

阅0231861

73-1-13

内部参阅

蒸馏工程手册

(三)

上海化学工业设计院医药农药工业设计建设组

一九七三年七月

第三册目录

III. 蒸馏塔的设计

3. 填料塔的设计	1
3.1 概要	1
3.1.1 填料塔的性质	1
3.1.2 填料塔的设计	1
3.2 填料	3
3.3 流动和塔径	3
3.3.1 压力损失和稳定性	3
3.3.2 泛点速度, 载点速度和塔直径	11
3.3.3 持液量	26
3.3.4 润湿表面积和有效表面积	28
3.3.5 流速分布	32
3.4 传质系数和填料层高度	33
3.4.1 概要	33
3.4.2 容量系数和 H.T.U.	34
3.4.3 H.E.T.P.	45
3.4.4 填料层高度	56
3.5 填料塔内的诸部件	66
3.5.1 填料的支持器	66
3.5.2 液体分配器	68
5. 蒸馏塔的附属设备	74
5.1 概要	74
5.2 热交换器的概述	75
5.3 原料预热器	87
5.4 再沸器	89
5.4.1 概论	89
5.4.2 各种再沸器型的特征	90
5.4.3 再沸器进出料的循环系统	96

5.4.4	使用加热炉场合	101
5.5	冷凝器	102
5.6	冷却器	105
5.7	空冷式热交换器	105
5.7.1	一般优点和经济性	105
5.7.2	型式和结构	107
6	蒸馏塔的自控	114
6.1	自控术语	114
6.2	工业检测用符号	124
6.2.1	检测术语的意义	124
6.2.2	记号	125
6.3	检测仪表的选择	136
6.3.1	选择的标准	136
6.3.2	仪表的种类	139
6.4	仪表盘	150
6.5	空气源装置	151
6.6	仪表控制举例	155
6.6.1	特性	155
6.6.2	控制法	157

3. 填料塔设计

3.1 概 要

3.1.1 填料塔的性质

填料塔和板式塔一样也是气液接触装置的代表设备。以它作为精馏塔，在塔径较小而无污垢的场合上用起来是有利的，但在塔径大的场合，则差不多都用板式塔。因此，下面比较填料塔和板式塔的性质并列举之。

a. 气液接触机理

填料塔与板式塔最大差别之处为气液接触机理，在板式塔中，进行着十字形的流动以及分级的接触，然而在填料塔中则进行着连续的、向流的接触。所以，在填料塔设计时，希望使用由板式塔的概念发展出来的H.E.T.P或宁可使用H.T.U。

b. 塔径

对于板式塔，一般是如塔径变大则板效率变好，而填料塔则相反，即其效率大多变低。它的原因是如塔径变大时，液体均匀分配困难，填料层内液流不平均而有流向塔壁的偏向等等。另外，容许蒸气速度大多是填料塔一方小。

c. 压力损失和持液量

填料塔一方都小。压力损失在减压蒸馏时成为重要因素。持液量则对间歇蒸馏的馏出液成分变化有很大影响。

d. 结构和材料

填料塔结构简单，又因填料主要使用磁制物，故耐腐蚀性能好。

e. 重量

因填料而异，但一般说来是填料塔较重。

f. 价格

塔径小时填料塔便宜，可是随着塔径增大则对板式塔有利。

3.1.2 填料塔设计

填料塔的设计可归纳为以下3事项的决定：

1) 填料的选定

2) 塔径的决定

3) 填料层高度的决定

a. 填料的选定

填料是支配塔性能的最大因素。另外，它对于塔的价格亦有很大影响，故对其选定加以充分研究是必要的。

在1.3.3中列举有代表性的填料。如果要区别普通填料和高效填料，则1)2)12)属普通填料而3)~11)属高效填料。高效填料特别适用于要求高度分离的场合以及减压蒸馏。

