

科学研究

碳纤维复合材料表面涂层激光去除工艺及其力学性能的影响

宣善勇

(国营芜湖机械厂, 芜湖 241007)

摘要 采用激光除漆工艺去除碳纤维复合材料(CFRP)的表面涂层,通过改变设备的激光功率、脉冲频率、扫描速度和扫描次数等参数,研究不同激光除漆工艺对样条表面温度、表面形貌以及力学性能的影响。结果表明:工艺优化后样条表面温度低于60℃,激光可以精确地除去面漆和底漆而不损伤基材,扫描后样件弯曲性能有所降低,多次扫描后弯曲强度相比未除漆样件降低了8.82%,证实了激光去除碳纤维复合材料表面涂层的可行性。

关键词 激光,除漆,碳纤维复合材料,力学性能

中图分类号 TB332

文献标识码 A

文章编号 1006-3536(2020)07-0124-05

DOI 10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.029

Influence of laser paint stripping process on mechanical property of CFRP laminate

Xuan Shanyong

(Wuhu Machinery Plant, Wuhu 241007)

Abstract Laser paint stripping technology has been used to remove coating of CFRP laminate. Through Changing the laser power, pulse frequency, scan speed and scan times of the equipment, the effects of different parameters on the surface temperature, apparent morphology and mechanical properties were studied. The results shown that the surface temperature was below 60℃ after laser paint stripping by optimize the parameter, and the laser can accurately remove the top coating and primer while had no damage to the base material. Flexural properties were reduced about 8.82% after several times scan. The results proven the laser paint stripping technology for CFRP laminate was feasibility.

Key words laser, paint stripping, CFRP, mechanical property

复合材料由于比强度和比模量高、耐腐蚀、抗疲劳性优、可设计性强等优点受到广泛关注,并在航空航天、汽车等领域得到快速应用和发展。由于维护维修需要,飞机、船舶、汽车等表面需要去除涂装。复合材料表面涂装去除无法采用除漆剂去除,采用手工打磨方式去除涂层对人员和环境造成极大的影响。随着环境保护和可持续性发展的要求,需要开发新的绿色、环保、高效的复合材料表面去除方法,包括塑料粒子喷丸除漆方法^[1]和激光除漆方法^[2-5]。

激光除漆指的是将高能量的激光束照射到待清除涂层部位,利用激光与涂层相互作用,诱导的烧蚀、玻璃、弹性振动等多样性机制,可以有效地去除

基体表面的涂层。这种技术有以下优点:不需要使用任何化学试剂;是非接触式的;可选择性地去除材料表面涂层;能够去除各种基材表面涂层并达到很高的洁净度;可进行各种复杂形状基材表面除漆工作;除漆后产生的固体粉末可通过吸尘系统处理,对环境基本不造成污染;激光设备可长时间稳定使用。因此激光除漆被认为是一种可以取代传统除漆工艺的理想方法。国外在采用激光技术进行飞机复合材料表面除漆方面的研究和应用较早,美国犹他州希尔空军基地(Hill AFB)的Ogden空军修理厂(OO-ALC)在1995年就装备了激光自动除漆系统(LADS)应用于机头雷达罩的除漆。我国由于复合

基金项目 芜湖市科技计划项目(2018pt01)

作者简介 宣善勇(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为复合材料结构修理。

材料在飞机上应用起步较晚,采用激光技术进行飞机复合材料表面除漆研究基本处于空白。

激光除漆技术研究的关键在于除漆过程中和除漆后对于基材性能的影响,如基材温度和基材力学性能等。激光除漆对基材性能的影响国内外开展了大量研究^[6-9]。对于飞机蒙皮复合材料而言,激光除漆对于复合材料性能的影响决定着此种方法是否适用。

本研究采用激光除漆方法去除复合材料基材表面不同涂层,考察了不同激光除漆参数对于材料性能和除漆后表现质量的影响。

1 实验部分

1.1 原材料与设备

碳纤维复合材料(CFRP)层压板:通过热压罐工艺制备,其中预浸料为 T300/QY8911(中航复合材料责任有限公司),共 17 层,均为[0]铺层,之后采用机械切割的方法将层压板切割成拉伸试验样条(230mm×13mm)以及弯曲试验样条(80mm×13mm),准备进行喷涂。底漆为白色环氧底漆;面漆为深灰色氟塑料磁漆。

