

引用格式: CHENG Jian, LI Jiale, ZHANG Zhiwei, et al. Characteristics and Properties of Femtosecond Laser Drilling of Kevlar-29 Substrates[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0752309

成健,李嘉乐,张志伟,等. Kevlar-29 材料的飞秒激光制孔形貌及性能研究[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0752309

# Kevlar-29 材料的飞秒激光制孔形貌及性能研究

成健<sup>1,2</sup>, 李嘉乐<sup>1</sup>, 张志伟<sup>1</sup>, 姜晟<sup>1</sup>, 章鹏<sup>2</sup>, 翟中生<sup>1,2</sup>, 刘顿<sup>1,2</sup>

(1 湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068)

(2 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 武汉 430068)

**摘要:**为提升飞秒激光加工芳纶纤维复合材料制孔质量,优化制孔加工参数,进行了制孔试验。用共聚焦显微镜与超景深显微镜观察圆孔边沿形貌,并测量了热影响区大小。分析了激光功率、扫描速度和重复频率对圆孔的形貌、热影响区大小以及几何精度的影响,对比了激光制孔与机械制孔后材料的拉伸强度。研究发现,一定参数范围内,激光功率增加、重复频率降低或扫描速度减小使热影响区尺寸整体上逐渐变大。但激光功率不足导致的烧蚀不充分也会产生较大的热影响区与表面损伤。热影响区最优状态对应的激光参数为激光功率 5 W,扫描速度 1 050 mm/s,重复频率 200 kHz。对比传统机械加工,飞秒激光加工后材料的拉伸强度波动性更小。结果表明,芳纶纤维复合材料的飞秒激光制孔加工不是完全的“冷”加工,由于芳纶纤维导热性差,热量累积造成纤维及纤维周边基材的热损伤,仍会导致较小的热影响区产生。采用合适激光参数的飞秒激光对芳纶纤维复合材料进行制孔加工,能有效提升制孔质量,满足相关领域精度和强度的要求。

**关键词:**激光加工;飞秒激光;激光制孔;芳纶纤维复合材料;表面质量;几何精度;拉伸性能

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235207.0752309

## 0 引言

芳纶纤维增强复合材料(Aramid Fiber Reinforced Plastics, AFRP)由芳纶纤维和环氧树脂复合而成,是一种具有高强度、高刚度、低密度和优异的耐腐蚀性能的材料<sup>[1-5]</sup>。由于其卓越的性能,AFRP 材料已经被广泛应用于航空航天、汽车、装备防护、建筑和电子领域<sup>[6-11]</sup>。

一次成型工艺无法满足 AFRP 在各领域的应用,制孔是 AFRP 材料加工过程中必要的一步,能为其带来更广泛的应用<sup>[12]</sup>。例如,被用作防护外壳时,需要在 AFRP 上加工定位孔和连接孔。王晋宇等<sup>[13]</sup>采用液氮超低温切削的方式进行 AFRP 的制孔研究,使用液氮冷却能降低由于切削热产生的烧蚀,有效提高制孔质量,但仍存在较明显的毛刺。LIU Sinan 等<sup>[14]</sup>基于多目标遗传算法,优化了钻削参数,减小了撕裂、毛刺产生等损伤,但仅能得到单一损伤的优化解。传统机械加工方法进行 AFRP 制孔加工时往往伴随着刀具磨损、毛刺产生、分层撕裂、烧伤损伤等问题<sup>[15-17]</sup>。这些缺陷可能会降低材料的强度和可靠性,从而影响材料的性能和应用。

激光制孔技术通过非接触式加工方法,避免了机械制孔可能造成的物理损伤,同时也能更精确地控制孔的位置、孔径和形状<sup>[18-22]</sup>。TAGLIAFERRI V 等<sup>[23]</sup>采用 CO<sub>2</sub>激光对 AFRP 进行切割试验,发现芳纶纤维和树脂基体对该波长的吸收差异较小,从而使 AFRP 获得较好的加工质量。BASSIM B 等<sup>[24]</sup>建立了激光切割模型,研究了激光能量、聚焦位置和气体环境等工艺参数对切割过程的影响;同时采用 Nd:YAG 激光器进行验证试验,发现低激光功率、低激光扫描速度和高激光重复频率可以获得光滑的切割表面。本课题组<sup>[25]</sup>

**基金项目:**现代制造质量工程湖北省重点实验室 2022 年度实验室开放基金项目(No. KFJJ-2022015),湖北省自然科学基金(No. 2022CFA006),湖北省科技重大专项项目(No. ZDZX2020000013)

**第一作者:**成健,chengjian@hbut.edu.cn

**通讯作者:**刘顿,dun.liu@hbut.edu.cn

**收稿日期:**2023-02-28; **录用日期:**2023-04-18

<http://www.photon.ac.cn>

也研究了超快激光脉宽、激光能量密度和激光重频对 AFRP 加工的效果。发现单脉冲体积去除率、材料去除效率和烧蚀表面粗糙度与激光脉宽、激光能量密度和重复频率正相关。MOGHADASI K 等<sup>[26]</sup>分析了工艺参数(如激光功率、扫描速度和扫描间距)之间的相互作用,以及它们对材料切割质量(包括热影响区尺寸和切口特性)的影响;发现芳纶纤维和树脂基体的热性能差异会影响热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)的大小。大量研究介绍了 AFRP 在连续激光以及纳秒激光作用下的制孔质量影响因素以及影响因素的作用机理和规律,但采用连续激光以及纳秒脉冲激光对 AFRP 进行制孔加工时仍然会产生较大的热影响区。

相对而言,超快激光加工在抑制热扩散方面表现优异,具有“冷加工”效果<sup>[27]</sup>。本研究采用飞秒激光器对 AFRP 试件进行制孔加工和正交矩阵试验,对试验结果进行分析,以研究激光工艺参数对加工后圆孔出入口表面的 HAZ 和几何精度的影响,并进一步对比激光加工与机械加工后 AFRP 的拉伸强度,为 AFRP 的飞秒激光制孔加工提供参考依据。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

试验样品为热固性芳纶纤维增强复合材料,牌号为 Kevlar-29,样品厚度为 2 mm。环氧树脂体积分数为 42%,芳纶纤维体积分数为 58%。芳纶纤维以及环氧树脂的热学性能参数(密度、弹性模量、热膨胀系数、分解温度、拉伸强度、层间剪切强度)如表 1 所示。

表 1 Kevlar-29 基板的性能参数  
Table 1 Properties of Kevlar-29 substrate

Materials	Density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Elastic modulus/GPa	Thermal expansion coefficient/ $(\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	Decomposition temperature/K	Tensile strength/MPa	Interlaminar shear strength/MPa
Aramid fiber	1.45	112.4	2.7	800	3 000	48-69
Epoxy resin	1.1~1.3	1~2	56.8~62.4	440	650~850	—

### 1.2 试验设备及方法

试验用飞秒激光器为安扬飞秒 FemtoYL-50 型激光器,激光束为高斯脉冲模式,激光功率为 55 W,波长为 1 030 nm,脉宽为 480 fs,最高重频为 1 000 kHz,焦距为 100 mm,聚焦光斑直径为 21  $\mu\text{m}$ 。试验用激光加工系统由激光器光源、光束传输光路、扫描头、扫描振镜和三维运动控制平台组成。整个试验装置结构如图 1 所示。试验时,将 AFRP 固定在 X-Y 移动工作平台上。激光束通过反射镜  $M_1$  入射到扩束镜以及光偏振调节器,再通过反射镜  $M_2$  和  $M_3$  反射到  $M_y$ 、 $M_x$  和  $M_z$  三个反射镜上,最后进入扫描振镜,通过振镜的激光束聚焦在 AFRP 的上表面位置,完成指定的扫描动作实现材料加工。其中反射镜  $M_y$ 、 $M_x$  和  $M_z$  处于同一平面上组成飞行光路, $M_x$  与  $M_y$  在同一水平位置, $M_z$  与  $M_x$  在同一竖直位置,确保传输光路能在 Z 方向上自由

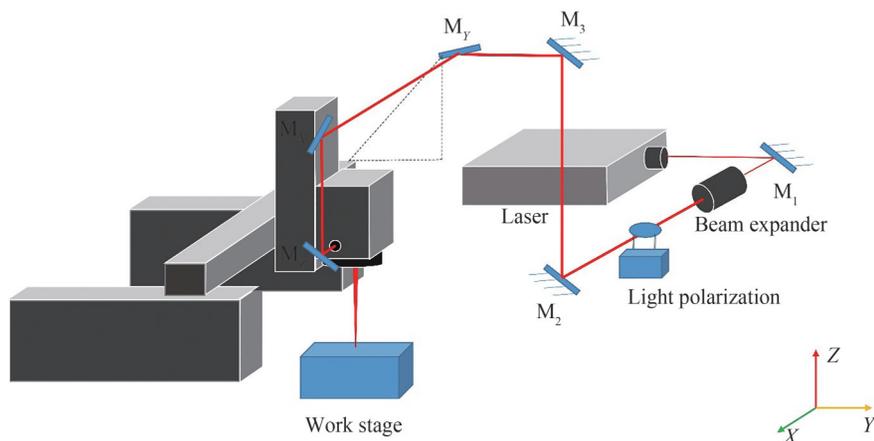


图 1 FemtoYL-50 激光加工系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the femtosecond laser processing system (laser model: FemtoYL-50)

调节位置。

为研究飞秒激光器制孔加工中激光参数与制孔表面HAZ大小的关系,以激光功率、扫描速度和重复频率为自变量进行制孔试验,制取直径为6 mm的系列圆孔。试验中,激光焦平面位于AFRP板材厚度一半处(距上表面1 mm深处)。在飞秒激光钻孔完成后,进一步对比研究激光加工与机械制孔方式对AFRP拉伸性能的影响。其中,AFRP样件的机械加工采用HURCO-VMX42三轴立式加工中心进行。制孔孔径以出口处测量所得直径为统一标准,参照ASTMD5766进行准静态拉伸测试。进行拉伸试验前,用砂纸对AFRP各边缘进行打磨,以排除工件侧边缺陷影响试验结果,准静态拉伸试验采用德国Zwick/RoellZ100型电子万能拉伸试验机,拉伸强度检测过程中,设备以0.5 mm/min的速度缓慢拉伸,激光加工样本与机械加工样本皆进行5次重复试验,取平均拉伸强度用于对比分析。飞秒激光钻孔试验中,激光加工参数为扫描速度1 050 mm/s,重复频率200 kHz,激光功率5 W;机械制孔参数为主轴转速1 000 r/min,进给速度0.06 mm/r。

### 1.3 加工样件的表面形貌及锥度表征

经过激光制孔加工后的AFRP,需要观测圆孔边缘HAZ表面宏、微观形貌,分析圆孔的精度与锥度。加工样品观测所采用的设备有日本KEYENCE公司生产的共聚焦显微镜与超景深显微镜,型号分别为VK-X200与VHK-5000。由Nikon公司生产,型号为Ci-L的透反偏光显微镜。HAZ表面评价方式如图2,虚线部分内为HAZ范围,取虚线部分的外接圆与孔径轮廓的间距作为表面HAZ的尺寸。

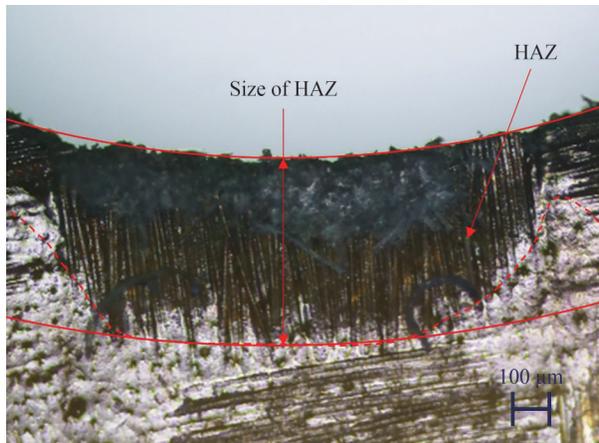


图2 飞秒激光钻孔边缘的HAZ示意图

Fig.2 Heat affected zone along the edge of the femtosecond laser drilled hole

在激光制孔过程中,材料上通孔出入口烧蚀的差异会导致锥度产生。为确保精密加工的要求,通孔需保持低锥度的状态。AFRP制孔加工后锥度示意如图3,锥度计算公式为

$$\theta = \arctan \left[ \left( \frac{W_1 - W_0}{2L} \right) \cdot \left( \frac{180}{\pi} \right) \right] \quad (1)$$

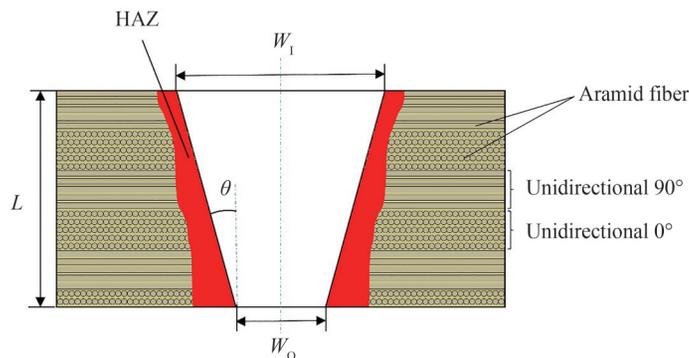


图3 AFRP制孔加工后锥度示意图

Fig.3 The taper diagram of AFRP after laser drilling

式中,  $\theta$  为圆孔锥度;  $W_1$  为入口处圆孔直径;  $W_0$  为出口处圆孔直径;  $L$  为材料厚度。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 扫描策略优化

对于厚度较大的板材, 由于聚焦光斑较小, 采用单线扫描划圆的方式, 容易造成无法切透的现象。因此, 必须适当增加扫描区域的宽度。在本研究过程中, 不同扫描方式对制孔质量也会产生一定的影响, 因此需要研究扫描路径对制孔质量的影响。主要对比了环形填充和十字填充方式, 其填充方式填充效果如图4所示, 十字填充方式的扫描路径为纵横交错网格, 环形填充则是多环叠加制孔。

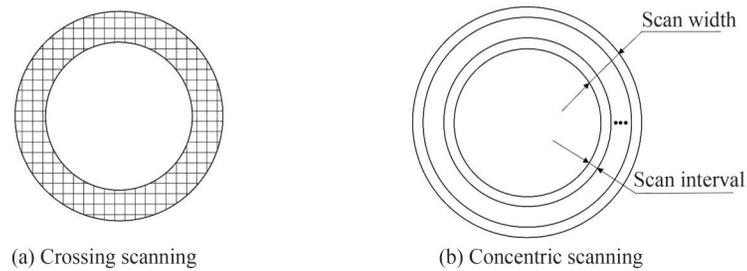


图4 AFRP制孔加工光束扫描方式示意图  
Fig.4 Schematic of laser scanning trajectories of AFRP drilling