一般是填料越小所要填料层越低，然而处理量相同时需要的塔径变大，并且压力损失也变大。

b. 塔径的决定

塔径主要由处理量决定。其程序为以流过塔内的气液流量规定泛点速度或载点速度来决定塔径的下限值，而以填料表面尽量有效作用来选择单位截面上的液流量以决定塔径的上限值。所以，必需注意假如选择操作范围过大则与常用操作条件的塔径比起来就变得太大了，而填料的润湿恶劣，在极端的场合下引起沟流，性能就急剧降低。

c. 填料层高度的决定

填料层高度主要由馏出液和釜底残液的组成所决定。决定的方法有用H.T.U.和用H.E.T.P.的方法。

用H.T.U.的方法是以传质单位数乘H.T.U.以决定填料层高度的方法，但是因为由于操作条件的关系总H.T.U.变化颇大，而且蒸馏中求各个介面H.T.U.非常困难，所以，要考虑吸收或蒸发所得介面H.T.U.中有效面积不同这样来考虑蒸馏场合的介面H.T.U.，假如不这样考虑则其他的适当的方法又找不到，是其缺点。

用H.E.T.P.的方法是以板式塔的概念应用于填料塔中之法，虽然缺乏理论根据，但是因为H.E.T.P.不如H.T.U.那样为操作条件所左右，所以较为实用。此法是以理论板数乘以相当于一块理想板的填料层高度即H.E.T.P.来决定高度。

3.2 填 料

1.8.3 中示出了常用填料的种类。填料塔的性能完全由填料的性能支配，故在其选定中一定要研究种种的事项。

作为填料的选定基准有以下各项目：

- 1) 传质容量系数大
- 2) 泛点速度大
- 3) 压力损失小
- 4) 耐腐蚀和适应操作的加热条件
- 5) 机械强度高
- 6) 重量轻
- 7) 价格便宜
- 8) 各项经常费用小（充填费，维修费）。

表示填料的特性为 1) 每单位充填体积的填料个数，2) 填充密度，3) 比表面积，4) 空隙率，5) 填料因数等。填料的各种特性值记于表 3.1 作为一例。

3.3 流动和塔径

3.3.1 压力损失和稳定性

a. 概要

图 3.1 指出压力损失和气液流速之间的一般关系。

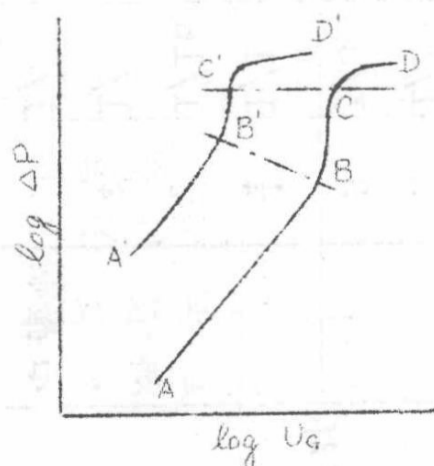


图 3.1 气液流速和压力损失。

表 3.3 填料的特性值

种类	材料	尺寸		厚度	充填个数 N/m^2	充填密度 kg/m^3	比表面积 $a_t (m^2/m^3)$	干燥时空隙率 $\epsilon_d (\%)$	填料因数 l/m	
		英寸	英寸						干燥充填	充水充填
拉西环	磁制	$\frac{3}{8}$	1/16	847000 (918000)	816	440 (485)	68 (53)	1620	1860	
		$\frac{1}{2}$	3/32	371000 (378000)	800	400 (374)	64 (53)	1870	1790	
		1	1/8	47700 (47900)	640	190 (190)	73 (68)	521 (509)	538	
		1 1/2	1/4	13200 (13400)	672	115 (118)	68 (68)	356 (318)	377	
		2	1/4	5720 (5820)	592	95 (95)	74 (83)	152 (246)	164	
		3	3/8	1700	640	62	74			
		$\frac{1}{4}$	1/16	3000000 (3000000)	736 (736)	695 (695)	55 (55)	9080	6220	
		$\frac{1}{2}$	1/16	374000 (374000)	432 (432)	374 (374)	74 (74)	1220	1170	
		$\frac{3}{4}$	1/8	110800	544	246	67	1100	1070	
		1	1/8	46700 (47650)	432 (432)	187 (190)	74 (73)	557	555	
1 1/2	1/4	13840 (14100)	544 (543)	123 (125)	67 (67)	302	324			
2	1/4	5860 (6000)	432 (432)	93.5 (95)	74 (73)	183	186			
3	5/16	1730 (1730)	528 (368)	62.3 (62.3)	78 (78)					