激光清洗机(CL500 型),德国 CleanLASER 公司,Nd:YAG 激光器,最大功率为 500W;手持式非接触红外测温仪(AS872 型),Smart sensor 公司;万能试验机(CMT5105),美特斯工业系统(中国)有限公司。

1.2 CFRP 层压板表面喷漆

将准备好的实验样条擦净表面,室温干燥 1h 后分别均匀喷涂 2 层白色环氧底漆、2 层 C 型深灰色氟塑料磁漆,层间间隔均为 0.5h。涂层体系喷涂完毕后,干燥。图 1 为喷涂后样条的图片。

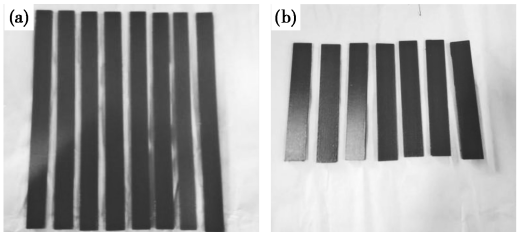


图 1 复合材料表面喷涂普通涂层后样条的实物图

[(a)喷涂 2 层白色环氧底漆;
(b)喷涂 2 层 C 型深灰色氟塑料磁漆]

1.3 除漆实验

共进行 3 组 CFRP 样条表面涂层除漆实验,所用的激光功率分别为 500W、250W 以及 20W。

1.3.1 第一组实验

在 500W 下,在保证扫描频率、线宽以及台架速

度恒定的情况下,通过调整脉冲频率,分别在 36kHz、32kHz 以及 28kHz 测试不同频率对除漆工艺的影响,除了 9-1-12,其他样条均扫描 1 次,9-1-12 样条扫描 2 次,能够去除面漆和底漆,露出基材,具体的样条除漆工艺参数见表 1。

表 1 500W 下除漆工艺参数(第一组)

编号	脉冲频率/ kHz	扫描频率/ Hz	线宽/ ns	台架速度/ (mm·s ⁻¹)	备注
9-1-1	36	105	55	12	拉伸样条
9-1-2	36	105	55	12	拉伸样条
9-1-3	36	105	55	12	拉伸样条
9-1-4	36	105	55	12	弯曲样条
9-1-5	36	105	55	12	弯曲样条
9-1-6	36	105	55	12	弯曲样条
9-1-7	32	105	55	12	拉伸样条
9-1-8	32	105	55	12	拉伸样条
9-1-9	32	105	55	12	弯曲样条
9-1-10	32	105	55	12	弯曲样条
9-1-11	28	105	55	12	弯曲样条
9-1-12	36	105	55	12	去除底漆到基材

1.3.2 第二组实验

250W 下各样条的激光扫描参数皆设置为:脉冲频率=36kHz,扫描频率=105Hz,线宽=55ns,台架速度=12mm/s,改变的是扫描次数,具体见表 2。由表 2 可见,样条 9-2-14 面漆和底漆完全去除。

表 2 250W 下样条扫描设置(第二组)

编号	扫描次数	备注
9-2-1	1	拉伸样条
9-2-2	1	拉伸样条
9-2-3	1	弯曲样条
9-2-4	2	此次扫描中间有停顿,无效
9-2-5	2	拉伸样条
9-2-6	2	拉伸样条
9-2-7	2	弯曲样条
9-2-8	2	弯曲样条
9-2-9	3	拉伸样条
9-2-10	3	拉伸样条
9-2-11	3	弯曲样条
9-2-12	3	弯曲样条
9-2-14	18	去除底漆到基材

