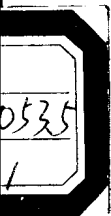


最适宜泡帽塔板的設計

(新的化工設計方法)

[美] 威廉·波列士 著

中国工业出版社



最适宜泡帽塔板的設計

(新的化工設計方法)

〔美〕威廉·波列士 著

北京石油学院加工过程及设备教研室 译

中 国 工 业 出 版 社

本小冊子系摘譯自美國 *Petroleum Processing* 雜誌1956年第11卷第2、3、4、5期 William L. Bolles 所寫的 “New Process Design Methods for Optimum Bubble—Cap Tray Design” 一文。

全文內容分四部分：第一部分主要敘述泡帽塔板動力學因素的計算方法；第二部分主要介紹泡帽塔板設計標準；第三部分敘述各種特定條件下最適宜塔板的設計方法；第四部分通過解例題來闡述本書所介紹的新方法在實際上的應用。

本書譯者為北京石油學院加工過程及設備教研室部分同志：第一部分——沈復講師；第二部分——郭天民講師；第三部分——臧福祿講師；第四部分——劉衍烈講師。最後全文由臧福祿同志校閱。

本書可供化學、石油、食品等工業部門的工程技術人員及化工、石油、食品院校師生參考。

最適宜泡帽塔板的設計

(新的化工設計方法)

北京石油學院加工過程及設備教研室譯

(根據化學工業出版社紙型重印)

*

化學工業部圖書編輯室編輯 (北京安定門外和平北路四號樓)

中國工業出版社出版 (北京後鵝欄路丙10號)

(北京市書刊出版事業許可證出字第110號)

中國工業出版社第四印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行·各地新華書店經售

*

開本850×1168¹/₃₂·印張3⁵/₈·插頁2·字數79,000

1959年12月北京第一版

1963年8月北京新一版·1963年8月北京第一次印刷

印數0001—1,013·定價0.71元

*

統一書號：15165·2657(化工-229)

目 录

第一部分 塔板动力学..... 4

初步设计与最终设计 5 塔板的动力学计算 7 长方形汽缝的汽缝开度 9 梯形汽缝 10 三角形汽缝 13 堰板上的液面高度 13 液体抛过堰板的距离 15 液面降落 16 蒸汽压力降 21 降液管内液体高度 26 雾沫夹带 27 板效率 28

第二部分 设计标准..... 32

结构材料 32 一般的塔板型式 33 塔板结构 34 降液管 36 溢流堰 36 泡帽设计 36 标准泡帽 41 泡帽排列 43 帽缘高度 43 泡帽的固定 44 塔板动力学 44 塔板间距 57 其他设计因素 59

第三部分 设计方法..... 66

主要的设计变数 66 塔板型式的选择 66 降液管和溢流堰 67 塔板面积的分析 67 泡帽的尺寸和排列 70 梯阶式排列泡帽 72 塔板布置 72 推荐的塔板设计步骤 73

第四部分 设计例题..... 80

符号说明..... 111

单位换算表..... 113

参考文献..... 114

第一部分 塔板动力学

尽管新近出现的其他塔板型式有许多提倡者，泡帽式塔板并不是过时了的。往往宣称这些新型塔板能够提供大的处理量，从而可以节省基本建设费用。有时候，这种提法是以和泡帽式塔板比较的例子作为根据的，然而这种比较往往是把泡帽式塔盘置于不利地位，因为它的尺寸是用老式的設計方法来确定的。

近来，在某些加工工业部門中，出现了返回来用泡帽式塔板的情况，这是部分地由于創造了新的設計方法，从而增大了泡帽式塔板的处理量，而使泡帽式塔板在价格上能够 and 新型塔板相匹敌。然而决定性的因素則在于大家公認泡帽式塔板具有一些特殊的优点，而这些正好是别的型式所缺少的。这就是：1) 塔板效率高；2) 能在宽的負荷变动范围内保持高的效率；3) 能够处理的汽液比范围可以很宽；4) 較易避免脏污及阻塞。这些优点使它对于各种操作都較可靠。

