

矿井通风工程



内 容 简 介

本书应用热力学理论较系统地阐述了矿井通风的基本原理和一般矿井的通风及测量技术,特别是对于深矿井及有热、湿问题矿井的通风系统进行了较全面的论述,并附有较多的计算实例。全书系统性强,简明易懂,是一本学习矿井通风技术较好的教科书和参考书,可供矿业高等院校通风安全、采矿、矿井建设等专业的师生,以及生产、科研和设计部门的工程技术人员学习参考。

责任编辑:邓 荷 香

C. J. Hall

MINE VENTILATION ENGINEERING

The American Institute of Mining, Metallurgical,
and Petroleum Engineers, Inc. New York. 1981

矿 井 通 风 工 程

〔美〕C. J. 霍尔 著

侯运广 贺敦良 刘冠姝 任周荣 译

侯运广 李新东 校

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

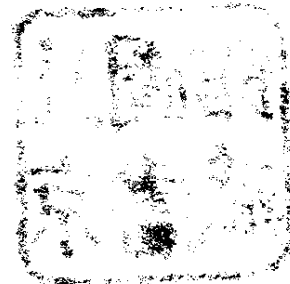
开本850×1168mm¹/₃₂ 印张13

字数343千字 印数1—7,000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

ISBN 7-5020-0000-3/TD·1

书号 2914 定价 3.75元



译 者 的 话

随着采矿工业的发展,矿井开采深度日益加深,矿井的热、湿问题也越来越严重,以往沿用传统的以水力学为理论基础研究矿井通风技术的方法,已显得不能适应;而美国C.J.霍尔编著的《矿井通风工程》一书正是以热力学为理论基础来阐述矿井通风基础理论和通风技术,能比较完善地考虑矿井风流的压缩、热、湿等因素的影响。因此,对于我们研究矿井通风,特别是热、湿矿井的通风问题有一定的参考价值。

该书除了介绍热力学的基础理论外,对矿井空气流动进行了非压缩流分析、干空气流动的热力分析、压缩流的重力分析、湿空气流动的热力分析,并对计算的精度进行了评价。以此为基础,对自然风压、扇风机、通风网路和空气调节系统进行了全面的分析,形成了一个完整的体系;并对矿用通风测量仪表、通风测量方法、辅助通风、空气质量,以及通风设计和通风经济都作了介绍。

在翻译过程中,对主要例题进行了演算,对发现的数据错误进行了改正。

翻译本书时曾得到常心坦同志的帮助,在此表示感谢。

参加翻译的有侯运广(第一、二章)、贺敦良(第五、七、九、十一章)、刘冠姝(第三、六、八、十章)和任周荣(第四章)等同志,最后由李新东同志进行审校。由于我们水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

符号和单位	1
第一章 热力学基础知识复习	3
单位	3
纯物质的性质	4
蒸汽表	9
数学关系	12
功、动能、位能和热	14
热力学第一定律	19
损耗功	22
$\int PdV$ 和 $-\int VdP$ 的关系	23
比热	24
理想气体的内能、焓和比热	25
例题	26
理想气体混合体	37
热力循环	40
第二章 湿度测定	43
空气-蒸汽-水的混合体	43
名词定义	44
湿度图	48
湿度图上过程的表示法	54
湿空气的蒸汽压力	62
绝热混合	63
冷却塔	65
习题	68
第三章 风流流经井下巷道及管道	71
基本关系	71
非压缩流体流动分析	74
干空气流的热力分析	86

压缩流的重力分析	96
计算精确性的评价	109
湿气流的热力分析	115
习题	127
参考文献	129
第四章 自然通风	130
干空气的热力分析	130
湿空气的热力分析	153
不平衡空气柱的热力分析	156
结论	177
习题	177
第五章 扇风机	179
扇风机的类型	179
扇风机的特性曲线	182
扇风机的定律	189
扩散器	191
扇风机应用于网路	193
扇风机特性曲线和损耗功	196
扇风机工况点的调节	198
各种类型扇风机的比较	202
扇风机试验	203
压力坡度图	204
扇风机串联	207
扇风机并联	208
增加风量所需扇风机风压的确定	211
习题	216
参考文献	219
第六章 网路	220
串联风道	220
并联风道	224
控制风流分支	226
网路	228
控制分风网路	229

