

# 化纤厂 空气调节

林福海 主编

HUA XIAN CHANG  
KONG QI TIAO JIE

中国纺织出版社

# 化纤厂空气调节

林福海 主编  
郭 静 徐德增  
周 森 张凤山 编

中国纺织出版社

(京)新登字037号

### 内 容 提 要

本书内容包括化纤厂空气调节的基本原理, 化纤厂空气调节过程; 空调车间冷、热、湿负荷计算; 空气的热湿处理设备、热工计算及空气输送; 水系统与制冷; 空调系统的运行调节、自动控制及常用检测设施; 熔纺生产中丝束冷却系统的设计原理、系统控制以及化纤厂空调系统设计实例等。书末还附有化纤厂空调系统设计资料。

本书可供化纤厂工程技术人员及高等院校化纤专业师生阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

化纤厂空气调节/林福海主编; 郭静等编. —北京: 中国纺织出版社, 1994. 6

ISBN 7-5064-1042-7

I. 化… I. ①林…②郭… II. 化学纤维厂-空气调节系统  
IV. ①TU276.4②TU831

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第02437号

中国纺织出版社出版发行

北京东直门南大街4号

邮政编码: 100027 电话: 01-4662932

北京觅子店印刷厂印刷 各地新华书店经销

1994年9月第一版 1994年9月第一次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 17 12/16

字数: 432千字 印数: 1—3,000

定价: 20.00元

# 前 言

化纤厂空气调节工程在化纤厂公用工程中占据相当重要的地位，它直接影响化纤生产的稳定性和产品质量。作为化学纤维专业的工程技术人员，应了解并掌握化纤厂空气调节的基本原理、必要的基本技能、使用及控制方法。

本书作为化学纤维专业学生学习“化纤厂空气调节”课程的教材，可使学生掌握有关化纤厂空气调节的基本理论知识以及对化纤厂空气调节进行初步设计的能力。本书亦可供化纤厂的工程技术人员参考。

本书编写力求理论联系化纤厂生产实际，尽量反映国内外先进技术。但由于水平所限，书中的缺点和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。本书在编写过程中曾经得到辽阳石油化纤公司所属各化纤厂及营口化纤厂、锦州合成纤维厂等单位的大力支持，在此深表感谢。