采用图4中两种扫描方式, 基于同一激光功率和扫描速度, 对试件进行了制孔测试, 重点观察了切割边缘质量, 特别是不同纤维方向上的激光刻蚀效果; 此外, 对制孔耗费时间也进行了对比。由图5可以看出环形填充与十字填充都会产生热影响, 对比图5(a)与(c), 以及图5(b)与(d)可以看出采用十字填充方式加工出来的通孔上下表面的缺陷比环形填充加工出来的通孔上下表面的热影响要严重。这是由于采用该扫描方式, 更容易造成热沿着纤维方向传导, 从而影响到基体材料。对比两种扫描方式制孔出口, 发现十字扫描

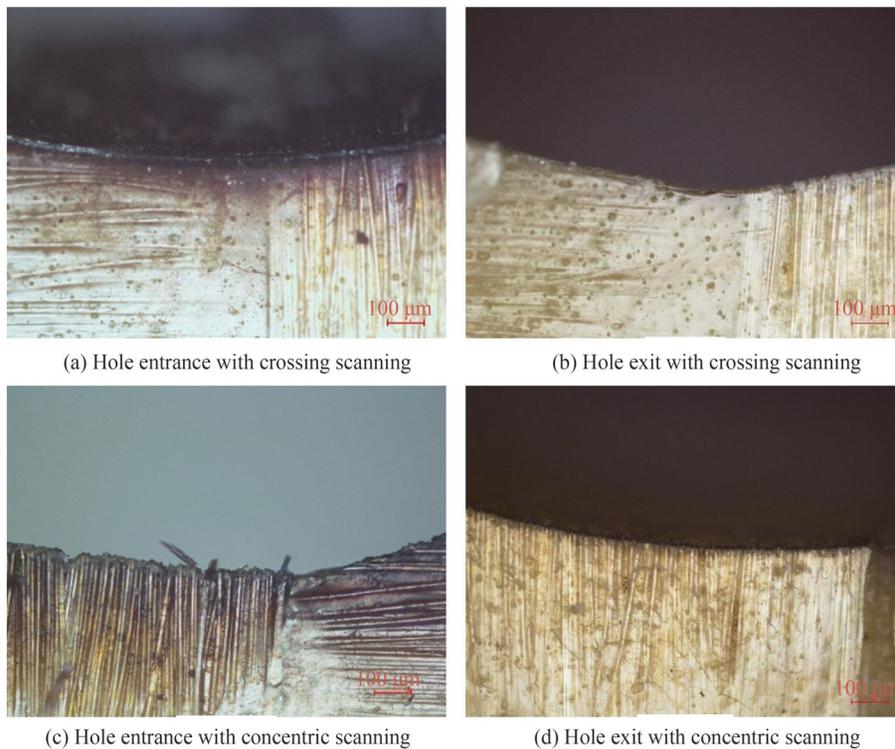


图5 AFRP制孔加工不同光束扫描方式加工效果  
Fig.5 Machining results with different laser scanning trajectories of AFRP drilling

出口处边沿具有较大缺陷以及毛刺。另外,从效率上分析,采用十字填充方式制孔耗时 3 min,而环形填充方式只需要 2 min,表明环形填充方式比十字填充方式效率高。因此,环形填充加工方式优于十字填充方式,在后续的试验中,也均采用此种扫描方式进行制孔研究。

## 2.2 激光参数对 HAZ 表面形貌及加工质量的影响

在复合材料的激光制孔加工过程中,每个激光脉冲都会对作用区域的物质产生烧蚀,材料被去除的同时会将大量的热量带走。由于激光光束在空间上呈高斯分布,因此激光作用在材料表面的能量密度不是完全均匀的。能量密度低的区域不足以使材料发生烧蚀,激光作用在材料上的能量会以热量的形式积累在材料中产生热影响区,降低圆孔周边的表面质量。理论上,飞秒脉冲激光由于超短的脉宽可避免热损伤,实现冷加工,然而,芳纶纤维热导率较低,热量不能及时发散,而是集中在芳纶纤维周围,产生热量的累积,去除周围环氧树脂或碳纤维,损伤材料表面,形成 HAZ。

为探究激光功率与重复频率对 HAZ 表面质量的影响,将扫描速度取为 1 050 mm/s 进行激光功率和重复频率的正交矩阵试验。不同激光功率以及重复频率的表面形貌如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,激光功率以及重复频率的增加会导致 HAZ 在整体上逐渐变大的趋势。当重复频率足够大时,AFRP 表面甚至出现了大面积的烧焦和碳化,且 AFRP 未被切穿。通孔无法形成的现象仅出现在低功率以及高重复频率处,在这些激光参数下,同时还出现大面积未扫描处发生严重烧焦和碳化、表面质量被严重破坏的现象,此时激光单脉冲能量较小,以至于材料去除效率低,激光能量主要转化为热量,积累在材料中并大面积损伤材料表面。

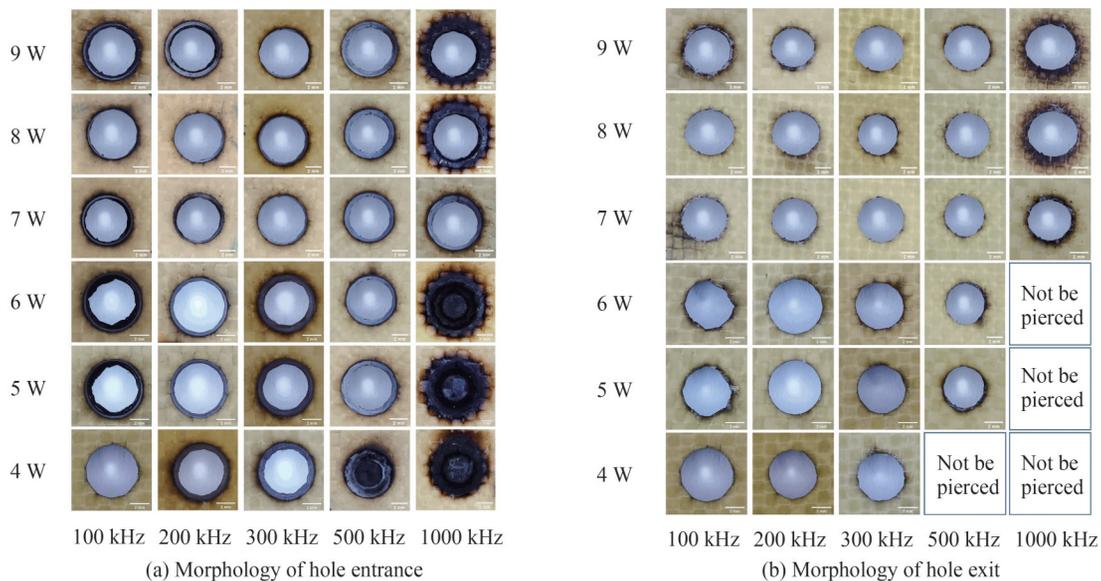


图 6 不同重复频率与激光功率的制孔表面形貌

Fig.6 Surface morphology of holes at various repetition rates and laser power

图 7 给出了飞秒激光钻孔后,孔的入口与出口处 HAZ 尺寸。从中可以清楚地看到,重复频率与激光功率的增加在整体上会导致 HAZ 的增大。当飞秒激光重复频率为 200 kHz,激光功率为 5 W 时,制孔效果较好。经测量比较发现,此时样本表面 HAZ 最小。该样本对应的单脉冲能量能有效切断纤维,产生热量较少,更加适合材料去除。单脉冲能量过低时,激光对 AFRP 无法进行有效切割,产生严重的热效应,导致材料无法被切穿。反之,当单脉冲能量过高时,激光会对材料造成热损伤。例如,对比图 6 中 8 W@1 000 kHz 与 7 W@1 000 kHz 处样本会发现,8 W@1 000 kHz 的激光参数下孔洞表面热损伤更严重,说明在该激光参数下的单脉冲能量过高。可以推断出固定频率下存在最优加工功率使材料表面 HAZ 最小,且该功率的值与该频率存在对应关系,而在超过最优加工功率后继续增大激光功率会使 HAZ 变大,损伤表面。

