

Ti6Al4V 表面激光渗碳磨削及其强化机理

邓延生^{1*}, 曹长虹^{2*}, 陶彦辉², 孙聪³

(1.季华实验室, 广东 佛山 528000; 2.新疆工程学院, 乌鲁木齐 830023;
3.东北大学, 沈阳 110819)

摘要: **目的** 利用激光渗碳磨技术, 研究 Ti6Al4V 表面性-形协同控制机理。**方法** 以 Ti6Al4V 为研究对象, 提出了一种高效的加工强化一体化技术——激光渗碳磨削。即对工件表面预涂覆渗碳膏, 并置于马弗炉中干燥, 形成稳定的固态碳源。采用激光辅热的方式对磨削加工过程进行表面性形协同抗疲劳制造。通过对比实验研究了激光渗碳磨削和传统磨削对 Ti6Al4V 表面力学性能和加工表面质量的影响。对 Ti6Al4V 表面微相组成、硬度、耐磨性和表面粗糙度进行表征。探究了激光渗碳合金化对材料磨削去除的正向作用以及磨削热回火对重熔层性能的调节作用。**结果** 激光辅热足以使磨削表面温度高达 1 700 °C, 实现表面主动渗碳, 且激光渗碳磨削后, Ti6Al4V 表面形成具有均匀树枝状晶和颗粒状碳化物的重熔层, 加工表面硬度达到 850HV, 磨损损失仅为常规磨削的 6.7%, 表面粗糙度 R_a 降低 22%。**结论** 激光渗碳磨是一种高效的 Ti6Al4V 表面性-形协同制造新技术。渗碳重熔层不仅提高了加工表面力学性能, 还会影响表层材料的磨削特性, 使加工表面更加光整。该技术实现了磨削加工-强化一体化制造, 对指导工业生产具有重要的实际意义。

关键词: Ti6Al4V; 激光渗碳磨削; 性-形协同控制; 加工强化一体化

中图分类号: TG580 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)18-0167-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.18.014

Laser Carburizing Grinding of Ti6Al4V Surface and Its Strengthening Mechanism

DENG Yansheng^{1*}, CAO Changhong^{2*}, TAO Yanhui², SUN Cong³

(1. Jihua Laboratory, Guangdong Foshan 528000, China; 2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumchi 830023, China; 3. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

ABSTRACT: Titanium alloy is considered as the superalloy and widely utilized in military, aerospace, biomedicine, and marine engineering for its special strength and property. Moreover, high-performance Ti6Al4V surfaces are in great demand in aerospace, military, automotive manufacturing and marine engineering. Many surface strengthening methods are applied in Ti6Al4V, such as electrochemical anodic oxidation, chemical vapor deposition, and plasma spraying technology. However, Ti6Al4V surface machining and strengthening technologies face challenges in balancing productivity, energy consumption and

收稿日期: 2024-01-10; 修订日期: 2024-04-12

Received: 2024-01-10; Revised: 2024-04-12

基金项目: 广东省实验室重点项目 (X190301TH190); 晶圆减薄金刚石砂轮磨块材料溶胶凝胶法制备技术开发 (S230551VB230); 国家自然科学基金资助项目 (52105433)

Fund: Key Project of Guangdong Province Laboratory (X190301TH190); Development of Technology for the Preparation of Wafer-thinning Diamond Wheel Grinding Block Materials by Sol-gel Method (S230551VB230); National Natural Science Foundation of China (52105433)

引文格式: 邓延生, 曹长虹, 陶彦辉, 等. Ti6Al4V 表面激光渗碳磨削及其强化机理[J]. 表面技术, 2024, 53(18): 167-174.

DENG Yansheng, CAO Changhong, TAO Yanhui, et al. Laser Carburizing Grinding of Ti6Al4V Surface and Its Strengthening Mechanism[J]. Surface Technology, 2024, 53(18): 167-174.

*通信作者 (Corresponding author)

equipment cost. Nowadays, the laser technology has become a hot topic in the key part manufacture. The high precision surface removal is required to improve the surface quality. It can be found that these two procedures seem complicated and time-consuming. Immortally, the productivity rate decreases as well. To fill these gaps, an efficient integrated Ti6Al4V machining and strengthening technology, laser carburizing grinding, is proposed to study the control mechanism of property-shape synergistic manufacturing technology. With the help of the property-shape synergistic manufacturing method, the Ti6Al4V surface with higher strength can be obtained efficiently. The workpiece was coated by the carbon carburization paste, which was mixed by the carbon powder, the starch and the PVA-1799. Afterwards, the coated workpiece was set in the muffle furnace and was heated for 15 min at the temperature of 150 °C. Therefore, the workpiece with the ready-made solid carbon source could be obtained. After the experiment item was confirmed, the grinding was conducted on the carbon coated workpiece assisted by the laser heating. The macroscopic characterization of the ground surface was testified by the force measurement, the temperature paperless recorder, the metallographic microscope, the microhardness tester, and the friction wear tester. The effects of laser carburizing grinding and conventional grinding on the mechanical properties and machining accuracy of Ti6Al4V surfaces were investigated by the designed comparative experiments. The microphase composition, microhardness, wear resistance and surface roughness of Ti6Al4V surfaces were characterized. Moreover, the positive effect of laser carburizing alloying on material removal by grinding and the modulating effect of grinding heat tempering on remelted layer properties were revealed. During the whole material removal process, the workpiece surface experienced two temperature rising process, which was on account of the grinding tempering process and the laser heating process respectively. The grinding tempering process could arise the surface temperature at 300 °C. The assisted laser heating could arise the surface temperature at 1 700 °C, and the higher temperature could cause the surface active carburization and the microstructure transformation. After laser carburizing grinding, the dendritic shape and granular shape microstructure could be observed at the laser grinding carburization surface. The surface microhardness of Ti6Al4V can reached 850HV, the wear loss was only 6.7% of that by conventional grinding, and the surface roughness Ra was reduced by 22%. To sum up, the proposed composite processing technology is beneficial for higher strength surface with higher precision compatibly. This study proposes a new technology of Ti6Al4V surface property-shape synergistic manufacturing, which fills the grinding processing-strengthening integration theory gap and has important practical significance in guiding industrial production.

