

纵轴式掘锚机截割机构结构优化设计

李天润 黄鹏飞

西安煤矿机械有限公司 陕西 西安 710200

摘要：针对纵轴式掘锚机截割机构存在的截齿排布不均、截割臂刚度不足、传动效率损耗及运行振动等问题，开展了各部件结构优化设计。截割头采用光滑曲线过渡轮廓与等截割间距螺旋排布方式，壳体壁厚按受力梯度分区设计。截割臂采用闭合箱型截面，在高应力区布置加强筋与减重孔。传动系统简化为全行星齿轮结构，以过盈配合替代花键连接来消除间隙。导向支撑部件设置耐磨衬套与背对背轴承配置。优化后截割比能耗降低，结构应力分布趋于均匀，疲劳寿命与运行稳定性均得到提升。

关键词：纵轴式掘锚机；截割机构；结构优化

引言：纵轴式掘锚机广泛应用于煤巷及半煤岩巷道掘进，截割机构是其核心工作部件，直接决定破岩效率与整机运行稳定性。截割机构由截割头、截割臂、传动系统及导向支撑部件构成，通过截割头旋转与截割臂摆动的复合运动实现煤岩破碎。当前截割机构在结构设计上存在截齿排布不均、截割臂刚度不足、传动链效率损耗及运行振动等问题，导致截割效率降低、磨损加剧与使用寿命缩短。围绕强度刚度匹配、效率优先、轻量化及可制造性原则，对各部件开展结构优化设计，以提升截割机构综合性能。

1 纵轴式掘锚机截割机构结构组成与工作原理

1.1 截割机构核心组成部件

截割头结构特性表现为外形呈锥形或圆柱形，表面按螺旋线排布着截齿与齿座。截割头前端设计为球冠形或尖锥形，便于切入煤岩体。截齿通常采用镐形或刀形结构，齿座通过焊接或螺栓固定在截割头壳体上。截割头内部为中空结构，用于容纳喷雾冷却系统，降低截齿温度并抑制粉尘。截割臂结构形式为箱型焊接构件，内部布置有减震与连接接口。截割臂前端与截割头通过花键套或法兰盘连接，后端与回转座铰接。截割臂壳体采用高强度钢板制造，关键受力区域布置有加强筋板。截割臂内部留有传动轴或链条的安装空间，同时设有润滑通道和密封结构。传动系统结构组成主要包括截割电机、联轴器、减速器以及截割主轴。截割电机通过联轴器将动力输入至减速器，减速器采用行星齿轮或平行轴齿轮多级减速结构，将高转速低扭矩转换为低转速高扭矩输出^[1]。截割主轴一端与减速器输出端连接，另一端与截割头刚性连接。导向与支撑部件结构包括滑动轴承、滚动轴承以及密封组件。滑动轴承布置在截割臂与回转座的铰接部位，承受径向与轴向联合载荷。滚动轴承支

撑截割主轴并保证其旋转精度。密封组件采用多层组合形式，防止粉尘与水分侵入润滑腔与齿轮箱。

1.2 截割机构工作机理

截割运动轨迹与力学传递过程如下。截割头在旋转运动的同时随截割臂作摆动或升降运动，形成复合运动轨迹。截割电机输出的扭矩经传动系统传递至截割头，驱动截齿依次切入煤岩体。截齿在接触煤岩时受到法向阻力与切向阻力，法向阻力使截割头产生轴向反力，切向阻力形成截割扭矩。这些力经截割头壳体传递至截割主轴，再传递至减速器壳体，最终作用在截割臂与回转座上。截割负载的产生与分布规律取决于截齿与煤岩的相互作用过程。单个截齿切入煤岩时形成压碎区与剪切区，同时产生周期性变化的阻力。多个截齿在螺旋线排布下依次切入，使截割负载呈现波动特性。截割头前端区域截齿承受较大冲击负载，中段区域截齿承担主要截割功，后段区域截齿起修整壁面作用。截割臂摆动方向上的负载分布不均匀，迎向摆动方向一侧截齿负载较大，背向一侧负载较小。

2 纵轴式掘锚机截割机构现存结构问题分析

2.1 结构设计缺陷识别

截割头结构合理性不足主要表现为截齿排布密度与角度设计未充分考虑不同岩层的破碎特性。截割头锥形段与圆柱段过渡区域截齿间距过大，形成破碎盲区。截齿角度在截割头不同区域缺乏差异化设计，导致部分截齿过度磨损而部分截齿参与截割不足。截割头壳体壁厚分布未与受力梯度相匹配，局部区域产生应力集中。截割头内部喷雾通道截面变化剧烈，造成冷却液流动阻力增大。截割臂刚度与强度短板主要体现在箱型截面变化过渡不够平滑，高应力区域缺少局部加强结构。截割臂与回转座连接铰点处的耳板厚度及筋板布置未能有效抵

抗扭转载荷。截割臂内部传动轴支撑位置间距过大,导致传动轴在负载下产生挠曲变形。截割臂焊缝布置在弯矩最大截面附近,降低了结构的疲劳寿命。截割臂润滑通道与结构强度布局存在冲突。传动系统结构冗余与效率损耗表现在减速器采用多级齿轮传动,级间轴承支撑结构复杂且占用较大轴向空间。截割电机与减速器之间的联轴器结构存在对中误差补偿能力不足的问题,造成附加动载荷。

