

皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料

张学聪^{1,2}, 钱静², 付强², 王关德², 刘军², 崔红³, 张承双³, 包艳玲³, 戴晔^{1**}, 赵全忠^{2*}

¹上海大学物理系, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

³西安航天复合材料研究所, 陕西 西安 710025

摘要 一次性整体成型或传统的加工方式已不能满足聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维增强复合材料精密加工和装配的要求。首先分别采用波长为 355 nm 的紫外皮秒激光和波长为 1030 nm 的红外皮秒激光对 PBO 纤维增强复合材料进行切割加工, 加工过程中采用渐进式焦点下移和多道扫描策略; 然后采用扫描电子显微镜观察了复合材料的切割截面形貌, 分析了材料的物理去除机制和加工热损伤; 最后研究了激光功率、扫描速度和方向、脉冲重复频率等激光参数与切割质量、切割效率之间的关系。实验结果表明: 紫外皮秒激光可以实现“冷加工”和光化学效应, 得到了较高的切割质量; 激光焦点随加工进程下移可以有效提高加工质量并改善材料切割表面的一致性。研究结果表明, 采用 8 W、400 kHz、1000 mm/s 的激光参数可以进行高质、高效的材料加工。

关键词 激光技术; 激光与物质相互作用; 皮秒激光; 聚对苯撑苯并双噁唑纤维增强复合材料; 表面质量; 热损伤; 加工效率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1002004

Cutting of PBO Fiber-Reinforced Composites Using Picosecond Lasers

Zhang Xuecong^{1,2}, Qian Jing², Fu Qiang², Wang Guande², Liu Jun²,
Cui Hong³, Zhang Chengshuang³, Bao Yanling³, Dai Ye^{1**}, Zhao Quanzhong^{2*}

¹Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract The precision machining and assembly requirements of poly(p-phenylene-benzobisoxazole) (PBO) fiber-reinforced composites cannot be satisfied using direct integral forming or traditional machining methods. First, we cut PBO fiber-reinforced compositions using different picosecond lasers (with wavelengths of 355 nm and 1030 nm), apply a progressively downshifted focus, and implement multi-pass scanning strategy. The cross-section morphologies of the processed samples were observed using scanning electron microscopy, and the mechanisms of material removal and thermal damage of the materials were analyzed. Finally, the cutting quality and efficiency were related to the laser parameters (laser power, scanning speed and direction, and pulse repetition rate). The UV picosecond laser achieved “cold processing” and a photochemical effect with high cutting quality. The downshift of laser focus with the machining process effectively improved the machining quality and consistency of the material cutting surface. The high-quality and efficient material processing can be achieved with laser power of 8 W, repetition rate of 400 kHz and scanning speed of 1000 mm/s.

Key words laser technique; laser-material interaction; picosecond laser; PBO fiber reinforced composites; surface quality; thermal damage; processing efficiency

OCIS codes 320.7090; 160.4890; 350.3850

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-04-16; 录用日期: 2020-06-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107501)、国家自然科学基金(61675214, 11774220)

* E-mail: zqz@siom.ac.cn; ** E-mail: yedai@shu.edu.cn

1 引言

聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维是一种具有高强度、高模量以及优异的热稳定性和化学稳定性的有机纤维,被誉为“21世纪超级纤维”。PBO纤维增强复合材料是一种以PBO纤维为增强相的树脂基复合材料,由于具有轻质高强和高温下稳定工作的特点而被广泛应用于航空航天、武器装备等领域^[1-2]。目前,一次性整体成型工艺还难以满足日益增长的精密制造和装配的需求,而传统的机械加工不仅存在刀具磨损大的问题,还易引起树脂基体破坏和材料分层等。激光制造作为一种柔性和物态可控的优势制造技术,有望解决上述问题^[3]。

激光加工是利用聚焦的高能量密度激光束辐照材料,使其迅速熔化、气化或化学降解,从而实现材料分离^[4]。采用激光加工纤维复合材料的优势很明显,如:无应力加工,对材料结构的破坏小;没有刀具磨损,加工成本低廉;加工精细程度可达微米级别;加工柔性好。20世纪80年代,Tagliaferri等^[5]开展了一项开创性工作,他们用CO₂激光分别切割了芳纶纤维、玻璃纤维和碳纤维增强复合材料,结果发现,由于有机芳纶纤维与树脂基体的热学性能差异较小,因此芳纶纤维增强复合材料可以得到更好的加工质量。Fenoughty等^[6]指出,由于脉冲激光每两个脉冲之间存在时间间隙,有利于材料冷却,因此材料的热损伤比采用连续激光切割时的更小。Yung等^[7]采用紫外纳秒激光加工玻璃纤维复合材料后发现:红外激光主要依靠光热转换对材料进行热烧蚀,热损伤较大;而紫外激光则是凭借光化学作用(利用短波长产生的较高的光子能量直接打断树脂中的化学键)实现材料的去除,有效降低了材料的热损伤。Freitag等^[8]和

Salama等^[9]在采用红外皮秒激光加工碳纤维复合材料过程中,通过优化工艺参数得到了宽度小于25 μm的热影响区,加工质量优于纳秒激光的加工质量。他们发现,随着激光功率降低、扫描速度提高和脉冲重叠率减小,材料的热损伤会变小。Lau等^[10]通过研究后发现,纤维取向不仅影响热影响区的宽度,还会影响切缝深度。Staehr等^[11]指出,对复合材料实施多道扫描切割策略可以有效提高加工质量。

