

93, 3 (3)  
①

填料塔, 进气结构, 设计



# 填料塔进气结构及其设计\*

董 谊 仁

(浙江工学院化工系)

12053.5

1-8

## 摘 要

本文简要介绍填料塔气流分布研究进展; 分析了各种类型进气结构的特性; 提出其设计方法。

## 一、前言

填料塔的大型化是与新型填料的发展、各种塔内件的发展分不开的; 填料塔的放大, 其关键问题是液体和气体在塔内的均匀分布。因此, 塔内件的设计, 特别是液体分布器和进气结构的设计, 成为开发大型填料塔的核心问题, 而流体均布理论和技术又是发展填料和填料塔内件的先导。

关于填料塔内的液体分布问题, 已积累了大量文献, 这方面的工作已有相当基础。至于气体分布, 由于其流动性远大于液体, 而且以往强调了填料对速度场的均化作用, 人们常需假定入口气流为均匀分布, 但是随着大空隙率、低压降新型高效填料的发展, 大直径、浅床层填料塔的使用, 气流在填料床内自然可以达到均匀分布的看法已为人们所摒弃, 对其重要性的认识与日俱增。近十年来有不少研究者, 如Honer<sup>[1]</sup>、Chen<sup>[2]</sup>、Potter<sup>[3]</sup>、Ali<sup>[4]</sup>、Kour<sup>[5]</sup>等对气体进口结构及气体初始分布状态对填料塔中气液均布的影响作了多侧面(或多方面)的实验研究。这里特别指出Karakob<sup>[6]</sup>在 $\phi 4.5 \times 20\text{m}$ 用乙醇胺吸收 $\text{CO}_2$ 的大型填料塔中的测试, 其结果充分说明了气体入口分布对传质性能的影响。在液体分布均匀的前提下当吸收塔底部采用水平侧向进气时, 由于气流发生偏

流, 致使填料床层中气体分布不均匀, 其影响波及整个床层, 实验结果表明, 靠进气口的半边塔传质效率较另半边塔高30%。

综合有关填料塔气体分布技术的研究, 可以看出:

- (1) 低压降填料床层中应考虑气体初始分布问题, Honer以压降小于 $8.3\text{mmH}_2\text{O}/\text{m}$ 为界线;
- (2) 浅床层填料塔应考虑气体初始分布问题, 许多作者将高径比小于 $0.5 \sim 1$ 的床层高度作为区分浅床层的界线;
- (3) 大直径填料塔即使填料层的高径比大于1, 气体初始分布同样是很重要的, 不良初始分布会使传质效率显著下降;
- (4) 气体不均匀流入填料床, 是床层内气流分布不均匀的主要原因。

因此研究填料塔内气体分布, 主要是研究气体的预分布以及达到均匀预分布应采用的进气结构的设计方法, 本文试图对此作一系统介绍。

## 二、填料塔的进气结构

良好的进气结构应具备下列各项要求:

- (1) 均布性能好, 即入塔气流经过进气结构预分布后能均匀流入填料床;
- (2) 流动阻力小;

\*浙江省自然科学基金资助项目。

- (3) 占空间小;
- (4) 液体能自由下落, 有利于两相传质;
- (5) 结构简单, 安装方便。

这些要求中均布性能好和阻力小是主要的。常用进气结构式样各异, 图1为6种典型结构, 从分布原理讲主要有三类: (a)侧向水平进气; (b)垂直朝下进气; (c)垂直朝上进气。此外尚有(d)斜向进气; (e)水平进气管伸入塔内, 在管的下侧开缺口; (f)侧向水平进气, 塔周设布气环。当简单的进气

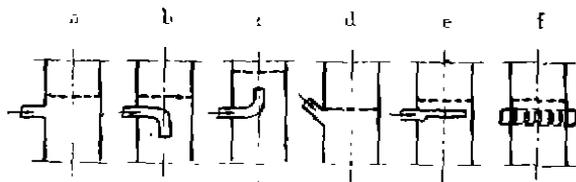


图1 6种典型进气结构

结构不能满足均布要求时, 塔内可增设均布格栅或格栅组(图2)。Идельчик将格栅分为两类: 平面格栅(a)和管形格栅(b), 它们对气流的均布具有不同的机理<sup>[7]</sup>。若要进一步改善均布性能, 应使用气体分布器。图3表示三种典型的分布器: (a)径向型; (b)排管型; (c)格栅型。

