

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与
工程研究著作 **丛书**



深部岩石热力学及 热控技术

◎何满潮 郭平业 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

深部岩石热力学及热控技术

何满潮 郭平业 著

国家重点研发计划重点专项(2016YFC0600900)
国家自然科学基金重点项目(51134005)
国家基础研究计划(973计划)项目(2006CB202206)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部介绍矿井高温热害及次生灾害研究控制的专著。全书共10章,第1章和第2章介绍矿井高温热害研究现状及煤田地温场分布特征;第3~6章以热力学为基础,介绍深部岩石在高温高湿环境作用下的热力学效应,开展高温热害控制技术研究,包括冷负荷的计算到热控技术分类、评价,以及适合中国煤矿特色的热控技术 HEMS 系统的研发;第7~10章介绍不同的冷源条件下具体应用工程案例。

本书可作为学习深部岩石热力学的参考用书,要求读者有一定的热力学基础。本书不仅适合作为岩土工程、地下工程等工科专业本科高年级及研究生灵活掌握深部岩石热力学及热控技术的参考书,而且还可以作为热害控制工程现场的技术人员及相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

深部岩石热力学及热控技术/何满潮,郭平业著. —北京:科学出版社, 2017. 2

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-051801-9

I. ①深… II. ①何…②郭… III. ①煤矿开采-岩石力学-热力学-研究
②煤矿开采-热控制-研究 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 029829 号

责任编辑:刘宝莉 张晓娟 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年2月第一次印刷 印张:18

字数:363 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭 何满潮

副主编: 康红普 李术才 潘一山 殷跃平 周创兵

秘书长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	陈卫忠	陈云敏	陈志龙
邓建辉	杜时贵	杜修力	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙灵	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	蒋宇静	焦玉勇	金丰年	景海河
鞠 杨	康红普	李 宁	李 晓	李海波
李建林	李世海	李术才	李夕兵	李小春
李新平	廖红建	刘宝莉	刘大安	刘汉东
刘汉龙	刘泉声	吕爱钟	潘一山	戚承志
任辉启	余诗刚	盛 谦	施 斌	宋胜武
谭卓英	唐春安	汪小刚	王 驹	王 媛
王金安	王明洋	王旭东	王学潮	王义峰
王芝银	邬爱清	谢富仁	谢雄耀	徐卫亚
薛 强	杨 强	杨更社	杨光华	殷跃平
岳中琦	张金良	张强勇	赵 文	赵阳升
郑 宏	郑炳旭	周创兵	朱合华	朱万成

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

我国一次能源的主体是煤炭,随着开采强度的加大,浅部资源越来越少,深部煤炭资源成为我国未来主体能源的主要保障。随着开采深度的加深,岩温升高,高温热害问题不可必免。高温热害不仅影响工人身心健康,使其劳动力下降,而且还会诱发深部工程岩体塌方事故和瓦斯爆炸事故,对矿井安全造成巨大威胁。目前,矿井高温热害已经成为继煤矿顶板、瓦斯、水、火、粉尘五大灾害之后的第六大灾害,但其危害程度超过其他五大灾害。

近年来,国内外学者针对围岩与风流的传热机理、工作面温度场分布、高温热害防治技术等方面开展了大量的研究工作,取得了丰富的成果。但是在深部工程中,在温度场、应力场和渗流场的耦合作用下,各种灾害相互耦合作用,机理十分复杂,需要系统地开展深部高温温度场作用下各种灾害致灾机理及防治技术。为此,深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(北京)在国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项“煤矿深井建设与提升基础理论及关键技术”(项目编号:2016YFC0600900)、国家自然科学基金重点项目“深井热害防治与矿井热能利用”(项目编号:51134005)、国家基础研究计划(973 计划)项目“深部煤岩体温度场特征及热害防治对策”(项目编号:2006CB202206)的资助下,系统开展高温环境下岩石物理力学性质变化和成灾机理以及灾害防治技术,本书主要内容为以上研究成果。

本书主要围绕煤矿高温热害及次生灾害开展研究,首先通过我国地温场资料分析总结我国煤田主要地温场纵向和横向分布特征,然后通过试验分析深部岩石在高温高湿环境作用下的热力学效应,揭示深部岩石高温软化和吸附瓦斯逸出效应,在此基础上,开展高温热害控制技术研究,从冷负荷的计算到热控技术分类、评价,再到适合中国煤矿特色的热控技术研发以及现场试验结果分析,以期为我国矿井热害控制提供科学依据和理论指导。

