

# 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望

王恩元<sup>1,2</sup>, 张国锐<sup>1,2</sup>, 张超林<sup>1,2</sup>, 李忠辉<sup>1,2</sup>

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

**摘 要:**我国是世界上煤与瓦斯突出灾害最为严重的国家,在突出预防方面进行了大量深入的研究和实践,突出防治取得了较为显著的效果,但近年来突出灾害事故仍时有发生。为了提高深部矿井煤与瓦斯突出防控技术,提升煤矿安全、智能化水平和煤炭安全保障能力,分析了突出发生机理研究进展及现状,阐述了我国煤与瓦斯突出预测及监测预警手段的关键技术,系统总结了防治煤与瓦斯突出的措施及新兴技术。我国在煤与瓦斯突出机理、预测、监测和防治等理论与技术方面取得了系列创新性成果,解决了大量理论和技术难题。但是,随着我国煤矿开采深度的增加,煤矿突出危险性日趋严重复杂。与此同时,国家对煤矿安全生产的要求也越来越高。针对新形势下煤与瓦斯突出防治现状和需求,亟需建立更为适应完善的煤与瓦斯突出防治理论及技术体系。基于此,提出了未来发展趋势及研究展望:在突出机理方面,应加强复杂多变地层及不同构造条件下突出耦合演化机理和定量化表征研究;在突出危险性鉴定方面,需关注低参数突出多发背景下不同区域及类别突出危险性的适应性判定标准研究;在瓦斯参数测试方面,应聚焦精细化定点测量及随钻反演技术的发展;在工作面突出危险性精准探测/预测/监测预警技术方面,应加强物联网、大数据分析及人工智能识别技术在突出危险性综合监测、智能预警方面的研究与应用;在防治方面,应进一步发展煤层突出危险性远程、区域、智能防控技术;在风险隐患管控方面,应深入研究并推广瓦斯灾害风险大数据分析与预警平台,从而全面提高我国瓦斯灾害风险隐患管控能力和瓦斯治理水平。

**关键词:**煤与瓦斯突出;演化机理;监测预警;防治技术;风险管控

**中图分类号:**TD713      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-9993(2022)01-0297-26

## Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China

WANG Enyuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Guorui<sup>1,2</sup>, ZHANG Chaolin<sup>1,2</sup>, LI Zhonghui<sup>1,2</sup>

(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, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** China is the country with the most serious coal and gas outburst disaster in the world. Many in-depth research and practice have been carried out in outburst prevention, and outburst prevention and control has achieved remarkable results. However, the outburst accidents still occur in recent years. In order to further improve the outburst prevention and control technology in deep mines and improve coal mine safety, intelligent level and coal safety guarantee ability, the research progress and current situation of outburst occurrence mechanism were analyzed, and the

收稿日期:2021-11-25    修回日期:2021-12-22    责任编辑:王晓珍    DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1846

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51934007,51904293);山东省重大科技创新工程资助项目(2019JZZY020505)

作者简介:王恩元(1968—),男,内蒙古卓资人,教授,博士生导师,博士。Tel:0516-83885655, E-mail:weytop@cumt.edu.cn

通讯作者:张超林(1991—),男,安徽阜阳人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail:chaolinzhang@cumt.edu.cn

引用格式:王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.

WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1):297-322.



移动阅读

key technologies of coal and gas outburst prediction, monitoring and early warning means were expounded, and the measures and emerging technologies for preventing and controlling outburst were summarized systematically. China has made a series of innovative achievements in the theory and technology of coal and gas outburst mechanism, prediction, monitoring and prevention, and solved a large number of theoretical and technical problems. However, with the increase of coal mining depth, the risk of coal outburst is becoming more and more serious and complex. At the same time, the national requirements for coal mine safety production are becoming higher and higher. In view of the current situation and demand under the new situation, it is urgent to establish a more suitable theoretical and technical system for outburst prevention and control. Therefore, the future development trend and research prospect are proposed. In terms of outburst mechanism, the research on outburst coupling evolution mechanism and quantitative characterization should be strengthened under complex and changeable strata and different structural conditions. In terms of outburst risk identification, it is necessary to pay attention to the study of adaptive criteria for different outburst regions and categories risk under the background of low parameter outburst. In the aspect of gas parameter testing, the development of fine fixed-point measurement and inversion while drilling should be focused. In terms of accurate detection/prediction/monitoring and early warning technology of prominent hazards in the working face, the research and application of internet of things, big data analysis and artificial intelligence identification technology in comprehensive monitoring and intelligent early warning of prominent hazards should be strengthened. In terms of prevention and control, the remote, regional and intelligent prevention and control technology of coal seam outburst risk should be further developed. In terms of risk management and control, it is necessary to study and promote the big data analysis and early warning platform of gas disaster risk, so as to comprehensively improve the ability of risk management and control of gas disasters and gas control level in China.

**Key words:** coal and gas outburst; evolution mechanism; monitoring and early warning; prevention and control technology; risk management and control

煤炭在较长时期内仍将是我国的主体能源和基础能源。近年来,虽然煤炭消费量占一次能源消费量的比例逐年降低,2020年为56.8%<sup>[1]</sup>,但在较长时间内,煤炭产量和消费量依然处于高位,2016年以来我国煤炭产量和消费量仍呈增长态势。随着我国浅部煤炭资源逐渐枯竭,向深部要资源成为必然趋势,煤炭开采深度正以10~25 m/a的速度延伸,现有千米以深矿井47座,最大采深达到1 500 m,未来5~10 a还将新建30余座千米矿井<sup>[2-5]</sup>。与此同时,随着开采深度和开采强度的增大,地应力、地温和瓦斯压力不断增加,采场结构越来越复杂,采动影响也越来越大,深部煤炭采掘过程将伴随着更加复杂的煤与瓦斯突出灾害(简称突出),极易引发重特大事故,严重威胁煤矿安全生产,影响煤炭产能。

为了规范煤与瓦斯突出防治工作,原国家安全生产监督管理总局、国家煤矿安全监察局先后颁布实施了《防治煤与瓦斯突出规定》(2009年)以及现行的《防治煤与瓦斯突出细则》(2019年),随着我国防突技术的迅猛发展,煤与瓦斯突出事故得到了有效控制,但是至今仍然难以彻底遏制。统计显示<sup>[6]</sup>,我国近20年(2001—2020年)的突出事故起数、死亡人数均表现为下降趋势,但突出死亡人数占煤矿事故总死

亡人数的比例却呈现波动式增长趋势,表明突出事故在煤矿事故中仍处于相对较高水平。仅在2021年上半年,就发生了5起煤与瓦斯突出事故,事故的频发体现了深部开采煤与瓦斯突出的复杂性和现行防突理论与技术的局限性,兼具技术性与难度性的防突工作在今后的煤炭开采中依然任重而道远。如何在落实2个“四位一体”综合防突措施的同时,进一步完善防突理论及技术以及发展新兴技术,将直接关系到我国实现“零突出”目标的时间跨度。基于此,笔者梳理了煤与瓦斯突出机理研究历程,总结了煤与瓦斯突出预测及监测预警技术研究现状,阐述了煤与瓦斯突出防治理论与技术取得的进展,并提出了未来重点发展方向。

## 1 煤与瓦斯突出发生机理研究现状

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的煤岩动力灾害,其发生机理一直是突出灾害研究中最主要、最根本的内容之一,也是突出灾害防治的前提和理论基础。煤与瓦斯突出机理,是指煤与瓦斯突出发生的原因、条件及其发生、发展过程<sup>[7]</sup>。前人经过大量研究,提出了“综合作用假说”,认为突出是由地应力、包含在煤体中的瓦斯及煤体自身物理力学性质等综合作用的

结果,能较为全面客观地解释突出现象,从而被广大学者所接受,其代表性理论为前苏联学者 B.B.霍多特提出的煤与瓦斯突出“能量假说”<sup>[8]</sup>。

我国从 20 世纪 60 年代起,通过现场观测和试验研究对煤与瓦斯突出机理进行了大量探索,相继提出了许多新的观点,为突出的有效防控提供了理论依据。何学秋和周世宁<sup>[9-10]</sup>通过开展含瓦斯煤三轴力学性质研究,认为当外部载荷超过煤的屈服载荷时,煤体会发生流变行为,从而提出了煤与瓦斯突出的“流变假说”,并首次基于时间因素介绍了不同流变阶段,其中变形衰减阶段和均匀变形阶段对应突出准备阶段,而加速变形阶段对应突出由激发到发展的阶段(图 1),合理地解释了现场延期突出现象;蒋承林和俞启香<sup>[11]</sup>提出“球壳失稳假说”,认为突出是地应力首先破坏煤体,随后煤体解吸瓦斯使得煤体的裂纹扩张,形成球盖状煤壳,最后瓦斯再次促使煤壳失稳破坏并抛向采掘空间的过程,较好地解释了突出孔洞的形状及形成过程;梁冰等<sup>[12]</sup>提出了突出“固流耦合失稳理论”,认为突出是含瓦斯煤体在采掘活动影响下,局部发生迅速、突然破坏而生成的现象,该理论建立在煤岩破坏机理的基础上,因此可为利用煤体微破裂信息预报突出的技术提供理论依据;胡千庭等<sup>[13]</sup>认为突出是一个力学破坏过程,结合已发生的大量突出动力现象的特征和规律,应用力学理论对突出的

力学作用机理进行了研究,将突出全过程划分为准备、发动、发展和终止 4 个阶段(图 2),认为初始失稳条件、破坏的连续性进行条件和能量条件是突出发生的 3 个必要条件;郑哲敏<sup>[14]</sup>通过对特大型突出释放能量进行研究,从数量级和量纲分析的角度,发现突出的瓦斯内能要比煤体弹性能高出 1~3 个数量级;鲜学福等<sup>[15]</sup>利用演绎法探讨了突出的激发与发生条件,得到了突出的瓦斯临界压力判别式。

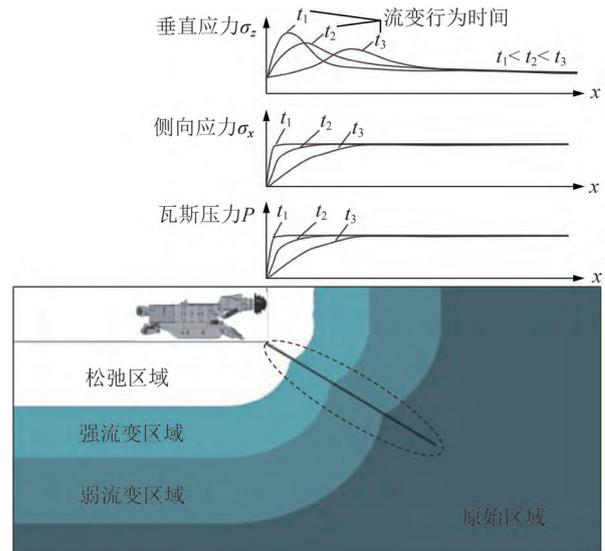


图 1 煤与瓦斯突出机理流变假说<sup>[9-10]</sup>

Fig.1 Rheological hypothesis of coal and gas outburst mechanism<sup>[9-10]</sup>

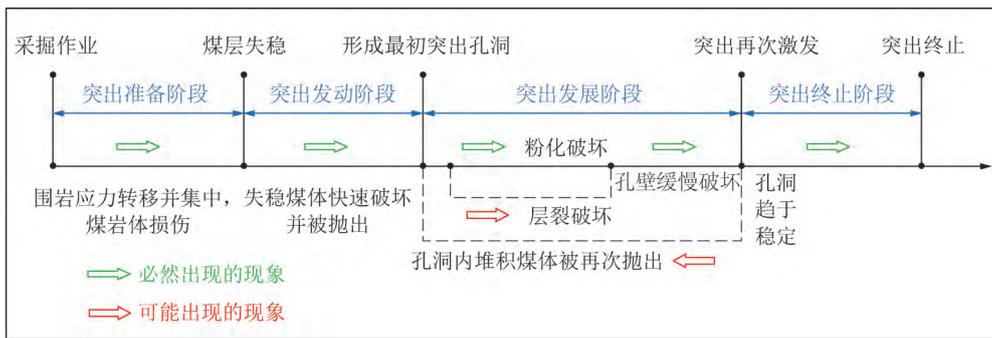


图 2 煤与瓦斯突出的力学作用过程描述<sup>[13]</sup>

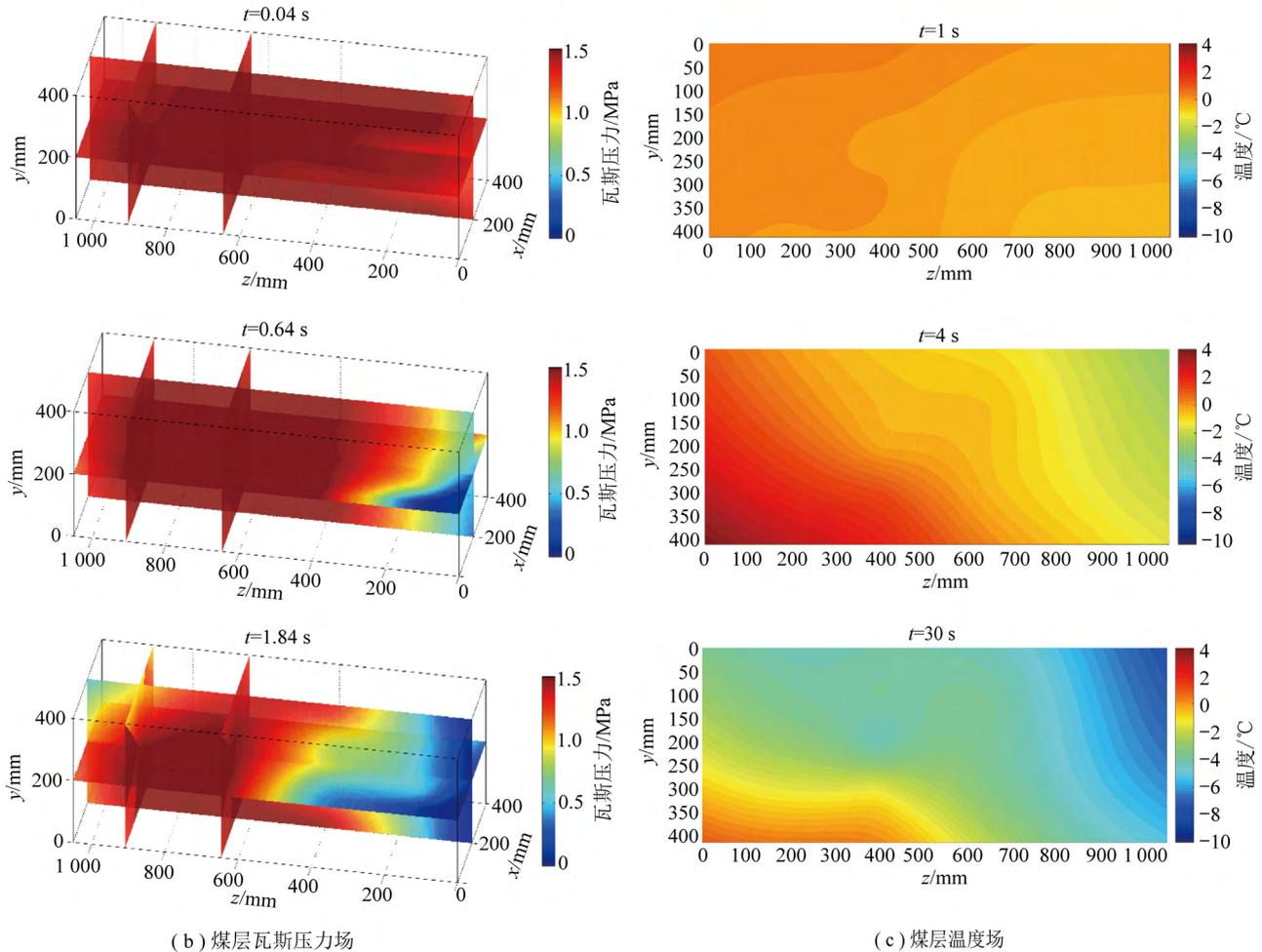
Fig.2 Phase division of coal and gas outburst based on mechanical action process<sup>[13]</sup>

物理模拟试验是重现煤与瓦斯突出演化过程、探究突出发生机理的重要途径,受到众多学者青睐。2004 年,蔡成功等<sup>[16]</sup>从力学模型入手,结合相似理论研发国内首台煤与瓦斯突出三维模拟试验装置,模拟了不同成型煤体强度、三向应力、瓦斯压力条件下的突出过程,得出了突出强度与上述参数之间的数学模型,研究发现应力与煤的力学性质对突出强度起关键性作用;许江团队<sup>[17-20]</sup>研制了多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统(图 3),研究了突出过程中煤

层瓦斯场、温度场和应力场的分布特征,分析了巷道内突出两相流的运动形态、冲击力和温度的演化规律,并探讨了突出能量释放问题;王恩元团队<sup>[21-22]</sup>发明了突出模拟及声电监测一体化试验系统,实现了突出过程中煤体载荷和瓦斯压力的连续采集及电磁辐射、声发射和电位信号的实时监测,获得了突出演化过程中煤体的声电瓦斯信号时变响应特征,并进一步揭示了煤与瓦斯压出发动的载荷和能量条件(图 4)。



