

采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战

秦波涛^{1,2}, 马 东¹

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:采空区煤自燃与瓦斯复合灾害是煤矿最严重的灾害之一, 往往会造成重大的人员伤亡和经济损失。为了进一步提高防控采空区复合灾害的能力, 分析了采空区的漏风、瓦斯运移集聚和煤自燃火灾是发生煤自燃与瓦斯复合灾害的主要形成要素, 指出了复合灾害具有耦合性、隐蔽性、不确定性、动态性、继发性和严重性的主要特征; 提出了复合灾害防控技术体系, 系统阐述了目前我国在煤自燃与瓦斯复合灾害动态演化特性、复合灾害辨识与预警技术、采空区绿色高效防灭火技术、复合灾害惰化抑爆技术和复合灾害应急处置技术等方面的最新研究成果及进展。但是, 随着我国煤矿开采深度和强度的增大, 开采环境发生剧烈变化, 采空区复合灾害问题也日趋严重复杂, 采空区煤自燃诱发瓦斯爆炸的重特重大事故仍时有发生。针对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害高效防控的迫切需求, 通过分析最近发生的采空区煤自燃与瓦斯复合灾害事故, 凝练出复合灾害耦合致灾风险的精准预判与评估、复合灾害信息的精准获取、封闭区域的合理选择、灾害区域的精准定位和智能定向处置是当前复合灾害高效防控面临的四大挑战, 并提出了相应的研究方向和内容, 为防范与遏制采空区煤自燃与瓦斯复合灾害事故、保障我国煤炭安全高效开采提供借鉴。

关键词:采空区; 复合灾害; 煤炭自燃; 瓦斯爆炸; 灾害防控

中图分类号: TD75 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)01-0392-17

Research progress and challenges in prevention and control of combined disasters of coal spontaneous combustion and methane in coal mine goaf

Qin Botao^{1,2}, MA Dong¹

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The combined disaster of coal spontaneous combustion and methane in coal mine goaf is one of the most serious disasters, often causing significant casualties and economic losses. In order to improve the ability to prevent and control combined disaster in goaf, the air leakage, methane migration and accumulation, and coal spontaneous combustion are summarized as the main forming factors, and the main characteristics of coupling, concealment, uncertainty, dynamicity, secondary and severity has been pointed out. A technology system for prevention and control of combined disaster has been proposed, and the latest research achievements and progress in the dynamic evolution characteristics of coal spontaneous combustion and methane, identification and early warning technology, green and efficient fire prevention and extinguishing technology in goaf, inerting and explosion suppression technology, and emergency response technology have been systematically elaborated. However, with the increasing depth and intensity of coal mining in China, the mining en-

收稿日期: 2023-11-28 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1624

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (51825402); 国家自然科学基金资助项目 (52204250)

作者简介: 秦波涛 (1977—), 男, 重庆忠县人, 教授, 博士生导师。E-mail: qbt2003@163.com

引用格式: 秦波涛, 马东. 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 392-408.

Qin Botao, MA Dong. Research progress and challenges in prevention and control of combined disasters of coal spontaneous combustion and methane in coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 392-408.



移动阅读

vironment undergoes drastic changes, which leads to the problem of composite disasters in goaf areas becoming increasingly serious and complex. Major accidents caused by spontaneous combustion of coal and methane explosions still occur from time to time. In response to the urgent need for efficient prevention and control of coal spontaneous combustion and gas composite disasters in goaf areas, four major challenges are summarized by analyzing the recent combined disasters of coal spontaneous combustion and methane in goaf areas: accurate prediction and evaluation of coupled disaster risk, accurate acquisition of combined disaster information, reasonable selection of enclosed areas, accurate positioning and intelligent targeted disposal of disaster areas. Further, the corresponding research directions and contents are proposed for the efficient prevention and control of coal spontaneous combustion and gas combined disasters in goaf areas, which aims to provide reference for preventing and curbing coal spontaneous combustion and methane combined disasters in goaf areas, and ensure safe and efficient coal mining.

Key words: goaf; compound disaster; coal spontaneous combustion; methane explosion; disaster prevention

0 引言

煤炭是我国能源安全稳定供应的“压舱石”^[1],习近平总书记指出“富煤贫油少气是我国的基本国情,以煤为主的能源结构短期内难以根本改变”。安全问题是煤炭开采过程中的头等大事,是切实维护国家能源安全与供给保障的重中之重。2022年,全国煤矿百万吨死亡率降至0.024,但与美国、澳大利亚等发达国家相比还有较大差距^[2]。我国约92.6%的煤矿为井工开采^[3],随着煤炭开采深度和强度逐渐增大,矿井地质条件愈加复杂,煤炭开采面临煤自燃与瓦斯复合灾害的严重威胁^[4,5]。如果对煤层自燃与瓦斯灾害防治不到位,很容易发生由煤层自燃引发瓦斯爆炸的重特大事故,还易引发粉尘爆炸、矿井通风系统紊乱等一系列严重的次生灾害^[6]。因此,如何防范和遏制矿井煤自燃引发瓦斯爆炸事故,是煤炭开采过程中亟需解决的重大工程难题。

采空区煤自燃与瓦斯复合灾害是指在煤矿井下采空区发生的煤与瓦斯非控制燃烧与爆炸造成的灾害,主要包括煤自燃引发瓦斯爆炸,煤自燃引发瓦斯燃烧,瓦斯燃烧引发煤燃烧等。自2000年以来,我国共发生16起煤自燃引发的重、特大瓦斯爆炸事故,造成383人死亡。其中,吉林通化八宝煤矿2013年发生的2起因采空区煤自燃引发的瓦斯爆炸事故,是我国煤矿近十年来最严重的瓦斯爆炸事故,事故共造成53人死亡^[7]。

国家高度重视煤矿重大复合灾害的防治工作,在《“十四五”国家应急体系规划》明确提出加强“矿山复杂耦合重大灾害防治、重大复合灾害事故动力学演化与防控”等基础理论和关键技术研究。近年来,国内外学者对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害的研究不断深入,其致灾理论取得了一定的进展,但由于采空区煤自燃与瓦斯灾害互为诱因、复杂多变,现有采空

区复合灾害的防控理论和方法还不能从根本上杜绝煤自燃引发重特大瓦斯爆炸事故的发生。为提高煤矿复合灾害防控水平,笔者总结了煤自燃与瓦斯复合灾害形成的要素和主要特征,阐述分析了复合灾害防控的研究进展,指出了我国煤矿采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控面临的主要挑战,为未来复合灾害的防控提供了参考。

1 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害形成要素及特征

1.1 复合灾害形成要素

煤矿井下封闭采空区,如存在漏风,可能导致采空区煤自燃火灾;开采工作面采空区是一个半封闭空间,内部由大量的破碎岩石及遗煤组成,如在煤层开采过程中遇到断层、巷道冲击地压等因素导致工作面推进速度减慢时,采空区遗煤氧化时间长,也易导致煤自燃火灾^[8-10]。同时,由于采空区破碎煤岩体压力释放和孔隙增大,煤体赋存的瓦斯逐渐涌出并在一些区域形成集聚现象^[11],最终达到爆炸浓度极限。此外,由于采空区存在漏风,其不仅能为采空区遗煤氧化自燃供给氧气,又能通过漏风流场影响瓦斯运移与集聚过程^[12],还可为瓦斯燃烧与爆炸提供氧气^[13]。

依据瓦斯爆炸三要素,当煤自燃温度、瓦斯浓度、氧气浓度达到一定的条件,就可能引发瓦斯爆炸。因此,采空区的漏风、瓦斯运移集聚和煤自燃火灾是发生复合灾害的基本要素(图1)。

1.2 复合灾害的特征

煤和瓦斯作为气、固可燃物在采空区广泛分布,共生共存。为了治理采空区高浓度瓦斯,通常采用钻孔抽放、埋管抽放、专用巷道抽放等方法,但瓦斯抽放过程中容易加剧采空区漏风,从而引发采空区浮煤自燃^[14-16]。采空区煤自燃过程中由于释放CO、C₂H₄等可燃性气体会影响瓦斯爆炸极限,同时煤自燃火源又

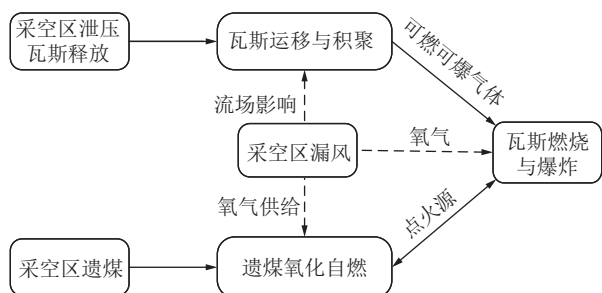


图1 采空区瓦斯与煤自燃复合灾害形成要素

Fig.1 Coupling characteristics of gas and coal spontaneous combustion in goaf

会引燃或引爆瓦斯气体;瓦斯燃烧与爆炸又会进一步引发煤体燃烧。因此,采空区煤自燃与瓦斯之间存在相互关联、耦合致灾的特点^[17-18]。

同时,由于采空区冒落空间大,使得采空区内部煤自燃高温点和高瓦斯集聚区隐蔽性强,且灾变环境内含瓦斯混合气体的浓度、温度、压力等参数与煤自燃发展状态息息相关并不断变化,具有压力-温度-气体浓度的多场耦合动态发展特征^[19],这也导致复合灾害的发展过程具有不确定性和动态性。

随着复合灾害不断的发展演化,当煤自燃发展至燃烧阶段就极易引发瓦斯爆炸或者瓦斯燃烧。已有

统计表明,采空区煤自燃与瓦斯爆炸等热动力灾害在单次事故死亡人数和造成的经济损失上都高居各类灾害之首^[4]。此外,在煤自燃与瓦斯复合灾害发生后还易导致瓦斯二次或多次爆炸、煤尘爆炸、重大火灾、通风系统破坏等继发性灾害^[20],这些继发性灾害通常更具破坏性,不仅会加重井下被困人员的伤亡,还会严重威胁救援人员的生命安全。

鉴于采空区具有以上特点,使得采空区煤自燃与瓦斯灾害表现出耦合性、隐蔽性、不确定性、动态性、继发性和严重性等特点。

2 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究现状

由于采空区瓦斯与煤自燃复合灾害具有以上主要特征,导致灾害表现出风险大、辨识难、防控难的特点。为此,为高效防控采空区煤自燃与瓦斯复合灾害,国内外有关学者主要从煤自燃与瓦斯复合灾害动态演化特性、灾害辨识与预警技术、绿色高效防灭火技术、惰化抑爆技术及应急处置技术等方面开展研究,取得了较大进展,并初步形成了复合灾害防控技术体系(图2)。

