

飞机金属蒙皮以及复合材料表面 激光除漆技术*

靳 森^{1,2}, 王静轩², 袁晓东², 胡 勇¹, 姚彩珍²

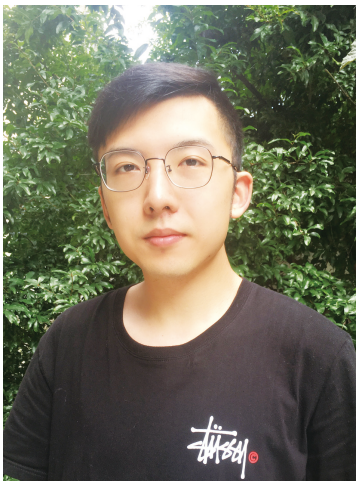
(1. 东北大学理学院, 沈阳 110819;

2. 中物院激光聚变研究中心, 绵阳 621000)

[摘要] 激光除漆作为一种环保、高效的新型除漆技术是激光清洗技术的一个重要分支, 而飞机在使用过程中需要定期对原有漆层进行去除。分别对飞机金属蒙皮和复合材料部件表面的激光除漆工业应用进展进行了介绍, 详细分析了飞机金属蒙皮以及复合材料部件表面激光除漆的作用机理, 展望了激光除漆技术在国内航空制造业的发展方向。

关键词: 激光除漆; 激光清洗; 金属蒙皮; 复合材料; 航空航天

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.063



靳 森

硕士研究生, 研究方向为激光清洗物质表面污染物和飞机蒙皮激光除漆。

飞机在使用一段时间后, 表面会因为外力、太空辐射和各种气流冲刷等原因而导致蒙皮的脱落、龟裂、老化等损伤, 因此需要定期对飞机原有漆层进行去除^[1]。

传统的飞机蒙皮除漆工艺主要包括溶剂除漆、机械除漆和喷砂除漆。国内目前普遍采用的是以二氯甲烷^[2]为主溶剂的脱漆剂除漆, 这种方法虽然快速, 但是有毒有污染、消耗量大而且成本很高。同时, 由于如今应用于飞机的复合材料^[3]不断增多, 溶剂除漆容易造成基材损伤, 因此溶剂除漆方法受到很多限制。机械除漆是利用传统手工打磨, 这种方法效率低、耗时长、精确度低, 还容易造成潜在的材料破坏等, 因此也不适用。目前先进的喷砂除漆(喷塑料丸工艺)^[4], 其效率、成本以及环境保护方面都优于溶剂除漆, 是一种有效的复合材料表面除漆工艺, 但是这种方法对于厂房和环境的要求高, 并且

会对操作人员及环境造成影响。因此, 研究一种高效、环保、安全, 低成本的飞机除漆技术显得尤其重要。

激光除漆是利用激光高能量脉冲让材料表面的漆层、杂质、污染物发生瞬间蒸发、剥离等达到洁净目的的工艺, 其优点十分明显。与溶剂除漆工艺相比, 不会对基底造成损伤也不会残留废液对环境造成污染; 与机械除漆相比, 不会造成机械损伤; 与喷砂除漆相比, 对厂房环境要求不会太高, 且不会损伤周围装置。此工艺只需消耗电量, 大大节约了使用成本^[5], 并且还有洁净度高、可以进行复杂形状基材表面除漆工作^[6]的优点。这项工艺不仅适用于飞机金属蒙皮漆层去除, 同样广泛应用于飞机复合材料表面。

国内的飞机大多采用铝合金为基材, 国外很早就研究以碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)^[3]为基材的飞机部件, 性能对比如表1^[3]所示。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51535003, 51701087, 61675186, 61505170); 中国博士后科学基金项目(2016M592709); 四川省博士后科学基金。

先进复合材料具有比模量及比强度高、抗疲劳好、可塑性强等优点,可以很大程度上减轻飞机重量,减少油耗。因此复合材料在飞机结构上得到越来越广泛的应用,已经成为衡量飞机先进性的标志之一。

飞机铝蒙皮表面涂层体系^[7]包括:蒙面表面预处理、底漆层、面漆层。目前国内外主要飞机制造厂所采用飞机铝蒙皮表面涂层体系如图1^[7]所示,铝蒙皮表面预处理方法有电化学氧化法(阳极化法)、化学氧化法和磷化底漆3种。底漆主要有环氧聚酰胺类底漆和聚氨酯类底漆,而面漆一般采用双组分脂肪族聚氨酯涂料。

