

文章编号:1001-5078(2025)06-0870-07

· 激光应用技术 ·

大曲率圆柱钢激光除漆影响因素研究

侯秋园¹, 杨文锋², 李绍龙², 杨豫封¹

(1. 中国民用航空飞行学院 洛阳分院, 河南 洛阳 471000;

2. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘要:激光除漆技术是一种环保、安全的清洗技术,将其应用于大曲率圆柱钢除漆时还存在除漆均匀性差、参数优化困难等缺点。对大曲率圆柱钢激光除漆影响因素的研究有助于激光参数优化以及提高圆柱钢表面除漆质量。论文采用1064 nm激光对飞机发动机架圆柱钢进行除漆,分别对除漆表面进行二维、三维形貌、粗糙度、表面元素进行分析,并对不同除漆区域进行硬度测试,探究曲率引起的激光离焦与入射角变化对圆柱钢除漆效果的影响。结果表明:激光功率500 W,其余参数一定时,随光斑在25 mm直径圆柱钢顶点向圆周方向移动,离焦量与入射角随之改变,除漆表面粗糙度从8.44 μm 逐渐减小至7.32 μm ,降低了13.27%,横截面硬度从254.2 HV降至221.0 HV,降低了13.06%,除漆表面熔融态程度逐渐降低,且逐渐趋于基材原始表面。除漆过程由光斑位移引起的离焦能量密度仅减小了1.43%,说明激光入射角度是影响大曲率圆柱钢除漆效果的主要因素。

关键词:发动机架;大曲率;圆柱钢;激光除漆

中图分类号:TN249;TG178 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.06.006

Research on the influencing factors of laser paint removal for large curvature cylindrical steel

HOU Qiu-yuan¹, YANG Wen-feng², LI Shao-long², YANG Yu-feng¹

(1. Civil Aviation Flight University of China Luoyang Flight College, Luoyang 471000, China;

2. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Laser paint removal technology is an environmentally friendly and safe cleaning technique. However, its application to paint removal on high-curvature cylindrical steel surfaces is associated with drawbacks, including poor paint removal uniformity and difficulties in optimizing parameters. Studying the factors influencing laser paint removal on high-curvature cylindrical steel can aid in optimizing laser parameters and improving the surface quality of cylindrical steel. In this paper, a 1064 nm laser is employed to remove paint removal from cylindrical steel aircraft engine mounts. The painted surfaces are analyzed in terms of their two-dimensional and three-dimensional morphology, roughness, and surface elements, and hardness tests are conducted on different paint removal areas to explore the influence of curvature-induced laser defocusing and changes in the incidence angle on the paint removal effectiveness of cylindrical steel. The results show that when the laser power is 500 W and other parameters are fixed, changes in defocus amount and incident angle occur as the spot moves circumferentially around the vertex of a 25 mm diameter cylindrical

基金项目:四川省通用航空器维修工程技术研究中心项目(No. GAMRC2021YB07);中国民用航空飞行学院面上项目(No. J2023-054);中国民用航空飞行学院青年基金项目(No. QJ2022-144)资助。

作者简介:侯秋园(1992-),男,硕士研究生,主要从事激光智能维修、表面处理研究。

通讯作者:杨文锋(1979-),男,博士,教授,主要从事激光智能维修研究。E-mail: ywfcyy@163.com

收稿日期:2024-10-22

steel. The surface roughness decreases from $8.44\ \mu\text{m}$ to $7.32\ \mu\text{m}$, a reduction of 13.27%. The cross-sectional hardness decreases from 254.2 HV to 221.0 HV, a reduction of 13.06%. The degree of molten state on the paint removal surface gradually decreases and approaches the original surface of the substrate. During the paint removal process, the defocused energy density caused by the displacement of the laser spot only decreases by 1.43%, indicating that the laser incidence angle is the main factor affecting the paint removal effectiveness on high-curvature cylindrical steel.