(a) 煤与瓦斯突出试验现场照片

图3 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统<sup>[17-20]</sup>Fig.3 Multi-field coupling test system for dynamic disaster in coal mine<sup>[17-20]</sup>

程远平团队<sup>[23-24]</sup>设计了真三轴突出试验系统,针对构造煤中瓦斯分布不均现象,基于能量原理对突出发生的条件及突出形成机制进行了深入研究;聂百胜等<sup>[25]</sup>基于中等尺度突出模拟装置,参照现场工作面条件构建顶底板岩层分层布置模型及超前应力集中分布形式,从能量转化、突出传播、粒度分布等角度研究了突出演化规律;文光才等<sup>[26]</sup>针对千米深井煤层“高地应力、高瓦斯压力、高地温”赋存环境,研发了可真实还原突出过程中煤岩失稳的深井煤岩瓦斯动力灾害模拟试验系

统;卢义玉等<sup>[27]</sup>研制了具备复杂地质条件构建、气体连续供给、自动模拟开挖和试验数据实时监测的深部煤岩工程多功能物理模拟试验系统;李术才和袁亮等<sup>[28-30]</sup>研发了大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统,巷道掘进采用可视化伺服掘进和自动排渣技术,考虑了不同构造条件、地应力、煤岩体强度、瓦斯压力和施工过程下的突出试验,同时实现了全过程多物理量信息快速获取融合及突出多场演化耦合致灾机理的研究,如图5所示。

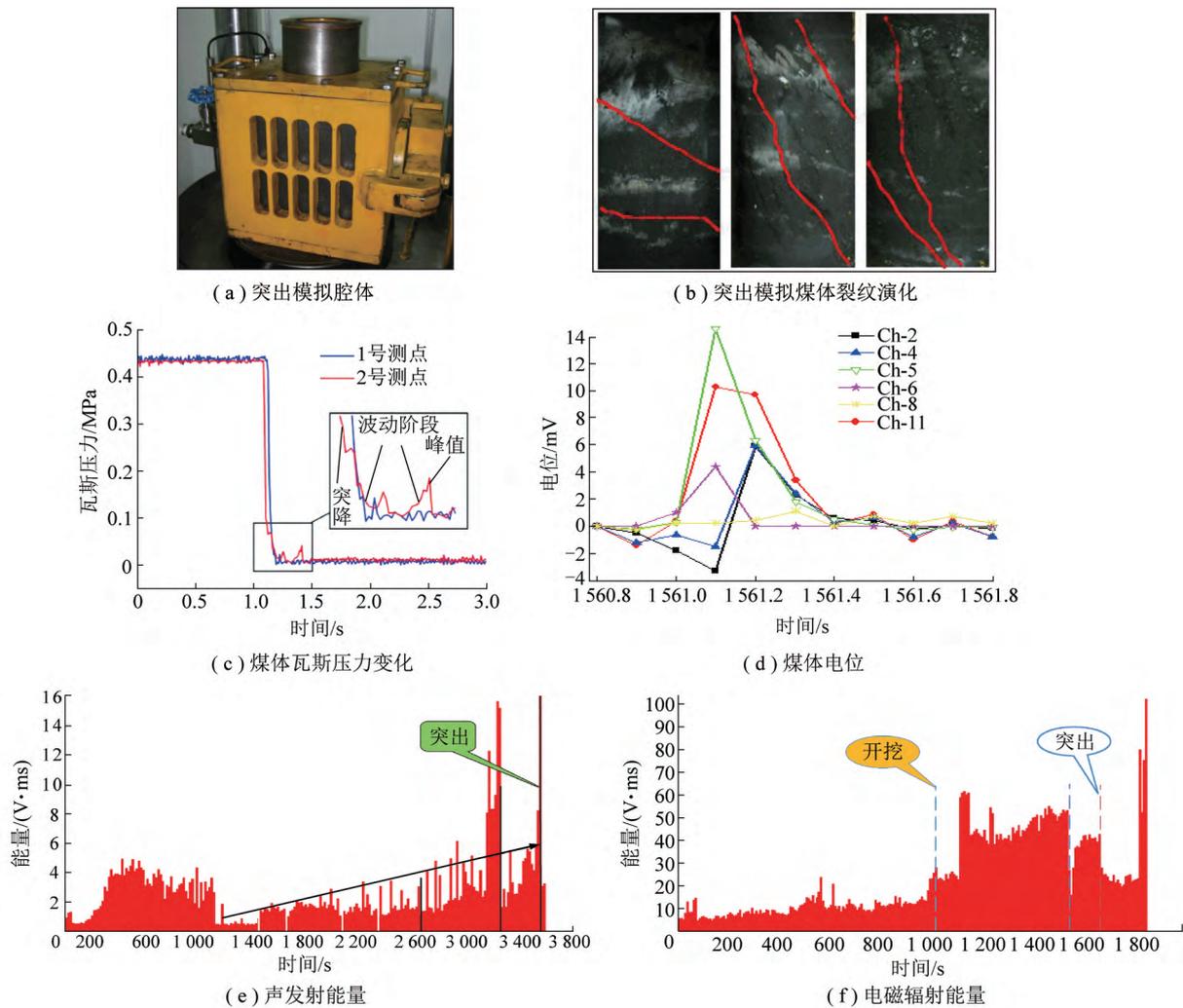


图 4 突出演化过程中煤体裂纹及多参数特征变化规律<sup>[21-22]</sup>

Fig.4 Evolution of coal cracks and multi parameters during coal and gas outburst<sup>[21-22]</sup>

随着计算机技术的发展,数值模拟方法也越来越多地应用于煤与瓦斯突出机理研究。唐春安团队<sup>[31-32]</sup>建立了含瓦斯煤岩突出过程固气耦合作用的RFPA2D Flow模型,对石门掘进诱发的含瓦斯煤岩突出进行了数值模拟,揭示了采动影响下煤岩介质渐进破坏诱致突变的非线性本质;胡千庭等<sup>[33]</sup>提出一种FEM-SPH耦合方法,模拟了煤巷在微小扰动作用下,极限平衡区内的部分煤体失稳破坏并抛出的规律,研究了突出发生的临界条件和能量之间的关系;薛生等<sup>[34]</sup>基于FLAC 3D与COMET 3开发出了模拟煤与瓦斯突出的耦合模型,分析了突出过程中煤层的变形破坏、瓦斯解吸以及瓦斯与水在煤中的流动规律;王凯团队<sup>[35]</sup>采用有限体积法(FVM)数值模拟了瓦斯解吸对突出冲击波和瓦斯流动传播特性的影响;卢守青等<sup>[36]</sup>基于双重孔隙结构的软硬组合煤体气固耦合模型,分析了不同条件下的巷道前方瓦斯压力、应力和塑性破坏的分布规律,进而建立了突出的能量失稳判据(图6);何学秋团队<sup>[37]</sup>建立了突出全过程

的统一模型,采用拉格朗日积分点有限元法(FEMLIP)模拟了含瓦斯煤的流固耦合规律;魏建平团队<sup>[38]</sup>基于流固耦合模型研究了受载含瓦斯煤体卸压后的应力分布与演化规律,探讨了地应力在煤与瓦斯突出过程中的作用机理。

综上所述,众多学者针对煤与瓦斯突出机理从实验室试验、理论分析、数值模拟和现场统计等方面开展了大量深入研究,揭示了煤体瓦斯赋存、解吸、扩散特性,建立了煤层瓦斯多场多相耦合模型,获得了煤与瓦斯突出影响因素、发生规律及条件等,提出了煤与瓦斯突出的定性假说或半量化机理,解释了煤与瓦斯突出现象,取得了显著成果。然而,目前仍然缺乏可以解释所有突出现象和特征的相对系统完整的理论体系,尤其是针对深部地质构造、复杂多变非均匀地层条件及高应力条件下的瓦斯富集与运移释放特性、突出耦合演化过程、低参数突出发生失稳判据、渗透性参数对突出的影响规律与机制、诱突动载源及耦合演化机理等方面的研究还依然较少,今后这些研

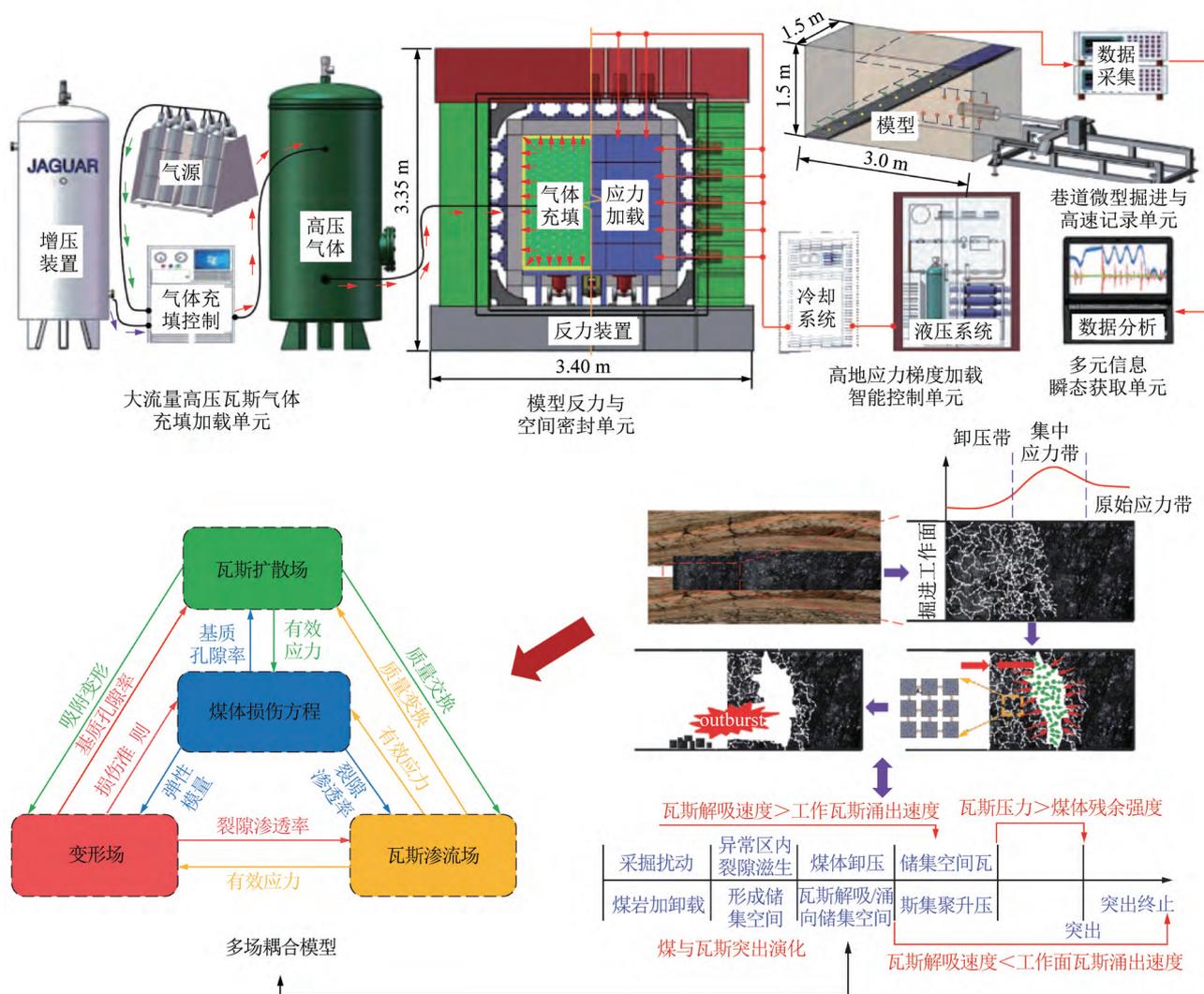


图 5 试验系统构成及煤与瓦斯突出多场耦合致灾机理<sup>[28-30]</sup>

Fig.5 Composition of test system and multi-field coupling disaster mechanism of outburst<sup>[28-30]</sup>

究的开展将能进一步促进突出发生定量化失稳判据的发展及突出理论体系的完善。

## 2 煤与瓦斯突出预测及监测预警技术研究现状

我国《防治煤与瓦斯突出细则》明确规定：突出矿井应该结合开采条件，制定、实施区域和局部综合防突措施（简称 2 个“四位一体”）<sup>[39]</sup>，即：区域突出危险性预测、区域防突措施、区域防突措施效果检验、区域验证，以及工作面突出危险性预测、工作面防突措施、工作面防突措施效果检验、安全防护措施。其中区域突出危险性预测和工作面突出危险性预测是实施防突措施的重要前提。区域预测的任务是按照矿井、煤层和部分煤层区域 3 个层次，对突出危险性区域进行划分。主要通过瓦斯地质分析结合瓦斯参数进行预测；工作面（局部）预测的任务是在前者的基础上及时预测采掘工作面、石门等小范围的突出危险性。目前主要分为接触式与非接触式 2 种。其中

接触式预测多属于静态预测，非接触式预测基于动态连续性的特点，也得到了广泛的应用。

### 2.1 常规静态预测技术

常规静态预测技术以瓦斯地质分析、单指标及综合指标等方法为主。其中瓦斯地质分析法主要依据已掌握的瓦斯参数及地质构造条件，结合已采区域突出危险分布规律和未采区域的地质赋存条件对突出危险区域进行划分。单指标法通过钻孔施工方式，测试区域及工作面参数指标，结合临界值进行突出危险性判定。目前涉及的指标主要有：钻屑量  $S$ 、钻孔瓦斯涌出初速度  $q$ 、钻屑瓦斯解吸指标  $\Delta h_2$ （或  $K_1$ ）、煤体破坏类型及坚固性系数  $f$  等参数<sup>[40]</sup>。而综合指标法则主要考虑多个预测指标的敏感性与影响因素，通过一定的法则，综合判定突出危险性，主要包括综合指标  $D, K$  与  $R$  值等。

静态预测存在一定的局限，例如，预测手段多以施工钻孔形式获取定点及抽检指标，工艺繁琐且人为

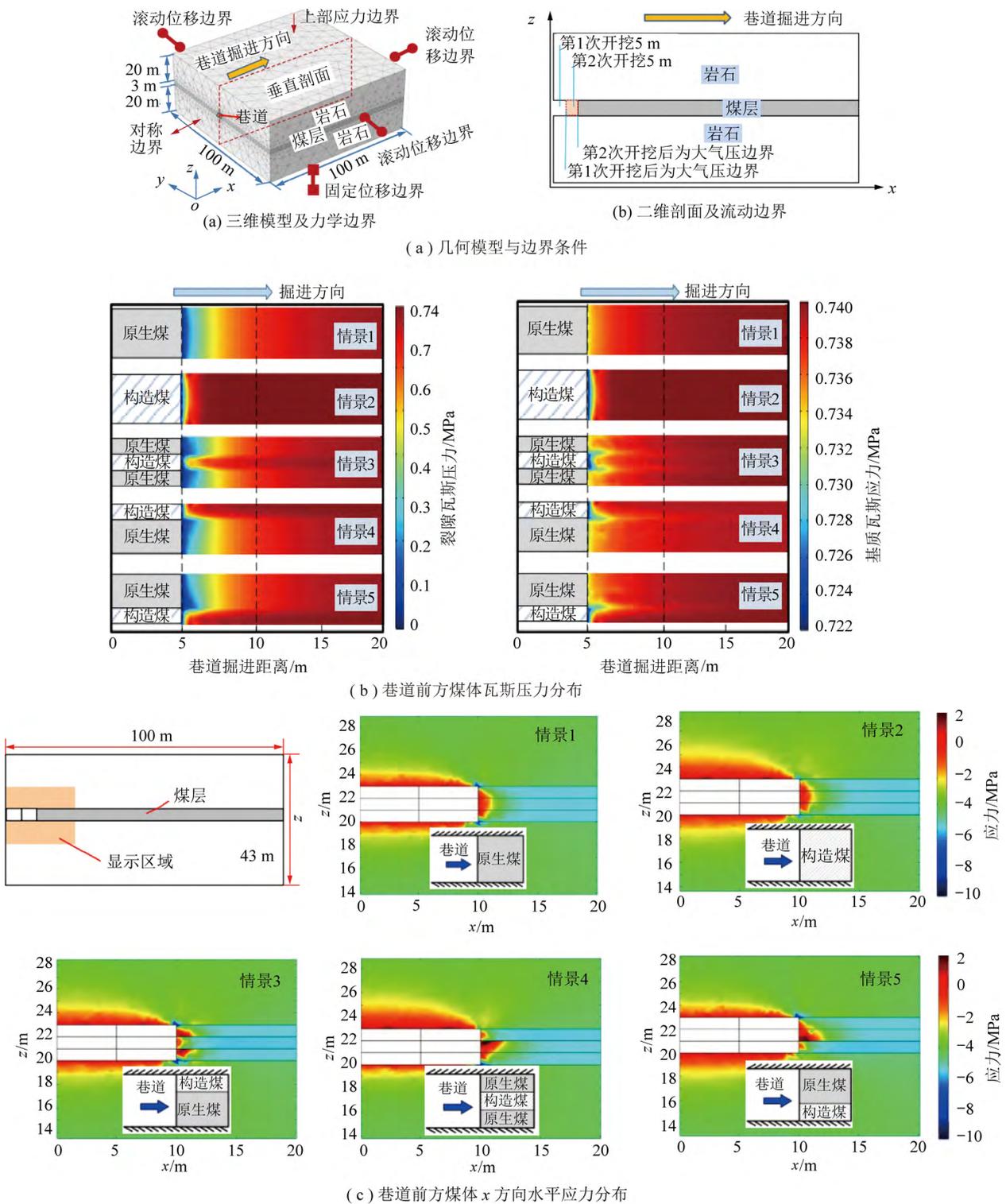


图 6 煤体采掘失稳及突出过程数值模拟<sup>[36]</sup>

Fig.6 Numerical simulation of coal mining instability and outburst process<sup>[36]</sup>

