复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

皮秒激光切割AFRP复合材料实验研究

杨剑 张瑞 赵煜 杜婷婷 叶云霞

Experimental study on picosecond laser cutting AFRP composites

YANG Jian, ZHANG Rui, ZHAO Yu, DU Tingting, YE Yunxia

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210426.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Threshold properties of high modulus carbon fiber reinforced plastic composite with picosecond laser processing

复合材料学报. 2021, 38(11): 3613–3621 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210210.008

纳秒激光调控CFRP复合材料表面润湿性及其对胶接性能的影响

Tailoring CFRP composite surface wettability with nanosecond laser and its effect on bonding performance

复合材料学报. 2021, 38(5): 1435–1445 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.003

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

Research on the feasibility and machining experiment of the laser–milling combination machining for Kevlar fiber reinforced composite

复合材料学报. 2021, 38(10): 3553–3563 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210423.001

基于飞秒激光制备润滑表面及光响应液滴操控

Preparation of slippery surface based on femtosecond laser toward photo–induced droplet manipulation

复合材料学报. 2021, 38(2): 517–525 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200713.003

激光对碳纤维及碳纤维/环氧树脂复合材料性能影响

Effect of laser on properties of carbon fibre and carbon fibre/epoxy resin composites

复合材料学报. 2018, 35(11): 2979–2986 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180428.001

环保型水切割胶粉对天然橡胶力学性能和动态性能的影响

Effect of environmental and water cutting rubber powder on the mechanical and dynamic mechanical properties of rubber powder–natural rubber

复合材料学报. 2018, 35(3): 706–713 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170613.001

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 1 期 1 月 2022 年
Vol. 39 No. 1 Jan 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210426.002

皮秒激光切割 AFRP 复合材料实验研究

杨剑[1,2], 张瑞[2], 赵煜[1,2], 杜婷婷[1,2], 叶云霞*[1,2]

(1. 江苏大学 微纳光电子与太赫兹技术研究院，镇江 212013；2. 江苏大学 机械工程学院，镇江 212013)

分享本文

摘 要：采用紫外皮秒激光 (λ=355 nm)、绿光皮秒激光 (λ=532 nm) 和红外皮秒激光 (λ=1 064 nm) 的三波长皮秒脉冲固体激光器，对 1 mm 厚芳纶纤维增强树脂基复合材料 (Aramid fiber reinforced polymer，AFRP) 进行单次扫描切割实验，用光学显微镜 (OM) 和 SEM 测量了上切缝宽度、切缝深度和上表面热影响区宽度，并计算了切缝锥度，分析了激光波长、功率及扫描速度等参数对切口形貌和切缝质量的影响。结果表明：相比于红外激光和绿光激光切割 AFRP，紫外激光的切割效率更高，切割质量更好；上切缝宽度、切缝深度和上表面热影响区宽度随着激光功率的增大而增大，随着激光扫描速度的增大而减小；切缝锥度随着激光功率的增大而减小，随着激光扫描速度的增大而增大；适当降低激光扫描速度，有利于提高切缝深宽比。

关键词：皮秒激光；波长；激光切割；切缝质量；AFRP

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)01-0147-11

Experimental study on picosecond laser cutting AFRP composites

YANG Jian[1,2], ZHANG Rui[2], ZHAO Yu[1,2], DU Tingting[1,2], YE Yunxia*[1,2]

(1. Institute of Micro-Nano Optoelectronic and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A three wavelength picosecond pulsed solid-state laser with ultraviolet picosecond laser (λ=355 nm), green picosecond laser (λ=532 nm) and infrared picosecond laser (λ=1 064 nm) was used to cut 1 mm thick aramid fiber reinforced polymer (AFRP) by a single pass scanning. The slit width, thickness and thickness were measured by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The effects of laser wavelength, laser power and scanning speed on the notch shape and quality were analyzed. The results show that: compared with the infrared laser and green laser cutting AFRP, the cutting efficiency of ultraviolet laser is higher, and the cutting quality is better; the width of upper slit, slit depth and the width of upper surface heat affected zone increase with the increase of laser power, and decrease with the increase of laser scanning speed; the slit taper decreases with the increase of laser power, and increases with the increase of laser scanning speed. When the laser scanning speed is reduced properly, the ratio of slit depth to width is improved.

Keywords: picosecond laser; wavelength; laser cutting; kerf quality; AFRP

芳纶纤维增强树脂基复合材料 (Aramid fiber reinforced polymer，AFRP) 具有较高的比强度和比刚度、良好的抗疲劳性、可设计性强及良好的绝缘性等优点，广泛应用于汽车、船舶、航空航天、体育用品、国防等领域。与此同时，由于具有多相、层合和各向异性的物构特点，使常规机械加工 AFRP 材料，容易产生分层、撕裂、毛边等缺陷，降低了最终产品的质量[1]。激光加工与传统加工技术相比，具有非接触的特点，可以克服接触式机械加工存在的问题，因此在纤维增强树脂基复合材料加工领域具有广泛应用前景。

大多数激光加工过程是典型的光-热-力耦合

收稿日期：2021-01-15; **修回日期**：2021-03-22；**录用日期**：2021-04-18；**网络首发时间**：2021-04-26 15:47:28
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210426.002
基金项目：装备预先研究项目 (61409230314); 镇江市重点研发计划 (GY2019005); 江苏省重点研发产业前瞻项目 (BE2020037)
通信作者：叶云霞, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为激光精密加工 E-mail: yeyunxia@ujs.edu.cn

引用格式：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.
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(in Chinese).

过程[2]，因此，加工材料的热物性参数分布对加工过程和加工效果有显著影响。AFRP 材料中 AF 热分解温度为 800 K；树脂基体热分解温度为 440 K；AF 的导热系数为 0.04 W/(m·K)；树脂基体的导热系数为 0.1 W/(m·K)。除此以外，激光加工过程中材料对激光的吸收率等也会影响材料内部激光能量的分布。由此可见，AFRP 多相结构伴随的多相之间热物性和激光吸收特性差别会使激光与 AFRP 作用过程复杂，加工效果影响因素多。为了获得高质量的加工效果，需要细致研究相关理论、工艺和技术。

围绕上述问题，研究人员进行了大量的研究。王含妮[3]应用 Comsol Muhiphysics 有限元分析软件建立三维脉冲激光辐照 AFRP 的物理模型，获得了 AFRP 的温度场分布及其变化规律。结果表明，随着激光功率密度的增大，AFRP 的温度逐渐升高；AFRP 的温度在光斑中心处最大并随着各位置到中心距离的增大而减小。王贵兵等[4]通过 Nd:YAG 连续波固体激光器激光辐照 AFRP 烧蚀实验得到在不同的激光参数下 AFRP 的热损伤形态和损伤物理化学过程。结果表明，热损伤的关键在于化学变化，由于焦化和炭化使树脂和纤维剧烈收缩而产生应力，使材料性能变坏而产生材料损伤。B.S.Yilbas 等[5]通过 CO_2 激光器对不同厚度的多层 AFRP 板进行了激光切割。结果表明，当切削速度变化范围在 30~80 mm/s 时，切缝宽度和损伤尺寸急剧变化，热效率随厚度和切削速度的增加而增加，而比能随厚度的增加而降低。切削参数对平均切缝宽度和无量纲损伤尺寸有显著影响，在工件底面的局部结焦和侧烧现象更明显。Girish 等[6]采用 250 W 脉冲 Nd:YAG 激光系统，对 1.35 mm 厚的 Kevlar-29 和玄武岩纤维增强聚合物 (KBFRP) 混杂复合材料层合板进行了激光切割实验研究。通过对激光切割参数的优化设置，多切口质量特性总体提高了 22.23%。上切缝宽度、下切缝宽度、上切缝偏差、下切缝偏差和切缝锥度分别提高 11.44%、8.47%、17.65%、15.22% 和 58.87%。Dhananjay R. Mishra 等[7]用脉冲 Nd:YAG 激光切割 AF 体积分数为 55.2vol% 的 1.92 mm厚混杂复合材料层合板。通过灰色关联分析，得到了最佳的切割参数，当采用最佳输入参数时，切口宽度值较原值分别降低了 15.28% 和 12.81%。F. Al-Sulaiman 等[2]研究了 Kevlar 层合板的 CO_2 激光切割及辅助气体射流对切割质量的影响。结果表明，辅助气体压力对切割断面质量有显著影响，在较高的辅助气体压力下，不平度和切口宽度比均有较大改善。尽管目前研究人员已经开始将激光加工作为加工 AFRP 的手段，但是相关工艺、技术和机制的研究尚属于起步阶段。

