



矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望

邓军 李鑫 王凯 王伟峰 闫军 汤宗情 康付如 任帅京

引用本文：

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. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023–2016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤自燃过程特性及防治技术研究进展

Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 66–99 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.01.005>

我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展与展望

Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9eaa144a-fb7d-4a67-8eb8-7f569d90f617>

气溶胶灭火技术防治采空区自燃火灾的应用潜力研究

Study on application potential of aerosol fire-extinguishing technology for prevention and control spontaneous combustion of coal in goaf
煤炭科学技术. 2018(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52b355c1-bbca-4a8b-bad3-aa8d31030842>

地音监测技术在煤矿冲击地压预警中的应用研究

Application research on rock sound monitoring technology in early warning of rock burst in coal mine
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 57–62 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c965dc74-3d6e-4c51-bf91-65e11aa7e4e2>

煤矿带式输送机火灾光纤传感检测技术研究

Technology research on optical fiber sensing detection for belt conveyor fire in coal mine
煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3c985764-301b-40cb-b4c9-7b7afe3f8f2d>

煤矿冲击地压综合监测预警平台研究及应用

Research and application of comprehensive monitoring and early warning platform for coal mine rock burst
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 32–41 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/59ed77e6-4e1d-4bc2-9470-8db5adffe463>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

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.

矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望

邓军^{1,2},李鑫^{1,2},王凯^{1,2},王伟峰^{1,2},闫军³,汤宗情^{1,2},康付如^{1,2},任帅京^{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 陕西省煤火灾防治重点实验室,陕西 西安 710054;

3. 新疆矿山安全服务保障中心,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要:为加强矿井火灾智能监测预警系统建设,提出了矿井火灾智能监测预警技术研究思路,从矿井火灾智能感知技术及装备、预测技术及模型、智能预警系统及平台3方面综述了矿井火灾智能监测预警技术研究进展。首先,总结了内外因火灾信息监测技术及装备,归纳了基于图像视频识别的识别流程,阐述了多源信息融合在火灾监测过程中的应用情况。其次,介绍了矿井火灾的预测技术及模型,包括支持向量机、人工神经网络、随机森林算法等机器学习算法。然后,阐述了矿井火灾预警系统及平台:在总结矿井煤自燃和外因火灾分级预警技术的基础上,介绍了矿井火灾预警系统平台的感知层、网络层、服务融合层以及应用层方面的进展内容;归纳了预警系统各层的内涵及应用框架;搭建了矿井火灾智能监测预警系统。最后,展望了我国矿井火灾智能监测预警技术的未来发展趋势,具体包括:在矿井火灾信息智能感知技术方面,提出加强传感技术及装备研发;在矿井火灾智能预测技术方面,提出加强隐蔽火源的位置探寻方法研究,构建火灾灾害透明化模型;在矿井火灾智能预警系统建设方面,提出将大数据融入智能判识,查明矿井火灾风险源及隐蔽火源位置的预报,实现特殊条件下煤自燃的预警。在矿井火灾智能判识与防控技术联动方面,提出利用大型语言模型在智能判识的基础上实现对矿井火灾的自适应防控。

关键词:煤自燃;监测技术;外因火灾;火源辨识;预警系统;矿井火灾;火灾监测

中图分类号:TD752 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2024)01-0154-24

Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years

DENG Jun^{1,2}, LI Xin^{1,2}, WANG Kai^{1,2}, WANG Weifeng^{1,2}, YAN Jun³, TANG Zongqing^{1,2},
KANG Furu^{1,2}, REN Shuaijing^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Coal Fire Disaster Prevention and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Xinjiang Mining Safety Service and Security Center, Urumqi 830063, China)

Abstract: In order to strengthen the construction of mine fire intelligent monitoring and early warning system, the research idea of mine fire intelligent monitoring and early warning technology, and summarizes the research progress of mine fire intelligent monitoring and early warning technology is put forward. The research progress from three aspects of mine fire intelligent perception technology and equipment, prediction technology and modeling, and intelligent early warning system and platform is summarized. First, the internal and external cause fire information monitoring technology and equipment are summarized, the recognition process based on image-video recognition is summarized, and the content of multi-source information fusion and its application in the fire monitoring process are described. Secondly, the prediction techniques and models for mine fires are introduced, including machine learning algorithms such as support vector machine, artificial neural network, and random forest algorithms. Then, the mine fire early warning system and platform are elaborated.

收稿日期:2023-12-28 责任编辑:宫在萍 DOI: 10.12438/cst.2023-2016

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074215, 52374232, 51974234);新疆自治区重点研发计划资助项目(2022B03025, 2022B03031);陕西省自然科学基础研究计划—杰出青年科学基金资助项目(2021JC-48)

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

On the basis of summarizing the graded early warning technology for spontaneous coal combustion and exogenous fires in mines, the progress of the mine fire early warning system platform in terms of perception layer, network layer, service fusion layer and application layer is introduced. The connotation of each layer of the early warning system and the application framework are summarized, and the intelligent monitoring and early warning system for fires in mines is constructed. Finally, the future development trend of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in China is outlooked including following aspects. In terms of intelligent perception technology of mine fire information, it is proposed to strengthen the research and development of sensing technology and equipment. In terms of intelligent prediction technology for mine fires, it is proposed to strengthen the research on the location exploration method of hidden fire sources and construct a transparent model of fire disasters. In terms of the construction of an intelligent early warning system for mine fires, it is proposed to integrate big data into intelligent judgment, identify the risk sources of mine fire and forecast the sources' location of hidden fire, and realize the early warning of spontaneous coal combustion under special conditions. In terms of the linkage between the intelligent judgment and prevention and control technology for mine fires, it is proposed to utilize large-scale linguistic models to realize the self-adaptive prevention and control of mine fires on the basis of intelligent judgment.

Key words: spontaneous coal combustion; monitoring techniques; exogenous fires; fire source identification; early warning systems; mine fire; fire monitoring

0 引言

我国化石能源资源禀赋为缺油、少气、相对富煤^[1], 人均煤炭资源为世界平均值的 42.5%。由于非化石能源短时间内仍难以成为安全可靠的主体能源, 煤炭资源在我国能源结构中仍将长期占主体地位。随着我国将小矿逐渐关停, 矿井生产进入规模化, 开采强度加大, 各类事故频发。虽然我国百万吨死亡率逐年下降, 但是 2022 年仍高于美国、澳大利亚等世界主要产煤国家^[2], 几近是美国的 5 倍。

矿井火灾作为矿井 5 大灾害之一, 尤其是在我国 90% 以上都是自燃或者容易自燃煤层情况下应得到重点关注^[3]。煤矿火灾具有自燃、阴燃和复燃的特点, 火灾防治难度较大。另外, 随着开采规模的变大, 井下机电设备的数量和功率逐年提升, 因动力电缆引发的外因火灾日益增多^[4]。火灾一旦发生, 轻则烧毁煤炭资源、释放有毒有害气体污染环境、烧毁采煤与通风设备、冻结煤炭资源; 重则引发瓦斯、粉尘

爆炸或者是风流紊乱造成大量人员伤亡^[5]。据统计, 在国内外死亡 10 人以上的重大火灾事故中, 90% 以上是由于外因火灾造成的^[6]。国外对于在井下建立和发展可靠的监测设备和物联网技术仍存在薄弱环节^[7-8]。煤炭安全开采受到矿井火灾的严重威胁。

1 矿井智能火灾监测预警系统建设总体思路

近 70 年来, 我国煤炭行业经历了恢复与调整、异常波动、持续恶化、高波动、稳定下降等 5 个阶段(图 1), 年产量不断增加, 事故死亡率稳定下降, 国内煤矿智能化进展持续推进。2020 年 2 月, 国家发改委和国家能源局牵头出台了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[10], 给出了提高煤矿智能化建设水平的总体任务。2021 年 6 月又发布了《智能化煤矿建设指南(2021 年版)》^[11], 给出了生产煤矿智能化改造三步走方案, 最终要实现基于智能化综合管控平台的一体化智能协同管控, 要求实现对火灾的智能监测、预测和预警及联动控制。

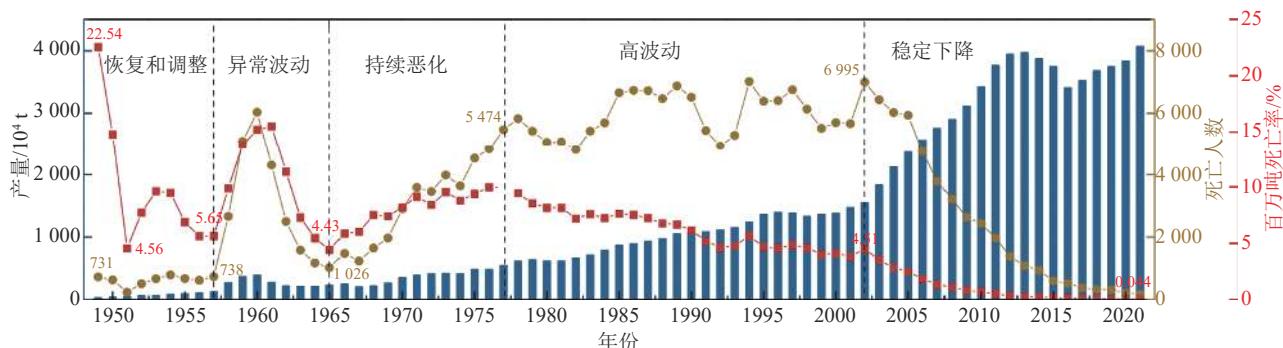


图 1 近 70 年中国每百万吨煤炭总产量、死亡人数和死亡率^[9]

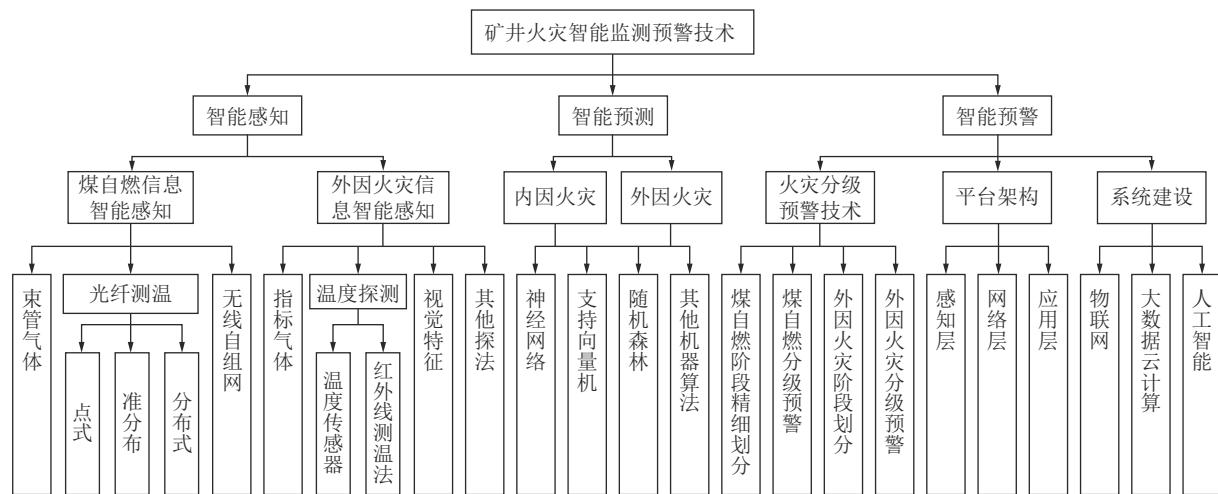
Fig.1 Total production, deaths and mortality rate per million tons of coal in China in the last 70 years^[9]

针对火灾精准智能监测预警,首先应研究火灾发生的条件,基于此开展火灾信息智能感知及相关预测模型的搭建,其次研究内外因火灾的燃烧特性,结合实际开采条件,建立多参量火灾预警指标体系,最后根据燃烧阶段划分阈值,进行分级预警,以此为基础构建矿井火灾智能预警系统。

当前,我国安全生产方针为“安全第一,预防为主,综合治理”,但监测预警技术存在检测范围大、盲区多、监测系统融合度低、数据同步难、火灾信息辨识与防控技术联动不到位等薄弱环节。因此,笔者将从矿井火灾信息智能感知技术及装备、矿井火灾

智能预测技术及模型、矿井火灾智能预警系统及平台3方面展开对矿井火灾智能监测预警技术的综述。

图2为矿井火灾智能监测监控技术研究框架,通过对煤自燃和外因火灾的参数状态进行智能感知;根据感知得到的信息结合神经网络、支持向量机等机器学习算法对火灾进行智能预测;基于火灾分级预警技术和平台架构,利用物联网、大数据、云计算、人工智能等方法完成智能预警系统和平台搭建。矿井火灾的智能感知、智能预测、智能预警协同共促共同组成了矿井智能监测预警技术。



2 火灾信息智能感知技术及装备

由我国近5年部分火灾发生事故统计表(表1)可以看出,引起矿井火灾的因素主要包括采空区内煤自燃、电焊等明火、电缆开关的超负荷、电火花及

电弧短路、违规爆破、机械摩擦等,一旦发生极其容易扩散蔓延,形成火风压扰乱通风网络并且产生大量有毒有害气体,容易导致工人烧伤、中毒和窒息,甚至于导致瓦斯、煤尘爆炸。

表1 近5年部分矿井火灾发生事故统计

Table 1 Statistics of some mine fire accidents in the past 5 years

日期	地点	火灾原因	火灾结果
2019-03-15	东升阳胜煤业有限公司	15203综采工作面上隅角堆积的瓦斯被引燃	3人被困
2019-05-24	龙成煤综合利用有限公司	809号传送带处的煤粉自燃引发火灾	2人死亡 6人受伤
2019-06-03	山西保利平山煤业股份有限公司	31016运输巷掘进工作面施工瓦斯抽采钻孔过程中,因干打眼引发钻孔内着火	9人受伤, 2人重伤
2019-11-19	山东能源肥城矿业梁宝寺煤矿	3306掘进工作面发生火灾	11人被困
2019-11-22	华宁县华盖山煤矿	掘进工作面违规采用气焊切割,乙炔泄漏并着火燃烧	8人受伤
2019-12-12	云南恩洪煤矿	工作面采空区发生火灾	8人受伤
2020-07-20	湖南高峰煤业团结煤矿	巷道式采煤造成局部瓦斯积聚,失爆的煤电钻短路产生火花,引燃瓦斯	1人死亡, 2人重伤
2020-09-27	重庆渝新能源松藻煤矿	输送带与煤混合燃烧产生一氧化碳超限	16人死亡, 42人受伤
2020-12-04	重庆吊水洞煤业公司	违规使用氧气/液化石油气切割,高温熔渣引燃吸水井内沉积油垢	23人死亡, 1人重伤
2021-01-19	贵州大方瑞丰煤矿	穿孔误穿采空区导致一氧化碳超限	3人死亡, 1人受伤
2022-02-07	宁夏煤业枣泉煤矿	采煤机割煤引发煤尘爆燃	1人死亡, 8人受伤

近年来, 针对于燃烧过程中出现的发光、放热、析出气体等特性, 国内外学者围绕矿井内外因火灾风险智能感知技术及装备进行了深入研究, 主要包括指标气体监测技术、温度测量监测技术、图像视频识别监测技术。其中, 对内因火灾主要通过束管监测、无线自组网测温和光纤测温方式进行监测。外因火灾通过分布式感温光纤、多参数传感器、图像识别技术等进行监测。

2.1 煤自燃智能感知技术及装备

煤氧复合过程中会析出多种标志性气体, 如 CO 、 CO_2 、 C_2H_4 等^[12]; 且会释放出热量, 温度升高, 因此, 煤自燃监测可以从指标气体和温度 2 方面展开。

