

# 中国激光

## 脉冲激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面氧化层的影响

王蔚<sup>1</sup>, 沈杰<sup>1</sup>, 刘伟军<sup>1\*</sup>, 卞宏友<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 周瑜<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

<sup>2</sup> 沈阳帕卡灏精有限公司, 辽宁 沈阳 110042

**摘要** 采用脉冲激光清洗技术以不同的振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面的氧化层和油污进行去除, 分析了激光清洗后 TA15 钛合金的表面形貌以及清洗表面的成分变化和硬度变化。结果表明: 随着振镜扫描速度从  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增大到  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 清洗表面的钛元素含量呈现先增加再降低的趋势, 而氧元素含量则是先降低再升高; 当扫描速度为  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 清洗表面的钛元素含量达到最高值,  $w(\text{Ti})=79.47\%$ , 氧元素含量达到最低值,  $w(\text{O})=8.62\%$ ; 清洗表面的硬度随着扫描速度的减小而增大; 激光清洗去除 TA15 氧化层的机制主要为气化机制和相爆炸机制。

**关键词** 激光技术; 激光清洗; TA15 钛合金; 氧化层; 表面形貌; 表面成分; 维氏硬度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1802004

### 1 引言

TA15 钛合金是一种近  $\alpha$  型钛合金<sup>[1]</sup>, 具有重量较轻、耐蚀性好、高温强度较高、焊接性较好等优点, 已被广泛应用于航空航天领域<sup>[2-3]</sup>, 如, 经常被用于制造需要承受较高温度和复杂应力的飞机隔框、壁板、焊接承接框和发动机等零件<sup>[4-5]</sup>。但是, TA15 钛合金表面具有较高的吸氧性, 所以不只是在高温环境下工作的 TA15, 仅是暴露在大气环境中的 TA15 钛合金, 其表面也会形成一层氧化膜。在焊接时, 氧化层的存在不仅会导致焊缝强度和韧性变差<sup>[6]</sup>, 还会导致搭接部位的导电率下降。此外, 在 TA15 表面涂覆涂层时, 表面一致性差的氧化层会导致涂层与合金表面间的结合力降低<sup>[7]</sup>。

随着科学技术的进步, 激光清洗技术被逐步应用到工业领域中用于去除金属表面的漆层<sup>[8-9]</sup>、锈蚀层<sup>[10]</sup>和氧化膜<sup>[11]</sup>等, 而且该技术比较适用于清洗表面有亚微米级污染颗粒的工件。该技术通过激光照射工件表面, 使表面氧化膜或其他污染物吸收激

光能量后气化, 或在激光照射的瞬间受热膨胀, 克服与基体之间的吸附力而从工件表面脱离, 达到清洗的目的<sup>[12]</sup>。与传统的物理清洗<sup>[13]</sup>和化学清洗<sup>[14-15]</sup>方式相比, 激光清洗具有加工精度高、适用性广、工序简单和清洁环保等优点<sup>[16]</sup>。

Alshaer 等<sup>[17]</sup> 使用调 Q-Nd: YAG 激光器去除了铝合金表面的氧化膜, 并发现该方法有利于减少焊缝中的气孔。Wang 等<sup>[18]</sup> 使用纳秒脉冲 Nd: YAG 激光器对铝合金表面进行焊前清洗, 结果发现激光清洗后, 激光辐照区的材料发生了熔化和凝固, 氧含量明显下降, 原始氧化层被清除。陈俊宏等<sup>[19]</sup> 使用 IPG 光纤激光器对 Ti6Al4V 钛合金进行焊前清洗后发现, 激光线能量的变化会对氧化层的清洗效果产生影响。Wang 等<sup>[20]</sup> 使用脉冲光纤激光器去除了 Ti6Al4V 钛合金表面的污染物和氧化层, 并发现激光能量密度会影响清洗效果, 而且当能量密度接近基体表面烧蚀阈值时, 清洗效果最明显。朱洪浩等<sup>[21]</sup> 使用准连续激光器对 TA15 钛合金表面进行了清洗, 结果发现, 激光功率、离焦量和清洗速度

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802038)

通信作者: \*wjliu@sut.edu.cn

均会对表面氧化层的去除效果和清洗表面的粗糙度产生影响。

目前,利用脉冲式光纤激光器清洗 TA15 钛合金表面氧化层的研究较少,而且脉冲式光纤激光器作为一种新型的激光器相比其他激光器有着光电转化效率高、光束质量好和可靠性高等优点<sup>[22]</sup>。因此,本文采用 200 W IPG 脉冲光纤激光器对 TA15 表面的氧化层和油污进行激光清洗,研究了激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面微观形貌、元素含量、成分及硬度的影响。

