中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

移动扫码阅读

李宏艳,莫云龙,孙中学,等. 煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):62-68.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.01.008

LI Hongyan,MO Yunlong,SUN Zhongxue,*et al*. Research status and prospect of coal bumps prevention and control technology[J]. Coal Science and Technology,2019,47(1):62-68.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.01.008

煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望

李宏艳[1,2],莫云龙[1,3],孙中学[1,2],李 磊[1,2]

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 矿山安全技术研究分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院),北京 100013;3. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要:基于我国煤矿冲击地压矿井的最新数据,从冲击地压致灾机理、监测预警和防治技术 3 个方面归纳了我国煤矿冲击地压灾害防控领域研究现状。综述了冲击地压发生机理、致灾机理,并从煤岩介质属性、环境应力以及赋存结构 3 个方面探讨了冲击地压防控机理的研究现状。冲击地压监测预警平台及设备较多,阐述了在现场应用较为广泛的自震式微震监测系统、应力在线监测系统、“震动场-应力场”联合监测预警系统、“全频广域”震动监测系统、电磁辐射监测仪、电荷监测系统等 6 种系统的应用现状。当前我国已经初步形成了浅部冲击地压灾害防控技术体系,重点阐述了主动支护防控冲击地压技术与装备的发展现状。最后对我国冲击地压防控研究提出了以下认识:灾变破坏的多尺度效应以及多尺度转变机制是揭示冲击地压发生机理新的突破口;从煤岩属性、环境应力以及煤岩结构控制 3 个方面着手,结合高效率、智能化防控装备是冲击地压防控技术发展的必由之路,煤岩动力灾害的一体化防控是深部开采的必然要求。

关键词:冲击地压;致灾机理;监测预警技术;复合动力灾害; 深部开采

中图分类号:TD324 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)01-0062-07

Research status and prospect of coal bumps prevention and control technology

LI Hongyan[1,2],MO Yunlong[1,3],SUN Zhongxue[1,2],LI Lei[1,2]

(1. *Mine Safety Technology Branch*,*China Coal Research Institute*, *Beijing* 100013,*China*;
2. *State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization*(*China Coal Research Institute*), *Beijing* 100013,*China*;
3. *School of Mechanics and Engineering*,*Liaoning Technical University*, *Fuxin* 123000, *China*)

Abstract:Based on the latest data of coal bumps mine in China,the research status of coal bumps has been summarized from these aspects: catastrophic mechanism, monitoring and early warning, and control technology. This paper summarizes the catastrophic mechanism of coal bumps, and discusses the research status of coal bumps control mechanism from three aspects of coal rock properties, environmental stress and occurrence structure. There are many monitoring and early warning platforms and equipments, and the application status of six systems (self-seismic microseismic monitoring system, stress on-line monitoring system, joint monitoring and early warning system of vibration field-stress field,full-frequency wide-area vibration monitoring system, electromagnetic radiation monitoring instrument and charge monitoring system) which are widely used in the field is expounded. China has initially formed a technical system for control of shallow coal bumps disaster, and the development status of active support and control technology and equipment are expounded. It puts forward the following understandings for the study of coal bumps control in China: the multi-scale effect of catastrophic damage and the multi-scale transformation mechanism are the new breakthrough to reveal the catastrophic mechanism; the only way for the development of coal rock dynamic disasters control technology is to start from the three aspects of properties, environmental stress and structure control, and to combine high efficiency and intelligent control equipment; the integrated prevention and control of coal rock power disasters is an inevitable requirement for deep mining.

Key words:coal bumps; catastrophic mechanism; monitoring and early warning technology; complex dynamic disaster;deep mining

收稿日期:2018-12-20;**责任编辑**:代艳玲

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51674143,51874176);国家自然科学基金青年基金资助项目(51704159)

作者简介:李宏艳(1978—),女,河北唐山人,研究员,博士(后)。E-mail:lhylhb@163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0 引　　言