此外,由图 7 可以看出材料表面钻孔入口和孔出口表面的 HAZ 大小差距不大,说明在试验中参数的调整范围内,不同激光功率与重复频率对孔入口和孔出口的影响并无明显差距。同时也可以更直观地看出,

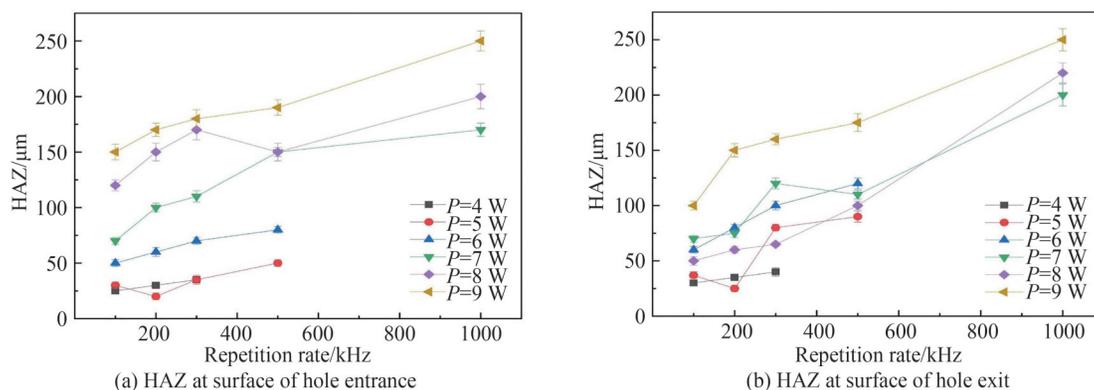


图7 不同重复频率与激光功率下HAZ尺寸变化折线  
Fig.7 The trendline of HAZ under different repetition rates and laser power

随着重复频率的增大,表面HAZ也变大。这是因为重复频率的增大使相同时间内脉冲数增多,材料中产生更明显的热累积。在功率不变的情况下,重复频率的增加伴随着单脉冲能量的减少,在圆孔边缘的区域不能充分烧蚀材料,激光能量以热能的形式传给了AFRP,导致AFRP去除不完全,同时热量残留在材料中并在短时间内积累,进而造成内部树脂基体热损伤范围变大,最终导致HAZ以及表面损伤范围增大。对比图7中4 W@200 kHz和8 W@500 kHz处的HAZ可以看出,即使保证单脉冲能量相近,高重复频率处仍会出现更大的HAZ。此时,HAZ的增大主要是由于热累积效应的增强。

为进一步分析单脉冲能量以及热累积对HAZ的影响程度,将6 W@200 kHz作为参照样本,对比4 W@200 kHz、9 W@300 kHz以及6 W@300 kHz处的HAZ。此三个样本分别对应了调整单脉冲能量、热累积以及同时调整两者时飞秒激光钻孔结果。图7中看出,仅单一改变单脉冲能量或热累积,即激光参数分别为4 W@200 kHz和9 W@300 kHz时,对应材料表面HAZ与参照样本HAZ的差值大小相近,同时,功率为6 W,重复频率从200 kHz增加到300 kHz时,HAZ变化不大,此时表面HAZ的变化是单脉冲能量与热累积对HAZ的影响相互抵消产生的结果,说明单脉冲能量与热累积对HAZ的影响程度接近。因此,在足以有效烧蚀材料的单脉冲能量下,为获得HAZ较小且孔周围表面质量较高的通孔,加工需要较小的激光功率以及重复频率。

对重复频率和功率的研究表明,当重复频率为200 kHz时,表面HAZ最小,因此将重复频率固定为200 kHz,适当缩小功率变化范围,选用激光功率从4 W至6 W以及扫描速度从525 mm/s至5 250 mm/s进行正交试验,以分析扫描速度对HAZ的影响。制孔表面形貌如图8所示。可以看出,扫描速度的增加使圆孔表面HAZ的整体趋势为逐渐变小,这是由于扫描速度的增大使相邻脉冲的搭接率变小,脉冲之间空间间隔的增大同样会导致AFRP加工过程中热累积变小,进而使表面HAZ更小,有效减小表面损伤。然而,扫描速度的增大导致激光作用在AFRP上单位区域内能量减少,则单位时间内AFRP的去除体积随之减少,导致制孔加工效率降低。因此,最终确定5 W@200 kHz作为后续激光制孔的最优参数。在该参数组合情况

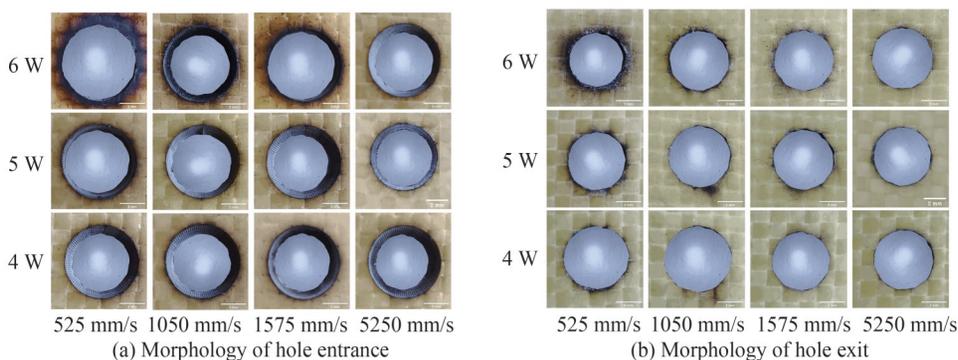


图8 不同激光功率与扫描速率的制孔表面形貌  
Fig.8 Surface morphology of holes under different laser powers and scanning velocities

下,制孔样件上表面边缘扫描电镜结果如图9所示:可以看出白色区域(HAZ)约20 μm左右,同时也可以看到上表面有零星树脂残留物,呈白色絮状,由被激光高能量冲击起来然后掉落材料的上表面所致,不影响制孔效果。

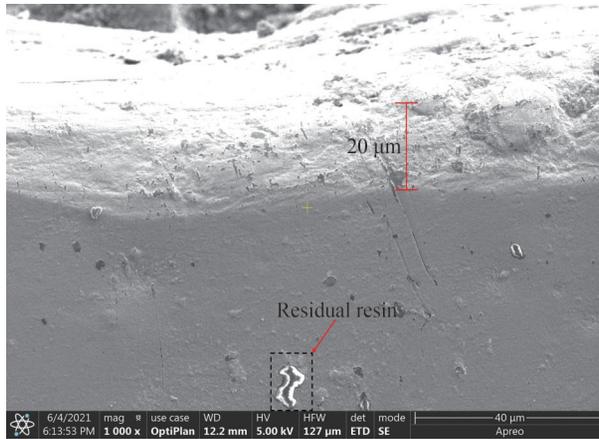


图9 在200 kHz,5 W参数条件下加工下孔径上表面扫描式电子显微镜图  
Fig.9 Scanning electron microscope image of hole edge of the laser drilled sample at 5 W@200 kHz

