

邹德蕴 张广文 编著

矿井环境气体理化性 与 控制技术

煤炭工业出版社

71
2072

矿井环境气体理化性 与控制技术

邹德蕴 张广文 编著

煤炭工业出版社

序

近十多年来,随着开采深度、力度的进一步加大,矿井瓦斯超限的频数和概率明显增加,不少煤矿变成高瓦斯矿井,原来没有瓦斯突出危险的煤层变为有瓦斯突出危险,现有的采区环境空间瓦斯管理技术受到挑战,使煤矿安全生产受到严重威胁。矿井生产安全是煤炭开采工作的重中之重,与往日相比,各级政府部门主管生产安全的责任与执法力度明显加强。随着人类社会的不断发展进步,人们对自己的生活与工作环境质量要求越来越高,自我生存与保护意识得到完善和加强。纵观大局,矿井中各类灾害事故的防治技术水平的提高显得越来越迫切,生产一线工程技术人员的专业知识水平的提高,对煤矿安全有着最直接的影响。

我非常高兴地看到这本关于煤矿安全管理专业知识的专著出版。书中体现了作者多年来的研究成果和工作与学习的积累;详尽的论述和分析了矿井工作环境中有气体的特性,易燃易爆气体的理化性与危害机理,以及实用有效的灾害防治技术对策。书中给出了许多新的知识要点和气体控制技术方法,例如,采面隅角瓦斯层的能量驱散法,采区通风系统压流比,采掘通风系统通风强度压力能调节控制法,以及关于瓦斯的固有物理属性——瓦斯分子羽浮性和逃逸性等,体现了作者的创新意识。相信这本书能够受到广大采矿工程技术人员及技术管理者的欢迎。

谨以此序向本书的作者表示祝贺,并期待有更多富有实践经验的专家学者和工程技术管理者,把自己的心得和成果写出来,奉献给煤炭行业的同仁,为共同谱写 21 世纪我国煤炭工业的新篇章贡献力量。

山东科技大学
博士生导师 谭允颖

2002 年 4 月 10 日

前 言

煤炭开采的历史长河中，人们不断地与煤炭开采引起的各类灾害作抗争。采矿工程方法和技术在工程装备的强有力支持下，迅速改进和提高。我们亲身感受到科学知识对煤矿安全产生的巨大作用力和影响力。在采矿工程中的各种环境条件下，开采过程的安全性（度）有了极大提高，灾害事故显著降低。但遗憾的是我们还不能乐观的说：安全隐患不存在，不安全因素得到了有效控制。安全问题，归根结底是人的问题，近几年，一些地方的技术管理人员，由于缺乏相应的安全专业知识，在经济利益的影响下，自觉不自觉地淡化了安全意识，安全理念受到扭曲，造成煤矿安全事故时有发生，尤其是瓦斯事故的发生，从事故发生的根源来看，潜在的灾害危险时刻威胁着我们。通过对这些事故的分析与分类，很容易发现矿井有害气体与瓦斯类灾害的发生极其严重，不管是在数量上还是在灾害程度上都是最高的量化指标。

在调研分析的基础上，作者体会到，许多事故的原因大都是由于从事煤炭开采的工人及工程技术管理人员的安全意识理念不健全；缺乏相关专业知识的学习和有力支持；工作中缺乏知识的综合运用技能与理念意识等因素。基于这种状况，作者在认真总结专家学者的大量研究成果和现场工程技术人员的实践经验的基礎上编写的这本书，其中体现了作者多年来的工作与学习的积累；书中还吸收了[8]、[24]、[25]等文献中的许多宝贵的数据资料。编写出版这本书，旨在为矿山安全开采尽一份责任，希望能受到广大现场工程技术人员及管理人員的欢迎。

本书仅仅是一本引玉之作，限于水平和实践经验，书中错误和不足之处在所难免。对任何事物而言，发展过程总是包含着提出问题 and 解决问题两部分，互为依据，所谓的“完美”只是相对

