

碳纤维复合材料激光切割制孔 工艺研究*

叶逸云¹, 贾少辉¹, 徐子法¹, 欧阳文泰¹, 焦俊科¹, 王飞亚², 葛恩德²

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201;

2. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 碳纤维复合材料(CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等特点,在航空航天和汽车轻量化制造上被广泛应用,但CFRP的加工上依然面临着一些问题,如边沿毛刺、层间撕裂等。针对CFRP材料加工面临的问题,业内提出了一些新的加工方案,激光加工便是重要的一个解决方案。本文采用532nm波长的皮秒激光在碳纤维复合板上进行了激光切割制孔工艺的试验,对比了不同功率下激光旋转切割、平行填充切割以及十字填充切割3种不同的扫描方式对加工质量的影响。利用共聚焦显微镜对孔质量和热影响区进行了表征分析。试验结果表明,激光旋转切割的加工方式对CFRP的材料去除效率最高,锥度最小,热影响区较小。同时采用了D5766开孔拉伸标准,对3种不同工艺的激光扫描制孔样件及机械制孔样件进行了拉伸试验。相关研究为CFRP高质量的加工提供新的研究思路。

关键词: 激光制孔;碳纤维复合材料;激光切割;激光旋切;拉伸测试;激光应用

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.18.050



叶逸云

硕士研究生,主要从事激光精密加工、激光焊接等研究。

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)是一种由树脂作为基体,碳纤维作为增强体的复合材料,因具有良好的力学性能且重量轻的特点受到航空与汽车制造公司的青睐^[1]。但是,由于CFRP具有高强度高硬度以及非均质的特点,传统的刀具切削、钻孔等加工方式在加工CFRP时容易出现一系列的问题,例如:材料分层、纤维拔出、刀具磨损严重等,这些问题严重制约了CFRP的应用^[2]。

作为一种非接触式先进加工技术,激光加工技术在CFRP加工上应用潜力巨大^[3]。但由于树脂基体对热输入敏感,碳纤维和树脂的热力学性能巨大差异等原因,激光加工CFRP时极易产生热影响区(Heat

Affect Zone)^[4],热影响区的存在严重影响CFRP的静态强度^[5]。同时,由于高斯光束的特性,激光制孔容易产生锥度,在打深孔时更为明显。如何解决热影响区和锥度的问题,国内外学者进行了广泛的研究。Salama^[6]等研究了激光制孔时的自限制效应,发现激光制孔的深度与切缝宽度正相关,并对单道和多道并行的扫描方式进行比较,结果表明在相同加工时间和能量的条件下后者对材料的去除效率更高,加工深度更深。Leone等^[7]探究了150W Nd:YAG激光切割1mm厚CFRP板时的热影响区扩展量与工艺参数(平均功率、切削速度、脉冲频率和脉冲持续时间)之间的关系,发现热影响区范围在170~1600 μm

* 基金项目: 商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMASFGS201736734); 国防基础科研计划(JCKY2016130B203)。

之间,且热影响区范围与光斑重叠率直接相关。Li等^[8]对激光打孔后的碳纤维板进行了拉伸试验并发现高功率与低功率激光制孔的板材性能差距可达7%,但并未对比机械制孔性能。西安交通大学段文强等^[9]在304不锈钢和DZ445定向结晶镍基合金上进行了孔加工试验,研究了激光旋切法加工微小孔的工艺特点,对旋切法所涉及的3个关键参数(旋切路径、旋切速度、旋切圈数)对孔质量的影响规律进行了深入探讨。Weber等^[10]模拟分析了激光工艺不同参数对CFRP热损伤的影响。Goeke等^[11]研究了激光参量对CFRP材料切割热影响区和切缝宽度的影响。Fenoughty等^[12]比较了Nd:YAG脉冲激光与连续激光对CFRP切割的影响,试验证明了脉冲激光比连续激光在加工CFRP时造成的热损伤更小。

为进一步研究工艺参数对激光切割制孔质量的影响规律,提高制孔效率,本文对比了不同扫描路径对CFRP打孔的影响。试验验证了激光旋切在CFRP制孔上的应用可行性,对比了激光加工与传统机械加工对CFRP性能影响的差异,为激光制孔技术在CFRP上应用提供工艺参考。

