

我国冲击地压发生机理、监测预警及防治现状与展望

张全平¹, 吴少康², 郝英豪¹, 王新振², 简丰坝¹, 杨如鑫¹, 欧才权¹, 董贾坤²

- 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017200;
- 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 1001-0076(2026)01-0163-13
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2026.01.003

摘要 随着煤炭资源开采深度增加与规模扩大, 冲击地压已成为制约煤矿安全生产的重大动力灾害。系统综述了我国冲击地压在机理认知、监测预警及防治技术领域的研究进展。基于全国 150 余座冲击地压矿井的分布特征与典型案例, 现有研究已揭示地质构造、采动应力、煤岩体属性及多场环境的多因素耦合致灾机理。在监测技术方面, 现有成果通过对比微震、地音、电磁辐射等单一技术在深浅部开采中的效能差异, 构建了“微震—应力—电磁”多参量融合预警平台, 推动深部预警准确率得到提升。防治技术领域已形成“采矿优化设计—卸压减冲—防冲吸能支护”的协同体系, 通过从源头规避风险、主动释放能量到被动缓冲防护的全流程管控, 实现冲击地压“预防—治理—防护”的闭环防控。在门克庆煤矿等典型矿区的工程实践中, 该体系已显现显著效果, 使微震事件能级、能量及频次大幅降低。未来研究需进一步攻克人工智能驱动的多源数据融合、复杂地质条件下的主动防控等技术瓶颈, 推动构建“智慧防冲”体系, 为煤炭工业安全高效发展提供支撑。

关键词 冲击地压; 发生机理; 监测预警; 防冲吸能; 巷道支护

引言

冲击地压是采掘工作面煤岩体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], 且大概率会诱发矿井煤与瓦斯突出、井下火灾、巷道和工作面来压片帮和顶板冒落, 造成严重后果。目前, 随着已有矿井采掘深度和新建矿井规模的不断增加, 冲击地压已成为阻碍全世界煤炭资源开发利用必须要面对的重大难题^[2]。此外, 随着西方大多数发达国家注重于清洁能源的利用, 煤炭资源在国外所占能源消耗比例不断减少, 中国已成为当前开展冲击地压预防治理研究人数最多、规模最大的国家。据不完全统计^[3], 世界上首次发生冲击地压灾害于 1738 年英国南史塔福煤田, 我国自 1985 年开始冲击地压矿井数量逐渐上升, 当时仅 30 个左右冲击地压矿井; 到 2011 年时, 已接近 142 个, 且开采深度达到千米的就有近 50 个。近几年, 冲击地压事故频繁发生。2018 年前后多次

发生冲击地压事故。如吉林龙家堡“6·9”事故、山东新巨龙矿“2·22”事故、陕西彬长孟村矿业“5·24”冲击地压事故等^[4]。

经过长期研究, 我国已经形成整套冲击地压技术体系^[5]。冲击地压发生机理、现场实时预警监测、卸压减冲措施及现场工业性试验已取得很多成果。但仍有很多问题需进一步解决。为进一步了解冲击地压发生的原因、事前监测、采取措施防治等, 笔者系统总结了我国冲击地压发生机理—监测预警—防治措施等体系。研究结果可为从事冲击地压发生机理、监测及防治的研究人员提供参考。

1 我国冲击地压分布特点

当前, 我国发生冲击地压的煤矿数量已超过 150 座, 所受影响矿井年产煤量约 5 亿 t^[6], 是当前世界冲击地压发生矿井总数量最多且情况最为复杂的国家。2000—2014 年间, 我国煤炭产量飞速增加, 随后开始减少, 煤矿安全系数不断提高。但在这样

收稿日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U23B2093); 国家自然科学基金重点项目(52034009)

作者简介: 张全平(1974—), 安徽萧县人, 高级工程师, 长期从事煤矿采掘技术和安全管理工作。

共同第一作者: 吴少康(1996—), 男, 安徽安庆人。从事冲击地压、巷道支护等方面研究工作, E-mail: wsk13037896248@126.com。

一个大背景下,我国冲击地压灾害矿井总数却一直增长,一定程度上说明冲击地压复杂、难防范和难治理,以及对其研究和重视程度不足。我国冲击地压灾害发生的地域广泛,大部分位于华北、华东和中部区域。其中,山东约 33 个冲击地压矿井,为全国拥有该类型灾害矿井数量最多的省份^[7]。自 2010 年来,随着现存老矿井逐渐向深部开采,煤炭资源开采重心向西部地区转移,东部的黑龙江省和山东省及西部的内蒙古自治区等地成为冲击地压发生的高频区。例如,原来该类灾害发生较少的鄂尔多斯地区,由于采掘深度的加深和采掘规模的增大,新增大量冲击地压灾害矿井^[8]。表 1 为我国冲击地压矿井年产能,总量达到 4.5 亿 t。图 1 为我国不同省份发生冲击地压的矿井平均埋深。

表 1 我国冲击地压矿井年产能 /10⁷t
Table 1 Annual production capacity of coal mines with rock burst in China

地区	陕西	新疆	内蒙古	江苏	山东	山西	甘肃	河南	黑龙江	河北	辽宁	吉林
产能	11.284	1.14	9.28	1.114	8.262	0.76	3.79	0.73	2.305	0.3	1.39	0.21

由图 1 可得,埋深在 400 m 范围就会出现冲击地压现象^[9]。图 2 为近年来我国典型冲击地压事故及诱因,可以看出,大多受采动应力、构造应力、坚硬顶板、断层、褶曲等影响,同时也有几种原因一起构成,如陕西彬长孟村矿“5·24”事故中,褶曲构造与大理深采动应力叠加,使煤岩体应力集中系数达 3.2 倍,远超临界值。冲击地压事故每次发生都造

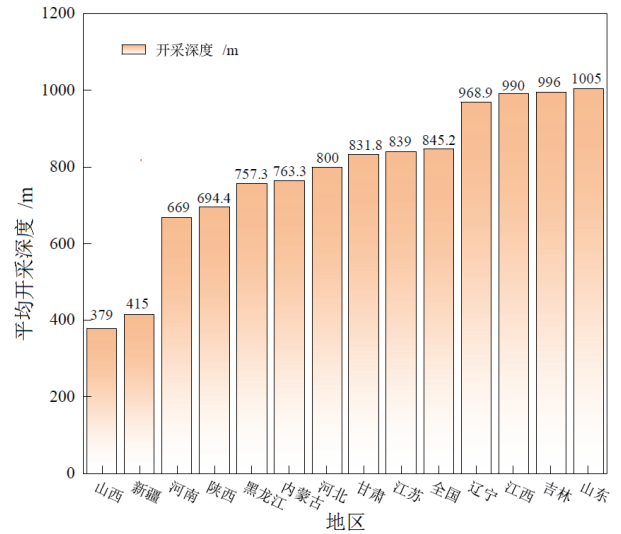


图 1 冲击地压矿井开采深度^[9]
Fig. 1 Mining depth of coal mines with rock burst^[9]

成了人员的重大伤亡,也造成了工程设备的损坏、巷道的报废及经济的巨大损失。因此,了解冲击地压发生机理、监测以及防治冲击地压是目前亟待解决的难题。

2 冲击地压灾害发生机理

冲击地压灾害发生的前提、原理和演变流程即为其发生机理^[10]。关于冲击地压灾害的发生机理研究,20 世纪 50 年代初首次提出强度理论^[11],随后又有了刚度理论^[12]、冲击倾向性理论^[13]、能量理论^[14]等成果。这 4 个机理是所有冲击地压发生机理中最基础的理论,后续很多理论都是从其演变而来。如“三准则理论”^[15]、“三因素”理论^[16-17]、变形失稳理论^[18]、弱化减冲理论^[19-20]、冲击启动理论^[21]

