

建新煤矿大埋深综采工作面冲击地压防治的研究与应用

童苗苗

陕西建新煤化有限责任公司

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8142

[摘要] 本文聚焦建新煤矿大埋深综采工作面冲击地压防治问题展开研究。通过分析其地质条件、开采技术条件及冲击地压影响因素,并实施多种防治措施,包括监测预警、卸压解危、优化支护及推采速度等,构建完善管理技术体系。实践证明,这些措施应用有效降低了冲击地压风险,保障了矿井安全生产,为类似条件煤矿提供了有益参考。

[关键词] 建新煤矿;大埋深;综采工作面;冲击地压防治

Study and application of rock burst prevention in deep mining face of Jianxin coal mine

Tong Miaomiao

Shaanxi Jianxin Coal Chemical Co., LTD.

[Abstract] This paper focuses on the research of rockburst prevention and control in the deep mining face of Jianxin Coal Mine. By analyzing its geological conditions, mining technical conditions, and factors affecting rockbursts, various preventive measures have been implemented, including monitoring and early warning, pressure relief and hazard elimination, optimized support, and controlled extraction speed, to establish a comprehensive management technology system. Practical experience has shown that these measures effectively reduce the risk of rockbursts, ensuring safe production in the mine, and provide valuable references for coal mines under similar conditions.

[Key words] Jianxin coal mine; deep burial; comprehensive mining face; rock burst prevention and control

引言

煤炭作为我国的主体能源,在能源结构中占据重要地位。随着浅部煤炭资源的逐渐减少,煤矿开采深度不断增加,冲击地压等动力灾害问题日益凸显。建新煤矿 4301 工作面埋深较深,地质条件复杂,面临着严峻的冲击地压威胁。有效防治冲击地压对于保障建新煤矿安全生产、提高煤炭资源回收率以及保护作业人员生命安全具有重要意义。国内外众多学者对冲击地压防治进行了广泛研究,为本文的研究提供了理论基础和实践经验参考。本文结合建新煤矿实际情况,深入探讨大埋深综采工作面冲击地压防治技术的研究与应用。

1 建新煤矿 4301 工作面概况

1.1 矿井基本情况

建新井田位于陕西省延安市黄陵矿区南部,行政区划隶属黄陵县腰坪乡管辖。井田东西长约 10.5km,南北宽约 6.4km,登记面积约 49km²。2013 年核定生产能力为 4.0Mt/a,剩余服务年限为 30.1 年。井田内可采煤层 4 层,4301 工作面位于 43 盘区西翼,开采 4-2 煤层^[1]。

1.2 地质条件

4301 工作面地面标高 +1384~+1772m,井下标高 +764~+828m,埋深约 435~974m。煤层赋存稳定,平均厚度

4.55m,倾角约 3°。煤层含夹矸 1-2 层,个别区域 2-4 层,夹矸以炭质泥岩和泥岩为主。顶底板岩性各异,直接顶为粉砂岩,基本顶为细粒砂岩,底板局部为细粒砂岩,基本底为砂质泥岩。该工作面发育有向斜,向斜倾角较小,两巷无断层经过,但断层距离切眼及回风巷较近。

1.3 开采技术条件

4301 工作面采用长壁式放顶煤开采工艺。其相邻 4300 工作面已回采完毕,4303 工作面尚未掘进。与 4300 工作面之间的区段煤柱宽度为 9m,工作面预留 0.5-1m 底煤。

2 冲击地压影响因素分析

2.1 地质因素

开采深度方面,4301 工作面煤层采深约为 631m~932m,开采深度与冲击地压发生概率正相关,当前埋深已具备诱发冲击地压的可能。煤岩物理力学性质上,4-2 煤层及其顶底板具有弱冲击倾向性,对冲击危险性有一定影响。断层构造虽未经过工作面两巷及切眼,但距离较近,会使工作面前方煤体承受压力增加,影响冲击地压发生。褶曲构造方面,工作面发育有向斜,向斜不同部位应力分布差异大,易引发冲击地压。顶板岩层结构中,煤层上方存在坚硬厚层砂岩顶板,其聚积的弹性能在破断或滑移时释放,可能导致冲击地压。煤层厚度变化在

