矿井巷道火灾应急救援技术研究现状

马　砺[1],高文博[1],王　旭[2,3],王　凯[2],宋　岩[3],范　晶[1]
(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安　710054;2. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州　221116;
3. 兖矿能源集团股份有限公司,山东 邹城　273500)

摘要: 矿井巷道属于狭长受限空间,火灾时烟气蔓延快、通风系统紊乱、灭火救援难度大. 本文从巷道火灾热动力学特征、监测与侦检、应急处置及救援演练技术等方面系统综述了巷道火灾应急救援技术现状. 分析了巷道中火灾发展与烟气运动理论,阐明了不同通风方式与巷道形式下的热动力灾害特征,剖析了高温烟气环境中救援技术难题. 梳理了救援过程中的火灾环境监测侦检技术,归纳了巷道内灾变烟流调控、灭火处置技术及方法,总结了灭火处置训练、装备配备以及辅助决策技术. 最后,展望了我国矿井巷道火灾技术理论、应急救援技术和救援演练的发展趋势:技术理论层面应加强全尺寸巷道网络的火灾发展、烟流调控和灭火试验,增强真实火灾下的技术验证;装备技术层面应加强侦检和灭火装备智能化,研究通风控制与灭火处置的协同技术,研发融合大数据和人工智能的应急救援决策辅助系统;在救援演练方面需要加强火灾虚拟场景与救援实操演练结合,提升巷道火灾应急救援技术水平.

关键词: 巷道火灾;应急救援;侦检技术;救援装备;火灾处置
中图分类号: TD 77　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0309-17

Research status of emergency rescue technology for mine roadway fire

MA Li[1], GAO Wenbo[1], WANG Xu[2,3], WANG Kai[2], SONG Yan[3], FAN Jing[1]
(1. School of Safety Seience and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi, Xi'an 710054, China;
2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Yankuang Energy Group Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: Mine roadways are narrow, confined spaces, characterized by rapid smoke spread, disrupted ventilation systems, and significant challenges in firefighting and rescue during fires. This paper systematically reviewed the technological advancements in emergency rescue for mine roadway fires, focusing on fire thermodynamics, detection techniques, response techniques, and rescue exercise technologies. Theories of fire development and smoke movement in roadways were analyzed, the thermodynamic disaster characteristics under different ventilation methods and roadway forms were clarified, and the challenges of rescue operations in high-temperature smoke environments were expounded. Detection and monitoring technologies and equipment used during rescue operations were summarized, and techniques and methods for smoke flow regulation, automatic fire suppression, and manual firefighting in roadways were reviewed. The current status of firefight-

收稿日期: 2025-12-07　　**修回日期:** 2026-01-21　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250568
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3009800);陕西省重点领域科技创新团队项目(2023-CX-TD42)
通信作者: 马　砺(1978—),男,四川省隆昌市人,教授,博士生导师. E-mail:mal@xust.edu.cn
引用格式: 马　砺,高文博,王　旭,等. 矿井巷道火灾应急救援技术研究现状[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(2):309-325.
MA Li, GAO Wenbo, WANG Xu, et al. Research status of emergency rescue technology for mine roadway fire[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 309-325.

ing training, equipment deployment, and auxiliary decision-support technologies was also discussed. Finally, the development trends of mine roadway fire technology in China are proposed. At the theoretical level, full-scale experimental studies on fire development, smoke flow control, and fire suppression in roadway networks should be strengthened to enhance technical validation under real fire conditions. At the equipment level, the development of intelligent detection and firefighting equipment should be accelerated, and coordinated research on ventilation control and fire suppression should be promoted, and emergency rescue decision-support systems integrating big data and artificial intelligence should be developed. In terms of rescue training, it is necessary to strengthen the combination of practical firefighting operations and virtual scenario drills to improve the emergency rescue capability of rescue teams. This review provides new directions for improving the level of emergency rescue technology.

Key words: mine roadway fire; emergency rescue; detection and monitoring technology; rescue equipment; fire suppression

火灾是矿井生产中五大灾害类型之一，常发生在井下巷道、工作面、硐室和采空区等区域[1]. 近 10 年国内煤矿重特大事故中，火灾起数占比 10%，仅次于瓦斯爆炸事故和水灾事故[2]. 据应急管理部、矿山安全监察局发布的 2005—2024 年期间巷道火灾事故信息统计分析（图 1），火灾事故主要诱因包括放电、爆破、违规明火和摩擦撞击等. 电缆和输送带等典型外因火灾发生频率增加，造成人员伤亡、设备设施破坏，甚至引发瓦斯与煤尘爆炸等次生灾害，严重威胁煤矿安全生产[3]. 2020 年 9 月重庆松藻煤矿发生输送带火灾，造成 16 人死亡；2023 年 9 月，贵州山脚树煤矿发生输送带火灾，造成 16 人死亡[4].

巷道火灾具有突发性、破坏性和继发性等特点，救援工作危险性大，增加救援处置决策难度[5]. 应急救援作为矿山安全生产最后防线和重要保障，其科学化、专业化和智能化水平直接关系到灾害事故处置效果和人员生命财产安全. 目前，火灾应急救援装备种类逐渐完善，个人防护、侦测与搜索类、救援与抢险技术、通信与信息传输技术以及其他技术装备专业化与先进性持续提升，基本满足救援实际需求[6-7]. 然而，巷道火灾救援中存在火灾场景复杂多变与处置技术不适应等问题，易造成遇险与救援人员伤亡，需进一步开展研究不同巷道火灾场景，在烟气控制、风流调控与火源处置等关键环节，提升巷道火灾救援装备智能化、管理精细化和专业化水平[8-9]. 因此，通过系统梳理和总结巷道火灾救援处置技术现状，对应急救援能力水平提升具有重要意义. 本文从巷道火灾特征和救援难点、巷道火灾监测与侦检技术、应急处置技术以及救援演练等 4 个方面开展系统总结，展望了巷道火灾灭火救援技术发展趋势.

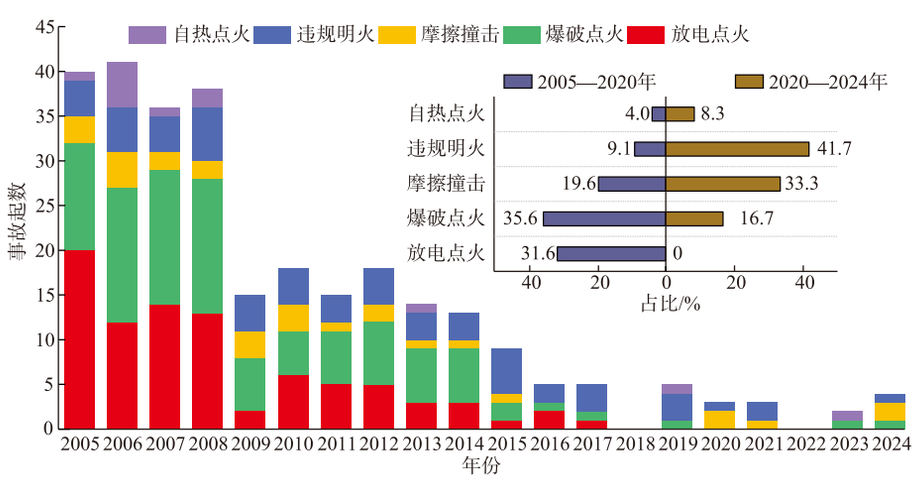


图 1 我国矿井火灾事故及原因统计分析

Fig. 1 Statistics of mine fire accidents in China

1　矿井巷道火灾特征及救援难点

矿井巷道属于受限空间，发生火灾时有烟气分层、径向蔓延和逆流等现象．国内外学者通过全尺寸、中尺寸、小尺寸和数值模拟试验对巷道火灾期间的烟气蔓延、温度分布、临界风速和烟流逆退长度等火灾特征进行了研究[10-11]，如图 2 所示．Kurioka模型中：$\triangle T_{max}$为下游烟层最大温升，K；T_a为通风风流温度，K；γ和ε为试验常数；Q为热释放速率，kW；Fr为弗鲁德数；$\triangle T$为温升，K；$\triangle T_0$为参考点温升，K；a和b为常量；x为距火源的距离，m；x_0为参考点距火源的距离，m；L为特征长度，m．临界风速研究中：v_{cr}为临界风速，m/s；k为常数，取 1；g为重力加速度，取 9.8 m/s^2；H为巷道高度，m；c_p为定压比热，kJ/(kg•K)；ρ_0为矿内空气密度，1.2 kg/m^3；A为巷道断面积，m^2；T为烟气温度，K．坡度修正公式中：$v(\theta)$为倾角正切值为θ时的临界风速，m/s；θ为倾角正切值的百分数；$v(0)$为倾角为 0 时的临界风速，m/s；α为巷道摩擦阻力系数，N•S^2/m^4；β为断面阻塞比；f为无因次比例系数，取值范围为 0.004～0.004 6；D_e为巷道当量直径，m；$E_{1(B)}$为下游火源产生的回流中烟气微团的初始动能，J；$f_B(x_B)$为其在运动过程所受阻力，N；$E_{1(A)}$为上游火源产生的回流中烟气微团的初始动能，J；d为火源间距，m；V_0为单位体积，m^3；ρ_w为风流平均密度，kg•m^{-3}．烟气逆退长度研究中：L^*为烟气逆退长度，m；L^*_{double}为双火源烟气逆退长度，m；Q_1和Q_2分别为双火源中火源 1 和火源 2 的热释放速率，kW；V^*为纵向风速，m/s；k_1和k_2为影响系数．

