

超短脉冲激光加工芳纶纤维增强树脂基复合材料

何光宇¹ 李遥遥¹ 吴泽华² 陈旭³ 赵越³ 王明伟¹

(1 南开大学现代光学研究所, 天津 300350)

(2 天津科技大学理学院, 天津 300222)

(3 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

文 摘 芳纶纤维增强树脂基复合材料(Aramid fiber-reinforced polymer, AFRP)是一种高性能的纤维增强复合材料,具有比强度高、模量高、质量轻等优点,在航空航天、军事装备、汽车制造等领域有着广泛应用。AFRP各向异性和不均匀性等特点导致其在加工过程中会产生分层、起毛、热影响区过大等问题,已有的加工技术达不到航空航天领域应用所需要的加工精度,构成了目前精密加工AFRP的技术瓶颈。本文综述了AFRP加工的研究现状,通过比较和讨论传统机械加工、磨料水射流加工、连续激光和长脉冲激光加工以及超短脉冲激光加工的优缺点和尚有缺陷,依据飞秒激光“冷加工”的原理,讨论了利用飞秒激光精细加工克服这个技术瓶颈的可行性,并给出了相应的研究内容和相关技术途径。本文内容为精密加工AFRP指明了方向,具有明显的研究意义和潜在应用价值。

关键词 超短脉冲激光,芳纶纤维增强树脂基复合材料,热影响区,激光加工

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.001

Ultrashort Pulse Laser Processing of Aramid Fiber-reinforced Polymer Composites

HE Guangyu¹ LI Yaoyao¹ WU Zehua² CHEN Xu³ ZHAO Yue³
WANG Mingwei¹

(1 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350)

(2 College of Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222)

(3 Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract Aramid fiber-reinforced polymer (AFRP) is a high-performance fiber-reinforced composite with high specific strength, high modulus and light weight, and is widely used in aerospace, military equipment, automobile manufacturing and other fields. The characteristics of AFRP anisotropy and inhomogeneity lead to problems such as delamination, linting, and excessive heat-affected zone during processing, and the existing processing technology cannot reach the processing accuracy required for application in the aerospace field, which constitutes the technical bottleneck of current precision processing AFRP. This paper reviews the research status of AFRP processing, compares and discusses the advantages, disadvantages and shortcomings of traditional machining, abrasive waterjet processing, continuous laser and long pulse laser processing and ultrashort pulse laser processing, discusses the feasibility of using femtosecond laser fine processing to overcome this technical bottleneck according to the principle of femtosecond laser "cold processing", and gives the corresponding research content and related technical approaches. This paper points out the direction for precision machining AFRP, which has obvious research significance and potential application value.

收稿日期:2023-11-21

基金项目:国家自然科学基金(12174201);国家自然科学基金(62375145)

第一作者简介:何光宇,1998年出生,硕士研究生,主要从事超短脉冲激光与物质相互作用研究工作。Email:he.guangyu@foxmail.com

通信作者:吴泽华,博士,讲师,主要从事飞秒激光与物质相互作用的研究工作。Email:wuzehua@tust.edu.cn

0 引言

芳纶纤维增强树脂基复合材料(Aramid Fiber-reinforced Polymer, AFRP)是一种高性能的纤维增强复合材料,其基体由环氧树脂和不饱和聚酯构成,芳纶纤维则作为增强体。该材料具有诸多优异性能,如高比模量和比强度(相对于同等质量的钢铁,其比强度可高达五倍)、轻质化(仅为钢丝的五分之一)、耐腐蚀和良好的抗冲击性能等。因此,该材料在各种极端环境下都具有重要应用前景^[1]。

与碳纤维相比,芳纶纤维具有更高的动载和局部冲击承载能力,且不导电,无电化学腐蚀问题。因此,芳纶纤维的绝缘性和抗老化性能使其具有更长的使用寿命^[2]。AFRP已经广泛应用于航空航天^[3]、汽车工业^[4]、警用军用^[5]等领域,尤其是在航空航天领域,已广泛应用于卫星的承力结构、连接结构、表面覆盖件等部位,并持续替代更多的金属材料结构^[6]。AFRP复合材料在各行业的广泛应用使得对其的高质量加工需求迫切,常见的加工方式有机械加工、磨料水射流加工以及连续激光和长脉冲激光加工等。然而,AFRP材料本身各向异性、材料胶接不均匀性,导致在传统机械加工和长脉冲激光加工过程中易产生分层、起毛和热效应区域过大等问题,已经构成航空航天工业领域精密加工AFRP

亟待解决的重大技术瓶颈^[7]。因此,如何解决这些问题、实现AFRP材料的精细加工,是当前迫切需要的研究方向和内容。

超短脉冲激光加工是一种非接触、高能量的加工方式,超短脉冲的脉冲宽度通常在皮秒至飞秒量级($10^{-12}\sim 10^{-15}$ s),远小于电子-声子耦合弛豫时间。在极短时间内,超短脉冲激光可以将能量传递给材料,达到远高于材料融化甚至气化温度数倍的温度值,形成高温高压的等离子体喷射,实现材料的去除^[8-9]。与传统长脉冲激光加工相比,超短脉冲激光,尤其是飞秒激光,可以有效避免加工过程中物质受热融化和汽化等过程,从而直接烧蚀剥离材料,没有冷却重铸过程,有望实现对AFRP的高精细加工。

1 传统加工方法

1.1 机械加工

传统的加工方法,如机械钻铣等,对AFRP的加工去除主要利用芳纶纤维的拉断和基体材料的脆性断裂来完成。加工过程中,刀具和AFRP之间所产生的摩擦和热量导致材料表面的纤维束缚松弛和基体表面的熔化,AFRP中芳纶纤维的抗拉强度远高于树脂基体,机械切削时纤维更易被从基体中抽出而导致出现毛刺、分层等不良后果,如图1所示。

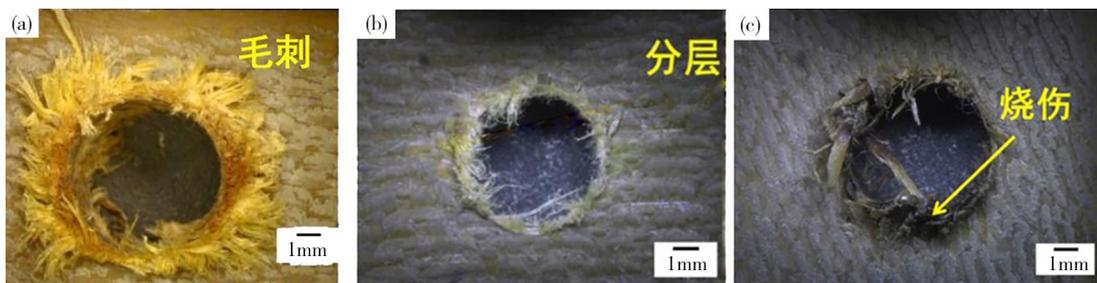


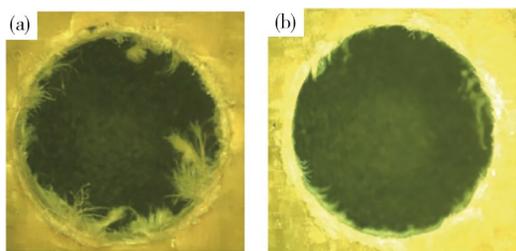
图1 机械加工AFRP典型缺陷^[10]

Fig. 1 Typical defects of machining AFRP^[10]

