

激光与光电子学进展

激光除漆工艺及其对 KMN 钢表面组织性能的影响

邓德伟^{1,2*}, 赵祥路¹, 黄治治², 汪峻宇¹, 杨树华², 张勇², 陈彬³¹大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116024;²沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869;³江南工业集团有限公司, 湖南 湘潭 411207

摘要 采用波长 1064 nm 的脉冲光纤激光器对 KMN 钢表面环氧有机硅漆进行清洗, 以搭接率和能量密度作为变量, 使用单次清洗和二次清洗两种工艺, 探究了激光清洗参数对基体表面粗糙度和重新涂覆漆层附着力的影响, 并分析了清洗后基体表面维氏硬度随清洗参数变化的规律和原因。研究表明, 在能量密度为 4.73 J/cm² 和搭接率为 0.4~0.7 参数下, 单次清洗漆层难以完全清除干净, 需进行二次清洗以去除残余漆块。当第二次清洗搭接率小于 0.5 且能量密度小于 4.25 J/cm² 时, 基体表层金属熔化导致表面粗糙度小幅下降, 但在基体粗糙度高于 0.6 时, 不会影响重新涂覆漆层的附着力。当第二次清洗搭接率大于 0.5 且能量密度大于 4.25 J/cm² 时, 基材表面熔化和重新凝固引入拉应力, 并发生相变和晶粒长大, 导致清洗后试样表面硬度低于基材硬度。

关键词 激光技术; 激光清洗; 搭接率; KMN 钢; 粗糙度; 硬度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220720

Laser Cleaning Process for Paint Removal and Its Effect on Surface Microstructures and Properties of KMN Steel

Deng Dewei^{1,2*}, Zhao Xianglu¹, Huang Zhiye², Wang Junyu¹, Yang Shuhua², Zhang Yong², Chen Bin³¹Liaoning Province Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;²Shenyang Blower Group Corporation, Shenyang 110869, Liaoning, China;³Jiangnan Industries Group Co., Ltd., Xiangtan 411207, Hunan, China

Abstract A pulsed fiber laser with a wavelength of 1064 nm is used to clean the epoxy silicone paint on the surface of KMN steel. The overlap ratio and energy density are selected as variable parameters, and the samples are cleaned in one pass and two passes under different parameters. The effects of laser cleaning parameters on the substrate surface roughness and the adhesion of the recoating paint are investigated, as well as the trends and reasons for the variation of substrate surface Vickers hardness with the cleaning parameters. The results show that with an energy density of 4.73 J/cm² and an overlap ratio of 0.4~0.7, the paint cannot be removed by a single pass cleaning, and a second pass cleaning is required to remove the residual paint chips. When the overlap ratio of the second cleaning is less than 0.5 and the energy density is less than 4.25 J/cm², the substrate surface melting causes a minor decrease in the surface roughness, but the adhesion of the recoating paint is unaffected at surface roughness of more than 0.6. When the overlap ratio of the second cleaning is greater than 0.5 and the energy density is greater than 4.25 J/cm², the surface tensile stress caused by melting and solidification of the substrate surface, as well as the phase change and grain growth in the heat-affected zone, resulting in a lower hardness on the substrate surface compared to the interior.

Key words laser technique; laser cleaning; overlap ratio; KMN steel; roughness; hardness

收稿日期: 2022-02-11; 修回日期: 2022-03-12; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-28

基金项目: 辽宁重大装备制造协同创新中心基金(DUT2017031)、高端控制阀产业技术协同创新中心基金(2018WZ003)

通信作者: *cailiaoqingqibing@163.com

1 引言

金属表面漆层可有效避免基体发生腐蚀或磨损,而长期使役的漆层会发生老化、破裂或脱落,在进行部分补漆或整体重新涂装时,需要去除原有漆层。传统除漆方法有手工或机械打磨以及喷砂等,但存在劳动强度大、环境污染大以及严重损伤基体等问题^[1]。激光清洗作为一种新型清洗技术,与传统的机械清洗相比,具有清洗效率高、对环境和操作人员友好、可精准控制的显著优点^[2],在航空航天^[3]、核工业^[4]、微电子^[5]、海洋^[6]等领域已有广泛应用。在激光清洗除漆的应用方面,清除飞机蒙皮已经得到了实际的应用,并获得了较好的效果^[7]。

在激光清洗除漆的机理研究方面,赵海朝等^[8]对激光清洗铝合金漆层的作用机制和能量密度的影响进行了研究,认为铝合金表面漆层的清除是多种机制耦合作用的结果,包括热燃烧、高温分解和等离子体冲击 3 种机制。Ünalđi 等^[9]研究了高压激光诱导冲击波在水中的机械剥离过程。而 Lu 等^[10]利用有限元模拟阐明了热应力是纳秒激光脉冲脱漆的主要机制之一。在工艺研究方面:邱太文等^[11]使用纳秒脉冲激光对 2024 铝合金表面厚度约为 150 μm 的环氧基底漆进行激光清洗;郭召恒等^[12]采用纳秒脉冲激光器对 HT250 铸铁表面水性防锈漆层进行激光清洗试验,通过参数优化均得到了良好的除漆效果。关于激光清洗对基材表面组织性能的影响:Shamsujjoha 等^[13]对激光清洗后基材表面粗糙度进行测量,发现清洗后粗糙度总体上没有显著变化,重新涂覆漆层的附着力与原来一致;Zhu 等^[7]应用激光清洗去除飞机蒙皮,发现激光清洗对基材表面的摩擦磨损性能和显微硬度无明显影响;Li 等^[14]利用激光清洗去除 Q345 钢表面漆层后发现,基体表面熔化和快速冷却发生晶粒细化,导致硬度上升。也有研究人员探究了激光清洗对 316L 不锈钢^[15]和船舶板材 10CrNi3MoV 钢^[16]表面硬度的影响,均发现硬度下降现象,但并未详细指出原因。

KMN 钢是一种低合金高强度钢种,综合性能好,常用于大型离心式压缩机叶轮的制造^[17]。但 KMN 钢易锈蚀,通常需要涂装防锈油/漆进行防护,使用化学方法除漆时对环境及基材均有不利影响。随着激光清洗应用领域的逐渐扩展,激光除漆工艺以及清洗机理研究取得了许多成果。但关于激光清洗对 KMN 钢表面环氧有机硅漆的去除工艺,以及激光清洗对 KMN 钢表面组织性能的影响却鲜有报道。特别是激光清洗对基材硬度影响,有些研究人员给出了不同的结论,但并未指明原因。本文采用脉冲光纤激光器,对 KMN 表面涂覆的环氧有机硅漆进行激光清洗,对于较厚的漆层,以单次清洗实现漆层的完全清除需要较高能量密度的参数,通常容易导致基体表面发生烧蚀。因此,本文在确定单次清洗的除漆能力后,尝试采用二次清

洗工艺以改善基体表面烧蚀的情况。同时,对第二次激光清洗后基材表面粗糙度和重新涂覆漆层的附着力进行测试和评定,确定激光清洗后重新涂覆漆层的可行性,并对基体表面硬度变化的原因进行了解释。

