

# 功率对 TC4 钛合金表面激光熔覆改性的影响\*

文◆陇东学院 智能制造学院 司玉杰

## 引言

钛合金具有比强度高、生物兼容性好且耐腐蚀性能强等优点<sup>[1,2]</sup>，但是表面硬度和耐磨性欠佳是限制钛合金大量应用的主要问题<sup>[3,4]</sup>。改善钛合金表面性能对扩大钛合金的应用范围具有非常重要的意义。

Kamat 等<sup>[5,6]</sup>通过激光气体氮化提高钛合金表面硬度和耐磨性，提高了氮化层机械性能，但是氮化层非常容易产生裂纹，工艺可控性较差。柴琛等<sup>[7]</sup>研究钛表面微弧氧化膜层的磨损行为，发现钛表面微弧氧化膜比基体耐磨性明显提高，但是膜层厚度只有  $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ ，无法应用于重载工况。冷崇燕等<sup>[8]</sup>将 Ta 离子

注入 Ti-6Al-4V 合金，发现钛合金表面摩擦系数明显降低，但是工艺效率较低。以上方法均存在不足之处。

钛合金表面激光熔覆技术可以克服以上方法的不足，是目前研究的热点。Weng 等采用激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 基体上熔覆“Co42+B4C”粉末，研究发现降低激光能量，熔覆层 TiC 树枝晶和 TiB 粒子明显细化，熔覆层硬度和耐磨性提高。Sun 等研究激光功率、扫描速度和送粉率对熔覆层成型的影响，发现送粉率是决定熔覆层宽度和深度的主要因素。Li 等研究发现钛合金表面激光熔覆层晶粒尺寸随激光扫描速度的增加而降低。

基于此，采用光纤激光在 TC4 钛合金表面熔覆 TiN 和 Ti 混合粉末，研究激光功率对熔覆层化学成分、显微组织和显微硬度的影响。检测熔覆层化学成分，拍摄熔覆层横截面形貌和显微组织，测量熔覆层横截面显微硬度。实验表明，激光功率越高，熔覆层 N 含量越低，熔覆层 Ti<sub>2</sub>N 相含量越少。熔覆层中部显微组织为粗大的树枝晶，底部显微组织为细小的针状组织。增大激光功率，熔覆层显微组织有变大的趋势。较大激光功率导致熔覆层显微硬度降低，熔覆层厚度增加。激光功率直接决定激光熔覆过程的热输入，进而决定熔覆工艺和熔覆层性能，目前激光功率对钛合金表面激光熔覆的影响尚不明确。本文主要研究不同激光功率对熔覆层的影响。

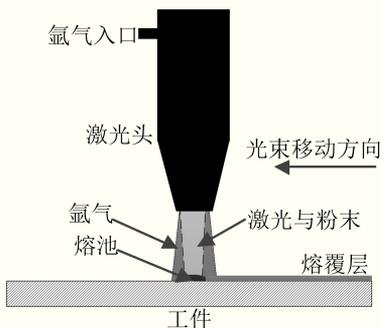


图1 试验系统示意图

## 1 试验方法与材料

试验系统示意图如图1所示，试验选用高功率光纤激光器，激光波长  $1.064\mu\text{m}$ ，激光光斑直径为  $3\text{mm}$ 。熔覆粉末为 TiN 和 Ti 混合粉末，TiN 与 Ti 的质量比为 1:2，熔覆粉末与激光束同轴送给，本研究采用氩气保护熔覆区域。

试验基体为 TC4 钛合金板材，试验前将 TC4 板材切割成  $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 8\text{mm}$ 。试验中激光扫描速度为  $600\text{mm}/\text{min}$ ，氩气流量为  $10\text{L}/\text{min}$ ，激光功率分别为  $2.0\text{kW}$ 、 $2.5\text{kW}$ 、 $3.0\text{kW}$  和  $3.5\text{kW}$ 。