冲击地压(冲击矿压)是指井巷或工作面周围岩体,由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象,常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等现象[1]。冲击地压具有很大的破坏性,是严重威胁煤矿安全生产的典型动力灾害之一。根据国家煤矿安全监察局 2017 年对全国冲击地压矿井调研数据显示[2],我国已经定性的冲击地压矿井达到 177 座,主要分布在我国山东、陕西、山西和黑龙江等 25 个省份。随着我国大多数矿井进入深部开采阶段,冲击地压灾害愈发严重,而且常诱发其他煤矿重大事故,如瓦斯异常涌出、煤与瓦斯突出、突水、瓦斯爆炸等灾害,造成次生灾害。由于深部岩体具有高应力、高瓦斯、高地温、高岩溶水压力的特点,推测未来井下由冲击地压诱发的复合动力灾害将会愈发常见,且诱发灾变的阈值有可能更低。统计分析表明,各种类型的矿井都有冲击地压发生,各类煤层都发生过冲击现象,地质构造从简单到复杂,煤层从薄到特厚,倾角从水平到急倾斜,砾岩、砂岩、灰岩、油母页岩顶板都发生过冲击地压。浅部开采也有发生冲击地压。从采煤方法来讲,长壁、短壁、房柱式、分层开采等都发生过冲击地压;从采煤工艺来讲,综采、普采、炮采、水采、水砂充填等各种工艺也都发生过冲击地压。因此,冲击地压防控是当今采矿、地质、力学和地球物理界亟待解决的科学与技术难题。我国冲击地压的研究,初步形成了理论-技术-装备-工程链条式的冲击地压防治技术体系,对冲击地压灾害的防控以及重特大冲击地压灾害的发生起到了遏制作用,但离完全控制冲击地压的发生还有很多科学问题与技术问题需要突破。笔者从冲击地压的发生与防控机理、冲击地压的监测预警技术与装备、冲击地压防控技术等方面,阐述当前我国煤炭行业冲击地压问题的研究现状,并对研究趋势进行展望。

1　冲击地压的致灾机理

自 20 世纪 50 年代南非成立世界上第一个冲击地压研究机构以来,业内学者提出了众多理论,仅我国提出的机理便已超过 100 种,是世界上提出冲击地压机理最多的国家[3]。此处笔者仅列出经典理论和国内最新成果。早期主要有强度理论[4-5]、刚度理论和能量理论[6-9]、“三准则”理论[10]、冲击倾向性理论[11]、变形失稳理论[12-14]。虽然这些理论不能完全解释冲击地压的发生,但构成了冲击地压机理研究过程中的理论基础。在此基础上,有学者提出“三因素”机理[1]、应力控制理论[15]、复合型厚煤层“震冲”机理、岩体动力失稳的折迭突变机理、冲击地压和突出的统一失稳理论[16]、冲击地压启动理论[17]、扰动响应失稳理论[18]、冲击源两体作用致灾机理[19]等。由于不同矿井地质赋存条件的差异,致使煤岩介质与赋存环境的相互作用机制也大不相同,因此尚没有一种具有普适性的冲击地压的致灾机理。

我国现有的冲击地压致灾机理可分为 4 类[20-21]:①从研究煤岩体材料的物理力学性质出发,分析煤岩体失稳破坏特点及诱使其失稳的固有因素,同时利用混沌、分叉等非线性理论来研究煤岩失稳过程;②从研究灾害区域所处的地质构造以及变形局部化出发,分析地质弱面和煤岩体几何结构与煤岩冲击失稳之间的相互关系;③工程扰动以及采动影响与冲击失稳之间的关系;④从能量角度出发,通过能量密度、能量释放率等指标或通过构建复合型能量转化为中心的煤岩冲击失稳分类体系,对煤岩冲击失稳的能量积聚和转化特征进行研究。

从冲击地压的致灾机理和典型案例分析,我国煤矿冲击地压灾害与以下条件密切相关。

1)煤岩体介质属性。冲击倾向性是鉴别煤岩介质本身冲击能力大小、是否具有冲击危险性的力学属性,据相关资料统计我国发生的冲击地压事故中,约有 75%煤层具有冲击倾向性。冲击倾向性已经成为我国冲击地压问题的基础性研究,冲击倾向性鉴定是煤层开采前的必要工作,现已形成了对我国煤矿安全生产一线具有指导意义的鉴定标准。但部分发生冲击地压的煤层不具有冲击倾向性,如平顶山十矿、徐州权台矿和北京大安山矿,故冲击倾向性理论的研究尚需完善。近几年,左建平等[22]分析了不同煤岩组合方式对冲击倾向性的影响。张广辉等[23]研究了瓦斯作用下煤体冲击倾向性的变化。也有学者尝试从其他角度提出新的冲击倾向性指标,如姜耀东等[24]研究发现煤的冲击倾向性与其细观结构特征紧密相连,可以用煤体微晶参数来判断煤层冲击倾向性的大小。