对三类进气结构的性能, 文献[7, 8]有系统论述, 针对国内常见的进气结构, 我们又做了一些研究工作<sup>[9, 10]</sup>。

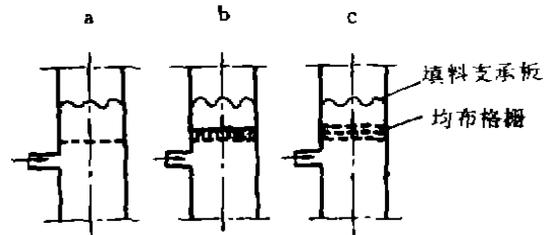


图2 均布格栅

a—平面; b—管型; c—格栅组

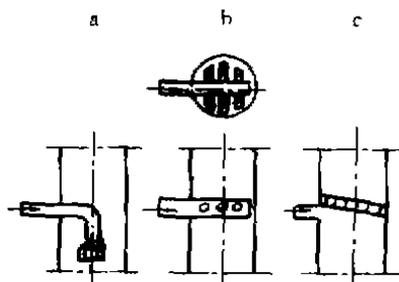


图3 三种典型的分布器

图4表示气流在各类进气结构中的流线和速度分布, 从管口流出的气流形成一股自由射流, 或水平(a), 或向下(b), 或向上(c)流动。由于射流表面的湍流脉动、卷吸作用, 流动截面逐渐扩大, 速度减慢, 在射流周围形成旋涡。当受到塔壁和内构件的阻挡时形成各种复杂的流动分布。图中a所示的水平射流, 由于前方圆柱壁的阻挡, 气流向四周分散, 一部分气体折转向上沿柱壁

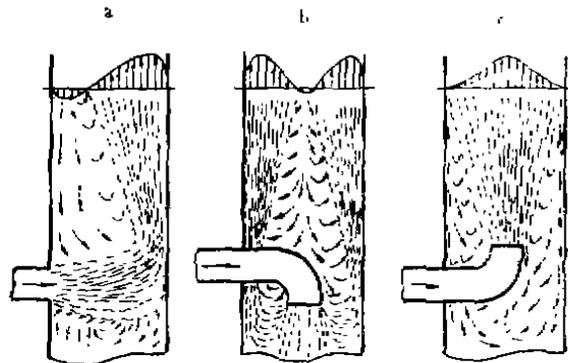


图4 典型进气结构中的流谱

流动形成附壁射流, 这是主流, 一部分向塔底流去, 构成底部的循环区; 其余则向两侧运动, 形成两个转向相反的环流。主流和支流相互影响、相互制约。但根据连续性原理, 全部流体必沿塔体向上流动, 各截面的流量应该相等。c为上流的情况, 射流截面逐渐扩大, 速度分布趋向均匀。b的流动情况比较复杂, 射流流向塔底, 受到阻挡后再折转向上, 因此出口与塔底间的距离大小,

是否设置挡板对速度分布影响很大。

无论哪一类进气结构，进口管的结构形式、尺寸大小、均布格栅的不同设计，分布器的结构型式和尺寸均会影响气体的均布性能。图5为常见的6种进气管结构形式：(a)水平直管；(b)90°弯管，在安装时弯头有各种朝向；(c)弯管后接扩散管；(d)135°弯管，弯头处加整流隔板；(e)直角弯管，在弯头处加有整流隔板；(f)弯管后接有带

整流隔板的扩散管。进口管结构对管子出口自由射流的速度分布有很大影响，从而进一步影响到塔内速度分布。图6表示各种结构的管口速度剖面，可以看出弯管的速度剖面是不对称的，当直管长度x太小时还会出现倒流，使塔内速度均布变差。图7说明由于进口的偏流，塔内形成逆时针方向的螺旋流，对这种流场，速度场的均化是十分困难的。

