

激光改性制备钛合金表面 WC 耐磨涂层研究进展

索井港, 张聪敏, 刘 晨, 殷世坤, 亓 方
(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110039)

摘要: 通过在钛合金表面制备碳化钨(WC)耐磨涂层可以改善其硬度低和耐磨性差的劣势,大幅度提高钛合金的耐磨程度,延长其在摩擦工况下的服役寿命。利用激光改性技术可以使 WC 涂层与基材实现冶金结合,促进所制备涂层的结合力和致密性进一步提升。本文介绍了激光熔覆、激光重熔、激光原位辅助喷涂技术制备钛合金表面 WC 涂层的技术特点、涂层性能及发展趋势,期望为未来钛合金表面 WC 涂层制备方式的优化改进带来启发和借鉴。

关键词: 钛合金; WC 耐磨涂层; 激光熔覆; 激光重熔; 激光原位辅助喷涂

中图分类号: TG174.44, TG148, TQ639 文献标志码: B 文章编号: 1007-9548(2025)01-0017-04

Research Progress on WC Wear-resistant Coating on Titanium Alloy Surface Prepared by Laser Modification

SUO Jing-gang, ZHANG Cong-min, LIU Chen, YIN Shi-kun, QI Fang
(Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110039, China)

Abstract: The low hardness and poor wear resistance of titanium alloys can be improved by preparing tungsten carbide (WC) coatings on their surfaces. The existence of WC coatings renders titanium alloys with a nice wear resistance, which delays their work lifetime under friction conditions. Laser modification technology can make the metallurgical binding between substance materials and coatings, facilitating the further enhancement on the adhesion and compactness of WC coatings. In this paper, the laser cladding, laser remelting and in situ laser assisted spraying will be introduced, which involves the corresponding manufacture characteristics, coatings performances and development trends for the preparation of WC coatings. It is expected to provide inspiration and reference for the optimization and improvement on preparing WC coatings in the future.

Key words: titanium alloy; WC wear-resistant coating; laser melting; laser remelting; in-situ laser assisted spraying

0 引言

钛合金比强度高、耐腐蚀性优良,在航空航天和特种装甲等高端武器装备制造领域已成为不可或缺的轻质高强结构材料(钛用量:航空器 15%~40%,航天器 5%~30%,舰船超过千吨,坦克和导弹实现全钛制备)。然而,钛合金耐磨性能的不足严重限制了其使用寿命,需要在其表面制备硬质涂层,以满足对钛合金在摩擦

工况下的耐磨要求^[1]。碳化钨(WC)在金属陶瓷碳化物中硬度最高(约 2 000 HV),具有优良的红硬性和耐磨性,且易被熔融金属润湿,常被用于制备高耐磨涂层。同时,WC 与钛合金的热膨胀系数较为接近(分别约为 $6.9 \times 10^{-6}/K$ 和 $6.5 \times 10^{-6}/K$),可有效降低涂层开裂敏感性^[2]。因此,制备 WC 涂层可以大幅提高钛合金耐磨性,满足其长期服役的使用需求。

WC 涂层的耐磨性能与两项指标密切相关,一是涂层的致密性,二是涂层和基底的结合力,选取不同的涂层制备技术对上述两项指标会产生直接影响。钛表面制备 WC 涂层的常见方法主要有热喷涂(TS)、物理

收稿日期: 2024-06-07

作者简介: 索井港(1997—),男,硕士,助理工程师,主要从事金属材料表面处理相关工作。E-mail: saccmgroup@163.com。

气相沉积(PVD)和激光改性(Laser modification)等,不同的制备方式具有各自的优缺点^[9]。其中,物理气相沉积需在真空条件下(压强 <101 kPa)进行,熔覆层易产生缺陷;超音速火焰喷涂可均匀制备涂层,源于粒子超音速冲击,涂层致密性高,但制备温度较低(~ 800 °C),涂层与基体仅为机械结合,结合力不足。激光改性技术制备 WC 涂层具有相对优势,激光热源温度高(>1 500 °C),所制备涂层与基体实现冶金结合,结合力优异,通过调节激光参数(功率、扫描速度或光斑直径等)还可以改善涂层的致密性。另外,激光改性技术对操作环境要求较低,适用于多种复杂环境中的制备和修复场景,技术可靠性高。本文介绍了采用 3 种激光改性技术在钛表面制备 WC 涂层的技术特点和涂层特性,包括激光熔覆、激光重熔和激光原位辅助喷涂,每种激光改性方式各有特点。

