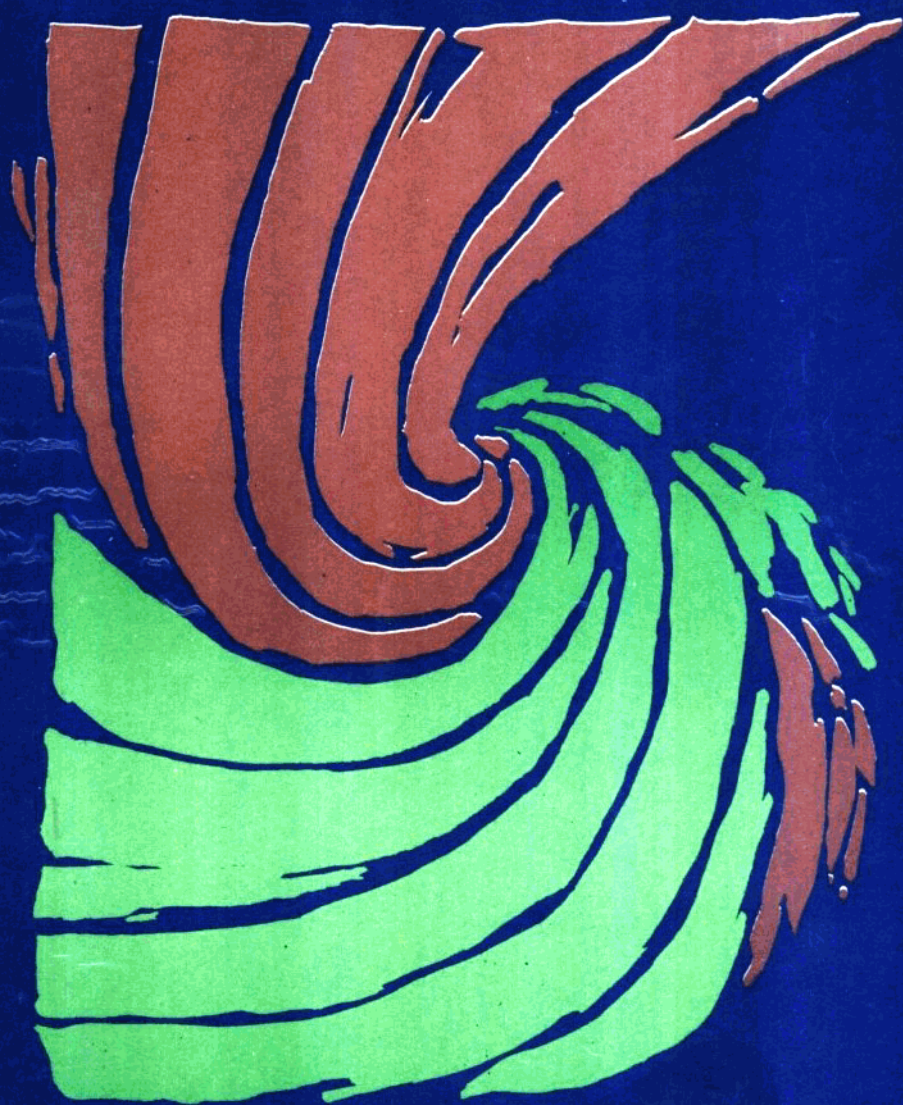


有害气体性状及监测技术

董连华 主编



东北工学院出版社

前 言

“安全生产，文明生产”是党和政府一贯的方针，也是各行各业必须遵循的准则。在生产建设或人民生活中，经常产生出一些对人体和工程有害的气体。为了加强对有害气体的管理，国家已投资了数亿元资金，在有害气体经常发生的工作场所装备了有害气体监测装置。但是，气体监测工作是一项复杂的技术，测值不只与仪器有关，而且与环境状况、干扰气体成分、操作人员的业务水平及管理人员的知识素质有关。因此，《煤矿安全规程》第160条规定：“……安全监测人员必须经过安全监测和通风专业的培训，经矿务局考核合格持有合格证，方可从事此项工作。”为了适应这一需要，煤炭科学研究总院抚顺分院，将董连华所编《矿井有害气体性状及检测方法》（王源增审校）讲义，于1985年印刷并发行全国各煤矿、公安消防及石油化工部门，受到读者欢迎。为满足读者的需要，作者董连华在广泛征求意见的基础上，结合国内外最新发展，对书稿又做了全面的修改和增补。考虑到工科院校有关专业的教学和现场有关人员培训的需要，由董连华、翟国斌、徐和卿对书稿又做了进一步的修改，其中：有害气体性状部分的第一至六章、第九至十一章主要由翟国斌修改；第七、八章主要由徐和卿修改；有害气体监测部分主要由董连华修改；韩国彬参加了第十二、十六章的部分修改工作。全书由董连华主编，王金邦主审。本书在编写过程中，对浓度单位延用了旧有单位，如 ppm, ppb。现行法定单位 $\text{ppm}=10^{-6}$ ， $\text{ppb}=10^{-9}$ ，特此说明。

