

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 15 篇

增湿与减湿

化学工业出版社



化学工程手册

第 15 篇

增湿与减湿

《化学工程手册》编辑委员会



化学工业出版社

8810227

本书是《化学工程手册》第15篇，主要是围绕气体的增湿与减湿的有关理论、计算方法、有关设备加以介绍论述，其中对循环水冷却塔尤为详细。

全书共分5章，第1至3章主要介绍湿气体的性质、气体的湿度图表及其应用，第4章讲述循环水冷却塔的设计，第5章介绍传热与传质速率数据。

本书可供各工业部门的设计、研究人员及工厂技术人员参考。

化学工程手册

第 15 篇

增湿与减湿

编写人 张有衡 姚虎卿 南京化工学院

审校人 时钧 南京化工学院

责任编辑：苗延秀

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版

北京和平里七区十六号楼

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆ 印张6³/₄ 字数165千字 印数1—10,170

1987年11月北京第1版 1987年11月北京第1次印刷

统一书号15063·4035 定价 1.50 元

155

《化学工程手册》总篇目

- | | |
|----------------|--------------|
| 1. 化工基础数据 | 14. 萃取及浸取 |
| 2. 化工应用数学 | 15. 增湿与减湿 |
| 3. 化工热力学 | 16. 干燥 |
| 4. 流体流动 | 17. 吸附及离子交换 |
| 5. 搅拌及混合 | 18. 薄膜过程 |
| 6. 流体输送机械及驱动装置 | 19. 颗粒及颗粒系统 |
| 7. 传热 | 20. 流态化 |
| 8. 传热设备及工业炉 | 21. 气态非均一系分离 |
| 9. 蒸发及结晶 | 22. 液固分离 |
| 10. 传质 | 23. 粉碎、分级及团聚 |
| 11. 蒸馏 | 24. 化学反应工程 |
| 12. 气体吸收 | 25. 化工自动控制 |
| 13. 气液传质设备 | 26. 化工系统工程 |

DT82/05

880100

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司

苏元复 华东化工学院

汪家鼎 清华大学

委员

卢焕章 中国寰球化学工程公司

区灿棋 中国石油化工总公司

邓颂九 华南工学院

朱亚杰 华东石油学院

朱自强 浙江大学

余国琮 天津大学

时 钧 南京化工学院

沈 复 华东石油学院

吴锡军 江苏省科委

李步年 陕西省化工设计院

蔡剑秋 化学工业出版社

林纪方 大连工学院

杨友麒 化学工业部计算中心筹备处

张洪沅 成都科技大学

张剑秋 北京燕山石油化学总公司研究院

郑 炯 上海医药设计院

郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

傅举孚 北京化工学院

萧成基 化学工业部北京化工研究院

第15篇《增湿与减湿》

编写人

张有衡 姚虎卿 南京化工学院

审校人

时 钧 南京化工学院

目 录

15.1 绪论	1
(1) 循环水的冷却	1
(2) 气体的降温与除尘	1
(3) 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用	1
(4) 溶剂回收	2
(5) 空气调湿	2
15.2 湿气体的性质及湿度图表	4
15.2.1 湿气体的性质	4
(1) 湿度	4
(2) 相对湿度与饱和度	4
(3) 湿气体的比容和重度	5
(4) 湿气体的比热和焓	5
(5) 露点	6
(6) 绝热饱和温度	10
(7) 湿球温度	11
(8) 湿度的测定	16
15.2.2 湿气体的湿度图及其应用	16
(1) 湿空气的 $t-H$ 图	16
(2) 高温下湿气体的 $t-H$ 图	20
(3) 湿空气的焓-湿图 ($I-H$ 图)	22
(4) 总压对湿气体性质的影响	22
参考文献	25
15.3 增湿与减湿过程的计算基础	26
15.3.1 气体与液体间的传热与传质关系	26
(1) 增湿塔内的传热与传质关系	26
(2) 减湿塔内的传热与传质关系	27
15.3.2 增湿与减湿塔的气液平衡线与操作线	28
15.3.3 传热与传质速率方程	30
15.3.4 气液相界面状态及气体的温度和湿度	31
(1) 气液相界面状态	31
(2) 气体的温度与湿度	31
(3) 气液相界面状态和气体状态在塔内的分布	32
(4) 气液相界面状态和气温的图解法	33
15.3.5 塔高的计算	35
15.3.6 横流式增湿与减湿过程	38
15.3.7 增湿与减湿过程的设计	43
(1) 工艺参数的选择	43
(2) 塔设备的设计	44
(3) 辅助设备的设计与选型	44

