

# 冷却塔计算基本理论

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

杜成琪 华东电力设计院 dcq@eceptdi.com

冷却塔理论研究的是水和空气两相间同时发生的热质传递过程，冷却塔计算包括热力计算和空气动力计算。

## 热力计算

冷却塔计算涉及热力学、传热传质学和空气动力学理论以及水、蒸汽和空气的许多热物理特性，附表总结了本文所使用的符号系统，如无特别说明，不再另述。

图一显示了水和空气之间的热质传递过程，设定  $0^{\circ}\text{C}$  时水的焓值及干空气的焓值为零，在图一取微控制体  $dV$ ，根据质量守恒和能量守恒定律，我们可以得到以下关系式：

$$\delta m_w = m_a dx = \beta_{xv} (x'' - x) dV \quad (1)$$

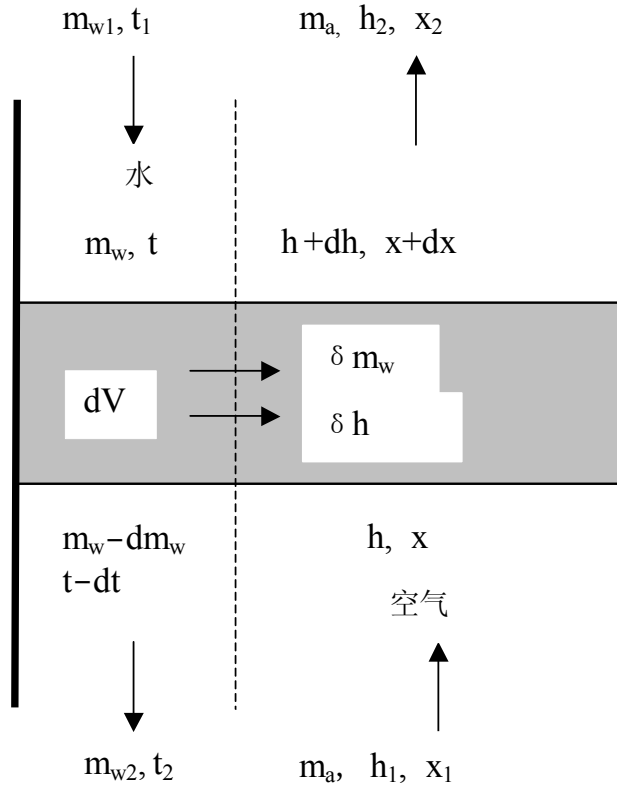
$$\delta h = m_a dh = \alpha (t - \theta) dV + h_v \beta_{xv} (x'' - x) dV \quad (2)$$

其中  $h_v$  是温度为  $t$  时的蒸汽焓值，可以表示为  $h_{fg,0} + c_v t$ 。比较麻烦的是上式有  $\alpha$  和  $\beta_{xv}$  两个传递系数，为此引入对流 Lewis 数  $Le_c$ ：

$$Le_c = \frac{\alpha}{\beta_{xv} \cdot c_x} \quad \text{其中 } c_x = c_a + c_v x$$

代入 (2) 式并整理得到：

$$m_a dh = \beta_{xv} (h'' - h + (Le_c - 1) c_x (t - \theta)) dV \quad (3)$$



图一 热质传递过程示意图

其中  $h''$  和  $h$  分别为温度  $t$  时的水面饱和蒸汽焓和温度为  $\theta$  及湿度为  $x$  的空气焓：

$$h'' = c_a t + (h_{fg,0} + c_v t) x''$$

$$h = c_a \theta + (h_{fg,0} + c_v \theta) x$$

在 (3) 式中取  $Le_c=1$  可以得到：

$$m_a dh = \beta_{xv} (h'' - h) dV \quad (4)$$

这就是有名的麦克尔 (Merkel) 方程，是冷却塔热力计算的基础。

综合以上，我们可以得到：

$$dm_w = (x'' - x) \beta_{xv} dV$$

$$d(c_w m_w t) = (h'' - h) \beta_{xv} dV$$

$$m_a dx = (x'' - x) \beta_{xv} dV$$

$$m_a dh = (h'' - h) \beta_{xv} dV$$

经整理后可得到一组常微分方程组：

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C_w m_w (x'' - x)}{m_a (h'' - h - C_w t (x'' - x))}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{C_w m_w (h'' - h)}{m_a (h'' - h - C_w t (x'' - x))}$$

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{C_w m_w (x'' - x)}{h'' - h - C_w t (x'' - x)}$$

$$\frac{d(\beta_{xv} V)}{dt} = \frac{C_w m_w}{h'' - h - C_w t (x'' - x)}$$

在已知进口空气状态、进出口水温、进水量或出水量的情况下，可以用数值法 (如 Runge-Kutta 法、Adams 法或 Gear 法) 求解上述微分方程组，在获得  $\beta_{xv} V$  的累积值后，再除以填料总体积就可以得到  $\beta_{xv}$  的平均值。