编 者

1993. 3

GA079/19.09

# 目 录

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 概述                   | (1)  |
| 第一节 基本概念                 | (1)  |
| 第二节 空气及其物理性质             | (1)  |
| 一、空气的组成                  | (1)  |
| 二、空气的状态参数                | (2)  |
| 第三节 空气的 <i>i-d</i> 图及其应用 | (6)  |
| 一、 <i>i-d</i> 图          | (6)  |
| 二、 <i>i-d</i> 图的应用       | (8)  |
| 第四节 空调室内外计算参数的确定         | (11) |
| 一、室内计算参数的确定              | (11) |
| 二、室外计算参数的确定              | (13) |
| 第二章 空调车间热(冷)湿负荷的计算       | (16) |
| 第一节 冬季房屋热损失              | (16) |
| 一、基本热损失                  | (16) |
| 二、附加热损失                  | (19) |
| 三、渗入空气的热损失               | (20) |
| 第二节 夏季围护结构的传热量           | (21) |
| 第三节 设备及人体散热与散湿           | (25) |
| 一、设备散热量                  | (25) |
| 二、设备散湿量                  | (28) |
| 三、人体散热与散湿                | (29) |
| 第四节 空调车间冷、热负荷的确定         | (30) |
| 一、夏季车间的冷、湿负荷             | (30) |
| 二、冬季车间的热负荷               | (30) |
| 第三章 化纤厂空气调节过程            | (34) |
| 第一节 空调房间送风状态与送风量         | (34) |
| 一、夏季空调房间送风状态与风量的确定       | (34) |
| 二、冬季送风状态与风量的确定           | (36) |
| 三、有毒气散发车间送风量的确定          | (37) |
| 第二节 纺丝冷却吹风的送风状态与送风量的确定   | (38) |
| 第三节 空气的各种单一处理过程          | (39) |
| 一、加热过程                   | (39) |
| 二、等湿冷却过程                 | (39) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 三、冷却去湿过程.....            | (40)  |
| 四、绝热加湿过程.....            | (40)  |
| 五、空气的等温加湿与升温加湿过程.....    | (40)  |
| 六、空气的去湿过程.....           | (41)  |
| 第四节 空气调节过程.....          | (41)  |
| 一、全新风式空气调节系统.....        | (42)  |
| 二、部分回风式空气调节系统.....       | (45)  |
| 第五节 局部式空气调节系统.....       | (50)  |
| 一、空气调节机组的选用.....         | (51)  |
| 二、局部式空调系统的机房布置.....      | (51)  |
| 第六节 丝束冷却空调系统.....        | (56)  |
| 一、传统丝束冷却空调系统.....        | (56)  |
| 二、新型丝束冷却送风系统.....        | (58)  |
| 三、多功能冷却送风系统.....         | (58)  |
| 第四章 空气的热湿处理设备及其热工计算..... | (61)  |
| 第一节 空气加热器.....           | (62)  |
| 一、热水或蒸汽加热器.....          | (62)  |
| 二、电加热器.....              | (66)  |
| 第二节 喷水室处理空气.....         | (67)  |
| 一、喷水室的结构及其配件.....        | (67)  |
| 二、空气与水直接接触时热湿交换规律.....   | (69)  |
| 三、喷水室的热工计算.....          | (72)  |
| 第三节 表面式空气冷却器.....        | (77)  |
| 一、水冷式表冷器.....            | (77)  |
| 二、直接蒸发式表冷器.....          | (96)  |
| 三、淋水式表冷器.....            | (97)  |
| 第四节 空气的加湿与去湿.....        | (98)  |
| 一、空气的加湿.....             | (98)  |
| 二、空气的去湿.....             | (99)  |
| 第五章 水系统与制冷.....          | (102) |
| 第一节 冷冻水与冷却水.....         | (102) |
| 一、冷冻水系统.....             | (102) |
| 二、冷却水系统.....             | (103) |
| 第二节 制冷设备.....            | (104) |
| 一、蒸汽压缩式制冷机.....          | (104) |
| 二、蒸汽喷射式制冷机.....          | (106) |
| 三、溴化锂吸收式制冷机.....         | (107) |
| 四、制冷机的选用.....            | (109) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第六章 空气输送</b> .....           | (110) |
| <b>第一节 流体力学</b> .....           | (110) |
| 一、基本概念.....                     | (110) |
| 二、连续性方程.....                    | (111) |
| 三、伯努利方程.....                    | (111) |
| 四、流动过程分析与阻力计算.....              | (113) |
| <b>第二节 风道设计</b> .....           | (126) |
| 一、风道设计原则.....                   | (126) |
| 二、风道的选择.....                    | (127) |
| 三、风管的保温.....                    | (128) |
| <b>第三节 气流组织</b> .....           | (130) |
| 一、风口与送排风.....                   | (130) |
| 二、管道均匀送风.....                   | (134) |
| <b>第四节 通风机</b> .....            | (137) |
| 一、通风机的分类.....                   | (137) |
| 二、通风机性能及特性曲线.....               | (138) |
| 三、通风机的选型.....                   | (140) |
| 四、水泵.....                       | (141) |
| <b>第七章 空调系统的运行调节</b> .....      | (143) |
| <b>第一节 室内负荷变化时的运行调节</b> .....   | (143) |
| 一、余热量变化、余湿量不变.....              | (143) |
| 二、余热、余湿量同时变化.....               | (143) |
| <b>第二节 室外空气状态变化时的运行调节</b> ..... | (146) |
| 一、空调工况区的划分.....                 | (146) |
| 二、各工况区的空气调节.....                | (147) |
| <b>第三节 化纤厂常用空调方案</b> .....      | (148) |
| 一、变风量系统调节方案.....                | (148) |
| 二、定风量系统调节方案.....                | (150) |
| <b>第八章 空调系统的自动控制</b> .....      | (154) |
| <b>第一节 自动控制原理</b> .....         | (154) |
| 一、自动控制系统的组成.....                | (154) |
| 二、自动调节常用术语.....                 | (154) |
| 三、调节系统的分类.....                  | (155) |
| 四、空调参数的调节品质.....                | (155) |
| 五、空调系统的特点.....                  | (156) |
| 六、其他控制方法.....                   | (160) |
| <b>第二节 自动控制装置</b> .....         | (161) |
| 一、敏感元件.....                     | (161) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 二、调节器 (控制机构) .....                    | (163) |
| 三、执行机构 .....                          | (166) |
| 第三节 自动控制系统 .....                      | (167) |
| 第四节 空调系统自动控制实例 .....                  | (172) |
| <b>第九章 空调系统常用检测设施</b> .....           | (175) |
| 第一节 测温仪表 .....                        | (175) |
| 第二节 测量空气相对湿度的仪表 .....                 | (177) |
| 第三节 测量风速的仪表 .....                     | (183) |
| 第四节 测量风压的仪表 .....                     | (186) |
| <b>第十章 熔纺生产中的丝束冷却系统</b> .....         | (190) |
| 第一节 丝束冷却与熔纺成形的关系 .....                | (190) |
| 一、吹风形式 .....                          | (190) |
| 二、吹风位置 .....                          | (190) |
| 三、冷却气流的速度分布 .....                     | (191) |
| 第二节 丝束冷却吹风系统的气流组织 .....               | (191) |
| 一、侧吹风系统 .....                         | (191) |
| 二、环吹风系统 .....                         | (193) |
| 三、环吹风装置的发展 .....                      | (195) |
| 第三节 冷却送风系统的控制 .....                   | (196) |
| 一、温、湿度控制 .....                        | (196) |
| 二、风压控制 .....                          | (196) |
| 三、风量控制 .....                          | (196) |
| 第四节 空气净化 .....                        | (197) |
| 一、空气净化的标准与要求 .....                    | (197) |
| 二、空气净化措施与设备 .....                     | (199) |
| <b>第十一章 设计实例</b> .....                | (203) |
| 第一节 年产8000 t 锦纶长丝车间的空调设计 .....        | (203) |
| 第二节 年产2000 t 涤纶工业丝生产车间的空调设计 .....     | (217) |
| <b>附录</b> .....                       | (225) |
| 附录图1-1 湿空气焓湿图(1) .....                | (225) |
| 附录图1-2 湿空气焓湿图(2) .....                | (226) |
| 附录图1-3 高温焓湿图 .....                    | (227) |
| 附录表1-1 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓 .....       | (228) |
| 附录表2-1 若干建筑材料的物理性能 .....              | (230) |
| 附录表2-2 传热系数表 .....                    | (231) |
| 附录表2-3 围护结构外表面的太阳辐射热吸收系数 $\rho$ ..... | (234) |
| 附录表2-4 北纬30°夏季太阳辐射照度 .....            | (235) |
| 附录表2-5 窗的遮阳系数 $X_s$ .....             | (237) |

