



煤炭学报

Journal of China Coal Society

ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目: 我国煤矿冲击地压防治现状与难题
作者: 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 巩思园, 贺虎, 何江, 蔡武, 李许伟
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1873
网络首发日期: 2021-12-28
引用格式: 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 巩思园, 贺虎, 何江, 蔡武, 李许伟. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J/OL]. 煤炭学报.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1873>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1873

我国煤矿冲击地压防治现状与难题

窦林名^{1,2,4}, 田鑫元², 曹安业^{1,2,4}, 巩思园^{1,2,4}, 贺虎³, 何江^{1,2}, 蔡武^{1,2}, 李许伟^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要：随着煤矿开采强度和深度的增加，冲击地压矿井数量和冲击危险程度显著增加，政府关注度不断上升，我国冲击地压防治研究取得了一系列重要进展，冲击地压矿井防治能力取得长足的进步，多数冲击地压矿井达到事故可控。基于冲击地压重要研究成果，全面地阐述了冲击地压领域在法规建设、发生机理、监测预警等方面研究进展与发展趋势，同时指明了未来冲击地压防治面临的难题。法规与标准方面，形成了《煤矿安全规程》和《防治煤矿冲击地压细则》为核心的法规体系，法规建设的具体化、标准化不断完善；冲击地压发生机理方面，形成了“三因素”理论、动静载叠加诱冲理论等多种机理共存的局面，从多角度叙述了冲击地压致灾过程，呈现多元化发展；冲击地压预测预报方面，形成了综合多因素、多系统、多前兆信息的复合预测预警体系，预警效率不断上升；冲击地压巷道支护方面，形成了三级支护理论体系，增强了巷道稳定性和抗动载扰动的能力；冲击地压限员管理方面，实现了智能化限员；冲击地压防治层面，形成了区域防范、局部解危相结合的冲击地压防治技术体系，灾害防控能力不断提升。当前我国建立了较为完善的冲击地压防治理论与技术体系，防治效果显著，但由于冲击地压的震动性、瞬时性、复杂性以及难预知性，还存在冲击地压与矿震关系不清、冲击危险预测方法难以定量、空间监测精度不足等问题亟待解决。

关键词：冲击地压；发生机理；预测预警；灾源防治；深部围岩控制；智能管理

中图分类号：TD324

文献标志码：A

Present Situation and Problems of Coal Mine Rock Burst Prevention and Control in China
Dou Linming^{1,2,4}, Tian Xinyuan², Cao Anye^{1,2,4}, Gong Siyuan^{1,2,4}, He Hu³, He Jiang^{1,2}, Cai Wu^{1,2}, Li Xuwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;)

Abstract: With the increase of mining depth and intensity of coal mining, the number of rock burst mines and risk degree of rock burst increase significantly. The government pays more attention to rock burst hazard, a series of important progress has been made in the field of prevention and control of rock burst in China, accidents can be controlled in most of the rock burst mines. Based on the valuable research achievements of rock burst, this paper presents a comprehensive overview of the research progress and development trends of rock burst in terms of regulation construction, occurrence mechanism, monitoring and early warning of rock burst, and identifies the challenges of rock burst prevention and control in the future. In terms of regulations and standards, a system of regulations centered on Coal Mine Safety Regulations and Rules for Prevention and Control of Rock Bursts in Coal Mines has been formed. The construction of regulations has been continuously improved towards concretization and standardization; In terms of occurrence mechanism of rock burst, multiple mechanisms such as "three-factor" theory, dynamic and static combined load inducing rock burst theory coexist, which describe the disaster-causing process of rock burst from multiple perspectives, showing diversified development trend; In terms of prediction and forecast of rock burst, a composite prediction and warning system which integrates multiple factors, multiple systems and multiple precursor indexes has been formed, the warning efficiency has been rising continuously; In terms of roadway support of rock burst mines, the 'three-level supporting theory system' has been formed, which enhances the roadway stability and the ability of resistance to dynamic load disturbance; In terms of the manage-

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51874292, 51934007），国家重点研发计划（2016YFC0801403）

作者简介：窦林名(1963—)，男，青海平安人，教授，博士。Tel: 0516-83995904, E-mail: lmdou@126.com

通讯作者：田鑫元(1994—)，男，山西忻州人，博士研究生。E-mail: tianxinyuan1994@163.com

ment of personnel limit in rock burst mines, intelligent personnel limit has been realized; In terms of rock burst prevention and control, a technical system combining regional prevention and local disaster control has been formed, the disaster prevention and control capacity has been continuously improved. At present, China has established a relatively thorough theory and technology system of rock burst prevention and control, remarkable prevention effect of rock burst has been achieved. However, due to the vibration, instantaneousness, complexity and unpredictability of rock burst, there are still some problems such as unclear relationship between mine tremors and rock burst, uncertainty in rock burst risk prediction methods, and low accuracy of monitoring methods remains to be solved.

Key words: Rock burst; Occurrence mechanism; Prediction and early warning; Disaster prevention and control; Deep surrounding rock control; Intelligent management

冲击地压（又称“冲击矿压”）是采掘工作面煤岩体积聚的弹性变形能突然释放，产生强烈震动，造成煤岩体剧烈破坏的动力灾害^[1,2]。据国家矿山安全监察局调查，我国第一起冲击地压事故发生在辽宁省胜利煤矿，随后全国各地矿区（井）陆续发生冲击地压灾害。据相关研究记载^[3]，1985年我国仅有 32 个矿井发生冲击地压，2019 年，冲击地压矿井数量达到了 200 余处。随着政府化解煤炭过剩产能工作的推进，冲击地压矿井数量降至 144 处，如图 1 所示。近些年来，多次发生冲击地压重特大事故，严重威胁煤矿安全高效生产，并造成严重的人员伤亡和经济损失^[3]，如 2018 年 10 月 20 日，山东龙郛煤矿发生重大冲击地压事故，造成 21 人死亡；2019 年 06 月 09 日，吉林省龙家堡煤矿发生较大冲击地压事故，造成 9 人死亡；2019 年 08 月 02 日，河北唐山煤矿发生较大冲击地压事故，造成 7 人死亡；2020 年 02 月 22 日，山东新巨龙煤矿发生冲击地压事故，造成 4 人死亡；2021 年 10 月 11 日，陕西胡家河煤矿发生较大冲击事故，造成 4 人死亡。重大冲击地压灾害频发引起了国家领导人高度重视，多次批示要深入研究并切实解决冲击地压的源头治理问题；国务院安全生产委员会下发了《关于进一步贯彻落实习近平总书记重要指示精神坚决防范遏制煤矿冲击地压事故的通知》^[4]，指出要强化煤（岩）“零冲击”（无人员伤亡、无巷道破坏、无设备损坏）目标管理，严格管控冲击地压现象和事件，坚决遏制事故发生。冲击地压灾害防控成为社会关注焦点，也成为煤矿保障安全生产的关键性工作。

我国经过长期的研究基本形成了冲击地压灾害发生机理理论、监测预警与防治成套技术体系(图2),分别从理论基础、技术支持以及装备等方面对冲击地压进行有效的防控,大大降低冲击危险性,冲击地压事故单次伤亡人数呈下降趋势。

笔者将总结我国冲击地压防治研究历程,详细阐述被广泛认同或推广的冲击地压发生机理、监测预警技术、防治方法、冲击危险巷道支护技术等理论与技术,并根据当前冲击地压防治的需要,指明了矿震与冲击地压关系不清、冲击危险预测方法不定量、监测方法精度低等关键科学问题亟待解决。

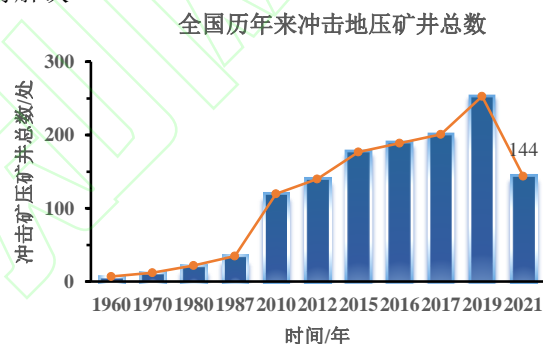


图 1 我国历年冲击地压矿井数

Fig. 1 Number of rock burst mines in China over the years

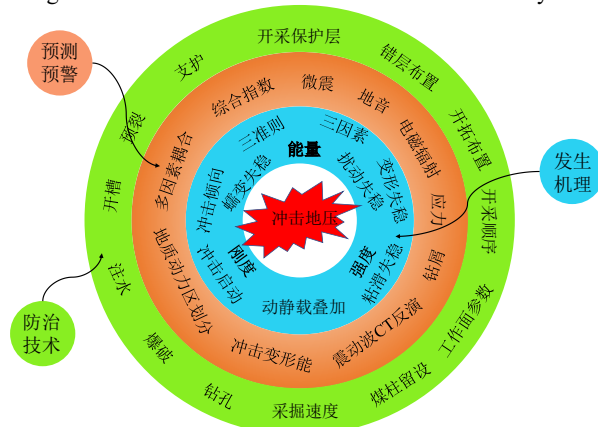


图2 冲击地压机理、监测预警与防治技术

Fig. 2 Rock burst mechanism, monitoring, early warning and prevention technology

1 冲击地压法律法规建设

1.1 法律法规初始构建阶段

随着我国采煤设备不断升级, 开采强度逐渐增大, 开采深度逐步向深部发展, 冲击地压矿井和冲击地压灾害数量上升。为了保证冲击地压矿

井安全开采,原煤炭工业部于1987年发布了我国第一部与冲击地压相关的法规《冲击地压煤层安全开采暂行规定》^[5]和《冲击地压预测和防治试行规范》^[6],填补了冲击地压防治法条的空白。2000年,原国家煤炭工业局组织制定《煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法》(MT/T 174—2000)^[7]和《岩石冲击倾向性分类及指数的测定方法》(MT/T 866—2000)^[8],使我国在冲击地压倾向性的认定、鉴定方面有了行业标准,但是关于冲击地压的法规和标准体系还很不健全。随着我国煤矿安全监察监管体制的改变和对煤矿冲击地压的重视,在国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局的主持下,2004年新修订的《煤矿安全规程》^[9]中第一章增设“冲击地压煤层开采”专节(第六节),对冲击地压煤层开采过程中的冲击倾向性鉴定、冲击危险性预测和防治作了规定,对指导煤矿冲击地压的防治起到了积极的作用。

1.2 法律法规逐渐健全阶段

2013年10月,国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局对《煤矿安全规程》进行了全面修订,将冲击地压防治列为专章(第三编第五章),具体包括一般规定、冲击危险性预测、区域与局部防冲措施、冲击地压安全防护等部分,全面系统地对冲击地压防治中相关技术管理作了明确说明,并于2016年10月1日正式颁布实施^[10]。