即使泡帽式塔板价格稍为高一点，必須記住，精餾塔只占全厂費用中的一小部分。所以，稍稍增加一点塔的费用对全厂費用来说，增加的百分率几可忽略不計。

讀者必然会問，已經有了很多关于泡帽塔板的文章发表了，其中有不少是全套的設計方法、(2、5、10、16、18、19、25)，为什么还要有关于泡帽式塔板設計的文章呢？因为以前的文章并不是完全滿意的，对于工艺設計者所需要的資料往往是零散的，沒有一个統一完整的来源。許多計算方法都是相当繁瑣的，而对于泡帽設計方面的文章很少。此外，确定适宜的泡帽排列的方法是被忽視的。

本書的目的

本书的目的在于提供全套的泡帽式塔板工艺設計指南。希图提出合乎邏輯地选择塔板上每一因素的方法。

对于估算压力降及液面降落将介绍新的简化而可靠的方法，将提出确定适宜塔板设计的新方法，同时还要提出一套标准泡帽以供普遍应用；另外，还第一次提供了确定适宜泡帽尺寸及帽间距的方法。这些都将与适宜塔板之设计方法结合起来。最后，还有一点关于求雾沫夹带的合理方法。

应该说清楚，本文范围仅限于钟状圆形泡帽的工艺设计。至于泡帽塔板的机械设计，介绍读者看戴威斯的出色的著作。^[10]

利用现在提供的新设计方法将有许多的优点。以前的可靠的设计方法非常繁复，以致极少有一个设计者有耐心去试验两个以上的塔板布置方案。而新方法则不然，它便于设计者，可以很方便地找出塔板布置上一切重要变数的影响，特别是泡帽尺寸及设计、泡帽间距、帽缘高度及塔板型式等变数。

尽管比较方便，新方法具有现有知识所允许的可靠程度。新方法是安全的，这已由几十个分馏塔设计所证明。然而为了提高信心起见，将把新法与较熟悉的老法作出比较。

这个设计方法适用于所有逆流汽液接触过程，包括精馏或分馏塔、吸收塔及汽提塔。

在编写这本泡帽式塔板设计小册子的过程中明显地看出，在泡帽式塔板工艺学方面存在着明显的空白点。特别是：1) 在降液管中泡沫的定量预计问题；2) 雾沫夹带的预计问题；3) 板效率的预计问题。

此外尚可明显看出，有关工业用泡帽式分馏塔的完整操作数据极为缺乏，除了布朗^[3]、锡卡利斯^[5]、克雷^[6]、及霉埃和福兰克^[17]等以外。建议更多地发表有关泡帽式分馏塔的操作数据以扩展我们对这种重要设备的知识。

初步设计与最终设计

泡帽式塔板设计主要分两大类：1) 估价用的初步设计；2) 构成用的最终设计。估价用的设计一般只需要近似的塔径，及板间距或塔高。为此目的，建议应用已发表了的方法^[2]，这个方法是以考虑蒸气速度及液体流量为根据的。这种结果往往是保守的但对估价

用則足够可靠。

泡帽式塔板的最后結構設計則是另一回事了，每一个因数都需要考慮。但是，对于一个好的泡帽式塔板的工艺要求却可以归結为四个简单的特性，即：

1. 液、汽处理量大；
2. 板效率高；
3. 压力降小；
4. 能够担负变动范围大的負荷。

难题在于不可能同时达到所有上述的特性，只能在牺牲了某些特性后才能获得其中的另一些特性。然而，如果認識到一个适宜的塔板設計是包括下列綜合要求，則这个难题是可以解决的了，这就是

1. 最低的基本建設費用，及
2. 最低的操作及維護費用。

在最后設計中，工艺設計者應該定出影响分餾过程的全部因素。表 1 为这些因素的一覽表举例。

表 1 工艺設計者应定出的因素

A. 結構材料	1. 型 式
B. 塔板型式	2. 数 目
C. 泡帽設計	3. 板間距
1. 型式和形状	4. 降液管底部与塔板間之間隙
2. 壁 厚	5. 对塔板支承圈的限制
3. 泡 帽	E. 塔板設計
a. 直 径	1. 塔 径
b. 高	2. 溢流堰
c. 汽縫数目	a. 位 置
d. 汽縫尺寸	b. 型 式
e. 帽緣圈之高度	c. 长 度
f. 帽緣高度	d. 高 度
4. 升汽管	e. 齿形开口設計（如果使用的話）。
a. 直 径	f. 調整范围
b. 高 度	3. 其他堰板
5. 装配及固定方法	a. 进口堰
D. 降液管設計	

