

编号：

# 哈尔滨工业大学

## 大一年度项目立项报告

项目名称： 铝合金油漆激光绿色高效清洗工艺研究

项目负责人： 秦明浩 学号： 1190301715

联系电话                      电子邮箱                     

院系及专业： 工科试验班（智能装备）

指导教师： 徐杰 职称： 教授

联系电话：                      电子邮箱                     

院系及专业： 材料学院

哈尔滨工业大学基础学部制表  
填表日期： 2019 年 11 月 5 日

## 一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

| 姓名  | 性别 | 所在院系 | 学号         | 联系电话 | 本人签字 |
|-----|----|------|------------|------|------|
| 秦明浩 | 男  | 智能装备 | 1190301715 |      |      |
| 刘海东 | 男  | 智能装备 | 1190301714 |      |      |
| 王灏天 | 男  | 智能装备 | 1190301726 |      |      |
|     |    |      |            |      |      |
|     |    |      |            |      |      |

## 二、指导教师意见

本项目针对高铁、飞机等领域维修中绿色高效脱漆需求，开展铝合金表面油漆激光清洗工艺研究，分析激光参数、工艺参数对清洗之清洗质量的影响规律，确定铝合金油漆激光清洗阈值和基材损伤阈值，获得铝合金表面油漆的激光清洗工艺参数，为激光清洗产业化应用提供技术支撑。该项目研究内容和实施方案合理，实践性好，适合大一训练项目要求，同意立项。

签 名：

年 月 日

## 三、项目专家组意见

批准经费： 元

组长签名： （ 学部盖章 ）

年 月 日

## 四、立项报告

### （一）立项背景（研究现状、趋势、研究意义等）

激光清洗被誉为“21 世纪最具潜力的绿色清洗技术”。在各种大型机械的检修过程中，通常需要首先对机械表面进行除漆，然后对机械进行探伤。近年，先进制造业的快速增长以及“中国制造 2025”中的绿色发展方针，都对激光清洗技术提出了迫切的需求。因此，急需低成本、高质高效、绿色环保的激光清洗装备及其技术，以替代污染环境、操作复杂、人工作业强度大、效率低、精度低、易损伤基材的传统清洗技术。传统脱漆方法主要分为两类，即化学清洗方法和物理清洗方法。传统化学脱漆技术通常包含碱性除漆剂和有机溶剂脱漆剂两大类<sup>[1]</sup>。传统物理脱漆方法包括流动床法、盐浴法、喷砂和机械刮削法等。

激光清洗技术主要分为湿式清洗和干式清洗<sup>[2]</sup>，克服了以上缺点，并已在许多领域有所应用。例如采用高重复率的 TEA-CO<sub>2</sub> 激光清洗固体表面<sup>[3]</sup>，清洗结构材料表面，清除磁头滑动装置中的颗粒<sup>[4]</sup>。又如，美国新泽西州的一家公司采用一种专用的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器来烧蚀漆层。该激光系统的每一脉冲将 0.05 mm 厚的漆层汽化而基体保持冷态、不受损伤，该系统在 1h 内可以将厚度 1mm，面积 36 m<sup>2</sup> 的漆层剥离，并有真空系统及过滤器对废渣进行处理。多个激光系统并行工作，预计可以在 32 小时内将一架波音 737 飞机的漆层完全去除。<sup>[2]</sup>

激光清洗应用范围广。激光清洗在飞机、船舶等金属表面的除锈、除漆、建筑物表面清洁泥污、原子发电设施中管道内室放射性物质清除回收、微电子行业晶片表面清洗等方面均可应用，显示着极佳的优越性。<sup>[2]</sup>

与其他方法相比，激光清洗法具有如下的优点：1. 非接触式清洗，对基材损伤小；2. 准确定位，清洗误差小，清洗精度高；3. 实时控制反馈，保障了清洗过程的灵活性；4. 对欲清洗对象具有可选择性、针对性；5. 对环境无污染、人体无伤害；6. 能有效清除微米级及更小尺寸的污染微粒 7. 多用途和可靠性。<sup>[5]</sup>

