



国家自然科学基金资助 (50804021)

辽宁省高校杰出青年学者成长计划资助 (LJQ2011031)

裂隙岩体的流固耦合 传热机理及其应用

The Heat-transfer Mechanism and Application of Fractured Rock in Fluid-solid Coupling

张树光 李永靖 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

裂隙岩体的流固耦合 传热机理及其应用

张树光 李永靖 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 张树光 李永靖 2012

图书在版编目 (CIP) 数据

裂隙岩体的流固耦合传热机理及其应用 / 张树光, 李永靖著. —沈阳: 东北大学出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-5517-0128-0

I. ①裂… II. ①张… ②李… III. ①高温矿井—岩体—传热—研究
IV. ①TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 049167 号

内容简介

针对高温矿井的工程实际, 建立含水裂隙岩体的二维和三维传热模型, 对裂隙岩体渗流-应力-温度三场耦合作用下的二维模型、渗流-温度耦合作用下的三维模型, 通过有限元计算和分析, 获得岩体的流固耦合传热机理。基于信息元数据模型, 选取影响岩土体导热能力的物理参数作为信息元, 单独分析孔隙率、裂隙、裂隙水流速和流体黏性作为信息元对岩土体传热的不同作用, 得出信息元和等效导热系数之间的关系及对岩体温度场的影响, 建立深部岩体的流固耦合传热机理理论, 为矿井热害治理提供基础。

本书可供矿井高温治理和工程热物理等方面的科学技术与教学人员参考。

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110004

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印刷者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印张: 11.5

字数: 232千字

出版时间: 2012年3月第1版

印刷时间: 2012年3月第1次印刷

责任编辑: 郎坤 孙锋

封面设计: 刘江扬

责任校对: 一方

责任出版: 唐敏智

ISBN 978-7-5517-0128-0

定 价: 30.00 元

前 言

目前,煤炭在我国的能源消耗结构中所占的比例为69%,在今后的20年内,煤炭仍将占据能源消耗结构的60%左右,但我国大部分矿山的浅部资源已接近枯竭,深部开采将是解决能源紧张的必由之路。大量的深部开采矿井、金属矿山已经面临高温带来的巨大压力,井下高温已对地下工作环境构成威胁,成为制约安全生产的关键因素之一。另外,我国的地热资源非常丰富,直接利用量很大。我国大陆地区地热资源分布丰富的地区有西藏、云南、广东、河北、天津、北京等。地热作为地热发电、地热温室、地热养殖和温泉浴疗的清洁、无污染能源备受各国重视,我国直接利用的总装机容量已超过2GW,居世界第一位,但年产能值不高。加大地热资源的开发利用、提高地热产能已引起广泛的关注,而地热循环本质上属于水-岩热交换问题,研究深部岩体的传热机理对深部开采面临的高温威胁和加大地热资源的开发利用,也具有很强的必要性和紧迫性。

影响深部围岩温度场的因素涉及围岩地球物理特征、水热迁移特性及围岩与流体的换热等。围岩本身的构造不仅决定了其导热性质和渗流特性,同时,裂隙、节理等构造面的存在直接影响了水热迁移的过程;开采扰动进一步加剧了矿场围岩裂隙和节理的孕育、发展,使得水热迁移过程复杂化;由构造应力场或残余构造应力场叠合累积而形成的高应力,在深部岩体中形成了异常的地应力场;由于高地应力、渗流场和开采扰动的作用,温度场分布异常。近年来,针对以上问题的研究逐步展开,包括裂隙岩体流固耦合特征研究、热-流-固耦合渗流的数学模型研究、复杂应力条件下裂隙岩体渗流-应力耦合机理研究以及高温作用下裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合分析等。这些问题的研究对于揭示深部岩体的传热机理起到了至关重要的推动

作用。

本书以深部开采所面临的岩体高温这一亟待解决的工程实际为背景，兼顾地热资源开发与利用中遇到的深部岩体传热问题，结合深部岩体的实际情况，提出采用应力 - 渗流耦合理论来研究深部采动围岩的传热过程和机理。针对深部工程地质环境的复杂性，开展应力 - 渗流 - 温度耦合作用下采动岩体传热机理的研究，完善深部工程的水热迁移规律理论，有助于推动解决高温对深部开采带来的瓶颈问题，有利于地热资源的开发利用。