目前研究人员将目光主要集中在用 CO_2 激光和纳秒激光加工 AFRP。CO_2 激光的波长为 10.6 μm，构成 AFRP 的树脂和 AF 都对该波长有较强线性吸收；在纳秒激光器方面，科研人员主要使用的波长为 1.06 μm，树脂基体对该波长的吸收率比较低，AF 对该波长的吸收比较强。因此，波长为 10.6 μm 的 CO_2 激光和波长为 1.06 μm 的纳秒激光与 AFRP 作用，其作用微观过程和材料去除机制是不同的，作用效果也不同。随着超短脉冲激光器的发展，由于超短脉冲激光的超高峰值功率密度会使材料对该类激光有强的非线性吸收，此类激光与 AFRP 的作用微观过程不仅与波长有关，还跟加工过程中所采用的其他参数密切相关。相比于 CO_2 激光和纳秒激光加工，皮秒激光可实现比 CO_2 激光和纳秒激光更高的加工精度和质量，因此皮秒激光有望在兼顾加工质量和效率方面带来突破性发展[8-9]。如何利用皮秒激光高质高效地加工 AF 增强复合材料，降低材料热损伤，以满足工业应用，成为纤维增强树脂基复合材料激光加工科研人员的关注问题之一。先前的研究表明，较短波长的激光有利于实现复合材料的高质量切割[10-12]。

本文用紫外皮秒激光 (λ=355 nm)、绿光皮秒激光 (λ=532 nm) 和红外皮秒激光 (λ=1 064 nm) 分别对 AFRP 进行切割实验，测量计算了上切缝宽度、切缝深度、切缝锥度及上表面热影响区宽度，用光学显微镜 (OM) 和 SEM等观察相关形貌，结合表面形貌和加工数据等，分析了激光加工 AFRP 的物理机制及三种激光波长作用下切缝形貌和切缝质量存在较大差异的内在机制，并得到了激光扫描速度和激光功率等加工参数对加工效果。

1 实验材料和方法

1.1 原材料

研究采用预浸布层压成型工艺制备的由 kevlar-29 纤维织物和环氧树脂组成的复合材料层合板，厚度为 1 mm，由无锡是盛特碳纤维制品有限公司提供，环氧树脂的体积分数为 42vol%，纤维的体积分数为 58vol%。芳纶纤维 (AF) 和树脂基

体热学性能参数 (热分解温度、导热系数、比热容和材料密度) 见表 1。

表 1　材料热学性能参数

Table 1　Thermal properties of materials

Property	Kevlar-29	Epoxy resin
Decomposition temperature/K	800	440
Heat conductivity/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	0.04	0.1
Specific heat capacity/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	1 400	1 884
Density/($kg\cdot m^{-3}$)	1 440	1 100

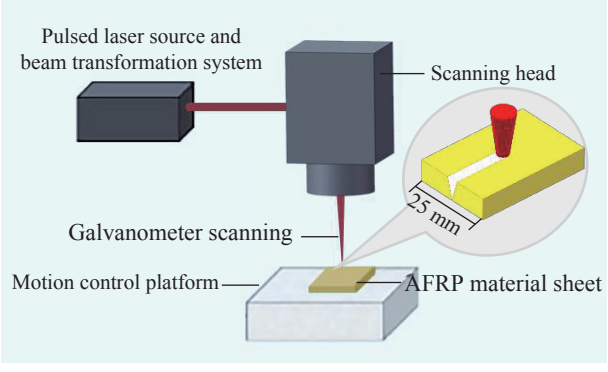
1.2　激光装置和实验

实验所用的激光器为脉冲皮秒固体激光器 (MLPS-3W，北京莱泽光电技术有限公司)，分别采用激光器紫外皮秒、绿光皮秒和红外皮秒激光系统，波长分别为 355 nm、532 nm 和 1 064 nm，功率范围、重复频率、脉冲宽度和聚焦光斑大小见表 2。激光束为高斯脉冲模式，加工系统由脉冲激光源与光束变换系统、扫描头、扫描振镜和运动控制平台组成，如图 1(a) 所示。扫描头具有平面扫描功能，扫描振镜可以在加工过程中保持聚焦光斑不变。芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 用夹具夹持固定在 *X*-*Y* 移动平台上。激光束通过扫描振镜组完成激光的路径折射和聚焦，高能量密度的激光焦点在 AFRP 上表面完成指定的扫描动作实现材料加工。扫描头、扫描振镜共同嵌入 *Z* 轴。*Z* 轴系统整体向下进给指定距离完成焦点下移，直至材料加工完成。

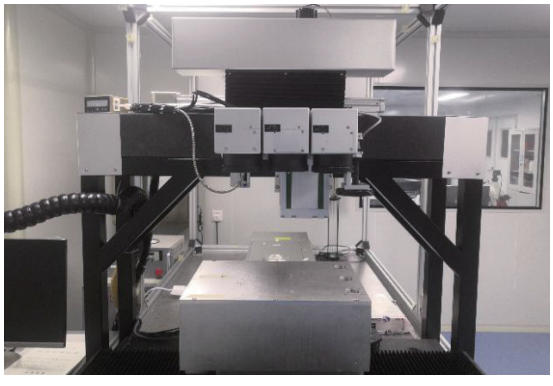
表 2　激光器参数

Table 2　Laser parameters

Options	Average power/W	Repetition rate/kHz	Pulse duration/ps	Focus diameter/μm
UV laser	0-25	500	15	50-60
GN laser	0-45	500	15	35-40
IR laser	0-90	500	15	25-30



(a) Schematic diagram of pulse laser cutting system



(b) Physical drawing of pulse laser cutting system

AFRP—Aramid fiber reinforced polymer

图 1　脉冲激光切割系统原理示意图与实物图

Fig. 1　Schematic diagram and physical drawing of punching laser cutting system

在开始实验时，将实验样品置于 *X*-*Y* 位移平台的夹具上，使激光聚焦平面与样品上表面重合。设置好激光加工参数和扫描路径后，通过计算机控制激光器开始进行加工。首先以三个波长功率均分别为 10 W、15 W 和 20 W，扫描速度为 10 mm/s，以每组激光参数只扫描一次完成如图 1(a) 所示的 25 mm 长直切轮廓。然后以三个波长激光功率均为 25 W，扫描速度为变量，共选取 10 mm/s、30 mm/s、50 mm/s、70 mm/s 和 90 mm/s 五组参数，以每组激光参数只扫描一次完成如图 1(a) 所示的 25 mm 长直切轮廓。最后再以扫描速度为 45 mm/s，功率为变量进行切割，由于三个激光波长系统功率范围不同，故紫外皮秒激光共选取 17 W、19 W、21 W、23 W 和 25 W五组参数，绿光皮秒激光共选取 25 W、30 W、35 W、40 W 和 45 W 五组参数，红外皮秒激光共选取 50 W、60 W、70 W、80 W 和 90 W 五组参数，以每组激光参数只扫描一次完成如图 1(a) 中所示的 25 mm 长直切轮廓。切割实验结束后，用场发射扫描电子显微镜 (Nova NanSEM 450，美国 FEI 公司) 观察切缝微观形貌，用正置光学显微镜 (Leica DM750，德国徕卡公司) 测量切缝的上切缝宽度、上表面热影响区宽度和切缝深度。

