

工业厂房通风技术

刘锦梁 苏永森 主编

天津科学技术出版社

工业厂房通风技术

刘锦梁 苏永森 主编

天津科学技术出版社

内 容 提 要

本书以改善工业厂房作业环境为内容，系统地介绍工业厂房通风的基本原理、设计和计算方法，并结合基本理论知识扼要介绍了有关通风系统的运行管理。

本书可作为工业企业从事通风设计、管理技术人员的参考，也可供学校有关专业师生作参考书。

工业厂房通风技术

刘锦梁 苏永森 主编

责任编辑：李国常

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷四厂印刷

新华书店天津发行所发行

开本 787×1092毫米 1/16 印张 23 插页 1 字数 555,000

一九八五年十月第一版

一九八五年十月第一次印刷

印数：1—10,000

书号：15212·167 定价：4.80元

目 录

第一章 湿空气的物理性质及焓湿图	(1)
第一节 湿空气的物理性质	(1)
第二节 湿空气的焓湿图 ($i-d$ 图)	(6)
第三节 焓湿图的应用	(7)
第四节 空气状态测定方法	(13)
第二章 空气环境与健康	(17)
第一节 人体与环境之间的热平衡	(17)
第二节 有害物质对人体的危害	(22)
第三节 卫生标准与排放标准	(23)
第四节 改善空气环境	(25)
第三章 有害物散发量的计算	(26)
第一节 各种有害气体及蒸气的散发量	(26)
第二节 生产设备与人体的散热量	(30)
第三节 散湿量的计算	(38)
第四节 太阳辐射热对建筑物的热作用	(41)
第四章 通风方法及通风系统的组成	(46)
第一节 房间通风的主要方法	(46)
第二节 全面通风换气量的确定	(48)
第三节 全面通风的气流组织方式	(50)
第四节 空气平衡及热平衡	(52)
第五节 通风系统的组成及构件	(54)
第五章 通风管道	(60)
第一节 通风管道的种类	(60)
第二节 通风管道内空气流动的阻力	(61)
第三节 风管内的压力及其变化	(66)
第四节 通风管道的计算	(69)
第五节 均匀送风管道的计算	(75)
第六节 通风管道设计中的有关问题	(79)

第六章 通风机 (82)

第一节 通风机的分类及性能参数 (82)

第二节 离心式通风机 (85)

第三节 轴流式通风机 (93)

第四节 通风机在管网中的运行工况及调节 (97)

第五节 通风机的选择 (110)

第六节 通风机的试调及运行维护 (119)

第七章 局部排风 (121)

第一节 设计局部吸气罩的基本原则 (121)

第二节 防尘密闭罩、通风柜 (123)

第三节 外部吸气罩 (127)

第四节 接受式吸气罩 (140)

第五节 槽边吸气罩 (145)

第六节 气流覆盖式(吹吸式)槽边吸气罩 (154)

第八章 除尘技术 (158)

第一节 粉尘分类及其基本性质 (158)

第二节 除尘器的分类、压力损失及除尘效率 (162)

第三节 重力式沉降室 (169)

第四节 旋风式除尘器 (172)

第五节 过滤式除尘器 (184)

第六节 湿式除尘器 (194)

第七节 电除尘器 (198)

第八节 卸尘装置 (207)

第九节 除尘装置的选择 (212)

第十节 除尘系统的设计与计算 (214)

第十一节 除尘系统的运行管理 (221)

第九章 自然通风与降温 (223)

第一节 自然通风 (223)

第二节 局部送风 (237)

第十章 热风采暖 (243)

第一节 概述 (243)

第二节 暖风机 (243)

第三节 集中送风式热风采暖 (245)

第四节 热风采暖系统的运行管理 (254)

第五节 大门空气幕	(255)
第六节 空气加热器	(263)
第十一章 通风系统的消声	(272)
第一节 基本概念	(272)
第二节 通风机的声功率级	(275)
第三节 噪声控制标准	(277)
第四节 通风系统中噪声的自然衰减	(279)
第五节 通风系统必要消声量的计算	(283)
第六节 消声原理和消声器	(286)
第十二章 通风系统的测试与调整	(297)
第一节 通风系统测定常用仪表	(297)
第二节 通风系统的测定	(306)
第三节 通风系统风量的调整	(312)
第四节 通风系统测试中对发现问题的分析和处理	(314)
第五节 含尘空气的检测	(314)
主要参考文献	(322)
附录	(324)
附录 1 空气的重量、体积、水蒸气压力和含湿量 (压力为760毫米水银柱)	(324)
附录 2 车间空气中有害物质的最高容许浓度	(326)
附录 3 十三类有害物质的排放试行标准	(330)
附录 4 居住区大气中有害物质的最高容许浓度	(332)
附录 5 夏季太阳辐射热总辐射强度 (千卡/米 ² ·时)	(333)
附录 6 a、b 矩形风管流量当量直径换算表 (a、b为任意单位)	(339)
附录 7 局部阻力系数	(343)
附录 8 各种粉尘的爆炸浓度下限	(356)
附录 9 管道平衡 $\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)^{0.225}$ 值	(357)
附录 10 通风柜工作口截面的排风速度	(357)
附录 11 工业企业设计噪声标准 (草案)	(359)
附录 12 国际单位制与工程单位制的换算表	(360)
附图 湿空气焓湿图 (i-d 图)	(插页)

