

国家自然科学基金重点项目(51134005);中国澳大利亚国际合作项目(16394507D);
河北省专家与留学服务中心优秀专家出国培训项目;河北省人社厅资助项目
(D2016002);河北省教育厅高等学校科学技术研究项目 (Z2012137)联合资助

深井高温热害 资源化利用技术

曹秀玲 周爱红 屈晓红 著

中国建筑工业出版社

国家自然科学基金重点项目（51134005）；中国澳大利亚国际合作项目（16394507D）；河北省专家与留学服务中心优秀专家出国培训项目；河北省人社厅资助项目（D2016002）；河北省教育厅高等学校科学技术研究项目（Z2012137）联合资助

深井高温热害资源化利用技术

曹秀玲 周爱红 屈晓红 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深井高温热害资源化利用技术/曹秀玲, 周爱红, 屈晓红著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 7
ISBN 978-7-112-19115-4

I. ①深… II. ①曹… ②周… ③屈… III. ①深井-
高温矿井-热害-防治 IV. ①TD727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 124177 号

本书以深部矿山的典型——三河尖矿为工程研究背景, 针对其存在的深井热害问题, 分析了三河尖矿水文地质及深部地温场特点, 采用理论分析和数值模拟相结合的方法, 揭示了深部围岩与巷道奥陶水的传热机理, 找出了巷道奥陶水的温度场分布规律, 确定了其供热能力, 获得了三河尖矿深井高温热害资源化利用工程设计与实施的重要依据。进而, 研发了以奥陶水、矿井涌水为联合热源的三河尖矿冬季深井高温热害资源化利用井上井下联合循环的工艺技术。提出了利用奥陶水的热能, 同时又用其产生的冷能进行夏季空调的方法及工艺技术。

责任编辑: 郇锁林 王华月

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 张 颖

深井高温热害资源化利用技术

曹秀玲 周爱红 屈晓红 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 $\frac{1}{4}$ 字数: 189 千字

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-19115-4

(28750)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

随着我国经济的高速发展,对能源需求的不断增长,深部开采成为必然发展趋势,从而不得不面对深井高温热害的问题。本书以深部矿山的典型——三河尖矿为工程研究背景,系统分析了三河尖矿的地质构造和各个地层钻孔地温实测资料,水文地质条件及地热资源条件,包括区域水文地质,地温分布条件,区域含水层划分及其特征,地下水补、径、排条件;分析了矿井涌水、奥陶水和第四系含水层的水质、水量、流速等特点。确定三河尖矿深井高温热害特点、规模、危害程度,指出了三河尖矿存在的问题。

(1) 三河尖矿深井高温热害资源化利用

三河尖矿区恒温带深 30m,温度为 16℃,地温平均梯度为 3.24℃/100m。三河尖矿开采深度已达-1010m,矿井高温热害现象严重。根据井下巷道已测温记录,-700m 水平岩温 37.7℃;-860m 水平岩温 43.9℃;-980m 水平岩温 46.8℃。在夏季,-980m 大巷进风温度为 32℃左右,掘进头及工作面温度高达 36~37℃,严重影响工人的身心健康和矿井的安全生产,深井热害成为制约深部开采的问题之一。

三河尖矿深井高温热害控制已在一期工程中解决,但其资源化利用问题并未涉及。

(2) 高温奥陶系灰岩水闲置未用造成热资源浪费且存在透水隐患

奥陶系灰岩水在 21102 工作面突水动态补给量为 1020m³/h,水温为 50℃,水压 7.6MPa,现在水观 1 孔奥灰水位为-71m。这部分水一直闲置未用,一方面造成热资源的浪费,另一方面这些热水存在突水隐患,诱发安全事故。

(3) 高耗煤及环境污染

三河尖煤矿现有供暖总面积 21 万 m²,其中工业广场 10.4 万 m²,工人村 10.6 万 m²;锅炉燃煤供热系统全年耗煤 12045t,其中工业广场耗煤 9530t,其他耗煤 2515t;现有供暖系统耗煤量大,运行费用高,对环境污染严重,每年大约排放 CO₂ 22542t,SO₂ 72.3t,氮氧化物 64.5t。现有供热系统急需进行改造,以达到节能减排,降低运行费用,改善环境质量的目的。

针对三河尖矿存在的上述难题,分析了国内外深井高温热害资源化利用研究现状,研究了奥陶系灰岩承压水资源的条件,并采用理论分析与数值模拟相结合的方法,确定了奥陶水的供热能力,为三河尖矿深井高温热害资源化工程设计与实施提供了可靠的依据,探讨了解决问题的方法,设计了三河尖矿深井高温热害资源化 HEMS 井上井下联合利用的工艺技术。

目前,深井热害治理技术主要有集中空调、冰冷、气冷、热电乙二醇等技术,这些技术均仅仅考虑的深井降温问题。而国内外还没有综合考虑奥陶水利用、深井热害资源化及高耗煤及环境污染等问题的技术。

本文研究 HEMS 技术进行深井热害控制后,将深井高温工作面置换到矿井涌水中的热能与奥陶水的热能综合利用,进行井上冬季供暖,实现深井高温热害资源化 HEMS 井

上井下联合利用，一并解决深井热害资源化利用问题以及高温奥陶系灰岩水闲置未用造成热资源浪费问题，同时消除奥陶系灰岩水存在透水的隐患，并解决高耗煤及环境污染问题。

本课题充分运用流体力学、工程热力学、传热学、供热工程、地下工程学、多孔介质理论、传热传质学、统计学以及其他相关学科的基础理论及方法，针对奥陶系灰岩承压含水层的地层、奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层特征和 21102 工作面采空区水源特征，通过对—760m水平围岩、冒落后巷道、奥陶系承压灰岩水之间的传热过程及特点分析，建立了三河尖矿在抽水供热条件下奥陶水和围岩多孔介质传热模型，并进行了理论计算与分析，揭示了奥陶水和围岩之间的传热机理。

