

超深井钻采工况下钛合金钻杆模拟工况摩擦磨损行为对比研究

刘 强¹, 谢俊峰², 赵密锋², 李 宁², 胡芳婷², 祝国川¹, 陈家磊², 张娟涛¹,
宋生印¹, 尹成先¹

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 陕西 西安 710077)
(2. 塔里木油田分公司 石油工程技术研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要: 钛合金材料由于具有高的比强度, 低弹性模量, 优异的韧性、疲劳性能和耐蚀性, 已经成为深井、超深井及大位移水平井工况环境下钻杆及井下工具的热门候选材料, 但超深井钻采工况下钛合金钻杆材料的摩擦磨损性能和磨损机理缺乏研究。本工作在模拟超深井工况通过硬度测试、冲击磨损试验、往复摩擦试验、模拟工况摩擦磨损试验和显微分析手段对 3 种钛合金钻杆和钢制钻杆的摩擦磨损性能进行对比分析, 并对钻采工况下的钛合金钻杆磨损机理进行研究。结果表明, 钛合金钻杆耐冲击磨损性能均要低于钢制钻杆材料, 特别是在中等频率冲击下钛合金钻杆材料耐冲击磨损的性能最差; 在空气中往复磨损试验下, 钛合金钻杆的摩擦系数均低于钢钻杆的摩擦系数, 当钛合金钻杆与岩石对磨时为典型的磨粒磨损机制、与钢管对磨时为典型的粘着磨损; 在模拟工况钻井液条件下, 钛合金钻杆的摩擦系数显著低于空气中, 而且当钛合金在水基钻井液条件下和岩石摩擦时的摩擦系数最低、耐磨性能最强, 这是由于在水基钻井液中更容易形成致密且具有较低摩擦系数的钝化膜所致, 建议在使用钛合金钻杆钻井时用水基钻井液, 但由于钛合金钻杆在工况下的磨损量仍然大于钢制钻杆, 下一步研究应对钛合金钻杆进行表面处理以提高钛合金耐磨性。

关键词: 超深井钻采; 钛合金钻杆; 钢制钻杆; 模拟工况; 钻井液; 摩擦磨损性能; 磨损机理; 钝化膜

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)01-0195-11

随着全世界石油天然气的勘探开采不断向超深井、“高温、高压、高腐蚀”工况、大位移、多鱼骨水平井和海洋开发等非常规环境深入, 对石油管材性能要求提到了更高的级别^[1-2]。目前中国西部主要开发区块, 开采平均深度为 6800 m, 特别是最新在中国西部发现的高产气田^[3], 优质整装储量达到了 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的, 井底压力接近 140 MPa, 完钻深度超过了 8000 m, 勘探开发难度巨大。在这种超深、高压、高温的工况下常规钢制钻柱不但载荷极大, 而且还要承受井下内压/外压、拉伸/压缩、磨损、旋转疲劳、弯曲、温差应力等复杂载荷, 从而使超深井钻井周期长、事故频发、成本高, 已经严重制约中国深层油气资源的勘探开发。

钛合金材料由于具有许多钢铁材料无法比拟的优秀特性如高强度、低密度、优异的耐腐蚀性能、较好的耐高温性能、高抗疲劳、低弹性模量和无磁性等, 已经

成为下一代高性能石油管材料的研究和应用方向^[4-7]。早在上世纪末, 美国等国家率先开发出钛合金钻杆产品, 在美国本土得克萨斯州和墨西哥湾等进行了深井海洋工况及超短半径水平井的钻采^[8-10], 现场应用表明采用钛合金钻杆进行大位移井钻完井作业, 钻机大钩载荷可有效降低 30%, 悬重同比降低 50%, 扭矩可降低 30%~40%, 有效钻深增大 1524 m, 并且配套移动式钻机可实现快速从式井钻井, 节省投资可达 30%^[11-12], 钛合金材料在井下可以承受 260 °C 的高温, 并有优异的耐腐蚀性能^[13], 在钛合金管材 25% 壁厚减薄条件下, 管柱的安全系数是铬钢/镍基管柱的 3.5 倍^[14-15]。

在深井和超深井钻探过程中, 由于钻杆在井下高速钻进中与外层地层岩石以及钢制管材等发生激烈的摩擦和碰撞, 并且在钻井液的介质条件下摩擦磨损过程更为复杂苛刻, 对钛合金钻杆的耐磨性和使用寿命

收稿日期: 2022-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3700804); 中国石油科学研究与技术开发项目(2021DJ2703); 陕西省自然科学基金(2021JM-607)

作者简介: 刘 强, 男, 1983 年生, 博士, 教授级高工, 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 陕西 西安 710077, E-mail: liuqiang030@cnpc.com.cn

提出较大的挑战, 王林青等^[16]研究了在模拟海水中 TC4 钛合金电化学腐蚀与机械磨损间的交互作用, 得出腐蚀磨损交互作用下钛合金的磨损随着外加电位的增加而增强; 刘勇等^[17]研究了在空气和真空条件下对钛合金的磨损性能, 结果表明空气磨损后钛合金在较高滑动速度下出现显微裂纹; 林乃明等^[18]研究了热氧化后的 TC4 合金在 CO₂ 饱和模拟油田采出液中的冲蚀磨损行为, 证明了经过热氧化处理的钛合金具有更好的耐冲蚀性能; 吴松波等^[19]研究了不同硬质沙粒对 TC4 钛合金冲击磨损的损伤行为, 结果显示在冲击过程中硬质沙粒会不断切削、挤压钛合金表面, 造成较大的材料损失, 磨损机制主要表现为微观切削和挤压剥落; 李新星等^[20]研究了 2 种钛合金在空气、水和海水中不同滑动速度下磨损行为和机制, 发现钛合金不一定具有较差的耐磨性, 而是随滑动条件变化呈现出 2 种磨损状态: 轻微磨损和严重磨损。但是, 在超深井钻采工况下钛合金钻杆材料的摩擦磨损性能和磨损机制尚未完全了解, 钛合金在不同介质中的摩擦学特征以及磨损机理缺乏研究, 钛合金钻杆与钢钻杆材料的磨损性能对比鲜见报道, 为钛合金钻杆的设计和应用带来较大的安全隐患。本工作通过选取 3 种典型的钛合金钻杆材料, 在实际钻井液工况下对不同钛合金钻杆材料和钢制钻杆的摩擦磨损性能进行对比分析, 研究在深井钻采工况下的钛合金钻杆磨损行为和机制, 为钛合金钻杆在深井钻采环境中的应用提供理论基础。

1 实验

钛合金钻杆材料试验选取 3 种中国企业及科研院所已开发应用的常规及高强高韧钛合金钻杆材料^[21], 所制备钻杆产品实测室温下的管体屈服强度均达到 826 MPa 以上, 3 种钛合金的化学成分见表 1, 金相组织为魏氏体、 $\alpha+\beta$ 和等轴组织; 对比用的钢制钻杆材料室温下屈服强度为 931 MPa, 抗拉强度为 1051 MPa, 伸长率为 13.5%, 材料硬度为 3381 MPa, 力学性能均满足 API SPEC 5DP 标准^[22]要求, 化学成分见表 2, 钢钻杆的金相组织为回火索氏体, 钛合金和钢制钻杆

