

煤田火区裂隙渗流 耦合动力学

Coupling Dynamics for Fissure Seepage
in Coalfield Fires

肖 旻 李树刚 邓 军 著



科学出版社



国家自然科学基金项目(编号:51134...)
国家自然科学基金项目(编号:51204136)
973 计划前期研究专项(编号:2011CB411902)
长江学者和创新团队发展计划资助项目(编号:IRT0856)

煤田火区裂隙渗流 耦合动力学

Coupling Dynamics for Fissure Seepage
in Coalfield Fires

肖 旻 李树刚 邓 军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统综述了煤田火区煤岩体裂隙场的多场耦合作用过程的基础理论,发展了三维情况下的损伤基本方程;基于CT三维扫描测试研究了煤岩体在热固耦合作用下的裂隙扩展分布规律及其三维重建;开展了煤体、岩体、煤岩组合体在热固耦合作用下的数值模拟研究;采用MTS测试研究了煤岩体在不同加载模式下(单轴、三轴、温度)的全应力应变过程以及全应力应变过程的渗透性,构建了煤田火区煤岩体的热-流-固多场耦合动力学模型;根据乌达煤田火区实际,数值模拟煤田火区的形成演化过程,并开展了火区的监测和分析。书中针对煤田火区灾害实际中迫切需要解决的问题,在实验、理论、数值模拟和应用等方面形成了系统成果。

本书可供安全科学与工程、矿业工程、煤火灾害领域的广大科技工作者和院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤田火区裂隙渗流耦合动力学=Coupling Dynamics for Fissure Seepage in Coalfield Fires/肖旻,李树刚,邓军著. —北京:科学出版社,2015.1

ISBN 978-7-03-043724-2

I. ①煤… II. ①肖… ②李… ③邓… III. ①煤田-矿山火灾-研究②煤田-裂隙-岩体-渗流-耦合-动力学-研究 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 049829 号

责任编辑:李 雪/责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:216 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

煤田火灾已成为全球性的灾难,我国煤田火区分布范围广、火灾程度严重,据初步调查,新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西、山西、内蒙古七个产煤大省(自治区)现共有 200 多个煤田火区,火区总面积达 720km^2 。露头煤体经自燃而发展为充分燃烧的火源,继续往深部扩展,形成大面积煤田火区,这是一个复杂的多场耦合动力学作用过程。

目前中国是世界上煤火灾害最严重的国家,所释放出的 CO_2 占全球 CO_2 排放量的 $2\%\sim 3\%$,严重威胁着人类健康、生态自然环境和煤矿安全生产,造成巨大的资源损失和环境污染。随着全球对节约能源和保护生态环境要求的逐步提升,以及对煤田火灾机理的认识和研究的不断深入,这一问题越来越受到社会和科学界的一致关注,并被列入“中国 21 世纪议程”,党和国家领导人也作出重要批示,现已成为国内外的研究热点。

近年来,国内外学者对煤自燃、煤高温热解及燃烧、煤岩体热破坏、裂隙渗透性、煤岩体耦合作用下的破坏和对渗流的影响及其本构关系的建立等方面开展了大量的研究工作,取得了丰硕的成果,深化了对煤火灾害的发展演化过程的认识。但煤火灾害的发展演化涉及煤岩体温度场、裂隙场、渗流场、化学场、应力应变场等多场相互耦合作用的过程,煤本身的氧化特性和放热特性决定着煤的自燃属性。煤燃烧生成气体和热量以及氧气的运输、化学反应、煤岩体间的传热传质和应力应变是煤田火灾的本质,属于典型的非稳态热动力问题,其外在表现为四部分:热量的产生、热量的聚集、热量的扩散、燃烧动力系统的形成,而燃烧动力系统是大气圈与岩石圈相互作用的自然循环。因此,影响煤田火灾动态变化的直接和间接因素很多,问题十分复杂。

本书围绕煤田火区煤岩体裂隙场的形成及分布、气体渗流的热-流-固耦合动力学角度开展研究,揭示煤田火区进一步往深部扩展的过程,对研究煤田火区的发展与演化机理具有重要意义,以期为煤田火区的灭控关键技术提供科学依据和理论指导。