第一章 湿空气的物理性质及焓湿图

通风工程是以空气为介质去改善空气环境，而环境中的空气均为湿空气，因此需要了解湿空气的物理性质、状态变化以及空气中各参数之间的关系。

第一节 湿空气的物理性质

一、湿空气的组成

大气是由干空气和水蒸气两部分组成的混合气体，称为湿空气，简称空气。其中，干空气的成分比较稳定，其主要成分如表1-1所示。

表 1-1 干空气组成成分表

组成气体	氮	氧	惰性气体（氮、氦、氩等）	二氧化碳
体积（%）	78.09	20.95	0.93	0.03
重量（%）	75.53	23.14	1.28	0.05

在自然环境中绝对干燥的空气是不存在的。湿空气中的水蒸气是来源于地球表面上各种水分的蒸发。其含量甚少，所占的百分比也不稳定，随季节、地区的气候特征以及水源分布情况的不同而变化。湿空气的干湿程度，将直接影响到人体的舒适感觉和产品的质量。

此外，大气中还含有少量的悬浮尘埃、烟、雾和微生物等。它们直接影响着空气的清洁程度。

二、湿空气的状态参数

湿空气的物理性质，除与其组成成分有关外，还取决于它所处的状态。湿空气的状态通常采用压力、温度、湿度、比容和焓等参数来表示，这些参数称为湿空气的状态参数。

在研究湿空气性质时，我们把干空气视为理想气体。而存在于湿空气中的水蒸气，由于分压力很低，比容很大，而且含量甚微，也可以近似地把它当作理想气体来对待，所以湿空气可视为理想混合气体。它也应遵循理想气体的规律，可用理想气体状态方程式来表示其压力、体积及温度之间的关系。即

$$Pv = RT \text{ (对于 1 公斤气体)} \tag{1-1}$$

或 $PV = GRT \text{ (对于 G 公斤气体)} \tag{1-2}$

式中 P —— 气体的绝对压力（公斤/米²）

v —— 气体的比容（米³/公斤）

V —— G 公斤气体的体积（米³）

G —— 气体的重量（公斤）

T —— 气体的绝对温度（K）

R —— 气体常数（公斤·米/公斤·K），其值取决于气体的性质，而与气体所处的状态无关。对于干空气 $R_g = 29.3$ ，对于水蒸气 $R_v = 47.1$ 。

1. 空气的压力

(1) 大气压力(B) 地球表面上的大气层对地面所产生的压力,称为大气压力。其单位一般以毫米水银柱来表示。大气压力不是一个定值,随地区海拔高度不同而不同,随季节、天气变化而稍有变化。通常以纬度 45° 处海平面上测得的常年平均大气压力等于760毫米水银柱,作为一个标准大气压(或称物理大气压)。

工程上不用物理大气压单位,而是采用公斤/厘米²为单位。把1.0公斤/厘米²叫作一个工程大气压。其单位换算如下:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1.0 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 10000 \text{ 公斤/米}^2 \text{ 或毫米水柱} \\ &= 735.6 \text{ 毫米水银柱} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 标准大气压} &= 760 \text{ 毫米水银柱} \\ &= 1.0332 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 10332 \text{ 公斤/米}^2 \text{ 或毫米水柱} \end{aligned}$$

通风工程中采用工程大气压。因使用的压力很小,所以均以公斤/米²或毫米水柱计之。

(2) 水蒸气分压力(P_v) 任何气体由于分子热运动,它都具有一定的压力。在混合气体中某种气体的压力即为分压力。气体分压力就是混合气体中各组成气体单独占有混合气体容积,其温度与混合气体温度相同时所产生的压力。对于理想气体,道尔顿定律指出:混合气体总压力等于各组成气体分压力之和。因为大气是干空气和水蒸气组成的混合气体,所以大气压力必然等于干空气分压力 P_a 与水蒸气分压力 P_v 之总和。即

$$B = P_a + P_v \quad \text{毫米水银柱} \quad (1-3)$$

显然,空气中水蒸气量越多,其分压力就越大。因此,水蒸气分压力的大小直接反映了空气中水蒸气含量的多少。

2. 空气的温度

空气的温度是表征空气冷热程度的参数。衡量温度的高低必须确定统一的温标,目前工程上常用的温标有摄氏温标和绝对温标。摄氏温标规定:在标准大气压下,把纯水冰点定为 0°C ,沸点定为 100°C ,在冰点与沸点之间划分为100等分,每一等分就是摄氏温度1度,用符号 t 表示,单位为摄氏度,代号为 $^\circ\text{C}$ 。绝对温标(开尔文温标)用符号 T 表示,单位为开尔文,代号为 K 。绝对温度的零度是由物理学理论推导出来的最低温度。 0 K 等于 -273.16°C (工程上可取 -273°C)。绝对温标每 1 K 与摄氏温标每 1°C 在数值上完全相等,所以两者的关系为:

$$T = 273 + t \quad \text{K} \quad (1-4)$$

3. 空气的湿度

空气的潮湿程度、空气中含有水蒸气量的多少是用湿度来表示的。其表示方法有下面几种:

(1) 绝对湿度(Z) 1米³湿空气中含有的水蒸气量(公斤)称为湿空气的绝对湿度。即

$$Z = \frac{G_v}{V} \quad \text{公斤/米}^3 \quad (1-5)$$

因为湿空气中的水蒸气被看作为理想气体,根据公式(1-2)可写出:

$$P_s V = G_s R_s T$$

则

$$Z = \frac{G_s}{V} = \frac{P_s}{R_s T} \quad (1-6)$$

式中 P_s ——湿空气中水蒸气分压力 (毫米水银柱)

V ——湿空气的体积 (米³)

R_s ——水蒸气的气体常数

T ——湿空气的绝对温度 (K)。

由公式 (1-6) 可知, 绝对湿度随水蒸气分压力和温度两个参数而变化。在同一温度条件下, 水蒸气分压力愈大, 绝对湿度也愈大。但由于空气的体积随温度而变化, 所以绝对湿度也随温度而变化, 使用上并不方便。

(2) 含湿量 (d) 湿空气是由于空气和水蒸气所组成的, 其中 1 公斤干空气所含有的水蒸气量 (克), 称为含湿量。即

$$d = \frac{1000 G_s}{G_k} \text{ 克/公斤干空气} \quad (1-7)$$

式中 G_s ——湿空气中水蒸气的重量 (公斤)

G_k ——湿空气中干空气的重量 (公斤)。

上式是 1 公斤干空气所含有的水蒸气量, 实际上也就是 $\left(1 + \frac{d}{1000}\right)$ 公斤的湿空气中含有 d 克水蒸气量。由于干空气的重量不因温度变化、水蒸气量的变化而改变, 所以用含湿量 d 来确定空气中实际水蒸气量的多少是很方便的。

根据理想气体状态方程式可写出:

对于水蒸气

$$G_s = \frac{P_s V_s}{R_s T_s}$$

对于干空气

$$G_k = \frac{P_k V_k}{R_k T_k}$$

将上面二式代入公式 (1-7), 因 $V_k = V_s$ 、 $T_k = T_s$ 、当分压力单位为毫米水银柱时, $R_k = 2.155$, $R_s = 3.465$, 则得

$$\begin{aligned} d &= 1000 \frac{R_k}{R_s} \frac{P_s}{P_k} = 1000 \frac{2.155}{3.465} \frac{P_s}{P_k} \\ &= 622 \frac{P_s}{P_k} \text{ 克/公斤干空气} \end{aligned} \quad (1-8)$$

因 $P_k = B - P_s$, 上式可写为

$$d = 622 \frac{P_s}{B - P_s} \text{ 克/公斤干空气} \quad (1-9)$$

从上式可以看出, 含湿量与大气压力、水蒸气分压力有关。对某一地区, 大气压力可认为是一个定值, 则空气的含湿量就只取决于水蒸气分压力的大小, 水蒸气分压力愈大, 含湿

量也就愈大。当水蒸气分压力一定时，大气压力愈大，含湿量就愈小。

(3) 饱和湿度 空气在容纳水蒸气方面有这样一种物理特性，即在一定温度下，一定量的空气中只能容纳一定限度的水蒸气量。如果超过这一限度，多余的水蒸气就会从湿空气中凝析出来，形成雾状或水滴。这个最大限度的水蒸气量称为饱和湿度。

饱和湿度与空气的温度有关，随温度的提高或降低而增加或减小。空气温度已定，饱和湿度也随之确定。

当湿空气实际所含水蒸气量达到该温度下饱和湿度时，这种湿空气称为饱和空气。这时所对应的水蒸气分压力、绝对湿度与含湿量，相应地称为饱和水蒸气分压力、饱和绝对湿度与饱和含湿量。它们的数值可根据空气的物理性质表查得，见附录 1。

(4) 相对湿度 (φ) 空气中水蒸气的实际含量接近于饱和的程度，称为相对湿度 (又称饱和度)，以百分数表示。即

$$\varphi = \frac{Z}{Z_b} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 Z ——湿空气的绝对湿度

Z_b ——同温度下湿空气的饱和绝对湿度。

不论空气的温度如何，由 φ 值的大小就可以直接说明空气的干湿程度。 φ 值小，表示空气干燥，有较强的吸收水分的能力。 φ 值大，表示空气潮湿，吸收水分的能力较弱。 $\varphi = 0$ 时为干空气， $\varphi = 100\%$ 时为饱和空气。