0~10.18m 之间,厚度变化处易诱发冲击地压^[2]。

2.2 开采技术因素

切眼及停采线外错方面,4301 工作面相对 4300 工作面的停采线外错,导致拐角煤柱处应力叠加,增加冲击地压风险。采空区的影响表现为,4301 工作面靠近 4300 采空区,煤柱受侧向支承压力影响,且顶板坚硬,煤柱承受应力大。区段煤柱宽度为 9m,在工作面回采期间,巷道变形较大,对冲击地压有一定影响。底煤厚度方面,4301 工作面预留 0.5~1m 底煤,掘进期间底煤有破碎,对冲击地压发生影响较小。

2.3 组织管理因素

冲击地压管理中,组织管理至关重要。缺乏针对性安全管理制度、专业管理队伍以及个体防护管理不到位等,都可能导致冲击地压事故伤亡和损失增加。

3 冲击地压防治措施

3.1 监测预警方案

3.1.1 区域微震监测

区域微震监测依托 KJ669 微震系统,构建起全矿范围的动态监测网络。该系统通过在矿井关键位置布置高灵敏度的传感器,能够实时捕捉采矿活动引发的震动信号。当煤岩体内部发生破裂或应力调整时,会产生弹性波,传感器将其转化为电信号并传输至监测中心。

系统采用先进的定位算法,基于时差定位原理,通过分析多个传感器接收到震动信号的时间差,精确确定震源位置,定位误差可控制在数米范围内。在能量计算方面,依据弹性波的振幅、频率等参数,结合特定的能量计算公式,准确评估震动能量大小。

预警机制设定了多重阈值指标。当震动能量最大值超过 $5 \times 10^5 \text{J}$,或在工作面每推进 50m 的距离内,释放的微震能量总和超过 $1 \times 10^7 \text{J}$ 时,系统将自动发出预警信号。此外,还会对震源分布密度、能量释放速率等趋势性指标进行分析,提前预判冲击地压危险区域和发展态势^[3]。

3.1.2 局部应力在线监测

KJ847 应力在线监测系统主要用于巷道两侧应力状态的实时监测。在巷道两帮及顶底板关键部位,间隔 5~10m 安装应力传感器,这些传感器能够实时感知煤岩体的应力变化,并将数据以无线传输的方式发送至监测终端。

系统采用应力云图可视化技术,直观展示巷道围岩应力分布情况。三级预警指标依据应力监测值和变化率进行设定:当应力监测值达到原岩应力的 1.2 倍,且应力变化率超过 0.5MPa/d 时,判定为一级预警;应力监测值达到原岩应力的 1.5 倍,变化率超过 1MPa/d 时,为二级预警;应力监测值达到原岩应力的 2 倍,变化率超过 2MPa/d 时,触发三级预警。一旦达到相应预警级别,系统将立即发出声光报警,并向相关管理人员推送预警信息。

3.1.3 冲击地压地音监测

ARES-5/E 地音监测系统通过在煤岩体内布置多个监测

通道,实时监测地音信号。地音现象本质上是煤岩体在受力变形和破裂过程中产生的微小震动,系统能够捕捉到这些频率范围在数赫兹到数千赫兹的震动信号。

预警规则综合考虑单个地音通道和相邻通道的危险等级变化。当单个地音通道在 24 小时内,能量累计值超过 10^4J ,且事件计数超过 50 次时,判定该通道处于危险状态;若相邻两个通道同时达到危险状态,或单个通道危险等级在短时间内急剧上升,则发出冲击危险预警。系统还具备趋势分析功能,通过对历史地音数据的分析,预测冲击地压发生的可能性和时间窗口。

