

“矿山典型灾害智能监测预警理论与技术”专题

文章编号: 1671-251X(2025)07-0001-14

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025040073

煤自燃监测预警技术研究进展及展望

邓军^{1,2}, 刘登祯^{1,2}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 陕西省煤火灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对煤自燃监测预警技术鲜有学者从井下不同场景实际工况与监测技术适配性的角度出发进行综述的问题, 对井下场景实际工况的适用监测技术展开了综述。梳理了煤矿典型场景(采空区、工作面-巷道)适用的煤自燃监测技术及研究现状; 分析了基于指标气体和机器学习的煤自燃预测技术原理及研究现状; 介绍了现有煤自燃阶段划分方式、分级预警方法, 并提出煤自燃预警技术智能化发展路径: 构建“矿井一站式、可视化、智能化”煤自燃智能预警平台, 实现煤自燃关键信息的实时连续可视化监测; 随着大模型与煤炭行业的深度结合, 煤自燃预警技术将向“多模态分析-精准预测-主动式防控”的智能化方向发展。指出了煤自燃监测预警技术的发展方向: ① 继续研究煤自燃多物理场耦合机制及其致灾机理, 为超前预警与主动防控提供理论支撑。② 基于煤自燃特性与井下实际工况, 重点突破新型监测技术的井下应用瓶颈, 为多参数动态监测网络构建提供技术支持。③ 深度结合机器学习、数字孪生等技术, 基于多模态预测模型搭建三维可视化智能预警平台。④ 深耕煤炭行业大模型, 以通用大模型为底座蒸馏出轻量型煤矿领域垂直大模型, 助力煤矿智能化建设。

关键词: 煤自燃监测; 煤自燃预警; 煤自燃灾害防治; 内因火灾; 煤自燃阶段; 多参数动态监测

中图分类号: TD712.5

文献标志码: A

Research progress and prospects of coal spontaneous combustion monitoring and early warning technology

DENG Jun^{1,2}, LIU Dengzhen^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory for Prevention and Control of Coal Fires in Shaanxi Province, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the lack of comprehensive reviews focusing on the suitability of coal spontaneous combustion monitoring and early warning technologies for various underground scenarios, this paper reviews monitoring technologies applicable under real underground conditions. It summarizes coal spontaneous combustion monitoring technologies suitable typical coal mine scenarios along with their current research status (goaf areas, working face-roadway). It analyzes the principles and current research on coal spontaneous combustion prediction technologies based on indicator gases and machine learning. It introduces existing coal spontaneous combustion stage division methods and hierarchical early warning strategies. An intelligent development path is proposed: constructing a “one-stop, visualized, and intelligent” early warning platform for coal spontaneous combustion in mines to realize real-time continuous visualization monitoring of key information. With the deep integration of large models and the coal industry, coal spontaneous combustion early warning

收稿日期: 2025-04-23; 修回日期: 2025-07-03; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U24A2092); 新疆维吾尔自治区重点研发计划资助项目(2022B03031-1, 2022B03025-2)。

作者简介: 邓军(1970—), 男, 四川大竹人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为煤火灾害防治, E-mail: Dengj518@xust.edu.cn。

引用格式: 邓军, 刘登祯. 煤自燃监测预警技术研究进展及展望[J]. 工矿自动化, 2025, 51(7): 1-14.

DENG Jun, LIU Dengzhen. Research progress and prospects of coal spontaneous combustion monitoring and early warning technology[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(7): 1-14.



扫码移动阅读

technology will advance toward an intelligent model of “multimodal analysis-accurate prediction-proactive prevention and control.” The paper points out the development directions of coal spontaneous combustion monitoring and early warning technology: ① continue studying the multi-physical field coupling mechanisms and disaster-causing mechanisms of coal spontaneous combustion to provide theoretical support for proactive early warning and control; ② focus on overcoming bottlenecks in applying new monitoring technologies underground based on coal spontaneous combustion characteristics and actual working conditions, providing technical support for constructing multiparameter dynamic monitoring networks; ③ deeply integrate machine learning, digital twins, and other technologies to build a 3D visualized intelligent early warning platform based on multimodal prediction models; ④ cultivate large models specialized for the coal mining industry, distilling lightweight vertical domain models based on general large models, thereby supporting the intelligent development of coal mines.

Key words: coal spontaneous combustion monitoring; coal spontaneous combustion early warning; coal spontaneous combustion disaster prevention and control; endogenous fire; coal spontaneous combustion stages; multiparameter dynamic monitoring

0 引言

煤炭是我国能源安全的“压舱石”^[1],我国能源结构呈现出“富煤、贫油、少气”的禀赋特征,以煤为主的能源结构短期内不会发生改变^[2-3]。煤炭在我国的能源体系中仍发挥着不可替代的作用,据国家统计局数据显示,我国 2024 年原煤产量 47.6 亿 t,煤炭消费量占能源消费总量的 53.2%。然而,随着煤炭资源的长期开采,目前煤炭生产面临着严峻的安全问题,各种安全事故频发,严重影响我国煤炭行业的发展。

截至目前,煤自燃始终是威胁煤炭安全生产的主要隐患之一(图 1)。矿井煤自燃是煤矿五大灾害之一,我国 90% 以上的煤层为自燃或易自燃,每年发生的煤自燃灾害超 4 000 起,因煤自燃引起的火灾占矿井火灾总数的 85%~90%。矿井火灾还易引发粉尘爆炸、瓦斯爆炸等严重的次生灾害^[4-7]。此外,煤自燃直接或间接地导致了大量煤炭资源损失,据统计,我国煤自燃燃烧面积为 $2\,998.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,每年因煤自燃导致的资源损失量达 $4\,146.94 \times 10^4 \text{ t}$,因此排放的 CO_2 达 $8\,728.28 \times 10^4 \text{ t}$,造成的损失超 200 亿元^[8-9]。因此,煤自燃防治对保障煤矿安全生产、助力碳中和有着十分重要的意义。

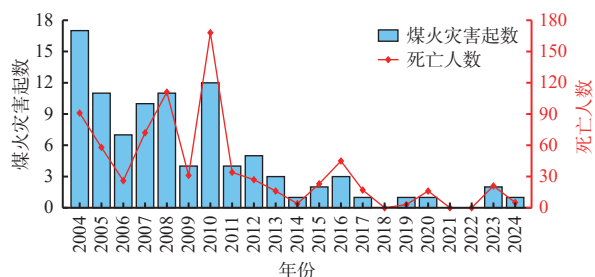


图 1 2004—2024 年我国造成人员死亡的煤火灾害数量及死亡人数

Fig. 1 Number of coal fire disasters and the number of fatalities in China from 2004 to 2024

《煤矿安全规程》指出,煤矿企业要落实“安全第一,预防为主,综合治理”的指导方针,必须建立煤自燃监测系统和煤自燃预警预报体系^[10]。本文就煤自燃监测与预测预警技术研究现状展开分析,并对其智能发展方向提出合理展望,以期为煤自燃灾害防治在监测预警技术体系构建、工程实践应用等方面提供参考。

1 煤自燃监测技术

当前,我国煤炭开采正在从综合机械化向以“智能化”为标志的第 4 次重大技术改变迈进^[11]。这对煤自燃监测预警技术提出了更高要求,即要做到对煤自燃全过程的实时连续可视化监测,实现对煤自燃孕育-发展-成灾全生命周期的精准把控。近年来,众多学者围绕煤自燃监测技术展开综述,针对其工作原理、工作方式及场景等进行分类论述^[12-14],具体见表 1。然而,鲜有学者从井下不同场景实际工况与监测技术适配性的角度出发进行综述。基于此,本文针对井下场景实际工况的适用监测技术展开综述,根据采空区、工作面、巷道等煤矿典型场景的煤自燃风险,优选监测技术并总结其研究现状及未来发展方向,以构建覆盖采空区-工作面-巷道的全尺寸、多维度感知网络。