|         |                                          |       |
|---------|------------------------------------------|-------|
| 附录表2-6  | 北纬30°夏季透过标准窗玻璃的太阳辐射照度.....               | (238) |
| 附录表2-7  | 我国不同纬度夏季屋顶上空气综合温度的波动值 $\Delta t_z$ ..... | (241) |
| 附录表2-8  | 每人散热量和散湿量 .....                          | (242) |
| 附录表3-1  | 饱和蒸汽表 (按温度编排).....                       | (243) |
| 附录表3-2  | 未饱和水与过热蒸汽表 .....                         | (244) |
| 附录表4-1  | 空气加热器型号及其主要技术性能 .....                    | (246) |
| 附录表4-2  | 空气加热器的传热系数与阻力 .....                      | (246) |
| 附录表4-3  | SRZ型散热排管外形尺寸及结构特性 .....                  | (247) |
| 附录表4-4  | SRL型散热排管外形尺寸及结构特性 .....                  | (249) |
| 附录表4-5  | GL-I型空气加热 (或冷却) 器基本规格 .....              | (251) |
| 附录表4-6  | I型散热排管基本参数.....                          | (252) |
| 附录表4-7  | PB、JW型表冷器规格与性能 .....                     | (254) |
| 附录表6-1  | 局部阻力系数表 .....                            | (254) |
| 附录表6-2  | 水管摩擦阻力计算表 .....                          | (269) |
| 附录表9-1  | 温湿度换算表(1).....                           | (272) |
| 附录表9-2  | 温湿度换算表(2).....                           | (273) |
| 附录表10-1 | 部分国产过滤器的主要性能.....                        | (274) |
| 主要参考资料  | .....                                    | (276) |

# 第一章 概 述

## 第一节 基 本 概 念

1. 空气调节 使室内或局部区域内的空气温度、湿度、流动速度、压力、清洁度等参数保持在一定范围内的技术称为空气调节，简称空调。化纤厂空气调节包括环境空调和工艺空调两大部分。环境空调是指车间内设置的、旨在满足生产和劳动保护要求的空气调节系统，如卷绕间、牵伸加捻间的空调系统。工艺空调是指服务于化纤生产的某个特殊阶段，为使化纤生产连续进行而必须设置的空气调节系统，如丝束冷却用空调系统。

2. 空调车间 实施空调技术措施的车间称为空调车间，亦称空调房间。

3. 空调区域 空调车间内部离墙、离地面、离顶棚一定距离的空调有效区域称为空调区域。空调区域的范围由送风方式、气流组织、室内热源、设备布置及工艺要求等因素确定。通常说的空调区域是指离外墙0.5m、离地面0.3m、高于精密设备0.3~0.5m范围内的空间。

4. 全室性空调 整个车间采取空调技术设施的称为全室性空调。

5. 局部性空调 在某一车间或空调车间内的局部区域采取的空调措施称为局部性空调。在不影响生产的条件下，采用局部性空调比较经济、有效。

6. 空调车间的室内温湿度基数 空调车间内根据生产工艺要求等，设计指定的空气温度和相对湿度。

7. 空调精度 亦称温湿度允许波动范围。空调区域内或要求空调的工件旁，在要求的持续时间内所设的温度或湿度检测仪表表示值偏离设定温湿度基数的最大值。

## 第二节 空气及其物理性质

空气是空气调节过程的主要研究对象。湿空气的性质及其相互关系是空气调节工程的基础，也是空调工程师必须掌握的内容之一。

### 一、空气的组成

地球被大气层所包围，而地球表面有大量的海洋、江河和湖泊，总有大量的水分蒸发为水蒸气进入大气中。所以，自然界中的空气都是“干空气”与水蒸气的混合物——湿空气。空气调节中提到的空气都是指湿空气。绝对干燥的空气在自然界中并不存在。