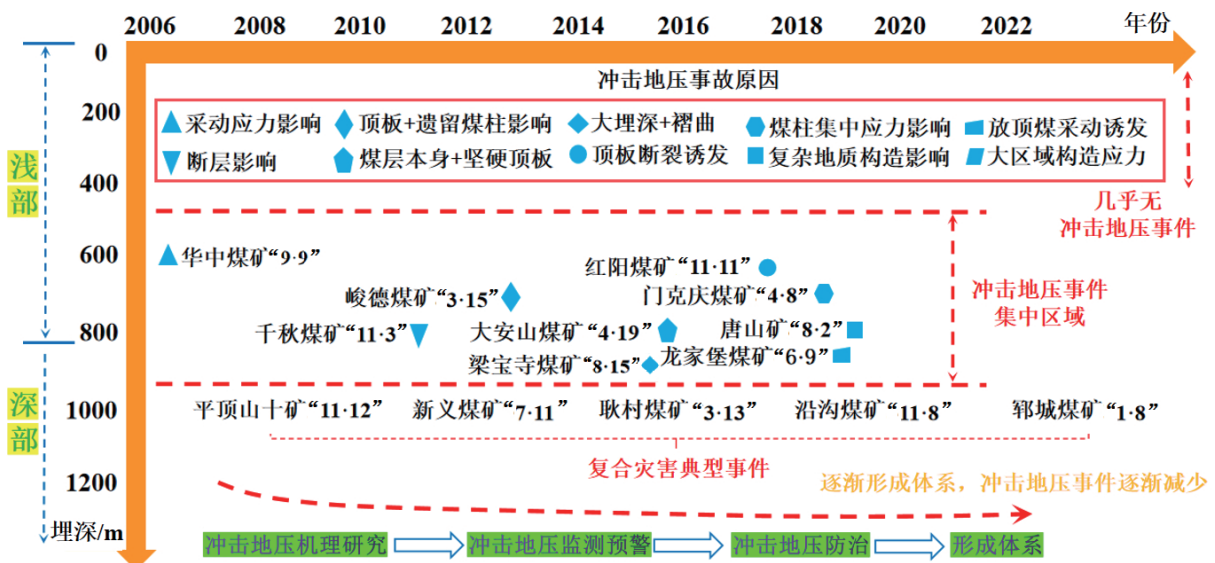


图 2 近年来我国典型冲击地压事故及诱因
Fig. 2 Typical impact ground pressure accidents and their causes in China in recent years

等。这些理论在经典基础理论的框架上, 进一步结合我国煤矿复杂地质条件与开采实践, 从不同维度深化了对冲击地压发生机理的认知。根据对这些机理的系统梳理, 依据其核心原理可划分为不同类别, 各类机理的典型理论及特点如表 2 所示。由表 2 可知, 基于“强度与极限平衡”的机理, 以强度理论、“三准则理论”为代表, 聚焦“应力—强度”关联, 适用于浅部局部应力集中引发的冲击。基于“刚度匹配关系”的机理, 以刚度理论为核心, 关注“煤体—支架”系统刚度耦合, 对支护失效诱发的冲击有解释力。基于“材料固有属性”的机理, 如冲击倾向性理论, 强调煤岩体自身冲击倾向性是内在前提, 可用于早期识别高风险煤体。基于“能量平衡与转移”的机理, 包括能量理论、冲击启动理论, 量化能量与冲击的关联, 能解释深部高应力下的冲击。基于“多因素耦合”的机理, 如“三因素”理论、变形失稳理论, 可解释复杂地质条件下多因素叠加导致的冲击。基于“弱化与调控”的机理, 以弱化减冲理论为典型, 为卸压减冲技术提供理论依据。

通过对提出的发生机理深入探讨, 可以发现这些理论相互关联, 均是对冲击地压发生机理及类型的细化。国内大量工程实践表明^[22-23], 冲击地压灾害发生于冲击性煤岩体材料本身性质。因此, 有必要对冲击地压灾害的灾变演化机制研究更加细化。冲击性煤岩体材料的物理力学性质、微观结构及动态响应特征, 是冲击地压发生的内在基础, 可从以下方面剖析^[24], 如冲击性煤岩体材料物理力学性质、微观结构及动态响应特征^[25]。弹性模量高、

强度大、泊松比高的岩体易积聚弹性应变能, 孔隙率低且硬矿物含量高的微观结构会降低能量耗散效率, 应变率敏感性强与滞回特性弱的动态特征则促使能量突发释放^[26]。此外, 温度、水、瓦斯等会改变岩体材料特性^[27]。当前研究虽已明确岩体材料特性的定量影响, 但多尺度能量传递机制、动态损伤模型及原位监测技术仍需突破。以陕西某矿为例, 其煤层在埋深 800~1 000 m 处, 由于强矿震+高应力+动静载扰动造成不同于常规冒顶灾害的复合灾害, 冲击能量指数远超实际^[28]。未来需从微观结构与宏观特性的映射关系入手深入研究, 为精准防治提供支撑。

3 冲击地压监测与防治

当前, 随着对冲击地压认识的逐渐深入, 以及对影响因素的定量化描述和发生机理研究的不断完善^[29-30], 已能够针对不同类别冲击地压灾害矿井的地质条件与风险特征, 提出精准化的预防治理办法, 实现冲击地压灾害高效的防控。总体来说, 我国冲击地压灾害监测和防治技术均取得显著成果, 且已形成多层次、多维度的完善体系。图 3 为目前煤矿冲击地压实时监测技术及防治技术系统。由图 3 可知, 监测技术主要从煤岩震动、煤体应力、围岩运动等多维度构建立体监测网络, 现场需结合矿井实际条件明确实用监测手段, 为提前察觉危险、精准划定风险区域提供可靠技术路径。防治技术则形成“区域防范与局部解危”的协同框架: 区域防范通过优化开采布局、合理设计工作面参数等源头性措施, 从根本上降低冲击风险; 局部解危则针

表 2 冲击地压发生机理及特点分类

Table 2 The occurrence mechanism and classification of characteristics of rock burst

分类依据	典型理论	特点
强度与极限平衡	强度理论 ^[11] 、“三准则理论” ^[15]	聚焦“应力—强度”直接关联, 物理意义明确, 适用于解释浅部开采中因局部应力集中(如煤柱、断层附近)导致的冲击地压, 对深部复杂应力场下的动态破坏解释性有限
刚度匹配关系	刚度理论 ^[12]	突破单一强度视角, 引入“系统动态响应”概念, 为支护设计提供理论依据, 适用于解释巷道支护失效诱发的冲击地压
材料固有属性	冲击倾向性理论 ^[13]	强调煤岩体自身“冲击倾向性”是内在前提, 可通过冲击能量指数等指标量化, 为冲击危险矿井早期识别提供关键依据, 是区域防控中“规避高风险煤体”的理论基础
能量平衡与转移	能量理论 ^[14] 、冲击启动理论 ^[21]	量化能量与冲击的关联, 可解释深部高应力环境下(如埋深>800 m)“低应力集中但高能量积聚”导致的冲击, 为卸压减冲技术提供理论支撑
多因素耦合	“三因素”理论 ^[16-17] 、变形失稳理论 ^[18]	贴合深部复杂地质条件下的冲击机理, 可解释“单一因素不满足但多因素叠加”导致的冲击
弱化与调控	弱化减冲理论 ^[19-20]	以“防治效果反推机理”为核心思路, 为工程实践中“卸压减冲技术”的优化升级提供理论依据