2017年2月,国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局组织有关单位和相关专家开展《防治煤矿冲击地压细则》^[11]的起草工作,并于2018年8月1日正式实施,同时废止《冲击地压煤层安全开采暂行规定》和《冲击地压预测和防治试行规范》。细则对《煤矿安全规程》第三编第五章中的全部条款作了进一步的细化,从而形成了包括总则,一般规定,冲击危险性预测、监测、效果检验,区域与局部防冲措施,冲击地压安全防护措施和附则在内共87条系统的冲击地压防治规范。

2018年龙郓煤矿“10·20”冲击地压事故后,国家陆续下发《关于加强煤矿冲击地压源头治理的通知》(发改能源〔2019〕764号)^[12]和《关于加强煤矿冲击地压防治工作的通知》(煤安监技装〔2019〕21号)^[13]文件,进一步加强了煤矿冲击地压防治的要求。

2020年3月国家煤矿安全监察局发布了《煤矿冲击地压防治监管监察指导手册(试行)》^[14],对冲击地压防治监察工作进行了详细说明。

2019年7月,山东省政府发布了全国首部煤矿冲击地压防治省级规章《山东省煤矿冲击地压防治办法》(省人民政府令第325号)^[15],并于9月1日起施行。2021年4月,陕西省应急管理厅发布了《陕西省煤矿冲击地压防治规定(试行)》(陕应急〔2021〕171号)^[16]。两部地方性规章依据本省的冲击地压现状,进一步细化、标准化、制度化了冲击地压防治的要求。

2010—2021年,国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会陆续发布了中华人民共和国国家标准《冲击地压测定、监测与防治方法》^[17],共14个部分,包括顶板岩层冲击倾向性分类及指数的测定方法、煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法、煤岩组合试件冲击倾向性分类及指数的测定方法、微震监测方法、地音监测方法、钻屑监测方法、采动应力监测方法、电磁辐射监测方法、煤层注水防治方法、煤层钻孔卸压防治方法、煤层卸压爆破防治方法、开采保护层防治方法、顶板深孔爆破防治方法、顶板定向水压致裂防治方法等,建立了一整套完善的冲击地压防治标准。

我国冲击地压防治的法律法规建设起步较晚,但经过近10余年发展和完善,已基本构建了冲击地压防治相关法律法规体系,冲击地压防治的监察机制和法律法规日趋完善。

2 冲击地压机理研究现状

冲击地压发生机理,是冲击地压发生的原因、条件、机制和物理过程^[2],是通过对冲击地压的不断深入研究和认识,简明深刻的概括和阐述其发生的内、外在原因。自从冲击地压现象出现,就开始了对冲击地压机理的探索和研究。由于冲击地压的复杂性、影响因素和现象多样性、产生突发性、过程短暂性、对孕育条件的破坏性,虽然诸多学者和科技工作者做出了艰辛努力,但至今学术界和工程界对冲击地压机理仍存在较大争议,未形成统一而普遍认可的理论和观点。

2.1 早期冲击地压理论

早期的冲击地压发生机理包括强度理论,刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论、“三准则”理论、变形失稳理论等^[1,2],其中最经典的是强度理论^[18]、刚度理论^[19-21]、能量理论^[22-24]和冲击倾向性理论^[25-27],是早期德国、波兰、苏联等国学者提出的。20世纪80年代,李玉生提出我国最早的冲击地压发生机理:三准则机理^[28],认为强

度准则是煤体的破坏准则，能量准则和冲击倾向性是突然破坏准则，且三个准则同时满足，是发生冲击地压的充分必要条件。变形失稳理论^[29]认为冲击地压是煤岩体内高应力区的介质局部形成应变软化与尚未形成应变软化的介质处于非稳定状态时，在外界扰动下的动力失稳过程。

早期的机理研究从煤岩体能量、应力、系统稳定性等角度阐述了冲击地压发生的过程，一定程度指导了冲击地压防治工作，但仍存在各自的局限性，难以解释一些实际现象。如煤炭开采过程中应力集中区域是常见的，都满足了强度条件，但未都发生冲击地压；同一层煤冲击倾向性都相同的，只有少数区域发生冲击地压。

2.2 当今冲击地压理论

冲击地压机理经过二十余年的大量研究，当前国内能够较好的解释冲击地压孕育致灾全过程的理论主要包含三因素理论、扰动失稳理论、动静载叠加诱冲理论、冲击启动理论、蠕变失稳理论等。

冲击地压“三因素”理论^[30-32]认为煤岩地层受力的瞬间粘滑过程释放大动能导致冲击地压发生，其主要因素分为内在（冲击倾向性）、力源（高静载与强扰动）、结构因素（突变滑移结构面）。

冲击启动理论^[33]从能量角度分析认为冲击地压历经冲击启动、冲击能量传递、冲击地压显现3个阶段，且启动准则为 $E_f + E_d - E_c > 0$ 。

冲击扰动响应失稳理论^[34]，认为冲击地压是煤岩体变形系统的控制量、扰动量和响应量共同作用的结果，即冲击地压是变形系统在扰动下响应趋于无限大而发生的失稳，当非稳定的煤岩体系统受扰动后必然失稳。

蠕变失稳理论^[35]认为强度腐蚀和应力解除导致煤岩发生不稳定蠕变，从而产生冲击破坏。

动静载叠加诱冲理论^[36-38]认为煤岩体中静载与矿震形成动载叠加之和大于诱发煤岩体冲击破坏的最小载荷时，诱发冲击地压灾害。冲击的发生要满足应力条件和能量条件。同时依据应变率对煤矿载荷状态进行了界定，将冲击地压划分为高静载型与强动载型两种类型，随后结合煤矿实际条件进一步将冲击地压灾害分为四种基本类型：顶板型、断层型、褶皱型和煤柱型，并针对四种类型的冲击地压开展了一系列基础研究。

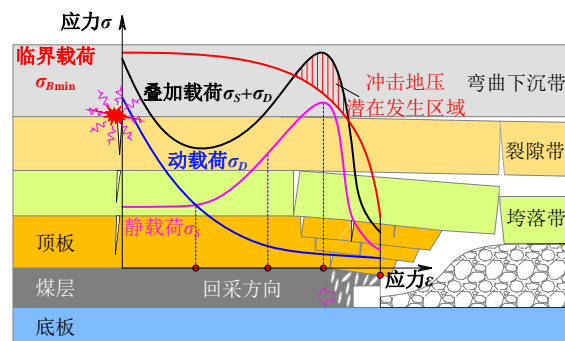


图3 动静载叠加诱冲机理

Fig. 3 Mechanism of dynamic and static combined load inducing rock burst

除上述发生机理外，其他学者运用分形、损伤和突变等理论进行了相关研究，提出一些解释冲击发生的新方法。如煤岩体扩容突变理论^[39]认为冲击地压孕育过程包括该理论将冲击地压的孕育过程分为三个阶段：弹性变形阶段、非线性变形阶段、扩容突变阶段。姜耀东等^[40]阐述冲击地压孕育过程中“煤体-围岩”系统内能量集聚及耗散特征，根据非平衡态热力学和耗散结构理论，认为冲击地压是煤岩体系统在变形过程中的一个稳定态积蓄能量向非稳定态释放能量转化的非线性动力学过程。

综上所述，可以看出这些冲击地压发生机理是相互关联的，都是对能量理论、强度理论、刚度理论、冲击倾向性理论的深度融合与发展。“三因素”理论是冲击倾向理论和能量理论的综合，从三个主要因素解释冲击发生机理；冲击启动理论是能量理论的细化，解释冲击地压发生过程和能量条件，扰动失稳理论对刚度理论和能量理论的发展，确立了扰动响应能量准则和极值点准则，解释了压缩失稳、拉伸失稳、剪切失稳现象。动静载叠加诱冲机理是能量理论、刚度理论、强度理论、冲击倾向性的融合和发展，细化了冲击地压的类型。随着冲击地压研究的不断深入，冲击地压发生过程逐渐清晰，发生条件或准则不断细化与明确。目前我国冲击地压发生机理基本清晰、发生过程基本明确。

3 冲击地压预测预警研究现状

冲击地压的预测预警是冲击地压防治的基础，是指导各类防治措施的实施准则。经过国内诸多学者的共同努力，初步建立了区域与局部相结合的冲击地压预测、监测预警技术体系，实现了冲击危险分区分级预测预警（图4）。

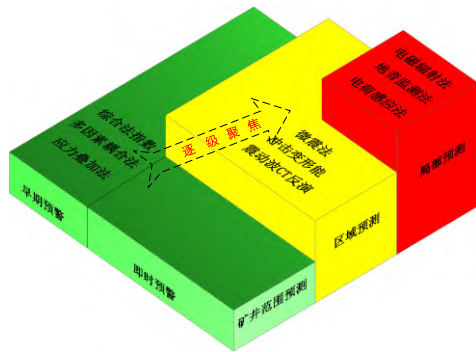


图4 冲击危险分区分级预测预警

Fig. 4 Classified Prediction and Warning of Rock Burst Hazard Zones

3.1 冲击危险静态预测评价方法

在冲击地压煤层或工作面开采前，利用地质、开采、巷道设计、煤岩体性质等固定因素的静态预测评价方法辨识冲击危险区域。其中具有代表性的方法包括基于各种采矿与地质因素的综合指数法^[3,41]、以采动应力和煤层冲击倾向性为主要指标的可能性指数诊断法^[42]、以断裂构造形式与煤岩特性等为主要判据的地质动力区划法^[43]、基于数量化理论的评价方法^[44,45]、多种影响因素区域叠加的多因素耦合法^[46]。其中综合指数法是《防治煤矿冲击地压细则》中明确优先采用的预测方法。

冲击危险预测方法广泛应用于矿井设计和开拓准备阶段的冲击危险早期评估，对冲击地压危险区域的预卸压和安全采掘起到了积极指导作用，但均是非量化冲击危险评价方法，评价结果受人为因素影响大，而且未考虑时间效应不适用于生产阶段的冲击危险实时动态预警。

3.2 冲击危险动态预警方法

随着冲击地压防治问题突显，受到国家和煤炭企业的关注，冲击危险监测方法从最初的矿压监测和钻屑监测，进一步发展到采动应力监测、微震监测、地音监测、电磁辐射监测等应力场、震动场监测，实现了冲击危险多维空间、多源信息的系统化综合监测。

井下煤炭开采采场内冲击危险监测系统布置如图5所示，冲击地压动态监测预警方法按空间范围可分为点监测、局部监测和区域监测三个层级。

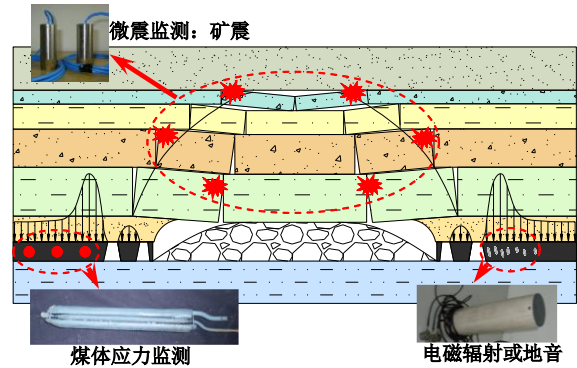


图5 采场区域冲击地压监测系统布置

Fig. 5 Layout of rock burst monitoring system in stope area

点监测中代表性的方法有钻屑法^[3,47,48]和应力监测法^[49-51]，两种方法能够直观反映煤岩体的应力水平，区域静载应力集中区，但其只能在巷道附近进行监测，空间预警范围有限，且在监测位置选择上依赖于对冲击危险区域的理论和经验预判。

