

L角钢挡板塔盘的凉水塔热模试验

林新波

(化工与生化工程系)

摘要 本实验表明:在筛板上呈泡沫状态,在挡板上呈喷射状态,有一300—350mm左右细雾滴密集区,是适宜的流体力学操作工况,也是凉水塔适宜的传热传质操作工况,其传热传质效果很好,文中提出了板效率和体积传质系数关联式。

关键词 凉水塔, 塔板, 热质传递

0 前言

文[1—3]讨论了在基板较大开孔率筛板上高度140,160mm处加一L角钢挡板组成的L角钢挡板塔盘,在600×300mm矩形塔用空气水物系进行流体力学试验研究^[1,2]。在 $\phi 219 \times 8$ mm的热模塔内进行了甲醇-水、乙醇-水、环己烷-正庚烷物系的精馏热模试验^[3]。在筛板上呈泡沫状态,挡板上呈喷射状态,有一高度约300—350mm细雾滴密集区,充分利用分离空间,其汽液两相接触表面积大而又不断更新,是适宜的流体力学操作工况,也是适宜的传质操作工况,其传质效果很好。该塔盘具有生产能力大、压降小、结构简单、加工容易、安装方便的特点。当板间距 $H_T = 0.5$ m时,其空速可高达2.5—3 m/s左右,每块塔盘压降为400—1000Pa左右,弹性2以上。在全回流条件下空速动能因子 $F_s = 2—3.5$ 时冒夫里板效率 $E_{MV} = 0.55—0.98$,是一可推广应用的新塔型。

随着工业冷却水的发展需要,凉水塔也由各种木制填料、金属网格等发展成现在的窄、宽水泥板条,钢丝网水泥格网板,塑料点波、斜波等水膜式空气水直接接触的凉水塔。寻找高效的凉水塔对水的循环利用、节能有很大的现实意义。为了扩大L角钢挡板塔盘在工业上的应用范围,将进行该型凉水塔热水冷却的热模试验研究。

1 实验装置流程及实验条件

该600×300mm矩形热模塔内装三块L角钢挡板塔盘,其主要尺寸如文[2]所述。其实验装置流程如图1所示。

实验条件:有效空塔气速1.5—3.2 m/s;水的液流强度($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)为15,10.8,7.6;

本文1989-08-31收到。

热水的入口温度40—55℃。

挡板在筛板上高度 $H=140\text{mm}$ ，板间距 $H_T=0.5\text{m}$ ，堰高 $h_w=50\text{mm}$ ，L角钢挡板的张角 $\theta=67^\circ$ ，缝宽 $B=17\text{mm}$ ，筛板孔径 $d_0=5\text{mm}$ ，开孔率 $\alpha=14.8\%$ 。

2 凉水塔的冷却原理与数学模型

凉水塔为热质同时进行的操作，其热水冷却的基本原理有二：一是空气水直接接触由水传递给空气的热量 Q_a ；二是由水汽化带至空气的热量 Q_p 致使水被冷却。热水温度可被冷却降至气温以下，空气的湿球温度为水冷却的极限。一般情况下欲提高蒸发效果，关键在水和空气的接触面积、接触时间、空气水的相对速度。L角钢挡板塔盘的适宜流体力学操作工况是实现这个目的有利条件。

凉水塔内第 n 块塔盘的物料衡算，如图2。

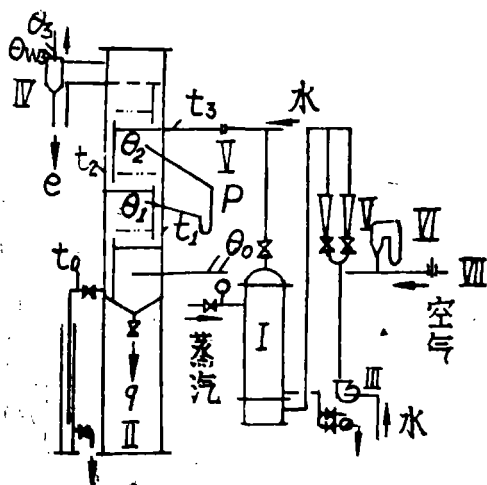


图1 实验装置流程

- I —— 水预热器； II —— 塔； III —— 水泵；
IV —— 旋风分离器； V —— 水孔板流量计；
VI —— 空气毕托管流量计； VII —— 风机；
 θ, θ_w —— 测干湿球温度计点；
 P —— 测塔盘压降