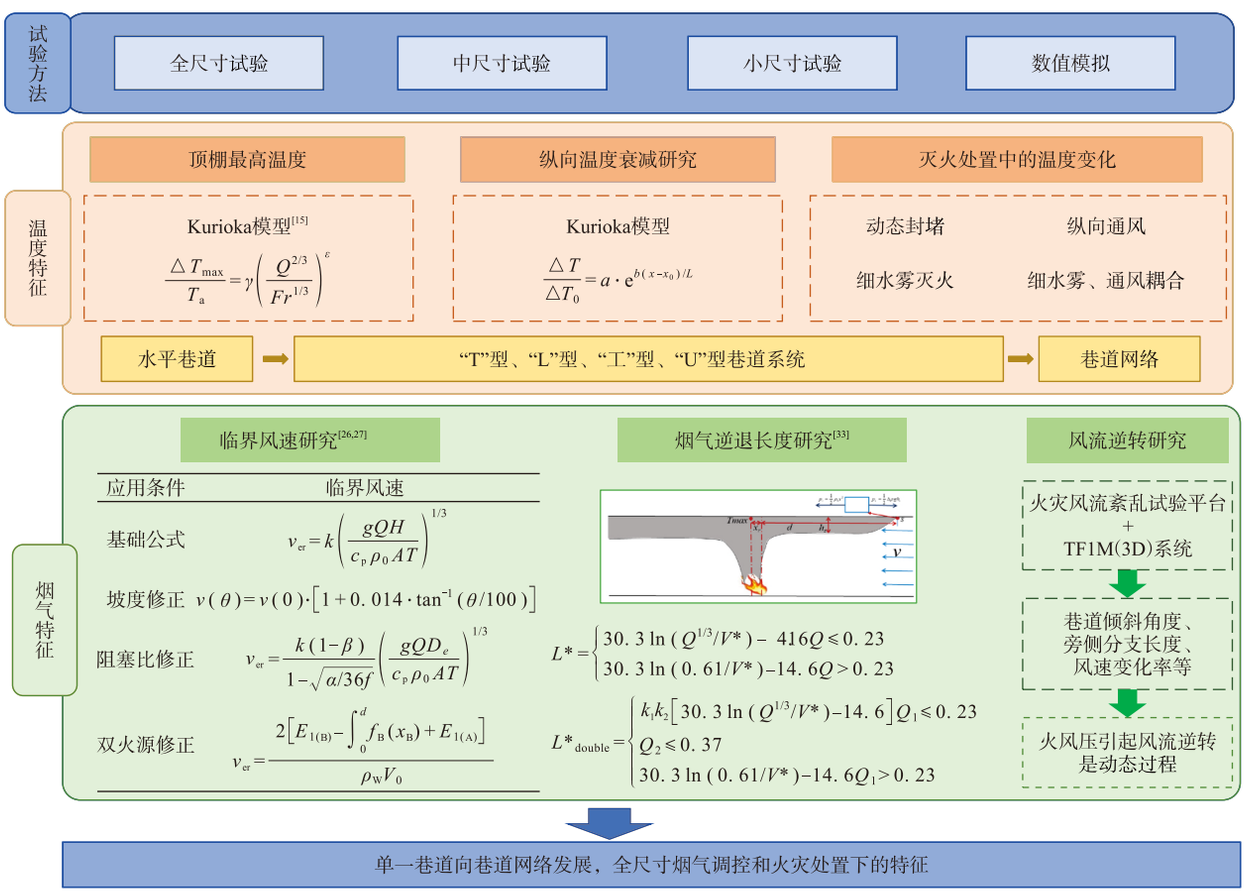


图 2　矿井巷道火灾温度与烟气研究方法

Fig. 2　Research methods for temperature and smoke in mine roadway fire

1.1　巷道火灾温度分布特征

巷道火灾温度特征主要体现在顶棚最高温度、纵向温度衰减以及烟气温度分布等．巷道倾斜角度、机械通风、封闭过程对巷道火灾温度分布特征有较大的影响[12-13]．文献[14]建立了火羽流中心线上特征温度分布模型．文献[15]研究了狭长受限空间顶棚最高温度预测模型．文献[16]研究了顶棚温度在水平距离上的分布并建立温度衰减预测模型．文献[17-18]利用小尺寸和数值模拟方法对顶棚最高温度预测模型进行了验证和修正．文献[19]研究全尺寸模拟巷道中通风作用下火灾温度分布．在复杂巷道形式如“T”型、“L”型、“工”

型、“U”型中，开展了火灾蔓延规律和温度分布特征研究[20-21]. 文献[22]利用Ventsim软件建立皮带巷火灾网络模型，研究了火灾近灾源场-控风排烟区域-复杂风网调控的演化特性. 在灭火处置过程中的温度变化方面，文献[23]采用1∶10小尺寸试验装置和火灾动力学模拟(FDS)相结合的方法研究了巷道直接封堵和动态封堵过程中温度变化规律. 文献[24]采用数值模拟的方法研究了细水雾和纵向通风耦合作用下的火灾温度分布.

目前巷道火灾常以油池或木垛作为近似火源，采用相似试验和数值模拟相结合的方法，开展火灾蔓延和温度分布规律研究. 需要进一步开展胶带、电缆、无轨胶轮车等典型全尺寸巷道火灾发展过程、烟流特性和温度动态演化规律研究.

1.2 巷道火灾烟气蔓延规律

火灾烟气通常会出现上升、沉降、径向蔓延和逆流现象. 目前，研究集中于巷道通风控制下的烟气分层、烟气逆退、临界风速及风流逆转等特征. 火风压、火区阻力是研究井下烟气运移的重要参数，前者是造成巷道风流紊乱、出现烟流逆退或风流逆转现象的主要原因，后者反映巷道通风控制的难易程度. 文献[25-26]发现浮力效应是烟气逆退的主导作用，并提出阻止火灾烟气逆退的临界风速计算公式. 文献[27]通过1∶10小尺寸模型试验在其基础上对临界速度计算公式进行修正.

通风风速、火源功率、巷道尺寸与倾角等因素影响了烟气产生[28-29]. 文献[30-31]通过理论分析和数值模拟方法对比研究了隧道火灾纵向通风和临界风速的关系，得到临界风速随着隧道宽度增加而变大. 文献[32]发现巷道风速对火灾烟气蔓延方向及速度影响较大，并得到了阻止烟气逆退的临界风速. 文献[33]采用FDS模拟研究了双火源火灾的烟气逆流长度随火源间距的变化规律，提出了双火源烟流逆退长度的预测公式. 烟气分层现象是其运动过程中的重要特征，高温浮力作用下烟羽流撞击巷道顶板后形成顶棚射流，烟气卷吸空气形成烟气分层，且火源下游纵向范围内烟气层温度由上向下依次降低[34-35]. 当烟气层与下部空气层的热量及质量交换降低，分层越明显[36]. 强制通风和巷道坡度、火源功率增加均会造成烟囱效应和烟气自身浮力改变，导致烟气分层现象失稳[37]. 此外，巷道网络风流逆转和烟气流动蔓延也被大量研究. 文献[38]设计搭建矿井火灾风流紊乱试验平台和矿井灾变时期通风仿真系统——TF1M(3D)系统，认为巷道网络中旁侧支路有次序性地发生风流逆转，造成烟流涌入和回流是导致灾害扩大的原因，且巷道倾斜角度越大，火风压作用增强，更容易发生烟流逆退现象. 文献[39]推导了火风压条件下旁侧分支逆转次序的判别式，认为火风压引起风流逆转是动态过程. 文献[40]在此基础上发现，考虑风流惯性时旁侧分支长度或风速变化率与风流逆转相关. 文献[41]发现巷道内CO浓度空间分布与烟气层沉降及温度降低密切相关，且在顶部沿纵向呈衰减趋势.

目前，烟流逆退距离、临界风速研究主要聚焦于预测模型中系数和无量纲火源功率的取值范围的修正，火灾场景则由单一巷道向巷道网络发展. 然而，试验场景简化了火源，忽略各巷道间相互作用以及无轨胶轮车、传送带的阻塞作用，难以完全体现真实巷道火灾烟气的运移规律. 在技术上需要突破尺度效应和真实环境耦合作用的局限，开展全尺寸巷道不同类型火灾烟气蔓延规律和调控方法研究.

1.3 巷道火灾应急救援难点

巷道火灾中明火高温、烟气毒性、强刺激性和减光性是影响人员救援逃生的主要障碍[42]. 矿井通风、巷道倾角、直角转弯等都会影响烟气流动与温度分布，增加火灾不确定性及救援难度. 文献[43]建立了矿井火灾风流速度、毒性气体浓度与热释放速率、能见度的关系. 文献[44]研究确定烟气能见度低于3 m将严重影响应急决策及人员逃生速度. 此外，烟气蔓延也造成高温区域顺风迅速蔓延. 文献[45]研究发现火灾中心产生的高温烟气先流入下风侧，使其成为灼烧事故的主要区域.

灾变环境复杂多变导致灾区侦测与判定困难. 巷道内可燃气体、温度、烟气等环境参数时空演化规律不明确，气体组分预测性弱[46]. 应急通信普遍存在稳定性较差、传输距离受限、抗干扰能力较弱等问题，导致井下声音、图像、环境参数等信息难以高效传输，增加了灾后救援决策和行动难度[47].

巷道以及衍生灾害的不确定性显著增加灭火与处置风险. 高温明火和风流紊乱容易导致继发性瓦斯爆炸，如减风或停风导致瓦斯积聚，或瓦斯与新鲜风流混合形成爆炸极限区间内的混合气体，可能引发爆炸[48]. 受救灾现场条件限制，灾区气体和火源情况复杂，导致救援过程存在瓦斯爆炸风险.

