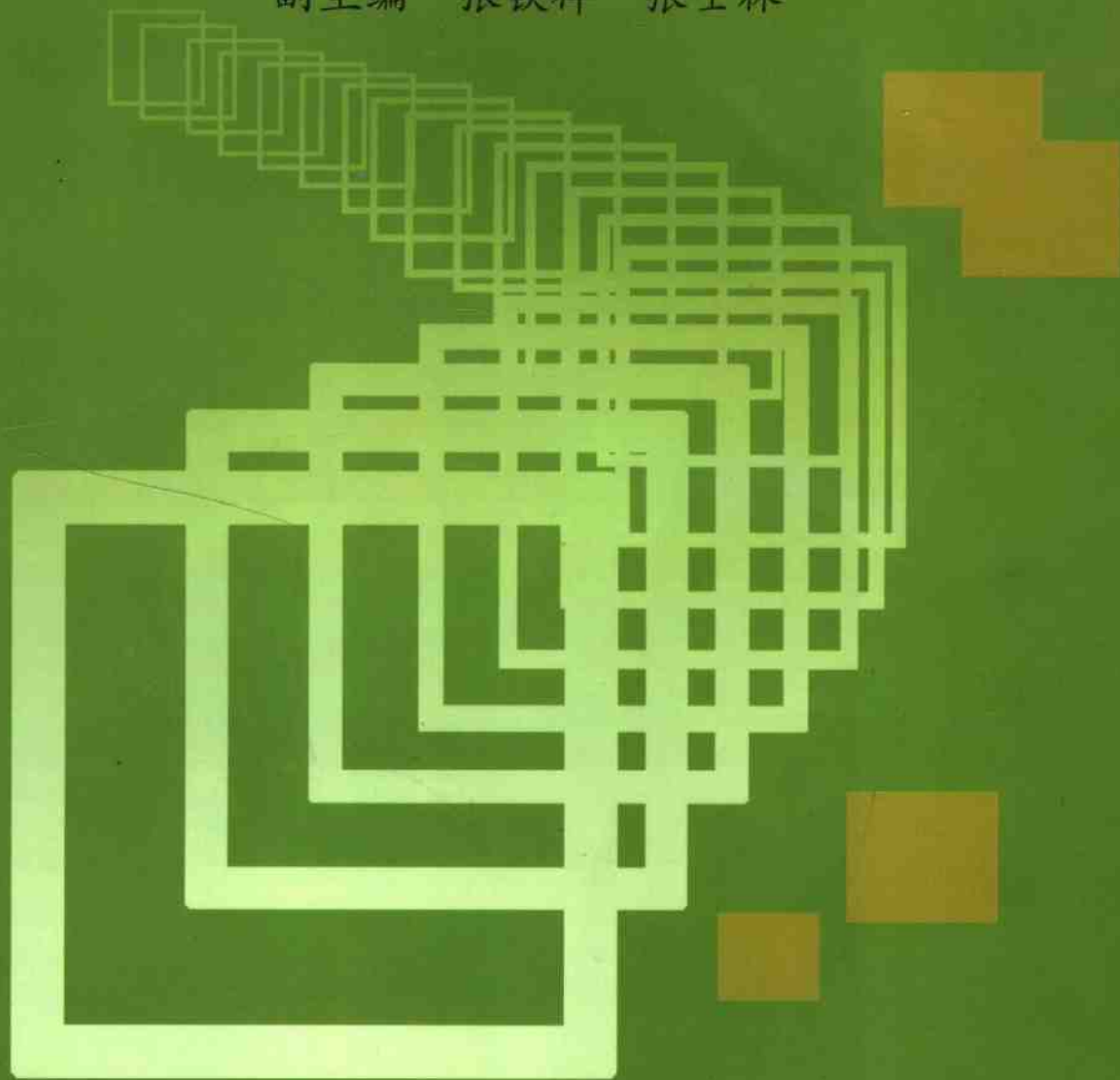


矿井通风与安全

KUANG JING TONG FENG YU AN QUAN

主 编 王国臣

副主编 张钦祥 张士林



哈尔滨地图出版社

普通高等学校教学用书

矿 井 通 风 与 安 全

KUANGJING TONGFENG YU ANQUAN

主 编 王国臣

副主编 张钦祥 张士林

哈尔滨地图出版社

· 哈尔滨 ·

内 容 提 要

本书是根据煤炭高等院校采矿工程专业的人才培养方案编写的,比较系统地介绍了矿内空气的成分、性质、变化规律、矿井风流的能量变化规律与测算、矿井通风阻力类型、通风动力、通风网络与风量调节、矿井与采区通风系统的类型与设计、矿井空气加热、降温方法等,以及瓦斯、火灾、矿尘、水害、顶板五大煤矿灾害的防治理论和技术管理,和矿山救护、抢险救灾与事故处理、通风安全检测仪表与安全环境监控系统以及矿山安全法规,是煤炭应用型本科及高职高专采矿工程、通风安全专业的教学参考书,也可供从事煤矿科研、设计、管理及工程技术人员自学和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

矿井通风与安全/王国臣主编. —哈尔滨:哈尔滨地图出版社, 2006. 5
ISBN 7-80717-314-9

I. 矿... II. 王... III. 矿井通风—安全技术
IV. TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 040889 号

哈尔滨地图出版社出版发行
(地址:哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮政编码:150086)
哈尔滨海天印刷设计有限公司印刷
开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17.5 字数:448 千字
2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷
印数:1~1 000 定价:36.00 元

