

# 采空区煤自燃高温点识别与探测技术研究与发展

邓 军<sup>1,2</sup>, 王津睿<sup>1</sup>, 任帅京<sup>1,2</sup>, 王彩萍<sup>1,2</sup>, 屈高阳<sup>1</sup>, 马 砺<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤火灾防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**我国因采煤活动造成的采空区总量大、范围广, 针对采空区煤自燃高温点的有效识别与探测是煤矿安全生产的重要保障。从采空区煤自燃发生过程、高温点的形成运移特点概述了采空区高温点的生成演化特性, 为采空区煤自燃高温点的有效识别与探测提供基础理论支撑。围绕地下直探技术、地表及空天探测技术的基本原理、研究进展以及现场实际应用效果, 从可靠性、稳定性等方面进行多元比较, 剖析现有煤自燃高温点识别探测技术的适用性。针对探测中存在的实际难点, 拓展分析了矿井声波温度信息探测、基于量子技术的热源探测、毫米雷达波探测技术等新兴技术的研究现状和应用潜力, 进一步推动采空区隐蔽火源精细化探测技术发展创新。通过对现有技术的综合性研判及新兴技术的前瞻性思考, 展望了煤自燃隐蔽火源探测技术的未来发展趋势, 结合当前物探技术和多元信息融合理论的发展趋势, 提出了采空区高温点动态运移智能可视化系统构想, 从“空-天-地-孔”的综合化分时分区多维探测模式应用、“特征获取-场景仿真规划-动态决策”逐级时空演化数字孪生模型两方面阐述了矿井开采全生命周期平台建设的现实意义。通过该构想的逐步实施, 为实现采空区隐蔽火源的高效识别预测和矿井智能化建设提供新的决策思路。

**关键词:** 识别探测; 煤自燃; 高温点; 采空区; 数字孪生; 矿井

**中图分类号:** TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0885-17

## Identification and detection technology for high-temperature spontaneous combustion points in goaf areas

DENG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Jinrui<sup>1</sup>, REN Shuaijing<sup>1,2</sup>, WANG Caiping<sup>1,2</sup>, QU Gaoyang<sup>1</sup>, MA Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control of Coal Fire, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The total amount and scope of mined-out areas caused by the coal mining activities in China are large. Effective identification and detection of the coal spontaneous combustion point in the mined-out zone is an important guarantee for the safe production of coal mines. From the process of coal spontaneous combustion in the mining area and the characteristics of the formation and transfer of high-temperature points, the characteristics of the generation and evolution of high-temperature points in the mining area are summarized, and the basic theoretical support is provided for the effective identification and detection of high-temperature points of coal spontaneous combustion in the mining area. Focusing on the basic principles, research progress and practical application effects of underground direct exploration technology, surface and airborne detection technology, the authors conduct multiple comparisons in terms of reliability and stability, and analyze the applicability of the existing detection technologies for identifying the high-temperature point of coal spontaneous combustion. Aiming at the difficulties in detection, the research status and application potential of emerging technologies such

收稿日期: 2023-10-16 修回日期: 2024-02-27 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1301

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074215, 52204239); 青年人才托举工程资助项目 (2023QNRC001)

作者简介: 邓 军 (1970—), 男, 四川大竹人, 教授, 博士生导师。E-mail: dengj518@xust.edu.cn

引用格式: 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 采空区煤自燃高温点识别与探测技术研究与发展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 885-901.

DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Identification and detection technology for high-temperature spontaneous combustion points in goaf areas[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 885-901.



移动阅读

as the mine acoustic temperature information detection, the heat source detection based on quantum technology, and the millimeter radar wave detection technology are expanded and analyzed. The future development trend of coal spontaneous combustion hidden ignition source detection technology is envisioned through the comprehensive assessment of existing technologies and the prospective thinking of emerging technologies. Combined with the current development trend of physical exploration technology and multiple information fusion theory, the concept of intelligent visualization system for the dynamic transfer of high-temperature points in the mined-out zone is proposed. The significance of the construction of the platform for the whole life cycle of mining is explained in terms of the application of the integrated time-division and multi-dimensional detection mode of “space-sky-earth-hole” and the digital twin model of the step-by-step spatial-temporal evolution of “feature acquisition-scenario simulation planning-dynamic decision-making”. Through the gradual implementation of the concept, it provides a new decision-making idea for realizing the efficient identification and prediction of hidden fire sources in the mined-out area and the intelligent construction of mines.

**Key words:** identification and detection; coal spontaneous combustion; high temperature point; mined-out area; digital twins; mine

煤炭作为中国能源保供的压舱石,对能源安全起着至关重要的作用。在全球碳中和的背景下,虽然传统能源体系正面临转型,但富煤仍是中国能源禀赋的主要特点之一,据国家统计局数据显示,2022 年全国规模以上工业原煤产量 45 亿 t,占全国能源消费总量 56.2%,再次证明其在国内能源体系的核心地位<sup>[1]</sup>。然而,随着开采活动不断进行,采空区的煤自燃火灾问题日益突出,已成为煤矿五大灾害中不可忽视的一大严重问题<sup>[2]</sup>。

我国煤矿的开采模式和矿井的地质结构造成采空区环境复杂,使得采空区煤自燃高温点的形成和演变过程难以掌控。统计数据表明,由采空区煤自燃引发的火灾事故在矿井火灾中的所占比例正呈现多态式增长趋势<sup>[3]</sup>。为确保煤炭资源的安全高效开采,关键在于防止煤层自燃导致的高温点产生及其扩散,同时确保监测和防火措施不出现延迟或失效<sup>[4]</sup>。近年来许多学者致力于采空区煤自燃机理、采空区高温运移规律及隐蔽高温点探测技术等方面的研究,旨在揭示煤自燃的化学动力学过程同时,实现采空区高温隐蔽火源的精准探测<sup>[5-7]</sup>。然而,受限于采空区的多变性,上述关键领域的研究仍然面临挑战。特别是高温点的定量分析、早期预警机制以及实时监控策略等方面。

采空区高温点识别与探测技术作为保障矿井安全的“前哨站”,其针对温度信息的早期探测和准确识别是煤火灾害防控的关键<sup>[8]</sup>。笔者梳理了煤自燃高温点的形成演化规律研究;探讨了各类探测技术的优势和局限性,同时强调了未来极具潜力的技术发展方向,为采空区高温点探测技术发展开拓新的途径;积极探索了一种多方法融合的精准探测系统,为构建数字孪生煤矿提供更为科学有效的思路。同时也为后续智能化矿井建设提供理论和技术框架支持。

