

激光脱漆技术的研究进展

王晓东^{1,2}, 余锦^{1,2*}, 貂泽强^{1,2}, 何建国^{1,2}, 代守军^{1,2}, 孟晶晶^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光脱漆作为一种绿色、高效的新型脱漆技术,在制造和维修领域具有广泛的应用前景,正在逐步取代传统的脱漆工艺而发展成为最先进的物理脱漆方式。介绍了激光脱漆技术的原理,综述了基于不同激光器的激光脱漆技术的国内外研究进展,并对激光脱漆技术的发展前景进行了展望。

关键词 激光脱漆技术; 脱漆方法; 激光器类型; 设备维修

中图分类号 TN249 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.050005

Research Progress on Laser Paint Stripping Technology

Wang Xiaodong^{1,2}, Yu Jin^{1,2*}, Mo Zeqiang^{1,2}, He Jianguo^{1,2}, Dai Shoujun^{1,2}, Meng Jingjing^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract As a new green and efficient paint stripping technology, laser paint stripping has broad application prospects in the field of manufacturing and maintenance, and is gradually replacing the traditional methods to become the most advanced approach. We introduce the principle of laser paint stripping technology, review the research progress based on different lasers at home and abroad, and look forward the development prospect of laser paint removal technology.

Key words laser paint stripping; paint removal method; laser type; equipment maintenance

OCIS codes 350.3390; 350.5340; 140.3460

1 引言

表面脱漆是设备制造与再制造工程中的重要环节,如飞机、舰船在实施电镀、刷漆或喷涂之前,汽车和雷达系统等设备在维修和保养时,都要先清除其表面的旧漆^[1],再次涂装效果与脱漆质量有直接关系。

传统的脱漆工艺一般采用物理脱漆法或化学脱漆法。物理脱漆法包括高温加热法、高压喷射水法、盐浴法、喷砂法以及钢刷打磨法;化学脱漆法包括碱性和有机溶剂脱漆剂浸泡的方法^[2]。两种方法都存在很多弊病:物理脱漆法工作效率低、成本高、工作

环境恶劣、容易损伤基底表面等;化学脱漆法严重污染环境、危害身体健康,不适合局部清洗,而且会对复合材料造成损伤^[3],不适用于目前发展迅速且使用量日益增多的复合材料表面脱漆。激光脱漆技术能够克服传统脱漆方法中固有的弊病,在不损伤基底表面的情况下快速去除设备、工件表面的油漆。与传统的脱漆方法相比,具有以下优点^[4]:1)非接触式清洗。激光脱漆是以光的形式将能量传递到清洗对象上,没有机械接触,不会对清洗对象造成机械损伤;2)能精确去除任何位置、各种尺寸的油漆。激光光斑直径可以在零点几毫米到几厘米间调整,能轻松清洗形状不规则、部位隐蔽的油漆;3)实时监控。

收稿日期: 2019-06-22; **修回日期:** 2019-08-05; **录用日期:** 2019-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407400)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170035)、中国科学院光电研究院创新项目(Y70B15A13Y)

* **E-mail:** jinyu@aoe.cn.com

通过实时监测材料表面的反射光谱或者激光引起的表面声波,判断清洗效果,以便在清洗过程中随时调整清洗条件,实现智能控制;4)无毒无污染。不需要使用任何有害的化学清洗剂,从而引入附加杂质,仅产生少量的杂质,做好简单防护即可;5)多用途和可靠性。激光脱漆能清除多种材料表面的各种类型的油漆,并且能达到很高的清洁度;6)运行和维护成本低。激光脱漆系统可以长期稳定使用,需要人工少,运行成本低;7)更好的粘附力。经激光脱漆后的金属基底其表面粗糙度较小,且具有优良的微观结构,使得二次涂覆的油漆能更好地粘附在基底上^[5-7]。

激光脱漆因其具有的优点在很多工程领域中崭露头角,实用价值高,发展潜力大,有望取代传统的脱漆工艺而发展成为最先进的物理脱漆法^[8-9]。近年来,激光脱漆技术在理论研究、工艺开发以及设备制造方面取得了显著的进展。本文主要总结了激光脱漆技术的原理及国内外研究进展。

2 激光脱漆原理

激光脱漆是激光清洗技术在除漆方面的具体应用。本质是激光与物质相互作用,利用高能量的激光束照射在被清洗对象表面,使漆层发生膨胀、蒸发、燃烧、气化、分解、振动、剥离等一系列物理化学变化,最终脱离基底表面。目前激光清洗方法可分为两大类:干式清洗法^[10]和液膜辅助式清洗法^[11]。干式清洗法是直接将激光光束照射在清洗对象表面,实现清洗效果;液膜辅助式清洗法是先在被清洗对象表面覆盖一层液膜,再将激光照射到液膜上,液膜会瞬间汽化,所产生的爆炸性冲击波作用于污染物,从而达到清洗目的。干式清洗法操作简单,应用广泛;液膜辅助式清洗法效率较高^[12],但是操作麻烦,而且液膜可能在激光作用下与基底发生化学反应,引入新污染^[13]。

激光脱漆一般采用干式激光清洗,其作用机制主要分为烧蚀效应和振动效应两种机制。激光脱漆过程中,两种机制同时存在,但有主次之分,区分的关键在于去除的油漆对于激光的吸收能力。比如,对于某一特定波长的激光,若漆层对其吸收明显,则烧蚀效应起主要作用;若漆层对其吸收不明显,则振动效应起主要作用^[14]。

激光脱漆的烧蚀效应机制如图1所示,高能量的脉冲激光或高功率的连续激光照射在附着于基底表面的油漆层上,漆层因吸收大量的激光能量会导致温度不断升高。当漆层内部的激光能量密度足够

大时,就会因高温而发生熔化、燃烧、分解或气化,从而脱离基底表面。

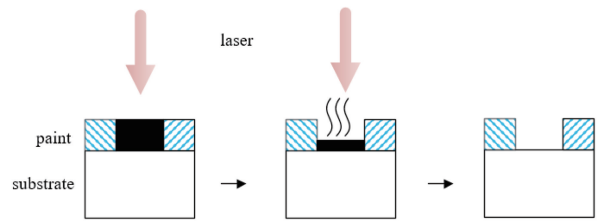


图1 激光烧蚀效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser ablation effect

激光脱漆的振动效应机制如图2所示,脉冲激光照射在基底表面的油漆层上,部分激光能量被油漆层吸收,部分激光会透过漆层直接作用在基底表面被基底吸收,油漆层和基底会在极短的时间内升温,并产生热膨胀现象。由于油漆与基底的热膨胀系数不同,激光脉冲持续时间又极短,所以会在漆层与基底结合的界面处产生巨大的应力差,因应力差而形成的振动能克服漆层与基底之间的粘附力作用,从而使漆层脱离基底表面。