试验及方法

1 试验材料

试验所用CFRP由环氧树脂和

碳纤维热固形成,碳纤维是HF10(T300级),含量为62%(表1)。板材总共包含16层,最外两层为编织层,内部为单向排列。拉伸件采用ASTM标准:D5766/D5766M-02a。样件宽36mm,长200mm,厚2mm,板材中心开直径6mm的孔,板材两端正反面均贴上36mm×50mm×2mm的玻璃纤维加强片。测试材料去除效率的试验样件尺寸为长100mm,宽80mm,厚4.25mm。

2 试验设备

试验所用EdgeWave激光器波长532nm,脉冲宽度10ps,重复频率200kHz,聚焦光斑直径约50 μ m,最大实测出光功率50W。加工软件为北京金橙子科技公司的EZCAD2,该软件能自动记录加工时间。

3 试验设计

3.1 材料去除深度试验设计

根据前期试验确定了不相关参数的优选值:扫描宽度1mm,速度均为500mm/s,分别在8W与30W的功率下进行材料去除能力测试。8W情况下分别扫描100、200、300、400、500次并进行深度对比,30W情况下分别扫描50、100、150、200、

250次并进行深度对比。使用共聚焦显微镜测量切缝宽度、深度以及热影响区面积。激光加工时为了防止材料燃烧,使用浓度99.99%氩气作为保护气,流量8~10L/min。为了确保每圈的输入能量一致,调整相关参数使得每圈扫描时间均为0.158s。具体参数为:激光旋切的单个圆环直径为1mm,每个圆环间距0.098mm,平行填充扫描方式圆环间距0.034mm,十字填充扫描方式线间距0.046mm。旋转切割的扫描路线为光束一边画圆一边前进,圆环横截面的单次扫描在短时间内发生,且距离下次扫描间隔为0.158s。平行填充方式的扫描路线为同心圆环。对于平行填充的圆环横截面来说,激光的单次完整扫描时间为0.158s且距离下次扫描无间隔。十字填充方式的扫描路径为纵横交错网格。十字填充扫描方式与平行填充扫描类似,单个圆环横截面增加了水平方向的扫描线路,减少了竖直方向的扫描线路。为了便于观察去除深度,扫描去除试验在CFRP板边缘进行。扫描方式如图1所示,激光制孔原理如图2所示。

表1 碳纤维复合材料性能参数

Table 1 Performance parameters of carbon fiber composites

材料参数	体积分数/%	密度/(g·cm ⁻³)	气化温度/°C	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
CFRP	62	1.78	4000	50
环氧树脂	38	1.2	700	0.1

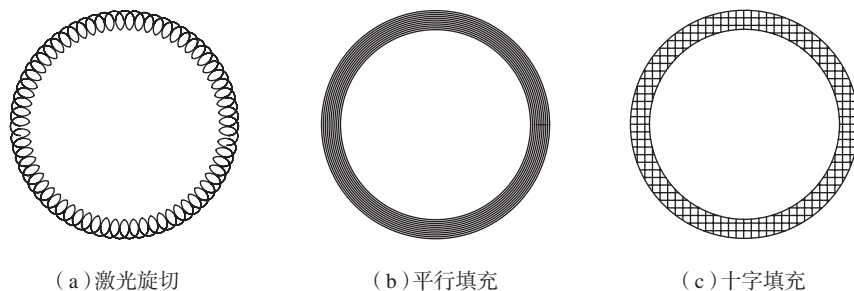


图1 扫描方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of scanning mode

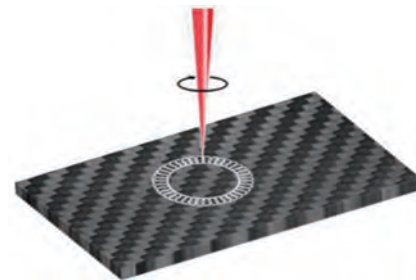


图2 激光制孔原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser hole making principle

