

■ 张 毅 郭东明 著

中国深部煤矿 地热资源评价及利用分析

ZHONGGUO SHENBU MEIKUANG DIRE ZIYUAN PINGJIA JI LIYONG FENXI



冶 金 工 业 出 版 社
Metallurgical Industry Press

Ⅲ 深部煤矿 地热资源评价及利用分析

张 毅 郭东明 著

北 京
冶金工业出版社
2012

内 容 提 要

本书根据我国不同区域的地温资料,分析了含煤地层地温场的分布特征。通过研究典型高地温矿井——夹河矿 200~1200m 深煤系地层大量地温实测资料和其深部采场热源特征,总结出该矿深部地温场及地温梯度的变化趋势和规律,讨论了其深部采场热交换的影响因素;分析了不同进水温度和提取温差对水源热泵性能的影响。通过比较深部矿井地层涌水热害资源化利用与传统燃煤锅炉技术,对 5 个地区的矿井涌水温度与煤炭价格平衡点进行了经济性分析。

本书可供地下工程、岩土工程、地热工程及采矿工程等专业的工程技术和管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国深部煤矿地热资源评价及利用分析/张毅,郭东明著.

—北京:冶金工业出版社,2012.5

ISBN 978-7-5024-5921-5

I. ①中… II. ①张… ②郭… III. ①煤系—地热场—
资源评价—中国 IV. ①P618.11 ②P314.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 073713 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 宋 良 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5921-5

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 5 月第 1 版,2012 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 4.875 印张; 117 千字; 145 页

19.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着国民经济的快速发展和对能源需求的日益增长，我国煤矿开采也不断向深部发展，伴随而来的制约深部开采的关键性难题——深部热害问题，也正变得日益严重。热害问题如何解决，直接影响到深部资源的安全开采。地热从有益的一面来讲可认为是一种清洁能源——地热能，若能将治理与利用同时并行，代替现有的燃煤锅炉，更是利国利民的事业。本书从技术和经济两个方面着手，探讨了我国深部地温场，特别是深部煤矿地热资源的利用，对深部开采及地热能利用具有一定的参考实用价值。以往的书籍多从深井热害治理角度来论述，而涉及热害资源化利用方面的却较少，本书可弥补这方面研究的不足。

本书共分为6章。第1章介绍了我国矿井涌水利用现状和矿井涌水作为地热资源利用所遇到的问题以及全书的内容结构；第2章通过收集分析我国不同区域地温梯度随深度变化的资料，研究了我国千米深含煤地层地温梯度变化规律，结合我国煤炭区域分布特征，分析了1000m、800m和600m深含煤地层的地温场分布特征，为千米内矿井涌水温度范围的研究提供可靠依据；第3章进一步研究了典型高地温矿井——夹河矿深部地温场的分布规律和地温梯度的变化趋势及规律；第4章基于对夹河矿深部采场热源的分析，讨论了

其深部采场热交换的影响因素,通过将深部采场考虑辐射时的模拟结果与实测结果相对比,初步判断深部采场热环境评价应考虑三种热传导方式,并推导出考虑导热、对流和辐射共同作用时深部地层的热传导微分方程;第5章针对煤矿向深部发展后矿井温度急剧升高的特点,将深井热害通过热能采集及利用系统变废为宝,但同时发现该系统性能除受压缩机性能、水源热泵机组的工质、水源的水质以及水源的供水稳定性等客观因素影响外,矿井涌水温度对水源热泵的制热量及COP值影响较大,进而分析了不同进水温度和提取温差对水源热泵性能的影响,初步确定了其最优运行参数;第6章通过对深部地层热害资源化利用与传统燃煤锅炉技术的分析比较,在对比我国5个不同纬度地区1000m、800m和600m深矿井涌水温度范围的基础上,对这5个地区的矿井涌水温度与煤炭价格平衡点做了经济性分析。

本书由张毅和郭东明共同撰写,其中郭东明参与了本书第2章、第3章的撰写,并负责全书的修改和整理工作;张毅撰写了其余章节内容,同时负责全书的统稿工作。本书在撰写过程中得到了中国矿业大学(北京)何满潮教授的无私指导和帮助;清华同方的于卫平高级工程师也对本书的撰写给予了许多帮助,在此对他们表示衷心的感谢!

