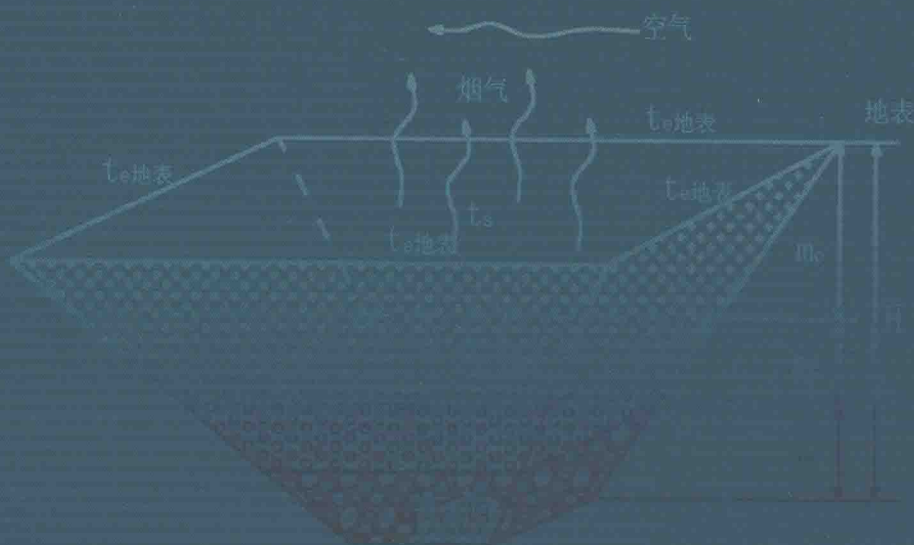


国家自然科学基金资助项目 (51374182, 51164032)

新疆地区 煤火热动力特性与环境影响

Xinjiang Diqu Meihuo Redongli Texing Yu Huanjing Yingxiang

曾 强 著



中国矿业大学出版社

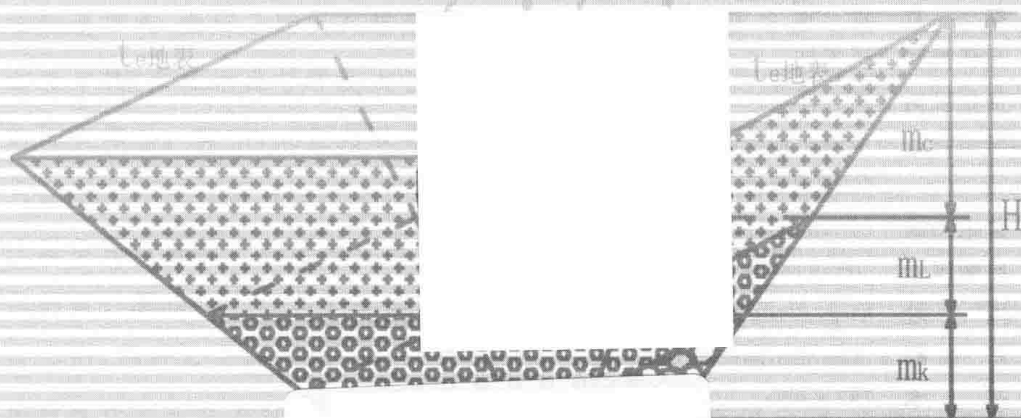
China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目 (51374182, 51164032)

新疆地区 煤火热动力特性与环境影响

曾 强 著

Xinjiang Diqu Meihuo Redongli Texing Yu Huanjing Yingxiang



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以新疆地区煤火为研究对象,较系统地从事煤火赋存物理边界、火区持续燃烧供氧动力、火区煤燃烧放热特性与传热特性、火区烟气污染物排放特征、火区土壤重金属分布特征与迁移规律等方面开展了其燃烧系统热动力特性与环境影响研究。本书主要内容包括:火区控制体范围及其属性特征、火区煤持续燃烧供氧动力、火区条件煤燃烧放热特性、火区与外部环境的热量传递、实例分析、地下煤火综合实验装置的设计与构建、火区烟气污染物排放特征、火区土壤重金属分布特征、火区土壤重金属吸附解吸特性与迁移规律。本书研究内容具新颖性、实用性和先进性。