### 2.3 激光参数对圆孔精度、锥度以及孔壁表面影响

通过检测激光制孔加工所产生通孔的尺寸精度与锥度,可以有效评价钻孔的加工质量。图10展示了采用激光加工AFRP时,在不同的重复频率下,随着功率的增加,AFRP孔入口和孔出口直径的变化规律。试验中扫描速度始终为1 050 mm/s。可以明显看出,加工参数显著影响制孔精度,孔出口直径大小随着功率的增大而增加。当重复频率在100~300 kHz时,没有出现无法产生通孔的情况;而当重复频率被调至500 kHz和1 000 kHz时,出现通孔未产生的现象。当重复频率为500 kHz,功率仅为4 W时,无法在芳纶纤维复合AFRP上加工出通孔,这说明在此重复频率下,单脉冲能量为8 μJ时,无法在AFRP上完成通孔的加

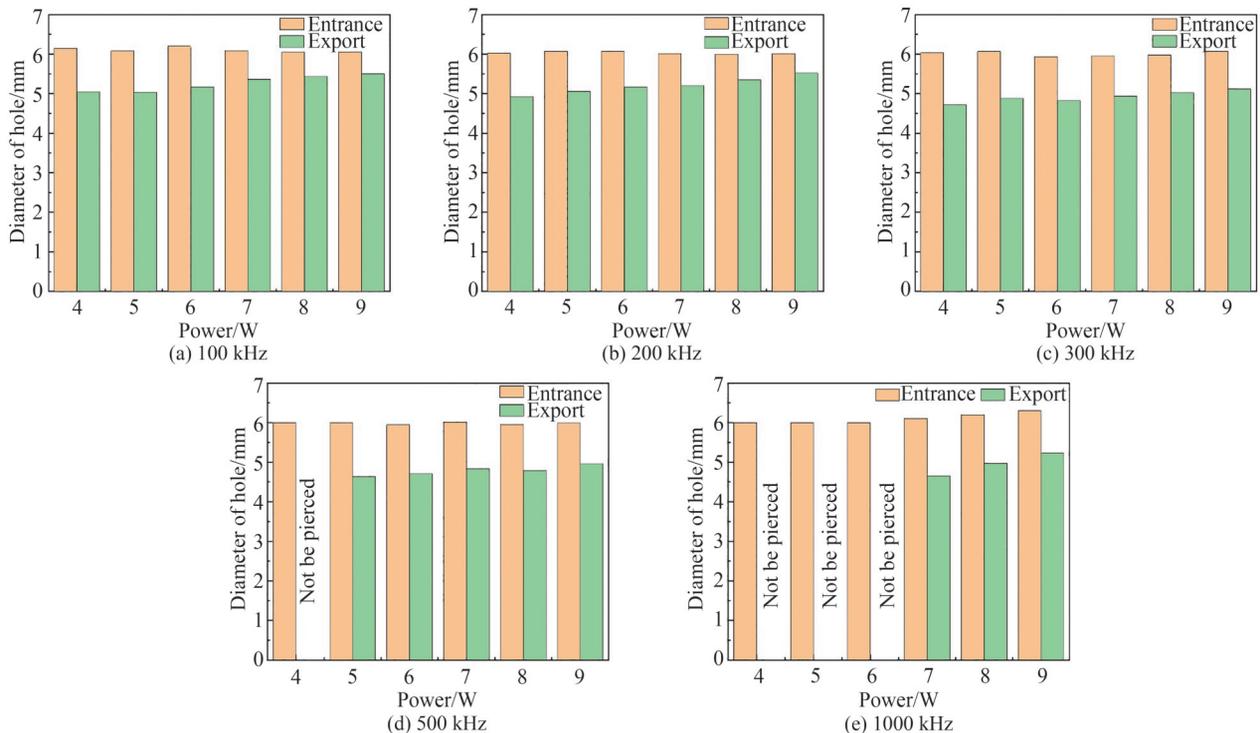


图10 不同重复频率下圆孔的直径统计  
Fig.10 Diameters of hole at different repetition rates

工。在重复频率为 500 kHz 和 1 000 kHz 出现制孔失败的原因是单脉冲能量过低,无法对 AFRP 进行有效烧蚀去除,同时,较低的单脉冲能量使 AFRP 表面产生更多热效应。在 AFRP 上加工出完好的通孔的重点在于选择合适的单脉冲能量进行加工。对比在 100 kHz、200 kHz、300 kHz 重复频率下,孔入口的直径变化不大,皆在 6.00 mm 左右。然而,出口处的直径相对于入口处的直径有更大的变化。在重复频率为 100 kHz 的情况下,出口处直径的变化为 5.25 mm,而 200 kHz 和 300 kHz 出口处的直径变化分别为 5.20 mm 和 4.91 mm,在 100 kHz 的频率下,出口处直径的均值要比其他频率下出口处直径要大。功率为 9 W 时,出口处的直径最接近 6.00 mm,为 5.49 mm。产生这种现象的原因是,在相同的功率下,不同的重复频率所对应的单脉冲能量大小不同,相较于其他频率,当重复频率为 100 kHz 时,激光的单脉冲能量比其他频率下相同功率的单脉冲能量高,以至于有更多的单脉冲能量对 AFRP 进行去除,从而导致该重复频率下,出口处的直径要比其他频率出口处的直径大,但相较于重复频率为 200 kHz 的样本,重复频率 100 kHz 的样本表面 HAZ 更大。

激光束作用在 AFRP 上会产生等离子体,然后转化为纳米及微米量级的颗粒,并大量聚集在孔的表面以及内壁,以至于激光到达圆孔出口前会受到等离子体屏蔽,沿深度方向逐渐衰减<sup>[28-30]</sup>。这一现象进而导致激光作用在出口处的能量更少,AFRP 烧蚀区域更小,入口处与出口处孔径的不同导致了锥度的产生。图 11 是在不同激光功率与不同重复频率下进行加工的锥度变化折线图,可以看出总体的锥度值的趋势是随激光功率增大而变低,这是由于较小的激光功率下,能量沿深度方向会逐渐衰减,当激光到达孔出口,激光所携带的能量不足以对足够大的区域进行烧蚀,以至于孔出口尺寸比孔入口小,产生较大的锥度。当激光功率逐渐变大时,由于激光作用区域固定,入口处烧蚀轮廓尺寸早已接近或达到期望烧蚀面积,则入口圆孔尺寸偏差不明显,从图 10 中可以看出这一现象。而出口处由于激光烧蚀不充分,烧蚀孔径与期望孔径存在较大差距,随着功率增大,这一差距逐渐减小。从图 10 中可以发现增大的激光功率会使出口处烧蚀面积明显增大,表现为出口处烧蚀轮廓尺寸增大,以至于孔出口相较于孔入口,烧蚀面积的增加率更高,进而使锥度降低。

在图 11 中还能发现,随着重复频率的增大,圆孔的锥度也增加。主要原因是,重复频率的增加使激光单脉冲能量密度降低,以至于单脉冲沿深度方向的烧蚀穿透能力减小,从图 10 中可以看到,激光入口的烧蚀比较充分,基本不变,而对出口处的烧蚀量减少,表现为孔出口尺寸减小,导致锥度增大。在本试验中,重复频率为 200 kHz、激光功率达到 9 W 时,圆孔锥度取得最小值 6.99°。在保证制孔质量的情况下,获得的最小锥度值为 14.10°,此时重复频率为 200 kHz,激光功率为 5 W。

