

①331-338

金属板波填料板片上开孔孔型 对气流径向混合的影响

TQ053.504
~~TQ053.5~~

梁国颜 高维平

叶永恒

(吉林化工学院化工系, 吉林 132022)

(北京化工大学化学工程系, 北京 100029)

摘要 在两相流工况下,对两种孔型板波填料作气流的径向分布性能的实验研究。提出用液气动力比来反映不同操作工况条件。对比结果表明,桥孔比圆孔更有利气流的径向扩散。

关键词 塔填料 孔型 气流扩散 传质

填料塔

孔板波纹填料

1 引言

放大效应问题是填料塔研究中很重要也很复杂的问题,是制约填料塔广泛应用的关键。填料塔中气液流动分布均匀化程度决定着放大效应的大小,研究气液在填料层中的分布规律是开发新填料的基础。在以往的研究中,人们多集中于液流的分布问题而较少对气流分布进行研究,文献^[1]中已表明气流不均匀分布会造成传质效率大幅度的降低。可见,气流的分布研究同样重要。

孔板波纹填料是Sulzer公司70年代推出的优秀规整填料,业已在工业上广泛应用。以往人们认为这种填料属无放大效应。然而,随塔径的增大,从工程应用中发现孔板波纹填料还是存在一定的放大效应问题^[2]。为此,改进板片上开孔孔型,完善板波填料的性能是本文的基础。

文中分析了板波填料的结构特点,并在气液两相逆流工况下对改进孔型和圆孔型的板波填料进行了对比研究,为改善孔板波纹填料提供依据。

2 板片上孔型结构改变对气流混合作用的对比分析

板波填料是由压成波纹状的板片组成,波纹方向与塔的轴线呈一定角度。组合时相邻板片波纹方向相错,在填料内部形成许多交叉的倾斜通道,这是气液流动的主流道。通过对气流在孔板波纹填料流道内混合的特点分析认为,单元孔板波纹填料的结构具有不对称性,即气流沿平行于板片方向

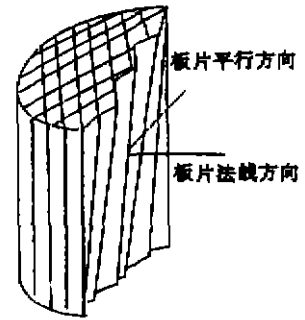


图1 单盘板波填料示意图
Fig. 1 The sketch map of individual element packing

1997-10-24收到初稿,1998-06-15收到修改稿。
联系人及第一作者 梁国颜,男,34岁,硕士,讲师。

流动有规定的通道导向(图1),而在板片的法线方向上,气流扩散仅能通过板片上的圆孔,导致气流径向扩散在波纹板片平行方向和法向上的不均衡性,尽管安装时使相邻填料单元错开一定角度,对此有所缓解,随塔径的增大,这种不均衡性会更加显著。

将典型孔板波纹填料板片上圆孔改为“拱桥”状的桥孔,由一种平面的孔变为立体的孔(图2),根据文献^[3,4]的分析,桥孔应有以下几点优势:

- (1) 强化板片间的气流混合
- (2) 强化板片上的两相湍动
- (3) 保留一定的填料几何面积

3 气液两相逆流工况下两种孔型填料的气流径向混合对比

3.1 气流径向混合实验

实验是在直径 $\phi 500$ 的有机玻璃塔中进行,流程如图3所示。气流混合实验采用示踪剂法。示踪剂 CO_2 以点源形式注入填料层底部,在气流携带作用下,与液流水呈逆流状,沿填料床层扩散。通过改变气、液流率及填料床层高,获得不同工况下气流混合结果,测定不同径向位置示踪剂浓度分布表征填料对气流的混合作用。两种板波填料的结构参数见表1。