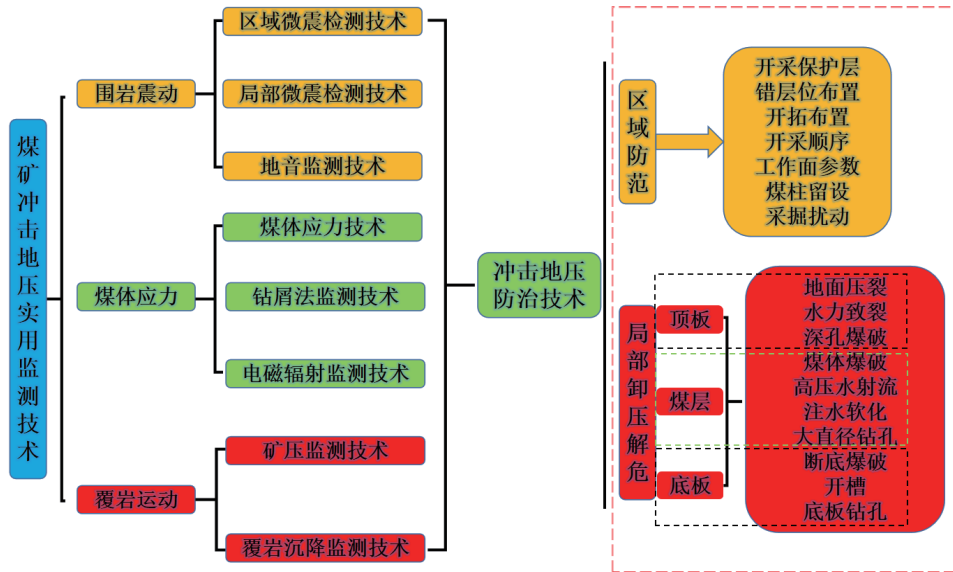


图3 冲击地压实时监测技术及防治技术系统

Fig. 3 System diagram of real-time monitoring technology and prevention technology for impact ground pressure

对已探明的顶板、煤层、底板等特定危险区域,采用压裂、爆破等靶向性措施,防控已存或潜在冲击危险。整体呈现“先监测预警精准判识,再分区分类科学防治”的煤矿冲击地压防控逻辑,为不同条件下的冲击地压治理提供系统性解决方案。

3.1 冲击地压监测方法

随着矿山智能化的发展,计算机、大数据等新技术在矿山相关领域和设备的应用,我国冲击地压监测、防治已经进入一个新的阶段。当前我国冲击地压灾害监测的办法有很多种,大体上可以分成2类,即岩石力学类和地球物理类^[31-34]。其中,岩石力学类办法主要有钻屑法、顶底板来压测量法;地球物理类主要有地音法、CT扫描技术、微震测量法等^[35-36]。此外还有利用前期矿井发生冲击地压灾害所得经验,与情况类似的矿井防治经验进行类比。在中国绝大多数矿井中,都是采用钻屑法、微震测量法和地音测量法进行冲击地压灾害的监测预警^[37]。

3.1.1 深浅部开采监测技术效能对比

我国冲击地压矿井埋深已从2000年的平均400 m增至目前的超800 m(图1),深部开采(>800 m)呈现“高应力、高温、高渗透压”特征,与浅部(<500 m)监测技术应用存在显著差异。浅部开采监测特点:小保当一号煤矿(埋深300 m)为例,微震监测定位误差<10 m,地音监测受环境噪声干扰率<15%,电磁辐射信号稳定性较高,单一技术即可

满足预警需求。深部开采监测挑战:内蒙古某矿(埋深900 m)实践表明,高温(38 ℃)导致微震传感器漂移率达25%,高渗透压(瓦斯压力0.8 MPa)使电磁辐射信号衰减30%,单一技术预警准确率仅55%,需采用“微震+应力+电磁”多参量融合监测。

3.1.2 主要监测技术优缺点及适用边界

受开采深度、地质条件及设备性能等多因素影响,不同监测技术在实际应用中呈现显著的适应性差异。如前文所述,深部高应力环境下单一技术预警准确率不足60%,而浅部简单条件下单一技术即可满足需求。为精准指导监测技术选型,现将主要方法的优缺点及适用边界系统性归纳如表3所示。

当前,冲击地压的致灾因素具有显著的复杂性与耦合性,其机理尚未完全明晰,这对监测预警的精准性提出了更高要求。为此,学界与工程界普遍采用“整体-局部”协同监测思路,通过多技术融合构建综合预警平台,以突破单一方法的局限性。然而,现有体系仍存在数据时效性不足、风险定位精度有限等问题,难以精准锁定危险区域的范围与强度。为破解这一难题,未来需从“时空尺度协同”与“多源数据融合”两个维度构建升级方案:一方面,通过明确监测频率、能量级等关键参数的适用范围与尺度边界,实现不同设备的科学布局与数据互补,形成从局部监测到全域覆盖的无盲区网络(图4)。另一方面,将巷道、工作面及采区作为有机整体,对其应力变化率、电磁辐射脉冲频率、地音参数、微震能量等多维度指标进行归一化处理,构建时空耦

表 3 主要监测技术优缺点及适用边界

Table 3 Main advantages, disadvantages and applicable boundaries of monitoring technologies

监测技术	优点	缺点	适用边界
微震监测	可定位能量释放源, 覆盖范围广 (单台设备监测半径 500 m), 适用于区域预警	受煤岩体非均匀性影响, 深部定位误差 >30 m; 对微能量事件 (<10 ³ J) 敏感度低	埋深 <800 m、地质构造简单区域, 或与应力监测联合用于深部预警
地音监测	对煤岩体微破裂敏感, 设备成本低, 可实时监测局部变形	信号易受机械噪声 (如采掘设备) 干扰, 深部信噪比 <3:1 时预警失效	浅部回采工作面、巷道掘进头的局部监测, 需配合隔音措施
电磁辐射监测	对煤体受载变形敏感, 可提前 1~2 d 捕捉冲击前兆, 数据传输实时性强	信号受金属设备干扰, 深部高湿度环境下传感器故障率升高 (>15%)	浅部煤层巷道 (湿度 <60%), 或与应力监测互补用于深部短临预警
应力监测	直接反映煤体应力状态, 单点监测精度高 (误差 <5%), 可定量评估应力集中程度	单点监测范围有限 (直径 5 m 内), 深部钻孔易塌孔 (塌孔率 >40%), 需频繁维护	浅部煤柱、构造带等局部应力集中区, 或与微震联合构建“点-面”监测网络
多参量融合监测	整合微震定位、应力数值、电磁信号等多源数据, 预警准确率提升至 85% 以上	系统复杂度高, 成本是单一技术的 3~5 倍, 需专业数据分析平台支撑	深部复杂地质条件 (如鄂尔多斯厚硬顶板矿区), 或冲击高危矿井的全时段监测

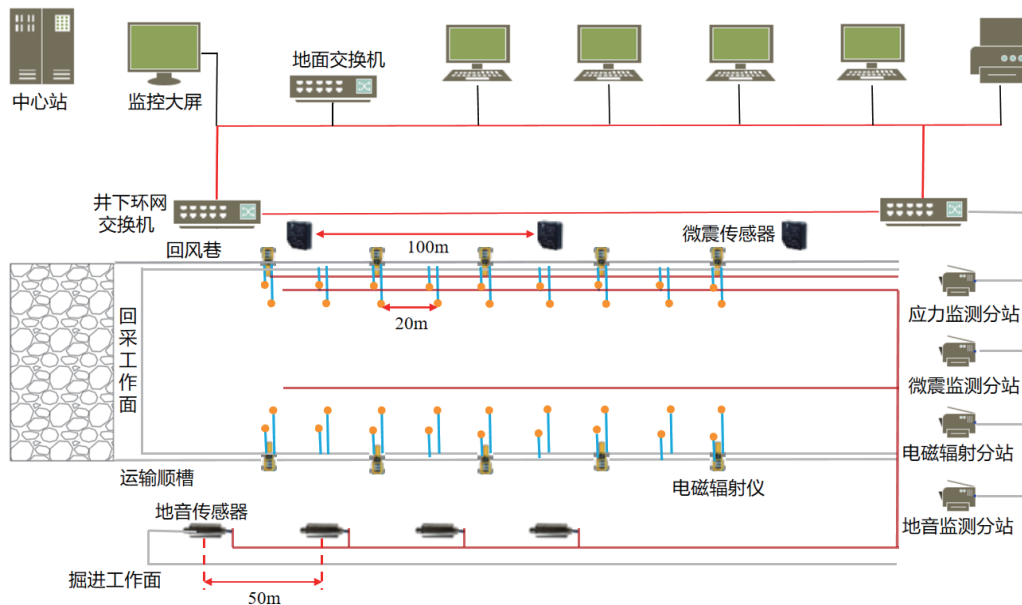


图 4 冲击地压微震-应力-电磁-地音监测预警系统

Fig. 4 Microseismic-stress-electromagnetic-acoustic monitoring and early warning system for impact ground pressure

