

激光与光电子学进展

高温氧化钛合金激光清洗机理与工艺

艾思飞, 王非森, 汪倩, 程银芬, 文婷, 陈辉*

西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 钛合金在高温环境中表面会发生严重氧化, 影响后续的加工与使用, 采用激光清洗技术去除氧化层, 通过高速摄像设备分析氧化层的去除机理, 研究激光清洗、机械打磨以及酸洗工艺对试样表面宏观形貌、微观形貌、化学成分、平整性以及显微硬度的影响。结果表明, 氧化层的激光去除机理以烧蚀作用为主, 通过选择合适的工艺参数清洗后, 试样表面氧化物基本除尽, 呈现出银白色金属光泽, 相比于原始试样, 激光清洗试样表面的氧含量大幅降低, 平整性优于机械打磨试样与酸洗试样。此外, 受到激光清洗过程中热作用的影响, 激光清洗试样表面的显微硬度要显著高于机械打磨试样与酸洗试样。

关键词 激光光学; 激光清洗; 钛合金; 高温氧化; 清洗机理; 清洗方法对比

中图分类号 TG146.2+3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114012

Laser Cleaning Mechanism and Process of High-Temperature-Oxidized Titanium Alloy

Ai Sifei, Wang Feisen, Wang Qian, Cheng Yinfen, Wen Ting, Chen Hui*

Institute of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract The surface oxidation of titanium alloy will occur severely in a high-temperature environment, affecting subsequent processing and use. Laser cleaning technology was used to remove this oxide layer. A high-speed camera was used to analyze the removal mechanism of the oxide layer. The influences of laser cleaning, abrading, and pickling processes on the macroscopic morphology, microscopic morphology, chemical composition, flatness, and microhardness of the sample surface were studied. The results show that the mechanism of laser removal of the oxide layer was mainly performed through ablation. The oxides on the surface of the samples were removed after cleaning them with appropriate laser parameters, resulting in a silver-white metallic luster. The oxygen content of the samples was significantly lower than that of the original samples, and the surface smoothness was superior to that of the pickling and abrading samples. In addition, due to the thermal effect of the laser cleaning process, the microhardness of the laser cleaning sample surface was significantly higher than that of the abrading and pickling samples.

Key words laser optics; laser cleaning; titanium alloy; high-temperature oxidation; cleaning mechanism; comparison of cleaning methods

OCIS codes 140.3390; 140.3380; 140.6810

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1303720201)、2020年度四川省重大科技专项(2020ZDZX0002)、四川省科技计划项目(2020JDRC0047, 2019JDRC0130)

通信作者: *xnprt@swjtu.edu.cn

1 引言

钛合金在形成航空零部件或结构件的过程中需要经过一系列的热加工处理,由于钛合金活性高,其在高温环境中很容易和氧元素结合,形成一层较厚的氧化皮^[1-2],这层氧化皮会严重影响钛合金的后续加工和使用,必须将其清理干净。钛合金表面氧化层的传统清洗方法是机械打磨或酸洗,机械打磨易损伤金属基体,且劳动强度大,清洗质量难以把控^[3];酸洗污染环境,对人体有害,且化学反应不可控,容易导致钛合金表面发生氢脆腐蚀^[4]。相比于传统清洗方法,激光清洗方法具有智能可控、自动高效、绿色环保等优点^[5],已广泛应用于激光除锈^[6-7]、激光除漆^[8-10]、焊前激光清洗^[11]与文物保护^[12]等。

关于钛合金的激光清洗研究大多数针对其表面生成的自然氧化膜。朱洪浩等^[13]采用准连续激光器清洗 TA15 钛合金表面的自然氧化膜,发现激光清洗后试样表面平整性较好,且表面成分由清洗前的 TiO₂ 转变为清洗后的 Ti,但存在少量的 Ti=O 键。陈俊宏等^[14]研究了砂纸打磨、酸洗、激光清洗这 3 种清洗方式对钛合金表面粗糙度的影响,发现在合适的参数下激光清洗对钛合金表面粗糙度的影响较小,而酸洗工艺的影响很大。Marimuthu 等^[15]利用准分子激光器清洗钛合金表面的自然氧化膜,通过有限元模拟和试验分析,发现氧化层的去除机理主要是汽化烧蚀机制。Kumar 等^[16]采用光纤激光器对 Ti3Al2.5V 钛合金管材接口进行焊前清洗,发现经激光清洗后的钛合金管材焊缝成形好,无孔洞,焊接质量明显提高;他们还激光作用过程中钛合金表面的温度变化情况进行了理论计算,在激光作用下钛合金表面温度最高可达

3748 K,使氧化膜发生汽化,将其去除^[17]。

钛合金自然氧化膜的厚度一般只有几纳米到几十纳米^[18],在低能量密度下通过单次清洗即可去除,而钛合金表面在高温环境中生成的氧化皮厚度通常为微米量级且分布不均匀,在单次清洗下难以将其完全剥离,需要进行多次清洗。此外,考虑到提高清洗效率与防止基体受损等,每次清洗采用的工艺参数也可能不同,因此钛合金高温氧化皮的激光清洗工艺较为复杂。本文将针对钛合金表面高温氧化层开展激光清洗研究,通过观察激光与氧化层的交互作用现象分析激光去除机理,对比不同清洗方法(激光清洗、机械打磨、酸洗)对试样宏观形貌、微观形貌、化学成分、平整性以及显微硬度的影响,旨在推动激光清洗技术在航空工业领域中的应用。

2 试验材料、设备及方法

如图 1 所示,试验材料为某研究所提供的 TC4 钛合金高温氧化工件,TC4 钛合金化学成分如表 1 所示。在高温冲压成型过程中 TC4 钛合金表面形成了一层黑色的高温氧化层,使用线切割机从工件上取下尺寸为 10 mm×10 mm×8 mm 的小块试样进行试验。



图 1 TC4 钛合金高温氧化工件

Fig. 1 TC4 titanium alloy workpiece after high temperature oxidation

表 1 TC4 化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4

Element	Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
Mass fraction / %	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	5.5-6.8	3.5-4.5	Bal.