局部监测中代表性的方法有电磁辐射法^[41,52,53]、地音监测法^[54,55]和电荷感应法^[56]等。这些方法可持续监测煤岩体内微小破裂产生的声-电信息，探测范围为工作面尺度，且只能绘制局部区域内统计参数的变化趋势，也存在监测范围小，无法整体上、高分辨率预警区域内冲击危险分布的弊端。在实际应用的过程中易受到采掘活动或电气设备干扰，预警临界值难以确定且不能动态更新，预警效果不佳。

区域监测主要采用覆盖整个矿井采掘区域的微震监测法^[57-60]。微震监测系统通过安装在巷道的检波器连续分区域记录震动信号。微震监测系统的检波器可有效监测 500m 范围内频率小于 100Hz、能量大于 10²J 的震动信号，监测范围广，可实时给出矿震的多种信息，而且其安装工艺简单，具有不损伤煤岩体、劳动强度小等特点。因此，微震法是用于大范围判识冲击危险分布的最可靠方法^[61]，广泛应用于矿井冲击地压的监测预警。

在微震时序预警方面，国内外学者提出了许多冲击地压前兆指标^[62-65]，如矿震频次、矿震能量、*b* 值、缺震 *b_L*、断层总面积、震源集中度等，并开展了现场应用，取得了一定的预警效果。但冲击地压具有非线性、模糊性以及不确定性，单一指标难以准确识别冲击破坏前兆信息，因此提出了多前兆指标联合辨识方法^[66-68]，如支持向量机 (SVM) ^[69]、模糊综合评价法^[67,70-72]等，此类方法综合考虑了多种前兆信息，增强了识别冲击危险的能力。

在微震空间预警方面，通过深度挖掘微震信息研发了基于应力-波速幂函数关系^[73-78]的震动波 CT 反演预警技术^[73]和基于应力-能量-物理量耦合关系的冲击变形能预警技术^[79]，实现了大范围高分辨率的探测冲击危险；通过融合自然震源（被动源）与人工震源（主动源）反演技术的优势，研发了双源震动波一体化 CT 技术与装备，实现了区域应力场高精度快速反演^[77]。研究成果在华能集团、山东能源集团、陕西煤业化工集团有限责任公司等矿区成功应用，取得了良好的社会效益，提升了各下属矿井冲击地压防控能力。

如图 6 所示为河南某矿工作面不同阶段开采时区域内震动波波速反演结果，并将上月波速反演结果与未来一个月内发生的矿震进行对照叠加。可以看出，随工作面回采，区域内高波速区与矿震均随之不断转移，且后期矿震尤其大能量矿震发生位置与反演确定的高波速区或梯度变化区较吻合，现场结果进一步说明了冲击危险震动波 CT 反演结果的可靠性^[80]。

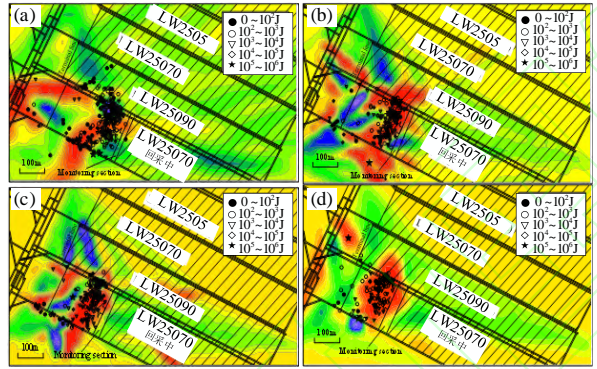


图 6 河南某矿工作面震动波 CT 连续反演结果^[80]

Fig.6 Successive tomography results for velocity distribution in a longwall face in Henan Province

如图 7 所示为冲击变形能时序预警曲线图，图中冲击事件及大部分强矿震发生前，均提前显示出了强危险预警等级。如图 8 所示为冲击变形能空间预警云图，图中指标值明显指示出了冲击区域的低损伤高应力异常^[79]。

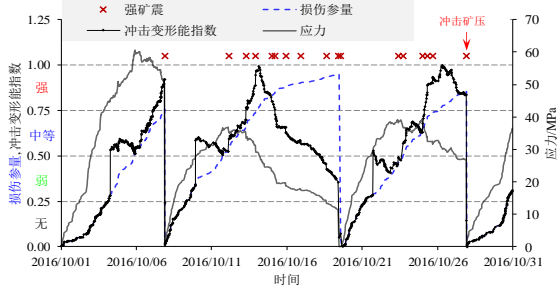


图 7 冲击变形能时序预警^[79]

Fig.7 Time series warning of bursting strain energy

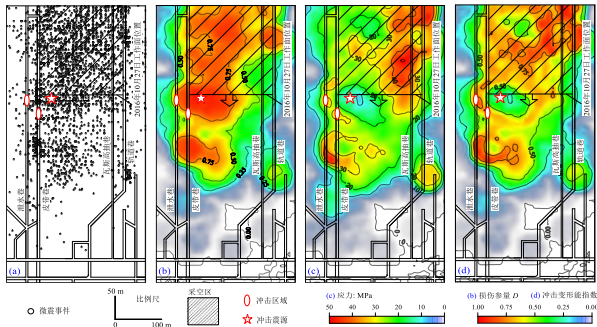


图 8 冲击变形能空间预警^[79]

Fig.8 Spatial warning of bursting strain energy

3.3 冲击危险信息融合动态评价方法

矿井地质与开采技术条件复杂、采掘空间不断移动、动静态应力场交织叠加，从而准确把握冲击地压灾害的复杂过程是对其进行可靠预警与防治的关键。传统的单指标或相互独立的多项指标监测，只能反映灾害演化过程的单一特征或离散特征，不能准确反映灾害孕育的整体动态特征。因此，多参量综合监测预警是冲击地压监测预警的必然趋势。

国家重点研发计划“煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究”根据动静载叠加诱冲机理和长期跟踪监测预警冲击危险情况，总结了分别适用煤柱型、褶曲型、顶板型、断层型冲击地压的监测预警指标体系^[81]（图 9），进一步认为冲击地压的发生是应力场、震动场、能量场共同作用的结果（图 10），监测预警也应从三个方面同时进行。基于此认识提出了“应力-震动-能量”三场耦合监测体系（图 11）和“应力-震动-能量”三场融合的多参量综合预警技术。

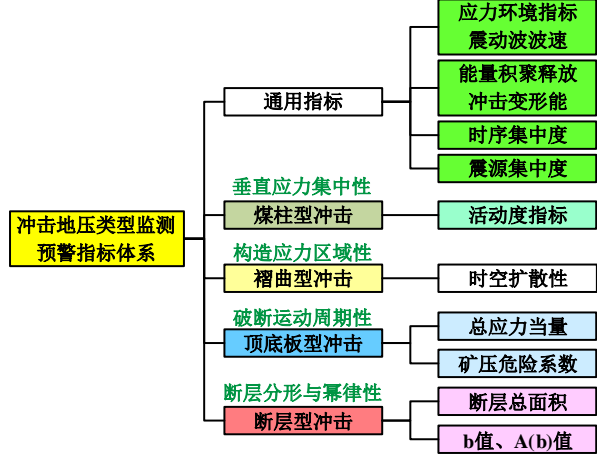


图 9 冲击地压类型监测预警指标体系^[81]

Fig. 9 Monitoring and warning index system of rock burst type

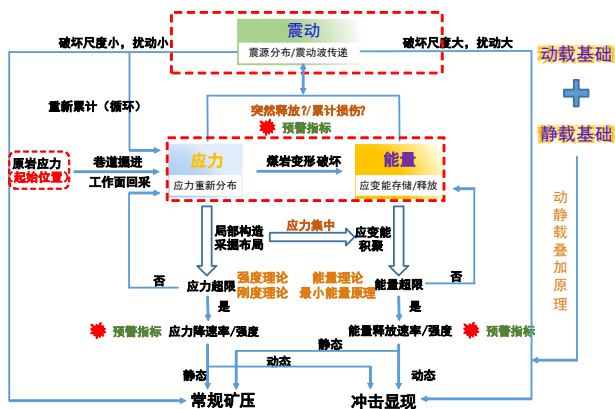


图 10“应力-震动-能量”三场耦合冲击显现过程
Fig.10 ‘Stress-vibration-energy’ three-field coupling impact process

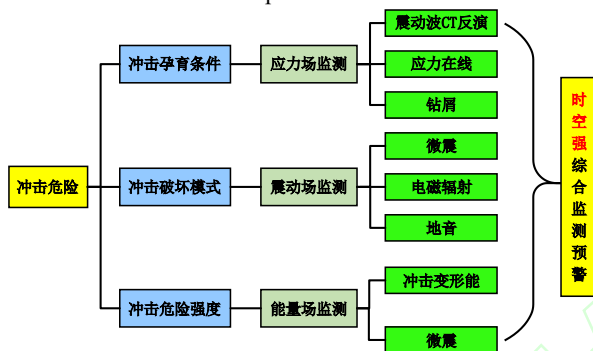


图 11 冲击危险“应力-震动-能量”三场耦合监测体系^[81]
Fig.11 'Stress-vibration-energy' three-field coupling monitoring for shock hazard system

如图 12 所示，“应力场、震动场、能量场”多参量预警技术是基于“应力-震动-能量”耦合冲击地压显现原理，综合分析微震、地音、电磁辐射、应力以及双震源一体化 CT 反演等系统的预警特征，提取了应力场指标（钻屑指标 b 、应力值 σ 、震动波波速 V_p 、矿压危险系数 Δp 等）、震动场指标（活动度 S 、地音预警指数 K 、趋势变化率 η_N 等）以及能量场指标（冲击变形能 W_E 等），并构建了“三场”多参量预警指标体系。由于不同指标反映不同的前兆信息，构建了内嵌归一化、高斯隶属函数、混淆矩阵等方法的多参量预警模型，综合确定冲击危险等级。最终实现基于微震、钻屑、应力等方法的多参量综合预警，实时、分级、直观显示矿井冲击地压风险状态。

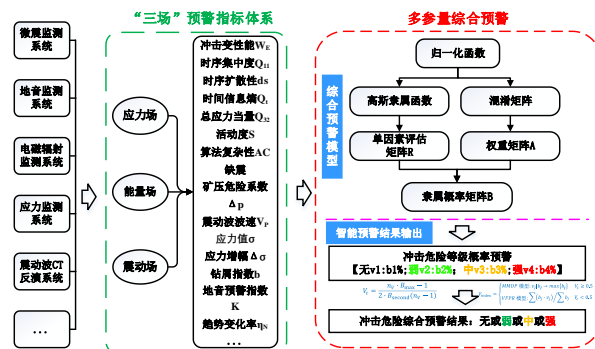


图 12 “应力场-震动场-能量场”多参量预警流程
Fig. 12 'Stress-vibration-energy field' multi-parameter early warning process