参考文献	44
15.4 循环水冷却塔的设计	45
15.4.1 概述	45
15.4.2 塔型和塔结构的选择	46
15.4.3 气象参数	48
15.4.4 冷却塔的热力计算	49
(1) 焓差法	50
(2) 用辛普生公式计算冷却数	53
(3) 温度差法	54
(4) 平均压差法	54
(5) 横流式冷却塔的热力计算	56
(6) 冷却塔的热力特性	61
(7) 冷却塔热力与动力的综合计算方法	65
15.4.5 冷却塔的通风阻力	67
(1) 填料层的通风阻力	68
(2) 冷却塔的局部通风阻力	71
15.4.6 补充水量的计算	78
(1) 蒸发损失的水量	78
(2) 通风损失的水量	79
(3) 渗漏损失的水量	79
(4) 排污损失的水量	79
15.4.7 辅助设备的选择	80
(1) 通风设备	80
(2) 配水系统	82
参考文献	83
15.5 传热与传质速率数据	84
15.5.1 填料塔传热与传质系数的实验关联式和实测数据	84
15.5.2 喷雾塔传热与传质系数的实验关联式和实测数据	92
15.5.3 传热与传质系数的测定	96
参考文献	98
符号表	100
MKS制和SI制换算表	101

15.1 绪 论

增湿与减湿是指可凝蒸汽在某一物质中含量的增加与减少,这种物质可以是气体、液体或固体。但通常所指的增湿与减湿是不凝气体中可凝蒸汽含量的变化,亦称气体的增湿与减湿,其中不凝者为“干”气体,可凝者为“湿”组分,最常见的湿组分是水蒸汽。例如,在空气与水蒸汽的气体混合物中,空气为干气体,水蒸汽为湿组分,当空气中的水蒸汽含量增加时,谓之增湿;反之为减湿。

使气体增湿的方法主要有两种:一是向气体中喷入可凝蒸汽;另一种方法是用高于可凝蒸汽露点的同种液体与气体直接接触,使液体蒸发而增湿。

使气体减湿的方法按其原理可分为如下四种:①冷却减湿——湿气体与低于其可凝蒸汽露点的液体或固体壁面接触使之冷凝;②吸收减湿——湿气体与具有吸湿性的液体或固体(如浓硫酸、氢氧化钾、氯化钙等)进行化学或物理吸收;③吸附减湿——用固体吸附剂(如硅胶、分子筛、活性炭等)吸附气体中的可凝蒸汽;④压缩减湿——将湿气体压缩到一定的压力,再间接冷却到可凝蒸汽的露点之下,使其冷凝减湿。

本篇主要讨论湿气体与其可凝蒸汽相同的液体直接接触,使该气体实现增湿或减湿的过程。这种增湿与减湿过程的应用主要有如下几个方面:

(1) 循环水的冷却

作为冷却介质使用后的温水,经与空气直接接触,可以将其冷却后再循环使用,这一过程在电力、化工等工业和其他工程设施方面的应用非常广泛。循环水的冷却通常采用湿式冷却塔来实现,这是一个空气增湿过程,本篇15.4章将详细地进行讨论。

(2) 气体的降温与除尘

对于煤气、炉气等含有灰尘的高温气体,可以用水进行洗涤,使其降温与除尘。这种直接洗涤气体的特点是传热效率高,且节省了单独设置气体除尘的设备。洗涤用的装置以往多为木格填料塔,现在主要用喷射塔,以降低气体在洗涤过程的阻力。气体经洗涤塔的冷却过程多为减湿;但当气体中原来的水蒸汽含量很少时,在洗涤过程中也可能是增湿。水经洗涤塔后温度升高,若需循环使用,则可用冷却塔进行冷却,组合成水的加热与冷却的循环系统,其循环流程示于图1-1。

(3) 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用

湿气体中的可凝蒸汽与低于其露点的同种液体接触时,蒸汽将冷凝释放出潜热使液温升高,被加热的液体可以作为热源利用。典型的例子为合成氨工业中一氧化碳变换工序所用的饱和塔与热水塔系统。该系统示于图1-2,两个塔叠加在一起,塔径相等,而塔高不等,塔内装填料或筛板。含有水蒸汽的湿变换气在热水塔内与水直接接触,变换气中的水蒸汽冷凝释放出潜热,同时气体降温向水传递显热。被加热的热水再经间接换热器加热后送至饱和塔,与半水煤气接触使气体升温并增湿,以提供一氧化碳变换反应所需的水蒸汽,水经饱和塔冷却后再流到热水塔循环使用。在此过程中,水为热量的载体,在热水塔内回收热量,而在饱和塔内利用其热量产生水蒸汽,所回收和利用的热量约为 $(2.0 \sim 3.0) \times 10^5 \text{ kcal/1000 Nm}^3$ 半水煤气。这种直接换热的过程不仅传热效率高,而且不需锅炉就可以得到水蒸汽。在这个

