

Study on Mechanism and Prevention Technology of Impact Ground Pressure Disaster in Coal Mining Engineering

Zhiyuan Wang

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 034000, China

Abstract

Rock burst, as a typical dynamic disaster in coal mining engineering, is characterized by strong suddenness, high destructiveness, and wide impact range, and has become a key factor restricting the safe and efficient extraction of deep coal resources. Focusing on the formation mechanism and prevention requirements of rock burst, this study systematically analyzes its dynamic essence from the perspectives of stress evolution, energy accumulation and release, and structural instability of coal and rock mass, and reveals the critical mechanisms of multi-field coupling effects on the initiation and development of disasters under mining disturbance conditions. On this basis, the regulatory effects of geological structures, mining parameters, and physical and mechanical properties of coal and rock on the occurrence probability and intensity of rock burst are examined, and an early warning system integrating multi-source monitoring and risk identification is established. Meanwhile, combined with regional pressure relief, local support optimization, and mining layout adjustment, a multi-level coordinated prevention and control path is proposed to enhance the intrinsic safety level and disaster control capability of coal mining engineering.

Keywords

rockburst; coal mining; dynamic disasters; prevention and control technologies

煤矿采矿工程冲击地压灾害机理与防控技术研究

王志远

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西忻州 034000

摘要

冲击地压作为煤矿采矿工程中典型的动力灾害之一, 其发生具有突发性强、破坏程度高及影响范围广等特点, 已成为制约深部煤炭资源安全高效开采的重要因素。围绕冲击地压灾害的形成机理与防控需求, 从煤岩体应力演化、能量积聚与释放及结构失稳等方面系统梳理其动力学本质, 揭示采动扰动条件下多场耦合作用对灾害孕育与触发的关键影响机制。在此基础上, 分析地质构造、开采参数及煤岩物理性质等因素对冲击地压发生概率与强度的调控作用, 并构建多源监测与风险识别相结合的预警技术体系。同时, 结合区域卸压、局部支护优化及开采布局调整等措施, 提出多层次协同防控路径, 以提升煤矿采矿工程的本质安全水平与灾害防控能力。

关键词

冲击地压; 煤矿采矿; 动力灾害; 防控技术

1 引言

随着煤炭资源开发不断向深部延伸, 围岩应力水平显著提高, 地质环境复杂程度持续加剧, 煤矿采矿工程面临的动力灾害问题日益突出。冲击地压作为深部开采条件下典型的灾害形式, 其发生过程往往伴随应力快速集中与能量瞬时释放, 对巷道稳定、设备运行及人员安全构成严重威胁。传统以经验为主的防控方式已难以满足复杂开采条件下的安全需求, 亟需从机理层面深入认识冲击地压的发生规律。通过系统分析采动作用下煤岩体力学响应特征, 结合多参数监

测手段与风险评估方法, 可实现对灾害演化过程的动态识别与精准调控。在工程实践中, 将机理研究成果转化为可操作的防控技术, 对于提升矿井安全管理水平、优化开采组织方式及实现高效生产具有重要现实意义。

2 煤矿采矿工程冲击地压灾害机理理论基础

冲击地压是指在高应力条件下, 煤岩体内部弹性能量快速积聚并在局部区域瞬时释放所引发的动力失稳现象, 通常表现为巷道围岩剧烈震动、煤岩块体抛出以及支护结构破坏等形式。该灾害具有明显的突发性和瞬时性, 发生过程往往在极短时间内完成, 持续时间一般小于 1 s, 但释放的能量密度可达到 $10^3 \sim 10^5 \text{ J/m}^3$, 对井下环境产生显著冲击效应。冲击地压的发生依赖于特定的地质构造背景与应力