材料的金相组织见图 1。

分别在所有试验用钻杆管体上截取 20 mm×20 mm×5 mm 的试样, 使用 400#~2000#水砂纸上磨制, 使试样表面磨至粗糙度一致 ($Ra\approx 0.25\ \mu\text{m}$), 利用超声波清洗机+丙酮试剂将材料表面的油污及指纹等清洗干净, 并利用分析天平对试样称重。

冲击磨损: 为了模拟井下岩石碎屑等对钻杆材料的冲击磨损过程, 使用 MLD-10 型动载磨料磨损试验机分别以 50、100 和 200 r/min 的冲击频率使用 100 kN 的冲锤分别对 4 种试样进行冲击磨损试验, 在冲击的过程中使用粒度为 24 目的棕刚玉磨料不停冲刷覆盖试样表面, 试验时间为 30 min, 测试实验前后的磨损量差异。

往复磨损: 为了模拟不同钻杆材料井下与岩石、金属对磨的磨损状态, 对磨材料分别为 SiC (密度为 3.22 g/cm³, 显微硬度为 3100 kg/mm²) 和 GCr15 钢球 (硬度 62 HRC), 使用 MSR-2T 型电化学往复摩擦磨损试验仪分别在 5、10 和 20 N 的载荷下用不同钻杆材料与对磨材料进行反复磨损试验, 计算不同实验条件下的摩擦系数和磨损量。

模拟工况磨损试验: 在现场取的水基钻井液和油基的环境下进行腐蚀磨损试验, 水基腐蚀液的成分见表 3, 载荷统一设定为 20 N, 研究在不同钻井液工况条件下 3 种钛合金材料和钢钻杆材料的摩擦性能及机理的不同。

表 1 试验用钛合金钻杆材料化学成分

Table 1 Chemical composition of titanium alloy drill pipe used in test (wt%)

Sample	Al	V	Mo	Zr	O	C	H	Fe	Ni	Ti
1#	5.4	4.37	1.04	2.01	0.08	0.009	0.003	-	-	Bal.
2#	5.92	4.02	-	-	0.082	0.0098	0.009	-	0.54	Bal.
3#	3.82	2.44	-	-	0.26	0.0064	0.001	1.25	-	Bal.

表 2 试验用钢制钻杆材料化学成分

Table 2 Chemical composition of steel drill pipe used in test (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0.36	0.24	0.93	0.007	0.002	1.08	0.30	0.10	0.052	Bal.

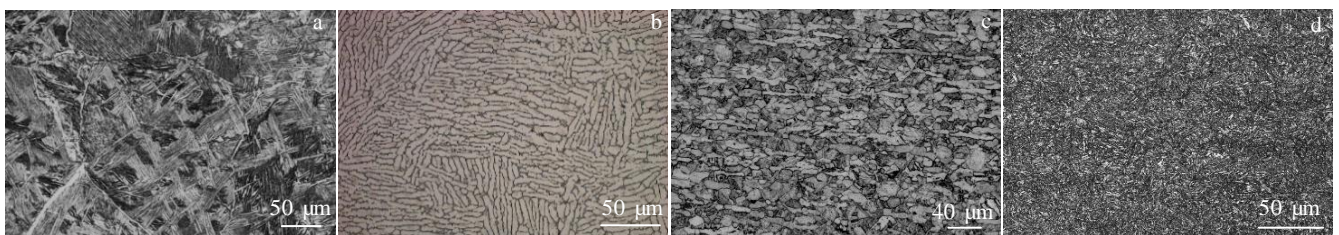


图 1 试验用钛合金材料和钢制钻杆材料的金相组织

Fig.1 Metallographic microstructures of tested titanium alloy materials 1# (a), 2# (b), 3# (c) and steel drill pipe material (d)

磨损试验后，使用乙醇清洗试样表面，并使用超声波清洗机+丙酮试剂清洗风干后，用分析天平对试样称重，使用 TESCAN-VEGA II 扫描电镜和 OXFORD-INCA350 型能谱仪进行磨损形貌和磨屑进行观察分析，使用 ZESIS Smart Z00n5 超景深光学数码显微镜和奥林巴斯 OLS 4100 激光共聚焦显微镜对磨损表面扫描分析。所有样品的表面使用带 Cu K α 辐射源的 Bruker D8 advance X 射线衍射仪进行表征分析，扫描范围从 10 $^{\circ}$ 扫描到 90 $^{\circ}$ ，速率为 2 $^{\circ}$ /min，加速电压和电流分别为 40 kV 和 30 mA；使用单色 Al K α X 射线源、发射角为 90 $^{\circ}$ 的 K-alpha XPS 光谱仪对原始合金样品和磨损试验后样品的表面化学成分进行分析与比较，XPS 光谱仪能量为 50 eV，高分辨率扫描的能量步长为 0.1 eV，束斑面积为 400 μm^2 ，根据 NIST XPS 数据库确定表面元素的标准结合能及价态。

2 结果与分析

2.1 冲击磨损试验

在 50、100 和 200 r/min 3 种不同冲击频率下对 3 种钛合金材料和钢制钻杆进行冲击磨损试验，不同钻杆材料磨损量随冲击时间的变化如图 2 所示，从图中可以看出，所有钻杆材料的磨损量随着冲击磨损时间的增加而升高，其中前 5 min，所有钻杆材料的磨损量变化的幅度不大，这是由于钛合金和钢制材料在冲击磨损的开始，材料表面在棕刚玉的冲击作用下形成了类似喷砂强化的作用，但随着冲击时间的延长，这个强化层被冲击锤不断地破坏，磨损量有所上升，当试验时间超过 16 min 时，所有钻杆材料的磨损量均显著上升，表面破坏加速；对比钛合金钻杆材料和钢制钻杆材料可以看出，在所有冲击频率下钢制钻杆的磨损量都要低于钛合金钻杆材料，说明在此试验工况下钢制钻杆材料的耐冲击磨损性能要优于钛合金材料。

分析对比不同冲击频率对钻杆材料的磨损量影响，如图 2d 所示，可以看出当冲击频率为 50 r/min 时，所有钻杆材料的磨损量相对于其他冲击频率均是最低的，当

表 3 试验用水基钻井液化学成分

Table 3 Chemical composition of water-based drilling fluid used in test (mg/L)

K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	S ²⁻	SO ₄ ²⁻	Total
84 719.76	2449.33	162.07	289.41	251.66	109 366.09	60.01	644.41	34 571.88	232 514.61

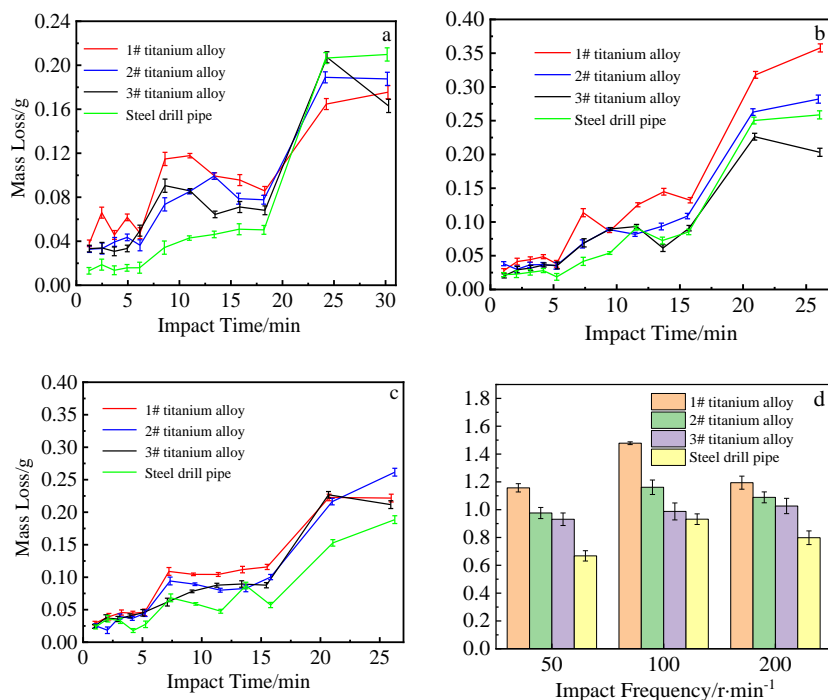


图 2 磨损试验中不同钻杆材料的磨损量随时间及冲击频率的变化

Fig.2 Change of mass losses of titanium alloy drill pipes and steel drill pipe with impact time under different impact frequencies in the impact abrasive wear test: (a) 50 r/min, (b) 100 r/min, and (c) 200 r/min; (d) change of mass losses with impact frequency