中国科学院学部委员、中央顾问委员会委员、中国发明者协会主任、原中国科学院副院长、国家科学技术委员会副主任武衡同志为本书题词；在能源部黄毅诚部长的关怀和支持下，能源部安全环保局为本书作了序言；中国仪器仪表学会理事、中国劳动保护科学技术学会理事、煤炭工业安全仪器领导小组副组长、高级工程师陈学平为本书作了二序。本书在编写过程中，得到了东北工学院出版社的支持。此外，王希庆、周启凤，胡泰康等同志都曾给以热情的帮助。在此一并表示感谢。

本书虽经数度修改，错误和缺点仍恐难免，欢迎批评指正。

编 者

1991年1月

提高检测技术，
防治环境污染。
保护职工健康，
搞好安全生产。

祝贺《有害气体性状
及监测技术》出版。

武衡 1990年10月26日
于北京。

中国发明者协会主任、中央顾问委员会委员、原中国科学院副院长、国家科学技术委员会副主任武衡同志为本书题词。

序 言

搞好安全生产是党和政府的一贯方针，在能源系统中，特别是煤炭生产，大量接触易燃易爆、有毒有害气体和有腐蚀性的物质。它将严重威胁职工生命和国家财产的安全。

为了搞好安全生产，我们建立了各级安全管理与安全监察机构，在技术上我们已装备了有害气体监测装置并在现场运转，为了使用好这些装备，充分发挥其效用，尚须加强技术教育。只有将管理、技术、教育三者同步进行，才会保障安全生产。

《有害气体性状及监测技术》一书曾于 1985 年内部发行试用，通过实践在取得广大读者和有关专家的宝贵意见的基础上，作者对书稿又进行了修改和增补。为了适用于教学和培训的需要，又对书稿在编排上进行修整。因此，本书通版是生产实践的总结、是比较系统的阐述有害气体性状及监测技术的教材，具有一定的科学性、先进性和实用性。

本书系有害气体安全监测人员、瓦斯检查人员、有害气体监测装置的制造与检验人员、生产班队长、安全管理与安全监察人员、救护人员的重要参考教材，也可做为安全技术培训中心的培训教材。

能源部安全环保司

1990 年 12 月

序

安全生产是我们国家的一项基本政策，这在煤矿生产中具有特殊重要的意义。在历年的煤矿事故原因分析中可以看出：矿井瓦斯和其它有害气体的存在和产生，是造成人员伤亡的重要原因。1942年4月26日，在日伪统治下的本溪湖煤矿发生的一次瓦斯大爆炸，死亡1527人，震惊了全世界。但是，这些伤亡人员中，直接受到爆炸冲击波而死亡的仅占一小部分，而大多数人却是由于爆炸后产生的大量一氧化碳和其它有毒气体而中毒死亡的。所以，矿井环境中的大气成分，是关系着矿工安全和健康的根本性问题。怎样来认识这类有害气体的危害程度，怎样才能定量地检测出来从而加以调节、控制，这是每一个从事煤矿安全工作的人员所必须掌握的一门科学。《煤矿安全规程》（1986年版）中亦增加了安全培训的章节，规定了各矿“必须建立安全监测队伍，安监人员必须经过安全监测和通风专业的培训，经考试合格后，方准从事此项工作”。也说明了安全监测工作以及掌握这门科学的重要性和迫切性。