自然分风网路	236
多进风井和出风井	246
习题	266
第七章 测量仪表	269
测量空气绝对压力的仪表	269
测量空气压差的仪表	271
测量空气温度和湿度的仪表	275
测量风速的仪表	277
测量巷道断面积	282
测量长度和标高	283
第八章 通风测量	284
风量测量	284
温度-湿度测量	286
压力测量	287
漏风测量	300
参考文献	301
第九章 辅助通风	302
纵向风幛	302
刚性和柔性风筒	303
设计方法	312
第十章 空气的质量	315
缺氧	315
矿井瓦斯	317
矿尘	328
热和湿	335
参考文献	355
第十一章 通风设计和通风经济	356
设计矿井主要通风系统	356
设计建井通风系统	368
经济分析	369
参考文献	377
附 录	378

符号和单位

A	面积, m^2	L	升 ($1\text{L} = 10^{-3}\text{m}^3$)
b	巴bar ($= 100\text{kPa}$)	1bf	磅力, 1bf
C	摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1b	磅, 1b
C	常数	l_w	单位质量消耗的功, J/kg
C	费用, \$	M	分子量
c_p	定压比热, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	m	质量, kg
c_v	定容比热, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	m	平均水力半径, m
D	基准面下深度, m	m	米, m
d	直径, m	m	质量流率, kg/s
e	砂粒或粗糙物直径, m	N	牛 ($1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$)
f	摩擦系数, 无因次	N_R	雷诺数, 无因次
ft	英尺, ft	NVP	自然风压, Pa
g	重力加速度, m/s^2 (标准值 $= 9.80665$ m/s^2)	n	气体指数, 无因次
g_c	因次常数, $32.174 \text{ lb}\cdot\text{ft}/$ $1\text{bf}\cdot\text{s}^2$	P	压力, Pa
H	压头, mmWG或 m液体柱	P	周长, m
H	焓, J	P	功率, W
h	单位质量的热焓, J/kg	Pa	帕斯卡 ($1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$)
J	焦 ($1\text{J} = 1\text{Nm}$)	P_a	干空气分压力, Pa
K	开尔文, K ($K = 273.15 +$ C)	P_v	水蒸汽分压力, Pa
k	粗糙度系数, 无因次	pe	单位质量的位能, J/kg
k	气体等熵指数, 无因次	Q	热交换, J
ke	单位质量的动能, J/kg	q	单位质量的热交换, J/kg
kg	千克, kg	R	风阻, m^{-4}
L	温度垂直梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$	R	气体常数, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$
L	长度, m	$\bar{R}$	通用气体常数, $\text{J/mol}\cdot\text{K}$
		r	半径, m
		S	摩擦面积, m^2
		S	斜率, 无因次
		s	秒, s

T	绝对温度, K
t	温度, °C
U	内能, J
u	单位质量的内能, J/kg
V	体积, m ³
$\dot{V}$	体积流速, m ³ /s
$\bar{v}$	速度, m/s
v	比容, m ³ /kg
W	瓦 (1W = 1N·m/s)
W	功, J
WG	水柱压差, (1mmWG = 9.80665Pa)
w	单位质量的功, J/kg
Z	基准面以上的高度, m
$\alpha\beta$	扇风机叶片角度, (°)
Δ	差值
η	效率, 无因次
η	绝对粘度, kg/m·s
ϕ	相对湿度, 无因次
ρ	密度, kg/m ³
ω	比湿, 单位质量干空气携带的水蒸汽质量, 无因次
ω_w	单位质量干空气携带的水分质量, 无因次
$\oint$	计算整个一圈的循环积分

