

# 激光精细表面制造工艺研究及应用：清洗与抛光\*

宋 杨<sup>1</sup>,王海鹏<sup>1</sup>,王 强<sup>1</sup>,马程鹏<sup>1</sup>,管迎春<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

2. 大型金属构件增材制造国家工程实验室,北京 100191;

3. 北京航空航天大学国际交叉科学研究院,北京 100191)

**[摘要]** 介绍了激光精细表面制造中的两类关键技术——激光清洗和激光抛光,以及其在提高结构材料表面质量和性能表现中的研究和应用。采用激光清洗技术去除铝合金表面氧化层,清洗表面氧含量显著降低,从而明显提高铝合金焊缝质量,避免熔合区气孔形成;通过激光抛光技术对增材成形钛合金构件进行抛光,可将表面粗糙度由 $5\mu\text{m}$ 以上降低到 $1\mu\text{m}$ 以下,同时激光抛光钛合金表面发生相变,使表面硬度和耐磨性得到显著提高。最后,进一步讨论激光清洗和抛光复合技术处理 Ni-Ti 形状记忆合金(SMA)表面的可行性。

**关键词:** 激光清洗; 铝合金; 激光抛光; 钛合金; Ni-Ti 形状记忆合金; 表面制造

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.078



宋 杨

硕士研究生,研究方向为激光表面精细加工。

激光制造是利用激光束与物质相互作用的特性,对材料(包括金属与非金属等)进行焊接、切割、表面处理 and 微加工等,其广泛应用于汽车、航空航天、航海和生物医疗等重要领域<sup>[1]</sup>。激光精细表面制造技术在不改变或影响材料整体性能的前提下,对材料表面进行微细加工,增强多种表面性能,具有广阔发展前景<sup>[2-3]</sup>。本文围绕目前应用最广泛的激光清洗技术和最新的激光抛光技术在结构材料表面上的应用展开探讨,运用扫描电镜等多种表征方法对激光处理后的表面质量进行分析。

铝合金(5A06)板材,使用Nd:YAG倍频激光器对铝合金表面污物进行扫描去除。采用TIG焊接方法探究激光清洗对于提高焊缝质量的重要作用。试验中,选择铝镁合金焊丝(ER5356)作为TIG焊接填充材料。5A06和ER5356材料化学组分如表1所示。TIG焊接工艺参数如表2所示。

## 1.2 激光参数

激光清洗采用Nd:YAG激光器,主要参数为:波长 $532\text{nm}$ ,脉冲宽度 $10\text{ns}$ ,重复频率 $10\text{kHz}$ ,光斑直径 $30\mu\text{m}$ 。通过工艺参数优化,激光清洗过程中选用的激光功率密度 $5.31 \times 10^8\text{W}/\text{cm}^2$ ,扫描速度 $15\text{mm}^2/\text{s}$ 。对材料表面 $100\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的区域面积进行扫描清洗加工。激光清洗过程采用氩气保护。

## 1.3 表征测量

在焊缝和激光清洗区域分别切

## 试验及方法

### 1 激光清洗

#### 1.1 试验材料

试验材料采用厚度为 $3\text{mm}$ 的

\* 基金项目: 科技部增材制造和激光制造重点研究项目(2016YFB1102503); 科技部青年973重点基础研究项目(2015CB059900); 国家自然科学基金项目(51005011); 北京市自然科学基金项目(J170002、3162019); 科技部重点研发专项(2018YFB1107400;2018YFB1107700)。

割 10mm × 10mm × 3mm 的试样进行分析。采用扫描电子显微镜 (SEM, 型号 Carl Zeiss EVO MA15) 对材料表面形貌特征进行表征, 使用能谱仪 (EDS) 对表面化学成分进行分析。借助聚焦离子束切割技术 (FIB, 型号 FEI Helios 650) 切割出 (100~200) μm × (40~80) μm × (20~30) μm 尺寸的试样, 对材料局部区域横截面特征进行分析。聚焦离子束切割主要参数: 束流工作电压 30kV, 电流 0.47~0.79nA, 系统工作在  $1.5 \times 10^{-4}$  Pa 高真空条件下; 随后借助 FEI Helios 650 扫描电镜对局部区域横截面特征进行分析。

## 2 激光抛光

### 2.1 试验材料

试验材料为激光增材成形 (LAM) 的块状 Ti-6Al-4V (TC4) 和 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si (TC11/BT9) 钛合金材料。利用线切割技术将块状钛合金材料分别切割成厚度为 10mm 的试样。两种材料化学组分如表 3 所示。

表1 5A06和焊丝ER5356材料化学组分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 5A06 and ER5356 %

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Mg	Al
5A06	< 0.4	0~0.4	< 0.1	0.5~0.8	< 0.2	5.8~6.8	余量
ER5356	< 0.1	< 0.2	—	0.15	—	4.9	余量

表2 TIG焊接主要工艺参数

Table 2 Main parameters of TIG welding process

焊接电流 / A	焊接速度 / (mm · min <sup>-1</sup> )	送丝速度 / (m · min <sup>-1</sup> )	保护气体流量 / (L · min <sup>-1</sup> )
160	200	5	15

表3 TC4和TC11材料化学组分(质量分数)

Table 3 Chemical compositions of TC4 and TC11 %

材料	Al	V	Mo	Si	Zr	Fe	Ti
TC4	5.5~6.8	3.5~4.5	—	—	—	< 0.3	余量
TC11	5.8~7.0	—	2.8~3.8	0.20~0.35	0.8~2.0	< 0.25	余量

### 2.2 激光参数

采用纳秒光纤激光器, 对钛合金表面进行抛光处理。激光器主要参数: 波长 1060nm, 脉冲宽度 220ns, 重复频率 500kHz, 光斑尺寸 44μm。经过工艺参数优化, 激光抛光选用的主要工艺参数为: 功率密度  $1.20 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>, 扫描速度 8.8mm<sup>2</sup>/s, 激光扫描重叠率 50%。对材料表面 100mm × 100mm 的区域进行扫描抛光。

### 2.3 表征测量

通过 SEM 和共聚焦显微镜 (LSCM, 型号 Keyence VK-X) 对材料表面形貌特征进行分析。利用 X-射线衍射仪 (XRD) 对激光抛光前后的物相组成进行分析。采用维氏硬度计 (FUTURE-TECH FM-800) 对激光抛光表面进行硬度测试, 加载载荷为 0.98N, 保持时间 10s, 每处显微硬度测量 5 次取平均值。采用多功能材料表面性能测试仪 (MFT-4000) 对抛光后的钛合金表面进行干摩擦测试, 选用直径为 5mm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 磨球, 施加载荷为 50N, 线速度为