3.2 卸压解危方案

3.2.1 常规卸压方案

大直径钻孔卸压:根据 4301 工作面煤层平均厚度 4.55m 的特点,确定钻孔深度为 6~8m,以确保钻孔能够穿透应力集中区域。在中等冲击危险区,钻孔间距设置为 1.5m,呈梅花形布置;弱冲击危险区,钻孔间距扩大至 2m。钻孔施工采用专用钻机,垂直煤壁方向钻进,孔径为 150~200mm。通过钻孔的形成,破坏煤岩体的完整性,使应力向钻孔周边转移,从而降低煤体内部的应力集中程度。

顶板水力压裂卸压:基于对 4301 工作面钻孔柱状图和承压拱力学模型的分析,确定压裂层位位于基本顶细粒砂岩内,距煤层顶板 3~5m。在回风巷每隔 30m 布置一个钻场,运顺回风通道每隔 20m 布置一个钻场,每个钻场施工 3~5 个钻孔,钻孔长度 30~50m,倾角根据顶板岩层走向进行调整。采用分段压裂技术,通过高压泵将压裂液注入钻孔,在不同段形成裂缝,弱化顶板岩层强度,使顶板在开采过程中能够有序垮落,减少弹性能的积聚。

底板卸压措施:在巷道底板施工大直径钻孔进行卸压,钻孔俯角为 45° ,孔径 150mm。在中等冲击危险区域,钻孔间距为 2m,弱冲击危险区域间距为 3m。钻孔深度根据底板岩性确定,一般为 3~5m。通过底板卸压,释放底板岩层中的应力,有效减少巷道底板冲击及底鼓现象,保证巷道的正常使用和人员通行安全。

3.2.2 解危卸压方案

当巷道两帮监测到冲击危险时,立即启动大直径钻孔解危措施。解危钻孔与之前的卸压钻孔交错布置,钻孔深度和孔径与常规卸压钻孔相同,但间距缩小至 1m。施工过程中,采用快速钻进设备,确保在最短时间内完成钻孔施工。

卸压效果监测采用微震和地音法相结合的方式。通过对比卸压前后微震震动能量、频次以及地音信号的变化,评估卸压效果。若卸压后震动能量明显降低,地音信号趋于平稳,则认为卸压措施有效;反之,则需进一步采取补充卸压措施,直至消除冲击危险^[4]。

3.3 超前支护与推采速度优化

3.3.1 超前支护

运输巷采用防冲吸能单元支架进行单排布置,支架间距

3m, 支护长度从工作面煤壁超前 120m。该支架采用高强度钢材制造, 具备良好的承载能力和吸能特性, 能够在冲击地压发生时吸收部分能量, 减小对巷道支护结构的冲击。支架安装时, 严格控制支架的初撑力, 确保达到设计要求的 25MPa 以上。

回风巷采用双排防冲吸能单元架, 前后排支架间距 1.5m, 支架间距同样为 3m, 支护长度超前 200m。双排支架的布置方式进一步增强了巷道的支护强度, 能够更好地抵御来自工作面后方采空区的压力和冲击。在支护过程中, 定期对支架的工作阻力进行监测, 及时调整支架状态, 保证支护效果。

3.3.2 推采速度优化

根据工作面监测情况及现场实际条件, 对推采速度进行分区分级管理。在中等及以下冲击危险区域, 回采推进速度严格控制在不超过 8m/d, 单班推进速度不超过 4m / 班。这是因为过快的推采速度会导致工作面煤岩体应力调整不充分, 容易引发应力集中和冲击地压。通过合理控制推采速度, 使煤岩体有足够的时间释放应力, 减少矿山震动, 降低冲击地压发生的概率。同时, 在推采过程中, 密切关注各项监测数据的变化, 根据实际情况灵活调整推采速度。

4 冲击地压防治管理技术体系

4.1 防冲管理制度

成立专门的冲击地压防治机构, 由矿长担任组长, 总工程师、安全副矿长等为副组长, 各生产、技术、安全部门负责人为成员, 全面负责冲击地压防治工作的组织、协调和管理。组建专职防冲队伍, 配备专业的地质、采矿、监测等技术人员, 负责冲击地压监测数据的分析、防治措施的实施和效果评估。