2.2 结构问题引发的性能影响

截割效率降低的结构诱因包括截割头破岩能力分布不均,锥形前端截齿承担过重截割任务而快速钝化,中后部截齿未能充分发挥截割作用。截割臂刚度不足导致截割头实际运动轨迹偏离设计轨迹,部分煤岩体被多次重复破碎。传动系统效率损耗使输入功率未能有效转化为截割功,能量以热量形式耗散。截割头喷雾冷却效果不佳造成截齿温度升高,截齿强度下降后加速磨损,进一步降低截割能力。机构磨损加剧与使用寿命缩短的结构关联表现为截割头壳体与截割臂连接部位存在间隙,交变载荷下产生微动磨损。截割臂内部传动轴支撑轴承润滑不良,滚动体与滚道表面产生接触疲劳剥落。截割臂铰接部位密封结构不完善,煤岩粉尘侵入后加速滑动摩擦副的磨粒磨损^[2]。减速器齿轮啮合表面在冲击载荷作用下产生塑性变形与齿面点蚀。各磨损部位未设计可更换耐磨衬层,壳体本身磨损后修复困难。运行稳定性不足的结构根源为截割臂在截割负载波动时产生扭转振动,振动能量沿结构传递至整机。截割头与截割臂连接花键的齿侧间隙在负载换向时产生撞击,激发高频冲击。减速器齿轮侧隙分布不均匀,在变负载工况下产生周期性的传动误差。

3 截割机构结构优化设计原则与目标

3.1 结构优化设计基本原则

强度与刚度匹配原则要求结构中各承载部件的强度等级与刚度分布相互协调,避免局部过强而邻近区域偏弱。刚度设计应以力流传递路径为依据,使载荷顺畅传递至安装基座。连接部位强度应与被连接构件相当,防止接头处成为失效起点。效率优先原则强调动力传递全过程中机械损耗应控制在最低水平。齿轮啮合副的数量应在满足减速比前提下尽量减少,支撑轴承的选型与布置应兼顾承载能力与摩擦功耗。截齿排列方式应使每个截齿均能有效参与破碎。轻量化与紧凑化原则要求在不降低强度与刚度的前提下减小结构质量与外形尺寸。截割臂壳体可采用变壁厚设计,高应力区域增厚而低应力区域减薄。传动系统各部件应尽可能集成在有限空间

内,截割头内部可利用空间应布置喷雾冷却通道^[3]。可制造性与装配性原则要求优化后的结构便于加工与组装。截割臂焊接结构应避免过小的焊缝操作空间,截割头截齿座的位置应使齿座焊接时具备清晰的定位基准。传动系统各轴承与齿轮的装配顺序应合理,避免出现不可达的安装位置。

3.2 结构优化设计目标

力学性能优化目标旨在提高截割机构抵抗外部载荷的能力。截割头在不同岩层条件下工作时,应力分布应趋于均匀且峰值应力降至材料屈服强度以下。截割臂在最大截割深度与最大摆动角度组合工况下,变形量控制在允许范围内。传动轴在额定扭矩与冲击扭矩作用下,扭转变形不影响齿轮啮合精度。各连接螺栓在交变载荷作用下,预紧力保持能力应得到提升。工作效率优化目标聚焦于截割比能耗的降低。截割头每破碎单位体积煤岩所消耗的能量,应通过优化截齿排布而减小。截割臂摆动速度与截割头转速的匹配关系,应使截齿切入厚度处于合理区间。传动系统功率损耗应降至额定功率的规定百分比以内。喷雾冷却系统在保证截齿降温前提下,冷却液消耗量应实现最优控制。结构寿命优化目标着眼于延长截割机构的无故障工作时间。截割头壳体在交变截割载荷作用下的疲劳寿命应达到规定循环次数。截割臂关键焊缝的疲劳强度应通过优化接头形式得以提高。传动齿轮齿面接触疲劳寿命与弯曲疲劳寿命应满足整机使用寿命要求。轴承在额定负载下的计算寿命应与截割机构大修周期相匹配^[4]。运行稳定性优化目标致力于抑制截割过程中的振动与冲击。截割头在旋转状态下应满足动平衡等级要求,以减小不平衡离心力。截割臂与回转座铰接间隙应控制在合理范围内,防止运动副间隙引发的振动。传动系统齿轮侧隙应按负载工况选取最优值,避免齿面撞击。截割主轴与截割臂轴承座孔的同轴度误差应得到严格限制,以降低旋转惯性力的激励作用。

4 纵轴式掘锚机截割机构各部件结构优化设计

4.1 截割头结构优化

截割头外形轮廓优化设计应将锥形段与圆柱段的过渡区域采用光滑曲线连接,使截齿切入岩层的角度平缓变化。截割头前端球冠形轮廓的曲率半径应根据截齿伸出长度确定,保证前端截齿的有效破岩能力。截割头尾部与截割臂连接处的直径过渡应避免产生应力集中,整体轮廓应保证截割头在旋转过程中与岩层表面形成合理的接触区域。截齿排布方式优化应使截齿按等截割间距原则沿螺旋线分布,从截割头前端至后端截齿间距逐渐增大,以适应破岩载荷的衰减规律。同一螺旋线上的

