



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题

王德明^{1,2}, 邵振鲁^{1,2}, 朱云飞^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 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)

摘要:对我国煤矿发生的重特大事故进行统计表明,热动力灾害(火灾与爆炸)是煤矿重特大事故中占比最高、致灾最严重的灾害。当前对其成灾原因、致灾作用和救灾风险等还认识不足,导致对热动力重大灾害的预防和处理仍缺少有效方法与技术,造成热动力重特大事故至今时有发生、救援处理常面临困境。针对防范与遏制煤矿热动力重大灾害的迫切需求,通过系统的国内外案例统计分析、亲历的事故救援经验总结和长期的深入研究与思考,凝练提出了煤矿热动力重特大事故防治需要解决的3个关键科学问题:采场中气、固相可燃物(瓦斯与煤)复合燃烧及点火特性,热动力灾害致灾因素与通风系统耦合的致灾作用,热动力灾害救援的不确定性风险特性与应对。为解决这些科学问题,需要有针对性地加强和完善瓦斯抽采与顶板控制技术,预防含瓦斯混合空气的形成,减少和控制矿井顶板周期来压造成的压电效应,消除瓦斯燃烧或爆炸的最初点火源,提高矿井的防灾能力;掌握冲击波与烟流在通风系统中传播范围及致灾程度的规律,构建可靠通风系统和有效避险系统,提高矿井的减灾能力;开发发现和处理不确定性风险的方法与技术,提高矿井的救灾能力。这些科学问题的研究解决,可突破现有技术瓶颈,提高预防煤矿热动力灾害、防止事故扩大和应对不确定性风险的能力,为防范与遏制热动力重大灾害事故、保障我国煤炭工业健康可持续发展提供借鉴。

关键词:热动力灾害;矿井火灾;瓦斯爆炸;复合可燃物;耦合致灾;应急救援

中图分类号:TD75

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2021)01-0057-08

Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines

WANG Deming^{1,2}, SHAO Zhenlu^{1,2}, ZHU Yunfei^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Statistics of major coal mine accidents in China show that thermodynamic disasters (fires and explosions) account for the highest proportion and cause the most serious damages. However, the causes, effects and relief risks of thermodynamic disasters are still insufficiently understood. As a result, there is still a lack of effective methods and techniques for the prevention and treatment of major thermodynamic disasters, causing serious thermodynamic accidents to occur from time to time. If it happens, rescue and treatment work often face difficulties. Aiming at the urgent need to prevent and contain the major thermodynamic disasters, three key scientific issues that need to be resolved are proposed by the systematic statistical analysis of cases around the world, the summary of first-hand accident rescue experience, and long-term intensive research. They are the ignition and combustion characteristics of gas-solid composite combustibles (gas and coal) in the stope, the coupling hazardous effect of disaster-causing factors (shock wave and smoke) and ventilation systems, uncertain risk and response during disaster rescue and treatment. A comprehensive ex-

收稿日期:2020-11-17 修回日期:2020-01-09 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YG20.1798

基金项目:国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0801802);国家自然科学基金面上资助项目(51974299)

作者简介:王德明(1956—),男,贵州遵义人,教授,博士生导师。Tel:0516-83590592, E-mail:wdmcumt@163.com

引用格式: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.



移动阅读

planation and analysis of their research status, development trends and prospects are also carried out. In order to solve these scientific problems, it is necessary to strengthen and improve the gas drainage and roof control technology, prevent the mixing of gas and air, reduce and control the piezoelectric effect caused by the periodic roof weighting, and eliminate the initial ignition source of the combustion or explosion of gas, which will improve the disaster prevention capability of the mine. Understanding the law and degree of the spread of shock waves and smoke flow in the ventilation system, constructing a reliable ventilation system and effective avoidance system are also important for improving the disaster reduction capability of the mine. Developing technologies to discover and deal with uncertain risks can improve the mines' disaster relief capabilities. The solution of these scientific issues will break through the existing technical bottlenecks, improve the ability to prevent the formation and expanding of the thermodynamic disasters, as well as the respond to uncertain risks. It is of great significance to provide key scientific basis for the healthy and sustainable development of coal industry in China.

Key words: thermodynamic disaster; mine fire; gas explosion; compound combustibles; coupled disasters; emergency rescue

我国近 90% 的煤炭为井工开采,加之矿井地质条件和煤层赋存条件复杂,面临热动力灾害、突水、煤与瓦斯突出、冲击地压及顶板等重大灾害的严重威胁。近些年来,我国通过加大煤矿安全科技投入、强化安全监管和优化产能结构,煤矿安全生产状况虽明显好转,但形势依然严峻,坚决防范和遏制煤矿重特大事故仍是煤矿安全发展的迫切需求。