KEY WORDS: Ti6Al4V; laser carburizing grinding; property-shape synergistic manufacturing; processing-strengthening integration

被誉为“未来金属”的钛合金，因其优越的综合性能被广泛应用于航空航天、生物医学和海洋工程等领域，常被用来制造反射系统支撑背板、空间连接结构等^[1]。Ti6Al4V 是一种密度低、强度高、耐腐蚀、高韧性的两相合金。bcc 晶格的 β 相在 α 相间隙中存在，提高了材料的断裂韧性^[2-3]。由于这些特点，Ti6Al4V 成为具有代表性且应用较广泛的钛合金。然而，在生产 Ti6Al4V 产品的生产实践中，对一些核心零部件的接触表面往往提出远高于基体材料的力学性能要求^[4-5]。因此，关于 Ti6Al4V 表面强化方法及其改性机理的探索一直是近年来的研究热点。

电化学阳极氧化由于成本相对较低，是目前应用较广泛的 Ti6Al4V 表面强化方法^[6]。然而，当电化学阳极氧化应用于大表面或复杂形状的零件时，电流密度分布不均匀会导致涂层厚度不均匀。同时，氧化层的存在增加了材料的脆性^[7]。化学气相沉积（CVD）技术可以很好地解决上述问题，CVD 技术可以形成密度和均匀性非常高的涂层，在生物医学领域应用广泛^[8]。但 CVD 技术存在设备复杂、生产效率低等问

题，在实际工业生产中成本较高^[9]。与上述方法相比，等离子喷涂技术是目前常用的高效面强化方法^[10-11]，难以避免的是，等离子喷涂技术在实际生产应用中仍面临涂层易出现气孔、结合强度弱等问题。

近年来激光技术发展迅速，其设备成本和工艺成本已显著降低。因此，激光合金化已成为一种极具潜力的 Ti6Al4V 表面强化方法。与其他强化方法不同，激光合金化具有高生产率和可靠的涂层结合强度。Murmu 等^[12]使用脉冲波激光源将 Ti6Al4V 合金与钛基复合材料（Ti6Al4V-ZrO₂-CeO₂）熔覆。CeO₂ 相的存在细化了复合涂层的微观组织，涂层结合处没有产生垂直裂纹。此外，激光合金化在涂层材料（硬质合金、镍基合金和高熵合金）的制备方面具有广泛的适应性^[13-15]。Zhang 等^[16]在 Ti6Al4V 表面制备了等物质的量比高熵合金 FeCuNiTiAl 涂层，该涂层与基体材料有良好的冶金结合，在界面处没有发现裂纹等缺陷。在 Ti6Al4V 表面激光合金化的各种方法中，渗碳合金化因其适应性强、性价比高而广泛应用于实际生产。Courant 等人测试了添加石墨的激光渗碳钛合金

表面的显微组织和硬度。重熔层由坚硬的碳化钛相、延展性基体相和润滑的石墨夹杂相组成,显著提高了加工表面的硬度^[17]。Saleh 等利用激光合金化对 Ti6Al4V 表面进行渗碳处理,提高了材料的硬度和耐磨性。此外,Gayen 等^[18]最近的研究结果表明,激光合金化可以显著提高 Ti6Al4V 表面的耐腐蚀性和生物活性。然而,激光合金化技术仍存在着一些不可避免的问题。一方面,由于表层材料的重熔,强化表面的粗糙度难以稳定控制^[19]。另一方面,重熔层表面存在明显的温度梯度,容易造成材料表层微观组织分布不均匀^[20]。在实际生产中为了增强表面的制造精度和力学性能,激光合金化后的表面往往要进行精加工处理,最常见的是磨削加工^[21-23]。值得注意的是,这种表面加工和强化工艺的分离导致了能源浪费,延长了工艺周期,降低了高性能 Ti6Al4V 表面的生产率。同时,Ti6Al4V 表面的加工与强化之间存在着密切的相关性。激光合金化工艺改变了表层材料的切削性能,影响了零件的表面光洁度。相反,磨削过程中的热回火效应会影响合金层的微观相分布,从而改变了表层材料的力学性能。

以上问题在目前的生产实践和科学研究中都没有得到充分的考虑。为此,提出了一种 Ti6Al4V 表面激光渗碳磨削方法,将激光合金化工艺耦合到表面磨削加工过程中。通过这种方式实现 Ti6Al4V 表面加工与强化过程的一体化,进而简化工艺流程,提高生产效率。设计了常规磨削和激光渗碳磨削的对比试验,研究了激光、渗碳和磨削工艺对 Ti6Al4V 表面力学性能及其加工质量的综合影响。此外,对加工表面的微

