

文章编号:1001-5078(2023)12-1822-06

· 激光应用技术 ·

CFRP 硅油辅助皮秒激光低损伤制孔工艺

陈兴华, 荣佑民, 李文元, 吴从义, 陈 龙, 黄 禹, 张国军

(华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:皮秒激光加工具有峰值能量高、脉冲作用时间短等特点,是碳纤维复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)孔切割的重要手段。但是碳纤维和树脂基体的热物性存在较大差异,激光脉冲能量累积与传导行为,致使热损伤难以避免。本文提出一种 CFRP 硅油辅助皮秒激光制孔工艺,研究硅油对孔内部缺陷、热影响区(Heat-affected Zone, HAZ)、孔圆度及锥度的影响。研究表明,与皮秒激光制孔相比,硅油辅助制孔质量显著提高:切口处无基体损伤,孔内壁面无裂纹,仍存在轻微的纤维裸露;孔表面 HAZ 减至 $4.1 \mu\text{m}$ (重复频率 200 kHz、扫描速度 1800 mm/s);激光重复频率 200 kHz、扫描速度 600 mm/s 时锥度减小 16.09%。综上,硅油有助于调控 CFRP 激光制孔损伤:改善微观缺陷,抑制热影响区,降低锥度等。

关键词:激光切割;CFRP;硅油;HAZ;锥度

中图分类号:TN205;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.12.003

Technology on dimethicone-assisted picosecond laser cutting CFRP with low damage

CHEN Xing-hua, RONG You-min, LI Wen-yuan, WU Cong-yi, CHEN Long, HUANG Yu, ZHANG Guo-jun
(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: Picosecond laser processing has the characteristics of high peak energy and short pulse action time, which is an important means of cutting holes in carbon fiber reinforced polymer (CFRP). However, the thermal physical properties of carbon fiber and resin matrix are quite different, and the laser pulse energy accumulation and conduction behavior make thermal damage difficult to avoid. In this paper, a kind of picosecond laser cutting CFRP technology assisted by dimethicone is proposed to study the effect of dimethicone on the internal defects, heat-affected zone (HAZ), hole roundness and taper. The results show that the quality of dimethicone assisted hole cutting is significantly improved compared to picosecond laser cutting. And there is no matrix damage at the notch, no crack on the inner wall of the hole, and still slight fiber exposure. HAZ on surface is reduced to $4.1 \mu\text{m}$ (laser repetition of 200 kHz, scanning speed of 1800 mm/s). The taper is reduced by 16.09% at a laser repetition frequency of 200 kHz and scanning speed of 600 mm/s. In conclusion, dimethicone is helpful to control the damage of CFRP laser cutting which improving the micro defects, suppressing the HAZ, and reducing the taper.

Keywords: laser cutting; CFRP; dimethicone; HAZ; taper

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金项目(No. 2020A1515011393)资助。

作者简介:陈兴华(1998-)女,硕士研究生,主要从事碳纤维复合材料等外纳秒、皮秒激光的研究。E-mail: cxh264339303@163.com

通讯作者:荣佑民(1987-),男,博士(后),副教授,硕士生导师,主要从事激光制造技术的研究。E-mail: rym@husb.edu.cn

收稿日期:2023-01-14; **修订日期:**2023-02-07

1 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有比强度高、比模量大、耐腐蚀性好、热膨胀率低等优点,在航空航天、汽车、船舶等领域有着广泛的应用前景^[1]。然而,层间强度低、各向异性使常规的机械制孔产生分层、毛刺等缺陷,并伴随严重的刀具磨损^[2]。多种特种加工方法应运而生,磨料水射流^[3]、电火花^[4]等非接触式加工方法,由于无刀具磨损、无刀具切削力等特点,受到研究人员的关注。但是磨料水射流加工效率低、磨料水处理困难;电火花加工精度差且需要频繁更换电极,存在一定的局限。

