

激光加工碳纤维增强复合材料及其在 航空航天领域应用(特邀)

李欣^{1*}, 宋绮梦¹, 张学强¹, 王少乾¹, 张开虎²

¹北京理工大学机械与车辆学院激光微纳制造实验室, 北京 100081;

²中国空间技术研究院北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094

摘要 碳纤维增强复合材料(CFRP)以其轻质高强、可设计性强等优势已成为航空航天领域不可或缺的关键材料之一。为满足制造装备的要求,需对一体成型的CFRP构件进行二次加工,然而CFRP非均质、各向异性、层合结构等特征使其在加工过程中易出现分层、毛刺、热影响区较大等缺陷。概述了CFRP各种加工方法的研究进展,对比分析了CFRP不同加工方法的优缺点,从方法、工艺及机理层面介绍了激光加工CFRP的研究现状,总结了CFRP在航空航天领域中的应用,分析讨论了CFRP激光加工当前面临的挑战和今后的研究重点。

关键词 激光技术; 碳纤维增强复合材料; 加工工艺; 超快激光; 航空航天

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231358

1 引言

随着航空航天器件朝着大尺寸、高承载、长寿命的方向发展,结构轻量化与高刚度已成为飞机、火箭、卫星等航空航天产品设计制造的基本要求。碳纤维增强复合材料(CFRP)由碳纤维增强相和聚合物基体结合而成,是近年来航空航天领域中应用最广泛的复合材料之一。CFRP根据不同应用要求进行设计,按照所需的配比和铺层角度,由各向异性的碳纤维与基体材料压制而成^[1]。CFRP的性能由碳纤维和聚合物(一般为树脂)共同决定,其中碳纤维作为增强相,具有重量轻、强度高、模量大、耐腐蚀等突出优势^[2-3],主要用于承载负荷,提供复合材料层合板的强度和模量;树脂作为基体相,将碳纤维粘结成一个整体,在碳纤维之间转移负载,主要用于传递应力,并且保护碳纤维免受环境侵蚀^[4]。CFRP复合材料结合了两种材料的优势,具有质轻、比强度高、比模量高、耐腐蚀、低热膨胀、抗疲劳性好、可设计性强等突出优点^[5-6],可应用于飞机机身蒙皮及尾翼、火箭整流罩及仪器舱、探测卫星天线罩及桁架等多种构件,已成为航空航天领域中应用最典型、最广泛和最重要的复合材料。

CFRP优异的性能使其在各个国家经济竞争和航空航天发展中脱颖而出。2022年,全球CFRP需求量已达208千吨,销售收入达到262.1亿美元,其中中国占比32.3%,位列第一^[7],CFRP已成为复合材料市场

不可或缺的一部分。在应用方面,美国F22“猛禽”战斗机使用CFRP代替传统铝合金材料,从而使该战机的机动性、隐身性等作战性能显著提升^[8]。欧洲空中客车公司生产的A380客机使用CFRP使飞机减重1.5吨,燃油消耗量降低13%^[9]。我国自主研发的新一代隐身战斗机歼-20、国产大型飞机C919和C929、武装直升机直10和直19、长征运载火箭等都大量使用了CFRP以实现机体结构的高强度及轻量化。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》将CFRP列为制造业核心竞争力提升的关键战略材料^[10]。

在航空航天设备的加工制造中,CFRP零部件通过一系列固化、铺层和热压等成型工艺,实现复杂构件中材料与结构的同步制造、整体成型,但一次成型的CFRP构件常常因为不能满足产品的工艺要求而需要进行二次加工,因此在最终实际装配前需要进行大量的切割、钻孔、修边等^[11-12]。CFRP自身具有非均质、各向异性、层合结构、耐磨损、高硬度等特征,在加工过程中容易出现材料分层、毛刺、热损伤等加工缺陷,成为典型的难加工材料^[13]。目前CFRP加工方法主要包括机械加工、超声振动辅助加工、水射流加工、电火花加工、激光加工等。

基于此,本文综述了CFRP各种加工方法的研究进展,对比分析了CFRP不同加工方法的优缺点,从方法、工艺及机理层面介绍了激光加工CFRP的研究现状,总结了CFRP在航空航天领域中的应用,分析讨论

收稿日期: 2023-11-03; 修回日期: 2023-11-29; 录用日期: 2023-12-13; 网络首发日期: 2023-12-22

基金项目: 国家自然科学基金航天联合基金(U2037205)

通信作者: *lixin02@bit.edu.cn

了激光加工 CFRP 面临的挑战并进行了相应的展望。

2 非激光加工碳纤维复合材料的典型加工工艺

2.1 机械加工

机械加工依靠刀具对 CFRP 的剪切、拉伸、弯曲、挤压等作用力完成材料的去除,如图 1(a)所示,是目前 CFRP 加工中应用最广泛、最成熟的理论/工艺体系。

CFRP 的机械加工过程涵盖树脂基体破坏和碳纤维断裂两部分,二者交替发生,切削力、切削热等因素动态变化,影响 CFRP 加工质量。基于此,国内外学者从刀具材料、刀具设计、加工工艺等方面开展了一系列研究。在刀具材料方面,Ferreira 等^[15]对比了硬质合金刀具、陶瓷刀具、立方氮化硼刀具和金刚石刀具等不同材料刀具在切削速度和进给率不同时加工 CFRP 的结果,发现金刚石刀具在精加工中更具有优势,能够保证更好的表面质量。为提高刀具的耐磨性,Zhang 等^[16]在硬质合金钻头上涂覆不同的金刚石涂层[微晶金刚石(MCD)、纳米晶金刚石(NCD)和双层复合 MCD/NCD 涂层],通过实验发现 MCD/NCD 双层复合涂层刀具钻削 CFRP 时材料分层最小,切加工后刀具结构表面光滑,刃口锋利,钻削性能最佳。在刀具设计方面,贾振元等^[17]对麻花钻、阶梯钻、双顶角钻和圆弧钻四种钻头加工 CFRP 展开了研究[图 1(b)],结果发现,钻头在设计中具有较低的轴向力归零速度,可降低 CFRP 材料的分层损伤。为进一步减小 CFRP 制孔时的分层缺陷,该团队在钻削刀具上开设反向螺旋槽,发明了一种能实现反向剪切功能的新微齿钻削刀具。当刀具进行高速旋转和进给时,微齿结构后端的反向切削刃可与体内已加工材料相配合,利用体内材料较强的抗压性来限制被切削材料的变形,被切削材料通过二者的相对运动作用,在刀-工接触部位附近被“剪断”,实现钻削碳纤维复材出口损伤的抑制,如图 1(c)所示。无微齿钻头在加工到第三个孔时就出现了明显的毛刺,而微齿钻头可有效控制 CFRP 加工中产生的分层、撕裂和毛刺等缺陷,将刀具寿命延长 6 倍以上^[18]。Gara 等^[19]采用不同微齿结构的滚花铣刀加工 CFRP 的表征图像,通过大量数据研究后发现,粗糙度依赖于刀具的几何形状,精齿滚花铣刀对 CFRP 的加工损伤最小。在加工工艺方面,为减小外界施加的切削力和产生的热量,Morkavuk 等^[20]将 CFRP 样品置于液氮中进行低温铣削加工,低温冷却剂改善了切屑的可破碎性及加工温度,减小了轴向切削力和热损伤,经低温处理的 CFRP 的极限抗拉强度和弹性模量比未经低温处理的 CFRP 分别高出 3.65% 和 3.04%。

为了更好地实现 CFRP 的高质高效加工,国内外学者从切削力变化、切屑形成机理、刀具磨损机理等方面进行了一系列研究。Karpát 等^[21]提出了一种预测切

削力作为纤维取向函数的模型,利用平滑函数表达了切削力系数和纤维切割角度之间的关系,可预测多向碳纤维复合材料层合板铣削过程中的切削力变化。Calzada 等^[22]基于 CFRP 微观结构加工变化,使用连续单元对 CFRP 中的碳纤维材料进行有限元建模,模拟了基于纤维取向的切屑形成过程,可用于改进加工工艺设计。Jin 等^[23]提出了一种将机器学习技术与基于物理的运动学模型相结合的 CFRP 修边刀具磨损预测方法,利用单层 CFRP 的训练数据预测了多向 CFRP 刃口修整时的整体径向力,实现了不同铺层结构 CFRP 在修边过程中刀具磨损的监测。

机械加工属于接触式加工,依靠刀具对样品施加外力去除材料,而 CFRP 各铺层纤维以相同或不同方向堆叠,加工刀具几何结构和角度相对固定,刀具切削刃以不同的瞬时纤维切削角切削各铺层的材料,难以实现对不同方向纤维的低损伤切削^[24];同时 CFRP 高模量、高刚度的特性会对刀具产生磨损^[25],增加加工成本。因此,探索不同 CFRP 加工方法显得尤为重要。

2.2 非传统加工碳纤维增强复合材料

2.2.1 超声振动辅助加工

超声振动辅助加工在机械加工的基础上引入了超声技术,在加工中对刀具或工件施加超声振动,结合超声波的空化作用使刀具在工件上产生高频率小幅度的锤击,实现材料的去除^[26]。超声振动的引入降低了刀具与工件之间的切削力,减少了刀具与工件的接触时间,提高了 CFRP 等难加工材料的可加工性能^[27]。

现有 CFRP 超声振动辅助加工也被称为旋转超声加工,具体操作为在刀具旋转的主轴上施加轴向高频振动以提升切削刀具的加工能力。根据加工的方式不同,可分为旋转超声钻削、旋转超声磨削(RUM)、旋转超声铣削(RUAM)等,加工原理示意图及加工结果如图 2 所示。Liu 等^[28]进行了旋转椭圆超声钻削 CFRP 的可行性研究,发现与传统钻削(CD)相比,旋转椭圆超声钻削(RUEM)可使钻头出口的最大扭矩、平均推力和切削力分别降低 60%、25% 和 45%,有效减少了刀具磨损和材料分层。Wang 等^[29]采用旋转超声磨削加工 CFRP,可得到比传统磨削(CSG)表面更光滑、缺陷更少的加工结果。Lotfi 等^[30]设计并制造了旋转超声铣削刀具对 CFRP 进行加工,有效减少了 CFRP 的纤维拔出和分层。

为研究 CFRP 旋转超声加工的影响因素,Wang 等^[31]研究了在刀具转速、进给速度和切削深度等不同加工变量组合下,超声波频率对旋转超声加工 CFRP 的影响,发现切削力随着超声频率的增加而减小,CFRP 表面粗糙度降低。Geng 等^[32]利用旋转椭圆超声技术对 CFRP 进行钻孔,分析了旋转超声加工 CFRP 的降温机理和防止碎屑黏附的机理,加工中切削刃的间歇性切削作用可在钻孔过程中减少热量产生,改善切屑的去除条件并有效散热,从而减少材料分层。