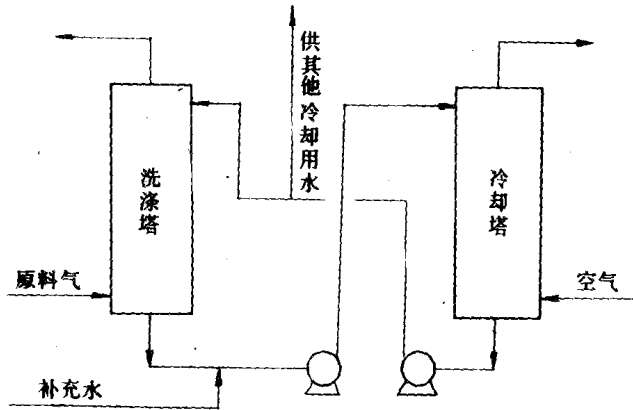


图 1-1 洗涤塔与冷却塔的水循环系统示意图

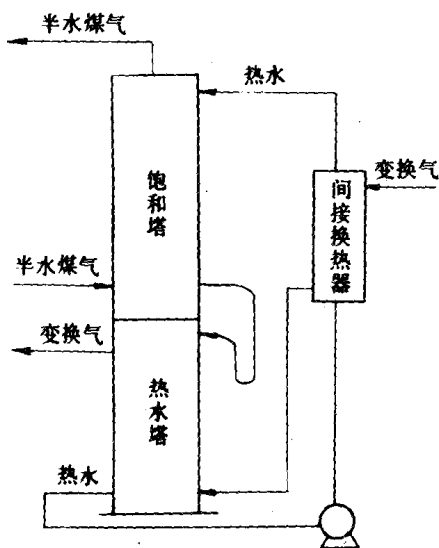


图 1-2 加压下操作的饱和塔与热水塔系统

系统中，半水煤气通过饱和塔与水接触为增湿过程；变换气通过热水塔与水接触为减湿过程，两个塔的操作参数是相互有关的。

(4) 溶剂回收

气体中含有的某种可凝蒸汽（如苯、甲醇、三氯乙烯等），可用低于其露点的同种液体与该气体直接接触，使可凝蒸汽冷凝下来予以回收，这是一种较为简单地回收溶剂的方法。例如，在甲醇生产过程排放的废气中含有甲醇蒸汽，采用冷甲醇液体洗涤该气体，回收其中的甲醇蒸汽，即可减少甲醇的损失。显然，溶剂回收为气体的减湿过程，所用的装置一般为填料塔或板式塔。

(5) 空气调湿

空气调湿是调节房屋内部或某一空间空气中的水蒸汽含量，在调节湿度的同时，往往伴随着调节空气的温度。调湿的目的主要是为使生产过程、设备仪器和物品等保持其固有的性能，或是为增进人们的舒适感。但在工业上，空气调湿的具体应用主要有如下几个方面：①控制吸湿性物料的湿度；②保持仪器具有较高精密度所需的湿度；③控制生物化学反应或金属腐蚀的速度；④满足实验室的环境要求；⑤消除静电影响。

空气调湿既可以是增湿过程，又可以是减湿过程。它的装置视其用途不同而有多种型式，图1-3是空气调湿装置的基本组成示意图。根据所需要的温度和湿度条件，可以调节空气的流量、喷入的水量以及加热和冷却的负荷。

综合上述各种气体与液体直接接触的增湿与减湿过程看出，在气、液两相之间同时发生热量传递与质量传递。该过程是由两个相和两种组分所组成的体系，在气相的组分是不凝的

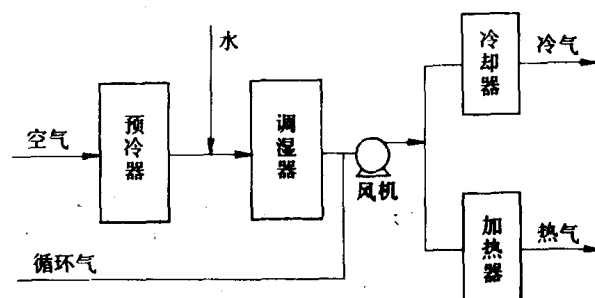


图 1-3 空气调节装置示意图

干气和可凝蒸汽；在液相则是与可凝蒸汽相同的单一组成。虽然，气体和液体中还可能混有其它组分，在气液接触过程中，也可能有某些杂质发生溶解或汽化，但它们的变化均不予考虑。

15.2 湿气体的性质及湿度图表

15.2.1 湿气体的性质

在气体的增湿与减湿过程中,湿气体中的可凝蒸汽发生变化,而干气体作为载气,它的重量认为是不变的。因此,为了计算的方便起见,有关湿气体的参数多以单位重量的干气为基准。有关湿气体诸参数的物理意义及其相互之间的关系介绍如下:

(1) 湿度

气体中可凝蒸汽的含量称为湿度,又称湿含量,它以单位重量干气体中可凝蒸汽的重量来表示,即

$$H = \frac{G_v}{G_d} = \frac{M_v n_v}{M_d n_d} \quad (2-1)$$

式中 H ——湿度, kg可凝蒸汽/kg干气 (kg_v/kg_d)

G_v ——可凝蒸汽的重量, kg

G_d ——干气体的重量, kg

M_v 、 M_d ——分别为可凝蒸汽和干气体的分子量

n_v 、 n_d ——分别为可凝蒸汽和干气体的摩尔数, mol或kmol

对于理想气体,湿度可表示为

$$H = \frac{M_v}{M_d} \frac{p_v}{P - p_v} \quad (2-2)$$

式中 P 、 p_v ——分别为湿气体的总压和可凝蒸汽的分压, atm或 kg/cm^2 。

对于空气中所含的水蒸汽,其湿度为

$$H = \frac{18.016}{28.96} \frac{p_v}{P - p_v} = 0.622 \frac{p_v}{P - p_v} \quad (2-3)$$