前 言

矿井通风的基本任务是供给井下足够适量的新鲜空气,冲淡并排出井下从煤、岩层涌出的或在生产过程中形成的有毒、窒息性和爆炸性的气体、矿尘及水蒸气,改善矿内气候环境,防止各种灾害事故,保护国家资源和财产及保障井下工作人员的身体健 康和安全,使生产工作人员得以充分发挥劳动效能和促进劳动生产率的不断提高,达到安全生产的目的。矿井通风是矿井各生产环节中最基本的一环,它在矿井建设和生产期间始终占有非常重要的地位。

矿井安全是矿业安全工程学科中的一个基本分支,主要阐述煤矿五大灾害产生的原因、防治理论及措施。根据我国宪法关于改善劳动条件、加强劳动安全保护的规定,国务院颁布了《矿山安全条例》,明确要求煤矿必须坚持安全第一的方针,要求各级领导干部在管理生产的同时,必须负责管理安全工作。早在 20 世纪 50 年代,我国就颁布执行了《煤矿和油母页岩矿保安规程》,60~70 年代又先后颁布执行了《煤矿保安暂行规程》。它是煤矿安全生产必须遵循的准则,煤炭工业系统各企业、事业单位及主管部门都必须严格执行这个规程。此外,我国还颁布了《矿山资源法》、《煤炭法》、《矿山安全法》及《矿山安全监察条例》等,逐渐形成了矿山行业的法律、法规体系。

建国以来,尤其是改革开放 20 年来,我国的矿山通风安全理论和技术迅速得到发展,矿井通风与安全教材亦有过多种版本。本次编写过程中吸收了以前教材的优点,注重实践内容,适合应用型本科和高职高专类院校教学使用。

《矿井通风与安全》是内容丰富的一门科学。自解放以来,全国煤炭高等院校和煤炭中等专业学校,都把《矿井通风与安全》列为一门专业课讲授。1970 年以来,在这些高等院校和中等专业学校中开始设置煤矿通风与安全专业。

按照上述基本内容,本书共编写了 19 章,需用 80~90 学时。各院校在教学工作中,可视具体情况加以增删。本书第一章至第十五章由王国臣老师编写;第十六章、第十七章及第十八章第一节由张钦祥老师编写;第十八章第二节至第五节及第十九章由张士林老师编写。

由于编者水平有限,加之时间紧迫,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2006 年 3 月

目 录

第一章 矿井空气成分、性质和变化规律	1
第一节 矿井空气的成分	1
第二节 矿井空气主要物理参量	5
第三节 矿井气候	7
第二章 矿井空气流动基本理论	11
第一节 矿井风流运动的特征	11
第二节 矿井风流的能量方程	11
第三节 风流任意一断面上的机械能量	15
第四节 能量方程的应用	21
第三章 矿井通风阻力	25
第一节 风流的流动状态	25
第二节 摩擦阻力定律	26
第三节 局部阻力	30
第四节 矿井总风阻与矿井等积孔	32
第五节 通风阻力测量方法	34
第四章 矿井通风动力	38
第一节 矿井自然风压	38
第二节 主要通风机的构造及工作原理	41
第三节 主要通风机附属装置	43
第四节 通风机实际特性曲线	46
第五节 通风机的联合工作	47
第五章 矿井通风网络中风流基本规律与风量分配	53
第一节 风网的基本术语和形式	53
第二节 通风网络中风流的普遍规律	54
第三节 简单网络中风流的特殊规律	55
第四节 矿井风量调节	58
第六章 采区通风	61
第一节 采区通风系统	61
第二节 采区所需的风量	66
第三节 采区通风构筑物	69
第四节 漏风及有效风量	73
第七章 掘进通风	76
第一节 掘进通风方法	76
第二节 掘进工作面所需风量的计算	79

第三节	掘进通风设备的选择	80
第四节	掘进通风的技术管理和安全措施	82
第八章	矿井通风系统设计	86
第一节	矿井通风设计内容与优化	86
第二节	拟定矿井通风系统	89
第三节	矿井总风量计算与分配	92
第四节	计算矿井通风总阻力	94
第五节	选择矿井通风设备	95
第六节	概算矿井通风费用	97
第七节	创造良好作业环境的途径	98
第九章	矿井瓦斯	104
第一节	概 述	104
第二节	煤层瓦斯储存与含量	104
第三节	矿井瓦斯涌出	106
第四节	瓦斯喷出	109
第五节	煤与瓦斯突出防治	111
第六节	矿井瓦斯爆炸及预防	115
第七节	矿井瓦斯抽放	118
第十章	矿尘防治	124
第一节	矿尘及其性质	124
第二节	矿山尘肺病	126
第三节	煤矿粉尘防治技术	128
第四节	煤尘爆炸事故防治	130
第五节	煤尘爆炸事故实例	133
第十一章	矿井火灾防治	135
第一节	矿井火灾特征	135
第二节	外因火灾预防与处理	136
第三节	内因火灾的早期预测预报	140
第四节	煤炭自燃的预防与处理	142
第十二章	矿井水害防治	147
第一节	我国矿井水害的概况及存在的问题	147
第二节	矿井充水条件分析	148
第三节	煤矿主要防治水技术	149
第四节	矿井突水事故处理	153
第十三章	顶板灾害的防治	155
第一节	顶板事故的统计分析	155
第二节	局部冒顶事故的防治	161
第三节	大型冒顶事故的防治	163
第四节	采煤工作面顶板事故的处理	166
第十四章	矿井安全监测监控系统	169

