

KONGTIAO
SHIYONGJICHU

客车空调实用基础

刘东岭 主编



中国铁道出版社

内 容 简 介

本书对客车空调的基本构造、种类、操作使用及维护方面的知识作了简明介绍,内容以客车空调系统的操作使用为主,并对实验方法、测量仪表作了简单说明。全书共分五部分:空调技术的理论基础,典型车辆空调系统的工作原理和基本构造,客车空调的操作与使用,客车空调的维护保养及主要常见故障的排除,客车空调的供电装置。

本书编写人员:刘东岭(第一、二章)、鲁钰(第三、五章)、傅华坤(第四、六章),刘文璿、王跃英负责绘图。

目 录

第一章 旅客列车对空气参数的要求	1
第一节 空气的主要物理性质	1
第二节 湿空气的焓湿图	9
第三节 对车内空气参数的要求	20
第二章 空调技术的理论基础	23
第一节 热力学基本定律	23
第二节 传热及基本计算公式	25
第三节 压缩式制冷机的工作原理	28
第四节 制冷剂、载冷剂和润滑油	31
第五节 压焓图	41
第六节 蒸气压缩式制冷机的制冷循环	44
第七节 压缩式制冷机的制冷计算	49
第三章 客车空调基本构造及空气处理过程	53
第一节 通风系统	54
第二节 制冷系统	79
第三节 加热加湿系统	116
第四节 自动控制系统	126
第五节 空气处理过程	150
第六节 高速客车空调装置	154
第四章 客车空调的操作与管理	160
第一节 客车空调装置的类型	160
第二节 客车空调装置的运行操作	162

第三节	制冷剂的充注	190
第四节	客车空调装置的管理	193
第五章	客车空调的日常维护保养与故障处理	196
第一节	客车空调的日常维护保养	196
第二节	检查故障的方法	200
第三节	主要常见故障	205
第四节	故障分析及处理	212
第五节	故障分析实例	227
第六章	客车空调的测试	234
第一节	测试常用仪表	234
第二节	客车空调试验	250
第三节	空调客车供电装置概述	260
附录		
1.	湿空气的密度、水蒸汽压力、含湿量和焓	270
2.	R_{12} 、 R_{22} 饱和温度和压力的关系	275
3.	R_{12} 、 R_{22} 饱和和液体密度	277
4.	制冷和空调常用单位换算	278
5.	湿空气焓湿图	插页
6.	R_{12} 的 $P-h$ 图	插页
7.	R_{22} 的 $P-h$ 图	插页
	主要参考文献	279

第一章 旅客列车对空气参数的要求

第一节 空气的主要物理性质

地球表面有许多海洋、江河、湖泊,所以大量的水蒸汽便进入大气中,这种含有水蒸汽的空气叫湿空气。如果把空气中的水蒸汽除去,不含水蒸汽的空气叫干空气。干空气是由氮、氧、氩、二氧化碳、氦、氖和其他某些微量气体所组成的混合气体。干空气中除二氧化碳外,其他气体的含量是非常稳定的。二氧化碳的含量随动物、植物的生长状态,气象条件,以及生产过程中所排放的气体物质而有较大的变化。由于其含量非常小,对干空气性质的影响可以忽略不计。但是由于人们的呼吸作用,室内氧气会逐渐减少,二氧化碳逐渐增加,对人体造成影响。所以,必须向室内不断地供应新鲜空气,更换室内污浊的空气,以满足人们对氧气的需要。

湿空气中水蒸汽的含量虽然不多,但在湿空气中所占的百分比却很很不稳定,时常随着海拔、地区、季节、气候、湿源的不同而变化。这种改变对人体的舒适、产品的质量、生产工艺过程 and 设备的维护将产生直接的影响。

湿空气是空气调节的对象。湿空气的状态通常用压力、温度、相对湿度、含湿量及焓等参数来度量和描述。这些参数称为湿空气的状态参数。

在热力学中,常温常压下的干空气可以认为是理想气体。所谓理想气体,就是假定该气体分子是不占有空间的质点,分

子间没有相互作用力。但对于湿空气中的水蒸汽,由于压力很低、含量很少,故将其看作是理想气体。这样处理对湿空气来说,造成的误差很小,所以空调工程中,把湿空气也近视地看作理想气体。这就可用下列理想气体的状态方程来描述湿空气的压力、体积和温度的关系,即:

$$pv = RT$$

或

$$pV = mRT$$

式中 p ——气体的压力, Pa;

v ——气体的比容, m^3/kg ;