相对湿度还可另外形式来表达。根据公式 (1-6) 可写出：

绝对湿度为

$$Z = \frac{P_s}{R_s T}$$

在同温度下的饱和绝对湿度为

$$Z_b = \frac{P_b}{R_s T}$$

式中 P_b ——在温度 T 时的饱和水蒸气分压力 (毫米水银柱)。

把上面二式代入公式 (1-10)，就可以得到用水蒸气分压力来表示空气相对湿度的表达式。

即

$$\varphi = \frac{Z}{Z_b} \times 100\% = \frac{P_s}{P_b} \times 100\% \quad (1-11)$$

又根据公式 (1-9) 湿空气的含湿量为

$$d = 622 \frac{P_s}{B - P_s}$$

在同温度下的饱和含湿量为

$$d_b = 622 \frac{P_b}{B - P_b}$$

两式相比：

$$\frac{d}{d_b} = \frac{B - P_b}{B - P_s} \cdot \frac{P_s}{P_b} = \frac{B - P_b}{B - P_s} \varphi / 100\%$$

则

$$\varphi = \frac{(B - P_s) d}{(B - P_b) d_b} \times 100\%$$

由于大气压力 B 较之 P_s 与 P_b 大得多, 可以认为 $B - P_s \approx B - P_b$, 因此相对湿度又可近似地用含湿量之比来表示:

$$\varphi \approx \frac{d}{d_b} \times 100\% \quad (1-12)$$

因为 $P_s = \varphi P_b$, 把它代入公式 (1-9), 还可写出含湿量的另一表达式:

$$d = 622 \frac{\varphi P_b}{B - \varphi P_b} \text{克/公斤干空气} \quad (1-13)$$

4. 空气的焓 (i)

在通风工程中, 空气状态的变化过程 (如加热或冷却等) 一般都是在空气压力变化不大的条件下进行的, 可视为定压过程。由工程热力学可知, 在定压过程中, 空气状态变化过程中的热量变化, 可用过程前后的焓差来计算。

湿空气的焓是以 1 公斤干空气为标准的。它是 1 公斤干空气的焓和 $\frac{d}{1000}$ 公斤水蒸气的焓的总和, 即相对于 $(1 + \frac{d}{1000})$ 公斤湿空气而言的。即

$$i = i_g + \frac{d}{1000} i_s \text{千卡/公斤干空气} \quad (1-14)$$

式中 i_g ——1 公斤干空气的焓 (千卡/公斤)

i_s ——1 公斤水蒸气的焓 (千卡/公斤)。

工程热力学规定, 0°C 的干空气和 0°C 的水的焓值为零, 则 $t^\circ\text{C}$ 状态下的

干空气的焓: $i_g = 0.24 t$

水蒸气的焓: $i_s = 597.3 + 0.44 t$

式中 0.24——干空气的定压比热 (千卡/公斤· $^\circ\text{C}$)

0.44——水蒸气的定压比热 (千卡/公斤· $^\circ\text{C}$)

597.3—— 0°C 时水的气化潜热 (千卡/公斤)。

所以湿空气的焓为:

$$i = 0.24 t + (597.3 + 0.44 t) \frac{d}{1000} \text{千卡/公斤干空气} \quad (1-15)$$

上式中 $0.24 t + 0.44 t \frac{d}{1000}$ 是随温度而变化的热量, 称为显热。而 $597.3 \frac{d}{1000}$ 是 0°C 时

$\frac{d}{1000}$ 公斤水的气化热, 它仅随含湿量变化, 与温度无关, 所以称为潜热。显热加潜热称为全

热 (亦称为总热量)。焓值的大小及其变化取决于空气的温度和含湿量两个因素。温度在

0°C 及 0°C 以上的湿空气, 焓为正值; 在 0°C 以下的湿空气, 当 $597.3 \frac{d}{1000} > 0.24 t + 0.44 t$

$\frac{d}{1000}$ 时, 焓为正值, 而当 $597.3 \frac{d}{1000} < 0.24 t + 0.44 t \frac{d}{1000}$ 时, 则焓为负值。

【例1-1】已知 $B = 760$ 毫米水银柱, 空气温度 $t = 20^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 50\%$, 求空气的

含湿量和焓。

【解】由附录 1 查得，当 $t = 20^{\circ}\text{C}$ 时，饱和水蒸气分压力 $P_b = 17.39$ 毫米水银柱。

由公式 (1-13) 求得

$$d = 622 \times \frac{0.5 \times 17.39}{760 - 0.5 \times 17.39} = 7.2 \text{ 克/公斤干空气}$$

由公式 (1-15) 求得

$$\begin{aligned} i &= 0.24 \times 20 + (597.3 + 0.44 \times 20) \times \frac{7.2}{1000} \\ &= 9.2 \text{ 千卡/公斤干空气} \end{aligned}$$

第二节 湿空气的焓湿图 (i - d 图)