而言，不思进取是悲哀的。因此，提出问题又回答问题，是事物发展过程中最为重要的一环。多年来，作者坚持向生产一线工程技术人员学习，也得益于生产一线广大同仁的帮助支持，故以这本书回报于工程技术管理者们，愿共同探索相关工程技术问题，形成更系统更完善的实践与可操作性强的技术。需要指出的是，由于书中所引用的资料、数据大都来源于实验或现场测定，这些资料、数据中有些没有采用法定计量单位。为尊重原始资料的原创性和真实性，作者并未对其进行换算或改动。书后附有常用法定计量单位与非法定计量单位之间的换算关系，读者可根据需要进行换算或直接使用。

作者感谢山东科技大学资源与环境工程学院硕士研究生廖俊展同学，以及采矿99级学生赵云虎、张绪言同学，这三位同学负责完成了书中的全部绘图工作。同时感谢山东省生物制品研究所的赵风华副主任技师在编写中给予的指导和帮助。

作 者

2002年3月12日

目 录

第一章 环境大气	1
第一节 大气成分.....	1
第二节 空气的密度.....	3
第三节 密度与温度、压力的关系.....	6
第四节 密度的气态方程算法	12
第五节 密度的测量法	20
第二章 矿井环境有害气体的危害及允许浓度	31
第一节 有害气体的作用途径和危害机理	31
第二节 有害气体的允许浓度	35
第三章 矿井环境气体理化性分析	41
第一节 一氧化碳	41
第二节 碳氧羰基络合物	50
第三节 二氧化碳	54
第四节 氧 气	58
第五节 二氧化硫	61
第六节 硫化氢	66
第七节 氨 气	71
第八节 氮氧化物	75
第九节 汽 油	85
第四章 易燃易爆气体的理化性	91
第一节 烷烃系气体	91

第二节	烯 炔	93
第三节	炔 炔	94
第四节	氢	94
第五节	甲 烷	95
第六节	灾变气体的理化性	98
第五章	可燃性气体的爆炸反应特征.....	101
第一节	物质燃烧理论的基础.....	101
第二节	燃烧反应的特征.....	106
第六章	气相爆炸控制理论.....	113
第一节	瓦斯爆炸现象分析.....	113
第二节	爆炸极限的理论基础.....	117
第七章	瓦斯爆炸的因果分析.....	142
第一节	因果的分类.....	142
第二节	火源的性质.....	146
第八章	有害气体检测仪表性能设计基础.....	153
第一节	性能与设计标准.....	154
第二节	检测报警装置的组成.....	156
第三节	瓦斯综合安全监测系统.....	163
第九章	气体传感技术.....	165
第一节	气体传感器的发展.....	165
第二节	矿用气体传感器.....	167
第三节	半导体气敏传感器.....	170
第四节	吸附效应晶体管气体传感器.....	183
第五节	电化学式气体传感器.....	193
第六节	压电化学气体传感器.....	211

第七节	声波与超声波气体传感器·····	215
第八节	红外线气体传感器·····	222
第九节	热导式气体传感器·····	225
第十节	催化燃烧式气体传感器·····	240
第十一节	光干涉型瓦斯检定器·····	280
第十章	检测方法与管理技术·····	326
第一节	瓦斯检测的要求·····	326
第二节	瓦斯检测设备的选型条件·····	328
第三节	环境检测工作基本要求·····	332
第四节	环境检测计划设计·····	333
第五节	瓦斯检测设备的使用与管理技术·····	339
第六节	标准气样配制法·····	353
第十一章	采煤工作面瓦斯涌出规律及控制	
	新技术·····	366
第一节	瓦斯涌出规律及控制技术现状·····	366
第二节	采区空间瓦斯赋存特征及测控 新技术·····	384
第三节	工作面及上隅角聚集瓦斯的治理 新方法·····	397
第四节	掘进面污染质运移扩散特征及控制 新技术·····	399

第一章 环境大气

第一节 大气成分

大气是指包围在地球表面的人们呼吸的空气 (atmosphere air), 人们将包围在地球表面的气态物质称为大气圈, 大气圈的厚度可达 150~300km。依大气高度的不同, 其组成成分不同, 同时其温度也不一样, 在大约 10km 以上, 其温度保持相同的 -55℃, 因此称为同温层, 而在其以下高度范围内的温度是多变的, 称为变温层或温跃层。

