

矿山地热与热害治理

主编 余恒昌
副主编 邓孝 陈碧琬

煤炭工业出版社

矿 山 地 热 与 热 害 治 理

主 编 余恒昌

副主编 邓 孝 陈碧琬

编 写

序 言	余恒昌	第八、十章	邓 孝 余恒昌
绪 论	余恒昌 陈碧琬	第九章	余恒昌 邓 孝
第一、三章	陈墨香	第十一章	熊亮萍 邓 孝 余恒昌
第二章	汪集旻 陈墨香	第十二章	邓 孝 王 钧
第四章	熊亮萍	第十三至十七章	陈碧琬
第五章	邓 孝 樊志成	第十八、十九、二十二章	杨德源
第六章	杨淑贞 沈显杰	第二十、二十一章	常业钧
第七章	樊志成		

煤 炭 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书由两篇组成。第一篇,系统介绍矿山地热的有关基础理论知识,高温矿井形成的地质条件、矿山地温类型、矿山地热勘探及研究的方法和手段,国内若干热矿山的研究实例以及矿山地热能利用方面的知识;第二篇,系统介绍了有关矿井空调的热力学基础理论知识、井下热环境对人体的影响、矿井热源及其与井下空气的热交换计算和矿井空气热状态的预测,矿井降温的技术和装备,热矿山降温工程的设计等。本书可作为从事矿产(煤田)资源勘探、矿井地质人员和矿井降温工作现场科技人员的参考书,也可作为与上述专业有关的科研、设计人员和高等院校师生的参考书。

责任编辑:罗 醒 民

矿 山 地 热 与 热 害 治 理

主 编 余恒昌

副主编 邓 孝 陈碧琬

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

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 $787 \times 1092\text{mm}^{1/16}$ 印张 $25^{3/4}$

字数614千字 印数1—1,255

1991年7月第1版 1991年7月第1次印刷

ISBN 7-5020-0530-7/TD·486

书号 3307 定价 10.90元



序 言

随着矿井开采深度的增加,地温不断增高,矿山热害日趋严重。1978年,煤炭部地质局决定在煤炭资源勘探中普遍开展地温测量工作,同时组织中国科学院地质研究所等单位编写了《矿山地热概论》一书(以下简称《概论》),1981年元月由煤炭工业出版社出版。此次改写仍以《概论》为基础,但补充了大量近年来研究的新成果,书名改为《矿山地热与热害治理》。

《概论》原是一本煤田地热地质研究方面的专著,主要介绍矿山地热研究的基础理论知识、测试手段和研究方法。对降温技术仅用第十三、十四两章作了概略介绍,目的是让矿山地热研究人员了解自己所提供的资料被利用的情况。这次改写由煤炭科学研究总院抚顺分院的专家将其扩大为第二篇矿井热害的治理(含十章),从而使本书成为全面系统阐述热矿山探采技术的专门读物。

本书第一篇为矿山地热部分,含12章,其中一至七章主要介绍与研究矿山地热有关的基础理论知识、测试方法和手段;八至十二章,偏重于应用的实际问题、工作方法和研究实例。第二篇,主要介绍矿井热害、热害的治理技术和有关的基础理论以及国内外的一些研究成果。

本书所讨论的问题,取材和选用的实例,不仅仅局限于煤矿。因此,对于其他矿山或地下工程的地热地质条件研究和热害的治理也有参考价值。

第一篇的内容与《概论》相比,章节顺序有较大的调整、压缩、更新和增补。原第一章绪论完全改写放在卷首;第十三、十四章取消,扩充改写为第二篇;原第二、四、九章压缩为第二章,新增了第七、九两章的内容。第七章水化学方法在矿区热水研究中的应用,主要介绍国内矿山地热研究中已涉及的部分,目的在于使读者了解,水化学方法作为研究矿山热水的手段之一,其作用是不容忽视的。第九章基建和生产矿井的地热工作的部分内容是从《概论》第七章中分离出来的,增加了工作方法和研究实例。因为我国的某些老矿区,出现热害的矿井多,又缺少地温资料,目前及近期补充研究的任务重,单列一章是必要的。

第十章矿山地温类型及实例剖析是预定要重点加强需进行补充研究的一章,也是煤炭部技术发展司下达给河南煤炭科学研究所的科研项目。《概论》原有的矿山地热类型划分发表于1978年,现在的分类与其已相隔10年。10年中,国内外的实践使我们对矿山地温类型划分的认识更深入了一步。新分类是由河南煤炭科学研究所和中国科学院地质研究所合作完成的。前此,作者们已积累了一些有典型意义的实例,1986年,又用半年时间到7个省的重点热矿山收集、整理、分析了一些典型资料作为分类的基础,使新的分类比原有分类具有较丰富的基础资料,在理论上也更趋完善。在新的分类中,取消了原分类中的硫化矿物氧化型。虽然硫化矿床在开采中大多伴有严重的热害,但热害主要来自采后的氧化热,除埋藏浅、位于氧化带的矿体呈局部高温异常外,一般未经井巷揭露和遭受氧化的部分并不存在高温异常地温场,在资源勘探中,无从查得高温。所以新分类中不再保留此

型。但本书第二篇的内容，仍可供这类热矿山在治理中参考借鉴。还应指出，本书没有针对硫化矿床开采中应当改善巷道布置和采矿方法减缓矿体氧化过程和缩短氧化时间等方面介绍相应的技术措施，因为这些属于防灭火专业技术问题。同样，在煤矿中，也有煤炭自热和发火引起的巷道空气温升问题，本书亦未予涉及。