复合材料表面防护涂层体系包括表面处理层、聚氨酯底漆、弹性聚酯腻子、聚氨酯面漆,如图2^[7]所示。

激光除漆机理

激光除漆是激光清洗技术的一

个分支,激光清洗是近来迅速发展的新型清洗技术。目前激光清洗技术已经发展出干式清洗法^[8],湿式清洗法^[9]和等离子体冲击波法^[10]。其中激光除漆技术就是采用干式清洗法,利用较高能量或功率的脉冲激光直接照射在除漆材料表面,克服漆层与基材间的结合力,使漆层被清除干净。激光除漆主要有两种机制,烧蚀效应和振动效应^[11]。

烧蚀效应是漆层被能量密度足够高的激光照射后,漆层因为高温而发生燃烧、分解或者气化,从而最终将漆层清除。作用机制如图3^[12]所示。

振动效应是利用脉冲激光辐射到漆层表面,漆层和基底分别吸收部分激光能量,在极短时间内因受热而产生热膨胀,在基底和漆层之间形成振动波,产生强大的脱离应力,使漆层克服与表面结合力而脱离基底^[12]。其作用机制如图4^[12]所示。

在激光除漆试验中,影响除漆效

果的重要激光参量包括:激光能量密度、脉冲宽度、脉冲频率和扫描速度。因此需要选择合适的工艺参数,使漆层完全脱落并且对基材不造成损伤。当激光功率密度高于某一阈值时,除漆效果虽然存在,但基底表面也已损伤,该阈值称为损伤阈值;另一方面,当激光功率密度低于某一阈值时,即使延长激光清洗时间,也无任何清洗效果,该阈值为清洗阈值。因此,当激光功率密度处于清洗阈值和损伤阈值之间时,提高激光功率密度才能提高清洗效果。

为了探索激光能量密度和主要除漆机制的关系,南开大学的施曙东等^[12]进行了钢材漆层清洗阈值及损伤阈值下的温度随深度的仿真,得出不同阈值条件下温度随深度 γ 的分布如图5^[12]所示,可见清洗阈值条件下漆层中的温度低于熔点和汽化温度,温度的最大值发生在基底的浅表面,而迅速变化的温度产生的热应力

表1 不同材料的性能

材料	密度 / (g·cm ⁻³)	拉伸强度 / MPa	拉伸模量 / GPa	比强度 / (MPa·g ⁻¹ ·cm ³)	比模量 / (MPa·g ⁻¹ ·cm ³)
钢	7.8	1100	210	141	27
铝	2.7	500	75	185	28
钛	4.5	1500	120	333	27
CFRP	1.5	1600~3000	130~180	1067~2000	87~120

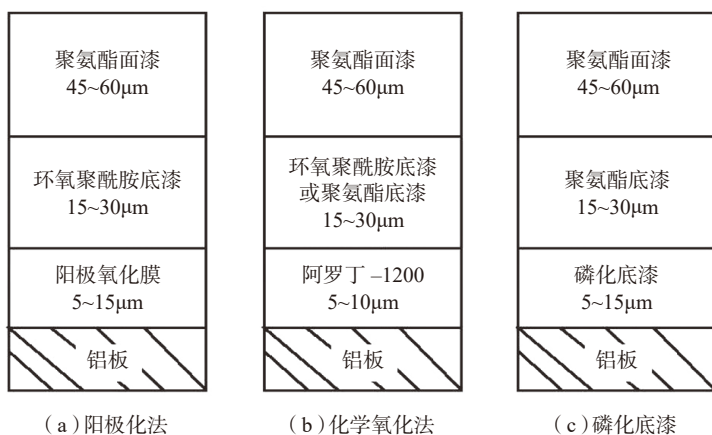


图1 3种涂层体系示意图

Fig.1 Sketch map of three kinds of coating system



图2 复合材料表面涂层体系示意图

Fig.2 Sketch map of coating system for composite material surface

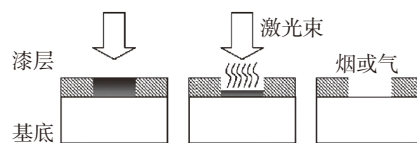


图3 烧蚀效应作用机制

Fig.3 Mechanism of ablation effect

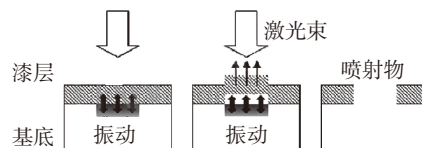


图4 振动效应作用机制

Fig.4 Mechanism of vibration effect

是漆层分离的脱离力来源。当激光能量密度远高于清洗阈值时,属于损伤清洗条件,激光光斑中心的基底温度已经接近或超过试验中的熔点,因此有烧蚀效应。可见,激光能量密度在清洗阈值条件下有效清洗机理是振动效应,而超过损伤阈值时有效清洗机理是振动效应和烧蚀效应。