“干空气”主要由氮、氧、二氧化碳、和少量稀有气体组成，其比例如表1-1所示。

此外，大气中还夹杂着少量的灰尘、烟雾和细菌。一般情况下，干空气的组成比例基本不变。从卫生角度来看，要求工作环境的空气新鲜、清洁，一是空气中要保持正常的含氧比例，为此，新风量不低于总风量的10%~15%，二是要将空气中的灰尘和有害气体的浓度降低到许可范围内。

表 1-1

干空气的组成

| 组 成  | 分 子 量 | 体 积 百 分 比 (%) | 重 量 百 分 比 (%) |
|------|-------|---------------|---------------|
| 氧    | 32.00 | 20.90         | 23.10         |
| 氮    | 28.02 | 78.13         | 75.55         |
| 二氧化碳 | 44.01 | 0.03          | 0.05          |
| 稀有气体 | —     | 0.94          | 1.30          |

湿空气中的水蒸气含量很少，没有固定比例，它是随天气的变化和水气的来源情况而经常改变的。实践证明，空气中水气含量将直接影响人的日常生活和生产过程，同时在某种程度上也决定着湿空气的热工性质。

## 二、空气的状态参数

空气的物理性质不仅取决于其组成，而且与其所处状态有关。空气的状态可用一些物理量来表示，如温度、压力等。这些物理量称为空气的状态参数。

空气调节中常用的状态参数如下。

1. 压力 单位面积上所受到的力称为压力。压力的法定计量单位为帕斯卡 (Pa)。

(1) 大气压力：包围着地球表面的很厚的大气层对地面产生的压力称为大气压力。

1 标准大气压力为  $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

通常以纬度  $45^\circ$  处海平面（空气温度为  $0^\circ\text{C}$  时）测得的平均压力（ $101.31\text{kPa}$ ）作为一个标准大气压 (atm)。大气压力与所在地区的海拔高度有关。在地面附近，平均每升高  $12\text{m}$ ，大气压力就大约降低  $133.322\text{Pa}$  左右。就是同一地区，也因季节、晴雨等气候变化而稍有变化。由于大气压力不同，空气的性质也不同，所以空调设计和运行时，应注意所在地区的压力变化，否则可能造成误差。

气象工作中还可采用巴 (bar)，毫巴 (mbar)，标准大气压 (atm) 作压力单位。这些单位与法定计量单位的关系为： $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$ ， $1\text{mbar}=10^2\text{Pa}$ ， $1\text{atm}=101.325\text{kPa}$ 。关于压力的非法定计量单位还有公斤力每平方厘米 ( $\text{kgf/cm}^2$ )，毫米汞柱 (mmHg)，毫米水柱 ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) 等。其与法定计量单位的关系为： $1\text{kgf/cm}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ ， $1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}$ ， $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8\text{Pa}$ 。

(2) 水蒸汽分压力：大气是干空气和水蒸气的混合气体。根据 Gibbs Dalton 分压定律可知，大气压力 ( $P_a$ ) 等于干空气分压力 ( $P_d$ ) 与水蒸汽分压力 ( $P_v$ ) 之和：

$$P_a = P_d + P_v \quad (1-1)$$

空气中水蒸气含量越多，其分压力也越大，也就是说，水蒸汽分压力的大小直接反映水蒸气数量的多少，它是衡量空气湿度的一个指标，在空气调节中经常要用这个参数。空气的加湿与去湿处理过程就是水分蒸发到空气中去与水气从空气中冷凝出来的湿交换过程，这与空气中的水气分压力有关。

2. 温度 温度是衡量物质冷热程度的指标。温度高低用温标来衡量，目前国际上

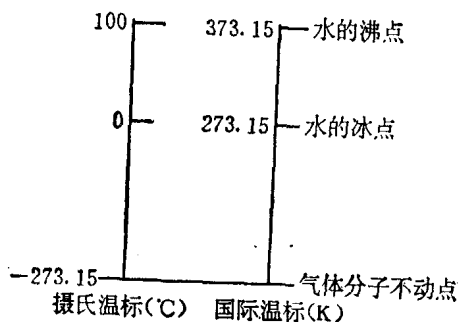


图 1-1 两种温标的起点

使用的有摄氏温标和绝对温标。

两种温标的差别在于其起讫点不同。见图1-1。

两种温标之间的换算关系为：

$$T = 273.15 + t \quad (1-2)$$

式中： $T$ 为绝对温度 (K)； $t$ 为摄氏温度 (°C)。

3. 湿度 湿度是衡量空气潮湿程度的指标。有以下几种表示方法。

(1) 绝对湿度 ( $r_v$ )：1m<sup>3</sup>湿空气内含有水蒸气的重量 (以克计) 称为绝对湿度，单位是g/m<sup>3</sup>。

按照Gibbs Dalton定律，在1m<sup>3</sup>湿空气内，水蒸气所占的体积也是1m<sup>3</sup>，所以绝对湿度也就是单位体积水蒸气的重量，可表示为：