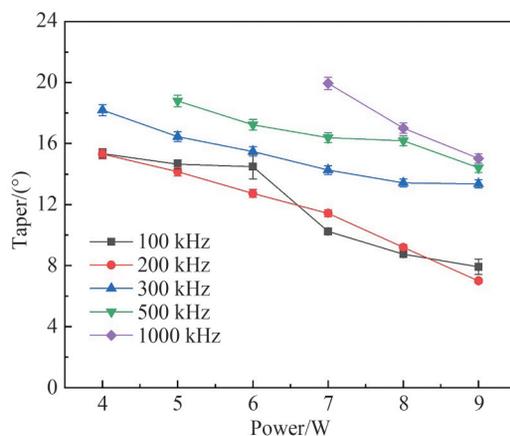


图 11 不同激光功率与重复频率下锥度值变化

Fig.11 Change of taper angles at different powers and repetition rates

飞秒激光制孔过程中,孔壁的质量也可能会对其机械性能产生影响。本研究中采用超景深显微镜对孔壁表面形貌进行了观测,如图 12 所示。可以看出,随着激光功率的增加,圆孔内壁结构的碳化现象逐步增加。在 1 000 kHz 的重复频率下,功率的增加使材料成功穿孔,进一步增加功率又使圆孔内壁发生严重碳化,主要原因是激光功率在 4 W 至 6 W 时的单脉冲能量过低,不足以完全去除 AFRP,而 7 W 时的能量适宜,8 W 及 9 W 时单脉冲能量过高,内壁表面出现明显碳化区域。在 500 kHz 的重复频率下,激光功率增加到

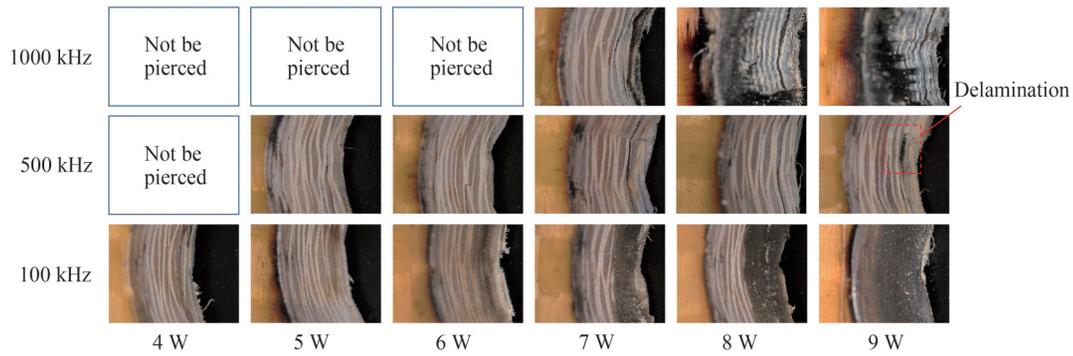


图12 100倍显微镜下AFRP制孔加工后的孔壁形貌

Fig.12 Hole wall morphology of AFRP after drilling with 100× magnification.

9 W时孔壁出现层间裂纹,说明热影响甚至会导致层间粘附力下降,形成分层。激光功率为9 W时,纵向对比圆孔内壁形貌可以发现,重复频率从1 000 kHz降低到500 kHz时,碳化区域明显减小,几乎观察不到,这是由于重复频率的减小同样减小了热累积。当重复频率进一步降低到100 kHz时,单脉冲能量过大,孔壁内部发生树脂材料析出并熔融,出现圆孔内壁纤维分层模糊现象。

#### 2.4 样件制孔后拉伸强度分析

考虑到AFRP加工工艺的工程应用,除对AFRP进行几何精度分析外,还须确保AFRP力学性能。因此,通过与传统机械加工方式进行对比,分析飞秒激光加工后AFRP的拉伸强度。激光制孔与机械制孔参数参照2.2节执行。拉伸试验后的断口形貌如图13所示。

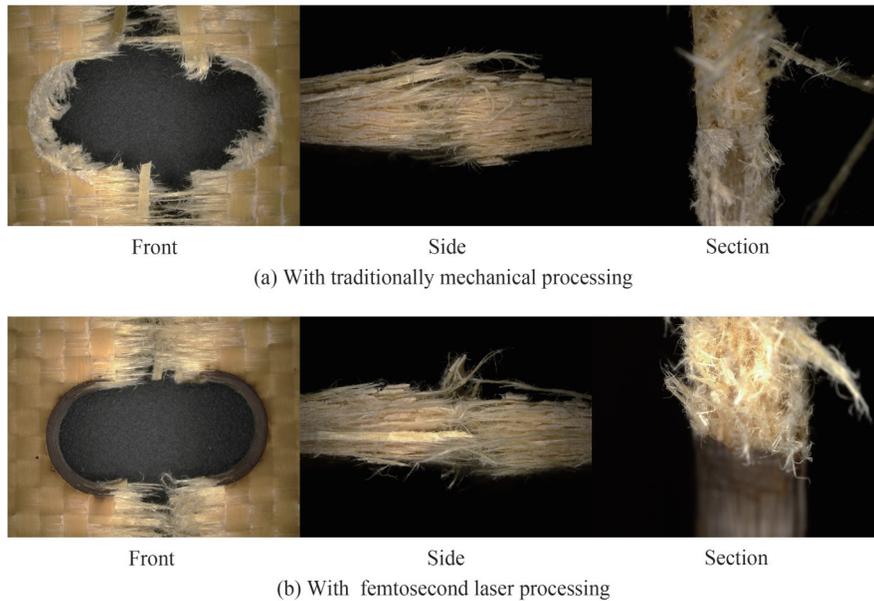


图13 制孔加工后AFRP拉伸断口形貌

Fig.13 Tensile fracture morphology of AFRP after drilling

从图13的拉伸断口形貌来看,机械加工产生的毛刺严重。由于AFRP表层附近的环氧树脂基体对芳纶纤维的束缚作用较弱,在机械制孔过程中,当刀具作用于材料表层并对材料施加一定的切削力时,部分芳纶纤维会从基体中抽离,而被抽离出的纤维则会被刀具切断或者拉断。直到纤维断裂,其在被抽离的过程中同时会带动附近的基体,破坏材料稳定的结构,进而使刀具附近的基体对纤维束缚力降低,造成更深处的纤维抽离。而激光加工主要为烧蚀去除,不存在大量纤维拔出,可以看出激光加工时,切口平整,拉伸侧面相比于机械纤维束拉丝较少。

根据拉伸试验数据,绘制出机械加工拉伸应力变化以及激光加工拉伸应力变化,如图14所示。可以看

出随着延伸率的变化,虽然激光制孔样本的拉伸曲线发散程度略大,但总体而言机械加工拉伸应力变化与激光加工拉伸应力变化趋于一致。此外,观察图14中虚线框内各样本拉伸应力曲线终点对应的断裂值,即各样本拉伸极限应力,可以看出机械制孔样本的极限应力相较于激光制孔样本波动幅度更大。图15中的标准差能更直观地显示出机械制孔的抗拉强度测试误差波动比激光加工大一些,说明在批量加工的情况下,激光制孔后AFRP的拉伸强度更为稳定。由图15还可以看出机械加工后材料的平均拉伸强度略高于激光加工后的材料,其中机械加工后样本强度为332.2 MPa,而激光加工后强度为317.5 MPa。两数值之间的少量差异可能是由于激光作用下的材料制孔边缘处发生焦化和碳化,使纤维和基体发生收缩,收缩过程中的应力影响AFRP,导致其拉伸强度减小并略低于机械加工<sup>[31]</sup>。

