

激光清洗高铁车辆表面漆层机理研究

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: 鉴于传统除漆弊端,采用激光清洗高铁车辆表面漆层是高效且环保的一种方法。主要介绍了激光清洗技术原理和激光清洗高铁车辆表面漆层机理,通过对材料与激光的相互作用和除漆机理进行分析,激光清洗高效环保,对基体损伤小,是高铁车辆长期维护的理想选择。

关键词: 激光清洗; 高铁车辆; 除漆机理

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)05-0005-04

Research on the Mechanism of Laser Cleaning the Surface Paint Layers of High-Speed Railway Vehicles

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: Given the drawbacks of traditional paint removal methods, using laser cleaning to remove the paint layer from high-speed train surfaces is an efficient and environmentally friendly approach. This paper mainly introduces the principle of laser cleaning technology and the mechanism of laser cleaning the surface paint layers of high-speed railway vehicles. Through the analysis of the interaction between materials and lasers as well as the paint removal mechanism, laser cleaning is highly efficient and environmentally friendly, with little damage to the substrate. It is an ideal choice for the long-term maintenance of high-speed railway vehicles.

Key words: laser cleaning; high-speed railway vehicles; mechanism of paint removal

0 引言

高铁作为现代交通的重要组成部分,其车体表面的污垢主要来源于列车的运行、车轨的摩擦以及刹车过程中产生的颗粒物。这些污垢不仅影响列车的美观,还可能对其性能产生负面影响。传统的去除漆层方法往往涉及化学清洗剂,这些清洗剂可能对环境 and 人体健康造成隐患,因此,寻求一种绿色高效的工业清洗方法变得尤为重要。在此背景下,激光清洗技术因其无接

触、高效及适用性广等优点,逐渐成为高铁维保中的理想选择。激光清洗能够精确地去除车体表面的污垢,避免了对漆层的损伤,同时也减少了化学品的使用,符合环保和可持续发展的理念。此外,激光清洗的过程简便,清洗效率高,能够大幅缩短维保时间,提高列车的运行效率。随着激光清洗技术的不断发展与应用,未来高铁的维护将更加绿色、环保和高效,为列车的安全运行提供有力保障。

1 激光清洗技术原理

激光清洗技术利用激光光束的高激光能量、良好的可控性和强大的凝聚能力,使得材料表面的污染物在吸收能量后迅速破碎和飞溅,从而实现工件表面的清洁。根据激光清洗介质与清洗原理不同,激光清洗可以分为干式激光清洗、湿式激光清洗以及激光等离子体清洗。

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 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,主要从事轨道交通车辆运用维保、激光除漆方面的研究工作。E-mail:472788624@qq.com。

干式激光清洗方式是直接利用高能量密度的激光束照射在被清洗物体表面^[1],激光能量使污染物瞬间吸收能量,发生气化、膨胀、振动等物理变化,从而使污染物从基底表面脱离,见图1所示^[2]。例如,在清洗金属表面的锈迹时,激光束照射到铁锈上,铁锈中的成分吸收激光能量后迅速气化,锈层就会从金属表面脱落。这种方式不需要额外的清洗介质,避免了清洗介质残留的问题,而且清洗速度相对较快,适合对清洁度要求较高且不能有其他介质残留的场合。

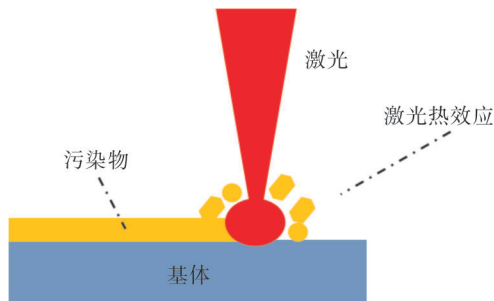


图1 干式激光清洗示意

湿式激光清洗是在清洗过程中使用液体辅助清洗,一般是先将少量液体(如水或专用的清洗液)涂覆在被清洗物体的表面,然后再用激光照射,见图2所示。液体的作用主要是增强清洗效果。比如在清洗一些顽固的污物时,液体可以帮助溶解污物。激光照射后,能够使污物更容易从物体表面去除。同时,液体还可以吸收部分激光能量,减少对被清洗物体基底的损伤。这种清洗方式适用于对基材无损伤要求的清洗场合。比如文物保护领域,在去除文物表面污物的同时,最大限度地保护文物基底。在清洗过程中,清洗介质可能残留,需进行干燥或其他处理步骤,以防对清洗表面造成损伤,确保清洗效果和表面安全^[3]。