本书内容是在国家自然科学基金（50804021）和辽宁省高校杰出青年学者成长计划（LJQ 2011031）的资助下取得的研究成果。

编 者

2012 年 2 月

目 录

第一章 概 述	1
第一节 深部岩体的高温问题	1
第二节 我国深井地温状况	3
第三节 国内外研究现状	6
第二章 岩体传热的基本理论	10
第一节 岩体传热中的工程热力学	10
第二节 热传导基本方程	12
第三节 岩体中的对流传热	15
第三章 裂隙岩体的导热性分析与测试	18
第一节 裂隙岩体传热原理	18
第二节 裂隙岩体流热耦合导热系数测定方法	20
第三节 流热耦合导热系数的测试结果分析	24
第四章 单裂隙岩体的水-岩传热分析	30
第一节 岩体的结构性	30
第二节 单裂隙水流瞬态温度场理论分析	32
第三节 单裂隙水流作用下裂隙岩体稳定温度场分析	42
第五章 深部巷道围岩温度场分析	50
第一节 地下岩体温度场的基本特征	50
第二节 深部巷道围岩温度场的形成机制	54
第三节 深部巷道围岩温度场耦合模拟分析	58
第六章 裂隙岩体的渗流-温度耦合分析	64
第一节 裂隙岩体渗流场与温度场耦合作用	64
第二节 裂隙岩体的流热耦合控制方程	66
第三节 渗流作用下裂隙岩体温度场的数值模拟	74

第七章 裂隙岩体的应力 - 温度耦合分析	84
第一节 裂隙岩体的本构方程	84
第二节 温度作用下巷道围岩的应力场分布	85
第三节 应力作用下巷道围岩的温度场分布	90
第八章 裂隙岩体的应力与渗流耦合分析	93
第一节 裂隙岩体应力与渗流耦合的基本理论	93
第二节 岩体应力与渗流的耦合关系	94
第三节 巷道围岩应力渗流耦合分析	97
第九章 裂隙岩体的流固耦合传热分析	104
第一节 裂隙岩体的渗流 - 应力 - 温度耦合数学模型	104
第二节 巷道围岩温度场的流固耦合数值模拟分析	110
第三节 裂隙岩体温度场的流固耦合作用机理分析	113
第十章 裂隙岩体传热影响因素的反分析	115
第一节 岩体孔隙率对传热的影响	115
第二节 岩体裂隙对传热的影响	120
第三节 流体流速对传热的影响	125
第四节 流体黏性对传热的影响	131
第十一章 岩土体传热在工程中的应用	136
第一节 含水地层巷道围岩的温度场	136
第二节 风流与围岩换热的数值模拟分析	140
第三节 土体传热在冻结法施工中的应用	152
参考文献	167

第一章 概述

第一节 深部岩体的高温问题

围岩原始温度是指井巷周围未被通风冷却的原始岩层温度，它与地层深度和温度梯度有直接的关系，尤其在深井开采中，围岩原始温度高是造成矿井高温的最主要原因。

在地面大气温度和深部岩层高温的共同影响下，原岩温度沿垂直方向上大概可划分为三个带。在地表浅部，由于受地面大气温度的影响，岩层原始温度随地面大气温度的变化而呈周期性的变化，这一层带称为变温带。随着深度的增加，岩层原始温度受地表大气的影 响逐渐减弱，而受大地热流场的影响逐渐增强，当到达某一深度处时，二者趋于平衡，岩温基本常年保持不变，这一层带称为恒温带。恒温带的温度比矿区年平均气温约高 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。在恒温带以下一定的范围内，岩层温度一般随深度的增加而呈线性增加，当然也存在非线性或异常变化的情况，这一层带称为增温带。

随着社会的发展和煤炭资源开发的日益加强，矿井的开采深度不断增大。深井开采条件下，地温不断升高，热害以及有毒有害气体、粉尘的危害也日益增大，由此带来的井下工作条件恶化、支护结构和养护要求高以及引发煤层发火等问题迫切需要解决。《煤矿安全生产“十二五”规划》中指出：“水、火、冲击地压、热害等灾害越来越严重，防灾抗灾难度加大。”目前，高温热害已被认为是除水、火、瓦斯之外的第四大矿井灾害。

