

基于工况自适应的露天钻机钻具结构优化研究

莫海荣

浙江红五环掘进机械股份有限公司 浙江衢州 324000

摘要: 随着矿业资源开采强度的不断提高,露天钻机作为现代采矿作业的核心设备,其钻具结构优化对于提升钻孔效率、降低能源消耗和延长设备寿命具有重要意义。受地质环境复杂性、钻孔参数多变性及作业条件动态波动等因素影响,传统的钻具结构设计难以满足当前露天采矿对高效、低耗、智能化的综合需求。本文从工况自适应的理论出发,系统梳理露天钻机钻具结构的优化设计需求,分析了钻具在不同岩性、孔深、钻进速度等多工况下的力学响应与失效机理。结合多学科协同设计方法,提出基于工况自适应的钻具结构参数优化策略,构建了集多源数据采集、工况识别、结构仿真与优化决策为一体的智能分析平台。通过多场景仿真和现场应用验证,所提方法能够有效提升钻具在复杂工况下的适应性和作业效率,显著降低钻具失效率 and 运营成本。研究成果为露天钻机钻具的高效开发与智能升级提供了理论基础和技术支撑。最后,对工况自适应钻具结构优化的未来发展方向进行了展望。

关键词: 露天钻机; 工况自适应; 钻具结构; 优化设计; 力学分析

引言

露天钻机广泛应用于煤炭、有色金属、建材等矿业资源的露天开采,是现代矿山智能化作业的关键装备。钻具作为钻机实现高效岩石破碎和孔道成型的核心部件,其结构性能直接决定着钻机的钻进效率、能耗水平与作业可靠性。面对复杂多变的地质条件和不断变化的工艺参数,传统钻具结构优化大多以典型工况为基础,忽略了实际工况下岩性波动、钻速调整和孔深变化对钻具性能的影响,难以实现高适应性与高可靠性的统一。近年来,随着传感器、数据采集与分析技术的进步,基于工况自适应的钻具结构优化成为装备设计与数字化运维的热点。本文围绕露天钻机复杂工况下的钻具结构优化问题,系统分析了多工况响应机理,提出了数据驱动下的结构参数自适应优化方法,并在仿真与现场应用中进行了系统验证,为钻机装备智能化升级和绿色高效采矿提供理论与实践支撑。

1 露天钻机钻具结构优化的需求分析与理论基础

露天钻机钻具长期在高冲击、高扭矩、强磨损的恶劣环境下工作,既要满足高强度、高刚度的力学需求,又要兼顾耐磨性、抗疲劳性和可维护性。钻具结构优化的首要目标是提升作业效率和结构可靠性,具体体现在降低钻进阻力、减少能耗、延长使用寿命和降低更换频率。当前行业多采用基于经验和单一工况的结构优化方案,难以兼顾多种岩性、

孔深和钻速的耦合影响。以岩性为例,坚硬岩层对钻头产生极高冲击力和扭矩,易导致钻头破损和杆体疲劳;而松软岩层下,钻具容易发生滑移和扭转失稳。孔深变化会显著增加钻具自重和挠度,对整体刚度和稳定性提出更高要求;钻速与给进力的动态调整则直接影响钻具受力波动和疲劳寿命。因此,露天钻机钻具结构优化需从多工况、多目标、多约束出发,构建自适应优化理论基础,形成以数据驱动、模型预测和智能调节为核心的结构设计新范式。

理论上,钻具结构优化主要包括材料选择、截面参数设计、连接结构优化与受力分布分析等方面。采用有限元力学分析、动态响应仿真和疲劳寿命预测等方法,能够揭示钻具在多种工况下的受力状态、变形模式和失效机理。通过多目标优化算法,结合各工况下的性能指标权重,实现强度、刚度、疲劳、磨损等多目标协同优化。进一步借助工况感知和自适应控制,实现钻具结构参数的动态调整和作业模式的智能切换,提升复杂工况下的作业安全性和经济性。

2 工况自适应的露天钻机钻具结构优化理论与技术路线

2.1 多工况数据采集与工况识别

实现钻具结构的工况自适应优化,首先需要建立完善的多工况数据采集体系,对钻进作业过程中各种复杂环境和动态变化进行精准感知。通过在钻机的关键部位布置压力传感器、加速度计、扭矩传感器、温度传感器等多种高精度智