本书的撰写和出版得到了中央高校基本科研业务费(2009QL04、2010QL04)、国家重点基金项目(51134005)等资金的资助;得到了中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室、岩土工程国家重点学科、工程力

学博士后科研流动站、中国矿业大学（北京）力学与建筑工程学院、徐州矿务集团有限公司等单位的大力支持和协助，在此一并表示感谢！

在撰写过程中，参考了许多与地温场和矿井降温方面相关的著作、学术期刊论文及互联网刊载文章，可以说没有众多科研工作者的艰辛劳动，就没有本书立足的基础。在此特向给予本书写作以启迪、支撑的相关文献的作者表示感谢！

由于作者水平所限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者
2012 年 2 月

目 录

1 绪论	1
1.1 能源概述	1
1.1.1 能源结构现状、问题及发展趋势	1
1.1.2 能源政策	12
1.2 矿井涌水利用研究现状	17
1.2.1 我国矿井涌水情况	21
1.2.2 矿井涌水热能利用 HEMS 技术	23
1.3 矿井涌水作为地热资源利用所遇到的问题	25
1.3.1 矿井涌水的水质问题	25
1.3.2 矿井涌水的流量和温度问题	29
1.4 本书的内容与结构	30
2 我国千米深度地温场分布特征研究	32
2.1 地温场及地温梯度基本概念	32
2.2 中国地温分布的控制因素	35
2.2.1 区域地质构造的控制作用	35
2.2.2 深部地壳结构的控制作用	36
2.3 中国地温分布的影响因素	36
2.3.1 岩石性质的影响	36
2.3.2 火山活动与岩浆作用的影响	37
2.3.3 地下水活动的影响	37

2.3.4 地形和降水的影响	38
2.3.5 温泉的影响	38
2.4 我国地温梯度的分布特征	38
2.5 我国含煤地层地温场分布及其特征	48
2.5.1 我国含煤地层 1000m 深地温场分布	48
2.5.2 我国含煤地层 800m 深地温场分布	49
2.5.3 我国含煤地层 600m 深地温场分布	51
结语	52
3 夹河矿深井地温场特征分析	55
3.1 夹河矿深井概况及存在问题	55
3.2 夹河矿地质构造状况及其热害类型	56
3.3 夹河矿深部地温变化特征	58
3.3.1 地温变化特征分析	59
3.3.2 不同深度地温变化规律分析	67
3.3.3 地温梯度变化特征分析	69
3.3.4 不同深度地温梯度变化规律分析	75
3.4 夹河矿深部地温变化规律	75
结语	77
4 夹河矿深部采场热交换规律	78
4.1 引言	78
4.2 夹河矿深部热源分析	78
4.3 深部地层热传导方式	79
4.3.1 导热	80
4.3.2 对流	81
4.3.3 辐射	82

4.4 深部采场温度场热环境分析	83
4.4.1 9435 工作面实测情况	83
4.4.2 9435 工作面模拟情况	85
4.5 采场内温度场的热传导微分方程	86
结语	92
5 矿用水源热泵系统及其性能分析	93
5.1 水源热泵系统替代燃煤锅炉的必要性和可行性	93
5.2 水源热泵性能影响因素	93
5.2.1 客观因素	94
5.2.2 主观因素	94
5.3 相同温差不同进水温度对 COP 值的影响	95
5.3.1 制热量与进水温度关系分析	97
5.3.2 输入功率与进水温度关系分析	99
5.3.3 制热量与输入功率关系分析	100
5.4 相同进水温度不同提取温差对 COP 值的影响	104
5.4.1 制热量与提取温差关系分析	105
5.4.2 输入功率与提取温差关系分析	105
5.4.3 COP 值与提取温差关系分析	105
5.4.4 相同进水温度不同回水温度下性能综合 分析	106
结语	107
6 矿井涌水温度与煤炭价格平衡点分析	109
6.1 不同进水温度下耗电量与耗煤量对应关系分析	109
6.2 不同纬度地区不同深度矿井涌水温度范围分析	113
6.2.1 哈尔滨周围地区不同深度矿井涌水温度	