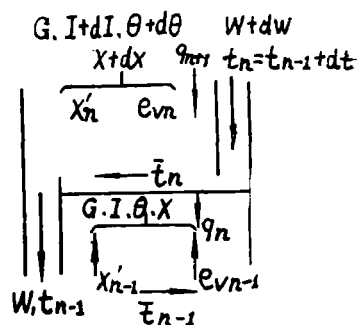


图2 凉水塔物流

$$W + dW - W = G[(X'_n + e_{v_n}) - (X'_{n-1} + e_{v_{n-1}})] - [(W + dW)q_{n+1} - Wq_n], \quad (1)$$

式中 $X = X' + e_v$ ，一般每块塔盘的漏液、雾沫夹带量相等 $q_{n+1} = q_n$ ， $e_{v_n} = e_{v_{n-1}}$ ， dWq_n 略。故 $dW = G(X_n - X_{n-1}) \doteq GdX$ 。

关于凉水塔的计算。Markel, Л. Д. Берман, Oluwasola Ogboja 等提出许多计算方法^[4-6]，现考虑到雾沫夹带影响的计算，其数学模型表示如下：

由空气水直接接触水传递给空气的热量为

$$Q_a = GC_H d\theta = \alpha_V dV(t - \theta),$$

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{\alpha_V}{GC_H}(t - \theta). \quad (2)$$

相邻两板空气湿含量的变化为水分从热水表面到空气传递的量和雾沫夹带净增量所致, 即

$$GdX = \beta_{VX}(X'' - X)dV + G(e_{yn-1} - e_{vn}), \quad (3a)$$

$$\frac{dX}{dV} = \frac{\beta_{VX}(X'' - X)}{G}. \quad (3b)$$

水热容量的减少等于空气中热含*量的增加

$$WCdt + dWCt = GdI. \quad (4)$$

空气中热含量的增加等于空气水直接接触水传给空气的热量 Q_a , 水分汽化传递到空气带走的热量 Q_b 和雾沫夹带的净显热之和.

$$GdI = \alpha_V dV(t - Q) + \beta_{VX} dV(X'' - X)(r_0 + C_W \bar{t}_n) + GC(e_{vn} \bar{t}_n - e_{vn-1} \bar{t}_{n-1}). \quad (5)$$

对空气水系统刘易斯数 $\alpha_V/\beta_{VX}C_H = 1$, 并将式(4)代入式(5)以及空气含 $I = C_H\theta + r_0X$, 和饱和空气含 $I'' = C_Ht + X''r_0$ 的关系式可得

$$WCdtK_1 = \beta_{VX}dV(I'' - I), \quad (6)$$

所以

$$V = \frac{K_1WC}{\beta_{VX}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{dt}{I'' - I} \text{ 或 } V = \frac{K_1WC}{\beta_{VX}} \frac{\Delta t}{(I'' - I)_m}. \quad (7)$$

再有

$$rt_{n-1} = r_0 + C_W \bar{t}_n - Ct_{n-1},$$

式中 K_1 表示为

$$K_1 = 1 + \{ [WC(t_n - t_{n-1}) - GC_H(\theta_n - \theta_{n-1})](Ct_{n-1} - C_W \bar{t}_n) - r_0 GC(e_{vn} \bar{t}_n - e_{vn-1} \bar{t}_{n-1}) \} / (rt_{n-1} WC(t_n - t_{n-1})). \quad (8a)$$