1.1 采空区煤自燃监测

采空区煤自燃风险主要是由于漏风供氧通道的存在,使得采空区遗煤长期氧化蓄热;该通道同时会影响瓦斯的迁移与集聚过程,这又为煤自燃与瓦斯复合灾害的发生提供了必要条件,进一步加剧了采空区煤自燃的危险程度^[15]。煤自燃过程中会析出 CO 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等指标气体,其析出特征与煤自燃程度密切相关;同时会释放大量热量,环境温度升高。

表1 近3a相关综述文章论述视角
Table 1 Perspectives discussed in relevant review articles in the past three years

综述视角	分类方式	监测技术	优点	优化方向
煤自燃关键参数 ^[12]	气体监测	束管监测、吸收光谱、 气体传感器	直观体现不同监测技术工作原理	
	温度监测	光纤测温、红外热成像		
数据采集方式 ^[13]	接触式监测	光纤测温、热电偶	便于了解各类监测技术工作方式与场景	进一步加强监测技术与矿井实际环境结合的研究,针对各类监测技术与井下环境的适配性进行更深入探讨
	非接触式监测	束管监测、红外热成像		
监测设备安装位置 ^[14]	地下监测	钻探、束管监测、 光纤测温	直观体现各类监测技术的适用场景	
	地表监测	红外热成像、磁探法、 同位素测氧		

由于采空区环境相对封闭,产生的气体和热量不易消散,所以,基于气体和温度的监测技术是目前最常用的采空区煤自燃监测方法^[16]。

1.1.1 基于气体特征的煤自燃监测

1) 束管监测系统。束管监测通过工作面回采将束管埋入采空区,随之借助抽气泵将监测地点的空气抽送至分析仪器中进行分析,其工作原理如图2所示。

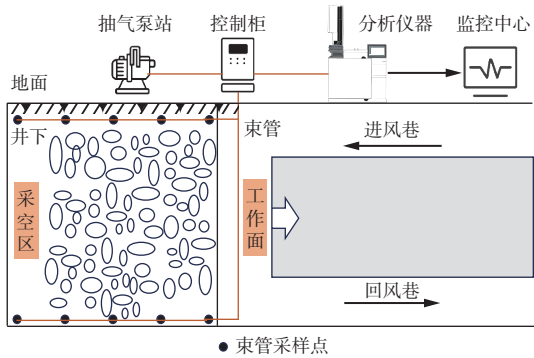


图2 束管监测系统工作原理
Fig. 2 Working principle of bundle tube monitoring system

束管监测可实现对测点气体的连续监测,可靠性高。然而,束管监测依靠管路抽送测点气体,因此存在一些缺陷:①束管易被采空区上覆岩层垮落砸断保护钢管导致漏气,抽检气体易被采空区气体污染。②管路过长导致监测数据在时间上存在滞后性^[17]。

当前使用的负压束管监测系统在发生泄漏后外界气体会进入管道内,导致检测气体失真,且负压系统输送动力较小,无法实现快速输送气体^[18]。基于此,陆伟等^[19]研发了一种正压束管监测系统,在发生泄漏时,束管从内向外泄漏气体,不会影响被检测气体组分浓度。此外,正压束管输送动力远大于负压抽气,输气速度快,滞后时间短^[20]。王栋等^[21]研制了一种输气与控制共用管线的高正压束管监测系统,并研究了输气管路的最优管径和最优输出压力。

随着采深增加,束管监测逐渐出现抽气距离长、

阻力大和束管维护困难等问题。此外,采空区内气体分布不均,测点收集的气体不能完全反映采空区真实的气体组分和浓度,无法做到对采空区气体信息的准确把握。因此,亟需针对现有缺陷进行系统性优化,以满足采空区煤自燃风险监测需求。

2) 可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser AbsOrption Spectroscopy, TDLAS)技术。TDLAS技术通过调节电流和温度可调谐激光器的波长和线宽,在目标气体的特征吸收光谱范围内进行扫描,基于吸收前后的光强变化特性,结合朗伯比尔定律实现对气体浓度的精确反演^[22]。

TDLAS技术在井下的应用主要是与束管结合组成激光束管监测系统。该系统借助束管抽送测点气体至气体吸收池中进行扫描,最终得到测点处气体组分浓度。其基本原理如图3所示^[23]。

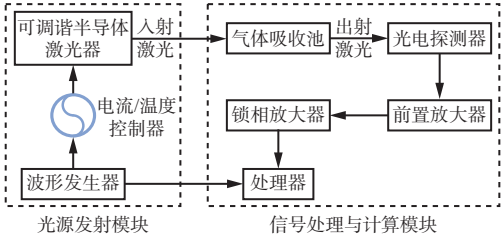


图3 TDLAS技术基本原理^[23]
Fig. 3 Basic principles of TDLAS technology^[23]

针对采空区环境,申晓良等^[24]在TDLAS技术基础上,结合物联网、光纤传输技术研发了气体监测系统,能够在千米外实时监测井下气体。针对多气体检测存在吸收谱线相互干扰的现象,王前进等^[25]基于支持向量回归模型,解决了CO和CH₄吸收谱线重叠干扰的问题。Yao Jiaqi等^[26]开发了一种基于频分复用和归一化谐波检测的TDLAS系统,通过为不同波长的激光器施加不同频率的调制信号,实现了多组分气体检测。

TDLAS技术在抗干扰算法及多组分同步检测等关键技术上的突破,有效克服了其在采空区复杂环

境下的气体监测瓶颈。该技术具有灵敏度高、精度高等优点,且不受背景气体干扰,可实现对多组分气体的实时动态监测,能够满足采空区煤自燃风险监测需求。

1.1.2 基于温度特征的煤自燃监测

1) 分布式光纤测温。目前井下应用最广泛的温度监测技术主要是光纤测温技术,其根据传感单元布局的不同可分为多点式、准分布式及分布式 3 类^[27]。相较于多点式和准分布式技术,分布式光纤测温(Distributed Temperature Sensing, DTS)技术采用全分布式架构,无需复用设备且抗电磁干扰性强,可实现长距离的连续监测,适用于井下复杂环境^[28]。

DTS 技术通过在煤体中埋入光纤实现全分布式测温。目前基于拉曼散射的分布式光纤测温技术发展较为成熟,其利用反斯托克斯光强与斯托克斯光强的比值计算环境温度,同时结合光时域技术可以实现对高温区域的定位^[29]。

对于 DTS 技术的井下应用,王伟峰等^[30-31]提出采用“弓”形布置感温光缆,有效避免了监测盲区,其布设方式如图 4 所示。曹文辉等^[32]基于 DTS 技术实现了对采空区高温区域的精准判断,弥补了束管监测无法对高温点精确定位的不足。余国峰^[33]采用束管+测温光纤交叉交叉法准确判断了采煤工作面



图 4 采空区分布式光纤“弓”形布设^[31]

Fig. 4 Distributed optical fiber “bow-shaped” layout in goaf^[31]

DTS 技术可实现对温度的 24 h 实时监测,具有成本低、耐高温的优点,其结果可以与束管监测结果相互印证,从而更精准地定位采空区隐蔽高温点位置。

2) 无线自组网测温。由于束管监测和光纤测温都需敷设管路,无法从根本上解决其易被采空区垮落矸石砸断的风险,所以结合无线传感器自组网技术与温度传感器的无线自组网测温技术成为近几年新的发展趋势。

无线自组网测温技术可以有效避免有线监测手段布线所带来的弊端,但在无线通信技术稳定性及检测范围方面存在不足。基于此,张辛亥等^[34]通过现场试验发现掩体是影响通信环境的重要因素,通过临近节点跳跃传输温度信息,有效扩展了监测范围。刘强^[35]基于 Zigbee 技术,结合 CAN 总线传输技术设计了采空区温度监测系统,通过无线有线相结