皮秒激光^[5]加工是一种非接触式的高精度加工方法,加工灵活性高、无刀具磨损,是 CFRP 孔切割的重要途径^[6]。但 CFRP 的各向异性以及两相比较大的热力学性能差异,使激光切割过程中存在热量的累积、传递,产生严重的热影响区(Heat-affected Zone, HAZ)、分层及微裂纹等热损伤^[7],从而影响 CFRP 孔的质量。Wahab^[8]证明了 HAZ 严格依赖于激光光源类型和加工工艺参数,并指出脉冲重复频率和脉冲持续时间是影响切缝宽度的重要因素。Wolynski^[9]等人研究了波长对皮秒激光切割质量的影响,发现皮秒激光波长越短,HAZ 越小,切割质量越好。Salama 等人^[10]研究 400 W 皮秒激光器多环材料去除方法,得到了 HAZ 为 25 μm 的高质量孔。Negarestani^[11]等人发现激光光束聚焦在材料下方有效降低热损伤程度,且多道次切割、高激光扫描速度和低激光功率下显著减小分层缺陷的数量。

综上,针对皮秒激光加工 CFRP 的工艺参数及加工路径的优化已经有了很多研究。然而,在工艺条件基础上有效的辅助加工手段并不多。为此,本文研究 CFRP 硅油辅助皮秒紫外激光低损伤制孔工艺。探究硅油辅助对孔微观形貌及 HAZ 的影响,分析制孔圆度、锥度的变化规律,为激光高质量制孔提供参考。

2 实验方案

2.1 实验装置与材料

图 1 为皮秒激光切割示意图。激光光源为波长 355 nm 的皮秒紫外激光器,脉冲宽度 15 ps,最大输出功率 30 W(800 kHz),脉冲重复频率可调节范围

100 kHz ~ 1 MHz;3D 数字振镜,其主要参数为:扫描速度 0.1 ~ 5000 mm/s,定位精度 < 1 μrad ,三维幅面 120 mm \times 120 mm \times 10 mm,远心聚焦物镜焦距 167 mm。此外,需要烟尘过滤器用来吸收激光切割 CFRP 过程中产生的 CO、苯酚等有害气体。

实验用 T700 环氧树脂基碳纤维板,尺寸为 100 mm \times 100 mm \times 2 mm,材料内部层压板由 12 层纤维排向为 [0°/90°] 的单层层压板构成,碳纤维丝直径为 7 μm ,体积分数为 57%。CFRP 具体参数见表 1。

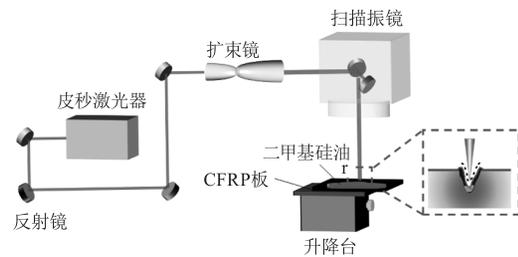


图 1 皮秒激光切割示意图

Fig. 1 Picosecond laser cutting schematic diagram

表 1 CFRP 物理特性

Tab. 1 Physical characteristics of CFRP

参数	环氧树脂基体	碳纤维	单位
密度	1250	1850	Kg/m^3
导热系数	0.2	50(平行) 5(垂直)	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
比热容	1200	710	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
汽化温度	350	3500	$^{\circ}\text{C}$
汽化潜热	1000	43000	kJ/kg
体积分数	57	43	%

2.2 实验参数选择

实验用激光器平均功率及单脉冲能量随激光重复频率同步变化(如图 2 所示)。当重复频率增加至大于 400 kHz 时,由于平均功率过大,环氧树脂基体持续在 CFRP 表面燃烧,在孔切口处留下严重的烧蚀痕迹,并且切开的材料分层脱落。如图 3(a)、3(b)所示,激光重复频率 500 kHz、扫描速度 1500 mm/s 时,被切开的 CFRP 层间环氧树脂汽化,层间脱落。图 3(c)为激光扫描方向与纤维排向垂直处 SEM 图,切口处有生成重铸层,切割表面有碳化基体和溅射杂质附着。