2 试验材料和方法

本研究采用 RFL-P200 型脉冲光纤激光器进行激光清洗,激光器详细参数如表 1 所示。

表 1 设备参数信息

Table 1 Device parameter information

Parameter	Value
Power /W	0-200
Wavelength /nm	1064
Focal length /mm	139
Laser scanning width /mm	100
Pulse width /ns	100 \pm 10
Pulse frequency /kHz	10-50
Laser spot size (rectangle) /($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	(460 \pm 10) \times (460 \pm 10)
Laser scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1000-15000
Manipulator movement speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	0-100

图 1(a)给出了光纤激光器清洗系统照片,激光头固定于 FANUC R30i 机械臂上,将激光输出头内振镜扫描方向定义为 Y 方向,水平面内垂直于扫描方向定义为 X 方向,竖直方向为 Z 方向。光斑在 Y 方向的运动由振镜控制,在 X 方向和 Z 方向上的运动由机械臂控制。激光光斑为矩形光斑,经过整形后光斑内部能量分布均匀,光斑直角边与光斑扫描方向呈 20° 夹角。光斑在清洗表面的运动轨迹为“Z”字型,示意图如图 1(b)所示。

光斑在 X 方向的搭接率 η_x 与振镜扫描速度、幅宽及机械手臂移动速度有关,Y 方向的搭接率 η_y 与振镜的扫描速度和脉冲频率有关,其计算公式分别为

$$\eta_x = 1 - \frac{L_x}{d} = 1 - \frac{bv_x}{dv_y}, \quad (1)$$

$$\eta_y = 1 - \frac{L_y}{d} = 1 - \frac{v_y}{fd}, \quad (2)$$

式中: L_x 和 L_y 分别为X和Y方向相邻光斑间距; v_x 和 v_y 分别为机械手移动速度和振镜扫描速度; b 为激光扫描幅宽(100 mm); f 为脉冲频率; d 为光斑投影宽度(本试验采用矩形光斑,由于设备限制,光斑与横向移动方向呈 20° 夹角,故 $d = \sqrt{2} l \times \cos 25^\circ$, l 为光斑边长)。试验过程中保持 η_x 和 η_y 相等。

能量密度 I 的计算公式为

$$I = \frac{P}{fS} = \frac{P}{f l^2}, \quad (3)$$

式中: P 为激光功率; S 为光斑作用面积。

本文选用不同光斑搭接率(0.5、0.6、0.7、0.8、0.85、0.895)和不同光斑能量密度(1.42、1.89、2.36、

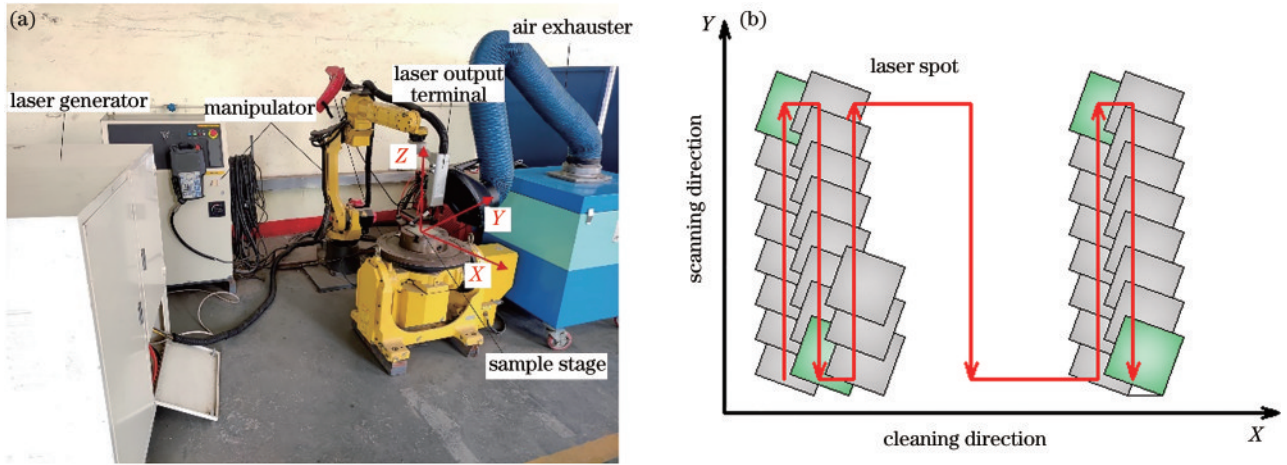


图 1 光纤激光器清洗系统和光斑扫描路径。(a)激光清洗系统;(b)扫描路径

Fig. 1 Fiber laser cleaning system and scanning path of laser spot. (a) Laser cleaning system; (b) scanning path

2.84、3.31、3.78、4.25、4.73 J/cm² 进行激光清洗除漆试验,并分析工艺参数对清洗效果和基材的影响。清洗工艺分为单次清洗和二次清洗。单次清洗时,设定能量密度为 4.73 J/cm²,搭接率在 0.6~0.895 范围变化。二次清洗时,设定第一次清洗参数为能量密度 4.73 J/cm²,搭接率 0.6,第二次清洗分两种方式,一种是恒定搭接率为 0.6,能量密度在 1.42~4.73 J/cm² 范围变化,另一种是恒定能量密度为 4.73 J/cm²,搭接率在 0.2~0.6 范围变化。

试验选用轧制 KMN 钢板作为基板,其合金成分如表 2 所示,首先对钢板表面进行机械打磨使表面平整且粗糙度一致,然后在打磨表面涂覆环氧有机硅

漆,漆层厚度约为 (35±5) μm,漆层成分如表 3 所示。用电火花线切割将试板切成面积为 20 mm×10 mm 的小试块进行激光清洗试验。抛光后使用体积分数 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀观察金相组织,采用 Nikon MA100 光学显微镜(OM)和 Zeiss SUPRA 55 场发射扫描电镜(SEM)对清洗后试样表面微观形貌进行观察,借助 Olympus OLS4000 3D 激光共聚焦显微镜(LSCM)对激光清洗后试样表面粗糙度进行测试,应用 MVC-1000B 型维氏硬度仪对清洗后基体的表面硬度进行测试,并通过 Empyrean X 射线衍射仪(XRD)对清洗后基体表面残余应力进行测试计算。

表 2 KMN 钢合金元素成分

Table 2 Element composition of KMN steel

Element	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	S	P
Mass fraction / %	95.69	0.15	0.21	0.59	2.33	0.95	0.12	0.01	0.017

表 3 环氧有机硅漆元素成分

Table 3 Elemental composition of epoxy silicone paint

Element	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Cu	Ti	Fe
Mass fraction / %	39.50	44.10	5.17	0.19	0.47	8.03	0.12	2.26	0.29

3 结果与讨论

3.1 单次清洗搭接率对除漆厚度及表面形貌的影响

为确定激光光斑搭接率对漆层去除厚度的影响,选择厚度(70±5) μm 的较厚漆层,在设备最高能量密度 4.73 J/cm² 下,改变光斑搭接率,并进行测试。图 2 为漆层去除厚度随搭接率变化曲线,可以看出,在搭接率 0.4~0.7 范围内,去除厚度随搭接率近似呈线性变化。在搭接率为 0.6 和能量密度 4.73 J/cm² 时,清除漆层厚度为(40±3) μm,理论上可实现对 35 μm 厚待清洗实际漆层的去除。