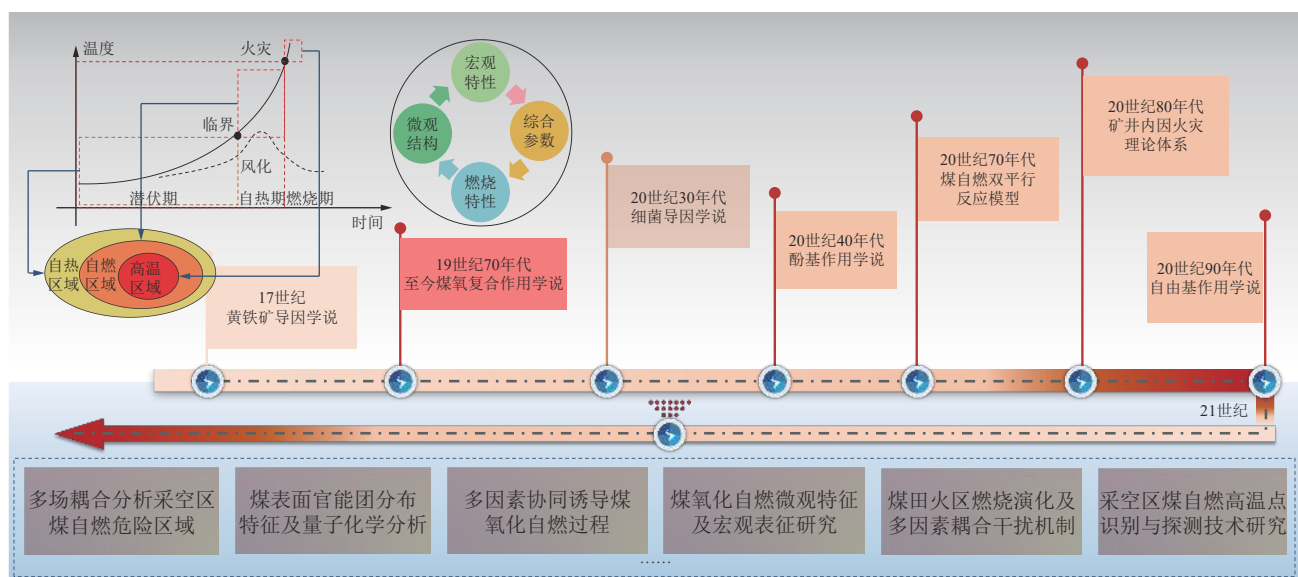
## 1 采空区高温点演化运移研究

### 1.1 采空区高温点生成演化过程

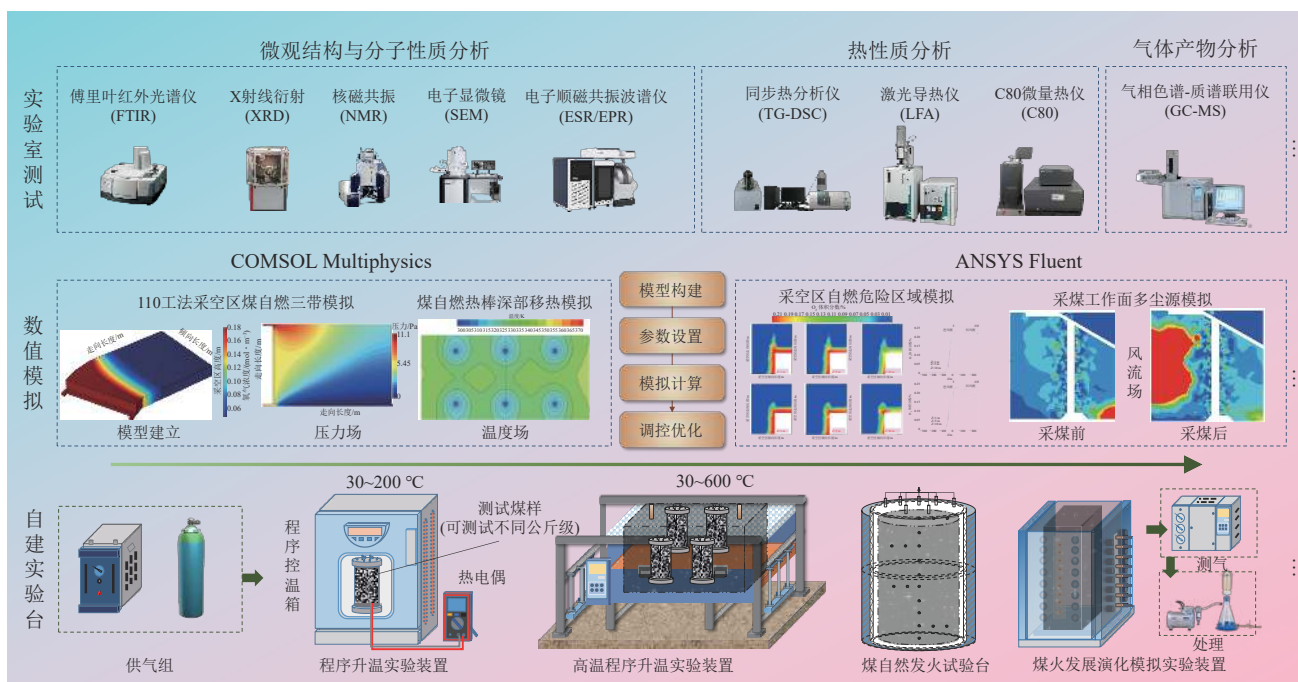
采空区高温点的演化运移是一个复杂且动态的过程,与矿山压力、煤层开采后形成的垮落空间和次生裂隙紧密相关。这些因素共同影响着采空区内遗留煤体的自燃行为<sup>[9-10]</sup>。在这过程中高温点的形成、发展与煤的氧化反应和蓄热环境密切相关。如何在复杂的环境中获取气体变化规律、通风情况及掌握其内在关联是获取采空区高温点演化规律的重心<sup>[11]</sup>。学者们在研究技术手段、形成演化运移机制等方面开展了大量研究。

(1) 采空区煤自燃发生过程。王德明、李增华、徐精彩、邓军、Kam 等众多国内外学者从分子结构模型构建、自由基反应机理、官能团迁变规律、煤氧化循环链式反应途径等方面出发,从微观尺度开展对煤自燃灾变过程的广泛研究,尝试揭示煤体低温氧化至自然发火整个过程的微观机理(图 1)<sup>[12-16]</sup>。后续的研究依据入手角度和测试方法的不同<sup>[17-19]</sup>,主要分为以下方面:从煤本身出发,主要涉及煤中过渡金属元素、氢原子等化学元素在煤自燃过程中的催化作用探索<sup>[20]</sup>;煤中孔隙结构及分布变化对煤氧复合反应热效应及气体竞争吸附的影响;复杂开采条件下出现的二次氧化煤、水浸煤、富油煤等特殊煤样的自燃特性研究等<sup>[21-23]</sup>;从供氧条件出发,围绕煤氧化动力学中主要涉及的活化能、指前因子、反应速率等关键动力学参数展开分析,在研究不同变质程度煤的热释放特性、动力学特征、变化规律等环节的基础上,进一步细化数学分析模型与阶段温度划分。

宏观层面,围绕煤自燃氧化过程中的关键气体参数指标,探究煤氧化自燃耗氧速率、产气速率、放热强度等宏观表征参数的变化规律,深入分析遗煤的宏观



(a) 采空区煤自燃机理代表性学说研究过程



(b) 采空区煤自燃测试分析手段

图1 采空区煤自燃机理代表性学说研究进程及测试分析手段研究<sup>[17-19]</sup>Fig.1 Study on the research process and test analysis method of representative theory of coal spontaneous combustion mechanism in goaf<sup>[17-19]</sup>

特性变化规律与其微观特征变化之间的对应关系<sup>[24]</sup>,开展煤自燃火灾的前期预警工作。主要体现在气体分析法(甲烷比、乙烷比、烯烷比等)的优选、气体预警指标及临界值确定等方面的研究(图2)<sup>[25-26]</sup>。实验手段方面,也整体呈现立体多维化态势,通过使用现代化测试分析技术开展煤自燃热动力学特性定量表征;应用大型煤自然发火及热分析等试验方法研究煤自燃过程的宏观特征参数;结合热动力学仿真软件模拟煤的氧化反应和热传导过程,预测煤层内部的温度

分布和变化趋势;引入岩土工程、地理信息系统等模拟辅助软件<sup>[27]</sup>,完善煤自燃预测模型(表1)。

(2) 采空区高温环境推演。物理相似实验以表征再现采空区的高温环境,通过控制实验条件,模拟煤自燃的全过程,揭示采空区高温区域的发生、发展及其动态变化过程<sup>[28]</sup>。通过数学理论模型的不断完善,优化采空区高温点数学模型来详细描述工作面回采时的温度演化过程。同时结合小波变换分析等方法进一步评估各区域对温度变化的敏感性<sup>[29-30]</sup>。实地



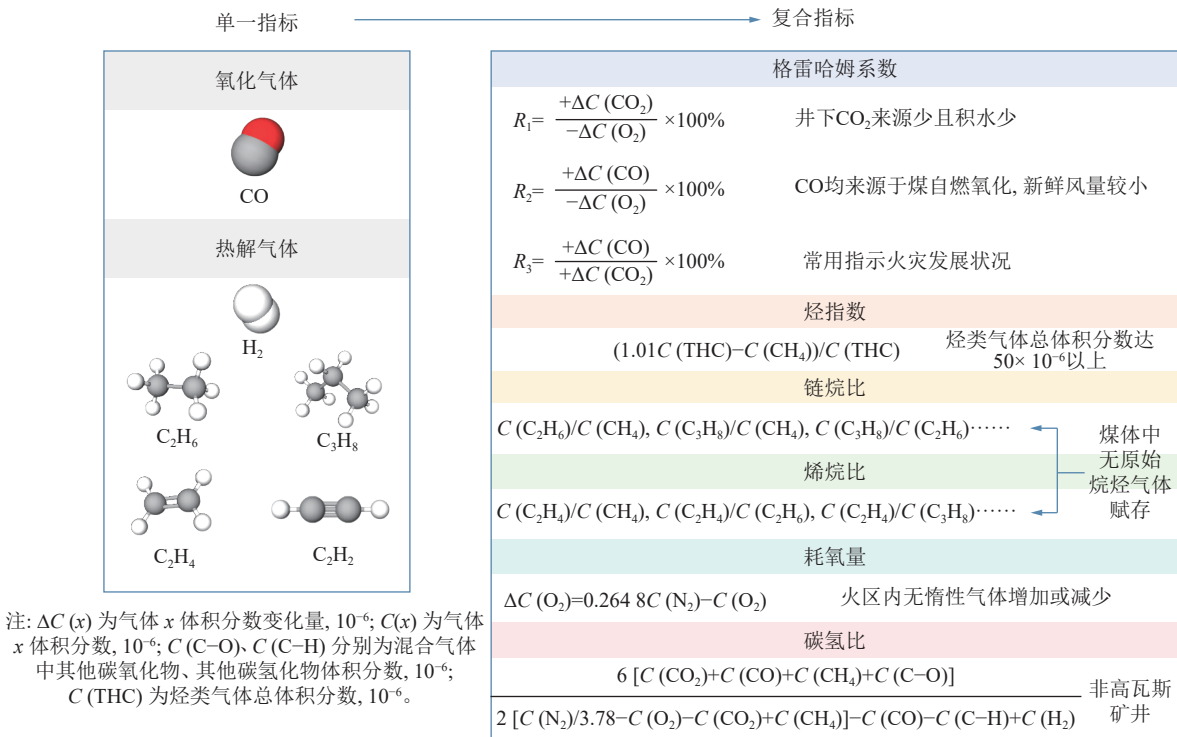


图 2 部分煤自燃气体指标类型及指标形式<sup>[25]</sup>

Fig.2 Part of coal spontaneous combustion gas index type and index form<sup>[25]</sup>

表 1 煤矿隐蔽火源探测方法 (部分)

Table 1 Detection method of concealed fire source in coal mine (part)

探测方法	探测机理	探测流程	实际应用情况
地面钻探法 <sup>[40]</sup>	孔壁温度参数采集观测	地质调查-钻孔施工-仪器下放-数据采集	其准确性、钻探深度和对复杂地层的适应能力都相对较好。在德泉煤矿等陕北浅埋房采区得到应用
无源钻孔测温法	无源温度测量仪连续测温	钻孔选址-钻孔施工-无源测温仪器下放-数据记录分析	无需供电电源;连续观测温度,准确率高,在一些中小型矿山或需要快速评估地下温度的地区得到应用
分布式光纤测温法 <sup>[41]</sup>	光纤沿线连续温度监测	钻深确定-预定位置钻孔-光纤部署-持续测温-数据收集分析	由于其高分辨率和持续监测的优点,在大佛寺工作面、采空区等多场景广泛应用
热红外探测法 <sup>[42]</sup>	基于物体表面热辐射差异推断温度	设备校准-平台搭载采集-数据处理-分析识别	作为一种有效、迅速的方法,在鲍店煤矿等采空区的高温点初步识别得到应用
地质雷达探测 <sup>[43]</sup>	通过收发高频率电磁波探测地下的结构和特征,间接辅助判断温度信息	选择适当GPR系统和天线频率-预定路线移动-收集反射数据-提高数据清晰度分析	可在温度信息获取中起辅助作用,在山西、宁夏等主要矿区的地质勘探得到应用
电阻率探测法 <sup>[44]</sup>	利用煤燃烧引起周围煤岩层电阻率异常进行探测	装置选取-测量配置-数据采集分析	可在温度信息获取中起辅助作用,适用于大范围的煤田火。在山西、陕西等主要煤矿主要用于识别采空区、探测突水源等目的
磁探测法 <sup>[45-46]</sup>	利用不同温度条件下煤岩矿物磁性差异获取温度	前期准备-布置测量线-磁场强度记录-绘制剖面图	在温度信息获取应用中存在挑战,适用于大范围的煤田火,需要与其他地球物理方法结合使用,以提供更全面的地下信息
瞬变电磁法 <sup>[47-48]</sup>	基于电磁感应定律,观测脉冲电磁场激发的二次异常场获得地电异常信息	设备选取-电极接收器布置-注入电流脉冲-导电性分布	可间接在温度信息获取中起辅助作用,在主要煤炭产区,该技术已被应用于解决煤矿的复杂地质问题,特别是在深层煤矿的勘查和开采过程中
微震测量法 <sup>[49-50]</sup>	捕捉岩体微破裂过程中产生的震动信号,获得岩体破裂发生的“时、空、强”等信息	部署传感器-震动数据采集-信号处理-震源定位分析-预警反馈	可辅助提供温度变化信息地热活动区,在四川、安徽等煤矿中,主要用于监测煤层的稳定性和预测岩爆等地质灾害
同位素测氦法 <sup>[51]</sup>	利用氦气随环境温度升高析出率增加,且具有向上扩散运移特性来判断火源位置	选点采样-氦浓度测定-数据分析-解释定位	在陕西榆林市刘家峁、郭家湾煤矿,中煤平朔集团有限公司安家岭露天矿等多地开展勘探测试,有效验证火源位置和范围的准确性
航空航天探测法 <sup>[52]</sup>	利用航空或航天平台搭载的传感器(热红外传感器、多光谱传感器等),对地表进行大范围、高分辨率的遥感观测	平台选择-载荷配置-飞行路线规划-飞行任务执行-数据收集分析	适用于具有复杂地形或大面积特征的煤矿,如新疆、宁夏、内蒙古等地的一些大型煤矿

