

◆设备、控制与安全生产◆

振动筛板塔阻力降和塔板主轴荷载计算

程希晨, 李海昆

(云南化工设计院有限公司, 云南 昆明 650041)

[摘要] 振动筛板塔是一种用于液-液萃取工艺过程的塔器设备, 广泛应用于石油化工、湿法冶金工业中的液-液萃取过程。振动筛板塔操作弹性大, 传质效率高, 适用于处理容易乳化和含有固体颗粒的体系。以往的文献中对于板式精馏塔的干板阻力降、总阻力降计算已有完整详细的阐述, 但缺乏用于液-液萃取过程的振动筛板塔阻力降和荷载的计算方法。将各类文献中的阻力降计算方法用于振动筛板塔阻力降计算, 并结合试验数据, 给出一种振动筛板塔阻力降的计算方法, 同时给出振动筛板塔主轴荷载的计算方法。

[关键词] 振动筛板塔; 阻力降; 主轴荷载

[中图分类号] TQ053 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 08-0125-04

Calculation of resistance drop and main axis load of vibrating sieve plate tower

CHENG Xichen, LI Haikun

(Yunnan Design Institute of Chemical Engineering Co., Ltd., Kunming 650041, China)

Abstract: The vibrating sieve plate tower is a tower equipment used in liquid-liquid extraction processes, widely used in liquid-liquid extraction processes in petrochemical and hydrometallurgical industries. The vibrating sieve plate tower has high operational flexibility and mass transfer efficiency, making it suitable for handling systems that are prone to emulsification and contain solid particles. In previous literature, there has been a complete and detailed explanation of the calculation of dry plate resistance drop and total resistance drop for plate distillation towers, but there is a lack of calculation methods for the resistance drop and load of vibrating sieve plate towers used in liquid-liquid extraction processes. The resistance drop calculation methods from various literature are applied to calculate of resistance drop in vibrating screen towers, and combined experimental data provides a calculation method for resistance drop in vibrating sieve plate towers. At the same time, a calculation method for the main shaft load of vibrating sieve plate towers is also provided.

Key words: vibration sieve plate tower; resistance drop; main axis load

1 振动筛板受力分析

振动筛板塔在工作时塔内充满液体, 塔的筛板在中心轴的带动下上下往复运动, 向上运动时塔内液体向下从筛板孔中喷射, 向下运动时塔内液体受到挤压向上喷射。筛板上下运动时受到筛板上下液体的压力及上下运行时液体流过筛板孔洞产生的阻力。筛板的受力分析见图1。

由图1可见, 每一片振动筛板受的合力可以用式(1)计算:

$$F = P_2 - P_1 + f_c \quad (1)$$

由于筛板的厚度一般不超过3 mm, 故 P_1 和 P_2 可以视为相等, 所以每一片振动筛板受的合力 F 可以视为与振动筛板上液体流过筛孔的阻力相等, 振动筛板的合力计算可简化为式(2):

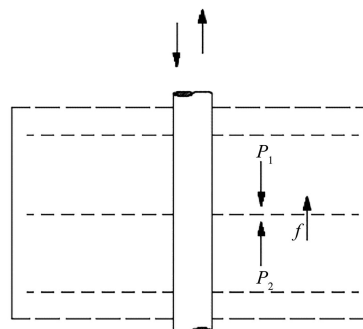


图1 振动筛板受力分析

Fig.1 Force analysis diagram of vibrating screen plate

[收稿日期] 2023-08-02; [修回日期] 2025-05-13

[作者简介] 程希晨(1981-),男,云南昆明人,高级工程师,从事化工工艺设计工作。

$$F = f_0 \tag{2}$$

振动筛板运动时的流体阻力通常表示为筛板的压力降，因此每片振动筛板受的合力可以用式(3)表示：

$$F = \Delta p \times S \tag{3}$$

式中 Δp —— 每片振动筛板的阻力降，Pa；
 S —— 振动筛板的面积， m^2 ；
 F —— 每片振动筛板上受的合力，N。

2 振动筛板阻力降计算方法

2.1 孔间流速计算

液-液萃取过程中振动筛板塔被液体充满，分散相自孔间被分散在连续相中，这与精馏塔有很大的区别。在精馏塔中分散相通常为气体，连续相为液体，连续相在塔板上形成一定高度的液层，分散相经塔板筛孔分散后穿过这些液层。在振动筛板塔中，连续相不形成液层而是充满整个塔，分散相经筛板孔分散后在塔内通过重力差与连续相逆流接触，当振动筛板上下运动时，连续相在孔间喷射。所以在振动筛板塔中，筛板的孔间流速应是连续相在孔间的流速。连续相的孔间流速可按照式(4)计算：

