

矿井热害防治

KUANGJING REHAI FANGZHI

辛嵩 等 编著

煤炭工业出版社

“973”计划项目“煤田地质学”建设工程专项经费资助
教育部重点实验室开放基金资助
教育部长江学者和创新团队发展计划 IRT0843 资助
山东省博士后创新基金(200703021)资助

矿井热害防治

辛 嵩 等 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了矿井热害防治技术研究的现状,从矿井热害形成机理(热源分析)、风流热湿计算到矿井热环境的评估,然后对矿井热害防治技术措施(非机械制冷降温、机械制冷降温)进行了详细分析,并对机械制冷降温状态下的部分技术工艺、降温系统及降温效果测试情况进行了说明。最后对目前国内外部分矿井降温案例进行了介绍。

本书可以作为高等院校采矿工程、安全工程专业教材和工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿井热害防治/辛嵩等编著. --北京:煤炭工业出版社,

2011

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3736 - 9

I. ①矿… II. ①辛… III. ①矿井-热害-防治 IV.

①TD727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 194622 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 14
字数 329 千字 印数 1—2 500
2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
社内编号 6546 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

矿井热害防治是一门综合性的科学技术，它涉及采矿工程、通风安全、气象、地质地热、环境工程、劳动卫生、制冷、空气调节等多学科领域。在深部采矿工程中，矿井的开拓及生产系统的布局、矿井火灾预测与控制、矿井的正常通风与灾变通风等都与井下的热环境有关。要想实现井下热环境的有效控制，就必须采取有效的矿井降温技术措施。提高矿井降温技术与管理水平是保证矿井安全生产的基本任务之一。

目前，矿井安全生产日益得到政府和社会的广泛关注。为进一步普及和提高矿山从业人员的技术与管理水平，保护井下职工的职业卫生安全，降低事故发生率，使我国矿山井工开采技术形成矿井通风系统优化、矿井瓦斯防治、矿井火灾防治、矿井粉尘防治、矿井水害防治、矿井支护、矿井热害防治等方面完整的矿井灾害防治技术体系，笔者以多年工作经验为基础，以提供实用的前沿技能为目标编写了本书。

本书系统介绍了矿井热害防治技术研究的现状。主要内容包括矿井热害形成机理（热源分析）、风流的热湿计算、矿井热环境的评估，矿井热害防治技术措施（非机械制冷降温、机械制冷降温）、机械制冷降温状态下的部分技术工艺，降温系统及降温效果测试情况等。最后对目前国内外部分矿井降温案例进行了介绍。把基础理论与现场技术有机的结合在一起，阐述了较完整的矿井热害防治体系。

本书的出版受到了山东省博士后创新基金的资助（项目编号：200703021），并且得到了兖州矿业集团有限责任公司有关领导和科研人员的支持和帮助，在此表示衷心感谢。值得说明的是，书中引用了不少其他作者的图表和数据，因时间仓促，没有一一注明，仅在参考文献中列出，就此深表歉意。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大专家和读者提出宝贵意见。

编 著 者

2010年6月

目 次

1	概述	1
1.1	矿井热害的类型	1
1.2	矿井热害的危害	4
1.3	矿井热害防治理论的研究现状和水平	5
1.4	矿井空调技术的研究现状和水平	7
1.5	矿井热害防治亟待解决的问题和发展趋势	8
2	矿井主要热源	11
2.1	地表大气状态变化	11
2.2	空气自压缩温升	12
2.3	井巷围岩传热	14
2.4	机电设备放热	16
2.5	运输中煤炭及矸石放热	18
2.6	热水放热	19
2.7	其他热源	21
3	矿井气候参数与传热基本原理	23
3.1	矿井气候参数	23
3.2	传热基本原理	27
4	矿井热环境的评估	31
4.1	矿井热害防治规程与标准	31
4.2	热环境对人的影响	34
4.3	矿井热环境评估指标	37
4.4	矿井热环境的模糊综合评价	43
5	矿井风流热湿计算	48
5.1	矿井空气	48
5.2	井筒内与井底车场风流热湿交换	50
5.3	矿井巷道风流热湿交换	55
5.4	采掘工作面风流热湿交换	59
5.5	矿井风流热湿交换系数的测定计算	62
5.6	矿井风温预测	68
5.7	矿井通风极限开采深度的确定	71
6	矿井冷负荷计算	76
6.1	矿井冷负荷计算原理	76
6.2	基于制冷站的冷负荷计算	78

6.3	采掘工作面冷负荷计算	82
6.4	回采工作面降温风量与冷量的最优搭配与计算	85
7	矿井非机械制冷降温技术措施	88
7.1	增加风量	88
7.2	顶板管理	90
7.3	通风方式	92
7.4	其他措施	95
8	矿井机械制冷降温技术	99
8.1	机械制冷基本原理	99
8.2	矿井机械制冷降温系统类型与设计简介	105
9	矿井制冷降温系统及设计方案优选决策	112
9.1	概述	112
9.2	矿井制冷降温系统方案决策评价指标及权值	114
9.3	矿井制冷降温系统方案确定的多目标决策法	121
9.4	矿井制冷降温系统方案优选决策分析与应用	123
10	井下主要热害地点制冷降温技术工艺	131
10.1	制冷降温技术工艺确定原则	131
10.2	高温工作面热源分布及散热量测定计算	131
10.3	回采工作面制冷降温技术工艺	136
10.4	掘进工作面制冷降温技术工艺	146
10.5	机电硐室制冷降温技术工艺	152
10.6	局部机械制冷降温技术工艺	156
10.7	矿井机械制冷降温系统技术特征与工况	158
11	矿井制冷降温系统测试	169
11.1	制冷机组测试与分析	169
11.2	冷冻水循环系统测试	170
11.3	冷却水循环系统测试	172
11.4	散冷系统(空冷器)测试	173
11.5	采掘工作面降温效果测试	175
12	国内外矿井降温实例	177
12.1	德国煤矿降温概况	177
12.2	南非矿山降温概况	178
12.3	河南平煤集团矿井降温概况	182
12.4	国投新集矿业集团矿井降温概况	187
12.5	新汶矿业集团孙村煤矿矿井降温概况	190
12.6	兖矿集团巨野矿区赵楼矿井降温概况	197
	附录	202
	参考文献	215