Keywords: engine mount; large curvature rate; cylindrical steel; laser paint removal

1 引言

大曲率(小直径)圆柱钢在航空、建筑、水利等行业应用广泛,在航空领域主要应用于飞机发动机支架,起到支撑发动机、连接机体与发动机的作用,该区域具有震动频率高、温度高、所处环境恶劣的特点,易造成金属的疲劳、腐蚀甚至断裂。通过无损探伤,能够及时发现发动机支架的缺陷,避免断裂的发生,保证机组的训练安全。对发动机支架进行无损探伤前需对其进行褪漆处理^[1]。目前,发动机架褪漆以化学褪漆为主。化学褪漆使用简单、便捷,在工程中得到了广泛应用,但由于化学脱漆剂多采用氯代烃、酮、酯、醇、苯系物等溶剂混合而成,因此对环境、人体会产生较大影响,且可控性差,褪漆效果完全凭经验判断^[2-3]。激光除漆技术是利用激光作用到漆层材料上,通过烧蚀、瞬时热应力和激光冲击波等效应的共同作用,去除漆层材料^[4]。激光除漆技术在满足环保、安全的同时能够提高褪漆质量,还具有可控性强等优点。将其应用到航空领域能有效降低飞机停场维修时间,对增强航空维修水平与技术实力具有积极的促进作用。激光除漆具有诸多优点的同时还具有一定的局限性,将其应用于大曲率圆柱钢表面时还存在均匀性差,参数优化困难等现象,因此探究大曲率圆柱钢激光除漆影响因素是解决激光除漆难以应用于发动机架的关键问题之一。

针对平面工件,李宇强等人^[5-7]分别研究了激光功率、入射角、离焦量等参数对除漆效果的影响,发现激光除漆过程是激光功率、频率、离焦量、入射角等参数综合作用的结果。相较于平面工件,曲面工件进行激光除漆时光斑在工件表面移动会发生离焦量和入射角改变的现象,导致除漆效果与效率降低。针对此现象,工程上更多是采用旋转工件的办法,使激光光斑始终保持在焦点上,此方法避开了曲率对激光除漆的影响,但该方法无法做到工件的原位检测。另外一种方法是工件固定,通过随形聚

焦的方式进行激光除漆,如潘长青^[8]通过协同控制六轴机器人和激光加工头实现激光的随形聚焦和分块扫描清洗,但该方案仅适用大型曲面工件即小曲率工件。目前国内针对大曲率圆柱钢的激光除漆还未见系统性研究。

本文通过对圆柱钢采用激光除漆,分别对激光除漆表面二维、三维形貌、粗糙度、表面元素进行分析,并对不同除漆区域进行硬度测试。探究大曲率圆柱钢激光除漆影响因素,为激光除漆应用到圆柱钢的过程控制和表面质量优化提供依据。

2 试验与方法

2.1 材料与设备

研究采用西锐 SR20 飞机 25 mm 直径圆柱钢发动机架,如图 1 所示,其表面曲率为 $400\ \text{m}^{-1}$ 。该发动机架所使用材料为 30CrMo 合金结构钢,表面喷涂思卡夫 1126 型环氧漆层,涂层厚度 $90 \pm 10\ \mu\text{m}$ 。激光表面处理设备波长 1064 nm,平均功率 500 W,其由激光器、六轴机器人与激光处理加工头组成,激光器的光斑直径为 $677\ \mu\text{m}$,场镜标准焦距 349 mm。