激光与漆层作用时间越长,即激光脉宽越长,漆层表面易产生热积累,达到烧蚀效应的条件;相对的,振动效应需要的能量较低,激光脉宽在 ns 量级,因此在合适的激光能量密度下,脉宽在 ns 量级激光器的激光除漆的主要机制为振动效应^[13]。

同理,脉冲频率越高,激光单位时间作用次数更高,漆层表面单位时间内的易产生很高的热积累,达到烧蚀效应的条件。

脉冲激光器发出的激光扫描线是一系列非连续的点脉冲组成,依靠光束调整系统中的扫描振镜的往复摆动形成一条扫描线。激光扫描速度越慢,每条扫描线之间的搭接率越高,激光光斑单位时间作用涂层次数越高,清洗效率越高。

激光除漆国内外研究进展

1 飞机金属蒙皮除漆

20 世纪 80 年代,美国的

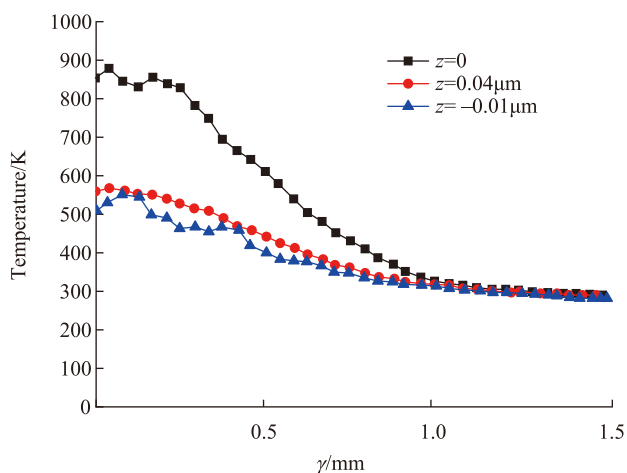
Woodroffe 等利用 CO₂ 激光器在单脉冲 1kJ、脉宽 20 μ s、重复频率 10Hz 的条件下为飞机脱漆,获得了良好效果。Head 等^[14]认为 CO₂ 激光除漆最佳功率密度是 6J/cm² 脉冲。1995 年,德国的 Schweizer 等^[15]采用 2kW 的 TEA CO₂ 激光器实现了飞机表面的除漆工作,使用 3 台激光器,在 3 天内将一架表面积为 1600m² 的飞机漆层去除,没有造成损伤。这标志着激光除漆技术正式应用到飞机金属蒙皮除漆工业领域。

国内方面,2002 年,罗红心等^[16]用连续 CO₂ 激光器进行了脱漆试验,结果表明脉冲激光更适合飞机脱漆。郑光等^[17]对高平均功率、高重复率的 TEA CO₂ 激光脱漆进行了系统的研究,结果得出飞机金属蒙皮激光脱漆前后,力学性能没有影响,不会有安全隐患。

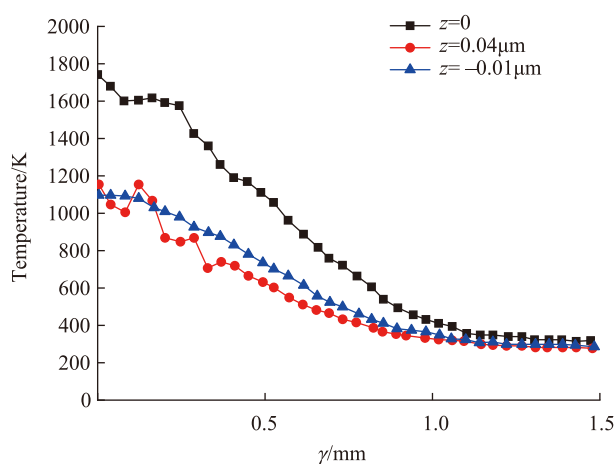
近年来, Madhukar 等^[18]用 1.07 μ m 波长的光纤激光器借助水射流辅助进行除漆试验,结果表明,水射流辅助激光除漆具有彻底去除残余灰的效果,并且提高了除漆效率。

Han 等^[19]在烧蚀形貌的基础上,结合数值模拟和试验,研究了激光除漆中烧蚀反应基本机制和优化参数,研究表明去除效果包括烧蚀效应、振动效应和激光等离子体效应,其中振动效应最明显,在去除过程中应避免激光等离子体效应。该研究基于热力学方程,数值模拟了激光脉冲在 1064nm 处的温度和热应力在油漆和基体中的空间分布,如图 6^[19]所示;并得到了不同油漆厚度 r 与损伤阈值的曲线分布,获得了不同油漆厚度下的激光除漆参数,如图 7^[19]所示;同时提出了一个多脉冲模型,并在恒定激光能量密度下进行了验证,可完美地去除较厚的油漆层。该试验研究为增加涂层去除的有效操作、降低基材损伤的风险提供很好的参考。