相组成、硬度、耐磨性和表面粗糙度进行表征。揭示了激光渗碳合金化对材料磨削去除的正向作用以及磨削热回火对重熔层性能的反向调节作用。本研究开辟了一种 Ti6Al4V 表面性-形协同制造新技术,对指导工业具有重要的实际意义。同时,研究结果填补了磨削表面加工强化一体化理论的空白,为高性能 Ti6Al4V 表面的制造提供了理论支持。

1 激光渗碳磨削实验

创新性地提出了一种激光渗碳磨削方法,并开展了一系列实验研究。借助高能激光将渗碳合金化技术与表面磨削工艺相结合,实现了 Ti6Al4V 表面的加工-强化一体化。同时,对加工表面微观相组成进行了表征,并测试表层材料力学性能。通过构建表面微观结构与宏观性能之间的映射关系,来研究激光渗碳磨削过程中 Ti6Al4V 表面的强化机理。

1.1 实验材料与方法

如图 1a 所示,基于自动平面磨床 MY250 搭建激光渗碳磨削试验平台,包含力-热同步测量系统、激光辅助模块和磨削系统。工件由专用夹具定位,其底部留有通孔以方便布置热电偶。同时,夹具底部与测力计刚性连接,记录仪可以实时捕获加工过程中磨削表面的动态热-力数据。如图 1b 所示,高能激光从实验台的侧面入射,在工件表面形成直径为 5 mm 的光斑。经过大量的实验试错,确定光斑区域距离磨削接触区为 4 cm,可以确保表面熔池在进入接触区之前

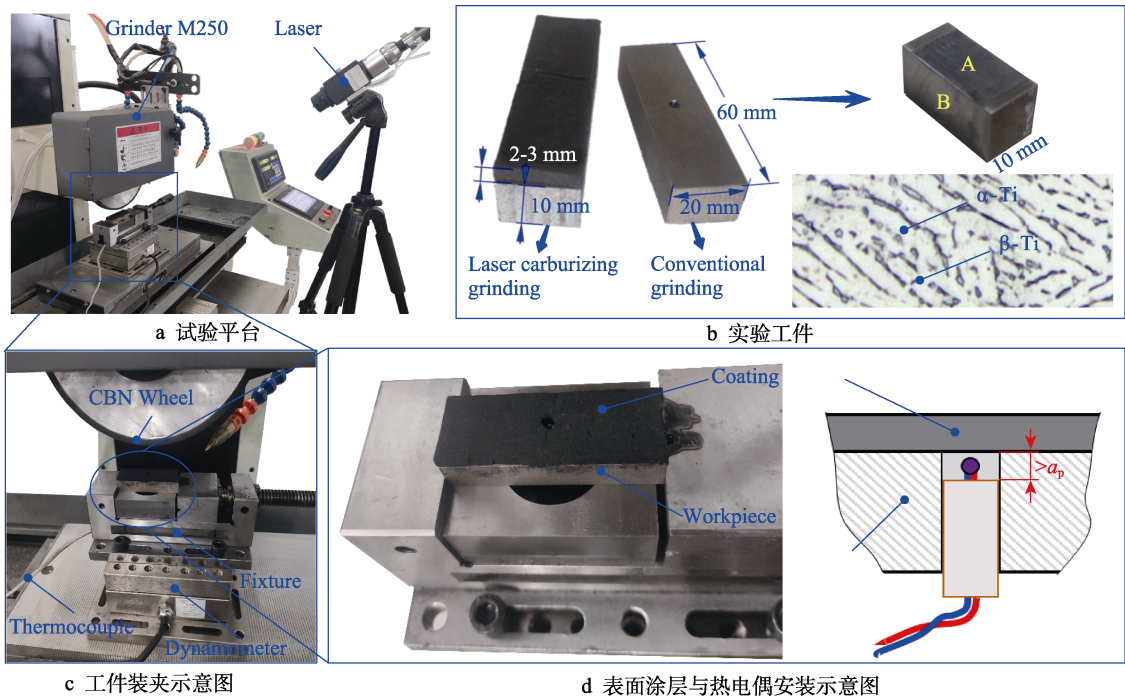


图 1 实验设备与实验材料

Fig.1 Experimental equipment and materials: a) test platform; b) workpiece; c) schematic diagram of clamping schematic; d) schematic diagram of surface coating and thermocouple installation

表 1 各实验组磨削参数
Tab.1 Grinding parameters of each experimental group

Group	Working condition	Laser power/ (J·s ⁻¹)	Carbon coating	Grinding depth <i>a_p</i> /μm	Wheel's linear speed <i>v_s</i> /(m·s ⁻¹)	Feeding rate <i>v_w</i> /(m·s ⁻¹)	Wheel granularity	Wheel's diameter <i>d_{eq}</i> /mm
1	Conventional grinding	0	×	60	30	3	F60	180
2	Laser carburizing grinding	600	○	60				

彻底固化并保持一定的激光软化效果。随着工件的进给，表层材料先被激光照射形成合金化熔池。之后熔池冷却固化在磨削接触区发生动态去除。

如图 1b 所示，实验所用工件为 60 mm×20 mm×10 mm 的 Ti6Al4V 矩形块。基体材料的微观结构为典型的双态组织，由 α 相和 β 相组成。实验组工件表面覆盖均匀厚度的碳涂层（2~3 mm）。碳涂层由碳粉和少量糊化淀粉制备的碳膏剂经过干燥脱水后形成。工件的中心开有直径 3 mm 的通孔用于固定热电偶。热电偶测量端套着一层陶瓷管用于绝缘和固定。电偶固定后，测量节点略高于陶瓷管，预留空间要大于单次磨削深度 *a_p*。加工过程中即使测量节点顶端被砂轮破坏，在陶瓷管的绝缘保护下仍可以形成电偶回路，保持温度数据的传输。实验加工工况分为 2 种，其中激光渗碳磨削为研究组，传统磨削为对比组。每组工况进行 2 次重复试验，以保证实验结果的稳定性。各组实验组加工参数见表 1。

