

激光清洗技术在铝合金表面除漆方面的研究

陈芳^{1,2}, 刘武军^{1,2}, 帅成碧¹

(1.湖南铁路科技职业技术学院,湖南 株洲 412000; 2.湖南工业职业技术学院,长沙 410006)

摘要: 激光清洗作为一种绿色环保的除漆技术,因其高效、无污染的特点,逐渐在各个领域得到广泛应用。本文探讨了激光清洗的机理及工艺参数对除漆效果的影响,并对除漆后的性能进行了研究。同时,分析了国内外激光除漆的应用现状,指出当前技术中存在的问题,如缺乏系统的激光清洗工艺数据库和自动化除漆设备。这些问题的解决将有助于提升激光清洗技术的应用效率和可靠性,为相关领域的进一步发展提供支持。

关键词: 激光清洗; 除漆机理; 工艺参数; 性能研究

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)04-0032-04

Research on Laser Cleaning Technology for Paint Removal on Aluminum Alloy Surfaces

CHEN Fang^{1,2}, LIU Wu-jun^{1,2}, SHUAI Chen-bi¹

(1.Hunan Vocational College Of Railway Technology, Zhuzhou 412000, Hunan, China;

2.Hunan Industry Polytechnic, Changsha 410006, China)

Abstract: Laser cleaning, as an environmentally friendly and green paint removal technology, has gradually gained widespread application in various fields due to its efficiency and pollution-free characteristics. This article explores the mechanism of laser cleaning and the impact of process parameters on paint removal efficiency, as well as investigates the performance after paint removal. At the same time, the current status of laser paint removal applications both domestically and internationally was analyzed, highlighting issues in current technologies, such as the lack of a systematic laser cleaning process database and automated paint removal equipment. The resolution of these issues will help improve the efficiency and reliability of laser cleaning technology, providing support for the further development of related fields.

Key words: laser cleaning; paint removal mechanism; crafting parameters; performance research

0 引言

在现代工业生产中,铝合金表面的漆层因老化而失去保护作用,需要及时去除,以确保铝合金的耐用性和性能。传统铝合金表面除漆方法有打磨除漆法、化学除漆法、干冰除漆法、热空气除漆法等。表1总结了铝合金表面除漆的常用清洗方法及优缺点,为相关行业

提供实用参考^[1]。

在工业领域,传统的清洁手段在除漆时常常面临效率低、污染严重等问题。因此,亟需一种高效环保的除漆工艺,以满足行业的清洁需求,推动绿色发展,实现经济与环境的双赢。激光清洗技术是一种创新的非接触式清洗方法,利用激光能量与材料表面之间的相互作用,有效去除表面污染物。该技术通过热膨胀、共振冲击、燃烧气化和分解蒸发等过程使污染物、氧化物或涂层与基底材料之间分离,而不会对基底材料造成损害^[2]。这种清洗方式具有高效、环保的优势。此外,激光清洗技术广泛应用于航空、铁路运输、汽车制造、文物保护等领域,成为未来清洗行业的重要发展方向。

收稿日期:2025-01-16

基金资助:湖南省教育厅科学研究项目 22B1016; 湖南省教育科学“十四五”规划课题 ND227117。

作者简介:陈芳(1982—),女,硕士,副教授,主要从事轨道车辆运用维保、激光除漆方面研究。E-mail:472788624@qq.com。

表1 铝合金表面除漆常用清洗方法及优缺点

除漆方法	除漆原理	优点	缺点
打磨 除漆法	利用手工或者机械工具打磨, 直接利用机械力量把铝合金表面漆层去除	操作简单,成本较低, 能局部处理	可能损伤材料,精度难以控制,处理效率较低
化学 除漆法	利用化学除漆剂中的有效成分会与漆膜中的有机 成分(如树脂、颜料等)发生反应从而使得漆层 从物体表面脱落	适当使用时,对基底材料 损伤小;化学除漆能够 快速地去除大面积的漆层	如果操作不当,可能会对基底材料造成严重的腐蚀; 化学除漆剂含有有毒有害成分,危害环境和健康; 化学除漆后产生的废气或废液后续处理复杂
干冰 除漆法	当干冰颗粒以高速喷射到物体表面有漆层的地方时, 干冰颗粒的动能和升华产生的能量使漆层发生脆化, 与基底材料的附着力降低。同时,高速喷射的干冰颗 粒就像微小的“炮弹”一样,对漆层产生机械冲击, 将漆层从基底材料上剥离下来	环保高效, 对基底材料损害小	设备成本高,能源消耗大;对操作人员要求高; 干冰很容易升华,对储存和运输要求高; 干冰除漆作业现场需要有良好的通风条件
热空气 除漆法	使用热空气喷枪,将热空气(温度一般在 200~400 ℃) 喷射到铝合金表面的漆层上,使漆层软化、起泡, 然后用刮刀或刷子等工具将漆层去除	可以实现大面积的除漆, 效率高,成本低	对操作人员要求较高,操作人员需要掌握合适的热 空气温度和喷射时间;可能产生有害气体和异味; 热空气除漆需要持续提供高温热空气,能源消耗较大

