

赵禹深,许献磊,曹仕龙,等. 地下煤火探测技术及工程应用综述[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 24-39. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024936

ZHAO Yushen, XU Xianlei, Cao Shilong, et al. A review of underground coal fire detection technology and engineering application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 24-39. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024936

地下煤火探测技术及工程应用综述

赵禹深^{1,2}, 许献磊¹, 曹仕龙^{1,2}, 朱鹏桥^{1,2}

- 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083;
- 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要: 地下煤火对煤炭资源及环境造成严重影响, 而火区位置的精准探测是开展煤火治理工作的前提和关键。在研究煤火形成过程基础上, 结合文献调研、数值分析、物理实验、现场勘测等方法, 深入开展地下煤火探测技术及工程应用的相关研究。首先, 详细介绍现有不同煤火探测技术的原理及特点, 并分析和总结其优劣。然后, 结合实际案例, 阐述各探测技术的研究及工程应用现状, 揭示现阶段地下煤火探测存在的问题。在此基础上, 提出未来煤火探测的研究重点与发展方向。研究成果可为我国地下煤火的科学研究和防治提供重要技术支撑。

关键词: 地下煤火; 遥感技术; 地质雷达; 分布式光纤; 高密度电法; 氦气探测

中图分类号: TD 75

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2025)01-0024-16

A review of underground coal fire detection technology and engineering application

ZHAO Yushen^{1,2}, XU Xianlei¹, CAO Shilong^{1,2}, ZHU Pengqiao^{1,2}

- State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, Beijing 100083, China;
- College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: Underground coal fires have a serious impact on coal resources and the environment, and the accurate detection of the location of fire areas is the premise and key to carrying out coal fire control. Based on the formation process of coal fire, this paper combines literature review, numerical analysis, physical experiments, field investigation and other methods to study the underground coal fire detection technologies and their engineering applications. Firstly, the principles and characteristics of different existing coal fire detection technologies are introduced in detail, and their advantages and disadvantages are analyzed and summarized. Then, combined with actual cases, the research and engineering application status of various detection technologies are expounded, and the problems existing in underground coal fire detection at this stage are revealed. On this basis, the research focus and development direc-

收稿日期: 2024-07-10 修回日期: 2024-08-31

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3008902, 2023YFB3211002); 国家自然科学基金(52174155)

作者简介: 赵禹深(2000—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事探地雷达仪器开发等方面的研究工作。E-mail: 1060836869@qq.com

通信作者: 许献磊(1982—), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 主要从事探测仪器开发与应用等方面的研究工作。E-mail: xuxl@cumt.edu.cn

tion of coal fire detection in the future are proposed. The research results can provide important technical support for the scientific research and prevention of underground coal fires in China.

Key words: underground coal fires; remote sensing technology; geological radar; distributed optical fiber; high-density electrical method; radon detection

地下煤火是一种严重的地质灾害,广泛分布于中国、印度、美国、南非、澳大利亚等国,对生态环境、人类健康和煤矿安全构成重大威胁^[1-6]。2023年全球能源相关的二氧化碳排放量较2022年增长1.1%,达37.4 Gt。其中,煤炭排放占比超过65%;中国的二氧化碳排放量达12.6 Gt,约占全球排放量的34%。

中国承诺力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,而地下煤火治理是其中重要的一环。以中国新疆为例,截至2019年底,未治理的燃火区40处,总面积4.78 Mm²;煤火风险区域28处,面积5.75 Mm²;每年煤火损失煤炭4.56 Mt,排放有害气体及二氧化碳12.04 Mt。同时,煤火还引发土壤酸化、水资源污染、地表荒漠化等问题^[7]。

在煤火治理的整个环节中,精准识别火区是制约灭火工作的关键难题,也是实现煤火有效治理的基础和前提。煤层的持续燃烧导致温度场、电磁场等发生明显变化,根据这些场的变化特征,形成多种用于煤火勘探的方法。截至目前,地质雷达、温度探测、遥感技术等方法已应用于探测地下煤火。然而,面对我国地下煤火着火点隐蔽、煤层倾斜角度大、煤层露头多以及煤火易复燃等特殊条件,各种探测方法均有局限性,难以满足复杂煤火条件下的精确探测需求^[8]。因此,针对复杂多变的地下煤火条件研究新型高效的探测技术,已成为当前煤炭行业的重要科学导向。

为此,首先介绍煤火形成过程,然后梳理和总结当前地下煤火探测技术的研究进展,从技术分类和原理、实验研究与工程应用、存在的问题及未来展望等方面进行深入探讨,以期为我国地下煤火科学研究和防治工作提供参考。这对于在“双碳”目标下推动我国煤炭行业的绿色转型和高质量发展,具有重要的现实意义。

1 煤火形成过程与分布特征

地下煤火是煤层在自然或人为条件下与氧气接触后发生氧化自燃的现象^[9]。其形成经历低温

氧化、热分解、高温燃烧和岩层破坏4个阶段。形成初期,煤体氧化反应释放少量热量并增加孔隙,随后受热释放可燃气体,燃烧逐渐深入扩展,最终导致裂隙发育、岩层垮塌、火区迅速蔓延^[10-14]。

目前,我国煤火主要集中于新疆、内蒙古、宁夏。新疆是我国最主要的煤火发生地,宁夏的汝箕沟、内蒙古的乌达等地区次之^[15]。我国地下煤火主要特征为:①煤火的发生区域集中在北纬35°~45°;②与煤层的变质程度密切相关,主要为低变质煤;③与气候有关,多发生于干旱半干旱地区;④多为阴燃且火区面积大、着火点分散、火源较为隐蔽^[16]。随着我国煤炭生产重心向西转移,地下煤火发火位置愈发深入和隐蔽,控制好的火区也时常出现复燃。这些情况使得我国煤火治理工作形势更加严峻^[9]。

2 煤火探测技术及其特点分析

2.1 温度探测

在煤火燃烧过程中,温度场的变化最为直观,可分为氧化自热期、煤层燃烧期和熄灭期。表1为燃烧过程温度变化及特点^[17]。目前,国内外用于探测煤自燃火源位置的测温技术,主要包括测温传感器法、红外测温法和光纤法。

测温传感器法通过元件性能参数随温度变化的特性探测温度异常区域,从而定位隐蔽火源,适用于浅层含煤露头和储煤量有限的露天煤场等火区的检测和研究。

红外测温法通过热像仪探测火区辐射功率信号,生成对应物体表面温度分布的热像图^[18]。与需埋设探头的测温传感器法相比,红外测温法操作简便,是当前最常用的温度探测方法之一^[19]。物体红外辐射的总功率与温度的关系^[20]为

$$E_T = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中, E_T 为物体处于温度 T 时在所有波段上的总体辐射强度, W/m²; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 值为 5.67×10^{-8} W/(m² · K⁴); T 为物体的绝对温度, K。

分布式光纤测温技术利用光纤传输的特定光信号对温度的响应,通过光纤一端的信号解调实现温度的分布式测量。

信号受温度调制后,可分为散射光和传输光,其中散射光更为常用。图1为基于散射光的分布式光纤测温技术原理^[21]。

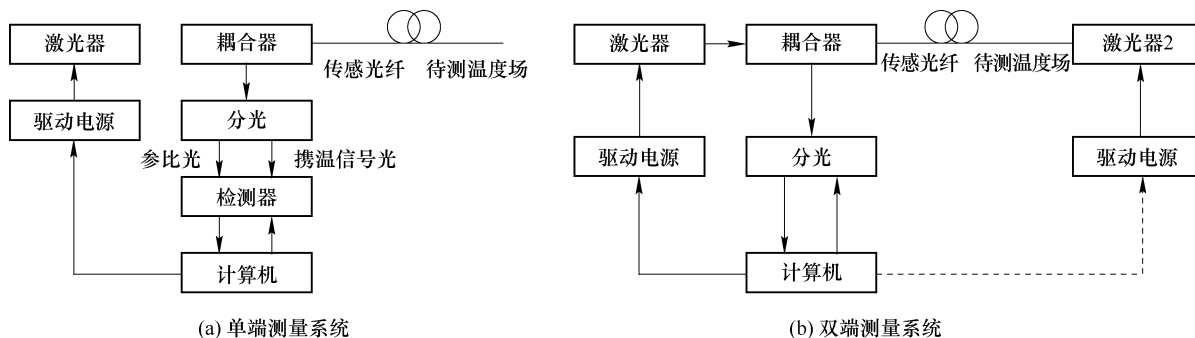


图1 基于散射光的分布式光纤测温技术原理示意

Fig. 1 Schematic of distributed fiber optic temperature measurement technology based on scattered light

表1 燃烧过程温度变化及特点^[17]

Table 1 Temperature changes and characteristics of the combustion process^[17]