Jasim 等^[20]采用 ns 脉冲光纤激



(a) 清洗阈值条件下的温度分布



(b) 基底损伤条件下的温度分布

图5 不同阈值条件下温度随深度的分布

Fig.5 Distribution of temperature with depth under different threshold conditions

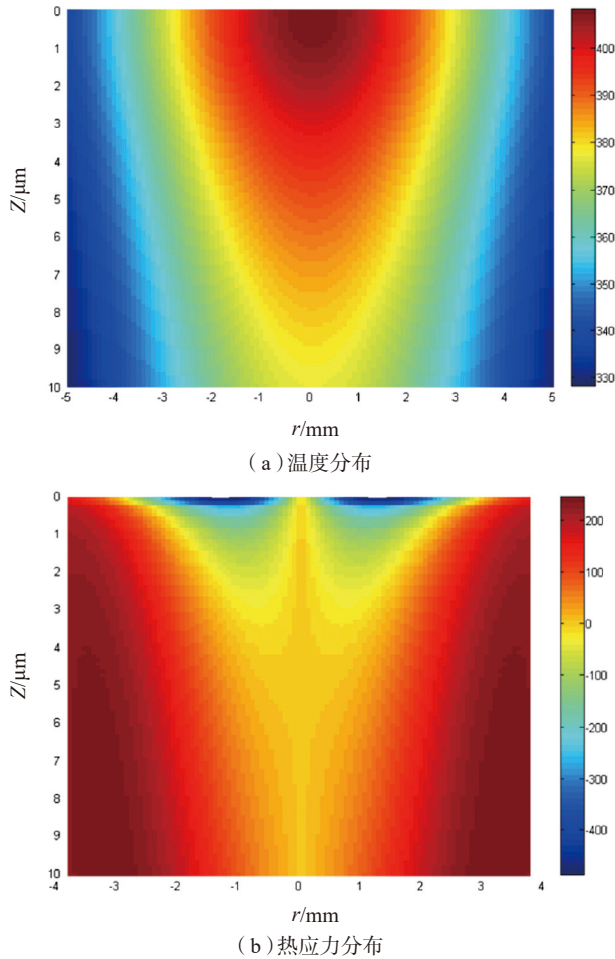


图6 不同参数的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of different parameters

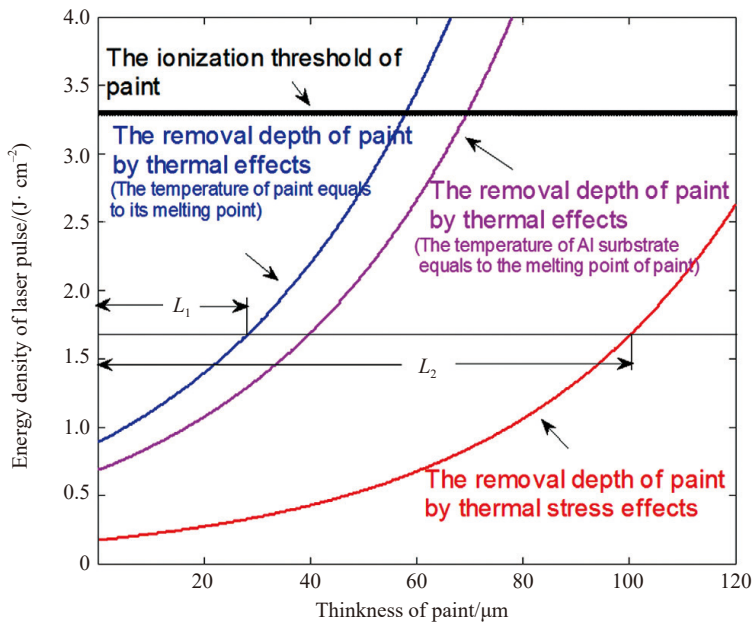


图7 不同厚度下的损伤阈值分布曲线
Fig.7 Distribution curve of damage threshold under different thickness

光器对白色聚合物漆和铝合金基片进行了激光脱漆研究。对单脉冲烧蚀效应进行了评估,测量烧蚀区尺寸,研究了脉冲重复率等参数对加工深度的影响,同时利用光学发射光谱来研究加工行为以及监测。结果表明,尽管油漆的透明度很高,但仍可以达到很高比例的去漆程度,发射光谱可以用来识别涂层是否去除干净。

