

水力割刀切割失效实例分析及硬质合金刀头选型优化

隗德祥, 刘维平*, 孙健越, 闫昱昊

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004)

摘要: 岩心钻探工程中, 套管护壁技术能保障孔壁稳定, 但竣工后因地层遇水膨胀、岩石剥落等问题, 常导致套管无法起拔, 造成资源浪费与经济损失。水力割刀作为套管回收与孔内事故处理的核心工具, 其切割效能取决于硬质合金刀头性能与加工件的匹配度及工况适应性。本文结合山东莱芜夹钻事故处理以及广西百色套管起拔两个现场实际案例, 通过对比YG类、YT类、YW类硬质合金刀头的切割效果, 系统分析刀头性能与锰钢钻杆、常规套管的匹配规律。同时, 结合切割过程中刀头崩刃、铁屑卡滞等失效现象及对应实物, 分析了刀头材质选型偏差、出刀速度控制不当、刀头修磨状态不合理三大失效原因。本研究提出以YW2(适配锰钢钻杆)、YT5(适配高强度套管)硬质合金刀头为优先选型的方案, 并展望立方氮化硼(CBN)刀头的应用前景。本研究可以为水力割刀刀头科学选型与切割工艺优化提供实践依据, 并且对提升钻探工程管材回收率具有重要指导意义。

关键词: 水力割刀; 硬质合金刀头; 切割失效; 岩心钻探; 事故处理; 套管回收; 刀头修磨; 出刀压力控制

中图分类号: P634.4⁺9 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0388-08

Analysis on cutting failure case of hydraulic cutter and optimization of cemented carbide cutter-bit

WEI Dexiang, LIU Weiping*, SUN Jianyue, YAN Yuhao

(Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: In core drilling projects, casing wall protection technology can ensure the stability of the hole wall. However, after completion, due to problems such as water expansion of the stratum and rock spalling, the casing often cannot be pulled out, resulting in resource waste and economic losses. As a core tool for casing recovery and in-hole accident handling, the cutting efficiency of the hydraulic cutter depends on the matching degree between the performance of the carbide cutter-bit and workpieces as well as its adaptability to working conditions. Combined with two field cases, namely the stuck-drilling accident treatment in Laiwu of Shandong and casing pulling operation in Baise of Guangxi, this paper systematically investigates the matching rules between cutter-bit properties and manganese-steel drill pipes as well as conventional casings by comparing cutting performance of YG-series, YT-series and YW-series cemented carbide bits. In view of typical failure modes including bit chipping and iron-chip jamming observed on actual failed components, three primary failure causes are summarized, that is improper material selection of cutter-bits, inappropriate cutter extending speed, and unreasonable cutter grinding status. YW2 for manganese-steel drill pipes and YT5 for high-strength casings are proposed as the priority selection schemes. The application prospect of cubic boron nitride (CBN) bits is also discussed. This study provides practical references for rational bit selection and cutting-process optimization of hydraulic

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-12-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.052

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20242961)

第一作者: 隗德祥, 男, 汉族, 1987年生, 二级技师, 助理工程师, 探矿工程专业, 从事岩心钻探, 工程钻探工作, 山东省烟台市芝罘区机场路287号, 739550448@qq.com。

通信作者: 刘维平, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事探矿工程相关技术和管理, 山东省烟台市芝罘区机场路287号, 563916176@qq.com。

引用格式: 隗德祥, 刘维平, 孙健越, 等. 水力割刀切割失效实例分析及硬质合金刀头选型优化[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 388-395.

WEI Dexiang, LIU Weiping, SUN Jianyue, et al. Analysis on cutting failure case of hydraulic cutter and optimization of cemented carbide cutter-bit[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 388-395.

cutters, and possesses important guiding significance for improving pipe recovery rate in drilling engineering.