为了研究搭接率对激光除漆试样表面形貌的影

响,选择与实际应用漆层厚度相近的(35±5) μm 厚漆层试样进行不同搭接率下清洗后的表面形貌观察。图 3 为激光能量密度 4.73 J/cm² 时,不同光斑搭接率下清洗一次后的表面形貌。如图 3(a)所示,当搭接率为 0.5 时,宏观可见大量残余漆层,金相显微镜下可以看到形状不规则的大块残余漆层。当搭接率大于等于 0.6 时,清洗后试样宏观可见表面有明显金属光泽和原始基体的打磨痕迹,但在图 3(b)金相显微照片中依然有尺寸约 50~100 μm 的残余油漆块。当搭接率为 0.7 时,残余油漆块消失,但是出现许多 10~20 μm 点状残余。当搭接率升至 0.8 时,基材表面原始打磨划痕开始减少。当搭接率升至最高 0.895 时,表

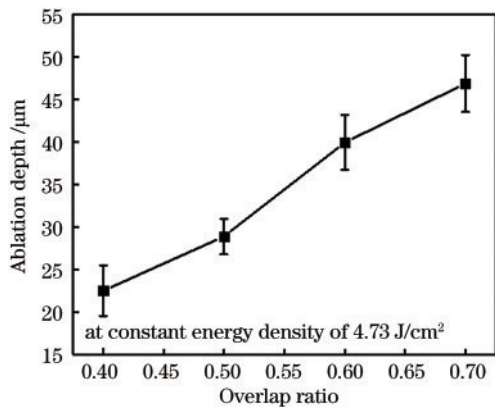


图2 能量密度为 4.73 J/cm^2 时,激光去除厚度随搭接率的变化
Fig. 2 Variation of ablation depth with overlap ratio at energy density of 4.73 J/cm^2

面已变得较为平整,磨痕几乎消失。另外,清洗后基材表面散落大量漆层碎屑。

通过以上除漆试样表面的微观观察可以推断,激

光清洗除漆是多种机制耦合作用的结果,除烧蚀作用外^[8],通常在热输入较高时材料还会被离子化,产生高温高压的激光等离子体电离气化漆层^[10],等离子体膨胀形成冲击波会破碎漆层,从而实现大范围清除^[18]。在清洗过程中,当冲击波作用力高于漆层内分子键合力时,分子键被破坏^[19],漆层受冲击波作用而剥离、飞溅形成漆层碎屑。在光斑搭接率较低时,局部区域漆层经受冲击波作用且未被完全烧蚀,清洗后的试样表面仍残留部分漆块。随着搭接率的增大表面热积累增加,形成的激光等离子体增多,等离子体与激光共同烧蚀残余漆层,导致残余油漆块数量逐渐减少并消失。另外,高温高压的等离子体作用在基材表面,同时基材表面也会吸收激光辐照能量而升温,随着搭接率的增大表面热累积增强,基材表面发生熔化并导致磨痕逐渐消失。

图4显示了能量密度为 4.73 J/cm^2 时,光斑搭接率分别为 0.7 和 0.8 清洗后试样的扫描电镜观察结果,

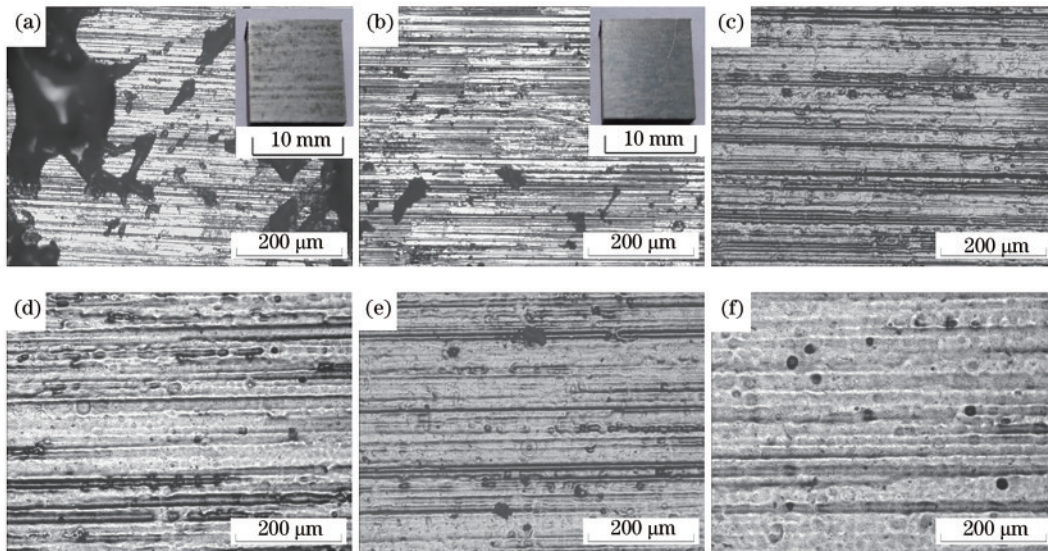


图3 能量密度为 4.73 J/cm^2 时,不同搭接率下单次清洗后试样表面形貌。(a)搭接率为 0.5;(b)搭接率为 0.6;(c)搭接率为 0.7;(d)搭接率为 0.8;(e)搭接率为 0.85;(f)搭接率为 0.895
Fig. 3 Surface morphology after single pass cleaning with different overlap ratios at energy density of 4.73 J/cm^2 . (a) Overlap ratio is 0.5; (b) overlap ratio is 0.6; (c) overlap ratio is 0.7; (d) overlap ratio is 0.8; (e) overlap ratio is 0.85; (f) overlap ratio is 0.895

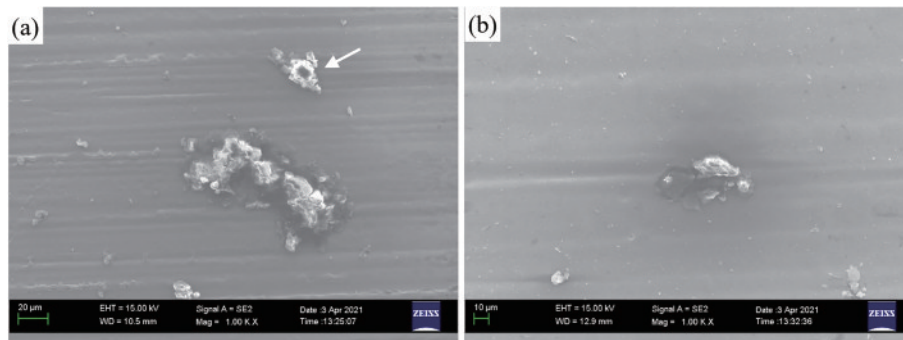


图4 能量密度为 4.73 J/cm^2 时,单次清洗后试样表面 SEM 图像。(a)搭接率为 0.7;(b)搭接率为 0.8
Fig. 4 SEM images of sample surface after single pass cleaning at energy density of 4.73 J/cm^2 . (a) Overlap ratio is 0.7; (b) overlap ratio is 0.8