第一篇第十一章也是要加强的一章，在矿区地温预测原理、传导型和对流型地温场的预测计算方法方面增加了新的内容。第十二章介绍了矿井地热能、地下热水的利用问题，尽管矿山地热工作者把地热作为矿山热害根源的研究视为自己的主要任务，但在条件具备时，应当力求利用地热能 and 地下热水，将其视为宝贵的天然资源。本章介绍了某些金属矿山利用地热能冬季预热矿井进风防冻的经验和矿井热水利用的有关知识。

本书第二篇含10章，涉及的问题较多，有些问题我国尚未开展类似的研究。如第十五、十六章，比较系统地介绍了国外在矿内热气候对人体影响方面的研究成果及现状，特别是南非金矿对有关问题的大量研究成果，值得我们参考。

南非金矿的矿工大多为有色人种的贫苦劳动者。因此，在研究井下气候对人体的影响时，着重以降低降温费用、获取更多的利润为目的，所以非常重视提高工人对井下恶劣条件的适应和耐受能力。由此可知，他们为矿工创造的劳动环境的舒适程度是不高的。我们能否照搬这些研究成果？笔者认为应从三个方面来考虑：（1）我国是社会主义国家，矿工是企业的主人不是被剥削的对象；（2）我国矿工的体质与欧美白种人和非洲黑种人有差别；（3）当前我国的技术经济发展水平不高、国力有限。因此，应当充分研究国外的成果，结合我国国情，开展自己的研究工作，走自己的路。目前，我国在热矿山的劳动卫生和劳动保护方面尚未开展系统的研究工作。为此本篇中以较大篇幅介绍国外的研究现状，以供有关方面参考。

在热害治理技术方面，煤炭科学研究院抚顺分院（即原抚顺研究所）有较多的研究成果和实践经验。在本书中推荐了较为适用的矿井空气热状态计算方法和治理井下热环境的各种方法，较详细地介绍了人工制冷技术措施的各个方面和技术装备，这些内容都是比较适合我国国情的。

我国在热矿山治理方面的实践经验有限，在新矿井降温设计和矿井空调系统的技术管理方面经验不足，国内已建成的矿井制冷站屈指可数，因此在如何提高制冷设备的可靠程度，提高设备的效率和节约制冷费用等方面尚未形成一整套管理制度和办法，这也是今后应大力加强的领域。

本书包含两个学科，每个学科的内容又涉及许多专门问题，编写的方法是统一安排章节、分工执笔撰写。因此，全书在某些语句上略有重复，各位作者的文字风格也有所不同，虽经编者努力，仍未尽如人意。由于编者水平所限，书中难免有缺点、错误，敬希读者惠予指正。

要特别说明：前煤炭工业部陈炳强副总工程师、技术发展司的领导，以及河南煤炭科学研究所的领导，对本书的编写曾给予大力支持，为编者创造了必要的条件，在此对他们表示衷心的感谢。

一九八八年六月

目 录

序 言	
绪 论	1
第一节 矿山地热研究的现状、趋势和存在问题	2
第二节 矿井降温技术研究的现状、趋势和存在问题	6
第一篇 矿 山 地 热	
第一章 热传递的基本概念	9
第一节 温度、温度场和热	9
第二节 热传导	10
第三节 热对流	12
第四节 热辐射	15
第二章 大地热流及地球的内热	17
第一节 大地热流的基本概念及测试方法	17
第二节 地表热流分布	18
第三节 地球内部热状态	28
第三章 地壳的热状况	36
第一节 地壳的热性质	36
第二节 地壳最上层的温度	41
第三节 影响区域地温场的主要因素	46
第四章 钻孔测温仪器	59
第一节 钻孔测温仪器的类型	59
第二节 几种常用的钻孔测温仪器	61
第三节 频率测温仪与连续测温仪	70
第五章 钻孔温度测量	77
第一节 钻探作业的温度场效应	77
第二节 利用井底温度测量推求平衡温度的方法	82
第三节 钻孔的近似稳态温度曲线	88
第四节 地下水垂直运动的温度场效应	91
第六章 岩石热物理性质测定	94
第一节 岩石热导率测试方法概述	94
第二节 几种常用的岩石热导率测量仪器	96
第三节 岩石比热容、密度测定及岩石放射性生热率的确定方法	102
第四节 岩石热物理性质测试样品的选取与制备	104
第七章 水化学方法在矿区热水研究中的应用	106
第一节 各种成因类型地下水化学成分特征	106
第二节 氢、氧同位素在地下水研究中的应用	110

第三节	水化学用于矿区热水研究实例	115
第八章	煤田地质勘探中的地热工作	122
第一节	煤田勘探中地热工作的任务	122
第二节	测温钻孔的布置	123
第三节	钻孔测温中应注意的问题	125
第四节	测温资料的整理	128
第九章	基建和生产矿井的地热工作	134
第一节	矿井地热工作的特点和任务	134
第二节	基建和生产矿井的测温工作	135
第三节	国内典型热矿井地热地质工作举例	142
第十章	矿山地温类型及实例剖析	146
第一节	概述	146
第二节	矿山地温类型	147
第三节	矿区地温研究实例	148
第十一章	矿区深部地温预测方法及实例	179
第一节	深部地温预测的一般原理	179
第二节	矿区深部地温预测实例	189
第十二章	矿井地热的利用	195
第一节	利用地热预热矿井进风	195
第二节	矿井热水的利用	200
附 录		205
表 1	岩石热导率实测数据综合表	205
表 2	部分岩石密度、比热容测试数据表(平均值)	207
表 3	概率函数表	208
参考文献		209