合的监测预警模型。在此基础上, 依托大数据技术搭建远程监测预警平台(图 5), 通过统一的数据采集层整合井下各类监测系统信息, 经数据中心服务器的智能预处理、分类存储与重点标记, 最终实现对目标区域危险程度的动态判别与精准研判。这一体系不仅实现了“点-面-域”监测的无缝衔接, 更通过数据的深度挖掘与时空关联分析, 推动冲击地压监测从“被动感知”向“主动预警”、从“经验判断”向“数据驱动”的智能化转型, 为实现冲击地压风险的超前防控提供了系统性技术支撑。

3.2 冲击地压防治技术

近年来, 煤矿现场环境错综复杂, 现场冲击地

压发生机理不同随之采取的防治措施不同, 冲击地压目前更多需要的是“对症下药”。国内研究普遍认为冲击地压防治有 3 种类型: 一是运用采矿优化设计方法减少巷道与应力之间的冲突, 避免冲击地压的发生, 如优化开拓布置、留设宽窄柱或无煤柱等^[38-39]。二是对已探明且具有冲击危险区域通过应力转移等方法进行卸压, 避免应力集中和改善煤岩体属性减弱弹性能积聚^[40-41]。三是采用防冲吸能材料或构件等对围岩巷道进行支护, 通过增强或改善支护强度提高支护体抵抗冲击能力, 如高预应力锚杆、恒阻大变形锚杆(索)支护法、防冲吸能材料等^[42]。

采矿优化设计方法主要包括错层位巷道布置

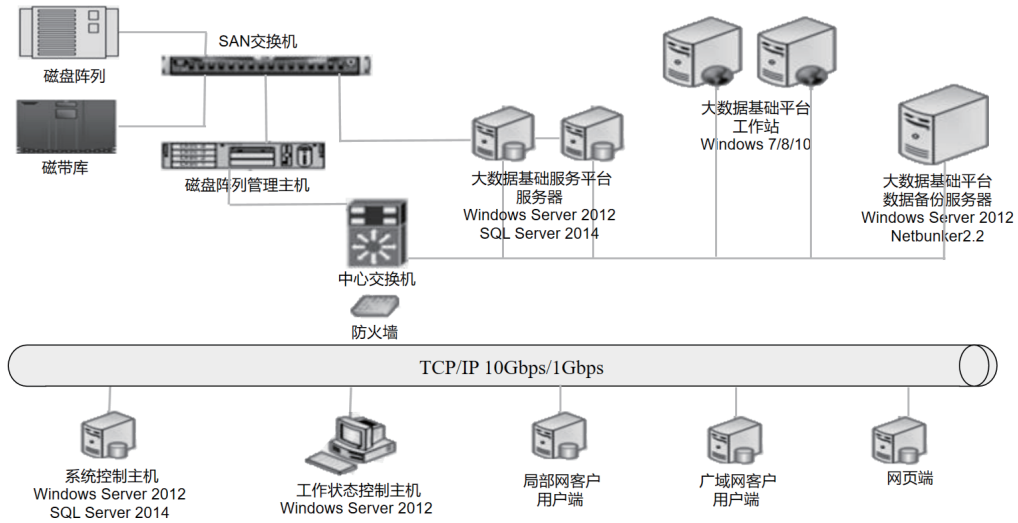


图5 冲击地压远程监测预警平台

Fig. 5 Remote monitoring and early warning platform for impact ground pressure

及开采保护层等。错层位巷道布置主要根据地质构造和煤层赋存情况,合理选择巷道的位置和错层的方式。通常采用错层交替布置或错层平行布置的方式分散地压的传递路径,减少巷道受力集中的可能性。开采保护层主要是在煤层开采过程中保留一定厚度的保护层,以减缓地压的传递和减少对地表和地下设施的影响。主要根据地质条件和开采规模,合理确定保护层的厚度。保护层的厚度应能有效减缓地压传递,一般建议保留足够的煤层厚度作为保护层,通常应不少于2~3个工作面的煤层厚度。图6为负煤柱—保护层开采联合使用体系,两者的合理使用很大程度降低微震事件的能量大小。

卸压减冲方法主要分为大直径钻孔、煤层爆破、煤层注水、顶板爆破、底板爆破及水力压裂等。具体如图7所示。

各方法原理如下:(1)大直径钻孔卸压法是当前最常用的冲击地压防治方法之一^[43]。巷道掘进过程中,煤岩体内应力积聚区用钻孔机钻孔。利用钻孔将煤粉排出,使钻孔破坏范围变大,将钻孔周围应力降低或转移到煤岩深部,降低冲击地压发生概率。(2)煤层爆破主要释放煤体内部应力能量,通过控制爆破参数(爆破药量、装药密度和布置方式)有效调节煤层应力分布,减少其应力集中,降低冲击地压发生和影响范围^[44]。(3)煤层注水主要通过增加煤层孔隙水压力改变煤层内部力学状态^[45],减缓岩层变形和压缩,降低冲击地压程度。注水后,煤层中水压力均匀分布,使冲击地压不会集中在某些局部区域,减少局部煤岩破坏和塌陷,提高矿井安全性。注水还可以使煤层中的水填充孔隙和裂隙,增加煤层整体支撑能力和稳定性,减少因冲击

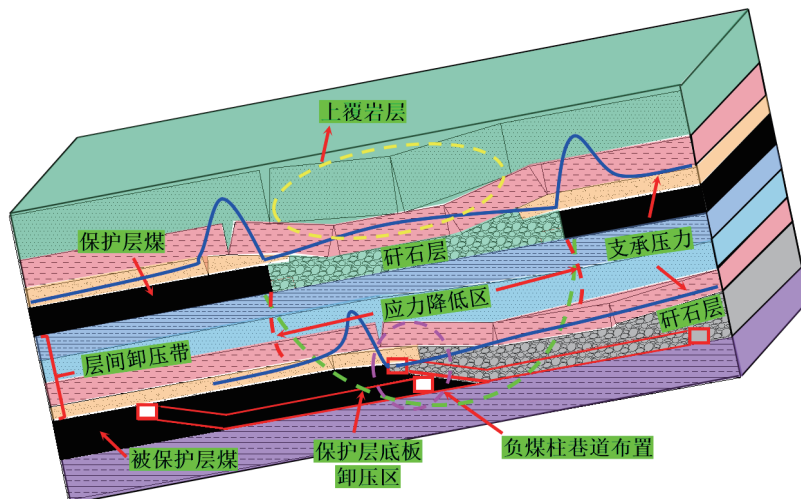


图6 负煤柱—保护层开采联合使用体系^[4]

Fig. 6 Combined system for negative coal pillar and protective layer mining^[4]