为了实现及时地监测矿井环境条件的各项参数，煤炭部早在1965年就着手组织矿井瓦斯监测系统的研制，可惜的是受到“十年浩劫”的冲击而中断，直到1973年以后，才得以逐渐恢复，出现了第一批能监测多点瓦斯（甲烷）的遥测仪和多种便携式甲烷检测仪。由于客观的需要，品种和数量都发展得很快。到1986年，瓦斯遥测系统先后发展有AYJ-1，AYJ-2，AYJ-3系统和AWJ-80采用计算机监控系统（均为重庆煤矿安全仪器厂生产），ABD-21（上海电表厂）、AWBY-2（淮南无线电一厂）、MJC-100A（西安煤矿仪表厂）以及近期集中了国内外产品特点而研制成功的KJ1系统（常州自动化研究所为主）、KJ4系统（航空部634所和抚顺煤矿安全仪器厂）。监测的对象，也由单一的低浓度甲烷发展到高浓度甲烷、一氧化碳、氧气、风速、温度等，并继续开发对二氧化碳、硫化氢、二氧化硫、氧化氮类及湿度等的监测，相应的传感器研制都有了很大的发展。1983年开始，煤炭部又有组织地引进一批国外的先进监测系统，有英国的MINOS（H&S）系统，美国的DAN 6400（MSA）和FEMCO（NMS）系统、法国的CTT63/40U（OLDHAM）系统、联邦德国的CP-80（AEG）系统和TF-200（FUNKEN & HUST）系统等。这些国内外系统，已经装备了三十多个样板矿井和近百个高沼气矿井，在安全生产方面，起到了预期的效果，有效地降低了统配煤矿百万吨煤的死亡人数。事实说明了我国煤矿的安全监测工作，正在进入世界先进行列。

但是，要用好和管理好这些仪器和监控系统，必须首先对被监测的对象——各种矿井有害气体的物理、化学特性及其对人体生理的影响程度等，有较透彻的理解，对监测的原理及其传感器的特点、最适用的条件等亦有所了解，而目前对这些科学知识的较集中而系统介绍的书籍，还很少见诸于市。本书的原编讲义，虽也受到煤矿安全工作者的广泛欢迎，但就内容而言，尚不够完全。对某些煤矿所特有的诸如瓦斯、煤尘爆炸后的矿井大气成分的变化，爆破作业之后在一定时间空间内的气体成分，以及内因火灾前后环境条件的变化等的实测或经验数据，均尚未编入。而这些数据却是预防事故所极有价值的资料，而且也是供事故分析从而吸取教训的重要参考依据。在本书中，均已补充编入。此外，本版本中对光干涉原理的气

体检测仪器的应用范围，也做了大量的补充，使之能用于多种化工气体的检测。因此，本书除可供广大从事煤矿安全工作者作为有用的工具书外，对从事石油化工、公安消防、交通运输等产业部门的安全工作者，也不失为一本很有价值的参考书。而本书的正式出版，将有助于我国劳动保护科学技术的进步，是以作序推荐给广大读者。

陈学平

1987 年 8 月于北京

目 录

序 序 言 前 言

第一篇 气体通论

第一章 气体的物理性质

§ 1-1 气体参量	(1)
§ 1-2 气体的状态方程	(3)
§ 1-3 道尔顿分压定律和混合理想气体的状态方程	(5)
§ 1-4 气体的密度	(6)

第二章 大 气

§ 2-1 大气成分	(8)
§ 2-2 大气的湿度	(9)
§ 2-3 大气的质量	(11)

第二篇 特殊环境中的气体性状

第三章 自然发火区的气体性状

§ 3-1 早期发火期与分析气体法	(14)
§ 3-2 指标气体	(16)
§ 3-3 早期发现自然发火及其评价方法	(22)

第四章 火灾烟雾中的气体成分

§ 4-1 纤维物质燃烧时产生的气体	(27)
§ 4-2 橡胶燃烧时产生的气体	(31)

第五章 瓦斯爆炸后的气体

§ 5-1 瓦斯爆炸产生的气体	(33)
§ 5-2 瓦斯爆炸后的气体流动规律	(35)

第六章 炮烟的气体成分

§ 6-1 炸药爆炸后产生的气体	(37)
§ 6-2 基本炸药爆炸后产生的气体	(38)

第三篇 有毒气体与窒息性气体

第七章 有害气体的评价标准

§ 7-1 有害气体的分类	(42)
§ 7-2 有害气体侵入人体的途径	(42)
§ 7-3 影响人体中毒程度的因素	(43)
§ 7-4 大气的质量标准	(43)
§ 7-5 允许浓度	(44)
§ 7-6 混合气体的允许浓度	(45)

