

钛合金减磨技术研究进展

马健凯¹, 李豪¹, 刘蒙蒙¹, 张琪², 包建兴¹, 赵恒章¹

(1. 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

(2. 安顺学院 电子与信息工程学院, 贵州 安顺 561000)

摘要: 系统综述了提升钛合金摩擦学性能的 4 种技术路径: 表面涂层技术通过构筑高性能覆层实现显著减摩; 表面改性技术通过改变基体表层成分与组织提升耐磨性; 润滑剂添加技术借助界面成膜直接降低摩擦; 表面织构化技术则通过微纳形貌调控界面状态。上述技术均能有效降低摩擦系数与磨损率, 但仍在涂层结合强度、改性层厚度、润滑剂长效性及织构参数优化等方面面临挑战。当前发展聚焦于多技术复合与智能化协同设计, 未来将朝着开发新材料体系、深化界面机理研究及发展高效绿色工艺等方向迈进, 以满足航空航天、生物医用等高端领域对钛合金部件高可靠、长寿命的严苛需求。

关键词: 钛合金; 磨损机理; 减磨技术; 多技术协同

中图分类号: TG174.4; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)02-044-09

Research Progress on Wear Reduction Technology of Titanium Alloys

Ma Jiankai¹, Li Hao¹, Liu Mengmeng¹, Zhang Qi², Bao Jianxing¹, Zhao Hengzhang¹

(1. Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

(2. School of Electronic and Information Engineering, Anshun University, Anshun 561000, China)

Abstract: This paper systematically reviews four primary technological pathways for enhancing the tribological performance of titanium alloys: surface coating technology significantly improves friction-reduction by constructing high-performance overlayers; surface modification technology enhances wear resistance by altering the chemical composition and microstructure of the substrate surface layer; lubricant addition technology directly reduces friction through the formation of interfacial films; surface texturing technology regulates the interfacial state by designing micro/nano topography. While all four approaches effectively reduce the coefficient of friction and wear rate, they face challenges such as insufficient coating adhesion, limited thickness of the modified layer, difficulties in sustained lubricant supply, and complexities in optimizing texture parameters. Current development focuses on the integration of multiple technologies and intelligent synergistic design. Future efforts should prioritize the development of novel material systems, in-depth investigation of interfacial mechanisms, and the advancement of efficient, green manufacturing processes to meet the stringent demands for high reliability and long service life of titanium alloy components in high-end fields such as aerospace and biomedical applications.

Keywords: titanium alloy; wear mechanisms; friction reduction techniques; multi-technique synergy

钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性和生物相容性, 在航空航天、生物医疗及能源化工等领域具有不可替代的地位^[1-4]。其中, TA15 钛合金经热处理后极限抗拉强度可达 987 MPa, 适用于高承载结构件^[5-6];

Ti-6Al-4V(TC4)合金广泛用于航空发动机压气机叶片^[7]与人工关节^[8]; TA3 纯钛与 TA10 钛合金则凭借出色的耐腐蚀性, 常被用于油气输送管道等苛刻环境^[9-10]。

然而, 钛合金固有的摩擦学短板, 如表面硬度低^[11]、氧化膜结合力差以及摩擦系数高, 严重限制了其在摩擦工况下的应用^[12]。特别是在高温或干摩擦条件下, 钛合金的磨损率可达 $10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N}\cdot\text{m})$ 量级, 远高于传

收稿日期: 2025-11-25

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2025CY-YBXM-583)

通信作者: 马健凯(1988—), 男, 工程师。

统钢铁材料^[13-14]。因此, 开发高效的减磨技术, 对于拓展钛合金的应用领域、提升装备服役可靠性具有至关重要的理论与工程意义^[12,15]。

为改善钛合金的摩擦磨损性能, 研究人员开发了多种减磨技术, 主要涵盖表面涂层、表面改性、润滑剂添加及表面织构化四大类。这些技术通过提高表面硬度、降低摩擦系数、优化润滑状态及捕获磨屑等不同机制实现钛合金的减磨^[14-15], 从而显著提升了钛合金关键运动部件的可靠性与服役寿命。本文系统综述了上述技术的最新研究进展, 旨在为相关领域的科研人员提供理论参考与技术指引, 进而推动钛合金在航空航天、生物医学及高端装备制造中的工程化应用。

1 表面涂层技术

1.1 激光熔覆

激光熔覆技术利用高能激光束使预置或同步输送的涂层材料与钛合金基体表面同步熔化, 经快速凝固

后形成冶金结合的熔覆层。该技术具有结合强度高、成分可调以及层厚可控等显著优势, 非常适合用于复杂几何形状钛合金构件的表面强化。其核心设计思路是通过引入硬质相或自润滑相, 构建“硬质增强-自润滑协同”的复合涂层体系^[15]。

针对镍基复合涂层体系, Xu 等^[16]在 TC4 钛合金表面激光熔覆了 Ni60-Ti-Cu-xB₄C 复合涂层。在激光高温作用下, B₄C 与 Ti 发生原位反应(3Ti+B₄C=2TiB₂+TiC), 生成了 TiB₂ 晶须和 TiC 颗粒等硬质增强相。如图 1 所示, 当 B₄C 含量(质量分数, 下同)为 8% 时, 涂层表现出最优的综合性能: 其摩擦系数曲线最为平稳且数值最低(图 1a), 对应的磨损量也达到最小值(图 1b)。此时, 涂层的平均显微硬度为 1078 HV, 约为 TC4 基体的 3.2 倍; 平均摩擦系数为 0.28, 磨损量仅为基体的 2.7%。磨损表面微观形貌分析表明, 磨损机制已从基体的严重黏着磨损转变为轻微的磨粒磨损, 表明涂层具有优异的耐磨性。