冲击频率增加到 200 r/min 时,所有材料的最终磨损量有所增加,而当冲击频率为 100 r/min 时,所有钻杆材料的磨损量最大,在中等频率冲击磨损下,钛钻杆材料耐冲击磨损的性能最差。对比冲击频率对不同材料的影响,可以看出 1#钛合金材料对冲击频率的变化最为敏感,而 3#钛合金材料在不同冲击频率下磨损量变化不大。

对所有钻杆材料经过 100 r/min 冲击磨损试验后的表面形貌进行宏观观察,如图 3 所示,可以看出 3 种钛合金钻杆材料在冲击磨损后,试样的磨损深度要远远大于钢制钻杆,其中 2#和 3#钛合金材料要优于 1#钛合金材料;对磨损表面放大进行表面粗糙度方面观察可以看出,经过 100 r/min 冲击频率试验后,3 种钛合金材料表面在冲击磨损后形成粗并且较深的犁沟,如图中白色箭头所示,表面伴随有明显被磨料冲击形成的小坑,小坑周围出现明显的塑性变形,并有少数棕刚玉磨料被嵌在材料表面中,造成周围存在细小的裂纹,如图 3 中黄色箭头所示,而钢制钻杆的磨损表面较为平直,磨痕相对较为细小且浅,表面依然存在被磨料冲击形成的小坑,但是坑的深度和面积比钛合金钻杆材料要小很多。

2.2 往复磨损试验

为了模拟钛合金钻杆材料与岩石、金属对磨的磨损状态,分别和 SiC 对磨副与 GCr15 钢球在 5、10 和 20 N 载荷下进行往复磨损试验,摩擦系数随时间变化曲线见图 4,从图中可以得出,在试验摩擦条件下,钛合金钻杆材料的摩擦系数均低于钢钻杆的摩擦系数,且 3 种钛合金材料的摩擦系数均呈现开始时迅速增大,但随着摩擦的进一步进行摩擦系数先略为降低然后逐步缓慢升高并稳定的趋势,这是由于钛合金表面易形成厚而致密的氧化膜^[13],与对磨材料一接触后摩擦系数迅速上升,随着摩擦材料表面不断被往复磨平强化后摩擦趋于稳定,摩擦系数有所下降,但随着摩擦的不断进行,钛合金材料表面的氧化膜在不

断的摩擦切向力的作用下被破坏,切削出的小磨屑在接触表面被带着一一起摩擦引发对表面的粘着和切削导致,引起了摩擦系数的迅速上升^[23]。而钢制钻杆没有这层厚而致密的氧化膜,所以摩擦系数基本上随着试验进行是不断增大的。

对比不同对磨材料对往复磨损试验的影响,如图 5 所示,当与 GCr15 钢球对磨时,3 种钛合金钻杆材料的摩擦系数基本上变化不大,而钢制钻杆的摩擦系数从 0.63 逐步增加到了 0.81,同时可以发现钛合金钻杆材料与钢制钻杆材料的摩擦振动现象也逐步增强;当与 SiC 材料进行摩擦试验时的摩擦系数均大于与 GCr15 钢球对磨时的摩擦系数,并且随着载荷从 5 N 增加到 20 N,除 1#钛合金材料摩擦系数变化不大外,其他 2 种钛合金材料的摩擦系数均呈现略微下降的趋势,说明钛合金钻杆材料对载荷的影响不敏感,同时对比钢制钻杆材料可以看出,钢制材料摩擦系数对载荷的敏感性较大。并且对比 2 种对磨材料下的摩擦系数震动幅度可以看出,当与 GCr15 材料对磨时,钛合金及钢制钻杆的摩擦系数振动幅度较小,且钛合金材料也小于钢制钻杆。

对 20 N 载荷下往复磨损试验后的试样表面进行 SEM 磨损形貌分析,结果如图 6 和图 7 所示,从表面 SEM 形貌可以看出,与 SiC 对磨副和 GCr15 钢球往复摩擦后,钢制钻杆材料表面呈现大块片状层脱落,并且与 SiC 对磨后的表面脱落的面积和深度要高于与 GCr15 对磨后的试样,磨损表面没有发现过多的磨粒和磨屑,这是由于钢制钻杆接头材料表面硬度较高,同时钢铁材料的导热性能优于钛合金,粘性小,容易产生表面的塑性变形,当材料表面与对磨材料摩擦脱落后不容易嵌入摩擦表面从而进一步恶劣表面形貌,如图 6d 和图 7d 所示。

对比钛合金钻杆材料可以看出,3 种钛合金材料表面均出现较深且明显的犁沟磨痕,在犁沟的边缘均呈现出严重的由于塑性撕裂变形而产生的白色条状亮

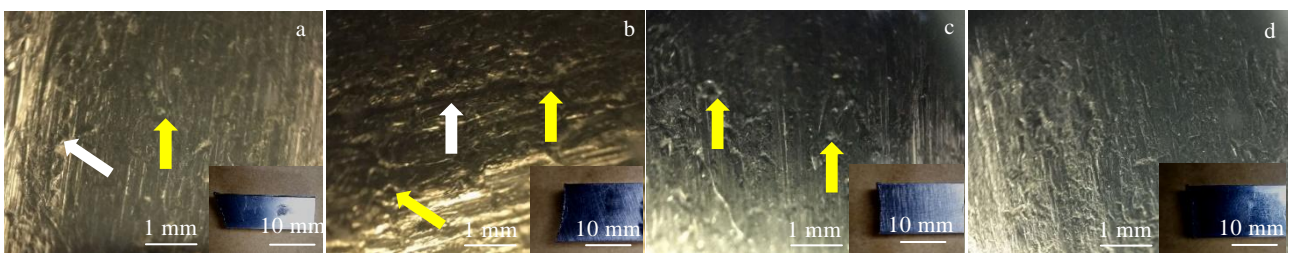


图 3 冲击频率为 100 r/min 下钛合金钻杆和钢制钻杆表面形貌对比

Fig.3 Comparison of the surface morphologies of 1# (a), 2# (b), 3# (c) titanium alloy drill pipes and steel drill pipe (d) at an impact frequency of 100 r/min