第二篇 矿井热害及治理

第十三章	矿内湿空气	214
第一节	湿空气的成分	214
第二节	气体状态方程式	214
第三节	湿空气的状态参数	215
第四节	湿球温度与露点温度	220
第五节	湿空气 <i>i-d</i> 图的绘制与应用	222
第十四章	矿内传热学基础	233
第一节	稳定导热	233
第二节	辐射换热	234
第三节	对流放热	235
第四节	总传热系数	239
第五节	湿表面的传热	240
第十五章	人与热环境	242
第一节	人体的热平衡	242

第二节 人体的热调节与热适应	248
第十六章 热环境的评估	255
第一节 热害防治规程	255
第二节 热应力指标	257
第三节 人体热调节模型	263
第四节 热病及其防治	267
第五节 体温与环境热应力	270
第六节 劳动生产率与热应力的关系	276
第十七章 矿内热源	279
第一节 地表大气状态的变化	279
第二节 空气的自压缩温升	281
第三节 围岩传热	282
第四节 机电设备放热	296
第五节 其它热源	297
第十八章 井下风流的热交换及热状态预测	300
第一节 井下空气的特征	300
第二节 风流通过巷道的热交换	301
第三节 风流通过采掘工作面的热交换	304
第四节 风流通过井筒的热交换	306
第五节 矿内风流热状态预测	307
第六节 井底车场风流热状态预测	316
第七节 矿内巷道风流热状态预测	318
第八节 采掘工作面风流热状态预测	321
第九节 矿床无人工制冷的极限开采深度预测	323
第十节 有热水巷道的风流热状态预测	324
第十一节 热系数的计算	325
第十九章 改善矿内气候条件的方法	329
第一节 概述	329
第二节 改善矿内气候条件的一般措施	329
第三节 个体防护	333
第四节 人工冷却风流	334
第五节 矿井热水的防治	336
第二十章 制冷原理及其应用	338
第一节 制冷机原理	338
第二节 矿用制冷设备的技术要求	342
第三节 矿用制冷设备的选择计算	343
第四节 制冷剂	350
第五节 载冷剂	351
第六节 润滑油	352
第二十一章 矿用换热器	357
第一节 表面式空气冷却器	357
第二节 喷雾式空气冷却器	370

第三节	高压水的减压装置	372
第四节	矿用制冷机的排热方法	377
第五节	管道隔热与计算	383
第二十二章	矿井空调设计	386
第一节	矿井空调系统	386
第二节	制冷站负荷的确定	388
第三节	制冷站及制冷设备的选择	393
第四节	矿内风流冷却地点和空冷器参数的确定	395
第五节	矿井空调系统供水设计	396
第六节	矿井空调的费用分析	400
参考文献		404

绪 论

热害是矿井的自然灾害之一，是矿井向深部发展不可避免的。在矿业发达国家，由于矿井深，热害问题出现早。如南非、最深金矿已达4000m左右；印度、巴西的金属矿井有的已超过2000m；苏联、西德、英、法等国的超千米煤矿较多。另外，在某种特殊条件下，矿井虽然深度不大，但也会遇到较高的岩温或水温。国外热矿井遇到的岩（矿）体或水温高达50~90℃。70年代，我国在千米深煤矿井下遇到的岩温和水温达到或超过40℃。80年代初期，统配煤矿的平均开采深度已超过500m，平均每年约增加10m，高温问题日渐突出。预计本世纪末，我国井下遇到的岩温和水温，最高可达50℃左右。

国外关于矿山地热和区域性地温预测方面，尚未见到系统的研究资料（虽然我们对此注视已久）。在我国，已有的降温技术研究，都是在矿井建井期内或生产遇到热害之后进行的。但这种研究受矿井原设计条件的限制。如既定的井巷断面面积和通风系统限制了增加风量的可能性；排热水的管道安装在进风井内及许多热源安排在进风流中，人为的升高了井温等等。实践使人们认识到，热矿山的治理，必须在新矿井设计时，按照一定的设计原则进行综合考虑，才能取得最佳的技术经济效益。这就要求人们预先探知井田的地温条件和预计井下的气候状况。矿井空气与围岩（包括其他热源）热交换计算技术的发展，已使对矿井热害程度的预测成为可能。因此，矿山地热地质条件的研究，在矿产勘探阶段就应基本完成，并要为未来矿井的降温设计提供依据。所以说，矿山地热和热害治理技术已经成为矿产勘探和开采技术中不可缺少的部分。

