

基于传递过程理论剖析湿球温度和绝热饱和温度

王广全, 艾 宁

(浙江工业大学 化学工程学院, 浙江 杭州 310014)

[摘要] 传递过程理论是理解和分析化工单元操作过程的有力工具。文章结合传递过程理论, 探讨了湿空气-水体系在不同热边界条件下的接触过程, 剖析了化工原理教材中关于湿球温度和绝热饱和温度的论述; 基于传递过程理论和物料/热量衡算关系, 建立了湿球温度和绝热饱和温度的严格计算式, 并考察了水的初始条件对两个温度的影响; 借助干湿比或干湿系数得到了湿球温度和绝热饱和温度之间的定量关系, 实现了两个温度的简单计算和方便测量。

[关键词] 湿球温度; 绝热饱和温度; 传递过程; 干湿比

Analysis of Wet-bulb Temperature and Adiabatic Saturation Temperature Based on Transportation Process Theory

Wang Guangquan, Ai Ning

(College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310014)

Abstract: Transportation process theory is a powerful tool to understand and analyze the unit operations in chemical engineering. Using transportation process theory, the contacting process of moist air-water system under different thermal boundary conditions was discussed. Some statements about wet-bulb temperature and adiabatic saturation temperature in the classical textbook of principles of chemical engineering were clarified and theoretically analyzed in depth. The rigorous formulae to calculate the wet-bulb temperature and adiabatic saturation temperature were established based on transportation process theory and mass-energy balance relationship. The effects of initial conditions of water, such as temperature and quantity, on the temperatures were investigated. By means of psychrometric ratio or psychrometric coefficient, the quantitative relationship between wet-bulb temperature and adiabatic saturation temperature was obtained in order to achieve the simple calculation and easy measurement of both temperatures.

Key words: Wet-bulb temperature; Adiabatic saturation temperature; Transport process; Psychrometric ratio

[作者简介] 王广全(1978-), 男, 副教授, 博士; 艾宁(1977-), 男, 教授, 博士, 院长。

[通信作者] 艾宁, E-mail: aining@zjut.edu.cn。

在化学工业领域,干燥过程和空调工程中经常会遇到两个关于湿空气温度的概念,即湿球温度和绝热饱和温度。传统的《化工原理》教材中给出的定义如下^[1]:湿球温度是利用湿球温度计测得的湿空气温度,绝热饱和温度是在绝热增湿塔中测得的湿空气温度。二者既有联系又有区别:它们均为空气和水经过长时间接触达到的平衡(饱和)温度,但湿球温度是大量空气和少量水的动态平衡温度,而绝热饱和温度则是少量空气和大量水的静态平衡温度。论述中使用的“少量”和“大量”这种定性描述增加了教学的难度,而且概念中没有明确水的初始条件对温度的具体影响,这就导致学生只会机械记忆相关结论,而不能掌握两种温度的真正内涵。

从本质上看,湿球温度计的测温过程和绝热增湿塔内的增湿过程都是未饱和的湿空气与水的接触过程,最终结果都表现为通过蒸发补充一定的水分,实现空气的增湿达到饱和。因此,两个过程应该遵循相同的规律。本文基于这一基本观点,结合传递过程的相关理论,阐述湿球温度和绝热饱和温度的测量和计算原理,并对二者的区别和联系进行深入分析,以帮助师生更好地理解湿空气温度的概念。

一、湿空气和水的接触过程

当未饱和的湿空气与液态水接触时,水会汽化并扩散到湿空气中,这是典型的质量传递过程。同时,由于水的汽化需要吸收热量,因此该过程中往往还伴随着热量传递。图1给出了湿空气与液态水接触的示意图,虚线框内为所研究的系统,外部为环境。为了方便,这里假定空气与水之间的界面为平面。该过程可通过下述方程组来描述(以1kg/s干空气为基准):