全书共 10 章,第 1 章介绍矿井高温热害的现状和研究意义,以及该领域的国内外动态和发展趋势;第 2 章分析总结我国主要煤田地温场纵向和横向分布特征;第 3 章通过自主研发的试验设备研究深部岩石在高温高湿作用下的热力学效应;第 4 章主要针对矿井冷负荷计算的复杂性和不准确性提出反分析计算方法;第 5 章主要介绍矿井降温系统的构成以及现有降温技术和评价指标体系;第 6 章主要介绍 HEMS 降温系统原理及其关键技术;第 7~10 章为不同冷源条件下的具体应用工程案例。

另外,本书的研究成果主要参与人员为深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(北京)热害防治与热能利用研究团队,主要成员如下:李启民、徐敏、杨生彬、张毅、郭平业、曹秀玲、王春光、王晓蕾、陈学谦、韩巧云、蒋正君、孟丽、田景、齐平、杨清、朱艳艳、闫玉彪、陈晨、吴军银、刘达、朱国龙、张鹤、庞坤亮、刘宇卿、庞冬阳、秦新展等。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

何满潮
2016年10月28日于北京

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高温热害的普遍性	1
1.2 高温热害的严重性	2
1.2.1 高温热害与人身健康	2
1.2.2 高温热害与劳动效率	3
1.2.3 高温热害与瓦斯事故	4
1.2.4 高温热害与塌方事故	5
1.3 与热害相关的法律法规	6
1.4 高温热害研究现状	7
1.4.1 高温热害成灾机理研究现状	7
1.4.2 矿内热环境评价研究现状	9
1.4.3 矿井热害治理技术研究现状	10
1.5 本书主要内容	12
参考文献	12
第 2 章 我国煤矿的地温场特征	18
2.1 我国煤矿地温场纵向分布特征	18
2.1.1 线性模式	18
2.1.2 非线性模式	18
2.1.3 异常模式	20
2.2 我国煤矿地温场横向分布特征	21
2.2.1 地温梯度横向分布特征	22
2.2.2 -1000m 深地温场横向特征	24
2.2.3 -1250m 深地温场横向特征	25
2.2.4 -1500m 深地温场横向特征	26

2.2.5	—2000m 深地温场横向特征	27
2.3	我国主要热害矿井分布特征	28
	参考文献	31
第3章	深部岩石热力学效应	32
3.1	深部岩石热效应试验系统	32
3.1.1	系统结构	32
3.1.2	系统设计原理	32
3.2	高温软化效应	33
3.2.1	均值岩石高温软化效应	33
3.2.2	静荷载作用下温度-结构层理耦合效应	35
3.2.3	循环荷载作用下温度-结构层理耦合效应	48
3.3	高温吸附气体逸出效应	66
3.3.1	温度-吸附气体逸出效应	66
3.3.2	T-P 耦合吸附气体逸出效应	68
	参考文献	73
第4章	热害控制冷负荷计算方法	74
4.1	深部围岩导热过程分析	74
4.1.1	热传导微分方程	75
4.1.2	对流传热微分方程	76
4.1.3	辐射传热微分方程	77
4.2	矿井降温冷负荷传统算法	78
4.2.1	围岩散热	78
4.2.2	热水的散热	80
4.2.3	氧化放热	81
4.2.4	压缩放热	81
4.2.5	机电设备散热	82
4.2.6	采落矿岩的冷却散热量	82
4.2.7	采落矿岩在运输过程中的散热	83
4.2.8	人体散热	83
4.3	矿井降温冷负荷计算反分析法	83
4.3.1	反分析算法原理	84

4.3.2	反分析算法的推导思路	84
4.3.3	反分析算法的公式推导及其参数确定	85
4.3.4	工作面热荷载反分析计算	88
4.3.5	制冷工作站冷负荷计算	89
4.3.6	反分析算法计算程序设计	89
	参考文献	90
第 5 章	矿井降温系统的构成、分类和评价	91
5.1	矿井降温系统的构成	91
5.2	矿井降温系统的分类	92
5.2.1	压缩空气制冷降温系统	92
5.2.2	冰制冷降温系统	93
5.2.3	地面集中制冷降温系统	93
5.2.4	地面排热井下集中降温系统	94
5.2.5	回风排热井下集中降温系统	94
5.2.6	地面热电联产制冷降温系统	95
5.2.7	矿井涌水为冷源的降温系统	95
5.3	矿井降温系统有效性评价方法	96
5.3.1	降温系统合格指标	96
5.3.2	降温有效性评价指标体系	98
5.3.3	除湿有效性评价指标体系	98
5.4	矿井降温系统设计步序	100
	参考文献	100
第 6 章	HEMS 热害控制模式及技术	102
6.1	HEMS 介绍	102
6.2	HEMS 热控模式	104
6.2.1	矿井涌水丰富型	104
6.2.2	矿井涌水适中型	105
6.2.3	矿井涌水冷源缺乏型 I	106
6.2.4	矿井涌水冷源缺乏型 II	107
6.3	HEMS 关键技术	108
6.3.1	“三防”换热技术	108