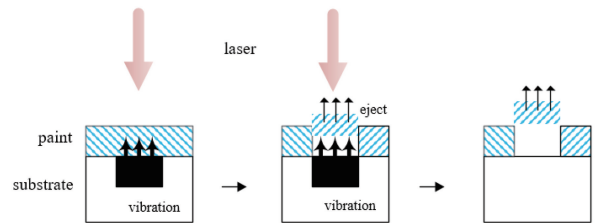


图2 激光振动效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser vibration effect

从两种清洗机制原理可以看出^[15]:烧蚀效应可以实现逐层脱漆、精准脱漆,能满足一些特殊要求。且脱漆效果依赖于激光作用在漆层上所产生的热量积累,所以连续和脉冲激光都可以使用。缺点在于脱漆过程中漆层温度要达到熔点甚至于沸点,所以需要注入较高的激光总能量,产生的高温液滴的飞溅会导致安全问题;振动效应由于脱漆过程中漆层没有发生相变,所需的激光总能量较小,但不能实现油漆的逐层剥离,且脱漆效果依赖于激光作用下漆层瞬间加热和基底内部产生的热应力,故只能采用短脉冲激光来实现。

3 激光脱漆技术的研究进展

激光脱漆技术在1974年被首次提出,美国陆军机动装备研究与发展中心的Fox^[16]在研究如何加强激光照射靶面时所产生的应力波时,将油漆涂在树脂玻璃和铝表面,然后使用调Q钕玻璃激光器进

行照射,结果在激光照射下漆层表面产生强烈的光致应力波,照射位置处略大于光斑面积的漆层被粉碎性去除。如在漆层表面施加一层辅助水膜,同样条件下会产生更强的应力波。同时还研究了光致应力波随时间的变化情况,发现施加水膜可以明显增大应力波的半波宽。自此,人们展开了对激光脱漆技术的各种研究。1995年《蒙特利尔协定书》规定禁止使用大量危害环境的化学溶剂之后,激光脱漆技术的绿色环保优势愈发凸显,从而掀起了一场持续的研究热潮,促进了该技术的快速发展,至今,已经取得了很大的进步及广泛的应用。激光脱漆的效果与激光脱漆设备密切相关,而激光器是其中的核心部分,需要根据具体的清洗要求和环境进行合理选择。目前用于激光脱漆的激光器主要有CO₂激光器、Nd:YAG激光器和光纤激光器,不同类型的激光器在研究和实际应用中有各自的特点。

3.1 CO₂ 激光脱漆设备

CO₂激光脱漆设备是最早投入工业应用的激光脱漆设备,输出功率高,工作寿命长。使用CO₂气体作为工作介质,输出平均波长为10.6 μm的激光,一般金属对其吸收率低于10%,而油漆材料对其吸收率高达90%,因此能够实现高效脱漆且不损伤金属基底^[17]。早在1985年,美国的Woodroffe就使用波长为10.6 μm、脉冲能量为1 kJ、脉冲宽度为20 μs、重复频率为10 Hz的CO₂激光器进行了脱漆实验,并取得了良好的效果^[2]。但由于当时脉冲式CO₂激光器的制造成本高,因此激光脱漆技术未得到真正的推广应用。

为了研究激光脱漆对基底材料性能的影响,1991年,美国里昂南部激光技术公司Head等^[18]使用高功率CO₂脉冲激光去除飞机金属蒙皮上石墨环氧复合材料的油漆。检测了脉冲激光去除油漆过程中各种飞机结构材料性能潜在的损坏或损失形式,并在被清洗的表面重新涂漆,测试了涂漆的物理性能、附着力和防腐保护能力,在所有样品中没有发现不良变化,证明了激光脱漆技术在飞机表面维修和二次重覆油漆应用方面的可能性。1996年,希腊佩特雷大学Pantelakis等^[19]研究了不同种类激光清除漆层后基底力学性能发生的变化。分别使用CO₂、横向受激大气(TEA)CO₂、钇铝石榴石(YAG)、准分子激光器照射以及等离子体刻蚀的方法针对2024号铝合金进行了脱漆工作,并对脱漆完成后的铝合金基底进行了材料塑性和韧性测试,包括测量材料的屈服应力、极限拉伸应力、断裂延伸

率、能量密度以及韧性等指标。对比发现经TEA CO₂激光器脱漆的铝合金不仅材料塑性几乎没有变化,韧性还得到了大幅提升。而经YAG激光器脱漆后,材料的断裂延伸率和能量密度以及韧性都稍有降低。2005年,中国科学院电子学研究所郑光^[20]采用高平均功率的TEA CO₂激光器对飞机蒙皮进行了脱漆实验,发现较佳的能量密度为6~8 J/cm²。即使用该能量密度进行脱漆前后飞机蒙皮抗拉强度、疲劳强度和维氏硬度等力学性能没有明显差异,得出TEA CO₂激光脱漆不会给飞机蒙皮带来安全隐患的结论。

为了研究工艺参数对激光烧蚀脱漆效果的影响,1995年,德国Urenco公司Schweizer等^[21]建立了一个基于光吸收定律的激光清洗能量模型,以此为基础设计制作了用于飞机蒙皮脱漆的工业级TEA CO₂脉冲激光器,其单脉冲能量为9 J、重复频率为330 Hz、超高斯平顶模输出,激光输出平均功率最低为2 kW。仅需要15个脉冲就能完全除去厚度为100 μm的漆层,脱漆速率达7 m²/h。使用3台这样的激光器,仅用3 d就能完全清除面积为1600 m²的飞机表面漆层,取得了良好的脱漆效果和经济效益。但其体积庞大,不利于搬运,此外平顶模输出虽然能使被清洗对象受热均匀,但在远距离传输下对于激光光束质量的要求较高。

2002年,中国科学院上海光学精密机械研究所罗红心等^[22]采用自主研发的5000 W TEA CO₂连续激光器实现了飞机蒙皮表面厚度为70 μm的双组分面漆清除。激光功率密度为30 W/mm²、扫描速度为400 mm/min时,仅单次扫描就能实现漆层的完全脱落,且基底没有损伤。尽管使用连续激光脱漆不利于基底的散热,但通过提高扫描速度可以降低基底的温升,既提高了脱漆速率,又不会造成基底过多的热积累。

2006年,华中科技大学郭为席等^[23]采用高功率脉冲TEA CO₂激光器,对不同颜色不同种类的油漆进行了清洗实验,测量了其各自的清洗阈值与损伤阈值。红色醇酸漆的完全清洗阈值为10.37 J/cm²、损伤阈值为11.43 J/cm²;红色金属喷漆的完全清洗阈值为9.66 J/cm²、损伤阈值为10.37 J/cm²;黄色金属喷漆的完全清洗阈值为10.71 J/cm²、损伤阈值为11.07 J/cm²。