1.2 加工表面性能表征

如图 1b 所示，用于材料表征的试样取自于垂直加工方向工件的中心区域（避免中心孔）。试样的 A 面是加工表面，其中微观相组成使用 Rigaku Smartlab X 射线衍射仪进行检查。采用 CuKai 辐射阳极对样品进行步进扫描，扫描角度为 30°~90°。步长为 0.005°，每一步的测试时间为 5 s。同时，在 5 个随机位置测量了加工表面的显微硬度。实验设备为 HV-1000Z 型显微硬度计，加载力为 4.9 N。此后，在高速往复摩擦磨损试验机上测试加工表面的耐磨性。实验在 30 N

的法向负荷和 4 Hz 的往复频率下持续 60 min。利用超景深显微镜观察磨损表面的微观形貌，并对磨损深度和磨损宽度进行统计。进一步探讨了激光重熔和渗碳合金化对磨削表面加工表面质量的影响。观察磨削表面的加工形貌，用粗糙度计测量不同工况下的粗糙度 *R_a* 值。试样的 B 面为工件的横截面，用金相显微镜观测沿深度方向的微观组织特征。样品依次经过砂纸研磨、抛光，然后在 HF 腐蚀液中浸泡约 10 s。同时，在截面上沿深度方向测量材料的硬度变化，加载力为 4.9 N。

2 结果与讨论

2.1 动态磨削力与磨削温度

探究激光渗碳磨削过程中表层材料的形成与改性机理，需要先获得加工表面的动态热-力状态。图 2a 对比了不同实验组在加工过程中切向磨削力 *F_x* 的动态变化，2 种工况的平均值分别为 20.78 N 和 10.21 N，法向磨削力的动态分布与切向磨削力一致，但对应 2 种工况下的平均值分别为 42.96 N 和 15.74 N。结合整个过程磨削力的动态分布情况，可以看出，磨削开始时，磨削力迅速增大。当进入稳定磨削阶段后，磨削力在平均值上下来回波动。之后，随着砂轮移除磨削接触区，磨削力逐渐减小到 0。对比各实验组稳定阶段的平均磨削力（从图 2a 可以发现，常规磨削（第一组）的磨削力较小，激光渗碳磨削（第二组）产生的磨削力明显增大，其稳定阶段动

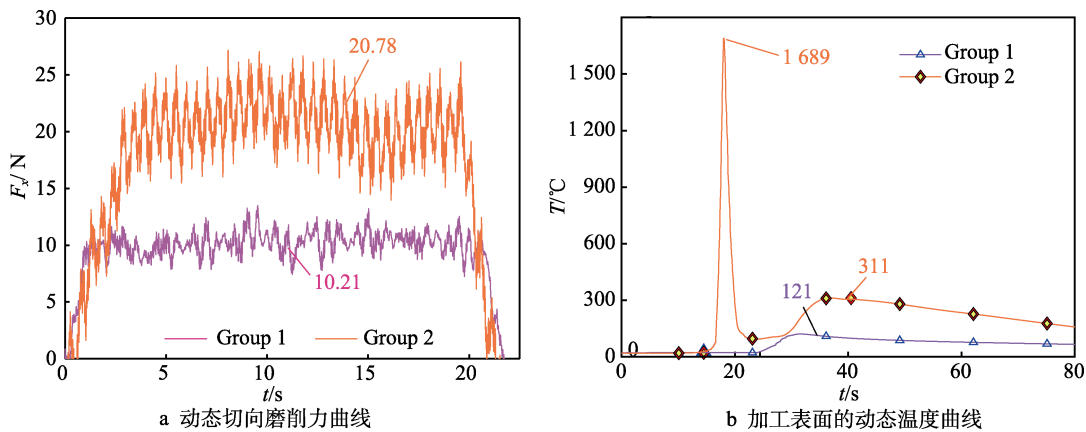


图 2 动态磨削力与磨削热
Fig.2 Dynamic grinding forces and grinding heat: a) dynamic tangential grinding force profile;
b) dynamic temperature profile of the machined surface

态力的波动范围也更大。这是因为, 表层材料受渗碳合金化影响形成了重熔层。表层材料的硬度提升, 使磨削过程产生更大的磨削力。另一方面, 工件表面覆盖碳涂层对砂轮去除过程产生阻碍, 涂层破碎脱落时引起磨削力波动, 使动态测量结果的波动范围增大。

图 2b 为不同实验组测得的加工表面动态温度曲线。对具备激光加热过程的实验组 2 而言, 材料表面的升温梯度和降温梯度都很大, 峰值温度均接近 1700°C 。因此表层材料会在光斑照射区域形成熔池并快速冷却凝固, 部分高温 β 相会转变成 α 相马氏体, 使材料表面力学性能发生改变。此外, 2 组的动态温度曲线存在第二峰值, 这是由于磨削加工阶段接触区生热造成的。与常规磨削 (1 组) 相比, 激光渗碳磨削会使接触区产生更多的热能, 这是因为经过激光强化后表层材料更难以去除, 使切向磨削力增大, 接触区内的生热功率增加。