建立完善的冲击地压事故上报和记录制度。一旦发生冲击地压事件, 现场人员应立即通过井下通讯系统向调度室报告, 调度室在接到报告后, 10 分钟内向上级主管部门和相关领导汇报。详细记录事故发生的时间、地点、震级、影响范围、人员伤亡及设备损坏等情况, 为后续的事故分析和处理提供依据。

明确各部门在冲击地压防治工作中的职责。生产部门负责合理安排开采顺序和生产进度, 避免不合理的开采布局引发冲击地压; 技术部门负责制定冲击地压防治技术方案, 提供技术支持; 安全部门负责监督防治措施的落实情况, 开展安全检查和隐患排查。

4.2 限员管理

严格执行冲击危险区域限员管理制度, 将超前两巷 200m 范围划定冲击危险重点区域, 所有防冲预卸压措施均在此区域外实施。在运回顺各设置一个限员管理站, 配备专职管理人员, 负责对进入该区域的人员进行登记和管控。

明确规定不同作业班次进入冲击危险区域的人数限制。生产班进入人数不得超过 20 人, 检修班进入人数不得超过 15 人。同时, 严格控制人员在危险区域的停留时间, 非必要人员不得长时间逗留。对于中等冲击危险工作面临空巷道, 从工作面煤壁超前 300m 进行封闭管理, 禁止无关人员进入, 确保人员安全^[5]。

4.3 安全防护措施

作业前, 由班组长组织对作业区域的支护和安全防护设施进行全面检查, 确保支护结构牢固, 安全防护设施完好。严格执行人员准入制度, 禁止未经过安全培训、不熟悉作业环境和安全要求的人员进入冲击危险区域作业。

对井下物料进行固定管理, 采用专用的固定装置将设备、材料等固定在巷道帮部或底板, 防止在冲击地压发生时因震动导致物料移动、滚落伤人。对井下管路、电缆等进行加固处理, 确保在冲击作用下不会脱落、损坏, 影响正常生产和安全供电。

在冲击危险区域悬挂醒目的警示牌, 标明“冲击危险区域, 注意安全”等警示信息。按照相关标准, 在巷道内每隔 50m 设置一组压风自救系统, 每组压风自救装置可供 5 - 8 人使用, 确保在紧急情况下, 人员能够及时获得新鲜空气, 保障生命安全。

5、防治应用效果分析

通过实施上述冲击地压防治措施, 4301 工作面在回采过程中, 冲击地压危险得到有效控制。微震监测数据显示, 震动能量和频次在大部分时间内处于较低水平, 偶尔出现异常时, 通过及时采取解危措施, 危险得以解除。应力在线监测表明, 巷道围岩应力集中程度明显降低, 未出现应力超限导致的冲击地压事故。现场观察发现, 巷道变形量得到有效控制, 顶板垮落和底鼓现象明显减少, 保障了工作面的安全回采。同时, 通过对支架工作阻力的监测, 发现支架受力稳定, 未出现因冲击地压导致的支架损坏情况, 确保了工作面支护系统的可靠性。

6 结论

本文通过对建新煤矿 4301 工作面冲击地压防治的研究, 详细分析了冲击地压的影响因素, 包括地质、开采技术和组织管理因素, 确定了主控因素。采用综合指数法评定了工作面的冲击危险指数, 明确其为弱冲击危险, 并划分了冲击危险区域。建立了区域与局部相结合的监测预警体系, 采用多种监测手段实时监测冲击地压危险。提出了有效的防治方案, 包括卸压解危、超前支护和推采速度优化等措施, 构建了完善的管理技术体系。实施防治措施后, 有效降低了冲击地压风险, 保障了矿井安全生产。

[参考文献]