所谓多孔介质，是指多孔固体骨架构成的孔隙中充满单相或多相介质。固体骨架遍及多孔介质所占据的体积空间，孔隙相互连通，其内的介质可以是气相、液相或气液两相流体。多孔介质的主要特征是孔隙尺寸极其微小，比表面积数值要大。多孔介质内的微小孔隙可能是互相连通的，也可能是部分连通的、部分不连通的。

废弃巷道冒落后，巷道内会有一定量散落的岩石，岩体比原来要松散，岩体孔隙中充满了奥灰水，岩体与奥灰水之间的热传递，可看成是多孔介质中的传热，将所研究岩体与冒落后的巷道看成是非均质多孔介质。

多孔介质传递现象分为多孔介质外和多孔介质内的传递过程。首先要在被研究岩体中选取控制体去分析传递过程。所选择的控制体，即对围绕多孔体内某一点 p 的流体参数进行平均，用在一定范围内的平均值去替代局部真值。这种方法称为局部容积平均方法，所选取的平均范围称为表征体元 (representative elementary volume)，简称 REV。在 REV 的基础上，获得参数平均值，然后代入标准参数方程中，以获得多孔介质宏观变量的传输规律。

依据三河尖矿地质构造，水文地质条件及地热资源条件，区域水文地质，地温分布条件，区域含水层划分及其特征，地下水补、径、排条件、奥陶水、第四系含水层的水质、水量、流速等特点，21102 工作面采空区水源特征，奥陶系灰岩承压含水层的地层情况及其裂隙岩溶特征等条件，地热井所在地层为灰岩，其孔隙有原生和次生之分，其中次生结构又分为：正常的孔隙结构、缩小的粒间孔隙结构、扩大的粒间孔隙结构等，孔隙结构比较复杂，而且粒径分布规律也不一样，为了研究问题方便，假设为各向同性多孔介质；工作面采空区顶板陷落后，会引起灰岩内部结构的变化，从而对其渗流性产生影响，孔隙的分布会产生变化，现假设顶板完全陷落，采空区所引起的岩石孔隙的变化均匀分配到和巷道等长等宽，高度等于两井井底竖向高度的范围内；假定在采空区的周围壁面上，换热条件都是一样的。采用计算流体力学应用软件 FLUENT，建立了奥陶水和围岩多孔介质间的传热数值模型，在满足三河尖矿工业广场用热的工况下，分析了在定流量、不同进水口温度情况下，奥陶水沿巷道各方向的温度变化及出水口的温度变化，沿巷道长度方向围岩对奥陶水温度的影响程度和影响范围的变化；分析了定水温，不同流量下，奥陶水温度沿巷道各方向的温度变化及出水口的温度变化，沿巷道长度方向围岩对奥陶水温度的影响程度和影响范围的变化；进而绘制了奥陶水温度场分布图。分析了不同工况下奥陶水温度场的变化规律，确定了其供热能力，为三河尖矿深井高温热能资源化利用技术设计提供了重要依据。

依据上述结论,综合分析了三河尖矿区建筑物采暖负荷、井下降温系统冷负荷等影响因素,并根据三河尖矿提供的气象条件,确定了采暖季节的室内、外设计温度;然后,针对三河尖矿矿区建筑物的结构特点,充分考虑井上建筑维护结构的传热耗热量,冷风渗透耗热量,冷风侵入耗热量以及太阳辐射等因素,并根据三河尖矿提供的资料,确定了三河尖矿区工业广场、工人新村、洗浴、主副井口供热负荷。根据负荷进行了水力计算,确定了系统管道直径、管道中的流量、沿程压力损失、局部压力损失、总压力损失、网路循环水泵的流量和扬程,确定了主要设备和辅助设备型号及数量。提出了以奥陶水、矿井涌水为联合热源,综合考虑地上供暖的特点,三河尖矿冬季深井高温热害资源化利用 HEMS 井上井下联合利用的工艺技术。

本书的研究得到以下重要结论:

(1) 奥陶水和围岩之间的传热传质过程,符合多孔介质中的传热机理。

(2) 在抽水供热条件下,定流量,不同进水温度时,奥陶水的温度场分布不同。出口水温度随着进口水温度的升高而升高,但升高的速度在不断减慢,即进出口水温差越来越小,围岩传递给巷道奥陶水的热量也越来越少。在定水温,不同流量时,出口水温度、进出口水温差和传热量不同。其规律:随着流量的增加,出口水温度降低,进出口水温差减小。

(3) 三河尖矿深井高温热害资源化 HEMS 井上井下联合利用工艺技术,既解决了深井热害资源化利用问题以及高温奥陶系灰岩水闲置未用造成热资源浪费问题,又消除了奥陶系灰岩水存在的透水隐患,同时还解决了高耗煤及环境污染问题。