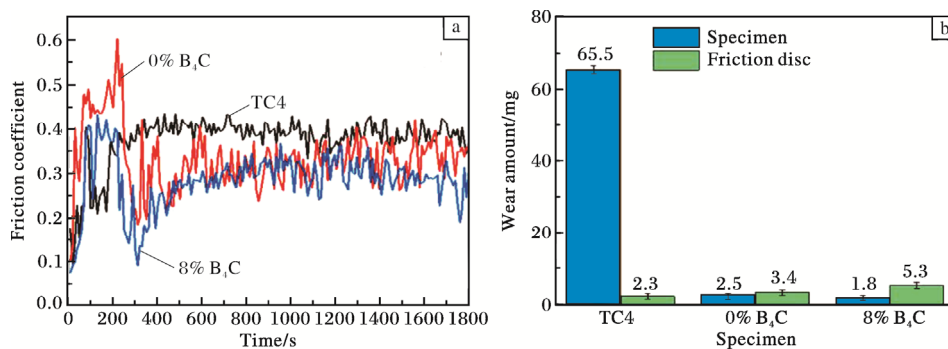


图 1 不同 B₄C 含量熔覆层的摩擦性能^[16]

Fig.1 Friction properties of cladding layers with different B₄C contents: (a) friction coefficient; (b) wear amount

添加稀土氧化物是优化激光熔覆层性能的有效策略。由表 1 给出的 TC4 钛合金表面激光熔覆层的摩擦系数和磨损量数据可知, 添加 3% 的 CeO₂ 后, 平均摩擦系数进一步降至 0.25, 磨损量显著降至基体的 1.8%^[16]。其强化机制为: ① 添加 CeO₂ 可发挥“稀土

表 1 TC4 钛合金表面激光熔覆层的摩擦系数和磨损量^[16]

Table 1 Friction coefficient and wear amount of laser cladding layers on the surface of TC4 titanium alloy

Material	Friction coefficient	Wear amount/mg
TC4	0.73	65.5
Ni60+Cu+Ti	0.33	2.5
Ni60+Cu+Ti+8%B ₄ C	0.28	1.8
Ni60+Cu+Ti+8%B ₄ C+3%CeO ₂	0.25	1.2

效应”, Ce 元素富集于晶界, 降低熔体表面张力, 改善熔池流动性, 从而减少气孔与裂纹; ② CeO₂ 可作为异质形核核心, 进一步细化凝固组织; ③ 固溶的 Ce 原子与空位相互作用, 形成柯垂尔气团, 通过钉扎位错提升涂层强度。

1.2 气相沉积

气相沉积技术是一类在基体表面通过气相化学反应或物理过程, 沉积形成涂层的制备技术。根据沉积过程的机理不同, 气相沉积主要分为物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)。其中, 物理气相沉积技术包括电弧离子沉积、磁控溅射等, 能够在钛合金表面制备纳米至微米级厚度的高硬度薄膜。该技术具有涂层致密、表面粗糙度低以及热影响区窄等突出优势, 非常适用于人工关节、精密刀具等对热敏感性和尺寸精度要求高的构件^[17-18]。

在 TiN 基涂层方面, 界面结合强度是决定其服役寿命的关键。Xu 等^[7]采用激光冲击喷丸(LSP)对 TC4 钛合金进行预处理, 通过在表面引入微米级纹理(深度 5~10 μm)和高幅值残余压应力, 显著改善了后续电弧离子沉积 TiN 涂层的界面状态。优化工艺参数后, TiN 涂层的临界载荷从 25 N 提升至 42 N, 界面结合强度得到显著提高。得益于更强的结合与优化的应力状态, TiN 涂层的摩擦系数从 0.6 降至 0.35, 磨损率降低 60% 以上。LSP 的强化机理在于其高应变率塑性变形引入了位错缠结、晶粒细化和孪晶, 从而提供了高硬度的支撑层; 同时, 残余压应力能有效抵消摩擦过程中的拉应力, 延缓裂纹萌生与扩展。

在美金刚石(DLC)涂层方面, 元素掺杂是调控其

性能的关键手段。Wei 等^[8]通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)在 TC4 钛合金表面制备了 Si 掺杂的 DLC 涂层(Si-DLC)和 Si、N 共掺杂的 DLC 涂层(SiN-DLC)。Si 和 N 的共掺杂形成了 sp³ C—Si/C—N 键增强的三维交联网络, 使涂层在保持高硬度的同时获得了良好的韧性。如图 2 所示, 在添加牛血清蛋白的模拟体液(SBF+BSA)中, SiN-DLC 涂层样品的摩擦系数曲线极其平稳, 平均摩擦系数低至 0.072, 磨损率仅为 1.82×10⁻⁷ mm³/(N·m), 性能远优于 TC4 基体。这归因于掺杂元素在含水环境中促进表面形成亲水官能团, 易于吸附水分子形成流体润滑膜, 从而实现“超滑”效应。该涂层在生物医学植入物领域展现出巨大的应用潜力。