2010年,新加坡义安理工学院Chen等^[24]使用平均功率为120 W、峰值功率和重复频率都特别高的CO₂板条脉冲激光器成功清除了低碳钢表面的

航海涂料。结果表明:激光的功率密度和搭接率是影响激光脱漆后基材表面质量的关键因素。激光功率密度偏低,达不到完全脱漆的效果;激光功率偏高,会造成能量浪费,甚至对基材造成不可逆的损伤;搭接率过高或者过低都会造成基材表面粗糙度偏大。实验测得:激光功率密度为 19 kW/cm^2 、光斑搭接率为 50% (效果近似于平顶激光) 时对厚度为 $25 \mu\text{m}$ 的漆层能够取得良好的脱漆效果;对较厚的漆层(实验中为 $500 \mu\text{m}$) 则需要重复扫描多次才能清除,不仅非常耗时,还会使漆层碳化,基层升温甚至融化。为了减少这些不良反应,提出了一种爆破清除法(Blast-and-clear method),先用高功率密度的激光扫描清除掉大部分油漆,再使用相对较低功率密度的激光清除剩下的残留物,既提高了脱漆速率,又降低了基底的损伤。

2013年,印度拉贾拉曼纳先进技术中心 Kumar 等^[25]使用高重复频率 TEA CO_2 激光器在惰性气体氛围中清除环氧树脂涂层。在相同的能量密度下,分别使用脉冲宽度为 200 ns 和 $3 \mu\text{s}$ 的激光束照射漆层,发现长脉冲激光在单个脉冲下脱掉的漆层要比短脉冲激光厚。原因是短脉冲激光辐照漆层时产生的等离子体形成了一道屏障,削弱了激光能量。还发现激光脱漆所需的能量阈值在惰性气体环境下比在空气环境下低。

2016年,马来西亚吉兰坦大学 Razab 等^[26]使用平均功率为 30 W 的 CO_2 连续激光器对汽车表面的旧漆层进行了脱漆实验。发现激光脱漆效率与激光平均功率成线性关系,如图3所示,为了获得良好

的脱漆效果,需要根据油漆种类、辐射时间和激光源到靶材的距离选择最优的激光功率。同时建议在脱漆过程中首先使用高功率的激光器,等到剩余漆层较薄时再改用低功率的激光器,既能提高脱漆速度、又能保证基底不会受到损伤。

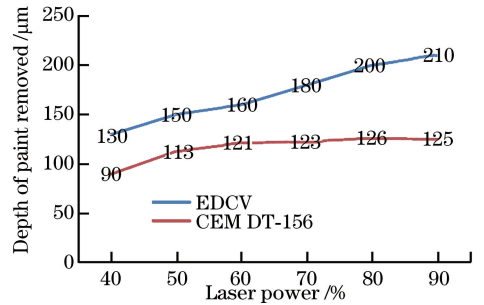


图3 采用 EDCV 和 CEM DT-156 测厚仪测量的不同激光功率下对应的脱漆深度^[26]

Fig. 3 Depth of paint removed for different laser powers by using EDCV and CEM DT-156 techniques^[26]

为了对激光烧蚀脱漆过程进行实时监测,提高脱漆效率以及避免基底损伤,2009年,法国塞德克斯大学 Coutouly 等^[27]在使用 TEA CO_2 激光烧蚀脱漆实验时利用一个简单的麦克风收集激光烧蚀脱漆过程中产生的声波信号,如图4所示。发现刚开始激光烧蚀脱漆时所采集到的声波信号振幅很大,在烧蚀过程结束时声波信号的振幅显著减小,所以可以通过分析声波信号的变化来判断漆层是否得到完全清除,进而判断基底是否受到损伤。这种实时检测声波的方法能够替代传统的视觉检测方法,为开发激光脱漆实时控制系统提供了参考。

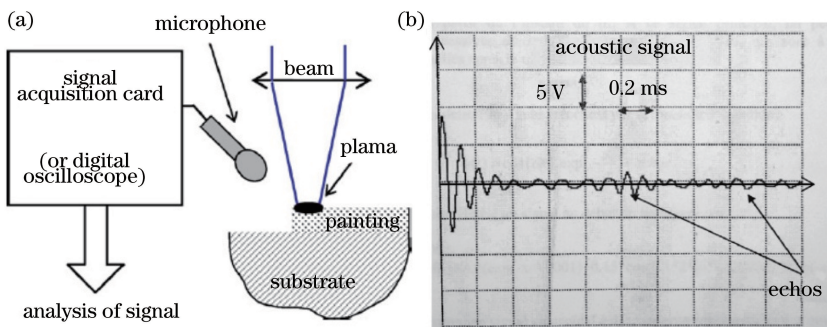


图4 声波监测实验^[27]。(a)实验设置示意图;(b)激光清洗过程中记录的声音信号

Fig. 4 Acoustic wave monitoring experiments^[27]. (a) Diagram of experimental set-up;

(b) acoustic signal recorded during the laser cleaning process

3.2 Nd:YAG 激光脱漆设备

与 CO_2 气体激光相比,Nd:YAG 固体激光器输出电光效率高、体积小、质量轻、易于搬运,可通过光纤柔性传输,适应比较恶劣的工作环境,在激光脱漆

中也得到了广泛应用。

1995年,美国南加利福尼亚大学 Liu^[28]对激光去除墙面油漆涂鸦的应用前景进行了总结,并对不同类型、模式、参数的激光器进行了脱漆实验研究,

测得激光能量密度达到 10^7 W/cm^2 时可去除非导体基底表面的油漆。通过对比不同种类激光的除漆效率和经济成本发现,使用 Nd:YAG 调 Q 激光器是最有效的除漆方法,用平均功率为 15 W、重复频率为 50 Hz 的 Nd:YAG 调 Q 激光器去除面积为 1 m^2 、厚度为 $14 \mu\text{m}$ 的漆层大约需要 10 min,证明了这种激光器可应用于脱漆设备。

为了研究工艺参数对激光烧蚀脱漆效果的影响,1997 年,日本东京电力公司 Ashidate 等^[29]研究了使用不同脉冲宽度且由光纤耦合输出的 Nd:YAG 脉冲激光器对电塔进行的脱漆除锈效果。在激光重复频率为 50 Hz、脉冲宽度分别为 9 ns 和 200 ns 时,实现对镀锌钢电塔上涂覆厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的环氧树脂底漆和聚氨酯面漆的有效去除。发现对于脉冲宽度为 9 ns 的短脉冲激光,能量密度只有高于 1.7 J/cm^2 时才能去除漆层,同时会损伤基底,所以短脉冲激光不适合于激光脱漆;而对于脉冲宽度为 200 ns 的长脉冲激光,能量密度在 $3.3 \sim 4.4 \text{ J/cm}^2$ 时就可在不损伤镀锌钢基底的情况下完全去除表面漆层。2006 年,法国原子能研究中心(CEA Saclay)Brygo 等^[30]研究了 Nd:YAG 激光的能量密度、重复频率和脉冲宽度对于烧蚀脱漆效率的影响。在激光波长为 532 nm、重复频率为 1~10 kHz、脉冲宽度分别为 5 ns 和 100 ns 的实验中,显示在重复频率为 10 kHz、能量密度为 1.5 J/cm^2 时脱漆效率最高,还得出结论:1)高重复频率的激光可以提高烧蚀脱漆效率,降低烧蚀脱漆的能量阈值;2)高能量密度下,长脉冲激光的烧蚀脱漆效率要比短脉冲高。