可以看出,相较于搭接率 0.7,搭接率 0.8 清洗后的表面更加光滑,磨痕较少。表 4 为清洗表面点状残余物 [如图 4(a)中箭头所示]的能谱仪(EDS)测试结果,其主要元素成分为 C、O、Mg、Ca 等,可以确定为油漆残余。由能量密度 4.73 J/cm^2 下不同搭接率漆层去除厚度的试验结果(图 2)可知,在搭接率分别为 0.6 和 0.7 时,单次激光清洗分别可以去除 $(40 \pm 3) \mu\text{m}$ 和 $(52 \pm 2) \mu\text{m}$ 厚的漆层。但是,从图 4(b)可以看出,在能量密度 4.73 J/cm^2 和搭接率 0.8 条件下,漆层依然难以彻底清洗干净。

表 4 表面残余物 EDS 结果
Table 4 Surface residue EDS results

Element	C	O	Mg	Si	Ca	Ti	Fe
Weight fraction /%	62.62	19.34	4.36	0.49	9.52	2.37	1.31
Atomic fraction /%	75.24	17.45	2.59	0.25	3.43	0.71	0.34

3.2 二次清洗工艺对清洗效果的改善

在能量密度为 4.73 J/cm^2 条件下进行单次激光清洗,虽然点状油漆残余随搭接率增大而越来越少,但仍难以完全清除。当搭接率增至 0.8 后,表面已出现较为严重的烧蚀熔化。为避免在基体烧蚀的情况下进行漆层的彻底清洗,尝试采用二次清洗的方式。将能量密度 4.73 J/cm^2 和搭接率 0.6 作为第一次清洗参数,以保证整体漆层的大部分去除。第二次清洗的目的是实现局部残余漆层的彻底清除,故选择较低热输入的参数。

图 5 分别为机械打磨后基材表面形貌,以及在低热输入参数进行第二次清洗时,高搭接率低能量密度参数下和低搭接率高能量密度参数下清洗后的表面形貌照片。图 5(a)为机械打磨后基材表面形貌,可见均匀的平行加工沟槽。如图 5(b)所示,在高搭接率 0.6 和低能量密度 1.42 J/cm^2 条件下进行第二次清洗后,

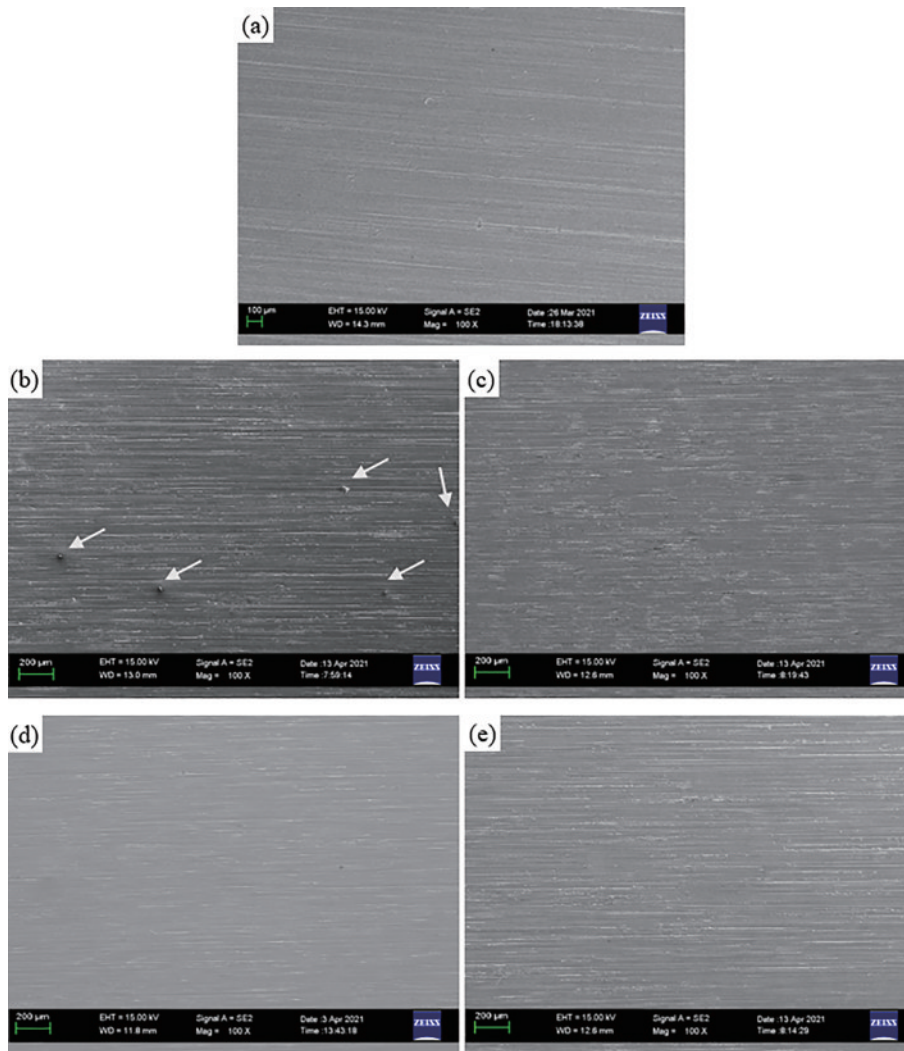


图 5 基材和不同参数下第二次清洗后试样的表面形貌。(a)打磨后基材表面形貌;(b)搭接率为 0.6,能量密度为 1.42 J/cm^2 ; (c)搭接率为 0.6,能量密度为 1.89 J/cm^2 ; (d)搭接率为 0.2,能量密度为 4.73 J/cm^2 ; (e)搭接率为 0.3,能量密度为 4.73 J/cm^2
Fig. 5 Surface morphologies of substrates and samples after second pass cleaning at different parameters. (a) Surface morphology of substrate after grinding;(b) overlap ratio is 0.6 and energy density is 1.42 J/cm^2 ; (c) overlap ratio is 0.6 and energy density is 1.89 J/cm^2 ; (d) overlap ratio is 0.2 and energy density is 4.73 J/cm^2 ; (e) overlap ratio is 0.3 and energy density is 4.73 J/cm^2

仍可见较多的 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 点状残余(箭头所示)。从图 5(c)可以看出,当能量密度增大至 $1.89\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,可以获得无残余漆层的较好清洗效果。而在高能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 和低搭接率 0.2、0.3 条件下进行第二次清洗,均可将基体表面的漆层完全清除干净,如图 5(d)、(e)所示。

由于二次清洗增大了基体的激光辐照次数,为考

察基体表面是否发生氧化,选择较高搭接率 0.6 和较高能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 参数清洗两次后的试样进行 SEM 能谱分析,如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,经二次清洗后基体表面磨痕有明显的熔化特征,表面变得更加光滑平整。从图 6(b)能谱测试结果可以看出,基体表面以 Fe 和 Cr 元素为主,未出现显著的 O 元素特征峰,表明二次清洗后基体表面未发生严重氧化。

