

CFRP 复材飞秒激光小孔加工工艺研究

邱 一¹, 刘 壮¹, 李元成², 张晓兵²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘 要: 飞秒激光有着极窄的脉宽、极高的峰值能量, 因此具有加工范围广、加工质量好等优势。利用飞秒激光对 CFRP 复合材料进行小孔加工试验, 研究了光斑局部填充和全填充两种方式对 $\phi 3$ mm 小孔加工的影响。通过光学显微镜、工业 CT 等检测手段对试件的小孔加工进行检测, 分析小孔进出口形貌以及内壁锥度, 对比讨论了不同填充方式对材料去除的影响。试验结果表明, 全填充的排屑条件好于局部填充, 因此更容易加工出通孔; 局部填充易导致光束向底部反射以及热量聚集所致的材料去除, 因此加工出的通孔锥度较小。扫描速度越小, 孔的锥度越小, 反之扫描速度越大, 孔的锥度越大。填充间距影响着激光的输入能量密度, 因此填充间距对小孔加工的深度有直接影响, 对小孔入口直径以及小孔锥度的影响较小。

关键词: 飞秒激光; CFRP 复合材料; 小孔加工; 光斑填充方式

中图分类号: TN205; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.02.008

Technological investigation of femtosecond laser drilling of CFRP composite

QIU Yi¹, LIU Zhuang¹, LI Yuan-cheng², ZHANG Xiao-bing²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Femtosecond laser machining has advantages of wide processing capability and good processing quality due to extremely narrow pulse and high peak energy. In this paper, femtosecond laser is applied to drill small holes on CFRP composite materials using different spot filling patterns. The effect of the partially filling and full filling on the drilling of $\phi 3$ mm holes has been investigated. Optical microscope and industrial CT have been used to measure machining results. The morphology and wall taper angle have been analyzed, and effects of different spot filling patterns on material removal also been compared and discussed. The result shows that full filling pattern can easily form through holes; however, the partial filling pattern can achieve holes with smaller taper angle. The smaller the scanning speeds are, the smaller the taper of the hole is; on the contrary, the higher the scanning speeds is, the greater the taper of the hole is. The filling distance affects the input energy density of the laser, so the filling distance has a direct effect on the depth of the small hole processing, and less effect on the small hole entrance diameter and the small hole taper.

Keywords: femto second laser; CFRP composite; drilling small hole; spot filling pattern

1 引 言

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Re-

inforced Plastics) 是以碳纤维为增强体、树脂为基体的复合材料, 具有低密度、高强度、耐高温、耐辐射、

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-VII-0015-0111) 资助。

作者简介: 邱 一, 男, 硕士研究生。E-mail: qiyi726@163.com

通讯作者: 刘 壮, 男, 博士, 副教授, 研究方向为特种能场加工技术。E-mail: liuzhuang@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-04

抗化学腐蚀等优良性能,是目前最受青睐的高性能材料之一,被广泛应用于航空航天等领域^[1-2]。CFRP 成型后,多数情况下需要进行大量的小孔结构加工,以满足装配、连接、冷却等功能需求。目前 CFRP 复材制孔工艺主要有两大类,一类是传统加工工艺,如铣削、钻削等^[3];另一类是特种加工工艺,如电火花加工^[4]、激光加工^[5]、超声打孔^[6]、水射流加工^[7]以及它们的复合加工技术等。由于该类复材基体与增强相的物理特性差异大,导致制孔技术难度较大,易出现纤维拔出、分层、基体损伤、纤维末端膨胀等^[8]。

CFRP 复材激光加工技术是目前的研究热点。Sehyeok 等人^[9]使用光纤连续激光对 CFRP 材料进行了切割实验,研究了激光功率及扫描速度等参数对加工结果的影响,结果显示扫描速度是减小热损伤的主要因素。路明雨等人^[10]对高模量 CFRP 复材的皮秒激光加工阈值特性进行了研究,通过面积外延法测定了两种 CFRP 复材的皮秒激光加工阈值,并分析了入射能量通量和扫描速度对切口质量的影响规律。Oliveira 等人^[11]利用飞秒激光对 CFRP 复材进行表面处理,实验结果表明,使用合适的加工参数可以选择性地去除复材的树脂基体,将碳纤维裸露出来。