燃烧过程	氧化自热期	燃烧期			燃烧熄灭期
		燃烧前期	燃烧中期	燃烧后期	
特点	煤体氧化吸热,温度缓慢升高至临界状态	温度达到自燃临界值,煤层开始燃烧。热量通过各种途径扩散到地表	燃烧最旺盛时期,温度达到最高	燃烧体燃烧殆尽,温度下降,热量逐渐扩散和消失	煤层烧空,形成大面积的塌陷区,煤火燃烧过程逐步结束
温度/℃	35~80	80~800	>800	800~100	100~35
能否用测温法探测	不能	能	能	能	不能

2.2 遥感探测

遥感技术和测温法均基于煤火温度场的变化特征进行探测。测温法是直接测量温度定位火源,遥感技术则是通过捕捉热辐射、从遥感图像中提取地下煤火信息,反演提取热异常特征识别煤火。根据传感器平台的不同,遥感技术分为卫星遥感和无人机遥感。卫星遥感适合大范围

温度反演,精度约 30 m,可提供高温区域的大致分布;无人机遥感在卫星遥感基础上聚焦高温区域,精确圈定着火点和燃烧范围(图2)^[22]。相比于测温法,遥感法的成本低且无须进入燃烧区域,适用于大面积火区探测。近年来随着卫星遥感影像技术的提升,其数据精度和丰富性进一步提高,遥感探测在煤火识别中表现出更大优势。

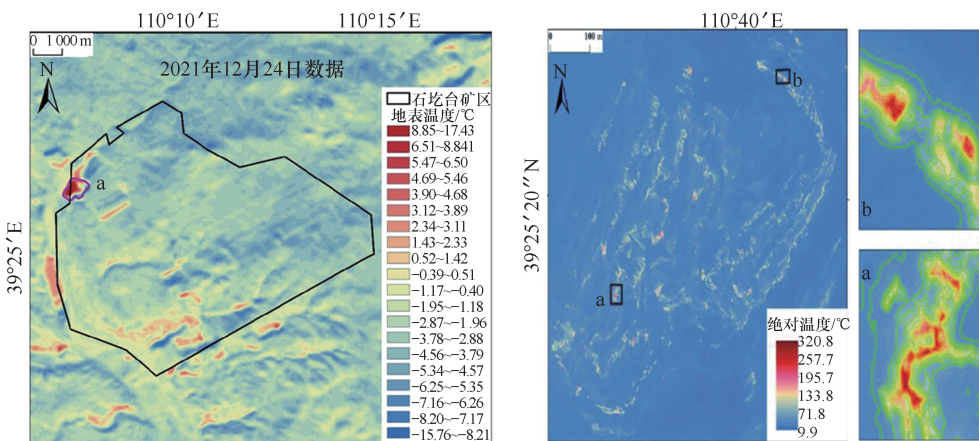


图2 卫星遥感与无人机遥感热红外温度反演

Fig. 2 Thermal infrared temperature retrieval based on satellite and UAV remote sensing

2.3 磁法探测

磁法探测利用岩体或矿物磁性差异的变化特征识别并圈定火区范围。煤层周围的铁化合物在

高温燃烧过程中转变为强磁性矿物。图 3 为围岩 $k-T$ 曲线^[23]。

在升温过程中,温度低于 400 °C 时,磁化率变

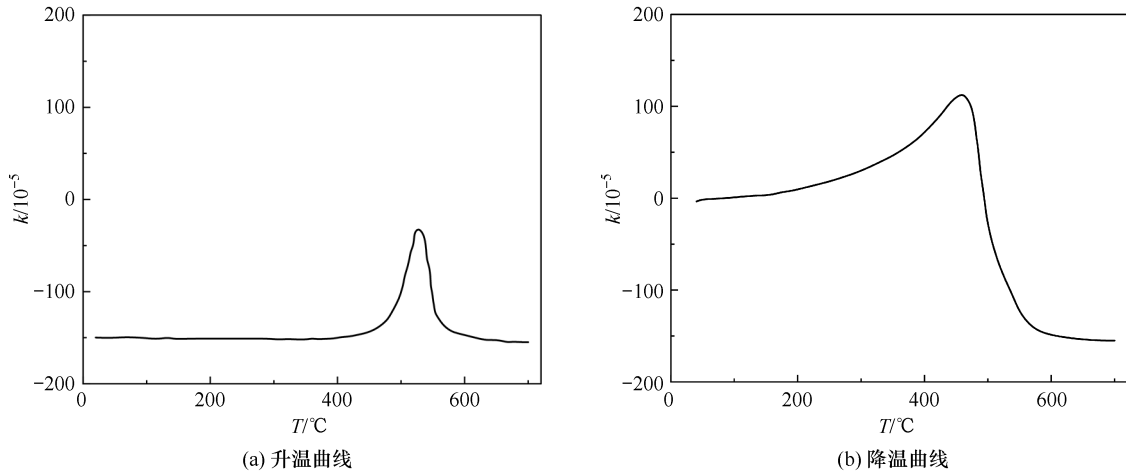


图 3 围岩 $k-T$ 曲线

Fig. 3 $k-T$ curve of surrounding rock

化不明显;温度在 400~500 °C,磁化率显著增强,并在约 500 °C 时达到最大值,此后磁化率急剧下降;当温度超过 600 °C 时,所有标本的磁化率降为 0,磁性消失,曲线趋于平坦。降温曲线与升温曲线形态相似,但并非完全重合。降温过程中,磁化率的峰值比升温时高出几十倍。表 2 为燃烧过程磁异常变化及特点。在对燃烧结束后的火区进行探测时,磁法探测具有明显优势^[24-26]。

为磁性源和电性源,磁性源利用不接地的线圈发射脉冲电磁场,电性源利用接地导线发射脉冲电流。图 4 为瞬变电磁装置^[28]示意图。

表 2 燃烧过程磁异常变化及特点

Table 2 Magnetic anomaly changes and characteristics of the combustion process

温度/°C	35~400	400~600	>600	600~35
岩石磁性变化	无或弱磁性	磁性升高	磁化率降为 0	磁性回升且较原岩磁性显著升高
磁异常特征	不明显	明显	不明显	明显
能否用磁法探测	不能	能	不能	能

2.4 电法探测

地下煤火燃烧所产生的高温对煤、岩层的电性特性有很大影响^[27]。在煤火探测方面应用较为广泛的电法探测,主要有瞬变电磁法和高密度电法。

瞬变电磁法常用的地面装置按照发射源可分

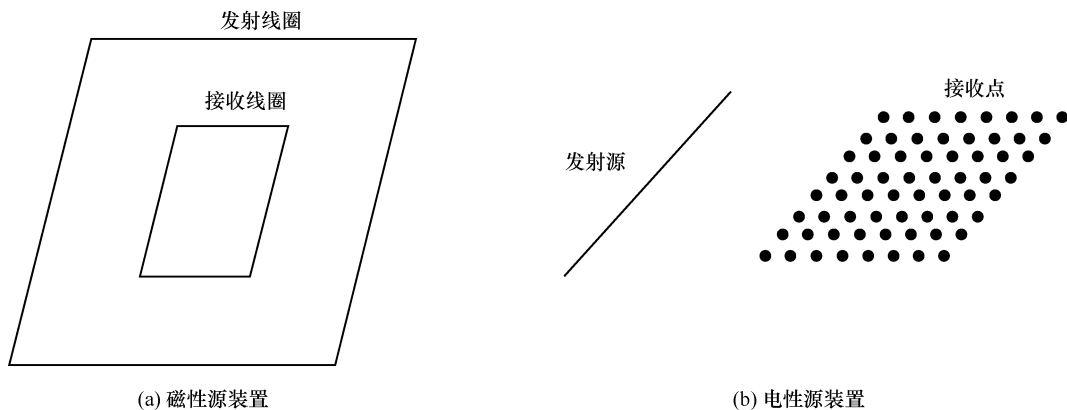


图 4 瞬变电磁装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transient electromagnetic device

高密度电法以地下煤岩电阻率差异为基础,通过各条测线上测量电极采集的数据计算出地下煤岩断面视电阻率变化情况,得到视电阻率断面图,反演后确定地下煤田火区埋藏深度、影响范围与发展程度。表 3 为燃烧过程煤岩电阻率变化特征。高密度电法只需一次布极,即可实现不同排列方式下数据的快速和自动采集,简化了工作量^[29-31]。

2.5 地质雷达探测

煤火燃烧会形成空腔和破碎区 2 种典型地质结构。图 5 为煤火燃烧形成的典型地质结构示意图。地质雷达向地层下发射电磁波时,遇到空腔

区、破碎区发生不同形态的反射,产生不同的波场特征,从而对火区进行识别^[32-33]。

表 3 燃烧过程煤岩电阻率变化特征
Table 3 Changes in the resistivity of coal and rock during combustion

温度/℃	35~110	110~200	200~500	500~800	>800
煤层电阻率变化	快速升高	缓慢升高	急剧下降	急剧下降	趋近于 0
岩石电阻率变化	升高	升高	升高	快速下降	趋近于 0