2.1.1 束管监测指标气体

束管监测是煤矿为了获取采空区气体数据的运用最为广泛的方法, 其原理是利用工作面回采使得束管进入采空区, 随之可测得采空区内气体含量。采空区预埋束管位置示意如图 3 所示。

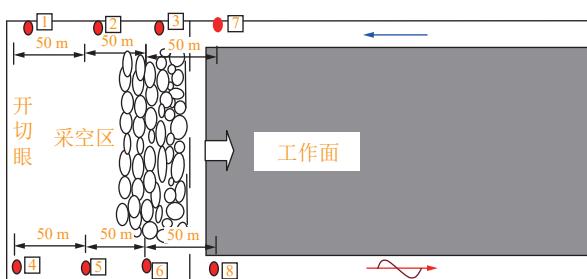


图 3 采空区预埋束管位置示意

Fig.3 Schematic of location of embedded beam tube in goaf area

在监测指标方面, 许多专家学者发现在火灾燃烧蔓延的进程中, 受分布位置、开采工艺的不同影响, 升温阶段生成的气体特性也是不一样的, 找到了煤自燃发展进程与指标气体对应关系, 以此来监测煤自燃的发展程度。煤自燃产生的主要气体为一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烯、乙烷等。其中最常用的指标气体为 CO , 其在煤自燃升温初期就已经产生, 一直伴随着煤自燃全过程。笔者^[13]应用程序升温方法, 提出了指标气体增长率分析法, 选取的指标气体为一氧化碳、乙烯和链烷比, 并通过计算各指标气体的增长率, 得出特征温度值和判断煤自燃的重要指标: $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 和火灾系数 R_2 、 R_3 。WANG 等^[14]采用格雷厄姆系数和灰色相关方法的积分推导了用于预警的主要气体指数 $100\Delta(\text{CO})/\Delta\text{O}_2$ 和辅助气体指数 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 C_2H_2 。易欣等^[15]发现煤自然发火温度与 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)/\varphi(\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ 以及 Graham 指数有明显关系。

当前束管监测系统有地面式和井下式 2 种^[16]。地面式利用气相色谱仪或者气相色谱仪叠加红外气体分析技术来对气体进行精准分析, 但是其存在线路布设长度长、维护难度大、故障率较高等问题; 井下式又可以分为 2 种, 传感器式和色谱仪型。传感器式目前在井下采用广泛, 但传感器易受井下高湿高粉尘的影响导致测量精度低, 且其存在量程的限制。结合色谱仪和井下测量分析的优点, 井下色谱仪束管检测系统具有分析时间短、不受量程限制等束管监测本质要求^[17]。

针对束管容易在采空区被砸断或者被挤压抽气困难的问题, 在钢管保护的基础上, 文献 [18—20] 研制了一种输气与控制共用管线的高正压束管监测系统, 解决了气体组分和浓度失正误差, 缩短了气体输送时间。姜龙^[21]使用可调谐半导体激光吸收光谱技术进行气体监测。利用光源波长的选定、时分复用技术等一系列关键技术, 实现了对多种气体的同时监测, 提高气体监测的灵敏度。

2.1.2 光纤测温

光纤传感器用光作为敏感信息的载体, 用光纤作为传递敏感信息的媒质。其较一般传感器具有抗电磁干扰、灵敏度高、重量轻、尺寸小、成本低, 适于在高温、腐蚀性等环境中使用的优点, 还具有本征相干能力强及在一根光纤上利用复用技术实现多点复用、多参数分布式区分测量的独特优势, 因此广泛应用于井下测温^[22]。图 4 为光纤传感测量系统。

$U = ct/(2n_{\text{eff}})$ 表示事件点与光脉冲注入段之间的距离, c 为真空中的光速, t 为时间, c/n_{eff} 为光在光纤中的传播速度。anti-Stokes 和 Stokes 是温敏特性不同的散射光信号。分别为拉曼 anti-Stokes 散射光信号以及拉曼 Stokes 散射光信号, 将其经光电探测模块放大后可转换为电信号。

煤自燃采空区光纤测温技术的原理同束管埋入

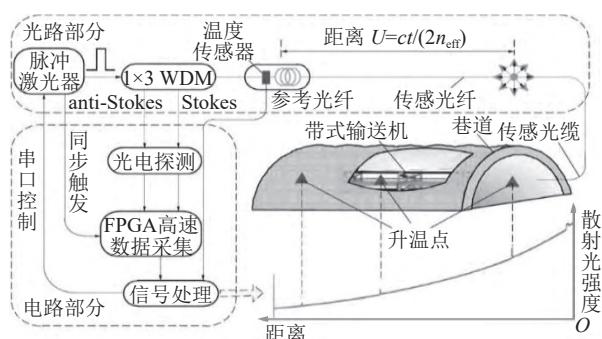


图 4 光纤传感测量系统^[23]

Fig.4 Optical fiber sensing measurement system^[23]

采空区类似,因其具有体积小且可以传输信号的优点,被应用到矿井火情监测系统当中,图5为工作面温度监测部署。对于温度的监测可分为2种:一种

是以光纤直接作为传感器或在其端头上涂抹感温材料,另一种是以光栅^[23]为基础的传感器。光纤传感器与以电为基础的传感器有本质区别。

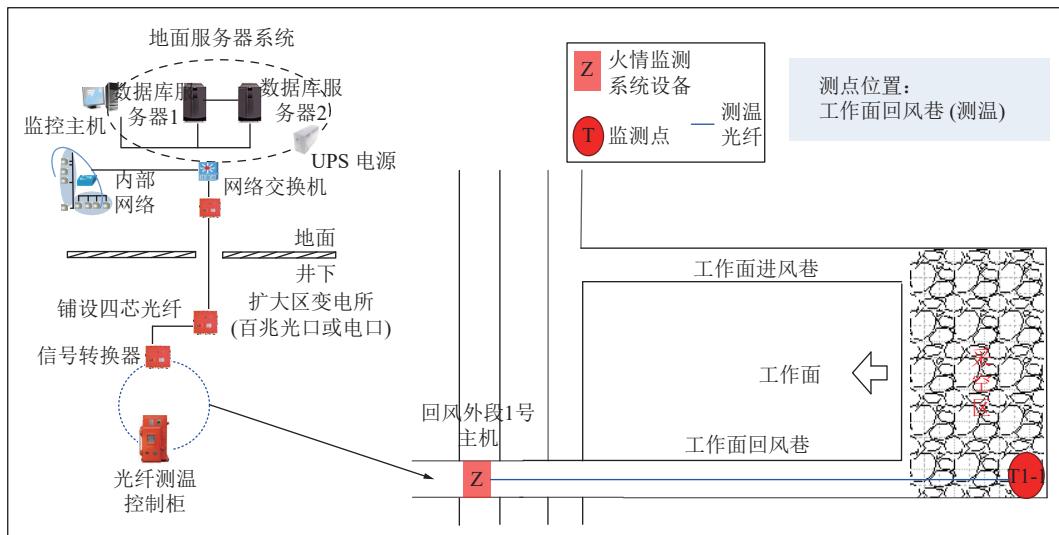


图5 工作面温度监测部署示意

Fig.5 Schematic of working face temperature monitoring deployment

光纤测温技术可以实现在一根光纤上串联多个传感单元,从而形成监测网络。根据传感单元布局设计的差异,可分为多点式、准分布式和分布式3大类。

1)点式光纤测温。按照光波调制方式,根据光波的强度、频率、波长、相位和偏振态等特性研制针对性的调制型光纤传感器。其也可分为光纤光栅(FBG)^[25]、热辐射光纤温度传感器、荧光式温度传感、光纤法布里-珀罗(F-P)型^[26]等。图6为FBG结构及其波长选择性。

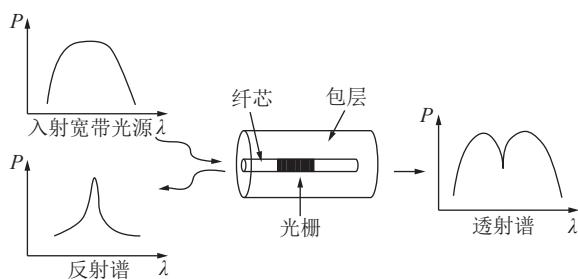


图6 FBG结构及波长选择性

Fig.6 FBG structure and wavelength selectivity

热辐射光纤温度传感器^[27]利用光纤内产生的热辐射来传感温度,它是以光纤纤芯中的热点本身所产生的黑体辐射现象为基础,如蓝宝石光纤温度传感器。荧光式温度传感^[28]将温敏荧光材料与光纤结合形成荧光光纤温度传感器,在光纤末端黏合少量荧光粉(荧光材料对温度具有敏感特性),通过激发光和荧光在自由空间传输,即可实现荧光无线测温,

特别适合监测平面温度场,具有空间分辨力高、响应快速的优点。其器件制作及解调方式都十分简单,其成本远低于光纤光栅温度传感器。其可分为荧光寿命法、荧光强度比法、荧光谱频移法等。

袁俊杰等^[29]总结了相位生成载波(PGC)技术中可能出现的伴生调幅、调制深度漂移和相位延迟引起信号解调失真的关键问题,并分析其原因。SEKINE^[30]开发了一种以高空间分辨率(沿光纤的最小间距为2.56 mm)测量温度的光纤测温方法,测量速度范围为0~7 m/s。

2)准分布式光纤测温。在一根光纤上串联多个光纤光栅传感器利用光纤光栅解调仪采用复用技术实现准分布式测量。即利用解调仪将不同种类的传感器相连,采用宽带光源和波长检测仪测量不同波长的光纤光栅的中心波长,从而实现单通道多点测量^[31]。因其受限于光源带宽以及单个FBG传感波长移动范围和相邻FBG反射光谱之间的相互影响,并不能广泛分布,导致空间分辨率受限,传感器间存在盲区,故称之为准分布式光纤传感技术。图7为准分布式光纤传感技术示意。S₁、S₂、…、S_n为不同类型的传感器。将不同类型传感器接入解调仪实现单通道多点测量。

光纤法布里-珀罗(F-P)型^[32]将待测FBG连接至光纤光栅解调仪上,通过光谱分析测量加载前后的FBG中心波长的平移,平移量可以通过传递系数

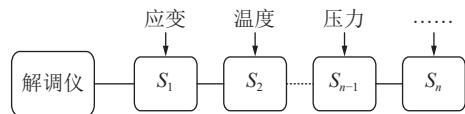


图 7 准分布式光纤传感技术

Fig.7 Quasi-distributed fiber optic sensing technology

转换为被测物理量, 进而实现对 FBG 位置处的应变、温度或压力的测量。

3) 分布式光纤测温。国外对分布式光纤测温技术的研究始于 20 世纪 80 年代, 主要集中在英国、日本和美国, 英国 York 公司是世界上首家开发光纤分布式测温系统并使之商品化的公司。目前的光纤测温技术使用的光纤最长距离可达 4 000 m, 测温范围为 $-300 \sim +900$ °C, 定位精度为 1 m。

采用光纤做传感介质和传输信号介质, 通过测量光纤中特定散射光的信号来反映光纤自身或所处环境的应变或温度的变化, 一根光纤可实现成百上千传感点的同时测量^[33]。分布式光纤传感技术无盲区, 突破了 FBG 解调复用传感单元数量限制和空间分辨率限制, 因而称为分布式测量。当一束光射入光纤后, 光纤中会产生后向散射光, 常见有瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光, 3 种散射效应如图 8 所示。 ν_B 为反射光与入射光之间的频率差, 被称为布里渊频移。

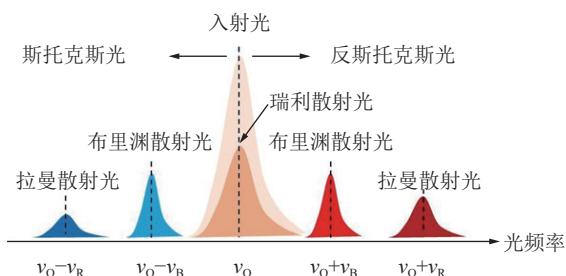


图 8 光纤中的 3 种散射

Fig.8 Three types of scattering in optical fibers

温度改变, 散射光的特性也随之改变。通过对散射光进行测量从而可得出测量环境的温度分布, 常见分布式光纤传感技术有基于瑞利散射的 OFDR 技术^[34]、DAS 技术^[35], 基于拉曼散射的 ROTDR 技术, 基于布里渊散射的 BOTDR、BOTDA 和 BOFDA 技术^[27]。瑞利散射光变化幅度较小, 其和布里渊散射都受到应变和温度的影响, 拉曼散射只对于温度的变化敏感。ZHANG^[36] 研发了一种具有较强抗损伤能力的完整分布式光纤温度传感系统(DTSS)。

2.1.3 无线自组网测温

无论是束管还是光纤, 对于采空区冒落空间来说, 都有被挤压甚至于砸断的可能。无线传感器自

组网络技术与温度传感器的结合, 是近几年来一个新的发展趋势。改变了传统温度传感器系统的拓扑结构, 适应更多温度测量的应用场合。其摒弃了有线管路, 通过在采空区布设温度传感器终端来采集数据, 然后在采空区外布设网关将无线信号转换为有线信号, 通过有线的方式将数据传输至地面。

但在实际应用过程中还是存在着数据信号传输不稳定的问题。基于此, 张辛亥等^[37] 利用温度传感器所测得的温度信息可通过临近节点跳跃传输, 实现“自组网”功能, 并针对信号传输问题进行了传感器布设位置规划。文虎等^[38]、程永新^[24] 基于此设计了 1 套系统, 该系统在测温的基础上还可以实现记录预警信息的功能。

2.2 外因火灾信息智能感知技术及装备

煤矿井下环境极其复杂, 用电设备多、功率大且分布分散、电缆线路长, 特别容易引起特别是井下变电站、配电点、电缆以及电气设备短路着火发生电气火灾事故, 另外带式输送机也可能因为滚筒停转以及摩擦生热等原因导致火灾的发生。因其处于巷道中, 附近可燃物多、通风顺畅, 一旦发生很容易借助电缆、风流、煤等引起连锁反应导致二次事故的发生。

对于电气火灾以及输送带火灾的监测主要可分为温度监测、指标气体监测以及基于视觉特征的图像识别方法。

2.2.1 火灾温度监测

温度是判断火灾程度和范围最直接、最有效的指标。测温法^[22] 是指利用温度检测技术对被监测地点进行温度测量以判断火灾危险程度的方法。受外部因素影响小, 只要确定某处的温度场及其分布, 就能分析给定火灾的危险程度和范围。此方法有利于发现设备过热和探寻高温点, 可以直观地了解发火地点温度及其发火程度, 对火灾预报有重要的意义。

通过电气设备、输送带及周围介质温度的升高也可直接判断火灾进行的程度。温度监测技术包括常规的温度传感器、光纤测温、红外测温等技术。

1) 温度传感器。目前常用的温度传感器有热电阻、热电偶^[39], 感温电缆等。热电阻和热电偶的工作原理是^[40] 热电效应。这种方法具有预测可靠、直观的优点, 但是由于点接触, 预测预报范围较小, 安装、维护工作量大, 特别是探头、引线极易破坏。

近几年, 开始应用集成温度传感器、热敏材料等测温传感技术检测电气内部温度异常。但由于电气电路环境复杂, 在现场的应用推广一直受到限制。

TANG 等^[41]将石墨烯传感器与光纤测温技术相结合,将石墨烯作为敏感材料涂抹在光纤表面,测量精度方面取得了良好的效果。

2)红外测温法。红外测温主要是探测红外能量场,通过能量场可综合判断电气火灾高温区域。红外测温法简单、迅速、精确,是目前探测领域的高新技术,所使用的仪器主要有红外探测仪和红外热成像仪。按照探测方式可分为红外线测温和红外成像测温。