$$u_0 = \frac{u}{x} \tag{4}$$

式中 u_0 —— 孔间流速，m/s；
 u —— 连续相平均流速，m/s；
 x —— 筛板开孔率。

若以筛板作为参照物，筛板的运动速度可视为连续相的平均运动速度。连续相的平均流速可按照式(5)计算：

$$u = A \times \frac{1}{T} + u_1 \tag{5}$$

式中 A —— 振幅，m；
 T —— 周期，s；
 u_1 —— 连续相在塔截面上的流速，m/s。

2.2 阻力降计算

板式精馏塔的计算中，塔板阻力降包括干板阻力降、液层阻力降、鼓泡时克服液体表面张力的阻力。如2.1节所述，振动筛板塔不存在液体穿过塔板上液层的情况，所以在计算振动筛板塔塔板阻力降时只需要计算干板阻力降。

1) 参考板式精馏塔干板阻力降计算方法

板式精馏塔的干板阻力降可按式(6)计算：

$$h_c = 0.051 \left(\frac{u_0}{C_0} \right)^2 \frac{\gamma g}{\gamma l} (1-x^2) \tag{6}$$

式中 C_0 —— 流量系数；
 $\frac{\gamma g}{\gamma l}$ —— 轻相与水的密度比；
 h_c —— 干板阻力降，m。

C_0 可从图2中查取。

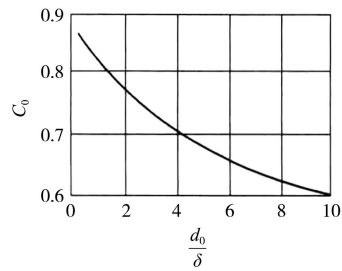


图2中 d_0 —筛板孔径， δ —为塔板厚度

图2 流量系数

Fig. 2 Discharge coefficient

2) 参考孔板阻力降计算方法

若将振动筛板塔筛板孔出的流体状况看作是流体流过孔板的情形，则振动筛板塔筛板阻力降可参考孔板阻力降的计算方法。孔板阻力降的计算方法见式(7)：

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{u_0}{C_0} \right)^2 \tag{7}$$

式中 C_0 —— 孔板流量系数。

C_0 可自图3中查取。图3孔板流量系数中 Re 对应的流速是孔板所在管道截面上的流速。计算振动筛板塔时可取振动筛板塔截面上连续相的平均流速(参见式(5))和筛板直径按式(8)求取 Re 。

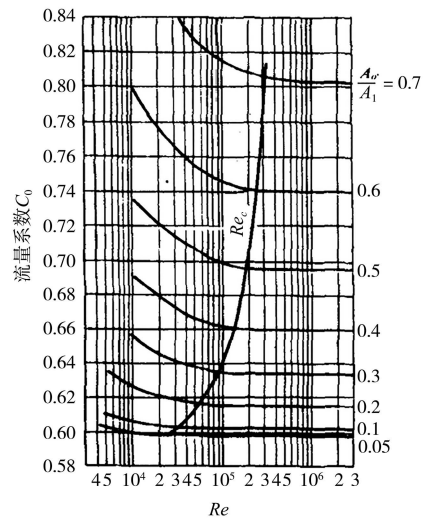


图3 孔板流量系数与 Re

Fig. 3 Orifice plate flow coefficient and Re

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \tag{8}$$

式中 u —— 塔截面上连续相平均流速，m/s；
 d —— 筛板直径，m；
 ρ —— 流体密度， kg/m^3 ；
 μ —— 流体黏度， $Pa \cdot s$ 。

3) 局部阻力系数法

若将流体流过振动筛板塔筛板孔看作是流体自

小孔流出突然进入一个扩大的空间,则可以参照局部阻力系数法计算阻力降,见式(9)^[3]:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (9)$$

式中 ζ 为局部阻力系数,见图4。

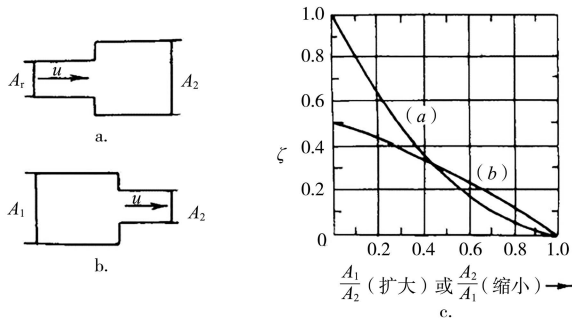


图4 局部阻力系数

Fig. 4 Local resistance coefficient

2.3 试验验证

因计算振动筛板塔塔板阻力降的方法缺乏文献记载,且2.2节中的计算方法都具有代表性,拟通过试验,模拟振动筛板,测出其阻力降,并利用2.2节的计算方法进行计算,将计算结果与试验测量结果进行对比,从而找到一种合理的计算方法。