$$r_v = \frac{G_v}{V_v} \times 1000 \quad (1-3)$$

式中： $r_v$ ——绝对湿度 (g/m<sup>3</sup>)；

$G_v$ ——水蒸气的重量 (kg)；

$V_v$ ——水蒸气的体积 (m<sup>3</sup>)。

湿空气由干空气和水蒸气组成，在常温、常压下三者均可视为理想气体，根据理想气体状态方程有：

$$P_v V_v = G_v R_v T_v \quad (1-4)$$

$$P_d V_d = G_d R_d T_d \quad (1-5)$$

式中： $V_v (=V_d)$ ——湿空气的体积 (m<sup>3</sup>)；

$T_v (=T_d)$ ——湿空气的绝对温度 (K)；

$R_v$ 、 $R_d$ ——水蒸气与干空气的气体常数[J/(kg·K)]， $R_v = 461.5$ ； $R_d = 287$ ；

$P_v$ 、 $P_d$ ——水蒸气和干空气的分压 (Pa)。

将 (1-4) 式代入 (1-3) 式可得：

$$\begin{aligned} r_v &= \frac{G_v}{V_v} \times 1000 \\ &= \frac{P_v}{R_v T_v} \times 1000 \end{aligned} \quad (1-6)$$

(2) 含湿量 ( $d$ )：在湿空气中，与1kg干空气混合在一起的水蒸气的重量 (以克计)，即内含1kg干空气的湿空气中所含水蒸气的重量 (以克计)，称为空气的含湿量，其单位为 (g/kg干空气)。

$$d = \frac{G_v}{G_d} \times 1000 \quad (1-7)$$

由 (1-4) 式、(1-5) 式及 (1-1) 式可得：

$$d = \frac{R_d P_v}{R_v P_d} \times 1000$$

$$\begin{aligned}
 &= 622 \frac{P_v}{P_d} \\
 &= 622 \frac{P_v}{P_a - P_v} \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

由 (1-8) 式可见, 在一定大气压力下, 空气的含湿量  $d$  仅与水蒸气分压力  $P_v$  有关。换言之, 水蒸气分压力也只取决于空气的含湿量。它们是互相联系的两个参数。

含湿量是空气调节工程中经常应用的参数之一。当空气状态发生变化时, 空气中的干空气量是一定的, 所以在分析、计算空气中水蒸气的变化时, 比采用绝对湿度方便。

(3) 饱和湿度 ( $r_s$ ): 在一定温度下, 空气容纳水蒸气量有一最大限度 (饱和量), 超过这个限度时, 空气不能容纳水蒸气, 多余的水蒸气就会在空气中凝结成雾 (实际上是凝结水), 这种状态的空气称为饱和空气。与饱和空气状态相适应的参数有饱和水蒸气分压力  $P_s$ , 饱和绝对湿度  $r_s$  和饱和含湿量  $d_s$ 。

此时 (1-6) 式可写成:

$$\begin{aligned}
 r_s &= \frac{P_s}{R_v T_v} \times 1000 \\
 &= 2.17 \frac{P_s}{T_v} \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

(1-8) 式可写成:

$$d_s = 622 \frac{P_s}{P_a - P_s} \quad (1-10)$$

不同温度下, 饱和空气的水蒸气分压力及饱和湿度见附录表1-1。

(4) 相对湿度 ( $\phi$ ): 相对湿度是衡量空气潮湿程度的指标, 它表示空气接近饱和的程度, 即空气的绝对湿度 ( $r_v$ ) 与同温度下饱和绝对湿度  $r_s$  的比值, 用百分数表示:

$$\phi(\%) = \frac{r_v}{r_s} \times 100 \quad (1-11)$$

由 (1-6) 式和 (1-9) 式可得

$$\phi(\%) = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (1-12)$$

(1-12) 式表明, 空气的相对湿度等于空气的实际水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力之比。