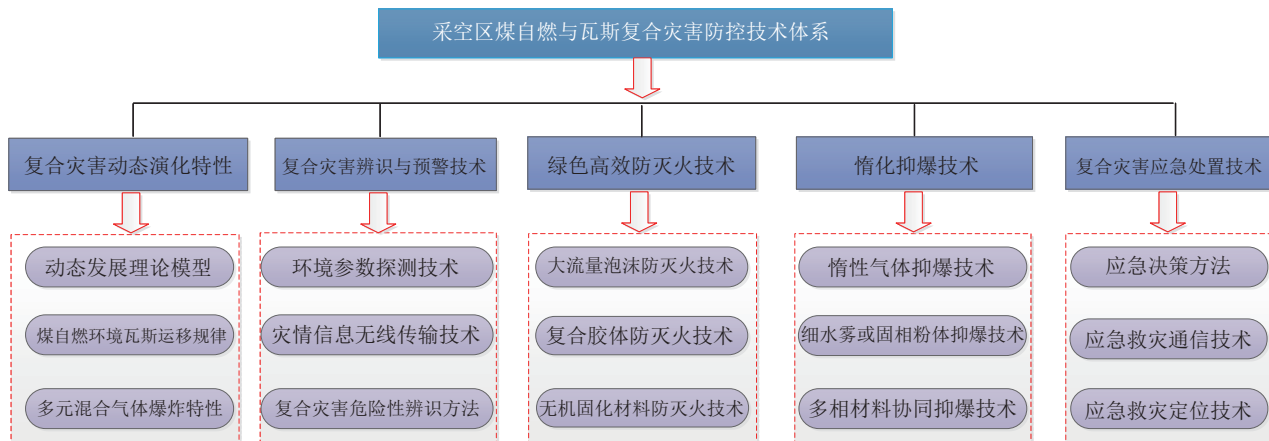


图2 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控技术体系

Fig.2 Technical system for preventing composite disasters of coal spontaneous combustion and gas in goaf

2.1 采空区复合灾害动态演化特性

1) 煤自燃与瓦斯复合灾害动态发展理论模型。采空区煤自燃与瓦斯复合灾害影响因素众多、致灾因素复杂多变,这也增大了对矿井采空区复合灾害动态发展规律的研究难度。然而,通过数值模拟方法建立采空区煤自燃与瓦斯复合致灾理论模型,为揭示采空区煤自燃与瓦斯的复合作用机制提供了重要技术手段。周福宝^[5]提出了采空区煤自燃与瓦斯复合灾害致灾机理是采空区裂隙场、温度场、瓦斯浓度场和氧气浓度场在时间和空间上的交叉,并通过构建采空区气

体运移数值模型得出了采空区多元混合气体的分布规律。为进一步揭示煤自燃与瓦斯灾害的复合作用机理,一些学者^[14, 21-22]建立了采空区煤自燃与瓦斯之间的共生模型(图3),计算得到了在遗煤耗氧和瓦斯解吸条件下采空区瓦斯的分布规律,并通过理论分析得出采空区煤自燃位置存在的气体升浮与扩散效应是瓦斯爆炸发生的主要原因,但以上模型均未考虑煤自燃环境温度对气体流动的影响。为了将温度对气体运动的影响进行耦合实现,笔者团队^[23]通过进一步理论推导建立了较为完善的热动力作用下采空区气

体运动模型(图 4), 提出了采空区煤自燃多孔“烟囱效应”理论。

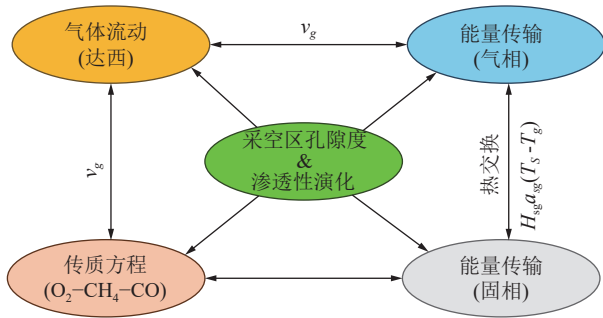


图 3 瓦斯与煤自燃之间的共生模型^[21]

Fig.3 Symbiosis model between gas and coal spontaneous combustion

2) 采空区煤自燃环境瓦斯运移规律。瓦斯运移与集聚是瓦斯爆炸的主要影响因素, 相关学者研究了

工作面采空区瓦斯涌出对瓦斯浓度分布的影响, 如丁洋等^[24]通过布置立体网格测点分析了综放工作面煤壁及采空区遗煤瓦斯涌出对支架后方瓦斯分布的影响, 结果表明支架后方的瓦斯分布主要受煤壁瓦斯涌出影响, 且随着煤壁瓦斯涌出强度增大, 架后采空区瓦斯逐渐向上隅角汇聚; 高建良等^[25]分析了采空区不同瓦斯涌出源位置对瓦斯浓度分布的影响, 发现当上、下临近层及底板遗煤处瓦斯同时涌出时, 采空区瓦斯在靠近底板和顶板位置处容易形成集聚; 此外, 考虑到瓦斯抽采对采空区瓦斯运移的影响, 李树刚等^[26]研究了高抽巷与定向长钻孔协同抽采条件下采空区瓦斯运移特征, 发现协同抽采下回风侧经上隅角涌入工作面的瓦斯强度降低。以上研究揭示了瓦斯涌出及瓦斯抽采对工作面后方采空区瓦斯运移与集聚的影响规律。

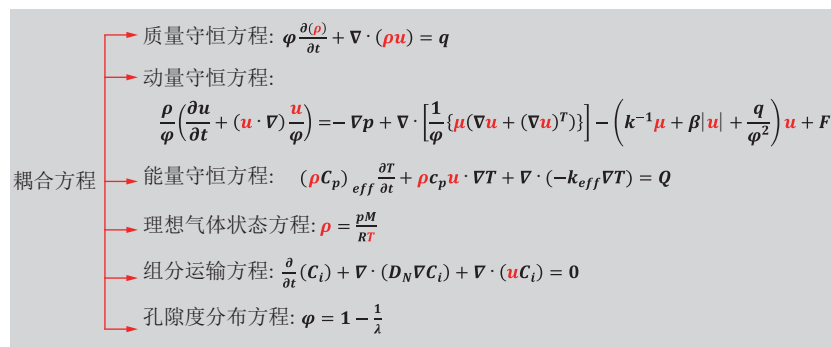


图 4 热动力作用下采空区气体运动模型^[23]

Fig.4 Gas movement model in goaf under thermal power

然而, 对于采空区的煤自然环境, 由于煤燃烧导致煤自燃火区和周围环境之间存在密度差, 产生了气流的运动, 这就会影响煤自燃附近的瓦斯运移^[27]。车强^[28]分析了煤自燃火区混合气体浓度场的发展规律, 发现环境中瓦斯气体逐渐上煤自燃火区的上风侧运移。为研究采空区煤自燃与瓦斯复合灾害的演化过程及特征, 还原煤矿采空区实际, 一些研究团队建立了采空区煤自燃与瓦斯复合灾害物理相似模拟试验平台。如林柏泉等^[19]搭建了采空区热动力灾害模拟试验平台, 测试了气体浓度场、温度场等多场演变规律, 分析了煤自燃对采空区瓦斯运移的影响。太原理工大学研究团队^[29-30]构建了采空区相似模拟试验模型, 测试了不同通风方式下采空区瓦斯分布规律, 分析了通风系统的变化对瓦斯运移的影响。西安科技大学研究团队^[31]以贵州某矿为研究对象搭建了三维采空区气体运移综合实验台, 分析了工作面风速、遗煤氧化温度和采空区封闭对瓦斯运移的影响。为还原采空区遗煤从低温氧化直至着火燃烧的全过程, 笔

者团队搭建了采空区煤自燃与瓦斯复合灾害物理试验模型^[12], 在实验平台中设置煤燃烧的火区, 发现火区附近的瓦斯随着煤自燃温度的升高逐渐向火区内部运移, 瓦斯气体浓度在火区附近呈现明显的聚集现象(图 5)。

3) 煤自燃环境多元混合气体爆炸特性。通常认为瓦斯爆炸的 3 个条件是: 具备一定能量的点火源, 氧气浓度达到 12% 以上, 瓦斯浓度处于 5%~16%^[32]。然而, 瓦斯爆炸界限随着煤自燃环境混合气体浓度、温度、压力等参数的改变而发生变化。从上世纪 80 年代起, 美国、波兰、俄罗斯、日本、中国等国家的研究人员开展了初始温度和压力、可燃气体及粉尘混入、点火能量等因素对瓦斯爆炸特性影响的测试, 取得了丰硕的成果^[33-37]。针对矿井煤自燃火区环境多参数复合致灾的特点, 白刚、周西华等^[38]在实验室模拟了采空区煤自燃环境, 测试不同环境温度(25~200 ℃)和 CO(1%~10%) 条件下瓦斯的爆炸极限和最大爆炸压力, 发现初始温度和 CO 气体对爆炸极限的耦合

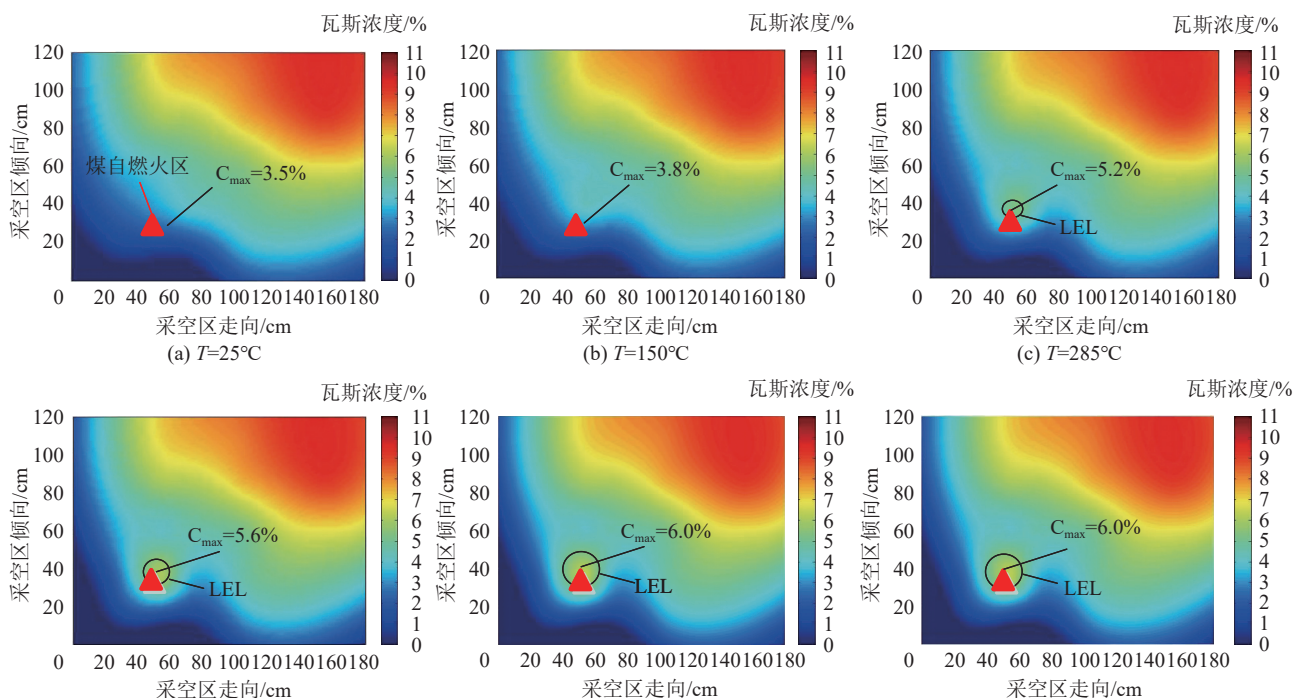
图5 不同煤自燃火区温度条件下采空区瓦斯浓度分布^[12]

Fig.5 Methane concentration distribution in goaf under different coal spontaneous combustion temperature conditions