第一节 概 述	169
第二节 国内外研究概况、水平和发展趋势	171
第三节 矿井安全监控系统组成及传感器分类	172
第四节 《煤矿安全规程》对安全监控系统的规定	175
第十五章 抢险救灾与事故处理	179
第一节 矿井灾害预防及处理计划	179
第二节 矿井灾害事故与处理	181
第三节 抢险救灾与处理方法	185
第四节 《煤矿安全规程》对煤矿救护的有关规定	191
第十六章 矿山救护	196
第一节 矿工自救与互救	196
第二节 现场急救	200
第十七章 矿井通风安全现代化管理	203
第一节 矿井通风安全现代化管理体系与制度	203
第二节 矿井通风安全信息管理系统	208
第三节 掘进通风管理	209
第四节 瓦斯安全管理体系	210
第五节 火区管理	226
第六节 安全技术措施计划编制	228
第十八章 通风安全检测仪器仪表	232
第一节 风速测量仪表	232
第二节 压力测量仪器	235
第三节 粉尘浓度检测仪器	239
第四节 温度、湿度检测仪表	242
第五节 气体检测仪器仪表	243
第十九章 安全生产方针与安全法规	252
第一节 安全生产方针	252
第二节 安全生产法	253
第三节 矿山法律法规体系	258
第四节 矿山安全法规简介	259
附录 井巷摩擦阻力系数值 α (空气密度 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$)	265
参考文献	270

第一章 矿井空气成分、性质和变化规律

本章将着重阐述矿井空气的主要成分,矿井空气的物质变化和状态变化,矿井空气的安全标准以及矿井气候条件等的主要问题,同时进一步明确矿井通风与井下气候调节的目的、意义和要求,为进一步学习矿井通风的基本理论奠定基础。

矿井通风就是利用机械或自然通风为动力,将定量的新鲜空气,在巷道中做定向和定量的流动,输送到井下各个作业地点,稀释并排出有害气体与粉尘,为井下创造良好的气候条件,最后把污浊空气排出矿井的全过程。矿井通风是保障矿井安全的最主要技术手段之一,调节和改善矿井气候条件也是矿井通风基本任务之一。因此,矿井通风非常必要,必须引起高度重视。

第一节 矿井空气的成分

矿井空气的主要来源是地面空气,但地面空气进入井下以后会发生物理和化学两种变化,因而矿井空气在成分、质量与数量上都和地面空气有着不同程度的区别。

一、地面空气成分的种类和数量

地面空气是干空气和水蒸气组成的混合气体,通常称为湿空气。在正常情况下,干空气由表 1-1-1 所列的几种成分组成,而且这些成分的数量基本不变。干空气成分的数量用体积浓度或质量浓度来表示,前者为某种气体的体积在干空气的总体积中所占的百分比,后者为某种气体的质量在干空气的总质量中所占的百分比。在混合气体中,水蒸气的浓度随地区和季节而变化,其平均的体积浓度约为 1%;此外,还含有尘埃和烟雾等杂质,有时能污染局部地区的地面空气。

表 1-1-1 地表大气组成成分

气体成分	体积浓度%	质量浓度%	备 注
氧气(O_2)	20.90	23.10	惰性气体等计入氮气中
氮气(N_2)	79.00	76.71	
二氧化碳(CO_2)	0.04	0.05	

新鲜空气无色、无味、无臭,是维持生命所必需的,并能助燃。

二、矿井空气的主要成分及生成

上面提到,地面空气进入井下后,因发生物理和化学两种变化,使其成分种类增多,各种成分的浓度也发生改变。

1. 矿井空气的主要成分

就煤矿而言,井下空气的成分种类共有 O_2 , CH_4 , CO_2 , CO , H_2S , SO_2 , N_2 , NO_2 , H_2 , NH_3 , 水蒸气和浮尘 12 种。由于具体条件不同,各矿的井下空气成分种类和浓度都有一定的差异。

在上述成分中,氧气是井下人员呼吸所必需的,必须保持足够的浓度,其余 9 种(水蒸气除外)气体和浮尘,超过一定浓度时,对人体都是有害的,必须把它们的浓度降低到没有危害的程度。在这 9 种气体中, CO 、 H_2S 、 SO_2 和 NO_2 超过一定浓度时,还能使人体中毒,故称这 9 种气体为有害有毒气体,又称为广义的矿井瓦斯;而狭义的矿井瓦斯则专指 CH_4 。 CH_4 是煤矿井下普遍存在的气体,在一定浓度范围内,具有爆炸性。所以, CH_4 是煤矿井下最危险的气体。煤矿井下经常出现且数量较多的气体是 CH_4 和 CO_2 ,它们是计算矿井所需风量的主要根据。

2. 物理变化

井下的物理变化有:

气体混入:沼气(CH_4)、二氧化碳(CO_2)和硫化氢(H_2S)等气体从地层中涌出到井下空气中。多数矿井有沼气涌出现象,沼气涌出量的大小各矿不同,有些矿井沼气涌出量高达 $40 \sim 50 \text{ m}^3/\text{min}$,有些矿井还伴随沼气涌出氮气(N_2)、二氧化硫(SO_2)和氢气(H_2)等气体。

固体混入:井下各种作业所产生的微小的岩尘、煤尘和其他杂尘浮游在井下空气之中。

气象变化:主要是由于井下空气的温度、气压和湿度的变化引起井下空气的体积和浓度变化。

以上物理变化的结果,不仅使井下空气的成分种类增多,而且各种成分的浓度亦发生变化。

3. 化学变化

井下的化学变化有:

井下一切物质(煤、岩石、坑木……)的缓慢氧化、爆破工作、火区氧化和人员的呼吸等都会产生二氧化碳;井下的爆破工作、火区氧化和机械润滑油高温分解等都能产生一氧化碳;井下火区氧化和含硫煤的水解都能产生硫化氢;井下火区氧化和含硫煤的缓慢氧化都能产生二氧化硫;井下爆破工作能产生氧化氮;井下充电硐室的电解能产生氢;井下火区氧化能产生氨。

以上化学变化的结果,不仅使井下空气的成分种类和浓度发生变化,而且各种化学变化都要消耗空气中的氧而产生二氧化碳,使井下空气中的氧量减少、二氧化碳量增加。

三、井下空气成分的基本性质

1. 氧(O_2)

氧是无色、无臭、无味、无毒、无害的气体,密度为 1.105,是人呼吸所必须的物质,故须供给井下足够的风量,以保证井下空气中有足够的氧量。因为氧是很活跃的元素,易使其他物质氧化,并能助燃,产生 CO_2 和 CO ,故应阻止空气进入采空区和火区,以防止氧对煤炭氧化而自燃。

氧对人体的影响:人们吸入空气中的氧,供体内食物氧化,产生新细胞,以维持生命,并全部或部分变成 CO_2 而呼出。通常,人在休息时的耗氧量,至少为 $0.25 \text{ L}/\text{min}$;在工作时为 $1 \sim 3 \text{ L}/\text{min}$ 。人的耗氧量大小因劳动强度及体质强弱而异。当空气中的氧浓度降低时,人体就可能产生不良的生理反应,出现种种不舒适的症状;若空气中氧的体积浓度降低到 15%,就会使人呼吸急促,脉搏加快,灯焰熄灭;降到 10%,就可能使人休克,严重时可能导致缺氧死亡。人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系如表 1-1-2 所示。

造成矿井空气中氧浓度降低的主要原因有:人员呼吸;煤岩和其他有机物的缓慢氧化;煤炭自燃;瓦斯、煤尘爆炸。此外,煤岩和生产过程中产生的各种有害气体,也使空气中的氧浓度相对降低。缺氧窒息是造成矿井人员伤亡的原因之一。

表 1-1-2 人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系

氧浓度(体积)%	主 要 症 状
17	静止时无影响,工作时能引起喘息和呼吸困难
15	呼吸及心跳急促,耳鸣目眩,感觉和判断能力降低,失去劳动能力
10~12	失去理智,时间稍长有生命危险
6~9	失去知觉,呼吸停止,如不及时抢救几分钟内可能导致死亡

2. 二氧化碳(CO₂)

二氧化碳不助燃,也不能供人呼吸,略带酸臭味。二氧化碳比空气重(与空气的相对密度为 1.52),在风速较小的巷道中,底板附近浓度较大;在风速较大的巷道中,一般能与空气均匀地混合。

在新鲜空气中含有微量的二氧化碳对人体是无害的。二氧化碳对人体的呼吸中枢神经有刺激作用,如果空气中完全不含有二氧化碳,则人体的正常呼吸功能就不能维持。所以在抢救遇难者进行人工输氧时,往往要在氧气中加入 5% 的二氧化碳,以刺激遇难者的呼吸机能。但当空气中二氧化碳的浓度过高时,也将使空气中的氧浓度相对降低,轻则使人呼吸加快,呼吸量增加,严重时也可能造成人员中毒或窒息。空气中二氧化碳对人体的危害程度与浓度的关系如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3 二氧化碳中毒症状与浓度的关系

二氧化碳浓度(体积)%	主 要 症 状
1	呼吸加深,但对工作效率无明显影响
3	呼吸急促,心跳加快,头痛,人体很快疲劳
5	呼吸困难,头痛,恶心,呕吐,耳鸣
6	严重喘息,极度虚弱无力
7~9	动作不协调,大约 10 分钟可发生昏迷
9~11	几分钟内可导致死亡

矿井空气中二氧化碳的主要来源是:煤和有机物的氧化;人员呼吸;碳酸性岩石分解;炸药爆破;煤炭自燃;瓦斯、煤尘爆炸等。此外,有的煤层和岩层中也能长期连续地放出二氧化碳,有的甚至能与煤岩粉一起突然大量喷出,给矿井带来极大的危害。例如,吉林省营城煤矿五井,曾在 1975 年 6 月发生过一起二氧化碳和岩石突出的事故,突出岩石 1 005 t,二氧化碳 11 000 m³。

3. 氮气(N₂)

氮气是一种惰性气体,是新鲜空气中的主要成分,它本身无毒、不助燃,也不供呼吸。但空气中若氮气浓度升高,则势必造成氧浓度相对降低,从而也可能导致人员的窒息性伤害。正因为氮气为惰性气体,因此又可将其用于井下灭火和防止瓦斯爆炸。

矿井空气中氮气主要来源是:井下爆破和生物的腐烂,有些煤岩层中也有氮气涌出。

四、井下常见有毒有害气体的基本性质

有毒有害气体的性质可分为以下几方面:

臭味和颜色方面:有臭味的气体有 4 种,即 NH₃(剧臭), SO₂(强烈硫磺臭), H₂S(臭鸡蛋味,浓度为 0.000 1% 时,便可嗅出来), CO₂(微酸臭);有色气体只有一种,即 NO₂(浅红褐色)。可根据以上性质察觉这些气体的存在。

密度方面:空气的密度为 1,比空气重的气体有四种,即 SO_2 (密度为 2.264), NO_2 (密度为 1.57), CO_2 (密度为 1.529), H_2S (密度为 1.19);比空气轻的气体有 5 种,即 H_2 (密度为 0.069), CH_4 (密度为 0.555), NH_3 (密度为 0.596), CO_2 (密度为 0.967), N_2 (密度为 0.967)。观测气体浓度时须注意气体的密度,即须靠近底板观测比空气重的气体,靠近顶板观测比空气轻的气体。