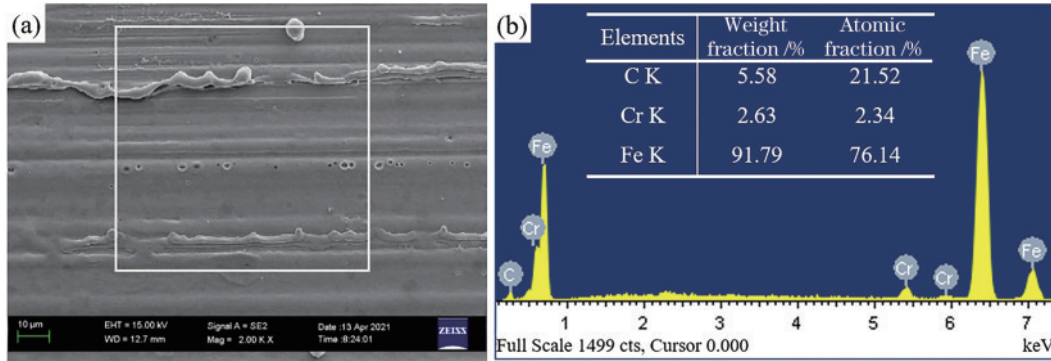


图 6 搭接率 0.6 和能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 条件下进行第二次清洗试样的 SEM 图像和 EDS 结果。(a) SEM 图像; (b) EDS 结果
Fig. 6 SEM image and EDS result of the sample after second pass cleaning at overlap ratio of 0.6 and energy density of $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$.
(a) SEM image; (b) EDS result

3.3 激光清洗对基体表面粗糙度和重新涂覆漆层附着力的影响

由于激光清洗造成了基体表面重熔,会引起基体表面粗糙度的变化,而粗糙度降低会减小金属与漆层的接触面积,同时减少漆层的锚固点,故表面粗糙度的变化可能影响到重新涂覆漆层与基体间的粘附力^[20]。本小节针对第二次清洗试验中恒定搭接率 0.6 且能量密度在 $1.89\sim 4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 范围内变化,以及恒定能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 且搭接率在 0.2~0.6 范围内变化的两组样品进行粗糙度变化分析,并重新涂覆漆层进行基体粘附力测试。其中,二次清洗试样的第一次清洗参数均为搭接率 0.6 和能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。经机械打磨的 KMN 试板,很难保证表面不同位置粗糙度完全均匀一致,因此在激光清洗前后分别对基体试样表面粗糙度进行测量,并借助粗糙度差值来准确表征不同参数清洗后粗糙度的变化。

图 7 为不同参数下第二次清洗前后试样粗糙度变化曲线。如图 7(a)、(b)所示,在恒定搭接率 0.6 条件下进行第二次清洗,结果显示:当能量密度低于 $3.31\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,粗糙度差值无明显变化;当能量密度高于 $3.31\ \text{J}/\text{cm}^2$ 后,随着能量密度增大,清洗前后粗糙度差值逐渐增大,并有快速上升趋势;当能量密度恒定为 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ [图 7(c)、(d)] 时,粗糙度差值随搭接率增大而稳定升高。由此可见,随着能量密度和搭接率的升高,激光对清洗表面的热输入越来越高,表面磨痕沟槽发生熔化的程度不断增大,从而造成粗糙度的降幅越来越大。

对上述参数清洗二次后的试样重新涂覆漆层,根

据国标《GB 9286—1998 色漆和清漆漆膜的划格试验》应用百格法检测漆层的附着力。如图 8 所示,在恒定搭接率 0.6 条件下进行第二次清洗,结果显示:当能量密度小于等于 $3.78\ \text{J}/\text{cm}^2$ (对应清洗后基体表面粗糙度为 0.601) 时,漆层均未出现明显脱落;当能量密度为 $4.25\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,开始出现脱落迹象 [图 8(e)]。如图 9 所示,在恒定能量密度 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 条件下进行第二次清洗,结果显示:当搭接率小于等于 0.5 (对应清洗后基体表面粗糙度为 0.599) 时,漆层均未出现明显脱落;当搭接率升高到 0.6 (对应清洗后基体表面粗糙度为 0.543) 时,漆层脱落现象明显 [图 9(e)]。故第二次清洗采用高能量密度和高搭接率时,虽然会导致清洗后基体表面粗糙度下降,但只要清洗后表面粗糙度高于 0.6,附着力依然满足要求。

3.4 激光清洗对基体表面硬度的影响

为探究激光清洗参数对基体表面力学性能的影响,对以不同能量密度和搭接率第二次清洗的试样进行表面硬度分析。图 10(a)给出了搭接率为 0.6 时表面硬度随能量密度的变化曲线,可以看出:当能量密度为 $1.42\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,清洗后表面硬度未发生明显变化;当能量密度在 $1.42\sim 2.37\ \text{J}/\text{cm}^2$ 之间时,激光清洗后表面硬度呈下降趋势,且硬度值逐渐接近于内部基体;当能量密度在 $2.37\sim 3.31\ \text{J}/\text{cm}^2$ 之间时,硬度值稳定在基体内部硬度值附近;当能量密度高于 $3.31\ \text{J}/\text{cm}^2$ 后,随能量密度增大硬度迅速下降;当能量密度为 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,硬度值下降至 333 HV。图 10(b)为能量密度密度为 $4.73\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时的表面硬度随搭接率变化曲线,可以看出:当搭接率在 0.2~0.4 之间时,表

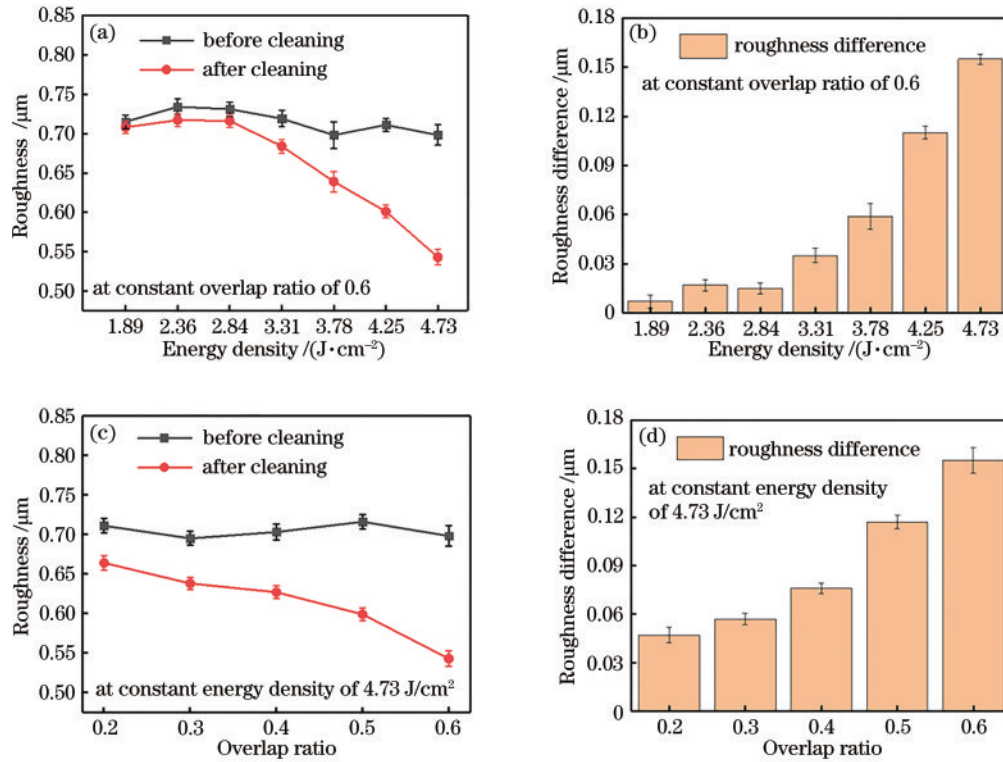


图 7 不同能量密度和搭接率下第二次清洗前后粗糙度及粗糙度差值变化。恒定搭接率为 0.6, 清洗前后 (a) 粗糙度和 (b) 粗糙度差值随能量密度变化; 恒定能量密度为 $4.73 \text{ J}/\text{cm}^2$, 清洗前后 (c) 粗糙度和 (d) 粗糙度差值随搭接率变化