2)环境应力集中。煤岩体的环境应力分为相对静态的初始地应力(原岩应力)和相对动态的采动应力[25]。冲击地压主要发生在深部矿井中,大多数矿井埋深接近或超过 400 m,超过 400 m 埋深的矿井必须做冲击倾向性鉴定,这是工程实践达成的共识,说明了初始地应力在冲击地压孕灾的过程中起到关键作用。环境应力集中的另一因素为相对动态的采动应力,如开采强度过高,工作面见方,放炮

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

等工程扰动的影响,采场布置的不合理等因素均会造成采动应力集中。如鹤岗矿区富力煤矿 1998 年发生的冲击地压事故位于三面采空的孤岛地带;阜矿集团艾友煤矿 2015 年某综放工作面临近采终,造成煤柱区域应力集中,在施工大断面拆装硐室时诱发冲击地压。早期的强度理论、能量理论都认识到了应力场对冲击地压灾害的主控作用;现阶段提出的冲击地压应力控制理论,更是针对环境应力这一诱发因素,从发生机理、预警手段和防治技术上均做了系统研究。

3)赋存结构。研究表明[26-28],断层、褶皱、相变等构造带附近容易发生冲击地压灾害。构造对煤岩冲击灾变的影响主要体现在:①断层、褶皱等区域构造在形成过程中,储存在岩层中的弹性能,传递至采掘的煤体中。②断层、褶皱和相变等构造带中有残余应力,轴向上与采掘活动形成的超前支撑压力叠加,造成应力集中;水平方向上,构造应力的存在增加了煤岩体轴向抗压强度,可以积聚更多的弹性能。③处于构造带不同部位的煤岩体,受力状态不同,形成较大的空间应力梯度。④诸多开采活动可诱发断层活化运动,不仅增加了区域范围内煤岩体承受的静载压力,也产生了显著的动载扰动。如义马煤田跃进煤矿和千秋煤矿受区域构造的影响,都是典型的冲击地压矿井。地质构造分为增压型和减压型,减压型构造不是冲击地压的诱因,遇见具体问题时需要区分。

坚硬煤层上覆巨厚、坚硬岩层[29-30],巨厚或坚硬顶板岩性多为砾岩、砂岩,对冲击地压的诱发作用体现在以下 3 方面:①巨厚、坚硬的顶板岩层不易充分垮断,形成大范围悬顶。由于煤层本身也具有较高强度,顶板与煤层均可积聚大量的变形能,容易诱发冲击地压。②巨厚、坚硬的顶板岩层一部分作为下方煤层的静力源,同时一部分对采场围岩结构起支撑作用。超前采场对顶板进行预裂卸压时,导致采场上方顶板自身悬臂支撑作用的减弱甚至消失,原来的悬臂梁变为断裂后的裂隙体梁或简支梁。随着采场的不断前移,顶板急剧下沉并断裂,导致灾害发生。③巨厚顶板岩层的运动还可能引起周围断层活化,断裂产生的弹性波在采场中传播也可诱发影响区域内煤岩的灾变。这些特点在大同忻州窑矿、北京城子矿、河南千秋煤矿等都有体现。

2　冲击地压监测预警技术

冲击地压监测预警方法众多,可分为岩石力学方法、地球物理方法和经验类比法[31]。岩石力学方法包括矿压观测法、钻屑法、顶板离层观测法、钻孔应力测量法;地球物理方法包括电磁辐射法、地音法、微震法、地震 CT 技术、电荷感应监测技术等;经验类比法是根据以往对发生过冲击地压矿井的经验进行总结,用于预测条件相似的矿井的冲击地压,但受人为因素影响较大。这些技术手段构成了我国冲击地压监测预警体系的基础,目前我国矿井应用最多的是钻屑法、微震监测和地音监测。

由于冲击地压致灾机理尚不明确,矿井地质赋存条件、开采条件类型众多,为提高预警的可靠性,现场多采用区域监测和局域监测相结合,多参量同步监测的方法,目前部分煤矿如千秋煤矿、郓城煤矿等已经建立了多参量实时在线、联合监测预警平台,并对现场安全生产工作起到了重要的指导意义[32-33],但尚未在全国范围内推广。以下对目前现场应用较多的预警平台和系统进行综述。