续上表

种类	材料	尺寸 英寸	厚度 英寸	充填个数 N/m^2	充填密度 kg/m^3	比表面积 $a_t (m^2/m^3)$	干燥速率 $\epsilon_d (%)$	填料因数	
								干燥充填	充水充填
拉西环	钢制	5/16	1/32	1590000	1920	623	75		
		1/2	1/32	416000	1230	420	84	985	
		1/2	1/16	388000	2110	387	73	110	
		3/4	1/32	120300	880	274	88	606	
		3/4	1/16	112700	1600	235	78	7755	
		1	1/32	50800 (54700)	640	206 (213)	92 (91.8)	377	
		1	1/16	47500	1170	186	85	472 (377)	
		1 1/2	1/16	14800	800	135	90	172	
		2	1/16	6350	608	103 (105)	92 (94.5)	187 (246)	
		3	1/16	1870	400	67.6	95	105	
勒辛环	钢制	1/4	1/32	2890000 (2540000)	3120	1000 (820)	60 (87)		
		3/8	1/32	887000 (707000)	1825	712 (525)	76 (89)		
		1/2	1/32	387000 (318000)	1600	546 (427)	81 (91)		
		3/4	1/32	112000	1136	356	85		
		1	1/16	44200 (459000)	1520	268 (243)	60 (93)		
		1 1/2	1/16	13800	1040	176	87		
		2	1/16	5900 (5650)	784	134 (121)	90 (95)		

续上表

种类	材料	尺寸		厚度	充填个数 N/m ²	充填密度 kg/m ³	比表面积 a _t (m ² /m ³)	干燥时		因数 I/m ³
		英寸	英寸					空隙率 ε _d (%)	干燥充填	
包尔环	钢制	5/8	1/64	234000 (234000)	585	360	90.2	233	充水充填	
		1	1/32	50800 (51000)	650	210	93.8 (93)	147		
		1 1/2	1/32	13300 (15000)	385	130	95.3	78.5		
		2	1/16	6350 (6500)	650	110	96.4 (94)	59 (55.7)		
培儿鞍 形填料	塑料制	5/8		234000 (234000)	72	360	88		1570	
		1		50800 (51000)	72	210	90			
		1 1/2		133000 (15000)	67	129	90.5			
	2		6350 (6500)	67	110	91				
	2	1/4	5790 (6500)	610	95	74				
	3	3/8	1730 (2400)	640	66	74				
英泰罗 克司 形填料	磁制	1 1/2		572000 (529000)	864 (720)	466 (463)	63 (68)	1250	1570	
		1 1/4		176500	768	269	66	557 (453)		
		1		77700	720 (672)	249 (259)	69 (69)	361 (270)		
	1 1/2		20500	608 (672)	144 (164)	75 (70)	213 (249)			
	2		8830	640	105	72	148			
	1 1/4		4144000		980	75	1970			
英泰罗 克司 形填料	磁制	1 1/2		731000		621	78	870	1570	
		1		84000		256	77.5	322 (252)		
		1 1/2		25000		194	81	170 (266)		
		2		9400		117	79	115		

在图 3.1 中, A~B 区域是在液流量少而蒸气流有效流路的断面与干燥时的空隙截面积之差不大的状态下, 压力损失与 $G^{1.8\sim 2.0}$ 成比例。