近于地表面的大气组成成分, 依地区不同而有所不同, 表 (1.1) 所示为世界范围内平均污染状态的空气组成成分。其中干燥的无污染的空气中通常含有 0.1%~0.5% 的水蒸气, 正常状态时含有 1%~3% 的水蒸气。

表 (1.1) 基本空气的组成成分
(0℃, 101325Pa)

名 称	ppm	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
氮 气	780.000	
氧 气	209.000	
氩 气	9.300	16000000
二氧化碳	315	630000
氦	18	16000
一氧化碳	0.03~0.14	35~160

续表

名 称	ppm	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
氦	1.1	3100
甲 烷	1.4	900
硝 酸	0.26	480
氮	5.1	850
氢 气	0.5	40
氫	0.086	470
二氧化氮	0.02~0.07	40~130
二氧化硫	0.02	53
硫化氢		0.07
氨		10
臭 氧	0.02	40
丁 烷		150
乙 烷		120
丙 烷		90

空气是一种混合气体,其平均分子量为 28.84,空气的热膨胀率与所有气体一样,皆为该容积 0°C 时的 $1/273$ 。干燥空气的比热为 0.24。空气的主要成分是氮气、氧气,平均氮气占 78%,氧占 21%。

人类呼吸空气,主要是吸收空气中的氧气,一般成人每天要呼吸约 23m^3 的空气。为了保证煤矿井下工人能够呼吸到足够的空气,《煤矿安全规程》规定:矿井需要的风量,按下列要求分别计算,并采取其中最大值:

(一) 按井下同时工作的最多人数计算,每人每分钟供给风量不得少于 4m^3 ;

(二) 生产矿井的风量应按采煤、掘进、硐室及其他地点实际

需要风量的总和进行计算。各地点的实际需要风量，必须使风流中的瓦斯、二氧化碳、氢气和其他有害气体的浓度，风速及温度，每人供风量符合规程的有关规定。

设计矿井的风量计算，可参照邻近生产矿井的通风资料，按生产矿井的风量计算方法进行，也可按平均日产一吨煤预计涌出的沼气量或二氧化碳量来计算，矿井需要的风量见表（1.2）。

表（1.2） 生产矿井风量计算方法

平均日产 1t 煤涌出 CH_4 或 CO_2 量 $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	日产 1t 煤矿井需要的风量 $/\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
≤ 10	1.00~1.25
> 10	计算风量时，必须使总回风流中的瓦斯和二氧化碳浓度都不超过 0.75%，同时日产 1t 煤矿井需要风量不少于 1.5

第二节 空气的密度

一、干燥空气的密度

在标准状态下（0℃，101325 Pa），干燥空气的密度与 4℃时纯水密度的 1/273 相同，即为 $1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。当气温和气压发生变化时，其密度由下式计算：

$$W = \frac{1.293P}{(1 + 0.00367t) \cdot P_0} \quad (1.1)$$

式中： W 为空气的密度， kg/m^3 ； t 为温度，℃； P 为实测气压，Pa； P_0 为在标准状态下大气压值， $P_0=101325 \text{ Pa}$ 。

该公式适用于标准大气成分二氧化碳含量为 0.06%（体积）的情况下，当 CO_2 变化 $\pm 0.01\%$ （体积）时，则其计算所得值必须相应地在 $\left(\pm \frac{1}{19.000}\right)$ 范围内变化。 CO_2 浓度的变化，与实际变化的比重有很大差别，应进行计算更正。

二、湿润空气的密度

湿润空气的密度根据同温、同压下干燥空气的密度计算如下：

$$W_w = W \left(1 - 0.378 \frac{P_w}{P} \right) \quad (1.2)$$

$$\text{由(1.1)式可得: } W_w = \frac{1.293(P - 0.378P_w)}{(1 + 0.00367t) \cdot P_0} \quad (1.3)$$