第八章 有害气体的性状及危害

§ 8-1 一氧化碳(Carbon monoxide)	(48)
§ 8-2 碳氧羰基配合物	(52)
§ 8-3 二氧化碳(Carbon dioxide)	(54)
§ 8-4 氧气(Oxygen)	(56)
§ 8-5 二氧化硫	(62)
§ 8-6 硫化氢(Hydrogen sulfide)	(64)
§ 8-7 氨气(Ammonia)	(66)
§ 8-8 氮的氧化物	(68)
§ 8-9 汽油(Gasoline)	(71)
§ 8-10 氯气	(74)
§ 8-11 氰化氢(氢氰酸)	(76)
§ 8-12 醛类	(77)
§ 8-13 酒精(乙醇)	(79)

第四篇 易燃易爆性气体

第九章 可燃性物质的燃烧

§ 9-1 燃 烧	(83)
§ 9-2 燃烧的特点	(85)

第十章 气相爆炸

§ 10-1 气相爆炸及其产生的条件	(90)
§ 10-2 燃烧与爆炸危险的估价方法	(90)
§ 10-3 火焰速度与爆炸速度	(101)

第十一章 气相爆炸的原因及防治

§ 11-1 气相爆炸的直接原因与间接原因	(105)
§ 11-2 火源的性质	(107)

§ 11-3 防止可燃性气体爆炸的方法	(111)
§ 11-4 险情判断与爆炸地点的判定	(112)

第五篇 有害气体的监测

第十二章 有害气体监测设备

§ 12-1 性能与构造基准	(115)
§ 12-2 固定式检测报警装置	(116)
§ 12-3 携带型气体检测报警器	(120)
§ 12-4 综合安全监测系统	(123)

第十三章 气体成分传感器

§ 13-1 气体成分传感器的发展史	(132)
§ 13-2 气体传感器概论	(133)
§ 13-3 气体传感器的选择方法	(134)
§ 13-4 半导体气体传感器	(138)
§ 13-5 吸附效应晶体管气体传感器 (AET)	(144)
§ 13-6 电化学式气体传感器	(147)
§ 13-7 压电化学气体传感器 (PCS)	(157)
§ 13-8 声波与超声波气体传感器	(159)
§ 13-9 红外线气体传感器	(161)
§ 13-10 热导式气体传感器	(163)
§ 13-11 光反应型气体传感器	(170)

第十四章 催化燃烧式气体传感器

§ 14-1 基本原理	(174)
§ 14-2 金属丝催化元件	(180)
§ 14-3 载体催化燃烧式气体传感器	(183)

第十五章 光干涉型气体检测装置

§ 15-1 光干涉型瓦斯检定器的特点及分类	(199)
§ 15-2 光干涉型气体检定器原理	(201)
§ 15-3 光干涉型瓦斯检定器的检查	(205)
§ 15-4 光干涉型仪器的校验	(207)
§ 15-5 光干涉型瓦斯检定器的使用方法	(213)
§ 15-6 光干涉型检定器的管理	(219)

第十六章 检测装备的管理与使用

§ 16-1 有害气体监测设置规范	(220)
-------------------	-------

§ 16-2	有害气体监测装备的检验	(221)
§ 16-3	用户管理业务	(222)
§ 16-4	对瓦斯检测者的要求	(224)
§ 16-5	瓦斯检测设备的选型	(225)
§ 16-6	检测要求及测定点计划	(227)
§ 16-7	瓦斯监测设备的使用方法	(231)
§ 16-8	校准气样配制法	(239)
§ 16-9	瓦斯监测设备的校准	(246)
§ 16-10	有机溶剂蒸气性状及管理方法	(247)
§ 16-11	特种气体的管理	(251)
§ 16-12	船舶气体检测与管理	(253)
参考文献		(255)
附录一 气体检测管		(257)
附录二 有害物质的 mg/m^3 与 ppm 换算数		(259)

第一篇 气 体 通 论

第一章 气体的物理性质

§1-1 气体参量

气体是存在于客观世界中物质的一种表现形态。它与其它物质一样，都是由大量微观粒子（分子、原子）所组成。

为研究问题方便，通常称被研究的物体或对象为物体或系统，而位于系统以外的任何事物，均称为外界。就系统内部而论，物质（如所研究的气体）的分子或原子，都在不停地运动，而从宏观上看，在不受外界影响的条件下，其宏观性质是不随时间变化的，称这种状态为平衡态。

当系统（或被研究的对象）处在平衡状态时，它具有可用某些确定的物理量表征其属性的特点，称这些确定的物理量为系统参量。而用以描写气体属性的某些物理量则称为气体参量。

在宏观上，能较完整地反应气体物理属性的气体参量有：体积、压强、温度。

一、体积(V)