200mm/min, 持续 30min。通过共聚焦显微镜对磨痕进行表征。

## 3 激光清洗-抛光复合工艺

### 3.1 试验材料

试验选择厚度为 0.6mm 的 Ni-45.0% Ti 形状记忆合金 (SMA) 材料。将材料分别切割成 10mm × 10mm 和 4mm × 5mm 两种尺寸的试样用于不同试验。

### 3.2 激光参数

试验采用 Nd:YAG 纳秒激光器对 SMA 合金表面进行加工。激光器主要参数为: 波长 1064nm, 脉冲宽度 34ns, 重复频率 30kHz, 光斑尺寸 50μm。经过工艺参数优化, 试验采用功率密度为  $5.3029 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, 扫描速度为 10.519mm<sup>2</sup>/s, 激光扫描工艺沿扫描方向的重叠率为 67%, 扫描路径之间的重叠率为 80%。激光扫描 3 次以去除表面氧化层, 在此基础上再进行 2 次扫描以实现表面抛光。激光清洗和抛光工艺均在氩气保护氛围内进行。

### 3.3 测量表征

通过 SEM 和 3D 表面轮廓仪 (KLA-Tencor MicroXAM-100) 对材料表面形貌特征进行测量和分析。借助 FIB 切割技术分析局部区域的横截面微观特征。FIB 工艺参数选择与激光抛光试验中的 FIB 参数相同。采用 EDS 分析激光清洗处理前后的表面化学成分变化。使用差示扫描量热计 (DSC, 型号 NETZSCH DSC 204F1 Phoenix) 对尺寸为 4mm × 5mm 的 Ni-Ti SMA 的转变温度进行测量。

## 结果与讨论

### 1 激光清洗

传统清洗方法, 如机械打磨和化学清洗, 具有成本高、质量差、易造成环境污染等弊端, 而激光清洗作为一种高效去污技术近年来不断得到应用和推广。特别是对于工业环境中的金属, 利用激光清洗技术可显著

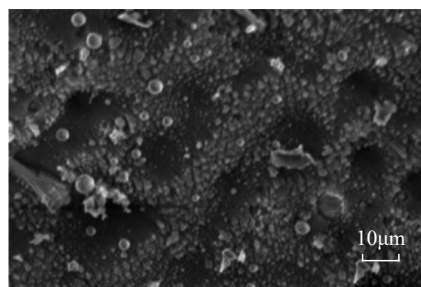
去除其表面颗粒污染物、氧化层及油脂。激光清洗采用高能激光束照射工件表面,使表面的污物、锈斑或涂层发生瞬间蒸发或剥离,同时不改变或损伤基体材料性能,从而达到表面净化。激光清洗技术可控性强,可用于材料表面选择性区域加工<sup>[4-5]</sup>。

焊接作为一种重要的材料加工技术,广泛应用于工业各领域。相关研究表明,焊接母材表面的清洁程度会直接影响焊缝质量。为保证焊接质量,母材表面的氧化皮及其他污染物必须完全去除<sup>[6]</sup>。母材表面质量较差会引起飞溅和焊条短路,杂质会使焊缝中心容易产生热裂纹<sup>[7]</sup>,而基材表面的污染物极易在焊缝中产生气孔<sup>[8]</sup>。研究表明,激光清洗可以将A356合金的气孔率从15%降低至2%以下<sup>[9]</sup>。

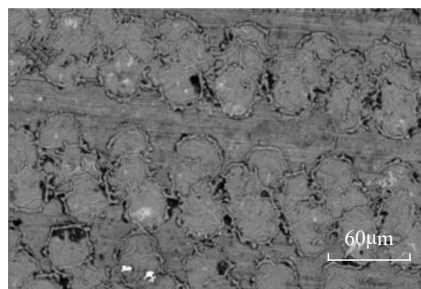
如图1(a)所示,在TIG焊接之前未经过激光清洗处理的铝合金焊缝表面发现污染物颗粒,颗粒平均直径约为1~2 $\mu\text{m}$ ,少数颗粒尺寸达到5~10 $\mu\text{m}$ 。与以往研究不同,本文首先采用独立光束扫描来分析激光清洗对氧化物去除的效果,如图1(b)所示,材料表面激光清洗区域发生熔化和凝固。图1(c)为利用EDS能谱面扫描分析得到的氧分布图。可以发现,与未经激光处理区域相比,激光清洗后表面氧分布显著下降。这表明,激光清洗后材料表面氧化层被有效去除,但激光清洗表面仍存在少量氧,其原因可能是:铝合金原始表面的氧化膜去除不完全;铝合金原始表面的氧化膜已被完全去除,激光清洗过程是在氩气保护下进行,并未产生新的氧化膜,但在进行化学分析之前铝合金表面在空气中发生自然氧化。由于表面氧化层与基体材料对激光吸收率不同,吸收激光能量会使氧化层表面温度迅速达到沸点,氧化层材料汽化而被去除,而基体材料对激光吸收率较低,表面发生熔凝过程,如图1(b)中所示。

考虑到在实际应用中需要采用连续清洗工艺以实现大面积清洗,文中采用连续扫描方式对材料表面进行清洗处理,所得表面和横截面如图2所示。图2(b)为采用FIB切割技术从材料(图2(a))上切割得到的截面,显示材料表面初始氧化层厚度约为2 $\mu\text{m}$ ,经过激光表面清洗后氧化层及污染物颗粒被有效去除。通过氧元素在激光清洗表面和未处理表面的线型分布可知,其与图1(b)中独立光束扫描结果类似,连续扫描所得表面氧含量也显著降低。

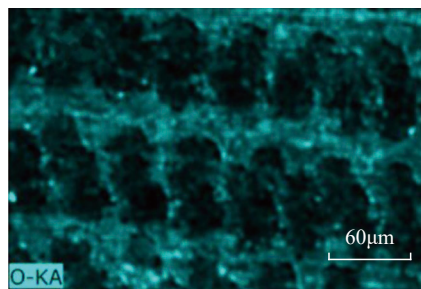
在此次研究中,比较了传统打磨和激光清洗预处理对TIG焊缝质量的影响,试验结果如图3所示。通过