目前，激光清洗技术在国内尚未成熟，国内关于激光和油漆的作用机理尚不明确，激光清洗工艺和评价体系尚未建立，因此相关研究亟待开展，来填补这一领域的空白。



图 1 载有激光头的清洗机器人

## （二）项目研究内容及实施方案

### 研究内容：

#### 1. 激光清洗工艺试验研究

针对飞机、高铁铝合金表面油漆展开激光清洗工艺试验，确定典型颜色油漆在不同激光参数下的清洗阈值与损伤阈值，研究重复频率、脉冲宽度、振镜扫描速度、扫描宽度等对清洗质量、清洗效率的影响规律，及重复频率、脉冲宽度对清洗阈值的影响规律。确定合理的激光清洗工艺参数范围，获得铝合金表面油漆的激光清洗工艺参数。

#### 2. 激光清洗过程材料温度变化规律研究

在进行激光清洗工艺试验的同时，用红外热像仪检测激光清洗过程中材料表面温度的瞬时变化，研究不同脉冲宽度、重复频率、扫描速度对温度场的影响规律，确定一定温度条件基材的损伤情况，为后续基材的应用获得理论依据。

#### 3. 激光清洗对材料性能影响研究

为研究激光清洗对材料性能的影响规律，针对激光清洗后的铝合金表面，采用扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱分析(XPS)、原子力显微镜、激光扫描共聚焦显微镜等技术仪器，对清洗后铝合金表面物理形貌进行分析；采用万能拉伸试验机对激光清洗后基材的力学性能进行检测；采用硬度计对清洗后基材表面硬度进行检测。

