

激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响

徐硕, 苏波泳, 花国然, 王恒, 曹宇鹏

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要:目的 提高 TC4 钛合金与 TiN 涂层的结合强度。方法 通过实验研究的方法探索激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响。首先, 采用不同激光冲击参数(光斑搭接率、功率密度)对其表面进行前处理。利用 Wyko NT 1100 型非接触式光学轮廓仪(NCOP)测量 TC4 钛合金试样的表面几何形貌和粗糙度。利用 X350A 型 X 射线残余应力测定仪测量 TC4 钛合金表面残余应力。利用 HXD-1000TMSC/LCD 型显微硬度计测量冲击表面的显微硬度。其次, 采用离子镀膜技术在激光冲击区域制备 TiN 薄膜, 并利用 WS-2005 型涂层附着力自动划痕仪测试 TiN 涂层与 TC4 钛合金的界面结合力, 分析激光冲击前处理对 TiN 涂层界面结合性能的影响。最后, 通过摩擦磨损试验验证激光冲击强化前处理改善涂层界面结合性能的有效性。**结果** 在动态加载载荷为 50 N、加载速率为 50 N/min、划痕长度为 4 mm 的测试条件下, 未经激光冲击处理的 TiN 涂层与基体的结合力为 28.9 N, 经激光冲击前处理后 A1—A5 试样的结合力分别提升至 32.3、33.2、34.9、36.8、39.6 N, 前处理对界面结合力的提升幅度分别为 11.76%、14.88%、20.76%、27.34%、37.02%。在试验负载为 7.5 N、往复行程为 5 mm、往复频率为 2 Hz、测试时间为 25 min 的干摩擦条件下, A1—A5 试样的磨损率分别降至 3.79×10^{-5} 、 9.8×10^{-6} 、 8.82×10^{-6} 、 4.32×10^{-6} 、 $1.24 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** 激光冲击强化前处理可以有效提高 TiN 涂层的界面结合力, 提高涂层的耐磨损性能。激光参数中光斑搭接率对涂层界面性能的影响最显著, 50%的搭接率可使激光强化效果均匀, 在 50%搭接率、6.43 GW/cm²功率密度的激光参数作用下可以获得最优的界面结合性能和耐磨效果。

关键词: 激光冲击强化; TiN 涂层; TC4 钛合金; 残余应力; 界面结合力; 摩擦磨损

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0315-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.034

Effect of Laser Shock Peening on the Interfacial Bonding Properties of TiN Coatings on TC4 Titanium Alloy

XU Shuo, SU Bo-yong, HUA Guo-ran, WANG Heng, CAO Yu-peng

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-11-08

Received: 2021-07-30; Revised: 2021-11-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2005300, 2019YFB2005305); 江苏省高校自然科学研究项目(20KJB460010); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX21_3081)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Project (2019YFB2005300, 2019YFB2005305); Natural Science Research Projects of Universities in Jiangsu Province (20KJB460010); the Ordinary University Graduate Student Scientific Research Innovation Projects of Jiangsu Province (KYCX21_3081)

作者简介: 徐硕(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光加工与表面改性技术。

Biography: XU Shuo (1998—), Male, Postgraduate, Research focus: laser processing and surface modification technology.

通讯作者: 苏波泳(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光加工与表面改性技术。

Corresponding author: SU Bo-yong (1990—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser processing and surface modification technology.

引文格式: 徐硕, 苏波泳, 花国然, 等. 激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 315-325.
XU Shuo, SU Bo-yong, HUA Guo-ran, et al. Effect of Laser Shock Peening on the Interfacial Bonding Properties of TiN Coatings on TC4 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 315-325.

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the bonding strength of TC4 titanium alloy and TiN coatings, the effect of laser shock peening on the interfacial bonding properties of TiN coatings on the surface of TC4 titanium alloy is explored through experimental research. Firstly, the surface was treated with different laser parameters (spot overlap ratio and power density), and the surface geometry and roughness of TC4 titanium alloy samples were measured by Wyko NT 1100 non-contact optical profilometer (NCOP), the surface residual stress of TC4 titanium alloy was measured by X350A X-ray residual stress tester, and the microhardness of impact surface was measured by HXD-1000TMS/LCD microhardness tester; Secondly, the ion plating technology was used to prepare TiN coatings in the laser shock region, and the interfacial adhesion between the TiN coating and TC4 titanium alloy was measured by WS-2005 film adhesion automatic scratch instrument to analyze the effect of laser shock pre-treatment on the interfacial adhesion of tin coatings; Finally, the friction and wear test was used to verify the effectiveness of the laser shock strengthening pre-treatment to improve the bonding performance of the coating interface. The following experimental data were obtained: Under the test conditions of a dynamic load of 50 N, a rate of 50 N/min, and a scratch length of 4 mm, bonding force of TiN coating and substrate of the sample without laser shock treatment was 28.9 N, but after pre-treatment of laser shock peening, the adhesion was increased to 32.3 N, 33.2 N, 34.9 N, 36.8 N and 39.6 N, and the increase of interfacial adhesion by pretreatment was 11.76%, 14.88%, 20.76%, 27.34% and 37.02% respectively; Under dry friction conditions with a load of 7.5 N, a reciprocating stroke of 5 mm, a reciprocating frequency of 2 Hz, and a test time of 25 min, the wear rate of each sample was reduced to $3.79 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, $9.8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, $8.82 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, $4.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ and $1.24 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ respectively. The experimental results show that the pre-treatment of laser shock peening has an effective function of improving the interfacial bonding performance of TiN coatings on the surface of TC4 titanium alloy. The results of the friction and wear test indicate that the synergistic effect of laser shock and TiN coating significantly reduces the friction coefficient and wear rate of the TC4 titanium alloy, and improves the wear resistance of the coating. Among the laser parameters, the spot overlapping rate has the most significant effect on the interface performance of the coating. When the overlap rate is 50%, the surface treatment effect of the material has good uniformity, and the best interface bonding performance and wear resistance effect can be obtained under the action of the laser parameters of 50% overlapping rate and 6.43 GW/cm^2 power density.

KEY WORDS: laser shock peening; TiN coating; TC4 titanium alloy; residual stress; interfacial adhesion; friction and wear

因具有热强度高、抗蚀性好等良好的机械性能,钛合金已广泛应用于航空航天、舰船工业、汽车制造、海洋工程等领域。但在实际中,钛合金材料仍然存在很多问题,如表面硬度低、摩擦磨损性能差等,这极大地限制了钛合金的使用范围^[1-5]。为提高钛合金表面性能,目前许多学者利用多弧离子镀技术在 TC4 钛合金表面制备纳米涂层,从而提高钛合金表面硬度,改善其摩擦性能^[6]。孟君晟等^[7]通过氩弧熔覆技术在 TC4 合金基体上制备了 TiN、TiB 和 TiB₂ 等多相颗粒增强镍基复合涂层。结果显示,其显微硬度相对于未处理 TC4 合金基体提高近 4 倍,耐磨性提高约 7 倍。Zhang Peng 等^[8]在 TC4 钛合金表面制备了 CrTiSiCN 涂层,研究其摩擦学性能。结果表明,CrTiSiCN 涂层具有更好的耐磨性,其磨损率仅为 TC4 钛合金的 1/30。吴秋实等^[9]对 TC4 钛合金进行喷丸和微弧氧化预处理,研究基体强化对涂层摩擦学性能的影响。研究发现,预处理形成的硬化层提高了涂层摩擦学性能的可靠性。目前已有大量研究从涂层材料、制备方法和工艺参数着手,对涂层的力学和摩擦学性

