

石油专用钻具螺纹荧光磁粉探伤及缺陷分析

冯浩轩

中石化西南石油工程有限公司油田工程服务分公司 四川 绵阳 621000

摘要：石油钻具螺纹是钻井设备核心连接结构，复杂井下工况极易诱发各类隐蔽性结构损伤，直接影响钻井作业的整体安全性与设备稳定性。本文结合钻具螺纹结构特征与井下受力状态，系统梳理荧光磁粉探伤的技术特性与标准化工艺流程，围绕螺纹裂纹、磨损变形、隐性损伤等常见缺陷类型，细致剖析各类损伤的发育特征与形成机理。针对探伤作业中的信号识别难点与各类干扰因素，梳理科学的缺陷甄别方法，从设备防护、工艺规范、流程升级多个角度提出优化思路，为石油钻具螺纹无损检测与结构防护提供技术参考。

关键词：螺纹缺陷；荧光磁粉探伤；缺陷识别；无损检测

引言：油气钻井作业过程中，钻具螺纹长期承担动力传递与载荷支撑功能，复杂的井下力学环境与腐蚀介质会持续造成结构损耗。螺纹结构造型精密、应力集中特征明显，细微损伤具备隐蔽性、渐进性的发育特点，常规检测方式难以完成全面筛查。荧光磁粉探伤是适配铁磁性构件表层与近表层缺陷检测的主流技术，高度契合螺纹异形结构的检测需求。深入探究该技术在钻具螺纹检测中的应用工艺，系统梳理各类缺陷的生成规律与识别要点，能够提升螺纹损伤检测质量，助力钻井设备安全稳定运行。

1 石油钻具螺纹与荧光磁粉探伤基础特性

1.1 石油专用钻具螺纹结构与工艺特征

石油专用钻具螺纹属于油气钻井作业的关键连接结构，承担钻柱组合对接、动力传递与载荷承载的重要功能。螺纹整体采用高强度合金钢材加工成型，整体结构精度要求严格，牙型角度、螺距、齿高等几何参数均保持统一标准。螺纹内外扣的配合精度较高，表层经过精加工与强化处理，能够适配井下复杂的作业环境。钻具螺纹整体呈现阶梯式配合结构，啮合区域接触面积集中，局部结构应力相对集中。加工过程会通过滚压、热处理等工序提升表层强度，改善结构耐磨与抗疲劳性能^[1]。精密的结构设计可以保障多节钻具的稳定对接，也对表层完整性与结构均匀性提出较高标准。结构布局的特殊性，让螺纹部位成为钻具整体中最易出现损伤的薄弱区域，长期作业状态下容易产生各类隐蔽性结构缺陷。

1.2 钻具螺纹工况受力与损伤形成特点

钻井作业全程处于动态复杂的载荷环境中，钻具螺纹需要持续承受拉伸、扭转、弯曲等多种力学作用。井下泥浆冲刷、温度变化、介质腐蚀等外界环境因素，会

持续作用于螺纹啮合表面。长期往复的力学加载会让螺纹表层产生疲劳累积，微观结构逐步出现损伤演化。螺纹啮合位置存在摩擦挤压作用，表层材料会慢慢出现磨损、剥离等结构变化。井下环境中的腐蚀性介质会侵入螺纹表层微缝隙，加速结构损伤的扩展。力学载荷与环境腐蚀的长期叠加，会让微小损伤持续发育扩展，逐步形成各类结构性缺陷。损伤演化过程具备隐蔽性与渐进性，初期缺陷难以通过肉眼识别，只会在持续作业中不断累积加重，最终影响钻具整体结构稳定性。