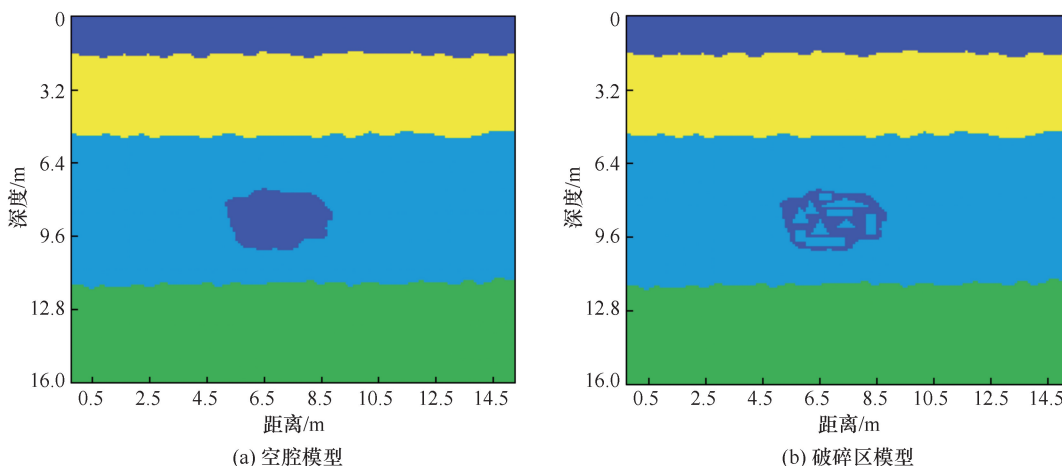


图 5 煤火燃烧形成的典型地质结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a typical geological structure formed during a coal fire

图 5 中模型大小为 16 m×15 m,中间为 7 m 厚的煤层,顶、底界面分别位于 $z=5.5$ m 和 12.5 m 处,上层为砂岩,下层为页岩。模型 1 为空洞,由空气充填;模型 2 为煤层松散跨落模型,内部由岩石、煤和空气混合充填。相对磁导率均设为 1,模型网

格大小为 0.1 m×0.1 m,激励源为 100 MHz 的雷克子波。

采用时域有限差分算法和广义完全匹配层边界条件正演模拟计算,得到雷达时间剖面图。图 6 为典型地质结构雷达波场。

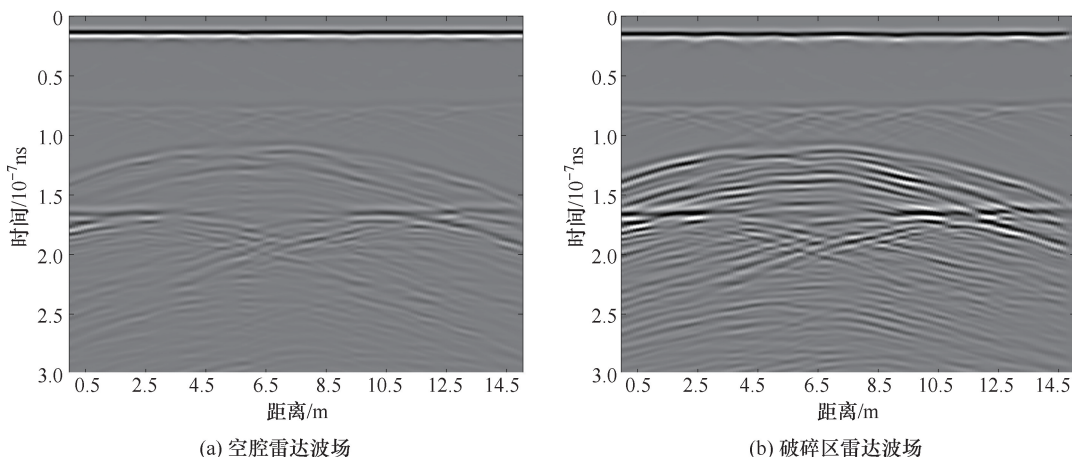


图 6 典型地质结构雷达波场

Fig. 6 Radar wave field of a typical geological structure

图 6 中 2 幅剖面均显示出明显的水平同相轴,

其中包括煤层顶板反射波、底板反射波和煤层内的

多次波。煤层缺失段的反射波同相轴不连续,伴随强烈的断点绕射波。破碎区的绕射波更加明显,松散跨落区内部也产生较强的散射。正演分析表明,空腔区域雷达响应显示洞顶反射波具有良好的连续性和较强的振幅,下部无绕射波,背景干净无噪声;破碎区雷达响应表现为复杂的绕射波,能量较弱,无明显的界面反射波。结果表明,雷达对煤火燃烧时的地质形态具有显著的响应差异,验证了探地雷达在煤火探测中的可行性。

2.6 特征气体探测

目前在煤火探测方面应用较广的主要有测氦法、指标气体法。测氦法利用煤岩介质中天然放射

性氦元素随环境温度升高析出率增加的特性,通过在地面布置测点探测氦气浓度在该区域的变化规律,根据氦元素异常分布范围、形态以及异常中心位置分析火源位置^[34]。指标气体法利用的指标气体包括 CO、CO₂、甲烷、乙烯、乙烷等。地下煤火在燃烧初期会产生高温高压环境,有利于指标气体的析出,指标气体借助构造裂隙向周围扩散逐步到地表,形成气体异常^[35]。指标气体探测法利用析出的气体与煤介质温度之间存在的对应关系进行探测。图 7 为煤自燃过程各气体体积分数与温度关系^[36]。表 4 为燃烧过程气体异常特征变化。

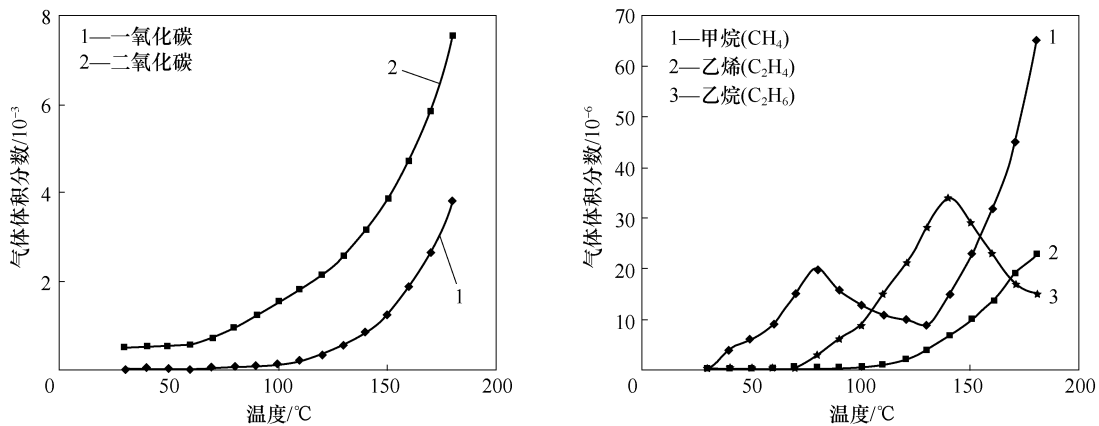


图 7 煤自燃过程各气体体积分数与温度关系^[36]

Fig. 7 Relationship between the volume fraction of each characteristic gas and temperature in the process of coal spontaneous combustion^[36]

表 4 燃烧过程气体异常特征变化

Table 4 Changes in the abnormal characteristics of gases during combustion

燃烧过程	燃烧期			燃烧熄灭期
	燃烧前期	燃烧中期	燃烧后期	
特点	温度上升,产生小的构造裂隙	岩石发生破碎塌陷,形成密集的塌陷群,构造裂隙进一步扩大	温度降低,岩石收缩,导致空间变小,形成规模较小的裂隙	温度下降,热量逐渐扩散和消失,岩石熔融体开始冷却
气体异常特征	气体借助于构造裂隙向周围扩散逐步到地表,形成气体异常	构造裂隙进一步扩大,气体扩散速度加快,气体异常更加明显,异常值达到最大	气体析出速度减缓,气体异常减弱	气体异常随着煤火的熄灭而逐步减弱乃至消失
能否用特征气体探测	能	能	能	不能

2.7 声波探测

声波探测主要是通过测量声波传播时间,计算传播速度,利用二者间的物理关系计算温度值^[37]。声波测温系统通过布置多对声波收发器构建声波传播路径,并采用抑噪算法减小时延误差,计算不同介质下的声传播速度获得待测介质温度,图 8 为声波测温原理系统^[38]。一维单路径条件下所建立

的基于声学测温模型的推导公式为

$$\theta = \frac{mL^2}{\gamma Rt^2} = \left(\frac{L}{tZ}\right)^2 \quad (2)$$

式中, γ 为与分子结构有关的气体绝热指数,常数; R 为摩尔气体常数,取值 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; m 为气体摩尔量, kg/mol ; Z 为气体介质常数,空气中取值 20.05 ; L 为测点之间的距离, m ; t 为声波传播时