如水分汽化时带的显热不计以及雾沫夹带影响不考虑时可简化为

$$K_1 = 1 + \frac{Ct_{n-1}}{\gamma_{tn-1}} \left[1 - \frac{GC_H(\theta_n - \theta_{n-1})}{WC(t_n - t_{n-1})} \right]. \quad (8b)$$

式(6)也可表示为

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\alpha_V(t - \theta)}{K_1WC} + \frac{\beta_{VX}(X'' - X)r_0}{K_1WC}. \quad (9)$$

由式(6), (4)得

$$I_n = I_{n-1} + (1/G)(K_1WCdt + dWC_W \bar{t}_n + GC(e_{vn} \bar{t}_n - e_{vn-1} \bar{t}_{n-1})), \quad (10a)$$

如水分汽化时带的显热不计以及雾沫夹带影响不考虑时可简化为

$$I_n = I_{n-1} + \frac{1}{G} K_1 WCdt. \quad (10b)$$

对塔内气温、湿含量、水温、气体含的变化按式(2), (3b), (9), (10b)用逐板递推计算, 从被冷却后的水温 t_0 计算至热水入口温度 t_n 为止.

3 含温图与冒夫里板效率

在热含温度 $I-t$ 图上画出水温 t 与其饱和空气热含 I 间的平衡曲线 A_2B_2 如图3所示, 及凉

*本文所有“热含”字均以“含”字代用.

水塔的操作线 AB 。其空气进口端 A 由水冷却后出口温度 t_0 和空气进塔状态干球温度 θ_0 、湿球温度 θ_{w0} 对应的热含 I_0 确定,而空气出口端 B 由热水进塔温度 t_n 和空气出塔状态干球温度 θ_n 、湿球温度 θ_{wn} 对应的热含 I_n 确定。

冒夫里板效率 E_{MV} 可根据实验测定的进出各塔板的气液温度和空气含利用含温图在平衡线和操作线之间作梯级 $ACDEFGH$ 而求得

$$E_{MVn} = \frac{FG}{FH} = \frac{I_n - I_{n-1}}{I_{t''_{n-1}} - I_{n-1}} \quad (11)$$

4 实验数据的整理与讨论

凉水塔内气水温度分布实际测定表示于图4。

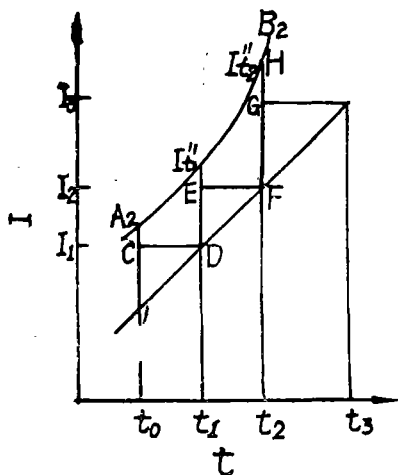


图3 $I-t$ 图解

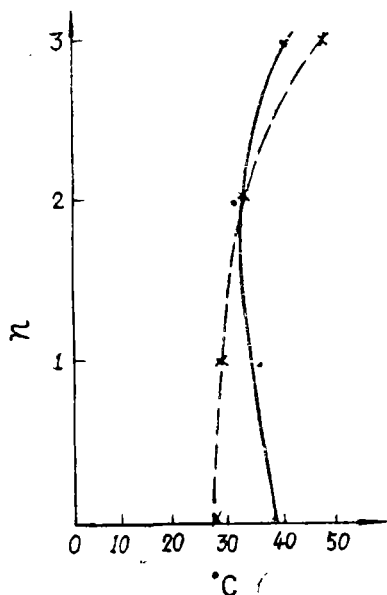


图4 塔内气水温度分布

L 角钢挡板塔盘(LBST)热水冷却试验的数据部分整理列于表1。

该塔盘热水被冷却的效果从表1可以看出:热水冷却后出塔温度 t_0 与空气的空速 u_a ,水量 W ,气体进塔温度 θ_0 (气温 θ_A),热水的进塔温度 t_3 有关,即