飞秒激光因具有脉冲持续时间极短、峰值功率极高的优点,使其在微小孔加工方面受到越来越广泛地关注。在使用飞秒激光对 CFRP 材料进行制孔时,对于较大尺寸孔径(如 $\phi 6$ mm 以上),可以采用光斑局部填充方式进行加工,这样有利于提高加工效率。但是,对于较小尺寸孔径(如 $\phi 3$ mm),光斑填充方式的选择值得考量:如采用局部填充方式,则存在材料去除不充分的风险;如采用全填充方式,则增加了加工时间,降低了加工效率。针对这方面的研究尚未见报道。因此,本文采用飞秒激光对 $\phi 3$ mm 小孔进行不同填充方式的加工研究,主要探讨光斑半填充和全填充两种方式对小孔入口直径、锥度以及加工效率的影响,为今后 CFRP 复合材料飞秒激光小孔加工的应用提供参考。

2 试验与方法

试验所使用的试件为 CFRP 复材板,二维多向编织,铺层方向分别为 -45° 、 0° 、 45° 、 90° ,如图 1 所

示。将 CFRP 复合材料切割成尺寸为 $30\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 2.8\text{ mm}$ 试件,厚度为 2.8 mm 。该复材中的碳纤维为日本东丽公司 T300 型碳纤维,碳纤维直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$,树脂基体为聚酰亚胺,两者的体积分数分别为 60% 和 40% 。碳纤维层合板由预浸料铺层后,在热压罐中固化成型。试件材料的性能参数如表 1 所示。

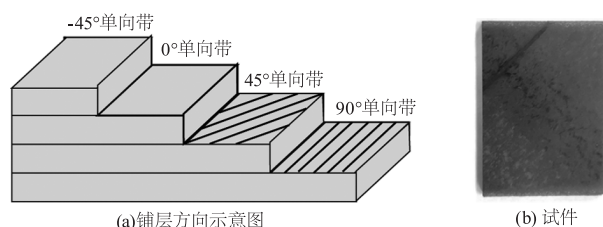


图 1 CFRP 复合材料试件

Fig. 1 CFRP composite specimen

表 1 CFRP 复合材料的物理性能参数

Tab. 1 Thermal and physical properties of the CFRP

材料参数	碳纤维	树脂
体积分数 ϕ_i	0.6	0.4
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1850	1200
比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	710	1884
热导率 $k/(\text{W} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	50(轴向), 5(径向)	0.3
相变潜热 $L/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	43000	1000
气化温度/K	3900	698
编织角度	-45° 、 0° 、 45° 、 90°	无

所采用飞秒激光加工系统由飞秒激光器、光路系统、监视系统、运动平台和计算机控制器等部分组成。表 2 为飞秒激光加工试验参数。加工后的试样经酒精棉擦拭后烘干,在显微镜下观测小孔入口以及出口形貌,并使用工业 CT 对小孔剖面进行扫描检测,得到小孔剖面图。小孔加工试验采用光斑同心圆轨迹扫描方式进行,选择了 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 三种填充间距(即两同心圆扫描轨迹间的距离)来研究半填充方式和全填充方式对小孔加工结果的影响规律。光斑半填充是指激光扫描区域覆盖小孔外圆边界到 $D/2$ 处(D 为小孔直径),全填充是指激光扫描区域覆盖整个小孔面积,如图 2 所示(阴影区域为光斑填充区域)。光斑沿光束轴线方向采用匀速进给方式,进给速度为 $2\text{ }\mu\text{m/s}$ 。

