

掘进机截齿磨损机理与刀具布局优化对掘进效率的影响

赵 全

宁夏银星煤业有限公司 宁夏 银川 750000

摘 要：截齿作为掘进机破岩作业的核心构件，长期在复杂围岩环境中承受复合载荷作用，极易产生多种形式的结构磨损，影响掘进作业的平稳推进。本文结合截齿结构特性与井下掘进工况，系统梳理磨粒磨损、冲击磨损、疲劳磨损的形成过程，分析多类磨损耦合作用的损伤规律，探讨截齿损耗与刀具布局缺陷对破岩作业的制约关系，从安装角度、排布间距、工况适配及磨损防控层面完善布局优化方式，改善截齿服役状态，提升巷道掘进作业的整体平稳性。

关键词：掘进机；截齿磨损；磨损机理；刀具布局；掘进效率

引言：井下巷道掘进环境复杂多变，围岩结构动态差异明显，对掘进设备构件性能与作业模式有着严苛要求。截齿在连续破岩过程中持续承受摩擦、冲击与交变载荷，结构损伤问题频繁出现，会逐步削弱破岩能力。同时，固定式刀具布局适配性不足的问题逐步凸显，容易造成受力不均、局部过载等情况，进一步加速截齿损耗，干扰掘进作业推进节奏。掌握截齿磨损演化规律，改良现有刀具布局形式，能够有效适配复杂掘进工况，维持掘进作业的稳定运行状态。

1 掘进机截齿基础特性与掘进作业工况分析

1.1 掘进机截齿基本结构与材质特性

截齿是掘进机直接接触围岩、完成破岩作业的核心构件，整体结构设计适配巷道掘进的高强度作业需求。构件主要由齿头、齿体与齿柄三部分组成，各结构分工明确，共同承担冲击、切削与摩擦载荷。齿头作为核心切削部位，多采用硬质合金材料加工成型，具备较强的硬度与抗摩擦能力，能够应对岩体切削带来的持续损耗。齿体承接齿头与齿柄，起到载荷传递与结构缓冲的作用，整体韧性较强，可缓解掘进过程中的瞬时冲击力。齿柄负责与刀座完成装配固定，结构规整紧凑，保障截齿作业过程的安装稳定性^[1]。加工选材会兼顾硬度、韧性与抗疲劳性能，适配井下复杂的作业环境。材质配比与成型工艺的差异，会直接改变构件耐磨与抗冲击能力，决定截齿的基础服役性能。

1.2 截齿参与破岩掘进的作用原理

巷道掘进的破岩过程依靠截齿与岩体的直接接触作用完成。掘进机滚筒带动截齿高速转动，齿头持续挤

压、切削围岩表层岩体，让岩体内部产生应力集中。应力累积达到岩体承载极限后，围岩结构出现裂隙、剥离与脱落，逐步完成巷道断面的岩体破除作业。硬质齿头会率先切入岩体内部，通过机械作用力割裂岩体结构，后续持续切削扩大破碎范围。岩体破碎产生的碎屑会随滚筒转动脱离作业面，持续推进掘进作业进程。整套破岩过程依靠机械切削与挤压破碎协同作用，结构稳定、作业连续性强。截齿的切入角度、转动速度与岩体硬度，都会改变破碎作业的推进状态，影响整体掘进作业的流畅程度。

1.3 复杂巷道围岩掘进作业工况特征

井下巷道掘进作业环境具备较强的复杂性与不确定性，围岩工况始终处于动态变化状态。不同掘进区段的岩体结构存在明显差异，完整坚硬岩体、松散破碎岩体交替分布，岩体致密程度与承载能力各不相同。部分区段围岩伴随裂隙发育，整体结构稳定性差，破碎形态无固定规律。井下作业空间受限，掘进设备作业幅度受到约束，切削作业范围与角度存在固定局限。作业环境粉尘浓度高、湿度大，长期潮湿环境会对截齿表层结构产生轻微腐蚀作用。复杂多变的围岩条件与作业环境，持续增加截齿切削作业的难度，对截齿服役性能与作业状态提出较高要求。

1.4 掘进作业中截齿的受力与运动状态

掘进作业开展过程中，截齿始终处于复合受力与动态运动状态。滚筒旋转带动截齿做圆周运动，齿头周期性接触岩体，持续承受径向切削力、轴向挤压力与侧向摩擦力。岩体结构不均匀会让截齿承受的各类载荷不

断波动,瞬时载荷峰值差异明显,容易产生交变应力作用。截齿切入岩体的深度不断变化,受力点位与受力大小持续调整,长期处于动态载荷冲击状态。不规则的岩体碎屑会增加表层摩擦阻力,让运动过程产生持续性扰动。交变载荷与摩擦作用长期叠加,会逐步改变截齿结构形态,诱发磨损、形变等损耗问题,影响掘进作业的整体推进效率。