1.3.3 第三组实验

在 20W 下,脉冲频率=36kHz,扫描频率=105Hz,线宽=55ns,台架速度=12mm/s,对同一部

位进行 3 次、6 次、9 次、12 次、16 次激光扫描直至将底漆和面漆完全去除,露出基材,经过实验,发现连续扫描 16 次后,露出基材。

每次样条除漆结束后立即使用手持式红外非接触温度测量仪对扫描中间部位进行测试,分别得到激光除漆后样条上表面温度以及下表面温度。

2 结果与讨论

2.1 试样表面温度分析

由于碳纤维复合材料颜色深,并且对热的传导率低,因此在进行激光除漆时易产生温度升高而造成基体性能破坏。实验时自然温度为 28.2℃,对于普通涂层除漆实验,分别检测了除漆表面层的温度以及背面的温度,具体见表 3 和表 4。

表 3 除漆实验第一组样件表面温度

样条编号	除漆层温度/℃	背面温度/℃	脉冲频率/kHz	备注
9-1-1	—	—	36	未测量
9-1-2	32.2	35.1		拉伸样条
9-1-3	40.0	36.0		拉伸样条
9-1-4	31.2	29.1		弯曲样条
9-1-5	32.5	32.3		弯曲样条
9-1-6	32.1	31.9		弯曲样条
9-1-7	31.1	31.3	32	拉伸样条
9-1-8	31.1	31.8		拉伸样条
9-1-9	45.0	33.0		弯曲样条
9-1-10	30.8	31.5		弯曲样条
9-1-11	33.0	32.2	28	弯曲样条

表 4 除漆实验第二组样件表面温度

样条编号	除漆层温度/℃	背面温度/℃	备注
9-2-1	30.5	32.3	1 次,拉伸样条
9-2-2	32.3	31.4	1 次,拉伸样条
9-2-3	35.9	31.4	1 次,弯曲样条
9-2-4	33.4	49.3	无效
9-2-5	34.0	48.4	2 次,拉伸样条
9-2-6	32.0	49.1	2 次,拉伸样条
9-2-7	35.9	45.5	2 次,弯曲样条
9-2-8	34.3	30.2	2 次,弯曲样条
9-2-9	32.8	36.7	3 次,拉伸样条
9-2-10	33.4	34.9	3 次,拉伸样条
9-2-11	34.1	37.0	3 次,弯曲样条
9-2-12	38.1	42.1	3 次,弯曲样条
9-2-14	58.0	59.0	18 次,去除到露出基材

普通涂层厚度小于 80 μm ,3 次扫描后即能除去面漆,因此采用的都是连续扫描。从表 3 及表 4 可见,高功率下除漆后样件表面温度均未超过 60℃。改变脉冲频率后,会造成表面温度有一定程度的升高,但效果并不明显。重复多次扫描也会造成温度升高,尤其是样条背面紧贴台架,散热困难,温度升高较多。但由于温度均低于 60℃,而碳纤维复合材料 T300/QY8911 可在 77℃ 下长期使用,这说明设定好参数后,激光除漆实验基体升温范围在材料使用范围内。

2.2 表观形貌分析

2.2.1 第一组除漆实验分析

图 2 为第一组除漆实验(500W)后样条的实物图片。由图可见,激光脉冲频率为 36kHz 的激光扫描后,样条表面的面漆完全去除,而采用激光脉冲频率为 28kHz 的激光扫描只能除去部分面漆,样条表面仍有一定的面漆残留。

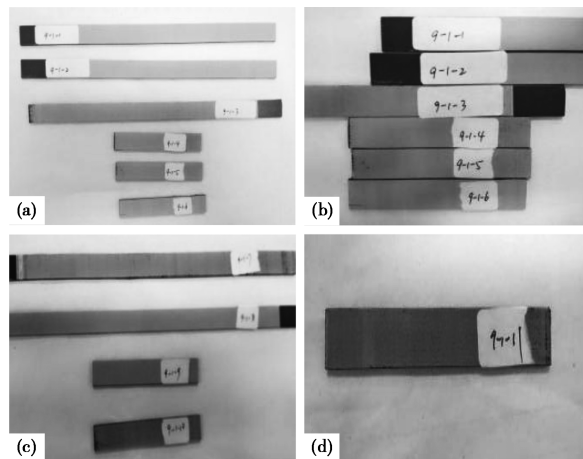


图 2 500W 下不同脉冲频率激光除漆后样条的实物图
[(a)36kHz;(b)36kHz 放大图;(c)32kHz;(d)28kHz]