表2 飞秒激光参数

Tab. 2 Parameters of femtosecond laser used in the experiment

脉冲宽度 /fs	波长 /nm	重复频率 /kHz	脉冲能量 /μJ	光斑直径 /μm
290	1028	10	200	30

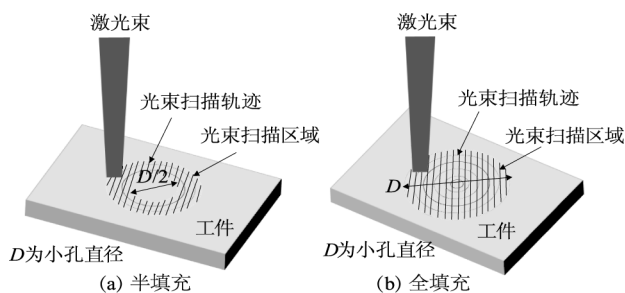


图2 两种不同的填充方式

Fig. 2 Two different filling methods

3 结果与讨论

3.1 光斑半填充的加工结果

3.1.1 不同光斑填充间距的加工结果

图3所示为半填充方式,脉冲能量200 μJ,扫描速度300 mm/s,填充间距分别为20 μm(线重合度33.3%)和30 μm(线重合度0%),经1500层扫描加工后的加工结果。两种填充间距均未加工出通孔,填充间距为20 μm时,小孔入口直径为3228 μm,材料被切透,但中心凸台仍有材料与孔壁相连,如图3(a)所示。填充间距为30 μm时材料未被切透,小孔入口直径为3220 μm,如图3(b)所示。

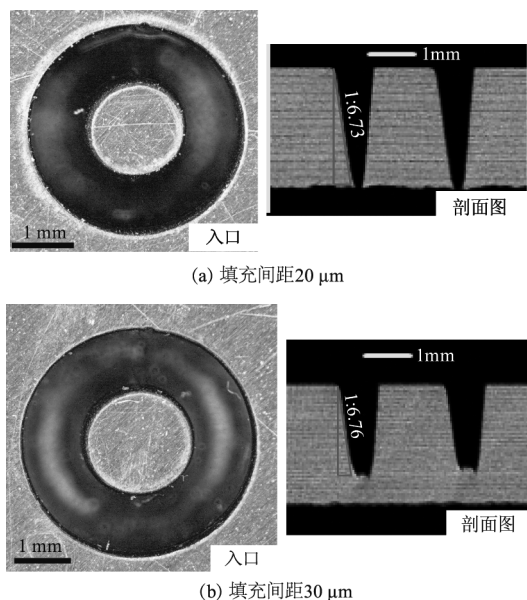


图3 光斑半填充及扫描速度300 mm/s下的加工结果

Fig. 3 Machined results due to half-filled pattern and scanning speed of 300 mm/s

从材料去除机理方面分析,填充间距大小决定了光斑线重叠率的高低,进而影响到激光输入能量密度,输入能量密度越大则材料去除越多,反之亦然。此外,剥蚀效应^[12]在CFRP激光加工中的作用也不能忽视。剥蚀效应是指在按照同心圆扫描轨迹进行加工时,由于树脂基体的热解温度较低,因此加工区域的树脂基体先于碳纤维被去除,造成碳纤维失去支撑;在高温高压的树脂热解气体的作用下,部分纤维被力学作用剥蚀去除。当线重叠率较大时,力学剥蚀现象较强,提高了材料的去除率。因此,填充间距越小,越容易加工出通孔。同时发现,填充间距对小孔的入口直径以及孔的锥度的影响较小。

3.1.2 不同扫描速度的加工结果

图4为脉冲能量200 μJ,采用半填充加工方式,填充间距20 μm,1500次扫描条件下,扫描速度分别为200 mm/s和300 mm/s下的加工结果。结果显示,扫描速度为200 mm/s时获得通孔(入口直径3298 μm、锥度为1:9.04)。扫描速度为300 mm/s时,未获得完整的通孔,中间凸台部分未被切离材料,入口直径为3228 μm,孔壁锥度为1:6.73。从图4中可以看出,扫描速度200 mm/s时不但能得到通孔,而且孔壁的锥度较小。分析认为,其原因跟与3.1.1中的分析大致相同。扫描速度较小时,光斑重叠率较高,输入能量密度较大,材料的去除更多。因此,适当降低扫描速度,提高光斑重叠率有利于小孔的加工,同时降低扫描速度还能改善小孔的锥度。

