

激光加工纤维增强复合材料研究进展

张学聪^{1,2}, 钱静¹, 刘军¹, 赵全忠^{1*}

¹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;

²上海大学物理系, 上海 200444

摘要 激光加工纤维增强复合材料的常见方法是切割、钻孔和表面处理等, 本文综述了激光加工纤维增强复合材料的国内外研究进展, 重点聚焦碳纤维增强复合材料的激光加工方法, 阐述了激光加工纤维增强复合材料的特点和物理去除机制, 总结了激光工艺参数对加工质量和加工效率的影响规律, 最后展望了激光加工纤维复合材料的发展与挑战。

关键词 激光光学; 激光加工; 纤维增强复合材料; 激光与物质相互作用; 热损伤; 加工效率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111432

Recent Process in Laser Processing of Fiber-Reinforced Composites

Zhang Xuecong^{1,2}, Qian Jing¹, Liu Jun¹, Zhao Quanzhong^{1*}

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

Abstract Cutting, drilling, and surface treatment are the methods that are commonly used for the laser processing of the fiber-reinforced composites. In this study, the domestic and international research progress with respect to the laser processing of the fiber-reinforced composites are reviewed by mainly focusing on the processing of the carbon fiber-reinforced composites. Further, the characteristics and physical removal mechanism associated with the laser processing of the fiber-reinforced composites are presented, and the effects of the laser processing parameters on the processing quality and efficiency are summarized. Finally, we present the development and the associated difficulties of the laser processing of the fiber-reinforced composites.

Key words laser optics; laser processing; fiber-reinforced composites; laser-material interaction; thermal damage; processing efficiency

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 160.4890; 160.5470

1 引言

纤维增强复合材料一般是纤维原丝, 比如碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维等, 与树脂溶胶混合并固化后, 再按照不同的铺设方向铺叠层压而成^[1]。纤维铺设角度可以根据不同的使用要求进行设计, 可以为单向多层排布, 也可以为多向叠层排布^[2-3]。由于纤维增强复合材料具有高比强度、高比模量、低密度和热稳定性好等一系列优良特性, 其在航空航天、军工武器和电力电子等领域已有广泛的应用^[4-5]。

通常, 纤维增强复合材料产品是直接纺织成型, 但很多情境下产品不满足精度或装配要求, 还需对其进行二次加工, 所以人们相继开发了机械加工、超声振动辅助加工、水射流加工和电火花加工等工艺方法。机械加工^[6-10]已经形成了一套专用刀具和特定工艺, 具有良好的加工效果。随着应用的规模化, 机械加工面临着刀具磨损严重且种类繁多的问题, 这导致制造成本增高, 且加工过程中易发生纤维断裂、结构破坏和切削热损伤等加工质量问题。超声振动辅助加工^[11-13]是对刀具或工件施加超声振动,

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-02-20; 录用日期: 2020-02-26

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

* E-mail: zqz@siom.ac.cn

通过刀具的切削、高频微撞击和超声的空化作用相结合进行材料去除,但装置结构复杂,机械加工存在的缺陷也不能完全避免。电火花加工^[14-17]通过两个电极间的脉冲性放电产生的局部瞬时高温进行材料去除,但只能加工导电材料,并且加工效率低,不适合大规模工业应用。水射流加工^[18-20]是利用高压水带动磨粒对材料进行冲蚀去除,加工热损伤小,但是会形成锥角、切口变形和材料分层等加工缺陷,加工精度难以控制。

激光的应用使得以上加工方式的不利因素或缺点得以消除,被认为是应用前景非常广阔的纤维增强复合材料加工方法^[21]。激光加工是利用聚焦的高能量密度激光照射材料,使其迅速熔化、汽化或化学降解,从而实现材料分离,达到加工目的^[22-23]。激光加工是无应力加工,对材料结构的破坏小;没有刀具磨损,加工成本低廉;聚焦光斑可达微米级别,加工精度高且加工柔性好。超快激光具有极窄的脉冲宽度和极高的峰值强度,可以实现材料的“冷加工”,进一步提高了加工质量。

激光加工纤维增强复合材料虽然解决了刀具磨损、材料结构破坏等问题,但由于纤维和树脂基体的热力学性能差异大,且各层铺设方向不尽相同,纤维增强复合材料具有明显的各向异性,加工过程中会产生热影响区(HAZ)过大、纤维拔出、材料分层和纤维末端膨胀等热损伤缺陷^[24]。国内外学者经过大量理论及实验验证发现,不同波长、不同脉宽的激光与纤维增强复合材料的物理反应机制存在明显差别,同时他们发现通过优化激光工艺参数可以有效提高加工质量和加工效率^[25]。故此,本文梳理了国内外学者在激光加工方面的研究成果,可以帮助人们更好地理解激光加工纤维增强复合材料的物理去除机制、加工特点及加工难点,总结了激光工艺参数对加工质量和加工效率的影响规律,可为激光加工纤维增强复合材料技术的进一步发展提供参考。

2 连续激光加工纤维增强复合材料

激光加工纤维增强复合材料时产生的热效应与激光波长、激光工作模式、加工速度及复合材料的热学性能等参数密切相关。1985年,Tagliaferri等^[26]做了开创性的工作,他们用500W的CO₂激光分别切割了芳纶纤维、碳纤维和玻璃纤维增强复合材料(分别简称AFRP、CFRP和GFRP),他们指出,纤维和树脂的热学性能是影响切割质量的主要因素,所得到的切割面质量与光束和材料的相互作用时间

联系密切。由于芳纶纤维与树脂基体具有相似的物理性质,所以AFRP相比其他两种复合材料可以得到更好的加工质量。Caprino等^[27]提出了一个基于激光功率、材料厚度和光斑直径的单因素温度模型,可以预测CO₂激光切割纤维增强复合材料所能够达到的最大切割速度,并对碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维三种复合材料进行了实验论证,结果与模型预测较吻合,如图1所示。他们还根据切面形貌对切割质量进行了分类,发现切割质量与激光工艺参数密切相关,切割速度越大,切割质量越好。Cenna等^[28]建立了基于激光束空间分布、激光与材料相互作用时间、激光波长的吸收系数和材料热性能的理论模型,预测了材料的激光入口宽度、出口宽度和材料去除率等,并用CO₂激光分别对AFRP和GFRP进行了切割实验,计算结果与实验结果相关性较好,说明利用理论模拟计算已经可以较准确地得到CO₂激光的加工结果。

