

煤矿安全手册

第一篇 矿井通风与空调



煤炭工业出版社

煤矿安全手册

主 编 赵全福

副主编 戴国权 黄元平

第一篇 矿井通风与空调

主编单位 中国矿业大学

参加单位 中国矿业大学北京研究生部 山东矿业学院
淮南矿业学院 山西矿业学院 煤炭勘察设计协会
中国煤炭科学研究总院合肥研究所 焦作矿业学院

主 编 黄元平

副主编 赵以蕙

编写人 黄元平（第一章 第三章一、十二、十五节）赵以蕙
（第二章）黄勇健（第三章二~十一、十三~十五
节）钱仲德（第四章）马逸吟（第五章 第七章）
吴中立（第六章）王冶（第八章）许德佐（第九
章）王家琛（第十章一~五节）丁国玺（第十章
六节）胡卫民（第十一章）

前 言

建国30多年来,我国煤炭工业和其他工业一样,取得了突飞猛进的发展,煤炭产量由1949年的3240万t增长到1986年的8.94亿t。煤炭作为我国的主要能源,在社会主 四个现代化建设和人民生活方面做出了应有的贡献。

与此同时,我国煤矿安全技术的发展也取得了令人瞩目的成就,安全生产面貌发生了巨大变化,并且随着新技术、新工艺、新材料和新设备的不断使用,煤矿生产建设和矿井安全程度有了很大提高。为了总结煤炭工业战线广大职工积累起来的安全生产的丰富经验和科研成果,促进煤矿安全技术的发展,进一步加强煤矿安全技术管理工作,提高矿井安全程度,从根本上解决生产建设中的不安全隐患,以适应煤炭工业发展的需要,煤炭工业部于1985年组织煤炭工业生产建设、科研、设计和院校等单位的有关专家、教授和学者,编写了《煤矿安全手册》一书。

《煤矿安全手册》是一部囊括煤矿安全生产技术知识的大型工具书。它是根据党和国家的有关安全生产方针、政策和规程、规范,以及行之有效的安全生产经验和科研成果,本着科学性、先进性和实用性的原则进行编写的。在内容上,以总结我国的安全技术经验和最新成果为主,实事求是地反映我国煤矿的科学技术成就和发展趋向,并适当地吸收国外的先进技术,注意理论与实践相结合,在表达形式上,力求系统性和层次清楚,文字简练和条理化,尽力做到文、图、表并茂,便于读者查阅使用。《手册》主要供煤矿生产建设现场的工程技术人员(部分可供医务人员)和管理干部使用,也可供科研、设计部门及院校师生参考。

《手册》包括:矿井通风与空调,矿井防治瓦斯,矿井粉尘防治,矿井防灭火,矿井防治水,矿山压力与岩层控制,爆破安全,凿井安全,采掘机械安全技术,运输提升安全,电气安全技术,矿山救护,工业卫生及劳动保护,煤矿安全仪器、仪表及装备,安全法令法规等内容,共十五篇,将分册陆续出版。

《手册》的编写工作得到了部有关司局,特别是安全监察局,以及各主编单位和参加编写单位的很大支持,在搜集资料和审稿过程中也得到有关单位及人员的大力帮助。因此,《手册》的编写成功是各级领导、全体编写人员和审稿人员,以及提供资料单位共同努力的结果,也凝聚着煤炭系统广大职工共同的智慧与结晶,在此向他们表示衷心感谢。

由于编写时间仓促和缺乏经验,加之水平有限,书中缺点、错误在所难免,望读者批评指正。

《煤矿安全手册》编审委员会

一九八七年五月

AB12H 02

目 录

第一章 矿内空气的成分、性质和变化规律	1
第一节 空气的成分和性质	1
第二节 空气的物理参量	4
第三节 矿内空气的基本定律	17
第四节 矿内空气的热力变化过程	19
第二章 矿井通风的能量与阻力	22
第一节 风流流动的能量	22
第二节 摩擦阻力	33
第三节 局部阻力	39
第四节 通风阻力定律和特性	43
第五节 井巷通风阻力测量	44
第三章 矿井通风动力	59
第一节 自然通风	59
第二节 扇风机结构特点	63
第三节 个体性能	68
第四节 扇风机的类型性能参数	71
第五节 扇风机性能转换及其他性能参数	72
第六节 主要扇风机的规格与特性	74
第七节 局部扇风机	80
第八节 扇风机的变型	83
第九节 主要扇风机构筑物的合理规格	84
第十节 主要扇风机布置方式	89
第十一节 轴流式扇风机的噪声控制	95
第十二节 扇风机性能的测试	99
第十三节 老扇风机技术改造	101
第十四节 扇风机装置主要部件的故障及其排除方法	110
第十五节 扇风机的联合作业	112
第四章 风网中风流流动规律和自然分风	121
第一节 风网的构成和绘制	121
第二节 风网中风流流动的基本规律	124
第三节 简单风网中风流诸参数的关系	125
第四节 风网中风流稳定性分析	126
第五节 复杂风网中自然分配风量的计算	128
第五章 采区通风	135
第一节 采区通风系统	135
第二节 采区所需风量	154
第三节 采区通风构筑物	157