热动力灾害是指煤矿井下发生的非控制燃烧与爆炸造成的灾害,包括煤自燃、外因火灾、瓦斯燃烧爆炸、煤尘爆炸等灾害。2010—2019 年,我国共发生煤矿热动力重特大事故 55 起,死亡 1 074 人。其中 2013-03-29, 2013-04-01 吉林通化八宝煤矿采空区发生煤燃烧与瓦斯爆燃,封闭工作面时又发生瓦斯爆炸,共造成 53 人死亡,是我国近年来最严重的一起煤矿热动力特大事故。煤矿热动力重特大事故时至今日还在发生,未被遏制。2019 年,我国仍发生煤矿热动力重大事故 2 起,造成 36 人死亡;还发生了一起 11 人被困井下的重大火灾涉险事故;此外,还发生了 8 起造成 10 人以下死亡和多起造成严重经济损失的热动力灾害事故。2020 年,又发生了 2 起重大火灾事故,共造成 39 人死亡。

国外煤矿的热动力重特大事故也十分严重。据不完全统计,国外近些年发生有报道的煤矿重特大事故 49 起,其中热动力灾害事故 43 起,占 88%。其中 2010-04-05 美国西弗吉尼亚州 UBB 煤矿的一个长壁采煤工作面上隅角先发生瓦斯燃烧、后出现爆炸,最后引发煤尘爆炸,造成 29 人死亡,是美国近 40 a 来最大的一起煤矿事故。2014-05-14 土耳其索玛煤矿井下发生火灾,后又引起瓦斯爆炸,救援过程中采取反风又导致事故扩大,最终造成 301 人死亡,成为可燃物在煤矿井下的采场中同生共存,过去将瓦斯灾

21 世纪世界范围内最大的一起煤矿事故。

过去国内外在煤矿热动力灾害防治理论与技术方面开展了大量研究,取得了许多成果。但对于热动力重特大事故的成灾、致灾机理和救灾风险的基础研究还比较缺乏,导致热动力重大灾害预防和处理的科学性不足。为此,笔者凝练提出煤矿热动力重大灾害防控亟需解决的几个科学问题,并对它们的研究现状、发展动态及前景进行阐述与分析,为进一步有效防范与应对煤矿热动力重特大事故提供关键科学依据。

1 科学问题的提出

为认识煤矿热动力重特大事故的发生规律,笔者对我国 2000—2019 年一次死亡 10 人及以上的 509 起煤矿重特大事故、1949—2019 年一次死亡 30 人及以上的 302 起煤矿特大事故和 24 起一次死亡百人以上事故进行了统计与分析,结果表明热动力灾害在煤矿重特大事故中占比最高、致灾最严重。如图 1 所示,热动力灾害的事故起数在百人及以上事故中占 91.6%,在 30 人及以上的特大事故中占 83.6%,在 10 人及以上的重特大事故中占 61.6%。

在煤矿开采技术经历了长期发展、科技水平日益进步的当代,为何热动力灾害还时有发生?为何还不能遏制热动力灾害重特大事故?笔者通过对近年来国内外的煤矿热动力灾害重特大事故的总结分析,特别结合亲身参与的多起事故救援与处理经历,对这些问题进行了剖析,认为过去未能遏制热动力重特大事故发生的主要原因是对以下 3 个科学问题认识不足,导致在防治和救援工作中缺少针对性和有效性:

(1) 对采场中气、固相可燃物(瓦斯与煤)复合燃烧及点火特性认识不足。瓦斯与煤作为气、固相可燃物、煤自燃和煤尘爆炸分类对待,较少关注不同相态

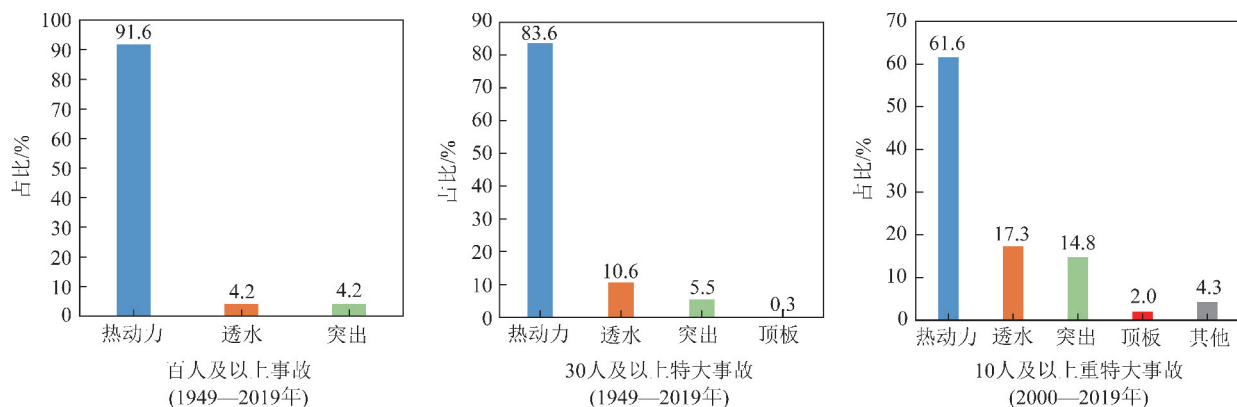


图 1 我国煤矿重特大事故类型统计

Fig. 1 Statistics of major coal mine accidents in China

复合可燃物的成灾特性,也缺少有效防治措施,导致常发生瓦斯与煤复合燃烧的重特重大事故,如我国八宝煤矿、美国 UBB 煤矿、土耳其索玛煤矿等热动力重特重大事故都具有瓦斯与煤复合燃烧(爆炸)的共同特征。即使认识到 2 者有联系,也只认为煤自燃是瓦斯的点火源,未认识到采场中含石英砂岩顶板垮落产生压电火花等点火源可引发瓦斯燃烧(爆炸)、进而引发煤着火再形成引燃瓦斯的点火源,可导致瓦斯多次爆炸,这正是瓦斯与煤复合燃烧(爆炸)的特征,如宁夏白茆沟煤矿 2421-1 采空区发生了上百次爆炸、吉林八宝煤矿-416 采区发生了 5 次爆炸(爆燃)、安徽任楼煤矿 II 7322 采空区发生了 8 次爆炸等。过去对这种复合燃烧的最初点火原因和采场中含瓦斯混合空气的时空特性缺少研究,导致不了解采场中复合可燃物的燃烧特性,也缺少针对性的防治措施。

(2) 对热动力灾害致灾因素与通风系统耦合的致灾作用认识不足。煤矿热动力灾害的致灾因素为火焰、烟气和冲击波,造成人员大量伤亡的原因主要是有害气体。过去只认识到了火风压对通风系统的影响,但对火焰与冲击波对通风系统的破坏作用、不可靠(脆弱)通风系统与灾变扩大的关系、灾变时期通风与烟流的控制方法等缺少研究,导致目前仍缺少有效的应对方法和技术。凡是造成大量人员伤亡的热动力重特重大事故都与通风系统不可靠(脆弱)有关,例如阜新孙家湾、水城木充沟、铜川陈家山、开滦刘官屯等煤矿发生的死亡百人以上的热动力灾害事故,事故采区都为下行通风,有的还存在缺少专用回风巷、一巷多用、通风装备与设施不可靠等问题,当发生热动力灾害时,冲击波、火风压首先破坏脆弱通风系统,然后有毒烟流扩散到更大区域酿成重特重大事故。2020 年我国又发生 2 起重特大热动力(火灾)事故(重庆松藻煤矿“9·27”重大火灾事故、重庆吊水洞煤矿“12·4”重大火灾事故),尽管这 2 起火灾的

起因并不复杂,但都发生了因火风压导致的风流逆转现象,正是高温烟流与脆弱通风系统的耦合作用造成烟侵区域扩大。

(3) 对热动力灾害救援的不确定性风险特性认识不足。由于煤矿井下环境复杂,热动力灾害的发生具有隐蔽性和突发性、发展具有动态性,灾情信息难以准确、及时获取,救援决策常面临不确定性的灾情和风险。但是,已有的救援方法与技术主要针对确定性问题或风险,缺少处理不确定性风险的能力,当面对未知的状态和不确定性风险时,常常束手无策或容易冒险决策。由于灾情发展的动态性和后果的严重性,当认识不到不确定性风险时,冒险决策就会产生严重后果,如吉林八宝煤矿 2013-04-01 处理灾情时造成 17 名救援人员死亡、新疆大黄山煤矿 2014-07-05 处理灾情时也造成 17 人遇难。对救援的不确定性风险缺少认识,主要是缺少发现和处理不确定性风险的方法与技术,这是导致救援困难和决策失误的主要原因。

2 科学问题的研究现状与分析

2.1 采场中气、固相可燃物(瓦斯与煤)复合燃烧及点火特性

瓦斯与煤作为气、固相可燃物在煤矿井下的采场中共生共存,在煤矿开采过程中,采场中遗留的浮煤可能发生自燃,逸出的瓦斯则可能发生燃烧与爆炸。过去将煤自燃、瓦斯灾害分类对待,较少关注 2 者的相互关系,但近年来煤与瓦斯复合致灾的重特重大事故时有发生,人们开始关注煤与瓦斯复合成灾的原因。

采空区具有煤自燃与瓦斯积聚共存的特点,故不少学者对采空区煤自燃与瓦斯的相互作用关系进行了研究。有的研究了高瓦斯易自燃煤层综放开采下瓦斯与煤自燃的综合治理问题、瓦斯抽采对工作面采空区煤炭自燃的影响^[1-4],有的开展了抽采与通风条

件下不同工作面采空区瓦斯分布的数值模拟与现场测试研究^[5-6],有的开展了模拟采空区条件的煤样在含甲烷浓度到达爆炸界限的混合空气中升温并引燃瓦斯的实验研究^[7],有的对采空区中不同瓦斯浓度场、煤自燃氧气浓度场等条件下的煤与瓦斯交汇区域的危险性进行了分析^[8]等。相关研究认为抽采瓦斯对采空区煤自燃的“三带”有显著影响,抽采负压带来的漏风增加了煤自燃和形成可燃瓦斯混合空气的危险性,沿工作面的新鲜通风区域与富含瓦斯气体结合的边缘处是采空区瓦斯爆炸与煤自燃耦合成灾的危险区域等。这些研究都是致力于寻找采空区中煤易自燃、瓦斯易爆的交汇区,在发生采空区瓦斯爆炸的点火原因上,都认为煤自燃是瓦斯燃烧爆炸事故的最初点火源。

