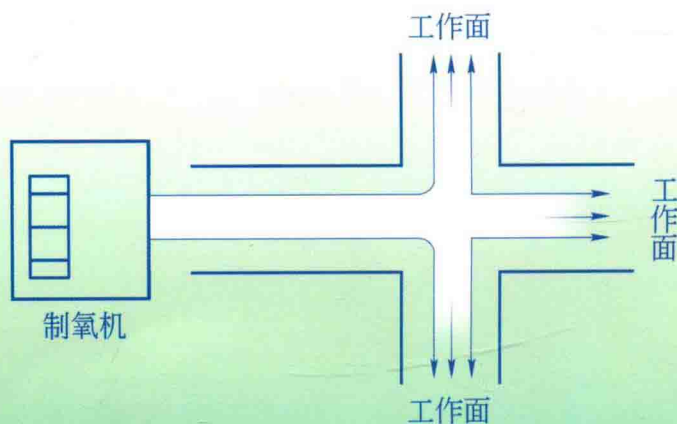


矿井大气环境治理及 地热资源的开发利用

KUANGJING DAQI HUANJING ZHILI JI DIRE ZIYUAN DE KAIFA LIYONG

张永亮 蔡嗣经 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

矿井大气环境治理及 地热资源的开发利用

张永亮 蔡嗣经 著



北 京
冶金工业出版社
2015

内 容 简 介

本书内容分为9章,主要以金属矿山深井大气环境和地热资源有效利用为研究对象,以深井恶劣工作环境的危害为研究切入点,通过理论分析、实验、计算机模拟等研究方式,介绍了金属矿山深井开采即将面临的大气环境问题以及治理方法,包括采用通风除湿降温方法和静电除尘方法治理,提出了合理利用矿山地热资源理念,并通过实验论证了以地热能促进生物质能的可行性。

本书可供矿山安全、环保、工程规划等领域的科技人员、管理人员阅读,也可供矿业工程、安全科学与工程、环境科学与工程等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井大气环境治理及地热资源的开发利用 / 张永亮, 蔡嗣经
著. —北京: 冶金工业出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-5024-6890-3

I. ①矿… II. ①张… ②蔡… III. ①矿山环境—环境管理—
研究 IV. ①X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 047239 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 张 卫 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6890-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 4 月第 1 版, 2015 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.75 印张; 229 千字; 176 页

45.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

随着我国矿产资源的不断开发，浅表矿床储量不断消耗，今后大多数矿山必然转入深部开采，随之而来深井原始岩温不断增高，矿山地下水涌出量也呈上升趋势，矿山井下湿热危害日趋严重。同时，采矿机械化的快速发展，引起了大量难以治理的油烟危害，加之采矿过程中产生的粉尘及有毒有害气体，对矿井工作场所大气环境治理提出了挑战。

矿山深井开采过程中，矿井地下热岩体、渗透出的地热水导致了高温、高湿的井下作业环境，当风温高于 30°C 时，井下工作人员易产生高温中暑、热晕并诱发其他疾病，对职工造成严重的身体伤害，安全生产受到威胁，湿度过高易导致湿疹等职业病。由于井下空气湿度过大，水泵、卷扬、排水管线等设施严重锈蚀，井下湿热问题亟待解决。同时，地下水的流失也导致地质结构发生显著变化，地基承载力减弱，出现地面裂缝、沉降等现象，矿山开采暴露出的地热一方面破坏了矿山生产环境，另一方面又造成大量地热资源和水资源的白白流失，这是矿山工作者一直迫切想要解决的问题。

根据文献记载，国外矿井热害现象研究，最早开始于1740年的法国，人们已经开始对金属矿山的地温进行监测，得出一些有价值资料。我国深井地温的研究始于1949年新中国成立后，20世纪50年代初，煤科院抚顺分院最先开始地温观测，1974年中科院地质所对平顶山矿区的地热问题进行过研究。地热是矿山热害的主要热源，从另一个角度来说，其实热害也是一种能源，是地热能的一部分。矿山热害属于矿山二次资源的范畴，科学合理地实现矿山二次资源利用，即资源的再生和第二次获取过程也是矿山灾害治理的过程。发展低碳经济、减少碳排放量是2010年丹麦哥本哈根气候大会上各国讨论的焦点，地热