R ——气体常数, 取决于气体的性质, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

V ——气体的总容积, m^3 ;

T ——气体的热力学温度, K ;

m ——气体的总质量, kg 。

由于干空气的平均分子量和水蒸汽的平均分子量分别为 28.97 和 18.02, 故干空气的气体常数 R_r 和水蒸汽的气体常数 R_q 分别为:

$$R_r = \frac{8314}{28.97} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$R_q = \frac{8314}{18.02} = 461.4 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

式中 8314 为通用气体常数, 单位为 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

一、空气的压力

1. 大气压力

地球表面的大气层对单位地球表面积形成的压力称为大气压力。大气压力的单位用帕(Pa)或千帕(kPa)表示。

大气压力不是一个定值,它随着各地海拔的不同而存在

差异。同时还随着季节、天气的变化而稍有高低。通常以北纬45°处海平面的全年平均气压作为一个标准大气压力或物理大气压,其数值为101325Pa。海拔高度越高的地方大气压力越低。例如,我国东部的上海市海拔高度为4.5m,夏季压力为100500Pa,冬季为102500Pa,而西部青海高原的西宁市海拔为2261.2m,夏季压力为77300Pa,冬季为77500Pa。由于大气压力的不同,空气的物理性质也会不同,表示空气物理性质的状态参数也要发生变化。所以,在空气调节的设计和运行中,必须考虑当地气压大小,否则,就会造成一定的误差。

在空调系统中,空气的压力是用仪表测出的。仪表上指示的压力称为工作压力。工作压力不是空气压力的绝对值,而是与当地大气压的差值。工作压力与绝对压力的关系为:

$$\text{绝对压力} = \text{当地压力} + \text{工作压力}$$

只有绝对压力才是湿空气的状态参数。凡未指明是工作压力的,均应理解为绝对压力。

2. 湿空气的总压力与分压力

根据道尔顿定律,混合气体的总压力等于各组成气体的分压力之和。所谓气体分子的分压力,系指混合气体中各组成气体单独存在,并且具有与混合气体相同的温度和容积时,给予容器壁的压力。大气由干空气和水蒸汽组成,故大气压力是水蒸汽的分压力和干空气分压力之和,即:

$$p = p_s + p_e$$

式中 p ——湿空气压力,即大气压力;

p_s ——干空气的分压力;

p_e ——水蒸汽的分压力。

从分子运动论看,分子的压力是由分子撞击容器的结果,气体分子愈多,撞击容器的机会愈多,表现出来的压力也就愈

高。水蒸汽分压力的大小反映了水蒸汽含量的多少。在一定的温度下,空气能容纳的水蒸汽有一个最大的量,因而水蒸汽的分压力也有一个最大值。当空气中水蒸汽含量达到最大限度时,此时的空气称为饱和空气,此时的水蒸汽分压力称为饱和水蒸汽分压力。饱和水蒸汽分压力值取决于温度。各种温度的饱和水蒸汽分压力值可从湿空气性质表中(附录 1)查出。

二、空气的温度

空气的温度是表示空气冷热的程度。温度的高低用“温标”来衡量。目前常用的温标有绝对温标、摄氏温标和华氏温标。

绝对温标系开尔文温标,简称开氏温标,符号为 T ,单位为 K 。这种温标以气体分子热运动的平均动能(分子的移动动能,转动动能和振动动能)趋于零的温度为起点,定为 $0K$,以水的三相点温度为定点,定义为 $273.16K$ 。

摄氏温标的符号为 t ,单位为 $^{\circ}C$ 。

华氏温标的符号为 t ,单位为 F 。

三种温标的换算关系为:

$$t = T - 273.15 \approx T - 273$$

$$t^{\circ}C = \frac{5}{9}(t^{\circ}F - 32)$$

式中 T ——绝对温度, K ;

