

TBM 刀盘区域集成式模块化锚杆钻机系统设计与结构优化

张宏超

浙江海聚科技有限公司 浙江 杭州 311100

摘要: TBM刀盘区域空间紧凑且需应对复杂地质支护需求,集成化设计面临空间、运动干涉等多重约束。设计集成式模块化锚杆钻机系统,划分五大功能模块,采用“周向分布式+径向伸缩式”布局。关键模块创新设计提升钻进效率与导向精度,通过拓扑优化、轻质材料应用及动态稳定性分析,实现结构轻量化与可靠运行,满足TBM高效掘进与支护需求,为隧道掘进技术提供理论支持与技术参考。

关键词: TBM; 刀盘区域; 模块化设计; 锚杆钻机; 结构优化

引言:在隧道掘进工程中,TBM凭借高效连续掘进优势广泛应用,但其刀盘区域结构紧凑、空间约束严格,且需适配不同地质条件的锚杆支护需求。传统锚杆钻机难以满足复杂工况下的高效作业要求,集成化设计需兼顾空间利用率、运动协同性与支护工艺精度。开展TBM刀盘区域集成式模块化锚杆钻机系统设计与结构优化研究,对提升掘进效率、保障施工安全具有重要意义,是推动隧道掘进技术向智能化、高效化发展的关键方向。

1 刀盘区域空间约束与支护需求分析

1.1 TBM刀盘区域结构特征

TBM刀盘区域作为隧道掘进核心作业区域,其结构特征直接决定空间约束条件与支护系统设计方向。该区域核心构件包括刀盘本体、驱动装置、护盾结构及推进系统,各构件布局紧凑且运动协同性要求高。刀盘本体多采用辐板式或辐条式结构,辐板间预留的作业空间有限,且随刀盘旋转存在周期性空间占用变化,形成动态空间约束。驱动装置位于刀盘后方,体积庞大且包含复杂传动机构,进一步压缩了周边作业空间^[1]。护盾结构分为前盾、中盾和尾盾,其中前盾与刀盘衔接处为关键作业区域,其内径尺寸直接限制锚杆钻机的安装高度与横向伸缩范围。刀盘区域需承受掘进过程中的冲击载荷、扭矩及围岩压力,结构设计需兼顾强度与空间利用率,这些结构特征共同构成了锚杆支护系统集成设计的基础约束条件,也决定了支护设备必须具备紧凑化、模块化的核心特性。

1.2 锚杆支护工艺需求

TBM掘进过程中,刀盘区域围岩暴露后需及时进行锚杆支护,以防止围岩坍塌、保障掘进安全,其工艺需求需适配不同地质条件与掘进节奏。在硬岩地质条件下,锚杆支护需实现深孔钻进,要求钻机具备较大的输出扭矩与推进力,同时需保证钻孔精度以确保锚杆锚固效果;

在软岩或破碎带地质中,需采用浅孔密排支护策略,且钻进过程中需控制钻进速度与冲击力,避免加剧围岩扰动。从工艺时序来看,锚杆支护需与TBM掘进工序高效衔接,理想状态下可实现掘进与支护并行作业,因此要求支护设备具备快速定位、钻进、安装锚杆的能力,单根锚杆安装周期需匹配TBM掘进循环节奏。锚杆支护工艺对钻孔角度精度要求严格,需根据围岩产状调整钻孔方向,通常要求角度偏差不超过 $\pm 1^\circ$;同时,锚杆安装后需进行锚固力检测,支护系统需预留检测接口,确保支护质量达标,这些工艺需求为锚杆钻机系统的功能设计提供了明确依据。

1.3 集成化设计约束条件

TBM刀盘区域锚杆钻机系统的集成化设计需面临多维度约束条件,核心约束源于空间、运动干涉、设备协同及安全规范四大方面。空间约束方面,刀盘区域有限的径向与轴向空间,要求集成系统各模块必须紧凑化设计,设备整体尺寸需严格匹配护盾内径、刀盘辐板间距等空间参数,同时需预留刀盘旋转、推进系统动作的冗余空间。运动干涉约束表现为,锚杆钻机系统的伸缩、摆动等动作需避开刀盘旋转轨迹、护盾支撑油缸行程及其他周边设备运动范围,需通过精准的运动学分析规划设备动作边界。设备协同约束要求锚杆钻机系统与TBM主控系统、刀盘驱动系统实现数据互通与动作联动,确保支护作业与掘进作业协同开展,避免工序冲突。安全规范约束则包括设备需具备防爆、防尘、防水功能,以适应隧道内恶劣作业环境。