除了煤自燃可作为点燃瓦斯的点火源外,人们还关注了煤矿中岩石、金属等坚硬物体间摩擦撞击产生的点火源,但至今对岩石之间的摩擦撞击点火成因仍不明确。最早开展相关研究的是英国^[9],从 1928 年起到 20 世纪 90 年代,英国的煤矿管理部门就对煤矿中瓦斯燃烧的点火源进行了调查,发现含石英的坚硬岩石是摩擦点火的常见原因;随后美国、南非、前苏联、澳大利亚等国都对金属、岩石摩擦点火引起的煤矿瓦斯事故进行了统计与调查,结果表明摩擦点火引发的瓦斯燃烧爆炸事故至少占事故总数的 1/4 以上,有的达 75%。自 20 世纪末起,国内一些研究者开始关注岩石冒落摩擦撞击引发瓦斯事故的原因,开展了相关的实验,但开展的岩石摩擦撞击实验仅根据热点火的温度标准来衡量其点火能力,相关实验结果表明,岩石摩擦测试的最高温度没有超过 160 ℃,岩石撞击摩擦产热没有超过 250 ℃^[10-12]。由于难以在实验室模拟并验证实际条件下的顶板岩石摩擦撞击产热点火,人们在实际分析采空区点火源时很少将顶板岩石冒落摩擦认定为点火源,由于一般认为采空区内没有其他人为的外部热源,如果不能确认顶板岩石冒落摩擦撞击的点火作用,就普遍将煤自燃认定为引发瓦斯燃烧爆炸的点火源。但需要指出的是,点燃瓦斯的最低温度为 650 ℃,煤自燃若作为点火源,其煤温要到达 650 ℃ 以上,此时的煤炭已处于明火燃烧状态,在此之前需经历相当长的蓄热过程,且一定会出现煤自燃指标气体浓度持续升高,并出现烟雾和气味等明显发火征兆,如果前期无征兆,直接认定煤自燃为点火源就缺少依据。此外,如果坚硬岩石摩擦撞击产生摩擦火花或含石英岩石受压断裂的压电效应产生的电火花,其点火能量就能达到点燃瓦斯的电点火条件(0.28 mJ 以上)。笔者团队近年开展了采空区

含石英顶板岩石的压电效应实验,八宝、任楼煤矿的顶板岩石石英质量分数分别为 81.6%,63.3%,初步实验结果表明石英质量分数超过 60% 的顶板岩石受压破裂产生的压电效应非常显著,岩石破裂时压电效应产生的电场放电形成电火花,这从压电效应新角度揭示了采空区瓦斯燃烧爆炸点火源的特性。

综上所述,现有研究大多认为煤与瓦斯复合灾害发生在开采自燃(易自燃)和高瓦斯煤层的矿井,只认识到煤自燃是瓦斯燃烧爆炸事故的点火源,这是一种对煤与瓦斯复合灾害认识的误区,许多实际案例表明,开采高瓦斯、不易自燃煤层的矿井更易发生煤与瓦斯复合灾害,这是由于瓦斯的点火能量低、易点燃,瓦斯燃烧后引燃煤炭、燃烧时间持久、还可再引燃(爆)瓦斯的缘故。目前,对瓦斯与煤作为气固复合可燃物的最初点火原因和燃烧特性还缺少深入研究,防治措施也缺乏针对性。针对瓦斯与煤复合可燃物的特点,需进一步研究采场中瓦斯与漏风形成可燃混合气体的时空特性;研究采空区中可能存在的点火源及其点火特性,包括煤自燃、各类坚硬物体摩擦撞击产生的热点火条件及特性,含石英砂岩顶板应力变化造成的压电效应和顶板受压破裂压电放电的电点火及特性;研究煤与瓦斯复合燃烧形成的连续爆炸原因、条件和规律。通过这些研究,有针对性地加强和完善瓦斯抽采与顶板控制技术,预防含瓦斯混合空气的形成,弱化和控制矿井顶板初次及周期来压造成的压电效应,消除点燃瓦斯的最初点火源,提高矿井的防灾能力。

2.2 热动力灾害致灾因素与通风系统耦合的致灾作用

热动力灾害烟气和冲击波可在井巷网络中远距离传播,这是导致重特大事故的主要原因。过去对火灾烟流在通风系统中产生火风压及其导致的风流紊乱有较多研究,但对火风压、冲击波与通风系统的关系及致灾作用研究较少。

在矿井火灾烟气扩散及致灾作用方面,BUDRYK 最早研究了矿井火灾时期的风流紊乱现象,提出过量烟气学说和局部火风压理论,开创了矿井火灾时期风流紊乱研究的先河。20 世纪 70 年代起,波兰、中国、日本、德国和美国开展了一系列矿井火灾实验,考察了煤矿常见可燃物的燃烧特性,以及在不同火源强度和通风状态下烟气在巷道中的蔓延规律和多参数演化特征,尤其对烟流倒退、风流逆转、节流效应等火灾烟流热动力现象进行了探讨^[13-14],得到了井巷网络中火灾时期的风流紊乱规律。基于此,国内外学者自 20 世纪 70 年代起应用计算机编程技术研究了火灾