【作者简介】王志远 (1984-), 男, 中国山东曲阜人, 本科, 工程师, 从事采矿工程研究。

场条件,深部煤层开采过程中,原岩应力随埋深增加而显著提高,当埋深达到600 m以上时,垂直应力一般超过15 MPa,局部构造叠加区域可超过25 MPa,为灾害孕育提供必要能量基础。断层、褶皱及岩性突变带对围岩应力分布产生扰动作用,使应力集中系数可达2.0~3.5,显著提升冲击地压发生概率。坚硬顶板与高强度煤层组合结构能够有效储存弹性能量,当顶板厚度超过20 m且抗压强度大于60 MPa时,体系具备较强的能量积聚能力^[1]。采空区与煤柱之间形成的应力重新分布区,也易形成高应力集中带,导致局部区域进入极限平衡状态。地应力方向与巷道布置之间的夹角关系同样影响灾害发生位置,夹角小于30°时更易诱发冲击地压。

3 煤矿采矿工程冲击地压形成机理分析

3.1 采动应力演化与集中机制

煤矿开采过程中,原岩应力场受到扰动,形成应力重新分布与集中区,工作面推进过程中前方支承压力逐渐增强,当推进距离达到30 m时,应力集中系数由1.2上升至2.5以上,局部峰值应力可超过35 MPa。采空区后方应力释放区与前方集中区之间形成明显梯度,梯度值可达0.8 MPa/m,使煤岩体内部产生较强剪切与压缩作用。顶板结构破断周期对集中程度产生影响,当基本顶周期来压步距为15 m时,应力峰值呈周期性波动,峰值差可达8 MPa。煤柱尺寸对集中效应具有显著调控作用,宽度为8 m时应力集中系数约为3.0,减小至5 m时可降低至2.2,反映出结构尺度与应力集中之间的耦合关系。该演化过程推动煤岩体逐步进入临界失稳状态,为冲击地压的发生提供直接动力条件。

3.2 煤岩体结构失稳与动力破坏机制

煤岩体在高应力环境下表现出明显的脆性破坏特征,当单轴抗压强度为40 MPa的煤体在围压5 MPa条件下,其峰值应变约为0.006,达到极限后迅速失稳,释放应变能约为150 kJ/m³。岩层结构完整性对失稳模式具有决定作用,完整岩层破坏时裂纹扩展速度可达到1500 m/s,而节理发育岩体则呈现分级破裂特征。多层结构组合体系中,上覆硬岩层厚度为25 m时,破断后产生的冲击载荷可达到2.0~3.0倍静载水平,对下伏煤层形成强烈扰动。巷道围岩在应力集中作用下产生塑性区与弹性区分界,当塑性区半径达到3 m以上时,局部稳定性显著下降,容易触发整体失稳。动力破坏过程中伴随应力波叠加效应,波速约为3000 m/s,叠加后峰值应力可提高至原始值的1.8倍,进一步强化冲击效应^[2]。

4 煤矿采矿工程冲击地压灾害影响因素分析

4.1 地质构造条件对冲击地压的影响机制

地质构造对冲击地压发生具有显著控制作用,断层带附近应力集中系数可达到3.0以上,距断层距离10 m范围内冲击事件发生频率提高约2.5倍。褶皱轴部区域由于应力叠加作用,垂直应力可增加20%~40%,使煤岩体处于高

能量状态。岩性突变界面处弹性模量差异超过5 GPa时,应力传递出现不连续,形成局部集中区。构造应力方向与采掘方向夹角小于20°时,应力叠加效应明显增强,峰值应力可提高至30 MPa以上。坚硬顶板条件下,断层滑移诱发的能量释放量可达到 8×10^5 J,对围岩产生强烈冲击作用。构造复杂区域中多种因素叠加,使应力场分布呈现高度非均匀性,显著提升冲击地压发生风险。

