

钛合金钻杆：从组织性能到加工工艺的综合研究

杨柳, 李成*

西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065

摘要： 复杂恶劣的钻井环境对未来的钻井工具提出了更高的要求 and 标准。与其他钻杆相比, 钛合金钻杆具有比强度高、密度低、耐腐蚀、抗疲劳、非磁性等一系列特点, 已成为非常规深井、深海等恶劣环境下油气钻井的首选材料。本文综述了钛合金钻杆的发展现状、显微组织、力学性能、耐腐蚀性、耐磨性能、抗疲劳性能, 并对其热处理方式及加工工艺进行了概述。结合钛合金钻杆的应用和发展, 对钛合金钻杆在深井、超深井等非常规钻井作业中的发展和应用前景进行了展望, 为促进钛合金钻头在油田的应用和发展提供支持。

关键词： 恶劣环境; 钻井工具; 钛合金钻杆; 耐蚀抗疲劳; 热处理

Titanium Alloy Drill Pipes: A Comprehensive Study From Microstructure and Properties To Processing Technology

Yang Liu, Li Cheng*

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract: The complex and harsh drilling environment poses higher requirements and standards for future drilling tools. Compared with other drill pipes, titanium alloy drill pipes have a series of characteristics such as high specific strength, low density, corrosion resistance, fatigue resistance and non-magnetism, and have become the preferred material for oil and gas drilling in unconventional deep Wells, deep seas and other harsh environments. This paper reviews the development status, microstructure, mechanical properties, corrosion resistance, wear resistance and fatigue resistance of titanium alloy drill pipes, and provides an overview of their heat treatment methods and processing techniques. Combined with the application and development of titanium alloy drill pipes, the development and application prospects of titanium alloy drill pipes in unconventional drilling operations such as deep Wells and ultra-deep Wells are prospected, providing support for promoting the application and development of titanium alloy drill bits in oil fields.

Keywords: harsh environment; drilling tools; titanium alloy drill pipe; corrosion resistant and fatigue resistant; heat treatment

引言

全球油气勘探开发向非常规、深层超深层及海洋领域拓展, 国内塔里木、四川等盆地存在大量深井、超深井等复杂工况井, 非常规油气田高温、高压、腐蚀等极端环境导致石油管材频繁失效^[1]。钛合金钻杆因低密度、高比强度、耐腐蚀等特性, 成为深井、深海作业理想选择, 在高温强酸环境中安全系数达传统铬钢/镍基管柱3.5倍, 虽存在硬度低、耐磨性差、成本高问题, 但短半径水平井作业寿命较传统钻杆提升约10倍^[2,3]。钢钻杆虽因价低、适应性强被广泛应用, 却难以满足特殊工艺井高强度与韧性需求。美国 Grant Prideco 与 RTI 能源系统公司研发的钛合金钻杆融合钢铁与复合材料优势, 为行业提供新方向。

一、钛合金钻杆特性

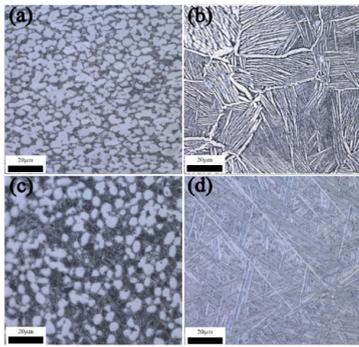
(一) 钛合金的组织

钛合金通常包含 α 相和 β 相两种主要组织形式, 其性能在很大程度上取决于这两种相的比例、形貌、分布特征以及尺寸大小^[4]。根据 α 相的含量和形态, 等轴状、片层状、双态状与网篮状, 这四种类型是 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金的典型组织类型, 如图 1-1 所示。组织与性能的一般关系如表 1-1 所示。

(二) 密度与比强度

在 20 °C 以下, 钛合金钻杆的密度为 4.506 ~ 4.516 g/cm³, 较铝合金钻杆 (2.70 g/cm³) 更高, 但低于铁、铜和镍合金管材。图 1-2 显示, 钛合金在常温区间内具备最高的比强度。较高的比强度有助于石油钻采装备减重设计, 并提升其运行安全性。表 1-2 列出了常用金属材料的性能对比数据。