当蒸气流速变得比 B 点大时; 蒸气就拦持一部份液体, 故填料层内的持液量变多而有效流路截面积变小。在此状态下, 压力损失增加的比例大于蒸气流速的二次方。B 点称为载点。

当蒸气流速进一步加工时大: 到 C 点附近, 均匀化了的气液混合物充满填料层。在此于气体流速变动中压力损失波动极大, 所以塔达到完全不安定的状态。C 点称为泛点。

C~D 区域在液体形成连续相而蒸气形成分散相的状态下, 相当于泡沫塔的操作条件。此状态已越过了泛点却是稳定的, 详细请参阅文献 30) 55)。

在液体流量多时压力损失与蒸气流速的关系示如 A'B'C'D', 对同一蒸气流速压力损失大, 虽然不产生载点的状态 $\log U_G$ 对 $\log \Delta P$ 标绘亦能形成曲线。

另外, 载点 B' 接近泛点 C', 变得不明显了。

b. 单相流动的压力损失

填料层压力损失的原因极为复杂, 流路的弯曲、扩大和缩小, 以及在填料表面上的摩擦为主要的因素。

在不流液体的场合, 压力损失除了此处推荐的 Ergun¹³⁾ 式子以外, 还有 Carman⁵⁾ 对球、破碎固体、鞍形填料、环形填料等的式子和内田, 藤田⁵⁸⁾ 的式子

$$\left(\frac{\Delta P}{Z}\right) \left\{ \frac{g_c \varepsilon_d^3 d_e \rho_G}{(1-\varepsilon_d) G^2} \right\} = \frac{150(1-\varepsilon_d)}{Re} + 1.75 \quad (3.1)$$

$$\text{在此, } d_e = 6V_p/a_t = 6(1-\varepsilon_d)/a_t$$

$$Re = d_e G / \mu_G$$

(3.1) 式中右边第 1 项相当于由于表面摩擦的压力损失而第 2 项则相当于流路扩大缩小的压力损失, 通常后者占大部分。

c. 二相流动的压力损失

有液流场合的蒸气在填料层中的压力损失比干燥时增大。其原因主要为塔内有液体故蒸气的流路缩小。

如灌液量变得很大，那末即使从塔底不送入蒸气时塔底也产生压力，此时塔底如在大气压情况下排出，由液体吸入了的蒸气即随同放出。此称作吸气现象。

有液体和同流的蒸气流动的场所，压力损失由下式给出：

$$\Delta P/Z = K \times 10^{-6} (10^6 L / \rho L) (G^2 / \rho G) \quad (3.2) \quad (31)$$