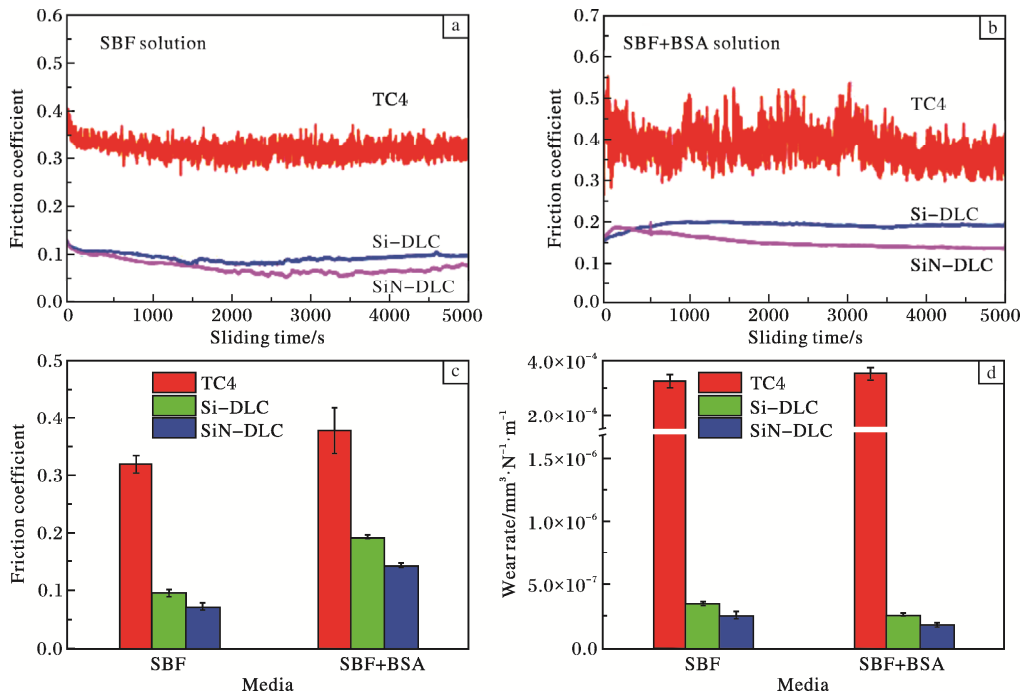


图2 TC4 及 Si-DLC、SiN-DLC 涂层样品在 SBF 和 SBF+BSA 溶液中与 Al₂O₃ 球滑动的摩擦系数曲线、平均摩擦系数和磨损率^[8]
 Fig.2 Friction coefficient (a, b), average friction coefficient (c), and wear rate (d) of TC4, Si-DLC, and SiN-DLC coating specimens during sliding against Al₂O₃ balls in SBF solution and SBF+BSA solution

1.3 热喷涂

热喷涂技术是一类将涂层材料(金属、陶瓷、塑料或其复合材料)加热至熔融或半熔融状态, 并通过高速气流将其雾化、加速, 喷射到基体表面形成涂层的表面工程技术。它兼具沉积效率高、热影响区窄、材料选择范围广等优势, 是现代工业中在材料表面制备防护涂层与功能涂层的重要方法。根据热源和工艺特点, 热喷涂技术可分为等离子喷涂、火焰喷涂和电弧喷涂等。

等离子喷涂技术是利用高温等离子弧将涂层材料熔化并高速喷射至基体表面, 可形成厚度 100 μm 至 10 mm 的涂层。该工艺非常适合在钛合金表面制备适

用于重载、高温等苛刻工况的厚防护层。其技术核心在于选用具备高硬度、优异热稳定性和良好耐磨性的涂层材料体系。

在 WC-Co 金属陶瓷涂层方面, Thirumalvalavan 等^[19]采用高速氧燃料热喷涂技术在 TC4 钛合金表面成功制备了 WC-Co 纳米涂层。通过 TOPSIS 方法与 Golden Jack 优化算法对工艺参数进行了系统优化, 优化后涂层的磨损量、摩擦系数及摩擦力分别比未优化涂层降低了 42.33%、27.97%和 9.38%, 耐磨性提升了 3~4 倍。性能的提升主要归因于以下协同作用: 首先, 高速粒子赋予了涂层极高的致密性; 其次, 纳米 WC

颗粒的尺寸效应发挥了关键作用,有效抑制了其在高温喷涂过程中的分解与脱碳,使得更多 WC 以完整的硬质相形式保留,并通过 Orowan 强化机制显著增强了 Co 粘结相。此外,细小的 WC 颗粒在摩擦过程中不易发生整体剥落,从而形成了更为平整的磨损表面,有效降低了局部接触应力。

在 Cr_3C_2 增强复合涂层方面, Geng 等^[20]研究了采用等离子熔覆技术制备的 Cr_3C_2 改性 NiCr-TiC 涂层的性能。研究发现,随着 Cr_3C_2 含量增加,涂层的摩擦磨损性能呈现先提升后降低的非线性变化规律。当 Cr_3C_2 含量在 15%~26% 之间时,涂层的硬度和耐磨性随着含量增加而提升;当 Cr_3C_2 含量超过 30% 时,尽管硬度可能继续增加,但过量的脆性相会诱发涂层产生裂纹,导致耐磨性下降。如图 3 所示,对 Cr_3C_2 含量为 26% 的涂层进行扫描电镜(SEM)及能谱分析(EDS),证实了涂层中 TiC 等硬质相的存在,且均匀分布的 Cr_3C_2 硬质相是耐磨性提高的主要原因。一方面, Cr_3C_2 自身作为硬质相,可提高耐磨性;另一方面,部分 Cr_3C_2 在熔覆过程中溶解,释放的 Cr、C 元素可分别起到固溶强化和促进细小 TiC 析出的作用。然而,过量的 Cr_3C_2 会因与基体热膨胀系数失配及自身脆性而成为裂纹源,这一现象揭示了此类涂层中第二相含量存在的临界阈值效应。

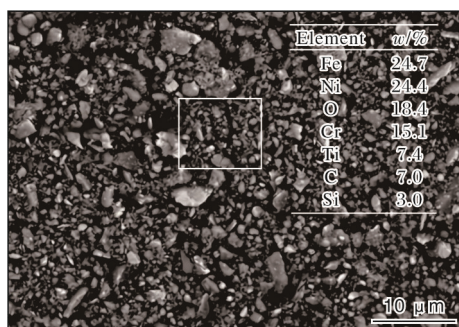


图3 Cr_3C_2 改性 NiCr-TiC 涂层 SEM 形貌及 EDS 分析结果^[20]