数据监测与数值模拟高度结合,以获取采空区煤自燃氧化升温温度场、氧体积场以及渗流场的运移规律<sup>[31]</sup>。

目前针对采空区高温点演化运移规律的研究,在充分考虑空隙结构、漏风规律、工作面倾斜角度等因素的条件下,主要体现在采空区热环境和流场模拟、煤自燃与采空区高温点运移动态的关联机制等方面<sup>[32-33]</sup>。在未来将继续深入围绕模型细化、多场景下的采空区高温点运移机制等方向开展研究。以期更为精准地研究采空区高温点的时空演化模型,满足高温点现场监控预防的实际需求。

## 1.2 采空区高温点形成特点

采空区高温点的动态演化规律受多种因素影响,包括采空区物理特性(如几何形状、深度),煤内在性质(如含水量、孔隙结构),环境条件(温度、压力、湿度、通风),地质条件(地下应力、岩层裂隙)和开采因素(采掘方法、工作面推进速度)等。多因素交织作用共同影响采空区高温点的形成、发展和迁移过程<sup>[34]</sup>。最终导致了采空区高温点具有以下特点:

(1) 形成区域深隐。高温点一般集中在采空区深部区域,适宜风流作用下,煤氧复合反应的作用加剧,放热量超过散热量,煤体温度不断升高,形成采空区高温点。

(2) 形成区域动态。高温点的形成需要消耗大量氧气。因氧气体积分数限制,高温点往往沿逆风流方向动态移动,随采煤过程的变化而动态变化。

(3) 形成环境复杂。采空区作为有机物和无机物混杂而成的松散煤岩体,具有多孔性,工作面回采后,顶板岩层相继垮落,其空气渗流场、温度场、氧气体积分数分布场和煤的物理化学过程相互影响,呈非稳态变化。

(4) 形成产物多样。高温点形成时,煤中的大分子经历裂解过程,生成多种不同气体。同时煤中小分子也会挥发并释放入空气。多样化的气体产物积聚体现了煤自燃化学反应的复杂性。

面对采空区遗煤与空气接触引发的复杂自燃过程,高温点信息难以直接准确捕捉。通过对煤自燃过程中的产气特性、热量释放及磁性变化等物化参数进行表征和指标确定,深入研究各类采空区高温点识别探测方法,以期获取准确的温度信息及高温点运移特性,从而达到后续煤自燃隐患的精准预测防治。

## 2 采空区高温点识别探测方法

### 2.1 现有煤自燃高温点识别探测技术分析

基于煤自燃过程产生的标志性物质(气体、放射性元素等)和物性变化(电、磁、光等),采空区高温点识别探测技术通过建立上述参数与温度之间的对应

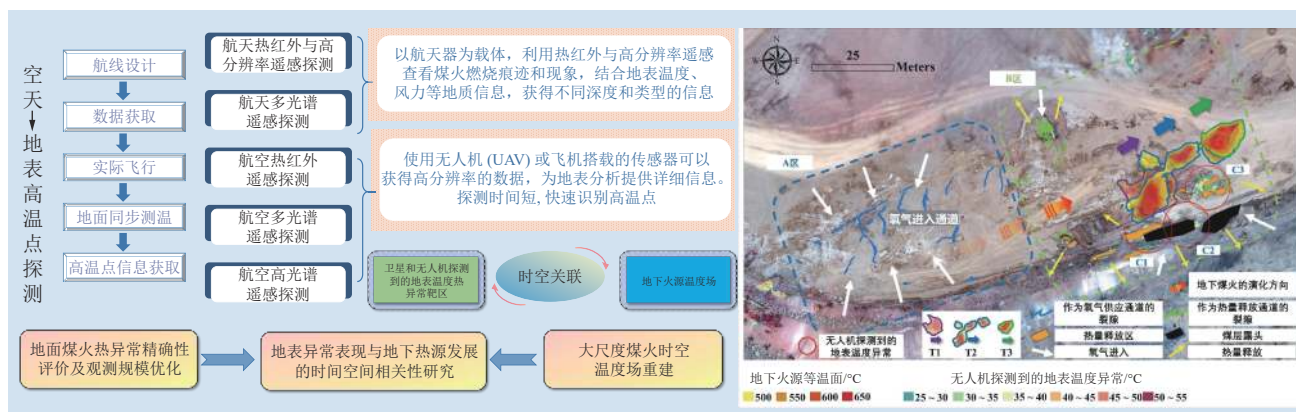
关系,获取采空区温度信息。该技术可为后续探讨高温点运移规律和进行预测防治性工作提供关键信息<sup>[35]</sup>。采空区高温点信息识别领域中,气体分析法与智能数值计算法应用较为广泛<sup>[36-37]</sup>;气体分析法通过“测气定温+测温定位”来确定高温点位置;智能数值计算法依托海量监测数据,通过构建高温点的分析模型预测高温点位置<sup>[38]</sup>。采空区高温点信息探测领域,按照探测装置的空间定位进行分类,可分为地下直探技术、地表探测技术、空天探测技术(图3)<sup>[39]</sup>,其相关隐蔽火源探测技术分类见表1。

(1) 地下直探技术通过直接与目标地层进行物理交互来获取相关的温度数据。近年来,地下直探技术经历了持续的进步和完善,主要表现在搭载设备的多样化(钻孔瞬变电磁、方位自然伽马等先进技术的复合探测)、长距超前技术、自动化定向钻探、技术联用等方面的完善发展<sup>[53-54]</sup>。对于具有复杂地质结构的采空区,尤其是在长壁工作面全部垮落法所形成的倾斜或缓倾斜煤层的采空区,直探技术尤为适用。其固有局限性主要在于钻孔破坏性和工程量极大,因此不适用于具有硬岩区域深、地下水丰富、大范围探测等特点的采空区温度探测。李树静等<sup>[55]</sup>以大同辛安煤矿为例,通过“地面+井下钻探法”划定小煤窑隐蔽火范围,为后续治理措施奠定基础。

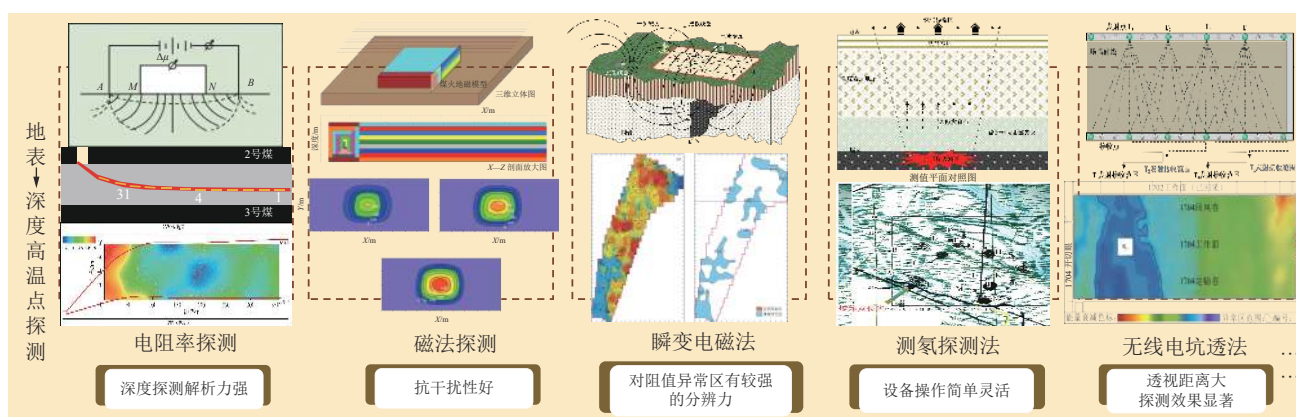
(2) 地表探测技术通过采用氢气探测、地质雷达探测、电阻率探测等地球物理方法。探测采空区隐蔽火源周围所产生的物理化学属性差异或特殊产物,建立指标性区域分类,间接推断采空区内部的温度分布。在使用地表探测技术(电阻率法、磁法等)进行火源探测时,面对隐藏于深部矿井下的采空区高温隐蔽火源时会存在深度限制、地质结构干扰等问题。例如测氢法易受埋深、火区上覆岩层性质、地表大气流动的影响,仅适用于氢气释放量明显的采空区;电阻率探测法适用于较浅层采空区,但由于该方法易受大地杂散电流干扰,难以清晰分辨小尺度结构等问题干扰,不适用于深层或导电性强的采空区域探测;磁法探测则适用于含有磁性矿物的采空区,对于非磁性岩层或地区反应不明显。林柏泉等<sup>[56]</sup>对采空区热动力灾害信息探测技术方法展开综述整理,对地表探测技术中有关火区圈划<sup>[57]</sup>、多元电磁探测技术<sup>[58]</sup>等采空区复杂条件下灾害信息探测与火源定位技术发展趋势展开讨论。马子钧等<sup>[59]</sup>以内蒙古乌海市公乌素露天矿为例,通过地质雷达和圆锥型瞬变电磁法,结合地面冒烟区位置,成功探测了火区着火点及其地下通道的地球物理特征和分布范围。