第六章 掘进通风	165
第一节 掘进通风方法	165
第二节 掘进通风方式	171
第三节 巷道掘进通风所需风量	172
第四节 掘进通风设备的合理选择	174
第五节 掘进通风技术管理	182
第六节 建井时期掘进通风	186
第七章 矿井漏风	193
第一节 矿井漏风的分类	193
第二节 矿井漏风率和有效风量率	193
第三节 通风构筑物漏风	194
第四节 采空区漏风	196
第五节 箕斗井漏风	198
第八章 矿井风量按需调节	201
第一节 局部风量调节	201
第二节 矿井总风量的调节	208
第九章 矿井通风设计	211
第一节 矿井通风设计的主要依据及内容	211
第二节 矿井通风系统	212
第三节 矿井风量计算及分配	218
第四节 矿井通风总阻力计算	225
第五节 矿井通风设备选择	226
第六节 矿井通风费用计算	228
第七节 生产及改扩建矿井的通风设计	228
第十章 矿井空气调节	231
第一节 矿井高温气候与劳动安全	231
第二节 矿井内高温热源的测定和计算	233
第三节 降低矿井高温的一般措施	251
第四节 矿井空气冷却系统	256
第五节 矿井空气冷却设备及计算	260
第六节 井筒防冻设备的选型与计算	295
第十一章 矿井通风与空调的电算	302
第一节 电算概况	302
第二节 矿井风网分析的电算	303
第三节 选择扇风机的电算	324
第四节 通风数据管理的电算	342
第五节 井巷气候条件预测的电算	360

第一章 矿内空气的成分、性质和变化规律

第一节 空气的成分和性质

一、地面空气的成分

地面空气是矿内空气的主要来源,是由干空气和水蒸汽组成的混合体。在正常情况下,其中干空气的成分如表1-1-1所示,这些成分的体积浓度或质量浓度(某气体的体积或质量在干空气的总体积或总质量中所占的百分数)基本不变。水蒸汽的数量随地区和季节而变,平均的体积浓度约为1%。

表 1-1-1

气 体 名 称	体积浓度 (%)	质量浓度 (%)
氮 (N ₂)	78.13	75.53
氧 (O ₂)	20.90	23.14
二氧化碳(CO ₂)	0.03	0.05
氩 (Ar)	0.93	1.27
其它稀有气体	0.01	0.01

二、矿内空气的成分和性质

在一般情况下,煤矿内的空气成分和性质见表1-1-2。由于各矿的具体条件不同,其矿内空气成分的种类和数量各不相同。表中的安全浓度(指对人体无害的允许浓度)是衡量矿井通风工作的标准之一。

三、矿内空气主要有害成分的分级

CH₄和CO₂是煤矿井下空气中普遍存在而且数量较多的两种主要有害成分。我国规定只用CH₄的相对涌出量(即为平均每吨煤的涌出量,米³/吨、m³/t)来划分矿井沼气的等级,见表1-1-3。按CH₄分级的作用,不仅为了按级别计算矿井所需风量,而且为了按级别采取相应的安全生产措施。当矿井的CO₂涌出量大于CH₄涌出量时,则用CO₂的涌出量来计算矿井所需风量。

表 1-1-3

CH ₄ 的相对涌出量	矿井的CH ₄ 等级
≤10m ³ /t	低沼气矿井
>10m ³ /t	高沼气矿井
	煤与沼气或岩石与二氧化碳突出的矿井

表 1-1-2

气体名称	主要来源	色、臭、味	相对密度	溶水性	助燃与自燃性	爆炸性	对人的影响	防治措施	安全浓度
氧气 (O_2)	来自地面的新鲜空气	无色, 无臭, 无味	1.105	无	能助燃	无	浓度为17%时, 呼吸困难, 心跳 15%时, 无力进行劳动 12%时, 开始威胁生命 9.5%时, 半小时后失去知觉 3%时, 立刻死亡	加强通风	工作地点 须 $\geq 20\%$
沼气 (CH_4)	从地层(煤或岩)涌出; 压气机中油料高温分解	无色, 无臭, 无味	0.554	无	遇650℃的明火能引燃	在体积浓度为5~16%的范围内, 遇明火能爆炸, 9.5%时爆炸力最强	虽然无毒, 但浓度大以致氧浓度降到12%以下时, 能使人窒息	加强通风, 量 大时须预先抽放	工作地点的进 风流中须 $\leq 0.5\%$, 采区和采掘工作 面的回风流中须 $\leq 1\%$, 矿井和分 区总回风流中须 $\leq 0.75\%$
二氧化碳 (CO_2)	井下一切物质的缓慢氧化; 从地层涌出; 人员呼吸; 爆破工作; 火区自燃; 火灾; 沼气、煤尘爆炸	无色, 微酸臭, 微酸味	1.519	在气温和气压分别为15℃和101325Pa的状态下, 1l水能溶解203.5 cm ³ 的浓度为20%的 CO_2	无	无	5%时, 呼吸加快 7%时, 喘息与头痛 10%时, 短时昏迷 20%时, 即刻死亡	加强通风, 量 大时须预先抽放; 水封爆破; 严防火灾、瓦斯 煤尘爆炸	工作地点的进风 流中须 $\leq 0.5\%$, 采 区和采掘工作面 的回风流中须 $\leq 1\%$, 矿井和分区总回风 流中须 $\leq 0.75\%$
一氧化碳 (CO)	爆破工作; 火区自燃; 火灾; 沼气; 煤尘爆炸; 润滑油高温分解; 伴随沼气从煤层涌出	无色, 无臭, 无味	0.967	溶水性极微	能燃烧	在体积浓度为13~75%的范围内, 遇明火能爆炸, 30%时爆炸力最强	0.02%时, 允许停留半小时 0.048%时, 1小时内会耳鸣、头痛、心跳 0.128%时, 1小时后会无力行动, 知觉迟钝 0.4%时, 较快丧失知觉 1%时, 立刻死亡	加强通风, 水 封爆破; 严防火 灾、瓦斯、煤尘 爆炸	工作地 点 须 $\leq 0.0024\%$, 短时 内允许 $\leq 0.02\%$