胡久等^[21]分别对飞机蒙皮进行了激光除漆与溶剂除漆,对除漆后的零件氧化膜层厚度、完整性、零件力学性能,以及重新喷漆后漆层结合力等性能进行了测试。经过对比发现,激光除漆对零件表面氧化膜有一定的影响,但仍能满足零件氧化膜的厚度要求;除漆后零件的力学性能、膜的完整性、耐蚀性等没有差别;激光除漆后再喷漆的漆层结合力要优于溶剂除漆后的再喷漆漆层结合力。

陈林等^[22]采用 LIBS 技术,研究了油漆中特征元素对应的光谱特征峰强度随时间的变化情况,为快速准确实时判断油漆去除情况提供了参考。

2 复合材料除漆

早在 1977 年, Kibler 等^[23]就使用连续波 CO₂ 激光处理碳纤维/环氧树脂复合材料,探究了激光功率密度、光斑尺寸、光斑形状、材料铺层方式、靶板厚度和辐照时间等工艺参数对烧蚀效应的影响。

Hart^[24]研究了不同除漆技术对于 F-16 战斗机平尾复合材料表面漆层清除的效果,并进行了评价。结果表明,激光可以选择性地去除面漆保留底漆,也可以面漆和底漆一起去除;而且除漆效率很高,节约了工艺时间和成本,复合材料温度也一直未超过 80℃。

Iwahori 等^[25]采用 TEA CO₂ 激光器进行了碳纤维复合材料层压板表面激光除漆研究。结果表明,除漆前后复合材料层压板的拉伸强度、拉伸模量、压缩强度以及压缩模量等力

学性能未发生明显变化。

近年来,国内科研人员对飞机复合材料部件除漆研究也重视起来。占小红等^[26]采用50kHz的红外脉冲激光处理碳纤维复合材料,通过分析不同参数组合的微观形貌图,来研究激光功率和扫描速度分别对碳纤维增强复合材料表面形貌的影响,得出了表层树脂和污染物被清除且碳纤维未被损毁的激光工艺参数。

Genna等^[27]研究了激光清洗对于高性能碳纤维表面的影响,用激光辅助连接法将碳纤维连接到聚碳酸酯(PC)板中,对环氧树脂接头进行了试验研究。结果表明,激光预处理使接头强度显著提高,在最佳条件下,超过参考样品的两倍以上,但是如果考虑表观剪切强度,激光预处理并没有明显的优势。

Oliveira等^[28]用1024nm波长和脉宽550fs飞秒激光处理单向碳纤维增强复合材料。研究发现,通过选择适当的激光参数,可以选择性地去除环氧树脂,从而使碳纤维暴露出来。此外在碳纤维表面上激光诱导产生的亚微米周期性表面结构,有利于增强胶接工艺,并且对碳纤维有微加工作用。研究表明飞秒激光对于复合材料部件表面处理时有着重要意义。

Leone等^[29]用脉冲Yb:YAG光

纤激光器在碳纤维复合材料上进行了不同工艺条件的激光处理,研究了激光处理对于碳纤维复合材料层合板接头强度的影响,与未经处理和砂纸处理的样品进行了对比,结果如图8^[29]所示。结果表明,激光处理可以使表观剪切强度增加1倍。

Zhan等^[30]研究了激光表面处理对CFRP表面微观结构的影响,并考虑激光表面处理参数对剪切强度和破坏模式的影响。得出结论:当激光扫描速度为6000mm/s,激光功率密度为22.93kW/cm²,脉冲频率为100kHz时,CFRP表面上的树脂和各种污染物被清除,暴露的纤维被发现是连续和集成的。同时得出,激光处理后得到的最大剪切强度为27MPa,与没有表面处理的材料相比剪切强度提高了36.15%;并且得出剪切强度提高的原因是黏结剂侵入纤维之间的间隙,形成不明显的界面。

激光除漆技术国内外最新应用实例

2015年6月,由Concurrent Technologies公司和美国国家机器人工程中心开发的两套先进的机器人激光涂层去除系统(ARLCRS)被运送到犹他州空军基地用于F-16战斗机和C-130货机除漆^[31],如图

9所示。与以往的除漆系统相比,ARLCRS是半自动的,每个机器人都有IPG的光纤激光器,使得除漆时间缩短了50%。

2017年,荷兰的LR Systems公司计划在一家大型航空公司的维修设施上安装激光除漆机器人(LCR),模拟图见图10^[31]。激光除漆移动机器人高52英尺(约15.6m),臂展可达85英尺(约25.5m),是世界上体型最大的移动机器人之一。其采用全新设计的20kW CO₂激光器并且配备全机型机器人首次应用于商用客机进行激光除漆。这套除漆系统能在30m距离范围内输出精确对准的激光光束,精度可达微米量级。

