

新型轻质铝合金钻杆研究现状与展望

刘政涛^{1,2}, 宋刚^{2,3*}, 王瑜¹, 梁健², 牛庆磊^{2,3},

张欣^{2,3}, 陈晓君^{1,2,3}, 赵明^{2,3}, 韩均中^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 3. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 天津 300399)

摘要:随着深部钻探需求提升,现有的钢钻杆、钛合金钻杆和碳纤维钻杆均难以全面满足轻量化、耐高温、低成本与高可靠性需求。铝合金钻杆以其低密度、高比强度、成本相对较低等优势,展现出巨大潜力。本文系统阐述了铝合金钻杆在深井高温高压及复杂载荷环境下的失效机理,涵盖材料微观组织演变、连接结构热应力失配及表面磨损-腐蚀协同效应等方面。梳理了关键技术研究进展:材料方面,通过稀土元素添加、颗粒复合与强化相优化等,提升高温性能与强度;结构方面,采用冷装配、双锥面螺纹设计等降低应力集中;表面强化方面,以微弧氧化为核心,结合激光熔覆、复合处理技术提升耐磨耐蚀性。进一步剖析了高温强度衰减与连接可靠性不足等瓶颈,并对新材料开发、智能化管理及仿生智能涂层等未来研究方向进行了展望,旨在为铝合金钻杆在超深井钻探中的工程化应用与未来发展提供理论依据与技术指导。

关键词:铝合金钻杆;失效机理;材料优化;结构优化;表面强化;微弧氧化;高温性能;深部钻探

中图分类号:P634.4⁺2;TE921⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)03-0024-10

Research status and prospects of novel lightweight aluminum alloy drill pipe

LIU Zhengtao^{1,2}, SONG Gang^{2,3*}, WANG Yu¹, LIANG Jian², NIU Qinglei^{2,3},

ZHANG Xin^{2,3}, CHEN Xiaojun^{1,2,3}, ZHAO Ming^{2,3}, HAN Junzhong^{1,2}

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China*; 3. *Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300399, China*)

Abstract: With increasing demand for deep drilling, existing steel drill pipes, titanium alloy drill pipes, and carbon fiber drill pipes cannot fully satisfy the demands for lightweight, high-temperature resistance, low cost, and high reliability. Aluminum alloy drill pipes have shown great potential due to their advantages such as low density, high specific strength, and relatively low cost. This paper systematically elaborates on failure mechanisms of aluminum alloy drill pipes under high-temperature, high-pressure, and complex load environments in deep wells, including the evolution of material microstructure, thermal stress mismatch of the connection structure, and the wear-corrosion synergistic effect on the surface. The research progress of key technologies is summarized: in terms of materials, high-temperature performance and strength are improved through the addition of rare earth elements, particle reinforcement, and optimization of strengthening phases; in terms of structure, cold assembly, double-taper thread design, and other methods are adopted to reduce stress concentration; in terms of surface strengthening, micro-arc oxidation (MAO) is taken as the core, combined with laser cladding and composite treatment technologies to enhance wear and corrosion

收稿日期:2025-09-26; 修回日期:2025-11-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.03.003

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号:DD20230400402)

作者简介:刘政涛,男,汉族,2002年生,硕士研究生,机械工程专业,研究方向为地质工程装备、地质钻探、海工装备等,天津市东丽区锦鲤道23号,2102240016@email.cugb.edu.cn。

通信作者:宋刚,男,汉族,1971年生,正高级工程师,探矿工程专业,博士,主要从事地质钻探、大洋钻探、海域天然气水合物钻探工艺器具、海工装备等方面的研究工作,天津市东丽区锦鲤道23号,379012534@qq.com。

引用格式:刘政涛,宋刚,王瑜,等.新型轻质铝合金钻杆研究现状与展望[J].钻探工程,2026,53(3):24-33.

LIU Zhengtao, SONG Gang, WANG Yu, et al. Research status and prospects of novel lightweight aluminum alloy drill pipe [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 24-33.

resistance. Furthermore, bottlenecks such as high-temperature strength degradation and insufficient connection reliability are analyzed, and future research directions including the development of new materials, intelligent management, and biomimetic smart coatings are outlined. This study aims to provide a theoretical basis and technical guidance for the engineering application and future development of aluminum alloy drill pipes in ultra-deep drilling.

Key words: aluminum alloy drill pipe; failure mechanism; material optimization; structural optimization; surface strengthening; micro-arc oxidation; high-temperature performance; deep drilling

0 引言

随着地球科学探索不断向深部进军,深井与超深井钻探已成为揭示地壳结构、探测资源分布、研究地球演化的重要手段。这些钻井如同深入地球内部的望远镜,为人类直接获取地下深部实物样本与数据提供了不可替代的通道。在这一复杂系统中,钻杆作为钻井工程的“脊柱”,不仅承担着传递扭矩、输送钻井液的核心作用,更直接决定了钻探深度、效率与安全,其性能优劣直接影响钻探工程的成败。

在深井钻探领域,常用钢钻杆主要问题在于自身质量较大,随井深增加,自重 在井口处产生的轴向拉力不断累积,进而可能接近材料的极限抗拉强度。以常用 $\varnothing 127\text{ mm}\times 9.19\text{ mm}$ 的 V150 钢钻杆为例,其极限破断载荷约为 3167.4 kN。将该强度作为约束条件并依据单位长度重量计算可得,当井深为 11000 m 时自重 在井口处产生的轴向拉力约为 3131.5 kN,已逼近其极限承载能力。由此判定该

类钢钻杆在接近 11000 m 深度时即将达到受拉极限,所以纯钢钻杆难以满足工程需求。在高温高压环境下,钢钻杆的抗拉强度显著下降,腐蚀速率明显加快,易发生疲劳破坏和腐蚀损坏。这不仅增加了钻探的安全风险,还提高了钻探成本和维护难度^[1]。