1 激光表面改性技术制备 WC 耐磨涂层

激光源于 20 世纪 60 年代,由光受激辐射演变而来,具有颜色纯、亮度高、方向性高度集中等特性。激光束通过光学镜片可聚焦成小尺寸的光斑(直径为 1~3 mm),具有极高的功率密度,可以对金属材料表面进行非接触式瞬间加热,然后实现迅速冷却凝固(冷却速度约 1 000 °C/s),形成具有一定厚度(mm 级)的表面处理层^[9]。近年来,利用具有高能量特性的激光改性技术来制备 WC 耐磨涂层的研究数量不断增加,激光束可在钛合金表面形成 WC 涂层,有效改善钛合金的耐磨性,其中具有代表性的技术有激光熔覆、激光重熔、激光原位辅助喷涂等方式。

1.1 激光熔覆制备技术

激光熔覆是利用高能激光束对基材上添加的熔覆材料进行辐照熔凝,进而形成与基材冶金结合的熔覆层以实现表面改性的技术。该技术可以熔覆多成分、多粒度、多功能的单元或多元复合添加材料,熔覆层的成分和厚度灵活可调;同时以较小的稀释度($\eta < 8\%$)产生较高强度的冶金结合,涂层结合力优异;由于加热与冷却速率快,相应改性涂层的晶粒细小、热影响区窄、组织致密;同时,面向金属材料表面改性和修复,激光熔覆技术具有可控性高和制造高效率(熔覆线速度可达数 m/s)的特点,并且对比零件更换成本,激光熔覆修复成本大幅度下降。基于以上,激光熔覆在金属基和陶瓷基涂层等制造和修复领域以短时耗、低成本、高质量等特点脱颖而出^[9]。

裂纹和气孔是激光熔覆制备钛合金表面 WC 涂层的主要缺陷,这主要由于快速加热与冷却易产生缺陷。通过调节工艺参数和熔覆材料成分可以改善涂层缺陷^[9]。如激光熔覆速率调控方面,适宜的熔覆速率可

以避免快速热胀/冷缩诱导的晶界、气孔等处裂纹萌生;光斑直径调控方面,适宜的光斑尺寸可以减轻涂层开裂;熔覆材料成分调控方面,通过选取适宜成分配比,可以消除熔覆层与基体材料热膨胀系数和导热率等物理性能差异较大引起的裂纹和脱落。气孔是在激光快速凝固过程中熔池里的气体遗留在熔覆层中所形成。另外,熔池存在的时间短,使得残留的氧气与高温下的 C 发生反应,生成 CO 和 CO₂ 等气体也会造成气孔。

综上,激光熔覆制备 WC 涂层时选择合适的工艺参数以及熔覆材料较为关键。张珺等^[9]在制备 WC-Co 涂层时发现,合适的激光功率和扫描速度对涂层耐磨性能影响显著,如图 1 所示。激光功率为 2 000 W 时,形成致密的涂层,磨损率最佳为 1.48 g/h;扫描速度为 480 mm/min 时,磨损率最佳为 1.79 g/h。采用陶瓷/合金复合涂层方法可以降低熔覆层的残余应力,提高涂层与基体的结合强度。刘金刚等^[7]在 TC4 钛合金上预置 Ni60+50%WC 混合粉末,利用激光熔覆技术制备的 WC 颗粒增强耐磨复合涂层与基体结合优异,组织均匀致密,涂层中原位合成的硬质相和细晶强化共同作用使得涂层硬度显著提高,约为 TC4 基体的 3 倍,同时摩擦系数和磨损量都远低于 TC4 钛合金基体,有效改善了钛合金基体的综合性能。张林等^[8]利用激光熔覆技术在钛表面制备出 Ti-Al/WC 复合涂层,涂层与基体实现冶金结合,同时涂层组织致密均匀,TiC 呈树枝晶状或花瓣状在熔覆层中弥散分布,无裂纹、气孔等缺陷。通过磨粒磨损试验发现,其涂层耐磨性能较基体提高了约 4 倍。