1.3　几何质量特性评价

用正置光学显微镜放大 100 倍、40 倍测量了上切缝宽度、上表面热影响区宽度和切缝深度。

上切缝宽度和上表面热影响区宽度测量中，在每个切口的不同点测量了六个宽度。上切缝宽度、上表面热影响区宽度和切缝深度的测量分别如图 2 和图 3 所示。利用式 (1)~(3) 计算了上切缝宽度、上表面热影响区和切缝锥度。

$$K = \frac{(K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6)}{6} \tag{1}$$

$$W = \frac{(W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6)}{6} \tag{2}$$

$$C = \frac{K \times 180^\circ}{H \times \pi} \quad c = \frac{(K - k) \times 180^\circ}{H \times \pi} \tag{3}$$

式中：K 为顶部切缝宽度；k 为切穿时的底部切缝宽度；W 为上表面热影响区宽度；H 为切缝深度；C 为未切穿时的切缝锥度；c 为切穿时的切缝锥度。

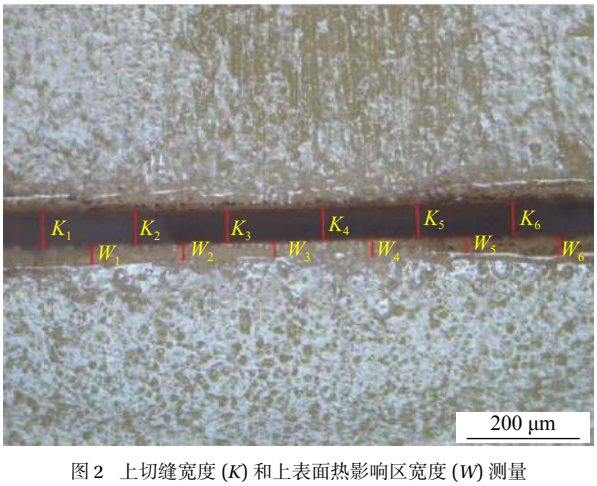


图 2　上切缝宽度 (K) 和上表面热影响区宽度 (W) 测量

Fig. 2　Measurement of the upper kerf width (K) and upper surface heat- affected zone width (W)

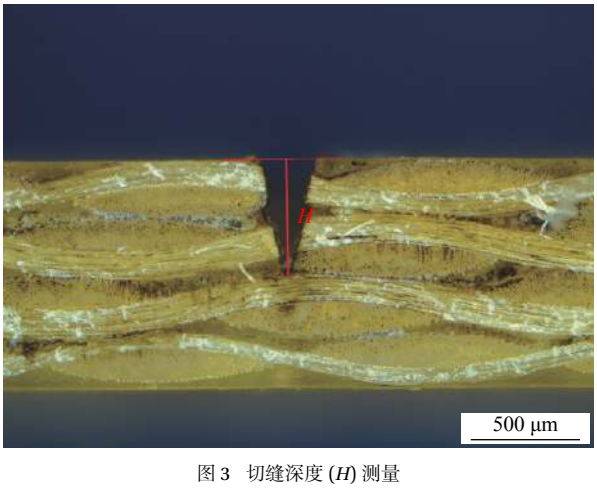


图 3　切缝深度 (H) 测量

Fig. 3　Measurement of kerf depth (H)

2　结果与讨论

2.1　波长对 AFRP 的影响

图 4(a)~4(i) 为在三个波长激光功率分别为 10 W、15 W 和 20 W 及扫描速度均为 10 mm/s 时，切割 AFRP 获得的切割截面 SEM 图像。可以看出，紫外激光切割试样上，可以清晰地看到截面处纤维整齐排列，没有严重损伤纤维。绿光激光切割试样上，可以观察到截面处纤维长短不一，部分纤维受到损伤。而红外激光切割试样上，可见截面处部分纤维从根部发生断裂，纤维受到严重损伤。对比发现，紫外激光的切割截面更加平整，切割质量最好。

图 5(a) 为 1 mm 厚环氧树脂板的 FTIR 图谱[13]。可见，超过 85% 的 1 064 nm 和 532 nm 的光会穿过环氧树脂不被有效吸收，而 355 nm 的光透射率几乎为 0，即能被很好地吸收。图 5(b) 为 0.5 mm 厚的 AF 织物的 FTIR 图谱[14]。与环氧树脂相比，AF 织物对于 355 nm、532 nm和 1 064 nm 三个波长透射率都低于 20%，即绝大部分光都能被吸收的。其中，355 nm 的光被 AF 吸收最好，532 nm 次之，1 064 nm 吸收率最低。因此环氧树脂板对紫外激光的吸收性更最好，再者紫外激光波长短，单光子能量高，实验中所用波长为 355 nm 的紫外激光单光子能量为 3.49 eV，大于 AF 和环氧树脂中 C—C 键的键能 3.32 eV及 C—N 键的键能 3.17 eV，可以直接打断 AF 分子和环氧树脂分子的化学键而实现材料去除。图 6 为 AF 和环氧树脂的分子结构。从切割截面的微观形貌图可以看到，当紫外激光切割时，纤维被直接切断，切割截面最平整，此时可以确定光化学去除是材料去除的主要方式。而相比于红外激光和绿光激光去除材料主要依靠激光脉冲能量迅速升温汽化材料或者对材料造成热烧蚀而去除，紫外激光的切割质量更好。

实验所用样品为 AF 交叉编制的 AFRP，具有明显的不均匀性和各向异性，AF 排布方向对切口形貌有一定程度的影响。图 7 为三个波长激光功率分别为 10 W、15 W 和 20 W、扫描速度均为 10 mm/s 时，AF 排布方向对切口宽度的影响。总体上，对于三个波长，在 AF 方向垂直于切缝处，则切缝相对较窄；在 AF 方向平行于切缝处，则切缝相对较宽。众所周知，热量沿 AF 方向的热传导率高于垂直于 AF 方向的热传导率。因此，当 AF 方向垂直于切缝，激光诱导产生的热量沿