合的方法实现了井下数据远距离传输。针对无线 ZigBee 协议存在的传输速率低、距离短问题,邓慧芳等^[36]研发了一套基于 WaveMesh 协议的无线自组网测温系统。

在无线自组网测温系统的基础上,进一步与各类气体传感器结合,实现对采空区温度、气体浓度等多维参数的耦合监测,从而构建一套完整的采空区煤自燃无线监测系统,可从根本上避免有线传输可能出现的线路故障。但这对无线通信技术的通信质量、通信距离及传感器的井下应用都提出了更高要求,因此还需持续针对无线通信技术、传感器技术与煤矿监测领域的更深层次结合展开研究。

1.2 工作面-巷道煤自燃监测

工作面和巷道环境相对开放,且相互连通,其煤自燃风险主要是由于带式输送机在运行过程中易因摩擦生热引燃托辊内部积存的煤尘,继而引燃胶带导致火灾蔓延^[37]。此外,巷道高冒区煤体松散破碎且存在大量孔隙,由于巷道开放的通风环境,浮煤在供氧条件下逐渐氧化蓄热导致煤自燃。

工作面-巷道需重点针对带式输送机及巷道高冒区等地点进行监测。工作面-巷道采煤作业煤尘多且风流量大,当前煤矿工作面-巷道中常用的煤自燃监测方法(束管监测、光纤测温及人工巡检等)精度易受影响且存在较大误差。红外热成像、巡检机器人等新型监测技术开始逐渐应用于煤自燃监测领域。

1.2.1 红外热成像技术

红外热成像技术通过红外探测器将物体红外热辐射转换为电信号,再通过信号处理电路转换为数字形式的视频图像信号,最终在监视器上呈现出反映物体温度分布的红外图像^[38]。其工作原理如图 5 所示。

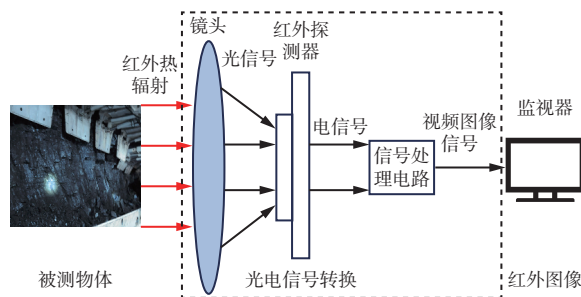


图 5 红外热成像技术基本原理

Fig. 5 Basic principles of infrared thermography technology

红外热成像技术具有非接触、监测距离远等优点,但其精度易受粉尘、水蒸气等影响,并且测量距离越远,误差越大,难以满足煤矿井下实际需求。基于此,孙继平等^[39]研究了矿井中煤尘、湿度、测温距

离等因素对红外测温精度的影响,提出了矿井红外热成像远距离精确测温方法。王晓强等^[40]模拟井下采空区遗煤蓄热环境开展实验,研究了红外热成像仪的有效探测距离。秦汝祥等^[41]建立了近巷煤体内部高温点反演算法,基于红外热像仪监测结果,可以确定煤体内部高温点深度和温度。于海成等^[42]基于红外热成像技术、火灾图像识别技术构建了火灾探测模型,可以有效识别火焰与烟雾,可满足不同区域对煤自燃的监测需求。

1.2.2 智能巡检机器人

现阶段,煤矿井下巡检方式仍以人工巡检为主,然而人工巡检存在工作强度大、效率低、人为失误无法避免等问题,且无法实时监测煤自燃高风险区域发展态势,存在巡检盲区。近年来随着机器人、井下通信技术的不断发展,机器人开始逐渐应用于

煤矿的巡检工作。

通过机器视觉及路径规划算法等技术,巡检机器人可以实现自主移动、智能避障等关键功能,从而实现对测点的准确定位。对于人工巡检无法到达的煤自燃高风险区域,巡检机器人通过本安防爆设计,能够深入危险区域进行有效监测,提高了煤自燃巡检覆盖率,确保对煤自燃信息的全域感知。通过配备热成像仪、气体传感器等便携式检测装置,巡检机器人可以实时采集测点数据,然后通过 5G, WiFi 等通信手段传回井上数据处理中心,解决了人工巡检存在时间滞后性的问题,最终实现对气体、温度等煤自燃关键信息的实时监测。

根据行走形式不同,煤矿巡检机器人可分为轨道式、履带式、轮式、飞行式、仿生式等类型^[43]。其适用场景及优缺点各不相同,详情见表 2。

表 2 煤矿巡检机器人性能及检测指标
Table 2 Performance and detection indexes of coal mine inspection robot

巡检机器人	适用场景	优点	缺点	检测指标
轨道式 ^[44]	工作面-巷道	结构简单,运行稳定,不受地形影响	灵活性差,存在巡检盲点	通过配备红外热成像仪、多气体传感器等装置,可实现实时监测煤温、气体浓度等功能
履带式 ^[45]	巷道	越障能力强,适应复杂地形	履带易磨损,维护成本高	
轮式 ^[46]	巷道	结构简单,运动灵活	对复杂地形适应能力差	
飞行式 ^[47]	巷道	机动灵活,巡检范围广	对飞行环境要求较高	
仿生式 ^[48]	各类场景	机动灵活,可适应复杂地形	结构复杂,研发成本高	

目前,煤矿巡检机器人的研究仍处于起步阶段,其在煤自燃监测领域的应用还未形成完整的技术体系。未来可针对煤自燃关键参数研发便携式监测装置,并构建机器人协同控制决策机制,最终达到逐渐代替人工巡检的目的。

1.2.3 声波测温技术

声波测温技术利用声波在不同介质中的传播特性来推断温度。在松散煤体中,声波的传播速度、飞渡时间等参数会受到温度的影响。通过准确构建声速与煤温之间的映射关系,建立松散煤体的声速-温度映射关系模型,可以实现对煤体内部三维温度场的反演和重构^[49]。邓军等^[50]发现声波在松散煤体中的最优传播频率为 600~900 Hz,并对声波在松散煤体中的传播路径进行了研究,为声波测温在松散煤体中的应用提供了理论依据。郭军等^[51]构建了松散煤体的声速-煤温映射关系模型,设计了松散煤体声学测温系统,验证了声速反演煤温的可行性,并进一步提出基于燃烧音和外加声波的“双源”复合声波煤温感知技术,为进一步实现煤矿隐蔽火源的精准探测提供了重要参考。

声学测温法具有非接触、精度高及稳定性强等优点,但目前其有关研究仍处于实验室场景下,缺乏

对井下高温高湿、强粉尘等复杂环境的工程化应用研究,未来可重点针对采空区、巷道高冒区等典型松散煤体区域的井下应用进行适应性设计,开发矿用声波测温装置,并进一步研发便携式声波测温装置,配合煤矿巡检机器人实现对采空区-巷道的全局监测。

煤自燃是多种因素共同作用的结果,单一监测指标难以实现对煤自燃危险程度的准确把握,并且可能导致误判。因此,需针对各场景实际工况与煤自燃风险优选监测技术,以此构建多参数融合智能感知网络,通过多源信息融合技术对各指标按重要程度赋予不同权重,之后进行融合分析。在此基础上,结合数字孪生等三维重构技术再现井下场景,可视化各场景温度场、气体组分浓度等信息,并根据数字模型反演结果智能调整监测策略。

2 煤自燃预警技术

2.1 煤自燃预测技术

2.1.1 基于指标气体的煤自燃预测技术

指标气体出现的时间顺序及浓度变化与煤温和氧化程度密切相关。通过研究气体析出与煤温的对应关系可分析煤自燃进程。目前常用的手段是通过程序升温实验获得析出气体浓度随煤体温度的变化