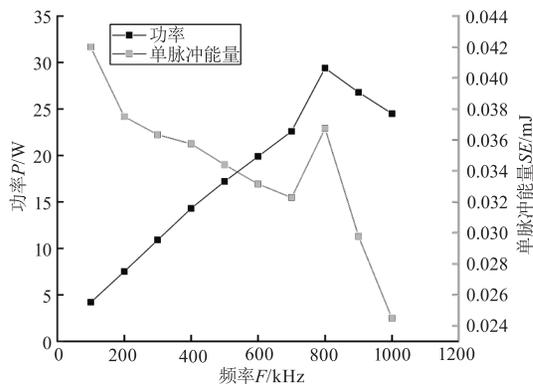
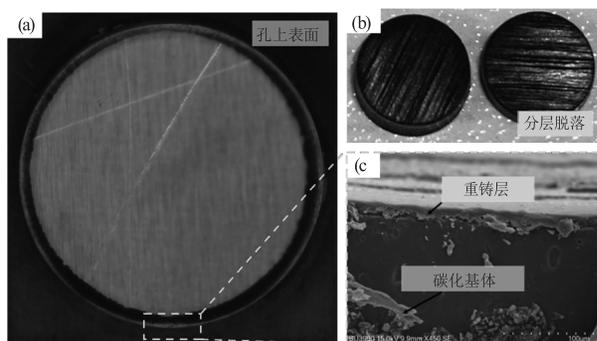


图2 激光重复频率与功率、单脉冲能量关系

Fig. 2 Relation between laser repetition rate and power, single pulse energy



(a) 孔表面形貌 (b) 切除材料实物 (c) 扫描方向与纤维排列垂直处SEM图

图3 激光重复频率 500 kHz、扫描速度 1500 mm/s 孔切口情况

Fig. 3 The cut condition, when laser repetition frequency is 500 kHz and scanning speed is 1500 mm/s

激光重复频率低于 400 kHz, 扫描速度 600 ~ 2400 mm/s 时, 研究激光切割的表面质量, 设计激光重复频率和扫描速度的全因子实验, 研究这两个重要工艺参数对制孔表面 HAZ 尺寸、孔圆度、锥度的影响。为降低随机误差, 每组参数重复切割三次。其实验参数设置见表 2。

表 2 实验参数设计

Tab. 2 Experimental parameter design

工艺参数	数值
重复频率/kHz	200, 250, 300, 350
扫描速度/(mm · s ⁻¹)	600, 1200, 1800, 2400

2.3 实验流程设计

同心圆切割法是最普遍的激光加工 CFRP 通孔的方法^[12]。本次实验在 2 mm 厚的 CFRP 板上进行 $\phi 8$ 孔的切割, 激光焦点聚焦于材料表面, 扫描路径设置为 20 个同心圆(同心圆间距为 40 μm), 逐层扫描。

二甲基硅油是稳定性较好的惰性液体, 其高温稳定性好, 热传导低。主链为 Si-O-Si, 其 Si-O 键能高于 355 nm 紫外激光的单光子能量, 并且不会对该波段的紫外激光造成衰减, 理论上是合适的辅助激光加工液体。通过全因子实验, 综合表面 HAZ 尺寸、孔圆度、锥度等指标, 研究硅油辅助加工的可行性。

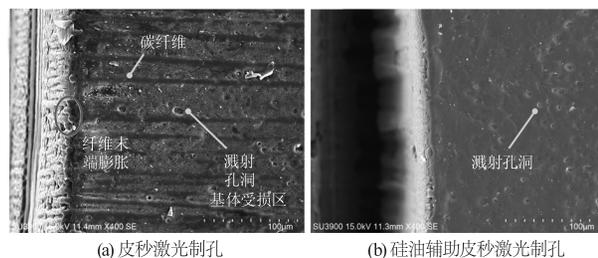
皮秒激光加工后, 利用超声波清洗机对样品进行五分钟清洗, 去除切割表面溅射物及残渣, 并利用扫描电镜对加工后表面微观形貌进行表征分析。

3 结果分析与讨论

3.1 硅油对内部缺陷的微观影响

图 4 为重复频率 300 kHz CFRP 皮秒激光制孔与硅油辅助制孔时, 孔上表面的微观形貌图。发现 (1) 皮秒激光制孔后热损伤形式有切口处的纤维裸露、纤维末端膨胀以及远离切口处基体受损产生的纤维条纹; (2) 硅油辅助皮秒激光制孔表面热缺陷明显较小, 尤其是基体受损区域; (3) 两种切割条件下均存在由于杂质溅射产生的孔洞。