为了进一步提高冲击地压矿井冲击危险预警效能，助力煤矿自动化和智能化建设，利用大数据和云平台技术，开发了冲击地压风险判别与多参量监测预警云平台（图 13）^[81,82]。实现了由点、局部、单参量监测至区域多场多参量综合预警的转变；通过监测数据的信息化与防治措施信息化的融合，将现场监测、防治信息通过“一张图”的形式实时预警，在预警冲击危险性的同时指导现场对高危区域加强卸压解危，同时根据解危效果反馈预警信息准确性，做到了监防互馈。该平台在陕西胡家河煤矿、山东古城煤矿、内蒙古门克庆煤矿等 20 余个矿井成功运用。



图 13 冲击地压多参量监测预警云台
Fig. 13 Multi-parameter monitoring and early warning platform of rock burst

4 冲击地压防治技术研究现状

我国冲击地压防治理论与技术起步较晚且发展缓慢。2005 年，窦林名^[83-87]首先提出强度弱化减冲防治理论，认为松散煤岩体可降低煤岩体的强度和冲击倾向性，从而降低冲击危险，其次煤岩体强度弱化后，应力峰值区向深部转移，且应力集中程度降低；采取减冲措施后，煤岩体内能量聚集程度降低、矿震动载释放的能量减小，从而降低冲击危险性和发生冲击的强度。2011 年齐庆新等^[88]基于深孔断顶爆破技术提出了应力控制理论，认为采动应力的控制是防治冲击地压的重要手段。同年 7 月，姜福兴^[89]基于欧拉小挠度顶底板压杆稳定模型提出了应力三向化理论，认为煤层钻孔卸压促使煤层支撑压力的峰值位置沿水

平方向向煤体深部转移;煤层支撑压力峰值位置的深部转移造成顶底板岩层水平应力的提高;断顶、断底卸压后,顶底板水平应力的峰值位置沿竖直方向顶底板深部转移。

随着改革开放和科学技术的发展,冲击地压防治技术和装备均得到进一步发展。防治技术方面,已经初步建立了区域防范、局部解危相结合的冲击地压防治技术体系和“区域先行、局部跟进、分区管理、分类防治”的防治原则。区域防范方法是通过保护层开采、厚煤层错层布置、优化采掘布置及开采顺序等技术方案,预先在矿井规划设计阶段进行区域大范围降(卸)压或避免形成应力叠加区域。局部卸压解危技术主要通过人为制造变形空间、钻孔、压裂、注水、爆破等手段向深部驱赶应力峰值或降低动载扰动,是直接改变承压介质属性的方法,防治效果局限在巷帮或采场周边。冲击地压防治装备上,研发了超大转矩远程控制自动化钻机、液体炸药等,提升了防治效率。目前国内冲击地压矿井均已根据自身冲击地压防治工作的要点,选择了相应的冲击地压防治措施,并将其列入矿井冲击地压防治体系。

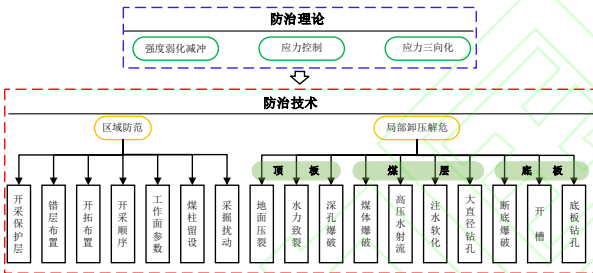


图 14 冲击地压防治理论与技术体系

Fig. 14 Theory and technical system of rock burst prevention

4.1 区域防范方法

区域防范方法是在矿井设计和生产规划阶段提出的冲击地压防治方法,是根本性解决冲击地压难题的关键手段。做好区域防范工作可提升矿井冲击地压防控能力,大大降低冲击地压灾害的发生概率,减小企业局部卸压解危安全成本投入。

1) 煤层合理开拓或开采布置。合理的开拓布置和开采方式通过调整煤层或工作面开采顺序、巷道及硐室设计和煤柱留设等方式降低未来采掘区域应力集中和叠加,破坏冲击的孕育环境,有效降低实施局部解危措施成本,是防治冲击地压的根本性措施。

如图 15 所示,陕西某强冲击地压矿井,埋深超过 600m,具有“断层-褶皱”复合构造发育和地应力水平高特征。其中央大巷布置在主采煤层,且穿过“断层-褶皱”复合构造区,地应力达

43.8MPa。在巷道掘进和使用期间,曾发生过 3 次冲击显现。分析认为显现原因为:①开拓巷道布置在具有强冲击倾向性的煤层;②穿过“断层-褶皱”复合构造复合构造区,应力集中程度高;③大巷距首采工作面 200m,回采期间产生动载扰动。

该煤矿对中央大巷复合构造区先后采取了顶板定向深孔水力压裂、顶板及煤层爆破、大直径卸压钻孔等局部卸压解危措施,但卸压解危效果不佳,最终将复合构造区的大巷从煤层逐步调整至顶板岩层中,从根本上解决了中央大巷构造区冲击地压问题。

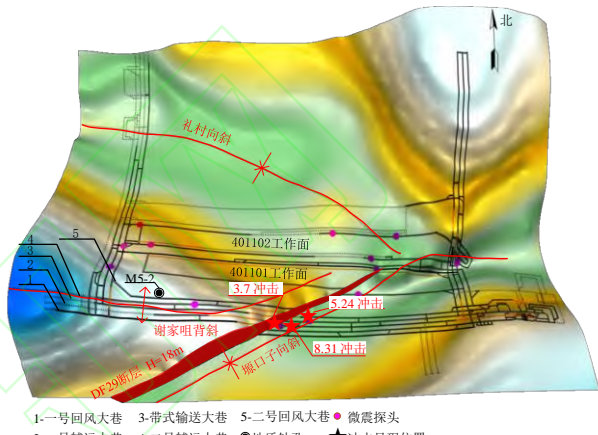
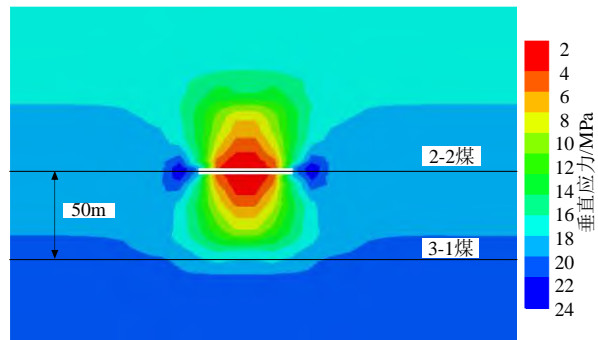


图 15 陕西某矿采掘工程平面图

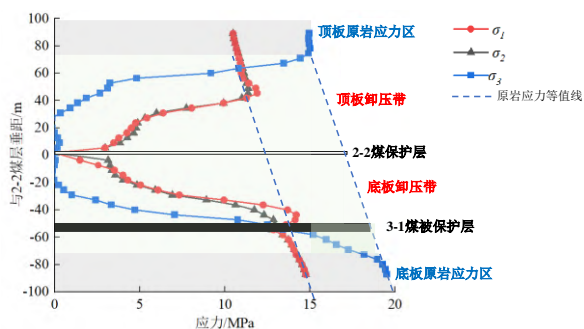
Fig. 15 Mining engineering plan of a mine in Shaanxi

2) 保护层开采。保护层开采通过开采较弱的冲击危险煤层,形成具有“降压、减震、吸能”作用的垮落覆岩结构,从而消除或降低邻近煤层的冲击危险。保护层开采是一种有效的、带有根本性的降低冲击危险性的区域卸压方案,也是最有效的防治冲击地压战略性措施。

如图 16 所示,内蒙古某矿开采 2-2 煤保护层后,下覆 3-1 煤层应力明显降低,且上覆岩层破坏范围扩大,高位坚硬岩层破断产生的强矿震被有效吸收。因此开采 2-2 煤保护层具有明显降压、减震、吸能作用。



(a) 2-2 煤层开采应力分布情况



(b) 2-2 煤层首采工作面开采后三向应力分布规律

图 16 开采保护层应力分布

Fig.16 Stress distribution law of protective layer in mining

3) 厚煤层临空巷道错层布置 (负煤柱)

厚煤层采用分层开采时, 受上分层的覆岩弯曲破坏影响承载位置向临空侧移动, 下分层临空回采巷道承受的静载增加, 同时上分层覆岩运动未完全稳定, 下分层临空回采巷道动载扰动最为强烈。因此, 下分层临空回采巷道冲击破坏可能性增加。将下分层工作面的临空巷道布置到上分层形成的采空区, 可同时降低临空回采巷道静载荷和动载扰动, 从而降低下分层时临空巷道的冲击危险和局部解危措施实施强度。

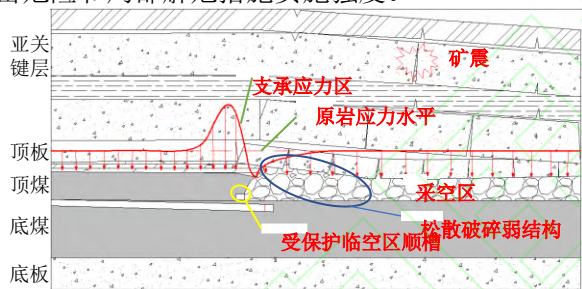
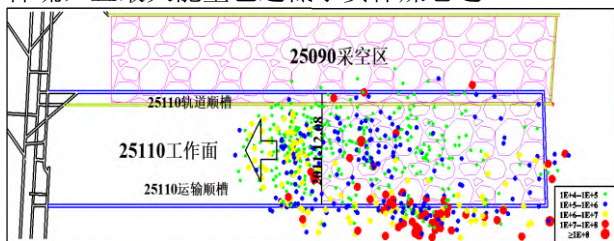


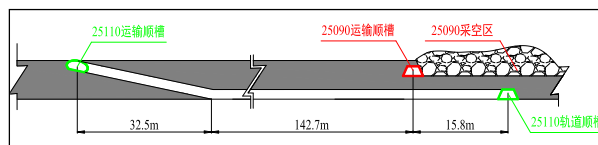
图 17 厚煤层临空巷道错层布置示意图

Fig. 17 Thick coal seam roadway cross layer layout schematic diagram

如图 18 所示, 河南某矿主采煤层为 2-1 煤层, 煤厚 7.4~13.5m, 平均厚 11.6m, 采用分层综放采煤工艺, 采高 2.6 m, 采放比为 1:3。该矿 25 采区回采过程中, 工作面临空巷道曾发生多次冲击显现, 因此 25110 工作面探索采用临空巷道错层布置, 即将上巷轨道顺槽布置在 25090 采空区下方。错层布置后临空巷道矿震分布明显较实体煤巷道稀疏, 且最大能量也远低于实体煤巷道。