2.1　自震式微震监测系统

齐庆新等[34]研发的 KJ768 自震式微震监测系统可以得到矿山微震事件的位置、能量和频谱特征,用以实时、连续监测煤岩体应力分布、顶板断裂、岩层活动、构造分布等情况。该技术已在神东矿区石圪台等矿成功应用,有效地解决了浅埋房式采空区下方综放开采条件下的围岩动载破坏监测问题。

2.2　应力在线监测系统

冲击地压发生的根本原因是在地应力和采动应力综合作用下形成了高度的应力集中,采动应力受采掘工作面的动态改变而不断变化,因此可以通过煤岩体应力的长期在线监测来实现冲击地压的预警[31]。欧阳振华等[35]研制的光纤光栅应力在线监测系统,采用一孔多点的钻孔应力测试技术,可实现工作面多种应力参量的实时动态监测、动态显示工作面范围内应力场和位移场,实时预警煤岩动力灾害等功能。此外,姜福兴等[36]也研制了 KJ550 全矿应力在线监测系统,可实现采掘工作面、煤柱、上下山全矿监测。钻孔应力观测技术,能够有效显示采掘过程中,煤岩系统应力集中程度的变化以及危险区域分布情况,尤其是对卸压解危措施的有效性可以起到良好的实测分析的作用。

此外,当量钻屑监测也是冲击地压预警技术体系中的有效手段。冲击地压孕育过程中,随着危险性的增加,钻孔出屑量应该逐渐增多,而钻屑增多的根源在于采动应力的集中,理论上二者有对应的数量关系。尹永明等[37]研发的 KJ615 掘进工作面冲击地压实时监测预警系统,通过对掘进过程中钻孔应力的连续监测,推测钻孔出屑量的变化,从而实现

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

冲击地压危险性实时预警的目的。

2.3 “震动场-应力场”联合监测预警系统

文献[38-39]提出了“震动场-应力动态”一体化监测预警系统。该系统形成了以震动波 CT 监测为主、采动应力为辅的空间“应力场”预警方法,其中以波速异常与波速梯度异常为震动波 CT 主要预警指标,煤体应力增量为应力监测主要预警指标,并通过建立不同时域内震动能量与煤岩破裂状态的耦合关系,提出冲击变形能物理模型与预警指标,即以地音能量或事件数偏差值为地音预警主要预警指标,以离层速度比为采空区离层监测主要预警指标,从而形成煤岩冲击危险“震动场-应力场”的多参量预测与监测预警体系,实现了冲击危险分析预测与实时监测预警相结合、区域到局部逐级筛查的聚焦式预警。

2.4 “全频广域”震动监测系统

传统的微震监测手段只能监测到低频高能的微震事件,忽略了高频低能事件,对冲击地压孕育、发生的全过程监测不全面,造成预警准确率低,且容易出现漏报现象。刘金海等[40]研制的“全频广域”震动监测系统通过配备各种频率的微震监测设备,对工作面、巷道围岩、矿井、矿区整个区域内各种频率、能量级的微震事件拾取。类似的,姜福兴等(2015 年国家煤矿安全监察局召开的煤矿冲击地压灾害防治研讨会资料)将震动事件频率分为:高频的小尺度损伤、中高频的微破裂事件、中频破裂事件、中低频贯通滑移和低频失稳。研制的微震一体化系统包括 KJ926 地音与微震综合监测系统监测高频、中高频事件,高精度 KJ551-Ⅰ煤矿微震监测系统监测中频、中低频事件,全矿井 KJ551-Ⅱ煤矿微震监测系统监测低频大能量事件。目前,该系统可有效记录矿区周围的地震事件、矿区范围内的冲击地压事件、矿井范围内的矿震事件与爆破事件、工作面区域的岩层破裂事件与构造活化事件。

2.5 电磁辐射监测仪

电磁辐射监测技术是一种较为有效的煤岩动力灾害监测手段。王恩元等[41]研制了 KBD5 便携式和 KBD7 在线式煤岩动力灾害电磁辐射监测仪,其中前者用于确定具体的冲击危险区域,后者用于在某一具体的危险区域进行连续监测及预警。该套系统在山东华丰等 40 余个煤矿进行煤岩动力灾害的监测预报,能与顶板周期来压、采掘空间的矿压分布、松动圈有较好的响应,在大能量的冲击事件或矿震发生前,有明显的激增或趋势上的变化。