Fig. 7 Variation of roughness and roughness difference after second pass cleaning under different energy densities and overlap ratios. Variation of (a) roughness and (b) roughness difference with energy density at overlay ratio of 0.6; variation of (c) roughness and (d) roughness difference with overlap ratio at energy density of $4.73 \text{ J}/\text{cm}^2$

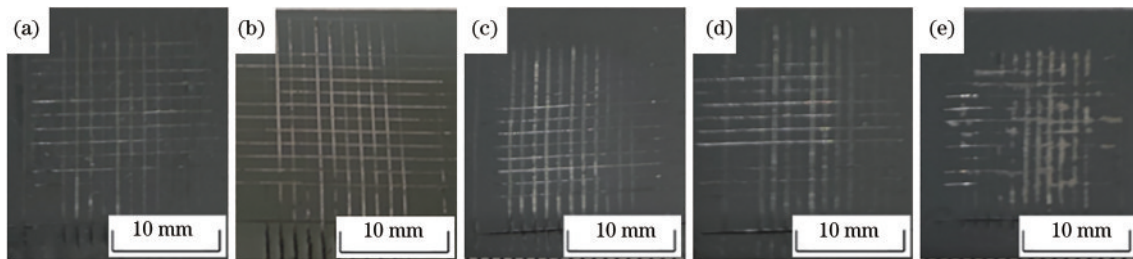


图 8 在恒定搭接率 0.6 条件下, 以不同能量密度进行第二次清洗并重新涂覆漆层后百格法测试结果。(a) $1.89 \text{ J}/\text{cm}^2$; (b) $2.84 \text{ J}/\text{cm}^2$; (c) $3.31 \text{ J}/\text{cm}^2$; (d) $3.78 \text{ J}/\text{cm}^2$; (e) $4.25 \text{ J}/\text{cm}^2$

Fig. 8 Cross-cut test results of the recoating paint after second pass cleaning at constant overlap ratio of 0.6 and different energy densities. (a) $1.89 \text{ J}/\text{cm}^2$; (b) $2.84 \text{ J}/\text{cm}^2$; (c) $3.31 \text{ J}/\text{cm}^2$; (d) $3.78 \text{ J}/\text{cm}^2$; (e) $4.25 \text{ J}/\text{cm}^2$

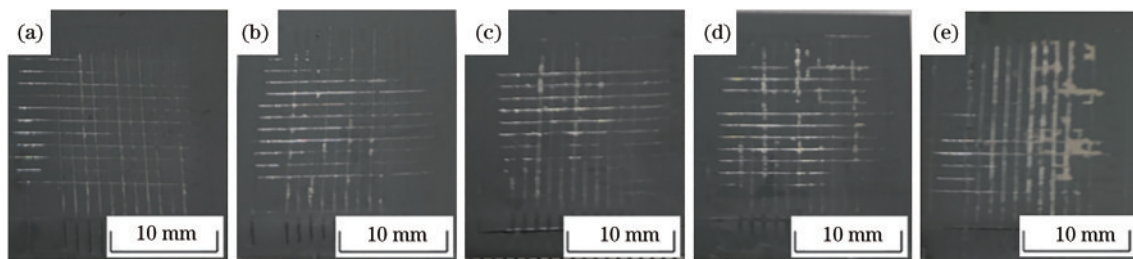


图 9 在恒定能量密度 $4.73 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时以不同搭接率进行第二次清洗并重新涂覆漆层后百格法测试结果。(a) 搭接率为 0.2; (b) 搭接率为 0.3; (c) 搭接率为 0.4; (d) 搭接率为 0.5; (e) 搭接率为 0.6

Fig. 9 Cross-cut test results of the recoating paint after second pass cleaning at constant energy density of $4.73 \text{ J}/\text{cm}^2$ and different overlap ratios. (a) Overlap ratio is 0.2; (b) overlap ratio is 0.3; (c) overlap ratio is 0.4; (d) overlap ratio is 0.5; (e) overlap ratio is 0.6

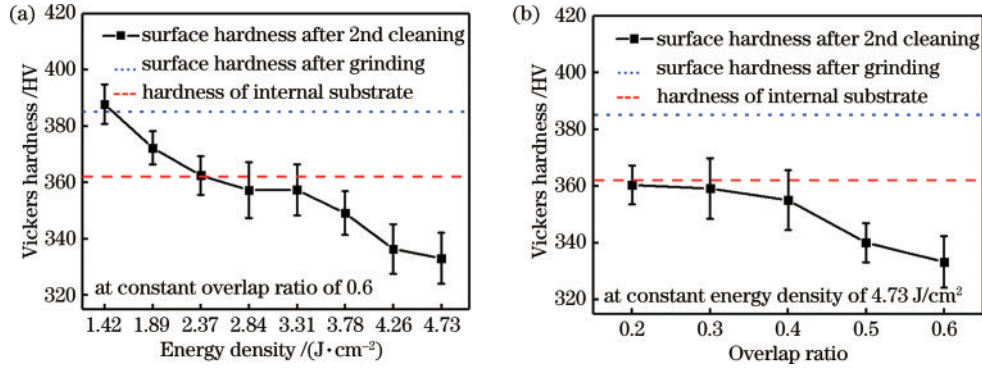


图 10 不同能量密度和搭接率下第二次清洗后试样表面硬度变化。(a)搭接率恒定为 0.6 时,表面硬度值随能量密度的变化;(b)能量密度恒定为 4.73 J/cm²时,表面硬度值随搭接率的变化

Fig. 10 Variation of surface hardness under different energy densities and overlap ratios after second pass cleaning. (a) Variation of surface hardness with energy density at constant overlap ratio of 0.6; (b) variation of surface hardness with overlap ratio at constant energy density of 4.73 J/cm²

面硬度值下降幅度不大,硬度值与内部基体相近;当搭接率在 0.4~0.6 之间时,表面硬度值下降幅度较大。

由图 10 可知,激光清洗参数不同会导致清洗后表面硬度存在较大差异。为探究激光清洗后基体表面硬度变化的原因,对清洗后基体表面进行金相组织观察。图 11 给出了搭接率为 0.6 时,不同能量密度下第二次清洗后漆层试样基体表面金相组织照片,随着激光清洗能量密度的增大,贝氏体中马氏体含量逐渐减少,针状铁素体转变为等轴状且尺寸逐渐增大,组织转化为