有时也把 H 称为绝对湿度。而且绝对湿度也可用体积分率表示:

$$Y = \frac{p_v}{P - p_v} \quad (2-4)$$

(2) 相对湿度与饱和度

湿气体中的可凝蒸汽分压 p_v 与同温度下可凝蒸汽的饱和压力 p_s 之比称为湿气体的相对湿度,即

$$\varphi = p_v / p_s \quad (2-5)$$

由于 p_s 随温度升高而增加,故当 p_v 一定时,相对湿度 φ 随温度升高而减小。

将式(2-5)代入式(2-2),得

$$H = \frac{M_v}{M_d} \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad (2-6)$$

对于含有水蒸汽的湿空气,其湿度可表示为

$$H = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad (2-7)$$

当气体中的可凝蒸汽达到饱和时, $\varphi = 1$, 此时的饱和湿度为

$$H = \frac{M_v}{M_d} \frac{p_s}{P - p_s} \quad (2-8)$$

此式表明, 当干气体与可凝蒸汽的组分一定时, 饱和湿度为总压和温度的函数, 且随总压的增加而减小; 随温度升高而增大。

湿气体的湿度与其同温度下的饱和湿度之比称为饱和度, 即

$$\psi = \frac{H}{H_s} = \frac{1 - p_s/P}{1 - \varphi p_s/P} \varphi \quad (2-9)$$

或

$$\varphi = \frac{\psi}{1 - (1 - \psi)p_s/P} \quad (2-9a)$$

对于含有水蒸汽的湿空气, 在 50°C 以下时, 饱和水蒸汽压远小于大气压力, 故相对湿度与饱和度相差甚小, 两值近似相等。

(3) 湿气体的比容和重度

湿气体的比容 v_H 是以 1 kg 干气体的重量作为基准的湿气体体积 (即干气体的体积与可凝蒸汽的体积之和)。按理想气体来考虑, 干气体比容 v_d 与可凝蒸汽的比容 v_v 分别为

$$v_d = \frac{22.4}{M_d} \times \frac{1.033}{P} \times \frac{273 + t_g}{273} \quad (2-10)$$

$$v_v = \frac{22.4}{M_v} \times \frac{1.033}{P} \times \frac{273 + t_g}{273} \quad (2-10a)$$

式中 t_g —— 气体的温度, $^\circ\text{C}$

则湿气体的比容 v_H 可根据上列两式及湿度合并计算而成, 即

$$v_H = 22.4 \left(\frac{1}{M_d} + \frac{H}{M_v} \right) \times \frac{1.033}{P} \times \frac{273 + t_g}{273} \quad (2-11)$$

若湿气体为含水蒸汽的湿空气, 在标准大气压下, 其比容为

$$v_H = (0.773 + 1.244H) \frac{273 + t_g}{273} \quad (2-12)$$

湿气体的重度 γ 为单位湿气体体积 (包括干气体及可凝蒸汽的体积) 的总重量。由于湿气体的比容是以 1 kg 干气体的重量为基准, 故湿气体的重度为

$$\gamma = (1 + H)/v_H \quad (2-13)$$

饱和湿气体的比容 v_{HS} 和重度 γ_s , 以饱和湿度 H_s 代替上列各式中的湿度 H 即可求得。

含水蒸汽的湿空气, 在标准大气压下, 各不同温度 t_g 和湿度 H 时的重度 γ 值列于表2-1。

当湿空气的压力不等于 1 atm 时, 可先从表2-1中查取湿空气的重度值, 再除以工作压力 (atm), 即得该压力下的重度。

(4) 湿气体的比热和焓

以单位重量的干气体为基准的湿气体比热简称为湿比热 c_H , 湿比热与干气体的比热和可凝蒸汽的比热为如下的关系:

$$c_H = c_d + c_v H \quad (2-14)$$

式中 c_H ——湿比热, kcal/kg_d·°C
 c_d ——干气体的比热, kcal/kg_d·°C
 c_v ——可凝蒸汽的比热, kcal/kg_v·°C

表 2-1 含水蒸汽的湿空气的重量, kg/m³

温度, °C		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
湿度 kg/kg _d	0.0	1.293	1.270	1.248	1.226	1.205	1.185	1.166	1.147	1.128	1.111	1.093
	0.01	—	—	1.240	1.219	1.198	1.178	1.159	1.140	1.122	1.104	1.087
	0.02	—	—	—	—	—	1.171	1.152	1.133	1.115	1.097	1.080
	0.03	—	—	—	—	—	—	—	1.127	1.109	1.091	1.074
	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	1.103	1.085	1.068
	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.079	1.063