能进行研究,但对于基体强化或者表面预处理方法改善涂层性能的研究仍较少。

激光冲击强化技术 (Laser Shock Peening, LSP) 是一种利用冲击波的力学效应对材料表面进行改性的技术,其主要是通过强冲击波作用于材料,诱导材料表面塑性变形,调控表面质量,改善材料性能^[10-13]。在 LSP 工艺中,Clauer 建立的约束模式得到了广泛应用,即为了避免激光直接烧蚀待处理工件,首先将吸收层涂覆到待处理工作表面,而后再粘贴一层透明约束层。当激光束辐照待处理基材表面时,吸收层材料被烧蚀形成等离子体并受约束层限制^[14]。该等离子体产生强大的冲击波 (GPa 级),导致冲击区域产生塑性变形。周围材料和次表面对这种变形产生反应,导致产生压缩残余压应力和微观结构变化。近年来,国内外研究人员针对激光冲击强化技术开展了大量研究。Santana 等^[15]测量了激光冲击强化后 6061-T6 铝合金表面的显微硬度和残余应力,并进行摩擦磨损试验。结果表明,由于 LSP 提高了材料的硬度,诱导了较深的残余应力层,材料的磨损率得到了显著降

低。Cao Ziwen 等^[16]采用方形光斑和不同的喷丸参数,利用白光干涉法和无损 X 射线衍射法测量材料表面的几何形貌和残余应力,发现激光冲击强化处理可以有效提高 TC17 基体表面的显微硬度,更有利于残余应力的稳定。罗新民等^[17]以 TC4 钛合金为研究对象,研究了激光冲击强化引起的微结构响应,通过 TEM 观察到应变在晶体内部引起大量位错增值。Binod Ohakal 等^[18]发现 LSP 可以在铝合金基体中诱导第二相析出,同时细化晶粒并改变晶界映射。Ren Xudong 等^[19]对 AZ91D 镁合金进行激光冲击强化处理,揭示了表面纳米化对表面形貌、显微硬度和显微组织的影响。研究发现,激光冲击处理可以诱导 AZ91D 镁合金的塑性变形和晶粒细化,从而提高了镁合金的显微硬度。Cao Xin 等^[20]在沉积多层梯度 TiN/Ti 涂层前,采用激光冲击强化技术对 TC4 钛合金基体进行预处理。结果表明,激光冲击预处理可以有效提高材料的硬度和表面残余应力,从而提高材料的抗疲劳性能。Sarvesh Kumar Mishra 等^[21]利用阴极电弧蒸发的方法制备 AlTiN 和 AlCrN 涂层前进行激光冲击强化处理,结果显示 LSP 和涂层的复合处理可以降低磨损量,提高基体的耐磨性。上述研究着重揭示了激光冲击强化技术的作用机制,研究了材料对冲击波作用的超高应变率动态响应,分析了激光冲击强化与镀膜技术结合的有效性,但未能分析激光冲击强化增强涂层与基体界面结合力的影响机制,也未曾探讨基体强化对涂层质量和耐磨性能的影响。

因此,本文以 TC4 钛合金为研究对象,通过实

验研究的方法探索激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响。首先,采用不同激光冲击参数对其表面进行处理,测量处理后材料表面残余应力、显微硬度与粗糙度的分布状态;其次,采用离子镀膜技术在激光冲击区域制备 TiN 薄膜,并测量复合处理区域的界面结合力,分析激光冲击前处理对 TiN 涂层界面结合性能的影响;最后,通过摩擦磨损试验验证激光冲击强化前处理改善涂层界面结合性能的有效性。

1 试验

1.1 激光冲击强化前处理

试验基体采用 TC4 钛合金材料,表 1 给出了其具体成分。利用线切割技术按照 30 mm×30 mm×3 mm 的尺寸加工试样,用 400—2000 号砂纸逐级打磨并抛光,之后用乙醇进行超声清洗,超声清洗的功率为 100 W,温度控制为 60 ℃,清洗时间为 20 min。激光冲击强化实际应用中,常用的约束层有 K9 光学玻璃和水。其中玻璃需保证与 TC4 钛合金表面做到无间隙配合,操作繁琐,通用性差,而静水受激光作用易飞溅,造成约束层厚度不均匀,甚至导致约束层缺失。故本文采用 1 mm 厚的流水作约束层,水流厚度均匀,并且可以冲洗掉激光与钛合金材料相互作用产生的碎屑。常用的吸收层有铝箔和黑胶带,铝箔对激光反射强。本文采用黑胶带作为吸收保护层,具有吸收率高的特点,黑胶带厚度为 180 μm。

表 1 TC4 钛合金的化学成分与部分力学性能
Tab.1 Chemical composition and mechanical properties of TC4 titanium alloy

Fe/wt. %	C/wt. %	N/wt. %	H/wt. %	O/wt. %	Al/wt. %	V/wt. %	σ_b /MPa	σ_s /MPa
≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	5.5~6.8	3.5~4.5	≥895	≥830

激光冲击强化试验使用的仪器为西安天瑞达光电技术股份有限公司研制的 YS120-R200A 型激光冲击强化设备,重复频率为 5 Hz,脉冲宽度为 20 ns。激光参数将直接影响前处理的作用效果。一般来说,由于激光器输出光束的辐照面积十分有限,必须依赖光斑搭接的方式对工件进行大面积覆盖。Karbalaian 等^[22]验证了搭接率增加对残余应力的增大会产生促进效果,但是激光喷丸可能会在冲击区域周围产生有害的残余拉应力,并且这种拉应力会随着搭接率的增加而增加。Hu Yongxiang 等^[23-25]利用数值仿真和实验分析相结合的方法,研究了搭接率对激光冲击强化效果的影响,发现搭接率为 50%时,冲击区域产生了均匀的残余压应力场。当激光搭接率超过 50%时,激光冲击对材料硬度及残余应力的强化效果仍有所增加,但是搭接率越高,加工工艺越复杂,加工效率低下且成本高昂,故本文采取的最高搭接率为 50%。对于激

光功率密度的选择,本文参照了 Ballard^[26]提出的最佳冲击波峰值压力范围,即激光冲击强化的峰值压力应符合 $2\sigma_{HEL} < P_{max} < 2.5\sigma_{HEL}$,其中 σ_{HEL} 为材料的 Hugoniot 弹性极限,本文取 TC4 的 $\sigma_{HEL}=2.8$ GPa,则最佳峰值压力应为 5.6~7 GPa。激光冲击波的峰值压力可由 Fabbro 模型^[27]计算得出,其计算公式为:

$$P_{max} = 0.01 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{0.5} Z^{0.5} I_0^{0.5} \tag{1}$$

式中: P_{max} 为峰值压力; α 为能量转化效率系数,取 $\alpha=0.2$; Z 为折合声阻抗,取 $Z=1.61 \times 10^6$ g/(cm²·s); I_0 为激光功率密度, GW/cm²。

本文取最高功率密度为 6.43 GW/cm²,其峰值压力约为 7.8 GPa。若取更高的功率密度,则光斑中心压力过大,易出现明显的残余应力缺失现象^[28-29],而且过高的能量会烧蚀吸收层甚至 TC4 基体,产生异物而不利于后续 TiN 涂层的沉积。

具体试验参数如表2所示,共计5个试样,分为3种不同的搭接率和3种不同的功率密度。

表2 激光冲击强化参数
Tab.2 Process parameters of LSP

Laser parameter	A1	A2	A3	A4	A5
Laser power density/($\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$)	3.02	3.02	3.02	4.64	6.43
Pulse duration/ns	20	20	20	20	20
Spot diameter/mm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Shock times	1	1	1	1	1
Overlapping rate/%	0	33	50	50	50

激光冲击强化处理之后,利用美国 Veeco 公司生产的 Wyko NT 1100 型非接触式光学轮廓仪 (NCOP) 对 TC4 钛合金试样的表面几何形貌和粗糙度进行测量,利用上海五久自动化设备有限公司生产的 X350A 型 X 射线残余应力测定仪对试样表面残余应力进行测量,利用北京中仪友信科技有限公司生产的 HXD-1000TMS/LCD 型显微硬度计测量冲击表面的显微硬度。