2 TBM刀盘区域集成式模块化锚杆钻机系统总体设计

2.1 系统总体架构

2.1.1 功能模块划分

集成式模块化锚杆钻机系统基于功能拆解与协同工作原理,划分为五大核心功能模块,各模块既相互独立

又紧密协同,实现锚杆支护全流程自动化作业。钻进模块为核心执行单元,承担钻孔、清孔、锚杆推送及锚固剂注入等关键作业,具备扭矩与推进力自适应调节功能;导向定位模块负责实时检测并修正钻孔位置与角度,通过激光定位与姿态传感技术保障钻孔精度;快换接口模块实现钻杆、锚杆及锚固剂组件的快速更换,缩短作业切换时间,提升作业效率;动力驱动模块为系统提供液压或电动力,根据作业工况实现动力输出的无级调节;控制系统模块作为系统“大脑”,集成传感器数据采集、动作逻辑控制、与TBM主控系统通讯等功能,实现作业流程自动化与远程监控^[2]。各模块采用标准化接口设计,具备良好的互换性与扩展性,可根据不同地质条件与支护需求灵活组合,确保系统适配性与运维便捷性。

2.1.2 布局方案

结合TBM刀盘区域结构特征与空间约束,系统采用“周向分布式+径向伸缩式”布局方案,实现空间利用率最大化与作业覆盖范围全优化。在布局位置选择上,将系统主体安装于前盾周向预留的安装基座上,沿前盾圆周均匀分布3-4套锚杆钻机单元,确保支护作业无死角覆盖隧道断面。每套钻机单元采用径向伸缩机构设计,非作业状态下收缩至护盾内侧,避开刀盘旋转轨迹与其他设备运动空间;作业状态下通过伸缩机构伸出,实现不同径向深度的钻孔作业。在轴向布局上,将动力驱动模块与控制系统模块安装于中盾区域,通过高压油管与电缆实现与前盾作业模块的连接,既缩短了动力传输路径,又避免了作业模块体积过大导致的空间占用问题。另外,布局设计充分考虑设备维护空间,在各模块连接处预留检修通道与操作窗口,同时设置专用吊装点,方便设备安装与故障维修,确保布局方案兼顾作业效率、空间适配性与运维便捷性。

2.2 关键模块设计

2.2.1 钻进模块设计

钻进模块作为锚杆钻机系统的核心执行部件,其设计需兼顾钻进效率、适应能力与作业稳定性。模块采用“液压马达+行星减速器”的动力传动方案,液压马达具备输出扭矩大、调速范围宽的特性,配合行星减速器可实现扭矩放大与转速调节,满足不同地质条件下的钻进需求,最大输出扭矩可达 $5000\text{N}\cdot\text{m}$,钻进转速可在 $0\sim 60\text{r}/\text{min}$ 范围内无级调节。钻进执行机构采用伸缩式钻杆设计,钻杆采用高强度合金钢材质,表面经耐磨涂层处理,提升使用寿命;钻杆连接采用螺纹自锁结构,确保钻进过程中连接可靠,避免脱杆事故。模块集成清孔与锚固剂注入功能,在钻杆内部预留通道,钻孔完成后通过通道

通入高压风进行清孔,清除孔内岩粉,随后通过同一通道推送锚固剂,实现清孔与锚固剂注入一体化作业,缩短工序时间。

2.2.2 导向模块设计

导向模块设计以实现高精度钻孔定位为核心目标,采用“激光定位+姿态传感+闭环控制”的技术方案,确保钻孔角度与位置偏差控制在允许范围内。模块核心组件包括激光发射器、激光接收器、惯性导航传感器及伺服驱动机构,激光发射器安装于TBM机身固定位置,发射精准直激光束作为定位基准;激光接收器安装于钻进模块前端,实时接收激光信号,计算钻孔位置偏差;惯性导航传感器则实时检测钻进模块的姿态角度,包括俯仰角、横滚角与方位角,精准反馈钻孔角度状态。导向控制单元将位置偏差与姿态角度数据进行融合分析,生成调节指令,驱动伺服机构带动钻进模块进行姿态调整,实现闭环导向控制^[3]。模块具备自动校准功能,可定期对激光定位系统与惯性导航传感器进行校准,消除累计误差,确保长期作业过程中的导向精度,满足不同围岩条件下的支护工艺要求。

2.2.3 快换接口设计

快换接口模块设计旨在实现钻杆、锚杆及锚固剂组件的快速、可靠更换,提升作业切换效率,其核心要求为连接牢固、更换便捷、密封良好。接口采用“液压驱动+锥面定位+钢球锁紧”的结构形式,主体分为公接头与母接头两部分,公接头安装于钻杆、锚杆等执行部件末端,母接头集成于钻进模块输出端。更换过程中,通过液压系统驱动母接头内的锁紧套移动,实现钢球的张开与收缩,完成接头的解锁与锁紧;锥面定位结构确保公母接头对接精准,同轴度偏差不超过 0.2mm ,避免对接偏差导致的动力传输不稳定。接口内部设置双重密封结构,包括O型密封圈与防尘圈,既防止隧道内的岩粉、水汽进入接口内部,损坏传动部件,又确保锚固剂注入过程中无泄漏。此外,接口集成到位检测传感器,实时反馈接头连接状态,当连接未到位时,控制系统禁止作业启动,保障作业安全;同时,接口采用标准化设计,适配不同规格的钻杆与锚杆,提升模块通用性,降低运维成本,确保系统在不同支护工况下的快速响应能力。