1.3 荧光磁粉探伤技术基本原理与技术特征

荧光磁粉探伤依托铁磁性材料的磁导特性开展检测工作，通过对钻具螺纹构件施加磁化处理，让构件内部形成均匀磁场。构件表层及近表层存在不连续缺陷时，磁场分布会发生畸变，形成局部漏磁场。混合配置的荧光磁粉会在漏磁场吸附聚集，形成对应缺陷形态的磁痕显示。暗视场检测环境下，磁痕可以呈现清晰的荧光显色状态，帮助检测人员识别缺陷位置与形态。该检测方式适配铁磁性金属构件的表层缺陷筛查，对裂纹、夹层、表层破损等细微损伤具备良好识别能力。检测操作流程简洁，适配管状、螺纹类异形结构件检测作业。检测灵敏度较高，能够捕捉肉眼无法分辨的微观缺陷，可为钻具螺纹损伤筛查、状态判定提供可靠的技术支撑。

2 石油钻具螺纹荧光磁粉探伤工艺要点

2.1 钻具螺纹探伤前期预处理要求

钻具螺纹长期投入井下作业，表层会附着泥浆污垢、锈蚀杂质、油脂涂层以及各类沉积物。这类杂质覆盖螺纹牙型表面，遮挡构件原始形貌，干扰磁场分布与磁粉聚集状态，对探伤检测精度造成不良影响。探伤作业开展前，需要对螺纹检测区域开展全面清理处理。通过机械打磨、溶剂清洗、脱脂除污等方式去除表层附

着物,保证螺纹齿面、齿底、啮合过渡区域保持洁净干燥^[2]。清理作业需要控制操作力度,避免过度打磨破坏螺纹原始结构与表层金相状态。完成清理工序后,需要排查螺纹表面是否存在残留污渍与异物,维持检测区域表面平整洁净,为后续磁化处理与磁粉检测提供稳定基础条件。

2.2 荧光磁粉探伤介质选用与适配规范

荧光磁粉与悬浮液等探伤介质的性能状态,直接影响螺纹缺陷检测的灵敏程度。探伤介质选型需要结合钻具螺纹的材质属性、结构形态以及缺陷检测需求开展。荧光磁粉颗粒需要保持均匀细腻的状态,具备良好的磁导率与荧光显色性能,可精准响应微弱漏磁场作用。悬浮介质需要具备稳定的分散性能,磁粉颗粒可以在介质中均匀分散,不会出现沉淀、团聚等问题。针对螺纹细密的齿槽结构,需选用适配粒度的磁粉介质,保障细小缝隙内部可以充分浸润介质。严格把控介质配比浓度与静置状态,规避介质性能失衡引发的漏检、误检问题,保障探伤过程的稳定性与检测结果的准确性。

2.3 螺纹部位磁化方式与探伤操作要点

螺纹结构齿形复杂、沟槽细密,应力集中区域分布零散,需要匹配科学的磁化方式完成探伤作业。结合钻具螺纹圆柱形结构与螺旋齿面特征,选用适配的磁化设备与磁化工艺。合理把控磁化电流大小、磁化时长等核心工艺参数,让螺纹整体区域形成均匀有效的感应磁场。针对齿底、过渡圆角等易产生缺陷的隐蔽位置,可调整磁化角度与作业位置,强化局部磁化效果。磁粉喷施作业保持匀速均匀,让介质完整覆盖螺纹全部检测区域。作业过程保持检测设备稳定,杜绝外部震动、位移干扰磁粉聚集成型,保证缺陷磁痕可以完整、清晰呈现。

2.4 暗场观测与缺陷信号采集方式

荧光磁粉探伤的观测工作需要在遮光暗场环境内开展,隔绝外界杂光对荧光信号的干扰。检测设备紫外光源需要维持稳定照射强度,保证螺纹检测区域光照均匀。观测过程循序渐进,顺着螺纹走向逐段排查,重点关注齿底、咬合过渡区等缺陷高发位置。区分磁痕堆积形成的真实缺陷信号与介质残留、磁场不均引发的伪显示信号。对成型清晰、轮廓规整的荧光磁痕区域开展信号采集,记录磁痕分布位置、形态特征与延展范围。规范的观测与采集流程,能够精准区分各类缺陷信号,为后续螺纹缺陷类型判别与成因分析提供详实的现场依据。