\*【基金项目】庆阳市科技计划项目“轻质农业机械材料 Ti-6Al-4V 表面激光改性研究”（QY-STK-2022B-151）；陇东学院科研项目“高能束复熔法改性工艺方法研究及设备研制”（HXZK2317）；陇东学院博士基金“钛合金表面改性研究”（XYBYZK2301）；陇东学院科研项目“金属表面稀释气体合金化机理研究及系统开发”（HXZK2316）。

【作者简介】司玉杰（1991—），男，甘肃庆阳人，本科，从事金属表面改性方面的基础研究工作。

采用 X 射线光电子能谱仪 (EDS) 检测熔覆层横截面化学成分, 采用场发射扫描电镜拍摄熔覆层横截面显微组织, 采用显微硬度计测量熔覆层横截面显微硬度, 沿着熔覆层深度方向每隔 0.1mm 测量显微硬度值。

## 2 试验结果以及讨论

### 2.1 熔覆层化学成分与相组成

熔覆层表面照片如图 2 所示, 图中熔覆方向自右往左。由于初始熔覆阶段送粉不够稳定, 故图 2 中 AA 线右侧熔覆层薄而宽, 后续稳定送粉导致 AA 线左侧熔覆层厚而窄。从图 2 中可见, 随着激光功率增加, 熔覆层宽度略微增加。

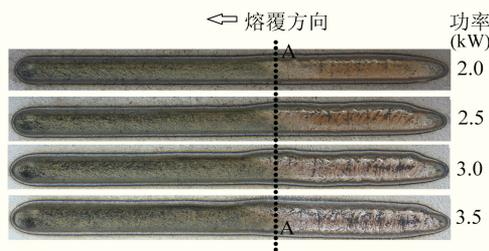


图 2 熔覆层表面照片

采用 EDS 检测熔覆层化学成分, 检测点距离熔覆层表面 500 $\mu\text{m}$ , 激光功率分别为 2.0kW 和 3.5kW 的熔覆层化学成分如表 1 所示。Ti 元素和 N 元素是熔覆层主要成分, 另外还有少量 Al 和 V 元素。激光功率为 3.5kW 的熔覆层 Ti、Al 和 V 元素含量高于激光功率为 2.0kW 的熔覆层, 激光功率为 3.5kW 的熔覆层 N 元素含量低于激光功率为 2.0kW 的熔覆层, 这是由于激光功率越大, 热输入越高, 熔池体积越大, 更多 TC4 基体被熔化, TC4 基体对熔覆层有稀释作用。

表 1 中激光功率分别为 2.0kW 和 3.5kW 的熔覆层 N 含量分别为 19.55%

表 1 熔覆层化学成分 (at%)

激光功率	Ti	N	Al	V
2.0kW	80.23	19.55	0.14	0.08
3.5kW	83.19	16.50	0.20	0.11

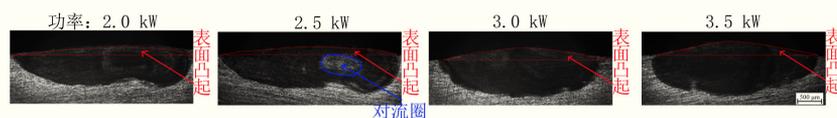
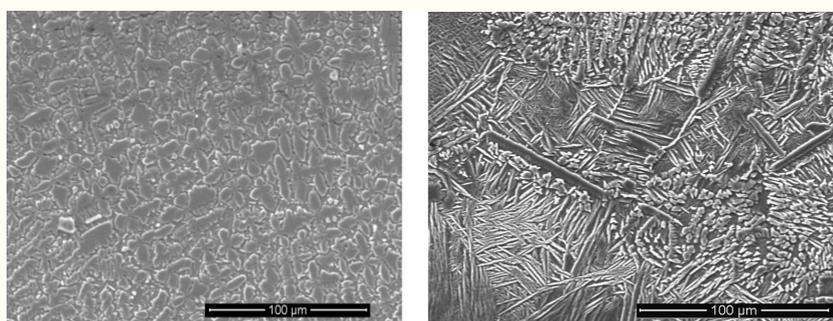