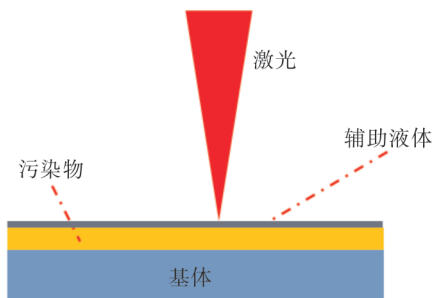


图2 湿式激光清洗示意

激光等离子体清洗是与前两种方式不同的一种清洗方式,在清洗时,激光与工件不直接接触,激光光束沿着与待清洗工件方向平行的一定距离发射,并在待清洗区域的上方形成一个光束焦点,这导致该区域的

空气吸收激光能量并发生电离,从而产生冲击波,同时伴随高温热效应,在冲击波和热效应的共同作用下,污物从材料表面剥离并清除,见图3所示。这种清洗方式由于激光不直接作用于基底,对基底伤害小,因此主要适用于航空航天精密零件和半导体芯片的清洗。

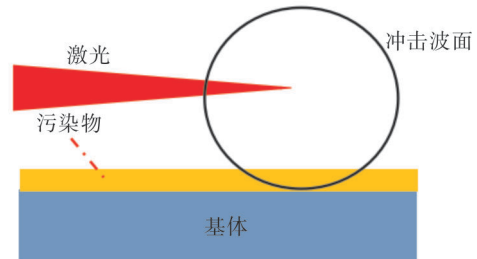


图3 激光等离子体清洗示意

激光清洗技术是一种绿色环保的清洗方式,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^[4],具有显著的环境友好性和安全性。该技术通过高精度的激光束,能够有效去除污垢和杂质,清洗效率高且自动化程度高,降低了人力成本。同时,激光清洗的可控性使得在复杂环境中也能精确操作,成为现代清洗行业的重要选择。

2 激光清洗高铁车辆表面漆层机理

激光是一种具有极高相干性、良好方向性和集中能量的光源。因此,对不同种类的脉冲激光在材料去除效率及其工作原理的研究和探索显得尤为关键。脉冲激光与材料之间的作用是相当复杂的,利用脉冲激光照射工件表面污物进行去除试验,在激光能量清洁的过程中,会有很多复杂的物理和化学反应,比如发光、热、力。下面主要分析材料与激光的相互作用及脉冲激光除漆机制^[5]。

2.1 材料与激光的相互作用

2.1.1 金属基底对激光在激光清洗中的吸收

当脉冲激光对工件表面进行清洗时,激光会照射到工件表面,这时激光照射到的能量主要分为三部分,可以用公式表示: $E_0 = E_{反} + E_{吸} + E_{透}$,式中: E_0 是激光照射的初始能量, $E_{反}$ 是物质反射回来的能量, $E_{吸}$ 是物质吸收的能量, $E_{透}$ 是物质透射出来的能量。当金属材料有一定厚度时,激光无法穿透,此时 $E_{透} = 0$,故 $E_0 = E_{反} + E_{吸}$,将上式变形为: $1 = E_{反}/E_0 + E_{吸}/E_0 = R + \alpha$, R 代表材料对激光能量的反射率, α 代表材料本身对激光能量的吸收率。金属对激光的作用主要体现在反射和吸收两个方面。在激光清洗过程中,清洗效果依赖于金属对激光能量的吸收,进而将吸收的能量转化为清洗机制的动力。

不同材料对激光的吸收情况存在显著差异,这主

要受材料性能、表面质量及温度等因素的影响。材料的吸收率 α 决定了激光在材料中的衰减程度。根据朗伯定律 $I=I_0e^{-\alpha z}$ ，激光强度沿 z 方向传播时，其强度随着深度的增加而指数衰减⁶。式中 I 为材料对激光的吸收强度， I_0 为入射激光强度， z 为距离表面深度。当光线通过厚度为 $1/\alpha$ 的材料时，激光强度将减少至初始强度 I_0 的 $1/e$ 。

激光技术在清洗领域展现出巨大的潜力，尤其是针对不透明材料如漆层和高铁车辆的铝合金基底。这些材料对激光的吸收率极高，几乎可以将所有激光能量完全吸收，因此激光能够作为一种高效的表面热源。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t),$$