为了提高AFRP的加工质量,研究人员进行了加工工具以及加工方式上的改进。刘汉良等^[11]通过分析复合材料特性以及加工机制,总结了几种适用于芳纶纤维复合材料机械加工的钻削和铣削刀具,如空心套料式刀具、“三尖两刃”钻头、双人压迫式立铣刀等,其锋利的刀刃和特殊的排屑结构可对AFRP进行高质量切削,同时有效抑制拉毛分层现象。伍俏平等^[12]采用了一种新型钻铣工具超细晶硬质合金钻头对AFRP进行钻铣,发现相比于普通硬质合金钻头,超细晶硬质合金钻头钻铣产生的拉毛和热损伤明显减小,如图2所示,拉毛现象明显减少,同时刀具磨损较小,更适合AFRP的高效低损伤加工。BAO等^[13]建立了AFRP的切割力

学模型,提出通过提高切削速度和刀具的锋利度来减少毛刺缺陷。王晋宇等^[14]利用液氮作为冷却介质,在加工过程中对AFRP进行喷射,利用超低温提高了AFRP材料的层间强度,纤维更易被切断而不是拉断,使得毛刺面积相比于干式切削减少了24.7%,同时低温有效抑制了热效应带来的热损伤。张斌^[15]同样使用液氮对AFRP进行超低温钻铣,并利用单因素分析法获取了各加工参数对孔加工质量的影响规律,发现AFRP在低温下的力学性能变化可以有效抑制加工缺陷。然而,虽然可以通过改进刀具、材料改性和施加冷却介质等方式改善加工质量,但机械切削始终为接触式加工,刀具施加在AFRP上的切削力不可避免地会使其在加工过

程中产生拉毛、热损伤等缺陷,本质上解决不了AFRP的精密加工问题。



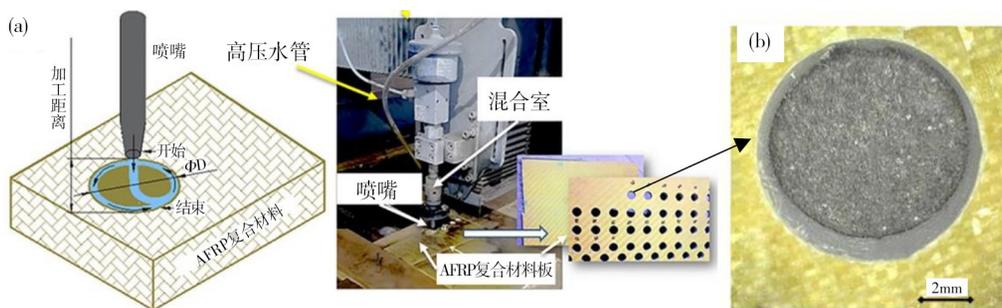
(a)传统刀头 (b)改进刀头钻孔

图2 传统刀头与改进刀头钻孔AFRP形貌^[12]

Fig. 2 AFRP morphology of traditional cutter head and improved cutter head drilling^[12]

1.2 磨料水射流加工

为了解决加工表面拉毛等问题,研究人员提出了使用磨料水射流的加工方式。磨料水射流通过将磨粒与水流的混合体以高速的冲击作用对材料进行加工。水流的高速冲击可以产生更高的切削力,同时具有降温作用,在切削过程中不会出现明显的温



注:(a)磨料水射流加工装置;(b)AFRP加工形貌。

图3 磨料水射流加工装置与AFRP加工形貌^[17]

Fig. 3 The processing device of abrasive waterjet and the morphology of AFRP processing^[17]

1.3 连续激光、长脉冲激光加工

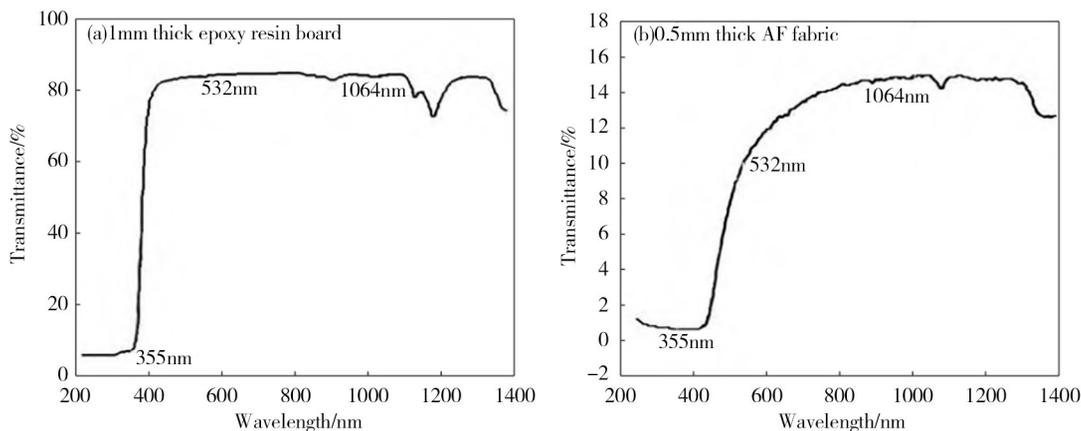
激光加工作为一种非接触式加工,主要通过热效应去除和光化学去除的方式来去除材料,可以避免传统接触式加工产生的拉毛、分层等问题以及磨料水射流加工产生的材料受潮问题。

当激光波长 $> 400 \text{ nm}$ 且激光脉冲作用时间较长时,激光加工的原理是材料中的电子通过对光子共振线性吸收获得的热能将材料逐步熔化、蒸发去除,属于热熔性过程。而当激光波长在紫外波段,即 $< 400 \text{ nm}$ 时,例如使用 355 nm 的近紫外光,其光子能量 3.5 eV 已经与芳纶、环氧树脂的禁带宽度相当,光化学消融的效果相比于光热效应会更明显,其热影响区会更小,表面几乎没有烧焦变色^[6]。根据图4透射光谱可以看出,环氧树脂对于近紫外波段的吸收较好,对于 $> 400 \text{ nm}$ 的波段,则只有约20%的吸收率。芳纶纤维对于从近紫外到近红外各波段的透射率都低于20%,即在此波段内都有80%的吸收率^[18]。激

升现象,避免了复合材料进行加工时产生的烧伤损伤等问题,可以获得较好的切削质量。2011年,SIDDIQUI等^[16]采用磨料水刀对AFRP进行钻孔加工,分析了切割速度、磨料流量、磨粒粗细等参数对复合材料加工过程和质量的影响,发现使用更细的磨料、更高的水压、更低的移动速度可以获得更好的加工质量,满足防弹板的开孔质量需求。2021年,SAKINCIOĞLU^[17]通过实验探究了喷嘴直径、切割速度、磨料流量等对AFRP表面粗糙度、剖面质量、断裂强度等性能指标的影响,进一步优化了加工参数,如图3所示,加工后的AFRP无拉毛分层现象,内壁光滑。目前,磨料水射流加工已经可以实现加工材料表面光滑、无热影响区的加工效果。然而在进行水射流加工时,AFRP需要被水浸泡,这会导致芳纶复合材料产生受潮现象,进而影响材料的应用性能可靠性,在对材料加工后的性能要求非常严格的航天领域,水射流加工技术被视为禁用的技术。

光加工的优势在于其具有非接触性、高精度、高效率等优点,可以应用于AFRP的制孔、切割和雕刻等加工过程。然而,连续激光与长脉冲激光加工也存在一些问题,例如加工时产生的热效应会导致材料的变形、热损伤等问题。

国外早在20世纪80年代就已经开始进行激光加工AFRP的研究。TAGLIAFERRI等^[19]使用500 W连续 CO_2 激光器对AFRP进行切割,分析了连续激光作用下AFRP的去除机制。分析指出,纤维和聚酯树脂基体的热性能差异是影响切割性能的主要因素,但由于芳纶纤维的有机性质,与聚酯树脂基体性能相似,相较于玻璃、石墨纤维与基体之间较大的汽化温度差,AFRP使用激光加工的效果更好,热影响区可以控制在 $40\sim 45 \mu\text{m}$ 之间。M. DELL'ERBA等^[20]利用准分子激光器和 CO_2 激光器对AFRP进行激光钻孔和切割,发现相比于 CO_2 激光器,准分子激光器因其较短的波长带来的更高的光子能量可以获得更