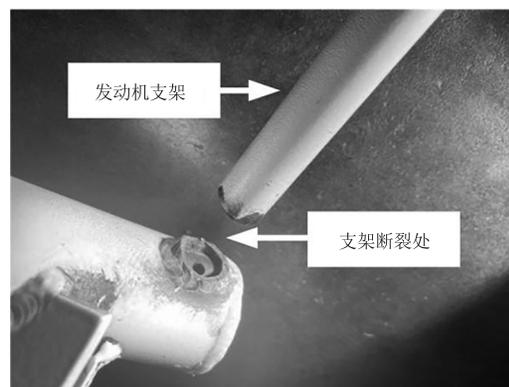


图1 发动机架前段断裂

Fig. 1 Front section of engine mount fractured

2.2 试验方法

圆柱体相对于平面有较高的曲率,较大的曲率会导致激光照射到柱体表面时的能量有所不同。本

文通过分析大曲率圆柱钢激光除漆过程,探究光斑在圆柱钢表面除漆时的主要影响因素。激光光斑在圆柱钢表面移动时,激光入射角度会发生变化并会产生一定的离焦量,离焦分为正离焦与负离焦,正离焦焦点在工件上方,负离焦是焦点在工件内部。本研究将激光聚焦到圆柱钢顶点,因此光斑经过位移可达到正离焦的效果。图 2 为激光扫描路径,其扫描区域可调节。将激光器功率设置为 500 W,脉冲宽度 70 ns,频率 25 kHz,扫描速度 1500 mm/s,扫描间距 0.05 mm。将扫描区域长度设置为 30 mm,宽度定为 10 mm,以便表征测试,圆柱钢除漆表面如图 3 所示。

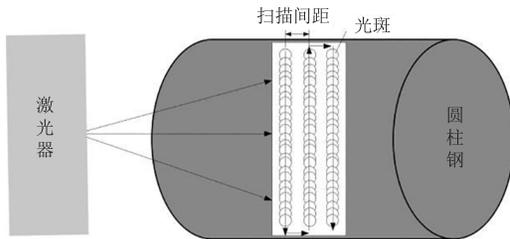


图 2 激光扫描路径
Fig. 2 Laser scanning path

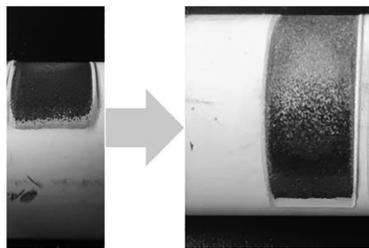


图 3 圆柱钢激光除漆表面
Fig. 3 Laser paint removal surface of cylindrical steel

2.3 表征方式

采用光学显微镜对不同区域除漆表面形貌进行表征,不同区域以圆柱钢横截面圆心、激光作用点、圆柱钢顶点形成的圆心角 θ 表示,如图 4 所示,图中 A 点为圆柱顶点, B 点为激光作用到点, d 为离焦量。采用西班牙 Sensofar 公司的 S neox 090 型 3D 光学表面轮廓仪对不同位置除漆表面三维形貌进行表征、表面粗糙度进行测试。采用德国 Leica 公司的 DM6M LIBS 测试系统对除漆后表面成分进行分析。对除漆圆柱钢横截面进行打磨、抛光,并用 4 % 硝酸酒精,腐蚀 5 s 左右之后采用德国徕卡 DMI 8 金相显微镜对圆柱钢进行金相分析。采用美国威尔逊 Tukon1102 型显微硬度仪对

激光除漆位置横截面进行显微硬度测试,载荷大小 0.5 Kgf,保持时间 10 s。

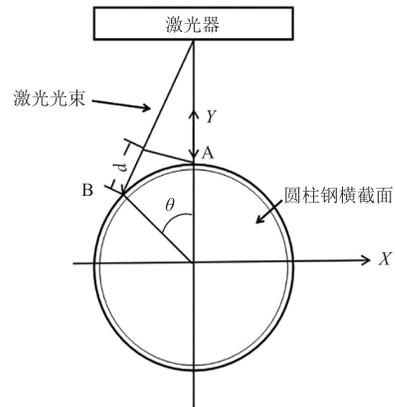


图 4 激光除漆示意图
Fig. 4 Schematic diagram of laser paint removal

3 结果与讨论

3.1 除漆表面微观形貌与粗糙度

圆柱钢表面激光除漆微观结构如图 5 所示。从图中可知随着圆心角 θ 的增大圆柱钢表面微观结构熔融态程度逐渐降低,直至 40° 时圆柱钢表面状态逐渐接近原始表面状态, 75° 说明此时位于漆层涂漆边界。可见随圆心角 θ 的变化,激光作用到圆柱钢表面的能量存在着巨大差异。