Key words: hydraulic cutter; cemented carbide cutter-bit; cutting failure; core drilling; accident handling; casing recovery; cutter grinding; cutter extending pressure control

0 引言

岩心钻探是地质勘查与矿产资源开发的关键技术手段,套管护壁作为复杂地层中防止塌孔、保障钻进连续的核心工艺,在寒武系破碎灰岩、泥岩遇水缩径等复杂地层钻探中应用广泛^[1]。然而,钻孔竣工后,受泥岩遇水体积膨胀、破碎地层岩石剥落填充套管与孔壁间隙等影响,套管与孔壁易形成紧密咬合,导致套管起拔阻力骤升,据现场统计数据,复杂地层中套管回收率普遍不足 60%,不仅造成钢材资源的大量浪费,还可能因套管滞留孔内引发钻孔报废风险,相关经济损失占单孔总成本的 15%~20%^[2-3],严重影响钻探工程的经济性与资源利用效率。

水力割刀作为一种高效的孔内管材切割工具,其核心原理是通过液压驱动硬质合金刀头从管材

内壁进行环形切削,可实现套管分段切割回收与事故钻杆处理,为解决套管无法起拔的问题提供了技术方法^[4-5]。在水力割刀的整体结构中,硬质合金刀头作为直接与管材接触的切割执行部件,其硬度、韧性、耐磨性与耐热性等性能参数,与加工件(钻杆、套管)材质的适配性(表 1 为钻杆成分),直接决定了切割效率、成功率、工具刀头寿命。近年来,虽有学者针对水力割刀的结构优化(如刀架稳定性设计)、适用场景(如煤矿区域治理、烧钻事故处理)展开研究,但关于不同型号硬质合金刀头性能与加工件的匹配规律、切割失效原因的系统性研究仍较为缺乏,导致现场施工中常因刀头选型不当、工艺参数设置不合理造成切割失败,延长事故处理周期,进一步增加工程成本^[6]。

表 1 钻杆成分

单位: %

钢级	牌 号	化 学 成 分							
		C	Si	Mn	S	P	Mo	B	V
DZ40	45MnB	0.42~0.49	0.20~0.40	1.10~1.40	≤0.040	≤0.040		0.001~0.0035	
DZ50	40Mn2	0.37~0.44	0.20~0.40	1.40~1.80	≤0.040	≤0.040			
DZ55	40Mn2Mo	0.38~0.45	0.20~0.35	1.50~1.80	≤0.040	≤0.040	0.20~0.30		
DZ60	45MnMoB	0.41~0.49	0.17~0.37	0.90~1.20			0.20~0.30	0.001~0.005	
DZ65	27MnMoVB	0.22~0.32	0.17~0.37	1.20~1.60			0.30~0.50	0.001~0.005	0.08~0.15

基于此,本文以新一轮找矿突破战略行动中的岩心钻探项目为依托,选取山东莱芜夹钻事故处理、广西百色套管起拔两个典型现场案例,通过对比 YG 类(YG6)、YT 类(YT15、YT5)、YW 类(YW2)硬质合金刀头的切割效果,结合失效刀头、割断管材等实物观测,系统分析刀头性能与锰钢钻杆、高强度套管的匹配关系;同时,通过追踪切割过程中的压力变化、扭矩波动及失效现象,揭示切割失效的主要原因,最终提出科学的刀头选型方案与工艺优化建议,为水力割刀在岩心钻探工程中的高效应用提供实践支撑。