2014 年到 2016 年,马来西亚吉兰坦大学 Abdul Razab 等^[31-34]对汽车工业的激光脱漆技术进行了研究,得出结论:1)对激光能量密度的合理控制不仅能够保证完全去除漆层,而且由于金属基底升温极低而不会造成性能的下降;2)热分解过程中,漆层材料的热扩散率对清洗阈值、吸收系数、热负荷和平均脱漆效率影响很大;3)图层化学元素组分不同,激光脱漆的效率也大不相同。

2016 年,四川大学刘彩飞等^[35]使用 ANSYS 有限元软件模拟了移动脉冲激光脱漆过程中的漆层和基底的温度变化,用激光波长为 1064 nm、脉冲宽度为 7 ns、重复频率为 1~8 Hz 的 Nd:YAG 脉冲激光进行实验。数值模拟和实验研究了不同时刻漆层表面的温度分布情况以及激光能量、扫描速度和重复频率对漆层表面温度分布的影响。结果表明:随着

激光光斑的移动,漆层表面的温度会发生变化,呈现出拖尾巴的彗星状;漆层表面的温度随着激光能量和重复频率的增大而线性增高,随扫描速度的提升而指数性降低;高重复频率的激光扫描造成的温度累加效应能够提升激光脱漆效率。

2018 年,四川大学 Zhang 等^[36]研究了重复频率为 20 kHz、脉冲宽度为 140 ns 的准连续 Nd:YAG 激光脱漆过程。通过数值模拟时间域上漆层在相邻激光脉冲作用下的温度变化情况,得到去除指定厚度漆层所需的脉冲数量,进而实现逐层扫描脱漆。与实验结果对比后发现当漆层较厚时,导热系数高的金属基底对漆层的温升影响不大,模拟结果与实验结果吻合较好;脱漆过程中,当漆层逐渐变薄或者薄于热穿透深度时,基底开始影响漆层的温升,这时模拟结果与实验结果有较大的差异。所以使用激光清洗厚度小于激光热穿透深度的漆层时,需要考虑基底对于漆层温度变化的影响。

Nd:YAG 激光脱漆过程中占主导的作用机理不仅有烧蚀效应,还有振动效应。2000 年,德国克雷格·沃尔特斯协会 Walters^[37]制作了一台用于清除有机油漆涂层的小型化短脉冲 Nd:YAG 激光脱漆样机。激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 15~30 ns,重复频率为 10~20 Hz,采用远程手持的方式。发现与 CO_2 激光的烧蚀效应不同,短脉冲激光脱漆是一种激光冲击波效应。如图 5 所示,脉冲激光作用在漆层表面,使一小部分的漆层蒸发并产生冲击波,整个漆层破碎成微粒溅射出去,从而达到脱漆效果,清除掉的漆层是比较大的颗粒状物质。耗能较低且对于单层漆仅需单个脉冲就能去除整个厚度的漆层,清洗阈值约是长脉冲或连续激光在同样情况下的烧蚀脱漆阈值的 1/5。证明该样机节能高

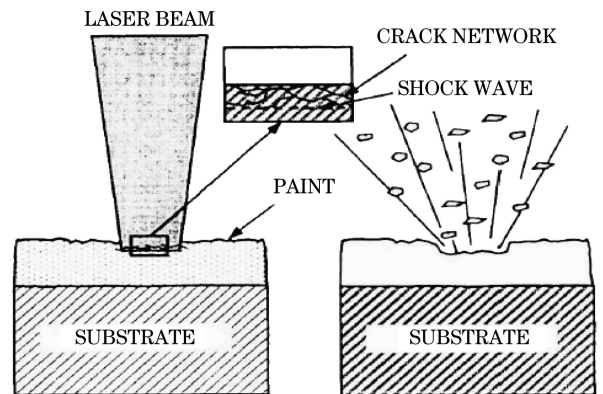


图 5 短脉冲 Nd:YAG 激光的脱漆机制^[37]

Fig. 5 Paint removal mechanism for short Nd:YAG pulses^[37]

效,在小面积脱漆方面的应用效果非常好。

2007年到2012年,南开大学邹万芳等^[2,38]、田彬等^[39-40]和施曙东等^[41-42]针对激光振动效应脱漆机理进行了详细的研究。建立了温度分布模型、热应力模型以及热弹性振动模型,并进行了持续的优化与完善。通过数值求解得到激光脱漆的理论清洗阈值与损伤阈值,以声光调Q的Nd:YAG激光器作为光源进行了脱漆实验,实验与理论计算结果相吻合。

为了研究工艺参数对激光振动脱漆效果的影响,2013年,四川大学杨洁等^[43]采用波长为1064 nm、脉冲宽度为13.6 ns的Nd:YAG脉冲激光对铝合金基材表面厚度为23 μm 的暗红色漆层进行了单脉冲辐照实验,分析了纳秒脉冲激光脱漆的振动效应机理。实验中测得激光光强呈高斯分布,输出光斑半径约为3.8 mm,其作用在漆层表面的能量密度为1.5 J/cm^2 时可获得最佳脱漆效果,此时漆层整块脱落,伴有碎屑溅射,脱漆裸露的基底面积大于光斑尺寸,半径达5.5 mm。分析了激光辐照下漆层与基底内部因升温而导致的热致应力效应和界面处漆层汽化所产生的等离子体冲击波效应,发现激光作用下的热致应力是使漆层与基底分离的主要原因,等离子体冲击波的形成则导致了漆膜约束层的断裂,进而使得漆层从基底脱离。同年,大连理工大学章恒等^[44]使用波长为1064 nm、脉冲宽度为1.0 ms、重复频率为2 Hz的长脉冲宽度YAG脉冲激光对FV520B高强度不锈钢表面厚度为50 μm 的黑色油漆进行脱漆实验。实验中分别向样品表面吹氩气和注水,发现不同的辅助条件下低频YAG脉冲激光的脱漆机理也不相同:吹氩气时为烧蚀效应;注水时则为烧蚀效应和振动效应的共同作用。同时发现注水不仅能够明显提高脱漆效果,也能大幅提升不锈钢基底的损伤阈值。