操作影响较大,不仅在空间上只局限于“点预测”,时间上也难以满足连续预测需求。另外,针对突出孕育发展过程的延期效应等情况也难以及时反映采掘全阶段的突出危险性。而近几十年来,为了提高突出预测的准确率,改善防突技术水平,诸多学者针对突出危险性预测及监测预警方面开展了大量研究,试图实

时掌握突出危险情况,至今,从瓦斯动态涌出指标与新兴地球物理技术 2 个方面,形成了多类型交叉预测及监测预警体系。因其兼具操作测试简单、不影响正常采掘生产、可实时连续监测等优点,成为当前国内突出预测的主流研究方向,同时《防治煤与瓦斯突出细则》也鼓励将其列为辅助预测手段<sup>[39]</sup>。

## 2.2 瓦斯涌出指标预测及监测预警方法

长期的开采实践表明,突出危险发生前,往往伴随瓦斯涌出异常的现象。瓦斯涌出量的变化能够反映突出煤层的损伤演化过程,因此可以作为识别煤与瓦斯突出危险的前兆信息。目前瓦斯涌出相关指标主要包括  $V_{30}$  与  $K_V$ , 其中  $V_{30}$  为工作面放炮后 30 min 内瓦斯涌出量与爆破落煤量之比,  $K_V$  为巷道瓦斯涌出过程不同循环涌出量的变异系数<sup>[41]</sup>。二者虽反映了一段时间的瓦斯涌出平均值,但由于研究因素单一,预测准确率有待进一步提高。与此同时,张庆华等<sup>[42]</sup> 基于最优化理论结合瓦斯涌出动态特征建立了预警指标及临界值的优选方法,提高了掘进工作面突出危险实时、动态预警的普适性。曹森林<sup>[43]</sup> 基于大量历史突出事故,分析了瓦斯涌出动态特征及影响因素,结合新型瓦斯动态涌出预测方法及临界值法则,研制了 KJ338 瓦斯动态监测系统,提高了突出预测的可靠性。然而面对更加复杂的开采条件,通过分析突出前瓦斯涌出规律与其他参数的耦合更有助于提高突出实时预测的效率和准确性。姜福兴等<sup>[44]</sup> 提出了基于应力和瓦斯浓度动态变化特征的掘进工作面突出实时监测预警技术(SMD法),建立了钻孔应力增量和瓦斯浓度时间序列变化特征相结合的模糊预测模型。关维娟等<sup>[45]</sup> 构建了包括实时瓦斯涌出指标、动态指标、预测和基础指标的多参数预警体系,实现了突出危险性的提前预警。陈亮等<sup>[46]</sup> 研究了瓦斯涌出异常的临界慢化特征,建立了掘进工作面前方的瓦斯含量反演模型,通过融合电磁辐射、声发射等指标创建了实时突出协同耦合预警方法,并在现场得到了很好的验证和应用。

## 2.3 地球物理监测预警方法

近些年来,突出防治的地球物理监测预警方法发展迅猛,主要包括微震、声发射(地音)、电磁辐射、地质雷达和震动波 CT 等技术手段。煤岩体材料在受

外力或内力作用产生变形或破裂时往往以弹性波形式向外释放应变能,此类现象称为声发射/微震活动<sup>[47]</sup>。其中微震监测技术是利用煤岩破裂产生的低频率微震信息来研究煤岩结构和稳定性的实时、动态、连续的地球物理方法,广泛应用于煤与瓦斯突出、冲击地压、突水等灾害监测领域<sup>[48]</sup>。目前学者们针对突出发生过程中的微震活动空间分布与演化、波形特征(幅频、持续时间、频带能量等)、时间序列监测指标和方法等进行了研究<sup>[49-51]</sup>,为突出微震监测技术的发展提供了理论基础。唐春安团队<sup>[32,52]</sup> 基于煤岩破坏过程的微震效应及演化规律发现了微震在研究煤岩体微裂纹、微缺陷演化、力学性质以及局部特征的独特优势,分析了围压、软分层厚度、煤质、瓦斯含量等因素影响下的微震时空分布特征,并依据长短时指标和事件特征建立微震监测系统,实现了突出危险性的动态连续监测。何学秋等<sup>[53-54]</sup> 提出了突出危险煤层微震区域动态监测新方法,通过频次与能量指标对煤层采掘扰动及地质异常进行了动态连续监测,验证了震动波 CT 得到的应力场分布特征与理论分布一致,突破了传统区域预测手段在时、空维度上的局限,如图 7 所示。张浪等<sup>[55]</sup> 针对突出危险区域附近的煤体分布、瓦斯赋存和巷道掘进过程采动应力演化特征 3 个方面综合分析了突出过程的微震前兆特征,发现了“安全期—前震期—平静期”与软煤渐变梯度影响下的关系。

声发射技术通过监测煤岩体内部破裂及应力卸载下的弹性波活动,实时反映煤岩体及周围的应力破坏状态,进而判断工作面的突出危险性。我国对该项技术的研究相比国外起步较晚。文光才等<sup>[56]</sup> 建立了煤岩体声发射传播理论模型,依据现场试验得出了不同强度煤岩介质中的声发射传播规律,为确定声发射监测煤岩动力灾害的适用条件奠定了基础。邹银辉等<sup>[57]</sup> 研制的 AEF-1 型声发射监测技术,实现了声发

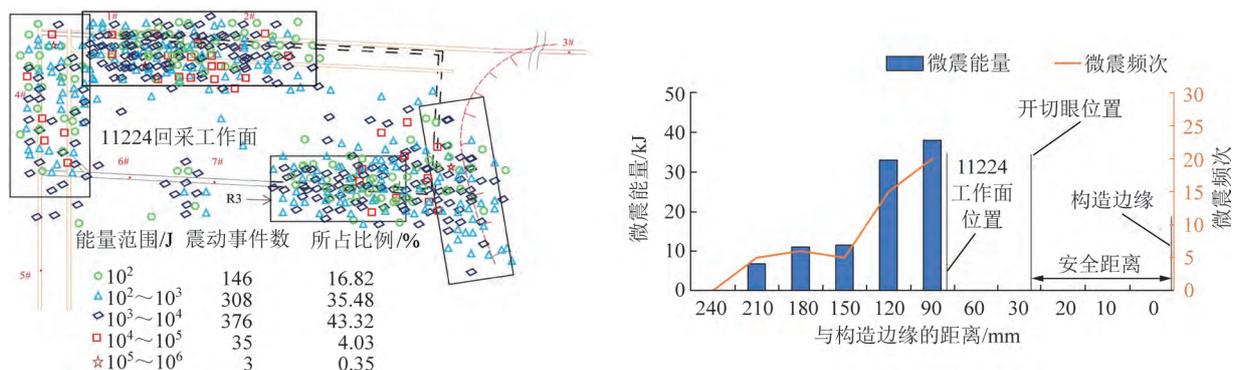


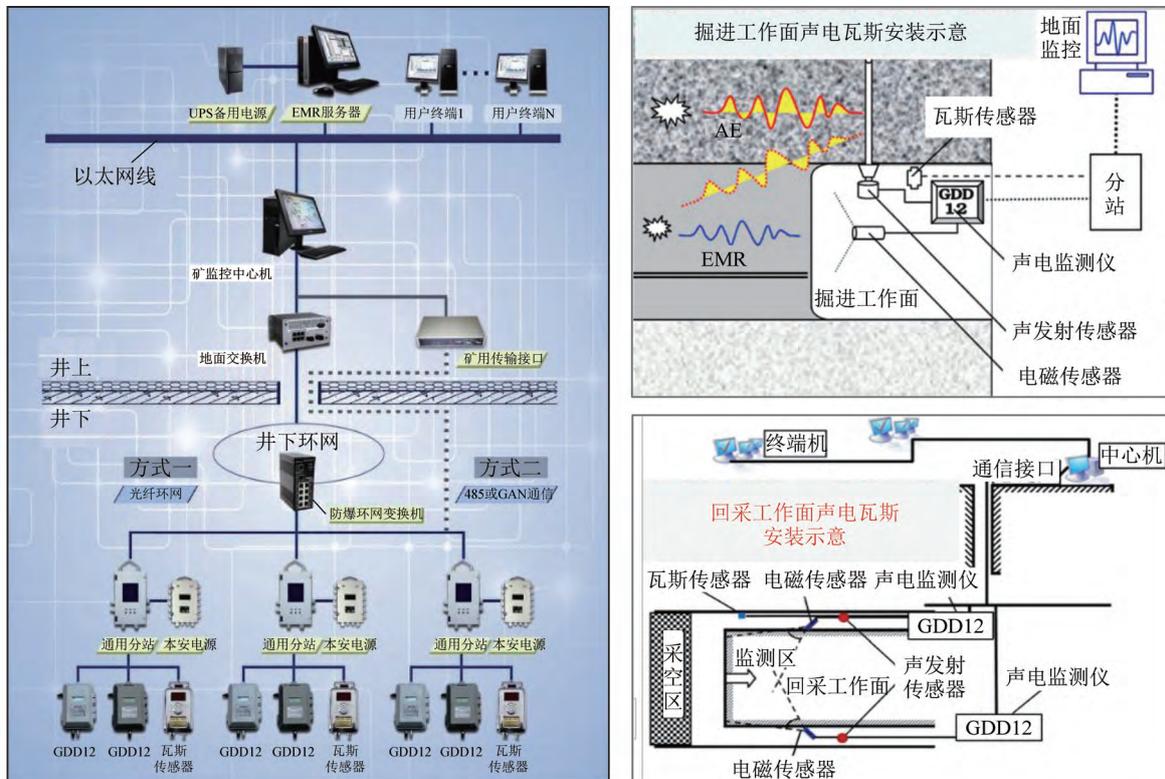
图 7 微震事件平面分布及掘进工作面微震信号时序变化<sup>[54]</sup>

Fig.7 Plane distribution of microseismic events and timing change of microseismic signal in headwall area of a driving face<sup>[54]</sup>

射预测突出的预测及滤噪工艺。胡千庭等<sup>[58]</sup>利用自行开发的声发射监测系统 YSFS(A) 对平煤十矿试验工作面的突出动力现象进行现场监测。研究发现突出发生前,随着煤岩体应力增大,裂纹发生扩展,声发射信号具有明显上升趋势,且先于瓦斯浓度变化。

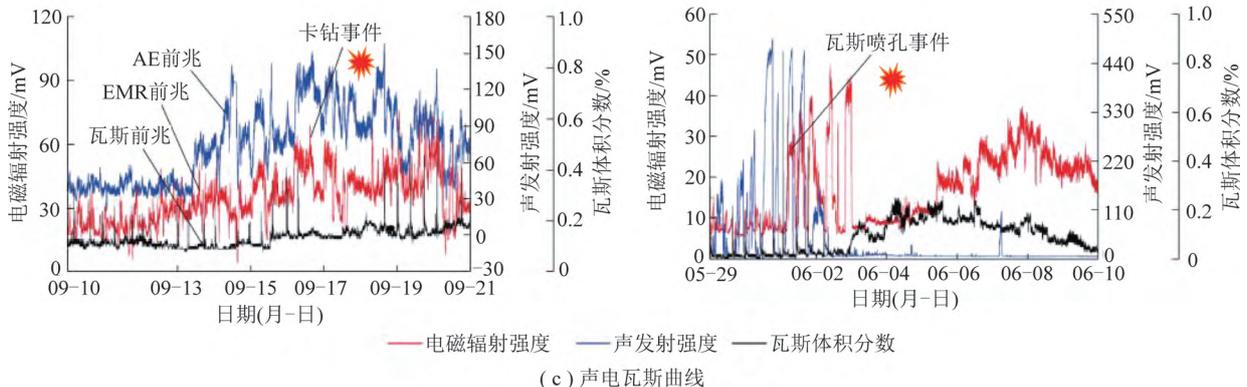
电磁辐射法作为一种动态连续突出危险性监测方法,近年来备受关注<sup>[59]</sup>。中国矿业大学研究发现了煤岩/含瓦斯煤岩损伤电磁辐射效应及规律,建立了煤岩电磁辐射力电耦合模型;提出了电磁辐射预测煤与瓦斯突出原理<sup>[60]</sup>,发明了便携式煤岩动力灾害电磁辐射监测仪和移动式煤与瓦斯突出监测方法,建立了煤岩动力灾害预警准则,发明了临界值法与趋势

法相结合的预警方法;通过实验室试验、现场验证和应用,表明电磁辐射对突出显现、常规预测指标和瓦斯异常涌出等均有明显的超前响应<sup>[61-63]</sup>,目前电磁辐射技术已被列入《防治煤与瓦斯突出细则》。为了进一步提高突出监测的可靠性、抗干扰性和适用范围,发明了便携式声电监测仪、声电瓦斯实时监测预警突出方法及在线式声电监测传感器和系统,实现了煤与瓦斯突出的综合、实时、自动监测预警(图 8)<sup>[64]</sup>;开展了声电干扰信号和灾害前兆特征的智能识别研究,建立了瓦斯灾害风险隐患大数据分析预警平台,应用于贵州省和四川省多个煤矿,多次超前预警突出危险及重大风险隐患<sup>[65-66]</sup>。



(a) 系统架构

(b) 布置方式



(c) 声电瓦斯曲线

图 8 煤岩动力灾害声电瓦斯监测系统及应用<sup>[67]</sup>

Fig.8 Acoustic electric gas monitoring system for coal rock dynamic disaster and its application<sup>[67]</sup>

煤体受载破裂过程中的电磁信号来源于煤岩破裂自由电荷的产生与转移,该过程中同样会测试得到电位信号。电位与电磁辐射属于同源异象,其优势在于对煤岩体应力及破裂过程敏感性强、抗干扰能力好。钮月等<sup>[68]</sup>应用双边反演模型进行了煤层电位测试,识别出了局部应力异常区,与微震监测存在很好的对应关系。基于现场条件研究了煤体掘进过程中

的电位响应特征,分析了工作面前方的电位分布与演化规律,研究发现电位信号的时序变化整体上与对应区域的煤体采动应力、煤体变形破裂产生的电磁辐射信号具有良好的对应性,结合点电位反演成像,验证了高值区域与常规指标在空间分布上的一致性,建立了掘进工作面前方的突出危险精细辨识方法,如图 9 所示。

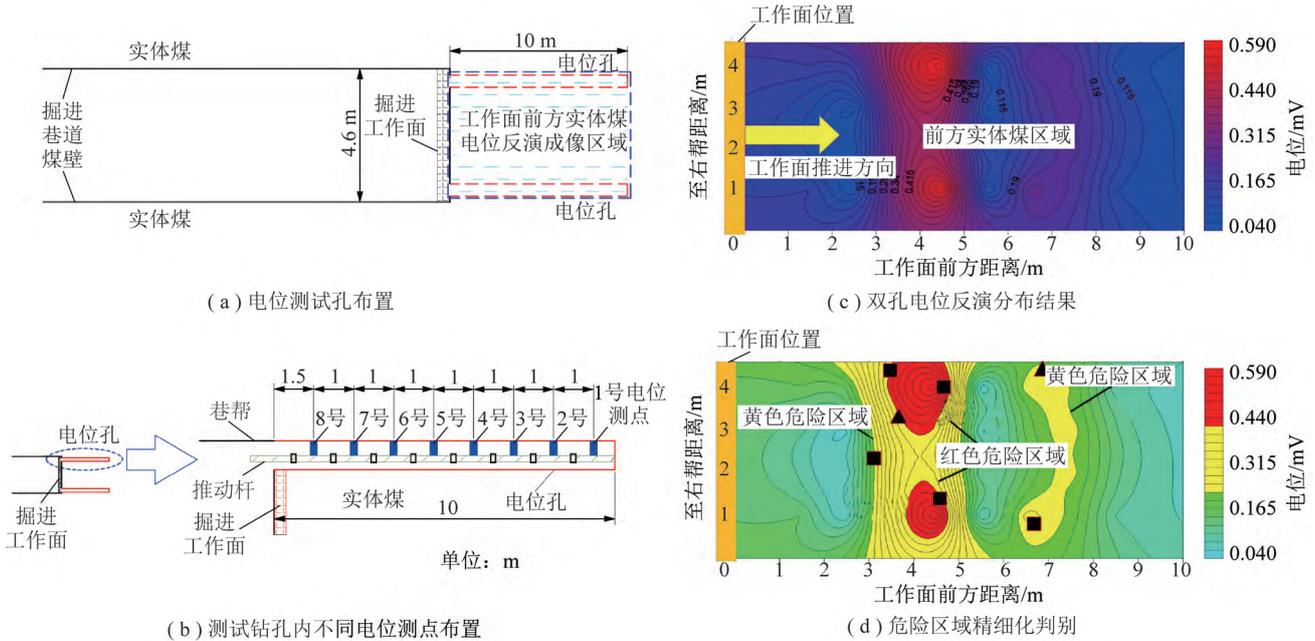


图 9 工作面电位布置及电位反演危险性辨识<sup>[68]</sup>

Fig.9 Potential layout and potential inversion risk identification of working face<sup>[68]</sup>