### 实施方案：

整体思路：确定对象→工艺试验研究→清洗过程材料温度变化规律研究→激光清洗对材料性能研究→总结最优参数。流程框图如图 2 所示：

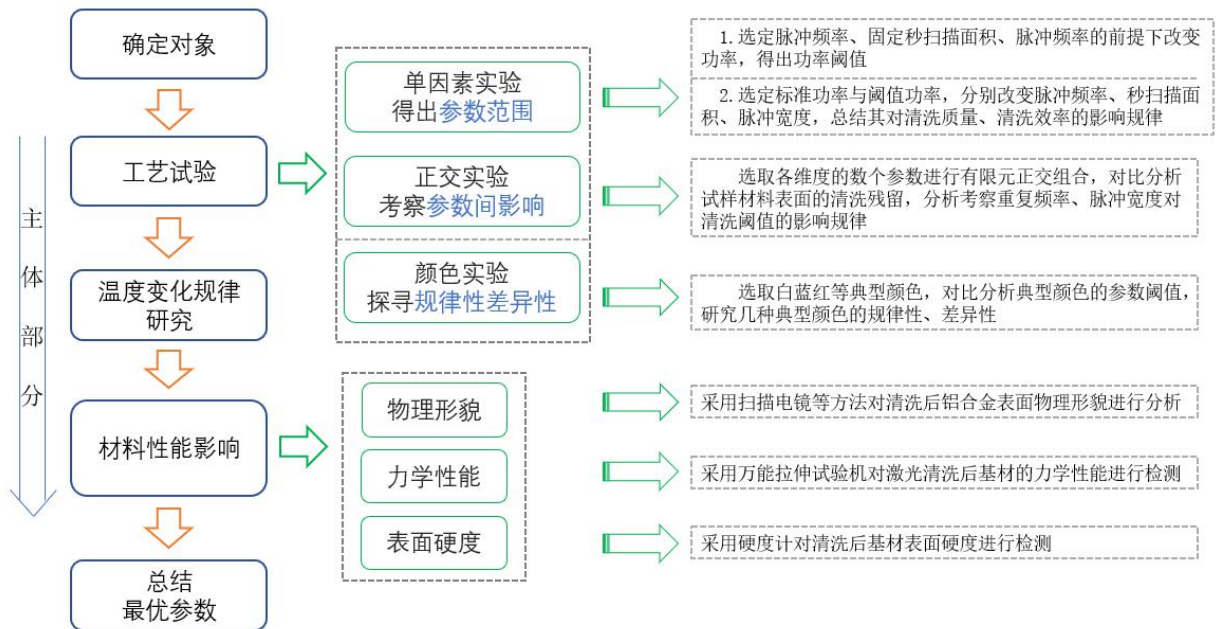


图 2.项目实施流程

### 具体实施方案：

#### 1. 硬件使用方面：

（1）使用激光清洗机器人进行清洗试验。

- (2) 使用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、X 射线光电子能谱分析(XPS)、原子力显微镜、激光扫描共聚焦显微镜等技术及仪器检测清洗过程中及清洗后该区域的物理形貌。
- (3) 使用万能拉伸试验机检测激光清洗对基材的力学性能的影响情况。
- (4) 使用硬度计测量表面硬度。
- (5) 拟采用红外热成像仪测量激光作用过程中材料表面温度的瞬时变化。

## 2. 软件使用方面:

- (1) 采用 LaserClean 软件进行激光参数调整。
- (2) 使用库卡 KUKA 系统软件操控载有激光头的机械臂。
- (3) 拟尝试采用有限元模拟软件进行建模, 并以实验验证模型。

## 3. 实验测试:

### 3.1 工艺试验单因素实验部分:

针对白颜色油漆, 确定固定脉冲频率(如 25kHz)下, 油漆的清洗阈值, 以及基材出现损伤、氧化变黑的功率阈值, 从而得出能够有效清除油漆而不损伤基材表面的功率范围。采用单因素实验方法, 研究重复频率、脉冲宽度、扫描振镜速度与扫描宽度对清洗质量、清洗效率的影响规律, 研究重复频率、脉冲宽度对清洗阈值的影响规律, 得到不同工况的清洗阈值。

白颜色油漆的单因素实验完成后, 目标扩展到白蓝红等典型颜色, 研究几种典型颜色的规律性、差异性。

### 3.2 工艺试验正交实验部分:

针对白蓝红等典型颜色油漆, 选取各维度的数个参数进行有限正交组合。使用扫描电镜、X 射线衍射、X 射线光电子能谱分析等方法, 对比分析试样材料表面的清洗残留, 分析考察重复频率、脉冲宽度对清洗阈值的影响规律。总结实验数据, 最终完成参数数据库的建立。

### 3.3 清洗过程材料表面温度变化规律:

针对清洗过程中材料表面瞬时温度, 采用红外热像仪检测瞬时温度, 结合工艺试验研究成果, 在工艺规范及参数数据库的指导下研究脉冲宽度、重复频率、扫描速度对温度场的影响规律, 确定不同温度条件下基材的损伤情况, 确立不同程度损伤下的参数阈值, 为后续基材的应用获得理论依据。

### 3.4 清洗对材料性能影响研究:

本部分将结合工艺实验、温度研究成果。针对激光清洗后的铝合金表面, 采用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、X 射线光电子能谱分析(XPS)、原子力显微镜、激光扫描共聚焦显微镜等技术仪器, 对清洗后铝合金表面物理形貌进行分析; 采用万能拉伸试验机对激光清洗后基材的力学性能进行检测, 确定不同情况下清洗对基材力学性能的影响; 采用硬度计对清洗后基材表面硬度进行检测, 确定不同情况下清洗对表面硬度的影响。