试验所用的激光器为 IPG 公司生产的型号为 YLPP-1-150V-30 的光纤激光器,其输出波长为 1064 nm,最大脉冲频率为 1000 kHz,最大单脉冲能量为 1 mJ,脉冲宽度有四档可调,分别为 150 ps、1 ns、2 ns 以及 5 ns。

考虑到氧化层较厚且分布不均匀,在单次清洗试验中发现试样中存在较多的残留氧化物,因此采

用多次清洗工艺对氧化层进行去除,所选用的激光清洗参数组合 A1 与 A2 如表 2 所示,采用氩气对试样进行保护,防止其发生二次氧化。为了了解激光清洗技术是否能代替传统清洗方法,将利用 A1、A2 参数清洗后的试样与机械打磨和酸洗后的试样进行对比。其中,机械打磨试样是由砂纸打磨至 2000 目以去除氧化层,酸洗试样是将试样浸泡在配置好

的硝酸与氢氟酸混合溶液中(HF、HNO₃、H₂O的体积比为1:9:90),并通过超声振动辅助清洗,酸洗时长为1 h。

采用型号为Photron FASTCAM SA4的高速摄像设备对激光清洗过程中的物理化学现象进行拍摄,以分析氧化层的激光去除机理;采用型号为Hitachi SU8010的场发射扫描电子显微镜搭配能谱仪对试样的微观形貌进行观察并对其化学成分进

行测试,再利用型号为LY-WN-YH500的超景深显微镜对不同清洗方法处理后的试样进行三维形貌拍摄并测量试样表面的轮廓变化,最后利用型号为DHV-1000ZTEST型的显微维氏硬度计在试样表面8 mm×8 mm的区域内进行硬度测试,每间隔1 mm测试一次,共测量81个点的硬度值,施加载荷大小设为4.95 N,保荷时间设为15 s,并将测得的数据导入Origin软件中绘制成硬度云图。

表2 激光清洗参数组合

Table 2 Laser cleaning parameter combination

Serial No.	Pulse frequency /kHz	Pulse width /ns	Scanning speed /($m \cdot s^{-1}$)	Energy density /($J \cdot cm^{-2}$)
A1	600	5	3	2.04
	1000	0.15	6	1.53
A2	600	5	4	2.55
	1000	0.15	6	1.53

3 试验结果与分析

3.1 高温氧化层分析

TC4钛合金表面的氧化层形貌如图2所示。可以看到,试样表面的氧化层存在许多裂缝,结构较

为疏松,这是因为氧化层在高温环境中受到外载作用开裂。对氧化层进行EDS面扫描,氧元素的分布形貌与扫描区域形貌相近,在大块的氧化皮上出现氧元素的富集,而钛元素在扫描区域中的分布较为均匀。

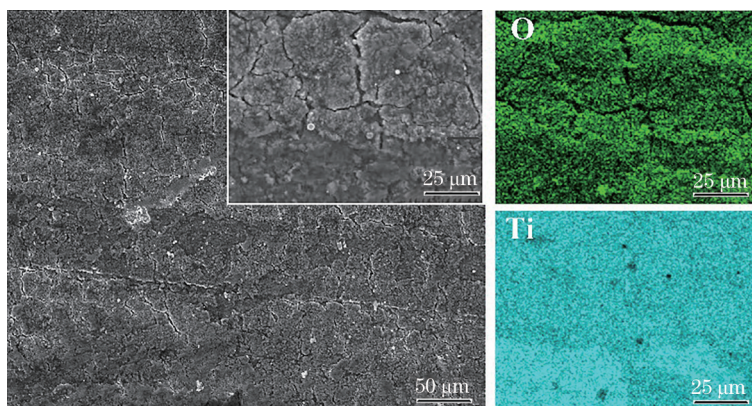


图2 TC4钛合金表面氧化层微观形貌与元素分布

Fig. 2 Micromorphologies of oxide layer on the surface of TC4 titanium alloy

从图3所示的能谱可以看到,氧化层的元素主要以钛、氧、碳为主,碳元素含量较高,这说明氧化

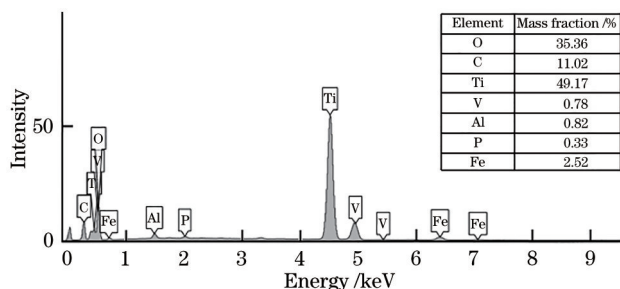


图3 TC4钛合金表面氧化层EDS能谱图

Fig. 3 EDS spectrum of surface oxide layer of TC4 titanium alloy

层表面除了氧化物外,还存在一些油污或积碳,且还可以检测到微量的铁元素,这可能是因为工件在热成型过程中吸收了夹具中铁元素。在氧化层中氧元素的质量分数为35.36%,钛元素的质量分数为49.17%。通过XRD测试发现氧化层主要由大量的TiO₂与少量的Ti组成(图4)。