钛合金钻杆强度高,耐腐蚀、耐高温性能好,但成本高、加工工艺复杂,限制了其广泛应用。碳纤维钻杆质量轻、强度高、耐腐蚀,但其连接结构对工艺和服役条件要求较高^[2]。铝合金钻杆凭借其轻量化和高强度的特性,成为替代钢钻杆的理想选择。铝合金的密度仅为钢材的 1/3 左右,能显著减轻钻具质量,降低钻杆自身重力产生的轴向拉力,避免因重力过大导致钻杆拉断。其强度和韧性可满足深井钻探的性能要求,耐腐蚀性能略强于钢钻杆(见表 1),成本低于钛合金钻杆和碳纤维钻杆。相比之下,铝合金钻杆在成本、加工工艺和性能之间取得了较好的平衡,具有更广阔的应用前景^[3]。

表 1 不同类型钻杆性能比较
Table 1 Performance comparison of different types of drill pipes

钻杆类型	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	耐高温性能/℃	对比钢钻杆价格 ^[4]	极限深度/m ^[5]	耐腐蚀性 ^[6]
钢钻杆	7.85	1134	500		11965	弱
钛合金钻杆	4.54		600~700	7~10 倍	28895	强
碳纤维钻杆 ^[3]	1.80	1500	150~200	高(具体不详)		强
铝合金钻杆	2.78~2.80	410~530	120~220	1.5~2.5 倍	43562	中

本文在分析新型轻质铝合金钻杆失效机理的基础上,开展其需求分析,同时深入探讨关键技术研究进展,总结并展望其未来发展方向。研究重点聚焦于铝合金钻杆在高温高压及复杂载荷环境下的磨损-腐蚀协同失效机制,从三大核心维度总结关键技术突破。围绕高强耐热 7 系与 2 系铝合金性能改进,螺纹接头抗疲劳设计与过盈装配工艺的优化升级,表面强化技术,包括微弧氧化、激光熔覆等先进工艺的应用与突破,梳理现有研究成果,剖析

技术瓶颈,以期为铝合金钻杆行业的快速发展提供参考与指导。

1 新型轻质铝合金钻杆失效机理分析

1.1 材料层面失效机理

材料层面的失效主要是铝基本体及其微观组织在外部环境作用下的响应。在地质因素方面,井底高温环境是导致材料性能退化的关键。万米井底理论温度超过 300 ℃,高温会引发过时效现象,导致纳米尺度的强化相(如 GP 区、 η' 相)粗化或回溶,

从而失去对位错运动的阻碍能力。铝合金钻杆在200℃下热暴露500 h后,其抗拉强度和屈服强度相较于时效态分别降低55.6%和67.3%。在高温和持续拉应力的共同作用下,会引发蠕变变形,即使应力低于屈服强度,长时间的累积也足以导致钻杆过度伸长或断裂^[7]。在工程因素方面,铝合金钻杆特有的生产工艺,如挤压成形、热处理(固溶时效)及矫直工艺,对其最终性能有决定性影响。如果这些工艺控制不当,会直接导致材料内部出现缺陷。例如挤压成形工艺若控制不当,容易导致钻杆横向性能变差,使其在承受复杂应力时更易开裂^[8]。固溶时效处理的参数设定直接影响着强化相的析出行为和材料的最终强度、韧性及耐腐蚀性。钻井作业中的交变载荷会引发疲劳损伤,高温环境会降低材料的疲劳强度,使得微裂纹更容易在腐蚀坑或材料缺陷处萌生和扩展。

1.2 结构层面失效机理

结构层面的失效主要源于钻杆及其连接部件的几何形状、配合关系在内外因素作用下的失稳。在地质因素方面,地温升高会导致热应力出现。由于铝合金的热膨胀系数远高于钢制接头,当整个钻柱在井下升温时,会在过盈配合界面产生巨大的附加热应力。此应力叠加在装配应力上,可能导致接头抱死、松动,或使铝合金螺纹牙发生塑性塌陷。在工程因素方面,钻柱涡动是深井作业中常见的失稳现象。转速、摩擦系数和钻柱与井壁的间隙都会影响涡动状态。当反涡动形成后,钻柱的速度、加速度、接触力和摩擦力都会大幅增加,从而显著加剧磨损和疲劳损伤^[9]。在连接工艺上,目前广泛应用的热组装技术若控制不当,过程中的高温会降低铝合金钻杆与钢接头连接所能承受的最大过盈量,并导致其抗拉强度和抗扭强度下降,螺纹根部等几何突变处出现应力集中,在交变载荷下极易成为疲劳裂纹源^[10]。

1.3 表面层面失效机理

表面层面的失效是钻杆与外部介质(钻井液、井壁)直接相互作用的结果,表现为材料的加速损耗。在地质因素方面,井壁岩石的研磨性是外表面磨损的主要诱因之一。高研磨性地层会显著加速钻杆外壁的磨粒磨损。地层流体的腐蚀性会先导致表面损伤,为后续的机械磨损奠定基础^[11]。在工程因素方面,钻井液冲蚀是钻杆内壁减薄的主要原

因^[12]。钻杆杆体与钢接头连接处存在凸起台阶,流经的钻井液会产生强烈紊流。紊流中携带的固相颗粒会反复冲击金属表面,通过切削作用和微射流冲击造成材料剥离。钻杆材料的强度越低,冲蚀磨损的速度越快。高温下磨损与腐蚀会产生协同效应,螺纹连接处的微动磨损会不断刮擦去除表面保护膜,暴露出新鲜的金属基体,导致腐蚀加剧;而腐蚀又会削弱材料表面,形成疏松的腐蚀产物,这些产物易被磨去,从而加速磨损。这种循环在高温下尤为显著^[13]。

2 新型轻质铝合金钻杆关键技术需求分析

2.1 钻杆材料性能需求分析

在深井钻探中,井底高温会极大削弱铝合金的强度,而钻柱自身的巨大重量又要求材料必须在此高温下保持足够的比强度,以克服其被自重拉断。为解决上述问题,需基于钻柱组合设计准则,从工程技术需求出发,采用“上部高强、中部均衡、下部耐热”的差异化选材原则,以发挥不同井段铝合金材料的性能优势,重点聚焦7系和2系铝合金。7系铝合金虽强度高,但高温易软化,需通过合金化设计或热处理改进提升其高温稳定性;2系铝合金高温屈服强度高、耐蚀性佳,但需深入研究特定钻井液环境下的耐蚀机制,以充分挖掘其应用潜力。