美、俄、英、德等国已利用红外线技术预报井下自然灾害,成功检测了煤壁、煤柱与浮煤堆的自燃^[42],其中,美国使用的红外线探测仪是“米开莱-44型”;英国使用“649”型红外成像仪和改良型“M.E.L1045”型直流热成像仪;原苏联采用“卡瓦思替”红外辐射指示仪。在国内,各大矿区已采用红外测温仪测定井下煤壁温度^[43]。孙继平等^[44]分析了矿井外因火灾监测方法,提出了基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法。试验表明,红外技术对于测量煤堆、露头、巷壁煤柱的火灾十分有效。但是它只能探测出物体表面与仪器垂直物体的温度,而且要求中间无遮挡物,因此,可作为辅助方式应用到火灾识别过程。

2.2.2 传感器指标气体监测技术

在外因火灾方面,电气设备和输送带热解燃烧过程中可产生HCl、CO、CO₂、C₂H₂等多种标志性气体,并随着燃烧温度的升高,其产生量将发生显著变化。因此,可以利用指标气体产生量的变化,来判断矿井火灾状态。

现主要采用气体传感器来检测HCl、CO、CO₂、C₂H₂等气体。气体传感器安装简单、可靠性强但受维护难度的影响其不可能在井下全覆盖,矿井火灾一旦发生,将会迅速蔓延,温度突然升高,烟气弥漫,传感器采集到异常数据时,就会利用阈值判断火灾发生情况,且会受到周围热环境的影响导致数据信号微弱的问题,针对以上问题,学者们不断寻求更为准确的指标、不断改进传感器的测量精度问题,开发多传感器信息融合的检测方法。

在测量精度方面,赵勇毅等^[45]设计了一种可测甲烷、二氧化碳双组分的气体传感器,王伟峰等^[46]利用PSO-SVM补偿法消除非目标参量对传感器输出结果的影响,提高了CO传感器的可靠性与精度;孙瑞彩等^[47]利用Solid Works Flow Simulation仿真软件得到最佳气室结构参数,从而提高传感器元件的精度;为消除温度对传感器响应信号的影响,马砾等^[48]研究了传感器温度补偿算法模型。GONG等^[49]

研发了基于可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)的气体传感器,基于TDLAS的甲烷传感器、一氧化碳传感器和多气体监测系统应用效果良好。WANG等^[50]研究了Ti₃AlC₂(MXenes)/聚苯胺(PANI)复合材料作为半导体CO传感器,提高了CO传感器的精度。张子良^[51]采用AHP方法改进烟雾传感器,使其实现烟雾多特征数据融合,能够克服环境中的干扰。

2.2.3 基于视觉特征的矿井外因火灾监测方法

视频图像识别技术利用的主要方法是可见光与红外等视频图像监测法,其具有监测范围大、响应速度快等因素如今被广泛应用。红外热成像仪探测原理如图9所示。

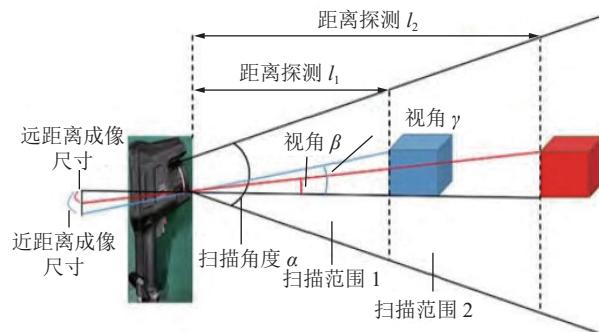
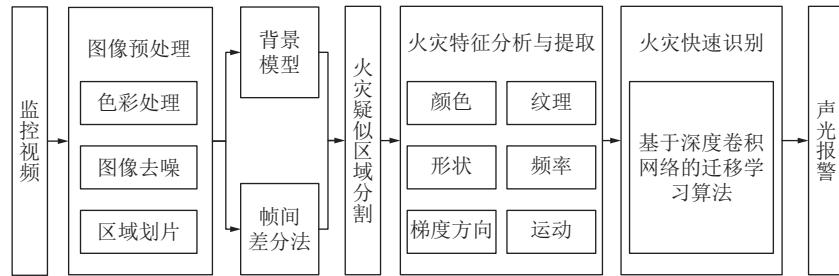


图9 红外热成像仪探测原理示意^[52]
Fig.9 Schematic of infrared thermal imaging camera detection principle^[52]

目前,基于视觉特征的矿井外因火灾监测的主要内容^[53]为:视频图像的预处理、火灾疑似区域的分割、火灾特征的分析和提取,以及火灾的快速辨识^[54]等。观测的主要内容为烟气和火焰。烟火识别流程如图10所示。

在火灾监测研究中,按照摄像机的工作波长,将火灾监测划分为紫外视觉监测方法^[56]、可见光视觉监测方法^[57]、近红外视觉监测方法^[58]和远红外视觉监测方法^[44]。

刘晓琴^[59]对视频图像进行特征分析及预处理,去除类似因素的干扰,然后进行动态区域分割,对满足火焰特征的疑似区域提取HOG特征,利用支持向量机分类器进行火焰识别。袁洁等^[60]利用红外摄像机外加红外照射灯来采集视频,将利用烟雾的LBP与灰度共生矩阵相结合而得的纹理特征输入分类器中进行分类识别,以期达到低照明度下预防火灾的目的。单亚峰等^[61]提出了一种命名为RLN-ELAM的新颖算法,用来消除瑞利噪声对精度的影响来提高测量效果。该方法首先利用火焰、烟雾和温度传感器感知火灾状态,然后根据给出模糊隶属函数计

图 10 烟火识别流程^[55]Fig.10 Pyrotechnic recognition process^[55]

算各个传感器的模糊隶属度。赵端等^[62]提出一种基于边缘智能的煤矿外因火灾感知方法。除此之外, QIU^[63]配置了能够精确测量气体和数据处理的微型激光传感器系统。王伟峰等^[64]提出了一种基于 YOLOv5 的矿井火灾视频图像智能识别方法, 结合 K-means 改进的暗通道去雾算法及动态目标提取算法, 可解决矿井环境造成的图像特征信息丢失问题。WANG 等^[65]提出的 AI 图像火灾量热法仅使用火灾现场图像即可较好地识别瞬态火灾热释放速率。利用红外热像仪和 YOLOv4 深度学习算法实现了火源的准确识别和定位。最后, 通过创建模拟火灾试验环境, 对消防机器人的性能进行了评价。LI 等^[66]设计了一款利用可以实时识别火焰的巡检机器人, 并可以实现自动灭火。李涛^[67]提出使用多灾源信息融合的火灾判别方法, 在摄像头可视范围内布设少量温度或者气体传感器进行辅助验证。

随着人工智能的发展, 智能算法在图像识别、特征分析方面应用的越来越多, 将搭载着图像特征信息分析处理的红外摄像头布设在巷道内, 可为监测外因火灾提供良好的保障。

2.3 其他监测方法

此外, 还有瞬变电磁法^[68-69]、测氡法^[70-71]、气味检测法、示踪气体法^[72-73]、电阻率法^[74]、声波法^[75-76]等监测方法。可针对现场实际选用合适的一种或多种方法。

示踪气体法是通过示踪气体(SF₆)的浓度变化相关分解物成分, 从而间接测定火灾隐患位置和温度。示踪物质会对被测煤体的热状态产生影响, 因此, 示踪剂选择应具有毒性小, 热解前稳定性好, 不氧化、不反应, 分解物易被检测等特点。

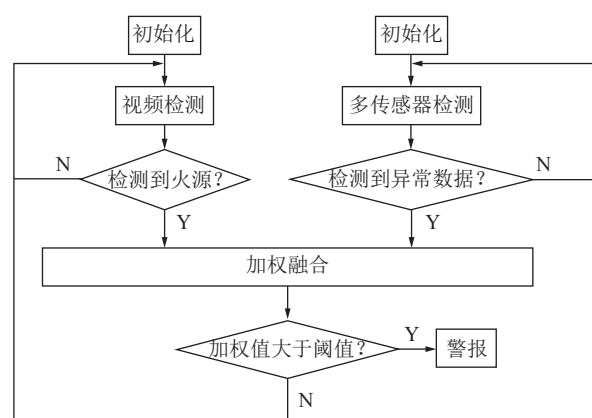
气味检测技术依托于应用不同种类的气味传感器检测煤自然发火过程中所释放出的气味及其变化规律, 通过神经网络解算, 实现对煤自然发火类型和程度的预测预报。气味检测法的研究最早出现在美、日等国, 国内对气味检测法的研究起步较晚, 20 世纪

末, 煤炭科学研究院抚顺分院与日本北海道大学合作研究煤自然发火气味检测法, 能够在 30~40 ℃ 就检测到煤低温氧化初期所释放出的微弱气味。陈欢等^[77]基于煤自然特性, 并以温度和反应生成物等宏观量为检测指标, 分别采用气体分析、温度监测、仿生气味监测、磁力预测等技术实现煤自然预测预报。

2.4 多源数据融合监测

井下条件复杂多变, 且随着开采规模的变大、采深的增加, 采煤情况也变得越来越错综复杂, 而且很多情况下高湿高热高粉尘会使得传感器的精度变低, 且单一指标不能准确标示火灾危险程度^[78]。因此, 多源信息融合是保障所测参数正确性的重要手段。

信息融合是一种自动化信息综合处理技术。它充分利用多源数据的互补性和电子计算机的高速运算与智能化, 把多个传感器在空间或时间上的冗余或互补信息, 依据贝叶斯估计、模糊逻辑、神经网络、遗传算法、粗糙集理论等算法进行组合, 以获得对被检测目标相对完整、一致性的解释或描述, 从而实现更加准确的识别和判断功能。通过不同种类传感器共同获取参数, 利用实现多源信息融合。图 11 为一种动态加权算法对图像和传感信息进行加权融合判

图 11 图像和传感信息加权融合判识流程^[62]Fig.11 Weighted fusion identification process of image and sensor information^[62]

识的流程。

段锁林等^[79]将模糊集合和D-S证据推理有机结合提出一种新的用于火灾检测的多传感器数据融合的方法。ZHAI等^[80]提出了一种基于混合核函数支持向量机和改进遗传算法的软传感器模型。董寅^[81]采用多传感器数据融合的方法,提出了基于BP神经网络的DS证据理论模型,并用模拟火灾验证该模型的有效性。

项平川^[82]利用多传感器信息融合技术中的神经网络融合算法,将获取到的参数进行融合。李正周等^[83]利用多传感器感知火燃烧状态,对是否发生火灾分配不同信任度函数,利用DS证据理论融合3种传感器信息以判断火灾状态。陈婷婷等^[84]从宏观角度分析多传感器信息融合时间序列特征,将模型分为二级架构,运用模糊控制算法聚类相同属性传感信息,消除冗余数据,为多传感器信息融合领域提供了新的研究思路。孙继平等^[58]提出了基于近红外图像、可见光图像、温度传感器、气体传感器和烟雾传感器等多信息融合的矿井外因火灾感知方法。虽然这种方式可以在一定程度上能够提升测量的效果,但是还是受到测量范围的掣肘,不能实现在矿井下全方位的覆盖。

目前,国内外学者对于矿井火灾态势估计与威胁估计的研究也开始起步,随着对信息融合性能的要求越来越高,多种方法的联合使用将成为未来的一种发展趋势。在监测方法、融合识别技术、态势评估、威胁估计、判断依据、预警机制等方面仍需要开展大量的研究工作。

3 矿井火灾预测技术及模型

预测,指“预先监测”,即在突发事件发生前对各种致灾因子及其表象进行实时、持续、动态的监视和测量,收集相关的数据和信息,并通过风险分析与风险评估来研判突发事件发生的可能性。通俗来讲,在煤氧复合作用还没有开始的时候,根据历史数据和当前数据评估火灾发生的可能性,即对煤自燃的发火危险性进行推断^[85]。常见的方法有人工神经网络、支持向量机、随机森林以及时序分析方法。

3.1 人工神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Network,即ANN),是20世纪80年代以来人工智能领域兴起的研究热点。它从信息处理角度对人脑神经元网络进行抽象,建立某种简单模型,按不同的连接方式组成不同的网络,是由大量处理单元互联组成的非线性、

自适应信息处理系统。其具有自学习、联想储存以及告诉寻求优化解的优点,引起了国内外学者的研究。

王福生等^[86]选取煤的组成与结构方面的碳含量、镜质组含量、固定碳含量、比表面积、微孔占比与羟基含量6项主要影响因素建立了基于BP神经网络的煤自燃倾向性预测模型。其框架如图12所示。

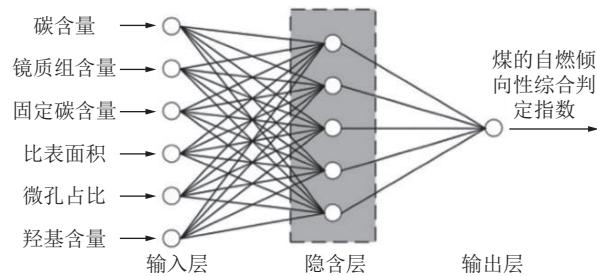


图12 煤自燃倾向性预测的神经网络框架^[86]
Fig.12 Neural network framework for prediction of coal spontaneous combustion propensity^[86]

昝军才等^[87]采用气体成分分析法和神经网络算法建立BP神经网络预测模型,选取CO、CO₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄气体浓度作为神经网络的输入层,煤温作为输出层,设置8个隐含层神经元对煤自燃情况进行预测。刘永立等^[88]建立的循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)主要应用于语音识别,情感分析,机器翻译等领域。利用LSTM神经网络处理时序数据的优势,以及自动挖掘数据关联的特性,调整LSTM模型时间步长和迭代次数参数,提高了模型预测的准确度。贾澎涛等^[89]提出了一种基于改进粒子群(PSO)优化简单循环单元(SRU)的煤自燃温度预测模型(PSO-SRU模型)。孔彪等^[90]建立了一个基于标准鲸鱼优化BP神经网络(WOA-BP)模型。

3.2 支持向量机

支持向量机被广泛用于模式分类和回归分析,可用于矿井火灾预测,通过训练数据建立边界,实现对新数据的分类。邓军等^[91]用粒子群优化算法(PSO)优化支持向量回归(SVR)参数,建立了煤自燃温度预测的PSO-SVR模型,不易出现“过拟合”现象。其预测结果散点图如图13所示,建立的PSO-SVR模型具有良好的预测效果。

董天文^[92]开展了基于BP与LSTM神经网络的采空区内因火灾动态预警方法的研究。郭军等^[93]开发了智能分析预警模块,能够结合深度学习和多元回归分析等理论以实现多源信息融合自处理,智能分析火灾预警级别和煤自燃异常区域态势预测,根据此实现火灾防控技术方案的辅助决策支持。WANG等^[94]采用遗传算法(GA)和支持向量机(SVM)耦合

方法构建了基于 GA-SVM 的煤自燃极限参数预测模型。

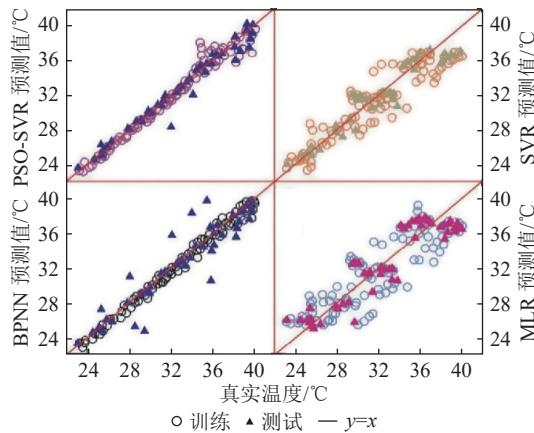


图 13 4 种模型预测结果散点图^[91]