(a) 25110 工作面平面布置图



(b) 25110 工作面剖面示意图

图 18 河南某矿 25110 工作面布置及矿震分布图

Fig. 18 25110 working face layout and mine tremors distribution of one mine in Henan Province

4) 控制回采速度

坚硬顶板破断释放的弹性能是冲击地压的主要能量源之一, 随着工作面回采速度加快, 矿震数量及释放的能量增高, 冲击危险性增加。回采速度对覆岩结构影响机制如图 19 所示, 随着回采速度加快, 悬臂端载荷减小、悬臂端长度增加、应力峰值增量增、应力峰值增量距煤壁的距离减小、增压载荷影响范围减小^[90]。如图 20 所示, 统计了陕西某矿 402103 工作面回采速度与矿震规律。由图可知, 随着回采速度的增加, 顶板覆岩破断产生的大能量矿震频次和总能量先平缓后陡然增加, 且回采速度临界值为 4 m/d, 工作面回采速度应控制在临界值以下。

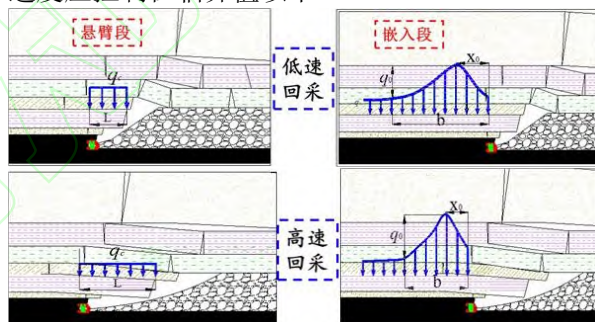


图 19 开采速度对砌体梁结构及支承压力的影响

Fig. 19 Influence of mining speed on masonry beam structure and bearing pressure

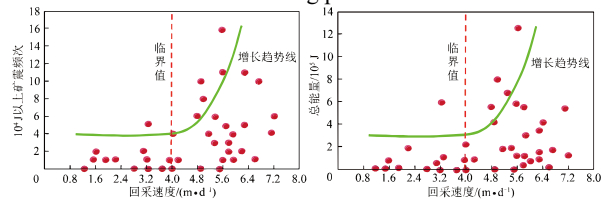


图 20 陕西某矿 402103 工作面矿震能量与回采速度统计曲线

Fig.20 Statistical curve of mine tremors' energy and mining speed in 402103 working face of a mine in Shaanxi Province

4.2 局部卸压解危方法

冲击地压具有不同区域不同冲击类型、冲击动静载力源、能量释放主体等方面的差异, 局部防冲技术措施可分为控制储能条件的煤层卸压减冲措施、控制顶板能量突然释放与加载的降动载减冲技术和改善底板应力环境与支承能力的底板疏导方法。如图 21 所示, 各类卸压解危措施作用

范围有限，主要目的是降低巷道周边煤岩体应力水平、营造“破裂圈”和消弱强动载，破坏冲击发生孕灾及灾变条件。

1) 煤层卸压减冲技术

煤层卸压减冲措施一般包括钻孔卸压、煤体爆破、煤体注水软化等。其中大直径钻孔卸压技术具有操作简单、施工成本低、适用性强等特点，广泛应用于全国冲击地压矿井。煤体爆破技术可充分消除或大幅降低局部区域的冲击危险性，但不适用于煤体孔隙率低、高瓦斯含量高等不宜爆破的情况，同时可能损坏支护系统和诱发冲击地压，因此不适宜大规模使用。注水软化技术和高压水射流技术分别从改变煤体物理力学性质和人工制造卸压空间途径破坏冲击地压的能量条件和强度条件煤体冲击危险性，实现煤体大面积卸压。

2) 顶板卸压解危技术。坚硬顶板破断和滑移是诱发冲击的重要因素，根据上覆坚硬岩层距采场距离由近及远依次可采用爆破、水力致裂和地面压裂技术，将具有强储能的岩层提前破断，降低整体性，释放聚集的能量，减少对煤层和支架的冲击震动。其中水力致裂和地面压裂技术在中高位岩层中钻孔（井）中预制定向裂缝，在较短的时间内采用高压水将顶板岩体沿预先切割的定向裂缝破裂分解岩体。水力致裂技术致裂半径可达 6~10m，甚至 30m。水力致裂方法相比爆破法简单有效，可大面积改变距煤层较远的坚硬关键层的岩体固有物理属性，同时使坚硬岩层分层或切断，实现应力转移释放，控制了冲击地压发生的应力条件和能量条件。

3) 底板卸压解危技术。为了防止底板型冲击地压，采用断底爆破、底板开槽等方法破坏底板结构，切断底板与煤体、顶板应力传递的通道，进一步控制底板变形，并及时释放存储的弹性能，降低冲击危险性。

综上，局部卸压解危方法分别通过制造变形空间、释放弹性能和改变煤岩体物理力学性质，降低煤岩体应力集中，但其卸压范围有限，无法从根本上消除应力集中。因此，卸压解危区域经常因应力转移，短时间内再次形成应力集中，导致卸压时效性和效果降低。

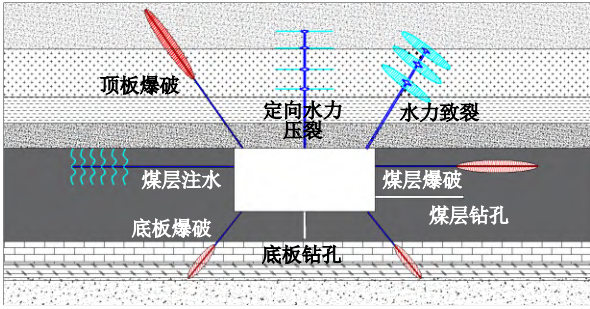


图 21 局部解危措施示意图

Fig. 21 Schematic diagram of local hazard relief measures

如图 22 所示，某矿 3108 工作面回采过程中撤面巷局部应力集中，巷道变形量增大。矿方采用震动波 CT 探测圈定强冲击危险区，并实施顶板爆破卸压。卸压解危后应力峰值向深部转移，冲击危险性降低。此例说明顶板解危卸压诱发了顶板能量释放，降低其应力水平和冲击危险性，但不能完全消除顶板积聚的能量和冲击危险性。

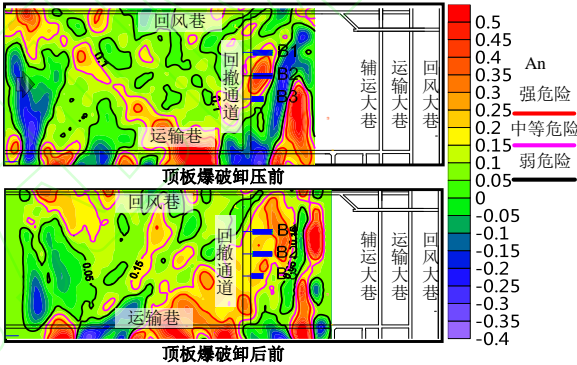


图 22 某矿回撤通道震动波 CT 探测结果

Fig. 22 CT detection results of vibration wave of retracement in a mine

5 冲击地压支护与防护现状

5.1 冲击地压巷道支护技术

巷道支护是冲击地压防治的重点内容，也是保障安全生产的重要屏障。《防治煤矿冲击地压细则》第八十条、《关于加强煤矿冲击地压防治工作的通知》（煤安监技装〔2019〕21 号）中明确指出，冲击危险区域的巷道必须采取加强支护措施，采煤工作面安全出口和巷道连接处超前支护范围不得小于 70m，综放工作面或具有中等及以上冲击危险的工作面超前支护范围不得小于 120m，超前支护优先采用液压支架。

我国冲击地压巷道支护技术从提升锚杆力学属性及结构、优化支护参数、联合或复合支护等方面提升支护强度和刚度来保证巷道围岩稳定阶段，逐步发展到具备抵抗强动载扰动的主动和被动支护相结合、刚柔耦合的吸能强力支护阶段。

国内学者经过长期研究，形成了巷道围岩的

强弱强结构效应与具备主动让压功能的高强支理论^[91-93]、刚柔耦合快速吸能让位防冲支理论^[94]、“卸压-支护-防护”协同防控理论^[95]、等强支护控制理论^[96]、三级吸能冲击支理论^[97]。如图23所示,三级支理论体系具体指:①一级支护:锚杆索支护,可抵抗 10^5J 动载;②二级支护:“锚杆+O型棚”联合支护,可缓冲 10^6J 动载;③三级支护:“锚杆+O型棚支护+液压支架”,可消耗 10^7J 能量。三级支理论在老虎台煤矿、耿村煤成功应用,在强冲击条件下均未发生巷道破坏。

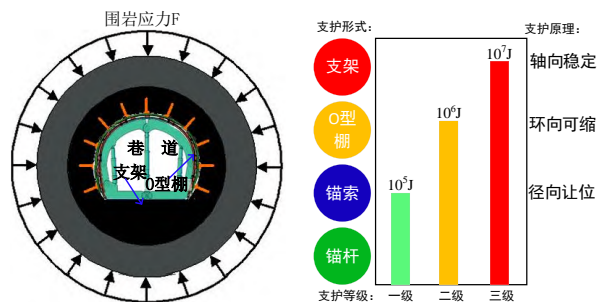


Fig. 23 Principle of three-level support diagram

在完善冲击地压巷道支护理论的同时也研制了强吸能支护装备。如恒阻大变形锚杆^[98]（NPR锚杆）、大变形锚杆^[99]、超高强度、高冲击韧性锚杆^[100]（CRM700锚杆）等吸能锚杆和具备吸能构建或吸能缓冲装置的系列防冲吸能支架（柱）。部分吸能支架及设备如图24所示。



图 24 超前支护防冲支架

Fig. 24 Anti-scour support of advanced supporting

5.2 智能限员技术

冲击地压灾害具有难预知性、瞬时性和强破坏性,因此在落实各项冲击地压监测、预警、防治措施外,还应加强井下人员冲击地压防治意识、健全冲击地压防护体系。《煤矿安全规程》、《防治煤矿冲击地压细则》等文件中明确指出,矿井要

严格落实冲击危险区域人员准入制度,严格控制进入时间、区域和人数,对不同冲击危险区域实行不同的人员安全管理措施。同时规定人员进入强冲击危险区域必须穿戴防冲服等特殊个体防护装备。

以前冲击地压矿井针对限员管理的解决办法有三种:①在冲击危险区域的安全范围之外设置限员牌板,人员进入时领取号牌并登记,离开时交回并登记;②在出入口设置刷卡机,进入和离开时及时刷卡;③利用红外监测技术,自动计算冲击危险区域内人员数量。以上方法依靠现场作业人员自觉执行,难以监管。随着我国计算机和信息技术的快速发展和煤矿智能化建设需要,冲击地压矿井应用智能识别技术逐步建立了智能化人员监控系统,系统支持危险区域电子围栏和危险区域智能人员监管等功能,实现了智能识别进入人员、实时人数统计、人员超限自动报警。