(3) 空天探测技术主要利用航空航天观测平台,搭

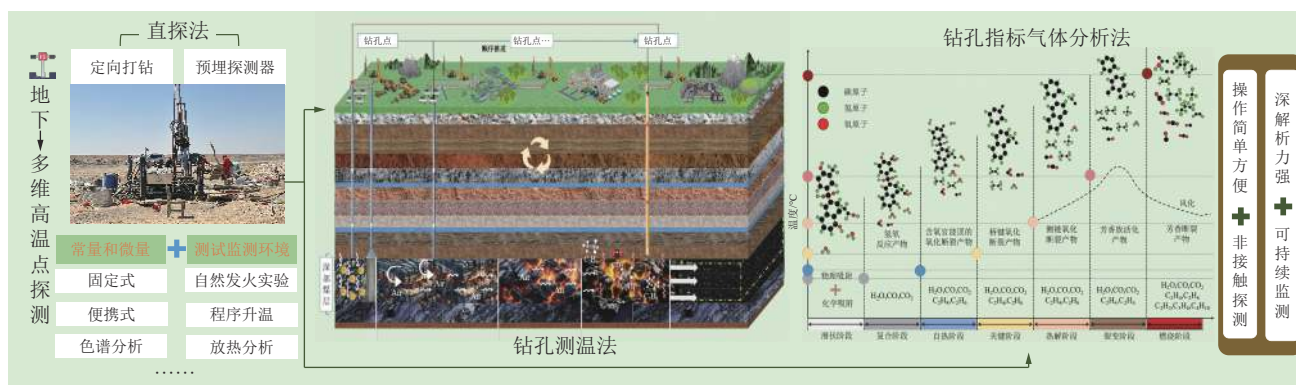




(a) 空天高温点探测[47, 50]



(b) 地表高温点探测[44, 54, 59, 61, 66]



(c) 地下高温点直探技术

图3 矿井高温火源探测技术

Fig.3 Mine high temperature fire source detection technology

载相应传感器对地表进行大规模、高分辨率的探测监测。具有覆盖面积大、探测速度快的显著特点。由于其高空视角,能够提供整体的温度分布图。目前航空航天探测技术在采空区温度探测中已逐渐成为一种关键工具。尤其搭载红外成像技术后,能有效捕捉浅层、地表温度变化大的采空区<sup>[60]</sup>。在采空区温度探测过程中,尤其是在大范围和长时序的监测效果上具备明显的优势,其主要局限性在于易受到大气、云层和其他环境因素的影响,对深部采空区探测信息有限等劣势,在具体探测中多用于高温区域边界界定和梯度

划分,并以其他物探技术进行辅助精细化探测。赵毅鑫等<sup>[61]</sup>以神东上湾煤矿 12401 工作面为实验背景,通过无人机搭载红外相机,结合边缘检测技术有效识别获取了工作面附近地裂缝的温度信息。汪云甲等<sup>[62]</sup>结合新疆阜康、米泉等隐蔽火源探测实际,围绕“多像识源”研究链条,探讨了极化时序 InSAR、时空温度阈值法、多源卫星遥感等方法的应用进展及效果。

实际应用中,单一技术很难完全满足所有需求,交叉应用多种技术往往能获得更全面、准确的结果。原刚<sup>[63]</sup>以新疆典型煤火区作为探测对象,结合卫星和

无人机的热红外遥感技术、地面综合监测及理论分析,对优化地表热异常数据获取、重建地下火源演化模型、地表与地下火源的时空关联特性等方面展开研究。通过综合应用各类地球物理勘查技术,研究人员在老采空区勘察治理、浅埋煤层火源探测等方面取得了显著成果,有效地识别了待测区域的结构和特征,提高了采空区火灾隐患的识别与处理效率,为后续的地层治理提供了可靠的理论依据<sup>[64-65]</sup>。然而,当前的探测手段在应对复杂采空区时仍存在一定的短板,因此急需进一步研发和应用具有更高精细度、更强灵敏度和更优分辨率的新型探测技术,以应对多变的地质结构、深层的隐蔽火源及煤层自然特性带来的多重干扰。

## 2.2 采空区高温点探测难点

采空区煤自燃探测的关键任务是识别出特定区域内的高温热点。这些高温区域的存在可能会对磁、电性等非接触探测技术所捕捉到的关键信号产生影响。加之采空区空间大、不均一性强,相关信号容易淹没其中。关于采空区高温区域的探测特征难点如下:

(1) 探测路径隐蔽。采空区受残留煤柱、人工工程、断层等因素影响,内部环境复杂。例如上覆岩层中“横三区”和“竖三带”分布、遗煤空间分布特征及物化特性、不同类型采空区的沉陷机理等均存在差异,导致探测介质在其中的运移路径具有极高的复杂性。

(2) 动态环境探测辨识难。随采矿作业的进行,采空区环境持续动态变化,如通风条件、岩层裂隙等条件的改变。采空区失稳可能会诱发巷道顶板垮落、围岩片帮和底板隆起,还可能会诱发矿震,采空区内分布埋设传感器难度较大,使得高温点的位置和特性也随之变化。

(3) 信号精准采集难。由于采空区内部的多变环境(温度、湿度、介质非均匀性等),可能导致探测信号的衰减或失真。此外,煤岩层中的自然裂隙(层理面、节理面等)、机械噪声和其他设备的信号可能互相干扰。这些因素都给准确识别和定位采空区高温点带来了新的挑战。

## 2.3 采空区高温点探测新技术探索

### 2.3.1 声波感温探测技术

作为一种非接触式温度测量技术,声波感温探测技术在矿区温度异常地区的信息实时获取和监测方面,具有良好的应用前景。该技术利用声波在采空区遗煤空隙中的气体进行传播的特点,通过确定采空区梯度温度变化与声飞渡时间的物理关系,解算温度值(图4)。通过空间排列的声波收发设备来收集测试空间内各个声道的信息。运用高斯函数、正则化重建算法和同步迭代算法等技术,对温度场进行重建,得到被测物体的内部温度分布<sup>[68-69]</sup>。

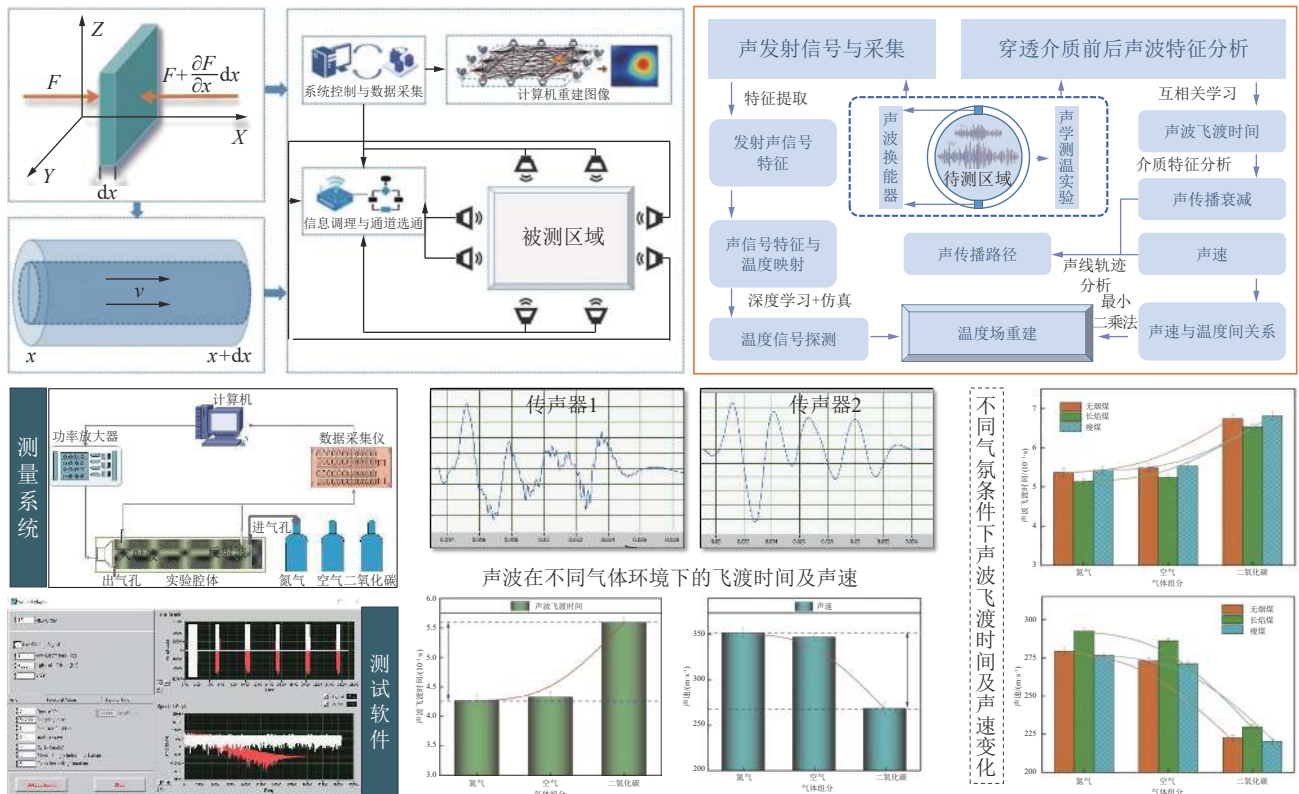


图4 声波隐蔽火源探测过程<sup>[66-67]</sup>

Fig.4 Sound wave concealed fire source detection process<sup>[66-67]</sup>



不同于传统的接触式测温技术,声波感温探测技术既具备非接触性的特点,也能实时获取和监测矿井领域中的矿区温度异常地区信息。在矿井采空区隐蔽火源的探测领域,基于声学法的异常温度检测技术已取得初步进展。目前,已开展有关松散煤体非均匀温度场下的声飞渡时间算法优选、气-固两相中的声传播特性、声信号吸声衰减规律和优选声波信号等方面的前期基础性研究<sup>[70-72]</sup>。未来研究方向将聚焦于三维实体探测过程中的抑噪技术,提高温度测算模型精度在揭示声波感温原理的前提下为实现复杂采空区高温点探测做准备。此外,在不断优化声波探测技术装备的同时,构建声波在线采空区高温点探测系统以实现采空区高温异常区域的动态可视化监测,为未来的隐蔽火源精确探测提供坚实的理论和技術基础。