这里讲的气体体积，是指气体分子所能达到的空间，而与气体分子本身体积的总和是不同的。所能达到的空间，与系统的形状（如封闭容器的容积等）有关，因此体积是气体的几何参量。

体积的单位为 m^3 （立方米），容积的单位为 L （升）

二、压强(p)

气体压强是气体作用在封闭容器壁单位面积上的正压力。

应该指出：对于一定质量的气体，因其密度很小，在研究气体压强时，可以忽略气体自重（即重力）的影响。压强是气体的力学参量。

压强的单位为帕斯卡(Pa)，它就是牛顿/米²(N/m^2)。

三、温度(T)

温度是热现象所特有的热参数。它与物体的冷热程度有关，温度的高低，将使人们有冷热的感觉，而感觉往往因人而异，因地制宜。这样就需要对冷热程度进行度量，称冷热程度的数值表示为温度。

热学原理指出：一切互为平衡的物体有相同的温度，而对于每个所研究的对象或一个系

统来说, 在热平衡时, 其温度只取决于系统内部的热运动状态。气体温度则反应了构成气体的诸分子无规则运动的强弱程度。

温度的单位为开尔文(K), 习惯上也用摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

在表示温度间隔或温度差时, 有:

$$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$$

在表示温度的数值时, 有:

$$t = T - 273.15$$

式中 t 为摄氏温度, T 为热力学温度。上式表明: 热力学温度 273.15K 规定为摄氏温度的零点。

四、气体组分的含量

在自然界, 或在工程实际中气体往往是以多种组分的混合形式共存, 不同组分构成的气体, 或相同组分而组分含量不同的气体, 它们就有不同的状态。这样就需要一个化学参量来描写气体的含量和组分。

每种组分的含量可用它的量或摩尔(mol)数表示。

1. 摩 尔

摩尔是一个系统物质的量, 它在国际单位制中是物质的数量单位。摩尔的定义是: 摩尔是一个物系中所含物质的数量, 如果该系统中所含的基本原体的数目与 0.012 千克碳 -12 (即 ^{12}C) 的原子数目相等时, 该数量就称为 1 摩尔。这里所指的基本原体(或称基本单元)是指在一个物系中计数的基本单元, 它可以是原子、分子、离子、电子, 以及其它粒子或者这些粒子的特定组合。

依确定的实验已知, 12 克 ^{12}C 中含有 6.022×10^{23} 个 ^{12}C 原子, 这个数目叫做阿伏加德罗数。因此摩尔的定义, 又可表述为: 如果一个物系中所含物质的基本原体(或基本单元)的数目为 6.022×10^{23} 个时, 则该数量就称为 1 摩尔。

2. 原子(分子)的摩尔质量

原子(分子)的摩尔质量就是已废除的旧术语中的克原子量(克分子量), 它是分析气体物性时经常应用的一个物理量。这样, 任何原子(分子)的摩尔质量, 如取 g 作为质量单位, 在数值上, 就应该等于该物质的相对原子质量(相对分子质量)。知道摩尔质量, 就可以求出物质的摩尔数。

$$\text{物质的摩尔数} = \frac{\text{物质的质量(克)}}{\text{物质的摩尔质量(克)}}$$

如以 M, μ, N 分别代表理想气体的质量, 摩尔质量和摩尔数, 则上式可写成:

$$N = \frac{M}{\mu} \quad (1-1)$$

3. 气体的摩尔体积

气体的摩尔体积在分析气体状态时, 是一个很重要的参数。它表示一个摩尔气体所占有的体积。阿伏加德罗由实验总结出一条定律: 在气体压强趋于零的极限情况下, 在同温、同压时, 各种气体的摩尔体积都相等。这就是有名的阿伏加德罗定律。

实验表明: 1 摩尔理想气体, 在温度 T_0 为 273.15K, 压强 p_0 为 101 325Pa 时所占

有的摩尔体积 v_0 为

$$\begin{aligned}v_0 &= 22.414 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{mol} \\&= 22.414 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol} \\&= 22.414 \text{ L/mol}\end{aligned}$$

§1-2 气体的状态方程

在忽略重力场以及没有电磁场作用的条件下, 对于一定质量的气体, 可以用压强 p , 体积 V , 温度 T 来描述其平衡态。这时气体的状态, 可以用

$$F(T, p, V) = 0$$

表示的函数形式表达, 这就是气体的状态方程。

当压强不太大 (与大气压强相比), 温度不太低 (与室温相比) 的情况下, 很多气体基本上都遵守玻义耳-马略特、盖·吕萨克、查理等三个实验定律, 即都可近似地视为理想气体。所谓理想气体, 就是严格地遵守此三定律的气体, 因此, 严格讲, 理想气体是不存在的。但实验表明, 气体压强越低, 温度越高, 遵从三定律的准确性就越高。