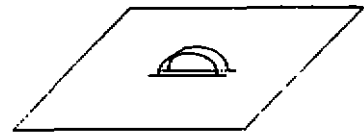


图2 桥孔示意图

Fig. 2 The sketch map of improved hole

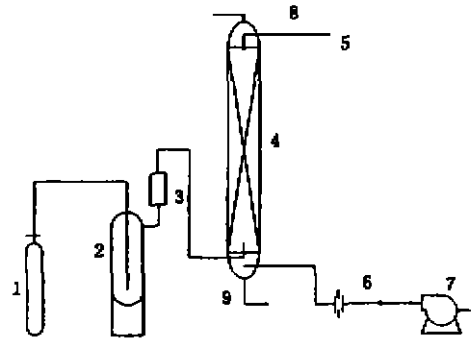


图3 气流混合实验装置流程简图

Fig. 3 Process flow diagram of experiment on mixing gas stream

1. 二氧化碳钢瓶
2. 缓冲器
3. 转子流量计
4. 填料塔
5. 气体采样器
6. 孔板流量计
7. 离心鼓风机
8. 入塔水
9. 出塔水

表1 两种孔型板波填料结构参数

Table 1 The structure parameters of two type of packings

填料	开孔率 %	波高 h, m	波距 $2B, \text{m}$	板厚 δ, m	盘高 H, m	盘径 D, m	倾角 $\beta, ^\circ$	比表面积 $a, \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	空隙率 $\epsilon, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	堆积密度 $\rho, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
桥孔型 (JK)	9.2	0.0112	0.022	0.0003	0.06	0.466	45	260	0.96	312
圆孔型 (SK)	10.5	0.0112	0.022	0.0003	0.06	0.466	45	240	0.97	234

3.2 不同工况两种孔型填料对气流径向混合作用的比较

3.2.1 相对浓度曲线的对比

实验空气流速选为 $0.63, 2.0 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;液流率选为 $10, 20, 40 (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$;床层高选为 $0.48, 0.72 (\text{m})$ 。

根据径向浓度实测数据,作出相对浓度与径向位置 $C_r/C_0 \sim r/R$ 关系图。图中虚线代表理想均衡分布状态,通过相对浓度线偏离均衡线的程度来反映填料的混合作用。

3.2.1.1 床层高 0.72 m 的比较

从下列图可见,无论是哪一种工况,桥孔填料对气流的分布都要好于孔板波纹填料,在第二工况更明显一些,这恰好是一般工业填料塔的设计点。

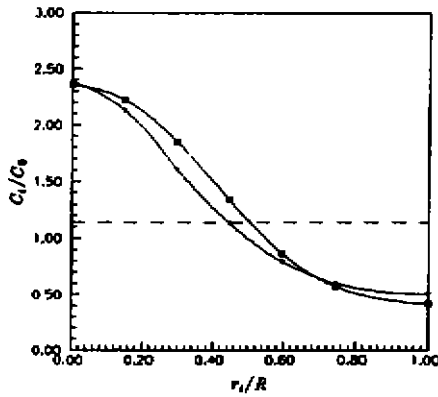


图4 液流率为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的气流分布
 Fig. 4 The profile of mixing gas stream
 on liquid rate $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
 * JK □ SK $U_0 = 2.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.72 \text{ m}$

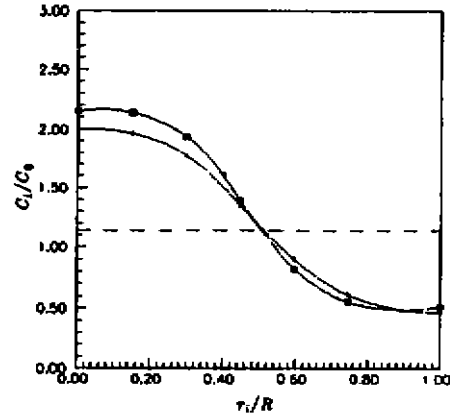


图5 液流率为 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的气流分布
 Fig. 5 The profile of mixing gas stream
 on liquid rate $40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
 * JK □ SK $U_0 = 2.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.72 \text{ m}$

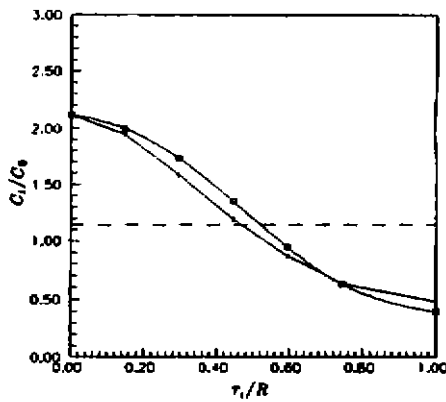


图6 液流率为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的气流分布
 Fig. 6 The profile of mixing gas stream
 on liquid rate $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
 * JK □ SK $U_0 = 0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.72 \text{ m}$