烟气在复杂井巷网络中的传播,当时成为了国际上矿井通风理论研究的热点,如美国 MFIRE 程序、波兰 POZAR 程序能对矿井复杂风网的火灾发展过程进行动态模拟^[15]。这些研究为矿井火灾时期的灾情分析和发展预测提供了一定基础,但已有研究仅局限于稳定通风状态,没有考虑灾变时期通风系统的变化和致灾因素对通风系统的影响,其研究成果难以获得实际应用。

在爆炸冲击波传播及致灾作用方面,萨文科最早开始研究矿井瓦斯爆炸在井巷中的传播及致灾规律,他利用管道爆炸实验得出了冲击波通过直巷、分岔和转弯处的衰减系数,得到了冲击波强度基本取决于巷道断面尺寸的认识。从 20 世纪 60 年代起,波兰、日本、美国、澳大利亚、中国等学者在各类尺寸管道和大型实际巷道中对瓦斯煤尘爆炸的火焰区长度和传播速度、冲击波压力的峰值与变化规律和爆炸破坏效应等进行了实验研究^[16],研究表明爆炸具有明显的尺度效应,即小尺寸实验结果只能获得定性参考,不能用于定量推断大尺寸条件下的灾变特性。有学者也开展了依经验公式和计算流体力学的瓦斯爆炸数值模拟研究,前者受限于经验公式提出背景和特定条件,对变参数场景模拟的还原性较差^[17];多数学者应用后者还原小尺寸管道实验以拓展实验无法反映的参数特征^[18],但有关矿井瓦斯爆炸的数值模拟研究还鲜有报道^[19-20]。关于瓦斯爆炸的破坏效应,挪威学者 Eckhoff 对火焰、超压和动压对人体和设备的伤害方式进行了较系统的总结和研究^[21],前苏联提出了井下抗爆设计的计算方法,美国在巷道中放置采掘运输等设备并建造密闭墙进行破坏形式和抗爆性能的实验^[22]。事故调查表明,瓦斯爆炸的超压和动压均具有巨大的致灾作用。由于瓦斯爆炸正超压的数值大且易于测量,当前破坏效应的研究主要关注冲击波正超压,但仍无法较好解释正超压对矿井设施及构筑物的作用特征,更未深入研究负超压和动压的破坏特性。

在矿井通风系统可靠性方面,国外学者采用结构法、模拟模型法及统计法将通风系统的失效分为 3 级^[23-24],国内学者借鉴其它领域的可靠性研究方法对通风系统可靠性的理论和指标体系等进行了探索^[25-28]。但目前矿井通风系统可靠性理论还不完善,可靠性指标尚无统一的标准,更缺乏结合热动力致灾因素评价通风系统可靠性的研究。

综上所述,矿井火灾实验和仿真模拟已有较成熟的成果,可基本实现火灾时期的烟流动态预测模拟;但对爆炸冲击波在井下的传播及致灾作用还认识不

足,缺少在矿井原型尺度通风系统中的冲击波传播及致灾特性研究,更缺少冲击波与烟流的复合致灾作用的研究,导致对构建和评价矿井通风系统的抗灾能力缺少方法与标准。针对现有研究的不足和实际需求,应当开展 2 个方面的研究,一是冲击波与火灾烟流的复合致灾作用,包括冲击波在复杂风网中的传播特性及对通风系统的破坏、对人员伤害的致灾范围及致灾程度,通风系统遭破坏后的灾变烟流扩散范围及致灾程度等,为矿井避险系统设计、矿井救援和人员逃生等提供计算模型和依据;二是开展矿井抗灾能力研究,包括井下消防系统的优化设计,人员集中区域的局部反风系统、烟流短路控风系统、人员避险设施,通风系统抵御冲击波的方法与设施等。通过这些研究,掌握冲击波与烟流在通风系统中的传播范围及致灾程度的规律,建立冲击波与烟流在通风系统中的传播范围及致灾程度的正反演模型,构建可靠通风系统和有效避险系统,为灾变预防、发展预测和救援处理提供理论和技术基础,提高矿井的抗灾与减灾能力。

2.3 热动力灾害救援的不确定性风险与应对

井工煤矿开采的一个特点是作业地点及地质环境不断变化,煤岩构造、瓦斯含量及涌出、浮煤堆积、采空区漏风等都具有不确定性;井下通风系统又是复杂网络,热动力灾害发生时产生的高温和冲击波会破坏通风设施,火风压、节流效应会造成通风系统紊乱。因此,煤矿井下作业的动态与多变性和热动力灾害的复杂性,使煤矿热动力灾害的处理与救援具有很大风险。风险指可能发生的灾变事故,是一种随机事件,已知概率的风险为确定性风险,未知概率的风险为不确定性风险。由于井下灾区环境的复杂性和灾情的动态性,应急救援常面临不确定性风险。现有救援方法与技术主要针对确定性问题或风险,对不确定性风险的特性缺少研究,更缺少应对方法与技术,使救援决策及灾变处理十分困难,应对不确定性风险成为应急救援的瓶颈。

