

煤矿灾害防控新技术丛书

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

易欣 王振平 王乃国 著
郭英 王伟峰 王保齐

深井高地温 综放开采防灭火技术

 煤炭工业出版社

煤矿灾害防控新技术丛书

深井高地温综放开采防灭火技术

易 欣 王振平 王乃国 著
郭 英 王伟峰 王保齐

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

深井高地温综放开采防灭火技术 / 易欣等著. --北京:
煤炭工业出版社, 2017

(煤矿灾害防控新技术丛书)

ISBN 978-7-5020-5669-8

I. ①深… II. ①易… III. ①深井—煤矿开采—矿山防
火 - IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 323473 号

深井高地温综放开采防灭火技术 (煤矿灾害防控新技术丛书)

著 者 易 欣 王振平 王乃国 郭 英 王伟峰 王保齐

责任编辑 闫 非

编 辑 刘 鹏

责任校对 孔青青

封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

电 话 010-84657898 (总编室)

010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 14³/₄ 字数 356 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 8532 定价 108.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书主要介绍了我国深井高地温煤层自燃特点与规律,阐述了高地温煤层综放开采煤自燃特性、自燃危险区域判定预测及监测预警技术,重点介绍了煤自燃程度识别新技术,煤自燃预控技术,采空区有害气体密闭控制技术,分析了高地温综放工作面煤层自燃防控典型实例等,可使读者对深井高地温煤层自燃预测技术、监测预报方法、预防控制新技术及其应用形成较为清晰的认识。

全书既可供安全工程专业的本科学生教学使用,也可作为煤矿企业从事煤矿安全监察、煤矿安全生产、矿山通风与安全的技术和管理人员的培训用书。

前 言

随着开采强度增加,我国煤矿开采深度以每年8~12 m的速度增加,中东部矿区以每年10~25 m的速度进入深部开采,超过800 m的矿井有200多处,超过1000 m的矿井有47处。深井开采地温高,煤自燃起始温度高,发火期短;矿压大,煤体破碎,氧化蓄热条件好;受冲击地压防治影响,工作面推进速度慢,煤氧化时间长:以上自燃致灾因素均有利于煤炭自然发火,自燃危险性极强,发火现象尤为突出,严重威胁安全开采。目前,我国煤矿已经有较为完善的防灭火技术体系,但针对深井高地温环境煤层自燃防治,却还未有针对性预防和控制措施。因此,针对深井高地温煤自燃危险区域、特征信息识别及有效防控3个关键技术难点,围绕煤自燃特性与危险区域预测、监测与预警方法、防控技术的研究和应用,实现高地温煤层自燃早期识别与科学防控显得尤为重要。为适应当今煤矿火灾事故防治需求,进一步提高我国煤矿安全生产技术与管理水平,我们编写了《煤矿安全新技术》丛书,本书是其中之一。

本书共由8章组成:第1章简要介绍了我国深井高地温煤层自燃特点与规律,第2章阐述了高地温煤层综放开采煤自燃影响因素及特性,第3章主要介绍了基于指标气体的煤自燃程度识别新技术,第4章介绍了高地温煤层综放开采采空区自燃危险区域判定与预测,第5章介绍了高地温综放采空区自燃危险区域监测预警技术,第6章介绍了高地温煤层综放开采煤自燃预控技术,主要包括采空区隔离、灌浆注胶、液态二氧化碳、阻化泡沫等关键技术,第7章介绍了深井高地温综放采空区有害气体密闭控制技术,第8章介绍了工程典型实例。本书可使读者对深井高地温煤层自燃预测技术、监测预报方法、预防控制新技术及其应用形成较为清晰的认识。

本书共8章,王振平编写了第1章,易欣编写了第2章、第3章和第4章,王伟峰编写了第5章,王乃国编写了第6章和第8章,郭英、王保齐编写了第7章。

本书在编写过程中,参阅了国内外许多专家学者的论文、著作及教材,在此深表感谢。特别感谢西安科技大学文虎教授在百忙之中对本书稿进行审阅,

提出了许多宝贵的修改意见和建议。本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51574193)、国家自然科学基金重点项目(51134019)、中国博士后基金项目(2015M570625)和国家安全科技“四个一批”项目的资助和支持,在此表示衷心感谢。