2.6 电荷监测系统

冲击地压孕育过程中,煤岩变形破裂与瓦斯运移产生大量电荷。通过监测这些电荷辐射信息,可对冲击地压等动力灾害进行预测。潘一山等[42-43]在煤岩变形破裂过程电荷辐射特性研究的基础上,获得了冲击地压和煤与瓦斯突出条件下,电荷辐射信号特征的差异;研制了在线式煤岩电荷辐射监测系统,可对工作面超前煤体内电荷变化进行连续、实时监测。此外还有工作面液压支架阻力监测装置、顶板离层仪等监测预警装备。这些设备为冲击地压矿井常用设备,已经在各大矿井得到广泛使用。

3 冲击地压防治技术

3.1 冲击地压应力控制技术

我国目前已经初步形成了以应力控制为主的浅部矿井冲击地压防控技术体系。虽然冲击地压致灾机理目前尚未真正掌握,但是影响冲击地压的诸多因素被界内学者明确,为冲击地压的防治工作提供了参考。冲击地压矿井需要采取区域和局部相结合的防冲措施。在矿井设计、采(盘)区设计阶段应当先行采取区域防冲措施,从区域范围降低应力水平,整体上减弱冲击危险程度。区域防治技术主要包括 2 个方面:①从优化开采设计出发的区域冲击危险防治技术,主要有开拓方式、采掘部署、煤层群的开采顺序、保护层开采、工作面的顺序开采、煤柱尺寸设计、主要巷道位置及层位选择、采煤方法与采煤工艺的选择等,这是从开采源头上避免应力集中,防控冲击地压的有效手段。②从区域范围弱化煤岩体和降低应力水平的防治技术,主要有煤体注水、区域的煤体预卸压、顶板预裂等。

对已形成的采掘工作面应当在实施区域防冲措施的基础上及时跟进局部防冲措施。冲击地压局部防治技术则是针对受到特殊因素影响的或监测有异常的局部区域,采取局部范围的防治措施,主要有煤层钻孔卸压、煤层爆破卸压、煤层注水、顶板爆破预裂、顶板水力致裂、底板钻孔或爆破卸压、弱化断层煤柱等。其中应用最多的 3 种技术分别为煤层大直径卸压钻孔、顶板水力压裂、顶底板深孔爆破。

3.2 冲击地压支护设备

冲击地压危险区域必须采取加强支护措施,支护设备分为液压支架、锚杆(索)2 种,支护方式多为锚杆主动支护和钢架棚被动支护相结合。新型支护设备主要有潘一山等[44-45]研制的新型防冲吸能巷道液压支架,通过采用刚度较大的梁体和工作阻力较高的液压支柱来增加支护体系的整体刚度,同时

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

采用多孔泡沫金属材料或吸能构件来增大支护中的阻尼系数,利用其优异的吸能特性使支护体系能够在围岩冲击下快速吸收冲击能并稳定地变形让位。何满潮等[46-47]自主研发的恒阻大变形锚杆由恒阻装置和弹性杆体组成,能提供恒定的工作阻力和稳定变形量,不仅适用于软岩巷道、深部巷道的围岩控制,也可有效控制冲击地压等动力灾害。文献[48-50]从支护理论、锚杆预处理、新锚杆材料研发等层面对巷道支护问题开展了系统研究,针对多条巷道支护难的问题,提出了高预应力强力锚杆一次支护理论,即大幅度提高支护系统的初期支护刚度与强度,减少围岩强度降低,保持围岩的完整性,并开发了强力支护系统;采用超高强热处理技术可大幅度提高锚杆强度;CRM600 锚杆材料不仅能够满足常规巷道支护的要求,在冲击载荷作用下表现出优越的瞬时延伸性能和吸能能力。此外还尝试了用预应力钢棒替代高强度锚杆支护的研究[51]。尽管在主动支护方面得到较大的发展,但巷道冲击地压还未得到根本性的遏制。