石油天然气领域制定了铝合金钻杆国际标准^[14],要求材料符合表2的力学性能,并进行金相检测和化学分析以控制残余铅含量。铝合金钻杆通常分为4组,以满足不同井段的环境需求,第I组无特殊要求,第II组强度高,第III组高温力学性能好,第IV组抗腐蚀性能高。铝合金钻杆材质选择至关重要,需综合考虑高温力学性能、耐蚀性、强度匹配及标准符合性,以保障超深井钻探的安全与效率。

2.2 钻杆结构优化需求分析

目前铝合金钻杆主要由中间的铝合金杆体和两端的钢质公母接头组成(图1)。杆体与接头通常采用过盈嵌装的方式连接^[15]。

油气钻井用的铝合金钻杆根据结构类型可分为常规型、带内加厚端型、带外加厚端型以及带增厚保护器型(图2)。铝合金杆体实质上是一种变截面管材,其端部进行加厚设计,旨在确保加工螺纹后仍具有足够的截面积以维持强度;而中部的加厚处理则用于提升杆体的耐磨性并延长钻杆使用寿命。

表 2 铝合金钻杆材料需求

Table 2 Material requirements for aluminum alloy drill pipe

合金系列材料组	最小屈服强度/MPa	最小抗拉强度/MPa	最小伸长率/%	最高工作温度/℃	3.5% 氯化钠溶液中最大腐蚀速率/[g·(m ² ·h) ⁻¹]
I (Al-Cu-Mg)	325	460	12	160	
II (Al-Zn-Mg)	480	530	7	120	
III (Al-Cu-Mg-Si-Fe)	340	410	8	220	
IV (Al-Cu-Mg)	350	400	9	160	0.08

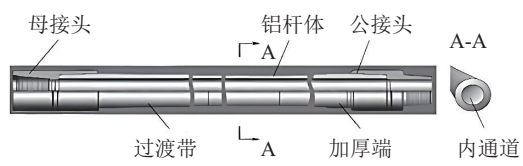


图 1 铝合金钻杆结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the aluminum alloy drill pipe structure

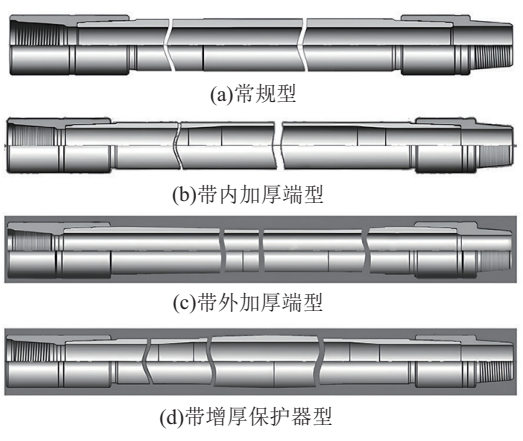


图 2 铝合金钻杆类型

Fig.2 Aluminum alloy drill pipe type diagram

结构设计以在保证全井筒钻柱安全系数统一的前提下实现轻量化与经济性平衡为目标,关键优化螺纹接头抗应力集中设计,通过改进螺纹参数降低应力集中系数、提升抗疲劳性;优化加厚过渡带结构使应力分布均匀、减少裂纹萌生。此外,采用热装配与液氮冷装配工艺实现过盈配合,增强连接强度与抗疲劳性能,满足深井、超深井钻探需求^[16]。

2.3 钻杆表面强化需求分析

深井高温高压工况下,铝合金钻杆面临严重腐蚀与磨损挑战,直接影响其使用寿命及钻探效率。具体表现为自然形成的氧化膜多孔、不均匀且稳定性差,易失效;钻井液中有有机或无机添加剂在高温高压下形成强腐蚀介质,引发化学/电偶腐蚀;钻柱

自重产生的拉应力使晶界成为腐蚀通道,与井壁摩擦导致摩擦腐蚀或点蚀,复杂工况下甚至引发剥落腐蚀(图 3)。腐蚀过程受环境因素(温度、压力、介质成分)及材料表面组分、相组成、微观组织等多重因素影响^[17-18]。

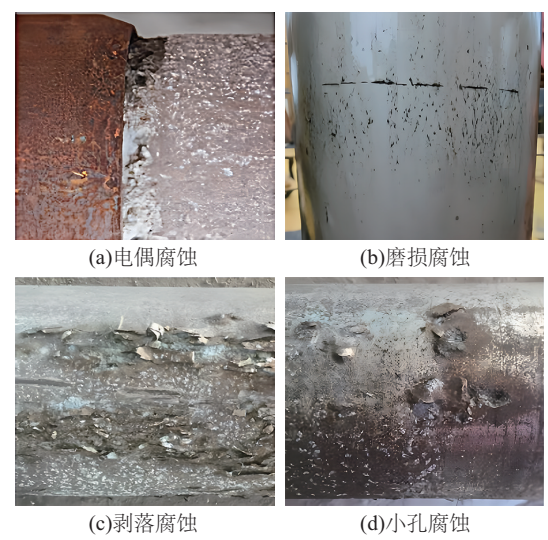


图 3 铝合金钻杆典型腐蚀照片

Fig.3 Photograph of typical corrosion on aluminum alloy drill pipe

为解决上述问题,需通过表面强化技术提升钻杆表面综合性能。微弧氧化技术可在钻杆表面生成硬度高、耐腐蚀性强的陶瓷膜,有效隔绝钻井液与基体接触,提升表面性能;激光熔覆技术可熔覆特殊合金涂层,针对性提升耐磨与耐蚀性,并可根据工况需求调整材料成分和工艺参数;复合表面处理技术通过融合微弧氧化、激光熔覆等多种工艺,进一步增强钻杆表面的综合性能,保障其在极端工况下的长期稳定使用^[19-20]。