湿分衡算:

$$H_2 = H_1 + m_L \quad (1)$$

热量衡算:

$$I_2 = I_1 + I_L + Q \quad (2)$$

式(1)中 H 为湿空气的绝对湿度, m_L 为补充水的流量;式(2)中 I 为湿空气的焓, Q 为环境传递给系统的热量。根据不同的热边界条件对上述方

程组进行求解,便可以获得温度信息。

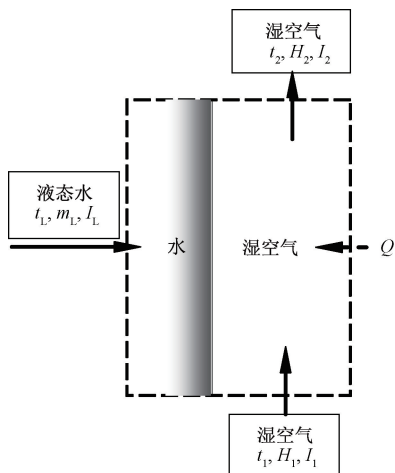


图1 湿空气和液态水接触示意图

二、湿球温度和绝热饱和温度的计算过程

(一)湿球温度计(对流传热边界条件)

在湿球温度计的测温过程中,水-空气体系并非绝热体系,即 $Q \neq 0$ 。这是因为,来自环境的热量通过空气层以对流的方式传递给液态水,同时液态水汽化产生的水蒸气又通过空气层以对流的方式扩散到空气中,因此空气层内(垂直于空气流动方向)会逐渐建立起温度和湿度梯度。当环境提供的热量与液态水汽化所需的热量相等时,传热和传质过程便达到了稳态,空气层内的温度和湿度梯度不再随时间变化,空气呈现“饱和”状态,如图2所示。

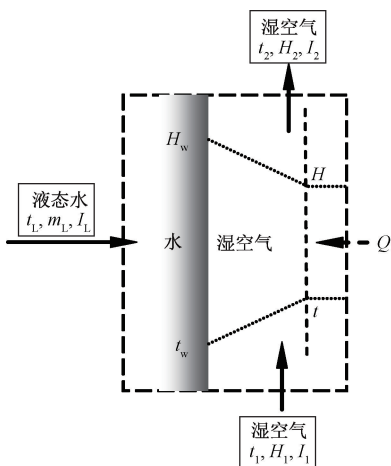


图2 湿球温度计中湿空气和液态水接触示意图

此时,环境传递给系统的热量可由传热速率方程描述:

$$Q = \alpha A (t - t_w)_m \quad (3)$$

其中, α 为湿空气与液态水之间的对流传热系数。相应地, 通过扩散进入湿空气的水蒸气的量可由下述传质速率方程描述:

$$m_L = k_H A (H_w - H)_m \quad (4)$$

其中, k_H 是以绝对湿度差为推动力的对流传质系数。因为液态水蒸发的热量由环境提供, 所以此时空气流动方向上的温度是恒定的, 即 $t_2 = t_1 = t$ 。根据式(1)和式(2)可知, 空气的湿度和湿焓都是增加的, 即 $H_2 > H_1, I_2 > I_1$ 。

根据传热和传质过程达到稳态时的热量平衡关系可知:

$$Q = m_L [r + c_L (t_w - t_L)] \quad (5)$$

其中, r 是液态水在 t_w 下的汽化潜热, t_L 为水的初始温度, c_L 为水在 $t_L - t_w$ 间的平均热容, 将式(3)和(4)代入(5)可得

$$\frac{Q}{m_L} = [r + c_L (t_w - t_L)] = \frac{\alpha (t - t_w)}{k_H (H_w - H)_m} \quad (6)$$

通常情况下空气的湿度变化很小, 因此平均推动力 $(H_w - H)_m$ 可用算术平均值来代替:

$$(H_w - H)_m = \frac{(H_w - H_1) + (H_w - H_2)}{2} = (H_w - H_1) - \frac{m_L}{2} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$r + c_L (t_w - t_L) = \frac{\alpha (t - t_w)}{k_H \left[(H_w - H_1) - \frac{m_L}{2} \right]} \quad (8)$$

