结果相吻合。填料 A 和填料 B 的平均相对误差均为 7.7 %。

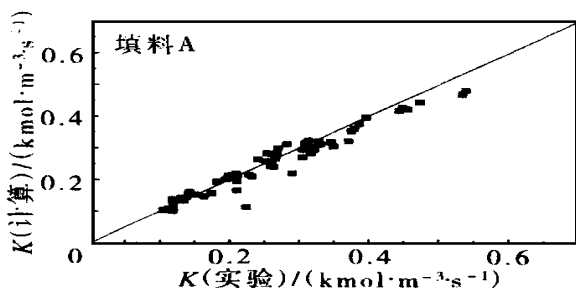


图 9 填料 A 中  $K$  的回归结果与实验结果的对比

Fig. 9 Comparison of  $K$  between regressive and experimental results for packing A

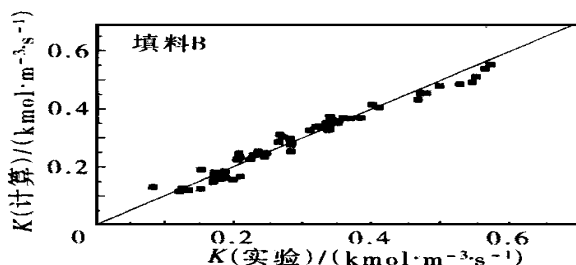


图 10 填料 B 中  $K$  的回归结果与实验结果的对比

Fig. 10 Comparison of  $K$  between regressive and experimental results for packing B

## 4 结 论

第一,对于 A 和 B 两种填料,在实验研究范围内,通过旋转床装置的气体总压降随气量增大而增大;随转速增大而增大;随液量增大而减小。

第二,填料 B 比填料 A 的气相压降小约三分之一。

通过对填料 A 和填料 B 的体积传质系数的对比研究表明:

(1) 气量、液量、转速增大,两种填料的体积传质系数都增大;液量、转速增大,吸收率增大;气量增大,吸收率减小。

(2) 填料 B 的体积传质系数比填料 A 的体积传质系数大 15 %。

(3) 在旋转床中,并非比表面积大的填料体积传质系数一定高。例如,填料 A 的比表面积为  $852 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,填料 B 的为  $266 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。填料 A 的比表面积比填料 B 的大 3 倍多,但体积传质系数小 15 %。

(4) 得到了装填填料 A 与填料 B 的旋转床装置气相压降和体积传质系数的经验关联式。

## 符 号 说 明

$a$  —— 填料比表面积,  $\text{m}^2/\text{m}^3$

$d$  —— 填料丝径, mm

$k_y$  —— 以摩尔比表示的传质推动力的传质系数,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$K$  —— 气相体积传质系数,  $K = k_y a, \text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

$q_v$  —— 液体体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

$q_n$  —— 液体摩尔流量,  $\text{kmol}/\text{s}$

$n$  —— 旋转床转速,  $\text{r}/\text{min}$

$q_n$  —— 气体摩尔流量,  $\text{kmol}/\text{s}$

$q_v$  —— 气体体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

—— 填料孔隙率,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

—— 填料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$p$  —— 气相压降, Pa

## 参 考 文 献

- [1] Ramshaw C. Hige distillation: an example of intensification. Chem Eng, 1983(2): 13 ~ 14
- [2] 郭锴, 柳松年, 郑冲, 等. 超重力工程技术应用的新进展. 化工进展, 1997(1): 1 ~ 4
- [3] 简弃非, 邓先和, 邓颂九. 超重力旋转床的传质研究. 化工进展, 1996(6): 6 ~ 9
- [4] Sarat Munjal, Milorad P Dudukovic, Palghat Ramachandran. Mass transfer in rotating packed beds: experiment results and comparison with theory and gravity flow. Chemical Engineering Science, 1989, 44(10): 2257 ~ 2268
- [5] 陈昭琼, 熊双喜, 伍极光. 螺旋型旋转吸收器. 化工学报, 1995, 46(3): 388 ~ 392
- [6] 李振虎, 郭锴, 郑冲, 等. 超重力旋转床的气相压降特性的研究. 北京化工大学学报, 1999, 26(4): 4 ~ 10
- [7] 郭锴. 超重力转子填料内液体流动的观测与研究. [学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1996
- [8] 竺洁松. 旋转床内液体微粒化对气液传质强化的作用. [学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1997
- [9] 张军. 旋转床内液体流动与传质的实验研究和计算模拟. [学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1996

(下转第 12 页)

## 符 号 说 明

$F_H$ 、 $F_C$ 、 $F_{out}$ 、 $F_{into}$  ——热容流率, kW/

$P$  ——单位时间内的换热负荷, W

$t$  ——温度,

$t_s$  ——物流起始温度,

$t_t$  ——物流目标温度,

## 参 考 文 献

- [1] Linnhoff B, Townsend D W. User guider on process integration for the efficient use of energy. New York: Pergmon Press, Ltd, 1982
- [2] Gundersen T, Grossmann I E. Improved optimization strategies for automated heat exchanger network synthesis through physical insight. Comput Chem Engng, 1990, 14: 925

## Synthesis and analysis of heat exchanger networks featuring multiple pinch points

LIU Hong-qian MA De-xian

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

**Abstract:** It was often to come across streams with phase changed, which might result in multiple pinch points in the composite curve, in the modern petrochemical industries. When the process system was being synthesized by means of Linnhoff's pinch point technology, sub-systems can be obtained based on pinch point location and synthesized effectively. The tests illustrated that the method can reasonably allot process utilities consumption, and it was significant to facilitate the system control, operation and safety.

**Key words:** process system engineering; heat exchanger networks; pinch point

(上接第 8 页)

## Comparison of characteristics of the pressure-drop and mass-transfer of two kinds of packing in a rotating packed bed

LI Zhen-hu GUO Kai WENG Nan-mei FENG Yuan-ding ZHENG Chong

(High Gravity Engineering & Technology Research Center, Department of Chemical Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** With an air-water-SO<sub>2</sub> system, the characteristics of the pressure-drop and mass-transfer in RPB have been studied. Results show that the gas pressure-drop of packing A (normal metal wire packing) is about 30 % higher than that of packing B (wave wire packing). The volume mass-transfer coefficient of packing A is about 15 % less than that of packing B. In other words, the characteristics of hydromechanics and mass-transfer of packing B is better than that of packing A.

**Key words:** countercurrent; RPB; pressure-drop; mass-transfer; packing