合适地设置均布格栅，可以改善填料床

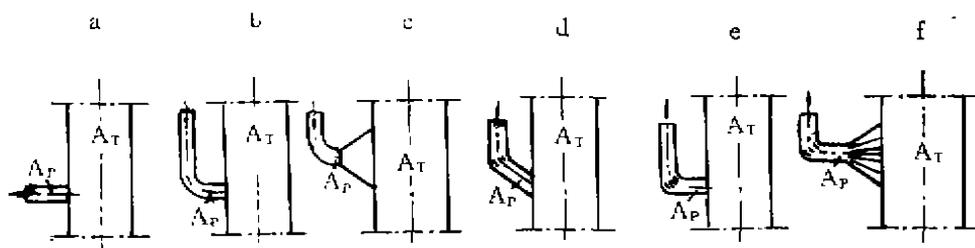


图5 6种进气结构

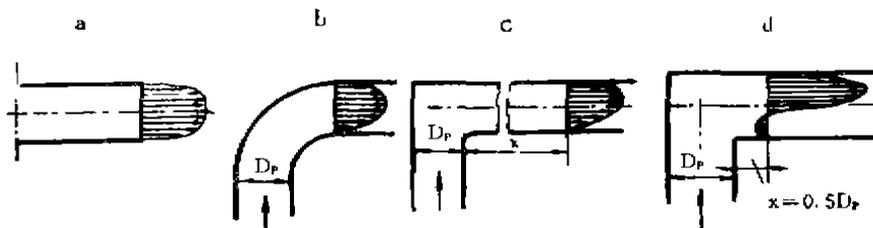


图6 不同进口管结构的管口速度剖面

a—直管；b—弯管；c—直角弯管；d—直角弯管

层入口段气流的均布性能。格栅的均布作用与其几何参数、开孔率、板厚等有关，这些参数可用格栅的阻力系数定量计算，即

$$\zeta = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (1)$$

一般而言均布性能随 $\zeta$ 的增大而改善。但也不是阻力系数越大，速度分布越均匀，如平面格栅在阻力系数达到某一临界值 $\zeta_c$ 后，会出现图8a、c所示的新的不均匀分布，速度分布发生了“逆转”。对于侧面进

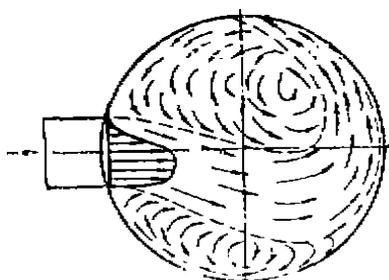


图7 不对称速度分布引起的旋转流

气，高速区从格栅前的右侧(见图4a)转移到格栅后的左侧(图8a)，倒流区也有对应的变化，垂直朝上进气有类似现象出现(比较图4c和图8c)。进气口上缘离格栅的距离 $H_g$ 对气流均布有影响，图9表示使用同一块均布格栅，仅放置位置不同而产生的三种情形，a和b表示 $H_g/D_T$ 过小和过大都不会改善均布性能，只有c是合适的位置，均布性较好。

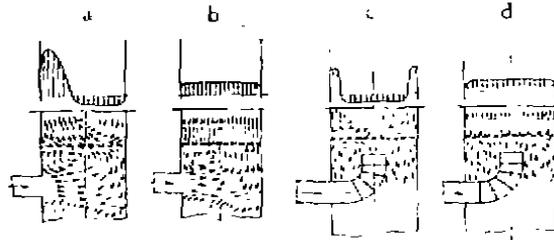


图8 格栅阻力系数 $\xi$ 对均布的影响

a、c— $\xi > \xi_c$ ; b、d— $\xi$ 合适(管型格栅)

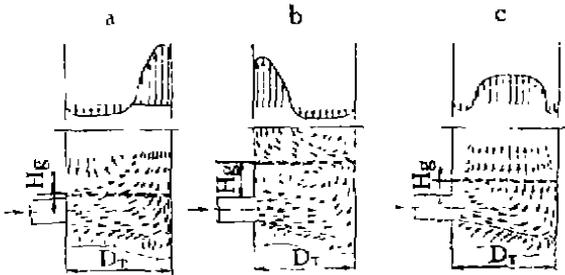


图9  $H_g/D_T$ 对均布性能的影响

a— $H_g/D_T < 0.1$ ; b— $H_g/D_T > 0.15$ ;  
c— $H_g/D_T = 0.1 - 0.15$

点是不增大大气阻力，结构紧凑特别适用于旧塔改造<sup>[11]</sup>。

### 三、进气结构的设计

进气结构的设计是根据对气体预分布等项要求，选择其结构类型，计算主要尺寸，确定是否要使用均布格栅，有没有必要采用气体分布器等。它包括进气管结构的设计，主要尺寸的确定，格栅型式的选择和设计，分布器型式的选择和设计等。