曲线,再选择合适的函数对其拟合,最终得到煤温与指标气体的数学模型^[52]。

为提高预测可靠性,不断有学者针对指标气体优选展开研究。郭军等^[53]基于 Logistic 拟合方法,采用 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$, $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{O}_2)$ (φ 为气体体积分数),结合 O_2 , CO , C_2H_4 等指标建立煤自然发火指标体系阈值曲线。疏义国等^[54]通过煤层自然发火试验及现场实践,建立了易自燃煤层的预测气体指标体系。武福生^[55]分析了不同氧浓度及干空气流量下指标气体的变化规律,得到了煤温分别在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下、 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上及 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时的气体指标。任万兴等^[52]选择 4 种函数对指标气体和煤温进行拟合,发现 Logistic 函数拟合效果最佳。

目前,基于指标气体的煤自燃预测方法发展最为成熟,可以据此实现对煤自燃阶段的精细划分。但是指标气体析出特征与煤自身性质及变质程度之间存在诸多关联,导致不同矿井煤样的气体析出规律存在显著差异,在实际应用中必须结合矿井实际构建合理的指标气体预测体系。

2.1.2 基于机器学习的煤自燃预测技术

煤矿井下每天产生的海量监测信息既包括气体浓度、温度、湿度等结构化时序数据,还包括视频图像、音频记录等非结构化模态数据及日志文件、设备运行信息等半结构化数据,多元异构数据的复杂

性对煤自燃预测技术提出了更高要求。近年来,不断有学者将机器学习引入煤自燃预测领域,借助大数据算法,对煤矿井下多源、海量的监测信息进行处理及融合分析^[56]。

机器学习具有强大的学习能力和数据处理能力。利用煤矿历史数据对机器学习模型进行训练,通过调整参数和算法对其预测性能进行优化,最终在煤矿现场数据输入时模型可自行预测煤自燃温度、阶段等关键信息。其基本原理如图 6 所示。

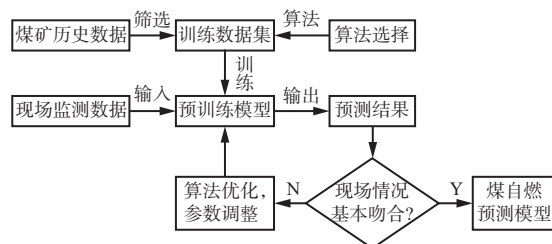


图 6 基于机器学习的煤自燃预测模型^[57]

Fig. 6 Machine learning-based model for coal spontaneous combustion prediction^[57]

应用于煤自燃预测的机器学习算法主要有随机森林、人工神经网络、粒子群优化算法、多层感知机、支持向量机、梯度提升等,可以对煤自然温度、煤自燃阶段、煤自燃发火最小周期、煤自燃危险性 & 煤自燃倾向性等进行预测。基于机器学习的煤自燃预测研究见表 3。

表 3 基于机器学习的煤自燃预测研究

Table 3 Machine learning-based research for coal spontaneous combustion prediction

预测功能	主要算法	研究结论
煤自燃温度预测	相关向量机	基于相关向量机的模型适用于复杂非线性问题的预测 ^[58]
	K近邻算法、随机森林等	构建了基于数据填补的煤自燃温度预测模型 ^[59]
煤自燃阶段预测	麻雀搜索算法、径向基神经网络	构建的模型对缓慢氧化和加速氧化阶段的预测准确性分别达99%和93% ^[60]
煤自然发火周期预测	多层感知机、随机森林	利用特征工程、网格搜索法、学习曲线法优化模型 ^[61]
	反向传播神经网络、粒子群优化算法	通过粒子群优化算法、遗传算法和蚁群算法优化反向传播神经网络,优选最准确的预测模型 ^[62]
煤自燃危险性预测	反向传播神经网络、粒子群优化算法	通过粒子群优化算法优化模型,解决反向传播神经网络易陷入局部最优解问题 ^[63]
煤自燃倾向性预测	支持向量机	构建了多煤种煤自燃危险性预测指标体系 ^[64]
	随机森林、Stacking堆叠等	发现基于Stacking堆叠的预测模型泛化能力最佳 ^[65]
	梯度提升、随机森林等	对比了5种不同机器学习算法的预测性能,发现基于随机森林和梯度提升的模型预测准确性极高 ^[66]

当前基于机器学习的煤自燃预测研究呈现出多算法协同优化及功能细分特点,以不断提高其预测性能。相比于传统的煤自燃预测技术,机器学习通过识别不同监测参数之间的关联性和规律性,可以准确预测煤自燃风险。然而,随着煤自燃预测场景复杂化与数据量的增加,机器学习方法逐渐暴露出可解释性差、泛化能力不足等问题,难以满足煤矿“智能化”转型背景下的煤自燃预测需求。在此背景下,深度学习作为机器学习的深化拓展,其在特征提取及多模态

数据处理等方面具有巨大优势,可突破传统机器学习瓶颈,进一步推动煤自燃预测技术的智能化发展。

2.2 煤自燃分级预警技术

煤自燃分级预警技术包含 2 层架构: ① 基于煤自燃氧化、自燃特性,对煤自燃阶段进行精细划分。② 依据煤自燃各阶段特征及危险程度确定煤自燃分级预警方法。

2.2.1 煤自燃阶段划分

为实现对煤自燃过程的精准判定,国内外学者

针对煤自燃阶段精细划分展开研究。现阶段,煤自燃过程的划分方式主要有三阶段、四阶段、五阶段和七阶段等^[67-70],各方式的具体特征及划分依据见表4。

表4 煤自燃阶段精细划分
Table 4 Detailed classification for coal spontaneous combustion stages

划分方式	阶段划分	温度/℃	阶段特征	划分依据
三阶段 ^[67]	缓慢氧化期	<90	耗氧量与CO产生量微乎其微	$\Delta C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ 比率随温度的变化特征(ΔC 为气体体积分数增量)
	加速氧化期	90~140	$\Delta C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ 比率随温度升高稳定上升	
	剧烈氧化期	>140	$\Delta C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ 比率快速上升	
四阶段 ^[68]	潜伏期	25~84	煤体温度无明显变化	温度变化趋势,煤与氧气反应程度
	缓慢升温期	84~110	开始出现C ₂ H ₄	
	加速升温期	110~338	煤体加速升温,出现C ₂ H ₂	
	燃烧期	>338	煤燃烧	
五阶段 ^[69]	潜伏期	55~70	CO, CH ₄ 出现并缓慢增加	水分,氧气浓度变化
	蓄热期	70~90	外部水蒸发	
	蒸发期	90~105	外部水几乎完全蒸发,内部水开始蒸发	
	活跃期	105~170	CO, CH ₄ 浓度迅速增加	
	缺氧期	>170	氧气体积分数低于5%时,煤可能发生无焰阴燃	
七阶段 ^[70]	潜伏期	<30	CO浓度较平稳	指标气体出现规律,多指标气体比值
	复合期	30~50	CO, CH ₄ 浓度持续升高	
	自热期	50~70	CO浓度持续升高,出现C ₂ H ₆	
	临界期	70~100	开始出现C ₂ H ₄	
	热解期	100~150	O ₂ 浓度急剧下降	
	裂变期	150~210	CO, CH ₄ 浓度急剧增加	
	燃烧期	>210	出现明火	

随着对煤自燃特性研究的不断深入,煤自燃阶段划分依据逐渐由单一指标判断转向多因素多指标综合分析,研究整体上呈精细化发展趋势。这为精准认知与防控煤自燃提供了多维度理论支撑,也为其精准防控提供了更为可靠的依据。

采空区的复杂环境致使遗煤可能会经历二次氧化、长期浸水等特殊情况,煤样经特殊处理后其氧化特性会发生改变,如果使用正常煤样的划分标准可能会导致误报,因此研究特殊处理后煤样的自燃阶段特征对煤自燃防治有重要意义。肖旻等^[71]针对二次氧化煤在不同温度下的自燃特性变化规律进行了研究,可为采空区遗煤二次氧化后的自燃过程精细划分提供参考。葛俊岭等^[72]、朱建国等^[73]针对浸水煤的临界温度、指标气体析出规律及不同含水率条件下煤样的氧化规律等方面进行了研究。