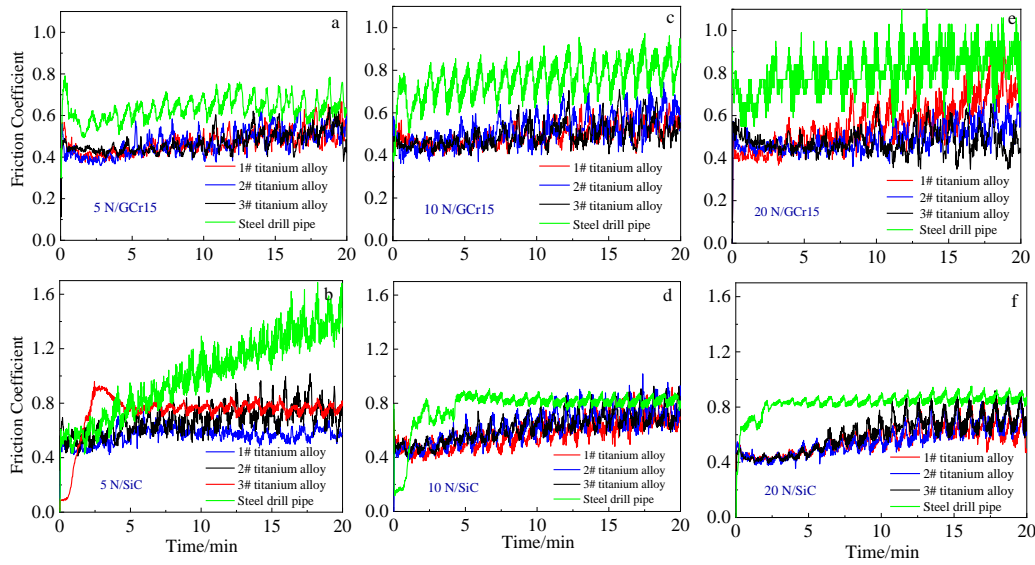


图 4 不同钻杆材料摩擦系数随时间变化曲线

Fig.4 Change curves of friction coefficient of different drill pipe materials with GCr15 (a, c, e) and SiC (b, d, f) under different loads with sliding time: (a, b) 5 N, (c, d) 10 N and (e, f) 20 N

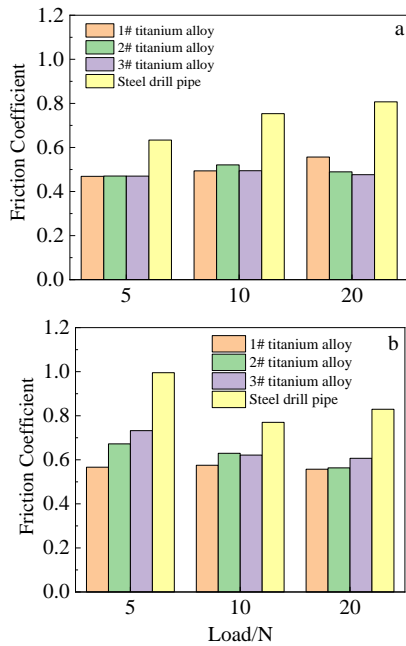


图 5 不同钻杆材料与 GCr15 及 SiC 对磨的平均摩擦系数对比
Fig.5 Comparison of average friction coefficient of different drill pipe materials with GCr15 (a) and SiC (b)

带，不同钛合金材料之间对比可以看出，1#钛合金材料表面的磨损脱落较为严重，大面积的表面氧化膜被对磨材料拖拽下来而发生断裂和破碎，但 2#和 3#钛合金材料表面磨损情况要好很多，特别是 2#钛合金材料表面主要形成较宽的犁沟磨痕，磨屑数量较少，根据 Archard 公式^[24]，表面磨损的体积与载荷、摩擦距离

成正比，与材料表面的硬度成反比，在本实验条件下载荷与摩擦条件一致，钛合金材料硬度越高则表明磨损体积越少。在 2#和 3#钛合金材料表面犁沟的边缘出现了明显塑性撕裂形貌和微裂纹，如图 6b, 6c 和图 7c 中白箭头所示。

对比不同对磨材料对钛合金磨损形貌的影响，可以看出由于 SiC 对磨副表面硬度远高于 GCr15 钢球，在同样载荷下 SiC 对钛合金表面的撕裂和损伤更为严重，同时 SiC 表面在强大的剪切力作用下也发生一定的破碎，相比于 GCr15 在表面形成了更多的片状及粒状磨屑^[25]，这些磨屑在后续摩擦试验过程中被对磨材料推动和挤压，形成第三体磨粒加速磨损，从而在钛合金表面形成了更多的表面损伤和沟壑，为典型的磨粒磨损^[26]，而 GCr15 钢球主要对钛合金表面进行犁削而形成较深犁沟，从而导致磨痕边缘部位产生塑性撕裂变形，并且随着载荷的增加变化磨痕不明显，表面磨粒较少，为典型的粘着磨损^[27]，如图 7a~7c 所示。

对试验用 4 种钻杆材料往复磨损后的磨损量进行对比分析，如图 8 所示，结果显示当与 GCr15 对磨时，1#钛合金钻杆材料的磨损量均高于钢制钻杆，特别是在低载荷条件下，3#钛合金钻杆材料的磨损量在低载荷下高于钢制钻杆，在高载荷下略低于钢制钻杆；与 SiC 对磨时，只有 1#钛合金钻杆材料的磨损量均高于钢制钻杆，在所有对磨材料下，2#钛合金钻杆材料在所有载荷下磨损量均显著低于钢制钻杆，具有优异的耐往复磨损性能。

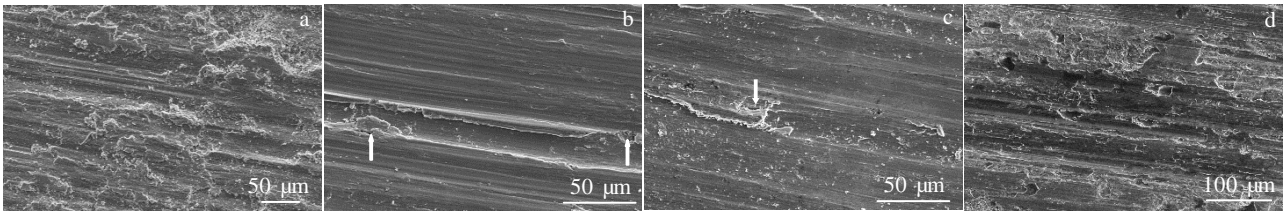


图 6 钛合金材料和钢制钻杆与 GCr15 对磨在 20 N 载荷下的磨痕形貌

Fig.6 Wear scar morphologies of 1# (a), 2# (b), and 3# (c) titanium alloy drill pipes and steel drill pipe (d) with GCr15 under load of 20 N

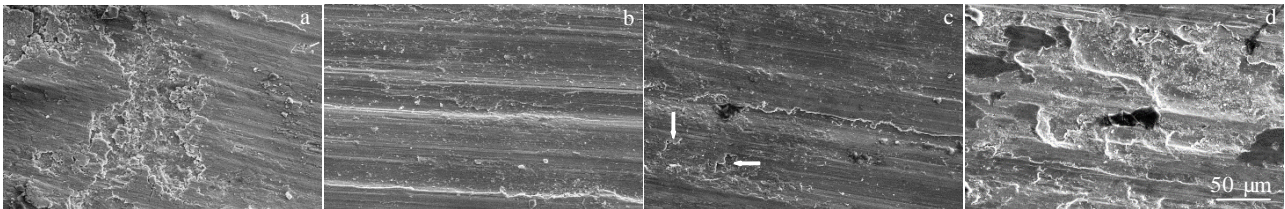


图 7 钛合金材料和钢制钻杆与 SiC 对磨在 20 N 载荷下的磨痕形貌

Fig.7 Wear scar morphologies of 1# (a), 2# (b), and 3# (c) titanium alloy drill pipes and steel drill pipe (d) with SiC under load of 20 N