4　冲击地压防控技术发展趋势

1)灾变破坏的多尺度效应以及多尺度转变机制是揭示冲击地压发生机理新的突破口。煤矿冲击地压发生机理的研究成果较多,但由于煤层结构和环境应力十分复杂,发生机理仍然需要从煤岩介质自身属性以及灾变破坏的多尺度效应、多尺度灾变转化机制上对冲击地压发生的本质进行深入研究。

2)冲击地压灾害防控机理的研究是确保防治技术有效性的客观要求。矿业工程重在解决实际问题,一直存在着技术先行理论滞后的现状,影响了煤矿工业向精细化发展,尤其是煤矿安全领域,防控理论的研究滞后于防治技术的发展,也正是由于理论研究的滞后,阻碍了防控技术在解危成效上的最大化,因此需要开展冲击地压灾害防控机理的研究,为煤矿灾害的防治新技术提供理论支撑。

3)冲击地压灾害的监测预警与智能感知等技术的融合是必然要求。冲击地压事故的监测监控设备较多,但大多数都是根据某一发生机理,研发的监测设备,由此监测预警的准确性也是在一类冲击地压事故中有较好的表现。冲击地压致灾因子的识别以及预警模型都还需要深入的研究,尤其是在煤矿开采智能化少人化的大背景下,对冲击地压灾害的监测监控与预警也提出了更高的要求,与互联网+相结合的智能感知技术的应用也成为可能。

4)从煤岩属性、环境应力以及煤岩结构控制 3 个方面着手,结合高效率、智能化防控装备是防控技术发展的必由之路。冲击地压防控技术的研究一直是研究的重点,以服务于现场需求为目标。冲击地压防控技术区域解危方法以合理的巷道布置和合理的开采方法结合区域卸压措施为主,并没有更有突破性的方法来控制。对于局部解危措施,从致灾因素来看可以从 3 个方向入手:①控制环境应力,主要控制采动应力,因此局部的卸压技术成为主力;②控制煤岩介质属性,煤层注水是常用手段;③煤岩结构的控制,顶板卸压技术也是冲击地压防控的主要手段,已经形成工程化。但在冲击地压防控技术装备上需要向高效率、智能化的方向发展,例如大直径钻孔卸压装备大功率远程控制钻机以及顶板水力压裂装备等。

5)煤岩动力灾害的一体化防控是深部开采的必然要求。冲击地压灾害与煤与瓦斯突出灾害并称为煤岩动力灾害,随着煤矿开采条件的复杂化,冲击地压灾害与其他灾害相互诱发时有发生,因此需要对冲击地压诱发其他灾害的机理、防控技术等进行一体化研究,尤其是与煤与瓦斯突出灾害等复合型灾害的一体化研究。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 国家煤矿安全监察局科技装备司.全国煤矿冲击地压矿井专项调研报告[R].北京:国家煤矿安全监察局科技装备,2017.

[3] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2188-2204.

[4] BRAUNER G.Rockbursts in coal mines and their prevention[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1994.

[5] BURGERT W, LIPPMANM H.Models of translatory rock bursting in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1981, 18:285-194.

[6] COOK N G W.The basic mechanics of rockburst[J]. Journal of South African Institute of Mining & Metallurgy, 1963, 64:71-81.

[7] BECK D A, BRADY B H G.Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(5):633-642.

[8] COOK N G W.A note on rockbursts considered as a problem of stability[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65:437-446.

[9] CROUCH S L, FAIRHURST C, Mechanics of coal mine bumps [J]. Society of Mining Engineers, 1974, 256:317-321.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

[10] 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):37-43.
LI Yusheng. The mechanism of impact ground pressure and its preliminary application[J].Journal of China University of Mining & Technology,1985(3):41-43.

[11] KIDYBINSKI A.Bursting liability indices of coal[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1981,18:295-304.

[12] ORTLEPP W D.Study of rockburst source mechanism[J].Safety in Mines Research Advisory Committee,2000,524:1-42.

[13] ZUBELEWICA O C,MROZ Z.Numerical simulation of rockburst processes treated as problems of dynamoic instability[J].Rock Mechanics & Rock Engineering,1983,16:253-274.

[14] 章梦涛.冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J].岩石力学与工程学报,1987,6(3):197-204.
ZHANG Mengtao.Theory and numerical simulation of impact pressure instability[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1987,6(3):197-204.

[15] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6):35-40.
QI Qingxin,LI Xiaolu,ZHAO Shankun.Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J].Coal Science and Technology,2013,41(6):35-40.