1 水力割刀结构组成与硬质合金刀头性能特性

1.1 水力割刀核心结构与工作原理

水力割刀的结构如图 1 所示,其切割效能依赖于各组件的协同作用,核心组成包括硬质合金刀

头、压力伸出机构、压力控制机构、结构刀架与回水机构^[7],各部件功能及作用如下。

(1)硬质合金刀头:直接参与切割作业的核心部件,其材质与修磨状态决定切割效果,通常采用硬质合金材质,通过焊接或螺栓固定于刀架上。

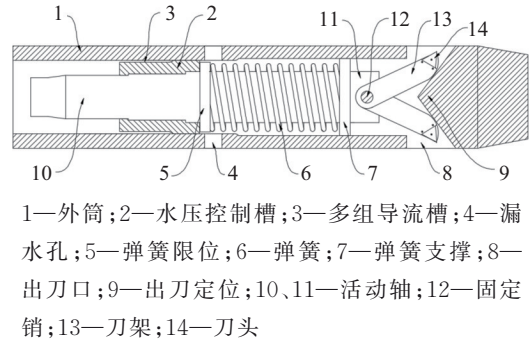


图 1 水力割刀结构

(2)压力伸出机构:以泥浆泵输送高压液体为动力源,驱动刀头从刀架内缓慢伸出,实现刀头与管材内壁的贴合,其推力大小决定刀头给进深度。

(3)压力控制机构:通过调节液压回路压力,控制刀头弹出速度,同时保障水路畅通,避免因压力失衡导致刀头卡顿或过度伸出。

(4)结构刀架:用于固定刀头与压力伸出机构,确保切割过程中刀头位置稳定,防止因钻杆旋转振动导致刀头偏移。

(5)回水机构:具备双向导流功能,下钻过程中引导孔内液体进入钻杆,平衡孔内压力;切割结束后引导钻杆内液体流出,避免因钻杆内负压形成抽吸效应,防止上水钻现象^[7]。

水力割刀的具体工作流程为:首先通过钻杆将割刀下入孔内指定切割位置,随后启动泥浆泵向钻杆内输送高压液体,高压液体驱动压力弹出机构,

使硬质合金刀头从刀架内缓慢伸出并紧密贴合管材内壁;待刀头贴合后,通过钻机驱动钻杆柱旋转,带动割刀整体绕管材轴线转动,刀头在压力与旋转力的共同作用下对管材内壁进行环形切削;当管材被完全割断后,降低泥浆泵压力,压力控制机构驱动刀头收回至刀架内,最后通过钻杆将割刀提出孔外,完成一次切割作业。

1.2 典型硬质合金刀头性能对比

目前,岩心钻探工程中水力割刀常用的硬质合金刀头主要分为YG类、YT类与YW类,三类刀头的性能差异源于碳化钨(WC)、钴(Co)、碳化钛(TiC)、碳化钽(TaC)等主要成分的比例不同,这些成分比例直接影响刀头的硬度、抗弯强度、耐磨性与韧性,进而决定其适配的切割件材质与工况^[8-9]。三类刀头的具体性能参数及适用场景对比如表2所示。

表2 不同类型合金刀头性能参数及适用场景对比

刀头 型号	核心成分特征	硬度/HRA	抗弯强 度/MPa	耐磨性	韧性	适配加工件	适 用 工 况
YG6	高 钴 (Co 含 量 6%)、低 碳化钨	89~90	≥1400	较低	较高	铸铁、有色金属、 非金属材料	低强度材料连续切削(如粗 车)、无冲击工况
YT15	高 碳 化 钛 (TiC 含 量 15%)、低钴	91~92	≥1150	较高	较低	碳 素 钢、低 合 金 钢材	中低强度材料连续切削(如 精车)、避免断续冲击
YT5	中 碳 化 钛 (TiC 含 量 5%)、中钴	89~90	≥1300	中等	中等	合 金 钢、高 强 度 套管	中高强度材料粗加工、轻微 冲击工况
YW2	含碳化钽(TaC含量3%~ 5%)、成分均衡	90~91	≥1250	中等	较高	锰 钢 钻 杆、不 锈 钢、耐热钢	高强度材料断续切削、复杂 冲击工况

注:表中硬度以洛氏硬度HRA为衡量标准,抗弯强度为室温下实测平均值。

从表2可知,YG类刀头因钴含量较高,适用于低强度、低硬度的加工件;YT类刀头随碳化钛含量增加,耐磨性提升但韧性降低,其中YT5刀头因碳化钛含量适中,在耐磨性与韧性间取得平衡,更适应中高强度材料的粗加工场景^[10-11];YW类刀头因添加了碳化钽,在保持较高韧性的同时,提升了耐磨性与耐热性,尤其适用于锰钢等高强度、高韧性管材的切割,且能适应井下断续切削的复杂工况^[12]。