图 3 为第一组除漆实验(500W)后样条表面的显微镜图片,放大倍数均为 50 $\times$ 。由图可见,激光脉冲频率为 36kHz 的激光扫描后,样条表面致密光滑,并且无漆层的残留,32kHz 脉冲激光扫描后,样条表面也致密光滑,但有部分面漆漆层残留(图中圆圈处),28kHz 脉冲激光扫描后,样条表面致密,有较多的面漆漆层残留。这说明高频脉冲激光除漆效率要高于低频脉冲激光。

另外,从多次重复扫描后得到的面漆及底漆都去除的样条表面微观形貌上可以看出,样条表面整体致密光滑,这说明基体未受到破坏,同时可以清晰地看到碳纤维,这表明面漆和底漆已完全去除,还仍有部分底漆漆层残留在碳纤维复合材料基材表面。

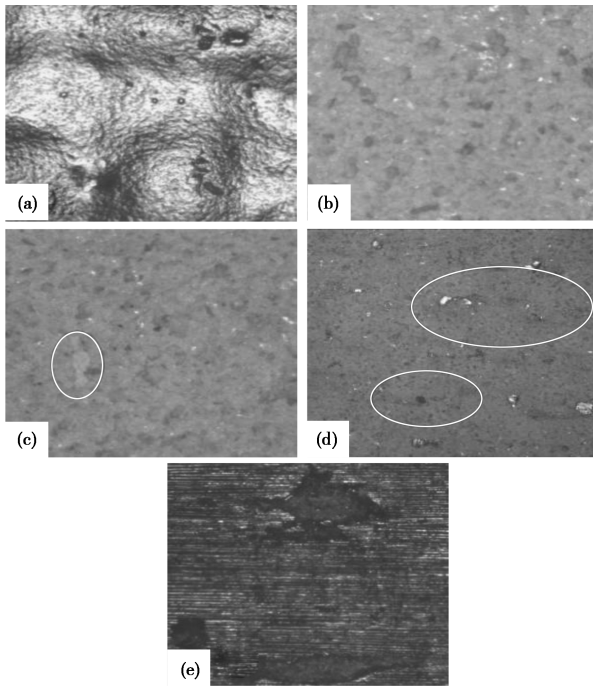


图 3 第一组除漆实验后样条的显微镜图
[(a)未除漆;(b)9-1-1(36kHz);(c)9-1-8(32kHz);
(d)9-1-11(28kHz);(e)除底漆]

漆层残留主要由两个因素引起,底漆喷涂工艺以及单一的频率。底漆喷涂高低不平容易导致漆层去除不完全。单一频率下,无法精确地控制漆层去除的厚度,高频率脉冲激光去除的漆层厚度大,而低频脉冲激光去除漆层浅,如果采用高低频脉冲激光搭配的方式可实现漆层精确去除,即首先采用高频脉冲激光除到一定厚度后再调整到低频脉冲激光扫描,这样即可以保证涂层去除精度又可以保护基材。

2.2.2 第二组实验分析

图 4 为第二组除漆实验(250W)后样条的实物

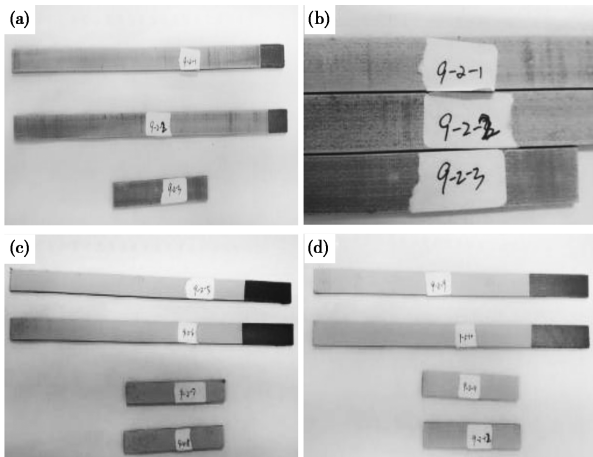


图 4 250W 下不同扫描次数下激光除漆后样条的照片
[(a)1次;(b)1次后放大图;(c)2次;(d)3次]