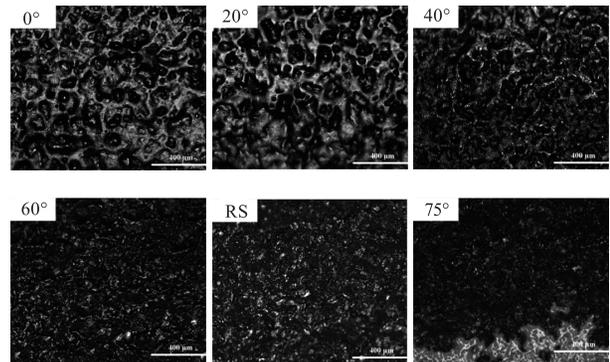


图 5 除漆区域二维微观形貌

Fig. 5 Two-dimensional microstructure of paint removal area

激光除漆之后圆柱钢不同区域的三维微观形貌如图 6 所示,其观测区域为 $1689.1 \mu\text{m} \times 1413.1 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,随圆心角 θ 的增加熔融状态逐渐减弱,直至 40° 时接近原始基材表面 RS,图 6 中 0° 、 20° 时熔融状态较明显,这是由于激光照射到圆柱钢表面的能量密度较高,表面漆层已被去除干净,持续的脉冲激光能量直接作用于基体,产生的热效应使基体表面产生固-液-固相变,热效应熔化后快速凝固,但凝固收缩空隙没有得到足量的熔融金属及时

填充,最终在基体表面形成尺寸各异、数量密集的凹坑^[9]。图6中75°为漆层边界。考虑到激光参数未发生改变,仅光斑的位置发生改变,说明造成激光作用到圆柱钢表面能量密度变化的原因是由于圆柱钢的曲率,而曲率对激光的影响主要体现在离焦与入射角两个方面。

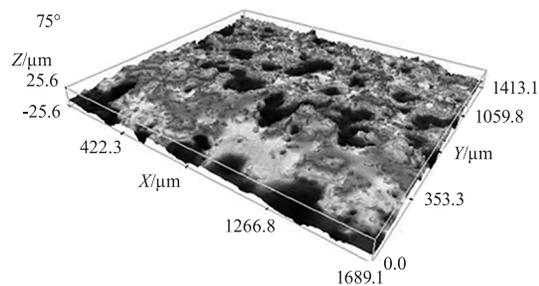
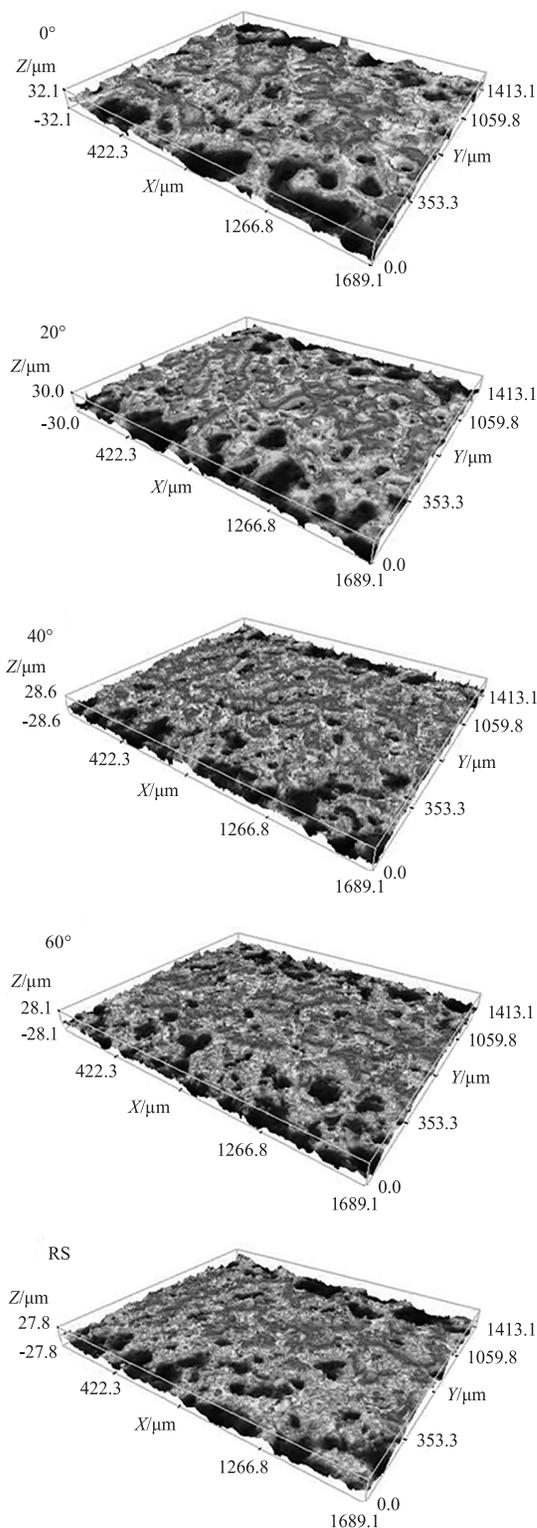