尽管编者在该书系统性、完整性及科学性等方面尽了最大努力,但由于学术水平及经验等方面的限制,书中难免存在不妥之处,恳请各位读者批评指正。

著 者

2017年6月

目次

1 绪论	1
1.1 我国深井开采概况	1
1.2 深井开采煤炭自燃特点	2
1.3 国内外研究现状	3
1.4 本书主要结构体系	14
2 高地温煤层综放开采自燃特性及影响因素	17
2.1 高地温矿井煤自燃影响因素	17
2.2 温度对煤自燃危险性影响实验	20
2.3 煤自燃特性及氧化动力学分析	25
2.4 煤自燃特征参数测试	35
2.5 煤对 CO_2 、 N_2 吸附惰化特性	41
2.6 本章小结	44
3 基于指标气体的煤自燃程度识别新技术	45
3.1 煤炭自然发火预报指标气体	45
3.2 煤自燃指标气体与特征温度对应关系	52
3.3 煤自燃指标气体的吸附浓缩检测技术	66
3.4 本章小结	74
4 高地温煤层综放开采采空区自燃危险区域判定与预测	75
4.1 高地温采空区漏风流场主要影响因素	75
4.2 高地温采空区漏风场渗流规律数值模拟	77
4.3 高地温采空区自燃危险区域判定	85
4.4 本章小结	92
5 高地温综放采空区自燃危险区域监测预警技术	94
5.1 采空区煤自燃监测预警系统整体架构	94
5.2 采空区煤自燃无线监测技术	95
5.3 采空区煤自燃温度场分布式光纤监测技术	103
5.4 采空区煤自燃预警方法研究	117
5.5 采空区煤自燃无线监测系统	128

5.6 本章小结	130
6 高地温煤层综放开采煤自燃预控技术	131
6.1 高地温综放开采煤自燃预控模式	131
6.2 高地温采空区煤自燃防控关键技术	132
6.3 高地温综放工作面煤层自燃应急防灭火预案	162
6.4 本章小结	165
7 深井高地温综放采空区有害气体密闭控制技术	166
7.1 采空区抗冲击密闭结构类型	166
7.2 采空区密闭的原则和形式	168
7.3 钢筋混凝土密闭结构设计	171
7.4 钢筋混凝土密闭结构强度验算	175
7.5 本章小结	185
8 工程应用	186
8.1 矿区概况	186
8.2 龙固矿 2301N 工作面煤自燃监测及防治	186
8.3 赵楼矿 1306 工作面煤自燃监测及防治	196
8.4 本章小结	208
附录 不同开采阶段关键点的监测数据结果	209
参考文献	221

1 绪 论

1.1 我国深井开采概况

我国煤炭资源分布不均衡，埋藏较深，深埋在 1000 m 以下的煤炭储量约为 2950 Gt，占煤炭资源总量的 53.17%。随着人类对矿产需求量的逐渐增加，开采强度增加，浅部资源的减少甚至枯竭，矿井开采深度逐渐增加，越来越多的矿井将面临严峻的深部开采问题^[1]。根据矿井开拓系统形成的过程不同可以将深部矿井分为两类：第一类是由于开采浅部煤层逐渐开拓延深至深部的矿井（占多数）。这类矿井开采水平较多，生产环节多，生产系统复杂。第二类是在深部新建的矿井，第一开采水平深度就比较大。目前，我国大多数煤矿开采深度已由 20 世纪 50 年代的平均不到 200 m 增加到 20 世纪 90 年代的 500 m 左右。生产矿井方面，1980 年平均开采深度达到 288 m，1995 年平均开采深度增加至 428 m，2017 年平均深度已经达到 500 多米。据统计，我国已有平顶山、淮南和峰峰等 43 个矿区的 300 多处矿井开采深度超过 600 m（开采深度达到 600 m 以上即称之为深井），逐步进入深部开采的范畴。且矿井开采每年以 8~12 m 的速度向深部发展，东部矿井每年以 10~25 m 的速度向深部发展（图 1-1），其中开滦、北票、新汶、沈阳、长广、鸡西、抚顺、阜新和徐州等地近 200 多处矿井开采深度超过 800 m，而开采深度超过 1000 m 的矿井已有 47 处，如徐州张小楼煤矿（开采深度达 1100 m，年生产能力 1.2 Mt，立井开拓）、开滦赵各庄煤矿（开采深度达 1160 m，年生产能力 2.3 Mt，主斜井副立井综合开拓）等。仅山东省开采深度超过 1000 m 的矿井就占 21 处，其中巨野矿区有 7 处^[2]。