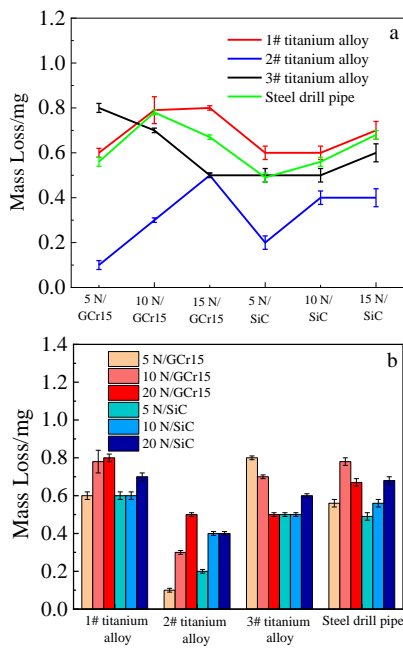


图 8 不同钻杆材料磨损量随不同实验条件下变化

Fig.8 Changes (a) and comparison (b) of mass losses for different drill pipe materials under different test conditions

2.3 模拟工况磨损试验

对实验用 4 种钻杆材料分别在空气中、水基钻井液和油基钻井液中与 GCr15 和 SiC 对磨进行摩擦试验，摩擦系数对比如图 9 和图 10 所示，从图中可以看出，在与不同对磨材料摩擦时，所有钻杆材料在空气中的摩擦系数均较高，而在水基钻井液和油基钻井液中的摩擦系数显著降低，这里值得注意的是，钢制钻杆与 GCr15 和 SiC 对磨时在油基钻井液

中的摩擦系数最低，只有 0.15 左右，而 3 种钛合金材料在水基钻井液的摩擦系数显著低于其他 2 种工况，说明钛合金钻杆材料在水基钻井液中的摩擦更小，当与 GCr15 对磨时，1#与 2#钛合金钻杆材料的摩擦系数较高，在 0.2~0.3 之间，3#钛合金的摩擦系数与钢制钻杆相当；特别是在与 SiC 对磨时（模拟与岩石摩擦过程），3 种钛合金材料的摩擦系数显著减低，并且接近于钢制钻杆在油基钻井液中的性能（摩擦系数 0.16~0.18），同时可以发现，所有钻杆材料在水基钻井液和油基钻井液中的摩擦振动现象均大为减小，其中钛合金在水基钻井液中、钢制钻杆在油基钻井液中的摩擦震动最小，说明钛合金更适用于水基钻井液，钢制钻杆更适用于油基钻井液。这与 Jackie 等人^[11]的研究结果认为钛合金钻杆钻井更适合使用水基钻井液的结论相一致。

对不同工况试验后的磨痕尺寸测量，结果见表 4，可以看出所有钻杆材料在油基和水基钻井液环境下的磨痕尺寸均远小于在空气中的磨痕尺寸；对比在空气中的磨痕尺寸发现，钛合金钻杆材料与 GCr15 对磨的深度和宽度略大于钢制钻杆，但是当与 SiC 对磨时，钛合金钻杆材料的磨痕尺寸要略小于钢制钻杆，说明在空气中与岩石对磨时，钛合金钻杆材料耐磨性略优于钢制材料，特别是 2#钛合金材料，磨痕最小的深度和宽度分别只有 9 和 375 μm，远低于其他钢制钻杆及钛合金材料。

当在水基和油基钻井液工况中进行摩擦磨损试验后，钢制钻杆的磨痕尺寸显著下降，特别是与 SiC 对磨时磨痕的深度和宽度分别只有 2~4 和 100~400 μm，相比于空气中降低 80% 以上；钛合金钻杆材料在钻井

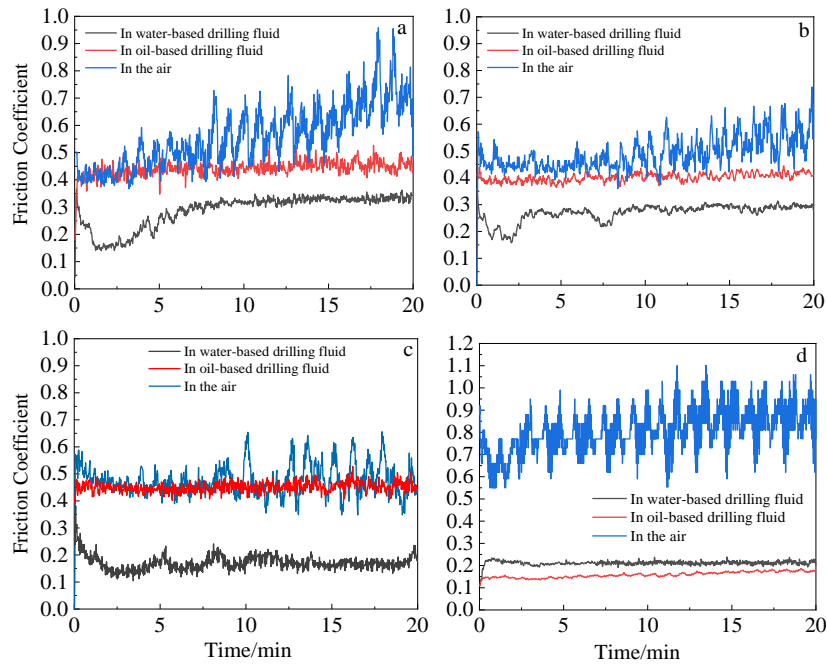


图 9 钛合金和钢制钻杆与 GCr15 对磨在不同工况下的摩擦系数

Fig.9 Friction coefficient of 1# (a), 2# (b), and 3# (c) titanium alloy drill pipes and steel drill pipe (d) with GCr15 under different conditions

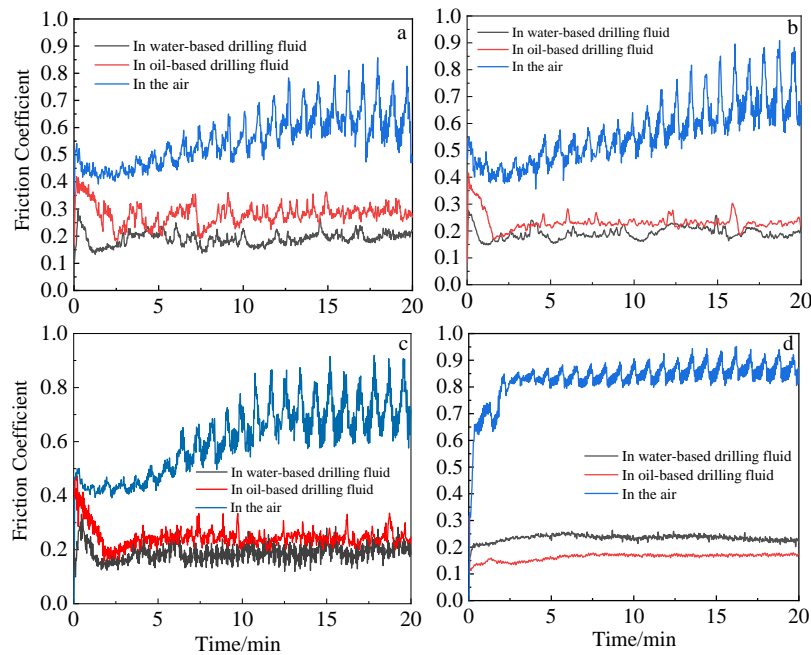


图 10 钛合金和钢制钻杆与 SiC 对磨在不同工况下的摩擦系数

Fig.10 Friction coefficient of 1# (a), 2# (b), and 3# (c) titanium alloy drill pipes and steel drill pipe (d) with SiC under different conditions