截齿应错开一定角度,保证截割过程中截齿依次切入岩层,避免同时接触。截齿的安装角度应根据其在截割头上所处位置分区设定。截割头材料与壁厚优化应采用高强度耐磨材料制造壳体,壳体壁厚根据受力梯度进行分区设计。前端承受冲击区域壁厚较大,中后部壁厚可适当减薄。截割头内部筋板布置应与外部截齿位置相对应,形成力流短路径,同时筋板厚度与壳体壁厚应保持合理的比例关系。

4.2 截割臂结构优化

截割臂截面形状与尺寸优化应采用闭合箱型截面替代开放截面。箱型截面的宽度与高度比应根据截割臂受力方向确定,承受主要弯矩方向的截面尺寸应大于另一方向。截面壁厚在满足局部稳定前提下尽量减薄以降低自重,截面内部转角处应设置过渡圆弧以降低应力集中程度。截割臂受力区域结构强化设计应在截割臂与回转座铰点附近布置环形加强筋,在截割臂与截割头连接法兰根部设置过渡圆角并增加局部壁厚。在传动轴支撑位置的外壁对应区域设置纵向加劲肋以传递支撑反力,在截割臂侧面承受侧向载荷的区域增设横向隔板。截割臂轻量化结构改进应在低应力区域的壁面上开设减重孔,减重孔的形状采用圆形或椭圆形以避免应力集中。在截割臂内部非受力区域去除多余材料,同时保留足够的工艺凸台用于加工定位。对截割臂上不同壁厚区域进行平滑过渡,避免截面突变引起的应力集中^[5]。

4.3 传动系统结构优化

传动部件结构简化与效率提升设计应减少减速器中的齿轮啮合级数,将多级行星齿轮传动与一级平行轴齿轮传动的组合形式优化为全行星齿轮传动。取消中间过渡轴及相应的支撑轴承,以缩短传动链长度。截割电机输出轴与减速器输入轴采用直接插入式连接替代联轴器连接,以消除对中误差。对减速器壳体进行集成化设计,将原本分散的轴承座整合为一体式结构。传动间隙优化与稳定性改进应在减速器齿轮副中采用齿厚修形技术,对齿顶与齿根部位进行微量修整以降低啮合冲击。齿轮侧隙选取应使负载工况下的弹性变形刚好补偿齿侧间隙。截割主轴与截割头连接采用过盈配合替代花键连接,以消除传动间隙。在减速器各级齿轮之间设置相位调整装置,保证各齿轮副的最佳啮合状态。

4.4 导向与支撑部件结构优化

导向结构精度优化应在截割臂与回转座的铰接处设置耐磨导向衬套,衬套内表面加工出油槽以保证润滑油脂均匀分布。导向衬套与销轴之间的配合公差应控制在滑动配合范围内。在截割臂摆动油缸的活塞杆端部设置可调节的限位装置,以实现截割臂摆动角度的精确控制。导向衬套两端设置防尘密封圈,防止煤岩粉尘侵入配合表面。支撑部件承载能力强化设计应将截割主轴两侧的支撑轴承由面对面配置改为背对背配置,以提高轴承组的整体刚度。轴承座孔采用整体式结构替代剖分式结构,以保证同轴度。在轴承外圈与轴承座之间增加减振环,以吸收高频冲击能量。滚动体材料采用高纯度轴承钢并对其表面进行改性处理,以提高接触疲劳寿命。轴承润滑通道应设计为独立回路,保证重载条件下润滑油的持续供给。

结束语:纵轴式掘锚机截割机构通过截割头外形轮廓优化、截齿等截割间距螺旋排布及壳体壁厚分区设计,改善了破岩能力分布不均与应力集中问题。截割臂采用闭合箱型截面并布置加强筋与减重孔,提升了刚度并实现了轻量化。传动系统简化为全行星齿轮结构并消除花键间隙,降低了功率损耗。导向支撑部件通过耐磨衬套与背对背轴承配置,提高了承载能力与运行稳定性。各部件优化协同作用,使截割比能降低,结构疲劳寿命延长,振动冲击得到有效抑制,截割机构综合性能获得全面提升。

参考文献

- [1]汪强.龙门式钻锚机器人与纵轴掘进机器人会车技术研究[D].陕西:西安科技大学,2022.
- [2]巩孔正,卢团部,张星,等.一种纵轴掘锚机用滑移机构[J].现代工业经济和信息化,2022,12(7):164-165.
- [3]范要辉.快掘成套装备的设计研究[J].煤矿机械,2022,43(9):25-27.
- [4]贺颖.悬臂式掘进机截割岩石硬度识别方法的研究[D].山西:太原理工大学,2021.
- [5]谢苗,石俊杰,张鸿宇,等.多激励下新型纵轴式掘进机的纵向振动特性预测[J].工程设计学报,2023,30(6):728-737.