资源开发能基本实现碳的零排放,是我国未来重点支持发展的新能源之一。中国作为一个发展中的大国,其社会经济持续快速的发展离不开充足的能源保证,在此背景下,建设节约型社会,加大节能减排的力度,增加可再生能源占社会能源供给的比例,是科技人员应该加大力度深入探讨和努力解决的重点问题。

在矿山,由于地下热水的出现,一方面加重了矿井热害的程度,使治理热水成为这类矿山开采中必不可少的措施和步骤;另一方面,热水又是地热能的典型表现形式。利用水的渗流特性开发地下热能,是美国知名地热学家 White 博士在 20 世纪 60 年代末提出的中低温对流型地热系统的经典模式 (White, 1968)。此后中国、日本、欧洲国家都进行了高温岩体的技术开发。美国 1978 ~ 1986 年在 Fenton Hill 进行了钻井取热实验,英国在 Cornwall Rosemanowes Quarry 进行了地热利用实验,均取得了一定的效果。地热能直接利用的技术性、可靠性、经济性、环境的可接受性已被世界各地的实际利用所证实。

本书作者在大量科研实践中发现,矿山工作者既受井下湿热难题的困扰,又对井下大量流失的热能和淡水资源十分惋惜,鉴于此,课题组调研走访了国内许多矿山,搜集了矿山技术人员及管理人员对井下大气环境治理的意见及矿山地热利用的可行性分析意见,在此基础上进行了初步的理论分析和实验研究,形成本书的主要内容。

本书的主要特色如下:(1) 利用矿井系统本身与地热开发主体工程相似的特点,寓地热开发于矿山开采之中,节省大量开发地热水工程投资,研究深井岩体裂隙水渗流机理,将矿山开采时暴露出的大量热岩、热水加以合理转化利用,同时减少热岩、热水给井下工作带来的高温高湿困扰。(2) 矿山开采过程,往往是遇到热害后再进行治理,此时治理措施常受到已有条件的限制,浪费财力而且效果不甚理想;课题研究建立复杂地质条件下深部开采地温预测模型理论,为深井未开采矿床湿热治理规划提供依据,同时可作为深井地热储量的参考。(3) 提出热害资源化理念,首先将地热资源进行合理利用,地热水热量利用结束后变成低温尾水,分析典型矿山地质条件,将尾水回灌到

地下热储体,做到防止地下水流失造成的地表沉降、地热资源和水资源良性循环,实现矿山灾害治理和二次资源循环利用同步进行。

(4) 静电除尘技术中粉尘之间黏结力和粉尘与收尘极板之间的黏结力如何调节是一个瓶颈问题,本书将矿尘视为带电粒子进行其极化分析和黏结力分析,应用 MATLAB 软件模拟矿尘在静电收尘过程中的受力情况,为有效收尘提供直观依据。

本书在撰写过程中得到了中南大学吴超教授,青岛理工大学王旭春教授、王在泉教授的关心指导,河北联合大学董宪伟副教授和滦南县水务局张永平工程师为本书的素材调研及研究做出了重要贡献,清华大学陈一洲博士,中国矿业大学吴迪博士,青岛理工大学陈喜山教授、撒占友教授、岳丽宏教授、刘杰博士、谭清磊博士、孟娟博士、王春源博士、王玉华博士、研究生吴慧、袁凤丽、李自福等也在课题研究中做了许多工作。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目“金属矿山深井湿热治理及二次资源循环利用一体化研究”(编号:51204100)、中国博士后科学基金特别资助项目“金属矿山地温效应治理井下高温及冻井的节能机理研究”(编号:2014T70658)、山东省科技发展计划项目“山东省金属矿山矿井地热水循环利用关键技术研究”(编号:2014GSF116020)、青岛市科技计划资助项目“胶东半岛金属矿山深部开采地热资源转换利用关键技术研究”(编号:14-2-4-95-jch)等的资助,在此表示衷心的感谢。