1 概 述

随着煤炭开采强度的增加,浅部资源日益减少,开采深部资源已成为人类的必然选择。当采矿工程延伸到深部时,岩层温度将达到几十摄氏度。由于矿井热环境的变化带来越来越多的矿山热害,矿井热环境问题日益成为制约深部矿床有效开采的重要因素。同时,由于矿井热环境条件的改变使工作条件恶化,持续的高温对人体健康和工作能力产生极大的影响,造成井下工人注意力分散,甚至无法工作,使劳动生产率大大下降,并对作业人员的人身安全构成了重大威胁。随着矿井开采逐渐向深部发展,矿井高温问题不可避免,矿井热害已成为继顶板、瓦斯、火、粉尘、水五大灾害之后的又一灾害。

位于地面以下矿井巷道和采掘工作面的热湿空气环境直接受到巷道周围的地质热物理性质、地质状况、巷道内散热设备、地层高温渗水等因素的影响,当开采深度增加地温升高或特殊高地温、地层内渗水的温度较高、设备的容量较大散热量较大时,均会使得巷道内的空气温度和湿度升高。当温湿度超过一定限度时,就会影响井下作业正常进行和矿工的身体健康,从而使得劳动生产率降低、操作失误率增加、工人体能消耗增大等情况出现,严重影响生产的安全,甚至不得不停产。这种灾害称为矿井热害。

矿井内的空气环境达到什么程度才能称为矿井热害,当前尚无统一的标准。矿井内环境对人的影响程度也要视工人个体素质、健康水平、年龄大小、工种差别和劳动强度不同,以及每个人适应温湿度的气候条件情况而定。但总的来说,人对高温高湿的耐受力相差不大。一般来说,当矿内工作面的空气干球温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度在 $90\% \sim 100\%$ 范围内,此时具有高温高湿特点的工作面称为高温工作面。矿内在短时间内出现高温工作面,并不能构成严重的矿井热害,但若常年持续地出现具有高温现象的工作面,并对井下工作人员的身体健康和采掘工作造成影响,就会造成矿井热害。

在矿业发达地区,由于矿井深,热害问题出现的比较早。国外一些主要产煤国家从 20 世纪 80 年代进入深部开采,如德国平均采深 900 m ,平均地温 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$,最深达 1712 m ,最高地温达 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;英国平均采深 700 m ,平均地温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,最深达 1200 m ,最高地温达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$;波兰平均采深 690 m ,平均地温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,最深达 1300 m ;前苏联的顿巴斯矿区最深的煤矿达到 1400 m ,千米平均地温为 $30 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,个别达 $52\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。我国国有大中型煤矿在 20 世纪 60 年代有北票矿区台吉矿千米深井,70 年代开滦矿区进入 -800 m 开采,80 年代以来东部矿区相继进入深部开采。如新汶、沈阳、抚顺、兖州、长广等矿区,其中开滦赵各庄矿采深达 1100 m ,新汶孙村矿达 1055 m 。我国部分高温煤矿简况见表 1-1。

1.1 矿井热害的类型

1.1.1 矿井热害类型划分的原则

划分矿井热害类型的目的主要是为了勘探预测评价矿床在将来井下开采时是否会出现

表1-1 我国部分高温煤矿简况

序号	省份	矿井	矿井深度/m	矿井气温/℃	岩温/℃	低温梯度/(℃·hm ⁻¹)
1	辽宁	老虎台	685~715	30~33	38~42	3.6~4.3
2	辽宁	龙凤	715~800	30~33	30	2.7~4.6
3	辽宁	胜利	730~900	30~33		3.2
4	辽宁	北票	722~872	27~31	31~38	2.1~2.2
5	河北	桥东	670	28	31~43	3.0~3.5
6	山东	陶庄	627~712	30~32		2.13
7	山东	孙村	424~624	28~32	34.9~43.5	2.7
8	河南	平顶山八矿	510	33	42	3.8
9	江苏	三河尖矿	740	33.6	37.5	2.92~3.43
10	安徽	九龙岗	830	30	31	1.8
11	安徽	潘集	550	28	40~43	3.0~3.1
12	浙江	长广	937.58	34	40.54	2.28

注：表内的统计数据为1996年以前的资料。

矿井高温，甚至造成矿井热害，以及根据所划分的类型来研究设计治理矿井热害的措施。根据此目的，划分矿井热害类型的主要依据应该是矿井高温的热源，也就是以热源中的自然因素和人为因素为依据。因此，矿井热害类型划分应遵循以下原则：

1) 地温的赋存状态

地温的赋存状态中最有代表性的数值就是矿井所在地区的热流值或地温梯度值。

热流值或地温梯度值等于或接近于地壳热流或地温梯度平均值的地区，称为地热正常区。热流值或地温梯度值高于或低于地壳热流或地温梯度平均值的地区，称为地热正异常区或地热负异常区。本书所提到的“地热异常区”都是指地热正异常区。