深部岩体处于高渗透水压力、高地应力和高地温的特殊环境下，由此引发的相关问题不仅仅局限于矿井空气的高温。第一，造成深部岩体高温的因素不仅仅是地层温度的升高，高地应力对流体的作用、流体伴随的热迁移、岩体高温带来的热应力等问题相互作用，组成深部岩体的热环境作用体系。第二，在岩体高温的同时，空气自压缩放热、围岩散热、机电设备散热、氧化热和炸药爆破热等又造成矿井风流温度升高。第三，矿井开采带来的井下突水时有发生，在深部开采中这种情况将更为严重，因为突水造成巷道内充满水汽，矿井空气相对湿度甚至达到 100%，如此的高温高湿环境使得抢险救灾工作难以进行。第四，对高温作业的矿工进行生理和生化方面的测定表明，井下高温作业环境对矿工的身体健康

存在严重的威胁。因此,伴随着煤矿、金属矿等矿山的深部开采,矿井高温灾害的解决迫在眉睫。

据世界各地的测量资料,全球平均地温梯度约为 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,随着矿井采掘深度的增加,地温不断升高,这是造成矿井岩体高温的主要因素。瑞士-意大利的Simplon地铁隧道,岩体温度达到 56°C ;德国伊本比伦煤矿现采深达 1530m ,井底岩温可达 60°C ;南非斯太总统(President Styen)金矿的工作面深度超过 3000m ,原岩温度达 63°C 以上;德国和俄罗斯的一些矿山开采深度也已达 $1400\sim 1500\text{m}$;南非卡里顿维尔金矿开采深度达 3800m ,竖井井底已达地表以下 4146m ;加拿大超千米的矿井有30座,美国有11座。

1980年,我国煤矿平均开采深度为 288m ,到1995年已达 428m ,目前开采深度以平均每年 $8\sim 12\text{m}$ 的速度增加。煤炭在我国能源结构中占据 69% 左右的份额,我国对煤炭资源有很高的依赖度。据全国矿井高温热害普查资料统计,采深超过 1000m 的矿井有数十对,已有65对矿井出现了不同程度的热害,其中38对矿井的采掘工作面气温超过 30°C 。重庆永荣矿区永川煤矿六井在 -400m 开采水平以下,地温增至 37°C 。淄博矿区南定煤矿 -300m 开采水平时的温度已经达到 $29.4\sim 43.3^{\circ}\text{C}$ 。同时,该地区的最大地温梯度达到 $5.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,处于 -800m 开采水平时的最高温度将超过 60°C ,随着开采深度的增加,兖州矿区东滩煤矿、新汶矿区孙庄煤矿、枣庄矿区陶庄煤矿、平顶山八矿等高温矿井也将出现类似的情况。徐州矿区三河尖煤矿21102工作面发生突水事故时水温高达 50°C ,排水地点空气温度在 39°C 以上。

另外,我国的地热资源非常丰富,直接利用量很大,我国大陆地区地热资源分布丰富的地区有西藏、云南、广东、河北、天津、北京等地。地热能作为地热发电、地热温室、地热养殖和温泉浴疗的清洁、无污染能源备受各国重视,我国直接利用的总装机容量已超 2GW ,居世界第一位,但年产能值不高。渗流作用下岩体的水热迁移规律也是当前开发和利用地热资源的关键问题,以利用地热为主导的温泉、取暖、发电等节能工程已经贴近人民生活,做到了节省能源、开发新能源和环境保护的和谐统一,有力地支持了可持续发展战略。

针对深部矿场的复杂性,开展采动-渗流耦合作用下围岩传热机理的研究,对进一步完善和补充深部工程的水热迁移规律、合理确定围岩的热源分布、提出合理的矿场降温措施及有效利用地热资源等都具有重要的实际意义,对逐步向深部延伸的能源开采和地热资源开发具有广阔的应用前景。由此可见,岩体高温给深部资源开采带来一系列问题,而对地热资源的开发利用又是极其有利的,以上问题的结合点就在于深部岩体的传热机理。