上述成果为深井高温热害资源化利用开辟了新的途径,在节能减排,改善环境,实现循环经济可持续发展方面具有重要意义,经济和社会效益突出,具有广阔的推广应用前景。

矿井开采向深部发展是必然的趋势,相伴而来的是深井高温热害的难题。对此问题的解决办法,虽然国内外均有些相关研究,但相比较而言,到目前效果最好的还是本课题研发的以奥陶水、矿井涌水为联合热源,三河尖矿冬季深井高温热害资源化利用 HEMS 井上井下联合利用的工艺技术。该技术不仅利用矿井涌水达到了控制深井热害的目的,同时提取奥陶水的热能进行矿区井上供暖,充分利用高温奥陶系灰岩水的热能,取代锅炉采暖,达到节能减排、循环生产、降低污染、改善环境、变害为利目的,在保障安全生产,实现矿井开采的可持续发展方面具有重要的意义。

在深井高温热害资源化利用技术方面,我们的研究工作仅取得了初步的进展,还有许多工作需要做,许多问题有待进一步深入,后继研究工作任重而道远。

目 录

第1章 引言	1
1.1 三河尖矿深井概况及问题的提出	1
1.1.1 三河尖矿深井概况	1
1.1.2 问题的提出	3
1.2 国内外深井高温热害研究现状	6
1.2.1 国外研究现状	6
1.2.2 国内研究现状	7
1.3 热害治理及资源化利用研究现状	8
1.3.1 热害治理现状	8
1.3.2 深部热能利用现状	9
1.3.3 HEMS 深井热能利用工程实例	11
1.3.4 深部热资源梯级利用技术及应用实例	15
1.3.5 混合水源联动运行空调技术	16
1.3.6 深部地层储能反季节循环利用技术	20
1.4 本书主要研究内容	22
1.5 本书研究方法及技术路线	23
1.5.1 研究方法	23
1.5.2 技术路线	23
1.6 创新点	23
第2章 三河尖矿水文地质条件及地热资源条件分析	25
2.1 区域水文地质条件	25
2.1.1 区域构造地质	25
2.1.2 区域水文地质	26
2.1.3 区域地层概况	28
2.2 井田水文地质条件	28
2.2.1 井田构造地质	28
2.2.2 矿井水文地质	30
2.2.3 井田含煤地层	33
2.2.4 井田深部地应力	33
2.3 三河尖矿深井开采岩体温度场特征	33
2.3.1 深井开采热害模式分类及其特征	33

2.3.2	三河尖矿区地温状况	37
2.3.3	地温异常原因分析	39
2.3.4	三河尖矿深部地温预测	39
2.4	地热资源条件	40
2.4.1	区域含水层划分及其特征	40
2.4.2	地下水补、径、排条件	41
2.4.3	矿井涌水	41
2.4.4	奥陶系灰岩含水层特征	41
2.4.5	第四系含水层特征	41
2.5	本章小结	42
第3章	三河尖矿奥陶水与围岩间的传热机理	43
3.1	三河尖矿高温奥陶水资源情况	43
3.1.1	三河尖矿地层概化	43
3.1.2	奥陶系灰岩承压含水层的地层情况	44
3.1.3	奥陶系灰岩裂隙岩溶含水层特征	44
3.1.4	21102工作面采空区水源特征	44
3.2	计算模型的建立	44
3.3	奥陶水与岩体间的传热机理	45
3.3.1	基本参数	46
3.3.2	多孔介质传热传质过程分析	48
3.3.3	理论建模及求解	49
3.3.4	初始条件及边界条件	54
3.3.5	数学模型的简化	54
3.3.6	求解方法	57
3.4	三河尖矿奥陶水与岩体间传热的理论分析	58
3.4.1	计算假定	58
3.4.2	计算公式	58
3.4.3	计算参数	58
3.4.4	岩体与奥陶水的换热计算	59
3.5	本章小结	62
第4章	三河尖矿奥陶水与围岩相互作用数值分析	63
4.1	FLUENT 简介	63
4.2	基本假设	64
4.3	原岩温度的确定	65
4.4	模型建立	66
4.4.1	计算流体动力学概述	66
4.4.2	数学模型	66

4.4.3	几何模型建立及网格划分	67
4.4.4	模拟参数	68
4.5	模拟工况	68
4.6	巷道内奥陶水温度场变化规律	68
4.7	结果分析	74
4.8	本章小结	77
第5章	三河尖矿热/冷负荷计算	78
5.1	供暖负荷计算的基本理论	78
5.1.1	围护结构的传热耗热量	79
5.1.2	冷风渗透和冷风侵入耗热量	83
5.2	三河尖矿区井上供暖热负荷计算	84
5.2.1	气象条件	84
5.2.2	供暖热负荷计算	84
5.3	深井工作面热荷载及系统冷负荷计算	86
5.3.1	深井降温冷负荷计算	86
5.3.2	反分析法计算冷负荷	88
5.3.3	循环生产系统冷负荷计算	90
5.4	本章小结	90
第6章	三河尖矿深井高温热害资源化利用工程设计	91
6.1	三河尖矿深井高温热害的特点	91
6.1.1	热水水量	91
6.1.2	水质分析	91
6.1.3	水质处理方法	92
6.2	水力计算	92
6.2.1	室内热水供暖系统的水力计算	92
6.2.2	室外热水供暖系统的水力计算	93
6.2.3	三河尖矿区供暖水力计算	96
6.3	主要设备选用	96
6.4	深井高温热害资源化 HEMS 井上井下综合利用技术	97
6.4.1	系统流程	97
6.4.2	深井高温热害资源化综合利用 HEMS 技术	97
6.4.3	运行工况说明	98
6.5	工艺系统的关键技术	100
6.5.1	深井 HEMS 系统的工作原理及特点	100
6.5.2	HEMS-Ⅲ能量转换与提升技术	101
6.5.3	HEMS-T 换热技术	104