溶水性方面:能溶于水的气体有 5 种,按溶水性大小依次为 SO_2 (最易溶于水), H_2S (也比 CO_2 溶水性大), CO_2 , NO_2 和 NH_3 (都比 CO_2 的溶水性小)。根据这种性质,采用喷雾洒水的措施,可以降低这些气体在空气中的浓度。

爆炸性:气体爆炸的体积浓度范围叫做气体的爆炸界限;能够燃烧且能爆炸的气体有 4 种,即 CH_4 (其爆炸界限为 5% ~ 16%), H_2S (爆炸界限约为 4% ~ 46%), CO (爆炸界限约为 13% ~ 75%), H_2 (爆炸界限为 4% ~ 74%)。

有毒有害气体对人体的影响:

对人体有毒的气体有 5 种。其中 NO_2 是最毒的气体,它能强烈地刺激眼睛和呼吸系统(鼻、喉、肺),能和呼吸道上的水分化合而生成硝酸(HNO_3),可使肺浮肿致命,且初期不易发觉,有时数小时后才中毒征兆。 SO_2 能较强地刺激眼睛和呼吸系统,使眼睛红肿,俗称“害眼气体”,此外,这种气体能和呼吸道上的水分化合而成硫酸,使肺浮肿致命。 H_2S 能刺激眼睛和呼吸系统,且能使人体血液中毒致命。 CO 能驱逐人体血液中的 O_2 ,使血液缺氧致命。这是因为 CO 比 O_2 对血红素的亲和力要大 250 ~ 300 倍。一般的煤气中毒就是 CO 中毒。 NH_3 能刺激眼睛、皮肤和呼吸系统。

CH_4 , CO_2 , H_2 和 N_2 等四种气体,虽然无毒性,但当它们的浓度较大,使氧的浓度降到 12% 以下时,便能使人窒息而死。

五、井下空气成分安全标准

由于矿井空气质量对人员健康和矿井安全有着重要的影响,所以《煤矿安全规程》(以下简称《规程》)对矿井空气主要成分(氧气、二氧化碳)的浓度标准做出了明确的规定。

表 1-1-4 井下空气中有害气体的最高允许浓度

有害气体名称	最高容许浓度%
一氧化碳(CO)	0.002 4
二氧化氮(NO_2)	0.000 25
二氧化硫(SO_2)	0.000 5
硫化氢(H_2S)	0.000 66
氨(NH_3)	0.004

采掘工作面风流中的氧气浓度不得低于 20%;二氧化碳浓度不得超过 0.5%;总回风流中二氧化碳浓度不得超过 0.75%;当采掘工作面风流中二氧化碳浓度达到 1.5% 或采区、采掘工作面回风道风流中二氧化碳浓度超过 1.5% 时,必须停工处理。

由于矿井空气中有害气体对井下作业人员的生命安全危害极大,因此《规程》对常见有害气体的安全标准都做了明确的规定,其值如表 1-1-4 所列。制定这些标准时,都留有较大的安全系数。如空气中 CO 浓度达 0.048% 时,一小时内才可出现轻微的中毒症状,而《规程》规定的 CO 最高允许浓度为 0.002 4%,是其轻微中毒浓度的 1/20;再如 NO_2 浓度达 0.025% 时,中毒者在短时间内有死亡危险,而《规程》规定的 NO_2 最高允许浓度为 0.000 25%,是其危险中毒浓度的 1/100。因此,只要我们能够严格遵守《规程》规定,不违章作业,就完全可以避免

有害气体对人体的侵害。

第二节 矿井空气主要物理参量

气体的分子具有体积和相互吸引力,但在分析气体的一般问题时,这两个因素的影响很小。为了便于分析和计算,一般可把多种气体看成是没有这两个因素的理想气体,因此,井下空气也可视为理想气体。气体的分子做永不停息的不规则运动,这种运动产生热能,故气体分子运动是热运动,气体的物理参量较多,其中比容、压力、温度是三个基本参量。

一、空气的密度和比容

1. 空气的密度

空气和其他物质一样具有质量。单位体积空气所具有的质量称为空气的密度,用符号 ρ 表示。空气可以看作均质流体,故:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-2-1)$$

式中: ρ ——空气的密度, kg/m^3 ;

M ——空气的质量, kg ;

V ——空气的体积, m^3 。

一般来说,当空气的温度和压力改变时,其体积会发生变化。

2. 空气的比容

质量为 $M(\text{kg})$ 的空气占有的空间(或容积)为 $V(\text{m}^3)$,则空气的比容(又名容积度) ν 就是容积 V 和质量 M 之比。或者说是单位质量空气所占有的体积,即:

$$\nu = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad (1-2-2)$$

也就是空气的密度倒数。故空气的比容和密度是两个相互依存的参量,在矿井通风中,气流流经复杂的通风网络时,其温度和压力将会发生一系列的变化,这些变化都将引起空气密度的变化。在不同的矿井其变化规律是不同的。在实际应用中,应考虑什么情况下可以忽略密度的这种变化,而在什么条件下又是不可忽略的。

二、空气的温度

温度是描述物体冷热状态的物理量。测量温度的标尺简称温标。热力学绝对温标的单位为 $\text{K}(\text{Kelvin})$,用符号 T 表示。热力学温标规定纯水三态点温度(即气、液、固三相平衡态时的温度)为基本定点,定义为 273.15 K ,每 1 K 为三相点温度的 $1/273.15$ 。