影响比单一参数的影响大;李润之^[39]发现初始压力与点火能量2个因素的耦合对瓦斯爆炸上限的影响要比单纯一种影响因素对瓦斯爆炸上限的影响效果明显。笔者团队自主研发了煤自燃与瓦斯复合灾变模拟实验系统(图6),主要由爆炸腔体、精密配气模块、煤样程序升温模块、数据采集与处理系统和外部设备驱动等组成,能够测试瓦斯与煤自燃火灾环境混合气

体的点火及爆炸特性;借助该系统,揭示了煤自燃过程中多元可燃气体生成具有明显的分段特征,即当煤温 $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,可燃性气体生成以CO为主;当煤温 $\geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,可燃性气体生成以CO、 CH_4 和 H_2 为主^[40],分析发现当煤自燃处于生成CO、 CH_4 和 H_2 气体的高温阶段时,煤自燃环境瓦斯气体的爆炸极限降低了32.5%(图7)。

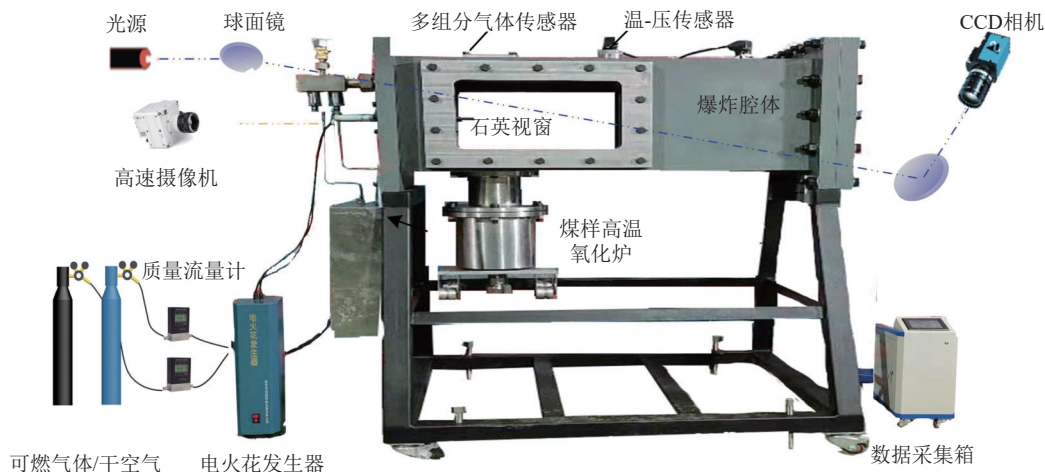


图6 煤自燃与瓦斯复合灾变实验系统

Fig.6 Experimental system of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster

2.2 采空区复合灾害辨识与预警技术

1) 采空区环境参数探测技术

采空区环境参数主要包括温度、煤自燃气体与瓦斯气体浓度、漏风风速、风流压力等。目前,采空区温度数据的采集主要通过热电偶、红外探测技术、同位

素测氦法和光纤测温技术等。文虎等^[41]根据拉曼散射理论,设计出用于采空区温度检测的分布式光纤测温系统;梁运涛等^[42]研究了针对矿井隐蔽火源的多元电磁探测技术,在神东矿区石圪台煤矿等进行了技术应用。采空区气体浓度主要通过电化学式、热导式、

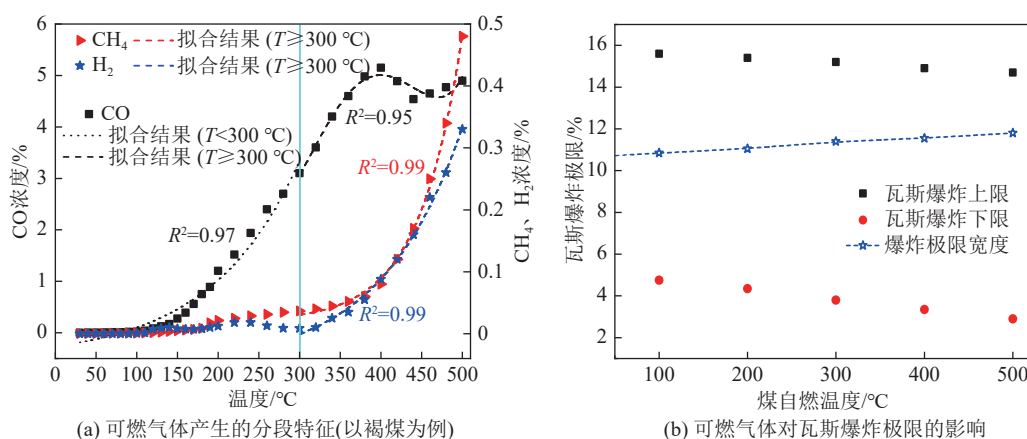
图7 煤自燃过程中可燃性气体产生规律及其对瓦斯爆炸极限的影响^[40]

Fig.7 The rule of combustible gas production during coal spontaneous combustion and its influence on gas explosion limit

催化燃烧式等各类传感器原位检测,以及与束管监测系统相结合的色谱分离技术、傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR)、非分散型光谱分析技术 (NDIR) 和可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 等^[17,43]。如中国科学院安徽光学精密机械研究所^[44]设计了一种全量程一体化激光甲烷传感器,在 0~5% 的测试浓度范围内误差小于 $\pm 0.06\%$; 中煤科工集团沈阳研究院^[45]基于 TDLAS 开发了用于煤矿热动力灾害监测的一氧化碳传感器,提出一种组分智能识别方法,其测试 $0 \sim 5 \times 10^{-4}$ 量程内的线性度优于 2%,可以实现一氧化碳和瓦斯组分识别。此外,为了对井下作业环境的一氧化碳、瓦斯等气体浓度、温度实时在线监测,我国煤矿在作业场地都安装了基于监测中心站、安全监控分站、各种传感器等组成的安全监测监控系统,例如 KJ73 型、KJ169 型安全监测监控系统。

传统的采空区漏风检测方法有 SF₆ 示踪气体法^[46],通过示踪气体在采空区内流动时间、释放与取样地点的相对位置计算采空区的漏风风速,但该方法存在干扰因素多、测试精度低、耗时长的问题。为实现对采空区漏风风速快速精准测试,山东微感光电子公司开发了高灵敏度光纤热线风速监测系统,测试精度可达 0.02 m/s,能够对采空区漏风风速实时在线监测。煤矿井下采空区风压测定一般采用 U 型管和不同种类的微压计^[47],通过在采空区闭墙前安设的压力计观测闭墙内外压差情况,判断采空区内部的风流状态和煤自燃状态。但由于采空区煤自燃发展初期,煤自燃所导致的环境气压变化微小,很难通过监测密闭内外压差来对内部灾变情况进行判断,因此该方法还不能对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害发生早期的危险辨识提供有效的数据支撑。近年来,国内外相关学者针对风速、风压等通风参数的精准监测难题,在新型传感器研制与布置策略优化等方面取得了较大进展,提出

了通风参数感知和多参数优化配置的新方法,形成了系列矿井智能通风技术装备。如周福宝团队^[48]开发了基于超声波时差法的高精度风速测量仪,实现了全量程测量精度小于 0.1 m/s; 张浪团队^[49]研发了全断面多点移动式全自动测风系统,实现了“点风速”到“面风速”监测升级,这些研究成果为采空区环境参数的探测提供了技术基础。

2) 采空区灾情信息无线传输技术

近年来,随着计算机技术的不断发展,采空区无线传输技术取得了快速的进展。在采空区煤自燃的监测预警方面,王伟峰等^[50]设计了煤自燃危险区域高密度网络化系统架构,研发了集气体、温度、压差监测于一体的采空区多参数无线传感器。在采空区瓦斯的监测预警方面,王仁宝团队^[51]结合 TDLAS 技术和无线传感网络技术,开发了适用于采空区复杂环境的瓦斯在线监测系统。以上预警方法仅对煤自燃或瓦斯爆炸的单一灾种进行判定和辨别,而对于矿井复合型灾害,这些预警方法并不适用。针对传统煤矿井下灾害监测方式单一、易产生误判漏判等问题,张巨峰等^[52]从煤自燃与瓦斯复合灾害的数据深度挖掘、智能预警系统设计、应用架构搭建等方面出发,建立了瓦斯与煤自燃共生灾害的大数据智能化预警系统的数据特征与应用架构 (图 8)。

3) 采空区复合灾害危险性辨识方法

为防止矿井灾害事故的持续恶化,基于复合灾害的发生条件提出准确可靠的危险区域划分方法,对瓦斯爆炸危险性进行辨识,对于采空区复合灾害的防控具有重要的指导意义。为此,程卫民等^[53]提出了煤自燃与瓦斯复合灾害危险区域重构技术,得到了复合灾害危险区域在采空区空间的分布情况。徐宇等^[54]采用移动网格的数值方法建立了工作面推进动态模型,得到正常开采状态时采空区氧气体积分数和瓦斯体

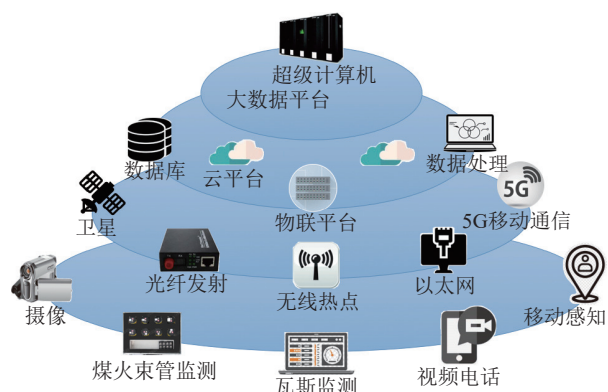
图 8 多元信息融合复合灾害的监测预警技术架构^[52]

Fig.8 Monitoring and warning technology architecture for disasters coupled with multiple information fusion

积分数分布规律,并划分了复合灾害危险区域。以采空区复合致灾机理为基础,笔者团队提出了多元混合气体浓度场的危险区域划分方法,该方法基于 Grid-data 网格化插值与 Find 函数,通过自编程序对采空区多元混合气体的可爆范围进行识别,并与瓦斯爆炸极限氧浓度区域和煤自燃氧化自燃带进行叠加处理,最终实现对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害危险区域的准确辨识^[55](图 9)。

2.3 采空区绿色高效防灭火技术

1) 大流量泡沫防灭火技术。近年来,随着煤炭开采规模和强度的不断增加,使得采空区空间大、遗煤分布范围广。大空间采空区具有遗煤氧化时间长、煤自燃防治区域大、火源位置隐蔽性强等特点,导致大空间采空区的煤自燃防治十分困难。目前采空区防灭火常用的技术主要有灌浆、注惰气、阻化剂等^[56],但都存在一定的缺陷和不足,如灌浆容易产生“拉沟”