上节介绍了空气状态诸参数及其相互间的关系。其中温度 t 、相对湿度 φ 、含湿量 d 与焓 i 是主要参数。在一定大气压力下，已知其中两个参数即可利用公式计算出其余的参数。但为了计算应用方便，可以利用上述一些公式编制成各种大气压力下的线算图，即湿空气焓湿图 (i - d 图)。 i - d 图可以清晰地表示出湿空气状态诸参数的关系，不仅图上的每一个点都表征湿空气的一个状态，而且可以用来描述湿空气状态的变化过程，所以湿空气焓湿图是通风工程计算中的一种重要图表（在附录中给出了气压为 760 毫米水银柱的湿空气 i - d 图）。

i - d 图是用斜坐标法绘制成的。为使图面线条清晰，坐标轴之间的夹角取 135° ，以焓 (i) 为纵标，含湿量 (d) 为横标。但是实际所使用的 i - d 图，为了避免图面过长，而取一水平辅助线来代替实际的含湿量 d 轴。

湿空气焓湿图中主要包括四组等值线，如图 1-1 所示。

1. 等含湿量线

与纵轴平行的一系列垂直线为等含湿量线。在坐标轴原点上 $d = 0$ ，自左向右 d 值逐渐增加。

2. 等焓线

与横轴成平行的并与等含湿量线相交 135° 角的一系列平行线为等焓线。通过原点的横轴 $i = 0$ 。横轴以上的焓值为正，以下为负。

3. 等温线

它是根据公式 $i = 0.24t + (597.3 + 0.44t) \frac{d}{1000}$ 绘制的。当 $t = \text{常数}$ 时，则 i 与 d 成直线关系，所以在 i - d 图中等温线是一系列直线。但温度不同的等温线并不是互相平行的，随着温度的增高，等温线的斜率逐渐增大。

4. 等相对湿度线

它是根据公式 $d = 622 \frac{\varphi P_b}{B - \varphi P_b}$ 绘制的。在一定的大气压力 B 下，当给定某一 φ 值时，含湿量 d 与饱和水蒸气分压力 P_b 有一系列相对应之值。而 P_b 又是温度 t 的单值函数（其值可由附录 1 查得）。因此可以根据温度 t 含湿量 d 之间的对应关系，在 i - d 图上找到若干点，连接这些点即得该 φ 值的等相对湿度曲线。用同样的方法便可作出不同 φ 值的等相对湿度曲

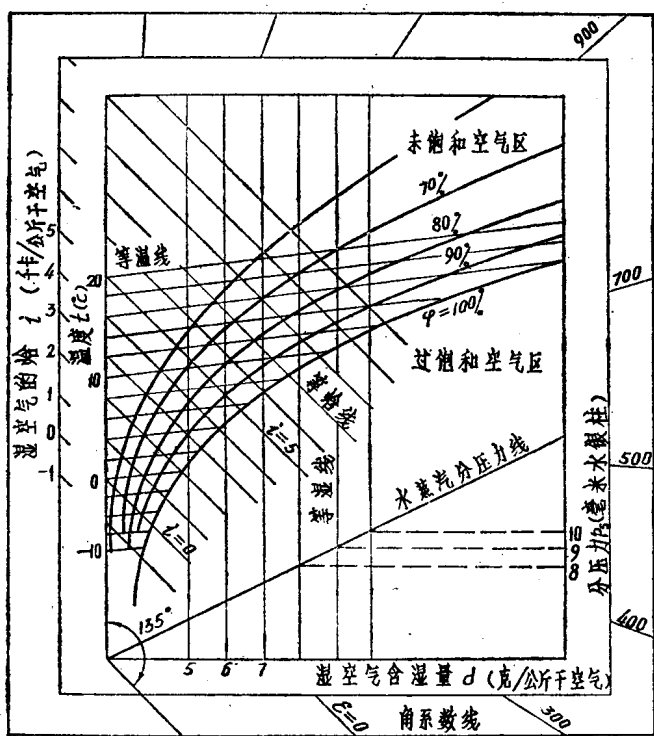


图 1-1 湿空气焓湿图

线。

$\varphi = 100\%$ 的相对湿度曲线称为饱和曲线。该曲线上的各点均表示湿空气的饱和状态。饱和曲线把整个 $i-d$ 图划分为两个区域，它的上部为未饱和空气区，下部为过饱和空气区。在未饱和空气区域中的水蒸气处于过热状态，在过饱和空气区域中的水蒸气被凝析出来，形成细小雾状而存在，所以也称雾状区。

除上述四组主要等值线外，在图的右下角还绘有水蒸气分压力线。由公式 (1-9) 可以看出，当大气压力一定时，水蒸气分压力 P_v 与含湿量 d 相互对应，每给定一个 d 值，就可得到相应的 P_v 值，近似为一条直线。在右侧纵边框上标出水蒸气分压力 P_v 的数值，单位为毫米水银柱。另外，在图框的外围还绘有热湿比 e 线，此线的物理意义见下节。

因为湿空气的状态与大气压力有关， $i-d$ 图都是根据给定的某一大气压力绘制而成的。因此，在使用时必须选择与当地大气压力相适应的 $i-d$ 图。

第三节 焓湿图的应用

一、确定空气状态参数

在 $i-d$ 图上的每一个点都表征空气的一个状态。只要已知空气的任意两个参数，就可在图上确定出该空气状态点的位置，从而可以查出其余的参数。例如，已知 $B = 700$ 毫米水银柱，空气温度 $t = 20^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\varphi = 50\%$ ，即可在 $i-d$ 图上找到其状态点，如图 1-2 中点 A 。通过点 A 可查得： $d = 7.4$ 克/公斤干空气， $P_v = 8.8$ 毫米水银柱； $d_s = 14.4$ 克/公斤干空气，

