

深部开采环境下机电设备抗冲击振动防护机制创新

刘雪冬

陕西竹园嘉原矿业有限公司 陕西榆林

【摘要】深部开采环境中，机电设备面临冲击波与高频振动的双重威胁，设备稳定性与安全性成为制约生产效率的重要因素。基于对深部矿井地质压力、爆破冲击和机械振源特性的分析，本文提出了机电设备抗冲击振动防护机制的创新思路。研究从结构减振、材料缓冲与智能监测三方面入手，构建了多层防护体系，并结合动力学仿真与实地试验验证其有效性。结果显示，该机制可显著降低冲击应力峰值和振动传递率，提升设备运行寿命与故障预警能力，为深部矿山安全生产提供了可行的技术路径和理论支持。

【关键词】深部开采；机电设备；抗冲击；振动防护；防护机制创新

【收稿日期】2025 年 4 月 17 日

【出刊日期】2025 年 5 月 19 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250184

Innovation in anti-impact and vibration protection mechanisms for electromechanical equipment in deep mining environments

Xuedong Liu

Shaanxi Zhuyuan Jiayuan Mining Co., Ltd. Yulin, Shaanxi

【Abstract】In deep mining environments, electromechanical equipment is subjected to the dual threats of shock waves and high-frequency vibrations, making equipment stability and safety critical factors restricting production efficiency. Based on an analysis of geological pressure, blasting impacts, and characteristics of mechanical vibration sources in deep mines, this paper proposes innovative ideas for anti-impact and vibration protection mechanisms for electromechanical equipment. The research focuses on three aspects: structural vibration reduction, material buffering, and intelligent monitoring, and constructs a multi-layered protection system. Its effectiveness is verified through dynamic simulations and on-site tests. The results show that this mechanism can significantly reduce the peak impact stress and vibration transmission rate, improve the operational life of equipment and fault early warning capabilities, providing a feasible technical path and theoretical support for the safe production of deep mines.

【Keywords】Deep mining; Electromechanical equipment; Anti-impact; Vibration protection; Innovation in protection mechanisms

引言

深部矿井的开采环境复杂，伴随高地应力、强震动和频繁冲击事件，机电设备的运行稳定性面临严峻挑战。长期高强度振动不仅会加速关键部件的疲劳损伤，还可能引发系统性故障，造成重大经济损失与安全事故。当前防护技术多侧重于单一减振或隔震措施，难以满足深部高冲击环境的综合防护需求。针对这一技术短板，本文立足于深部矿山工况特征，探索兼具结构优化、材料吸能和智能监测功能的综合防护机制，旨在为设备安全运行提供系统化、可推广的解决方案，并为相关工程设计与标准制定提供参考。

1 深部开采环境下机电设备冲击与振动特征分析

深部开采作业区域承受的地应力显著高于浅部矿井，矿体开采过程中会释放大量能量，形成瞬态冲击波和长周期振动，这些动态载荷直接作用于机电设备的基础和结构构件。冲击载荷呈现高峰值、短持续时间的特点，能够在毫秒级内引发应力集中现象，使金属结构件产生塑性变形甚至脆性断裂^[1]。矿井内钻爆作业、运输设备运行和大型通风系统产生的机械振源，会在设备安装基础和传动系统中形成持续性高频振动，导致螺栓连接松动、焊缝疲劳裂纹扩展以及轴承磨损加剧。冲击与振动的叠加效应不仅影响设备精度和稳定性，还会对电气控制系统造成接触不良、传感器漂移等隐患，严重时甚至会触发自动保护停机，降低生产效率。

深部矿山的空间环境封闭且地质构造复杂,冲击与振动信号的传播路径存在多次反射和折射,容易形成局部共振区域,使设备在特定频率下承受的动载荷倍增。矿岩介质的非均质性导致波速不稳定,冲击能量在传播过程中可能出现瞬间聚集,形成比平均水平更高的冲击强度。这种波动性使得设备防护设计难度增加,单一基于固定频率的隔振方案往往无法覆盖全部工况。深部环境温度和湿度变化幅度大,潮湿环境会加速金属疲劳和腐蚀,使冲击与振动的损伤效应在时间维度上呈现累积性,这对长期运行的机电设备是严峻考验。