图 25 智能限员监控技术

Fig. 25 Intelligent personnel limit monitoring technology

6 冲击灾害防治主要难题

6.1 矿震与冲击地压辨识

冲击地压的发生往往伴有矿震产生,容易被误解为两者相等,造成矿震成为敏感话题甚至引起社会恐慌。实则并不是所有矿震都具有危险致灾性,如2021年内蒙古石拉乌素煤矿和红庆河煤矿、山东滕东煤矿、陕西神木矿区等区域都曾发生过强矿震(最大震级3.0级),井下巷道无明显破坏、无人员伤亡和设备损坏。

矿震是煤炭开采必然现象,一般不具备致灾性,仅有极少数矿震会引发冲击地压、煤与瓦斯突出等矿震灾害。但客观、合理评价矿震与矿震灾害的相关性(图26)仍存在诸多问题需要深入研究:①矿震的科学分类与致灾分类;②矿震能量释放传递规律及对井上下空间的破坏作用机制;③矿震孕育-触发-致灾的前兆信息产生机理及演化模式;④矿震井上下联合高精度定位与震源信息全方位成像;⑤远场矿震源的井上下远距离、长时效干预减灾治理。

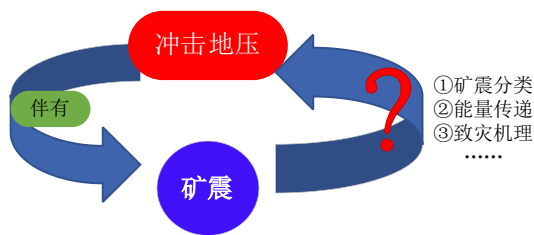


图 26 矿震与冲击地压

Fig. 26 Mine tremors and rock burst

6.2 冲击地压地质透明化保障

矿井透明地质条件是冲击地压防治的重要基础，明晰的地质环境有助于掌握煤炭开采过程中采掘区域应力应变场、地质地球物理场等变化特征，有力推动冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害的精细化研究，大幅提升褶曲、断层等大型地质构造体冲击危险源综合治理效果。目前大多数矿井所构建的三维地质模型，只是不同精度和数据结构的钻探及地震勘探资料的人工叠加，精度和分辨率上并未有明显提高。因此采场应力高精度探查和地质透明化技术还有待研究，其中涉及到诸多关键技术，可以概括为：①大范围、高精度智能钻探与物探技术与装备；②地质数据、工况数据、灾变监测数据等多源信息融合感知与地质模型动态重构技术；③智能识别地质异常体及应力特征区划技术；④地质空间的全方位动态可视化技术。

6.3 冲击危险定量智能预测预警

广泛使用的综合指数法、多因素耦合分析法等冲击危险性预测方法，未能全面考虑冲击地压灾害的影响因素、多因素耦合和演化过程等，是地质、开采技术等因素融合的定性或半定量评价方法，难以实现定量精准预测。同时冲击危险动态预警的基础是煤炭开采过程中采场应力场、能量场、震动场的响应特征，冲击危险前兆信息的辨识规则和阈值是对历史冲击现象的定性或数量化总结，缺乏可靠的理论支撑。因此亟待研究基于理论与动态监测数据驱动的冲击地压风险全时空辨识及定量评价模型与冲击危险智能精准识别方法（图 27），实现应力定量分析与监测数据、采掘设计、防治措施等多因素耦合叠加，实时动态预测冲击危险区域及其危险等级。

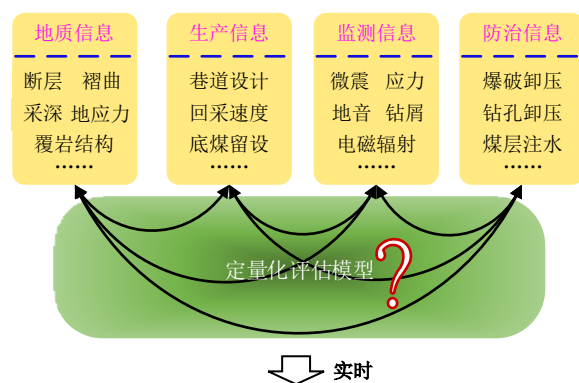


图 27 基于多因素耦合的冲击危险量化预测

Fig. 27 Quantitative prediction of rock burst risk based on multi-factor coupling method

6.4 冲击地压矿井产能核定安全系数确定

2015 年，《国家安全监管总局国家煤矿安监局国家发展改革委国家能源局关于开展灾害严重煤矿生产能力核定工作的通知》^[101]中规定具有强、中、弱冲击危险的冲击地压矿井核定产能时安全系数 K_c 应分别取 0.7、0.75、0.8，冲击地压与高瓦斯等灾害叠加要取 0.7。《煤矿安全规程》和《防治煤矿冲击地压细则》颁布后，提出按照冲击地压危险等级及灾害防治需要布置采掘工作面，并合理确定工作面的推进速度。如何根据矿井年度开采计划及冲击危险等级评定分析等因素，合理确定冲击地压矿井安全系数的计算方法迫在眉睫。

6.5 冲击地压监测精度提升

我国冲击危险监测已实现“点-局部-区域”全方位覆盖的布局，但在探测精度和可靠性方面存在一些问题，监测数据一致性差，在数据分析过程中经常出现结论相互矛盾的情况。因此，监测精度低制约了冲击地压防治研究的精细化发展。

冲击地压矿非常用的冲击地压监测预警装备包括应力实时在线监测系统和微震监测系统两类。两种装备对冲击地压的监测预报发挥了重要作用，同时现场应用表明目前监测预警系统也存在诸多问题和不足。微震监测虽可实现平面大范围区域监测，但受井下巷道布置限制，无法形成空间包围布置，导致垂直定位误差常大于 50m，难以准确判断覆岩（关键层）运动与矿震的相关性，存在“震源找不准、灾害控不住”难题。同样应力监

测受孔径、安装技术等因素影响，导致应力在线探头敏感性及冲击地压预警效能不高。因此如何提高微震和应力监测的精度，是进一步提高冲击地压危险监测预警水平的关键。华亭、鄂尔多斯等矿区积极开展井地联合监测技术研究，拟通过井上下联合监测提高垂向微震定位精度，但井下拾震器和地面台站布置设计原理、矿井速度模型确立和动态调整方法、高精度井地联合定位算法等有待深入研究。

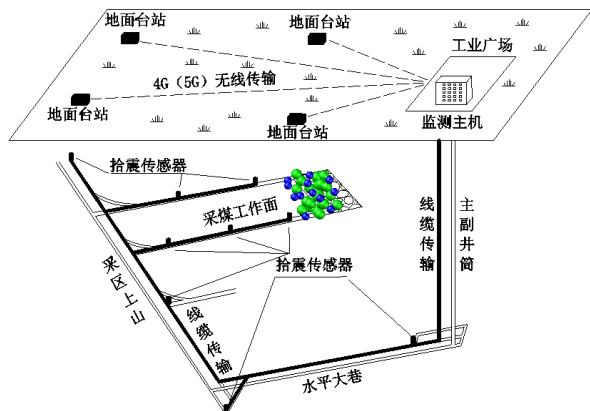


图 28 井地联合监测技术示意图

Fig. 28 Schematic diagram of well-ground joint monitoring technology

6.6 冲击地压安全精准防控

随着我国煤炭资源开采深度和开采强度的增加，地质条件、煤岩体性质、开采布局等也愈加复杂，随之而来的局部高应力集中和强矿震现象也愈加普遍。

煤岩高应力状态是冲击地压发生的必要条件，当前主要实施以钻孔为基础的大直径钻孔、爆破等措施，释放存储的弹性能，降低区域冲击危险性。但在钻进过程中可能诱发冲击地压，且需要防冲人员直接暴露在高危环境中操作钻机，威胁人员生命安全。研制防冲钻孔机器人，实现卸压解危作业无人化是根本解决防冲施工安全问题的方法。亟待结合智能机器人技术研究钻机平台自主移动与远程交互控制、钻孔自动定位、钻进方位自动纠正、应力智能感知等关键科学问题。

强矿震(动载)是冲击地压发生的诱发条件，强矿震的显现引起了当地政府和居民的担忧和恐慌，不利于高产高效矿井的建设和发展。矿震的机理以及控制因素尚未明确，尤其对深部开采的巨厚坚硬顶板条件下、高位矿震孕育与演化机理缺乏了解，且冲击地压解危治理以井下近场危险源防控为主，防控范围小，存在高位远场冲击危险源精准防控的装备短板和技术空白(图 29)。陕西孟村煤矿、山东东滩煤矿等少数煤矿开展地

面水力压裂工业性试验，拟通过增加地层非均质性调整局部应力变化，减小坚硬岩层破断释放的能量，降低破断诱冲致灾的可能，但缺乏防控原理与参数设计理论依据，防治效果难以保障。高位厚硬顶板破断诱冲机理、水力压裂缝扩展形态与地层应力应变演化规律、地层压裂位置和范围的确定方法，压裂工艺的选择原则、压裂监测与防治效果评价方法等亟待研究。

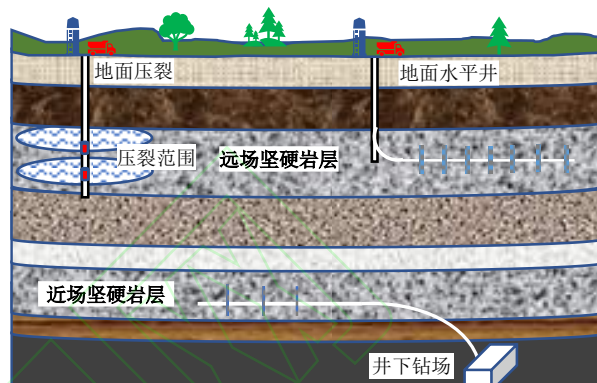


图 29 高位厚硬顶板水力压裂示意图

Fig. 29 Hydraulic fracturing diagram of high thick-hard roof

6.7 区域应力场精准调控

煤系地层普遍存在断层、褶曲等地质异常体，形成高应力集中分布的区域应力场，为冲击地压等动力灾害提供良好的孕育环境，附近采掘工程活动均具有较高冲击风险。为了降低区域应力场诱发冲击地压的可能性，一般采用加强卸压工程实施范围和强度等方法降低冲击危险状态。此类防治方法缺乏相应的理论支撑，卸压效果和时效性差。

在区域地质形态与应力分布关系的基础上，进一步分析冲击地压与区域应力分布特征参数的相关性及其应变响应规律，根据关键参数分类研究区域应力场分布与采动应力耦合致灾机制，进而建立不同类型区域应力场调控理论，是实现区域应力场高效防控亟待解决的重要问题。