2017年,四川大学Han等^[45]研究了不同能量密度下的短脉冲激光脱漆机理,并提出了一种脉冲激光脱漆工艺参数的选择方法。实验中使用波长为1064 nm、脉冲宽度为13.6 ns的Nd:YAG脉冲激光辐照铝基底表面涂覆的环氧聚酯混合漆层,通过改变激光输出功率得到了漆层厚度与清洗阈值之间的关系曲线,如图6所示。发现激光脱漆主要受激光蒸发效应、热应力效应和激光等离子体效应的影响,其中热应力效应脱漆效果最好,而激光蒸发效应和等离子体效应脱漆效果较差,应该尽量避免。同时提出在激光脱漆过程中应选择低于汽化阈值,高

于热应力效应的入射光强,可有效利用涂料与基底之间的热应力效应,避免汽化和等离子体效应对基体的损伤。

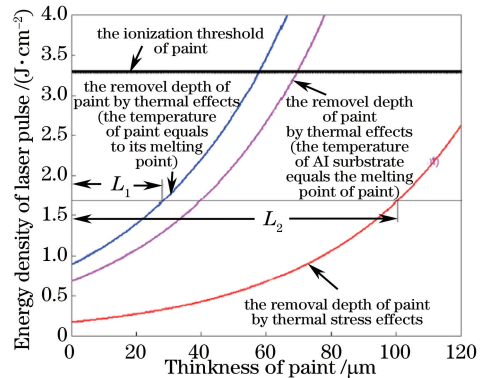


图6 清洗阈值与漆层厚度之间的关系^[45]

Fig. 6 Relationship between cleaning threshold and paint thickness^[45]

为了对激光脱漆过程进行实时、快速、准确的监测,2018年,四川大学陈林等^[46]采用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术,采集了Nd:YAG激光(波长为1064 nm,脉冲宽度为10 ns,重复频率为1 Hz,能量密度为25 mJ/mm^2)脱漆过程中激发等离子体的发光光谱,发现油漆中的特征元素Ti在波长为375.9 nm和428.7 nm处的LIBS光谱信号强度随激光脉冲的作用不断减小,在油漆完全去除前后呈跳跃趋势减少。所以可通过分析LIBS光谱信号强度变化来判断漆层是否得到完全清除,进而判断基底是否受到损伤。

3.3 光纤激光脱漆设备

光纤激光器输出光束质量好,可实现柔性传输,且随着生产技术的成熟,价格也越低,在激光脱漆技术中的应用前景也被发掘出来。

为了研究光纤激光脱漆对基底材料性能的影响,2015年,中国南车南京浦镇车辆有限公司朱伟等^[47]使用波长为1064 nm、脉冲宽度为10 μs 、重复频率为40 kHz的脉冲光纤激光器清除了铝合金表面的丙烯酸气雾漆,获得了良好的脱漆效果。通过测量脱漆前后铝合金的表面形貌以及硬度值,发现脱漆后的铝合金表面不仅没有明显损伤,硬度还得到了强化,脱漆前后硬度从100 HV增大到180 HV,证实了激光脱漆能够提高基材表面的力学性能的结论。2018年,哈尔滨工业大学陈浩^[48]采用波长为1070 nm的连续光纤激光器清除汽车表面的油漆。通过研究脱漆过程中的温度及应力分布,发现连续激光脱漆的机理主要是烧蚀效应。实验测

得对于铝合金和碳钢表面厚度为 $40\ \mu\text{m}$ 的黑色丙烯酸树脂漆的完全清洗阈值分别为 $1.07\ \text{J}/\text{mm}^2$ 和 $2.67\ \text{J}/\text{mm}^2$ 。完全清洗后的基底表面没有出现损伤,基材硬度得到提高,拉伸强度、屈服强度、弹性模量基本没有变化,延展性有所降低,但二次喷涂油漆的粘附力几乎没有变化。

为了研究工艺参数对光纤激光脱漆效果的影响,2013年,印度理工学院 Madhukar 等^[49]研究了不同运转模式的光纤激光器对于激光脱漆的影响。结果表明,无论光纤激光器为哪种运转模式,都存在特定工艺参数范围,可以在避免基底损伤的情况下完全清除漆层。对于激光功率一定的连续激光,只有扫描速度位于一定范围内时才能够完全清除漆层;在保证脱漆效果的前提下,增加激光功率的同时可以增加扫描速度,从而提高脱漆速率,同时降低清除单位体积油漆所消耗的激光总能量;对于脉冲激光,当重复频率为 $1\ \text{kHz}$ 时,清除单位体积的油漆所需的激光总能量随着占空比和相应的扫描速度的增加而降低;当重复频率为 $50\sim 150\ \text{Hz}$ 、光斑搭接率为 50% 时,清除单位体积的油漆所需的激光能量随着占空比的增加而增加。

2017年,伊拉克巴格达大学 Jasim 等^[50]使用波长为 $1064\ \text{nm}$ 、脉冲宽度为 $250\ \text{ns}$ 、最大单脉冲能量为 $1.12\ \text{mJ}$ 、最大重复频率为 $80\ \text{kHz}$ 的脉冲光纤激光器进行了烧蚀脱漆实验,脱漆对象为铝合金表面厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 的高透明聚合物油漆。研究了激光能量、重复频率以及光斑搭接率对烧蚀区域的直径和深度、材料的表面形貌和粗糙度的影响,结果显示在最优的工作条件下,脱漆速率达 $11.7\ \text{cm}^2/\text{min}$,效率达 $2.9\ \text{cm}^3/(\text{min}\cdot\text{kW})$,完全脱漆后的铝合金表面粗糙度为 $1.3\ \mu\text{m}$ 。虽然光纤激光脱漆效率要比 CO_2 激光低,但是精度更高,同时发现了振动效应机理的作用,可通过分析脱漆过程中材料表面的发射光谱强度随加工深度的变化情况来判断是否完全脱漆。同年长春理工大学李师等^[51]研制了重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 、波长为 $1064\ \text{nm}$ 的高功率光纤调 Q 脉冲激光器,平均功率达 $101.4\ \text{W}$,脉冲宽度为 $138.4\ \text{ns}$ 。通过对高铁车厢表面的脱漆实验,研究了激光能量密度和扫描速度对脱漆效果的影响,发现当扫描速度为 $5000\ \text{mm}/\text{s}$,能量密度为 $19108\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,能够完全清除高铁车厢表面厚度为 $22\ \mu\text{m}$ 的清漆,脱漆速度大约为 $1\ \text{m}^2/\text{h}$,对高铁车厢的基底材料的损伤阈值为 $34392\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