3.2 制孔能力对比

采用上述3种工艺参数对2mm板材进行6mm圆孔制孔测试,功率8W,扫描次数到100次时Z轴进给1mm 确保焦点与加工平面接近,高效利用加工能量。加工后使用共聚焦显微镜观测孔进出口的圆整度。

3.3 拉伸性能对比试验

试验根据 ASTM 标准 D5766/D5766M-02a (聚合物基复合材料层压板开孔拉伸强度标准试验方法) 进行制孔样件力学性能拉伸测试。对比3种激光制孔与麻花钻钻孔的力学性能差异。

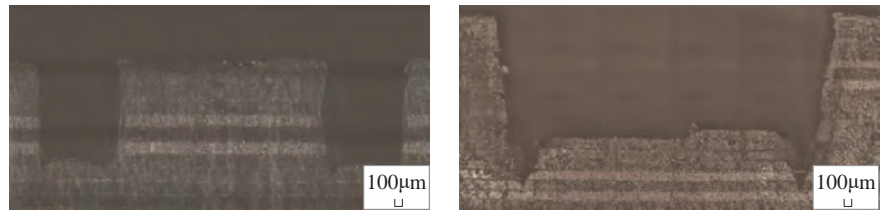
结果与讨论

1 材料去除效率对比

用共聚焦光学显微镜拼接扫描样件侧边,观察材料去除深度与形貌。相同功率下3种加工方式对材料的去除模式接近,剩余截面相似,如图3所示,仅存在效率上的差异。图3(a)中8W激光旋切样件的切缝上下宽度接近,因为加工深度较浅,离焦平面接近束腰,光束半径较小,锥度不明显。由于孔侧壁遮挡产生的自限制效应,以及激光加工CFRP时烧蚀产生的

气体颗粒和等离子体对激光的遮蔽效应,使得激光到达切缝底部的能量减少,低功率激光对CFRP的去除效率随深度增长下降。十字填充方式与平行填充方式加工深度相近,激光旋切加工深度始终领先。因为在一段小于0.158s(单次扫描时长)的时间内,激光旋切扫

描线路更密集,材料加工表面功率密度更高,材料去除效率更高,如图4所示。30W激光切割加工时,由于功率较高,孔中间区域在加工时部分被气化,产生平顶,如图3(b)所示。气化产生的空白区域减轻了激光加工时的遮蔽效应和自限制效应。如图5所示,3种加工方