间, $s; \theta$ 为所求平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.8 探测技术优点及局限性分析

每种方法均具有其适用范围、优点及局限性。

为便于对比与选择, 将以上方法的特点进行归纳和总结。表5为各种煤火探测技术原理概述、优点及其局限性。

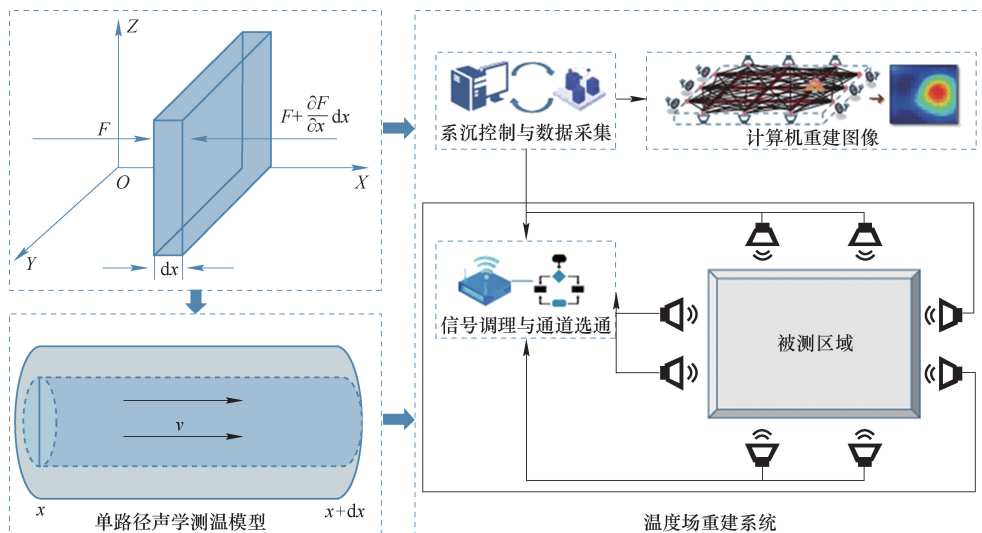


图8 声波测温原理系统^[38]

Fig. 8 Principle system of sonic temperature measurement^[38]

表5 各种煤火探测技术原理概述、优点及其局限性

Table 5 Principles, advantages and limitations of various coal fire detection technologies

探测方法	探测原理概述	优点	缺点
测温传感器法		对埋藏深度较浅的煤层露头、储煤容量不大的露天发火区域有较好的探测效果	工作量大, 投资大, 稳定性较差
光纤测温法	利用火区围岩温度场的差异进行探测	直接可靠, 定位准确	光纤的布置方式尚存在一定的困难, 容易受到周围地压、落石、封闭等环境因素或开采工艺的影响
红外测温法		对于测量煤堆、露头、煤柱、近距离煤层的自燃温度场十分有效	不适用于松散煤体内部或者采空区内部的温度探测
遥感技术	反演提取热异常信息对煤火进行识别	范围广, 速度快, 时效性强	易受气象条件影响, 分辨率低, 不利于深部煤火探测
磁法	根据燃烧区后方降温后的烧变岩引起的磁异常进行探测	施工简单, 设备轻便	分辨率低, 探测精度易受电磁干扰, 精度不高
高密度电法	温度对煤火区的电性特征具有重要影响, 利用电阻率差异探测	精度高, 布极方式多样化	受大地杂散电流、地形起伏的影响较大
瞬变电磁法		勘探效率高, 成本低, 分辨率高	对地下高阻体不敏感, 很容易遗漏没有高温活火区的烧空区
地质雷达法	电磁波遇到不同空间形态波阻抗分界面产生反射, 通过捕捉反射信号能量的差异进行探测	探测精度较高, 操作方便简单、快速	电磁波随着深度的增大衰减的非常快, 对于埋深较大的煤火探测效果有限
氦气探测法 指标气体法	气体借助于高温高压环境以及构造裂隙向周围扩散逐步到地表, 利用氦气、CO、CO ₂ 等气体析出量的变化进行探测	操作简便, 经济成本低, 数据提取速度快, 探测效率高	精度易受采动影响以及围岩裂隙漏风干扰, 适用性低, 探测精度不高
声波探测法	通过测量声波传播时间, 计算传播速度, 利用二者间的物理关系计算温度	成本较低, 能实时、连续测温	难以应对复杂的地质条件

3 煤火探测技术研究进展与工程应用

3.1 测温法进展与应用

国内外研究者针对传感器的耐高温性、稳定性等问题进行革新和优化。邬剑明^[39]通过改进采样电路、A/D 转换电路和电源电路,开发出智能防灭火钻孔温度测量仪,并成功应用于晋城三八煤矿的火区现场测定。也有一些学者采用地质调查与钻探温度测量相结合的方式检测隐蔽火源。ELICK^[40]利用红外热像仪与钻探温度测量技术,成功探测澳大利亚森罗利亚煤矿的火灾区域。邵光强等^[41]将 WRNK191 铠装热电偶温度测量方法与地质雷达相结合,确定中煤安太堡煤矿火区的分布范围。

国外红外技术在井下煤壁和煤柱自燃探测中的应用起步较早,多个国际公司如美国 FLIR、德国 STNATLAS 和日本 NEC 等研发多款矿井红外探测设备。随着技术的发展,这些设备在原理和性能上不断优化,逐渐实现小型化、轻型化,并显著提升成像质量。国内也将红外热成像技术广泛应用于矿井火源位置和煤柱自燃温度的探测。文虎等^[42]利用红外热像仪圈定火区范围,并通过注胶体灭火和封堵流程成功扑灭河北某煤矿主斜井的自燃火灾。王振平等^[43]基于热传导反问题(IHCP)理论,提出应用红外探测技术进行自燃高温点火源探测的反演技术,在小于 10 m 的煤巷煤层中获得良好效果。

分布式光纤测温技术因其高精度、广泛的测温范围、远距离传输及连续监测等优点,逐渐成为煤火监测的主流方法。WILLETT 等^[44]首次使用该技术监测英国煤矿井下火源,证明其具有小型化、耐腐蚀、抗干扰等优点,适用于矿井环境。刘红林等^[45]优化设计出 30 km 分布光纤温度传感器系统,空间分辨率达到 3 m。

3.2 遥感技术进展与应用

遥感技术在国内煤火探测领域应用广泛且拥有丰富成果。为提升探测精度,研究者常结合热红外遥感与 GIS、InSAR、高光谱探测等技术,或采用更高精度的温度场反演算法。李峰等^[46]利用无人机搭载热红外相机探测火区,准确率高达 96.72%。徐凯磊等^[47]通过无人机平台构建地表温度反演模型,验证其在圈定煤田火区中的高效性与准确性。刘竞龙^[48]结合 InSAR 与热红外技术对新疆火区进行 DS-InSAR 反演,验证方法的高精度。许怡^[49]将 TCP-InSAR 与热红外技术进行叠加分析,精确划定新疆煤田火区范围。冯瀚^[50]提出极化时序优

化方法,结合 PSI 和 SBAS 技术探测地表形变,效果较传统方法提升 2 倍,显示出极高的可靠性。图 9 为叠加分析流程,图 10 为探测的火区范围与实测火区范围对比。

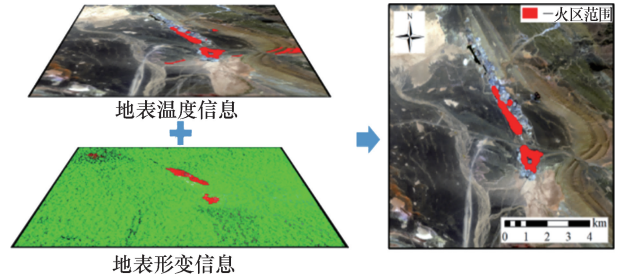


图 9 叠加分析流程^[49]

Fig. 9 Flowchart of overlay analysis^[49]

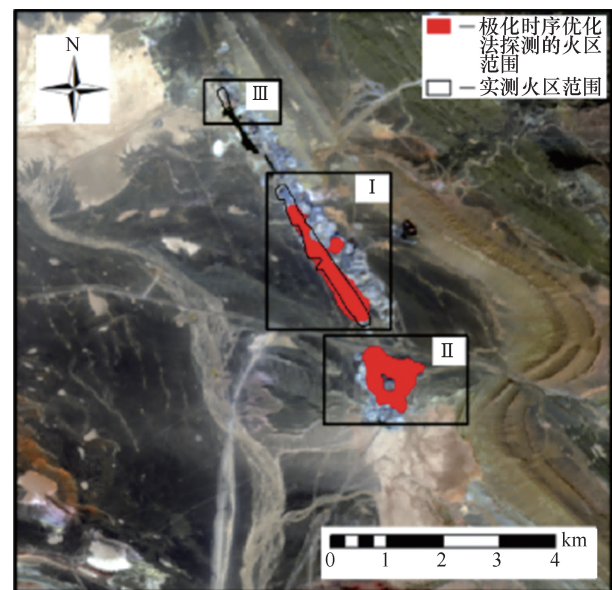


图 10 探测的火区范围与实测火区范围对比图^[49]