2.2.2 煤自燃分级预警方法

在对煤自燃阶段进行精细划分的基础上,根据各阶段危险程度确定相应预警等级,根据各阶段特征制定应对措施,从而构建完整的煤自燃分级预警方法^[74],具体见表5。

Wen Hu等^[75]研究了漏风封堵条件下煤自燃多指标分级预警方法,确定了“安全、注意、预警、危

险”4个预警等级。翟小伟等^[76]研究了漏风条件下采空区煤自燃分级预警体系,确定了“灰、蓝、黄、橙、红”5个预警等级。Wang Caiping等^[77]根据气体指标和煤温的变化规律,将煤自燃过程划分为4个阶段,并确定了“预警初值、蓝、黄、橙、红、黑”6个预警等级。Kong Biao等^[78]建立了基于正压束管的煤自燃分级预警系统,将煤自燃过程划分为“安全、灰、蓝、黄、橙、红、黑”7个预警等级。

2.3 煤自燃预警技术智能化发展路径

2.3.1 煤自燃智能预警平台

构建“矿井一站式、可视化、智能化”煤自燃智能预警平台,对实现煤自燃关键信息的实时连续可视化监测具有重要意义^[79]。在煤自燃监测预测技术基础上,结合矿井三维数字模型,构建煤自燃风险可视化“一张图”,通过该平台将各测点数据和预测结果等关键信息以三维点云形式呈现在矿井三维数字模型中。当灾害发生时,平台不仅能快速精准定位数据异常点,可视化灾害发展区域,还可基于煤自燃发展趋势和煤自燃分级预警方法智能预警,将灾害信息、避灾路线以短信、语音播报等形式告知井下人员。可通过实际应用反馈持续优化平台架构和算法,减少误报漏报现象,最终实现对煤自燃周期全过

表 5 煤自燃分级预警

Table 5 Hierarchical early warning for coal spontaneous combustion

煤自燃阶段	预警等级	温度/℃	阶段特征	应对措施
潜伏阶段	安全	<30	$\varphi(\text{CO})$ 较平稳	加强监测
复合阶段	灰色	30~50	$\varphi(\text{CO})$ 持续升高	
自热阶段	蓝色	50~70	出现 C_2H_6	注氮隔氧降温
临界阶段	黄色	70~90	出现 C_2H_4 , $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 极大	
热分解阶段	橙色	90~120	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 开始上升	多种防火措施协同防治
裂变阶段	红色	120~210	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 极小	
燃烧阶段	黑色	>210	出现明火烟火	综合协同灭火,做好火区封闭准备工作,防止事故扩大

程的智能监测预警。

煤自燃智能预警平台由智能感知层、数据传输层、分析决策层 3 个部分组成,其基本架构如图 7 所示。智能感知层针对煤矿井下 3 种典型场景存在的煤自燃风险,优选监测技术,结合多源信息融合监测技术,实现对煤自燃关键信息的智能感知。数据传输层通过 5G、WiFi、以太环网等信号传输手段,将井下多模态数据传回数据处理中心。分析决策层对煤自燃阶段及发展趋势进行预测,根据煤自燃分级预警方法,在预测值达到报警阈值时智能启动应急机制,同时持续采集现场数据,可视化展示煤自燃危险区域等灾害信息。

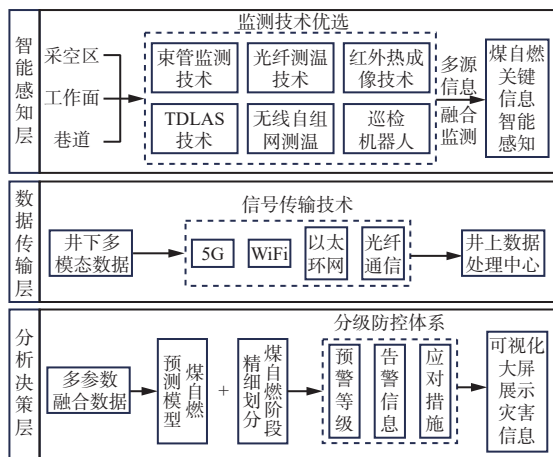


图 7 煤自燃智能预警平台

Fig. 7 Intelligent early warning platform for coal spontaneous combustion

2.3.2 大模型驱动煤自燃智能预警

近年来,人工智能大模型不断发展,其强大的多模态数据处理能力和优异的泛化能力为煤自燃预警技术的智能化发展提供了新思路,大模型通过多模态融合和自监督学习等关键技术,可量化各致灾因素的影响权重,更准确地预测煤自燃灾害发展趋势。在此基础上,大模型可根据煤自燃危险等级自动搜寻专家知识库,智能生成通风优化、注氮注浆等可行性

防控建议,并联动控制井下设备实现智能预测与自适应决策功能,是支持煤矿智能化建设的有力工具。

2022 年 8 月,科技部印发《关于支持建设新一代人工智能示范应用场景的通知》,明确将智能矿山列为首批 10 个优先支持的人工智能示范应用场景之一,为煤矿大模型的发展提供了政策支持。同时,以 ChatGPT, Deepseek, Grok 等为代表的通用人工智能大模型不断迭代升级,其强大的语言处理能力和逻辑推理能力为煤矿多模态数据处理、复杂场景建模奠定了技术基础,加速了煤矿大模型从理论构建到工程落地的转化过程。

目前,不少煤矿企业已初步探索大模型在煤矿中的落地应用^[80-81],初步涉及煤矿智能巡检、智能预警、智能决策等方面,如图 8 所示。

随着大模型与煤炭行业的深度结合,煤自燃预警技术将持续向“多模态分析-精准预测-主动式防控”的智能化方向发展,为煤炭行业高质量、智能化发展提供安全保障。

3 展望

1) 持续研究煤自燃多物理场耦合机制及其致灾机理。当前煤自燃多场耦合机制及演化规律尚不明晰,缺乏统一的理论框架,导致煤自燃预测模型普适性不足。此外,煤自燃与各类煤矿灾害之间的耦合致灾效应尚未厘清。因此,还须继续研究煤自燃及多灾种耦合致灾机理,同时通过矿井三维数字孪生模型动态模拟煤自燃时空演化过程,形成“致灾机理研究-数字模型验证”的研究框架,以构建煤自燃与多灾种耦合灾害的风险评估体系,为超前预警与主动防控提供理论支撑。

2) 构建“多元化监测+智能化协同优化”的双重防控体系。在深入研究煤自燃机理基础上,重点突破机器人巡检、声学测温等新型监测技术井下应用瓶颈。在此基础上,通过基于场景化的技术优选策

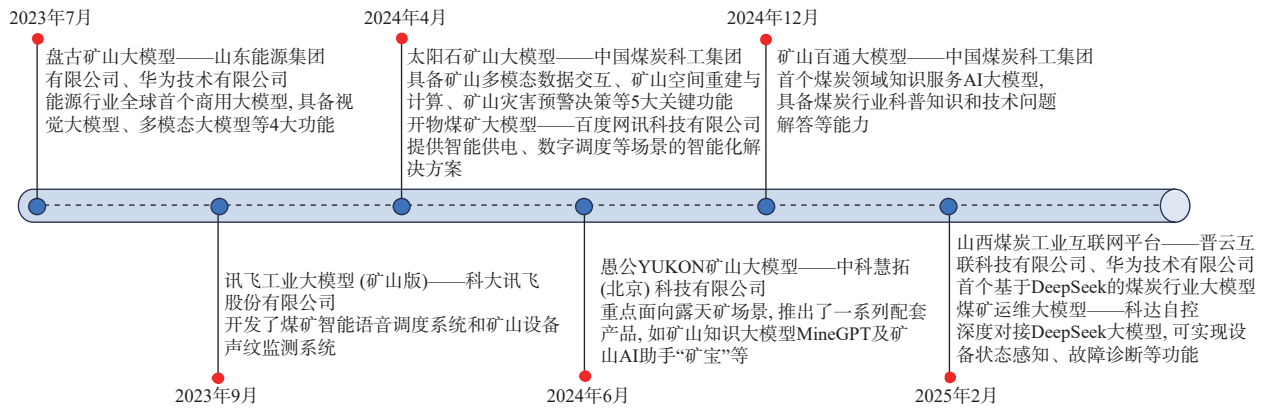


图8 煤矿行业现有大模型

Fig. 8 The existing large models in the coal mining industry

略动态构建最优监测网络,即根据煤矿井下采空区、工作面、巷道的实际工况及其存在的煤自燃风险优选监测技术,避免技术堆砌导致数据冗余,提高监测效率。进一步地,构建“监测-预警-反馈迭代”的闭环优化机制,对比预警结果与实际情况间的误差,调整监测节点、监测间距等参数,以达到监测策略最优化。以此实现监测技术多元化,监测过程智能化,最终达到对煤自燃全过程的智能监测。