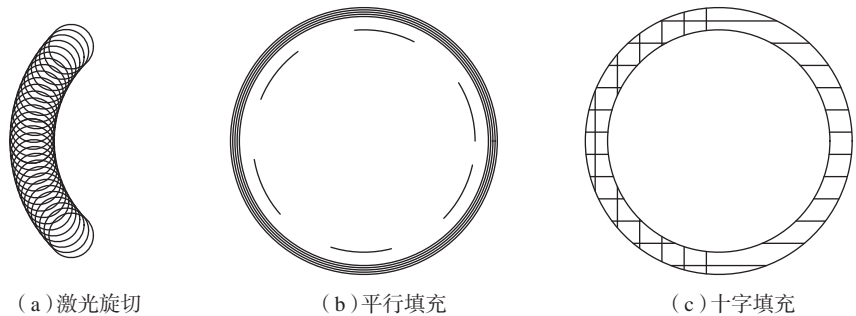


(a) $P=8W$, 250次扫描, 激光旋切

(b) $P=30W$, 500次扫描, 激光旋切

图3 激光去除深度试验共聚焦显微镜拼接图

Fig.3 Confocal microscope mosaic of laser removal depth experiment



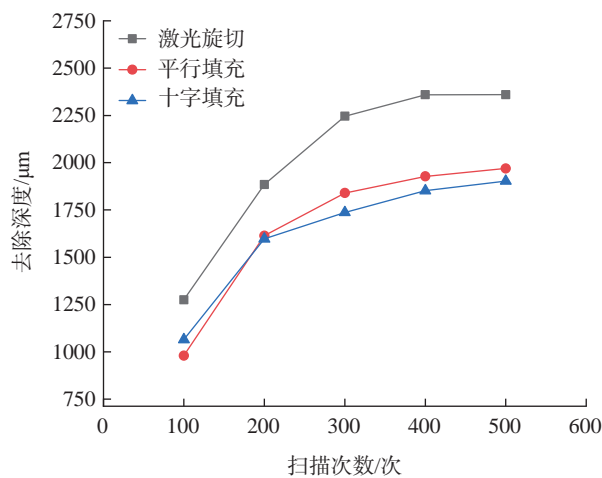
(a) 激光旋切

(b) 平行填充

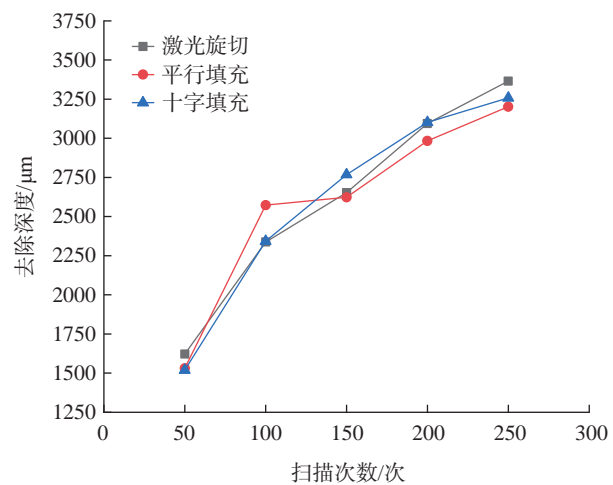
(c) 十字填充

图4 四分之一周期的扫描线路

Fig.4 Scanning path diagram of one fourth cycle



(a) 8W皮秒激光去除深度试验



(b) 30W皮秒激光去除深度试验

图5 激光制孔去除深度试验记录

Fig.5 Record of laser drilling removal depth experiment

式切缝底部的激光进光量充足,相同扫描次数的3种加工方式所得切缝深度接近。切缝上宽下窄,孔壁呈现出一定的锥度,这是由于激光能量在空间上服从高斯分布。

2 制孔能力对比

在2mm板材上用8W皮秒激光进行直径6mm圆孔的制备。使用3种激光加工方式加工,每种加工方式加工3组,每组耗时如表2所示。激光旋切比平行填充平均制孔耗时减少15.9%,比十字填充平均制孔耗时减少23%。观察材料表面形貌发现,激光旋切方式制孔的表面较为破碎,出现纤维丝脱出的现象,材料分层较少(图6和7)。由于激光旋切扫描路径的特殊性,旋切制孔的孔壁边缘出现波浪状条纹,如图6(a)所示。平行填充方式制孔的材料表面平整,但是分层严重,如图6(b)所示。十字填充方式制孔的材料表面破碎严重,分层严重,如图6(c)所示。出现这种差异的主要原因是激光旋切

方式的加工时间更短,加工速度更快,热积累量更少,纤维丝被烧断却未完全去除。平行填充和十字填充两种方式的加工时间更长,热积累量更大,将断裂的纤维丝完全去除,但是同时也导致材料的分层更加严重。十字填充加工方式耗时最长,热积累量最大,孔壁边缘质量最差。

CFRP具有各向异性及非均质的特性,热量在CFRP中的传导速率不同。CFRP板层间不含纤维,使得CFRP层间导热主要依靠导热系数较低的树脂导热。导致出口处热量分布不均,使树脂熔化不均匀,出口的圆度下降。热影响区沿纤维排布方向扩散较快,有呈现出椭圆的趋势。3种扫描方式的入口直径均为6mm,孔入口表面孔径精度高,表面平整,加工质量好,如图8(a)所示。因为孔入口表面与焦平面重合,加工速度快,加工最早,热积累