根据已有热流数据及大量测温资料，从全球看，地区或区域地热正常区分布面积很广。地壳平均热流值为1.4~1.5热流单位，平均地温梯度值为1.5~3.0℃/hm（一般指沉积岩地区）。地区或区域地热异常区所占面积则很小，主要分布在大洋中的海岭、活动断裂带和第四纪火山活动区。这里热流值和地温梯度值很大，都大大超过地壳平均值。除地区或区域地热异常区外，实际观测表明，在地区或区域地热正常区内，有局部地热异常区存在。所以，具有热害的矿井除位于地区或区域地热异常区外，也存在于地区或区域地热正常区内的局部地热异常区。我国地热异常类型的矿井热害中后者是主要的。

2) 深部热源导热载体的性质

地球从内部向地壳上部导热的载体有两种：一种是固体，即岩石；另一种是流体，即地下热水和热气。如果导热的载体是岩石，则形成岩温正常传导区和岩温异常传导区，岩温正常传导区即地热正常区。如果导热的载体是地下热水，则形成热水异常区；如果导热的载体是热气，则形成热气异常区。这种热气异常区是开发地热资源的最好场所。

3) 人为因素造成的矿井热害

人为因素造成的矿井热害，主要是煤层和硫化物矿体由于人类生产活动，也就是在开采过程中矿体的氧化作用造成的矿井热害。这种矿井热害在我国虽然数量不多，但较严

重,且常常因持续高温而使矿体自燃,造成矿产大量损失。

目前,在我国进行矿床勘探时尚未发现由于氧化反应放热而引起地热异常区,在阎如珽的矿床地温类型划分中,这种矿井热害没有被划分为一种单独的类型。但在这种矿体实际生产的矿井中,已产生矿井热害,故在矿井热害类型的划分中,仍应单独划分为一种类型。这种矿体在开采时防止和治理矿井热害的方法和措施也有其与地温造成的矿井热害不同之处,故在类型划分时也应考虑这种特点。

这种类型的矿井热害除去因煤层和硫化物矿体在开采过程中由于氧化作用而产生热以外,在自然条件下也有可能产生。如含硫较多的煤层露头长期暴露于地表大气之下,就可能引起自燃,甚至延伸至一定深度。如前捷克斯洛伐克某硫化物矿床,由于硫化物沉积层氧化带的放热反应而形成了局部地热异常区。又如前苏联某矿“热山”地热异常的形成就是在巨厚的泥灰岩层中由于有机物氧化作用的放热过程形成高温异常区,在地下 50 m 深处温度为 150 ~ 270 ℃, 90 m 深处温度高达 380 ℃。目前在我国尚未发现这种情况,如果在勘探的过程中发现这种地热异常区,也不可能建设矿井,故也无所谓矿井热害了。

1.1.2 矿井热害类型的划分

根据目前我国出现的具有热害的矿井情况,将我国的矿井热害划分为以下几种类型:正常地热增温型,岩温地热异常型,热水地热异常型,以及碳、硫化物氧化热型。

目前,出于能源的需要,新矿井大量兴建,其中有些矿井出现了热害。这些新矿井热害分为以下三类:

1) 岩温地热异常型热害

目前地质勘探工作已遍布全国,新矿井大量兴建,所以遇到地热异常区的概率增大。有些新开拓的矿井虽然开采深度不大,但位于地热异常区,因而就遇到了高温。如河南平顶山矿务局和广西合山矿务局所属的几个矿井都是在 -500 m 左右或更浅的井巷,其空气温度已达到 30 ℃ 左右。

2) 深部的正常地热增温型热害

煤层位于深部时,为了在深部采煤,新开拓的矿井要掘进到 -800 m 左右的深度,甚至更深。在这样的深度内,即使在地热正常区内,也会遇到高温。如浙江的长广煤矿的牛头山七号井,建井时一直掘进到 -937.58 m 的深度,岩温为 40.54 ℃,矿井内气温为 34 ℃,所以一开始就必须采取空调降温措施。华东地区缺少煤炭资源,虽然煤层位于 -800 ~ -900 m 的深度,但出于需要,还是不惜多投资,采取各种降温措施把煤炭开采出来。比如兖州矿区新建的矿井中,第一水平就已经进入深部,井下采掘工作面热害严重。

3) 热水地热异常型热害

我国部分矿井存在的高温热害现象是由于承压热水涌入开采巷道造成的。它们的开采深度都不大,但水温都很高,并且都造成了热害。如辽宁某矿开采深度仅 -198 m,涌入巷道的热水水温 48 ~ 51 ℃,巷道内空气温度 34 ℃。浙江某矿开采深度 -330 m,涌入巷道的热水水温 37 ℃,巷道内空气温度 34 ℃。江苏苇岗铁矿开采深度 -300 m,涌入巷道的热水温度 44 ~ 46 ℃,巷道内空气温度 35.2 ℃。湖南郴州铀矿 +80 m 中段的深度只有 -120 m,一般的热热水温 46 ~ 48 ℃,掘进工作面的空气温度达到 35 ~ 43.6 ℃,在突水淹井时水温达到 54 ℃。这是当前我国最严重的热害矿井,由于热水水量大,围岩坚硬,