在50年代初，煤炭科学研究院抚顺研究所的降温技术研究小组，为研究油页岩废渣用于井下充填发热问题，曾在抚顺煤矿测过岩温，但当时全国煤矿的热害尚不突出，地温观测未引起重视。直至70年代以前，在矿山地热研究方面还是一项空白。当时，中国科学院地质研究所地热组（后在1978年成立地热研究室）正从事大地热流测量工作，这无疑属于基础理论研究的一部分。该地热组为了在油田和煤田寻找供热流测试的深钻孔，曾与煤矿有所接触。到70年代初，开滦矿务局为了评价开平盆地深部煤炭资源开发的前景，曾邀请地质所地热组帮助观测地温，以了解地温对开发深部资源的影响。这是我国正式研究矿山地热的开始。1971年，平顶山八矿东风井出热水淹井。1974年，该局地测处向当时的燃化部科教组反映平八矿存在的地温问题，并提出寻求研究指导合作者的愿望。在陈炳强同志的大力支持下，该局地测处与地质所地热组建立了合作关系。在1975年初，当时的燃化部在平顶山召开煤矿系统第一次矿山地热座谈会，交流地热研究和热害治理方面的经验。除前述两个研究所外，煤田勘探和设计部门以及地质部、二机部、冶金部的专家也到会进行了交流。会议还确定由燃化部出面组织一个由平顶山矿务局、中国科学院地质研究所以及煤炭科学研究院抚顺研究所、武汉煤矿设计院和山东煤田地质勘探公司参加的全国煤矿地温调查小组，对热害的涉及面作一次概略调查。调查组用了4个月时间，对20个省（自治区）的煤管局和地质公司，17个矿务局、14个煤矿进行了调查。调查发现：有24对生产井（生产能力1740万t/a）和13对在建井（设计能力1662万t/a）有不同程度的热害；几乎所有的

新老矿区和正在勘探的煤田（井田）都没有开展测温工作，个别煤田和矿区虽有一些零星测温资料，但由于仪器陈旧、方法不当，资料的可靠性均不高。调查结果引起原煤炭工业部和有关部门领导重视，且认识到矿山地热是煤矿一大自然灾害，应当重视起来。从此，矿山地热和热害治理工作得到了较为顺利的发展。

从1975年到现在，短短的10余年中，中国科学院地质研究所地热室和煤炭科学研究院抚顺研究所降温小组与煤炭系统的有关单位密切合作，取得了一系列成果（下面我们还将谈到这些成果）。正是在这些研究成果的带动下，使若干局、矿、地质公司、高等院校、设计院和研究所均开展了地热和降温技术研究工作，并取得了丰硕成果。

下面概略介绍这两个领域的发展现状、趋势和存在问题。

第一节 矿山地热研究的现状、趋势和存在问题

人们从火山喷发、温泉、地面冒气及深矿井高温等自然现象中早已知道地球是热体，其内部存在着大量热能。地热问题一直都是地学界所关注并广泛引起人们兴趣的问题。

描述深矿井高温现象，在文献上可追溯到16世纪。1740年，法国曾有人对金属矿的地温进行过观测。18世纪末，英国开始系统地进行矿井巷道的温度观测，从而看出温度随深度的增加而升高。钻孔测温始于19世纪后半叶，在1882~1900年间，欧洲打了两个深孔，一个孔深1959m，孔底温度为69.3℃；另一个孔深2221m，孔底温度为83.4℃。两钻孔的全孔增温梯度都是3.12℃/100m。所以在一个相当长的时期内，都认为地壳的增温梯度大体为3℃/100m。后来，不同地质条件下的钻孔测温资料日渐增多，由不同岩石组成的剖面都有了测温数据之后，这一概念才得到修正。

地热资源的探查和开发，对地热学的发展起到巨大的推动作用。1904年，意大利在拉德瑞罗建成了世界上第一个地热电站，二次世界大战之后，在许多国家，地热勘探和新建的地热电站如雨后春笋。目前已建成地热电站的主要国家有：美国、日本、意大利、冰岛、新西兰、墨西哥、苏联、菲律宾和中国等。到1982年，全世界已有41个国家在利用地热能，另外还有50个国家已着手研究本国的地热资源。据苏联1985年预计，全世界地热电站的装机容量可比1982年翻一番，达到500万kW。

大地热流概念的建立及其测试工作在地热学的发展中具有重大意义。1939年布拉德和本菲尔德分别在南非和英国取得了首批热流数据。截止1975年，全球共有热流数据5417个，其中陆地占30%，海洋占70%。据查普曼等人在1985年报导（*Journal of Geodynamics*, 4, 3-37），1982年1月1日以前，全球热流数据已达10058个，平均每年约增加450个。大地热流的观测为阐明地壳深部热结构提供了重要依据，扩大了地热学的视野，并成为板块构造学说的有力支柱之一。

矿山地热工作是把地温作为一种矿产开采条件进行研究的，与大地热流研究和地热田探采相比，矿山地热工作有可能，也有必要做得更为深入细致。因为在矿产勘探中有大量钻孔可供研究利用，矿井中又有大量巷道可供验证和进一步观测；另一方面，从事重体力劳动的矿工，长期对湿热空气的适应和耐受能力是极其有限的，井下允许的温度超标范围也十分有限。因此，热害治理要求对地温场的特点及各种致热地质因素的内在联系有清晰的了解。

我国地热资源相当丰富，但地热条件比较复杂，系统的地热研究工作始于建国之后。

特别是从70年代开始,在李四光教授的大力提倡下,掀起了大规模的地热普查和地下热水利用的高潮。北京、天津、西安等大城市利用地下热水为城市供暖、工业用热取得了成效;在广东丰顺县、河北怀来县、辽宁营口市等地先后建成了6个试验性地热电站,在西藏羊八井建成的工业性地热电站装机容量为1.9万kW。许多省(市、自治区)也相继开展了温泉调查和利用工作,并建立了一批研究机构。