1.2 制备薄膜

采用多弧离子镀方式制备薄膜,具有沉积速度快、入射粒子能量高、膜层致密度高的工艺特点。本试验采用无锡纳弧新材料科技有限公司生产的 NANOARC-SP1010 型多弧离子镀膜机制备薄膜,选用纯度为 99.99% 的钛靶。样品悬挂在真空室转架上,转架频率为 20 Hz。先粗抽真空至 4.0 Pa,然后精抽至 4.0×10^{-3} Pa,真空室加热温度设置为 80 $^{\circ}\text{C}$ 。在表面活化过程中,通入 Ar 气,流量为 400 mL/min,脉冲偏压为 600 V,占空比为 50%,用 Ar 离子辉光清洗 TC4 钛合金试样表面 15 min。为了提高膜基结合力,改善薄膜应力,在制备薄膜之前沉积 Ti 打底层,打开 Ti 靶挡板,脉冲偏压设置为 150 V,占空比设置

为 15%,控制工作气压为 0.8 Pa,弧电流为 100 A,沉积时间为 5 min。制备 TiN 薄膜时,通入纯度为 99.99% 的 N_2 ,控制 N_2 气流量阶梯式上升,即 N_2 流量 0 \rightarrow 10 mL/min 沉积 5 min,10 \rightarrow 30 mL/min 沉积 20 min,当 N_2 流量升至 30 mL/min 后不再改变。

1.3 膜层性能测试

采用划痕法测试 TiN 涂层与 TC4 钛合金的界面结合性能。仪器为兰州中科凯华科技开发有限公司生产的 WS-2005 型涂层附着力自动划痕仪。动态加载载荷为 50 N,加载速率为 50 N/min,划痕长度为 4 mm,测量方式为单往复、声发射信号接收,同时结合摩擦力变化情况及划痕形貌来判断涂层的临界载荷值。每个试样测量 3 次后取平均值。

膜层耐磨性能测试采用上海伟品智能科技有限公司生产的 TBT-M5000 型摩擦磨损试验机进行测试,陶瓷球 (Si_3N_4) 直径为 10 mm,磨损时间为 25 min。试验形式为球盘往复试验。润滑形式为干摩擦。测试环境:温度 20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 50%,1 个大气压。试验负载 7.5 N,往复行程 5 mm,往复频率 2 Hz。

采用日本 Hitachi 公司生产的 S-3400N 型扫描电子显微镜对不同试样进行观察和检测,进而分析其磨损机理。

2 结果与分析

2.1 激光冲击强化

图1为按照3种不同搭接率进行激光冲击强化处理后试样的表面形貌。从图1可以看出,激光冲击强化处理改变了试样的表面粗糙度,导致被处理表面出现局部微凹坑和凸变形的现象。为了综合分析激光搭接率对试样表面几何形貌的影响,从试样表面选取3个光斑点,对微凹坑和凸变形进行深入分析。选取区域如图1所示。

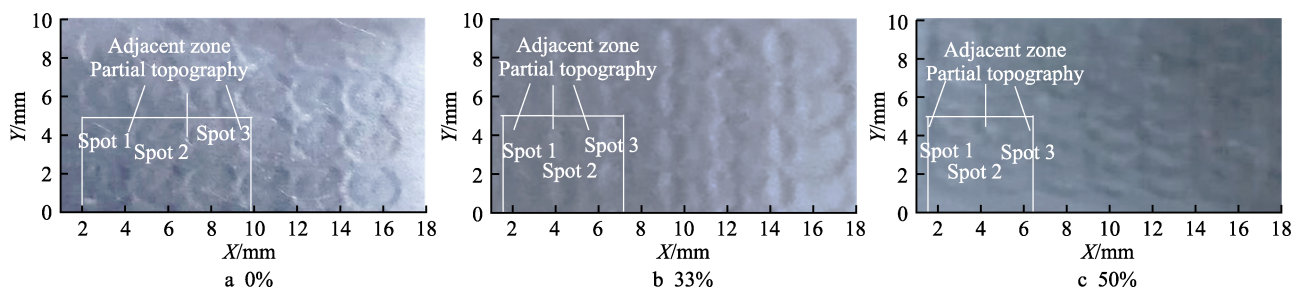


图1 不同搭接率下激光冲击强化处理后 TC4 钛合金表面微凹坑分布

Fig.1 Distribution of micro-pits on the surface of TC4 titanium alloy after laser shock peening with different overlapping rate

图2为激光搭接率为0%时试样表面形貌和残余应力分布图。图2a为所选光斑区域形貌,表面形貌采集区域范围是3.2 mm \times 3.2 mm,远小于3个光斑的范围。由图2a可知,搭接率为0%时,激光冲击强化处理导致试样表面几何形貌发生变化,主要体现在光

斑中心区域出现微凹坑,而光斑与光斑交界的地方出现凸起。结合图2b可以看出,二者高度差约为10.2 μm 。图2b为沿X轴方向高度变化,可见激光冲击处理在光斑1中心产生约8 μm 深的凹坑,在光斑1边缘产生约2.2 μm 高的凸起。

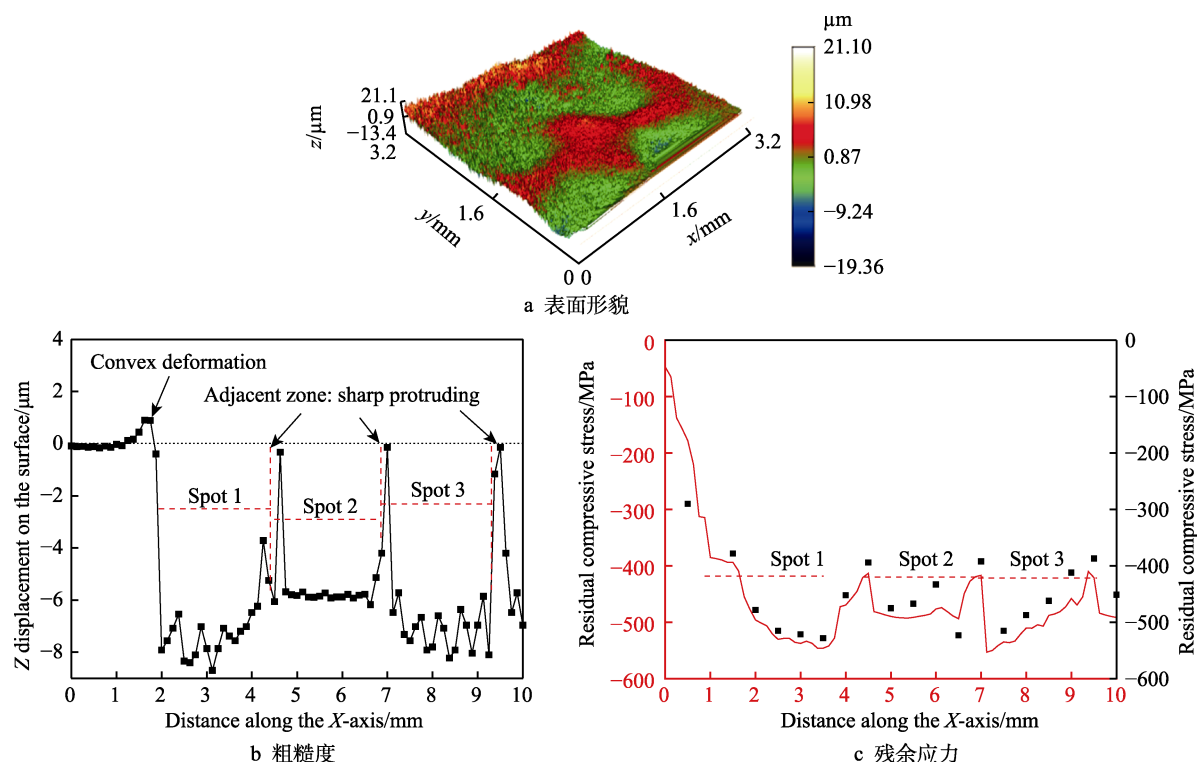


图 2 0%搭接率激光冲击强化处理后 TC4 钛合金表面完整性测试

Fig.2 Surface integrity test of TC4 titanium alloy after LSP when the overlapping rate is 0%:

a) surface morphology; b) roughness; c) residual stress

表面粗糙度的变化与激光冲击处理产生的表面塑性变形和体积传递相关。激光冲击处理光斑 1 区域时,表面约束层受激光辐照作用产生等离子体冲击波并向 TC4 钛合金材料内部传播,促使钛合金表面冲击区域沿冲击方向上产生一定深度的压缩塑性变形,同时变形层中的材料受挤压沿垂直于冲击波传播的方向向两侧膨胀转移,导致 TC4 钛合金表面形貌发生变化,具体体现在 2~4.4 mm 范围内产生约 8.2 μm 深的凹坑,光斑 1 区域边缘和光斑 2 区域形成凸起变形,如图 2b 所示。这种凸起变形的存在使得光斑 2 区域接受激光冲击作用的初始条件不同于光斑 1 区域,形成的凹坑范围为 4.7~6.9 mm,深度约为 5.7 μm ,光斑 2 区域形成的凹坑范围和深度都要小于光斑 1 区域。激光辐照光斑 2 区域同样会在光斑 2 的边缘和光斑 1 区域形成凸起变形,在图 2b 中体现为在 4.4~4.7 mm 范围内出现尖锐凸起。激光对光斑 3 区域的作用类似于光斑 2 区域,在 7.1~9.2 mm 之间形成凹坑,在 6.9~7.1 mm 之间形成尖锐凸起。试样表面轮廓平均偏差 R_a 为 4.99 μm ,微观不平度 R_z 为 3.92 μm ,轮廓最大高度 R_y 为 9.6 μm 。

图 2c 为搭接率为 0% 时试样表面残余应力分布图。由残余应力可以看出,0% 搭接率的激光冲击强化处理存在严重的不均匀性。类似于表面形貌分布,材料表面残余压应力也呈现出“中间凹,两端凸”的分布状态,即激光冲击强化处理在光斑中心区域形成较大的残余压应力,并向边缘逐渐减小。这种分布状

态的原因仍然是激光冲击波对 TC4 钛合金造成的不均匀塑性变形,在 0% 搭接率的激光冲击处理下,冲击波消失后,变形层仍然保持部分塑性变形状态,因此在加工表面形成了残余压应力层,塑性变形的不规则性导致残余应力分布的不均匀,0% 搭接率处理后的平均残余压应力为 -435 MPa。以上结果表明,试样受激光冲击处理后,其表面几何形貌和残余压应力直接受材料表面塑性变形和受压体积传递的影响。

图 3 为激光搭接率为 33% 时试样表面形貌和残余应力分布图。图 3a 显示了重叠区域高度差约为 5.8 μm 。不同区域受激光冲击的次数不同, X 轴上 2.75~3.5 mm 和 4.45~5.3 mm 范围分别为光斑 1 和光斑 2、光斑 2 和光斑 3 重叠区域,受到 2 次激光冲击处理,其余未重叠区域仅受 1 次激光冲击处理。从图 3b 可以看出,当搭接率为 33% 时,凸起变形的高度明显减小,高度差约为 2.7 μm ,试样表面轮廓平均偏差 R_a 为 2.99 μm ,微观不平度 R_z 为 2.23 μm ,轮廓最大高度 R_y 为 6.2 μm 。

图 3c 为搭接率为 33% 时试样表面残余压应力分布图。可以看出,重叠区域的残余压应力约为 -500 MPa,非重叠区域的残余压应力约为 -400 MPa,说明提高冲击次数可以有效提高表面残余应力的大小。33% 搭接率多点处理后的平均残余压应力为 -472 MPa。

图 4 为激光搭接率为 50% 时试样表面形貌和残余应力分布图。相对于 0% 搭接率和 33% 搭接率,50%

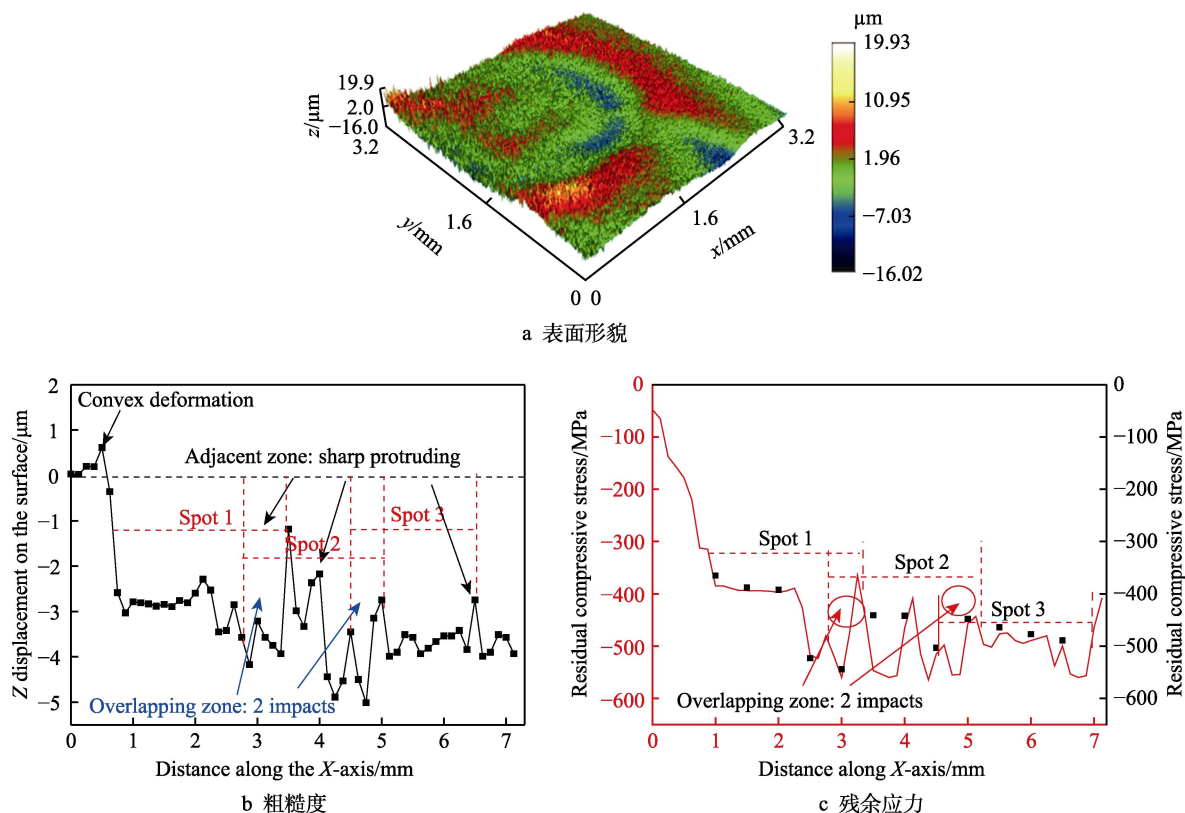


图3 33%搭接率激光冲击强化处理后 TC4 钛合金表面完整性测试
Fig.3 Surface integrity test of TC4 titanium alloy after LSP when the overlapping rate is 33%:
a) surface morphology; b) roughness; c) residual stress