对于常压下含水蒸汽的湿空气, 在0~200°C的温度范围内, 可近似把 c_d 和 c_v 视为常数, 其值分别为0.24 kcal/kg_d·°C和0.461 kcal/kg_v·°C, 则湿空气的湿比热仅随湿度 H 而变, 即

$$c_H = 0.24 + 0.461H \quad (2-15)$$

以单位重量干气体为基准的湿气体的焓与干气体的焓和可凝蒸汽的焓为如下的关系:

$$I = I_d + I_v H \quad (2-16)$$

式中 I ——湿气体的焓, kcal/kg_d

I_d ——干气体的焓, kcal/kg_d

I_v ——可凝蒸汽的焓, kcal/kg_v

在进行增湿与减湿过程的计算时, 为方便起见, 通常规定干气体和可凝蒸汽的液态在0°C时的焓作为参考状态, 即在此状态下的焓为零。在其他温度下, 湿气体的焓值等于可凝组分在0°C汽化时所需的潜热以及干气体和可凝蒸汽从0°C升至该温度所需的显热之和, 据此, 式(2-16)可以改写成如下的形式:

$$I = c_d t_g + (r_0 + c_v t_g)H = c_H t_g + r_0 H \quad (2-17)$$

式中 r_0 ——0°C时可凝蒸汽的冷凝潜热, kcal/kg_v

在式(2-17)中, 右端第一项为湿气体的显热, 第二项为可凝组分的潜热。当干气体的组成和总压一定时, 湿气体的焓随温度和湿度而变; 而饱和状态下湿气体的焓则仅为温度的函数。

对于含水蒸汽的湿空气, 根据式(2-15)和式(2-17), 得其焓值为:

$$I = (0.24 + 0.461H) t_g + 597.1 H \quad (2-18)$$

式中的597.1为0°C时水的汽化潜热, kcal/kg。

(5) 露点

不饱和的湿气体在总压和湿度保持不变的情况下, 使其冷却达到饱和状态时的温度, 称为该湿气体的露点 t_s 。当达到露点时, 气体中的可凝蒸汽分压为其饱和蒸汽压 p_s , 它与饱和湿度 H_s 的关系可由式(2-8)改写为

$$p_s = \frac{H_s P}{\frac{M_v}{M_d} + H_s} \quad (2-19)$$

对于含水蒸汽的湿空气, 其饱和蒸汽压为

$$p_s = \frac{H_s P}{0.622 + H_s} \quad (2-20)$$

从上列两式看出, 当干气体的组成和总压一定时, 饱和蒸汽压仅与气体的湿度有关, 亦即露点仅取决于湿度。

露点与饱和蒸汽压的关系由实测而得, 至今已发表了许多数据, 常用的数据可从本手册第一篇以及Perry, J. H.: Chemical Engineers' Handbook, 5th ed., McGraw-Hill, New York (1973) 和化学工学协会编“化学工学便览”(改订四版) 丸善株式会社(1978)等手册查取; “Hydrocarbon Processing”、“物性定数”等刊物也收录了有关露点与饱和蒸汽压的数据。

对于含有水蒸汽的湿空气, 露点与饱和水蒸汽压的关系可由Antone式求取⁽¹⁾:

$$\log p_s = 8.10765 - \frac{1750286}{235 + t_s} \quad (2-21)$$

式中 p_s 的单位为mmHg; t_s 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。此式在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间的计算误差较小。在 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 露点可用下列近似式求取:

$$t_s = 100 p_s^{0.25} \quad (2-22)$$

式中 p_s 的单位为 kg/cm^2 ; t_s 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

Keenan和Keyes⁽²⁾根据实验数据关联出计算湿空气中饱和水蒸汽压的经验式:

$$p_s = \frac{a}{\exp \left[\frac{bx(c + dx + ex^3)}{(f - x)(1 + gx)} \right]} \quad (2-23)$$

式中 $x = 673.4 - 1.8t_s$

$a = 2.181625 \times 10^2$; $b = 2.302585$; $c = 3.2437814$; $d = 3.26014 \times 10^{-3}$; $e = 2.00658 \times 10^{-9}$; $f = 1.16509 \times 10^3$; $g = 1.21547 \times 10^{-3}$ p_s 的单位为atm; t_s 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

例 2-1 已知含水蒸汽的湿空气总压为1 atm, 温度为 25°C , 相对湿度为70%。试计算

①湿度; ②焓; ③露点; ④比容; ⑤重度。

解 先由式(2-21)计算 25°C 时的饱和水蒸汽压 p_s ;

$$\log p_s = 8.10765 - \frac{1750.286}{235 + 25} = 1.3758, \text{ 则 } p_s = 23.756 \text{ mmHg}$$

① 由式(2-7)计算空气的湿度

$$H = 0.622 \frac{0.7 \times 23.756}{760 - 0.7 \times 23.756} = 0.0139 \text{ kg}_w/\text{kg}_a$$

② 由式(2-18)计算湿空气的焓

$$I = (0.24 + 0.461 \times 0.0139) \times 25 + 595 \times 0.0139 = 14.4 \text{ kcal/kg}_a$$