将 (1-12) 式代入 (1-10) 式可得含湿量 ( $d$ ) 与相对湿度  $\phi$  的关联式:

$$d = 622 \frac{\phi P_s}{P_a - \phi P_s} \quad (1-13)$$

相对湿度是指空气的实际绝对湿度接近饱和绝对湿度的程度。当  $\phi = 100\%$  时, 空气为饱和空气;  $\phi = 0$  时, 空气为干空气;  $0 < \phi < 100\%$  时空气为未饱和空气, 此状态空气具有一定的吸湿能力。

相对湿度对人体健康和生产工艺都有一定影响。人生活在相对湿度很大的环境中, 会感到闷热、濡湿; 在相对湿度很小的环境中, 又会感到口干舌燥。从生理卫生角度出发, 空调

房间的相对湿度应控制在40%~60%之间,至少也应在30%~70%之间。在化纤生产中,如果生产车间的相对湿度低,丝条上的水分和油剂就会蒸发,使本来抱合在一起的丝束变得松散,这种松散干湿的丝条在进行加工时,与设备部件摩擦而产生静电,使得丝束更加散乱,以致无法进行加工,进而影响产品质量。

4. 焓 ( $i$ ) 焓是指内含1kg干空气的湿空气所含有的热量,即1kg干空气的含热量与( $d/1000$ )kg的水蒸气含热量的总和,以 $i$ 表示,其单位为kJ/kg或J/kg。在空气调节中,一般以摄氏零度时干空气的含热量和水的含热量为零作为热量计算的起点。当空气的温度为 $t$ 、含湿量为 $d$ 时,湿空气的焓 $i$ (kJ/kg)等于:

$$\begin{aligned} i &= 1.005t + (2500 + 1.9t)d/1000 \\ &= 1.005t + 2.5d + 0.0019td \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中:  $1.005t$ ——干空气的含热量;  $1.005$ 为干空气的比热[kJ/(kg·℃)];

$(2500 + 1.9t)d/1000$ ——水蒸气含热量,其中2500为0℃时水的汽化潜热[kJ/(kg·℃)],其中的1.9为水蒸气的比热[kJ/(kg·℃)]。

(1-14)式中的第一项和第三项随温度升高而增大,称为“显热”;第二项与温度无关,称为“潜热”。因此当温度提高时,空气的焓值不一定增加,因为焓值还与空气的含湿量有关。如果温度提高的同时,含湿量减少,完全可能出现焓值不变或减少的现象。

5. 露点温度 一定压力下的未饱和空气,如果将其温度不断降低,就可以变成饱和空气(如 $t=20^\circ\text{C}$ ,  $d=7.625\text{g/kg}$ 干空气的空气降温至 $10^\circ\text{C}$ 时,即为饱和空气,见附录表1-1)。空气在含湿量不变条件下,达到饱和状态的温度叫做露点温度,也就是空气开始结露的临界温度。如果将温度降至露点温度以下,饱和空气中的水蒸气就会马上凝结成水珠,此即所谓的结露现象。能否产生结露现象,取决于表面温度与空气露点温度的相对值,如果表面温度高于空气的露点温度就不会结露,否则将结露。结露现象会破坏设备的外观形象,甚至会造成仪器、仪表的损坏。所以在工农业生产中,要采取必要措施,避免结露。但是在空气调节工程中,有时要利用结露的规律达到使空气去湿的目的,例如用表面式冷却器处理空气,可使空气获得冷却、减湿的效果。

6. 比容 ( $v$ ) 单位重量的空气所占的体积称为空气的比容,单位为 $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

湿空气的比容应该是单位重量湿空气所占的体积,但由于湿空气中水蒸气量经常发生变化,空气的比容也将随之变化,为了分析问题方便,在空气调节中湿空气的比容定义为内含1kg干空气的湿空气所占的体积。即

$$\begin{aligned} v &= v_d = \frac{V_d}{G_d} = \frac{R_d T}{P_d} \\ &= \frac{287T}{P_a - P_v} \\ &= \frac{287T}{P_a - \phi P_s} \end{aligned} \quad (1-15)$$

式中 $v$ 、 $v_d$ 分别为湿空气和干空气比容( $\text{m}^3/\text{kg}$ 干空气)。

容重是指单位体积的空气所具有的重量,通常以 $\gamma$ 表示,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ,其与比容的关系为:

$$\nu \cdot \gamma = 1. \quad (1-16)$$

**例1-1** 某地大气压力为101325Pa, 空气温度为26℃, 相对湿度为76%, 求湿空气的含湿量 $d$ , 绝对湿度 $r_v$ 和焓值 $i$ 与比容 $\nu$ 。

**解** 由附录表1-1查得 $t=26^\circ\text{C}$ 时, 空气的饱和水蒸气分压力 $P_s=33.53 \times 10^2 \text{Pa}$ 。将 $\phi=76\%$ ,  $P_o=101325 \text{Pa}$ 代入(1-13)式得:

$$\begin{aligned} d &= 622 \frac{\phi P_s}{P_o - \phi P_s} \\ &= 622 \frac{0.76 \times 33.53 \times 10^2}{101325 - 33.53 \times 10^2} \\ &= 16.086 (\text{g/kg干空气}) \end{aligned}$$