现象、不能向高处堆积,无法完全覆盖遗煤区域^[57]; N_2 、 CO_2 惰性气体容易随漏风逸散,无法长时间惰化采空区^[58]; $MgCl_2$ 等卤盐阻化剂存在用量大、腐蚀井下设备、吸热降温阻化周期短等缺点^[59]。泡沫材料因其扩散范围广、堆积性好、可对高处遗煤覆盖等特点,对大空间采空区遗煤自燃防控更为有效^[60]。我国于上世纪 50 年代末开展了对水基泡沫技术的研究,但传统的水基泡沫属于气、液两相泡沫,存在泡沫易破裂、稳定性差的问题,对火区的治理效果达不到预期^[61]。针对传统的水基两相泡沫稳定时间短、易破裂消失等问题,秦波涛等^[62]在传统两相泡沫的基础上,发明了粉煤灰三相泡沫防灭火技术,提出将粉煤灰加入到发泡剂溶液中,利用发泡器将氮气(或空气)引入泥浆制备得到大流量泡沫材料。该技术以粉煤灰固体废弃物为基材,不仅使粉煤灰变废为宝,实现资源化利用,还能有效解决粉煤灰堆积导致的占地、污染环境等问题。粉煤灰三相泡沫在采空区具有更优良的堆积扩散性能,从而有效地抑制采空区煤自燃隐蔽火源;同时,泡沫破裂后附着在泡沫上的粉煤灰颗粒还能够覆盖煤体,形成保护层,降低煤自燃复燃的风险^[58]。

2) 复合胶体防灭火技术。在“限制东部、控制中部和东北、优化西部地区煤炭资源开发”的政策指导下,我国煤炭重心加快向资源禀赋好、开采条件好的西部地区转移。然而,我国西部矿区地表缺水少土,常规黄泥注浆、注沙等技术应用过程中需要大量的水土资源,限制了我国西部矿区采空区煤自燃的高效防治。考虑到西部矿区山砂资源丰富,以及燃煤电厂粉煤灰废弃物排放量大的现状,相关学者提出了以粉煤灰或山砂为基料的复合凝胶防灭火技术,通过在粉煤

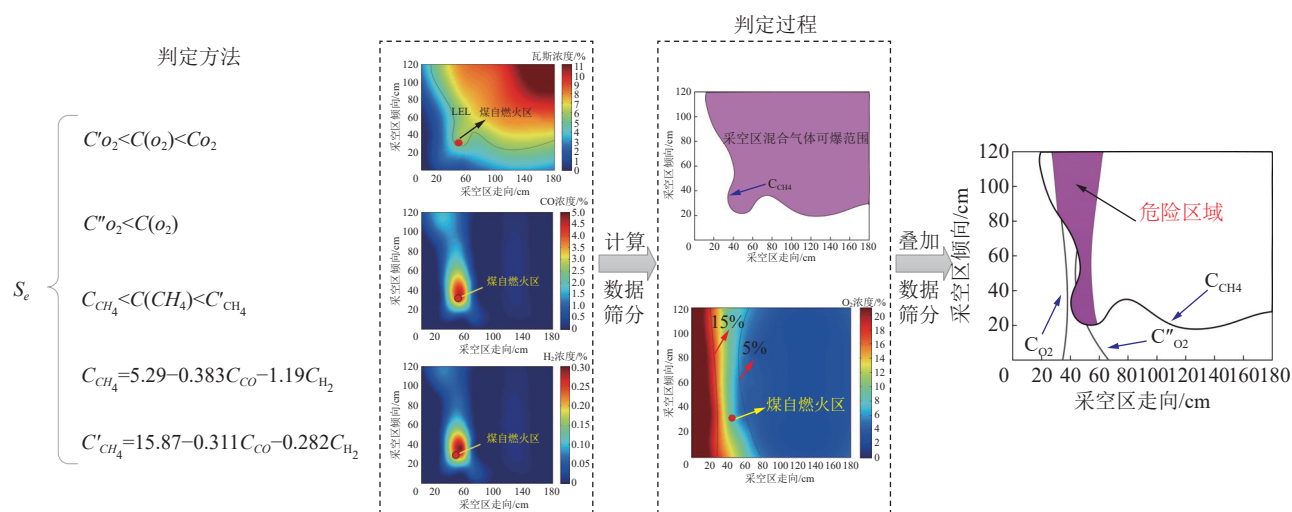
图 9 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害危险区域判定方法及过程^[55]

Fig.9 Determination method and process of dangerous area of combined thermal dynamic disaster of coal spontaneous combustion and gas in goaf

灰浆液或砂浆中加入少量的有机高分子材料或聚合物制得复合胶体材料^[63-64]。山砂和粉煤灰材料可就近取材,具有良好的阻燃性和环保性^[65],可显著降低矿井防火的原料成本和经济投入;加入的有机高分子材料或聚合物为绿色环保材料^[66],无毒无害、成本低廉,水资源消耗量小,制成的复合胶体成胶体系稳定、保水能力强,具有优异的防火性能^[67]。如笔者团队提出了稠化砂浆防火技术,开发了KCD悬砂稠化剂^[68],能悬浮固相物质且显著降低了防火过程中的用水量,将水砂比由7:1~15:1减小至3:1,同时解决了传统注砂技术易堵管、难以长距离输送的技术难题。

3) 无机固化材料堵漏防火技术。煤矿井下采空区由于裂隙等漏风通道的存在导致松散遗煤与氧气接触,促进煤体氧化自热过程,最终在采空区形成煤炭自然发火隐患^[69]。因此,充填堵漏是防治采空区煤自燃的关键^[70]。目前常用的聚氨酯泡沫、酚醛树脂泡沫等有机堵漏材料存在成本高、反应放热量大、产生废气废水等问题,使用过程中容易引发火灾^[71],无法实现采空区漏风区的安全封堵。因此,成本低廉、放热量低、绿色环保的无机类堵漏材料越来越引起国内外学者的关注^[72-75]。常规的以水泥、促凝剂等为基材的水泥喷浆堵漏技术存在材料脆性大、抗变形能力差的问题,喷浆材料在矿压作用下极易产生新的漏风通道。为此,笔者团队提出了以粉煤灰、水泥和水为基材的粉煤灰无机固化泡沫堵漏防火技术,开发了以中空螺旋混合器为核心部件的无机固化泡沫制备系统。粉煤灰无机固化泡沫浆液注入采空区后可大范围扩散并向高处堆积,迅速充填煤体裂隙,并对高温煤体有较好的降温效果^[76];材料固化后力学强度高,密封性较好,堵漏过程中对环境不放热,且对井下环境无污染,是绿色环保型堵漏材料^[77]。

2.4 采空区惰化抑爆技术

1) 惰性气体抑爆技术。采空区惰气抑爆是通过向采空区封闭火区等危险区域注入 N_2 、 CO_2 等惰性气体,稀释火区内 O_2 浓度和瓦斯浓度,降低瓦斯爆炸的危险性。有关学者^[78-80]先后研究了 N_2 、 CO_2 等惰性气体对瓦斯爆炸极限、临界氧浓度、爆炸火焰传播的影响,如LI^[81]等测试分析了 N_2 、 CO_2 对瓦斯爆炸最大超压、最大爆炸压力上升速度及火焰传播速度的抑制效果;张迎新等^[82]探讨了 N_2 、 CO_2 对瓦斯爆炸抑制的作用机制。以上这些研究帮助人们进一步认识惰性气体对采空区瓦斯爆炸的抑制作用。在采空区惰性气体抑爆的应用方面,捷克首次使用了液态惰性气体防火技术,此后,该技术在英国、德国、法国、南非

及中国也得到了应用。朱红青^[83]提出了旋转牵引式非间隔式注氮装备及防火工艺系统,有效缩小了采空区氧化自燃带宽度,降低了瓦斯爆炸发生危险性;张延松^[84]等提出了高位压注 CO_2 和低位压注 N_2 的灭火抑爆技术,解决了唐口煤矿瓦斯与火灾复合灾害的问题。然而,采用惰性气体对采空区进行抑爆控制中也存在致爆的可能性,相关学者^[85]研究了火区注惰后内部可燃气体的运移规律,分析了注惰引发瓦斯爆炸的过程,阐明了注惰致爆的原因。

2) 细水雾或固相粉体抑爆技术。细水雾作为一种安全清洁环保的抑爆技术,已被广泛应用到瓦斯爆炸防治领域^[86]。近年来,国内外学者主要围绕细水雾对瓦斯爆炸压力参数、爆炸火焰、反应动力学等方面探讨细水雾的抑爆效果与抑爆机理。毕明树团队^[87-89]系统探究了细水雾的雾滴粒径、雾化方式、喷雾量等物理参数对瓦斯抑爆效果的影响,BADHUK等^[90]和VILFAYEAU等^[91]通过化学动力学揭示了细水雾对瓦斯爆炸的抑制机理。由于水是良好的溶剂,可将灭火添加剂溶于水中来大大提高水雾的抑爆效果,如余明高团队^[92]测试了含 $NaHCO_3$ 、 $FeCl_2$ 、 $MgCl_2$ 的细水雾对瓦斯爆炸火焰的影响。此外,基于静电感应原理,余明高团队^[93]还设计得到了荷电细水雾,荷电作用使得细水雾保持更高的稳定性,从而达到更好的降温效果。

粉体抑爆技术也是常用的瓦斯爆炸控制技术之一,粉体抑爆材料种类多、性能优良、易于改性,通常有单一粉体抑爆剂和复合粉体抑爆剂两大类。单一粉体抑爆剂主要包括物理抑制材料(如岩粉、二氧化硅、碳酸钙等)与化学活性抑制材料(如碳酸盐、磷酸盐、钾盐、钠盐等)。为提高单一粉体的抑爆效果,相关学者通过物理或化学方法对单一粉体抑爆剂进行复配、合成,制得了高性能的复合粉体。如程卫民等^[94]将 $Al(OH)_3$ 、聚磷酸铵、硅藻土合成了复合抑爆剂;张延松等^[95]以沸石作为载体,通过与铁离子和聚磷酸铵的复配,制备了一种新型的爆炸抑制剂。笔者团队^[96]基于物理和化学协同作用制备出具有高效抑爆功能的核壳结构干水材料(图10),该材料由疏水性气相纳米二氧化硅和碱金属盐复合形成,外观呈固体粉末状,具有优异的流动性和分散性。实验验证该材料可使瓦斯最大爆炸压力最多降低82%,抑爆效果显著。

3) 多相复合材料协同抑爆技术。多相复合材料协同抑爆是采用具有抑爆作用的惰性气体为载体,协同具有抑爆性能固态粉体或气态细水雾、泡沫等材料注入采空区瓦斯集聚区域,抑制瓦斯爆炸。余明高团队^[97-99]开展了一系列 CO_2 -细水雾双流体抑爆实验研