所设计的试验装置见图5。

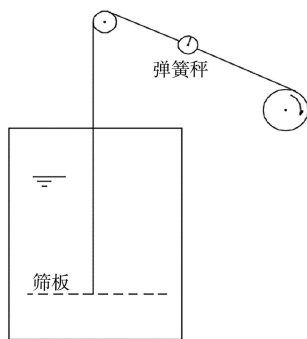


图5 筛板阻力降测量装置

Fig. 5 Sieve plate resistance drop measurement device

通过以上装置以一定的速度提升试验筛板,记录提升高度及时间,以及弹簧秤的读数,再根据筛板的特性即可测得筛板提升时的阻力。

试验介质为水,所用筛板特性见表1,试验数据见表2。

根据2.2节第(6)(7)(9)式及筛板介质特性计算得到的筛板阻力降数值列于表3。

由以上计算值与试验值的对比可见,式(9)的计算结果与试验数值接近,式(7)的计算结果比试验结果偏大,式(6)的计算结果与试验结果有较大的偏差。因此,可以将振动筛板塔的筛板看

表1 试验筛板特性

Table 1 The characteristics of the sieve plate

筛板直径/m	筛板面积/m ²	筛孔直径/mm	开孔率/%	筛板厚度/mm
0.253	0.05	6	10.4	0.15

表2 试验数据

Table 2 Test data

序号	提升高度/ m	提升速度/ (m·s ⁻¹)	稳定阻力/ N	最大阻力/ N	阻力降/ Pa
1	0.226	0.043	0.22	0.35	43
2	0.226	0.039	0.24	0.38	47
3	0.226	0.042	0.24	0.36	47

表3 试验筛板阻力降计算值

Table 3 Calculate value of the resistance drop of the test sieve plate

序号	筛孔流速/ (m·s ⁻¹)	阻力降试验值/ Pa	阻力降 ^① / Pa	阻力降 ^② / Pa	阻力降 ^③ / Pa
1	0.42	43	158	94	69
2	0.37	47	126	75	55
3	0.41	47	153	91	67

注:①由式(6)计算;②由式(7)计算;③由式(9)计算。

作是孔板或是利用局部阻力系数计算其阻力降。

由于式(9)中阻力系数通过图表直接查取,式(7)中的流量系数引入了雷诺准数 Re ,因此在实际应用中,当物系发生变化时利用式(7)进行计算较可靠。

2.4 工程实例

某工程中使用振动筛板塔完成液-液萃取过程,轻相自塔底进入振动筛板塔。计算轻相给料泵的扬程时需要确定全塔振动筛板的阻力降。设计中振动筛板塔的特性列于表4。轻相的性质及其他参数列于表5。利用式(7)计算的结果及参数见表6。

表4 振动筛板塔特性

Table 4 Characteristics of vibrating sieve plate tower

筛板直径/m	开孔率/%	筛板数量	振动周期/s	振幅/m
2.45	40	125	0.8	0.022

表5 轻相性质及其他参数

Table 5 Light phase properties and other parameters

轻相流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	轻相密度/ (kg·m ⁻³)	轻相黏度/ (Pa·s)	塔高/ m	混合相密度/ (kg·m ⁻³)
150	960	0.003 4	17.5	1 100

表6 计算结果

Table 6 Calculation result

Re	孔速/(m·s ⁻¹)	C_0	干板阻力降/Pa	总阻力降/Pa
24 628	0.091	0.71	7.9	948

已知轻相给料泵进口压力为 158 kPa，根据塔高及混合相密度计算得到塔进口静压为 189 kPa，由表 6 计算结果知塔板总阻力降为 0.95 kPa，则轻相进入筛板塔需要的压力为 32 kPa。

此工程实例中考虑一定的余量和管路损失，轻相给料泵的扬程定为 10 m，工程建成投产后轻相给料泵运行正常。

3 主轴荷载计算

塔板主轴的直接荷载主要有几个方面：塔板的总阻力（见第 1 节），塔板及传动轴、传动机构的质量，塔板上结垢的质量（如用于处理含固物料），塔板上下加速运动时增加的惯性力。振动筛板塔塔板主轴的荷载计算见式（10）：