Fig.13 Scatterplot of predicted results of 4 models^[91]

MUHAMMAD 等^[95]采用 k-means 聚类机制指定 t-SNE(分布式随机近邻嵌入)维度缺失数据集,然后采用支持向量分类机 (SVC) 模型对矿井火灾各等级进行预测。模型预测流程如图 14 所示。

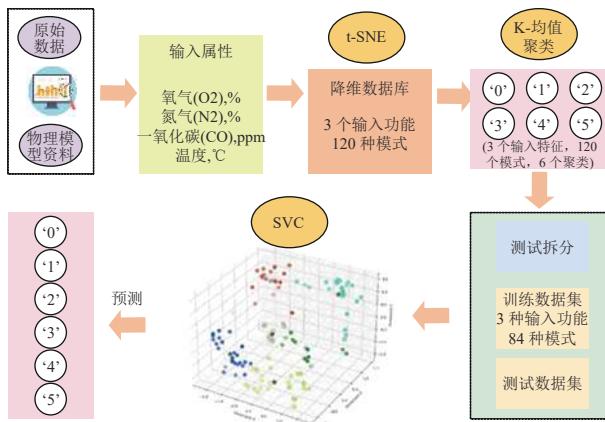


图 14 模型预测研究流程^[95]

Fig.14 Model prediction study flowchart^[95]

王媛彬等^[96]针对煤矿井下环境特点,提出了基于数字图像处理和支持向量机的煤矿外因火灾早期探测方法。以上方法在矿井中得到了良好的应用,取得了不错的效果。

3.3 随机森林

随机森林是一种集成学习方法,通过整合多个决策树的结果,提高预测准确性,对于矿井火灾的复杂性有一点的优势。翟小伟等^[97]提出了将 K 近邻算法 (KNN)、随机森林 (RF)、决策树 (DT) 及基于粒子群优化的支持向量回归等填补算法 (PSO-SVR) 应用于缺失值填补。图 15、图 16 为 RF 算法流程和基于 RF 算法的煤自燃温度预测模型构建流程。

郑学召等^[98]基于支持向量机 (SVM) 的预测模型对参数的选取要求较高和基于神经网络的预测模型测试时易出现过拟合的问题,提出了一种基于随机森林算法的煤自燃温度预测模型。邓军等^[99]提出了一种基于随机森林 (RF) 方法的采空区煤自燃预测模型,并将预测结果与支持向量机 (SVM) 和 BP 神经网络 (BPNN) 方法对比,结果表明其预测效果和性能良好。

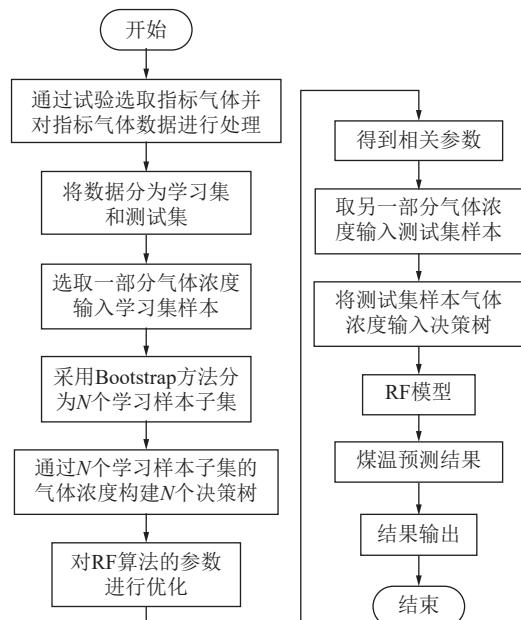


图 15 基于 RF 算法的煤自燃温度预测模型构建流程^[97]

Fig.15 Process of constructing coal spontaneous combustion temperature prediction model based on RF algorithm^[97]

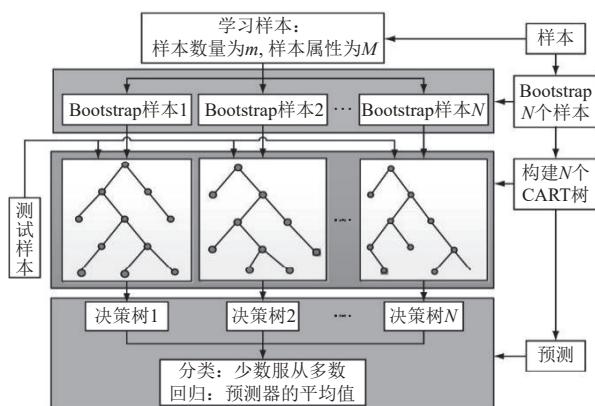


图 16 RF 算法流程^[97]

Fig.16 RF algorithm flow^[97]

3.4 其他机器学习算法

邓军等^[100]拟合出等效放热强度与表征煤体自燃性强弱的特征放热强度的函数关系,建立了试验条件下煤体自然发火期预测模型。张春等^[101]利用理论分析和数值模拟方法,对采空区漏风量与遗煤温

度场的关联性进行了分析。周旭等^[102]选取 O_2 、CO、 C_2H_4 、CO 体积分数与剩余 O_2 体积分数的比值, 以及 C_2H_4 体积分数与 C_2H_6 体积分数的比值作为指标, 结合 PSO 优化算法与 XGBoost 算法, 提出能应用于煤自燃预测的 PSO-XGBoost 模型, 拟合程度高、误差较小。

朱令起等^[103]认为指数函数作为最优拟合方法, 构建烟煤自燃预测模型, 提出低温条件下烟煤自然发火预测模型的统一形式, 预测模型的系数和截距值应根据煤样性质、试验条件等具体情况而定。汪伟等^[104]提出一种改进的基于指标相关性权重确定法 (CRITIC) 的 G2 赋权法来确定评价模型中的指标权重难以确定的问题。

4 矿井火灾智能预警系统

随着传感技术的发展, 煤矿智能监测技术方面取得了很大的进展。在监测技术的智能化发展进程中, 数据采集和传输依赖物联网, 数据处理和挖掘依靠云计算和大数据技术, 机器的学习和自适应通过人工智能技术实现^[105]。它们均属于智能化发展范畴, 是层层递进又相互促进、相互发展的关系。笔者将从矿井火灾分级预警技术、预警系统平台架构、预警系统建设 3 个方面对矿井火灾智能监测预警系统及平台的研究现状进行阐述。

4.1 矿井火灾分级预警技术

4.1.1 采空区煤自燃火灾分级预警技术

在火灾预警方面, 单指标和多指标复合超限报警方法被广泛的应用于矿井煤自燃的预测预报工作中。部分学者从多因素、多指标综合的角度对煤自燃预警进行了研究。

1) 煤自燃阶段精细划分。在煤自燃阶段精细划分方面, 主要是根据煤与氧气复合产生指标气体的规律来划分阶段。朱建国等^[106]根据煤自燃预测预报指标将煤自燃进程划分为 3 个阶段。郭军等^[93]在分析相关指标特征后将煤自燃过程划分为稳定、波动和剧烈反应 3 大区间, 通过处理指标数据以比值、Logistic 函数拟合的方式重构数据曲线, 划分出“潜伏、氧化、自热、临界、热解、裂变、燃烧”等 7 个阶段。**表 2** 为煤自然发火分级预警体系。其中, R_0 为根据氧浓度、CO 浓度确定的预警初值, 在达到临界条件, 即发生热解反应之前, 可根据 Graham 系数范围确定煤氧复合进程 (R_2 , R_3 , R_4)。当煤氧复合反应进入临界阶段之后, 通过指标气体 C_2H_4 的浓度进行判定, 在此基础上引入烯烷比确定临界值 R_5 , 当其持

表 2 煤自然发火分级预警体系^[93]
Table 2 Early warning system for the classification of natural coal fires^[93]

阶段	预警等级	温度范围/℃	判定临界值
潜伏阶段	预警初值	$T_0 < 30$	$R_0 = \left\{ \begin{array}{l} \varphi(O_2) > 18\% \cap \\ \varphi(CO) > 0.005\% \end{array} \right\} \cup$
			$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(O_2) \in (15\%, 18\%) \cap \\ \varphi(CO) > 0.01\% \end{array} \right\} \cup$
			$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(O_2) \in (12\%, 15\%) \cap \\ \varphi(CO) > 0.015\% \end{array} \right\} \cup$
			$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(O_2) < 12\% \cap \\ \varphi(CO) > 0.02\% \end{array} \right\}$
复合阶段	灰色	$T_1 \in (30, 50)$	$R_1 = R_0 \cap \left\{ \frac{100\varphi(CO)}{\varphi(O_2)} > 0.2 \sim 0.3 \right\}$
自热阶段	蓝色	$T_2 \in (50, 70)$	$R_2 = R_1 \cap \left\{ \frac{100\varphi(CO)}{\varphi(O_2)} > 0.4 \sim 0.5 \right\}$
临界阶段	黄色	$T_3 \in (70, 100)$	$R_3 = R_2 \cap \left\{ \frac{100\varphi(CO)}{\varphi(O_2)} > 0.6 \sim 0.8 \right\}$
热解阶段	橙色	$T_4 \in (100, 150)$	$R_4 = R_3 \cap \{\varphi(C_2H_4) > 0\}$
裂变阶段	红色	$T_5 \in (150, 210)$	$R_5 = R_4 \cap \left\{ k = \frac{\varphi(C_2H_4)}{\varphi(C_2H_6)_{\max}} \right\}$
燃烧阶段	黑色	$T_6 > 210$	$R_6 = R_5 \cap \{\text{明火、明烟及其他现象}\}$

续增加直到峰值、出现明火明烟即判定临界值为 R_6 , 实现煤自然发火分级预警。

王福生等^[107]依据升温氧化实验数据将煤自燃过程划分为初期氧化、缓慢自热、临界加速和热解裂变 4 个阶段, 贾海林等^[108]发现 DSC 划分法、TG 划分法同煤氧复合全过程的划分具有高度的重合性, 可划分为水分蒸发及气体脱附吸热阶段、化学吸附和缓慢反应放热阶段、煤热解生成活性基团放热阶段和挥发分与固定碳燃烧放热阶段等 4 个阶段; KONG 等^[109]利用 Logistic 拟合模型对指标气体随温度的变化曲线进行拟合分析, 建立基于正压束管监测的煤自燃 7 级预警系统。ZHU 等^[110]在煤自燃“三阶段”划分存在的划分界限模糊的情况下, 提出了“五阶段”划分。GUO 等^[111]通过程序升温试验模拟了煤自燃过程, 并利用逻辑拟合函数确定了指标气体浓度与煤温的关系, 根据此将煤自燃划分为 7 个阶段, 建立了 6 个标准的煤层自燃预警系统。

随着划分理论和方法的不同, 对于煤自燃反应的进程阶段也各不相同, 但整体上呈精细化发展, 对于煤自燃的精准防控提供了更为可靠的依据。

2) 煤自燃分级预警技术。煤自燃预测预报方法可以分为 2 种, 一种是基于指标体系, 根据煤自燃释放出的氧化性气体和热解气体辅助温度进行预报, 另一种则为基于大量的煤自然发火数据根据智能算法通过大数据分析的技术进行预测预报。

在指标体系方面, 利用单一指标分析煤自燃危险状态易受到漏风稀释、外来气源干扰等因素影响,

导致气体检测值(浓度或初现温度)与所设定的阈值不符而出现漏报、误报情况。为了克服这一不足, 双气体或多气体等复合指标(即复合指标预测预报方法)不断被提出并得到广泛应用^[112], 极大地丰富了煤自燃预测预报指标体系, 有力地推动了煤自燃危险程度判定方法进步。在预警指标、阈值研究与分级预警方面, 董天文^[92]通过标志气体与煤温之间的对应关系建立了“四级”煤自燃分级预警方法, 郭军等^[93]基于煤氧复合自燃机理, 综合分析各煤样在大型自然发火试验和程序升温试验过程中的特征参数得出

煤自燃各反应阶段内的风险等级及指标阈值。疏义国等^[113]发现 CO、O₂结合火灾系数能相对准确地对煤体氧化情况进行判断, 辅以乙烷、乙烯对温度进行反演, 实现了多指标煤自然发火隐患的动态识别。XU 等^[114]结合程序升温选择 CO 浓度、 $\phi(C_2H_6)/\phi(CH_4)$ 、第二火灾系数 R_2 作为预测煤自燃的主要指标, 而其他气体、烯烃比值和火灾系数可作为辅助指标。郭军等^[115]通过 Logistic 拟合方法, 利用 $\phi(C_2H_4)/\phi(C_2H_6)$ 、 $\phi(CO)/\phi(O_2)$ 。结合 O₂、CO、C₂H₄ 等指标建立煤自然发火指标体系阈值曲线, 如图 17 所示。

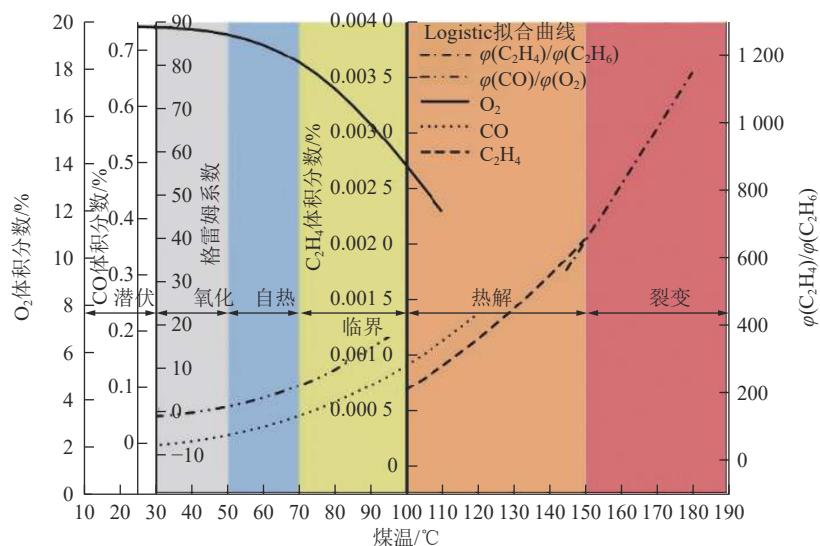


图 17 煤自然发火指标气体阈值曲线^[115]
Fig.17 Coal natural flare indicator gas threshold curves^[115]

WANG 等^[116]采用变异系数和 Kruskal-Wallis 检验对煤自燃指数进行评价, 发现气态化合物的产生与煤温呈正相关, 选择 O₂/CO₂ 和 CO₂/CO 作为主要指标, CO/CH₄ 作为煤炭在低温阶段(≤80 °C)的替代指标。C₂H₄ 和 C₂H₆ 的检测是煤温达到 90 °C(与 100 °C 相似)时的确认指标。YANG 等^[117]以煤自燃试验平台的试验测试方法, 通过升温速率、耗氧率、产气率、单一气体和复合气体指标等一系列参数, 找出煤自燃的特征温度, 分析了特征温度与各参数的对应关系, 建立了煤温与产气相关参数的对应关系。岳宁芳等^[118]优选确定以 CO、O₂、C₂H₄ 及 C₂H₆ 作为主要预测指标气体, 辅以 $\phi(CO)/\phi(O_2)$ 和 $\phi(C_2H_4)/\phi(C_2H_6)$ 作为煤自燃预测指标, 确定了“灰、蓝、黄、橙、红、黑”6 个预警等级及相应的判定阈值标准。

在智能算法方面, KONG 等^[119]结合 Logistic 拟合模型, 对指标气体数据随煤温的变化曲线进行拟合分析, 将煤自燃过程准确划分为“安全、灰、蓝、黄、