本书可供从事安全工程、采矿工程、环境工程等专业的研究人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新疆地区煤火热动力特性与环境影响/曾强著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2017.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2385 - 2

I. ①新… II. ①曾… III. ①煤田—矿山火灾—动力特性—研究—新疆 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 140451 号

书 名 新疆地区煤火热动力特性与环境影响

著 者 曾 强

责任编辑 王美柱

责任校对 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 10.75 字数 205 千字

版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤火是伴生煤炭资源开发的一种灾害,在世界主要产煤国普遍存在。煤火不仅燃烧损失大量煤炭资源,还对区域环境产生严重影响。本书以新疆地区煤火为研究对象,系统地从煤火赋存物理边界、火区持续燃烧供氧动力、火区煤燃烧放热特性与传热特性、火区烟气污染物排放特征、火区土壤重金属分布特性与迁移规律等方面开展了其燃烧系统热动力特性与环境影响研究。应用岩层控制理论分析了火区空间的状态特性,提出了确定火区控制体物理空间边界的方法,构建了火区控制体模型。在火区控制体模型研究基础上,结合火区内孔隙介质透气率、裂隙介质透气率,提出了火区等效透气率计算模型。结合火区控制体模型,研究了火区控制体孔隙介质围岩导热率的计算方法。通过对火区烟气流动特性的研究,描述了火区煤持续燃烧供氧动力——火风压的形成机制。应用燃烧学理论对火区煤燃烧状态进行了分析,提出了火区控制体煤燃烧放热计算模型,即火区控制体热源强度模型。应用传热学理论研究了火区与外部环境的热量传递方式,提出了煤火火源温度计算模型。煤火热量传递包括火区控制体内围岩导热、火区地表与环境大气的对流传热、火区地表的辐射传热以及火区烟气的传质传热。其中,火区内以导热方式传向地面的热量以对流和辐射方式散失。火区地表与空气的对流传热符合外掠平板自然对流模型,对流传热系数根据空气流动雷诺数确定的流动状态计算。建立了火区控制体单位时间散热量和累积散热量计算模型。以典型火区 1——水西沟火区和典型火区 2——托洛盖 05 火区为例,进行了火区煤燃烧系统热动力特性部分参数的计算。结果表明,地表辐射散热量普遍高于对流散热和传质散热。由建模及实例分析,在煤火治理中需要强调的治理原则:一是首先应考虑置换火区热量,尤其需要置换火区高温区域热量以快速降低火区内外温度差,及时减少火区供氧动力;二是对非高温区域裂隙及时进行覆盖封堵,增加空气渗入火区的阻力,及时降低火区供氧量。针对煤

火环境影响,初次研究了火区烟气污染物排放特征、火区土壤重金属分布特征与迁移规律。通过上述研究,本书初次较系统地构建了煤火燃烧系统热动力特性基本模型,初次定量研究了煤火环境影响,深入了地下煤火的理论认知,为揭示新疆地区煤火燃烧系统热动力特性演化规律与科学评价煤火环境影响提供了定量分析手段。

本书是在导师王德明教授指导下完成的笔者博士学位论文及在新疆大学地理学博士后流动站开展的博士后研究工作基础上完善而成的,在此对导师深表感谢。笔者指导的硕士研究生聂静完成了大量火区土壤分析测试工作。限于笔者学识水平,书中内容不足之处在所难免,当在今后研究工作中继续深入。

著 者

2017年9月

目 录

第一篇 地下煤火热动力特性

1 绪论	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究现状	6
1.3 研究内容和方法	8
2 火区控制体范围及其属性特征	11
2.1 新疆地区煤火分布特征	11
2.2 火区控制体范围	17
2.3 火区控制体属性	26
2.4 本章小结	33
3 火区煤燃烧持续供氧动力	34
3.1 火区烟气流动特征	34
3.2 火区煤持续燃烧供氧动力——火风压	38
3.3 火风压计算的数值分析	42
3.4 本章小结	51
4 火区条件煤燃烧放热特性	53
4.1 火区煤燃烧状态分析	54
4.2 煤燃烧反应动力学参数	63
4.3 火区煤燃烧放热量计算	65
4.4 火区煤燃烧累积放热量	66