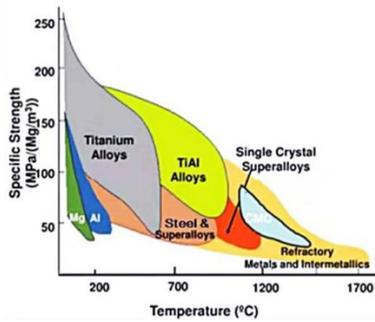
作者简介: 杨柳 (1999.04-), 女, 汉, 籍贯: 辽宁省沈阳市, 学历: 硕士研究生, 研究方向: 高强韧钻杆材料;
通讯作者: 李成, 男, 汉, 籍贯: 陕西省商洛市, 邮箱: licheng0224@qq.com



> 图1-1 组织类型分类：(a) 等轴状 (b) 片层状 (c) 双态状 (d) 网篮状

表1-1 组织与性能的一般关系

性能	片层组织	网篮组织	双态组织	等轴组织
强度	高	较高	较高	稍低
塑性	低	良	好	优
冲击韧性	低	优	好	较好
断裂韧性	高	较好	较好	低
疲劳性能	低	较好	好	优
蠕变抗力	高	较好	较好	低



> 图1-2 不同金属的温度 - 比强度关系

表1-2 几种金属材料性能

材料类型	抗拉强度 /Mpa	弹性模量 /10·Mpa	密度/g·cm ⁻³	比强度/N·m·kg ⁻¹	比模量 /m
超硬铝合金	588	7.154	2.8	210	2.55
耐热铝合金	461	7.154	2.8	165	2.55
高强度镁合金	343	4.41	1.8	191	2.45
高强度钛合金	1646	11.76	4.5	366	2.61
高强度结构钢	1421	20.58	8.0	178	2.57

(三) 耐腐蚀性能

钛在常温常压下展现出优异的耐腐蚀性能，其表面可迅速生成致密且稳定的 TiO₂ 氧化膜，具备良好的抗氧化性和自愈能力，能有效抑制氧在钛表面的扩散，防止进一步腐蚀^[5]。与镍基合金 028、825、728 相比，钛合金的耐蚀性更优，在 95% 屈服强度的载荷下不会发生应力腐蚀开裂。室温状态下，钛合金在 NaCl、H₂S 和 C₁₄H₃COOH 混合液中浸泡 90 小时未出现裂纹，说明对 HIC 会有较强的抗性。在 160 °C、总压为 30 MPa、H₂S 分压为 4 MPa、CO₂ 分压 4.5 MPa、Cl⁻ 的浓度为 1.2 × 10⁵ mg/L 的极端环境中，没有腐蚀发生，且盐雾腐蚀速率会有极大的降低。

(四) 摩擦磨损性能

深井、超深井钻井中，钻杆面临复杂苛刻的摩擦磨损环境，极大考验钛合金钻杆耐磨性与使用寿命。Wu 等人^[6] 对比有耐磨带的钛合金钻杆和 S135 钢钻杆发现：两种材料硬度从耐磨带向内壁递减，S135 钻杆耐磨带平均显微硬度 610.75 HV、本体为 390.26 HV，而钛合金钻杆耐磨带平均显微硬度达 1271 HV，本体为 513 HV，S135 钻杆硬度约为钛合金钻杆一半；磨损试验数据显示，

S135 钻杆磨损量 0.167 g、磨损速率 0.042 g/h，钛合金钻杆磨损量 0.006 g、磨损率 0.006 g/h，相同条件下，S135 钢钻杆磨损率是钛合金钻杆的 6.7 倍。分析表明，钛合金耐磨带耐磨性优异，能有效保护基体，减少钻杆过度磨损。

(五) 抗疲劳机理及性能

高频振动引发的高周疲劳失效是钛合金钻杆的失效模式之一，断口光滑平整，无明显塑性变形。疲劳裂纹发展分萌生与稳定扩展两阶段，其中萌生阶段占裂纹寿命大部分。钛合金中的等轴 α 相可有效抑制裂纹萌生，添加 Al 能改变临界剪切应力，促进 α 相滑移系统萌生，提升材料屈服强度与断裂韧性。层状次生 α 相在 β 相变结构中形成，当裂纹沿晶界 α 方向扩展时，层状结构使裂纹角度改变、数量增多、扩展路径扭曲，随着裂纹总长度和分叉增加，裂纹尖端应变场松弛，扩展速率降低。J.Smith^[7] 建模分析显示，循环应力在 30000~40000 psi 时，钛合金钻杆疲劳寿命达钢的 10 倍。