范围	113
6.2.2 沈阳周围地区不同深度矿井涌水温度范围	115
6.2.3 北京周围地区不同深度矿井涌水温度范围	116
6.2.4 徐州周围地区不同深度矿井涌水温度范围	118
6.2.5 资兴周围地区不同深度矿井涌水温度范围	119
6.3 不同纬度地区涌水温度与煤炭价格平衡点分析	121
6.3.1 哈尔滨地区矿井涌水温度与煤炭价格平 衡点	121
6.3.2 沈阳地区矿井涌水温度与煤炭价格平衡点	124
6.3.3 北京地区矿井涌水温度与煤炭价格平衡点	127
6.3.4 徐州地区矿井涌水温度与煤炭价格平衡点	129
6.3.5 资兴地区矿井涌水温度与煤炭价格平衡点	132
结语	135
参考文献	137

1 绪 论

能源是国民经济发展的基础，我国是以煤炭为主的能源生产和消费大国，煤炭开采过程中不但地温会随着开采深度的加深而升高，从而导致深井热害问题的出现，而且在开采过程中往往还会伴随着大量矿井涌水的排放。

本书在分析我国地温场随深度变化规律的基础上，提出将矿井涌水作为地热资源来利用，针对其水质、流量和温度对水源热泵系统的影响，分析了不同工况下水源热泵的工作性能及其变化趋势；并与传统的燃煤锅炉供暖方式对比，在制热量相同的条件下，比较了水源热泵系统的耗电量与燃煤锅炉系统的耗煤量；分析了不同温度矿井的涌水范围对应的平衡煤价。

1.1 能源概述

1.1.1 能源结构现状、问题及发展趋势

能源是推动社会经济快速发展的动力，能源的可持续开发和利用则是实现社会经济、人口、资源、环境协调发展的重要基础与物质保障^[1]。煤炭是世界上储量最多、分布最广的常规能源，也是重要的战略资源。它广泛应用于冶金、电力、化工等各类工业生产及居民生活领域。在未来数十年内，煤炭仍将是一种主要能源。

我国是一个富煤、少油、贫气的国家，是世界上唯一以煤炭为主的能源消费大国，燃煤占世界煤炭消费量的 27%；二氧

化碳排放量占全世界的 13%，仅次于美国，居世界第二位；二氧化硫排放量为世界第一^[1]。

我国的煤炭资源丰富，煤炭产量已多年位居世界首位^[2]。我国煤炭资源占一次能源构成的 70%，已探明的煤炭资源量占世界总量的 11.1%，而石油和天然气仅占世界总量的 2.4% 和 1.2%。煤炭在我国一次性能源生产和消费构成中均占 2/3 以上^[3]。据有关部门预测，在未来 20~50 年内，我国一次能源生产和消费以煤炭为主的格局不会改变^[4,5]。我国已探明的煤炭储量中，埋深在 1000m 以下的为 2.95 万亿吨，占煤炭资源总量的 53%^[6,7]。根据煤炭行业协会统计，2011 年我国煤炭产量达到 35.2 亿吨，约占一次能源生产总量的 78.6%。长期开采使得浅部资源日益枯竭，因此，煤炭资源开采向深部发展是必然的趋势。目前，我国煤矿开采深度正以 8~12m/a 的速度增加，东部矿井更是以 10~25m/a 的速度发展，预计在未来的 20 年，我国很多煤矿将进入 1000~1500m 的开采深度^[6,8]。煤炭资源的深部开采问题已经摆在我们面前。

随着开采深度的增加，地质条件出现恶化、破碎岩体增多、地应力增大、涌水量加大、地温升高，从而导致提升难度加大、作业环境恶化、巷道维护困难、地质灾害增多、通风降温设施扩容、生产成本急剧增加、安全难以保障等一系列问题，给深部资源的开采带来了严峻的挑战^[9~13]。

在深部开采条件下，地温升高是工作条件恶化的重要原因，持续的高温将对井下工作人员的身体能力和工作能力造成极大的伤害，并使劳动生产率大大下降^[14]。

20 世纪 50~60 年代，国内外一些深热矿井的热害问题日趋严重。到了 70 年代，矿井热害更加突出，并有从局部发展成带普遍性的趋势。到 90 年代，仅我国有热害的矿井就已发展到 70

个^[15] (含台湾省 20 个^[16])，采掘工作面气温超过 30℃ 的煤矿约 40 个，最高达 40℃；某些稀有金属矿山还可达 45℃。在国外，南非西部矿井，在深度 3300m 处，气温达到 50℃；日本丰羽铅锌矿，由于受地下热水的影响，在深 500m 处气温甚至高达 80℃^[17]。