本书共八章,第一章介绍了煤火灾害的现状和研究意义,该领域的国内外动态及发展趋势;第二章进行了煤田火区煤岩体裂隙场多场耦合过程的基础理论研究,主要包括煤岩体的温度场、裂隙场、渗流场及其多场耦合动力学作用;第三章采用 CT 实验测试研究了煤岩体热破坏裂隙的形成及其扩展规律,并进行三维重建,获得了煤岩体的孔裂隙分布及其长度统计;第四章建立了煤岩体破坏的热固

耦合作用三维数学模型,并开展了煤、岩、煤岩组合体的数值模拟;第五章开展了煤岩体在不同加载模式下(单轴、三轴、温度)的全应力应变过程,以及全应力应变过程的渗透性测试和研究;第六章建立了煤岩体热-流-固多场耦合动力学模型,并分析了裂隙气体渗流的动力学行为;第七章采用数值模拟方法开展了乌达煤田火区的演化发展过程研究;第八章进行了乌达煤田火区的监测和效果分析,主要包括遥感、测氦和红外测温,并计算分析了火区地表裂隙间距。

本书的研究得到了国家自然科学基金重点项目“煤田火区形成演化过程及灭控理论与方法研究”(项目编号:51134019)、国家自然科学基金青年科学基金项目“煤田火区煤岩体热破坏及气体渗流动力学研究”(项目编号:51204136);科技部973计划前期研究专项项目“西部侏罗纪煤自燃火灾动力学基础研究”(项目编号:2011CB411902);教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目“煤层火灾隐患识别及控制新技术”(项目编号:IRT0856)的资助,在此表示感谢!

本书的形成离不开作者之一(肖晷)的导师李明教授。李教授严谨的治学态度、渊博的学识、敏锐的洞察力、周密的思维方式、严谨的科研作风深深地影响着作者,对博士论文的完成倾注了大量的心血和精力,而本书正是在该论文的基础上得以完成,对此向导师表示深深的感谢!

另外,还要感谢西安科技大学煤火灾害防治教育部创新团队以及太原理工大学赵阳升教授、梁卫国教授,西安科技大学理学院张天军教授,还有神华地质勘查有限责任公司、乌海能源公司灭火处贾跃荣处长,安世亚太公司成李博的支持和帮助!

受作者水平所限,时间较为仓促,难免有不足之处,敬请读者予以斧正。

作者

2014年6月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 煤火灾害现状及研究意义	1
1.1.1 世界各国	1
1.1.2 中国	7
1.1.3 研究意义	9
1.2 国内外研究动态及发展趋势	10
1.2.1 煤岩体和岩土体热破坏过程研究	10
1.2.2 煤田火区煤岩体裂隙渗流特性研究	13
1.2.3 煤田火区煤岩体流-固-热耦合数学模型	16
1.2.4 问题的提出	17
1.3 研究的主要内容	18
参考文献	19
2 煤田火区煤岩体裂隙场多场耦合过程基础理论研究	30
2.1 煤岩体温度场	30
2.1.1 煤氧复合作用及其热效应	30
2.1.2 煤燃烧化学场	32
2.2 煤岩体裂隙场	33
2.2.1 温度应力	33
2.2.2 煤岩体热损伤演化	34
2.2.3 煤体燃烧后上覆岩层形成垮落裂隙	35
2.3 煤岩体渗流场	37
2.3.1 热力风压	37
2.3.2 气体非稳态渗流	39
2.4 煤田火区煤岩体多场耦合作用过程	41
2.4.1 煤火灾害的热动力特性	41
2.4.2 煤岩体多场耦合作用的热力学过程	42