3.2 氧化去除机理分析

利用高速摄像设备对激光清洗过程中的物理化学现象进行拍摄,分析氧化层的激光去除机理。图5展示了高速摄像设备记录的熔池运动情况。可以看到,在高速摄像下氧化层呈银白色,且在氧化层上可

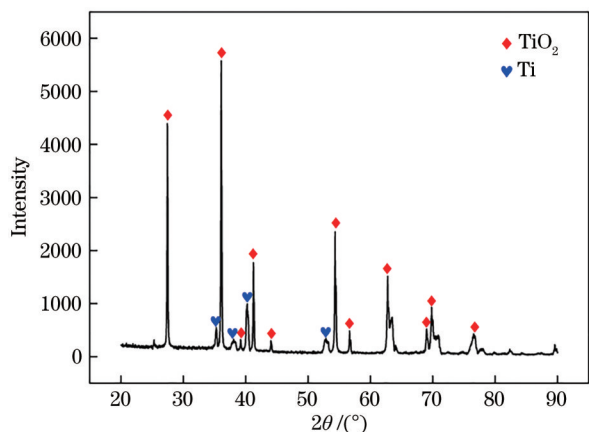


图4 TC4钛合金表面氧化层XRD分析

Fig. 4 XRD analysis of surface oxide layer on TC4 titanium alloy

以看到较亮的粉末飞溅沉积。在激光作用下氧化物发生熔化,形成高亮度的熔池,熔池尺寸约1.1 mm,由多个光斑(光斑尺寸为50 μm)聚集而成,在熔池上方隐约可见氧化物烧蚀产生的火焰焰羽。在扫描振镜作用下熔池与火焰焰羽一同向右运动,且由于运动速度极快,在宏观上形成了肉眼可见的线状光斑。当高速摄像时间 t 为442.222 ms时,熔池中有熔融飞溅物产生,在高能量激光的作用下氧化层温度迅速升高,超过氧化物的熔点和沸点,导致氧化物发生熔化、汽化,形成熔体和气体,气态氧化物会产生反冲压力冲击熔池,从而导致氧化物熔体向外飞溅。当高速摄像时间为442.500 ms时,熔融氧化物已脱离熔池,最终于443.056 ms时沉积在材料表面。

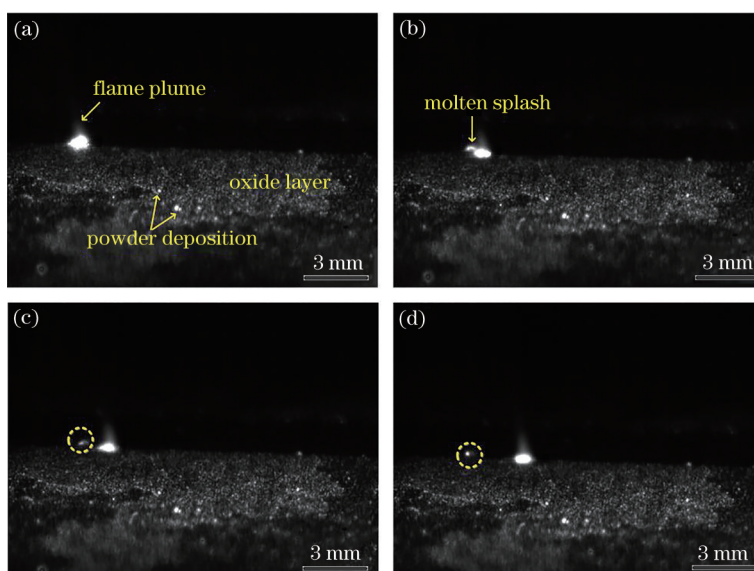


图5 高速摄像设备记录的熔池运动与熔融飞溅。(a) $t=441.944$ ms; (b) $t=442.222$ ms; (c) $t=442.500$ ms; (d) $t=443.056$ ms

Fig. 5 Molten pool movement and molten splash recorded in the high speed camera equipment. (a) $t=441.944$ ms; (b) $t=442.222$ ms; (c) $t=442.500$ ms; (d) $t=443.056$ ms

如图6所示,对比265.833 ms与1356.667 ms的高速摄像图片可以发现,当 $t=265.833$ ms时

图6(a)虚线框内存在银白色的氧化层,随着熔池运动,TC4表面的氧化物逐渐被烧蚀去除,清洗区域

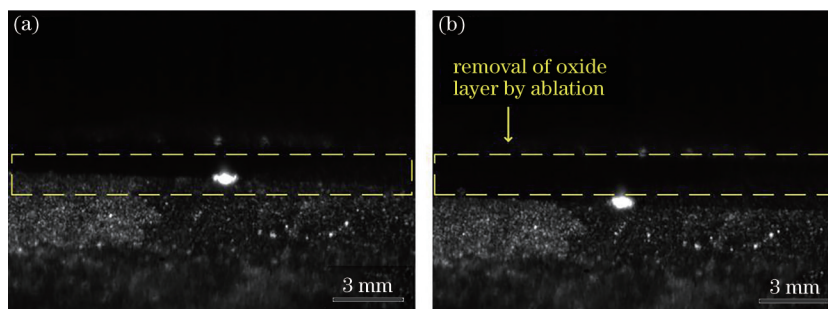


图6 高速摄像设备记录的氧化层去除。(a) $t=265.833$ ms; (b) $t=1356.667$ ms

Fig. 6 Removal of oxide layer recorded in the high speed camera equipment. (a) $t=265.833$ ms; (b) $t=1356.667$ ms