降温十分困难。

在矿井热害防治过程中,进行矿井的热害勘探和矿井热害的类型划分,对于采取有效的矿井热害防治措施、提高降温效果和减少初投资具有重要意义。

据我国煤田地温观测资料统计,平均百米地温梯度为 $2 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。深部开采条件下,地温的升高和采掘机械化程度的提高,进一步恶化了作业环境。我国高温矿井数量日益增加,热害程度也日趋严重。据不完全统计,到1999年,我国已有70处大中型生产矿井的采掘工作面最高气温超过《煤矿安全规程》的规定,其中,超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的矿井有26处,最高达到 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。矿井高温已严重制约了安全生产,受到国内外采矿界的普遍关注。

1.2 矿井热害的危害

矿井高温热环境给井下作业人员的健康和矿井生产带来了极大的危害。

矿井内气象条件对人体健康的影响,不仅要看温度高低,在很大程度上还要看空气的相对湿度与空气流动速度。这是因为人的温热感觉与汗液的蒸发难易程度密切相关。人体借助于汗液的蒸发散发热量,以维持热平衡,而蒸发程度的大小与空气的相对湿度密切相关,相对湿度较小时,汗液蒸发量增加;相对湿度较大时,汗液蒸发量较小。除此之外,风速的大小也会使得汗液蒸发量不同。例如在夏季,空气温度相同,相对湿度大时要比湿度小时汗液蒸发量小,人会感到闷热;相同的温度与湿度,有风要比无风时感觉凉爽。这主要是因为人体散热是以对流、辐射和蒸发三种方式进行。在井下,人体对流散热效果取决于周围空气温度和相对湿度、人体温度及并巷内风流速度的大小和分布;辐射散热效果取决于人体温度与周围空气温度;蒸发散热效果不但与人体温度、周围空气温度、相对湿度和风流速度有关,而且还与空气湿度密切相关。所以,散热条件的好坏不仅取决于空气温度,还取决于相对湿度和风速。

人在高温高湿的矿井中劳动时,人体的热平衡将遭到严重破坏,人体以对流、辐射和蒸发的方式进行散热的能力大大减弱,由此产生一系列对人体健康有害的反应。例如:

(1) 为适应高温高湿的井下环境,人的调节机能为加速人体冷却而处于长时间的紧张状态,导致感觉不适、烦躁、疲倦、恶心、循环失常,甚至昏倒,对身体损害较大。

(2) 高温环境作业使人大量出汗。虽然出汗可以带走人体部分热量,起到调节体温的作用,但是由于出汗时的汗液、粉尘和呼吸性气溶胶等都易黏附于皮肤和毛孔,不但会影响人体的散热,还会妨碍分泌物的排出,从而出现病情。如汗水带走体内大量盐分,导致胃液酸度降低而影响食欲,人的体力急剧下降。特别是采掘作业劳动强度比较大时,人的体温调节、消化系统、供血系统等都会受到严重影响,体内水分和盐分的平衡遭到破坏,容易发生“中暑”。此外,井下温度高、湿度大、风速又受到限制,工人容易患传染性湿疹和风湿性关节炎。

(3) 由于井下温度高、湿度大,工人作业时体温升高、血压降低、心跳加快,易患心脏病。

我国淮南九龙岗煤矿开采深度 $\sim 830\text{ m}$,在 -630 m 水平开采时,工作面气温达到 $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,工人中患高血压和心悸病者较多。1974年,平顶山八矿东一石门(深 510 m ,气温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)工作面涌出 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热水,水量仅 $12\text{ m}^3/\text{h}$,竟使工作面气温上升至 $33 \sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$,工人曾多次“中暑”,并且很多人患传染性湿疹,冬季感冒的发病率也很高。广西

合山矿务局里兰矿由于井下有 $28 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 的热水涌出, 巷道内气温达 $22 \sim 29.6^{\circ}\text{C}$, 出水点附近气温达 33°C 。据 1976 年统计, 井下工人有 415 人患各种皮肤病, 也发生过多起“中暑”和昏倒的病例。从以上实例可以看出, 矿井高温高湿的气象条件对人体的危害是十分严重的。

矿井高温热环境还有可能增加事故发生率。据日本有关资料统计, $30 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 气温的工作面, 比低于 30°C 时的事故率高 3.6 倍。据南非有关资料统计, 当矿内作业地点的空气干球温度达到 30°C 时, 即开始出现“中暑”死亡事故。南非金矿井下温度与事故率的关系见表 1-2。

表 1-2 南非金矿井下温度与事故率的关系

工作地点气温/ $^{\circ}\text{C}$	27	29	31	32
工伤频次/(次·千人 $^{-1}$)	0	150	300	450

矿内高温高湿的作业环境, 必然要降低矿工的劳动生产率。前苏联顿涅茨克劳动卫生和职业病研究所的测试资料显示: 在风速为 2 m/s 、相对湿度为 90% 的条件下, 气温为

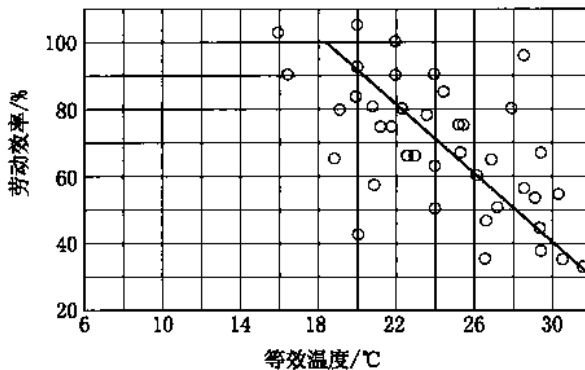


图 1-1 劳动效率与等效温度的关系

25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 劳动生产率为 90%, 30°C 时为 72%, 32°C 时为 62%。研究资料指出, 当矿内气温每超过标准 (26°C) 1°C 时, 劳动生产率则下降 6%~8%。我国一些高温矿井也是这样, 使得生产能力下降, 基建进度迟缓, 甚至被迫停产。例如, 新汶矿业集团孙村矿在 -800 m (垂深 1050 m) 的开拓掘进中, 因工作面风温高达 34°C , 曾被迫停产 3 个月。徐州矿业集团三河尖矿, 因采掘工作面高温, 致使采掘劳动生产率下降 20%~