- [1]周云帅, 张向东, 陈思嘉.综采工作面冲击地压危险性分析及防治技术研究[J].采矿技术, 2025, 25(01): 97-101.
- [2]李瑞华, 尚秀全, 孟清华, 等.综采工作面回采期间冲击危险性评价及防冲设计[J].工矿自动化, 2024, 50(S2): 60-63.
- [3]陈兆生, 丁瑞兴, 杜宝宏, 等.冲击地压工作面防治技术研究[J].山西焦煤科技, 2024, 48(07): 9-11+30.
- [4]王龙, 任青.煤矿综采工作面冲击地压研究与防治[J].内蒙古煤炭经济, 2024, (08): 181-183.
- [5]李同胜.煤矿采煤生产过程中冲击地压防治技术[J].科学技术创新, 2023, (19): 189-192.

面向高精度加工的数控系统误差补偿与智能控制策略探究

胡华

湖州善迁机电科技有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8143

[摘要] 面向高精度加工的数控系统正面临着日益严峻的挑战，其中主要包括环境扰动、机床自身结构缺陷以及加工过程中的动态误差等。为了应对这些挑战，误差补偿技术和智能控制策略显得至关重要。误差补偿通过预先测量或建模误差源，并对数控指令进行修正，从而显著降低系统误差。而智能控制策略则能够实时监测加工过程中的各种状态参数，利用先进的算法对进给速度、切削参数等进行自适应调整。基于此，本文主要论述了数控系统误差补偿与智能控制的重要性，并给出了有效策略，以期构建稳定可靠的数控系统提供参考。

[关键词] 数控系统；误差补偿；智能控制

Research on error compensation and intelligent control strategy of CNC system for high precision machining

Hu Hua

Huzhou Shanqian Electromechanical Technology Co., LTD.

[Abstract] CNC systems designed for high-precision machining are facing increasingly severe challenges, primarily including environmental disturbances, structural defects of the machine tool itself, and dynamic errors during the machining process. To address these challenges, error compensation techniques and intelligent control strategies have become crucial. Error compensation involves pre-measuring or modeling error sources and correcting CNC commands to significantly reduce system errors. Intelligent control strategies can monitor various state parameters in real-time during the machining process and use advanced algorithms to adaptively adjust feed rates, cutting parameters, and more. Based on this, this paper mainly discusses the importance of error compensation and intelligent control in CNC systems, and provides effective strategies to offer a reference for building stable and reliable CNC systems.

[Key words] CNC system; error compensation; intelligent control

在现代制造业中，高精度加工已成为提升产品质量与性能的关键环节。然而，数控系统在实际运行中不可避免地受到各种误差源的影响，严重制约了加工精度的进一步提升。针对这一问题，本研究聚焦于面向高精度加工的数控系统误差补偿与

智能控制策略研究。通过深入分析数控系统的误差特性，并结合先进的补偿算法与智能控制方法，旨在有效降低系统误差，提高加工精度和稳定性。

一、高精度加工的数控系统功能特点

面向高精度加工的数控系统利用先进科技手段达到对加工过程的细致把控，它的主要功能特性表现在诸多层面的共同改善之中。此系统运用精确驱动技术和动态补偿算法，在加工期间不断检测并且调整机械设备出现的细微差错，使得刀具路径同预先设定好的参数维持较高度的一致性，进而改善加工完成产品的尺寸准确度及其表面状况。它把高清晰度感应设备以及即时回馈体制整合进来，可以精确地掌握加工环境中诸如温度起伏，机械抖动之类的各种扰乱要素，并自动加以修正，如此一来就大大缩减了外部条件给加工精确度带来的不良影响。

系统自带标准化工艺数据库以及智能参数适应模块，能够按照加工材料特点自行调节主轴转速，进给速度等关键参数，最大程度缩减人工操作失误，经由改良加工路径规划削减非切削时间，突出改善生产效率。系统还具有灵活适应能力，凭借模块化程序体系做到多种加工模式的极速转换，既可以满足复杂曲面零件精确雕铣的需求，又可以符合批量产品的稳定加工，切实协调好个性化定制和规模化生产的技术需求。在维持稳定性上，数控系统依靠多级安全防护机制随时监测设备运行状况，一旦察觉到异常数据就会自动启动保护程序，并告知维修信息，从而有效地防止因设备故障造成的精度下降。