注:(a)环氧树脂;(b)芳纶纤维透射光谱。

图4 环氧树脂与芳纶纤维透射光谱^[18]

Fig. 4 Transmission spectra of epoxy resin and aramid fiber^[18]

好的加工效果,加工后的芳纶纤维没有明显的变化,树脂基体也保持致密均匀。B. S. YILBAS等^[21]研究了激光切割多层AFRP的过程和质量,发现多层Kevlar板的切割质量受到不同层之间的影响,不同层之间的纤维方向和间距对切割质量有很大的影响。F. AL-SULAIMAN等^[22]使用CO₂激光器对AFRP进行切割,发现在其他加工参数不变的情况下,增加激光功率和减小扫描速度可以提高钻孔质量。

国内有关AFRP激光加工的研究集中于对激光加工AFRP物理机制的研究以及对加工质量的评估与提高上。王贵兵等^[23-24]使用Nd:YAG连续固体激光器研究激光与AFRP的相互作用机制,定性总结了AFRP对激光能量的吸收、反射和透射规律。苏飞等^[25]利用纳秒Nd:YAG激光对AFRP进行加工,分析激光加工过程中的温度演变过程,测定了纳秒激光下芳纶纤维与树脂基体的烧蚀阈值为0.01和0.005 J·cm⁻²,建立了芳纶纤维与树脂基体热影响区的损伤预测模型。针对纳秒级近红外激光的特性,可以发现激光功率与切缝宽度之间存在着最为显著的影响关系。同时,扫描速度

对切缝深度和炭化区宽度的影响也相当明显。相比之下,脉冲宽度和重复频率对于热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)的影响则较小。

如表1所示,机械加工AFRP因其存在切削力而容易产生拉毛、分层等损伤,加工效果较差。采用磨料水射流虽可以避免切削力的损伤,但又会带来材料受潮而影响其性能的新问题。为了避免材料受潮而使用长脉冲或连续激光加工又因其功率过大以及作用时间较长而造成材料表面热影响区较大等问题。然而综合来看,激光加工仍是最有希望达到高精细加工AFRP这一目标的加工方式,为了解决传统长脉冲或连续激光加工时与材料作用时间长热影响区域大等问题,可以使用超短脉冲加工。不同于传统长脉冲激光或连续激光加工方式,超短脉冲激光加工因其超短作用时间和超高峰值特性而能使能量被加工材料非线性吸收,理论上可以实现对加工对象的非热熔性加工,拥有传统加工方式难以企及的高精度、低损伤的独特优势,有望解决如航空航天领域等对AFRP的高精度加工需求。

表1 三种加工方式优劣比较

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of three processing methods

加工方式	优点	缺陷
机械加工	加工效率高、成本低	拉毛、分层、热损伤
磨料水射流	大尺度加工,表面较光滑、无热效应	芳纶、树脂受潮影响性能
连续激光、长脉冲激光加工	加工效率高、无拉毛分层损伤	热影响区较大(> 100 μm)

2 超短脉冲激光加工AFRP

2.1 超短脉冲加工机制

激光加工材料的能量转移过程与激光脉冲宽度和激光功率密度有关。如图5所示,当激光作用时间较长时,如连续激光和纳秒脉冲激光,其加工原理为材料中的电子通过对光子共振线性吸收获得的热能

将材料熔化蒸发去除,并通过辐射声子来进行热量转移实现冷却。此过程激光脉冲持续时间远大于材料的热扩散时间,不可避免地将热量扩散到周围区域,形成热影响区造成热损伤,影响加工后的材料性能^[8]。

当激光脉冲宽度仅与电子-声子耦合时间相当,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第5期

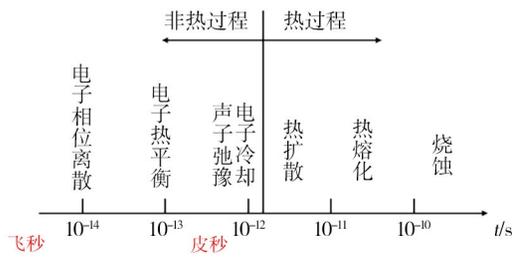


图5 受激电子弛豫过程

Fig. 5 The relaxation process of excited electron

远小于材料的热扩散时间,如皮秒脉冲激光,仍然存在激发电子通过声子耦合实现能量转移、转化的热学过程,因此作用区域内的材料也将按照热熔化和气化的方式得到去除,同时其边缘也会受到一定程度的热影响。因此,长脉冲和皮秒脉冲的加工过程本质上起源于入射光-受激电子-声子转化而成的热能,材料通过固体-液体-气体的三相热熔过程得到去除,其中的热扩散过程会不同程度地影响加工质量。另一方面,激光脉冲较长的持续时间降低了峰值功率,使得电子的受激过程依赖于单个入射光子的共振线性吸收,是热加工机制。

当激光脉冲宽度在 10 ps 以下,即通常认为的飞秒量级时,激光脉冲作用时间远小于材料中的电子-声子耦合时间,就可以忽略电子温度通过辐射声子进行冷却和热扩散的过程,只需考虑电子吸收入射光子过程,避免了能量的转移和热扩散的影响。当激光脉冲入射时,瞬间达到的电子温度将远远高于材料的熔化甚至汽化温度,形成高温高压的等离子体喷发,实现材料的去除。同时,由于飞秒激光极高的峰值功率,使得材料对激光能量的吸收不再是线性吸收,材料中的电子可以同时吸收多个光子获得电离,摆脱原子的束缚实现材料的去除,这种非线性吸收过程与照射的激光强度密切相关。因此,同时兼顾超短脉冲和超高功率密度的飞秒激光有望实现材料超高精度的“冷”加工。

2.2 超短脉冲加工 AFRP 研究现状

近年来,国内学者开展了超短脉冲激光加工 AFRP 的研究。相比于连续激光与长脉冲激光,超短脉冲激光加工可以得到更小的热影响区,如表 2 所示。2019 年,张开虎等^[6]使用 15 ps 以及 400 fs 的超短脉冲激光对 1 mm 厚 AFRP 进行加工并与连续激光和纳秒激光加工实验结果进行对比,发现利用超短脉冲激光可实现热影响区宽度为 10~100 μm 量级的高质量切割;相较于连续激光或纳秒激光,飞秒激光加工可以使热影响区更小,如图 6 所示。2022 年,CHENG 等^[26]利用波长为 1 064 nm、脉宽 480 fs 到 10 ps 可调、激光重复频率从 50 kHz 到 5 MHz 的红外飞秒激光器对 AFRP 进行加工并分析其体积烧蚀率和表面粗糙度,得出结论:对于所有激光通量和激光重复率,激光脉宽越短,体积烧蚀率越高,即加工效率越高。对于表面粗糙度,高激光重复率会导致材料碳化现象加重,当激光重复率下降到 100~200 kHz 时,碳化效应减弱,即低重复率可以保证更好的表面形貌。2022 年,杨剑等^[18]利用皮秒激光切割 AFRP,发现皮秒激光切割技术可以实现对 AFRP 复合材料的高精度切割,切割面质量较高,且没有明显的热影响区。在红外、绿光、紫外三种波段的比较中,紫外光无论是切割效率还是切割质量都要优于其余两种;研究了切缝形貌与扫描速度的关系,发现适当降低激光扫描速度,有利于提高切缝深宽比。使用合适的参数可以达到 15 μm 的热影响区以及 7° 以下的切割锥角。2023 年,成健等^[27]使用 1 030 nm 红外飞秒激光器对 2 mm 厚 AFRP 进行制孔加工,研究了不同参数下 AFRP 的制孔形貌,并与机械制孔后的 AFRP 进行了拉伸强度测试对比,发现相比于机械制孔,超快激光加工后的 AFRP 拉伸强度波动性更小。使用超短脉冲激光加工,热影响区可以达到几十微米甚至十几微米,表面可以实现无焦糊变色的加工形貌。因此,超短脉冲激光加工是目前能达到最高加工精度以及最有希望实现无热影响“冷加工”AFRP 的加工方案。