煤矿进入深部开采后，普遍存在岩层压力大、涌水量大、地温高等现象，给矿井围岩

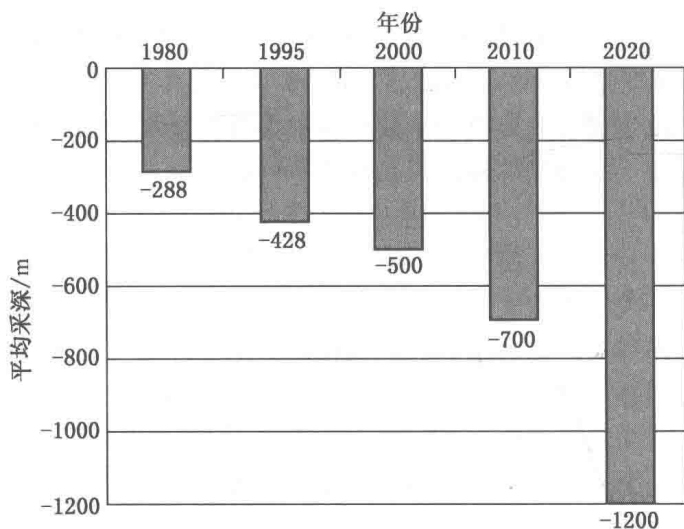


图 1-1 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势图

控制、突（涌）水治理、防灭火、热害治理带来了挑战，特别是随着矿井开采强度及生产规模的不断增大，矿井生产所面临的技术难题更为严峻。

1.2 深井开采煤炭自燃特点

我国煤层火灾十分严重，在开采和储运过程中自燃现象经常发生，矿井采空区、煤层露头、地面煤堆及煤仓自燃着火，造成了巨大的资源浪费、环境污染、人员伤亡和财产损失^[3]。据统计，我国煤矿自燃火灾约占矿井火灾的70%，一些自然发火严重的矿区，如兖州、抚顺、鹤岗、窑街、义马、淮南等矿区，其自然发火占矿井火灾次数的90%以上^[4]。煤自燃由煤氧复合放热所致，具有自燃火源位置隐蔽、内部能量难消除、易复燃等特点^[5]。煤自燃会释放出大量的有毒有害气体和烟雾，严重威胁井下工人的生命安全。例如，1996年，阳泉矿务局因自燃火灾封闭综放工作面3个，冻结煤量近4 Mt，造成的直接和间接损失达4亿多元。2002年2月28日，阜新市三道壕煤矿发生火灾事故，造成21人死亡；2002年5月23日，黑龙江宝清县煤矿发生火灾事故，17人死亡；2002年12月6日，吉林省万宝煤矿发生火灾事故，34人死亡。2003年10月，宁煤集团白芨沟矿因采空区自燃而引起百余次瓦斯爆炸，直接和间接经济损失达2亿多元。

煤自燃火灾容易诱发次生灾害，如瓦斯、煤尘爆炸，特别是在一些较为封闭的区域、巷道高冒顶区域、煤柱破碎区域及采空区等特殊地点。高温火源点较为隐蔽，难以及时发现，稍有不慎便可能导致瓦斯、煤尘爆炸，严重威胁着矿井安全生产。例如，1908年2月13日，格林果煤矿由于煤层自燃引起瓦斯爆炸，3人死亡。1924年4月，捷克斯洛伐克加勃里埃尔矿井采空区煤层自燃，引起瓦斯和煤尘爆炸，井口形成高达350 m的火焰烟柱，造成16人死亡。1910年，顿巴斯由于火灾引起瓦斯爆炸造成11人死亡。1930年，卡尔马克思煤矿因为煤层自燃造成9人死亡。1995年9月，石嘴山二矿掘进工作面自燃引起瓦斯爆炸，9名救护队员死亡。2005年5月10日，汝箕沟高瓦斯矿井综放工作面采空区自燃，面临重大瓦斯爆炸威胁，最后采用水淹封闭的方式对采空区进行了处理，造成了重大经济损失。2013年3月29日和4月1日，八宝煤业公司-4164 m东水采工作面东一分层上阶段采空区煤炭自然发火引起瓦斯爆炸，造成53人死亡，8人受伤。

我国大部分矿井地温场的地温梯度属于线性分布，平均地温梯度为 $(24.18+3.14)^\circ\text{C}/\text{km}$ ，当矿井开采深度超过800 m时地温超过 40°C 。深井开采由于地温高，煤自燃起始温度高，发火期短；围岩温度升高改变了煤体蓄热条件，煤氧化放热性增强，在煤体与工作面风流之间形成温差，热风压导致漏风供氧充分，造成煤体自身氧化放热性能增强，增强了采空区遗煤自燃的危险性^[6]。矿山压力大，煤体破碎，氧化蓄热条件好；受冲击地压防治影响，工作面推进速度慢，煤氧化时间长；这些自燃致灾因素均有利于煤炭自然发火，自燃危险性极强，发火现象尤为突出，严重威胁安全开采。在深井高地温煤层综放开采条件下，由于工作面煤层埋藏深，因此地温较高；综放开采强度大，垮落空间高；采煤工作面配风量大，漏风强度大；顶煤采出率低，采空区堆积大量松散煤体，丢煤多等。深井高地温煤层自燃火灾防治呈现出一系列特点和难题：

(1) 煤层埋深大，地温高，工作面煤层原岩地温高。由于起始温度高，煤自然发火期缩短，煤炭自燃氧化速度快。

(2) 高地温煤层综放工作面开采强度大，煤体散热量大，所需配风量大。配风量的增

加造成漏风强度增强,采空区渗透系数、漏风范围及其漏风规律发生相应的变化,自燃“三带”分布规律也随之发生变化,采空区自燃危险区域范围增大。

(3) 综放工作面开采煤层厚度大,造成采空区范围大,漏风严重,尤其是工作面“两道两线”丢煤多。由于回风巷、运输巷采用锚网支护,顶煤难以垮落,采空区漏风严重,极易造成采空区浮煤自然发火。

(4) 综放工作面采空区与工作面间的温差造成热风压,导致采空区与工作面间风流的热湿交换增加,采空区漏风供氧充分,自燃危险性强。

(5) 工作面在掘进过程中涌水量大,水温高。井下空气湿度比较大,相对湿度可以达到100%。回采过程中采空区涌水量可能较大,将会影响推进速度,导致自燃危险性较大。

(6) 综放工作面采空区垮落高度和空间体积大,采空区防灭火区域增大,自燃危险区域位置模糊且隐蔽,一旦有浮煤自然发火的迹象,自燃火源将会迅速发展,危及整个矿井的生产,防灭火难度更大,而常规的黄泥灌浆、注氮等灭火措施难以实现其防灭火的要求。