最后,还要感谢本书所引用的参考资料的所有作者,感谢编辑出版人员对本书的出版所付出的努力。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

张永亮

2014年11月

目 录

1 矿山井下环境治理技术研究进展	1
1.1 国内外矿井降温技术	1
1.1.1 国外矿井降温技术发展状况	1
1.1.2 国内矿井降温技术发展状况	2
1.2 矿山井下大气环境综述	3
1.2.1 井下湿热产生的原因	3
1.2.2 高温、高湿危害	3
1.2.3 井下粉尘来源及危害	4
1.2.4 治理措施及意义	5
1.3 深井热岩体水渗流及其湿热影响	6
1.3.1 矿山岩石渗流研究现状	6
1.3.2 裂隙渗流对巷道空间的湿热影响	7
1.4 矿山热能利用综述	7
1.4.1 矿山二次资源开发的意义	7
1.4.2 国内外矿山地下热能利用概况	8
1.5 矿山热能利用发展趋势	9
1.6 本章小结	10
2 通风改善矿井环境方法优化	11
2.1 矿井通风网络图论	11
2.1.1 流体网络的基本概念	11
2.1.2 流体网络中的图	12
2.1.3 网络图中的路径	14
2.1.4 通风网络矩阵	14
2.2 通风网络中风流流动的基本规律	15
2.2.1 质量守恒定律	16
2.2.2 能量守恒定律	17
2.2.3 阻力定律	18

2.3 不同结构的风路及其特点	18
2.3.1 串联风路的风流特点	18
2.3.2 并联风路的风流特性	19
2.3.3 角联风路的风流特点	20
2.4 矿井通风网络的特点	21
2.4.1 矿井通风网络的复杂性	21
2.4.2 矿井通风网络的动态性	22
2.4.3 矿井通风网络稳定性的影响因素	22
2.5 矿井通风系统的优化	22
2.5.1 矿井通风系统的阻力调节	23
2.5.2 矿井通风系统的风量调节	24
2.5.3 矿井通风系统的主通风机工况优化	25
2.6 本章小结	26
3 巷道湿热交换及角联网络的模拟	27
3.1 流体动力学基本理论及数学模型	27
3.1.1 流体力学基本模型	27
3.1.2 湍流流动模型	29
3.2 巷道风流湿热交换的数值模拟	30
3.2.1 模型的假设	30
3.2.2 模型的建立	30
3.2.3 边界条件及计算参数的设置	31
3.2.4 模拟结果分析	32
3.3 井筒风流湿热交换的数值模拟	43
3.3.1 模型的假设	43
3.3.2 模型的建立	43
3.3.3 边界条件及计算参数的设置	44
3.3.4 模拟结果分析	44
3.4 角联通风网络数值模拟	52
3.4.1 拟牛顿法及基于 Matlab 编程解算	54
3.4.2 FLUENT 数值模拟	57
3.5 本章小结	60
4 矿井通风系统参数评价研究	62
4.1 基于熵理论的耗散系统评价分析	62

4.1.1 矿井通风系统耗散结构	62
4.1.2 矿井通风系统状态过程演变	64
4.1.3 应用分析	65
4.1.4 评价结论	66
4.2 逼近理想解方法评价	66
4.2.1 基于熵权的 TOPSIS 方法	66
4.2.2 矿井通风系统方案综合评判	68
4.3 本章小结	71
5 矿井工作面增氧技术研究	72
5.1 矿井环境对人体的影响	72
5.1.1 矿井空气对人的影响	72
5.1.2 气候环境对人的影响	72
5.1.3 有毒有害气体对人的影响	73
5.1.4 粉尘对人的影响	73
5.2 矿井增氧量计算	73
5.2.1 矿井新风量	74
5.2.2 矿井新风量氧气消耗量	76
5.2.3 矿工氧气消耗量	77
5.2.4 矿井漏风氧气消耗量	77
5.3 矿井增氧系统设计	78
5.3.1 矿井制氧设计	78
5.3.2 矿井供氧设计	80
5.4 工作面增氧通风模型及数值模拟	81
5.4.1 通风风流中的紊流方程	82
5.4.2 工作面增氧通风模拟	84
5.5 本章小结	97
6 井下粉尘及有害气体治理的理论与实践	98
6.1 井下尘毒来源分析	98
6.1.1 炸药的氧平衡	98
6.1.2 炸药爆炸反应的完全程度	99
6.1.3 周围介质的作用	99
6.2 静电除尘技术	100
6.2.1 静电除尘器粉尘振打	101