由(1-12)式及(1-6)式得:

$$\begin{aligned} r_v &= \frac{P_v}{R_v T} \times 1000 \\ &= \frac{\phi P_s}{R_v T} \times 1000 \\ &= \frac{0.76 \times 33.53 \times 10^2}{461.5 \times (273.15 + 26)} \times 1000 \\ &= 18.45 (\text{g/m}^3) \end{aligned}$$

将 $d=16.086$ 代入(1-14)式得:

$$\begin{aligned} i &= 1.005t + 2.5d + 0.0019td \\ &= 1.005 \times 26 + 2.5 \times 16.086 + 0.0019 \times 26 \times 16.086 \\ &= 67.140 (\text{kJ/kg干空气}) \end{aligned}$$

由(1-15)式得:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{287T}{P_o - \phi P_s} = \frac{287 \times (273.15 + 26)}{101325 - 0.76 \times 33.53 \times 10^2} \\ &= 0.845 (\text{m}^3/\text{kg干空气}) \end{aligned}$$

### 第三节 空气的*i-d*图及其应用

计算空气的状态参数, 分析空调系统的运行工况, 是空气调节的基本任务。如果利用上一节介绍的公式计算既费事又费时。为了简化计算, 可根据各种空气状态参数关系式, 针对一定大气压力作成表示湿空气状态参数及其相互关系的图表——湿空气性质图。由于该图是以焓( $i$ )和含湿量( $d$ )为坐标轴而画出来的, 所以又称为湿空气的焓湿图, 简称*i-d*图, 见附录图1-1及附录图1-2。

*i-d*图是空调设计和运行管理的重要工具。这不仅在于用*i-d*图可以根据两个独立的参数比较简便地确定空气的状态及其余参数, 更重要的是它可以反映空气状态在热湿交换作用下的变化过程。

#### 一、*i-d*图

*i-d*图是以与纵坐标平行的等含湿量线( $d$ )及与等含湿量线交成 $135^\circ$ 角的等焓线( $i$ )

构成的斜角坐标系, 见图1-2。为避免图面过长, 常取一水平辅助 $d$ 轴代替倾斜 $d$ 轴。在 $i$ - $d$ 图上主要有以下六种等值线:

①与纵坐标平行的垂直线是等含湿量线 ( $d = \text{常数}$ );

②与等含湿量线成 $135^\circ$ 角的平行斜线为等焓线 ( $i = \text{常数}$ ), 在纵坐标轴0点以上的焓为正值, 以下为负值;

③等温度线 ( $t = \text{常数}$ ) 是一组斜率为 $2.5 + 0.0019t$ , 截距为 $1.005t$ 的直线, 它是利用(1-14)式绘制的, 因为该组直线的斜率与温度有关, 所以其彼此间并不平行, 特别是在高温区;

④等相对湿度线 ( $\phi = \text{常数}$ ) 为曲线。它是根据(1-13)式绘制的。在图面上 $\phi$ 值从左向右逐渐增大, 其中 $\phi = 100\%$ 线为饱和曲线, 它将 $i$ - $d$ 图划分为两个区域, 在 $\phi = 100\%$ 线以上为未饱和空气区; 在 $\phi = 100\%$ 线以下为过饱和空气区, 该区内空气中的蒸汽凝结成细小的水珠形成雾状, 故亦称为“雾状区”, 见图1-3。

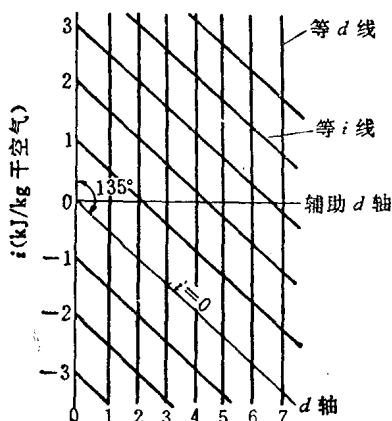


图 1-2  $i$ - $d$ 图中的等 $i$ 线及等 $d$ 线

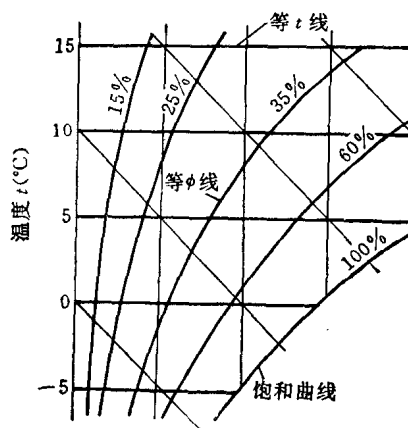


图 1-3  $i$ - $d$ 图中的等 $t$ 线及等 $\phi$ 线

应该指出的是在空气温度高于 $100^\circ\text{C}$ 时, (1-13)式中的 $P_s$ 为定值, 此时相对湿度 $\phi$ 线仅与含湿量 $d$ 有关[即 $\phi = d/(622 + d)$ ], 因此, 一切等相对湿度线均以温度 $100^\circ\text{C}$ 为极限。当温度超过 $100^\circ\text{C}$ 时, 等相对湿度线就出现一急剧转折, 见图1-4及附录图1-3。