23%, 最高达 40%~45%。劳动效率与等效温度的关系如图 1-1 所示。

矿井热害问题如果得不到及时解决, 将给我国的矿井生产带来诸多的困难, 也将难以适应矿井今后所面临的严峻形势。因此, 进一步开展对矿井热害防治与空调的基本理论与新技术的研究, 就有着十分重要的现实意义。

1.3 矿井热害防治理论的研究现状和水平

国外对矿井热害防治理论的研究始见于 1740 年法国在 Belfort 附近的矿山进行的地温测定。但真正在矿井热害防治理论的研究上的发展起步于 20 世纪 20 年代。据现有的资料, 国外矿井热害防治理论的发展大致可分为三个时期, 即雏形期、发展期和形成学科理论体系期。

雏形期: 20 世纪 20 年代至 50 年代。这一时期由于世界各国煤矿的开采规模都比较小, 矿山的地热问题并不是十分严重, 所以矿山降温理论研究的发展比较缓慢, 研究成果散见于各种文献中, 仅限于个别的研究成果。其中比较有代表性的是: 1923 年德国 Heist Drekoht 在假定巷壁温度为稳定周期性变化的前提下, 解析了围岩内部温度场的周期性变化, 提出了围岩调热圈等概念, 尽管其基本假定不尽合理, 但这是研究矿井热害防治问题

的最初理论;1939年至1941年间,南非 Biccand Jappe 连续发表了题为“深井风温预测”的论文,提出了风温计算的基本思路;1951年英国 Van Heerden,日本平松、天野等结合平巷与围岩的热交换,在理想条件下提出了围岩调热圈温度场的理论解,这个理论解与传热学领域中英国 Carslaw 等人在1939年用拉普拉斯变换得出的理论解是一致的;1953年苏联学者又提出了较精确的不稳定换热系数和调热圈温度场的计算方法;1955年日本平松又提出了围岩与风流不稳定换热时的风温近似计算式。这些研究成果奠定了现代矿井降温理论的研究基础,有的现在还在沿用。

发展期:20世纪50年代至70年代初。这一时期由于电子计算机的应用,矿井降温理论有了较大的发展。如1961年苏联 BopomaeB、1966年联邦德国 Nottort 等发表了用数值计算法描述围岩调热圈温度场的学术论文。同时,矿井围岩热物理参数的测试技术也得到了初步应用。如1964年联邦德国 Mucke 用圆板状试块测定稳态导热的岩石导热系数。1967年联邦德国 Shernat 在现场对一段巷道强制加热,实测围岩中的温度分布,从实测值和理论值的对比中,得出了一些热参数;同年,南非 Starfield 等对巷道在潮湿条件下的热交换规律进行了初步探讨,矿井降温理论已朝着实用性的方向迈进。

形成学科理论体系期:20世纪70年代中后期至今。这一时期学科理论迅猛发展,一些系统专著相继问世,如舍尔巴尼等著的《矿井降温指南》、平松等著的《通风学》、福斯著的《矿井气候》等都对矿井降温理论作了较系统的阐述,而且问题的研究已深入到了采掘工作面。如1971年后联邦德国的 J. Voss 等相继提出了一整套采掘工作面风温计算方法,1975年美国的 J. McGuaid 系统提出了矿井热害治理的各种对策,1977年保加利亚的 Shcherban 等对掘进工作面的风温计算作了较详尽的论述。进入80年代后,学科的研究更提高到了一个新的水平,发表论文数量激增,研究成果更加符合实际。如日本内野用差分法求得不同巷道形状、岩性条件下的调热圈温度场,并提出了考虑入风温度变化、有水影响条件下的风温计算式;南非 Starfield 等也提出了更为精确的不稳定换热系数的计算公式;日本天野等提出了较为完整的矿井热害防治设计的程序数模;南非 Richard Gundersen 编制了迄今较为完善的矿山通风与降温网络模拟(VUMA)软件等。

我国对矿井热害防治理论的研究起步于20世纪50年代初期。当时,我国的抚顺煤炭科学研究院就开展了矿井热害防治地温考察和气象参数的观测。到60年代,随着我国高温矿井数量的增多,国内的一些学者在认真学习国外经验的同时,开始结合我国矿井的实际,逐步开展了矿井热害防治理论的研究,但进展较慢,有代表性的成果不多。直至80年代以后,我国矿井热害防治理论的研究才有了实质性的发展,较有代表性的论文主要有黄翰文的“矿井风温预测的探讨”、“矿井风温预测的统计研究”,杨德远的“矿井风流的热交换”等。到80年代后期,我国也形成了较完整的矿井热害防治的学科理论体系,相继出版了一些系统专著,如岑衍强等编著的《矿井热环境工程》、余恒昌等主编的《矿山地热与热害治理》、王隆平编著的《矿井降温与制冷》、杨德源等编著的《矿井热环境及其控制》等。这些研究成果更加丰富和发展了我国矿井热害防治理论的理论体系。