2.2 加工表面微观相组成及其金相特征

图 3 为加工表面 XRD 的测试结果。对常规磨削而言, 磨削温度较低且表面无涂层覆盖。因此, 加工表面微观相组成与 Ti6Al4V 基体材料相近, 为 α -Ti。图 3b 为激光渗碳磨削的结果。加工表面的微观相成分除了能检测到 α -Ti 外还存在明显的碳化物相。说明在激光重熔作用下, 碳涂层释放出活性碳原子

与表层材料发生反应, 生成了钛和钒的碳化物。

图 4 为常规磨削的横断面金相组织形态。表层微观相呈现出双相结构, 由 α 相和 β 相片层交替组成。图 4b 与图 4c 分别为加工表面与内层基体材料的微观组织形态。可以看出加工表面的 β 相片层在磨削热-力耦合作用下发生了细晶强化, 在 α 相间形成了更为细小的 β 相区, 双相组织分布更加均匀。激光渗碳磨削的断面金相形貌如图 5 所示。在低倍光学显微镜下能观测到加工表面存在分层现象, 自上而下分为重熔层和针状马氏体层。这说明在高能激光轰击作用下, 表层材料温度超过自身熔点 ($1632\sim 1660^{\circ}\text{C}$) 并形成熔池。同时, 碳涂层破碎成细小的微粒进入熔池并释放活性碳原子。此后, 熔池内材料迅速凝固, 碳微粒为该过程提供了大量的结晶形核点。如图 5b 所示, 重熔层内存在明显的树枝状晶体结构且枝晶生长方向各异, 说明材料凝固过程中形核点均匀且降温迅速。此外, 在树枝状晶体的间隙处可以观察到大量的碳化物, 这表明在表层材料凝固的过程中活性碳原子与材料发生了反应, 生成了钛和钒的碳化物, 第 2 组表面的 XRD 检测结果证实了这一点。重熔层下方是针状马氏体层, 该层是在高温状态下由等轴 β 相快速冷却形成。在激光加热过程中, 亚表面材料的温度没有达到熔点, 但超过了 β 相的临界转变温度 (750°C)。因此, 基体中的两相组织会在加热阶段全部转变为等

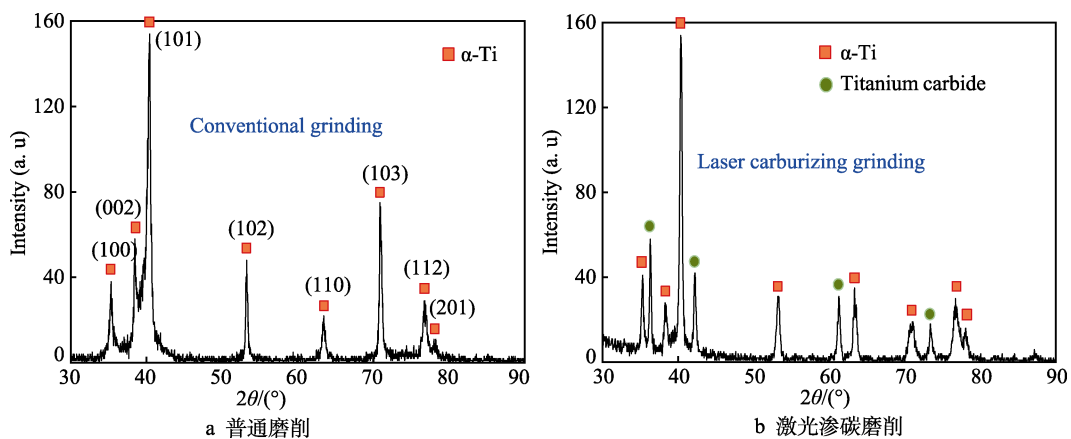


图 3 加工表面的 XRD 衍射结果

Fig.3 XRD diffraction results of the machined surface: a) conventional grinding; b) laser carburizing grinding

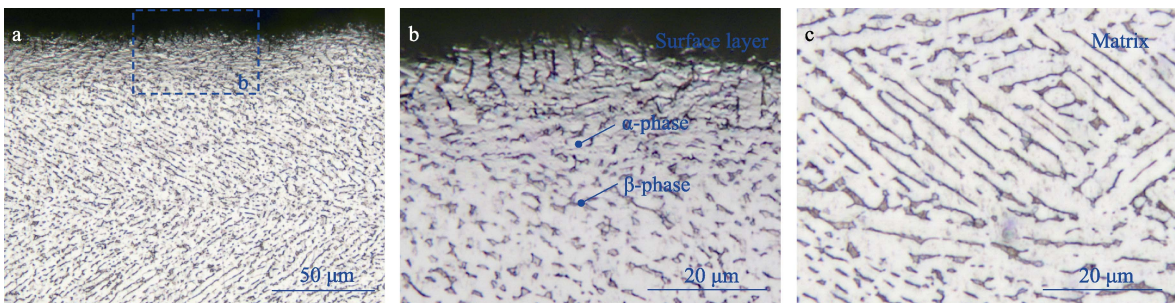


图 4 常规磨削的断面金相形貌 (a)、加工表面金相特征 (b) 以及内部材料金相特征 (c)

Fig.4 Metallographic morphology of the section after conventional grinding (a), metallographic characteristics of the machined surface (b) and metallographic characteristics of the internal material (c)