2019年,中国科学院光电技术研究所张志研

等^[52]对相邻激光脉冲作用在漆层上的温度变化情况进行了理论仿真,发现对高重复频率(kHz)脉冲激光而言,脉冲间隔对漆层材料温度变化影响非常小,可以忽略不计。同时采用平均功率为 $10\ \text{W}$,脉冲宽度为 $200\ \text{ns}$,重复频率为 $30\ \text{kHz}$ 的光纤激光器对铝合金表面的丙烯酸脂类油漆进行烧蚀脱漆实验,发现由于脉冲间隔对漆层材料温度变化影响非常小,作用于漆层的脉冲数与烧蚀深度之间呈一维线性关系,为激光定量脱漆提供了参考依据。

2019年,江苏大学的高辽远等^[53]采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件模拟分析了 ns 脉冲激光能量密度、扫描速度、光斑搭接率对铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层温度场和去除深度的影响。结果表明:漆层表面和基底表面最高温度随激光能量密度的增加而线性升高;扫描速度以搭接率的形式影响脱漆效率,扫描速度越慢,热积累效应越高,但清洗速率降低,当搭接率为 50% 时效果最佳。确定了最优的工艺参数,使用平均功率为 $100\ \text{W}$,波长为 $1064\ \text{nm}$,脉冲宽度为 $100\ \text{ns}$ 的脉冲光纤激光器进行实验。结果表明:对于厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的铝合金表面漆层,在激光能量密度为 $25\ \text{J}/\text{cm}^2$,搭接率为 50% 的工艺参数下,可完全去除漆层,铝合金基底表面沟槽的峰谷高度(PVH)为 $50.234\ \mu\text{m}$,与模拟结果($50\ \mu\text{m}$)基本一致,符合涂装的工艺要求。

3.4 基于其他激光器的脱漆设备

英国曼彻斯特理工大学 Li 等^[54-56]报道了直接使用输出功率分别为 $120\ \text{W}$ 和 $2.5\ \text{kW}$ 的半导体激光器完成了混凝土、不锈钢表面的氯化橡胶(CR)和环氧树脂涂层的清除作业,发现清洗效率和清洗深度分别随着半导体激光输出功率和能量密度的增大而线性提高。还发现与其他激光设备清洗时的激光化学、激光声学 and 激光烧蚀过程不同,其清洗过程主要是激光控制的燃烧过程,通过注入辅助 O_2 可以将清洗效率提高 4 倍,但相应因燃烧而造成的危险性增大。与其他激光脱漆设备相比,半导体激光在漆层的吸收系数、烧蚀阈值和热载荷等方面都没有任何优势,但是其便携性、高效率以及脱漆深度可控性能够弥补这些不足。

3.5 小结

通过分析国内外基于不同类型激光器的激光脱漆研究的进展,发现:

1) 激光脱漆的主要机制除了与激光器类型密切相关外,还受到运行模式、材料性质以及激光参数等的影响。对于 CO_2 激光,当工作波长为 $10.6\ \mu\text{m}$

时,有机物油漆对该波长的激光吸收能力很强,但金属对该波长激光反射率很高,故烧蚀效应为 CO₂ 激光脱漆的主要作用机制;对于 Nd:YAG 激光和光纤激光,工作波长一般在 1 μm 左右,有机物油漆对该波长激光的吸收能力较弱,且具有一定的透明度,当激光器输出为连续或长脉冲激光时,烧蚀效应为其脱漆的主要作用机制,当激光器输出为短脉冲激光时,振动效应为其脱漆的主要作用机制。

2) 在实际应用方面,CO₂ 激光器输出功率高、脱漆效率高,且在脱漆过程中较容易控制,避免基底损伤,但体积庞大,不能使用光纤传送光束,灵活性较差^[57],只适用于工厂、车间等条件较好的工作环境;Nd:YAG 激光器和光纤激光器体积小,能够使用光纤柔性传输光束,灵活性较好,并且随着激光器制造技术不断提升,激光器的功率水平也大幅提高,既能适用于工厂、车间等较为简单的工作环境,也能适用于野外、高空等复杂恶劣的工作环境,但为了保证较高的脱漆效率以及保护基底不受损伤,还需配备先进的表面监测及反馈技术;尽管半导体激光器体积小、易于携带、效率高,但在脱漆方面的优势并不明显。

3) 激光脱漆研究仍然存在以下问题:a)目前所建立的激光脱漆理论模型存在较大的局限性,不能完全揭示激光脱漆过程;b)Nd:YAG 激光器和光纤激光器实现有效脱漆需要更为先进的表面实时监测和反馈技术的支持,这方面研究较少;c)虽然国内外对激光脱漆过程中的工艺参数选择和优化做了大量实验研究,但尚未系统地建立激光脱漆过程中关键工艺参数与漆层去除量之间的关系;d)我国对于激光脱漆技术的研究起步较晚,理论与工艺研究还不够成熟,且激光器的制造水平稍落后,与国外激光脱漆技术发展存在一定差距。

4 激光脱漆技术应用实例

欧美国家对于激光脱漆技术的研究与应用一直处于领先地位,已经研制了许多先进的激光脱漆设备,占据了大部分的市场,国内在这方面与国际先进水平尚有较大差距。

荷兰的 XYREC 公司研发了一款大型的激光脱漆机器人(LCR),适用于所有类型的商用和军用飞机以及直升机,如图 7 所示(<https://www.xyrec.com/products-and-services/robot-systems/>)。这款激光脱漆机器人配备一台输出功率为 20 kW 的 CO₂ 激光器,能够清除各种颜色的漆层,还有一个

内置的闭环颜色识别和控制系统,能精确地剥离金属和复合材料表面,同时实现选择性剥离漆层。一共有四种尺寸,最小的可用于战斗机和直升机等小型飞机,最大的可用于 A380 等大型客机。2017 年夏,XYREC 公司为美国一家大型航空公司安装一台最大的激光除漆机器人,可实现 30 m 距离范围内的 μm 量级精准除漆。



图 7 激光脱漆机器人展示图

Fig. 7 Rendering of LCR

美国 General Lasertronics 公司于 2009 年开发了一套自动旋翼叶片剥离系统(Automatic rotor blade stripping system),用于剥离美国海军和海军陆战队使用的 H-53 和 H-60 直升机旋翼叶片上的漆层,如图 8 所示(<http://www.lasertronics.com/wp/products/>)。这套系统配备了一台 Nd:YAG 激光器,搭配了闭环颜色识别和控制系统,可实现自动脱漆,比人工打磨节省 90% 的时间。

