

引用格式: 赵朕, 庞华, 邱翠翠, 等. 镍基合金表面激光精密抛光及其摩擦性能研究[J]. 中国材料进展, 2026, 45(4): 324-329.  
ZHAO Z, PANG H, QIU C C, *et al.* Laser Precision Polishing of Nickel-Based Alloy Surface and Its Frictional Properties[J]. Materials China, 2026, 45(4): 324-329.

## 镍基合金表面激光精密抛光及其摩擦性能研究

赵朕<sup>1</sup>, 庞华<sup>2</sup>, 邱翠翠<sup>2</sup>, 孙汝剑<sup>3</sup>, 李庆<sup>1</sup>, 刘文斌<sup>1</sup>, 刘大猛<sup>2</sup>

(1. 季华实验室, 广东佛山 528200)

(2. 清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室, 北京 100084)

(3. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

**摘要:** 镍基高温合金是航空发动机热端部件的关键材料, 其服役性能高度依赖于表面光洁度与组织结构。然而, 现有机械或人工抛光方法在复杂构件上难以兼顾纳米级抛光与力学性能增强。为此, 采用激光精密抛光方法, 系统探究了扫线间距、激光功率与扫描速度对合金表面形貌及摩擦学性能的影响。在扫线间距 9  $\mu\text{m}$ 、激光功率 110 W、扫描速度 600  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的工艺条件下抛光后, 表面粗糙度由 518 降至 94 nm, 维氏显微硬度由 192HV<sub>0.3</sub> 提升至 278HV<sub>0.3</sub>, 摩擦系数由约 0.25 降至约 0.23。机理分析表明, 表面粗糙度的显著降低源于激光重熔与马兰戈尼效应驱动的材料再分布, 而近表层硬度提升与摩擦学性能改善则可归因于快速凝固诱导的晶粒细化和组织致密化。因此, 激光精密抛光为复杂构件同步实现表面平整化与性能增强提供了可行途径, 有望为构件在极端服役条件下的工程应用提供技术支撑。

**关键词:** 激光抛光; 镍基合金; 表面粗糙度; 马兰戈尼效应; 摩擦系数

**中图分类号:** TG175<sup>+</sup>.3; V252.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)04-0324-06

## Laser Precision Polishing of Nickel-Based Alloy Surface and Its Frictional Properties

ZHAO Zhen<sup>1</sup>, PANG Hua<sup>2</sup>, QIU Cuicui<sup>2</sup>, SUN Rujian<sup>3</sup>, LI Qing<sup>1</sup>,

LIU Wenbin<sup>1</sup>, LIU Dameng<sup>2</sup>

(1. Jihua Laboratory, Foshan 528200, China)

(2. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Nickel-based superalloys are key materials for hot-section components in aeroengines, whose service performance critically depends on surface finish and microstructural integrity. However, conventional mechanical or manual polishing techniques struggle to achieve both nanoscale smoothness and mechanical strengthening on complex geometries. Here, a laser precision polishing approach was employed to systematically investigate the effects of hatch spacing, laser power and scanning speed on surface morphology and tribological behavior. Under the optimized parameters (9  $\mu\text{m}$  hatch spacing, 110 W laser power, 600  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  scanning speed), the surface roughness was reduced from 518 to 94 nm, while the Vickers microhardness increased from 192HV<sub>0.3</sub> to 278HV<sub>0.3</sub> and the coefficient of friction decreased from  $\sim 0.25$  to  $\sim 0.23$ . Mechanistic analysis revealed that the remarkable reduction in roughness arises from laser remelting and Marangoni flow driven material redistribution, whereas the elevated near-surface hardening and improved tribological performance originate from grain refinement and densification induced by rapid solidification. This study demonstrates that laser precision polishing provides a viable pathway for simultaneously achieving surface planarization and performance enhancement in complex components, offering technological support for their reliable operation under extreme service conditions.