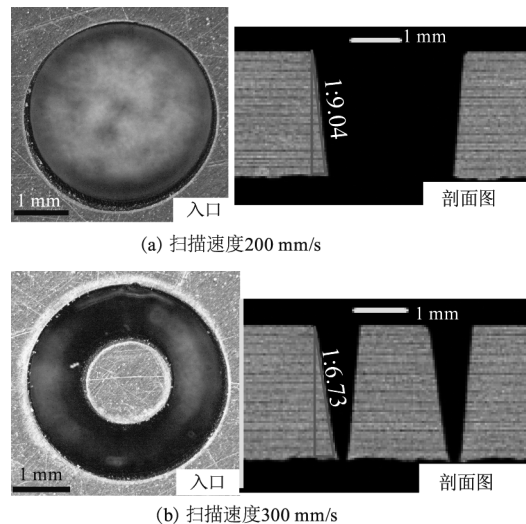


图4 采用半填充及填充间距20 μm下的加工结果

Fig. 4 Machined results due to half-filled pattern and filling space of 20 μm

3.2 全填充方式下的加工结果

3.2.1 不同填充间距下的加工结果

图5展示了在脉冲能量 $200\ \mu\text{J}$, 扫描速度 $200\ \text{mm/s}$, 扫描 1500 次, 光斑全填充条件下, 填充间距分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ (线重叠率分别为 33% 、 0% 、 -33%) 的加工结果。从图5(a)中可以看出, 光斑填充间距为 $20\ \mu\text{m}$ 时获得通孔 (入口直径 $3270\ \mu\text{m}$ 、锥度 $1:4.35$)。填充间距为 $30\ \mu\text{m}$ 时也获得通孔 (入口直径 $3270\ \mu\text{m}$ 、锥度 $1:4.82$)。填充间距为 $40\ \mu\text{m}$ 时获得盲孔, 其入口直径为 $3254\ \mu\text{m}$, 锥度为 $1:5.17$ 。从加工结果可以看出, 线重叠率为 33% 和 0% 时可以得到通孔, 而当线重叠率为 -33% 时, 只能得到盲孔。其原因在于, 填充间距增大, 线重叠率降低, 激光的输入能量密度变小, 单层扫描的材料去除深度降低, 因而 $40\ \mu\text{m}$ 的填充间距仅能加工出盲孔。此外, 光斑全填充下加工出的小孔锥度明显高于光斑半填充的加工结果。产生锥度的原因是侧壁对激光的反射作用, 激光按照同心圆轨迹扫描到最外圈时, 由于侧壁对激光的反射, 导致侧壁材料对激光能量的吸收大幅降低, 而中心区域的材料对能量的吸收反而增多, 因此边缘的材料去

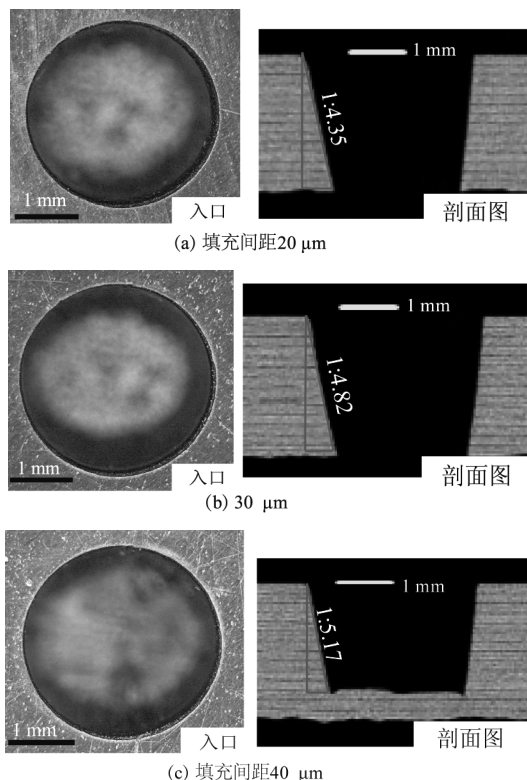


图5 光斑全填充及扫描速度 $200\ \text{mm/s}$ 下的加工结果

Fig. 5 Machined results due to full-filling pattern and scanning speed of $200\ \text{mm/s}$