4.5	本章小结	67
5	火区与外部环境的热量传递	68
5.1	火区热量传递方式	68
5.2	火区累积散热量	70
5.3	火源温度计算	70
5.4	本章小结	73
6	地下煤火综合实验装置的设计与构建	74
6.1	设计原则	74
6.2	实验装置结构	74
6.3	参数巡检系统	75
6.4	WebAccess 系统架构	77
6.5	参数巡检系统功能	77
6.6	数值模拟研究	79
6.7	本章小结	82
7	实例分析	83
7.1	典型火区 1——水西沟火区	83
7.2	典型火区 2——托洛盖 05 火区	93
7.3	本章小结	99

第二篇 地下煤火环境影响

8	火区烟气污染物排放特征	103
8.1	火区烟气污染物种类	103
8.2	火区烟气排放量估算	105
8.3	温室气体排放估算	107
8.4	本章小结	110
9	火区土壤重金属分布特征	111
9.1	水西沟火区土壤重金属分布特征	111

9.2	大泉湖火区土壤重金属分布特征	118
9.3	本章小结	134
10	火区土壤重金属吸附解吸特性与迁移规律	135
10.1	土壤采样与实验方法	135
10.2	结果与讨论	137
10.3	数值模拟研究	144
10.4	本章小结	152
	参考文献	154
	后记	162

第一篇 地下煤火热动力特性

1 绪 论

1.1 研究背景

煤火,是指在自然环境或人为因素下,煤炭因氧化聚热引发燃烧并不断发展形成的大面积煤田火灾,属多学科交叉复杂传热、传质系统。

1.1.1 煤火分布及其特点

世界上煤田火灾分布很广,遍布南北半球,不仅中国存在,印度、美国、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚、中亚等国家和地区都普遍存在。

煤火在中国主要分布于内蒙古、宁夏和新疆^[1-3];在印度尼西亚主要分布于 Sumatra 岛和 Kalimantan 岛^[4];在美国主要分布于西部的怀俄明、蒙塔那、北达科他、科罗拉多、犹他、新墨西哥、亚利桑那和宾夕法尼亚等州^[5-7];在印度主要分布于 Jharkhand 邦的 Jharia 煤田^[8];在南非主要分布在 Witbank 煤田和 Sasolburg 煤田^[9]。我国由于特殊的地理位置、气候条件及人为因素等,是世界上煤田火灾灾害最为严重的国家。而且燃烧历史悠久,从有煤田自燃记载的《水经注》成书时算起,煤火至今已有 1 600 年的历史。新疆地区煤火分布如图 1-1 所示。

煤火按其成因,可分为人为火灾和自然火灾,前者主要因为人类活动(如开采等)导致,后者主要因为自然原因(如闪电、森林火灾等)导致;按其燃烧深度,可分为浅部煤火和深部煤火;按其燃烧煤层赋存,可分为急倾斜煤层火灾和倾斜煤层火灾。除燃烧煤层及外部环境条件外,煤火燃烧深度、燃烧煤层和围岩赋存条件对煤火的持续燃烧具有重要的影响。

1.1.2 煤火的严重性及其环境影响

煤火造成大量煤炭资源损失。根据资料^[1],中国煤田火区燃烧面积达 720 km²,每年直接燃烧损失的煤炭资源 1 360 万 t,间接损失的煤炭资源约 2 亿 t。初步估算,煤田火灾每年至少造成经济损失约 200 亿元。我国的煤田火灾尤以新疆煤田火灾最为严重。据 1995 年至 1997 年完成的《新疆维吾尔自治区第二