**Key words:** laser polishing; nickel-based alloy; surface roughness; Marangoni effect; coefficient of friction

收稿日期: 2025-08-29 修回日期: 2025-10-24

第一作者: 赵朕, 男, 1995年生, 博士研究生

通讯作者: 刘大猛, 男, 1979年生, 教授, 博士生导师,

Email: ldm@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202508016

### 1 前言

镍基合金凭借卓越的高温强度、抗氧化性能及耐腐蚀特性, 长期以来广泛应用于航空发动机热端关键部件,

是该领域的核心结构材料之一<sup>[1]</sup>。然而, 在高温滑动条件下, 由制造过程引入的表面粗糙峰易成为氧化膜剥落及黏着磨损的起始位置, 显著提高摩擦系数与磨损率<sup>[2]</sup>。传统磨削与人工镜面抛光工艺虽可实现近亚微米级平均粗糙度, 但其材料去除效率低、工具磨损快且难以适用复杂几何结构, 因此可满足现代航空发动机零部件制造需求的抛光新技术亟待发展<sup>[3, 4]</sup>。

激光抛光通过瞬时熔融与快速凝固实现表面重构, 能有效降低粗糙度, 改善组织性能, 极高峰值功率、高精度和可控性使它尤其适用于高温合金等难加工材料的加工, 在航空航天关键零部件性能提升等方面极具应用潜力<sup>[5-8]</sup>。近年来, 该技术已成功应用于不锈钢及钛合金等金属的表面加工, 可使金属表面粗糙度降低 30%~70%。例如, 采用 532 nm、10 ps 激光脉冲对微铣削 Inconel 718 合金进行抛光, 该合金表面粗糙度由 0.435 降低至 0.127  $\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。针对增材制造成形的镍基合金零件(初始表面粗糙度 $>1 \mu\text{m}$ ), 研究通过优化激光轨迹重叠率并引入氩气保护, 实现了稳定的表面平整化, 最终将该零件表面粗糙度降低至约 0.3  $\mu\text{m}$ , 同时有效抑制了氧化产物生成及飞溅现象<sup>[10]</sup>。热力学分析及截面显微组织观察显示, 激光工艺可实现高达  $10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  的冷却速率, 从而促使枝晶结构显著细化并降低残余应力<sup>[11]</sup>。激光强度分布对熔池温度场与流动场具有关键影响, 马兰戈尼对流与熔池几何演化密切相关, 从而直接决定了表面质量与组织性能的优化效果<sup>[12]</sup>。

虽然激光抛光在降低金属粗糙度方面已有显著进展, 但在实现镍基合金的纳米级精密抛光方面仍面临挑战。为此, 本文利用双向交叉网格激光扫描策略, 系统研究

了不同激光条件下抛光后表面形貌演化规律, 揭示通过调控激光功率、扫描速度与扫线间距稳定熔池与马兰戈尼对流诱导的溶质再分布与快速细晶化, 促成致密均匀的重熔层并抑制方向性纹理与摩擦波动, 实现纳米级表面粗糙度(最低达 94 nm), 为镍基合金在极端服役条件下的表面强化提供工艺路径与理论依据。

## 2 实验

图 1 展示了使用的连续光纤激光抛光系统, 该系统主要由光纤激光器、扫描振镜、移动平台、充气腔体及控制软件组成。系统采用 SPI Lasers QUBE SP-2000 光纤激光器(波长为  $(1064 \pm 2) \text{ nm}$ , 最大功率为 2000 W), 激光通过 100  $\mu\text{m}$  光纤传输至 ScanLab 振镜系统, 将光斑聚焦至直径约 30  $\mu\text{m}$ 。样品固定在移动平台上, 在高纯氩气(99.99%)保护的常压环境下进行加工, 以防止氧化。激光参数(激光功率、扫描速度、扫线间距)及扫描路径通过软件编程进行控制, 实现对试样的精确表面抛光。图 1 右侧示意了研究采用的双向交叉网格扫描策略。激光束从样品左上角开始沿水平方向进行连续的双向扫描, 每完成一条扫描线后, 按设定的扫线间距向下移动一步。随后将扫描方向旋转 90°, 在垂直方向重复上述过程, 以确保表面抛光的均匀性和可重复性。此外, 采用白光干涉仪(Bruker GT-X)对激光抛光前后的表面形貌进行定量表征; 利用扫描电子显微镜(Thermo Fisher Prisma E)分析抛光表面形貌; 通过全自动显微维氏硬度计(QATM QNESS 60 A+EVO)测量抛光表面硬度分布; 采用球-盘摩擦磨损试验机(Rtec MFT-5000)评估高温摩擦及磨损行为。