我国煤田勘探中的钻孔测温,大约始于60年代。现可看到该时期测温钻孔资料的有:开平煤田,林南仓井田,元氏、邢台东庞井田,兖州东滩井田,淮南潘集,平顶山八矿和九宫山勘探区等,但资料零星,孔数甚少,测温工作不正规。

1974年,平顶山矿务局与中国科学院地质研究所地热室开始合作,对平顶山八矿,后扩大到整个平顶山矿区进行了为期4年的研究工作。1978年提出研究报告。同年5月,前煤炭工业部地质局在平顶山召开了由各省、自治区煤田勘探技术人员参加的地温会议,除对这一研究给予充分肯定外,还决定在全国煤田勘探中开展测温工作,会议还为此草拟了一个暂行规定并立即颁发试行,会议上还讨论确立了划分一、二级热害区的概念,并组织有关人员着手编写《矿山地热概论》一书。1980年,上述暂行规定被纳入部颁《煤炭资源地质勘探规范》(试行),地温条件评述已成为地质报告中的规定内容之一,地温已被正式认定为煤矿的一个新的开采技术条件。1981年,《矿山地热概论》问世。1982年,国务院颁发了《矿山安全条例》,其中规定了地质勘探报告应对有热害的矿山提供地热资料的种类和名称;1986年,由国家储委修订颁发的《煤炭资源地质勘探规范》也将地温测量工作,地温条件评价的有关规定纳入相应条文。以上各点充分体现了政府各部门对煤矿安全、矿工健康的高度重视,也是我国煤田勘探技术进步的标志之一。

从70年代初至今10余年来,中国科学院地质研究所地热室与原煤炭工业部合作,先后对开滦、兖州的东滩、平顶山、黄县煤矿以及豫西六个煤田进行了专题研究,所取得的成就可归结为以下几点:

- (1) 与矿山地热有关的地热基础理论知识在采矿和勘探部门得到一定程度的普及。
- (2) 研制了地热测量所需的仪器装备,如精度较高的测温仪器和岩石热物理性质测试装备,为地温测量提供了手段。
- (3) 以钻孔热平衡理论为基础,建立了稳态测温、近似稳态测温 and 简易测温方法,在矿产勘探中已广泛应用。
- (4) 对典型高温的平顶山矿区进行了地温评价和深部地温预测,预测精度经验证达到1~2℃的高水平,所推出的预测方法具有普遍意义。
- (5) 总结了矿山地热的研究方法,提出并改进了矿山地温类型的划分,这对地质勘探和矿井地质工作中的地热工作,有较大的指导意义。

1978年以后,在煤田地质勘探中,全面开展了地温测量,这标志着矿山地热工作步入了一个新阶段。测温工作的普遍开展,一方面迅速改变了煤田和矿区严重缺乏地温资料的状况,为矿山的建设和远景规划提供了资料;另一方面,在普及地温测量的实践中,也出现了一些新问题,暴露出在地温勘探方法指导上存在某些缺陷,有待解决。

因此,总结10余年来地温勘探的新成果,改进、完善地温勘探方法是当前面临的一大任务。这一任务的实现和完成,除了需要有关多方面的协作和努力外,还需进一步对以下几个问题统一认识。

1. 正确认识矿山地热研究的目的和任务

地温是矿产的开采条件之一,研究矿山地热的目的是为了与矿井热害作斗争。其任务是查明地温条件,为矿井降温设计、确定热害防治提供依据。因此,某一勘探区是否进行地温工作和地温工作做到何种程度,均应以是否存在形成热害的地质条件为准,不应简单地只以有无热异常或地温梯度是否大于 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。为此,有关条例和规范的条文应作适当修订,以免引起误解造成工作损失。

2. 关于衡量热异常的尺度问题

“热异常”,确切地说应是“热流异常”,它包括正异常和负异常。一个较大的地质构造单元,热流异常存在与否是由该单元有代表性的区域热流值与全球平均热流值相比较而判定的。对于一个矿区或较大的勘探区来说,热流异常是由该区有代表性的热流值与所在大区的背景热流值(或来自本区深部基底的背景热流值)相比较而判定的(所以,研究地地质条件时,一定要力求注意外围与深部有关资料的获取和分析)。而地温梯度值则不具备这种权威性。众所周知,热流值 = 地温梯度 $\times$ 岩层的热导率。脱离了地层岩性条件所控制的岩石热导率,单纯依靠地温梯度来衡量热异常是否存在是不恰当的,有时则是极为不妥的。例如:甲地区在新生界松散覆盖沉积中测得的地温梯度为 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,乙地区在花岗岩体中测得的梯度为 $2.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。若甲地区松散岩层的热导率平均值为 $1.675\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ($4\text{cal}\times 10^{-3}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$),乙地区为 $2.51\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ($6\text{cal}\times 10^{-3}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$),则甲地的热流值为 $58.6\text{mW}/\text{m}^2$ (1.4HFU),乙地为 $71.85\text{mW}/\text{m}^2$ (1.74HFU)。依照热流值判断,高梯度的甲地,热流值比全球平均热流值偏低,属轻微的负异常区;而梯度较低的花岗岩区,其热流值却略高于全球平均热流值,属轻微的正异常区。由此可知,把 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 作为判定有无热异常的界限值和把低于 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的地区称为地温正常区都是不恰当的。

但是,在煤田地质勘探中取得合格的热流值很不容易,而确定背景热流值或区域热流值就更不容易。因此,通常还是用地温梯度值的大小来描述和比较研究区各部的地温状况。考虑到这一现实状况,本书仍以地温梯度值为标准来划分矿区地温场,但这决不是热异常的划分。