1.2 激光重熔技术

相对激光熔覆,激光重熔是一种针对涂层缺陷进行二次热处理的技术,即该技术是在等离子喷涂或冷喷涂等之后对现有涂层进行二次修复。等离子喷涂或冷喷涂涂层致密性较差,且涂层与基体为机械结合,激光重熔技术可以使机械结合转为冶金结合,实现结合强度的提升;同时,激光重熔过程带来的热量输入可以使喷涂涂层更加致密,改善裂纹缺陷。

对于激光重熔钛表面 WC 涂层,孔隙率和涂层与基体结合力直接影响涂层的耐磨性能。何文等^[9]制备了等离子喷涂 WC/Ni 金属陶瓷涂层,经过激光重熔处理后发现,基体与涂层由机械结合转变为冶金结合,涂层孔隙率下降 55%,涂层硬度得到明显提高,其显微硬度比基体高 255 HV。这主要是由于在重熔过程中,WC 发生分解,形成新的硬质相使涂层的硬度和耐磨性提升。赵运才等^[10]经激光重熔技术处理等离子喷涂 WC/Fe 复合陶瓷涂层后发现,重熔涂层的显微硬度约为原等离子喷涂涂层的 2 倍,涂层片层状结构和孔隙

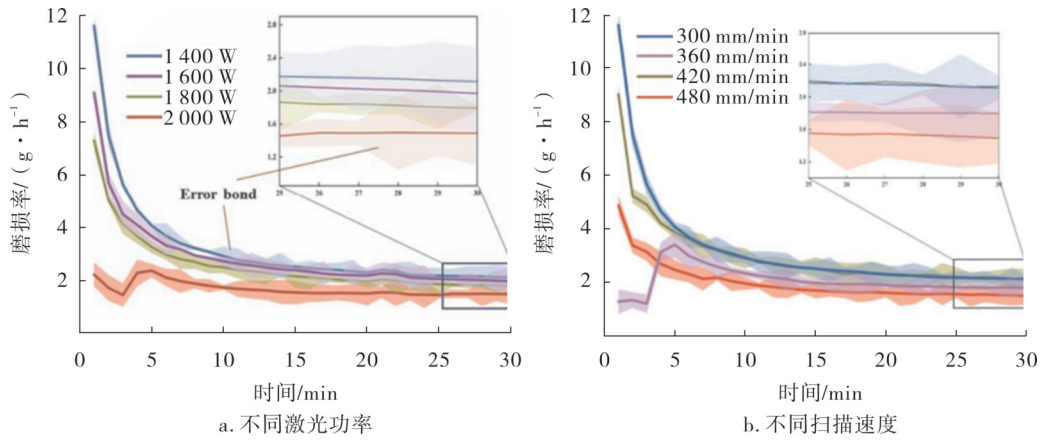


图1 WC-Co 涂层磨损率曲线

等缺陷基本消失。Mateos J 等^[11]对比了等离子喷涂 WC-Co 涂层在激光重熔前后的耐磨性能,发现涂层经激光重熔后,微观结构得到改善,涂层显微硬度和涂层与基体的结合力均得到提升,相同环境磨损率由 $9.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降为 $2.7 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,显著提高了涂层的耐磨性能。综合来看,激光重熔改善了涂层夹杂气孔、裂纹和杂质等原生缺陷。陶瓷和金属间的元素扩散以及冶金结合的界面共同提升了涂层的综合性能。