液中的磨痕具有 2 个特点,第 1 是所有钛合金钻杆材料在水基钻井液中的磨痕尺寸要略小于油基钻井液中的磨痕尺寸,第 2 是当与 SiC 材料对磨时磨痕的尺寸均略小于 GCr15 对磨的深度和宽度,对 3 种钛合金材料进

行横向对比可以看出,2#钛合金在水基钻井液中与 SiC 材料对磨时磨痕的深度和宽度分别只有 3 μm 和 470 μm,与同种工况下的钢制钻杆的磨痕尺寸相当,结合前面摩擦系数分析结果,说明 2#钛合金材料在水基钻

井液条件下和岩石摩擦时的耐磨性能最强、摩擦系数最低，因此使用钛合金钻杆钻井时推荐使用水基钻井液。

3 分析与讨论

通过对比钛合金钻杆和钢制钻杆在模拟钻井工况下的综合摩擦磨损性能，可以看出钛合金在水基钻井液中与GCr15和SiC对磨的摩擦系数最低，不同于对常规钢制钻杆在油基钻井液中摩擦系数最低的认识，针对本工作发现的这个特殊现象探寻原因，本工作选取 1#钛合金钻杆材料，对该钛合金材料分别在成品态、钻井液浸泡态、以及分别在油基钻井液和水基钻井液中与GCr15和SiC对磨后的表面成分、表面膜结构、摩擦磨损形貌进行分析讨论，找出钛合金钻杆材料在水基钻井液中摩擦系数更低的本质原因。

图 11 为 1#钛合金钻杆材料分别在原始表面、油基钻井液和水基钻井液浸泡后的表面 XRD 图谱。从图上对比可知，3 种状态下钛合金钻杆表面的主要物相为钛元素，但是原始钛合金钻杆表面及经过水基钻井液浸泡后的材料表面有较为显著的 TiO₂ 相的衍射峰，说明在这 2 种状态下钛合金钻杆表面膜层内有一定数量的 TiO₂ 成分，根据 Dugdale^[28]，Shibata^[29]和

Ou^[30]等人的研究表明，钛合金材料在非极限环境条件下在表面易形成致密且具有较高耐蚀性能的氧化膜，其主要成分为 TiO₂，与本研究结果相符，但是当环境中的氧含量或者氧化物有限时，会影响表面氧化层形成的数量和结构。同时在钛合金钻杆表面还存在有微量的 ZrO 相，这是因为 1#钛合金钻杆材料中含有 2.01% 的 Zr 元素所致。

为了进一步研究钛合金表面氧化层在原始状态、油基钻井液中及油基钻井液中摩擦磨损后的不同环境中的变化，对这些不同环境下的钛合金表面进行进一步的精细分析，分别对不同状态下的钛合金表面进行 XPS 分析，选取 O 元素和 Ti 元素的卷积图如图 12 所示，表面原子价态的分析结果见表 5，从结果可以看出，1#钛合金钻杆材料在原始状态表面膜层的主要组成元素为 Ti⁴⁺、Ti³⁺、Ti²⁺和原子态 Ti 元素，结合 O 元素的分析结果可以得出，原始表面膜层主要由 Ti 元素和 Ti 的各种氧化物组成，其中原子态 Ti 元素的含量最高接近 35at%，结合其他学者的研究^[31]可知 Ti 的氧化物主要包含有 TiO₂、Ti₂O₃ 和 TiO₂²⁻。当钛合金钻杆材料在水基钻井液中进行一段时间的摩擦磨损试验后，原始的表面膜层在摩擦过程中不断被磨损脱落，但同

表 4 不同试验工况下4种钻杆材料磨痕尺寸

Table 4 Wear scar sizes of four drill pipes materials under different conditions

Drill pipes material	Condition	Friction pair	Depth of wear scar/μm	Width of wear scar/μm
1# titanium alloy	In the air	With GCr15	27	785
		With SiC	24	833
	In the water-based drilling fluid	With GCr15	12	558
		With SiC	11	464
	In the oil-based drilling fluid	With GCr15	13	467
		With SiC	13	393
2# titanium alloy	In the air	With GCr15	17	791
		With SiC	9	375
	In the water-based drilling fluid	With GCr15	7	469
		With SiC	3	470
	In the oil-based drilling fluid	With GCr15	14	778
		With SiC	6	463
3# titanium alloy	In the air	With GCr15	28	848
		With SiC	26	909
	In the water-based drilling fluid	With GCr15	7	481
		With SiC	10	638
	In the oil-based drilling fluid	With GCr15	23	816
		With SiC	7	677
Steel	In the air	With GCr15	10	716
		With SiC	32	932
	In the water-based drilling fluid	With GCr15	6	281
		With SiC	4	417
	In the oil-based drilling fluid	With GCr15	5	166
		With SiC	2	239

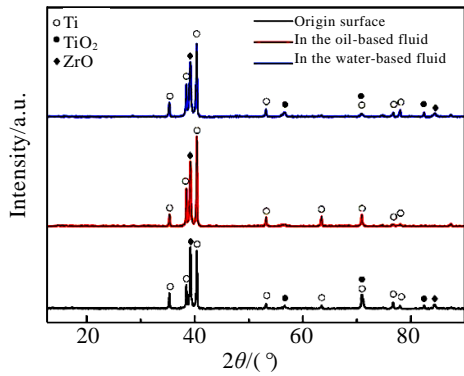
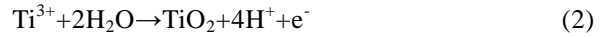


图 11 1#钛合金钻杆在原始态和钻井液浸泡后的 XRD 图谱
Fig.11 XRD patterns of 1# titanium alloy drill pipe in original state and after immersion in drilling fluid

时由于钛本身的活泼性质^[31-32]和水基钻井液中高水含量带来较多的氧、离子含量，钛钻杆表面新产生的基体作为阴极在富氧环境中发生自溶解和氧化反应不断生成新的表面钝化膜，反应如下：



以及



随着溶解及氧化反应的不断进行，导致钛合金钻杆表面膜层里 Ti^{4+} 、 Ti^{3+} 和 H_2O 的不断增多，在表5的XPS分析结果也印证了这一点，根据等Qin等人^[32]的研究，由于 Ti^{4+} 是钛元素的最高价态，不能进一步被氧化，所以比钛的其他亚稳态氧化物更稳定，形成的 TiO_2 结构致密且稳定^[33]，根据Wang等人^[34]的研究， TiO_2 结构的膜是一种具有典型低摩擦系数的膜层结构，因此具有较高 TiO_2 含量的表面膜层显著降低钛合金钻具材料表面的表面摩擦系数。而在油基钻井液中，经过检测在油基钻井液中油相占91.93%，固相占5.73%，而水相只占到2.34%，因此没有足够的溶解和氧化环境来补充因为摩擦而损失的高价态氧化物，导致 TiO_2 的含量较低，甚至低于原始钛合金管表面，表面生成的主要是疏松、多孔的亚稳态氧化物，在摩擦磨损试验中更容易被磨损掉，因此在摩擦磨损过程中摩擦系数较高。