橙、红、黑”7 个预警等级。周旭等^[119]构建了基于贝叶斯优化的 XGBoost 煤自燃分级预警模型(BO-XGBoost)。煤自燃分级防控见表 3。其中, T 为温度; R_1-R_6 代表自然的 6 个阶段对应的气体指标阈值。

此外, 还有一些学者考虑了特殊情况下的煤样对煤自燃分级预警的影响, GUO 等^[120]发现在一次氧化进入严重氧化阶段时, 预氧化温度较高、二次氧化气体比例较高会影响指示剂的判断。二次氧化产生的瓦斯会影响煤矿采空区煤炭自燃的预警, 建立预警系统时应考虑这一点。ZHANG 等^[122]研究了水热耦合对不同水温下浸泡煤自燃风险的影响, 发现水浸泡后的氧化性更强, 水浸煤在 30 °C 情况下自燃危险性最大。朱建国等^[106]发现浸水的遗煤低温氧化具有分阶段特性。

当煤样经过浸水风干、二次氧化等特殊情况处理后, 煤样的氧化性会有一定程度上的改变, 如果仍依据正常煤样的参数构建分级预警指标等内容可能会使得预警效果变差, 因此特殊条件下的煤自燃分

表3 煤自燃分级防控^[120]Table 3 Coal spontaneous combustion graded prevention and control^[120]

自燃阶段	预警级别	温度范围/℃	气体指标阈值	采取措施
复合阶段	灰色	$T \in [30, 50)$	$R_1 = R_0 \cap \{100 \times CO / \Delta O_2 \in (0.2, 0.3)\}$	监测警报
自加热阶段	蓝色	$T \in [50, 70)$	$R_2 = R_0 \cap \{100 \times CO / \Delta O_2 \in (0.3, 0.5)\}$	
活化阶段	黄色	$T \in [70, 110)$	$R_3 = R_0 \cap \{100 \times CO / \Delta O_2 > 0.5\} \cap \{C_2H_4 > 0\}$	注氮隔氧降温
热分解阶段	橙色	$T \in [110, 150)$	$R_4 = R_3 \cap \{C_2H_4 > 0\} \cap (C_2H_4 / C_2H_6)_{min}$	降温隔氧降温
裂变阶段	红色	$T \in [150, 250)$	$R_5 = R_4 \cap (CO / CO_2)_{max}$	综合协同灭火
燃烧阶段	黑色	$T \in [250, 400)$	$R_6 = R_5 \cap \{(C_2H_4 / C_2H_6)_{max}\}$	

级预警技术的研究对于正确预测预报具有重要意义。表4为浸水煤低温氧化分段特性。其中 φ 为气体浓度,依据气体浓度划分阶段。

表4 浸水煤低温氧化分段特性

Table 4 Characteristics of low-temperature oxidizing segments of water-soaked coal

阶段	温度/℃	指标
吸氧蓄热阶段	$30 \sim 100$	$\frac{\varphi(CO)}{\varphi(CO_2)} \leq 0.1$ 或 $\frac{\varphi(O_2)}{\varphi(CO_2) - \varphi(CO)} \geq 0.02$
自热氧化阶段	$100 \sim 140$	$0.8 \leq \frac{\varphi(C_2H_4)}{\varphi(C_2H_6)} \leq 1.10$
加速氧化阶段	$140 \sim 230$	$\frac{\varphi(CO)}{\varphi(CO_2)} \geq 0.5$ 或 $\frac{\varphi(O_2)}{\varphi(CO_2) - \varphi(CO)} \leq 0.005$

4.1.2 矿井外因火灾分级预警技术

矿井外因火灾一旦发生很容易产生蔓延,造成通风紊乱导致部分地点少风或者无风,产生人员伤亡。通过划分外因火灾的进程,根据对监测到的大量温度、气体组分及浓度和位置数据进行的深度关联分析,判断每个阶段对应的阈值,从而建立外因火灾预测模型。井下巷道中持续供风,当电缆或者输送带产生火灾的时候虽然会产生气体,但是因为风流的稀释,会产生较大的误差,外因火灾监测以温度测量为主^[123]。

1) 电气火灾。电路短路故障是导致电气火灾的最主要原因,输电线路或电气设备发生短路时,短路电流能够高达额定电流的几十倍,热量在短时间内快速积聚形成危险温度^[124],导致熔化绝缘层并引燃周围可燃物。电缆与电缆之间、电缆与电气设备之间接触不良、井下电气设备安装使用不当以及电气设备和机电设备金属上感生电动势放电产生电火花等^[56]都易引发电气火灾。对于电缆火灾,可将其分为以下5个阶段,见表5。

目前专家学者广泛关注的点在极早期,如何监测到电缆线芯的发热情况是研究的热点。高压电力电缆火灾的早期预警是火灾防治系统的重要环节^[125],当前各隧道内,主要通过缠绕于电缆表面的感温光

纤实现电缆内部线芯过热的间接监控。还有部分学者专注于研究线缆热解产生的气体,WANG等^[126]使用热重红外线、CCT型锥型量热仪等研究了电缆火灾,发现其热解温度主要在350~470 K。主要气体产品是CO₂、H₂O、CH₄、HCl和CO。

表5 电缆火灾分级防控

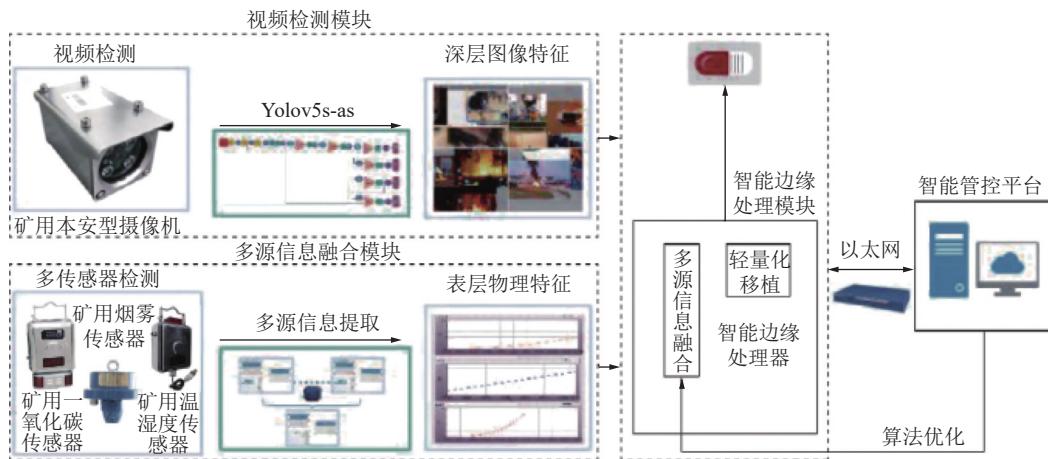
Table 5 Cable fire hierarchy prevention and control

阶段	现象
极早期	电缆线芯导体发热,热量聚集
前期	阴燃
早期	明火
中期	电缆群燃烧
晚期	电缆烧尽

CHEN等^[127]分析模拟了不同条件下的温度分布和特征气体浓度,提出一种基于混合贝叶斯网络(BN)的火灾风险分析模型,研究过载诱发的早期电缆火灾风险的演变规律。赵端等^[62]提出了一种基于边缘智能的煤矿外因火灾检测模型,其主要由视频检测模块、多源信息融合模块及智能边缘处理模块组成,如图18所示。

在智能边缘处理器上部署轻量化的改进YOLOv5s模型和多源信息融合模块,分别提取火源的图像特征和环境信息的多维度时空特征,通过特征融合判断是否发生火灾。基于此,LI等^[128]提出了一种基于异常特征量监测的高压电力电缆隧道火灾预警方法。XIE等^[129]利用感温光纤监测电缆表面温度并反演电缆内部线芯温度的预警方法,研究了高压电力电缆内部的空气层对该反演预警模型的影响,指出空气层会导致内部过热线芯向外热流传递受阻而延迟报警乃至漏报。

LIU等^[130]针对综合管廊内的线性火源,研究了弯曲侧壁对其中纵向温度分布的影响,提出了管廊内温度分布预测的经验公式。王彦文等^[131]从电缆

图 18 基于边缘智能的煤矿外因火灾检测模型^[62]Fig.18 An edge intelligence-based model for exogenous fire detection in coal mines^[62]

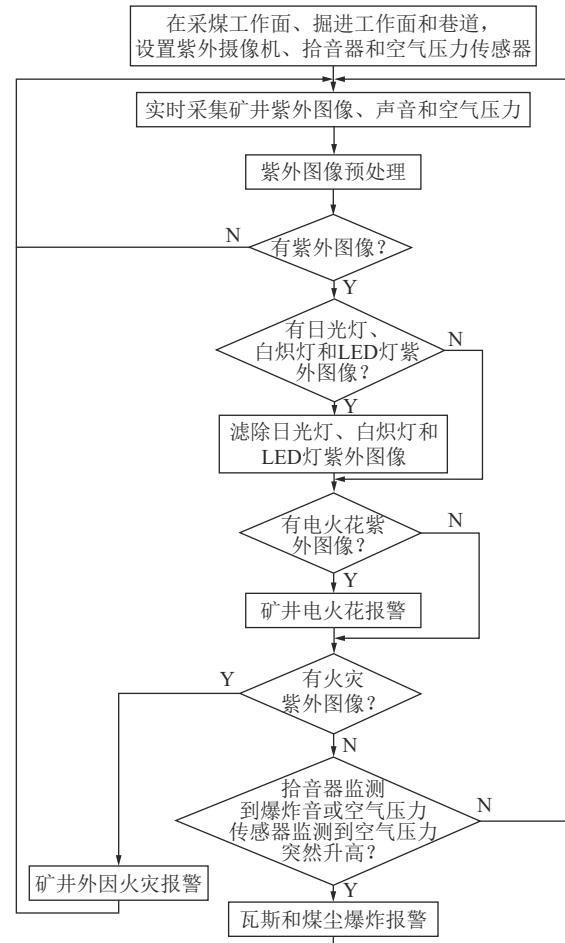
径向截面上的热传导规律入手,建立了基于等效三等分暂态热路模型的三芯矿用电力电缆线芯温度计算方法,可由电缆外护套表面温度实时计算出电缆线芯温度。

针对电火花引发火灾,孙继平等^[56]提出了矿井电火花及热动力灾害紫外图像感知方法,如图 19 所示。

通过在井下不同位置布设紫外摄像机、拾音器和空气压力传感器对矿井紫外图像、声音和空气压力进行实时采集;后经过处理判别得出是否进行报警,实现对电火花的监测预警,取得了不错的效果。以上学者从燃烧气体产物、热量以及燃烧光学特性出发进行了相关研究,为早期预警提供依据。

2) 输送带火灾。可将外因火灾分为以下阶段:
 ① 初始阶段。在该阶段内,输送带因托辊不转、浮煤摩擦等出现发热现象,电缆因负荷大、机械损坏等原因出现发热现象,此时温度仍较低,主要表现为温度 t_c 超过日常平均温度 t_p 。
 ② 发展阶段。该阶段温度迅速上升,表现为温度 t_c 明显迅速升高,输送带、电缆或机电硐室下风口监测到 CO 等气体异常,出现烟雾伴有焦糊味。
 ③ 燃烧及快速扩大阶段。当温度升高到燃点 t_R 后,出现明火,并快速扩大,表现为温度 t_c 突然陡升,出现大量烟雾伴随烧焦味,输送带、电缆下风口监测到 CO 等气体异常,输送带断带、断电、设备停机等。可将监测预警等级分为以下 4 个阶段,见表 6。

ZHANG 等^[132]通过热重分析-傅立叶变换红外光谱法,测试了输送带在 4 种加热速率下的热重变化,也将其划分为 3 个阶段(图 20);WANG 等^[133]通过试验确定了输送带燃烧过程中的 7 个特征温度及其阈值,并将该过程分为 3 个阶段(I、II、III)。该工艺主要产生 CH₄、CO、CO₂ 等气体,并确定了各种

图 19 基于双目视觉的矿井外因火灾感知与火源定位方法流程^[56]Fig.19 Flow of mine external fire sensing and fire source positioning methods based on binocular vision^[56]

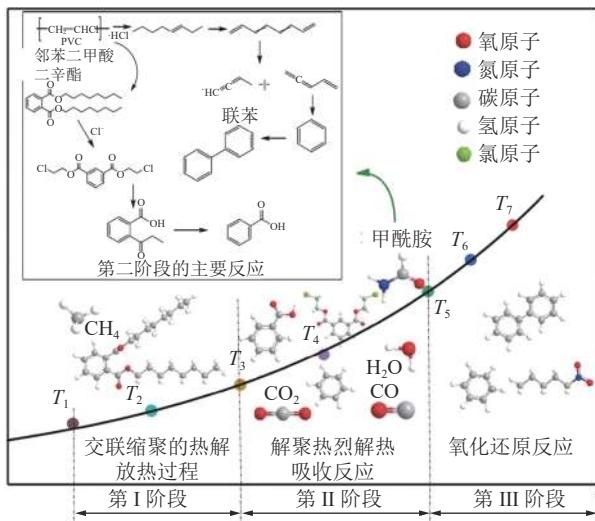
气体的温度范围。如图 21 所示。

针对外因火灾特征信息传统检测手段定量获取、判识及预警存在的误差大、监测范围小、测点少、工作量大的特点,结合数据分析方法的研究现状和特

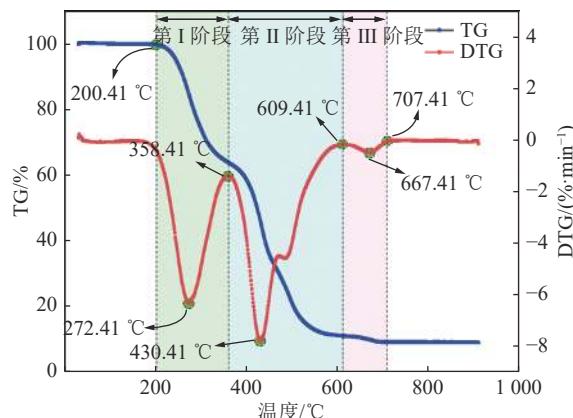
表6 输送带火灾分级防控

Table 6 Tape fire hierarchy prevention and control

阶段	现象	指标
正常阶段	无	$1.5 t_p \geq t_c$
初始阶段	出现发热现象	$3.4^\circ\text{C} \geq t_c \geq 1.5 t_p$
发展阶段	出现烟雾伴有焦糊味	$t_R \geq t_c \geq 3.4^\circ\text{C}$
燃烧阶段	出现明火, 烟雾并伴有气体异常、断电、断带、设备停转等现象	$t_c > t_R$

图20 输送带燃烧的3个阶段^[132]Fig.20 Three stages of conveyor belt combustion^[132]

点, 研究输送带和电缆燃烧特征信息隐患辨识预判方法, 对监测数据进行有效挖掘和分析, 掌握外因火灾指标气体与特征温度的内在关联关系, 实现重点

图21 样品在20~900℃的TG和DTG曲线^[133]Fig.21 TG and DTG curves of duct tape samples^[133]