二、钛合金钻杆材料的热处理

热处理是改善钛合金组织与性能的重要方法，热处理改变金属组织与性能的核心是相变，加热及保温温度、加热及保温时间、冷却方式等都是影响相变的因素，目前钛合金最主要的热处理方式是退火、固溶和时效工艺^[8]。

(一) 退火

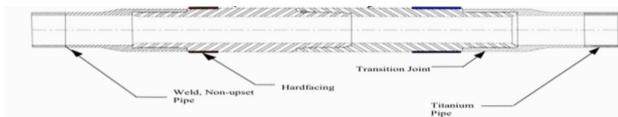
去应力退火、等温退火、完全退火、真空退火及双重退火是钛合金退火的主要方法。退火过程中，晶粒会发生回复与再结晶，显微组织的类型、比例和尺寸随之变化。冷变形加工引起晶格畸变并积累畸变能。在相变点以下进行热处理时，会形成点缺陷，通过位错移动释放畸变能量，从而缓解内应力。双重退火分两步进行：第一次加热温度高于再结晶结束温度，以促进充分再结晶，精确调控初生 α 相体积分数，避免晶粒异常长大；第二次加热温度低于再结晶温度，β 相会充分分解，组织更加平衡，表现出与时效强化相同的作用。

(二) 固溶 + 时效处理

钛合金的固溶处理通过加热并保温后缓慢冷却，促使 β 相转变为 α 相，生成片状次生 α 相，且冷却速度较淬火慢，因此无马氏体组织。时效处理则在固溶冷却后的组织上进行低温保温，促使亚稳定相分解，增强合金强度。时效析出 α 相的形态和尺寸受温度影响，低温时效果最佳。在固溶 + 时效热处理中，相变点以上得到片层组织，以下得到双态或等轴组织，时效处理则是合金强化的关键，残余亚温 β 相含量越高，强化效果越好。固溶时效强化热处理相比退火和高温 β 相区淬火，能显著提升钛合金钻杆的室温强度。

三、钛合金钻杆加工工艺

钛合金钻杆的结构主要包括管体和接头两部分，如图 3-1 所示。这两个部分主要通过摩擦焊接连接，以减少电偶腐蚀的概率。



> 图3-1 钛合金钻杆结构

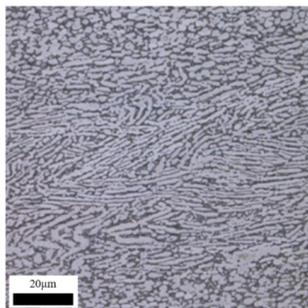
(一) 钛合金钻杆管体

钛合金钻杆管体为无缝管，服役中承受拉压扭转及井壁摩擦，环境恶劣，对生产工艺要求比较高，包含五大类型的工艺：

(1) 熔铸工艺：用真空自耗电弧炉进行二次熔炼，将3-1/2规格钻杆铸成长9~12 m、尺寸 $\phi 300 \times 800$ mm 的圆锭坯。(2) 锻造：分三种方式。 $\alpha + \beta$ 两相区锻造可形成等轴组织，室温塑性与疲劳极限优，但冲击韧性差；近 β 锻造形成双态组织，塑性和疲劳强度高； β 锻造形成片层组织，在室温下，表现出优异的拉伸强度、断裂韧性和抗蠕变性能，具有较低的塑性和断面收缩率。(3) 挤压：采用金属铜包覆热挤压，因高温易氧化，需大挤压比(10~30)、快挤压速度，挤压温度低于 β 相转变点 $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，可细化晶粒，使组织性能均匀。(4) 轧制：温轧时管坯内用芯棒定径，涂刷石墨等润滑剂防内部缺陷。(5) 热处理：包括退火、固溶+时效处理。