下 标

A	大气的
a	空气
calc	计算的
db	干球

dc	进风井
e	出口
f	扇风机
f	水 (蒸汽表)
fg	水或蒸汽 (蒸汽表)
fr	摩擦
g	蒸汽 (蒸汽表)
i	入口
i	冰 (蒸汽表)
ig	冰或蒸汽 (蒸汽表)
L	损耗
m	算术平均值或平均值
m	混合体
mp	中点
nv	自然通风
S	静压
SG	静压计
T	总数
uc	上风井
v	蒸汽, 水蒸汽
$\bar{v}$	速度
w	水
wb	湿球
x	冲击
Z	位或标高

上 标

*	单位质量干空气携带的水蒸汽和水 (1 + ω + ω_w)
'''	试验值或专用值

第一章 热力学基础知识复习

热力学是研究能、功、热，以及能量改变对物质性质改变的影响。矿井通风工程师特别关心的物质是干空气、水蒸汽、水及冰。本章的复习内容，限于对风流的适当理解，但对于分析制冷装置是不够的。因此，描述了等价于能量守恒定律的热力学第一定律，而略去了熵的讨论和热力学第二定律。

这样安排仅仅是为了复习。对于不知道这些内容的人，许多基础热力学教材是很有用的，而本章内容可作为他们在普通测验中的指导。

单 位

本书的单位制为国际单位制。它与美国标准制的换算见附录A。

主要的国际单位制有：质量为千克(kg)，长度为米(m)，时间为秒(s)以及温度为摄氏度(°C)。标准千克为一铂圆柱体，保存于法国的塞弗尔。“米”原规定为一铂尺上两标线间距离，此尺也在规定条件下保存于塞弗尔，但现在则依据一特定光的波长来规定“米”的长度。“秒”原依据平均恒星日来规定，现在则依据一特定谐振器的周期来规定。温度标准依据冰点（一个标准大气压下冰和水的混合物）和沸点（一个标准大气压下水和蒸汽的混合物）来规定，这些点是易于再现的，并两点的温度值分别取为0°C和100°C。这又可用一点即水的三相点（处于平衡状态下的冰、水和蒸汽的混合物）和规定一度的大小来代替。从旧定义得到的数值是十分符合于从新定义得到的数值的。

由实验求得绝对温度的开氏度(K)等于摄氏度值加273.15或 $T(K) = t(^{\circ}C) + 273.15$ 。

力的单位为牛[顿](N)。它的定义为1kg质量产生 1m/s^2 的加速度的力，故可建立方程

$$1\text{N} = \frac{1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{g_c}$$

则因次常数 $g_c = 1\text{kgm/Ns}^2$ 。

重力加速度的标准值 g_0 为 9.80665m/s^2 。

这两种单位制的另一重要差别是符号。例如数值一千二百三十四点五六七八，美制写为1234.5678，而国际制则写为1234,5678，本书采用美制小数点的写法。

当应用到基本单位的倍数时，所有单位均应采用标准前缀，见附录A中表1。

纯物质的性质

在热力分析中，说明物质状态的纯物质性质包括压力 (P)、温度 (T)、比容 (v)、密度 (ρ)、干度 (x)、比内能 (u)、比焓 (h)，以及比熵 (s) 等。按我们的目的，可以设想由两个独立的性质说明纯物质的状态，并且在任一给定状态中所有性质均为单一的数值。某一性质的数值可用不同的单位表示，所以必须注意方程中数值表示的一致性。当采用美制单位时很容易引起混乱。

压力是单位面积上的力，以牛每平方米表示。其基本单位叫帕[斯卡] (Pa)， $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ ，我们将采用Pa、kPa 及 MPa。另一常用压力单位巴 (b)， $1\text{b} = 0.1\text{MPa}$ 。