(a) 未经激光扫描清洗



(b) 激光独立清洗后



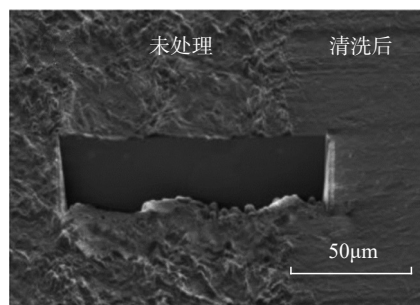
(c) 激光独立扫描清洗后的表面氧分布

图1 激光扫描清洗前后焊缝表面形貌  
Fig.1 Surface morphology of welds before and after laser scanning cleaning

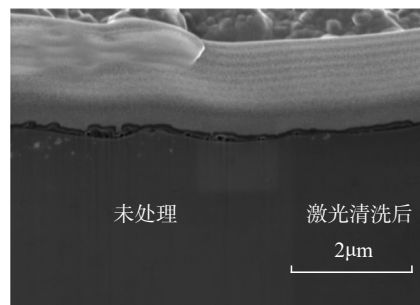
传统方式打磨后焊接的工件,熔合区仍有气孔,同时存在尺寸约1~2 $\mu\text{m}$ 的夹杂物,母材与熔合区的氧含量相近。对该夹杂物进行分析可知,其边缘非常尖锐,在焊缝中极易产生应力集中甚至形成裂纹。通过激光清洗处理后进行焊接的工件,熔合区不存在气孔,且含氧量明显低于母材,同时由于快速熔化-凝固过程使夹杂物得到细化<sup>[10-11]</sup>。由于传统打磨方式对铝合金表面氧化膜去除不完全,其在焊前吸附了较多的水分(通常以结晶水形式存在)<sup>[12]</sup>,在激光辐照下发生分解,产生大量的氢,致使焊缝中出现较多的氢气孔;激光清洗后的表面几乎不存在氧化膜,消除了氢的来源,故焊缝几乎没有气孔存在。

## 2 激光抛光

钛合金因具有比强度高、耐腐蚀性好等特点<sup>[13]</sup>而被广泛应用。由于钛化学性质活泼,使用传统方法加工



(a) FIB 切割横截面



(b) 未经和经过激光清洗后的横截面

图2 采用连续扫描清洗后表面与截面的显微形貌特征和元素分布  
Fig.2 Top view and cross section of surface morphology and element mapping for laser cleaned area by overlapping scanning

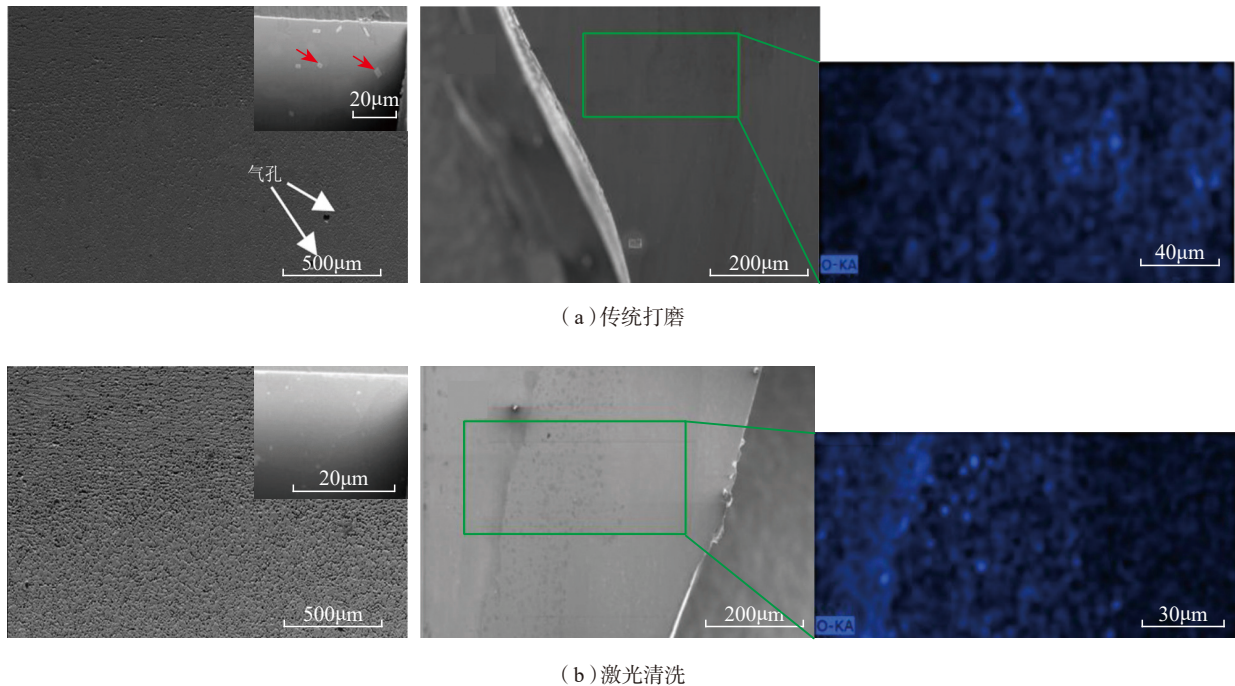


图3 传统打磨和激光清洗后进行TiG焊接得到的焊缝微观结构

Fig.3 Microstructure of TiG weld after normal ground or laser cleaning on substrate surface

困难<sup>[14-15]</sup>,激光增材制造技术(laser additive manufacturing, LAM)应运而生。由扫描轨迹和分层结构产生的波纹度使得LAM成形构件的表面粗糙度通常高于 $10\mu\text{m}$ <sup>[16-17]</sup>。

激光抛光作为降低增材制造工件表面粗糙度的有效方法,其原理是激光辐射过程中的热量输入导致母材表面熔化,熔化液体在表面张力和重力作用下流动并填充凹洼部位,使表面趋于同一平面,激光束离开后,表面温度迅速下降,液态熔体快速凝固,表面粗糙度随之降低<sup>[18-20]</sup>。与传统的机械抛光方法相比,高度自动化的激光抛光通过重熔改变表面形态,不影响工件的整体性能,不会对环境产生危害。

激光抛光前后Ti合金宏观图片和SEM显微图像分别如图4(a)和图4(b)所示,LAM成形的钛合金粗糙表面经过激光抛光处理后变得平滑光亮并显现出激光熔凝的痕迹。这表明,在激光抛光过程中,钛合金表面吸收激光能量并迅速达到熔点温度使表面材料发生熔化,在表面张