2.4 突出危险性数学模型预测方法

煤与瓦斯突出灾害孕育发展过程中的各影响因素呈复杂的非线性特征。尽管目前多种预测指标证实与突出危险性存在很好的契合关系,但仍依靠单一指标难以满足理想的预测准确性需求。为了解决预测指标临界值难以确定和多种指标融合下的综合突出危险性判定问题,近年来,学者们尝试利用各种数学理论模型来提高突出预测的准确性。郭德勇等<sup>[69]</sup>运用层次分析结合模糊综合评判方法对平顶山典型工作面进行了突出危险性预测,结果表明了该套理论预测突出强度的可行性。师旭超等<sup>[70]</sup>基于支持向量机(SVM)分类算法,考虑采深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、煤的坚固性系数以及地质破坏程度 5 个因素,实现了突出危险性程度的细化预测。梁冰等<sup>[71]</sup>将突出强度与危险性程度进行量化,基于灰色系统理论提出了智能加权灰靶决策模型,将 4 个单项指标临界值作为灰靶临界点,实现了定性与定量相结合的突出可能性与强度预测。李忠辉等<sup>[72]</sup>将突出是否发生与多个预测指标现场数据相关联,建立了 Logistic 回

归预测模型,结果表明该方法具有较高的准确度及精度。此外,属性数学理论<sup>[73]</sup>、未确知测度理论<sup>[74]</sup>、多元回归分析<sup>[75]</sup>、距离判别分析<sup>[76-77]</sup>、人工及智能神经网络<sup>[78-79]</sup>等数学模型均被用于突出危险性评价及预测领域。

目前,突出预测及监测预警技术已经在我国得到了深入的研究与实践,全面实施了基于常规预测指标及其敏感性的突出危险预测,部分矿井实现了实时监测预警。但由于突出演化致灾机理的复杂性及各地区地质条件的差异性,特别是采深、应力、温度和瓦斯等越来越大,突出预测面临着诸多难题亟待解决,如煤层突出危险性的有效鉴定标准及科学分类、不同地区突出差异化预测指标及参数的标准化、工作面前方异常区的精细化探测、深部小构造影响下的突出预测、煤与瓦斯压出等应力主导型突出的预测、动静载耦合条件下的突出预测等。实时监测预警技术还需进一步发展、验证及标准化。新一代信息技术,特别是大数据、人工智能等技术在突出预测和监测预警中的作用还未充分发挥。近年来已经从信息采集、预警

指标及模型、数据趋势分析、多参数多指标融合、软件开发等方面开展了大量研究工作,但突出危险预测及监测技术装备技术的自动化、智能化等有待深入发展,特别是智能开采下的煤层突出危险性的精细化区域探测、智能化预测等重大需求急需解决。

### 3 防治煤与瓦斯突出技术研究现状

《防治煤与瓦斯突出细则》明确指出,始终坚持“区域综合防突措施先行、局部综合防突措施补充”的原则。目前,区域防突措施主要分为保护层开采与大面积预抽煤层瓦斯 2 类。关于局部防突措施,形成了预抽瓦斯、超前钻孔、水力化措施、松动爆破等成熟的工作面防突技术体系。长期的理论研究与开采实践表明,针对现场不同条件开展系统完善的防突技术,是遏制突出发生的根本保障。

#### 3.1 保护层开采技术

在煤层群条件下,通常优先采用保护层开采措施,该项技术多煤层有效增透卸压,实现大面积消突效果上具有重要作用。与此同时,学者们针对保护层范围的确定和卸压瓦斯抽采 2 个方面进行了深入研究。袁亮等<sup>[80]</sup>提出了利用测定开采前后煤层瓦斯含量结合突出临界值确定被保护层消突范围的方法。刘洪永等<sup>[81]</sup>探讨了保护层的分类及其判定。我国存在较多的急倾斜突出煤层,利用传统方法划定保护范围通常偏差较大,针对此类难题,王宏图等<sup>[82-83]</sup>通过建立瓦斯越流固-气耦合模型,对上保护层卸压保护范围进行了计算。同时基于数值计算及关键层理论,

研究了急倾斜煤层有效保护卸压范围及其影响因素,并进行了现场实际应用考察。梁冰等<sup>[84]</sup>采用试验相似模拟方法,分析了保护层工作面推进过程中的应力分布情况,对远距离薄煤层保护效果有效性进行了论证。

随着保护层工作面的推进,及时对被保护层进行卸压瓦斯抽采才能彻底消除突出危险性,否则待上覆岩层移动稳定后应力恢复,卸压瓦斯重新吸附就难以实现瓦斯排放,达到消突目的。程远平和袁亮等<sup>[85-87]</sup>提出了煤层群煤与瓦斯安全高效共采的概念,重点阐述了不同卸压瓦斯流动特点的近程、中程和远程卸压瓦斯抽采方法及实际工程应用实践。表 1 介绍了保护层开采下的卸压瓦斯抽采方法。随着开采深度的加大,复杂突出煤层群地质条件变得普遍,传统保护层开采适用性明显受限,在没有适宜或非危险突出煤层作为保护层的情况下,首采保护层选择变得更加困难,从而成为防治整个煤层群突出的一大难题<sup>[88]</sup>。相关学者针对远距离保护层及全岩保护层的应用可行性进行了研究,根据淮北、阳泉等矿区现场实践,证实了远距离保护层开采依然能获得很好的卸压及瓦斯抽采效果<sup>[89-90]</sup>。杨威等<sup>[91-92]</sup>系统分析了保护煤层开采过程的应力分布、地层变形和渗透性演化规律,揭示了瓦斯流动特征所具有的普遍时空规律,对被保护层卸压瓦斯治理具有指导性意义。综上所述,针对不同条件下的保护层技术进行合理规划,依然将是我国现有区域防突措施的首要途径。

表 1 保护层开采及卸压瓦斯强化抽采方法汇总<sup>[86]</sup>

Table 1 Summary of pressure-relief gas extraction methods and exploitation of protecting seams<sup>[86]</sup>

瓦斯抽采区	方法	瓦斯来源	具体做法	应用矿区	应用效果	
近程抽采		首采煤层的未开采分层	顶板走向穿层钻孔	淮南、淮北、铁法、沈阳、平顶山等	好	
		采空区遗煤	顶板走向顺层长钻孔	淮南、阳泉等	较好	
		处在垮落带的煤层	顶板走向高抽巷	淮南	较好	
		底板变形较大区域的煤层	采空区埋管	抚顺、淮南、淮北、平顶山等	较好	
		裂隙带内煤层	采空区尾抽	淮南、阳泉等	—	
上部卸压区域			顶板走向高抽巷法	阳泉、盘江、淮南等	好	
			裂隙带内煤层	顶板倾斜高抽巷法	阳泉	好
			部分来自弯曲带内煤层	顶板倾斜穿层钻孔法	阳泉	较好
			地面钻井法	阳泉、淮北、淮南、铁法等	部分较好	
远程抽采		弯曲带内煤层	底板巷道网格格式上向穿层钻孔法	淮南、阳泉	好	
			地面钻井法	阳泉、淮北、淮南、铁法等	部分较好	
下部卸压区域		下部卸压区域内煤层	底板巷道网格格式上向穿层钻孔法	淮南、天府、沈阳等	好	
			顶板巷道网格格式上向穿层钻孔法	淮南、天府等	较好	

### 3.2 预抽煤层瓦斯技术

目前针对单一煤层、保护层本身为突出煤层和被保护层的未被保护区域等开采条件,主要采用预抽煤层瓦斯技术。经过长期的探索和发展,我国煤矿的瓦斯抽采理念先后经历了“局部防突措施为主、先抽后采、抽采达标和区域防突措施先行”等阶段,至今形成了完善的技术体系。《防治煤与瓦斯突出细则》针对区域防突措施提出了地面井预抽煤层瓦斯、井下穿层钻孔或顺层钻孔预抽区段煤层瓦斯、顺层钻孔或者穿层钻孔预抽回采区域瓦斯、穿层钻孔预抽井巷(含立、斜井,石门等)揭煤区域煤层瓦斯、穿层钻孔预抽煤巷条带煤层瓦斯以及定向钻孔预抽煤巷条带煤层瓦斯等多种方式。其中,最为常用的是穿层钻孔瓦斯抽采技术和顺层钻孔瓦斯抽采技术。

为了改善抽采效果,学者们对抽采负压<sup>[93]</sup>、钻孔密度<sup>[94]</sup>、封孔材料<sup>[95]</sup>、封孔长度、始封深度和封孔工

艺<sup>[96]</sup>等参数进行了一系列优化,效果显著。近年来,定向钻进技术由于兼具钻进效率高、控制范围广、抽采效果好等技术优点,在国内瓦斯抽采领域实现了广泛的应用。石智军等<sup>[97]</sup>通过优化信号传输系统、螺杆钻具结构、钻进工艺参数等,实现了煤矿2 500 m顺层超深定向钻孔,为顺层超深钻孔施工技术和瓦斯超前治理提供了指导作用。姚宁平等<sup>[98-99]</sup>基于现场施工经验,开发了新型梳状定向钻进技术装备及工艺,针对松软煤层瓦斯抽采成孔性差、抽采距离短等难题,建立了梳状定向成孔方法,满足了超500 m孔深和钻遇率大于90%的瓦斯抽采施工现场需求。王恩元与汪皓<sup>[100-101]</sup>建立了定向钻进条件下受载煤体瓦斯运移气固耦合模型,优化了定向钻孔布孔参数,提出了定向钻进瓦斯涌出量的煤层原位瓦斯压力和含量反演方法,实现了煤层消突效果的高效动态评价,并进行了现场应用与验证(图10)。

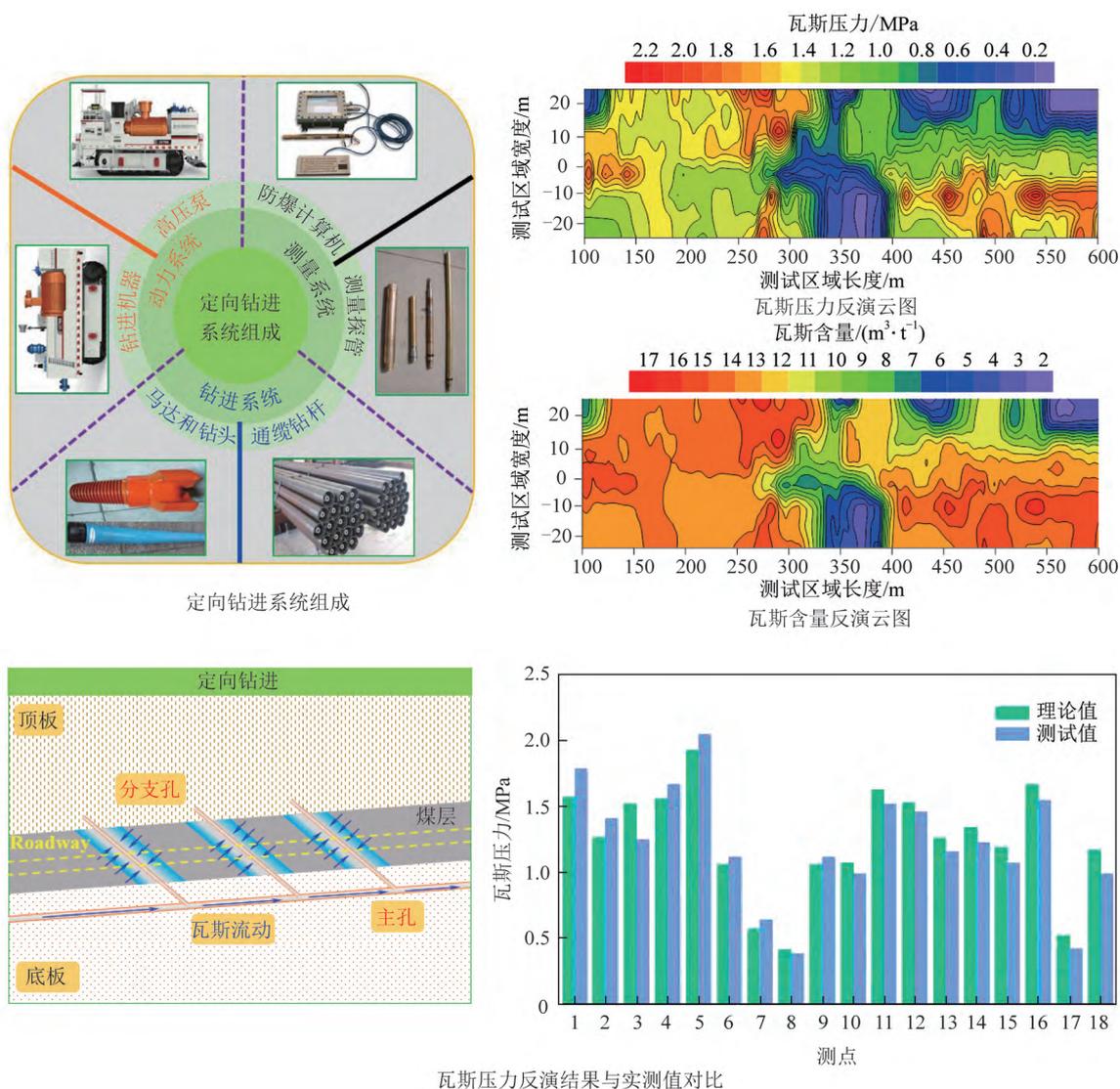


图10 定向钻进随钻瓦斯参数动态反演模型<sup>[101]</sup>

Fig.10 Dynamic inversion model of gas parameters during directional drilling<sup>[101]</sup>

预抽煤层瓦斯作为防突措施中应用最广泛的技术手段,近年来得到了不断的优化。通过优化钻孔布置方式及钻进形式,在一定程度上改善了传统抽采钻孔的施工工程量大、抽采瓦斯浓度低、抽采效果差和抽采时间长等缺点<sup>[102]</sup>。但实际上瓦斯抽采效果受渗透率等多种复杂因素的影响。而随着采深的增加,煤层透气性必然降低,瓦斯抽采难度也随之加大。因此,对于低透气性松软突出煤层等多种复杂条件,有必要采取人为增透措施,进一步提高煤层瓦斯抽采效果。

### 3.3 强化瓦斯抽采的增透措施

长期以来,我国矿山安全科研人员以传统钻孔卸压增透为基础,开发引进了一系列煤层增透新技术,其中主要包括:水力化系列措施、无水化措施以及深孔预裂爆破增透等技术。主要目的是降低煤层外在应力和改变煤体自身力学特性,从而改善煤层透气性,实现高效抽采。

#### 3.3.1 水力化增透关键技术

水力化增透技术通常分为 2 种形式,一种是向钻孔内注入高压水压裂钻孔,随着煤层原生裂隙的扩大、延伸,为瓦斯的解吸流动提供通道。另一种是通过高压水射流割缝或冲孔将钻孔内部煤体排出,使孔壁周围应力发生转移,孔洞裂隙的贯通会增加煤层的渗透性,提高瓦斯的抽采效果<sup>[103]</sup>。其中以水力压裂、水力割缝和水力冲孔为主的卸压增透技术,已广泛应用于工程实践。

水力压裂技术通过混有支撑剂的高压水对钻孔周围的煤岩体进行压裂,形成沿着煤层层理和垂直于最小主应力方向的延伸裂隙,来提高煤层渗透性<sup>[104]</sup>。由于我国突出煤层普遍存在的松软、低透特性,常规水力压裂实际产生的裂隙较少且容易由于增透方向的不确定而导致应力集中以及瓦斯抽采屏障区的出现。为了改善压裂效果,部分学者尝试在压裂液中添加表面活性剂,这在一定程度上能够降低煤体吸附瓦斯的能力,同时通过选择性的溶解煤中矿物质,提高煤体的裂隙通道尺度和渗透率<sup>[105]</sup>;并先后提出了射孔、预置裂缝、定向孔等方式来控制裂缝的扩展方向,解决了局部压裂不均所引起的致裂效果不佳的难题<sup>[106-108]</sup>。为了克服井下压裂作业空间有限的难题,部分学者通过适当降低水力压裂压力来减小装备尺寸,同时结合脉动水力压裂技术避免裂隙的重新闭合。研究发现,高压脉动压裂技术通过高压水激发震荡,不断冲击煤层,由峰值压力与谷底压力构成周期性的脉动波,使煤体裂隙孔隙产生“压缩—膨胀—压缩”的循环作用,进而使煤层弱面的原生裂隙不断贯穿、延伸成新裂隙。在实际应用中,与传统水力压裂技术相比,起裂压力更低,卸压装备尺寸更小,压裂裂缝更多,因此实现了快速卸压增透及抽采效果(图 11)<sup>[109-110]</sup>。进一步研究还发现变频脉冲比单频脉冲增透效果更好<sup>[111]</sup>。另外,变排量压裂、复合压裂、重复压裂、分段压裂等多种方法也在实际应用中实现了良好增透效果<sup>[112-115]</sup>。