粒状贝氏体^[21]。图中,M 为马氏体,AF 为针状铁素体,GB 为粒状贝氏体。

图 11 中相应参数下清洗后基体表面的晶粒尺寸测试结果如图 12 所示,结合图 10 清洗后试样表面硬度变化可知,晶粒尺寸变化趋势与硬度变化趋势呈较强的负相关性,随着晶粒尺寸增大硬度逐渐降低。因基板为轧制态且表面经磨削加工,存在一定的塑性变形引起晶粒细化,但在清洗时表面金属吸收激光辐照热量发生再结晶和晶粒长大,最终导致清洗后试样表面硬度低于内部基材硬度。

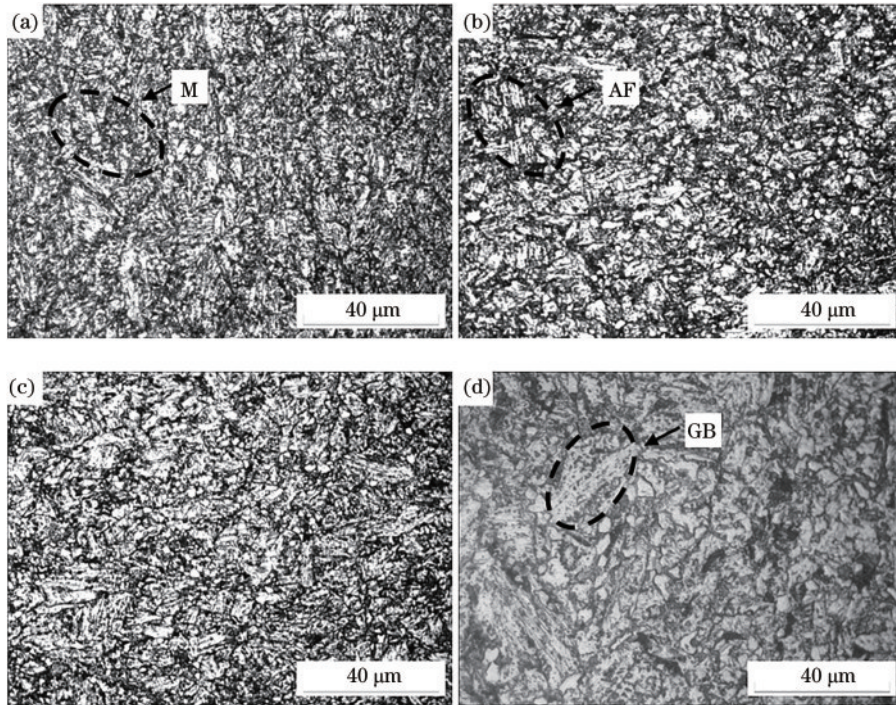


图 11 搭接率恒定为 0.6,不同能量密度下第二次清洗后基体表面金相组织。(a) 能量密度 1.89 J/cm²; (b) 能量密度 2.84 J/cm²; (c) 能量密度 3.78 J/cm²; (d) 能量密度 4.73 J/cm²

Fig. 11 Metallographic structure of substrate surfaces after second pass cleaning at overlap ratio of 0.6 and different energy densities. (a) energy density of 1.89 J/cm²; (b) energy density of 2.84 J/cm²; (c) energy density of 3.78 J/cm²; (d) energy density of 4.73 J/cm²

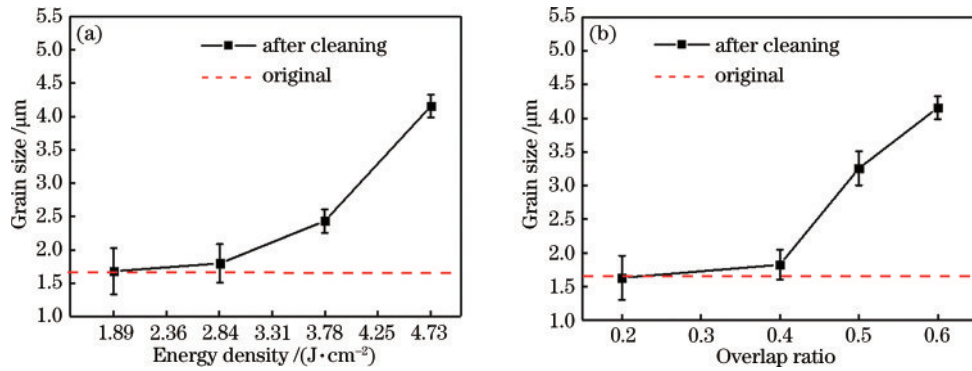


图 12 不同能量密度和搭接率下第二次清洗后试样表面晶粒尺寸变化。(a)搭接率恒定为 0.6 时,晶粒尺寸随能量密度变化;(b)能量密度恒定为 4.73 J/cm^2 时,晶粒尺寸随搭接率变化

Fig. 12 Variation of surface grain size under different energy densities and overlap ratios after second pass cleaning. (a) Variation of grain size with energy density at constant overlap ratio of 0.6; (b) variation of grain size with overlap ratio at constant energy density of 4.73 J/cm^2

3.5 激光清洗对基体表面残余应力的影响

综上所述,在较高能量密度参数下,激光清洗可使基体表面发生熔化,不仅导致材料组织形态改变,还会引起材料表面应力状态的变化,而应力状态也会对硬度测试值产生一定影响^[22]。试验用基板在涂覆漆层前进行了机械磨削加工,在表面加工过程中容易引入压应力^[23],使得表面硬度高于基材。而激光清洗过程中表面发生熔化和凝固,理论上会引入拉应力^[13],导致清洗后试样表面硬度低于基材硬度。

选择搭接率 0.6 时不同能量密度下第二次清洗试样,借助 X 射线衍射方法进行表面残余应力测试。由于板材轧制和后续表面机械打磨过程导致表层晶粒产生一定织构,造成晶粒衍射强度发生变化^[24]。激光能量密度越低,表面熔化和重新凝固的基体金属越少,消除的织构越少,初始织构对应力测试产生的影响就越大,这种情况会导致衍射峰数量降低。当激光能量密度分别为 3.78 J/cm^2 和 3.31 J/cm^2 时,因衍射峰数量

少不能拟合而无法计算残余应力;当激光能量密度分别为 4.73 J/cm^2 和 4.25 J/cm^2 时,拟合计算得到试样表面残余拉应力分别为 (688.3 ± 80) MPa 和 (585.6 ± 70.8) MPa。由此可知,激光清洗过程中引入了拉应力,且在能量密度较高时因再结晶使得基板表面织构大幅降低。

材料表面的应力状态,还可根据维氏硬度压痕法进行判断^[25-26]。图 13(a)~(c)分别给出了无残余应力状态的基体内部压痕形貌、存在压应力的机械打磨表面压痕形貌,以及存在拉应力的搭接率 0.6 和能量密度 4.73 J/cm^2 下第二次清洗后压痕形貌,并附各自对应的压痕形状原理示意图。当无应力存在时,硬度压痕的形状为规则的菱形;当表面存在压应力时,硬度压痕的 4 条边呈向外凸的弧形;当表面存在拉应力时,压痕 4 条边呈向内凹陷的弧形。如图 13 所示,从压痕形貌也可以反映出不同条件基体中的应力状态。

