

普通高等教育规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU GUIHUA JIAOCAI

矿井空气调节

刘靖 主编

赵文彬 毕文峰 副主编

MINE AIR CONDITIONING



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

矿井空气调节

主 编	刘 靖	
副主编	赵文彬	毕文峰
参 编	王建强	韩欣欣
主 审	连之伟	

机械工业出版社

本书系统地介绍了矿井热湿环境的基本特征、矿井空调热湿负荷计算原理及方法,以及矿井热湿环境控制的基本概念、基本方法、系统形式及设备。内容包括:第1章绪论,介绍了矿井热害基本知识、现状及防治措施;第2章矿山大气环境与地热环境,介绍了矿山地面及井下空气环境、地热成因、热害等级以及地热利用基本知识;第3章矿井气候参数与传热基本原理,介绍了井下热湿环境对人体的影响以及用于热害控制的传热基本原理和湿空气的矿用温湿图;第4章矿井热湿源及热湿源计算,分析了井下散热源、散湿源及相应的散发量计算原理和方法,并介绍了井下各工作地点风流热湿交换的详细过程;第5章矿井空调系统,介绍了矿井空调系统的形式;第6章矿井空调系统设计,介绍了矿井空调冷负荷、湿负荷计算原理及计算方法、制冷机组及空冷器类型及确定方法;第7章矿井空调系统的运行管理,介绍了矿井空调系统中风流冷却站、冷媒循环系统及制冷机组的运行管理及故障排除方法。

本书可作为普通高等院校建筑环境与能源应用工程、安全工程、采矿工程、热能动力工程、低温制冷工程等专业本科教学用书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井空气调节/刘靖主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 8

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-43352-1

I. ①矿… II. ①刘… III. ①矿井空气—空气调节—高等学校—教材
IV. ①TD727

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第161544号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林辉 责任编辑:林辉 版式设计:常天培

责任校对:张媛 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·8.25印张·198千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43352-1

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着矿井开采深度的增加和采掘机械化程度的不断提高,矿井高温热害已经成为制约煤矿安全开采的重大问题之一,有关专家认为未来矿山的极限开采深度将取决于矿井降温技术和装备的发展水平。我国煤矿大约以每年8~12m的速度向下延伸,近年来我国高温矿井的数目日益增多,热害程度日趋严重。据不完全统计,目前我国国有重点煤矿采深大于700m的矿井有近100处,最深矿井已超过1000m,已有80多对矿井出现了不同程度的热害,其中多数矿井采掘工作面的气温超过30℃。

高温、高湿环境不仅严重地危害了人体的身体健康,而且时刻威胁着生产的正常进行。因为人体在热环境中,中枢神经系统受到抑制,使注意力分散,降低了动作的准确性和协调性。高温、高湿的环境容易使工人处于昏昏欲睡的状态,且工人易烦躁不安,加上繁重的体力劳动,工人的机警能力降低,从而使事故的发生率上升。

为此必须采用人工制冷降温——矿井空气调节技术来对井下高温、高湿环境进行控制。空气调节不仅包含温湿度的调节,而且包含气体成分、风速调节等。井下气体成分、风速等调节原理及技术由“矿井通风”课程来进行讲解,“矿井通风”为采矿工程、安全工程专业的主干专业技术课程。本教材主要讲述有关人工制冷降温的原理及技术。矿井空气调节是一门综合性的科学技术,涉及空调技术、制冷技术、采矿工程、安全工程、气象学、地质工程、工程地热学、环境工程等多个学科领域。

“矿井空气调节”为建筑环境与能源应用工程、安全工程、采矿工程专业的一门专业技术课程。通过本课程的学习,使学生掌握井下热湿环境控制的基础原理、基础知识及基本技能,能够分析井下热源及散湿源,并能够计算井下热、湿负荷,进而进行井下空调系统设计及系统运行管理等。本教材按照40学时进行编写,各校可根据实际学时数加以取舍。

本书共分7章,第1、4、6章及各章思考题由河南理工大学刘靖编写;第2章由河南理工大学韩欣欣编写;第3章由山东科技大学赵文彬编写;第5章由河北工程大学王建强编写;第7章由河南工业大学毕文峰编写。全书由河南理工大学刘靖统稿。

本书承上海交通大学连之伟教授细致审阅,得到多方面的指导,谨致谢意。

本书编写过程中,硕士研究生陈珊珊、杜争同学做了大量的录入、校对工作,对此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,不妥或错误之处,恳请读者指正。

本书可作为普通高等院校建筑环境与能源应用工程、安全工程、采矿工程、热能动力工程、低温制冷工程等专业本科教学用书,也可供相关工程技术人员参考。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 矿井热害及其类型	1
1.2 矿井热害标准	1
1.3 矿井热害的危害	2
1.4 我国矿井热害现状	3
1.5 矿井热害的防治	4
思考题	5
第2章 矿山大气环境与地热环境	6
2.1 矿山地面空气环境	6
2.2 矿井内空气环境	7
2.3 地热成因	11
2.4 矿区地温类型及热害等级	16
2.5 矿山地热利用	18
思考题	23
第3章 矿井气候参数与传热基本 原理	24
3.1 矿井气候参数	24
3.2 矿井热环境对人体的影响	28
3.3 传热基本原理	33
3.4 矿用温湿图	37
思考题	45
第4章 矿井热湿源及热湿量计算	46