最少,所以圆孔附近存在的热影响区较小。由于高斯光束的特性,孔有一定的锥度,出口圆直径均小于6mm。由于孔底部的热积累量较大,孔出口处的热影响区比入口处更大,热损伤也更加严重。其中,十字填充扫描方式的孔出口表面热影响区最小,表面最平整。激光旋切方式孔出口表面热影响区最大,出口圆直径最大,孔锥度最小(图8(b))。机械制孔采用麻花钻钻孔方式,钻孔直径6mm,钻速1200r/min,进给量0.01mm/r。麻花钻钻孔的孔入口表面存在毛刺,碳纤维撕裂,纤维丝脱出等现象,孔壁表面质量较差,见图8(c);出口处缺陷主要为材料分层,在钻头钻出时产生,见图8(d)。但是机械制孔不会产生锥度,这是其优点。

3 拉伸性能测试

采用ASTM标准D5766/D5766M-

表2 8W激光加工2mm厚CFRP板的时间
Table 2 Time of processing 2mm thick CFRP plate with 8W laser

加工分组	激光旋切	平行填充	十字填充
组一时间	251	279	308
组二时间	261	295	317
组三时间	229	308	338
平均时间	247	294	321

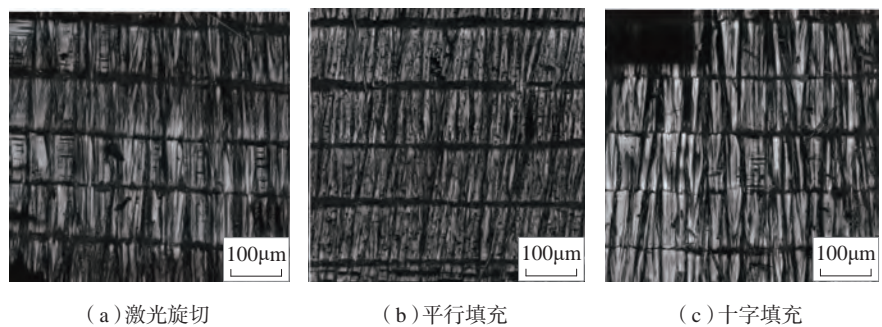


图6 共聚焦光学显微镜观察孔侧壁热损伤
Fig.6 Thermal damage of lateral wall of hole observed by confocal optical microscope