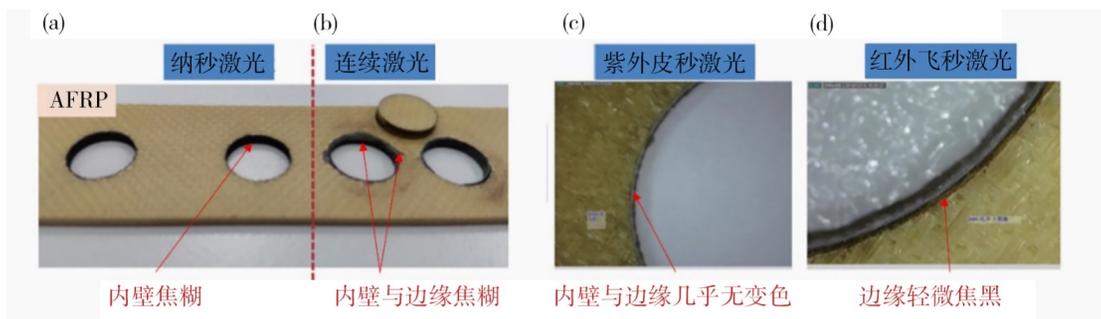


图6 纳秒激光、连续激光、紫外皮秒激光、红外飞秒激光加工 AFRP 表面形貌对比^[6]

Fig. 6 Comparison of surface morphology of AFRP processed by nanosecond laser, continuous wave laser, ultraviolet picosecond laser and infrared femtosecond laser

表2 不同波长与脉宽的激光器加工AFRP的热影响区域

Tab. 2 The HAZ of AFRP processed by lasers with different wavelengths and pulse widths

激光器类型	波长	脉宽	样品	加工参数	热影响区
CO ₂ 激光器 ^[28]	10.6 μm	连续 CW	Kevlar/epoxy厚度:2 mm	激光功率:150~180 W 透镜焦距:63.5 mm 光斑直径:0.5 mm 辅助气体:氮气 气压:0.75~2 bar 加工速度:10~140 mm/s	100~150 μm
Nd:YAG激光器 ^[25]	1 064 nm	20~ 120 ns	Kevlar-49/epoxy厚度:5 mm	激光功率:10~30 W 扫描速度:1~5 mm/s 脉冲频率:200~650 kHz	1.2 mm
皮秒激光器 ^[6]	355 nm	15 ps	Kevlar-49/4211epoxy厚度:1 mm	激光功率:0~45 W 光斑直径:30 μm 脉冲频率:1 MHz	10~100 μm
固体皮秒激光器 (MLPS-3W) ^[18]	355 nm、532 nm、 1 064 nm	15 ps	Kevlar-29复合树脂厚度:1 mm	激光功率:0~25 W、0~45 W、0~90 W 重复频率:500 kHz	15~100 μm
飞秒激光器 ^[6]	1 064 nm	400 fs	Kevlar-49/4211环氧树脂厚度:1 mm	脉冲通量:8.0 J/cm ² 光斑直径:31 μm 加工速度:15 m/s 脉冲频率:1 MHz	20 μm

3 超短脉冲激光加工AFRP的研究内容与方向

超短脉冲激光加工AFRP的优势可以有效降低HAZ,理论上可以实现AFRP的“冷”加工。然而,加工热影响区的形成是由多种因素造成的,包括激光的脉冲宽度、波长、脉冲重复频率、扫描速度、光斑半径、激光光束的整形、流体场辅助的加工氛围。在实际加工过程中,由于激光脉冲频率过高或激光功率密度过大等原因,仍然可能会导致热积累,从而降低加工质量。因此,仅依靠超快激光的超短脉冲优势不足以满足如航空航天等领域日益精密的加工要求。为了实现更高的加工精度和更快的加工效率,需要采用优化激光参数,寻求冷加工窗口以及采用其他辅助工艺等手段。

3.1 超短脉冲激光精密加工AFRP的研究

3.1.1 参数选择与优化

适当的加工工艺参数是提高激光加工质量和效率的关键。如对波长的选择中,如参考文献[6,18,29],使用紫外波段加工AFRP时同时具有光化学效应与光热效应,芳纶纤维与环氧树脂对紫外光的吸收率更高,因此烧蚀效率更高,热影响区要小于绿光与红外光。对于脉宽的选择,超短脉冲因从作用机制上改变了物质去除的方式,“冷加工”特性使其更易获得较小的热影响区和更高的加工精度。同时,飞秒激光脉冲拥有比皮秒脉冲更高的烧蚀效率^[26]。扫描速度同样是个关键的参数,扫描速度,脉冲重复频率与光斑半径共同决定每冲击落下的有效脉冲

数^[6],当有效脉冲数在2个左右时,其热影响区最小^[30-31]。此外,脉冲宽度不变情况下,当超短脉冲激光的能量密度增加到一定的数值后,加工过程中的热效应也变得明显^[32],激光脉冲宽度与加工靶材热影响区之间的关系仍在进行中^[33]。多脉冲加工过程中还存在表面增强吸收和累积效应^[34-35],在利用阴影图方法研究多脉冲飞秒激光烧蚀靶材的过程中也发现随着烧蚀脉冲的增加,烧蚀形成的喷射物质在空间分布上也存在变化,后继脉冲烧蚀会受到之前脉冲烧蚀的影响^[36]。超短脉冲激光与物质相互作用的过程较为复杂,为系统揭示超短脉冲激光与物质相互作用的机制仍然需要进行更多的研究工作。当前试验研究结果指出,要获得较低的热影响区,应选择短波长激光、超短脉宽、较低的重复频率(≤ 200 kHz)^[26]、较高的扫描速度^[18],这样的参数组合可以尽可能地减小热影响区。然而,考虑到加工过程的复杂性,还需要对超短脉冲加工参数的优化进行更多更深入的探索。

激光加工参数众多,在实验设计时,通常需要控制单变量进行大量实验,单因素实验方法虽然可以清楚地展示某加工参数对加工质量的影响趋势,但是加工质量的最终确定是各种因素共同作用的结果。为了解决实验量大的问题,同时了解工艺参数之间的相互作用,可以使用实验设计(Design of experiment, DOE)技术进行参数优化^[37]。常用的实验设计技术有响应面法^[38](RSM)和田口法^[39]

(Taguchi)等。两者的基本思路都是通过设计有限次的实验,建立参数与响应之间的对应模型,给出最佳的参数组合。EL-TAWHEEL等^[40]使用Taguchi试验设计方法,以切口宽度、熔渣高度等作为试验指标,以激光功率、切割速度、材料厚度等作为影响因子,通过设计正交表进行一系列的试验,分析各种元素之间的相互作用,确定了多种影响因素条件下加工AFRP的最优方案。对于响应面法(RMS),配合Design Expert实验设计软件可以将变量相互作用对响应的结果直观地在三维曲面上图形化显示,通过分析响应与输入之间的关系,可以对参数进行优化达到最优结果。如SALAMA等^[41]利用响应面法探究了脉冲通量、重复频率和切割速度等参数对热影响区和材料去除率的影响,通过优化参数达到最小化热影响区和最大化材料去除率的目的。使用DOE方法对于复杂的非线性优化问题是有效的,然而,由于控制参数难以确定,难以获得全局最优解。