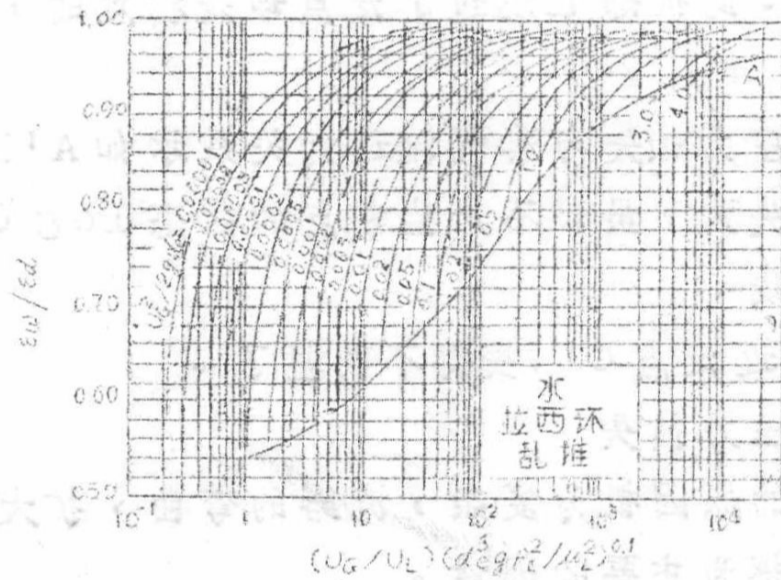


图 3.2 灌液时空隙率

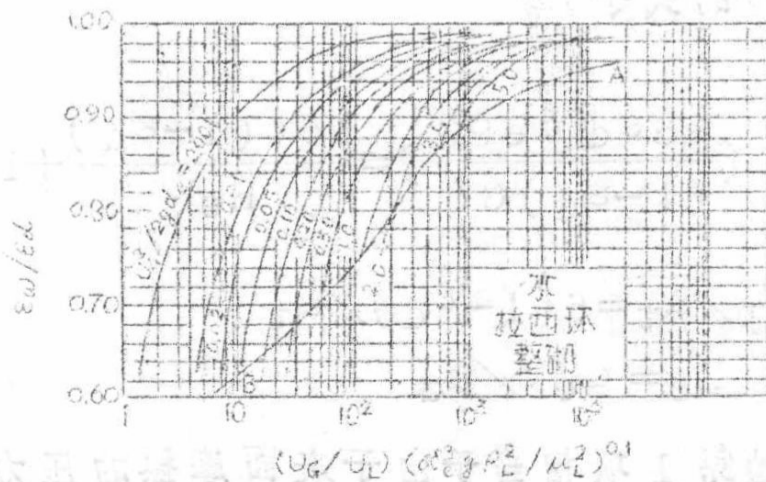


图 3.3 灌液时空隙率

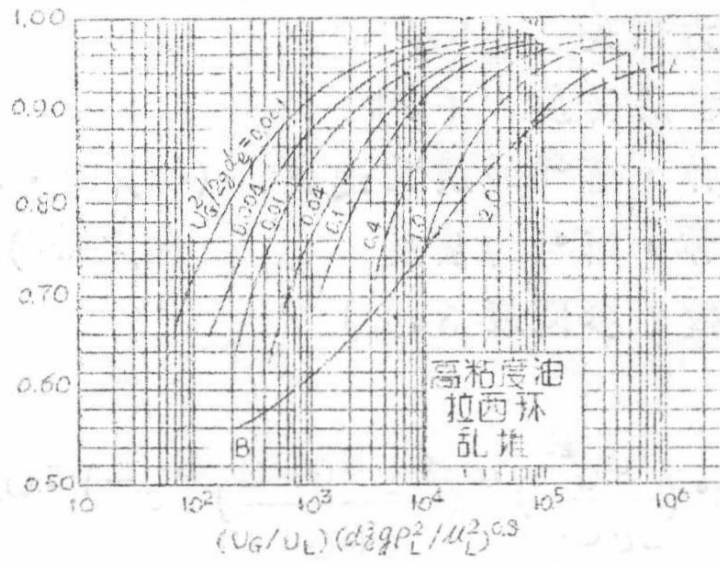


图 3.4 灌液时空隙率

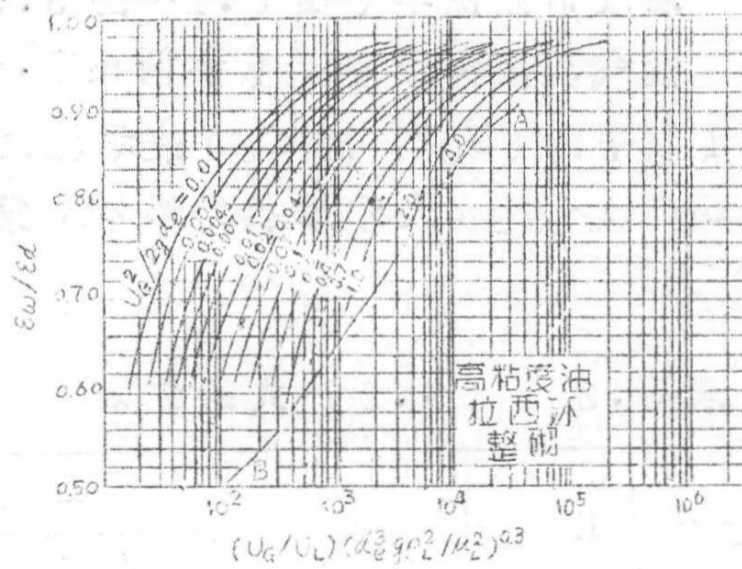


图 3.5 灌液时空隙率

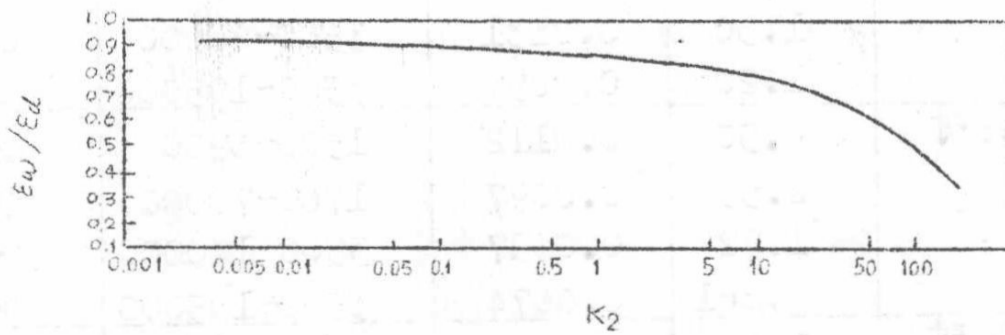


图 3.6 吸气现象的修正值 (58)

(3.2) 式为适用于载点以下的有因次式，具有以下单位：

ΔP : 压力损失 (kg/m^2)

Z : 填料层高度 (m)

L, G : 液体，蒸气的质量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{小时}$)

ρ_L, ρ_G : 液体，蒸气的密度 (kg/m^3)

K, α : 常数 (参阅表 3.2)

$$\frac{\Delta P g_c}{Z \rho_G g} = K_1 \times 10^6 \left(\frac{U_G^2}{2g d_p} \right)^\alpha \left(\frac{d_p U_G \rho_G}{\mu_G} \right)^\beta e^{-\gamma \varepsilon \omega} + K_2 \quad (3.3)^{58}$$

此处

$K_1, \alpha, \beta, \gamma$: 常数 (参阅表 3.3)

ε : 灌液时空隙率 (图 3.2~图 3.5)