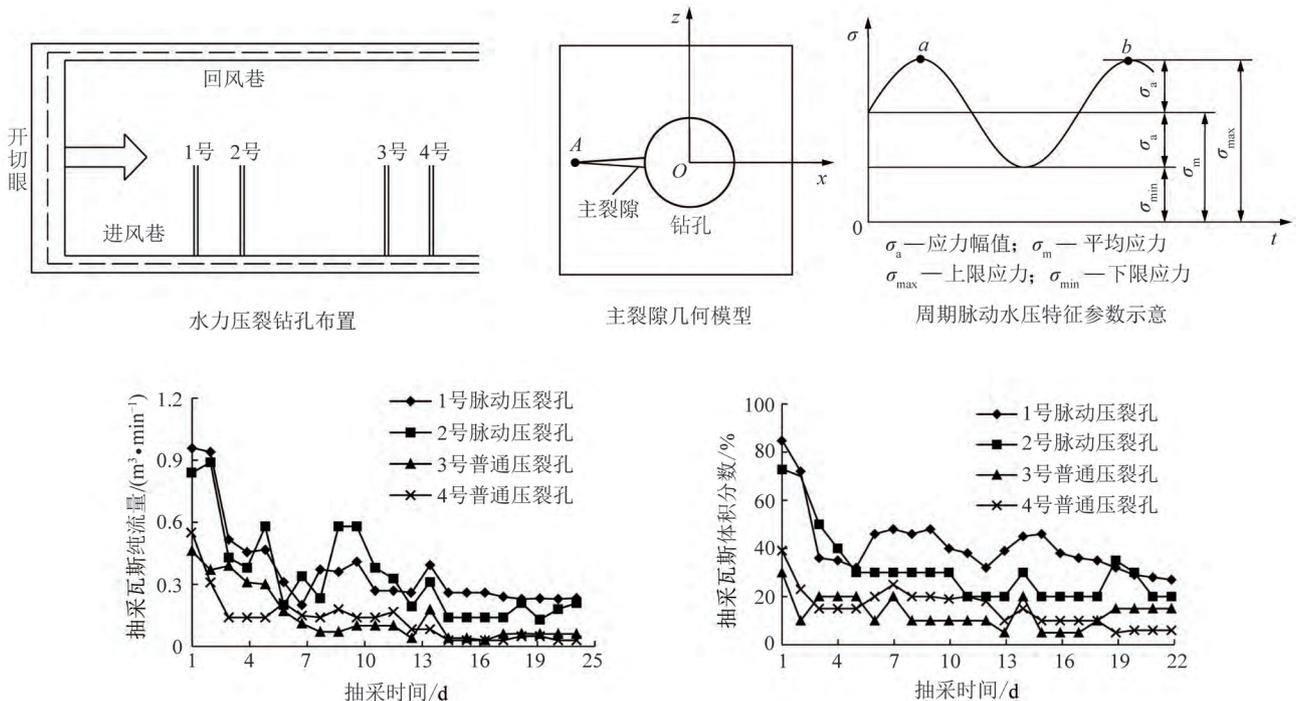
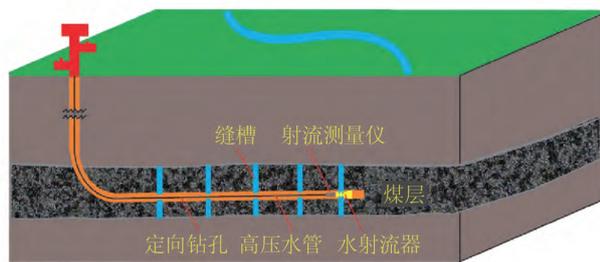


图 11 煤层高压脉动水力压裂技术原理及应用效果<sup>[109]</sup>

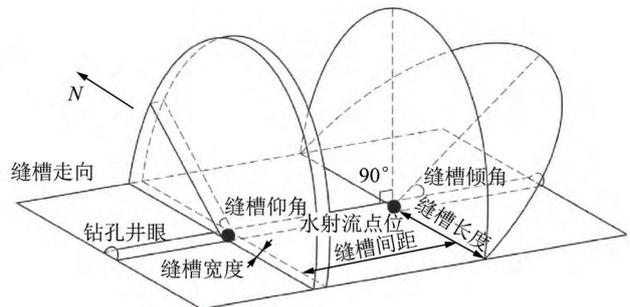
Fig.11 Theory and application of pulse hydraulic fracturing technology<sup>[109]</sup>

水力割缝技术利用高压水射流沿着钻孔径向切割煤体,形成缝槽,伴随着暴露面积的增大,不仅为煤体提供了变形空间也导致煤体发生损伤而形成裂隙,为煤层的内部卸压及瓦斯流动提供了良好的条件<sup>[116]</sup>。林柏泉等<sup>[117-119]</sup>从突出机理出发,提出了整体卸压理念,开发了高压水射流割缝网格化增透技术及“钻-割-抽”一体化装备,并在实际应用中取得了良好的煤层卸压消突效果。卢义玉等<sup>[120-122]</sup>针对近距离多突出煤层的石门揭煤防突技术难题,提出了自激振荡脉冲水射流割缝技术,从而缩短了石门揭煤时

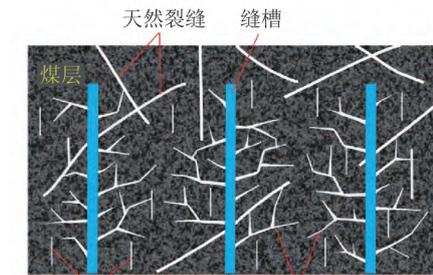
间,通过研究供水压力、流量等因素与切槽深度、宽度的关系,优化了自激振荡喷嘴结构及高压脉冲水射流的水力参数,并针对深部煤层地应力高的特点,探讨了地面定向井+水力割缝卸压方法,通过切割造缝利用地应力变化增加煤层孔隙和渗透性(图12)。陆庭侃等<sup>[123]</sup>提出了顺层钻孔割缝技术,通过分析割缝深度和割缝间距对煤体卸荷增透效果的影响,最终采用高压(40~60 MPa)水射流割缝在宁夏地区煤矿进行应用,使瓦斯抽采效率提高了3~6倍。上述研究大幅拓展了近些年水力割缝技术的应用前景。



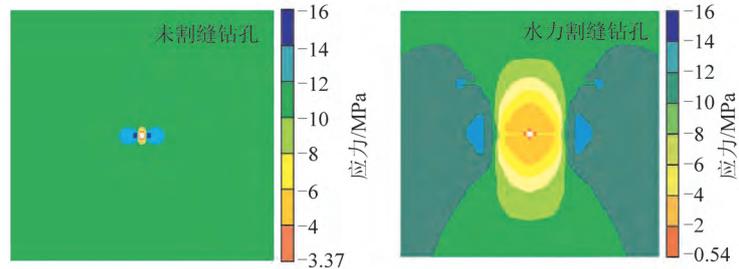
(a) 煤层气水平井+水力割缝卸压方法



(b) 水力缝槽几何参数表示



(c) 水力割缝诱导新裂缝形成



(d) 未割缝钻孔与水力割缝钻孔垂直应力云图

图12 地面定向井+水力割缝卸压开发煤层气方法<sup>[122]</sup>Fig.12 CBM exploitation method combining ground directional well with hydraulic slotting<sup>[122]</sup>

水力冲孔以煤岩柱为安全屏障向煤层施工穿层钻孔,利用钻具喷嘴喷射的高压水射流作为动力,冲击破坏周围煤体,从而在煤层中形成大直径孔洞。该技术与水力割缝技术较为类似,但也存在明显不同。水力割缝的目的是在四周煤体内产生人工裂隙,因此出煤量较少;而水力冲孔的目的在于构建大尺寸的孔洞,因此出煤量较大<sup>[124]</sup>。王兆丰等<sup>[125]</sup>在罗卜安矿的测试结果表明:水力冲孔钻孔等效直径达到0.87 m,抽采孔有效影响半径提高2~3倍,抽采体积分数提高4~5倍,抽采衰减周期提高3倍以上。王凯等<sup>[126]</sup>根据钻孔周围的瓦斯参数确定了现场钻孔的有效卸压范围,并通过RFPA<sup>2D</sup>-Flow对水力冲孔钻孔周围煤体应力及透气性变化规律进行了研究。石必明等<sup>[127]</sup>进行了水力冲孔后的瓦斯压力考察试验,将水力冲孔后的孔洞区域划分为瓦斯充分排放

区、瓦斯排放区、瓦斯压力过渡区和原始瓦斯压力区,并模拟分析了冲孔后煤层裂隙发育的过程及地应力、瓦斯压力的分布规律。刘明举等<sup>[128-129]</sup>基于高压水射流的破煤理论,结合在淮南矿区的现场实践情况,将水射流的最佳破煤压力确定为煤层坚固性系数的12~20倍。程远平等<sup>[130]</sup>提出了新型顺层钻孔水力冲孔的瓦斯抽采技术,并在阳泉矿区进行了工业试验,结果表明该技术是实现软、低渗煤层掘进工作面瓦斯高效抽采和快速掘进的有效方法。同时将水力冲孔技术进一步应用于厚复合构造煤层中,表明在软分层中进行水力冲孔同样可以对硬分层进行卸荷增透<sup>[131]</sup>。曹佐勇等<sup>[132]</sup>针对低渗高突煤层群的特殊条件,开展了水力冲孔破煤增透多场耦合效应研究,模拟分析了水力冲孔下瓦斯压力与孔径之间的时空演化规律。王恩元等<sup>[133-134]</sup>针对薛湖煤

矿煤层瓦斯含量高、吸附性强、透气性低的特点,提出了煤层顺层水力冲孔卸压增透技术并对冲孔参数进行了优化,现场实践表明,顺层水力冲孔后,卸压煤体体积增大 6.9 倍,瓦斯体积分数提高 2.2 倍,

煤层增透效果显著。同时,基于目前水力冲孔周围煤体多场分布演化规律不清的问题,研究了冲孔孔洞周围煤体应力场与瓦斯场的时空分布及演化规律,如图 13 所示。

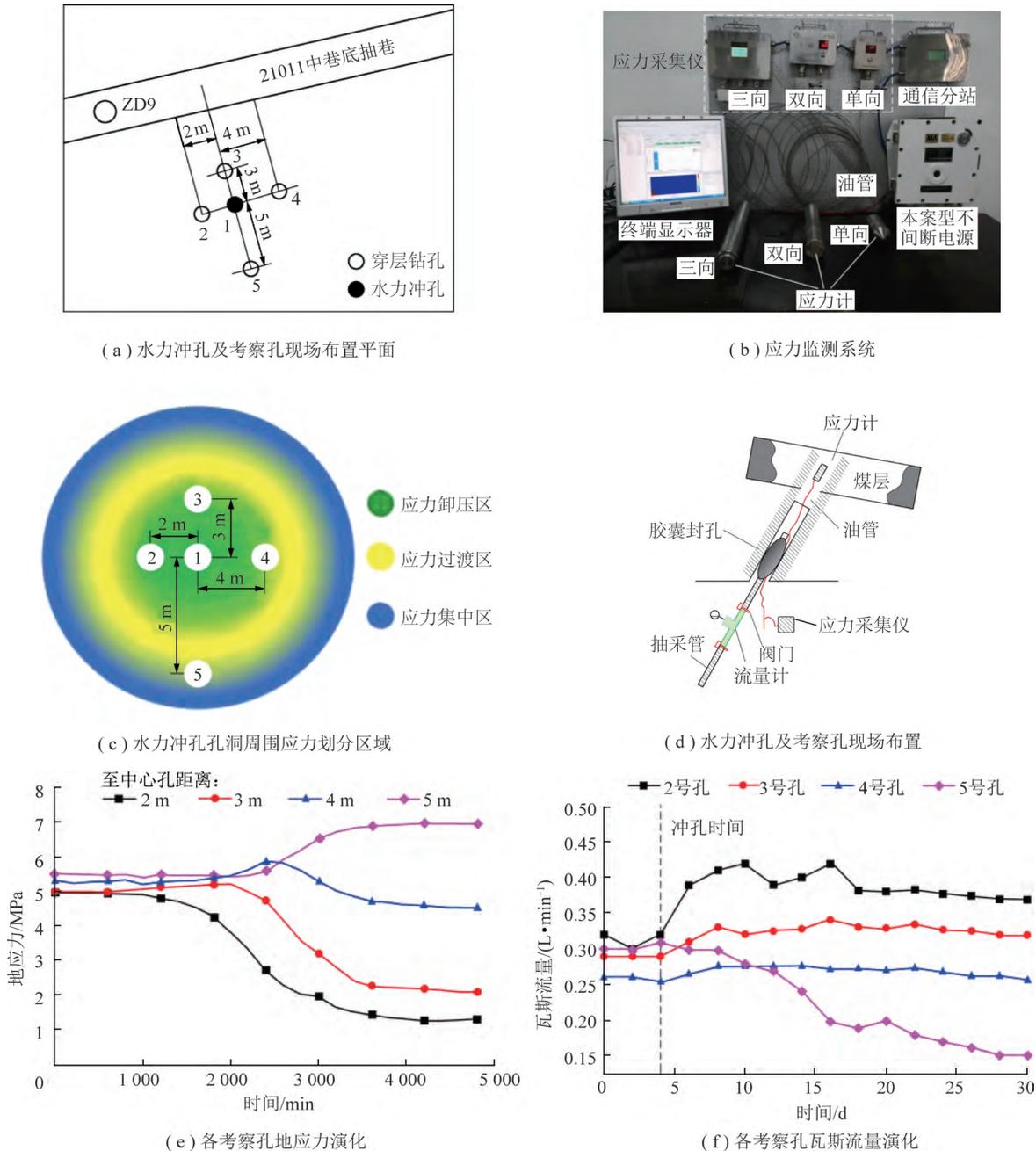


图 13 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯演化<sup>[133]</sup>

Fig.13 Evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam<sup>[133]</sup>

### 3.3.2 无水化致裂增透技术

无水化致裂增透采用非水物质作为煤层致裂增透介质,具有避免水资源污染和煤储层伤害、不会导致含黏性矿物质煤层吸水膨胀堵塞瓦斯运移通道等优点,目前主要涉及液氮致裂和二氧化碳致裂等技术手段。液氮致裂技术早在 1971 年就被提

出,并进行了现场应用<sup>[135]</sup>。近年来,衍生了一系列增产工艺及结合其他增透技术的双重增产工艺,如液氮和蒸汽致裂煤层的瓦斯抽采方法,通过增强水-冰相变冻胀作用,提高液氮增透效果<sup>[136-137]</sup>;液氮循环致裂增透方法,采用液氮循环注入方式实现持续充填不断扩展的裂隙空间,由于冰的不流动性

和水冰相变的膨胀性,与其他流体相比有着更高的致裂效率(图14),在瓦斯抽采中具有很好的应用前景<sup>[138-139]</sup>。部分学者还建立了微波、红外热辐射

等辅助液氮增透技术,不仅可加热煤体,形成温度梯度。还可以提供能量促进煤体解吸吸附瓦斯<sup>[140-141]</sup>。

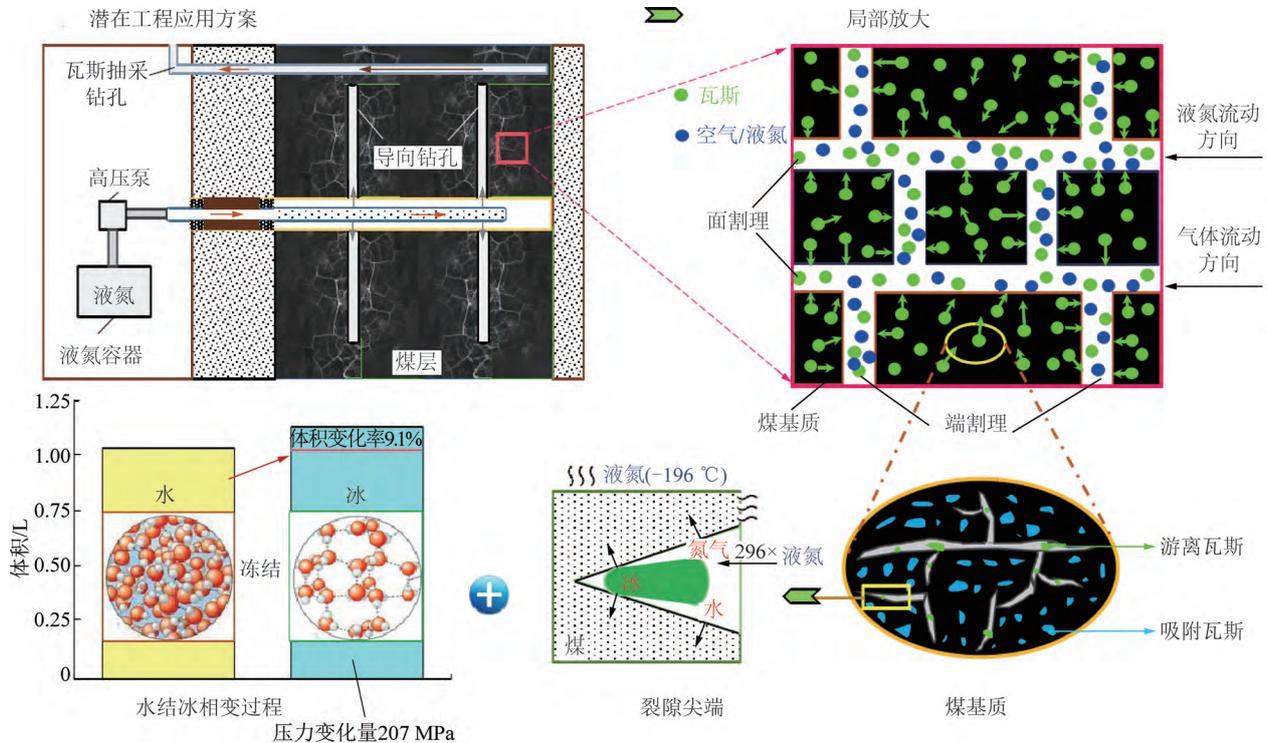


图14 液氮循环致裂煤体作用机制<sup>[139]</sup>

Fig.14 Action mechanism for cyclic fracturing coal seams by liquid nitrogen<sup>[139]</sup>

液态二氧化碳相变致裂技术不仅能对煤层结构进行改造,同时其较强的吸附性对瓦斯具有驱替作用,有效提高了瓦斯的抽采效果,起到防突目的。王兆丰等<sup>[142-143]</sup>基于现场试验研究了高瓦斯低透气性煤层中的液态CO<sub>2</sub>增透机理和消突效果以及布孔方式的影响。张东明等<sup>[144]</sup>提出了低渗煤层液态CO<sub>2</sub>相变定向射孔致裂增透方法,可有效改善煤体内部孔隙结构及渗流能力,提高瓦斯抽采纯流量9~12倍,降低抽采流量衰减系数92%。而针对单一注入形式或储液管瞬时加热爆破形式,可能引起流体随裂隙扩展运移所导致的起裂压力不足等问题。翟成团队<sup>[145]</sup>开展了液态CO<sub>2</sub>循环致裂研究,发现利用循环机制能够促进煤基质内多尺度孔裂隙结构的扩容及延伸,裂隙间的贯通率和渗透性大幅提升,基于现场工况液态CO<sub>2</sub>循环冲击致裂应用表明,液态CO<sub>2</sub>介质的循环热应力、相变高压及疲劳劣化耦合机制可实现煤层的高效致裂。

### 3.3.3 深孔预裂爆破技术

深孔预裂爆破是通过远距离爆破所发生的冲击在煤层中产生径向和切向裂隙的损伤破坏,从而造成煤层卸压增透的技术<sup>[146]</sup>。近年来,在应用过程中,

研究学者主要针对爆破孔间距、爆破致裂效果等问题进行了优化和改进。石必明等<sup>[147]</sup>分析了突出煤层实行松动爆破时的煤与瓦斯耦合裂隙衍生机理,开展了控制松动爆破的相关理论研究,分析了爆破过程中含瓦斯煤的致裂机理,确定了贯穿裂隙的生成条件以及控制孔和爆破孔间距的制定依据。刘泽功等<sup>[148-149]</sup>基于煤层爆破损伤模型,利用数值分析再现了动压冲击震裂、应力波传播、叠加和气体驱动裂纹扩展机制,通过研究控制孔与爆破孔对卸压增透效果的影响,提出了深孔预裂爆破的合理间距在5~6 m。而基于常规深孔松动爆破粉碎圈范围大但断裂带半径小的缺陷,郭德勇等<sup>[150-152]</sup>提出了深孔聚能爆破方法,对该项技术从理论机理到布置改进进行了深入研究,分析了多孔及微差聚能爆破的裂隙贯通机制及增透效果(图15),对有效致裂范围进行了探讨,按照裂隙类型及数量将炮孔周围分为裂隙密集区和主裂隙扩展区,结果表明深孔预裂爆破针对突出危险性较小的工作面以及坚固性系数较大的煤体卸压增透效果显著。

综上所述,国内学者对煤层瓦斯抽采技术、煤层卸压增透技术的系列研究促进了其在突出矿井的广

泛应用,解决了众多瓦斯灾害防治难题。但面对煤层及瓦斯赋存的显著非均匀性、深部突出灾害的复杂性等,复杂多变煤层瓦斯条件的均匀消突措施、不同卸压增透技术的有效边界确定、定向长钻孔测试反演及抽采达标的标准化、不同措施消突效果的考察判定方

法等难题,还有待深入研究解决。今后还需要结合我国深部高瓦斯矿井的开采特点,特别是智能化开采的需求,形成更具科学性及针对性的深部煤层瓦斯高效协同治理理论及技术方法,并进一步发展煤层突出危险性远程、区域性、智能防控技术与体系。

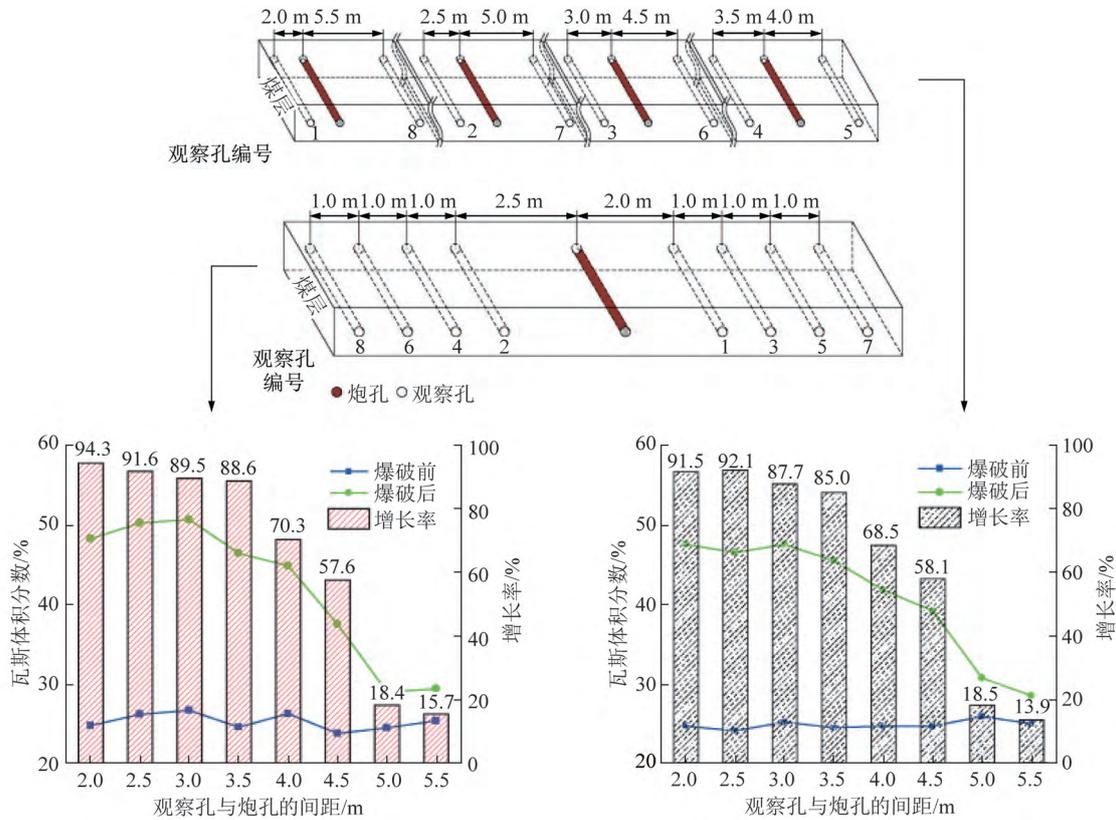


图 15 煤层深孔聚能爆破增透试验钻孔及各个观察孔的平均瓦斯体积分数对比<sup>[151]</sup>

Fig 15 Layout of boreholes for deep-hole cumulative blasting test in a coal seam and comparison of average gas volume fractions<sup>[151]</sup>

#### 4 瓦斯-突出灾害风险管控研究现状

我国针对煤矿瓦斯突出灾害风险管控的研究起步相对较晚,《防治煤与瓦斯突出细则》第四十四条已明确指出鼓励突出矿井进行防突信息系统的建立,实施完善信息化管理。然而,由于煤矿井下环境恶劣、监测信号非常复杂,导致瓦斯相关的信息数据有时是不准确的,甚至是错误的;同时瓦斯相关信息数据量是巨大的,瓦斯相关各种信息与瓦斯安全状况之间呈非线性关系,这将给煤矿瓦斯-突出灾害风险管控增加难度。采用数据挖掘、深度学习和大数据分析技术等进行煤矿瓦斯-突出灾害风险隐患智能识别,可以有效提升工作质量和效率,提高对异常信息及风险隐患识别的准确率<sup>[65]</sup>。高晓旭等采用熵权-灰色关联度评价方法评价了煤矿风险数据,借助FP-Growth算法挖掘了隐患数据在多个维度间的关联关系,优化了煤矿风险预控流程和隐患闭环管理流

程<sup>[153]</sup>。文光才等<sup>[154]</sup>研究了突出预警指标体系及技术实现流程,开发了包括预警综合数据库、地质测量管理、瓦斯地质动态分析、动态防突管理分析、采掘生产进度管理、瓦斯涌出动态分析、突出预警管理等多个子系统实现了突出危险性的智能实时预警。冀少军<sup>[155]</sup>基于多传感器数据融合技术,在具体分析煤矿瓦斯赋存状态基础上,将多传感器数据融合理论及算法与矿井瓦斯赋存状况相结合,建立了瓦斯风险的预警管控机制。张庆华等<sup>[156]</sup>为进一步提高煤矿瓦斯灾害区域的风险分级管控能力,研究了瓦斯灾害区域安全态势预警管控技术。根据我国煤矿监察行政管理模式,将预警区域划分成全国区域、省市区域、煤监局管辖区域、地级行政区域 4 个层级,并制定了不同风险程度分级。设计开发的瓦斯灾害区域安全态势预警软件系统,实现了数据的动态采集与存储、综合分析和实时预警。王恩元团队针对影响瓦斯灾害的各类风险隐患自动识别难题,以煤矿安全监测监控

系统和瓦斯抽采系统实时监测数据为基础,采用大数据分析研发了煤矿安全监测监控预警分析平台,实现了对各类风险隐患的自动识别、分级预警以及分级推送。平台已在某市139个煤矿进行了现场应用,并多次对瓦斯灾害现象有提前响应,有效避免了灾害事故发生,保障了煤矿安全生产。

目前,我国全面实施了煤矿风险分级管控和隐患排查治理工作,但在突出矿井的实施效果与实际需求还有一定差距。针对瓦斯灾害风险隐患的实时监测及精准管控研究工作还处于不断发展阶段。高瓦斯及突出矿井依据自身地质采矿特征所涉及的模糊因素相对难以确定,瓦斯突出风险隐患管理系统平台的集成化程度普遍较低,单一平台的功能仍然存在一些缺陷,风险管控效率较低,多数系统仅局限于单指标临界预警,存在信息化与专业性结合不够的问题。瓦斯突出灾害风险隐患实时全方位监测、识别与预警技术及其在安全管理、安全监管和安全监察中的作用还未充分发挥。针对实际矿井现场错综复杂的耦合影响因素、突出灾害动态演化过程及不同矿区的差异性,风险隐患的共性与差异化特征、风险隐患智能识别技术、风险隐患精准管控技术及体系等难题仍需深入研究解决。

## 5 煤与瓦斯突出防治发展趋势和研究展望

国内外学者对煤与瓦斯突出机理、危险性鉴定、预测、监测、防治和防护等理论与技术进行了大量的研究,取得了许多创新性成果,解决了大量理论和技术难题,成效较为显著。然而,时有发生突出灾害事故也表明,突出防控理论与技术仍有很大的发展需求。我国各产煤区域的地层条件、地质构造及瓦斯赋存差异很大,甚至同一区域不同矿井、不同采区的条件也差异较大;煤炭资源的赋存特性和逐渐深入的开采方式决定了向深部要资源是必然趋势,但随着开采深度和开采范围的增大,应力、温度和瓦斯也在不断增大,煤与瓦斯耦合致灾危险性也越来越高;随着矿井智能化工作的推进,对煤矿瓦斯治理和突出预防也提出了智能化的要求;随着经济社会发展和安全水平的不断提高,国家对煤矿安全生产的要求也越来越高,超前进行风险管控成为必然;随着多场耦合理论研究的进展及信息化、定向钻进等技术的发展,煤与瓦斯突出防治理论与技术突破成为可能。基于煤与瓦斯突出防治现状和需求,提出发展趋势、建议和展望。

(1)煤与瓦斯突出耦合演化机理研究。近年来煤厚变化、小构造及采动应力叠加引发突出及复合煤

岩动力灾害占较大比例,今后应致力于深部复杂多变的地质条件、地质构造、煤层物理力学性质、瓦斯、采动影响瓦斯卸压抽采措施及效果等多因素耦合、时空演化过程的研究分析,开发基于不同地质、开采、结构面及边界条件下的突出耦合演化模拟分析方法与软件系统,建立多因素耦合演化灾变模型,探讨突出启动发生的定量化机制,为提高对突出的认识和防控效果奠定理论基础。

(2)煤层突出危险性适应性鉴定技术研究。近年来低参数突出时有发生、应力主导型压出性突出越来越多已经表明,目前的煤层突出危险性鉴定技术已经不能满足实践需求,坚固性系数 $f > 0.5$ 、破坏类型 $< III, IV, V$ 的非破碎煤也能发生突出,两淮、重庆和平顶山地区部分高突煤层的瓦斯放散初速度 $\Delta P < 10$ 。煤层突出危险性鉴定指标及主要临界参数已近30 a没有变化,但期间煤炭平均采深增加了300~400 m,地应力随采深增加而增大,煤层渗透性也降低。构造区是突出的高发区,但鉴定要求所有测点要避开构造影响区。分析及实践表明,透气性系数对煤层突出危险性影响也很大。我国不同地区的煤层瓦斯赋存及突出瓦斯特征差异很大。事实上,目前深部矿井鉴定时,瓦斯压力处于临界值下附近的,鉴定机构很难判定其突出危险性。因此,我国应综合考虑煤层瓦斯赋存主要特征参数、煤体强度及破坏类型、构造及采动影响等,科学研究并制定判定标准,实施分区(不同地区)、分类(有危险、有威胁和无危险)进行突出危险性科学鉴定非常必要。

(3)煤层瓦斯参数精细化测试技术研究。我国多数煤层瓦斯赋存极不均匀,有时候差异很大,煤层突出危险性也呈现很强的分区特征。少量、散点式取样测试不能完全满足煤层瓦斯资源量精准计算、瓦斯精准抽采、科学防突和抽采达标精准评判的要求。进一步发展煤层瓦斯参数精细化探测和随钻精准测试反演技术、准确划定突出危险区域并制定相关标准是非常必要的。

(4)工作面突出危险性精准探测/预测/监测预警技术研究与应用。深部开采情况下小构造、煤厚变化及采动应力叠加区易多发突出,但缺乏相应的探测/预测/监测预警技术。智能化采掘工作面对此也有更高的要求。因此,有必要进一步研究工作面前方煤层及瓦斯赋存异常精细化、自动探测与智能识别技术,发展基于常规预测指标的趋势法预测技术,发展各类工作面突出危险性综合实时监测与智能预警技术,研究基于物联网、大数据分析和人工智能识别技术,结合煤岩层赋存、地质构造和实时监测大数据的

突出危险性智能识别与预警技术,进一步验证并制定相应的标准和规范。

(5)发展煤层突出危险性远程、区域性、智能防控技术。我国防突工作坚持“区域综合防突措施先行、局部综合防突措施补充”的原则。不同煤岩层定向钻进技术、智能钻进技术的突破和煤层瓦斯参数随钻测试反演技术的发展,为进一步发展煤层突出危险性远程区域性精准防控技术奠定了基础。需要发展煤层突出危险性远程区域防控智能设计技术、智能远程钻进技术,研究不同煤岩层条件的远程高效卸压增透技术,卸压增透效果、瓦斯抽采达标、消突效果远程监测或评判技术等突出危险性远程区域性精准防控技术。

(6)进一步发展并推广瓦斯灾害风险隐患大数据分析平台。安全大数据分析在安全管理、安全监管、安全监察和应急救援等方面能够发挥更大的作用。应基于多网融合物联网技术和大数据、云技术,完善瓦斯灾害监测预警与风险隐患管控技术,建立分别适应于安全管理、安全监管、安全监察和应急管理的平台,智能识别瓦斯灾害危险性和各类风险、隐患,进行分级预警,并针对性提出管控措施,分类、分级别推送相关技术和管理人员,提高我国瓦斯灾害风险隐患管控能力和瓦斯治理水平。

## 参考文献 (References) :

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2021(3): 8-22.  
National Bureau of Statistic. Announcement on the national economic and social development of the People's Republic of China in 2020 [J]. China Statistics, 2021(3): 8-22.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325.  
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [4] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.  
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [5] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.  
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [6] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 近 20 年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 134-141.  
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 134-141.
- [7] 张超林, 许江, 彭守建. 煤与瓦斯突出及其防控物理模拟试验研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- [8] 霍多特 B B, 宋士钊, 王佑安. 煤与瓦斯突出[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [9] 何学秋, 周世宁. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. 煤矿安全, 1991(10): 1-7.  
HE Xueqiu, ZHOU Shining. Rheological hypothesis of coal and gas outburst mechanism [J]. Safety in Coal Mines, 1991(10): 1-7.
- [10] MA Yankun, NIE Baisheng, HE Xueqiu, et al. Mechanism investigation on coal and gas outburst: An overview [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(7): 872-887.
- [11] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [12] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J]. 煤炭学报, 1995, 20(5): 492-496.  
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, PAN Yishan, et al. Solid fluid coupling instability theory of coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1995(5): 492-496.
- [13] 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理[A]. 郑哲敏文集[C]. 2004: 416-426.
- [15] 鲜学福, 辜敏, 李晓红, 等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 577-581.  
XIAN Xuefu, GU Min, LI Xiaohong, et al. Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 577-581.
- [16] 蔡成功. 煤与瓦斯突出三维模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 66-69.  
CAI Chenggong. Experimental study on 3D simulation of coal and gas outbursts [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 66-69.
- [17] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11): 2354-2362.  
XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(11): 2354-2362.
- [18] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 966-975.  
LIU Dong, XU Jiang, YIN Guangzhi, et al. Development and application of multifield coupling testing system for dynamic disaster in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 966-975.