气象学家广泛地用巴，并且许多气压计的分度为毫巴。最后，仍在广泛应用的压力单位是标准大气压， $1\text{atm} = 101325\text{Pa} = 101.325\text{kPa} = 1013.25\text{mb}$ 。

通常压力是用表压力来量度，为某位置某物质的压力和大气压力之差。一般表压力用于蒸汽和压缩空气管路以及吸尘罩的表征上。为说明某物质的状态或确定其它性质的数值还需要绝对压力，这可由大气压力（恒为正）与表压力（正或负）之和得到，

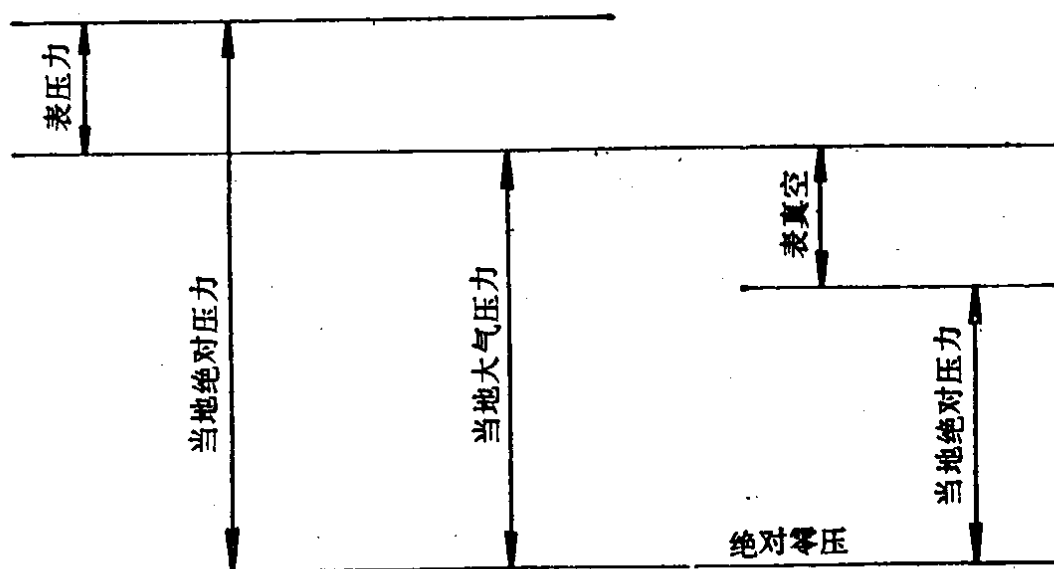


图 1-1 表压力和绝对压力的关系

如图1-1所示。

为了通风目的，常用分度为摄氏温度或华氏温度的仪器来测量温度，并必须转化为开氏温度以确定物质的某些性质。凡表列数值或性质常为摄氏温度值。

测量温度和压力是比较容易的，这些特性值将表明物质的状态，倘若它们是独立的，则其余性质常不需测量而可从已知状态确定。

比容为每单位质量的容积 V/m ，单位为 m^3/kg 。常用的容积为升(L)，等于 $0.001m^3$ ，即 $1L = 10^{-3}m^3$ 。

密度是比容的倒数，即每单位容积的质量，单位为 kg/m^3 。很多人用单位容积的重量来表示密度是不正确的。

前述其余性质亦将在本章内讨论。一个纯物质具有不变且均匀的化学成分，但它可以多于一个相而存在。例如，水是一纯物质，它可为固体、液体和气体，并且所有三相能互存于平衡中。空气不是一个纯物质，而是氮、氧及其它气体的混合体。在相当大的温度和压力范围内，干空气的化学成份保持不变而且均匀（从宏观看），故可当作纯物质处理。湿空气则是单位质量干空