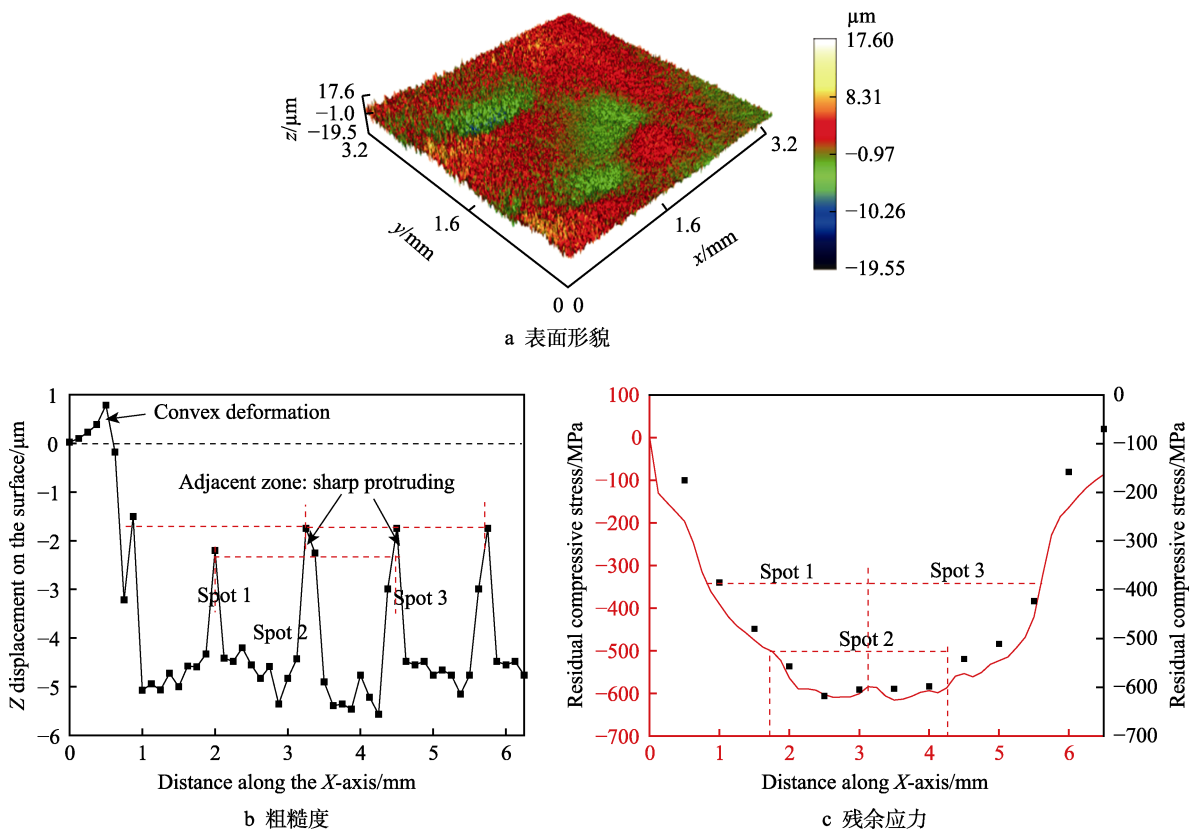


图4 50%搭接率激光冲击强化处理后 TC4 钛合金表面完整性测试
Fig.4 Surface integrity test of TC4 titanium alloy after LSP when the overlapping rate is 50%:
a) surface morphology; b) roughness; c) residual stress

搭接率冲击下 TC4 钛合金表面的微凹坑和凸起变形分布均匀,粗糙度较小。光斑 2 区域被光斑 1 和光斑 3 覆盖,凸起变形只在未重叠区域产生,并且高度也减小为 2.75 μm ,试样表面轮廓平均偏差 R_a 为 2.29 μm ,微观不平度 R_z 为 1.46 μm ,轮廓最大高度 R_y 为 3.63 μm 。

图 4c 为搭接率为 50% 时试样表面残余压应力分布图。可以看出,重叠区域的残余压应力约为 -600 MPa,非重叠区域的残余压应力约为 -460 MPa。50% 光斑搭接率多点处理后的平均残余压应力为 -539 MPa。

图 5 为不同功率密度下表面粗糙度和残余压应力结果。由上述分析可知,光斑搭接率为 50% 时,试样表面粗糙度及残余应力分布较为均匀,此时改变激光功率密度将直接影响冲击波强度,从而在材料表面形成不同的几何形貌和残余压应力分布状态。由图 5 可知,随着激光功率密度的增大,激光冲击强化处理后的材料表面粗糙度和残余压应力的值都逐渐增大。

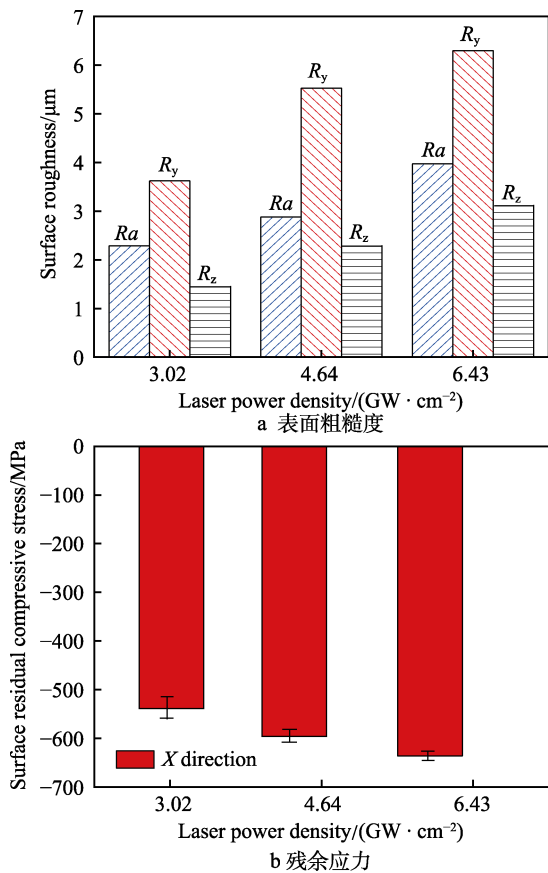


图 5 不同功率密度激光冲击强化处理后 TC4 钛合金的表面粗糙度和残余应力的分布 (光斑直径 2.5 mm, 重叠率 50%, 脉冲宽度 20 ns)
Fig.5 Surface roughness (a) and residual stress (b) of TC4 titanium alloy after LSP with different power densities (spot diameter 2.5 mm, overlap ratio 50%, pulse width 20 ns)

表 3 为不同激光参数处理后的表面硬度。由表 3 可知,类似于对材料表面残余应力的影响,激光冲击

强化处理对表面硬度同样有积极影响,并且随着光斑搭接率的提高和功率密度的增大,表面硬度也逐渐增大,但是其变化幅度较小,光斑搭接率为 50%、功率密度为 6.43 GW/cm^2 时,处理效果最好,表面硬度达到了 253HV。激光冲击强化处理对材料硬度的积极作用可以归结于表层组织在激光冲击波作用下发生的超高应变率塑性变形,形成了更多的位错,产生晶粒细化现象^[17,30]。

表 3 激光前处理后 TC4 钛合金的表面硬度
Tab.3 Surface hardness of TC4 titanium alloy after LSP pre-treatment

					HV
A1	A2	A3	A4	A5	
163.485	25	171.456	56	188.378	13
248.8432				253.149	87

2.2 涂层界面结合性能

表 4 为不同激光参数处理后的界面结合力。由表 4 可知,相对于未处理的试样,在动态加载载荷为 50 N、加载速率为 50 N/min、划痕长度为 4 mm 的条件下,对 TC4 钛合金进行激光冲击强化前处理后再镀 TiN 涂层,其界面结合性能均得到了有效改善,A1—A5 试样界面结合力的提升幅度分别为 11.76%、14.88%、20.76%、27.34%、37.02%,提高光斑搭接率,或者增大激光功率密度,界面结合力都会随之增大。

表 4 不同参数激光冲击前处理后 TiN 涂层的界面结合力
Tab.4 Interfacial bonding force of TiN coatings after LSP with different parameters