目前学术界多使用软件优化技术如粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)^[42]、遗传算法(GA)^[43]、灰狼优化器(Grey Wolf Optimizer, GWO)^[44]、灰色关联度分析法(Grey Relational Analysis, GRA)^[45]、萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)^[46]、教与学算法(Teaching Learning-based Optimization, TLBO)^[47]等技术来优化加工参数以得到最优解。算法优化的优点在于收敛性好,可以综合考虑多种变量的影响,通过迭代计算逐步逼近最佳参数组合获得全局最优解。2019年,GAUTAM等^[47]使用自主开发的Python程序TLBO(Teaching Learning-based Optimization)算法预测了Nd:YAG激光切割KFRP(凯夫拉纤维复合树脂材料,为AFRP的一种)的最佳激光加工参数,通过优化激光切割参数的设置,顶部切口宽度、底部切口宽度、顶部切口偏差、底部切口偏差以及切口锥度相比于未优化时分别提高了11.44%、8.47%、17.65%、15.22%、58.87%,优化效果显著。同年,GAUTAM等^[46]使用基于萤火虫算法(FA)的多目标优化方法对激光加工玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)的加工参数进行优化,通过执行确认实验验证了预测的最优解,评估过程中切口质量整体改善了26.75%。2020年,MISHRA等^[45]使用GRA算法分析激光切割碳-玄武岩-凯夫拉复合材料的各种参数,对顶部切口宽度以及底部切口宽度作为响应参数进行优化,发现切割速度是对所有响应参数影响最大的参数,经优化后顶部切口宽度和底部切口宽度等分别减少了15.28%和12.81%。2022年,AKANKSHA^[44]提出了一种基于响应面法的灰狼优化算法(Response Surface Based Grey Wolf Optimization,

RSGWO),用于预测加工KFRP的激光参数的最优组合以得到最小的热影响区。经实验验证,观察到在最佳切削参数之下,HAZ减小了14.92%。多项研究表明,通过软件算法得到超快激光系统的最佳加工参数,有望大幅缩减试验次数,获得最佳的加工参数组合,得到超快激光加工AFRP的“冷”加工窗口,满足当前高质高效加工AFRP的需求。

3.1.2 超短脉冲光束整形

在超快激光加工过程中,光斑能量分布通常符合高斯分布,这导致材料的不同区域会接收不同的能量密度,进而导致中心区域的能量密度较高而边缘区域未达到烧蚀阈值。这种不均匀的能量密度分布会引起热效应和钻孔锥度较大等问题。为了解决这些问题,光束整形技术被广泛研究,以实现激光能量的空间分布改善,从而提高加工表面质量并减小热影响区。

平顶光束因其能量分布均匀的特点而备受关注。如图7所示,相较于高斯光束,使用平顶光束能够获得更好的加工平整度,这有望解决超快激光加工过程中锥角过大等问题。此外,平顶光束的加工效率也相对较高,因为其能量密度在整个光斑区域内都是均匀分布的,中心强度不至于过大而扩展热影响区,边缘强度不至于过小而被浪费,使得能量利用率更加高效。

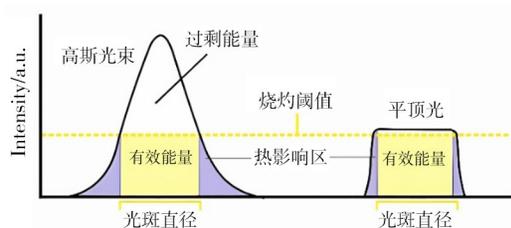


图7 高斯光束与平顶光束形貌对比

Fig. 7 Comparison of Gaussian beam and flat-top beam

常见的平顶光束整形技术有衍射光学元件、非球面透镜组、微透镜阵列、空间光调制器等^[48]。衍射光学元件激光损伤阈值较低,不适合高功率密度的飞秒激光系统;微透镜阵列多用于对具有不均匀光场空间分布、相干性能差的复杂模场激光光束进行整形,但各微小透镜之间存在缝隙,激光经过时会产生衍射,因此激光能量利用率不高;液晶空间光调制器根据液晶分子在外电场的影响下指向发生改变来影响材料的折射率进而调控光束达到整形的目的,目前常用的空间光调制器有透射式和反射式两种,但均存在因透射率较低或反射光束到其他区域而造成能量利用率不足的问题;非球面透镜组采用两片非球面透镜组成伽利略式望远镜对光束进行能量再分配并以平顶光束出射,结构简单能量利用率高,激

光损伤阈值高,因此非球面透镜组可用于超快激光系统的光束整形。如图8所示,德国AdlOptica公司的 π shaper12_12系列光束整形器即为非球面透镜的平顶光束整形系统,适用于紫外激光器和短脉冲钛蓝宝石激光器,符合飞秒激光加工系统的光束整形应用场景。2015年,李睿等^[49]利用 π shaper整形系统搭建实验平台,获得了直径为60 μm 的平顶光斑。对金属钛、钛合金、蓝宝石材料进行飞秒激光微加工实验验证,发现相比于高斯光束,平顶光束能有效控制加工过程的热效应范围,改善由于热积累导致的氧化现象,且加工材料表面平整度较高、不易产生重铸层和微裂。2020年,李党娟等^[50]采用伽利略式非球面透镜整形系统,利用平顶洛伦兹函数作为平顶光分布函数并用ZEMAX光学软件进行优化设计,得到了在焦距为20~30 mm时,激光能量均匀度变化小于0.5%的平顶光束。因此,平顶光束作为一种新型的激光光束形式,在超快激光微加工领域拥有着广阔的应用前景。

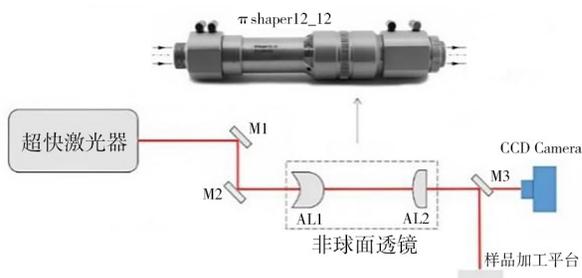


图8 非球面透镜组平顶光束整形系统

Fig. 8 Aspheric lens group flat top beam shaping system

在超短脉冲激光经过聚焦透镜聚焦后高斯光束聚焦位置固定的情况下,在对靶材进行制孔等加工过程中,靶材表面会形成坑或孔,激光照射位置由原来靶材表面处变为照射坑或孔的底部,当坑或孔较深时,能流密度将下降,加工条件也就发生了变化,甚至可能出现激光经过聚焦点处使空气发生强烈电离后才照射靶材的情况,使物质去除效率下降,使用贝塞尔光束有利于解决这个问题。贝塞尔光束由DURNIN等^[51]于1987年首次提出,如图9所示,其光强分布为一个主瓣以及若干旁瓣,主瓣能量密度远高于旁瓣,且光束传播过程中光强具有“无衍射特性”,在一定距离内横向光强分布基本保持不变。和高斯光束相比,在光斑大小相近的情况下,贝塞尔光束有远大于高斯光束的细长焦深,因此贝塞尔光束在进行高深径比结构加工时有天然的优势。目前贝塞尔光束最为常用的整形方法有轴棱镜法以及空间光调制器整形法等^[52]。空间光调制器整形法具有能量利用率不高以及不能承载大功率激光入射的缺点,相比之下,轴棱镜法产生贝塞尔光束的转化率极