式(8)是计算湿球温度的理论公式, 是理解、分析和计算湿球温度的依据。该式表明, 湿球温度与水量 m_L 及初始温度 t_L 均有关。为了消除水量的影响, 测量过程中应保证水相对于空气的量足够小 ($m_L \approx 0$), 甚至可以忽略, 这就是传统教材中提到的“少量水”和“大量空气”的原因。显然, 进入空气的水蒸气的量同样很小, 不影响空气的湿含量 ($H_1 \approx H_2$), 这就是教材中认为空气湿度不变的原因。同时, 正是由于水的量非常小, 水蒸发过程中的显热与汽化潜热相比要小得多, 亦可忽略不计, 这样湿球温度便与水的初始温度 t_L 无

关, 因此有:

$$r = \frac{\alpha (t_1 - t_w)}{k_H (H_w - H_1)} \quad (9)$$

式(9)就是传统教材中给出的湿球温度计算式, 显然该式需要进行迭代求解。

需要指出的是, 由于热量和物质传递过程都是连续进行的, 因此水的绝对量应保证此状态维持一定长的时间, 否则测得的湿球温度会偏高。由于空气与水之间的热、湿传递过程都与空气流速有关, 因此空气的流速也会影响湿球温度的测量值。如空气流速为 $1 \sim 2 \text{ m/s}$, 测得的湿球温度称为 Screen(百叶箱)温度; 空气的流速大于 $2.5 \sim 4 \text{ m/s}$ 时, 测得的湿球温度称为 Sling(悬摇)温度^[2]。另外, 湿球温度计的测量要求传热面积等于传质面积, 所以测量时应保证湿球温度计上的纱布全部润湿, 以保证测量的准确性。

需要特别注意的是, 湿球温度并不是湿空气的(主体)温度, 而是水的温度! 而且湿球温度会受到空气流动状况的影响。因此, 从严格意义上来说, 湿球温度并不是湿空气本身的性质, 而是空气状态在水温上的体现。

湿球温度具有重要的现实意义。如在工业上的对流干燥过程中, 假如湿物料中的水分是足够的, 那么干燥过程就类似于湿球温度计的测温过程, 湿物料表面的温度等于空气的湿球温度, 这就是恒速干燥阶段。又如工业中的凉水塔(喷水池)是让热水与不饱和空气在适宜的条件下接触, 使空气增湿而水温下降, 显然冷却后的水温的极限就是空气的湿球温度。

(二) 绝热增湿塔(绝热边界条件)

绝热增湿塔中空气-水的接触情况与湿球温度计不同, 因为此时空气-水系统处于绝热状态, 即 $Q = 0$ 。由于环境与空气层间不存在热量传递, 所以空气层内垂直于空气流动方向(塔截面)上的温度和湿度梯度很小, 可认为是均匀的。系统内部的热量和物质交换体现为空气流动方向(塔高)上的温度降低和湿度增加(见图3)。若塔高足够的话, 空气和水会在一定高度处达到热和湿的平衡, 即空气被水蒸气完全饱和, 水和空气的

温度相同,此温度即绝热饱和温度,因此有 $H_2 =$

$H_{as}, t_2 = t_{as}$ 。根据式(1)和(2)可得

$$H_{as} = H_1 + m_L \quad (10)$$

$$I_{as} = I_1 + I_L \quad (11)$$

由此可见,绝热增湿塔中湿空气的状态变化并非等焓过程,只有当液态水的初始焓值 I_L 为零时,才可认为是等焓过程。

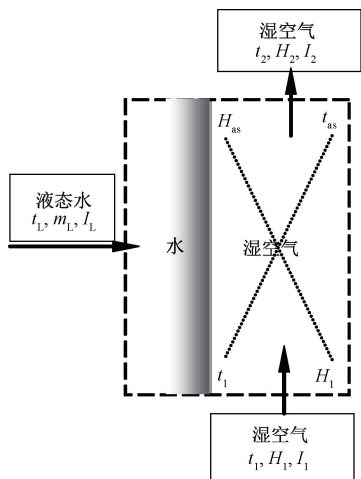


图3 绝热增湿塔中湿空气和水接触示意图

空气-水体系内部的热量和物质交换过程如图4所示,根据热量衡算关系可知:

$$q = m_L[r + c_L(t_{as} - t_L)] = c_m(t_1 - t_{as}) \quad (12)$$

其中, q 为水蒸发所需的热量, c_m 为空气在 t_1-t_{as} 间的平均比热容,将式(9)代入可得

$$r + c_L(t_{as} - t_L) = \frac{c_m(t_1 - t_{as})}{H_{as} - H_1} \quad (13)$$

式(13)是计算绝热饱和温度的理论公式,是理解、分析和计算绝热饱和温度的依据。该式表明,空气的绝热饱和温度同样与水的初始温度 t_L 有关。显然,蒸发过程中水的显热与汽化潜热相比要小得多,因此可以忽略不计。同时假定空气的湿比热容不随温度变化,则式(13)可简化为

$$r = \frac{c_1(t_1 - t_{as})}{H_{as} - H_1} \quad (14)$$

式(14)是教材中给出的绝热饱和温度的计算式,亦需要进行迭代求解。

需要说明的是,这里的热是过程的热量,而非速率! 该过程是指从水和空气开始接触直至最终

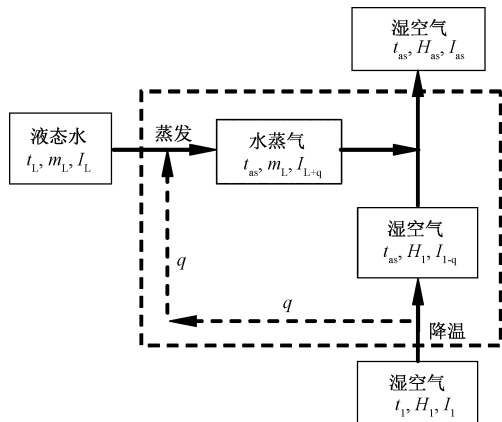


图4 绝热增湿塔中湿空气—水内部的热质交换过程

达到绝热增湿平衡(亦即整个绝热增湿塔)的过程。完成整个过程所需的时间 θ 可由下式估算:

$$L(H_{as} - H_1) = k_p A (p_{as} - p)_m \theta \quad (15)$$

其中, L 是绝干空气的质量, p_{as} 和 p 分别为过程结束时(饱和)湿空气中水蒸气的分压和某时刻(塔中某位置处)湿空气中水蒸气的分压, $(p_{as} - p)_m$ 表示水蒸发的平均推动力, k_p 为以分压表示推动力的传质系数,表示蒸发过程的快慢。由于绝热增湿塔一端空气处于饱和状态,推动力为零,因此所需时间为无穷大。由此可见,绝热增湿平衡状态只能无限趋近而无法到达,因此绝热饱和温度在实际中是不可测量的,只具有理论上的意义。

此外,需要特别注意的是,式(10)表明绝热增湿过程中补充水的量 m_L 只要能使湿空气达到饱和即可,同时其值亦应保证空气状态变化是等焓过程,因此水的量是很少的。那为什么教材中认为绝热饱和温度是“大量水”和“少量空气”接触达到平衡时的温度呢^[1]? 式(13)表明,水的初始温度不影响绝热饱和温度的充分条件是蒸发水的显热为零,即空气释放的热量完全用于水汽化的潜热。显然,如果水的初始温度 t_L 等于绝热饱和温度 t_{as} ,则可以满足上述条件。因此,许多教材中将绝热增湿塔补充水的温度设定为 t_{as} ^[3-5]。但绝热饱和温度 t_{as} 只有在实验结束时才能确定,因此在实际操作过程中难以实现。另一个办法就是将温度接近 t_{as} 的水与温度为 t_L 的补充水混合,混

合后的温度非常接近 t_{as} 。因此绝热增湿塔通常采用如图 5 所示的循环流程。采用大的循环量一方面可以使塔内的水温度更接近 t_{as} , 另一方面可以增加蒸发面积, 减少绝热增湿过程的时间。同时, 空气用量减少也有助于系统尽快达到平衡状态进而降低塔高。这就是传统教材中提到的“大量水”和“少量空气”的原因。换句话说, 大量水和少量空气是绝热增湿过程动力学的要求, 而不是热力学的要求!