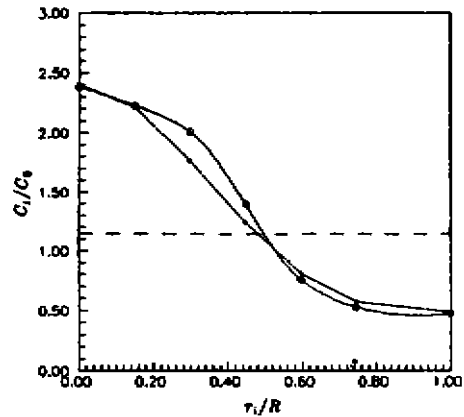


图7 液流率为 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的气流分布
 Fig. 7 The profile of mixing gas stream
 on liquid rate $40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
 * JK □ SK $U_0 = 0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.72 \text{ m}$

3.2.1.2 床层高度 0.48 m 的比较

在这一条件下,我们选用了以下两种工况进行实验:

空塔气速 $0.63 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$; 喷淋密度 $20 \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$, 见图 8。

空塔气速 $2 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$; 喷淋密度 $20 \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$, 见图 9。

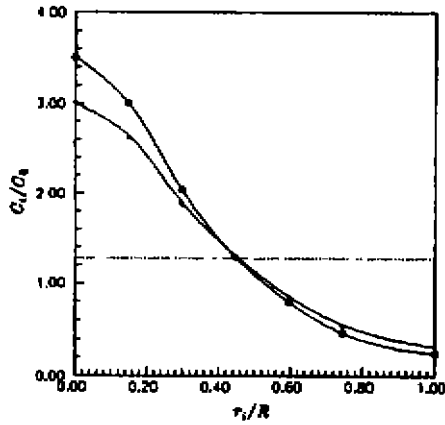


图 8 空气气速 $0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的气流分布

Fig. 8 The profile of mixing gas stream
on air rate $0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

* JK ○ SK $U_0 = 0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.48 \text{ m}$

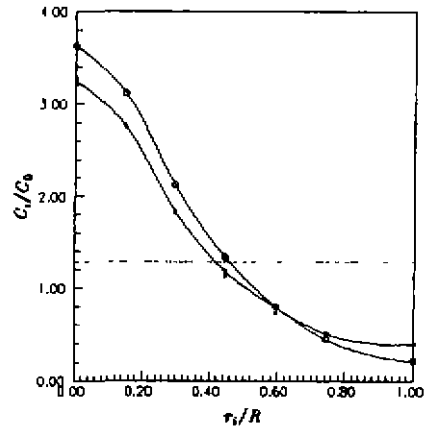


图 9 空气气速 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的气流分布

Fig. 9 The profile of mixing gas stream
on air rate $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

* JK ○ SK $U_0 = 0.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $Z = 0.48 \text{ m}$

由图可见,在填料层较低时,两种孔型填料的分布性能差别更加明显。

综上,无论气速、液流率的高低,桥孔填料的优势都存在。

3.2.2 Peclet 准数的量化描述

国内、外学者在研究填料床气体扩散性能通常用 Peclet 准数来作量化描述。Peclet 准数表征了混合扩散中对流扩散与分子扩散的关系,同时反映了气流的混合程度。为了便于对比,本文也用 Peclet 准数来描述气流的径向混合状态。

3.2.2.1 扩散方程的求解及 Peclet 准数的计算

研究流体在填料层内的行为广泛用“扩散模型”。在圆柱形塔内其形式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_0 \frac{\partial C}{\partial Z} = D_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \quad (1)$$

通常,假设 D_r, D_L 不随流体的浓度而变化,但与流体的性质、流动参数及填料的几何形状有关。其数值的大小和变化,可以反映流体在各种填料中的混合程度。对于规整的板波纹填料,可以认为基本上符合轴对称的条件,满足扩散方程的应用条件。文献^[2]已经证明了这一点。