4.1 矿井热源类型及产热量计算	46
4.2 矿井散湿源类型及散湿量计算	52
4.3 矿井风流热湿交换计算	54
思考题	62
第5章 矿井空调系统	63
5.1 矿井空调系统的类型	63
5.2 矿井空调系统的排热	67
思考题	69
第6章 矿井空调系统设计	70
6.1 系统设计的依据及内容	70
6.2 矿井冷负荷计算	70
6.3 制冷机组设计	80
6.4 矿用空气冷却器及热工计算	93
6.5 高压水的减压装置	97
思考题	101
第7章 矿井空调系统的运行管理	102
7.1 运行管理的内容及步骤	102
7.2 风流冷却站	103
7.3 冷媒系统	107
7.4 制冷机组运行与调试	111
思考题	123
参考文献	124

第 1 章 绪 论

1.1 矿井热害及其类型

目前,随着矿井(煤矿及冶金矿)开采深度逐渐增加,综合机械化程度不断提高,地热和井下设备向井下空气散发的热量显著增加;而从岩石裂隙中涌出的热水或与热水接触的高温围岩放热,不但使矿内气温升高,而且造成湿度增大。矿内高温、高湿环境严重影响井下作业人员的身体健康和生产效率,形成了矿井热害。矿井热害最终将成为制约矿物开采深度的决定性因素。

根据矿井热害形成的热源(包括岩温、地下热水的水温以及煤层和硫化物矿体的氧化生热等)划分热害类型,我国矿井热害的类型有:

1) 正常地热增温型矿井热害,矿床一般分布在地热正常区,矿井温度随着开拓深度的增加而逐渐升高。

2) 异常地热增温型矿井热害,除一部分在区域地热异常区出现外,多数出现在局部地热异常区。这类矿区,当开采深度不大时(常在 500m 深度以内)即在井巷内出现高温。如安徽省罗河铁矿在 -700m 水平,岩温高达 38~42℃。

3) 热水地热异常型矿井热害,主要是由深循环地下热水造成的。渗入地下深部加温后沿断层裂隙带上升的热水,沿裂隙进入矿井造成热害。由于热水流速快、水量大,常常造成热水淹井事故,矿井气温很快升高。

4) 煤炭或硫化物氧化型矿井热害。

划分矿井热害类型的目的在于勘探预测矿床在井下开采时可能出现的矿井高温、矿井热害以及根据所划分的类型来设计治理矿井热害的措施。此外,机电设备生热和入风气温过高也可成为热源。

1.2 矿井热害标准

为调查井下高温和确定是否形成矿井热害以及对其进行治理等目的,世界各国根据本国矿井具体条件、技术、经济状况及发展水平,对矿井热害都制定了相应的标准。我国各有关部门先后颁布了有关矿井热害的标准。早在 1980 年我国原煤炭工业部颁布的《煤矿安全规程》第 107 条规定:井下采掘工作面的空气温度不得超过 26℃;机电硐室的空气温度不得超过 30℃。1978 年颁发的《煤炭资源勘探地温测量若干规定》中规定:原始岩温高于 31℃的地区为一级热害区;原始岩温高于 27℃的地区为二级热害区。1984 年我国原核工业部颁布的《铀矿安全规程》第 329 条中规定:采掘工作面的温度不得超过 28℃;机电硐室的温度不得超过 30℃。1981 年我国原冶金工业部制定的《冶金矿山安全规程》第 204 条中规定:采掘工作面的空气干球温度,不得超过 27.0℃,热水型矿井和高硫矿井的空气湿球温度,不得超过 27.5℃。上述各项规定中还指出:如井下空气温度超过标准时,应采取相应的降

温及其他必要的防护措施。

由于我国煤矿安全事故形势严峻，我国煤矿安全监察局不断修订《煤矿安全规程》，以加强煤矿安全生产，减少灾害的发生。《煤矿安全规程》（2012 版）中第 102 条对煤矿井下热环境做出了强制规定：生产矿井采掘工作面空气温度不得超过 26°C ，机电设备硐室的空气温度不得超过 30°C ；当空气温度超过时，必须缩短超温地点工作人员的工作时间，并给予高温保健待遇。采掘工作面的空气温度超过 30°C ，机电设备硐室的空气温度超过 34°C ，必须停止作业。新建、改扩建矿井时，必须进行矿井风温预测计算，超温地点必须有制冷降温措施。

应注意的是以上所述的空气温度均为空气的干球温度。

1.3 矿井热害的危害

随着矿井开采深度的增加，机械化程度也越来越高，由此产生的机械散热也越来越大，矿井中高温高湿等热害问题将显得越来越突出。在炎热气候下，人的日排汗量约为 1L；在闷、潮、热的矿井中从事繁重的体力劳动时，8h 内人的排汗量可达 8~10L，甚至更高，如不适时地补充水分，则可能导致人脱水、失钠、血液浓缩及黏稠度增大，再加上血管扩张，血容量更显不足，以致引起周围循环衰竭，从而使人产生热疲劳、中暑、热衰竭、热虚脱、热痉挛、热疹，甚至死亡，造成重大安全事故。

矿井热害不仅影响井下作业人员的工作效率，影响矿山的经济效益，而且严重地影响井下作业人员的身体健康和生命安全，严重地影响矿山的安全。

1. 矿井高温对人体的影响

所谓矿井高温，是指矿井下气温超过 30°C 时的气温。人们长期在矿井下高温环境中作业，高温可能使人产生一系列生理功能的改变：

1) 体温调节发生障碍，主要表现为体温和皮温升高。

2) 盐、水代谢出现紊乱，有机体的机能受到影响。

3) 神经系统、循环系统、消化系统和泌尿系统等均会因高温下机体大量失水，改变正常的功能，甚至致病。

人们长期在矿井下高温环境中作业，人的中枢神经系统特别容易失调，从而造成人精神恍惚、疲劳、浑身无力、昏昏沉沉，这种状况成为矿山劳动生产率低下的主要原因。

调查表明：在我国高温矿井中，一般劳动生产率均较低，有的矿山劳动生产率仅为 30%~40%。矿井高温除了造成矿山劳动生产率低下外，还成为诱发矿山事故的重要原因。南非多年全国调查统计表明，当矿井中作业地点的空气湿球温度达到 28.9°C 时，相当于干球温度 30°C ，就开始出现高温中暑死亡事故。表 1-1 为南非金矿矿井下空气温度与事故率的关系。另外，矿井下高温也是造成我国矿井火灾事故频繁发生的一个不可忽视的因素。