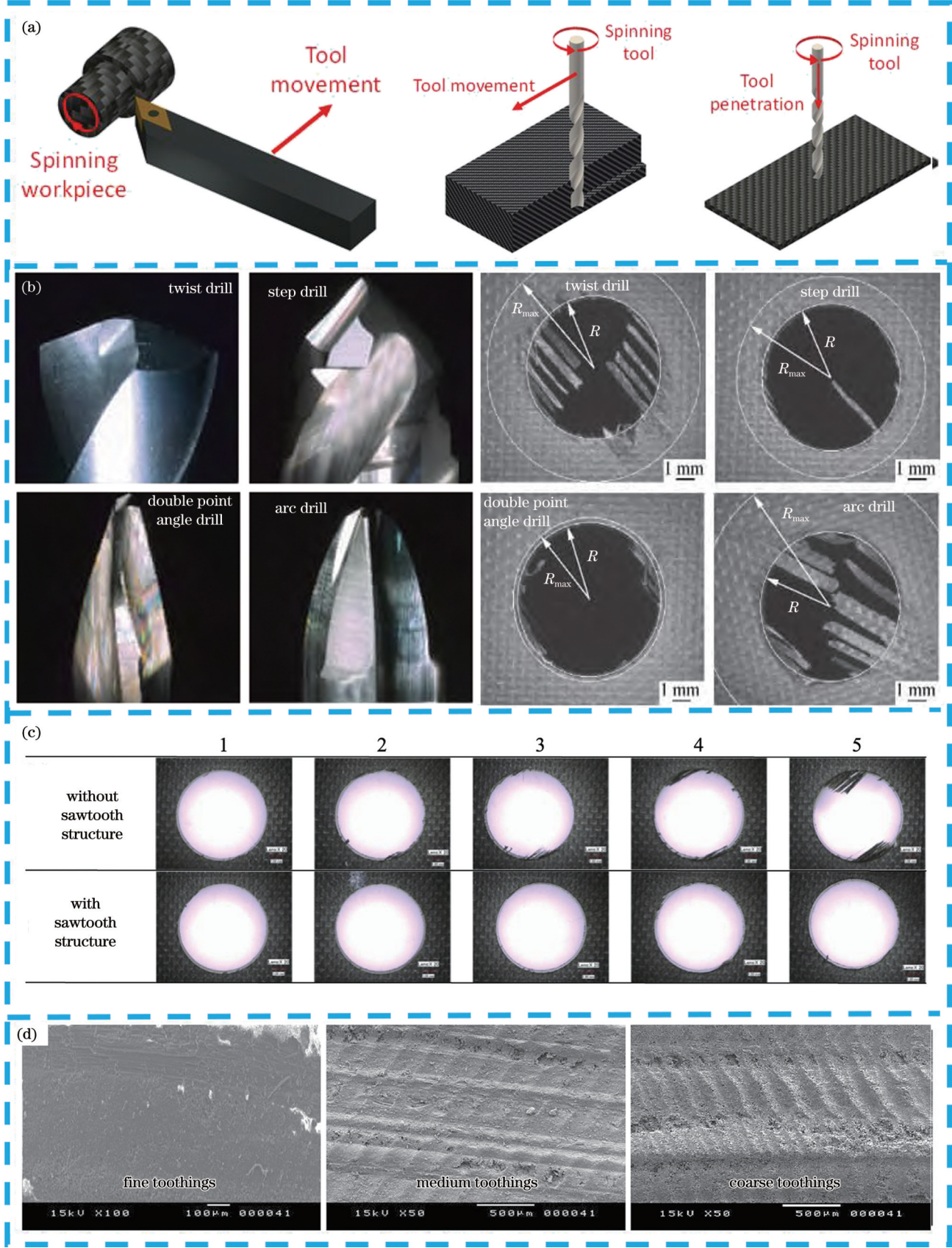


图1 机械加工CFRP。(a)机械加工CFRP示意图(车削、铣削、钻削)^[14]；(b)不同钻头形状及CFRP钻削结果对比^[17]；(c)无微齿钻头和微齿钻头在CFRP上连续制孔的结果^[18]；(d)不同滚花铣刀对CFRP表面粗糙度的影响^[19]

Fig.1 Mechanical machining process of CFRP. (a) Schematics of mechanical processing of CFRP (turning, milling, drilling)^[14]；(b) comparison of different drill bits and CFRP drilling results^[17]；(c) results of continuous drilling on CFRP by drill bits with/without sawtooth structure^[18]；(d) effects of different knurling mills on surface roughness of CFRP^[19]

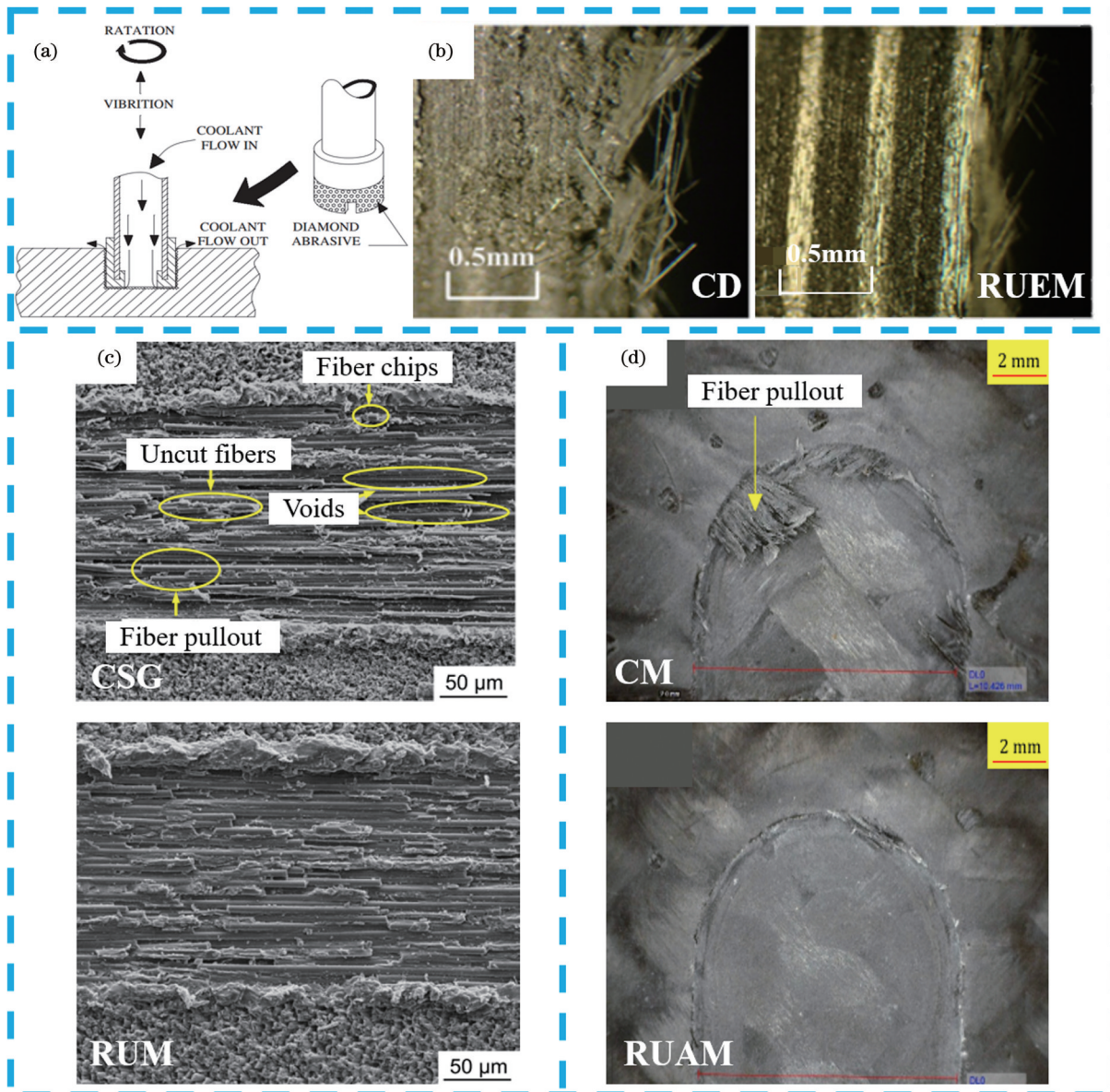


图2 超声振动加工CFRP。(a)旋转超声钻削CFRP示意图^[28]; (b)传统钻削与旋转椭圆超声加工孔洞的入口细节图^[28]; (c)传统磨削和旋转超声磨削加工CFRP的表面扫描电镜(SEM)图^[29]; (d)传统铣削(CM)和RUAM加工CFRP的表面^[30]

Fig. 2 Ultrasonic machining process of CFRP. (a) RUEM diagram of CFRP^[28]; (b) detailed illustrations of hole entrances for CD and RUEM processes^[28]; (c) scanning electron microscope (SEM) images of CFRP surface processed by CSG and RUM processes^[29]; (d) images of CFRP surface processed by conventional milling (CM) and RUAM processes^[30]

超声振动加工能够有效降低切削力,提高加工精度,但目前CFRP的超声振动辅助加工仍以工艺可行性研究为主,关于超声能量引入对纤维断裂拔出、界面分层、基体破碎等机理问题的影响研究有待深入^[33],且超声振动加工普遍存在临界切削速度问题^[34]。如何保证超声振动加工工艺的有效性,及理解超声振动加工CFRP的机理依然值得进一步深入研究。

2.2.2 水射流加工

水射流加工利用高压泵或超高压加压器使水具有极高压力,并通过细小的喷嘴结构将水喷出,利用水射流对材料的冲击完成CFRP的加工^[35]。但增压装置对水的增压作用有限,为大幅提高水射流的冲击性能,学者们将磨料颗粒混入高压水射流流束中,通

过磨粒的冲蚀和磨削作用实现对材料的去除,提高水射流的破坏能力,可应用于多种高强度材料的切割^[36-37]。

Wang^[38]使用不同水压的磨料水射流对聚合物基复合材料进行了切割,指出磨料水射流作为一种“冷”加工手段可有效提升复合材料的切割质量[图3(a)]。除射流压力外,射流速度、磨料流量及尺寸等参数都会影响CFRP的加工结果。Sambruno等^[39]使用磨料水射流对CFRP进行制孔,发现高进给速度会降低孔的圆度,影响加工质量。Doluk等^[40]发现,在高压水射流下增加磨料流量会降低CFRP的切割深度,这是由于流量过大时磨料粒子间易发生碰撞,从而出现磨料碎裂、动能下降。Kumaran等^[41]和Demiral等^[42]结合

实验与数值计算,研究了磨料水射流切割 CFRP 的损伤机理,前者通过建立回归模型,预测了加工参数与表面粗糙度的相关性,后者采用三维 Hashin 损伤模型模拟层内损伤,预测了 CFRP 的层间分层,发现射流压力、速度、磨料颗粒冲击角度等参数对材料的去除

率和损伤有显著影响,为磨料水射流加工 CFRP 的参数选择提供了依据。然而,在磨料提升水射流冲击力的同时,可能会嵌入纤维层或使树脂表面产生凹坑损伤^[43],影响构件的力学性能^[44],常见的水射流加工 CFRP 缺陷形式如图 3(b)~(d)所示。