[16] 潘一山.煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J].煤炭学报,2016,41(1):105-112.
PAN Yishan.Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J].Journal of China Coal Society,2016,41(1):105-112.

[17] 潘俊锋,宁 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,2012,21(3):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,2012,21(3):586-596.

[18] 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.

[19] 向 鹏,纪洪广,孔灵锐,等.基于两体系统动态加卸载效应的冲击地压机理[J].煤炭学报,2016,41(11):2698- 2705.
XIANG Peng,JI Hongguang,KONG Lingrui,*et al*.Rockburst mechanism analysis based on dynamic loading and unloading effect of two-body systems[J].Journal of China Coal Society,2016,41(11):2698-2705.

[20] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong,PAN Yishan,JIANG Fuxing,*et al*.State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J].Journal of China Coal Society,2014,39(2):205-213.

[21] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等.煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M].北京:科学出版社,2009.

[22] 左建平,陈 岩,崔 凡.不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):81-87.
ZUO Jianping,CHEN Yan,CUI Fan.Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal-rock combined bodies[J].Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(1):81-87.

[23] 张广辉,欧阳振华,齐庆新.瓦斯对煤冲击倾向性影响的试验研究[J].煤炭学报,2017,42(12):3159-3165.
ZHAGN Guanghui,OUYANG Zhenhua,QI Qingxin,*et al*.Experimental research on the influence of gas on coal burst tendency[J].Journal of China Coal Society,2017,42(12):3159-3165.

[24] 姜耀东,赵毅鑫,何满潮,等.冲击地压机制的细观实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):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(8):901-907.

[25] 欧阳振华.煤矿冲击地压区域应力控制技术[J].煤炭科学技术,2016,44(7):146-152.
OUYANG Zhenhua.Technology of mine pressure bump regional stress control[J].Coal Science and Technology,2016,44(7):146-152.

[26] 王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(S2):263-268.
WANG Cunwen,JIANG Fuxing,LIU Jinhai.Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases[J].Journal of China Coal Society,2012,37(S2):263-268.

[27] 吕进国,南存全,张 寅,等.义马煤田临近逆冲断层开采冲击地压发生机理[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):567-574.
LYU Jinguo,NAN Cunquan,ZHANG Yin,*et al*.Coal bump mechanism in Yima Coalfield mining near thrust fault[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(3):567-574.

[28] 齐庆新,欧阳振华,赵善坤,等.我国冲击地压矿井类型及防治方法研究[J].煤炭科学技术,2014,42(10):1-5.
QI Qingxin,OUYANG Zhenhua,ZHAO Shankun,*et al*.Study on types of rock burst mine and prevention methods in China[J].Coal Science and Technology,2014,42(10):1-5.

[29] 许家林,鞠金峰.特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1547-1556.
XU Jialin,JU Jinfeng.Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(8):1547-1556.

[30] 秦忠诚,刘玉腾,王生超,等.基于微震监测的深埋“两硬”综放面覆岩运动规律研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1):74-78.
QIN Zhongcheng,LIU Yuteng,WANG Shengchao,*et al*.The study of motion regularity of overlying strata over deep-buried “dual hard” fully-mechanized workface based on microseismic monitoring[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(1):74-78.

[31] 齐庆新,李宏艳,邓志刚,等.我国冲击地压理论、技术与标准体系研究[J].煤矿开采,2017,22(1):1-5.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

QI Qingxin, LI Hongyan, DENG Zhigang, *et al*. Studying of standard system and theory and technology of rock burst in domestic[J].Coal Mining Technology,2017,22(1):1-5.

[32] 赵善坤,李宏艳,刘　军,等.深部冲击危险矿井多参量预测预报及解危技术研究[J].煤炭学报,2011,36(S2):339-345.
ZHAO SHankun,LI Hongyan,LIU Jun,*et al*.The research of deep rock burst dangerous mine prediction with multiparameter and danger rescission technology[J].Journal of China Coal Society,2011,36(S2):339-345.

[33] 王　永,刘金海,王颜亮,等.煤矿冲击地压多参量监测预警平台研究[J].煤炭工程,2018,50(4):19-21.
WANG Yong,LIU Jinhai,WANG Yanliang,*et al*.Study on multi-parameter monitoring and warning platform for rock burst[J].Coal Engineering,2018,50(4):19-21.