6.3.2	采掘工作面全风降温技术	111
6.3.3	高差循环冷源获取技术	112
6.3.4	水平循环冷源技术原理	113
6.3.5	模块化组装移动式降温技术	113
6.3.6	HEMS-III 热能利用技术	114
6.3.7	循环冷(热)源利用技术	115
6.3.8	地热异常利用技术	115
6.3.9	井口防冻供热技术	116
6.3.10	地面洗浴供热技术	118
6.3.11	工业广场建筑物空调技术	119
6.4	热控系统自动化监控技术	119
6.4.1	现场数据采集技术	119
6.4.2	现场数据传输技术	119
6.4.3	现场数据接收分析技术	120
6.4.4	工程效果演示技术	120
	参考文献	121
第7章	现场试验 I ——张双楼煤矿	122
7.1	热害特征及冷源分析	122
7.1.1	热害特征	122
7.1.2	冷源分析	125
7.2	热害控制方案	127
7.2.1	系统工艺设计	127
7.2.2	冷源工程设计	129
7.2.3	高效制冷系统设计	130
7.2.4	全风降温系统设计	131
7.3	热能利用方案	132
7.3.1	深井热能梯级开发利用系统	132
7.3.2	井口防冻系统	133
7.3.3	工人洗浴系统	144
7.3.4	自动控制系统	144
7.4	现场试验参数分析	146

7.5 效果评价	157
7.5.1 热害治理效果	157
7.5.2 热能利用效果	158
参考文献	163
第8章 现场试验Ⅱ——三河尖煤矿	164
8.1 热害特征及冷源分析	164
8.1.1 热害特征	164
8.1.2 冷源分析	166
8.2 热害治理方案设计	167
8.3 现场试验参数分析	169
8.4 热力平衡参数分析	176
8.4.1 运行参数测试	176
8.4.2 系统热力平衡参数分析	176
8.4.3 工作面降温效果分析	180
8.5 降温系统热排放对生态环境影响评估	182
8.5.1 热水排放对河流生态影响的分析	182
8.5.2 数学模型	184
8.5.3 物理模型	185
8.5.4 结果分析	186
参考文献	194
第9章 现场试验Ⅲ——夹河煤矿	196
9.1 热害特征及冷源分析	196
9.1.1 热害特征	196
9.1.2 冷源分析	199
9.2 热害治理方案设计	200
9.3 高差冷却效果分析方法	203
9.3.1 计算模型的建立	203
9.3.2 求解模型的建立	206
9.3.3 边界条件	208
9.3.4 计算参数的确定	209
9.3.5 数值计算方法	209

9.4 冷却效果分析	209
9.4.1 700m 管道冷却效果分析	209
9.4.2 1200m 水沟冷却效果分析	216
9.4.3 1900m 管道冷却效果分析	227
9.5 效果评价	231
9.5.1 系统运行状态分析	231
9.5.2 生产效果	234
参考文献	237
第 10 章 现场试验Ⅳ——张小楼矿	238
10.1 热害特征及冷源分析	238
10.1.1 热害特征	238
10.1.2 冷源分析	244
10.2 热害治理方案	245
10.2.1 系统工艺总设计	245
10.2.2 回风冷源计算方法	246
10.3 现场试验参数分析	251
10.4 效果评价	269
参考文献	270

第 1 章 绪 论

我国一次能源的主体是煤炭,随着开采强度的加大,浅部资源越来越少,深部煤炭资源成为我国未来主体能源的主要保障。随着开采深度的加深,岩温逐渐升高,高温热害问题不可避免。高温热害不仅影响工人身心健康,使其劳动力下降。更为严重的是,通过科学研究发现,高温热害还会诱发深部工程岩体塌方事故和瓦斯爆炸事故,对矿井安全造成了巨大威胁。因此,开展深部岩体热力学及热控技术方面的研究迫在眉睫。