二、数控系统误差补偿与智能控制的重要性

高端制造要达成高精度加工，离不开数控系统的误差补偿及智能控制技术，这是现代制造业迈向高效，精密生产的关键所在。航空航天，精密模具，光学器件等行业对加工精度的要求日益提升，传统数控系统受机械结构误差，热变形误差，伺服控制偏差等诸多复杂因素制约，很难符合亚微米甚至纳米级别的加工需求。误差补偿技术经由创建多源误差模型，整合高精度传感器并采用数据融合算法，可以及时分析机床运动链中的几何误差，热致误差和动态误差，按照逆向补偿策略调整加工轨迹，大幅缩减系统性误差给加工质量带来的影响。在复杂曲面加工这种情形下，依靠数字孪生的误差预测与补偿系统能够超越传统试切法的限制，做到加工误差的动态缩减，这样就可以防止由于返工而产生的材料和时间损失，从而给高端装备制造赋予精度方面的保障。

智能控制技术被采用之后，数控系统朝着自适应，自决策的方向发展的进程得到了进一步加快。加工过程中的非线性扰动和随机干扰很难建模，依靠深度神经网络，加强学习等算法

的智能控制器，可以经由在线学习和参数改良，及时调整伺服系统的控制策略，使得加工系统即便受到负载波动，刀具磨损等变量的影响，其输出仍然维持稳定。智能控制系统把工艺知识库和多传感器的信息融合起来，就能自行规划最佳的进给速率，主轴转速之类的加工参数，从而既改善加工效率，又增长刀具的使用寿命。而且，智能控制技术还让数控系统具有多目标协同改良的能力，可以在加工精度，表面质量，能耗控制等方面达成动态兼顾，进而给智能制造向柔性化，绿色化转变给予关键技术支撑。

三、面向高精度加工的数控系统误差补偿策略

（一）几何误差补偿

面向高精度加工的数控系统误差补偿策略中，几何误差校正通过研究机床结构特性与运动轨迹偏移的关联性，建立误差预判机制并实施定向修正方案。具体操作中需依据各运动轴实时位置信息，综合温度波动、部件磨损等变量，建立涵盖直线度、垂直度、反向间隙等关键指标的误差评估模型。依托数控系统内部补偿机制，将预测误差转化为轴系位置调整值，实时修正刀具或工件的运动路径。以导轨装配偏差引发的定位误差为例，借助激光干涉仪等精密仪器测得实际位移偏差后，可通过调整数控程序坐标系偏移参数实现误差对冲。针对具有重复特征的系统性偏差，可在数控系统中预置补偿函数，在加工流程中自动施加逆向补偿信号。该技术方案无需改造机械本体结构，具备成本效益且便于操作，配合定期校准与参数优化，可显著提高机床定位精度与加工重复性，尤其适用于复杂型面高精度加工需求。实施过程中需要重点监控环境温控精度与机械组件保养状况对补偿效能的影响，融合在线检测技术形成动态误差校正体系。

（二）热误差补偿

在面向高精度加工的数控系统误差补偿策略当中，热误差补偿重点在于解决由于温度改变造成的机床结构变形和位移偏差情况，在加工的时候，电机运行，轴承摩擦以及切削都会产生热量，这些热量会使机床床身，主轴，丝杠等重要部件不均等地发生热胀冷缩现象，从而影响到刀具和工件之间的相对位置精度。要应对这种情况，一般会采用温度检测和动态补偿关联的办法：先是在机床那些对温度比较敏感的地方，比如主轴轴承，丝杠螺母之类的位置安装上温度传感器网络，随时获取温度分布的数据；然后再加上机床本身的热特性实验所得到