不断扩大,在 $t=1356.667$ ms 时可以看到熔池位置已发生改变,图 6(b)虚线框内的银白色氧化层完全消失,去除效果明显。

在高速摄像拍摄过程中未观察到大块氧化物破碎脱离的现象,但能观察到火焰焰羽产生、熔融飞溅与氧化层烧蚀去除等现象,这说明 TC4 表面高温氧化层的清洗机理以烧蚀作用为主,而非依靠热振动机制去除。

3.3 氧化层激光清洗工艺试验

经 A1 与 A2 参数激光清洗后试样 S1 和 S2 的宏观表面如图 7 所示。可以看到,在经过两次激光扫描后, S1、S2 试样表面的绝大多数氧化物都被烧蚀去除,两个试样的激光清洗区域都显露出银白色的金属基体,表面基本无氧化物残留,激光清洗区域与原始未清洗区域对比明显,清洗效果较好。

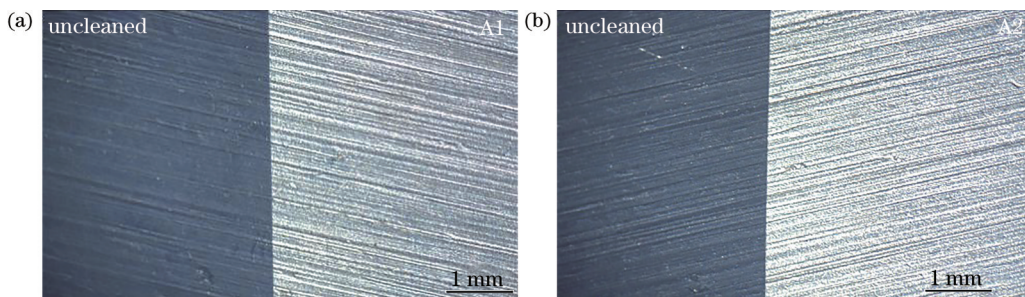


图 7 A1、A2 参数激光清洗后试样表面宏观形貌。(a) S1 试样; (b) S2 试样

Fig. 7 Macroscopic morphologies of the sample surface after laser cleaning with A1 and A2 parameters. (a) S1 sample; (b) S2 sample

图 8 所示为 S1 试样分界区微观形貌与 EDS 线扫描曲线。可以看到,未清洗区域的颜色较暗,存在许多颗粒状和块状的氧化物,且出现多条由氧化层开裂形成的间隙,在清洗区域与未清洗区域之间存在一个过渡区域,过渡区域中存在大量凹凸不平的熔融氧化物,过渡区域的产生是因为在边缘区域激光热积累效应不强,温度不高,导致边缘区域的部分氧化物只发生了熔化而未发生汽

化。沿着图 8 所示的箭头方向进行 EDS 线扫描,从成分变化曲线可以看到,在未清洗区域氧元素含量相对较高、钛元素含量相对较低,且成分曲线波动起伏较大,这是由氧化物分布不均匀、形状不规则造成的。从未清洗区域向清洗区域扫描,氧元素的含量逐渐降低,钛元素的含量逐渐升高,激光去除效果明显。图 9 所示为 S2 试样分界区微观形貌与 EDS 线扫描曲线,与 S1 试样表面褶皱的熔