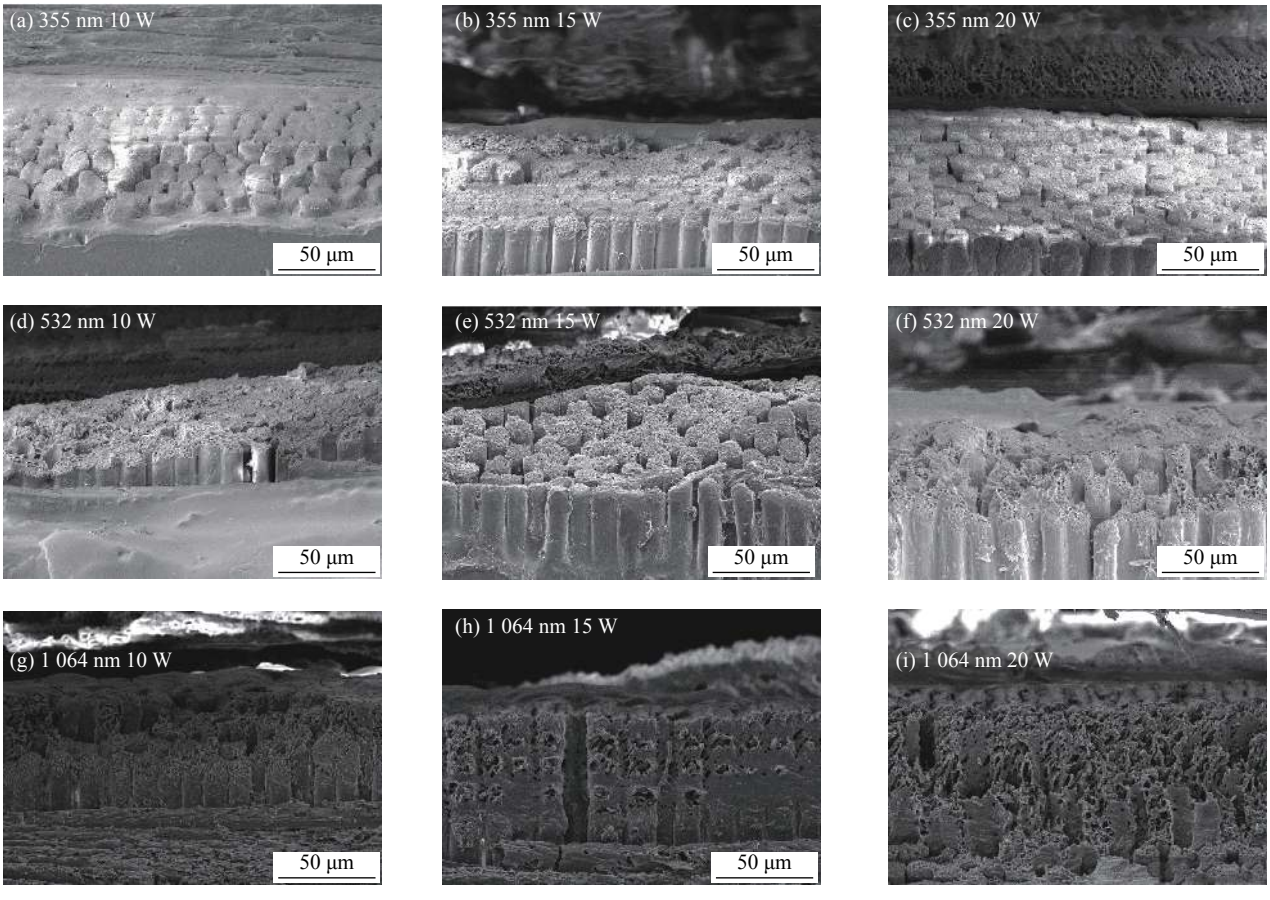


图 4　三个波长下芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 切缝微观形貌图片

Fig. 4　Micrographs of aramid fiber reinforced polymer (AFRP) slit at three wavelengths

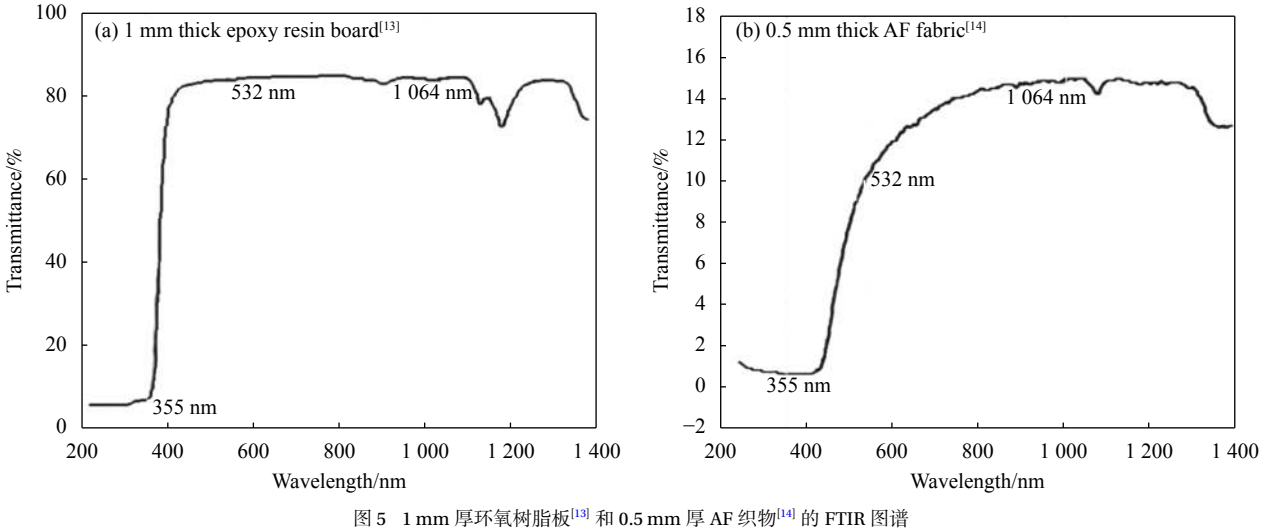


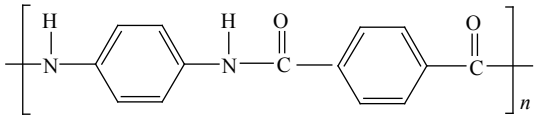
图 5　1 mm 厚环氧树脂板[13] 和 0.5 mm 厚 AF 织物[14] 的 FTIR 图谱

Fig. 5　FTIR spectra of 1 mm thick epoxy resin board[13] and 0.5 mm thick AF fabric[14]

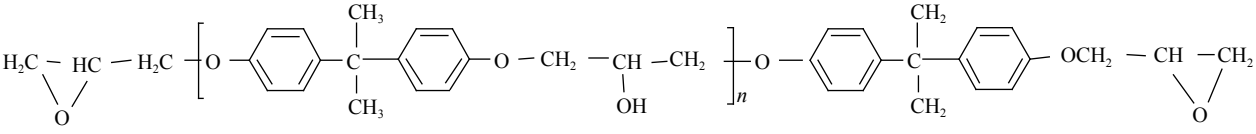
着纤维传导，逐渐远离切缝。这种情况下，用于去除材料的有效能量减少，获得较窄切缝；当 AF 方向平行于切缝，激光诱导产生的热量沿着 AF 传导，仍旧主要积聚与切缝边缘。这种情况下，用于去除材料的有效能量相对充足，获得较宽切缝。这就导致了由于 AF 排布方向不同导致的切缝宽度差异。此外由图 7 可以比较明显看出，AF 排布方向对切缝宽度的影响程度，因波长不同而

不同。

由前文可知 1 mm 厚环氧树脂板对 1 064 nm 和 532 nm 的光的吸收率不足 15%，而对 355 nm 的光的吸收率超过 95%。AF 织物对 355 nm 的光吸收最好，532 nm 次之，1 064 nm 吸收率最低。因此，当紫外激光加工时，由于表层环氧树脂基体自身对该波长激光就有强吸收，紫外光照射则先去除树脂表面，去除材料自外而内顺序进行，如图 8(a) 所示。并且紫外激光可以直接打断 AF 分子和环氧树脂分子的化学键而不依赖于激光的热效应实现材料去除。故紫外激光切割时切口宽度受到 AF 排布方向的影响较小，不同 AF 方向切口宽度变化极小，加工质量较高，如图 5(a) 所示。当采用红外激光和绿光激光辐照时，由于表层环氧树脂对激光吸收较低，激光束穿过树脂并直接加热 AF，如图 8(b) 所示。表层的环氧树脂基体则