图6 除漆区域三维微观形貌

Fig. 6 Three-dimensional microstructure of paint removal area

激光除漆区域截面金相组织如图7所示。从图中不难看出随着圆心角 θ 的增大,晶粒尺寸逐渐增大,晶界密度逐渐稀疏,并在40°时与基材晶界密度与晶粒大小基本相同。这是因为随着圆心角 θ 的增大,激光作用到圆柱钢表面的能量密度逐渐减小,所形成的热效应迅速减小,表面温度逐渐降低,可见,在圆柱钢除漆过程中在其横截面方向由于曲率的影响对除漆效果的影响极其显著,即离焦和入射角是影响圆柱钢除漆的两个主要因素。

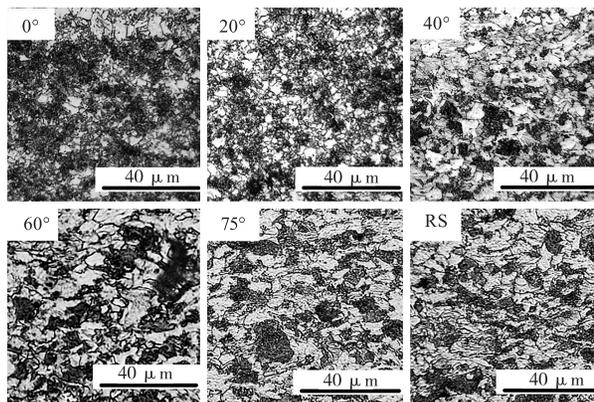


图7 除漆区域截面显微组织

Fig. 7 Microstructure of the cross-section of the paint removal area

粗糙度可以表示物体表面的光滑程度,粗糙度越小物体表面越光滑,粗糙度大小对涂层附着力起到关键性作用,其可以通过3D光学表面轮廓仪测得。采用3D光学表面轮廓仪对圆柱钢除漆表面粗糙度进行测试,结果如图8所示。可得出随圆心角 θ 的增加,圆柱钢表面粗糙度逐渐减小,其中0°至20°时基材表面粗糙度下降较快,之后趋于平缓,结合二维、三维图像可得出在40°时已达到较好的除漆效果,此时的试样表面粗糙度为7.64 μm ,接近原始基材表面的7.51 μm ,说明此时的能量密度即不伤基材又可去除表面漆层。这也对圆柱钢除漆表面微观表征进行了验证。

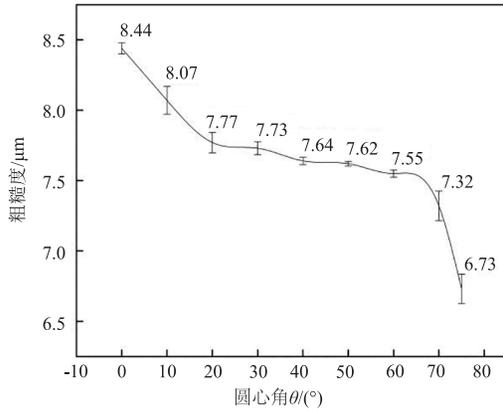


图 8 除漆区域粗糙度随圆心角 θ 的变化

Fig. 8 The variation of roughness in the paint removal area with respect to the central angle θ