						N
A1	A2	A3	A4	A5	Untreated	
32.3	33.2	34.9	36.8	39.6	28.9	

基体表面性能是影响涂层结合性能至关重要的因素,激光冲击处理通过改变钛合金表面状态对涂层结合性能产生影响。相对于仅进行抛光处理的表面,激光冲击强化前处理在一定程度上重构了材料表面形貌,造成了较大的表面粗糙度,在基体表面形成凸起变形和微凹坑等织构形态,在这些表面织构分布均匀适当的情况下,增大粗糙度可以提高基体与涂层的结合面积,并且在涂层形成过程中,气相原子入射基体表面容易与这些表面织构形成机械锁合^[31-32],从而提高涂层与基体的结合性能。另一方面,涂层的内应力和界面结合处的残余应力对界面结合性能的影响不可忽视。在涂层沉积过程中,由于涂层和钛合金基体的热膨胀系数存在差异,涂层和基体具有不同的热收缩倾向,导致涂层内部和界面结合处产生相应的应力^[31,33-34]。这种内应力的存在容易在结合处产生剪切应力,萌生微裂纹,导致涂层失效。钛合金表面由于激光冲击波作用在深度方向上产生塑性变形,材料受

挤压沿平行于表面的方向向两侧扩展延伸,冲击波消失后,变形层仍然保持部分塑性变形状态,因此在加工表面形成了硬化层和残余压应力层,提高了抵抗弹性和塑性变形的能力,在薄膜生长过程中可以消除或分散 TiN 涂层的内应力及界面处的应力集中^[35],阻碍微裂纹的萌生和扩展。

按照上述分析, A1—A3 试样,激光冲击前处理使用的光斑搭接率逐步增大, TC4 基体表面的塑性变形越来越均匀,此时影响界面结合力的主要因素为激光冲击在试样表面留下的微凹坑和凸起织构,搭接率的增加使得这些织构尺寸和分布呈现出越来越好的规则性,所以 A1—A3 试样的界面结合力呈上升趋势。A4—A5 试样对结合力的提升幅度显著高于 A1—A3 试样,这是因为在 50% 搭接率条件下,激光功率的增加对冲击表面微凹坑和凸起变形的幅度影响较大,但对其分布的均匀性影响较小,而此时材料硬度和残余压应力相比于前几组试样有大幅提升,抵抗变形的能力大幅提升,可以更有效地抑制因内应力和界面处应力集中产生的涂层损伤。

2.3 摩擦磨损性能

图 6 为试样摩擦因数曲线,可知磨合期曲线斜率较大,摩擦因数迅速上升,试样表面在较短的时间内产生了较大的磨损量。其原因是摩擦初期试样表面凸起变形较多,且曲率半径较小,摩擦副的接触面积小,局部作用压强大,本实验 6 组试样的磨合期长度近似相同。进入稳定磨损阶段,试样的磨损速度大大降低,摩擦因数也比较稳定。

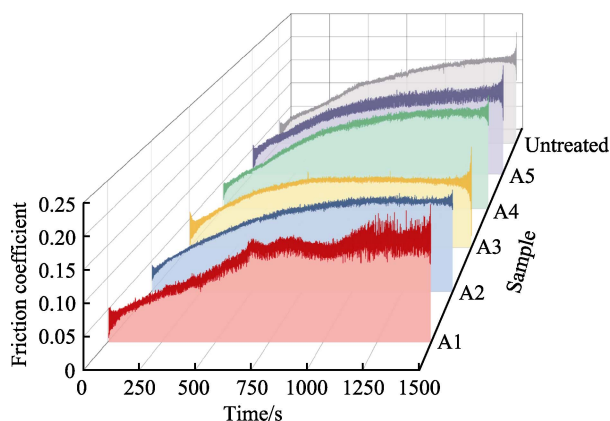


图 6 TiN 涂层摩擦因数随时间变化的曲线
Fig. 6 Variation curve of friction coefficient of TiN coatings with time

图 7 为试样磨损率及平均摩擦因数。未做任何处理的 TC4 钛合金基材的摩擦因数为 0.1612,磨损率为 $3.32 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。由图 7 可知,不同工艺参数的激光冲击强化处理均可起到减小摩擦因数和磨损率的作用,且效果良好,在本文的试验条件下(磨损时间 25 min,试验形式为球盘往复试验,润滑形式为

干摩擦,试验负载 7.5 N,往复行程 5 mm,往复频率 2 Hz), A1—A5 试样磨损率的降低幅度分别为 94.6%、97.1%、98.04%、99.7%、99.8%,随着光斑搭接率的提高,或者随着激光功率密度的增大,激光冲击处理对磨损率的降低效果越明显。由复合磨损率可知,在激光冲击强化处理后,采用多弧离子镀膜技术在 TC4 钛合金表面沉积 TiN 涂层,材料的磨损率较未处理试样降低了至少 2 个数量级,其中采用 50% 光斑搭接率、 6.43 GW/cm^2 功率密度前处理的试样磨损率最低 ($1.24 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$),仅为未处理试样的 0.03%,采用 0% 搭接率、 3.02 GW/cm^2 功率密度前处理的试样磨损率最高 ($3.79 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$),为未处理试样的 1%。

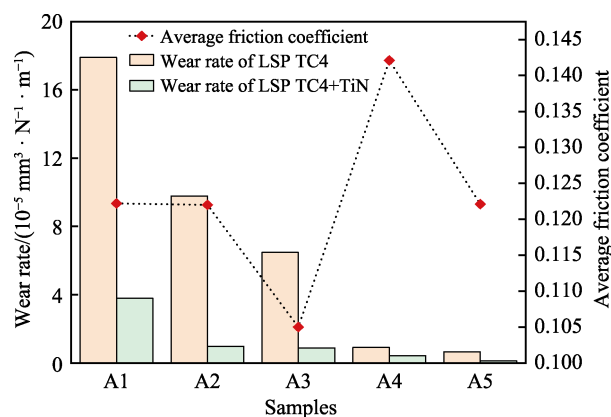


图 7 TiN 涂层的平均摩擦因数和磨损率
Fig. 7 Average friction coefficient and wear rate of TiN coatings

图 8 为试样的磨损形貌。可以看出,未经激光强化前处理的试样磨损情况较严重,出现了较多大而深的剥落、微孔和犁沟。这是因为在磨损初期, TiN 涂层表面有一定的微凸起变形,这些微凸起受到上试样 Si_3N_4 球的反复挤压作用,发生局部塑性变形,其内部也产生了部分拉应力,与此同时,在不断地加载与卸载的过程中,这些微凸起的脆性由于冷作硬化逐渐增大^[36-37],导致微凸起在摩擦磨损试验中发生脆性断裂,并产生坚硬的磨粒。磨粒在载荷作用下压入材料表面,并在切向力的作用下沿试样表面滑动,对涂层表面产生微切削作用而产生磨损,涂层表面出现“犁沟”状划痕。同时,这些坚硬的磨粒和磨痕在循环载荷作用下易在涂层表面产生应力集中现象,从而导致微裂纹的产生并迅速扩展,对涂层表面造成了疲劳损伤,产生大量点蚀坑和剥落。此外,由于 TiN 涂层和 TC4 钛合金基体的弹塑性等物理机械性能不同,在受到上试样的切向力时,变形不同步也可能在界面上造成应力集中,从而导致微裂纹的产生。

图 8b—f 分别为 A1—A5 试样的磨损状况。图 8b 为 0% 搭接率、 3.42 GW/cm^2 功率密度前处理下的磨损形貌,此时划痕较浅,磨损情况较未处理试样有所改善,但仍然有部分面积较小的剥落。图 8c 为 33% 搭