6.8 冲击地压巷道支护标准化

冲击地压能否发生与巷道支护形式及能力密切相关，合理的防冲支护可提升巷道抗冲能力，降低矿震动载诱发冲击地压灾害的风险，减少冲击破坏，保障井下人员安全。由于冲击地压发生的复杂性及巷道围岩结构的多样性，暂未建立冲击危险巷道的防冲支护方法与参数选择的标准，煤矿冲击地压巷道支护形式各不相同，巷道抵抗冲击危险的能力差异性较强。根据冲击地压发生机理，进一步分析巷道围岩结构失稳及破坏模式和冲击应力波作用机制，确定冲击动载特征参数、

支护参数与支护系统响应及巷道围岩损伤破坏的关系,建立围岩支护系统动力学模型,确定支护失效机理、支护结构抗冲能力校核方法、支护方式及其参数设计评判准则和匹配原则,是完善冲击地压巷道支护理论与技术体系亟待解决的重要问题。

7 结论

经过最近三十余年的研究,我国冲击地压防治工作取得了丰硕的成果,实现了冲击地压法律法规、发生机理、监测、预测预报、防治等多个领域从无到有的突破,理论技术与装备不断革新,逐步形成了具有我国特色的冲击地压防治理论与技术体系。冲击地压防治研究主要取得以下重大进展:

(1) 在冲击地压防治法规建设与标准方面,自1987年发布冲击地压行业标准以来,逐步形成了《煤矿安全规程》、《防治煤矿冲击地压细则》和《冲击地压测定、监测与防治方法》系列标准为核心的冲击地压防治法律法规体系,实现了法规从无到有再到完善。

(2) 在冲击地压发生机理研究方面,在借鉴国外经典冲击理论的基础上构建了“三因素”理论、扰动失稳理论、动静载叠加诱冲理论等为主的理论体系,深化了冲击地压机理研究。

(3) 在冲击地压监测预警方面,从初始的单一监测系统单一指标演化规律研究,逐步演化到多种监测系统预警信息融合的“应力场、震动场、能量场”三场综合预警,预警效能和准确率不断提升。

(4) 在冲击地压防治方面,从以往重点关注钻孔卸压、顶板爆破等局部卸压解危措施上,逐渐意识到合理开拓开采优化设计的重要性,初步建立了区域防范、局部解危相结合的冲击地压防治技术体系,防治有效性不断提升。

(5) 在深部巷道围岩控制方面,从单纯提升支护强度的刚性支护过渡到刚-柔复合支护、吸能支护等,最终形成了多级巷道支护方法,巷道抗冲能力不断增强。

(6) 在人员管理方面,从人工登记号牌计数过渡到刷卡和自动红外计数,最后引入智能识别技术,实现了多场景人员智能管理。

在碳达峰碳中和目标的时代背景下,我国冲击地压防治工作已取得良好成绩,同时随着陕蒙晋等大型煤炭基地逐步进入深部开采,冲击地压问题成为制约矿区高产高效绿色发展的障碍,且

部分区域存在冲击地压、矿震、煤与瓦斯突出等多灾害交织影响,冲击地压防治面临新的挑战。冲击地压防治研究应借助人工智能、大数据、云计算等新兴技术,提升冲击地压监测预警防治的智能化和精准化水平,实现煤炭资源安全绿色生产,助力“双碳”重大战略。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
DOU Linming, HE Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- [2] 齐庆新,窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008.
QI Qingxin, DOU Linming. Theory and Technology of Rock Burst [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.
- [3] 聚焦科学“防冲”开展头脑风暴 [EB/OL].
https://www.chinaminesafety.gov.cn/xw/mkaqjcxw/202110/t20211012_399891.shtml.
Focus on scientific ‘anti-shock’ to carry out brain storm [EB/OL].
https://www.chinaminesafety.gov.cn/xw/mkaqjcxw/202110/t20211012_399891.shtml.
- [4] 国务院安全生产委员会关于进一步贯彻落实习近平总书记重要指示精神坚决防范遏制煤矿冲击地压事故的通知[S].北京:国务院安全生产委员会,2020.
- [5] 冲击地压煤层安全开采暂行规定[S]. 北京:煤炭工业部,1987.
- [6] 冲击地压预测和防治试行规范[S]. 北京:煤炭工业部,1987.
- [7] MT/T 174-2000,煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法[S].
- [8] MT/T 866-2000,岩石冲击倾向性分类及指数的测定方法[S].
- [9] 《煤矿安全规程》[S].北京:国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局,2005.
- [10] 《煤矿安全规程》[S].北京:国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局,2013.
- [11] 防治煤矿冲击地压细则[S]. 北京:国家煤矿安监局,2018.
- [12] 《关于加强煤矿冲击地压源头治理的通知》(发改能源〔2019〕764号)[S]. 北京:国家煤矿安监局,2019.
- [13] 《关于加强煤矿冲击地压防治工作的通知》(煤安监技装〔2019〕21号)[S]. 北京:国家煤矿安监局,2019.
- [14] 《煤矿冲击地压防治监管监察指导手册(试行)》[S]. 北京:国家煤矿安监局,2020.
- [15] 《山东省煤矿冲击地压防治办法》[S]. 山东:山东省人民政府办公厅,2019.
- [16] 《陕西省煤矿冲击地压防治规定(试行)》[S]. 陕西:陕西省应急管理厅,2021.
- [17] 冲击地压测定、监测与防治方法[S]. 国家市场监督管理总局;国家标准化管理委员会.
- [18] ROMASHOV AN, TSYGANKOV SS. Generalized model of rock bursts[J]. Journal of mining science, 1993, 28(5): 420-423.
- [19] SALAMON M-D-G. Stability, instability and design of pillar workings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1970, 7(6): 613-631.

- [20] CHEN Z-H,TANG C A,HUANG R-Q. A double rock sample model for rockbursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(6):991-1000.
- [21] MA Tianhui,TANG Chunan,TANG Shibin,et al. Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,110:177-188.
- [22] SINGH S-P. Burst energy release index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,1988,21(2):149-155.
- [23] XU Y-H, CAI M. Influence of strain energy released from a test machine on rock failure process[J]. Canadian Geotechnical Journal,2018,55(6):777-791.
- [24] HUDSON John-A,CROUCH Steven-L,CHARLES Fairhurst. Soft,stiff and servo-controlled testing machines; a review with reference to rock failure [J]. Engineering Geology,1972,6(3):155-189.
- [25] CAI Wu, DOU Linming,SI Guangyao,et al. A principal component analysis/fuzzy comprehensive evaluation model for coal burst liability assessment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2016,81:62-69.
- [26] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1981,18(4):295-304.
- [27] WANG JA,PARK HD. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2001,16(1):49-57.
- [28] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报,1985,(3):42-48.
LI Yusheng. Rock burst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining & Technology,1985,14(3):37-43.
- [29] 章梦涛. 冲击地压机理的探讨[J]. 阜新矿业学院学报,1985,(S1): 65-72.
ZHANG Mengtao. Discussion on the mechanism of coal burst [J]. Journal of Fuxin Mining Institute,1985,4(S1):65-72.
- [30] 齐庆新,刘天泉,史元伟,吕家立. 冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J]. 矿山压力与顶板管理,1995,(Z1): 174-177.
QI Qingxin,LIU Tianquan,SHI Yuanwei,et al.Mechanism of friction sliding instability of rock burst[J]. Ground Pressure and Strata Control,1995,3(4):174-177.
- [31] 齐庆新,史元伟,刘天泉. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报,1997,(02):34-38.
QI Qingxin,SHI Yuanwei,LIU Tianquan. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J].Journal of China Coal Society,1997,21(2):34-38.
- [32] 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[D]. 煤炭科学研究总院(北京所),1996.
QI Qingxin. The study on its theory and practice of rockburst led by the structure failure of bedded coal-rock mass[D]. China Coal Research Institute(Beijing),1996
- [33] 潘俊锋,丁宇,毛德兵,等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(03): 586-596.
- PAN Junfeng,NING Yu,MAO Debing,et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(3):586-596.
- [34] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报,2018,43(8): 2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(8):2091-2098.
- [35] 姜福兴,冯宇,KOUAME K. J. A.,等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(10): 1762-1768.
JIANG Fuxing ,FENG Yu ,KOUAME K. J. A,et al. Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(10):1762-1768.
- [36] DOU Linming,Mu Zonglong,LI Zhenlei,et al. Research progress of monitoring,forecasting,and prevention of rockburst in underground coal mining in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(003):278-288.
- [37] HE Jiang,DOU Linming,GONG Siyuan,et al. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2017,93:46-53.
- [38] LI Zhenlei,DOU linming,WANG Guifeng,CAI Wu,HE Jiang. Risk evaluation of rock burst through theory of static and dynamic stresses superposition[J]. Journal of Central South University,2015,22(2):676-683.
- [39] 潘立友. 冲击地压前兆信息的可识别性研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(8):1411.
PAN Liyou. Identification and application of omen information of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(8):1411.
- [40] 姜耀东,赵毅鑫,何满潮,等. 冲击地压机理的细观实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,(05): 901-907.
JIANG Yaodong,ZHAO Yixin,He Manchao,et al.Investigation on mechanism of coal mine bumps based on mesoscopic experiments[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(5):901-907.
- [41] 窦林名,何学秋. 采矿地球物理学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,2001.
DOU Linming,HE Xueqiu. Mining geophysics [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,2001.
- [42] 姜福兴,冯宇,刘晔. 采场回采前冲击危险性动态评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(10):2101-2106.
JIANG Fuxing,FENG Yu,LIU Ye. Dynamic evaluation method for rockburst risk before stopping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(10):2101-2106.
- [43] 韩军,张宏伟,兰天伟,等. 京西煤田冲击地压的地质动力环境[J]. 煤炭学报,2014,39(6): 1056-1062.
HAN Jun,ZHANG Hongwei,LAN Tianwei,et al. Geodynamic environment of rockburst in western Beijing coalfield[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(6):1056-1062.
- [44] DONG Longjun,LI Xibing,PENG Kang. Prediction of rockburst classification using Random Forest[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2013,23(2):472-477.

