

冷却塔热力计算模型比较

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

杜成琪 华东电力设计院 dcq@eceptdi.com

1. 前言

冷却塔是工业水循环利用的主要设备。冷却塔中水的冷却过程是一个水和空气两相间同时发生热质传递的过程，冷却塔理论的任务就是分析和研究这个特定的过程。

从传质过程的表达方式来看，冷却塔热力计算理论可分为焓差理论、压差理论和湿差理论。焓差理论以麦克尔方程为基础^[1]，将传热和传质两个过程用一个以焓差为推动力的过程来表达，因简洁及计算相对简单而应用广泛。压差理论以水蒸汽分压差为传质推动力，分析过程较严密但计算复杂，经若干简化后，这种计算方法仍在一定范围内使用。湿差理论以含湿量差为传质推动力，Threlkeld^[2]和 Sutherland 对此作了详细的分析，这种计算方法国内也有应用。

从冷却塔理论的发展历程看，绝大多数的研究集中于麦克尔方程的不同求解方法及其比较，而对于基于不同传质模式的冷却塔热力计算理论的比较则很少见。本文拟对焓差理论，压差理论和湿差理论作全面的比较，通过对模拟工况和实测工况的计算，比较出各种计算方法计算的传质系数的差异，并分析不同的计算方法对工业塔设计的影响。

2. 理论

冷却塔（逆流）中的传热传质过程可由图一表示，根据质量守恒和能量守恒，有：

$$dm_w = m_a dx \quad \text{和} \quad d(c_w m_w t) = m_a dh$$

根据传热传质学，质量传递率可以表达为：

$$\text{传质系数} \times \text{传质推动力}$$

其中传质推动力可以有不同的表示方式，传热传质理论分析中常以含湿量差和水蒸汽分压力差表示，即：

$$dm_w = \beta_{xv} (x'' - x) dV \quad (1a)$$

或

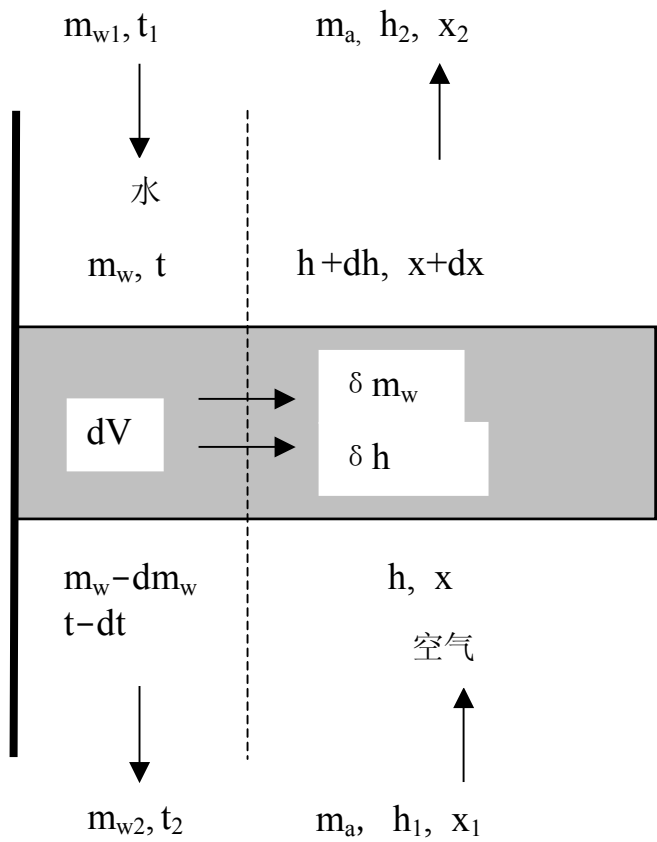
$$dm_w = \beta_{pv} (p'' - p) dV \quad (1b)$$

水和空气向总的焓传递量 dh 为:

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

或

$$m_a dh = \alpha (t - \theta) dV + h_v \beta_{pv} (p'' - p) dV \quad (2b)$$



图一 热质传递过程示意图

以上诸式是冷却后热力计算理论的基础，尽管对于不同的理论其表达方式有所不同，但它们都隐含下列基本假设和简化：

- 传热面积等于传质面积；
- 气、水交界面空气处于饱和状态；

- 气、水交界面处水温等于水流水温，或者说忽略水侧传热阻力；
- 传热系数和传质系数之间存在一定关系；
- 干空气和湿空气均作为理想气体处理。

此外不同计算方法另有各自的简化。

2.1 焓差模型

由于水和空气独有的热物理特性，（2）式所示的同时发生的热质传递过程可以简化为一个以焓差表示的过程，即麦克尔方程：

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

实用中麦克尔方程有不同的解法。

2.1.1 忽略蒸发水量损失

忽略蒸发水量损失后，麦克尔方程可变换为：

$$\frac{\beta_{xv} dV}{dt} = \frac{C_w \cdot m_w}{h'' - h}$$

对上述微分方程在 t_1 和 t_2 上求积，可以得到 $\beta_{xv} V$ 的累积值。

2.1.2 对蒸发水量损失进行修正

这种方法引入蒸发水量损失带走的热量系数 K 来对蒸发水量进行修正：

$$K = 1 - \frac{C_w t_2}{h_{fg}}$$

则麦克尔方程变换为：

$$\frac{\beta_{xv} dV}{dt} = \frac{C_w \cdot m_w}{K(h'' - h)}$$

2.1.3 考虑蒸发水量损失

在假定对流 Lewis 数等于 1 的前提下，由能量质量守恒定律及传热传质分析可以得到下列微分方程组：

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

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

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

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

将 $d(\beta_{xv} V)$ 当作一个变量，在已知进出口水和空气状态的情况下，给定温度步长 dt 后，可以用数值法求解上述微分方程组，获得 $d(\beta_{xv} V)$ 的累积值 $\beta_{xv} V$ 。

2.2 压差模型

这个理论由别尔曼^[3]等推出，理论模式为：

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{\alpha \cdot (t_w - \theta)}{C_x m_a}$$

$$\frac{dp}{dV} = \frac{\beta_{pv} \cdot (p_{amb} - p) \cdot (p'' - p)}{0.622 m_a}$$

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\alpha \cdot (t_w - \theta) + h_{fg} \cdot \beta_{pv} (p'' - p)}{C_w \cdot m_w}$$

在压差模型的导出过程中引入了不少简化，具体有：

- 忽略蒸发水量损失，
- $p_{amb} - p$ 等于常数，
- 水的蒸发焓取为常数，
- 具体计算中均假定 α_v / β_{pv} 值为一常数

在将饱和蒸汽压曲线线性化或抛物线化后，可以求出上述模型的分析解。但常用的却是将模式差分化后进行数值求解。

2.3 湿差模型

与焓差理论和压差理论相比，湿差理论引人的简化最少，作为分析方法来说它是最适宜的，利用方程 (1 a) 和 (2 a) 并引入 Lewis 关系：

$$Le_c = \frac{\alpha}{\beta_{xv} \cdot C_x} \quad \text{其中} \quad C_x = (C_a + x C_v) \theta$$

可以导出下列一组微分方程：

$$\frac{dh}{dx} = Le_c \frac{h'' - h}{x'' - x} + h_v (Le_c - 1)$$
$$\frac{dt}{dx} = \frac{m_a (Le_c \frac{h'' - h}{x'' - x} + h_v (1 - Le_c) - C_w t)}{C_w m_w}$$
$$\frac{dm_w}{dx} = m_a$$
$$\frac{\beta_{xv} dV}{dx} = \frac{m_a}{x'' - x}$$

湿差模式中对流 Lewis 数 Le_c 作为一个常数出现，不一定取 1，根据传热传质相似分析得出的结果， Le_c 值为 0.9，给定初值及含湿量微增 dx 后，可以对上述微分方程组进行数值求解。

3. 各种计算模式的比较和结论

取相同的工况，分别利用各种计算模式计算对应的传质系数，就可以对这些模式进行比较。本文比较取计算模式 5 种，其中属焓差理论 3 种，属湿差理论 1 种，属压差理论 3 种，分列如下：

- a) 焓差理论，忽略蒸发水量损失，采用 Simpson 积分法。
- b) 焓差理论，对蒸发水量进行修正，采用 Simpson 积分法。
- c) 焓差理论，考虑蒸发水量损失，四阶 Runge-Kutta 法求解。
- d) 湿差理论，四阶 Runge-Kutta 法求解，取 $Le_c = 1$ 。

e) 压差理论, 矩形积分法, 亦称终差法^[4], 取 $\alpha_v/\beta_{pv}=0.35$

因数值方法不同造成的影响可以通过减小积分步长而减少到最低限度。

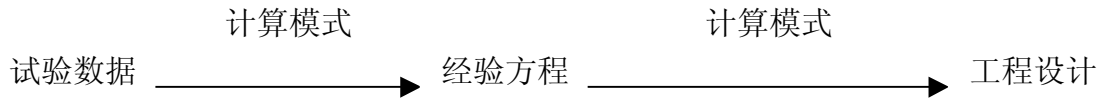
取一组工业试验塔实测数据, 利用上述 5 种计算模式, 可以计算各种工况下的冷却数, 结果见表二。从中可以看出, 在冷却塔常用工况下:

- 忽略蒸发水量损失 (模式 a) 会严重低估冷却数, 造成的误差可能高达 10%。
- 引入蒸发水量损失带走的热量系数 (模式 b) 对蒸发水量损失作修正后, 可以显著地将误差减小至 1% 左右。
- 终差法 (模式 e) 尽管也忽略蒸发水量损失, 但它引起的误差却比预计的要小, 可能是这种方法引入的其它简化起了抵削作用。
- 考虑蒸发水量损失的焓差法 (模式 c) 和 Le_c 取 1 的湿差法 (模式 d) 的计算结果非常接近, 实际上这两种模式的假设完全一样, 只不过是具体表达方式不同而已, 两者计算结果的误差可以认为是数值求解方法不同而产生的。

表二 不同计算模式计算结果

P	θ	τ	v	t1	t2	q	λ	各模式所计算的冷却数				
								a	b	c	d	e
103900	24.22	22.50	2.246	41.58	29.97	12.090	0.794	1.317	1.446	1.450	1.451	1.386
103900	22.53	20.18	1.894	41.85	30.07	12.090	0.676	1.203	1.330	1.336	1.338	1.264
103900	20.86	18.72	1.580	41.26	30.56	12.090	0.568	1.063	1.187	1.188	1.192	1.104
103800	23.43	20.83	1.779	42.71	26.22	6.100	1.252	1.982	2.131	2.154	2.157	2.086
103900	23.71	20.21	1.373	41.30	27.30	6.090	0.969	1.646	1.788	1.806	1.809	1.737
103900	20.02	17.58	1.010	41.21	27.99	6.080	0.725	1.418	1.562	1.573	1.577	1.471
103900	23.50	20.54	2.208	40.27	26.58	8.255	1.150	1.711	1.843	1.858	1.858	1.796
103900	24.22	20.56	1.763	41.24	28.22	8.251	0.917	1.442	1.568	1.582	1.583	1.525
103900	25.56	21.50	1.400	41.04	29.78	8.233	0.726	1.286	1.419	1.429	1.430	1.373
103900	23.43	20.60	0.985	41.33	31.63	8.233	0.514	1.030	1.164	1.165	1.168	1.098
103900	23.59	20.50	1.186	41.30	31.10	9.230	0.552	1.096	1.232	1.235	1.238	1.169
104000	24.69	21.62	1.622	41.50	29.87	9.240	0.751	1.282	1.411	1.419	1.419	1.362
104000	24.50	21.90	2.130	42.14	28.51	9.293	0.981	1.548	1.681	1.694	1.694	1.637
104000	23.91	21.42	2.300	40.77	27.50	9.290	1.062	1.648	1.783	1.795	1.801	1.733
填料特性方程								$1.605\lambda^{0.682}$	$1.741\lambda^{0.627}$	$1.755\lambda^{0.637}$	$1.757\lambda^{0.636}$	$1.690\lambda^{0.677}$

需要指出，在工业应用中，冷却数和传质系数均由经验方法得出，即通过工业塔实测数据或用模拟塔试验数据整理出经验方程，再运用到设计中去，冷却塔设计过程总是经过下列步骤：



在实用上，只要采用的计算模式前后一致，由不同计算模式所产生的差异大多可以抵消，因此设计选用填料时，必须注意给出填料特性方程的计算模式。如果设计计算采用的计算模式与给出填料特性方程采用的计算模式不一致，那么设计出来的塔要么偏于保守，要么偏于不安全。

尽管模式 c 和模式 d 较模式 a 和模式 b 复杂，但计算机的广泛应用使复杂的计算不再成为障碍。另外，出塔空气状态在自然通风冷却塔的设计计算中极为重要，它决定了通风抽力的大小。而模式 a 和模式 b 难以得到正确的出塔气态，因此冷却塔热力计算应该采用更精确的计算模式。

参考文献

- [1] 艾·汉佩，‘冷却塔’，胡贤章译，1981年，电力工业出版社。
- [2] Threlkeld, ‘Thermal Environmental Engineering’, ch.11, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1970.
- [3] 别尔曼，‘循环水的蒸发冷却’，胡贤章译，1965年，中国工业出版社。
- [4] 给水排水设计手册 第五册 工业给水处理与循环水冷却

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
α	传热系数	kJ/Km^2h
β	传质系数	$kg/m^2\ h$
φ	相对湿度	
λ	气水比	
γ	比重	kg/m^3
ρ	密度	kg/m^3
θ	干球温度	K
τ	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	