2 水力割刀现场应用分析

2.1 山东莱芜夹钻事故处理

2.1.1 工程背景与事故概况

2024年,在山东莱芜钻探项目中,钻孔设计深

度800 m,主要揭露地层为寒武系灰岩与页岩互层,其中750 m以深地层受区域构造影响,呈断续破碎状态,节理裂隙发育,钻进过程中易发生漏水与塌孔。当钻进至799.20 m处时,钻孔出现严重漏水现象,漏失量达5 m³/h,先后采用浓度3%的随钻堵漏剂、体积比1:0.8的水泥-水玻璃混合堵漏剂进行堵漏处理,均未达到预期效果;最终采用水灰比1:2的纯水泥浆进行堵漏,待水泥凝固24 h后,下入Ø95 mm钻具进行透孔作业。

当扫孔至780 m处时,仅能旋转钻具而无法进尺,当班技术人员判断为孔内钻具遇阻;将孔内钻杆提出1个立根(长度12 m)后,再次尝试扫孔,发现钻杆夹钻无法转动,但钻杆内返水正常,结合地层

破碎特性,确定为孔内钻杆被破碎岩石夹持,形成夹钻事故。由于孔内钻杆为2016年生产的 $\varnothing 89$ mm老旧钻杆,且在前两个钻孔处理过断钻脱扣事故,钻杆局部强度存在不确定性,若采用强拉硬顶方式处理,易导致钻杆断裂,进一步扩大事故规模,因此决定采用 $\varnothing 89$ mm规格水力割刀进行切割处理。

2.1.2 刀头选型与切割效果

选用水力割刀原配的YG6硬质合金刀头(图2a),按照操作规程将割刀通过钻杆下入至夹钻位置上方5 m处(孔深775 m),启动泥浆泵将压力缓慢调至1.8 MPa,驱动刀头伸出;然而,刀头伸出后仅旋转30 s,钻机扭矩突然从正常的 $8\text{ kN}\cdot\text{m}$ 骤升至 $15\text{ kN}\cdot\text{m}$,随后泥浆泵压力快速下降,判断刀头可能出现失效;提出割刀后检查发现,YG6刀头刀刃出现严重崩刃(图2b),缺失长度约2 mm,切割失败。为排除偶然因素,更换新的YG6硬质合金刀头重复上述操作,结果仍以刀头崩刃告终,累计尝试3次均未成功。

为了明确失败原因,现场与刀具加工技术人员沟通,得知YG6硬质合金刀头虽韧性较高(抗弯强

度 $\geq 1400\text{ MPa}$),但硬度(89~90 HRA)与耐磨性不足,切割时刀头需承受较大的冲击载荷,YG6刀头难以适应此类高强度、高硬度的切割工况。基于此,决定更换为YW2硬质合金焊接刀头(图3a),为进一步提升刀头抗冲击能力,将刀头刃角修磨为 100° 圆角,避免尖刃应力集中。



(a)使用前



(b)使用后崩刃

图2 YG6硬质合金刀头



(a)使用前



(b)成功切割后

图3 YW2硬质合金焊接刀头

将修磨后的YW2硬质合金刀头安装于割刀上,再次下入至孔深775 m处;启动泥浆泵后,将压力控制在1.5~1.6 MPa区间,确保刀头缓慢伸出;待刀头贴合钻杆内壁后,保持钻杆转速30 r/min,持续切割8 min后,钻机扭矩从 $10\text{ kN}\cdot\text{m}$ 逐渐下降至 $6\text{ kN}\cdot\text{m}$,判断钻杆已被割断;提出割刀后检查发现,YW2刀头仅刃口出现轻微磨损,无崩刃现象(图3b),切割成功;后续顺利将下部事故钻杆提出孔外,割断的钻杆切口平整,无明显变形。

2.2 广西百色套管起拔案例

2.2.1 工程背景与管材回收需求

2025年,在广西百色某矿区地质勘查项目中,钻孔设计深度1600 m,地层主要由泥岩、粉砂岩、细砂岩组成,其中150~250 m段泥岩地层胶结性差、呈破碎状,且具有遇水膨胀缩径特性,以前钻孔施工过程中多次出现孔壁坍塌风险。为保障钻进安