2　巷道火灾监测与侦检技术

巷道高温和火焰灼烧、CO和瓦斯、煤尘爆炸等是矿井巷道火灾的主要威胁. 巷道火灾监测与侦检是开展决策制定、火灾处置和人员救援等行动的基础. 当前监测与侦检技术主要围绕火灾“热、气、光”特征，形成基于温度、气体、烟雾、视觉特征和红外图像等技术监测与侦查体系，如图3所示.

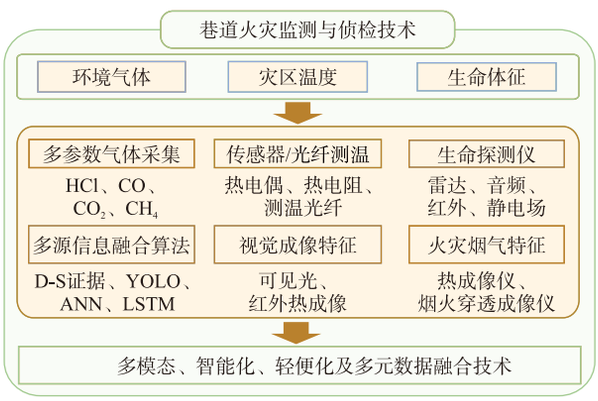


图3　巷道火灾监测及侦检技术

Fig. 3　Monitoring and detection technologies for mine roadway fire

2.1　巷道火灾监测

测温法是火灾主要监测方法，包含热电偶、测温电阻、光纤测温和红外测温等技术，常用于确定高温点和火灾危险范围. 温度传感器测温准确率高、实时性强，适用于巷道内易发火位置如皮带定点监测[49]. 光纤传感器具有连续精确测温、定位特点，采用分布式光纤实现煤矿带式输送机沿线火灾早期预警[50]. 红外测温按照探测方式可分为红外线和红外图像测温，具有非接触性、实时性、测温范围广、无测温热惯性、测量结果直观等优势[51].

气体监测是火灾状态分析重要方法之一. HCl、CO、CO_2、CH_4等是外因火灾标志性气体，可通过传感器监测其浓度变化实现火灾发展状态判断[52-53].《煤矿安全规程》第277条指出，抢救人员和灭火过程中，须检查CH_4、CO、煤尘、其他有害气体浓度和风向、风量的变化，并采取防止瓦斯、煤尘爆炸和人员中毒的安全措施. 文献[54]研发了矿井火灾和爆炸过程中O_2、CO、CH_4、CO_2、C_2H_2等气体的实时感知技术. 文献[55]提出了应急救援期间爆炸环境有毒有害气体综合分析方法.

高温区域火光、可见光和红外热成像监测是掌握火灾烟雾蔓延规律的检测手段之一. 文献[56]提出基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法，不受矿井光源形状、检测目标距离和图像大小、检测目标角度等影响. 文献[57]研究了一种基于YOLO的矿井外因火灾早期识别轻量化算法，构建了6 400张多场景火灾图像、矿井无火图像和矿井模拟火灾图像的可见光火灾探测数据集，提高识别精度. 文献[58]提出基于红外视觉特征融合的矿井火灾监测算法，实现远距离和早期阶段外因火灾监测. 文献[59-60]提出了基于双目视觉的高温热源和火源检测与定位方法，解决高温热源和火源定位难，红外图像无法直接用于双目视觉测距的问题.

为克服井下高热高湿和粉尘条件下单一检测指标难以有效表征火灾危险的问题，学者们在多源信息融合的算法上开展了大量研究，采用D-S证据理论、YOLO模型、神经网络、长短期记忆网络(LSTM)等数据处理方法将多种类、多数量的传感器信号进行分析处理，以实现火灾状态精准判断，如图4所示. 文献[61]基于D-S证据理论提出了外因火灾预警的多参量融合方法. 文献[62]构建YOLOv5s-as模型提高了视频检测和多传感器检测对初期火灾判识的可靠性. 文献[63]提出了基于环境参数的人工神经网络(ANN)预测火灾响应时间方法. 文献[64]提出了以温度、烟雾、CO、CO_2、O_2浓度等各种传感器全过程时序数据为基础的LSTM-AE算法模型. 文献[65]从体征及位置、设备状态、环境状态感知，以及生产过程智能控制、矿山安全联动与应急响应等方面构建了矿山“感知-通信-决策-控制”一体化框架. 这些多源信息融合算法有助于准确地辨识火灾发展状态，为应急救援行动决策提供技术支撑.

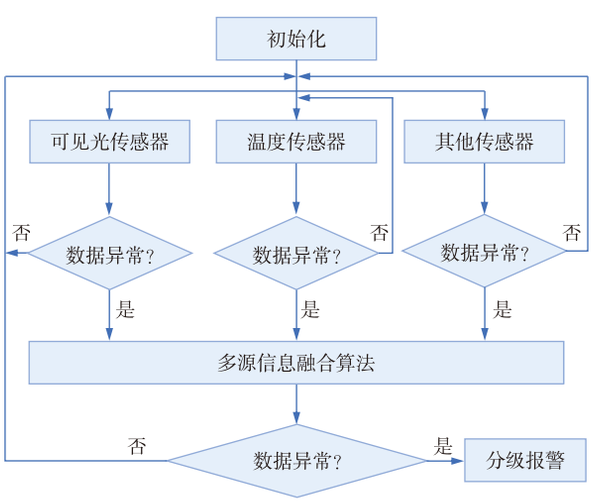


图4　火灾感知多源信息融合算法流程

Fig. 4　Workflow of a multi-source information fusion algorithm for fire perception

目前,多源信息融合的火灾感知方法已在井下监测预警系统进行使用,需要深入研究判断依据和融合方法,研发融合温度、气体与视觉数据多元数据融合的火灾态势判定技术.

2.2 巷道火灾侦检

本安型便携类多参数气体分析仪、环境监测仪和便携式气相色谱仪等现场化验装备,可对采集气体进行快速定性与定量检测,实现对O_2、CO、CO_2、CH_4、C_2H_6等气体测量[66]. 文献[67]提出了基于FreeRTOS的无线便携式多气体检测仪,可检测CH_4、CO和H_2S这3种气体. 文献[68]采用可调谐半导体激光吸收光谱技术实现千米矿井环境内多种气体实时监测. 文献[69]采用多参数检测设备与矿用智能机器人相结合侦测近距离环境参数. 文献[70]构建了基于无线网状网络和多参数环境监测终端的地下紧急救援通信系统,实现了井下各类环境参数实时监测. 总体而言,侦检装备正向智能化、集成化、远距离与非接触检测发展,可在复杂危险环境中快速获取气体组分、风速和温湿度等关键参数,为灾区侦查和人员搜救提供信息支撑.

生命探测仪通过微动信号捕获掩埋和遮挡条件下的人员. 常用设备包括雷达生命探测仪、音频生命探测仪、红外生命探测仪、静电场生命探测仪等[71]. 雷达生命探测利用电磁波对人体微弱周期性运动与介质差异的响应来实现探测与定位,其中超宽带雷达具有电磁波脉冲频谱宽、穿透性强、分辨力高、抗干扰性好及保密性高等优点[72]. 音频生命探测仪[73]利用敏感微振探头捕捉被困人员在废墟掩埋物下发出的敲击、摩擦等声音信号,通过放大、滤波、信号转换等步骤确定被困人员位置. 红外生命探测仪[74]基于热辐射原理进行探测,在浓烟、大火或黑暗等救援视线受到阻碍情况下具有较好效果. 静电场生命探测仪[75]利用人体产生静电场,通过感知人体在周围静电场中引起的微弱电势扰动,在密闭无风环境下探测准确率更高. 现有各类生命探测技术仍存在穿透与探测距离受限、对金属与强噪声环境敏感、易受障碍物影响以及单一传感体制适应性不足等问题.

矿用热成像仪和烟火穿透成像仪是侦测温度特征的重要装备. 矿用热成像仪可在浓烟、黑暗等环境下提供清晰热成像,便于快速识别被困人员、定位隐蔽火源、监测设备过热与自燃风险[76]. 烟火穿透成像仪在浓烟和火焰环境中也能提供清晰的成像,适用于能见度极低条件下的侦察和搜救[77]. 井下强光直射、复杂遮挡、煤尘高负荷以及水汽冷凝等因素会造成信噪比下降、伪热源增多与目标边缘模糊,影响侦测精度. 通过融合温度、图像、环境参数的检测数据,配合多级预警与智能识别算法,可提高目标判别的准确性与稳定性.

侦检技术涵盖环境气体监测、热成像和生命体征侦查等内容,未来巷道火灾侦检技术将聚焦多模态、智能化和轻便化发展,利用多传感器融合和机器人、无人机“人机协同”开展立体化侦检.

3 巷道火灾应急处置技术

巷道火灾应急处置技术主要包括风烟流控制、火灾处置技术和应急救援指挥调度等内容. 巷道火灾烟流有效控制、火灾快速灭火与应急指挥决策密切相关,直接决定了火灾处置效率.

3.1 火灾烟流调控技术

火灾烟流调控是通过对风向和风流控制,防止灾变产生烟气进入易燃易爆点和人员避灾路线,控制灾害事故扩大[78]. 文献[79]研发了矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统,对火灾时期通风参数及环境参数实时监测和通风系统远程可视化智能调控. 文献[80]通过模拟巷道运输巷火灾风烟流应急调控,确定了防止烟流逆退的临界风速,提出不同火灾场景下最佳风烟流联动方案. 文献[81]研发的井下灾变风烟流快速密闭气囊,能够在5 min内对灾变区域风烟流快速隔离.