4.2 采矿工艺与开采参数的影响机制

采矿工艺与参数设置直接影响应力分布与能量积聚过程,工作面推进速度由3 m/d提高至6 m/d时,应力集中区前移速度加快,峰值应力提高约5 MPa。采高由3 m增加至5 m时,顶板暴露面积扩大,能量积聚能力提升约30%,冲击风险显著增加。煤柱宽度控制在6 m以内时,应力集中系数降低至2.0以下,有利于缓解局部高应力状态。放顶煤开采方式中,顶板垮落高度达到12 m时,冲击载荷显著增强,瞬时冲击力可达原始静载的2.5倍。巷道布置与主应力方向夹角控制在45°以上时,应力集中程度明显减弱,峰值应力下降约20%。不同开采参数之间存在耦合作用,对冲击地压发生条件产生综合影响。

4.3 煤岩物理力学性质与动力响应特征

煤岩体的物理力学性质决定其能量储存与释放能力,弹性模量为20 GPa的岩层其单位体积储能能力较10 GPa岩层提高约2倍,形成更高冲击潜势。煤体单轴抗压强度由20 MPa提升至40 MPa时,峰值应变能密度由80 kJ/m³增加至160 kJ/m³,表现出明显的能量累积特征。泊松比在0.25~0.35范围内变化时,对围岩横向变形能力产生调节作用,影响应力分布形态。节理裂隙发育程度对动力响应具有重要影响,裂隙间距由0.5 m减小至0.2 m时,能量释放过程趋于分散,冲击强度降低约40%。岩层脆性指数超过0.6时,破坏过程以瞬时断裂为主,释放速率显著提高,极易形成强烈冲击地压事件^[3]。

5 煤矿采矿工程冲击地压监测预警技术体系

5.1 多源信息融合监测技术方法

冲击地压监测体系依托微震监测、应力在线监测、钻屑量检测及电磁辐射监测等多种手段构建多源信息融合框架,通过不同类型传感器对煤岩体动力响应进行实时采集,实现对灾害孕育过程的连续跟踪。微震监测系统可捕捉能量在 $10^2 \sim 10^6$ J范围内的事件信息,反映煤岩体内部裂隙扩展与应力释放情况,应力传感器能够记录围岩应力变化幅度在5~30 MPa之间的动态过程,揭示应力集中与转移趋势。钻屑量监测通过单位长度钻屑重量变化反映煤体破碎程度,单位进尺钻屑量增加30%以上时表明局部应力显著集中。电磁辐射信号频率范围在1 kHz~1 MHz之间,能够反映微裂纹扩展活动。多源数据通过统一采集平台进行时空匹配与特征融合,提高监测信息的完整性与可靠性,为后续

预警分析提供数据基础。

5.2 冲击地压前兆信息识别与判据构建

冲击地压发生前往往伴随一系列可识别的前兆特征，微震事件频次在短时间内由日均20次上升至80次以上，释放能量呈现集中趋势，能量等级逐步向 10^5 J以上转移。应力监测曲线出现持续升高状态，局部应力增幅超过8 MPa且持续时间超过12 h，表明区域处于高风险阶段。钻屑量指标出现异常波动，单位进尺钻屑重量由15 kg/m增加至25 kg/m以上，反映煤体破坏程度加剧。电磁辐射信号强度提高约2倍，频率分布向高频段集中，表征裂隙快速扩展。基于多指标组合特征，构建综合判据体系，当微震能量、应力增幅及钻屑量指标同时达到设定阈值时，可判定为冲击地压高风险状态，实现对灾害的提前识别与分级预警^[4]。

5.3 灾害风险评估与动态预警模型构建

冲击地压风险评估依托多参数数据集构建动态分析模型，通过对微震能量、应力变化率及煤岩变形指标进行综合量化，实现风险等级划分。采用时间序列分析方法，对监测数据进行趋势提取与波动分析，当应力变化率超过0.5 MPa/h且微震能量累计值达到 10^6 J时，模型判定风险等级进入高风险区间。空间分布分析结合工作面推进位置，对高风险区域进行定位，定位精度可控制在10 m范围内。动态预警模型通过实时数据更新，实现风险等级由低、中、高三级动态调整，预警响应时间控制在10 min以内。模型中引入权重系数对不同监测指标进行综合评价，权重分配范围在0.2~0.4之间，提升评估结果的稳定性与准确性，为现场防控决策提供科学依据。