3 新型轻质铝合金钻杆材料研究现状

3.1 钻杆材料组成

铝合金钻杆的材料组成设计需兼顾强度、耐热性、耐腐蚀性及轻量化需求。梁健等^[7,21]在地质钻探铝合金中添加0.05%稀土元素(RE),使疲劳寿命延长30%,其后续研究又发现Al-Cu-Mg系合金因形成Al₂Cu强化相,在200℃高温下仍能保持高屈服强度,且耐酸性腐蚀性能较钢钻杆显著提升;王一唱等^[22]证实7系铝合金通过Mg、Zn协同作用实现超高强度,但需攻克高温软化难题;Belkacem等^[23]则通过优化2024铝合金中Mg₂Si相分布,大幅提升了抗裂纹扩展能力;颜芳霞等^[24]发现在7075铝合金中添加锂可细化晶粒并提高再结晶温度,有效延缓高温软化;黄世寅等^[25]通过引入SiC颗粒形成复合强化相,使2A12铝合金的拉伸强度与耐磨性同步提升;Kondrat'ev等^[26]证实D16T铝合金因高铜含量在疲劳寿命上优于钢钻杆,为高性能铝合金设计提供了关键依据。

3.2 钻杆成形工艺

铝合金钻杆成形工艺历经多阶段发展,雷诺公司最早提出挤压成形工艺制造双端加厚铝合金钻杆,以工序少、成本低为优势奠定技术基础,但受限于技术,加厚段精度不足^[27];俄罗斯随后首创“润滑挤压筒-移动挤压针”半连续挤压法,通过优化模具结构与润滑剂实现双端内加厚成形,显著减少缺陷并提升结构完整性;Mao等^[28]针对轴向变截面难题提出一次性热挤压成形工艺,通过模具与流动控制优化实现管体-加厚段同步成形,大幅降低工序成本,采用55MN双动挤压机对7075铝合金管材进行挤压试验,获得了表面质量良好的单孔变截面管体;Negendank等^[29]的穿孔针后退挤压技术虽能分段成形,但因非恒速运动导致形成过渡段且表面质量欠佳;Kondrat'ev等^[30]系统研究了铝合金钻杆关键工艺参数对性能的影响,优化了D16T/1953T1热装配时间和温度参数,明确了组织性能调控机制,同时对比2024/1953合金工艺,证实2024在强度与耐蚀性方面的优势^[31],建立了热处理温时参数与组织演变的定量关系,揭示了工艺对服役性能的影响规律^[32]。

3.3 钻杆装配工艺

Santus等^[33]通过工艺对比确定在合理过盈量和相同几何条件下,冷装配为最优方案,在提升抗扭

强度的同时避免高温损伤铝合金微观结构;俄罗斯团队采用梯形螺纹改进牙型设计,并增设支撑端面与锥形配合面,结合高温装配实现过盈配合,使抗疲劳强度提升60%~80%;王小红等^[34]通过优化热处理工艺提升铝合金基体强度,为连接技术奠定材料基础;王勇等^[35]结合解析与有限元分析提出0.50~0.54 mm过盈量设计窗口,显著提升复杂载荷下的连接稳定性;刘宝昌等^[36]通过液氮冷组装试验确定0.15 mm为最优过盈量,在保障连接强度前提下解决螺纹副失效问题。

3.4 钻杆材料技术评述

针对深井钻探的复杂工况,在材料方面建议依据井下温度与载荷条件进行差异化选材。对于井底温度超过150℃的深层作业,应优先选用Al-Cu-Mg系合金,其稳定的Al₂Cu相可有效保持高温强度与耐腐蚀性;在常温至中温的高载荷井段,可选用Al-Zn-Mg-Cu系合金,以发挥其超高比强度的优势,但需重视其高温软化与应力腐蚀敏感性问题。在成形工艺方面推荐采用“润滑挤压筒-移动挤压针”或一次性热挤压成形等先进工艺,通过精确控制金属流动与温度-应变场,保障变截面过渡区的结构完整性。在装配连接方面宜推广采用冷装配技术并结合梯形丝扣、支撑端面与精准过盈量设计,可在避免铝材热损伤的同时,系统改善应力分布,显著提升接头的抗疲劳与防松性能。

4 新型轻质铝合金钻杆的结构优化现状

4.1 钻杆连接结构设计

石油天然气领域针对铝合金钻杆制定的技术标准^[14]明确了其管体类型规范,涵盖外加厚端、内加厚端及带加厚保护器3种结构形式,并对长度、管体尺寸、接头及螺纹参数等关键参数给出了具体要求。该标准允许制造方与采购方通过协议约定采用其他尺寸规格或设计构型,但未明确提供钻杆结构设计的具体方法或参考依据。在连接可靠性优化方面,虽未直接涉及设计理论来源,但行业实践表明,通过非线性有限元分析等数值方法对螺纹副结构参数(如螺距、牙型高度等)进行精细化调整,已成为提升铝合金钻杆与钢接头连接性能的重要技术路径。Santus^[37]发现铝合金钻杆与钢接头连接处因微动摩擦导致疲劳强度降低了37%,基于应力-滑移图谱提出优化接触面设计,以抑制微动损

伤,为连接结构抗疲劳设计提供理论依据,同时对热装、冷装工艺,指出冷装配抗扭强度更高且可避免高温对铝合金微观结构的潜在损伤,但在复合材料中使用可能影响冷装配扭转强度分散性;Tikhonov等^[38]通过有限元分析热装应力对钢铝螺纹连接的影响,计算多轴载荷下的应力集中系数,结合谐振与四点弯曲试验验证优化方案降低连接区应力集中;孙建华等^[39]面向工程应用提出综合性结构改进方案,包括端部镦粗增厚、双锥面螺纹设计并增设中部防磨钢套以提高耐磨性,并通过野外试验验证了连接可靠性;房精哲等^[10]分析接头内表面交界处冲蚀失效机理,提出优化结构平滑过渡设计与采用高强度铝合金基体来减少冲蚀磨损。

4.2 钻杆管体结构设计

管体结构设计需兼顾结构强度、环境耐腐蚀性及轻量化需求,以适配深部钻探、极地作业等多场景复杂工况。吕拴录等^[40]基于含H₂S腐蚀井、超深井、复杂结构井等典型场景,明确提出钻杆防腐蚀性能强化、整体减重优化、提升套管下入深度的核心性能需求,为管体结构的场景化设计提供关键依据;王永夏等^[41]通过 $\phi 127$ mm规格铝合金钻杆的有限元仿真分析,模拟多载荷耦合作用下管体的峰值应力分布规律,进一步提出针对性的安全系数设计准则,为钻杆结构可靠性评估奠定扎实的数值基础;刘宝昌等^[42]针对深井超高压工况采用外径147 mm、壁厚13 mm的内加厚设计优化管体结构,试验证实7075/2024铝合金钻杆承压能力超过理论计算值20%,符合ISO深井安全标准;白皓亮等^[43]面向极地需求设计7075铝合金外管与40CrMn钢内管双壁结构,采用分体式螺纹连接与限位台肩,−50℃下屈服强度提升5.3%,满足极地低温高强需求。