Fig.3 SEM morphology and EDS analysis results of Cr_3C_2 -modified NiCr-TiC coating

综上所述,表面涂层技术是提升钛合金耐磨性的主流途径之一。激光熔覆技术具有界面结合强度高、涂层设计灵活等优势,适用于复杂构件的表面强化;PVD 涂层致密,可满足高尺寸精度与低表面粗糙度的需求;热喷涂适用于制备厚涂层,其抗重载与高温性能突出。然而,各种技术仍存在各自的局限性:激光熔覆的热影响区大且易产生残余应力;PVD 涂层较薄,导致其承载能力有限;热喷涂涂层的界面结合强度相对较低,且难以避免孔隙缺陷。

2 表面改性技术

2.1 陶瓷转化处理

陶瓷转化处理(ceramic conversion treatment, CCT)是指在高温含氧环境中,通过氧化反应在钛合金表面生成以 TiO_2 为主的致密陶瓷层。传统 CCT 工艺存在处理温度高、时间长的缺点,易导致基体软化。催化型 CCT 通过预沉积催化金属层,能够显著降低处理温度、缩短时间,并同时提升氧化层的耐磨性。

为证实 Ag 催化 CCT 技术的有效性, Zhang 等^[21]在 Ti6Al4V 合金表面预沉积银,随后于 620 °C 进行 CCT 处理。结果表明, Ag 以细小弥散的纳米颗粒形式存在于氧化层中,能够通过钉扎晶界和裂纹尖端抑制裂纹的萌生与扩展。Ti6Al4V、T-620/60(未沉积银)和 T-Ag620/2(预沉积银)样品分别在 5 N 和 20 N 载荷下与直径 8 mm 的碳化钨球对磨,经过 3000 次循环摩擦试验后,形成的磨损形貌和磨损轮廓如图 4 所示。在摩擦过程中, Ti6Al4V 合金表层 Ag 颗粒被挤出并铺展形成软金属润滑膜,有效隔离了涂层与摩擦副接触,从而将摩擦系数从 0.6 降低至 0.35,磨损体积降低 60%。尤为重要的是,该方法可将 CCT 处理时间从 20 h 缩短至 10 h,且基体硬度未发生显著下降,为航空发动机钛合金部件提供了一种高效且低损伤的表面改性路径。

2.2 热化学处理

热化学处理通过将钛合金置于特定活性介质中,在高温下使 C、N、B 等元素扩散至表层,原位生成 TiC、TiN 和 TiB_2/TiB 等高硬度陶瓷相,从而大幅提升合金的表面硬度和耐磨性。

Grabarczyk 等^[22]针对 TC4 钛合金的热化学处理研究清晰地展示了不同工艺的差异:渗碳处理形成的 TiC 层厚度约 2 μm ,硬度达 1200 HV,摩擦系数从 0.65 降低至 0.3,磨损率较基体降低 70%,效果最佳;氮化处理形成的 TiN 层较薄(厚度约 1 μm),硬度为 800 HV,磨损率较基体降低 40%,效果相对较弱;氧化处理则主要提升耐腐蚀性,对减摩性能的改善有限。这些性能差异的根源在于生成物本身的性质及其改性层结构,即 TiC 层具备更高的硬度和更优的韧性匹配;而 TiN 层由于较薄且缺乏有效的支撑过渡结构,导致其承载能力不足且易发生剥落性失效。

在渗硼处理方面,其强化效果尤为显著。Wu 等^[23]采用粉末包渗法对 Ti-5Al-2.5Sn 合金进行处理,形成了独特的“ TiB_2 表层+TiB 晶须内层”双层结构,如图 5 所示。其中,渗硼温度为 1075 °C 的样品,其表层 TiB_2 硬度高达 3200 HV,摩擦系数降至 0.28,磨损率