Fig. 10 Comparison of the detected and measured fire areas^[49]

3.3 磁法进展与应用

张秀山^[51]1961 年在新疆、宁夏、甘肃等地率先采用磁法进行煤火探测并取得良好效果。甄凡玉^[52]通过磁法探测内蒙古乌达火区,钻探验证火区深度误差小于 20%。宁靖等^[53]结合磁测技术和小波函数分析磁场异常曲线,发现火区温度最强处磁异常较低。王卫平等^[54]基于多源数据分析航空磁场与煤火分布相关性,成功圈定火区并判断其燃烧状态。熊盛青等^[55]研究岩石磁性特征的温度变化规律,从岩石磁性角度探讨不同温度条件下岩石磁性特征的差异。国际上,德国地质调查局(BGR)发现磁法在区分燃烧火区与燃烧结束火区方面优于电法^[56]。LINDQVIST 等^[57]使用质子磁力仪

探测新西兰煤火区域,并进行定量解释。IDE等^[58]通过提高磁法解析精度,成功圈定南犹他煤火位置。

3.4 电法进展与应用

邵振鲁等^[30]对温纳、复合对称四极等5种装置进行正演模拟,并采用高斯-牛顿迭代法进行反演,结果表明,在5种不同装置下视电阻率的拟断面图均显示出燃烧异常,其中复合对称四极装置分辨效果最佳。宋吾军等^[31]在安家岭露天煤矿通过

构建火区地电和地磁模型进行分析,并结合高密度电法探测与钻孔验证,证实该方法在火区分布与埋藏深度探测中的可行性与优势。贺小元等^[59]应用高密度电法探测采空区和火区,发现在170~315、345~395和435~575 m处视电阻率值较高,推测为采空火区,后经钻孔验证,确认高密度电法探测采空区的有效性。图11为高密度电法探测实测图。

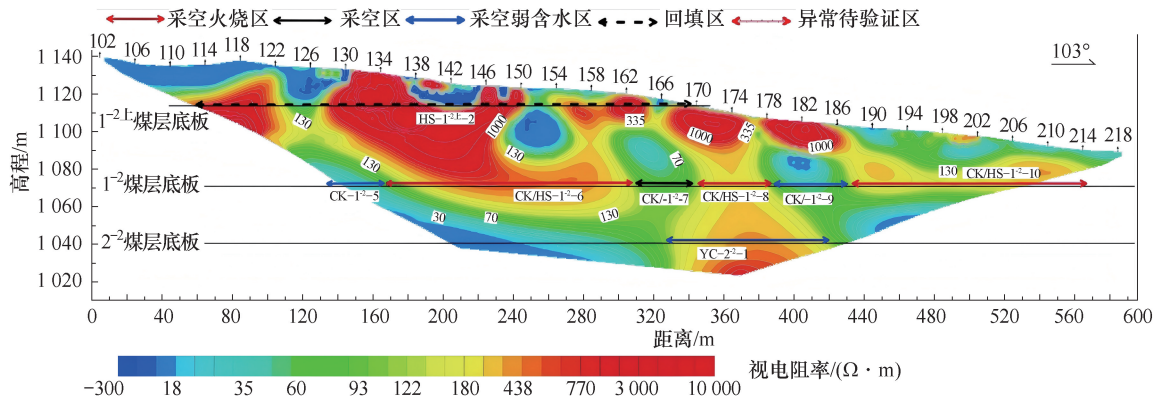


图11 高密度电法探测实测图^[59]

Fig. 11 Measurement by the high-density electrical method^[59]

曾凡杰^[28]通过瞬变电磁三维正演研究电性源对隐蔽火区的高阻反应,并改进该方法。王志励等^[60]采用小回线瞬变电磁法探测火区,发现与活性炭测氡法结果一致,进一步确认火区的空间位置。朱红青等^[61]提出基于瞬变电磁法的综合探测方法,有效解决煤火探测中时间长、工作量大等问题,实现火区范围的高效、精准定位。

3.5 地质雷达法进展与应用

地质雷达探测效率高、精度高、操作方便,适用于煤火探测,但是目前无法广泛应用于煤火探测,主要原因是探地雷达利用的电磁波随着深度的增大衰减得非常快,对于埋深较大的煤火探测效果有限。中国矿业大学(北京)的研究团队在低频地质雷达技术方面取得重大突破,研发的低频屏蔽天线系统(图12)将探测深度提升至60 m,有效改善信噪比,推动地质雷达技术在煤火探测中的应用^[62]。在此基础上,GAO等^[63]提出基于深度学习的探地雷达煤火识别方法,通过扫描物理模型提取雷达图像,显著提升煤火区域划分的精度和速度。杨峰等^[64]利用100 MHz雷达探测内蒙古乌达煤田采空区,提出塌陷破碎带的雷达判定依据,包括反射波同相轴错动、不规则绕射和裂隙特征等。



图12 中国矿业大学(北京)研究团队研制的GPR装备
Fig. 12 GPR device developed by the research team of China University of Mining and Technology-Beijing

为验证地质雷达法在煤火探测中的有效性,在内蒙古乌海市多个露天矿区进行现场实验,选择3种典型的煤火场景进行探测,包括排土场火区、注浆治理后的排土场火区和原始地层煤层火区。实验选用自主研发的100和400 MHz探地雷达进行对比,时窗分别设置为300和100 ns,采集样点数为512。完成数据采集后,进行零点校正、背景去噪、滤波和增益处理,提高数据信噪比。实验结果如图13~图15所示。

由图13可以看出,在注浆治理后的排土场火区,现场未出现冒烟、硫磺等现象。雷达图谱中,回波同相较为连续,岩体较完整,仅有少量裂隙发育,未见疏松或空洞等异常现象,表明注浆治理对煤火的抑制效果明显。

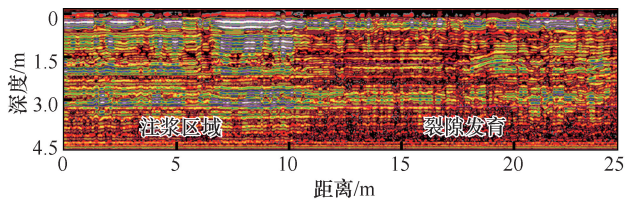


图 13 注浆治理后的排土场火区雷达图谱
Fig. 13 Radar spectrum of spontaneous combustion area in a dump after grouting treatment

由图 14 可以看出,在未治理的排土场火区,浅部出现多处范围较大、能量较强的条带状反射,分析是煤火燃烧改变地质结构所形成的空洞现象;深部没有出现此种情况,分析是排土过程中有少许煤混入,然后被覆盖,长时间的高温暴晒导致煤自燃引起的煤火现象,所以火源一般集中在浅部。探测现场异常范围附近也出现路面烧黑以及硫磺现象,印证了实验结果。

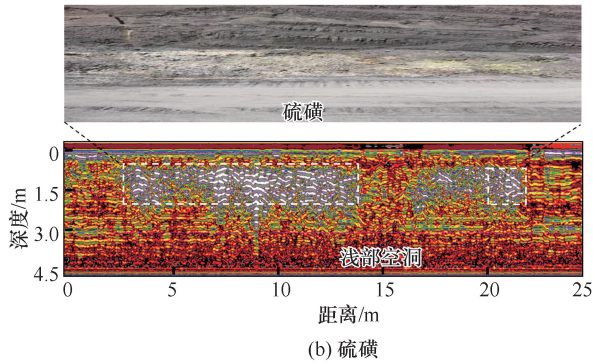
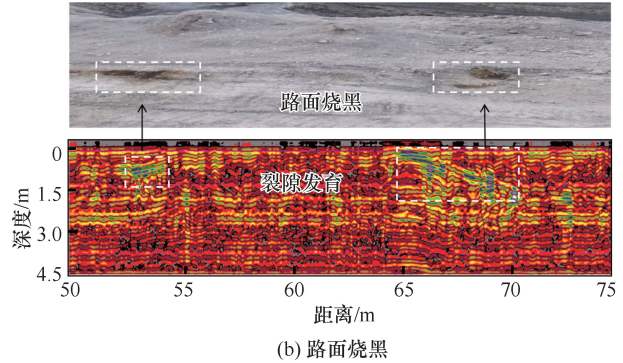