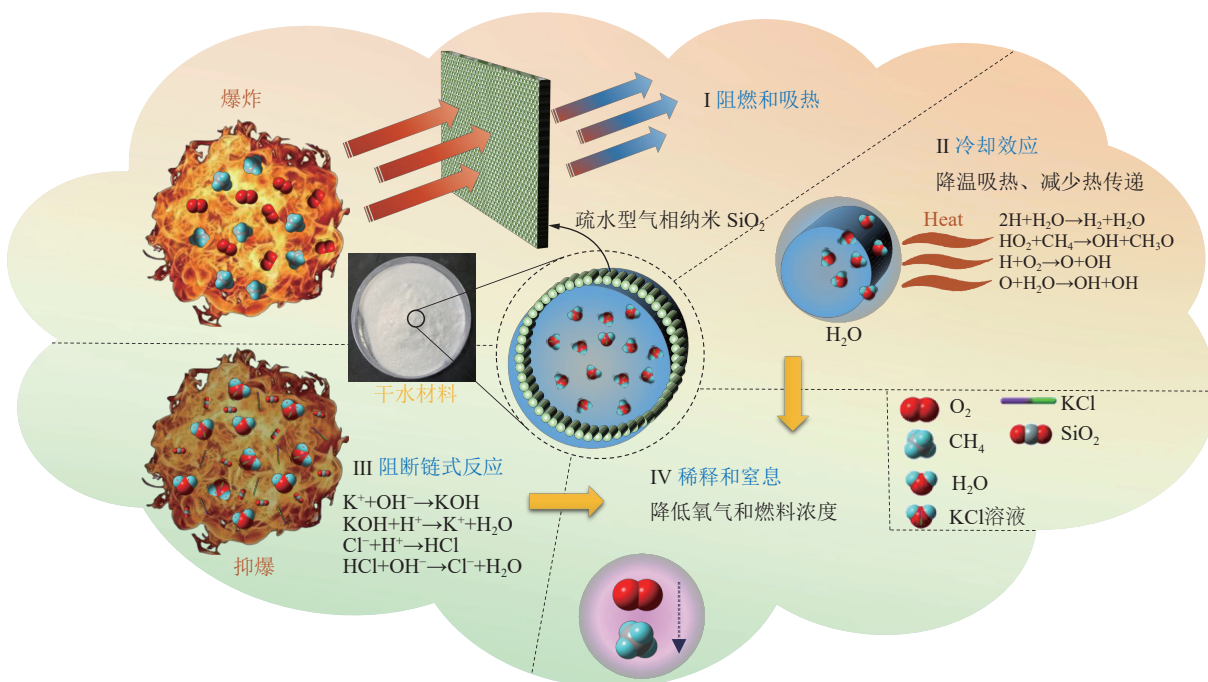
图 10 新型核壳结构干水材料^[96]

Fig.10 New type of core-shell structure dry-water material

究, CO_2 本身起到一定的惰化作用, 同时能够推动细水雾在采空区瓦斯集聚区更好地分散, 达到了协同的抑爆效果。李贤忠、林柏泉等^[100]研制了粉煤灰二氧化碳泡沫气-固-液三相灌浆防火抑爆材料, 并在开滦矿区赵各庄煤矿采空区进行应用, 起到了抑制采空区瓦斯爆炸和煤自燃的作用。罗振敏团队^[101]提出了利用纳米特性效应的气溶胶类物质进行瓦斯科爆的新思路, 开展了多组分热气溶胶对瓦斯爆炸的抑制研究, 为热气溶胶灭火剂在采空区瓦斯抑爆领域的应用提供了参考。以上多相复合材料中的不同相态抑爆剂可在瓦斯爆炸的不同阶段发挥相应作用, 提高了瓦斯爆炸的防控效果。

2.5 采空区复合灾害应急处置技术

1) 应急决策方法。应急决策是否科学合理是应急救援顺利进行的关键。周心权等^[102]通过分析煤矿重大热动力灾害的救灾决策过程及特点, 总结出矿井火灾与爆炸复合型灾害的救灾决策是矿井各类灾害救灾中难度最大、危险性最高、技术性最强的工作。目前, 我国针对煤矿应急决策主要采用层级式决策方式和分散式决策方式, 考虑到矿井煤自燃与瓦斯复合灾害具有复杂性和高危性的特征, 在事故处置中应该结合 2 种决策方式制定决策机制^[103]。例如, 在肖家湾煤矿特别重大瓦斯爆炸事故中, 采取了多元主体协同联动的应急处置方法^[104], 通过在同级部门的不同主体之间的水平合作和决策层与执行主体之间的垂直合作, 保证了参与决策的个体形成高效运转的整体。此

外, 鉴于煤自然与瓦斯复合灾害发展过程的动态性, 决策主体与应急方案也应随着灾害的发展不断变化, 因此应急决策还应具有阶段性。如温廷新^[105]构建了分阶段的应急防控信息系统模型, 优化了煤自燃与瓦斯等煤矿生产灾害的应急处置流程, 有效降低了应急决策的风险性。

2) 应急救援通信技术。由于煤矿生产活动中的安全问题日益凸显, 采空区应急救援无线通信技术受到了广泛关注。无线通信技术是以电磁波进行信号传输的新型通信技术, 不再要求其终端设备连接繁杂的线缆, 极大地提高了应急救援通信设备的便携性^[106]。张玉等^[107]基于组网模式构建了具备语音通信、视频监控和环境监测功能的无线应急通信网络, 该网络具有较好的吞吐性能、传输稳定性与实时性, 但其系统抗破坏性弱, 且 Mesh 终端能耗较高, 发生灾害时容易遭到破坏难以全部发挥作用。为提高通信设备的抗干扰能力, 降低通信系统能耗, 张燕燕^[108]基于无线传感器网络 (WSN) 搭建了用于煤矿井下的应急通信系统, 该系统具有自组织、低功耗、快速部署、抗破坏性强的特点, 可以在电力系统故障的情况下实现与地面控制中心的实时通信。此外, 为了使通信系统更全面, 增强系统的应用性, MORIDI 等^[109]将无线传感器网络 (WSN) 与地理信息系统 (GIS) 相结合, 设计出一种兼具采空区环境参数实时监控与应急通信功能的设备系统。

3) 应急救援定位技术。当前, 我国煤矿井下定位

技术有 RFID 射频识别技术、基于蜂窝小区标识的定位技术、WiFi 定位技术、ZigBee 技术和基于超宽带 (UWB) 的定位技术等。其中, RFID 射频识别技术在我国煤矿应用最为广泛, 可用于工人考勤和非定点的区域跟踪, 但该技术只能确定人员的所处区域, 不能测距和定位。基于蜂窝小区标识的定位技术和 WiFi 定位技术都是基于 RSSI 测距^[110-111], 但 RSSI 测距定位误差较大, 因此这两种技术都无法进行精确定位。无线传感器网络 (WSN) 技术中的 ZigBee 定位技术, 具有自组网、功耗小、设备成本低、易实施的优点, 但其定位精度不足, 误差可达数十米^[112]。目前, 可达高精度定位要求的是超宽带技术, 其定位精度可以达到厘米级^[113], 能够满足煤矿事故应急救援中对井下遇险人员定位的精度要求, 如中煤科工集团重庆研究院开发了基于超宽带技术的 KJ251A 人员定位系统^[114], 其

定位精度小于 30 cm, 可实现人员目标精确定位与动态跟踪。

3 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控面临的挑战

通过对近年来由煤自燃引发的瓦斯爆炸重特大事故的统计调研, 对重点事故矿井在火区发生的爆炸—封闭—再爆炸事故经过的分析总结, 认为当前防控采空区煤自燃与瓦斯复合灾害还面临以下 4 个挑战 (图 11)。在后续的科研攻关中还需要进行采用多学科交叉、多手段融合的方式, 开发智能感知、多元信息挖掘等技术, 实现采空区煤自燃与瓦斯复合灾害致灾风险的精准预判与评估、灾情信息的精准获取、封闭区域的合理选择及灾害区域的精准定位和智能定向处置, 为有效避免复合灾害事故的发生提供关键技术支撑。

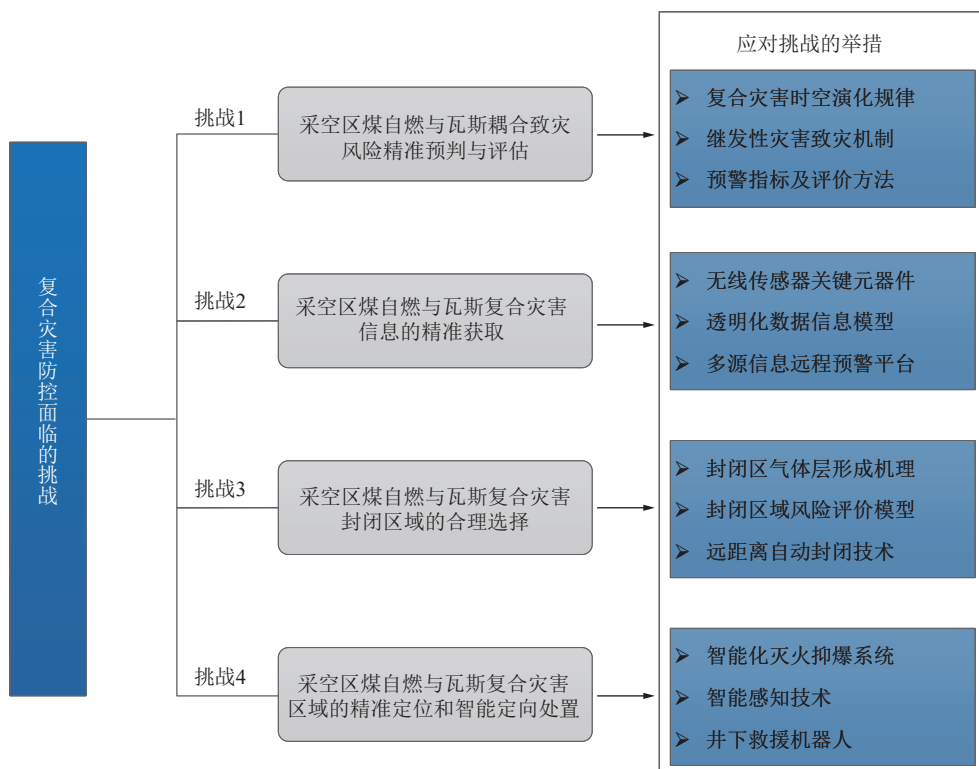


图 11 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害面临的挑战及应对举措

Fig.11 Challenges and solution of coal spontaneous combustion and methane combined disasters in mine gob

3.1 采空区煤自燃与瓦斯耦合致灾风险的精准预判与评估

我国矿井地质条件和煤层赋存条件复杂多变, 尤其是煤炭开采进入深部以后, 开采环境发生剧烈变化, 采空区的遗煤量大、漏风加剧, 瓦斯涌出强度增加, 导致发生采空区煤自燃与瓦斯复合灾害的风险提高。同时, 由于复合灾害的灾变原因具有多样性和复杂性, 发展具有耦合性和动态性, 导致对复合灾害致灾风险

的精准预判与评估十分困难, 使得救灾过程中很多时候难以做出正确的决策。如 2013 年 4 月 1 日吉林八宝煤矿处理井下灾情时又造成 17 名救援人员死亡的次生灾害事故, 就是由于对灾变环境热动力灾害时空演化规律认识不清、对瓦斯爆炸危险性预判不准确造成的。传统的仅基于瓦斯浓度或氧气浓度等单一气体浓度、温度等基于静态临界指标的预判方法具有局限性^[19], 不适用于采空区煤自燃火区环境。此外, 煤

自燃引发瓦斯爆炸灾害发生后还易导致多种继发性灾害,如瓦斯二次或多次爆炸、煤尘爆炸、矿井火灾等,这些继发性灾害往往破坏性更强,现有防控体系尚缺乏对继发性灾害风险的预判与评估。

为实现采空区煤自燃与瓦斯耦合致灾风险精准预判,急需开展煤自燃-瓦斯燃烧与爆炸复合灾害时空演化规律的研究,掌握灾变环境气体浓度、温度、漏风风速等不同参数与瓦斯爆炸灾害演变进程的对应关系,阐明瓦斯爆炸诱发二次爆炸、矿井火灾等继发性灾害的致灾机制,提出复合灾害多参数融合的预警指标及评价方法。