(二) 钛合金钻杆接头

钛合金钻杆采用“钻杆+钢接头”和“钻杆+钛接头”两种连接结构，通过装配或摩擦焊接将接头与管体连接。接头制造过程包括墩粗锻造、钻孔和退火，退火温度较低。例如，首先，将TA15X钛合金钻杆接头在 720°C 的温度下，保温90分钟并进行空冷，得到如图3-2所示的微观组织形貌。其次，在接头上取 $\phi 8$ mm 的拉伸试样，尺寸为 $7.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 的冲击试样，对其力学性能进行测试，结果见表3-1和表3-2。测试结果表明，抗拉强度均值为911 MPa，屈服强度均值为878 MPa，延伸率为19.3%。温度的升高，致使钛合金钻杆接头的冲击功也相应增加， 20°C 时的冲击功为59 J。因为等轴组织会具有比较高的强度，且片层组织抗冲击性能表现优异，所以，接头显现出优良的强韧匹配性。



> 图3-2 接头的微观组织形貌

表3-1 拉伸力学性能参数

接头	R_m/MPa	$R_{0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$
单值	906	877	20
	917	885	20
	911	872	18
平均值	911	878	19.3

表3-2 不同温度下钛合金钻杆接头的冲击功 /J

温度	-60?	-40?	-20?	0?	20?
纵向/单值	38	41	54	49	49
	35	36	42	43	62
	43	43	40	47	67
平均值	39	40	45	46	59

(三) 钛合金钻杆焊缝

钛合金钻杆与管体之间是通过摩擦焊连接的，要保证焊缝处的质量性能要求，其中摩擦焊的转速以及压力参数比较关键，并且焊后要进行焊缝局部热处理^[9]。TA15X钛合金钻杆焊缝用固溶+时效的方式进行热处理。焊缝处的抗拉强度均值为940 MPa，屈服强度均值为876 MPa，延伸率为15%，冲击功为31 J，如表3-3所示。

表3-3 焊缝力学性能

焊缝	R_m/MPa	$R_{0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$	A_{kv}/J
单值	940	878	16	26
	945	878	14	36
	935	872	15	31
平均值	940	876	15	31

四、结论

钛合金钻杆有低密度、高比强度、耐腐蚀和抗疲劳性能的特点，在深井、超深井等恶劣钻井环境中展现了显著优势。其优异的耐腐蚀性和耐磨性有效延长了钻井工具的使用寿命，尤其在高温和强酸环境下表现突出。通过固溶+时效处理，钛合金钻杆的强度和抗疲劳性能得到了显著提升。摩擦焊接技术为接头提供了可靠连接，退火与固溶时效等热处理工艺进一步优化了显微组织和力学性能。尽管钛合金钻杆在成本和耐磨性方面仍有提升空间，但其在特殊钻井作业中的表现明显优于传统钢制钻杆，具有广泛的应用前景。随着钛合金材料和加工技术的不断进步，未来将在石油钻井作业中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] Mou Y, Lian Z, Li W, et al. The effect of friction welding on the mechanical properties and corrosion fatigue resistance of titanium alloy drill pipe [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2022, 45(2): 466-481.
- [2] 鲜宁, 荣明, 李天雷, 等. 钛合金在高温高压酸性油气井的应用研究进展 [J]. 天然气与石油, 2020, 38(05): 101-107.
- [3] 吕祥鸿, 舒滢, 赵国仙, 等. 钛合金石油管材的研究和应用进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1518-1524.
- [4] Feng C, Li R, Liu Y, et al. Aging treatment effect on microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-3V-1.5 Mo-2Zr titanium alloy drill pipe [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 7011-7025.
- [5] P'erez-Mora R, Palin-Luc T, Bathias C, et al. Very high cycle fatigue of a high strength steel under sea water corrosion: a strong corrosion and mechanical damage coupling [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 74: 156-165.
- [6] Wu J, Li Y, Liu H, et al. Comparative Analysis of Friction and Wear Properties of Titanium Alloy Drill Pipe and Steel Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2587(1): 012001.
- [7] Smith J E, Chandler R B, Boster P L. Titanium drill pipe for ultra-deep and deep directional drilling [C]. Drilling Conference and Exhibition, SPE, 2001: SPE-67722-MS.
- [8] Zhang W, Feng C, Zhang K, et al. Research Progress on High Temperature Resistance of Titanium Alloy Material for Oil Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2956(1): 012040.
- [9] Zhang W, Huang Y, Wu J, et al. Performance Test of Weld Zone of Rotary Friction Welding of Titanium Alloy Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2587(1): 012002.