(a) AF



(b) Epoxy resin

图 6　AF 和环氧树脂的分子结构

Fig. 6　Molecular structure of AF and epoxy resin

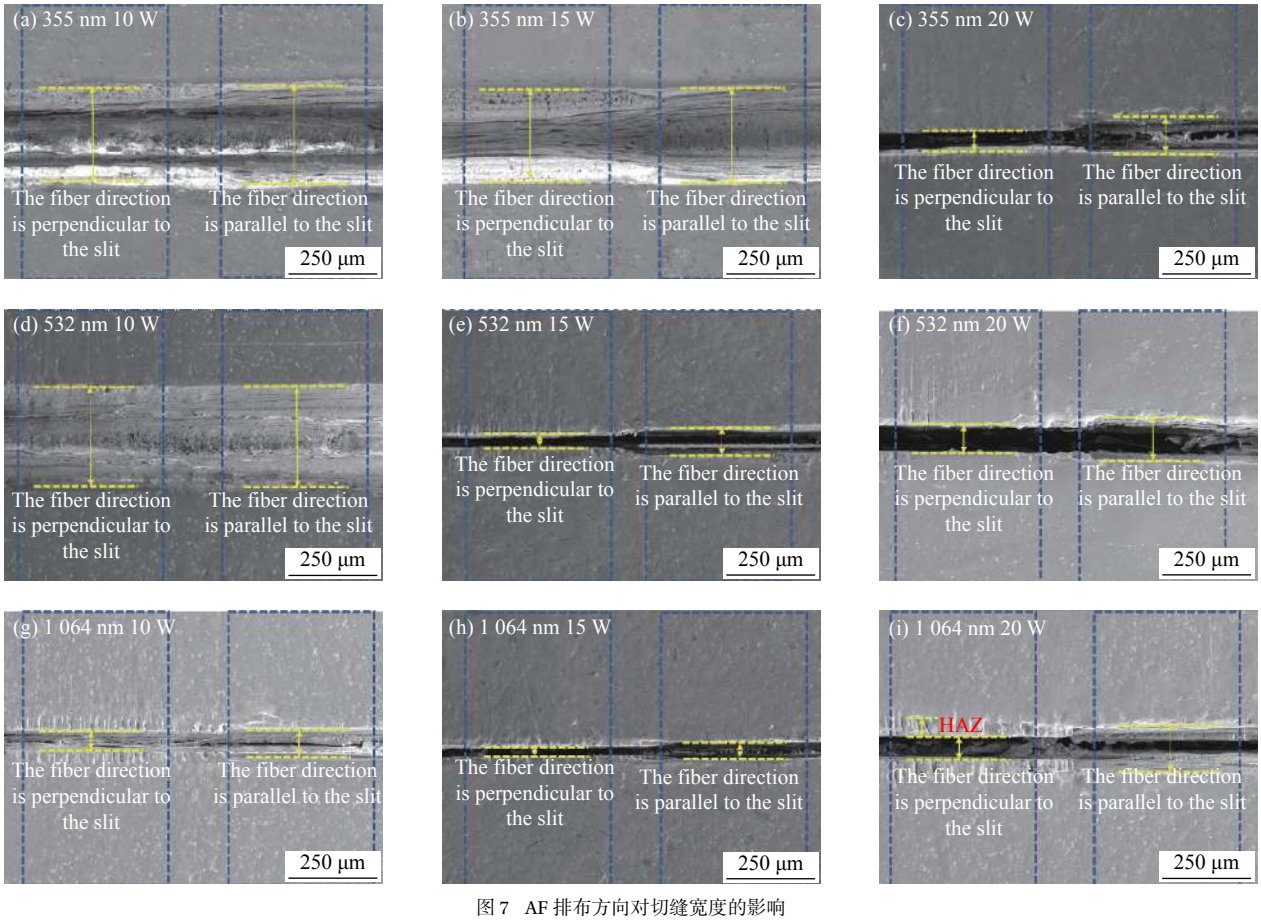
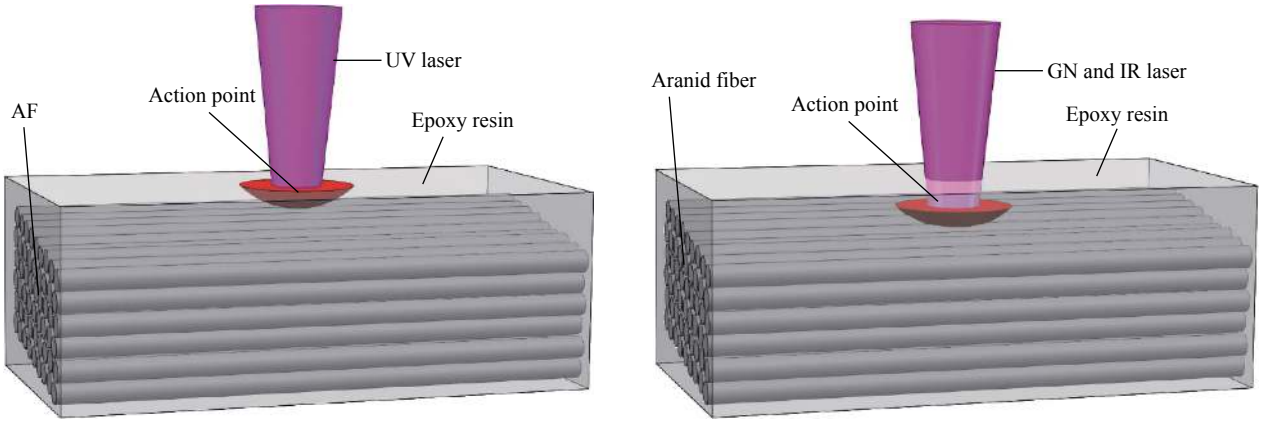


图 7　AF 排布方向对切缝宽度的影响

Fig. 7　Effect of AF arrangement direction on slit width

被内层受热分解的 AF 所加热，当 AF 的温度超高气化分解温度而气化，形成内层爆炸力，该爆炸力会去除基体树脂[15]。因此，热传导对加工效果影响很大。该加工效果包括切缝宽度和切缝边缘的热影响区。如前文所讲，AF 平行于切缝边缘处，则切缝较宽；纤维垂直于切缝边缘，则切缝较窄。同时，热传导的影响还体现在对热影响区宽度的影响。如图 7 所示，当波长为 1 064 nm 时，可以观察到明显的以 AF 露出为特征的热影响区，并且可以发现 AF 方向垂直于切缝时的热影响区宽度大于纤维方向平行于切缝时的热影响区宽度，由前文可知 AF 轴向上的热传导率大于径向上的热传导率。故当 AF 方向垂直于切缝时激光诱导产生的热量沿着 AF 方向逐渐远离切缝，去除了切缝两边部分树脂，形成较宽的热影响区；当 AF 方向平行于切缝时激光诱导产生的热量主要沿着纤维传导，仍旧主要积聚与切缝边缘，使在此处形成较窄的热影响区。

图 9 进一步展示了三种波长下扫描速度为变量时的切缝截面形貌。可见，紫外激光加工的切缝最深，上切缝宽度最宽；绿光激光次之；红外激光加工的切缝最浅，上切缝宽度最窄。这是由于当激光作用与材料表面时，环氧树脂基体和 AF 对不同波长激光的吸收率不尽相同，AFRP 对波长为 355 nm 的激光能量吸收的最好，对波长 532 nm 的激光次之，对波长为 1 064 nm 的激光能



(a) Absorption mechanism of AFRP for UV laser　　(b) Absorption mechanism of AFRP for GR and IR laser

图 8　AFRP 对紫外激光、绿光和红外激光的吸收机制

Fig. 8　Absorption mechanism of ultraviolet laser, green laser and infrared laser by AFRP