参考文献	44
3 煤岩体热破坏裂隙扩展 CT 实验研究	46
3.1 煤岩样 CT 扫描实验方法	46
3.1.1 CT 扫描原理	46
3.1.2 实验装置	47
3.2 实验条件与过程	49
3.2.1 试样选取与制备	49
3.2.2 试验过程	50
3.3 煤岩热破坏裂隙扩展特征	51
3.3.1 无烟煤试样热破坏裂隙演化特征	52
3.3.2 泥岩试样热破坏裂隙演化特征	57
3.4 三维重建及其裂隙扩展分布	61
3.4.1 无烟煤试样热破坏裂隙演化规律	61
3.4.2 泥岩试样热破坏孔裂隙演化规律	64
参考文献	68
4 煤田火区煤岩体破坏的热固耦合模型及数值模拟	69
4.1 煤岩体材料属性	69
4.2 耦合数学模型及有限元分析	70
4.3 热固耦合作用下煤岩体热破裂数值模拟	73
4.3.1 数值模拟的物理力学参数	73
4.3.2 砂岩的裂隙扩展分布	74
4.3.3 煤的裂隙扩展分布	75
4.3.4 煤岩组合体的裂隙扩展分布	78
参考文献	80
5 煤岩体全应力应变过程的渗透性试验研究	82
5.1 实验装置及原理	82
5.1.1 瞬态法实验原理	82
5.1.2 Darcy 流的渗透性	84
5.1.3 非 Darcy 流的渗透性	84
5.2 煤岩体单轴和三轴应力应变特征	85
5.2.1 煤岩体单轴应力应变	86
5.2.2 煤岩体三轴应力应变	88

5.3	煤岩体在温度影响下的三轴应力应变特征	90
5.4	煤岩体全应力应变过程渗透试验	92
5.4.1	实验程序及步骤	92
5.4.2	煤样的渗透特性	94
5.4.3	煤样非 Darcy 流渗透性	97
	参考文献	100
6	煤田火区煤岩体热-流-固多场耦合动力学模型	102
6.1	煤田火区煤岩体双重孔隙介质属性	102
6.2	煤田火区煤岩体热-流-固多场耦合动力学机制	104
6.2.1	基本假定	104
6.2.2	煤岩体热-流-固耦合数学模型及边界条件	106
6.3	裂隙气体渗流动力学分析	109
6.3.1	齐次数值解法	111
6.3.2	非齐次柯西解法	113
	参考文献	114
7	乌达煤田火区演化发展过程数值模拟	115
7.1	工程背景	115
7.1.1	乌达煤田概况	115
7.1.2	含煤地层	116
7.1.3	煤火特征	118
7.2	模型的建立	122
7.2.1	模拟思路	122
7.2.2	模型构建	125
7.2.3	网格划分	126
7.2.4	物理参数选择	126
7.2.5	边界条件确定	127
7.3	数值模拟及结果分析	129
7.3.1	应力应变、位移场分布	129
7.3.2	垮落前后的位移场变化	144
7.3.3	温度场、应力场随时间的变化	145
7.3.4	流场分布	146
	参考文献	148

8 乌达煤田火区监测结果及分析	150
8.1 煤火成因	150
8.2 高光谱热红外遥感监测	150
8.2.1 红外光谱	151
8.2.2 高光谱遥感成像特点	153
8.2.3 乌达煤火遥感监测	154
8.3 测氦法探测	159
8.3.1 探测原理	159
8.3.2 测氦方法及仪器装置	163
8.3.3 乌达6号火区探测结果	168
8.4 红外线测温结果	169
8.5 裂隙间距	170
参考文献	172

1 绪 论

1.1 煤火灾害现状及研究意义

1.1.1 世界各国

煤田火灾是因为地表煤层露头燃烧由浅部不断向深部发展而形成大面积的火区,现已成为全球性的灾难^[1~4],严重威胁着人类健康、生态自然环境和煤矿安全生产,造成巨大的资源损失和环境污染^[5~7]。据统计,仅中国的煤火所释放出的CO₂占全球CO₂排放量的2%~3%^[2~4]。图1.1^[8]是世界煤田火灾的分布图,中国、美国、印度、俄罗斯、澳大利亚、新西兰、印度尼西亚、南非等国家和地区煤田火灾普遍存在。