第二节 我国深井地温状况

我国煤炭资源在地质史上的成煤期共有 14 个，其中最主要的 4 个成煤期分别是：分布在华北一带的晚炭纪—早二叠纪、分布在南方各省的晚二叠纪，分布在华北北部、东北南部和西北地区的早中侏罗纪以及分布在东北地区、内蒙古东部的晚侏罗纪—早白垩纪。它们所赋存的煤炭资源量分别占我国煤炭资源总量的 26%，5%，60% 和 7%，合计占资源总量的 98%。中国煤炭资源分布面积广，除上海市外，其他省、自治区、直辖市都有不同数量的煤炭资源。从煤炭资源的分布区域看，华北地区最多，占全国保有储量的 49.25%，其次为西北地区，占全国的 30.39%，以下依次为西南地区占 8.64%，华东地区占 5.7%，中南地区占 3.06%，东北地区占 2.97%。按省、市、自治区计算，山西、内蒙古、陕西、新疆、贵州和宁夏六省区最多，这六省的保有储量约占全国的 81.6%。

除山西、内蒙古等省区的部分煤田以外，我国的煤炭资源大部分依赖井工开采，尤其是深井开采，因此，面临的高温问题成为近年来的研究热点问题。我国地温研究表明，煤炭主要赋存区由于受到地壳深部结构、岩浆作用、赋存区地质构造及其活动性的影响，地温梯度存在较大差异。我国煤炭主要赋存区的恒温带深度一般在 20~30m，恒温带的温度和深度与该区域的地形及气候有直接关系。一般来说，低纬度带温度较高，恒温带较浅。

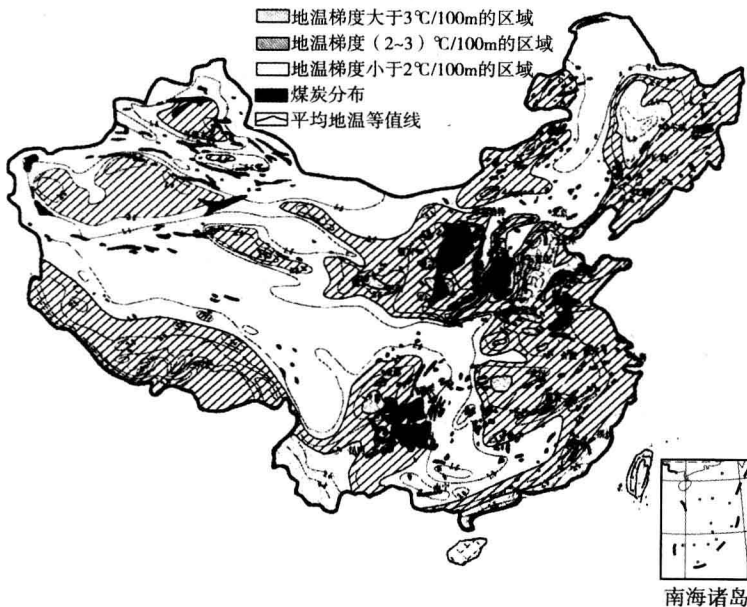


图 1.1 我国主要煤田地温梯度区划图

根据我国各煤炭赋存区的地温梯度, 将我国主要煤田地温梯度划分为三个区域: 地温梯度小于 $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的区域、地温梯度为 $(2\sim 3)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的区域和地温梯度大于 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的区域。结合我国煤田分布图, 地温梯度区划图见图 1.1 (引自《中国地温分布的基本特征》)。

由图 1.1 可以看出, 我国地温梯度的总体趋势是东高西低、南高北低。

东部地区: 地温梯度大多在 $(3\sim 4)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 其中东北松辽盆地的地温梯度最高, 一般在 $(3.5\sim 4.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高可达 $6.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

东北地区: 主要为蒙东(东北)基地, 包括扎赉诺尔、宝日希勒、伊敏、大雁、霍林河、平庄、白音华、胜利、阜新、调兵山、沈阳、抚顺、鸡西、七台河、双鸭山、鹤岗。其中黑龙江和吉林部分煤田地温梯度大于 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 蒙东基地以及辽宁、吉林和黑龙江东部地区煤田地温梯度为 $(2.5\sim 3.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

华北地区: 大部分地区地温梯度为 $(3.2\sim 3.5)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 局部可达 $7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上。其中冀南、鲁西、豫东、苏北、皖北等地区部分煤田地温梯度大于 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 其他大部分煤田地温梯度为 $(2.0\sim 3.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