用以表示均布性能的指标有：

(1) 分布不均匀系数 $M_f$

$$M_f = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i - u}{u} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

(2) 动量系数M

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i}{u} \right)^2 \quad (3)$$

(3) 动能系数N

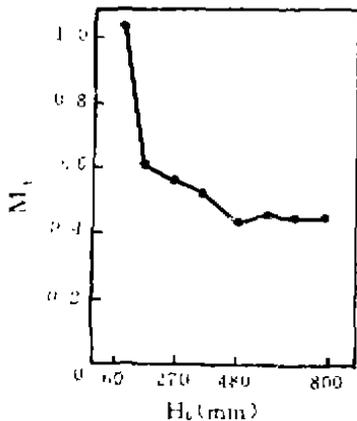


图10  $H_g$ 对均布性能的影响

( $D_T = 285\text{mm}$ )

同的性能。排管式分布器具有良好的均布性能，不足之处是压降大，较难设计，设计不好孔间流量难以达到均匀；径向型分布器结构简单、均布性能良好，但其阻力较大。格栅型分布器，是在射流的前方设置挡板，将气体分流形成较均匀的速度分布，只要设计妥当也会形成均匀的气体分布。其最大的优

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i}{u}\right)^3 \quad (4)$$

(4) 无因次最大速度  $u_{max}/u$

显然, 对于理想均匀的速度场,  $M_f = 0$ ,  $M = N = u_{max}/u = 1$ 。分布越不均匀, 系数值越大。

上列系数间的关系为

$$M = 1 + M_f^2 \quad (5)$$

$$\text{和 } M \cong \frac{1}{3}(N + 2) \quad (6)$$

按对气体流入填料床层的均布程度要求的高低, 本文将填料塔分为4类, 即:

- (1) 大直径浅床层填料塔;
- (2) 中、小直径浅床层填料塔;
- (3) 大直径填料塔;
- (4) 中、小直径填料塔。

以上分类中, 床层高径比小于等于1的为浅床层; 塔径大于2米的为大直径。

第一类填料塔由于床层自身的均布能力最差, 几乎完全依靠进气结构的预分布来实现床层中气流的均布。塔径大选用较小的截面比  $A_T/A_F$  有困难, 最理想的均布措施是采用气体分布器。第二类塔, 由于其床层高度太低, 不均匀的初始分布不可能在床层内转化为均匀分布。因此, 也要求气流均匀预分布后进入床层, 以提高传递效率。因这类塔的塔径较小, 只要进气管结构设计得合理, 或采用增设均布格栅等项措施, 使进气流得到均匀预分布是不难做到的。对于其余两类

塔, 特别是第四类, 鉴于床层高径比较大, 本身有较好的均布性能, 对于分布的要求就可以低一点。但要特别注意进气管结构、填料支承板和床层结构本身对均布性能的影响。

除均布性能外, 设计中还要考虑其它要求以及特殊场合的考虑重点也不同。如真空操作中要强调进气结构的阻力小; 旧设备改造中, 常常受塔内空间的限制, 因此结构的紧凑性很重要; 有毒、污浊的操作介质要把结构简单、安装维修方便放在重要地位等。总之在设计中, 首先要弄清塔的特性和要求, 再着手制定方案, 确定有关结构和尺寸。

### 1. 进气管结构的设计<sup>7, 8</sup>

进气管结构由进气管及其内构件组成, 简单的进气管结构不设内构件。床层初始分布受截面比  $A_T/A_F$ 、进气管的形状和参数的影响。

进气管要认真设计, 以保证管口气体速度分布达到一定的均布程度, 各种进气管结构如图11所示。在各管口所能达到的均布程度见表1~5。设计时根据对均布的要求选择合适的结构和尺寸。

比较各表中数据可以看出:

- (1) 采用弯管输气时, 均布性能随直管段长度  $x$  的增加而改善;
- (2) 直角弯管的均布性能较弯管的差, 弯管的均布性能受圆弧半径  $r$  影响,  $r$  越大均布性能越好;