井下巷道火灾发生地点随机性大,火源在回风巷时,为避免烟流滚退逆转,加大风机动力将烟流排出地面,烟气蔓延集中在回风巷致灾风险较小;火源在进风巷时,烟气随风流蔓延至作业地点,由回风巷排到地面,多采用全矿井反风、局部反风和进回风联络巷短路等控风排烟方式,控制烟流波及范围来降低灾害损失. 针对典型进风胶带巷火灾,改变正反向风门状态,主要路径上风流反向,火灾烟流反向由进风口排出地面;也可将主要胶带巷与回风巷之间联络巷风门打开,烟流短路导入回风巷进而排出地面,将热烟流参数融入风网解算,调节灾变通风网络的风量分配,满足胶带巷排烟的需求,还可保障新鲜风流区域的人员逃生用风.

风烟流的快速准确解算是烟气控制关键环

节．基于灾变时期巷道内风流场、温度场、烟流浓度场的数据监测，进行通风网络实时解算和机器学习预测分析，确定应急调控参数[82]．文献[83]基于全尺寸巷道火灾试验建立了火灾风烟流温度演化理论模型和控风模型．文献[84]提出有限差分法求解通风网络内风流传热-传质过程，实现了通风网络风量、风温和风速动态解算．文献[85]提出多目标智能决策与联动控制方法，采用裸粒子群优化算法进行通风决策．文献[86]研发了基于PID控制算法的多用风地点风量全自动在线联合调控系统．

灾变风烟流控制已从传统通风控制向远程、自动、智能化联动调控技术发展，如图5所示．巷道发生火灾后，井下分布式监测站点与多参数环境感知模块实时采集风速、温湿度及气体、烟雾等信息．各分站基于信息交互与决策算法，在通信受限时可实施本地自主判决．监测数据经工业以太网等传送至地面监控中心，融合分析后生成调控策略．最终，由风烟流智能调节装置联动通风设施与动力电源，实现风量、风向与封闭措施的远程控制．

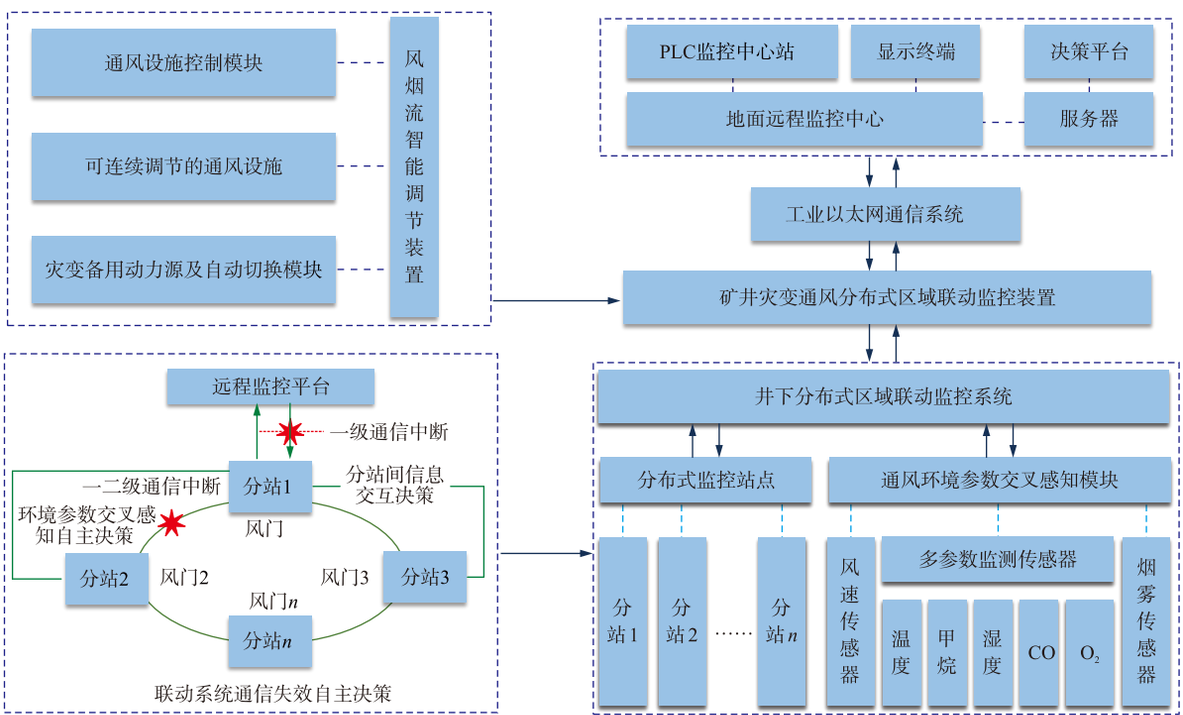


图5　矿井灾变风流调控技术

Fig. 5　Mine disaster air flow regulation technology

3.2　灭火处置技术

巷道火灾处置根据火灾类型、着火位置、通风条件与瓦斯含量，兼顾二次灾害风险防控与人员安全撤离，采用“控风、降温、隔氧、固压、封闭”的综合策略[87]．在火源明确、火势范围较小和瓦斯浓度在允许范围内时，采取清除火源和用水浇灭等直接灭火方法；当火源点不明确、火区范围大且难以接近火源，直接灭火无效或者危及救援人员安全时，应采取封闭火区的隔绝灭火或综合灭火方法，封闭具有爆炸危险的火区，采取注入惰性气体和注浆等惰化火区，消除爆炸危险，在安全位置建立密闭墙进行隔绝灭火[88-89]．处置流程如图6所示．

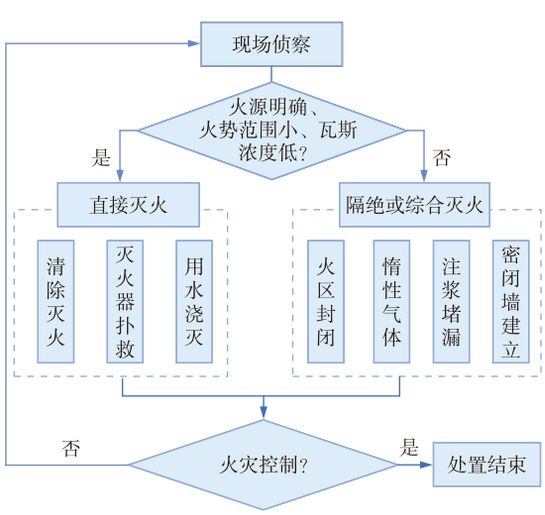


图6　矿井巷道火灾处置流程

Fig. 6　Process for mine roadway fire suppression

井下电气线路或电气设备火灾常用气体灭火系统控制，其中 IG-541 和二氧化碳灭火系统因其较好的灭火效能被广泛使用，尤其在封闭、半封闭空间内无人值守的用电场所或用电设备内部[90]. 细水雾灭火技术通过冷却、窒息和抑制烟气灭火. 文献[91]对灭火时间和灭火过程中一氧化碳气体监测验证了细水雾快速安全熄灭巷道火灾能力. 文献[92]探讨调整细水雾雾滴粒径、喷雾流量和喷嘴间距等参数，作用于带式输送机火灾过程中温度变化和灭火时间. 文献[93]研究了 N_2/超细水雾共同作用对火焰传播速度的抑制效果.

巷道火灾救援关键在于早期自动灭火、风流调控与人工处置的协同配合. 复杂巷道火灾综合处置与全尺寸场景风流调控技术相融合，是实现矿井通风与灭火战术协同的关键.

3.3 灭火救援装备与调度

灭火救援装备按使用范围划分为个人防护装备、环境参数检测装备、化验分析设备、灭火装备、通信传输设备及救援器具等[94]. 个人防护装备包含氧气呼吸器、防护服和安全帽等. 通信传输设备是应急救援指挥调度基础，现有的应急通讯技术主要有工业以太网、光纤网、RS485、CAN 总线等串行通信协议等有线传输，以及蜂窝通信、Mesh、Wi-Fi、Zig Bee、UWB 技术等[95-96]. 基于以上技术，研发了井下通信、地面指挥和后勤保障等设备，如井下救灾通信系统、通信指挥车和救援指挥车等装备[97]. 此外，救援灭火机器由原来单一监测环境探测功能拓展为环境与灾情评估、清障、灭火、排水、生命探测、医疗保障与伤员运送等多种功能[98]. 火灾侦察机器人、火灾通信机器人、灭火救援机器人、密闭砌筑机器人、无人机等成为了巷道火灾救援过程中的重要装备[99-100]. 火灾侦察和灭火机器人可携带各类传感设备和摄像机，探测并传回火灾区域的甲烷、一氧化碳、氧气和温度等灾害场景环境信息. 灭火机器人可安装水炮与泡沫灭火系统进行灭火处置[101]. 自主飞行无人机能够在没有通信的条件下完成巷道中视觉和气体数据的监测后并回到基地完成数据传输[102].

灭火救援装备科学调度是快速控制灾情的保障. 文献[103]提出通过救援环境数字孪生系统(DTSMRE)实现救援过程中监测、仿真、协调、预测和控制，提升整个救援过程调度响应速度. 文献[104]构建了煤矿突发情况下人员管理、物资管理和信息管理模型. 文献[105]构建了一种在多处救点、多物资和多受灾点约束条件下的多目标应急物资调拨模型. 文献[106]开发了具有应急资源一站式调配、处置方案自动生成等功能的煤矿灾害风险数字化应急管理系统. 库内装备的调配与优化能够缩短救援出动时间，如图 7 所示. 按不同救援场景和功能需求，可将常用救援装备分为侦察搜救、个人防护、破拆救生、医疗急救、通信保障和环境监测等模块. 装备模块化储存箱实现快速调配到位，可根据灾害情况也可在主要模块基础上快速增加拓展模块，接到救援信息后系统可实现自动调配.