K_2 : 吸气现象修正值。(参阅图 3.6)

(3.3) 式第 1 项中的 $(U_G^2/2g d_p)$ 表示流路的曲折，扩大和缩小的影响； $(d_p U_G \rho_G/\mu_G)$ 表示摩擦的影响。第 2 项是有关吸气现象的修正值。

表 3.2 (3.2) 式的常数

填 料		K	α	L	$\Delta P/Z$
种 类	尺 寸			$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{小时}$	$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$
拉西环	$\frac{1}{2}$ 英寸	14.95	0.0236	1500~42000	0~42
	$\frac{3}{4}$	3.54	0.0148	8800~53000	0~42
	1	3.45	0.0143	1760~13200	0~42
	$1\frac{1}{2}$	1.30	0.0131	3500~88000	0~42
	2	1.20	0.0097	3500~105000	0~42
培 儿 鞍形填料	$\frac{1}{2}$ 英寸	6.50	0.0112	1500~6900	0~42
	$\frac{3}{4}$	2.59	0.0097	1760~70000	0~42
	1	1.72	0.0097	3500~140000	0~42
	$1\frac{1}{2}$	0.861	0.0074	3500~105000	0~42
英泰罗克司 鞍形填料	1 英寸	1.34	0.0091	11300~70300	0~42
	$1\frac{1}{2}$	0.605	0.0074	11300~70300	0~42