表 1-1 南非金矿矿井下空气温度与事故率的关系

作业地点气温/ $^{\circ}\text{C}$	27	29	31	32
工伤频次/（人/千人）	0	150	300	450

2. 矿井高湿对人体的危害

高湿是指矿井下的相对湿度超过 80%。人们长期在高湿的矿井下作业,将会使人产生一系列的生理功能改变,影响人的正常生理功能,使人的机理不能有效地散发热量,出现中暑晕倒,严重的会出现死亡。另外,矿工长期在高湿的矿井下作业,会患上风湿病、皮肤病、皮肤癌、心脏病及泌尿系统和消化系统等疾病;还会产生心绪不宁、心情浮躁,诱发人精神方面的疾病。所以,矿井高湿严重影响矿工的身心健康。

据调查有以下典型案例,1996 年 7 月 25 日,湖南省邵阳某矿因回采工作面风温高达 32℃,相对湿度达 98% 以上,一个班就有 5 名矿工因中暑晕倒在工作地点,经抢救才幸免于难。湖南省冷水江某矿多年调查统计表明,矿工长期在高湿的矿井下作业,患风湿病、皮肤病、皮肤癌、心脏病的比例很高,并有如下调查结果:患风湿病的比例为 186 人/千人,患心脏病的比例为 79 人/千人,患皮肤病的比例为 121 人/千人,患皮肤癌的比例为 45 人/千人。

1.4 我国矿井热害现状

西安科技大学姬长发教授对我国热害矿井分布情况进行了调研,共掌握了近 30 余对热害矿井的情况。调查结果显示,我国热害矿井主要分布在安徽、山东、河南、江苏以及河北等省份,矿井类型以煤矿为主,涉及铜矿及铁矿。我国矿井热害基本情况调查见表 1-2。

表 1-2 我国矿井热害基本情况调查表

名称	地理位置	性质	产量 (t/a)	开采水平 /m	采掘面 温度 /℃	井下最 高温度 /℃	井下 水温 /℃	原岩 温度 /℃	平均温度 梯度 /(℃/100m)
孙村矿	山东新汶	煤矿	160	-1050	30	—	—	35	3
协壮矿	山东新汶	煤矿	—	-850	—	34	—	—	—
唐口矿	山东淄博	煤矿	300	-1000	32	33	—	37	2.2
济宁二号矿	山东济宁	煤矿	600	-820	—	—	—	37	—
东滩煤矿	山东兖州	煤矿	400	-1100	—	30~36	—	32	2.8
夹河矿	江苏徐州	煤矿	150	-1000	—	37	—	—	2.21
三河尖矿	江苏徐州	煤矿	170	-736	—	—	—	37	—
旗山煤矿	江苏徐州	煤矿	170	-700	30	—	—	—	2.26
姚桥煤矿	江苏徐州	煤矿	380	-850	—	—	—	—	1.83
白集煤矿	江苏徐州	煤矿	21	-800	—	—	—	—	1.2~2
潘三矿	安徽淮南	煤矿	300	-650	28	—	—	—	3.42
新集一矿	安徽淮南	煤矿	400	-550	30	—	35	35.2	3.2
刘庄矿	安徽淮南	煤矿	800	-1000	—	35.1	—	—	3 左右
冬瓜山矿	安徽淮南	煤矿	300	-1007	—	30~39	—	—	—
北票台吉矿	安徽淮南	煤矿	—	-873	—	—	—	33.4	—
长广七矿	浙江长兴	煤矿	—	-920	—	—	—	40	—
丰城建矿	江西丰城	煤矿	75	-650	—	—	—	42	—

(续)

名称	地理位置	性质	产量 (t/a)	开采水平 /m	采掘面 温度 /℃	井下最 高温度 /℃	井下 水温 /℃	原岩 温度 /℃	平均温度 梯度 /(℃/100m)
梧桐庄矿	河北邯郸	煤矿	120	-1200	30	—	35~38	34.6	2.8~2.9
平煤四矿	河南平顶山	煤矿	180	-550	29	33	—	42	3.2
平煤五矿	河南平顶山	煤矿	120	-650	34	37	—	50	3.8
平煤六矿	河南平顶山	煤矿	280	-700	34	37	44	44	3.2~4.8
平煤八矿	河南平顶山	煤矿	300	-650	35	34	—	42	3.4
平煤十矿	河南平顶山	煤矿	300	-850	32	—	—	38	3.5
平煤十三矿	河南平顶山	煤矿	180	-670	31	—	—	39	3.5
城郊煤矿	河南永城	煤矿	240	-750	27	33	35	39	2.67
梁北矿	河南禹州	煤矿	90	-550	30.8	—	42	—	—

目前,我国矿井开采深度不断加大、原岩温度升高,导致了矿井热害。我国煤矿开采深度从20世纪80年代的288m,已经增加到目前的550m,而且以每年8~12m的速度向下延伸。开采深度超过1000m的矿井已达数十对,开采深度超过700m的矿井近100处。开采深度超过700m的矿井其原岩温度大都超过35℃,有的接近40℃,最高的达到50℃。地温梯度接近或超过3℃/100m,最大的达到5℃/100m。因此,我国矿井热害在矿井数量及地区分布上必将进一步加大。