气体名称	主要来源	色、臭、味	相对密度	溶水性	助燃与自燃性	爆炸性	对人体影响	防治措施	安全限度
CO ₂	从地层涌水, 含硫酸水, 从矿泉水涌出, 火区自燃	无色, 鸡蛋臭, 微甜味	1.177	溶水性比CO ₂ 要大	能燃烧	在体积浓度为4~46%的范围内, 遇明火能爆炸	0.01%时, 几小时后会 使血液粘稠度中毒 0.02%时, 十分钟后会 较强中毒 0.05%时, 半小时后有 生命危险 0.1%时, 很快死亡	加强通风, 量 大时尚须预先将 石灰水注入煤体	工作地点须 ≤0.00066%
CH ₄	伴随沼气从地层涌出; 含硫高的煤自燃; 火灾; 沼气、煤尘爆炸; 含硫高的炸药爆破	无色, 强烈硫磺臭, 酸味	2.212	最易溶于水, 相当于CO ₂ 溶水性的46.5倍	无	无	0.0005%时, 有刺激眼 膜和呼吸系统的感觉 0.002%时, 有较强烈的 刺激 0.05%时, 短时内有生 命危险	加强通风, 水 封爆破; 严防火 灾和爆炸事故	工作地点须 ≤0.0005%
NO ₂	爆破工作	浅红褐色, 无臭, 无味	1.588	比CO ₂ 的溶水性要小	无	无	0.01%时, 使肺发炎, 威胁生命 0.025%时, 很快死亡	加强通风, 水 封爆破	工作地点须 ≤0.00025%
NO	火区自燃	无色, 剧臭, 无味	0.588	比CO ₂ 的溶水性要小	无	无	刺激眼睛、皮肤和呼吸 系统	加强通风	工作地点须 ≤0.004%
N ₂	井下充电硐室电解, 伴随沼气从地层涌出	无色, 无臭, 无味	0.069	无	能燃烧	在体积浓度为4~74%的范围内, 遇明火能爆炸	虽然无毒, 但浓度大以致 氧浓度降低时, 对人体有害	加强通风	充电硐室和灯房须≤0.5%
N ₂	伴随沼气从地层涌出; 来自地面空气; 有机物腐烂	无色, 无臭, 无味	0.968	无	无	无	对生理无反应的惰性气体		工作地点须 ≤79%
水蒸气(H ₂ O)			0.622						
粉尘	各种采、掘、运、提作业过程				遇750℃明火能引燃	有些煤尘在空气中的浓度为30~2000g/m ³ 的范围内遇明火能爆炸	无论煤和岩的浮尘吸入 肺内均能发生尘肺病	加强通风, 综合防尘	工作地点: 粉尘中含游离SiO ₂ 10%以上时, 须≤2mg/m ³ ; 含SiO ₂ 10%以下时, 须≤10mg/m ³

第二节 空气的物理参量

一、空气的压力

空气分子永不停息、无规则的热运动对容器壁面产生的压强，习惯叫做空气的绝对静压。理论上已说明：空气的绝对静压 P_s 就是单位容积中空气分子数 n 作热运动的动能 $(mv^2/2)$ 的 $2/3$ 所产生的（ m 为空气的质量， v 为空气的速度）。

即

$$P_s = n \times \frac{2}{3} \times \frac{mv^2}{2}, \text{ Pa} \quad (1-1-1)$$

n 和 $mv^2/2$ 越大， P_s 越大。空气的绝对静压具有在各个方向上强度相等的特点，不论空气静止还是流动，绝对静压都存在。地表大气的绝对静压习惯叫做大气压力。标高越低的地表大气，其 n 值越大， $mv^2/2$ 越大，则 P_s 越大。一个标准的大气压力是气温为 0°C 时、纬度为 45° 的海平面上空气的绝对静压。

用我国法定单位制时，计量空气压力的小单位为帕（Pa），大单位为千帕（kPa）和毫巴（mbar），其中 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ （牛顿/米²） $=1/1000\text{kPa}$ 。

用公制时，小单位为（公斤力/米²）（kgf/m²）或毫米水柱（mmWG或mmH₂O），大单位为毫米汞柱（mmHg）。

用英制时，小单位为磅力/英尺²（lbf/ft²）和英寸水柱（inWG或inH₂O），大单位为英寸汞柱（inHg）。

以上各单位间的换算关系见表1-1-4。例如，

$$\begin{aligned} 1 \text{ 个标准的大气压力} &= 101324.96\text{Pa} = 101.32496\text{kPa} = 1013.2496\text{mbar} = 760\text{mmHg} \\ &= 10332.27\text{kgf}/\text{m}^2 = 10332.27\text{mmH}_2\text{O} = 2116.2139\text{lbf}/\text{ft}^2. \end{aligned}$$

表 1-1-4

mm H ₂ O	kgf/m ²	mmHg	mbar	inH ₂ O	lbf/ft ²	Pa
1	1	0.07356	0.09807	0.03933	0.20482	9.80665
13.595	13.595	1	1.33321	0.53462	2.78447	133.3214
10.19716	10.19716	0.75007	1	0.401	2.08854	100
25.42932	25.42932	1.87049	2.49376	1	5.20833	249.3764
4.88243	4.88243	0.35913	0.4788	0.192	1	47.8803
0.10197	0.10197	0.0075	0.01	0.00401	0.02089	1
10332.27	10332.27	760.00514	1013.2496	406.31332	2116.2139	101324.96

二、空气的温度

空气分子热运动的动能大小，表现出空气的冷热程度，表示这种冷热程度的参量就是温度。故知（1-1-1）式中的动能 $mv^2/2$ 和 T 成正比，可写成

$$mv^2/2 = BT \quad (1-1-2)$$

式中 B ——比例常数,

T ——绝对温度, 是反映分子热运动的动能大小的理论温度, K。

物质的冷热程度实际用热平衡的方法来测量, 即当温度计与被测物质达到热平衡时, 温度计指示的温度就等于被测物质的实测温度, 这个温度叫做摄氏温度, 用符号 t 表示, 计量单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度与绝对温度具有以下关系

$$T = t + 273.15, \text{ K} \quad (1-1-3)$$

上式表明: 摄氏温度 t 为 0°C 和 -273.15°C 时, 分别相当于绝对温度 T 是 273.15K 和 0K 。

另一种实测温度叫做华氏温度 t' , 单位为 $^{\circ}\text{F}$, 可用下式和摄氏温度 t 换算

$$t = 5(t' - 32)/9, ^{\circ}\text{C} \quad (1-1-4)$$

三、空气的温度

矿内空气是由干空气和水蒸汽组成的湿空气。常用以下几种方法来表示湿空气的湿度:

绝对湿度 f ——单位容积或质量的湿空气中所含水蒸汽质量的绝对值, 其计量单位是 g/m^3 或 g/kg 。

饱和绝对湿度 f_s ——单位容积或质量的湿空气中所含已饱和的水蒸汽质量的绝对值(g/m^3 或 g/kg)。在标准状态下, 不同气温的 f_s 值见表1-1-5。

相对湿度 φ ——在同温同压下, 湿空气的 f 值和 f_s 值的百分比, 即

$$\varphi = 100f/f_s, \% \quad (1-1-5)$$

测算空气的湿度时, 须先测出相对湿度, 即用干球温度计和湿球温度计分别测出空气的干温度(又名干球温度) t ($^{\circ}\text{C}$)和湿温度(又名湿球温度) t_w ($^{\circ}\text{C}$), 根据这两个数值在图1-1-1中查出相对湿度值。

例1 若测得 $t = 20^{\circ}\text{C}$, $t_w = 15^{\circ}\text{C}$, 在图1-1-1中横坐标值为20的点向上画垂直线, 并在竖坐标值为15的点向右画水平线, 用两线交点的位置对比相对湿度斜线, 得出 $\varphi = 58\%$ 。再根据 t 值在表1-1-5中查出饱和的绝对湿度 $f_s = 17.2\text{g}/\text{m}^3$ 。然后把 φ 和 f_s 两个数值代入(1-1-5)式, 便可算出空气的绝对湿度 f 的近似值, 即

$$f = \varphi f_s = 58\% \times 17.2 = 9.976\text{g}/\text{m}^3。$$

湿空气的含湿量是指含有 1kg 干空气的湿空气中所含水蒸汽的质量, 用符号 d 表示, 计量单位为 g , 可用下式测算

$$d = 622\varphi e_s / (P_s - \varphi e_s), \text{ g}/\text{kg}_{\text{干空气}} \quad (1-1-6)$$

式中 φ ——湿空气的相对湿度, %;

e_s ——饱和水蒸汽的绝对分压, kPa 或 mmHg ;

P_s ——湿空气的绝对静压, kPa 或 mmHg 。

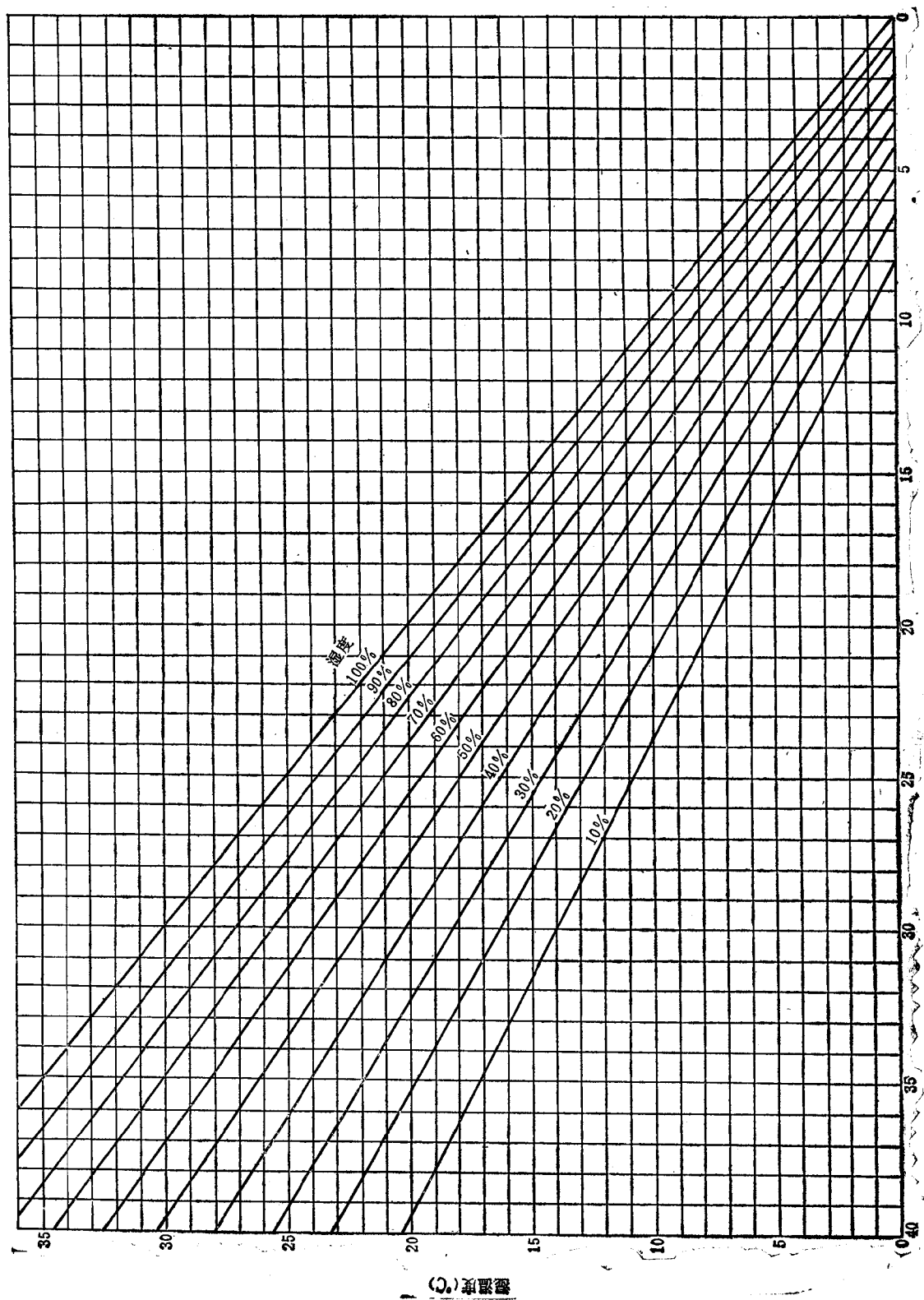
例2 测得湿空气的干温度 $t = 20^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 58\%$, 绝对静压 $P_s = 101.32496\text{kPa} = 760\text{mmHg}$; 据 t 值查表1-1-5得 $e_s = 2.331\text{kPa} = 17.48\text{mmHg}$