图 4(a) 中体现出的热损伤有拔出纤维末端膨胀和基体受损区纤维条纹明显、孔洞密集。激光光斑扫描方向与纤维排向垂直处, 能量沿纤维传递, 在远离切口处, 这些能量虽不足以汽化基体, 但有一定程度的受热烧蚀, 尤其是当碳纤维板上表面首层纤维排布较浅, 基体厚度较薄时, 就会有明显的纤维条纹。观察到图 4(b) 相同工艺条件下无此现象, 说明传递到此处的能量被硅油抑制。



(a) 皮秒激光制孔

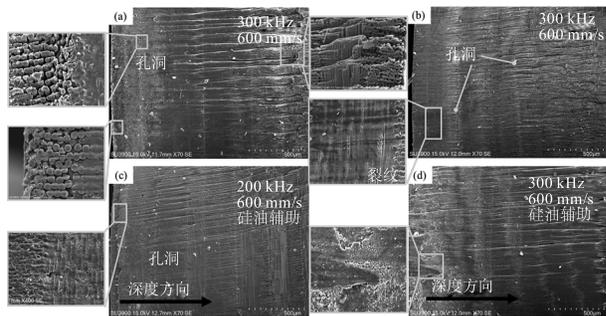
(b) 硅油辅助皮秒激光制孔

图 4 皮秒激光制孔孔表面 SEM

Fig. 4 Surface SEM of picosecond laser drilling hole

图 5 是激光重复频率 200 kHz、300 kHz 时孔壁面的 SEM 图像。图 5 反映出: (1) 随着切割深度的下降, 孔壁面越来越粗糙; (2) 无论是否有硅油辅助, 纤维排向 0° 层(即光斑扫描方向与纤维排向垂直层)均发现碳纤维间的间隙不均匀, 具体表现为密集孔洞; (3) 重复频率 300 kHz 时, 纤维排向 90°

层处出现数量较多的裂纹。图 5(a)、5(b)中出现的孔洞及裂纹,会使 CFRP 服役期间发生分层失效,影响使用寿命。重复频率 200 kHz 时,纤维排向 90°层未出现裂纹,随着重复频率增大,出现面积小、密度较大的微裂纹。而在纤维排向 0°处的密集孔洞在重复频率 200 kHz 时主要集中在孔的上部,随着重复频率增大至 300 kHz,密集孔洞出现在较深的部位。孔洞及裂纹均是由于碳纤维之间基体沿纤维汽化消失产生,由于碳纤维较大的热导率,使纤维排向 0°处极易产生孔洞,但是图 5(d)反映硅油辅助后,随着重复频率增加至 300 kHz,孔洞并未向深度方向扩展,并且由于基体杂质存在,孔上部的孔洞也有所减小。



(a)200 kHz, 600 mm/s皮秒激光制孔 (b)300 kHz, 600 mm/s皮秒激光制孔
(c)200 kHz, 600 mm/s硅油辅助皮秒激光制孔 (d)300 kHz, 600 mm/s硅油辅助皮秒激光制孔

图5 皮秒激光制孔孔壁 SEM

Fig.5 SEM of hole wall made by picosecond laser

3.2 硅油对 HAZ 的影响行为

图 6、图 7 显示了不同工艺参数组合在激光制孔与硅油辅助制孔时,孔上表面激光扫描方向与纤维垂直部位的形貌图。图 6 中可以观察到切口处有基体附着、纤维拔出,以及激光重复频率较高时,由于基体汽化、纤维裸露产生的不均匀切口。而硅油辅助激光切割后,切口表面无明显 HAZ。激光重复频率 350 kHz、扫描速度 2400 mm/s 时切口处有轻微纤维裸,HAZ 宽度为 12.3 μm。硅油辅助后 HAZ 有被明显抑制的现象,尤其是远离切口处的基体受损区被完全消除,这种现象说明硅油能够阻止热量从切口往外传导。

图 8 为硅油辅助皮秒激光制孔后 HAZ 在激光重复频率及扫描速度变化下的趋势图。图中反映出 HAZ 随着扫描速度增大而增大的现象,这主要是因为硅油具有良好的润滑性,激光扫描速度过快,切割表面的硅油向周边扩散,硅油的辅助效果削弱。扫描速度为 600 mm/s 时,四个不同的激光重复频率形成的 HAZ 差异不明显,均小于 5 μm,但重复频率

