

钻具失效分析及预防措施

杨 露

中原石油工程有限公司管具公司 河南 濮阳 457331

摘 要：钻具失效涵盖断裂、表面损伤及螺纹连接失效等多种类型，其原因涉及钻具自身条件与外部影响因素。自身条件方面，材料成分与钢级不当、制造工艺缺陷及设计不合理等，会削弱钻具性能、埋下失效隐患；外部因素上，地质条件复杂、钻井液腐蚀、振动碰撞载荷以及井斜角和方位角变化等，均会加速钻具失效。针对此，可通过优化设计与材料选择、改善制造与热处理工艺、加强腐蚀控制、减少振动碰撞以及规范操作维护等措施，降低钻具失效风险，保障钻井作业安全高效。

关键词：钻具失效；原因；预防措施

引言：在石油与天然气等能源的钻探开采作业中，钻具作为核心工具，其性能的稳定性和可靠性至关重要。钻具一旦失效，不仅会导致钻井进度受阻、增加成本，还可能引发严重的安全事故，造成人员伤亡和环境破坏。然而，在实际钻井过程中，由于地质条件的复杂性、钻井工艺的多样性以及钻具自身存在的质量隐患等诸多因素，钻具失效现象时有发生。深入分析钻具失效的原因，并采取切实有效的预防措施，已成为保障钻井作业安全、高效、经济运行的关键所在。

1 钻具失效的基本类型及特点

1.1 断裂失效

(1) 过载断裂：多因钻具承受的载荷远超设计额定值引发，如钻进中突然遇到坚硬岩层、卡钻时强行提拉等。断裂前钻具会出现明显塑性变形，断口呈纤维状，且伴随一定程度的颈缩现象，断裂过程通常较快，多发生在载荷突变的瞬间。(2) 低应力脆断：在远低于钻具屈服强度的应力下发生，常与钻具材料缺陷（如内部裂纹、夹杂物）或低温、冲击载荷等环境因素相关。断裂前几乎无明显塑性变形，断口平整、有解理面，断裂过程迅速，易造成突发事件。(3) 应力腐蚀断裂：由拉应力与腐蚀环境共同作用导致，如钻井液中的腐蚀性离子（ Cl^- 、 H^+ ）与钻具表面应力叠加。断裂具有隐蔽性，先在表面形成微小腐蚀裂纹，随后裂纹逐渐扩展，断口多呈树枝状，且伴随腐蚀产物附着。(4) 疲劳断裂：因钻具长期承受交变载荷（如钻进时的旋转应力、振动应力）引发，是钻具最常见的断裂形式。断裂过程分裂纹萌生、扩展和最终断裂三阶段，断口存在明显的疲劳辉纹，且通常从钻具表面的缺陷处开始^[1]。

1.2 表面损伤失效

(1) 腐蚀：分为化学腐蚀与电化学腐蚀，前者由钻

具与钻井液中的化学物质直接反应导致，如钢材与酸性钻井液的反应；后者因钻具表面形成原电池引发，表现为表面出现点蚀、均匀腐蚀等现象，会逐渐减薄钻具壁厚，降低其承载能力。(2) 磨损：源于钻具与井壁、岩屑或其他部件的摩擦，如钻具旋转时与井壁的接触磨损、岩屑对钻具表面的冲刷磨损。磨损会使钻具表面粗糙度增加，甚至出现沟槽、台阶，不仅影响密封性能，还会加速应力集中，诱发其他失效形式。

1.3 螺纹连接失效

(1) 螺纹损坏：包括螺纹牙断裂、变形、黏扣等，多因螺纹加工精度不足、安装时扭矩过大或钻进中承受过大扭矩、冲击载荷引发。如螺纹牙根部应力集中，长期交变载荷下易发生断裂；黏扣则因螺纹表面润滑不良、安装时错位，导致金属黏结磨损。(2) 连接松动：主要因螺纹预紧力不足或在振动、冲击载荷下预紧力逐渐丧失，如钻进时的高频振动会使螺纹连接逐渐松动，导致钻具之间出现间隙，不仅影响钻进稳定性，还会加剧螺纹磨损，进一步扩大失效范围。

2 钻具失效的原因分析

2.1 钻具自身条件

(1) 材料成分与钢级选择不当：材料元素配比失衡会削弱钻具性能，如碳含量过高易导致脆性增加，铬元素不足则降低耐腐蚀性。同时，钢级与工况不匹配会加剧失效，例如在含硫化氢的酸性地层用普通钢级钻具，易引发应力腐蚀断裂；在深井中用低强度钢级，难以承受高压载荷，易出现过载断裂。(2) 制造工艺缺陷：热处理不当会导致钻具内部组织异常，如淬火温度过高使钻具脆性增大，回火不充分残留内应力，加速疲劳裂纹萌生。螺纹加工质量差也会埋下隐患，牙型误差、表面粗糙会导致连接时应力集中，在交变载荷下易出现螺纹