式中： W_w 为湿润空气的密度， kg/m^3 ； P_w 为水蒸气压，Pa。
设 $t^\circ\text{C}$ 时水蒸气最大张力为 F ， h 为相对湿度，则，

$$h = \frac{P_w}{F} \times 100\text{RH}，\text{故 } P_w = \frac{h \cdot F}{100}，\text{将之代入 (1.3) 式得：}$$

$$W_w = \frac{1.293(P - 0.378h \cdot F/100)}{(1 + 0.00367 \times 30) \cdot P_0} \quad (1.4)$$

例题：求干球温度为 30°C ，湿度为 $85\%\text{RH}$ ，大气压力为 103991Pa ， $F=2314.5\text{N}$ 时的空气的密度。

根据 (1.1) 式求出干燥空气的密度为：

$$W = \frac{1.293 \times 103991}{(1 + 0.00367 \times 30) \cdot P_0} \approx 1.195 \text{ kg/m}^3$$

根据式 (1.4) 求出湿润空气的密度为：

$$W_w = 1.195 \left(1 - 0.378 \times \frac{85 \times 2314.5}{100 \times 103991} \right) \approx 1.86 \text{ kg/m}^3$$

三、混合气体的重量

设混合气体中各成分所占浓度为 $v_1, v_2, v_3, \dots$ ，在标准状态下各成分 1m^3 的重量分别为 $d_1, d_2, d_3, \dots$ ，则在 $t^\circ\text{C}$ ，大气压为 P 时 1m^3 的重量由下式计算：

$$W_m = \frac{1}{100} (v_1 d_1 + v_2 d_2 + v_3 d_3 + \dots) \frac{P}{(1 + 0.00367t) \cdot P_0} \quad (1.5)$$

若混合气体中含有水蒸气时，则将 (1.5) 式代入 (1.2) 式，可求得湿润混合气体的重量，或者将水蒸气作为混合气体中的一种成分进行计算。

例题：试计算温度为 27°C ，气压为 101991Pa 下表 (1.3) 混合气体的密度：

表 (1.3) 混合气体密度参数

成 分	O_2	N_2	CH_4	CO_2
体积/%	19.7	78.8	1.2	0.3
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.429	1.250	0.717	1.976

$$\begin{aligned}
 W_m &= \frac{1}{100} (19.7 \times 1.429 + 78.8 \times 1.250 + 1.2 \times 0.717 + \\
 &\quad 0.3 \times 1.976) \times \frac{101991}{\left(1 + \frac{27}{273}\right) \times 101325} \\
 &= \frac{1.2810 \times 101991}{\left(1 + \frac{27}{273}\right) \times 101325} = 1.173 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}
 \end{aligned}$$

四、空气的湿度

单位体积或单位重量的空气所含水分的重量，称为绝对湿度或含水量常以 g/m^3 或 g/kg 表示。

相对湿度指气体为水蒸气所饱和的饱和度，它是在所给定条件下气体实际上所含的水蒸气量与此状态下气体最大可能含量之比，或气体在该状态下的水蒸气量与最大可能含量之比，或气体在该状态下的绝对湿度与水蒸气所饱和时的绝对湿度之比。

相对湿度也可以作为气体中水蒸气的分压 p 与同一温度下饱和水蒸气压力 P_n 之比而求出：

$$h = \frac{p}{P_n} \% \text{RH}$$

式中的 p 和 P_n 的单位为 Pa 。

假如在某一温度下，气体中的水蒸气分压等于饱和水蒸气压力，则认为气体被水蒸气所饱和，对于饱和蒸汽 $h=100\% \text{RH}$ 。

湿气体为水蒸气所饱和的温度，称为该气体的露点温度。

在已知温度下的饱和蒸汽压与气体的体积无关，因为当体积减小时，一部分蒸汽就转变为液体。有关饱和水蒸汽压及温度的有关数据列于附录 2。

气体中的水分，可以按照下式计算：

$$W = \frac{R_r}{R_n} \cdot \frac{h p_n}{P - h p_n}$$

式中： R_r 和 R_n 为干燥气体与水蒸气的比气体常数； h 为气体的相对湿度，%RH； p_n 为在所给温度下的饱和水蒸气压力，Pa； P 为湿气体的总压力，Pa； W 为每 1kg 干气体中的含水量，kg。