我国淮南九龙岗矿（深 830m，工作面温度 28℃ 左右）的工人中，受热害影响所致的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）工作面涌出温度为 36℃ 的热水，水量仅有 12m³/h，却使工作面温度上升至 33~34℃，施工的工程兵战士中曾多次发生中暑昏倒及呕吐的现象，凡是在那里工作的人均患有传染性湿疹，几乎无人幸免，冬季感冒的发病率也特别高。广西合山矿务局里兰矿，由于井下有 28~35℃ 的热水涌出，巷道内气温保持在 22~29.6℃ 之间，出水点附近更可达 33℃，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^[18]。

高温环境不但会对工人的身体健康造成严重的伤害，而且还可引起人的中枢神经系统失调，从而使人感到精神恍惚、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。

20 世纪 20 年代，南非威特沃特斯兰中部的许多矿山由于开采深度的加大，原岩温度升高，其工作面的湿球温度超过 30℃，1924 年第一次出现了高温人身事故。图 1-1 列出了在 1924~1970 年间，每年在井下劳动的工人总人数和发生高温人身事故的次数，从图中可以明显地看出，1924~1930 年期间，高温事故率在急剧上升^[19]。

曾为南非公共卫生秘书的 E·H·克卢弗博士对金矿高温事故首先进行了系统的研究，研究结果于 1932 年公开发表^[20]。该研究发现在 1924~1931 年的七年中因高温引起的死亡事故为

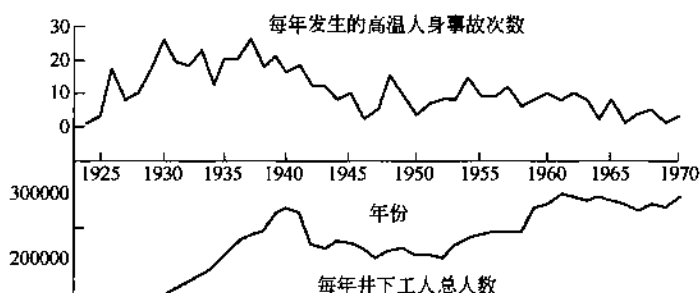


图 1-1 高温人身事故次数与井下工人总人数关系图^[19]

92 人，1930 年仅在两个矿山就发生了 69 次死亡事故，其开采深度均在地表以下 1700m；92 次死亡事故中有 67 次是发生在工作面，其湿球温度均超过了 30℃，受到高温威胁的工人人数估计有 14000 人。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^[21]：“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，在高温适应训练期间，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经济效益影响深远。”

据日本北海道七个矿井的调查统计，气温在 30℃ 左右的工作面事故率比气温在 30~40℃ 的高 1.5~2.3 倍^[22]。

据南非多年的调查统计，当矿内作业地点的空气湿球温度达到 28.9℃（相当于干球温度 30℃）时，开始出现中暑死亡事故^[23]。表 1-1 为南非金矿井下温度与事故率关系表^[24]。

表 1-1 南非金矿井下温度与事故率关系表^[24]

作业地点气温/℃	27	29	31	32
工伤频次/次·千人 ⁻¹	0	150	300	450

由此可见,热害已成为限制煤炭资源深部开采的主要障碍之一,目前已得到普遍的重视。我国的《煤炭资源地质勘探低温测量若干规定》指出,平均地温梯度不超过 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的地区为地温正常区,超过 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的地区为高温异常区。同时该规定还指出,原始岩温高于 31°C 的地方为一级热害区,原始岩温高于 37°C 的地区为二级热害区^[25]。我国《煤矿安全规程》第102条规定:“生产矿井采掘工作面空气温度不得超过 26°C ”,“当空气温度超过 26°C 时,必须缩短超温点工作人员的工作时间,并给予高温保健待遇”;“采掘工作面的空气温度超过 30°C ,必须停止作业”;“新建、改扩建矿井设计时,必须进行矿井风温预测计算,超温地点必须有制冷降温设计,配齐降温设施”^[26]。

相关统计数据^[27~29]表明了我国的能源现状:2001~2008年间,我国每年一次性能源(不可再生能源)的消费比重均在90%以上(见表1-2),而地热能、太阳能、风能、生物质能等可再生新能源的利用率很低(见图1-2)。

表 1-2 2001~2008 年中国能源消费总量及构成^[27~29]