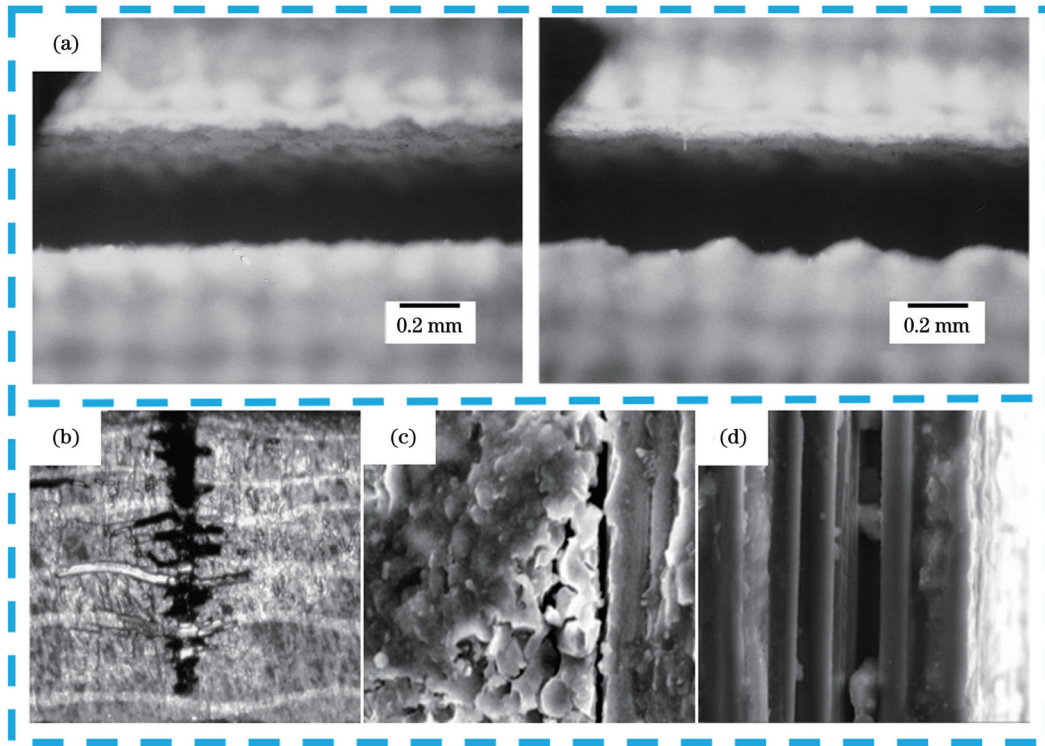


图 3 水射流加工 CFRP。(a)不同水压磨料水射流加工 CFRP 的切缝对比^[38];(b)~(d)常见水射流加工 CFRP 的缺陷形式(切口质量、分层、磨粒嵌入)^[35,42];

Fig. 3 Water jet processing of CFRP. (a) Comparison of CFRP slits machined by different hydraulic abrasive water jets^[38]; (b)~(d) common CFRP defect forms in water jet machining (notch quality, layering, and abrasive embedding)^[35,42]

但是水射流加工的作用边界和深度难以像传统切削刀具一样实现精准控制,更适用于 CFRP 大尺寸大厚度构件下料、粗切,以及对加工精度要求不高的非对接装配构件的加工^[45],如何实现水射流加工的精准控制,减少加工缺陷仍有待深入研究。

2.2.3 电火花加工

电火花加工是指利用两个电极间脉冲放电产生电能和热能,使工件产生局部瞬间高温,从而实现材料的去除,加工过程中无直接的机械接触,减少了应力作用,适合加工高硬度/高强度/高脆性导电材料^[46]。

Lau 等^[47]使用正反极性铜电极和石墨电极对 2.5 mm 厚的 CFRP 层叠板进行钻孔,验证了电火花加工的可行性。在电火花加工 CFRP 的过程中,焦耳热和等离子体热在放电点周围产生极高的温度,使环氧树脂发生热分解,碳纤维发生热致断裂和升华^[48-49],这一系列热能作用易导致 CFRP 加工入口处发生熔化、蒸发和热剥落等热损伤^[50],如图 4(a)、(b)所示。为提高 CFRP 电火花制孔质量,赵一锦等^[51]在不同放电电流

及脉冲宽度下加工 CFRP,加工结果如图 4(c)所示,可以看出,高功率低脉宽可有效抑制热影响区的形成但无法完全避免。Teicher 等^[52]采用硬质合金电极对 CFRP 进行微细电火花加工,研究发现,采用小能量的放电脉冲可获得好的加工质量,且电极损耗率低,但加工效率受到影响,而采用小电流、中高能量的放电脉冲可获得较好的加工质量和加工效率,但电极损耗较大。

由此可见,电火花加工能够成为加工 CFRP 的新途径,但加工过程中存在电极损耗,对加工环境要求较高等问题^[53],实现电火花加工 CFRP 的精准控制、扩大应用范围仍有待进一步的研究。

综上所述,CFRP 作为典型难加工材料,国内外学者对机械加工、超声振动辅助加工、水射流加工、电火花加工等不同加工方法展开了大量研究,各种方法面临的挑战与机遇并存。然而,影响 CFRP 构件加工质量和效率的因素众多,如何实现 CFRP 零件的低损伤和高效率加工仍是 CFRP 构件制造中的难题。

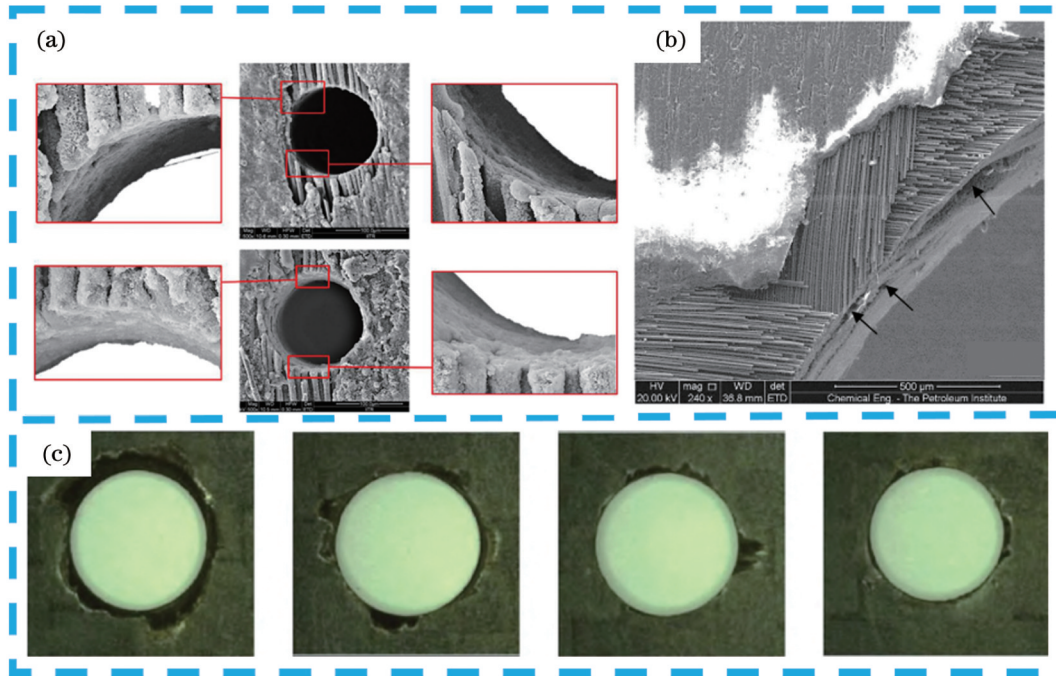


图 4 电火花加工 CFRP。(a)(b)电火花加工 CFRP 易导致的热损伤^[49-50]；(c)不同能量施加方式下 CFRP 电火花制孔质量^[51]
Fig. 4 Electrical discharge machining of CFRP. (a)(b) Thermal damage easily caused by electric discharge machining of CFRP^[49-50];
(c) drilling hole qualities during electric discharge machining of CFRP under different energy application methods^[51]

3 激光加工碳纤维增强复合材料

3.1 激光加工碳纤维增强复合材料的方法

激光加工具有精度高、无机械应力/变形、无刀具磨损、灵活快速、非接触^[54-57]等天然优势,有望成为 CFRP 低损伤和高效率加工的有效手段。然而 CFRP 中的树脂与碳纤维热力学性能存在巨大差异,碳纤维分解温度和导热系数分别为 3300 °C 和 50 W/(m/K),树脂基体分解温度和导热系数分别为 350~500 °C 和 0.2 W/(m/K),激光加工中易产生树脂被烧蚀、碳纤维残留暴露的热影响区(HAZ),树脂缺失使材料微观结构发生变化,承受的载荷不再向碳纤维传递,导致材料力学性能衰退^[58-59],影响 CFRP 构件质量,CFRP 的高质量高精度加工存在巨大挑战^[60]。目前国内外激光加工 CFRP 的研究集中在热致损伤问题及加工质量问题方面^[61]。以下将从传统激光加工、超快激光加工、激光复合加工三个方面对激光加工 CFRP 展开梳理和总结,为激光加工 CFRP 的技术发展提供参考。

3.1.1 传统激光加工

传统激光根据脉冲持续时间分为连续激光(包含连续模式运行的 CO₂激光和光纤激光)、长脉冲激光(脉宽在毫秒、微秒量级)和短脉冲激光(脉宽在纳秒量级),主要依靠热效应完成材料的烧蚀、熔化和去除,通常会产生宽度为百微米量级的 HAZ,HAZ 的存在严重影响 CFRP 的力学性能。

Herzog 等^[62]使用 CO₂激光器、圆盘激光器和 Nd:YAG 脉冲激光器三种不同的激光器,验证了不同激光系统

加工对 CFRP 热影响区以及力学性能的影响。加工结果如图 5(a)~(c)所示,实验发现,CO₂激光切割 1.5 mm 厚的 CFRP 后,HAZ 宽度约为 1400 μm,圆盘激光加工后 HAZ 宽度约为 1200 μm,Nd:YAG 脉冲激光加工后 HAZ 宽度仅有 600 μm,HAZ 尺寸会影响 CFRP 的静态强度,热影响区尺寸越大,静态强度越低。Riveiro 等^[63]研究了在 CO₂激光连续波和脉冲两种加工模式下,加工参数对 3 mm 厚 CFRP 切割质量的影响,发现在脉冲模式下,切割边缘更整齐,HAZ 宽度最低约为 540 μm。Leone 等^[64]使用准连续(QCW)光纤激光,研究了工艺参数对 CFRP 切口几何形状和 HAZ 的影响规律,发现采用高脉冲功率(高达 4.5 kW)和短脉冲持续时间(0.05 ms)可有效减小热影响区,实现宽度小于 200 μm 的窄切口并将 HAZ 宽度控制在 500 μm 左右。Heiderscheit 等^[65]利用纳秒(ns)激光钻孔 CFRP,通过工艺优化加工出 HAZ 宽度约为 164 μm、孔直径为 4 mm 的通孔结构。Schneider 等^[66]研究了高功率的连续波和纳秒脉冲 CO₂激光切割 CFRP,在高功率、高进给速度的配合下,纳秒激光可将 CFRP 层合板的 HAZ 宽度减小到 100 μm 以下,而在相同功率下连续激光加工的 HAZ 宽度是其一倍[图 5(d)、(e)]。可见高强度和短时间的脉冲相互作用可有效减小 HAZ,提高 CFRP 加工质量。Ye 等^[67]分别使用毫秒(ms)激光、纳秒(ns)激光和皮秒(ps)激光对 CFRP 样件进行钻孔加工,并分析比较了对应热影响区[图 5(f)、(h)]: 2.5 mm 厚的 CFRP 材料在毫秒激光加工下的 HAZ 宽度范围为 600~2050 μm,相比之下,纳秒和皮秒激