此三个实验定律指出了, 对于一定质量 M 的气体, 在固定 p, V, T 三个参量中的任一个参量的条件下, 当气体状态发生变化时, 其它两个参量间的相互关系。

一、玻义耳-马略特定律 (体积与压强的关系)

在温度 T 保持不变的条件下, 一定质量的气体的体积 V 与压强 p 成反比。这就是说, 对所研究的系统 (质量 M 一定的气体), 当热力学温度 T 一定时, 气体体积 V 和压强 p 成反比, 或者说 p 与 V 的乘积是一个常数, 即:

$$p \cdot V = \text{常数} \quad (1-2)$$

式中常数值, 由系统的特性即由气体的性质、质量和温度决定。

在以体积 V 为横坐标, 压强 p 为纵坐标构成的 $p-V$ 图上, 式(1-2)可表示为图 1-1 所示的双曲线。曲线上任何一点, 都表示了一个状态, 而构成这些状态的各点又都在同一温度下, 因而又称 $p-V$ 图上的曲线为等温线。

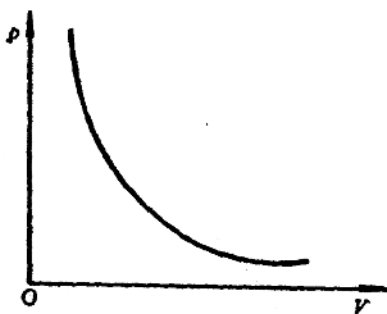


图 1-1 $p-V$ 图

二、盖·吕萨克定律 (温度与压强的关系)

盖·吕萨克定律可表述为: 如果气体的体积保持不变, 则一定质量气体的热力学温度 T 与压强 p 成正比。即当气体的质量 M , 体积 V 一定时, 压强 p 与温度 T 的比值是个常数。

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad (1-3)$$

式中常数由气体的性质、质量和体积决定。

在分别以温度 T 、压强 p 为横、纵坐标构成的 $p-T$ 图上，式(1-3)可表示为具有一定斜率(斜率的大小为 p/T) 并通过坐标原点(确切地说是延长线通过原点)的一条直线，如图 1-2 所示。由于温度太低时，定律已不成立，因而在 $p-T$ 图上低温线段用虚线表示。

直线上的任何一点都代表气体的一个状态，而直线上各状态又都在同一体积下，故称 $p-T$ 图上的直线为等容线。

式(1-3)可写成：

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} = \text{常数} \quad (1-4)$$

如取 T_0 为热力学温度 273.15K(即 0°C)，则式(1-4)中的 p_0 就表示为该温度下的压力。

设 t 表示摄氏温度($^\circ\text{C}$)，则热力学温度 T 与摄氏温度 t 之间关系如下：

$$T = t + 273.15 \quad (1-5)$$

由式(1-5)通过式(1-4)可求得温度为 $t(^\circ\text{C})$ 时的压强为：

$$p = T \cdot \frac{p_0}{T_0} = p_0 \cdot \frac{t + 273.15}{273.15} = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right) = p_0 (1 + \alpha_p t) \quad (1-6)$$

式中 $\alpha_p = \frac{1}{273} = 0.003663$ 它代表了定容气体的压强“膨胀”系数。式(1-6)表明：一定质量的气体，当体积保持不变时，温度每增加一度，其压强就增加 0°C 时压强的 $1/273$ 倍。

三、查理定律 (体积与温度的关系)

压强一定时，一定质量气体的体积和它的热力学温度成正比。即：

$$\frac{V}{T} = \text{常数} \quad (1-7)$$

式中常数由气体性质、质量和压强决定。

在以温度 T 为横坐标，体积 V 为纵坐标的 $T-V$ 图上，式(1-7)可以表示为如图 1-3 所示的直线。其斜率为 V/T ，其延长线过坐标原点。在温度很低时，气体就要凝聚成液体，而我们所讨论的是气体定律，因而低温段的直线只能用虚线表示。在 $T-V$ 图上画出的实线段，称为等压线。