能传感器,结合无线数据采集和传输技术,能够实现对钻具在不同作业状态下的多维度实时监控。采集到的多源数据通过融合处理,结合信号去噪、特征提取等预处理步骤,形成具有代表性的工况特征集。利用先进的机器学习和数据挖掘算法,如支持向量机、随机森林和深度神经网络,能够对钻井过程中的岩性变化、孔深调整、钻速波动等典型工况进行动态标注和精确分类,实现对复杂作业环境的自动化识别和量化描述。此外,结合实时工况识别结果,系统能实现快速响应,为后续钻具结构的参数调节和性能优化提供准确的数据支撑,从而有效提升钻具的适应能力和工作效率。整个过程不仅大幅提升了工况识别的自动化和智能化水平,也为智能钻探技术的推广应用奠定了坚实的基础。

2.2 工况-结构-性能响应机理分析

钻具在不同工况下的力学响应和性能表现存在显著差异,这对结构设计提出了极高的要求。通过采用多工况下的有限元仿真技术,结合实际钻井作业的典型岩性条件、孔深及钻速参数,对钻具结构进行系统的力学响应分析,揭示其受力特征和潜在的弱点。例如,在硬岩层钻进时,钻头需具备较强的抗冲击性能和合理的齿形设计,以有效减少磨损和破损风险;在深孔作业阶段,钻杆的截面形状及连接方式对整体刚度和抗弯曲能力影响显著,合理设计可有效避免疲劳断裂和变形;而高速钻进条件下,材料的耐磨性和抗热疲劳性能成为保障钻具寿命和稳定运行的关键。通过构建涵盖力学、热学、疲劳等多场耦合的综合模型,能够量化钻具在不同工况下的强度安全系数、最大应力集中点、挠度以及疲劳寿命等关键指标。基于这些定量分析结果,设计团队能够深入理解工况对钻具性能的影响机理,为优化设计提供科学依据,实现结构性能与工况需求的高效匹配,确保钻具在多变作业环境下具备优异的适应性和稳定性。

2.3 结构参数多目标协同优化

在深入掌握钻具多工况响应机理的基础上,开展结构参数的多目标协同优化是提升钻具综合性能的关键。首先,需要明确各工况下不同性能指标的重要性,结合实际工程需求为强度、刚度、疲劳寿命、耐磨性等性能赋予合理的权重,构建涵盖多目标的综合性能评价函数。接着,基于遗传算法、粒子群优化等先进多目标智能优化方法,将有限元仿真与力学性能分析结果作为约束和目标,进行截面参数、材料分布、齿形设计等关键变量的联合寻优。优化过程不仅追求提升单

一指标,更强调多目标之间的协调和平衡,力求在保证结构安全可靠的前提下实现经济制造。通过对拓扑结构和参数空间的高效搜索,探索出多种性能优异且工艺可行的设计方案,为工程师提供设计备选。优化结果通过帕累托前沿分析,帮助决策者直观理解不同设计方案在性能权衡上的差异,支持基于实际应用需求的合理选择。该方法大幅提高了钻具设计的科学性和创新水平,推动了智能化、定制化钻具的开发进程。

3 基于智能平台的钻具结构工况自适应优化实现

3.1 智能分析与优化决策平台构建

为实现工况自适应结构优化的工程落地,本文开发了一套集数据采集、工况识别、结构建模与参数优化为一体的智能分析平台。平台采用分布式数据采集与实时传输架构,支持多点同步采集钻进力、钻速、岩层硬度、孔深等核心数据。内嵌多工况识别与特征分析模块,可自动完成作业条件判别与工况切换。结构建模模块基于三维建模与有限元分析,实现钻具多工况下的快速响应仿真。优化决策模块集成多目标优化算法与专家知识库,能够根据实际工况自动调整钻具结构参数并输出最优设计方案。平台通过与钻机控制系统的接口联动,实现钻具结构与作业参数的动态调节和闭环控制,显著提升了钻机整体运行的智能化水平。

3.2 多场景仿真与工程应用验证

为验证工况自适应结构优化方法的有效性,针对典型硬岩、软岩、深孔及高速钻进等多工况,开展了系统的有限元仿真和现场应用测试。仿真结果显示,经过自适应优化的钻具在各工况下均表现出更优的强度分布、更小的最大应力和更高的疲劳寿命,特别是在工况波动频繁的复杂环境下,结构响应的鲁棒性和安全裕度明显增强。现场应用中,自适应优化钻具在同等条件下的钻进效率提高 10% 以上,钻具更换周期延长 20%-30%,能耗与运营成本同步下降,系统运行稳定性与安全性得到有效提升。平台的开放架构还支持与矿山生产管理系统的对接,实现钻具全生命周期的数字化管理与智能运维。