- [45] ZHOU Jian, LI Xibing, MITRI Hani-S. Evaluation method of rockburst; state-of-the-art literature review[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 81: 632-659.
- [46] 雷毅. 冲击危险性评价模型的建立及应用研究[D]. 煤炭科学研究总院, 2005.
- LEI Yi. Study on establishment and application of hazard evaluation model for rock-burst[D]. China Coal Research Institute, 2005
- [47] 吴祥彬, 茅献彪, 孙海, 等. 用钻屑法监测巷道围岩冲击危险[J]. 矿山压力与顶板管理, 1998, (01): 77-79.
- WU Xiangbin, MAO Xianbiao, SUN Hai, et al. Monitoring rock burst risk of roadway by drilling cuttings [J]. Mine Pressure and Roof Management, 1998, (01): 77-79.
- [48] 牟宗龙, 窦林名, 张广文, 等. 坚硬顶板型冲击矿压灾害防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, (06): 737-741.
- MU Zonglong, DOU Linming, ZHANG Guangwen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, (06): 737-741.
- [49] 王平, 姜福兴, 王存文, 等. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 5-9.
- WANG Ping, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. The stress incremental forecasting method of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 5-9.
- [50] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.
- QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.
- [51] 付东波, 齐庆新, 秦海涛, 等. 采动应力监测系统的设计[J]. 煤矿开采, 2009, 14(06): 13-16.
- FU Dongbo, QI Qingxin, QIN Haitao, et al. Design for mining stress monitoring system[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(6): 13-16.
- [52] 何学秋, 聂百胜, 王恩元, 等. 矿井煤炭动力灾害电磁辐射预警技术[J]. 煤炭学报, 2007, (1): 56-59.
- HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2007, (1): 56-59.
- [53] 王恩元, 何学秋, 窦林名, 周世宁, 聂百胜. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报, 2005, (1): 216-221.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, DOU Linming, et al. Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 216-221.
- [54] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1262-1268.
- HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1262-1268.
- [55] 夏永学. 不同冲击启动类型的地音前兆信息识别[J]. 中国煤炭, 2015, 41(3): 49-53.
- XIA Yongxue. Precursor information identification of rock noise in different start up types of rock burst[J]. China Coal, 2015, 41(3): 49-53.
- [56] 潘一山, 赵扬锋, 李国臻. 冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3988-3993.
- PAN Yishan, ZHAO Fengyang, LI Guozhen. Charge-induced technique of rockburst prediction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3988-3993.
- [57] 李楠, 王恩元, 葛茂辰. 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.
- [58] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, (5): 1511-1516.
- JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [59] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (5): 1002-1011.
- PAN Yishan, ZHAO Fengyang, GUAN Fuhai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, (5): 1002-1011.
- [60] 夏永学, 潘俊锋, 王元杰, 等. 基于高精度微震监测的煤炭破裂与应力分布特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 239-243.
- XIA Yongxue, PAN Junfeng, WANG Enyuan, et al. Study of rule of surrounding rock failure and stress distribution based on high-precision microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 239-243.
- [61] 刘金海. 煤矿冲击地压监测预警技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 71-77.
- LIU Jinhai. New progress on monitoring and early warning technology of mine strata pressure bump[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 71-77.
- [62] CAI Wu, BAI Xianxi, SI Guangyao, et al. A monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5451-5471.
- [63] 李广宽. 基于神经网络与微震信息的岩爆预测[D]. 东北大学, 2011.
- LI Guangkuan. Rockburst prediction based on neural network and microseismic information[D]. Northeastern University, 2011.
- [64] 李素蓉. 深部金属矿山地震活动特性及岩爆的支持向量机预测研究[D]. 中南大学, 2011.
- LI Surong. Study of characteristics of mining induced seismicity in deep metal mine and rockburst prediction based on support vector machine[D]. Central South University, 2011.
- [65] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判别及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(02): 306-318.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early

- warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(2):306-318.
- [66] MUTKE Grzegorz, DUBIŃSKI Józef,LURKA Adam. New criteria to assess seismic and rock burst hazard in coal mines[J]. Archives of Mining Sciences,2015,60(3):743-760.
- [67] LIU Jianpo,XU Shida,LI Yuanhui,et al. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: a case study at the hongtoushan copper mine in china[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,52(1):265-276.
- [68] 刘建坡. 深井矿山地压活动与微震时空演化关系研究[D]. 东北大学,2011.
LIU Jianpo. studies on relationship between microseism time-space evolution and ground pressure activiess in deep mine[D]. Northeastern University,2011.
- [69] 贾瑞生,孙红梅,樊建聪,等. 一种冲击地压多参量前兆信息辨识模型及方法[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(8):1513-1519.
JIA Ruisheng,SUN Hongmei,FAN Jiancong ,et al. Multiparameter precursor information identification model and method for rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(8):1513-1519.
- [70] DOU Linming,CAI Wu,CAO Anye,et al. Comprehensive early warning of rock burst utilizing microseismic multi-parameter indices[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2018,28(5):767-774.
- [71] CAI Wu,DOU Linming,ZHANG Min,et al. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,80:232-245.
- [72] 窦林名,冯龙飞,蔡武,等. 煤岩灾变破坏过程的声震前兆识别与综合预警模型研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(5):960-968.
DOU Linming,FENG Longfei,CAI Wu,et al. Seismo-acoustic precursor identification and comprehensive warning model for the catastrophic failure process of coal and rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(5):960-968.
- [73] 巩思园. 矿震震动脉波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践[D]. 中国矿业大学,2010.
GONG Siyuan. Research and application of using mine tremor velocity tomography to forecast rockburst danger in coal mine.[D]. China University of Mining and Technology,2010.
- [74] 巩思园,田鑫元,郑有雷,等. 弹性波 CT 反演识别煤岩体空区实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(4): 759-766.
GONG Siyuan,TIAN Xinyuan,ZHEN Youlei,et al. Empty area recognition technology of coal and rock mass by elastic wave ct inversion[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(4):759-766.
- [75] 曹安业,王常彬,窦林名,等. 临近断层孤岛面开采动力显现机理与震动脉 CT 动态预警[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(03):411-417.
CAO Anye,WANG Changbin, DOU Linming,et al. Dynamic manifestation mechanism of mining on the island coalface along fault and dynamic pre-warning of seismic waves with seismic tomography[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(3):411-417.
- [76] 窦林名,陈同俊,巩思园,等. 弹性波 CT 透视深部采面冲击危险区研究[A] 煤炭开采新理论与新技术——中国煤炭学会开采专业委员会 2012 年学术年会论文集[C].2012.
Dou Linming,CHEN Tongjun,GONG Siyuan, et al. Elastic wave CT perspective of deep mining face impact risk area research [A] New theory and new technology of coal mining-Chinese Coal Society Mining Committee 2012 academic annual conference paper collection [C]2012.
- [77] 田鑫元. 震动脉 CT 反演的主动源参数优化理论与实验研究[D]. 中国矿业大学,2020.
TIAN Xinyuan. Theoretical and experimental study on parameter optimization of active source in seismic wave CT inversion[D]. China University of Mining and Technology,2020.
- [78] 李静. 煤矿震动脉 CT 反演探测技术的优化与应用[D]. 中国矿业大学,2017.
LI Jing. Optimization and application of seismic computerized tomography in coal mines[D]. China University of Mining and Technology,2017.
- [79] CAI Wu, DOU Linming,Si Guangyao,et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,123,104086.
- [80] CAI Wu,DOU Linming,GONG Siyuan,et al. Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. Natural Hazards,2015,75(3):2453-2465.
- [81] 窦林名,周坤友,宋士康,等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报,2021,29(4): 917-932.
DOU Linming,ZHOU Kunyou,SONG Shikang,et al. Occurrence mechanism,monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines[J].Journal of Engineering Geology,29(4):917-932.
- [82] 窦林名,王盛川,巩思园,等. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. 煤炭学报,2020,45(6): 2248-2255.
DOU Linming,WANG Shengchuan,GONG Siyuan,et al. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multiparameter monitoring and early warning [J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2248-2255.
- [83] 窦林名,何学秋. 煤岩混凝土冲击破坏的弹脆性模型[C]//中国岩石力学与工程学会学术大会.2002.
DOU Linming,HE Xueqiu. Elastic-plastic-brittle model of rock and concrete burst failure[C]. Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering,2002.
- [84] 窦林名,陆莱平,牟宗龙,秦玉红,姚精明. 煤岩体的强度弱化减冲理论[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2005,24(3):169-175.
DOU Linming,LU Caiping,MU Zonglong,et al. The theory of intensity weakening for rockburst in coal mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),2005,24(3):169-175.
- [85] 窦林名,陆莱平,牟宗龙,等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报,2005,(6):690-694.

- DOU Linming, LU Caiping, MU Zonglong, et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, (6): 690-694.
- [86] 陆莱平. 组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D]. 中国矿业大学, 2008.
- LU Caiping. Intensity weakening theory for rockburst of compound coal-rock and its application[D]. China University of Mining and Technology, 2008.
- [87] 陆莱平, 窦林名, 吴兴荣. 煤岩动力灾害的弱化控制机理及其实践[J]. 中国矿业大学学报, 2006, (3): 301-305.
- LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong. Controlled weakening mechanism of dynamic catastrophe of coal and rock and its practice[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, (3): 301-305.
- [88] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (S1): 3522-3527.
- QIN Qingxin, LEI Yi, LI Hongyan, et al. Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, (S1): 3522-3527.
- [89] 于正兴, 姜福兴, 桂兵, 等. 防治冲击地压的应力三向化理论探究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(07): 1-4.
- YU Zhengxing, JIANG Fuxing, GUI Bing et al. Study and application of stress three-dimensional theory to prevention and control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(07): 1-4.
- [90] 冯龙飞, 窦林名, 王晓东, 等. 回采速度对坚硬顶板运动释放能量的影响机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3329-3339.
- FENG Longfei, DOU Linming, WANG Xiaodong, et al. Mechanism of mining advance speed on energy release from hard roof movement[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3329-3339.
- [91] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 巷道防冲机理及支护控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 40-44.
- HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Mechanism of rock-burst prevention and supporting control technology in roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 40-44.
- [92] 曹安业, 朱亮亮, 杜中雨, 等. 巷道底板冲击控制原理与解危技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 848-855.
- CAO Anye, ZHU Liangliang, DU Zhongyu, et al. Control principle and pressure-relief technique of rock burst occurred in roadway floor [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 848-855.
- [93] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, (2): 359-364.
- GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, (2): 359-364.
- [94] 潘一山, 王凯兴, 肖永惠. 基于摆型波理论的防冲支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1537-1543.
- PAN Yishan, WANG Kaixing, XIAO Yonghui. Design of anti-scour support based on theory of pendulum-type wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1537-1543.
- [95] 吴拥政, 付玉凯, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控原理与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(01): 132-144.
- WU Yongzheng, FU Yukai, HE Jie, et al. Principle and technology of ‘pressure relief-support-protection’ collaborative prevention and control in deep rock burst roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 132-144.
- [96] 左建平, 文金浩, 刘德军, 等. 深部巷道等强支护控制理论[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(02): 148-159.
- ZUO Jianping, WEN Jinhao, LIU Dejun, et al. Control theory of uniform strength support in deep roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 148 - 159.
- [97] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1585-1594.
- PAN Yishan, QI Qingxin, WANG Aiwen, et al. Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1585-1594.
- [98] 李晨. NPR 锚杆冲击拉伸动力学特性研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2016.
- LI Chen. Study on impacting and elongation dynamic mechanical characteristics of NPR bolt[D]. China University of Mining and Technology(Beijing), 2016.
- [99] ZHAO Tongbing, XING Minglu, GUO Weiyao, et al. Anchoring effect and energy-absorbing support mechanism of large deformation bolt[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 572-581.
- [100] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845-864.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1000m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845-864.
- [101] 关于开展灾害严重煤矿生产能力核定工作的通知[S]. 北京: 国家安全监管总局国家煤矿安监局国家发展改革委国家能源局国务院安全生产委员会, 2015.