6.2.2	粉尘极化能力对黏结力的影响	101
6.2.3	推论	109
6.3	影响粉尘黏结力的各种因素	110
6.3.1	MATLAB 语言演示黏结力变化趋势的直观性	110
6.3.2	小结	121
6.4	矿山尘毒治理实例	121
6.4.1	典型矿山尘毒现状	121
6.4.2	尘毒治理方案选择	122
6.4.3	方案实施前后的数据分析	124
6.4.4	方案实施中的注意事项	125
6.5	本章小结	125
7	岩体裂隙渗流及围岩-风流湿热交换机理研究	127
7.1	岩体渗透率与静应力关系测定	127
7.2	岩体裂隙渗流与应力关系分析	129
7.3	岩体裂隙变形与渗流关系模型的建立	129
7.3.1	流体的存储效应模型	130
7.3.2	裂隙引起的附加应力模型	131
7.3.3	边界条件对孔弹性应力变化的影响	131
7.4	岩体压裂控制研究	132
7.4.1	稳定开裂条件分析	132
7.4.2	裂隙失稳压力分析	133
7.5	热岩裂隙控制模型的建立及其意义	134
7.6	深井湿热参数测定	136
7.6.1	风流参数测试	136
7.6.2	围岩温度测试	137
7.7	围岩壁面湿热散发求解	140
7.7.1	显热计算	140
7.7.2	潜热计算	141
7.8	围岩与风流湿热交换模型的建立	143
7.8.1	温度平衡方程建立	143
7.8.2	湿度平衡方程建立	144
7.8.3	岩壁温度的求解	144
7.8.4	预测模型在矿山中的应用分析	145
7.9	本章小结	147

8 矿山地热阶梯利用研究	148
8.1 矿山深部开采地温预测研究	148
8.1.1 矿井深部温度预测模型建立	148
8.1.2 深部温度推算中的地形校正	152
8.2 我国地热能利用可行性分析	154
8.3 地热分级利用模式	154
8.3.1 典型金矿地热概况	154
8.3.2 矿井热能开发新方法	155
8.3.3 分级利用模式的提出	156
8.4 矿山地热能促进沼气生物质能研究	156
8.4.1 温度对产气量的影响	157
8.4.2 沼气池加温热源分析	157
8.4.3 地热加温沼气池试验	158
8.4.4 加温系统成本效益分析	161
8.5 余水回灌系统实验研究	161
8.5.1 回灌技术原理	162
8.5.2 金属矿区回灌方案设计	162
8.5.3 回灌试验分析	163
8.6 本章小结	165
9 结论及展望	166
9.1 主要研究结论	166
9.2 主要创新点	167
9.3 展望	167
参考文献	168
术语索引	175

1 矿山井下环境治理技术研究进展

随着对矿产资源的不断开发利用及大强度的开采，浅层资源慢慢减少甚至枯竭，我国大部分金属矿山已经开始了深层开采。由于开采深度的增加及热源的放热作用，高温矿井热害现象日益严重，严重威胁井下的安全生产，同时还危害工人的身心健康，并制约矿山劳动生产效率和经济效益的提高。在继顶板、瓦斯、水、火及粉尘五大矿井灾害之后，热害已经成为第六大矿井灾害，因此严重影响高深矿井安全生产的问题亟待解决。