$$t_0 = [f_{uc}, W, \theta_0(\text{或}\theta_A), t_3].$$

在同一水量下热水冷却后出塔温度随风速增大而降低。在同一水量、风速条件下如气温低,空气进塔温度也低,则水冷却后出塔温度也低。在同一风速条件下水量增大则水的冷却后出塔温度变高。当热水的进塔温度较高时可获得较大的热水温降。水冷却后出塔温度在夏天一般比空气湿球温度高3—8℃。

表 1 L 角钢挡板塔盘凉水塔热水冷却热模试验

编 号	热 水		空 气		t_2	t_1	t_0	$\Delta t = \theta_{w2} - t_0$	UG	ΔP	中板 大气压 (10^5Pa)	$t_{\text{室}}$	t_{tw}					
	W (m^3/h)	W' ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)	t_s ($^{\circ}\text{C}$)	G (kg/h)										气液比 $m=G/W$	ρ (kg/m^3)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	θ_w ($^{\circ}\text{C}$)	
1	2.29	12.7	46.3	2158	0.94	1.19	29.9	21.2	38.2	32.2	29.2	17.1	35.4	3.17	637	1.0195	26.5	26
2	2.29	12.7	40.3	2151	0.94	1.19	29.9	21.2	35.6	32.1	28.8	14.2	33.8	3.16	637	1.0195	26.5	26
3	2.29	12.7	41.2	1935	0.84	1.19	30.6	21.6	35.8	32.6	29.2	12	33	2.84	539	1.0195	26.5	26
4	2.29	12.7	51.2	1698	0.74	1.16	31.5	22.2	41.8	35.9	33.4	17.8	42.6	2.56	441	1.0195	26.5	26
5	3.24	18	40.8	2025	0.62	1.18	31.8	22.5	36.9	34.1	31	9.8	34.5	3	627	1.017	28	27.5
6	3.24	18	42.9	1733	0.54	1.17	32.8	23.2	39	36.7	33	10	36.7	2.59	519	1.017	28	27.5
7	4.5	25	40.2	2110	0.49	1.18	33.5	26.3	37.6	35.1	32.6	7.6	35.6	3.13	676	1.017	28	27.5
8	4.5	25	41.2	1727	0.38	1.17	34	26.8	39.2	37.3	34	7.2	37.1	2.58	549	1.017	28	27.5

表 2 凉水塔性能的比较 [4, 5]

序 号	冷 却 塔 类 型	喷淋密度 L' , $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$	热水温差 Δt , $^{\circ}\text{C}$	热 负 荷 q kW/m^2	水 出 口 温 t_2 , $^{\circ}\text{C}$	空 气 速 度 U , m/s	备 注
1	大气式冷却塔 喷水式 点滴式	1.5—3 2—4	1—2 2—3	$\text{max} = 35—60$	$tw + 8—10$		(1)
2	双曲线风筒式 逆流、横流冷却塔	3—7	$> 6—7$ $\text{max} = 8—10$	> 90			(2)
3	机械通风冷却塔 喷水式 点滴式 水膜式 逆流式玻璃钢冷却塔 L角钢挡板塔盘	5—6 6—8 8—12 11—17 13—25	可达25°或更多 3—5 5—18	90—120 以上	$tw + 4—6$ 少数 $tw + 2—3$ $(tw + 3) — (tw + 6)$	$> 4—5$ — 23.5 1.6—3.2	(3)

- (1) 小型冷却塔;
- (2) $\Delta t > 6—7^{\circ}\text{C}$, 冷却幅高 $> 7—10^{\circ}\text{C}$, $tw < 25^{\circ}\text{C}$ 下采用较有利;
- (3) 适用于气温较高湿度较大地区及用于对冷却后温度及其稳定性要求严格的工艺条件.