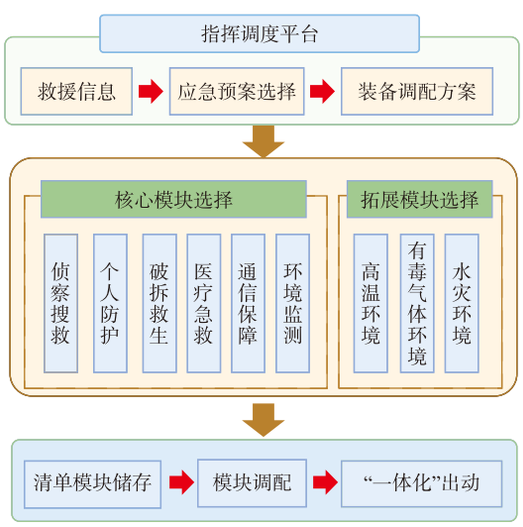


图 7 救援装备模板设置与调度

Fig. 7 Template configuration and dispatch of rescue equipment

指挥部对灾害状态参数、人员、装备、资源等各类信息分析是科学决策的基础[107]. 巷道火灾应急救援辅助决策通常集成于指挥平台系统，通过融合监测通信、资源管理、灾情信息和数据处理等功能，向指挥人员提供数据与分析结果. 文献[108]依托物联网、人工智能技术和三维地理信息系统建立了矿山应急救援指挥决策系统，可实现应急避险路线制定、救援预案推演和辅助指挥等功能. 文献[109]建立基于云计算的矿山应急救援平台，融合了应急救援指挥、综合保障、队伍管理、应急预案与案例管理、装备与物资管理等功能. 文献[110]提出了应急救援“一张图”资源管理机制. 文献[111]构建了包含救援现场、井下指挥基地、地面指挥基地、远程指挥中心等子系统的矿山应急救援一体化指挥决策信息平台. 文献[112]提出在矿山管理平台中引入位置推理，并以此构建决策模型库，实现调度决策优化. 文献[113]考

虑了多方救援力量问题，提出犹豫模糊环境下多群组风险决策方法和流程．

综上所述，巷道火灾处置技术已形成了良好的体系．为提高复杂环境下救援能力和处置效率，需对救援装备智能化与自动化进行升级．随着 AI 技术发展，多模态感知、灾情预测和数据智能分析将是巷道火灾应急救援辅助决策重要发展方向．

4　巷道火灾救援演练技术

巷道火灾应急救援演练对提升救援人员的火灾处置能力有重要意义．救援演练包括桌面推演、实操演练和虚拟演练．桌面演练通过对假定情景进行讨论、决策和处置，促进救援人员掌握处置措施和流程，提高参演人员的风险感知能力、信息研判能力、指挥决策能力和协同配合能力[114]．实操演练则通过模拟巷道设定突发险情，救援人员在训练中能够感受到巷道狭窄、积水、粉尘的影响等真实物理约束，以及直接接触和操作救援装备，能够提高装备使用熟练度和生理适应能力．文献[115]分析了矿山救援演习巷道的功能要求，提出了矿山救援演习巷道的建设原则和通用技术要求．文献[116]进一步提出了现有烟热模拟训练的考核标准．实操演练场景固定、演练成本高、考核难度大、存在一定安全隐患，此外由于矿山救援演习巷道技术标准暂未颁布，各救援队巷道形式、功能和设施水平、救援实战演练效果参差不齐．

虚拟现实演练技术主要基于 Unreal、Unity3D、Source Engine 等虚拟现实引擎平台，模拟如瓦斯爆炸、冒顶坍塌、矿井火灾、水灾等各类复杂灾害场景，能够全程、全维度记录训练过程中各项数据并对训练结果进行评价．文献[117]对比分析了不同虚拟现实引擎在矿山应急救援实际模拟中的适应性．文献[118]基于时间尺度的知识推理方法，提出火灾、水灾、煤与瓦斯突出、煤尘爆炸和顶板灾害等 5 种灾害动态场景的模拟和控制方法．文献[119]对比了全沉浸式和非沉浸式虚拟现实技术在煤矿运输巷发生火灾时的搜救行动演练效果，认为有利于减少极端环境下培训成本．文献[120]比较了虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)、扩展现实(XR)等多种沉浸式技术在应急救援、决策、态势感知和团队协调等方面的能力．文献[121]总结了美国当前地下矿井救援和自我逃生现状，认为虚拟现实技术作为井下人员逃生、自救训练的平台，能够减少灾害时的恐惧感．文献[122]开发的矿山救援小队在线协同训练系统可进行矿图标注、灾区侦察、抢救遇险遇难人员、处置灾害等操作，同时进行智能考核评价．然而，虚拟训练也存在一些局限性，如感官体验不完全、环境体验不准确、实际装备操作丧失等．

构建融合全尺寸巷道火灾与 VR 虚拟现实模拟系统等结合的沉浸式救援训练体系，开展灭火装备操作、战术协同和应急处置流程训练，对提高训练效果有重要意义．如图 8 所示，首先通过矿山模拟巷道实战演练，开展装备实操和处置流程应用；其次，基于典型案例提取关键救援节点、决策要点和处置流程并编制推演脚本库；最后，运用 VR 技术将推演脚本转化为三维虚拟场景，开展救援装备、灭火战术与火灾处置的训练和评估．

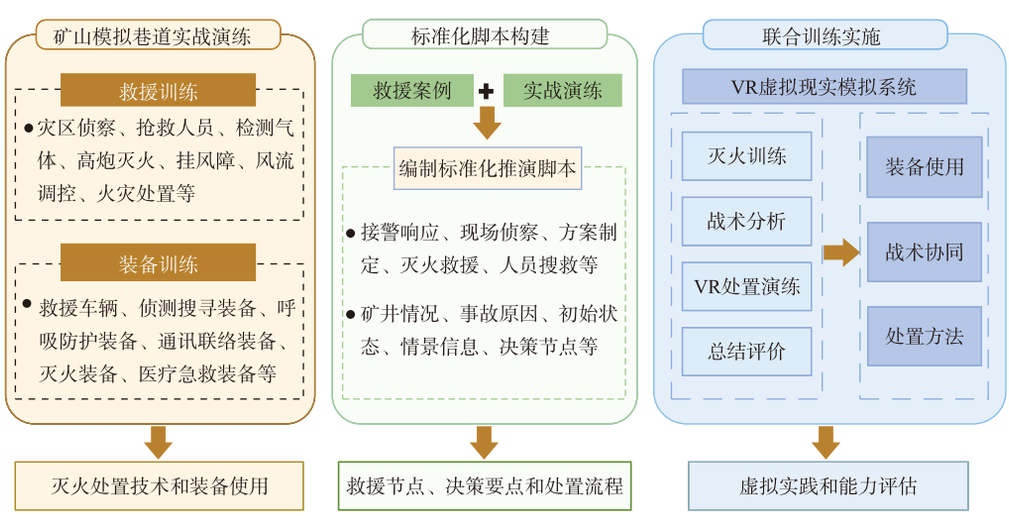


图 8　巷道火灾演练方法

Fig. 8　Methods for roadway fire drills

5 结 论

1)巷道火灾试验场景通常简化了火源类型,忽略各巷道间相互作用,需要探索火灾场景由单一巷道向巷道网络发展,在技术上突破尺度效应和真实环境耦合作用的局限,开展全尺寸巷道不同类型火灾如胶带、电缆、无轨胶轮车等火灾烟气蔓延规律和调控方法研究.

2)巷道火区侦检设备包括环境气体监测、温度特征成像和生命体征搜救等,集成和智能化程度不高,需要聚焦精准性、智能化和轻便化,开展新型传感器、机器人和无人机"人机协同"立体化侦检方法研究.

3)巷道火灾应急处置技术涵盖风烟流控制、灭火技术及指挥决策,多种灭火处置技术的协同难度大.为提高复杂环境下救援能力和处置效率,需要探索大尺度火灾场景下的通风控制与灭火战术的精准协同方法,对救援装备的智能化与自动化进行升级,研究融合人工智能、大模型数据、态势分析和决策支持于一体的救援指挥技术.

4)随着救援演练装备、处置技术、虚拟现实演练以及AI分析决策技术的发展,需解决救援演练形式单一等问题,从救援实战出发,将巷道火灾虚拟场景与救援人员实操相结合,研究模拟巷道火灾发展过程中快速识别与态势分析、风烟流调控、火区侦查、灭火处置与指挥调度全过程演练方法,提升救援队伍处理巷道火灾的应急救援能力.

参考文献:

[1] 王德明.矿井火灾学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
WANG Deming. Mine fire science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.

[2] 王海军,齐庆杰,梁运涛,等.我国煤矿重特大事故统计分析及对策建议[J].中国安全科学学报,2024,34(9):9-18.
WANG Haijun, QI Qingjie, LIANG Yuntao, et al. Statistical analysis and countermeasures for major coal mine accidents in China[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 9-18.

[3] 梁运涛,王 伟.矿井外因火灾监测预警与智能防控技术[J].矿业安全与环保,2025,52(2):1-8.
LIANG Yuntao, WANG Wei, et al. The technology of monitoring and early warning and intelligent prevention and control for mine exogenous fire [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(2): 1-8.

[4] 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.

[5] 郭 军,蔡国斌,郑学召,等.矿井热动力灾害及救援安全性判定研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(12):116-122.
GUO Jun, CAI Guobin, ZHENG Xuezhao, et al. Research status and prospect of mine thermal disaster and rescue safety judgement[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 116-122.

[6] 高广伟.中国矿山救护工作改革与发展[J].煤矿安全,2020,51(10):18-23.
GAO Guangwei. Reform and development of mine rescue work in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 18-23.

[7] 李刚强,程 刚,兰泽全.新时代矿山应急救援队伍现状与发展策略研究[J/OL].中国矿业,1-9[2026-01-09]. https://link. cnki. net/urlid/11.3033. TD. 20251117.1026.002.
LI Gangqiang, CHENG Gang, LAN Zequan. Research on the current situation and development strategy of mine emergency rescue team in the new era[J/OL]. China Mining: 1-9[2026-01-09]. https://link.cnki.net/urlid/11.3033.TD.20251117.1026.002.