我国《煤矿安全规程》、《矿山救护规程》等规程以及煤矿企业编制的《矿井灾害预防和处理计划》对处理确定性风险都有明确的规定与要求,但煤矿热动力灾害救援处理常面临不确定风险,这种救援特点给决策者带来了困难。周心权等^[29]对煤矿重大灾害的救灾决策特点进行了分析,指出因灾情的动态性导致决策依据不确定,处理原发性灾害时可能引发继发性灾害,故决策十分困难且面临巨大风险。笔者在所著的《煤矿热动力灾害学》^[16]中对热动力灾害事故救援中的风险概念及不确定性风险特性进行了介绍,指出了依靠专家救灾知识与经验处理不确定性风险的优

点及不足。近年来,随着我国煤矿安全监测、预警等现代化技术的发展,特别是当代人工智能、大数据等高新技术的突飞猛进,为构建智能救援决策系统提供了条件,但目前相关研究还十分滞后。

救援决策的基础是灾情信息的准确获取。当前煤矿井下主要通过各类传感器、束管系统获取各测点温度和气体组分与浓度数据,并通过光纤通讯系统将信息传输至地面监测监控中心。温度数据的采集主要采用热电偶和光纤测温技术,气体组分测定技术主要包括基于催化燃烧式^[30]、热导式^[31]、电化学式^[32]等各类传感器的原位测量技术,以及基于束管抽气系统的色谱分离技术^[33]、可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)^[34-36]、傅里叶变换红外光谱技术(FT-IR)^[37-38]和非分散红外光谱技术(NDIR)^[39]。

随着微电子及人工智能科技的发展,国内外相继开展了井下探测救援机器人的研究,通过挂载摄像头、温度及气体传感器进入灾区获取灾情信息,用于事故后的灾区无人侦查工作^[40-41]。但救援机器人目前只能在较为理想的环境中(障碍物少、无积水、短距离)和特定的救援阶段使用。近年来,微小型无人机技术取得很大发展,因其体积小、质量轻、机动性及可操作性好、能够在狭小空间中飞行等优点,国内外学者围绕无人机在煤矿井下巷道中自主飞行的导航、障碍物检测和路径规划等方面开展了研究。通常无人机利用自身携带的 GPS^[42]或 IMU 惯性传感器^[43]实现自主导航,但是在井下巷道中由于无法获取 GPS 信号,而 IMU 惯性传感器不可避免地存在误差累积的缺点,难以满足无人机自主导航系统在井下巷道狭窄空间中长距离精确定位的要求。此外,煤矿井下巷道中光线弱或无光线,且热动力灾害产生的烟气充斥在巷道内,即使采用一定的照明方式,烟气也将大大减弱光线的穿透能力,导致巷道中能够被提取的特征参照物不明显,无法实现对灾区环境信息的及时、准确获取。目前尚缺乏能够穿透烟气的探测装备,灾区侦查无法实现在无光线、浓烟气条件下获取灾情信息。

在热动力灾害处理方面,目前主要采用水、黄泥浆、惰性气体(N_2 , CO_2)、凝胶、三相泡沫、细水雾等防灭火技术。早在 20 世纪 50 年代,波兰、德国、苏联等国的煤矿以注水注浆、注惰气(N_2 , CO_2)等方法处理井下火源,并在实际应用中形成了一整套灭火工艺和技术;此外,捷克首次使用了液态惰性气体防灭火技术,其后,该技术在英国、德国、法国、南非及中国也得到了应用。然而,由于阴燃煤体熄灭的极限氧体积分数极低(1% ~ 3%),惰性介质防灭火技术难以消除

火源。此外,采用注惰性介质(液态或气态)进行采空区灭火还可能存在致爆的问题,有关学者^[44-46]对注惰引起的火区气体运移规律进行了研究,阐述了注惰对火区气体的稀释和活塞作用,但对注惰抑爆或致爆的原因及机理仍缺乏深入研究。泡沫灭火技术具有灭火能力强、速度快等特点,国内外都研制了适应巷道灭火的可移动高倍数泡沫灭火装备,但采用专用风机供风,出口压力小,在实际应用中受到限制。进入 21 世纪后,中国矿业大学开发的应用惰气或压缩空气的三相泡沫灭火技术得到广泛应用,其具有向高处堆积,短时间内填满火区,可远距离快速灭火等特点。细水雾因具有经济、环保、消焰效果好、灭火降温迅速、耗水量低和破坏性小等优点,已成为国内外研究的热点^[47-48]。

综上所述,煤矿救援主要针对确定性问题或风险,对不确定性风险特性、发现和处理不确定风险的方法与技术缺少研究,当前缺乏基于大数据和人工智能的灾变分析与决策、灾区复杂环境多信息探测、适应灾变条件使用的灭火降温等应对不确定性风险的方法与技术。为突破该瓶颈,笔者提出将不确定性风险救援分为发现风险和处理风险 2 个环节。发现风险是重点,需研究三维激光雷达、红外热成像仪、气体传感器综合应用的探测不确定状态灾区环境的探测技术,并采用大数据与人工智能技术构建风险识别的模型与方法,开发应对救援不确定性风险的辅助救灾决策系统;同时,为处理风险,针对目前缺乏适合救护队员应用的简便高效灭火降温装备及处理隐蔽火源的方法与技术的现状,笔者提出开发适合救援人员使用的自吸气泡沫和细水雾降温灭火装备。通过这些研究,构建发现和处理热动力灾害不确定性风险的方法与技术体系,提升热动力灾害的救援与处理能力。