图 3 熔覆层横截面形貌



(a) 熔覆层中部

(b) 熔覆层底部

图 4 熔覆层横截面显微组织

和 16.50%。结合 Ti-N 相图和熔覆层化学成分, 发现两组实验的熔覆层都是由 ( $\alpha\text{Ti}$ ) 和  $\text{Ti}_2\text{N}$  相组成, 但是由于 N 的质量分数有差异, 所以熔覆层中两相含量不同。激光功率越高, 熔覆层氮含量越低, 根据杠杆定律, 熔覆层中 ( $\alpha\text{Ti}$ ) 含量越多,  $\text{Ti}_2\text{N}$  相含量越少。以上分析表明, 激光功率越高, 熔覆层 N 含量越低, N 在密排六方 Ti 晶格中形成的固溶体 ( $\alpha\text{Ti}$ ) 相越多。

### 2.2 熔覆层横截面形貌与显微组织

熔覆层横截面形貌如图 3 所示, 随激光功率增大熔覆层厚度增加, 并且熔覆层宽度略微减小。当激光功率为 3.0kW 和 3.5kW 时, 熔覆层呈规则椭圆形, 当激光功率为 2.0kW 和 2.5kW 时, 熔覆层呈不规则椭圆形, 这是由于激光功率较大时, 熔池存在时间更长, 熔池对流更充分, 更多激光能量通过对流形传输到熔池底部, 导致熔池底部更光滑, 凝固形成规则椭圆形熔覆层。激光功率较小时, 熔池对流不充分, 形成不规则椭圆形熔覆层。当激光功率为 2.5kW 时, 熔覆层中有对流圈存在, 证明以上分析正确。图 3 中熔覆表面有明显凸起趋势, 并且激光功率越大熔覆层表面凸起越明显。

拍摄熔覆层横截面显微照片, 激光功率为 3.0kW 的熔覆层横截面显微组织如图 4 所示。图 4 (a) 为熔覆层中部显微照片, 熔覆层中部分布着不均匀的树枝晶, 晶粒非常粗大, 以一次枝晶为主, 有少量二次直径。由于熔覆层中部温度高, 温度梯度小, 降温速度慢, 且 N 元素含量高, 所以长出粗大的树枝晶。图

4 (b) 是熔覆层底部显微组织照片, 在熔覆层底部逐渐由粗大的树枝晶过渡成针状组织。针状组织比熔池中部树枝晶细小, 多数针状组织垂直于基体分布, 有少量针状组织平行于基体。在熔池底部, 由于散热速度非常快, 温度梯度非常大, 所以成分过冷更明显, 从而形成了细小的针状组织。本试验中其他熔覆层行为组织类似于图 4, 证明激光功率对熔覆层显微组织形貌影响较小。

### 2.3 熔覆层显微硬度

测量熔覆层横截面显微硬度, 熔覆层横截面显微硬度如图 5 所示。从图 5 中可以看出, TC4 基体显微硬度约 360HV, 熔覆层的显微硬度大约为 750HV ~ 980HV, 熔覆层比基体显微硬度有较明显提高。图 5 中可见, 激光功率越高, 熔覆层显微硬度越小, 这是由于较大激光功率导致更多 TC4 基体熔化, 对熔覆层稀释作用更明显, 所以较大激光功率的熔覆层显微硬度更小。另外, 激光功率越大, 熔覆层厚度越大, 这是由于较大激光功率导致熔池深度增大, 所以熔覆层深度更大。图 5 中熔覆层显微硬度基本均匀, 没有表现出明显梯度, 熔覆层与基体过渡区域显微硬度迅速降低, 这是由于激光能量呈现高斯分布, 熔池表面存在较大温度梯度和表面张力梯度, 熔池中形成强烈的马兰戈尼对流, 强烈搅拌作用导致熔池中化学成分和相均匀化, 故熔覆层中硬度表现出均匀化的特点。