则 $d = 622 \times 58\% \times 2.331 / (101.32496 - 58\% \times 2.331) = 8.41\text{g}/\text{kg}_{\text{干空气}}$

或 $d = 622 \times 58\% \times 17.48 / (760 - 58\% \times 17.48) = 8.41\text{g}/\text{kg}_{\text{干空气}}$

四、空气的比容、密度和重率

空气的比容(又名容积度) v 是空气的容积 $V(\text{m}^3)$ 和质量 $m(\text{kg})$ 之比, 或者说是单位



干温度(°C)

图 1-1-1

表 1-1-5

空气温度 t (°C)	饱和空气绝对湿度 f_s		干空气密度 ρ	饱和空气密度 ρ_s	饱和空气的水 蒸汽分压力 e_s	饱和空气含湿量 d_s	饱和空气焓 i_s
	(g/m ³)	(g/kg)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kPa)	(g/kg干空气)	(kJ/kg干空气)
-20	1.1	0.8	1.396	1.395	0.102	0.63	-18.55
-19			1.394	1.393	0.115	0.70	-17.39
-18			1.385	1.384	0.125	0.77	-16.20
-17			1.379	1.378	0.137	0.85	-14.99
-16			1.374	1.373	0.150	0.93	-13.77
-15	1.6	1.1	1.368	1.367	0.165	1.01	-12.60
-14			1.363	1.362	0.181	1.11	-11.35
-13			1.358	1.357	0.198	1.22	-10.05
-12			1.353	1.352	0.217	1.34	-8.75
-11			1.348	1.347	0.237	1.46	-7.45
-10	2.3	1.7	1.342	1.341	0.259	1.60	-6.07
-9			1.337	1.336	0.283	1.75	-4.73
-8			1.332	1.331	0.309	1.91	-3.31
-7			1.327	1.325	0.336	2.08	-1.88
-6			1.322	1.320	0.367	2.27	-0.42
-5	3.4	2.6	1.317	1.315	0.400	2.47	1.09
-4			1.312	1.310	0.436	2.69	2.68
-3			1.308	1.306	0.475	2.94	4.31
-2			1.303	1.301	0.516	3.19	5.90
-1			1.298	1.295	0.561	3.47	7.62
0	4.9	3.8	1.293	1.290	0.609	3.78	9.42
1	5.2	4.1	1.288	1.285	0.656	4.07	11.14
2	5.6	4.3	1.284	1.281	0.704	4.37	12.89
3	6.0	4.7	1.279	1.275	0.757	4.70	14.74
4	6.4	5.0	1.275	1.271	0.811	5.03	16.58
5	6.8	5.4	1.270	1.266	0.870	5.40	18.51
6	7.3	5.7	1.265	1.261	0.932	5.79	20.51
7	7.7	6.1	1.261	1.256	0.999	6.21	22.61
8	8.3	6.6	1.256	1.251	1.070	6.65	24.70
9	8.8	7.0	1.252	1.247	1.146	7.13	26.92
10	9.4	7.5	1.248	1.242	1.225	7.63	29.18
11	9.9	8.0	1.243	1.237	1.309	8.15	31.52
12	10.0	8.6	1.239	1.232	1.399	8.75	34.08
13	11.3	9.2	1.235	1.228	1.494	9.35	36.59
14	12.0	9.8	1.230	1.223	1.595	9.97	39.19
15	12.8	10.5	1.226	1.218	1.701	10.6	41.78
16	13.6	11.2	1.222	1.214	1.813	11.4	44.80
17	14.4	11.9	1.217	1.208	1.932	12.1	47.73
18	15.3	12.7	1.213	1.204	2.059	12.9	50.66
19	16.2	13.5	1.209	1.200	2.192	13.8	54.01
20	17.2	14.4	1.205	1.195	2.331	14.7	57.78
21	18.2	15.3	1.201	1.190	2.480	15.6	61.13
22	19.3	16.3	1.197	1.185	2.637	16.6	64.06
23	20.4	17.3	1.193	1.181	2.802	17.7	67.83
24	21.6	18.4	1.189	1.176	2.977	18.8	72.01
25	22.9	19.5	1.185	1.171	3.160	20.0	75.78