东南沿海地区: 地温梯度一般在 $(2.5\sim 3.5)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 尤其是沿海地区的温州、大浦、广州一线以东地区多为 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上, 其中一些局部地热异常区域的地温梯度可达 $(6.0\sim 7.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

中部地区: 鄂尔多斯盆地、四川盆地及其以南的滇、黔、桂地区, 地温梯度多在 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 左右, 局部地区达 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上。云南东部、贵州、广西地区的地温梯度一般为 $(2.0\sim 2.5)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 昆明—六盘水一带地温梯度比较高; 中部山区的地温梯度一般为 $(1.5\sim 2.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

西部地区: 地温梯度分布总趋势为南高北低, 西藏和云南西部地区存在一条较高的地温梯度陡变带, 一般均在 $(2.5\sim 3.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高可达 $7.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上, 一些受构造控制的高温异常区域还要高出数倍, 高山区的地温梯度一般低于 $1.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。藏北高原盆地的中部大部分在 $(2.5\sim 3.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 最高可达 $(3.5\sim 4.0)^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。青藏高原的其他地区和云南西部的三江地区地温梯度多低于 $1.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

根据王钧、黄尚瑶和黄歌山等人的《中国地温分布的基本特征》中的深地温资料, 在我国煤田分布图上描绘 -1000m 的地温等值线图(见图 1.2), 并根据地温等值线将其划分为地温大于 45°C 的高地温区域、地温为 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ 的中地温区域和地温小于 35°C 的低地温区域。

东部地区: 松辽盆地和华北盆地、东南沿海地区的南部等地区地温最高, 下辽河盆地、都阳盆地、南阳盆地、苏北盆地等一般在 $40\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。

东北地区: 松辽盆地周围的黑龙江、吉林部分煤田地温超过 45°C , 黑龙江东部和辽宁大部分煤田地温为 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。

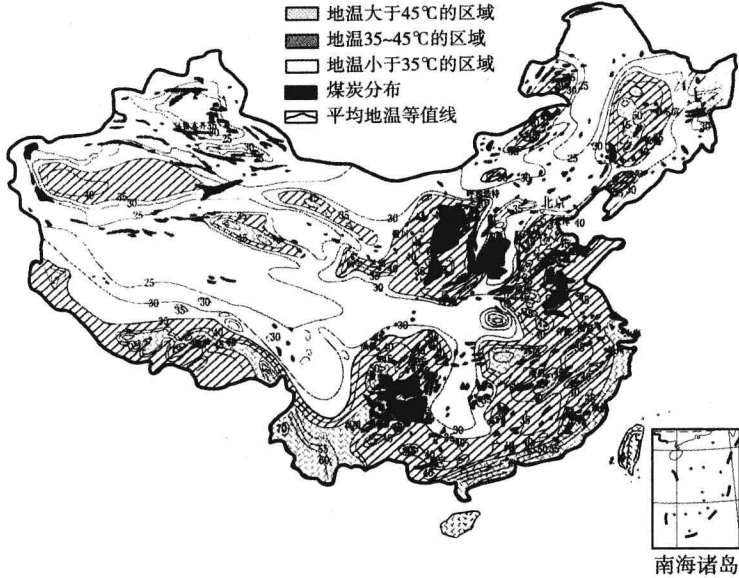


图 1.2 我国主要煤炭分布区 - 1000m 地温区划图

华北地区：鲁西、豫东、苏北、皖北等地煤田大部分超过 40°C ，部分煤田地温超过 45°C 。

中部地区：最高地温出现在四川盆地的中南部、南宁及百色盆地、南盘江盆地的部分地区，最高地温可达 50°C 以上。鄂尔多斯盆地、四川盆地以及云南、贵州、广西广大地区的地温为 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ；云贵地区的地温大部分为 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，局部超过 45°C 。

西部地区：柴达木盆地和河西走廊地区零星分布有地温超过 45°C 的煤田，塔里木盆地局部地温超过 35°C ，其余大部分地区地温为 $35 \sim 45^{\circ}\text{C}$ ，准噶尔盆地的地温为 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，部分地区为 $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