光加工的 HAZ 宽度仅为 $140\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 。热影响区尺寸越小,材料的抗拉性能越好,与毫秒激光钻孔

样品相比,皮秒激光钻孔样品的抗拉强度提高了 12.2%。

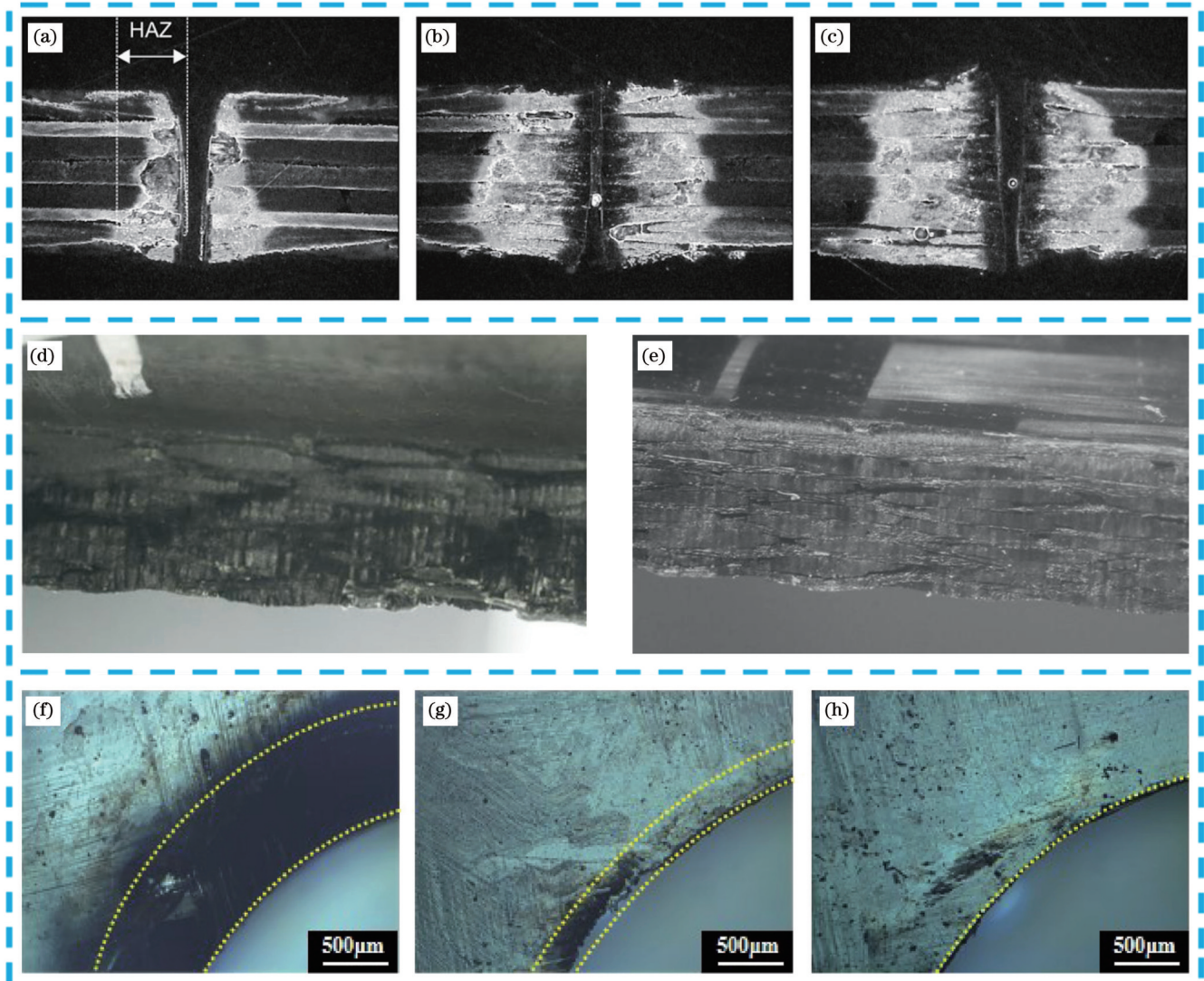


图5 传统激光加工 CFRP 的形貌图。(a)Nd:YAG 脉冲激光器、(b)圆盘激光器和 (c)CO₂ 激光器加工 CFRP^[62]; (d)连续波和 (e)纳秒脉冲 CO₂ 激光切割 CFRP 的截面图^[66]; (f)毫秒、(g)纳秒、(h)皮秒激光钻孔加工结果^[67]

Fig. 5 Morphologies of traditional laser processed CFRP. CFRP machined with (a) Nd:YAG pulsed laser, (b) disk laser, and (c) CO₂ laser^[62]; CFRP cross sections cut with (d) continuous wave and (e) nanosecond pulsed CO₂ laser^[66]; drilling results with (f) millisecond, (g) nanosecond, and (h) picosecond laser^[67]

由上述分析可知,激光脉冲持续时间是影响 CFRP 加工质量的关键因素。在传统激光下通过优化激光脉宽、功率、扫速等工艺参数,难以完成 HAZ 宽度在百微米量级以下的低损伤加工。

3.1.2 超快激光加工

超快激光加工具有超快(极短脉宽 $< 10\ \text{ps}$)、超强(极高瞬时功率密度 $> 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$)、超精密(可突破光学衍射极限)的独特优势,其利用物理/化学效应,作用机制不同于传统激光加工,有望成为 CFRP 低损伤高质量加工手段。

Ouyang 等^[68]提出使用皮秒激光“双旋转”切割技术来加工 CFRP 的孔洞结构[图 6(a)~(c)],加工后切割边缘没有毛刺和裂纹,切割断面无层间撕裂,碳

纤维断裂面规则,加工精度约为 $60\ \mu\text{m}$,加工锥度约为 0.64° ,激光加工后 CFRP 试样的拉伸强度和疲劳性能等力学性能得到了改善。Freitag 等^[69]使用皮秒激光加工 CFRP,对扫描次数、扫描速度、激光功率等加工条件进行优化后,得到的 HAZ 宽度在 $20\ \mu\text{m}$ 以下。在此过程中,研究者发现,增加扫描次数可减少热累积,获得更好的边缘加工结果,但扫描累积效应存在临界值,大于临界值时会对边缘造成巨大热损伤[图 6(e)~(g)]。除皮秒激光外,飞秒激光加工 CFRP 在减小 HAZ 宽度方面的优势明显。Wang 等^[70]设计了一种飞秒激光螺旋钻孔装置,用于 CFRP 高质量、高深径比微孔加工,实现了几乎无锥度的垂直通孔加工,且 HAZ 宽度小于 $15\ \mu\text{m}$ 。Jiang 等^[71]结合飞秒激光和旋

切钻孔装置对 CFRP 进行钻孔加工, 系统研究了飞秒激光参数对 CFRP 孔径质量和热影响区的影响。通过优化, 最终实现了锥度小于 0.32° 、HAZ 宽度低于 $10\ \mu\text{m}$ 的高质量孔径加工[图 6(h)]。

除脉宽外, 超快激光波长和功率也是影响 CFRP 加工质量的关键因素。Wolynski 等^[72]研究了紫外到红外不同波长的超快激光对 CFRP 加工质量的影响, 证明了从红外到紫外, CFRP 对激光的吸收能力逐渐提升, 吸收能力越好, 烧蚀材料所需的能量越少, 在加工过程中能够更加有效地控制加工深度和加工精度。张瑄珺等^[73]使用波长为 $532\ \text{nm}$ 和 $355\ \text{nm}$ 的皮秒激光在 $5\ \text{mm}$ 厚的 CFRP 上进行钻孔, 结果显示, 前者的热影响区宽度大约为 $200\ \mu\text{m}$, 后者的热影响区宽度仅为

$70\ \mu\text{m}$ 。Finger 等^[74]使用高功率皮秒激光切割 CFRP, 发现在 $200\ \text{kHz}$ 的重复频率下采用 $7.5\ \text{m/s}$ 高扫速可实现 HAZ 宽度小于 $5\ \mu\text{m}$ 的烧蚀。

当使用皮秒、飞秒等超快激光加工 CFRP 时, 其“冷”加工效果可轻松将 HAZ 宽度降低到百微米甚至十微米以下。目前超快激光加工 CFRP 仍面临以下三大挑战^[75-76]: 1) 如何实现 CFRP 非均质材料的均质加工? 2) 如何同时进一步降低热影响区宽度和断面倾角(锥度)? 3) 如何提高 CFRP 加工效率以满足工程需求? 随着超快激光器性能(如功率密度和稳定性)的进一步提升, 上述问题有望得到有效解决, 使超快激光成为最理想的加工工具之一。