此外，还可以得到填料特性数  $N$ ，其定义为：

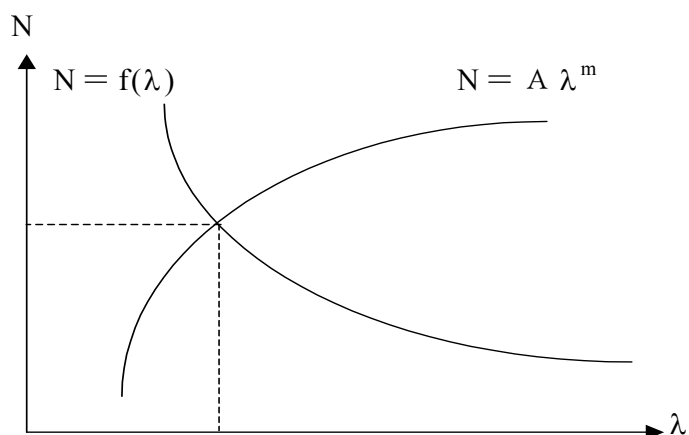
$$N = \frac{\beta_{xv} V}{C_w m_w}$$

作者已根据上述微分方程组编制了求解填料特性的计算机程序，算例如下：大气压力 100400 帕，干球温度 30℃，湿球温度 27℃，空气流速 1.5 m/s，进水温度 43℃，出水温度 33℃，淋水密度每平方米 10 吨/小时，由程序求得的填料特性数为：1.418。

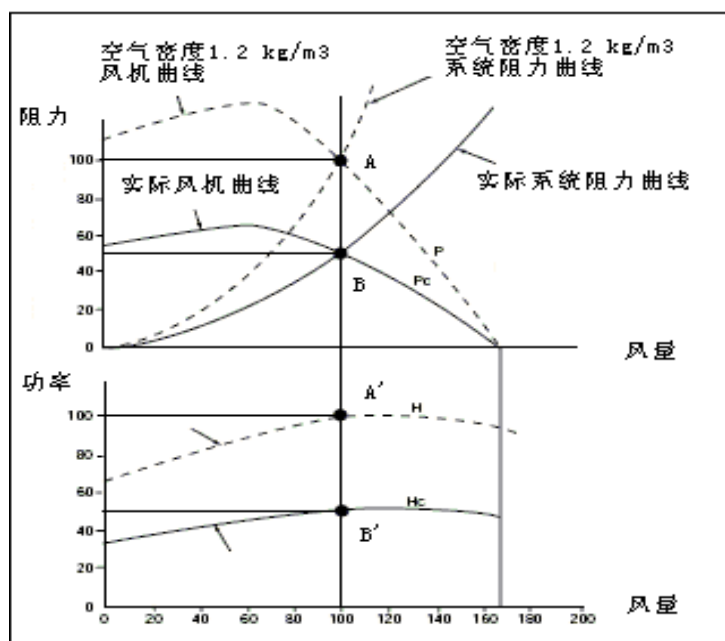
在实际应用中，通常利用工业塔实测或模拟塔试验得到不同工况下塔的运行数据，整理出有关 $N$ 和 $\beta_{xv}$ 的填料特性方程：

$$N = C\lambda^m \quad \text{和} \quad \beta_{xv} = Cq^m g^n$$

对于一个特定的冷却塔设计任务，水量、进出水温度和气象参数给定，假定不同的气水比，就可以得出一个冷却数 $N$ 对应于气水比 $\lambda$ 的方程： $N = f(\lambda)$ ，这个方程与填料特性方程的交点便是所要求的气水比（图二）。



图二 冷却数和填料特性关系



图三 风机特性和塔总阻力关系

## 空气动力计算

在机力通风情形下，冷却塔里空气动力来自风机。在自然通风情形下，空气动力来自冷却塔内外的空气密度差。不管是那种情形，在稳定状态下空气通过冷却塔各部件的压降总和必须和抽力相等。

对于机力通风冷却塔，总阻力曲线和实际风机特性曲线的交点B为工作点（图三），问题是风机厂家一般仅提供标准状态下（空气密度等于 $1.2\text{kg/m}^3$ ）的风机特性曲线，如果用实际系统总阻力曲线与厂家提供的风机特性曲线求解，计算所得的风量将偏大而趋于不安全。假定流经风机的体积流量不随空气密度变化而变化，工作点可以按以下步骤计算：

- 假定空气密度等于 $1.2\text{ kg/m}^3$  作系统总阻力曲线，与厂家提供的风机特性曲线相交，求得标准状态下的风量和风速（图三中的A点）。
- 假定风量不变，利用实际系统总阻力曲线求得实际工况点B。
- 利用A点所对应的功率值参考选择电动机，B点所对应的功率值为实耗功率。

自然通风冷却塔则要麻烦得多。自然塔的抽力来自塔进口和塔出口的空气密度差，但是出口空气密度取决于热力计算结果，因此空气动力计算必须和热力计算结合在一起，通过试算才能得到塔的出口空气状态。

附表：符号说明

符号	说明	单位
A	面积	$m^2$
c	等压比热	$kJ/kg\ K$
g	干空气质量流率	$t/m^2h$
h	焓	$kJ/kg$
$h_{fg}$	水的蒸发焓	$kJ/kg$
K	热量修正系数	
$Le_c$	对流 Lewis 数	
m	质量流率	$kg/h$
P	压力	Pa
q	淋水密度	$t/h\ m^2h$
t	水温	K
v	速度	$m/s$
V	体积	$m^3$
x	绝对含湿量	$kg/kg$
$\alpha$	传热系数	$kJ/Km^2h$
$\beta$	传质系数	$kg/m^2\ h$
$\varphi$	相对湿度	
$\lambda$	气水比	
$\gamma$	比重	$kg/m^3$
$\rho$	密度	$kg/m^3$
$\theta$	干球温度	K
$\tau$	湿球温度	K
上标:		
"	饱和状态	
下标:		
a	干空气	
v	水蒸汽	
w	水	
x	基于干空气混合空气	
1	进口	
2	出口	