### 2.3.2 基于量子技术的火源探测

量子技术(特别是量子传感器技术)作为一种非

接触式地球物理探测手段,在矿产探测、精密地球测量和特定工业热处理等场景中逐渐崭露头角<sup>[73]</sup>。在矿井火源探测领域,利用量子态的叠加和纠缠特性,理论上可以精确地捕捉到异常温度区域的微小变化,为探测深藏的火源提供了全新手段。当前已开展针对钻石矿石中的单一缺陷进行高精度纳米尺度的温度感测<sup>[74-75]</sup>,展示了在纳米尺度上利用矿石特性进行高精度温度测量的潜力。利用特定配置的量子传感器获取火源相关的量子信号,借助于量子计算和量子干涉技术,实现对火源温度场的精准映射,进而了解被测矿区的深部温度特性(图5)。尤其是在开发更高效、更灵敏的纳米级温度传感器方面。未来的研究将更多地集中在利用量子特性模拟火源的热动力学行为以及提高量子传感器的灵敏度和稳定性,同时对量子态传输、叠加效应及火源的微观量子结构进行更为深入的研究,进一步揭示其基于量子原理的探测机制。

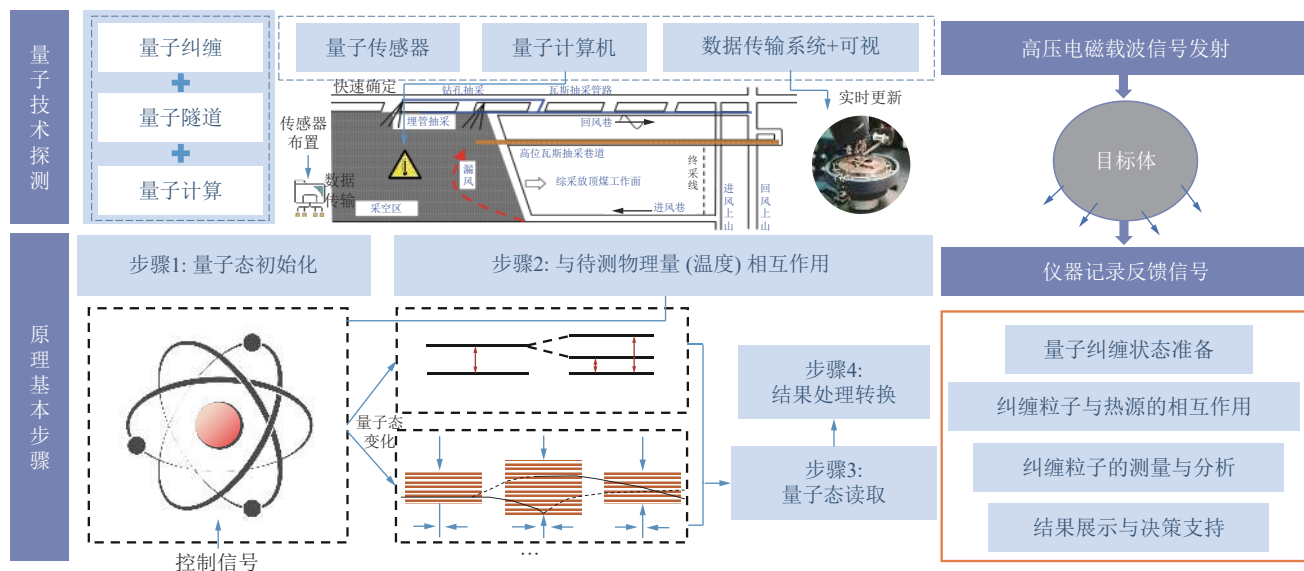


图5 基于量子技术的火源探测过程构想

Fig.5 Conception of fire source detection process based on quantum technology

### 2.3.3 毫米波雷达火源探测

作为一种操作在 30~300 GHz 内的雷达技术,以其出色的空间分辨率和穿透能力在天气信息获取、遥感卫星通信、人体安全检查等方面得到广泛应用<sup>[76]</sup>。在未来新的矿井火源探测技术中,该技术可利用毫米波的波长特性,通过采空区内火源产生的温度变化与气体介电常数差异变化进行高效探测(图6)。其能够在视线受阻或烟雾密集的环境中探测到微小的温度变化或动态异常,为火源的早期发现和定位提供探寻基础。刘宏等<sup>[77]</sup>成功利用毫米波雷达技术探测山火烟雾距离范围,此案例可为采空区隐蔽火源探测提供一定技术借鉴及思考。依托毫米波雷达的实时监测

特性,对火源位置和温度分布进行实时探测分析,进而获取矿区的火源温度特性。

毫米波雷达技术凭借其在低能见度条件下的高精度分辨能力,逐渐受到矿山物探领域的重视。现有研究已涉及矿井本安传感器<sup>[78]</sup>、矿车检测跟踪算法<sup>[79]</sup>等方面软硬件开发与研究,在未来将会面向人员设备高温点定位、障碍物和空腔检测、结构稳定性评估等方面投入更多的力量。特别是针对矿井采空区的火源探测中,探明采空区不同温度下气体介电常数等基础参数变化与毫米波之间的对应关系;开展矿井内部多种材料对毫米波的反射和吸收特性研究;针对不同矿区环境,优化雷达波的频率和功率配置,提高探测



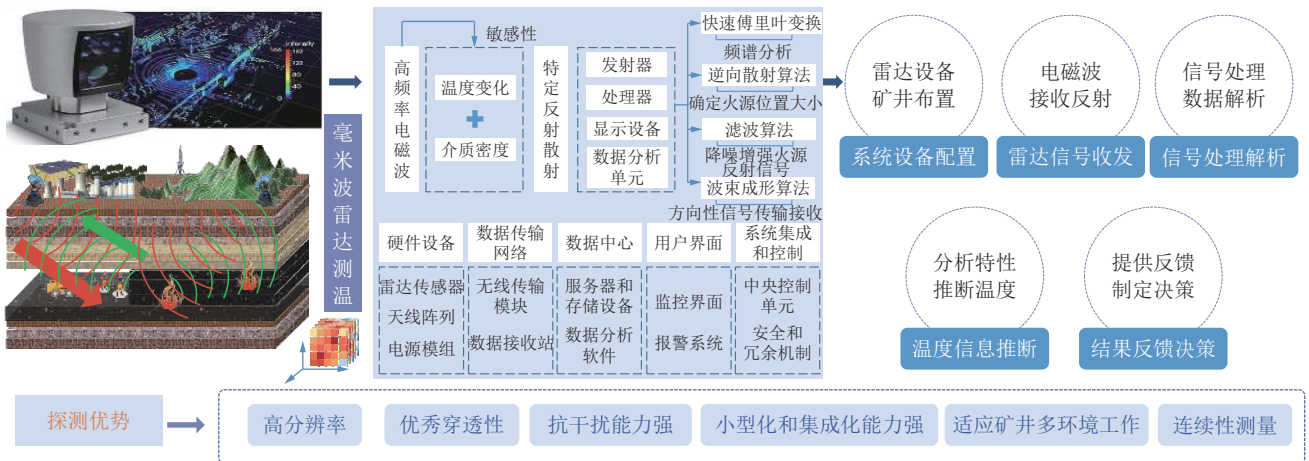


图6 毫米波雷达火源探测技术

Fig.6 Millimeter wave radar fire source detection technology

精度;探究毫米波的波长特性受温度变化影响后与氧气体积分数的对应关系,从而依据煤自燃极限参数快速判定待测区域是否处于接近自燃状态的危险区域,为采空区的三带划分提供依据。这将为未来矿井的温度异常区域的精准判定提供一种更为高效和准确的技术手段。

### 3 采空区高温点动态运移智能可视化系统构想

采空区煤自燃作为矿山火灾的主要诱因,如何高效、准确地识别与探测其高温点成为透明矿山数字化建设的关键技术之一。通过深入剖析矿井智能化建设过程中存在的问题、总结矿井火灾探测监测技术装备的发展趋势,提出一种采空区多方法融合的精准探测技术构想,特别是强调基于数字孪生技术的在高温点探测的应用前景,以期为未来的矿井智能化建设全过程提供新的研究视角与思考。

#### 3.1 采空区高温点综合智能化多维探测系统

##### 3.1.1 “空-天-地-孔”多维化异常区域探测

随着矿井的不断深入,针对采空区高温点信息的探测识别技术发展需求更加迫切。不同的探测方法针对不同的地质环境都有其独特的优势和局限性。为了确保探测的准确性和可靠性,提出了采空区高温点多维探测模式,即充分利用多种探测手段的互补性,综合各类数据以形成更全面、准确的地下温度分布模型。该模式的核心思想是将多种探测技术相结合,如地质雷达、磁探测、热红外探测、瞬变电磁法等。根据特定采空区的地质、地貌和物理环境进行灵活选取。每种探测方法针对其最佳应用场景产出的数据可以为其他方法提供基准或验证信息,形成数据互支模式,增强了探测结果的信度。同时将所有探测数据集成

至一个统一的数据库中,方便数据管理与检索的同时,也可后续分析与建模提供丰富的数据支持。在综合数据库基础上实现对采空区高温点的精确定位和属性解读。

在实际的探测过程中,需根据地下采空区的分布范围、空间形态特征和采空区的冒落状况等特征进行探测方法的选取,整体可分为以下3个探测阶段:初步定位阶段,采用航空航天、地质雷达等大范围探测技术,完成对温度异常区域的初步划定;细分阶段,在确定火源的粗略位置后,运用直探法、氦气探测和电阻率探测等,进一步细化采空区内部的温度分布,建立指标性区域分类,将粗略大面积的火源范围拆解为更具体的指标性区域;精确探测阶段,为确保对高温点探测的最大精确度,引入矿井声波温度信息探测、基于量子技术的热源探测、毫米雷达波探测技术等新技术,优化火源范围分布,精准标定高温点。

采空区高温点多维探测模式的提出与实践,旨在通过技术整合与数据融合,实现对采空区高温点的高精度、高稳定性探测。这种模式为煤矿的安全高效生产提供了重要的技术保障,同时也为地球物理和地质探测领域带来了新的研究思路。

##### 3.1.2 高温点综合智能化探测系统设想

采空区煤自燃高温点识别探测监测技术的发展历程可概括为3类探测模式,每种模式均从不同视角为提高矿井安全性提供了重要的技术支撑(图7)。

(1) 静态采空区精准探测模式:基于采空区的温度场分布式探测技术,考虑到采空区的特殊环境与复杂性,相关硬件的开发着重于耐高温、抗冲击与低功耗设计。通过开发相关密闭采空区的多参数无线监测硬件以实现高精度的静态高温点探测,再同智能解算法相结合,对采空区气体浓度场和高温区域的同步分