1 激光除漆机理

1.1 烧蚀机理

激光烧蚀除漆技术的原理是基于激光与漆层的相互作用^[5]。即当激光直接照射到漆层表面时,漆层表面会迅速吸收激光产生的能量,并将这些能量转化为漆层自身的热能。由于激光与漆分子间产生了强烈的相互作用,因此,漆层中存在大量的热能。随着热量的持续累积,漆层温度逐步上升。当温度超出漆层的熔点和沸点,漆层表面会在极短的时间内经历多种物理和化学变化,这将导致漆层逐渐被移除,直至漆层被彻底清除。

激光除漆技术主要利用激光的热烧蚀效应,其除漆效果受到功率密度的显著影响。在应用激光清洗时,需要考虑损伤阈值和清洗阈值的存在。损伤阈值是指激光功率过高时,可能导致物体表面受损的临界点;而清洗阈值则是有效去除污染物的最低功率要求。如果功率密度小于清洗阈值,清洗效果将不理想,难以达到预期的清洁效果。因此,在激光清洗过程中,合理调节功率密度是确保清洗效果和保护物体表面的关键。在实际应用中,激光能量密度应选在清洗阈值和损伤阈值之间,以避免对基底材料造成不必要的损伤^[6]。

1.2 热振动机理

当激光照射在铝合金表面时,漆层和铝合金各自吸收激光能量。由于漆层和铝合金的热膨胀系数、吸收率等物理参数差异较大,导致漆层与铝合金结合界面处产生较大温度梯度导致不同的应变,进而产生巨大的应力差。当应力差产生的振动能够克服漆层和铝合金间的结合力时,漆层会从铝合金表面脱离,达到除

漆效果^[5]。

1.3 等离子冲击机理

LEE 等研究发现,激光照射下,空气达到击穿阈值,产生电离效应,形成等离子冲击波。这种冲击波以强大的冲击力作用于漆层,使其与铝合金发生脱落。在等离子体作用下,冲击波对铝合金表面形貌产生了显著影响。冲击波引发的高能熔融物质飞溅,使漆层底部的材料受到强烈冲击,形成类似于陨石坑的独特表面特征。

2 工艺参数对除漆效果的影响

2.1 激光能量密度

激光除漆中激光能量密度公式为 $E=4P/f\pi D^2$,式中: E 为激光能量密度, J/cm^2 ; P 为激光平均功率, W ; f 为脉冲激光重复频率, kHz ; D 为光斑直径, cm 。

激光能量密度与激光平均功率之间存在正比例关系,在脉冲激光重复频率和光斑直径固定的情况下,提升激光能量密度对铝合金表面漆层的物理化学变化具有显著影响。随着激光能量密度的增加,漆层的热效应愈加明显,导致其温度迅速升高,从而加速漆层的气化和电离效应,最终导致漆层的脱离^[6]。

通过试验研究发现,激光能量密度的变化对铝合金表面去漆后的粗糙度产生了显著影响。表2结果表明,当激光能量密度为 $30 J/cm^2$ 时,铝合金表面的粗糙度较高,表明去漆效果不理想。随着激光能量密度的增加,当其达到 $35 J/cm^2$ 时,表面粗糙度降至最低,显示出最佳的去漆效果。然而,当能量密度提升至 $35 J/cm^2$ 及以上时,铝合金表面开始出现损坏,导致粗糙度再度增加。因此,实际应用中需要严格控制激光能量密度,

以达到理想的去漆效果^[7]。

表 2 不同激光能量密度下激光除漆后的表面粗糙度

激光能量密度/(J·cm ⁻²)	30	35	40	45
除漆后粗糙度/μm	1.843	1.449	1.584	1.882

试验结果表明,激光能量密度越大,去除漆层的厚度也相应增加。表 3 为不同激光能量密度下激光去除漆层的厚度。

表 3 不同激光功率密度下漆层去除厚度

激光能量密度/(J·cm ⁻²)	2.11	2.67	3.11	3.56	4.00
涂层去除厚度/μm	42	68	106	119	126

2.2 激光扫描速度和搭接率

在激光清洗过程中,为了达到最佳效果,必须采用适当的光斑搭接率。激光移动时,光斑搭接率与扫描速度之间的关系为 $\eta=1-v/Df$, 式中: η 为光斑搭接率; v 为扫描速度; D 为光斑直径; f 为重复频率。