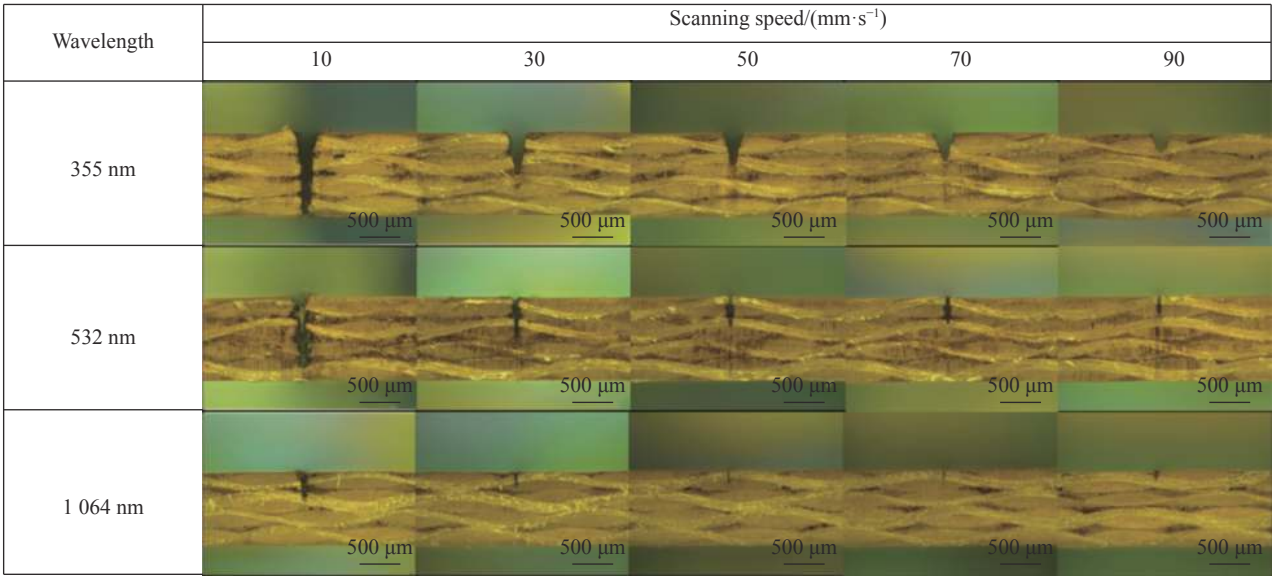


图 9　功率为 25 W 时三种波长下 AFRP 切缝截面

Fig. 9　Cross section of AFRP kerf under three wavelengths at 25 W power

量吸收的最少。并且相比于红外激光和绿光激光去除材料主要依靠激光脉冲能量迅速升温汽化材料或者对材料造成热烧蚀而去除，紫外激光的去除效率更高。因此在相同的激光参数下，紫外激光加工的切缝最深，上切缝宽度最宽；绿光激光次之；红外激光加工的切缝最浅，上切缝宽度最窄。

由图 9 还可以看出，在激光波长为 355 nm 时，切缝内部破坏相对较小，而当波长为 532 nm 和 1 064 nm 时，切缝内部破坏较严重。这是由于当波长为 355 nm 的激光作用于材料表面时，去除材料自外而内顺序进行，并且紫外激光可以直接打断分子的化学键而实现材料去除，故切缝内部受到的破坏较小。而当波长为 532 nm 和 1 064 nm 的激光作用于材料表面时，覆盖在材料表层的树脂几乎不吸收激光能量，激光能量几乎全被位于树脂层下的纤维吸收，表层的环氧树脂基体则被内层 AF 加热，依靠 AF 气化而形成内层爆炸力去除树脂，而这种爆炸力使切口内部受到较大的破坏。故在紫外激光作用时，切缝内部破坏相对较小，绿光激光和红外激光作用时，切缝内部破坏较严重。

2.2 扫描速度的影响

图 9 同时给出了三种波长下上切缝宽度和深度。在激光波长为 355 nm、扫描速度为 10 mm/s 时实现全切。通过测量计算得出如图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 所示的三个波长下上切缝宽度、切缝深度和切缝锥度随着扫描速度的变化曲线。可见，切缝宽度和深度随激光扫描速度的增大而减小。这主要由于激光扫描速度增加，激光光斑重叠率降低，单位面积上注入能量减少，则切缝宽度和深度降低。

图 11 为波长为 532 nm 时两种不同扫描速度下的热影响区宽度。可见，在其余参数都相同时，扫描速度越大，热影响区越小。图 10(d) 为三个波长下上表面热影响区宽度随着扫描速度的变化曲线。造成这种热损伤宽度变化的原因有两点：(1) 由于激光脉冲是高斯脉冲，聚焦光斑中心能量密度高，远离中心的能量密度迅速降低，不足以去除材料的剩余能量就会转化成热的形式扩散。当扫描速度增大时，激光光斑重叠率降低，单位面积上注入能量减少，导致热影响区宽度减小；(2) 由于切缝宽度的限制和切割锥角的产生，切割至一定深度，激光射入时会被前道激光作用产生的废气阻挡而发生折射或散射，阻碍激光与材料的相互作用，产生屏蔽效应，或被切割截面吸收，致使脉冲能量不能有效汽化材料而使热量传导到树脂基体中，热累积效应进一步加强[15]。而当激光扫描速度增大时，单位面积上注入能量减少，导致单位面积内脉冲能量不能有效气化材料而使屏蔽效应降低，使热影响区宽度降低。

2.3 功率的影响

通过研究发现，在三个波长下激光功率的变化对切缝形貌的影响规律是一致的，故此部分只讨论在激光波长为 355 nm 下激光功率对上切缝宽度、上表面热影响区宽度、切缝深度和切缝锥度的影响。图 12 为波长为 355 nm、扫描速度为 45 mm/s，激光重复频率为 500 kHz，功率为变量时的切缝截面图片。图 13(a)、图 13(b) 和图 13(c) 是通过测量计算得出的上切缝宽度、切缝深度和切缝锥度随着激光功率变化的曲线。可以看出，上切缝宽度和深度随激光功率的增大而增大。这主要由于，一方面，激光功率增加，注入材料的能量更多，可以更有效地去除材料，增加了切缝宽度和深度。另一方面，在 Kevlar 层压板中存在多孔间隙，在层压板料生产过程中这些多孔间隙中捕获了大量氧分子。在激光切割过程中，切口部分氧气释放并发生小的氧化燃烧反应，增大功率增强了侧向和纵向燃烧，使切缝宽度和深度进一步增加[16]。

图 14 为波长为 355 nm 时两种不同功率下的热影响区宽度图片。可以看出，在其余参数都相同时，激光功率越大，热影响区越大，激光对切缝的损伤越大。图 13(d) 为上表面热影响区宽度随着激光功率的变化曲线。造成这种热损伤宽度变化的原因分析如下：(1) 由于激光当激光功率增大时，去除材料的能量增加，去除的材料越多使切口越宽。同时不足以去除材料的剩余能量也增多，导致剩余能量扩散而形成的热影响区增大；(2) 增大激光功率导致激光于与材料的反应更加激烈，产生更多的废气使屏蔽效应更加明显，使热损伤区增大。

通过以上数据可以看出，当激光波长为 355 nm、激光扫描速度从 10 mm/s 增加到 90 mm/s 时，上表切缝宽度减小 34.74 μm，深度减小 722 μm。分析可得当扫描速度为变量时，上表面切缝宽度每变化 1 μm，深度变化 20.78 μm。而激光功率从 17 W 增加到 25 W 时，上表面切缝宽度增大 53.02 μm，深度增大 190.21 μm。因此，当功率为变量时，上