分析表明, 较大激光功率导致熔覆层显微硬度更小, 层深更大。实际应用中, 推荐选择较大激光功率, 提高熔覆粉末中 TiN 的含量, 这样可以得到厚度大、

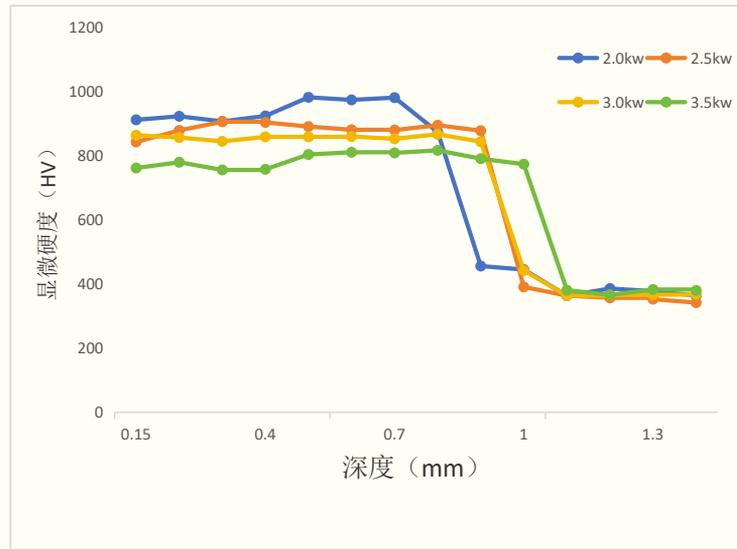


图 5 熔覆层横截面显微硬度

硬度高并且硬度均匀的熔覆层。

### 结语

- (1) 激光功率越高, 熔覆层 N 含量越低, 并且 Ti<sub>2</sub>N 相含量越少。
- (2) 激光功率较大时, 熔覆层呈规则椭圆形, 激光功率较小时, 熔覆层呈不规则椭圆形。熔覆层中部显微组织为粗大的树枝晶, 熔覆层底部显微组织为细小的针状组织。
- (3) 较大激光功率导致熔覆层显微硬度更小, 熔覆层厚度更大。

### 引用

- [1] 吴迪鹏,武永,陈明和,等.TC31钛合金板材高温流变行为及组织演变研究[J].稀有金属材料与工程,2019,48(12):3901-3910.
- [2] 王浩军,张颖云,伍亚辉,等.TC4钛合金薄板双侧激光角焊搭接变形研究[J].热加工工艺,2020(9):144-146.
- [3] TAKESUE S,KIKUCHI S,AKEBONO H,et al.Effect of Pre-treatment with Fine Particle Peening on Surface Properties and Wear Resistance of Gas Blow Induction Heating Nitrided Titanium Alloy[J].Surface and Coatings Technology,2019(359):476-484.
- [4] 李周波,赵勇,高盟召,等.热处理工艺对钛合金油管组织与性能的影响[J].钢铁钒钛,2021,42(1):50-54.
- [5] Kamat A M,Copley S M,Segall A E.Effect of Processing Parameters on Microstructure During Laser-sustained Plasma (LSP) Nitriding of Commercially-pure Titanium[J].Acta Materialia,2016(107):72-82.
- [6] Kamat A M,Copley S M,Segall A E,et al.Laser-sustained Plasma (LSP) Nitriding of Titanium:A review[J].Coatings,2019,9(5):283.
- [7] 柴琛,汪华月,陈兆祥,等.不同摩擦工况下钛微弧氧化膜层的摩擦磨损行为研究[J].表面技术,2021,50(7):266-275,309.
- [8] 冷崇燕,张旭,周荣,等.Ta离子注入Ti6Al4V合金耐磨性研究[J].稀有金属材料与工程,2008(3):556-560.