力和重力驱动下,凸处熔融液体流向凹处。当光束离开后,液态材料快速凝固,使表面峰-谷高度显著降低,表面粗糙度下降。图4(c)和图4(d)分别为TC4和TC11经激光抛光前后的LSCM表面形貌图。激光抛光后,TC4表面峰谷高度从 $90\mu\text{m}$ 降至 $4\mu\text{m}$ ,TC11表面峰谷高度从 $80\mu\text{m}$ 降至 $4.5\mu\text{m}$ 。表面粗糙度( $S_a$ )由激光扫描共聚焦显微镜测量得到的表面高度数据计算得到,如表4所示。经过激光抛光,TC4和TC11表面粗糙度均由原来的 $5\mu\text{m}$ 以上降至 $1\mu\text{m}$ 以下。

在LAM成形后,TC4显微组织结构由针状 $\alpha$ 相(V含量较低)和 $\beta$ 相(V含量较高)组成<sup>[21-22]</sup>。激光抛光后,TC4表面的抛光层厚度约为 $170\mu\text{m}$ (图5(a)),其中分布着针状马氏体 $\alpha'$ 相,如图5(b)和(c)所示。抛光区域化学组分发生明显变化,主要元素为Ti、Al、V,分别占91.48%、6.19%和2.33%(质量分数),在 $\alpha + \beta$ 相成分范围内。抛光区顶部的元素均匀分布,这可能是激光抛光过程中快速熔凝导致马氏体 $\alpha'$

相形成所致<sup>[23-24]</sup>。图5(d)XRD分析结果表明,LAM成形的TC4由 $\alpha + \beta$ 相组成,而激光抛光表面主要由 $\alpha'$ 马氏体相组成,无 $\beta$ 相产生。因此,在激光抛光快速熔凝过程中,材料表层发生相变。对于 $\alpha + \beta$ 双相Ti合金,当温度升高到 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变点,开始相变;继续升温至 $\beta$ 相转变温度(约1273K), $\alpha + \beta$ 双相完全转化为 $\beta$ 相。在激光束离开后的快速冷却过程中, $\beta$ 相将根据冷却速率分解为二次 $\alpha$ 相或 $\alpha'$ 马氏体相,临界冷却速率约为410K/s。若冷却速率大于410K/s,无 $\beta$ 相产生。在脉冲激光处理的热循环中,通过一维热模型<sup>[25]</sup>计算得到TC4和TC11的冷却速率分别为 $1.209 \times 10^4 \text{K/s}$ 和 $9.238 \times 10^3 \text{K/s}$ ,远高于410K/s。因此,在快速冷却时,bcc晶体结构的 $\beta$ 相通过无扩散和剪切转变完全转变为亚稳态的 $\alpha'$ 马氏体相。经激光抛光后,发生非平衡相变 $\alpha + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ ,所以抛光层主要由 $\alpha'$ 马氏体相组成。通过分析发现,激光抛光使TC11表面产生类似的显微组织结构变化。

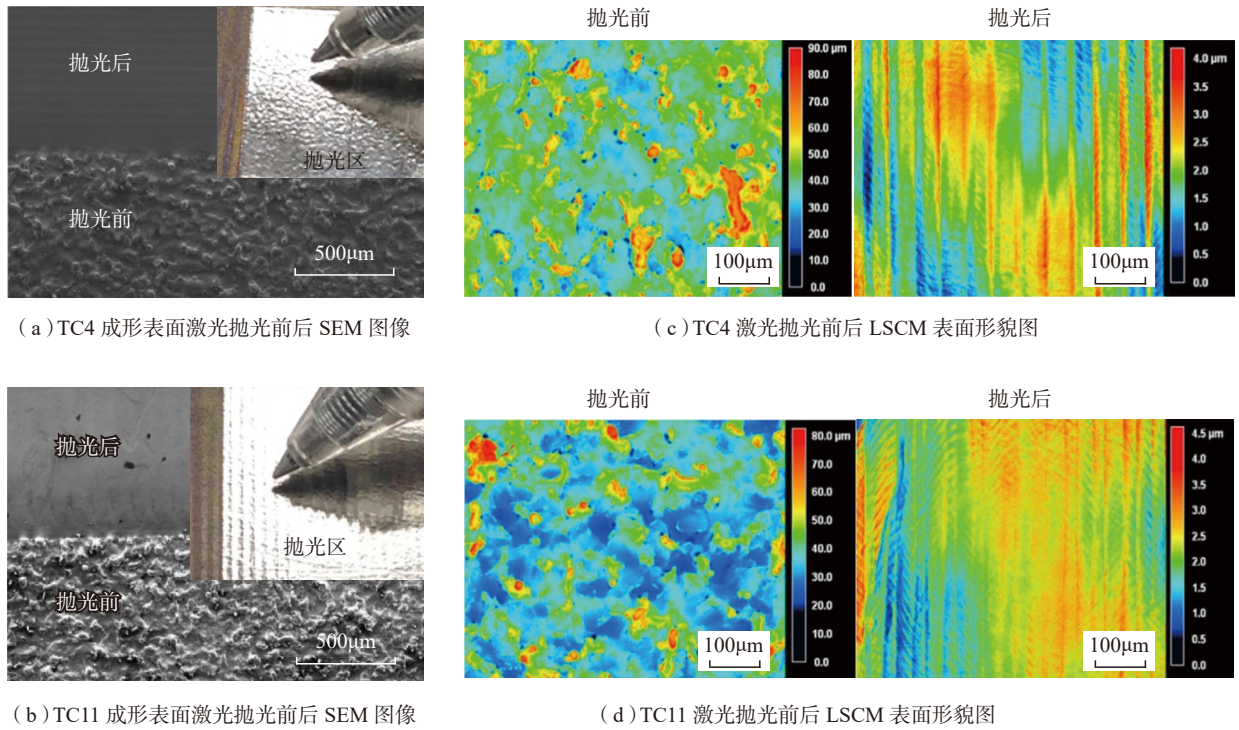


图4 激光抛光前后TC4和TC11表面形貌

Fig.4 Surface morphology of TC4 and TC11 alloys before and after laser polishing

表4 抛光前后TC4和TC11表面粗糙度 ( $S_a$ )

Table 4 Surface roughness of TC4 and TC11 before and after polishing  $\mu\text{m}$

材料	抛光前	抛光后
TC4	5.226	0.375
TC11	7.21	0.73

激光抛光后 TC4 和 TC11 的显微硬度沿截面分布如图 6 (a) 所示, TC4 和 TC11 的初始平均硬度分别为 345HV 和 400HV。激光抛光后, 由于在抛光层中形成  $\alpha'$  马氏体相, 硬度比基体材料分别提高 32% 和 42%。由于  $\alpha'$  马氏体相具有六方密堆积(hcp)结构, 而  $\beta$  相具有体心立方(bcc)结构, hcp 结构比 bcc 结构具有更高的体积模量值, 因此抛光层硬度比基体材料更高<sup>[26]</sup>。图 6(b) 为 TC4 和 TC11 在激光抛光前后的磨损轨迹横截面轮廓, 激光抛光表面的磨损量明显小于未处理表面。采用磨损率评估样品的耐磨性, 将其定义为:  $W = \Delta V / (L \times D)$ , 其中  $\Delta V$  为磨损痕迹的体积,  $D$  为滑动距离,  $L$  为

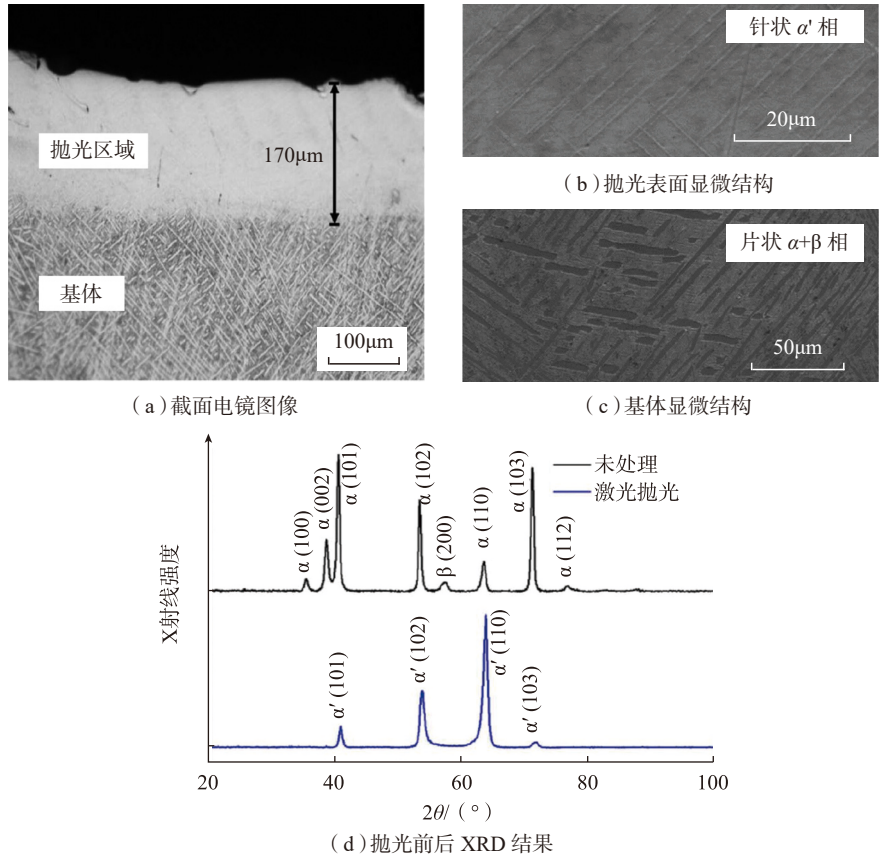


图5 TC4激光抛光表面显微结构分析

Fig.5 Microstructure analysis of laser polished TC4 surface

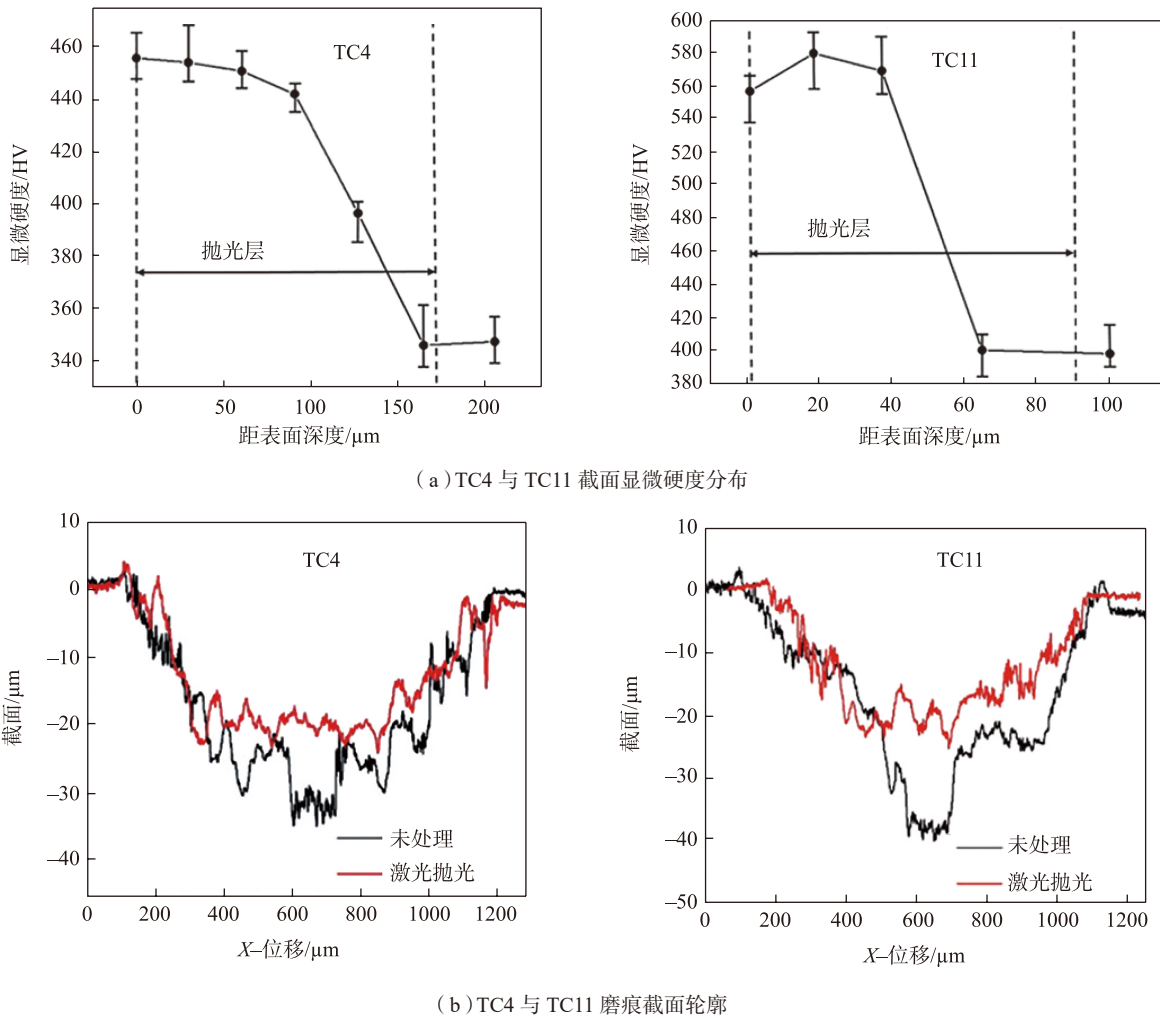


图6 激光抛光后TC4与TC11截面显微硬度分布和磨痕截面轮廓

Fig.6 Microhardness distributions in cross sections of laser polished TC4 and TC11, and cross sectional profiles of wear tracks before and after laser polishing

试验施加载荷<sup>[27]</sup>。计算得到 TC4 在激光抛光前磨损率约为  $0.475\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，抛光后磨损率降低至约  $0.3\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ；TC11 在激光抛光前磨损率约为  $0.4\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，抛光后降低至约  $0.27\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。激光抛光后，材料表面硬度和耐磨损性能的提高归因于抛光层中硬质相  $\alpha'$  马氏体的形成。