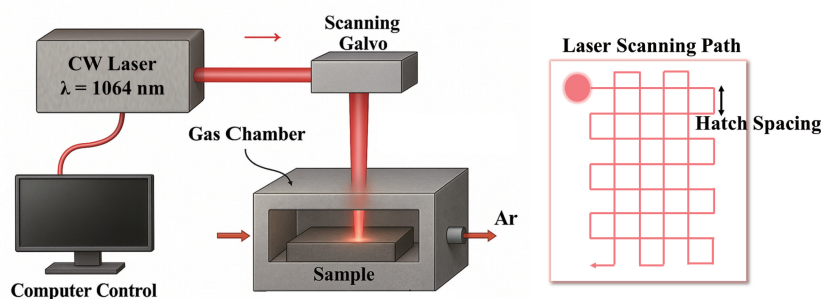


图 1 激光抛光强化装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the laser polishing and strengthening setup

图 2 展示了制备的镍基高温合金 GH4169 矩形片状试样(15 mm×15 mm×2 mm)的初始表面微观形貌。采用白光干涉仪对 342  $\mu\text{m}$ ×400  $\mu\text{m}$  区域进行测量, 得到的表面粗糙度约为 518 nm, 中线最大峰谷达 5.5  $\mu\text{m}$ 。通过显微维氏硬度测试(间隔 20  $\mu\text{m}$  选取 5 个点位), 得出表面的硬度均值为 192HV<sub>0.3</sub>。通过低倍扫描电子显微镜可观察到样品表面残留有明显的加工痕迹及微米

级阶梯结构, 高倍照片进一步揭示出不规则颗粒团聚物及较深的沟槽结构。在 800 °C 施加 10 N 往复载荷(频率 1 Hz, 持续 30 min)条件下进行摩擦测试, 摩擦系数曲线初期呈现明显波动, 最终稳定于约 0.25。这些初始状态的基准数据为后续激光抛光试样在表面形貌、力学性能及摩擦学行为等方面的性能提升评估提供了可靠依据。

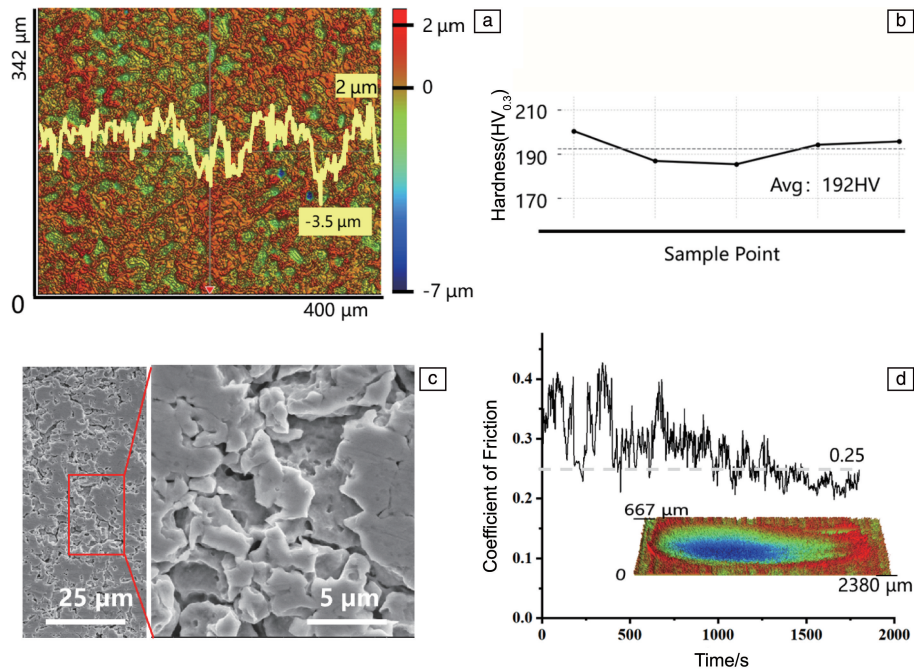


图 2 合金初始表面粗糙度(a), 硬度(b), 显微组织(c)和摩擦曲线(d)

Fig. 2 Original surface roughness (a), hardness (b), microstructure (c) and friction curve (d) of alloy

### 3 结果与讨论

#### 3.1 激光参数对表面形貌演化的影响

为系统揭示激光参数对镍基合金抛光质量的影响, 分别围绕扫线间距、激光功率与扫描速度 3 个关键变量, 通过控制单一变量、固定其余参数的方法, 依次分析各参数对表面形貌演化影响。图 3 展示了在固定激光功率 (120 W)、扫描速度 ( $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 与光斑直径 ( $30 \mu\text{m}$ ) 条件下, 不同激光扫线间距对合金抛光后表面形貌的影响。扫线间距设置在 3, 6, 9 和  $15 \mu\text{m}$ , 对应的扫描轨迹重叠率分别约为 90%, 80%, 70% 及 50%。