除较少, 中心区域材料去除较多。同时采用全填充方式进行加工时, 易于散热和加工产物的排除, 加剧了锥形孔的产生。同时发现, 填充间距对孔壁锥度的影响较小。

3.2.2 不同扫描速度下的加工结果

图6展示了在脉冲能量为 $200\ \mu\text{J}$, 采用全填充加工方式, 填充间距 $20\ \mu\text{m}$ 、 1500 次扫描, 扫描速度分别为 $200\ \text{mm/s}$ 和 $300\ \text{mm/s}$ 下的加工结果。从图6中可以看出, 两种扫描速度均能得到通孔。当扫描速度为 $200\ \text{mm/s}$ 时, 通孔入口直径为 $3273\ \mu\text{m}$, 孔壁锥度为 $1:4.35$ 。当扫描速度为 $300\ \text{mm/s}$ 时, 通孔的入口直径为 $3252\ \mu\text{m}$, 孔壁锥度为 $1:3.65$ 。扫描速度为 $200\ \text{mm/s}$ 时获得的通孔锥度小于扫描速度为 $300\ \text{mm/s}$ 的加工锥度。分析其原因, 扫描速度越大光斑重叠率越小, 因此输入能量密度越低, 材料去除率越低, 小孔的孔壁锥度越大。采用较小的扫描速度有利于得到锥度较小的通孔, 同时发现扫描速度对小孔入口直径的影响较小。

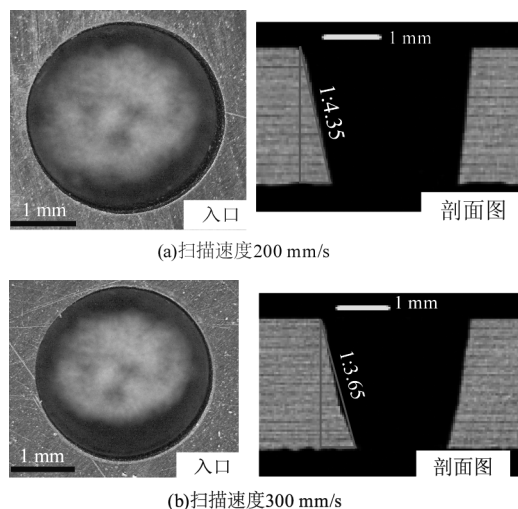


图6 光斑全填充及填充间距 $20\ \mu\text{m}$ 下的加工结果

Fig. 6 Machined results due to full-filling pattern and filling space of $20\ \mu\text{m}$

3.3 光斑半填充与全填充方式的对比

通过上述试验可以得出, 不同的光斑填充方式对加工结果有较为显著影响, 图7展示了脉冲能量 $200\ \mu\text{J}$ 、扫描速度 $200\ \text{mm/s}$ 、填充间距 $20\ \mu\text{m}$ 及 $30\ \mu\text{m}$ 、两种不同的填充方式加工 1500 次后的结果。填充间距为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 两种填充方式均能加工出通孔。当采用半填充时, 通孔入口的直径为 $3298\ \mu\text{m}$, 锥度为 $1:8$ 。采用全填充时, 通孔的入口直径为 $3273\ \mu\text{m}$, 锥度为 $1:4.35$, 如图7(a)与(b)所示。

当填充间距为 $30\ \mu\text{m}$ 时,采用半填充的加工方式未能成功加工出通孔,其入口直径为 $3276\ \mu\text{m}$,锥度为 $1:7.1$ 。采用全填充方式能成功加工出通孔,其入口直径为 $3270\ \mu\text{m}$,锥度为 $1:4.82$,如图 7(c)与(d)。从图中可以看出,采用半填充时,填充间距为 $20\ \mu\text{m}$ 能加工出通孔,而填充间距为 $30\ \mu\text{m}$ 时不能加工出通孔,其原因如前文所述,是因为填充间距越小,线重叠率越大,输入能量密度越高,因此越容易加工出通孔。从图 7(c)与(d)中可以看出,当填充间距为 $30\ \mu\text{m}$ 时,采用全填充方式能获得通孔,而采用半填充方式不能获得通孔。经分析可认为在采用半填充方式加工时,随着加工深度的增大,排屑更加困难,气化或熔化的材料不能及时排出孔外,同时加工产物会对激光能量进行吸收,大幅降低了材料对飞秒激光能量的吸收率。