### 3 激光清洗-抛光复合工艺

形状记忆合金(SMA)因其形状记忆效应(SME)和超塑性特性<sup>[28]</sup>而得到广泛应用,包括锻造和轧制在内的热加工工艺是形状记忆合金的关键成形技术<sup>[29-30]</sup>。热处理后的SMA初始表面极易产生氧化层,因

此在应用前需要对其表面氧化层进行去除加工。同时,要保持SMA表面较小的粗糙度以保证工件的机械性能。

在激光清洗铝合金表面氧化层和激光抛光增材成形钛合金结构件表面等工作的基础上,本文进一步对激光清洗-抛光复合工艺在Ni-Ti形状记忆合金表面的应用进行研究。首先通过3次激光扫描过程清除Ni-Ti合金表面的氧化层(厚度约 $10\mu\text{m}$ ),再进行2次激光扫描过程可实现对Ni-Ti合金表面的抛光,如图7(a)所示。可见,激光处理区与未处理区差别显著。通过对表面进行EDS分析(图7(b)、(c))可知,激

光处理Ni-Ti合金表面氧含量显著下降。未处理表面氧含量高于40%(质量分数),而激光处理表面氧含量降低至3%以下,如表5所示。图7(d)、(e)为利用FIB切割技术得到的激光处理前后的截面图,可见未处理截面存在很多污染物,而在激光处理区域的截面未发现氧化层和污染层。研究表明,利用激光清洗技术可以有效去除Ni-Ti合金表面的氧化层和污染物。激光清洗技术去除Ni-Ti合金表面氧化层的原理与上文所述激光清洗去除铝合金表面氧化膜原理相似,由于表面氧化层与基体材料对激光吸收率不同使氧化层被有效去除。

在对 Ni-Ti SMA 进行激光清洗和抛光复合处理过程中,为使氧化物去除和表面质量保持有效平衡,激光扫描工艺采取 80% 的重叠率和多次扫描的方法。利用 3D 表面轮廓仪检测表面 3D 形貌如图 7 (f) 所示,在激光辐照过程中,钛合金表面吸收激光能量并迅速达到熔点温度使表面材料发生熔化,在表面张力和重力驱动下,凸处熔融液体流向凹处。当光束离开后,液态材料快速凝固,使表面峰-谷高度显著降低,表面粗糙度下降。因此,激光处理后表面波纹结构的峰谷高度约为 4~5 $\mu\text{m}$ ,平均粗糙度约为 0.9 $\mu\text{m}$ 。

为研究激光处理对 Ni-Ti SMA 转变温度的影响,将未处理和激光处

理后的 Ni-Ti SMA 薄片在 450 $^{\circ}\text{C}$  下进行 30min 老化,然后测量老化的 Ni-Ti 薄片的转变温度。如图 8 所示,对于未处理和激光处理后的 Ni-Ti SMA,在冷却和加热循环过程中,转变温度只发生轻微变化,差值小于 5 $^{\circ}\text{C}$ ,因此可以推断激光处理 SMA 表面没有改变 Ni-Ti SMA 的转变温度,并且激光处理后 Ni-Ti SMA 主相也没有发生改变。该试验结果表明,激