当扫线间距为  $3 \mu\text{m}$  时, 高重叠率扫描方式下, 表面形成了不规则条带、重凝固结构以及颗粒物再沉积等缺陷(图 3a); 扫线间距增大至  $6 \mu\text{m}$  后, 表面质量略有改善, 但仍可观察到明显的轨迹边界与局部重熔分离现象(图 3b); 当扫线间距为  $9 \mu\text{m}$  时, 重叠率约为 70%, 此时表面形貌最为致密均匀, 颗粒物显著减少, 轨迹融合连续性良好(图 3c); 而在扫线间距进一步增大至  $15 \mu\text{m}$  后, 表面质量显著下降, 出现明显的未熔区、飞溅物与重凝固颗粒(图 3d)。

图 4 展示了在固定扫描速度 ( $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )、扫线间距 ( $9 \mu\text{m}$ ) 和光斑直径 ( $30 \mu\text{m}$ ) 条件下, 不同激光功率对表面形貌的作用。激光功率分别设定为 90, 110, 130 和 150 W, 对应的能量密度分别为 20.0, 24.4, 28.9 和  $33.3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。能量密度通过公式  $E = P \cdot (v \cdot h)^{-1}$  计算,

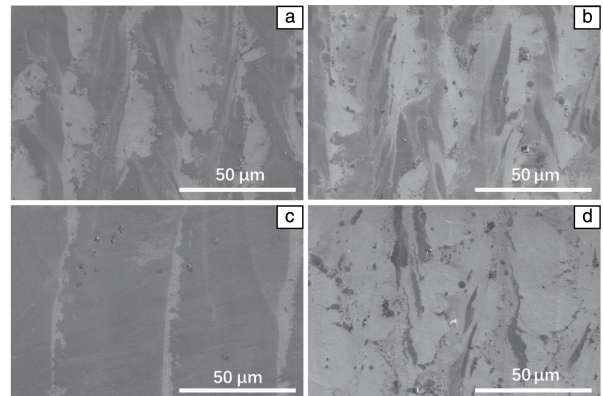


图 3 不同扫线间距下合金表面形貌的演化: (a)  $3 \mu\text{m}$ , (b)  $6 \mu\text{m}$ , (c)  $9 \mu\text{m}$ , (d)  $15 \mu\text{m}$

Fig. 3 Surface morphology evolution of alloy under different hatch spacings: (a)  $3 \mu\text{m}$ , (b)  $6 \mu\text{m}$ , (c)  $9 \mu\text{m}$ , (d)  $15 \mu\text{m}$

其中  $P$  为激光功率,  $v$  为扫描速度,  $h$  为扫线间距, 该参数表征了单位面积能量输入。

当激光功率为 90 W 时, 较低的热输入形成了离散的扫描轨迹边界, 表面存在轻微不平整且相邻轨迹间熔融流动性较差(图 4a); 当激光功率升至 110 W, 对应能量密度为  $24.4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ , 表面形貌最为均匀致密, 熔融轨迹充分融合, 颗粒物再沉积现象最少(图 4b); 当激光功率继续增加至 130 W 时, 表面质量开始下降, 也即出现明显的波纹状结构及间断性颗粒堆积(图 4c); 当激光功率进一步提高至 150 W 时, 过高的能量输入导致表面严重扰动, 出现大量重凝固熔滴、重熔痕迹及不规则织构(图 4d)。

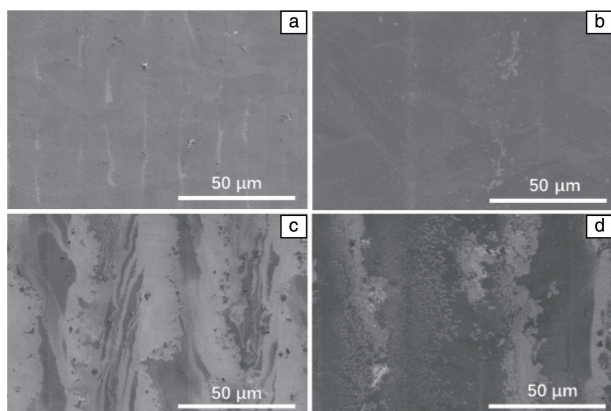


图 4 不同激光功率下合金表面形貌的演化：(a)90 W，(b)110 W，(c)130 W，(d)150 W

Fig. 4 Surface morphology evolution of alloy under different laser powers: (a) 90 W, (b) 110 W, (c) 130 W, (d) 150 W