用扩散模型计算径向混合 D_r 时,大多忽略了轴向混合的影响,对模型作了简化处理。但根据文献^[4]在大塔内的研究中发现,忽略轴向扩散会引起平均 34% 的偏差。因此对本实验的体系而言,气、液两相逆流,在 $\phi 500$ 塔中进行实验,轴向因素不可忽视,在扩散模型中把轴向扩散考虑在内。

当系统处于稳态时,有:

$$U_0 \frac{\partial C}{\partial Z} = D_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} = D_r \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \quad (2)$$

边界条件为:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=R} &= 0 & \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} &= 0 \\ C(r, 0) &= C_f & 0 < r \leq r_0 \\ C(r, 0) &= 0 & r_0 < r \leq R \\ C(r, \infty) &= C_0 \end{aligned} \tag{3}$$

扩散方程属偏微分方程,用 Dorweiler^[3]方法对方程求解,得到方程的解析解:

$$\frac{C_1}{C_0} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{K_n r_0} \frac{J_1(K_n r_0) J_0(K_n r_1)}{J_0^2(K_n R)} \exp\left[\frac{Z}{2D_L} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4K_n^2 D_L D_r})\right] \tag{4}$$

C_0 按下式计算:

$$C_0 = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R C_1 d(\pi r^2) = \frac{2}{R^2} \int_0^R C_1 r dr \tag{5}$$

根据贝塞尔函数及负指数函数组成的级数收敛迅速的特点,在此取其两项,以保证精度。

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{C_0} &= 1 + \frac{2}{K_1 r_0} \frac{J_1(K_1 r_0) J_0(K_1 r_1)}{J_0^2(K_1 R)} \exp\left[\frac{Z}{2D_L} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4K_1^2 D_L D_r})\right] \\ &+ \frac{2}{K_2 r_0} \frac{J_1(K_2 r_0) J_0(K_2 r_1)}{J_0^2(K_2 R)} \exp\left[\frac{Z}{2D_L} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4K_2^2 D_L D_r})\right] \end{aligned} \tag{6}$$

为简化求解,参考文献^[2,4]设定 D_L 等于 ND_r , 则上式变为:

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{C_0} &= 1 + \frac{2}{K_1 r_0} \frac{J_1(K_1 r_0) J_0(K_1 r_1)}{J_0^2(K_1 R)} \exp\left[\frac{Z}{2ND_r} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4NK_1^2 D_r^2})\right] \\ &+ \frac{2}{K_2 r_0} \frac{J_1(K_2 r_0) J_0(K_2 r_1)}{J_0^2(K_2 R)} \exp\left[\frac{Z}{2ND_r} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4NK_2^2 D_r^2})\right] \end{aligned} \tag{7}$$

令:

$$\begin{aligned} \frac{2}{K_1 r_0} \frac{J_1(K_1 r_0) J_0(K_1 r_1)}{J_0^2(K_1 R)} &= x_1 \\ \frac{2}{K_2 r_0} \frac{J_1(K_2 r_0) J_0(K_2 r_1)}{J_0^2(K_2 R)} &= x_2 \\ \exp\left[\frac{Z}{2ND_r} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4NK_1^2 D_r^2})\right] &= A \\ \exp\left[\frac{Z}{2ND_r} (U_0 - \sqrt{U_0^2 + 4NK_2^2 D_r^2})\right] &= B \end{aligned}$$

则(7)式变成如下的简单关系式:

$$C_1/C_0 = 1 + Ax_1 + Bx_2 \tag{8}$$

根据 $C_1 \sim r_1$ 关系首先编程求解贝塞尔函数,然后利用 Broyden 法进行回归,为此引入目标函数 Q , 使按上式计算的浓度值与实验值之差平方和最小。即:

$$Q = \sum_{i=1}^n (C/C_0 - C_1/C_0)^2 \tag{9}$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n (C/C_0 - C_1/C_0) \left(\frac{\partial(C/C_0)}{\partial D_r}\right) = 0 \tag{10}$$

