

■ 现代企业职业卫生技术丛书 ■

工业通风 与空气调节实用技术

“现代企业职业卫生技术丛书”编委会 编

主编 胡学毅 薄以匀 主审 吕琳



 中国劳动社会保障出版社

现代企业职业卫生技术丛书

工业通风与空气 调节实用技术

“现代企业职业卫生技术丛书”编委会

主 编 胡学毅 薄以匀

主 审 吕 琳

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业通风与空气调节实用技术/胡学毅, 薄以匀主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2011

现代企业职业卫生技术丛书

ISBN 978-7-5045-8802-9

I. ①工… II. ①胡…②薄… III. ①工业生产—通风②工业生产—空气调节 IV. ①X962

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 015856 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

北京市艺辉印刷有限公司印刷装订 新华书店经销

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 422 千字

2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

定价: 48.00 元

读者服务部电话: 010-64929211/64921644/84643933

发行部电话: 010-64961894

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64954652

如有印装差错, 请与本社联系调换: 010-80497374

前 言

通风工程在我国工业现代化过程中，一方面起着改善厂房和生产车间的空气条件，保护职工身体健康、提高劳动生产率的重要作用，另一方面在许多工业部门又是保证生产正常进行，提高产品质量不可缺少的重要组成部分。通风工程在内容上可分为工业通风和空气调节两部分。工业通风的主要任务是：控制生产过程中产生的粉尘、有害气体、有害蒸气、高温、高湿等有害物，创造良好的生产环境，并保护大气环境。当工业通风不能满足要求时，就需要采用空气调节技术加以补充完善。

本书共分十一章，从实用技术的角度出发，概要介绍了湿空气的物理性质、人体与环境、工业有害物的来源等基础知识；简要介绍了工业通风和空气调节的工作原理和一些基本计算方法；比较系统地介绍了工业通风的方式方法及其系统所涉及的风机、风管、排风罩、屋顶通风器等设备设施的选型，厂房空调所涉及的参数调节、各种空调系统适用范围及主要设备选型要点；结合实际需要介绍了通风空调系统的测试、调试和运行管理等方面的基本内容；最后结合使用情况列举了不同场所典型的工业应用实例。书中力图结合工厂实际反映国内外工业通风和空气调节技术在节能领域方面的进展。希望本书能够对读者有所裨益。

本书的第一、三、七、九、十、十一章由北京首钢国际工程技术有限公司胡学毅编写，第二、四、五、六、八章由北京市劳动保护科学研究所薄以匀编写。本书由北京市疾病预防控制中心吕琳主审。

本书在资料收集过程中，得到北京市劳动保护科学研究所李旭工程师大力

支持，同时，本书的编写参考了大量近期有关专家的著作和论文，在此一并深表谢意。

因编者的编写时间和水平有限，书中难免存在不妥和错误之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 空气的物理性质及焓湿图	1
第一节 空气的物理性质	1
第二节 空气的焓湿图 ($i-d$ 图)	6
第三节 焓湿图的应用	8
第四节 空气状态测定方法	13
参考文献	16
第二章 空气环境与工业有害物	17
第一节 人体与环境之间的热平衡	17
第二节 工业有害物的来源及其危害	20
第三节 有害物浓度、职业安全卫生标准 and 环境排放标准	24
第四节 防治工业有害物的综合措施	26
参考文献	27
第三章 有害物散发量的计算和确定	29
第一节 各种有害气体及蒸气的散发量	29
第二节 各类生产设备的散热量	33
第三节 散湿量的计算	41
参考文献	43
第四章 工业通风方法及其系统组成	45
第一节 工业通风方法的分类	45
第二节 全面通风换气量的确定	52
第三节 全面通风的气流组织方式	55
第四节 空气的质量平衡及热平衡	58
第五节 通风系统的组成及构件	61

参考文献	70
第五章 通风管道	71
第一节 通风管道的材质、布置及保温	71
第二节 通风管道内空气流动的阻力	73
第三节 风管内空气的压力分布	81
第四节 通风管道的设计计算	84
第五节 均匀送风管道	92
第六节 通风管道设计中的有关问题	97
参考文献	101
第六章 局部排风	102
第一节 设计局部排风罩的基本原则	102
第二节 密闭罩	103
第三节 通风柜	108
第四节 外部排风罩	109
第五节 槽边排风罩	115
第六节 吹吸式排风罩	119
第七节 接受式排风罩	122
参考文献	126
第七章 通风机	127
第一节 通风机的分类、性能参数与命名	127
第二节 通风机的选择及其与风管系统的连接	136
第三节 通风机在通风系统中的工作特性	137
第四节 通风机的联合工作特性	139
第五节 通风机的运行调节	141
参考文献	144
第八章 自然通风与隔热降温	145
第一节 自然通风	145
第二节 局部送风	160
第三节 空气幕	163