3.2 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害信息的精准获取

矿井灾害治理、事故救援的基础是灾变环境灾情信息的准确提取。由于煤矿采空区环境复杂,采空区内部煤自燃气体与瓦斯气体浓度、煤自燃温度、漏风风速、风流压力等环境状态参数监测一直是复合灾害研究的重点和难点。如果在煤自燃火区灭火或封闭过程中,对灾变环境内的环境参数不清楚,就无法对瓦斯爆炸的危险性进行准确辨识,很容易发生爆炸-封闭-再爆炸-再封闭的复杂过程,如安徽任楼煤矿Ⅱ7322采空区发生了8次爆炸等。由于煤的热传导能力差,使得煤自燃高温区对其临近煤岩体的放热影响范围很小,因此很难通过温度测试方法获取采空区灾情信息;而目前对采空区内部风速、风压的测试方法都存在干扰因素多、可操作性差等问题,还无法对复合灾害发生早期提供及时、可靠的灾变信息。因此,当前煤矿主要通过探测采空区内的 O_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等气体浓度来获得灾变环境信息,探测方法包括热导式分析法、催化燃烧法、电化学法等。这些方法可对 O_2 、 CO 、 CH_4 3种气体进行实时分析,但检测精度受井下水分、粉尘等环境因素的影响较大,一般每隔7—10天就需要送至地面校准。传统束管取样与地面色谱分析法能同时检测 CO 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等灾变气体,但存在气样分析周期长、时效性差等问题。以上这些基于非光学原理的测试方法,尚无法满足采空区复合灾害环境多组分气体快速检测的需求。近年来开发的用于采空区气体快速检测的近红外可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术,具有分析精度高、响应速度快的优点,但还未解决多组分气体谱线重叠干扰的问题^[44],尚无法实现采空区多组分气体的精准分析。

为实现采空区煤自燃与瓦斯复合灾害信息的精准探测,需要开发适用于采空区复杂环境条件的无线传感器元器件,研发针对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害的“点-线-面”全覆盖高精度智能探测技术与装备;

基于采空区不同的点、线、面信息的汇集与整合,逐步形成透明工作面、透明采空区等透明化数据信息模型。结合煤矿井下大数据、云计算、机器学习等信息处理技术,建立可对采空区复合灾害多源动态信息远程在线采集、传输、存储和分析的预警平台。

3.3 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害封闭区域的合理选择

当煤矿采空区发生遗煤自然发火时,在采用综合防灭火技术措施仍不能有效控制火情发展的情况下,及时封闭火区是重要的火灾应急措施。对于高瓦斯矿井,如果封闭区域选择不当,就会影响自然发火工作面的通风系统,导致涌向火源风流的速度、风量、风压发生改变,造成火势扩大与火区瓦斯积聚,因而火区封闭过程中和封闭后发生瓦斯爆炸的危险性极大。如2005年黑龙江鹤岗兴安矿“8.21”瓦斯爆炸事故,就是由于在施工回风石门密闭后,风流被隔断,导致21号煤层瓦斯涌向火源处发生爆炸事故。因此,当采取封闭火区措施时,合理确定封闭范围是至关重要的。当封闭区域过大时,虽然能够降低火灾与爆炸等灾害对井下工作人员的威胁,但由于封闭区域空间大、含氧量高,导致灭火时间长,存在火灾持续扩大的风险,且生产系统或备用工作面封闭往往都被封闭在内,影响矿井接续生产。因此,在保证安全的情况下,应当尽量缩小封闭范围,但封闭范围过小会导致内部含瓦斯可燃混合气体浓度升高,爆炸危险性也随之增大。过去只认识到了火区封闭后可能导致瓦斯集聚,对封闭后内部燃烧状态和气体运移开展了相关研究,但还缺乏有对防火墙合理构筑位置方面的研究。

为实现对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害封闭区域的合理选择,需要研究封闭火区内气体层形成机理,揭示火区封闭位置对工作面通风状态参数的影响特征,提出火区封闭区域的风险评价模型;开发远距离自动封闭技术,研发集成输料系统、控制系统、激光测距系统及喷浆系统的密闭墙快速构筑智能一体机装备。

3.4 采空区煤自燃与瓦斯复合灾害区域的精准定位和智能定向处置

与井下其他区域抢险救灾相比,矿井采空区的灾害防控及救援制约因素更多,因而需要更强的技术性、时效性和精准性,要求对灾害发生区域判定准确、处置措施选择得当且反应迅速。然而,传统的救援方式效率低,如果处置不当极易导致次生灾害的发生。近年来,随着互联网、人工智能等技术的飞速发展,井下救援机器人受到越来越多的关注。救援机器人通过挂载相机、红外测距仪、气体传感器以及导航仪等设备,进入灾变环境进行人员定位和应急处置,已成为

应对事故救援发展的趋势。目前的救援机器人仅能在通行路况好、移动距离短、通信组网良好等理想的环境中应用,而采空区煤自燃诱发瓦斯爆炸灾害发生后,采空区上覆煤岩体垮落坍塌,现场通行条件极为恶劣,且多数情况下煤矿灾后现场的常规通信设施被损毁,这使得救援机器人在灾后恶劣环境的应用受限。此外,为实现更精确、更自主的机器人定位和决策规划,可通过引入基于视觉系统的感知技术辅助其自主决策和智能控制,通过视觉传感器获知灾变环境信息,并协助救援机器人开展工作^[15]。但由于井下救援环境盲区较多、照度低、单一场景下定位精度差等情况,导致救援机器人难以满足在采空区灾变环境自主导航及精确定位的要求。

2020年3月,国家发改委等八部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,提出到2035年各类煤矿基本实现智能化的总目标,对采空区煤自燃与瓦斯复合灾害智能化防控提出了新的标准。为实现采空区煤自燃与瓦斯复合灾害区域精准定位和智能高效定向处置,急需研发安全高效的智能化灭火抑爆技术装备,充分采用矿山物联网、5G通信、工业互联网、人工智能等技术,实现地面预警平台与井下灭火抑爆系统的互联互通;研发适用于井下复杂地形特征的智能感知技术以及越障行走策略,开发具有精准感知、自主学习、自主决策的井下救援机器人,实现巡检、防控全过程的少人化甚至无人化作业。

4 结 语

随着煤炭开发快速向深部转移,在高地应力和高地温环境影响下,采空区煤自燃与瓦斯复合灾害问题愈加严峻,严重影响着煤炭工业的安全高效发展。采空区煤自燃与瓦斯复合灾害具有耦合性、隐蔽性、不确定性、动态性、继发性和严重性的特征,往往会导致煤矿重特大事故,造成重大的经济损失和人员伤亡,还会诱发粉尘爆炸、瓦斯涌出等次生灾害。当前,我国防控采空区煤自燃与瓦斯复合灾害已初步形成技术体系,在复合灾害演化特性、危险性辨识方法、灭火抑爆技术、应急处置技术方面取得了较丰硕的研究成果。但由于采空区煤自燃与瓦斯灾害互为诱因、复杂多变,目前对复合灾害的发生及发展条件还存在缺乏科学的认识,对灾变环境参数探测、火区封闭位置的确定、灾害精准定位等方面还缺乏有效方法与技术,还不能从根本上杜绝煤自燃引发瓦斯爆炸事故的发生。为此,未来急需在复合灾害智能监测预警平台、高精度智能感知装备、智能化灭火抑爆系统等方面开展系统研究,为复合灾害的防控提供关键技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [2] 武强,涂坤,曾一凡,等.打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J].煤炭学报,2019,44(6):1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy(coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [3] 贺佑国,刘文革,李艳强.世界煤炭工业发展综论[J].中国煤炭,2021,47(1):126-135.
HE Youguo, LIU Wenge, LI Yanqiang. Overview of world coal industry development[J]. China Coal, 2021, 47(1): 126-135.
- [4] 王德明.煤矿热动力灾害及特性[J].煤炭学报,2018,43(1):137-142.
WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137-142.
- [5] 周福宝.瓦斯与煤自燃共存研究(I):致灾机理[J].煤炭学报,2012,37(5):843-849.
ZHOU Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion(I): disaster mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 843-849.
- [6] 秦波涛,张雷林,王德明,等.采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J].煤炭学报,2009,34(12):1655-1659.
QIN Botao, ZHANG Leilin, WANG Deming, et al. Mechanism and restraining technology on spontaneous combustion of coal detonating gas in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1655-1659.
- [7] 赵庆跃.屡越“红线”连酿惨剧:吉林八宝煤业公司“3·29”特别重大瓦斯爆炸事故案例分析[J].吉林劳动保护,2013(8):37-39.
ZHAO Qingyue. Repeatedly crossing the “red line” and brewing tragedies—a case study of the “March 29” extraordinarily serious gas explosion accident in Jilin Babao Coal Industry Company[J]. Jilin Labour Protection, 2013(8): 37-39.
- [8] PAN R K, CHENG Y P, YU M G, et al. New technological partition for “three zones” spontaneous coal combustion in goaf[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 489-493.
- [9] 杨永良,李增华,陈奇伟,等.利用顶板冒落规律研究采空区自燃“三带”分布[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):205-209.
YANG Yongliang, LI Zenghua, CHEN Qiwei, et al. The study of distribution of spontaneous combustion “three-zone” in gob using the law of the roof caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 205-209.
- [10] 邓军,夏海斌,郑忠亚,等.高瓦斯综放工作面采空区自燃危险区域分析[J].煤矿安全,2011,42(2):122-124.
DENG Jun, XIA Haibin, ZHENG Zhongya, et al. Analysis of