3.2 除漆区域 LIBS 元素分析

LIBS 测试系统是脉冲氮气激光器和 CCD 分光器组成,其原理是有高能激光束作用到待测试样表面,其表面附近产生电子、离子以及原子组成的高温高压等离子体,等离子体中的粒子发生原子能级跃迁,辐射出元素的特征光谱,再由收集装置采集,探测器转化光信号为电信号,经计算机分析可得到待测试样表面成分信息^[10]。采用 LIBS 分别对圆柱钢不同除漆区域进行元素分析,分析结果如图 9 所示,发现 0°~60°成分与基材表面(RS)元素一致,分别为 Fe、C、Mo 等 30CrMo 典型成分。随着角度的增大,激光能量逐渐减弱,直到 75°时检测中开始出现 Ti、S、Ba 等元素,这些元素主要来源于颜料(TiO₂)、填料(BaSO₄)中。说明此时激光能量密度已经不足以完全去除圆柱钢表面漆层,以此可判断此处作用到圆柱钢表面的能量密度为除漆临界能量密度,这也对微观形貌结果进行了验证。

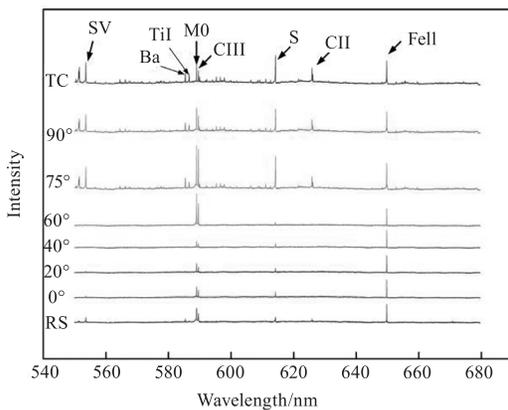


图 9 除漆区域元素随圆心角 θ 的变化

Fig. 9 The variation of elements in the paint removal area with respect to the central angle θ

3.3 显微硬度分析

金相组织的改变可以显著影响材料的力学性能。除漆区域横截面显微硬度随圆心角 θ 的变化如图 10 所示,从图中可以看出,随圆柱钢横截面圆心角 θ 的增大,显微硬度逐渐降低,从 0°的 254.2 HV 降至 90°的 221.2 HV,接近原始基材的 221.0 HV,并且在 20°~40°区间内硬度变化最为明显,这也和金相分析结果相对应。在激光照射下,基材表面温度提升到相变点,再经过自然冷却起到淬火作用,该过程使得圆柱钢内部奥氏体转变为马氏体,从而提高圆柱钢硬度^[11-12],而硬度变化的规律也验证了随圆心角 θ 的改变,激光作用到圆柱钢表面的能量密度也发生了明显变化,并呈现出随圆心角 θ 增大激光作用到圆柱钢表面能量密度逐渐减小的趋势。

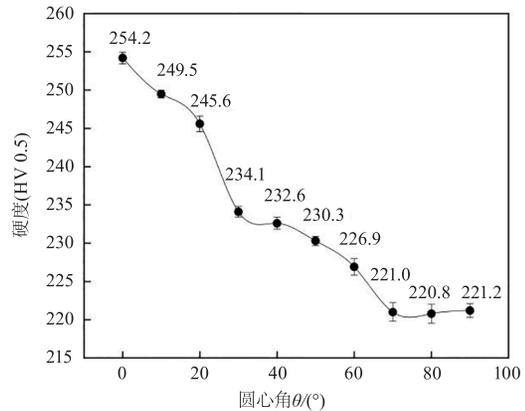


图 10 除漆区域横截面显微硬度随圆心角 θ 的变化

Fig. 10 The variation of microhardness in the cross-section of the paint removal area with respect to the central angle θ