2017年,四川省绵阳市的中国激光聚变研究中心自主研发的固体

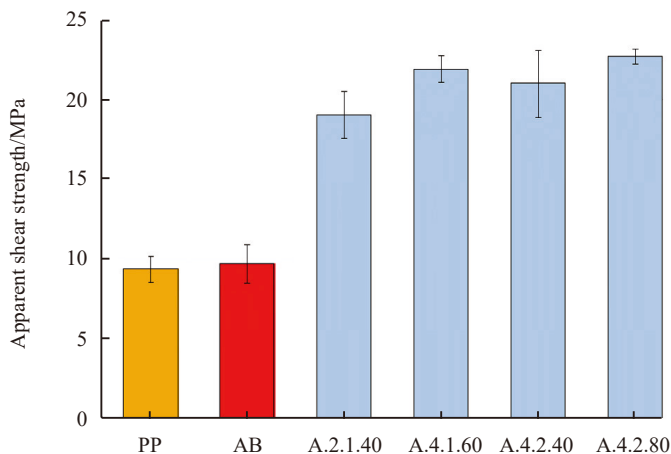


图8 不同样品的表观剪切强度

Fig.8 Apparent shear strength against the surface treatment



图9 ARLCRS对F-16战斗机进行激光除漆过程

Fig.9 Process of laser painting removal for F-16 fighter by ARLCRS



图10 LCR系统模拟图

Fig.10 LCR system simulation diagram

激光器,在位于西安泾渭工业园的工厂首次应用,进行各类合金材料激光除漆,如图 11 所示。除漆效果对比如图 12 所示,可以看出不同合金材料在选择适合的激光参数进行除漆后,基本可以去掉基底表面的漆层,但是具有以下缺点:激光除漆效率较低;部分合金除漆部分表面出现少量不规则黄色物质。据检测分析,黄色物质并非氧化物而是未去除的漆层,这是由于激光器的光束质量导致的漆层去除不均匀现象。

发展趋势及未来展望

综上,激光除漆未来研究趋势有如下特点:为了更加了解除漆的过程,分析不同除漆过程中的激光除漆作用机制;为了追求更好的除漆效



图11 自主研发激光器激光除漆过程
Fig.11 Process of laser painting removal by the independent-developed laser

果,寻找最佳激光工艺参数和提高除漆效率的方法;为了更好地保证漆层去除干净并且不造成基底的破坏,研究多种检测方法;为了不断证明激光除漆的可行性和优越性,应检测除漆后的基底除力学性能以及疲劳情况以外的性能变化。

在工业应用方面,国外发展趋势有 3 个特点:除漆种类多样化,由部分部件表面除漆扩展到整机除漆;除漆效率翻倍化,由手持式到自动化系统应用;除漆过程智能化,由人工控制除漆精度到机器控制,以及根据材料和分布不同对工艺参数进行实时调整,满足不同机型飞机除漆的多样化要求。我国的激光清洗技术的研究和设备的开发起步较晚,虽然取得了一些进步,由于光束质量不够优质和功率较低等缺点,大部分还在试验阶段,成熟的激光清洗设备^[32]不多,因此工业应用仍处于初步阶段。

国内虽有不少飞机金属蒙皮激光除漆研究,但是缺少激光光束扫描均匀性动态调控技术,即需要根据不同激光参量下基材及涂层之间的微观结构、物化特性及热耦合作用的规律,建立关键工艺参数对于涂层去除量精确控制的数据库,这是未来研究的重要方向。

国外越来越重视飞机激光除漆技术的商业价值,强调军用化到商业

化的转型,因此未来国外会有大量的民用客机激光除漆公司涌现。普及激光除漆技术的工业应用,为推动现代工业清洗技术的革新提供很大助力。对于国内而言,当今先进制造业已成为国际竞争的制高点,激光制造是我国“十三五”期间部署的重点任务,激光除漆作为激光清洗技术范畴,是激光制造中的一种先进技术,在工业中应用价值及潜力巨大,大力发展激光清洗技术对我国高端制造业与国际竞争力大幅提升有非常重要的战略意义。

结论

(1)激光除漆是一种高效、环保、安全,低成本的新型除漆技术,在国内工业应用中受制于高功率短脉冲激光器研制困难以及效率、精度低等缺点。

(2)飞机金属蒙皮激光除漆和复合材料部件表面激光除漆的主要作用机制视激光参数而定,在清洗阈值到损伤阈值之间大多仍是以振动效应为主。

(3)国外对于激光除漆技术以及复合材料研究较早,已有很多成功应用案例。国内虽还处在理论摸索阶段,但近年来也有很多对于激光除漆技术研究的优秀成果以及很多自主研发的激光器应用于工业生产。

(4)未来的激光除漆工业将沿着多样化、自动化的趋势逐渐走向商业化转型。激光除漆的显著优势和应用前景值得我们投入大量人力、物力、财力进行深入研究,这对于现代工业清洗的革新和提高国家工业实力有着重要的意义。

参考文献

[1] 郑光. 飞机蒙皮激光脱漆技术研究[D]. 北京: 中国科学院研电子学研究所, 2005.