气携带不同量的水蒸汽和水，必须当作两种成分的混合体来处理。这在第二章中再讨论。

水蒸汽的温度-比容图如图1-2所示。a点表示1kg水在20℃和101.325kPa（大气压）的状态。设置此1kg水于一汽缸内，并用一个无摩擦和重量的活塞将其与大气隔开。如果加热此水使其处于恒压过程，那么压力始终保持为101.325kPa。加热时水温增加直至100℃，在此过程中水略有膨胀，沿路径ab进行。在b点，水开始沸腾，温度和压力仍保持在100℃和101.325kPa不变，但由于水转化为水蒸汽，故比容显著增加。沿路径bc，在b点的1kg水达c点时正好转化为1kg水蒸汽。继续加热水蒸汽使其在恒压下膨胀，则温度沿路径cd而增加。

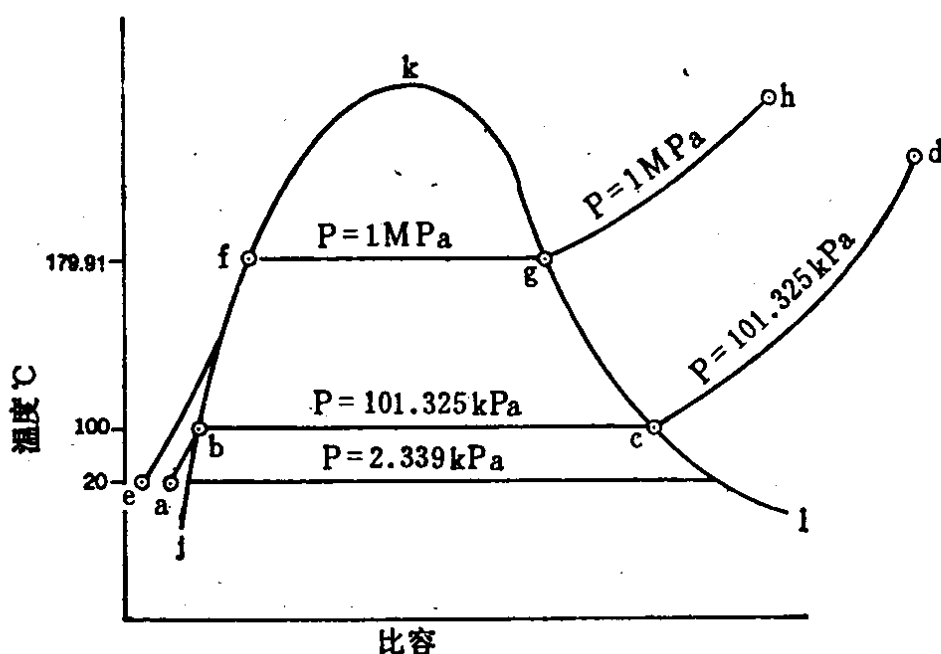


图 1-2 水蒸汽的温度-比容图

假设从a点开始，水处在20℃和101.325kPa的状态。然后，在无摩擦的活塞顶上加以足够的重量使其绝对压力增加至1.000 MPa。由于水被压缩，故比容略有减小，从e点可表示出水的这一状态。水在恒压下加热，沿路径ef膨胀，f点温度为179.91℃，比容为0.001127m³/kg，而在b点则为0.001044m³/kg。继续加热使水在179.91℃和1.000MPa（1000kPa）时沸腾，沿路径fg，在

g点的比容为 $0.19444\text{m}^3/\text{kg}$ ，而在c点则为 $1.6729\text{m}^3/\text{kg}$ 。再在恒压下加热，温度和比容沿路径gh增加。

在b点和f点的水，叫做在饱和压力和饱和温度下的饱和水。它的意思是指如在恒压下继续加热将导致汽化。因此 100°C 是压力为 101.325kPa 时的饱和温度和 179.91°C 是压力为 1.000MPa 时的饱和温度。也可以说成 101.325kPa 是 100°C 的饱和压力和 1.000MPa 是 179.91°C 的饱和压力。