3.4 大曲率圆柱钢激光除漆影响因素分析

相较于平面除漆,激光光斑在大曲率圆柱钢表面移动时不仅涉及到离焦作用,还会引起入射角的明显变化。在仅考虑离焦的情况下,能量密度计算公式如下:

$$m = \frac{P}{f\pi R^2} \tag{1}$$

$$R = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi R_0^2}\right)^2} \tag{2}$$

其中, m 为能量密度; P 为功率; f 为激光频率; R 为光斑半径; R_0 为光斑束腰半径; λ 为激光波长; d 为离焦长度,如图 4 所示。由公式(1)、(2)可得到聚焦在不同位置时试样表面能量密度,其公式为:

$$m = \frac{P}{f\pi R_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi R_0^2}\right)^2\right)} \tag{3}$$

式中, d 的计算公式为:

$$d = \sqrt{r^2 + (D+r)^2 - 2r(D+r) \times \cos\theta} - D \quad (4)$$

因此得到能量密度随圆柱钢圆心角 θ 的变化规律,如图11所示。从图中不难看出随圆心角 θ 的增大,照射到物体表面的能量密度逐渐减小,从0度时的 5.56 J/cm^2 下降到 89.4° (光斑与圆柱钢相切时的圆心角)时的 5.48 J/cm^2 ,能量密度仅减小了 1.43% ,但从表面粗糙度以及微观形貌的变化可以看出其除漆效果随角度的变化具有明显的能量减小趋势。其原因在于以上分析仅考虑离焦量对能量密度的影响,在实际除漆过程中激光作用于曲面,光斑会有一些的失真现象,由于激光作用于物体表面的光斑尺寸为微米级,相较于待清洗平面的厘米级,可以将圆柱钢表面近似为与激光作用点切线方向平行的斜面。根据入射角对激光除漆的影响规律可知,随着入射角的减小(激光垂直照射时为 90°),除漆深度逐渐降低。另一方面,激光除漆时会产生大量烟雾,烟雾轻与空气向试样上方飘散,造成一定量的激光能量损失,改变入射角可以在一定程度上减少光束方向上的能量损失^[13],可见,圆柱钢除漆效果随圆心角 θ 变化,入射角的影响大于离焦,起到了决定性作用。

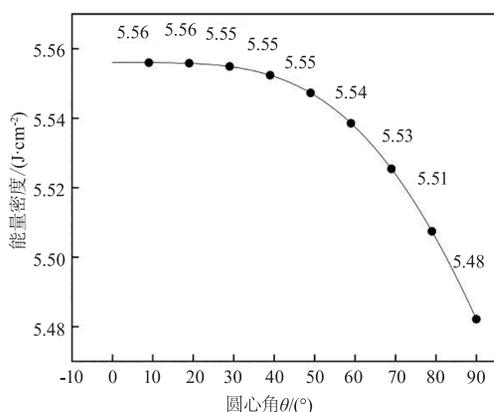


图11 能量密度随圆心角 θ 变化规律

Fig. 11 The variation law of energy density with the central angle θ

4 结论

本文对大曲率圆柱钢激光除漆影响因素进行探究,得出如下结论:

(1)激光功率 500 W ,其余参数一定时,随圆心角 θ 的增大,表面粗糙度从 $8.44 \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $7.32 \mu\text{m}$ 。硬度从 254.2 HV 降低至 221.0 HV ,除漆表面熔融态程度逐渐降低,且逐渐趋于基材原始表

面状态,说明随圆心角 θ 增大激光作用于圆柱钢表面的能量明显降低。

(2)随圆心角 θ 增大,作用于圆柱钢表面的能量明显降低,而激光光斑在圆柱钢表面由于位移引起的离焦能量密度仅减小了 1.43% ,说明了激光入射角度是影响圆柱钢除漆效果的主要因素,因此在对大曲率圆柱钢进行除漆时不仅需要考虑离焦更要考虑入射角对除漆效果的影响。

