

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-899-09

带填料型闭式冷却塔热力计算方法研讨

祝儒修

(埃希玛(中国)能源技术有限公司 南京 211300)

【摘要】 市面上常见的带填料型闭式冷却塔目前研究较少,结合传统逆流闭式冷却塔和横流开式冷却塔的计算方法,建立了一种带填料型闭式冷却塔热交换模型,将盘管部分喷淋水与填料部分喷淋水分开计算热平衡,以求得从盘管段流出的喷淋水温,从而试算出所需盘管数量及填料数量。所得结果与 AXIMA 现有标准塔型相比,误差在 10%~30%,分析原因可能是计算中所选用的经验公式及盘管、填料的布置方式有所差异,证明此种计算方法基本可行,只需根据相应设计情况选用合适的经验公式及布置方式,可用于冷却塔的选型及校核计算。

【关键词】 闭式冷却塔;热力计算;设计计算

中图分类号 TU831.4 文献标识码 B

Discussion on Thermal Calculation Method of Closed Cooling Tower with Packing

Zhu Ruxiu

(Axima China Energy Technology Limited, Nanjing, 211300)

【Abstract】 There is little research on the common closed cooling towers with packing on the market. This article combines the calculation methods of traditional counter-flow closed cooling towers and cross-flow open cooling towers to establish a heat exchange model with packed closed cooling towers. The spray water of the coil part and the spray water of the filler are calculated separately to calculate the heat balance to obtain the temperature of the spray water flowing from the coil section, so as to try to calculate the required number of coils and the number of fillers. Compared with the existing standard tower type, the obtained result has an error of no more than 10%, and can be used for the design and check calculation of this type of tower.

【Keywords】 closed cooling tower; heat and mass exchange; design calculation

作者(通讯作者)简介:祝儒修(1994.7-),男,助理工程师,E-mail:zhurx@aximachina.cn

收稿日期:2021-01-05

0 前言

循环冷却水广泛应用于石油、化工、电力、食品等领域,在企业用水量中占比超过 50%。研究冷却塔换热机理,从而提高冷却塔的换热性能,可以极大减少冷却水使用量,对企业节省成本、提高效率具有重要意义。但现有对冷却塔的研究大部分集中在开式冷却塔和逆流闭式冷却塔上,对于目前市场上常见的带填料型闭式冷却塔研究较少,尤其对于这种塔型的设计计算,缺少相应文献参考。

本文从能量守恒角度建立冷却塔换热计算模型,探讨一种针对带填料型闭式冷却塔的热力计算

方法,并提出一种计算机编程逻辑,以期在日常设计工作中,较为精确地计算给定设计任务下所需的盘管数量及填料数量。

1 带填料型闭式冷却塔工作原理

带填料型闭式冷却塔可以看做换热盘管与开式冷却塔的組合。

在换热盘管段,如图 1 所示,冷却水携带的热量通过换热盘管的管壁传递给喷淋水,喷淋水再通过蒸发和对流,将这部分热量传递给流经冷却塔的空气。

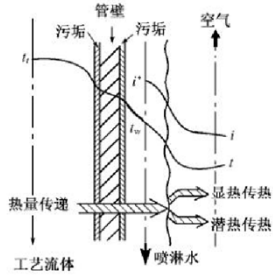


图1 盘管段换热情况

Fig.1 Heat transfer of coil section

填料段是典型的开式冷却塔换热过程。如图2所示，当空气直接与水接触时，在接触的界面上存在一个饱和空气边界层，其温度等于水膜表面的温度。空气与水之间的热质交换通过边界层内饱和空气和远离边界层的空气之间的温差和压差进行。显热交换的推动力为温差，潜热交换的推动力为压差，二者共同作用，使气水之间进行热量交换，其代数和即为总换热量，总推动力即为焓差。

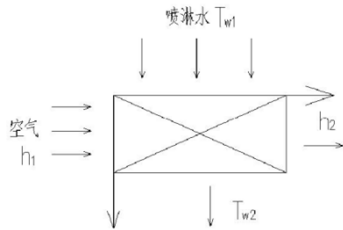


图2 填料段换热情况

Fig.2 Heat transfer of packing section

2 空气物性参数计算

在进行热质交换分析时，需用到各种空气物性参数，按照以下公式进行计算^[1]：

(1) 饱和水蒸气压力按下式计算：

$$\lg p'' = 2.0057173 - 3.142305 \left(\frac{10^3}{273.15 + t} - \frac{10^3}{373.15} \right) + 8.2 \lg \frac{373.15}{273.15 + t} - 0.0024804(100 - t) \quad (1)$$