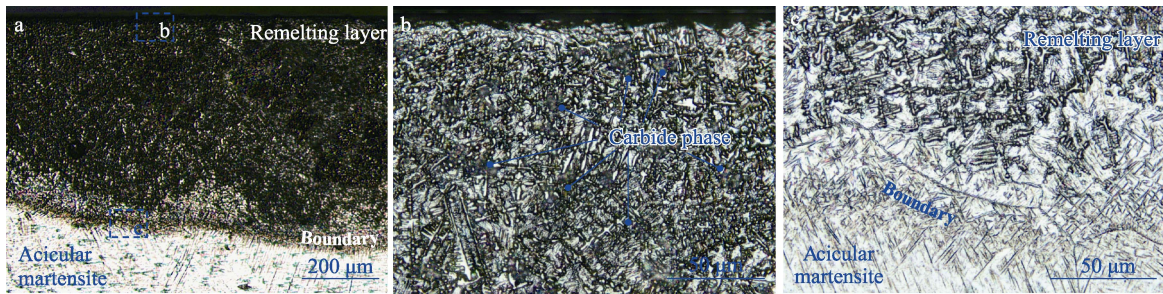


图 5 激光渗碳磨削的断面金相形貌 (a)、加工表面金相特征 (b) 以及重熔层边界处金相特征 (c)
Fig.5 Metallographic morphology of the section after laser carburising grinding (a), metallographic characteristics of the machined surface (b) and metallographic characteristics at the boundary of the remelted layer

轴 β 相。等轴 β 相迅速冷却转变成针状的马氏体相 α' ，如图 5c 所示。可以清晰地观测到等轴 β 相的原始晶界。两层的界面处微观相逐渐转变，枝状晶减少，等轴晶增加，在等轴晶内部形成针状马氏体组织。

2.3 显微硬度分布

在各实验组的加工表面选取 10 个随机位置测量表层材料的显微硬度，其结果如图 6 所示。对常规磨削而言，加工表面硬度分布十分稳定，其大小与基体硬度相近，均为 320HV 左右。虽然通过金相观测（图 4b）发现，磨削加工后表层材料微观结构更加细小，但其力学性能的提升并不显著。对激光渗碳辅助磨削而言，加工表面强化效果显著，表层材料硬度高达 850HV。重熔层中的树枝状晶更加细小，碳化物相分布更加均匀致密，这使表层材料获得了更加优异的力学性能。同时，对比了常规磨削与激光渗碳磨削后工件剖面上硬度沿深度方向的变化。对常规磨削而言，从加工表面到材料内部基体，硬度均稳定在 320HV 左右，磨削强化作用不明显。激光渗碳磨削后，重熔层硬度提升显著（800HV 左右），其厚度约为 500 μm 。根据硬度曲线的变化可以看出重熔层与针状马氏体层之间存在明显的硬度突变。针状马氏体层的硬度为 370HV 左右，较内层基体硬度略微提高。值得注意的是，针状马氏体层较厚，可达 1 000 μm ，这说明激光作用对亚表面材料固态相变过程产生了显著影响。

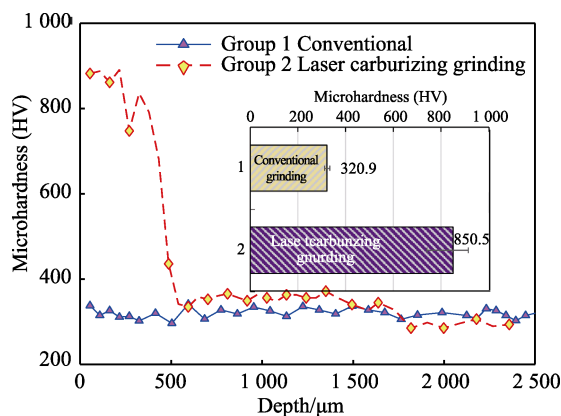


图 6 加工表面在显微硬度及深度方向上的硬度变化
Fig.6 Variation of microhardness of machined surface and hardness in depth direction

2.4 加工表面摩擦磨损性能

图 7 对比了不同加工方法下加工表面的动摩擦因数、磨损量和磨痕轮廓。普通磨削工艺后的材料表面硬度较低。因此，表层很快被磨损，动摩擦因数在整个磨损过程中不断上升，后半段磨损发生时，动摩擦因数已经大于 1。激光渗碳磨削表面的动摩擦因数在磨损开始时迅速增大，但是很快就会趋于平稳。此后，摩擦磨损过程进入稳定阶段，动摩擦因数稳定在 0.7 左右。同时，第二组表面的磨损量远小于第一组，仅为第一组的 6.25%。这说明在重熔层中均匀析出的枝晶和层状碳化物提高了表面材料的耐磨性。此外，磨痕的轮廓尺寸与磨损量成正比。对激光渗碳磨削而言，磨痕宽度 B 和磨痕高度 H 均显著减少。这是因为材料表面非常硬，压头难以完全压入，磨损接触面大大减少。