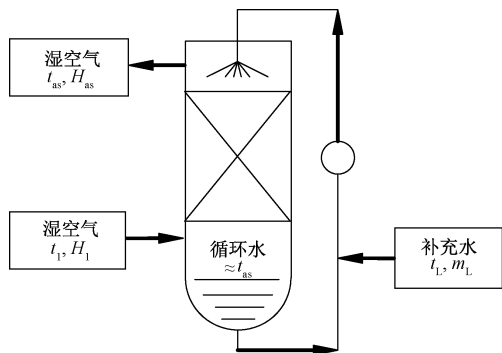


图 5 绝热增湿塔

三、湿球温度和绝热饱和温度的关系

湿球温度和绝热饱和温度均有重要的实用意义, 都表达了与一定状态的湿空气相接触的液体的最终温度, 统称为湿球温度。但是从推导过程可知, 二者有完全不同的物理意义。湿球温度是传热和传质速率平衡的结果, 属于动力学范围, 可称为动力学湿球温度; 绝热饱和温度却完全没有速率方面的含义, 是热量衡算和物料衡算的结果, 属于静力学/热力学范围, 又称热力学湿球温度。

通过分析不难发现: 湿球温度易于测量, 但是计算较为困难, 因为涉及传热和传质系数的计算; 相反, 绝热饱和温度的计算非常简单, 仅涉及空气的物性, 但是几乎不可能测量。因此, 我们有必要在二者之间建立起某种关联, 以实现其测量和计算。

假定湿空气的初始状态相同, 联立方程(9)和(14)可得:

$$\frac{t_1 - t_{as}}{H_{as} - H_1} = \frac{\alpha}{k_H c_1} \cdot \frac{t_1 - t_w}{H_w - H_1} = \Lambda \cdot \frac{t_1 - t_w}{H_w - H_1} \quad (16)$$

其中 Λ 称为干湿比^[6], 是润湿表面上传热系数与

传质系数和湿空气比热容乘积的比值, 也是讨论湿球温度和绝热饱和温度之间关系的基础。在通常的温度和压力范围内, 干湿比近似为常数, 这样便避免了传热和传质系数的估算。根据 Chilton 和 Colburn 的传热和传质 j 因子类比律可以得到^[7]:

$$\Lambda = (Sc/Pr)^{2/3} = Le^{2/3} \quad (17)$$

其中 Le , Sc 和 Pr 分别为湿空气的 Lewis 准数, Schmidt 准数和 Prandtl 准数, 据此可知干湿比主要取决于湿空气的物理性质。对于空气-水体系而言, $\Lambda \approx 1$, 则湿球温度近似等于绝热饱和温度, 因此通常也可以将湿球温度作为湿空气的性质参数。研究表明^[8], 在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, 若湿度不超过 0.1kg/kg , 则两者的偏差基本在 1°C 以内, 这一偏差对工程计算几乎没有影响。因此, 工业设计中需要计算湿球温度时, 可用易于计算的绝热饱和温度来代替; 当需要测量绝热饱和温度时, 可用易于测量的湿球温度来代替。这样湿球温度和绝热饱和温度的实验测量和理论计算都可以简单地实现。

在非空气-水体系中, 湿球温度近似等于绝热饱和温度的结论则不一定成立。对于多数的空气-有机液体系来说, $\Lambda > 1$, 湿球温度将高于绝热饱和温度, 如空气-甲醇体系、空气-甲苯体系等; 还有极少数的体系 $\Lambda < 1$, 湿球温度会低于绝热饱和温度, 如氟利昂 12-水体系^[9]。此外, 当空气温度一定, 随着相对湿度增加, $H_1 \rightarrow H_w (H_{as})$, 则湿球温度与绝热饱和温度接近相等, 这一点与体系的性质无关。