图 14 未治理的排土场火区雷达图谱

Fig. 14 Radar spectrum of spontaneous combustion area in an untreated dump



由图 15 可以看出,原始煤层火区浅部与排土场火区相比,空洞现象明显减少,以多处面积小、数量密的疏松现象为主;在对应位置的深部也发现面积较大裂隙发育现象,分析是地下深部的裂隙使得

空气进入引起煤火,并且深部燃烧所产生的热量向上烘烤浅部地层,进而发生地层塌陷,导致多处疏松现象。探测现场该区域地表也出现大面积的冒烟现象,印证了实验结果。

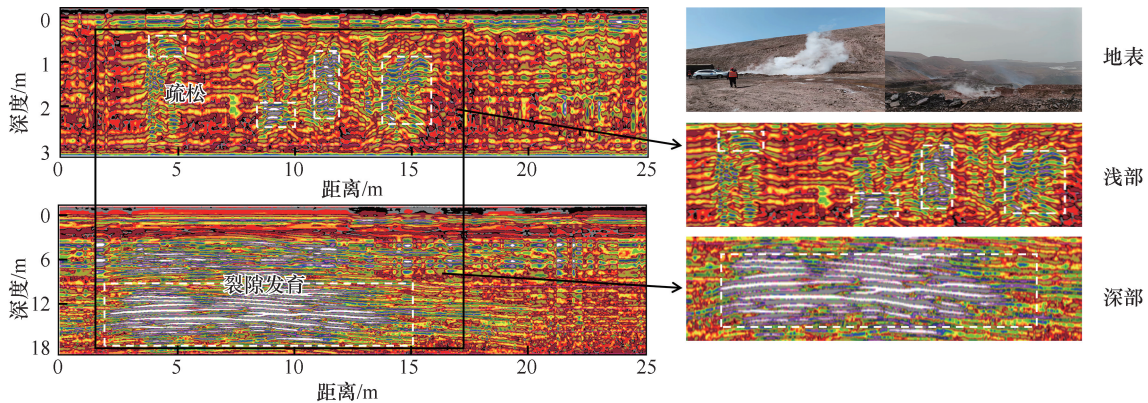


图 15 原始煤层火区雷达图谱

Fig. 15 Radar spectrum of spontaneous combustion zone in original coal seam

3.6 特征气体法进展与应用

金永飞等^[34]在中煤平朔煤炭有限责任公司安家岭 1 号矿井下,采用测氦技术准确发现火源的位置与范围,并验证异常区域与实际情况的一致性。杨彦成^[65]将同位素测氦法与瞬变电磁法结合,探测煤田火区的位置、燃烧深度及区域边界,取得良好效果,证明该方法投资小、操作简单,是一种有效的煤田火区探测技术。刘志忠等^[66]根据神东矿区主矿周围小型窑炉的开采特征,采用瞬时测氦法检

测石圪台煤矿南面小型窑炉内的隐伏火源,得到浓度等值线图并成功找到火区位置。

谭波等^[36]结合指标气体分析法和红外热像仪测温法,确定朔州某矿 4+9 号煤层高冒火区内部温度和巷道表面高温区域,综合圈划出火区大致范围和高温点位置。KIM^[67]在指标气体法基础上提出一种矿井火灾诊断(MFD)方法,通过在废弃矿井地面区域布置一定数量的钻孔和抽气风机,人为控制地下抽气风流流动方向,根据各钻孔采集到的

各类烷烃类气体数据进行煤火区域的综合判定,并划分出高温火源点。

3.7 声波法进展与应用

声学测温技术最早在国外发展, GREEN^[68]提出一种基于最小二乘法的算法用于炉膛温度场的重建, MODLIŃSKI 等^[69]利用声波测温技术预测煤粉锅炉的温度分布,实现锅炉截面温度测量。相比之下,国内在 20 世纪八九十年代才开始关注声学测温技术。李祥春等^[70]研究煤岩体中声波传播特性,发现温度与波速呈负相关,为矿井声学测温奠定基础。邓军等^[71]在煤自燃高温点的声波感温探测中,通过声波传播时间测试系统研究松散煤体的声波传播规律,为测温中的声波频率和传播路径选择提供依据。

杨庚等^[72]通过探索堆积煤粉的声吸收特性及低频声波传播特性,验证声学测量堆积煤粉温度的可行性。李鹏飞等^[73]通过建立数学模型,提升声波在不同煤粉浓度下的气体监测精度。郭军等^[74]结合声学测温技术与煤自燃理论,总结出声发射信号在煤岩体温度感知中的处理方法,为煤矿温度探测提供新的技术思路。

4 煤火探测技术未来发展趋势分析

目前,想要实现对煤火的快速精确探测仍然面临诸多挑战。首先,煤火是一个多因素交互作用的复杂过程,涉及复杂的物理化学反应,现有的研究更多集中在工程环境的火区探测与监测手段,对地下煤火的致灾机制探索仍然不足,尚未清晰揭示煤火在复杂多场耦合作用下的形成与发展规律。其次,现存探测技术适用性不足、分辨率有限,且易受煤火复杂场景影响,难以在不同地质条件和环境下保持高精度与稳定性。最后,当前的探测手段主要聚焦于对已发生火灾区域的判别,而对煤火的预防与监测工作重视不足,缺乏科学系统的评价体系以及配套的预防、监测与治理措施。

针对这些问题,未来可从以下几方面展开研究:

(1) 通过实验和数值模拟相结合的方法,研究不同因素(温度、压力、氧气供应、煤层结构等)对煤火燃烧行为的影响,建立能够准确预测燃烧行为的多场耦合模型。利用统计学方法对煤火燃烧过程中的关键参数进行敏感性分析,评估其对模型预测结果的影响,提高煤火燃烧模型的准确性和鲁棒性。同时,实地考察地下煤火发生地区,收集煤火燃烧触发条件及临界状态的关键参数,明确这些条件对燃烧启动和发展的作用。结合实验数据、数值

模拟结果和理论分析,全面理解地下煤火燃烧的复杂过程。

(2) 研发适用于复杂地下环境的新型探测设备(便携式高灵敏度气体探测器、耐高温地下传感器等),提升探测的灵活性与可靠性,并结合人工智能与机器学习技术,建立智能探测系统,通过实时分析多源传感器数据(温度变化、气体浓度、电磁信号等),快速识别潜在煤火风险,基于历史数据预测煤火发展趋势,为治理提供决策支持。

(3) 建立煤火综合探测技术体系。结合卫星遥感、无人机探测与地质雷达等多种技术,通过大范围圈定火区、局域精确定位的方式,实现探测精度与效率的显著提升。同时,研究多源数据融合技术,将不同来源、不同类型或不同层次的探测数据进行融合,通过综合多个数据源的信息弥补单一数据源的不足,提高结果的准确性。

(4) 制定煤火燃烧等级评价机制。基于探测数据如温度、气体成分、地质结构、燃烧速度等关键参数,建立科学的风险评价模型,对燃烧状态进行等级划分,并为每个等级制定明确的治理指标,从而实现对煤火的精细化管理,优化治理策略,降低治理成本,提高治理效率。

(5) 推动煤火防治从被动响应向主动预防转变。通过对潜在煤火区域的风险评估,结合地质条件、煤质特性、历史火灾记录等因素建立定期监测制度,采用多参数监测系统实现对高风险区域的全面监控,并对潜在煤火复燃区域进行定期检查,确保及时发现早期迹象,将煤火隐患扼杀在萌芽阶段,从而最大限度减少损失。

5 结 语

(1) 根据技术原理,将煤火探测技术分为温度探测、遥感、磁法、电法、地质雷达法、特征气体法和声波法 7 大类;总结了煤火燃烧过程中物性参数的变化规律及探测原理。

(2) 结合实际应用表现,综合分析每种技术的优缺点。同时,归纳煤火探测技术的发展概况,探讨不同技术在煤火探测中的应用情况及研究进展,为综合利用与推广提供参考。

(3) 针对现阶段存在的问题,提出今后的研究方向和建议,包括:创建精确的燃烧行为预测模型,开发新型耐高温探测设备,构建智能煤火探测系统,建立多技术融合的综合探测体系,制定煤火燃烧等级评价机制与分级治理指标体系,确立完善的煤火预防与监控机制等。