第四节 隔热降温·····	169
参考文献·····	172
第九章 工业厂房的空气调节·····	173
第一节 概述·····	173
第二节 空气参数的确定·····	173
第三节 空调房间对建筑布置和建筑围护结构的热工要求·····	175
第四节 空调房间负荷计算·····	177
第五节 空调系统设计·····	185
第六节 空调系统的气流组织方式和适用范围·····	189
第七节 工业厂房和辅助设施主要空调形式和设备·····	202
第八节 工业洁净空调技术·····	218
参考文献·····	225
第十章 通风空调系统的测试、调试及运行维护·····	226
第一节 通风系统风压、风速、风量的测定·····	226
第二节 送排风口风量的测定·····	231
第三节 局部排风罩风量的测定·····	232
第四节 通风空调系统试运转及调试·····	235
第五节 通风空调系统的运行与维护·····	241
第六节 空调通风系统的检查和清洗·····	249
参考文献·····	253
第十一章 工厂典型通风空调的应用·····	254
第一节 化验室的通风空调应用·····	254
第二节 工厂供水、供气、供油等设施通风应用·····	258
第三节 供配电设施通风与空调应用·····	263
第四节 集中控制室的空调与消防通风·····	268
第五节 生产车间局部和全面通风空调应用·····	274
参考文献·····	277
附录·····	279
附录1 湿空气焓湿图·····	279

附录 2 工作场所空气中化学物质职业接触限值 (OELs) (摘录)	280
附录 3 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	282
附录 4 部分局部构件的局部阻力系数	285
附录 5 几种气体或蒸气的爆炸极限	288
附录 6 通风柜的控制风速	289

第一章 空气的物理性质及焓湿图

通风空调的任务是采用人工的方法创造和保持满足一定要求的空气环境。工业通风主要是消除工业生产过程中产生的粉尘、有害气体和蒸气、余热和余湿的危害；空气调节主要是在自然环境下将室内空气维持一定的温度、湿度、气流速度以及一定的洁净度等。作业场所的空气是工业通风和空气调节的主要处理对象，因此，了解空气的物理性质、状态变化以及空气各种参数之间的关系，是学习和掌握工业通风和空气调节应用技术的必备基础。

第一节 空气的物理性质

一、空气的组成

环绕地球周围的空气层称为大气。从通风空调技术的角度看，大气是由干空气和水蒸气两部分组成的混合气体，通常也将这种组成的空气称为湿空气，简称空气（本书统一用空气表示湿空气）。其中，干空气由氮、氧、氩、二氧化碳、氖和其他一些微量气体所组成，干空气的组成成分比较稳定，其主要成分见表1—1。

表 1—1

干空气组成成分表

组成气体	氮气 (N ₂)	氧气 (O ₂)	氩气 (Ar)	二氧化碳气 (CO ₂)	氖气 (Ne)
相对分子质量	28.01	32.00	39.94	44.01	20.18
体积比 (%)	78.084	20.946	0.934	0.033	0.0018

自然环境中绝对干燥的空气是不存在的。空气中的水蒸气含量很少，它来源于海洋、江河、湖泊表面的水分蒸发，各种生物的生理过程以及工艺生产过程等。在空气中，水蒸气所占的百分比是不稳定的，随季节、气候、湿源等各种条件的变化而改变。空气中水蒸气含量虽少，但其变化对空气的物理性质和状态的影响非常明显。空气干湿程度的改变，直接影响人体舒适感觉、产品质量、工艺过程和设备维护等。此外，大气中还含有少量的悬浮尘埃、烟、雾和微生物等，它们直接影响空气的清洁程度。

工业厂房的空气是大气与作业场所的有关气态物质混合而成的，因此，其成分和性质将产生一系列的变化，如氧气浓度降低，二氧化碳浓度增加，混入各种有毒、有害气体和粉尘，空气的状态参数发生改变等。尽管工业厂房的空气与大气相比，在性质上存在许多差异，但在新鲜空气中其主要成分仍然是氮气、氧气和二氧化碳，干空气组成变化的幅度很小，对于干空气的热工计算几乎没有影响。因此，在通风空调工程中，允许将干空气作为一个整体考虑。