式中： p'' 为饱和水蒸气压力，kPa； t 为温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 空气相对湿度按下式计算：

$$\varphi = \frac{p_{\tau}'' - 0.000662p(\theta - \tau)}{p_{\theta}''} \quad (2)$$

式中： φ 为空气相对湿度； θ 为空气干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； τ 为空气湿球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； p 为大气压力，kPa；

p_{θ}'' 为空气温度等于 $\theta^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水蒸气分压力，kPa； p_{τ}'' 为空气温度等于 $\tau^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水蒸气分压力，kPa。

(3) 空气含湿量按下式计算：

$$x = 0.622 \frac{\varphi p_{\theta}''}{p - \varphi p_{\theta}''} \quad (3)$$

式中： x 为空气含湿量，kg/kg 干空气。

(4) 湿空气比焓按下式计算：

$$h = 1.005\theta + x(2500.8 + 1846\theta) \quad (4)$$

式中： h 为湿空气比焓，kJ/kg 干空气。

(5) 饱和空气比焓按下式计算：

$$h'' = 1.005t + 0.622 \frac{p''}{p - p''} (2500.8 + 1846t) \quad (5)$$

式中： h'' 为饱和空气比焓，即当空气温度为水蒸气分压达到饱和状态温度 t 时的比焓，kJ/kg 干空气。

(6) 湿空气密度应按下式计算：

$$\rho = \rho_d + \rho_s = \frac{(p - \varphi p_{\theta}'') \times 10^3}{287.04(273.15 + \theta)} + \frac{\varphi p_{\theta}'' \times 10^3}{416.50(273.15 + \theta)} \quad (6)$$

式中： ρ 为湿空气密度，kg/m³； ρ_d 为湿空气干空气部分的密度，kg/m³； ρ_s 为湿空气水蒸气部分的密度，kg/m³。

3 冷却塔热质平衡模型的建立

对常规逆流闭式冷却塔而言，如图3所示，换热过程仅存在于盘管段，此时盘管部分相当于开式冷却塔中的“填料”，建立换热模型时，从盘管上方至盘管下方为一完整的换热周期，喷淋水循环，即有 $T_{pi} = T_{po}$ 。

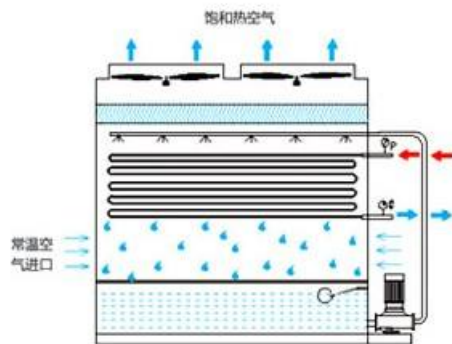


图3 常规逆流冷却塔

Fig.3 Conventional countercurrent cooling tower

对带填料的闭式塔而言，换热过程既有盘管段的热质交换，也有填料段的热质交换，如图 4 所示。将盘管段和填料段分开建立换热模型，此时，从盘管上方进入，盘管下方流出的喷淋水温不再相等，即有 $T_{pi} \neq T_{po}$ 。而对于填料段，喷淋水温从 T_{po} 降低到 T_{pi} ，下落到集水盘中，集水盘中的喷淋水再通水泵重新进入盘管上方进行循环，对填料段可按照开式冷却塔的

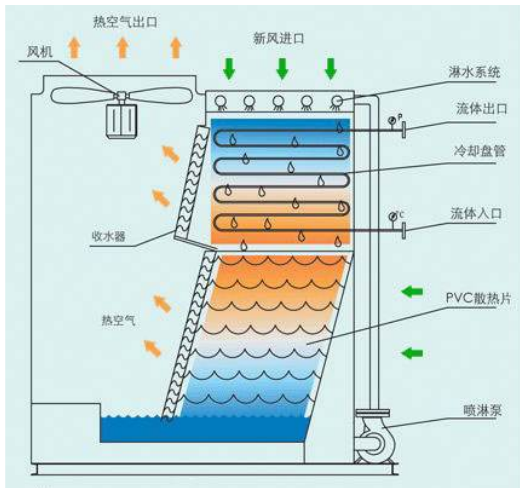


图 4 带填料型闭式冷却塔

Fig.4 Closed cooling tower with packing

3.1 盘管段热质平衡分析

为了对盘管段换热过程进行分析，取盘管微元段，分别从冷却水侧、喷淋水侧和空气侧建立微分方程，为方便计算，做出以下假设^[2]：

- (1) 计算中采用平均大气压力值，所有物性参数为常量，不随空气温度变化；
- (2) 水膜表面和内部温度一致，即不考虑水侧热阻；
- (3) 计算中，由于蒸发量很小，忽略蒸发及飘水带来的热损失；
- (4) 在水温变化不大的范围内，可将饱和水蒸气分压力、饱和空气焓看做水温的一次函数；
- (5) 进入封闭式冷却塔的空气质量高于理论空气需要量；
- (6) 忽略辐射传热；
- (7) 按照沿 Z 轴向下为正向建立微分方程式，冷却水温、喷淋水温及空气焓只沿一个方向变化。