在一定的实验点数 (m) 下,可以得到回归参数 A, B 之值。
通过求解含 D_r 的一元非线性方程,可以得到 $D_r(1), D_r(2)$ 。
由:

$$D_r = \frac{D_r(1) + D_r(2)}{2} \quad (11)$$

根据 Peclet 准数的定义式(径向)

$$\begin{aligned} Pe_r &= Ud_r/D_r \\ d_r &= 4\epsilon/a \end{aligned} \quad (12)$$

两相流的研究中我们考虑轴向扩散,涉及到 N 的取值问题,那么就有必要对轴向扩散系数进行求解。

本文根据实验测试得到的数据,运用非线性最小二乘法对 D_L 和 D_r 两参数进行回归,根据目标函数的特点,在给定适当精度和初值后进行求解。各种工况下回归结果如下表:

表 2 N 值的回归结果

Table 2 The correlation results of N

$U_0, m \cdot s^{-1}$	0.63				2.0			
$L, m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	0	10	20	40	0	10	20	40
$N = D_L/D_r$	1.45	1.51	1.50	1.58	1.86	1.90	1.64	1.62

因此,在计算 Pe_r 时,取 N 值为各个工况的平均值 1.63。

3.2.2.2 两种孔型填料的 Peclet 准数量化描述

从以上大量的数据可见:对于气流的分布除了填料层高因素外,操作因素如气速、液体流率对气流的均布都有一定程度的影响。而且单从一种工况来逐个对比分析还难以直观地找出内在的规律性。如何以一个综合参数描述气、液两相流动工况对气流混合的影响?通过填料床的气、液流率的变化体现了气、液动能的改变。我们认为合适的气液湍动有利于气液的表面更新,会促进传质过程。一组气、液流率反映出一种流动状态。液、气动量的比值可以很好地反映流率的关系。从量纲的角度看,研究的两个因素气速、液体喷淋密度的单位均属于速度范畴,这无疑会与动量的概念联系上。在此,试把液气动量比^[5]的概念引入到对填料床的气流分布的描述中并呈现它的规律性。液气动量比公式^[6]:

$$\psi = \frac{W_L \sqrt{\rho_L (\epsilon - h_L) \tau_L}}{W_G \sqrt{\rho_G h_L \tau_G}} \quad (13)$$

在数据整理时,可作简化处理, τ_L, τ_G 近似相等。根据各种填料气液流动工况进行动量比的求解。以 JK 填料为例,可以获得的液气动量比值如表 3。

表 3 液气动量比值

Table 3 The momentum flux ratio of liquid to vapor

U_0	L				
	0	10	20	40	50
0.63	0	0.123	0.246	0.492	
1.00	0	0.0770	0.154	0.298	
1.50	0	0.0515	0.102	0.204	
2.00	0	0.0380	0.0760	0.152	0.193

然后把表征气流分布的 Pe_r 准数与液气动量比进行作图,可以得到气流分布性能与液气动量比的关系。

由图 10 可见:两种孔型不同的填料差别较为明显。JK 的 Pe_r 显著低于孔板波纹填料。在 Pe_r 相差最大处,JK 填料较 SK 填料低约 15.4%;在相差最小处,JK 填料较 SK 填料低约 8.1%;平均为 12%。说明与圆孔填料相比 JK 填料对气体径向分布有较大优势。

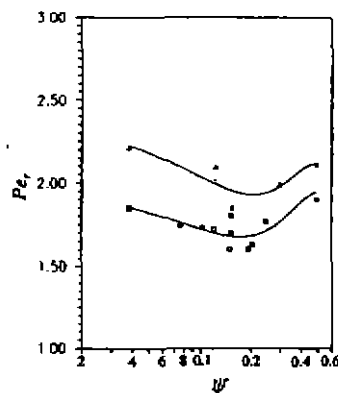


图 10 两种不同孔型填料 Pe_r 对比
Fig 10 The comparison on Peclet numbers with different packings
△ SK □ JK

4 传质性能差别对桥孔优势的佐证

孔型的改进能够强化气流在床层的径向混合程度,以期提高填料的传质效率,适应塔器大型化的需要。因而在气流混合性能研究的同时,对它们的传质性能也进行了对比。实验采用氧解吸法,利用 STG-203A 型溶氧仪测定。