3 石油钻具螺纹典型缺陷类型及形成成因

3.1 钻具螺纹表面裂纹类缺陷类别

裂纹是石油钻具螺纹服役阶段出现频率较高的危险

缺陷,会大幅降低结构承载安全储备。依据生长位置与延展形态,螺纹裂纹可划分为齿底裂纹、齿面裂纹以及过渡区裂纹几类。齿底裂纹多萌发于螺纹应力集中位置,会沿着齿根径向方向持续延展,破坏螺纹整体结构完整性。齿面裂纹产生于螺纹啮合表层,多呈现细碎短小的纹路形态,延展方向贴合螺纹螺旋走势^[3]。过渡区裂纹集中在螺纹与钻杆基体衔接位置,生长规模更大,对整体结构稳定性影响更为突出。各类裂纹缺陷均具备渐进扩展的特点,初期发育阶段尺度微小,常规目视检查难以识别,是荧光磁粉探伤重点筛查的缺陷类型。

3.2 钻具螺纹磨损与形变类缺陷特征

钻具螺纹长期处于啮合摩擦与动态载荷环境,极易产生磨损和形变类缺陷。磨损问题集中出现在螺纹啮合工作面,长期接触摩擦会让表层金属材料逐步损耗,造成齿厚减薄、螺距精度偏移等问题。工作面光滑度持续下降后,螺纹啮合紧密性会大幅降低,影响动力传递稳定性。形变缺陷多表现为螺纹齿体挤压变形、齿顶塌陷等形态,高强度扭转与拉伸载荷会改变螺纹原始几何结构。严重形变会造成螺纹啮合错位,破坏钻具组合的对接精度。这类缺陷会逐步改变螺纹受力结构,加剧局部应力集中问题,诱发更多次生损伤积累。

3.3 钻具螺纹加工与服役产生的隐性缺陷

隐性缺陷隐藏于螺纹表层或近表层结构,无明显外在形貌变化,常规检测手段很难有效识别。加工阶段会因切削、滚压、热处理等工序操作偏差,在螺纹亚表层残留微小孔隙、夹层及微裂纹等初始缺陷。这类缺陷尺度细微,不会对初期使用造成明显影响。钻井服役过程中,持续力学载荷与复杂井下环境会持续作用于隐性缺陷位置,让缺陷逐步发育扩张。隐性缺陷发育具备长期性与隐蔽性,前期不会表现出明显故障特征,积累到一定程度后会突发结构失效,对钻井作业安全造成严重威胁。

3.4 各类螺纹缺陷的产生诱因与生成机理

螺纹缺陷生成源于加工工艺、力学载荷、环境介质等多重因素的综合作用。加工工序精度把控不足,会让螺纹留存初始结构性瑕疵,为后续缺陷发育提供基础条件。钻井作业产生的交变载荷、扭转应力会持续作用于螺纹应力集中区域,推动微观缺陷不断拓展延伸。井下潮湿环境、腐蚀性介质会侵蚀螺纹表层结构,弱化材料力学性能,加快裂纹、磨损等缺陷的发育速度。不同类型缺陷的发育规律存在差异,应力主导会催生疲劳裂纹,摩擦作用会引发表层磨损,介质侵蚀会加剧结构老化。厘清各类缺陷生成机理,可为螺纹探伤检测与结构防护提供可靠理论支撑。

4 石油钻具螺纹探伤缺陷识别与质量优化对策

4.1 荧光磁粉探伤缺陷信号区分与识别方法

荧光磁粉探伤作业中会产生多种类型的磁痕显示,不同形态的信号对应不同的螺纹损伤状态。准确分辨各类信号特征,是提升探伤检测精准度的核心环节。真实缺陷对应的荧光磁痕轮廓清晰、边界规整,发光亮度均匀,能够完整复刻裂纹、损伤的延展形态与分布轨迹。非缺陷类磁痕多呈现弥散分布、边缘模糊、亮度不均的状态,不存在固定的延伸规律^[4]。检测人员可依托磁痕形态、分布位置、发光特征完成信号甄别,结合螺纹结构受力特点与损伤发育规律,区分疲劳裂纹、表层磨损、隐性夹层等不同缺陷信号。建立系统化的信号判别逻辑,能够降低误判、漏判问题出现概率,提升螺纹缺陷识别的专业程度与可靠程度。