盘管段换热过程中，热量从冷却水经过换热管

壁传递给喷淋水，再由喷淋水传递给空气。从喷淋水向空气的传热依靠水的蒸发和对流两种形式进行。取盘管段微元高度换热面积 df 分析，其计算简图如图 5 所示^[3]。

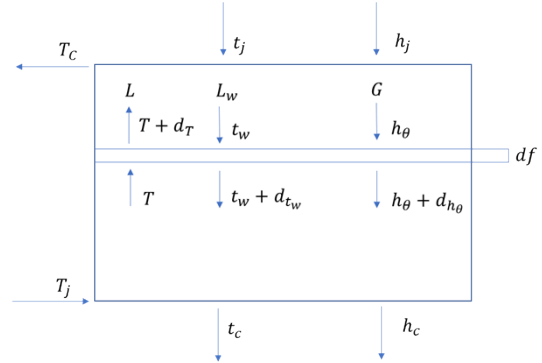


图 5 逆流闭式塔计算简图

Fig.5 Calculation diagram of countercurrent closed tower

冷却水失去的热量为：

$$LgC_LgT = -K_o g(T - T_p)gdf \tag{7}$$

式中： df 为微元高度段的传热面积， m^2 ； L 为冷却水质量流量， kg/s ； C_L 为冷却水的比热， $kJ/kg \cdot ^\circ C$ ； K_o 为以管外表面为基准，从冷却盘管内到喷淋水的传热系数， $kW/m^2 \cdot ^\circ C$ ； T_p 为喷淋水的温度， $^\circ C$ ； T 为冷却水的温度， $^\circ C$ 。

喷淋水得到的热量为：

$$L_p g C_p g T_p = -K_m g(h_p - h)gdf + K_o g(T - T_p)gdf \tag{8}$$

式中： L_p 为喷淋水流量， kg/s ； C_p 为喷淋水比热， $kJ/kg \cdot ^\circ C$ ； h_p 为喷淋水温度对应的饱和湿空气的焓， kJ/kg ； h 为空气水界面上空气的焓， kJ/kg ； K_m 为换热盘管表面的散质系数， $kg/m^2 \cdot s$ 。

空气得到的热量为：

$$G_g g h = -K_m g(h_p - h)gdf \tag{9}$$

式中： G_g 为盘管段空气流量， kg/s 。

将上式整理后，得：

$$\frac{dT}{df} = \frac{K_o}{LgC_L} g(T_p - T) \tag{10}$$

$$\frac{dT_p}{df} = \frac{K_m}{L_p g C_p} g(h - h_p) - \frac{K_o}{L_p g C_p} (T_p - T) \tag{11}$$

$$\frac{dh}{df} = \frac{K_m}{G_g} g(h - h_p) \tag{12}$$

h_p 是与喷淋水温度相关的函数, 即

$$h_p = f(T_p) \quad (13)$$

喷淋水在塔中循环, 对带填料的闭式塔而言, 冷却塔顶部的喷淋水温度 T_{pj} 不等于经过盘管流出的喷淋水温度 T_{pc} , 即

$$T_{pj} \neq T_{pc} \quad (14)$$

为了求解微分方程组, 令:

$$a_1 = \frac{K_o}{L \mathcal{G}_L}, \quad a_2 = \frac{K_m}{L_p \mathcal{G}_p}, \quad a_3 = \frac{K_o}{L_p \mathcal{G}_p}, \quad a_4 = \frac{K_m}{G_s}$$

设

$$Y = T_p - T \quad (15)$$

$$Z = h - h_p \quad (16)$$

近似将 h_p 看成是喷淋水温度 T_p 的一次函数,

即:

$$\frac{dh_p}{df} = m \quad (17)$$

上式可变换为:

$$\frac{dh_p}{df} = m \frac{dT_p}{df} \quad (18)$$

将式 (15)、(16) 代入前式后得:

$$\frac{dY}{df} + b_1 Y + b_2 = 0 \quad (19)$$

$$\frac{dZ}{df} + b_3 Y + b_4 Z = 0 \quad (20)$$

式中, $b_1 = a_1 + a_3$, $b_2 = -a_2$, $b_3 = -ma_3$,

$$b_4 = ma_2 - a_4.$$

解方程组可得:

$$Y = M_1 e^{\psi_1 f} + M_2 e^{\psi_2 f} \quad (21)$$

$$Z = \frac{-M_1(\psi_1 + b_1)}{b_2} \mathcal{G}^{\psi_1 f} - \frac{-M_2(\psi_2 + b_1)}{b_2} \mathcal{G}^{\psi_2 f} \quad (22)$$