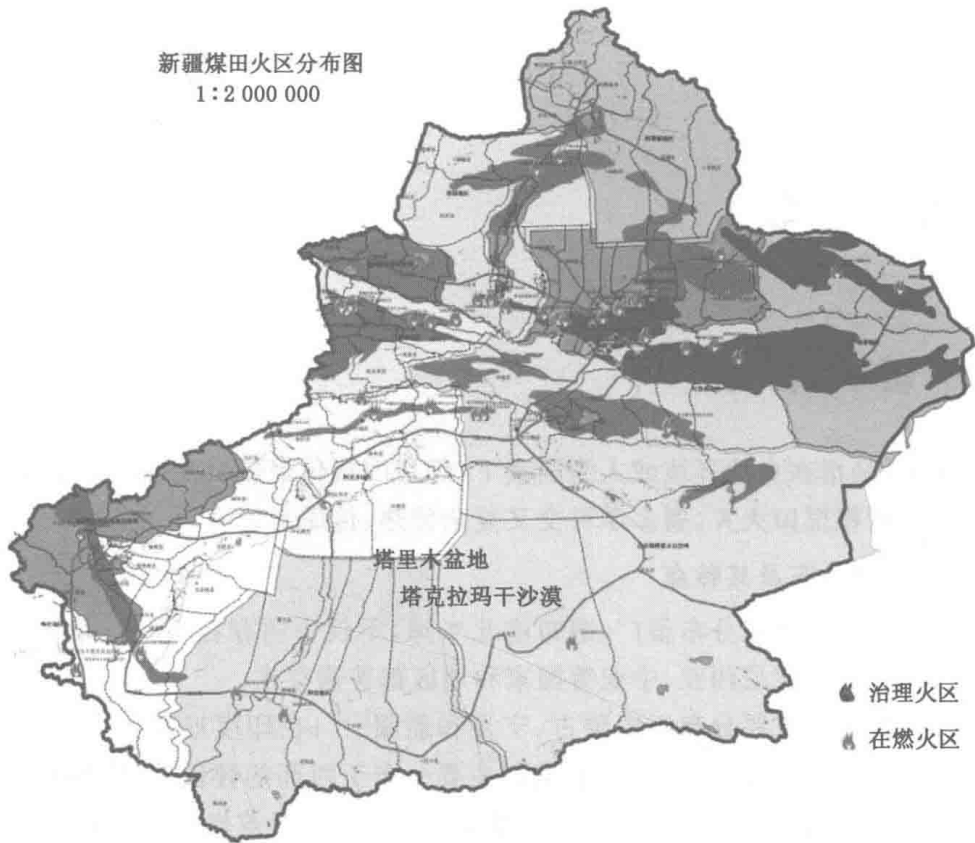


图 1-1 新疆地区煤火分布图

次煤田火区普查报告》，新疆境内煤田火区(不含已治理的与正在治理的 7 处)共计 35 处，火区面积达 135 km^2 ，其中，活火区面积达 8.26 km^2 。每年燃烧损失的煤炭资源约 1 000 万 t，每年造成的直接经济损失约 2 亿元。据最新资料统计^[3]，截至 2008 年年底，仅新疆地区在燃煤田火区 49 处，其中，新增火区 22 处，火区面积 9.061 km^2 ，每年燃烧损失煤炭资源达 812.6 万 t，直接经济损失达 10 亿元。

煤火除造成煤炭资源损失外，还对区域生态环境造成严重破坏。煤火对区域生态环境的破坏主要体现在以下 3 个方面：① 对土地、土壤资源及地表植被的破坏。与煤矿开采一样，随煤火的蔓延，燃烧空洞上覆岩层受自身重力的影响发生破断，进而导致地表下沉和坍塌。煤火的热效应使火区及其影响区域地表及围岩温度升高，土壤涵养的水分蒸发，地表植被的生长条件破坏，导致植被死亡。② 对地表、地下水资源的污染与破坏。由于煤火的热效应，煤层及围岩所含的重金属元素会富集。火区裂隙、孔隙发育，流经火区的雨水、雪水等可裹挟

这些重金属元素流入和渗入地表及地下水系,从而造成水资源的污染。③ 对大气环境的污染。煤火对大气环境的污染和破坏有两个层面的含义,即火灾烟气对低空大气环境的污染和其释放的温室气体对大气臭氧层的破坏。如图 1-2 至图 1-4 所示。

随着国际社会对环境和气候变化问题的日益关注,煤火的环境影响已成为热点研究领域。为科学评价煤火的环境影响、开发高效灭火方法与工艺、研究综合火源精确探测技术,有必要对煤火这一热动力现象的科学本质进行研究。



图 1-2 煤火对土地、土壤资源的破坏(淮南煤田阜康四工河火区)