1.1 国内外矿井降温技术

1.1.1 国外矿井降温技术发展状况

国外对高温矿井现象的研究，最早是 1740 年法国对贝尔福（Belfort）周围的矿山做的地温测量工作。矿井降温理论的研究始于 20 世纪 20 年代。分析现有资料，国外在矿井降温理论上的发展大体分为三个时期：雏形期、发展期和完整的学科理论体系期^[1-8]（表 1-1）。

表 1-1 国外矿井降温理论的发展进程

雏形期	20 世纪 20 ~ 50 年代。这一时期由于世界各国矿山的开采规模都较小，矿山热害问题并不是很突出，矿井降温理论的研究发展比较缓慢。研究成果分散于各种文献中，且只有个别的有效成果。其中，具有代表性的有：1923 年德国 Heist Drekopt 在假设巷道表面温度的变化是周期性的条件下，得出了内部岩石的温度变化也是周期性的，提出了围岩调热圈的概念等；1939 ~ 1941 年，南非 Biccand Jappe 前后发表了四篇有关“深井风温预测”的文章，提出了计算风温预测的基本思想；1951 年英国 Van Heerden、日本平松等根据平巷围岩和风流之间的对流换热，得出了围岩调热圈温度场的理论解（在理想情况下）；1953 年苏联学者提出了比较精确的不稳定换热系数及调热圈温度场的算法；1955 年平松又提出了计算围岩和风流之间不稳定换热时的风温的近似式，以上研究成果为现代矿井降温技术的研究奠定了基础
发展期	20 世纪 50 ~ 70 年代。电子计算机的应用使矿井降温理论有了比较大的发展。像 1961 年苏联 Воропаев、1966 年联邦德国 Nottort 等发表的学术论文是用数值计算的方法来论述围岩中调热圈的温度场。这一时期，测试矿井围岩热物理参数的技术得到了初步的应用，如 1964 年联邦德国 Mucke 用圆板状试块做试验，测定了岩石的稳定导热系数。1967 年 Shernat 实地强行加热一段巷道，测定围岩温度，对比实测值和理论值，得出了一些热物理参数。同一年南非 Starfield 等初步探讨了巷道在潮湿条件下的热交换规律，矿井降温理论已朝着实用性的方向迈进

续表 1-1

学科理论 体系期	20 世纪 70 年代中、后期至今。学科理论飞速发展,有些系统的专著相继问世,例如舍尔巴尼的《矿井降温指南》、平松的《通风学》、福斯的《矿井气候》等都较为系统地阐述了矿井降温理论,并且研究的问题已深入到采掘工作面,如 1971 年后联邦德国的 J. Voss 等先后提出了一套计算采掘工作风温的方法;1975 年美国的 J. Meguaid 全面详细地提出了各种矿井热害的治理对策;1977 年保加利亚的 Shcherban 等比较详细地描述了采掘工作面风流温度的计算方法。80 年代以后,学科的研究层次更是达到了一个新水平,论文发表数量猛增,研究成果更加切合实际,譬如日本内野采取差分方法,在巷道形状不同、岩性条件不同的情况下求出了调热圈的温度场,且描述了风温在变化的入风温度、水影响情况下的算法;南非的 Starfield 等提出了更精确合理的不稳定换热系数的算法;日本的天野等研制出了比较完善的矿井降温设计程序的模型;南非的 Richard Gundersen 制作了迄今为止较为理想的矿山通风降温模拟软件(VUMA)等
-------------	---

1.1.2 国内矿井降温技术发展状况

我国深井热害的研究起步较晚,直到 20 世纪 50 年代初才有个别局(矿)开始对矿区进行测温,由于当时的矿山热害尚不突出,因此地温观测并没有引起足够重视。直到 60 年代末,我国在矿山地热研究方面基本上还是一项空白。

70 年代以后,一些矿区相继出现了不同程度的地热问题,并引起了相关部门的重视,部分局(矿)、地质公司、高校和研究所开展了地热和降温技术的研究。70 年代初,开滦矿务局曾邀请地质所地热组帮助观测地温,这是我国正式研究矿山地热的开始。