6.6 系统运行效果预测分析 105

6.7 本章小结 105

第7章 结论与展望 106

7.1 结论 106

7.2 展望 107

参考文献 108

第 1 章 引 言

随着我国经济的快速增长和人民生活水平的不断提高,能源的总需求量逐年增长。然而,由于长期开采,浅部资源日渐枯竭,使得大部分煤矿开采不得不向深部发展。随着开采深度的增加,矿井原岩温度不断升高,深井热害问题日益严重,本书针对三河尖矿深井高温热害和高温高压奥陶系灰岩水的特点以及矿区地面锅炉耗煤及污染等重要问题,分析了国内外大量关于矿山地温、热害治理、节能减排、环境保护等方面的资料,并结合三河尖矿的实际情况,提出本书的主要研究内容、研究方法、技术路线以及创新点。

1.1 三河尖矿深井概况及问题的提出

1.1.1 三河尖矿深井概况

徐州矿务集团公司三河尖煤矿,位于徐州市沛县龙固镇境内,主井地理坐标为东经 $116^{\circ}47'25''$,北纬 $34^{\circ}54'38''$ 。地处苏鲁边界,东临昭阳湖,西临丰县,北与山东省鱼台县接壤,东南距徐州市 92km,至沛县 27km,西北距鱼台县城 19km,徐济公路穿过该井田,东北至京杭大运河 6km,可进行水陆运输。大屯煤电(有限)责任公司铁路专用线通至矿区,交通较为便利,其具体交通位置见图 1-1。

三河尖井田范围东以 F1 断层、孙氏店断层(F1)与姚桥、龙东井田相邻,南以 F24、F1 断层为界,西以经线 39471500 为界,北以-1200m 各煤层底板等高线为界。井田东西长 7~15km,南北宽 3.5~6km,面积约 49km²。

本区属黄淮冲积平原,地势平缓稍向东北倾斜。地面标高 +34.3~+37.04m,地面坡降一般均小于千分之一,属南四湖南端西部堆积区。

矿区水系,总称南四湖,1960 年二级坝建成后,独山和昭阳湖为一级湖,微山湖为二级湖。南四湖总面积为 600km²,流域面积 2726km²,历史最大汇水量 107 亿 m³ (1957 年),据南阳站观测:最高水位 +36.89m,最大蓄洪量 $25.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ (1964 年 9 月),最低水位 +32.32m,最小蓄洪量 $0.57 \times 10^9 \text{ m}^3$ (1962 年 6 月),湖底高程 +31m,湖堤高程 +39m。

井田内河流稀少,除大沙河为天然河流外,尚有姚楼河、苏鲁河、义河、复兴河、徐沛运河等均为兴修水利人工开掘的河流。坡降均小于 1/2000。河水位同于湖水位,属季节性河流,农业上用河道引水灌溉,同时地面南北、东西向的灌溉渠道纵横交错。

矿区气象条件,根据沛县气象站十多年气象资料汇编(1987~2002),本区属南温带的鲁淮区,具有长江流域和黄河流域的过渡性,区内气候温和,年降雨量充沛,冬寒干燥,夏热多雨,春秋季短,常有寒潮、霜冻、冰雹、旱风等自然灾害。由于沛县地处中纬度副热带和暖温带的过渡区,因此,表现降水的集中性高,年变化大,全年降雨量平均