$P_b = 17.3$ 毫米水银柱以及 $i = 9.2$ 千卡/公斤干空气。

二、空气的露点温度

空气的饱和含湿量是随着空气温度的下降而减小的。某一未饱和状态的空气，在实际含湿量不变的情况下，使其温度下降，由公式（1-12）可知，对应的饱和含湿量减小，而其相对湿度就会增加。当空气温度下降到使其相对湿度增至 $\varphi = 100\%$ 时，空气即成为饱和状态。如再下降，空气即变为过饱和状态，空气中的水蒸气就开始凝析出来（结露）。因此把某一状态的空气沿等含湿量线冷却，最终达到饱和时所对应的温度称为该空气的露点温度，以 t_l 表示。

按上述的定义即可利用 $i-d$ 图（如图1-2），通过空气状态点 A 的等含湿量线向下交于 $\varphi = 100\%$ 曲线点 l 而查得露点温度 t_l 。

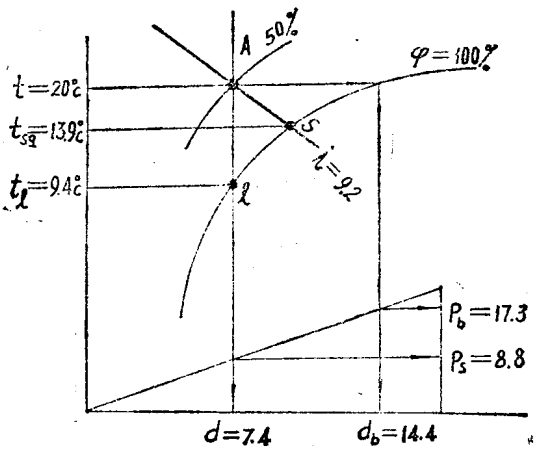


图 1-2 焓湿图上的空气状态及其各参数关系
($B = 700$ 毫米水银柱)

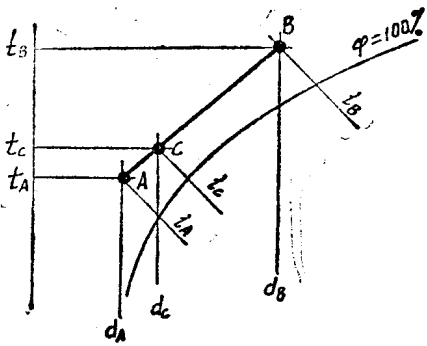


图 1-3 两种空气的混合过程

三、确定空气的混合状态

在通风和空调工程中，经常遇到 A 、 B 两种不同状态的空气相混的情况，如图1-3所示。 A 状态的风量为 G_A 公斤/时，参数为 t_A 、 i_A 、 d_A ， B 状态的风量为 G_B 公斤/时，参数为 t_B 、 i_B 、 d_B 。设混合后的空气状态为 C ，混合空气重量 $G_C = G_A + G_B$ 公斤/时，参数为 t_C 、 i_C 、 d_C 。在混合过程中假定与外界无热、湿的交换，根据热、湿平衡原理，可写出下列两个方程式：

$$G_A i_A + G_B i_B = (G_A + G_B) i_C \quad (1-16)$$

$$G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_C \quad (1-17)$$

由上二式可分别写出

$$\frac{G_B}{G_A} = \frac{i_C - i_A}{i_B - i_C} \quad (1-18)$$

$$\frac{G_B}{G_A} = \frac{d_C - d_A}{d_B - d_C} \quad (1-19)$$

$$\text{所以} \quad \frac{G_B}{G_A} = \frac{i_C - i_A}{i_B - i_C} = \frac{d_C - d_A}{d_B - d_C} \quad (1-20)$$

或

$$\frac{i_C - i_A}{d_C - d_A} = \frac{i_B - i_C}{d_B - d_C} \quad (1-21)$$

显然，在*i*-*d*图上，上式中 $\frac{i_C - i_A}{d_C - d_A}$ 是直线 $\overline{AC}$ 的斜率，而 $\frac{i_B - i_C}{d_B - d_C}$ 是直线 $\overline{CB}$ 的斜率。两个斜率相同，又都通过一个公共点*C*，则*A*、*B*、*C*三点必然在同一条直线上。这说明了两种不同状态的空气进行混合，其混合状态点是位于两状态点*A*、*B*的连线上。

由公式 (1-16)、(1-17) 可分别求得

$$i_C = \frac{G_A i_A + G_B i_B}{G_A + G_B} \quad (1-22)$$

$$d_C = \frac{G_A d_A + G_B d_B}{G_A + G_B} \quad (1-23)$$

当已知*i_C*或*d_C*之后，在*i*-*d*图中引*i_C*等焓线或*d_C*等含湿量线与 $\overline{AB}$ 直线相交，其交点即为混合状态点*C*，随之可查出*C*点的其余参数。