1) 美国

美国煤火燃烧了数百万年,烧掉了数百亿吨煤炭,主要分布在西部^[9,10]。目前,据AMLIS(Abandoned Mine Land Program Office)文档记录,美国共有106处地下煤火,主要分布在科罗拉多、肯塔基、马里兰、新墨西哥、宾夕法尼亚、犹他、弗吉尼亚、西弗吉尼亚、怀俄明州;86处地表煤火,主要分布在亚拉巴马、阿拉斯加、科罗拉多、伊利诺斯、堪萨斯、肯塔基、新墨西哥、俄亥俄、宾夕法尼亚、田纳西、弗吉尼亚、西弗吉尼亚、怀俄明州。图1.2为美国肯塔基州东部的煤矿井下火灾,巨大的烟从井下运输大巷漫出。

2) 印度

印度的煤层地质条件复杂,随着开采深度和时间的增加,煤火灾害亦越趋严重^[11]。被报道的煤火既包括地表煤田火,又有地下煤火^[12]。其中,贾里煤田(Jharia Coalfield)火是最严重的一个,数量超过65个,面积达450km²^[13]。如图1.3所示,火区中心的火焰高度达7m。

3) 印度尼西亚

印度尼西亚拥有超过17000个岛屿,位于澳大利亚和东南亚之间的赤道南和北。其煤火既出现在没有开采的煤炭中,也出现在开采过的煤炭中。在东加里曼丹(Kalimantan Timur)地区的未采动煤层中,由于受到人类活动(并非煤炭开采)的影响,煤火灾害产生的数量众多,并且频繁发生。现有数目超过3000个,从1980年以来就开始出现了^[14]。图1.4为印度尼西亚东加里曼丹(Kalimantan