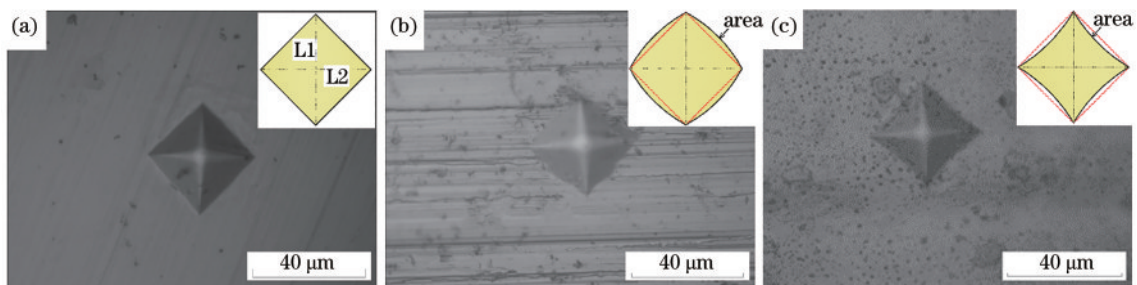


图 13 不同应力状态下基体压痕形貌及其示意图。(a)基材内部无应力状态;(b)磨削加工后表面压应力状态;(c)激光清洗后表面拉应力状态

Fig. 13 Indentation shape of the substrate at different stress states and corresponding schematic diagrams. (a) Stress-free state in the internal substrate; (b) compressive stress state on the grinding surface; (c) tensile stress state on the laser-cleaned surface

4 结 论

本文采用脉冲激光清洗去除 KMN 钢表面的环氧有机硅漆,探究了清洗工艺参数并分析了激光清洗对

基材的影响。在能量密度为 4.73 J/cm^2 和搭接率为 0.4~0.7 参数下,单次清洗难以完全清除厚度约 35 μm 的环氧有机硅漆层,需采用低能量密度和低搭接率的参数进行第二次清洗以彻底去除残余漆块。当

第二次清洗采用较低热输入参数(搭接率小于 0.5 和能量密度小于 4.25 J/cm^2)时,基体表层金属熔化导致表面粗糙度下降,但在表面粗糙度高于 0.6 时,并不影响重新涂覆漆层的附着力。当第二次清洗采用较高热输入参数(搭接率大于 0.5 和能量密度大于 4.25 J/cm^2)时,基材表面熔化和重新凝固引入拉应力,并在热影响区发生相变和晶粒长大,导致清洗后试样表面硬度低于基材硬度。

参 考 文 献

- [1] 陈晓奎. 石化设备激光清洗工艺及应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020: 2-4.
Chen X K. Study on technology and application of petrochemical equipment by laser cleaning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020: 2-4.
- [2] 贾宝申, 屈红星, 唐洪平, 等. 钛轧板表面氧化层激光清洗技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211401.
Jia B S, Qu H X, Tang H P, et al. Laser cleaning technology of oxide layer on titanium rolled plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211401.
- [3] D'Addona D M, Genna S, Giordano A, et al. Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 464-469.
- [4] 童懿, 邱太文, 易俊兰, 等. 脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914009.
Tong Y, Qiu T W, Yi J L, et al. Effect of pulse frequency on laser cleaning mechanism of paint coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914009.
- [5] Zhu H Z, Lu J, Ni X W, et al. Experimental investigation on cleaning of corroded ancient coins using a Nd: YAG laser[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10173: 101730F.
- [6] Zhou F, Sheppard J C, Vecchione T, et al. Establishing reliable good initial quantum efficiency and *in situ* laser cleaning for the copper cathodes in the RF gun[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 783: 51-57.
- [7] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106475.
- [8] 赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131403.
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131403.
- [9] Ünal S, Papadopoulos K, Rondepierre A, et al. Towards selective laser paint stripping using shock waves produced by laser-plasma interaction for aeronautical applications on AA 2024 based substrates[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107095.
- [10] Lu Y, Yang L J, Wang M L, et al. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress[J]. Optik, 2021, 227: 165589.
- [11] 邱太文, 易俊兰, 程程, 等. 纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面油漆涂层特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0514001.
Qiu T W, Yi J L, Cheng C, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings on 2024 aluminum alloy surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514001.
- [12] 郭召恒, 周建忠, 孟宪凯, 等. HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002012.
Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002012.
- [13] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, et al. Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: part I: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 281: 193-205.
- [14] Li X Y, Wang D, Gao J M, et al. Influence of ns-laser cleaning parameters on the removal of the painted layer and selected properties of the base metal[J]. Materials, 2020, 13(23): 5363.
- [15] 关来庆. 搭接率对 316L 激光微结构粗糙度和硬度的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 21-24.
Guan L Q. Effect of pulse overlap on surface roughness and microhardness in laser processing of 316L stainless steel[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016: 21-24.
- [16] 方世超. 激光脱除船舶板材表面环氧漆的应用研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019: 47-48.
Fang S C. Application research on laser cleaning of epoxy-paint from ship plates[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019: 47-48.
- [17] 贾莹, 金玉淑, 刘亮. 离心压缩机叶轮补焊工艺研究及应用[J]. 风机技术, 2014, 56(2): 55-58.
Jia Y, Jin Y S, Liu L. Research and application of centrifugal compressor impeller repair welding technology [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2014, 56(2): 55-58.
- [18] Li X K, Zhang Q H, Zhou X Z, et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal [J]. Optik, 2018, 156: 841-846.
- [19] Grojo D, Cros A, Delaporte P, et al. Experimental investigation of ablation mechanisms involved in dry laser cleaning[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8309-8315.
- [20] 吴显斌, 豆小艳, 何宾, 等. 浅析粗糙度微观形貌对海洋钢结构油漆附着力的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(6): 28-31.
Wu X B, Dou X Y, He B, et al. Analysis on the affection of roughness microstructure to paint adhesion with offshore steel structures[J]. Total Corrosion Control,

- 2017, 31(6): 28-31.
- [21] 郝晓虎. 焊接工艺对 KMN 钢接头性能影响及微裂纹修复研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 16-23.
Hao X H. Influence of welding parameters on properties of KMN steel joints and healing of microcracks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 16-23.
- [22] 朱丽娜. 基于纳米压痕技术的涂层残余应力研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 22-26.
Zhu L N. Research on residual stresses of coatings by nanoindentation technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 22-26.
- [23] 栗育琴, 肖罡, 李涛. 超声振动辅助磨削 GCr15 轴承钢的表面残余应力[J]. 机械工程材料, 2019, 43(6): 50-52.
Li Y Q, Xiao G, Li T. Surface residual stress of GCr15 bearing steel by ultrasonic vibration assisted grinding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(6): 50-52.
- [24] 韦贺. 铜镍硅系合金中织构对性能和残余应力的影响及作用机制[D]. 北京: 北京科技大学, 2021: 21-26.
Wei H. Effect of texture on properties and residual stress in Cu-Ni-Si alloys and its mechanism[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021: 21-26.
- [25] Suresh S, Giannakopoulos A E. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5755-5767.
- [26] Song B, Dong S J, Liu Q, et al. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior[J]. Materials & Design, 2014, 54: 727-733.