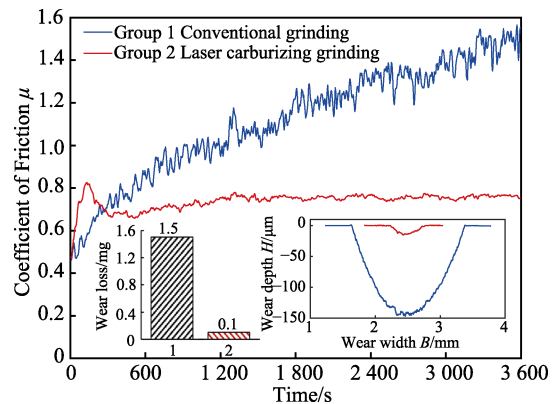


图 7 加工表面动摩擦因数、磨损量及磨痕轮廓
Fig.7 Dynamic friction coefficient, wear and abrasion contour of machined surface

图 8 对比了不同实验组磨损表面的微观形貌。对第一组而言，由于表层硬度较低，磨粒很容易压入材料表面。磨损表面存在很深的磨粒耕犁留下的沟壑。同时，表层材料在磨粒磨损中积累大量的塑性变形，形成片状剥落，如图 8a 所示。在表面磨损过程中，沟壑和片状剥落交替产生，因此动摩擦因数持续增大，磨损量显著。如图 8b 所示，第二组磨损表面整体来看较为平整。磨损表面存在由磨粒耕犁产生的沟

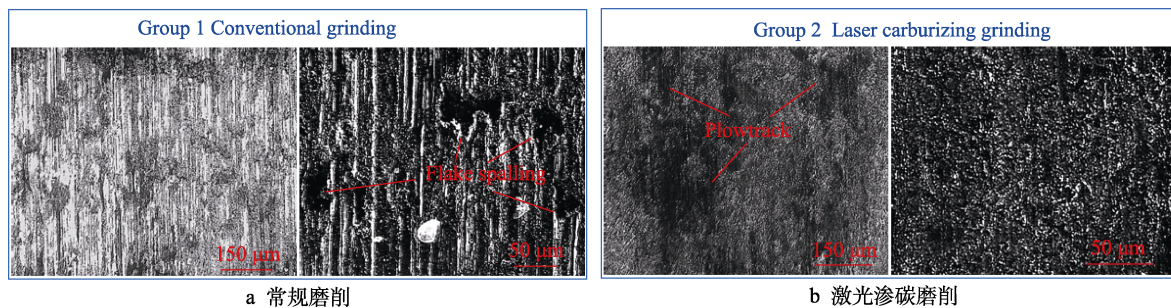


图 8 磨损表面的微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of the worn surface: a) conventional grinding; b) laser carburizing grinding

壑和粘着磨损形成的韧窝,但沟壑韧窝的尺寸远小于第一组。激光渗碳磨削后,重熔层组织细密,碳化物相分布更为均匀,加工表面耐磨性得到显著提升。

2.5 加工表面粗糙度

探究了激光重熔与渗碳合金化过程对磨削表面加工表面质量的影响。图 9 为常规磨削和激光渗碳磨削后,加工表面的形貌。由于磨粒耕犁和切削的作用,加工表面均可以观测到交替出现的沟壑和凸起。对 1 组而言,表面沟壑和凸起的尺寸较大,这是因为基体材料硬度较低,磨粒很容易完全压入材料表面。同时,材料在反复的塑性变形过程中发生断裂,图 9a 可以观测到大量的片状脱落。经过激光加热后,材料表面形成了重熔层,材料硬度得到提高。因此,沟壑和凸起的尺寸明显减小,磨削表面变得更加平整,如图 9b 所示。此外,经过激光渗碳合金化后的重熔层主要由致密的树枝状晶和弥散的碳化物相组成,具有较好的切削加工性能。因此,激光渗碳磨削的粗糙度 Ra 比常规磨削减少近 22%,加工表面质量得到了显著提升。

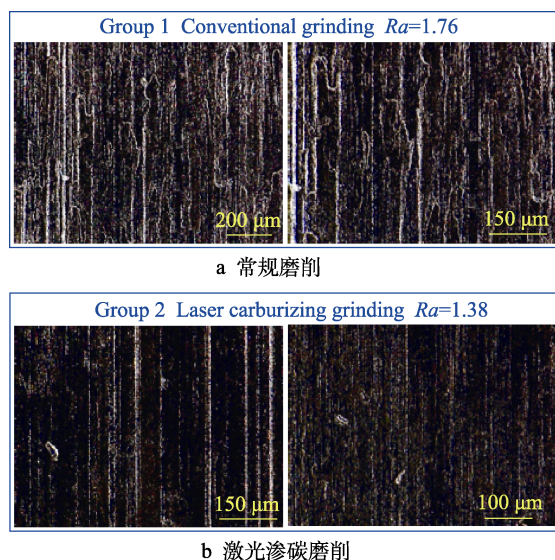


图 9 加工表面形貌

Fig.9 Surface morphology of machined surface: a) conventional grinding; b) laser carburizing grinding

3 结论

本文提出一种高效的 Ti6Al4V 加工-强化一体化技术,即激光渗碳磨削。该技术将激光合金化过程耦合到磨削加工中,通过加工热力耦合效应作用影响表层材料冶金转变过程,进而实现 Ti6Al4V 表面力学性能与形貌质量的协同控制。

对比了各实验组加工表面微观相成分和组织形态。激光渗碳磨削后,材料表面存在明显的碳化物相。碳涂层的覆盖对表层材料起到保护作用,避免了表面氧化物相的生成。在激光渗碳作用下,加工表面形成合金化重熔层,它由树枝状 Ti6Al4V 基体与其间隙处弥散分布的碳化物组成。亚表面材料发生固态相变,形成针状马氏体层。