1.3 激光原位辅助喷涂

激光原位辅助喷涂是将激光热源同步在加热成形过程中,在喷涂过程中使用激光辅助,保持粉末沉积点与激光光斑同步运动,瞬间调节、改善材料的力学性能和粉末碰撞沉积状态,提高沉积效率、致密性以及与基体结合强度,进而提高涂层的耐磨性能。相较于单一喷涂,激光原位辅助工艺可以消除喷涂层层状结构以及气孔、裂纹等缺陷,有效缓解了因热应力产生的微裂纹,具有较好的应用前景^[14]。

冷喷涂制备陶瓷基复合涂层对材料的选择存在限制,涂层的质量受粘结相熔化程度制约,激光原位辅助

冷喷涂工艺可以利用激光加热喷涂的颗粒和基材,来实现硬质材料的沉积。喷涂过程中,利用粉末的极快飞行速度和激光快速的扫描速度,从而减少激光对喷涂粉末作用的时间,保证了颗粒在沉积过程中保持固态,大幅提升了硬质相的保留率^[15]。Luo F 等^[16]利用激光原位辅助冷喷涂技术制备了 WC/Ni60 陶瓷基复合涂层,涂层中物相为 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、FeNi 和 WC,说明冷喷涂过程中同步辅助的激光热源并没有导致 WC 分解。相比之下,激光熔覆制备的涂层 WC 发生了分解,导致涂层耐磨性能下降。李社宏等^[18]采用激光原位冷喷涂技术制备 WC-Stellite 6 复合涂层,涂层制备过程中陶瓷相未分解使得 Stellite 6 涂层保持其本身韧性优异的性能,均匀分布的陶瓷相在涂层受载时起到了良好的应力缓冲作用,使得涂层未发生开裂。

就目前研究来看,作为一种新型的涂层制备技术,激光原位辅助喷涂工艺优势明显,其涂层与基体结合强度高、孔隙率低;同时粉末沉积效率高,具有较强的发展前景,表 1~2 总结了激光重熔和激光原位辅助喷涂的工艺参数以及涂层的性能^[9-13,16-19]。

表 1 激光重熔对 WC 涂层性能影响

| 涂层 | 参考文献 | 激光重熔参数 | | | 性能变化 | |
|-------|------|--------|--|---------------|--|-------|
| | | 功率/W | 速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | 光斑/mm | 激光重熔前 | 激光重熔后 |
| WC-Ni | [9] | 1 000 | 480 | $\varphi 4$ | 孔隙率/%/硬度/HV 7.02/1 000 3.08/1 200 | |
| WC-Fe | [10] | 500 | 186 | $\varphi 1.5$ | 磨损率/($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 25.13×10^{-5} 8.5×10^{-5} | |
| WC-Co | [11] | 1 450 | 500 | $\varphi 3$ | 磨损率/($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 9.3×10^{-7} 2.7×10^{-7} | |
| WC-Co | [12] | 1 100 | 720 | $\varphi 5$ | 硬度/HV 1 046.2 1 547.6 | |
| WC-Ni | [13] | 1 200 | 300 | 5×3 | 磨损质量损失/mg 1.9 0.6 | |

表 2 激光原位辅助喷涂对 WC 涂层性能影响

| 涂层 | 参考文献 | 激光原位辅助喷涂参数 | | | 性能变化 | |
|---------------|------|--|----------------------------|---------|------------|---------|
| | | 功率/W | 速度/(mm·min ⁻¹) | 喷射距离/mm | 激光原位辅助前 | 激光原位辅助后 |
| WC-Ni | [16] | 2 000 | 10 | | 硬度/HV | |
| | | | | | 294 | 690 |
| WC-316L | [17] | | 10 | 30 | 摩擦系数 | |
| | | | | | 0.54 | 0.39 |
| WC-Stellite 6 | [18] | 8.66×10 ⁷ W/m ² (密度) | 10 | 30 | 50 kg 加载压力 | |
| | | | | | 放射性裂缝 | 无裂纹 |
| WC-316L | [19] | 1 800 | 10 | 30 | 摩擦系数 | |
| | | | | | 0.9 | 0.65 |