3. 关于一、二级热害的界限问题

矿井热害是指井下风流的温度、相对湿度、风速和环境温度(指向人体辐射放热的高温岩壁和物体等)达到一定状态后,致使人体散热困难,工人感到闷热,劳动生产率下降,进而出现:大汗不止、体温升高、头昏、虚脱、呕吐等中暑症状,甚至死亡的自然灾害。正确判断热害严重程度的方法是在矿井设计之前,根据矿床的地温条件、矿井入风温度和湿度、矿井深度、矿井通风强度和井下的装备状况(人工热源)等因素(详见本书第二篇),用矿井热交换计算方法来进行,地质勘探技术人员则不可能运用这一方法。为了把有限的地温勘探工作量集中在可能的有热害地区,《规范》中规定,在一、二级热害区,把 37°C 地温作为两级热害的界限值。这个规定的原意是地温在 37°C 以下、 31°C 以上,可能产生热害,但此种程度的热害一般靠通风降温是可以解决的。在地温达到 37°C 的地区,一般说单靠加强通风降温难以解决,应考虑人工制冷降温系统。这种提法,仅限在地质勘探中,对降温技术人员来说,是没有约束力的。

据了解,西德有的煤矿目前已可在 40°C 岩温条件下,靠加强通风来维持采掘工作。这就提出了 37°C 这个界限值是否应当修改,或者说, 37°C 的界限是一个值得讨论的问题。笔

者认为,我国煤矿的井巷断面面积与西德相比,普遍偏小很多,增加风量的困难较大,西德煤矿主要进风巷道断面在 25m^2 左右,薄煤层工作面风量规定为:煤厚 $<1\text{m}$ 者,风量应不小于 $800\text{m}^3/\text{min}$;煤厚 $>1\text{m}$ 者,风量不小于 $1000\text{m}^3/\text{min}$;高温综采工作面的风量一般都达到 $1400\sim 2200\text{m}^3/\text{min}$,而我国的情况则距此甚远。如平顶山八矿,主要进风巷道断面仅为 $10\sim 14\text{m}^2$,工作面回风顺槽断面为 $5\sim 8\text{m}^2$,综采工作面的风量为 $400\sim 600\text{m}^3/\text{min}$,如果将主要进风道断面改扩到 $16\sim 20\text{m}^2$,就需要6000万元投资,这是难以办到的,就全国而言,更难普遍推行。目前平八矿-430m水平(垂深510m)的地温只有 $34\sim 36^\circ\text{C}$,已经在考虑采用人工制冷了。基于我国当前的国情, 37°C 的界限值目前暂不宜修改。

4. 热水型高温矿山应当是当前加强研究的重点

国内已经过较详细研究的热矿山大多属于传导型的,而热对流控制的地温场类型(即热水型高温矿区),目前为止只有河南新郑一例。这类矿山不仅煤矿有,金属矿山也有。在有热对流参与下的传导和对流两种因素共同作用的地温场要比单纯的传导型复杂得多,在热害的治理上也有其特殊的复杂性。因此,热水矿山应当是当前矿山地热研究的重点和主攻方向。

我们的实践和国际地热界的经验都表明,将地热学方法与水文地质方法结合起来用于研究有对流传热作用的地温场,要比单纯用某一种方法更为有效。因为地下水本身就是热的载体,是地温场的一个重要影响因素,地下水的运动伴随着的热迁移,在地温场上得到显示,热量与运动着的水量之间存在着平衡关系。将地温场与地下水的渗流场结合起来,从定性到定量研究,揭示其内在联系,必将在此类矿区的地温场特点和水量计算方面有所突破。据国外一些学者认为,有不少地热方面的变量可以获得比水文地质变量更为精确的实测值。因而在定量研究中,即使是纯粹的水文地质方面的水量计算问题,引入地热方法也能提高精度。

此外在大水矿区,虽然从与热害作斗争方面来说,测温的意义不太大,但近来已有人提出,利用多含水层之间的微小温度差别及热传导和对流的原理,用测温资料判断地下水的水力联系、水文单元的补给部位和某些水文地质条件,效果较好。

5. 关于研究手段问题

矿山地热工作之所以能取得较大进展,同地热测试手段的进步是分不开的,与测温方法的创立、数学模拟计算方法的引进和开发也是分不开的。

现有的三线制热敏电阻测温仪,确有精度高,价廉的优点,且能满足现场需要。但也存在操作较复杂,稍有疏忽会影响测温精度,现场占人多和室内辅助工作量大的缺点。应加强研究数字显示、自动记录、既能自动作图打印又能适应野外施测特点的测温仪。数学模拟计算是一种经济、快速的资料处理和分析手段,现已成为重要的地热分析方法之一,应继续给予重视。

6. 采矿部门应建立矿山地热研究中心

目前矿山地热研究人员分散,老化,并都是以其他工作为主、兼搞矿山地热工作,而且研究工作也缺乏总体规划与近期的计划安排,连有关的国外情报资料也无人收集。多年来未能建立起专业的学术交流渠道和研究中心。我们的矿产勘探和开发正在向深部发展,而矿山地热研究却面临着萎缩和消失,这一面貌应当立即改变。

第二节 矿井降温技术研究的现状、趋势和存在问题

我国对矿井热害的治理研究工作起步于50年代初期。当时,煤炭科学研究院抚顺研究所就对抚顺煤矿用的充填料—乾溜过的油页岩的放热、井上下气温变化和地温进行过调查、测定。此后还在抚顺、淮南、合山、平顶山、北票、长广、新汶等矿务局(矿)进行了井下热源考察和风流温度预测。并开展了大小型号的制冷机、空冷器及其它降温器材的研制和试验工作,协助新汶矿务局孙村煤矿建立了我国第一个井下集中制冷站。目前正与一些设计院和高等院校联合,着手在平顶山八矿建立我国第二个井下制冷系统。中国医学科学院劳动卫生研究所曾应前煤炭部的邀请,先后在京西、开滦、淮南、合山、北票等矿务局进行了井下热气候对人体危害及各工种代谢产热量的调查。此外,马鞍山钢铁设计院、长沙有色金属设计研究院、淮南矿业学院、山东矿业学院、中国矿业大学、河北煤矿建筑工程学院、湖南711矿、江苏韦岗铁矿、三河尖煤矿等,也做了一些调查、研究和试验工作。这些成就的取得大多在60年代之后,其中煤炭科学研究院抚顺研究所的成果最多。

在热矿山的治理中,遇到的第一个问题是如何确定什么样的气候条件是对人体有害的。问题似乎并不太复杂,但要制定一个公认的、具体的标准,却有很大的困难。近百年来,全世界的有关学者竟提出了90多种标准,均未取得令人满意的结果。大家都知道,空气的干球温度是衡量气候条件的最不全面的指标,但是许多国家却都用它作为标准,因为它最为简单,我国也是如此。在众多的标准中,湿卡它度、同感温度(或译为实效温度、有效温度)是比较好的指标,并认为同感温度 $t_{eff} = 28^{\circ}\text{C}$ 是热害气候的下限。1972年,南非学者提出的比冷力(单位人体表面面积的散热量 W/m^2)的概念,可能是评价井下湿热气候条件的一个突破。这一指标是经过大量观测试验,综合了人体热平衡方程之后提出的,后又经过人体静态、动态热调节模型检验加以完善,目前正在南非矿山推广应用中。但是,比冷力指标的推导是以人的肛门温度达到 40°C 的概率为 10^{-6} 为基础的。换言之,是以矿工能否丧命为基础的指标,这与人类现代文明是不相容的。

有的国家提出人道主义或人的尊严问题,要求改善热矿井劳动条件的呼声甚高。例如,西德在1982年召开的矿井空调会议上就有人要求修改劳动条件法规,1983年在原定干球温度 $t_a \geq 28^{\circ}\text{C}$ 之外又增加了一个 $t_{eff} \geq 25^{\circ}\text{C}$ 的界限,规定矿工在这两个界限中任一环境下逗留的时间超过3小时者,日工作时间缩短为6小时。

可以预料,随着人类文明的进展和生活水平的提高,人们对矿井内劳动环境的要求必将越来越高,矿井降温及安全工作者肩上的担子亦将日益加重。

在矿井热害治理和设计中要解决的第二个问题是要预先计算出采掘工作地点将出现怎样的气候条件,为了使气候条件合乎劳动卫生要求,需采取哪些合理措施和供给多少冷量。这就是井下气流与围岩以及与各种人为、天然热湿源的交换计算问题。这也是个极其复杂至今未能妥善解决的问题。大家都知道,使井下风流状态参数发生变化的因素很多,如入风的状态参数、风流的自然压缩、围岩的传热散湿和局部热源、矿井水的散热散湿等等,而这些因素本身又是多变的。

在围岩传热中,多利用傅里叶热传导方程,并假定:原始地温场是稳定的,围岩是均质各向同性的,巷道断面是圆形的,采面为半无限平板等初始条件和边界条件。然后才能积分。并引进傅里叶数 F_0 和毕奥数 B_i 来表述无因次不稳定传热系数 $BF(F_0, B_i)$ (或称 K_u ,

K_a), 使井下围岩传热的计算成为可能。这种计算异常繁琐, 但由于采用了电子计算机, 可将 BF 值贮存起来, 也可以用经验公式计算, 加之将巷道和采面分成小段, 分段引入实测的围岩热导率, 使之取得了较好的效果。在局部热源计算中, 过去是将机电设备产生的热直接全部加入风流中, 但实际上, 机电设备用时时停, 负荷多变, 停机时, 曾被围岩吸收的部分热量又会散放出来。

风流与水的湿交换计算困难较多。岩体的裂隙有的含水, 有的不含水。有些肉眼观察似乎相当干燥的岩壁在风流通过后也可测到风流中水分的增减, 这意味着这里仍有水的蒸发或冷凝。但水分蒸发热或冷凝热并不一定都完全取自或传给风流, 也可能部分取自或传给围岩。所以, 机械地采用湿壁系数 (巷道潮湿面积与其总面积之比值) 来计算, 已被证明是不准确的。即使是巷道水沟中流水的焓变化也很难区分传给围岩和风流各占多大比例。此外, 围岩由于相变、含水、受压开裂造成热物理性质变化, 采面的长度、采高、矿层厚度变化引起的热交换面积的变化, 采空区漏风造成的风量变化、煤层氧化条件的变化等等, 均给气候条件预测计算造成困难。因此, 为未来矿井和生产矿井的新水平、新采区、新工作面所进行的热交换计算, 由于计算参数获取的多寡和精度不相同, 因而对其计算精度的要求亦应有所不同。目前在传导型地温场的生产矿井中, 风温预计的误差达到 2°C 左右已属不易。随着科学技术的进步, 数学模型的改善, 预测的精度还会提高。