全,采用四开设计:一开 $\varnothing 150$ mm开孔钻进至5 m,下入 $\varnothing 146$ mm表层套管;二开 $\varnothing 122$ mm绳索取心钻进至225 m,下入 $\varnothing 114$ mm套管;三开 $\varnothing 98$ mm钻进至445 m处时,因孔壁破碎导致 $\varnothing 98$ mm钻具夹钻,强行起拔过程中引发钻杆脱扣,钻具落至孔底;为避免工期延误,决定将 $\varnothing 91$ mm钻杆作为套管,四开 $\varnothing 75$ mm绳索取心钻进至终孔(1711.1 m)。

钻探工程竣工后,需对孔内 $\varnothing 114$ mm套管与 $\varnothing 91$ mm事故钻杆进行回收,以降低材料成本。现场采用主卷扬进行直接起拔,当起拔力升至60 kN时, $\varnothing 91$ mm套管没有松动迹象。 $\varnothing 91$ mm事故钻杆因脱扣后与孔壁岩石紧密咬合,起拔力达60 kN时仍无法提出,因此决定采用水力割刀分两段切割回收。

2.2.2 钻杆切割过程

首次切割选用YT15硬质合金刀头(图4a),将水力割刀下入至事故钻杆上部30 m处(孔深415 m),启动泥浆泵将压力调至1.7 MPa,驱动刀头伸出并贴合钻杆内壁;仅切割1 min后,孔内出现“咔嚓”异响,钻机扭矩从7 kN·m波动至13 kN·m,立即停止切割并提出割刀;检查发现,YT15刀头出现明显崩刃(图4b),且刀仓内卡有大量铁屑,导致刀头无法完全收回。分析认为,YT15刀头韧性较低(抗弯强度 ≥ 1150 MPa),切割时刀刃局部受力超过其抗弯极限,引发崩刃。

随后,更换为YT5硬质合金刀头(图5a),为优化切割效果,将刀头刃角修磨为 100° ,同时控制刀刃伸出刀架的长度为1.5 mm(避免因伸出过长导致支撑不足);将割刀下入至事故钻杆上部90 m处(孔深355 m),避开钻杆可能被卡埋段;启动泥浆泵后,将压力控制在1.4~1.5 MPa,保持钻杆转速175 r/min;持续切割12 min后,钻机扭矩从9 kN·m稳定下降至5 kN·m,确认钻杆割断;提出割刀后检查,YT5刀头仅刃口出现均匀磨损,无崩刃与铁屑卡滞现象(图5b),同时提出被割断的 $\varnothing 91$ mm钻杆(图6),钻杆切口平整,验证了YT5硬质合金刀头对变形钻杆的适应性。

2.2.3 套管切割过程

参考 $\varnothing 91$ mm钻杆的切割经验, $\varnothing 114$ mm套管切割选用YT5硬质合金刀头,将割刀下入至套管卡滞位置上方30 m处(孔深195 m);启动泥浆泵将压力调至1.6 MPa,刀头伸出后旋转切割;1 min后孔



(a)使用前



(b)使用后崩刃

图4 YT15硬质合金刀头



(a)使用前



(b)成功切割后

图5 YT5硬质合金刀头

内出现“沙沙”异响,持续切割10 min后,提出割刀发现刀头崩刃,套管未被割断。

针对上述问题,重新加工YT5硬质合金刀头。将刀刃厚度从原4 mm增加至6 mm,提升刀头整体抗载荷能力;刃角修磨为 120° ,减少切割时的应力集中;将优化后的割刀下入至原切割位置下方0.2 m处(孔深195.2 m),调整泥浆泵压力至1.7~1.8 MPa



图6 割断的Ø91 mm钻杆

以保证切割进给量,保持钻杆转速 80 r/min(降低转速减少冲击);持续切割 15 min 后,钻机扭矩从 11 kN·m 逐步下降至 7 kN·m,确认套管割断。提出割刀后检查,刀头仅刃口出现均匀磨损,无崩刃现象;后续成功提出 200 m 以深的 Ø114 mm 套管段,并获取刀头首次崩刃后未切断的套管内壁实物(图 7),该实物表面可见明显的刀痕,进一步验证了刀刃修磨对切割的影响及优化后刀头的适配性。