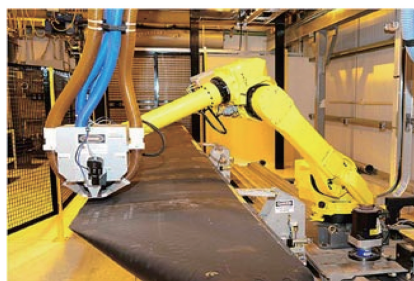


图 8 自动旋翼叶片剥离系统

Fig. 8 Automatic rotor blade stripping system

美国 Concurrent Technologies 公司和美国国家机器人工程中心于 2015 年合作开发了两套先进的机器人激光脱漆系统(Advanced robotic laser coating removal system),用于 F-16 战斗机和 C-130 货机的整机脱漆,如图 9 所示^[58]。这两套系统是半自动,共有 6 个机器人,每个机器人配备一台 IPG 的光纤激光器,可缩短 50% 的脱漆时间。

德国 CleanLASER 公司开发了 CL 系列的商用激光清洗机,输出功率从 50 W 到 1000 W 不等,采用的激光器分别为小功率的 Nd:YAG 脉冲激光器



图9 ARLCRs对F-16战斗机进行激光除漆过程^[58]

Fig. 9 Process of laser painting removal for F-16 fighter by ARLCRS^[58]

和大功率的连续光纤激光器,可手持,也可全自动操

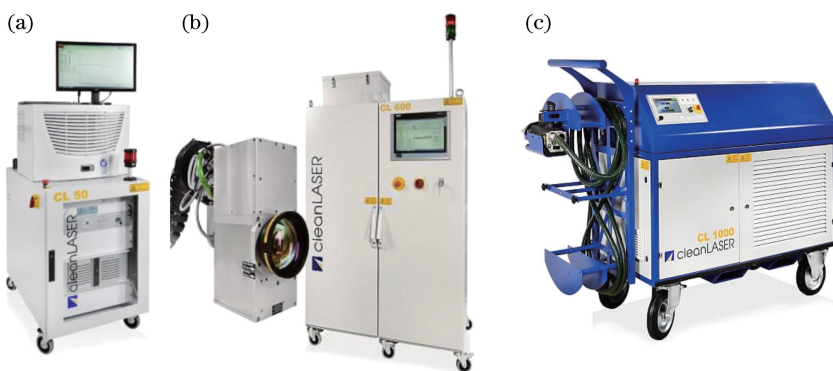


图10 激光清洗机。(a) CL 50;(b) CL 600;(c) CL 1000

Fig. 10 Laser cleaning machines. (a) CL 50; (b) CL 600; (c) CL 1000



图11 1 kW级高功率脉冲激光清洗样机

Fig. 11 1 kW high power pulse laser cleaning machine

5 结 论

随着科技水平的提高和制造技术的发展,激光脱漆设备方面,由单一的气体激光器发展到现在的气体、固体、光纤激光脱漆设备,并且不断朝着小型化、自动化、智能化的方向发展,具有非常广阔的应用前景。理论方面,主要发展了激光脱漆的烧蚀效应机理和振动效应机理,但考虑到目前基于各类机理所建立的物理模型仍然局限于对激光除漆过程中光-声-热-等离子体等多场耦合演化进程的定性研究,未来有必要对激光脱漆过程中系统各参数演变理论模型进行研究。实验方面,在激光除漆效果的

作,能够满足不同面积、不同厚度的脱漆要求。如图10所示(<https://www.cleanlaser.de/de/produkte/lasersysteme/>)。

近年来,激光脱漆技术在国内受到了极大关注,国内的学者也做了大量的研究并且取得了不俗的成果。比如中国科学院半导体研究所研制出了1 kW级高功率脉冲激光清洗样机,如图11所示(<http://www.semi.cas.cn/cgzl/201403/P020190912501490503360.pdf>),可用于表面脱漆,已小批量生产及销售,技术水平在国内保持领先,并在国际处于先进地位,但离实现真正的商业化还存在一定的距离。

实时监测和反馈控制方面仍有很大的提升空间,未来有必要重点关注。工艺方面,国内外学者已经针对激光脱漆过程中的工艺参数选择和优化开展了大量实验研究,并在实际应用中取得了良好效果,未来则期待系统地建立激光脱漆过程中关键工艺参数与漆层去除量之间的关系。应用方面,目前国内外研究的激光脱漆技术已经走出实验室,成为激光加工的重要组成部分。此外,国外众多厂商推出各类激光脱漆设备产品,也指明了激光脱漆技术精细化、实用化的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Liu Y J, Liu J H. Status and prospects of laser cleaning technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(2): 60-62.
刘雨佳, 刘建华. 激光清洗技术的现状及展望[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(2): 60-62.
- [2] Zou W F. Experimental and theoretical researches on Nd: YAG pulsed laser paint removal[D]. Tianjin: Nankai University, 2007.
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.

- [3] Xuan S Y. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016(8): 15-18.
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.
- [4] Song F, Liu S J, Niu K Z, et al. Principle and application research on laser cleaning [J]. *Cleaning World*, 2005, 21(1): 1-6.
宋峰, 刘淑静, 牛孔贞, 等. 激光清洗原理与应用研究[J]. *清洗世界*, 2005, 21(1): 1-6.
- [5] Li X, Huang T, Chong A W, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 340-344.
- [6] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, et al. Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: part 1: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 281: 193-205.
- [7] Razab M K A A, Jaafar M S, Abdullah N H, et al. Surface morphology study in laser paint removal mechanisms on selected national car coated substrate [J]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, 11(9): 6161-6165.
- [8] Kumar A, Bhatt B, Behere G, et al. Laser-assisted surface cleaning of metallic components [J]. *Pramana*, 2014, 82(2): 237-242.
- [9] Steen W M, Mazumder J, Watkins K G. *Laser material processing*[M]. 9th ed. London: Springer, 2003: 327-350.
- [10] Lu Y F, Song W D, Low T S. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface: theory and applications [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, 54(1/2/3): 181-185.
- [11] Lu Y F, Zhang Y, Song W D, et al. A theoretical model for laser cleaning of microparticles in a thin liquid layer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(11A): L1330-L1332.
- [12] Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702003.
雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强钢表面锈蚀层的去除研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0702003.
- [13] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030005.
- [14] Autric M L, Oltra R. Basic processes of pulsed laser materials interaction: applications to laser cleaning of oxidized surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5777: 982-985.
- [15] Roberts D E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4/5/6): 1067-1070.
- [16] Fox J A. Effect of water and paint coatings on laser-irradiated targets[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(10): 461-464.
- [17] Prinsloo F J, van Heerden S P, Ronander E, et al. Efficient TEA CO₂-laser-based coating removal system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6346: 63462Q.
- [18] Head J D, Niedzielski J P. *Laser paint stripping*[R]. South Lyon: Laser Technologies Inc South Lyon Mi, 1991.
- [19] Pantelakis S G, Kermandis T B, Haidemenopoulos G N. Mechanical behavior of 2024 Al alloy specimen subjected to paint stripping by laser radiation and plasma etching[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1996, 25(2): 139-146.
- [20] Zheng G. *Study on laser paint stripping of aircraft surface*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2005.
郑光. 飞机蒙皮激光脱漆技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2005.
- [21] Schweizer G, Werner L. Industrial 2-kW TEA CO₂ laser for paint stripping of aircraft[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2502: 57-62.
- [22] Luo H X, Cheng Z G. High power CW CO₂ laser using in aircraft laser paint removing [J]. *Laser Journal*, 2002, 23(6): 52-53.
罗红心, 程兆谷. 大功率连续 CO₂ 激光器用于飞机激光去漆[J]. *激光杂志*, 2002, 23(6): 52-53.
- [23] Guo W X, Hu Q W, Wang Z M, et al. Paint removal research on high power pulse TEA CO₂ laser [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(3): 32-35.
郭为席, 胡乾午, 王泽敏, 等. 高功率脉冲 TEACO₂ 激光除漆的研究[J]. *光学与光电技术*, 2006, 4(3): 32-35.
- [24] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal [J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 249-253.
- [25] Kumar M, Bhargava P, Biswas A K, et al. Epoxy-