按下式可以把湿空气的体积换算为标准状态下干燥气体的体积：

$$V = V_w \frac{273.2}{273.2 + t} \cdot \frac{P - p}{101325}$$

式中： V 为在 0℃ 及 101325Pa 压力下的干气体的体积， m^3 ； V_w 为在 t ℃ 的温度及 P 压力下湿气体的体积， m^3 ； p 为水蒸气压力，Pa； t 为气体的温度，℃。

例题：已知气体的相对湿度为 $h=40\%$ RH， $30m^3$ 的体积，6 个工程大气压（表压）的压力及 20℃ 的湿度，试求干气体在 0℃ 及 101325Pa 下的体积。

由附录 2 可以看出，在 20℃ 时，饱和水蒸气压力 $p_n = 2338.46\text{Pa}$ ，因此它在气体中的分压 $p' = h p_n = 0.4 \times 2338.46 = 936\text{Pa}$ ；6 大气压（表压） $= 6 \times 98066.33 = 588397.98\text{Pa}$ ，则：

$$V = 30 \times \frac{273.2}{273.2 + 20} \times \frac{588397.98 - 936}{101325} = 162m^3$$

第三节 密度与温度、压力的关系

一、膨胀性

从密度定义可知，它的密度特性主要决定于体积的变化，而体积是随其温度与压力变化的。这种情况下，若压力一定，则物

质体积与温度的关系可用下列多项式来表达，即：

$$V_t = V_0(1 + at + bt^2 + \dots)$$

式中： V_t 、 V_0 为物质在 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的体积； a 、 b 、 c 、 $\dots$ 为数值不大的常数。

在不太大的温度范围内，由于常数 b 、 c 、 $\dots$ 与 a 相比更小，故可以忽略简化为：

$$V_t = V_0(1 + at) \quad (1.6)$$

进一步，令 $a = a_v$ ，则有：

$$a_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1.7)$$

式中， a_v 表示物质每变化 1°C 时，其体积的相对变化率。这就是体膨胀系数（coefficient of volume expansion），单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ 、其中 dV/dt 为物质体积随温度的变化率。

由实验得到体膨胀曲线 $V = f(t)$ 见图 1.1，取 V_t 与 t 的交点 a_v ，求出该点曲线的斜率（ dV/dt ），并除以原体积 V ，便是这种物质在 t 温度下的真实膨胀系数，也就是说在压力一定的某个温度下 a_v 为一定值，所以体膨胀系数 a_v 随温度 t 及压力 P 而变化。

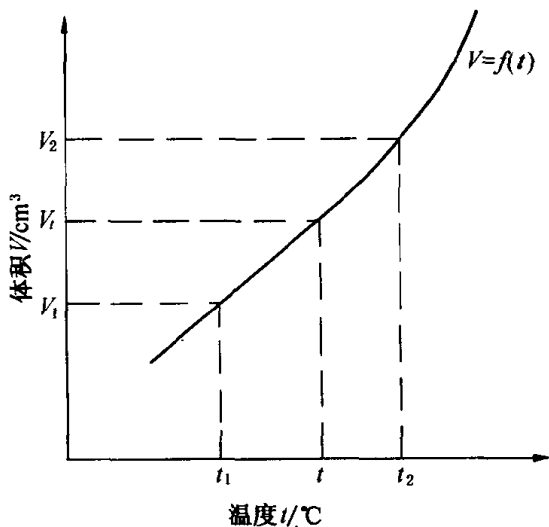


图 1.1 体积与温度间的函数关系

但是，应该指出的是， a_v 仅能在一个小的温度范围内被看成常数，即物质体积变化与其温度变化呈线性关系，故一般所给的值是在某个不大的温度范围内的平均值，如表 1.4。这样，在图 1.1 中，在温度 $t_1 \sim t_2$ 区间内的平均体膨胀系数为：