我国煤炭资源主要分布在 13 个大型煤炭基地的 98 个矿区，这些基地分别为神东基地、陕北基地、黄陇基地、晋北基地、晋中基地、晋东基地、蒙东（东北）基地、两淮基地、鲁西基地、河南基地、冀中基地、云贵基地和宁东基地。根据地温场特征可以看出，高温区域主要集中在东部地区和青藏高原局部，在我国高地温区域的矿井主要集中在东北基地、两淮基地、鲁西基地、河南基地以及冀中基地等东部。根据我国现有热害矿井调查，把我国东部矿井划分为北区、中区和南区三个热害区，我国现有热害矿井的分布见图 1.3。

东部北热害区主要包括我国黄河以北东部各省，热害矿井主要为河北、辽宁及内蒙古东部地区开采深度超过 600m 的矿井，典型的热害矿井分布在峰峰、开滦、沈阳、抚顺、调兵山等矿区。东部中热害区是我国现阶段热害最为严重的区

域，包括我国黄河以南、长江以北的东部各省份，超过 40℃ 的岩体温度与 32℃ 的夏季地面平均气温造成该地区热害严重，其中热害矿井主要为江苏、山东、安徽和河南东部地区开采深度超过 800m 的矿井，分布在徐州、兖州、新汶、永城、两淮等矿区。东部南热害区主要包括我国长江以南的东部各省，热害矿井主要分布在江西、福建和湖南东部，尤其以萍乡、丰城矿区的热害最为严重。

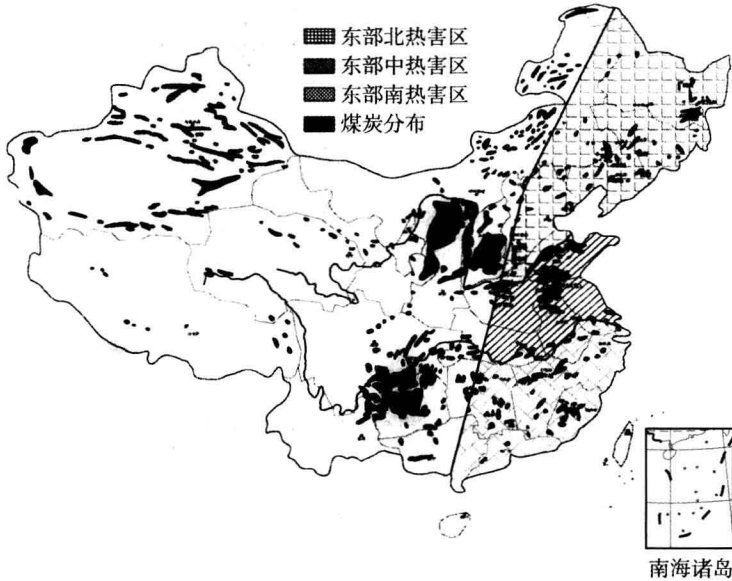


图 1.3 我国现有热害矿井分布图

第三节 国内外研究现状

国外矿井热害现象研究最早开始于 1740 年，法国针对金属矿山的地温进行监测，开始了对高温问题研究。18 世纪后期，英国开始对矿井巷道的气温进行系统的观测，研究井下气候条件及其影响因素，并提出了风温随着深度的增加而升高的规律，为地热梯度的研究奠定了基础。1915 年，巴西 Morro Velno 金矿面对矿井开采降温的需要，首次将空调系统应用到矿山工程。由于当时世界各国煤矿的开采规模都比较小，矿山热害问题并不十分严重。

矿井围岩温度经典计算方法的研究开始于 20 世纪 20—50 年代。1923 年，德国的 Heist Drekopt 在假定巷壁温度为稳定周期性变化的条件下，分析了围岩内部温度场的周期性变化，提出了围岩调热圈的基本概念。1939—1941 年，南非的 Biccand Jappe 发表了深井风温预测的相关论文，提出了矿井风流温度计算的基本思路。1939—1952 年，德国、日本、英国等国的学者基于热交换理论，推导了理

想条件下围岩调热圈温度场的解析解。1953—1955年,苏联和日本的学者提出了比较精确的不稳定换热系数、调热圈温度场的计算方法以及围岩与风流换热的近似计算式,这些研究成果奠定了热害理论经典计算方法的理论基础。随着电子计算机技术的发展,1966年,德国 Nottort 等用数值计算法分析了围岩调热圈的温度场,数值计算方法由此逐步应用于矿井风流热计算和风温预测计算。