混合状态点位置也可以用作图法来确定。从几何学可以证明：

$$\frac{\overline{CA}}{\overline{BC}} = \frac{d_C - d_A}{d_B - d_C} = \frac{i_C - i_A}{i_B - i_C} = \frac{G_B}{G_A} \quad (1-24)$$

此式说明了混合点*C*将 $\overline{AB}$ 直线分成两段，即 $\overline{AC}$ 和 $\overline{CB}$ ，而且两段长度之比同参与混合的两种空气重量成反比。当*G_A* = *G_B*时，*C*点在 $\overline{AB}$ 线段的中间；当*G_A* > *G_B*时，则*C*点向*A*点靠近；当*G_B* > *G_A*时，则*C*点向*B*点靠近。因此，求混合空气状态点十分简单，可不用公式计算，只要在*i*-*d*图上把*A*、*B*连成直线，再根据与其重量成反比的关系，即可找到混合状态点*C*。

【例1-2】已知*B* = 760毫米水银柱，*G_A* = 2000公斤/时，其参数为*t_A* = 20℃，*φ_A* = 60%，*G_B* = 500公斤/时，其参数为*t_B* = 35℃，*φ_B* = 80%，求其混合空气状态。

【解】在*B* = 760毫米水银柱的*i*-*d*图上找到状态点*A*、*B*，连直线 $\overline{AB}$ ，如图1-4。设混合状态点为*C*，根据公式 (1-24) 得：

$$\frac{\overline{CA}}{\overline{BC}} = \frac{G_B}{G_A} = \frac{500}{2000} = \frac{1}{4}$$

将直线 $\overline{AB}$ 分成五等分，则*C*点位于靠近*A*点的一等分处。相应地查得*t_C* = 23.1℃，*φ_C* = 73%，*i_C* = 13.4千卡/公斤干空气，*d_C* = 12.8克/公斤干空气。

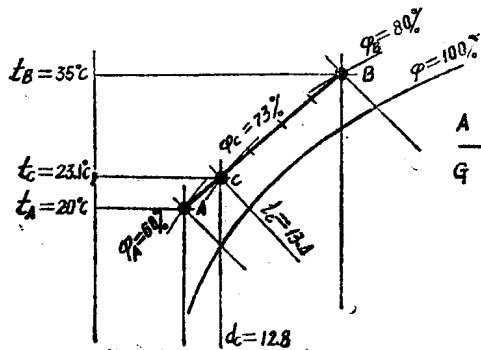


图 1-4

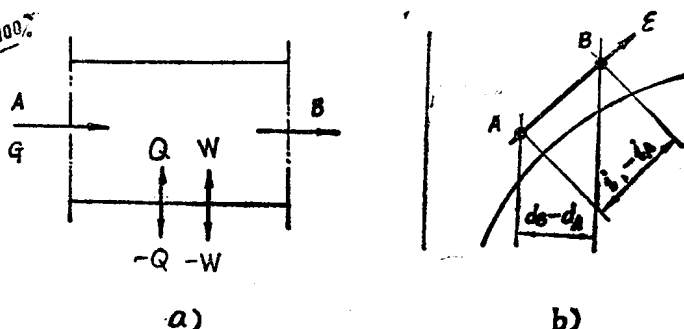


图 1-5 空气与热、湿交换时的状态变化

四、表示空气状态的变化过程

$i-d$ 图上每一个点都代表着空气的某一状态, 那么, 空气由一种状态逐渐变化到另一种状态, 显然也可以用其变化过程中的许多状态点的连线来表示其状态的变化过程。

假设有 G 公斤/时的空气, 通过某一热力装置 (或房间) 的过程中与热、湿接触。空气吸收 (或失去) 了总热量 (包括显热和潜热) Q 千卡/时和湿量 W 公斤/时, 空气由状态 A 将变为状态 B , 如图1-5所示。

空气焓的变化为:

$$i_B - i_A = \frac{Q}{G} \quad (1-25)$$

空气含湿量的变化为:

$$\frac{d_B - d_A}{1000} = \frac{W}{G} \quad (1-26)$$

利用上二式可以确定出空气的终状态点 B 的参数。如果空气状态由 A 变化到 B 的整个过程中, 空气的热、湿交换是同时而均匀进行的, 那么, 在 $i-d$ 图上由状态 A 到状态 B 的带箭头的直线连线, 就应代表空气状态的变化过程, 如图1-5之 b)。这种空气状态变化过程的方向和特征常用热湿比来表示。

将公式 (1-25) 除以 (1-26) 可得:

$$\frac{i_B - i_A}{\frac{d_B - d_A}{1000}} = \frac{Q}{W}$$

把 $\frac{Q}{W}$ 的比值称为热湿比, 即参与热、湿交换的热量与湿量之比。用符号 ϵ 表示, 则

$$\epsilon = \frac{Q}{W} = \frac{i_B - i_A}{\frac{d_B - d_A}{1000}} = \frac{\Delta i}{\frac{\Delta d}{1000}} \quad (1-27)$$