纵观国内外在矿井热害防治领域内的研究成果,虽然已取得了可喜的进展,但由于矿井条件的复杂性,影响井下风流状态变化的因素很多,所以这些研究都不可避免地存在一定的局限性。尤其是矿井风流与井巷热湿交换的问题在理论上还没有得到很好的解决,存在的不确定因素很多,致使矿井热湿计算的误差很大,就目前一般的预测计算而言,误差

达到 2℃ 已属不易。所以, 进一步开展降温基本理论的研究仍然具有十分重要的现实意义, 一直受到国内外学者的重视。

1.4 矿井空调技术的研究现状和水平

英国是世界上最早在井下实施空调技术的国家。早在 1923 年, 英国彭德尔顿煤矿就在采区安设制冷机冷却采煤工作面风流。巴西的莫罗维罗矿及南非的鲁宾逊深井也早在 20 世纪 30 年代就采用了集中冷却并筒入风的方法降温。60 年代南非便开始了大型的矿井热害防治工作, 矿井空调系统也逐渐大型化和集中化。

德国是世界上煤矿采深最大的国家。1985 年德国煤矿平均采深已达 900 m, 最深的依本伦矿已达 1530 m, 矿井岩温达 41℃, 最高达 60℃。1990 年德国生产商品煤约 7000 多万吨, 矿井降温总制冷能力约 285 MW, 其中有 180 台平均制冷能力为 1200 kW 的冷水机组、280 台平均制冷能力为 260 kW 的冷风机组, 使用的空冷器约 600 台。煤矿集中制冷站能力超过 3.7 MW 的有 18 个, 制冷能力合计为 126.9 MW, 其中采用井下集中制冷系统的有 8 个, 制冷能力合计 48 MW; 采用地面集中制冷系统的有 6 个, 制冷能力合计 53.4 MW; 采用井上下联合制冷系统的有 4 个, 制冷能力合计 25.5 MW。2006 年德国并工煤矿仅剩三个矿区, 分别是鲁尔 (Ruhr) 区、萨尔 (Saar) 区和依本比仁 (Ibbenbueren) 区。全德国共 8 对矿井, 矿井开采深度都在 800~1000 m 以上。现有的 8 对矿井全部采用机械制冷降温系统, 均采用地面集中式或井下集中式或混合式布置水冷机组, 井下局部可移动式制冷设备仅作为上述系统的补充。

东欧国家以俄罗斯和波兰为代表, 矿井高温问题也相当严重。俄罗斯从 20 世纪 70 年代开始采用大规模的矿井空调, 矿井采深达 1200 m, 岩温高达 40~45℃, 最高达 52℃, 井下单机制冷能力最大达 1.5 MW, 地面达 4.2 MW。波兰煤矿平均采深为 575 m, 岩温为 30~43.5℃。1983 年波兰首次在井下安装了一套局部空调装置, 制冷量为 0.25 MW。此后, 波兰的矿井空调技术发展很快。

世界上矿井空调规模最大的当属南非金矿, 全国矿井全部采用矿井空调。南非对矿井空调新技术的研究十分重视。1985 年 11 月南非首次在世界上用冰作载冷剂冷却空冷器的冷却水, 由于冰的溶解热高于水的比热容, 所以对于输送相同的冷量, 冰的质量流量仅为水的 1/5。

我国矿井空调技术的应用始见于 20 世纪 60 年代。在 60 年代初, 我国开始采用小型制冷设备对矿井风流进行冷却。1964 年淮南九龙岗矿在水平分层假顶工作面和掘进工作面采用一台苏制 4ΦY-10 型制冷机进行降温试验, 取得了一定的效果。1966 年武汉冷冻机厂和抚顺煤研所共同研制了 JKT-20 型矿用移动式空调器, 1979 年在 JKT-20 型的基础上又研制出了 JKT-70 型矿用移动式空调机组在平顶山一矿使用, 使用时配备了 4 台 55 kW 的空冷器, 使工作面温度降低了 4~6.4℃。1980 年湖南 711 矿在我国第一个采用了地面集中制冷、井下冷却风流的矿井空调系统, 地面设置两台 6AW-17 型制冷机, 产冷量达 0.67 MW, 空冷器的实际供冷量达 0.22 MW, 工作面气温平均降低 6.7℃, 掘进效率提高 78%~84%, 这是我国矿井集中降温的雏形。1984 年山东东汶孙村矿在井下 -400 m 水平建立了我国第一个井下集中制冷系统, 设备为两台重庆通用机械厂生产的 II-JBF50×0 型离心式制冷机, 制冷量为 1.75 MW。冷水管总长 1530 m, 管道保温材料为

EPS 可发性聚苯乙烯。空冷器设于工作面进风口, 冷凝热利用矿井总回风流排放。由于输冷管路系统处于回风流中, 冷损高达 45% 以上, 制冷系统可靠性低、降温效果差。“七五”期间, 平顶山八矿又建立了我国第二个井下集中制冷系统, 制冷站设备选用了三台国产的 JBF50 × 0 型离心式制冷机, 一台德国产的 WKMZ - 1200 型螺杆式制冷机组, 总制冷能力为 0.5 MW, 实际运转制冷能力为 0.24 MW。采煤工作面安设两台 KBL - 150 型空冷器, 安设位置距工作面进风口 100 m。掘进工作面安设一台 KBL - 90 型空冷器, 安设位置距迎头 50 ~ 100 m。供冷管道为双层隔热管道, 隔热材料为聚氨酯泡沫塑料。管道冷损量为 5.1%, 冷凝热利用矿井总回风流排放, 总排放量为 0.3 MW。降温前, 平顶山八矿采掘工作面气温一般为 29 ~ 32 °C, 最高达 34 °C。降温后, 当采煤工作面风量为 600 ~ 900 m³/min 时, 风温降低 4 ~ 6 °C; 掘进工作面风量为 80 ~ 130 m³/min 时, 风温降低 3 ~ 6 °C。1991 年新汶孙村矿在千米立井的地面建立了集中制冷系统, 设三台制冷机组 (两台国产、一台进口德国机组), 但没有进口高低压换热器, 地面系统未投入运行。90 年代末孙村矿在考察平顶山五矿的井下集中制冷系统后, 又在井下 -800 m 水平建立了集中制冷系统。此时的平顶山五矿、新汶孙村矿的井下降温系统由于可靠性不高, 从而未取得良好的降温效果。2002 年新汶矿业集团在总结国内 20 年的矿井制冷降温经验教训, 并考察了南非的地面集中制冰、向井下输冰的降温系统后, 立即在千米立井设置了地面集中制冰、向井下输冰的降温系统。