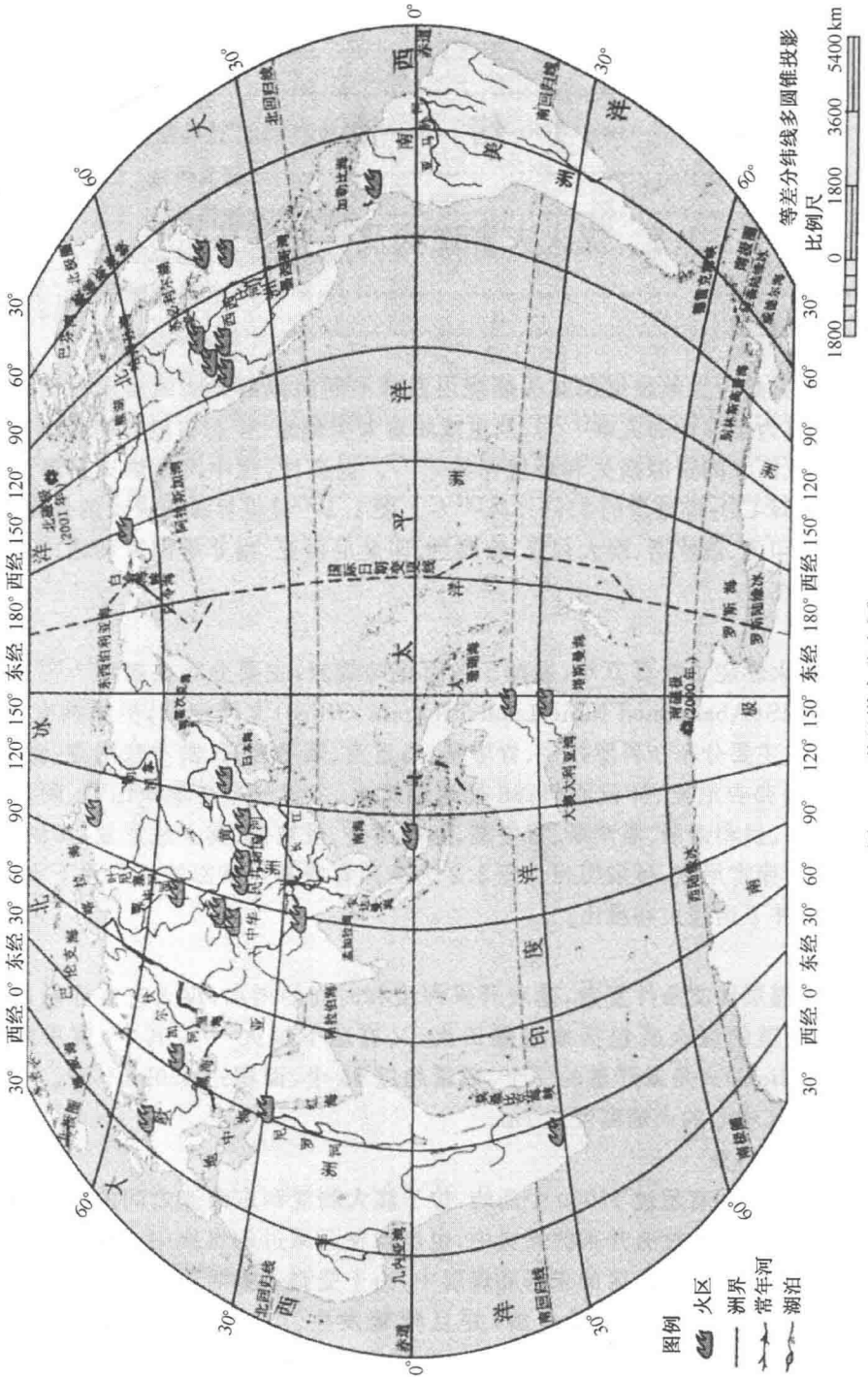


图 1.1 世界煤火分布^[9]



图 1.2 美国肯塔基东部的煤火灾害^[10]

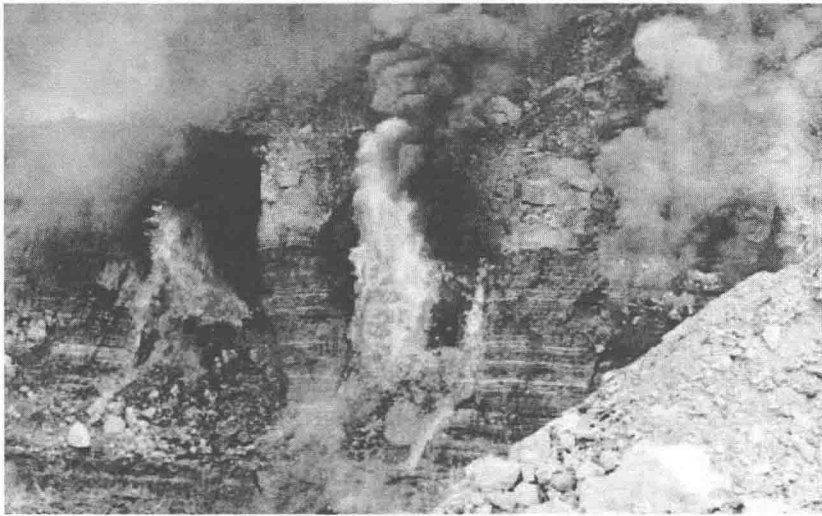


图 1.3 印度贾里煤田火灾^[13]

Timur)煤火,主要在巴厘巴板-三马林达(Balikpapan-Samarinda)公路的中北部巴厘巴板港市 24.1km 的范围内,附近的三处房屋有倒塌的危险,给当地人民带来了交通中断和消极的经济冲击。煤火始于 1997 年 9 月的 2.8m 厚的一号煤层露头火,到 1998 年 12 月,火灾达到 0.8hm²,并以每个月 5m 的速度推进[图 1.4(a)],工人在清理植被[图 1.4(b)],通过剥挖以隔离和扑灭煤火[图 1.4(c)],用黏土和不燃性材料回填[图 1.4(d)]。