(7) 工作面后部采空区温度高,热量难以有效消除,蓄热条件好,常规的防灭火技术难以有效降低采空区温度。

由于高地温煤层综放开采自燃防治存在以上难点,使得煤自燃监测及预防技术问题显得尤为重要,一旦发生煤层自燃将迫使工作面停产,会造成很大的经济损失。因此,本书针对高地温煤层自燃特点与规律、高地温煤层自燃特性、采空区自燃危险区域监测、预警方法及浮煤自燃灾害防控技术进行论述。

1.3 国内外研究现状

为抑制和减少煤层火灾事故的发生,世界各国科研机构和生产部门对煤自燃特性和过程、自燃预测预报及防治技术进行了大量的理论分析、实验研究和现场实践,取得了很多对现场实际有指导意义的研究成果。

1.3.1 煤自燃特性参数实验测试

1.3.1.1 煤自燃宏观表征特性

1. 煤自燃热分析研究

舒新前^[7]采用TG(热重分析法)研究了汝箕沟无烟煤和神府烟煤的自燃氧化动力学,并结合实验参数分析得出了煤自燃特征温度。路继根^[8]采用DTA(等温差热)和TG研究了煤氧化机理,结果表明:起燃温度惰质组>镜质组>壳质组,燃尽温度惰质组>壳质组>镜质组。彭本信^[9]基于DTA-TG-DSC-FTIR技术,测试了褐煤到无烟煤8个不同变质程度煤种70个煤样的氧化放热强度,表明造成低阶煤易自燃的主要因素是低阶煤的氧化放热强度大于高阶煤的氧化放热强度。Jose^[10]对比研究了新鲜煤样与氧化煤样的自燃特性。葛新玉^[11]研究了煤在整个氧化阶段的气体产物变化规律及其特征,得出了煤自燃的指标气体。张辉、邹念东^[12]采用热重分析法研究了不同添加剂对煤粉燃烧性能的影响。徐俊、王德明等^[13]采用微量热仪C80研究了煤样在不同升温速率下从室温到200℃时的氧化放热特性。

2. 煤自燃活化能研究

Tevrucht^[14]基于FTIR技术检测了煤分子中脂类C-H吸收峰强度的变化,得出了吸收

峰强度变化规律,并以此为依据计算出了煤氧反应的活化能及速率常数。Bowes P C^[15]采用 Frank-Kamenetskii 无量纲参数研究了煤自燃特性与活化能间的关系。Patil^[16]采用 XPS (X 射线光电子能谱)研究了煤分子中 O/C 原子比值和 SIMS (变用次级离子质谱)的变化规律,并得到在 295~398 K 时表观活化能为 11.451 kJ/mol。Martin^[17]用次级离子质谱 (SIMS)研究了 23℃、70℃和 90℃时煤表面 O₂ 浓度的变化。刘剑等^[18]认为现行的煤自燃倾向性鉴定方法具有一定的局限性。Myles^[19]认为反应热、热容量及活化能与煤级相关性较小。陆伟等^[20]研究了煤自燃是煤体不断氧化产热,使得热量得到一定程度的集聚,促使煤分子内官能团结构活化,煤氧化反应加速放出大量热量,当自热加速达到着火点时引起煤体的着火燃烧。李林、B. B. Beaimsh 等^[21]对 9 个典型煤样进行了绝热氧化实验模拟,结果揭示了煤在自燃过程中活化能随着温度升高而降低。Zhu Jianfang 等^[22]研究了煤自燃过程中耗氧速率与温度之间的关系。屈丽娜^[23]通过对 10 个不同变质程度的煤样进行同步热分析实验、程序升温实验、红外官能团测试,得到了煤自燃过程中不同影响因素对特征参数的影响。王德明、辛海会等^[24]采用前线轨道理论和量子化学计算分析了活性位点上的电子转移及其完整反应路径、活化能及放热量,得出了煤自燃过程中 13 个基元反应及其反应顺序和继发性关系,揭示了煤中原生结构转化为碳自由基并释放气体产物的低活化能链式循环的煤氧化动力学过程,提出了煤氧化动力学理论,阐明了煤自燃产物的生成机理。

3. 煤自燃氧化化学反应和表面反应热研究

Peter Nordon^[25]采用两种不同的氧化实验方法,研究了煤氧化速率与自燃性的相互关系。徐精彩等^[26]根据煤自身氧化放热特性及其所处环境的蓄热能力,采用热平衡方法推演得到引发煤体自燃的最大漏风强度、下限 O₂ 浓度、最小浮煤厚度及最大平均粒径等自燃极限参数。Itay^[27]研究了煤的氧化机制,认为煤在低温阶段的氧化是由里向外进行,遵守核反应收缩的原理模型,空气通过氧化层的扩散速率决定了煤的氧化速率。Continillo C^[28]通过研究化学吸氧与氧化速率之间所存在的相互关系,结合实验分析得出煤氧化速率在不同的温度阶段所表现出的变化规律存在很大的差异。徐精彩^[29]基于煤表面氧化反应热方法研究了煤的自燃机理,得出不同煤阶的煤及其表面反应热不同,且其变化规律与煤温相关。何萍^[30]研究了煤氧化过程中其氧化产物所发生的特征变化规律,并得出了煤自燃的指标性气体。梁晓瑜^[31]通过实验研究分析了低温氧化阶段水分对煤的影响,研究表明,水分对煤样低温氧化具有先催化后抑制的作用。严荣林^[32]研究了不同变质程度及含有不同煤岩成分煤样的氧化性,指出煤的变质程度和煤岩组分会对煤的自燃倾向性造成很大的影响。Tarba^[33]对煤的放热强度和吸氧能力进行了研究,得出煤的物理吸附放热强度大多都在 0.16~0.6 kJ/mol 之间,化学反应放热量随煤变质程度以及温度的变化而变化。肖畅^[34]对矿井风流中低浓度、难以直接测定的指标性气体进行了浓缩分析。谭波^[35]将煤自燃极限参数计算方法与热传导原理相结合,建立了动态坐标系下简化形成的采空区煤自然发火数学模型,得到了工作面回采时采空区煤自然发火规律。许涛^[36]基于绝热氧化法研究了煤自热升温特性,通过线性拟合的方式分析得出不同变质程度煤样的分段临界温度。谭波^[37]基于绝热氧化实验、元素分析实验及工业分析实验,计算得出了煤的绝热氧化阶段升温速率、不同变质程度煤种的自燃临界点 $Tr_{0.05}$ 与 $T_{\Delta max}$ 。

4. 煤自燃的煤岩相学研究

舒新前^[38]、葛岭梅等^[39]认为丝炭在低温下吸收大量的 O₂ 并释放热量是丝炭着火点低的主要原因。张玉贵^[40]研究了阜新长焰煤与平庄褐煤的自然发火过程,实验结果表明,镜煤的燃点低,自燃倾向性大。Markuszewski R^[41]认为不同变质程度的煤体中,其显微组分中镜质组的自燃倾向性最高。张军^[42]研究了煤质中显微组分在缓慢加温条件下的热解原理,实验结果表明,热解的活化能与显微组分密切相关,同时得出一般情况下活化能最低的是惰质组。Straszheim^[43]认为显微组分中镜质组最容易发生自燃,与煤级程度的高低无关。Jakab^[44]基于裂解质谱技术研究了低温阶段煤的显微组分的氧化情况,结果表明,富含脂肪族氢的煤结构不易被氧化,而镜质组与孢粉体却易被氧化。曹作华^[45]认为暗煤对 O₂ 吸附量少而稳定,暗煤的氧化速率明显比亮煤慢,镜煤与丝炭的吸附量最大且容易被氧化。

1.3.1.2 煤自燃微观特性

1. 煤分子中官能团的研究

Cannon 与 SutherLand^[46]最先将红外光谱应用于煤分子的研究过程之中。Painter^[47]、Ibarra^[48]将不同煤阶的红外谱峰进行了细致归属。陈莞^[49]研究了煤中氢基成分,将煤中氢基分为 5 大类型,并结合实验数据分析了热稳定顺序。Cerny^[50]基于红外光谱技术对煤的脂肪族与芳香族进行了分析。Jiang Xiumin 等^[51]研究了超细煤粉燃烧过程中活性官能团结构的变化规律。Maria. J I^[52]应用 FTIR 和 Py-GC/MS 研究了富氢煤的化学结构。Petersen H I^[53]对煤中含氧官能团做了深入的研究。冯杰^[54]将模型化合物确定标准浓度的方法与煤样的红外光谱相结合,定量分析了煤分子的官能团结构,并确定了煤中芳氢、脂氢、羟基的比例。葛岭梅^[55,56]通过煤分子结构特征及桥键推断出常温常压下发生煤氧复合反应的活性官能团结构。朱红^[57]研究了煤在不同自燃阶段的频率大小与吸附光谱能力,得出了不同煤阶在不同频率上吸收光谱的能力。刘国根^[58]利用红外光谱研究了风化烟煤和褐煤,结果表明,煤阶越高,芳环的缩合程度越高。黄庠永^[59]基于 FTIR 技术深入研究了粒径对铁法烟煤表面羟基官能团的影响,指出羟基氢键、醚氢键、羟基- π 氢键受粒径的影响最大。王继仁、邓存宝等^[60]采用量子化学理论与红外光谱相结合的方法研究了煤氧复合反应的化学机理,得出煤体中有机大分子侧链官能团及小分子化合物是诱导煤自燃的主要物质。仲晓星^[61]从热自燃理论和自由基链式自燃理论出发,采用 DSC-TG 热分析技术、电子自旋共振技术研究了煤自燃在不同阶段的产热速率和自由基浓度的变化规律,并将测试结果与绝热氧化升温速率进行了综合分析,得出煤自燃的分段特性及其氧化特性差异性。戚绪尧^[62]采用 FTIR 技术研究了不同煤阶原煤样中含硫官能团、烷基侧链、含氧官能团对煤中原生活性官能团及次生活性官能团的影响,得出了煤分子中官能团的分布状况。

2. 煤分子中微晶结构的研究

Mahadevan^[63]最早于 1929 年将 X 射线衍射仪用于对煤分子结构特征的研究。Yen^[64]将 XRD 分辨后的峰面积用于煤分子芳香度的计算。李美芬、曾凡桂等^[65]对不同煤阶的煤样分析后得出了 Raman 光谱参数与 XRD 结构参数之间的关联性。戴广龙^[66]研究了不同煤阶的 4 种煤样在低温氧化过程中的特性,得出低温氧化与煤体的微晶结构有着本质上的联系。罗隽飞^[67]研究了低中阶煤中镜质组的芳构化程度,得出镜质组的芳构化程度随煤阶的变化明显高于惰质组。

3. 煤分子中自由基的研究

张代均^[68]基于 ESR 实验系统,对不同煤阶煤样中自由基的起源、数量及性质进行了研究。X J Hou^[69]采用分子动力学与量子化学相结合的方法研究了煤分子结构与煤反应性之间的关系。P Strak^[70]对煤中壳质组、丝炭组及镜质组中大分子结构特征进行了研究。李建伟^[71]利用 ESR 测试了低温氧化阶段煤中自由基浓度的变化规律,选用汝箕沟、神府两种煤样进行了实验,得出煤中自由基浓度随着温升吸收峰变窄。戴广龙^[72]对不同变质程度的煤样进行了实验研究,得出含氧量与煤变质程度密切相关。张群^[73]对镜煤、丝炭和暗煤进行了研究。刘国根^[74]利用 ESR 实验对褐煤与风化烟煤进行了波谱分析,指出煤化程度越高,波谱吸收峰越窄,且分化使自旋浓度降低。Jonathan P. Mathews 等^[75]基于高分辨率透射电子显微镜及激光解吸低挥发分烟煤电离质谱数据确定了煤分子质量。罗道成^[76]采用 ESR 波谱研究了自由基浓度变化规律,结果表明,紫外光照射及低温氧化均能诱发自由基形成,且随着煤体破碎程度、氧化温度越高与氧化时间越长,自由基浓度越大。

1.3.2 煤自燃危险区域判定

1991 年,乌克兰全苏矿山救护研究所确定了煤自燃临界厚度的计算公式^[77],即

$$h_{kp} = \sqrt{(T_{kp} - T_{ok}) \sqrt{\varphi} (5.1^7 K_p \rho_m)} \quad (1-1)$$

式中 T_{kp} ——煤自燃临界温度, K;

T_{ok} ——围岩温度, K;

φ ——空气干燥状态下煤样湿度, %;

K_p ——原煤样氧吸附速度常数, $m^3/(kg \cdot s)$;

ρ_m ——煤的平均密度, kg/m^3 。

Sujanti、Wiwik Zhang 等^[78]采用静态恒温法实验,测出煤在多种类型的网状反应器中的临界环境温度 $T_{a,c}$,根据 F-K 模型推算出煤体活化能 E 和指前因子 A ,得到了地面煤堆自燃临界厚度,即

$$h_{kp} = \sqrt{\frac{\delta_c R T_a^2 k}{E Q A \rho \exp(-E/RT_{a,c})}} \quad (1-2)$$

式中 A ——指前因子;

E ——活化能, kJ/mol ;

k ——煤体导热系数;

Q ——氧化热, J;

T_a ——环境温度, $^{\circ}C$;

$T_{a,c}$ ——临界环境温度, $^{\circ}C$;

δ_c ——F-K 无量纲参数;

R ——气体常数;

ρ ——煤的块密度, kg/m^3 。

当破碎煤体处于堆集状态,且堆煤厚度大于或等于临界浮煤厚度时,就有可能发生自燃。

国内研究学者对煤自燃危险区域判定做了大量研究工作。齐庆杰、黄伯轩^[79]、章楚涛^[80]等研究了采空区火灾气体浓度分布与流动规律,分析了其与火源点之间存在的联系,

建立了判断采空区火源位置的数学模型。邓军、徐精彩等^[81]通过煤自然发火数值模拟计算,分析了不同供风强度、散热边界条件和煤粒度等对煤最短自然发火期的影响关系,并将该理论应用于兖州矿区煤最短自然发火期的确定。徐精彩^[82-84]基于热平衡法计算得到了不同温度松散煤体氧化放热强度,根据煤最短自然发火期与采空区氧化带的变化规律,提出了能够引发自燃的最小推进速度计算方法,确定了自燃危险区域判定的充分条件。

1.3.3 煤自燃预测技术

煤自燃预测技术是指在煤还未出现明显自然发火征兆之前,根据煤氧化放热特性和实际开采条件,超前判断松散煤体自燃危险程度、自然发火期及自燃区域的一种技术^[85]。

常用预测技术有综合评判预测法、自燃倾向性预测法、经验统计预测法、自然发火实验预测法、数值模拟等^[86]。

1. 综合评判预测法

综合评判预测法是根据影响煤层自燃危险程度的因素,结合通风条件、地质赋存条件、自燃倾向性、开采技术因素及相应的预防措施等进行判断,分析评分,然后应用模糊数学理论逐步聚类分析,并根据标准模式计算聚类中心,对开采煤层自燃危险程度进行预测。陈立文^[87]、许波云^[88]和郭嗣琮^[89]等根据影响煤层自燃危险程度的因素,对开采煤层自燃危险程度进行了综合评判预测。Kaymakci Erdogan 等^[90]基于线性和多次回归理论综合分析,根据实验测定的温度曲线,推导出了自燃参数与煤岩相学参数之间的关系。

2. 自燃倾向性预测法

根据煤自燃倾向性的不同,将煤层自然发火情况划分为不同等级,以此区分煤层的自燃危险程度,从而采取相应的防灭火措施。20 世纪 80 年代以前,国外主要以煤的氧化性为基础来测试煤自燃倾向性,分为化学试剂法和吸氧法^[91]。20 世纪 80 年代后,国内外一些学者和研究机构从煤热效应角度来探究煤的自燃性。进入 20 世纪 90 年代,人们利用色谱动态吸氧法来确定自燃倾向性^[92]。由于自燃倾向性预测法存在一定的不足,只能大致判断出煤炭的自然发火危险程度,不能确定实际条件下松散煤炭的自燃危险程度、自燃区域及自然发火期^[93]。

3. 经验统计预测法

经验统计预测法是基于大量统计资料分析归纳火灾原因。该方法存在明显的局限性,难以对不同发火类型的自燃进行预测,且在时间统计上存在着较大的偏差,仅能大致判断自然发火的危险区域范围^[94]。蒋军成^[95]、王德明^[96]、赵向军等^[97,98]基于神经网络算法,以煤炭自身自燃倾向性、开采煤层地质赋存条件、开拓开采及通风技术条件等指标预测了煤层自燃危险程度。施式亮等^[99]以防火系数为预测指标,建立了人工神经网络的时间序列预测模型,以此来判断自然发火程度。田水承等^[100]以煤自燃倾向性、煤厚、煤坚固性系数、煤层倾角及开采参数为基础,运用模糊聚类方法对煤自然发火危险性进行了分类。

4. 自然发火实验预测法

自然发火实验预测法采用实验模拟煤炭自燃过程中蓄热条件和漏风条件等对煤自燃的影响,建立煤自然发火数学模型,对煤自燃过程的各种影响参数进行数值解算,得出不同边界条件下煤自然发火危险程度。早在 20 世纪 80 年代,世界许多国家就先后建立了大型实验台,模拟煤自燃过程。1979 年,James B. Stott^[101]在美国匹兹堡设计建立了高 5 m、直径 60 cm、装煤 1 t 的垂直圆柱形煤自然发火实验台,研究煤体自燃时传热、传质过程。

1986年, James B. Stott 和 Benjamin J. Harris 等^[102,103]在新西兰建立了高 2 m、直径 30 cm 的圆柱形煤体自然发火实验台, 模拟煤自燃过程中不同参数的变化。1987—1990 年, X. D. Chen 和 James B. Stott^[104,105]在新西兰坎特伯雷大学建立了大型煤体自然发火实验台, 研究了松散煤体内部的传热、耗氧变化情况, 模拟了煤体自燃规律。1998 年, V. Fierro^[106]在西班牙 ENDESA 电厂储煤场, 实验测试了真实煤堆的自然发火情况, 实验中共用煤 2000~3000 t, 考察了各种煤堆自燃防治方法的有效性。

20 世纪 90 年代以后, 国内许多学者相继建立了大型煤自然发火实验台, 徐精彩等^[107,108]建立的 XK 系列煤体自然发火实验台, 可以模拟现场煤堆的散热、漏风等情况, 检测煤柱内各点的温度、 O_2 及 CO 等气体成分随着实验的进行而发生的变化, 掌握了煤自燃高温点的发生、发展、变化过程及停止供氧后高温点的降温规律。

5. 数值模拟

20 世纪 70 年代, Canterbury 大学推导出了煤自燃的瞬态数学模型。McNabb A. 等^[109]建立了一维自然对流模型, 用以模拟煤柱在自然对流情况下的氧化和放热性能。卞晓锴等^[110]建立了采空区温度场的数学模型, 并用有限差分数值方法进行了模拟计算。Rosema A. 等^[111]基于数值模拟模型 COALTEMP 研究了煤在露天场合的氧化和自燃特性, 建立了微分方程来描述煤中热、氧的流动。Zhu M S 等^[112]基于采空区自燃数学模型, 模拟了空气在煤、混凝土块、矸石的混合物均匀体内的二维渗流。Continillo 等^[113]建立了存在弱自然对流的煤堆自燃基本瞬时二维模型, 包括质量平衡方程、能量平衡方程和动量平衡方程。