目前,国内外的研究重点主要集中在连续激光和短脉冲激光加工碳纤维和玻璃纤维复合材料领域,还没有皮秒激光加工PBO纤维增强复合材料方面的公开报道。皮秒激光不仅可以实现比纳秒激光更高的加工精度和质量,还可以弥补飞秒激光加工效率低下的问题,有望在兼顾加工质量和效率方面带来突破^[12]。如何利用皮秒激光高质、高效地加工PBO纤维增强复合材料,降低材料的热损伤,满足工业应用,成为人们研究的主要目的。鉴于此,本文基于实际工业场景设计了一种将扫描振镜与X-Y移动平台相结合并且可上下定量移动焦点的激光加工系统,并基于该系统分别采用紫外皮秒激光和红外皮秒激光对PBO纤维增强复合材料进行了切割实验;之后,根据样品加工表面形貌和加工数据,本文分析了激光加工PBO纤维增强复合材料的物理机制,得到了激光扫描速度和方向、平均功率、重复频率等加工参数对加工效果的影响规律。

2 实验设计

本文分别采用紫外皮秒和红外皮秒激光系统进行切割实验,两种激光的波长分别为355 nm和1030 nm,两种激光系统的功率范围、重复频率、脉冲宽度和聚焦光斑尺寸如表1所示。

表1 激光器参数

Table 1 Laser parameters

Laser	Average power /W	Repetition rate /kHz	Pulse duration /ps	Focus diameter /μm
UV laser	0-15	1-1000	<15	~20
IR laser	0-100	1-400	10	~25

激光束为高斯脉冲模式^[13]。如图1所示,激光出射后依次经过数个反射镜、偏振器、扩束镜、分光镜、孔径光阑以及扫描振镜模组(包括扫描振镜和平场透镜)后聚焦于样品表面。PBO纤维增强复合材料用夹具夹持固定在X-Y移动平台上。激光束通过扫描振镜模组完成激光路径的折射和聚焦,高能量密度的激光聚焦在PBO纤维增强复合材料上表面完成指定的扫描动作,实现材料的加工。第四反

射镜、合束镜、CCD、孔径光阑和扫描振镜模组从左至右依次安置于横梁上,并共同嵌入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。

实验样品为PBO纤维单向排布的环氧树脂基复合材料层压板,厚度为2 mm,纤维直径为13~14 μm,体积分数为70%~75%。增强纤维(PBO纤维)和树脂基体(epoxyresin)的热学性能参数(热

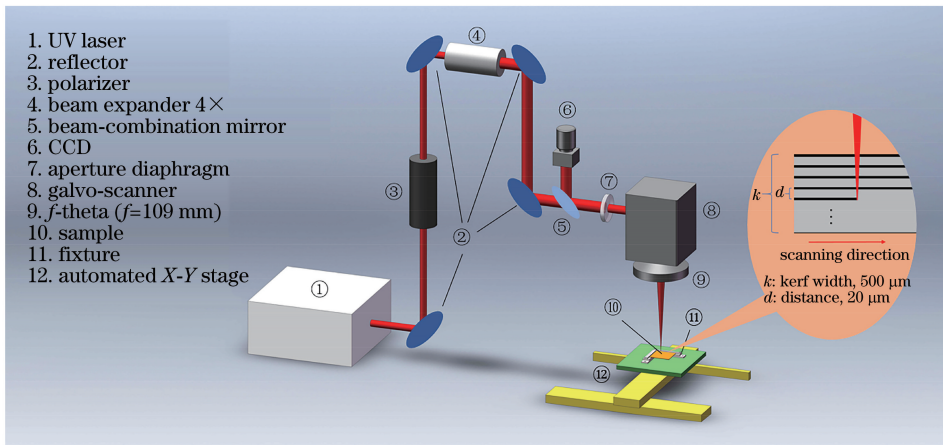


图 1 激光加工装置(插图为激光多道扫描示意图)

Fig. 1 Laser processing system (insert: scanning strategy)

分解温度、热导率、比热容和密度)如表 2 所示。

表 2 材料的热学性能参数

Table 2 Thermal properties of materials

Property	PBO fiber	Epoxy resin
Decomposition temperature /K	930	440
Heat conductivity / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	0.52	0.1
Specific heat capacity / $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	1700	1884
Density / $(kg \cdot m^{-3})$	1560	1100

首先进行紫外皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料的实验。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的上表面重合。设置好激光加工参数和扫描路径后,通过计算机触发激光器开始进行加工。为了有效减小超快激光加工过程中的热累积效应和等离子体屏蔽效应,采用如图 1 所示的多道填充的激光扫描方式^[14-15],扫描间距设为 20 μm。紫外皮秒激光切割实验完成后,进行红外皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料的对比实验,同样采用多道填充的激光扫描方式,并动态调整激光焦点,使聚焦平面随着待加工表面的下移而下移。

在加工实验中,为使材料的热损伤更小,根据实际需要施加压缩空气。实验结束后,采用光学显微镜测量激光加工的相关数据,探究加工效率随激光参数的变化规律,并采用扫描电镜(SEM)观察激光加工质量与加工的热损伤形式。

3 结果与分析

皮秒激光与材料复杂的相互作用包括多光子电离、电子-晶格能量耦合及晶格-晶格热扩散等。1974 年,Anisimov 等^[16]指出,超快激光极短的脉冲宽度远小于晶格热扩散的时间,在材料达到热力学

平衡之前激光与材料的相互作用就已经完成,所以能够实现“冷加工”。但有人认为,当脉冲时间结束后,残留在晶格中的热量由于高频脉冲的累积作用,仍然会对材料造成一定的热损伤^[17]。不同波长的激光与材料相互作用的机制迥异,PBO 纤维和环氧树脂对不同波长激光的吸收率也具有显著差异^[18],激光聚焦光斑直径、光束发散角、单光子能量等都与激光波长密切相关^[19]。所以,研究不同波长的激光对 PBO 纤维增强复合材料的去除机理以及材料热损伤的形成机制至关重要。

3.1 不同波长激光的材料去除机制及材料的热损伤

为探究紫外激光的材料去除机制以及材料热损伤的形成机制,采用扫描电镜观察紫外皮秒激光加工 PBO 纤维增强复合材料的切割截面。当激光扫描方向平行于纤维排布方向时,宏观视角和光学显微镜下的切割截面形貌分别如图 2(a)和图 2(b)所示。可见,切割平面光亮平整,切面无碳化变色。当激光扫描速度、重复频率和平均功率分别为 1000 mm/s、400 kHz 和 8 W 时,切割截面光滑平整,可以清晰地看到树脂内部纤维的排列,没有材料分层和烧蚀碳化现象出现,如图 2(c)所示,验证了紫外皮秒激光加工 PBO 纤维增强复合材料的可行性。

当激光扫描方向垂直于纤维排布方向时,宏观视角和光学显微镜下的切割截面形貌分别如图 3(a)和图 3(b)所示。可以看到,与平行扫描方式相比,紫外皮秒激光垂直于纤维排布方向切割时,截面明显发黑,并伴有烧蚀孔洞和周期性条纹状沟槽出现。图 3(c)和图 3(d)分别展示了切割截面上部和下部的微观形貌:上部的局部放大图显示材料具有良好的切割平面,树脂填充完整,未见纤维末端膨

胀;下部相比上部出现了更多的烧蚀孔洞,树脂基体受热分解或气化,PBO 纤维伸出,纤维末端膨胀熔

化甚至相邻纤维连成一体,表面附着有一层黑色的树脂重铸层,如图 3(d)中的区域 A 和区域 B 所示。

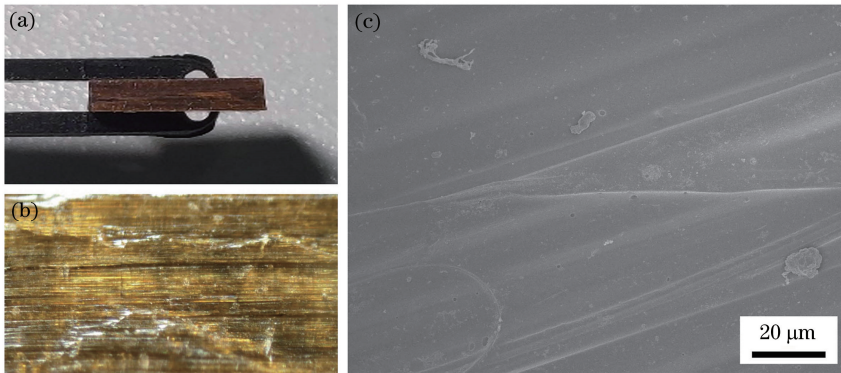


图 2 紫外皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料的平行切面形貌。(a)宏观截面;(b)光学显微镜图片;(c)扫描电镜图片
Fig. 2 Parallel section morphologies of PBO fiber-reinforced composites processed by UV picosecond laser.

(a) Macroscopic section picture; (b) microscopic section picture; (c) SEM picture

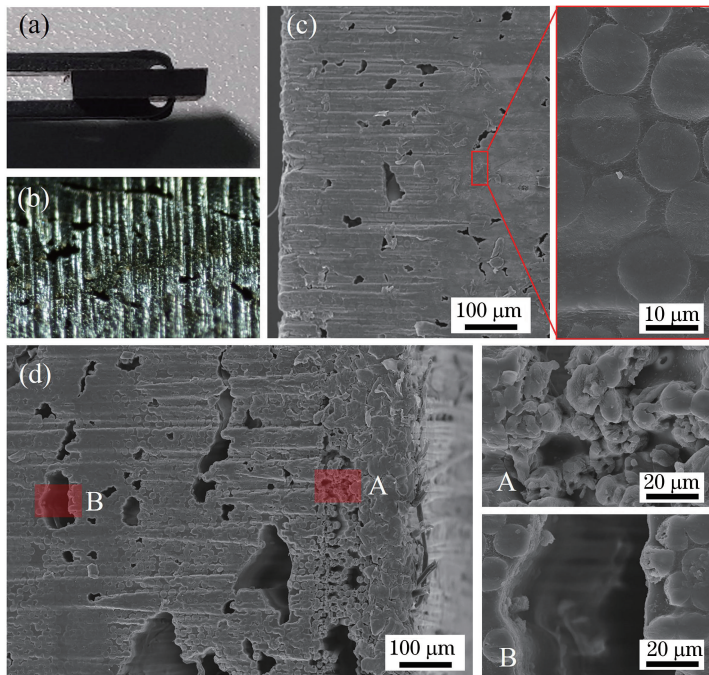


图 3 紫外皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料的垂直切面形貌。(a)宏观截面照片;(b)光学显微镜图片;
(c)切割截面上部的扫描电镜图片;(d)切割截面下部的扫描电镜图片

Fig. 3 Vertical section morphologies of PBO fiber-reinforced composites processed by UV picosecond laser. (a) Macroscopic section picture; (b) microscope section picture; (c) SEM picture of upper section; (d) SEM picture of bottom section