## 4. 项目的关键: 在保证能够实现清洗的同时使基材不受损伤。

## 5. 项目可能遇到如下困难:

参数及颜色种类繁多, 导致实验量偏大; 参数组合复杂, 且参数之间可能相互影响。

针对问题, 拟采取如下对策: 选出各方向数个典型参数进行有限正交组合, 分析参数之间的相互影响规律。

### （三）进度安排

表 1. 进度安排表

| 时间                          | 工作内容  | 结果   |
|-----------------------------|---|--|
| 2019 年 11 月 -<br>2020 年 1 月 | 学习基础知识，同时进行单因素实验，采用理论结合实践的方式掌握激光清洗相关设备的使用方法，积累初期经验。单因素实验完成后进行正交实验，至少完成一种颜色的正交实验。                                  | 获得单因素实验数据结果，给出参数范围。以初步确立参数数据库的形式总结实验内容           |
| 2020 年 1 月初 -<br>2020 年 2 月 | 假期阅读有关油漆清洗、颜色之间规律性差异性的资料，阅读激光清洗瞬时温度于基材损伤的资料，准备中期报告。   | 写出中期检查报告初稿                                       |
| 2020 年 2 月 -<br>2020 年 3 月  | 完善中期检查报告，完成全部正交实验，总结重复频率、脉冲宽度、振镜扫描速度、扫描宽度等对清洗质量、清洗效率的影响规律，及重复频率、脉冲宽度对清洗阈值的影响规律，并在实验中思考颜色的规律性、差异性。                 | 得出参数间影响规律<br>完成中期检查报告<br>初步建立参数数据库               |
| 2020 年 4 月 -<br>2020 年 5 月  | 采用红外热成像仪，得到脉冲宽度、重复频率、扫描速度对温度场的影响规律，确立不同程度损伤下的参数阈值。<br><br>进行补充性颜色规律实验，总结颜色规律及颜色间差异性。进一步思考针对不同颜色的最优参数做有关参数相互影响的实验。 | 得到不同程度损伤下的参数阈值<br><br>得出颜色的规律性与差异性               |
| 2020 年 5 月                  | 研究激光清洗对材料性能的影响规律，检测清洗后表面物理形貌、力学性能、表面硬度等。<br><br>总结参数复合结果，探究针对不同颜色的最优参数。   | 得出激光清洗对材料性能影响规律<br><br>以 Origin 三维曲面图像展示多种参数复合结果 |
| 2020 年 6 月                  | 总结实验数据，进行补充、验证性实验，探究完成参数数据库的建立，准备结题报告与答辩。   | 建立工艺规范，建立完整参数数据库<br><br>提交结题检查报告                 |

### （四）中期及结题预期目标

#### 中期目标：

对典型颜色完成单因素实验、正交实验，获得单因素实验数据结果与正交实验结果，得到激光功率、重复频率、扫描速度与扫描宽度、脉宽的参数范围，得到重复频率、脉冲宽度

对清洗阈值的影响规律。获得脉冲宽度、重复频率、扫描速度对温度场的影响规律，确立不同程度损伤下的参数阈值。初步建立参数数据库。

#### 结题目标：

得到典型颜色之间的差异性、规律性。完成清洗对材料性能影响的研究，得出对材料性能的影响规律。完成数据的整理，给出多种参数复合的结果，得到多种参数复合的最优解，。最终完成激光清洗工艺数据库与激光清洗工艺规范的建立，并给出参数复合下的最优解。

### （五）经费使用计划

表 2. 经费使用计划

| 预算类别  | 主要用途               | 预算金额（元） |
|-------|--------------------|---------|
| 材料费   | 购买带漆铝板             | 200     |
| 资料费   | 购买激光、油漆相关书籍        | 150     |
| 差旅费   | 路途费用               | 150     |
| 分析测试费 | 扫描电镜、红外热成像等仪器的使用费用 | 300     |

### （六）主要参考文献

- [1] 梁治齐. 实用清洗技术手册. 北京：化学工业出版社, 1999: 254-258.
- [2] 宋峰, 刘淑静, 颜博霞. 激光清洗——富有前途的环保型清洗方法[J]. 清洗世界 Cleaning World, 2004,20(5), 45-48.
- [3] Akira Tsunemi, Akifa Endo, Daiii Ichishima. Paim removal from Ainminum and composite substrate of aircraft by laser ablation using TEA CO<sub>2</sub> lasers, Pro. SPIE. 1998, 3343: 1018-1022.
- [4] Y.F.Lu, W.D.Song, M.H.Hong, et al . Laser removal of particles from magnetic head sliders. J,Appl.Phys, 1996, 80(1): 499～504.
- [5] 邹万芳. Nd:YAG 脉冲激光除漆的实验和理论研究[D]. 天津：南开大学, 2007.