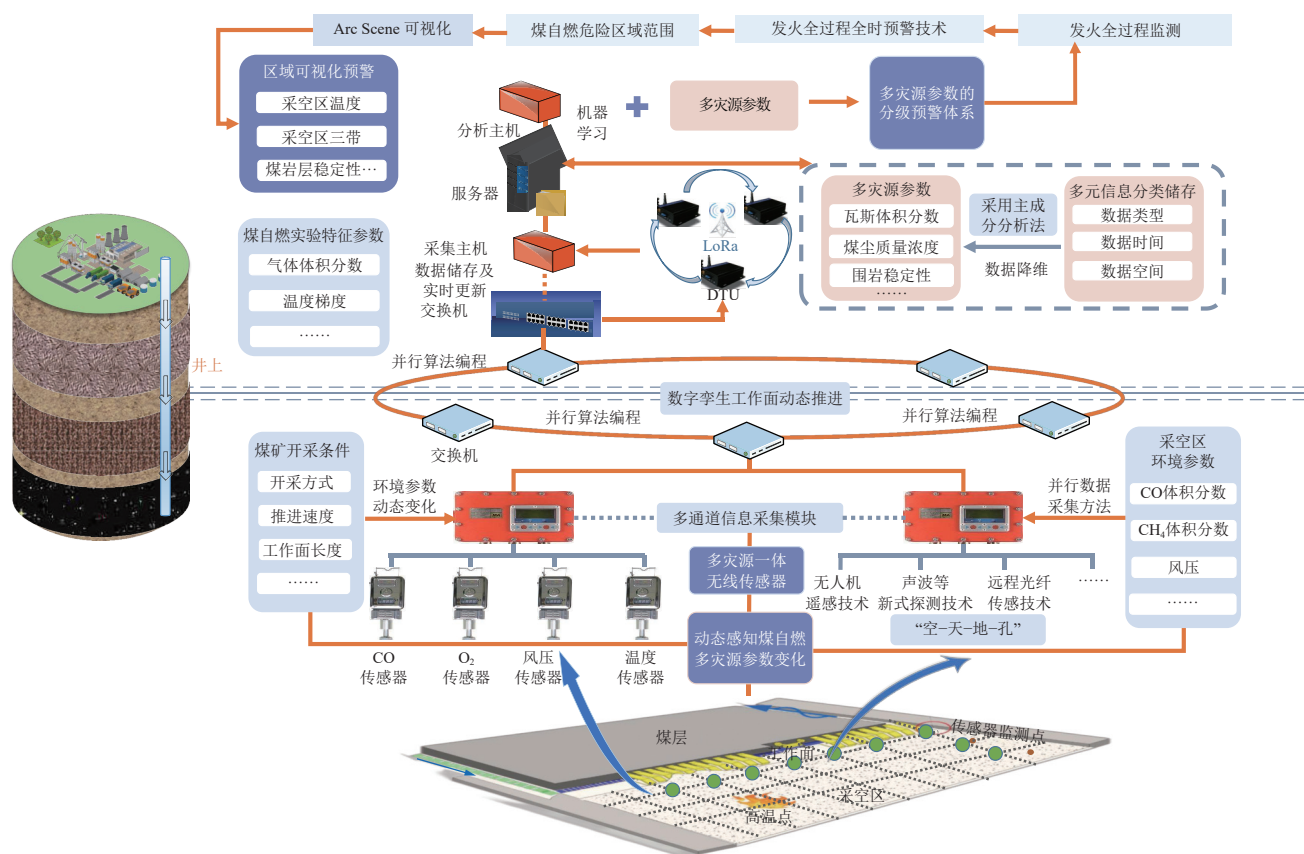


图8 数字孪生工作面动态监测推进平台构建设想

Fig.8 Construction idea of dynamic monitoring propulsion platform for digital twin working face

采空区内部空间特征获取方面,利用数字孪生技术构建煤矿采掘工作面的详细三维地质模型。这包括煤层、采空区、地质异常构造以及生产场景的空间分布特征。这些模型基于三维地震动态解释、离散光滑插值、钻探物探综合解释等技术。前期通过地质雷达探测、磁探测、航空航天探测等技术手段,详细了解采空区的塌陷深度和范围,发现异常变化和裂缝;在此基础上获取以温度信息为主的采空区物化环境参数、利用实验测试分析结果掌握采空区遗煤及岩石的微观宏观特征;同时根据矿井实际开采情况获得推采速度、通风情况等工况条件数据,集成大量多维度采空区数据后进行筛选整合,将经过验证和校准的数据用于采空区内部的高精度虚拟模型的构建,使其尽可能真实动态地反映采空区内部情况及煤自燃高温点运移过程。

在模型的基础上,利用数字孪生技术进行场景仿真和规划。辅助掘进工作和回采作业的进行同时,为多类探测传感装置的排布提供科学依据。利用并行数据采集方法整合火区监测、瓦斯监测、顶板监测、矿压监测、粉尘监测、通风系统等多种环境数据,同步更新至三维地质信息数字孪生体中,形成一个全面且动态的矿井监控系统。为多灾源分级预警体系的实

施提供了实时模拟和分析的能力,同时可视化展示高温点的动态变化和运移趋势,为后续矿井热动力灾害防治和工作面的动态推进提供依据。

为实现国家到2035年各类煤矿基本实现智能化的整体战略<sup>[81]</sup>,矿山建设经历了从单机综合自动化到局部智慧体的大幅跨越,并在未来向建成集闭环运行体系、远程诊断维护、智能决策、系统预测于一体的智慧矿山发展。结合技术发展趋势和行业经验,探索符合煤矿实际的智能化煤矿解决方案,以数字孪生为核心,整合上述探测推进平台的经验与成果,构建一个涵盖矿井开采生产全生命周期的平台(图9)。基于数字孪生技术,围绕矿井互联运营、虚拟化评估、多灾源数据库预警、矿山风险智能感知等关键问题<sup>[82]</sup>展开探索,将煤矿建成“系统可靠、装备先进、管理科学、决策智能”本质安全型智能矿井。在保障生产安全的前提下,实现矿井的高效数字化转型,从而推动矿井开采生产朝向可持续、绿色的方向迈进。

## 4 展 望

深度剖析采空区高温点的形成演化规律识别探测方法及构建动态运移智能可视化系统,对于实现采空区煤自燃高温点的精确探测和管理至关重要,相关



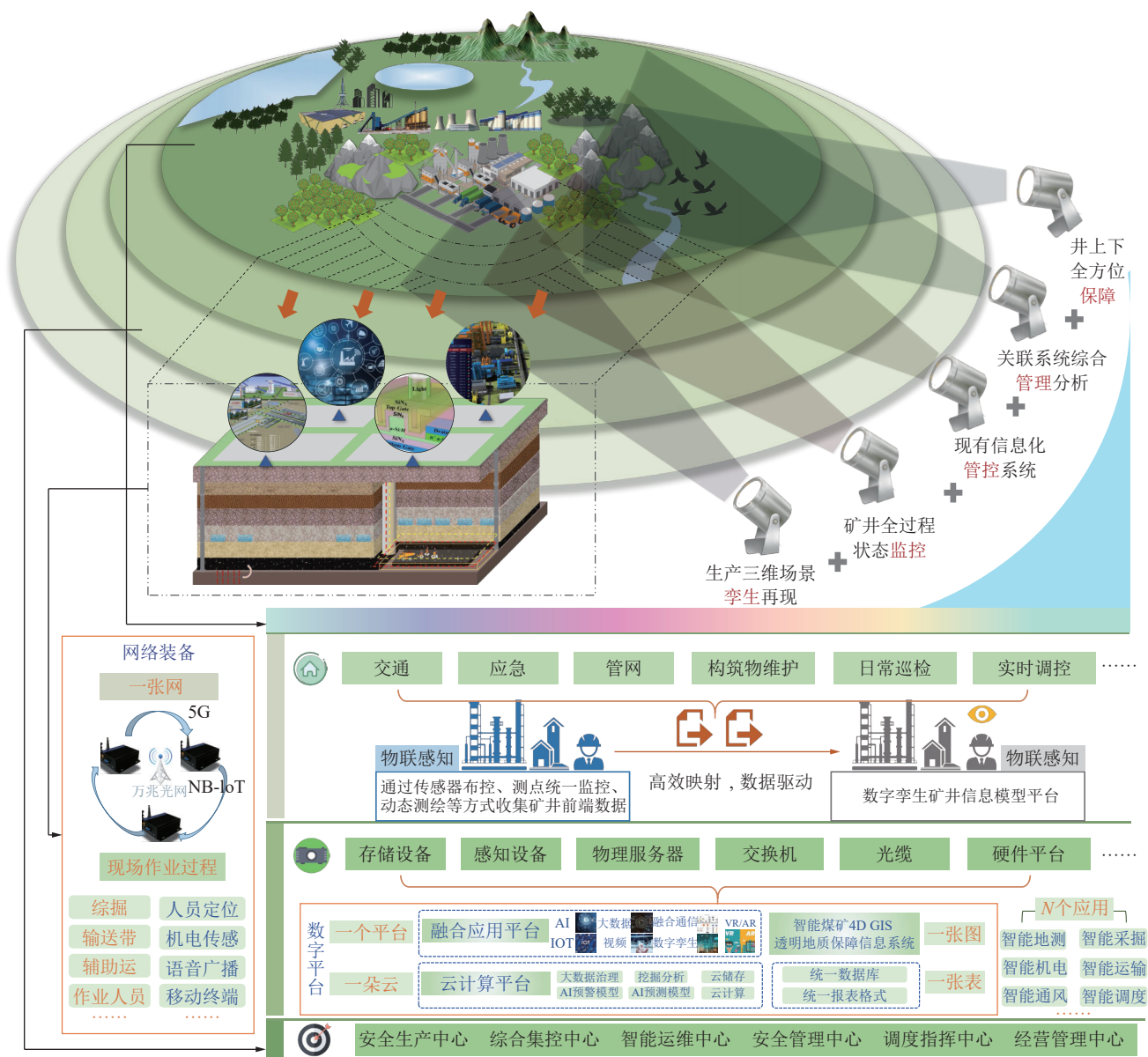


图9 全生命周期矿井开采生产平台化构想

Fig.9 Conception of full life cycle mine mining production platform

研究迫在眉睫。采空区煤自燃高温点识别与探测技术发展应以“精确识别、智能应对”为基本思想,后续重点应开展以下研究:

(1) 煤自燃与高温点演化机理深化研究。包括煤的物理化学反应过程与采空区环境条件的交互作用以及其他相伴变量的关系,在实验与数值模拟相结合基础上,展开多规模的高温点运移规律研究等内容。

(2) 识别探测技术的综合革新与升级。不断加强学科融合性探测新技术发展,深入探索声波感温探测技术,基于量子技术的火源探测技术及毫米波雷达火源探测等新兴技术;研制声、电、磁等多物理参数集合式的主、被动源综合探测与成像智能化仪器设备,为矿井的安全生产提供更加精确、快速和高效的探测