续表

空气温度 t (℃)	饱和空气绝对湿度 f_s		干空气密度 ρ	饱和空气密度 ρ_s	饱和空气的水 蒸汽分压力 e_s	饱和空气含湿量 d_s	饱和空气焓 i_s
	(g/m ³)	(g/kg)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kPa)	(g/kg干空气)	(kJ/kg干空气)
26	24.2	20.7	1.181	1.166	3.353	21.4	80.39
27	25.6	22.0	1.177	1.161	3.556	22.6	84.57
28	27.0	23.4	1.173	1.156	3.771	24.0	89.18
29	28.5	24.8	1.169	1.151	3.995	25.6	94.20
30	30.1	26.3	1.165	1.146	4.232	27.2	99.65
31	31.8	27.3	1.161	1.141	4.482	28.8	104.67
32			1.157	1.136	4.743	30.6	110.11
33			1.154	1.131	5.018	32.5	115.97
34			1.150	1.126	5.307	34.4	122.25
35			1.146	1.121	5.610	36.6	128.95
36			1.142	1.116	5.926	38.8	135.65
37			1.139	1.111	6.260	41.1	142.35
38			1.135	1.107	6.609	43.5	149.47
39			1.132	1.102	6.975	46.0	157.42
40			1.128	1.097	7.358	48.8	165.80
41			1.124	1.091	7.759	51.7	174.17
42			1.121	1.086	8.180	54.8	182.96
43			1.117	1.081	8.618	58.0	192.17
44			1.114	1.076	9.079	61.3	202.22
45			1.110	1.070	9.560	65.0	212.69
46			1.107	1.065	10.061	68.9	223.57
47			1.103	1.059	10.587	72.8	235.30
48			1.100	1.054	11.133	77.0	247.02
49			1.096	1.048	11.707	81.5	260.00
50			1.093	1.043	12.304	86.2	273.40
55			1.076	1.013	15.694	114	352.11
60			1.060	0.981	19.870	152	456.36
65			1.044	0.946	24.938	204	598.71
70			1.029	0.909	31.082	276	795.50
75			1.014	0.868	38.450	382	1080.19
80			1.000	0.823	47.228	545	1519.81
85			0.986	0.773	57.669	828	2281.81
90			0.973	0.718	69.931	1400	3818.36
95			0.959	0.656	84.309	3120	8436.40
100			0.947	0.589	101.300	—	—

大气压为101.324kPa或760mmHg。

质量空气所占有的容积，即

$$v = V/m, \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-1-7)$$

空气的密度 ρ 是空气的质量和容积之比，或者说是单位容积空气的质量，也就是空气比容的倒数，即

$$\rho = m/V = 1/v, \text{ kg/m}^3 \quad (1-1-8)$$

空气的重率（又名容重或重度） γ 是重力 G (N) 和容积之比，或者说是单位容积空气的重力，即

$$\gamma = G/V, \text{ N/m}^3 \quad (1-1-9)$$

因重力是质量和重力加速度 g (m/s^2) 的乘积, 即

$$G = m/g, \text{ N}$$

又

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

则

$$\gamma = mg/V = \rho g, \text{ N/m}^3 \quad (1-1-10)$$

以上 v 、 ρ 、 γ 三项参量不是彼此独立的, 知其一, 必知其二。

用公制单位时, γ 的计量单位是 kgf/m^3 , 1kgf 是指质量为 1kg 的空气受 9.80665m/s^2 重力加速度的作用而产生的重力, 即

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.80665\text{m/s}^2 = 9.80665\text{N} = 2.20462\text{lbf}$$

则由 (1-1-10) 式知 ρ 的计量单位是 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。

空气的密度可用下式测算:

$$\rho = \frac{3.484(P_s - 0.3779\varphi e_s)}{273.15 + t}, \text{ kg/m}^3 \quad (1-1-11)$$

式中 P_s ——空气的绝对静压, kPa ;

e_s ——饱和水蒸汽的绝对分压, kPa ;

φ ——空气的相对湿度, %;

t ——空气的干温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

例3 测得 $P_s = 101.325\text{kPa} = 760\text{mmHg}$, $t = 18^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 90\%$; 据 t 值查表1-1-5得 $e_s = 2.059\text{kPa} = 15.444\text{mmHg}$ 。代入 (1-1-11) 式, 得

$$\rho = \frac{3.484(101.325 - 0.3779 \times 90\% \times 2.059)}{273.15 + 18} \approx 1.2\text{kg/m}^3$$

又用 (1-1-10) 式算得 $\gamma = 1.2 \times 9.80665 = 11.768\text{N/m}^3$

用公制单位时, 常用下式测算空气的重率

$$\gamma = \frac{0.4645(P_s - 0.3779\varphi e_s)}{273.15 + t}, \text{ kgf/m}^3 \quad (1-1-12)$$

式中 P_s 和 e_s 的计量单位是 mmHg , 其它同 (1-1-11) 式。

例如把例3中的已知值代入 (1-1-12) 式, 得

$$\gamma = \frac{0.4645(760 - 0.3779 \times 90\% \times 15.444)}{273.15 + 18} \approx 1.2\text{kgf/m}^3$$

则相应的

$$\rho = 1.2/9.80665 = 0.122 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

五、空气的比热

质量为 1kg 的空气, 升高或降低温度 1K 时所吸收或放出的热量叫做空气的质量比热, 可写成

$$C = dq/dT, \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-1-13)$$

比热的公制计量单位是千卡/(公斤·开)、 $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 换算关系是

$$1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ} = 3.97\text{Btu} \text{ (英制热量单位)}$$

在等容过程中, 气体不能膨胀作功, 所吸收的热量全部用来增加气体热运动的动能, 使温度升高; 在等压过程中, 气体可以膨胀, 所吸收的热量除用来增加热运动的动能外, 还应克服外力而作功。因此对质量相同的气体升高相同的温度时, 在等压过程中所需的热量要比等容过程为多, 故等压比热 C_p 总是大于等容比热 C_v 。 C_p 与 C_v 之比叫做气体的绝热指数。干空气和其他气体的 C_p 、 C_v 、 C_p/C_v 以及其它参量, 见表1-1-6,