表 3.3 (3.3) 式的常数

填料：拉西环（磁制）

充填法	灌液量	$(Re)_G$	K_1	α	β	γ	精度 %
	$m^3/m^2 \cdot \text{小时}$	$d_p U_G \rho_G / \mu_G$					
整砌	30 以上	30~50	2.70	1.00	-0.60	15	±50
	30 以上	500~3000	0.297	1.00	-0.20	15	±50
	30 以上	20~2000	2.74	0.70	-0.40	15	±50
乱堆	30 以上	30~250	15.2	1.00	-0.41	15	±50
	30 以上	250~3000	2.17	1.00	-0.05	15	±40
	30 以上	10~100	35.6	0.70	-0.50	15	±30

3.3.2 泛点速度、载点速度和塔直径

a. 泛点速度

液泛现象是向流的异相系统流体流过时所发生的一般现象，它发生的条件因流路的状态以及流体的流量和物理性质而异。但如规定一种填料，则液泛现象发生的机理是一样的，即在泛点的压力损失当然反由流体系统的物理性质所决定，而与流量无关。表 3.4 中记录了空气—水系统在泛点的压力损失，作为一例。

表 3.4 在泛点的压力损失（空气—水系统）(44)

填 料		泛点上的压力损失	文 献
种 类	尺 寸	mmHg/m 填料层	
拉 西 环	1/4 英寸	25	1
	1/2	21	
	1	25	
	1 1/2	15	
	2	15	

续上表

填 料 种 类	尺 寸	泛点上的压力损失	文 献
		mmHg/m 填料层	
培儿鞍形填料	½ 英寸	15	1
	1	15	
	1½	13	
特勒雷脱填料	1 英寸	15	2

1) Zenz: Chem. Eng. 60 [8] 176 (1953)

2) Teller & Ford: Ind. Eng. Chem. 50 1210 (1958)

(1) 普通填料的泛点速度

普通填料的泛点速度关连除了图 3.7 示出的 Lera 所做的工作外, 还有 Sherwood et al.⁵²⁾ Lobo et al.³⁵⁾ 做过的工作等。它们都表现如次式:

$$\left(\frac{UG^2}{g_c}\right) \left(\frac{a_t}{\epsilon_d^3}\right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_W}\right)^{0.2} = f \left(\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}\right) \quad (3.4)$$

在图 3.7 和式 (3.4) 中的 $\left(\frac{a_t}{\epsilon_d^3}\right)$ 考虑为填料的比表面积 a_t

除以空隙率 3 次方 ϵ_d^3 , 宁以 $\left(\frac{a_t}{\epsilon_d^3}\right)$ 之值考虑为有关填料的泛点速度的特性值是可以的, 称之为填料因素。填料因素之值可参阅表 3.1。

关于表面张力的泛点速度影响有 Newton et al.⁴⁰⁾ 的报告, 他在图 3.7 的横轴上用 $(\sigma/\sigma_w)^3$ 乘过的值, 亦即推荐使用 $(L/G) (\rho_G/\rho_L)^{1/2} (\sigma/\sigma_w)^3$ 作为横轴, 但如同他指出的, 在其试验中为了改变表面张力使用界面活性剂, 所以发泡的影响有点过大。

作为泛点速度的实验式有下面举出的藤田式¹⁴⁾和 Sakiadis

式50), 它们对气液系和液液系的乱堆填料层都适用。

$$Y = 0.60e^{-2X} \quad (3.5)14)$$

在此

$$X = \left(\frac{U_D}{U_c}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho_D}{\rho_c}\right)^{\frac{1}{8}}$$

$$Y = \left(\frac{U_c^2 a_t}{g \epsilon_d^3}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho_c \rho_D}{\Delta \rho^2}\right)^{0.4} \left(\frac{a_t^3 \mu_D^2}{g \rho_D^2}\right)^{0.08}$$