3) 构建“多模态预测模型+可视化智能告警”的三维可视化智能预警平台。首先,构建煤矿行业级多模态数据库,以真实矿井环境的煤自燃“孕育-发展-致灾”的全过程数据训练模型。然后,在矿井三维数字孪生模型基础上,打造矿井全区域煤自燃风险可视化“一张图”,可视化各测点的气体浓度、温度等监测数据及煤自燃时空演化区域等预测信息。最后,嵌入自适应告警机制,当监测值超过阈值时,平台自动触发应急响应机制。

4) 深耕煤矿行业大模型,以大模型驱动煤自燃预警技术智能化发展。在理论创新层面,持续优化大模型底层架构,突破矿山行业多模态数据融合难点。在训练优化层面,以通用大模型为底座蒸馏出轻量型煤矿领域垂直大模型,通过煤矿行业级多模态数据库进行训练,助力煤矿智能化建设。在应用迭代层面,形成“监测-分析-决策-验证”的闭环优化机制,结合真实环境与预测值误差优化模型。

参考文献(References):

[1] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884-1898.

[2] 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 Qingmin, 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.

[3] 邓军,卢俊辉,王双明,等.富油煤可控氧化自燃的原位热解开采理论与技术构想[J/OL].煤炭学报:1-16 [2025-03-30].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1504>.
DENG Jun, LU Junhui, WANG Shuangming, et al. In-situ pyrolysis mining theory and technical conception of controllable and spontaneous combustion of tar-rich coal[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-16 [2025-03-30]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1504>.

[4] 孙继平,钱晓红.2004—2015年全国煤矿事故分析[J].工矿自动化,2016,42(11):1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11): 1-5.

[5] 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.

[6] QU Gaoyang, DENG Jun, REN Shuaijing, et al. Effect of oxygen deficient conditions on oxidative spontaneous combustion characteristics of raw coal and water-immersed air-dried bituminous coal[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 196. DOI: [10.1016/J.PSEP.2025.106859](https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2025.106859).

[7] 邓军,张敏,易欣,等.煤矿采空区微生物驯化及抑制煤自燃特性[J].煤炭学报,2025,50(1):379-391.
DENG Jun, ZHANG Min, YI Xin, et al. Microbial acclimatization and inhibition of coal spontaneous combustion in coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 379-391.

- [8] 张渝. 煤自燃的微观理化特性和宏观特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
ZHANG Yu. Study on micro-physical and chemical characteristics and macro-characteristics of coal spontaneous combustion[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2019.
- [9] 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展望[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.
- [10] 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
National Mine Safety Administration. Safety regulations in coal mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2016.
- [11] 张林, 王国法, 刘治国, 等. 煤矿智能化建设市场现状及发展趋势研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 29-44.
ZHANG Lin, WANG Guofa, LIU Zhiguo, et al. Research of the present situation and development trend of intelligent coal mine construction market[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 29-44.
- [12] 易欣, 胡震, 王伟峰, 等. 煤自然发火智能监测与早期预警关键技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 31-37.
YI Xin, HU Zhen, WANG Weifeng, et al. Key technologies for intelligent monitoring and early warning of coal spontaneous combustion[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 31-37.
- [13] 郭军, 咎若怡, 文虎, 等. 基于双源复合声波的煤温感知技术展望[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 83-90.
GUO Jun, ZAN Ruoyi, WEN Hu, et al. Perspectives on a new technology for coal temperature sensing based on dual-source composite acoustic waves[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(22): 83-90.
- [14] 邓军, 张琦, 陈炜乐, 等. 矿井煤自燃灾害监测预警技术及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 99-110.
DENG Jun, ZHANG Qi, CNEN Weile, et al. Coal spontaneous combustion disaster monitoring and early warning technologies and development trend for coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(3): 99-110.
- [15] 朱兴攀, 王洋, 任晓伟, 等. 不同季节条件下浅埋煤层采空区地表垂直漏风规律研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(10): 104-109.
ZHU Xingpan, WANG Yang, REN Xiaowei, et al. Research on vertical air leakage law of surface in goaf of shallow coal seams under different seasonal conditions[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(10): 104-109.
- [16] 李夏, 崔竟成. 煤矿井下外因火灾智能防控系统设计[J]. 工矿自动化, 2024, 50(增刊 1): 100-103.
LI Xia, CUI Jingcheng. Design of intelligent fire prevention and control system outside underground coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(S1): 100-103.
- [17] 李东发, 臧燕杰, 师吉林. 矿井火灾智能预警系统[J]. 工矿自动化, 2022, 48(增刊 1): 112-115, 120.
LI Dongfa, ZANG Yanjie, SHI Jilin. Intelligent mine fire early warning system[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(S1): 112-115, 120.
- [18] 王泽瑶, 白光星, 张琦, 等. 基于微色谱技术的煤矿自燃火灾智能监测系统应用[J]. 智能矿山, 2024, 5(2): 84-88.
WANG Zeyao, BAI Guangxing, ZHANG Qi, et al. Application of intelligent monitoring system for spontaneous combustion fire in coal mine based on microchromatography technology[J]. Journal of Intelligent Mine, 2024, 5(2): 84-88.
- [19] 陆伟, 李金亮, 王开胜, 等. 煤自燃预测预报的正压束管监测方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 77-80.
LU Wei, LI Jinliang, WANG Kaisheng, et al. Study on monitoring and measuring method of positive pressure bundle tube for prediction and forecast of coal spontaneous combustion[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 77-80.
- [20] 王栋, 陆伟, 李金亮, 等. 预报矿井煤自燃火灾的正压束管监测系统关键技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 57-60.
WANG Dong, LU Wei, LI Jinliang, et al. Study on key technology of positive pressure bundle tube monitoring system for predicting coal spontaneous combustion in mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 57-60.
- [21] 王栋, 陆伟, 李金亮, 等. 煤矿输气与控制共用管线的高正压束管监测系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 141-144.
WANG Dong, LU Wei, LI Jinliang, et al. Study on high positive pressure beam tube monitoring system of sharing pipeline for gas transmission and pump control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 141-144.
- [22] LIU Yahui, LIU Xu, ZHANG Sheng, et al. Research on multi-point measurement system of mine gas based on TDLA[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2704(1). DOI: [10.1088/1742-6596/2704/1/012033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2704/1/012033).
- [23] 马砺, 范新丽, 张朔, 等. 基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测与温度补偿方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11): 3632-3638.
MA Li, FAN Xinli, ZHANG Shuo, et al. Research on CH₄ gas detection and temperature correction based on TDLAS technology[J]. Spectroscopy and Spectral