3 系统结构优化与轻量化设计

3.1 基于拓扑优化的关键部件设计

基于拓扑优化技术的关键部件设计,以提升部件强度刚度、降低重量为核心目标,实现结构性能与轻量化的协同优化。优化对象包括钻进模块壳体、导向机构支架、径向伸缩臂等核心承载部件,优化过程采用有限元

分析与拓扑优化算法相结合的方法。首先,建立关键部件的三维模型,明确部件的载荷条件(包括掘进冲击载荷、扭矩、自身重量等)与约束条件(安装固定面、运动自由度限制等);随后,基于变密度法拓扑优化算法,设定体积分数降低30%为轻量化目标,以最大刚度为优化目标函数,进行拓扑优化计算,得到部件的最优材料分布形态。根据优化结果,对部件结构进行重构设计,去除冗余材料,形成镂空、加强筋优化布局的轻量化结构。重构后的结构需进行二次有限元验证,检测其在极限工况下的应力分布、变形量是否满足设计要求,若不满足则调整优化参数重新计算,直至获得满足强度刚度要求且重量最优的结构设计方案,实现关键部件的轻量化与高性能设计。

3.2 材料选择与减重策略

材料选择与减重策略是实现系统轻量化设计的关键手段,需在保障结构强度、耐磨性与可靠性的前提下,优先选用轻质高性能材料,并结合结构设计优化实现减重目标。在材料选择方面,核心承载部件如伸缩臂、钻机支架等,选用高强度铝合金与碳纤维复合材料替代传统钢材,高强度铝合金密度仅为钢材的1/3,且强度可达普通钢材的80%以上,碳纤维复合材料密度更低,比强度是钢材的4-5倍,可大幅降低部件重量;钻进模块的钻杆、接头等耐磨部件,选用高强度耐磨钢,并采用表面喷涂硬质合金涂层的方式,在保障耐磨性的同时,减少材料用量。在减重策略上,除材料替代外,还采用“结构镂空+薄壁设计”相结合的方式,对非核心承载区域进行镂空处理,对壳体类部件采用薄壁加强筋的结构形式,在不降低结构刚度的前提下减少材料消耗;同时,优化部件连接方式,采用螺栓连接替代焊接,减少焊接余量导致材料浪费,且便于拆装维护。通过精准的载荷计算,合理确定材料截面尺寸,避免过度设计导致的重量冗余,实现材料利用率最大化与系统轻量化的平衡。

3.3 动态稳定性分析

动态稳定性分析旨在评估系统在TBM掘进振动、作业冲击等动态载荷作用下的运行稳定性,为结构优化提供依据,确保系统长期可靠作业。分析采用多体动力学

仿真与现场试验相结合的方法,首先建立系统的多体动力学模型,明确各部件间的连接关系(如铰接、刚性连接、弹性连接等),并施加真实的载荷边界条件,包括TBM掘进过程中的机身振动载荷、钻进模块作业时的冲击载荷、围岩反力等^[4]。通过动力学仿真软件,模拟系统在不同掘进工况(如硬岩掘进、软岩掘进、转弯掘进)下的动态响应,分析系统的位移变化、速度波动、加速度分布及部件间的作用力变化,识别系统的薄弱环节(如连接部位、悬臂结构)。针对仿真发现的问题,对薄弱环节进行结构优化,如增加加强筋、优化连接方式、采用弹性缓冲部件等。随后,进行现场试验验证,在实际隧道掘进过程中,通过安装加速度传感器、位移传感器等设备,实时采集系统动态响应数据,与仿真结果进行对比分析,修正仿真模型参数,确保分析结果的准确性。通过动态稳定性分析与优化,使系统在动态载荷作用下的最大振幅控制在0.5mm以内,满足作业精度与安全要求,保障系统运行稳定性与可靠性。

结束语

TBM刀盘区域集成式模块化锚杆钻机系统通过功能模块化设计与空间优化布局,实现了有限空间内的高效集成与全断面支护覆盖。关键模块的创新设计与结构轻量化策略,显著提升系统钻进效率、导向精度与动态稳定性,动态稳定性分析确保复杂工况下的可靠运行。研究成果为TBM支护设备研发提供理论支撑与技术范式,有助于推动隧道掘进技术向更高效、更安全的方向发展,具有广阔的工程应用前景。

参考文献

- [1]刘建琴,魏琛,郭伟.基于离散元方法的TBM刀盘磨损研究及优化设计[J].铁道工程学报,2020,37(9):85-90.
- [2]张照煌,王鑫鑫,卓兴建,等.TBM不均匀磨损盘形滚刀破岩力研究[J].力学学报,2025,57(5):1188-1201.
- [3]李飞鹏.全断面硬岩TBM刀盘清理关键技术研究[J].铁道建筑技术,2025(1):176-179.
- [4]左岗永.机载锚杆钻机电液控制系统设计[J].煤矿机械,2025,46(7):18-20.