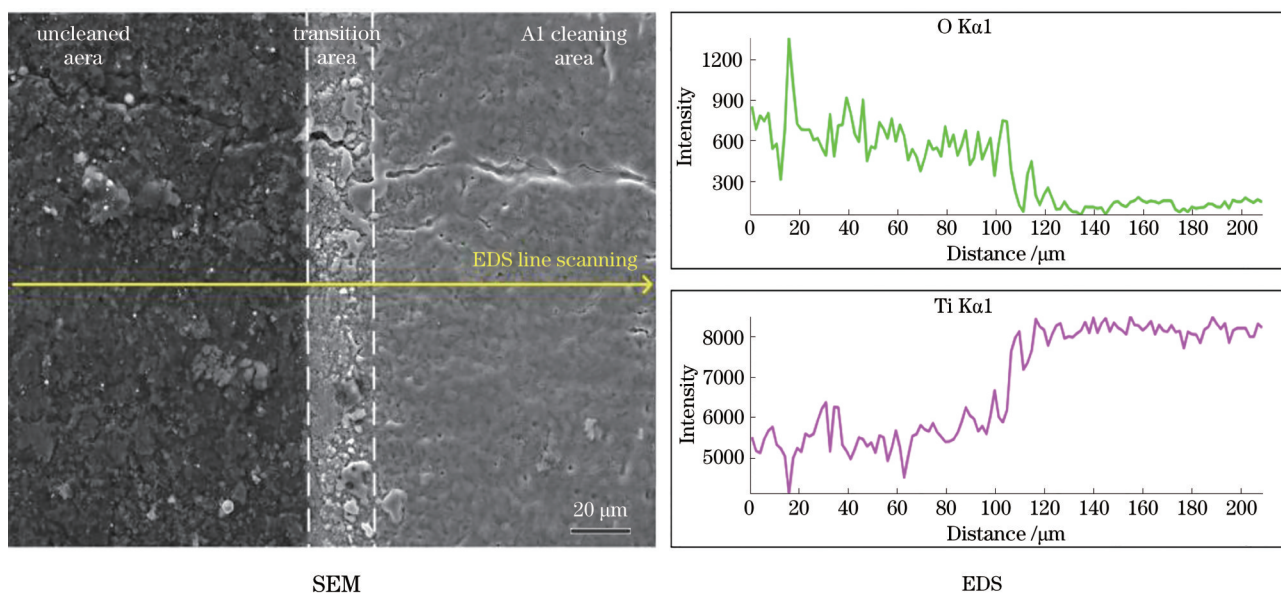


图 8 S1 试样分界区微观形貌与 EDS 线扫描曲线

Fig. 8 Boundary microstructure and EDS line scanning curves of S1 sample

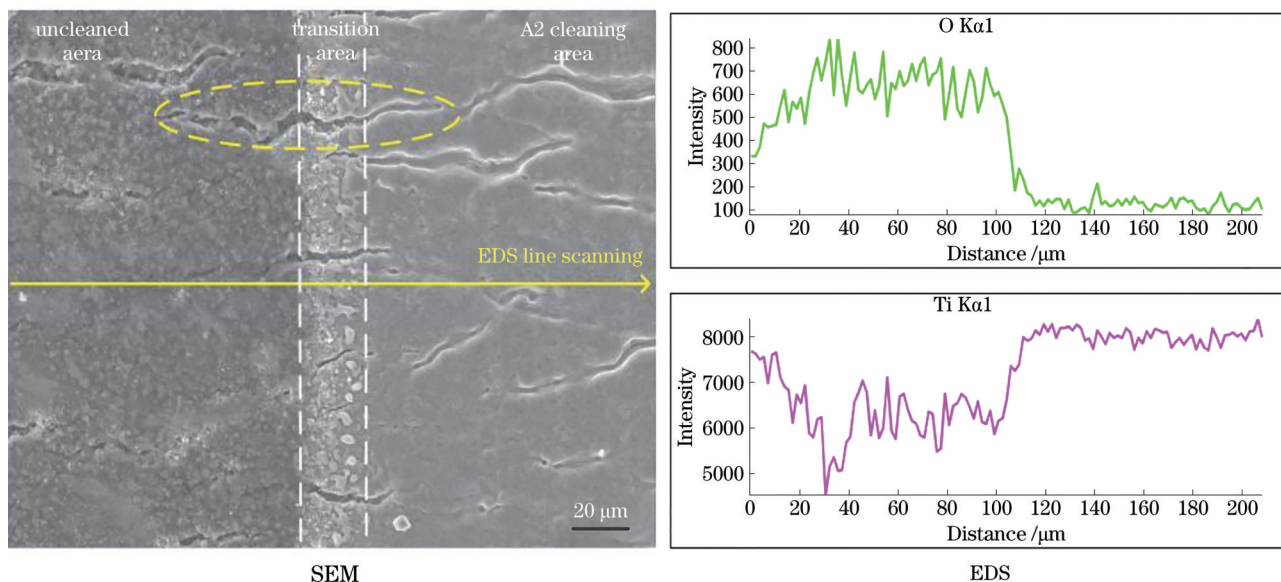


图 9 S2 试样分界区微观形貌与 EDS 线扫描曲线
 Fig. 9 Boundary microstructure and EDS line scanning curves of S2 sample

化形貌相比, S2 试样的表面较为平坦, 熔化程度明显轻于 S1 试样。在 S2 试样上, 虚线圈内有一条横跨未清洗区域、过渡区域、激光清洗区域的长条裂隙, 证明了裂隙的产生并非激光作用的结果, 而是氧化层原有的。从成分曲线可以看到, S2 试样表面氧、钛元素的含量同样发生了明显的升降变化。

3.4 不同清洗方法对比

经机械打磨和酸洗后试样的宏观形貌如图 10 所示。经机械打磨和酸洗后试样表面的黑色氧化层已被完全去除, 试样呈现出银白色的表面, 去除效果较好, 但机械打磨试样表面显现出条状的磨损划痕, 而酸洗试样表面显现出凹凸不平的腐蚀形貌, 在两种清洗方法下试样都受到较大的损伤。

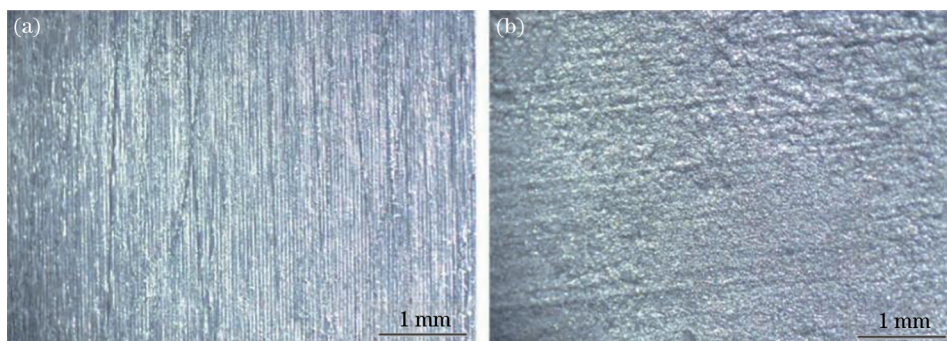


图 10 传统清洗方法处理后试样表面宏观形貌。(a)机械打磨试样;(b)酸洗试样
 Fig. 10 Macromorphologies of samples treated by traditional cleaning methods.
 (a) Abrading sample; (b) pickling sample

从图 11 所示的微观形貌中可以看到: 经机械打磨的试样表面较为平整, 无颗粒状或块状氧化物残留, 但可以观察到密集的条状划痕形貌; 而经酸洗的试样表面同样已无氧化物残留, 但出现了大量的腐蚀坑, 试样表面凹凸不平, 平整性较差。

对比不同方法处理后试样表面的氧含量, 结果如图 12 所示。机械打磨后试样表面氧的质量分数降至 4.5%, 而酸洗后试样表面氧的质量分数降至

4.96%, 与原始的未清洗试样相比, 氧的质量分数大幅降低, 对氧化层的去除较为彻底。激光清洗后, S1、S2 试样表面残留氧的质量分数分别为 8.27% 与 7.93%, 高于机械打磨试样与酸洗试样中氧的质量分数, 这可能是由以下两点造成的: 1) 在高速摄像中可以观察到氧化物熔融飞溅现象, 且熔融物重新沉积在材料表面, 这可能造成刚清洗洁净的材料表面发生二次污染; 2) 并非所有的氧化物都被汽化去除,