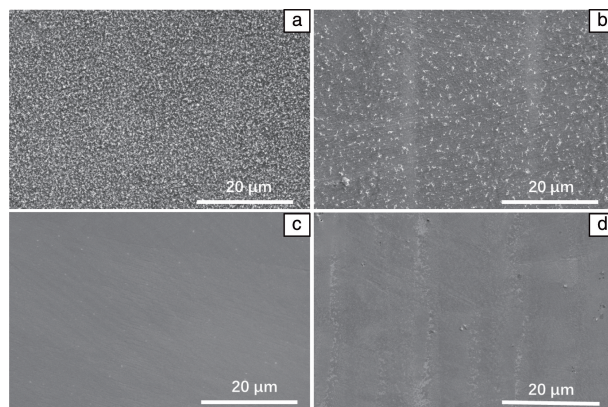


图 5 不同扫描速度下合金表面形貌的演化：(a)200 mm·s<sup>-1</sup>，(b)400 mm·s<sup>-1</sup>，(c)600 mm·s<sup>-1</sup>，(d)800 mm·s<sup>-1</sup>

Fig. 5 Surface morphology evolution of alloy under different scan speeds: (a) 200 mm·s<sup>-1</sup>, (b) 400 mm·s<sup>-1</sup>, (c) 600 mm·s<sup>-1</sup>, (d) 800 mm·s<sup>-1</sup>

为考察扫描速度对表面形貌演化影响，在固定扫线间距(9 μm)、激光功率(110 W)和光斑直径(约 30 μm)的条件下，系统改变扫描速度(200~800 mm·s<sup>-1</sup>)进行了激光抛光实验。在不同扫描速度下，抛光后的表面形貌存在明显差异：当扫描速度为 600 mm·s<sup>-1</sup> 时，表面最为均匀致密，几乎无可见缺陷和轨迹痕迹(图 5c)；扫描速度为 400 mm·s<sup>-1</sup> 时，表面均匀性有所提升，但仍可见周期性条带和轨迹边界(图 5b)；扫描速度为 200(图 5a)和 800(图 5d)mm·s<sup>-1</sup> 时，表面分别出现细微颗粒堆积与明显的未熔区域。

### 3.2 激光抛光对表面成分、硬度及高温摩擦性能的影响

图 6 是最优激光抛光参数条件下(激光功率 110 W、扫描速度 600 mm·s<sup>-1</sup>、扫线间距 9 μm)抛光后合金表面

元素面扫描和分析结果，定量分析结果表明，主要元素(质量分数)分别为：Ni 50.6%、Fe 17.8%、Cr 17.0%、Nb 4.1%、Mo 2.7%、C 5.2%。值得注意的是，未检测到氧元素，说明在氩气保护环境下的重熔过程抑制了氧化反应。因此，在优化的激光抛光工艺参数下，既实现了几何表面精修，又保持了元素成分的均匀性和界面化学稳定性，这对于确保镍基合金在高温环境下的耐磨性能至关重要。

为进一步评估激光抛光对合金摩擦磨损性能的影响，对抛光面进行形貌表征。图 7 展示了通过白光干涉仪测得的三维表面形貌。结果显示，表面起伏范围控制在 ±0.2 μm 以内，表面粗糙度由原始 518 降低至 94 nm，降幅为 81.9%。