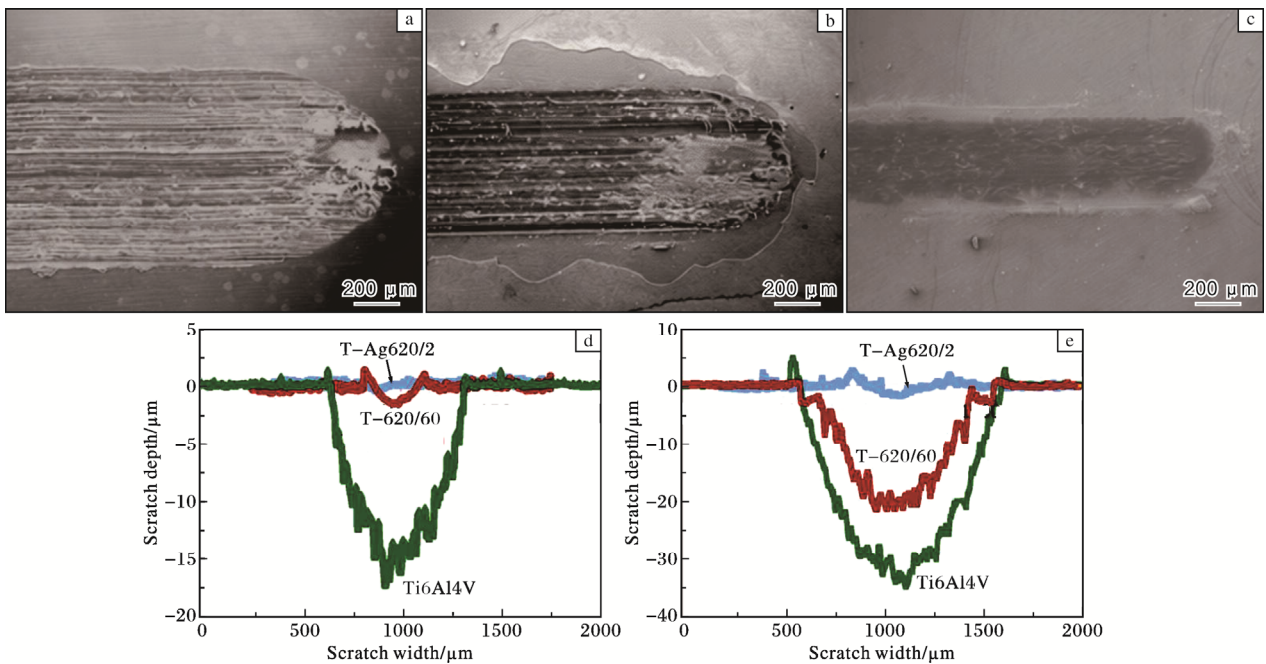


图4 Ti6Al4V、T-620/60 和 T-Ag620/2 样品在 20 N 载荷下的磨损形貌以及 5 N 和 20 N 载荷下的磨损轮廓^[21]

Fig.4 Scratch morphologies of Ti6Al4V (a), T-620/60 (b), and T-Ag620/2 (c) specimens under 20 N load and wear profiles under 5 N (d) and 20 N (e) loads



图5 Ti-5Al-2.5Sn 合金表面渗硼层的 SEM 形貌^[23]

Fig.5 SEM morphologies of boronized layer on the surface of Ti-5Al-2.5Sn alloy

较基体降低 85%，磨损机制从黏着磨损转变为磨粒磨损。该双层结构设计的关键在于外层 TiB₂ 提供优异的耐磨性，而内层垂直于表面生长的 TiB 晶须则像“微米级钢筋”，一方面与基体强力锚定，另一方面能有效

阻止横向裂纹扩展，将应力向深层分散，从而避免高硬度改性层的脆性剥落，实现了高硬度与强结合力的良好协同。Yu 等^[24]的研究进一步证实了渗硼温度与 TiB₂ 硬度之间的正相关性。

2.3 激光/电子束表面改性

激光/电子束表面改性技术利用高能量密度束流对钛合金表层进行快速加热与急速冷却，通过诱发非平衡相变、晶粒细化及固溶强化等机制，显著提升合金的表面硬度和耐磨性。该技术具有处理速度快、热影响区窄等突出优点。

在激光表面改性方面，Chauhan 等^[25]对 VT31 钛合金的研究表明，通过调控激光功率与扫描速度，可在合金表层获得不同的强化组织。高功率激光处理导致表层熔化并发生 β 相变，随后快速冷却几乎完全形成 β 相组织，硬度达到 800 HV，同时能获得低表面粗糙度的光亮表面，有利于减少初始磨粒磨损；较低功率激光处理则形成 β 相枝晶与马氏体的混合组织，硬度为 700 HV。该技术的核心强化机制在于快速非平衡相变导致的马氏体相变与晶粒细化效应。

在电子束表面改性方面，Nikolova 等^[17]展示了其在生物医学领域应用的显著成效。研究表明，电子束处理使 TC4 钛合金表层发生 α' 马氏体相变，并形成深度 5~8 μm 的纹理。以此改性表面作为预处理层，能够使后续沉积的 TiN/TiO₂ 梯度涂层的临界结合载荷从

30 N 大幅提升至 55 N, 摩擦系数降低至 0.25, 耐磨性提高 2 倍。电子束产生的表面纹理增强了涂层与基体间的机械互锁效应, 而马氏体相变与晶粒细化不仅提高了力学性能, 其产生的更多晶界与缺陷也作为生物活性位点, 显著促进了细胞附着与骨矿化进程, 实现了植入物力学性能与生物活性的协同提升。

2.4 超声辅助表面优化

超声辅助表面技术通过引入物理场, 能够在制备涂层的同时, 从微观尺度优化其组分与界面结构, 实现摩擦学性能的跨越式提升。

Guo 等^[30]采用超声辅助等离子体电解氧化(PEO)技术, 在 TC4 钛合金表面成功制备了 MoS₂/GO(氧化石墨烯)/TiO₂ 复合涂层。超声场的空化与声流效应有效解决了 GO 的团聚问题, 并促进了反应物传输, 从而在涂层中原位合成了具有两种特定层间距(0.534 nm 与 0.227 nm)的 MoS₂。这两种 MoS₂ 与 TiO₂ 基体构成了独特的“双重界面”: 较宽的界面(0.534 nm)通过位错偶极子的形成与湮灭释放剪切应力, 较窄的界面(0.227 nm)则通过强位错钉扎效应抵抗变形。这种“刚柔并济”的界面协同设计使涂层的摩擦系数和磨损率较传统 PEO 涂层分别降低了 90%和 95%, 展现出卓越的减摩抗磨性能。

此外, 超声的“锻造”效应显著提高了涂层的致密性, 将其孔隙率从 5%降低至 1%, 进一步减少了涂层自身的缺陷, 提升了承载能力和耐久性。该技术为构筑高性能钛合金自润滑涂层提供了一种基于能量场调控的先进界面工程策略。

上述研究表明, 表面改性技术通过改变钛合金表层成分、组织或应力状态, 本质性提升其耐磨性, 避免了涂层剥落风险, 尤其适用于复杂形状构件。催化型陶瓷转化处理可在低温条件下高效生成减摩氧化层; 热化学渗层硬度极高, 可显著改善耐磨性能; 超声场实现界面协同, 减摩抗磨性能优异。然而, 这些技术仍存在一定的局限: 热氧化处理温度较高, 会影响基体性能; 渗层厚度有限, 承载能力受到制约; 激光/电子束处理需精确控制工艺参数, 以防过热; 超声辅助表面优化工艺复杂, 设备要求高, 仅适用于特定材料体系。