区域外因火灾隐患的辨识与动态预判。

4.2 预警系统平台架构

基于物联网的矿井火灾监测预警系统由感知层、网络层和应用层构成, 基于物联网的煤自燃监测预警系统的3层结构(感知用), 如图22所示。

4.2.1 感知层

感知层是由束管监测、光纤测温、无线自组网测温、多参数气体传感器、红外测温、视觉特征图像识别等6部分组成, 用来感知井下火灾的信息参数和状态。

4.2.2 网络层

网络层主要包括无线感知网络(WSN)、RS485总线、WIFI、矿井工业以太环网, 以煤矿现有的工业

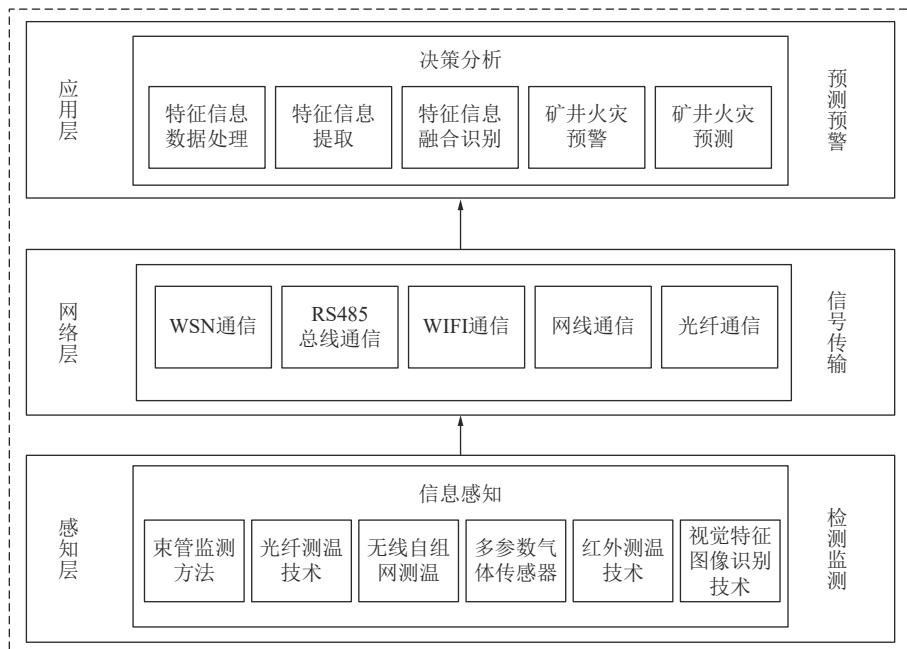


图22 基于物联网的火灾监测预警系统3层结构

Fig.22 Three-layer structure of IoT-based fire monitoring and early warning system

以太环网为主干, 多种通讯网络为分支, WSN 和光纤传感为末梢, 形成一体式的异构网络平台。

4.2.3 应用层

应用层采用云网络技术实现决策分析和信息分享功能。通过云网络的方式实现煤自燃多源信息大数据的整合与交互; 利用集群大数据云计算进行数据分析、状态识别、火灾预警、火灾定位、智能管理和趋势预测, 结合专家系统和现场经验, 挖掘煤自燃致灾因素和危险源的异常特征信息, 实现整个系统的动态分析和决策; 采用云网络技术的分享功能, 实现监控中心、相关部门、各级领导对煤矿火灾的动态感知、协调管控和应急反应。

4.3 预警系统建设

4.3.1 基于物联网的矿井火灾监测预警系统研究

丁伟杰等^[134]设计了基于窄带物联网 (NB-IoT) 技术的无线智能火灾监测与报警系统。采用 STM32 作为火灾监测终端节点的控制器, 设计了终端节点电路, 进行火灾各参数的监测; 采用物联网通信模块 BC20 作为通信节点, 实现控制器与通信模块的数据交换; 采用 MQTT 协议实现通信模块与云服务平台之间的数据通信。贺耀宜等^[135]提出了一种采用“模型驱动”开发模式的智能矿山低代码工业物联网平台设计方案。

张静等^[136]设计了基于物联网的煤矿安全监测与预警系统的平台架构, 包括感知层、传输层和应用层, 分析了该预警系统的功能需求。贺耀宜等^[137]提出了基于私有云部署的智能矿山基础信息平台结构和设计理念, 只需 1 套基于微服务技术的分布式软件平台即可解决全矿井各类自动化数据的采集、分类存储、交互、融合分析, 并实现与控制执行装置的联动控制。陈珍萍等^[138]基于下标偏移法抵消分组传输中的固定延迟和节点间相位偏移, 采用迭代法估计节点间的频率偏移, 降低了同步算法的计算复杂度。ZHAO 等^[139]结合预警准则阈值, 识别气体超限区域, 确定火源预警等级设计了一种基于随机森林算法的煤矿井下危险源识别预警系统。

从目前基于物联网的煤矿监测技术的发展现状及实际应用可以发现, 其受信息感知装备的影响很大。若信息感知不全面、不完善, 就会限制煤矿物联网监测监控技术的进一步发展。

4.3.2 基于大数据、云计算的火灾监测预警系统研究

云计算技术是近年来发展极为迅速的技术, 云计算技术将网络作为载体, 将虚拟化技术作为基础, 将可扩展的数据、存储以及计算资源整合, 利用分布

式计算资源完成工作的计算模式。将其应用于矿井火灾的监测预警中可实现对火情的智能预警。降华^[140]基于云计算的基本原理和 PaaS 模式, 构建了煤矿自燃安全监控与报警的云计算平台, 如图 23 所示。

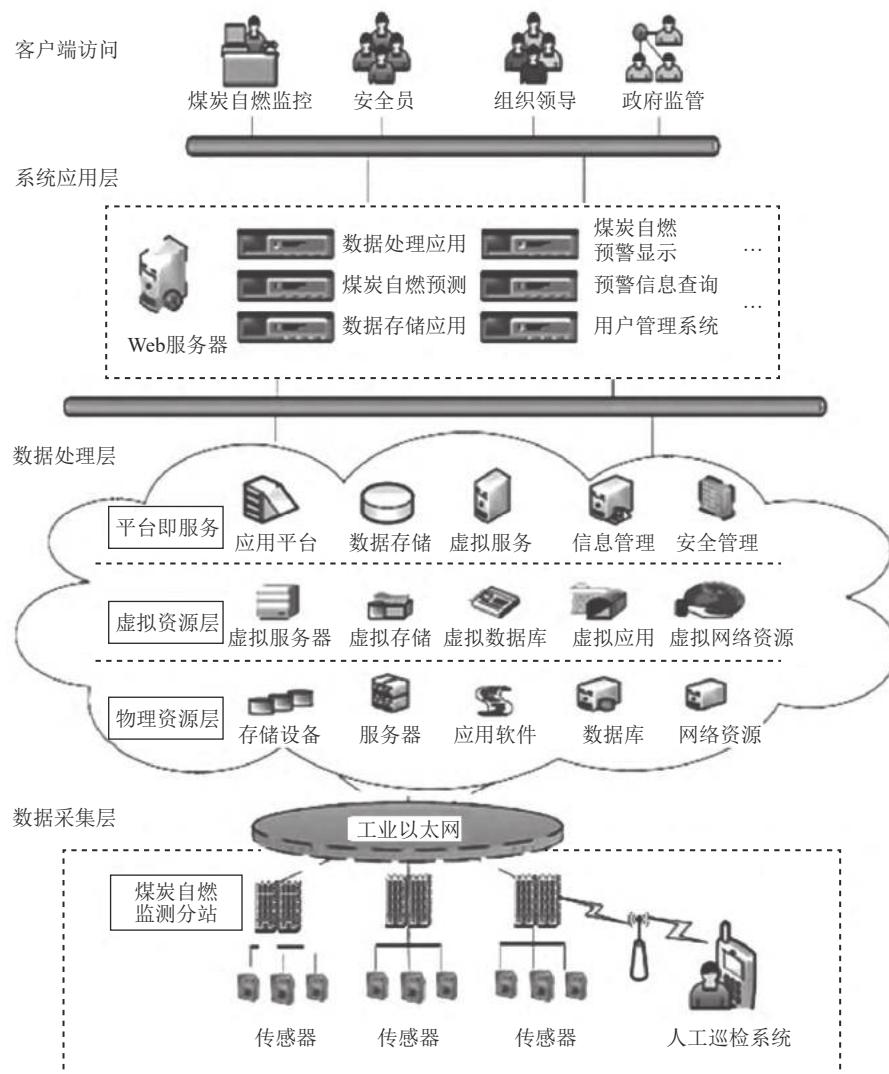
丁恩杰等^[141]指出煤矿安全监控系统的重点在于感知层, 分析了感知层实现数据采集与数据传输所用到的关键技术。曹允钦^[142]利用煤矿安全综合数据库中的基础数据、实时监测数据以及事务性数据, 根据煤矿安全动态诊断专家知识库进行评估、推理和演绎, 分析煤矿安全生产现状与趋势。

4.3.3 基于人工智能的火灾监测预警系统研究

利用大数据、人工智能等融合矿井内多灾源数据, 研发能感知火灾发展进程, 动态呈现矿井内危险区域变化, 是矿井火灾前期危险源辨识、灾害预测预报的提升和突破。可为煤自燃的主动防控提供有力保障。大型语言模型 (Large Language Models, LLM) 在过去的 5 年内迎来了极大的发展。尤其是 2022 年 11 月 Chat Generative Pre-trained Transformer (Chat GPT) 发布后更是引起了全世界的关注, 其可以通过一个简单的对话框就可以实现问题回答、文稿撰写、代码生成、数学解题等过去自然语言处理系统需要大量小模型订制开发才能分别实现的能力。2023 年 3 月, GPT-4 具有了多模态理解能力, 可以对图像、视频进行识别, 展现了“通用人工智能 (AGI)”的能力。其具有可基于人类反馈进行强化学习、纠正、泛化、创造性等优点, 可将其应用于矿井智能化研究中。

周福宝等^[143]指明了基于物联网 (IoT)+人工智能 (AI)+云平台 (CP) 的大数据策略与集成云边端架构的密闭安全风险监测预警总体建设路径。卢万杰等^[144]基于卷积神经网络的深度学习算法建立了煤矿设备类型识别模型, 使用基于粒子群优化的 SVM (support vector machine, 支持向量机) 建立了煤矿设备匹配模型, 经过同 BP 神经网络的对比发现, SVM 优于 BP 神经网络。靳德武等^[145]通过大数据挖掘技术和深度学习智能方法, 构建水害智能预警云平台。葛明臣等^[146]通过多层 BP 前馈神经网络构建了井下电弧预警模型, 经过训练的模型可以达到 97.333% 的正确预警率, 证实了 BP 前馈模型在井下故障电弧识别领域的可行性和适宜性。

另外还有基于数字孪生的监测与技术, 即将物联网、云计算和人工智能相结合的方式还原现场实际, 肖黎俊等^[147]借助数字孪生技术, 搭建煤矿智能管控平台, 成功破解了基本信息数字化、生产流程虚拟化、综合管控一体化, 以及决策分析融合化等技术难题。

图 23 基于云计算的煤矿安全监控系统框架^[140]Fig.23 Framework of coal mine safety monitoring system based on cloud computing^[140]

5 总结与展望

1) 在矿井火灾信息智能感知方面,进一步加强传感技术及装备研发。在前期研究内容的基础上,开发检测准确度更高、使用寿命更长、检测范围更广的优势检测设备;探索多检测设备协同作用的布设方案;研究可以精准识别、判断的多源数据处理方法,促使井下检测方法从单一向多元化转变。

2) 在矿井火灾智能预测及模型方面,进一步加强隐蔽火源的位置探寻方法研究。建立数字矿井、数字孪生工作面,掌握开采地质信息;提高火灾信息感知手段,多种方法协同作用共同判断火源位置及火灾危险区域,建立隐蔽火源探测方法,建立区域火灾信息探测平台,对采空区“三带”实现动态呈现,并针对火灾前兆信息,进行煤自燃进程判断及实现自感知、自分析、自预测,使灾害透明化,从而达到自动

预警的目标。

3) 在矿井火灾智能预警系统方面,将大数据融入智能判识。可以利用海量的训练数据,包括国内各个矿区的多种煤样的自然发火期、自燃倾向性等特性参数以及特殊条件下如浸水风干煤、火成岩侵入煤、二次氧化煤等的煤自燃特性输入模型中,归一化处理后,利用大型语言模型对事故历史数据进行分析,明确灾变前兆信息,确定气体和温度预警指标并促进二者的融合。深入挖掘事故发生发展过程中的数据变化,将数据变化同煤自燃发展程度相结合,得出火灾发生前的异常数据、发生的地点以及提出相应的预警信息。最后,结合现场具体条件,将矿井火灾智能感知装备接入语言大模型,利用大模型对监测得到的数据进行分析,结合灾变信息,实现对矿井火灾的监测预警。

4) 在矿井火灾智能判识与防控技术联动方面,

利用大型语言模型提出矿井火灾的防控策略。给模型输入现有的矿井火灾防控措施, 形成火灾防控措施库, 并给模型输入不同的地质结构、供风条件进行训练, 结合大模型提出的矿井火灾的预警阶段, 自主选择灭火方案, 并不断进行迭代优化, 从而实现对矿井火灾的智能判识与防控技术联动效果。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, *et al.* Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [2023-02-28]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.
- [3] 王德明. 矿井火灾学 [M]. 徐州: 中国矿业工学出版社, 2008: 1–30.
- [4] 丁震, 李浩荡, 张庆华. 煤矿灾害智能预警架构及关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 15–22.
DING Zhen, LI Haodong, ZHANG Qinghua. Research on intelligent hazard early warning architecture and key technologies for coal mine [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 15–22.
- [5] 邓军. 煤田火灾防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014: 1–26.
- [6] 白光星, 陈伟乐, 孙勇, 等. 煤矿带式输送机运输火灾风险智能监测与早期预警技术研究进展 [J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 47–54.
BAI Guangxing, CHEN Weile, SUN Yong, *et al.* Research progress on intelligent monitoring and early warning technology of fire risk in coal mine belt conveyor transportation [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 47–54.
- [7] MOHAMMAD Ali Moridi, MOSTAFA Sharifzadeh, YOUSHEI Kawamura, *et al.* Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 127–138.
- [8] MUDULI Lalatendu, MISLIRA Devi Prasad, JANA Prisanta K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: a systematic review [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2018, 106: 48–67.
- [9] WU Bing, WANG Jingxin, ZHONG Mingyu, *et al.* Multidimensional analysis of coal mine safety accidents in China-70 years review [J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2023, 40(1): 253–262.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知 [EB/OL]. [2020-02-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm.
- [11] 王国法. 《煤矿智能化建设指南(2021 年版)》解读——从编写组视角进行解读 [J]. 智能矿山, 2021, 2(4): 2–9.
WANG Guofa. Interpretation of the coal mine intelligent construction guidelines (2021 Edition) - from the perspective of the writing group [J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(4): 2–9.
- [12] LU Peizhong, HUANG Yuxuan, JIN Peng, *et al.* Optimization of a marker gas for analyzing and predicting the spontaneous combustion period of coking coal [J]. Energies, 2023, 16(23): 7802.
- [13] 邓军, 白祖锦, 肖旸, 等. 煤自燃指标体系试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1756–1761.
DENG Jun, BAI Zujin, XIAO Yang, *et al.* Experimental investigation and examination for the indexical system of the coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1756–1761.
- [14] WANG Beifang, LYU Yuanhao, LIU Chunbao. Research on fire early warning index system of coal mine goaf based on multi-parameter fusion [J]. Research Square, 2024, 14(1): 485.
- [15] 易欣, 葛龙, 张少航, 等. 基于指标气体法对水浸煤的氧化特性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 130–136.
YI Xin, GE Long, ZHANG Shaohang, *et al.* Research on oxidation characteristics of aqueous coal based on index gas method [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 130–136.
- [16] 张军杰. 煤矿束管监测系统的现状与发展趋势 [J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 89–92.
ZHANG Junjie. Current situation and development trend of coal mine beam tube monitoring system [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 89–92.
- [17] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1701–1714.
LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, *et al.* Research progress of coal mine gas detection technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1701–1714.
- [18] KONG Biao, WANG Enyuan, LI Zenghua, *et al.* Time-varying characteristics of electromagnetic radiation during the coal-heating process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 434–442.
- [19] 王栋, 陆伟, 李金亮, 等. 煤矿输气与控制共用管线的高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.
- [20] 赵晓夏. 正压束管监测系统输气关键部件的研发 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(7): 92–95.
ZHAO Xiaoxia. Research and development of key components of positive pressure beam tube monitoring system [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(7): 92–95.
- [21] 姜龙. 基于 TDLAS 的煤矿井下激光型束管监测系统设计 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
JIANG Long. Design of laser beam tube monitoring system in coal mine based on TDLAS [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [22] 陈晓坤. 煤自燃多源信息融合预警研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
CHEN Xiaokun. Study on early warning method for coal spon-