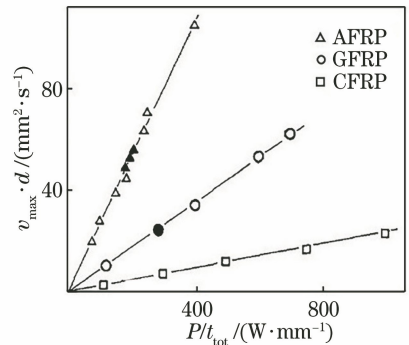


图1 实验结果和模型预测的结果^[27]

Fig. 1 Experimental and predicted results^[27]

Goeke等^[29]研究发现,波长为1.07 μm的光纤激光主要被纤维吸收,然后纤维将热量传递到树脂基体中,而波长为10.6 μm的CO₂激光则可以被树脂基体直接吸收,通过聚合物链的振动将激光辐射转化为热能,材料对不同波长激光的吸收率影响了材料的热影响区尺寸。他们指出两种激光都在工业应用上具备发展潜力,CO₂激光在切割较厚的CFRP方面比光纤激光更具优势。Niino等^[30]利用1 kW红外光纤激光切割CFRP,结果表明运用扫描振镜带动高功率激光对材料进行高速多道扫描时可以得到干净平整的切割截面和很小的热影响区,如图2所示。另外,在实验中用紫外激光和红外激光照射CFRP,观测到的材料烟羽辐射光谱有很大差异,这表明二者加工材料的物理反应机制有明显区别。

Fuchs等^[31]分别用单模光纤激光器和多模光纤激光器进行了远程激光切割和气体辅助激光切割

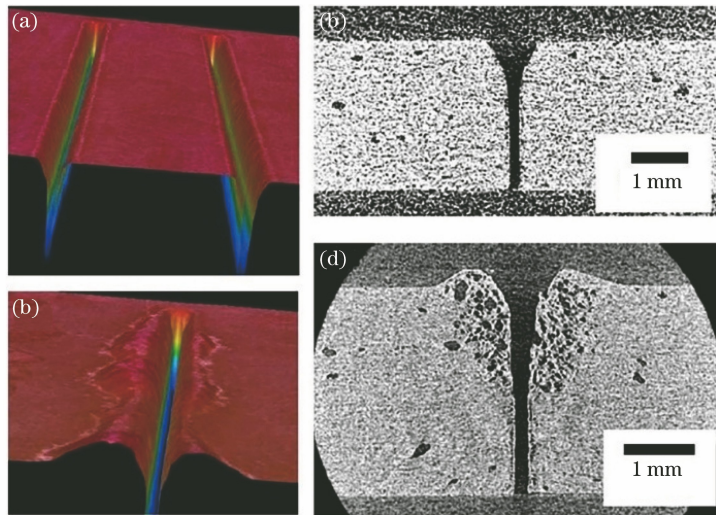


图2 光纤激光切割的CFRP板材图片^[30]。(a)表面3D图片:0.8 m/s,扫描15次;(b)表面3D图片:0.2 m/s,扫描4次;(c)X-CT图像:0.8 m/s,扫描15次;(d)X-CT图像:0.2 m/s,扫描4次

Fig. 2 Pictures of CFRP plate after fiber laser cutting^[30]. (a) Surface 3D image: 0.8 m/s, 15 passes; (b) surface 3D image: 0.2 m/s, 4 passes; (c) X-CT image: 0.8 m/s, 15 passes; (d) X-CT image: 0.2 m/s, 4 passes

实验,讨论了这两种不同工艺的优点及其在规模化生产中的适用性,3 mm厚的CFRP的最大切割速度为12 m/min,两种工艺都得到了较高的边缘质量。Herzog等^[32]用30 kW的超高功率光纤激光器对1.4 mm厚的CFRP进行了高速扫描(85 m/s)切割实验,获得的最小热影响区宽度为78 μm ,有效切割速度达97.8 m/min,这证明连续激光在CFRP的高速高质切割中具有广阔的应用前景。

Stock等^[21]比较了机械加工、水射流加工和激光加工等方法切割CFRP所得工件的疲劳强度,结

果表明激光加工对材料疲劳强度的影响最小,综合考虑加工质量及加工效率,指出激光加工是CFRP加工中具有广阔应用前景的加工方法。此外,他们还发现调整扫描路径之间的时间间隔可以有效控制热影响区的形成,如图3所示。Walter等^[33]对光纤激光加工CFRP过程中产生的废气排放物进行了研究,发现其中包含一氧化碳等有毒有害物质,选用恰当的切割方法,如多道扫描切割和延长扫描间隔时间等,不仅可以提高加工质量,也会减少有害物质的排放。

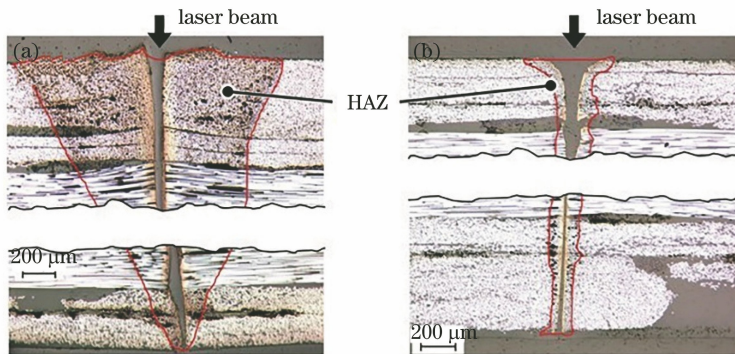


图3 扫描间隔时间对材料热影响区的影响^[21]。(a)无时间间隔;(b)时间间隔为600 ms

Fig. 3 Influence of scanning delay time on HAZ of the material^[21]. (a) Without time interval; (b) time interval of 600 ms

Staehr等^[34]用1 kW单模光纤激光切割不同含水率的CFRP,如图4所示,随着材料含水率的增大,热影响区宽度增大,材料剪切模量会下降,这是因为热影响区中包含由水蒸发引起的材料孔隙,可以通过对CFRP进行干燥和实施多道切割策略来

提高材料加工质量。

3 脉冲激光加工纤维增强复合材料

激光的波长、工作模式、脉冲宽度、平均功率、脉冲重复频率和扫描速度等工艺参数均对材料的激光

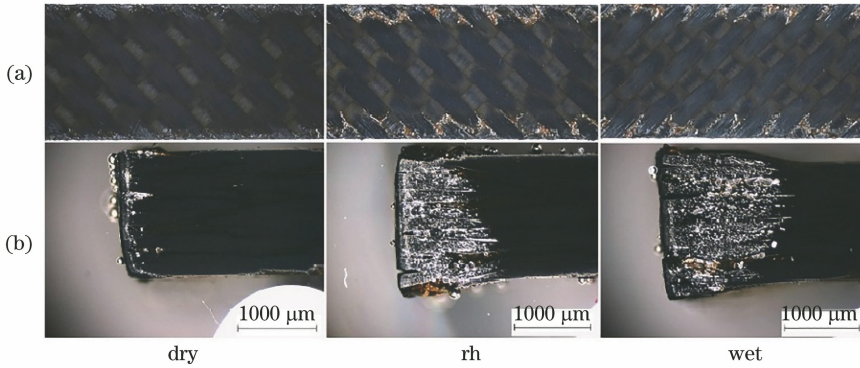


图4 激光切割不同含水率的CFRP^[34]。(a)表面图;(b)切面图

Fig. 4 Laser cutting CFRP with different moisture content^[34]. (a) Surface pictures; (b) cross sections

加工质量和加工效率有明显影响。Riveiro 等^[25,35]研究了 CO₂ 激光在连续和脉冲两种工作模式下加工 CFRP 的工艺参数与加工质量的关系,结果表明 CO₂ 激光在脉冲模式下相比连续模式得到了更小的热影响区,这是因为脉冲激光的每两个脉冲之间存在时间间隔,这有利于材料冷却,可以使材料热损伤比使用连续激光时更小。他们还指出,激光加工纤维增强复合材料产生的热影响区是不可避免的,但可以通过正确地选择加工参数使热影响区最小化。并且激光加工在切割比较薄的纤维增强复合材料时具有较高的应用价值,而水射流加工更适合切割较厚的纤维增强复合材料。

3.1 短脉冲激光

Mathew 等^[36]总结了影响纤维增强复合材料激光加工质量的因素并绘制了图 5,他们指出由于碳纤维和树脂基体的热学性能差别很大,使用连续激

光难以保证高质量的切割,毫秒 Nd : YAG 激光具有较高的光束强度和较好的聚焦性能,在切割过程中产生的热损伤较小,有助于高质量切割 CFRP。并且提出了一个以切割速度、脉冲能量、脉冲持续时间、重复频率和辅助气体压力为变量,热影响区尺寸及切口锥度为响应变量的预测模型,利用响应曲面法确定了激光工艺参数的最佳范围。花银群等^[37-38]也从不同的角度分析了这些激光工艺参数对材料切口几何形状和热影响区尺寸的影响。

Herzog 等^[39]研究了脉冲 Nd : YAG 激光、连续模式的碟片激光和 CO₂ 激光加工 1.5 mm 厚 CFRP 的加工质量,结果显示脉冲 Nd : YAG 激光加工产生的材料热损伤最小,又因为激光切割 CFRP 的静力强度与材料热影响区尺寸线性相关,所以它对材料强度的影响也最小,且高于材料制造商给出的标称强度。虽然波长 1.06 μm 的

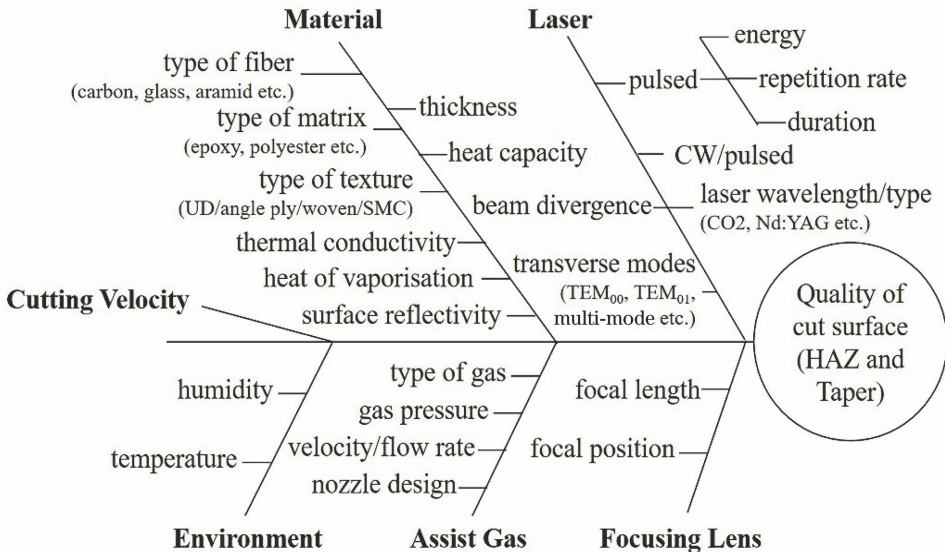


图5 纤维增强复合材料激光加工质量的影响因素^[36]

Fig. 5 Factors affecting quality of laser-processed fiber-reinforced composites^[36]

Nd:YAG激光的功率相比波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光小得多,但却可以得到更小的光斑直径和脉冲宽度,从而实现低功率高效加工^[40]。Dell'Erba 等^[41]分别用脉宽可调的毫秒 CO_2 激光和准分子激光(脉

宽为 $25\ \text{ns}$ 、波长为 $248\ \text{nm}$)加工纤维增强复合材料,结果表明因准分子激光与复合材料之间没有热传递,所以得到了更好的切削质量,如图 6 所示,但加工效率很低,不适合工业应用。

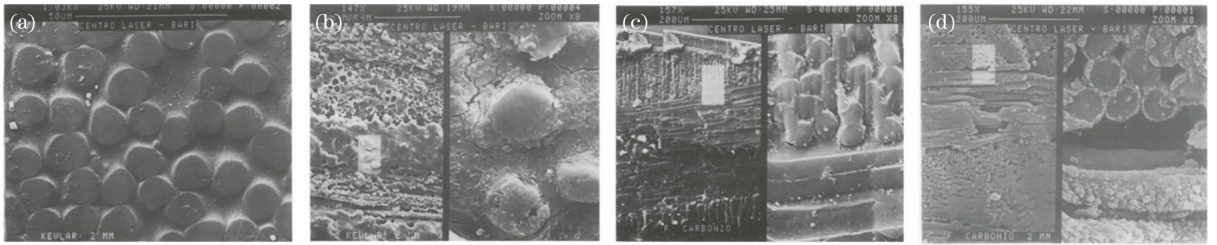


图 6 准分子激光和 CO_2 激光分别切割 AFRP 和 CFRP 的切面形貌^[41]。(a)准分子激光切割 AFRP; (b) CO_2 激光切割 AFRP; (c)准分子激光切割 CFRP; (d) CO_2 激光切割 CFRP

Fig. 6 Section morphologies of excimer laser and CO_2 laser respectively cutting AFRP and CFRP^[41]. (a) Excimer laser cutting AFRP; (b) CO_2 laser cutting AFRP; (c) excimer laser cutting CFRP; (d) CO_2 laser cutting CFRP

庞思勤等^[40]使用毫秒 Nd:YAG 激光加工 CFRP,研究表明红外激光加工机理以热蒸发和热融化为主,当辅助气体含氧时,氧化放热反应会增强光热作用,使加工速度变快。Yung 等^[42]用紫外纳秒激光在 GFRP 上钻孔,指出红外激光主要依靠光热转换进行材料热烧蚀,材料热损伤较大,而 $355\ \text{nm}$ 的紫外激光产生的单光子的能量较高,可以直接打断材料中的化学键实现材料去除,这种光化学作用可以有效降低材料热损伤^[43]。实验结果显示,激光功率和脉冲重复频率是影响热影响区尺寸的重要参数:脉冲重复频率为定值时,热影响区的等效宽度[定义如图 7 和(1)式所示]随平均激光功率的增加而增加;平均功率一定时,热影响区的等效宽度随着重复频率的增加而增加,在 $7\ \text{kHz}$ 时到达峰值,随着脉冲重复频率的进一步提高,热影响区的等效宽度开始减小。激光在低功率、低重复频率模式工作时加工质量更好。热影响区的等效宽度的定义式为

$$W_e = \frac{A_1 + A_2}{L_1 + L_2}, \quad (1)$$

式中: A_1 和 A_2 表示材料切缝两侧的热影响区面积; L_1 和 L_2 表示切缝两侧热影响区沿材料厚度方向的长度。

Negarestani 等^[24]利用纳秒 Nd:YAG 激光加工 CFRP,通过响应曲面法确定了激光加工的最优参数,并研究了辅助气体中氧气含量对切割质量的影响。结果表明,将氧气与氮气的混合气体用作切割保护气,加工效果要比使用纯氧或纯氮作为保护气体好得多,如图 8 所示,这是因为氧气在一定程度

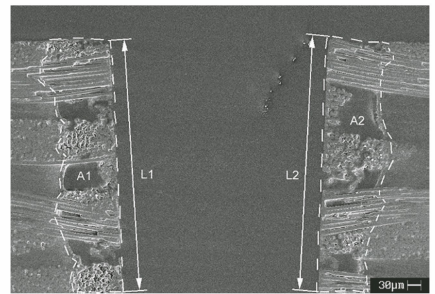


图 7 热影响区等效宽度示意图^[42]

Fig. 7 Schematic of HAZ equivalent width^[42]

上增大了材料去除率,而氮气又可以让材料加工区域温度迅速降下来。同时指出辅助气体的压力越大,加工质量越好。

Takahashi 等^[44]利用高功率红外纳秒激光配合扫描振镜切割了 CFRP,实验结果表明扫描间距和扫描速度对切割质量有较大的影响,他们采用如图 9 所示的非零间距激光扫描方式消除了加工过程中产生的粉尘和废气对激光的屏蔽作用,使激光更好地作用于材料去除,从而获得了良好的加工质量。

Li 等^[45]利用二极管泵浦激光器产生的紫外纳秒激光($355\ \text{nm}$)加工 CFRP,通过优化激光参数可加工出具有最小热影响区($50\ \mu\text{m}$)的孔。研究表明,为了减小热影响区,需要缩短激光与材料的相互作用时间,可以通过使用短脉冲激光和提高激光扫描速度来实现。同时,他还指出多道扫描切割方式可以利用切碎纤维间的蓄热来提高加工效率,但也应该注意蓄热带来的材料热损伤过大等问题,应保留足够的散热路径或时间,从最外圈开始切割,以降低孔间或边缘的热量积聚,如图 10 所示。

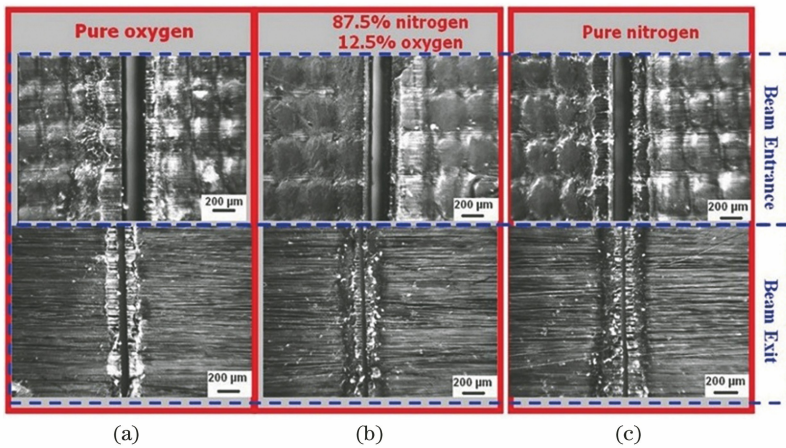


图 8 激光入射侧和出口侧的切缝形貌^[24]。(a)纯氧;(b) 12.5%氧气混合 87.5%氮气;(c)纯氮

Fig. 8 Cut kerf morphologies of laser incident side and exit side^[24]. (a) Oxygen; (b) 12.5% oxygen mixed with 87.5% nitrogen; (c) nitrogen

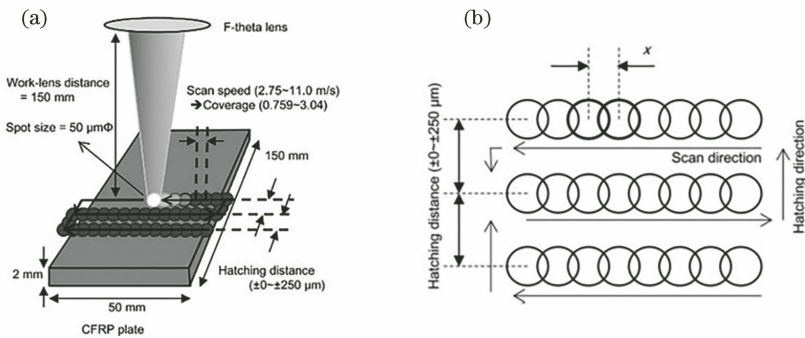


图 9 激光多道扫描示意图^[44]。(a)激光扫描方式;(b)激光扫描间距

Fig. 9 Schematic of laser multi-pass scanning^[44]. (a) Laser scanning pattern; (b) Laser scanning pitch

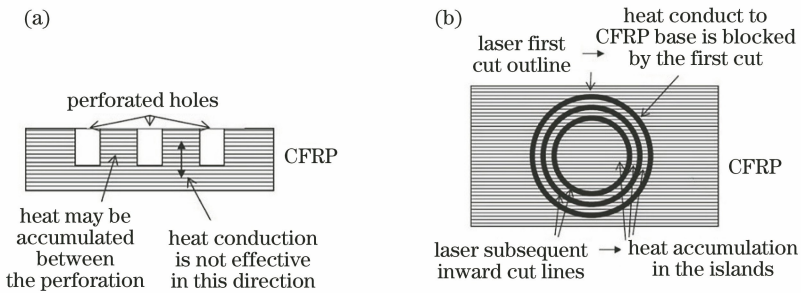


图 10 激光加工 CFRP 的材料蓄热示意图^[45]。(a)孔间热累积;(b)激光扫描路径

Fig. 10 Schematic of material heat accumulation in CFRP during laser machining^[45]. (a) Heat accumulation between holes; (b) laser scanning path

Al-Sulaiman 等^[46-47]利用毫秒激光切割 CFRP 时发现,纤维排布方向不仅影响热影响区的宽度,而且影响切割深度,切割时应使大多数纤维轴向平行于激光扫描方向。实验还证明激光加工的速度比电火花加工要快一个数量级,并且激光加工产生的切割面较电火花加工产生的切割面更加平整均匀。García 等^[48-49]利用毫秒 Nd : YAG 激光切割 CFRP,发现脉冲能量与重复频率对热影响区尺寸、

切割锥角、切缝宽度和深度具有显著影响,这两个参数共同作用于加工结果,当一个参数的数值改变时,相应的加工结果也会发生变化。要减小热影响区尺寸和切缝宽度就应该使脉冲持续时间尽可能短,脉冲能量越高切缝越深,重复频率越高材料的热影响区越大,扫描速度越快热影响区越小,这就需要在激光总作用时间和样品的有效冷却之间取得平衡。

Bluemel 等^[50]利用脉冲宽度为 30 ns 的红外激

光切割 CFRP,他们指出激光模式好、脉冲能量大的激光束可以得到高效高质的加工效果,并且在激光脉冲能量较大时脉冲重复频率对热影响区的影响较小。Jaeschke 等^[51]指出 CFRP 中的碳纤维表现出良好的光学吸收和导热性能,而树脂基体则相反,它通过碳纤维的传热间接被加热,使得激光加工热损伤较大,使用短脉冲纳秒激光则可以有效解决这个问题,

他们用红外纳秒激光加工 CFRP,得到了较好的加工质量,如图 11 所示。热影响区宽度会随着脉宽的增大而增大,因为脉宽增大会导致激光峰值功率下降,材料去除量降低,所吸收的热量更多地用于造成热损伤,通过激光技术提高激光功率和降低脉宽,以及采用脉冲整形、钻孔光学等工艺方法将使得激光加工技术被更好地应用于汽车、飞机等行业生产中。

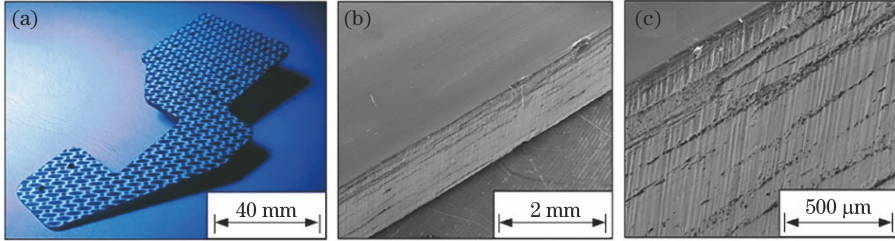


图 11 红外纳秒激光加工的 CFRP 飞机零件^[51]。(a)激光切割的零件轮廓;(b)(c)不同放大倍率的 CFRP 边缘扫描电镜图片
Fig. 11 CFRP aircraft parts processed by IR nanosecond laser^[51]. (a) Aircraft part cutting by laser; (b)(c) SEM photos of CFRP edge with different magnifications

3.2 超短脉冲激光

Weber 等^[52]指出应提高高重复频率脉冲激光的光斑移动速度来减少后续脉冲数,以降低热累积效应,图 12 所示为脉冲重复频率分别为 80 kHz 和 800 kHz 时的热累积模型,采用低重复频率激光加工时材料具备充足的时间进行散热,热量累积很小,当采用高重复频率激光时,热量积累会越来越多,更容易造成材料热损伤。

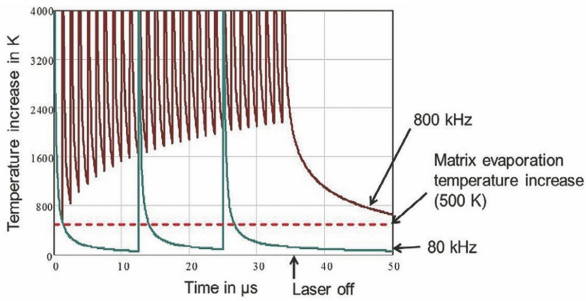


图 12 不同重复频率的激光脉冲引起的“热累积”^[52]
Fig. 12 “Heat accumulation” caused by laser pulses with different repetition frequencies^[52]

Freitag 等^[53]采用 1.1 kW 红外皮秒激光切割 2 mm 厚的 CFRP,计算出防止连续脉冲热累积所需要的最小扫描速度和最大扫描次数,以保证加工质量良好,实验获得了低于 20 μm 的热损伤尺寸,有效切割速度达到 0.9 m/min,充分展现出超短脉冲激光加工 CFRP 的优势所在。Salama 等^[54]利用 400 W 红外皮秒激光对 6 mm 厚的 CFRP 进行钻孔加工,通过优化工艺参数实现了低于 25 μm 的热影

响区。实验结果表明,随着激光功率的降低和扫描速度的提高,热影响区尺寸和刻蚀深度减小。为消除加工产生的切面锥角,设计了样品倾斜技术和激光束离场技术,如图 13 所示,都得到了竖直的切面。

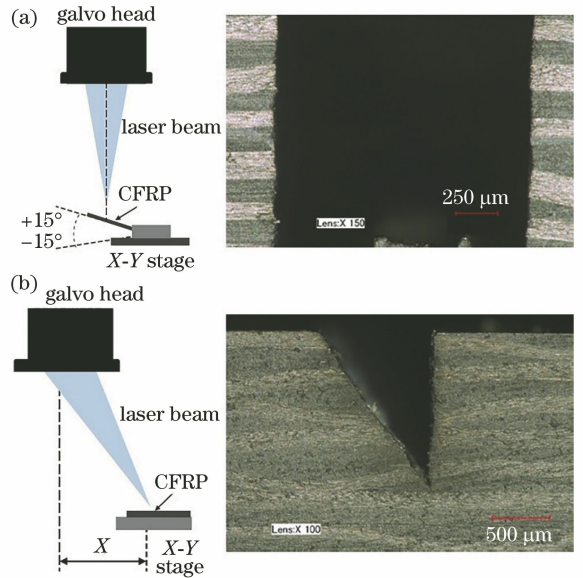


图 13 锥形消除技术^[54]。(a)样品倾斜技术;
(b)激光束离场技术

Fig. 13 Taper elimination techniques^[54]. (a) Sample tilting technique; (b) laser beam offsite technique

蒋翼等^[55]用红外皮秒激光加工 CFRP,他们将材料的热损伤尺寸降到了 5 μm。并且发现热影响区尺寸随激光参数变化的规律:随着激光平均功率的增大,其先减小再增大;热影响区尺寸随脉冲重复频率的增加而增大;随扫描速度的增大逐渐减小,最

后热影响区尺寸逐渐趋于一个稳定值。Kononenko 等^[56]针对氧气辅助的绿光皮秒激光切割 CFRP 进行了研究, 结论表明使用高氧气流辅助加工会显著提升加工效率, 尤其是在切缝深处, 此时氧气可以弥补切缝深处因激光通量减少而导致的材料热烧蚀量变小。他们还提出了一种理论模型, 用来论证相比于垂直扫描, 激光平行于纤维轴向扫描时的切缝更宽的原因, 如图 14 所示: 激光入射进材料后, 垂直于纤维轴向的激光被优先反射, 导致激光作用区域垂直于纤维轴向进行延伸。所以激光平行于纤维轴向扫描时, 切缝变宽, 如图 14(c) 所示; 激光垂直于纤维轴向扫描时, 切缝不变宽。

4 激光加工纤维增强复合材料的创新研究方法

Bluemel 等^[57]提出了两种测量激光加工温度场

分布的方法: 一是在树脂基体中掺杂测温漆, 通过观察加工后材料内部的颜色分布, 来确定加工过程中的温度场分布; 二是在 CFRP 的不同层间设置热电偶, 可以对材料内部温度实时监测。Canisius 等^[58]指出红外激光会穿透树脂被纤维吸收, 碳纤维首先被汽化, 导致树脂剥落形成较大的热影响区, 所以他们向树脂基体中掺杂了激光波长相关的吸收添加剂和炭黑颗粒, 提高了树脂基体对红外激光的吸收率, 减小了材料热损伤。花银群等^[36]利用 500 W 的毫秒 Nd: YAG 激光器, 分别在空气中和水下切割了 CFRP, 结果表明水下切割能有效减小热影响区尺寸。Jaeschke 等^[59]在用 CO₂ 激光切割 CFRP 的同时, 用喷嘴向加工表面喷射聚酰胺粉, 如图 15 所示, 激光与材料相互作用所产生的热量会使粉末熔化, 填补进树脂汽化后形成的孔隙, 提高了 CFRP 的表面加工质量。