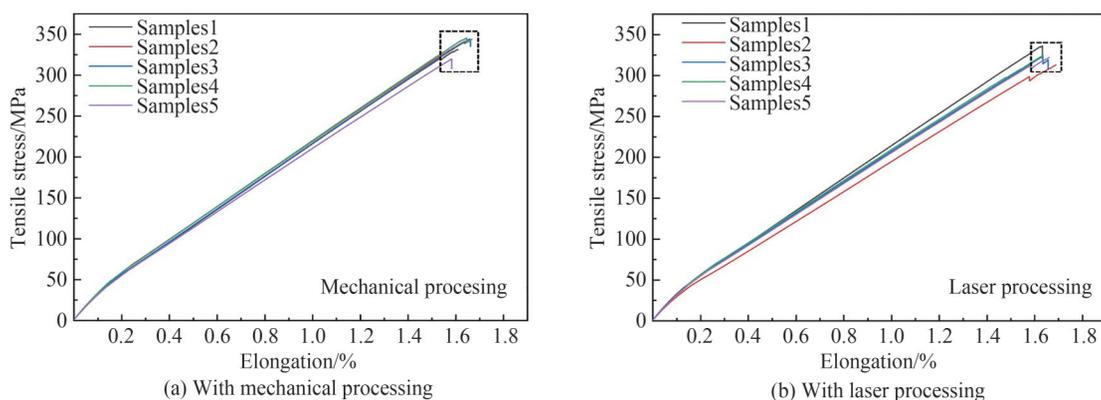


图14 制孔加工后AFRP拉伸应力—延伸率曲线  
Fig.14 Tensile stress-elongation curve of AFRP after drilling

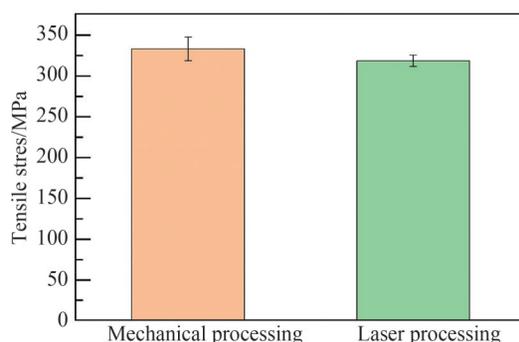


图15 激光制孔和机械制孔后AFRP的静态拉伸极限应力对比  
Fig.15 Comparison of static tensile stress of AFRP between laser drilling and mechanical drilling

### 3 结论

本研究通过更改激光制孔加工参数,对AFRP试件进行了飞秒激光制孔试验。需选取合适的激光参数,可以使飞秒激光对芳纶纤维复合材料进行高质量的制孔加工,有效减小制孔质量缺陷,满足各领域精度和强度要求。试验结果表明:

1) 芳纶纤维复合材料的飞秒激光制孔加工中,激光功率、重复频率和扫描速度都会对加工孔壁HAZ的表面和加工质量产生影响。扫描速度的减小会导致HAZ明显变大,加工过程中,在足以产生烧蚀的单脉冲能量下应尽量选用小功率与低重复频率,以减小热累积的影响。研究发现,AFRP在激光功率为5 W,扫描速度为1 050 mm/s,重复频率为200 kHz的加工参数下能得到最优表面HAZ。这一参数可为芳纶纤维复合材料的飞秒激光制孔加工提供参考。

2) 对比激光制孔加工与传统机械制孔加工后的AFRP拉伸强度发现,相较于传统机械制孔,激光制孔拉伸强度略低,但激光制孔后的AFRP拉伸断口与通孔内壁表面形貌更优,拉伸强度标准差较小,表现会更稳定一些。

## 参考文献

- [1] PAN Y C, SANG M, ZHANG J S, et al. Flexible and lightweight Kevlar composites towards flame retardant and impact resistance with excellent thermal stability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452(4): 139565.
- [2] SATHISHKUMAR T P, MURALIDHARAN M, RAMAKRISHNAN S, et al. Mechanical strength retention and service life of Kevlar fiber woven mat reinforced epoxy laminated composites for structural applications [J]. *Polymer Composite*, 2021, 42(4): 1855-1866.
- [3] LI Wei, CAO Yingmin, ZHANG Dianzi, et al. Study on composites reinforced with short aramid fiber [J]. *Engineering Plastics Application*, 2010, 38(9): 86-88.  
李伟, 曹应民, 张电子, 等. 短切芳纶纤维增强复合材料的研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2010, 38(9): 86-88.
- [4] GU D, DUAN C S, FAN B L, et al. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite in vacuum [J]. *Tribology International*, 2016, 103: 423-431.
- [5] KARVANIS K, RUSNAKOVA S, KREJI O, et al. Thermal analysis of postcured aramid fiber/epoxy composites [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2021, 60(1): 479-489.
- [6] VEDANARAYANAN V, KUMAR B S P, KARUNA M S, et al. Experimental investigation on mechanical behaviour of Kevlar and ramie fibre reinforced epoxy composites [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 2022: 8802222.
- [7] ZHOU J Y, ZHANG J S, SANG M, et al. Advanced functional Kevlar composite with excellent mechanical properties for thermal management and intelligent safeguarding [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131878.
- [8] ZHANG Xiongbin, HE Xinhai, CHENG Jiaji. Research progress on surface modification of aramid fibers and preparation of their reinforced resin matrix composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(8): 149-153.  
张雄斌, 贺辛亥, 程稼稷. 芳纶纤维表面改性及其增强树脂基复合材料制备的研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(8): 149-153.
- [9] MIAO Yajing, YANG Dan, XIN Binjie. Anti-ballistic properties of aramid fabrics and composites: a review [J]. *AATCC Journal of Research*, 2021, 8(4): 20-27.
- [10] WANG H M, WANG H M, WANG Y L, et al. Laser writing of Janus graphene/Kevlar textile for intelligent protective clothing [J]. *ACS Nano*, 2020, 14: 3219-3226.
- [11] RAO Y F, YUAN M, GAO B, et al. Laser-scribed phosphorus-doped graphene derived from Kevlar textile for enhanced wearable micro-supercapacitor [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630: 586-594.
- [12] ZHANG Xuecong, QIAN Jing, FU Qiang, et al. Cutting of PBO fiber-reinforced composites using picosecond lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 63-72.  
张学聪, 钱静, 付强, 等. 皮秒激光切割PBO纤维增强复合材料 [J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 63-72.
- [13] WANG Jinyu, LIU Haibo, LIU Kuo, et al. Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 89-95.  
王晋宇, 刘海波, 刘阔, 等. 芳纶纤维增强树脂基复合材料液氮冷却钻削试验 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(1): 89-95.
- [14] LIU S N, GONG K, ZHAO J, et al. Multi-objective optimisation of cutting parameters for drilling-induced damages and thrust force in AFRP drilling [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44: 562.
- [15] SHI Wentian, PANG Qingchao, LIU Yude, et al. Study on surface defects mechanism and process tests of aramid fiber composite hole-making [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(1): 184-191.  
石文天, 庞庆超, 刘玉德, 等. 芳纶纤维复合材料制孔表面缺陷机理及工艺试验研究 [J]. *表面技术*, 2022, 51(1): 184-191.
- [16] SU Fei, LI Chunjie, LI Wenyi, et al. Research on the feasibility and machining experiment of the laser-milling combination machining for Kevlar fiber reinforced composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3543-3553.  
苏飞, 李纯杰, 李文毅, 等. Kevlar纤维增强复合材料激光-铣削组合加工试验及可行性分析 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3543-3553.
- [17] BAHARLOOEY D, ABOOTORABI M M. Defects in the Kevlar-epoxy thin layer sheet drilling with different machining strategies [J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, 29(7): 909-918.
- [18] YILBAS B S, AKHTAR S S, KARATAS C. Laser circular cutting of Kevlar sheets: analysis of thermal stress field and assessment of cutting geometry [J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 96: 180-189.
- [19] HERZOG D, SCHMIDT-LEHR M, OBERLANDER M, et al. Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness [J]. *Materials and Design*, 2016, 92: 742-749.
- [20] GAUTAM G D, MISHRA D R. Dimensional accuracy improvement by parametric optimization in pulsed Nd:YAG laser cutting of Kevlar-29/basalt fiber-reinforced hybrid composites [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41: 284.
- [21] PRAJAPATI A, NORKEY G, GAUTAM G D. Optimization of heat affected zone in laser cutting of Kevlar-29 fiber composite using hybrid Response Surface based Grey Wolf Optimization (RSGWO) algorithm [J]. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, 2022, 236(17): 9622-9638.
- [22] JIA Baoshen, TANG Hongping, SU Chunzhou, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 133-140.  
贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 133-140.
- [23] TAGLIAFERRI V, DI I A, CRIVELLI V I. Laser cutting of fibre-reinforced polyesters [J]. Composites, 1985, 16(4): 317-325.
- [24] BACHY B, AL-DUNAINAWI Y. Influence of the effective parameters on the quality of laser micro-cutting process: experimental analysis, modeling and optimization[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(1): 012002.
- [25] CHENG J, ZHANG P, HE Z T, et al. Characteristics of ultrafast laser processing aramid fiber reinforced plastics[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2022, 41(23-24): 893-901.
- [26] MOGHADASI K, TAMRIN K F. Experimental investigation and parameter optimization of low power CO<sub>2</sub> laser cutting of a carbon/kevlar fibre-reinforced hybrid composite[J]. Lasers in Engineering, 2020, 45(1-3): 85-108.
- [27] SUGIOKA K. Progress in ultrafast laser processing and future prospects[J]. Nanophotonics, 2017, 6(2): 393-413.
- [28] PAUL S, KUDRYASHOV S I, LYON K, et al. Nanosecond-laser plasma-assisted ultradeep microdrilling of optically opaque and transparent solids[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101: 043106.
- [29] YANG Jian, ZHANG Rui, ZHAO Yu, et al. Experimental study on picosecond laser cutting AFRP composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 147-157.  
杨剑, 张瑞, 赵煜, 等. 皮秒激光切割 AFRP 复合材料实验研究[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 147-157.
- [30] SU Fei, LI Wenyi, DONG Guojun, et al. Theoretical modeling and experimental study on nanosecond laser machining of Kevlar fiber reinforced plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4139-4151.  
苏飞, 李文毅, 董国军, 等. Kevlar 纤维增强树脂基复合材料纳秒激光加工理论建模及试验[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4139-4151.
- [31] WANG Guibing, LUO Fei, LIU Cangli, et al. The research of the ablation morphology of the composite reinforced by poly aryl amide fibers irradiated by laser[J]. Laser Technology, 2006(2): 168-169,180.  
王贵兵, 罗飞, 刘仓理, 等. 芳纶纤维复合材料激光烧蚀损伤形貌研究[J]. 激光技术, 2006(2): 168-169,180.