350 kHz 时 HAZ 误差棒较大,切割表面均匀性较差。

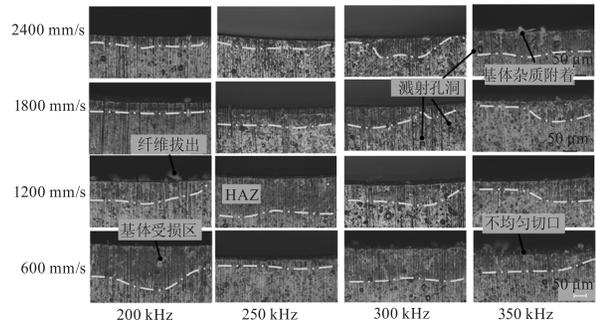


图6 不同参数下激光制孔的典型热损伤

Fig.6 Typical thermal damage of laser drilling

under different parameters

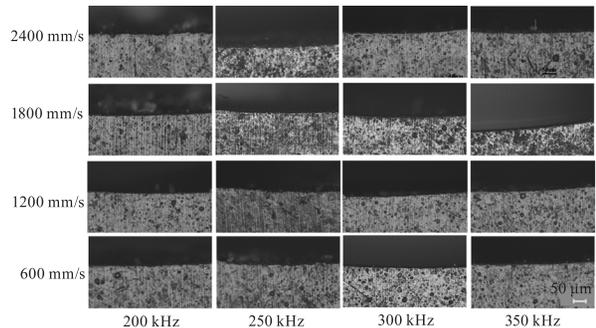


图7 硅油辅助后各参数的典型热损伤

Fig.7 Typical thermal damage of parameters

after dimethicone assistance

值得注意的是激光重复频率 250 kHz 时,HAZ 最大,整体来看,HAZ 随着激光重复频率的增大呈现先增大后减小的趋势。短脉冲激光与材料作用时,由于光化学裂解和光热蚀除,会产生热蒸汽和等离子体,他们带来的反推力会加快材料的去除,也就是所谓的机械剥蚀^[13]。当激光重复频率 300 kHz、350 kHz 时,较高的功率能量带来较大的机械剥蚀能力,因此 HAZ 较小。而激光重复频率为 250 kHz 时,平均功率较低,且机械剥蚀能力较小,材料蚀除能力弱,更多次数的光斑扫描带来更大的 HAZ。

较慢的扫描速度和较低的重复频率可以获得 HAZ 在 5 μm 左右的切割表面。尤其是扫描速度为 1200 mm/s 时,HAZ 及误差棒均较小,图 7 中也可看出切割表面较为均匀,无明显热缺陷。整体观察图 8,发现扫描速度对 HAZ 的影响最大,他主要是影响了硅油在切割表面的分布。

3.3 硅油对加工精度的影响

图 8 反映出激光重复频率为 200 kHz、300 kHz 时,HAZ 普遍较小,图 9(a)为该重复频率下,激光制孔及硅油辅助激光制孔上表面半径及其圆度。激光

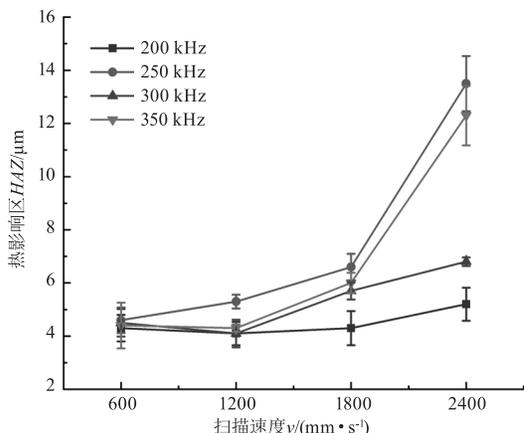
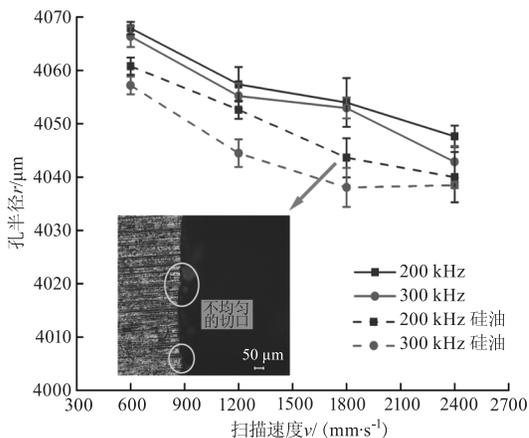