由此可见, 热湿比 ϵ 实际上就是直线 AB 的斜率, 故又称角系数。它反映出 A 状态空气与热、湿进行交换, 其状态变化是沿着斜率等于 ϵ 的直线进行的, 所以此线称为空气状态变化过程线。

在 $i-d$ 图上任何一条带有方向性的直线, 都相应地代表某一热湿比值的空气状态变化过程。为了应用方便, 根据两种不同空气状态与热、湿交换, 只要它们的热湿比值一样, 这两种空气状态变化过程线是平行的这一特性, 就可在 $i-d$ 图上事先以某一点为中心 (一般取坐标原点), 绘出一系列的不同热湿比 ϵ 值的方向线 (为了图面清晰, 只在 $i-d$ 图的边框上划出这一系列方向线的标尺线), 见图1-1。在应用时, 如果已知空气的初状态及其实际 ϵ 值, 则在 $i-d$ 图上找到与此 ϵ 值相同的标尺线后, 把它平行移动使其通过空气初状态点, 这样就可得到该状态的变化过程线。如果又知道变化过程的终了状态的任一参数, 则变化过程线与该已知参数线的交点, 即为空气终状态点。反之, 如果已知空气的终状态, 同样也可求得空气的初状态。

【例1-3】已知大气压力 $B = 760$ 毫米水银柱, 空气初状态点 A 的参数为 $t_A = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_A = 60\%$, 当它与热、湿接触的过程中而吸收了总热量 $Q = 4000$ 千卡/时和湿量 $W = 2$ 公斤/时之后, 温度变为 $t_B = 28^\circ\text{C}$, 求空气终状态点 B 及该过程的空气量。

【解】在 $B = 760$ 毫米水银柱的 $i-d$ 图上，根据 $t_A = 20^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_A = 60\%$ 确定出初状态点 A ，查得 $i_A = 10.1$ 千卡/公斤干空气， $d_A = 8.85$ 克/公斤干空气，如图1-6所示。

根据公式 (1-27) 求出热湿比为

$$\varepsilon = \frac{Q}{W} = \frac{4000}{2} = 2000$$

在 $i-d$ 图的外框上找到 $\varepsilon = 2000$ 的标尺线，然后过 A 点作与 $\varepsilon = 2000$ 标尺线的平行线，此线即为 A 点状态空气与热、湿交换时的状态变化过程线。空气的终状态点必然在此直线上。引 $t_B = 28^\circ\text{C}$ 等温线与状态变化过程线交于 B 点，此点就是空气的终状态点。由图可查得 $\varphi_B = 43\%$ ， $i_B = 13.0$ 千卡/公斤干空气， $d_B = 10.3$ 克/公斤干空气。

根据公式 (1-25) 可求出该过程的空气量为

$$G = \frac{Q}{i_B - i_A} = \frac{4000}{13.0 - 10.1} = 1380 \text{ 公斤/时}$$

下面在 $i-d$ 图上分析湿空气的几种典型的状态变化过程。

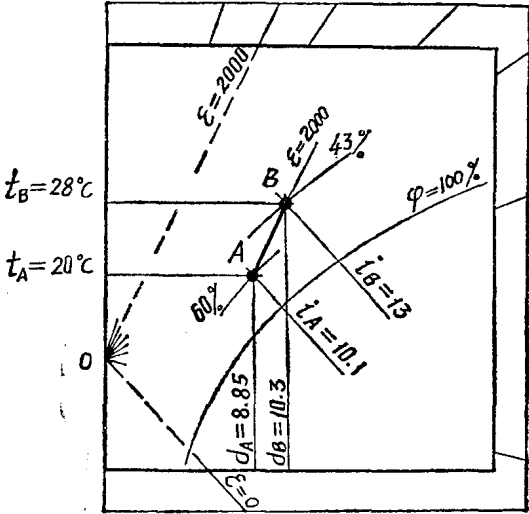


图 1-6

1. 干式加热过程

通风工程中常使空气在含湿量不变的条件下进行加热。例如，冬季的热风供暖系统，空气经过加热器时获得了热量，提高了温度，但是含湿量并没有变化，所以空气状态呈等湿增焓升温过程变化，如图1-7中 $A-B$ 线。由于 $i_B > i_A$ ， $d_B = d_A$ ，故

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{i_B - i_A}{0} = +\infty$$

说明此空气状态的变化过程是沿着 $\varepsilon = +\infty$ 的方向即沿着等含湿量线向上变化。

2. 干式冷却过程

使空气初状态 A 通过表面式空气冷却器，如果冷却器表面平均温度高于空气的露点温度，空气中的水蒸气就不会被凝析出来。空气在含湿量不变情况下进行冷却，焓值减少，所以空气状态呈等湿减焓降温过程变化，如图1-7中 $A-C$ 线。由于 $i_C < i_A$ ， $d_C = d_A$ ，故