2 总结与展望

通过激光技术制备 WC 涂层,可显著提高钛合金工件的耐磨性能,提高工件服役寿命,这对节约资源,减少污染,实现可持续发展具有重要意义。激光熔覆涂层与基体结合较好,低致密性往往制约涂层的应用,熔覆层易出现裂纹和气孔;激光重熔可以在喷涂后作为后工序有效改善涂层的致密性,却增加了工艺复杂性;激光原位辅助喷涂技术兼具了激光熔覆和热喷涂的优点,将会是未来制备高硬度涂层的重要技术手段。

参考文献:

- [1] 孙壮,王伟,王成,等.钛合金表面激光熔覆耐磨和自润滑涂层的研究进展[J].材料保护,2023(1):107-120.
- [2] 李宝轩.WC 添加对钛基激光熔覆层组织和性能的影响[D].天津:中国民航大学,2022.
- [3] 姬寿长,李争显,李京龙,等.钛表面厚碳化钨涂层研究进展[J].钛工业进展,2018(6):20-25.
- [4] 张晓东.激光熔覆制备 WC/Co-Cr 复合涂层及其高温磨损与高温氧化特性研究[D].广州:广东工业大学,2017.
- [5] 王伟志,马国政,韩珩,等.激光熔覆陶瓷涂层研究现状与展望[J].机械工程学报,2023(7):92-109.
- [6] 张珺.钛合金表面激光熔覆 WC-Co 涂层组织和磨损性能研究[D].西安:长安大学,2022.
- [7] 刘金刚,杨建花,王高升,等.TC4 钛合金表面激光熔覆 WC 增强镍基复合涂层的组织及耐磨性[J].稀有金属材料与工程,2022(8):2907-2914.
- [8] 张林,肇威,隋欣梦,等.钛合金表面激光熔覆 Ti-Al/WC 涂层组织与性能的研究[J].热加工工艺,2023(14):108-113.
- [9] 何文,赵运才,张佳茹.激光重熔对 Ni/WC 涂层组织结构的改善机制研究[J].激光与红外,2017(12):1486-1491.
- [10] 赵运才,上官绪超,张继武,等.激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能[J].表面技术,2018(3):20-27.
- [11] Mateos J,Cuetos J M,Fernandez E,et al.Tribological behavior of plasma-sprayed WC coatings with and without laser remelting [J].Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear,2000(2): 274-281.
- [12] H F Guo,Z J Tian,Y H Huang.Laser surface remelting of WC-12Co coating:finite element simulations and experimental analyses[J].Materials Science and Technology:2016 (3):1-10.
- [13] 王东生,田宗军,屈光,等.工艺参数对激光重熔等离子喷涂 Ni 基 WC 复合涂层影响[J].应用激光,2012(5):365-369.
- [14] 李思源,何鹏飞,程延海,等.激光复合热喷涂技术制备陶瓷基涂层研究现状[J].表面技术,2023(9):23-28.
- [15] 杨理京,李争显,黄春良,等.激光辅助冷喷涂制备高硬度材料涂层的研究进展[J].材料导报,2018(3):412-417
- [16] Luo F, Cockburn A, Sparkes M, et al.Performance characterization of Ni60-WC coating on steel processed with supersonic laser deposition[J].Defence Technology,2015(11):35-47.
- [17] LI Bo,YAO Jian-hua,ZHANG Qun-li,et al.Microstructure and tribological performance of tungsten carbide reinforced-stainless steel composite coatings by supersonic laser deposition[J].Surface and Coatings Technology,2015:58-68.
- [18] 李社宏,杨理京,李波,等.超音速激光沉积 WC/Stellite 6 复合涂层显微组织特征的研究[J].中国激光,2015(11):158-165.
- [19] 李鹏辉,李波,张群莉,等.超音速激光沉积与激光熔覆 WC/SS316L 复合沉积层显微组织与性能的对比研究[J].中国激光,2016(11):76-83.