③ 为计算湿空气的露点, 先求取其水蒸汽压分压 $p_p = 0.7 \times 23.756 = 16.629 \text{ mmHg}$ 以此值为饱和水蒸汽压, 代入式(2-21), 反算得其露点 $t_s = 19.16^{\circ}\text{C}$ 。

④ 湿空气的比容, 按式(2-12)计算

$$v_H = (0.773 + 1.244 \times 0.0139) \frac{273 + 25}{273} = 0.863 \text{ m}^3/\text{kg}_a$$

⑤ 湿空气的重度, 按式(2-13)计算

$$\gamma = (1 + 0.0139) / 0.863 = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

对于含有水蒸汽的湿空气, 上述诸参数的数据列入表2-2⁽³⁾。

表 2-2 含水蒸汽的湿空气性质

温 度 t ℃	水和水蒸汽的性质				干空气的性质(1atm)		饱和湿空气的性质(1atm)		
	水的饱和 蒸汽压 p_s kg/cm ²	饱和水的焓 i_s kcal/kg	饱和水蒸汽 的焓 i_v kcal/kg	饱和水蒸汽 的比容 v_v m ³ /kg	比 容 v_d m ³ /kg	焓 I_d kcal/kg	比 容 v_H m ³ /kg _a	焓 I_s kcal/kg _a	湿 度 H_s kg _v /kg _a
0	0.006228	0.00	597.1	206.3	0.7738	0.00	0.7786	2.253	0.003772
1	0.006697	1.01	597.6	192.5	0.7767	0.2402	0.7813	2.665	0.004057
2	0.007194	2.01	598.0	179.9	0.7795	0.4805	0.7850	3.089	0.004361
3	0.007724	3.02	598.5	168.1	0.7823	0.7207	0.7882	3.525	0.004685
4	0.008289	4.02	598.9	157.2	0.7852	0.9609	0.7915	3.974	0.005031
5	0.008891	5.03	599.3	147.1	0.7880	1.201	0.7948	4.437	0.005399
6	0.009530	6.03	599.8	137.7	0.7908	1.441	0.7982	4.914	0.005791
7	0.010210	7.03	600.2	129.0	0.7937	1.682	0.8016	5.407	0.006208
8	0.010932	8.04	600.7	120.9	0.7965	1.922	0.8050	5.917	0.006652
9	0.011699	9.04	601.1	113.4	0.7993	2.162	0.8085	6.443	0.007124
10	0.012513	10.04	601.5	106.4	0.8021	2.402	0.8120	6.988	0.007625
11	0.013376	11.04	602.0	99.86	0.8050	2.643	0.8155	7.553	0.008159
12	0.014292	12.04	602.4	93.79	0.8078	2.883	0.8192	8.138	0.008725
13	0.015263	13.04	602.9	88.13	0.8106	3.123	0.8228	8.744	0.009326
14	0.016290	14.04	603.3	82.86	0.8135	3.364	0.8265	9.373	0.009964
15	0.017378	15.04	603.8	77.94	0.8163	3.604	0.8303	10.03	0.01064
16	0.018529	16.04	604.1	73.34	0.8191	3.844	0.8341	10.70	0.01136
17	0.019747	17.04	604.6	69.06	0.8220	4.084	0.8380	11.41	0.01212
18	0.021034	18.03	605.0	65.05	0.8248	4.325	0.8420	12.14	0.01293
19	0.022395	19.03	605.5	61.31	0.8276	4.565	0.8460	12.91	0.01378
20	0.023830	20.03	605.9	57.81	0.8305	4.805	0.8501	13.70	0.01469
21	0.025347	21.03	606.3	54.53	0.8333	5.046	0.8543	14.53	0.01564
22	0.026948	22.02	606.8	51.46	0.8361	5.286	0.8585	15.39	0.01666
23	0.028637	23.02	607.2	48.59	0.8390	5.528	0.8629	16.29	0.01777
24	0.030415	24.02	607.6	45.90	0.8418	5.767	0.8673	17.23	0.01887
25	0.032291	25.02	608.1	43.37	0.8446	6.007	0.8719	18.21	0.02007
26	0.034266	26.01	608.5	41.01	0.8475	6.247	0.8766	19.20	0.02134
27	0.036347	27.01	608.9	38.79	0.8503	6.488	0.8813	20.30	0.02268
28	0.038536	28.01	609.4	36.70	0.8531	6.728	0.8862	21.41	0.02410
29	0.040838	29.01	609.8	34.75	0.8560	6.969	0.8912	22.58	0.02560
30	0.043261	30.00	610.2	32.91	0.8588	7.209	0.8963	23.80	0.02718
31	0.045807	31.01	610.7	31.18	0.8616	7.449	0.9016	25.07	0.02886
32	0.048482	32.01	611.1	29.55	0.8645	7.690	0.9070	26.41	0.03063
33	0.051292	33.00	611.5	28.02	0.8673	7.930	0.9126	27.80	0.03249
34	0.054240	33.99	611.9	26.58	0.8701	8.171	0.9183	29.26	0.03447
35	0.057337	34.99	612.4	25.23	0.8730	8.411	0.9229	30.80	0.03655
36	0.060585	35.99	612.8	23.95	0.8758	8.652	0.9283	32.40	0.03875
37	0.063990	36.99	613.2	22.75	0.8786	8.892	0.9367	34.08	0.04107
38	0.067561	37.98	613.7	21.61	0.8815	9.133	0.9431	35.84	0.04352
39	0.071301	38.98	614.1	20.54	0.8843	9.373	0.9499	37.70	0.04611
40	0.075220	39.98	614.5	19.54	0.8871	9.614	0.9568	39.64	0.04884
41	0.079324	40.98	614.9	18.58	0.8900	9.854	0.9640	41.67	0.05173
42	0.083620	41.97	615.4	17.68	0.8928	10.09	0.9714	43.81	0.05478