- taneous combustion based on multi-information fusion [D]. Xi'an : Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [23] CAI Yin, ZHANG Bingbing, WANG Jingyuan, et al. Research on a bimetallic-sensitized FBG temperature sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(3): 035010.
- [24] 程永新. 煤矿带式输送机火灾光纤传感检测技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 131–135.
- CHENG Yongxin. Technology research on optical fiber sensing detection for belt conveyor fire in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 131–135.
- [25] GUO Junyi, SUN Mengya, FANG Jinhui, et al. High-sensitivity seawater salinity sensing with cladding etched fiber bragg grating technology [J]. Ieee Sensors Journal, 2023, 23(13): 14182–14192.
- [26] LIU Qinpeng, WANG Danyang, WANG Chunfang, et al. Ultra-sensitive temperature sensor based on optic fiber Fabry-Perot interferometer with Vernier effect [J]. Optics Communications, 2023, 541: 129567.
- [27] YANG Yu, NIU Yanxiong, WANG Botao, et al. The research on improving the spatial resolution of radiant optical fiber temperature sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(3): 035111.
- [28] RODOLFO A. CARRILLO-BETANCOURT, A. DARIO Lopez-Camero, JUAN Hernandez-Cordero. Luminescent polymer composites for optical fiber sensors [J]. Polymers, 2023, 15(3): 505.
- [29] 袁俊杰, 刘喜银, 张萌颖, 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波技术研究进展 [J]. 激光杂志, 2023, 44(9): 1–10.
- YUAN Junjie, LIU Xiyin, ZHANG Mengying, et al. Research progress of phase generation carrier technology for interferometric fiber optic sensor [J]. Laser Journal, 2023, 44(9): 1–10.
- [30] SEKINE Masashi, FURUYA Masahiro, FURUYA Masahiro. Development of measurement method for temperature and velocity field with optical fiber sensor [J]. Sensors, 2023, 23(3): 1627.
- [31] ZHANG Xuebing, ZHENG Zhizhou, WANG Li, et al. A Quasi-Distributed optic fiber sensing approach for interlayer performance analysis of ballastless track-type II plate [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110237.
- [32] 王 宁, 朱 永, 张 洁. 高温高压环境下光纤法布里-珀罗传感技术研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 70–82.
- WANG Ning, ZHU Yong, ZHANG Jie. Fiber-optic fabry-perot sensing technology in high-temperature environments: a review, 2023, 60(11): 70–82.
- [33] GUI Xin, LI Zhengying, FU Xuelei, et al. Distributed optical fiber sensing and applications based on large-scale fiber bragg grating array: review [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(13): 4187–4200.
- [34] ZHANG Chao, BAO Yan, CUI Tao, et al. Polarization independent phase-OFDR in rayleigh-based distributed sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(8): 2518–2525.
- [35] EKECHUKWU Gerald, SHARMA Jyotsna. Degradation analysis of single-mode and multimode fibers in a full-scale wellbore and its impact on DAS and DTS measurements [J]. Ieee Sensors Journal, 2023, 23(9): 9287–9300.
- [36] ZHANG Fengjie, HAN Dongyang, QIN Yueping, et al. Optimization of the monitoring of coal spontaneous combustion degree using a distributed fiber optic temperature measurement system: field application and evaluation [J]. Fire-Switzerland, 2023, 6(11): 410.
- [37] 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 Xuezao, et al. Analysis of ZigBee-based wireless self-organized network temperature measurement system in mining area [J]. Coal Engineering, 2012(9): 122–124.
- [38] 文 虎, 吴 慷, 马 研, 等. 分布式光纤测温系统在采空区煤自燃监测中的应用 [J]. 煤矿安全, 2014, 45(5): 100–102, 105.
- WEN Hu, WU Kang, MA Li, et al. Application of distributed optical fiber temperature measurement system in monitoring goaf coal spontaneous combustion [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(5): 100–102, 105.
- [39] LIU Zhaojun, TIAN Bian, JIANG Zhuangde, et al. Flexible temperature sensor with high sensitivity ranging from liquid nitrogen temperature to 1200 °C [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 5(1): 015601.
- [40] 魏元焜. 基于压缩感知理论的声学层析成像温度场重建研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- WEI Yuankun. Research on temperature field reconstruction of acoustictomography based on compressed sensing theory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [41] TANG Chenggang, WANG Yuqiang, LI Yuning, et al. A review of graphene-based temperature sensors [J]. Microelectronic Engineering, 2023, 278: 112015.
- [42] 杨 飞. 高庄煤矿近距离煤层开采采空区遗煤自燃防控技术研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2018.
- YANG Fei. Study on prevention and control technology of spontaneous combustion of coal in goaf of short diatance seam mining in Gao Zhuang Mine [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [43] TANG Qianying, ZHONG Fang, LI Qing, et al. Infrared photodetection from 2D/3D van der waals heterostructures [J]. Nanomaterials, 2023, 13(7): 1169.
- [44] 孙继平, 孙雁宇, 范伟强. 基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 1–5, 21.
- SUN Jiping, SUN Yanyu, FAN Weiqiang. Recognition of exogenous fires in mines based on visible and infrared images [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(5): 1–5, 21.
- [45] 赵勇毅, 常建华, 沈 婉, 等. 矿井内 CH_4 与 CO_2 双组分 NDIR 传感器的设计与实现 [J]. 红外技术, 2019, 41(8): 778–785.
- ZHAO Yongyi, CHANG Jianhua, SHEN Wan, et al. NDIR sensor for CH_4 and CO_2 gas concentration detection in mines [J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 778–785.
- [46] 王伟峰, 邓 军, 侯媛彬, 等. 基于 PSO-SVM 的矿用 CO 传感器非线性补偿方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2017(9): 5–7, 51.
- WANG Weifeng, DENG Jun, HOU Yuanbin, et al. Study on

- nonlinear compensation method of mine carbon monoxide sensor based on PSO-SVM[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(9): 5–7, 51.
- [47] 孙瑞彩, 龙秉政. 基于 SolidWorks Flow Simulation 的矿用烟雾传感器气室结构流体仿真分析[J]. 煤矿机械, 2023, 44(10): 92–94.
- SUN Ruicai, LONG Bingzheng. Fluid simulation analysis of gas chamber structure of mine smoke sensor based on solid works flow simulation[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(10): 92–94.
- [48] 马砾, 范新丽, 张晓龙, 等. 矿用 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 红外传感器温度补偿算法模型研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(12): 1456–1462.
- MA Li, FAN Xinli, ZHANG Xiaolong, et al. Study on temperature compensation algorithm model of mine $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ infrared sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(12): 1456–1462.
- [49] GONG Weihua, HU Jie, WANG Zhaowei, et al. Recent advances in laser gas sensors for applications to safety monitoring in intelligent coal mines [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1058475.
- [50] WANG Xuwei, HU Xiangming, LIANG Yuntao, et al. Early Warning of coal spontaneous combustion: a study of CO response mechanism based on PANI/Ti₃AlC₂ composite gas sensing film [J]. *Chemistry Select*, 2022, 7(26): e202201563.
- [51] 张子良. 基于 AHP 多特征融合的矿用烟雾传感器设计[J]. 煤矿机械, 2023, 44(6): 6–10.
- ZHANG Ziliang. Design of mine smoke sensor based on AHP multi feature fusion[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(6): 6–10.
- [52] 王晓强, 米万升, 杨永辰. 基于非接触模式的采空区遗煤自燃预测红外有效探测距离研究 [J/OL]. 红外技术: 1–8[2023-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1053.TN.20231206.1117.002.html>.
- 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/OL]. *Infrared Technology*: 1–8[2023-12-20]. <https://link.cnki.net/urlid/53.1053.TN.20231206.1117.002>.
- [53] 范伟强. 矿井外因火灾双光谱图像监测方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- FAN Weiqiang. Research on dual-spectrum image monitoring method for mine external fire [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [54] 李光宇, 李守军, 缪燕子. 基于机器视觉和灰色模型的矿井外因火灾辨识与定位方法 [J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(2): 82–87.
- LI Guangyu, LI Shoujun, MIAO Yanzi. Identification and positioning method of mine external fire based on machine vision and grey model[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(2): 82–87.
- [55] 刘孝军, 王飞. 基于 AI 的煤矿视频智能分析技术 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 260–264.
- LIU Xiaojun, WANG Fei. Application of video intelligent analysis technology in coal mine based on computer vision[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S2): 260–264.
- [56] 孙继平, 李小伟, 徐旭, 等. 矿井电火花及热动力灾害紫外图像感知方法研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 1–4, 95.
- SUN Jiping, LI Xiaowei, XU Xu, et al. Research on ultraviolet image perception method of mine electric spark and thermal power disaster[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(4): 1–4, 95.
- [57] 范伟强, 李晓宇, 刘毅, 等. 基于可见光视觉特征融合的矿井外因火灾监测方法 [J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 529–537.
- FAN Weiqiang, LI Xiaoyu, LIU Yi, et al. Mine external fire monitoring method using the fusion of visible visual features[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 529–537.
- [58] 孙继平, 崔佳伟. 矿井外因火灾感知方法 [J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 1–5, 38.
- SUN Jiping, CUI Jiawei. Mine external fire sensing method [J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(4): 1–5, 38.
- [59] 刘晓琴. 基于视频图像的矿井火灾火焰识别方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- LIU Xiaoqin. Research on mine fire flame recognition method based on video image [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [60] 袁洁, 袁伟, 贾阳, 等. 一种基于纹理特征的主动红外烟雾识别方法 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 86–89.
- YUAN Jie, YUAN Wei, JIA Yang, et al. Renovated identifying method of the active infrared smoke based on the texture feature analysis[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(2): 86–89.
- [61] 单亚锋, 马艳娟, 付华, 等. 分布式光纤测温系统在煤矿火灾监测中的应用 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27(5): 704–708.
- SHAN Yafeng, MA Yanjuan, FU Hua, et al. Application of distributed optical fiber temperature measurement system in coal mine fire monitoring system[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(5): 704–708.
- [62] 赵端, 李涛, 董彦强, 等. 基于边缘智能的煤矿外因火灾感知方法 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 108–115.
- ZHAO Duan, LI Tao, DONG Yanqiang, et al. Coal mine external fire detection method based on edge intelligence[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(12): 108–115.
- [63] QIU Xuanbing, LI Jie, WEI Yongbo, et al. Study on the oxidation and release of gases in spontaneous coal combustion using a dual-species sensor employing laser absorption spectroscopy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103042.
- [64] 王伟峰, 张宝宝, 王志强, 等. 基于 YOLOv5 的矿井火灾视频图像智能识别方法 [J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 53–57.
- WANG Weifeng, ZHANG Baobao, WANG Zhiqiang, et al. Intelligent identification method of mine fire video images based on YOLOv5[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(9): 53–57.
- [65] WANG Zilong, ZHANG Tianhang, HUANG Xinyan. Predicting real-time fire heat release rate by flame images and deep learning [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 4115–4123.
- [66] LI Sen, YUN Junying, FENG Chunyong, et al. An indoor

- autonomous inspection and firefighting robot based on SLAM and flame image recognition [J]. Fire-Switzerland, 2023, 6(3): 93.
- [67] 李涛. 矿井火灾边缘智能检测系统设计与研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI Tao. Design and research of mine fire edge intelligent detection system [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [68] 朱红青, 杨成轶, 秦晓峰, 等. 瞬变电磁法——整合矿井火区探测的有效方法 [J]. 科技导报, 2014, 32(25): 2.
- 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): 2.
- [69] CHEN Youying, SHEN Yixin, XIAO Shiyun, et al. A detailed magnetic characterization of combustion products from various metamorphic grade coals [J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 217: 105168.
- [70] 张辛亥, 王辉, 郭戎, 等. 松散煤岩中放射性氡多角度扩散试验装置研制及应用 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 80–84.
- ZHANG Xinhai, WANG Hui, GUO Rong, et al. Development and application of multiangle diffusion test device for radioactive radon in loose coal rock [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(6): 80–84.
- [71] 周斌, 周文强, 董智宇, 等. 氧化升温过程中煤岩介质体氡析出特性实验研究 [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.
- [72] 刘思鑫, 李洪先, 王国芝, 等. 基于SF6示踪试验的孤岛面采空区漏风规律研究 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 166–170.
- LIU Sixin, LI Hongxian, WANG Guozhi, et al. Study on leakage law of isolated island surface mining area based on SF6 tracer test [J]. Coal Technology 2021, 40(12): 166–170.
- [73] 叶庆树, 戴广龙, 李鹏, 等. 基于双示踪技术浅埋煤层采空区地表漏风规律研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(7): 83–87.
- YE Qingshu, DAI Guanglong, LI Peng, et al. Air leakage law of surface above shallow coal seam goaf based on dual-element tracing [J]. Coal Engineering, 2020, 52(7): 83–87.
- [74] 华义. 神府矿区隐蔽采空区相关致灾因素分析及勘查技术 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1017–1024.
- MU Yi. Analysis of disaster-causing factors and exploration techniques in concealed minedareas in Shengfu mining area [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1017–1024.
- [75] GUO Jun, SHANG Haoyu, CAI Guobin, 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.
- [76] YIN Jueli, SHI Linchao, LIU Zhen, et al. Study on the variation laws and fractal characteristics of acoustic emission during coal spontaneous combustion [J]. Processes, 2023, 11(3): 786.
- [77] 陈欢, 杨永亮. 煤自燃预测技术研究现状 [J]. 煤矿安全, 2013, 44(9): 1–26.
- CHEN Huan, YANG Yongliang. Research status of predicting coal spontaneous combustion [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 1–26.
- [78] LIANG Yuntao, SONG Shuanglin, GUO Baolong, et al. Study on the coupling characteristics of infrasound-temperature-gas in the process of coal spontaneous combustion and a new early warning method [J]. Combustion Science and Technology, 2023: 1–21.
- [79] 段锁林, 杨可, 毛丹, 等. 基于模糊证据理论算法在火灾检测中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(5): 231–235.
- DUAN Suolin, YANG Ke, MAO Dan, et al. Fuzzy evidence theory-based algorithm in application of fire detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(5): 231–235.
- [80] ZHAI Xiaowei, HAO Le, MA Teng, et al. Non-linear soft sensing method for temperature of coal spontaneous combustion [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 1023–1031.
- [81] 董寅. 基于BP神经网络的DS证据理论模型在火灾探测中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- DONG Yin. The research on application of ds evidence theory model based on BP neural in fire detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [82] 项平川. 基于LSTM与多传感器信息融合的火灾检测研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
- JIANG Pingchuan. Research on fire detection based on LSTM and multi-sensor information fusion [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [83] 李正周, 方朝阳, 顾园山, 等. 基于无线多传感器信息融合的火灾检测系统 [J]. 数据采集与处理, 2014, 29(5): 694–698.
- LI Zhengzhou, FANG Chaoyang, GU Yuanshan, et al. Fire detection system based on wireless multi-sensor information fusion [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2014, 29(5): 694–698.
- [84] 陈婷婷, 赵世忠. 多传感器信息融合模糊控制模型设计 [J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 911–915.
- CHEN Tingting, ZHAO Shizhong. Design of multi-sensor information fusion fuzzy control model [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 911–915.
- [85] 邓军, 徐精彩, 阮国强, 等. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述 [J]. 西安矿业学院学报, 1999(4): 293–297, 337.
- DENG Jun, XU Jingcai, RUAN Guoqiang, et al. Review of the prediction and forecasting techniques of coal self heating both at home and abroad [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 1999(4): 293–297, 337.
- [86] 王福生, 张志明, 董宪伟. 基于BP神经网络的煤自燃倾向性预测: 以唐山矿及荆各庄矿为例 [J]. 唐山学院学报, 2020, 33(3): 16–20.
- WANG Fusheng, ZHANG Zhiming, DONG Xianwei. Forecast of coal spontaneous combustion tendency based on bp neural network: with tangshan mine and jinggezhuang mine as an example [J]. Tangshan Xueyuan Xuebao, 2020, 33(3): 16–20.
- [87] 昝军才, 魏成才, 蒋可娟, 等. 基于BP神经网络的煤自燃温度预测研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 113–117.