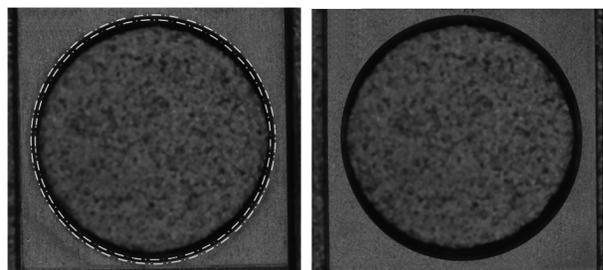
图 8 硅油辅助激光制孔 HAZ 变化趋势

Fig. 8 HAZ change trend of dimethylsiloxane-assisted laser drilling

加工的孔并不是一个规则的圆,图中的误差棒表示孔入口轮廓在一组同心圆中波动时,两同心圆的半径差,它反映了孔的圆度。图 9 观察到:(1)随着激光扫描速度的增大,孔半径整体呈下降趋势;(2)硅油辅助切割后,孔入口直径减小;(3)相同工艺参数下,硅油辅助使孔圆度变差;(4)激光扫描速度较小时,孔圆度误差小,但孔半径大,材料被过度蚀除。因此,硅油通过抑制能量的传导,虽然 HAZ 降低,但同时也导致了切口处用于加工材料的能量的减小以及不均匀,使切口不够平整,孔圆度变差。



(a)激光制孔时孔半径及误差



(a) 激光制孔: 200 kHz, 600 mm/s (b) 硅油辅助激光制孔: 200 kHz, 600 mm/s

图 9 激光制孔时孔半径及误差

Fig. 9 Hole radius and error during laser drilling

图 10 为 200 kHz、300 kHz 时硅油辅助激光制孔时孔锥度随扫描速度的变化趋势。硅油辅助皮秒激光制孔锥度减小,尤其是在 200 kHz、600 mm/s 时,锥度减小了 16.09 %。随着切割深度、扫描速度的增大,皮秒激光对 CFRP 的蚀除能力下降,深度越大,光束在切缝内受激光散射、等离子体屏蔽等影响,能量衰减越大,直接影响孔的锥度。此外孔出口表面并不是一个标准的圆,而是一个椭圆,并且光斑与纤维平行的方向优先切透(图 11)。这与碳纤维的热导率有关,沿着纤维方向的热导率远高于纤维径向,因此当光斑扫描方向与纤维方向垂直时,能量从切口沿纤维方向产生热损伤,而光斑扫描方向与纤维方向垂直时,能量热传导减小,切口处由于热量累积造成深度方向更大的蚀除量。

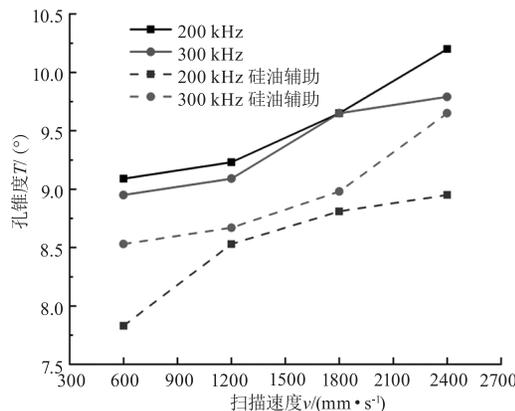


图 10 硅油辅助制孔孔锥度

Fig. 10 Silicon oil assisted hole making hole taper

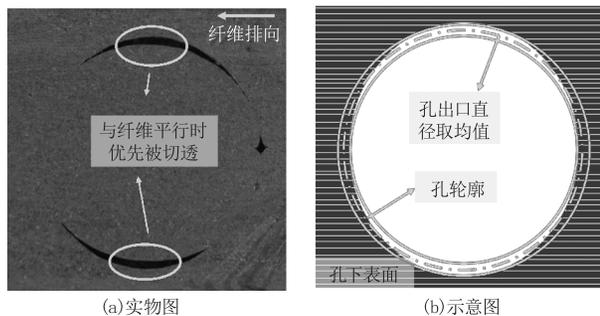


图 11 孔出口表面

Fig. 11 Hole outlet surface

激光束与材料的相互作用如图 12,作用机理包括烧蚀、汽化、以及机械剥蚀。烧蚀主要集中在基体材料上,因为其较低的汽化温度和较低的热导率,使其碳化甚至燃烧,导致较大的热损伤。机械剥蚀则是由于热蒸汽和等离子体的反推力导致脉冲间材料的去除,机械剥蚀可以提高材料的去除率,带走杂质,但同时可能会使杂质溅射到加工