1.5 矿井热害的防治

矿井热害的防治技术可分为非人工制冷降温与人工制冷降温两类。

1. 非人工制冷降温

(1) 采用通风降温 采用通风降温的主要方法是增加风量法。增加风量可以大大降低空气的含热量,是一种有效的降温措施。但是风量的增加不是无限制的,它受到规定的风速和降温成本的制约。因此,为了改善通风系统,有效增加井下通风量,可采取减少风阻、防止漏风、加大扇风机能力、采用合理分风与辅助风路通风法、利用地温预冷井下入风风流、采用多级机站通风系统、加强通风管理等措施。据现场增风降温的经验,高温工作面的风量最低限应为800~1000m³/min。采场通风有多种形式,但以能抑制采空区热气串入工作面 and 增加工作面有效风量的形式对降温最为有利。采用下行通风时,矿岩运输方向与风流相同,这样能使矿岩运输过程中放出的热量和水蒸气以及运输设备的机电设备散热等不再返回工作面,从而大大改善工作面入风流的空气状态。此外,新鲜风流从岩温较弱的上水平进入采区,从围岩获得的热量也相对较少。

(2) 采用合理的开拓方式降温 开拓方式不同,入风线路长度不同,则风流到达工作面的风温也不同。一般情况下,采用分区式开拓方式可以大大缩短入风线路长度,从而降低入风流到达工作面前的温升。

(3) 采用充填采矿法降温 采用充填采矿法有利于采场降温。这是因为减少了采空区

岩石散热的影响,同时采空区漏风量也大大降低,另外充填物还可大量吸热,可起到冷却井下空气的作用。

(4) 减少热源法降温 为了有效地降低工作面的温度,可以采取减少热源的方法降温。主要包括:①岩层热的控制。采用隔热物质喷涂岩层,防止围岩传热;使巷道保持适当的干湿,提高风速以提高空气冷却能力;预冷矿层等。②机械热的控制。采取机电硐室独立通风;选择辅助风扇并选择合适的位置;避免使用低效率机械等。③热水及管道热的控制。采取超前疏排热水的方法,并用隔热管道排至地面,或经过有隔热盖板的水沟导入水仓。将高温排水管和热压风管敷设于回风道,或将压缩空气冷却后再送入井下。④爆破热的控制。井下采掘爆破产生的热量,一般在爆破后不久即由回风道排到井外,为了避免受其影响,通常采取将爆破时间与井下作业人员的工作时间分开。

(5) 个体防护降温 对个别气候条件恶劣的地点,由于技术或经济上的原因,如不能采取其他降温措施时,对矿工进行个体防护也是一种有效的方法。矿工个体防护的主要措施就是让他们穿戴轻便,穿冷却服以及配戴冷却帽,其作用是防止环境热对流和热辐射对人体的侵害;同时使人体自身的产热量传给冷却服和冷却帽中的冷媒。国外一些国家已研制出了许多种适合井下使用的矿工冷却服和冷却帽,例如:南非加尔德-来特公司研制生产的一种干冰冷却背心,干冰用量为4kg,冷却功率为106~180W,冷却时间可达6~8h。再如由原西德米塔尔公司生产一种冰水冷却背心,其用冰量为5kg,没有冷媒循环系统和运动部件,在冷却功率为220W的条件下,持续工作时间可达2.5h以上。近年国内一些科研单位也研制出了同类产品,在煤矿井下试用也取得较好效果。

除了上述非人工制冷降温措施之外,还有其他一些措施,如煤层注水预冷煤体、在进风巷道放置冰块、利用调热圈巷道进风等都可起到一定的降温作用。

2. 人工制冷降温

当采用非人工制冷降温措施仍无法达到所要求的井下作业环境标准温度或不经济时,应考虑使用人工制冷降温技术——矿井空气调节。矿井采用矿井空调降温是空调应用技术发展的一个新领域。

矿井空气调节即采用人工制冷技术制备冷量,经由输冷系统输送至井下高温环境处,通过释冷设备把冷量传递给待冷却空气,以实现井下降温的目的。矿井空气调节技术的关键是制冷、输冷、释放与排热,以及降温系统及其控制系统。矿井制冷主要采用制冷机,制冷机所用的制冷剂必须符合无毒、不可燃和无爆炸危险的要求。在大范围的矿井降温中,制冷站制取的冷量大都采用管道用水作为载冷剂进行输冷;矿井深度较大时,可采用碎冰块及冰浆输冷,矿井越深,这种优点越突出。释冷是矿井降温中的重要环节,目前国内外在释冷方式上主要有表面式空气冷却器释冷、喷淋式空冷器释冷和其他传冷方式传冷。

思 考 题

- 1-1 矿井热害具有哪些危害?
- 1-2 矿井热害的防治措施有哪些?
- 1-3 试简述井下非人工制冷降温技术有哪些?
- 1-4 矿井空气调节是如何实现井下降温的?
- 1-5 简述如何降低井下空气的湿度?