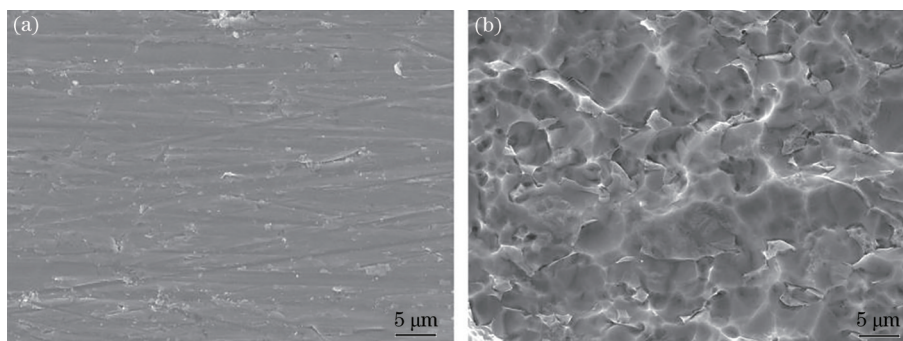


图 11 传统清洗方法处理后试样表面微观形貌。(a)机械打磨试样;(b)酸洗试样

Fig. 11 Micromorphologies of samples treated by traditional cleaning methods. (a) Abrading sample; (b) pickling sample

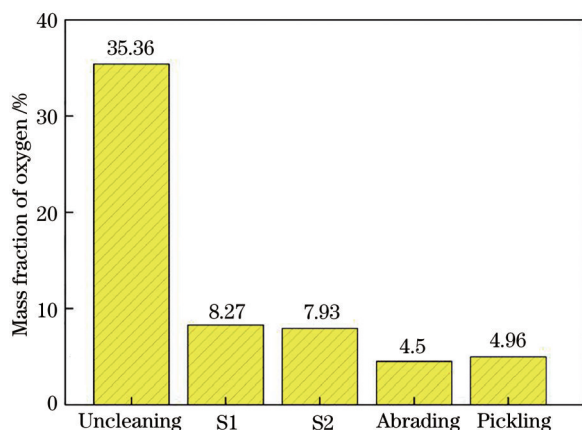


图 12 不同方法处理后试样表面氧的质量分数对比

Fig. 12 Comparison of surface oxygen mass fraction of samples treated by different methods

有可能存在熔融的氧化物未完全发生汽化,少量氧化物熔体与熔化的基体结合,导致氧含量上升。

图 13 展示了不同方法清洗后试样的三维形貌,图 14 展示了试样截取面处的轮廓变化。从图 13 可以看到, S1 试样表面出现了褶皱的熔融形貌, S2 试样同样发生熔化,但熔化程度要轻于 S1 试样。从图 14 可以看到,由于 S1 试样表面熔化较为严重,其截取面处凹凸起伏明显,粗糙度较大,而 S2 试样表面只发生微熔,截取面处凹凸起伏不大,相比于 S1 试样更均匀平整。经机械打磨后试样的三维形貌如图 13(c) 所示,试样表面出现条状的磨损划痕,但未出现明显的凹凸形貌,试样左侧较低,右侧较高,表面粗糙度较小,其平整性次于 S2 试样,优于 S1 试样。从图 13(d) 可以看到,酸洗试样表面出现了凹凸不平的腐蚀形貌,其截取面处凹凸起伏程度非常大,试样的平整性很差。在 4 种试样中, S2 试样表面平整性最好,其次是机械打磨试样与 S1 试样,而酸洗试样表面平整性最差。

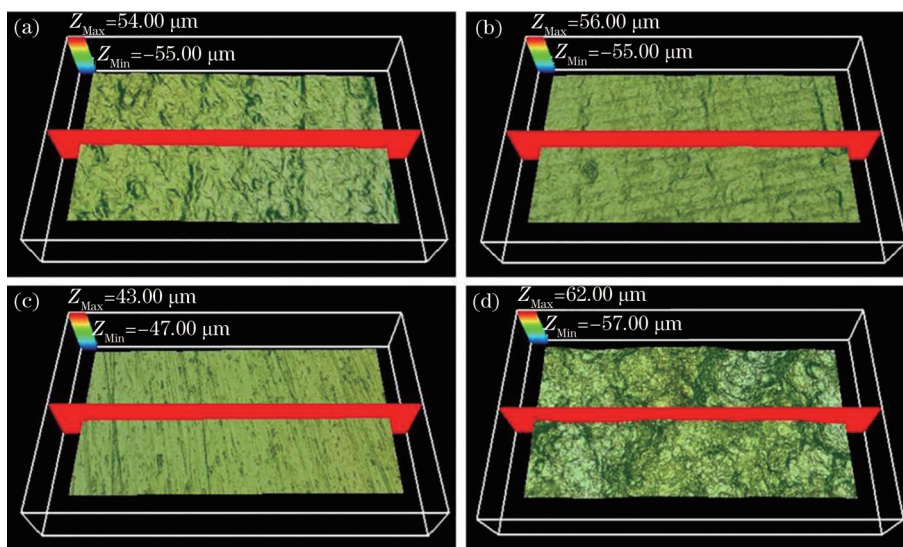


图 13 试样表面三维形貌。(a) S1 试样;(b) S2 试样;(c)机械打磨试样;(d)酸洗试样

Fig. 13 Three-dimensional surface morphologies of samples. (a) S1 sample; (b) S2 sample; (c) abrading sample; (d) pickling sample