式中， ρ 为材料密度， c 为材料比热容， K 为热导率， T 为温度， t 为时间， $A(x, y, z, t)$ 为单位体积材料在单位时间内温度的变化量。

激光清洗技术中，激光被作为材料表面的热源，因此 $A=0$ 。尤其是在脉冲激光应用下，热作用过程呈现为时间相关的瞬态特性⁷。方程可写为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

再将其变形为：

$$\frac{\rho c}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

$$T(z, t) = \begin{cases} T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left(\frac{\sqrt{\beta t}}{2\sqrt{\beta t}} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\beta t}} \right), & 0 < t \leq t_{\text{激光周期}}; \\ T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left(\frac{\sqrt{\beta t}}{2\sqrt{\beta t}} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\beta t}} \right) - \frac{2P(1-R)}{KS} \left[\frac{\sqrt{\beta(t-t_{\text{激光周期}})}}{2\sqrt{\beta(t-t_{\text{激光周期}})}} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\beta(t-t_{\text{激光周期}})}} \right], & t > t_{\text{激光周期}}. \end{cases}$$

式中， t 为激光作用待清洗表面时间， P 为激光的功率， R 为激光反射率， K 为材料热导率， β 为材料的热扩散率， T_0 为材料的初始温度， S 为光斑面积。

2.2 激光除漆机理

2.2.1 激光烧蚀机理

激光清洗技术是一种高效、环保的去漆方法，其核心原理是依赖激光产生的热烧蚀作用。烧蚀机理描述的是，当激光照射到漆层的表面时，漆层的表面会迅速吸收激光的能量，并将这些能量转换为其自身的热能。随着这些热能的不断累积，漆层的温度逐渐升高，当温度超过漆层的熔点和沸点时，漆层的表面会在非常短的时间内发生多种物理和化学变化，包括漆层有机物的燃烧。由于漆层表面出现了熔化和升华等，这导致漆层逐步被移除，直到漆层被完全清除，从而实现对漆层的全面清洁，其原理见图 4 所示。

利用激光的热能，可以有效去除漆层和其他污染物，实现精确清洗，避免对基材的损伤。这种清洗方法不仅环保、无化学品污染，还能提高工作效率，是现代清洗技术的重要发展方向。

2.1.2 激光的热传导过程

激光照射材料表面时，温度迅速上升，形成显著的温差。这种温差使得热能从表面向下传递，导致材料内部结构发生变化。通过精确控制激光的强度和照射时间，可以有效去除漆层而不损伤基体。当激光作用于材料时，在空间坐标系下三维热传导控制方程为：

其中 $\beta=K/\rho c$ 为材料的热扩散率。在激光加热过程中，当加热区的横向尺寸显著大于激光加热的深度时，可以运用一维热传导理论有效求解物体在深度方向的温度变化，公式为：

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

式中， z 和 t 分别表示激光加热深度和激光的作用时间，假如满足下面条件： $\left\{ \begin{array}{l} \partial T/\partial z=0(Z=\infty), \\ T=T_0(t=0). \end{array} \right.$

假设光斑均匀分布，且忽略误差，温度随加工深度以及时间的函数关系式为：

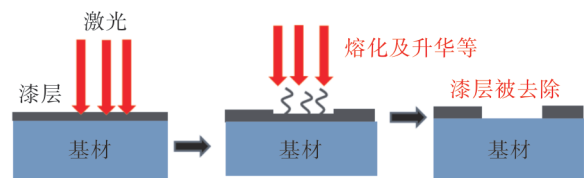


图 4 激光烧蚀机理示意

在去除高铁车辆表面漆中，激光除漆技术通过利用漆层材料的低熔沸点与铝合金基体的高熔点差异，能够实现对漆层的选择性烧蚀而不损伤铝合金基体。当激光束以高能量聚焦于漆层，使其迅速气化并剥离，而铝合金基体则因其高熔点而保持完整。而激光除漆技术的效果在很大程度上依赖于激光的能量密度。适当的能量密度能够使漆层迅速升温至其熔沸点并实现气化，而底层金属材料几乎不受影响。因此在实际应用