用前面同样的办法，可以导出查理定律的另一种表达形式，即：

$$V = V_0 (1 + \alpha_v t) \quad (1-8)$$

式中： V ： $t^\circ\text{C}$ 时气体的体积；

V_0 ： 0°C 时气体的体积；

α_v ：定压气体的体积膨胀系数，它表示一定质量

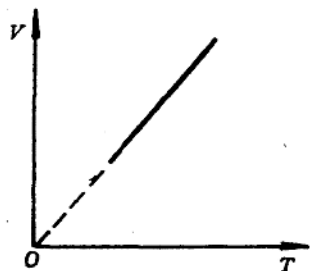


图 1-3 $T-V$ 图

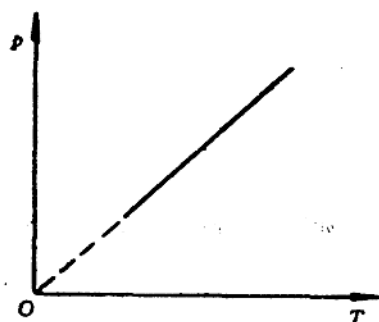


图 1-2 $p-T$ 图

和压强的气体，温度每变化 1°C ，其体积就变化 V_0 的 $1/273$ 倍。

可以看出， α_v 在数值上与 α_p 相等，均为 $1/273$ ，故用一通用符号 α 表示：

$$\alpha = \alpha_p = \alpha_v = 1/273 = 0.003663$$

四、理想气体状态方程

理想气体的状态方程是表明严格遵守三个实验规律的理想气体，其体积、压强、温度间的函数关系。下面首先介绍克拉珀龙方程。

如果将三个实验定律综合起来就可以导出下面的克拉珀龙方程，即：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{p_n V_n}{T_n} = \text{恒量} \quad (1-9)$$

如果气体的体积是一个摩尔体积 v ，则式(1-9)可写成：

$$\frac{p \cdot v}{T} = R \quad (\text{恒量})$$

或

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (1-10)$$

式(1-10)中的恒量 R ，对于一摩尔体积的气体来说，是一个与气体性质无关的常数。通常称 R 为摩尔气体常数。 R 可以在 T_0, p_0, v_0 条件下用式(1-10)求得。

取 $T_0 = 273.15 \text{ K}$

$$p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$v_0 = 22.414 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol} \quad (\text{即理想气体的摩尔体积})$$

依式(1-10)得：

$$R = \frac{p_0 \cdot v_0}{T_0} = 8.3143 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8.3143 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

设有质量为 M 的理想气体，摩尔质量为 μ ，气体的摩尔体积为 v ，根据式 (1-1)、式 (1-9)、式(1-10)，则摩尔数为 N 的气体方程可写成：

$$p \cdot (N \cdot v) = p \cdot V = N \cdot RT = \frac{M}{\mu} RT$$

即

$$p \cdot V = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-11)$$

式中 $V = N \cdot v$ 为 N 摩尔的气体体积，式(1-11)就是理想气体的状态方程。

§1-3 道尔顿分压定律和混合理想气体的状态方程

道尔顿由实验总结出：混合气体的压强等于各组分分压强之和，这条实验规律就是道尔顿分压定律。

所谓某组分分压强，是指该组分单独存在，当该组分摩尔数不变，其温度、体积均为混合气体的温度、体积时所表现出的压强。

利用道尔顿分压定律就可以将理想气体的状态方程式推广到混合理想气体中去。

设混合气体由几种气体成分组成，若第 i 种成分的质量为 M_i ，其摩尔质量为 μ_i ，所产生的分压强为 p_i ，则由式(1-11)有：

$$p_i \cdot V = \frac{M_i}{\mu_i} RT \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-12)$$

式中 V, T 分别为混合气体的体积、温度。

显然几种组分的气体，各有一相同形式的状态方程，如将这些状态方程迭加起来，并考虑到混合气体的压强为各组分气体分压强之和，即：

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

又，混合气体的摩尔数 N 就是各组分气体摩尔数 N_i 之和，混合气体的质量 M 就是各组分气体质量 M_i 之和，即：

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\mu_i}, \quad M = \sum_{i=1}^n M_i$$

则理想混合气体的状态方程可写成：

$$V \cdot \sum_{i=1}^n p_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\mu_i} \right) \cdot RT$$

$$\text{即} \quad V \cdot p = V \cdot \sum_{i=1}^n p_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\mu_i} \right) RT = \sum_{i=1}^n N_i \cdot RT = N \cdot RT$$

$$= \frac{M}{\mu} RT \quad (1-13)$$

从上面推导可以看出理想混合气体的状态方程式(1-13)与理想气体状态方程式(1-11)具有相同形式，但式(1-13)中的 $\mu = M/N$ 称为混合气体的平均摩尔质量，或称表观摩尔质量。