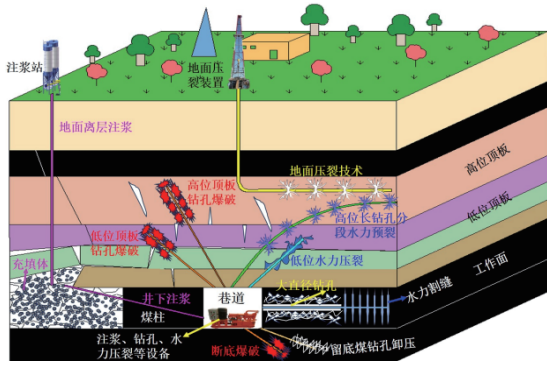


图7 冲击地压局部防治方法^[2]
 Fig. 7 Local prevention and control methods for impact ground pressure^[2]

地压而导致的地质灾害。(4)顶板爆破主要通过顶板岩层内钻孔装药,炸药爆破后,爆破源处岩体受高温高压作用使其顶板结构发生破坏,工作面来压步距变小,强度减弱,超前支撑压力也明显减小,同时对端头破坏程度减轻,片帮次数减少^[46]。(5)底板爆破主要改变底板岩层应力状态,释放其积聚的弹性能,降低发生冲击地压可能性。具体来说,爆破产生的能量可使底板岩层产生裂隙,减弱其整体性和强度,减少应力集中;同时还可以改变底板力学性质,使其更不容易积聚弹性能^[47]。(6)水力压裂主要在煤岩体中形成裂缝,降低其强度和弹性模量,减小其储存和释放弹性能的能力,降低冲击地压发生的风险^[48-49]。压裂过程中,裂缝的扩展使得煤岩体中的高应力得到释放和转移,减少应力集中现象。同时,有助于瓦斯等气体的排放,降低瓦斯压力,减轻瓦斯对冲击地压的影响。水力压裂产生的裂缝网络还可以破坏煤岩体的完整性,使其更易于变形和破裂,吸收能量,降低冲击倾向性。但是,传统水力压裂存在裂缝走向不可控、有效卸压范围小等问题,近年来发展的分段喷砂射孔压裂技术通过在钻孔内设置可移动封隔器,实现单孔多段定向造缝^[50]。该技术通过优化喷砂射孔角度,可在厚硬顶板中形成“一孔多缝、缝缝相连”的卸压网络,相比传统压裂卸压效率提升 3 倍。同时,还研发出耐高温、抗高压的定向压裂泵组,配套井下自动控制系统,实现压裂压力-流量的实时调节。如陕煤集团某矿应用的“智能压裂台车”,实现多元异构数据融合分析,实现了大采高特厚煤层高产、高效、高回收率开采^[51]。与此同时,国内还研发了坚硬顶板地面水平井体积压裂技术、地面垂直井分级压裂技术,发明了远场坚硬顶板裂缝扩展监测技术,试验实现矿压有效控制^[52]。

门克庆煤矿 3107 工作面为中等冲击危险区域,以该区域实施水力压裂为背景,借助微震监测设备分析卸压效果。对 3107 工作面卸压及与 3106 工作面未压裂区域进行对比,评估 3107 工作面压裂后的卸压防冲效果。图 8 为微震事件能级、能量及频次情况。

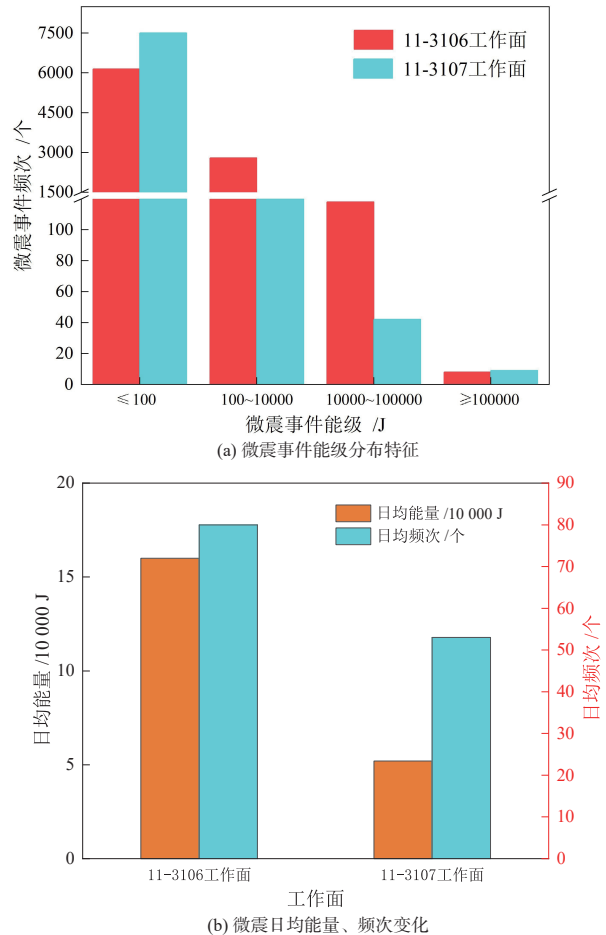


图8 工作面微震事件能级、能量及频次变化
 Fig. 8 Changes in magnitude, energy and frequency of microseismic events at the working face

由图 8 可得,对比门克庆煤矿 3106(未压裂)、3107(水力压裂后)工作面微震数据:从能级看,3107 低能级(10^3 J 以下)事件数多于 3106,中高能级($10^3 \sim 10^5$ J 及以上)则更少,说明压裂后低强度微震仍存在,但中高能级释放受抑制。从日均参数看,3107 日均能量及频次远低于 3106,反映压裂后岩石单位时间能量释放、微震活动频率降低。整体而言,水力压裂通过改变岩体应力状态,减少中高能级微震事件,降低能量累积与释放频率,一定程度上削弱了冲击危险,效果显著。

与此同时,典型矿区地质条件与冲击地压区域具有一定差异:华北矿区(山东、河南、河北等)地质

特征为埋深 400~1 000 m, 多为煤层群开采, 存在厚硬顶板与断层构造, 采动应力集中系数达 2.5~3.0。主要以“采动应力+顶板断裂”诱发为主。防治技术适配于优先采用顶板预裂爆破与大直径钻孔卸压。华东矿区(江苏、安徽等)地质特征为埋深 600~800 m, 煤层赋存稳定但受区域构造应力影响(水平应力占比 40%)。冲击地压特征为“动静载叠加”。防治技术适配推广“保护层开采+水力压裂”协同技术。西部矿区(陕西、内蒙古、新疆)地质特征为埋深 300~1 200 m, 呈现“浅部构造简单、深部条件复杂”特点。冲击地压特征深部表现为“高应力+巨厚顶板”诱冲, 浅部多为“煤柱应力集中”诱发。防治技术适配为深部采用“地面压裂+井下定向卸压”, 浅部推广错层位巷道布置。东北矿区(黑龙江、辽宁)地质特征为埋深 500~1 000 m, 多为急倾斜煤层与断层切割, 煤体冲击倾向性指数>2.0。冲击地压特征以“构造应力+重力”诱发为主。防治技术适配采用“底板爆破+吸能支护”。

此外, 增强支护强度或采用可抵抗冲击变形的支护办法也是一种高效的治理办法^[53-55]。当前较为成熟、应用较广泛的技术有快速让位方式吸能防冲支护技术^[56-59]。核心是利用多个让位吸能构件, 将顶板、围岩的冲击迅速让位吸能, 避免支护结构和煤岩体发生失稳破坏, 如自主研发的恒阻大变形锚杆(索)支护技术^[60]。利用恒阻结构和弹性杆体, 可以对深部软岩巷道、围岩以及冲击地压灾害实现有效控制。吸能防冲支护技术装置构件如图 9 所示。