实际上,图 3(c)所示的切面上部的局部放大图显示了原材料的实际切面特性,此时光化学效应是材料的主要去除方式,几乎没有热作用;而切面下部却由于热效应而产生了数量更多、尺寸更大的烧蚀孔洞。其中,烧蚀孔洞占切割截面的面积比从上部的 2.65%增大到下部的 13.13%。造成这种热损伤的原因有 4 个:1)树脂的气化温度更低,当 PBO 纤维熔化时,树脂已经气化或者降解成碳和石墨,气化或碳化的树脂从孔中喷射出来时,熔化的纤维也会

随着气化气流排出加工区域,并在孔洞侧壁和切割截面上附着,形成一层黑色的碳化层^[7];2)切割截面下部由于远离激光聚焦平面,激光能量密度急剧下降,达到纤维烧蚀阈值的能量变少,多余的能量转变为热能,导致树脂基体被大量气化;3)由于激光脉冲是高斯脉冲,聚焦光斑中心的能量密度高,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而扩散;4)由于切缝宽度的限制和切割锥角的产生,切割至一定深度时,入射的激光会被

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地气化材料,而是传导到树脂基体中,使热累积效应进一步增强^[20],导致切面下部的加工质量变差。

上述问题可以采用如下办法加以改善:1)施加压缩空气,以抑制屏蔽效应;2)根据具体材料的组构成适当增加切缝宽度和调整扫描填充间距(总结大量实验发现,激光加工纤维增强复合材料的板厚与切缝宽度比值小于5:1时可以达到比较好的切割效果);3)对激光脉冲进行整形,将其整形成其他光束脉冲形式(如平顶光束等),以降低锥角。这些改进措施都将是以后的研究重点。

图4为红外皮秒激光切割PBO纤维增强复合材料的切面形貌,为与紫外皮秒激光进行对比,此时设定激光平均功率、重复频率和激光扫描速度分别为8 W、400 kHz和1000 mm/s。图3所示的紫外

皮秒激光加工后的切割截面上下两部分表面质量相差较大,所以在这里采用激光焦平面随加工过程向下定量进给的切割方式,激光每扫描80次焦点向下移动0.5 mm。图4(a)~(c)分别是扫描方向垂直于纤维轴向时切割截面的上、中、下部的扫描电镜图像,可以看到红外激光加工的切割面发生了严重的烧蚀碳化;细节放大图显示有一层碳化层覆盖在突出的纤维和树脂表面,纤维末端均有不同程度的膨胀,甚至纤维相互黏结在一起。切面的上、中、下部均有烧蚀孔洞出现,且烧蚀孔洞均匀分布(切面上、中、下三部分烧蚀孔洞数目相近,所占切割截面的面积比分别为3.24%、3.33%和3.39%)。以上说明加工过程中向下移动焦平面有助于切割截面的质量提高(3.2节会展开叙述);烧蚀孔洞虽然变小,但材料由于热加工发生了比较严重的热损伤,相比紫外激光切面平整度仍有较大差距。图4(d)为平行于纤维轴向的切割截面,可以看到材料出现分层现象。

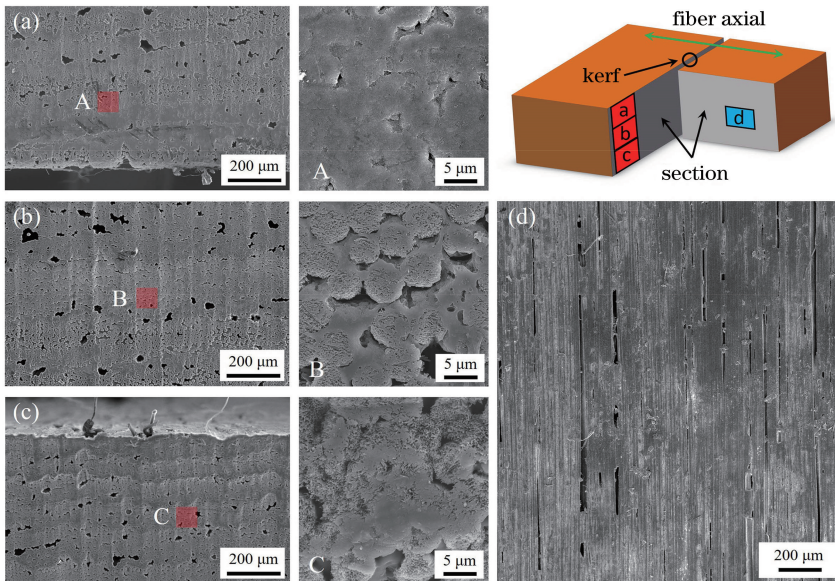


图4 红外皮秒激光加工PBO纤维增强复合材料的切面形貌。(a)垂直切面的上部;(b)垂直切面的中部;(c)垂直切面的下部;(d)平行切面

Fig. 4 Section pictures of PBO fiber-reinforced composites processed by IR picosecond laser. (a) Upper part of vertical section; (b) middle part of vertical section; (c) bottom part of vertical section; (d) parallel section

图5为PBO纤维和环氧树脂的分子结构。PBO纤维和环氧树脂对紫外激光的吸收性更好,加之紫外激光波长短,单光子能量高(波长为355 nm的紫外激光的单光子能量为3.49 eV,大于PBO纤维和环氧树脂中C—C键的键能3.45 eV以及C—N键的键能3.17 eV),可以直接打断分子的化学键,实现材料的去除。这种光化学效应可以有效抑制热累积的发生^[21-22]。