与其它凉水塔性能的比较见表2,可看出L角钢挡板塔盘的水喷淋密度较大达 $25\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$,热水温降为 $5\sim 18^\circ\text{C}$,空塔气速 $1.6\sim 3.2\text{m/s}$,气液比为 $0.4\sim 0.94$,每块塔盘压降 $450\sim 700\text{Pa}$,冒夫里板效率 E_{MV} 在 $0.45\sim 0.96$,即水处理量较大,效果较好.

将L角钢挡板塔盘的冒夫里板效率 E_{MV} 测定的结果表示于图5,它与有效空塔气速动能因子 F_s ,液流强度 L 有关,经多元回归整理关联得到

$$E_{MV2} = 8.3 \times 10^{-4} F_s^{0.9} L^{0.6} \quad (12)$$

其相对误差在30%以内.

该塔盘用于凉水塔其体积传质系数可用式(6)计算

$$\beta V X = \frac{K_1 W C (t_n - t_{n-1})}{V \Delta I_m} \quad (13)$$

$$\Delta I_m = \frac{(I''_{in} - I_n) - (I''_{io} - I_0)}{t_n \frac{I''_{in} - I_n}{I''_{io} - I_0} - 1}$$

将测定的结果表示于图6,它与质量气速 \bar{u}_G ,液流强度 L 有关.经多元回归关联得到

$$\beta V \times 2 = 0.75 \bar{u}_G^{1.43} L^{0.88} \quad (14)$$

其相对误差在30%以内.

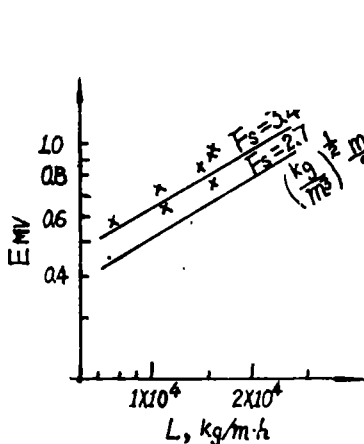


图5 E_{MV} 与 L 和 F_s 的关系

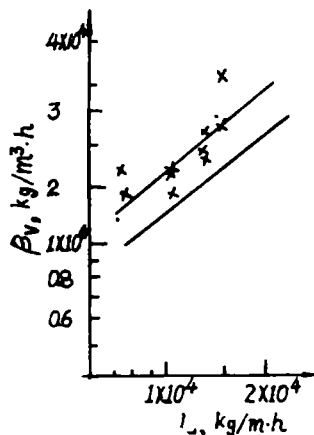


图6 $\beta V X$ 与 L 和 \bar{u}_G 的关系

该塔盘压降的实验结果表示于图7.

用空气将 46°C 的热水冷却至 30°C 左右,经三块L角钢挡板塔盘作凉水塔,气液比 0.94 ,即可达到其冷却效果.如用填料塔需用 4m 填料^[8],气液比在 0.64 .

5 结束语

(1) L角钢挡板塔盘用作凉水塔热水冷却试验表明:在基板上呈泡沫状态挡板上呈喷射状况是适宜的流体力学操作工况,也是适宜的传热传质操作工况.其水处理量较大,热水温降较大,效果较好.可在工业上推