4.3 结构优化技术评述

在结构优化方面建议从连接结构和管体设计两个维度系统推进。在连接结构设计中应优先采

用非线性有限元分析技术对螺纹副进行精细化设计,通过优化螺距、牙型角等参数降低应力集中;同时建议采用冷装配工艺配合双锥面螺纹设计,在避免热损伤的同时显著提升抗疲劳性能。在管体设计方面需基于不同井况(如含H₂S环境、超深井、极地钻井)进行差异化设计,对于常规深井可采用内加厚结构并适当增加壁厚以满足承压需求;对于特殊工况可考虑采用双壁复合结构或增设耐磨带等创新设计。通过这种系统性的结构优化路径可显著提升钻杆在复杂工况下的服役可靠性,延长使用寿命。

5 新型轻质铝合金钻杆表面强化技术现状

5.1 微弧氧化技术

微弧氧化(MAO)技术是解决铝合金钻杆-钢接头电偶腐蚀的核心手段。王艳秋等^[44]的研究表明MAO处理的7075铝合金钻杆表面陶瓷膜磨损性能较基体提升400倍,耐盐雾腐蚀时间超2000 h,性能显著优于硬质阳极氧化;Gu等^[45]对钻杆材料AA2024引入超声冷锻预处理,通过纳米晶层细化涂层孔隙,协同提升耐蚀性与显微硬度;王平等^[46]则通过在电解液中添加SiC微粉以增加氧化膜厚度并优化形貌,同步提升硬度和耐蚀性;Gelfgat等^[47]在螺纹区涂覆MAO陶瓷屏障涂层成功阻断电偶腐蚀,并实现工业化推广;Muhaffel等^[48]针对高温工况在电解液中添加ZrO₂颗粒,使7075铝合金在300℃下的寿命显著延长;Wen等^[49]通过微弧氧化在2024铝合金表面制备7 μm致密氧化膜,显著降低腐蚀电位及电流密度。

5.2 激光熔覆技术

张弛等^[50]利用激光熔覆技术在铝合金钻杆表面制备Ni基熔覆层,显著改善耐磨性与微观组织结构;林兆勇等^[51]采用激光冲击强化技术处理7075铝合金钻杆,通过残余压应力和晶粒细化抑制裂纹扩展,显著改善其表面耐磨性能(见表3)。

表3 激光熔覆处理的7075钻杆材料磨损试验结果

Table 3 Wear test results of laser cladding treated 7075 drill pipe material

试样类型	磨损前质量/g	磨损前直径/mm	磨损后质量/g	磨损后直径/mm	质量损失/g	直径减少/mm
未处理	1309.9	147.10	1273.6	145.40	36.3	1.70
全面	1295.2	146.25	1291.6	146.20	3.6	0.05
网格状	1289.1	146.25	1286.0	146.05	3.1	0.20
锯齿状	1303.1	146.50	1299.6	146.30	3.5	0.20

5.3 复合表面处理技术

通过多元复合表面处理工艺显著提升铝合金钻杆的综合性能。Ma等^[52]、Gu等^[45]指出纳米表面纳米化复合可有效提高微弧氧化陶瓷层的致密性,处理后的孔径集中在 $0.4\text{ }\mu\text{m}$,孔隙率为6.5%,表现出良好的热震性及抗腐蚀性等;李重阳等^[53]采用微弧氧化结合稀土铈盐封孔处理,使7A85铝合金阻抗值提高10倍,并同步增强耐磨性,该技术适用于严苛工况;孙塬等^[54]创新使用电镀Ni/氧化石墨烯(GO)复合涂层,显著提升2024铝合金阻抗性并降低腐蚀电流密度。面向特殊场景,马少明等^[55]融合表面纳米化与MAO形成梯度陶瓷膜,彻底消除摩擦火花,以保障煤矿井下作业安全;吴琰杰等^[56]则在MAO电解液中添加石墨烯,使B19铝合金表面硬度提升6倍,磨损量减少75%(见表4);梁健等^[57-59]对表面复合处理技术研究较深,首先使用超声表面滚压(USRP)优化2219铝合金高温摩擦性能,MAO/USRP协同处理较单一技术磨损量更低,其次用MAO陶瓷涂层有效抑制2024铝合金与钢接头的电偶腐蚀,最后结合超声波冷锻与MAO构建的复合防护层,使300 MPa拉应力下腐蚀速率降至 10^{-2} mm/a 。

表4 添加石墨烯前后 MAO 层的性能对比
Table 4 Property comparison of MAO layers
before and after graphene treatment

元 素	粗糙度/ μm	硬度/ HV	磨损量/ mg	平均摩 擦系数
B19 基底	1.33	78	10.86	0.43
未添加石墨烯	3.96	351	2.65	0.78
添加石墨烯	2.85	462	1.82	0.72

5.4 表面强化技术评述

当前铝合金钻杆表面强化已形成以微弧氧化为核心,并向复合技术发展的技术体系。MAO技术因其原位生长的陶瓷层能同步显著提升耐磨性和耐腐蚀性,并可有效阻断电偶腐蚀回路,成为目前工程应用的首选。对于螺纹连接等关键部位,推荐采用超声波冲击结合MAO等复合工艺,通过结构功能一体化设计,进一步提升结合强度与抗疲劳性能。而激光熔覆技术则更适用于磨损极为剧烈的局部区域强化。

6 研究挑战与展望

6.1 当前研究面临的挑战

现有7系和2系铝合金在高于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的井下环境中会出现明显的强化相粗化现象,导致强度指标大幅下降。在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中长期暴露后,部分铝合金材料的抗拉强度衰减幅度可达50%以上,同时抗蠕变性能显著恶化,难以满足万米以深超高温井段对材料持久强度的严格要求。铝合金与钢质接头的热膨胀系数差异导致在温度变化时产生显著的附加热应力,这一效应与螺纹连接部位固有的应力集中相互叠加,使得连接区域成为钻柱系统中最薄弱的环节。表面防护技术在极端工况下的适应性仍显不足。现有的微弧氧化等表面强化技术在超高温、高流速含岩屑钻井液冲蚀环境,其长期服役稳定性面临严峻考验。特别是涂层发生局部损伤后,缺乏有效的自修复机制,难以实现长效防护。