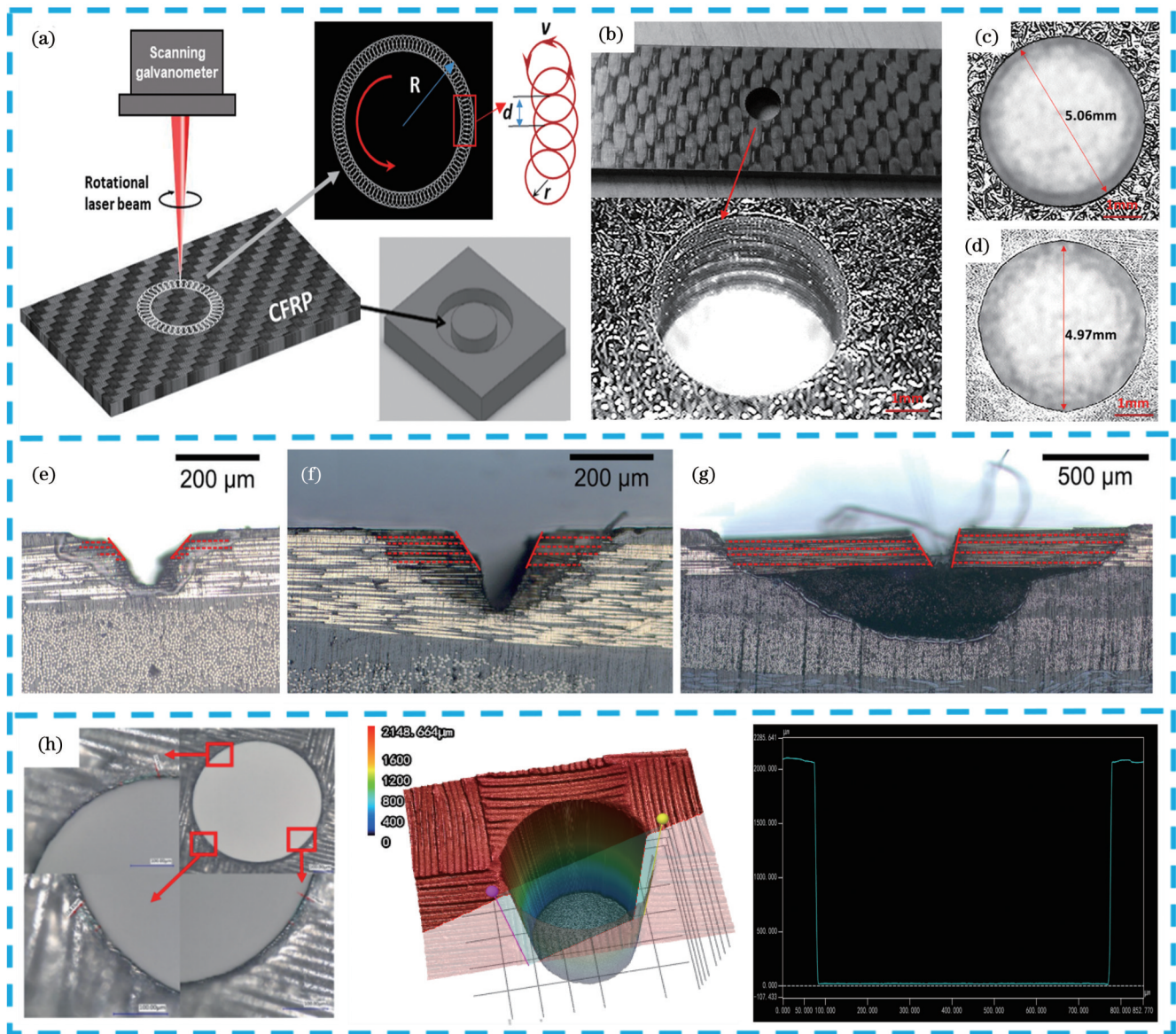


图 6 超快激光加工 CFRP 结果图。(a)~(d)皮秒激光“双旋转”钻孔加工 CFRP 示意图和加工结果^[68];当扫描次数为(e)50、(f)100、(g)200时,高功率皮秒激光切割 CFRP 的切缝形貌图^[69]; (h)飞秒激光钻孔加工 CFRP^[71]

Fig. 6 Results of ultrafast laser processing of CFRP. (a)~(d) Schematics and results of picosecond laser “double rotation” drilling of CFRP^[68]; slit topographies of CFRP cut with high-power picosecond laser when scanning times are (e) 50, (f) 100, (g) 200^[69]; (h) femtosecond laser drilling of CFRP^[71]

3.1.3 激光复合加工

为解决激光加工 CFRP 热损伤严重、加工效率较低、难以加工较厚板材等问题,激光复合加工技术受到越来越多的关注。目前常用的 CFRP 激光复合加工方法有水导激光加工及激光与机械复合加工等,保留了激光无接触、无应力集中、灵活性强的特点,并通过水射流、机械加工等辅助手段减小材料加工的热致损伤,提高加工精度,逐渐成为 CFRP 加工领域关注的重点之一。

水导激光加工是将激光束耦合到水射流中后作用于工件表面实现加工的激光复合加工方法,具体加工原理如图 7(a)^[77]所示。增压纯水通过耦合装置喷嘴

形成高速水射流,由于水与空气折射率不同,光束在二者交界面发生全反射,激光能量在水射流中均匀分布,利用激光的烧蚀和水射流的冲刷作用完成对材料的加工。水导激光集合了水射流切割温度低、工作距离长以及激光加工效率高、材料适用范围广的优点,能够解决激光加工中飞溅物堆积、热损伤严重等问题,为 CFRP 高质高效加工提供了可能。基于此,学者们开展了一系列研究,Sun 等^[78]使用波长为 355 nm 的同种纳秒激光光源切割 CFRP,对比了激光(LBM)和水导激光(WJGL)的加工结果[图 7(b)]。因为水射流直径为激光光斑直径 10 倍左右,加工后水导加工切口宽度明显大于激光直写切口宽度,同时因为水流方向会随

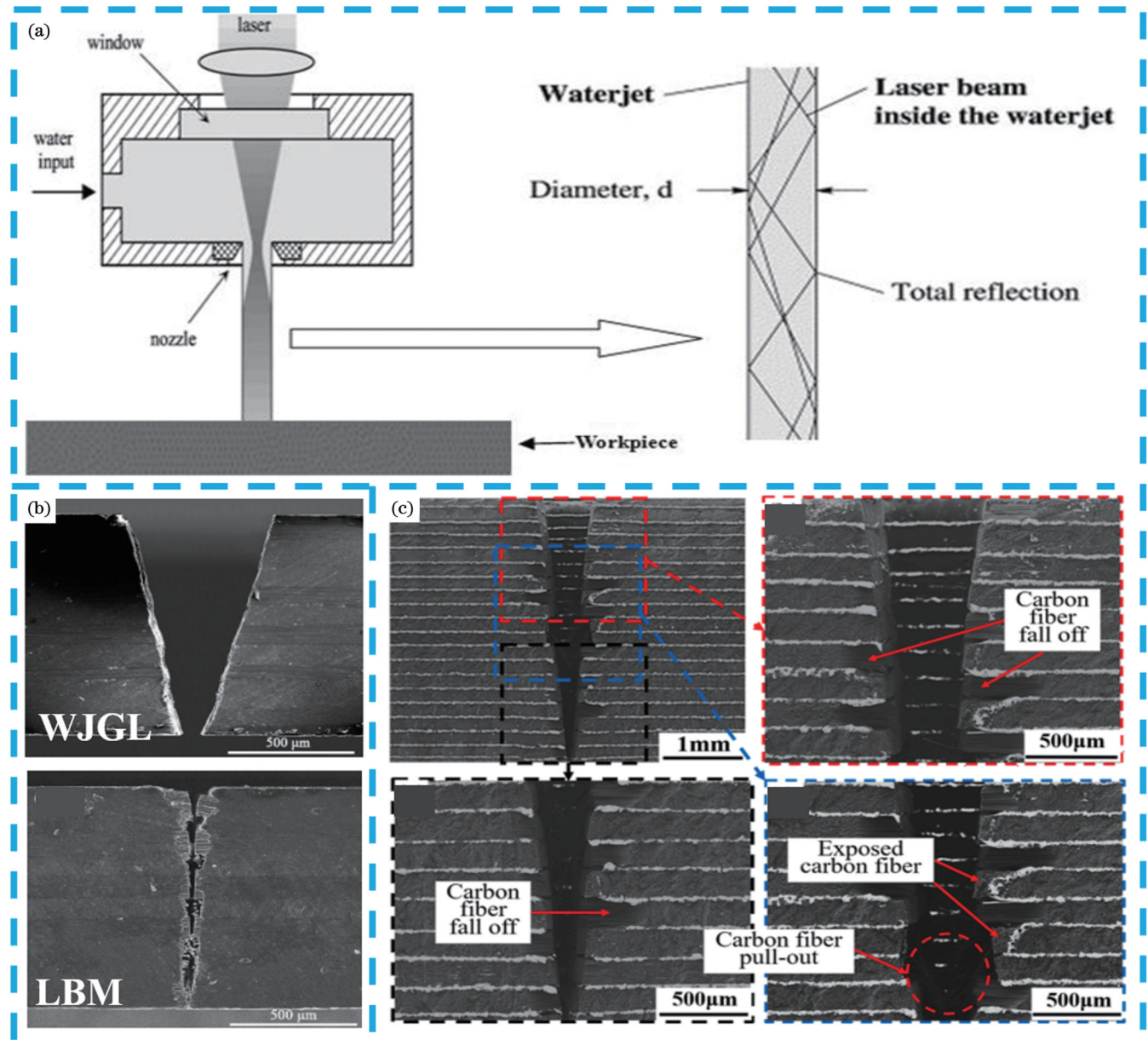


图 7 水导激光加工 CFRP。(a) 水导激光加工的原理图^[77];(b) 水导激光和传统激光切割 CFRP 的切面对比^[78];(c) 4 mm 厚 CFRP 在水导激光加工后的狭缝形貌^[79]

Fig. 7 Water guided laser processing of CFRP. (a) Schematic of water-guided laser processing^[77]; (b) comparison of CFRP sections cut by water-guided laser and conventional laser^[78]; (c) slit morphology of 4 mm thick CFRP after water-guided laser processing^[79]

着材料凹凸不平的表面发生变化,所以激光传播方向有所倾斜,切缝锥度较大。而传统激光光斑小且始终以直线传播,切口宽度较小。水射流的引入减小了 CFRP 加工过程中产生的热损伤,传统激光切割的 HAZ 平均宽度为 $37\ \mu\text{m}$,而水导激光切割表面几乎无明显损伤。Wu 等^[79]采用水导激光切割 4 mm 厚的 CFRP,从实验结果分析了碳纤维排列方向和激光切割路径对 CFRP 加工质量的影响,总结了纤维暴露、拔出和脱落三种加工缺陷的形成机理[图 7(c)]。为阐明水导激光与 CFRP 的作用机理,Zhang 等^[80]对水导激光与 CFRP 相互作用的瞬态热效应及去除机理进行了模拟,分析了水导激光脉冲占空比对材料温度场分布的影响,结果发现,占空比越小,水冷时间越长,激光脉冲之间的热积累越小,HAZ、裂纹等缺陷越少。虽然水导激光加工可减少 CFRP 的热损伤,但此工艺对水质敏感,水中存在的微细颗粒和气泡会导致激光的传输路径发生变化,影响加工质量;当激光功率高于水的击穿阈值时,会产生大量等离子体和气泡,阻碍激光传递,增加激光损耗^[81]。

激光与机械复合加工是在激光钻孔的基础上,预留一定精加工余量用于机械扩孔的复合工艺^[82],主要应用于厚度较大的 CFRP 构件加工,有效避免了机械加工应力集中导致材料易分层和激光加工热影响区残留、锥度较大等问题,提高激光加工效率的同时延长了刀具寿命。Chen 等^[83]使用光纤激光和数控铣削协同加工技术切割 10 mm 厚的 CFRP,先使用高功率光纤激光进行粗加工,再通过铣削精加工残余余量和去除激光加工产生的热影响区,加工结果显示,无热影响区残留,表面相对光滑,提高了加工效率。Zhu 等^[84]对比了机械钻孔及激光与机械复合钻孔 CFRP 的结果,在钻 240 个直径为 6.5 mm 的通孔条件下,前者需要耗费 15 把刀具,后者仅需耗费 8 把刀具,有效延长了刀具寿命。然而刀具磨损问题无法完全避免,且激光与机械复合加工方法目前主要用于毫米级的孔加工^[1],突破加工尺寸限制仍有待深入研究。

除上述方法外,超声振动辅助激光加工^[85]、电场辅助激光加工^[86]、磁场辅助激光加工^[87]等激光复合加工方法已被应用在玻璃、金属、碳化硅复合材料中,但目前针对 CFRP 的研究较少,激光与 CFRP 非均质材料相互作用的研究有待进一步开展。

综上所述,与传统激光相比,皮秒、飞秒等超快激光和激光复合加工 CFRP 都能够显著减小 HAZ,提升加工质量,已成为 CFRP 加工的研究热点和重要发展趋势。但超快激光、水导激光存在激光功率受限的问题,加工耗时长、效率低,随着高功率超快激光的快速发展,加工效率低下的难题有望解决。由于 CFRP 材料的非均质性、超快激光的极端特性及水导激光的耦合特性,难以从微观机理层面理解激光与材料的作用

过程,机理方面仍有待深入研究。

3.2 激光加工碳纤维增强复合材料的工艺

3.2.1 钻孔及切割

为了实现 CFRP 构件之间的连接装配及实际应用,需要进行大量钻孔/切割等加工,然而目前 60% 的 CFRP 零件因钻孔质量差而报废,因而亟须实现 CFRP 的高效率高质量钻孔/切割以满足市场需求^[88]。大量研究工作表明,相较机械加工方法,激光加工方法显著提升了 CFRP 的切割/钻孔质量,工艺灵活可调,针对不同应用需求可进行定制化加工工艺设计。

研究人员为了改善 CFRP 激光切割/钻孔中存在的损伤明显、孔壁质量差、加工效率低等问题,对激光加工工艺(如扫描路径、入射角度等)进行优化(图 8)。Salama 等^[89]采用单道次和多道次平行加工策略对 CFRP 进行钻孔,发现在能量输出和加工时间相同的条件下,增加平行道次可显著增大加工深度和材料去除率。但随着加工深度的增加,上层材料阻碍光束传播,导致激光制孔最大加工深度受到限制,加工结果出现较大的锥度。为了进一步减小 CFRP 孔径锥度、提升侧壁表面质量,Qiao 等^[90]利用五轴振镜调控扫描激光束的传输方向,研究了激光束与工件之间的入射角(AOI)对 CFRP 钻孔锥度和侧壁质量的影响规律。结果表明:增加激光 AOI 可防止入射激光被侧壁阻挡,减少纤维缺损及树脂的熔化和再凝固;并可提高激光能量密度,从而提升激光加工效率,减小侧壁锥度。针对较厚(10 mm 以上)的 CFRP 层合板难以实现高效高质加工的难题,Tao 等^[91]提出了一种双光束制孔工艺,该工艺采用同轴且相对的两束脉冲激光同时对 CFRP 厚板进行加工,将加工效率提高近 2 倍,且孔进出口的热影响区明显减小。但该工艺使用同心圆扫描方式,成型孔截面锥度问题仍然较明显,为了改善这一问题,Li 等^[92]提出了一种交错扫描新模式来改善 CFRP 结构锥度和表面质量。与同心圆扫描方式相比,使用交错扫描工艺可有效减弱 CFRP 钻孔加工中的热累积效应,HAZ 宽度和锥度分别降低 55.01% 和 51.48%。

3.2.2 表面处理

CFRP 表面树脂光滑、表面能低、润湿性差,难以与胶体或涂层材料实现有效结合。激光表面处理可用于 CFRP 表面选择性去除、表面微纳结构加工等,能够有效调控 CFRP 材料表面形貌、粗糙度、化学成分、润湿性等。激光表面处理可增强 CFRP 与胶体或涂层的机械互锁和化学黏合,将材料表面胶体或漆体的失效形式从黏结失效变为材料或胶体的强度失效,提高表面结合强度,显著提高材料应用的稳定性。

涂层可保护 CFRP 免受腐蚀、磨损和其他环境影响,提高材料耐久性和可靠性。然而 CFRP 表面涂层附着力通常较差,为提升表面结合强度,See 等^[93]使用

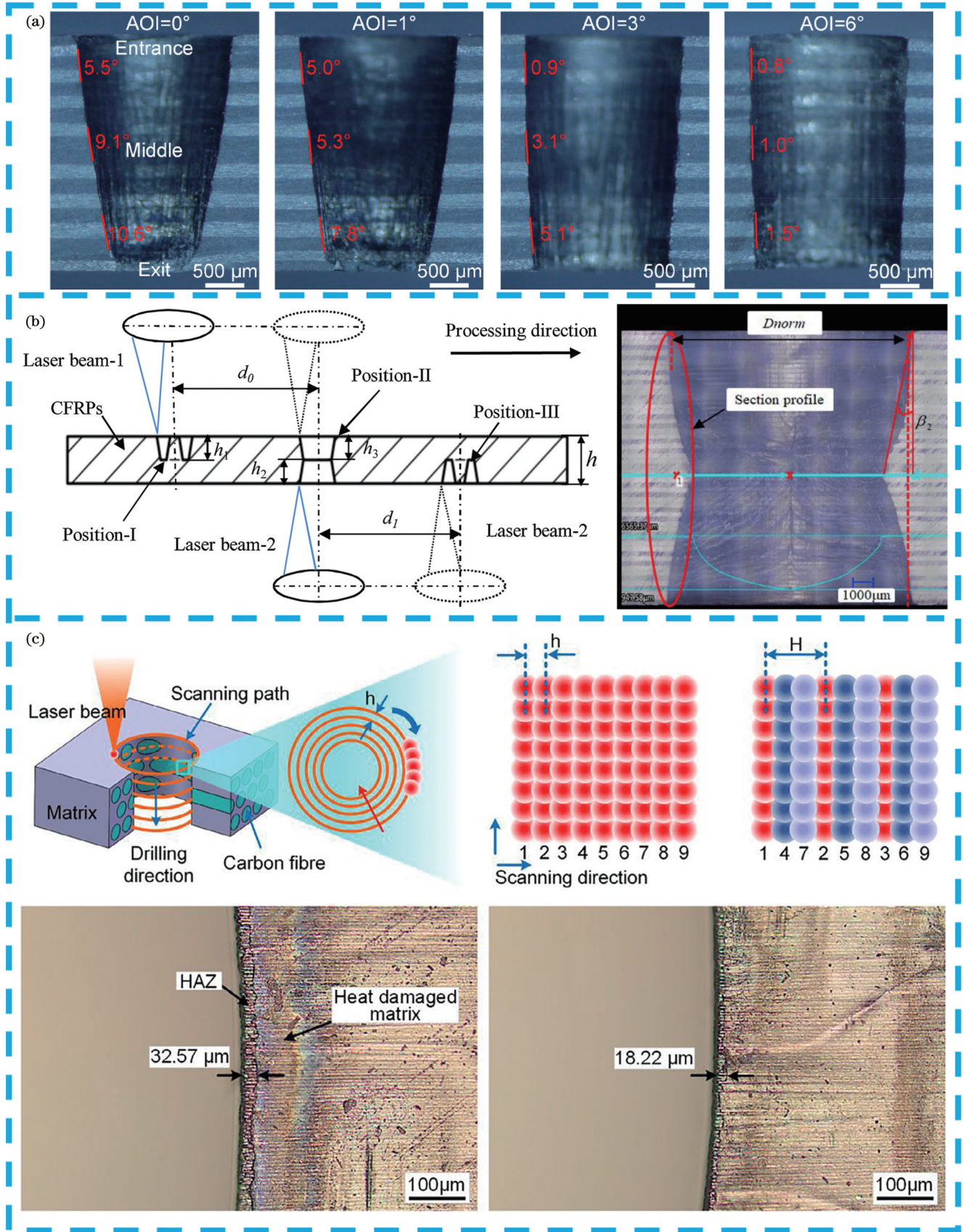


图 8 激光钻孔 CFRP。(a)激光 AOI 对 CFRP 侧壁锥度的影响^[90]；(b)“双光束”制孔工艺示意图及孔截面形貌^[91]；(c)顺序扫描方式和交错扫描模式的原理示意图及加工效果图^[92]

Fig. 8 Laser drilling of CFRP. (a) Influence of laser AOI on CFRP sidewall taper^[90]; (b) schematic of “double beam” laser drilling process and hole cross-section morphology^[91]; (c) schematic and processing effect of sequential scanning mode and interlaced scanning mode^[92]

KrF 准分子激光对 CFRP 进行表面处理加工,与传统砂纸打磨相比,激光表面处理显著提升了涂层的黏附程度。通过表征分析,发现激光表面处理实现了 CFRP 材料表面污染物的有效去除、表面结构的形成、表面活性官能团的增加等。表面预处理是提升 CFRP 异质结构胶接强度的有效策略,为了探究其界面作用机制, Li 等^[94]利用皮秒红外 (IR) 激光和纳秒紫外 (UV) 激光对 CFRP 接头表面进行预处理,表面形貌如图 9(a) 所示,这两种方法都将材料的剪切强度提升三倍以上,并通过有限元仿真分析,发现化学键合在增强异质接头结合强度方面起主导作用,而机械互锁相对次要。研究者认为皮秒红外激光具有更高的加工效率和更优的提升效果,更适用于胶粘异质结构的表面预处理。仅通过优化参数实现 CFRP 表面选择性去除对表面结合强度的改善是十分有限,因此, Xie 等^[95]提出了一种提高 CFRP 层合板黏接强度的激光表面处理两

步法:首先,在最佳激光加工参数下,完全去除 CFRP 层合板黏接界面上的表面树脂材料;然后,通过进一步的激光加工,在裸露的碳纤维织物上蚀刻出一系列不同图案的凹槽结构。实验发现,交叉沟槽的黏接比平行沟槽、光滑表面(只完成第一步的选择性去除)的黏接具有更好的抗剪强度。 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 交叉槽条件下的抗剪强度相比于光滑 CFRP 表面提升了 40.8%。CFRP 材料在飞机轻量化发展中发挥着重要作用,但同时航空航天应用也对其表面润湿特性提出了一定要求。Hauschwitz 等^[96]利用直接激光干涉图案化 (DLIP) 的方法在 CFRP 材料表面制备出功能化周期性多级结构 [图 9(b)],并通过调控激光参数实现了微结构的尺寸、深度及一致性的精准调节。在激光加工后,又进行了化学硅烷化处理,以降低 CFRP 材料的表面能,增强其疏水性,最高静态接触角可达 171° ,实现了优异的润湿性能,使 CFRP 具备超疏水、抗结冰等特性。