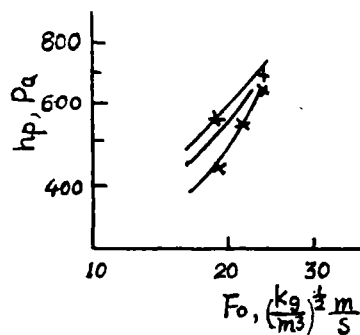


图7 h_p 与 F_o 和 L 的关系

广应用,也可在饱和热水塔上应用。

(2) 提出冒夫里板效率 E_{MV} , 体积传质系数 β_{VX} 的关联式可供设计用。

(3) 如需较低塔盘压降, 可采用L角钢挡板角钢塔盘, 基板角钢缝宽 $B=12\text{mm}$, 开孔率20%的角钢板, 挡板高度 $H=140\text{mm}$, 溢流堰高 $h_n=30\text{mm}$, 塔盘压降在280—400Pa左右, 传热传质效果好。将另文阐述。

符 号 说 明

C ——水的比热, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$; C_H ——湿空气的比热, $\text{kJ/kg干}\cdot\text{K}$; C_w ——水蒸汽的比热, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$; E_{MV} ——冒夫里板效率; e_v ——雾沫夹带量, kg液/kg干 ; F_s ——有效空塔气速动能因子, $F_s = \sqrt{\rho_G} u_G, (\text{kg/m}^3)^{1/2} \text{m/s}$; G ——干空气量, kg干/h ; I ——湿空气的热含量, kJ/kg干 ; I'' ——水温度 t 对应的饱和空气热含量, kJ/kg干 ; K_1 ——系数; L ——水的液流强度, $\text{kg/m平均流道宽度}\cdot\text{h}$; t ——水温, K ; u_G ——有效空塔气速, m/s ; \bar{u}_G ——质量气速, m/s ; V ——每块塔盘上的工作体积, $\text{m}^3/\text{每块塔盘}$; W ——水量, kg/h ; X ——计及雾沫夹带的空气湿含量, kg水/kg干 ; X' ——不计及雾沫夹带的空气湿含量, kg水/kg干 ; θ ——空气温度, K ; θ_w ——空气湿球温度, K ; α_v ——体积给热系数, $\text{kJ/m}^3\cdot\text{h}$; β_{VX} ——以湿含量为推动力的体积传质系数, $\text{kg/m}^3\cdot\text{h}$; r_0 —— 0°C 时水的汽化潜热, kJ/kg ; $r_{t_{n-1}}$ —— t_{n-1} 时水的汽化潜热, kJ/kg ; \bar{t} ——指塔板上水的平均温度, K ; ρ_G ——空气密度, kg/m^3 ; 下标 n —指第 n 块板数。

参 考 文 献

- [1] 林新波等, 不等边角钢挡板塔盘的流体力学, 安徽化工, 37, 4 (1984).
- [2] 林新波等, L角钢挡板塔盘的热模精馏试验, 安徽化工, 38, 2 (1985).
- [3] 林新波, L角钢挡板塔盘的精馏塔板效率, 福建化工, 1 (1987).
- [4] 汪大翥, 旋流塔板的板效率, 化工学报, 2 (1983), 212—220.
- [5] 格拉特柯夫, B. A., 等, 机械通风冷却塔, 化学工业出版社, (1981).
- [6] 李德兴, 冷却塔, 上海科学技术出版社, (1981).
- [7] 西德工程师协会工艺与化学工程学会编, 传热手册, 化学工业出版社, (1983).
- [8] 陈敏恒, 化工原理(下册), 化学工业出版社, (1986).
- [9] Ogboja, O., The chem. Eng. J., 35, 1 (1987), 43—50.

Heat Model Experiment with L Bar Baffle Tray as Cooling Tower

Lin Sinpo

(*Department of Chemical and Biochemical Engineering*)

Abstract A heat model experiment was carried out with L-bar baffle tray as cooling tower. The flow region shows a foaming state sieve and a spraying state. L bar baffle tray on which fine liquid droplets of 300—350 μm concentrated. This implies a proper hydrodynamic working condition. This also implies a proper cooling tower which has an efficient heat and mass transfer. The relationship between tray efficiency and overall gas-phase mass transfer coefficient is presented.

Key words cooling water tower, tray, heat and mass transfer