$$a_v = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.8)$$

从 (1.8) 式可知，当 $t_2 - t_1$ 和 $V_2 - V_1$ ，趋近于零时，在温度 t 时的体膨胀系数即变为式 (1.7)。

体膨胀系数表征了物质的热膨胀特性。一般来讲温度上升体积膨胀，温度下降体积收缩，其膨胀程度则因构成物系的物质而异。对于三态物质，以气体的 a_v 为最大，其次是液体，固体最小。通常情况下，液体膨胀比固体大 3 倍，所以液体与固体相比较，要注意温度膨胀系数较大的问题，故在工业测量仪器中，有自动进行温度补偿的装置。对于各向同性的固体来说，其体积膨胀系数可由它的线膨胀系数 (coefficient of linear expansion) a_l 求得，关系式为 $a_v = 3a_l$ 。

体膨胀系数很重要，常用它对各种物质的体积、流量及密度等随温度的变化进行计算。体膨胀系数可从适当的资料中查出或通过测量按有关公式求出。用测量的方法求密度时，应求出不同温度状态下的密度。一般来说，如果温度的变化范围在 $\pm 20^\circ\text{C}$ 以内，密度和温度之间基本上为线性关系。因此，可通过测量两个不同温度下的密度而求出此温度范围内的密度值。关于一些物质的体膨胀系数见表 (1.4)。

表 (1.4) 气体的体膨胀系数

名 称	$a_v (^\circ\text{C}^{-1})$	名 称	$a_v (^\circ\text{C}^{-1})$	名 称	$a_v (^\circ\text{C}^{-1})$
空 气	0.00367	二硫化碳	0.00390	一氧化碳	0.00367
氮 气	0.00367	氮 气	0.00366	二氧化碳	0.00374
氢 气	0.00366	氧 气	0.00367	氨 气	0.00380

二、压缩性

通常情况下, 温度一定时, 物质体积 V 随压力 p 增加而缩小的性质, 称为它的压缩性。压缩性大小, 可用压缩系数 k 来度量, 它是增加一个单位压力时所引起的体积相对缩小量, 单位是 Pa^{-1} , 其中

$$k = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (1.9)$$

式中负号, 表明了压力增加体积减小, 而 dV/dp 为物质体积随压力的变化率。

从实验得到的压缩曲线 $V=f(p)$ 见图 1.2, 取 V_p 与 p 的交点 k , 求出该点曲线的压缩斜率 (dV/dp), 并除以原体积 V , 便是这种物质在 p 压力下的真实压缩系数, 也就是说在温度一定的某个压力下 k 为一定值, 所以压缩系数 k 随压力 p 及温度 t 而变化。

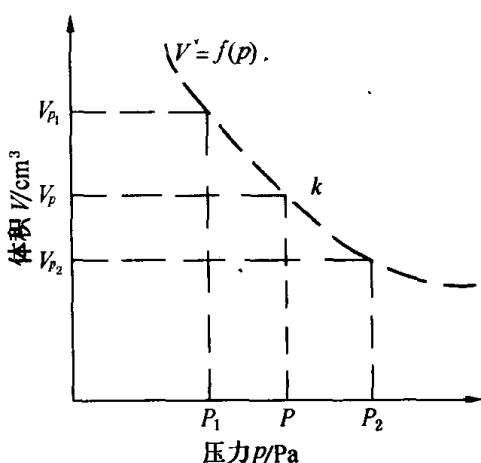


图 1.2 体积与压力间的函数关系

但是, 在这里应该指出的是, k 仅能在一个小的压

力范围内被看成是常数, 即物质体积变化与压力变化呈线性关系, 故一般所给的 k 值表系指在某个不大的压力范围内的平均值 (如表 1.5)。这样, 在图 1.2 中, 在压力 $p_1 \sim p_2$ 区间内的平均压缩系数为:

$$k = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \cdot \frac{1}{p_2 - p_1} = -\frac{1}{V_1} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.10)$$

从 (1.10) 式可知, 当 $p_2 - p_1$ 和 $V_2 - V_1$ 趋近于零时, 在压力 P 时的压缩系数即变为式 (1.9)