3 润滑剂添加技术

3.1 水基润滑剂

水基润滑剂以其优异的冷却性能和环境友好特性, 在钛合金加工领域得到广泛应用, 但其固有的润滑性能不足, 需要借助添加剂在摩擦界面形成有效的润滑膜。

高分子添加剂, 如聚丙烯酰胺(PAM), 主要通过物理吸附机制发挥润滑作用。Tang 等^[26]研究发现, PAM 分子通过酰胺基团与钛合金表面的 TiO₂ 层形成氢键吸附, 构建厚度约 10 nm 的边界润滑膜。当 PAM 添加量为 2.5%(质量分数)时, 形成的润滑膜能使 TC4 钛合金的摩擦系数从 0.65 降低至 0.39, 磨损率降低 90%。其增强机理在于: PAM 分子通过酰胺基团与钛合金表面的摩擦氧化层发生化学吸附和氢键作用, 形成稳定且坚韧的边界润滑膜, 提高了吸附膜的稳定性和承载能力。

纳米颗粒添加剂则主要通过物理机械机制改善润滑性能。例如, 添加 1%(质量分数, 下同)的纳米 Al₂O₃ 可使 TC4 钛合金的摩擦系数降低 35%^[14]。其润滑机理主要包括: ①“微滚珠”轴承效应, 即在接触面间滚动; ②“抛光效应”, 平滑表面微凸体; ③在极压条件下可能参与形成摩擦反应膜。这类添加剂尤其适用于高速切削等需要兼顾润滑与冷却的复杂工况。

3.2 油基润滑剂

油基润滑剂是应对钛合金重载、高温工况的主流选择。通过添加高性能添加剂, 可在界面形成“流体膜+固体润滑膜”的多重防护体系。

Chen 等^[27]研究了层状双氢氧化物(LDH)作为油基添加剂的优异性能。六方晶系纳米片状的 MgAl LDH 凭借其大比表面积和独特的层状结构, 极易在摩擦界面定向吸附铺展, 形成易于剪切的固体润滑膜。实验结果表明, 当 LDH 添加量为 2%时, TC4 钛合金的摩擦系数从 0.62 大幅降低至 0.2, 磨损率降低 80%。该研究揭示了“表面涂层-润滑剂”协同设计的前瞻性, 即在预先沉积了 TiN 硬质涂层的 TC4 钛合金表面使用含 LDH 的润滑油, 构成了“硬抗磨(TiN)+软减摩(LDH膜)”的协同系统, 磨损率较单一 TiN 涂层进一步降低了 50%。这种软硬结合的协同系统, 为石油机械等重载领域钛合金部件的长效可靠运行提供了解决方案。

3.3 固体润滑剂

固体润滑剂以其耐高温、耐重载的独特优势, 可以为在太空、高温轴承等极端工况下应用的钛合金提供润滑, 主要应用方式分为表面涂覆与材料复合两种。

在表面涂覆方面, 表面结构化是提升固体润滑剂服役寿命的有效手段。Wu 等^[28]利用激光在 TC4 钛合金表面制备微凹槽结构并填充 MoS₂ 润滑剂, 微凹槽结构作为润滑剂存储器, 实现了摩擦过程中润滑膜的持续供给, 使摩擦系数稳定在 0.18, 磨损率降低 70%, 其性能远优于无结构的传统涂覆。任小勇等^[12]则利用脉冲阳极氧化(PA)产生的多孔结构作为“纳米储库”来固定 MoS₂, 同样实现了摩擦系数约 0.25 的稳定长

效润滑。上述表面织构或微孔通过存储润滑剂、捕获磨屑以及微动压效应，共同保证了固体润滑系统的长效可靠性。

在材料复合方面，引入自润滑相是界面工程的关键策略。Chen 等^[29]通过将 SiC 纳米粒子装饰在少层石墨烯(FLG)上，再将其与 TC4 基体复合，巧妙地解决了石墨烯在钛基体中易与 Ti 反应生成脆性 TiC 的难题。SiC 粒子在此充当了物理间隔物与界面锚定点，既阻止了石墨烯与 Ti 的过度接触，又增强了界面结合与载荷传递。与未增强基体相比，用 30% (质量分数)SiC 装饰 FLG 时，该复合材料的磨损率降低了 86.8%。在摩擦过程中，受到保护的 FLG 能够有效释放并在表面形成润滑转移膜，而 SiC 则起到支撑抗磨作用，实现了协同增效。

润滑剂添加技术通过构建高效的界面润滑膜，成为调控钛合金摩擦学性能最直接且灵活的策略。各类润滑体系各具特色：水基润滑剂冷却性好，但润滑效能依赖于添加剂；油基润滑剂通过高性能添加剂形成耐重载润滑膜，是极端压力下的可靠选择；固体润滑剂则适用于高温、真空等工况。润滑剂添加技术的核心优势在于能根据不同工况“按需”提供润滑，并可结合表面织构化实现润滑剂长效供给。然而，该技术的应用仍存在局限性：润滑油存在环境污染与冷却局限；固体润滑膜易耗尽，服役寿命有限；纳米添加剂易团聚，分散稳定性差。这些局限性亟待通过多相复合、智能响应材料及结构化表面设计等前沿技术加以突破。