国际单位制还规定摄氏(Celsius)温标为实用温标,用 t 表示,单位为摄氏度,代号为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的每 1°C 与热力学温标的每 1 K 完全相同,它们之间的关系为:

$$T = 273.15 + t \quad (1-2-3)$$

温度是矿井表征气候条件的主要参数之一。《规程》第 108 条规定:生产矿井采掘工作面的空气温度不得超过 26°C ;机电硐室的空气温度不得超过 30°C 。

三、空气的压力

空气的压力也称为空气的静压(绝对静压),用符号 P 表示。压强在矿井通风中习惯称为压力。它是空气中分子热运动对器壁碰撞的宏观表现。其大小取决于在重力场中的位置(相对高度),空气温度、湿度(相对湿度)和气体成分等参数。根据物理学的分子运动理论,空气

的压力可用下式表示:

$$P = \frac{2}{3}n\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$$

式中: n ——单位体积内的空气分子数;

$\frac{1}{2}mv^2$ ——分子平移运动的平均动能。

上式阐述了气体压力的本质,是气体分子运动的基本公式之一。由上式可知,空气的压力是单位容积中空气分子热运动的总动能的 $2/3$ 所产生的能对外作功的机械能。因此,空气压力的大小可以用仪表测定。

按照统计观点,大量空气分子做无规则的热运动时,在各个方向运动的机会是均等的,故空气的绝对静压具有在各个方向上强度相等的特点。

压力的单位为 Pa(帕斯卡, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$), 压力较大时可采用 kPa ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$), MPa ($1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$)。其他压力单位参见附录。

不论空气是静止还是流动,绝对静压都存在,地表大气中的绝对静压习惯叫大气压力,标高越高的地表,单位体积空气中的分子数越多,热运动的动能越大,大气压力越大。一个标准的大气压力是气温 0°C 时纬度 45° 海平面上的绝对静压。 1 标准大气压 $P_0 = 101\,324.96 \text{ Pa}$, 可近似认为:海平面以上 $1\,000 \text{ m}$ 高度处的大气压 $P = 0.888P_0, \text{Pa}$; 海平面以下 $1\,000 \text{ m}$ 深度处的大气压 $P = 1.126P_0, \text{Pa}$ 。

四、空气的粘性

当流体层间发生相对运动时,在流体内部两个流体层的接触面上,便产生粘性阻力(内摩擦力)以阻止相对运动,流体具有的这一性质,称作流体的粘性。

另外,在矿井通风中还常用运动粘度系数 ν , 和气体密度 ρ 有关,即 ν 和压力有关,这两个系数有如下的关系(表 1-2-1 为几种有关流体的粘度):

$$\nu = \mu / \rho, \text{m}^2/\text{s} \quad (1-2-4)$$

表 1-2-1 几种流体的粘度 ($0.1 \text{ MPa}, t = 20^\circ\text{C}$)

流体名称	动力粘度 $\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$	运动粘度 $\nu/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
空气	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
氮气	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-5}
氧气	2.06×10^{-5}	1.43×10^{-5}
甲烷	1.08×10^{-5}	1.52×10^{-5}
水	1.005×10^{-5}	1.007×10^{-5}

五、空气的湿度

1. 空气湿度的意义

空气的湿度表示空气中所含水蒸气量的多少或潮湿程度,表示空气湿度的方法有绝对湿度、相对湿度和含湿量三种。

绝对湿度:单位体积湿空气中所含水蒸气的质量绝对值。其单位与密度单位相同,用符号 ρ_v 表示。

饱和湿度:单位体积湿空气中所含饱和水蒸气质量绝对值。用符号 ρ_s 表示。

相对湿度:单位体积空气中实际含有的水蒸气量 (ρ_v) 与其同温度下的饱和水蒸气含量 (ρ_s) 之比称为空气的相对湿度,可用下式表示:

$$\varphi = \frac{\rho_e}{\rho_s} \quad (1-2-5)$$

φ 值小表示空气干燥,吸收水分的能力强;反之, φ 值大则空气潮湿,吸收水分能力弱。即为干空气, $\varphi=1$ 即为饱和空气。水分向空气中蒸发的快慢和相对湿度直接有关。

含湿量:含有 1 kg 干空气的湿空气中所含水蒸气的质量(kg)称为空气的含湿量。

六、空气的焓

焓是一个复合状态参数,它是气体的内能 u 和压力功(流动功) $P\nu$ 之和,也称热焓。湿空气的焓是 1 kg 干空气的焓和其中水蒸气的焓的总和,可用下式表示:

$$i = u + P\nu, \text{kJ/kg}$$

式中: u ——气体的内能, kJ/kg;

P ——气体的绝对静压, kPa;

ν ——气体的比容, m^3/kg 。

第三节 矿 井 气 候

矿井气候是指矿井空气的温度、湿度、风速和辐射这四个参数的综合作用状态。这四个参数的不同组合,便构成了不同的矿井气候条件。矿井气候条件对井下作业人员的身体健康和劳动安全有重要的影响。