§1-4 气体的密度

气体的密度，是判断气体分布规律的重要依据。

气体的密度，即单位体积的气体质量。其单位为克/升或千克/米³。

由于在标准状况下，1摩尔理想气体的体积为 22.4 L，因此气体的密度可由式(1-14)求得：

$$\rho = \frac{\mu}{v} = \frac{\mu}{22.4} \quad (\text{g/L}) \quad (1-14)$$

式中 ρ ：气体密度；

μ ：气体的摩尔质量；

v ：气体的摩尔体积。

例如甲烷的相对分子质量为 $\text{CH}_4 = 12 + 1 \times 4 = 16$ ，丙烷的相对分子质量为 $\text{C}_3\text{H}_8 = 12 \times 3 + 1 \times 8 = 44$ ，丁烷的相对分子质量为 $\text{C}_4\text{H}_{10} = 12 \times 4 + 1 \times 10 = 58$ ，则它们的密度可由式(1-14)分别求得：

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16}{22.4} = 0.714 \text{ g/L}$$

$$=0.714 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{44}{22.4} = 1.96 \text{ g/L}$$

$$= 1.96 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{C}_2\text{H}_2} = \frac{26}{11.2} = 2.32 \text{ g/L}$$

$$= 2.32 \text{ kg/m}^3$$

工程上经常遇到的某些气体的密度及相对密度（该气体与空气的密度之比）如表 1-1 所示。

表 1-1 某些气体在标准状况下的密度及相对密度。

气 体	分子式	密度 $\rho, \text{kg/m}^3$	相对密度	气 体	分子式	密度 $\rho, \text{kg/m}^3$	相对密度
氮	N_2	1.2500	0.9669	二氧化碳	CO_2	1.964	1.5190
氨	NH_3	0.759	0.5971	氧化亚氮	N_2O	1.964	1.5190
氩	Ar	1.786	1.3814	氧	O_2	1.429	1.1053
乙炔	C_2H_2	1.161	0.898	甲烷	CH_4	0.714	0.5522
苯蒸气	C_6H_6	3.482	2.693	氖	Ne	0.893	0.691
正丁烷	C_4H_{10}	2.596	2.003	一氧化氮	NO	1.340	1.0365
丁烯	C_4H_8	2.500	1.934	一氧化碳	CO	1.250	0.967
氢	H_2	0.0893	0.0690	丙烷	C_3H_8	1.964	1.519
水蒸气	H_2O	0.804	0.622	丙烯	C_3H_6	1.875	1.450
空气	(无 CO_2)	1.2929	1.000	硫化氢	H_2S	1.518	1.174
氦	He	0.0893	0.0691	乙烷	C_2H_6	1.340	1.0365
二氧化硫	SO_2	2.857	2.2098	乙醚	C_4H_{10}	1.250	0.967

例题：某气体混合物的组分（以体积百分比计）为 CH_4 98%， N_2 1.3%， C_3H_8 0.7%，试求该混合气体的密度 ρ ？

解：依给出的体积百分比，从表 1-1 中查出相应的组分气体的密度，即可求得混合气体的密度 ρ 。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\text{CH}_4} \times 98\% + \rho_{\text{N}_2} \times 1.3\% + \rho_{\text{C}_3\text{H}_8} \times 0.7\% \\ &= 0.7168 \times 0.98 + 1.2505 \times 0.013 + 1.915 \times 0.007 \\ &= 0.7025 + 0.0163 + 0.0134 = 0.7322 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

复 习 题

1. 什么是气体参量？气体参量都包括些什么？这些参量的定义和国际单位都是什么？
2. 摩尔是什么单位？它的定义是什么？
3. 什么叫原子（分子）的摩尔质量？
4. 什么叫气体的摩尔体积？在标准状况下，一个摩尔理想气体的体积是多少？
5. 气体的三个实验定律都是什么？它们的使用条件和物理内容都是什么？
6. 什么是摩尔气体常数？摩尔气体常数是怎样求得的？
7. 说明气体的道尔顿定律的实质，并说明道尔顿定律的用途。
8. 什么是混合理想气体？其状态方程是什么？它与单一理想气体的状态方程有何异同？