- b. 中間堰
- 4. 泡帽布置
 - a. 泡帽数目
 - b. 垂直于液流的排数
 - c. 泡帽心距和間距
 - d. 泡帽与下列构件的最小距离 (間隙)
 - 1) 堰板
 - 2) 降液挡板
 - 3) 塔壁
- 5. 分配挡板
 - a. 数目及位置
 - b. 高度

- c. 与泡帽的間距
- 6. 泪孔
 - a. 数目
 - b. 位置
 - c. 尺寸
- 7. 塔板的設計挠度
- 8. 衬垫或填料
- F. 结构的公差
 - 1. 塔板水平度
 - 2. 堰板水平度
 - 3. 塔板渗漏
- G. 特殊要求

塔板的动力学計算

为了要使上述各項工艺要求达到适宜的平衡起见，塔板动力学計算应该要定出：

1. 汽縫开度
2. 堰板上的液面高度
3. 液体抛过堰板的距离
4. 液面降落
5. 汽縫动液封
6. 蒸气压力降
7. 蒸气分布
8. 降液管中液面高
9. 液体在降液管内停留时间
10. 雾沫夹带
11. 板效率

图1表示出了塔板动力学状况的主要因素。在本图中液体自左方由上面的降液管进入塔板，降液管中物料高度包括了清液高度及飘浮于液面上的泡沫高度，液体流过降液挡板的下面而进入泡帽部分，液体在横流过塔板时要克服阻力，故在塔板上产生了液面降落。然后，液体流过堰板离开泡帽部分而往下流入右方的降液管。

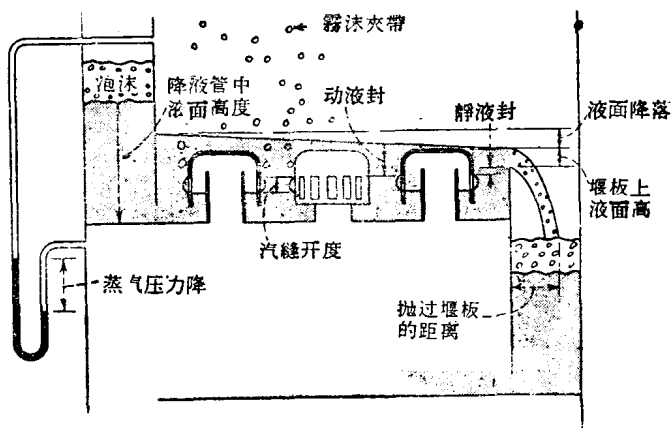


图 1 塔板动力学因数简图

液体流过堰板时夹带有气泡，后者在降液管的自由空间里与液体得到分离而复回升。在流过堰板时，液体是被抛过堰板的，而“抛过堰板的距离”是指自堰板到液流落到降液管内物料面上为止的一段水平距离。

同时，蒸气从下面的塔板升起，进入泡帽的升气管，经廻轉通路向下流动到环形空间，把液面压低，自己则经汽缝形成气泡穿过液体而逸出。汽缝开度是指被压低的液面到汽缝顶的距离，从汽缝顶端到塔板上液体自由面的距离叫做汽缝动液封。蒸气压力降是指塔板上下蒸气空间之压力差。上升的蒸气夹带着液滴进入上一塔板，这就叫做雾沫夹带。

由于液流横过塔板有液面降落，故在塔板降液端的液面较进液端的液面为低。因此，在降液端的泡帽中流过的蒸气较在进液端的为多。这就引起蒸气在塔板上分布得不均匀。

进一步研究图 1 可以发现泡帽式塔板具有“可靠性”的道理。溢流堰可以被安置到某个高度，使得汽缝上有一个正的液封以迫使蒸气与液体接触。进一步说，这个液封并不靠汽流来保持，所以低蒸气流速或高蒸气流速均可达到汽液良好接触。再进一步。汽液接触受液流之影响不大，无论是高的或是低的液流速度均可达到好的效率。