第2章 矿山大气环境与地热环境

矿山大气环境与地热环境是人类进行采矿工程活动的最基本的自然环境，与采矿工程活动有着密切的关系，是制约采矿业发展及采矿技术应用的基本因素。

2.1 矿山地面空气环境

1. 矿山地面空气的组成

包围着地球的空气层称为大气。大气层的总厚度约为 3000km。大气层空气是多种气体、水蒸气和无数污染物质的混合物。除了水蒸气和污染物质的量可能显著变化外，构成干空气的气体成分几乎是恒定的，随时间、地理位置和海拔高度的变化很小。1949 年，空气数据国际联合委员会确定了干空气的标准组成，见表 2-1。

表 2-1 干空气的标准组成

成分	相对分子质量 M_r	体积分数 (%)	质量分数 (%)
氧 (O_2)	32.000	20.95	23.14
氮 (N_2)	28.016	78.09	75.53
氩 (Ar)	39.944	0.93	1.27
二氧化碳 (CO_2)	44.010	0.03	0.05

理想气体的状态方程为

$$pV_m = RT \quad (2-1)$$

研究表明，用理想气体方程进行湿度学计算时，会产生较小的误差。基于表 2-1 所列的干空气成分，干空气的相对分子质量 M_a 为 28.965，摩尔气体常数 R 为 8314J/(kmol·K)，则干空气的摩尔气体常数 R_a 为

$$R_a = \frac{R}{M_a} = \frac{8314}{28.965} \text{J/(kmol} \cdot \text{K)} = 287 \text{J/(kmol} \cdot \text{K)} \quad (2-2)$$

多数空气调节过程都涉及干空气和水蒸气的混合。水蒸气的量可以从零变化到饱和状态，饱和状态时，最大水蒸气量是由混合物的温度和压力确定的。水的相对分子质量为 18.015，水蒸气的摩尔气体常数为 461J/(kmol·K)。

通常把在 0℃ 下，北纬 45°，海平面的全年平均大气压力作为一个标准大气压力（或称物理大气压），其数值为 101.325kPa。大气压力可作为海拔高度的函数，随着海拔高度的增加，大气压力则逐渐减小。例如，天津市的海拔为 3.3m，夏季大气压力为 100.48kPa，冬季大气压力为 102.66kPa；拉萨市的海拔为 3658m，夏季大气压力为 65.23kPa，冬季大气压力为 65.00kPa。大气压力 B (kPa) 与海拔高度（距海平面的高度） H 的函数关系可用下式表示

$$B = a + bH \quad (2-3)$$

在 $H \leq 1220\text{m}$ 时为： $a = 101.325$ ， $b = -0.01135$ ；在 $H > 1220\text{m}$ 时为： $a = 99.436$ ， $b = -0.010$ 。

2. 矿山地面大气参数的变化特征

矿区大气环境是矿井热环境的重要组成部分。矿内空气来自于地面大气，因此，地面大气参数的变化必然要影响到矿内空气参数的变化。

20 世纪 40 年代以来，许多国家都在地面大气参数的变化对矿内空气参数影响的规律方面做了大量的观测研究工作。我国煤炭科学研究总院抚顺分院 1954 年以来，先后在抚顺、淮南、合山、北票、平顶山、新汶、丰城、黄石以及峰峰等矿区进行了系统地观测研究。从中找出了大气参数变化的基本规律：

大气温度的变化规律

$$t(\tau) = t_{cm} - A_t \cos(\omega\tau - \psi) \quad (2-4)$$

大气相对湿度的变化规律

$$\varphi(\tau) = \varphi_{cm} - A_\varphi \cos(\omega\tau - \psi) \quad (2-5)$$

大气压力的变化规律

$$B(\tau) = B_{cm} + A_B \cos(\omega\tau - \psi) \quad (2-6)$$

式中 t_{cm} , φ_{cm} , B_{cm} ——表示大气年平均温度、平均相对湿度和平均大气压力；

A_t , A_φ , A_B ——波幅，其大小等于（参数的月平均的最大值 - 月平均最小值）/2；

ω ——年波动频率 $\omega = \frac{2\pi}{365}$ ；

ψ ——对应于月平均最小值开始后的时间（d）， $\psi = \frac{\pi}{6}$ 。

根据统计分析，矿山地面大气参数变化及其对矿内空气参数的影响有如下特点：

- 1) 在我国大部分地区，每年 7 月份（个别有 8 月份）气温最高，1 月份最低。
- 2) 每日 20:00 时刻的气温的月平均值，接近于每日四次观测（2:00，8:00，14:00，20:00 时刻）的月平均值。
- 3) 地面大气参数的周期性变化规律与井下空气的周期性变化规律基本上是同步的。
- 4) 矿内空气温度随着通风距离的加长，受矿山地面气温的影响逐渐减小，见表 2-2。

表 2-2 矿井上下气温波幅的比较 ($A_t/^\circ\text{C}$)

矿井	辽宁北票	安徽淮南	山东新汶	广西合山
地面	17.9	14.3	14.1	8.8
井底	6.6 (深 722m)	5.9 (830m)	9.0 (800m)	7.7 (300m)
采掘工作面	1.9	1.0	1.2	1.1

由表 2-2 可见，井下采掘工作面冬夏最大温差为 $2.0 \sim 3.8^\circ\text{C}$ （气温波幅为冬夏温差的 $1/2$ ）。

- 5) 矿山地面大气参数的日变化对矿内空气参数的影响甚小。

2.2 矿井内空气环境

1. 矿井内空气的主要成分及有毒有害气体

正常的地面空气进入矿井后，当其成分与地面空气成分相同或相差不大时，称为矿井内新鲜空气。由于采矿工程活动，产生了各种有害、有毒物质，使矿井内空气成分发生了一系

列的变化,具体表现为:含氧量降低,甲烷和二氧化碳增加,并混入了粉尘和有毒有害气体(如 CO 、 NO_2 、 H_2S 、 SO_2 、 $\cdots$),空气的温度、湿度和压力等也发生了变化。这种充满在矿井内巷道中的各种气体、粉尘和杂质的混合物,统称为矿井内污浊空气。