$t^{\circ}C$ ——摄氏温度, $^{\circ}C$;

$t^{\circ}F$ ——华氏温度, F 。

三、湿度

湿度的大小表示空气中所含水蒸汽量的多少。由于用途不同,湿度有以下几种表示方法:

1. 绝对湿度

绝对湿度系指单位湿空气中实际含水蒸汽的质量。单位是 g/m^3 或 kg/m^3 。由于湿空气中干空气和水蒸汽是均匀混合的,并且占有相同的体积,所以绝对湿度在数值上等于水蒸汽在其分压力和温度下的密度。即:

$$Z = \frac{m_q}{V} \text{kg}/\text{m}^3$$

式中 Z ——湿空气的绝对湿度, kg/m^3 ;

m_q ——水蒸汽的质量, kg ;

V ——水蒸汽占有的体积,即湿空气的容积, m^3 。

从式中可知,绝对湿度 Z 即为该温度和水汽分压力下的水蒸汽的密度(ρ_q)

绝对湿度是单位容积中实际含水蒸汽的量,而容积随温度的变化而变化,故 Z 是随温度的变化而变化。因而在空调工程中用绝对湿度表达空气的湿度,并且使用含湿量这个参数。

2. 含湿量

湿空气是由干空气和水蒸汽组成的。在湿空气中与 1kg 干空气同时并存的水蒸汽量,称为湿空气的含湿量。即:

$$d = \frac{m_q}{m_g} \quad \text{kg}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

式中 m_q ——湿空气中水蒸汽的质量, kg ;

m_g ——湿空气中干空气的质量, kg 。

含湿量是湿空气的重要参数。由于它表示了湿空气中实际含水蒸汽量的多少,所以在空气调节中,可用含湿量的增减表示加湿量和减湿量。

3. 饱和湿度

湿空气在一定的温度下,只能容纳一定的水蒸汽量,当水蒸汽量达到最大值时,称为饱和湿空气,此时的湿度称为饱和湿度。当水蒸汽量未达到最大值时,此时的湿空气称为未饱和湿空气。

4. 相对湿度

在一定温度下,饱和空气中的水蒸汽量已达到最大值,故空气不再具有吸湿能力,也即不能再接纳水蒸汽。这时空气所具有的含湿量,称为该温度下湿空气的饱和含湿量。单用含湿量不能表示空气的吸湿能力。例如,温度为 20°C , 含湿量为 14.7g/kg干空气 ; 温度为 30°C 时含湿量为 20g/kg干空气 。查湿空气性质表知,前一种空气虽然含湿量小,但已达到饱和状态,不再具有吸湿能力。而第二种空气虽然含湿量大,却未达到饱和状态,仍具有吸湿能力。为了表示湿空气的吸湿能力,可利用另外一个参数,即,相对湿度。

所谓相对湿度是指在一定温度下,空气的绝对湿度和饱和湿度之比。或者说,是空气中水蒸汽的分压力和同温度下饱和水蒸汽分压力之比:

$$\varphi = \frac{P_g}{P_{g,s}} 100\%$$

式中 φ ——相对湿度;

P_g ——空气的水蒸汽分压力;

$P_{g,s}$ ——同温度下空气的饱和水蒸汽分压力。

相对湿度表征空气接近饱和的程度。相对湿度的值小,说

明吸收水汽的能力强;反之,说明吸收水汽的能力弱。当相对湿度的值为 100% 时,指的是饱和空气;反之,相对湿度的值为 0% 时,指的是干空气。相对湿度值的大小表示吸收水汽的能力,但不能表示水蒸汽的含量,含湿量的大小表示水蒸汽的含量,但不能表示吸收水汽的能力。