续表

温度 t ℃	水和水蒸汽的性质				干空气的性质 (1atm)		饱和湿空气的性质 (1atm)		
	水的饱和 蒸汽压 p_s kg/cm ²	饱和水的焓 i_s kcal/kg	饱和水蒸汽 的焓 i_v kcal/kg	饱和水蒸汽 的比容 v_v m ³ /kg	比 容 v_d m ³ /kg	焓 I_d kcal/kg	比 容 v_H m ³ /kg	焓 I_s kcal/kg	湿 度 H_s kg./kg
43	0.088112	42.97	615.8	16.82	0.8956	10.34	0.9792	46.06	0.05800
44	0.092813	43.97	616.2	16.02	0.8985	10.58	0.9872	48.43	0.06140
45	0.097729	44.96	616.7	15.26	0.9013	10.82	0.9955	50.91	0.06499
46	0.10287	45.95	617.1	14.55	0.9041	11.06	1.004	53.52	0.06878
47	0.10824	46.96	617.5	13.87	0.9070	11.30	1.013	56.27	0.07297
48	0.11384	47.95	617.9	13.22	0.9098	11.54	1.022	59.16	0.07703
49	0.11968	48.95	618.3	12.62	0.9126	11.78	1.032	62.21	0.08151
50	0.12581	49.95	618.8	12.04	0.9155	12.02	1.042	65.42	0.08625
51	0.13219	50.95	619.2	11.49	0.9184	12.26	1.053	68.81	0.09126
52	0.13884	51.95	619.6	10.97	0.9211	12.50	1.064	72.37	0.09657
53	0.14577	52.94	620.0	10.48	0.9240	12.74	1.076	76.14	0.1022
54	0.15301	53.94	620.4	10.01	0.9268	12.98	1.088	80.12	0.1081
55	0.16054	54.94	620.8	9.572	0.9296	13.22	1.101	84.33	0.1144
56	0.16839	55.94	621.2	9.152	0.9325	13.46	1.114	88.78	0.1211
57	0.17657	56.94	621.7	8.754	0.9353	13.70	1.128	93.49	0.1282
58	0.18508	57.94	622.2	8.375	0.9381	13.94	1.143	98.48	0.1358
59	0.19394	58.94	622.5	8.016	0.9410	14.19	1.158	103.76	0.1438
60	0.20316	59.94	622.9	7.675	0.9438	14.43	1.175	109.37	0.1523
61	0.21275	60.94	623.3	7.349	0.9466	14.67	1.192	115.3	0.1613
62	0.22272	61.94	623.7	7.039	0.9495	14.91	1.210	121.7	0.1709
63	0.23309	62.94	624.2	6.745	0.9523	15.15	1.230	128.4	0.1812
64	0.24386	63.94	624.6	6.465	0.9551	15.39	1.250	135.6	0.1922
65	0.25506	64.93	625.0	6.198	0.9580	15.63	1.272	143.2	0.2039
66	0.26669	65.93	625.4	5.944	0.9608	15.87	1.295	151.4	0.2164
67	0.27876	66.93	625.8	5.703	0.9636	16.11	1.320	160.2	0.2298
68	0.29129	67.93	626.2	5.472	0.9665	16.35	1.346	169.5	0.2442
69	0.30430	68.93	626.6	5.253	0.9693	16.59	1.374	179.6	0.2597
70	0.31780	69.93	627.0	5.043	0.9721	16.84	1.404	190.4	0.2763
71	0.33197	70.93	627.4	4.844	0.9750	17.08	1.436	202.0	0.2943
72	0.34631	71.94	627.8	4.653	0.9778	17.32	1.471	214.6	0.3136
73	0.36136	72.94	628.3	4.471	0.9806	17.56	1.508	228.1	0.3346
74	0.37696	73.94	628.7	4.298	0.9835	17.80	1.548	242.8	0.3573
75	0.39313	74.94	629.1	4.132	0.9863	18.04	1.592	258.8	0.3820
76	0.40986	75.94	629.5	3.974	0.9891	18.28	1.640	276.3	0.4090
77	0.42720	76.95	629.9	3.822	0.9920	18.52	1.691	295.3	0.4385
78	0.44516	77.95	630.3	3.678	0.9948	18.76	1.748	317.2	0.4709
79	0.46374	78.95	630.7	3.540	0.9976	19.00	1.810	339.2	0.5066
80	0.48297	79.95	631.1	3.408	1.0004	19.25	1.879	364.6	0.5460
81	0.50286	80.95	631.5	3.281	1.003	19.49	1.955	392.8	0.5898
82	0.52344	81.96	631.9	3.160	1.006	19.73	2.040	424.3	0.6387
83	0.54472	82.96	632.3	3.044	1.009	19.97	2.134	459.6	0.6936
84	0.56673	83.96	632.6	2.934	1.012	20.21	2.241	499.5	0.7557
85	0.58947	84.96	633.0	2.828	1.015	20.45	2.362	544.9	0.8263