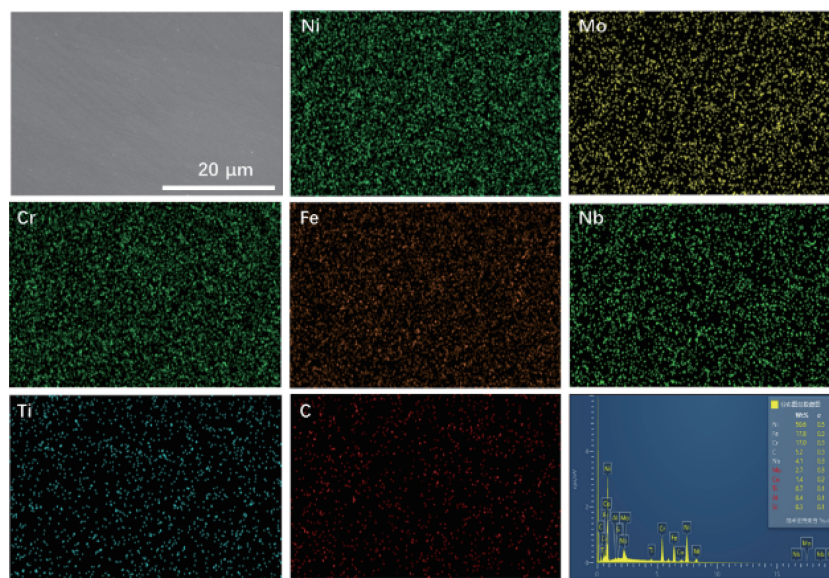


图 6 激光抛光后合金表面元素分布及成分分析

Fig. 6 Surface element distribution and compositional analysis of alloy after laser polishing

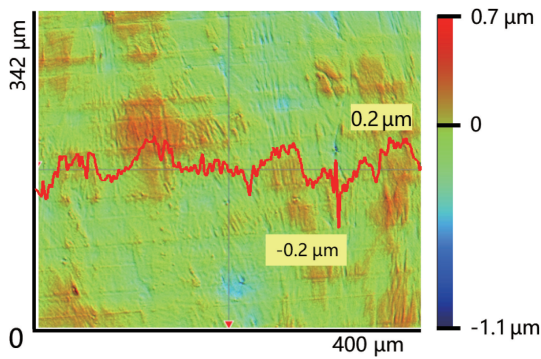


图 7 激光抛光后合金的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of alloy after laser polishing

图 8a 为显微维氏硬度测试结果, 平均硬度为  $278\text{HV}_{0.3}$ , 较未处理样品 ( $192\text{HV}_{0.3}$ ) 提高了 44.8%, 说明激光快速重熔-凝固过程显著增强了表面硬化效果。图 8b 展示了抛光后合金在  $800\text{ }^\circ\text{C}$  下摩擦系数变化曲线及相应的

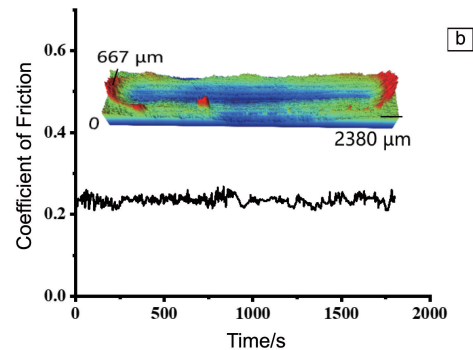
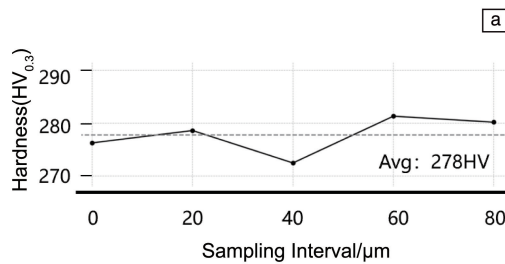


图 8 激光抛光后合金摩擦系数曲线与磨痕 (a) 和硬度测试曲线 (b)

Fig. 8 Coefficient of friction curve and wear track (a) and hardness test curve (b) of alloy after laser polishing

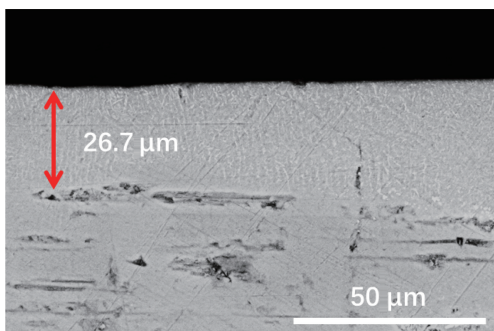


图 9 激光抛光后合金的横截面扫描电子显微镜照片

Fig. 9 Cross-sectional scanning electron microscope image of the alloy after laser polishing

### 3.3 激光抛光强化的物理机制

在激光抛光实验中, 不同工艺参数组合下镍基合金所表现出的显著差异可归因于激光-材料相互作用过程中多种热物理机制的协同作用。激光辐照镍基合金, 热能通过辐射迅速传递至材料表面, 并经电子-声子耦合转化为晶格振动, 从而诱导浅表熔池形成, 并伴随显著温度