高,且光束整形装置简单,仅需一个锥透镜即可实现光束整形,因此目前使用较多的为锥透镜整形方案,如图10。2019年,杨泽奇等^[53]利用皮秒激光高峰值功率、超短脉冲及贝塞尔光束长焦深的特点,对化学强化玻璃进行单次扫描切割,通过调节单脉冲能量与脉冲间隔,确定单脉冲能量为150 μJ 、脉冲在靶面间隔为5 μm 、扫描速度为400 mm/s时,实现了单次扫描即可使材料自动断裂分离的效果以及断裂表面粗糙度小于395 nm的高质量切割。2022年,孙伟高等^[54]对光束进行贝塞尔整形,利用飞秒单脉冲对钕酸锂晶体进行刻蚀,发现低功率的单脉冲贝塞尔光束容易获得高深径比的微孔,通过调节功率与焦点位置,在功率为0.76 mW,焦点位于样品上表面下方120 μm 时获得了深径比约为700:1的大面积均匀微孔阵列。因此,使用整形后的贝塞尔光束可以利用其长焦深的特点在不改变焦点位置的情况下对AFRP进行加工,实现扫描路径的简化,提高加工质量和加工效率。

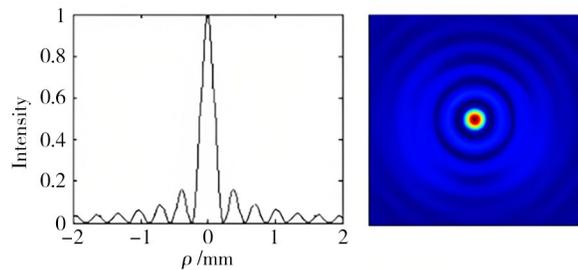


图9 贝塞尔光束光强分布^[52]

Fig. 9 Bessel beam intensity distribution^[52]

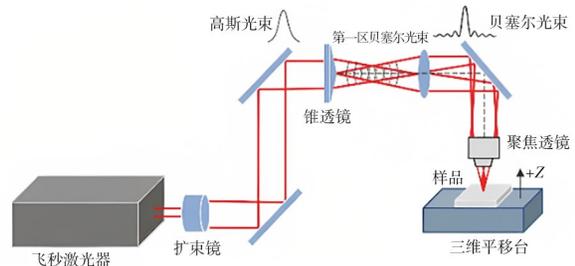


图10 飞秒贝塞尔光束加工系统^[54]

Fig. 10 Femtosecond Bessel beam processing system^[54]

综上,为解决高斯光束能量分布较分散导致能量利用率不高的问题,可以使用光束整形来改进超快激光加工系统。在利用超快激光系统加工AFRP过程中,使用平顶光束或贝塞尔光束可以实现激光能量的高效利用,同时有效减少热影响区,也可以有效解决加工过程中靶材表面形貌变化使加工条件发生变化的问题,提高加工质量。

3.1.3 辅助物理场

超短脉冲激光加工的机制决定了其“冷”加工的特性,但是若激光频率较高或移动速度较慢时,仍会出现热积累导致其产生热影响区等缺陷。除了对源

头的激光进行操作以外,还可以使用辅助物理场如吹入辅助气流或水流等方式降低热量的积累达到减小热影响区的目的。鉴于AFRP复合材料吸湿的特性,在加工过程中不建议使用吹入水流进行降温。2009年,T. A. EL-TAWHEEL等^[40]利用连续以及脉冲CO₂激光器对AFRP进行切割时,吹入3~16 bar氮气来进行辅助加工,发现辅助气体可以吹走熔渣残留并降低热效应,辅助气体气压越大,切口锥度越小,熔渣高度越低,即加工表面越平整。同时氮气的存在降低了氧气的浓度,减少了材料的氧化反应,可以有效抑制热影响区。若采用低温物理环境,同样可以起到减少热量积累抑制热影响区的效果。

除了吹入气流等手段对加工过程进行优化外,还可以对AFRP材料本身进行改性,如照射紫外光等。崔鹏等^[55]利用紫外辐照和超声振动对AFRP进行改性,提高了芳纶纤维表面的粗糙度,加大芳纶纤维与树脂之间的黏合度,同时超声振动可以使AFRP内部的气孔更少,纤维与基体之间的结合强度更高。使用超快激光加工改性后的AFRP时,芳纶与树脂之间的性能差异减小,树脂破碎减少,更利于激光进行加工。因此,添加辅助物理场同样是一个可行的提高加工质量的方案。

3.2 加工效率的提升

超短脉冲激光相比于连续激光与长脉冲激光还普遍存在激光功率较低以及加工效率较低等问题,针对此类问题,可以使用优化加工方式等手段进行改善。

为了提高超短脉冲激光加工系统的效率和灵活性,现有的超短脉冲激光加工系统主要采用串行加工或并行加工两种方法,对应于对激光的时间与空间上的高效利用。超短脉冲激光串行加工系统的主要元件是振镜和场镜,如图11所示。振镜由两片反射镜以及控制器组成,在电脑端进行路径设置,可以使反射镜按照特定的角度进行快速摆动从而控制光线按照设定的路线移动。场镜又称平场聚焦镜、 $F-\theta$ 物镜,区别于普通球面镜只能将光束聚焦于弧面上,场镜通过特殊设计可以将光束聚焦在加工平面上,加工面积可达 $(120 \times 120) \text{mm}^2$ 。若使用聚焦透镜与可移动透镜的组合来代替场镜,工作范围甚至可达 $(1\ 200 \times 1\ 200) \text{mm}^2$ 。在振镜和场镜的加工范围内,通过振镜中的镜片摆动和场镜的聚焦可以对超短脉冲激光束进行快速移动与精确定位,实现对工件表面的高效率加工^[56]。

并行加工系统的主要元件是偏振分光棱镜、空间光调制器和聚焦透镜等。如图12所示,超短脉冲光束经扩束镜和反射镜投射到分光棱镜上,分光棱

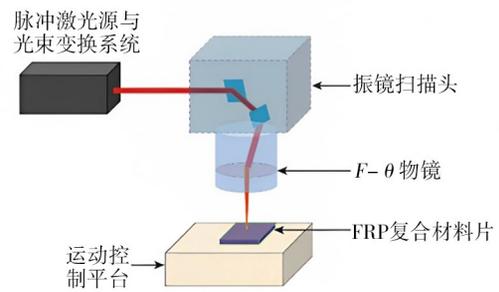


图11 串行加工系统^[56]

Fig. 11 Serial machining system^[56]

镜按照一定反射透射比例分成多束光,经空间光调制器按照不同的加工要求对光束进行调制后耦合入分光传输阵列,光束在分光传输阵列中经全反射可以实现长距离传输,而后出射到工件的不同位置经聚焦透镜聚焦到工件表面,以此来实现大幅面和多焦点的加工,可以有效提高加工效率^[57]。

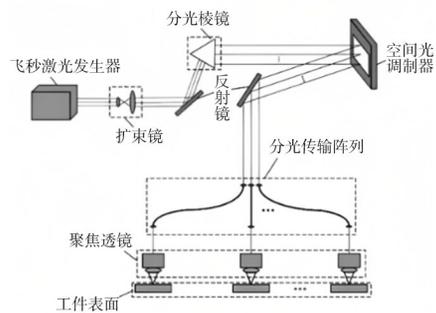


图12 并行加工系统^[57]

Fig. 12 Parallel machining system^[57]

使用振镜的串行加工方案已经非常成熟,而并行加工系统虽已经有多家高校、企业申请了相关专利^[57-59],但尚未广泛应用于生产,仅存在于实验室阶段。使用串行加工与并行加工,有望实现超短脉冲激光加工AFRP的高效率与高质量加工。

3.3 研究方向

当前超短脉冲激光加工AFRP的研究存在以下问题。第一,使用超短脉冲加工AFRP的相关研究人员很少,加工动力学过程和理想加工工艺参数有待破解。第二,目前采用算法进行参数优化方法不够深入,最佳加工参数的获取往往采用简单的“试参数”获得,运算量较大的同时所得最佳参数组合也未必为整体最优解。第三,AFRP是复合材料,仿真建模难度大,相关仿真工作多将其设置为均质模型进行处理,加上材料对超短脉冲激光的非线性吸收效应,使得仿真结果往往与实际加工效果存在较大差异。第四,光束整形技术比较成熟,尚未被有效应用于AFRP的加工中。第五,目前AFRP制孔加工较多采用固定纵向位置(Z 轴)环切的方式,纵向位置的固定使加工过程热积累较多从而产生较严重的热影响