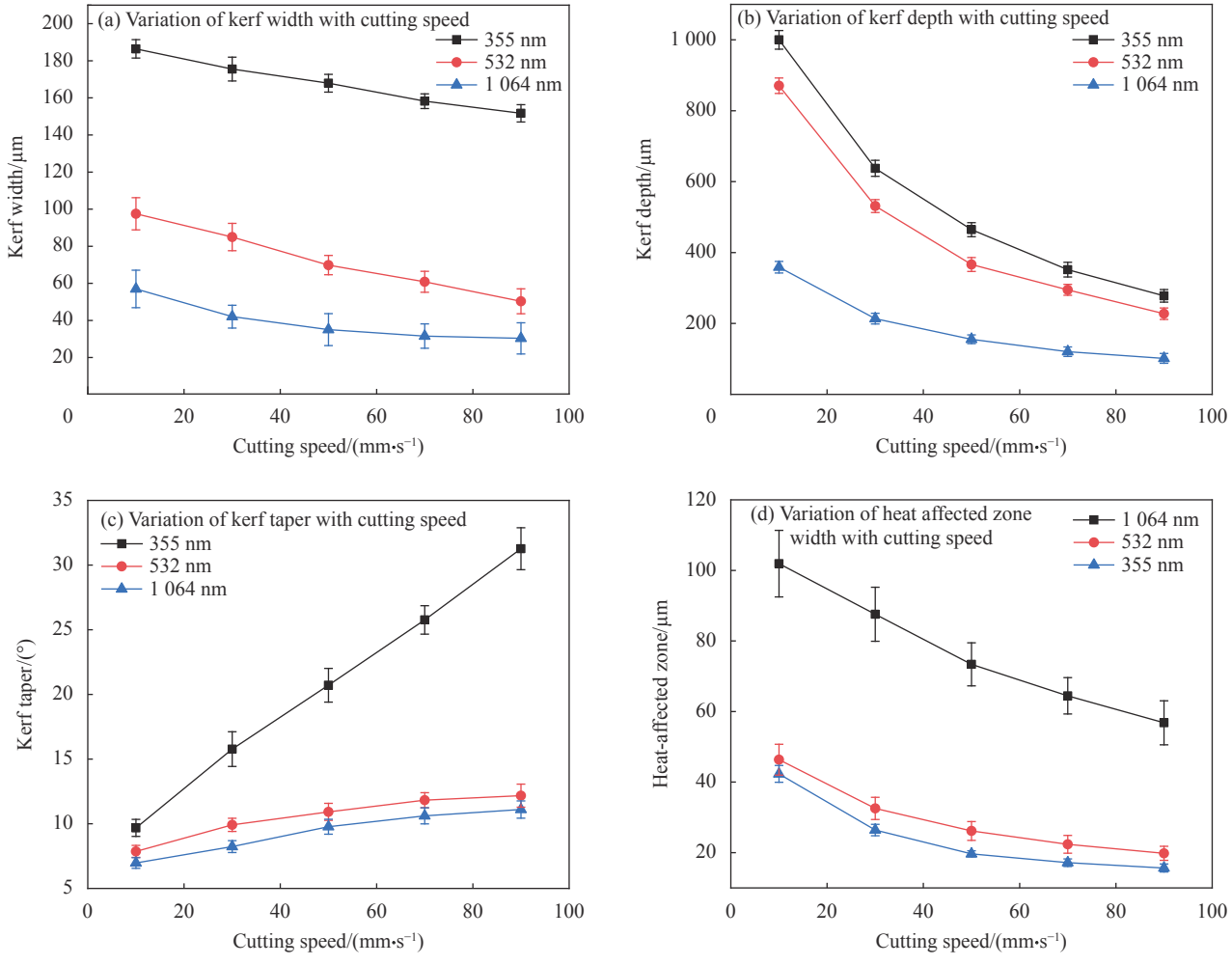
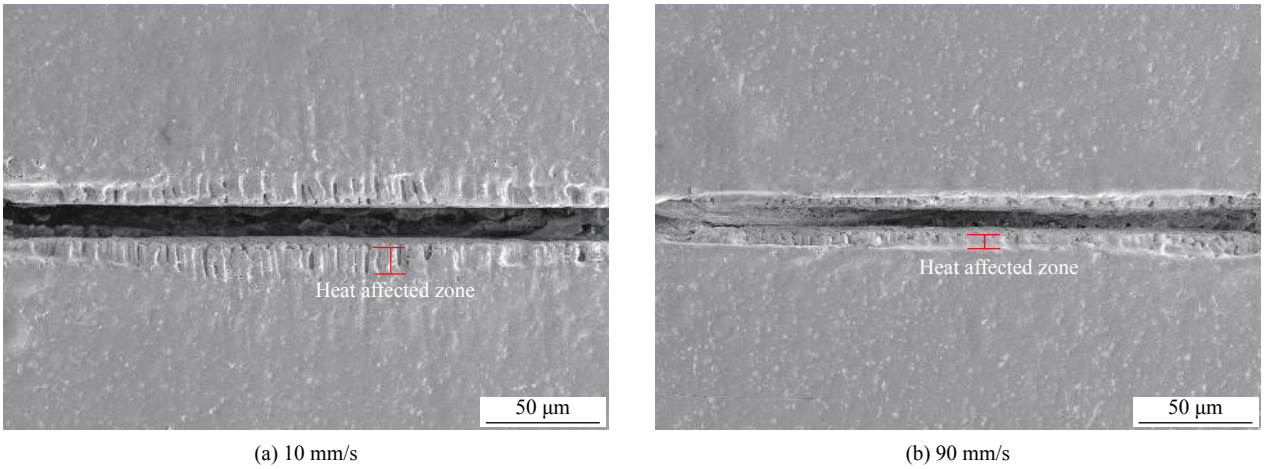


图 10　功率 25 W 时三种波长下 AFRP 切缝参数随切割速度变化

Fig. 10　Variation of AFRP kerf parameters with cutting speed under three wavelengths at 25 W power



(a) 10 mm/s　　(b) 90 mm/s

图 11　波长为 532 nm 时不同扫描速度下 AFRP 的热影响区

Fig. 11　Heat affected zone at 532 nm with different scanning speed of AFRP

表面切缝宽度每变化 1 μm，深度变化 3.59 μm。由此可见，与激光功率相比，激光束扫描速度对切缝深宽比影响比较显著。在工程应用中，可以通过适当降低激光扫描速度，提高切缝深宽比。当激光波长为 532 nm 和 1 064 nm 时，相关规律与 355 nm 类似。