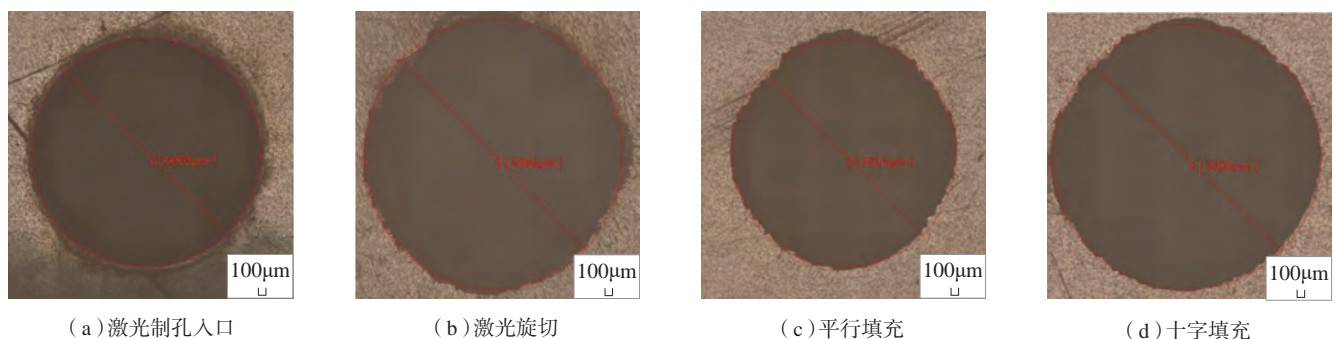


图7 共聚焦显微镜观察激光制孔质量
Fig.7 Laser drilling quality observed by confocal microscope

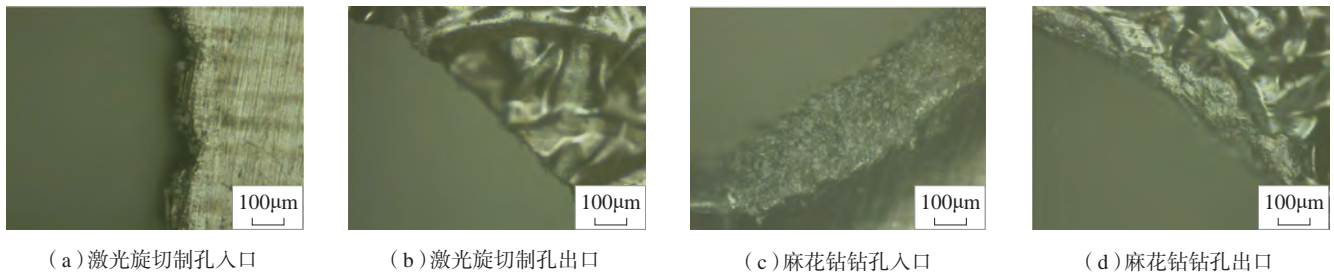


图8 孔表面质量观察
Fig.8 Observation of pore surface quality

02a 对制孔样品进行拉伸试验,拉伸样品如图 9 所示。3 种激光制孔方式样品断裂方式相似,样品断裂界面容易出现纤维拔出现象,孔周边更为明显。因为激光加工时热输入量较大,孔周边树脂熔化再凝固,使树脂对纤维的固定程度下降,样品断裂时纤维丝脱出,如图 9 (c) 所示。机械制孔的断裂通常不出现在圆横线中心处,每层材料的断裂位置不同。这是因为麻花钻钻孔时的机械应力导致材料间的分层,使得拉伸样品断裂时断口界面不在同一

平面,如图 9 (d) 所示。

样品拉伸性能如图 10 所示,麻花钻制孔方式与激光制孔方式拉伸性能均低于未打孔材料三分之一以上。不同激光制孔方式与麻花钻制孔方式板材性能差距不大。激光旋切与平行填充制孔方式制备的样品拉伸性能波动更小。麻花钻加工与十字填充方式制备的样品拉伸性能波动较大。

结论

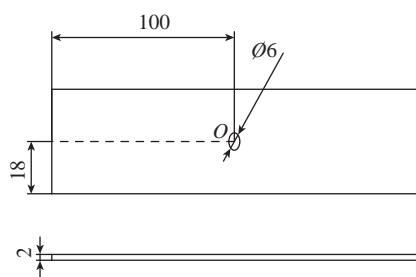
本文利用皮秒激光对 CFRP 进

行了制孔工艺研究,对比了不同激光扫描方式对 CFRP 制孔能力的差异,并对制孔后样品的力学性能进行了拉伸测试,得出了以下结论:

(1) 激光旋切制孔与激光十字填充,激光平行填充制孔方式相比,在功率较高时(孔中间材料被部分烧蚀),3 种扫描方式无明显差别,在功率较低时(孔中间材料未被完全烧蚀),激光旋切制孔速度明显领先于另外两种扫描方式。

(2) 相同参数下激光旋切的加工效率更高,热影响区较小,但是孔侧面平整度略微差于平行填充方式与十字填充方式。3 种激光加工方式均有一定锥度且较为接近。

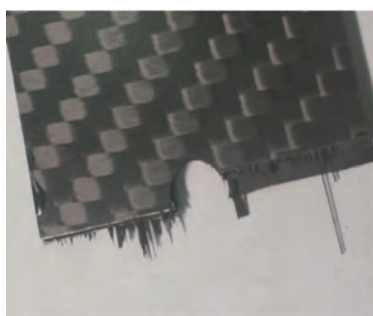
(3) 通过对比激光制孔与麻花钻制孔两种制孔工艺的特点,发现两种工艺拉伸性能相近,但激光制孔的表面质量较高,机械制孔的尺寸精度较高。