区,且加工时间较长,材料加工的厚度也受到限制,国内缺乏对 AFRP 加工路径进行优化来提高加工质量与加工效率的相关研究。这些问题都是超短脉冲加工 AFRP 研究中需要解决的。

综上,超短脉冲激光精密加工 AFRP 研究方向和内容如下。

(1)揭示超短脉冲激光与 AFRP 相互作用的机制,确定利于提高加工精度和最大限度地抑制热影响区的理想加工参数窗口。

(2)面向航天航空飞行器及特种车辆领域的应用,探索提高超短脉冲激光加工 AFRP 的三维尺度(幅面及厚度)技术方案和工艺,使超短脉冲激光精细加工 AFRP 有更多的重要应用场景。

(3)超短脉冲加工优势是可实现精细加工,但加工效率低是其先天的短板,如何通过并行加工方式、多物理场辅助工艺以及升级高功率激光器件等途径来有效提高加工效率是超短脉冲加工系统走向实用的关键。

目前,国内激光加工产业正在进行新技术布局,着眼点由传统的激光钣金切割和激光焊接领域转向泛半导体等微加工领域,企业间的技术竞争也从原来的高功率连续激光器转向超短脉冲激光器^[60],超短脉冲激光加工产业的迅速发展,将会为精密、大尺度、高效加工 AFRP 并实现多场景应用提供有利的设备与器件条件。

4 结语

通过对当前广泛应用于芳纶纤维增强树脂基复合材料(AFRP)的几种加工方法进行了系统性的梳理与分析,对比了各种方法在实际应用中所具备的优势和不足。研究表明,超短脉冲激光加工凭借其独特的“冷”加工优势,有望满足航空航天等应用领域高精度加工的需求。针对当前超短脉冲加工芳纶纤维增强树脂基复合材料存在的热影响区大、加工尺度小和加工效率低等问题,本文明确给出了以下研究方向:通过超短激光脉冲与 AFRP 相互作用动力学过程的研究确立抑制热影响区和提高精度的理想加工参数窗口;通过脉冲整形技术增大加工尺度;通过串行并行加工方式、多物理场辅助工艺以及升级高功率激光器件等途径提高加工效率。超短脉冲激光精密高效加工 AFRP 研究方向和内容以及可行的技术途径的确立,对航空航天等领域中的 AFRP 加工与应用具有重要的参考价值 and 意义。

参考文献

[1] 张蓓. 我国芳纶纤维的发展概况[J]. 精细与专用化学品, 2010, 18(10): 6-9.

ZHANG B. Review of the development on aramid fiber in

China[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2010, 18(10): 6-9.

[2] 杨青, 王小菊. 改性芳纶短纤维 Sulfron 3001 在轮胎胶料中的应用[J]. 橡胶工业, 2010, 57(5): 300-302.

YANG Q, WANG X J. Application of modified aramid staple fiber sulfron 3001 in tire compound [J]. China Rubber Industry, 2010, 57(5): 300-302.

[3] 张静. 芳纶纤维复合材料及其在卫星通讯技术中的应用[J]. 科技风, 2016(16): 215-216.

ZHANG J. Application of aramid fiber composition in satellite communication technique system [J]. Technology Wind, 2016(16): 215-216.

[4] 马岩. 汽车用碳/芳纶纤维增强复合材料管件的成型以及能量吸收机理的研究[D]. 上海: 东华大学, 2014-10-31.

MA Y. Study on The Molding and Energy Absorption Mechanism of Carbon/aramid Fiber Reinforced Composite Used on Vehicles[D]. Shanghai: Donghua University, 2014-10-31.

[5] 胡晓兰, 王东, 石毓斌, 等. 用于人体防护装甲的纤维复合材料的研究[J]. 纤维复合材料, 2000, 17(2): 40-44.

HU X L, WANG D, SHI Y Q, et al. Research on fiber composites for human protective armor [J]. Fiber Composites, 2000, 17(2): 40-44.

[6] 张开虎, 于洋, 张夏明, 等. 纤维增强树脂基复合材料激光切割热影响探析[J]. 导航与控制, 2019, 18(5): 60-66, 83, 88.

ZHANG K H, YU Y, ZHANG X M, et al. Laser cutting induced heat affected zone in fiber reinforced polymer: a comparative analysis [J]. Navigation and Control, 2019, 18(5): 60-66, 83, 88.

[7] 路明雨, 张明, 张加波, 等. 激光加工非金属复合材料的研究与应用进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(1): 30-38.

LU M Y, ZHANG M, ZHANG J B, et al. Advances in research and application of laser processing of nonmetallic composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(1): 30-38.

[8] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(I) [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 42-52, 57.

YANG J J. Femtosecond laser "cold" micro-machining and its advanced application (I) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(3): 42-52, 57.

[9] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(续) [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(4): 39-47.

YANG J J. Femtosecond laser "cold micro-machining and its advanced application (II) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(4): 39-47.

[10] 霍豪闯. 芳纶纤维复合材料高质量制孔工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

HUO H C. Study on High Quality Hole Making of Aramid Fiber Composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology,

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第5期

2019.

[11] 刘汉良, 张加波, 王震, 等. 碳纤维与芳纶纤维复合材料机械加工刀具选用[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(4): 95-98, 117.

LIU H L, ZHANG J B, WANG Z, et al. Cutting tool selection in CFRP and AFRP machining [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(4): 95-98, 117.

[12] 伍俏平, 刘平, 邓朝晖, 等. 基于超细晶硬质合金钻头的AFRP钻削性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2246-2253.

WU Q P, LIU P, DENG Z H, et al. Drilling performance of ultrafine cemented carbide drill in machining aramid fiber reinforce polymer composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 2246-2253.

[13] BAO Y J, HAO W, WANG Y Q, et al. Formation mechanism of burr defect in aramid fiber composites based on fly-cutting test [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1-4): 1531-1540.

[14] 王晋宇, 刘海波, 刘阔, 等. 芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 89-95.

WANG J Y, LIU H B, LIU K, et al. Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 89-95.

[15] 张斌. 芳纶纤维增强复合材料超低温铣孔基础研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.

ZHANG B. Basic Research on Ultra-low Temperature Milling Hole of Aramid Fiber Reinforced Composites [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.

[16] SIDDIQUI T U, SHUKLA M. Abrasive waterjet hole trepanning of thick Kevlar-epoxy composites for ballistic applications-experimental investigations and analysis using design of experiments methodology [J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2011, 10(3): 172-186.

[17] AKINCIOĞLU S. Investigation of effect of abrasive water jet (AWJ) machining parameters on aramid fiber-reinforced polymer (AFRP) composite materials [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2021, 93(4): 615-628.

[18] 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 J, ZHANG R, ZHAO Y, et al. Experimental study on picosecond laser cutting AFRP composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 147-157.

[19] TAGLIAFERRI V, DI ILIO A, VISCONTI C. Laser cutting of fibre-reinforced polyesters [J]. Composites, 1985, 16(4): 317-325.

[20] DELL'ERBA M, GALANTUCCI L M, MIGLIETTA
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第5期

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.

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

[22] AL-SULAIMAN F, YILBAS B S, KARAKAS F C, et al. Laser hole cutting in Kevlar: modeling and quality assessment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(11-12): 1125.

[23] 王贵兵. 连续激光与芳纶纤维树脂基体复合材料相互作用规律研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 2002.

WANG G B. Study on The Interaction Between Continuous Laser and Aramid Fiber Resin Matrix Composites [D]. Beijing: Beijing Graduate School, China Academy of Engineering Physics, 2002.

[24] 王贵兵, 刘仓理. 凯芙拉环氧复合材料烧蚀阈值实验研究[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 457-459.