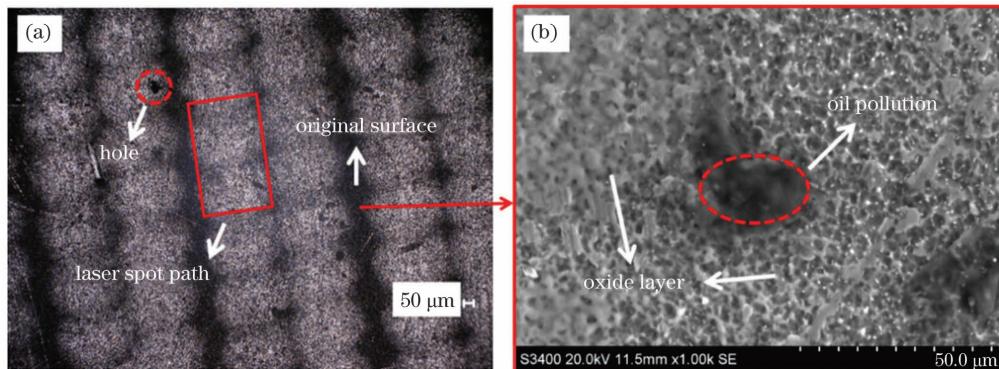


图 1 激光清洗前后 TA15 钛合金的表面形貌。(a) 清洗表面形貌和原始表面形貌;(b) 原始表面的电镜图

Fig. 1 Surface morphologies of TA15 titanium alloy before and after laser cleaning. (a) Cleaned surface morphology and original surface morphology; (b) SEM image of original surface

激光清洗系统以及激光清洗原理如图 2 所示。具体清洗操作步骤如下:1)将准备好的试样放置在 Y 轴移动平台上,通过控制移动平台使试样位于激光头的下方;2)打开激光清洗设备,将清洗参数设置为实验设计的参数;3)通过振镜的高速振荡来实现光斑在清洗表面沿 X 轴方向高速移动,从而在试样表面形成一条线状光斑,并通过 Y 轴移动平台实现试样在清洗方向的移动,通过振镜和移动平台的配合实现对 TA15 表面的清洗;4)清洗完成后,再次移动 Y 轴移动平台,取出试样,然后关闭激光器和主机电源。

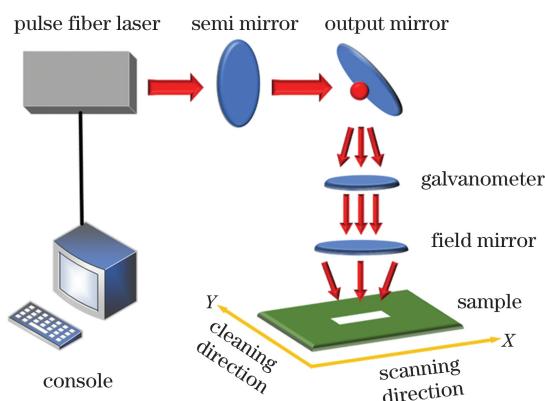


图 2 激光清洗原理

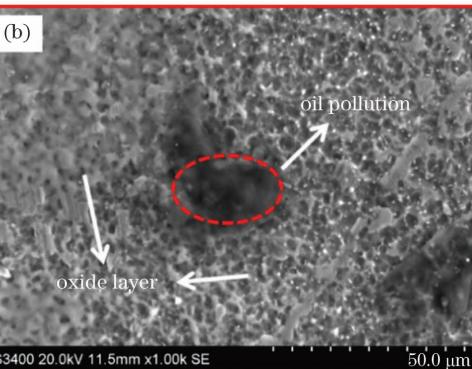
Fig. 2 Laser cleaning schematic

貌、元素含量、成分及硬度的影响。

## 2 实验材料和方法

### 2.1 实验设备及材料

以厚度为 2 mm 的 TA15 钛合金板材为实验材料进行激光清洗实验。该板材试样表面存在着在自然放置状态下形成的一层多孔松散的氧化层以及生产过程中留下的油污,其表面形貌以及激光清洗后的表面形貌如图 1 所示。



### 2.2 实验步骤

振镜光斑搭接率  $\lambda$  的计算公式为

$$\lambda = \left(1 - \frac{V}{f \cdot D}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $V$  为振镜扫描速度( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $f$  为重复频率(Hz); $D$  为激光光斑直径(mm)。由(1)式可知,在激光清洗中,当重复频率  $f$  和激光光斑直径  $D$  不变时,振镜扫描速度  $V$  这个因素的变化会直接影响振镜光斑搭接率  $\lambda$ ,从而影响工件表面的清洗效果<sup>[23]</sup>。故,设计单因素实验来研究分析这一因素(振镜扫描速度)对 TA15 表面油污和氧化层清洗效果的影响。

激光清洗实验所用工艺参数为:功率 200 W,重复频率 20 kHz,脉宽 60 ns,单脉冲能量 10 mJ,扫描速度 7000~10000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验中所使用的振镜扫描速度具体如表 1 所示,激光光斑扫描路径如图 3 所示。

### 2.3 表面分析和硬度测试

使用 VHX-5000 型超景深三维显微镜观察激光清洗 TA15 钛合金的表面形貌;利用 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)观察激光清洗 TA15 钛合金表面的微观形貌,并利用扫描电镜附带的能量谱分析仪(EDS)研究不同扫描速度下清洗的 TA15 钛合金表面元素含量的变化;采用 Aeris 台式 X 射线衍射

表1 激光清洗工艺参数

Table 1 Laser cleaning process parameters

Number	Laser power $P / \text{W}$	Scanning speed $V / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Spot diameter $D / \text{mm}$	Overlap ratio $\lambda / \%$
1	200	7000	1.2	70.8
2	200	8000	1.2	66.7
3	200	9000	1.2	62.5
4	200	10000	1.2	58.3