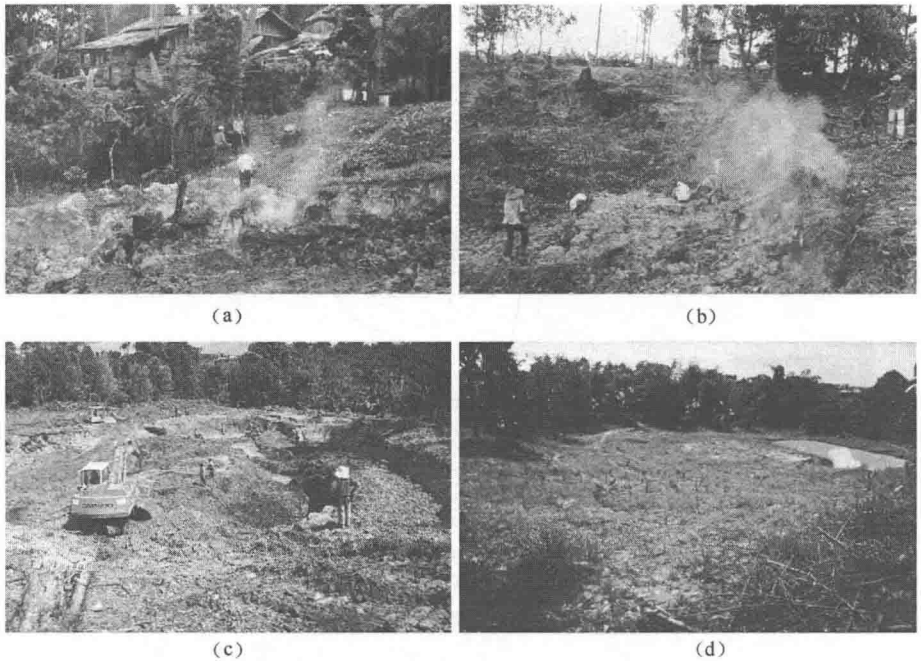


图 1.4 印度尼西亚东加里曼丹煤火

Whitehouse, 1999 拍摄;图(a)由 Stracher, 2007 拍摄

4) 澳大利亚

澳大利亚每年生产超过 4 亿 t 煤,绝大多数都采用露天开采方法,其中的一些矿井开采每年超过 1500 万 t,同时,也带来了大量煤炭的损毁和废弃,自然灾害十分严重^[3,15](图 1.5)。煤自燃灾害散发出大量有气味和有毒的气体^[16]以及温室气体^[17,18],并且高温和持续加热也会毁坏修复过的地面。

5) 俄罗斯

俄罗斯的库兹涅斯克(Kuznetsk)盆地含有可燃性的变质岩(包括似熔岩和接触变质煤)和矿物,形成于煤火发生的更新世时期,处于西西伯利亚平原与南西伯利亚山区之间,是最大的甲烷和煤炭生产地。在 2008 年煤炭产量达 1.845 亿 t,甲烷超过 $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ^[19,20]。在该盆地中,因古代煤火形成了二叠纪含煤变质沉积岩以及可燃性的变质岩。目前,最大的煤火分布在四个区域:克麦罗沃(Kemerovo)、萨莱尔(Salair)和孔多马(Kondoma)(位于盆地的边缘)和厄尔乌拉科沃(Erunakovo)(位于盆地的中心)。图 1.6 所示为俄罗斯西伯利亚西南部的煤火及其裂隙分布,图中小山体的圈划区域为可燃性的变质岩,中部地表因地下煤的燃烧而使其沿着结构性软弱区域下沉。



图 1.5 澳大利亚 Hunter Vally 煤田火灾

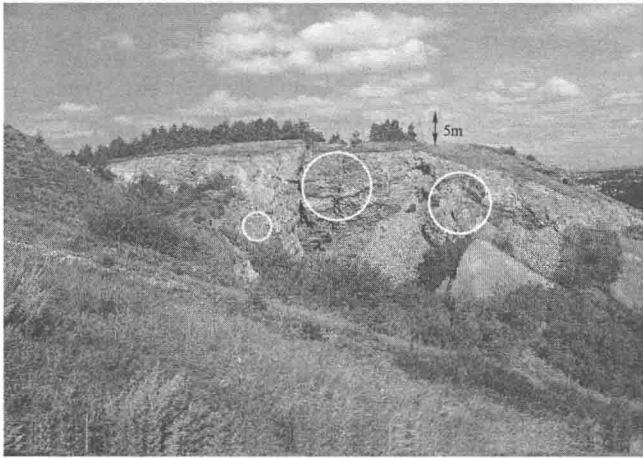


图 1.6 俄罗斯西伯利亚西南部煤盆地的煤火裂隙^[20]