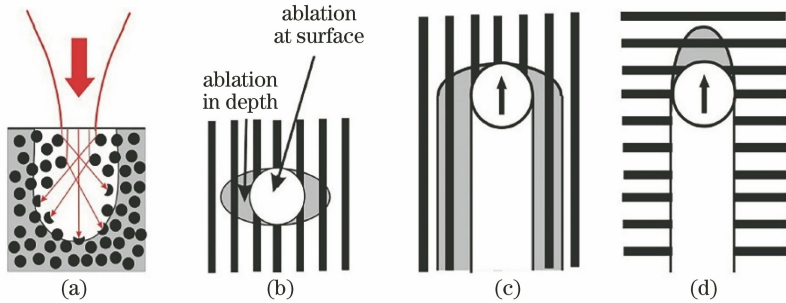


图 14 材料各向异性对切缝宽度的预期影响^[56]。(a) 激光的优先反射; (b) 各向异性延伸; (c) 切缝变宽; (d) 切缝宽度不变

Fig. 14 Expected influences of material anisotropy on kerf width^[56]. (a) Preferential reflection of laser; (b) anisotropic stretching; (c) kerf widening; (d) constant width of kerf

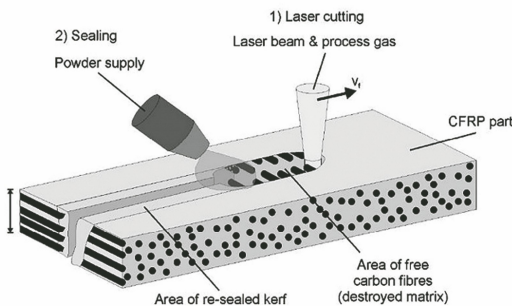


图 15 激光与粉体供给的设置^[59]

Fig. 15 Set-up of laser and powder supply^[59]

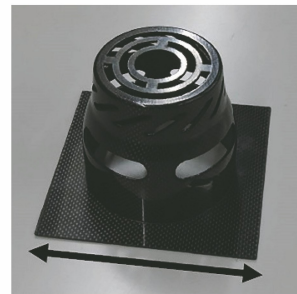


图 16 激光切割三维 CFRP 零件^[60]

Fig. 16 Laser cutting 3D CFRP sample^[60]

Niino 等^[60]利用连续红外光纤激光切割 CFRP, 指出可以通过控制激光的扫描次数实现指定深度的切割。他们利用五轴激光切割机床切割了三维 CFRP 零件, 如图 16 所示, 证明了利用激光切割三维零件的可行性。

Rauh 等^[61-63]研究了激光参数对材料表面处理

质量的影响, 以及激光清洗复合材料表面涂层的工艺, 以提高纤维增强复合材料的胶接强度。Oliveira 等^[64]报道了可以选用合适的飞秒激光参数, 去除 CFRP 表面的环氧树脂而使碳纤维暴露在表面。另外, 超快激光可以在碳纤维表面形成亚微米周期结构, 改善碳纤维与基体间的粘接性能。

5 结 论

本文分别对连续激光和脉冲激光在纤维增强复合材料加工中的国内外研究进展进行了梳理。首先,连续激光加工纤维增强复合材料主要基于热去除机制,激光功率高,结合适当的扫描策略可以对纤维增强复合材料进行高效率的切割,并且可以通过理论计算较准确地预测激光加工结果。其次,脉冲激光固有的脉冲时间间隔有利于材料冷却,可以得到高质量的加工边缘,超快激光的“冷加工”机制使得材料加工质量得到进一步提高,脉冲激光的应用要点在于激光参数和加工方法的合理选择。紫外脉冲激光可用于实现材料的光化学去除,在激光钻孔领域优势明显。最后,介绍了几种激光加工的新技术和新方法。研究表明,激光在纤维增强复合材料的加工领域优势明显,具备规模化应用的基础,具有广阔的发展前景。

目前,研究工作主要是优化激光工艺参数和加工方法,以在提高激光加工效率和降低材料热损伤方面取得平衡,对激光与纤维增强复合材料的相互作用机制缺乏更深入的研究,对材料加工区域的一致性关注较少。与规模化的工业应用还有一定距离,例如激光难以切割厚度较大的材料,激光加工产生的锥度使钻孔的深度与平行度受到限制,材料的加工效率还有待提高等。今后,针对纤维增强复合材料的激光加工质量和效率提高,加工实用性和加工限制的突破仍需持续研究,紧密结合近些年发展的激光并行加工、高能量脉冲激光加工、多技术复合加工等新型加工方式,对纤维增强复合材料在航空航天、军工武器、能源交通、电力电子等科技领域的应用具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] Khoathane M C, Vorster O C, Sadiku E R. Hemp fiber-reinforced 1-pentene/polypropylene copolymer: the effect of fiber loading on the mechanical and thermal characteristics of the composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, 27(14): 1533-1544.
- [2] Xue Q M. Study on laser cutting of high modulus carbon fiber reinforced plastic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
薛庆明. 高模量碳纤维增强复合材料激光切割技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] Yu D Y. Numerical simulation of laser cutting process of single-layer carbon fiber reinforced plastics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
于冬洋. 单层碳纤维复合材料激光切割过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [4] Malkapuram R, Kumar V, Negi Y S. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, 28(10): 1169-1189.
- [5] Wambua P, Ivens J, Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(9): 1259-1264.
- [6] Zhang H J. Study on the drilling technology of CFRP [D]. Beijing: Beihang University, 1998.
张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [7] Bao Y J, Gao H, Li F Q. Researches on drilling CFRP(carbon fiber reinforced plastics) with diamond electroplated drill bit [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2009, 29(3): 38-42.
鲍永杰, 高航, 李凤全. 电镀金刚石钻头钻削碳纤维复合材料研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2009, 29(3): 38-42.
- [8] Zhang J G, Wang X C, Shen B, et al. Effect of boron and silicon doping on improving the cutting performance of CVD diamond coated cutting tools in machining CFRP [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 41: 285-292.
- [9] Yang J, Li P N, Tang S W, et al. Process of drilling carbon fiber reinforced composite with diamond coated drills[J]. *Machine Design & Research*, 2014, 30(5): 119-124.
杨进, 李鹏南, 唐思文, 等. 金刚石涂层钻头钻削碳纤维增强复合材料的工艺[J]. *机械设计与研究*, 2014, 30(5): 119-124.
- [10] Liu J, Chen G, Ji C H, et al. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 86: 89-103.
- [11] Zemann R, Kain L, Bleicher F. Vibration assisted machining of carbon fibre reinforced polymers [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 69: 536-543.
- [12] Liu J, Zhang D Y, Qin L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53