参考文献

- [1] 张建民,管海晏,曹代勇,等. 中国地下煤火研究与治理[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.
ZHANG Jianmin, GUAN Haiyan, CAO Daiyong, et al. Underground coal fires in China: origin, detection, fire-fighting, and prevention[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.
- [2] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1705-1716.
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705-1716.
- [3] SONG Z Y, KUENZER C. Coal fires in China over the last decade: a comprehensive review[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 133: 72-99.
- [4] 管海晏. 中国北方煤田自燃环境调查与研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.
GUAN Haiyan. Investigation and research on the spontaneous combustion environment of coalfields in northern China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [5] 曹代勇,时孝磊,樊新杰,等. 煤田火区环境效应分析[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 40-42.
CAO Daiyong, SHI Xiaolei, FAN Xinjie, et al. Environmental effect analysis of coalfield fire[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(7): 40-42.
- [6] SINHA A, SINGH V K. Spontaneous coal seam fires: a global phenomenon[A]. Spontaneous coal seam fires: mitigating a global disaster[C]. Beijing: Tsinghua University Press and Springer Verlag, 2005: 42-66.
- [7] 包兴东. 新疆第五次煤田火区普查成果分析[J]. 能源与环保, 2021, 43(2): 1-4.
BAO Xingdong. Analysis on results of the fifth coalfield fire area survey in Xinjiang[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(2): 1-4.
- [8] 汪云甲,原刚,王腾,等. 煤田隐蔽火源多源遥感探测研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2022, 47(10): 1651-1661.
WANG Yunjia, YUAN Gang, WANG Teng, et al. Research on multi-source remote sensing detection of concealed fire sources in coalfields[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1651-1661.
- [9] 杨雅兰. 地下煤火多场耦合复杂系统特征及治理策略研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
YANG Yalan. Research on characteristics of multi-field coupled complex system and governance strategies for underground coal fires[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [10] 包兴东. 新疆煤田火区地质灾害治理方法研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(12): 133-135.
BAO Xingdong. Study on geological hazard control methods for fire area in Xinjiang Coalfield[J]. Coal Engineering, 2017, 49(12): 133-135.
- [11] 卢放,胡文广,罗旋. 太行山北段炭灰铺煤火的地球物理特征[J]. 煤炭技术, 2020, 39(2): 49-50.
LU Fang, HU Wenguang, LUO Xuan. Geophysical properties of coal fire in tanhuipu in northern part of Taihang[J]. Coal Technology, 2020, 39(2): 49-50.
- [12] 汤笑飞. 安家岭露天矿小窑火区快速治理技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.
TANG Xiaofei. The study for rapid control technology of small coal mine fire district in Anjialing surface mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [13] 郭琦. 地质构造对煤自燃的影响分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1670-1672.
GUO Qi. Influence analysis of geological features on coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1670-1672.
- [14] 曹代勇,樊新杰,吴查查,等. 内蒙古乌达煤田火区相关裂隙研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1009-1014.
CAO Daiyong, FAN Xinjie, WU Chacha, et al. Study on the fractures related with coalfield fire area in Wuda coalfield, Inner Mongolia[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1009-1014.
- [15] 朱红青,袁杰,赵金龙,等. 地下煤火分布及探测技术现状研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(12): 28-32.
ZHU Hongqing, YUAN Jie, ZHAO Jinlong, et al. Research on the status of underground coal fire distribution and development of the detection technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(12): 28-32.
- [16] 贺强. 双碳目标下我国西部地区地下煤火探测技术研究进展[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(4): 8-13.
HE Qiang. Research progress of underground coal fire detection technology in Western China under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(4): 8-13.
- [17] 张渝,杨雯. 煤火燃烧阶段的划分及其特征分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 151-153.
ZHANG Yu, YANG Wen. Coal fire burning stage division and its characteristic analysis[J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 151-153.

- gy, 2017, 36(6): 151-153.
- [18] 田裕鹏. 红外检测与诊断技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
TIAN Yupeng. Infrared detection and diagnostic technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [19] 宋大勇. 基于红外成像探测的煤层隐蔽火源反演识别技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
SONG Dayong. Research on the inversion technique recognition of hidden fire source in coal seam based on infrared imaging exploration[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [20] 葛文奇. 红外探测技术的进展、应用及发展趋势[J]. 光机电信息, 2007(4): 33-37.
GE Wenqi. Progress, applications, and development trends of infrared detection technology[J]. Opto-Electro-Mechanical Information, 2007(4): 33-37.
- [21] 谢俊文, 卢熹, 上官科峰, 等. 分布式光纤测温技术在大倾角易燃煤层采空区自燃监测中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 118-121.
XIE Junwen, LU Xi, SHANGGUAN Kefeng, et al. Application of distributed optical fiber temperature detection technology in spontaneous combustion monitoring of large angle flammable coal seam goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 118-121.
- [22] 孙长斌. 无人机热红外遥感技术对矿区煤火探测识别研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(S2): 85-94.
SUN Changbin. Research on coal fire detection and identification in mining areas using UAV thermal infrared remote sensing technology[J]. China Coal, 2023, 49(S2): 85-94.
- [23] 朱晓颖, 于长春, 熊盛青, 等. 磁法在煤火探测中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(2): 115-119.
ZHU Xiaoying, YU Changchun, XIONG Shengqing, et al. The application of the magnetic method to the detection of underground coal fires[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(2): 115-119.
- [24] 齐福辉, 张福英. 地下煤火的探测及防治[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(S1): 143-146.
QI Fuhui, ZHANG Fuying. Detection and controlling of underground coal burning[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(S1): 143-146.
- [25] 邵振鲁. 煤田火灾磁、电异常演变特征及综合探测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
SHAO Zhenlu. Magnetic and electrical signature of coal fires and comprehensive detection methodology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [26] 张辛亥, 窦凯, 李经文, 等. 磁异常划分煤岩火区机理及应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 135-139.
ZHANG Xinhai, DOU Kai, LI Jingwen, et al. Mechanism and application of coal-rock fire zone division based on magnetic anomalies[J]. Coal Engineering, 2021, 53(3): 135-139.
- [27] DUBA A G. Electrical conductivity of coal and coal char[J]. Fuel, 1977, 56(4): 441-443.
- [28] 曾凡杰. 煤田隐蔽火区的瞬变电磁探测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZENG Fanjie. Study on detection method of hidden fire area in coalfield using transient electromagnetics[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [29] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and application of high-density resistivity method[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 171-176.
- [30] 邵振鲁, 王德明, 王雁鸣. 高密度电法探测煤火的模拟及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 468-474.
SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming. Simulation of high-density electrical method in detecting coal fires and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 468-474.
- [31] 宋吾军, 王雁鸣, 邵振鲁. 高密度电法与磁法探测煤田火区的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 899-908.
SONG Wujun, WANG Yanming, SHAO Zhenlu. Numerical simulation of electrical resistance tomography method and magnetic method in detecting coal fires[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 899-908.
- [32] 胡明顺, 潘冬明, 董守华, 等. 煤火区浅部松散煤体及采空区的探地雷达响应特征[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 598-601, 606.
HU Mingshun, PAN Dongming, DONG Shouhua, et al. Gpr response characteristics of shallow loose coal seam and goaf in the coalfield combustion area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 598-601, 606.
- [33] 王浩然. 自燃过程煤太赫兹频段介电参数动态响应规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
WANG Haoran. Study on the dynamic response law of dielectric parameters in the terahertz frequency band during spontaneous combustion of coal[D]. Beijing: China University of Mining & Technology - Beijing, 2021.
- [34] 金永飞, 邓军, 许延辉, 等. 测氦法探测地下煤火技术研究与应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30

- (6): 647-650.
JIN Yongfei, DENG Jun, XU Yanhui, et al. Application of radon detection method in detecting of underground coal fire[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(6): 647-650.
- [35] 杨春. 地空一体化探测技术在煤田火区监测中的应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
YANG Chun. Research on the application of integrated air-ground detection technology in monitoring coal fire areas [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.
- [36] 谭波, 朱红青, 王海燕, 等. 巷道高冒封闭火区燃烧状态及表面温度场演变规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(3): 946-951.
TAN Bo, ZHU Hongqing, WANG Haiyan, et al. Combustion state and surface temperature field evolution of closed firing zone in top-coal caving region of coal drift [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(3): 946-951.
- [37] 郭军, 李帅, 蔡国斌, 等. 采空区隐蔽火源探测及声学法煤温感知新技术探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 5-11.
GUO Jun, LI Shuai, CAI Guobin, et al. Discussion on new technologies of hidden fire source detection and coal temperature sensing by acoustic method for goaf [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(6): 5-11.
- [38] 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 声波探测技术在矿井领域中的应用及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 149-162.
DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149-162.
- [39] 郭剑明. 煤自燃火灾防治新技术及矿用新型密闭堵漏材料的研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
WU Jianming. Research and application of new technologies for coal spontaneous combustion prevention and control and new sealing materials for mining [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [40] ELICK J M. Mapping the coal fire at Centralia, Pausing thermal infrared imagery[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(3/4): 197-203.
- [41] 邵光强, 赵猛超, 曹凯. 火区自然发火范围及发展程度的判定方法[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 181-184.
SHAO Guangqiang, ZHAO Mengchao, CAO Kai. Judgment method of spontaneous combustion range and development degree of fire area [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(10): 181-184.
- [42] 文虎, 马民, 费金彪. 基于红外成像技术的煤矿火灾治理[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 28-30.
WEN Hu, MA Min, FEI Jinbiao. Mine fire disaster control based on infrared imaging technology [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 28-30.
- [43] 王振平, 程卫民, 辛嵩, 等. 煤巷近距离自燃火源位置的红外探测与反演[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 603-607.
WANG Zhenping, CHENG Weimin, XIN Song, et al. The calculation of close-range coal inflammation position at coal-roads based on infrared detecting and inverse heat conduction technology [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 603-607.
- [44] WILLETT M J, WYKES J S, POWELL G A, et al. The use of a distributed optical fibre temperature sensing system to monitor underground mine roadways for spontaneous combustion [J]. Mining Technology, 1995, 77(890): 301-305.
- [45] 刘红林, 张在宣, 余向东, 等. 30 km 分布光纤温度传感器的空间分辨率研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(11): 99-102.
LIU Honglin, ZHANG Zaixuan, YU Xiangdong, et al. Research on spatial resolution of the 30 km distributed optical fiber temperature sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(11): 99-102.
- [46] 李峰, 崔希民, 孙广通, 等. 无人机热红外遥感煤火探测方法[J]. 煤矿安全, 2017, 48(12): 97-100.
LI Feng, CUI Ximin, SUN Guangtong, et al. Approach of detecting coal fires by unmanned aerial vehicle thermal infrared remote sensing technology [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 97-100.
- [47] 徐凯磊, 江晓光, 万余庆, 等. 煤田火区无人机热红外遥感监测技术[J]. 煤炭技术, 2022, 41(7): 120-123.
XU Kailei, JIANG Xiaoguang, WAN Yuqing, et al. Thermal infrared remote sensing monitoring technology of UAV in coalfield fire area [J]. Coal Technology, 2022, 41(7): 120-123.
- [48] 刘竞龙. 新疆米泉火区多源遥感协同探测与分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Jinglong. Collaborative detection and analysis of multi-source remote sensing in Miquan fire area of Xinjiang [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [49] 许怡. 基于 TIRS 与 InSAR 的新疆地下煤层火区识别与监测 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
XU Yi. Identification and monitoring of underground