(a) 尺寸示意图



(b) 样品



(c) 旋切制孔样品



(d) 机械制孔样品

图9 拉伸样品示意图

Fig.9 Schematic diagram of stretch sample

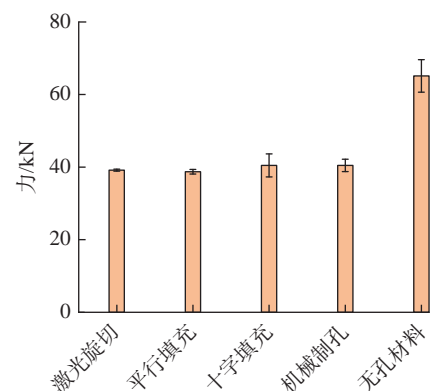


图10 拉伸试验性能记录

Fig.10 Tensile test performance record

参考文献

- [1] KATNAM K B, SILVA L F M D, YOUNG T M. Bonded repair of composite aircraft structures: a review of scientific challenges and opportunities[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 61: 26–42.
- [2] 孙婷, 杨文锋, 刘畅, 等. 民航 CFRP 二次加工技术[J]. 中国科技信息, 2018(5): 35–37.
- SUN Ting, YANG Wenfeng, LIU Chang, et al. Civil aircraft CFRP secondary processing technology[J]. China Science and Technology Information, 2018(5): 35–37.
- [3] AI-SULAIMAN F A, YILBAS B S, AHSAN M, et al. Laser hole drilling of composites and steel workpieces[J]. Lasers in Engineering, 2006, 16(1–2): 105–120.
- [4] YUNG K C, MEI S M, YUE T M. A study of the heat-affected zone in the UV YAG laser drilling of GFRP materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2–3): 278–285.
- [5] HERZOG D, JAESCHKE P, MEIER O, et al. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12–13): 1464–1473.
- [6] SALAMA A, YAN Y Z, LI L, et al. Understanding the self-limiting effect in picosecond laser single and multiple parallel pass drilling/machining of CFRP composite and mild steel[J]. Materials and Design, 2016, 107: 461–469.
- [7] LEONE C, GENNA S. Heat affected zone extension in pulsed Nd: YAG laser cutting of CFRP[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 140: 174–182.
- [8] LI M J, LI S, GAN G C, et al. Experimental study on hole quality and tensile progressive failure following fiber laser cutting of multidirectional carbon fiber reinforced plastic laminates[J]. Laser Applications, 2019, 31(1): 1–10.
- [9] 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 95–103, 112.
- DUAN Wenqiang, WANG Kedian, DONG Xia, et al. The technology and theory research of laser rotary cutting high quality micro hole[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 95–103, 112.
- [10] WEBER R, HAFNER M, MICHALOWSKI A, et al. Minimum damage in CFRP laser processing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 302–307.
- [11] GOEKE A, EMMELMANN C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 253–258.
- [12] FENOUGHTY K A, JAWAID A, PASHBY I R. Machining of advanced engineering materials using traditional and laser techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 42(4): 391–400.

通讯作者: 焦俊科, 博士、高级工程师、硕士生导师, 研究方向为激光焊接、激光熔覆, E-mail: jiaojunke@nimte.ac.cn.

Research on Hole Drilling in Carbon Fiber Reinforced Composite by Using Laser Cutting Method

YE Yiyun¹, JIA Shaohui¹, XU Zifa¹, OUYANG Wentai¹, JIAO Junke¹, WANG Feiya², GE Ende²

(1. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;
2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is widely used in aerospace and automotive lightweight manufacturing due to its lightweight, high strength and corrosion resistance. However, there are still some problems in the processing of CFRP, such as edge burrs, interlaminar tearing and so on. Many new processing schemes for CFRP materials are proposed in the industry. As an important processing method, the laser processing has become one of the research hotspots. The hole cutting process of carbon fiber composite plate was studied by using 532nm picosecond laser. The effects of laser rotary cutting, parallel filling cutting and cross filling cutting on machining quality were compared. The quality of the hole and the range of heat affected zone were observed by the confocal microscope. The experimental results showed that the scanning method of laser rotary cutting has the highest removal efficiency, the smallest tapers, and the hot affected zone was small. At the same time, D5766 open-hole tensile standard was adopted to conduct tensile experiments on three kinds of laser scanning hole making samples and mechanical hole making sample, and the results were analyzed. This research would provide new research ideas for high quality processing of CFRP.

Keywords: Laser drilling; CFRP; Laser beam cutting; Laser rotary cutting; Tensile test; Laser application

(责编 知舟)