4.2 螺纹探伤常见干扰因素与规避方式

螺纹复杂的齿形结构与特殊作业环境,会对荧光磁粉探伤过程产生多种干扰。构件表层残留污渍、氧化锈蚀、抛光痕迹都会引发无效磁痕堆积,掩盖真实缺陷信号。磁化参数设置不合理、磁粉介质配比失衡,会造成磁场分布不均、磁粉聚集异常,影响检测判定精度。暗场光照强度不稳定、观测角度偏差,也会干扰荧光信号的捕捉与辨识。针对各类干扰问题,可落实针对性处置手段。严格执行探伤前预处理流程,彻底清理螺纹表层杂质。结合螺纹结构调整磁化参数与介质状态,匹配适配的探伤作业模式。规范暗场观测环境与操作姿态,规避外部环境带来的检测干扰,保障探伤工作稳定开展。

4.3 基于探伤检测的钻具螺纹防护优化思路

荧光磁粉探伤可以精准捕捉螺纹各类显性与隐性损伤,为螺纹结构防护提供数据与技术依据。依托探伤筛查得出的缺陷分布规律、损伤高发区域、缺陷发育特征,可搭建针对性的防护体系。针对齿底、过渡区等缺陷高发位置,强化表层防护处理,通过表面强化工艺提升材料抗疲劳、抗腐蚀能力。结合不同缺陷的生成诱因,调整钻具服役使用方式,规避长期过载、频繁扭转等加剧结构损伤的作业行为。对筛查出轻微损伤的螺纹构件,及时开展修复处理,阻断缺陷持续发育路径。常

态化依托探伤结果更新防护方案,能够从源头降低螺纹损伤概率,延长钻具整体服役周期。

4.4 钻具螺纹探伤作业流程优化方向

传统螺纹探伤作业流程存在环节零散、操作规范性不足、细节把控不到位等问题,难以适配高精度检测需求。探伤流程优化可围绕作业全环节开展细化升级。梳理预处理、介质调配、磁化作业、信号采集、缺陷判定各环节操作标准,细化每一步作业规范,压缩人为操作带来的检测误差。结合螺纹异形结构特点,优化局部磁化与介质喷施方式,消除结构盲区带来的漏检问题^[5]。更新探伤作业判定标准,结合新型螺纹材质与作业工况,完善缺陷识别体系。持续细化作业流程、规范操作标准、补齐检测短板,可以全面提升螺纹荧光磁粉探伤的规范性、全面性与精准性。

结束语

钻具螺纹损伤问题是制约石油钻井设备稳定运行的重要因素,荧光磁粉探伤技术可以精准捕捉螺纹服役期间产生的显性与隐性缺陷。通过规范探伤预处理、介质选配、磁化检测及信号采集等关键工序,可有效规避检测过程中的各类干扰问题,提升缺陷识别的精准程度。结合螺纹缺陷的形成机理落实针对性防护手段,持续优化探伤作业整体流程,能够有效改善钻具螺纹的使用状态,提升设备抗损伤能力,夯实油气钻井作业的设备安全基础。

参考文献

- [1]胡国伟,苗文凯,孟胜涛. 浅析荧光磁粉探伤在石油钻具螺纹检测中的应用[J]. 中国设备工程,2023(14):128-130.
- [2]李健,路彬,翟子威. 浅析荧光磁粉探伤在石油钻具螺纹检测中的应用[J]. 中国设备工程,2023(1):131-133.
- [3]张善仁. 石油钻具螺纹防粘扣技术及运用[J]. 今日制造与升级,2025(5):187-189.
- [4]孟胜涛,刘森,胡国伟,等. 石油钻具螺纹磨损检测与修复技术研究[J]. 中国设备工程,2025(16):201-203.
- [5]关放. 石油钻具螺纹磁粉探伤及缺陷研究[J]. 科技创新导报,2022,19(22):37-39.