手段。

(3) 采空区高温点智能化探测系统建设。深度开发依托于数字孪生技术的火源探测系统,并与掘进采煤机械等设备相结合,建设一体化的识别预测监控体系,对开采活动中的隐蔽火源等多种灾害源因素进行信息采集,形成一个完整的、协同工作的生态系统。

(4) 全生命周期矿井开采生产平台构建。基于数字孪生技术,进行采空区高温点综合智能化探测系统平台建设,形成集识别、探测、监控、预测、应急响应等功能于一体的多灾源辨识防控体系。研究矿井典型灾害风险智能识别大模型与交互生成式深度学习算法,结合知识图谱技术与专家决策交互式系统反馈,开发煤矿典型灾害风险智能预测 AI 大模型,最终实

现异常事件的预警描述与专家建议反馈,完成井下多场景中异常事件的多模态预警决策工作。

## 参考文献(References):

- [1] 王佟,刘峰,赵欣,等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 1-8.  
WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Reflection on China's coal resource guarantee capacity and exploration work under the background of “double carbon” [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 1-8.
- [2] 秦波涛,张雷林,王德明,等. 采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1655-1659.  
QIN Botao, ZHANG Leilin, WANG Deming, et al. Mechanism and restraining technology on spontaneous combustion of coal detonating gas in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1655-1659.
- [3] 邓军,李贝,王凯,等. 我国煤火灾防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 1-7.  
DENG Jun, LI Bei, WANG Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 1-7.
- [4] 王刚,王锐,武猛猛,等. 火区下近距离煤层开采有害气体入侵灾害防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1765-1775.  
WANG Gang, WANG Rui, WU Mengmeng, et al. Prevention and control technology of harmful gas intrusion in close-up coal seam under fire area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1765-1775.
- [5] 王德明,辛海会,戚绪尧,等. 煤自燃中的各种基元反应及相互关系: 煤氧化动力学理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1667-1674.  
WANG Deming, XIN Haihui, QI Xuyao, et al. Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: The coal oxidation kinetics theory and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667-1674.
- [6] 王连聪,梁运涛,罗海珠. 我国矿井热动力灾害理论研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 1-9.  
WANG Liancong, LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Research progress and outlook on theory of thermodynamic disaster of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 1-9.
- [7] 周斌,周文强,董智宇,等. 氧化升温过程中煤岩介质体氮析出特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 859-866.  
ZHOU Bin, ZHOU Wenqiang, DONG Zhiyu, et al. Experimental study on radon exhalation characteristics of coal and rock during oxidation and heating[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 859-866.
- [8] 王德明,邵振鲁,朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 57-64.  
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57-64.
- [9] 李宗翔,张明乾,杨志斌,等. 断层构造对煤结构及氧化自燃特性的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1246-1254.  
LI Zongxiang, ZHANG Mingqian, YANG Zhibin, et al. Effect of fault structure on the structure and oxidative spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1246-1254.
- [10] 程卫民,张孝强,王刚,等. 综放采空区瓦斯与遗煤自燃耦合灾害危险区域重建技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 662-671.  
CEHNG Weimin, ZHANG Xiaoqiang, WANG Gang, et al. Reconstruction technology of gas and coal spontaneous combustion coupled hazard in fully mechanized caving goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 662-671.
- [11] 张鹏宇,陈晓坤,赵亮,等. 大面积采空区煤自燃环境下气体运移规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 122-128, 136.  
ZHANG Pengyu, CHEN Xiaokun, ZHAO Liang, et al. Study on gas migration law in large area goaf under coal spontaneous combustion environment[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 122-128, 136.
- [12] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137-142.  
WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137-142.
- [13] 李增华. 煤炭自燃的自由基反应机理[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(3): 111-114.  
LI Zenghua. Free radical reaction mechanism of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(3): 111-114.
- [14] 徐精彩,王华. 煤自燃极限参数的神经网络预测方法[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 366-370.  
XU Jingcai, WANG Hua. Neural network prediction method for limit parameters of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 366-370.
- [15] 邓军,张嫌妮. 煤自然发火微观机理[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015.
- [16] KAM A Y, HIXSON A N, PERLMUTTER D D. The oxidation of bituminous coal—I Development of a mathematical model[J]. *Chemical Engineering Science*, 1976, 31(9): 815-819.
- [17] 孟庆彬,韩立军,乔卫国,等. 深部软岩巷道锚注支护机理数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 27-34.  
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Numerical simulation research of bolt-grouting supporting mechanism in deep soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 27-34.
- [18] 张鹏宇,陈晓坤,赵亮,等. 大面积采空区煤自燃环境下气体运移规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 122-128.  
ZHANG Pengyu, CHEN Xiaokun, ZHAO Liang, et al. Study on gas migration law in large area goaf under coal spontaneous combustion environment[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 122-128.
- [19] 姜延航,周露函,韩明旭. 一面四巷瓦斯抽采对采空区遗煤自燃影

- 响数值模拟研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-10[2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230922.1512.001.html>.
- JIANG Yanhang, ZHOU Luhan, HAN Mingxu. Numerical simulation study on the effect of gas extraction in one face and four lanes on the spontaneous combustion of coal remains in the mining area[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-10[2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230922.1512.001.html>.
- [20] 王福生, 孙玮, 张渝, 等. 过渡金属离子促进煤自燃机理的量子化学计算[J/OL]. 煤炭学报, 1-14[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20230816.1310.002.html>.
- WANG Fusheng, SUN Wei, ZHANG Yu, et al. Quantum chemical calculation of the mechanism of transition metal ions promoting coal spontaneous combustion[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-14[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20230816.1310.002.html>.
- [21] 李金虎, 徐天硕, 陆伟, 等. 煤中原生活性位点的水-气掩蔽效应及脱附后煤体的常温氧化[J/OL]. 煤炭学报, 1-19 [2024-03-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0330>.
- LI Jinhu, XU Tianshuo, LU Wei, et al. Water-gas masking effect of the primary active sites in coal and room temperature oxidation of coal after desorption[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-19[2024-03-02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0330>.
- [22] 周效志, 桑树勋, 谷德忠, 等. 煤矿井下 CO 来源辨识与浓度超限原因研究——以内蒙古串草圪旦煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 138-144.
- ZHOU Xiaozhi, SANG Shuxun, GU Dezhong, et al. Study on identify sources of CO and reasons of concentration overrun in underground coal mine: A case study of Chuancaogedan Coal Mine in Inner Mongolia[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 138-144.
- [23] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1365-1377.
- WANG Shuangming, SHI Qingming, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1365-1377.
- [24] 刘焱, 王福生, 董轩萌, 等. 基于程序升温实验的煤自燃特性及微观机理研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-13[2024-03-02]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0567>.
- LIU Yao, WANG Fusheng, DONG Xuanmeng, et al. Study on the characteristics and microscopic mechanism of coal spontaneous combustion based on programmed heating experiment[J/OL]. Coal Science And Technology, 1-13[2024-03-02]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0567>.
- [25] 仲晓星, 王建涛, 周昆. 矿井煤自燃监测预警技术研究现状及智能化发展趋势[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 7-17.
- ZHONG Xiaoxing, WANG Jiantao, ZHOU Kun. Monitoring and early warning technology of coal spontaneous combustion in coal mines: Research status and intelligent development trends[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 7-17.
- [26] LI Q W, XIAO Y, ZHONG K Q, et al. Overview of commonly used materials for coal spontaneous combustion prevention[J]. Fuel, 2020, 275: 117981.
- [27] 周佩玲, 张英华, 黄志安, 等. 非均质孔隙率采空区氧化升温规律四维动态模拟[J]. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1350-1358.
- ZHOU Peiling, ZHANG Yinghua, HUANG Zhian, et al. 4D dynamic simulation of coal oxidation heating law in gobbs with heterogeneous porosity[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(10): 1350-1358.
- [28] 文虎. 煤自燃全过程实验模拟及高温区域动态变化规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 689-693.
- WEN Hu. Experiment simulation of whole process on coal self-ignition and study of dynamical change rule in high-temperature zone[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 689-693.
- [29] 谭波, 牛会永, 和超楠, 等. 回采情况下采空区煤自燃温度场理论与数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 381-387.
- TAN Bo, NIU Huiyong, HE Chaonan, et al. Goaf coal spontaneous combustion temperature field theory and numerical analysis under mining conditions[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(1): 381-387.
- [30] 郭庆, 任万兴, 陆伟, 等. 回采工作面煤自燃气体演化规律及危险区域划分[J/OL]. 煤炭学报, 1-9[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20230331.1504.002.html>.
- GUO Qing, REN Wanxing, LU Wei, et al. Spontaneous combustion gas evolution law and dangerous zone division of coal in stope face[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-9[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20230331.1504.002.html>.
- [31] DENG J, LIU L, LEI C, et al. Spatiotemporal distributions of the temperature and index gases during the dynamic evolution of coal spontaneous combustion[J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193(10): 1679-1695.
- [32] LI J, LI X, LIU C, et al. Study on the air leakage characteristics of a goaf in a shallow coal seam and spontaneous combustion prevention and control strategies for residual coal[J]. Plos One, 2022, 17(6): e0269822.
- [33] 李林, 陈军朝, 姜德义等. 煤自燃全过程高温区域及指标气体时空变化实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 444-450.
- LI Lin, CHEN Junchao, JIANG Deyi, et al. Experimental study on temporal variation of high temperature region and index gas of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 444-450.
- [34] LU X, DENG J, XIAO Y, et al. Recent progress and perspective on thermal-kinetic, heat and mass transportation of coal spontaneous combustion hazard[J]. Fuel, 2022, 308: 121234.
- [35] DU B, LIANG Y, TIAN F. Detecting concealed fire sources in coalfield fires: An application study[J]. Fire Safety Journal, 2021, 121: 103298.