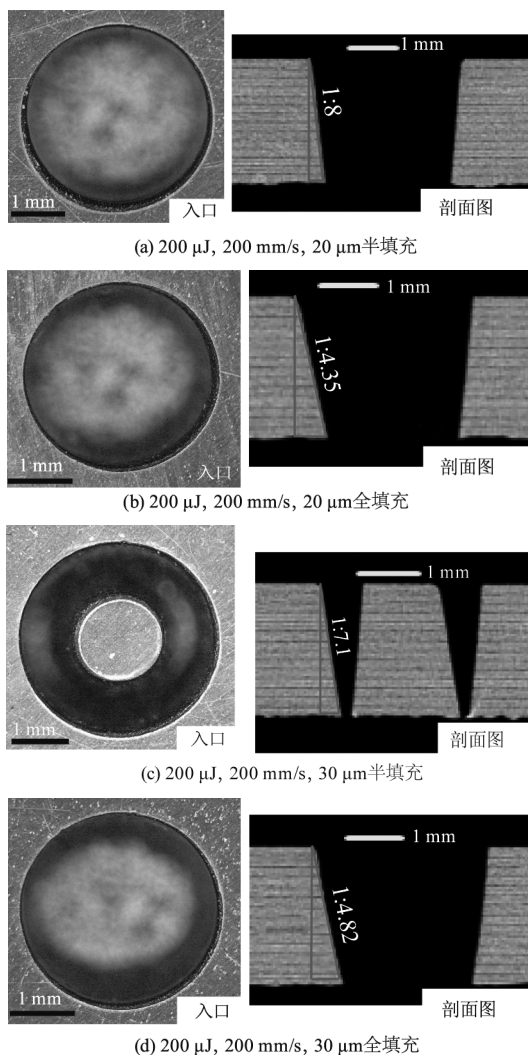


图 7 填充间距 $30\ \mu\text{m}$ 及不同填充方式下的加工结果
Fig. 7 Machined results due to a filling space of $30\ \mu\text{m}$ and different filling patterns

对比半填充和全填充下的加工结果可以看出,采用半填充加工出的通孔锥度比采用全填充的小。经分析可认为主要有两个原因,一是在脉冲能量较大,扫描速度较小,填充间距较小,采用半填充方式进行加工时,虽然小孔内壁会对激光产反射,但由于凸台的存在,激光将在凸台外壁与小孔内壁之间来回反射,反而会增加材料对激光能量的吸收,同时由于输入能量密度足够大,能够有效的去除小孔内壁的材料,改善小孔的锥度,如图 8 所示。二是由于采用半填充时热解气等气态物质无法及时的排除,吸收激光能量导致热量在凹槽内聚积,反而有利于改善小孔的锥度。从试验结果可以看出,在输入能量密度足够大时,采用半填充方式进行加工不仅可以提高加工效率,还能得到锥度更小的通孔。填充间距和填充方式对小孔入口直径的影响不大,这是因为飞秒激光按照同心圆轨迹从外圈扫至最内圈,最外圈的加工凹槽阻止了温度向圆外传递。而扫描速度和填充方式对小孔孔壁锥度有较大影响。采用较小的扫描速度和较小的填充间距可以获得锥度较小的通孔。

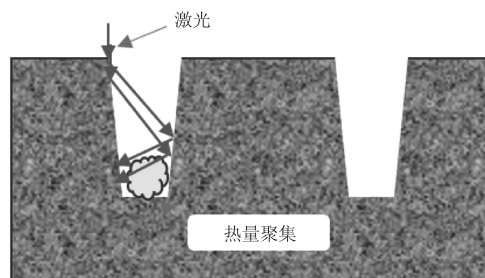


图 8 凹槽侧壁对激光的反射及热量聚集示意图
Fig. 8 Schematic of the reflection and heat accumulation of the laser on the sidewall of the groove