图7 崩刃后未切断的套管内壁

3 水力割刀切割失效原因分析

结合山东莱芜、广西百色两个案例的切割过程、失效现象及实物观测(图 2、图 8),通过对比不同刀头的性能参数与工况条件,可将水力割刀切割失效原因归纳为以下 3 类。



图8 刀刃崩裂并卡滞铁屑

3.1 刀头材质选型与加工件性能不匹配

刀头材质的硬度、韧性、耐磨性与加工件(钻杆、套管)的强度、硬度适配性,是决定切割成败的根本因素。山东莱芜案例中,锰钢钻杆表面氧化层硬度达 30~35 HRC,且存在局部硬化区域,而 YG6 刀头硬度仅 89~90 HRA(对应 65~66 HRC,但耐磨性因钴含量高而较低),切割时刀刃易产生塑性变形,在钻杆旋转扭矩(8~15 kN·m)作用下,刀刃应力超过其抗弯极限(≥ 1400 MPa),最终引发崩刃;而 YW2 刀头因添加碳化钽,硬度提升至 90~91 HRA,耐磨性显著增强,同时保持 ≥ 1250 MPa 的抗弯强度,可承受锰钢钻杆切割时的冲击载荷,因此切割成功。

广西百色案例中,切割 Ø91 mm 事故钻杆使用的 YT15 刀头虽硬度高(91~92 HRA)但韧性低(抗弯强度 ≥ 1150 MPa),切割时需承受波动载荷,局部受力瞬间超过极限值,导致刀刃崩裂并卡滞铁屑(参见图 8);而 YT5 刀头因碳化钛含量降低(5%),抗弯强度提升至 ≥ 1300 MPa,韧性显著优于 YT15,可适应变形钻杆的波动载荷,因此切割效果稳定。此外,Ø114 mm 套管初始 YT5 刀头因刀刃厚度不足(4 mm)难以承受高阻力,优化后增厚至 6 mm,刀头整体刚性提升,才实现稳定切割,进一步说明材质性能与加工件工况的匹配是切割成功的前提。

3.2 出刀速度控制不当引发冲击载荷过载

出刀速度由泥浆泵压力直接决定,若压力调节过快或过高,导致刀头快速弹出并瞬间贴合管材内壁,会产生瞬时冲击载荷,引发刀头失效^[9]。山东莱芜案例首次使用 YG6 刀头时,泥浆泵压力骤升至 1.8 MPa,刀头伸出时间仅 0.5 s,相当于出刀速度达 24 mm/s(刀架行程 12 mm),此时割刀处于旋转状态(30 r/min),刀刃瞬间扎入钻杆内壁,冲击载荷可达正常切割载荷的 2~3 倍,YG6 刀头虽韧性较高,但无法承受瞬时过载,直接导致崩刃;后续更换 YW2 刀头时,将压力控制在 1.2~1.5 MPa,刀头伸出时间延长至 2 s,出刀速度降至 6 mm/s,冲击载荷被有效分散,切割过程中扭矩稳定在 8~10 kN·m,避免了失效。

广西百色套管切割首次尝试中,压力调节过快(1.6 MPa 在 1 s 内到位),刀头伸出过快,贴合套管内壁时,因瞬间阻力大,刀刃瞬间受力超过设计值,

引发崩刃;调整压力后,采用梯度升压方式(1.4 MPa→1.6 MPa→1.8 MPa,每级停留 3 s),刀头伸出速度降至 0.5 mm/s,冲击载荷显著降低,切割过程平稳。由此可见,出刀速度过快导致的冲击载荷过载,是引发刀头崩刃、卡屑的重要诱因,需通过压力精准控制避免。

3.3 刀头修磨状态与安装精度不合理

刀头的修磨形状、刀刃伸出长度等预处理状态,直接影响切割应力分布与刀头支撑稳定性,不合理的修磨与安装会加剧失效风险。出厂刀头多为尖刃设计(刃角 90°以下),抗冲击能力弱,如山东莱芜案例中 YG6 原刀头为尖刃,出刀速度过快时,刀刃易“扎入”管壁,应力集中于刃口,加速崩刃;而将 YT5 刀头修磨为 120°圆角刃后,应力分散至刀刃两侧,抗冲击能力显著提升,即使出刀速度略有波动,也未发生崩刃。