- spontaneous combustion danger area in goaf of fully mechanized top-coal caving face with high gas content[J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(2): 122–124.
- [11] QIN B T, LI L, MA D, et al. Control technology for the avoidance of the simultaneous occurrence of a methane explosion and spontaneous coal combustion in a coal mine: a case study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 103: 203–211.
- [12] MA D, QIN B T, GAO Y, et al. An experimental study on the methane migration induced by spontaneous combustion of coal in longwall gobs[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 147: 292–299.
- [13] SU B, LUO Z M, WANG T, et al. Experimental and principal component analysis studies on minimum oxygen concentration of methane explosion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(21): 12225–12235.
- [14] LI Z, LU Z, QIANG WU. Numerical simulation study of goaf methane drainage and spontaneous combustion coupling[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 17(4): 503–507.
- [15] 文虎, 王文, 程小蛟, 等. 不同抽采条件对采空区煤自燃“三带”的影响研究[J]. *矿业安全与环保*, 2020, 47(6): 1–7.
WEN Hu, WANG Wen, CHENG Xiaojiao, et al. Study on the effect of different extraction conditions on “three zones” of coal spontaneous combustion in goaf[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(6): 1–7.
- [16] 褚廷湘, 陈月霞, 司俊鸿. 顶板巷抽采量对采空区遗煤氧化区域的扰动效应[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 475–482.
CHU Tingxiang, CHEN Yuexia, SI Junhong. Disturbance effect of drainage quantity of roof roadway on oxidation area of residual coal in goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2): 475–482.
- [17] 王德明, 邵振鲁, 朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 57–64.
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 57–64.
- [18] LI L, QIN B T, MA D, et al. Unique spatial methane distribution caused by spontaneous coal combustion in coal mine goafs: an experimental study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 116: 199–207.
- [19] 林柏泉, 李庆钊, 周延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1715–1726.
LIN Baiquan, LI Qingzhao, ZHOU Yan. Research advances about multi-field evolution of coupled thermodynamic disasters in coal mine goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1715–1726.
- [20] 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. Uncertain risk characteristics of major thermodynamic disasters in underground coal mines[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(4): 826–837.
- [21] XIA T Q, ZHOU F B, WANG X X, et al. Controlling factors of symbiotic disaster between coal gas and spontaneous combustion in longwall mining gobs[J]. *Fuel*, 2016, 182: 886–896.
- [22] 李宗翔, 吴强, 肖亚宁. 采空区瓦斯涌出与自燃耦合基础研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(1): 38–42.
LI Zongxiang, WU Qiang, XIAO Yaning. Numerical simulation of coupling mechanism of coal spontaneous combustion and gas effusion in goaf[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(1): 38–42.
- [23] LI L, QIN B T, LIU J S, et al. Integrated experimentation and modeling of the formation processes underlying coal combustion-triggered methane explosions in a mined-out area[J]. *Energy*, 2020, 203: 117855.
- [24] 丁洋, 宜艳, 林海飞, 等. 高强开采综放工作面瓦斯浓度空间分布规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 206–214.
DING Yang, YI Yan, LIN Haifei, et al. Spatial distribution law of gas concentration in the fully mechanized caving face of high intensity mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 206–214.
- [25] 高建良, 王立峰, 刘明信. 采空区瓦斯涌出源位置对瓦斯浓度及自燃带分布的影响[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 47–50.
GAO Jianliang, WANG Lifeng, LIU Mingxin. Impact of the gas outburst location on the gas concentration distribution and its spontaneous combustion zone[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(2): 47–50.
- [26] 赵鹏翔, 康新朋, 李树刚, 等. 卸压瓦斯运移区“孔-巷”协同抽采布置参数优化及高效抽采[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 137–146.
ZHAO Pengxiang, KANG Xinpeng, LI Shugang, et al. Optimization of “hole-drift” collaborative drainage layout parameters and high efficient drainage in pressure relief gas migration area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 137–146.
- [27] 牛会永, 邓军, 周心权, 等. 煤矿火区封闭过程中瓦斯积聚规律研究及危险性分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(9): 3918–3924.
NIU Huiyong, DENG Jun, ZHOU Xinquan, et al. Law of gas accumulation and analysis of danger of gas explosion during sealing fire zone in coal mine[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(9): 3918–3924.
- [28] 车强. 采空区气体三维多场耦合规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
CHE Qiang. Study on three-dimensional multi-field coupling law of gas in goaf[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2010.
- [29] 任攀华. 采空区漏风规律及瓦斯运移规律模拟试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
REN Qianhua. Simulation test study on air leakage law and gas migration law in goaf[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [30] 李霞. “一进两回”工作面通风系统瓦斯运移规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
LI Xia. Study on gas migration law of ventilation system in “one entry and two returns” working face[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.

- [31] 罗振敏,郝苗,苏彬,等.采空区瓦斯运移规律实验及数值模拟[J].西安科技大学学报,2020,40(1):31-39.
LUO Zhenmin, HAO Miao, SU Bin, et al. Experiments and numerical simulation research on gas migration in goaf[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(1): 31-39.
- [32] 潘尚昆,李增华,林柏泉,等.氢气及重烃组分对瓦斯爆炸下限影响的实验研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2008,23(3):23-27.
PAN Shangkun, LI Zenghua, LIN Boquan, et al. Experimental studies on the effect of hydrogen and heavy hydrocarbon on lower explosion limits of gas[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 23-27.
- [33] 王德明.煤矿热动力灾害学[M].北京:科学出版社,2018.
- [34] KUNDU S, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. A review on understanding explosions from methane-air mixture[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 507-523.
- [35] BAO Q, FANG Q, YANG S G, et al. Experimental investigation on the deflagration load under unconfined methane-air explosions[J]. *Fuel*, 2016, 185: 565-576.
- [36] PEKALSKI A A, SCHILDBERG H P, SMALLEGANGE P S D, et al. Determination of the explosion behaviour of methane and propene in air or oxygen at standard and elevated conditions[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2005, 83(5): 421-429.
- [37] GIERAS M, KLEMENS R, RARATA G, et al. Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40dm³ at normal and elevated temperature[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(2-3): 263-270.
- [38] 白刚,周西华,宋东平.温度与CO气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响实验[J].高压物理学报,2019,33(4):189-196.
BAI Gang, ZHOU Xihua, SONG Dongping. Experimental study on the coupling influence of temperature and CO concentration on CH₄ explosion limit[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 189-196.
- [39] 李润之.点火能量与初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究[D].青岛:山东科技大学,2010.
LI Runzhi. Study on the influence of ignition energy and initial pressure on gas explosion characteristics[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [40] MA D, QIN B T, ZHONG X X, et al. Effect of flammable gases produced from spontaneous smoldering combustion of coal on methane explosion in coal mines[J]. *Energy*, 2023, 279: 128125.
- [41] 文虎,吴慷,马砾,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.
- [42] 梁运涛,王伟.矿井自燃火灾超前协同防控技术[J].煤矿安全,2020,51(10):39-45.
LIANG Yuntao, WANG Wei. Advanced cooperative prevention and control technology of mine spontaneous combustion fire disaster[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 39-45.
- [43] TIAN F C, LIANG Y T, ZHU H Q, et al. Application of a novel detection approach based on non-dispersive infrared theory to the *in situ* analysis on indicator gases from underground coal fire[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(6): 1840-1855.
- [44] 庞涛,王煜,夏滑,等.基于TDLAS技术的全量程激光甲烷传感器[J].光子学报,2016,45(9):104-110.
PANG Tao, WANG Yu, XIA Hua, et al. Full scale methane sensor based on TDLAS technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 104-110.
- [45] 姜萌,冯文彬,高慧,等.用于煤矿热动力灾害监测的一氧化碳传感器[J].煤炭学报,2021,46(S2):793-799.
JIANG Meng, FENG Wenbin, GAO Hui, et al. Carbon monoxide sensor for coal mine thermal power disaster monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 793-799.
- [46] 王宁,张海军.浅埋深近距离煤层工作面漏风测定及防治技术[J].煤炭科学技术,2021,49(S2):131-134.
WANG Ning, ZHANG Haijun. Measurement and prevention technology of air leakage in shallow-buried close-distance coal seam working face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 131-134.
- [47] 陶志勇,李斌.特大面积上下复合采空区立体化技术观测装置[J].煤矿安全,2020,51(5):158-161.
TAO Zhiyong, LI Bin. Three-dimensional technical observation device for super large area upper and lower composite goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 158-161.
- [48] 周福宝,魏连江,夏同强,等.矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J].煤炭学报,2020,45(6):2225-2235.
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225-2235.
- [49] 张浪,刘彦青.矿井智能通风与关键技术研究[J/OL].煤炭科学技术. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20240128.1705.001>.
ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20240128.1705.001>.
- [50] 王伟峰,邓军,侯媛彬.煤自燃危险区域高密度网络化监测预警系统设计与应用[J].煤炭技术,2018,37(3):218-220.
WANG Weifeng, DENG Jun, HOU Yuanbin. Design and application of high density network monitoring and warning system in coal spontaneous combustion hazardous area[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 218-220.
- [51] 丁雨生.可调谐激光光谱吸收式瓦斯预警系统研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.
DING Yusheng. Study on tunable laser spectrum absorption gas early warning system[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [52] 张巨峰,施式亮,鲁义,等.大数据下瓦斯与煤自燃共生灾害智能预警系统:数据特征、应用架构、关键技术[J].中国安全科学学报,2021,31(9):60-66.
ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Intelligent early warning system of gas and coal spontaneous combustion disaster based on big data: data characteristics, application structure and key tech-

- nologies[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(9): 60–66.
- [53] 程卫民, 张孝强, 王刚, 等. 综放采空区瓦斯与遗煤自燃耦合灾害危险区域重建技术[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 662–671.
CHENG Weimin, ZHANG Xiaoqiang, WANG Gang, et al. Reconstruction technology of gas and coal spontaneous combustion coupled hazard in fully mechanized caving goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 662–671.
- [54] 徐宇, 李孜军, 翟小伟, 等. 开采过程中采空区煤自燃与瓦斯复合致灾隐患区域研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 585–592.
XU Yu, LI Zijun, ZHAI Xiaowei, et al. Study on the hidden danger area caused by coal spontaneous combustion and gas compound in goaf during mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 585–592.
- [55] MA D, QIN B T, LI L, et al. Study on the methane explosion regions induced by spontaneous combustion of coal in longwall gobs using a scaled-down experiment set-up[J]. *Fuel*, 2019, 254: 115547.
- [56] 秦波涛, 仲晓星, 王德明, 等. 煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 66–99.
QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 66–99.
- [57] 左希希. 粉煤灰三相泡沫的制备与性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
ZUO Xixi. Study on preparation and properties of fly ash three-phase foam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.
- [58] QIN B T, LU Y, LI Y, et al. Aqueous three-phase foam supported by fly ash for coal spontaneous combustion prevention and control [J]. *Advanced Powder Technology*, 2014, 25(5): 1527–1533.
- [59] 朱红青, 胡超, 周全涛, 等. 响应曲面法优化矿井三相泡沫防火材料配方研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(4): 120–126.
ZHU Hongqing, HU Chao, ZHOU Quantao, et al. Study on formula of mine three-phase foam fire prevention and control material optimized by response surface methodology[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(4): 120–126.
- [60] 张志英, 王志权, 韩兵. 三相泡沫在综放工作面采空区火灾治理中的应用[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(8): 187–188.
ZHANG Zhiying, WANG Zhiquan, HAN Bing. Application of three phase foam in fire district governance for fully mechanized caving goaf[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(8): 187–188.
- [61] 王瑒, 邢玉忠. 凝胶 N₂ 泡沫灭火新材料的研究[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(1): 47–50.
WANG Yang, XING Yuzhong. Research of gel N₂ foam extinguish material[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(1): 47–50.
- [62] 秦波涛, 蒋文婕, 史全林, 等. 矿井粉煤灰基防火技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 329–342.
QIN Botao, JIANG Wenjie, SHI Quanlin, et al. Research progress on fly ash foundation technology to prevent and control spontaneous combustion of coal in mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 329–342.
- [63] XU Y L, WANG L Y, CHU T X, et al. Suspension mechanism and application of sand-suspended slurry for coalmine fire prevention[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(5): 649–656.
- [64] 徐精彩, 文虎, 邓军, 等. 凝胶防灭火技术在煤层内因火灾防治中的应用[J]. *中国煤炭*, 1997, 23(5): 28–30.
XU Jingcai, WEN Hu, DENG Jun, et al. Application of gel fire prevention and extinguishing technology in prevention and control of internal fire in coal seam[J]. *China Coal*, 1997, 23(5): 28–30.
- [65] 刘杰, 窦国兰, 赵云锋, 等. 矿用复合防火凝胶的制备与特性研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(9): 177–185.
LIU Jie, DOU Guolan, ZHAO Yunfeng, et al. Study on preparation and properties of composite fire prevention gel for mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(9): 177–185.
- [66] 王刚. 新型高分子凝胶防灭火材料在煤矿火灾防治中的应用[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(2): 228–229.
WANG Gang. Application of new type polymer gel fire prevention material in mine fire prevention[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(2): 228–229.
- [67] 张振乾. 矿用防灭火活化粉煤灰胶体的制备及特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
ZHANG Zhenqian. Study on preparation and characteristics of activated fly ash colloid for mine fire prevention and extinguishing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [68] 秦波涛, 王德明, 李增华. 防火剂悬砂机理及应用[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(11): 1287–1291.
QIN Botao, WANG Deming, LI Zenghua. Mechanism of the thickener suspending sand and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(11): 1287–1291.
- [69] 王方田, 屈鸿飞, 张洋, 等. 松软厚煤层区段煤柱剪切滑块运动机理及协同控制技术研究 [J/OL]. *煤炭学报*.
WANG Fangtian, QU Hongfei, ZHANG Yang, et al. Shear Sliding Block Movement Mechanism and Cooperative Control Technology for Coal Pillar in Soft and Thick Coal Seam[J/OL]. *Journal of China Coal Society*.
- [70] 靳磊. 无机固化泡沫防火材料特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
JIN Lei. Study on inorganic solidified foam fire prevention and extinguishing material and its characteristics[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2020.
- [71] 胡相明, 王凯, 薛迪, 等. 防治煤自燃的高堆积固化泡沫的制备及应用研究 [J/OL]. *煤炭科学技术*.
HU Xiangming, WANG Kai, XUE Di, et al. Study on preparation and application of high accumulation solidified foam for preventing coal spontaneous combustion[J/OL]. *Coal Science and Technology*.
- [72] 景长宝, 王海宾, 杨瑞斌. 基于新型粉煤灰-水泥泡沫材料的采空区遗煤阻燃技术及应用[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(4): 132–135.
JING Changbao, WANG Haibin, YANG Ruibin. Retardant technology and application for residual coal in goaf based on pulverized fuel ash-cement foam material[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(4): 132–135.
- [73] 程明. 发泡水泥固化充填防火材料研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.