相对湿度是检验空调效果的重要参数之一。它对人体的舒适和健康有一定的影响。人处在相对湿度很大的空气环境中,会感到闷热、憋气,在相对湿度小的环境中,会感到口干舌躁。

5. 露点温度

湿空气中饱和水蒸汽压力与温度间有一定的关系。当温度降低时,饱和水蒸汽压力随着降低,饱和含湿量也随之降低。如将未饱和的空气冷却,且保持其含湿量在冷却过程中不变,则随着空气温度的下降,饱和含湿量减少。当温度降到 t_l 时,空气达到饱和状态,即 $\varphi = 100\%$,如果再继续冷却,则空气中的水蒸汽就会析出凝结成水。将湿空气在含湿量不变的情况下,冷却到相对湿度 $\varphi = 100\%$ 时所对应的温度,称为空气的露点温度(t_l)。露点温度是空气结露与否的临界温度。空气的露点温度只取决于空气的含湿量,含湿量不变时, t_l 也为定值。例如,标准大气压力 $B = 101325\text{Pa}$ 时,甲、乙两种空气的含湿量均为 7.63g/kg干空气 ,尽管其温度分别为 30°C 和 20°C ,但它们的 t_l 相同,均为 10°C 。

如果将某种空气环境中的空气温度降到露点温度以下,饱和空气中的水蒸汽就会凝结成水珠。所以,如空气中有一冷却表面,表面高于露点温度时,该表面就不会结露,如低于露点温度,该表面就会结露。由此可见,是否结露完全取决于表面温度和露点温度。空调技术中,常利用冷却方法使空气温度

降到露点温度以下,以使水蒸汽从空气中析出凝结成水,将空气干燥。

四、湿空气的焓

在湿空气内部有各种能量,这些能量称为湿空气的内能。内能包括分子的移动动能、转动动能、振动动能和分子之间引力而具有的位能。如果设湿空气的压力为 P , 比容为 v 则

$$h = u + A p v$$

式中 u ——湿空气的内能;

A ——功热当量。

h 称为湿空气的焓值。焓的绝对值无法计算,通常只需计算它的变化。在空调计算中,选定 273.15K(即 0℃)时的干空气及饱和水蒸汽的焓为 0,以此为标准推算其他状态的焓值,其单位为 J 或 kJ。

1kg 干空气的焓和 d kg 水蒸汽的焓之总和,称为 $(1+d)$ kg 湿空气的焓。表示为:

$$h = h_g + d h_q$$

式中 h ——对应于 1kg 干空气的湿空气之焓, kJ/kg 干空气;

h_g, h_q ——分别为 1kg 干空气和 1kg 水蒸汽的焓, kJ/kg。

在空调工程中,对空气的加热或冷却都是在定压条件下进行的。定压过程中热量的交换,可用过程前后的焓差来计算,即:

$$h_2 - h_1 = C_p (t_2 - t_1)$$

式中 h_2 ——过程终了的焓值, kJ/kg;

h_1 ——过程开始的焓值, kJ/kg;

C_p ——空气的定压比热, kJ/(kg · K);

t_2 ——过程终了时的温度, ℃;

t_1 ——过程开始时的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

这样, $h_2 = C_{p,g} \cdot t$

$$h_2 = 2500 + C_{p,g} \cdot t$$

式中 $C_{p,g}$ ——干空气的定压比热, 在常温下,

$$C_{p,g} = 1.005 \approx 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

$C_{p,q}$ ——水蒸汽的定压比热, 在常温下,

$$C_{p,q} = 1.84 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

2500—— 0°C 时水的汽化潜热, kJ/kg 。

将比热值代入, 可得湿空气的计算式:

$$h = 1.01t + d(2500 + 1.84t) \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

$$\text{或 } h = (1.01 + 1.84d)t + 2500d \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

从前式中知, $(1.01 + 1.84d)t$ 随温度的变化而变化, 故该热量称为“显热”; $(2500d)$ 是 0°C 时 $d\text{kg}$ 水的汽化热, 与含湿量变化有关, 与温度变化无关, 称为“潜热”。

湿空气的焓值取决于温度和含湿量。如果温度虽有提高, 但含湿量减少, 此时, 焓值很可能不变, 甚至减少。因此, 湿空气的焓值是否增减, 不仅与温度有关, 还要看含湿量的变化情况。

第二节 湿空气的焓湿图

一、湿空气焓湿图的绘制

以比焓 h 为纵坐标, 以含湿量 d 为横坐标绘制而成的线图称为焓湿图。为了使图线清晰, 焓湿图纵横坐标之间的夹角为 135° 。焓湿图主要由比焓 h 、含湿量 d 、温度 t 和相对湿度 φ 四组定值线组成。下面分述各线的绘制。