6.2 未来研究方向展望

(1)钻杆新材料及粉末冶金工艺研究。在现有7系和2系铝合金钻杆基础上,通过熔炼调控方法添加锆(Zr)和钪(Sc)等过渡元素及铒(Er)和钇(Y)等稀土元素,进一步提升铝合金综合性能。同时开发新型耐高温耐腐蚀铝合金系列,重点应对高温强度衰减问题,有望显著提升钻杆在深部、高腐蚀地层等苛刻环境中的可靠性与使用寿命。铝合金坯料可采用粉末冶金工艺,通过活化烧结技术将铝粉表面氧化膜转化为弥散强化相,可有效提高钻杆的抗拉强度与屈服强度。该工艺具备显著细化晶粒的优势,特别适用于深井钻探场景,结合智能烧结控制技术,未来有望形成一种可替代部分钢制钻杆的低碳、高性能解决方案。

(2)钻杆智能化和数字化管理研究。未来可研发铝合金钻杆服役状态及健康状况跟踪与监控系统,在钻杆表面镌刻二维码进行身份识别,构建钻杆全生命周期参数数据库,实现数字化管理。此外植入光纤光栅传感器实时采集应变、振动等钻井数据,可实现对单根钻杆的剩余寿命精确预测并优化钻柱组合,最终提升深井作业的安全性与运行效率。

(3)钻杆融合仿生与智能涂层技术研究。在表面强化方面可模仿贝壳珍珠层结构,通过制备羟基磷灰石/碳酸钙多层陶瓷涂层,使钻杆具备自修复能力,增强抗腐蚀性能。未来应进一步加强仿生结

构设计与复合涂层工艺的结合,提升钻杆在高转速、高磨损工况下的表面耐久性与环境适应性。

参考文献(References):

- [1] 梁健,张金昌,尹浩,等. 钻井利器故事之“铝合金钻杆”[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):1-3.
LIANG Jian, ZHANG Jinchang, YIN Hao, et al. An efficient drilling tool aluminum alloy drill pipe[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):1-3.
- [2] 宋杨,祁永顺,李勇. 科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺研究[J]. 中国设备工程,2025(6):109-111.
SONG Yang, QI Yongshun, LI Yong. Research on optimized design and corrosion protection technology of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep wells[J]. China Plant Engineering, 2025(6):109-111.
- [3] 兰凯,侯树刚,闫光庆,等. 国外轻质高强度钻杆研究与应用[J]. 石油机械,2010,38(4):77-81.
LAN Kai, HOU Shugang, YAN Guangqing, et al. Research and application of foreign lightweight high-strength drill pipe[J]. China Petroleum Machinery, 2010,38(4):77-81.
- [4] Jellison M J, Chandler R B, Payne M, et al. Ultradeep drilling pushes drillstring technology innovations[J]. SPE Drilling & Completion, 2008,23(2):190-200.
- [5] 彭政德,戚亚东,彭先波,等. 超深井修井作业减载技术研究[J]. 科技和产业,2021,21(9):43-47.
PENG Zhengde, QI Yadong, PENG Xianbo, et al. Research on lightweight technology of ultra-deep well workover[J]. Science Technology and Industry, 2021,21(9):43-47.
- [6] 王济生,陈卫东,孔永平. 铝合金钻杆在腐蚀环境下的力学性能[J]. 矿冶,2022,31(6):70-75.
WANG Jisheng, CHEN Weidong, KONG Yongping. Mechanical properties of aluminum alloy drill pipe in corrosive environment[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(6):70-75.
- [7] 梁健,尹浩,孙建华,等. 高强耐热铝合金钻杆材料优选[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):65-71.
LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Optimization of high strength and heat resistant aluminum alloy drill rod material[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):65-71.
- [8] Liu W Y, Li J Y, Zhong Y, et al. Failure analysis on aluminum alloy drill pipe with pits and parallel transverse cracks[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,131:105809.
- [9] 程锦华. 深井超深井铝合金钻杆柱整体涡动及接头极限承载能力研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
CHENG Jinhua. Study on whirl of aluminum drill string and ultimate strength of joint in deep and ultra deep wells[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [10] 房精哲,闻亚星,戴永国,等. 铝合金钻杆冲蚀磨损原因分析[J]. 石油管材与仪器,2024,10(5):80-84.
FANG Jingzhe, WEN Yaxing, DAI Yongguo, et al. Cause analysis on erosive wear of aluminum alloy drill pipe[J]. Petroleum Instruments, 2024,10(5):80-84.
- [11] 梁健,顾艳红,岳文,等. 科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):60-66.
LIANG Jian, GU Yanhong, YUE Wen, et al. Analysis on corrosion failure of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep well drilling[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):60-66.
- [12] 王姝婧,刘宝昌,李闯,等. 含缓蚀剂钻井液对铝合金钻杆材料的腐蚀影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):42-48.
WANG Shujing, LIU Baochang, LI Chuang, et al. Effect of drilling fluids containing corrosion inhibitors on aluminum alloy drill pipe corrosion[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):42-48.
- [13] 李闯. 铝合金钻杆材料在钻井液中腐蚀行为与机理研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
LI Chuang. Research on corrosion behavior and mechanism of aluminum alloy drill pipe material in drilling fluid[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [14] Deutsches Institut für Normung. Petroleum and natural gas industries-aluminium alloy drill pipe: ISO 15546[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.
- [15] 岳文,梁健,孙建华. 铝合金钻杆制造技术及工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2023.
YUE Wen, LIANG Jian, SUN Jianhua. Manufacturing technology and engineering application of aluminum alloy drill pipe[M]. Beijing: China Machine Press, 2023.
- [16] 王雪琪,刘宝昌,李思奇,等. 组焊工艺对铝合金钻杆性能的影响及自动化组焊装置研制[J]. 地质装备,2021,22(5):9-14.
WANG Xueqi, LIU Baochang, LI Siqi, et al. Influence of assembly process on the performance of aluminum alloy drilling rod and development of automatic assembly device[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021,22(5):9-14.
- [17] Mahindru D V. Protective treatment of aluminum and its alloys[J]. Global Journal of Research in Engineering, 2011,11(3):11-14.
- [18] Bernard J, Chatenet M, Dalard F. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques: Part I. Rotating ring-disk study[J]. Electrochimica Acta, 2006,52(1):86-93.
- [19] 梁健. 科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
LIANG Jian. Optimization design and corrosion protection technology of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep wells[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [20] Fu C J, Liu Y X, Yu M, et al. Effect of Cerium acetate doping on corrosion behavior of Sol-Gel coatings on 2A12 aluminum alloy[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015,10(3):2014-2025.
- [21] 梁健,彭莉,孙建华,等. 地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J]. 地质与勘探,2011,47(2):304-308.
LIANG Jian, PENG Li, SUN Jianhua, et al. Development of the aluminum alloy drill rod and laboratory tests[J]. Geology and Prospecting, 2011,47(2):304-308.
- [22] 王一唱,曹玲飞,吴晓东,等. 石油钻杆用7xxx系铝合金微观组织和性能的研究进展[J]. 材料导报,2019,33(7):1190-1197.