- ZAN Juncai, WEI Chengcui, JIANG Kejuan, et al. Prediction of coal spontaneous combustion temperature based on BP neural network[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(10): 113–117.
- [88] 刘永立, 刘晓伟, 王海涛. 基于 LSTM 神经网络的煤矿火灾预测[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2023, 33(1): 1–5.
- LIU Yongli, LIU Xiaowei, WANG Haitao. Coal mine fire prediction based on LSTM neural network[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2023, 33(1): 1–5.
- [89] 贾澎涛, 林开义, 郭风景. 基于 PSO-SRU 深度神经网络的煤自燃温度预测模型[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 105–113.
- JIA Pengtao, LIN Kaiyi, GUO Fengjing. A temperature prediction model for coal spontaneous combustion based on PSO-SRU deep artificial neural networks[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 105–113.
- [90] 孔彪, 朱思想, 胡相明, 等. 基于改进鲸鱼算法优化 BP 神经网络的煤自燃预测研究[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(5): 30–36.
- KONG Biao, ZHU Sixiang, HU Xiangming, et al. Study on prediction of coal spontaneous combustion based on MSWOA-BP[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(5): 30–36.
- [91] 邓军, 雷昌奎, 曹凯, 等. 煤自燃预测的支持向量回归方法[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(2): 175–180.
- DENG Jun, LEI Changkui, CAO Kai, et al. Support vector regression approach for predicting coal spontaneous combustion[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 175–180.
- [92] 董天文. 矿井采空区内因火灾动态预警方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
- DONG Tianwen. Research on dynamic early warning method of fire in goaf [D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [93] 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(S1): 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.
- [94] WANG Wei, LIANG Ran, QI Yun, et al. Study on the prediction model of coal spontaneous combustion limit parameters and its application[J]. *Fire-Switzerland*, 2023, 6(10): 381.
- [95] KAMRAN Muhammad, SHAHANI Niaz Muhammad. Decision support system for the prediction of mine fire levels in underground coal mining using machine learning approaches [J]. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2022, 39(2): 591–601.
- [96] 王媛彬, 马宪民. 煤矿外因火灾早期探测方法研究[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(9): 63–66.
- WANG Yuanbin, MA Xianmin. Research of early prediction method for exogenous fire in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(9): 63–66.
- [97] 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.
- [98] 郑学召, 李梦涵, 张嫌妮, 等. 基于随机森林算法的煤自燃温度预测模型研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(5): 58–64.
- ZHENG Xuezhaoh, LI Menghan, ZHANG Yanni, et al. Research on the prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on random forest algorithm[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(5): 58–64.
- [99] 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.
- [100] 邓军, 张燕妮, 徐通模, 等. 煤自然发火期预测模型研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(5): 568–571.
- DENG Jun, ZHANG Yanni, XU Tongmo, et al. Study on prediction model of coal spontaneous combustion stage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(5): 568–571.
- [101] 张春, 题正义, 李宗翔. 基于采空区漏风量的遗煤温度预测模拟分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(3): 328–332, 424.
- ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Simulation analysis of residual coal temperature prediction Based on air leakage volume of goaf[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(3): 328–332, 424.
- [102] 周旭, 朱毅, 张九零, 等. 基于 PSO-XGBoost 的煤自燃程度预测研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(6): 79–84.
- ZHOU Xu, ZHU Yi, ZHANG Jiuling, et al. Study on prediction model of coal spontaneous combustion based on PSO-XGBoost[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(6): 79–84.
- [103] 朱令起, 邵静静, 刘聰, 等. 指标气体与温度耦合的烟煤自燃预测模型研究[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(1): 44–46, 50.
- ZHU Lingqi, SHAO Jingjing, LIU Cong, et al. Research on forecasting model of bituminous coal spontaneous combustion combining indicator gases and temperature [J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(1): 44–46, 50.
- [104] 汪伟, 贾宝山, 祁云. 改进 CRITIC 修正 G2-TOPSIS 的钻孔自燃预测模型及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(11): 26–31.
- WANG Wei, JIA Baoshan, QI Yun. Prediction model of spontaneous combustion risk of extraction drilling based on improved CRITIC modified G2-TOPSIS method and its application[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11): 26–31.
- [105] 郑学召, 童鑫, 郭军, 等. 煤矿智能监测与预警技术研究现状与发展趋势[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(6): 35–40.
- ZHENG Xuezhaoh, TONG Xin, GUO Jun, et al. Research status and development trend of intelligent monitoring and early warning technology in coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2020, 46(6): 35–40.
- [106] 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. Experi-

- mental study on spontaneous combustion prediction index gas of water immersed long flame coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(5): 89–94.
- [107] 王福生, 王建涛, 顾亮, 等. 煤自燃预测预报多参数指标体系研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(6): 45–51.
- WANG Fusheng, WANG Jiantao, GU Liang, *et al.* Study on multi-parameter index system for prediction and forecast of coal spontaneous combustion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(6): 45–51.
- [108] 贾海林, 崔博, 焦振营, 等. 基于 TG/DSC/MS 技术的煤氧复合全过程及气体产物研究 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3704–3714.
- JIA Hailin, CUI Bo, JIAO Zhenying, *et al.* Study on the whole process and gas products of coal-oxygen complex reaction based on TG/DSC/MS technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3704–3714.
- [109] 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.
- [110] 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): e0202724.
- [111] GUO Jun, QUAN Yanping, CAI Guobin, *et al.* Meticulous graded and early warning system of coal spontaneous combustion based on index gases and characteristic temperature [J]. *Acs Omega*, 2023, 8(7): 6801–6812.
- [112] 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 coalmines: research status and intelligent development trends [J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(9): 7–17.
- [113] 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 Yanan. Research on prediction and forecast indicators system of easy spontaneous combustion coal seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 229–234.
- [114] XU Xuefeng, ZHANG Fengjie. Evaluation and optimization of multi-parameter prediction index for coal spontaneous combustion combined with temperature programmed experiment [J]. *Fire-Switzerland*, 2023, 6(9): 368.
- [115] 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 multilevel warning method of coal spontaneous combustion based on Logistic regression analysis [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(2): 88–93.
- [116] WANG Kai, LI Yang, ZHAI Xiaowei, *et al.* A method for evaluating the coal spontaneous combustion index by the coefficient of variation and Kruskal-Wallis test: a case study [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(20): 58956–58966.
- [117] YANG Yong, FEI Jinbiao, LUO Zhenmin, *et al.* Experimental study on characteristic temperature of coal spontaneous combustion [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(19): 10011–10019.
- [118] 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.
- [119] 周旭, 王认卓, 代亚勋, 等. 基于 BO-XGBoost 的煤自燃分级预警研究 [J]. *煤炭工程*, 2022, 54(8): 108–114.
- ZHOU Xu, WANG Renzuo, DAI Yaxun, *et al.* Classified early warning of coal spontaneous combustion based on BO-XGBoost [J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(8): 108–114.
- [120] 邓军, 杨囡囡, 王彩萍, 等. 采空区煤自燃“防-抑-灭”协同防灭火关键技术 [J]. *煤矿安全*, 2022, 53(9): 1–8.
- DENG Jun, YANG Nannan, WANG Caiping, *et al.* Key technology of “preventing-suppressing-extinguishing” coordinated fire preventing and extinguishing for coal spontaneous combustion in goaf [J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(9): 1–8.
- [121] GUO Chaowei, JIANG Shuguang, SHAO Hao, *et al.* Effect of secondary oxidation of pre-oxidized coal on early warning value for spontaneous combustion of coal [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2023, 13(5): 3154.
- [122] ZHANG Zhenya, DONG Ziwen, KONG Song, *et al.* Influence of long-term immersion in water at different temperatures on spontaneous combustion characteristics of coal [J]. *Acs Omega*, 2023, 8(35): 31683–31697.
- [123] 李东发, 褚燕杰, 师吉林. 矿井火灾智能预警系统 [J]. *工矿自动化*, 2022, 48(S1): 112–115, 120.
- LI Dongfa, ZHANG Yanjie, SHI Jilin. Intelligent mine fire early warning system [J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(S1): 112–115, 120.
- [124] 何勇军, 易欣, 王伟峰, 等. 煤矿井下电气火灾智能监控与灭火技术综述 [J]. *煤矿安全*, 2022, 53(9): 55–64.
- HE Yongjun, YI Xin, WANG Weifeng, *et al.* Review of intelligent monitoring and extinguishing technology of electricafire in coal mine [J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(9): 55–64.
- [125] 张伟, 陈红, 李陈莹, 等. 高压电力电缆隧道火灾早期预警判据的实验研究 [J]. *火灾科学*, 2021, 30(4): 232–241.
- ZHANG Wei, CHEN Hong, LI Chenying, *et al.* Experimental study on early warning criteria of fire in high voltage power cable tunnels [J]. *Fire Safety Science*, 2021, 30(4): 232–241.
- [126] WANG Weifeng, HUO Yuhang, KANG Furu, *et al.* Study on hazard of smoke generated by mining cable fires [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023: 1–11.
- [127] CHEN Xiaolong, HUANG Guozhong, GAO Xuehong, *et al.* BNRA: a hybrid model for risk analysis of overload-induced early cable fires [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(19): 8922.
- [128] LI Chenying, CHEN Jie, PU Ziheng, *et al.* Research on fire pre-

- diction method of high-voltage power cable tunnel based on abnormal characteristic quantity monitoring [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 836588.
- [129] XIE Qiyuan, CHEN Hong, YUAN Yanhua. Heat blockage of air gap for inner overheating of high-voltage power cable and delay of early detection [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2020, 38(4): 363–376.
- [130] LIU Haonan, ZHU Guoqing, PAN Rongliang, et al. Experimental investigation of fire temperature distribution and ceiling temperature prediction in closed utility tunnel [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019, 14: 100493.
- [131] 王彦文, 张旭然, 高彦, 等. 三芯矿用电缆线芯温度预测及故障预警方法 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1439–1448.
WANG Yanwen, ZHANG Xuran, GAO Yan, et al. Prediction of core temperature and early warning of fault of three-core mining cable [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1439–1448.
- [132] ZHANG Duo, LIU Maoxia, WEN Hu, et al. Use of coupled TG-FTIR and Py-GC/MS to study combustion characteristics of conveyor belts in coal mines [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(11): 4779–4789.
- [133] WANG Weifeng, LIU Hanfei, YANG Bo, et al. Pyrolysis characteristics and dynamics analysis of a coal mine roadway conveyor belt [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(11): 4823–4832.
- [134] 丁伟杰, 刘昱廷, 李建英, 等. 基于窄带物联网技术的智能火灾报警系统设计 [J]. *电工技术*, 2023(18): 19–21, 120.
DING Weijie, LIU Yuting, LI Jianying, et al. Design of intelligent fire alarm system based on narrowband internet of things technology [J]. *Electric Engineering*, 2023(18): 19–21, 120.
- [135] 贺耀宜, 陈晓晶, 郝振宇, 等. 智能矿山低代码工业物联网平台设计 [J]. *工矿自动化*, 2023, 49(6): 141–148, 174.
HE Yaoyi, CHEN Xiaojing, HAO Zhenyu, et al. Design of intelligent mine low code industrial IoT platform [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 49(6): 141–148, 174.
- [136] 张静, 聂章龙. 基于物联网的煤矿安全监测与预警平台设计 [J]. *煤炭技术*, 2021, 40(10): 209–211.
ZHANG Jing, NIE Zhanglong. Design of coal mine safety monitoring and early warning platform based on internet of things [J]. *Coal Technology*, 2021, 40(10): 209–211.
- [137] 贺耀宜, 刘丽静, 赵立厂, 等. 基于工业物联网的智能矿山基础信息采集关键技术与平台 [J]. *工矿自动化*, 2021, 47(6): 17–24.
HE Yaoyi, LIU Lijing, ZHAO Lichang, et al. Key technology and platform of intelligent mine basic information acquisition based on industrial internet of things [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 47(6): 17–24.
- [138] 陈珍萍, 黄友锐, 唐超礼, 等. 占空比机制下煤矿井下物联网感知层时间同步 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 232–238.
CHEN Zhenping, HUANG Yourui, TANG Chaoli, et al. Under-
- ground coalmine IoTs perception layer time synchronization under dutycycle mechanism [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 232–238.
- [139] ZHAO Yifan, TIAN Shuicheng. Hazard identification and early warning system based on stochastic forest algorithm in underground coal mine [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41(1): 1193–1202.
- [140] 降华. 基于云计算的煤炭自燃安全监测系统设计 [J]. *煤炭技术*, 2023, 42(8): 154–158.
JIANG Hua. Design of coal spontaneous combustion safety monitoring system based on cloud computing [J]. *Coal Technology*, 2023, 42(8): 154–158.
- [141] 丁恩杰, 金雷, 陈迪. 互联网+感知矿山安全监控系统研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(1): 129–134.
DING Enjie, JIN Lei, CHEN Di. Study on safety monitoring and control system of internet + perception mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 129–134.
- [142] 曹允钦. 基于云计算和物联网的煤矿安全动态诊断系统研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(7): 135–139.
CAO Yunqin. Study on dynamic diagnosis system of mine safety based on cloud computing and internet of things [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 135–139.
- [143] 周福宝, 时国庆, 王雁鸣, 等. 矿井密闭全生命周期安全风险监测预警 [J]. *工矿自动化*, 2023, 49(6): 48–56.
ZHOU Fubao, SHI Guoqing, WANG Yanming, et al. Safety risks monitoring and warning throughout the full lifecycle of mine airtightening [J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(6): 48–56.
- [144] 卢万杰, 付华, 赵洪瑞. 基于深度学习算法的矿用巡检机器人设备识别 [J]. *工程设计学报*, 2019, 26(5): 527–533.
LU Wanjie, FU Hua, ZHAO Hongrui. Equipment recognition of mining patrol robot based on deep learning algorithm [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2019, 26(5): 527–533.
- [145] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(3): 10–17.
JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for minewater hazard prevention and control [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 10–17.
- [146] 葛明臣, 刘大同. 基于 BP 神经网络的井下电弧火灾预警研究 [J]. *煤炭技术*, 2020, 39(9): 195–198.
GE Mingchen, LIU Datong. Study on downhole arc fire warning based on BP neural network [J]. *Coal Technology*, 2020, 39(9): 195–198.
- [147] 肖粲俊, 刘红梅, 石发强, 等. 基于数字孪生的煤矿智能管控平台架构研究与实现 [J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(5): 43–49.
XIAO Canjun, LIU Hongmei, SHI Faqiang, et al. Research and implementation of intelligent control platform architecture for coal mine based on digital twin [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(5): 43–49.