4 结 论

对 CFRP 复材飞秒激光小孔加工进行了试验研究,探讨了光斑半填充和全填充两种方式对小孔入口直径、锥度以及加工效率的影响,主要结论如下:

(1) 光斑填充方式对小孔入口尺寸影响较小、对小孔锥度有较大影响。采用光斑半填充加工出的小孔锥度好于采用全填充加工出的小孔锥度。

(2) 填充间距对小孔入口尺寸以及小孔锥度的影响较小。扫描速度对小孔入口尺寸影响较小,但对小孔锥度的影响较大;扫描速度越小则小孔锥度越小。

(3) 采用脉冲能量 $200\ \mu\text{J}$ 、半填充加工方式、填

充间距 20 μm 、扫描速度 200 mm/s 时,能加工出质量较好、锥度较小的通孔。

参考文献:

- [1] Meng Yuchen, Wang Yanhui, Jing Rong, et al. Research progress on epoxy resin system for carbon fiber composites [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40 (S1): 75 - 78. (in Chinese)
孟雨辰,王彦辉,荆蓉,等. 碳纤维复合材料用环氧树脂体系研究进展 [J]. 现代化工, 2020, 40 (S1): 75 - 78.
- [2] Peng Hexuan. Application and prospect of carbon fiber composites [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2018, 45 (5): 24 - 25. (in Chinese)
彭鹤轩. 碳纤维复合材料的应用和展望 [J]. 现代盐化工, 2018, 45 (5): 24 - 25.
- [3] Hu Andong, Chen Yan, Fu Yucan. Study on surface integrity during ultrasonic vibration assisted grinding of CFRP [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35 (6): 23 - 27. (in Chinese)
胡安东,陈燕,傅玉灿. 超声振动辅助铣磨加工 CFRP 表面质量研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35 (6): 23 - 27.
- [4] Dutta H, Debnath K, Sarma D K. A Study of Wire Electrical Discharge Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastic [M]. Shunmugam M S, Kanthababu M. 2020: 451 - 460.
- [5] Zhang P, Chen L, Chen J, et al. Material removal effect of microchannel processing by femtosecond laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 69 - 75.
- [6] Benammar A. Inspection problem of composite materials using an ultrasonic signal processing [C]//Société Française d'Acoustique. Acoustics 2012.
- [7] Potom B, Madhu S, Kannan S, et al. Performance Analysis of Abrasive Water Jet Cutting Process in Carbon Fiber Epoxy Polymer Composite [J]. IOP Conference Series: Materials Ence and Engineering, 2019, 574 (1): 12014 - 12017.
- [8] Wang Chunhao, Li Pengnan, Li Shujian, et al. Research progress on determination defect in CFRP cutting process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42 (6): 109 - 115. (in Chinese)
王春浩,李鹏南,李树键,等. CFRP 钻削加工过程的分层缺陷研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019. 42 (6): 109 - 115.
- [9] Sehyeok Oh, Inyong Lee, Young-Bin Park, et al. Investigation of cut quality in fiber laser cutting of CFRP [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 113: 129 - 140.
- [10] Lu Mingyu, Zhang Ming, Zhang Kaihu, et al. Threshold properties of high modulus carbon fiber reinforced plastic composite with picosecond laser processing [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38 (11): 3601 - 3609. (in Chinese)
路明雨,张明,张开虎,等. 高模量碳纤维增强树脂基复合材料的皮秒激光加工阈值特性 [J]. 复合材料学报, 2021, 38 (11): 3601 - 3609.
- [11] V Oliveira, S P Sharma, M F S F de Moura, et al. Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 94: 37 - 43.
- [12] Xu Hebing. Experimental research and numerical simulation on the woven CFRP short pulsed milling [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
徐合兵. 机织碳纤维复合材料短脉冲激光铣削的实验研究与数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.