



抚顺分公司设计参考资料

填料塔的工艺设计计算

FDC—Y—05<1>

中国石油集团工程设计有限责任公司抚顺分公司

前 言

本文对填料蒸馏塔的工艺设计计算的手算方法进行了比较详细的叙述，包括塔径确定、填料高度、填料层压降以及填料层持液量的计算。文中列举了散装填料及规整填料的计算例题，供设计人员的参考。欢迎提出意见，以便逐步修改完善。

整理编辑：

冯国治 张 晶

校 审：

冯国治

工作人员：

陈维思 温 博

2005.08

目 录

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 一、散装填料塔的设计计算 | 1 |
| (一) 泛点气速计算 | 1 |
| (二) 塔径计算 | 2 |
| (三) 压降计算 | 3 |
| 1. 气体通过填料层压降的计算 | 3 |
| 2. 填料层泛点与压降通用关联图 | 4 |
| 3. 通用压降关联图 | 7 |
| (四) 持液量计算 | 7 |
| 1. 载点以下持液量的计算 | 9 |
| 2. 泛点操作下持液量的计算 | 10 |
| 3. 载点到泛点之间的持液量 | 10 |
| (五) 效率计算 | 11 |
| (六) 例题 | 12 |
| 二、规整填料塔的设计计算 | 15 |
| (一) 波纹填料塔的设计与计算之一 | 15 |
| (二) 设计计算及举例 | 18 |
| 1. 填料层高度的计算 | 18 |
| 2. 塔直径计算 | 19 |
| 3. 填料层压降计算 | 21 |
| 4. 填料塔效率 | 24 |
| 5. 填料层持液量计算 | 24 |
| 6. 塔底热负荷 | 25 |
| 7. 液体及气体分布的要求 | 25 |
| 8. 计算举例 | 25 |
| (二) 波纹填料塔的设计与计算之二 | 28 |
| 1. 新塔设计, 求塔径 | 28 |
| 2. 老塔改造, 选填料 | 30 |
| 3. 填料高度选取 | 31 |
| (三) 塔内件简介 | 33 |
| 1. 液体分布器 | 33 |
| 2. 气体分布器 | 35 |
| 3. 填料支承 | 35 |
| (四) 格里奇栅格填料塔的设计计算要点 | 35 |
| 1. 构件的选择及塔径计算 | 35 |
| 2. 压降计算 | 36 |
| 3. 负荷上限 | 36 |
| 4. 传质、传热计算 | 37 |
| 5. 简单设计举例 | 37 |
| 三、几种主要散装填料与规整填料的几何特性数据 | 39 |

| | |
|--------------------------|----|
| (一) 散装填料几何特性..... | 39 |
| (二) 125 型板波纹填料几何特性 | 39 |
| 1. 几何结构..... | 39 |
| 2. 流体力学性能..... | 40 |
| 3. 传质性能..... | 43 |
| (三) 250 型板波纹填料几何特性 | 44 |
| 1. 几何结构..... | 44 |
| 2. 流体力学性能..... | 45 |
| 3. 传质性能..... | 50 |

填料塔的工艺设计计算

一、散装填料塔的设计计算

(一) 泛点气速计算

泛点气速是填料塔设计的一个重要参数，填料塔只有在泛点气速以下，才可能稳定地操作，但如果气速太低又会造成设备投资的浪费以及气、液体分布的不均匀。所以填料塔设计的首要任务是根据所选用的填料类型，将其在操作条件下的泛点气速算出，再确定适宜的塔径和塔内实际操作气速下的填料层压降。这些参数的计算，对吸收塔送风机的选取，精馏塔的底部温度的计算都是至关重要的。

散装填料计算填料液泛气速的关联式，首先是 Sherwood 等人提出一种图解关联的形式，

图线是在双对数坐标图上的一条曲线，其横坐标为流动参数 $FP = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$ ，纵坐标为

$\frac{u_{Gf}^2}{g} \frac{a}{\varepsilon^3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.2}$ ，后来由贝恩-霍根(Bain-Haugen)修正成以下形式的计算式，称为贝

恩-霍根公式

$$\lg \left[\frac{u_{Gf}^2}{g} \frac{a}{\varepsilon^3} \frac{\rho_G}{\rho_L} \mu_L^{0.2} \right] = 0.022 - 1.75 \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8} \quad (1-1)$$

式中 u_{Gf} —— 泛点空塔气速，m/s；

g —— 重力加速度， 9.81 m/s^2 ；

a/ε^3 —— 干填料因子， m^{-1} ；

μ_L —— 液相粘度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

L 、 G —— 液体、气体的质量流量， kg/h ；

ρ_L 、 ρ_G —— 液体、气体的密度， kg/m^3 。

此式最早是根据拉西环填料的实测数据关联出来的，其常数 0.022 系针对拉西环而言，后来将贝恩-霍根公式进一步改写成：

$$\lg \left[\frac{u_{Gf}^2}{g} \frac{a}{\varepsilon^3} \frac{\rho_G}{\rho_L} \mu_L^{0.2} \right] = A - 1.75 \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8} \quad (1-2)$$