总之, 与国外矿井空调技术相比, 我国矿井空调规模小, 发展慢, 在矿井空调的模式上主要是借鉴了国外的经验。

1.5 矿井热害防治亟待解决的问题和发展趋势

1.5.1 国内矿井热害防治技术存在的问题

国内有关矿井热害防治技术的研究与应用尚处于探索阶段, 诸如空气向下流动压缩放热、井巷围岩放热、机电设备放热、运输过程中的煤炭放热、采空区矸石放热等矿井热害形成机理方面的研究成果较少, 围绕非制冷降温 and 人工制冷降温两方面的热害治理技术研究也处在起步阶段。突出的问题主要有以下几个方面:

1) 基础研究投入不足, 理论体系有待进一步完善

主要表现在矿井热害形成机理、发展规律等基础理论研究相对滞后, 不能为热害防治技术研究和提供强有力的理论基础, 理论上没有形成完整的体系。对应的研究手段, 特别是实验研究条件、水平落后, 无法支持矿井热害相关技术、产品的研发, 迫切需要加大基础研究投入, 建立高水平实验研究平台, 增强技术开发创新能力。

2) 矿井热害的测量、计算精度不够

矿井降温制冷的关键是对矿井热害状况的准确把握, 基础热害参数的精确测量 (如各种热源的温度、分布、所占比例等, 以及煤炭、围岩、喷浆及各种材料的导热性能等) 是搞好矿井降温制冷的基础; 另外, 对井下风温预测的快速精确计算也是矿井降温制冷的关键所在。例如, 根据巷道围岩及巷道支护材料的基础参数计算围岩向巷道风流的传热量, 如果计算不准确, 势必影响矿井降温的设计精度。

3) 各种矿井热害防治技术优化筛选, 即矿井热害防治技术体系设计粗略

目前我国矿井热害防治设计, 主要采用矿井热害调查和不同矿井降温方式的粗略比较

的方法。基本步骤是：矿井热害调查→矿井需冷量的估算→不同矿井降温方式优缺点分析→确定矿井降温方式。这种模式的问题在于设计精度不够，建立的矿井降温系统不能满足矿井需求，造成大量投资浪费。平顶山五矿、新汶孙村矿等矿实用降温技术的应用考查表明：我国已基本解决了矿井降温所存在的技术问题，但大多数矿区并未取得良好的降温效果，设备运行时间较短，关键在于设计精度不够，针对性不强，没有形成各种降温技术的有效组合。

1.5.2 国外矿井热害防治技术发展的特点

研究掌握矿井热害形成机理以及综合治理技术，特别是超高温矿井人工制冷降温技术，在有效控制矿井热害的同时，实现制冷降温系统高效低耗运行，将是矿井热害防治技术发展的关键。

目前，国外矿井热害防治技术发展的特点和趋势是：

(1) 建立了系统的矿山热力学的理论体系，并应用其解决采矿工程中的一些重大技术问题。例如，矿床的合理开采深度、合理的开拓系统和开采程序，以及合理的矿井通风系统和供风量等。

(2) 应用高科技手段来解决矿井热害防治的重大技术问题，如采用三管式能量转换装置、板式蒸发器、可调速水泵以及内隔热保冷管道等，应用智能化控制系统来控制矿井降温系统，使矿井降温系统始终处在优化的状况下运行。

(3) 矿用制冷设备性能良好，运行安全可靠。板式蒸发器的使用，可将冷水温度降到 0°C 左右，大型冷水机组无故障运行时间可达 $7 \times 10^4 \text{ h}$ ，最高可达 $12 \times 10^4 \text{ h}$ 。

(4) 矿井传冷技术发展日新月异。矿用空冷器，由 20 世纪 60 年代以前的翅片管式，发展到 80 年代的板管式和光管式，80 年代后期到 90 年代各国都在试图用喷淋式或混合式取代表面空冷器等。

1.5.3 矿井热害防治的主要内容及研究方向

1.5.3.1 矿井热害防治涉及的主要内容

- (1) 地质勘查调研分析矿井的热害形成原因；
- (2) 采掘地点热害的热源与湿源调查；
- (3) 井巷空气热环境测试分析，降温需要的冷负荷调查；
- (4) 井下情况的调研，独头掘进工作面或采煤工作面的降温措施分析；
- (5) 降温系统设计及技术措施，降温专用设备的设计、制作与试验；
- (6) 井下原有热源设备的调整与移动、降温系统设备的安装，井上制冷系统、冷风冷水等冷量输送系统的安装及措施的实施；
- (7) 降温系统的监测与效果测试；
- (8) 降温系统的能量利用率、能耗、冷损、效果等评估分析；
- (9) 开拓掘进中巷道工作面降温系统的延伸设计与安装；
- (10) 根据监测运行情况对降温系统与设备进行改进或局部结构完善，以提高降温系统的能量利用率和降温效果，降低系统能耗，减小系统冷损失。