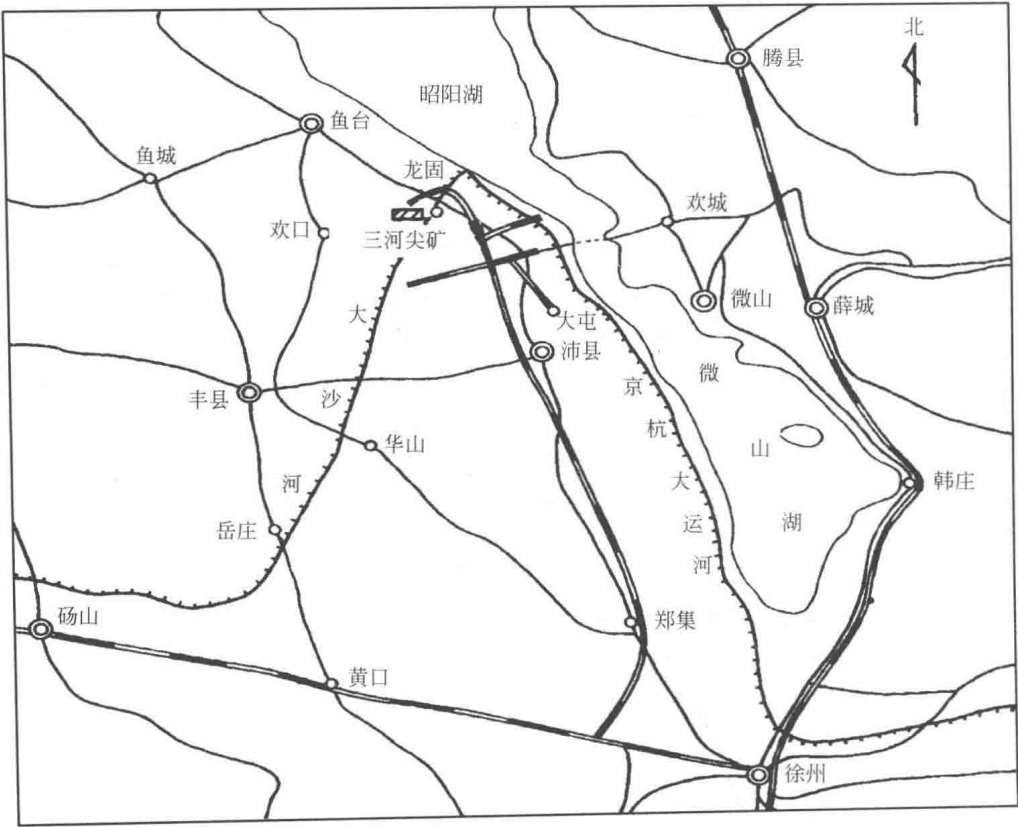


图 1-1 三河尖矿交通位置示意图

811.7mm，最大 992.1mm（1985 年），最小 546mm（1987 年），平均年降水天数 83 天，夏季平均雨量（6~8 月）476.4mm，占全年总雨量的 59.6%，其中以 7、8 两月雨量最多，形成了冬干春秋旱频繁；盛夏易涝易旱的气候特点。平均年蒸发量 1440mm。区内地面标高+34.3~+37.04m，1958 年前本区经常有洪水及内涝，1957 年 7 月南四湖湖堤决口，本区+36.50m 以下全淹，洪水持续 20 余日。全年以偏东风为多，年平均风速 3.2m/s。历年平均气温 13.8℃，日最高气温 38.4℃（1988 年 7 月 7 日，1997 年 6 月 22 日），日最低气温 -15.7℃（1990 年 2 月 1 日）。历年最大冻土深度 19cm（1969 年），平均 12cm。历年平均初霜期为 10 月 30 日，终霜期为 4 月 8 日，霜期 151 天。

地震情况：据不完全统计，自公元 462 年以来，本区共记载有感地震 30 余次，其中影响较大的有 1968 年 7 月 25 日山东莒县郯城 8.5 级地震，1937 年 8 月 18 日山东菏泽 7 级地震。本区属华北地震区，距郯庐断裂 100 余公里，该断裂总长 1000 余公里，为一长期活动的断裂带，亦为强地震带，郯城至新沂一带具有发生强地震的地质构造背景。

三河尖煤矿始建于 1979 年 12 月 15 日，设计生产能力 120 万 t/a，是国家“七·五”重点工程之一。1987 年由大屯煤电公司划归徐州矿务局，1988 年 12 月 12 日投产，1991 年达产。截止到 2000 年底共生产原煤 1596.1 万 t，其中 2000 年创历史最高水平，年产煤炭 156.1630 万 t。三河尖煤矿采用立井单水平开拓，落底水平 -700m，开采上限 -350m，回风水平 -420m、-400m。矿井目前通风方式为中央分列式；主井净直径为 5.6m，提升设备为 JKMD3.5×4 型多绳绞车和一对 12t 箕斗；副井净直径为 7.2m，提升设备为 JK-

MD3.5×4 型多绳绞车和一对 1t 双层四车加宽罐笼。

丰沛矿区恒温带深 30m，温度为 16℃，三河尖煤矿地温平均梯度为 3.24℃/100m。三河尖矿开采深度已达 -1010m，矿井高温热害现象严重。根据井下巷道已测温度，-700m 水平岩温 37.7℃；-860m 水平岩温 43.9℃；-980m 水平岩温 46.8℃。在夏季，-980m 大巷进风温度为 32℃左右，掘进头及工作面温度高达 36~37℃，严重影响工人的身心健康和矿井的安全生产，深井热害成为制约深部开采的问题之一。

三河尖矿具有丰富的奥陶系灰岩水资源，水量 1020m³/h，水温高达 50℃，其中含有大量的热能资源。

1.1.2 问题的提出

1. 21 世纪大批煤矿进入深部开采已成为必然趋势

能源是推动社会经济发展的动力，是实现社会经济、人口、资源及环境协调发展的非常重要的物质基础^[1]。目前能源的合理开发利用已成为世界各国越来越重要的问题，能源优先发展的战略越来越受到重视。进入 21 世纪，我国已经成为世界上最大的能源生产和消费国之一，随着我国经济建设的高速发展和人民生活水平的不断提高，对能源的需求量越来越大。（见图 1-2，据《2003~2009 年全国及地方国民经济和社会发展统计公报》）。根据国家统计局数据，初步测算，我国 2009 年能源消费总量为 31.0 亿 t 标准煤，比上年增长 6.3%。煤炭消费量 30.2 亿 t，增长 9.2%；原油消费量 3.8 亿 t，增长 7.1%；天然气消费量 887 亿 m³，增长 9.1%；电力消费量 36973 亿 kw·h，增长 6.2%。全国万元国内生产总值能耗下降 2.2%。主要原材料消费中，钢材消费量 6.9 亿 t，增长 22.4%；精炼铜消费量 753 万 t，增长 39.7%；电解铝消费量 1439 万 t，增长 14.4%；乙烯消费量 1066 万 t，增长 8.0%；水泥消费量 16.3 亿 t，增长 17.0%。