3 结 语

煤矿热动力灾害至今还严重威胁着煤炭工业的安全发展,但目前对煤与瓦斯复合燃烧的成灾原因、冲击波与烟流在通风系统中的传播与致灾作用、救援的不确定性风险缺乏科学的认识,对其防治和应对还缺少有效方法与技术,导致热动力重特重大事故时有发生,救援处理时常面临严重困难。为坚决防范与遏制煤矿热动力重特重大事故,需掌握气固复合可燃物的成灾规律,构建可靠通风系统和有效避险系统,开发应对不确定性风险的救援方法与技术,以提高矿井防灾减灾救灾能力。

参考文献(References):

[1] 卢平,张士环,朱贵旺,等.高瓦斯煤层综放开采瓦斯与煤自燃

- 综合治理研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(4): 68-74.
- LU Ping, ZHANG Shihuan, ZHU Guiwang, et al. Comprehensive control of spontaneous combustion of gas and coal for high gas-containing seam by fully mechanized mining technology [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(4): 68-74.
- [2] 周爱桃, 王凯, 臧杰, 等. 易自燃采空区瓦斯与火灾共治数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 49-53.
- ZHOU Aitao, WANG Kai, ZANG Jie, et al. Numerical simulation on gas and fire control in spontaneous combustion gob [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(8): 49-53.
- [3] 李宗翔, 吴志君, 王振祥. 采空区遗煤自燃升温过程的数值模型及其应用[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 58-61.
- LI Zongxiang, WU Zhijun, WANG Zhenxiang. Numerical simulation model and application of temperature rise process caused by natural burn of lost coal in goaf [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(6): 58-61.
- [4] 褚廷湘. 顶板巷瓦斯抽采诱导遗煤自燃机制及扰动效应研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- CHU Tingxiang. Study on the mechanism of coal spontaneous combustion and the disturbance effects induced by the upper tunnel gas extraction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [5] BALUSU R, TUFFS N, PEACE R, et al. Longwall goaf gas drainage and control strategies for highly gassy mines [A]. proceedings of the 8th international mine ventilation congress [C]. Queensland: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 2005: 201-209.
- [6] REN Ting, BALUSU Rao, CLAASSEN C. Computational fluid dynamics modelling of gas flow dynamics in large longwall goaf areas [A]. 35th APCOM Symposium-Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry, Proceedings [C]. Wollongong: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011: 603-613.
- [7] 常绪华. 采空区煤自燃诱发瓦斯燃烧(爆炸)规律及防治研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- CHANG Xuhua. Law and prevention research of coal spontaneous combustion inducing gas burning or explosion in goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [8] 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.
- [9] WARD Colin R, CROUCH Anton, COHEN David R. Identification of potential for methane ignition by rock friction in Australian coal mines [J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 45(2-3): 91-103.
- [10] 屈庆栋, 许家林, 马文顶, 等. 岩石撞击摩擦火花引爆瓦斯的实验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 466-469.
- QU Qingdong, XU Jialin, MA Wending, et al. Experimental study on gas explosion detonated by the rock friction sparks [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 466-469.
- [11] 余为, 缪协兴, 茅献彪, 等. 岩石撞击过程中的升温机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1535-1538.
- YU Wei, MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, et al. Analysis of the heating-up mechanism in the course of the rock ram [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1535-1538.
- [12] 许家林, 张日晨, 余北建. 综放开采顶板冒落撞击摩擦火花引爆瓦斯研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 12-16.
- XU Jialin, ZHANG Richen, YU Beijian. Study on gas explosion induced by impact-friction sparks during roof collapse with fully-mechanized top-coal caving mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(1): 12-16.
- [13] BEARD Alan, CARVEL Richard. Handbook of tunnel fire safety [M]. London: ICE publishing, 2012.
- [14] CHOW W K. Simulation of tunnel fires using a zone model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 1996, 11(2): 221-236.
- [15] 王德明, 李永生. 矿井火灾救灾决策支持系统 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [16] 王德明. 煤矿热动力灾害学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [17] LEA C J, LEDIN H S. A review of the state-of-the-art in gas explosion modelling [M]. Buxton: Health and Safety Laboratory, 2002.
- [18] SMIRNOV N N, NIKITIN V F. Effect of channel geometry and mixture temperature on detonation-to-deflagration transition in gases [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2004, 40(2): 186-199.
- [19] 刘如成, 朱云飞. 煤矿长壁工作面瓦斯爆炸全尺寸模拟[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 58-64.
- LIU Rucheng, ZHU Yunfei. Full-scale simulation of gas explosion at longwall coalface in coalmine [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(12): 58-64.
- [20] ZHU Yunfei, WANG Deming, SHAO Zhenlu, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 135: 101-112.
- [21] ECKHOFF Rolf K. Explosion hazards in the process industries [M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2016.
- [22] WEISS E S, MUTTON Kl Cashdollar I V, KOHLI D R, et al. Mining publication: Evaluation of reinforced cementitious seals [J]. Report of Investigations, 1999.
- [23] 马云东, 宋志, 孙宝铮. 矿井通风系统可靠性分析理论研究 [J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1995, 14(3): 5-14.
- MA Yundong, SONG Zhi, SUN Baozheng. Study on the reliability analysis theory of mine ventilation system [J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science), 1995, 14(3): 5-14.
- [24] WALLACE E T, KOSLOSKY T H. Reliability of mine ventilation system [A]. Proceedings of the 23rd international conference of safety in mines research institutes [C]. Washington, DC: Department of The Interior, 45-51, 1989.
- [25] 徐瑞龙, 刘剑, 李英贤. 通风构筑物的可靠性分析 [J]. 煤炭学报, 1992, 17(3): 65-71.
- XU Ruilong, LIU Jian, LI Yingxian. Analysis of reliability of ventilation structures [J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(3): 65-71.
- [26] 谢贤平, 赵梓成. 矿井通风系统设计评判指标体系研究 [J]. 冶金矿山设计与建设, 1995, 27(3): 3-8.