長方形汽縫的汽縫開度

估計汽縫開度的原始方法是由羅集爾及隋勒⁽²⁰⁾所導出的，可以加以進一步發展以利應用。下面的導演可參閱圖 2，其中分別表示出三角形、矩形及梯形的汽縫，對於長方形汽縫，導演公式時是以銳孔公式應用到汽縫的一個微分面積開始的：

$$u = K_s \sqrt{2g \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right) \left(\frac{h}{12} \right)} \quad (1)$$

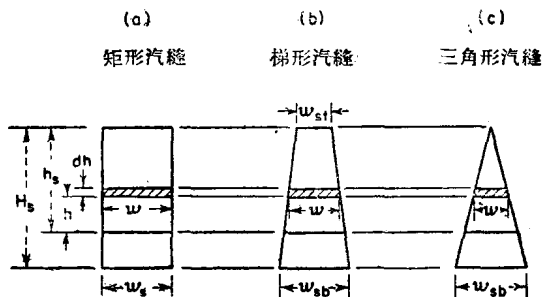


圖 2 導演汽縫開度的圖

通過此一微分面積的蒸氣量為

$$dV_s = u dA = K_s \sqrt{2g \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right) \left(\frac{h}{12} \right)} \cdot \left(\frac{w_s dh}{144} \right) \quad (2)$$

由此一公式可以積分而得出：

$$V_s = \frac{K_s w_s}{144} \sqrt{\frac{2g}{12} \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)} \int_0^{h_s} h^{1/2} dh \quad (3)$$

$$V_s = \frac{K_s w_s}{144} \sqrt{\frac{2g}{12} \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)} \left(\frac{2}{3} \right) h_s^{3/2} \quad (4)$$

根據實驗，他們確定出 K_s 為 0.51，以之代入公式 (4) 可得：

$$V_s = 0.00547 \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} w_s h_s^{3/2} \quad (5)$$

將方程式 (5) 應用到整個塔板，可得：

$$V = 0.00547 N_s N_c W_s \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} h_s^{3/2} \quad (6)$$

$$\text{以} \quad A_s = \frac{N_s N_c w_s H_s}{144} \quad (7)$$

代入方程式(6)則得

$$V = 0.79 \frac{A_s}{H_s} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} h_s^{3/2} \quad (8)$$

解方程式(8)中的汽縫开度, 可得出下面方便的估計汽縫开度方程式:

$$h_s = 1.17 \left(\frac{\rho_v}{\rho_L - \rho_v} \right)^{1/3} (H_s)^{2/3} \left(\frac{V}{A_s} \right)^{2/3} \quad (9)$$

或者, 若以 H_s 代替 h_s , 則可得出最大的汽縫流量为

$$V_m = 0.79 \sqrt{H_s \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \cdot A_s \quad (10)$$

梯 形 汽 縫

对于梯形汽縫, 基本方程式(1)亦可被应用而得出下列流过微分面积的汽流流量微分方程式:

$$dV_s = u dA = K_s \sqrt{2g \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right) \left(\frac{h}{12} \right)} \frac{w dh}{144} \quad (11)$$

按梯形的几何概念, 流动截面的宽度为

$$w = w_{st} + (w_{sb} - w_{st}) \left(\frac{h_s - h}{H_s} \right) \quad (12)$$

将方程式(12)代入(11)得

$$\begin{aligned} dV_s = \frac{K_s}{144} \sqrt{\frac{2g}{12} \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)} \left[w_{st} + \right. \\ \left. + (w_{sb} - w_{st}) \left(\frac{h_s - h}{H_s} \right) \right] \times h^{1/2} dh \end{aligned} \quad (13)$$