一、人体的热平衡

人要维持正常生理机能并进行各种劳动,就必须摄取空气、水和食物。这些物质进入人体经过消化、分解,产生能量(热量)。人的整个机体都参加产热过程,其中以肌肉活动产热量最多。当人进行体力劳动时,肌肉产热量增至正常量(在安静状态下的产热量)的 10 余倍,可达 2 500 ~ 3 140 kJ/h。人体产生的热量一部分用于身体各器官的正常生理机能活动,另一部分用来供肌肉作功,剩余的则通过辐射、对流传导、汗液蒸发等途径与周围环境进行热交换,散发到体外。人体代谢产热过程是体内生物化学过程,而散热过程则是物理过程。在正常情况下,人体依靠自身的调节机能,使产热和散热保持平衡,其平衡关系可用下式表示:

$$q_m - q_w = q_d + q_r + q_f + q_{ch} \quad (1-3-1)$$

式中: q_m ——人体在新陈代谢过程中的产热量,取决于人体活动量的大小;

q_w ——人体用于作功而消耗的热量, $q_m - q_w$ 为必须从人体内排出的多余热量,它因人体的活动强度不同而异;

q_d ——人体对流散热量,当空气温度低于人体表面温度时, q_d 为正,反之为负;

q_r ——汗液蒸发和呼出水蒸气所带出的热量;

q_f ——人体与周围物体表面间的辐射换热量,可能为正,也可能为负;

q_{ch} ——由热量转化而来没有排出体外的能量。

当人体处于热平衡状态时, $q_{ch} = 0$,这时人体因保持了热平衡而感到舒适;当受外界环境影响,人体这种热平衡受到破坏时,就将导致人体的体温升高($q_{ch} > 0$)或降低($q_{ch} < 0$),从而产生种种不舒适的症状,严重时甚至可能导致疾病和死亡,所以人体热平衡并非是简单的物理过程,而是在神经系统调节下的非常复杂的过程。

二、矿井气候对人体热平衡的影响

矿井气候是由空气温度、湿度、风速和辐射四要素组成的,它们都影响着人体热平衡,且各

要素之间的影响在很大程度上可以互换。例如,环境相对湿度增高对人体所造成的影响可以被风速的增加所抵消。

1. 温度

在矿井气候的四个要素中,气温对人体热调节起着主要作用。当气温较低时,辐射和对流传导散热是人体主要散热方式;当气温逐渐升高后,人体汗腺活动越来越显著,汗液蒸发散热就逐渐成为主要散热方式。据上海第一医学院研究,当气温在 32°C 以上时,人体出汗开始显著增加,当气温在 33°C 以上时,出汗几乎成为人体惟一的散热方式。

2. 湿度

空气相对湿度对人体热平衡和温热感有着重要作用,特别是在气温高的条件下,作用就更明显。因高温时,人体主要依靠汗液蒸发散热才能保持热平衡,此时相对湿度大,将妨碍汗液蒸发,使汗液成水滴状淌下。这种情况下汗液携带走的热量甚少,不能起到蒸发散热的作用,因为汗液只有在蒸发的过程中吸收汽化散热才能带走较多的热量。特别是在高温高湿条件下从事重体力劳动,虽大量出汗,但汗液有效蒸发率却很低,使散热量不能等于或大于蓄热量,从而导致人体热平衡破坏。

3. 风速

风速显著地影响着人体对流散热。当空气温度低于体温时,流速越大,散热量愈多。当空气温度高于体温时,人体反而从空气中得到对流热,此时风速越大,人体得到对流热愈多。

4. 辐射

影响人体辐射散热的是人体周围物体的表面温度。当周围物体表面温度高于人体表面温度时,人体就得到辐射热。空气温度并不影响人体辐射散热。因为空气主要是由氧气和氮气组成,是二原子气体,它对辐射热是一透明体。

可见,矿井气候条件对人体热平衡的影响是一种综合的作用,各参数之间相互联系、相互影响。如人处在气温高、湿度大、风速小的高温潮湿环境中,这三者的散热效果都很差,这是由于人体散热太慢,体内产热量得不到及时散发,就会使人出现体温升高、心率加快、身体不舒服等症状,严重时可导致中暑,甚至死亡。相反,如人处在气温低、湿度小、风速大的低温干燥环境中,这三者的散热效果都很强,这时由于人体散热过快,就会使人体的体温降低,引起感冒或其他疾病。因此,调节和改善矿井气候条件是矿井通风的基本任务之一。

三、衡量矿井气候条件的指标

国内外衡量矿井气候条件的指标很多,现择其主要的內容加以阐述。

1. 干球温度

干球温度是我国现行的评价矿井气候条件的指标之一。一般来说,由于矿井空气的相对湿度变化不大,所以干球温度能在一定程度上直接反映出矿井气候条件的好坏。而且这个指标比较简单,使用方便,用干球温度计进行测量。但这个指标只反映了气温对矿井气候条件的影响,而没有反映出气候条件对人体热平衡的综合作用,因而存在较大的局限性。

2. 湿球温度

在相同的气温(干球温度)下,若湿球温度较低,则相对湿度较小;反之,若湿球温度与气温相接近,则相对湿度较大。因此,用湿球温度这个指标可以反映空气温度和相对湿度对人体热平衡的影响,比干球温度要合理些,用湿球温度计进行测量。但这个指标仍没有反映风速对人体热平衡的影响,因而也存在一定的不足。

3. 同感温度

同感温度(也称等效温度或有效温度)是由美国采暖工程师协会(ASHVE)提出的。这个指标是通过实验,根据人在空气温度、湿度、风速三个指标不相同的各种环境中的舒适感觉和湿度已饱和、速度为零、温度不相同的各种环境中的舒适感觉,进行统计和比较,并以湿度已饱和、风速为零、舒适感觉相同的环境空气温度作为指标,用来评价温度、湿度和风速不相同的各种环境对人的舒适感觉。这种指标除不能评价环境辐射热的作用以外,它能反映空气温度、湿度和风速三种因素对人体热平衡的综合作用。显然,同感温度越高,人体舒适感就越差。