[8] 解学才,宫伟东,林 辰,等.我国煤矿应急救援现状分析研究[J].煤矿安全,2017,48(11):229-232.
XIE Xuecai, GONG Weidong, LIN Chen, et al. Analysis study on present situation of emergency rescue in China's coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(11): 229-232.

[9] 周西华,张潇文,白 刚,等.煤矿热动力灾害防控研究现状及趋势综述[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(5):534-544.
ZHOU Xihua, ZHANG Xiaowen, BAI Gang, et al. Review of research status and trends in prevention and control of coal mine thermodynamic disasters[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(5): 534-544.

[10] MA L, FAN J, GUO R Z, et al. Characteristics of fires in coal mine roadways and comparative analysis of control effectiveness between longitudinal ventilation and cross-section sealing [J]. Case Studies in

Thermal Engineering, 2024, 53: 103878.

[11] 刘业娇, 崔一诺, 任玉辉, 等. 矿井倾斜巷道火灾烟流运移规律研究现状与发展趋势[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(5): 113-117.
LIU Yejiao, CUI Yinuo, REN Yuhui, et al. Research status and development trend of smoke flow migration law in inclined mine roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(5): 113-117.

[12] 马　砺, 张晓龙, 刘尚明, 等. 倾斜角度对巷道输送带火灾影响的数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(10): 101-105.
MA Li, ZHANG Xiaolong, LIU Shangming, et al. Numerical simulation study on influence of inclination angle on roadway conveyor belt fire[J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 101-105.

[13] 郭睿智. 巷道火区封闭过程中烟气与温度变化规律及态势感知研究[D]. 西安:西安科技大学, 2023.
GUO Ruizhi. Study on smoke and temperature variation and situation awareness in the process of coal mine tunnel fire sealing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2023.

[14] MCCAFFREY B J. Purely buoyant diffusion flames : Some experimental results [M]. Washington, D.C.: National Institute of Standards and Technology, 1979.

[15] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 319-340.

[16] HU L H, HUO R, LI Y Z, et al. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 223-229.

[17] INGASON H, LI Y Z. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(6): 371-384.

[18] JI J, WANG H X, LI K Y, et al. A numerical study on upstream maximum temperature in inclined urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 516-526.

[19] 姚勇征, 张文明, 吴　兵, 等. 巷道火灾对通风系统影响的全尺寸实验与模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 709-715.
YAO Yongzheng, ZHANG Wenming, WU Bing, et al. Full-scale experimental and simulation study on the influences of laneway fire on ventilation system [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 709-715.

[20] 张春华, 康　璇, 申嘉辉. 矿井L形巷道火灾蔓延规律模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3111-3118.
ZHANG Chunhua, KANG Xuan, SHEN Jiahui. Simulation study on fire spread law in L-shaped mine roadway [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3111-3118.

[21] DING C, CHANG D, SUN D G, et al. Numerical simulation of the smoke distribution characteristics in a T-shaped roadway[J]. Fire, 2024, 7(3): 80.

[22] 郝海清, 王　凯, 张春玉, 等. 矿井皮带巷火灾风烟流场-区-网演化与调控规律[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 716-724.
HAO Haiqing, WANG Kai, ZHANG Chunyu, et al. Evolution and regulation law of wind and smoke flow field network in mine belt roadway fire[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 716-724.

[23] 马　砺, 张鹏宇, 郭睿智, 等. 巷道火灾密闭过程烟气温度预测的GA-SVM模型[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 641-648.
MA Li, ZHANG Pengyu, GUO Ruizhi, et al. GA-SVM model for predicting flue gas temperature of roadway fire under sealing process [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 641-648.

[24] 闫　帅, 王　刚, 洪　林, 等. 细水雾与纵向通风对倾斜巷道火灾烟气运动规律影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(2): 188-194.
YAN Shuai, WANG Gang, HONG Lin, et al. Research on influence of water mist and longitudinal ventilation on smoke movement in inclined roadway fire[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(2): 188-194.

[25] THOMAS P H. The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires [J]. Fire Safety Science, 1958, 351: 108789621.

[26] THOMAS P H. The movement of smoke in horizontal passages against an air flow[J]. Fire Safety Science, 1968, 723: 108985817.

[27] OKA Y, ATKINSON G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4): 305-322.

[28] LIU Y J, FANG Z, TANG Z, et al. Analysis of experimental data on the effect of fire source elevation on fire and smoke dynamics and the critical velocity in a tunnel with longitudinal ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2020, 114: 103002.

[29] 贾　静, 郭立稳, 朱令起, 等. 矿井巷道火灾烟流逆

退数值模拟及临界风速研究[J].中国安全生产科学技术，2020，16(4)：94-100.
JIA Jing，GUO Liwen，ZHU Lingqi，et al. Study on numerical simulation of smoke backflow and critical wind speed in mine roadway fire [J]. Journal of Safety Science and Technology，2020，16(4)：94-100.

[30] LI Y Z，INGASON H. Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires [J]. Fire Safety Journal，2017，91：303-311.

[31] LI Y Z，INGASON H. Corrigendum to "Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires" [Fire Saf. J. 91 (2017) 303 - 311][J]. Fire Safety Journal，2019，110：102893.

[32] 张 伟，刘 欢，李明辉，等.不同灾变条件下矿井胶带火灾烟气蔓延规律研究[J].工矿自动化，2025，51(7)：66-74.
ZHANG Wei，LIU Huan，LI Minghui，et al. Study on the smoke propagation characteristics of mine conveyor belt fires under different disaster scenariosg[J]. Journal of Mine Automation，2025，51(7)：66-74.

[33] LIANG Z Q，QI X Y，WEI C X，et al. Study on the length of smoke backlayering of double-source fire in tunnels [J]. ACS Omega，2024，9(27)：29529-29536.

[34] 何铖茂，王 洋，张庆锋.矿井巷道动态密闭过程火灾烟气特性变化规律研究[J].煤矿安全，2025，56(1)：100-106.
HE Chengmao，WANG Yang，ZHANG Qingfeng. Research on change law of fire smoke characteristics during dynamic sealing process of mine tunnels [J]. Safety in Coal Mines，2025，56(1)：100-106.

[35] 王玉怀，张思佳，李东明，等.全尺寸巷道阻燃输送带火灾烟气温度变化特征试验研究[J].中国安全科学学报，2025，35(5)：39-46.
WANG Yuhuai，ZHANG Sijia，LI Dongming，et al. Experimental study on fire flue-gas temperature change flame retardant conveyor belt in full-scale roadway [J]. China Safety Science Journal，2025，35(5)：39-46.

[36] 王 洁，樊勇杰，孔晓威，等.低气压对竖井自然排烟隧道内火灾烟气层的影响研究[J].安全与环境工程，2022，29(6)：78-86.
WANG Jie，FAN Yongjie，KONG Xiaowei，et al. Effect of reduced ambient pressure on the smoke layer of fire in shaft natural exhaust tunnel [J]. Safety and Environmental Engineering，2022，29(6)：78-86.

[37] 孙超鹏，刘 方，翁庙成.倾斜隧道火灾烟气分层稳定性研究[J].消防科学与技术，2024，43(9)：1227-1233.
SUN Chaopeng，LIU Fang，WENG Miaocheng. Study on smoke stratification stability in inclined tunnel fire [J]. Fire Science and Technology，2024，43(9)：1227-1233.

[38] 李宗翔，王海文，李 腾，等.下行风流火灾管道试验与烟流动力特征研究[J].安全与环境学报，2023，23(2)：391-396.
LI Zongxaing，WANG Haiwen，LI Teng，et al. Downstream airflow fire dust test and smoke flow dynamic characteristics study[J]. Journal of Safety and Environment，2023，23(2)：391-396.

[39] 周 延，王省身.上行风流火灾旁侧支路风流逆转条件分析[J].中国矿业大学学报，1998(4)：40-42.
ZHOU Yan，WANG Xingshen. Analysis of condition of airflow reversal in parallel airway during mine five in ascensional ventilation [J]. Journal of China University of Mining & Technology，1998(4)：40-42.

[40] 张建功，宋双林.网络火灾中风流流动特性实验研究[J].煤矿安全，2015，46(7)：28-31.
ZAHNG Jiangong SONG Shuanglin. Experimental study of airflow characteristics of network fire [J]. Safety in Coal Mines，2015，46(7)：28-31.

[41] HU L H，FONG N K，YANG L Z，et al. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel：Fire dynamics simulator comparisons with measured data[J]. Journal of Hazardous Materials，2007，140(1/2)：293-298.

[42] 朱云飞，王德明.矿井热动力灾害逃生影响因素研究[J].煤矿安全，2018，49(9)：301-304.
ZHU Yunfei，WANG Deming. Influence factors of thermodynamic disasters evacuation in coal mines [J]. Safety in Coal Mines，2018，49(9)：301-304.

[43] 季经纬，程远平.矿井火灾中火场能见度的估算方法[J].中国矿业大学学报，2006(2)：149-152.
JI Jingwei，CHENG Yuanping. Estimation approach for predicting fire visibility in mine fires[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2006(2)：149-152.

[44] FRIDOLF K，NILSSON D，FRANTZICH H，et al. Walking speed in smoke：Representation in life safety verifications[C]//Proceedings of the 12th International Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods Conference，Oahu，HI，USA. 2018：23-27.

[45] 陈 亮，邬长福，陈祖云，等.矿井巷道火灾安全区域划分数值模拟[J].消防科学与技术，2016，35(5)：633-636.
CHEN Liang，WU Changfu，CHEN Zuyun，et al.