矿井围岩热物理参数的测试技术开始于20世纪50—70年代。1964年,德国的 Mucke 用圆板状试块测定稳态导热条件下岩石的导热系数;1967年,Shernat 通过对巷道强制加热实测了围岩的温度场分布,Starfield 等分析探讨了巷道在潮湿条件下的热交换规律,对围岩热参数进行了实测和理论计算。

20世纪70—90年代,矿井降温的计算方法理论研究逐步建立和发展起来,如苏联舍尔巴尼等著的《矿井降温指南》、日本平松等著的《通风学》、德国 Fusi 著的《矿井气候》等。另外,德国的 J. voss 等相继提出了一整套采掘工作面的风温预测方法,美国的 J. Mcguaid 系统地提出了矿井热害治理的各种对策,保加利亚的 Shcherban 等论述了掘进工作面的风温预测。80年代以后,理论研究与工程实际相结合,使得研究成果提高到一个新的水平。如日本的内野等学者用差分法求解不同巷道形状和岩性条件下的调热圈温度场,提出了考虑风流入口温度变化和地下水影响下的风温计算公式;南非的 Starfield 等也提出了更为精确的不稳定传热系数的计算公式。从检索到的文献看,侧重于对风流与围岩间的热交换系数、当量热导率、热湿比以及湿度系数等关键系数的研究和计算。

我国对矿井降温理论的研究开始于20世纪50年代,并对少数矿井进行了矿内风流热力状态参数观测分析,沈阳矿区等的研究人员开展了一些矿井降温理论的研究,但有代表性的成果不多。

我国矿井降温理论研究在20世纪80年代以后有了实质性进展,发表了较多的论文,如黄翰文的《矿井风温预测的探讨》和《矿井风温预测的统计研究》、杨德源的《矿井风流的热交换》等。80年代后期,比较完整的矿井降温学科理论体系逐步形成,一些系统专著相继出版。如岑衍强等编著的《矿内热环境工程》、余恒昌主编的《矿山地热与热害治理》、严荣林等主编的《矿井空调技术》、王隆平编著的《矿井降温与制冷》等。在学术论文方面,采用数值模拟方法研究矿内热湿交换规律等的论文大量出现。

由此可见,岩层高温这一矿山开采所面临的具有共性、基础性和紧迫性的问题,已经引起国内外科技工作者的重视,国内外针对深部工程高温问题的研究主要集中在以下方面。

(1) 工程热传导问题

该研究始于20世纪80年代,最初主要集中于地温梯度的研究,建立深层岩体温度预测的经验公式。Shonder Ja、于明志等提出了地温及深部岩土体导热系

数的监测方法。近年来,针对复杂环境下岩石(体)导热性质的研究仍是国内外学者研究的热点问题之一,陈则韶在热物性测试方法和热物性预示推算方面做了大量的研究;C. M. R. Fowler, V. P. Ol'shanskii, 彭担任等研究了煤与岩石的导热性质、导热系数和综合导热系数及其计算;郭中平、王志军对高温矿井地温分布规律及其评价体系进行了系统研究;王飞在复杂高温灾害矿井综合治理技术方面进行了研究及应用;白兰兰、陈建生等对裂隙岩体热流模型进行了研究,这些为研究深部工程的高温问题奠定了基础。

(2) 工程环境对围岩传热的影响

围岩与工程环境的热交换问题也是深部围岩传热过程研究的主要内容之一,主要研究围岩与风流的热交换问题、调热圈半径及其温度场的数值计算、矿井降温与高温治理技术以及巷道内机电设备散热对风流温度的影响等。Petr Stulc 等研究了由开采引发的地下水运动对温度的影响;张树光、孙树魁等研究了埋深、风流速度、入口温度等对巷道温度场分布的影响,渗流作用对岩体内部温度场分布的影响,风流与岩体的热交换过程,岩体内部的温度场分布等;高建良、张学博对潮湿巷道风流温度及湿度计算方法及湿度变化规律进行了研究;王继仁、周西华等对风-岩的热交换作用进行了数值模拟研究;袁亮对淮南矿区矿井的降温进行了研究与实践;何满潮、杨胜强、张朝吕、朱孔盛等研究了深部开采的热环境及其治理对策与降温技术。