重排列并积分得:

$$V_s = \frac{K_s}{144} \sqrt{\frac{2g}{12} \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)} \left[\int_0^{h_s} w_{st} h^{1/2} dh + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^{h_s} (w_{sb} - w_{st}) \left(\frac{h_s}{H_s} \right) h^{1/2} dh - \\
& - \int_0^{h_s} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{H_s} \right) h^{3/2} dh \Big] \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_s = & \frac{K_s}{144} \sqrt{\frac{2g(\rho_L - \rho_v)}{\rho_v}} \left[\frac{2}{3} w_{st} h_s^{3/2} + \right. \\
& \left. + \frac{2}{3} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{H_s} \right) h_s^{5/2} - \frac{2}{5} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{H_s} \right) h_s^{5/2} \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

将 $K_s = 0.51$ 代入方程式(15), 可得

$$\begin{aligned}
V_s = & 0.00820 \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \left[\frac{2}{3} w_{st} h_s^{3/2} + \right. \\
& \left. + \frac{4}{15} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{H_s} \right) h_s^{5/2} \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

将方程式(16)应用到整个塔板, 可得

$$\begin{aligned}
V = & 0.00820 N_s N_c \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \left[\frac{2}{3} w_{st} h_s^{3/2} + \right. \\
& \left. + \frac{4}{15} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{H_s} \right) h_s^{5/2} \right] \quad (17)
\end{aligned}$$

但全塔板的汽缝总面积为:

$$A_s = N_s N_c H_s \left(\frac{w_{sb} + w_{st}}{2 \times 144} \right) \quad (18)$$

将方程式(17)及(18)合并, 可得

$$\begin{aligned}
V = & 2.36 \frac{A_s}{H_s} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{w_{st}}{w_{sb} + w_{st}} \right) h_s^{3/2} + \right. \\
& \left. + \frac{4}{15} \left(\frac{w_{sb} - w_{st}}{w_{sb} + w_{st}} \right) \frac{h_s^{5/2}}{H_s} \right] \quad (19)
\end{aligned}$$

引入下面符号以使方程式(19)简化:

$$R_s = \frac{w_{st}}{w_{sb}} \quad (20)$$

改写之, 可得

$$\frac{w_{st}}{w_{sb} + w_{st}} = \frac{R_s}{1 + R_s} \quad (21)$$

$$\frac{w_{sb} - w_{st}}{w_{sb} + w_{sc}} = \frac{1 - R_s}{1 + R_s} \quad (22)$$

将方程式(21)及(22)引入方程式(19), 最后可得

$$V = 2.36 \frac{A_s}{H_s} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{R_s}{1 + R_s} \right) h_s^{3/2} + \frac{4}{15} \left(\frac{1 - R_s}{1 + R_s} \right) \frac{h_s^{5/2}}{H_s} \right] \quad (23)$$

方程式(23)表示了确定梯形汽缝开度的最简单的可能的方程式, 但显然在此式中必须要用猜算法(嘗試誤差法)。然而, 它可以用图解法来直接解出。首先, 汽缝最大流量可以将式中的 h 用 H_s

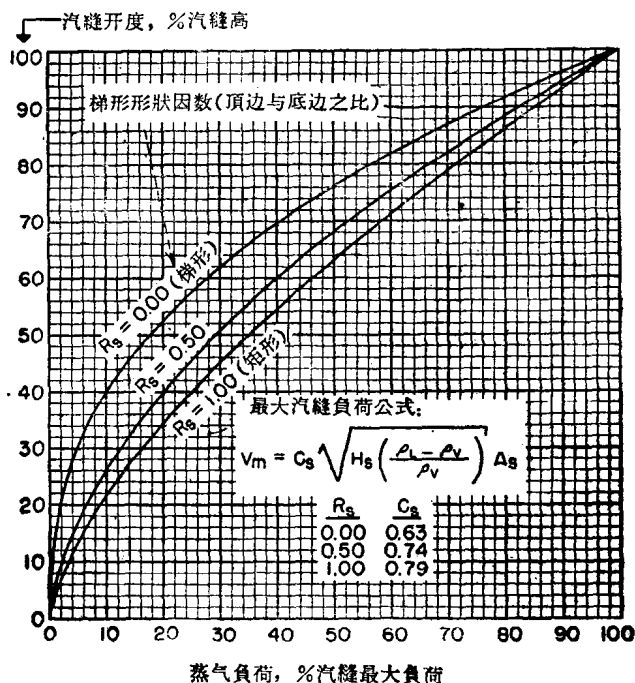


图3 梯形汽缝之一般关系

代替而得出。

$$V_m = 2.36 \left[\frac{2}{3} \left(\frac{R_s}{1+R_s} \right) + \frac{4}{15} \left(\frac{1-R_s}{1+R_s} \right) \right] \sqrt{H_s \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)} A_s \quad (24)$$