- [36] 马砾,雷燕飞,苏耀军,等.近距离煤层开采上覆采空区火区探测及治理[J].矿业安全与环保,2020,47(2):76-80.  
MA Li, LEI Yanfei, SU Yaojun, et al. Fire detection and control of overlying goaf in close-distance coal seam mining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(2): 76-80.
- [37] ZHANG J, REN T, LIANG Y, et al. A review on numerical solutions to self-heating of coal stockpile: Mechanism, theoretical basis, and variable study[J]. *Fuel*, 2016, 182: 80-109.
- [38] 邓军,雷昌奎,曹凯,等.采空区煤自燃预测的随机森林方法[J].煤炭学报,2018,43(10):2800-2808.  
DENG Jun, LEI Changkui, CAO Kai, et al. Random forest method for predicting coal spontaneous combustion in gob[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2800-2808.
- [39] 邓军,屈高阳,任帅京,等.地下煤火火源探测研究[J].工矿自动化,2023,49(6):68-77.  
DENG Jun, QU Gaoyang, REN Shuaijing, et al. Research on underground coal fire source detection[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 68-77.
- [40] 李博凡,刘磊,范涛,等.煤矿井下定向钻孔中电阻率探测技术与应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):52-58.  
LI Bofan, LIU Lei, FAN Tao, et al. Resistivity detection and its application in underground coal mine directional boreholes[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 52-58.
- [41] 曹文辉,王飞.基于光纤测温技术判定采空区自燃危险区域的研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):75-79,84.  
CAO Wenhui, WANG Fei. Study on the identification of spontaneous combustion hazard area in goaf based on optical fiber temperature measurement technology[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(6): 75-79,84.
- [42] 秦汝祥,陶远,何宗礼,等.近巷煤体高温区域红外成像探测与分析[J].煤田地质与勘探,2014,42(4):90-92.  
QIN Ruxiang, TAO Yuan, HE Zongli, et al. Detection and analysis of high temperature area of coal near roadway by infrared thermal imaging[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(4): 90-92.
- [43] 李冬,杜文凤,许献磊.矿井地质雷达超前探测方法及应用研究[J].煤炭科学技术,2018,46(7):223-228.  
LI Dong, DU Wenfeng, XU Xianlei. Study on advanced detection method and application of mine geological radar[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 223-228.
- [44] 王恩德,沈剑,李彬,等.基于三维高密度电阻率法的露天铁矿山采空区精准探测[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(7):996-1001.  
WANG Ende, SHEN Jian, LI Bin, et al. Accurate detection of goaf in open-pit iron mine based on 3d high-density resistivity method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(7): 996-1001.
- [45] 于永宁,李雄伟,石磊,等.时移航空磁法在煤矿火烧区探测中的应用研究[J].工矿自动化,2023,49(8):114-120.  
YU Yongning, LI Xiongwei, SHI Lei, et al. Research on the application of time shifting aeromagnetic method in detecting coal mine burning areas[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8): 114-120.
- [46] 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,2017:15-34.  
SHAO Zhenglu. Magnetic and electrical signature of coal firesand comprehensive detection methodolog[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 15-34.
- [47] 范涛.孔巷瞬变电磁动源定接收方法探测采空区试验[J].煤炭学报,2017,42(12):3229-3238.  
FAN Tao. Experimental study on the exploration of coal mine goaf by dynamic source and fixed reception Roadway-Borehole TEM detection method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3229-3238.
- [48] 武欣,潘冬明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测方法综述[J].地球物理学进展,2022,37(3):1197-1206.  
WU Xin, PAN DongMing, YU JingCun. Review in the geophysical methods for coalmine goaf prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(3): 1197-1206.
- [49] CAO W, DURUCAN S, CAI W, et al. The role of mining intensity and pre-existing fracture attributes on spatial, temporal and magnitude characteristics of microseismicity in longwall coal mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 4139-4162.
- [50] 王书文,毛德兵,潘俊锋,等.采空区侧向支承压力演化及微震活动全过程实测研究[J].煤炭学报,2015,40(12):2772-2779.  
WANG Shuwen, MAO Debing, PAN Junfeng, et al. Measurement on the whole process of abutment pressure evolution and microseismic activities at the lateral strata of goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2772-2779.
- [51] 文虎,程小蛟,许延辉,等.松散煤体自然发火过程氧析出及运移规律[J].煤炭学报,2019,44(9):2816-2823.  
WEN Hu, CHENG Xiaojiao, XU Yanhui, et al. Law of radon precipitation and migration in loose coal during spontaneous combustion process[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2816-2823.
- [52] YU B, SHE J, LIU G, et al. Coal fire identification and state assessment by integrating multitemporal thermal infrared and InSAR remote sensing data: A case study of Midong District, Urumqi, China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 190: 144-164.
- [53] 程建远,陆自清,蒋必辞,等.煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J].煤炭学报,2022,47(1):404-412.  
CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, et al. A novel technology of “long excavation/ long detection” for rapid excavation in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 404-412.
- [54] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J].煤炭学报,2020,45(6):2217-2224.  
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Development path and key technology of intelligent directional drilling in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2217-2224.

- nology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2217–2224.
- [55] 李树静, 韦昌新, 高明, 等. 大同矿区典型小窑隐蔽火源探测与治理关键技术[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(8): 87–89, 95.  
LI Shujing, WEI Changxin, GAO Ming, et al. Key Technologies of detection and control of hidden fire sources in typical small kilns in datong mining area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(8): 87–89, 95.
- [56] 林柏泉, 李庆钊, 周延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1715–1726.  
LIN Boquan, LI Qingzhao, ZHOU Yan. Research advances about multi-field evolution of coupled thermodynamic disasters in coal mine goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1715–1726.
- [57] 张俊英, 方熙杨, 王海宾, 等. 基于同位素测氦的煤矿火区圈划方法对比研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(1): 38–44.  
ZHANG Junying, FANG Xiyang, WANG Haibing, et al. Comparative study of coal mine fire areas zoning methods based on isotopic radon measurement technique[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(1): 38–44.
- [58] 梁运涛, 王伟. 矿井自燃火灾超前协同防控技术[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 39–45.  
LIANG Yuntao, WANG Wei. Fire disaster advanced cooperative prevention and control technology of mine spontaneous combustion[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 39–45.
- [59] 马子钧, 杨海燕, 李文宇, 等. 煤层自燃区隐蔽火源的综合地球物理探测应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(12): 131–137.  
MA Zijun, YANG Haiyan, LI Wenyu, et al. Application of integrated geophysical surveys in the identification of hidden fire sources in spontaneous combustion zones in coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(12): 131–137.
- [60] HE X, YANG X, LUO Z, et al. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared remote sensing to identify coal fires in the Huojitu coal mine in Shenmu city, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13895.
- [61] 赵毅鑫, 许多, 孙波, 等. 基于无人机红外遥感和边缘检测技术的采动地裂缝辨识[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 624–637.  
ZHAO Yixin, XU Duo, SUN Bo, et al. Investigation on ground fissure identification using UAV infrared remote sensing and edge detection technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 624–637.
- [62] 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 hidden fire sources in coalfield[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1651–1661.
- [63] 原刚. 煤火区地表热异常多源遥感探测与地下火源演化时空关联特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 27–39.
- YUAN Gang. Multi-source Remote sensing detection of surface thermal anomalies in coal fire areas and spatiotemporal correlation characteristics related to the evolution of subsurface fire sources[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 27–39.
- [64] 陈绍杰, 张立波, 江宁, 等. 山东某煤矿老采空区上方大型工程建设案例[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1017–1030.  
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, JIANG Ning, et al. A case of large buildings construction above oldmine goaf in Shandong Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1017–1030.
- [65] 费金彪, 文虎, 金永飞. 测氦法在浅埋煤层火区探测中的应用[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(1): 26–30.  
FEI Jinbiao, WEN Hu, JIN Yongfei. Application of radon method in detection of fire area in shallow coal seam[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(1): 26–30.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 温亨聪, 李学臣, 温英明. 高突矿井地质异常体快速精细探测技术[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(12): 84–88, 96.  
WEN Hengcong, LI Xuechen, WEN Yingming. Rapid and fine detection technology of geological anomaly body in high outburst mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(12): 84–88, 96.
- [69] 郭淼, 闫勇, 卢钢, 等. 基于低频声波的空气温度测量研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 75–83.  
GUO Miao, YAN Yong, LU Gang, et al. Research on air temperature measurement using low frequency sound waves[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 75–83.
- [70] 邓军, 屈高阳, 任帅京, 等. 松散煤体中声波传播特性及主要路径实验研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1238–1245.  
DENG Jun, QU Gaoyang, REN Shuaijing, et al. Experimental study on acoustic wave propagation characteristics and main paths in loose coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1238–1245.
- [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] GUO J, SHANG H, CAI G, et al. Early detection of coal spontaneous combustion by complex acoustic waves in a concealed fire source[J]. *ACS omega*, 2023, 8(19): 16519–16531.
- [73] 林君, 嵇艳鞠, 赵静, 等. 量子地球物理深部探测技术及装备发展

- 战略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 156–166.
- LIN Jun, JI Yanju, ZHAO Jing, et al. Development strategy of quantum-based deep geophysical exploration technology and equipment[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(4): 156–166.
- [74] TOYLI D M, DE Las Casas C F, CHRISTLE D J, et al. Fluorescence thermometry enhanced by the quantum coherence of single spins in diamond[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8417–8421.
- [75] NEUMANN P, JAKOBI I, DOLDE F, et al. High-precision nanoscale temperature sensing using single defects in diamond[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(6): 2738–2742.
- [76] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 383–391.
- ZHONG Lingzhi, LIU Liping, GE Runsheng. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 383–391.
- [77] 刘宏, 王天正, 张海, 等. 基于毫米波雷达山火监测技术研究[J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2020, 53(1): 72–80.
- LIU Hong, WANG Tianzheng, ZHANG Hai, et al. Research on mountain fire monitoring technique based on millimeter wave radar[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, 53(1): 72–80.
- [78] 王广先. 矿井毫米波雷达深度指示器设计与研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011: 12–19.
- WANG Guangxian. Research of millimeter wave radar depth indicator for mine[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011: 12–19.
- [79] LIU H, PAN W, HU Y, et al. A detection and tracking method based on heterogeneous multi-sensor fusion for unmanned mining trucks[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 5989.
- [80] 何启林, 王德明. 综放面采空区遗煤自然发火过程动态数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(1): 14–17.
- HE Qilin, WANG Deming. Numerical simulation of spontaneous combustion process in goaf areas by fully-mechanized and caving roof coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(1): 14–17.
- [81] 贾建称, 贾茜, 桑向阳, 等. 我国煤矿地质保障体系建设 30 年: 回顾与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 86–106.
- JIA Jiancheng, JIA Qian, SANG Xiangyang, et al. Review and prospect of coal mine geological guarantee system in China during 30 years of construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 86–106.
- [82] 邓军, 李鑫, 王凯, 等. 矿井火灾智能监测预警技术近 20 年研究进展及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 154–177.
- DENG Jun, LI Xin, WANG Kai, et al. Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 154–177.