中,需确保激光能量密度大于清洗阈值而小于损伤阈值,以避免对基底材料造成不必要的损伤^[8]。

2.2.2 热振动机理

热振动机理是指当激光照在工件表面时,漆层表面因温度升高发生热膨胀。而基体由于热传导和基体本身吸收激光能量的双重原因,基体也因为温度的升高而发生热膨胀,但由于基体与漆层的热物性参数存在差异,会导致漆层与基材之间产生应力差。如果这个应力差高于漆层与基材的结合力则漆层会被去除。

铝合金基体与漆层同时吸收激光能量会产生热膨胀,而两者的热物性参数不同,且两者吸收的能量也不同,所以漆层与基体之间会产生热应力差,用公式表示为:

$$\sigma_{\text{差}} = \frac{E_{\text{下}} \times \delta_{\text{下}} \Delta T_{\text{下}}}{1 - \mu_{\text{下}}} - \frac{E_{\text{上}} \times \delta_{\text{上}} \Delta T_{\text{上}}}{1 - \mu_{\text{上}}}$$

式中, $\sigma_{\text{差}}$ 为两种不同材料之间的热应力差, $E_{\text{下}}$ 为基体弹性模量, $\delta_{\text{下}}$ 为基体线膨胀系数, $\mu_{\text{下}}$ 为基体泊松比, $\Delta T_{\text{下}}$ 为基体温度变化量, $E_{\text{上}}$ 为油漆弹性模量, $\delta_{\text{上}}$ 为油漆线膨胀系数, $\mu_{\text{上}}$ 为油漆泊松比, $\Delta T_{\text{上}}$ 为油漆温度变化量。

在高铁车辆的激光清洗过程中,铝合金基体与漆层因吸收激光能量而产生热膨胀,导致两者之间产生热应力差。这是因为铝合金与漆层的热物性参数存在显著差异,热膨胀率不同使得它们在受热时的变形程度不一致,从而可能引发涂层的脱落,这一过程中会产生热应力差。当这个应力差高于漆层与基材的结合力时,油漆被去除^[9]。高铁常用的油漆材料如环氧树脂、聚氨酯和丙烯酸,其热物性参数与铝合金存在巨大差异。在用激光清洗高铁车辆表面时,漆层和铝合金都会因为温度升高而热膨胀,但由于两者的热物性参数不同,会导致漆层与铝合金之间产生应力差,这种应力差使得漆层能够有效剥离。

2.2.3 激光等离子冲击去除机理

当用激光进行除漆时,油漆会迅速地吸收激光的能量,然后发生电离,形成高温、高能量的等离子体。一旦等离子体生成,它会在非常短的时间里快速扩张并爆炸。这一膨胀爆炸的过程会产生剧烈的冲击波,该冲击波以极高的压力作用在油漆层与基底的交界处。从一个角度看,冲击波产生的压力可能导致已经气化的油漆分子更快地从物体表面脱落,从而增强了去漆的效果;从另一个角度看,对于尚未完全气化的油漆,冲击波产生的机械冲击可能会破坏油漆分子间的联结,导致它们从基材上脱落。同时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。因此,冲击波对铝合金表面

形貌会产生影响。

3 结语

激光清洗技术是一种高效、环保的表面处理方法,特别适用于高铁车辆的维护。通过高能量密度的激光照射,可以有效去除高铁表面的油漆及其他污染物,且对基体材料的损伤极小。这种技术不仅能保持高铁车辆的结构完整性和稳定性,还能降低长期的维护和运营成本。随着技术不断发展,激光清洗在铁路运输、航空航天和船舶领域应用也日益广泛。比如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^[10]。未来,激光清洗将深度融合 AI、物联网等技术,成为工业领域绿色化、智能化升级的关键支撑。

参考文献:

- [1] 王书文,王涛,李道齐,等.纳秒脉冲激光清洗石化设备对清洗表面的影响[J].光电子·激光,2023,34(6):644-653.
- [2] 王孝宇.高温合金表面氧化膜激光清洗特性及机制研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2022:2-3.
- [3] 王千瑞,张迪,韩珩,等.激光清洗技术及其在涂层清洗中的应用现状[J].热喷涂技术,2024,16(3):71-83.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 杨嘉年.纳秒脉冲激光清洗船用钢表面漆层数值模拟与实验研究[D].镇江:江苏大学,2021:12-17.
- [7] 施曙东.脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D].天津:南开大学,2012:29-30.
- [8] 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.
- [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,2022:24-26.
- [10] 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.

◆