如果在不同的压力时这些过程重复多次，显然可以通过水开始沸腾诸点（jbfg）画一条线，并且通过水已经转化为蒸汽诸点（lcfg）画另一条线。两线相交于k点，称为临界点。jbfg线叫做饱和液体线，而lcfg线叫做饱和蒸汽线。

饱和液体线左侧为单相区（压缩液体区的水），在任一点如e其压力较 20°C 时的饱和蒸汽压力 2.339kPa 为大。

饱和蒸汽线右侧亦为单相区，水以气体（蒸汽）状态存在，无液相和固相。此为过热蒸汽区，其中任一点的温度较该特定压力时的饱和温度高。

曲线jbfgcl下面为两相区，水以液体和蒸汽状态存在（向左液体多，向右蒸汽多）。

前曾述两个独立性质确定物质的状态，且在任一状态所有性质均为单一的数值，如图1-2所示。在单相区，温度、压力和比容均为独立性质，如规定任二性质即可在图上画一确定位置，并可读出第三性质的单一数值。然而在两相区，温度和压力为因变量，所以如果温度为 100°C ，压力为 101.325kPa 时，则沿整个bc线我们不能确定比容值。假若规定了温度和比容（如为 100°C 和比容 v 的数值， $v_b \leq v \leq v_c$ ），我们即能在图上划一位置，于是该状态得以确定。这是由于在两相区，比容与温度和压力无关的缘故。

压力、比容和温度之间的相互联系最好用一个三维图如图1-3来表示。描绘这三种性质可产生一个“面”，面上某点即代表某状态。cbe线是三相点线，并与比容轴平行。其温度恒定在 0.01°C ，压力恒定在 0.6113kPa 。比容变化范围为 $0.001111 \sim$

206.14m³/kg, 蒸汽、水和冰共存于平衡状态。

图中有三个两相面。ckdle面是液-汽相面, 图1-2即为其投影。它是一个平行于比容轴的规定面, 使得恒压、恒温线kl是位于该平面上并平行于比容轴的直线。

abef面为固-汽相面, 由于在此区温度和压力是相关的性质, 故该面亦为一个平行于比容轴的规定面。

cbgh面是第三个规定面, 代表固——液区。此面表示水结冰时, 要从h到g或从c到b的膨胀。由此, 所有两相区均为平行于比容轴的规定面, 并反映所有这两相区内的温度和压力为因变量。