式中, ψ_1 、 ψ_2 为方程 $\psi^2 + (b_1 + b_4)\psi + (b_1 b_4 - b_2 b_3) = 0$ 的根。

在封闭式冷却塔的上端 $f = 0$ 处, 边界条件为:

$$f = 0; \quad T = T_c; \quad T_p = T_{pj}; \quad h = h_j; \quad h_p = h_{pj}$$

代入式 (21)、(22) 后得:

$$Y_o = (T_{pj} - T_j) = M_1 + M_2 \quad (23)$$

$$Z_o = (h_j - h_{pj}) = \frac{M_1(\psi_1 + b_1)}{b_2} - \frac{M_2(\psi_2 + b_1)}{b_2} \quad (24)$$

在封闭式冷却塔的下部 $f = F$ 处, 边界条件为: $f = F$; $T = T_j$; $T_p = T_{pc}$; $h = h_c$; $h_p = h_{pc}$ 代入式 (21)、(22) 后得:

$$Y_F = (T_{pc} - T_o) = M_1 e^{\psi_1 F} + M_2 e^{\psi_2 F} \quad (25)$$

$$Z_F = (h_j - h_{pc}) = \frac{M_1(\psi_1 + b_1)}{b_2} \mathcal{G}^{\psi_1 F} - \frac{M_2(\psi_2 + b_1)}{b_2} \mathcal{G}^{\psi_2 F} \quad (26)$$

联立式 (23)、(25) 得:

$$M_1 = \frac{(T_{pc} - T_j) - (T_{pj} - T_c) e^{\psi_2 F}}{e^{\psi_1 F} - e^{\psi_2 F}} \quad (27)$$

$$M_2 = \frac{(T_{pc} - T_j) - (T_{pj} - T_c) e^{\psi_1 F}}{e^{\psi_2 F} - e^{\psi_1 F}} \quad (28)$$

联立式 (24)、(26) 得:

$$M_1 = \left(\frac{-b_2}{\psi_1 + b_1} \right) \mathcal{G} \left[\frac{(h_j - h_{pc}) - (h_c - h_{pj}) \mathcal{G}^{\psi_2 F}}{e^{\psi_1 F} - e^{\psi_2 F}} \right] \quad (29)$$

$$M_2 = \left(\frac{-b_2}{\psi_2 + b_1} \right) \mathcal{G} \left[\frac{(h_j - h_{pc}) - (h_c - h_{pj}) \mathcal{G}^{\psi_1 F}}{e^{\psi_2 F} - e^{\psi_1 F}} \right] \quad (30)$$

联立式 (27)、(29) 得:

$$T_c = T_{pc} - \frac{b_2}{\psi_1 + b_1} (h_c - h_j + h_{pc} - h_{pj}) - \frac{T_{pj} - T_j}{e^{\psi_2 F}} \quad (31)$$

联立式 (28)、(30) 得:

$$T_c = T_{pc} - \frac{b_2}{\psi_2 + b_1} (h_c - h_j + h_{pc} - h_{pj}) - \frac{T_{pj} - T_j}{e^{\psi_1 F}} \quad (32)$$

或者:

$$F = \frac{1}{\psi_2} \ln \left[\frac{b_2 (h_j - h_{pc}) + (\psi_1 + b_1) (T_{pc} - T_c)}{b_2 (h_c - h_{pj}) + (\psi_1 + b_1) (T_{pj} - T_j)} \right] \quad (33)$$

$$F = \frac{1}{\psi_1} \ln \left[\frac{b_2(h_j - h_{pc}) + (\psi_2 + b_1)(T_{pc} - T_c)}{b_2(h_c - h_{pj}) + (\psi_2 + b_1)(T_{pj} - T_j)} \right] \quad (34)$$

当已知盘管面积时, 可以联立式 (31) 及式 (32) 求得冷却水出口温度, 其中, 喷淋水进水温度已知, 喷淋水出口温度可根据能量守恒关系求得:

$$L g C_L q(T_c - T_j) = G g (h_c - h_j) + L_p g C_p q(T_{pc} - T_{pj}) \quad (35)$$

即盘管段喷淋水温升及空气焓增吸收的热量之和等于盘管内冷却水放出的热量, 上述计算过程中, 喷淋水进出口水温与冷却水出口水温互相影响, 计算时需通过试算, 得到使等式成立的喷淋水进出口温度, 此过程通过计算机进行, 将使计算效率大大提高。