- Analysis, 2021, 41(11): 3632-3638.
- [24] 申晓良, 胡澜夕, 高炎旭, 等. 基于 TDLAS 技术的井下多组分气体浓度监测(特邀)[J]. 光子学报, 2024, 53(10): 114-123.
- SHEN Xiaoliang, HU Lanxi, GAO Yanxu, et al. Monitoring of multi-component gas concentration in coal mine based on TDLAS technology(Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(10): 114-123.
- [25] 王前进, 孙鹏帅, 张志荣, 等. 混合气体测量中重叠吸收谱线交叉干扰的分离解析方法[J]. 物理学报, 2021, 70(14): 233-242.
- WANG Qianjin, SUN Pengshuai, ZHANG Zhirong, et al. Separation and analysis method of overlapping absorption spectra with cross interference in gas mixture measurement[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(14): 233-242.
- [26] YAO Jiaqi, YUAN Wenyang, GONG Ping, et al. Frequency division multiplexing and normalized harmonic method for WMS detection system in multi-gas detection[J]. Photonics, 2022, 9(11). DOI: [10.3390/PHOTONICS9110850](https://doi.org/10.3390/PHOTONICS9110850).
- [27] 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.
- [28] 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 1-5.
- SUN Jiping. New technologies and new equipments of coal mine monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(1): 1-5.
- [29] 刘晨, 谢军, 辛林. 煤自燃预测预报理论及技术研究综述[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 92-95, 99.
- LIU Chen, XIE Jun, XIN Lin. Review of theory and technology research on prediction of coal spontaneous combustion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(3): 92-95, 99.
- [30] 王伟峰, 邓军, 侯媛彬, 等. 采空区煤自燃分布式光纤温度监测预警技术的研究与应用[J]. 矿山机械, 2017, 45(2): 55-60.
- WANG Weifeng, DENG Jun, HOU Yuanbin, et al. Research and application of distributed optical fiber temperature monitoring and pre-warning technology for spontaneous combustion of coal in goaf[J]. Mining & Processing Equipment, 2017, 45(2): 55-60.
- [31] 张铎, 王帅豪, 文虎, 等. 采空区遗煤自燃隐蔽火源位置探查现状及新技术展望[J]. 煤矿安全, 2024, 55(11): 108-119.
- ZHANG Duo, WANG Shuaihao, WEN Hu, et al. Current situation and new technology prospects of hidden fire source location detection of residual coal spontaneous combustion in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(11): 108-119.
- [32] 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.
- [33] 余国峰. 基于十字交叉法判断采空区自燃异常点技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(增刊 1): 128-130.
- YU Guofeng. Abnormal spontaneous combustion point in gob area determination technology based on crossroads method[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 128-130.
- [34] 张辛亥, 刘强, 郑学召, 等. 基于 ZigBee 的采空区无线自组网测温系统分析[J]. 煤炭工程, 2012(9): 122-124.
- ZHANG Xinhai, LIU Qiang, ZHENG Xuezhao, et al. Analysis of wireless ad hoc network temperature measurement system in goaf based on ZigBee[J]. Coal Engineering, 2012, 44(9): 122-124.
- [35] 刘强. 基于 ZigBee 的煤矿采空区无线自组网温度监测系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- LIU Qiang. Research of wireless ad-hoc temperature measurement system used in goaf based on ZigBee[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [36] 邓慧芳, 谢锐, 孙传猛, 等. 高可靠性煤矿井下火源无线预警监测系统[J]. 中国测试, 2018, 44(6): 83-86, 94.
- DENG Huifang, XIE Rui, SUN Chuanmeng, et al. Wireless high reliability fire source monitor system of underground coal mine[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(6): 83-86, 94.
- [37] 梁运涛, 张鹏成, 孙勇, 等. 带式输送机回程托辊卡死故障摩擦升温实验研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 95-103.
- LIANG Yuntao, ZHANG Pengcheng, SUN Yong, et al. Experimental study on frictional heating due to return idler seizure failure in belt conveyors[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 95-103.
- [38] 郑学召, 贾勇骁, 郭军, 等. 煤田火灾监测技术研究现状及展望[J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 6-10, 61.
- ZHENG Xuezhao, JIA Yongxiao, GUO Jun, et al. Research status and prospect of coalfield fire monitoring technologies[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(5): 6-10, 61.
- [39] 孙继平, 范伟强. 矿井红外热成像远距离测温误差分析与精确测温方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1709-1722.
- SUN Jiping, FAN Weiqiang. Error analysis and accurate

- temperature measurement method of infrared thermal imaging long-distance temperature measurement in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1709-1722.
- [40] 王晓强, 米万升, 杨永辰. 采空区遗煤自燃红外非接触探测距离研究[J]. 红外技术, 2024, 46(3): 354-361.
WANG Xiaoqiang, MI Wansheng, YANG Yongchen. Research on infrared effective detection distance for predicting spontaneous combustion of goaf residual coal based on non-contact mode[J]. Infrared Technology, 2024, 46(3): 354-361.
- [41] 秦汝祥, 陶远, 唐明云, 等. 近巷高温区域红外探测与反演[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊 1): 112-116.
QIN Ruxiang, TAO Yuan, TANG Mingyun, et al. Detecting and inversing high temperature area of near roadway with infrared thermal imaging[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 112-116.
- [42] 于海成, 田羽, 李庆健, 等. 基于红外图像和目标检测的露天矿火灾探测技术[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增刊 1): 212-218.
YU Haicheng, TIAN Yu, LI Qingjian, et al. Fire detection technology in open-pit mines based on infrared images and target detection[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 212-218.
- [43] 梁占泽. 矿用带式输送机巡检机器人驱动系统设计[J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 108-112.
LIANG Zhanze. Driving system design of inspection robot for mine belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(4): 108-112.
- [44] 方崇全. 煤矿带式输送机巡检机器人关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 263-270.
FANG Chongquan. Research on key technology of inspection robot for coal mine belt conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 263-270.
- [45] 赵军伟, 袁学旭, 李攀, 等. 煤矿巷道智能巡检机器人的研究与应用[J]. 中国煤炭, 2024, 50(11): 92-95.
ZHAO Junwei, YUAN Xuexu, LI Pan, et al. Research and application of intelligent inspection robots for coal mine roadways[J]. China Coal, 2024, 50(11): 92-95.
- [46] 杨瑞, 鲍久圣, 鲍周洋, 等. 煤矿主运大巷轮式巡检机器人摇臂式行走机构设计与试验研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 126-137.
YANG Rui, BAO Jiusheng, BAO Zhouyang, et al. Design and experimental research on the rocker arm walking mechanism of the wheeled inspection robot for the main transportation roadway of coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 126-137.
- [47] 梁艳, 马宏伟, 崔亚仲, 等. 煤矿四旋翼飞行机器人环境信息数据压缩算法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(6): 31-34.
LIANG Yan, MA Hongwei, CUI Yazhong, et al. Environmental information data compression algorithm for coal mine four-rotor flying robot[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 31-34.
- [48] 宋锐, 郑玉坤, 刘义祥, 等. 煤矿井下仿生机器人技术应用与前景分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2155-2169.
SONG Rui, ZHENG Yukun, LIU Yixiang, et al. Analysis on the application and prospect of coal mine bionic robotics[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2155-2169.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 郭军, 陈昌明, 金永飞, 等. 松散煤体准多孔介质声速煤-温映射关系模型[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3510-3521.
GUO Jun, CHEN Changming, JIN Yongfei, et al. Mapping model of sound velocity and coal temperature for quasi-porous media in loose coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3510-3521.
- [52] 任万兴, 郭庆, 石晶泰, 等. 基于标志气体统计学特征的煤自燃预警指标构建[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1747-1758.
REN Wanxing, GUO Qing, SHI Jingtai, et al. Construction of early warning indicators for coal spontaneous combustion based on statistical characteristics of index gases[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1747-1758.
- [53] 郭军, 金彦, 王帆, 等. 基于 Logistic 回归分析的煤自燃多级预警方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 88-93.
GUO Jun, JIN Yan, WANG Fan, et al. Research on multi-level warning method of coal spontaneous combustion based on Logistic regression analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 88-93.
- [54] 疏义国, 赵庆伟, 郁亚楠. 易自燃煤层预测预报气体指标体系研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 229-234.
SHU Yiguo, ZHAO Qingwei, YU Ya'nan. Research on prediction and forecast indicators system of easy spontaneous combustion coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 229-234.
- [55] 武福生. 预测煤自燃的复合气体指标优选实验研究