80 年代以后,我国深井热害研究取得了实质性的进展,主要体现在很多学者发表了有关热害的著作。其中有代表性的如黄翰文的《矿井风温预测的探讨》、杨德源的《矿井风流热交换》、岑衍强等的《矿内热环境工程》、余恒昌的《矿山地热与热害治理》、严荣林等的《矿井空调技术》、王隆平的《矿井降温与制冷》等。至此,我国也形成了较为完整的深井降温学科理论体系。

进入 21 世纪后,又有一些新的书籍出版,如杨德源主编的《矿井热环境及其控制》、胡汉华主编的《深热矿井环境控制》、王朝阳主编的《低热损冷源介质输送技术及高效热交换技术》、辛嵩主编的《矿井热害防治》等。

以上研究成果丰富和发展了矿井降温系统的体系理论,可以总结成如下几点:

(1) 创立了矿井热交换的体系理论。整个矿井生产系统构成一个开口的热力系统,它的热交换特征可以用矿井热交换理论来描述,譬如风流流过井巷进行的传热传质交换规律;风流和围岩之间进行不稳定换热特征;矿物、硫化化合物和有机物进行氧化时的放热特征;矿井地下涌出水吸热、放热及散热、散湿的特征;井巷中运送的矿物质及矸石的放热等。经过了众多的实地测量分析及理论试

验以后,大体上掌握了以上特征规律,创立了矿井热交换的体系理论。

(2) 建成了矿山地热学体系理论。矿区地热场分布特点,岩石的热物理参数及围岩的传导热规则是矿山地热学研究的主要内容。大体上掌握了围岩的传导热规则和岩石的热物理参数;矿内岩石调热圈温度场的变化规律;最上层地壳温度场的特性以及影响它的因素;地热学和矿井水文地质学之间的关联等。

(3) 为矿井制冷降温系统奠定了热力学基础。制冷、输冷、传冷以及排热是矿井制冷降温系统的四大组成部分,形成了一个热力系统。各个系统构成元素的水力学特征、热力学特征以及这些元素的优化组合技术等都已比较明确,可以更加积极地探索矿井降温技术。

1.2 矿山井下大气环境综述

1.2.1 井下湿热产生的原因

造成金属矿山井下高温高湿环境的原因很多,综合分析其主要原因,有六个方面,见表1-2。

表1-2 高温高湿影响因素

序号	湿热因素	分 析
1	高温岩层散热	地球内部的热量通过井巷岩壁以一定的强度向矿井空气散热
2	热水散热	地下热水易于流动,且热容量大,是良好的载体,热水涌入矿井巷道中,直接加热风流
3	矿井机电 设备散热	机电设备在井下运转时,产生的电流热、机械摩擦热及内燃设备的燃烧散热,使矿井气温升高
4	空气压缩热	空气沿进风井下降和压入式通风使空气压缩转化的热量散发在矿井内,使井下气温升高
5	化学反应放热	矿井内各种氧化反应或其他化学反应放热,使矿井温度升高
6	其他热源放热	人体散热等

对于上述六种散热因素,其中高温岩层散热和热水散热所占比例较大,对我国胶东地区金属矿山的调查表明,井下热源比例构成分别为热水散热占58.7%,高温岩层散热占22.6%,其他热源散热占18.7%。