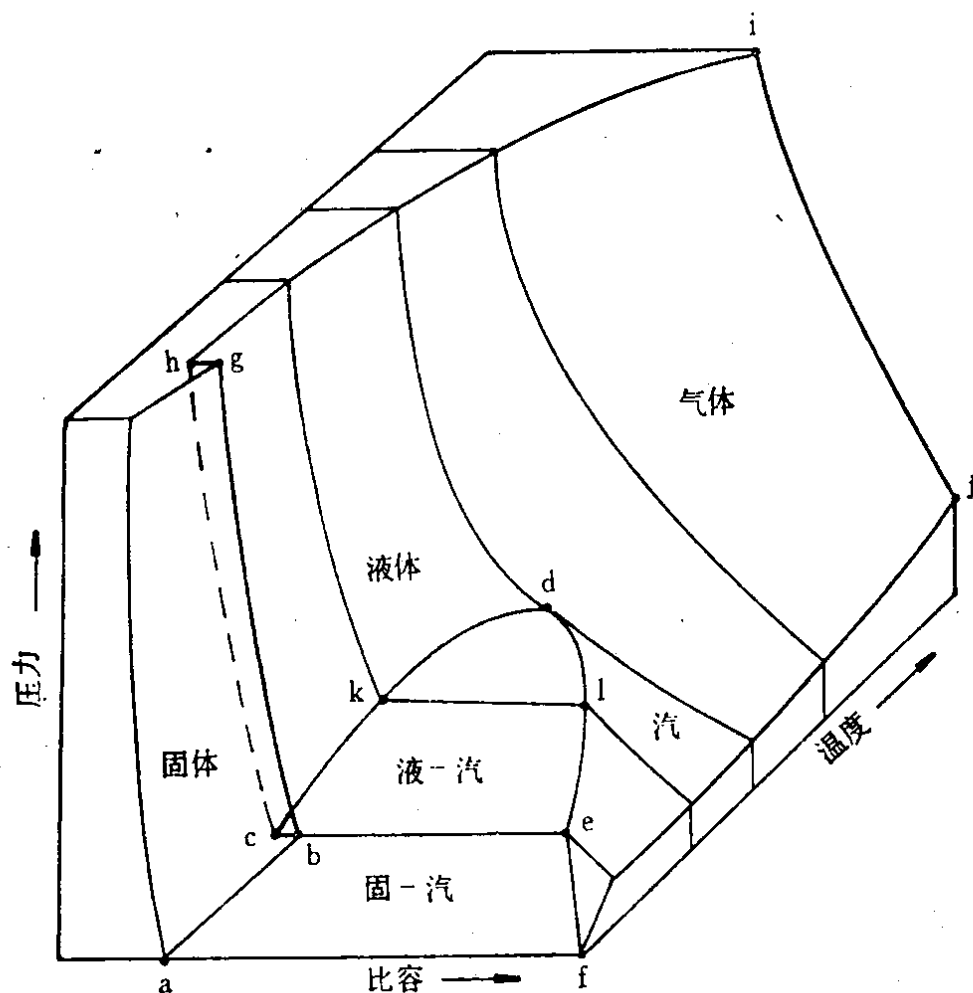


图 1-3 水的压力-比容-温度图

图中有两个曲面代表两个单相区。abg面代表固体冰, 并表示比容随着压力增大和温度减少而减小。第二个曲面是hijfedc, 代表液体、蒸汽和气体即单相流体。把这种在低温度和高压力下

的物质称为液体；正如在低温度和低压力下的物质则称为蒸汽；以及在高温下的物质则称为气体。

我们需要获得本章曾列举的在任一状态的压力、比容、温度及其它性质的数值。这可用表示为方程式的数学相互关系或用表列数值得到。除去理想气体（高温及低压气体），数学方程式对于应用来说太复杂了，所以表列数值法较好。因此，我们用蒸汽表查找蒸汽、水和冰的性质数值，但对于空气或低压水蒸汽则可用理想气体方程式求解。

蒸 汽 表

附录A有五个简要的蒸汽表。表2和表3给出图1-3中ckdle线所需的数据，该线是饱和液体和饱和蒸汽线。按k点和l点的数据，可得kl线上任一点的数据。所以各表给出了ckdleb液体蒸汽面的全部所需数据。我们感兴趣的是每表的前四列：第一、二两列为饱和温度和饱和压力，第三列为液体的比容，第四列为气体的比容。表2首先列出自变量温度，其次则为因变量压力。表3首先列出自变量压力，其次则为因变量温度。表2较详细，因之对通风更有用。

表中下标f、g及fg系指饱和液体值、饱和蒸汽值及蒸汽减液体值。如此， v_f 为饱和液体的比容， v_g 为饱和蒸汽的比容，则 v_{fg} 为 $v_g - v_f$ 。

需要一参数来说明在两相的液体蒸汽区内蒸汽和水的数量，该参数叫做干度（x），其定义为每单位质量含有的蒸汽质量。其数值变化范围从0（饱和水）~1.0，即100%（饱和蒸汽）。任一状态的湿蒸汽比容由下面方程求得：

$$\begin{aligned} v &= (1-x)v_f + xv_g \\ &= v_f + xv_{fg} \\ &= v_g - (1-x)v_{fg} \end{aligned} \quad (1-1)$$

学生应该校核此方程的单位。

例1 压力为800kPa，干度为0.8（80%）的蒸汽比容是

多少?