Numerical simulation study on the regional division of mine roadways fire safety[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(5): 633-636.

[46] 王连聪，梁运涛，罗海珠. 我国矿井热动力灾害理论研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术，2018，46(7)：1-9.
WANG Liancong, LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Research progress and outlook on theory of thermodynamic disaster of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 1-9.

[47] 董炳艳，张自强，徐兰军，等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报，2020，56(11)：1-25.
DONG Bingyan, ZHANG Ziqiang, XU Lanjun, et al. Research status and development trend of intelligent emergency rescue equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 1-25.

[48] 王德明，张　伟，王和堂，等. 煤矿热动力重大灾害的不确定性风险特性研究[J]. 采矿与安全工程学报，2023，40(4)：826-837.
WANG Deming, ZHANG Wei, WANG Hetang, et al. Study on uncertainty risk characteristics of major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 826-837.

[49] 李　军，张书林，龚仲强，等. 基于多传感信息融合的输送带运输巷道火灾预警方法[J]. 煤矿机械，2017，38(10)：132-135.
LI Jun, ZHANG Shulin, GONG Zhongqiang, et al. Fire alarm method of conveying belt transportation roadway based on multi-sensor information fusion[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(10): 132-135.

[50] 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.

[51] DENG L, WU S Q, ZOU S, et al. Large-space fire detection technology: A review of conventional detector limitations and image-based target detection techniques[J]. Fire, 2025, 8(9): 358.

[52] WANG W F, LIU H F, YANG B, 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.

[53] WEN H, LIU M X, ZHANG D, et al. HCl formation mechanism in the pyrolysis process of coal mine conveyor belt[J]. Fuel, 2025, 384: 133899.

[54] 马　砺. 井下灾变风流应急调控技术与装备[J]. 西安科技大学学报，2023，43(2)：216.
MA Li. Emergency control technology and equipment for catastrophic wind and smoke flow in coal mines[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 216.

[55] 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.

[56] 孙继平，李小伟. 基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法研究[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(1)：215-226.
SUN Jiping, LI Xiaowei. Research on identification and anti-interference method of mine external fire based on image smoothness[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 215-226.

[57] 王　凯，卢　锋，王纪硕，等. 基于YOLO的矿井外因火灾早期识别轻量化算法[J]. 煤炭学报，2025，50(9)：4194-4206.
WANG Kai, LU Feng, WANG Jishuo, et al. Lightweight algorithm for early recognition of mine exogenous fire based on YOLO[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(9): 4194-4206.

[58] 李晓宇，范伟强，刘　毅，等. 基于红外视觉特征融合的矿井外因火灾监测方法[J]. 矿业科学学报，2025，10(1)：116-124.
LI Xiaoyu, FAN Weiqiang, LIU Yi, et al. Mine exogenous fire monitoring method using the fusion of infrared visual features[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 116-124.

[59] 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.

[60] 范伟强. 矿井外因火灾双光谱图像监测方法研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2022.
FAN Weiqiang. Research on dual-spectrum image monitoring method for mine external fire[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2022.

[61] 刘东洋，张　浪，姚海飞，等. 煤矿火灾智能预警系统研发与应用[J]. 工矿自动化，2024，50(1)：1-8.
LIU Dongyang, ZHANG Lang, YAO Haifei, et al.

Research and application of intelligent early warning system for coal mine fires[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 1-8.

[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]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12):108-115.

[63] BARROS-DAZA M J, LUXBACHER K D, LATTIMER B Y. et al. Fire size and response time predictions in underground coal mines using neural networks[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(3): 1087-1098.

[64] 张 佳,辛 斌,王 蕾.基于多传感器的火灾检测仿真实验系统[J].实验室研究与探索,2025,44(5):42-47.
ZHANG Jia, XIN Bin, WANG Lei. Simulation experimental system for fire detection based on multi sensor[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2025, 44(5): 42-47.

[65] 陈晓晶,邢 震,包建军,等.矿山"感知-通信-决策-控制"一体化框架下人工智能应用综述[J/OL].煤炭科学技术,1-19[2025-11-25]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250922.2034.002.
CHEN Xiaojing, XING Zhen, BAO Jianjun, et al. A Review of the application research of artificial intelligence in the integrated framework of "sensing、communication、computing and control" in mines[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-19[2025-11-25]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250922.2034.002.

[66] 朱海军.新型便携式气相色谱仪在矿山救援中的应用[J].煤炭科学技术,2013,41(增1):155-156.
ZHU Haijun. Application on notable and portable gas chromatograph in mine rescue[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(Sup 1): 155-156.

[67] 郝天轩,陈旭阳,张赞旺.基于FreeRTOS的无线便携式多气体检测仪设计[J].中国矿业,2024,33(10):143-152.
HAO Tianxuan, CHEN Xuyang, ZHANG Zanwang. Design of a wireless portable multi-gas detector based on freeRTOS[J]. China Mining, 2024, 33(10):143-152.

[68] 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.

[69] 杨春雨,张 鑫.煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J].煤炭学报,2022,47(7):2844-2872.
YANG Chunyu, ZHANG Xin. Key technologies of coal mine robots for environment perception and path planning[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2844-2872.

[70] ZHENG X Z, HUANG Y, SUN Z Y, et al. Post-collapse mine rescue using ultra-wide band radar: Electromagnetic-wave attenuation mechanisms and key influencing factors in coal, rock, and stratified composite media[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 198: 107114.

[71] 文 虎,唐 瑞,刘名阳,等.矿山生命信息探测仪在事故救援中的应用[J].煤矿安全,2022,53(4):162-166.
WEN Hu, TANG Rui, LIU Mingyang, et al. Application of Mine life information detector in accident rescue[J]. Coal Mine Safety, 2022, 53(4): 162-166.

[72] 陈 曦,文 虎,黄 渊.面向矿山钻孔救援的超宽带雷达生命探测仪研制及性能测试[J].煤矿安全,2024,55(11):234-240.
CHEN Xi, WEN Hu, HUANG Yuan. Development and performance test of UWB radar life detector for mine borehole rescue[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(11): 234-240.

[73] 胡爱华.基于灾后复杂环境的无线定位关键技术研究[D].北京:北京邮电大学,2022.
HU Aihua. Research on key technology of wireless location based on post-disaster complex environment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.

[74] 郑学召,杨卓瑞,郭 军,等.灾后救援生命探测仪的现状和发展趋势[J].工矿自动化,2023,49(6):104-111.
ZHENG Xuezhao, YANG Zhuorui, GUO Jun, et al. The current status and development trend of post-disaster rescue life detectors[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 104-111.

[75] 张兰相.生命探测仪的技术原理与应用改进措施[J].武警学院学报,2017,33(4):36-39.
ZHANG Lanxiang. Life detection technology theory and improvement[J]. Journal of China People's Police University, 2017, 33(4): 36-39.

[76] 叶锦娇.煤矿应急救援和巡检中红外热成像仪的设计[J].煤炭技术,2017,36(5):229-231.
YE Jinjiao. Design of infrared thermal imaging instrument in coal mine emergency rescue and patrol inspection[J]. Coal Technology, 2017, 36(5): 229-231.

[77] 党海波，李希腾，马海涛，等.我国矿山救援队伍先进适用装备配备体系研究[J].煤矿安全，2025，56(11)：232-239.
DANG Haibo，LI Xiteng，MA Haitao，et al. Research on the advanced and applicable equipment allocation system of mine rescue teams in China [J]. Safety in Coal Mines，2025，56(11)：232-239.

[78] 贾进章，尚文天，雷　涛，等.矿井智能通风发展趋势[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2024，43(5)：545-555.
JIA Jinzhang，SHANG Wentian，LEI Tao，et al. Development trend of mine intelligent ventilation[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)，2024，43(5)：545-555.

[79] 王　凯，郝海清，蒋曙光，等.矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统研究[J].工矿自动化，2019，45(7)：21-27.
WANG Kai，HAO Haiqing，JIANG Shuguang，et al. Research on regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow[J]. Journal of Mine Automation，2019，45(7)：21-27.

[80] 裴晓东，郝海清，王　凯，等.矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用[J].煤炭科学技术，2023，51(5)：124-132.
PEI Xiaodong，HAO Haiqing，WANG Kai，et al. Research and application of fire air and smoke flow emergency control technology for mine complex ventilation network[J]. Coal Science and Technology，2023，51(5)：124-132.

[81] 刘尚明，马　砺，魏高明，等.井下灾变风烟流快速密闭气囊特性[J].中国矿业大学学报，2021，50(4)：735-743.
LIU Shangming，MA Li，WEI Gaoming，et al. Study of the characteristics of fast airtight airbag in underground catastrophic wind and smoke flow[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2021，50(4)：735-743.

[82] 魏连江，周福宝，夏同强，等.矿井智能通风与灾变应急决策平台[J].中国安全科学学报，2022，32(9)：158-167.
WEI Lianjiang，ZHOU Fubao，XIA Tongqiang，et al. Mine intelligent ventilation and disaster emergency decision platform [J]. China Safety Science Journal，2022，32(9)：158-167.

[83] 周福宝，辛海会，魏连江，等.矿井智能通风理论与技术研究进展[J].煤炭科学技术，2023，51(1)：313-328.
ZHOU Fubao，XIN Haihui，WEI Lianjiang，et al. Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology [J]. Coal Science and Technology，2023，51(1)：313-328.

[84] 李　伟，刘彦青，张　浪.外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法[J].煤炭科学技术，2025，53(5)：196-212.
LI Wei，LIU Yanqing，ZHANG Lang. Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire[J]. Coal Science and Technology，2025，53(5)：196-212.

[85] LI J Q，LI Y C，ZHANG W，et al. Multi-objective intelligent decision and linkage control algorithm for mine ventilation[J]. Energies，2022，15(21)：7980.