探究了激光渗碳磨削对加工表面力学性能与形状质量的提升。激光渗碳磨削后材料表面硬度高达 850HV,与常规磨削表面硬度相比提升了 165%。亚表面针状马氏体层厚度达到 1 mm,硬度约为 370HV。同时,激光渗碳磨削提高了 Ti6Al4V 的抗磨损性能。材料磨损表面的沟壑和韧窝明显减小,动摩擦因数更早趋于稳定,与常规磨削相比磨损量大大降低。此外,渗碳合金化过程改善了表层材料的磨削性能。细小的树枝状晶和弥散分布的碳化物提高了重熔层的强度和抗变形能力,使磨粒难以完全切入材料表面。与常规磨削表面相比,激光渗碳磨削后的表面沟壑的深度与宽度显著减小,由材料塑型堆积引起的片状断裂完全消失,表面粗糙度 Ra 降低了 22%。

参考文献:

- [1] LIU S Y, SHIN Y C. Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A Review[J]. Materials & Design, 2019, 164: 107552.
- [2] LUAN X S, MENG J B, HUANG B Q, et al. Machining Characteristics of Ti6Al4V Alloy in Laser-Assisted Machining under Minimum Quantity Lubricant[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(3): 775-785.
- [3] KALANTARI O, JAFARIAN F, FALLAH M M.

- Comparative Investigation of Surface Integrity in Laser Assisted and Conventional Machining of Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 90-98.
- [4] WANG Z M, JIA Y F, ZHANG X C, et al. Effects of Different Mechanical Surface Enhancement Techniques on Surface Integrity and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V: A Review[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019, 44(6): 445-469.
- [5] LIN N M, LI D L, ZOU J J, et al. Surface Texture-Based Surface Treatments on Ti₆Al₄V Titanium Alloys for Tribological and Biological Applications: A Mini Review[J]. *Materials*, 2018, 11(4): 487.
- [6] TURALIOĞLU K, TAFTALI M, TEKDIR H, et al. The Tribological and Corrosion Properties of Anodized Ti₆Al₄V/316L Bimetallic Structures Manufactured by Additive Manufacturing[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126635.
- [7] PAVESI A, BANDIERA M, MANCINI A, et al. Effect of Anodizing on High Cycle Fatigue Behaviour of Cast AlSi₈Mg-T6 Alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107836.
- [8] BAO Y C, WANG W L, CUI W F, et al. Corrosion Resistance and Antibacterial Activity of Ti-N-O Coatings Deposited on Dental Titanium Alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 419: 127296.
- [9] MOSTAFAVI A H, MISHRA A K, GALLUCCI F, et al. Advances in Surface Modification and Functionalization for Tailoring the Characteristics of Thin Films and Membranes *via* Chemical Vapor Deposition Techniques[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(15): e53720.
- [10] HUAN Y C, WU K D, LI C J, et al. Micro-Nano Structured Functional Coatings Deposited by Liquid Plasma Spraying[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2020, 9(5): 517-534.
- [11] GUO Y, SONG C, CHEN D, et al. Low-Pressure Plasma Sprayed Dense Scandia-Stabilized Zirconia Electrolyte and Its Effect on SOFC Performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 977: 173276.
- [12] MURMU A M, PARIDA S K, DAS A K, et al. Evaluation of Laser Cladding of Ti₆Al₄V-ZrO₂-CeO₂ Composite Coating on Ti₆Al₄V Alloy Substrate[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 473: 129988.
- [13] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106619.
- [14] DONG Y P, LI Y L, ZHOU S Y, et al. Cost-Affordable Ti-6Al-4V for Additive Manufacturing: Powder Modification, Compositional Modulation and Laser In-Situ Alloying[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101699.
- [15] YANG Y W, YUAN F L, GAO C D, et al. A Combined Strategy to Enhance the Properties of Zn by Laser Rapid Solidification and Laser Alloying[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 82: 51-60.
- [16] ZHANG D Q, DU D, LIU G, et al. Microstructure and Wear Resistance of FeCuNiTiAl High-Entropy Alloy Coating on Ti₆Al₄V Substrate Fabricated by Laser Metal Deposition[J]. *Lubricants*, 2022, 10(10): 263.
- [17] COURANT B, HANTZPERGUE J J, AVRIL L, et al. Structure and Hardness of Titanium Surfaces Carburized by Pulsed Laser Melting with Graphite Addition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 160(3): 374-381.
- [18] GAYEN T K, PITAYANA S, AKINLABI E, et al. Studies on Laser Surface Processing of Titanium Based Alloy (Ti₆Al₄V) with Titanium, Carbon and a Mixture of Titanium and Carbon[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(10): 105947.
- [19] WENG F, CHEN C Z, YU H J. Research Status of Laser Cladding on Titanium and Its Alloys: A Review[J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 412-425.
- [20] LIU Y N, DING Y, YANG L J, et al. Research and Progress of Laser Cladding on Engineering Alloys: A Review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 341-363.
- [21] SUN C, XIU S C, HONG Y, et al. Prediction on Residual Stress with Mechanical-Thermal and Transformation Coupled in DGH[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 179: 105629.
- [22] SUN C, ZHANG H, XU C W, et al. Influence of the Abrasive Shape-Position Characteristic on the Grinding Thermo-Mechanical Coupling[J]. *Surface Science and Technology*, 2023, 1(1): 19.
- [23] XU C W, ZHANG H, XIU S C, et al. Analysis of Microcosmic Geometric Property in Pre-Stressed Dry Grinding Process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(5): 2509-2523.