- coal seam fire area in Xinjiang based on TIRS and In-SAR[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [50] 冯瀚. 基于哨兵双极化数据的地表形变监测方法及其在煤火监测中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- FENG Han. Monitoring method of surface deformation based on sentry dual polarization data and its application in coal fire monitoring[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [51] 张秀山. 磁法探测煤层自燃火区[J]. 煤田地质与勘探, 1980, 8(6): 43-48.
- ZHANG Xiushan. Detection of spontaneous combustion fire area in coal seam by magnetic method[J]. Coal Geology & Exploration, 1980, 8(6): 43-48.
- [52] 甄凡玉. 物探技术在煤田火区探测中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2010(33): 90.
- ZHEN Fanyu. Application of geophysical techniques to coal fire exploration[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(33): 90.
- [53] 宁靖, 张建民, 宁书年. 磁导成像方法研究及在宁夏汝箕沟煤田火区探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 225-229.
- NING Jing, ZHANG Jianmin, NING Shunian. Study on magnetic digital imaging and its application of coal fire detection in Rujigou coal field, China[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 225-229.
- [54] 王卫平, 于长春, 方迎尧, 等. 内蒙古乌达地区地球物理场特征与地下煤火分布[J]. 物探与化探, 2007, 31(6): 551-555.
- WANG Weiping, YU Changchun, FANG Yingyao, et al. Geophysical characteristics and underground coal fire distribution in Wuda area, Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(6): 551-555.
- [55] 熊盛青, 于长春. 地下煤层自燃区岩石磁性增强特征及机理研究: 以内蒙古乌达和宁夏汝箕沟煤矿为例[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2827-2836.
- XIONG Shengqing, YU Changchun. Characteristics and mechanisms of rock magnetic increasing in underground coal spontaneous combustion area—take Wuda coal mine of Inner Mongolia and ruqigou coal mine in Ningxia as examples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2827-2836.
- [56] 卢国栋. 大面积煤田火区范围圈划及燃烧机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- LU Guodong. Research on the delineation of large-scale coal fire areas and combustion mechanisms[D]. Beijing: China University of Mining & Technology - Beijing, 2010.
- [57] LINDQVIST J K, HATHERTON T, MUMME T C. Magnetic anomalies resulting from baked sediments over burnt coal seams in southern New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1985, 28(3): 405-412.
- [58] IDE T S, CROOK N, ORR F M. Magnetometer measurements to characterize a subsurface coal fire[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(3/4): 190-196.
- [59] 贺小元, 王峰, 雒铮, 等. 高密度电法在煤火勘查中的应用: 以活鸡兔煤矿为例[J]. 中国矿业, 2022, 31(1): 168-174.
- HE Xiaoyuan, WANG Feng, LUO Zheng, et al. Application of high-density electrical method to prospect coal fire: taking huojituo coal mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(1): 168-174.
- [60] 王志励, 林金波, 刘丽娟, 等. 小回线瞬变电磁法在地下火区探测中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2014(3): 57-58.
- WANG Zhili, LIN Jinbo, LIU Lijuan, et al. Application of small-loop transient electromagnetic method in detecting underground fire area[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2014(3): 57-58.
- [61] 朱红青, 杨成轶, 秦晓峰, 等. 基于瞬变电磁法的整合矿井火区分布探测方法[J]. 科技导报, 2014, 32(25): 15-19.
- ZHU Hongqing, YANG Chengyi, QIN Xiaofeng, et al. Integrated coal mine fire district detecting method based on transient electromagnetic method[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(25): 15-19.
- [62] 许献磊, 张朝阳, 彭苏萍, 等. 低频地质雷达屏蔽天线开发及在地下空间工程探测应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 140-149.
- XU Xianlei, ZHANG Chaoyang, PENG Suping, et al. Development of low-frequency GPR shielding antenna and its application in underground space engineering detection[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 140-149.
- [63] GAO R X, ZHU H Q, LIAO Q, et al. Detection of coal fire by deep learning using ground penetrating radar[J]. Measurement, 2022, 201: 111585.
- [64] 杨峰, 彭苏萍, 马建伟, 等. 乌达煤田地下燃烧状况雷达探测谱分析算法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 770-775.
- YANG Feng, PENG Suping, MA Jianwei, et al. Spectral analysis for ground penetrating radar surveys of the underground coal fire in Wuda Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 770-775.

- [65] 杨彦成. 同位素测氡法与瞬变电磁法相结合探测煤田火区燃烧位置[J]. 科技视界, 2015(29): 255-256.
YANG Yancheng. Combined use of Isotope Radon measurement and transient electromagnetic method for detecting coalfield fire zones[J]. Science & Technology Vision, 2015(29): 255-256.
- [66] 刘志忠, 王伟. 瞬时法测量氡气在小窑隐蔽火源探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(7): 148-150, 154.
LIU Zhizhong, WANG Wei. Application of instantaneous measurement of radon in the detection of hidden fire sources in small coal pits[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7): 148-150, 154.
- [67] KIM A G. Locating fires in abandoned underground coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59(1/2): 49-62.
- [68] GREEN S F. An acoustic technique for rapid temperature distribution measurement[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(2): 759-763.
- [69] MODLIŃSKI N, MADEJSKI P, JANDA T, et al. A validation of computational fluid dynamics temperature distribution prediction in a pulverized coal boiler with acoustic temperature measurement[J]. Energy, 2015, 92: 77-86.
- [70] 李祥春, 聂百胜, 杨春丽, 等. 煤岩体声波波速随温度变化规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 140-144.
LI Xiangchun, NIE Baisheng, YANG Chunli, et al. Experiment study on acoustic wave velocity law with temperature variation in coal and rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 140-144.
- [71] 邓军, 屈高阳, 任帅京, 等. 松散煤体中低频声波传声频率优选实验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 15-23.
DENG Jun, QU Gaoyang, REN Shuaijing, et al. Experimental study on optimization of low frequency acoustic transmission frequency in loose coal[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1): 15-23.
- [72] 杨庚, 闫计栋, 沈国清, 等. 基于声学法的堆积煤粉温度场实时监测[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 59-65.
YANG Geng, YAN Jidong, SHEN Guoqing, et al. Real time monitoring of accumulated pulverized coal temperature field based on acoustic method[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 59-65.
- [73] 李鹏飞, 吕玉祥, 康爱国. 电站炉膛煤粉浓度调整下的声波测温技术研究[J]. 电子器件, 2019, 42(6): 1440-1443, 1491.
LI Pengfei, LÜ Yuxiang, KANG Aiguo. Research on acoustic temperature measurement technology for concentration adjustment of pulverized coal inside power station hearth[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(6): 1440-1443, 1491.
- [74] 郭军, 王凯旋, 蔡国斌, 等. 声发射信号研究进展及其在煤温感知领域应用前景[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 84-92.
GUO Jun, WANG Kaixuan, CAI Guobin, et al. Research progress of acoustic emission signal and its application prospect in coal temperature sensing field[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 84-92.

(责任编辑:陈贵仁)