机电设备在深部开采条件下的冲击与振动响应还与安装方式、结构刚度以及基础稳固程度密切相关。例如,刚性较大的设备在受到瞬态冲击时,内部应力峰值较高,而柔性结构则易在长周期振动下发生位移和形变。对于大型提升机、带式输送机 and 液压支架等关键设备,其运行状态直接影响矿井安全生产,若在高冲击高振动环境下长期运行,零部件磨损速率会显著高于常规条件,维护周期缩短,维修成本上升。因此,对深部开采环境下冲击与振动特征的精准分析,是构建有效防护机制的基础,也是防止设备早期失效的前提。

2 现有机电设备防护技术的局限性与改进需求

目前矿山机电设备防护技术主要包括被动防护和主动防护两大类,被动防护多采用减振垫、隔震基座、缓冲材料等手段,依靠物理结构吸收和衰减冲击能量。这类技术在常规矿山条件下效果较为稳定,但在深部高冲击、高频振动环境中,防护材料容易出现性能衰退,缓冲层压缩形变后回弹不足,导致隔振效果下降。尤其在长期湿热环境下,橡胶类或聚合物类缓冲材料会出现老化龟裂,阻尼系数降低,失去对高频振动的有效抑制作用。另一方面,现有的被动防护措施通常针对单一载荷特征设计,无法在冲击和振动叠加时保持均衡防护效果。

主动防护技术如实时监测与反馈控制系统,可以通过传感器采集冲击与振动信号,并驱动执行机构进行响应调整^[2]。然而在深部矿井中,由于信号传输距离长、干扰源多,监测数据容易受到噪声影响,导致判断滞后或误触发防护动作。主动防护系统对电气元件和控制算法的稳定性要求极高,而深部环境的粉尘、湿气和高温都会降低电子元件的可靠性,增加维护难度。高性能传感器和控制单元的成本较高,且在井下更换与调试需要停机操作,影响生产连续性,这也是制约其大规模应用的重要因素。

综合来看,现有防护技术在深部高冲击振动环境下存在响应速度不足、防护范围有限、材料寿命短等问题,难以满足长周期、高可靠性的使用要求。因此,亟需探索多机制协同的防护新路径,将结构优化、材料选型、智能监测与自适应调节有机结合,构建能够应对冲击与振动双重威胁的综合体系。这一改进方向不仅需要跨学科的技术融合,还需要在实际矿山环境中进行长期验证,以确保理论成果能够转化为稳定可靠的工程应用方案。

在深部矿井的高应力、高扰动环境中,单一的被动或主动防护措施往往难以实现长期稳定运行。防护体系不仅要具备对瞬态冲击的快速响应能力,还需对持续振动进行有效衰减,并在潮湿、高温及粉尘等恶劣条件下保持性能稳定。未来的技术发展应注重多种防护手段的耦合与优化,通过结构设计、功能材料和智能控制的深度融合,形成具备自适应调节和长期耐久性的综合防护系统,从而为矿山机电设备的安全高效运行提供全方位保障。

3 多层次抗冲击振动防护机制的构建与应用

深部开采环境的复杂动态载荷特征决定了防护机制必须具备多层次、全周期的综合应对能力。在结构层面,采用分区减振设计,将设备底座与基础之间设置多级隔振单元,针对不同频段的振动采用差异化阻尼材料,以实现高频与低频成分的分级衰减。结构连接部位引入高强度合金螺栓与柔性联轴器,既保证整体刚度,又允许微量位移吸收冲击能量,从而降低应力集中效应。在关键部位增设能量吸收装置,如金属蜂窝结构缓冲器或液压缓冲缸,以延长冲击作用时间,降低峰值载荷。

在材料层面,引入复合阻尼材料与相变吸能材料的组合防护策略。复合阻尼材料通过多相界面摩擦消耗振动能量,而相变材料在温度变化过程中吸收大量潜热,可在冲击发生瞬间缓冲能量传递。这类材料可根据井下环境进行定制配比,确保在高湿、高温或低温条件下仍保持稳定性能。将耐磨防腐涂层与防护结构结合,可显著延长设备表面及防护部件的服役寿命,降低因腐蚀导致的防护性能衰减风险。