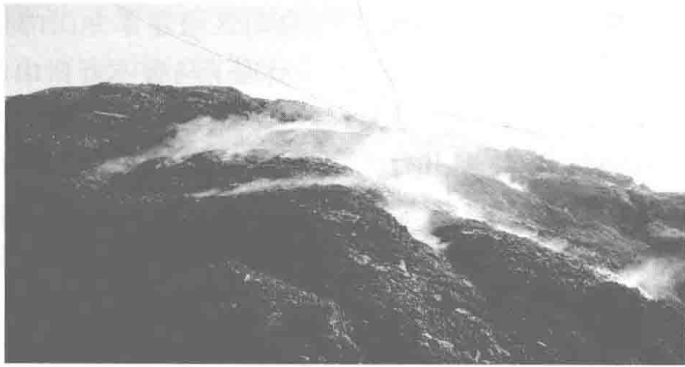


图 1-3 煤火对区域大气环境的污染(淮北煤田和什托洛盖 05 火区)



图 1-4 煤火对地表植被的破坏(伊犁盆地尼勒克吉仁台火区)

1.2 研究现状

煤火(coal fire)不同于矿井火灾(mine fire),其延燃蔓延供氧动力主要来自火区内外空气—烟气温度差引起的密度差而产生的重力差。煤火与矿井火灾又存在密切联系:大多数煤火是由开采活动引起的。

煤火研究源自保护煤炭资源和生态环境的需要。与矿井火灾类似,研究煤火燃烧系统热动力特性必然涉及煤火的成因、持续燃烧机制。17世纪以来,人们开始对煤的自燃现象进行了系统研究,提出了解释煤自燃的多种假说。众多假说中,煤氧复合作用假说因其在实践中得到不同程度证实,广为人们接受。煤火是煤炭燃烧产生的一种灾害,对煤火进行研究、治理的过程实质上是矿井火灾及其他基础火灾理论在煤火领域的具体应用和发展。

煤火治理是从治理矿井火灾着手的。20世纪30年代,英国煤矿井下火灾频发,而且地面矸石山火灾也十分严重,对区域环境造成很大影响。1962年起,美国宾夕法尼亚州东部 Centralia 持续燃烧数年,迫使矿井关闭,并一直延续燃烧至今。在中国,政府投入下的煤火治理可追溯到20世纪50年代。鉴于当时新疆煤火的严重程度,1958年,新疆维吾尔自治区组建了专门的煤火治理队伍。在国家 and 新疆维吾尔自治区的投入下,先后治理了乌鲁木齐西山煤田火区、哈密大南湖煤田火区、乌鲁木齐铁厂沟露头火区、奇台北山露头火区、阜康柏杨河煤田火区、阜康小黄山和小龙口煤田火区、乌鲁木齐硫磺沟煤田火区、托克逊克尔碱煤田火区、拜城铁列克煤田火区等重点火区。与国外类似,国内早期煤火治理主要采用注水、注浆等灭火工艺。随着对煤火认识的深入和经验的积累,目前已逐步发展为“剥离、平整—打钻—注水—注浆—地面覆盖”成套综合煤火治理工艺。21世纪伊始,随着全球对气候变化问题的持续关注,煤火的环境问题,尤其是大量温室气体排放问题成为煤火领域研究人员关注的焦点,中国、德国及荷兰等国学者已开展相关研究近10年。

通常来讲,煤火研究主要涉及两个方面:一是煤火发生、发展、延燃、蔓延机制的研究。内容主要涉及煤火的成因及其燃烧系统热动力特性演化过程。二是煤火治理技术的研究。主要涉及煤火探测、监测技术和灭火方法、工艺及材料的研究。其中,煤火燃烧系统热动力特性是煤火研究的核心内容,是煤火高效治理、火源精确探测与科学评价煤火环境影响的基础。

相对矿井火灾而言,煤火是一个开放的、可视为内含热源的动态热平衡系统。火区内部及其与周围环境存在复杂的能量、动量和质量传递过程。其燃烧系统热动力过程的供氧动力主要来自火区内外空气—烟气温度差引起的密度差

而产生的重力差。煤火燃烧系统热动力特性研究主要涉及火区控制体范围及其属性特征、火区煤持续燃烧的供氧动力——火风压、火区条件下煤燃烧特性及火区与外部环境的热量传递等。