式中系数用 A 替代了 0.022，此式便可以推广应用到多种不同填料，只要通过实验数据

回归出不同填料的 A 值，就可以分别计算多种填料的泛点气速。表 1-1 中给出了多种不同填料的 A 值。

表 1-1 多种不同填料的 A 值

| 填料类型 | 常用A值 | 填料类型 | 常用A值 |
|-----------|--------|-------------|---------|
| 瓷拉西环 | 0.022 | 金属鲍尔环 | 0.942 |
| 瓷弧鞍 | 0.26 | 金属阶梯环 | 0M |
| 瓷矩鞍 | 0.176 | 金属环矩鞍 | 0.06225 |
| 瓷阶梯环 | 0.2943 | 塑料鲍尔环 | 0.0942 |
| 压延孔板波纹4.5 | 0.35 | 塑料阶梯环 | 0.204 |
| 压延孔板波纹6.3 | 0.49 | 金属板波纹(250Y) | 0.291 |
| CY型金属丝网波纹 | 0.30 | | |

(二) 塔径计算

计算出泛点气速后即可计算填料塔径。以泛点气速为基准，实际操作气速一般取泛点气速的 60%~80%，对易起泡沫的物系，则实际气速取泛点气速的 40%~60%。

泛点气速可用式(1-2)表示的 Bain-Hougen 公式来计算。其误差约 15%。由泛点气速可得实际操作气速，从而可计算出塔径。

$$D_T = 2 \sqrt{\frac{G}{3600 \pi \rho_G u_G}} \quad (1-3)$$

式中 D_T ——塔径，m；

u_G ——空塔气速，m/s；

G ——气相质量流量，kg/h；

ρ_G ——气相密度，kg/m³。

对金属环矩鞍填料，Norton 公司给出了更为准确的计算方法。考虑了表面张力和液体粘度而作过修正的最大操作负荷点的气体负荷因子 C_{\max} 值。其计算式如下：

$$C_{\max} = C_S \cdot \left(\frac{10^3 \sigma}{20} \right)^{0.16} \left(\frac{10^3 \mu_L}{0.2} \right)^{-0.11} \quad (1-4)$$

式中 C_S ——未修正的气体负荷因子，m/s，可由图 1-1 查出；

σ ——表面张力, N/m;

μ_L ——液体粘度, Pa·s。

式(1-4)适用 $5 \times 10^{-3} \leq \sigma \leq 73 \times 10^{-3}$ 及 $0.07 \times 10^{-3} \leq \mu_L \leq 1.1 \times 10^{-3}$, 并只适用于不起泡沫的物系。

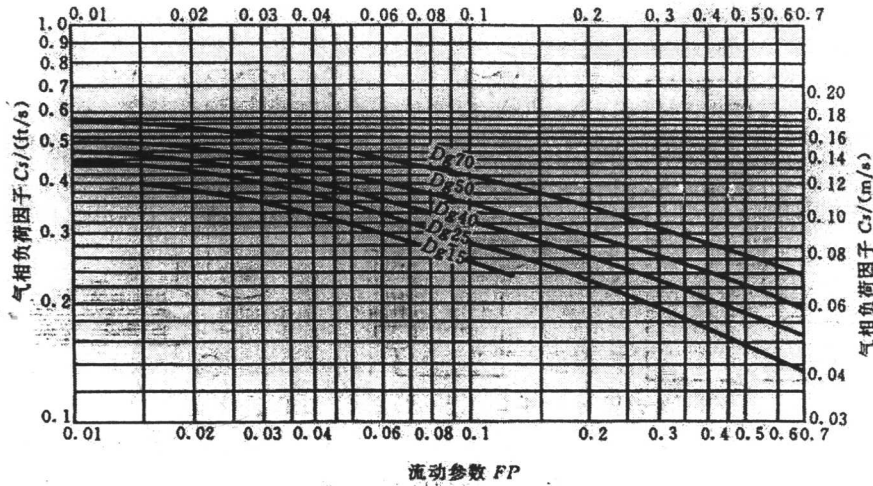


图 1-1 金属环矩鞍填料的气体负荷因子 C_s 值

气体负荷因子设计值, 一般取最大值的 80%~90%, 对于高真空度蒸馏塔, 为使压降不过高, 设计值可取最大值的 60%~70%。常规设计取最大值的 0.8~0.9 倍。于是塔截面积可按下式计算:

$$A_T = \frac{G}{3600 C_s [\rho_G (\rho_L - \rho_G)]^{0.5}} \quad (1-5)$$

式中 A_T ——塔截面积, m^2 ;