4 表面织构化技术

激光加工织构技术能够以极高的精度在钛合金表面制备微纳米尺度的规则形貌，其减磨机制主要源于三大功能：润滑剂存储、磨屑捕获以及增强涂层结合

强度。

在增强涂层结合强度方面，Xu 等^[7]利用激光冲击喷丸在 TC4 钛合金表面制备微坑纹理，使后续沉积的 TiN 涂层与基体的接触面积增大了 30%。这种机械互锁效应将涂层的临界载荷从 25 N 显著提升至 42 N，并结合其对磨屑的捕获能力，使涂层的磨损率降低了 60%。在实现长效润滑方面，Wu 等^[28]研究了织构作为微型润滑剂仓库的效能，通过纳米激光在 TC4 钛合金表面加工凹槽织构并填充 MoS₂ 固体润滑剂，实现了润滑剂的持续供给，使润滑膜的服役寿命延长至原来的 2 倍，摩擦系数稳定在 0.18，磨损率降低 70%。在高速润滑条件下，激光织构还能诱导微流体动压效应，有助于形成更厚的流体润滑膜，可将钛合金的摩擦系数降至 0.1 以下，尤其适用于航空航天领域的高速轴承^[7,14,28]。

表面织构化技术通过精准构筑表面微观几何形貌，成为提升钛合金耐磨性的高效“微纳工程”手段。其核心优势在于能主动调控摩擦界面状态，通过存储润滑剂、捕获磨屑、诱导流体动压效应及增强涂层机械互锁，显著降低摩擦与磨损。该技术常作为“增效器”与涂层、润滑剂协同，实现“1+1>2”的效果。然而，表面织构化技术的应用也存在局限：激光加工可能引入热影响区或微裂纹，削弱基体强度；织构形状、尺寸、密度等关键参数需针对特定工况进行优化；织构化表面与涂层的结合需精细化设计，以避免应力集中。

5 四种技术对比

表 2 系统比较了表面涂层、表面改性、润滑剂添加和表面织构化这四种技术在改善钛合金耐磨性方面的关键指标，包括性能提升幅度、工艺成本以及各自的优点与局限性，可为工况适配下的技术选择提供参考依据。

表 2 钛合金减磨技术的对比分析

Table 2 Comparative analysis of friction-reduction technologies for titanium alloys

Technology category	Performance improvement	Process cost	Advantages	Limitations	Suitable applications
Surface coating	Friction coefficient: 0.1–0.3; Wear rate: reduced by 1–2 orders of magnitude	High	Significant performance enhancement; Flexible design; Multi-functionality	High requirement for adhesion; Risk of delamination; Limited for complex geometries	Heavy load, abrasive wear, and applications requiring specific functions
Surface modification	Friction coefficient: 0.2–0.4; Wear rate: reduced by 60%–90%	Medium to high	No risk of interfacial delamination; Integral with substrate; Suitable for complex parts	Modified layer is thin with limited load-bearing capacity; High-temperature process may affect substrate	Complex-shaped parts, adhesive-dominated wear, scenarios requiring substrate toughness

续表

Technology category	Performance improvement	Process cost	Advantages	Limitations	Suitable applications
Lubricant addition	Friction coefficient: 0.1–0.3; Wear rate: reduced by >80%	Low to medium	Highly flexible; Adjustable cooling/lubrication; Immediate effect	Requires continuous supply/replenishment; Potential environmental pollution; Prone to failure at high temperatures	Machining processes, enclosed lubrication systems, bio-medical interfaces
Surface texturing	As a performance enhancer, can further reduce friction by 30%–50% in synergistic systems	Medium	Active interface control; Debris/oil reservoir; Enhanced coating adhesion	Limited effectiveness when used alone; Complex parameter optimization; May introduce stress concentration	Synergistic use with coatings/lubricants for high-speed, starved lubrication, or precision tribo-pairs

6 结 语

(1) 钛合金减磨技术已形成多路径协同发展格局：① 表面涂层技术通过构建高硬度与低摩擦系数的功能层以抵抗磨损，其核心在于梯度结构设计与界面结合强化；② 表面改性技术通过改变表层成分与组织来提升性能，其关键在于开发低温高效工艺，以实现耐磨性与韧性的协同提升；③ 润滑剂添加技术通过界面吸附成膜直接降低摩擦，其核心是高性能添加剂研发及与表面的协同设计；④ 表面织构化技术则通过微纳形貌实现存储润滑剂、捕屑的效果，其核心在于参数优化与多场耦合制备。

(2) 尽管钛合金减磨技术路线多样，当前仍面临五大共性挑战：① 涂层/改性层与基体间的力学性能失配，易导致界面失效；② 润滑剂与固体润滑相在摩擦过程中的消耗与失效机制尚不明确；③ 多技术复合时的协同效应机理与长效性预测缺乏理论支撑；④ 面向极端工况(高温、真空、腐蚀)的材料体系与工艺稳定性不足；⑤ 成本、效率与环保性之间的平衡难题制约了技术的规模化应用。

(3) 未来研究发展方向：① 发展多技术复合与智能化设计，如“智能织构+自适应润滑+梯度涂层”一体化系统；② 开发新型高性能材料体系，如高熵合金涂层、MAX 相自润滑复合材料及环保长效添加剂；③ 深化界面行为与失效机理的基础研究，借助原位表征与计算模拟指导理论设计；④ 推进低能耗、短流程、高精度绿色制造工艺发展；⑤ 建立面向特定工况的定制化减磨技术数据库与性能预测模型。

参考文献 References

[1] Vilhena L, Khan S A, Garcia A, et al. Tribological characterization of carbon fibre reinforced polymer (CFRP)

sliding against Ti and Al alloy counterbodies for aerospace applications[J]. *Materials*, 2025, 18(18): 4296.

[2] Li Y P, Huang W, He Y, et al. Early crack propagation behavior of laser metal deposited Ti-6Al-4V alloy under high cycles fatigue loading[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2025, 54(1): 62-75.