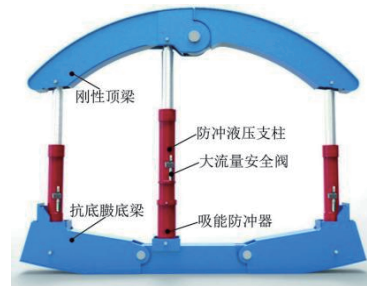
4 主要难题及展望

冲击地压作为煤矿安全生产的重要挑战之一, 防治涉及复杂的地质力学问题和工程技术难题。当前, 尽管在监测预警和治理技术上取得了一些进展, 但仍然存在多方面难题需要克服。主要难题包括: 技术手段的精准性与可靠性、应急响应机制的完善、成本与效益的平衡及不同地质条件下的适用性。面对这些挑战, 未来的研究和实践将需要更深入的理论探索和技术创新, 实现冲击地压防治的更大突破和进步。以下为笔者提出的冲击地压在整个体系中的主要难题及展望:

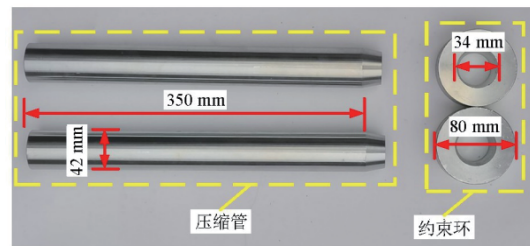
(1)复杂机理阐释难题: 冲击地压发生涉及地质构造、采动应力、煤岩体物理力学性质、多场耦合等众多因素。深部开采条件下, 各因素如何在多尺度上精准耦合、协同作用, 导致煤岩体从能量积



(a) 三级吸能装置



(b) 防冲液压装置



(c) 新型恒阻器试件

图9 吸能防冲支护装备^[56-59]

Fig. 9 Energy-absorbing anti-impact support equipment^[56-59]

聚到突然失稳的详细过程, 仍未完全明晰。未来还需深入研究。

(2)精准监测预警困境: 现有微震监测、地音监测、电磁辐射监测等技术虽各有优势, 但均存在局限性。各监测技术数据融合困难, 难以构建统一、精准的监测预警模型, 准确判断冲击地压发生的时间、地点和强度, 致使预警准确率难以满足安全生产需求。

(3)高效防治技术瓶颈: 无论是区域防治的优化开采设计、煤体注水、顶板预裂, 还是局部防治的钻孔卸压、爆破卸压等技术, 实际应用中效果参差不齐。深部开采时, 高强度、高密度、高频度的防冲卸压工程实施要求与采掘进尺低速度的矛盾突出, 如深部厚硬煤层钻孔卸压时, 塌孔问题严重, 小间距钻孔施工困难, 且卸压后应力恢复快, 难以达到持久有效的防治效果。

(4)巷道支护难题: 冲击地压巷道围岩变形破坏剧烈, 现有支护体系难以适应。传统支护设计缺乏对冲击地压动载荷作用下力学响应的深入考量,

高预应力、高强度、高延伸率及高冲击韧性“四高”锚杆(索)等新型支护材料与技术虽有应用,但如何与围岩结构重塑技术有效结合,实现支护与围岩协同承载、共同抗冲,以及在不同地质条件下如何精准优化支护参数,仍是亟待解决的问题。

(5)专业人才短缺:冲击地压防治需要具备扎实岩石力学、采矿工程、监测技术等多学科知识的专业人才。然而目前此类专业型人才较少,且大多集中在高校、科研院所,煤矿企业一线人才匮乏,导致现场灾害治理能力不足,使新理论、新技术的应用和推广受限,严重制约了冲击地压防治工作的有效开展。

(6)防控标准不统一:不同地区、不同矿井冲击地压防治标准存在差异,缺乏统一、科学、完善的行业规范。从冲击地压危险程度判定指标,到防治措施的设计、实施与效果评估,都缺乏明确、一致的标准,使得各矿井在防治工作中缺乏有效参照,防治质量难以保证,也不利于经验交流与技术推广。

(7)多技术协同应用挑战:冲击地压防治需综合运用开采设计优化、监测预警、卸压解危、支护防护等多种技术手段。但目前各技术之间缺乏有效协同,往往各自为政。如监测预警发现冲击危险后,卸压解危与支护防护措施不能及时、精准跟进,难以形成全方位、一体化的防治体系。

(8)智能化防治推进缓慢:尽管大数据、人工智能、物联网等技术快速发展,但在冲击地压防治领域的应用仍处于起步阶段。智能化监测设备研发滞后,数据采集、传输、分析效率低,难以实现对冲击地压实时、动态、精准监测;智能化决策系统缺乏,无法根据大量监测数据快速、准确地给出防治方案,智能化防治技术的推广应用面临重重困难。

展望未来,在理论研究上,应借助先进的实验设备与数值模拟技术,深入探究多因素、多尺度耦合的冲击地压发生机理,建立更完善的理论模型。技术研发方面,要加大力度攻克监测预警技术难题,开发高精度、高可靠性的监测设备与数据融合分析软件;创新防治技术方面,研发适应深部开采的高效卸压、支护技术与装备。人才培养方面,高校与企业应加强合作,开设相关专业课程,开展在职人员培训,培养高素质专业人才队伍。同时,加快制定统一、科学的防控标准,推动多技术协同应用,积极推进智能化防治进程,构建全方位、智能化冲击地压防治体系,保障煤矿安全生产。

5 结论

(1)基于煤岩体物理力学特性与多场耦合效应,将传统单一因素机理研究拓展至细观结构与宏观响应的跨尺度关联分析。

(2)构建了“空天地”一体化监测网络,形成了以定向水力压裂、恒阻支护为核心的“区域防控—局部解危”协同技术体系。

(3)以门克庆等煤矿为背景,使用水力压裂对现场进行防冲,工作面微震事件日均能量及频次显著降低,效果显著,为冲击地压矿井“有震无灾”目标提供了工程范例。

(4)针对智能化防控技术瓶颈,今后应加强理论探索和技术创新,重点突破深部高温高压环境下的监测装备可靠性、多技术协同标准体系等关键问题,推动冲击地压防治向智慧化、精准化升级。

参考文献:

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].*煤炭学报*,2022,47(1):152-171.
Dou Linming, Tian Xinyuan, Cao Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 张俊文,白旭阳,董续凯,等.煤岩动力灾害结构场孕育演化及调控技术[J].*煤炭科学技术*,2025,53(1):82-95.
Zhang Junwen, Bai Xuyang, Dong Xukai, et al. Structural field breeding and evolution and control technology of coal-rock dynamic disasters[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(1): 82-95.
- [3] 朱斯陶,姜福兴,刘金海,等.我国煤矿整体失稳型冲击地压类型、发生机理及防治[J].*煤炭学报*,2020,4(11):3667-3677.
Zhu Sitao, Jiang Fuxing, Liu Jinhai, et al. Types, occurrence mechanism and prevention of overall instability induced rockbursts in China coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 4(11): 3667-3677.
- [4] Wu S K, Zhang J W, Song Z X, et al. Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(11): 3763-3789.
- [5] 潘俊锋,齐庆新,刘少虹,等.我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J].*煤炭学报*,2020,45(1):111-121.
Pan Junfeng, Qi Qingxin, Liu Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rockburst in deep coal mining in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 111-121.