1. 等焓线和等含湿量线

作一组垂直线,并取间距为 A ,该组线称等含湿量线。再作一组线,取间距为 B ,这组线和等含湿量线成 135° 角,并令 $A:B=1:1.5$,则该组线称为等焓线。在纵坐标轴上标出零点,比焓 $h=0$,含湿量 $d=0$,作出的坐标图如图 1-1 所示。

从图 1-1 上看出,纵坐标轴为 $d=0$ 的等含湿量线,自左向右 d 值逐渐增加;纵坐标零点以上的焓值为正,零点以下的焓值为负,自下而上焓值逐渐增加。

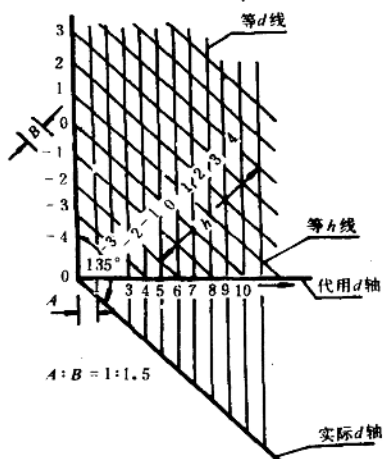


图 1-1 焓湿图坐标网

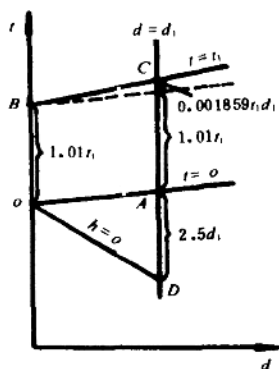


图 1-2 等温线的绘制

2. 等温线

从第一节知, $h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$, 如果 $t=0$, 并设 $d=0, h=0$, 则能在图 1-2 上得 0 点。另设 $d=d_1$, 则 $h=2.5d_1$, 则可得点 A, 把点 0 和点 A 连接起来, 则 OA 线即为等温线。同样, 取 $t=t_1$, 可得 B 点和 C 点, 连接 B 和 C, 则 BC 线即为 t_1 的等温线。用同样的方法, 可得出一系列直线(等温线)。在前述

公式中, $1.01t$ 为截距, $(2500 + 1.84t)$ 为斜率, 当 t 值不同时, 每一条等温线的斜率是不同的。因此, 温度不同的等温线并不是平行的, 温度愈高, 相对于横轴的倾斜程度愈大, 但由于 $1.84t$ 远小于 2500 , 温度 t 对斜率的影响不显著, 所以等温线之间又近似平行。

3. 等相对湿度线

根据第一节知, 常温常压下干空气和水蒸汽都可以视为理想气体, 因此,

$$\text{对于水蒸汽} \quad p_g V_g = m_g \cdot R_g \cdot T_g$$

$$\text{对于干空气} \quad p_g V_g = m_g \cdot R_g \cdot T_g$$

由于干空气、水蒸汽都具有和湿空气相同的容积和温度, 即 $V_g = V_g = V$ 及 $T_g = T_g = T$ 。

从第一节还知: $R_g = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$$R_g = 461.4 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

把以上数值代入下式, 即:

$$d = \frac{m_g}{m_g} = \frac{287 p_g}{461.4 p_g} = 0.622 \frac{p_g}{p_g} \text{ kg/kg 干空气}$$

湿空气的总压力即是大气压力, 设为 B , 则:

$$B = p_g + p_g$$

$$p_g = B - p_g$$

$$d = 0.622 \frac{p_g}{p_g}$$

$$= 0.622 \frac{p_g}{B - p_g}$$

应用该式, 可在焓湿图上画出等相对湿度线(图 1—3)。

在一定的大气压力

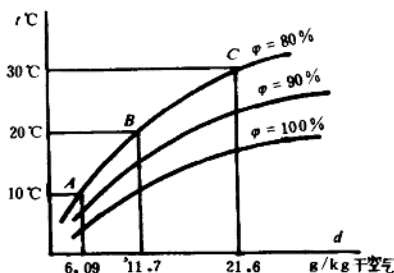


图 1—3 等 φ 线的绘制

下,当 φ 值一定时, d 是 p_s 的函数,而 p_s 又是 t 的函数。由此,给出不同的温度 t ,可求得对应的 d 值。根据 t 、 d 值在焓湿图上可找出若干点,连接各点得出的曲线,即为等 φ 线。 $\varphi=0\%$ 的等 φ 线是纵坐标轴, $\varphi=100\%$ 的等 φ 线是湿空气的饱和状态区。该曲线左上方为湿空气区,右下方为水蒸汽的过饱和状态区。