实验在喷淋密度为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,空塔气速在 $1.2 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围测试。由测试结果,计算出对应于空塔气速的传质单元高度 H_{01} ,并作出 $H_{01} - F$ 图。从图 11 可见桥孔型填料的 H_{01} 明显低于圆孔型填料的值,其降低率为 10%左右,即传质性能提高了 10%。这有力地证明板上小孔孔型的改变强化了气流在板片间的浓度分布和气液的表面更新,从而达到提高填料的传质效率。

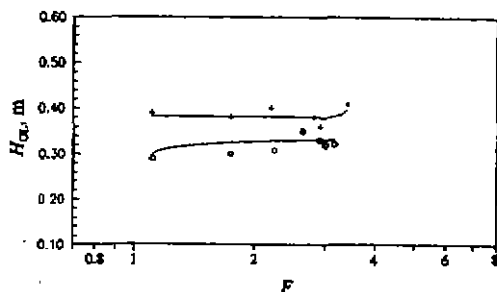


图 11 传质性能对比
Fig. 11 The comparison on the performance of mass transfer
+ SK □ JK

5 结 论

1. 孔板波纹填料的板片在结构上是不对称的,由此引起气流径向混合不均衡。
2. 两相流的气流径向研究结果表明,在模拟真实操作工况下,桥孔型填料较圆孔型填料强化了气流的径向均布,促进了气液的表面更新,提高了传质效率。
3. 两相流工况的模拟实验,为桥孔型填料的工业放大应用提供了新的选择。

符号说明

a	— 填料比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	N	— 轴向扩散系数与径向扩散系数的比值, 无因次
B	— 填料半波距, m	Pe_r	— 径向 Peclet 准数
C	— 气体浓度变量, %	Q	— 目标函数
C_r	— 注射管内示踪剂浓度, %	r_0	— 示踪剂注入管半径, m
C_i	— 不同径向位置示踪剂浓度, %	r_i	— 塔半径变量, m
C_0	— 径向示踪剂平均浓度, %	R	— 塔半径, m
C_r	— 径向位置 r 处的浓度, %	U	— 填料层内气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
d_c	— 填料当量直径, m	U_0	— 空塔气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
D	— 填料盘径, m	W	— 气相流率、液相流率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
D_r, D_z	— 径向、轴向扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Z	— 填料层高度, m
F	— 空塔动能因子, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{0.5}$	ρ	— 密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
h	— 填料波高, m	ϵ	— 空隙率, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
h_c	— 滞液量体积分数, %	δ	— 板片厚度, m
H	— 填料盘高, m	β	— 波纹倾角, $^\circ$
H_{01}	— 液相传质单元高度, m	τ	— 填料流道曲折度, 无因次
J_0, J_1	— 0 级、1 级贝塞尔函数	ψ	— 液气动量比, 无因次
K	— 无因次	下标	
L	— 液体喷淋密度, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	g, L	— 气相、液相

参 考 文 献

- 1 Кабаков М И, Ровей А М Хим Пром, 1984, 496
- 2 刘敏. 桥孔板波填料气流径向混合性能研究:[学位论文]. 北京:北京化工大学, 1995
- 3 栾国颜. 气液两相流工况桥孔板波填料气流径向混合性能研究:[学位论文]. 北京:北京化工大学, 1996
- 4 袁孝竞, 刘树臣. 金属板波填料气流混合性能研究:[学位论文]. 天津:天津大学, 1988
- 5 叶永恒, 方之蓉, 史季芬. 筛型塔板上两相密度分布及工况转变条件. 化工学报, 1987, 4: (4)438~446
- 6 David P Kurtz. Stretch the Capacity of Highpressure Distillation Columns. Chemical Engineering Progress, 1991, 2: 43~49

Influence of Hole Type of Mellapak on Radial Mixing of Gas Stream

Luan Guoyan Gao Weiping

(Department of Chemical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology)

Ye Yongheng

(Department of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

ABSTRACT The radial mixing characteristics were studied for different types of hole in the Mellapak under two-phase countercurrent flow. The ratio of liquid to vapor momentum flux were used to describe various operating conditions. The results show that improved hole is more advantageous to the radial mixing of gas stream.

Key words Tower packings, Type of hole, Diffusion of gas stream, Mass transfer