ZHEN Guang. Study on laser paint removal technology of aircraft skin with



(a) 铝合金表面除漆前后对比



(b) 钛合金表面除漆前后对比

图12 不同合金除漆前后对比图

Fig.12 Contrast diagram of different alloy before and after paint removal

- skin[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [2] 王议, 颜杰, 唐楷. 飞机蒙皮脱除技术研究进展[J]. 化工技术与开发, 2013, 42(4): 22-24.
- WANG Yi, YAN Jie, TANG Kai. Research progress of aircraft skin removal technology[J]. Chemical Technology and Development, 2013, 42(4): 22-24.
- [3] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 26-31.
- LIU Shanguo. Advanced composite material technology for foreign aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 26-31.
- [4] 周华. 喷塑料丸褪漆技术在现代飞机维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2008(3): 76-77.
- ZHOU Hua. Application of spray plastic pill lacquer technology in modern aircraft maintenance[J]. Aeronautical Maintenance and Engineering, 2008(3): 76-77.
- [5] 周倩. 一种飞机蒙漆激光清洗设备: CN201310424758.3[P]. 2015-03-25.
- ZHOU Qian. An aircraft lacquer cleaning equipment: CN201310424758.3[P]. 2015-03-25.
- [6] 邱兆飙, 朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 416-420.
- QIU Zhaobiao, ZHU Haihong. Research on pulse laser rust removal process[J]. Application of Laser, 2013, 33(4): 416-420.
- [7] 陆文明, 季建霞, 赵宝华. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 13-18.
- LU Wenming, JI Jianxia, ZHAO Baohua. The pretreatment and coating of aircraft skin surface[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 13-18.
- [8] TAM A C, LEUNG W P, ZAPKA W, et al. Laser cleaning techniques for the removal of surface particulates[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [9] MOSBACHER M, CHAOUI N, SIEGEL J, et al. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces[J]. Applied Physics A, 1999, 69(S1): 331-334.
- [10] LEE J M, WATKINS K G. Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(11): 6496-6500.
- [11] WALTERS C T. Short-pulse laser removal of organic coatings[C]//Proceedings of SPIE 4065, High-Power Laser Ablation III. Bellingham: SPIE, 2000: 567-575.
- [12] 施曙东, 杜鹏, 李伟. 1064nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 58-64.
- SHI Shudong, DU Peng, LI Wei. Study on 1064nm quasi continuous laser paint removal[J]. Chinese Laser, 2012, 39(9): 58-64.
- [13] 邹万芳. 激光干式除漆作用机制的分析[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(6): 60-62.
- ZOU Wanfang. Analysis of the mechanism of laser dry paint removal[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(6): 60-62.
- [14] HEAD J D, NIEDZIELSKI J P. Laser paint stripping[R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1991.
- [15] SCHWEIZER G, WERNER L. Industrial 2-kW TEA CO₂ laser for paint stripping of aircraft[C]//Proceedings of SPIE 2502, Gas Flow and Chemical Lasers: Tenth International Symposium. Bellingham: SPIE, 1995.
- [16] 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.
- LUO Hongxin, CHENG Zhaogu. High power continuous CO₂ laser used for aircraft laser lacquer[J]. Laser Journal, 2002, 23(6): 52-53.
- [17] 郑光, 谭荣清. TEA CO₂ 激光脱漆实验研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 82.
- ZHEN Guang, TAN Rongqing. Experimental study on TEA CO₂ Laser paint stripping[J]. Laser Journal, 2005, 26(5): 82.
- [18] MADHUKAR Y K, MULLICK S, NATH A K. Development of a water-jet assisted laser paint removal process[J]. Applied Surface Science, 2013, 286(4): 192-205.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 胡久, 马路, 王文全. 激光除漆与溶剂除漆对飞机蒙皮零件的性能影响[J]. 金属世界, 2017(6): 6-9.
- HU Jiu, MA Lu, WANG Wenquan. Influence of laser paint removal and solvent removal on properties of aircraft skin parts[J]. Metal World, 2017(6): 6-9.
- [22] 陈林, 邓国亮, 冯国英. 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.
- CHEN Lin, DENG Guoliang, FENG Guoying. 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.
- [23] KIBLER K G, CARTER H G, EISENMANN J R. Response of graphite composites to laser radiation: final scientific report 1[R]. Texas: General Dynamics/Fort Worth, 1977.
- [24] HART W G J. Paint stripping techniques for composite aircraft components[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR, 2003.
- [25] IWAHORI Y, HASEGAWA T, NAKANE K. Experimental Evaluation for CFRP Strength after Various Paint Stripping Methods[J]. Aeronautical and space sciences Japan, 2007, 55(644): 235-240.
- [26] 占小红, 范喜祥, 高川云. 脉冲激光清洗碳纤维增强树脂基复合材料表面研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 38-42.
- ZHAN Xiaohong, FAN Xixiang, GAO Chuanyun. Surface cleaning of carbon fiber reinforced polymer matrix composites by pulsed laser cleaning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 38-42.
- [27] GENNA S, LAMBIASE F, LEONE C. Effect of laser cleaning in laser assisted joining of CFRP and PC sheets[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 145: 206-214.
- [28] OLIVEIRA V, SHARMA S P, MOURA M F S F D, et al. Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 94: 37-43.
- [29] LEONE C, GENNA S. Effects of surface laser treatment on direct co-bonding strength of CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2018, 194: 240-251.
- [30] ZHAN X, GAO C, LIN W, et al. Laser cleaning treatment and its influence on the surface microstructure of CFRP composite material[J]. Journal of Powder Metallurgy & Mining, 2017, 6(1): 1000165.
- [31] SCHLETT J. Laser paint removal takes off in aerospace[EB/OL]. [2018-03-11]. https://www.photonics.com/a61353/Laser_Paint_Removal_Takes_Off_in_Aerospace.
- [32] 陈培峰, 余晓畅, 张自豪. 用于