表面,清洗后留下孔洞等。硅油辅助首先抑制表面热传导,使能量集中在加工范围内;其次杂质溅射在表面,落在硅油上,清洗后,使表面孔洞数量减小,孔表面 HAZ 减小、质量提高。同时硅油主要作用于上表面,抑制热传导,使孔上表面孔径减小导致孔的锥度变小。

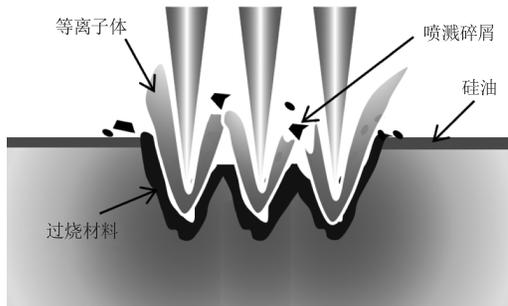


图 12 脉冲激光材料去除机理

Fig. 12 Pulse laser material removal mechanism

4 结论

(1)皮秒激光制孔时,孔上表面存在纤维裸露和基体损伤,孔壁面有裂纹、孔洞产生,而硅油辅助制孔均可降低此类损伤的程度。

(2)硅油辅助制孔时,激光重复频率 200 kHz,扫描速度 1800 mm/s 时刻获得一个 HAZ 为 4.1 μm 的高质量孔。并且扫描速度为 600 mm/s 时,激光重复频率对 HAZ 影响较小,HAZ 均在 5 μm 左右。

(3)硅油辅助皮秒激光加工能够降低孔的锥度,在工艺参数组合 200 kHz、600 mm/s 下,锥度减小了 16.09 %。

(4)较低的重叠频率、较慢的扫描速度可以获得 HAZ 小、孔上表面圆度好、锥度较小的优质孔。

参考文献:

[1] P A, D M, C R, et al. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics-a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 555 - 579.

[2] LI Maojun, HUANG Mingjie, JIANG Xiaogeng, et al. Study on burr occurrence and surface integrity during slot milling of multidirectional and plain woven CFRPs[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 163 - 173.

[3] E M, H M O, E G A, et al. Abrasive water Jet machining of multidirectional CFRP laminates [J]. Procedia Crip, 2018, 68: 535 - 540.

[4] Yue Xiaoming, Yang Xiaodong, Tian Jing, et al. Thermal, mechanical and chemical material removal mechanism of carbon fiber reinforced polymers in electrical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 133: 4 - 17.

[5] A S, Y Y, L 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 & Design, 2016, 107: 461 - 465.

[6] Hu Jun, Zhu Dezhi. Investigation of carbon fiber reinforced plastics machining using 355 nm picosecond pulsed laser [J]. Applied Composite Materials, 2017, 25(4): 1 - 12.

[7] Li Wenyuan, Zhang Guojun, Huang Yu, et al. UV laser high-quality drilling of CFRP plate with a new interlaced scanning mode [J]. Composite Structures, 2021, 273: 114258.

[8] M W, E R, N R, et al. Laser cutting characteristic on the laminated carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite of aerospace structure panel [J]. Adv Mater Res, 2012, 576: 503 - 506.

[9] A W, T H, P M, et al. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 292 - 301.

[10] P M, A S, L L, et al. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. Applied physics, A. Materials science & processing, 2016, 122: 73.

[11] R N, L L. Fibre laser cutting of carbon fibre-reinforced polymeric composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(13): 1755 - 1766.

[12] Li Wenyuan, Huang Yu, Chen Xinghua, et al. Study on laser drilling induced defects of CFRP plates with different scanning modes based on multi-pass strategy [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144(19): 107400.

[13] E M H, E H. Laser beam machining of CFRP composites: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9012).