- CHENG Ming. Study on curing and filling fire prevention and extinguishing materials with foamed cement[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [74] 易欣,康付如,邓军,等. 矿用无机固化泡沫充填材料研究及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(10): 136-142.
- YI Xin, KANG Furu, DENG Jun, et al. Research and application on inorganic solidified foam filling material for mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(10): 136-142.
- [75] QIN B T, LU Y, LI F L, et al. Preparation and stability of inorganic solidified foam for preventing coal fires[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 2014: 347386.
- [76] 鲁义. 防治煤炭自燃的无机固化泡沫及特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- LU Yi. Study on inorganic solidified foam and its characteristics for preventing coal spontaneous combustion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [77] 秦波涛, 冯乐乐, 蒋文婕, 等. 矿井泡沫防灭火技术研究进展[J]. 煤炭科技, 2022, 43(5): 1-12, 26.
- QIN Botao, FENG Lele, JIANG Wenjie, et al. Research progress on extinguishing foam of coal mine[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(5): 1-12, 26.
- [78] EMAMI S D, KASMANI R M, HAMID M D, et al. Effect of inhibitor gases on hydrogen flame propagation in a confined tee pipe (Part I)[J]. *Fuel*, 2016, 165: 50-58.
- [79] RAZUS D, MITU M, GIURCAN V, et al. Propagation indices of methane-nitrous oxide flames in the presence of inert additives[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 418-426.
- [80] DI BENEDETTO A, DI SARLI V, SALZANO E, et al. Explosion behavior of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ and $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(16): 6970-6978.
- [81] LI M H, XU J C, WANG C J, et al. Thermal and kinetics mechanism of explosion mitigation of methane-air mixture by N_2/CO_2 in a closed compartment[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115747.
- [82] 张迎新, 吴强, 刘传海, 等. 惰性气体 N_2/CO_2 抑制瓦斯爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 906-912.
- ZHANG Yingxin, WU Qiang, LIU Chuanhai, et al. Experimental study on coal mine gas explosion suppression with inert gas N_2/CO_2 [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(5): 906-912.
- [83] 朱红青, 李峰, 张悦, 等. 非间隔式注氮防灭火工艺的设计与惰化效果分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(2): 175-178.
- ZHU Hongqing, LI Feng, ZHANG Yue, et al. Design and inert effect analysis of non-interval nitrogen injection for fire control[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(2): 175-178.
- [84] 张延松, 杜文州, 王依磊, 等. 二氧化碳-氮气协同防控采空区燃爆技术[J]. 煤矿安全, 2018, 49(7): 52-54, 61.
- ZHANG Yansong, DU Wenzhou, WANG Yilei, et al. Combustion and explosion prevention technology with CO_2 and N_2 in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(7): 52-54, 61.
- [85] 苏福鹏. 环境因素对火区气体运移的作用规律及致灾机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
- SU Fupeng. Study on the action law of environmental factors on gas migration in fire area and its disaster-causing mechanism[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2011.
- [86] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 168-188.
- YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, et al. Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster reduction technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 168-188.
- [87] 曹兴岩, 任婧杰, 毕明树, 等. 水雾粒径对超细水雾抑制甲烷/空气爆炸过程的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2376-2384.
- CAO Xingyan, REN Jingjie, BI Mingshu, et al. Effect of droplet size on the inhibition of methane/air explosion process by ultrafine water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2376-2384.
- [88] 曹兴岩, 任婧杰, 毕明树, 等. 超细水雾雾化方式对甲烷爆炸过程影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1795-1802.
- CAO Xingyan, REN Jingjie, BI Mingshu, et al. Experiment study on effect of methane explosion process by atomization method of ultrafine water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1795-1802.
- [89] 毕明树, 李铮, 张鹏鹏. 细水雾抑制瓦斯爆炸的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 440-443.
- BI Mingshu, LI Zheng, ZHANG Pengpeng. Experimental investigation on suppression of gas explosion with water mist[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 440-443.
- [90] BADHUK P, RAVIKRISHNA R V. A study on the extinction condition in counterflow diffusion flames of methane and LPG under the influence of polydisperse water mist[J]. *Fuel*, 2022, 318: 123620.
- [91] VILFAYEAU S, MYERS T, MARSHALL A W, et al. Large eddy simulation of suppression of turbulent line fires by base-injected water mist[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 3287-3295.
- [92] 余明高, 安安, 赵万里, 等. 含添加剂细水雾抑制瓦斯爆炸有效性试验研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 149-153.
- YU Minggao, AN An, ZHAO Wanli, et al. On the inhibiting effectiveness of the water mist with additives to the gas explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 149-153.
- [93] 余明高, 梁栋林, 徐永亮, 等. 荷电细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2232-2238.
- YU Minggao, LIANG Donglin, XU Yongliang, et al. Experimental study on inhibiting the gas explosion by charged water mist[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2232-2238.
- [94] 左前明, 程卫民, 邹冠贵, 等. 协同增效原理在煤尘抑爆剂中的应用实验[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(1): 105-109, 116.
- ZUO Qianming, CHENG Weimin, ZOU Guangui, et al. Applied experiments on coal dust inhibitor based on the theory of synergistic effect[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(1): 105-109, 116.
- [95] WEI Q X, ZHANG Y S, CHEN K, et al. Preparation and performance of novel APP/NaY-Fe suppressant for coal dust explosion[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: 104374.
- [96] TIAN S Y, QIN B T, MA D, et al. Suppressive effects of alkali

- metal salt modified dry water material on methane-air explosion[J]. *Energy*, 2023, 285: 129547.
- [97] 裴蓓, 李杰, 余明高, 等. CO₂-超细水雾对瓦斯/煤尘爆炸抑制特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8): 54-60.
PEI Bei, LI Jie, YU Minggao, et al. Study on suppression characteristics of gas/coal dust explosion by CO₂ and ultra-fine water mist[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(8): 54-60.
- [98] 裴蓓, 韦双明, 陈立伟, 等. CO₂-超细水雾对 CH₄/Air 初期爆炸特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 169-178.
PEI Bei, WEI Shuangming, CHEN Liwei, et al. Effect of CO₂-ultrafine water mist on initial explosion characteristics of CH₄/Air[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 169-178.
- [99] 裴蓓, 余明高, 陈立伟, 等. CO₂-双流体细水雾抑制管道甲烷爆炸实验[J]. 化工学报, 2016, 67(7): 3101-3108.
PEI Bei, YU Minggao, CHEN Liwei, et al. Suppression effect of CO₂-twin fluid water mist on methane/air explosion in vented duct[J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(7): 3101-3108.
- [100] 李贤忠, 林柏泉, 张超, 等. 粉煤灰二氧化碳泡沫灌浆防火抑爆技术研究[C]//2010(沈阳) 国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳, 2010: 760-764.
- [101] 罗振敏, 郑学召, 邓军, 等. 气溶胶对煤燃烧的抑制实验研究[J]. 煤矿安全, 2010, 41(9): 11-14.
LUO Zhenmin, ZHENG Xuezhao, DENG Jun, et al. Experimental study on aerosol fire-extinguishing agent to inhibit coal combustion[J]. *Safety in Coal Mines*, 2010, 41(9): 11-14.
- [102] 周心权, 朱红青. 从救灾决策两难性探讨矿井应急救援决策过程[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(1): 1-3, 68.
ZHOU Xinquan, ZHU Hongqing. Discussion on decision making for mine emergent rescue with dilemma in decision making[J]. *Coal Science and Technology*, 2005, 33(1): 1-3, 68.
- [103] 李雷雷. 煤矿瓦斯爆炸灾区次生爆炸规律及应急决策模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
LI Leilei. Study on secondary explosion law and emergency decision model in coal mine gas explosion disaster area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [104] 向峻宏. 攀枝花市肖家湾煤矿特别重大瓦斯爆炸事故处置案例研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
XIANG Junhong. Case study on disposal of extraordinary gas explosion accident in xiaojiawan coal mine, Panzhihua City[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [105] 温廷新. 煤矿生产灾害预警与应急管理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
WEN Tingxin. Study on early warning and emergency management of coal mine production disasters[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [106] 王建华. 煤矿井下应急救援无线传感器网络设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
WANG Jianhua. Design of wireless sensor network for emergency rescue in coal mine underground[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [107] 张玉, 杨维, 韩东升. 混合结构矿井应急救援无线 Mesh 网络及其路由算法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2279-2284.
ZHANG Yu, YANG Wei, HAN Dongsheng. Architecture and routing algorithm of wireless mesh network for underground mine emergency rescue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(12): 2279-2284.
- [108] 张燕燕. 基于无线传感器网络的矿井应急通信系统的研究[J]. 工矿自动化, 2008, 34(4): 71-73.
ZHANG Yanyan. Research on mine emergency communication system based on wireless sensor network[J]. *Industry and Mine Automation*, 2008, 34(4): 71-73.
- [109] ALI MORIDI M, KAWAMURA Y, SHARIFZADEH M, et al. Development of underground mine monitoring and communication system integrated ZigBee and GIS[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 811-818.
- [110] 李靖, 樊晓明. 基于 RFID 技术的井下人员定位管理系统的应用[J]. 工矿自动化, 2011, 37(5): 85-87.
LI Jing, FAN Xiaoming. Application of underground personnel position and management system based on RFID technology[J]. *Industry and Mine Automation*, 2011, 37(5): 85-87.
- [111] 刘平, 李国民. 一种用于井下人员定位的 TOA 定位算法研究[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3): 439-442.
LIU Ping, LI Guomin. A TOA-based people locating algorithm in coal mine[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2007, 27(3): 439-442.
- [112] 李晶. 井下巷道超高频无线电波传播及定位算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
LI Jing. Research on propagation and location algorithm of UHF radio waves in underground roadway[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [113] 苟怡, 郭海军. 精确定位技术在煤矿井下的应用研究[J]. 中国煤炭, 2010, 36(8): 73-75.
GOU Yi, GUO Haijun. Study of the application of accurate positioning technology in underground coal mines[J]. *China Coal*, 2010, 36(8): 73-75.
- [114] 孙哲星. 煤矿井下人员精确定位方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
SUN Zhexing. Research on Underground Coal Mine Accurate Personnel Positioning Method[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2018.
- [115] 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.