广西百色案例中,首次切割 Ø91 mm 钻杆时, YT15 刀头刀刃伸出刀架长度达 2 mm,因缺少足够支撑,旋转切割时刀刃易产生偏摆,与钻杆内壁接触不均匀,导致局部受力过大;后续将 YT5 刀头伸出长度控制在 1 mm,刀架对刀刃的包裹度提升,减少偏摆,切割受力更均匀。此外,Ø114 mm 套管切割时,铁屑易堆积于刀仓与刀头之间,增加切割阻力并卡滞刀头;优化后刀头阻力显著降低,进一步说明刀头修磨与安装精度对切割效果的关键影响。

4 硬质合金刀头选型方案与立方氮化硼刀头应用展望

4.1 岩心钻探工程中硬质合金刀头选型方案

基于前文的实证分析与失效机理,结合不同加工件的材质特性、工况条件,提出岩心钻探工程中水力割刀硬质合金刀头的选型方案,具体如表 3 所示。

表 3 岩心钻探工程水力割刀硬质合金刀头选型方案

加工件类型	加工件特性	推荐型号	推 荐 理 由	配套工艺参数			
				压力/ MPa	转速/(r· min ⁻¹)	刃角/ (°)	刀刃厚 度/mm
锰钢钻杆(Ø73/ 89 mm)	高强度($\sigma_b\geq 900$ MPa)、高韧性、易氧化	YW2	含碳化钼,兼具高耐磨性(90~91 HRA)与韧性(≥ 1250 MPa),适配断续切削与冲击工况	1.5~1.6	25~30	120	
高强度套管(Ø 114/127 mm)	高刚性、易因地层变形导致壁厚不均	YT5	碳化钛含量适中,抗弯强度高(≥ 1300 MPa),适配高阻力、轻微变形工况	1.6~1.8	20~25	110	≥ 2.5
普通碳素钢套管	强度中等($\sigma_b\leq 600$ MPa)、无明显变形	YT15	耐磨性高(91~92 HRA),适配连续切削、无冲击的稳定工况	1.4~1.5	30~35	100	
铸铁/非金属管材	低强度、低硬度	YG6	韧性高(≥ 1400 MPa),可避免低强度材料切割时“崩料”,降低管材破损风险	1.2~1.4	25~30	90	

同时,结合失效机理,需配套以下工艺优化措施:①出刀压力采用梯度调节,避免骤升,确保出刀速度控制在 0.5~1 mm/s;②刀头修磨优先采用圆角刃(100°~120°),刀刃伸出刀架长度控制在 1~1.5 mm;③针对不同管材,需使用不同的刀头选型方案。

4.2 立方氮化硼刀头应用展望

立方氮化硼(CBN)作为超硬材料^[13],具有硬度高(HV3000~5000,仅次于金刚石)、热稳定性好

(800 ℃以下不分解)、对铁系金属化学惰性强等优势,在机械加工领域已广泛用于淬火钢、高温合金等难加工材料的切削。目前,传统硬质合金刀头在切割高强度锰钢($\sigma_b\geq 1000$ MPa)、不锈钢套管时,仍存在磨损快(切割寿命 ≤ 2 次)、需频繁更换的问题,而 CBN 刀头的耐磨性是硬质合金的 5~10 倍,理论上可显著延长使用寿命^[14-15]。

若将 CBN 刀头应用于水力割刀,需重点解决以下适配问题:①结构适配:CBN 刀头多为复合片结

构(CBN层+硬质合金基体),需优化刀架设计,采用螺栓固定替代传统焊接,避免高温焊接破坏CBN层;②参数适配:CBN刀头切削速度宜控制在10~15 m/min(对应转速70~80 r/min, $\varnothing 73$ mm 钻杆),压力需提升至2.0~2.2 MPa以保证给进量,需同步优化压力控制机构的耐压性能;③工艺适配:CBN刀头抗冲击能力略低于YW2,需进一步降低出刀速度(0.3~0.5 mm/s),并采用更平缓的梯度升压方式。