矿井内空气的主要成分有:氧、氮、二氧化碳和甲烷。而氮为惰性气体,在矿井内变化很小,二氧化碳和甲烷在煤矿中是普遍存在的。

(1) 氧(O_2) 氧来自于地面新鲜空气,为无色、无味、无臭的气体,密度为 $1.11\text{kg}/\text{m}^3$ 。它非常活跃,能与许多元素起氧化反应,能帮助物质燃烧和供人与动物呼吸,是空气中不可缺少的气体。

当氧与其他元素化合时,一般是发生放热反应,放热量决定于参与反应的物质和生成物质的量与成分,而与反应速度无关。当反应速度缓慢时,放出的热量往往被周围物质吸收,而无明显的热力变化现象。

人体维持正常的生理过程所需的氧量,取决于人的体质、神经与肌肉的紧张程度,休息时需氧量为 $0.25\text{L}/\text{min}$,工作和行走时为 $1\sim 3\text{L}/\text{min}$ 。

空气中氧气少了,人们就感到呼吸困难,严重时会造成缺氧而死亡。当空气中氧气含量减少到 17% 时,人们从事紧张工作会感到心跳和呼吸困难;减少到 15% 时,会失去劳动能力;减少到 10%~12% 时,会失去理智、威胁生命;减少到 6%~9% 时,会失去知觉,若抢救不及时,就会死亡。我国《矿山安全规程》规定:矿井内空气中的氧气含量不得低于 20%。

(2) 二氧化碳(CO_2) 二氧化碳的主要来源是井下一些物质的缓慢氧化从地层中涌出、人员呼吸、爆破工作、火区自燃、火灾、沼气、煤尘爆炸等。

二氧化碳是无色无味的气体,密度为 $1.52\text{kg}/\text{m}^3$,是一种较重的气体,很难与空气均匀混合,故常积存在巷道的底部,在静止的空气中有明显的分界线。二氧化碳不助燃、也不能供人呼吸,易溶于水,生成碳酸,使水溶液成弱酸性,对眼、鼻和喉黏膜有刺激作用。

二氧化碳对人的呼吸有刺激作用,当肺气泡中二氧化碳增加 2% 时,人的呼吸量就增加一倍。二氧化碳的生成量增加,使血液酸度加大,刺激神经中枢,因而引起频繁呼吸。在对中毒人员抢救时,最好首先使其吸入含有 5% 二氧化碳的氧气,以增加肺部的呼吸量。

当空气中的二氧化碳的体积分数过大时,造成氧的体积分数降低,可以引起缺氧窒息。当空气中二氧化碳的体积分数达到 5% 时,人就会出现耳鸣、无力、呼吸困难等现象;达到 10%~20% 时,人的呼吸处于停顿状态,失去知觉,时间较长有生命危险。

我国《矿山安全规程》规定:在作业地点的进风流中二氧化碳的体积分数须不大于 0.5%;在采区和采掘工作面的回风流中二氧化碳的体积分数不大于 1%;在矿井和分区的总回风流中二氧化碳的体积分数不大于 0.75%。二氧化碳是一种需要控制的温室气体。

(3) 沼气(CH_4) 沼气来源于地层(煤或岩)和压气机中油料高温分解等。它无色、无臭、无味,密度为 $0.554\text{kg}/\text{m}^3$,遇到明火能引燃,在体积分数为 5%~16% 的范围内,遇明火能爆炸,体积分数为 9.5% 时爆炸力最强。虽然无毒,但由于其使氧的体积分数降到 12% 以下时,能使人窒息。《煤矿安全规程》规定:沼气在作业地点及进、回风流中的安全的体积分数要求同二氧化碳。沼气同二氧化碳一样,也是一种能使地球变暖的温室气体。

我国规定只用沼气的相对涌出量(即平均每吨煤的涌出量, m^3/t)来划分矿井的瓦斯等级,即沼气的相对涌出量不大于 $10\text{m}^3/\text{t}$ 时,定为低沼气矿井;大于 $10\text{m}^3/\text{t}$ 时,定为高沼气矿井。

(4) 一氧化碳 (CO) CO 是无色、无味、无臭的气体, 密度为 0.967kg/m^3 , 能均匀地散布于空气中, 不易察觉, 微溶于水。一般它的化学性质不活泼, 但其体积分数在 13% ~ 75% 时能引起爆炸; 体积分数为 30% 时爆炸力最强, 能燃烧。它主要来源于: 爆破工作、火区自燃、火灾、沼气、煤尘爆炸、润滑油高温分解、伴随沼气从煤层中涌出。

一氧化碳有剧毒, 当空气中 CO 的体积分数为 0.02% 时, 允许停留 0.5h; 其体积分数为 0.048% 时, 在 1h 内会耳鸣、头疼、心跳; 其体积分数为 0.128% 时, 1h 后会无力行动, 知觉迟钝; 其体积分数为 0.4% 时, 较快丧失知觉, 若抢救不及时, 就会中毒死亡; 其体积分数为 1% 时, 立刻死亡。

日常生活中的“煤气中毒”就是 CO 中毒。CO 的毒性是因为: 人体血液中的血红蛋白是专门在肺部吸收空气中的氧气, 以维持人体的需要。而血红蛋白与 CO 的亲合力为它与氧的亲合力的 250 ~ 300 倍。因此, 当人体吸入含有 CO 的空气时, CO 很快就与血红蛋白结合, 这就大大地降低了血红蛋白吸收氧的能力, 使人体各组织产生缺氧现象, 引起窒息或血液中毒, 严重时造成死亡。