[34] 齐庆新,孔令海,欧阳振华,等.自震式微震监测系统:CN203962043U[P].2014-11-26.

[35] 欧阳振华,张　辉,赵善坤.煤矿井下一孔多点光纤光栅钻孔应力测试装置:CN203519216U[P].2014-04-02.

[36] 姜福兴,成　功,冯　宇,等.两侧不规则采空区孤岛工作面煤体整体冲击失稳研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4164-4170.
JIANG Fuxing,CHENG Gong,FENG Yu,*et al*.Reserch on coal overall instability of isolated working face with irregular gobs on both sides[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S2):4164-4170.

[37] 尹永明,姜福兴,朱权洁.掘进面冲击地压实时无线监测预警技术[J].煤矿安全,2014,45(3):87-91.
YIN Yongming,JIANG Fuxing,ZHU Quanjie. Rockburst real-time wireless monitoring and early warning technology in heading face[J].Safety in Coal Mines,2014,45(3):87-91.

[38] 刘金海,翟明华,郭信山,等.震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J].煤炭学报,2014,39(2):353-363.
LIU Jinhai,ZHAI Minghua,GUO Xinshan,*et al*.Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J].Journal of China Coal Society,2014,39(2):353-363.

[39] 窦林名,牟宗龙,李振雷,等.煤矿冲击矿压监测预警与防治研究进展[J].煤矿支护,2015(2):17-26.
DOU Linming, MOU Zonglong, LI Zhenlei, *et al*. Research progress on monitoring,early warning and prevention of mine rock pressure[J].Coal Mine Support,2015(2):17-26.

[40] 刘金海,高林生,朱权洁,等.一种矿震、冲击地压的全频广域震动监测系统:CN106443761A[P].2017-02-22.

[41] 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.

[42] 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 Yangfeng,LI Guozhen.Charge-induced technique of rockburstprediction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanicsand Engineering,2012,31(S2):3988-3993.

[43] 潘一山,徐连满,李国臻,等.煤矿深井动力灾害电荷辐射特征及应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1619-1625.
PAN Yishan, XU Lianman, LI Guozhen, *et al*. Characteristics of charge radiation of dynamic disasters in deep coal mine[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(8):1619-1625.

[44] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J].煤炭学报,2014,39(2):222-228.
PAN Yishan,XIAO Yonghui,LI Zhonghua,*et al*.Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J].Journal of China Coal Society,2014,39(2):222-228.

[45] 唐　治,潘一山,朱小景,等.自移式吸能防冲巷道超前支架设计与研究[J].煤炭学报,2016,41(4):1032-1037.
TANG Zhi,PAN Yishan,ZHU Xiaojing,*et al*.Design and study of self-moving energy absorption and anti-impact roadway advanced support[J].Journal of China Coal Society,2016,41(4):1032-1037.

[46] 何满潮,郭志彪.恒阻大变形锚杆力学特性及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1297-1308.
HE Manchao,GUO Zhibiao.Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(7):1297-1308.

[47] HE M C,GONG W L,WANG J,*et al*.Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2014,67(1):29-42.

[48] 曹晨明,吴拥政.高预应力强力支护系统及其在潞安矿区的应用[J].煤炭科学技术,2008,36(11):26-29,32.
CAO Chenming, WU Yongzheng. High pre-stressed support system and application in Lu'an Mining Area[J].Coal Science and Technology,2008,36(11):26-29,32.

[49] 吴拥政,康红普,丁　吉,等.超高强热处理锚杆开发与实践[J].煤炭学报,2015,40(2):308-313.
WU Yongzheng,KANG Hongpu,DING Ji,*et al*.Development and application of ultrahigh-heat processed rock bolts[J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):308-313.

[50] 林　健,吴拥政,丁　吉,等.冲击矿压巷道支护锚杆杆体材料优选[J].煤炭学报,2016,41(3):552-556.
LIN Jian,WU Yongzheng,DING Ji,*et al*.Optimization of bolt rod material used in rock-burst roadway bolting[J].Journal of China Coal Society,2016,41(3):552-556.

[51] 吴拥政,康红普,吴建星,等.矿用预应力钢棒支护成套技术开发及应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3230-3237.
WU Yongzheng,KANG Hongpu,WU Jianxing,*et al*.Development and application of mine prestressed steel bars supporting technology[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S1):3230-3237.