参考文献:

- [1] Jin X H, Zhang X H, Gao C F. Penetration testing [M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 51 - 62. (in Chinese)
金信鸿, 张小海, 高春法. 渗透检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 51 - 62.
- [2] Wan Z, Yang X F, Xia G F, et al. Application and prospect of laser cleaning technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(7): 172 - 178. (in Chinese)
万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光清洗技术的应用及展望 [J]. 机床与液压, 2020, 48(7): 172 - 178.
- [3] Zhao L J. Comparisons between cleaning methods for stone relics [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2014, (3): 85 - 87, 73. (in Chinese)
赵林娟. 几种常用清洗方法的清洗效果对比讨论 [J]. 中国文物科学研究, 2014, (3): 85 - 87, 73.
- [4] Zheng Z, Wang C F, Huang G, et al. Effect of defocused nanosecond laser paint removal on mild steel substrate in ambient atmosphere [J]. Materials, 2021, 14(20): 5969.
- [5] Li Y Q, Guo L Y, Jiang P, et al. Experimental study on surface morphology changes of aluminum alloy using laser cleaning and optimization of process parameters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202016. (in Chinese)
李宇强, 郭玲玉, 蒋平, 等. 铝合金激光清洗表面形貌变化的实验研究及工艺参数优化 [J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202016.
- [6] Liu S G, Sun S F, Wang P P, et al. Effect of laser incident angle on paint removal of 2024 aluminum alloy surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 1714009. (in Chinese)
刘世光, 孙树峰, 王萍萍, 等. 激光入射角度对去除2024铝合金表面油漆的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 1714009.
- [7] Yang W F, Fu C Y, Qian Z R, et al. Effect of defocus on

- damage characteristics of laser paint removal on aluminum alloy surface[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(6): 849 – 855. (in Chinese)
- 杨文锋, 付婵媛, 钱自然, 等. 离焦量对铝合金表面激光除漆损伤特性的影响[J]. *激光与红外*, 2022, 52(6): 849 – 855.
- [8] Pan C Q. A control system designed for robotic laser shape following cleaning of large curved workpieces [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020. (in Chinese)
- 潘长青. 大型曲面工件机器人激光随形清洗控制系统设计[D]. 温州: 温州大学, 2020.
- [9] Bi S, Lei Z L, Feng J H. Comparison and improvement of millisecond pulsed laser and nanosecond pulsed laser for cleaning to remove paint coating from aluminum alloy surface[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33: 5765 – 5775.
- [10] Zeng Q D, Yuan M T, Zhu Z H, et al. Research progress on portable laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 470 – 486. (in Chinese)
- 曾庆栋, 袁梦甜, 朱志恒, 等. 便携式激光诱导击穿光谱最新研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 470 – 486.
- [11] Guo L L, Liu G K, Xu B R, et al. Study on microstructure and properties of 15-5 PH surfacing on 30 CrMo surface by CMT welding process[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2023, 46(6): 64 – 69. (in Chinese)
- 郭龙龙, 刘广阔, 徐斌荣, 等. 30 CrMo 表面 CMT 堆焊 15-5 PH 工艺及组织性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2023, 46(6): 64 – 69.
- [12] Lu Y, Yang L J, Wang Y, et al. Paint removal on the 5a06 aluminum alloy using a continuous wave fiber laser[J]. *Coating*, 2019, 9(8): 488.
- [13] Yao D, Ma Y P, Zhao S Y, et al. Effect of laser incidence angle on the removal the non-uniform paintsurface of 6061 aluminum alloy [J/OL]. *Laser Technology*, 2024: 1 – 10 (2024 – 08 – 08). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.tn.20240808.0850.002.html>. (in Chinese)
- 姚迪, 马玉平, 赵世宇, 等. 激光入射角度对去除 6061 铝合金非均匀漆面的影响[J/OL]. *激光技术*, 2024: 1 – 10(2024 – 08 – 08). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.tn.20240808.0850.002.html>.