牙断裂或黏扣,加工毛刺还会成为腐蚀与疲劳失效的起点。(3)设计缺陷:结构不合理易造成局部应力集中,如钻杆内加厚过渡区设计为小半径或直角,钻进时该区域受力集中,成为疲劳断裂高发部位;部分钻具密封结构间隙过大,钻井液易渗入连接部位,加剧螺纹腐蚀与磨损,间接引发连接失效。

2.2 外部影响因素

(1)地质条件:地层硬度突变会给钻具带来冲击,如从软地层进入坚硬花岗岩地层,钻具易受瞬时过载断裂;松软地层中的砾石会持续冲刷钻具表面,加剧磨损。地层断层、裂缝发育区还会导致钻具受力不均,增加振动与碰撞风险。(2)钻井液与腐蚀介质:钻井液中溶解氧过多会引发氧化腐蚀,硫化氢气体则会破坏钻具表面钝化膜,诱发应力腐蚀断裂;酸性钻井液会加速电化学腐蚀,使钻具壁厚减薄,承载能力下降,这些腐蚀介质共同作用,缩短钻具使用寿命。(3)钻井过程中的振动与碰撞载荷:钻井泵往复运动、钻具旋转离心力会引发纵向与横向振动,使钻具承受交变载荷,逐渐萌生疲劳裂纹。起下钻时钻具与井壁、套管的碰撞,会造成表面损伤与塑性变形,进一步加速疲劳失效。(4)井斜角、方位角变化的影响:井斜角过大时,钻具与井壁侧向接触紧密,承受较大弯曲应力,加剧磨损与断裂风险;方位角频繁调整会使钻具承受额外扭矩与冲击,提升螺纹连接失效和过载断裂的概率,尤其在水平井转向作业中更为明显^[2]。

3 钻具失效的预防措施

3.1 优化钻具设计与材料选择

(1)选择合适的钻具材料与钢级:需根据钻井深度、地层压力、腐蚀环境等工况,精准匹配材料成分与钢级。例如,在深井、超深井(井深超过4500m)中,应选用含铬、钼元素的高强度合金钢材(如S135钢级),其抗高温(300℃以上)、抗高压(100MPa以上)性能优异,可避免过载断裂;在含硫化氢的酸性地层中,需选用抗硫钢(如L80-13Cr钢级),通过铬元素形成致密氧化膜,抑制硫化物应力腐蚀。同时,材料采购时需严格把控成分检测,确保碳含量控制在0.2%-0.3%(避免过高导致脆性增加)、锰含量不超过1.5%(平衡强度与韧性),从材质层面减少失效隐患。(2)优化钻具设计,避免结构缺陷:重点针对应力集中部位进行结构改进,降低局部失效风险。例如,钻杆内加厚过渡区采用“大圆弧过渡”设计,将过渡半径从传统的5mm提升至15mm以上,使应力集中系数降低40%-60%,减少疲劳裂纹萌生;在钻具接头处增加“双台肩螺纹”结构,通过额外

台肩分担扭矩与轴向载荷,避免单一螺纹牙受力过载。此外,优化密封结构设计,采用“金属-橡胶复合密封圈”,缩小与螺纹的配合间隙(控制在0.05mm以内),防止钻井液渗入引发腐蚀,间接提升螺纹连接可靠性。

3.2 改善制造工艺与热处理工艺

(1)提高螺纹加工质量:采用高精度数控加工设备(如五轴联动车床),将螺纹牙型误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内,表面粗糙度降至 $Ra 1.6\mu\text{m}$ 以下,减少连接时的应力集中。加工后需通过“螺纹综合量规”全检,重点排查牙型不完整、螺距偏差等问题;同时,对螺纹表面进行“磷化处理”,形成厚度5-10 μm 的磷化膜,提升润滑性与耐磨性,避免安装时出现黏扣。此外,必须清理加工过程中产生的毛刺,可通过超声波清洗与人工打磨相结合的方式,消除表面微小缺陷,防止其成为疲劳或腐蚀失效的起始点^[3]。(2)确保热处理过程恰当,避免内部缺陷:制定标准化热处理工艺曲线,严格控制加热、保温、冷却各环节参数。例如,淬火时采用“分段升温”(从室温升至600℃保温1h,再升至880-920℃保温2h),避免温差过大导致内部组织不均匀;冷却阶段采用“油冷+空冷”结合方式,油冷至300℃后转为空冷,减少马氏体组织过量生成,降低钻具脆性。回火过程需保证温度(580-620℃)与时间(4-6h)充足,使内应力释放率达80%以上,防止残留内应力加速疲劳失效。热处理后需通过“超声波探伤”检测内部裂纹,确保无直径超过0.5mm的内部缺陷。