图片。由图可见,250W 激光功率下,一次扫描后面漆未完全去除,2 次扫描后即可将面漆基本去除,而 3 次扫描后面漆完全去除。

图 5 为第二组样条除漆后表面的显微镜图。由图可见,1 次扫描后仍残留一定面漆涂层,2 次扫描后面漆基本清除,样条表面致密光滑,并且无烧蚀痕迹,3 次扫描后表面无面漆残留并且致密光滑,但是有烧蚀的痕迹。

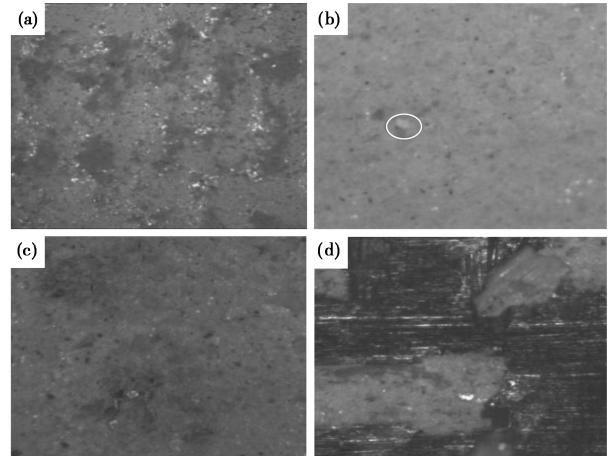


图 5 第二组除漆实验后样条的显微镜图
[(a)1次扫描;(b)2次扫描;(c)3次扫描;(d)除底漆,扫描18次]

另外从图 5 可以看到,已经除到了碳纤维复合材料的基材,但是底漆涂层仍较为明显,并且涂层周围的基材有一定的烧蚀,这与此次的激光扫描工艺有关,因为此次采用的是连续扫描,导致基材热量难以快速散发,使得基材温度有所升高,造成涂层周围基材发生一定烧蚀。

2.2.3 第三组实验分析

图 6 为使用 20W 功率的激光清洗机进行除漆实验后,不同扫描次数后样件的显微镜图片。由图可见,扫描 3 次后仍未底漆层,扫描 6 次后有底漆层露出,扫描 9 次后面漆层基本被清除,仍然有少部分面漆(图中圆圈处),扫描 12 次后,面漆很少有残留,并且出现了部分底漆的破坏,扫描 16 次后底漆也被完全去除,同时样件表面均匀,基材未受到破坏。由此可知,在低功率下,多次扫描也可实现面漆和底漆的完全清除并且不会对基材造成破坏,这更证明了高低激光功率合理配合使用可以达到复合材料表面涂层选择性去除以及完全去除的可行性。

2.3 力学性能分析

表 5 和表 6 列出了普通涂层除漆第一组实验及第二组实验后样条的弯曲性能数据。由表 5 和表 6 可见,激光扫描后样件弯曲强度仍满足制造要求。

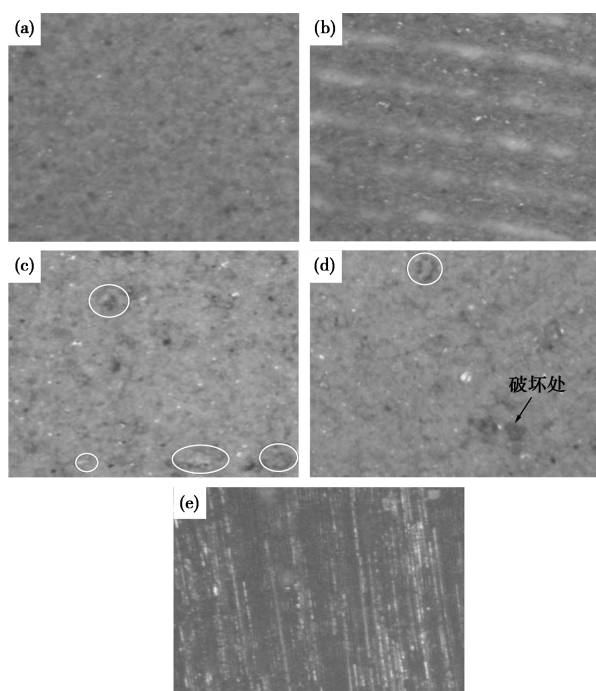


图 6 20W 功率下涂层去除试验样件表面的显微镜图
[(a)3 次;(b)6 次;(c)9 次;(d)12 次;(e)16 次]