方程式(23)及(24)合并可得出图3, 該图适用于任何形状的梯形汽縫开口。首先可自图上的公式算出汽縫的最大流量。然后汽縫开度就可以从图上根据实际蒸气負荷而查出(要利用相应的梯形形状因素 R_s 值之曲綫)。对于不同于图上的梯形的形状因素值, 可以用內插法。可以看出, 在 $R_s = 0$ 的极限情况下, 梯形变为三角形了; 而在另一极限 $R_s = 1.00$ 时, 則又变为矩形了。

三角形汽縫

对于三角形汽縫, 只要将 $R_s = 0$ 代入梯形汽縫的方程式, 就可很容易得出方程式。将此代入方程式(23)可得:

$$V = 0.63 \frac{A_s}{H_s^2} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} h_s^{5/2} \quad (25)$$

解方程式(25)中 h_s , 可得出三角形汽縫开度的設計方程式:

$$h_s = 1.20 \left(\frac{\rho_v}{\rho_L - \rho_v} \right)^{1/5} (H_s)^{4/5} \left(\frac{V}{A_s} \right)^{2/5} \quad (26)$$

对于汽縫最大流量方程式(26)变为:

$$V_m = 0.63 \sqrt{H_s \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)} A_s \quad (27)$$

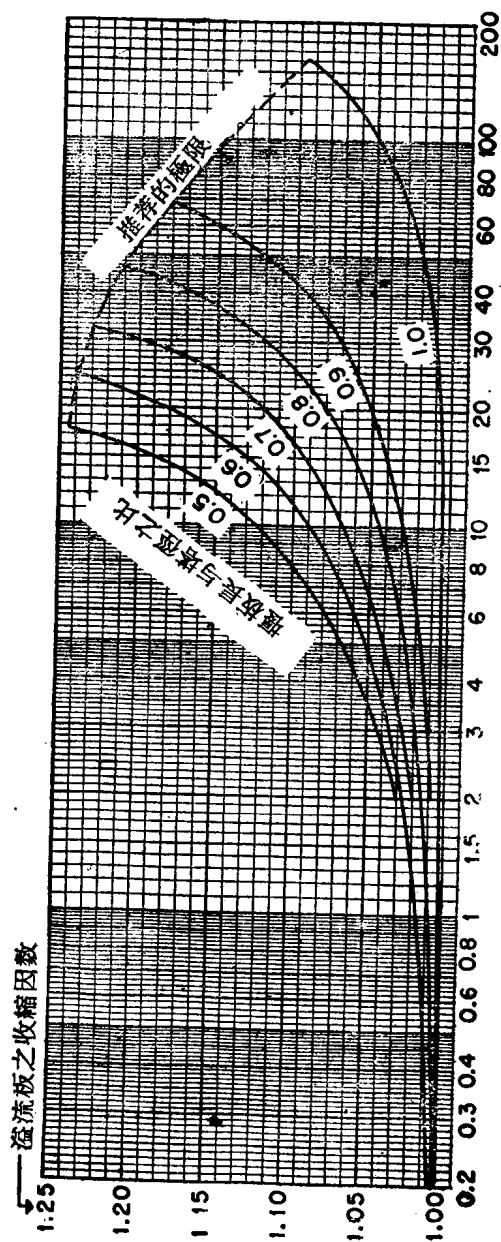
堰板上的液面高度

液体在平的堰板上的高度由范氏公式决定:

$$h_{ow} = 0.092 \left(\frac{Q}{l_w} \right)^{2/3} \quad (28)$$

当堰板的配置情况是使液流流入弓形降液管, 塔壁对于堰板上液流有一个收縮效应, 必須引入校正因数 F_w :

$$h_{ow} = 0.092 F_w \left(\frac{Q}{l_w} \right)^{2/3} \quad (29)$$



$Q/(l_w)^{2.5} = (\text{液体负荷, 加仑/分})/(\text{罐长, 呎})^{2.5}$

图 4 塔壁对溢流板的收缩因数

在前有的一篇文章中〔2〕，曹守山，……校正因素如下，

$$\frac{Q}{(l_w)^{2.5}} = 485 \left(\frac{\sqrt{1 - \frac{(K_w)^2}{(F_w)^3}} - \sqrt{1 - (K_w)^2}}{K_w F_w} \right)^{3/2} \quad (30)$$