实际上, 干湿比与空气的传热、传质状况是有关的。Keey 曾采用干湿系数 σ 代替干湿比 Λ 来关联湿球温度和绝热饱和温度^[10], 干湿系数定义如下:

$$\sigma = \left[\frac{1 + H_1}{\Phi_H (1 + \Phi_R)} \right] \Lambda \quad (17)$$

其中, Φ_H 是 Ackermann 校正因子^[11], 表征了蒸发传质对传热的影响, 通常可忽略(即使空气温度高达 200°C , 其值亦为 0.95); Φ_R 是辐射对传热的贡献因子, 通常也可忽略(假使空气温度为 100°C , 湿球温度为 50°C , 对流传热系数为 $30\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$, 则

辐射传热的贡献在 10% 以内)。

最后需要注意的是,气象学中有时会采用等压湿球温度来代指热力学湿球温度(绝热饱和温度),而将绝热饱和温度用来表示湿空气在凝结高度(LCL)上的温度^[12],即未饱和的湿空气作垂直上升运动,其体积因环境气压降低而增大,在绝热的情况下,其温度会下降直至水蒸气凝结。该过程实际上是湿空气的等湿绝热膨胀过程,而绝热增湿塔内则是湿空气的等压绝热增湿过程。

四、总结

湿球温度和绝热饱和温度是湿空气的两个重要性质,均为湿空气在与水接触的过程中所能达到的极限温度。本文先借助传递过程理论分析了湿空气与水的接触过程,认为湿球温度是在对流传热边界条件下传热速率平衡的结果,绝热饱和温度是在绝热边界条件下热量平衡的结果;然后基于传递过程理论,推导出了湿球温度和绝热饱和温度的严格计算公式,并阐述了湿球温度和绝热饱和温度与水量及初温无关的实验条件。分析认为,湿球温度易于测量而难于计算,绝热饱和温度易于计算而难于测量。本文还基于传递过程的类比律得到了空气的干湿比,并通过干湿比建立了湿球温度和绝热饱和温度之间的联系,简便地实现了湿球温度和绝热饱和温度的实验测量和理论计算。由此可见,传递过程理论有助于学生理解和分析湿空气与水的接触过程,准确把握湿球温度和绝热饱和温度的概念。本文的分析方法对于化工原理课程其他知识点的学习也具有借鉴意义,如化工单元操作过程及相关概念都可以借助传递过程理论进行剖析,有兴趣的读者可自行尝试。

(文字编辑:李丽妍)

参考文献:

[1] 何潮洪,伍钦,魏凤玉,等. 化工原理下册[M].3 版.

北京:科学出版社,2017.

[2] Miller R, Miller M R. Air conditioning and refrigeration[M]. New York: McGraw-Hill,2006.

[3] 蒋维钧,戴猷元,顾惠君. 化工原理(下册)[M].3 版. 北京:清华大学出版社,2009.

[4] 姚玉英,陈常贵,柴诚敬. 化工原理(下册)[M].3 版. 天津:天津大学出版社,2010.

[5] 谭天恩,婁梅. 化工原理(下册)[M].4 版. 北京:化学工业出版社,2013.

[6] Wilke C R, Wasan D T. A new correlation for the psychrometric ratio [J]. AIChE Symposium Series,1965, 6:21-26.

[7] Chilton T H, Colburn A P. Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on heat transfer and fluid friction [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,1934,26(11):1183-1187.

[8] Kemp I C, Berg C G. Developments in the psychrometer equation for estimating the wet bulb temperature of drying solids; Mujumdar A S. Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS2002) [C]. 2002:259-271.

[9] Lynch E J, Wilke C R. Effect of fluid properties on mass transfer in the gas phase [J]. AIChE Journal,1955,1 (1):9-19.

[10] Keey R B. Drying of loose and particulate materials [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation,1992.

[11] Ackermann G. Heat transfer and molecular mass transfer in the same field at high temperature and particle drift differences [J]. VDI-Forschungsh, 1937, 382 (8): 1-16.

[12] Stackpole J D. Numerical analysis of atmospheric soundings [J]. Journal of Applied Meteorology, 1967, 6 (3):464-467.