- (1): 141-150.
- [13] Ma F J. The development of ultrasonic assisted machining system and its application in machining of composite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
马付建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [14] Zhang J Q, Wang W, Zhang W, et al. Experimental study on high speed electrical discharge machining of carbon fiber-reinforced plastic [J]. *Electromachining & Mould*, 2014(2): 21-24.
张俊清, 汪炜, 张伟, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的高速电火花穿孔加工试验研究[J]. *电加工与模具*, 2014(2): 21-24.
- [15] Lau W S, Wang M, Lee W B. Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1990, 30(2): 297-308.
- [16] Teicher U, Müller S, Münzner J, et al. Micro-EDM of carbon fibre-reinforced plastics [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 320-325.
- [17] He Z F. Research on the WEDM characteristics of carbon fiber reinforced plastic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
何振丰. 碳纤维增强复合材料电火花线切割加工特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] Shanmugam D K, Nguyen T, Wang J. A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(6): 923-929.
- [19] Thongkaew K, Wang J, Yeoh G H. An investigation of hole machining process on a carbon-fiber reinforced plastic sheet by abrasive waterjet [J]. *Advanced Materials Research*, 2016, 1136: 113-118.
- [20] Li Z Y. Causes and elimination strategies of defects in abrasive water jet machining on polymer matrix composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
李宗原. 聚合物基复合材料磨料水射流加工缺陷成因及消减策略[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [21] 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.
- [22] Sun F, Song Y Y, Zhao Q L, et al. Influence of off-axis amount on dynamics performance of gas in laser cutting process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0402003.
孙凤, 宋园园, 赵庆龙, 等. 激光切割中离轴量影响气体动力学性能的研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0402003.
- [23] 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.
- [24] Negarestani R, Li L, Sezer H K, et al. Nano-second pulsed DPSS Nd : YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49: 553-566.
- [25] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, et al. Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(8): 1400-1409.
- [26] Tagliaferri V, di Ilio A, Visconti C. Laser cutting of fibre-reinforced polyesters [J]. *Composites*, 1985, 16(4): 317-325.
- [27] Caprino G, Tagliaferri V. Maximum cutting speed in laser cutting of fiber reinforced plastics [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1988, 28(4): 389-398.
- [28] Cenna A A, Mathew P. Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(1): 105-113.
- [29] Goeke A, Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 253-258.
- [30] Niino H, Kawaguchi Y, Sato T, et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 1 kW CW fiber laser irradiation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8067: 860714.
- [31] Fuchs A N, Schoeberl M, Tremmer J, et al. Laser cutting of carbon fiber fabrics [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 372-380.
- [32] Herzog D, Schmidt-Lehr M, Canisius M, et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic using a 30 kW fiber laser [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S28001.
- [33] Walter J, Hustedt M, Staehr R, et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics-investigation of

- hazardous process emissions [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1153-1164.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Mathew J, Goswami G L, Ramakrishnan N, et al. Parametric studies on pulsed Nd : YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89/90: 198-203.
- [37] Hua Y Q, Xiao T, Xue Q, et al. Experimental study about laser cutting of carbon fiber reinforced polymer [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 565-570.
花银群, 肖淘, 薛青, 等. 激光切割碳纤维复合材料的实验研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(5): 565-570.
- [38] Leone C, Genna S. Heat affected zone extension in pulsed Nd : YAG laser cutting of CFRP [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 140: 174-182.
- [39] 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 and Manufacture*, 2008, 48(12/13): 1464-1473.
- [40] Pang S Q, Liu W C. A study on the process and mechanisms of laser machining of high-performance composites [J]. *Acta Armamentarii*, 1992, 13(4): 84-91.
庞思勤, 刘伟成. 激光加工高性能复合材料的工艺与机理研究 [J]. *兵工学报*, 1992, 13(4): 84-91.
- [41] Dell'Erba M, Galantucci L M, Miglietta S. An experimental study on laser drilling and cutting of composite materials for the aerospace industry using excimer and CO₂ sources [J]. *Composites Manufacturing*, 1992, 3(1): 14-19.
- [42] 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.
- [43] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.
- 朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1200001.
- [44] 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.
- [45] 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 and Manufacturing*, 2010, 41(10): 1403-1408.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] García A J, Pilar Villar M, Araújo D, et al. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) Nd : YAG laser machining [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 2104.
- [49] 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.
- [50] Bluemel S, Bastick S, Staehr R, et al. Laser cutting of CFRP with a fibre guided high power nanosecond laser source-influence of the optical fibre diameter on quality and efficiency [J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 328-335.
- [51] Jaeschke P, Stolberg K, Bastick S, et al. Cutting and drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 70 W short pulse nanosecond laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8963: 89630S.
- [52] Weber R, Freitag C, Kononenko T V, et al. Short-pulse laser processing of CFRP [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 137-146.
- [53] 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.
- [54] 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): 73.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Bluemel S, Staehr R, Jaeschke P, et al. Determination of corresponding temperature distribution within CFRP during laser cutting [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 408-414.
- [58] Canisius M, Herzog D, Schmidt-Lehr M, et al. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic with an absorber transparent for visible spectrum [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(3): 032003.
- [59] Jaeschke P, Herzog D, Noelke C, et al. Investigations into the sealing of heat damaged areas by applying polymer powders during laser cutting of carbon fiber reinforced composites [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(7): 587-590.
- [60] Niino H, Harada Y, Anzai K, et al. 2D/3D laser cutting of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by fiber laser irradiation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9353: 935303.
- [61] Rauh B, Kreling S, Kolb M, et al. UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 82: 50-59.
- [62] Freeman R K, Rigby F A, Morley N. Temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, 14(3): 305-312.
- [63] 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.
- [64] Oliveira V, Sharma S P, de Moura M F S F, et al. Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94: 37-43.