2 掘进机截齿磨损类型与形成机理

2.1 截齿磨粒磨损产生机制

磨粒磨损是截齿服役过程中最为普遍的损伤形式,贯穿整体破岩作业全过程。巷道围岩内部含有大量硬质矿物颗粒与破碎岩屑,截齿切削岩体时,硬质颗粒持续挤压、刮擦齿头表层结构。坚硬颗粒物会嵌入截齿表层微观结构,随着切削运动不断划擦金属基体,表层材料逐步产生微量剥离。长期反复的微观刮削作用,会在截齿表面形成细密划痕与凹坑,表层金属持续损耗^[2]。岩体硬度越高、碎屑颗粒越密集,微观刮削作用越剧烈,磨损发展速度越快。这类损伤进程缓慢且持续性强,会逐步削减截齿有效切削厚度,弱化截齿破岩能力。

2.2 截齿冲击磨损演化规律

井下掘进工况复杂多变,截齿作业过程频繁接触硬度不均、结构破碎的岩体,冲击载荷作用持续存在。截齿切入坚硬岩体或裂隙岩体时,瞬间承载高强度机械冲击,齿头合金结构承受挤压与震荡作用。反复的冲击载荷会让材料内部产生微观裂纹,裂纹随作业时长逐步拓展、延伸。岩体结构突变会加剧冲击力度,加速微观裂纹扩张,引发表层合金剥落、崩缺等损伤形态。冲击损伤会从局部点位逐步向整体结构蔓延,破坏截齿切削部位的完整形态,大幅降低构件服役稳定性。

2.3 截齿摩擦疲劳磨损形成过程

掘进作业的持续性摩擦作用,会让截齿产生疲劳性质的结构损伤。截齿与岩体长期保持紧密接触摩擦,表层金属反复承受挤压、拉伸形变。频繁形变会让表层金属产生疲劳累积,微观区域出现结构松弛、材质脆化等现象。井下潮湿环境会加剧表层结构疲劳演化,弱化金属基体结合强度。疲劳损伤累积到一定程度后,表层材料会出现片状脱落,形成不规则磨损创面。这类磨损发展较为隐蔽,不易在作业初期被察觉,长期累积会改变截齿原有切削轮廓。

2.4 多类型磨损耦合作用下的损伤机理

实际掘进工况中,单一磨损形式极少单独存在,各类磨损模式会相互叠加、互相促进。磨粒磨损造成的

表层凹凸结构,会增大接触摩擦面积,加速疲劳磨损的累积进度。冲击磨损产生的微观裂纹,会让硬质颗粒更容易侵入基体内部,加深磨粒损伤程度。疲劳脆化的表层结构抗冲击能力大幅下降,更容易出现崩落破损。多种磨损形式互相促进、循环恶化,加速截齿整体结构损伤,缩短服役周期,干扰巷道掘进的稳定推进节奏。

3 截齿磨损及刀具布局缺陷对掘进作业的制约因素

3.1 截齿磨损对破岩作业状态的干扰

截齿在长期破岩作业中产生的各类磨损,会持续改变自身原始切削结构形态。齿头刃口会随磨损进程逐步钝化,岩体切入能力大幅下降,破岩作业需要耗费更大机械载荷才能实现岩体剥离。齿体表面形成的磨损凹痕、局部剥落和微观裂纹,会让切削接触面变得粗糙不平。破碎岩体的颗粒均匀度持续变差,作业断面容易出现残留岩块与未剥离岩体。掘进过程的机械阻力会出现无序波动,滚筒运转负荷持续升高,破岩过程的稳定性逐步下降^[3]。重度磨损状态下,截齿有效切削深度不断缩减,单次转动的破岩体量持续降低。掘进作业的连续性被打乱,巷道断面成型质量无法保持统一,直接拉低整体掘进作业的稳定程度。

3.2 现有刀具排布方式的常见缺陷

现阶段掘进机刀具排布多采用通用化固定模式,结构设计偏向标准化适配,缺少对复杂井下工况的针对性考量。滚筒局部区域刀具布设过于密集,相邻截齿作业范围出现大面积重叠。部分区域刀具布设过于稀疏,作业断面留存大量切削盲区,岩体破除不够彻底。多数排布方案的安装角度统一固化,无法根据围岩软硬差异、裂隙分布做出灵活调整。整体排布结构侧重基础破岩功能,忽略载荷均匀分配的设计需求。断面切削受力分布失衡,局部区域载荷集中,其余区域切削力度不足。固有排布缺陷长期存在,让破岩作业始终处于不平衡状态,为各类异常损耗问题埋下隐患。

3.3 刀具布局不合理引发的截齿异常磨损

不合理的刀具布局会改变截齿正常受力状态,催生各类非正常、加速磨损问题。密集排布的截齿会在作业过程中产生相互干涉,切削运动互相影响,额外增加摩擦损耗与冲击负荷。稀疏排布区域的单根截齿需要承接更大破岩压力,长期处于超负荷作业状态,磨损速度持续加快。固定角度排布无法适配动态围岩条件,受力点位集中于齿体局部位置,局部材料疲劳损伤快速累积。盲区与重叠区域的存在,让部分截齿出现空转摩擦、反复切削的情况。无用机械损耗持续叠加,截齿整体服役周