当扫描速度减小时,搭接率增加,从而提升除漆效果,但过大的搭接率可能导致铝合金表面损坏。相反,扫描速度增大时,搭接率会降低,导致激光能量不足,进而降低除漆效果。因此,在铝合金除漆过程中,需要综合考虑光斑搭接率与扫描速度,以实现最佳的清洗效果^[8]。

赵子铭等研究了激光除漆技术中激光能量密度、激光扫描速度和搭接率对工件表面特性的影响。通过试验分析,他们发现最佳除漆效果出现在激光能量密度为 4.45 J/cm²、扫描速度为 5.5 mm/s 以及光斑搭接率为 60% 时。在这一条件下,除漆后的表面粗糙度与原始阳极氧化膜的粗糙度相近,除漆效果最佳^[9]。

2.3 脉冲宽度与重复频率

雷正龙等通过优化试验,他们发现毫秒脉冲激光在 500 W 功率、500 Hz 频率和 0.6 ms 脉冲时间下,能够有效去除油漆,同时不损伤铝合金基材^[10]。而在纳秒脉冲激光方面,采用 200 W 的功率、5 kHz 的频率和 60 ns 的脉冲时间同样能够去除油漆涂层。ZENG X D 等采用脉冲光纤激光器进行激光除漆研究,探讨了不同参数对涂料去除效果的影响。试验结果表明,当激光能量密度达到 10.19 J/cm²,激光扫描速度为 4 200 mm/s,激光宽度为 0.02 mm 时,可以有效完全去除 100 μm 厚的涂料层,且基材保持完好无损^[11]。

3 激光类型

自激光器问世以来,激光技术发展迅速。随着 CO₂ 激光器向高效光纤激光器的转变,激光清洗的应用越

来越广泛,为工业和艺术品修复等领域提供了高效、环保的解决方案。激光清洗正逐渐成为除漆的首选技术。表 4 展示了常见的激光除漆光源类型及其工业应用。在激光清洗中,选择合适的激光器时需综合考虑漆层材料、厚度及铝合金材料,同时满足效率要求,以确保达到最佳的清洗效果和性能特性。

表 4 激光除漆分类

光源分类	激光设备类型	波长	适用类型
CO ₂ 激光器	TEA-CO ₂ 连续 CO ₂ 激光器	约 10 μm 10.6 μm	飞机表面漆 碳纤维/环氧树脂材料
固体激光器	Nd:YAG 激光器	1 064 nm	热压成型型钢
激光器	调 Q 激光	1 064 nm	碳纤维增强塑料
光纤激光器	脉冲光纤激光器	1 064 nm	船用钢板、6005A 铝合金 平板、ENAW5005A 铝合金
	连续光纤激光器	1 070~1 080 nm	Q235 碳钢材/5A06 铝合金

4 除漆后铝合金性能研究

谭荣清等的研究表明,高频 TEACO₂ 激光器在飞机蒙皮材料的激光清洗过程中,能够有效除漆,且对基材的力学性能没有影响^[12]。朱伟等对 6005A 铝合金平板表面的丙烯酸气雾漆进行激光除漆研究。研究结果表明,激光清洗不仅能有效去除漆层,还能显著提高铝合金基材表面的硬度和力学性能^[13]。陈辉刚等利用脉冲宽度 150 ps 的激光清洗铝合金表面氧化膜后,铝合金表面氧化膜被清洗掉,铝合金表面粗糙度降低^[14]。邱太文等研究了纳秒激光在清洗 2024 铝合金表面 150 μm 厚环氧基底漆涂层的效果^[15]。通过调整激光功率、脉冲宽度和脉冲频率,他们发现,当激光功率为 500 W、脉冲宽度为 60 ns、脉冲频率为 20 kHz 时,可以实现对油漆涂层的完全去除,并且基材表面没有熔化现象。清洗后的铝合金显微硬度测得为 168.34 HV,接近原始基材的显微硬度,表明该激光清洗方法不仅有效,而且对基材表面造成的损伤极小。