6 煤矿采矿工程冲击地压防控关键技术路径

6.1 区域应力调控与卸压技术体系

区域应力调控通过改变围岩应力分布格局，实现高应力区的有效削减，深孔爆破卸压技术在煤层中布置孔径75 mm、孔深20 m的卸压孔群，孔间距控制在5 m范围内，可使局部应力降低20%~35%。水力压裂技术通过高压注水形成裂隙网络，注水压力达到25 MPa时裂隙扩展半径可达10 m以上，有效释放储存能量。大直径钻孔卸压方式在煤层中形成直径120 mm的孔道结构，单孔影响范围约为6 m，可降低应力集中系数约0.5。区域卸压措施实施后，微震事件能量等级由 10^5 J下降至 10^3 J量级，反映能量释放趋于缓和。通过多种卸压手段组合应用，形成系统化应力调控体系，有效降低冲击地压发生条件。

6.2 局部防冲措施与支护优化技术

局部防冲措施针对高风险区域实施精细化控制，通过

高强度支护与能量吸收结构提升围岩稳定性。锚杆支护系统采用直径22 mm、长度2.4 m的高强钢锚杆，间距控制在0.8 m×0.8 m范围内，配合锚索支护形成复合支护结构，整体承载能力可提高40%以上。柔性支护材料通过吸收冲击能量，将冲击载荷峰值降低30%左右。局部区域布置卸压钻孔，孔深10 m、间距3 m，可在短时间内降低局部应力约5 MPa。巷道围岩变形监测结果表明，支护优化后顶板下沉量由150 mm降低至80 mm，变形速率下降约45%。支护结构与卸压措施协同作用，使局部区域冲击风险得到有效控制。

6.3 开采布局优化与全过程防控技术体系

开采布局优化通过调整工作面布置与采掘顺序，降低应力集中程度与能量积聚水平。工作面长度控制在200 m以内时，应力集中范围相对减小，峰值应力下降约15%。巷道布置方向与主应力方向夹角控制在45°以上，有助于分散应力集中区域。煤柱留设宽度优化至6 m左右，可使应力集中系数控制在2.0以下，降低冲击风险。全过程防控体系贯穿开采前、开采中及开采后各阶段，通过前期风险评估、中期动态监测与后期效果反馈形成闭环管理机制。监测数据显示，实施全过程防控后冲击地压发生频率由每月5次降低至1次以内，灾害强度明显减弱。系统化技术路径实现了从机理认知到工程控制的有效衔接，提高煤矿采矿工程安全运行水平。

7 结语

冲击地压作为深部煤矿开采中典型的动力灾害，其形成过程涉及应力演化、能量积聚及结构失稳等多因素耦合作用，具有显著复杂性与突发性特征。围绕灾害机理与影响因素的系统分析，可为监测预警与防控技术提供科学依据。通过构建多源信息融合监测体系与动态风险评估模型，并结合区域卸压、局部支护优化及开采布局调整等技术措施，能够有效降低冲击地压发生概率与破坏强度。面向复杂开采环境，持续强化机理研究与工程技术协同应用，对于提升煤矿安全生产水平具有重要意义。

参考文献

- [1] 李云飞.煤矿矿井冲击地压防治体系的创建策略[J].能源与节能,2026,(03):325-328.
- [2] 张浩.煤矿掘进工作面冲击地压防治技术研究[J].能源与节能,2026,(03):181-183+309.
- [3] 王腾飞.煤矿冲击地压灾害分析及监测技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2026,(02):29-31.
- [4] 李大奎,刘玉龙,强书墨,郭艺飞,王成玮.底煤厚度对煤矿冲击地压影响研究及控制技术[J].陕西煤炭,2025,44(12):77-83.