- paint stripping using TEA CO₂ laser: determination of threshold fluence and the process parameters[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 46: 29-36.
- [26] Razab M K A A, Jaafar M S, Suhaimi F M, et al. Study on performance of CO₂ laser in paint removal over selected national car model [J]. *Jurnal Teknologi*, 2016, 78(3): 203-209.
- [27] Coutouly J F, Deprez P, Breaban F, et al. Optimisation of a paint coating ablation process by CO₂ TEA laser: thermal field modelling and real-time monitoring of the process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(17): 5730-5735.
- [28] Liu K, Garmire E. Paint removal using lasers [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4409-4415.
- [29] Ashidate S I, Obara M. Rust and paint stripping from power transmission towers with a pulsed Nd:YAG laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3092: 740-743.
- [30] Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F, et al. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(6): 2131-2138.
- [31] Abdul Razab M K A, Jaafar M S, Rahman A A, et al. Estimation of threshold fluence, absorption coefficient and thermal loading of car coated substrate in laser paint removal [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 554: 439-443.
- [32] Abdul Razab M K A, Jaafar M S, Rahman A A. A study of temperature effects on car coated substrate in laser paint removal [J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2014, 14(2): 39-48.
- [33] Abdul Razab M K A, Jaafar M, Rahman A, et al. Influenced of threshold fluence, absorption coefficient and thermal loading in laser paint removal mechanisms [M] // Sung W P, Kao J C M. *Environment, Energy and Applied Technology*. London: CRC Press, 2015: 885-891.
- [34] Abdul Razab M K A, Jaafar M S, Abdullah N H, et al. Influence of elemental compositions in laser cleaning for automotive coating systems [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2016, 37(2): 197-206.
- [35] Liu C F, Feng G Y, Deng G L, et al. Temperature field analysis and experiment study about paint irradiated by moving laser based on FEM [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 274-279.
- 刘彩飞, 冯国英, 邓国亮, 等. 有限元法移动激光除漆的温度场分析与实验研究 [J]. *激光技术*, 2016, 40(2): 274-279.
- [36] Zhang Z Y, Zhang J Y, Wang Y B, et al. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns quasi-continuous wave laser [J]. *Optik*, 2018, 174: 46-55.
- [37] Walters C T. Short-pulse laser removal of organic coatings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4065: 567-575.
- [38] Zou W F, Xie Y M, Xiao X, et al. Application of thermal stress model to paint removal by Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(7): 074205.
- [39] Tian B. Theoretical model and experimental study of dry laser cleaning [D]. Tianjin: Nankai University, 2008.
- 田彬. 干式激光清洗的理论模型与实验研究 [D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [40] Tian B, Zou W F, He Z, et al. Paint removal experiment with pulsed Nd:YAG laser [J]. *Cleaning World*, 2007, 23(10): 1-5.
- 田彬, 邹万芳, 何真, 等. 脉冲 Nd:YAG 激光除漆实验 [J]. *清洗世界*, 2007, 23(10): 1-5.
- [41] Shi S D. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning [D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- 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.
- [42] Shi S D, Du P, Li W, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0903001.
- 施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0903001.
- [43] Yang J, Han J H, Duan T, et al. Mechanical analysis of paint film stripping from aluminum plate surface by means of nanosecond laser [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 718-722.
- 杨洁, 韩敬华, 段涛, 等. 纳秒激光去除铝板表面漆膜热力学过程分析 [J]. *激光技术*, 2013, 37(6): 718-722.
- [44] Zhang H, Liu W W, Dong Y Z, et al. Experimental and mechanism research on paint removal with low frequency YAG pulsed laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121401.
- 章恒, 刘伟巍, 董亚洲, 等. 低频 YAG 脉冲激光除漆机理和实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 121401.
- [45] Han J H, Cui X D, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint

- removal from metal substrate at 1064 nm: a multi-pulse model[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(19): 1947-1959.
- [46] Chen L, Deng G L, Feng G Y, et al. Study on the mechanism of laser paint removal based on LIBS and time resolved characteristic signal[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(2): 367-371.
陈林, 邓国亮, 冯国英, 等. 基于 LIBS 及时间分辨特征峰的激光除漆机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(2): 367-371.
- [47] Zhu W, Meng X W, Dai Z C, et al. Research on the laser de-painting process of carbon steel surface[J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(11): 126-128.
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.
- [48] Chen H. Process of basic research on laser cleaning technology of car bodysurface paint [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
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.
- [49] Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 264: 892-901.
- [50] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 60-66.
- [51] Li S, Li Y, Li P, et al. Study on the varnish stripping experiment based on the high power fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106008.
李帅, 李野, 李磐, 等. 基于高功率光纤激光器的清漆剥离实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S106008.
- [52] Zhang Z Y, Wang Y B, Liang H, et al. Removal of low thermal conductivity paint with high repetition rate pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102009.
张志研, 王奕博, 梁浩, 等. 高重复频率脉冲激光去除低热导率涂漆[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102009.
- [53] Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002.
- [54] Li L. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4/5/6): 231-253.
- [55] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. Removal of chlorinated rubber coatings from concrete surfaces using a 120-W high power diode laser[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 141(1): 40-47.
- [56] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. An investigation into the feasibility and characteristics of using a 2.5 kW high power diode laser for paint stripping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138(1/2/3): 109-115.
- [57] Zhang X, Chen Y H. Research progress and prospect of application of different types laser in laser cleaning technology[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(8): 37-40.
张鑫, 陈玉华. 各类型激光器在激光清洗技术应用中发展现状及展望[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(8): 37-40.
- [58] Schlett J. Laser paint removal takes off in aerospace [OL]. [2018-03-11]. <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=61353&PID=20&VID=144&IID=924>.