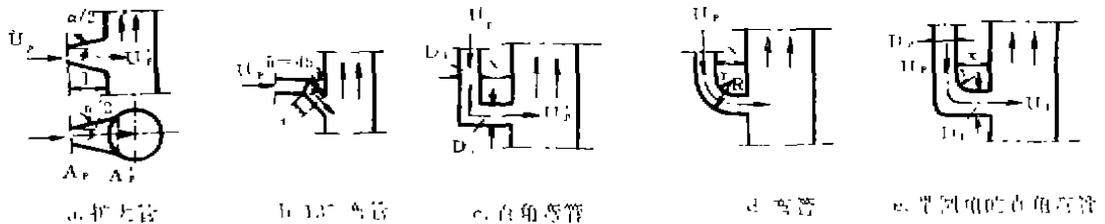


图11 各种结构的进气管

**表 1 扩大管均布性能参数**

$A_p'/A_p$	$\alpha=6^\circ$								$\alpha=10^\circ$							
	3.0	4.0	4.5	6.0	8.0	10	13	16	4.0	4.5	6.0	8.0	10	13	16	
$l/D_0$	6.8	9.50	10.6	13.6	17.5	21.0	25	29	5.70	6.35	8.00	10.0	12.5	15.0	17.0	
$u_{max}/u_p$	1.5	1.80	2.50	2.0	1.70	1.5	1.4	1.35	2.30	3.50	3.20	2.75	2.30	2.0	1.70	
$M_p$	1.95	1.20	1.55	1.4	1.27	1.24	1.15	1.15	1.30	2.00	1.90	1.70	1.40	1.25	1.20	
$N_p$	1.45	1.60	2.80	2.2	1.80	1.75	1.45	1.45	1.90	4.00	3.70	3.10	2.20	1.75	1.60	

$A_p'/A_p$	$\alpha=15^\circ$					$\alpha=30^\circ$				
	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
$l/D_p$	2.80	3.80	5.57	7.00	8.30	1.36	1.85	2.72	3.43	4.04
$u_{max}/u_p$	5.20	3.30	4.00	3.50	3.00	2.80	4.25	5.10	4.60	4.40
$M_p$	1.50	1.85	2.35	2.00	1.80	2.00	2.50	3.10	2.80	2.55
$N_p$	2.50	3.50	4.80	4.10	3.40	4.00	5.30	7.20	6.40	5.70

**表 2 135°弯管均布性能参数**

$x/D_p$	0.05	0.36	1.25	3.25	5.00
$u_{max}/u_p$	1.30	1.30	1.45	1.30	1.10
$M_p$	1.12	1.12	1.12	1.08	1.02
$N_p$	1.35	1.35	1.35	1.25	1.05

注:  $\delta=45^\circ$ ;  $r/D_p=0$

**表 4 弯管均布性能参数**

$x/D_p$	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0
$u_{max}/u_p$	1.20	1.20	1.17	1.18	1.12	1.10
$M_p$	1.25	1.13	1.07	1.03	1.025	1.02
$N_p$	1.80	1.40	1.20	1.10	1.08	1.05

注:  $\delta=90^\circ$ ;  $r/D_p=0.5$

**表 3 直角弯管均布性能参数**

$x/D_p$	0.8-1.2	3.0	6.0	10.0
$u_{max}/u_p$	2.30	2.00	1.40	1.10
$M_p$	1.80	1.60	1.10	1.02
$N_p$	3.50	2.80	1.30	1.05

注:  $\delta=90^\circ$ ;  $r/D_p=0$

**表 5 带圆角的直角弯管均布性能参数**

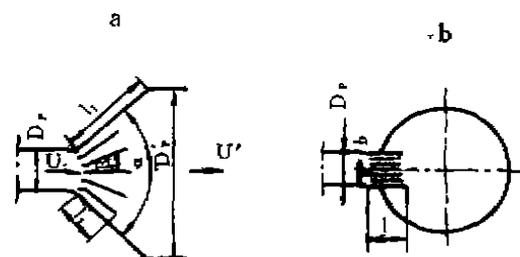
$x/D_p$	0.5	1.5	3.0	6.0	10.0
$u_{max}/u_p$	2.00	1.70	1.50	1.30	1.10
$M_p$	1.70	1.40	1.23	1.08	1.02
$N_p$	3.20	2.30	1.70	1.25	1.05