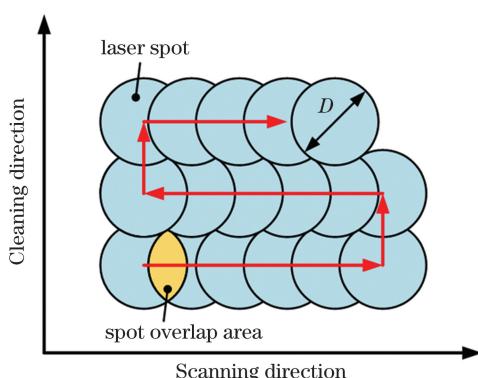
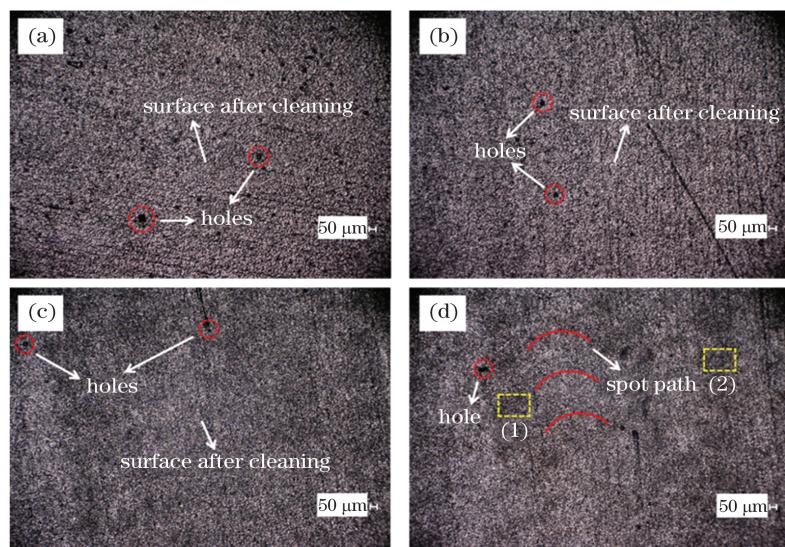


图3 激光光斑扫描路径

Fig. 3 Scanning path of laser spot

图4 激光清洗TA15钛合金的表面形貌。(a)  $V=7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $V=8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $V=9000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $V=10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Fig. 4 Surface morphologies of TA15 after laser cleaning. (a)  $V=7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $V=8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $V=9000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $V=10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 

### 3.2 表面微观形貌分析

TA15钛合金在不同激光工艺参数下清洗后的微观形貌如图5所示。对比图1(b)可以看到,在7000,8000,9000,10000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 扫描速度下清洗的TA15钛合金表面与原始表面相比发生了明显变化;同时从图5(b)中可以看到一些剥落的氧化层碎渣,这也证明了激光清洗TA15钛合金表面氧化层

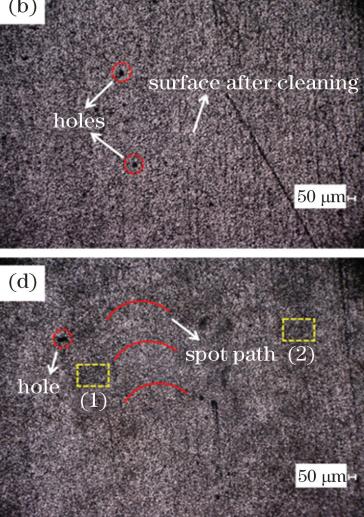
仪(XRD)对不同扫描速度下清洗的TA15钛合金表面进行物相分析;使用小负荷维氏硬度计在加载载荷为49 N、保荷时间为10 s的条件下,分别测量激光清洗前后试样的硬度,每个试样取三个不同的点进行硬度测试,并将它们的平均值作为最终的硬度值。

## 3 结果与分析

### 3.1 扫描速度对清洗效果的影响

图4(a)~(d)分别是用7000~10000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的振镜扫描速度清洗后的TA15钛合金的表面形貌。对比图1(a)中黑色的原始表面可以看到,激光清洗后,清洗表面整体变亮,且出现了孔洞。这说明钛合金试样表面的污染物和氧化层被大量清除。当扫描速度为10000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,清洗表面上可以看到激光光斑的扫描路径,且清洗表面上的黑白颜色分布不均匀,存在黑白色差,如图4(d)所示。从图4(d)中的区域(1)、(2)可以发现,由于振镜扫描速度过快,该区域表面呈现出与原始表面较为接近的暗黑色。这表明,在该扫描速度下部分油污和氧化层未被清洗掉。

Fig. 5 Surface morphologies of TA15 after laser cleaning.



的可行性。

从图5(a)~(d)中可以看出,在激光清洗过程中,当其他激光工艺参数保持不变时,不同的扫描速度对TA15钛合金表面氧化层的去除效果不同,但表面上大面积的油污可以被基本去除。图5(a)、(b)显示,采用7000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和8000  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 扫描速度清洗后,TA15钛合金表面相比其他较大扫描

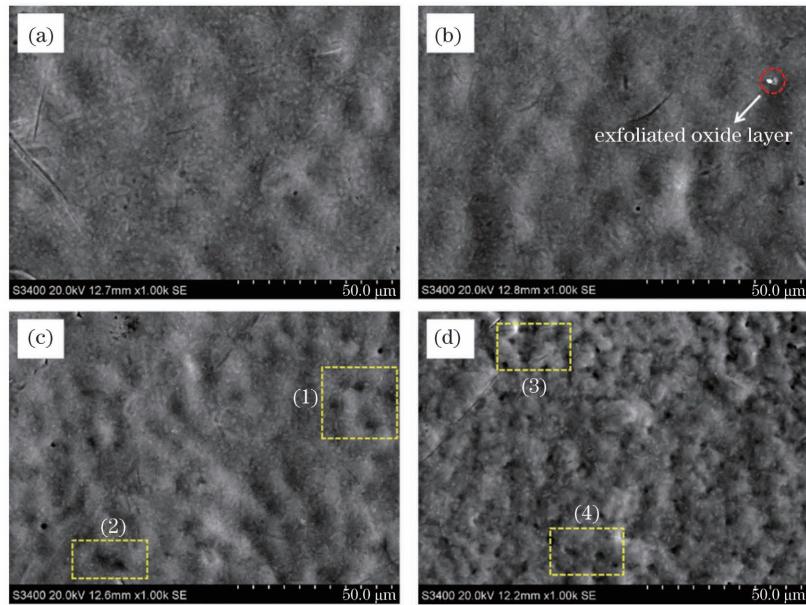


图 5 激光清洗 TA15 钛合金表面的 SEM 形貌。(a) $V=7000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b) $V=8000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c) $V=9000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d) $V=10000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 5 SEM morphologies of TA15 surface after laser cleaning. (a)  $V=7000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $V=8000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $V=9000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $V=10000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

速度下清洗的表面更加平滑。图 5(c)是采用 $9000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度清洗后的 TA15 钛合金的表面形貌,从其中的区域(1)、(2)可以看到,随着扫描速度增大,振镜光斑搭接率减小,部分清洗区域吸收的激光能量不足以去除氧化层,从而使得被清洗表面开始变得不平滑。图 5(d)是采用 $10000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度清洗后的 TA15 钛合金的表面形貌,同样,从其中的清洗区域(3)、(4)可以看到,由于扫描速度过大,振镜光斑搭接率较小,清洗后的表面比 $9000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度下清洗后的表面更加凹凸不平。这表明,振镜扫描速度过快会导致清洗表面上残留一些氧化物。

综上可以得出,当其他激光工艺参数不变时,随着扫描速度减小,振镜光斑搭接率增大,清洗表面单位面积内吸收的激光能量增多。当清洗区域吸收的激光能量达到激光清洗阈值后,TA15 钛合金表面

疏松多孔的氧化层可以基本被去除,所以使用较小振镜扫描速度清洗后的表面比使用较大扫描速度清洗后的表面更平滑,氧化层的去除效果也更明显。

由激光清洗原理可知<sup>[24]</sup>,在激光的辐照下,清洗表面吸收激光能量产生局部热效应,使得表面上的氧化层和油污发生迁移。当清洗表面的温度达到油污的燃点后,大量的油污便会气化或燃烧,从而被去除。结合图 5(b)中所示的剥落的氧化层碎片可知在激光清洗氧化层过程中发生了相爆炸,而且相爆炸是由氧化层多孔结构中夹杂的空气和水分在激光辐照下发生受热爆炸引起的。相爆炸导致大部分油污被气化去除,同时,一小部分油污会附着在氧化层爆炸后产生的氧化层碎渣上一起被去除。所以,依据本节的分析可知激光清洗过程主要基于气化机制和相爆炸机制去除 TA15 钛合金表面的氧化层和油污,去除原理如图 6 所示。

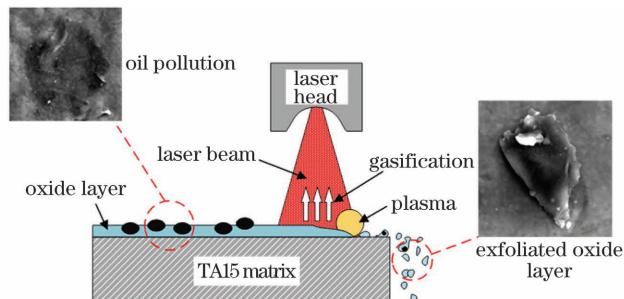


图 6 激光去除 TA15 钛合金表面氧化层和油污的原理图

Fig. 6 Schematic of laser removal of oxide layer and oil pollution on TA15 surface

### 3.3 表面成分分析

结合3.1节和3.2节的分析结果,利用EDS技术对扫描速度分别为7000, 8000, 9000, 10000 mm·s<sup>-1</sup>的清洗表面进行更深入的分析。

图7(a)、(b)分别是扫描速度为7000 mm·s<sup>-1</sup>和8000 mm·s<sup>-1</sup>时激光清洗TA15钛合金表面的EDS谱及EDS分析结果,可见,氧元素的质量分数分别为9.08%和8.62%,钛元素的质量分数分别为77.91%和79.47%。这说明,在7000 mm·s<sup>-1</sup>的扫

描速度下,清洗表面出现了热氧化现象。这是因为随着扫描速度的降低,光斑搭接率增大,激光光斑扫描区域的热累积效应随之增强,原始表面的氧化层被气化去除;同时,空气中的氧原子又与热累积区的基体材料结合形成新的氧化层,并附着在清洗表面,从而导致TA15钛合金基体裸露面积减小。图7(c)是扫描速度为9000 mm·s<sup>-1</sup>时激光清洗TA15钛合金表面的EDS谱及EDS分析结果,可见,氧元素的质量分数为8.67%,钛元素的质量分

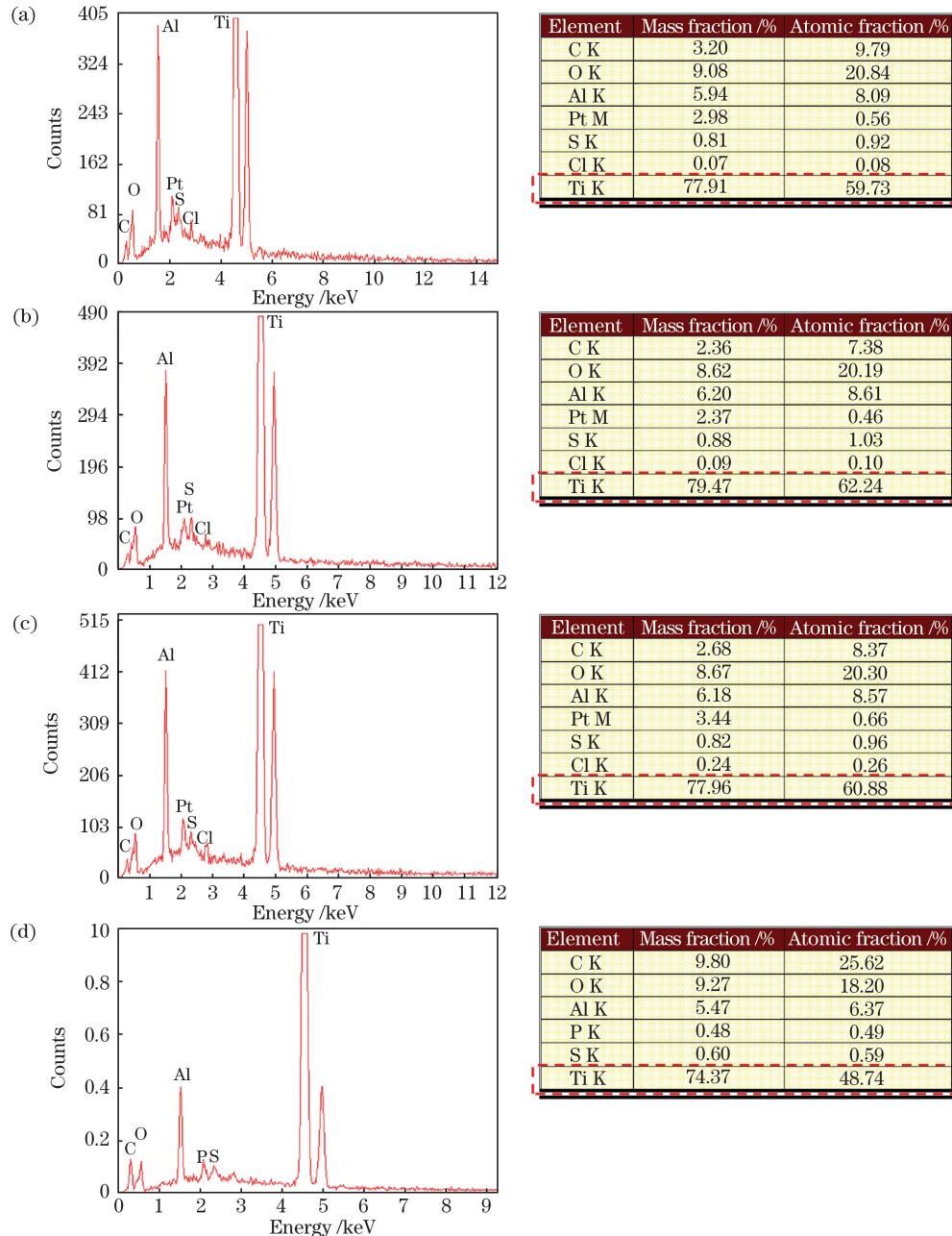


图7 激光清洗TA15钛合金表面的EDS谱及EDS分析结果。(a)V=7000 mm·s<sup>-1</sup>;(b)V=8000 mm·s<sup>-1</sup>;(c)V=9000 mm·s<sup>-1</sup>;(d)V=10000 mm·s<sup>-1</sup>

Fig. 7 EDS patterns and EDS analysis of TA15 surface after laser cleaning. (a) V=7000 mm·s<sup>-1</sup>; (b) V=8000 mm·s<sup>-1</sup>; (c) V=9000 mm·s<sup>-1</sup>; (d) V=10000 mm·s<sup>-1</sup>

数为 77.96%。相对于  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下的清洗表面,在  $9000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下清洗的 TA15 钛合金表面的钛元素含量有所下降,而氧元素的含量变化不大。前者表明在  $9000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的扫描速度下清洗后裸露出的 TA15 基体有所减少,而后者则主要是由氧化层厚度不均匀导致较厚的氧化层不能被很好地去除引起的。所以可以认为在该扫描速度下,氧化层的清洗去除效果不如  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下的清洗效果。由图 7(d)可以看出,当扫描速度为  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,清洗表面碳元素的质量分数为 9.80%,氧元素的质量分数为 9.27%,钛元素的质量分数为 74.37%。这表明,过大的扫描速度会导致 TA15 钛合金表面存在较多氧化层和一些残留的油污。上述分析表明,7000, 9000,  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下的清洗效果均没有  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描速度下的清洗效果好。

### 3.4 相组成

图 8 为不同扫描速度下清洗的 TA15 钛合金表面的 XRD 谱。可以看到,当扫描速度为  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  峰和  $\text{TiO}_2$  峰的强度都有所增强。这表明在该扫描速度下,激光清洗表面发生了热氧化,清洗表面又生成了新的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  层。当扫描速度为  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,清洗表面的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  峰基本消失,  $\text{TiO}_2$  峰的强度相比其他扫描速度下的更弱,  $\text{Ti}$  峰的强度更强。这更加有力地证明了激光清洗可以去除 TA15 钛合金表面的氧化层,且  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的扫描速度能获得较好的清洗效果。过小的扫描速度易使清洗表面发生热氧化,而过大的扫描速度又无法获得较好的清洗效果。

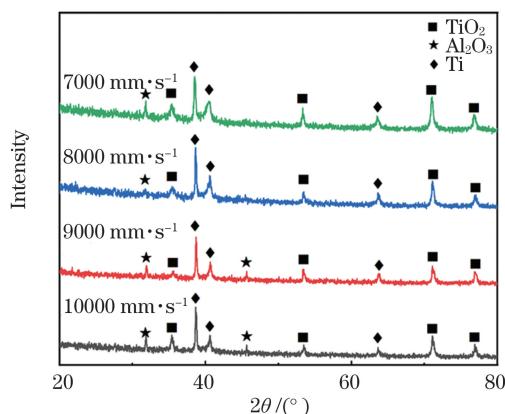


图 8 激光清洗 TA15 钛合金表面的 XRD 谱

Fig. 8 XRD spectra of TA15 surface after laser cleaning

### 3.5 表面硬度分析

为了研究激光清洗是否会对 TA15 钛合金表面

产生激光强化作用,对激光清洗后的 TA15 表面的维氏硬度进行了分析。从图 9 可以看出,经过激光清洗后,TA15 清洗表面的硬度相比原始表面有所提高。造成该现象的主要原因是 TA15 表面的氧化层较薄,在激光的辐照下,TA15 基体表面也会吸收部分激光能量,从而产生高温高压的等离子体,这些等离子体会被表层未清洗掉的氧化层束缚,被束缚的等离子体继续吸收激光能量后发生热膨胀,随后爆炸,爆炸产生的冲击波对 TA15 表面产生了压应力。同时,结合 3.2 节的分析可以知道,在清洗过程中,多孔结构的氧化层中夹杂的空气和水分在激光辐照下发生爆炸,也产生了冲击波。在这两种冲击波引起的压力的作用下,清洗表面发生塑性变形,导致表面晶粒细化<sup>[25]</sup>,从而产生了激光冲击强化作用,提高了 TA15 钛合金的表面硬度。从不同扫描速度下清洗的表面的硬度变化可以看出,随着扫描速度减小,表面硬度缓慢提高。这是由于扫描速度越小,单位面积的氧化层和基体吸收的激光能量越多,因此激光冲击强化作用越明显。

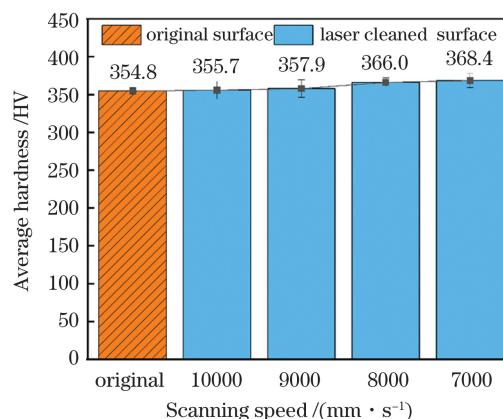


图 9 激光清洗 TA15 钛合金表面的硬度

Fig. 9 Hardness chart of TA15 surface after laser cleaning

## 4 结 论

本课题组进行了激光清洗 TA15 钛合金表面氧化层和油污的实验,并结合清洗表面的形貌、成分、相组成和硬度进行分析,得出了以下结论:

1) 在其他激光工艺参数保持不变的情况下,当振镜的扫描速度范围为  $7000 \sim 9000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,TA15 钛合金表面的大部分氧化层和油污可以基本被去除。在激光清洗过程中,TA15 表面油污和氧化层的去除机制主要为气化机制和相爆炸机制。

2) 随着振镜扫描速度从  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增大到  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , TA15 清洗表面的钛元素含量呈现

先增加后降低的趋势,而氧元素含量则是先降低再升高;当扫描速度为 $8000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,TA15表面的清洗效果最好,清洗表面钛元素的质量分数达到最高值(为79.47%),氧元素的含量达到最低值(氧元素的质量分数为8.62%),表面上的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 几乎完全被去除, $\text{TiO}_2$ 的含量也较低。

3)激光清洗会对TA15表面起到一定的激光冲击强化作用,提高了清洗表面的硬度。减小振镜扫描速度会增强激光冲击强化作用,增大清洗表面的硬度。

## 参 考 文 献

- [1] Li X W, Sha A X, Zhang W F, et al. TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe [J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(Z1): 90-94.
- [2] Xi M Z, Gao S Y, Liu B, et al. Effect of scanning pattern and annealing heat treatment on microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy formed by laser rapid forming process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(2): 445-449.
- [3] Wang J Y, Ge Z M, Zhou Y B. Titanium alloy for aviation [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985: 1-10.
- [4] Peng Y P, Zeng F C, Wang J J, et al. Development, application and feature of titanium alloys in foreign aviation industry [J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(10): 3-6.
- [5] Pei Q X. Research on the high temperature oxidation and hot corrosion resistance behaviors of the Cr-Si alloy layer on the surface of TA15 alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 38-75.
- [6] Chen L. A study on the full penetration stability and physical metallurgy of the laser welding of aeronautic titanium alloys[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 99-142.
- [7] Chen L. 航空钛合金激光焊接全熔透稳定性及其焊接物理冶金研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 99-142.
- [8] Sun Z H, Liu Y H, Zhang X Y, et al. A review of electroplating technology on titanium and titanium alloys[J]. Corrosion & Protection, 2005, 26(11): 493-496.
- [9] 孙志华, 刘佑厚, 张晓云, 等. 钛及钛合金的电镀工艺述评[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(11): 493-496.
- [10] Wang X D, Yu J, Mo Z Q, et al. Research progress on laser paint stripping technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050005.
- [11] 王晓东, 余锦, 猪泽强, 等. 激光脱漆技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050005.
- [12] Jia B S, Tang H P, Su C Z, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202010.
- [13] 贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202010.
- [14] Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702003.
- [15] 雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
- [16] Xia P Y, Yin Y H, Cai A J, et al. Laser cleaning process of 2219 aluminum alloy anodic oxide film before welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 102005.
- [17] 夏佩云, 尹玉环, 蔡爱军, 等. 2219铝合金阳极氧化膜焊前激光清洗工艺研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 102005.
- [18] Chen J B, Peng R L. Principles and applications of laser [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 191-192.
- [19] 陈家璧, 彭润玲. 激光原理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 191-192.
- [20] Tian X L, Nie L L, Zhang M W, et al. Study on weld grinding method of high speed EMU car body [J]. MW Metal Forming, 2012(12): 56, 69.
- [21] 田新莉, 聂丽丽, 张明伟, 等. 高速动车组车体焊缝打磨方法研究[J]. 金属加工(热加工), 2012(12): 56, 69.
- [22] Zhou Y, Chen X T, Xu H D, et al. Study on removing mechanism of epoxy & polyurethane film on metal surface [J]. Surface Technology, 2009, 38(1): 1802004-7.

- (3): 4-7, 50.
- 周雅, 陈希挺, 许海东, 等. 金属表面环氧聚氨酯涂层的去除机理研究[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 4-7, 50.
- [15] Du H B, Shen J P, Wu M H, et al. Formation mechanism of pores in partial penetration weld for titanium alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2006, 36(3): 51-54.
- 杜汉斌, 沈剑平, 邬美华, 等. 钛合金激光未穿透焊气孔形成的机理研究[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(3): 51-54.
- [16] Liu Y J, Liu J H. Status and prospects of laser cleaning technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(2): 60-62.
- 刘雨佳, 刘建华. 激光清洗技术的现状及展望[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(2): 60-62.
- [17] Alshaer A W, Li L, Mistry A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 162-171.
- [18] Wang Q, Guan Y C, Cong B Q, et al. Laser cleaning of commercial Al alloy surface for tungsten inert gas welding[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022507.
- [19] 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.
- [20] Wang X, Xu M Y, Wang Z W, et al. Properties of jet-plated Ni coating on Ti alloy (Ti6Al4V) with laser cleaning pretreatment[J]. Metals, 2019, 9(2): 248.
- [21] 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. 热输入参数对激光清洗TA15表面氧化层的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 132-139.
- [22] Du W C. IPG high power fiber laser [J]. Laser & Optronics Progress, 2002, 39(10): 36-40.
- 杜卫冲. IPG 高功率光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(10): 36-40.
- [23] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 60-66.
- [24] Chen Y M. Research on pre-welding laser cleaning of aluminum alloy and evaluation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 33-36.
- 陈一鸣. 铝合金焊前激光清洗工艺及评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 33-36.
- [25] Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, et al. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. Acta Materialia, 2010, 58(11): 3984-3994.

## Effect of Scanning Speed of Galvanometer on Surface Oxide Layer of TA15 Titanium Alloy in Pulsed Laser Cleaning

Wang Wei<sup>1</sup>, Shen Jie<sup>1</sup>, Liu Weijun<sup>1\*</sup>, Bian Hongyou<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>1</sup>, Zhou Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

<sup>2</sup>Shenyang Pakalaijing Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110042, China

### Abstract

**Objective** TA15 titanium alloy is often used to manufacture aircraft partitions, wall plates, welding bearing frames, and aircraft engine parts. These parts often need to withstand high temperatures and various stresses. However, the oxide layer on the surface of such parts reduces its welding performance, electrical conductivity, and bonding with the coating; therefore, it is necessary to clean the oxide layer film regularly. Compared with the traditional cleaning methods, laser cleaning technology has the advantages of high precision, broad applicability, simple process, and clean and green. As a new type of laser, pulsed fiber laser has the advantages of high photoelectric conversion efficiency, good beam quality, and high reliability compared with other lasers. This can solve the problems of poor consistency and low efficiency for cleaning some parts of the existing aircraft. This laser cleaning breaks the technical bottleneck of the traditional aircraft cleaning process regarding the cleaning mechanism,

which is conducive to improving aircraft re-service safety and service life. It provides the scientific basis and technical support for the popularization and application of laser cleaning technology in aviation and other major equipment. This also ensures the safety of equipment in service to promote the green and high-quality development of Chinese industries including aviation, marine equipment, and rail transit.

**Methods** In this study, a TA15 titanium alloy plate with oil stain and an oxide layer on the original surface was used. First, we used an IPG pulsed fiber laser and different scanning speeds of galvanometers to clean the original surface of TA15. Then, the surface morphologies of TA15 before and after the laser cleaning were observed using an ultra-depth three-dimensional field microscope to determine the feasibility of laser cleaning the oil stain and oxide layer on the TA15 surface. Then, a scanning electron microscope, an energy spectrum analyzer, and an X-ray diffractometer were used to observe and analyze the effect of different scanning speeds of galvanometers on the surface morphology, surface-element content, and surface composition of the cleaned TA15 surface. Simultaneously, the removal mechanism of the oil stain and oxide layer on the TA15 surface was studied. Finally, the hardness of the TA15 surface before and after the cleaning was tested using Vickers hardness tester to explore the influence of laser cleaning on the TA15 surface and the relationship between the scanning speed of the galvanometer and hardness during the laser cleaning.

**Results and Discussions** After pulsed laser cleaning, the original black surface of TA15 becomes white and bright. The scanning speed of the galvanometer has a certain influence on the cleaning effect [Fig. 1(a) and Fig. 4]. When other laser cleaning process parameters remain unchanged, the overlap ratio of galvanometer spot increases with the decrease of scanning speed. This leads to an increase in the laser energy absorbed by the cleaning surface so that the porous and loose oxide layer on the TA15 surface can be removed. Moreover, the surface cleaned with the small scanning speed of the galvanometer is smoother than the surface cleaned with the large scanning speed, and the removal effect of the oxide layer is also more obvious [Fig. 1(b) and Fig. 5]. Combined with the principle of laser cleaning and the oxide debris observed on the surface of the TA15 alloy, it can be inferred that gasification and phase-explosion mechanisms are followed during the laser cleaning process for the oxide layer and oil stain on the TA15 surface. Because the air and moisture contained in the porous structure of the original oxide layer explode under the irradiation of the laser, phase-explosion is caused in the cleaning surface. Additionally, some oil stain can be attached to the oxide layer debris generated by the phase-explosion and removed together (Fig. 6). Due to the element content changes on the cleaning surface, as the scanning speed of the galvanometer increases from  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , the Ti-element content on the TA15 surface first increases and then decreases, while the O-element content first decreases and then increases (Fig. 7). The oil stain and oxide layer on the TA15 surface cannot be well cleaned when very high scanning speed is used. However, very low scanning speed can easily cause thermal oxidation of the cleaned surface and generate new  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  layers that adhere to the cleaned surface (Fig. 8). Through the analysis of the change of the hardness of the cleaned surface, it is concluded that the plasma and phase-explosions can cause the plastic deformation of the TA15 surface and the refinement of the grain, which can produce the effect of laser shock strengthening and improve the surface hardness of TA15. With the decrease of scanning speed, the effect of laser shock strengthening is also improved (Fig. 9).

**Conclusions** The scanning speed of the galvanometer in pulsed laser cleaning is an important factor influencing the cleaning effect of oil stain and oxide layer on the TA15 surface, and the removal mechanisms of the oil stain and oxide layer on the TA15 surface are mainly gasification and phase-explosion mechanisms. When the scanning speed increases from  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , the surface cleaning effect of TA15 is the best at the scanning speed of  $8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . At this time, the Ti-element content of the cleaned surface reaches the highest value of 79.47%, and the O-element content reaches the lowest value of 8.62%; the surface  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is almost removed, and the  $\text{TiO}_2$  content is low. Laser cleaning can strengthen the TA15 surface by laser shock and improve the hardness of the cleaning surface. Reducing the scanning speed of the galvanometer will enhance the effect of laser shock strengthening and increase the hardness of the cleaned surface.

**Key words** laser technique; laser cleaning; TA15 titanium alloy; oxide layer; surface morphology; surface composition; Vickers-hardness

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.6810