热害治理要解决的第三个问题是如何经济、有效、持续地将井下工作地点的恶劣气候条件改善到合乎要求的水平。一般说, 由于人工制冷降温的费用甚高, 仅在采用加强通风等措施无效时才可采用。

目前矿内人工制冷多采用以氟利昂为制冷剂的压缩制冷机。在大型、特大型制冷系统中多采用离心式或螺杆式压缩机。70年代以前制冷站多采取分散布置, 在需要空调的地点就近建站, 供1~2个采面降温使用。随着管道隔热 (保冷) 技术的进步和井下需空调的地点增多, 分散制冷布置方式, 既不经济又难满足需要。因此转向大型机组集中布置方式, 在井下枢纽部位建立可向一两个采区或全矿井供冷的制冷站, 其冷凝热借助井下冷却塔 (南非) 或换热器 (西德) 经回风流排至地面。随着地温增高, 采面的产量和采掘设备的功率加大, 井下有限的回风量已无法将制冷机排放的热量全部带走, 致使冷凝温度上升、制冷机效率下降。所以南非、西德等矿山热害严重的国家又转向在井上建立制冷站或建立井上、下联合制冷站, 以克服冷凝温度过高问题。其冷水的输送采用两级循环, 即井筒中用高压管路, 井下用低压管网, 两者用高低压换热器在井底车场附近联接。

80年代以前, 工作面空调多用肋片式空冷器, 由于易积垢 (西德曾用10MPa的高压热水清洗, 效果不佳), 降低了冷却风流的性能。因而到80年代初期, 在南非、美国、西德的深井中又先后研制早已被“淘汰”的喷雾式空冷器。这种空冷器既可设在井上冷却总进风, 又可设在井下不同地点冷却一个采区或一个采面的进风流。实践表明, 喷雾式空冷器的性能良好, 维护量少, 将来也许可能部分地取代表面式空冷器。

为了评价冷却塔等直接喷雾式换热器的性能, 南非学者提出的 F 系数 (品质系数) 法具有深远意义。此外, 斗式水轮机和轴流径向水轮机研制方面的进展, 对喷雾式空冷器的发展也有一定影响。

在矿井空调中, 如将空冷器直接用在回采工作面, 可大大减少需冷量, 使工作面风温均匀, 对保障矿工健康、降低空调费用十分有益。但由于工作面空间有限, 粉尘大, 空冷

器外形尺寸大,需管材、缆线较多,迄今未能实现。近几年,西德研制了两种供薄煤层用的空冷器,其中一种利用冷水压力为动力,借助斗式水轮机驱动空冷器的风机,从而取消了馈电线路,对安全有重大意义,且其标称换热量超过5kW,风量超过8m³/min,而外形尺寸仅为800×300×200mm,可直接装在掩护支架的挡板上;另一种空冷器为装在铠装运输机侧面,冷风管直径为300mm,可直接将深冷的空气喷入采面,初步试验效果良好,可能对今后采面空调产生重大影响。

井下空冷器的回水温度一般为17~18℃,其冷量远未被充分利用。70年代,南非曾试验在高温地点喷洒回水的冷水,直接冷却新暴露的岩壁和采落的岩矿体或向凿岩机、消尘管网供给冷水,这样取得的降温效果相当于回水温度达到28℃,冷量已充分利用。这一成果发表后,立即在金属矿中进行了推广,我国煤矿也应积极考虑推广这一经验,至少在基建矿井或生产矿井的岩巷掘进中可以及早推广。

为了有效而经济地将冷量送入井下,南非近来试用管道输送小冰块,此办法亦不失为一有意义的尝试。

此外,井下零散工作人员降温用的冷却服、冰坎肩在今后也会得到进一步发展和改进。

我国目前在热害治理方面存在的主要问题是:

(1) 我国煤矿巷道断面面积普遍偏小,增加风量困难,迫使一些本来可以靠加强通风解决降温问题的矿井,采用费用较高的人工制冷降温措施。这些大多是设计时缺乏有关的地热资料,而设计中又未能周全地考虑或根本未考虑降温问题的矿井。

(2) 国产的制冷设备质量有待提高。在空冷器、冷却塔、高低压换热器及其他有关器材的研制和新产品开发方面,没有连续工作的研究力量。

(3) 井下风流与各种热源间热交换的考查研究工作不系统、不连续,这对热交换技术的发展不利。

(4) 设计部门缺乏新井降温设计的实践经验,研究部门缺乏高温热水类型矿山系统降温科研的经验,实践的局限性可能使我们在降温技术方面的薄弱环节尚未充分暴露出来。

(5) 目前在矿井空调领域中从事研究的单位和研究人员虽然较多,但缺乏全面系统的规划来协调指导各方面的工作。

(6) 热矿山的设计、管理尚缺乏规范性的依据,已建成的矿井空调系统的管理工作有待加强,许多重大问题尚待研究解决。

总的来说,降温技术研究现状比矿山地热研究要好得多。国内已经有了一支专业队伍,原煤炭部安监局也加强了领导工作,1987年在全国劳保学会之下建立了矿井降温专业委员会。但我国矿山热害的严重程度和涉及的面正在发展,有必要在国内形成一个矿山地热与热害治理的研究中心,集中人力、统一规划、更好地为解决我国热矿山的问题服务。