温 度 t °C	水和水蒸汽的性质				干空气的性质 (1atm)		饱和湿空气的性质 (1atm)		
	水的饱和 蒸汽压 p_s kg/cm ²	饱和水的焓 i_s kcal/kg	饱和水蒸汽 的焓 I_s kcal/kg	饱和水蒸汽 的比容 v_v m ³ /kg	比 容 v_d m ³ /kg	焓 I_d kcal/kg	比 容 v_H m ³ /kg _d	焓 I_s kcal/kg _d	湿 度 H_s kg _s /kg _d
86	0.61296	85.97	633.4	2.726	1.017	20.69	2.502	597.0	0.9072
87	0.63723	86.97	633.8	2.629	1.020	20.93	2.662	657.2	1.001
88	0.66231	87.97	634.2	2.536	1.023	21.17	2.850	727.7	1.111
89	0.68821	88.98	634.6	2.446	1.026	21.41	3.073	811.2	1.241
90	0.71493	89.98	635.0	2.361	1.029	21.65	3.340	911.6	1.397
91	0.74253	90.98	635.4	2.278	1.032	21.89	3.667	1035	1.589
92	0.77101	91.99	635.8	2.200	1.034	22.13	4.076	1189	1.829
93	0.80038	92.99	636.2	2.124	1.037	22.37	4.603	1387	2.138
94	0.83069	94.00	636.6	2.051	1.040	22.61	5.306	1652	2.551
95	0.86193	95.00	636.9	1.981	1.043	22.85	6.291	2023	3.130
96	0.89416	96.01	637.4	1.915	1.046	23.09	7.770	2581	3.999
97	0.92738	97.01	637.7	1.851	1.049	23.33	10.24	3511	5.449
98	0.96161	98.02	638.1	1.789	1.051	23.57	15.17	5373	8.352
99	0.99689	99.03	638.5	1.730	1.054	23.81	29.98	10960	17.06
100	1.03323	100.04	638.8	1.673	1.057	24.05	—	—	—

(6) 绝热饱和温度

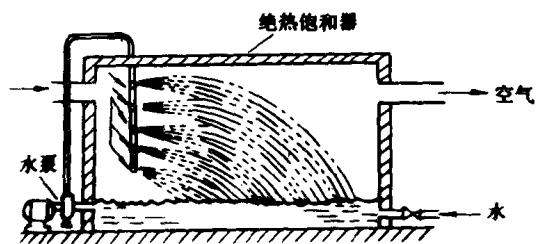


图 2-1 绝热饱和器

图2-1为一绝热饱和器,假定含有水蒸汽的不饱和空气(温度为 t_g 、湿度为 H),连续地通入器内与大量喷洒的水接触,水用泵循环,认为水温是完全均匀的。因饱和器处于绝热,故水向空气中汽化时所需的潜热,只能取自空气中的显热,使空气的湿度增加,而温度降低,但湿空气的焓是不变的。当空气被水所饱和之后,

气温就不再下降而等于循环水的温度,此温度称为空气的绝热饱和温度 t_{as} ,对应的饱和湿度为 H_{as} 。

对于其他气体与液体接触的体系,按上述方法同样可以得其绝热饱和温度。在绝热饱和过程中,由于湿气体的焓是保持不变的,故湿气体在进入绝热饱和器时的焓 I 等于经绝热增湿而降温至 t_{as} 时的焓 I_{as} 。根据式(2-17),可以得出:

$$\begin{aligned} I_{as} = I &= (c_d + c_v H) t_g + r_0 H \\ &= (c_d + c_v H_{as}) t_{as} + r_0 H_{as} \end{aligned} \quad (2-24)$$

由于在温度不太高时 H 与 H_{as} 一般均甚小,且忽略 c_d 与 c_v 随温度的变化,则可近似取

$$c_d + c_v H \approx c_d + c_v H_{as} \approx c_H$$

于是,由式(2-24)可得

$$t_{as} = t_g - \frac{r_0}{c_H} (H_{as} - H) \quad (2-25)$$

式(2-25)称为绝热饱和方程。由于 H_{as} 取决于 t_{as} ,故当干气体的组成和总压一定时,气