1.1 高温热害的普遍性

《全国煤炭资源预测和评价(第三次全国煤田预测)研究报告》表明,我国已探明煤炭资源总量为 5.57 万亿 t,其中,埋深—1000m 以内的煤炭资源总量为 2.86 万亿 t,已采储量约为 70%。今后我国的主体能源后备储量将主要是埋深为—2000~—1000m 的深部煤炭资源(见图 1.1)^[1]。

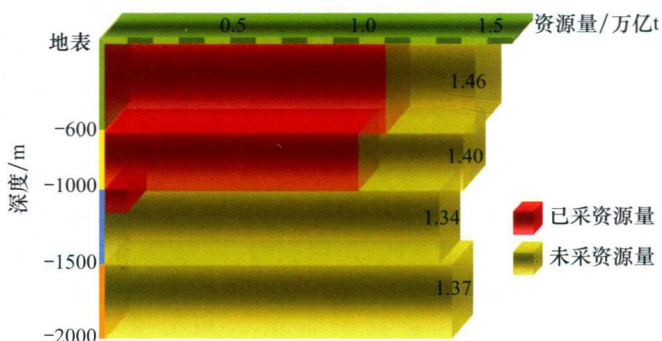


图 1.1 我国煤炭资源采出量按深度分布情况^[1]

在深部高地应力、高渗流场和高温度场的耦合作用及强烈开采扰动因素影响下,深部煤炭开采工程灾害显著加剧,尤其是煤与瓦斯突出、矿井火灾、顶板塌方、矿井水害、冲击地压、高温热害六大灾害严重制约深部煤炭资源开采,其中,高温热害则是深部矿井普遍面临的持续性灾害^[2,3]。

我国中东部大部分矿井已经面临高温热害,目前已有 47 对矿井开采深度超过—1000m,该 47 对矿井生产都已经严重受高温热害影响,例如,我国的两淮矿区、

徐州矿区、鲁西南矿区等所有矿井都面临高温热害。而且,近年来随着开采强度的加大,我国中西部矿井也出现高温热害,如义马矿区等。据不完全统计,我国已有超过 100 对矿井工作面温度高达 30~40℃。

1.2 高温热害的严重性

1.2.1 高温热害与人身健康

人在湿热环境下劳动,短时间内可能只有不舒适感,长期以后,就可能发生某些疾病。人们长期在高温环境中作业,高温可能使人产生一系列生理功能的改变,根据医学研究成果,井下不同温度的热环境对人的危害如下:

30℃——汗腺开始启动,在这种温度下工作 2~3h,人体“空调”——汗腺就开始启动,通过微微渗汗散发积蓄的体温。

31℃——散热机制立刻反应,此时浅静脉扩张,皮肤微微出汗,心跳加快,血液循环加速,对于井下工作的工人而言,应采取降温措施,同时应限制体弱者在井下工作。

32℃——人体开始自我冷却,一级报警,在这个温度下,人体通过蒸发汗液散发热量进行“自我冷却”,每天大约排出 5L 汗液,可带走钠 15g、维生素 C50mg 及其他矿物质,血容量也随之减少。此时,一定要注意补充含盐、维生素及矿物质的饮料,以防电解质紊乱,同时需要采取一定的降温措施。

33℃——多个脏器参与降温,二级报警,一旦气温升至 33℃,人体通过汗腺排汗已非常困难,且难以保证正常体温,不仅肺部急促“喘气”以呼出热量,就连心脏也要加快速度,输出比平时多 60% 的血液至体表,参与散热。这时降温措施、心脏药物保健及治疗不可有丝毫松懈。

34℃——汗腺濒临衰竭,三级报警,汗腺疲于奔命地工作,已经无能为力并趋于衰竭,这时很容易出现心脏病猝发的危险。

35℃——开始影响大脑正常运转,四级报警,高温直逼生命中枢,大脑已经顾此失彼,以致头昏眼花、站立不稳。人必须立刻移至阴凉地方或借助空调降温。

36℃——危及生命的休克温度,排汗、呼吸、血液循环等一切能参与降温的器官在开足马力后已接近强弩之末。此时生命临危,刻不容缓地需要救护措施。

井下湿度达 95%~100% 的高湿环境给工人身体带来极大的危害,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,使人在高湿环境下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,会使人患上风湿病、皮肤病、心脏病及泌尿系统和消化系统等方面的疾病,还会使人心绪不宁、心情浮躁,诱发精神方面的疾病,严重影响矿工的身心健康^[4~6]。图 1.2 为长期在高温高湿环境下作业的工人的皮肤溃烂情况。