表 1-1-6

气 体 名 称	标准状态下 的 密 度 ρ (kg/m ³)	等压比热 C_p (kJ/kg·K)	等容比热 C_v (kJ/kg·K)	绝热指数 C_p/C_v	气体常数 R (J/kg·K)	分子量	和干空气 相比的 相对密度	和干空气 相比的扩 散速率
干空气	1.292	1.010	0.716	1.410	287.041	28.96	1	1
O ₂	1.429	0.913	0.652	1.400	259.876	32.00	1.105	0.951
CH ₄	0.715	2.470	1.930	1.280	518.772	16.03	0.554	1.344
CO ₂	1.964	0.879	0.687	1.280	188.974	44.00	1.519	0.811
CO	1.250	1.047	0.749	1.398	297.043	28.00	0.967	1.017
NO ₂	2.052	0.841	0.658	1.278	180.694	46.00	1.588	0.794
H ₂ S	1.523	1.026	0.767	1.337	243.695	34.09	1.177	0.922
SO ₂	2.860	0.645	0.516	1.250	129.840	64.07	2.212	0.672
N ₂	1.251	1.043	0.745	1.400	296.749	28.03	0.968	1.016
NH ₃	0.766	2.219	1.720	1.290	488.273	17.03	0.588	1.304
H ₂	0.090	14.256	10.132	1.407	4124.677	2.01	0.069	3.807
水蒸汽	0.804	1.85	1.445	1.280	461.393	18.02	0.622	1.268

六、空气的内能和焓

空气的内能是空气分子热运动的动能（叫做内动能）和由分子间相互吸引所产生的位能（叫做内位能）的总和。空气质量为 m (kg)的内能用符号 U 表示，计量单位是kJ；质量为1kg的内能用 u 表示，计量单位是kJ/kg。即

$$u = U/m, \text{ kJ/kg} \quad (1-1-14)$$

U 的公制计量单位是 kcal； u 的公制计量单位是 kcal/kg。

由前面(1-1-2)式知，空气分子的内动能决定于空气的绝对温度 T ，温度越高，内动能越大；空气分子的内位能则决定分子间的距离，即决定于空气的比容 v 。由此可见，空气的内能 u 是 T 和 v 的函数，但为了简化，可以把矿内空气近似视为理想气体。所谓理想气体是指分子间没有引力的气体，即没有内位能的气体。这样可近似认为矿内空气的内能和它的比容无关，只是绝对温度的单值函数。

理想气体的焓 i 是内能 u 与流动功 $P_s v$ 之和，它是由热力状态所决定的总能量，即

$$i = u + P_s v, \text{ kJ/kg} \quad (1-1-15)$$

式中 u ——气体的内能，kJ/kg；

P_s ——气体的绝对静压，kPa；

v ——气体的比容，m³/kg。

用公制单位时， i 的计量单位是kcal/kg，则(1-1-15)式中的 $P_s v$ 项须乘以热功当量 A （即相当于做功1kgf·m的kcal热量）。因1kcal=426.93kgf·m，故 $A=1/426.93\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot\text{m})$ 。式中 u 、 P_s 、 v 的计量单位分别为kcal/kg、kgf/m²、m³/kg。

后面(1-1-19)式将表明：理想气体的 $P_s v$ 是绝对温度 T 的单值函数；上面已说明 u 也是 T 的单值函数，故理想气体的焓 i 也是 T 的单值函数。因此，可以得出温度与焓的关系式，用来计算气体的焓值。湿空气的焓是1kg干空气的焓和其中水蒸汽的焓之和，可用下式测算

$$i = 1.01t + 0.001d(1.85t + 2501), \text{ kJ/kg干空气} \quad (1-1-16)$$

式中

t ——湿空气的干温度, $^{\circ}\text{C}$;

d ——湿空气中的含湿量, $\text{g}/\text{kg}_{\text{干空气}}$, 用 (1-1-6) 式测算;

1.01、1.85——分别是干空气和水蒸汽的等压比热值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 见表 1-1-6;

2501——是 0°C 时 1kg 水蒸汽具有的热量, 叫做汽化潜热, kJ/kg 。

例 4 测得 $t=15^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\varphi=70\%$, $P_s=101.325\text{ kPa}=760\text{ mmHg}$, 据 t 值查 1-1-5 得饱和水蒸汽的绝对分压 $e_s=1.701\text{ kPa}=12.759\text{ mmHg}$ 。又据 (1-1-6) 式算得

$$d=622\times 70\%\times 1.701/(101.325-70\%\times 1.701)=7.4\text{ g}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

再由 (1-1-16) 式算得

$$i=1.01\times 15+0.001\times 7.4(1.85\times 15+2501)=33.86\text{ kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

用公制单位时, 须用下式计算:

$$i=0.24t+0.001d(0.46t+595), \text{ kcal}/\text{kg}_{\text{干空气}} \quad (1-1-17)$$

式中 0.24、0.46——分别是干空气和水蒸汽的等压比热值 $\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

595——是 0°C 时 1kg 水蒸汽的汽化潜热值 kcal/kg 。

其它符号同 (1-1-16) 式。

例如: 在上例中用 (1-1-17) 式可算得

$$i=0.24\times 15+0.001\times 7.4(0.46\times 15+595)=8.05\text{ kcal}/\text{kg}_{\text{干空气}}。$$

七、湿空气焓湿图的应用

湿空气的焓、含湿量和其它参量可在焓湿图 (又名 $i-d$ 图、见图 1-1-2 至图 1-1-6) 上直接查出它们的近似值 (单位换算为: $1\text{ kcal}=4.1868\text{ kJ}$; $1\text{ mmHg}=0.13332\text{ kPa}$)。

例 5 用例 4 的已知条件, 从 $i-d$ 图上查出各参量值:

因大气压为 101.325 kPa , 故用图 1-1-2 按照图 1-1-7 所示的方法来查。根据 $t=15^{\circ}\text{C}$ 和 $\varphi=70\%$, 15°C 的等温线与相对湿度 70% 的曲线相交于 A 点, 自这点向下画垂直线与横坐标底线相交, 得出湿空气的含湿量 $d\approx 7\text{ g}/\text{kg}_{\text{干空气}}$ 。

自 A 点向上画斜线和左侧竖坐标线相交, 得出湿空气的焓

$$i\approx 8\text{ kcal}/\text{kg}_{\text{干空气}}\approx 8\times 4.1868\text{ kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}=33.5\text{ kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}$$

自 A 点向下画斜线与 100% 的曲线相交于 B 点, 自这点向左画平行于等温线的斜线与左侧垂直的温度线相交, 得出湿球温度 $t_w\approx 12.8^{\circ}\text{C}$ 。

自 A 点向下画垂直线与 100% 的曲线相交于 C 点, 自这点向左画平行于等温线的斜线与左侧垂直的温度线相交, 得出露点温度 $t_{da}\approx 10^{\circ}\text{C}$ 。

自 A 点向下画垂直线与水蒸汽分压斜线相交于 D 点, 自这点向右画水平线与右侧垂直的压力线相交, 得出湿空气在 $\varphi=70\%$ 时的水蒸汽分压 $e\approx 9.3\text{ mmHg}\approx 1.24\text{ kPa}$ 。

自 15°C 的等温与 100% 的曲线的交点 E, 向下画垂直线与水蒸汽分压斜线相交于 F 点, 自这点向右画水平线与右侧垂直的压力线相交, 得出湿空气在 $\varphi=100\%$ 时的饱和水蒸汽分压 $e_s\approx 12.4\text{ mmHg}\approx 1.65\text{ kPa}$ 。

八、空气的粘性

空气流动时呈现内摩擦力的性质叫做空气的粘性。常用动力粘度 $\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 和运动粘度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ 来表示。它们的关系是

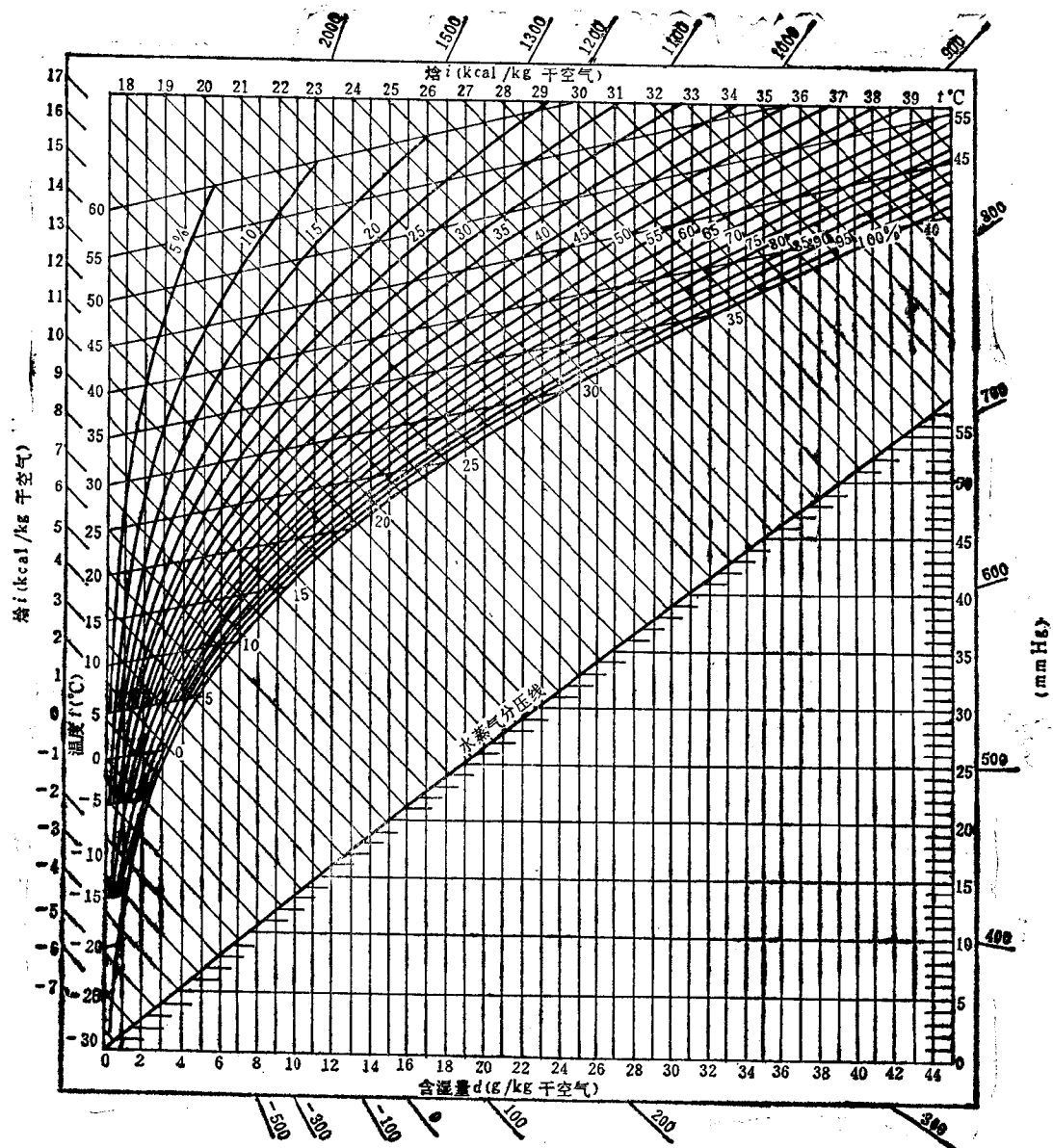


图 1-1-2 气压为101.325kPa或760mmHg