WANG G B, LIU C L. Experimental research on ablation threshold of Kevlar/epoxy [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 457-459.

[25] 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.

SU F, LI W Y, DONG G J, et al. Theoretical modeling and experimental study of nanosecond laser machining of Kevlar fiber reinforced plastics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4139-4151.

[26] CHENG J, ZHANG P, HE Z, et al. Characteristics of ultrafast laser processing aramid fiber reinforced plastics [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2022, 41(23-24): 893-901.

[27] 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): 86-98.

CHENG J, LI J L, ZHANG Z W, et al. Characteristics and properties of femtosecond laser drilling of Kevlar-29 substrates [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7): 86-98.

[28] ILIO A D, TAGLIAFERRI V, VENIALI F. Machining parameters and cut quality in laser cutting of aramid fibre reinforced plastics [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1990, 5(4): 591-608.

[29] ZHANG K, LU M, ZHAO Y, et al. ZUO C, WANG H, FENG S, et al., eds. Ultrafast laser ablation of aramid fiber-reinforced polymers and its application in satellite antenna [C/OL]//International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2022), ONLINE, China, 2023-04-05:

14[2023-04-05].

[30] 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.

[31] FINGER J, WEINAND M, WORTMANN D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power [J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, 25(4): 042007.

[32] YANG J, ZHAO Y, ZHU X. Transition between nonthermal and thermal ablation of metallic targets under the strike of high-fluence ultrashort laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(9): 094101.

[33] ENDO T, TANI S, KOBAYASHI Y, et al. Probing thermal dissipation dimensionality to laser ablation in the pulse duration range from 300 fs to 1 μ s[J]. *Optics Express*, 2023, 31(22): 36027-36036.

[34] PAIVASAARI K, KAAKKUNEN J J J, KUITTINEN M, et al. Enhanced optical absorptance of metals using interferometric femtosecond ablation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 13838.

[35] MCDANIEL C, FLANAGAN A, O'CONNOR G M. Evidence for increased incubation parameter in multi-pulse ablation of a Pt: SS alloy using a femtosecond laser at high repetition rates[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 295: 1-7.

[36] 吴泽华, 张楠, 朱晓农. 多脉冲飞秒激光烧蚀铝靶动态特性研究[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(8): 891-900.

WU Z H, ZHANG N, ZHU X N. Study on dynamic process in multiple pulse ablation of aluminum by femtosecond laser[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(8): 891-900.

[37] 郭正松. 基于DOE的激光焊接工艺优化研究[J]. *现代信息科技*, 2019, 3(12): 165-167.

GUO Z S. Study on optimizing laser welding process based on DOE [J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3(12): 165-167.

[38] 侯红玲, 郝海凌, 吕瑞虎, 等. 基于响应面法碳纤维复合材料激光切割工艺参数优化及性能试验[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 307-314.

HOU H L, HAO H L, LYU R H, et al. Parameter optimization and performance test of laser cutting of carbon fiber reinforced plastics based on response surface method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 307-314.

[39] 杨锐, 张健. 基于田口法的镁合金激光焊接工艺参数研究[J]. *轻合金加工技术*, 2012, 40(1): 55-59.

YANG R, ZHANG J. Study on processing parameter of magnesium alloy laser welding based on Taguchi method [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2012, 40(1): 55-59.

[40] EL-TAWHEEL T A, ABDEL-MAABOUD A M, AZZAM B S, et al. Parametric studies on the CO₂ laser cutting of Kevlar-49 composite [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(9-10):

907-917.

[41] SALAMA A, LI L, MATIVENGA P, et al. TEA CO₂ laser machining of CFRP composite [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(5): 497.

[42] 许兆美, 刘永志, 杨刚, 等. 粒子群优化BP神经网络的激光铣削质量预测模型[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2370-2374.

XU Z M, LIU Y Z, YANG G, et al. Laser milling quality prediction model of BP neural network by PSO [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2370-2374.

[43] 易金鑫. 基于GA-BP混合算法的激光工艺参数优化及软件开发[D]. 杭州:浙江工业大学, 2017.

YI J X. Optimization of Laser Process Data and Software Development Based on GA-BP Hybrid Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.

[44] 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, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(17): 9622-9638.

[45] MISHRA D R, BAJAJ A, BISHT R. 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: 174-183.

[46] GAUTAM G D, MISHRA D R. Firefly algorithm based optimization of kerf quality characteristics in pulsed Nd: YAG laser cutting of basalt fiber reinforced composite [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107340.

[47] 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): 1-22.

[48] 张家宝. 基于高斯激光平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2021.

ZHANG J B. Design of Flat-top Beam Shaping System Based on Gaussian Distribution Beam [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.

[49] 李睿. 光束整形及其在飞秒激光微加工领域的应用研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2015.

LI R. Laser Beam Shaping and Using It In the Femtosecond Laser Micromachining [D]. Xi'an: Graduate College of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics), 2015.

[50] 李党娟, 王佳超, 陈阳, 等. 大功率长焦深高斯光束整形设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2129-2137.

LI D J, WANG J C, CHEN Y, et al. Design of high power 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第5期

long-coke deep-Gaussian beam shaping system[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2129-2137.

[51] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.

[52] 谢乾. 飞秒激光贝塞尔光束高效率直写微纳结构的实验研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.

XIE Q. Experimental Study on High Efficiency Direct Writing Micro/nano Structure of Femtosecond Laser Bessel Beam [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016.

[53] 杨泽齐, 段军, 陈航, 等. 皮秒贝塞尔光束切割化学强化玻璃[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 161-166.

YANG Z Q, DUAN J, CHEN H, et al. Chemically strengthened glass fabricated by picosecond Bessel beam cutting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 161-166.

[54] 孙伟高, 季凌飞, 郑锦灿, 等. 飞秒贝塞尔光束直写铈酸锂高深径比光子晶体结构[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002503.

SUN W G, JI L F, ZHENG J C, et al. High-aspect-ratio photonic-crystal structure of lithium niobate fabricated via femtosecond bessel beam direct writing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002503.

[55] 崔鹏. 芳纶纤维复合材料改性制备方法及其切削加工性研究[D]. 济南:山东大学, 2020.

CUI P. Study on Modified Preparation Method and Machinability of Aramid Fiber-reinforced Polymer [D]. Jinan: Shandong University, 2020.

[56] 刘力. K9玻璃微结构超快激光加工技术研究[D].

青岛:青岛理工大学, 2022.

LIU L. Study on Ultrafast Laser Processing Technology of K9 Glass Microstructure [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.

[57] 孙爱西, 郑佳佳, 王成武, 等. 一种超快激光多焦点大间距并行加工装置及方法[P]. CN112846487A, 2021-05-28.

SUN A X, ZHENG J J, WANG C W, et al. Ultrafast laser multifocal large-spacing parallel processing device and method [P]. CN112846487A, 2021-05-28.

[58] 肖海兵. 一种超快激光多光束并行加工装置及方法[P]. CN110026678A, 2019-07-19.

XIAO H B. A kind of ultrafast laser multi-beam parallel processing device and method [P]. CN110026678A, 2019-07-19.

[59] 朱林伟, 周立强, 史强. 一种基于多焦点可控的动态激光并行加工的方法[P]. CN202110768796.5, 2022-09-16.

ZHU L W, ZHOU L Q, SHI Q. A method for dynamic laser parallel processing based on multifocal controllable [P]. CN202110768796.5, 2022-09-16.

[60] 前瞻产业研究院. 2023-2028年中国激光加工设备行业市场前瞻与投资战略规划分析报告[EB/OL]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/746ebell3cc04100.html>

Qianzhan Industry Research Institute. 2023-2028 China Laser Processing Equipment Industry Market Prospect and Investment Strategic Planning Analysis Report [EB/OL]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/746ebell3cc04100.html>