C_s ——气体负荷因子, m/s;

G ——气相质量流量, kg/h;

ρ_G 、 ρ_L ——分别是气相和液相密度, kg/m^3 。

于是可计算得塔径:

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_T} = 1.13 \sqrt{A_T} \quad (1-6)$$

(三) 压降计算

1. 气体通过填料层压降的计算

Leva 提出如下对湍流条件下填料层压降计算的关联式^[4]:

$$\Delta P = \alpha 10^{\beta L} \frac{V^2}{\rho_G} \quad (1-7)$$

式中 ΔP ——每米填料层的压降, kPa;

L ——液体的质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

V ——气体的质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

α, β ——常数。

Leva 的计算式主要用拉西环湍流的数据关联出来的, 作为一种关联方法, 具有普遍意义, 国内有些研究者应用此种方法, 对一些新型填料进行关联, 并给出了它们的常数。

2. 填料层泛点与压降通用关联图

压降计算对真空或常压操作的填料塔尤为重要。计算方法很多, 目前工程上广泛采用的是 Eckert 的填料层压降通用关联图。

Leva 在 Sherwood 等人的泛点关联图基础上, 将原纵坐标再乘以液相密度的校正常数 $\bar{\rho}$, 令 $\bar{\rho} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} / \rho_L$ (即水的密度与液体密度之比), 并提出等压降线的概念, 将一族填料的等压降线与液泛线, 绘在同一个坐标图上, 这样就更便于填料塔的设计计算。

Eckert 在 Sherwood、Leva 等人之后, 对包括有泛点线和等压降线的填料塔通用关联图进一步进行了改进, 将图中纵坐标中的干填料因子 a/ε^3 , 改用通过实验数据反算出来的“湿填料因子” Φ 替代, 并给出了不同填料的湿填料因子 Φ 值。图 1-2 显示了 Eckert 所绘制的用于泛点与压降计算的通用关联图, 简称通用关联图。该图的横坐标为 $\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$, 纵坐标为

$$\frac{u_{Gf}^2 \Phi \bar{\rho} \rho_G}{g \rho_L} \mu_L^{0.2}, \quad u_{Gf} \text{ 即为泛点气速}(\text{m/s})。 \text{图中上部为一条散装填料的泛点线, 可用来计}$$

算不同操作条件下散装填料的液泛点气速。

为了便于利用计算机进行计算, 有人将 Eckert 图中的泛点线进行模拟关联, 以解析式的形式进行表达, 其形式为

$$V = B \exp\{-3.845186 + 4.044306[-0.4982244 \ln(AB^2) - 1]\}^{0.5} \quad (1-8)$$

$$L = V / (\rho_G / \rho_L)^{1/2} \exp\{-4.303976 + 3.552134[-0.645854 \ln(AV^2) - 1]\}^{0.5} \quad (1-9)$$

式中 $A = (\Phi \bar{\rho} \mu_L^{0.2}) / (\rho_G \cdot \rho_L \cdot g_c)$;

$$B = L (\rho_G / \rho_L)^{1/2}$$

V ——气体质量流率, $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$;

L ——液体质量流率, $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$;

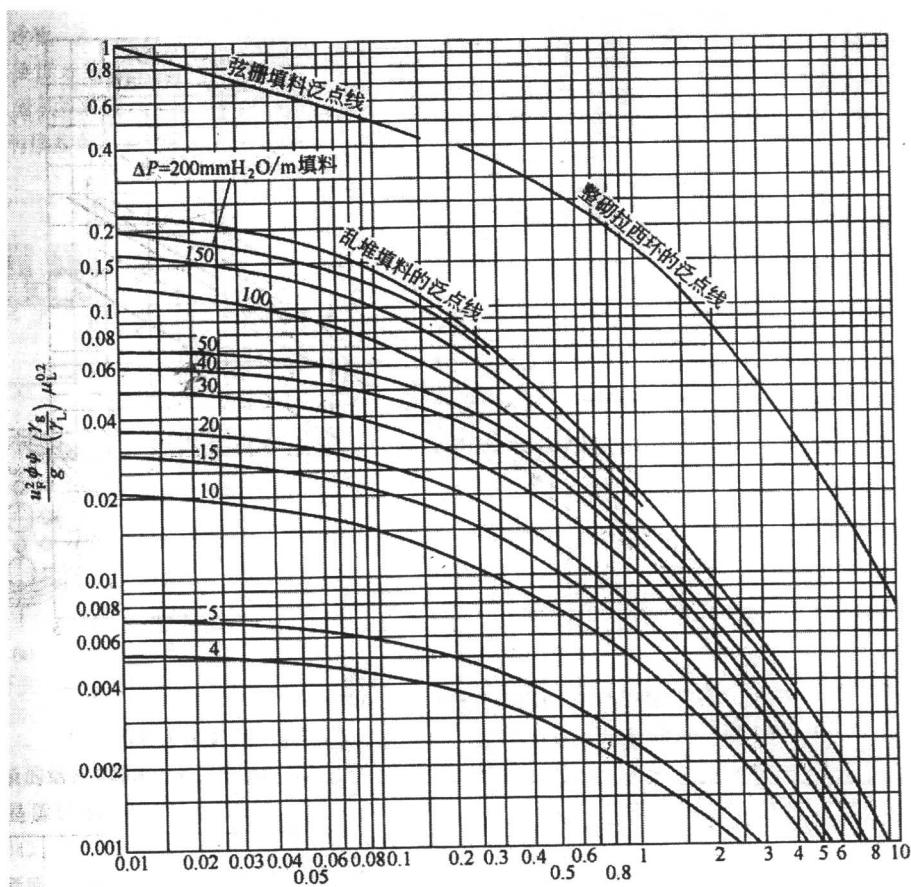
$\rho_G \cdot \rho_L$ ——气相及液相密度, kg/m^3 ;