年份	能源消费总量 /万吨标准煤	占能源消费总量比重/%			
		煤炭	石油	天然气	可再生新能源
2001	143199	66.7	22.9	2.6	7.8
2002	151797	66.3	23.4	2.6	7.7
2003	174990	68.4	22.2	2.6	6.8
2004	203227	68.0	22.3	2.6	7.1
2005	224682	69.1	21.0	2.8	7.1
2006	246270	69.4	20.4	3.0	7.2
2007	265480	68.3	20.3	3.2	8.2
2008	285000	67.6	20	3.4	9

注:数据来源于中国统计年鉴 2001~2006、2007~2008 年国民经济和社会发展统计公报以及中国能源网。

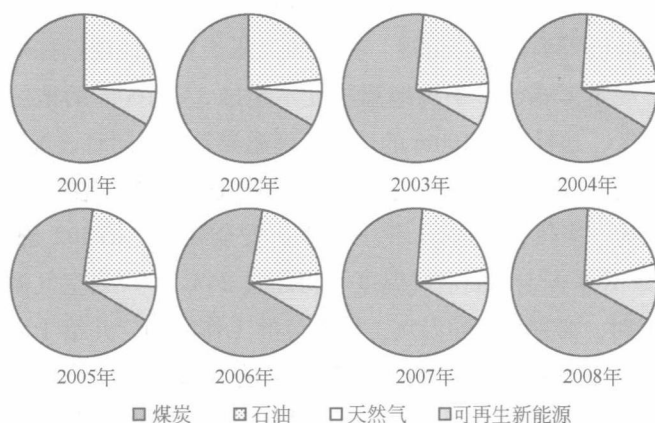


图 1-2 2001 ~ 2008 年中国能源结构图

从图 1-2 可以看出,我国能源消费结构中以煤炭为主的格局相当长一段时间内是不会改变的,新能源的利用率很低,仍然处于我国能源消费结构的次要地位,但所占比例增幅最快,发展势头良好。

我国能源消费构成的特点:

(1) 煤炭的生产和消费比重偏高。2001 ~ 2006 年煤炭年产量占能源总产量的比重呈逐年递增趋势,2006 年这一比重上升至 76.7%。

(2) 石油的生产量低,消费量高,供需缺口仍需依赖进口来满足。与煤炭资源相反,石油在能源总产量中的比重逐年递减,2006 年仅为 11.9%,而其消费量的比重五年来均超过 20%。

(3) 新能源利用率低,发展潜力大。一方面国内目前对新能源的利用率不足 10%,另一方面我国地域辽阔,地热能、太阳能、风能、生物质能等能源蕴藏丰富,开发潜力巨大。

煤炭的用途十分广泛，根据使用目的可分为两大用途，即动力用煤和炼焦用煤。

动力用煤的主要种类有：

(1) 发电用煤。我国约 $1/3$ 以上的煤用来发电，电厂利用煤的热值，把热能转变为电能。目前平均发电耗煤为标准煤 $370\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右。

(2) 蒸汽机车用煤。蒸汽机车用煤占动力用煤的 2% 左右，蒸汽机车锅炉平均耗煤指标为 100 千克/(万吨·千米) 左右。

(3) 建材用煤。建材用煤约占动力用煤的 10% 以上，其中以水泥生产用煤量最大，其次为玻璃、砖、瓦等生产用煤。

(4) 一般工业锅炉用煤。除热电厂及大型供热锅炉外，一般企业及取暖用的工业锅炉型号繁多，数量大且分散，用煤量约占动力煤的 30% 。

(5) 生活用煤。生活用煤的数量也较大，约占燃料用煤的 20% 。

(6) 冶金用煤。冶金用煤主要为烧结和高炉喷吹用无烟煤，其用量不到动力用煤量的 1% 。

炼焦煤的主要用途是炼焦炭，焦炭由焦煤或混合煤高温烧炼而成，一般 1.3 吨左右的焦煤才能炼出 1 吨焦炭。焦炭多用于炼铁，是目前钢铁行业的主要生产原料，被喻为钢铁工业的“基本食粮”。

煤炭用作动力煤带来的一个严重后果就是产生大量的二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、氧化亚氮 (N_2O)、水汽 (H_2O) 和臭氧 (O_3) 等温室气体，它们会促使全球气候变暖，从而带来一系列危及人类生存与发展的问題，虽是天灾，却也是人祸。在 1997 年于日本京都召开的联合国气候化纲要公约第三次缔约国大会所通过的《京都议定书》，明订针对六种温室气体进行削