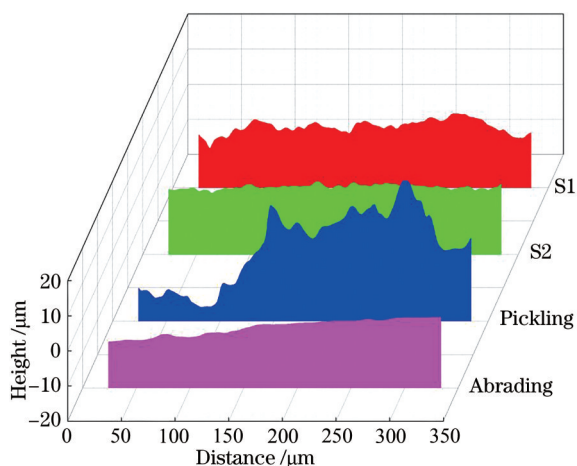


图 14 不同方法清洗后试样截面轮廓变化
Fig. 14 Profile changes of sample intercepted surface after cleaning by different methods

3.5 显微硬度测试

图 15 为利用不同清洗方法处理后试样表面的硬度云图。图 15(a)、(b)分别为经 A1、A2 参数激光清洗后试样的硬度云图,可以看到,S1 试样的硬度云图由橙色、黄色、绿色的区域混合构成,橙色区域

硬度值相对较高,绿色区域硬度值相对较低,其表面硬度的最大值为 524 HV,最小值为 431 HV,不同区域之间硬度值相差较大,其整体硬度平均值达到 477 HV。相比于 S1 试样,S2 试样表面橙色的高硬度区域减少,以硬度较低绿色区域为主,其硬度分布均匀性优于 S1 试样,整体硬度平均值为 430 HV。图 15(c)、(d)为机械打磨试样和化学酸洗试样的硬度云图:机械打磨试样的硬度平均值为 330 HV,远低于激光清洗试样,且试样表面不同区域之间硬度值差距不大,硬度分布更为均匀;而化学酸洗试样的平均硬度值为 366 HV,低于激光清洗试样,但略高于机械打磨试样,这可能是由化学酸洗试样表面凹凸不平的腐蚀形貌造成。在激光辐照下,试样表面经历了极快速的升温与降温过程,相当于对试样进行了表面淬火^[18],材料表面在热作用下发生熔化-固化,形成高硬度的重熔层,因此激光清洗试样表面的整体硬度值要高于非热作用的机械打磨试样与酸洗试样。此外,比较 S1、S2 试样的 SEM 图像发现,S1 试样的熔化程度要高于 S2 试样,导致 S1 试样的平均硬度值大于 S2 试样。

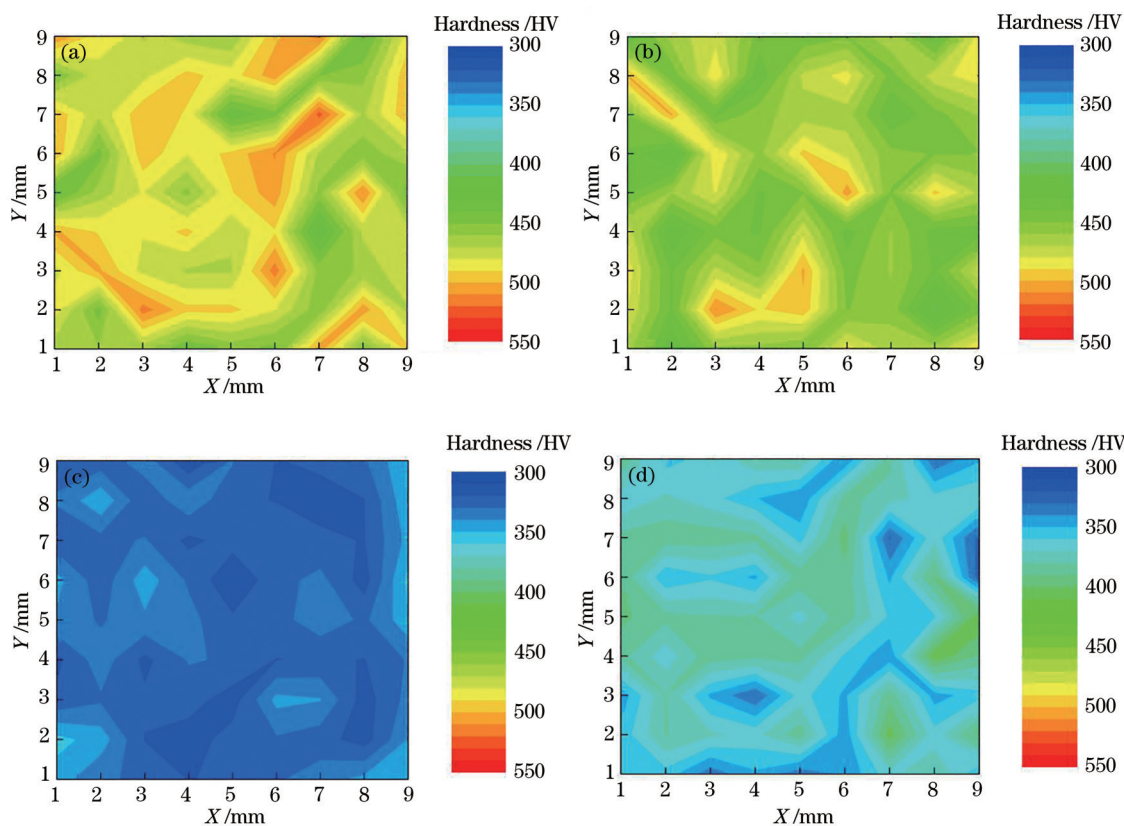


图 15 不同方法清洗后试样表面的硬度分布云图。(a) S1 试样;(b) S2 试样;(c)机械打磨试样;(d)酸洗试样
Fig. 15 Hardness distribution cloud diagrams of sample surface after cleaning by different methods. (a) S1 sample; (b) S2 sample (c) abrading sample; (d) pickling sample