1.5.3.2 矿井热害防治的研究方向

从总体上来讲，矿井热害防治研究主要包括矿井的热害勘查与热源湿源散热冷负荷研究、矿井热害防治技术与措施的研究和矿井热害防治设备研制等方向。其研究包括两个主

要的方面,即矿井热害防治的辅助方向的研究和矿井热害防治主体方向的研究。

1) 主体方向

矿井热害防治研究的主体方向是针对降温进行的研究,主要包括以下几个方面:

- (1) 矿井降温热源湿源的分布与散热散湿规律,冷负荷计算与预测分析;
- (2) 采煤巷道与工作面以及巷道独头工作面的降温措施与方案研究;
- (3) 矿井降温专用设备(空气处理装置、耐高压换热器、冷量输送专用设备、局部空气分配器、巷道移动式全部或部分降温设备等)的研究;
- (4) 井下热源分布调整与降温措施研究;
- (5) 井下降温系统管道、风筒设计与安装措施的研究;
- (6) 降温系统的能量利用率、能耗、冷损、效果等评估分析;
- (7) 开拓掘进中巷道工作面降温系统的延伸设计与进度计划研究;
- (8) 建井期间的降温延伸用于正常生产永久降温系统的研究;
- (9) 矿井降温研究方法的研究理论、数值、实验与现场测试实验等。

2) 辅助方向

矿井热害防治的辅助方向的研究虽然不是主要针对降温进行的研究,但却是矿井降温措施及实施的基础和前提或保证,主要包括以下几个方面:

- (1) 矿井热害勘探与热害成因调查;
- (2) 矿井通风系统状况与优化;
- (3) 矿井热环境的测量与测试分析;
- (4) 矿井热环境热舒适性的分析与评价;
- (5) 矿井巷道、降温系统的保温隔热;
- (6) 矿井巷道内的排水防水与防潮。

我国高温矿井数量虽多,但热害程度不一,如果采用单一的矿井空调的模式,必然难以适应矿井降温的需要。所以,我国的矿井空调也必然朝着多样化的方向发展。降低矿井空调成本,改善空调效果,提高经济效益,这是我国矿井空调发展中必须解决的问题。如果这一问题解决不好将影响我国矿井空调技术的应用和普及。因此,研究高效化的矿井空调系统和优化矿井空调系统的设计,是我国矿井空调技术发展中所面临的重大课题。

2 矿井主要热源

要进行矿井降温技术与相关空调设计,首先必须了解引起矿井高温热害的主要影响因素。能引起矿井气温升高的环境因素统称为矿井热源。本章主要讨论这些矿井热源,并简要介绍其散热量的计算方法。

2.1 地表大气状态变化

严格意义上讲,地表大气状态变化并不是热源,但是它对井下的气候影响较大。

大气的温度叫气温。从长时间平均看,地面和大气系统热量得失的总和平衡,因此,地面和大气的平均温度保持不变。但是,在不同时间、不同地域,太阳辐射、下垫面性质和大气条件等是有变化的,因此,气温具有时间上的变化差异。

气温的日变化由于大气中的热量累计相对于太阳辐射有一定的滞后性,因此,一天内气温的最高值一般出现在午后2点左右,比中午太阳高度角最大、太阳辐射最强的时间滞后2h左右(图2-1)。由于夜晚地面在没有太阳辐射热能补充的情况下,不断放出长波辐射热能,日出前地表储存的热能达到最少,随之气温也达到最低值。

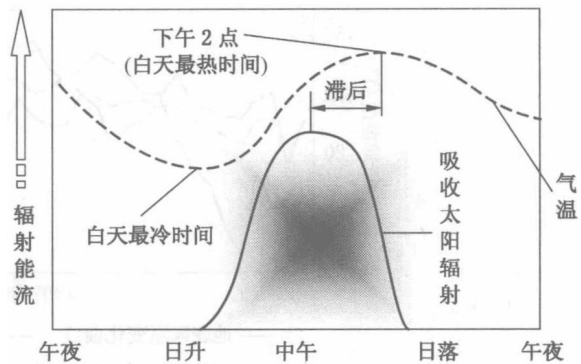


图2-1 气温的日变化

气温在每一年里周期性、有规律地升高和降低,称为气温的年变化(图2-2)。

地球上绝大部分地区,气温在一年中有一个最高值和一个最低值。一年中气温的最高值和最低值出现的时间分别比太阳辐射最强和最弱的时间滞后1~2个月,大陆上的最高气温出现在7月份(海洋上为8月份),最低气温出现在1月份(海洋上为2月份)。

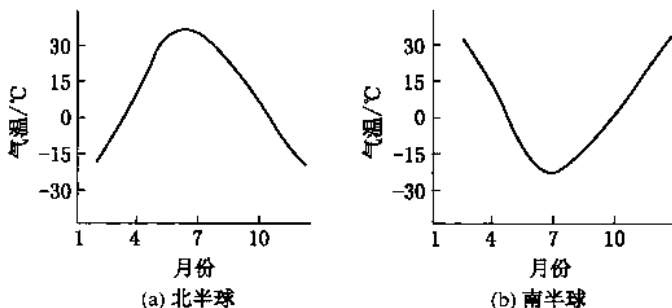


图2-2 气温的年变化