6) 波兰

波兰井下煤炭开采始于 1767 年,当时是在南部城市卡托维兹开采烟煤和亚烟煤。在 19 世纪欧洲工业革命期间,煤炭开采发展成为波兰的一个主要工业^[21~25]。但是,平均开采 1t 的煤就会产生 0.3~0.6t 的煤矸石,其中比较典型的质量含量为 8%~10% 的有机物,有的甚至高达 30%^[26~28]。因此,波兰的煤矸

石自燃比较严重,其中最大的矸石山位于上西里西亚煤盆地,几乎一半的范围都在持续燃烧着。图 1.7 为波兰马塞拉(Marcel)煤矿矸石山自燃的现场,其成锥体状烟高达 15m。



图 1.7 波兰马塞拉(Marcel)煤矿矸石山自燃^[25]

7) 南非

南非煤炭由欧洲人于 1838 年最早报道。到 1860 年,在邓迪(Dundee)煤田的煤层露头部分开始小规模开采,至 1880 年才开始大规模的开采^[29]。目前,主要集中在南非中部盆地的威特班克(Witbank)、海菲尔德(Highveld)和埃尔默洛(Ermelo)三个煤田进行煤炭开采,2010 年,南非的硬煤(包含烟煤和无烟煤)产量达 2.8 亿 t,位列世界第五。其用于电力生产的比例高达 93%。但由于自燃或其他因素引起的煤层火灾在南非十分普遍,消耗了大量的煤炭资源。Witbank 煤田在 19 世纪末矿井开始开采后就出现煤火灾害,直到 1953 年该矿关闭后都还在持续燃烧(图 1.8)。萨索尔堡(Sasolburg)煤田于 1985 年首次报道煤火灾害出现在新法尔(New Vaal)煤矿的未开采煤层,伴随着中部煤层开采后的工作面暴露,就爆发了大规模的煤火灾害^[30]。

8) 葡萄牙

葡萄牙西部部的杜罗(Douro)煤田在 NW-SE 方向绵延 53km,煤炭开采始于 1795 年,结束于 1994 年。在开采过程中形成的矸石堆发生自燃,并造成了严重的大气污染、块体坡移、酸性矿物排水^[31~35]。形成的矸石堆有 S. Pedro da Cova、Lomba 和 Midões,其中,S. Pedro da Cova 矸石堆大约 28000m²,有 70~80m 高,距离 S. Pedro da Cova 村庄约 500m;Lomba 矸石堆有 7300m²,20~30m 高,位于杜罗河(Douro River)南岸,距离 Lomba 村庄 2km;Midões 矸石堆面积大约为 200m²,高 5~8m。这些矸石堆都存在烧过和未烧过的区域。图 1.9 所示为葡萄



图 1.8 南非 Witbank 煤田火灾^[4]

牙 S. Pedro da Cova 矸石堆煤火。



图 1.9 葡萄牙 S. Pedro da Cova 矸石堆煤火(Jorge Sousa, 2009 拍摄)

1.1.2 中国

我国煤田火区分布范围广、火灾程度严重,据初步调查,新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西、山西、内蒙古七个产煤大省(自治区)现共有 200 多个煤田火区,火区总面积达 720km^2 。其中新疆煤田火区面积为 $9.92 \times 10^6 \text{m}^2$,火区的燃烧深度超过 300m ,地表温度高达 300°C 以上,平均年烧失煤炭资源 $5.82 \times 10^6 \text{t}$,一些更新世时期的煤火温度超过 1000°C ,其中有烘烤和未经烘烤的沉积岩^[36~38],温室气体排放 $1.238 \times 10^7 \text{t}$,威胁储量达 $4.77 \times 10^{10} \text{t}$ 。由于小煤窑滥采滥挖,非法开采,使得一些火区复燃,并使火区面积进一步扩大^[39]。内蒙古自治区 2008 年勘查出新火