(1) 火区控制体范围及其属性特征研究

研究煤火燃烧系统热动力演化过程需要确定其范围、属性及边界条件,这是煤火持续燃烧蔓延的物理基础。就火区范围和边界条件而言,涉及煤炭开发的自燃火灾主要有三种类型:受限空间和强制通风下的矿井自燃火灾,相对开放空间的非可控煤火,完全开放空间非受限储煤堆及矸石山火灾。火区控制体一般指包含火区温度异常体范围及火区空气—烟气渗入与逸出区域的范围,其属性一般指火区控制体内煤层及围岩的物理力学性质(如相对密度、抗压强度、抗拉强度、塑性、孔隙率、透气率、岩性、节理、层理等)和热物性参数(如温度场、导热率、热容等)。这些属性对火区内煤层的燃烧状态、火区延燃蔓延趋势具有重要影响。其中,作为火区煤持续燃烧供氧物理通道的火区控制体裂隙场分布及其透气率是研究的重点。在火区控制体范围领域,张秀山^[11]研究了磁法、自然电场法与具体煤田火区热效应的关系,采用该方法用于确定地下煤火范围;管海晏等^[1]、Stefan Voigt 等^[12]将遥感技术应用于煤火地表异常范围的探测;Ann G. Kim^[13]开发了通过监测一定网格布置钻孔内气体中高分子的碳氢化合物(C_xH_y , x 取值 2~5)占其总碳氢化合物的比率来确定地下火区燃烧区域的方法,即 MFD(mine fire diagnostic)方法;邬剑明等^[14,15]采用测氦技术圈定地下火区范围。在火区控制体属性特征领域,J. J. Huang 等^[16]对火区不同区域透气率进行了分类;Karl-Heinz Wolf 等^[17]采用 FLAC 研究了不同区域给定透气率变化对火区温度分布的影响;S. I. Taku 等^[18]理论上研究了原生裂隙和解理对煤火裂隙场发育的影响;D. H. Steve Zou 等^[19,20]研究了煤体围岩透气率与应力的关系;Stephen D. Butt 等^[21,22]研究了岩体透气率及其声学特征;曹代勇等^[23]定性描述了煤火火区的裂隙成因和分类。

(2) 火区煤持续燃烧供氧动力——火风压研究

煤火持续燃烧的供氧动力主要来自火区内、外空气—烟气温度差导致的密度差产生的重力差,即火风压。由于火风压的存在,使煤火的供氧条件持续存在。煤田火区火风压的研究来自于矿井火风压研究。不同学者对矿井火风压进行了大量的研究:戚颖敏^[24]基于流体静力学基础,王省身^[25]、张国枢等^[26]基于流体静力学和热力学基础,张兴凯等^[27]、王树刚等^[28]基于火风压物理过程的微观描述和风网特性分别提出了矿井火风压的计算模型。李唐山等^[29]基于流体力学流管、能量方程对煤田火区火风压进行了数值分析。

(3) 火区条件下煤燃烧放热特性及火区与外部环境的热量传递过程研究

研究火区条件下煤燃烧特性,主要研究其燃烧速率、放热强度、耗氧量与确定裂隙场条件下氧气供给能力及煤质特性与燃烧气态产物间的定量关系,是本书重点研究的问题之一。对于煤的自燃氧化及燃烧特性,国内外学者开展了大量的研究工作。在煤低温自燃氧化领域,徐精彩等^[30-32]通过大型煤低温氧化实验装置系统研究了自然升温条件下煤的低温氧化特性;王德明等^[33-35]通过煤自燃氧化绝热实验系统研究了煤的自燃属性;余明高等^[36,37]研究了煤氧反应的热平衡方程,研究了自燃矸石山爆炸的热力学过程;王继仁等^[38,39]应用量子化学理论和方法研究了煤表面吸附氧分子的物理机理。在煤燃烧特性领域,B. K. Mazumadar^[40]研究了煤燃烧发热量与理论需氧量的关系;邹显宏等^[41,42]研究了煤燃烧特性与释放 CO_2 的关联性,通过 CO_2 释放量判定煤样的着火温度、燃尽温度和燃尽时间等特性。另有部分学者针对煤火开展了相关研究:J. J. Huang等^[16]基于多孔介质自然对流理论及质量守恒、能量守恒原理,建立了煤火的质量、动量和能量的二维数学模型,模拟了煤火的流场和温度场分布;Stefan Wessling等^[43]结合现场温度观测数据,采用Rockflow有限元数值分析软件模拟了煤火涉及的力学和能量传递过程;Karl-Heinz Wolf等^[17]在地质力学和对流效应基础上,建立了煤火的能量、浓度、流动二维数学模型,描述其热动力学演化过程。在火区与外部环境热量传递领域,开展的系统研究工作较少。火区与外部环境的热量传递主要有传导传热、对流传热、辐射传热和传质传热。Zhang Jianzhong等^[44]对火区地表温度进行了较系统的测量与分析;M. Krajčiová等^[45]研究了不同建筑屋顶外形的辐射和对流传热;M. Hadavand等^[46]研究了地表储煤堆的辐射与对流传热;张建荣等^[47]采用风洞研究了混凝土的对流换热系数。这些研究方法和成果可为火区与外部环境热量传递过程相关参数的研究提供借鉴。