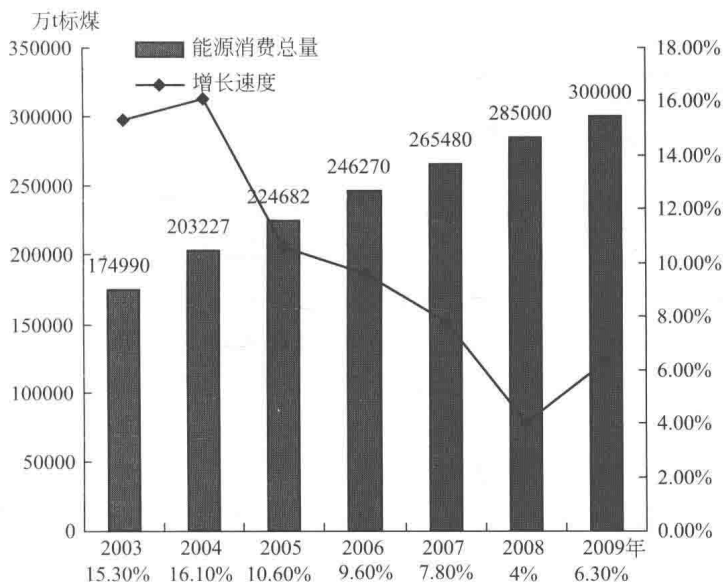


图 1-2 2003~2009 年能源消费总量及其增长速度
(据《2003~2009 年全国及地方国民经济和社会发展统计公报》)

我国是一个富煤、少气、缺油的国家。长期以来，煤炭一直是我国主要的能源资源，在一次性能源结构中约占 70% 左右，如图 1-3 所示。因此决定了今后相当长的时间内，在我国一次性能源结构中煤炭占据不可替代的重要地位^[2]。1989 年以来，我国煤炭的产量及消费量一直居世界首位。随着国民经济高速增长，煤炭的需求量将会进一步扩大。煤炭作为我国主体能源的地位在今后 50 年内不会有改变。据预测，2015 年和 2050 年中国煤炭产量将达 26.5 亿 t 和 36 亿 t 左右，如图 1-4 所示。

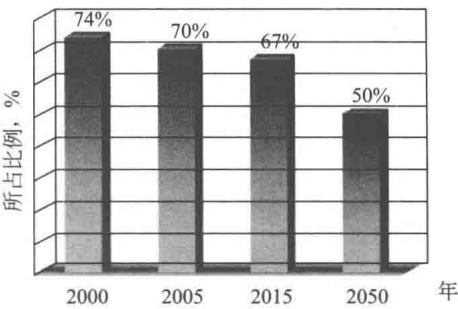


图 1-3 煤炭在一次性能源结构的比例

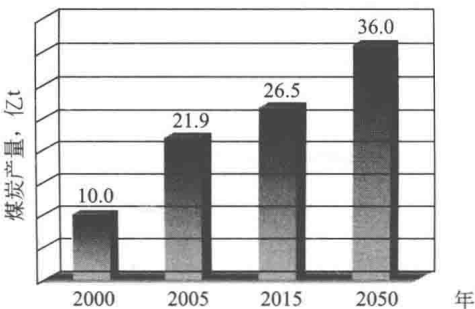


图 1-4 煤炭产量及预测

（据《2006 年全国及地方国民经济和社会发展统计公报》）

长期开采使得浅部资源日益枯竭，因此，煤炭资源开采必然向深部发展。据统计，我国煤炭埋深在 1000m 以下的储量为 2.95 万亿 t，占煤炭资源总量的 53%。目前，我国煤

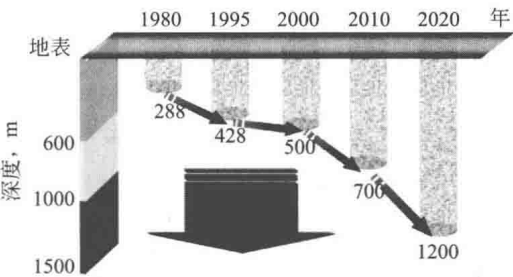


图 1-5 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势^[4]

矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加，如图 1-5，1980 年我国煤矿的平均开采深度 288m，到 1995 年已达到 428m。据 1996 年统计资料显示，我国主要国有矿区有 90 多个，井工开采的生产矿井 588 对，采深超过 800m 的深井 19 对，其中超过 1000m 的矿井就有数十个。如开滦矿业集团赵各庄煤矿水平开采深度达到 1155m，新汶矿业集团华丰矿开采深度为 1070m，徐州矿务集团的旗山矿开采深度为 1032m，张小楼井开采深度已超过 1100m。新汶矿区的其他矿，如孙村矿、长广七矿的采深也已经超过了 800m。目前，我国许多矿区的采深均已超过 600~800m，因此，我国进入 21 世纪矿山开采将大批转入深部开采阶段^[3,4]。煤炭资源的深部开采已成为必然趋势。

2. 深部开采不得不面对高温热害的问题

随着矿井开采深度的增加，原岩温度不断升高，地质条件恶化、地温升高、涌水量加大、地应力增大、破碎岩体增多，导致巷道维护困难、提升难度加大、地质灾害增多、通风降温和生产成本急剧增加、作业环境恶化、安全难以保证等一系列问题，为深部资源的开采提出了严峻的挑战^[5-9]。开采与掘进工作面的高温热害日益严重。据有关资料统计，到 20 世纪 90 年代，我国有热害的矿井已发展到 70 个^[10]（含台湾省 20