通过对激光清洗试样、机械打磨试样与酸洗试样的对比分析可以发现,3种方法都可以有效地去除钛合金表面的氧化层,还原出银白色的金属表面,机械打磨试样和酸洗试样的残留氧含量低于激光清洗试样。此外,从平整性角度来看,利用A2参数激光清洗后的试样熔化损伤程度小,平整性优于机械打磨试样与酸洗试样,并且在激光的热作用下试样表面得到强化,显微硬度提高。考虑到机械打磨与酸洗的缺点,激光清洗在合适的参数下是能代替传统方法去除钛合金表面的高温氧化层。

4 结 论

以TC4钛合金在高温环境中生成的氧化层为研究对象,探究了氧化层的激光清洗机理,对利用不同方法清洗的试样进行对比评价,得出的主要结论如下。1)通过高速摄像设备观察到火焰焰羽、熔融飞溅与氧化层烧蚀去除等现象,TC4表面高温氧化层的清洗机理以烧蚀作用为主。2)经激光清洗、机械打磨、化学酸洗后试样表面的高温氧化物基本除尽,呈现出银白色的金属光泽,氧含量显著降低;但激光清洗试样表面出现熔化现象,机械打磨试样表面有划痕分布,酸洗试样表面出现凹凸不平的腐蚀形貌,3种清洗方法都对试样造成了一定损伤。3)通过选择合适的激光参数清洗后,激光清洗试样的表面平整性要优于机械打磨试样与酸洗试样,且激光清洗过程中的热作用使得激光清洗试样的显微硬度显著高于机械打磨试样与酸洗试样。此外,相比于原始试样,激光清洗试样表面氧含量大幅下降,但仍然高于利用传统清洗方法处理后的试样,如何进一步减少表面残留氧含量,减轻基体损伤,提高激光清洗效率和质量,还有待进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Wang S, Liao Z H, Liu Y H, et al. Different tribological behaviors of titanium alloys modified by thermal oxidation and spraying diamond like carbon [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 252: 64-73.
- [2] Biswas A, Majumdar J D. Surface characterization and mechanical property evaluation of thermally oxidized Ti-6Al-4V[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60 (6): 513-518.
- [3] Liu S. Study on mechanism and process of nanosecond pulse laser derusting[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- 刘帅. 纳秒脉冲激光除锈机理与工艺实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [4] Du J, Liu Q M, Wang F S, et al. Corrosion inhibiting behaviors and mechanism of Ti-6Al-4V in hydrofluoric-nitric pickling solutions[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(6): 1000-1005.
- 杜娟, 刘青茂, 王付胜, 等. Ti-6Al-4V钛合金在氢氟酸-硝酸体系下的缓蚀行为及机理[J]. *材料导报*, 2019, 33(6): 1000-1005.
- [5] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
- 雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030005.
- [6] Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1002010.
- 李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对Q345钢表面锈层清洗质量的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47 (10): 1002010.
- [7] Li H T, Zhou J Z, Sun Q, et al. Electrochemical corrosion properties of AH32 steel via laser cleaning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56 (21): 211403.
- 李华婷, 周建忠, 孙奇, 等. 基于激光清洗的AH32钢的电化学腐蚀性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 211403.
- [8] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on the paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (6): 0602121.
- 赵海朝, 乔玉林, 杜炯, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602121.
- [9] Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
- 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002.
- [10] Zhang Z Y, Wang Y B, Liang H, et al. Removal of low thermal conductivity paint with high repetition rate pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102009.
- 张志研, 王奕博, 梁浩, 等. 高重复频率脉冲激光去

- 除低热导率涂漆[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102009.
- [11] Tong Y Q, Zhang A, Huang J Y, et al. Distribution and influence of oxygen content of laser pretreated aluminum alloy surface before welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0202003.
佟艳群, 张昂, 黄建宇, 等. 焊前激光预处理的铝合金表面氧含量的分布及影响[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0202003.
- [12] Qi Y. Study of mechanisms of laser cleaning of sandstone surface contaminants in Yungang grottoes and its applications[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
齐扬. 云冈石窟砂岩文物表面污染物激光清除机理及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [13] Zhu H H, Xia D, Shi Z Z, et al. Effects of heat input technological parameters on laser cleaning of surface oxide layer of TA15[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 132-139.
朱洪浩, 夏丹, 史中正, 等. 热输入参量对激光清洗 TA15 表面氧化层的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 132-139.
- [14] Chen J H, Wen P, Chang B H, et al. Laser cleaning of titanium alloy and its effect on laser welding porosity[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(4): 379-383.
陈俊宏, 温鹏, 常保华, 等. 钛合金激光清洗及其对激光焊接气孔的影响[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4): 379-383.
- [15] Marimuthu S, Mhich A, Molchan I S, et al. Numerical simulation of excimer laser cleaning of film and particle contaminants[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(12): 1-12.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Jiang G Y, Lei P, Liu Y P, et al. Laser removal of coating on oil and gas pipelines: effects on microstructure and hardness of substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302009.
江国业, 雷璞, 刘宇平, 等. 油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302009.