3.2 填料段热质平衡分析

从盘管段流出的喷淋水将下落到填料区, 经过与填料区空气的热质交换, 喷淋水温由 T_{pc} 降低到 T_{pj} , 再通过喷淋水泵重新进入盘管上方进行循环。此过程可以看做典型开式冷却塔的换热过程, 即进水温度 T_{pc} , 出口温度 T_{pj} , 按照开式冷却塔热力计算方法进行分析。

本文所分析的闭式冷却塔为混流复合型, 填料区为侧面进风, 即按照横流开式冷却塔进行计算, 如图 6 所示, 取填料区传热微元进行分析^[5]。

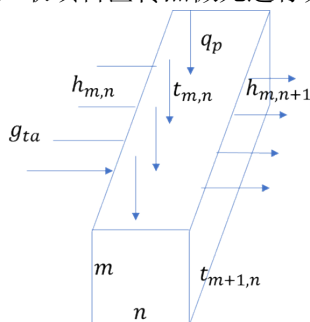


图 6 填料区传热微元

Fig.6 Heat transfer element in the packing area

沿填料高度向下方向, 水温不断降低, 沿填料进深方向, 空气不断升温, 增湿, 假设在填料宽度方向空气和水的状态参数不发生变化, 则有以下微分方程组:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{-K \beta_{xv}}{C_p q_p} (h_p - h) \quad (36)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\beta_{xv}}{g_{ta}} (h_p - h) \quad (37)$$

采用 GB/T 50392-2016 中平均焓差法计算, 有^[1]:

$$\Omega_h = \frac{K \beta_{xv} V}{L_p} = \int_0^x \int_0^H \frac{-C_p}{h_p - h} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) dx dz \quad (38)$$

式中: Ω_h 为横流开式塔冷却数 (无量纲);

β_{xv}

为容积散质系数, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$; K 为考虑蒸发水量带走热量系数 (小于 1, 无量纲); V 为填料淋水体积, m^3 ; x 为从进风口算起淋水填料深度, m ; H 为淋水填料高度, m 。

横流冷却塔的冷却数计算相对复杂, 有以下几种方法可以选用:

(1) 修正系数法

修正系数法是可以根据逆流式冷却塔冷却数求得横流塔冷却数的方法, 其中逆流式冷却塔的冷却数可根据切比雪夫积分法或辛普逊积分法算出:

$$\Omega_h = \frac{\Omega_n}{F_0} \quad (39)$$

$$F_0 = 1 - 0.106 \left(1 - \frac{h_2'' - h_2}{h_1'' - h_1} \right)^{3.5} \quad (40)$$

式中: Ω_n 为按逆流冷却塔冷却数计算公式得出的冷却数; F_0 为修正系数。

(2) 别尔曼近似求解法

此种方法可以手算计算横流塔的冷却数, 工程上应用较为方便:

$$\int_0^x \int_0^H \frac{-C_p}{h_p - h} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) dx dz = \frac{\Delta t C_p}{\Delta h_m} \quad (41)$$

式中: Δh_m 为平均焓差, kJ/kg 。

$$\Delta h_m = x_s (h_1'' - \delta h'' - h_1) \quad (42)$$

$$\delta h'' = \frac{h_1'' - h_2'' - 2h_m''}{4} \quad (43)$$

令

$$\eta = \frac{h_1'' - h_2''}{h_1'' - \delta h'' - h_1} \quad (44)$$

$$\xi = \frac{h_2 - h_1}{h_1'' - \delta h'' - h_1} \quad (45)$$

根据 η 、 ξ 的交点从 x_s 计算图中找到对应的 x_s 值，带入式 (41) 求出 Δh_m ，从而计算出横流冷却塔的冷却数。

(3) 差分法

$$\frac{C_p}{K} \frac{\partial t}{\partial z} H = -\lambda \frac{\partial h}{\partial x} x = -\Omega_h (h'' - h) \quad (46)$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta z} \quad (47)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{m,n+1} - h_{m,n}}{\Delta x} \quad (48)$$

差分法是将填料沿深度方向均分成 M 份，沿高度方向均分成 N 份，位置以 (m, n) 表示，对于所有的进风边层单元，空气状态参数均为已知，可知其空气焓，对于所有的进水顶层单元，水温均为已知，从而可知其饱和空气焓。

当边界条件以填料顶层计算时， $t_{m,1} = t_1$ ， $h_{1,1}'' = h_1''$ ， $h_{1,1}$ 按下式计算：

$$h_{1,1} = \frac{h_1'' \left\{ \exp \left[\frac{\Omega_h'}{\lambda M} (i-1) \right] - 1 \right\}}{\exp \left[\frac{\Omega_h'}{\lambda M} (i-1) \right]} \quad (49)$$

$$t_{m+1,n+1} = t_{m,n} - \frac{\left\{ t_{m,n+1} - t_{m+1,n} + R_1 [2h_{m,n}'' + h_{m,n+1}'' + h_{m+1,n}'' - 2h_{m,n} - 2h_{m,n+1}] \right\}}{[1 + R_1 C_{s(m,n)}]} \quad (56)$$

式中：

$$R_1 = \frac{K \Omega_h' \lambda M}{C_p N (2 \lambda M + \Omega_h')} \quad (57)$$

$$C_{s(m,n)} = \frac{h_{m+1,n+1}'' - h_{m,n}''}{t_{m+1,n+1} - t_{m,n}} \quad (58)$$

求 $h_{m+1,n+1}''$ 时按下式计算：

$$h_{m+1,n+1}'' = h_{m,n+1}'' - h_{m+1,n}'' + h_{m,n}'' - \frac{C_p N}{K \lambda M} [t_{m+1,n+1} - t_{m+1,n} + t_{m,n+1} - t_{m,n}] \quad (59)$$

求 t_2 时按下式计算：

当边界条件以进风面计算时， $h_{1,n} = h_1$ ， $t_{1,n+1}$ 按下式计算：

$$t_{1,n+1} = t_{1,n} + \frac{(K_0 + 2K_1 + 2K_2 + K_3)}{6} \quad (50)$$

式中， K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 分别按下式计算：

$$K_0 = R_3 [h_{1,n}'' - h_1] \quad (51)$$

$$K_1 = R_3 [h_{K_0}'' - h_1] \quad (52)$$

$$K_2 = R_3 [h_{K_1}'' - h_1] \quad (53)$$

$$K_3 = R_3 [h_{K_2}'' - h_1] \quad (54)$$

$$R_3 = \frac{-K \Omega_h'}{C_p N} \quad (55)$$

式中： h_{K_0}'' 、 h_{K_1}'' 、 h_{K_2}'' 为水温； $t = t_{1,n} + K_0 / 2$ ， $t = t_{1,n} + K_1 / 2$ ， $t = t_{1,n} + K_2$ 时的饱和空气焓，kJ/kg。

求 $t = t_{m+1,n+1}$ 时按下式计算：

$$t_2 = \frac{1}{M} \left[\frac{t_{1,N+1}}{2} + \frac{t_{M+1,N+1}}{2} + \sum_{m=2}^M t_{m,N+1} \right] \quad (60)$$

上述三种横流塔冷却数的计算方法中，差分法在步长极小时最接近实际换热过程，计算结果最精确，但由于计算量大，只能依靠计算机进行。工程上常用修正系数法和别尔曼近似求解法进行计算，效率较高。

根据喷淋水流量和进出水温，可以计算出填料区冷却数，根据不同填料特性，利用试算法或作图法求取热力工作点，从而确定填料段风量、填料体积等参数。

3.3 方程式中各项系数的计算

在上述方程求解过程中，需要明确各式中所涉及到的系数值具体是多少。在盘管段，首先要获得

换热盘管内高温流体至管外喷淋水膜的总表面传热系数 K_o , 换热管填料表面散质系数 K_m 等。在填料段, 需获得填料的容积散质系数 β_{sv} 等。

目前尚未有通用的公式来准确计算冷却塔换热过程中各处的换热系数和传质系数, 工程上大部分应用经验公式计算或通过实验方法总结。本节列举出一些常用的经验公式, 以便在求解冷却塔换热模型时使用。

3.3.1 管内冷却水至管外喷淋水总表面传热系数 K_o

管内冷却水至管外喷淋水的总表面传热系数可按式(61)计算^[6]:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{h_i} \frac{D_o}{D_m} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{D_o}{D_m} + r_i \frac{D_o}{D_i} + r_o + \frac{1}{h_w} \quad (61)$$

式中: h_i 为管内高温流体流动的对流换热系数, $W/m^2 \cdot ^\circ C$; D_o 为换热管外径, m ; D_i 为换热管内径, m ; D_m 为对数平均管径, $D_m = (D_o - D_i) / \ln(D_o / D_i)$, m ; δ 为换热管壁厚, m ; λ 为与换热管材料相关的金属导热系数, $W/m \cdot ^\circ C$; r_i 为管内污垢热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; r_o 为管外污垢热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 。

管内高温流体流动的对流换热系数可按式(62)计算^[7]:

$$h_i = \frac{(0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.4}) \lambda}{D_o} \quad (62)$$