[86] 张　浪，刘彦青.矿井智能通风与关键技术研究[J].煤炭科学技术，2024，52(1)：178-195.
ZHANG Lang，LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines [J]. Coal Science and Technology，2024，52(1)：178-195.

[87] 矿山救援规程[J].中华人民共和国国务院公报，2024(18)：13-46.
Mine rescue regulations [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China，2024(18)：13-46.

[88] 赵书海.矿井火灾事故应急处置及救援[J].内蒙古煤炭经济，2022(21)：102-104.
ZHAO Shuhai. Emergency response and rescue of mine fire accidents [J]. Inner Mongolia Coal Economy，2022(21)：102-104.

[89] 巩玉奎.矿井火灾事故应急处置及救援探讨[J].中国金属通报，2024(6)：183-185.
GONG Yukui. Discussion on emergency response and rescue for mine fire accidents [J]. China Metal Bulletin，2024(6)：183-185.

[90] 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 electrical fire in coal mine[J]. Safety in Coal Mines，2022，53(9)：55-64.

[91] 徐　俊，陆　伟，王正辉.细水雾抑制煤矿巷道火灾的试验和模拟[J].煤炭科学技术，2008，36(12)：37-39.
XU Jun，LU Wei，WANG Zhenghui. Experiment and simulation of fine water spraying to control fire disaster in mine gateway[J]. Coal Science and Technology，2008，36(12)：37-39.

[92] 李　贺，沈先华，田　丽，等.基于FDS的细水雾抑制熄灭带式输送机火灾研究[J].煤矿安全，2023，54(9)：53-59.

LI He, SHEN Xianhua, TIAN Li, et al. Research on suppression and extinguishment of belt conveyor fire by water mist based on FDS[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(9): 53-59.

[93] 裴 蓓, 李世梁, 韦双明, 等. N_2/超细水雾抑制甲烷爆炸点火和火焰传播特性[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 329-341.
PEI Bei, LI Shiliang, WEI Shuangming, et al. Inhibition effect on the ignition and flame propagation characteristic of methane explosion by N_2/ultrafine water mist [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 329-341.

[94] 马 砺, 宋先明, 李增良, 等. 兖州矿区应急救援体系研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(增1): 162-164.
MA Li, SONG Xianming , LI Zengliang, et al. Study on mine emergency rescue system of Yanzhou mining area [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(Sup 1): 162-164.

[95] 胡青松, 杨 维, 丁恩杰, 等. 煤矿应急救援通信技术的现状与趋势[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 163-179.
HU Qingsong, YANG Wei, DING Enjie, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 163-179.

[96] 朱德娟. 基于现代化矿井的通信技术[J]. 电子技术与软件工程, 2020(9): 17-18.
ZHU Dejuan. Communication technology based on modern mines [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(9): 17-18.

[97] 孙继平, 张高敏. 矿井应急通信系统[J]. 工矿自动化, 2019, 45(8): 1-5.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Mine emergency communication system[J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(8): 1-5.

[98] 葛世荣, 胡而已, 李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 54-73.
GE Shirong, HU Eryi, LI Yunwang. New progress and direction of robot technology in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 54-73.

[99] 王 强. 神东煤炭集团应急救援装备建设[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增1): 727-732.
WANG Qiang. Shendong coal group emergency rescue equipment construction research[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(Sup1): 727-732.

[100] 文 虎, 刘 洋, 郑学召, 等. 矿山救援机器人群设计[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 34-39.
WEN Hu, LIU Yang, ZHENG Xuezhao, et al. Design of mine rescue robot group [J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(9): 34-39.

[101] 陈 骋, 陈秀田, 朱明亮. 煤矿消防灭火机器人系统设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 142-146.
CHEN Cheng, CHEN Xiutian, ZHU Mingliang. A system design for coal mine fire-fighting robots[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 142-146.

[102] NORDSTRÖM S, STATHOULOPOULOS N, DAHLQUIST N, et al. Safety inspections and gas monitoring in hazardous mining areas shortly after blasting using autonomous UAVs [J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(5): 2076-2094.

[103] WEN H, LIU S K, ZHENG X Z, et al. The digital twins for mine site rescue environment: Application framework and key technologies [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186: 176-188.

[104] 李爱平, 张瑞新, 王忠强, 等. 煤矿应急资源优化管理与调度监控研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 151-153.
LI Aiping, ZHANG Ruixin, WANG Zhongqiang, et al. Research on optimization management and command monitoring of emergency resource for coal Mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 151-153.

[105] 许胜铭, 景国勋. 煤矿瓦斯爆炸事故的应急救援物资调度模型研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 104-107.
XU Shengming, JING Guoxun. Research on the emergency rescue material dispatching model for coal mine gas explosion accidents [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 104-107.

[106] 杨 欢, 屈世甲, 陈小林, 等. 煤矿灾害风险数字化应急管理系统设计及应用[J]. 煤炭工程, 2025, 57(7): 17-24.
YANG Huan, QU Shijia, CHEN Xiaolin, et al. Research and application of digital emergency management system for disaster risk in coal mine [J]. Coal Engineering, 2025, 57(7): 17-24.

[107] 方亚军. 基于信息技术的矿山应急救援平台开发: 评《矿山应急救援平台——互联网+应急救援》[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(7): 180.
FANG Yajun. Development of mine emergency rescue platform based on information technology: Review of "mine emergency rescue platform-internet + emergency rescue" [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(7): 180.

[108] 周红军. 开滦集团三维矿山应急救援指挥决策系统[J]. 煤矿安全, 2015, 46(4): 103-105.
ZHOU Hongjun. 3D Mine emergency rescue com-

mand and decision-making system for Kailuan Group[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(4): 103-105.

[109] 李文峰，冯永明，唐善成. 互联网＋矿山应急救援技术研究[J]. 煤炭科学技术，2016，44(7)：59-63.
LI Wenfeng, FENG Yongming, TANG Shancheng. Study on technology of internet plus mine emergency rescue[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 59-63.

[110] 吴金兵，毛善君，李　梅. 大型矿区应急救援"一张图"关键技术研究[J]. 煤矿安全，2016，47(11)：83-86.
WU Jinbing, MAO Shanjun, LI Mei. Key technology research on emergency rescue "one-map" for large mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(11): 83-86.

[111] 郑万波. 矿山应急救援一体化指挥决策信息平台研究[J]. 工矿自动化，2017，43(12)：70-75.
ZHENG Wanbo. Research on integrated command decision-making information platform for mine emergency rescue[J]. Journal of Mine Automation, 2017, 43(12): 70-75.

[112] 胡青松，张赫男，李世银，等. 基于大数据与AI驱动的智能煤矿目标位置服务技术[J]. 煤炭科学技术，2020，48(8)：121-130.
HU Qingsong, ZHANG Henan, LI Shiyin, et al. Intelligent coal mine target location service technology based on big data and AI driven[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 121-130.

[113] 王铁旦，杨　晟，彭定洪. 多方参与视角下矿难救援的多群组风险决策方法研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2023，48(4)：163-175.
WANG Tiedan, YANG Sheng, PENG Dinghong. Multi-group risk decision-making method for mine disaster rescue from the perspective of multiple stakeholders′ participation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 48(4): 163-175.

[114] 吕　欣，蔡梦思，陈　彬. 桌面推演技术前沿及发展趋势[J]. 中国科学基金，2021，35(5)：742-751.
LYU Xin, CAI Mengsi, CHEN Bin. Frontiers and development trend of tabletop exercise technology[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 742-751.

[115] 祁海莹. 矿山救援演习巷道通用技术要求研究[J]. 矿业安全与环保，2015，42(4)：103-105.
QI Haiying. Study on general technical requirements for mine rescue exercise roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(4): 103-105.

[116] 张郑平，吴慧斌. 烟热模拟训练评价考核系统的研究[J]. 工矿自动化，2014，40(12)：83-85.
ZHANG Zhengping, WU Huibin. Research on assessment and evaluation system of smoke and heat simulation training[J]. Journal of Mine Automation, 2014, 40(12): 83-85.

[117] 崔豫楠，李龙龙，宫　成，等. 矿山应急救援虚拟现实引擎优选研究[J]. 金属矿山，2024(10)：145-151.
CUI Yunan, LI Longlong, GONG Cheng, et al. Research on preferred virtual reality engines for mining emergency rescue[J]. Metal Mine, 2024(10): 145-151.

[118] 侯建明，杨俊燕. 基于虚拟现实技术开发的矿山救援虚拟仿真演练系统[J]. 矿业安全与环保，2018，45(5)：47-50.
HOU Jianming, YANG Junyan. Virtual simulation training system of mine rescue based on virtual reality technology[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(5): 47-50.

[119] PEDRAM S, OGIE R, PALMISANO S, et al. Cost-benefit analysis of virtual reality-based training for emergency rescue workers: A socio-technical systems approach[J]. Virtual Reality, 2021, 25(4): 1071-1086.

[120] HANCKO D, MAJLINGOVA A, KAČÍKOVÁ D. Integrating virtual reality, augmented reality, mixed reality, extended reality, and simulation-based systems into fire and rescue service training: Current practices and future directions[J]. Fire, 2025, 8(6): 228.

[121] STAFFORD A, REQUST K W B, LOPEZ S L, et al. Underground mining self-escape and mine rescue practices: An overview of current and historical trends[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023, 40(6): 2243-2253.

[122] 孙云川，刘　雄，唐　聃，等. 基于VR技术的矿山救援小队在线协同训练系统设计及实现[J]. 煤矿安全，2023，54(9)：233-239.
SUN Yunchuan, LIU Xiong, TANG Dan, et al. Design and implementation of online collaborative training system for mine rescue team based on VR technology[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(9): 233-239.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）