## Characteristics and Properties of Femtosecond Laser Drilling of Kevlar-29 Substrates

CHENG Jian<sup>1,2</sup>, LI Jiale<sup>1</sup>, ZHANG Zhiwei<sup>1</sup>, JIANG Sheng<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>,  
ZHAI Zhongsheng<sup>1,2</sup>, LIU Dun<sup>1,2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2 Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Aramid Fiber Reinforced Plastics (AFRP) are with excellent physical properties, but defects such as burrs and damage may result from traditional mechanical drilling methods, whereas the potential to avoid these issues exists in laser drilling technology. However, thermal effects would induce severe thermal damage to AFRP components during the ablation process by continuous wave laser or nanosecond laser. It is suggested that ultra-short pulse width of ultrafast lasers can effectively suppress thermal diffusion. Accordingly, drilling experiments were conducted on one of the AFRP substrates, i. e., Kevlar-29 by using femtosecond laser in this study, aiming to improve the quality of laser drilling, reduce thermal damage and thermal influence zones during laser ablation, enhance the geometric accuracy of circular holes, and optimize the processing parameters of femtosecond laser drilling. The experimental material is a 2 mm thick Kevlar-29 fiber-reinforced composite, the laser focal plane is set at half the thickness of the material, and the designated hole diameter is 6 mm. The laser wavelength is 1 030 nm and the pulse width is 480 fs. Firstly, the drilling effect of two scanning strategies, cross-scan and concentric ring scan, was compared, and the scanning strategy with superior drilling effect was determined. Furthermore, the influence of laser processing parameters (laser power, laser repetition rate and laser scanning speed) on drilling quality was analyzed using orthogonal matrix experiments. Confocal microscopy and ultra-depth microscopy were used to observe the circular hole morphology after laser drilling, and the size of the thermal influence zone was measured. The effects of laser power, scanning speed, and repetition rate on

circular hole morphology, thermal influence zone size, and geometric accuracy were analyzed. Finally, quasi-static tensile tests were conducted using a universal tensile testing machine, and the tensile strength of the samples after laser drilling was compared with those by using mechanical drilling processes. It has been found in this research that concentric ring scanning is more efficient than cross-scanning and the roundness of hole topography of concentric ring scanning is better. Within a certain femtosecond laser processing window, the overall size of the heat-affected zone will gradually increase as the laser power increases. Nevertheless, this increasing trend of heat-affected zone develops when the repetition rate is reduced, or the scanning speed is decreased. Moreover, a larger heat-affected zone and surface damage can also be produced if insufficient burning happens due to inadequate laser power. The optimal laser parameters for the heat-affected zone are a laser power of 5 W, a scanning speed of 1 050 mm/s, and a repetition rate of 200 kHz. The decrease in the taper angle of the femtosecond laser drilled hole is proportional to the laser power increasing and repetition rate decreasing. When the laser repetition rate is 200 kHz and the laser power reaches 9 W, a minimum taper angle of the hole is obtained as 6.99°, meantime a relatively large heat-affected zone is produced under these process parameters. It is found that the optimal taper angle of the hole is 14.10° with the least heat-affected zone. The tensile strength of the material after femtosecond laser processing is similar to that of traditional mechanical processing, but the fluctuation of tensile strength test performance is smaller. It has been indicated by the results that femtosecond laser drilling of Kevlar-29 fiber-reinforced composite is not a completely “cold” process, as thermal damage to the fibers and the surrounding matrix material is seen which is caused by the poor thermal conductivity of aramid fibers, hence resulting in the appearance of a relatively small heat-affected zone. To summarize, the use of appropriate laser parameters for femtosecond laser drilling of Kevlar-29 fiber-reinforced composite can effectively reduce the size of the heat-affected zone and improve the geometric accuracy of the hole so as to meet the requirements for precision and strength in related application fields.

**Key words:** Laser processing; Femtosecond laser; Laser drilling; Aramid fiber reinforced plastics; Surface quality; Geometric accuracy; Tensile strength

**OCIS Codes:** 140.3390; 160.4890; 350.3390; 120.6810