期大幅缩短,磨损程度呈现差异化、无序化发展趋势。

3.4 截齿损伤与布局偏差对掘进作业的制约逻辑

截齿损伤与刀具布局偏差会形成恶性循环,从多个维度限制掘进作业质量与推进水平。布局偏差诱发的异常磨损破坏截齿原有结构形态,破损截齿的切削性能持续衰减。破岩作业阻力不断增大,设备运行负荷长期处于偏高区间,作业稳定性持续弱化。断面岩体破碎效果参差不齐,巷道成型精度难以保障,后续修整作业量大幅增加。结构缺陷与构件损伤层层传导,持续拉低掘进作业效率,提升设备运行损耗。理清二者的制约关联,能够为后续布局优化、磨损防控提供清晰的改进方向,助力掘进作业实现稳定高效运行。

4 适配高效掘进的截齿刀具布局优化策略

4.1 截齿安装角度优化调整方式

截齿安装角度直接决定岩体切入姿态与受力状态,角度优化是改善破岩状态、减缓磨损的基础手段。常规固定安装角度适配场景单一,无法应对复杂围岩的破岩需求,容易产生受力集中、切入受阻等问题。结合破岩作业的受力特征调整切入角度,可让齿头刀口平稳接触岩面,减少无效挤压与表层摩擦。针对坚硬围岩适当调整前倾角度,提升齿头岩体穿透能力,降低高强度切削带来的结构损耗^[4]。针对松散裂隙围岩微调偏角参数,规避齿体过度嵌入引发的卡滞与崩损问题。角度参数的精细化调整能够均衡截齿受力分布,弱化局部载荷集中现象,让破岩作业过程更加平稳,从装配层面减少异常磨损的产生。

4.2 截齿间距与排布密度优化设计

截齿排布间距与密度的合理设计,能够解决传统布局干涉重叠、载荷不均的核心问题。原有固定密度排布模式,容易出现局部截齿作业区域重叠或作业盲区,破坏破岩作业的均衡性。合理拉大密集区域截齿间距,消除相邻构件作业干涉,减少多余摩擦冲击带来的损耗。补齐稀疏区域布设空缺,缩小单根截齿承载负荷,避免单一构件长期过载作业。结合滚筒结构尺寸规划整体排布点位,均匀分配各区域破岩任务量,让断面岩体破碎进度保持统一。科学调控排布密度可以平衡整体作业负荷,降低整体磨损速率,为稳定高效掘进提供结构支撑。

4.3 不同掘进工况下刀具组合排布优化方案

井下巷道围岩工况动态多变,单一固定排布模式难以适配全部掘进场景。均质完整围岩工况下,可采用规

整均匀的排布方式,保障切削轨迹规整,提升岩体破碎的整体效率。软硬交替围岩工况,可采用差异化组合排布方式,在硬质岩体集中区段强化刀具布设精度,优化切入姿态。裂隙发育、岩体破碎的复杂区段,调整排布结构减少瞬时冲击载荷,提升整体结构的作业稳定性。依据围岩硬度、结构形态区分掘进场景,定制对应排布方案,打破通用布局的适配局限。灵活的组合排布模式可以适配各类复杂作业场景,弱化工况波动对掘进作业的负面影响。

4.4 基于磨损防控的刀具整体布局改良思路

刀具布局改良需要围绕磨损防控核心方向推进,构建兼顾破岩质量与构件防护的布局体系。整体布局设计侧重均衡分配作业载荷,规避局部高强度损耗区域,弱化磨损差异化发展态势。优化滚筒轴向与周向排布逻辑,理顺整体切削轨迹,减少重复切削与无效摩擦带来的累积损伤。结合截齿磨损规律调整重点区域布设结构,对易损耗点位强化布局合理性,延缓结构损伤累积。摒弃一刀切的固化布局思维,让整体布局适配长期连续掘进的作业需求^[5]。布局体系的系统性改良,能够有效控制各类磨损问题的发生,维持截齿服役性能稳定,持续改善巷道掘进作业整体水平。

结束语

掘进作业效率与截齿磨损状态、刀具布局形式存在紧密关联,各类磨损问题与布局缺陷会相互影响,形成不良作业循环。通过分析不同工况下载齿的磨损类型与耦合损伤机理,明确构件损耗和布局偏差对破岩作业的制约路径,多角度优化刀具安装角度、排布密度与组合方式。针对性的布局改良可以均衡掘进作业载荷,减缓截齿结构损伤累积,优化井下破岩作业工况,保障巷道掘进作业保持稳定优质的运行状态。

参考文献

- [1] 刘胜超.复合地层竖井掘进机截齿磨损消耗控制技术[J].低碳世界,2023,13(12):157-159.
- [2] 刘晨.煤矿掘进机截齿磨损监测技术实践[J].工程技术研究,2025,7(10):157-160.
- [3] 刘晨.煤矿掘进机截齿磨损特性及材料性能优化实验研究[J].工程建设与发展,2025,4(8):208-210.
- [4] 杨万鹏.计及镐型截齿冷处理的掘进机机械性能优化研究[J].机械管理开发,2025,40(10):172-174.
- [5] 殷利明.采煤机和掘进机的截齿失效原因及改进措施[J].机械管理开发,2024,39(3):262-263,283.