按表 3:

$$v_f = 0.001115 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.2404 \text{ m}^3/\text{kg}$$

解 $v = 0.2 \times 0.001115 + 0.8 \times 0.2404 = 0.1925 \text{ m}^3/\text{kg}$

例 2 温度为 25°C , 比容为 $10 \text{ m}^3/\text{kg}$ 的蒸汽干度是多少?

按表 2:

$$v_f = 0.001003 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 43.36 \text{ m}^3/\text{kg}$$

解 由方程 (1-1)

$$\begin{aligned} x &= (v - v_f) / (v_g - v_f) = (10 - 0.001) / 43.36 \\ &= 0.2306, \text{ 即 } 23.06\% \end{aligned}$$

固体蒸汽区的阐述和液体蒸汽区同, 见表 6。下标 i 、 g 及 ig 代表饱和固体、饱和蒸汽及二者之差。自变量为温度。与用表 2 计算液体蒸汽区一样, 对于图 1-3 中的 $abef$ 面, 可用表 6 确定水的性质。

表 4 给出饱和蒸汽线右方和上方的过热区的数据。此表由于温度和压力均为自变量, 故较表 2、3、5 为复杂。表中对于自变量 P 的每一数值列出一系列的副表。在每一副表中, 对于自变量 T 给出比容和其它性质的数据。使用此表时, 常需用单和双插值法。

例 3 170°C 和 0.3 MPa 的蒸汽比容是多少? 从表 2 中在 170°C 时的校核表明此压力低于饱和压力, 故此蒸汽必须过热 (见图 1-2)。如果在 0.3 MPa 时校核表 3, 由于题示温度高于饱和温度, 故将表明其为过热蒸汽。从表 4 中知, 在 0.3 MPa 时。

$$\text{当 } t = 150, v = 0.6339 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{当 } t = 200, v = 0.7163 \text{ m}^3/\text{kg}$$

解 用直线插值法

$$v = \frac{(0.7163 - 0.6339)(170 - 150)}{(200 - 150)} +$$

+ 0.6339 = 0.6669m³/kg

必须注意在靠近饱和蒸汽线的低压力时，用直线插值法求比容将出现大的误差。

例 4 327℃ 和 0.37MPa 时的蒸汽比容是多少？在温度为 300℃和400℃之间与压力为0.3和0.4MPa之间需要用双插值法。最可靠的方法是按表 4 的四个点数据建立一副表，作 327℃ 的行由插值法求0.37MPa；或作0.37MPa的列，由插值法求327℃。

	0.3	0.37	0.4	0.3	0.37	0.4
300	0.8753		0.6548	0.8753	0.7210	0.6548
327	0.9175	(0.7559)	0.6866		(0.7559)	

答

答

400	1.0315		0.7726	1.0315	0.8503	0.7726
-----	--------	--	--------	--------	--------	--------

例 5 确定比容为1.000m³/kg，温度为300℃的蒸汽压力。
解 查表 2，300℃时比容大于v_g，故蒸汽是过热的。观察表 4，P=0.20MPa，t=300，v>1.00；P=0.3MPa，t=300，v<1.00。因此，对于此两压力，需建立300℃的行。

	0.20	0.30
300	1.3162	0.8753

于是

$$P = \frac{(0.30 - 0.20)(1.3162 - 1.0)}{(1.3162 - 0.8753)} + 0.20 = 272\text{kPa}$$

表 5 用于压缩液体，因为温度和压力均为自变量，故与表 4 类似。它给出饱和液体线左区的数据，但很少采用。代替表 5 由饱和液体线求数据时宁可用饱和温度（表 2）而不用饱和压力（表 3）。

例 6 用表 5 确定300℃和15MPa的压缩水比容。并与300℃和15MPa的饱和液体数值相比较。

由表 5，300℃，15MPa得

$$v = 0.001377\text{m}^3/\text{kg}$$

由表 2，300℃得