- [6] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.
Kang Hongpu, Xu Gang, Wang Biaomou, et al. Forty years: development and prospects of under ground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.
- [7] 齐庆新, 王守光, 王美美, 等. 煤矿冲击地压数值物理模拟方法与应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 1-13.
Qi Qingxin, Wang Shouguang, Wang Meimei, et al. Research on numerical-physical simulation methods and applications for coal mine rock burst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 1-13
- [8] 李晓鹏, 李海涛, 齐庆新, 等. 鄂尔多斯地区冲击地压矿井类型划分与防治途径[J]. 煤炭工程, 2023, 55(6): 60-66.
Li Xiaopeng, Li Haitao, Qi Qingxin, et al. Classification of coal bump types and the prevention measures in Ordos mining area[J]. Coal Engineering, 2023, 55(6): 60-66.
- [9] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081-2095.
Pan Yishan, Song Yimin, Liu Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081-2095.
- [10] Kidybiski A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1981, 18(4): 295-304.
- [11] Romashov A N, Tsygankov S S. Generalized model of rock bursts[J]. Journal of Mining Science, 1993, 28(5): 420-423.
- [12] 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.
- [13] Cai W, Dou L M, Si G Y, 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.
- [14] Singh S P. Burst energy release index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(2): 149-155.
- [15] 潘一山, 章梦涛. 用突变理论分析冲击地压发生的物理过程[J]. 阜新矿业学院学报, 1992(1): 12-18.
Pan Yishan, Zhang Mengtao. The study of coal burst by Catastrophic theory[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1992(1): 12-18.
- [16] 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, 21(2): 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.
- [17] 齐庆新, 刘天泉, 史元伟, 等. 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+200.
Qi Qingxin, Liu Tianquan, Shi Yuanwei, et al. Frictional sliding instability mechanism of rockburst[J]. Journal of Mine Pressure and Roof Control, 1995(Z1): 174-177+200.
- [18] 牵梦涛. 冲击地压机理的探讨[J]. 阜新矿业学院学报, 1985(S1): 65-72.
Qian Mengtao. Discussion on the mechanism of coal burst[J]. Journal of Fuxin Mining institute, 1985(S1): 65-72.
- [19] 陆菜平. 组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
Lu Caiping. Intensity weakening theory for rockburst of compound coal-rock and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [20] 窦林名, 陆菜平, 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 Coal Science, 2005(6): 690-694.
- [21] 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, 31(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, 31(3): 586-596.
- [22] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Cao Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [23] 舒龙勇, 齐庆新, 王凯, 等. 煤矿深部开采卸荷消能与煤岩介质属性改造协同防突机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3023-3032.
Shu Longyong, Qi Qingxin, Wang Kai, et al. Coordinated prevention mechanism of pressure-relief and coal and rock properties modification for coal and gas outburst in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3023-3032.
- [24] 张俊文, 宋治祥, 刘金亮, 等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 27-36.
Zhang Junwen, Song Zhixiang Liu Jinliang, et al. Architecture of structural regulation technology for rockburst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.
- [25] 郑凯歌, 张俭, 孙四清, 等. 煤层顶板多种灾害发生机理与协同防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 24-35.
Zheng Kaige, Zhang Jian, Sun Siqing, et al. Mechanisms and collaborative prevention and control techniques for various disasters in coal seam roof[J]. Coal

- Geology&Exploration, 2025, 53(5): 24–35.
- [26] 马念杰, 张文龙, 李军, 等. 冲击地压机理要素分析与评价[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 651–658.
Ma Nianjie, Zhang Wenlong, Li Jun, et al. Analysis and evaluation of essential factors for rock burst mechanism[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 651–658.
- [27] 宋常胜, 王文, 刘凯, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2011–2026.
Song Changsheng, Wang Wen, Liu Kai, et al. Energy dissipation characteristics of water saturated coal samples under true triaxial dynamic and static combined loading[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2011–2026.
- [28] 窦林名, 马小涛, 边戈, 等. 深部厚顶煤巷道矿震诱发冒顶复合灾害机理及其控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(1): 85–96.
Dou Linming, Ma Xiaotao, Bian Ge, et al. Mechanism and control of roof collapse induced by mining tremors in deep thick-top-coal roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(1): 85–96.
- [29] 秦续峰, 任杰, 罗浩, 等. 新街矿区深部开采大能量矿震规律与发生机理研究[J]. 防灾减灾学报, 2024, 40(1): 61–67.
Qin Xufeng, Ren Jie, Luo Hao, et al. study on seismic regularity and mechanism of deep mining large-energy mine in xinjie mining area[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2024, 40(1): 61–67.
- [30] 贾冬旭. 媒体滑移型冲击地压机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
Jia Dongxu. Study on mechanism of coal-slippage type of coal bump[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [31] 刘金海, 霍明华, 郭信山, 等. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用. 煤炭学报, 2014, 39(2): 353–363.
Liu Jinhai, Huo Minghua, Guo Xinshan, et al. Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application II. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 353–363.
- [32] 罗天敏, 庞伟, 刘旭京, 等. 冲击地压多参量集成监测预警平台本地化建设研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 19–27.
Luo Tianmin, Pang Wei, Liu Xujing, et al. Local construction of multi-parameter integrated monitoring and early warning platform for rock burst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 19–27.
- [33] 李利平, 贾超, 孙子正, 等. 深部重大工程灾害监测与防控技术研究现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2539–2556.
Li Liping, Jia Chao, Sun Zizheng, et al. Research status and development trend of major engineering disaster prevention and control technology in deep underground[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2539–2556.
- [34] 杨景峰, 刘战武, 吴学明, 等. 彬长矿区复杂地质条件下煤矿灾害预警平台研究与应用[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 19–27.
Yang Jingfeng, Liu Zhanwu, Wu Xueming, et al. Research and application of coal mine disaster warning platform under complex geological conditions in Binchang mining area[J]. China Coal, 2023, 49(6): 19–27.
- [35] 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, 2021, 29(4): 917–932.
- [36] 王同利, 张盛中, 崔博闻, 等. 2020年古冶M_s5.1地震序列微震检测及活动性研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(4): 1501–1514.
Wang Tongli, Zhang Shengzhong, Cui Bowen, et al. Micro earthquake detection and seismicity analysis of the 2020 Guye M_s5.1 earthquake sequence. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(4): 1501–1514.
- [37] 张磊. 基于微震监测的矿井地质灾害分析预测[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(5): 137–140.
Zhang Lei. Prediction of geological hazards in underground mines based on microseismic monitoring[J]. Shaanxi Coal, 2024, 43(5): 137–140.
- [38] 李鹏, 姜关照, 李红. 某煤矿深部软岩巷道围岩破坏特征及控制技术研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 58–64.
Li Peng, Jiang Guanzhao, Li Hong. Study on failure characteristics and control technology of surrounding rock in deep soft rock roadway of a coal mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 58–64.
- [39] 孙梦迪, 刘增辉, 龚固. 沿空掘巷切顶卸压关键技术优化研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(2): 46–52.
Sun Mengdi, Liu Zenghui, Gong Gu. Optimizing the key parameters of roof cutting in gob-side entry driving[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 46–52.
- [40] 钟涛平, 李振雷, 何学秋, 等. 弱化浅层岩体防治急倾斜特厚煤层冲击地压研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(3): 20–33.
Zhong Taoping, Li Zhenlei, He Xueqiu, et al. Research on rock burst prevention by shallow rock mass weakening in steeply inclined and extremely thick coal seams[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(3): 20–33.
- [41] 吴少康, 郑伟, 吴旭坤, 等. 断层影响下巷道应力演化规律及围岩控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(4): 74–79.