管外喷淋水膜到管外壁的对流换热系数有以下经验公式可以计算^[8]:

$$h_w = 2013 \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (63)$$

适用范围:

$$0.195 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq \frac{\Gamma}{D_o} \leq 0.556 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}),$$

$$12.7 \text{mm} \leq D_o \leq 40 \text{mm}.$$

或者有^[9]:

$$h_w = 980(1 + 0.016 t_w) \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (64)$$

适用范围:

$$1.398 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq \frac{\Gamma}{D_o} \leq 3.056 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}),$$

$$0.694 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq G_{\max} \leq 5.278 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}).$$

其中, t_w 为喷淋水液膜温度, 取管内流体和喷淋水温度平均值; Γ 为单位宽度喷淋水流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; L_w 为喷淋水质量流量, kg/s 。当换热管错列排布时:

$$\Gamma = \frac{L_w}{2N_t L}$$

式中, N_t 为管排平面内管根数, L 为每根换热管管长。

3.3.2 管外喷淋水向空气的总传质系数 K_m ^[10]

$$K_m = 1.006 \times 10^{-7} (R_{ea})^{0.9} (R_{ep})^{0.15} \times (D_o)^{-2.6} \left(\frac{P_t}{d_o} \right)^{-1} \quad (65)$$

式中:

$$R_{ep} = \frac{4L_{ws}}{\mu_w}, \quad R_{ea} = \frac{G_{\max} D_o}{\mu_a}$$

3.3.3 其他研究人员总结经验公式

$$h_w = 704(1.39 + 0.022 t_w) \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (66) \quad [11]$$

$$K_m = 0.065 (G_a)^{0.773} \quad (67)$$

$$D_o = 10 \text{mm}, \quad N_t = 19$$

$$h_w = 704(1.39 + 0.022 t_w) \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (68) \quad [12]$$

$$K_m = 0.049 (G_a)^{0.905} \quad (69)$$

$$D_o = 19 \text{mm}$$

$$h_w = 990 \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{0.46} \quad (70) \quad [13]$$

$$K_m = 0.076 (G_a)^{0.8} \quad (71)$$

$$D_o = 16 \text{mm}$$

$$h_w = 470 (G_a)^{0.1} \left(\frac{\Gamma}{D_o} \right)^{0.3} t_w^{0.3} \quad (72) \quad [14]$$

$$K_m = 0.038 (G_a)^{0.73} (G_w)^{0.3} \quad (73)$$

$$D_o = 38.1 \text{mm}, \quad N_t = 15$$

4 计算程序框图

根据上述计算方法,可用计算机编程进行冷却塔设计及校核计算。将冷却水进水温度、出水温度、湿球温度、风量等参数输入,再输入预设盘管参数(盘管管径、排数、弯头数),计算出传热及传质