- neering, 2013, 32(5):966-975.
- [19] 许江,周斌,彭守建,等. 基于热-流-固体参数演变的煤与瓦斯突出能量演化[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):213-222.  
XU Jiang, ZHOU Bin, PENG Shoujian, et al. Evolution of outburst energy based on development of heat-flow-solids parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):213-222.
- [20] 张超林,许江,王恩元,等. 突出煤体破碎抛出及粒度分布规律试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4):784-792.  
ZHANG Chaolin, XU Jiang, WANG Enyuan, et al. Experimental study of breaking characteristics and particles size distribution of ejected coal after outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4):784-792.
- [21] 欧建春,王恩元,马国强,等. 煤与瓦斯突出过程煤体破裂演化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6):978-983.  
OU Jianchun, WANG Enyuan, MA Guoqiang, et al. Coal rupture evolution law of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6):978-983.
- [22] 刘杰. 煤与瓦斯压出动力演化过程及机理实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.  
LIU Jie. Experiment research on evolution process and mechanism of coal and gas extrusion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [23] 郭品坤. 煤与瓦斯突出层裂发展机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.  
GUO Pinkun. Research on laminar spallation mechanism of coal and gas outburst propagation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [24] TU Qingyi, CHENG Yuanping, GUO Pinkun, et al. Experimental study of coal and gas outbursts related to gas-enriched areas[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9):3769-3781.
- [25] 聂百胜,马延崑,孟筠青,等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5):1218-1225.  
NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, et al. Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5):1218-1225.
- [26] 文光才,孙海涛,曹偈,等. 深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):223-231.  
WEN Guangcai, SUN Haitao, CAO Jie, et al. Simulation experiment system of coal and gas dynamic disaster in deep mine and its application in accident analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):223-231.
- [27] 卢义玉,彭子焯,夏彬伟,等. 深部煤岩工程多功能物理模拟实验系统——煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1):272-283.  
LU Yiyu, PENG Ziyue, XIA Binwei, et al. Coal and gas outburst multi-functional physical model testing system of deep coal petrography engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1):272-283.
- [28] 李术才,李清川,王汉鹏,等. 大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统研发[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1):121-129.  
LI Shucui, LI Qingchuan, WANG Hanpeng, et al. A large-scale three-dimensional coal and gas outburst quantitative physical modeling system[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1):121-129.
- [29] 袁亮,王伟,王汉鹏,等. 巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2):205-214.  
YUAN Liang, WANG Wei, WANG Hanpeng, et al. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2):205-214.
- [30] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5):1557-1566.  
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5):1557-1566.
- [31] 徐涛,郝天轩,唐春安,等. 含瓦斯煤岩突出过程数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1):107-110.  
XU Tao, HAO Tianxuan, TANG Chunan, et al. Numerical simulation of outburst process of gas-coal and rock[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1):107-110.
- [32] 段东,唐春安,李连崇,等. 煤和瓦斯突出过程中地应力作用机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(9):1326-1329.  
DUAN Dong, TANG Chunan, LI Lianchong, et al. Study on the mechanism of ground stress in coal-gas outburst[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(9):1326-1329.
- [33] 胡千庭,文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [34] XUE Sheng, WANG Yucang, XIE Jun, et al. A coupled approach to simulate initiation of outbursts of coal and gas-Model development[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2-3):222-230.
- [35] ZHOU Aitao, WANG Kai, FENG Tianfei, et al. Effects of fast-desorbed gas on the propagation characteristics of outburst shock waves and gas flows in underground roadways[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119:295-303.
- [36] 卢守青,张永亮,撒占友,等. 软硬组合煤体塑性破坏与突出能量失稳判据[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3):583-592.  
LU Shouqing, ZHANG Yongliang, SA Zhanyou, et al. Criterion of plastic failure and outburst energy instability of soft and hard composite coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3):583-592.
- [37] MA Yankun, HE Xueqiu, LI Zhaozhao. A unified model with solid-fluid transition for coal and gas outburst and FEM-LIP modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99:103349.
- [38] 秦恒洁,魏建平,李栋浩,等. 煤与瓦斯突出过程中地应力作用机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5):933-942.  
QIN Hengjie, WEI Jianping, LI Donghao, et al. Research on the mechanism of in-situ stress in the process of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5):933-942.
- [39] 国家安全生产监督管理总局. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2019.
- [40] 崔鸿伟. 煤巷掘进工作面突出预测指标及其临界值研究[J].

- 煤炭学报,2011,36(5):808-811.
- CUI Hongwei. Research on the prediction indexes of coal roadway heading face outburst and its critical value [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(5):808-811.
- [41] 胡千庭. 对煤巷掘进工作面放炮后瓦斯涌出指标的探讨[J]. 煤炭工程师,1996(4):25-30,49.
- HU Qianting. Discussion on gas emission index after blasting in coal roadway heading face [J]. Coal Engineer,1996(4):25-30,49.
- [42] 张庆华,文光才,邹云龙,等. 瓦斯涌出预警指标及其临界值优选方法[J]. 矿业安全与环保,2014,41(1):23-27.
- ZHANG Qinghua,WEN Guangcai,ZOU Yunlong, et al. Optimization method for early warning indicators of gas emission and its critical values [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2014,41(1):23-27.
- [43] 曹焱林. 掘进工作面煤与瓦斯突出动态预测方法与技术研究 [D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2014.
- CAO Yaolin. Study on dynamic prediction method and technology of coal and gas outburst at driving face [D]. Fuxin:Liaoning Technical University,2014.
- [44] 姜福兴,尹永明,朱权洁,等. 基于掘进面应力和瓦斯浓度动态变化的煤与瓦斯突出预警试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3581-3588.
- JIANG Fuxing,YIN Yongming,ZHU Quanjie, et al. Experimental study of precaution technology of heading face coal and gas outburst based on dynamic changes of stress and methane concentration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(S2):3581-3588.
- [45] 关维娟,张国枢,赵志根,等. 煤与瓦斯突出多指标综合辨识与实时预警研究 [J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(6):922-929.
- GUAN Weijuan,ZHANG Guoshu,ZHAO Zhigen, et al. Multi-index comprehensive identification and real-time warning of coal and gas outburst [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(6):922-929.
- [46] 陈亮. 掘进工作面煤与瓦斯突出实时监测预警技术研究 [D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
- CHEN Liang. Research on real-time monitoring & early warning technology of coal and gas outburst of the driving working face [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2016.
- [47] JR H Reginald Hardy. Acoustic Emission/Microseismic Activity: Volume 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications [M]. Taylor and Francis;CRC Press,2003.
- [48] 李楠,王恩元,GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望 [J]. 煤炭学报,2017,42(S1):83-96.
- LI Nan,WANG Enyuan,GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines:Present status and future prospects [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(S1):83-96.
- [49] 窦林名,牟宗龙,陆菜平. 采矿地球物理理论与技术 [M]. 北京:科学出版社,2014.
- [50] 朱权洁,李青松,李绍泉,等. 煤与瓦斯突出试验的微震动态响应与特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3813-3821.
- ZHU Quanjie,LI Qingsong,LI Shaoquan, et al. Microseismic dynamic response and characteristic analysis of coal and gas outburst experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S2):3813-3821.
- [51] 陆菜平,窦林名,吴兴荣,等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别 [J]. 岩土工程学报,2005,27(7):772-775.
- LU Caiping,DOU Linming,WU Xingrong, et al. Frequency spectrum analysis on microseismic monitoring and signal differentiation of rock material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(7):772-775.
- [52] 刘超. 采动煤岩瓦斯动力灾害致灾机理及微震预警方法研究 [D]. 大连:大连理工大学,2011.
- LIU Chao. Research on hazard mechanism and microseismic warning method for gas dynamic disasters of mining coal-rock [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2011.
- [53] 何学秋,王安虎,窦林名,等. 突出危险煤层微震区域动态监测技术 [J]. 煤炭学报,2018,43(11):3122-3129.
- HE Xueqiu,WANG Anhu,DOU Linming, et al. Technology of microseismic dynamic monitoring on coal and gas outburst-prone zone [J]. Journal of China Coal Society,2018,43(11):3122-3129.
- [54] 宋大钊,何学秋,窦林名,等. 煤层突出危险微震区域探测技术研究 [J]. 中国安全科学学报,2021,31(1):89-94.
- SONG Dazhao,HE Xueqiu,DOU Linming, et al. Research on MS regional detection technology for coal and gas outburst hazard [J]. China Safety Science Journal,2021,31(1):89-94.
- [55] 朱南南,张浪,舒龙勇,等. 煤与瓦斯突出的微震前兆特性试验研究与预警案例分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(6):1419-1429.
- ZHU Nannan,ZHANG Lang,SHU Longyong, et al. Experimental study on microseismic precursory characteristics of coal and gas outburst and case analysis of early-warning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(6):1419-1429.
- [56] 文光才,李建功,邹银辉,等. 矿井煤岩动力灾害声发射监测适用条件初探 [J]. 煤炭学报,2011,36(2):278-282.
- WEN Guangcai,LI Jianguo,ZOU Yinhui, et al. Preliminary study on the application conditions of acoustic emission monitoring dynamic disasters in coal and rock [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):278-282.
- [57] 邹银辉,赵旭生,刘胜. 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究 [J]. 煤炭科学技术,2005,33(6):61-65.
- ZOU Yinhui,ZHAO Xusheng,LIU Sheng. Research on sound transmitted continued prediction technology for coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology,2005,33(6):61-65.
- [58] LI Jianguo,HU Qianting,YU Minggao, et al. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst [J]. Energy Science & Engineering,2019,7(2):443-456.
- [59] FRID V,VOZOFF K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure [J]. International Journal of Coal Geology,2005,64(1):57-65.
- [60] 王恩元,何学秋,聂百胜,等. 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理 [J]. 中国矿业大学学报,2000,29(3):3-7.
- WANG Enyuan,HE Xueqiu,NIE Baisheng, et al. Principle of pre-

- dicting coal and gas outburst by electromagnetic radiation method [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(3):3-7.
- [61] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 电磁辐射技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(5):642-645.  
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, LI Zhonghui, et al. Application of electromagnetic radiation technology in monitoring and warning on coal and rock dynamic disasters[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2012, 31(5):642-645.
- [62] 何学秋, 聂百胜, 王恩元, 等. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1):56-59.  
HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1):56-59.
- [63] HE Xueqiu, NIE Baisheng, CHEN Wenxue, et al. Research progress on electromagnetic radiation in gas-containing coal and rock fracture and its applications[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4):728-735.
- [64] 王恩元, 刘晓斐, 何学秋, 等. 煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5):942-948.  
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, et al. Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5):942-948.
- [65] LI Bing, WANG Enyuan, SHANG Zheng, et al. Deep learning approach to coal and gas outburst recognition employing modified AE and EMR signal from empirical mode decomposition and time-frequency analysis[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 90:103942.
- [66] DI Yangyang, WANG Enyuan. Rock burst precursor electromagnetic radiation signal recognition method and early warning application based on recurrent neural networks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(3):1449-1461.
- [67] 曹康, 李忠辉, 余得胜, 等. 掘进工作面煤与瓦斯突出前兆特征及综合预警研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11):147-152.  
CAO Kang, LI Zhonghui, YU Desheng, et al. Study on precursor characteristics and comprehensive early warning of coal and gas outburst risk in driving face [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11):147-152.
- [68] 钮月. 含瓦斯煤损伤破坏电位响应时空演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
NIU Yue. Study on temporal and spatial evolution law of electric potential response of damage and failure of gas-bearing coal [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [69] 郭德勇, 范金志, 马世志, 等. 煤与瓦斯突出预测层次分析——模糊综合评判方法[J]. *北京科技大学学报*, 2007, 29(7):660-664.  
GUO Deyong, FAN Jinzhi, MA Shizhi, et al. Prediction method of coal and gas outburst by analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(7):660-664.
- [70] 师旭超, 韩阳. 煤与瓦斯突出预测的支持向量机(SVM)模型 [J]. *中国安全科学学报*, 2009, 19(7):26-30, 177.  
SHI Xuchao, HAN Yang. Prediction model for the outburst of coal and gas based on SVM [J]. *China Safety Science Journal*, 2009, 19(7):26-30, 177.
- [71] 梁冰, 秦冰, 孙维吉, 等. 智能加权灰靶决策模型在煤与瓦斯突出危险评价中的应用[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(9):1611-1615.  
LIANG Bing, QIN Bing, SUN Weiji, et al. The application of intelligent weighting grey target decision model in the assessment of coal-gas outburst [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9):1611-1615.
- [72] LI Zhonghui, WANG Enyuan, OU Jianchun, et al. Hazard evaluation of coal and gas outbursts in a coal-mine roadway based on logistic regression model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80:185-195.
- [73] 马行坤, 王恩元, 刘贞堂, 等. 煤层突出危险性的属性综合评价模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(3):416-420.  
MA Yankun, WANG Enyuan, LIU Zhentang, et al. Attribute synthetic evaluation model for predicting risk of coal and gas outburst [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(3):416-420.
- [74] 刘辉, 冯涛, 谢东海, 等. 煤层突出危险性预测的未确知测度方法研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(4):19-22.  
LIU Hui, FENG Tao, XIE Donghai, et al. Risk prediction method for coal seams outburst based on Uncertainty Measurement Theory [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2008, 23(4):19-22.
- [75] SHI X, SONG D, QIAN Z. Classification of coal seam outburst hazards and evaluation of the importance of influencing factors [J]. *Open Geosciences*, 2017, 9(1):295-301.
- [76] 王超, 宋大钊, 杜学胜, 等. 煤与瓦斯突出预测的距离判别分析法及应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(4):470-474.  
WANG Chao, SONG Dazhao, DONG Xuesheng, et al. Prediction of coal and gas outburst based on distance discriminant analysis method and its application [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(4):470-474.
- [77] CHEN L, WANG E, FENG J, et al. Hazard prediction of coal and gas outburst based on fisher discriminant analysis [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2017, 13(5):861-879.
- [78] HE Xueqiu, CHEN Wenxue, NIE Baisheng, et al. Classification technique for danger classes of coal and gas outburst in deep coal mines [J]. *Safety Science*, 2010, 48(2):173-178.
- [79] WU Yaqin, GAO Ronglei, YANG Jinzhen. Prediction of coal and gas outburst: A method based on the BP neural network optimized by GASA [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 133:64-72.
- [80] 袁亮, 薛生. 煤层瓦斯含量法确定保护层开采消突范围的技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9):1786-1791.  
YUAN Liang, XUE Sheng. Defining outburst-free zones in protective mining with seam gas content-method and application [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9):1786-1791.
- [81] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 保护层的分类及判定方法研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4):468-474.

- LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Classification and Judgment Method of the Protective Layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 468-474.
- [82] 王宏图, 黄光利, 袁志刚, 等. 急倾斜上保护层开采瓦斯越流固-气耦合模型及保护范围[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1377-1382, 1390.
- WANG Hongtu, HUANG Guangli, YUAN Zhigang, et al. Model of gas leak flow coupled solid and gas for exploiting of steep-inclined upper-protective layer and its protection scope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1377-1382, 1390.
- [83] 范晓刚. 急倾斜下保护层开采保护范围及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- FAN Xiaogang. Study on protection scope and effect factors in exploiting steep under-protection layer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [84] 梁冰, 石占山, 姜福利, 等. 远距离薄煤上保护层开采方案保护有效性论证[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(4): 17-22.
- LIANG Bing, SHI Zhanshan, JIANG Fuli, et al. Research on protection result of extra-thin protective coal seam mining [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4): 17-22.
- [85] 程远平, 俞启香, 袁亮, 等. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 8-12.
- CHENG Yuanping, YU Qixiang, YUAN Liang, et al. Experimental research of safe and high-efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 8-12.
- [86] 程远平, 俞启香, 周红星, 等. 煤矿瓦斯治理“先抽后采”的实践与作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 389-392, 410.
- CHENG Yuanping, YU Qixiang, ZHOU Hongxing, et al. Practice and effectiveness of “draining gas before coal mining” to prevent gas from bursting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 389-392, 410.
- [87] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8.
- YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of china coal society, 2009, 34(1): 1-8.
- [88] WANG Liang, LIU Shimin, CHENG Yuanping, et al. The effects of magma intrusion on localized stress distribution and its implications for coal mine outburst hazards [J]. Engineering Geology, 2017, 218: 12-21.
- [89] LIU Hongyong, CHENG Yuanping, CHEN Haidong, et al. Characteristics of mining gas channel expansion in the remote overlying strata and its control of gas flow[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 480-486.
- [90] JIN Kan, CHENG Yuanping, WANG Wei, et al. Evaluation of the remote lower protective seam mining for coal mine gas control: A typical case study from the Zhuxianzhuang Coal Mine, Huaibei Coalfield, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 44-55.
- [91] YANG Wei, LIN Baiquan, QU Yongan, et al. Stress evolution with time and space during mining of a coal seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(7): 1145-1152.
- [92] YANG Wei, LIN Baiquan, QU Yongan, et al. Mechanism of strata deformation under protective seam and its application for relieved methane control[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(3): 300-306.
- [93] 程远平, 董骏, 李伟, 等. 负压对瓦斯抽采的作用机制及在瓦斯资源化利用中的应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1466-1474.
- CHENG Yuanping, DONG Jun, LI Wei, et al. Effect of negative pressure on coalbed methane extraction and application in the utilization of methane resource [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1466-1474.
- [94] 易亚军, 俞启香. 突出煤层密集钻孔瓦斯预抽的数值试验[J]. 煤矿安全, 2010, 41(2): 1-4, 9.
- YI Lijun, YU Qixiang. Numerical test of gas pre-drainage with dense boreholes in outburst coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(2): 1-4, 9.
- [95] 翟成, 向贤伟, 余旭, 等. 瓦斯抽采钻孔柔性膏体封孔材料封孔性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 982-988.
- ZHAI Cheng, XIANG Xianwei, YU Xu, et al. Sealing performance of flexible gel sealing material of gas drainage borehole [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 982-988.
- [96] 周福宝, 李金海, 昃玺, 等. 煤层瓦斯抽放钻孔的二次封孔方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 764-768.
- ZHOU Fubao, LI Jinhai, ZE Xi, et al. A Study of the second hole sealing method to improve gas drainage in coal seams [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 38(6): 764-768.
- [97] 石智军, 许超, 李泉新, 等. 煤矿井下 2 570 m 顺煤层超深定向孔高效成孔关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 196-201.
- SHI Zhijun, XU Chao, LI Quanxin, et al. Key technology of high efficiency hole formation for ultra deep directional hole with long 2 570 m along seam in underground coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 196-201.
- [98] 姚宁平, 张杰, 李乔乔. 煤矿井下近水平定向钻技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 53-57.
- YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Qiaojiao. Research and application of horizontal directional drilling technology in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(10): 53-57.
- [99] 姚宁平, 张杰, 李泉新, 等. 煤矿井下梳状定向孔钻进技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 30-34.
- YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Quanxin, et al. Research and application of comb type directional borehole drilling technology in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 30-34.
- [100] 汪皓. 突出煤层定向钻进随钻瓦斯参数动态反演及消突效果评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- WANG Hao. Research on the outburst elimination effect evaluation and dynamic inversion model of gas parameters while drilling for the outburst coal seam based on directional drilling [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [101] WANG Hao, WANG Enyuan, LI Zhonghui, et al. Study and appli-

- cation of a new gas pressure inversion model in coal seam while drilling based on directional drilling technology [J]. *Fuel*, 2021, 306:121679.
- [102] 涂敏,付宝杰.低渗透性煤层卸压瓦斯抽采机理研究[J].*采矿与安全工程学报*,2009,26(4):433-436.  
TU Min,FU Baojie. Extraction mechanism of relieved gas from low permeability seam[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2009,26(4):433-436.
- [103] 袁亮,林柏泉,杨威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].*煤炭科学技术*,2015,43(1):45-49.  
YUAN Liang,LIN Baiquan,YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2015,43(1):45-49.
- [104] 黄炳香.煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[J].*煤炭学报*,2010,35(10):1765-1766.  
HUANG Bingxiang. The theory and application of hydraulic cracking weakening of coal rock body [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010,35(10):1765-1766.
- [105] 郑仰峰,翟成,倪冠华.基于表面活性剂解除水锁效应的压裂液性能研究[J].*煤矿安全*,2019,50(11):1-5.  
ZHENG Yangfeng,ZHAI Cheng,NI Guanhua. Study on performance of fracturing fluid based on surfactant releasing water locking effect [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019,50(11):1-5.
- [106] 李全贵,翟成,林柏泉,等.定向水力压裂技术研究与应用[J].*西安科技大学学报*,2011,31(6):735-739.  
LI Quanguai,ZHAI Cheng,LIN Baiquan, et al. Research and application of directional hydraulic fracturing technology [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2011, 31(6):735-739.
- [107] 徐幼平,林柏泉,翟成,等.定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J].*中国安全科学学报*,2011,21(7):104-110.  
XU Youping,LIN Baiquan,ZHAI Cheng, et al. Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application [J]. *Journal of Chinese Security Sciences*, 2011,21(7):104-110.
- [108] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].*煤炭学报*,2012,37(8):1326-1331.  
WANG Yaofeng,LI Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012,37(8):1326-1331.
- [109] 翟成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J].*煤炭学报*,2011,36(12):1996-2001.  
ZHAI Cheng,LI Xianzhong,LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011,36(12):1996-2001.
- [110] LI Quanguai,LIN Baiquan,ZHAI Cheng. The effect of pulse frequency on the fracture extension during hydraulic fracturing [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21:296-303.
- [111] LI Quanguai,LIN Baiquan,ZHAI Cheng, et al. Variable frequency of pulse hydraulic fracturing for improving permeability in coal seam [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013,23(6):847-853.
- [112] 魏斌,陈平,张冕,等.变排量压裂技术及其现场应用[J].*石油钻采工艺*,2000(6):70-71,80.  
WEI Bin,CHEN Ping,ZHANG Mian, et al. Variable displacement fracturing technology and its field application [J]. *Oil drilling process*, 2000(6):70-71,80.
- [113] GUO Tiankui,GONG Facheng,SHEN Lin, et al. Multi-fractured stimulation technique of hydraulic fracturing assisted by radial slim holes [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019,174:572-583.
- [114] 丰安祥,史文豹.穿层钻孔水力重复压裂增透技术研究及应用[J].*煤炭工程*,2019,51(9):87-90.  
FENG Anxiang,SHI Wenbao. Permeability increasing mechanism of hydraulic repeated fracturing in crossing-hole drilling [J]. *Coal Engineering*, 2019,51(9):87-90.
- [115] WANG Y,LI X,ZHANG Y X, et al. Gas shale hydraulic fracturing;a numerical investigation of the fracturing network evolution in the Silurian Longmaxi formation in the southeast of Sichuan Basin, China, using a coupled FSD approach [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(14):1093.
- [116] ZOU Quanle,LI Quanguai,LIU Ting, et al. Peak strength property of the pre-cracked similar material; Implications for the application of hydraulic slotting in ECBM [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017,37:106-115.
- [117] 林柏泉,吕有厂,李宝玉,等.高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J].*煤炭学报*,2007,32(9):959-963.  
LIN Baiquan,LÜ Youchang,LI Baoyu, et al. High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9):959-963.
- [118] 林柏泉,张其智,沈春明,等.钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J].*煤炭学报*,2012,37(9):1425-1430.  
LIN Baiquan,ZHANG Qizhi,SHEN Chunming, et al. Permeability-increasing mechanism of network slotting boreholes and application in crossing borehole gas drainage [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012,37(9):1425-1430.
- [119] 林柏泉,孟凡伟,张海宾.基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J].*煤炭学报*,2011,36(1):75-79.  
LIN Baiquan,MENG Fanwei,ZHANG Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology. [J] *Journal of China Coal Society*, 2011,36(1):75-79.
- [120] 卢义玉,黄辰,贾亚杰,等.近距离煤层群水射流割缝卸压石门快速揭煤技术分析[J].*重庆大学学报*,2014,37(3):95-100.  
LU Yiyu,HUANG Chen,JIA Yajie, et al. Analysis on rock cross-cut coal uncovering using high pressure water jet slotting in close distance seam group [J]. *Journal of Chongqing University*, 2014,37(3):95-100.
- [121] 卢义玉,张磊,葛兆龙,等.煤层割缝器用双梯度喷嘴结构设计及优化[J].*重庆大学学报*,2014,37(1):84-90.

- LU Yiyu, ZHANG Lei, GE Zhaolong, et al. Structure design and optimization of dual gradient nozzle used in coal mine[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1): 84-90.
- [122] 卢义玉, 李瑞, 鲜学福, 等. 地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 876-884.
- LU Yiyu, LI Rui, XIAN Xuefu, et al. Discussion on efficient development of deep coalbed methane by surface directional well + hydraulic slotting pressure relief method[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 876-884.
- [123] LU Tingkan, ZHAO Zhijian, HU Hefeng. Improving the gate road development rate and reducing outburst occurrences using the water-jet technique in high gas content outburst-prone soft coal seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1271-1282.
- [124] 张浩. 构造煤层掘进工作面区域性顺层水力造穴强化瓦斯抽采机制与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- ZHANG Hao. Regional in-seam borehole hydraulic cavitating in the driving face of tectonic coal seam; gas extraction enhancing mechanism and field application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [125] 王兆丰, 范迎春, 李世生. 水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 52-55.
- WANG Zhaofeng, FAN Yingchun, LI Shisheng. Application of borehole hydraulic flushing technology to soft and outburst seam with low permeability[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 52-55.
- [126] 王凯, 李波, 魏建平, 等. 水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 778-784.
- WANG Kai, LI Bo, WEI Jianping, et al. The law of change of the breathability of coal seams around hydraulic punching[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(5): 778-784.
- [127] 王新新, 石必明, 穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 467-471.
- WANG Xinxin, SHI Biming, MU Chaomin. Study on formation mechanism of gas emission partition in hydraulic flushing coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 467-471.
- [128] 刘明举, 任培良, 刘彦伟, 等. 水力冲孔防突措施的破煤理论分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 142-145.
- LIU Mingju, REN Peiliang, LIU Yanwei, et al. Breaking coal theoretical analysis of outburst prevention by hydraulic flushing[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 28(2): 142-145.
- [129] 刘明举, 赵文武, 刘彦伟, 等. 水力冲孔快速消突技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 58-61.
- LIU Mingju, ZHAO Wenwu, LIU Yanwei, et al. Research and application of hydraulic flushing borehole to quickly eliminate outburst[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 58-61.
- [130] ZHANG Hao, CHENG Yuanping, LIU Qingquan, et al. A novel in-seam borehole hydraulic flushing gas extraction technology in the heading face: Enhanced permeability mechanism, gas flow characteristics, and application [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 46: 498-514.
- [131] ZHANG Rong, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Enhancement of gas drainage efficiency in a special thick coal seam through hydraulic flushing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104085.
- [132] 曹佐勇, 王恩元, 何学秋, 等. 近距离突出煤层群水力冲孔卸压瓦斯抽采及效果评价研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 634-642.
- CAO Zuoyong, WANG Enyuan, HE Xueqiu, et al. Effect evaluation of pressure relief and gas drainage of hydraulic punching in short-distance coal seam group with the risk of outburst[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(3): 634-642.
- [133] 王恩元, 汪皓, 刘晓斐, 等. 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 39-45.
- WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Spatio-temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 39-45.
- [134] 王聪. 薛湖煤矿低渗透突出煤层顺层水力线造穴卸压增透技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- WANG Cong. Study on pressure relief and permeability enhancement technology of hydraulic linecaving in low permeability outburst coal seam of xuehu coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [135] 田苗苗, 张磊, 薛俊华, 等. 液氮致裂煤体技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021; 1-9. [2022-01-18]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020-0974.
- TIAN Miaomiao, ZHANG Lei, XUE Junhua, et al. Study and prospect of liquid nitrogen fracturing coal technology [J]. Coal Science and Technology, 2021; 1-9. [2022-01-18]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020-0974.
- [136] 张路路, 任永婕, 丁智奔, 等. 向煤层循环注入热水和液氮的增透系统[P]. 中国专利: CN207073410U, 2018-03-06.
- [137] 柳先锋, 王泽鹏, 聂百胜. 采用液氮和蒸汽致裂煤层的瓦斯抽采方法及抽采系统[P]. 中国专利: CN109854210A, 2019-06-07.
- [138] 翟成, 秦雷, 徐吉钊. 一种基于水平定向钻孔液氮循环冻融增透抽采瓦斯方法[P]. 中国专利: CN105134284A, 2015-12-09.
- [139] 秦雷. 液氮循环致裂煤体孔隙结构演化特征及增透机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- QIN Lei. Pore evolution after fracturing with cyclic liquid nitrogen and the mechanism of permeability enhancing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [140] 林柏泉, 李贺, 洪溢都. 一种微波液氮协同冻融煤层增透方法[P]. 中国专利: CN106285605B, 2019-06-04.
- [141] 张永利, 尚文龙, 曾鑫. 一种液氮结合远红外热辐射冻融循环的实验装置[P]. 中国专利: CN208283195U, 2018-12-25.
- [142] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 75-79.
- ZHAO Long, WANG Zhaofeng, SUN Juzheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO<sub>2</sub> phase transi-

- tion fracturing to high gassy and low permeability seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79.
- [143] 王兆丰, 李豪君, 陈喜恩, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 11-16.  
WANG Zhaofeng, LI Haojun, CHEN Xien, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam [J]. China Safety Production Science and Technology, 2015, 11(9): 11-16.
- [144] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变定向射孔致裂增透技术及应用 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1938-1950.  
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO<sub>2</sub> phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1938-1950.
- [145] 徐吉钊. 液态 CO<sub>2</sub> 循环冲击致裂煤体孔隙结构及损伤力学特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
XU Jizhao. Study of pore evolution and damage mechanical characteristics of coals under the effect of liquid CO<sub>2</sub> cyclic shock fracturing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [146] 曹树刚, 李勇, 刘延保, 等. 深孔控制预裂爆破对煤体微观结构的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 673-678.  
CAO Shugang, LI Yong, LIU Yanbao, et al. Influence of deep-hole controlled pre-cracking explosion on microstructure of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 673-678.
- [147] 石必明, 俞启香. 低透气性煤层深孔预裂控制松动爆破防突作用分析 [J]. 建井技术, 2002(5): 27-30.  
SHI Biming, YU Qixiang. Analysis of the anti-burst action of loose blasting control of deep hole in low breathable coal seams [J]. Well-building Technology, 2002(5): 27-30.
- [148] 刘泽功, 蔡峰, 肖应祺. 煤层深孔预裂爆破卸压增透效果数值模拟分析 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2008, 28(4): 16-20.  
LIU Zegong, CAI Feng, XIAO Yingqi. Numerical simulation and analysis of effect of stress release and permeability improvement in coal seams by deep-hole presplitting explosion [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 28(4): 16-20.
- [149] 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 499-503.  
CAI Feng, LIU Zegong, ZHANG Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 499-503.
- [150] 郭德勇, 裴海波, 宋建成, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透机理研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1381-1385.  
GUO Deyong, PEI Haibo, SONG Jiancheng, et al. Study on splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1381-1385.
- [151] 郭德勇, 赵杰超, 吕鹏飞, 等. 煤层深孔聚能爆破有效致裂范围探讨 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(5): 582-590.  
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, LÜ Pengfei, et al. Effective fracture zone under deep-hole cumulative blasting in coal seam [J]. Journal of Engineering Science, 2019, 41(5): 582-590.
- [152] 郭德勇, 张超, 朱同功, 等. 深孔聚能爆破起爆位置对煤层致裂增透的影响 [J]. 煤炭学报, 2020: 1-13. [2022-01-18]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1078.  
GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong, et al. Effect of detonating position of deep-hole cumulative blasting on coal seam cracking and permeability enhancement [J]. Journal of China Coal Society, 2020: 1-13. [2022-01-18]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1078.
- [153] 高晓旭, 申阳阳, 门鸿. 煤矿双重预防机制信息系统研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 156-161.  
GAO Xiaoxu, SHEN Yangyang, MEN Hong. Research and application of coal mine double preventive mechanism information system [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 156-161.
- [154] 文光才, 宁小亮, 赵旭生. 矿井煤与瓦斯突出预警技术及其应用 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 55-58.  
WEN Guangcai, NING Xiaoliang, ZHAO Xusheng. Coal and gas outburst early warning technology and application in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 55-58.
- [155] 冀少军. 多传感器数据融合技术在煤矿瓦斯预警中的应用研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.  
JI Shaojun. Research on application of multi-sensor data fusion in the coal mine gas early-warning [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016.
- [156] 张庆华, 宁小亮, 宋志强, 等. 瓦斯灾害区域安全态势预警技术 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(7): 42-48.  
ZHANG Qinghua, NING Xiaoliang, SONG Zhiqiang, et al. Early warning technology of regional security situation of gas disaster [J]. Industrial and Mining Automation, 2020, 46(7): 42-48.