- WANG Yichang, CAO Lingfei, WU Xiaodong, et al. Research progress on microstructure and properties of 7xxx series aluminum alloys for oil drill pipes[J]. Materials Review, 2019, 33(7):1190-1197.
- [23] Belkacem L, Abdelbaki N, Otegui J L, et al. Using a superfinially treated 2024 aluminum alloy drill pipe to delay failure during dynamic loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104:261-273.
- [24] 颜芳霞, 张文成, 张世文, 等. Li对7075铝合金钻杆材料微观组织与摩擦磨损行为的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(9): 78-86.
- FangxiaJIE, ZHANG Wencheng, ZHANG Shiwen, et al. Effects of Li on microstructure and friction and wear behavior of 7075 aluminum alloy for drill pipe[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(9):78-86.
- [25] 黄世寅, 刘宝昌, 孟庆南, 等. SiC与碳纤维强化2A12铝合金钻杆材料的拉伸性能研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(5):76-85.
- HUANG Shiyin, LIU Baochang, MENG Qingnan, et al. Study on tensile properties of 2A12 aluminum alloy drill pipe reinforced with SiC and Carbon fiber[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5):76-85.
- [26] Kondrat'ev Y S, Ermakov S B, Shvetsov V O, et al. Effect of scale factor on cyclic strength of drill pipes from aluminum alloy D16T and steel of strength group G-105[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2025, 67(1/2):141-146.
- [27] Boice E G, Dalrymple R S. The design and performance characteristics of aluminum drill pipe [J]. Journal of Petroleum Technology, 1963, 15(12):1285-1291.
- [28] Mao S J, Sun H Y, Liu C B. Research on one-shot process of hot extrusion forming technology for aluminum alloy drill pipe [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 415:623-626.
- [29] Negendank M, Müller S, Reimers W. Extrusion of aluminum tubes with axially graded wall thickness and mechanical characterization[J]. Procedia CIRP, 2014, 18:3-8.
- [30] Kondrat'ev S Y, Shvetsov O V. Effect of high-temperature heating on the structure and properties of aluminum alloys in the production of drill pipes[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2013, 55(3):191-196.
- [31] Kondrat'ev S Y, Shvetsov O V. Technological and operational features of drill pipes from aluminum alloys 2024 and 1953[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2018, 60(1):32-38.
- [32] Kondrat'ev S Y, Zotov O G, Shvetsov O V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys D16 and 1953 in production and operation of drill pipes[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2014, 55(9):526-532.
- [33] Santus C, Bertini L, Beghini M, et al. Torsional strength comparison between two assembling techniques for aluminium drill pipe to steel tool joint connection [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(2/3):177-186.
- [34] 王小红, 郭俊, 闫静, 等. 铝合金钻杆材料生产工艺及磨损研究进展[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(S1):1-6.
- WANG Xiaohong, GUO Jun, YAN Jing, et al. Research progress on material production process and wear of aluminum alloy drilling rods [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(S1):1-6.
- [35] 王勇, 余荣华, 高连新, 等. 铝合金钻杆接头装配过盈量优选[J]. 石油机械, 2015, 43(5):22-27.
- WANG Yong, YU Ronghua, GAO Lianxin, et al. The optimization of assembly interference of aluminum alloy drill pipe joint[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(5):22-27.
- [36] 刘宝昌, 李闯, 张弛, 等. 冷组装铝合金钻杆螺纹副力学性能测试及失效分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6): 13-17.
- LIU Baochang, LI Chuang, ZHANG Chi, et al. Mechanical performance test and failure analysis on cold assembled aluminum alloy drill pipe thread pair [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):13-17.
- [37] Santus C. Fretting fatigue of aluminum alloy in contact with steel in oil drill pipe connections, modeling to interpret test results [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 30 (4) : 677-688.
- [38] Tikhonov V, Kultsep A, Alikin R, et al. Application, calculation and experimental evaluation of SCF for aluminum drill pipe with steel connector[C]//Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: ASME, 2010:29-35.
- [39] 孙建华, 梁健, 张永勤, 等. 地质钻探高强度铝合金钻杆研制及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(7):5-8, 62.
- SUN Jianhua, LIANG Jian, ZHANG Yongqin, et al. Development of high-strength aluminum alloy drill rod and its application in geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(7):5-8, 62.
- [40] 吕拴录, 骆发前, 周杰, 等. 铝合金钻杆在塔里木油田推广应用前景分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3):74-77.
- ShuanluLYU, LUO Faqian, ZHOU Jie, et al. Prospects of aluminum alloy drill pipe in tarim oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3):74-77.
- [41] 王永夏, 张传涛, 张蓓. 新型钛合金和铝合金钻杆结构安全性分析[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(12):31-33.
- WANG Yongxia, ZHANG Chuantao, ZHANG Bei. New type of Titanium and aluminum alloy drill pipe of finite element analysis[J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(12):31-33.
- [42] 刘宝昌, 孙永辉, 孙友宏, 等. $\Phi 147\text{mm}$ 铝合金钻杆抗内外压强度试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(4): 63-67.
- LIU Baochang, SUN Yonghui, SUN Youhong, et al. Research on internal and external hydrostatic pressure resistance of $\Phi 147\text{mm}$ aluminum alloy drill pipe [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(4): 63-67.
- [43] 白皓亮, 刘宝昌, 王如生, 等. 极地钻探用铝合金双壁钻杆结构强度的有限元分析及试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 75-82.
- BAI Haoliang, LIU Baochang, WANG Rusheng, et al. Finite element analysis and experimental study of aluminum alloy double-wall drill pipe for polar multi-process drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):75-82.
- [44] 王艳秋, 王岳, 陈派明, 等. 7075铝合金微弧氧化涂层的组织结构与耐蚀耐磨性能[J]. 金属学报, 2011, 47(4):455-461.
- WANG Yanqiu, WANG Yue, CHEN Paming, et al. Micro-