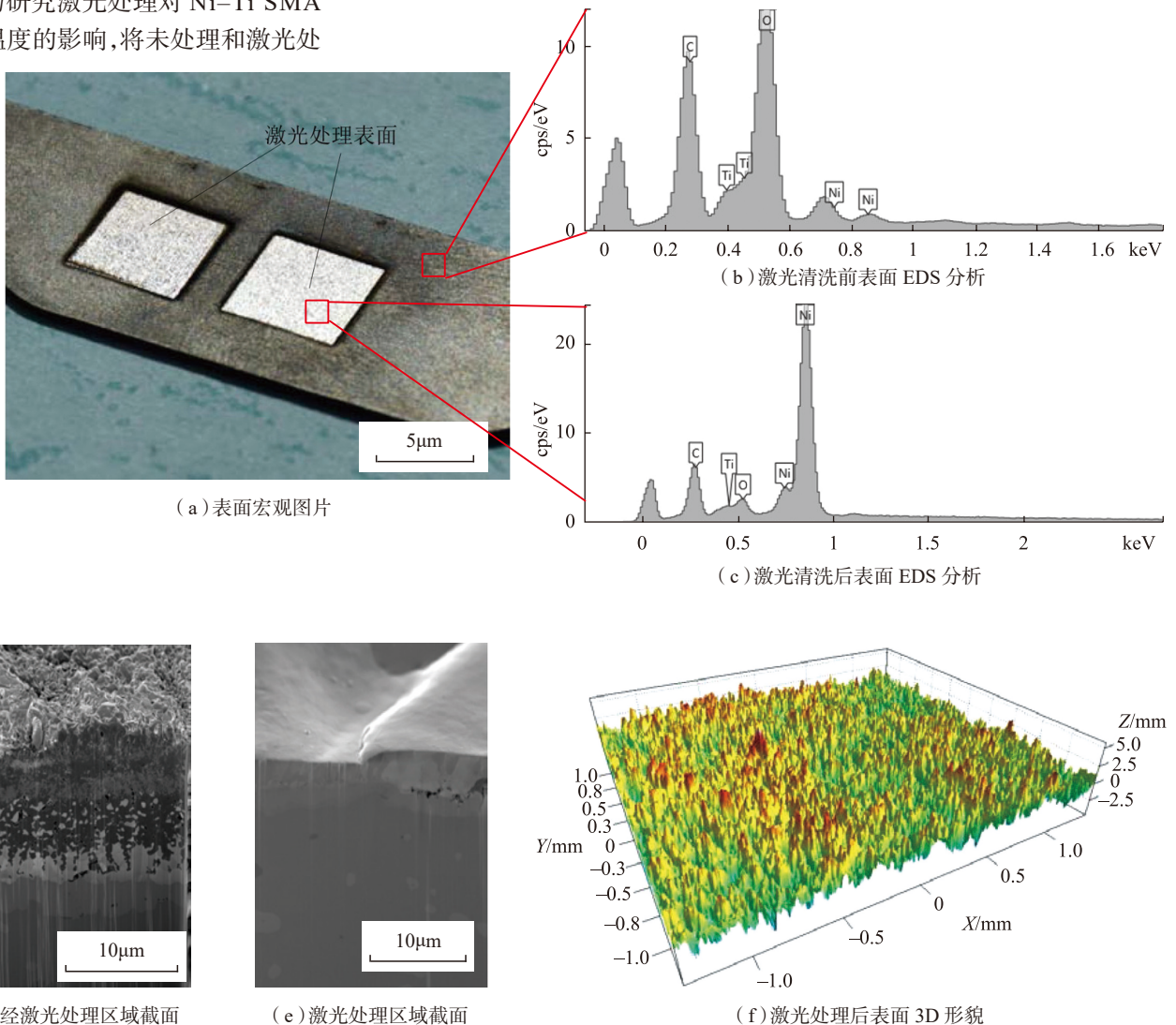
光处理只对 Ti-Ni 表面氧化层进行汽化消除及对表层材料熔化重凝,并未对 Ni-Ti 合金基材组织及性能产生影响,故激光清洗-抛光复合工艺可用于 Ni-Ti 形状记忆合金的处理。

### 结论

本文系统研究并分析了激光精细清洗和抛光技术在结构材料中的实际应用,得出以下结论:

表5 激光处理前后表面元素含量  
Table 5 Surface element content before and after laser treatment %

激光处理阶段	Ti	Ni	O	可能组成物
处理前	53.28	3.78	42.95	TiO <sub>2</sub>
处理后	18.06	79.10	2.85	TiNi 混合物, Ti



(a) 表面宏观图片

(b) 激光清洗前表面 EDS 分析

(c) 激光清洗后表面 EDS 分析

(d) 未经激光处理区域截面

(e) 激光处理区域截面

(f) 激光处理后表面 3D 形貌

图7 激光清洗Ni-Ti SMA前后图像与化学组分

Fig.7 Surface topography and EDS results before and after laser cleaning

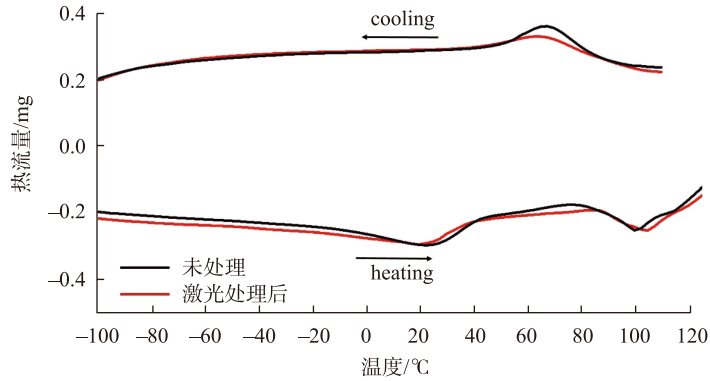


图8 激光处理前后Ni-Ti SMA DSC图像  
Fig.8 DSC graph of Ni-Ti SMA before and after laser processing

(1) 激光清洗技术可以有效去除铝合金和 Ni-Ti 合金表面厚度为 1~10 $\mu$ m 的氧化层,并使表面氧含量显著降低。焊前进行激光清洗去除材料氧化层可有效提高焊缝质量,避免在熔合区形成气孔,并细化显微结构。

(2) 激光抛光可有效改善 LAM 成形的 TC4 和 TC11 以及 Ni-Ti SMA 表面形貌,使表面粗糙度均降低至 1 $\mu$ m 以下。激光抛光处理使 TC4 和 TC11 表面显微硬度分别提高 32% 和 42%,耐磨性能也得到增强,这主要得益于激光快速熔凝过程导致微观组织细化和硬质相  $\alpha'$  马氏体的形成。

(3) 激光抛光使 TC4 和 TC11 发生相变,由  $\alpha + \beta$  双相组织转变为单一  $\alpha'$  马氏体相组织,但激光抛光过程对 Ni-Ti SMA 转变温度无明显影响。

## 参考文献

[1] KUMAR A, GUPTA M C. Surface preparation of Ti-3Al-2.5V alloy tubes for welding using a fiber laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1259-1265.  
[2] GUAN Y C, NG G K L, ZHENG H Y, et al. Laser surface cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine piston[J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 526-530.  
[3] KUMAR A, SAPP M, VINCELLI

J, et al. A study on laser cleaning and pulsed gas tungsten arc welding of Ti-3Al-2.5V alloy tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 64-71.

[4] COSTIL S, LAMRAOUI A, LANGLADE C, et al. Surface modifications induced by pulsed-laser texturing—influence of laser impact on the surface properties[J]. Applied Surface Science, 2014, 288: 542-549.

[5] CHEN G X, KWEE T J, TAN K P, et al. High-power fibre laser cleaning for green shipbuilding[J]. Journal of Laser Micro, 2012, 7(3): 249-253.

