

能量输入对 TC4 钛合金纳秒脉冲激光清洗质量的影响

杨 烁¹, 宋文清¹, 雷正龙², 冯俊华², 李 凯³, 彭 睿²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)

(2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(3. 中车长春客车轨道股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘要: 采用不同功率和脉宽的纳秒脉冲激光, 对 TC4 钛合金表面氧化层(厚度约 25 μm)进行了激光清洗试验研究, 分析了激光能量输入对清洗后表面形貌、粗糙度以及氧化层去除厚度的影响。结果表明: 在激光功率 300 W、脉宽 60 ns 条件下能获得较好的清洗效果, 且基材未受到明显损伤。相同脉宽下氧化层去除厚度随激光功率的增大而增加, 相同激光功率下去除厚度随脉宽的增大先增大后减小。相同脉宽下表面粗糙度随激光功率的增大先减小后增大, 在脉宽 60 ns、功率 300 W 条件下粗糙度最小。清洗后的 TC4 钛合金表面存在纳米级微裂纹, 增加脉宽可以有效抑制微裂纹产生。

关键词: 激光清洗; TC4 钛合金; 氧化层; 能量输入

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)05-031-05

Effect of Energy Input on Nanosecond Pulsed Laser Cleaning of TC4 Titanium Alloy

Yang Shuo¹, Song Wenqing¹, Lei Zhenglong², Feng Junhua², Li Kai³, Peng Rui²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: Nanosecond pulsed laser with different power and pulse width is used to study the laser cleaning process of TC4 titanium alloy with 25 μm -thick surface oxide layer. The effects of laser energy input on the surface morphology, roughness and oxide film removal thickness were analyzed. The results show that good cleaning effect can be obtained under the laser power of 300 W and pulse width of 60 ns, and the substrate is not obviously damaged. Under the same pulse width, the oxide layer removal thickness increases with the increase of laser power. Under the same laser power, the removal thickness first increases and then decreases with the increase of pulse width. Under the same pulse width, the surface roughness first decreases and then increases with the increase of laser power. The smallest roughness can be obtained when the pulse width is 60 ns and the power is 300 W. Nanoscale microcracks exist on the cleaned TC4 titanium alloy surface. Increasing the pulse width can effectively inhibit the generation of microcracks.

Key words: laser cleaning; TC4 titanium alloy; oxide layer; energy input

钛及钛合金是现代工业中不可缺少的结构材料和功能材料, 广泛应用于航空航天、海洋船舶、化工、汽车、电力、医疗等领域^[1-4]。钛及钛合金在加热成形或机械加工过程中, 因长时间与高温空气

接触, 表面不断吸附氧而形成氧化层^[5]。由于氧化层的存在, 钛合金的弹性模量、抗疲劳强度、承载能力会大大降低^[6], 在使用过程中易产生裂纹而使整个构件失效^[7]。此外, 氧化层也会对钛及钛合金的焊接性产生不利影响。因此, 钛及钛合金材料在加工使用前需要对其表面的氧化层进行清洗, 以提高使用寿命或者给后续材料的加工提供有利条件。

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1105000)

通信作者: 雷正龙(1977—), 男, 副教授。

清洗氧化层的传统方法有化学法(酸、碱洗法)^[8]和机械法(水喷砂法等)^[9]。虽然这2种方法能够达到一定的清洗效果,但是化学法存在清洗周期长、环境污染严重等缺点,机械法易对基材造成损伤,二者均存在很多局限性。

激光清洗技术作为一种绿色环保的表面处理新技术,具有精度高、清洗效果佳、应用范围广、易于自动化控制等优势,在航空航天、汽车、船舶、微电子及文物保护等领域应用前景广阔,被誉为是“21世纪最具发展潜力的绿色清洗技术”^[10]。Wang等^[11]研究了激光清洗功率对TC4钛合金样品表面形貌、涂层附着力、耐磨性和硬度的影响,当激光能量密度为 4 J/cm^2 时可以将污染物和氧化层去除,且涂层附着力、耐磨性和硬度均有所提高。罗雅等^[12]用激光对TC11钛合金表面进行焊前预处理,在激光功率 150 W 、光斑直径 0.8 mm 、清洗速率 10 mm/s 条件下可有效清除TC11钛合金表面的积碳、金属颗粒及氧化层,并且使焊缝质量得到提高。Yue等^[13]利用短脉冲激光去除钛合金表面的富氧 α 层,测定了富氧 α 层的去除率并通过建立模型预测富氧 α 层的厚度。陈俊宏等^[14]研究了不同焊前清洗方法对钛合金焊缝气孔率的影响,发现激光清洗可以使焊缝气孔率达到航天行业I级标准。

虽然研究人员已经开展了一些钛合金激光清洗试验,但研究内容主要集中在激光功率等工艺参数对表面形貌及性能的影响,鲜有关于纳秒脉冲激光能量输入对钛合金表面氧化层清洗效果的研究。本研究进行了TC4钛合金表面氧化层纳秒脉冲激光清洗试验,通过改变激光功率和脉宽等工艺参数研究了不同激光能量输入对清洗后钛合金表面形貌、氧化层去除厚度和粗糙度等的影响规律,从而获得比较合适的TC4钛合金激光清洗参数,以为激光清洗钛合金氧化层工艺参数制定和清洗机理研究提供实验数据和理论依据。

1 实验

待清洗试件为TC4钛合金板材,规格为 $75\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。通过光学显微镜可以观察到TC4钛合金板材表面覆盖有大量黑色氧化物,该氧化物是在热加工过程中形成的,以 TiO_2 为主,排布较为致密,几乎看不到银白色基体,如图1所示。图2为激光清洗前TC4钛合金板材横截面形貌,经测量

氧化层厚度为 $(25 \pm 3)\text{ }\mu\text{m}$ 。

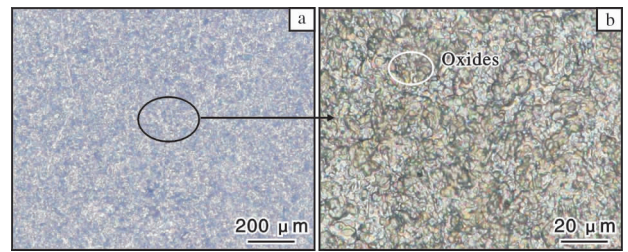


图1 激光清洗前TC4钛合金板材表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of TC4 titanium alloy plate before laser cleaning

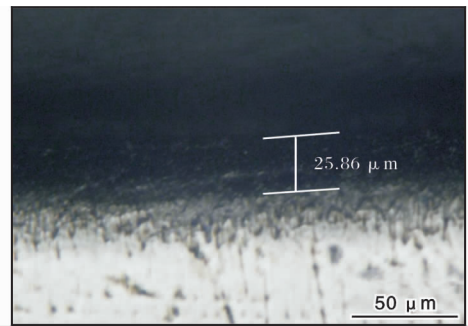


图2 激光清洗前TC4钛合金板材横截面形貌

Fig. 2 Cross section morphology of TC4 titanium alloy plate before laser cleaning

采用激光清洗试验平台清洗样品表面氧化层,其结构示意图如图3所示。该平台配备有纳秒级光纤脉冲激光器,波长为 1064 nm ,脉宽在 $30 \sim 100\text{ ns}$ 范围内可调,脉冲频率范围为 $2 \sim 50\text{ kHz}$,最大输出功率为 1000 W 。激光清洗使用振镜扫描方式,X方向振镜和Y方向振镜在一定角度旋转,使激光在一定区域内扫描。

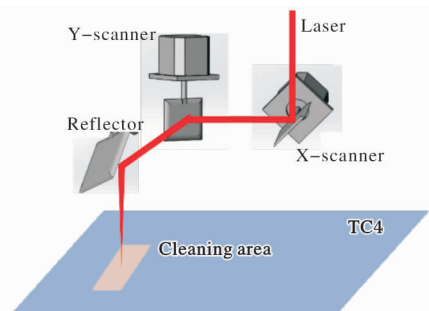


图3 激光清洗试验平台结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of laser cleaning experimental platform

激光清洗效果与激光在材料上形成的温度场和应力场的时空分布密切相关^[15],而激光能量输入是影响温度场和应力场最主要的因素。控制激光功率

和脉宽来改变激光能量输入, 可以得到不同的清洗效果。激光清洗参数: 脉冲频率 20 kHz, 光斑直径 960 μm , 扫描速度 3000 mm/s, 激光功率 100、300、500 W, 脉宽 30、60、100 ns。

利用光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 对激光清洗后的试样表面形貌进行观察和分析; 利用激光共聚焦电子显微镜对清洗后表面粗糙度进行测定; 利用超景深光学显微镜对清洗边界进行观察, 测量清洗区和未清洗区的相对高度, 计算氧化层的去除厚度。从清洗深度和表面形貌等维度评价不同激光能量输入下 TC4 钛合金表面氧化层的去除效果以及对基材表面的影响。

2 结果与分析

2.1 能量输入对表面形貌的影响

采用超景深光学显微镜观察激光清洗后的试样表面形貌并测量各区域的相对高度。通过相对高度信息绘制表面高度的起伏曲线, 分析高度的变化趋势。图 4 为 60 ns 脉宽下以不同功率激光清洗后 TC4 钛合金表面的超景深光学显微镜照片。根据表面形貌的特点, 可以将清洗界面大致分为清洗区、过渡区和未清洗区 3 个区域。过渡区形成的主要原因是在清洗区的末尾, 由于脉冲激光搭接不充分, 能量输入较少导致的。

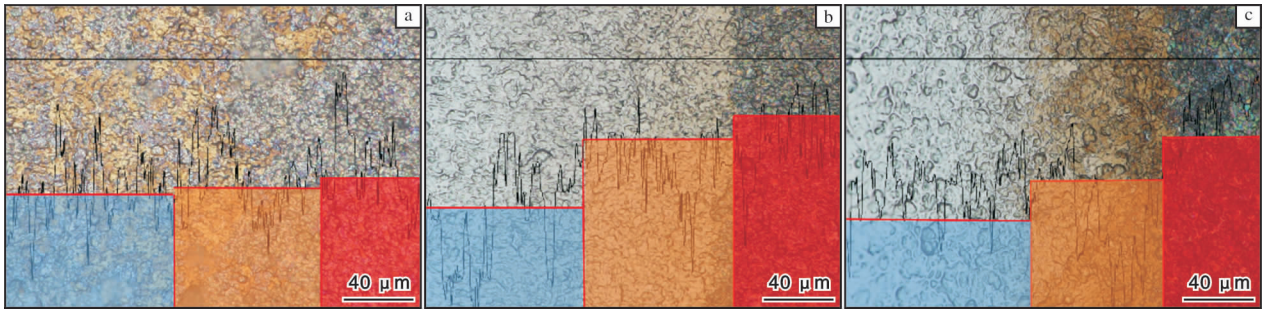


图 4 60 ns 脉宽下不同功率激光清洗后 TC4 钛合金表面的超景深光学显微镜照片

Fig. 4 Surface morphologies of TC4 titanium alloy after laser cleaning with different power at pulse width of 60 ns by depth of field optical microscope: (a) 100 W; (b) 300 W; (c) 500 W

激光功率为 100 W 时, 清洗区和过渡区仍残留较厚的且较为致密的氧化层, 导致表面在光学显微镜下呈现黄白色, 清洗区和未清洗区形貌差别不明显(图 4a)。当激光功率为 300 W 时, 清洗区、过渡区和未清洗区形貌呈现明显的区别(图 4b)。清洗区因表面氧化层被去除得较为彻底, 表面呈现钛合金基体的银白色, 且较为平整; 过渡区清洗不彻底, 表面起伏较大, 呈现黄黑色; 未清洗区依然是原始

的黑色表面。3 个区域的相对厚度呈现阶梯状, 清洗区和未清洗区的厚度差明显, 清洗效果较好。激光功率为 500 W 时, 清洗区呈现钛合金基体银白色, 但是有烧蚀的现象产生, 凹坑明显, 表面起伏大; 过渡区为黄白色, 有少量氧化物残留(图 4c)。

图 5 是脉宽 30 ns, 激光功率分别为 100、300、500 W 下清洗后 TC4 钛合金表面的 SEM 形貌。从图 5 可以看出, 激光功率为 100 W 时, 基材表面残留有

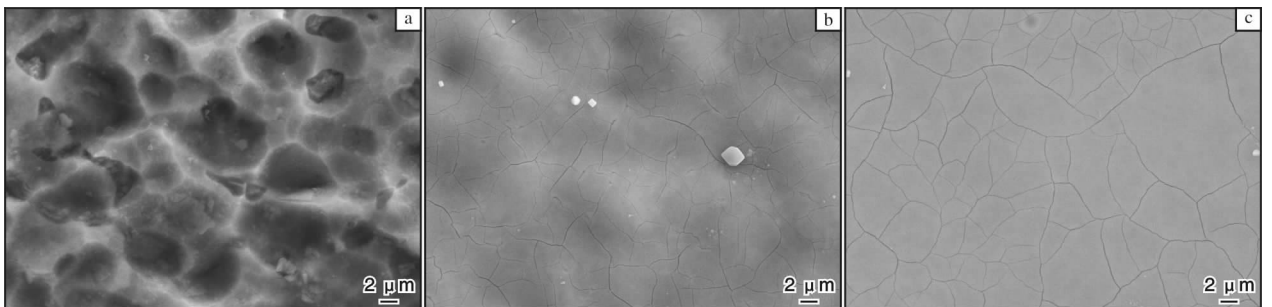


图 5 30 ns 脉宽下不同功率激光清洗后 TC4 钛合金表面的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphologies of TC4 titanium alloy surface after laser cleaning with different power at pulse width of 30 ns: (a) 100 W; (b) 300 W; (c) 500 W

大量氧化物, 氧化物排列较为致密, 附着在基材表面形成凹坑状的形貌; 激光功率为 300 W 时, 基材表面变得较为平整, 有纳米级微裂纹出现, 且局部明暗不一致, 表明表面状态一致性较差; 激光功率为 500 W 时, 基材表面平整, 氧化物基本被去除, 可以明显看到密布在表面的微裂纹。

据研究^[16], 微裂纹形成于钛合金的富氧 α 层。富氧 α 层是氧元素在表面 α 相中形成的间隙固溶体, 改变 α 相的晶格常数和位错的滑移方向, 导致位错运动阻力增加, 使合金的脆性增大, 因而表面易产

生微裂纹。纳秒脉冲激光清洗去除氧化物后暴露出了富氧 α 层, 因而观察到其表面存在大量微裂纹。微裂纹会极大地影响钛合金的拉伸性能和疲劳性能, 在工程中应尽量避免。

图 6 是平均激光功率为 300 W, 脉宽分别为 30、60、100 ns 条件下清洗后 TC4 钛合金表面的 SEM 形貌。从图 6 可以看出, 随着脉宽的增加, 微裂纹的宽度和密度均有所下降。在清洗过程中, 可以提高脉宽来减少微裂纹, 从而提高清洗后钛合金的力学性能。

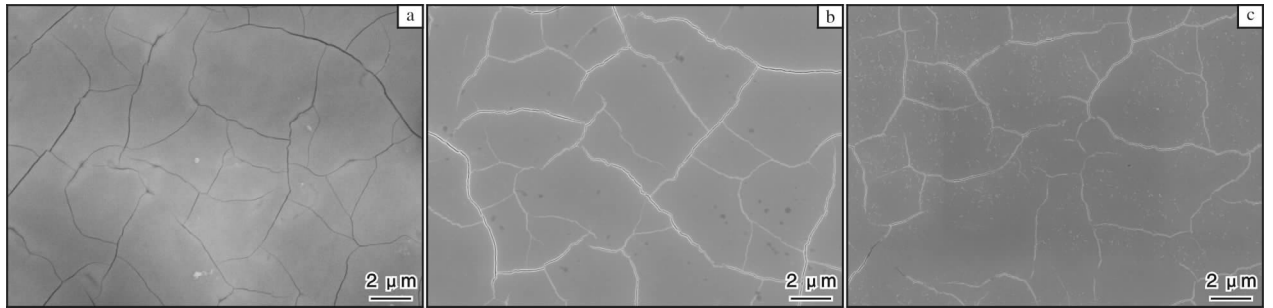


图 6 激光功率 300 W 时不同脉宽下激光清洗后 TC4 钛合金表面的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphologies of TC4 titanium alloy surface after laser cleaning with different pulse width at power of 300 W: (a) 30 ns; (b) 60 ns; (c) 100 ns

2.2 能量输入对氧化层去除厚度的影响

TC4 钛合金表面氧化层去除厚度随激光功率和脉宽的变化如图 7 所示。激光功率为 100 W 时, 由于激光能量较低, 产生的热影响区较小, 对氧化层的烧蚀效应和振荡剥离效应不明显, 只能去除少部分的氧化物, 清洗效率较低。激光功率为 300 W 时,

几乎能将所有氧化物去除, 清洗效率明显增加。激光功率增加到 500 W 时, 去除厚度相比 300 W 时增加并不多, 主要原因是激光功率过大, 激光在清洗氧化层后还对基材造成了一定的损伤, 而激光对基材的烧蚀速率远低于对氧化层的烧蚀速率, 导致去除厚度增加不明显。

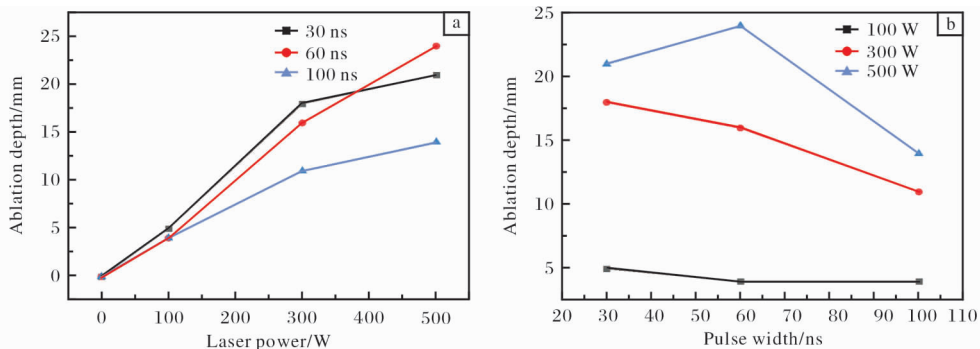


图 7 TC4 钛合金表面氧化层去除厚度与激光能量的关系

Fig. 7 Relationship between removal thickness of oxide layer on TC4 titanium alloy surface and laser energy: (a) laser power; (b) pulse width

激光能量输入是影响温度场和应力场最主要的因素, 与激光清洗效果有直接关系。激光能量输入

主要包括单脉冲激光能量密度和作用时间, 受脉宽的影响^[17]。单脉冲能量密度 E_1 、激光作用时间 T_0

表达式分别如式(1)、式(2)所示:

$$E_t = \frac{P}{fR(\pi R + 2vt)} \quad (1)$$

$$T_0 = Ttf \quad (2)$$

式中: P 为激光功率; f 为脉冲频率; R 为激光光斑半径; v 为清洗光斑移动速度; T 为激光扫描时间; t 为脉宽。在相同的激光扫描时间下, 脉宽增加时, 激光作用时间变长; 当激光功率和清洗光斑移动速度不变, 脉宽增加时, 单脉冲能量密度减小。激光功率恒定而脉宽较长时, 单脉冲热输入不变但是激光作用时间较长, 热量在钛合金中的传导时间长, 激光产生的热影响区域变大而用于烧蚀氧化层的热量减小, 并且钛合金板材的热变形明显。因此, 当激光功率为 500 W 时, 脉宽 100 ns 下的清洗效果不如 30 ns 和 60 ns。激光功率为 100 W 时, 去除厚度随脉宽的变化不明显, 主要原因是 100 W 的激光总热输入较小, 没有达到氧化层的清洗阈值。激光功率为 300 W 时, 去除厚度随脉宽的增大而明显减小。激光功率为 500 W 时, 随着脉宽增加, 去除厚度呈现先增加后减小的趋势。氧化层去除厚度随脉宽的变化是单脉冲能量密度和激光作用时间共同影响的结果, 当脉宽小于 60 ns 时, 单脉冲能量密度的影响效果占主导; 脉宽大于 60 ns 时, 热作用时间的影响效果占主导。

2.3 能量输入对表面粗糙度的影响

激光清洗后钛合金表面粗糙度随激光功率的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可见, 随着激光功率由 100 W 增加到 500 W, 清洗区钛合金表面粗糙度呈现出先减小后增大的趋势。激光功率为 100、300 W 时, 各脉冲下清洗区的粗糙度差别不大, 脉宽对粗糙度的影响较小; 激光功率增加到 500 W 时, 清洗

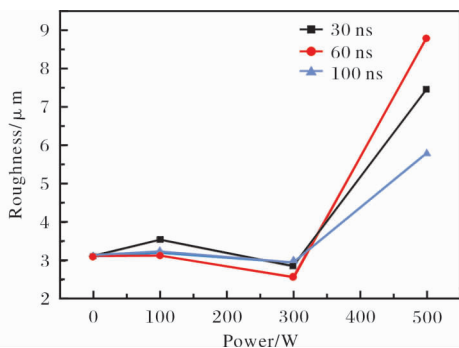


图 8 激光能量与 TC4 钛合金表面粗糙度的关系

Fig. 8 Relationship between laser energy and surface roughness of TC4 titanium alloy after laser cleaning

区粗糙度显著增大。这是由于激光功率较低时, 钛合金表面部分氧化物被去除, 在材料表面留下激光烧蚀的划痕, 未被清洗的腐蚀坑露出材料表面, 导致样件表面凹凸不平, 粗糙度稍有增大; 当激光功率较高时, 表面污垢和氧化层被去除后, 使得试件表面平整, 粗糙度减小; 当激光功率更高时, 试件表面吸收较高的激光能量, 产生较大的光致应力并发生微区熔化现象, 微熔池液面在光致应力的作用下震荡, 并在激光脉冲间隔期间迅速冷却形成粗糙表面, 最终使得材料表面的粗糙度显著增大。

3 结 论

(1) 采用纳秒脉冲光纤激光可以有效去除 TC4 钛合金表面氧化层。在激光功率 300 W、脉宽 60 ns 条件下能获得较好的清洗效果, 且基材未受到明显损伤。

(2) 清洗后的 TC4 钛合金表面存在纳米级微裂纹, 增加脉宽可以抑制微裂纹的形成。

(3) 随着激光功率的增加, TC4 钛合金表面氧化层去除厚度增大; 随着脉宽的增加, 氧化层去除厚度先增加后减小。

(4) 随着激光功率的增加, TC4 钛合金表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势; 脉宽对粗糙度的影响较小。

参考文献 References

- [1] 江洪, 张晓丹. 国内外钛合金研究及应用现状[J]. 新材料产业, 2017(3): 7-10.
- [2] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
- [3] 赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 398-404.
- [4] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1238-1264.
- [5] 杨雄飞, 黄德明, 韦青峰, 等. 钛合金 TC4 高温氧化特性研究[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(4): 16-21.
- [6] 张源, 张爱荔, 李惠娟. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响[J]. 钛工业进展, 2010, 27(1): 25-27.
- [7] Griza S, Azevedo T F, dos Santos S V, et al. Metallurgical failure analysis of acetabular metal-backed screws[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32: 178-187.
- [8] 乔永莲, 刘会军, 许茜, 等. TC4 钛合金表面氧化皮去

- 除[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(2): 165-169.
- [9] 蔡茜, 李昆. 水喷砂去除钛合金表面氧化层效果的研究[J]. 化肥设计, 2019, 57(3): 4-5.
- [10] 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): 60-72.
- [11] 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.
- [12] 罗雅, 王璇, 赵慧峰, 等. 焊前激光清洗预处理对 TC11 钛合金焊接性能的影响[J]. 表面工程与再制造, 2017, 17(2): 26-28.
- [13] Yue L Y, Wang Z B, Li L. Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(20): 8065-8071
- [14] 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] 雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强度钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 86-91.
- [16] 宋体杰. 钛合金表面富氧 α 层的形成及其对力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 陈玉华, 孙松伟, 周兴汶, 等. 脉冲宽度对超薄 TiNi/不锈钢激光焊接头 TiNi 侧界面的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1916-1920.

2020 年 7—12 月日本钛锭产量及钛材产销数据统计

日期	钛锭产量/t	国内钛材出货量/t	国外钛材出货量/t	钛材出货量合计/t
2020 年 7 月	951	386	568	954
2020 年 8 月	615	335	432	767
2020 年 9 月	432	328	450	778
2020 年 10 月	672	320	257	577
2020 年 11 月	370	383	372	755
2020 年 12 月	336	327	395	722
合计	3376	2079	2474	4553

2020 年 7—12 月日本钛产品进出口数据统计

日期	出口量/t			进口量/t		
	未锻轧钛	粉末及废旧料	其他钛制品	未锻轧钛及粉末	废旧料	其他钛制品
2020 年 7 月	332	315	842	24	53	209
2020 年 8 月	465	329	601	17	—	199
2020 年 9 月	464	431	739	7	29	158
2020 年 10 月	853	589	529	25	3	140
2020 年 11 月	1170	301	289	15	9	380
2020 年 12 月	1365	325	721	46	65	673
合计	4649	2290	3721	134	159	1759

王运锋摘自《チタン》