- [J]. 工矿自动化, 2018, 44(7): 61-65.
- WU Fusheng. Experimental study on composite gas indexes optimization for coal spontaneous combustion prediction[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(7): 61-65.
- [56] 邓军, 杨成, 任立峰, 等. 基于机器学习的煤自燃预测研究进展及展望[J/OL]. 煤炭学报: 1-22[2025-04-12]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1369>.
- DENG Jun, YANG Cheng, REN Lifeng, et al. A review on coal spontaneous combustion prediction based on machine learning[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-22[2025-04-12]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1369>.
- [57] 王玉怀, 胡硕鹏, 朱永兴, 等. 机器学习在煤自燃预测预报中的应用现状及展望[J]. 中国煤炭, 2024, 50(10): 98-103.
- WANG Yuhuai, HU Shuopeng, ZHU Yongxing, et al. Application status and prospect of machine learning in coal spontaneous combustion prediction and early warning[J]. China Coal, 2024, 50(10): 98-103.
- [58] 刘宝, 穆坤, 叶飞, 等. 基于相关向量机的煤自燃预测方法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 104-108.
- LIU Bao, MU Kun, YE Fei, et al. Prediction method of coal spontaneous combustion based on relevance vector machine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 104-108.
- [59] 翟小伟, 罗金雷, 张羽琛, 等. 基于数据填补的煤自燃温度预测模型[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 28-35, 98.
- ZHAI Xiaowei, LUO Jinlei, ZHANG Yuchen, et al. Prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on data filling[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 28-35, 98.
- [60] 高飞, 梁宁, 贾喆, 等. 基于 SSA-RBF 神经网络的煤自然发火预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 128-137.
- GAO Fei, LIANG Ning, JIA Zhe, et al. Prediction model of coal spontaneous combustion based on SSA-RBF neural network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 128-137.
- [61] 张利冬, 宋泽阳, 罗振敏, 等. 基于机器学习的煤自然发火期预测[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 118-124.
- ZHANG Lidong, SONG Zeyang, LUO Zhenmin, et al. Prediction of coal spontaneous combustion period based on machine learning[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 118-124.
- [62] XIAO Yang, CAO Yong, ZHONG Kaiqi, et al. Optimized neural network to predict the experimental minimum period of coal spontaneous combustion[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(19): 28070-28082.
- [63] 汪伟, 梁然, 祁云, 等. 基于 PSO-BPNN 的煤自燃危险性预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 127-132.
- WANG Wei, LIANG Ran, QI Yun, et al. Prediction model of coal spontaneous combustion risk based on PSO-BPNN[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 127-132.
- [64] 张天宇, 鲁义, 施式亮, 等. 基于支持向量机分类算法的多煤种煤自燃危险性预测[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(2): 11-17.
- ZHANG Tianyu, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Prediction on coal spontaneous combustion risk for multi-coal based on SVM[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2019, 34(2): 11-17.
- [65] 邹佩喆, 叶于欣, 梁晓瑜, 等. 基于机器学习的煤自燃倾向性预测比较分析[J/OL]. 重庆大学学报: 1-11[2025-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20240923.1046.002.html>.
- ZOU Peizhe, YE Yuxin, LIANG Xiaoyu, et al. A comparative analysis of coal spontaneous combustion tendency prediction based on machine learning[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-11[2025-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20240923.1046.002.html>.
- [66] SHUKLA U S, MISHRA D P, MISHRA A. Prediction of spontaneous combustion susceptibility of coal seams based on coal intrinsic properties using various machine learning tools[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(26): 69564-69579.
- [67] MA Li, ZOU Li, REN Lifeng, et al. Prediction indices and limiting parameters of coal spontaneous combustion in the Huainan mining area in China[J]. Fuel, 2020, 264. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116883.
- [68] LI Zongxiang, ZHANG Mingqian, YANG Zhibin, et al. Division of coal spontaneous combustion stages and selection of indicator gases[J]. PLoS One, 2022, 17(4). DOI: 10.1371/JOURNAL.PONE.0267479.
- [69] ZHU Hongqing, SHENG Kai, ZHANG Yilong, et al. The stage analysis and countermeasures of coal spontaneous combustion based on "five stages" division[J]. PLoS One, 2018, 13(8). DOI: 10.1371/journal.pone.0202724.
- [70] 郭军, 王凯旋, 金永飞, 等. 煤自燃进程精细划分方法及其智能监测预警——煤火精准防控技术变革[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增刊 1): 111-121.
- GUO Jun, WANG Kaixuan, JIN Yongfei, et al. Fine division method of coal spontaneous combustion process and its intelligent monitoring and early warning: Technological change in precise prevention and control of coal fires[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 111-121.
- [71] 肖旻, 叶星星, 刘昆华, 等. 二次氧化煤自燃过程关键官能团的转变规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊 2):

- 989-1000.
- XIAO Yang, YE Xingxing, LIU Kunhua, et al. Transformation law of key functional groups in the process of coal secondary oxidation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 989-1000.
- [72] 葛俊岭, 解树亮, 赵滨, 等. 浸水煤表面结构演化与自然发火指标实验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 21-30.
- GE Junling, XIE Shuliang, ZHAO Bin, et al. Experimental study on surface structure evolution and spontaneous combustion indexes of soaked coal[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2024, 43(3): 21-30.
- [73] 朱建国, 戴广龙, 唐明云, 等. 水浸长焰煤自燃预测预报指标气体试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(5): 89-94.
- ZHU Jianguo, DAI Guanglong, TANG Mingyun, et al. Experimental study on spontaneous combustion prediction index gas of water immersed long flame coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(5): 89-94.
- [74] 岳宁芳, 金彦, 孙明福, 等. 基于多指标气体的煤自燃进程分级预警研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(6): 2139-2146.
- YUE Ningfang, JIN Yan, SUN Mingfu, et al. Multi-staged warning system for controlling the coal spontaneous combustion based on the various index gases[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(6): 2139-2146.
- [75] WEN Hu, LIU Yin, GUO Jun, et al. A multi-index-classified early warning method for spontaneous combustion of coal under air leakage blocking[J]. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2021, 27(2): 208-226.
- [76] 翟小伟, 李心田, 侯钦元, 等. 漏风条件下采空区煤自燃分级预警方法研究及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(1): 161-169.
- ZHAI Xiaowei, LI Xintian, HOU Qinyuan, et al. Research and application of classification warning method for coal spontaneous combustion in goaf under air leakage[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(1): 161-169.
- [77] WANG Caiping, DU Yuxin, DENG Yin, et al. Study on spontaneous combustion characteristics and early warning of coal in a deep mine[J]. *Fire*, 2023, 6(10). DOI: [10.3390/FIRE6100396](https://doi.org/10.3390/FIRE6100396).
- [78] KONG Biao, NIU Siyu, CAO Huimin, et al. Study on the application of coal spontaneous combustion positive pressure beam tube classification monitoring and early warning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(30): 75735-75751.
- [79] 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.
- [80] 李伟. 全球首个矿山行业大模型在山东能源落地商用[J]. *智能矿山*, 2025, 6(2): 2-6.
- LI Wei. The world's first large-scale model of the mining industry has been put into commercial use in Shandong Energy[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2025, 6(2): 2-6.
- [81] 王海军. 矿山行业大模型建设路径探索与应用展望[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(11): 45-59.
- WANG Haijun. Construction exploration and application prospect of the large model in mining industry[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(11): 45-59.