- structure, corrosion and wear resistance of microarc oxidation coatings on 7075 Aluminum alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011,47(4):455-461.
- [45] Gu Y H, Ma H J, Yue W, et al. Microstructure and corrosion model of MAO coating on nano grained AA2024 pretreated by ultrasonic cold forging technology[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016,681:120-127.
- [46] 王平,曹文洁,蒲俊,等.SiC微粉添加剂对铝合金钻杆材料微弧氧化膜层性能的影响[J].*表面技术*,2018,47(6):63-67.
- WANG Ping, CAO Wenjie, PU Jun, et al. Effects of SiC micro-particles additives on properties of micro-arc oxidation coatings on aluminum alloy drill pipe material[J]. *Surface Technology*, 2018,47(6):63-67.
- [47] Gelfgat M, Alkhimenko A, Kolesov S. Corrosion and the role of structural Aluminum alloys in the construction of oil and gas wells[J]. *E3S Web of Conferences*, 2019,121:04003.
- [48] Muhaffel F, Baydogan M, Cimenoglu H. A study to enhance the mechanical durability of the MAO coating fabricated on the 7075 Al alloy for wear-related high temperature applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021,409:126843.
- [49] Wen L, Wang Y M, Zhou Y, et al. Corrosion evaluation of microarc oxidation coatings formed on 2024 aluminium alloy[J]. *Corrosion Science*, 2010,52(8):2687-2696.
- [50] 张弛,孙友宏,马少明,等.激光熔覆处理对铝合金钻杆表面耐磨性和组织的影响[C]//第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.乌鲁木齐,2017:273-277.
- ZHANG Chi, SUN Youhong, MA Shaoming, et al. Effect of laser cladding on wear resistance and microstructure of aluminum alloy drill pipe surface[C]//*Proceedings of the 19th National Annual Conference on Exploration Engineering*. Urumqi, 2017: 273-277.
- [51] 林兆勇,陈应烟.激光冲击强化对钻杆7075铝合金疲劳强度的影响[J].*石油和化工设备*,2021,24(10):52-56.
- LIN Zhaoyong, CHEN Yingyan. Effect of laser shock peening on fatigue strength of 7075 aluminum alloy for drill pipe[J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2021,24(10):52-56.
- [52] Ma S N, Suo X B, Qiu J. Fabrication of n-SiO₂ reinforced Al₂O₃ composites coatings on 7A52 aluminium alloy by micro-arc oxidation[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97/101:1463-1466.
- [53] 李重阳,刘道新,叶作彦,等.微弧氧化与稀土铈盐封孔对7A85新型铝合金耐蚀和耐磨性能的影响[J].*机械科学与技术*,2014,33(1):127-132.
- LI Chongyang, LIU Daoxin, YE Zuoyan, et al. Effect of the micro-arc oxidation and cerium salt sealing on the corrosion and wear resistance of new 7A85[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014,33(1):127-132.
- [54] 孙源,罗彦,王旭敏,等.2024-t6铝合金表面电镀镍/氧化石墨烯涂层的耐蚀性能[J].*材料保护*,2019,52(8):15-23,44.
- SUN Yuan, LUO Yan, WANG Xumin, et al. Corrosion resistance of Ni/GO coatings electrodeposited on 2024-t6 aluminium alloy surface[J]. *Materials Protection*, 2019,52(8):15-23,44.
- [55] 马少明.铝合金表面处理技术在煤矿井下钻探装备中的应用前景[J].*煤矿机械*,2023,44(1):153-156.
- MA Shaoming. Application prospect of aluminum alloy surface treatment technology in drilling equipment of underground coal mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023,44(1):153-156.
- [56] 吴琰杰,李晓.石墨烯对B19铝合金钻杆MAO层组织与摩擦性能的影响[J].*真空科学与技术学报*,2021,41(3):248-252.
- WU Yanjie, LI Xiao. Impact of Graphene-Addition on micro arc oxidation and tribological behavior of B19 Al-Alloy[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021,41(3):248-252.
- [57] 梁健,岳文,孙建华,等.超声表面滚压处理铝合金钻杆的高温摩擦学性能[J].*中国表面工程*,2016,29(5):129-137.
- LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. High temperature tribological properties of aluminum alloy drill pipe processed by ultrasonic surface rolling[J]. *CHINA SURFACE ENGINEERING*, 2016,29(5):129-137.
- [58] 梁健,顾艳红,杨远航,等.微弧氧化处理对铝合金钻杆与钢接头电偶腐蚀行为的影响[J].*材料保护*,2018,51(6):110-114,130.
- LIANG Jian, GU Yanhong, YANG Yuanhang, et al. Effects of micro-arc oxidation treatment on galvanic corrosion behavior between aluminum alloy drill pipe and steel joints[J]. *Materials Protection*, 2018,51(6):110-114,130.
- [59] 梁健,李嘉栋,林冰,等.超声波冷锻与微弧氧化处理铝合金钻杆的耐腐蚀性能[J].*表面技术*,2022,51(6):255-266.
- LIANG Jian, LI Jiadong, LIN Bing, et al. Corrosion performance of aluminum alloy drill pipe treated by ultrasonic cold forging and micro arc oxidation[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(6):255-266.

(编辑 王跃伟)