1.3.4 煤自然发火监测预警技术

煤自燃监测预警技术是通过观测自燃过程中其本身或周围介质的物理变化或化学变化判断煤自燃程度。

1.3.4.1 煤自燃监测方法

国内外煤自燃监测方法主要有指标气体分析法、测温法、示踪气体法、气味检测法、多元信息融合检测法等。

1. 指标气体分析法

煤自燃可产生多种标志性气体 (CO 、 CO_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_3H_8 、 C_2H_2), 产生量随着煤温升高出现明显的变化。赵顺武^[114]通过煤氧化升温试验建立了基于气体分析法相关的数学模型。张辛亥、孙久政等^[115]建立了人工神经网络专家系统, 利用指标气体判断煤自燃程度并预测发展趋势。郑学召^[116]、邓军^[117]研发了 JSG-8 型束管火灾监测系统, 确定了系统的布置方式, 分析了气体传输和可能出现的时间滞后问题。Jun Xie、Sheng Xue 等^[118]应用乙烯浓缩检测系统对煤自燃进行了预警。

指标气体是煤自燃发展过程中产生的氧化产物和高温分解产物, 在煤已经自热或自燃时才能检测到。由于产物量较少且随着风流流动, 受风流扰动影响大, 因此很难推断高温区域、自燃发展速度。

2. 测温法

测温法是反映煤自燃程度的有效方法。煤导热系数较小, 外部因素对煤体本身及周围介质温度影响较小, 对煤温监测可直接反映煤自燃状况, 因此, 只要能够实时掌握煤层的温度变化及温度分布状况, 就能确定煤自然发火程度及影响范围。煤体温度监测的技术主

要包括温度传感器测温、红外测温、光纤测温、无线传感器网络测温等。

(1) 温度传感器测温。该方法主要在采空区等自然发火概率较高区域通过埋设测温探头,可以实现连续监测煤体的温度。这种方法操作简单、可靠、直观,但其预测预报范围较小,传感器容易损坏,安装维护工作量大。最近几年,一些新温度传感器(热敏材料、集成温度传感器)克服了传统温度传感器的一些弊端,应用于煤自燃温度监测。

(2) 红外测温。主要是利用红外能量场来综合判断煤自燃危险区域。红外探测设备主要有红外热成像仪和红外探测器。该测温技术通常采用非接触式测温,具有探测简单、迅速、精确等特点,对煤柱、煤堆、露头的温度监测具有良好的效果。

(3) 光纤测温。20 世纪 80 年代,英美等国就开始对分布式光纤测温技术进行研究,与传统的测温技术相比,具有抗电磁干扰性强、灵敏度高、耐腐蚀性、耐高温等优势,广泛应用于地铁、隧道等场所火灾监测。文虎^[119]根据拉曼散射理论,设计出用于采空区的分布式光纤测温系统,能够准确实时监测采空区温度。李佳奇等^[120]设计了一种把煤矿巷道温度变化转变成光纤 Bragg 光栅波长移位温度传感器,并应用于煤矿巷道温度检测。谢俊文等^[121]通过敷设测温光纤,对采空区遗煤自然发火进行了监测预报。

(4) 无线传感器网络测温。无线传感器网络测温技术应用于煤层自燃火源定位监测、煤矿安全监测、煤田火区监测等方面,并取得了一定的成果。张辛亥等^[122]将 ZigBee 无线自组网测温技术应用于采空区温度监测,对采空区煤自然发火进行预测。

3. 示踪气体法

示踪气体法是通过示踪气体(如 SF_6) 的浓度变化相关分解物成分,从而间接测定火灾隐患位置和温度。示踪物质选择会对被测定煤体热状态具有重大的影响,因此,选择的示踪剂应具有毒性小、热解前稳定性好、不氧化、不反应、不溶于水、分解物易被检测等特点。

4. 气味检测法

气味检测法应用不同类型的气味传感器检测煤自然发火过程中所释放出来的气味及其变化规律,通过神经网络解算,实现对煤自然发火类型和程度的预测预报。气味检测法的研究最早出现在美、日等国,国内对气味检测法的研究起步较晚,20 世纪末,煤炭科学研究总院抚顺分院与日本北海道大学合作研究了煤自然发火气味检测法,能够在 30~40 °C 就检测到煤低温氧化初期所释放出的微弱气味。陈欢^[123]基于煤自燃特性,并以温度和反应生成物等宏观量为检测指标,分别采用气体分析、温度监测、仿生气味监测、磁力预测等技术实现了煤自燃预测预报。

5. 多元信息融合检测法

信息融合技术发展最为迅速,陈晓坤等^[124]基于采空区煤自燃的现状和采空区煤自燃特征,研发了一种采空区无线自组网温度监测系统。邓军等^[125]基于多元信息融合技术,结合现场采集的煤自然发火气体数据,提取煤自燃的多项指标信息及煤自燃特征信息,确定了特征信息与温度的对应关系,从而实现了煤自燃程度识别与预报。

仅一类煤自燃特征信息量无法及时、准确地反映煤自燃情况,很难满足煤自燃监测的需要。比较而言,标志气体分析法和测温法的可行性较强,且相应的检测技术发展的比较成熟,同时两种方法在判断煤自燃程度和高温区域方面有各自的优势,存在一定的互补性。