由此式不能直接解得 F_w ，所以作出了一个方便的工作图——图 4。

液体在齿形堰板上的高度，当齿口全满时可由下式〔10〕确定

$$Q = 14.3 \frac{l_w}{h_n} [h_{ow}^{5/2} - (h_{ow} - h_n)^{5/2}] \quad (31)$$

但如果齿口并不全满，则可用另一公式：

$$Q = 13.3 \frac{l_w}{h_n} (h_{ow})^{5/2} \quad (32)$$

液体抛过堰板的距离

液体抛过堰板距离的公式之导演可以最明显地自图 5 看到。此处液流横过堰板时在水平方向上的速度为：

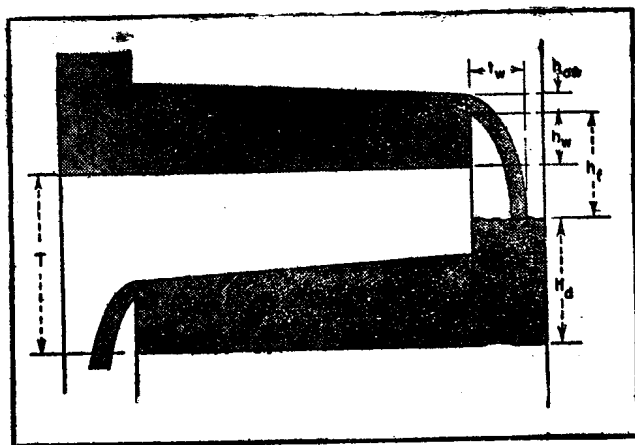


图.5 导演液体抛过堰板距离公式的图

$$u_w = \left(\frac{Q}{60 \times 7.48} \right) \left(\frac{12}{l_w h_{ow}} \right) = 0.0268 \left(\frac{Q}{l_w} \right) \left(\frac{1}{h_{ow}} \right) \quad (33)$$

但从平的堰板公式，我們可得，

$$\frac{Q}{l_w} = 35.7 (h_{ow})^{3/2} \quad (34)$$

合并方程式(33)及(34)可得，

$$u_w = 0.96 \sqrt{h_{ow}} \quad (35)$$

应用牛頓重力定律可得

$$\frac{h_f}{12} = \int_0^t g t dt = \frac{1}{2} g t^2 \quad (36)$$

其中自由降落的时间为

$$t = \sqrt{\frac{2h_f}{12g}} \quad (37)$$

最后，液体被抛过堰板的距离可以由合并方程式(35)及(37)而得到，

$$t_w = 12 u_w t = 12 (0.96 \sqrt{h_{ow}}) \sqrt{\frac{2h_f}{12g}} \quad (38)$$

簡化之

$$t_w = 0.8 \sqrt{h_{ow} h_f} \quad (39)$$

方程式(39)中的自由降落距离为

$$h_f = T + n_w - H_d \quad (40)$$

必須指出，上面的导演只适用于平的堰板，而且此处忽略了堰板收縮因素。

液 面 降 落

仅有的已經公布的关于計算液面降落的一般方法是由戴維斯⁽¹⁰⁾所創造的。他的方法是以流体力学的基本分析輔以实验数据而得出的，根据他的方法，液面降落(未校正蒸汽負荷之影响)用下式計算

$$\sqrt{\Delta'} \left\{ \Delta' \left[3 \left(\frac{N_r}{2} - 1 \right) + \frac{2}{1 + \frac{1}{4} \beta^2} \right] + 3N_r \left[h_{10} + S(\alpha - 1) \right] \right\}$$