三维磨痕形貌。在相同试验条件(载荷  $10\text{ N}$ , 频率  $1\text{ Hz}$ , 持续  $30\text{ min}$ )下, 未经处理的表面表现出较高的平均摩擦系数(约  $0.25$ ), 且整个测试过程摩擦系数波动明显, 范围为  $0.20\sim 0.40$ ; 相比之下, 激光抛光后的表面摩擦系数明显降低且更加稳定, 维持在约  $0.23$  且波动极小。

图 9 为激光抛光区的截面扫描电子显微镜照片。图中显示, 重熔层厚度约为  $26.7\text{ }\mu\text{m}$ , 组织细密, 未观察到明显裂纹或气孔等缺陷, 同时形成了界面连续稳定的冶金结合区, 表明热输入受控、结构完整性良好。与基体相比, 激光重熔区经历了快速加热与冷却过程, 晶粒明显更细且呈细小树枝晶特征, 说明激光抛光不仅改善了表面形貌, 还在显微组织上产生了显著的细化效应。综上所述, 激光抛光显著降低了表面粗糙度, 提高了表面硬度, 并明显改善了高温下的耐磨性与摩擦稳定性, 充分证明了该技术在镍基高温合金关键构件表面工程中的应用潜力。

梯度<sup>[13]</sup>。由于激光作用时间极短, 熔池范围极小, 对应的热影响区也非常窄<sup>[14]</sup>。有限的熔深结合快速冷却促进了表层的快速凝固<sup>[15]</sup>。在熔池存在期间, 沿表面存在的温度梯度引起表面张力的变化, 导致马兰戈尼对流的产生——即熔融金属从激光中心高温低表面张力区域流向熔池边缘的低温高表面张力区域<sup>[16]</sup>, 如图 10 所示。该流动将材料从表面突起区域输送至相邻低洼处, 实现了形貌的重新分布。因此, 马兰戈尼效应构成了激光抛光实现纳米级表面平整的物理基础<sup>[17-22]</sup>。

因此, 不同激光工艺参数实际上是通过调控热输入与扫描方式影响熔池行为及凝固过程, 最终影响抛光表面质量。激光功率为  $110\text{ W}$  时, 单位面积能量输入促使熔池稳定与连续, 马兰戈尼对流充分展开, 有效驱动熔体向低温区域流动, 实现表面自发整平; 进一步降低激光功率 ( $90\text{ W}$ ), 导致温度不足、流动性差, 熔合不良; 而激光功率过高 ( $150\text{ W}$ ) 则引发熔池过热和剧烈扰动, 破坏凝固过程, 形成不规则表面。控制扫描速度可调控激光与材

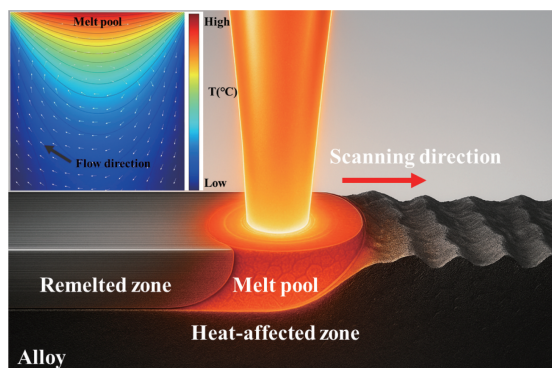


图10 镍基合金激光抛光原理示意图

Fig. 10 Schematic illustration of laser polishing on nickel-based alloys

料的作用时间及冷却速率,其中扫描速度为  $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  可实现热输入与散热的动态平衡,使熔池具有良好的流动性与凝固行为,获得致密、平整的表面;扫描速度偏离则打破平衡,分别引发未熔合或热积累引起表面缺陷。扫线间距直接决定光斑重叠率,从而影响热输入的空间分布和马兰戈尼对流连续性,当扫线间距与熔池稳定性之间取得平衡,使马兰戈尼效应驱动的熔体流动连续且可控,可有效实现表面突起向低洼处的输运与自发整平。与此同时,快速重熔-凝固循环极大限制了原子扩散,有效抑制了晶粒粗化与元素偏析。凝固前沿的稳定性有利于表层细小等轴晶或均匀重结晶组织形成<sup>[23, 24]</sup>。热影响区虽然未发生完全熔化,但在热激活作用下,位错密度升高进一步增强了近表层强度<sup>[18]</sup>。由此构建的致密且稳定的摩擦接触界面使高温摩擦响应更趋平稳而降幅有限。