接率、 3.42 GW/cm^2 功率密度前处理下的磨损形貌, 表面 TiN 涂层磨损后, 表面磨损比较少, 出现了一些较浅的“犁沟”磨痕。此时, TiN 涂层以磨粒磨损为主。图 8d—f 的磨损情况较为相似, 此时磨损表面连续光滑, 剥落和微坑的数量明显减少且面积较小, 表面只有部分划痕出现。总体来看, A1—A5 试样的磨损程度远小于未处理试样, 且 A3—A5 试样的磨损状

况也要优于 A1—A2 试样, 这是因为在 50% 的光斑搭接率冲击下, 钛合金的表面的微凹坑和微凸起变形分布均匀, 在涂层沉积后, 试样表面仍然保持着这种规则整齐的织构状态, 在摩擦磨损过程中减磨润滑效果要优于 A1 和 A2 试样 (表面凹坑和凸起织构分布不均匀)。

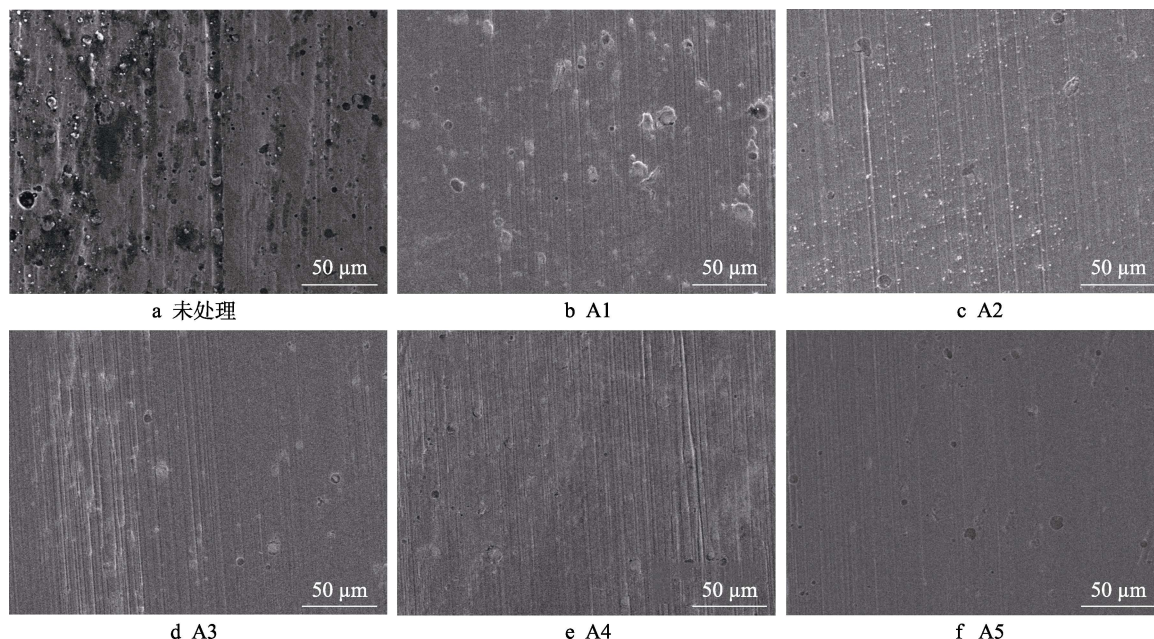


图 8 TiN 涂层磨损形貌
Fig.8 Wear morphology of TiN coatings

从上述不同处理参数下涂层磨损情况的分析可以看出, 激光冲击强化前处理可有效改善钛合金与 TiN 涂层的界面结合性能, 从而显著提高 TiN 的耐磨性能。一方面激光冲击强化前处理留下的微凹坑变形在摩擦磨损过程中具有储存磨屑、磨粒的作用, 可以减少异物对涂层的微观切削作用, 从而缓解涂层表面的磨粒磨损。另外, TC4 钛合金在激光处理后硬度有明显的提升, 抵抗塑性变形的能力增强, 给予 TiN 更有效的支撑, 在涂层受到外载荷时, 涂层的弯曲变形会减弱, 抵抗磨粒挤压剥落的能力也有所增强。同时, 激光冲击前处理显著提高涂层与基体的结合力, 在受到上试样的切向力时可以抑制由于运动或者变形不同步产生的微裂纹。

3 结论

1) 激光冲击强化前处理可以有效提高 TiN 涂层的界面结合力, 光斑搭接率越高, 或者激光功率密度越大, 激光冲击处理对界面结合力的提升效果越明显, 50% 搭接率、 6.43 GW/cm^2 功率密度将 TiN 涂层与 TC4 基体的界面结合力提升了 37.02%。其主要原因是激光冲击强化在基体表面形成规则的凹坑和凸

起织构, 并产生一定厚度的硬化层, 表面织构可以增强涂层与基体的机械锁合, 而更高的硬度和残余应力则可以提高材料抵抗变形的能力, 在涂层沉积过程中抑制内应力和界面应力集中造成的裂纹损伤。

2) 光斑搭接率主要是通过改变激光冲击次数影响处理效果的, 在激光功率密度相同的情况下, 50% 搭接率可以获得较为均匀的表面粗糙度和残余应力场分布, 试样受激光冲击处理, 其表面几何形貌和残余压应力直接受材料表面塑性变形和受压体积传递的影响。随着激光功率密度的增大, 激光冲击强化后, 材料表面粗糙度和残余应力都逐渐增大。

3) 激光冲击强化与涂层技术的复合处理显著降低了 TC4 钛合金的摩擦因数和磨损率, 且随着光斑搭接率的提高, 或者随着激光功率密度的增大, 激光冲击处理对磨损率的降低效果越明显。激光冲击形成的表面纹理在摩擦过程中起到存储磨屑的作用, 抑制磨粒磨损, 激光冲击和 TiN 涂层的协同作用提高了材料的摩擦磨损性能。

参考文献:

- [1] ANANTH M P, RAMESH R. Sliding Wear Characteristics

- of Solid Lubricant Coating on Titanium Alloy Surface Modified by Laser Texturing and Ternary Hard Coatings [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(4): 839-847.
- [2] LAO Xing-sheng, ZHAO Xu-feng, LIU Yong, et al. Study on the Friction Characteristics of Plasma Spray Modified Layer on Titanium Alloy in Artificial Sea Water Environment[J]. Materials Science Forum, 2020, 990: 73-78.
- [3] 高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915-922.
- GAO Yu-kui. Influence of Different Surface Modification Treatments on Surface Integrity and Fatigue Performance of TC4 Titanium Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 915-922.
- [4] YUAN Shuo, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Effect of Laser Surface Texturing (LST) on Tribological Behavior of Double Glow Plasma Surface Zirconizing Coating on Ti6Al4V Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 368: 97-109.
- [5] HUANG Jun-qi, MA Jie, WU Long, et al. Microstructure and Wear Resistance of WS₂/W Composite Coating on TC4 Titanium Alloy Surface[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1885(3): 032046.
- [6] 黄雪丽, 谭君国, 张腾飞, 等. 钛合金表面 TiN/CrN 纳米多层薄膜的制备及耐磨、耐腐蚀性能[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 4139-4143.
- HUANG Xue-li, TAN Jun-guo, ZHANG Teng-fei, et al. Deposition and Anti-Wear/Corrosion Properties of Nano-Multilayer TiN/CrN Films on Titanium Alloy[J]. Materials Reports, 2021, 35(4): 4139-4143.
- [7] 孟君晟, 金国, 史晓萍, 等. Ti6Al4V 表面氩弧熔覆 Ti+BN 复合涂层组织及耐磨性[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 184-190.
- MENG Jun-sheng, JIN Guo, SHI Xiao-ping, et al. Microstructure and Wear Resistance of Ti+BN Composite Coating on Ti6Al4V Alloy by Argon Arc Cladding[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 184-190.
- [8] ZHANG Peng, SHAN Lei, SU Xiao-lei, et al. Microstructure and Tribological Performance of CrTiSiCN Coatings on 316L and TC4 in Seawater[J]. Tribology International, 2021, 156: 106832.
- [9] 吴秋实. 基体强化对钛合金磁控溅射镀层摩擦磨损性能的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- WU Qiu-shi. Effect of Substrate Strengthening on Friction and Wear Properties of Magnetron Sputtered Coatings on Titanium Alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [10] 苏波泳, 孙桂芳, 裴旭, 等. 冲击波动态传播特性对激光喷丸残余应力场的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 15-22.
- SU Bo-yong, SUN Gui-fang, PEI Xu, et al. Influences of Shock Wave Transient Transmission on Laser Peened Residual Stress Fields[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 15-22.
- [11] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- LI Ying-hong. Theory and Technology of Laser Shock Processing[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [12] INOGAMOV N A, ZHAKHOVSKY V V, ILNITSKY D K, et al. Laser Shock Peening[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1787(1): 012024.
- [13] LU H F, XUE K N, XU X, et al. Effects of Laser Shock Peening on Microstructural Evolution and Wear Property of Laser Hybrid Remanufactured Ni25/Fe104 Coating on H13 Tool Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 291: 117016.
- [14] CLAUSER A H, FAIRAND B P, WILCOX B A. Pulsed Laser Induced Deformation in an Fe-3 Wt Pct Si Alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 8(1): 119-125.
- [15] SÁNCHEZ-SANTANA U, RUBIO-GONZÁLEZ C, GOMEZ-ROSAS G, et al. Wear and Friction of 6061-T6 Aluminum Alloy Treated by Laser Shock Processing[J]. Wear, 2006, 260(7-8): 847-854.
- [16] CAO Zi-wen, XU Hai-ying, ZOU Shi-kun, et al. Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-Spot Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(4): 650-656.
- [17] 罗新民, 赵广志, 张永康, 等. Ti-6Al-4V 激光冲击强化及其微结构响应分析[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1116-1122.
- LUO Xin-min, ZHAO Guang-zhi, ZHANG Yong-kang, et al. Laser Shock Processing of Ti-6Al-4V and Analysis of Its Microstructure Response[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(9): 1116-1122.
- [18] DHAKAL B, SWAROOP S. Effect of Laser Shock Peening on Mechanical and Microstructural Aspects of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116640.
- [19] CHEN Lan, REN Xu-dong, ZHOU Wang-fan, et al. Evolution of Microstructure and Grain Refinement Mechanism of Pure Nickel Induced by Laser Shock Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 728: 20-29.
- [20] CAO Xin, HE Wei-feng, LIAO Bin, et al. Effect of TiN/Ti Coating Combined with Laser Shock Peening Pre-Treatment on the Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126393.
- [21] MISHRA S K, GHOSH S, ARAVINDAN S. Physical Characterization and Wear Behavior of Laser Processed and PVD Coated WC/Co in Dry Sliding and Dry Turning Processes[J]. Wear, 2019, 428-429: 93-110.
- [22] KARBALAIAN H R, YOUSEFI-KOMA A, KARIMPOUR M, et al. Investigation on the Effect of Overlapping Laser Pulses in Laser Shock Peening with Finite Element Method[J]. Procedia Materials Science, 2015, 11: 454-458.
- [23] HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang, HU Jun. 3-D FEM

- Simulation of Laser Shock Processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3-4): 1426-1435.
- [24] HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang. Overlapping Rate Effect on Laser Shock Processing of 1045 Steel by Small Spots with Nd:YAG Pulsed Laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1517-1525.
- [25] HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang. Numerical Simulation and Experimentation of Overlapping Laser Shock Processing with Symmetry Cell[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(2): 152-162.
- [26] BALLARD P. Residual Stresses Induce by Rapid Impact-Application of Laser Shocking[D]. France: Ecole Poly Technique, 1991.
- [27] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(1-2): 102-113.
- [28] DING K, YE L. Laser shock peening Performance and Process Simulation[M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [29] 姜银方, 来彦玲, 张磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2073-2079.
- JIANG Yin-fang, LAI Yan-ling, ZHANG Lei, et al. Investigation of Residual Stress Hole on a Metal Surface by Laser Shock[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2073-2079.
- [30] ZHANG X C, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Improvement of Fatigue Life of Ti-6Al-4V Alloy by Laser Shock Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(15): 3411-3415.
- [31] 李振华, 盛敏奇, 钟庆东, 等. 基体表面粗糙度对 H13 钢板表面镀铬层的影响[J]. 材料研究学报, 2010, 24(5): 455-463.
- LI Zhen-hua, SHENG Min-qi, ZHONG Qing-dong, et al. Influence of Surface Roughness of Matrix on Chromium Coatings on the Surface of H13 Steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5): 455-463.
- [32] KROMER R, CORMIER J, COSTIL S. Role of Powder Granulometry and Substrate Topography in Adhesion Strength of Thermal Spray Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(5): 933-945.
- [33] KURŞUNCU B. The Effect of Cryogenic Treatment on Dry Sliding Wear Mechanisms in Hard Coatings[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(1): 97-102.
- [34] PAIVA J M, FOX-RABINOVICH G, LOCKS JUNIOR E, et al. Tribological and Wear Performance of Nanocomposite PVD Hard Coatings Deposited on Aluminum Die Casting Tool[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(3): 358.
- [35] MENG Ying, DENG Jian-xin, LU Yang, et al. Fabrication of AlTiN Coatings Deposited on the Ultrasonic Rolling Textured Substrates for Improving Coatings Adhesion Strength[J]. Applied Surface Science, 2021, 550: 149394.
- [36] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping.. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [37] GONZÁLEZ-CARMONA J M, TRIVIÑO J D, GÓMEZ-OVALLE Á, et al. Wear Mechanisms Identification Using Kelvin Probe Force Microscopy in TiN, ZrN and TiN/ZrN Hard Ceramic Multilayers Coatings[J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 24592-24604.

(上接第 303 页)

- [22] 杨洪亮, 金湘中, 修腾飞, 等. 钢/铝异种金属光纤激光焊接数值模拟[J]. 激光技术, 2016, 40(4): 606-609.
- YANG Hong-liang, JIN Xiang-zhong, XIU Teng-fei, et al. Numerical Simulation of Fiber Laser Welding of Steel/Aluminum Dissimilar Metals[J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 606-609.
- [23] 杨红斌, 卜恒勇, 李萌蘖. 7075 铝合金汽车支撑摆臂锻件固溶处理温度场模拟[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 212-217.
- YANG Hong-bin, BU Heng-yong, LI Meng-nie. Temperature Field Simulation for Solid Solution Treatment of 7075 Aluminum Alloy Support Swing Arm Forging for Automobile[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(10): 212-217.
- [24] 钟流发, 刘祚时, 高秀琴, 等. 基于 JMatPro 与 ANSYS 联合仿真的变速器齿轮轴选材和热处理工艺改进设计[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 84-88.
- ZHONG Liu-fa, LIU Zuo-shi, GAO Xiu-qin, et al. Material Selection and Heat Treatment Process Improvement Design of Transmission Gear Shaft Based on Joint Simulation of JMatPro and ANSYS[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(5): 84-88.
- [25] TRAN H S, TCHUINDJANG J T, PAYDAS H, et al. 3D Thermal Finite Element Analysis of Laser Cladding Processed Ti-6Al-4V Part with Microstructural Correlations[J]. Materials & Design, 2017, 128: 130-142.
- [26] GAO Jia-li, WU Cheng-zu, HAO Yun-bo, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation on Three-Dimensional Modelling of Single-Track Geometry and Temperature Evolution by Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106287.
- [27] LIU Hao, DU Xiao-tong, GUO Hua-feng, et al. Finite Element Analysis of Effects of Dynamic Preheating on Thermal Behavior of Multi-Track and Multi-Layer Laser Cladding[J]. Optik, 2021, 228: 166194.