[6] HOWARD K, HOWARD S, ZHOU Y. Welding aluminum sheet using a high-power diode laser[J]. Welding Journal, 2006, 85(5): 101-109.

[7] 王亚荣, 张忠典, 冯吉才, 等. 表面状态对镁合金点焊接头质量的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 27-30.

WANG Yarong, ZHANG Zhongdian, FENG Jicai, et al. Effects of surface conditions on spot welded joint of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 27-30.

[8] GOURET N, OLLIVIER E, DOUR G, et al. Assessment of the origin of porosity in electron-beam-welded TA6V plates[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2004, 35(3): 879-889.

[9] HABOUDOU A, PEYRE P, VANNES A B. Influence of surface preparation and process parameters on the porosity

generation in aluminum alloys[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(1): 20-24.

[10] LEFEZ B, LOPITAUX J, HANNOYER B, et al. Fourier transform infrared reflection absorption spectroscopy and microspectroscopy, a tool to investigate thermally grown oxide scales[J]. Thin Solid Films, 2007, 516(2-4): 349-354.

[11] GNEDENKOV S V, KHRISANFOVA O A, ZAVIDNAYA A G, et al. Composition and adhesion of protective coatings on aluminum[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 145(1): 146-151.

[12] 董世运, 宋超群, 闫世兴, 等. 激光清洗预处理对 7A52 铝合金激光焊缝成形质量的影响[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(4): 100-105.

DONG Shiyun, SONG Chaoqun, YAN Shixing, et al. Effect of laser cleaning pretreatment on laser weld forming quality of 7A52 aluminum alloy[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2017, 31(4): 100-105.

[13] QIN J H, CHEN Q, YANG C Y, et al. Research process on property and application of metal porous materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 654: 39-44.

[14] ZHANG S, LI J F, SUN J, et al. Tool wear and cutting forces variation in high-speed end-milling Ti-6Al-4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(1-4): 69-78.

[15] PERVAIZ S, RASHID A, DEIAB I, et al. Influence of tool materials on machinability of titanium- and nickel-based alloys: a review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(3): 219-252.

[16] PAKKANEN J, CALIGNANO F, TREVISAN F, et al. Study of internal channel surface roughnesses manufactured by selective laser melting in aluminum and titanium alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(8): 3837-3844.

[17] WANG M, LIN X, HUANG W. Laser additive manufacture of titanium alloys[J]. Materials Technology, 2016, 31(2): 90-97.

[18] UKAR E, LAMIKIZ A, LIÉBANA F, et al. An industrial approach of laser polishing with different laser sources[J].

Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2015, 46(7): 661–667.

[19] WANG Q, MORROW J D, MA C, et al. Surface prediction model for thermocapillary regime pulsed laser micro polishing of metals[C]//43rd North American Manufacturing Research Conference. Charlotte, 2015.

[20] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, MORROW J D, et al. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 237–240.

[21] NASSAR A R, REUTZEL E W. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V using a pulsed laser beam[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(6): 2781–2789.

[22] BRANDL E, GREITEMEIER D. Microstructure of additive layer manufactured Ti–6Al–4V after exceptional post heat treatments[J]. Materials Letters, 2012, 81: 84–87.

[23] HAHN J D, SHIN Y C, KRANE M

J M. Laser transformation hardening of Ti–6Al–4V in solid state with accompanying kinetic model[J]. Surface Engineering, 2013, 23(2): 78–82.

[24] WU S Q, LU Y J, GAN Y L, et al. Microstructural evolution and microhardness of a selective–laser–melted Ti–6Al–4V alloy after post heat treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 672: 643–652.

[25] LIU S Y, HU J D, YANG Y, et al. Microstructure analysis of magnesium alloy melted by laser irradiation[J]. Applied Surface Science, 2005, 252: 1723–1731.

[26] IYAKUTTI K, NIRMALA LOUIS C, ANURATHA S, et al. Pressure-induced electronic phase transitions and superconductivity in titanium[J]. International Journal of Modern Physics B, 2009, 23(5): 723–741.

[27] GUO G W, TANG G Z, MA X X, et al. Effect of high current pulsed electron beam irradiation on wear and corrosion resistance of

Ti6Al4V[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 229: 140–145.

[28] ZHANG L, XIE C Y, WU J S. Martensitic transformation and shape memory effect of Ti–49 at.%Ni alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 438–440: 905–910.

[29] ZHU Y F, WANG X T, WANG L Q, et al. Influence of forging deformation and heat treatment on microstructure of Ti–xNb–3Zr–2Ta alloys[J]. Materials Science and Engineering: C, 2012, 32(2): 126–132.

[30] FACCHINELLO Y, BRAILOVSKI V, PROKOSHKIN S D, et al. Manufacturing of nanostructured Ti–Ni shape memory alloys by means of cold/warm rolling and annealing thermal treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2294–2304.

通讯作者: 管迎春, 教授、博导, 研究方向为激光制造与增材制造等, E-mail: guanyingchun@buaa.edu.cn.

## Research and Application of Laser Fine Surface Processing Technology: Cleaning and Polishing

SONG Yang<sup>1</sup>, WANG Haipeng<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, MA Chengpeng<sup>1</sup>, GUAN Yingchun<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100191, China;

3. International Research Institute for Multidisciplinary Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** In current work, two key techniques in laser fine surface processing—laser cleaning and laser polishing—are introduced in the improvement of material surface quality and performance. On the one hand, laser cleaning technique was used to remove the oxide layer on commercial aluminum alloy (5A06) surface. Results reveal that oxygen content on the laser treated surface is significantly decreased, improving the welding quality and avoiding the formation of porosity in fusion zone. On the other hand, laser polishing process is carried out on the laser-based additive manufactured titanium alloys (TC4 and TC11), showing that as-received Ti-based alloys with surface roughness more than 5 $\mu\text{m}$  can be reduced to less than 1 $\mu\text{m}$  through laser polishing process. Meanwhile, phase transformation occurs on the laser polished Ti-alloy surfaces, which brings great enhancement of microhardness and wear resistance. Finally, it was furtherly discussed on the composite laser treatment on Ni–Ti shape memory alloy (SMA) surface by combining laser cleaning and polishing technologies.

**Keywords:** Laser cleaning; Al alloy; Laser polishing; Ti alloy; Ni–Ti SMA; Surface manufacturing

(责编 逸飞)