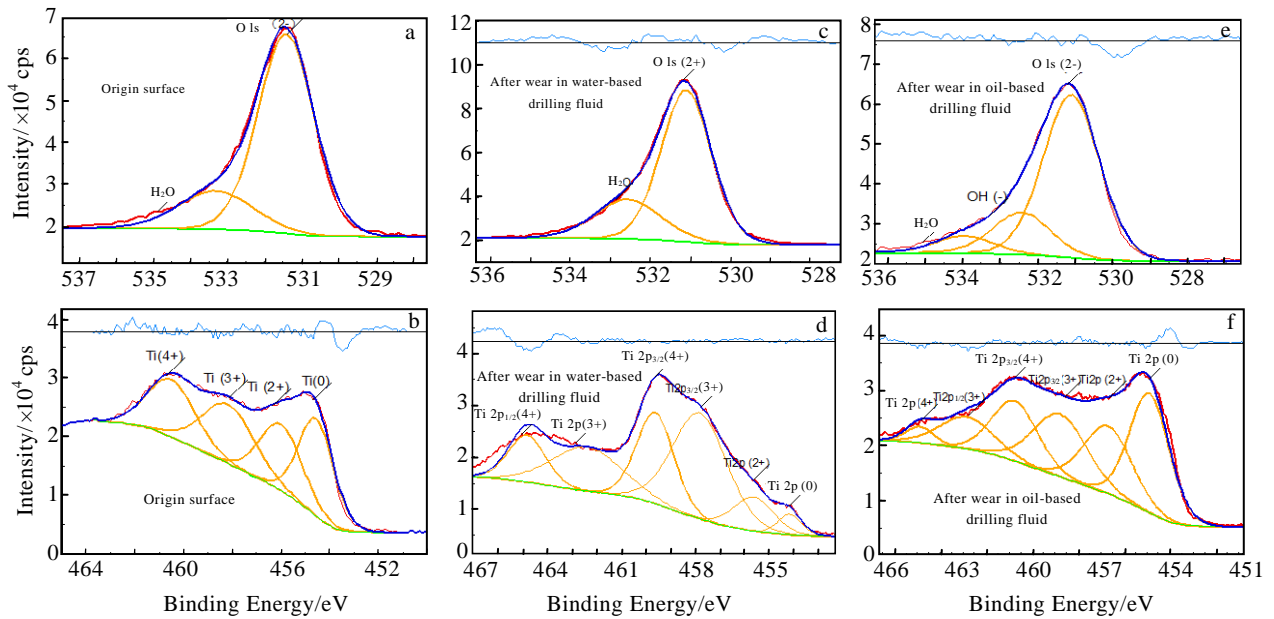


图 12 1#钛合金钻杆在原始态及不同钻井液中摩擦磨损后的 XPS 图谱

Fig.12 O 1s (a, c, e) and Ti 2p (b, d, f) XPS spectra for 1# titanium alloy drill pipe in original state (a, b) and after wear in water-based (c, d) and oil-based (e, f) drilling fluid

表 5 1#钛合金钻杆在原始态及不同钻井液中摩擦磨损后的 Ti 和 O 元素浓度

Table 5 Element concentration of Ti and O of 1# titanium alloy drill pipe in original state and after wear in water-based and oil-based drilling fluid (at%)

Condition	Ti ⁴⁺	Ti ³⁺	Ti ²⁺	Ti ⁰	O ²⁻	OH ⁻	H ₂ O
Origin state	21.92	22.55	20.59	34.94	83.7	-	16.3
After wear in water-based drilling fluid	49.22	43.79	5.35	1.64	66.58	-	33.42
After wear in oil-based drilling fluid	18.22	46.13	13.43	22.19	62.10	34.92	2.99

图 13 为 1#钛合金材料在油基钻井液和水基钻井液中摩擦磨损试验后的磨痕 SEM 形貌,可以看出由于在油基钻井液中水相的大幅减少,导致钛合金表面的钝化膜再生不够,在摩擦过程中对基体有较大的撕裂和塑性变形,犁沟也较深,而在水基钻井液中摩擦磨损试验后,表面已然形成了较为完整和密实的钝化膜保护,虽然也有一定的磨损和犁沟产生,但是深度和宽度都较浅,钛合金材料表面没有发生较为明显的塑性变形。

同时也需要指出,在水基钻井液中发生摩擦磨损时虽然钛合金钻杆的摩擦系数要低于钢制钻杆,但是磨损量仍然大于钢制钻杆,因此为了钛合金钻杆的现场应用和推广使用,需要对钛合金钻杆表面进行适当的表面处理强化,提高钛合金钻杆在实际应用中的耐磨性能。

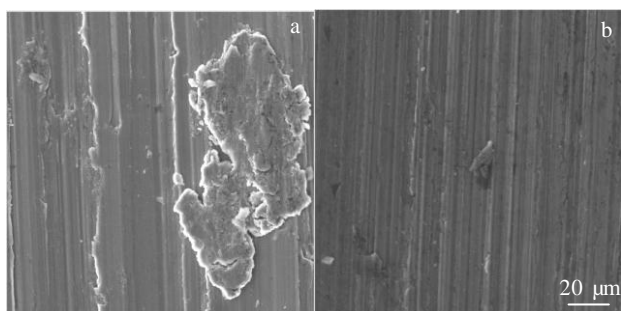


图 13 1#钛合金材料在油基钻井液和水基钻井液摩擦磨损试验后的磨痕形貌

Fig.13 Wear scar morphologies of 1# titanium alloy drill pipe after wear in oil-based (a) and water-based (b) drilling fluid

4 结 论

1)在试验工况下钛合金钻杆耐冲击磨损性能要低于钢制钻杆材料,在中等频率冲击磨损下,钛钻杆材料耐冲击磨损的性能最差。

2)在往复磨损试验工况下,钛合金钻杆材料的摩擦系数均低于钢钻杆的摩擦系数,在同样载荷下SiC对钛合金表面的撕裂和损伤更为严重,当钛合金钻杆与岩石(SiC)对磨时为典型的磨粒磨损机制、与钢铁(GCr15)对磨时为典型的粘着磨损,在所有对磨材料下,2#钛合金钻杆材料在所有载荷下磨损量均显著低于钢制钻杆,具有优异的耐往复磨损性能。

3)在模拟工况摩擦试验中,与不同对磨材料摩擦时钛合金材料在钻井液中的摩擦系数显著低于在空气中,钛合金在水基钻井液条件下和岩石摩擦时的耐磨性能最强、摩擦系数最低,特别是2#钛合金材料,应在使用钛合金钻杆钻井时推荐使用水基钻井液。