- XIE Xianping, ZHAO Zicheng. Study on evaluation targets system for design of mine ventilation system[J]. Metal Mine Design and Construction, 1995, 27(3): 3-8.
- [27] 谭允祯. 矿井通风系统优化[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [28] 陈开岩. 矿井通风系统优化理论及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [29] 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.
- [30] 王海潮. 煤矿用气体传感器稳定性检验方法的研究[J]. 矿山机械, 2016, 44(7): 94-96.
- WANG Haichao. Research on method of testing stability of gas sensor used in colliery[J]. Mining and Processing Equipment, 2016, 44(7): 94-96.
- [31] 陈越超. 热导式全量程甲烷变送器研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- CHEN Yuechao. The development of thermal conductivity full-scale methane transmitter[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [32] 刘召娜. 新型纳米结构材料在电化学传感器中的研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- LIU Zhaona. The application of novel nanostructural materials in electrochemical sensors[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [33] 蒋曙光, 李亚东, 邹力力, 等. 基于气相色谱技术的采空区煤自燃火灾预测预报研究[J]. 工矿自动化, 2010, 36(6): 38-40.
- JIANG Shuguang, LI Yadong, ZOU Lili, et al. Research of forecasting of spontaneous combustion of coal in mined-out area based on technology of gas chromatography[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(6): 38-40.
- [34] 潘卫东. 基于 TDLAS 的痕量乙烯气体检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- PAN Weidong. Research on tunable diode laser absorption spectroscopy for gas analysis of trace ethylene[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [35] 魏玉宾. 光纤气体传感器及其安全工程应用中的关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WEI Yubin. Research on key technologies of optical fiber gas sensor and its application in safety engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [36] 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.
- [37] 陆卫东, 王继仁, 邓存宝, 等. 神东矿区煤炭自燃标志气体的红外光谱分析[J]. 煤矿安全, 2007, 38(9): 1-3, 6.
- LU Weidong, WANG Jiren, DENG Cunbao, et al. Infrared spectrum study on significant gas produced by coal spontaneous combustion for shendong mining area[j]. Safety in Coal Mines, 2007, 38(9): 1-3, 6.
- [38] 梁运涛, 汤晓君, 罗海珠, 等. 煤层自然发火特征气体的光谱定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2480-2484.
- LIANG Yuntao, TANG Xiaojun, LUO Haizhu, et al. Quantitative spectrum analysis of characteristic gases of spontaneous combustion coal[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2480-2484.
- [39] 周庆隆, 叶刚. 基于非分散红外光谱原理的无线式火灾早期报警系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(4): 124-129, 134.
- ZHOU Qinglong, YE Gang. Design and implementation of wireless early fire alarm system based on NDIR[J]. Computer Application and Software, 2019, 36(4): 124-129, 134.
- [40] REDDY H A, KALYAN B, MURTHY S N C. Mine rescue robot system-A review[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 457-462.
- [41] WANG Yong, TIAN Peng, ZHOU Yu, et al. The encountered problems and solutions in the development of coal mine rescue robot[J]. Journal of Robotics, 2018, 2018: 1-11.
- [42] COUTTS Aaron J, DUFFIELD Rob. Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2010, 13(1): 133-135.
- [43] ZHAO Shiyu, LIN Feng, PENG Kemao, et al. Vision-aided estimation of attitude, velocity, and inertial measurement bias for UAV stabilization[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3-4): 531-549.
- [44] 张九零. 注惰对封闭火区气体运移规律的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- ZHANG Jiuling. Effect of inert gas injection on transport law of gas in closed fire zone[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2009.
- [45] 王忠文. 矿井火灾诱发爆炸动态演化规律及防治技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- WANG Zhongwen. The study of dynamic evolution law of explosion induced by fire and its prevention and control technology[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2013.
- [46] 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 action law of environmental factors to fire zone gas entrainment and disaster induced mechanism[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2011.
- [47] 范维澄, 刘乃安. 中国火灾科学基础研究进展与展望[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(1): 1-8.
- FAN Weicheng, LIU Naian. Progress and prospect of fundamental fire research in China[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(1): 1-8.
- [48] 陆春义. 细水雾喷射系统及灭火机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- LU Chunyi. Experimental and simulative study on the system and the mechanism of water mist spray[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.