个^[11]), 仅采掘工作面气温超过 30℃ 的煤矿约 40 个, 到 2000 年, 我国煤矿的平均采深达 650m 左右, 平均原始岩温为 35.9~36.8℃, 而采深超过 1000m 的矿井, 其原岩温度高达 40~45℃, 工作面温度达 34~36℃, 大部分矿井将进入一、二级热害区^[12]。我国东部的的主要矿区徐州淮南都是严重的热害矿区, 徐州矿务局夹河矿—1000m 水平巷道洞体岩体表面温度为 37.5℃, 工作面温度为 32~34℃, 湿度 95%~100%^[13], 三河尖矿受地温异常的影响温度热害更为严重, 根据井下巷道已测温度, -700m 水平岩温 37.7℃; -860m 水平岩温 43.9℃; -980m 水平岩温 46.8℃。在夏季, -980m 大巷进风温度为 32℃ 左右, 掘进头及工作面温度高达 40℃, 湿度 95%~100%。国外, 南非西部矿井在深 3300m 处, 气温达到 50℃; 日本丰羽铅锌矿受热水影响, 在深 500m 处气温高达 80℃^[14]。

3. 高温热害严重影响生产安全

高温环境下作业, 对人的身体健康造成严重的伤害, 体能下降、工作效率降低, 易产生高温中暑、热晕、神经中枢系统失调等疾病, 从而感到精神恍惚、疲劳、全身无力、昏昏沉沉, 这种精神状态成为诱发事故的原因, 严重影响生产安全^[15-18]。

南非公共卫生秘书 E·H·克卢弗博士对金矿高温事故首先进行了系统的研究, 研究结果发现在 1924~1931 年的七年中因高温引起的死亡事故 92 次, 其中的 67 次是发生在工作面, 1930 年在两个矿山发生了 69 次死亡事故, 其开采深度均在地表以下 1700m。其湿球温度超过了 30℃, 受到高温威胁的工人人数约 14000 人^[19-22]。1935 年 Dreosti 在一份报告中叙述了这一时期在金矿发生的高死亡率的紧急情况: 在西梯深金矿高温事故已成为一严重威胁, 特别是开采深度还在继续增加。而且, 在适应性高温训练期间, 每工班的生产量只相当于正常工班的 1/3。效率的损失对矿山的财政状况影响深远^[15]。据日本北海道七个矿井的调查, 气温在 40℃ 以上的工作面比 30~40℃ 的工作面, 事故率高 1.5~2.3 倍^[23]。

我国淮南九龙岗矿 (深 830m, 工作面温度 28℃ 左右), 工人中高血压及心悸病患者占较大比例; 1974 年, 平顶山八矿东一石门 (深 510m, 气温 30℃ 左右) 工作面涌出热水温度为 36℃, 水量仅 12m³/h, 竟然使工作面温度上升至 33~34℃, 施工人员曾多次发生中暑昏倒及呕吐的现象, 那里工作的人员均患有传染性湿疹, 几乎无人幸免, 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 28~35℃ 的热水涌出, 巷道内气温在 22~29.6℃ 之间, 出水点附近可达 33℃^[24-28], 据 1976 年统计, 井下工人有 415 人患各种皮肤病, 也发生过多起中暑昏倒的病例^[17]。2006 年我国某煤矿因高温热害, 现场热晕及中暑 172 人次, 死亡事故发生 5 起。因此我国《煤矿安全规程》规定: “采掘工作面的空气温度超过 30℃, 必须停止作业”^[29]。因此, 降低工作面温度, 改善工作环境, 治理深井热害, 迫在眉睫。

深井高温热害, 在一定条件下, 可作为能源加以利用。几十年来, 我国在地热利用方面已开展了大量的研究与实践, 并且取得了较好的研究成果。但在深井高温热害能源化方面还刚刚起步, 还有许多问题亟待解决。

本书就是基于上述问题和我国深矿井高温热害的现状而提出的。在对全国煤矿解决高温问题的经验和教训进行调研的基础上吸收已有的研究成果, 采用理论和实际工程项目相结合的方法进行研究。本书将用理论分析、数值模拟以及工程实例三者相结

合的方法,对三河尖矿深部高温热害资源化问题进行研究,提出一条行之有效的策略。

1.2 国内外深井高温热害研究现状

深井高温热害资源化利用技术研究,首先需要了解深井高温热害的特点、规模、危害程度,然后研究其合理的控制对策与利用技术。对矿井高温热害的研究国内外已有很长的历史,现分别从国内外研究现状两个方面进行阐述。

1.2.1 国外研究现状

据文献记载^[30],对于深井高温的研究始于16世纪。1740年,法国人曾对金属矿地温进行过观测。18世纪末,英国人开始进行矿井巷道的温度观测,观测数据显示,矿井巷道温度随着深度的增加逐步升高。19世纪后半叶开始进行钻孔测温工作,1882~1900年间,在欧洲,对孔深分别为1959m和2221m的两个深孔的地温进行了观测工作,测得的孔底温度分别为69.3℃和83.4℃,测得其增温梯度均为3.12℃/100m。因此认为地壳的增温梯度大约为3℃/100m。

20世纪20~50年代,由于世界各国煤矿的开采规模都不大,开采深度较浅,矿井地热问题并不十分突出,关于矿井围岩的热计算研究成果很少。主要是:1923年德国HeistD rekopt在假定巷道岩壁温度为稳定周期性变化的条件下,揭示了巷道围岩内部温度场的变化规律,并提出了围岩调热圈的概念^[30-33]。1939~1941年南非的vBiccandJ appe提出了风温计算的思路和方法;1951年日本平松良雄、田野,英国Van Heerden综合研究了巷道与围岩的热交换,给出了理想条件下的围岩温度场的理论解,这与用拉普拉斯变换得出的理论解是一致的^[34~37];1953年苏联学者提出了较精确的传热系数和温度场的算法^[38];上述研究成果为以后的现代经典计算方法的研究奠定了基础^[39]。