二、空气的基本物理参数

空气的基本物理参数主要包括空气的温度、压力、密度与比体积、湿度、黏性、比热容及焓等。

1. 空气温度

温度是描述物体冷热状态的物理量，是作业场所表征气象条件的主要参数之一。测量温度的标尺简称温标。热力学绝对温标的单位为 K (Kelvin)，用符号 T 表示。国际单位制规定摄氏温标为实用温标，用 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的每 1°C 与热力学温标的每 1 K 完全相同。它们之间的关系为：

$$T = 273.15 + t \quad (1-1)$$

2. 空气压力

空气的压力是压强在工业通风中的体现，也称为空气的静压，它是空气分子热运动对器壁碰撞的宏观表现，用符号 p 表示。根据压力的测算基准的不同，有绝对压力和相对压力两种表示方法。绝对压力是以真空状态绝对零压作为基准的，恒为正值；相对压力是以当地当时同标高的大气压力 B 为基准的，即表示有限空间内（设备或管道）空气的绝对压力与大气压力的差值。相对压力低于大气压力为负压 ($p - B < 0$)，高于大气压力为正压 ($p - B > 0$)。工程上一般采用相对压力。

值得指出的是，大气压力不是一个定值，它随海拔高度不同而变化。另外，在同一地区的不同季节，大气压力也有大约 $\pm 5\%$ 的变化。

压力的单位在国际单位制中为 Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)，压力较大时可采用 kPa ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$)、MPa ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$)。以前工程上习惯采用毫米水柱 (mmH_2O)、毫米汞柱 (mmHg)、标准大气压 (atm) 等。

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.32 \text{ Pa}$$

3. 空气密度与比体积

(1) 空气密度

单位体积空气所具有的质量称为空气的密度，一般用符号 ρ 表示。通常认为空气是均质流体，所以，空气的密度公式为：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——空气的密度， kg/m^3 ；

m ——空气的质量，kg；

V ——空气的体积， m^3 。

一般来说，当空气的温度和压力发生变化时，其体积也会发生变化。所以，空气的密度是随着温度、压力而变化的。

空气的密度应为干空气的密度和水蒸气的密度之和。

$$\rho = \rho_g + \rho_s \quad (1-3)$$

式中 ρ_g ——干空气的密度, kg/m^3 ;

ρ_s ——水蒸气的密度, kg/m^3 。

由气体状态方程和道尔顿分压定律可以得出湿空气的密度计算公式:

$$\rho = 0.003484 \frac{B}{273+t} - 0.00134 \frac{\varphi p_b}{273+t} \quad (1-4)$$

式中 B ——当地空气的大气压, Pa ;

φ ——空气的相对湿度, 用小数表示;

p_b ——温度为 t 时的饱和水蒸气分压, Pa ;

t ——空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由于水蒸气的密度较小, 在工程中湿空气的密度常近似取干空气的密度。

(2) 空气比体积

单位质量空气所占有的体积称为空气比体积, 一般用符号 v 表示。比体积和密度互为倒数, 它们是一个状态参数的两种表达方式, 即:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-5)$$

在工业通风中, 空气流经复杂的通风网络时, 其温度和压力将会发生一系列的变化, 这些变化都将引起空气密度的变化。在不同的作业场所, 其变化规律是不同的。在实际应用中, 应考虑什么情况下可以忽略密度的变化, 什么条件又是不可忽略的。

4. 空气湿度

表示空气湿度的方法有绝对湿度、相对湿度和含湿量三种。

(1) 绝对湿度

单位体积空气中所含水蒸气的质量称为空气的绝对湿度。用符号 ρ_s 表示:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (1-6)$$

式中 m_s ——水蒸气的质量, kg ;

V ——空气的体积, m^3 。

在一定的温度和压力下, 单位体积空气所能容纳的水蒸气量是有极限的, 超过这一极限值, 多余的水蒸气就会凝结出来。这种含有极限值水蒸气的空气叫饱和空气, 其所含的水蒸气量叫饱和湿度, 用 ρ_b 表示。此时的水蒸气分压叫饱和水蒸气压, 用 p_b 表示。由于空气的体积随温度变化, 所以绝对湿度也随温度而变化, 故在工程使用上并不方便。