从图4(a)所示的切面上部的局部放大图中可

以看到,纤维被直接切断,纤维间填充的树脂保存完好,可以确定光化学去除是此时材料去除的主要方式。PBO纤维是一种芳香族聚合物,分子链对于波长为200~400 nm的紫外光比较敏感。吸收紫外激光后,PBO纤维发生噁唑环的开环反应,可以有效降低纤维强度,助长光机械剥蚀作用,使材料更快地去除。而红外激光主要是依靠激光脉冲能量迅速气化材料或者对材料造成热烧蚀而去除材料^[23],所以红外激光加工的热损伤更加明显。

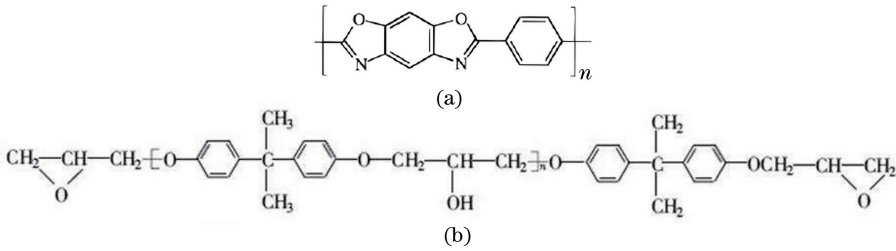


图 5 PBO 纤维和环氧树脂的分子结构。(a) PBO 纤维;(b)环氧树脂

Fig. 5 Molecular structure of PBO fiber and epoxy resin. (a) PBO fiber; (b) epoxy resin

综上,紫外激光比红外激光更适合用于 PBO 纤维增强复合材料的切割加工,平行于纤维轴向的切面光滑平整,表现出较高的加工质量;垂直于纤维轴向的切面虽然产生了部分烧蚀孔洞,但整体切割质量仍然较红外激光切割的更高,纤维形态完整,并且控制激光聚焦平面随加工进程下移可有效改善加工质量。

3.2 焦平面下移距离对切割表面质量的影响

如上节所述,控制激光聚焦平面随加工进程下移(激光每扫描 80 次焦点向下移动 0.5 mm)可有效改善加工质量,但图 4 显示的红外皮秒激光垂直切割截面仍然有比较明显的材料热损伤,如切割沟槽、碳化层等。所以,为减小材料的热损伤,本文降

低了激光功率和脉冲重复频率,将它们分别设置为 4 W 和 133 kHz,并将激光每扫描 80 次焦点下降的距离改为 0.2 mm(图 4 中为 0.5 mm)。调整参数后的切割截面如图 6 所示,图 6(a)~(c)显示了样品垂直切面上、中、下三个部位的表面形貌,其中,上、中、下三部分的烧蚀孔洞占切割截面的面积比分别为 2.64%、2.21%和 2.65%。与图 3 比较后可知,实验过程中动态下移激光焦点可最大限度地保持加工截面质量的一致性,并且可以提高加工效率,减小材料的锥角。与图 4 比较后可知,下移的距离梯度越小,切割表面质量越好,切割产生的周期性条纹基本消失,烧蚀孔洞也更小,材料表面的加工质量和一致性要优于图 4。

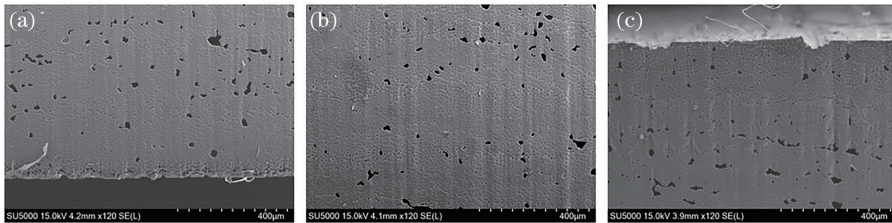


图 6 调整参数后切割表面的扫描电镜形貌。(a)切面上部;(b)切面中部;(c)切面下部

Fig. 6 SEM pictures of cutting section after adjusting parameters. (a) Upper part of section; (b) middle part of section; (c) bottom part of section

综上所述,动态移动激光的焦平面,使其与材料待加工面尽可能地接近,可以有效提高激光切割表面的质量。

3.3 扫描方向和激光功率对加工效率的影响

由于实验所用样品是 PBO 纤维单向排布的树脂基纤维增强复合材料,该材料具有明显的不均匀性和各向异性,所以激光扫描方向对加工效率的影响比较显著。由图 7(a)可以看出,当激光扫描方向平行于纤维排布方向时,切缝更深,加工效率更高。根据所得实验数据的拟合直线,平行于纤维排布方向扫描的有效加工速度是垂直于纤维排布方向的 1.6 倍。这是因为 PBO 纤维的热导率比树脂基体高得多,当脉冲能量密度小于 PBO 纤维的烧蚀阈值

时,剩余的能量沿着纤维轴线方向传导,与下一个激光脉冲共同作用去除材料,所以加工效率更高;而当扫描方向与纤维轴线正交时,剩余能量沿着热导率大的纤维深入树脂基体内部,使树脂基体烧蚀碳化甚至气化,如图 3(d)所示,严重时会出现纤维拔出及烧蚀孔洞现象,形成热影响区,导致加工效率和加工质量降低^[24]。

另外,由图 7(a)还可以看出,切缝深度随激光功率的增大而线性增加(图中拟合直线的置信区间为 95%,线性度较好,可近似认为二者成线性关系)。脉冲激光的平均功率为单脉冲能量与重复频率之积,实际上真正用于材料去除的是单脉冲能量(通过高频脉冲打孔形成切缝,从而分离材料)。随

着脉冲激光功率增加(本次实验中固定脉冲重复频率为 400 kHz),激光的单脉冲能量变大,达到材料

烧蚀阈值的能量更多,因此可以更有效地去除材料^[25]。

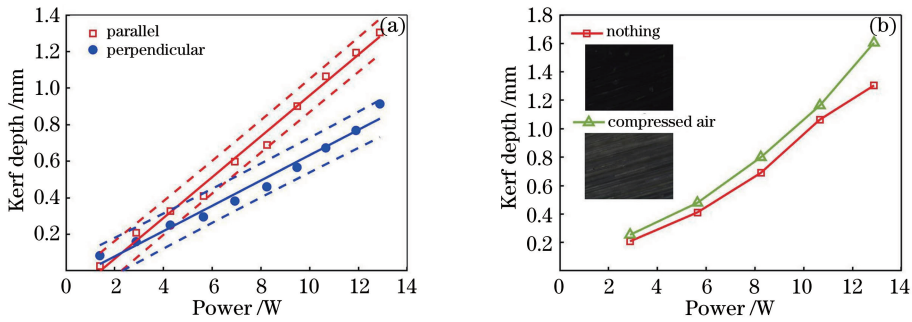


图 7 不同条件下,激光功率对切缝深度的影响。(a)激光扫描方向平行和垂直于纤维方向;(b)有无施加压缩空气条件下

Fig. 7 Influence of laser power on kerf depth under different conditions. (a) The laser scanning direction is parallel and perpendicular to the fiber axial direction; (b) with and without compressed air

由图 7(b)可以看出,在加工过程中施加 8 kPa 的压缩空气后,加工效率明显提高,并且材料的烧蚀程度明显变小。施加压缩空气后,光学显微镜下观察到的切缝颜色较浅,材料碳化程度低,纤维排列清晰可见;而未施加压缩空气时的切缝表面几乎完全变黑,烧蚀严重。压缩空气凭借快速气流带走被烧蚀气化的复合材料粉末和废气,在一定程度上减小了激光加工中的屏蔽效应,加快了激光与物质的相互作用,而且也带走了超快激光作用过程中的累积热量,使得加工质量得到改善^[26]。在实验过程中还发现,当激光扫描方向与纤维排布方向平行时,激光脉冲的冲击作用和光机械剥蚀作用会将前道激光作用过程中切断的 PBO 纤维崩射出材料基体,因此提高了加工效率。

综上,激光扫描方向平行于纤维轴向时,不仅加

工质量好,而且激光加工效率高,所以在 PBO 纤维增强复合材料的实际加工应用中,应使激光扫描方向尽量平行于纤维轴向,并结合实际需求设计加工路径和形式。如在垂直方向上设置更多和更宽的扫描填充路径,施加更多次的扫描次数等,以使不同方向上的材料加工效率保持一致,避免平行方向上的材料因过烧而损伤,这也更凸显出扫描振镜加工优越性。

图 8 是切割的圆形 PBO 纤维增强复合材料,可以看出,不同方向上的切割质量有很大差距,平行于纤维轴向的材料上表面几乎观察不到热影响区,切割截面光滑,如图 8(a)、(b)所示;而垂直于纤维轴向的材料上表面的热影响区较大,切割截面烧蚀严重,如图 8(c)、(d)所示。

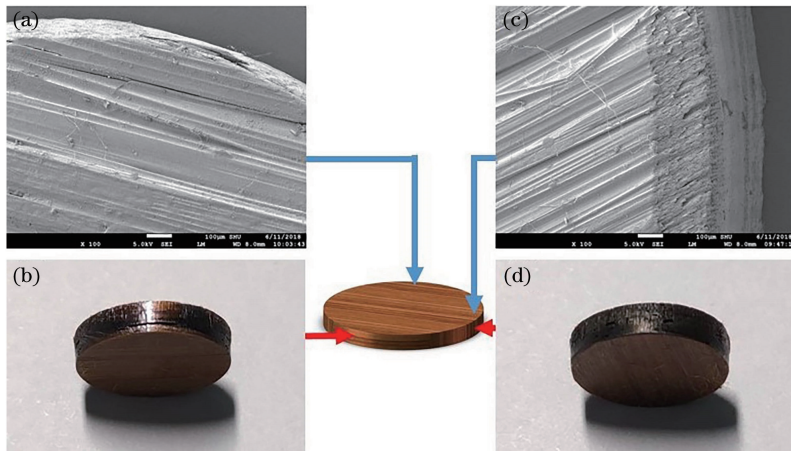
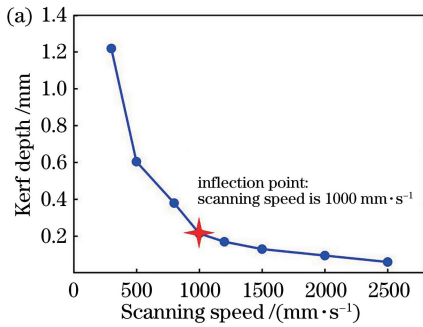


图 8 圆形切割的 PBO 纤维增强复合材料。(a)平行于纤维轴向的材料上表面;(b)平行切面照片;(c)垂直于纤维轴向的材料上表面;(d)垂直切面照片

Fig. 8 Circular cutting of PBO fiber-reinforced composite. (a) The upper surface parallel to the axial direction of fiber; (b) parallel section photo; (c) the upper surface perpendicular to the axial direction of fiber; (d) vertical section photo

3.4 激光扫描速度对加工效率的影响

设定激光重复频率为 400 kHz,平均功率为 8 W,激光扫描方向平行于纤维轴向扫描 20 次,调节激光扫描速度为 300~2500 mm/s 中的 8 个节点,记录切缝深度随扫描速度的变化规律。如图 9(a)所示,激光刻蚀深度随着激光扫描速度的增加而减小,当激光扫描速度小于 1000 mm/s 时,切缝深度随扫描速度的变化明显更快,而当扫描速度超过 1000 mm/s 后,切缝深度随扫描速度下降的趋势明显趋缓。选取激光扫描速度分别为 1000,1500,2000 mm/s 的实验结果,进行扫描速度与加工深度保持正比关系的等效换算^[27](假设切缝深度与扫描速度成反比,这样就可以将扫描速度为 1500 mm/s



时对应的切缝深度乘以 1.5,将扫描速度为 2000 mm/s 时对应的切缝深度乘以 2,得到扫描速度为 1000 mm/s 时的切缝深度,如插图中的虚线所示,这样就可以清晰地对比扫描速度对切缝的影响),得到图 9(b),可以看出,等效切缝深度会随着扫描速度的增大而减小,这也就意味着有效加工速度会随扫描速度的增大而减小。这是因为当其他参数不变时,增大扫描速度会导致单位长度内入射到材料表面的能量减少,从而缩短了激光与材料相互作用的时间。在这一过程中,脉冲激光的热累积相应减少,材料去除速率降低,但材料的加工质量会明显变好。

结上可知 1000 mm/s 的扫描速度可以在保证加工效率的前提下有效抑制热影响区的形成。

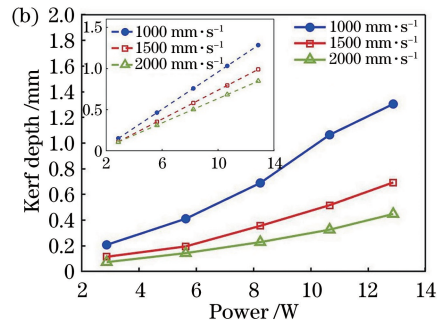


图 9 切缝深度随扫描速度的变化以及不同扫描速度下的加工效率对比。

(a)切缝深度随扫描速度的变化;(b)不同扫描速度下的切缝深度

Fig. 9 Variation of kerf depth with scanning speed and the comparison of laser processing efficiency at different scanning speeds. (a) Variation of kerf depth with scanning speed; (b) kerf depth at different scanning speeds

3.5 脉冲重复频率对加工效率的影响

影响激光加工效率和加工质量的另一个重要因素是脉冲重复频率。为更好地理解脉冲重复频率对材料加工的影响,引入光斑重叠率的概念。如上所述,激光切割通过单脉冲打孔和高重复频率脉冲相互连接形成切缝,实现材料的切割,如图 10 所示。

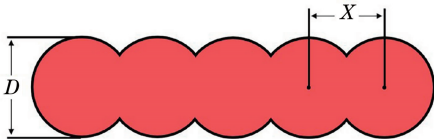


图 10 光斑重叠率示意图

Fig. 10 Illustration of spot overlapping

光斑直径确定后,光斑重叠率的大小与脉冲重复频率、激光扫描速度息息相关。在脉宽时间内,激光焦点的移动距离忽略不计,则光斑重叠率 R 可表示为

$$R = \frac{D - v/f}{D} = 1 - \left(\frac{v}{f \times D} \right), \quad (1)$$

式中: v 表示激光扫描速度; f 表示脉冲重复频率; D 表示激光聚焦光斑的直径。理论上,光斑重叠率越大,材料的去除效率越高,切缝的表面质量越高。根据(1)式可得到各重复频率对应的光斑重叠率,如表 3 所示。由表 3 可以看出,脉冲重复频率越大,光斑重叠率越大。

表 3 脉冲重复频率与光斑重叠率对照表

Table 3 Spot overlapping and pulse repetition rate

Pulse repetition /kHz	50	100	150	200	250	300	350
Spot overlapping /%	0	50	66.7	75	80	83.3	85.7
Pulse repetition /kHz	400	500	600	700	800	900	1000
Spot overlapping /%	87.5	90	91.7	92.9	93.8	94.4	95

平行于纤维轴向进行 PBO 纤维增强复合材料的切割实验,激光扫描速度为 1000 mm/s,扫描次数为 50,设定激光平均功率与脉冲重复频率一一对应,保证三组实验的单脉冲能量分别为 14, 10, 7 μJ 。实验中将光斑重叠率从 0 变化到 95% (此时相邻的两个脉冲光斑基本重合),实验结果如图 11 所示。可以看出:高能量脉冲下的材料去除效率更高;切缝深度随脉冲重复频率的增加而增加,这也就意味着材料的加工效率随重复频率的增加而增大。这是因为当单脉冲能量一定时,材料单位长度上输入的脉冲数增多,可以更有效地去除材料。但是对于激光器来说,确定所用功率后,高的脉冲重复频率必然会导致单脉冲能量降低,材料的去除效率也可能会降低。另外,过高的重复频率也会使不足以去除材料的剩余激光能量转化成热量累积在材料中,导致材料发生热损伤^[28]。所以,重复频率的选择需要综合考虑加工质量和加工效率。

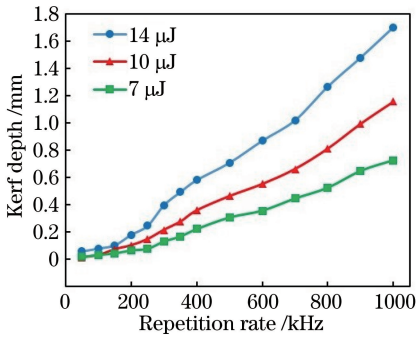


图 11 切缝深度随脉冲重复频率的变化规律

Fig. 11 Variation of kerf depth with pulse repetition rate

4 结 论

本文采用皮秒激光对 PBO 纤维增强复合材料进行了切割实验。355 nm 紫外皮秒激光由于具有超短脉冲激光的“冷加工”效应和紫外激光的光化学作用,比红外皮秒激光更适合用于 PBO 纤维增强复合材料的切割加工。PBO 纤维与环氧树脂同属于有机物,可以得到较高质量的切割截面。在紫外皮秒激光加工过程中,光化学作用占据主导地位。平行于纤维轴向进行扫描时,加工质量更好,加工效率更高。与此同时,渐进式下移激光焦平面可以使激光和材料进行更有效的相互作用,保证了材料切割表面的一致性;而且下移距离梯度越小,材料加工表面的质量越高,一致性越好。提高激光平均功率和脉冲重复频率都可以使材料的加工效率呈线性增长,但二者的内在物理机制是不同的。激光加工效

率会随着等效扫描速度的增加而下降,当激光平均功率、重复频率分别取 8 W 和 400 kHz 时,1000 mm/s 的扫描速度可以在不产生过大热损伤的情况下实现尽可能高的有效加工速度。

对于 PBO 纤维增强复合材料的激光去除物理机制,以及材料加工缺陷的避免和加工效率的提升,还需要进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Kumar S, Dang T D, Arnold F E, et al. Synthesis, structure, and properties of PBO/SWNT composites [J]. *Macromolecules*, 2002, 35(24): 9039-9043.
- [2] Hua J S, Li Y X, Liu X Y, et al. Graphene/MWNT/poly (p-phenylenebenzobisoxazole) multiphase nanocomposite via solution prepolymerization with superior microwave absorption properties and thermal stability [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(2): 1072-1081.
- [3] Stock J W, Zaeh M F, Spaeth J P. Remote laser cutting of CFRP: influence of the edge quality on fatigue strength [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8963: 89630T.
- [4] Zhang L L, Jiang Z H, Zhang W, et al. A review of laser processing fiber-reinforced flexible composite material [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(3): 238-243. 张玲玲, 姜兆华, 张伟, 等. 超强度纤维柔性复合材料激光加工工艺研究 [J]. *应用激光*, 2012, 32(3): 238-243.
- [5] Tagliaferri V, Di Ilio A, Visconti C. Laser cutting of fibre-reinforced polyesters [J]. *Composites*, 1985, 16 (4): 317-325.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Freitag C, Wiedenmann M, Negel J P, et al. High-quality processing of CFRP with a 1.1-kW picosecond laser [J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(4): 1237-1243.
- [9] Salama A, Li L, Mativenga P, et al. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 1-11.
- [10] Lau W S, Lee W B, Pang S Q. Pulsed Nd : YAG laser cutting of carbon fibre composite materials [J]. *CIRP Annals*, 1990, 39(1): 179-182.

- [11] Staehr R, Bluemel S, Hansen P, et al. The influence of moisture content on the heat affected zone and the resulting in-plane shear strength of laser cut thermoplastic CFRP [J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2015, 44(3): 111-116.
- [12] Thomas H, Bernhard K, Frank S. Micromachining with picosecond laser pulses [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2004, 199(10): 34.
- [13] Chen G Y, Zhu Z C, Yin J, et al. Experiment on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond laser processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402001.
陈根余, 朱智超, 殷超, 等. 单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402001.
- [14] Takahashi K, Tsukamoto M, Masuno S, et al. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222: 110-121.
- [15] 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*, 2010, 41(10): 1403-1408.
- [16] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L, et al. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. *Soviet Physics-JETP*, 1974, 39(2): 375-378.
- [17] Jiang Y. Research on cutting carbon-fiber reinforced plastic with picosecond pulsed laser and its connection with aluminum alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
蒋翼. 碳纤维复合材料皮秒激光切割及其与铝合金连接研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [18] Romoli L, Fischer F, Kling R. A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 449-457.
- [19] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.
- [20] Jia B S, Tang H P, Su C Z, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202010.
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.
- [21] Patel R S, Bovatsek J. Processing benefits of high repetition rate and high average power 355 nm laser for micromachining of microelectronics packaging materials [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6459: 64590H.
- [22] Srinivasan R, Maynebantou V. Self-developing photoetching of poly(ethylene terephthalate) films by far-ultraviolet excimer laser radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(6): 576-578.
- [23] Goeke A, Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 253-258.
- [24] Al-Sulaiman F A, Yilbas B S, Ahsan M. CO₂ laser cutting of a carbon/carbon multi-lamelled plain-weave structure [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(3): 345-351.
- [25] Wahab M S, Rahim E A, Rahman N A, et al. Laser cutting characteristic on the laminated carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite of aerospace structure panel [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 576: 503-506.
- [26] Kononenko T V, Freitag C, Komlenok M S, et al. Oxygen-assisted multipass cutting of carbon fiber reinforced plastics with ultra-short laser pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(10): 103107.
- [27] Niino H, Harada Y, Anzai K J, et al. 2D/3D laser cutting of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by fiber laser irradiation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9353: 935303.
- [28] Weber R, Freitag C, Kononenko T V, et al. Short-pulse laser processing of CFRP [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39(9): 137-146.