飞机蒙皮除漆的二氧化碳激光清洗设备: ZHANG Zihao. Carbon dioxide laser
CN201620510529.2[P]. 2016-05-30. cleaning equipment for aircraft skin removal:
CHEN Peifeng, YU Xiaochang, CN201620510529.2[P]. 2016-05-30.

通讯作者: 袁晓东, 研究员, 研究方向为激光清洗等光学工程, E-mail: yxd66my@163.com。

Laser Paint Removal Technology for Aircraft Metal Skin and Composite Materials

JIN Sen^{1,2}, WANG Jingxuan², YUAN Xiaodong², HU Yong¹, YAO Caizhen²

(1. College of Science, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

[ABSTRACT] As an environmentally friendly and efficient new paint removal technology, laser paint removal is an important branch of laser cleaning technology. The aircraft needs to remove the original paint layer regularly. This paper reviews the industrial application progress of laser paint removal on the surface of aircraft metal skin and composite material components, and the mechanism of laser paint removal on the surface of aircraft metal skin and the surface of composite materials is analyzed in detail. Finally, the development direction of laser paint removal technology in domestic aviation industry is also prospected.

Keywords: Laser paint removal; Laser cleaning; Metal skin; Composite materials; Aerospace

(责编 逸飞)

(上接第41页)

cycling[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(2): 151-155.

[15] 付倩倩, 通雁鹏, 杨玉璋. 航空发动机涡轮叶片热障涂层失效分析研究 [J]. 失

效分析与预防, 2017, 12(6): 376-380.

FU Qianqian, TONG Yanpeng, YANG Yuzhang. Failure analysis of thermal barrier coatings deposited on turbine blades[J]. Failure

Analysis and Prevention, 2017, 12(6): 376-380.

通讯作者: 蔡敏, E-mail: caiminchina@163.com。

Effect of Ultrafast Laser Processing Inclined Holes on Thermal Barrier Coatings (TBCs) Spallation Failure

CAI Min, ZHANG Xiaobing, ZHANG Wei, JI Liang, JIAO Jianeng

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Inclined holes processing at 45° on thermal barrier coatings (TBCs) which were deposited on superalloy samples by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) using the ultrafast laser were processed. Then the thermal cycling test was performed on samples with inclined hole at 45°, the changes of the holes in the thermal cycling test and the effect of the holes on thermal barrier coatings spallation failure were studied. The results show that, there is no cracking and re-casting layer in both thermal barrier coating and superalloy on the edge of the hole which processed by ultrafast laser. Ultrafast laser processing does not result in changes in the tissues of the hole edge at the location of the superalloy, which is still typical γ and γ' tissues. The hole diameter is no obvious change before and after the thermal cycling. But the inner wall of the inclined hole is changed from a clean surface to a surface with obvious oxide. With the increase of the thermal cycling times, the oxide on the surface of the inner wall of the superalloy is exfoliated. The spallation occurs on the thermal barrier coatings surface after 500 times of thermal cycling. Inclined holes at 45° processed by the ultrafast laser does not affect the thermal cycling spallation failure of thermal barrier coatings.

Keywords: Ultrafast laser; Thermal barrier coating; Superalloy; Inclined holes at 45°; Thermal cycling test

(责编 逸飞)