(2) 相对湿度

单位体积空气中实际含有的水蒸气量 ρ_s 与相同温度下的饱和水蒸气量 ρ_b 之比称为空气的相对湿度, 也称为饱和度, 用符号 φ 表示:

$$\varphi = \rho_s / \rho_b \approx d / d_b \quad (1-7)$$

式中 d 、 d_b ——分别为同温度下空气的实际含湿量和饱和湿度含湿量, kg/kg 干空气。

φ 值可用小数表示, 也可用百分数表示。 φ 值小表示空气干燥, 吸收水分的能力强; 反

之, φ 值大则表示空气潮湿, 吸收水分能力弱。 $\varphi = 0$ 时为干空气, $\varphi = 1$ 时为饱和空气。

不饱和空气随温度的下降其相对湿度逐渐增大。冷却达到 $\varphi = 1$ 时的温度称为露点温度。再继续冷却, 其中的水蒸气会因过饱和而凝结成水。反之, 当温度升高时, 空气的相对湿度会减小。

(3) 含湿量

含有 1 kg 干空气的空气中所含水蒸气的质量 (kg) 称为空气的含湿量, 用符号 d 表示:

$$d = 0.622 \frac{p_s}{B - p_s} = 0.622 \frac{\varphi p_b}{B - \varphi p_b} \quad (\text{kg/kg 干空气}) \quad (1-8)$$

式中 B ——当地空气大气压, Pa;

φ ——空气的相对湿度, 用小数表示;

p_s ——水蒸气分压力, Pa;

p_b ——温度为 t 时的饱和水蒸气压, Pa。

由上式可见, 含湿量与大气压、水蒸气分压有关, 水蒸气分压又与相对湿度和对应温度下的饱和水蒸气压有关。对某一地区, 大气压力可认为是一个定值, 因此, 空气的含湿量就取决于水蒸气分压的大小。水蒸气分压力越大, 含湿量也就越大。当水蒸气分压力一定时, 大气压力越大, 含湿量就越小。实践表明, 在工程上用含湿量来表征空气中的实际水蒸气含量是比较方便的。

5. 空气黏性

空气抗剪切力的性质称为空气的黏性, 黏性是空气流动时产生阻力的内在因素。黏性有两种表示方法, 动力黏度 (也称绝对黏度) 和运动黏度。动力黏度常用符号 μ 表示, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 运动黏度用 ν 表示, 单位为 m^2/s 。动力黏度与密度的比值即为运动黏度:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

表 1—2 为几种物质在标准状态下的黏度。

表 1—2 几种物质的黏度 (0.1 MPa, $t = 20^\circ\text{C}$)

流体名称	动力黏度 $\mu / \text{Pa} \cdot \text{s}$	运动黏度 $\nu / (\text{m}^2/\text{s})$
空气	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
氮气 (N_2)	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-5}
氧气 (O_2)	2.04×10^{-5}	1.43×10^{-5}
甲烷 (CH_4)	1.08×10^{-5}	1.52×10^{-5}
水	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}

温度是影响流体黏度的主要因素, 但其对气体和液体的影响不同。气体的黏度随温度升高而增大, 液体的黏度随温度升高而减小。在工业通风中, 压力对黏度的影响可忽略不计, 常用运动黏度; 但当空气的可压缩性不可忽略时, 需用动力黏度。

6. 空气比热容

单位物量的物质在准平衡过程中, 单位温度变化时所吸收或放出的热量称为比热容。比

热容的单位取决于热量单位和物量单位。表示物量的单位不同,比热容的单位也不同。通常采用的物量单位有质量(kg)、标准容积(m^3)和千摩尔(kmol)。因此,相应的就有质量比热容、容积比热容和摩尔比热容之分。

质量比热容用符号 c 表示,单位 $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;容积比热容用符号 c' 表示,单位 $\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;摩尔比热容用符号 C 表示,单位是 $\text{J/kmol} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

三种比热容的换算关系是:

$$c' = \frac{MC}{22.4} = c\rho_0 \quad (1-10)$$

式中 M ——气体的相对分子质量;

ρ_0 ——气体在标准状态下的密度, kg/m^3 。

工程上常用质量比热容。

7. 空气的焓

焓是一个复合的状态参数,它是内能和压力功之和,焓也称为热焓。空气的焓等于 1 kg 干空气的焓与共存的 d kg 水蒸气的焓的总和,用符号 i 表示,单位为 kJ/kg ,即:

$$i = i_g + di_s \quad (1-11)$$

式中 i_g ——单位质量干空气的焓, kJ/kg ;

i_s ——单位质量水蒸气的焓, kJ/kg 。

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,

干空气的焓: $i_g = 1.0045t$

水蒸气的焓: $i_s = 2500 + 1.84t$

式中 1.0045——干空气的平均质量比定压热容, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$;

2500—— 0°C 时水蒸气的汽化潜热, kJ/kg ;

1.84——水蒸气的平均质量比定压热容, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

将干空气和水蒸气的焓值代入式 (1-11), 可得空气的焓为:

$$i = 1.0045t + d(2500 + 1.84t) = 1.0045t + 1.84td + 2500d \quad (1-12)$$

上式中 $1.0045t + 1.84td$ 是随温度变化而变化的热量,称为显热。 $2500d$ 是 0°C 时 d kg 水蒸气的汽化潜热,它仅随含湿量变化,与温度无关,所以称为潜热。显热加潜热为全热。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。空气的焓将随着温度和含湿量的升高而增大,随其降低而减小。温度在 0°C 及 0°C 以上的空气,焓值为正;在 0°C 以下的空气,当 $2500d > |1.0045t + 1.84td|$ 时,焓值为正,而当 $2500d < |1.0045t + 1.84td|$ 时,焓值为负。

顺便指出, $t^\circ\text{C}$ 下水蒸气的汽化潜热为:

$$i = 2500 + 1.84t - 4.19t = 2500 - 2.35t \quad (1-13)$$

式中 4.19——水的质量比热容, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

三、空气状态参数之间的关系

在实际工程计算中,通常将空气近似地看做理想气体,干空气和水蒸气的主要状态参数

(压力、温度、密度等)之间的相互关系可用理想气体状态方程表示:

对于干空气

$$p_g V = m_g R_g T \text{ 或 } p_g = \rho_g R_g T \quad (1-14)$$

对于水蒸气

$$p_s V = m_s R_s T \text{ 或 } p_s = \rho_s R_s T \quad (1-15)$$

式中 p_g 、 p_s ——干空气和水蒸气的分压力, Pa;

V ——空气的容积, m^3 ;

m_g 、 m_s ——干空气和水蒸气的质量, kg;

R_g 、 R_s ——干空气和水蒸气的气体常数。 $R_g = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $R_s = 461 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;

T ——空气的热力学温度, K;

ρ_g 、 ρ_s ——干空气和水蒸气的密度, kg/m^3 。

按照道尔顿定律, 空气的总压力 (即当地的大气压) 应为:

$$B = p_g + p_s \quad (1-16)$$

第二节 空气的焓湿图 ($i-d$ 图)

上面介绍了空气状态各参数及其相互间的关系。空气的状态参数主要包括 t 、 d 、 B 、 i 、 p_s 及 ρ 等。其中部分参数可通过上面介绍的公式计算, 也可从空气物理参数表 (附录 3) 查得。但在工程中, 常采用线算图查取状态参数。

线算图有各种形式, 常用的湿空气性质图是以焓和含湿量为坐标的焓湿图 ($i-d$ 图), $i-d$ 图可以清晰地表示出空气状态各参数的关系, 不仅图上的每一个点都表征湿空气的一个状态, 而且可以用来描述空气状态的变化过程, 所以空气焓湿图是通风空调工程计算中的一种重要图表。参见图 1-1 和附录 1。

$i-d$ 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 $i=0$ 。

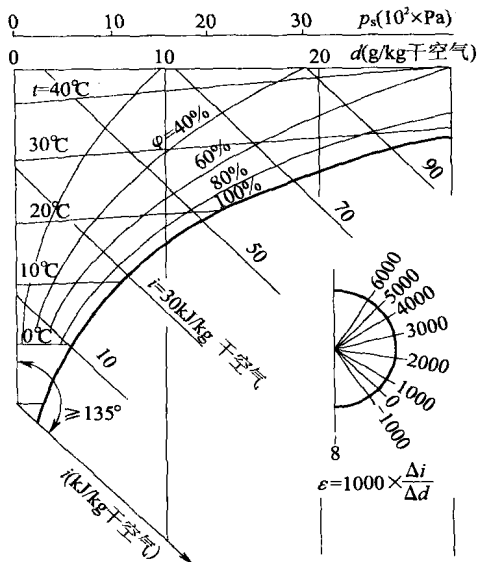


图 1-1 湿空气焓湿图

横轴以上的焓值为正，以下为负。

3. 等温线

它是根据公式 $i = 1.0045t + (2500 + 1.84t)d$ 绘制的。当 t 为常数时，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 $d = 0.622 \frac{\varphi p_b}{B - \varphi p_b}$ 绘制的。在一定的大气压力 B 下，当相对湿度 φ 为某一常数时，含湿量 d 与饱和水蒸气分压力 p_b 有一系列对应值，而 p_b 又是温度 t 的单值函数，其值可由附录 3 查得。因此，根据 t 、 d 的对应关系，在 $i-d$ 图上找到若干点，连接各点即得等相对湿度线。用同样的方法便可作出不同 φ 值的等相对湿度线。

$\varphi = 100\%$ 的相对湿度线称为饱和曲线。该曲线上的各点均表示空气的饱和状态。饱和曲线把整个 $i-d$ 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。

5. 热湿比线

在通风空调工程中，被处理的空气常常由一个状态变为另一个状态。如果在整个过程中，空气的热、湿变化是同时进行的，那么在 $i-d$ 图上由状态 A 到状态 B 的直线连线，就应代表空气状态的变化过程，如图 1—2 所示。为了说明湿空气状态变化的特征和方向，常用状态变化前后的焓差和含湿量差的比值来表示，称为热湿比 ε 。即：

$$\varepsilon = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{\Delta i}{\Delta d} \quad (1-17)$$

若已知状态变化过程的热量 Q 变化和湿量 W 变化，则有：

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{G \cdot \Delta i}{G \cdot \Delta d} = \frac{Q}{W} \quad (1-18)$$

式中 G ——空气的质量流量， kg/h ；

Q ——热量， kJ/h ；

W ——湿量， kg/h 。

由式 (1-17)、式 (1-18) 可见， ε 就是直线 AB 的斜率，它反映了过程线的倾斜角度，故又称“角系数”。附录 1 的右下角示出不同 ε 值的等值线。

附录 1 的 $i-d$ 图是以标准大气压 $B = 101325 \text{ Pa}$ 作出的。对不同的大气压力应采用与大气压力相对应的 $i-d$ 图。

除上述 4 组等值线和热湿比线外，在图的上部还给有水蒸气分压力线。由公式 (1-8) 可以看出，当大气压力一定时，水蒸气分压力 p_s 与含湿量 d 相互对应，每给定一个 d 值，就可得到相应的 p_s 值，近似为一条直线。在上侧边框上标出水蒸气分压力 p_s 的数值，单位为

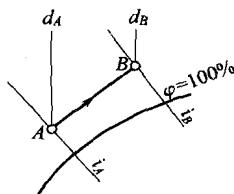


图 1—2 空气状态变化在 $i-d$ 图上的表示

$10^2 \times \text{Pa}$ 。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 $B = 93\ 326\ \text{Pa}$ (700 mm 水银柱), 空气温度 $t = 20^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 50\%$, 即可在 $B = 93\ 326\ \text{Pa}$ 的 $i-d$ 图上找到其状态点 A , 如图 1—3 所示。通过 A 点可查得: $d = 7.4\ \text{g/kg}$ 干空气, $p_a = 1\ 160\ \text{Pa}$, $d_b = 16\ \text{g/kg}$ 干空气, $p_b = 2\ 330\ \text{Pa}$ 以及 $i = 40\ \text{kJ/kg}$ 干空气。

二、确定空气的露点温度

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—7) 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 (见图 1—3), 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 $t_l = 9.4^\circ\text{C}$ 。

三、确定空气的混合状态

在通风和空调工程中, 经常遇到不同状态的空气相混合, 为此, 必须研究空气混合的计算方法。

假设状态为 A (i_A 、 d_A) 的空气 G_A (kg/s) 与状态为 B (i_B 、 d_B) 的空气 G_B (kg/s) 相混合, 混合后的空气状态为 C (i_C 、 d_C), 流量为 $G_C = G_A + G_B$ (kg/s)。

在混合过程中, 如果与外界没有热、湿的交换, 根据热、湿平衡原理有:

$$G_A i_A + G_B i_B = (G_A + G_B) i_C \quad (1-19)$$

$$G_A d_A + G_B d_B = (G_A + G_B) d_C \quad (1-20)$$

由上两式可得:

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

$$\frac{i_C - i_A}{d_C - d_A} = \frac{i_B - i_C}{d_B - d_C} \quad (1-22)$$

显然, 在 $i-d$ 图 (见图 1—4) 上, 由式 (1—22) 可知, 线段 $\overline{AC}$ 和 $\overline{CB}$ 的斜率相同,