5 应用

欧美国家在激光清洗技术方面发展较早,尤其在航空航天和船舶领域应用广泛。德国 Urenco 公司的 SCHWEIZER A G W L 将激光清洗技术成功应用于飞机表面除漆,研发出一款商用激光清洗设备。该设备采用 TEA-CO₂ 激光光源,能够有效去除厚度达到 100 μm 的漆层^[16]。1995 年,美国空军修理厂研发了一种激光自动除漆系统,经过多年的技术优化,2008 年升级为 LADS II 系统。该系统专门针对 A-10、F-16 和 C-130 等机型的雷达罩进行激光除漆,显著提高了维护效率^[17]。

日本物理化学研究所的 A TSUNEMI 等对飞机铝合金及复合材料基材表面的油漆进行了激光清洗试验, 研究表明, 当参数得当时, 激光能够有效地去除油漆, 且在清洗过程中未对基材造成任何损伤^[18]。

成都航利集团的杨成龙等通过激光清洗技术, 有效去除了航空发动机金属零件表面的有机硅耐热漆、氧化层和铁锈。这一创新的表面处理方法不仅提升了维修质量, 还为航空发动机的长期使用提供了保障^[19]。哈尔滨工业大学陈浩采用光纤连续激光对车体表面漆层的清洗开展激光清洗试验研究, 主要讨论了激光除漆的作用机理、清洗阈值、激光清洗的可靠性、清洗的工艺参数以及表面性能分析等内容^[20]。胡久等采用激光清洗技术对飞机典型曲面蒙皮零件进行清洗, 研究除漆后的性能, 为提高飞机维护效率和延长使用寿命提供了新的技术支持, 推动了航空工业的发展^[21]。

6 结语

激光除漆技术在不断发展中, 未来的研究应聚焦于以下几个方面:

1) 建立完善的激光清洗工艺数据库。针对不同的基材与漆层, 从激光器的选择、激光能量密度、扫描速度、搭接率等工艺参数的选择, 到最后的力学性能影响, 有一套完整的激光除漆工艺参数数据库。

2) 发展自动化除漆设备。研发实时监控的智能化与自动化相结合的除漆系统, 不仅是技术发展的必然结果, 更是行业升级的需求所在。

参考文献:

- [1] 万磊. 激光清洗 5083 铝合金表面漆层的数值模拟与试验研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2022: 16-23.
- [2] 王羽, 刘民军. 动力集中型动车组涂装前激光清洗工艺基础研究[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(4): 50-52.
- [3] 刘鹏飞. 基于脉冲激光清洗技术的飞机蒙皮除漆工艺及其表面完整性控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020: 2-7.
- [4] 赵永富, 祁文昌, 曹家鑫, 等. 激光清洗技术在涂装车间的应用研究[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(10): 43-45.
- [5] 鲁文婷, 陈亚军, 杨雅婷, 等. 激光技术去除漆膜研究及应用现状[J]. 热加工工艺, 2025, 54(2): 12-16.
- [6] 王裕光, 万磊, 张昌盛, 等. 激光清洗在除漆方面的研究进展及应用现状[J]. 热加工工艺, 2024, 53(12): 27-33.
- [7] 杨嘉年. 纳秒脉冲激光清洗船用钢表面漆层数值模拟与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 46-48.
- [8] 朱国栋. 高铁车体用铝合金激光清洗工艺与技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2021: 21-23.
- [9] 赵子铭. 航空铝合金表面激光除漆工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022: 35-44.
- [10] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 6-10.
- [11] ZENG X D, QIN W B, LI J, et al. Research on mechanism and process of paint removal with pulsed fiber laser[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 189: 1-8.
- [12] 谭荣清, 郑光, 郑义军, 等. 激光除漆对基材力学性能的影响[J]. 激光杂志, 2005(6): 83-84.
- [13] 朱伟, 孟宪伟, 戴忠晨, 等. 铝合金平板表面激光除漆工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(11): 126-128.
- [14] 陈辉刚, 陈婧雯, 陈辉. 能量密度对 A7N01 铝合金激光清洗表面形貌的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(3): 97-101.
- [15] 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]. 激光与电子学进展, 2021, 58(5): 168-175.
- [16] SCHWEIZER A G W L. Industrial 2-kW TEA CO₂ laser for paint stripping of aircraft[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 2502: 57-62.
- [17] 宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. 航空维修与工程, 2016(8): 15-18.
- [18] 张东赫. 铝合金表面油漆激光清洗机制与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 18-19.
- [19] 杨成龙, 何勇, 杨秀恩, 等. 激光清洗技术在航空发动机维修领域的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(10): 51-53.
- [20] 陈浩. 车体表面油漆激光清洗工艺基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 47-61.
- [21] 胡久, 马路, 王文全, 等. 激光除漆与溶剂除漆对飞机蒙皮零件的性能影响[J]. 铝合金世界, 2017(6): 11-14. ◆



欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告