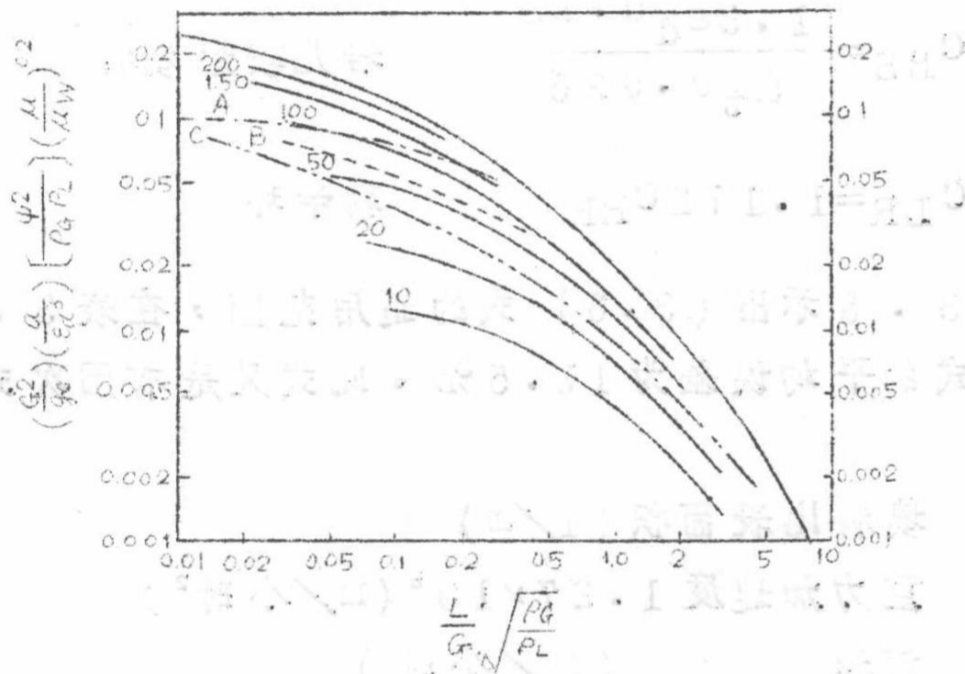


图 3.7 泛点速度 (普通填料)

Leva.M. Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. No.10 51 (1954)

参数表示压力损失 (mmH₂O/m 填料层)

A 载点速度的上限

B 载点速度的平均值

C 载点速度的下限

$$\psi = \rho_{\text{水}} / \rho_L$$

(3.5) 式为无因次式, 但其精确度不好而最大误差为 30%。

$$1 + 0.835 \left[\left(\frac{\rho_D}{\rho_C} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\mu_D}{\mu_C} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$= C \left[\left(\frac{u_c^2 a_t}{g \varepsilon_d^3} \right) \left(\frac{\rho_C}{\Delta \rho} \right) \mu_C^{\frac{1}{4}} \sigma^{\frac{1}{4}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (3.6)^{50}$$

在此，C 为填料的常数并由下式：

$$C_{RR} = \frac{0.92 \varepsilon_d^{0.0068}}{a_t^{0.043}} \quad \text{拉西环}$$

$$C_{BS} = \frac{1.3 \varepsilon_d^{0.78}}{a_t^{0.035}} \quad \text{培儿鞍形填料}$$

$$C_{LR} = 1.172 C_{RR} \quad \text{勒辛环}$$

在图 3.8 示出 (3.6) 式的适用范围，在表 3.5 示出其实验范围。此式的平均误差为 13.5%。此式又是有因次式并具有以下单位：

- a_t : 填料比表面积 (1/m)
- g : 重力加速度 1.27×10^8 (m/小时²)
- u : 流速 (m/小时)
- ε_d : 填料的干燥时空隙率 (—)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- μ' : 粘度 (厘泊)
- σ' : 表面张力 (达因/cm)

(3.5) 式和 (3.6) 式中加字 C, D 和符号 ΔP 表示：

- C : 连续相 (灌液填料塔中气相)
- D : 分散相 (灌液填料塔中液相)

$$\Delta \rho = |\rho_C - \rho_D|$$