4)钛合金钻杆在水基钻井液中发生磨损时,由于

水基钻井液中高水含量使得磨损后钛合金基体更容易形成致密且具有较低摩擦系数的高含TiO₂成分的氧化膜,显著降低了摩擦系数同时提高耐磨损性能。

5)钛合金材料在钻井液工况下的磨损量仍然大于钢制钻杆,需要进一步对钛合金材料进行适当的表面强化处理,提高钛合金钻杆在实际工况应用中的耐磨性能。

参考文献 References

- [1] Gu Tan(谷 坛), Huo Shaoquan(霍绍全), LI Feng(李 峰) *et al.* *Chemical Engineering of Oil and Gas*(石油与天然气化工)[J], 2008, 37(S1): 63
- [2] Ye Dengsheng(叶登胜), Ren Yong(任 勇), Guan Bin(管 彬) *et al.* *Natural Gas Industry*(天然气工业)[J], 2009, 29(3): 77
- [3] Tian Jun(田 军), Yang Haijun(杨海军), Wu Chao(吴 超) *et al.* *Natural Gas Industry*(天然气工业)[J], 2020, 40(1): 11
- [4] Schutz R W, Watkins H B. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1-2): 305
- [5] Liu Qiang(刘 强), Song Shengyin(宋生印), Li Dejun(李德君) *et al.* *Oil Field Equipment*(石油矿场机械)[J], 2014, 43(12): 88
- [6] Liu Qiang(刘 强), Hui Songxiao(惠松骁), Song Shengyin(宋生印) *et al.* *Materials Review*(材料导报)[J], 2019, 33(5): 841
- [7] Du Wei(杜 伟), Li Helin(李鹤林). *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2015, 1(6): 1
- [8] Jackie E, Schutz R W, Edmond I. *2000 IADC/SPE Drilling Conference*[C]. New Orleans: IADC/SPE, 2000: 59 140
- [9] Yuan Wenyi(袁文义), Zhang Quanhai(张泉海). *Xin Jiang Oil Technology*(新疆石油科技)[J], 2006, 16(3): 13
- [10] Hu Xinhe(胡辛禾). *China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2000, 28(6): 75
- [11] Jackie E, Grant P R, Brett Chandler *et al.* *2001 IADC/SPE Drilling Conference*[C]. Amsterdam: IADC/SPE, 2001: 67 722
- [12] Schutz R W, Baxter C F, Boster P L. *Titanium*[J], 2001, 4: 33
- [13] Liu Qiang(刘 强), Hui Songxiao(惠松骁), Wang Pengbo(汪鹏勃) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1427
- [14] Kane R D, Srinivasan S, Craig B *et al.* *Corrosion Conference and Expo 2015*[C]. Dallas: NACE Corrosion, 2015: 9457
- [15] Schutz R W, Lingen E V. *Proceedings of EUROCON'97 Congress*[C]. Paris: Tapir, 1997: 1
- [16] Wang Linqing(王林青), Zhou Yongtao(周永涛), Wang Junjun(王军军) *et al.* *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2019, 39(2): 206
- [17] Liu Yong(刘 勇), Yang Dezhuang(杨德庄), He Shiyu(何世禹) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(1): 128

- [18] Lin Naiming(林乃明), Zou Jiaojuan(邹娟娟), Tian Wei(田伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 4000
- [19] Wu Songbo(吴松波), Cai Zhenbin(蔡振兵), Lin Yu(林禹) *et al. Tribology*(摩擦学报)[J], 2018, 38(4): 383
- [20] Li Xinxing(李新星). *Thesis for Doctorate*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016
- [21] Liu Qiang(刘 强), Zhao Mifeng(赵密封), Zhu Guochuan(祝国川) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(7): 2557
- [22] API Spec 5DP. *Specification for Drill Pipe*[S]. USA: American Petroleum Institute, 2009
- [23] Qu Yadong, Wang Minmin, Lei Liming *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 555: 99
- [24] Patrick A S, Wah C. *Corrosion Conference and Expo 2007*[C]. Dallas: NACE Corrosion, 2007: 7183
- [25] Yu Shurong(俞树荣), Shao Chen(邵 晨), He Yanni(何燕妮) *et al. Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2019, 44(12): 24
- [26] Archard J F, Hirst W. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*[J], 1956, 236(1206): 1364
- [27] Zhao Wei(赵 威), He Ning(何 宁), Li Liang(李 亮). *Tribology*(摩擦学报)[J], 2006, 26(5): 439
- [28] Dugdale I, Cotton J B. *Corrosion Science*[J], 1964, 4: 397
- [29] Shibata T, Zhu Y C. *Corrosion Science*[J], 1995, 37: 253
- [30] Ou J F, Liu M Z, Li W *et al. Applied Surface Science*[J], 2012, 258(10): 4724
- [31] Qin Z, Pang X L, Yan Y *et al. Corrosion Science*[J], 2014, 78: 287
- [32] Qin Z, Pang X L, Qiao L J *et al. Applied Surface Science*[J], 2014, 303: 282
- [33] Macak J M, Tsuchiya H, Berger S *et al. Chemical Physics Letters*[J], 2007, 428(6): 421
- [34] Wang Y M, Lei T Q, Guo L X *et al. Applied Surface Science*[J], 2006, 252: 8113

Comparative Study on Tribology Behavior of Titanium Alloy Drill Pipe Under Simulated Working Conditions in Ultra-deep Well Drilling Conditions

Liu Qiang¹, Xie Junfeng², Zhao Mifeng², Li Ning², Hu Fangting², Zhu Guochuan¹, Chen Jialei², Zhang Juantao¹, Song Shengyin¹, Yin Chengxian¹

(1. State Key Laboratory for Performance and Structural Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

(2. Petroleum Engineering Institute, CNPC Tarim Oil field Co., Ltd, Kuerle 841000, China)

Abstract: Titanium alloy has become a promising candidate material for oil country tubular goods (OCTG) and offshore components in rigorous service environment, owing to its high specific strength, low density, low elastic modulus, excellent toughness, fatigue and corrosion resistance. However, there is a lack of research on the friction and wear properties of titanium alloy drill pipes under ultra-deep drilling conditions, and the comparison research on the tribology performance and mechanism of titanium alloy drill pipes and steel drill pipes is few. In this work, the friction and wear properties of three kinds of titanium alloy drill pipes and steel drill pipes were compared and analyzed through hardness test, impact wear test, reciprocating friction test, simulated condition wear test and microscopic analysis in simulating ultra-deep well conditions, and the wear mechanism of titanium alloy drill pipes under drilling conditions were also investigated. The results show that the impact and wear resistance of titanium alloy drill pipes is lower than that of steel drill pipe materials, especially the impact resistance of titanium alloy drill pipe materials under medium-frequency impact. In the air reciprocating wear test, the friction coefficient of titanium alloy drill pipe is lower than that of steel drill pipe. When titanium alloy drill pipe is worn against rock, it is a typical abrasive wear mechanism, and it is typical adhesive wear when it is worn against steel pipe. Under the simulated working condition of drilling fluid, the friction coefficient of titanium alloy drill pipe is significantly lower than that in air, and the friction coefficient of titanium alloy is the lowest when friction with rock under water-based drilling fluid conditions, and the wear resistance is the strongest, which is due to the fact that it is easier to form a dense passivation film with a lower friction coefficient on the surface of the titanium alloy in the water-based drilling fluid. It is recommended to use water-based drilling fluid when drilling with titanium alloy drill pipes. However, because the wear of titanium alloy drill pipes under working conditions is still not as good as that of steel drill pipes, the next step is to conduct surface treatment on titanium alloy drill pipes to improve the wear resistance of titanium alloys.

Key words: ultra-deep well drilling; titanium alloy drill pipe; steel drill pipe; simulated working conditions; drilling fluid; friction and wear performance; tribology mechanism; passivation film

Corresponding author: Liu Qiang, Ph. D., Professor Senior Engineer, State Key Laboratory for Performance and Structural Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, P. R. China, Tel: 0086-29-81887814, E-mail: liuqiang030@cnpc.com.cn