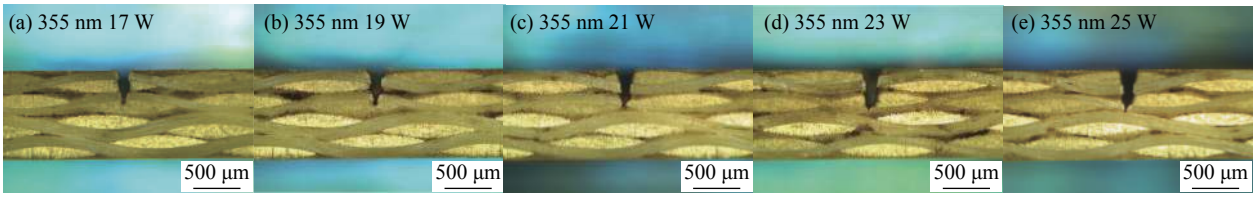


图 12　波长为 355 nm 时不同功率下的 AFRP 切缝截面

Fig. 12　Cross section of AFRP kerf obtained with 355 nm

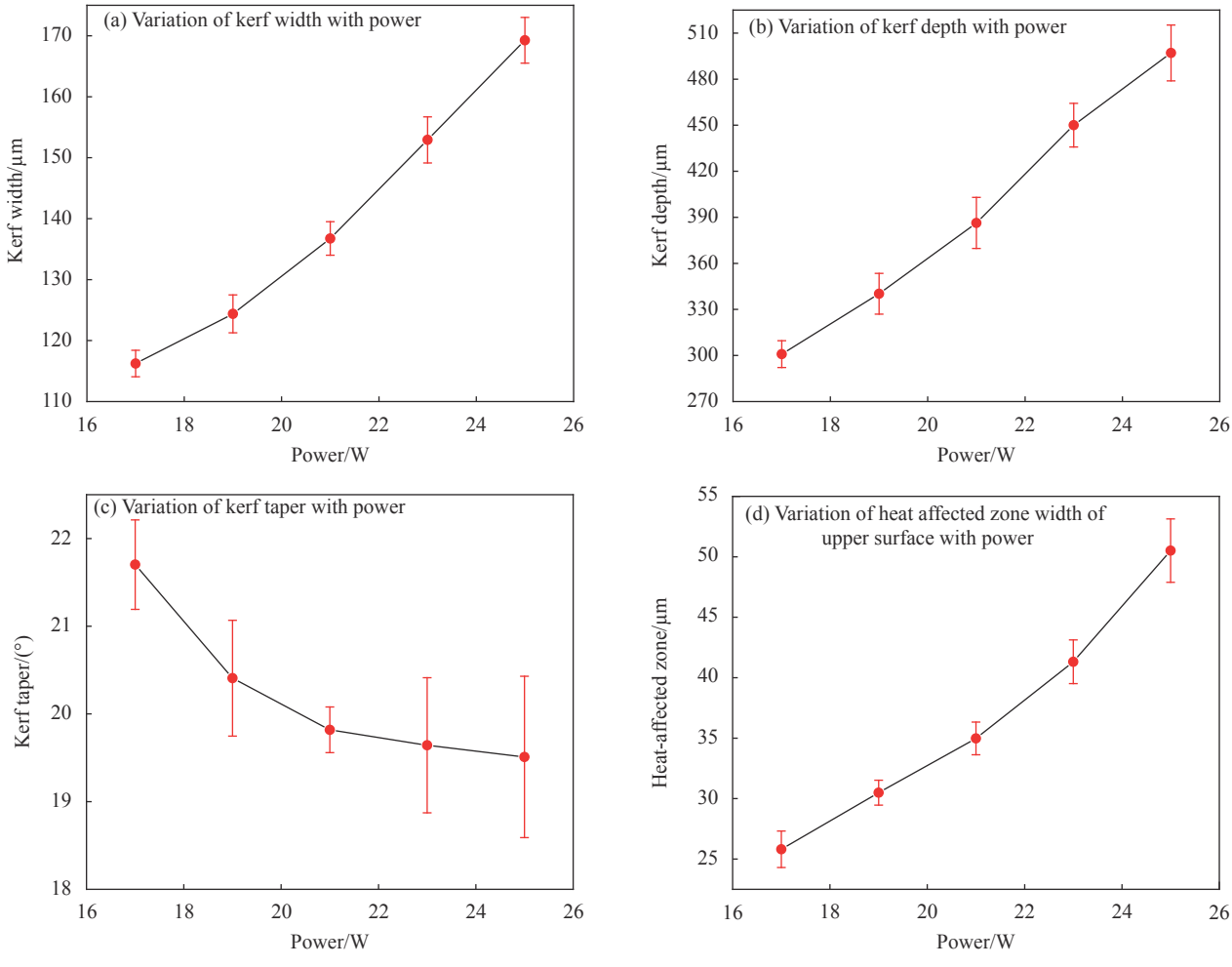


图 13　AFRP 切缝特征参数随功率变化

Fig. 13　Variation of kerf parameters with power of AFRP

3　结 论

本文研究了激光波长、功率及扫描速度等参数对芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 切缝宽度、切缝深度、切缝锥度和上表面热影响区宽度的影响。主要结论如下：

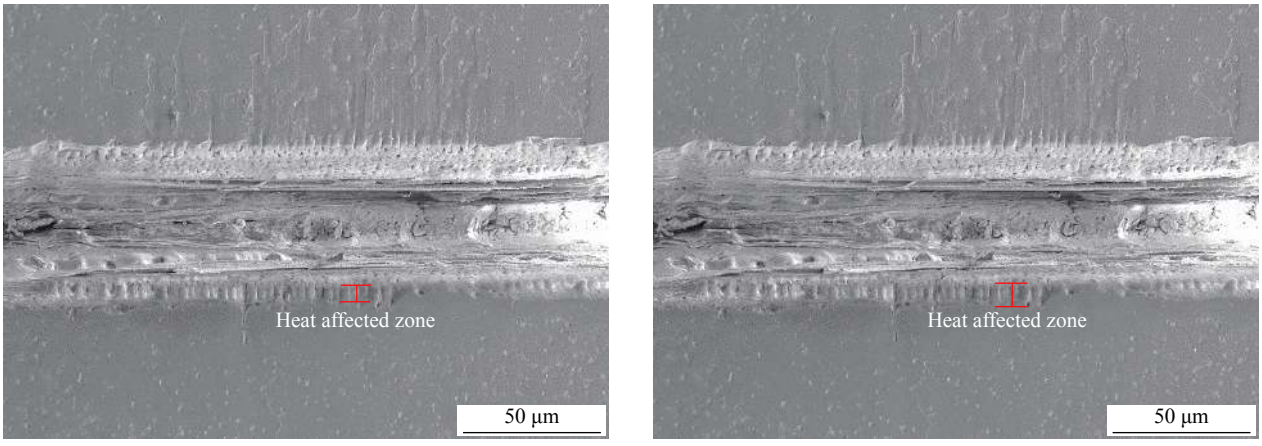
(1) 相比于红外激光和绿光激光切割 AFRP，紫外激光切割对切缝截面处纤维的损伤和对切缝内部的破坏最小。

(2) 紫外激光作用时切缝宽度受到纤维排布方向的影响最小，不同纤维方向切口宽度变化最小。

(3) 在三个波长的激光中，紫外激光的切割效率最高，绿光激光次之，红外激光最低。

(4) 上切缝宽度、切缝深度和上表面热影响区宽度随着激光功率的增大而增大，随着激光扫描速度的增大而减小；切缝锥度随着激光功率的增大而减小，随着激光扫描速度的增大而增大。

(5) 适当降低激光扫描速度，有利于提高切缝深宽比。



(a) 17 W　　(b) 25 W

图 14　波长为 355 nm 时不同功率下 AFRP 的热影响区

Fig. 14　Heat-affected zone with different power at 355 nm of AFRP

参考文献：

[1] 石文天, 刘玉德, 张永安, 等. 芳纶纤维复合材料切削加工研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(1)：28-35.
SHI Wentian, LIU Yude, ZHANG Yongan, et al. Research progress in cutting of aramid fiber composites[J]. Surface Technology，2016，45(1)：28-35(in Chinese).

[2] AL-SULAIMAN F, YILBAS B S, AHSAN M, et al. CO_2 laser cutting of kevlar laminate: Influence of assisting gas pressure[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2009，45(1-2)：62-70.

[3] 王含妮, 谭勇, 张喜和, 等. 芳纶纤维复合材料在脉冲激光作用下的热损伤研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(1)：6.
WANG Hanni, TAN Yong, ZHANG Xihe, et al. Thermal damage of aramid fiber composites under pulsed laser irradiation[J]. Application of Optoelectronic Technology，2015，30(1)：6(in Chinese).

[4] 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)：168-180.
WANG Guibing, LUO Fei, LIU Cangli, et al. Laser ablation damage morphology of aramid fiber composites[J]. Laser Technology，2006(2)：168-180(in Chinese).

[5] YILBAS B S, AL-SULAIMAN F, KARAKAS C, et al. Laser cutting of multilayered kevlar plates[J]. Journal of Materials Engineering & Performance，2007，16(6)：663-671.

[6] 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(7)：85-99.

[7] MISHRA D R, BAJAJ A, BISHT R, et al. Optimization of multiple kerf quality characteristics for cutting operation on carbon-basalt-Kevlar29 hybrid composite material using pulsed Nd: YAG laser using GRA[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology，2020，30(4)：24-35.

[8] HERRMANN T, KLIMT B, SIEGEL F, et al. Micromachining with picosecond laser pulses[J]. Industrial Laser Solutions，2004，19(10)：34-43.

[9] 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, 13：1-15.
ZHANG Xuecong, QIAN Jing, FU Qiang, et al. Cutting PBO fiber reinforced composites by picosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers，2020，13：1-15(in Chinese).

[10] LI Z L, ZHENG H Y, LIM G C, et al. Study on UV laser machining quality of carbon fibre reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing，2010，41(10)：1403-1408.

[11] DELL M, ERBA, GALANTUCCI L M, et al. An experimental study on laser drilling and cutting of composite materials for the aerospace industry using excimer and CO_2 sources[J]. Composites Manufacturing，1992，3(1)：14-19.

[12] 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.

[13] TAKAHASHI K, TSUKAMOTO M, MASUNO S, et al. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing，2016，84(9)：135-148.

[14] CUI X, KE Q F, CAI G M, et al. Evaluation of light protective properties of high performance aramid fabrics[J]. Applied Mechanics & Materials，2014，551：28-31.

[15] 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)：1202010.
JIA Baoshen, TANG Hongping, SU Chunzhou, et al. Surface coating removal of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers，2019，46(12)：1202010(in Chinese).

[16] AL-SULAIMAN F, YILBAS B S, KARATAS C, et al. Laser cutting of kevlar and mild steel composite structure: end product quality assessment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2007，16(1)：22-29.