3.3 自适应优化方法的可扩展性与创新性

本研究提出的工况自适应钻具结构优化方法不仅针对露天矿山钻机进行了深入开发和验证,同时其理论框架和技术路径具有良好的通用性,能够推广应用于隧道掘进、深井钻探等多种工程装备的结构优化领域。通过引入先进的人工

智能算法、数字孪生技术以及物联网系统,平台实现了对钻具运行环境的实时感知、动态分析与智能决策,具备持续学习和自我优化的能力。这种融合使得钻机装备能够根据不同地质条件、作业深度及工况变化,自动调整结构参数和作业控制策略,显著提升装备的适应性和作业效率。更重要的是,结构参数优化与智能作业控制的协同创新,不仅保障了钻具的安全性和耐久性,还降低了能耗和材料浪费,有助于推动矿山装备向高端化、智能化及绿色化方向转型。该方法的应用促进了矿山机械装备的技术升级和产业升级,满足了现代矿业对高效、安全、环保钻探设备的迫切需求,具有重要的理论价值和广泛的工程推广前景。未来,随着技术的不断完善和应用案例的积累,预计这一优化平台将在更多复杂工程环境中发挥关键作用,推动矿山装备制造业的创新发展和智能转型。

4 工况自适应钻具结构优化的前沿技术与发展趋势

4.1 数据驱动的智能感知与工况预测

未来露天钻机钻具结构优化将更加依赖多源大数据驱动的智能感知与工况预测。基于物联网技术,钻机作业现场能够实现数据的全时段、高频率、全覆盖采集,结合云计算与边缘智能,数据预处理、工况分类和异常识别更加高效准确。利用深度学习、时序建模等先进算法,可以提前预测岩层变化、孔深波动及钻进异常,为结构参数优化和作业策略调整提供前瞻性决策依据。

4.2 多学科耦合的智能优化设计

多学科协同优化(MDO)技术将为工况自适应钻具结构设计注入新动力。通过材料、力学、结构、疲劳、磨损等多学科建模与优化,实现钻具结构参数的全局协同与动态调整。进一步结合数字孪生技术,可实现钻机装备的虚实互动与全生命周期仿真优化,提升结构创新能力和工程应用价值。多目标自适应优化方法将在结构强度、刚度、耐磨、寿命等性能提升与制造成本、维护便利性工程约束间取得更优平衡。

4.3 智能制造与全生命周期管理

未来工况自适应钻具结构优化将与智能制造和装备全生命周期管理深度融合。通过数字化设计、智能制造、质量检测 and 在线运维,形成设计—制造—应用—维护的闭环优化体系。智能分析平台将为钻具状态监控、故障预测、维护决策和报废管理提供数据支持,实现设备全寿命的安全可靠运行和价值最大化。结合绿色制造理念和再制造技术,推动钻具结构优化向节能、环保、循环利用方向发展,为矿业装备高质量发展提供持续动力。

5 结论

本文系统研究了基于工况自适应的露天钻机钻具结构优化方法。针对复杂多变的露天采矿工况,分析了钻具结构多工况力学响应机理,提出了融合多源数据采集、工况识别、有限元仿真和多目标优化的自适应结构优化理论与技术体系。开发了智能分析与优化决策平台,实现了钻具结构参数的动态自适应调整和多工况高效匹配。多场景仿真和现场应用验证了所提方法在提升钻进效率、延长寿命、降低成本和增强系统稳定性等方面的显著效果。研究成果为露天钻机钻具的高效开发、智能制造与绿色运维提供了新思路和技术基础。展望未来,建议进一步加强与人工智能、大数据、数字孪生等新兴技术的深度融合,推动工况自适应结构优化方法在矿山装备、能源工程、地质勘查等领域的推广应用,实现装备制造与运维的全流程智能化、数字化和可持续发展。

参考文献:

- [1] 王伟,李庆文.露天钻机工况适应性与结构优化设计研究[J].矿山机械,2023,41(2):88-94.
- [2] 赵宏,许志勇.基于有限元分析的钻具多工况力学响应研究[J].矿业装备,2022,43(6):77-83.
- [3] 郝翔,陈浩.钻机钻具结构多目标优化方法及应用[J].煤矿机械,2023,44(4):65-70.
- [4] 周伟,王刚.基于工况感知的钻机装备自适应设计技术[J].煤炭科学技术,2022,50(5):145-151.
- [5] 刘博,杨振宇.工况自适应智能优化在矿山装备结构设计中的应用[J].矿业工程研究,2023,43(3):112-119.