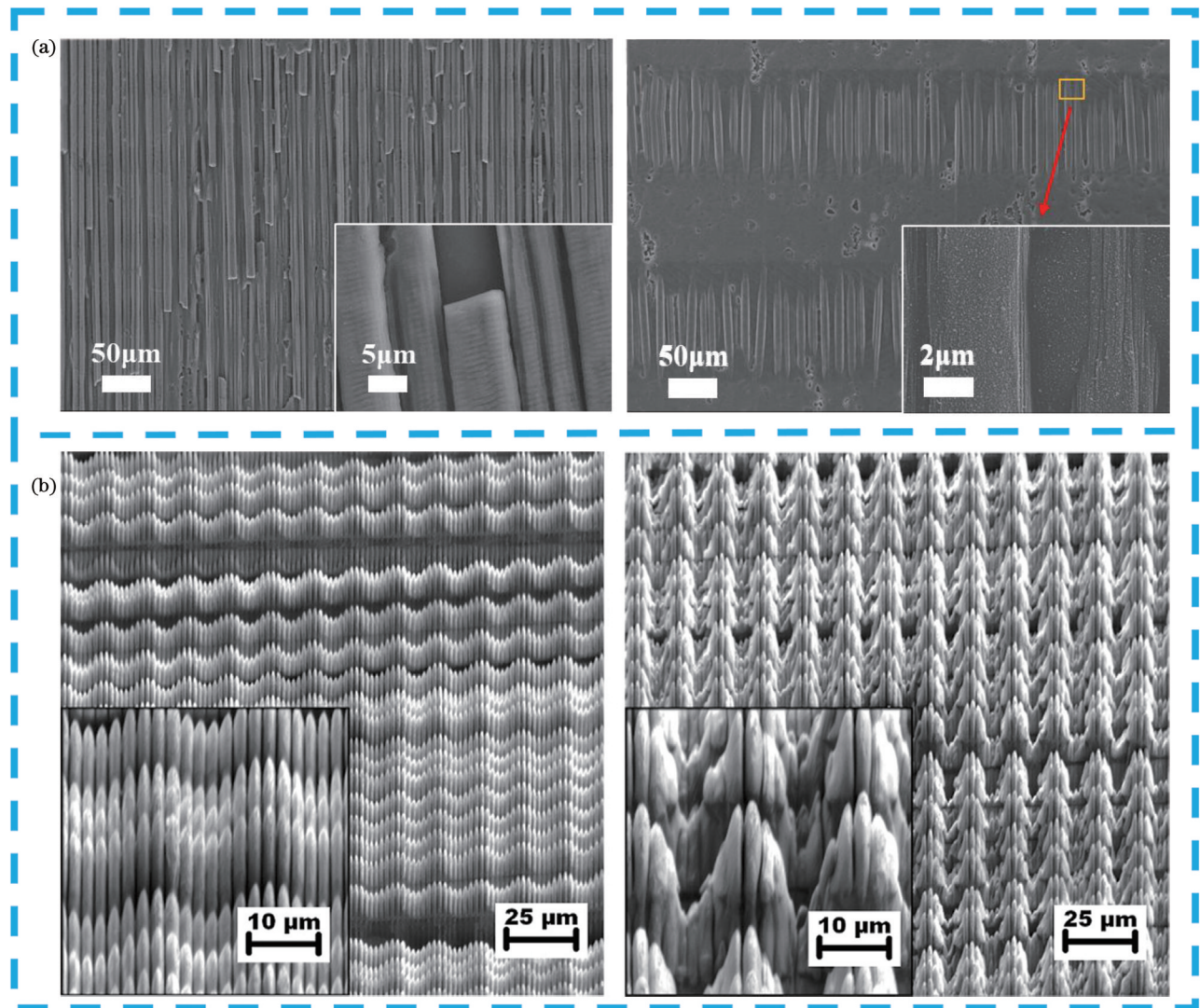


图9 激光表面处理 CFRP。(a)红外及紫外处理 CFRP 的表面形貌^[94]; (b)激光制备 CFRP 的表面微纳结构^[96]

Fig. 9 Laser surface treatment of CFRP. (a) Surface morphologies of CFRP treated with infrared and ultraviolet radiation^[94]; (b) laser preparation of CFRP Surface Micro/Nanostructures^[96]

3.2.3 激光焊接

CFRP/金属异质结构可有效实现轻量化并保证机械强度。激光焊接是一种非接触、高效、精确、灵活的焊接方法,其利用高能激光束使金属材料和CFRP表层树脂熔融、冷却,进而连接成具有一定强度的结构件^[97],可实现CFRP与钛合金、铝合金、钢等金属材料的高质量连接,有效解决了机械连接中的应力集中、应力腐蚀和胶接中黏结剂不易附着、黏结不均匀等问题,具有广泛的应用前景。

CFRP/金属异质结构激光焊接的界面连接机理是该领域的研究重点。Jung等^[98]对CFRP和304不锈钢进行了连续激光焊接研究,结果发现,CFRP中的熔化塑料渗透到不锈钢的界面凹槽或晶界中,实现了物理机械互锁;此外,在微观界面处,熔化塑料在原子/分子尺度上紧密结合不锈钢表面的铬-铁氧化膜,实现了化学键和物理键界面结合。因此CFRP/304不锈钢激光焊接异质结构紧密结合形成牢固连接,可承受的剪切载荷高达4800 N,远超其他塑料-金属的焊接接头。但连接界面处产生了较大数量和尺寸的气泡,研究者认为其作为断裂通道导致了接头力学性能的退化。为了探究激光焊接过程中气泡的内在形成机制,Tan等^[99]通过分析孔隙特征与工艺参数的关系,揭示了CFRP与钢激光焊接过程中的气孔形成过程:当热输入大于77.8 J/mm时,CFRP在连接界面中心区域附

近发生热解,酰胺基团之间首先发生交联反应,导致脱水。然后酰胺键发生水解,产生大量 CO_2 、 NH_3 、 H_2O 、碳氢化合物等气体产物,最终导致界面范围出现大量气孔,影响CFRP的焊接性能。因此,通过控制热输入防止基体热解,可以有效抑制气泡产生,优化前后激光焊接CFRP的对比图如图10(a)、(b)所示。为了实现最小孔隙缺陷并提升激光焊接效率,Wang等^[100]采用整形激光对CFRP与铝锂合金进行焊接,将原始的高斯激光束整形为矩形激光束,相较能量分布不均的高斯激光,矩形光束光斑具有相对均匀的能量密度,从而在焊接界面上提供了均匀的温度分布,最大限度地减少了孔隙缺陷,同时提高了接头的机械强度,具体焊接结果如图10(c)、(d)所示。在矩形激光束焊接下,在很宽的参数范围内都能实现成功焊接,表明该方法具有良好的适应性。当激光功率为5 kW时,焊接速度可达110 mm/s,显著提升了焊接速度。为进一步提高CFRP与金属之间的结合强度,Tan等^[101-102]采用微弧氧化和硅烷偶联剂处理的复合改性方法对钛合金表面进行优化,提高了金属表面的粗糙度,获得表面微纳结构,使钛合金表面能够吸附更多羟基,在增加CFRP与钛合金接触面积的同时,诱导官能团之间氢键的形成,实现了机械互锁及化学键和官能团相互作用的全面增强,对激光焊接CFRP与异质金属的工艺优化研究具有指导意义。

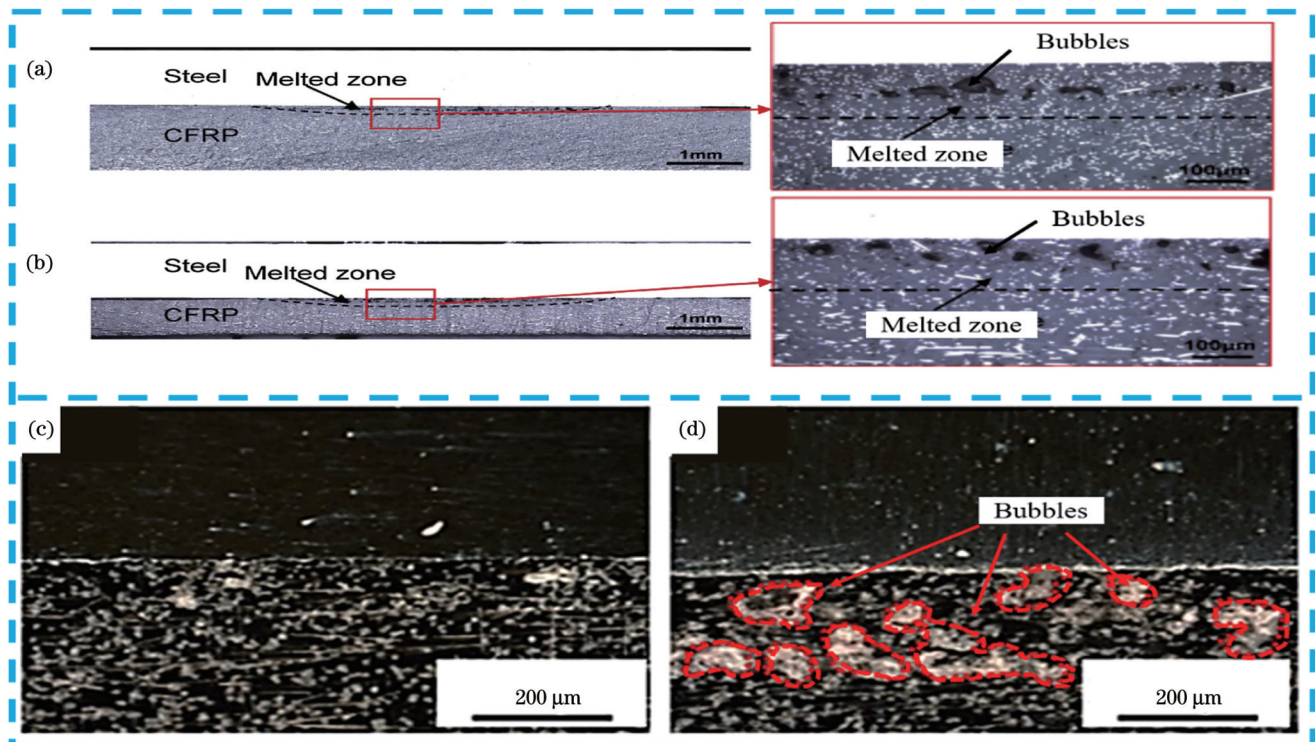


图10 激光焊接CFRP与金属材料。优化(a)前、(b)后激光焊接CFRP与钢过程中的气泡对比^[99]; (c)矩形激光和(d)高斯激光焊接CFRP与铝锂合金^[100]

Fig. 10 Laser welding of CFRP and metal materials. Comparison of bubbles during laser welding of CFRP and steel (a) before and (b) after optimization^[99]; (c) rectangular and (d) Gaussian laser joining of CFRP and Al-Li alloy^[100]

除此之外,激光辅助成型^[103-104]工艺可将高效的固化方式与纤维铺放、纤维缠绕等工艺结合,进而显著降低树脂基复合材料的制造成本,在大尺寸和厚 CFRP 零件制造中具有很大优势;激光检测技术可用于 CFRP 表面缺陷的快速无损检测,确定表面损伤的尺寸、位置和裂纹角度,可在生产和维修的每个阶段通过检测来评估材料和部件的安全性和可靠性^[105-106]。激光技术在 CFRP 制备、加工、检测等众多领域中发挥着重要应用。