注:  $\delta=90^\circ$ ;  $r/D_p=0.18$ ;  $A_p'/A_p=1.33$

(3) 扩大管的均布性能受扩散角 $\alpha$ 的影响, 同一面积比 $A_p'/A_p$ ,  $\alpha$ 越大均布性能越差, 当 $\alpha$ 大于 $15^\circ$ 时均布性能急剧恶化, 这时为改善均布性能, 可在通道中设置纵向隔板;

(4) 同一扩散角均布程度与 $A_p'$ 的关系较为复杂, 如 $\alpha=6^\circ$ , 当 $A_p'/A_p=4.5$ 时 $N$ 值最大, 大于或小于4.5时均布性能都会改善,

隔板有短隔板和长隔板两种, 如图12。



**图12 均布隔板**

a—短隔板; b—长隔板

不同扩散角所需的隔板数见表6。

表6 扩散角与隔板数的关系

扩散角 $\alpha^\circ$	隔板数Z					
	短	30	45	60	90	>90
短	2	4	4	6	8	8
长	2	4	6	6	8	8

为防止出口气流由于不对称的速度分布在塔内形成旋转流场,可采用图12.b的出口结构,其中隔板长度 $l \geq (4 \sim 6)b$ 。

靠进口管结构的良好设计和扩大进气管截面积的办法来改善气流分布是有限度的,塔内设置均布格栅是进一步改善均布性能的有效措施。

## 2. 平面均布格栅的设计<sup>[7, 8]</sup>

### (1) 单层平面均布格栅

对于侧向水平进气,可按以下步骤计算:

- ① 计算气流在格栅前达到一定分散度,格栅所需要的阻力系数

$$\zeta \approx [N_p \left(\frac{A_i}{A_T}\right)^2 \left(\frac{A_T}{A_p}\right)^2 - 1] \quad (7)$$

式中 $N_p$ 从表1-5查得。

- ② 根据 $\zeta$ 值,确定格栅的几何参数<sup>[11]</sup>。

- ③ 确定进口管上缘与格栅的距离 $H_g$

$$H_g = (0.10 \sim 0.15)D_T$$

- ④ 确定均布格栅与填料支承板的距离

$$H_s = 3.5t \approx 3.5d_0 / \sqrt{f}$$

当 $A_T/A_p$ 小于10时,使用单层平面格栅的侧向水平进气结构,可以得到较为满意的初始分布。当 $A_T/A_p$ 较大时,上述结构难以满足均布要求,可改用垂直朝下进气结构。

对于垂直朝下进气,当需设置均布格栅时,其最佳阻力系数 $\zeta_{op}$ 根据管口离塔底(或液面)距离 $H_b$ 和塔径 $D_T$ 的比值 $H_b/D_T$ 以及 $A_T/A_p$ 值按以下各公式计算:

当  $1 \leq H_b/D_T \leq 5$  和  $A_T/A_p \leq 30$

$$\zeta_{op} \approx \frac{0.0037}{H_b/D_T} \left(\frac{A_T}{A_p}\right)^3 \quad (8)$$

当  $5 < H_b/D_T \leq 10$  和  $A_T/A_p < 20$

$$\zeta_{op} = 0 \quad (\text{不设格栅}) \quad (9)$$

当  $5 < H_b/D_T \leq 10$  和  $20 \leq A_T/A_p \leq 30$

$$\zeta_{op} = 5 \sim 10 \quad (10)$$

当  $H_b/D_T > 10$  和  $A_T/A_p \leq 20$

$$\zeta_{op} = 0 \quad (\text{不设格栅}) \quad (11)$$

当 $A_T/A_p > 20$ 单层格栅无法满足均布要求。上述各种情况中, $H_b/D_T$ 值不应小于0.2。

### (2) 多层平面均布格栅

当截面比 $A_T/A_p$ 较大,或截面比虽不大,但均布要求很高时应采用多层格栅更为合适,其计算步骤如下:

- ① 计算最佳格栅数 $n_{op}$

$$n_{op} \approx 0.7 \sqrt{\frac{A_T}{A_p}} \sqrt{N_p} \quad (12)$$

- ② 计算每层格栅的阻力系数 $\zeta_i$

各层 $\zeta_i$ 值相等,按下式计算

$$\zeta_i \approx N_p \left(\frac{A_T}{A_p}\right)^2 - 1 \quad (13)$$

- ③ 根据 $\zeta$ 值确定格栅有关参数和尺寸。

- ④ 确定各层格栅间的最佳距离 $(l_d)_{op}$

$$(l_d)_{op} \approx 0.2D_T \quad (14)$$

当均布要求不高时,如 $M \approx 1.5$ ,距离可适当减小到

$$l_d = (0.10 \sim 0.15)D_T \quad (15)$$

最后,当要使用气体分布器时,其设计方法可参考有关文献<sup>[12, 13]</sup>。

### 符号说明

$A_d$  格栅前气流分散面积,根据要求选定  $m^2$

$A_p, A'_p$  管截面积、进气管出口截面积  $m^2$

$A_T$  塔截面积  $m^2$

$b$  隔板间距  $m$

$d_0$  格栅开孔直径  $m$

$D_p, D_T$  管径、塔径  $m$

$f$  格栅开孔率

$H_b, H_r$  进气口离塔底(或液面)、  
进气口上缘离格栅距离 m

$H_s$  填料支承板与格栅间距离 m

$l$  隔板长度 m

$l_d$  格栅间距 m

$(l_d)_{op}$  最佳格栅间距 m

$M_r$  分布不均匀系数

$M, M_p$  动量系数、管口动量系数

$N, N_p$  动能系数、进气管出口截面  
气流动能系数

$n$  截面上测速点数

$n_{op}$  最佳格栅数

$\Delta P$  格栅前后压力降 Pa

$t$  格栅孔间最大距离 m

$u, u_j, u_{max}$  气体空塔速度、点速度、  
最大点速度 m/s

$u_p, u_p'$  进气管进、出口气速 m/s

$Z$  隔板数

$\alpha$  扩散角

$\xi, \xi_c, \xi_j, \xi_{op}$  格栅阻力系数、格栅  
临界阻力系数、第*i*层  
格栅阻力系数、格栅  
最佳阻力系数

$\rho$  气体密度, kg/m<sup>3</sup>

$\delta$  进气管与塔中心线夹角

## 参考文献

- [1] Ferrer G. Process Engineering, May 1986
- [2] Chen G K. Chem. Eng., 1984, 91(5): 40
- [3] Porter K E, et al. I. Chem. E. Symp. Ser., 1987, (104): A244
- [4] Ali Q H. "Gas distribution in shallow large diameter packed beds", University of Aston, Triangle, Birmingham, B4 7ET. PHD. Thesis, 1984
- [5] Kojiri R J, et al. Chem. E. Symp. Ser., 1987, (104): B193
- [6] М И Кабаков, А М Розен, Хим. Пром., 1984: 496
- [7] И Е Идеальчик. Аэродинамика Промышленных Аппаратов, <энергия>, Москва, 1964
- [8] Р Е Миневич. Масштабный Переход в Химической Технологии, <Химия>, 1980
- [9] 袁俊红, 董谊仁, 徐崇嗣. 石油化工设备, 1990, 19(2)
- [10] 袁俊红, 董谊仁, 徐崇嗣. 石油化工设备, 1991, 20(2)
- [11] 华绍曾, 杨学宁等编译. 实用流体阻力手册, 国防工业出版社, 1985
- [12] 董谊仁, 过健. 化学工程, 1990, 18(3)
- [13] 王昂等. 化学工程, 1992, 20(3)

## 我国最大的芥酸生产装置考核验收

泸州天然气化工厂脂肪酸装置1992年2月~3月试车成功并已考核验收。该装置每年可处理3万吨高芥酸菜籽油,是目前我国与世界上最大的以生产高芥酸为主的脂肪酸装置。该装置投产后,可为国内外高长碳链脂肪酸的开发应用提供可靠的原料供应,并将促进以长碳链脂肪酸为原料的精细化工的发展。

该装置为意大利CM3公司的工艺技术,设计由意大利CMB公司与中国成达化学工程公司(化工部第八设计院)合作完成。

(马少芬)