表 5 第一组除漆实验后样条的弯曲强度

样条编号	弯曲强度/MPa	平均值/MPa	备注
9-1-4	1808	2000	36kHz 脉冲激光
9-1-5	2083		
9-1-6	2110		
9-1-9	2176	2129	32kHz 脉冲激光
9-1-10	2082		
9-1-11	2064	2064	28kHz 脉冲激光

表 6 第二组除漆实验后样条的弯曲强度

样条编号	弯曲强度/MPa	平均值/MPa	备注
9-2-3	2051	2051	扫描 1 次
9-2-7	1987	1993	扫描 2 次
9-2-8	1999		
9-2-11	1844	1870	扫描 3 次
9-2-12	1896		

从表 5 可见,脉冲激光频率的变化对扫描后样条弯曲强度影响很小。从表 6 可见,随着扫描次数增多,样条的弯曲强度有一定降低,3 次扫描后比 1 次扫描后样条弯曲强度降低了 8.82%。

通过样件的形貌分析可以看出,在第一组实验中,脉冲激光频率的不同主要影响的是碳纤维复合材料表面漆层去除程度,同时产生的温度不高于

60℃,因此对于基材性能的影响不明显。

从第二组实验样件形貌可以看出,随着扫描次数的增加,样件的基材受到影响,特别是随着扫描增加到 18 次,涂层周围的基材有一定烧蚀现象,造成了基材性能的降低。

3 结论

针对碳纤维复合材料层压板表面涂层进行了激光去除,通过改变激光功率、激光脉冲频率和扫描次数,研究了不同工艺参数对碳纤维复合材料性能的影响,结果表明激光除漆工艺去除碳纤维复合材料表面涂层是可行的,具体结论如下:(1)对涂层除漆后样件表面的温度测试可知,采用了冷却工艺后,样件表面温度均低于 60℃,均处于碳纤维复合材料使用温度范围内;(2)对除漆后样件表面形貌进行观察可知,通过合理控制工艺可以实现涂层的选择性去除,采用高低频率脉冲激光配合使用可达到精确地去除涂层且并不损伤碳纤维复合材料基材的目的;(3)弯曲强度实验结果表明随着扫描次数的增加,样条的弯曲强度略有降低,3 次扫描后弯曲强度降低了 8.82%。

参考文献

- [1] 程秀全,张建荣.喷丸成形技术在民航领域的应用[J].特种成形,2007(4):77-80.
- [2] 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.
- [3] Schweizer G, Werner L. Industrial 2kW TEA CO₂ laser for paint stripping of aircraft[J]. SPIE, 1995, 2502: 57-62.
- [4] Hart W G J't. Paint stripping techniques for composite aircraft components [C]. Warsaw, Poland: RTO/AVT Specialists Meeting, 2003.
- [5] Ted Reutzel. Automated laser stripping system for thin composite rotor blades: project review and status [C]. Baltimore, MD: NCMS CTMA Symposium, 2008.
- [6] 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,2005,26(6):83-84.
- [7] 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].金属世界,2017(6):6-9.
- [8] Iwahori Y, Hasegawa T, Nakane K. Experimental evaluation for CFRP strength after various paint stripping methods [C]. Kyoto, Japan: 16th International Conference on Composite Materials, 2007.
- [9] Hong S C, Chong S Y, Lee J R, et al. Investigation of laser pulse fatigue effect on unpainted and painted CFRP structures [J]. Composites: Part B, 2014, 58: 343-351.

收稿日期:2019-04-11

修回日期:2020-05-03