从20世纪50年代末至70年代初,由于电子计算机逐步应用于风温预测计算,使得风流热计算方法得到改善。比如1964年联邦德国的Mucke等提出了用圆板状试块测定岩石导热系数;1966年联邦德国的Nottort等又研发了矿井围岩的热物理参数的测试技术,并发表了利用数值分析方法来描述矿井巷道围岩温度场的数篇论文,该技术得到了初步推广应用^[40]。1967年Shernat对一段矿井巷道围岩进行现场强制加热,然后测量巷道围岩的温度,并将实测温度和理论计算温度进行对比,得到了围岩换热的部分参数,同年南非的Starfield课题组,研究了矿井巷道围岩在潮湿条件下热交换规律,提出的计算方法更为实用^[41]。

从20世纪70年代中后期开始,经典计算理论的研究进一步深入,研究成果及相关的专著相继出版,其中,有代表性的有日本平松的《通风学》、德国Fusi的《矿井气候》、舍尔巴尼的《矿井降温指南》等^[42-46]。矿井热害问题的研究不断进行,采掘工作面的热害问题得到进一步重视。1971年联邦德国的J. Voss等提出了矿井采掘工作面风温计算的理论;1975年美国的J. Mcguaid提出了矿井工作面热害控制的对策及成套技术^[47-48];1977年保加利亚的Shcherban对矿井采掘工作面的风温计算进行了比较详细的阐述。

20 世纪 80 年矿井风温的理论研究进一步发展, 研究水平得到进一步提高, 表现在发表论文数量的增加, 及研究成果的应用及普及, 比如日本的内野用差分法分析并得出了不同形状、不同岩性条件下岩石调热圈的温度场分布规律, 提出了在进风温度变化条件下的风温计算公式^[49]; 南非 Starfield 也提出了不稳定传热系数条件下更精确的计算公式。上述研究均对风流与围岩间的换系数、当量热导率、湿度系数以及热湿比进行了观测统计并提出计算图表^[50]。

据国外相关资料来看, 国外的热矿山尽管出现得较早, 在许多技术问题上比我国的先进。但也还未拥有在矿井设计前就能够掌握完整地温资料的能力, 达到在设计中周密安排降温技术措施的程度。许多国家往往是在老矿井延深过程中出现了热害之后才开始进行地温观测, 并采取各种实验性的降温技术措施。南非金矿发展到热害严重, 多次造成工人死亡的程度时, 才引起相关部门的重视^[51]。可见, 对于矿山热害程度预测的理论技术仍处于广泛实践的阶段, 远远没有达到成熟的程度。

1.2.2 国内研究现状

我国系统地进行地热研究工作始于新中国成立后, 特别是从 20 世纪 70 年代开始, 在李四光教授的大力倡导下, 掀起了大规模进行地热普查的高潮^[52]。

我国煤田勘探中的钻孔测温, 大约始于 20 世纪 60 年代。但资料零星, 孔数甚少, 测温工作也不是很正规。现在可以见到的该时期测温钻孔资料有: 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, 为将来进一步进行煤田勘探工作初步积累了经验^[53]。

1974~1978 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, 对整个平顶山矿区, 开展了研究工作。1978 年 5 月, 前煤炭工业部地质局在平顶山召开了由各省、市、自治区煤田勘探技术人员参加的地温会议, 对这一研究给予充分的肯定, 同时还决定在全国煤田勘探中开展测温工作, 并组织有关人员着手编写《矿山地热概论》一书并于 1981 年出版。1980 年颁布《煤炭资源地质勘探规范》(试行), 从此地温条件评述成为地质报告中的规定内容, 地温已被正式认定为煤矿的一个新的开采技术条件^[54]。1982 年颁布实施的《矿山安全条例》条例规定: 对有热害的矿山应在其地质勘查报告中提供地热资料; 1986 年国务院颁发的《煤炭资源地质勘探规范》也对地温的勘查、评价等做了相关的规定。由此可以看出, 我国政府各部门对矿山的安全生产、矿工健康等给予高度重视。

20 世纪 70 年代初至 90 年代初, 中国科学院地质研究所地热室与原煤炭工业部合作, 先后对平顶山、开滦、黄县煤矿、兖州以及豫西 6 个煤矿进行了专题研究。该项研究使得与矿山地热有关的理论在采矿及勘查单位得到了进一步推广普及; 研发了测量矿井地热的仪器设备, 比如岩石的热物理性质测试仪器和有较高精度的测温设备, 从而为矿井地温的测量工作开展提供了有效技术手段; 以热平衡理论为基础, 提出了简易测温、近似稳态测温及稳态测温方法^[55]; 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, 预测精度经验值达到 1~2℃, 其预测方法具有推广价值; 总结了矿山地热的研究方法, 提出了矿山地温类型的划分方法, 对地质勘探和矿井地质工作中的地热研究有重要意义^[56]。

1978 年以后, 地温测量工作在煤田地质勘探中得以全面开展, 它标志着矿山地热工作进入了一个新的发展阶段。从此改善了煤矿严重缺乏地温资料的状况, 且提供了矿山规