区 77 处,仅乌达煤田火区每年烧失量约 1.0×10^6 t,威胁储量为 5.087×10^7 t;宁夏 2007 年底除原国家立项的 12 个火区外,新增火区面积 187.238 万 m^2 ;而中国其他省份,如四川、重庆等产煤省(市)也存在不同程度的煤田火区,严重威胁着附近煤矿的安全生产。图 1.10 是我国的煤火分布区域示意图,分为煤田火灾和矿井火灾,主要分布在广袤的北方地区。

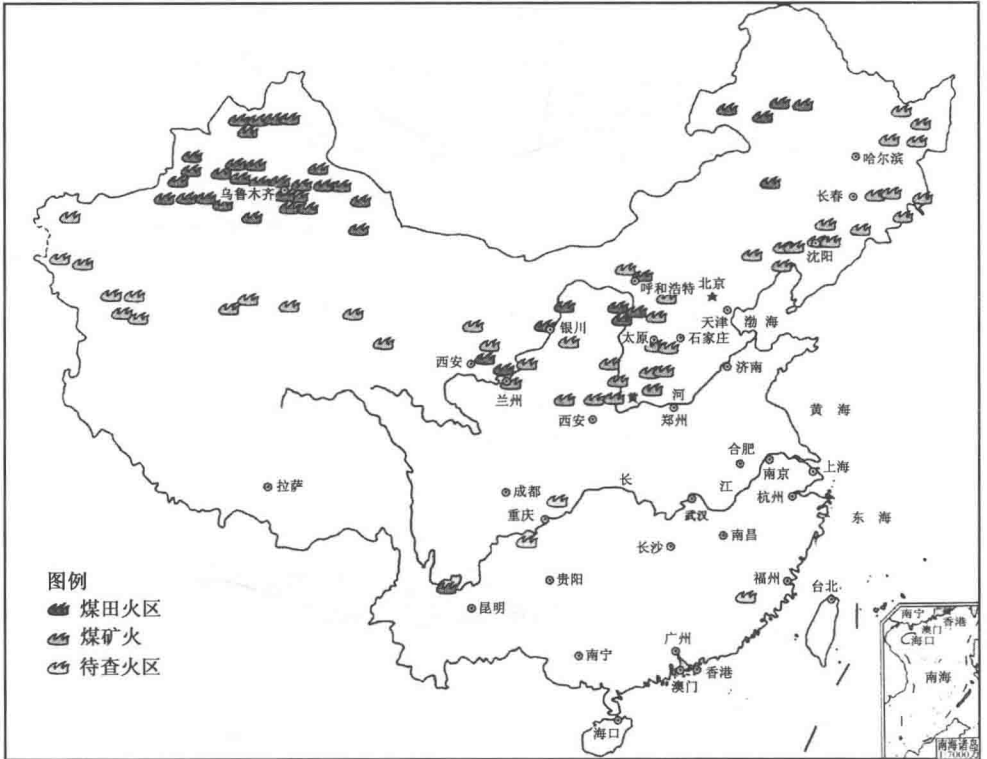


图 1.10 我国的煤火分布图

煤田火区具有如下特征:①对地质环境的影响。烧空区、烧变岩、燃烧裂隙和地面塌陷是煤田火区最明显的地质效应。煤田火区的浅部煤层在燃烧后形成烧空区,改变了上覆岩层的应力平衡状态,致使地表产生大量的燃烧裂隙、塌陷坑等,且煤体燃烧释放的巨大热量炙烤围岩,使岩石形成不同程度的烧变岩^[5,6]。②对大气环境的影响。煤层燃烧释放的大量有毒有害气体、热量,沿着裂隙、塌陷区传输到地表,随地表大气运动而扩散混入周围大气环境中。据统计,中国北方煤田火区,每年向大气层中排放 CO 4.902×10^5 t、 SO_2 1.547×10^5 t、 NO_2 3.0×10^5 t、粉尘 1.12×10^5 t,放出热量 3.09×10^{17} J,以及大量 CO_2 和 H_2S 等有毒有害气体^[5]。③对土壤环境的影响。煤田火灾主要为露头火,距离土壤很近,在其较高