总体而言,以往学者针对煤火燃烧系统热动力特性的研究尚未系统开展。本书研究尝试揭示新疆地区煤火燃烧系统热动力演化过程,为有效提高新疆地区煤火治理效率提供依据,促进煤火领域学科的发展。

1.3 研究内容和方法

1.3.1 研究内容

针对新疆地区煤火燃烧系统热动力特性的研究,主要涉及火区控制体范围及其属性特征研究、火区煤燃烧持续供氧动力研究和火区条件下煤燃烧特性及火区与外部环境的热量传递过程研究等,同时,结合实际火区条件和监测数据进行相关模型的分析,以指导灭火实践。

(1) 火区控制体范围及其属性特征

主要研究火区控制体范围及其物理属性,即结合采动影响导致的上覆岩层移动规律,研究火区控制体内裂隙、孔隙介质的分布特征及其属性特征,构建火区控制体基本模型与等效透气率模型。

(2) 火区煤持续燃烧供氧动力

基于流体力学与孔隙介质流体力学原理,研究火灾烟气在火区控制体内的流动特征,描述导致空气—烟气流动的动力来源,建立相关模型。

(3) 火区条件下煤燃烧放热特性及火区与外部环境的热量传递过程

通过燃煤元素分析、燃烧气体产物分析等进行火区条件下煤燃烧放热量及其影响因素的研究,建立火区煤燃烧放热量计算模型、火区耗氧量计算模型、火区累积放热量计算模型以及火源温度计算模型;研究火区与外部环境的热量传递涉及的对流传热、辐射传热、传质传热及火区内热传导过程,建立火区与外部环境散热量与累积散热量计算模型及火源温度计算模型。

1.3.2 研究方法

综合运用岩层控制理论、燃烧学、流体力学、传热学等学科的理论和方法,结合新疆地区煤火分布特点,采用理论分析、实验测试等方法,建立合理数学模型,用于描述煤火燃烧系统热动力特性涉及的透气率特征、供氧动力特征、火区煤燃烧放热特性、火区传热特性与烟气流动特性。具体方法如下:

结合已积累的丰富的新疆地区煤火勘察资料及现场调查资料,研究新疆地区煤火赋存矿区煤层及围岩赋存特点及采动特点,建立火区等效透气率模型,定量研究火区控制体等效透气率。

结合火区控制体范围及属性特征,分析火区控制体温度场、裂隙场、烟气流场分布与外部大气环境特征,研究火区空气渗入、烟气逸出及其状态变化特征,建立火区控制体内烟气流动模型,结合火区内外温度特征,建立火区火风压计算模型并应用于具体火区火风压的计算。

通过燃烧煤层元素分析、煤燃烧理论计算放热量与实际放热量,建立基于烟气成分分析和燃烧煤层元素分析的火区条件下煤燃烧放热量计算模型。考虑火区燃烧时空演化,建立其累计放热量计算模型;建立火区与外部环境散热量计算模型;建立其累计散热量计算模型;结合具体火区要素,分析火区放热、散热过程,描述火区燃烧系统动态变化规律。

研究总体技术路线如图 1-5 所示。