我国《煤矿安全规程》规定: 作业地点允许的 CO 的最高体积分数不大于 0.0024%, 短时间内允许在 0.02% 及以下。

(5) 其他有毒有害气体 在煤矿生产中产生的其他有毒有害气体有: 炮烟、废气、硫化氢 (H_2S)、火灾气体、二氧化硫 (SO_2)、二氧化氮 (NO_2)、氢气 (H_2)、氮气 (N_2)、氨气 (NH_3)、氧化氮 (NO_3), 以及在开采含铀、钍伴生的矿床时, 必须注意对空气中的放射性气体氡的防护。

《煤矿安全规程》规定, 矿井有害气体的体积分数不超过表 2-3 规定。

表 2-3 矿井有害气体的最高允许体积分数

名 称	最高允许体积分数 (%)
一氧化碳 CO	0.0024
氧化氮 (换算成 NO_2)	0.00025
二氧化硫 SO_2	0.0005
硫化氢 H_2S	0.00066
氨 NH_3	0.004

(6) 水蒸气 (H_2O) 除盐矿外, 一般矿井内空气是相当潮湿的, 但湿空气中水蒸气的含量仍然是较少的, 它主要来源于岩层和矿内涌水的蒸发。水蒸气是无色、无味的, 它的相对密度为 0.622kg/m^3 。

水蒸气对空气的状态变化影响很大, 它可以改变空气的潮湿程度和湿空气的性质, 并且影响人体的舒适、降温效果、降温消耗能量和设备的维护。

2. 矿井内微气候的基本特征

矿井内的空气不仅在成分上与地面空气有较大的差别, 而且在气象要素上与地面空气也有较大的不同。

(1) 气压高 矿井内空气压力 (B) 要高于地面大气压力 (B_0), 其与深度 H 的函数关系可近似用下式表示

$$B = B_0 + K_p H \quad (2-7)$$

式中 K_p ——压力梯度, 夏季为 0.01133kPa/m , 冬季为 0.01267kPa/m 。

(2) 含湿量大 矿井内空气是相当潮湿的, 除盐矿外, 一般矿井内空气的相对湿度为 $85\% \sim 100\%$, 空气中水蒸气的含量较大。含湿量 x [kg/kg (干空气)] 表征空气中水蒸气含量的大小, 可近似用下式表示

$$x = K_B \varphi (a_0 + a_1 t + a_2 t^2) \quad (2-8)$$

式中 K_B ——气压修正系数, $K_B = \frac{101.325}{B_0 + K_p H}$;

φ ——相对湿度;

t ——空气的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

a_0 、 a_1 、 a_2 ——常系数。

分析式 (2-8) 可见, K_B 是深度的函数, 变化较小, 因此, 含湿量主要受相对湿度的影响, 随着相对湿度的增加而增加。

(3) 气温波动幅度小 由于矿内空气温度不受太阳辐射的影响, 主要受围岩温度的影响, 而围岩温度一年四季是恒定的, 并且围岩对通过巷道风流的加热量取决于风流温度。因此, 围岩对风流温度有调节作用, 即冬季放热强度大, 夏季放热强度小 (甚至吸热)。所以, 矿井内空气温度 (即风流温度) 随季节变化波动幅度较小 (表 2-2)。如北票矿区地面大气温度最高月平均值与最低月平均值之差为 35.8°C , 而采掘工作面仅为 3.8°C ; 广西合山矿区地面为 17.6°C , 采掘工作面为 2.2°C , 由此可见, 理论分析与实践是一致的。

(4) 风速变化不均衡 矿山地面大气的气流速度取决于天气现象, 人们是无法控制的, 而矿井内微气候的风流速度是可以控制的。根据劳动卫生学的研究, 有利于人体热平衡调节的最佳风速为 $3 \sim 5\text{m/s}$ 。但是, 在矿井通风设计中, 考虑安全和经济因素, 矿井内不同地点的风速差异较大。《煤矿安全规程》第 101 条规定, 井巷中的风流速度应符合表 2-4 的要求。

表 2-4 井巷中的允许风流速度

井 巷 名 称	允许风流速度/ (m/s)	
	最低	最高
无设备的风井和风硐	—	15
专为升降物料的井筒	—	12
风桥	—	10
升降人员和物料的井筒	—	8
主要进、回风巷	—	8
架线电机车巷道	1.0	8
运输机巷、采区进、回风巷	0.25	6
采煤工作面、掘进中的煤巷和半煤岩巷	0.25	4
掘进中的岩巷	0.15	4
其他通风人行巷道	0.15	—

(5) 空气含尘量较大 在采矿生产过程中, 所产生的一切细散状矿物和岩石的尘粒, 称为矿尘 (或煤尘)。这些矿尘能悬浮于空气中 (称为浮尘), 使空气变为污浊。由于空气中浮尘的存在, 不仅危害人体的健康, 同时污染降温设备, 影响降温效果。

国务院颁布的《关于防止厂矿企业中矽尘危害的决定》中规定, 作业场所空气中粉尘

允许质量分数：含游离二氧化硅大于 10% 者，不得超过 $2 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ ；小于 10% 者，不得超过 $1 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 。《煤矿安全规程》也有相应的规定。

2.3 地热成因

1. 地球的结构

人类在地球上的活动范围仅局限于地球的最外层，即大气圈、岩石圈和水圈的表层。地球的平均半径为 6371km，然而，最深的矿井不足 5000m，最深的钻孔也不过十几千米。近几十年来，随着地球物理勘探技术的发展，特别是地震学的出现和应用，人们根据大量的地震资料的分析研究，才逐渐认识到地球内部的结构。