已有研究表明,CBN刀头车削锰钢时,磨损量仅为YW2的1/8,若在水力割刀上实现适配,有望解决传统刀头磨损快、切割高强度管材成功率低的问题。后续可通过小规模现场试验,验证CBN刀头在不同工况下的切割效果,为其规模化应用提供实证依据,进一步拓展水力割刀的适用范围。

5 结论

水力割刀切割效能的核心影响因素是硬质合金刀头性能与加工件的匹配度,其中YW2硬质合金刀头因兼具耐磨性与韧性,适配锰钢钻杆的切割。YT5硬质合金刀头因韧性优于YT15,适配高强度套管的切割。YG6刀头仅适用于低强度铸铁或非金属材料,不适用于锰钢、合金钢等高强度加工件。

(1)水力割刀切割失效的三大核心机理为:刀头材质选型与加工件性能不匹配、出刀速度控制不当引发冲击载荷过载、刀头修磨状态与安装精度不合理。通过梯度控制出刀压力1.4~1.8 MPa、将刀头修磨为 100° ~ 120° 圆角刃、控制刀刃伸出长度1~1.5 mm,可有效降低失效风险。

(2)立方氮化硼刀头凭借高硬度、高耐磨性与热稳定性,在水力割刀上具有良好的应用前景,需通过优化刀架结构、调整工况参数(如压力2.0~2.2 MPa、转速70~80 r/min)实现适配,后续可通过现场试验验证其切割效果,进一步提升水力割刀对高

强度管材的切割能力。

(3)本文提出的刀头选型方案与工艺优化措施,已在山东莱芜、广西百色案例中验证有效,可直接为岩心钻探工程中水力割刀的现场应用提供参考,有助于提升套管回收率、降低事故处理成本,对支撑新一轮找矿突破战略行动的高效开展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 孙熙宇,易军平,沈应航,等.湖南明月峰地区水力割刀使用问题研究[J].钻探工程,2024,51(S1):318-321.
- [2] 段晓,皮建伟,顾科伟,等.水力割刀在岩心钻探烧钻事故处理中的应用[J].钻探工程,2022,49(3):118-122.
- [3] 赵云良.机械水力割刀套管切割技术在煤矿区域治理中的应用[J].煤炭与化工,2022,45(9):55-57.
- [4] 田志超.水力内割刀在中国东部海区科学钻探套管卡阻事故处理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):75-79.
- [5] 罗永贵,王年友,王红阳,等.水力内割刀与可退式捞矛在打捞深孔事故钻杆中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):60-63.
- [6] 刘晓军,李康康,靳楠,等.单层套管专用高效切割工具研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(4):138-140.
- [7] 谢莫颖.涂层硬质合金高速铣削U71Mn钢材的磨损性能研究[J].硬质合金,2023(3):193-199.
- [8] 范志豪.我国硬质合金模具市场剖析[C]//1994年全国粉末冶金学术会议.1994.
- [9] 毛善文.硬质合金抗弯强度影响因素的统计研究[J].硬质合金,2013,30(4):197-203.
- [10] 姜增辉,王琳琳,石莉,等.硬质合金刀具切削Ti6Al4V的磨损机理及特征[J].机械工程学报,2014(1):178-185.
- [11] 周建涛,邓建新,张辉,等.硬质合金刀具车削Cr12Mn5Ni4Mo3Al不锈钢的试验研究[J].制造技术与机床,2010(2):89-92.
- [12] 屠厚泽.聚晶立方氮化硼切削刀具的研究现状及其发展[J].探矿工程,1995(2):14-16.
- [13] 钟国晋,陈五一.立方氮化硼刀具精车淬硬钢[C]//中国兵工学会机械加工学会先进制造技术学术交流会.2005.
- [14] 顾祖慰,汪津泽.立方氮化硼复合片刀具应用的初步探讨[J].工具技术,1990,24(10):44-47.
- [15] 蓝春录.CBN刀具特性及其应用[J].设备管理与维修,2005(S1):150-153.

(编辑 王文)