3.3 加强钻具的腐蚀控制

(1)使用内涂层钻杆:在钻杆内壁喷涂“陶瓷基复合涂层”(如 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层),涂层厚度控制在0.1-0.2mm,其致密度高、耐腐蚀性强,可隔绝钻井液中的 Cl^- 、 H^+ 等腐蚀离子与钢材接触,使均匀腐蚀速率降低90%以上。涂层施工后需进行“电火花检测”,确保无针孔(检测电压不低于5000V),同时通过“附着力测试”(拉拔强度 $\geq 50\text{MPa}$),防止涂层脱落失效。(2)应用缓蚀剂:根据钻井液类型添加针对性缓蚀剂,如在酸性钻井液中加入“咪唑啉类缓蚀剂”(添加量0.5%-1%),其分子可吸附在钻具表面,形成单分子保护膜,抑制电化学腐蚀;在含硫地层中,添加“季铵盐类缓蚀剂”,通过与硫化物反应生成稳定化合物,阻止硫化亚铁膜破裂。缓蚀剂添加后需定期检测“腐蚀速率”(要求低于0.076mm/a),确保缓蚀效果达标。(3)控制钻井液的pH值与成分:将钻井液pH值稳定在8.5-9.5之间,通过添加氢氧化钾(KOH)调节,碱性环境可促进钻具表面形成钝化膜,抑制氧化腐蚀。同时,严格控制钻井液中有

害成分含量,如溶解氧含量不超过0.5mg/L(可通过添加除氧剂实现)、硫化氢含量低于10ppm(通过加入脱硫剂去除),避免腐蚀性介质浓度过高引发应力腐蚀断裂。

3.4 减少钻具的振动与碰撞

(1) 根据钻具组合计算并调整钻井参数:利用钻井工程软件(如Landmark软件),结合钻具长度、直径、地层硬度等参数,计算最优钻井参数。例如,在坚硬地层(如花岗岩地层)中,将钻压控制在80-120kN、转速调整为60-80r/min,避免过高钻压导致过载、过高转速引发剧烈振动;在松软地层中,适当降低排量(控制在25-30L/s),减少岩屑对钻具的冲刷振动。同时,实时监测钻井参数,通过“振动传感器”采集钻具振动频率(要求横向振动频率不超过15Hz),发现异常及时调整。

(2) 在适当位置安装减振器:在钻具组合中加装“液压减振器”或“橡胶减振器”,通常安装在钻杆与钻头之间(靠近钻头位置),吸收钻进时的纵向与横向振动。液压减振器通过油液阻尼作用,可使振动幅值降低50%-70%;橡胶减振器利用橡胶的弹性变形,缓冲冲击载荷(可承受最大冲击载荷300kN)。安装前需检查减振器密封性能与阻尼效果,确保无泄漏、减振效率达标,同时定期更换减振元件(建议每口井更换一次),避免减振失效^[4]。

3.5 规范钻具操作与维护

(1) 严格按照操作规程进行钻具的连接与拆卸:连接螺纹时,需先清理螺纹表面的油污、杂质,涂抹“螺纹脂”(如石墨基螺纹脂),确保润滑充分;采用“扭矩扳手”按额定扭矩(根据钢级确定,如S135钢级钻杆扭矩控制在3500-4000N·m)上扣,避免扭矩不足导致连接松动、扭矩过大引发螺纹变形。拆卸时禁止使用榔头硬敲,需采用专用卸扣工具,防止螺纹牙损伤。(2) 定期对钻具进行检查与探伤:制定“钻具探伤周期表”,起下钻过程中每300m进行一次外观检查(重点查看表面磨损、腐蚀、裂纹);每口井作业结束后,进行全尺寸

探伤,包括“磁粉探伤”(检测表面裂纹,可发现长度 $\geq 2\text{mm}$ 的裂纹)与“超声波探伤”(检测内部缺陷)。对发现的轻微磨损(磨损量不超过壁厚10%),可通过打磨修复;对存在裂纹、严重腐蚀的钻具,立即报废,禁止继续使用。(3) 合理存放与管理钻具,防止存放过程中的腐蚀:钻具存放需搭建防雨、防潮的专用库房,地面铺设橡胶垫(避免与水泥地面直接接触),钻具采用“分层架式存放”,每层间距不小于10cm,防止相互挤压磨损。存放前需对钻具表面进行“防锈处理”(喷涂防锈油,厚度0.2-0.3mm),并定期(每15天)检查防锈效果,发现防锈油脱落及时补涂。同时,建立钻具“身份档案”,记录使用次数、探伤结果、存放时间等信息,实现全生命周期追溯,避免超期、超限使用。

结束语

综上所述,对钻具失效进行深入分析与采取有效预防措施,是保障钻井工程顺利推进的关键环节。通过明确钻具失效的基本类型与特点,精准剖析失效原因,我们能够从设计、选材、制造、操作及维护等多维度制定针对性预防策略。这些措施的实施,不仅有助于降低钻具失效概率,减少经济损失,更能提升钻井作业的安全性与效率。未来,随着钻井技术的持续发展,我们仍需不断探索与创新,完善钻具失效防控体系,以适应日益复杂的钻井工况,为能源开采事业提供坚实保障。

参考文献

- [1]司东亮.石油钻具失效分析及改进建议[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(16):28-30.
- [2]李梅英,吕伟,陈士金.石油钻具失效分析及改进措施[J].石油和化工设备,2022,25(11):95-97.
- [3]李健,高季枫,边海鹏.浅谈石油钻具的标准化使用与管理[J].中国设备工程,2022,(24):60-62.
- [4]茅亚林.浅谈石油钻具的标准化使用与管理[J].中国标准化,2021,(14):62-64.