系数,通过试算,求得盘管段和填料段喷淋水出口温度,再核验二者是否满足热量守恒关系,从而求得冷却水出口温度、盘管参数等近似解,程序框图如图 7 所示。

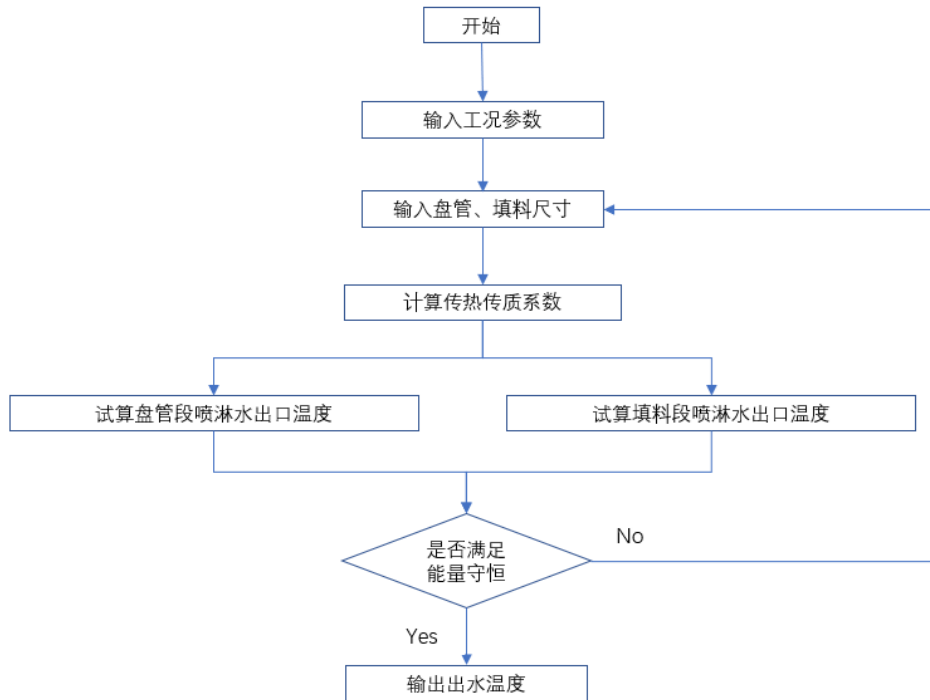


图 7 程序计算框图

Fig.7 Block diagram of program calculation

5 程序计算结果比较

根据上述计算方法,对埃希玛(中国)能源技术有限公司生产的 ACC 系列闭式冷却塔进行验证。

选取工况为进水温度 37℃,出水温度 32℃,湿球温度 28℃,部分验证结果如表 1 所示。

表 1 计算结果与样本数据对比

Table 1 Comparison of calculation results and sample data

埃希玛闭塔样本型号	ACC-30	ACC-45	ACC-60	ACC-75	ACC-90	ACC-100	ACC-120S	ACC-160N
处理水量 m ³ /h	27	41	69	77	90	100	110	140
样本盘管换热面积 m ²	31.32	52.47	63.97	96.16	89.97	106.49	101.96	170.38
计算盘管换热面积 m ²	40.51	65.76	92.15	116.56	115.3	135.12	135.02	235.25
盘管换热面积误差	29%	25%	44%	21%	28%	27%	32%	38%
样本填料体积 m ³	7.357	7.357	7.357	7.357	7.9534	7.9534	11.856	11.856
计算填料体积 m ³	5.016	6.429	4.921	5.567	6.57	6.84	9.576	10.5336
填料体积误差	-32%	-13%	-33%	-24%	-17%	-14%	-19%	-11%

从表 1 可以看出,对不同型号的埃希玛闭塔进行验证计算,计算出的盘管换热面积比样本中数据大 20%~40%,计算出的填料体积比样本数据小

10%~30%,分析可能有以下原因:

(1) 在盘管段热力计算的过程中,选用的对流换热系数经验公式由其他学者实验总结而成,不

能完全适用于埃希玛 ACC 系列塔型,造成计算结果有偏差;

(2) 为使经验公式适用,笔者在换热盘管和填料的布置方式上与样本数据不同,导致尺寸参数与样本数据不同;

(3) 填料段的计算中,由于不同填料特性不一,笔者选用的填料容积散质系数可能并不对应样本所选用的填料,导致计算出的填料体积与样本有差异。

6 结论

本文通过建立冷却塔热质平衡模型,论述了一种针对带填料型闭式冷却塔的计算方法,根据结果可以看出,此种计算方法可以在理论上进行带填料型闭式冷却塔的设计及校核计算,但在应用过程中,需要根据实际情况调整计算换热系数的经验公式,才能使计算结果尽可能贴近实际情况。

参考文献:

- [1] GB/T 50392-2016, 机械通风冷却塔工艺设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2017.
- [2] 谢卫.带填料的闭式冷却塔传热性能实验研究[D].上海:东华大学,2013.
- [3] 李宁瑾,曹长.闭式冷却塔热力计算方法研讨(上)[J].制冷与空调,2014,14(10):41-46.
- [4] 李永安.空调用封闭式冷却塔[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 李宁瑾,曹长.横流开式冷却塔的分段积分解法(上)[J].制冷与空调,2015,15(1):44-48,43.
- [6] 刘晶,谢安国.密闭式冷却塔冷却过程的换热分析与计算机仿真[J].制冷与空调,2007,(4):23-27.
- [7] 杨世铭,陶文铨.传热学(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [8] Mizushima T, Ito R, Miyashita H. Experimental Study of Evaporative Cooler[J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 1967,31(5):469-473.
- [9] 史美中,王中铮.热交换器原理与设计[M].南京:东南大学出版社,2014.
- [10] 尾花英朗,徐忠权.热交换器设计手册[M].成都:石油工业出版社,1981.
- [11] Hasan A, Kai Sirén. Theoretical and computational analysis of closed wet cooling towers and its applications in cooling of buildings[J]. Energy & Buildings, 2002,34(5):477-486.
- [12] R O Parker, R E Treybal. The heat mass transfer characteristics of evaporative coolers[J]. AIChE Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1961,57(32):138-149.
- [13] Y Niitsu, K Naito, T Anzai. Studies on characteristics and design procedure of evaporative coolers[J]. Journal of SHASE, Japan, 1969,43(7):581-590.
- [14] Heyns J A, Kroger D G. Experimental investigation into the thermal-flow performance characteristics of an evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(5):492-498.