[3] Li L L, Pan X, Liu B, et al. Strength and toughness of hot-rolled TA15 aviation titanium alloy after heat treatment [J]. *Aerospace*, 2023, 10(5): 436.

[4] 孙磊, 杨鹏飞, 孙奇, 等. 激光表面重熔对双态组织 TC4 合金力学性能和摩擦学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2025, 54(12): 3147-3155.

[5] 谷美邦. 热处理制度对激光增材制造 TA15 钛合金力学性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(3): 97-102.

[6] 卢凯凯, 周立鹏, 李敏娜, 等. 强韧化热处理对 TA15 钛合金组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(1): 44-49.

[7] Xu Y, Chen Y X, Zhou D C, et al. Fabrication of TiN coatings deposited on laser shock micro-textured substrates for improving the interface adhesion properties of coatings[J]. *Materials*, 2024, 17(13): 3302.

[8] Wei X B, Zhang Y J, Feng H Y, et al. Bio-tribology and corrosion behaviors of a Si- and N-incorporated diamond-like carbon film: a new class of protective film for Ti6Al4V artificial implants[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2022, 8(3): 1166-1180.

[9] Mao T, Yu Z M, Yan J, et al. Investigation of friction and erosion wear properties of titanium and titanium alloy pipes[J]. *Materials*, 2024, 17(20): 5043.

[10] 韩杰阁, 陈蔚泽, 张浩, 等. 钛合金表面耐磨性能及抗氧化性能的研究现状[J]. *电焊机*, 2017, 47(3): 73-78.

[11] 朱龙辉, 焦智超, 石焯然, 等. 常用金属材料的低温摩擦学

- 研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(1): 254-262.
- [12] 任小勇, 刘凯学, 李刚, 等. TC4 钛合金表面不同涂层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2025, 38(6): 199-208.
- [13] 钟亮, 付玉, 徐永东, 等. 钛基复合材料耐磨性研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(6): 36-42.
- [14] 刘雨薇, 吴霞, 陈纪云, 等. 钛合金摩擦磨损性能及减磨方法研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(12): 1-21.
- [15] Bai H Q, Zhong L S, Kang L, et al. A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 882: 160645.
- [16] Xu S N, Han K Q, Wang H L, et al. The influence of adding B₄C and CeO₂ on the mechanical properties of laser cladding nickel-based coatings on the surface of TC4 titanium alloy[J]. Materials, 2024, 17(15): 3823.
- [17] Nikolova M, Ormanova M, Nikolova V, et al. Electrochemical, tribological and biocompatible performance of electron beam modified and coated Ti6Al4V alloy[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(12): 6369.
- [18] Łepicka M, Tsybrii Y, Kiejko D, et al. The effect of TiN and DLC anti-wear coatings on the tribofilm formation and frictional heat phenomena in coated metals vs. WC-Co[J]. Materials, 2021, 14(12): 3342.
- [19] Thirumalvalavan S, Perumal G, Senthilkumar N, et al. Enhancing tribological characteristics of titanium grade-5 alloy through HVOF thermal-sprayed WC-Co nano coatings by TOPSIS and golden jack optimization algorithm[J]. Recent Patents on Nanotechnology, 2025, 19(4): 544-567.
- [20] Geng Z J, Zhang M L, Zhu J Y, et al. Effect of chromium carbide addition on the microstructures and properties in dual carbide phases reinforced Ni-based composite coatings by plasma cladding[J]. Materials, 2023, 16(13): 4580.
- [21] Zhang Z X, Zhang Y J, Li P Z, et al. Silver-promoted ceramic conversion treatment of Ti6Al4V alloy and its mechanical performance[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2024, 157: 106629.
- [22] Grabarczyk J, Batory D, Kaczorowski W, et al. Comparison of different thermo-chemical treatments methods of Ti-6Al-4V alloy in terms of tribological and corrosion properties[J]. Materials, 2020, 13(22): 5192.
- [23] Wu Y, Lu Y P, Duan Y H, et al. Microstructure and wear properties of powder-pack borided Ti-5Al-2.5Sn alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 4032-4043.
- [24] Yu H, Lu L, Wang Z, et al. Microstructure and wear resistance of a composite coating prepared by laser alloying with Ni-coated graphite on Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials, 2022, 15(16): 5512.
- [25] Chauhan A S, Jha J S, Telrandhe S, et al. Laser surface treatment of α - β titanium alloy to develop a β -rich phase with very high hardness[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116873.
- [26] Tang J Z, Chen S Q, Cao W H, et al. Tribological performance and lubrication mechanism of polyacrylamide as a high-efficiency water-based lubricant additive for titanium alloys[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 19411.
- [27] Chen X G, Wei T Q, Wang H D, et al. Enhancing the wear resistance of titanium alloys through the synthesis of layered double hydroxides combined with titanium nitride coatings[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 678: 393-408.
- [28] Wu Z, Tan X L, Li G C, et al. Tribological properties of groove-textured Ti-6Al-4V alloys with solid lubricants in dry sliding against GCr15 steel balls[J]. Micromachines, 2023, 14(11): 1978.
- [29] Chen B, Yan Q, Ye W T, et al. Extraordinary antiwear properties of graphene-reinforced Ti composites induced by interfacial decoration[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(23): 27118-27129.
- [30] Guo Z W, Chen Y N, Wang N, et al. Ultrasonic-assisted MoS₂/GO/TiO₂ ceramic coatings: enhancing anti-friction performance through dual-interface optimization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 112: 107180.

行业动态

2025 年 4—6 月日本钛锭产量统计

时间	钛锭产量/t	时间	钛锭产量/t
2025 年 4 月	1129	2025 年 6 月	1211
2025 年 5 月	991	合计	3331

王运锋摘自《チタン》