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \tag{10}$$

式中 G —— 塔板主轴上的荷载，N；

G_1 —— 塔板的总阻力，N；

G_2 —— 塔板、传动机构的重力，N；

G_3 —— 塔板上结垢产生的重力，N；

G_4 —— 塔板上下运动时增加的惯性力，N。

上式中的各项计算如下：

$$G_1 = \sum_n S \Delta p; \tag{11}$$

$$G_4 = (G_1 + G_2 + G_3)(\psi - 1); \tag{12}$$

$$G_3 = 9.81 \sum_n \delta \rho S(1 - x) \tag{13}$$

式中 δ —— 结垢厚度，m；

ρ —— 结垢物的密度，kg/m³；

S —— 筛板面积，m²；

x —— 筛板开孔率；

n —— 塔板数量；

ψ —— 筛板速度从 0 增加到匀速时的动力系数。

筛板上下运动时可将筛板的运动方式简化为简谐振动，简谐振动时的最大加速度见式（14）：

$$a_{max} = 4\pi^2 A/T^2 \tag{14}$$

式中 A —— 振幅，m；

T —— 周期，s。

由加速度和力的关系式导出筛板上下运动时竖直方向最大力如式（15）：

$$F_{max} = ma_{max} = [(G_1 + G_2 + G_3)/9.81]a_{max} \tag{15}$$

G_4 为塔板上下加速运动时增加的惯性力，因此 G_4 也可由式（16）计算：

$$G_4 = F_{max} - (G_1 + G_2 + G_3) = (a_{max}/9.81 - 1)(G_1 + G_2 + G_3) \tag{16}$$

联立式（12）及式（15）可得动力系数：

$$\psi = a_{max}/9.81 = 4\pi^2 A/(9.81T^2) \tag{17}$$

经以上计算方法可求得作用在塔板主轴上的荷载，求得塔板主轴荷载后即可由机械设计专业进行振动筛板塔传动设计。

4 结论

经试验数据验证及工程实例支撑，利用式（7）计算振动筛板塔的干板阻力降较可靠。结合阻力降的计算结果，利用式（10）可计算振动筛板塔的筛板在上下往复运动时主轴上的荷载，为振动筛板塔传动机构设计提供支撑。

[参考文献]

[1] 中石化上海工程有限公司.化工工艺设计手册[M].5版.北京:化学工业出版社,2018.

[2] 姚玉英.化工原理:上册.[M].天津:天津大学出版社,1999.

[5] 纪长苇,刘玲.APC先进控制技术的研究[J].自动化应用,2020(6):143-144.

[6] 兰洲.基于分散控制系统的半水法湿法磷酸生产PID控制[J].电气技术,2021,22(5):97-101.

LAN Z. PID control of semi water wet process phosphoric acid production based on distributed control system [J]. Electrical Technology, 2021, 22(5): 97-101.

[7] 阐晓旭,金晓明.RBF多模型神经网络软测量技术在湿法磷酸生产中的应用[J].化工自动化及仪表2006,33(1):64-66.

CHAN X X, JIN X M. Application of RBF Multi Model Neural Network Soft Sensing Technology in Wet Process Phosphoric Acid Production [J]. Chemical Automation and Instrumentation 2006, 33(1): 64-66.

[8] 王树青,金晓明.先进控制技术应用实例[M].北京:化学工业出版社,2005.

[9] 谢克明.现代控制理论基础[M].北京:北京工业大学出版社,2000.

[10] 李晓东.先进过程控制在常压装置的应用[J].氮肥与合成气,2022(2):46-47.

LI X D. Application of Advanced Process Control Technology in Atmospheric Pressure Plants [J]. Nitrogen Fertilizer and Syngas, 2022(2): 46-47.

（上接第 124 页）

APC 先进控制技术在湿法磷酸生产中的应用前景将更加广阔。

[参考文献]

[1] 郑尚磊.APC先进控制系统的设计与应用[J].自动化应用,2022(10):169-170.

ZHENG S L. Design and application of the APC advanced control system[J]. Automation Application, 2022(10): 169-170.

[2] 王晓光.APC系统在化工装置中的应用[J].自动化仪表,2021,35(3):153-155.

WANG X G. Application of APC System in Chemical Plants[J]. Automation Instrumentation, 2021, 35(3): 153-155.

[3] 毛志忠,常玉清.先进控制技术[M].北京:科学出版社,2012.

[4] 李延浩,鲍建欣.APC与DCS控制系统安全切换的设计与应用[J].石油石化绿色低碳,2020,5(4):15-17.

LI Y H, BAO J X. Design and Application of Safe Switching between APC and DCS Control Systems [J]. Petroleum and Petrochemical Green Low Carbon, 2020, 5(4): 15-17.