1.2.2 高温、高湿危害

高温、高湿危害是矿山生产向深部发展必须面对的问题,湿热矿井给矿山安全带来的危害主要有以下三点。

1.2.2.1 对人体的危害

井下作业本身属于高强度作业,作业人员在湿热环境中从事较长时间的高强

度作业，由于外界温度、湿度不适宜人体汗液的蒸发散热，体温调节功能将发生障碍，从而导致中暑、热虚脱等疾病。

1.2.2.2 诱发事故，降低劳动效率

高温、高湿环境中，人体内环境平衡遭到破坏，人的中枢神经系统容易失调，从而造成劳动人员感觉疲劳、精神恍惚，大大降低了劳动效率，而这种状态即为事故产生的直接原因之一：人的不安全因素。同时，高温、高湿对井下设施设备具有腐蚀作用，成为事故产生的另一直接原因：物的不安全因素。据前苏联顿涅茨克劳动卫生和职业病研究所的测试资料：在风速 2m/s、相对湿度 90% 的条件下，气温为 25℃ 时，劳动生产率为 90%；气温为 30℃ 时，劳动生产率为 72%；气温为 32℃ 时，劳动生产率为 62%。相关资料还表明，如果矿井内的空气温度每超过标准（26℃）1℃，作业人员的劳动效率就降低 6%~8%。国内矿山就有这样的例子：新汶矿业集团孙村矿，在 -800m 的开采掘进中曾因为工作面温度过高而被迫停产 3 个月；徐矿集团三河尖矿在开采掘进中因工作面温度过高导致采掘劳动生产效率降低 20%~23%，甚至降低 40%~50%。

1.2.2.3 造成恶劣的矿井气候

高温岩层和热水的散热造成了井下恶劣的气候环境，而且湿热加剧矿石氧化，消耗了井下氧气的含量，增加了有害气体，高温、高湿造成了这种影响井下气候的恶性循环。《煤矿安全规程》规定：在矿井生产中，采掘工作面的气温不能高过 26℃；开采掘进面上气温高过 30℃ 时，必须停止工作。作业人员在高温、高湿的环境中，神经中枢系统遭受压抑，注意力不集中，动作的标准性和协调性下降。而且作业人员极易昏昏沉沉，犯困、暴躁，加之井下作业是高强度的体力劳动，故作业人员的警觉性会下降，致使发生事故的概率上升。

日本有关统计资料显示，工作面温度为 30~40℃ 时的事故率，是工作面温度低于 30℃ 时的事故率的 4.6 倍；南非有关资料表明，当井下作业点处的干球气温升到 30℃ 时就会出现因中暑而死亡的事故。相关资料统计的南非金矿的矿井内空气温度和事故发生概率之间的关系如表 1-3 所示。

表 1-3 矿井内气温和事故率之间的关系				
作业点气温/℃	27	29	31	32
千人工伤频次/次	0	150	300	450

矿井热害问题日益严重，如果不能适时地解决将会给矿井生产造成很多困难，也难以适应今后矿山生产所面临的严峻形势。所以，对矿山巷道湿热交换动态数值模拟的研究就具有极为重要的现实意义。

1.2.3 井下粉尘来源及危害

井下污风主要是指采切工程施工产生的粉尘。这种风源污染一般由于没有形

成专用回风巷道，炮烟和粉尘在高压风和自然扩散的作用下，污风流回到上下中段的主要运输巷，在运输巷内随新鲜风一起流动，形成污染源。

在炸药爆炸生成的炮烟中，有毒气体的主要成分为一氧化碳和氮氧化物。如果炸药中含有硫或硫化物时，爆炸过程中，还会生成硫化氢和亚硫酸酐等有毒气体。这些气体的危害性极大，人体吸入一定量的有毒气体后，轻则引起头痛、心悸、呕吐、四肢无力、昏厥，重则使人发生痉挛、呼吸停顿，甚至死亡。

炮烟中有毒气体的毒性用空气中的危险浓度来表示（表 1-4）。

表 1-4 有毒气体空气中的危险浓度

有毒气体	各种气体危险浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	吸入数小时将引起轻微中毒	吸入 1h 后将引起严重中毒	吸入 0.5 ~ 1h 就会有致命危险	吸入数分钟会死亡
一氧化碳	0.1 ~ 0.2	1.5 ~ 1.6	1.6 ~ 2.3	5
氧化氮	0.07 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 1.0	1.5
硫化氢	0.01 ~ 0.2	0.25 ~ 0.4	0.5 ~ 1.0	1.2
亚硫酸酐	0.025	0.06 ~ 0.26	1.0 ~ 1.05	