(3) 水热耦合迁移问题

针对地下工程,基于温度、渗流、变形、应力等的多场耦合理论得到广泛的应用。王补宣、胡柏耿等建立了孔隙-裂隙岩层中的水流和热迁移的数学模型,研究了非均一多孔介质中的水热迁移规律;仵彦卿、赵镇南、徐曾和、H. Inaba 等对固液两相流中微对流强化的机理进行了理论分析和数值模拟;柴军瑞等提出了岩体渗流-应力-温度三场耦合的连续介质模型及岩体裂缝网络非线性渗流控制方程式;李宁等提出了裂隙岩体介质的温度-渗流-变形耦合模型,并进行了有限元解析;杨天鸿等提出了煤体变形过程中应力、损伤与透气性演化的耦合作用方程,建立了含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合作用模型;刘亚晨等对裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合过程进行了分析;陈占清、缪协兴等讨论了采动围岩渗流系统在时变渗透特性和时变边界条件下的动力学响应;谭凯旋、谢焱石、邓军等提出了构造-流体-成矿系统及其动力学的理论框架与方法体系,研究了构造和流体在成矿中的关键作用;王琴、程宝义、缪小平等对地下工程岩土耦合传热过程进行了动态模拟;梁卫国等建立了矿床开采的固-液-热-传质耦合的数学模型与数值模拟;赵阳升等提出了块裂介质岩体变形与气体渗流的耦合数学模型及其数值解法;白冰等对半无限成层饱和多孔介质作用随时间变化的温度荷载的热固结问题进行了解析求解,并且针对热-水-力耦合线性弹性控制方程考

虑了热渗效应和等温热流效应的影响；吉小明、白世伟、杨春和等对裂隙岩体流固耦合双重介质模型进行了有限元计算。张树光、吴强等对渗流和风流耦合作用下围岩的温度场进行了数值模拟计算。多场耦合问题及其数值解法的研究极大地推动了裂隙岩体、受扰动岩体以及多孔介质等流固相互作用及其相关问题的研究。

综上所述，国内外已经在地温与岩体的导热性、多场耦合分析、热交换与迁移、热环境与降温技术等方面进行了大量的研究和实践，我国针对复杂应力条件下裂隙岩体渗流应力耦合机理、高温作用下裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合分析等也正在进行深入的研究和探索，初步的研究成果表明，开采扰动与渗流场的相互作用对深部围岩换热与传热的影响同样不可忽视。

第二章 岩体传热的基本理论

岩体属于天然材料，在自然界中有着非常广泛的分布，工程中常将岩体作为建筑材料或工程环境的重要组成部分，目前的研究范围主要集中在岩体的力学性质上。随着工程建设的发展，对岩体的利用越来越充分，如何更好地利用这一天然材料的物理性质已逐渐成为研究热点。

第一节 岩体传热中的工程热力学

1. 传热过程分类

岩体的传热过程是一种复杂的物理现象，传热按照其本质不同可以分为三种形式，包括热传导、热对流和热辐射。

岩体的热传导是指岩体内部由于存在不同的温度，在高温和低温之间存在能量差，并且岩体作为一种传热介质，热能可以通过岩体这个导热介质进行流动，热能从高温区域向低温区域的传递叫做热传导。

严格地讲，岩体中的热对流实质并不是岩体自身的热对流，而是岩体中发育的孔隙和裂隙中赋存的流体或者气体的热对流。热对流是指在岩体中的流体或气体中产生的热现象，对流产生的条件是存在温度不同的流体，由于热量发生热扰动和混合引起热量传递，所以当岩体中存在可以自由运动的流体或者气体时，流体或者气体的运动特性对岩体的温度场分布也会有重要影响，在流体和气体发生对流时，热传导也在进行。

岩体中还存在着一种传热形式，即辐射传热，辐射是电磁波传热的一种形式，热能首先转化为辐射能，被岩体向外扩散发射，在辐射到相邻岩体时，被岩体吸收进而再次转化为热能，所以热辐射除了存在能量的传递外，还存在能量的转化。

实际上，在任何情况下，岩体中的传热形式都不是单独存在一种，而是多种传热形式共同作用。传热过程具有复杂性，分析岩体传热问题时，需要根据实际问题的需要，分析传热问题所采用的关键传热形式。

2. 传热的表示形式

岩体中存在传热的必要条件是岩体中存在热能差异，即存在温度差，没有温度差的岩体，传热处于动态平衡。岩体不同区域的温度差的大小会影响岩体传热动