综上,镍基合金激光抛光表面质量与摩擦学响应取决于受控热输入-熔池-凝固协同作用,在优化的激光工艺窗口内,稳定的马兰戈尼对流与快速凝固共同驱动材料由突起向低洼重分布,形成致密均匀的重熔层并细化组织,提高近表层强度,从而实现纳米级平整度与更稳定且摩擦系数小幅降低的高温摩擦行为;偏离该窗口则易因未熔合或过热扰动产生缺陷劣化表面。

## 4 结论

激光精密抛光可通过受控重熔与马兰戈尼效应驱动显著重构镍基高温合金表面。通过协同优化激光功率(110 W)、扫描速度( $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )与扫线间距( $9 \mu\text{m}$ , 约70%重叠率),使GH4169镍基合金表面粗糙度由518降至94 nm(降低81.9%),显微硬度由192HV<sub>0.3</sub>提升至278HV<sub>0.3</sub>(提高44.8%),在800℃、10 N条件下稳态摩擦系数由约0.25降至约0.23,且波动显著减小,无氧化或冶金缺陷生成。机理分析揭示,合理的热输入与重叠率可维持稳定的马兰戈尼对流,实现均匀的材料重分布和显微组织细化。本研究表明激光精密抛光可作为镍基合金

高性能表面构建的高效可控途径,对延长航空发动机关键部件在极端热-力工况下的服役寿命具有重要意义。

## 参考文献 References

- [1] TRESA M, POLLOC K, SAMMY T. Journal of Propulsion and Power [J], 2006, 22(2): 361-374.
- [2] JINO J, BASIL K. Wear [J], 2023, 522: 204681.
- [3] ZHAO P C, LIN B, ZHOU J G, et al. Journal of Materials Processing Technology [J], 2025, 337: 118744.
- [4] HU Z H, QIN C J, CHEN X G, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing [J], 2020, 21: 1421-1435.
- [5] MAI T A, LIM G C. Journal of Laser Applications [J], 2004, 16(4): 221-228.
- [6] GIORLEO L, CERETTI E, GIARDINI C. Procedia CIRP [J], 2015, 33: 446-451.
- [7] UKAR E, LAMIKIZ A, MARTÍNEZ S, et al. Journal of Materials Processing Technology [J], 2012, 212(6): 1305-1313.
- [8] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, LI X C, et al. CIRP Annals [J], 2013, 62(1): 203-206.
- [9] KRISHNAN A, FANG F Z. Frontiers of Mechanical Engineering [J], 2019, 14: 299-319.
- [10] ĆWIKŁA M, DZIEDZIC R, REINER J. Materials [J], 2021, 14(6): 1479.
- [11] LIU Y F, SUN S Y, WANG J L, et al. Journal of Materials Research and Technology [J], 2023, 25: 633-646.
- [12] SHUJA S Z, YILBAS B S. Optics & Laser Technology [J], 2011, 43(4): 767-775.
- [13] KLANJŠČEK U, KALIN M. Wear [J], 2025, 578/579: 206212.
- [14] LIU S Y, SHIN Y C. Materials & Design [J], 2019, 164: 107552.
- [15] LIU Z H, WANG C M, MI G Y, et al. Optics & Laser Technology [J], 2024, 171: 110419.
- [16] HU K X, LI F Y, ZHOU Y, et al. Laser & Optoelectronics Progress [J], 2024, 61(21): 2114003.
- [17] ZHANG C, ZHOU J, SHEN H. Journal of Manufacturing Science and Engineering [J], 2017, 139(4): 041019.
- [18] XU J L, ZOU P, WANG W J, et al. Optics & Laser Technology [J], 2021, 139: 106947.
- [19] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, LI X C, et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering [J], 2009, 131(3): 031002.
- [20] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, DUFFIE N A, et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering [J], 2009, 131(2): 021002.
- [21] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, LI X C, et al. Journal of Manufacturing Processes [J], 2009, 11(2): 74-81.
- [22] VADALI M, MA C, DUFFIE N A, et al. Journal of Manufacturing Processes [J], 2012, 14(3): 307-315.
- [23] AN Y, XU X L, LIANG L, et al. Journal of Alloys and Compounds [J], 2021, 864: 158821.
- [24] 徐鹤, 梁静静, 李金国. 稀有金属材料与工程 [J], 2025, 54(8): 1926-1933.

XU H, LIANG J J, LI J G. Rare Metal Materials and Engineering [J], 2025, 54(8): 1926-1933.