同感温度是以人的主观感受为基础确定的,经研究表明该指标也同样存在着一些不足。

根据实测的干球温度、湿球温度和风速的数值(如图 1-3-1),便可得出该测量地点的等效温度。例如,实测得某一工作面的干温度和湿温度分别为 25°C 和 23°C , 风速为 1.5 m/s , 则可在图左和图右的温度刻度上找出 25 和 23 两点, 联成直线, 和风速 1.5 的斜曲线相交, 由此交点, 即可从同感标尺上查得该工作面环境的等效温度约为 18°C 。

4. 卡他度

卡他度用卡他计测定。卡他计是一种酒精温度计, 如图 1-3-2 所示。卡他计下端有个比普通温度计大的贮液球, 上端有一个小空腔, 玻璃管上只有 35°C 和 38°C 两个刻度, 这两个温度的平均值恰好等于人体的正常体温(36.5°C)。测定时, 先把贮液球置于热水中加热, 当酒精柱上升至小空腔的一半时取出, 擦干贮液球表面水分, 然后将其悬挂于待测空气中, 此时由于液球散热, 酒精柱开始下降, 用秒表记下从 38°C 降到 35°C 所需时间 τ , 即可用下式求得干卡他度 K_d 。

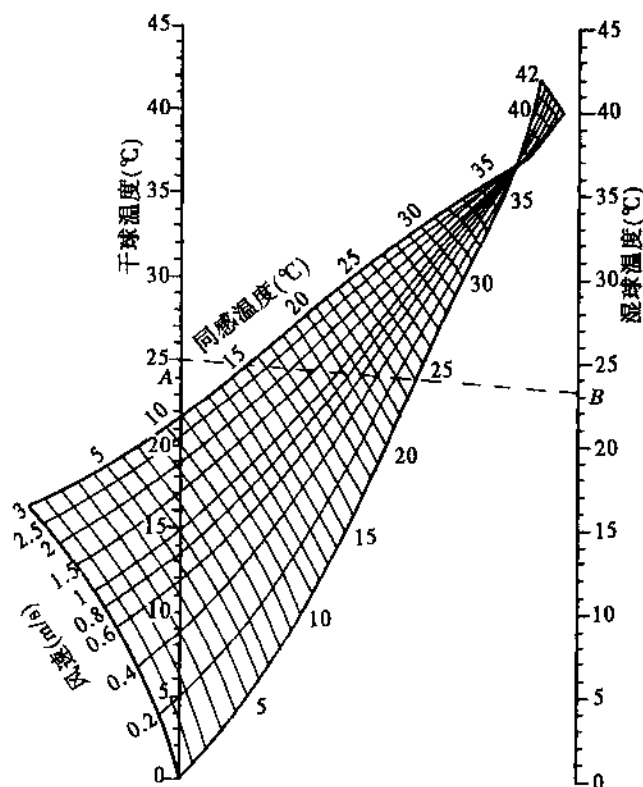


图 1-3-1 同感温度计算图



图 1-3-2 卡他计

$$K_d = 41.868 \frac{F}{\tau}, \text{W/m}^2 \quad (1-3-2)$$

式中: F ——卡他常数,每只卡他计玻璃管上都标有 F 值。

干卡他度反映了气温和风速对气候条件的影响,但没有反映空气湿度的影响。为了测出温度、湿度和风速三者的综合作用效果,需要采用湿卡他度 K_w 。湿卡他度是在卡他计贮液球上包裹上一层湿纱布时测得的卡他度,其实测和计算方法完全与干卡他度相同。

卡他计的设计者是想利用贮液球来模拟人体的散热效果,并取 1 卡他度等于 41.86 W/m^2 ,即相当于每小时从 1 m^2 的面积上散失掉 150.7 kJ 的热量,而成年男子的体表面积约等于 1.7 m^2 ,所以 1 卡他度就约等于每小时从体内散发掉 256.2 kJ 的热量。

作为一个评价矿井气候条件的指标,卡他度比用一个单一的温度指标要好一些。但与人体相比,它的尺寸太小,其散热效果和人体有很大的差别,在使用上有一定的局限性。

四、评价矿井气候条件的安全指标

制定矿井气候条件的安全标准,涉及国家政策、劳动卫生、劳动生理心理以及现有的国家技术经济条件。目前,世界各国关于矿井气候条件的安全标准差别很大。现将我国及其他一些国家规定标准简介如下:

1. 我国现行的矿井气候条件安全标准

我国现行评价矿井气候条件的指标是干球温度。1982 年国务院颁布的《矿山安全条例》第 53 条规定,采掘工作面的空气温度不得超过 26°C ,机电硐室的空气温度不得超过 30°C 。

2. 国外一些国家的矿井气候条件安全标准

世界主要产煤国家对矿井气候条件的评价指标并不统一。主要采用的指标有干球温度、湿球温度、同感温度等。有不少国家采用了同感温度这种指标。例如,美国规定井下同感温度须小于 $34 \sim 37^\circ\text{C}$,日本规定须小于 31.5°C ,比利时和法国均规定须小于 31°C 。我国法定的矿井气候允许值最低。但由于客观条件的限制,这一规定往往较难实现。

【复习思考题与习题】

1-1 地面空气的主要成分是什么? 矿井空气与地面空气有何区别?

1-2 矿井空气中常见的有害气体有哪些?《规程》对矿井空气中有害气体的最高容许浓度有哪些具体规定?

1-3 矿井空气主要物理参量有哪些?

1-4 何谓卡他度? 简述卡他度的使用方法。

1-5 什么叫矿井气候条件? 简述气候条件对人体热平衡的影响。

1-6 简述评价矿井气候条件的主要指标及优缺点。

1-7 《规程》对矿井空气的质量有哪些具体规定?