4. 水蒸汽分压力线

因 $d=0.622 \frac{p_s}{B-p_s}$,故解出 p_s 后,得:

$$p_s = \frac{B \cdot d}{0.622 + d}$$

由上式可知,当大气压力 B 一定,水蒸汽分压力的值和含湿量 d 互为函数,并近似地视为直线关系。每给定一个 d 值,就可得到相应的 p_s 值。可以在焓湿图的上方面画一条平行于代用 d 轴的水平线,并在线上标出 d 值所对应的 p_s 值,即为水蒸汽分压力线。

5. 热湿比线

所谓热湿比即湿空气状态变化前后的焓差和含湿量差之比值,即:

$$\varepsilon = \frac{h_B - h_A}{d_B - d_A} = \frac{\Delta h}{\Delta d}$$

分子、分母同乘以总空气量 G ,得:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{G \cdot \Delta h}{G \cdot \Delta d} = \frac{Q}{W}$$

Δd 和 W 的单位为 kg ,若 Δd 的单位为 g ,则上式可变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\frac{\Delta d}{1000}} = \frac{Q}{\frac{W}{1000}}$$

焓湿图右下方有一半圆形的图,图由一系列不同值的标

尺线组成。这些标尺线即热湿比 ε 线。该图的主要用途是求取空气状态的变化过程线。

例如大气压力 $B = 101325 \text{ Pa}$, 空气初始状态 $t_A = 20^\circ \text{C}$, $\varphi_A = 60\%$ 。当空气吸收 $Q_1 = 10000 \text{ kJ/h}$ 的热量和 $W = 2 \text{ kg/h}$ 的湿量后, 焓值变为 $h_B = 59 \text{ kJ/kg 干空气}$, 求状态终点 B 。该问题的求解方法如下: 由 t_A 和 φ_A 值, 在焓湿图找到初始状态点 A , 并求出 $\varepsilon = \frac{Q}{W} = \frac{10000}{2} = 5000 \text{ kJ/kg}$, 再根据 ε 值在 ε 标尺线上找到相应的 $\varepsilon = 5000 \text{ kJ/kg}$ 线, 过 A 点作该线的平行线, 即为空气状态变化过程线。此线与 $h = 59 \text{ kJ/kg 干空气}$ 的等焓线交于点 B , B 点即为空气状态终点, 由焓湿图再查出 $t_B = 28^\circ \text{C}$, $\varphi_B = 51\%$, $d_B = 12 \text{ g/kg 干空气}$ (图 1-4)。

6. 大气压力变化对焓湿图的影响

由公式 $d = 0.622 \frac{p_v}{B - p_v}$ 和公式 $p_v = \varphi \cdot p_{v,s}$ 可得下式:

$$d = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_{v,s}}{B - \varphi p_{v,s}}$$

式中 $p_{v,s}$ —— 饱和水蒸汽压力。

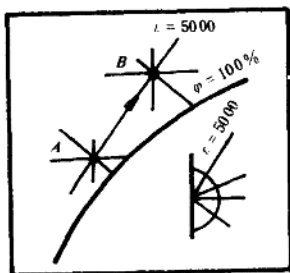


图 1-4 用 ε 线确定空气终状态

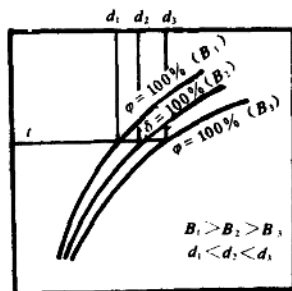


图 1-5 相对湿度线随大气压力变化图