由表 1-4 可看出，浓度越高，气体毒性越大。另外，有毒气体不仅对人体有害，而且某些有毒气体具有催爆作用（如氧化氮）或引起二次火焰（如一氧化碳），易造成灾难性事故。因此对井巷掘进爆破过程中的有毒气体，必须采取有效的防治措施，以防止安全事故的发生。

炮烟中的有毒气体含量与炸药的化学组分、氧平衡、药卷物理特性（密度、直径和外皮形式）、工作地点的条件（温度、湿度、岩石种类）以及放炮技术（装药长度、炮泥堵塞）有关。但炸药一旦制成，其生成的有毒气体量就是一个定值，主要取决于炸药自身组分的氧平衡、爆炸反应的完全性。

综上所述，采矿过程中产生的粉尘和有毒有害气体对人体、设备、工作环境及工作效率都会产生巨大的破坏作用，所以合理有效地消除矿中粉尘和有毒有害气体已经成为矿山必须完成的工作。

1.2.4 治理措施及意义

深井湿热问题是必须面对和解决的，矿井通风是目前矿井降温的基础。完备的通风设计涉及空气流体力学、地热学、制冷技术等知识领域。我国学者已在深井湿热治理方面做了大量的研究工作，并应用于实践工程当中，针对矿山不同情况，有效的治理措施也各不相同。综合起来，目前常见的治理措施有四种（表 1-5）。

表 1-5 深井湿热治理措施

序 号	治理措施	分 析
1	普通降温	控制热源散热、改进通风方法、利用天然冷水降温、冰块降温
2	人工制冷	地面制冷并冷却矿井总风流、地面制冷井下分散冷却空气、井下制冷地面排热、联合制冷空气冷却系统
3	隔热技术	冷、热管道的隔热、风筒隔热
4	通风安全信息系统	矿山通风安全信息管理提供了集成的数据环境和可视化的分析平台

关于地表热舒适性的研究，国内外学者已经取得较多研究成果，但矿山深部开采所面临的湿热环境尚处于初步研究阶段，结合不同矿山深部高温开采的具体情况，应加强对深井湿热治理的研究，将井下环境控制在人体热舒适性范围以内。

1.3 深井热岩体水渗流及其湿热影响

1.3.1 矿山岩石渗流研究现状

处于高温环境中岩体，如果岩石组成成分不同，岩体内部将会有裂隙产生并进一步扩展，从而导致岩体的渗透率等物理性质也随之改变，这就是岩体热开裂现象。

蕴藏在岩体内的地下热水，只有在岩体裂隙发达的情况下，才能更好地被提取和加以利用，所以岩体热开裂也成为地热开发研究人员的重点研究内容^[9,10]，岩体热开裂有自然开裂和人工开裂两种，从单纯的地热开发角度来说，岩体热开裂无疑是一种有利因素，可以提高地热产能，但对于深井开采情况下的热岩体，围岩岩体热开裂将会减弱岩体稳固性，造成冒顶片帮的危险，是一个不利因素。本书在岩体热开裂研究进展的基础上，研究有关岩体热开裂模型在矿山地下热能工程方面的应用前景。

受各种条件的限制，国内外将岩体热开裂应用于地热能开发中的研究尚未大量应用于实践，还处于实验阶段。深井开采中，既要利用岩体热开裂对地热水收集的积极作用，又要保证围岩的稳固性，应解决以下两个难点问题：

(1) 不同性质的岩石，施加的人工外力应能控制岩体内部裂隙网络扩展模式和渗透率。

(2) 人工压裂岩体的同时，要保证岩体结构的稳定性和安全性。

以提高岩体内裂隙水收集为目的，针对岩体裂隙渗透率已有相当的试验研究。如 Legrand^[11] 建立毛细管模型，得出岩体渗流时每个模型之间的结构参数、Reynolds 数、摩擦因子的关系式。Kogure, Keiji 在不同水力梯度下对破碎岩体进行渗透试验，得出了临界水力梯度关于破碎岩体有效粒径的经验公式。Engelhardt^[12] 通过不同岩体的水力-温度试验，得到不同岩体混合物的热导率、