⑤水汽分压力线与含湿量 $d$ 及大气压力 $P_a$ 有关。在 $P_a$ 一定的条件下, 水汽分压力线为一直线, 一般布置在 $i$ - $d$ 外围。

应该指出, 当空气温度高于或等于 $100^\circ\text{C}$ 时, 空气的饱和水汽分压力等于大气压力。

⑥热湿比线是一种过程线, 它表示空气从一种状态变化到另一种状态时, 其含热量与含湿量变化。一般用热湿比 $e$ 表示, 即:

$$e = \frac{\Delta i}{\frac{\Delta d}{1000}} = \frac{1000(i_2 - i_1)}{d_2 - d_1} \quad (1-17)$$

式中:  $i_1, i_2$ 分别为空气初、终状态的焓 ( $\text{kJ/kg}$ 干空气);  $d_1, d_2$ 分别为空气初、终状态的含湿量 ( $\text{g/kg}$ 干空气)。

$i$ - $d$ 图上的热湿比线是以坐标原点为空气变化的起点绘制的, 所以热湿比线为一系列过

坐标原点的射线,如图1-5。通常是在*i-d*图右下空白处标出。在实际使用时,只需找到所需的 $\varepsilon$ 线,然后将其平移到空气状态点,即可画出空气状态的变化过程。

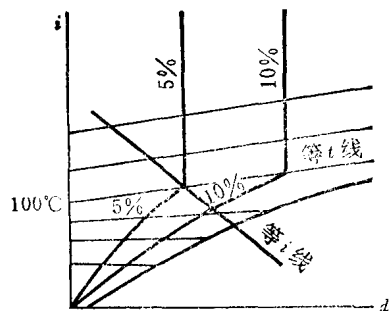


图 1-4 温度超过100°C时的*i-d*图

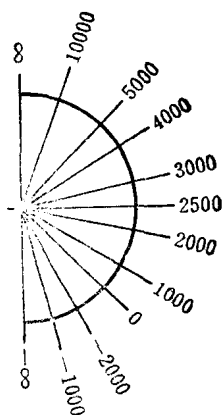


图 1-5 *i-d*图中的热湿比线

*i-d*图中的等 $\phi$ 线及水蒸气分压力线均是在假定大气压力一定的条件下绘制的,但事实上不同地区的大气压力并不一致,因此在使用*i-d*图时应注意所注大气压力,以防产生较大误差,影响计算的准确性。

## 二、*i-d*图的应用

1. 空气状态参数的确定 知道了空气的任意两个独立参数,就可以在*i-d*图上确定空气的状态点,并得到该状态下的其他参数。

**例1-2** 已知空气温度 $t=22^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $\phi=70\%$ ,所在地区大气压力为101325Pa。求空气的其他状态参数。

**解** 在大气压力为101325Pa的*i-d*图上找到 $t=22^{\circ}\text{C}$ 的等温线,再找到 $\phi=70\%$ 相对湿度线,并找出二线之交点——空气状态点A。过A点可找到空气的其它状态参数,见图1-6。

其中:

$$d=11.6\text{g/kg干空气};$$

$$i=51.6\text{kJ/kg干空气};$$

$$P_v=18.53\times 10^2\text{Pa};$$

$$t_{\text{露}}=16.2^{\circ}\text{C}。$$

2. 利用干湿球温度确定空气的状态 夏季室外空气的相对湿度变化较大,所以在确定夏季室外空气状态参数时,常以湿球湿度替代相对湿度。根据湿球温度测试原理,可将湿球温度理解为“焓不变时,空气加湿到饱和时的温度”。所以在已知干球温度和湿球温度时,空气状态点可由图1-7得出。

3. 两种不同状态空气的混合及其状态点的确定 在空气调节中,为了节省能源,往往将一定量的室外空气与室内空气混合,经过处理后再送入空调房间内,混合后的空气状态点及其参数可以在*i-d*图上求得。

如状态W( $i_W, d_W$ )的空气 $G_W$ 公斤,状态N( $i_N, d_N$ )的空气 $G_N$ 公斤,两种空气混合时,混合后的空气状态C的状态参数( $i_C, d_C$ 等)可由热湿平衡求得:

$$(G_W + G_N)i_C = G_W i_W + G_N i_N \quad (1-18)$$