地球是一个分层结构的球体，由外向内依次为地壳、地幔和地核，如图 2-1 所示。

(1) 地壳 地壳可分为大陆型和大洋型两大类。

大陆型地壳由沉积岩层、花岗岩层和玄武质层组成，平均厚度为 35 ~ 40km，平均密度为 2700 ~ 3000kg/m³。地表有 70% 的面积被水覆盖，其余为陆地。大陆地壳沉积物之下是花岗岩组成的基底，深度再增加是玄武岩。从大陆地表到 35km 深处有一分界面，此面称为莫洛霍维奇间断面，简称“莫霍面”，莫霍面就是地壳的下界。地壳概略剖面如图 2-2 所示。

我国大陆地壳厚度变化很大，有两条明显的变化带：一条沿太行山麓，另一条在东经 104°，南北构造带。太行山以东地壳厚度为 30 ~ 40km，太行山以西至南北构造带为 40 ~ 50km，南北构造带以西厚度继续增加，至青藏高原地壳厚度可达 70km。

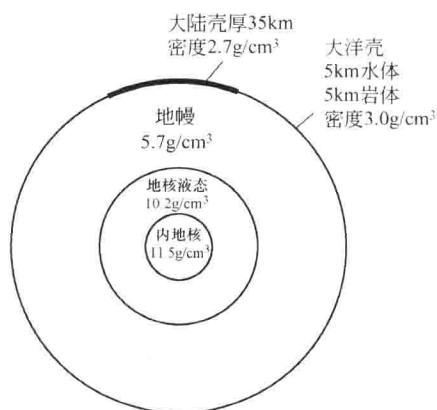


图 2-1 地球结构示意图

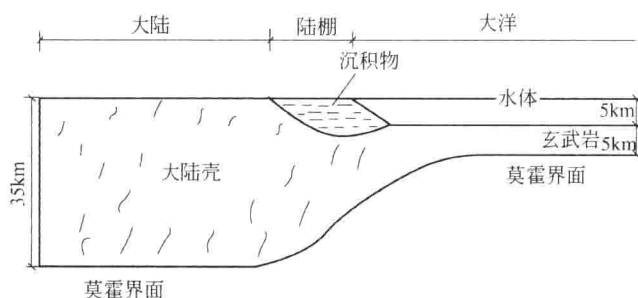


图 2-2 地壳概略剖面

(2) 地幔 地壳之下为地幔，厚度约为 2900km，平均密度约为 5700kg/m³。地幔又可分为上地幔和下地幔两层，地幔的物质不能直接观察到，主要靠地震波速度变化来推断。

上地幔低速层与火山岩浆活动、地表温度场分布，以及地震活动均有密切的关系。大量观测资料表明，原生玄武岩岩浆源于上地幔的局部熔融，岩浆层位于 100 ~ 350km 深处，与低速层位置相一致。与火山活动有关的地震大部分发生在 60 ~ 200km 的区间，显示出与低速层有某种内在的联系。构造活动地区的地表，热流高值与低速层位置较浅有直接关系。

下地幔，曾被称为硫氧化物圈，厚度为 670 ~ 2900km。目前，人们认为下地幔的成分比较均一，主要成分为硅酸盐，但因处于极端高温、高压环境，地幔岩石呈现为塑性状态。

(3) 地核 地幔以下为地核。地核分为内核和外核，外核平均密度约为 10200kg/m^3 ，内核厚度约为 1336km，平均密度为 11500kg/m^3 。

地震资料表明，外核为液态，内核为固态。据许多数学家推算，地核由以铁为主的铁镍合金组成。

2. 地热

(1) 大地热流密度的基本概念 大地热流密度是指地球的内热以热传导方式传输到地表，而后散发到太空中去的热量，在数值上它等于岩石热导率与垂直方向的地热梯度的乘积

$$q = -\lambda \frac{dt}{dz} \quad (2-9)$$

式中 q ——大地热流密度 (W/m^2)；

λ ——岩石热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]；

dt/dz ——地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)。

热流密度测试工作始于 20 世纪 30 年代末，直到 1955 年，全部数据尚不足 100 个，截至 1981 年底，全球热流密度数据达 10058 个，这些数据在全球面积上平均每 50000km^2 上才有 1 个热流密度测点。

我国大地热流密度测试工作始于 20 世纪 50 年代末，在 60 年代初仅取得 3 个热流密度数据，到 1987 年中国科学院地质研究所将我国大陆地区 167 个热流密度数据汇编成册。

1970 年，用等面积格子质量加权平均法对全球 3127 个热流密度数据所作的统计分析表明，海、陆及全球平均热流密度非常接近，几乎相等。全球平均热流密度值： $q = (61.5 \pm 3.1) \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ ；大陆平均热流密度值： $q = (61.1 \pm 1.93) \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ ；海洋平均热流密度值： $q = (61.5 \pm 3.27) \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ 。

(2) 地热的来源 地球表面接受太阳辐射的热量有 $2.345 \times 10^{24} \text{J/a}$ ，地热源源不断地以热传导的方式在地球表面散发的热量有 $1.026 \times 10^{21} \text{J/a}$ ，再加上其他方式释放的热量，地球每年实际散发的热量比上述数值还要大。如此巨大的热量释放是靠什么来维持呢？热源又是什么呢？

为了查清地热的来源，人们在世界各地进行了大量的地热观测和研究工作。观测和研究表明，就时间范围来说，有两类热源：即持续时间相当长的稳态热源和寿命较短的瞬间热源。

1) 稳态热源（放射性成因热）。地表热流量里有 20% ~ 80% 来自于地壳内放射性元素衰变所释放的热量，是地球内热的主要来源。放射性元素虽然很多，但只有具备下述三个条件的才能成为地球内热的主要来源：①具有足够的丰度；②放射性生热量大；③半衰期与地球的年龄相当。

目前已具备上述三个条件的放射性元素有铀 (U)、钍 (Th) 和钾 (K)，其半衰期，衰变常数及热产率见表 2-5。