Φ ——湿填料因子, m^{-1} ;

$\bar{\rho}$ —— $\rho_{\text{H}_2\text{O}}/\rho_L$ 即水的密度与液体密度之比, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}/\rho_L$;

μ_L ——液体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

g_c ——重力加速度, $1.27\times 10^8 \text{m}/\text{h}^2$ 。



$$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5}$$

图 1-2 Eckert 泛点压降通用关联图

在泛点线的下部是一簇等压降线，用作计算各种不同操作条件下气体通过填料层的压降。由于还未对这一簇等压降线进行线性回归关联，暂可以采用二元三点差值法对各种不同操作条件下的填料层压降进行试差计算，各条等压降线的纵、横坐标对应点参照图 1-2 或文献中的表格数据进行读取。

综上所述，应用 Eckert 通用关联图，既可以进行泛点气速的计算又可进行填料层压降的计算。在 Eckert 通用关联图中纵坐标中的湿填料因子 Φ 有泛点填料因子与压降填料因子的区别。泛点填料因子用 Φ_F 表示，是用来计算填料泛点气速所使用的湿填料因子，它是通过实测的泛点气速数据，用 Eckert 通用关联图中泛点线反算出来的。压降填料因子用 Φ_P 表示，是用来计算填料层压降所使用的湿填料因子，它是通过实测在各种不同喷淋密度下，填料层的气速与压降关系数据，并利用等压降线反算出来的。

由于用不同喷淋密度下的数据反算出的泛点填料因子 Φ_F 和压降填料因子不尽相同，所以研究者还将填料因子随喷淋密度的变化关系用一表达式反映出来。从精确角度考虑，这样计算的精度要高一些，但从工程设计的实际需要出发，设计单位将湿填料因子随喷淋密度的变化忽略，选一适当的代表值供设计计算使用，可使其平均误差控制在 20%以内。

表 1-2 给出不同填料的泛点填料因子 Φ_F 值，表 1-3 给出不同填料的压降填料因子 Φ_P 值。

表 1-2 不同填料的泛点填料因子 Φ_F 值

| 填料类型/填料尺寸 | Dg16 | Dg25 | Dg38 | Dg50 | Dg76 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 金属鲍尔环 | 410 | / | 117* | 160 | / |
| 金属环矩鞍 | / | 170 | 150 | 135 | 120 |
| 金属阶梯环 | / | / | 160 | 140 | / |
| 塑料鲍尔环 | 550 | 280 | 184 | 140 | 92 |
| 塑料阶梯环 | | 260 | 170 | 127 | |
| 瓷质矩鞍环 | 1100 | 550 | 200 | 226 | |
| 瓷质拉西环 | 1300 | 832 | 600 | 410 | |

*该值由实验归纳得到，但从数据上看是偏小的，在实际选用中可适当放大。

表 1-3 不同填料的压降填料因子 Φ_P 值

| 填料类型/填料尺寸 | Dg16 | Dg25 | Dg38 | Dg50 | Dg76 |
|-----------|------|------|------|---------------|------|
| 金属鲍尔环 | 306 | / | 114* | 98 | / |
| 金属环矩鞍 | | 138 | 93.4 | 70 | 36 |
| 金属阶梯环 | / | / | 118 | 82 | / |
| 塑料鲍尔环 | 343 | 232 | 114 | 125(米),110(井) | 62 |
| 塑料阶梯环 | / | 176 | 116 | 89 | / |
| 瓷质矩鞍环 | 700 | 215 | 140 | 160 | / |

| | | | | | |
|-------|------|-----|-----|-----|---|
| 瓷质拉西环 | 1050 | 576 | 450 | 288 | / |
|-------|------|-----|-----|-----|---|

3. 通用压降关联图

采用表 1-4 中填料因子 FP 值进行塔的设计时,应采用诺顿公司提供的压降关联图(图 1-3)进行计算。横坐标为流动参数,纵坐标为 $Y=10^6 \times F_P \cdot C_S^2 \cdot v^{0.1}$, 式中 C_S 为气体负荷因子(m/s), v 为液体运动粘度(m^2/s)。

表 1-4 几种金属英特洛克斯填料特性数据

| Dg/mm | 堆积个数/(个/ m^3) | 空隙率/% | 填料因子FP/mm | HETP/mm |
|-------|------------------|-------|-----------|---------|
| 25 | 168425 | 96.7 | 441 | 355~485 |
| 40 | 50140 | 97.3 | 258 | 460~610 |
| 50 | 14685 | 97.8 | 194 | 560~740 |
| 70 | 4625 | 98.1 | 129 | 790M0 |

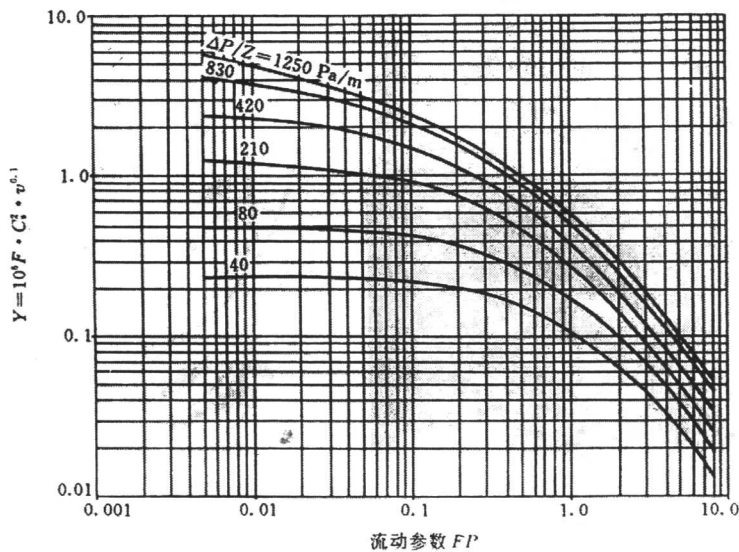


图 1-3 通用压降关联图

(四) 持液量计算

填料塔内的持液量是指在一定操作条件下,单位体积填料层内,在填料表面和填料空隙

中所积存的液体之体积量，一般以 $m^3_{\text{液体}}/m^3_{\text{填料}}$ 表示。

持液量可分为静持液量 H_s 、动持液量 H_o 和总持液量 H_t ，总持液量为静持液量和动持液量之和

$$H_t = H_o + H_s \quad (1-10)$$

总持液量是指在一定的操作状况下，存留于填料层中的液体总量。静持液量是指当填料被充分润湿后，停止气液两相的进料，并经过适当长时间的排液，直至不再有液体流下时，存留于填料层中的持液量。动持液量则为总持液量与静持液量之差。

影响填料层持液量的因素包括：

- 填料的形状和尺寸、填料的材质、表面特性及装填特性等。
- 气、液两相流体的物理特性，如粘度、密度、表面张力等。
- 塔的操作条件，如气液两相流量及操作温度等。
- 塔及塔内件的结构及安装特性等。

有实验表明在低于泛点负荷的 70% 操作范围内，持液量受气体负荷的影响不明显，而只受液体负荷和填料尺寸的影响，对同样尺寸的填料，持液量随填料材质不同而异。

图 1-4 中给出了三种不同材质(瓷质、金属、塑料)的 Dg50 鲍尔环填料在空气-水系统中的持液量随液体负荷的变化关系，由图中可以明显看出由于三种不同材质的表面性能不同，造成填料层内持液量的差别。填料表面与液体润湿性能的影响可以一目了然。

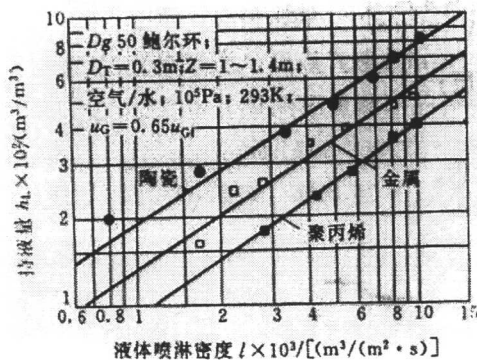


图 1-4 三种不同材质鲍尔环填料的持液量

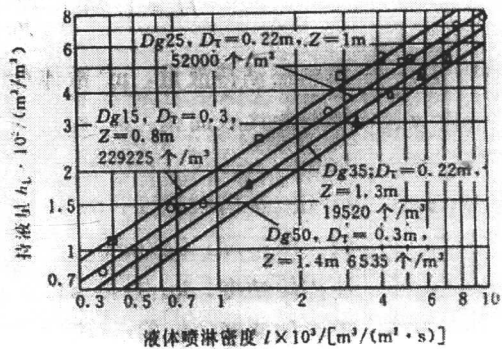


图 1-5 四种不同尺寸鲍尔环填料的持液量
实验条件: $1 \times 10^5 \text{ Pa}$; $F \leq 0.65 F_{FL}$; 金属鲍尔环; 空气/水

对同一材质的填料，其持液量又因其尺寸大小的不同而不同，图 1-5 中示出四种不同尺寸的金属鲍尔环填料的持液量随液体负荷的变化，图 1-6 示出二种尺寸的金属阶梯环(CMR)填料的持液量随液体负荷的变化关系。由图中可见，填料层持液量的大小随填料尺寸的减小而增大。由图 1-7 中可以看出，当风速在 70% 泛点负荷以下进行操作时，随液体负荷的增

加，持液量没有任何变化，一旦风速超过 70% 泛点负荷，持液量显著增加，当接近液泛点时，持液量将剧增。

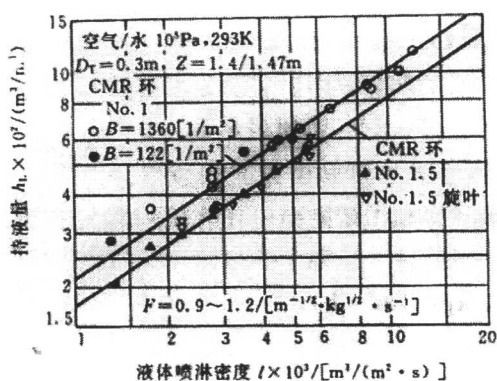


图 1-6 两种不同尺寸金属阶梯环填料的持液量

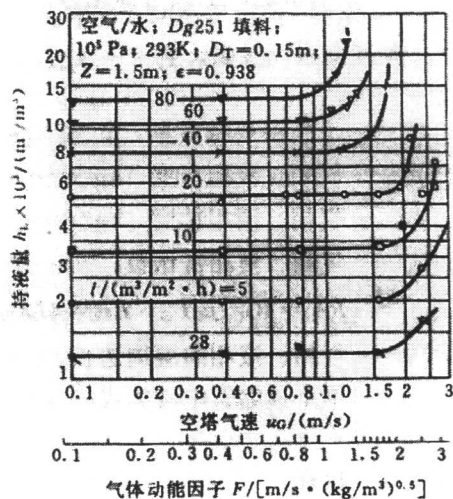


图 1-7 气速对比阿雷茨基金属环填料持液量的影响

北京化工大学在 80 年代应用几种 Dg50 填料在 $\Phi 600mm$ 的塔内，进行了有关持液量的研究，根据气液两相在填料层中流动状况不同，提出了在不同操作阶段时填料层持液量的计算方法。

1. 载点以下持液量的计算

文献中报道了在 600mm 直径的塔内，装填 Dg50 的填料，用空气-水系统进行的持液量测定的实验数据和结果，文中对 Buchanan 公式，大竹公式和 Mahunta 公式进行了比较，发现应用大竹公式关联的实验数据误差最小，86% 数据点的误差在 20% 范围以内。大竹计算动持液量的模型为：

$$H_0 = 1.295 \left(\frac{du_L \rho_L}{\mu_L} \right)^{0.675} \left(\frac{d^3 g \rho_L^2}{\mu_L^2} \right)^{-0.44} a d \quad (1-11)$$

式中 H_0 ——填料层动持液量， m^3 液体/ m^3 填料层；

a ——填料的比表面积， m^2/m^3 ；

d ——填料的公称尺寸， m ；

μ_L ——液相的空塔线速度， m/s ；

ρ_L ——液相的密度， kg/m^3 ；

μ_L ——液相的粘度， $kg/(m \cdot s)$ ；

g ——重力加速度, 9.81m/s^2 。

2. 泛点操作下持液量的计算

在泛点条件下总持液量可由下式计算:

$$H_t = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\Gamma_G}{\Gamma_L}\right)^{1-n/4} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{1/4} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{2/4} \left(\frac{Re_G}{Re_L}\right)^{(2+n)/4}} \quad (1-12)$$

对于空气-水系统, 上式可简化为:

$$H_t = \frac{C_0}{1 + C_1 (Re_G / Re_L)^\alpha} \quad (1-13)$$

式中 H_t ——填料层总持液量, m^3 液体/ m^3 填料层;

ρ_G 、 ρ_L ——气相、液相密度, kg/m^3 ;

μ_G 、 μ_L ——气相、液相粘度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$;

Re_G 、 Re_L ——气相、液相雷诺数;

$$Re_G = 4G_C / \mu_G \Gamma_G ; Re_L = 4L_C / \mu_L \Gamma_L$$

Γ_G 、 Γ_L ——气相、液相润湿周边长, m ;

L_C 、 G_C ——单个颈缩管中液体或气体质量流率, $\text{kg/(m}^2\cdot\text{h)}$;

C_0 、 C_1 ——常数;

α ——指数。

文献中对 6 种填料进行了回归关联和比较, 对此 6 种填料的 α 值可取 $\alpha = 0.25$, C_0 、 C_1 常数列于表 1-5 中。

表 1-5 六种不同填料常数 C_0 、 C_1 的值

| 常数值/填料类型 | Dg50 瓷拉西环 | Dg50 瓷矩鞍 | Dg50 塑料鲍尔环 | Dg13(1/2") 弧鞍 | Dg6.5(1/4") 弧鞍 | Dg16(5/8") 拉西环 |
|----------|--------------|-------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| C_0 | 0.252 | 0.275 | 0.329 | 0.542 | 0.758 | 0.812 |
| C_1 | 1.028 | 1.298 | 1.017 | 0.775 | 0.665 | 3.291 |

3. 载点到泛点之间的持液量

在载点到泛点区域内的持液量可按下式计算:

$$H = (H_{if} - H_0)(u_G / u_{Gf})^{10} + H_0 \quad (1-14)$$

式中 H ——两相流动时的持液量(总持液量), m^3 液体 / m^3 填料;

H_0 ——液体单相流动时的持液量, m^3 液体 / m^3 填料;

H_{tf} ——泛点下总持液量, m^3 液体 / m^3 填料;

u_G 、 u_{Gf} ——空塔气速与泛点气速, m/s。

应用(1-14)式可计算两相流动时的持液量, 式中 H_0 是液体单相流动时的持液量, 即在载点下的动持液量, 可通过(1-11)式进行计算, H_{tf} 为泛点操作下的总持液量, 可通过(1-12)式进行计算。这样应用(1-14)式就可以对泛点以下至零气速整个范围内的持液量进行计算了。

(五) 效率计算

填料塔的效率与填料层内气液分布均匀程度密切相关, 并随物系不同而有所变化, 物系的影响主要是温度、表面张力和液体浓度的影响等。

目前尚无很准确可靠的方法来计算填料的 HETP 值。一般的方法仍是从工业应用的实际经验中选取 HETP 值。近来 Norton 公司从大量数据回归, 得到常压蒸馏时 HETP 的关联式如下:

$$\ln HETP = h - 1.292 \ln \sigma + 1.471 \ln \mu_L \quad (1-15)$$

式中 HETP——等板高度, mm;

σ ——液体表面张力, N / m;

μ_L ——液体粘度, Pa·s;

h ——常数, 其值见表 1-6。

表 1-6 HETP 关联式中的常数值

| 填料类型 / mm | h | 填料类型 / mm | h |
|--------------|--------|-------------|--------|
| Dg25 金属环矩鞍填料 | 6.8505 | Dg50 金属鲍尔环 | 7.3781 |
| Dg40 金属环矩鞍填料 | 7.0382 | Dg25 瓷环矩鞍填料 | 6.8505 |
| Dg50 金属环矩鞍填料 | 7.2883 | Dg38 瓷环矩鞍填料 | 7.1099 |
| Dg25 金属鲍尔环 | 6.8505 | Dg50 瓷环矩鞍填料 | 7.4430 |
| Dg38 金属鲍尔环 | 7.0779 | | |

式(1-15)中考虑了液体粘度及表面张力的影响。其适用范围是: 在常压蒸馏下, 满足 $4 \times 10^{-3} < \sigma < 36 \times 10^{-3} \text{ N / m}$ 及 $0.08 \times 10^{-3} < \mu_L < 0.83 \times 10^{-3} \text{ Pa·s}$, 并假定了填料层内气液均匀分布

为前提。 σ 和 μ_L 分别是表面张力和粘度。

用于小于 15 块理论级的易分离物系时, 应将算得的 HETP 值再留出 20% 设计安全系数。用于 15~25 块理论级的物系, 应留出 15% 设计安全系数。用于难分离物系, 应尽可能少留甚至不留设计安全系数。

对于金属环矩鞍填料。Norton 公司^[9]还给出了关联式, 它适用于非水溶液、塔内无反应且不存在离子以及相对挥发度小于 3.0 的场合。

$$\text{HETP} = A_0 \left(\frac{10^3 \times \sigma}{20} \right)^{-0.16} \cdot (1.78)^{\mu_L} \cdot 10^3 \quad (1-16)$$

式 (1-16) 适用于 $\mu_L \leq 0.4 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

$$\text{HETP} = B_0 \left(\frac{10^3 \times \sigma}{20} \right)^{-0.19} \cdot \left(\frac{10^3 \times \mu_L}{0.2} \right)^{0.21} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 适用于 $\mu_L > 0.4 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