在智能监测与自适应调节方面,布设分布式振动与冲击传感网络,通过多点同步采集技术实现实时波形监控,并利用数据融合算法提取冲击与振动特征值。当监测到异常波动时,系统可自动调整阻尼单元的刚度或液压缓冲器的阻尼力,实现动态匹配工况需求^[3-7]。该机制可与矿山生产控制系统联动,在设备即将进入

高冲击作业环节前提进入防护预警状态,从而最大限度降低损伤风险。这种多层次防护体系在深部矿山中的应用,能够在延长设备寿命、减少停机检修次数、提高生产安全性方面发挥显著作用。

4 防护机制的实验验证与工程应用效果分析

在实验验证阶段,通过搭建模拟深部矿山冲击与振动环境的试验平台,对多种防护方案进行了长时间、多工况的对比研究。试验平台能够再现复杂载荷组合和多方向振动特征,使测试条件更贴近实际井下运行环境。研究过程中,重点对防护机制在冲击应力削减、振动能量衰减以及防护结构疲劳寿命等方面的表现进行了持续观测与分析。多层次防护体系在面对突发高幅值冲击时展现出稳定的能量缓释能力,在持续宽频振动作用下也保持了良好的阻尼性能,整体表现较单一防护方案更加均衡。材料与结构的协同作用使防护性能在长周期运行中依旧稳定,监测与调节系统能够快速响应外界扰动,有效防止设备在瞬态冲击中受到过载损伤。

在工程应用验证环节,选择深部金属矿井中运行负荷大、连续作业时间长的主运输系统作为试点,将多层次防护机制集成于带式输送机、提升机以及关键电控单元。系统安装完成后,运行监测显示设备的振动控制效果显著,关键部件受力状态趋于平稳,设备整体运转更加顺畅。运行稳定性的提升减少了频繁检修和突发停机的风险,保障了矿井生产作业的连续性。矿山运维团队在反馈中强调,该机制不仅改善了设备运行的安全性,还使现场维护的复杂程度降低,工作人员在高风险作业区域的停留时间缩短,从而提升了整体作业安全系数与工作效率。

在经济效益层面的综合评估中,防护机制的长期运行数据表明,该方案虽然在初期安装与调试阶段需要一定投资,但在设备延寿、故障率降低、维护频次减少等方面表现出的价值远高于投入成本^[8]。通过减少生产中断与意外维修,矿井运营的稳定性和计划性得到了保障,间接提升了资源开采效率。防护体系的技术稳定性与适应性,也为后续在不同类型矿山的推广奠定了基础。这一成果体现了将结构优化、材料创新与智能监测深度融合的优势,为深部开采机电设备的安全运

行提供了可靠的技术支撑,并为制定相关工程防护标准提供了有力的实践依据。

5 结语

本研究围绕深部开采环境下机电设备面临的冲击与振动问题,提出并验证了多层次综合防护机制的可行性与有效性。通过结构优化、材料创新与智能监测的协同应用,实现了对复杂动态载荷的稳定控制,有效提升了设备运行的安全性与可靠性。工程应用与长期运行结果表明,该机制在延长设备寿命、降低维护频率、保障生产连续性方面具有显著优势,具备广泛推广价值。该研究为深部矿山设备防护技术的发展提供了新的思路与实践参考。

参考文献

- [1] 陈兴华.地铁机电设备智能运维探究[J].人民公交,2025(14):152-154.
- [2] 赵震,朱万平.基于机电设备电气控制故障的智能检测方法研究[J].电气技术与经济,2025(07):220-222.
- [3] 张鹏,李铭华,关韬.煤矿机电设备故障预警及应急管理新型技术应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(13):178-180.
- [4] 吴琼.智能化技术在智能农业机电设备中的应用研究[J].南方农机,2025,56(12):172-174.
- [5] 杨文涛,汤立,戴阳等.农业水利泵站机电设备故障诊断及维修策略研究[J].棉花科学,2025,47(06):113-115.
- [6] 张国庆,牟夏青,于超等.信息化技术在机电设备管理中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(05):91-93.
- [7] 邵辉.基于机械故障诊断的煤矿机电设备监控系统设计[J].中国机械,2025(14):116-119.
- [8] 林锐旭.深部磷矿山开采环境监测与时空演化特性[J].科技与创新,2024(24):12-16.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS