

铝合金激光清洗机理与质量评估

陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 王军, 黎硕, 王春明

华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对轻量化发展中铝合金焊前表面清理的工艺需求,研究了铝合金板材光纤激光清洗机理。通过分析激光空间与能量分布参数,确定激光清洗中需要的激光密排方式。在此基础上,进行激光清洗工艺实验,得到了激光参量对表面状态的影响规律,探究并优化了氧化膜剥离工艺,并提出铝合金表层氧化膜可能的两种剥离机制。通过对优化后的清洗参数进行焊接评估,发现激光清洗可以改善焊缝成形,显著提升接头力学性能,验证了光纤激光清洗改善铝合金接头质量的可行性,有助于高强度铝合金接头在制造业领域的大面积推广。

关键词 激光制造; 激光清洗; 铝合金; 剥离机制; 激光焊接; 质量评估

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1202005

Mechanism and Quality Evaluation of Laser Cleaning of Aluminum Alloy

Chen Yiming, Zhou Longzao, Yan Fei, Wang Jun, Li Shuo, Wang Chunming

School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Aiming at the process need of surface cleaning before aluminum alloy welding in the development of lightweight, the mechanism of fiber laser cleaning for aluminum alloy is investigated. Laser arrangement in laser cleaning is determined by analyzing the laser space and energy distribution parameters. Laser cleaning process experiment is conducted to study the influence of laser parameters on surface state, explore and optimize the oxide film stripping process. Two possible kinds of aluminum alloy oxide film stripping mechanism are proposed. The results of welding evaluation for cleaning parameters after optimization show that laser cleaning can improve the formation quality of the welding line and mechanical property of the joint, which verifies that the fiber laser cleaning can improve the quality of aluminum alloy joint. The research will promote the widespread application of high strength aluminum alloy joint in the manufacturing industry.

Key words laser manufacturing; laser cleaning; aluminum alloy; divestiture mechanism; laser welding; quality evaluation

OCIS codes 140.3390; 140.3330; 140.3510; 140.3538

1 引言

在交通业高速发展的今天,我国面临的能耗、安全、环保等三大问题日益突出,而运载工具(汽车、飞机等)轻量化设计,有利于降低能耗、减少污染排放以及提高操控性能^[1-2]。铝合金因具有较高的比强度,适于轻量化发展,可以广泛地用作车体、机身的焊接构件材料^[3-4]。但铝合金氧化膜易吸收水分,在焊接过程中受热易分解产生氢气孔或氧化膜气孔缺陷,这些缺陷严重影响焊缝力学性能,对汽车、飞机的安全留下隐患^[5]。因此,铝合金焊接前必须清除表面氧化膜、水分和油脂。传统的清除手段是通过化学清洗和机械打磨。但是化学清洗存在耗时长、污染大、水分残留等问题,机械打磨存在高损伤、清洗不彻底等缺点,这些问题严重影响清洗后的焊接质量^[6]。因此在焊接技术高速发展的情况下,亟需一种新型的清洗方式,铝合金的激光清洗

收稿日期: 2017-06-27; **收到修改稿日期:** 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51375191)

作者简介: 陈一鸣(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光清洗方面的研究。E-mail: dacym123@163.com

导师简介: 王春明(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术方面的研究。

E-mail: cmwang@hust.edu.cn(通信联系人)

应运而生。

激光清洗是基于激光与物质相互作用的一种新技术,相比于传统方法,激光清洗具有非接触、高清洗质量、复杂表面适应性强等特点,特别适合选区的高速在线清洗^[7-8]。在激光清洗的过程中,激光照射到工件表面,并与物质发生物理化学作用,剥离基材表面污染物,其产物可以通过相应的净化装置吸收,不对加工环境造成影响;已清洗的表面反射大部分激光,不损伤基材^[9]。近年来,激光清洗应用的研究大多集中于锈蚀、油漆的清除^[10-13],仅有少量研究报道了铝及其合金的清洗。2005年,Dimogerontakis等^[14]研究了Nd:YAG激光清洗镁铝合金过程中的热诱导氧化,发现在激光能量密度为0.6~1.4 J/cm²时表面发生氧化,在激光能量密度达到1~2 J/cm²时,表面氧化层结晶形成大的晶体。2010年,Kumar等^[15]利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线光电子能谱分析(XPS)等研究了光纤激光清洗对Ti-3Al-2.5V管状材料表面形貌的影响,并通过探伤、金相分析研究了激光清洗后脉冲钨极焊接头成形和组织成分的变化,发现激光清洗可以获得无缺陷接头,但未对不同脉宽情况下激光清洗效果进行研究,所获得接头未进行力学性能评估。2014年,Alshaer等^[16]利用100 ns的Nd:YAG激光对4043及AC-170PX薄板铝合金进行激光清洗并进行焊接,发现激光清洗可以有效减少焊接接头中的气孔。目前,铝及其合金的激光清洗技术仍停留在研究基于固定脉宽的固体激光器清洗,对可调脉宽的光纤激光器的焊前清洗应用鲜有报道。近几年,光纤激光器的高速发展,使得激光清洗柔性化程度更高、清洗成本更低、清洗效果更好,因此利用光纤激光器清洗铝合金成为一种必然趋势。

本文针对铝合金焊前表面清洗的要求,研究了基于光纤激光器的铝合金焊前激光清洗技术。利用理论分析和科学实验相结合的方法,研究了工艺参数对清洗后表面状态的影响,提出了铝合金氧化膜剥离机制,并通过焊接质量评估,建立了一种工艺简单、成本较低、质量稳定可靠的铝合金焊前处理新方法。

2 实验方法

2.1 实验设备及材料

本研究所搭建的平台包括:脉冲光纤激光器、扫描振镜、固定平台及控制系统,如图1所示。激光由光纤脉冲激光器产生以后,进入扫描振镜进行扫描聚焦,作用于待加工物体表面。光纤激光器最大平均功率30 W,脉冲宽度包括30,45,60 ns,脉冲频率50~100 kHz可调。

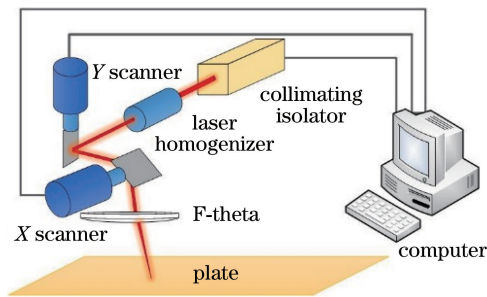


图1 激光清洗设备结构示意图

Fig. 1 Schematic of laser cleaning setup

实验所使用的5A06铝合金板材尺寸为300 mm×100 mm×8 mm,其化学成分如表1所示。

表1 5A06铝合金化学成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of the chemical compositions of 5A06 aluminum alloys

Alloy	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Be	Fe
Mass fraction /%	≤0.4	≤0.1	5.8-6.8	≤0.2	0.5-0.8	0.02-0.1	0.0001-0.005	0-0.4

2.2 实验步骤

研究通过理论分析及工艺实验,揭示工艺变量对清洗质量的影响机制。

激光清洗过程中,影响清洗效果的因素包括激光平均功率、激光频率、脉宽、扫描速度、扫描直线排列间距(线间距)等。传统的正交或单因素实验周期长、影响因素多、工作量大、研究成本高,因此需要预先分析简化。通过对微观的加工方式分析,可以将清洗效果的影响因素分为两个大的方面:一是激光的空间参数,二

是激光光束的能量参数。

激光的空间参数包括激光的横模方式以及光斑的空间排布(扫描速度、线间距)。光纤激光器的横模方式为近高斯模,而激光光斑的空间排布主要依赖二维振镜的扫描,将原本独立的激光光斑通过空间的有序排布来实现从点光斑到面分布的转变。振镜主要控制的空间参数为扫描速度和线间距。

脉冲光斑在 X 振镜的作用下,将从点光斑转变为线性排列,如图 2 所示。在此基础上,当光斑排列到达选区边界,由于 Y 振镜的偏折,将会在空中形成另一条与之相平行的线状排列,偏折后两线的距离就是线间距。

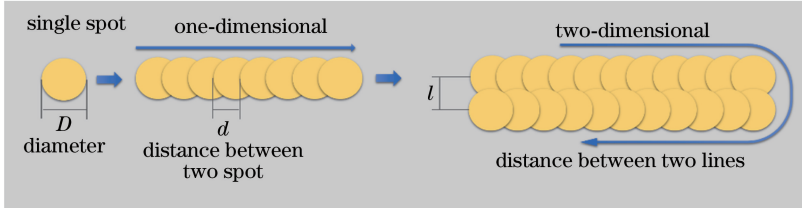


图 2 光斑排列图

Fig. 2 Laser spot diagram

在激光脉冲频率固定的情况下,扫描速度会直接影响光斑的一维密排,它在一维光斑间距的影响可由下式反映:

$$d = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

式中 v 代表扫描速度, f 代表激光频率。在激光脉冲频率固定的情况下,光斑的一维点间距与扫描速度成正比,扫描速度越大,一维间距越大。

激光的空间排列中,线间距 l 和扫描速度 v 会共同影响激光光斑的空间覆盖,如图 3 所示。

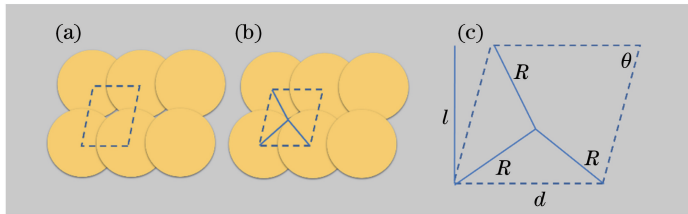


图 3 表面覆盖示意图。(a)常态临近光斑排列;(b)临界态临近光斑排列;(c)临界态数学模型

Fig. 3 Schematic of surface overlays. (a) Adjacent spots array in normal state; (b) adjacent spots array in critical state; (c) mathematical model in critical state

图 3(a)表示了激光二维排列过程中,相邻两行线光斑的空间位置关系。由于脉冲和扫描速度的理论值与实际值具有一定的误差,导致临近 4 个光斑的空间排列不呈矩形而呈平行四边形分布。如图 3(b)所示,在考虑极值情况下,当圆形光斑恰好完全覆盖表面时,将会在四边形内部出现两个相切点,该相切点到临近三个光斑圆心的距离等于光斑半径 R 。将其数学模型取出,从图 3(c)可以看出,此时的平行四边形为菱形。当 θ 为 90° 时,两个切点重合,整个模型形状为正方形。由以上分析,可得到以下等式:

$$d = \frac{l}{\sin \theta} = \frac{v}{f} = 2R \cos \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

进而得出要实现平面完全覆盖,需要满足下式的要求:

$$\begin{cases} v < 2Rf \cos \frac{\theta}{2} \\ l < 2R \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \end{cases}, \quad (60^\circ < \theta < 90^\circ), \quad (3)$$

式中, v 最小值在 $\theta = 90^\circ$ 时取得, l 最小值在 $\theta = 60^\circ$ 时取得。为满足激光清洗的完全覆盖需求,需要 v 和 l 取值都尽可能小;考虑到激光的清洗效率及激光对于材料表面产生的热效应,应尽可能选取较大的 v 和 l 数

值。综合两方面考虑,选取的 v 和 l 恰好小于(3)式中各自的最小值。

另一个影响清洗效果的因素是激光的能量参数。宏观上,能量参数包括激光平均功率、脉宽等。在一定的激光功率范围内,激光脉冲能够有效去除铝合金表面的氧化层、水分和油污;但是当功率过大时,激光会对母材造成损伤。同样,激光的脉冲宽度会影响清洗过程的热输入量,较高的热输入量易导致材料发生氧化^[17]。

因此,在激光清洗的过程中,需要先测量清洗光斑的大小,再将光斑有序排列,并通过严格控制清洗的能量输入及脉冲宽度,探究激光清洗的效果变化。前期测试中得到聚焦后的光斑大小基本不随功率及脉宽变化,故在清洗实验过程中保持扫描速度和线间距不变,设计了在频率固定为 50 kHz,脉宽 30,45,60 ns 情况下,功率以 6 W 为间隔、从 0~30 W 变化的激光清洗实验。

在激光清洗完成后,将通过表面形貌、表面元素分析等方法优化出最佳清洗工艺。对焊前无处理试件及激光清洗试件进行激光止口搭接焊实验,并对焊接完成后的接头进行探伤、拉伸测试及断口研究,分析激光清洗对激光焊接接头成形及力学性能的影响,验证光纤激光清洗改善接头质量的可行性。

3 实验结果与分析

3.1 清洗后表面测试与分析

铝合金表面的氧含量是影响焊接效果的一个重要参数,故选择在激光清洗实验后,及时使用 XPS 对铝合金表面晶格氧原子含量进行检测,得到其氧含量变化趋势。

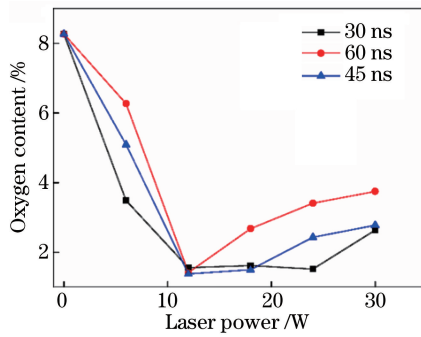


图 4 激光功率对氧原子含量影响

Fig. 4 Effect of laser power on oxygen content

从图 4 可以看到,对于 30,45,60 ns 的激光脉宽,在激光功率从 6 W 增加到 30 W 情况下,5A06 铝合金表面氧含量都先降低后有所升高;激光脉宽越短,6 W 时氧原子含量越低,这表明在功率达到 6 W 之前,含氧量迅速下降,而 6 W 之后下降减缓;同时在激光功率增大时其氧含量增加缓慢。因而选择 30 ns 短脉宽的脉冲,能够更有效地在低功率情况下降低铝合金表面氧含量,同时,短脉宽情况下,在激光功率升高过程中材料的抗氧化能力更强。

由于光斑相对于铝合金板而言面积极小,可将其清洗过程看作点热源对半无限大物体进行加热,其温度模型为^[18]

$$T = \frac{q \sqrt{\alpha \tau}}{0.885K}, \quad (4)$$

式中 q 为激光辐照功率密度, α 为材料的传温系数, τ 为激光作用时间, K 为材料导热系数。可以看出,铝合金表面升温与激光功率密度呈线性关系,功率越大,表面温度升高越多;铝合金表面温升与激光脉宽的二次根号呈线性关系,脉宽越短,升温越缓慢。在铝合金表面温度升高后,表面铝原子活性增强,容易结合空气中氧气发生氧化。

在激光脉宽为 30 ns 情况下,如图 5 所示,随着激光功率的增加,铝合金表面形貌发生变化。在未清洗状态下,铝合金表面较为平整,表面分布着清晰细密的“条纹”;激光作用后,原先平整的表面,在条纹缺陷处开始破裂,而氧元素含量有所下降,表明部分氧化膜被剥离;功率达到 12 W 时,铝合金表面原有的竖纹完全消失,转变为均匀排列的激光作用痕迹,氧元素含量下降至最低点,表明已达到激光剥除氧化膜的最佳效果;

功率达到 30 W 时,可以观察到表面布满了金属飞溅,起伏高度显著增加,此时,氧元素含量再次上升,表面发生热加工氧化。

通过观察,在激光清除氧化膜的过程中,可能的剥除机制有两种:一种是条纹孔爆破,一种是热应力。

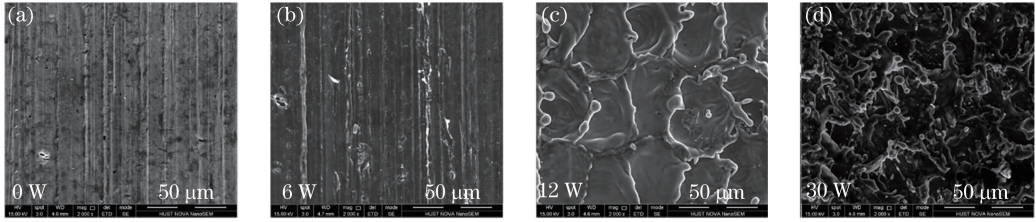


图 5 不同激光功率激光清洗后铝合金表面形貌。(a) 0 W; (b) 6 W; (c) 12 W; (d) 30 W

Fig. 5 Morphology of aluminum alloy after laser cleaning with different laser powers.

(a) 0 W; (b) 6 W; (c) 12 W; (d) 30 W

在功率低于 12 W 时,氧化膜的剥除主要依赖条纹孔爆破。铝合金在热挤压成型过程中,由于组织成分不均匀而在表面形成白色或黑色条纹缺陷^[19][图 5(a)情况],这些条纹缺陷往往富集空气和水分,在脉冲激光的作用下,气体和水分体积迅速膨胀,产生较大的爆破力,使氧化膜局部破碎剥离,在铝合金表面形成氧化膜解裂,如图 5(b)所示。

在功率超过 12 W 时,氧化膜的剥除主要依赖激光脉冲产生的热应力。脉冲激光作用于表面后,光能转化为热能,表面氧化膜受热迅速膨胀,膨胀过程中产生的冲击力大于氧化膜的附着力,从而使得氧化膜剥离,同时由于反冲力的作用,基材表面形成相应的反冲作用痕迹,如图 5(c)所示。为了探究激光功率对膜层剥离效果的影响,引入剥离率的概念,激光照射的过程中,膜层的剥离率如下^[20]:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{\alpha \epsilon}{\rho c h}}, \quad (5)$$

式中 ϵ 是激光脉冲能量, h 是膜层厚度, E 是膜层的弹性模量, ρ 是膜层密度, α 是膨胀系数, c 是比热容。从(5)式可以看出,随着激光功率的增加,在频率不变的情况下,激光脉冲能量将会增加,膜层脱离率将增加,但是功率过高后,氧化膜完全剥离,光能转变的热能被基材吸收,基材金属过度融化并发生氧化,如图 5(d)所示。

图 6 表明激光脉冲为 30 ns 情况下激光清洗后铝合金表面粗糙度的变化趋势。在激光清洗过程中,伴随着激光能量的增长,铝合金表面粗糙度不断增加。结合图 5 表面形貌的变化,可以看出,铝合金表面氧化层在剥离过程中,表面粗糙度将会轻微增加,此时粗糙度增加主要是由于氧化层与基材间针孔“爆破”使铝合金表面产生凹陷;在功率达到铝合金损伤阈值后,表面粗糙度显著增加,此时粗糙度增加是由于铝合金表面形成了规则阵列的光斑作用痕迹,该痕迹的深度随着功率的增加而增大,宏观上粗糙度也进一步增大。

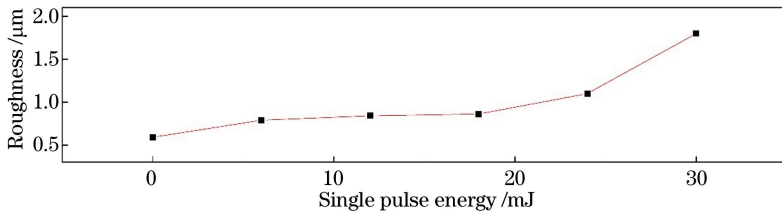


图 6 激光清洗后铝合金表面粗糙度的变化

Fig. 6 Surface roughness change of aluminum alloy after laser cleaning

综上所述,30,45,60 ns 激光有相近的清洗功率阈值,其中 30 ns 脉宽的激光能够有较高的功率损伤阈值和较宽的工艺区间,在功率为 12~24 W 时能够有效降低铝合金表面氧元素含量,间接反映出铝合金表面油脂、水分、氧化层的降低。

3.2 激光止口搭接焊评估

对未处理试件和激光清洗试件进行焊接实验,并进行探伤,可以看到,对于焊前未进一步处理的铝合金材料,其焊缝下端出现了未焊透现象[图 7(a)],单纯使用激光清洗可以有效地消除内部气孔缺陷[图 7(b)],

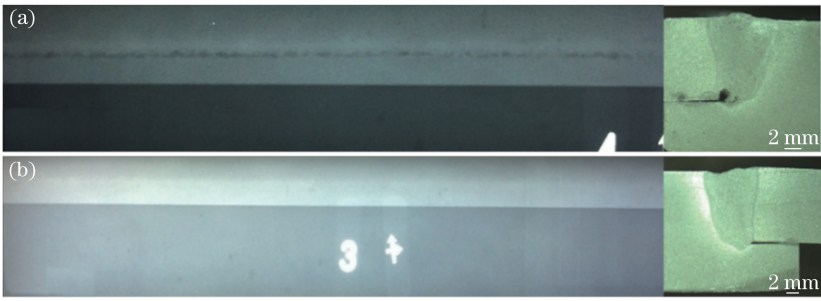


图 7 X 射线接头(a)探伤及(b)截面

Fig. 7 X-ray (a) inspection and (b) weld cross-section of the joint

这与 Kumar 等^[15]的研究结果(激光清洗后焊接可以得到无缺陷焊缝)相同。

对试件进行拉伸实验。图 8 为不同表面清洗条件下焊接接头的拉伸结果,可以看到未处理直接焊接的试件,焊接接头的抗拉强度为 233 MPa,仅达到母材抗拉强度(实测值为 345 MPa)的 67%。激光清洗后试件的抗拉强度为 317 MPa,达到母材抗拉强度的 91%。相比未激光清洗的焊接焊缝,清洗后激光焊接的焊缝强度得到明显提高。

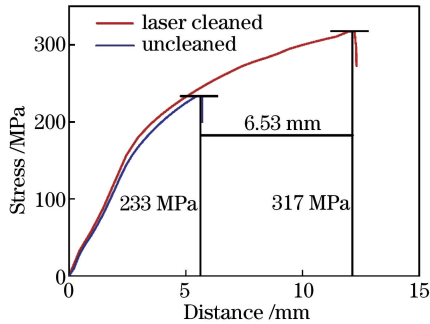


图 8 拉伸性能对比

Fig. 8 Comparison of tensile property

图 9 为拉伸断口 SEM 形貌。未清洗试样发生韧窝断裂,断口高度起伏较大,韧窝呈多边形形貌,大小波动较大;断口中分布着 10~20 μm 大小的球状孔洞,这些球状气孔在拉伸过程中缺陷易形成应力集中,产生裂纹,使得焊缝整体拉伸强度较差;孔洞内部含有杂质成分,这可能是因为焊接过程中表面氧化膜破碎进入熔池,产生气孔缺陷,氧化膜碎片形成杂质成分。

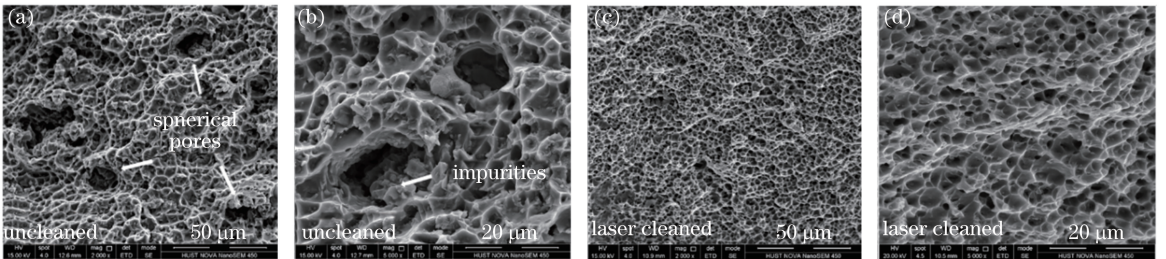


图 9 焊接接头断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of weld joints

激光清洗后的试样同样发生韧窝断裂,但断口高度起伏较小,韧窝呈大小均匀的椭圆形,断口内未见明显气孔缺陷,这表明在拉伸过程中不易发生应力集中,使得拉伸强度较高。综上,激光清洗能够有效地降低铝合金表面氧含量,去除表面氧化膜,提高铝合金激光焊接接头力学性能,减少气孔缺陷。

4 结 论

通过研究铝合金激光清洗工艺并进行焊接质量评估,得出了以下结论:

- 1) 激光清洗可以有效降低表面氧含量,去除氧化膜。铝合金在不同激光脉宽作用下具有相同的初始阈值,激光脉宽越短,清洗窗口越宽,氧化阈值越高。
- 2) 铝合金氧化膜剥除过程中主要有两种机制,一种是条纹缺陷内部空气及水分的爆破机制,另一种是热应力剥离。条纹爆破阈值较低,但剥除不彻底;热应力阈值较高,可以整面剥除。
- 3) 通过对比激光清洗与未清洗铝合金的焊接效果,发现激光清洗可以改善焊缝成形,减少接头内部缺陷,提高接头力学性能。

参 考 文 献

- [1] Witik R A, Payet J, Michaud V, *et al.* Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications[J]. *Composites: Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(11): 1694-1709.
- [2] Huang R, Riddle M, Graziano D J, *et al.* Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1559-1570.
- [3] Çam G, Mistikoglu S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1936-1953.
- [4] Prabhu T R. An overview of high-performance aircraft structural Al alloy-AA7085[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 28(7): 909-921.
- [5] Cai Hua, Kong Xiaofang, Xiao Rongshi. Effect of surface status on microstructures and solidification cracking susceptibility in laser beam welding of 2524 aluminum alloy[J]. *Chinese J lasers*, 2013, 40(2): 0203002.
蔡华, 孔晓芳, 肖荣诗. 表面状态对 2524 铝合金激光焊接组织和结晶裂纹的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203002.
- [6] Chen K, Yang W X, Xiao R S. Direct laser welding of an Al-Li alloy plate without prior surface cleaning[J]. *Lasers in Engineering*, 2011, 22(5): 361-369.
- [7] Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(11): 1050-1054.
王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(11): 1050-1054.
- [8] Li Wei. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [9] Arnold N, Schrems G, Muehlberger T, *et al.* Dynamic particle removal by nanosecond dry laser cleaning: theory[C]. *SPIE*, 2002, 4426: 340-346.
- [10] Buccolieri G, Nassisi V, Buccolieri A, *et al.* Laser cleaning of a bronze bell[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 272(5): 55-58.
- [11] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, *et al.* Laser cleaning of steel for paint removal[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 249-253.
- [12] Wang Z, Zeng X, Huang W. Parameters and surface performance of laser removal of rust layer on A3 steel[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2003, 166(1): 10-16.
- [13] Ye Yayun, Qi Yang, Qin Lang, *et al.* Laser cleaning of contaminations on the surface of stone relics[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0903005.
叶亚云, 齐扬, 秦朗, 等. 激光清除石质文物表面污染物[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0903005.
- [14] Dimogerontakis T, Oltra R, Heintz O. Thermal oxidation induced during laser cleaning of an aluminum-magnesium alloy[J]. *Applied Physics A*, 2005, 81(6): 1173-1179.
- [15] 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.
- [16] Alshaer A W, Li L, Mistry A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminum alloy for automotive component manufacture[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64(4): 162-171.
- [17] Lin J, Cetinkaya C. Potential thermo-mechanical substrate damage in nanoparticle removal with pulsed lasers [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003, 17(1): 91-113.

- [18] Song Feng, Zou Wanfang, Tian Bin, *et al.* Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q-switched short pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11): 1577-1581.
宋峰, 邹万芳, 田彬, 等. 一维热应力模型在调 Q 短脉冲激光除漆中的应用[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1577-1581.
- [19] Deng Caiqin. Causes of streak defect on 6063 aluminum alloy profile and measures to prevent it[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2002, 30(10): 21-22.
邓彩琴. 6063 铝合金型材条纹缺陷产生原因及预防措施[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(10): 21-22.
- [20] Zhang Yan. Laser cleaning technology and application of metal surface[J]. Ome Information, 2008, 25(8): 22-26.
张岩. 金属表面的激光清洗技术及应用[J]. 光机电信息, 2008, 25(8): 22-26.