上两式中 HETP——等板高度, mm;

σ ——液体表面张力, N/m, 若 $\sigma > 27 \times 10^{-3}$, 则取 $\sigma = 27 \times 10^{-3}$ 代入式中计算;

μ_L ——液体粘度, Pa·s;

A_0 、 B_0 ——常数, 其值见表 1-6。

表 1-7 式 (1-16) 及 (1-17) 中的常数 A_0 和 B_0

| 型号 | #15 | #25 | #40 | #50 | #70 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| A_0/mm | 272 | 351 | 412 | 550 | 758 |
| B_0/mm | 296 | 383 | 452 | 599 | 827 |

式(1-16)和(1-17)适用范围为: $2.0 \times 10^{-3} \leq \sigma \leq 26.6 \times 10^{-3}$ 及 $0.06 \times 10^{-3} \leq \mu_L \leq 0.83 \times 10^{-3}$ 。

由蒸馏工艺计算所需的理论级数与上述计算所得的 HETP 值的乘积, 即求得填料层高度。

(六) 例题

例 1 乙苯-苯乙烯精馏塔, 精馏段的内径为 5.6m, 塔内装有 Dg40 环矩鞍填料, 计算负荷能力及每米填料压降。塔顶操作数据如下:

液相流率 $L=110000\text{Kg/h}$, 气相流率 $G=125000 \text{ kg/h}$,

液相密度 $\rho_L=842.9\text{Kg/m}^3$, 气相密度 $\rho_G=0.226 \text{ kg/m}^3$,

液相粘度 $\mu_L=0.46 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$, 表面张力 $\sigma=25.2 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。

塔截面积 $A_T = \frac{\pi}{4} D_T^2 = \frac{\pi}{4} (5.6)^2 = 24.63 \text{ m}^2$

空塔气速 $\mu_G = \frac{G}{3600 \rho_G A_T} = \frac{125000}{3600 \times 0.226 \times 24.63} = 6.24 \text{ m/s}$

气体负荷因子 $C_S = \mu_G \sqrt{\frac{\rho_\xi}{\rho - \rho_\xi}} = 6.24 \times \left(\frac{0.226}{842.9 - 0.226} \right)^{0.5} = 0.102 \text{ m/s}$

流动参数 FP (ψ) $FP = \frac{L}{G} \left(\frac{\rho_\xi}{\rho_l} \right)^{0.5} = \frac{110000}{125000} \left(\frac{0.226}{842.9} \right)^{0.5} = 0.0144$

对 Dg40 金属环矩鞍填料，可得，

$$C_0 = 0.146 \text{ m/s}$$

最大操作负荷因子

$$C_{\max} = C_0 \left(\frac{10^3 \sigma}{20} \right)^{0.16} \left(\frac{10^3 \mu_L}{0.2} \right)^{-0.11} = 0.146 \left(\frac{25.2}{20} \right)^{0.16} \left(\frac{0.46}{0.2} \right)^{-0.11} = 0.138 \text{ m/s}$$

$$\frac{C_S}{C_{\max}} = \frac{0.102}{0.138} = 74\%$$

即目前塔的操作负荷为最大操作负荷的 74%，尚有较大的操作余地。

运动粘度 $\nu = \frac{\mu_L}{\rho_L} = \frac{0.46 \times 10^{-3}}{842.9} = 0.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Dg40 金属环矩鞍填料的填料因子 FP 为 258（见表 1-4），于是可计算图 1-3 通用关联图的

$$FP \cdot C_S^2 \cdot \nu^{0.1} = 258 \times 0.102^2 \times 0.55^{0.1} = 2.53$$

可查得每米填料的压降为：

$$\Delta P = 53 \text{ mmH}_2\text{O} / \text{m} = 0.52 \text{ kPa} / \text{m}$$

例 2 某脱乙烷塔拟采用金属环矩鞍填料替换原有塔板。精馏段和提馏段分别用 Dg25 和 Dg50 金属环矩鞍填料，并分别要求有 8.6 个和 19.6 个理论塔板。这两段的液体粘度分别为 $6 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 及 $5 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，表面张力分别是 $2.5 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 及 $1.2 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 。计算所需填料层高度。

由式(1-4)计算填料的效率 HETP 值，对于精馏段取粘度平均值 $\mu_L = 6.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ；表面张力平均值 $\sigma = 3.0 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ，并由表 1-16，对 Dg25 金属环矩鞍填料查得 $A_0 = 351$ 。

$$\text{HETP} = A_0 \left(\frac{10^3 \sigma}{20} \right)^{-0.16} (1.78)^{\mu_L 10^3} = 351 \left(\frac{3}{20} \right)^{-0.16} (1.78)^{0.065} = 494 \text{ mm}$$