- Wu Shaokang, Zheng Wei, Wu Xukun, et al. Research on stress evolution law and surrounding rock control of roadway under the influence of fault[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(4): 74-79.
- [42] 张俊文, 吴少康, 宋治祥, 等. 纤维种类及橡胶含量对矿用水泥基材料性能影响研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(5): 42-56.
- Zhang Junwen, Wu Shaokang, Song Zhixiang, et al. The influence of fiber type and rubber content on the properties of cement based materials for coal mines[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(5): 42-56.
- [43] 郭飞, 吴少康, 唐东旭, 等. 小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究综述[J]. *矿产保护与利用*, 2025, 45(2): 53-63.
- Guo Fei, Wu Shaokang, Tang Dongxu, et al. Review on deformation mechanism and control technology of small coal pillar working face roadway[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2025, 45(2): 53-63.
- [44] 王艳军, 张晨, 许志军. 厚煤层深孔爆破切顶沿空留巷围岩控制技术研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(12): 103-111.
- Wang Yanjun, Zhang Chen, Xu Zhijun. Research on surrounding rock control technology of deep hole blasting and roof cutting gob side entry retaining in thick coal seam[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(12): 103-111.
- [45] 马国良, 陈曦, 范超男, 等. 不同水力荷载路径下煤体微观渗流特征及宏观破坏研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(6): 1779-1788.
- Ma Guoliang, Chen Xi, Fan Chaonan, et al. Micro seepage characteristics and macro failure of coal under different hydraulic loading paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1779-1788.
- [46] 牟宗龙, 张泽辉, 张修峰, 等. 工作面单双巷顶板爆破应力演化规律研究[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(2): 114-121.
- Mu Zonglong, Zhang Zehui, Zhang Xiufeng, et al. Stress evolution law of single and double roadway roof blasting in working face[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(2): 114-121.
- [47] 吴少康, 张俊文, 徐佑林, 等. 煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 24-37.
- Wu Shaokang, Zhang Junwen, Xu Youlin, et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 24-37.
- [48] 葛帅帅, 孙亮, 贺丽峰, 等. 综采坚硬顶板分段水力压裂卸压护巷技术研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(7): 165-173.
- Ge Shuaishuai, Sun Liang, He Lifeng, et al. Investigation on the pressure relief and roadway support by segmented hydraulic fracturing technique in hard roof of fully mechanized mining[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(7): 165-173.
- [49] 张永成, 赵祉友, 汪奇, 等. 碎软低渗煤层水平井水力喷砂射孔工艺优化[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(2): 17-23.
- Zhang Yongcheng, Zhao Zhiyou, Wang Qi, et al. Optimization of hydraulic jet perforation tools for horizontal wells in broken soft and low permeability coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(2): 17-23.
- [50] 薛江达, 孙永康, 王军, 等. 水力压裂弱化顶板护孔技术[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(3): 160-166.
- Xue Jiangda, Sun Yongkang, Wang Jun, et al. Hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(3): 160-166.
- [51] 康红普, 雷亚军, 赵福堂, 等. 特厚煤层 10 m 超大采高综采关键技术及装备[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(4): 1849-1875.
- Kang Hongpu, Lei Yajun, Zhao Futang, et al. Key technology and equipment for fully mechanized mining with extra-large shearing height of 10 m in extra-thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(4): 1849-1875.
- [52] 于斌, 邵阳, 匡铁军, 等. 大空间采场远近场坚硬顶板井上下控制理论及技术体系[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1875-1893.
- Yu Bin, Taiyang, Kuang Tiejun, et al. Theory and technical system of control of far-near field hard roofs from ground and underground in a large space stope[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1875-1893.
- [53] 徐佑林, 吴少康, 周波, 等. 强动压破碎软岩巷道再造多重承载结构全空间协同支护技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(7): 1720-1735.
- Xu Youlin, Wu Shaokang, Zhou Bo, et al. Full-space collaborative support technology for reconstructing multi-bearing structures in crushed soft rock roadways under strong dynamic pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(7): 1720-1735.
- [54] 刘泉声, 邓鹏海, 毕晨, 等. 深部巷道软弱围岩破裂碎胀过程及锚喷-注浆加固 FDEM 数值模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 4065-4083.
- Liu Quansheng, Deng Penghai, Bi Chen, et al. FDEM numerical simulation of the fracture and extraction process of soft surrounding rock mass and its rockbolt-shotcrete-grouting reinforcement methods in the deep tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4065-4083.
- [55] 吴少康, 张俊文, 徐佑林, 等. 煤矿高水充填材料物理力学特性研究及工程应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(4): 754-763.
- Wu Shaokang, Zhang Junwen, Xu Youlin, et al. Research

- and engineering application on physical and mechanical properties of coal mine high water filling materials[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2023, 40(4): 754–763.
- [56] 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.
- [57] 赵明珠, 吴学震, 叶青, 等. 缩管式恒阻大变形锚杆抗冲击特性及其治理岩爆潜力研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(11): 3355–3365+3377.
- Zhao Mingzhu, Wu Xuezhen, Ye Qing, et al. Impact resistance characteristics of steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt and its potential for rockburst mitigation and control[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(11): 3355–3365+3377.
- [58] 唐治. 自移式吸能防冲巷道支架研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- Tang Zhi. Study on self-moving energy absorption and anti-impact roadway support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.
- [59] 高明仕, 俞鑫, 徐东, 等. 基于冲能吸能平衡效应的冲击地压巷道分级支护研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(1): 38–48.
- Gao Mingshi, Yu Xin, Xu Dong, et al. Graded support of rock burst roadway based on balance theory of impact energy and absorbed energy[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(1): 38–48.
- [60] 何满潮, 吕谦, 陶志刚, 等. 静力拉伸下恒阻大变形锚索应变特征实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 213–220.
- He Manchao, Lyu Qian, Tao Zhigang, et al. Experimental study of strain characteristics of constant resistant large deformation anchor cable under static stretching, condition[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 213–220.

Research Status and Prospect of Rock Burst in Coal Mines in China: Mechanism, Monitoring, Early Warning and Prevention

Zhang Quanping¹, Wu Shaokang², Hao Yinghao¹, Wang Xinzhen², Jian Fengba¹, Yang Ruxin¹, Ou Caiquan¹, Dong Jiakun²

1. Zhongtian Hechuang Energy Co. Ordos 017200, Inner Mongolia, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology–Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: With the increase in mining depth and scale of coal resources, rock burst has become a major dynamic disaster restricting the safe production of coal mines. This paper systematically reviews the research progress of rock burst in China in the fields of mechanism cognition, monitoring and early warning, and prevention and control technologies. Based on the distribution characteristics and typical cases of more than 150 rock burst mines in China, existing studies have revealed the multi-factor coupling disaster-causing mechanism of geological structures, mining-induced stress, coal and rock mass properties and multi-field environment. In terms of monitoring technology, existing achievements have constructed a "microseism-stress-electromagnetism" multi-parameter fusion early warning platform by comparing the efficiency differences of single technologies such as microseism, ground sound and electromagnetic radiation in shallow and deep mining, which has promoted the improvement of deep early warning accuracy. In the field of prevention and control technologies, a collaborative system of "mining optimization design-pressure relief and impact reduction-impact-resistant energy-absorbing support" has been formed. Through the whole-process management and control from avoiding risks at the source, actively releasing energy to passive buffer protection, the closed-loop prevention and control of rock burst "prevention-treatment-protection" is realized. In the engineering practice of typical mining areas such as Menkeqing Coal Mine, this system has shown significant effects, greatly reducing the energy level, energy and frequency of microseismic events. Future research needs to further overcome technical bottlenecks such as artificial intelligence-driven multi-source data fusion and active prevention and control under complex geological conditions, promote the construction of an "intelligent rock burst prevention" system, and provide support for the safe and efficient development of the coal industry.

Keywords: rock burst; occurrence mechanism; monitoring and early warning; anti-flushing energy; roadway support

引用格式: 张全平, 吴少康, 郝英豪, 王新振, 简丰坝, 杨如鑫, 欧才权, 董贾坤. 我国冲击地压发生机理、监测预警及防治现状与展望[J]. *矿产保护与利用*, 2026, 46(1): 163–175.

Zhang Quanping, Wu Shaokang, Hao Yinghao, Wang Xinzhen, Jian Fengba, Yang Ruxin, Ou Caiquan, Dong Jiakun. Research status and prospect of rock burst in coal mines in China: Mechanism, monitoring, early warning and prevention[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2026, 46(1): 163–175.