3.3 激光加工碳纤维增强复合材料的机理研究现状

激光与材料的相互作用涉及光学、热学、力学、流体力学等多学科,而 CFRP 是由树脂和碳纤维组成的非均质层状复合材料,其中树脂为透明绝缘体、碳纤维为类金属良导体,二者在力、热、电、光等方面性质迥异,且通常以树脂-纤维-树脂-纤维顺序交叉逐层排布^[5],因此激光与 CFRP 的相互作用机制十分复杂。激光束照射到 CFRP 表面时,会发生反射、吸收、散射等现象。其中,吸收是激光加工的关键,决定了激光能量的传递和转化,CFRP 的吸收率受到激光波长、功率、照射时间等多重因素的影响^[72,74],基于此,学者们采用数值模拟和实验验证等手段对激光加工 CFRP 的机理开展了一系列研究。

在数值模拟方面,研究人员利用基于傅里叶定律的热扩散方程对 CFRP 的激光加工进行了仿真模拟,指导 CFRP 激光加工技术的提升。Xu 等^[107]按照 CFRP 成分中碳纤维和聚合物的体积比例,对数值模型中 CFRP 的密度、热导系数、比热容等参数进行均质化处理,建立了可预测 CFRP 纳秒激光烧蚀深度和热影响区的宏观均质化的有限元模型^[图 11(a)],揭示了激光烧蚀和聚合物热解均会引起材料的机械侵蚀效应,该效应有利于提高激光加工 CFRP 的材料去除率。Weber 等^[108]建立了激光作用单层 CFRP 材料时升华过程的“垂直热流”模型,利用该模型可推导出符合加工应用要求的最佳激光加工参数。Wang 等^[109-110]采用曲线坐标系建立了基矢量系统,描述了碳纤维在轴向、径向上具有各向异性传热的特性及树脂和碳纤维在热容、热导等物理性质上的差异引起的 CFRP 非均质特性,建立了可预测 CFRP 激光烧蚀形貌和热损伤机理的非均质化的有限元模型,如^{图 11(b)}所示,提出碳纤维轴向热传输速率大于径向热传输速率是热损伤形成的主要原因。Takahashi 等^[111]计算了不同波长激光作用 CFRP 时的温度分布,解释了不同波长下激光切割 CFRP 的机理差异:在红外激光下,树脂基体对激光的吸收率小于 15%,绝大部分激光能量穿过树脂直接加热碳纤维,而紫外激光产生的能量几乎可以完全被树脂基体吸收,加工出的边缘质量更高、热影响区更小。

在实验验证方面,研究人员利用高速相机观测、红外热成像观测、声发射信号监测、激光诱导击穿光谱等

技术手段对 CFRP 的激光加工过程进行了观测和分析,定性研究了激光加工 CFRP 复合材料过程中的材料去除机理。Tao 等^[112]利用高速相机对脉冲激光加工 CFRP 时的材料去除动态进行了观测研究,提出了激光加工 CFRP 时的材料去除机制,包括热去除、氧化去除和机械去除三个阶段^[图 11(c)]。Bluemel 等^[113]通过观测揭示了激光加工 CFRP 过程中等离子体的寿命以及等离子体在两个脉冲之间的变化,结果表明,激光诱导产生的等离子体寿命在 20~200 μs 之间,当激光脉冲重复频率为 5~50 kHz 时,等离子体的寿命将缩短,羽辉的面积也将减小,有助于减小羽辉对激光束能量的遮挡作用,促进光场的进一步传播。Chen^[114]则利用 CFRP 激光加工过程中监测到的声发射信号特征,对 CFRP 材料激光去除机制进行了分析^[图 11(d)],发现迅速膨胀的等离子体羽辉会冲击并除去中间未烧蚀材料,引发机械剥蚀去除的现象,并会导致声发射信号的进一步增大,因此提出可根据声发射信号对 CFRP 的激光去除机理进行分析判断。

综上所述,在激光加工 CFRP 的机理研究方面,研究人员主要从宏观层面分析了传统激光与 CFRP 相互作用过程中的能量传递与材料不同组分的温升响应关系,或通过高速摄像等观测设备进行定性的机理分析,这些研究对激光加工 CFRP 的参数选择具有重要指导意义。然而,目前激光与 CFRP 相互作用的机理研究主要是基于实验现象推论和均质化或非均质化处理的热平衡傅里叶传输方程,尚未考虑加工过程中局部瞬时电子动态引起的复合材料特性变化。CFRP 中的树脂与碳纤维在超快激光作用下的响应迥异,关于超快激光作用下 CFRP 的非线性、非平衡、非均质能量传输过程还有待深入研究。

4 碳纤维增强复合材料在航空航天领域中的应用

航空航天器被誉为工业皇冠,各类航空航天器的研制越来越受到各个国家的重视,成为国家科技先进水平和综合国力提升的重要标志。高速、轻质和高承载能力已成为影响航空航天器件升空的关键要素,飞行器结构重量每降低 1%,其油耗可减少 3%~4%。相比传统铝合金、钢材等,CFRP 质量更轻且具有更优异的机械性能(高比模量和高比强度)、热力学性能(低热膨胀和高热导率)和化学性能(耐腐蚀),可大力推动航空航天器的轻量化、小型化发展^[115]。

4.1 在飞机上的应用

在军机、民机的大型承力构件中,采用 CFRP 替代金属材料,可大幅降低结构质量,减少油耗,降低运营成本。同时,基于 CFRP 整体成型工艺,可开展飞机结构一体化设计,减少飞机结构的零件种类、数量,缩短制造装配生产周期,进而降低飞机制造成本。

美国 F-22“猛禽”战斗机大量使用 CFRP 材料代

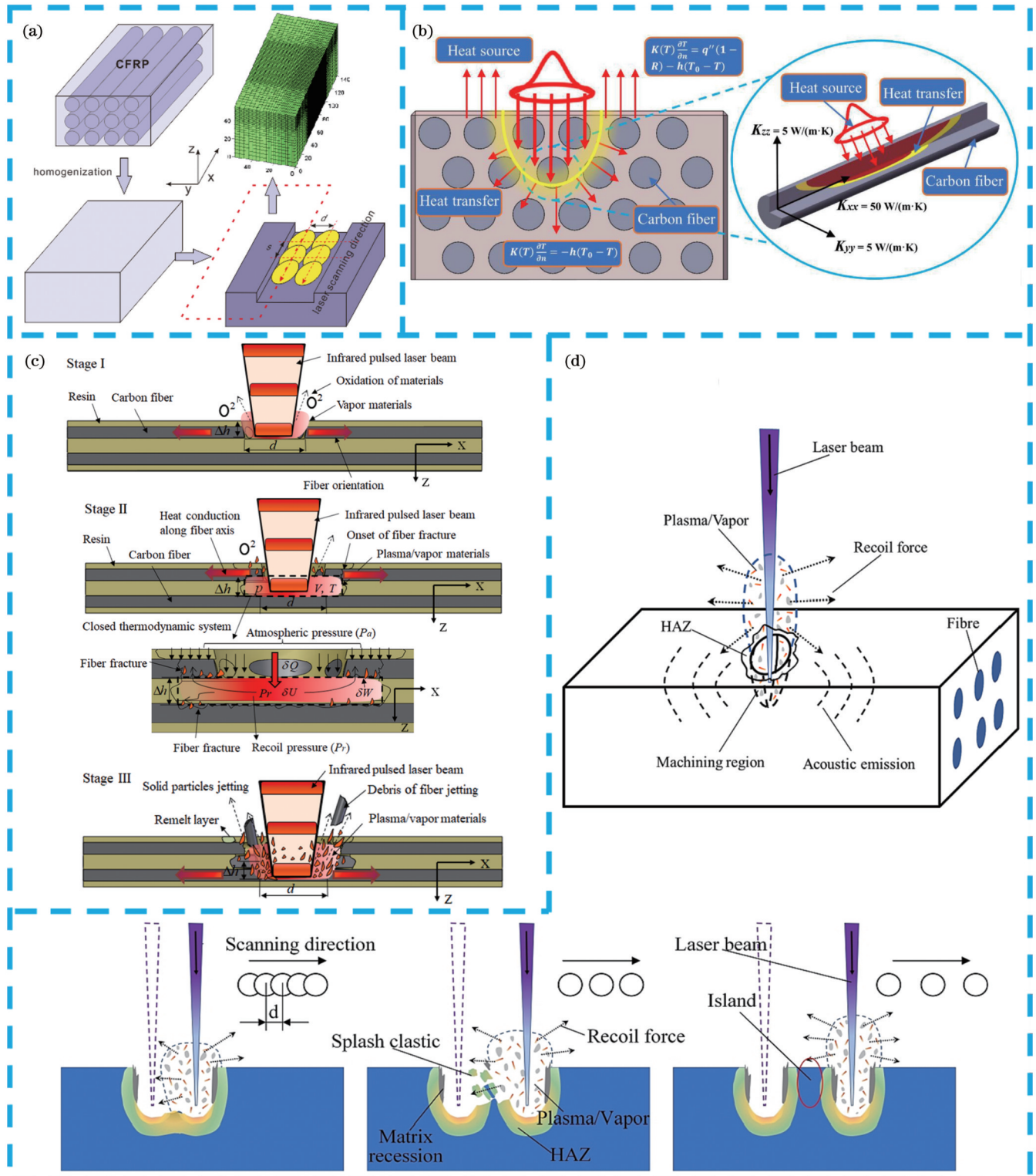


图 11 激光与 CFRP 材料的作用机理。(a) CFRP 均质化处理的数值模型^[107]；(b) CFRP 非均质处理的数值模型^[110]；(c) CFRP 高速相机观测实验^[112]；(d) CFRP 声发射技术探测实验^[114]；

Fig. 11 Mechanism of interaction between laser and CFRP. (a) Numerical model for homogenization treatment of CFRP^[107]；(b) numerical model for heterogeneous treatment of CFRP^[110]；(c) CFRP high-speed camera observation experiment^[112]；(d) CFRP detection experiment by acoustic emission technology^[114]

替传统的铝合金材料,采用树脂传递模塑成型(RTM)工艺制造复材零件约 400 件,使得战机整体质量得到大幅提升的同时,节省开支 2.5 亿美元^[8]。波音公司生产的 B787 客机在飞机机身、机翼、尾翼、升降舵和方向

舵等部件中大量采用了碳纤维增强复合材料,显著减轻了飞机重量,可节省 20% 燃油^[116]。欧洲空中客车公司生产的 A350 飞机机身框架、舱门、蒙板等构件均采用了 CFRP 材料,CFRP 良好的抗疲劳性能和耐腐蚀

性能,使得 A350 飞机的维修时间间隔比以往增加了一倍^[117]。除载人飞机外,CFRP 在无人机领域中同样应用广泛。美国制造的“捕食者”MQ-1 无人机机身大量采用 CFRP,在保证刚度的同时有效减重^[118]。在我国自主研发的第二代国产大型飞机 C919 的机身结构中,复合材料用量占比约为 11.5%,是我国民用航空制造

领域第一次在主承力结构、高温区、增压区使用复合材料^[119]。在军机制造领域,新一代隐身战斗机歼 20、武装直升机直 10 和直 19 都大量使用了 CFRP 以实现机体结构的高强度及轻量化^[120],表明该材料在飞机上有着广阔的应用前景。CFRP 在飞机上的应用如图 12 所示。

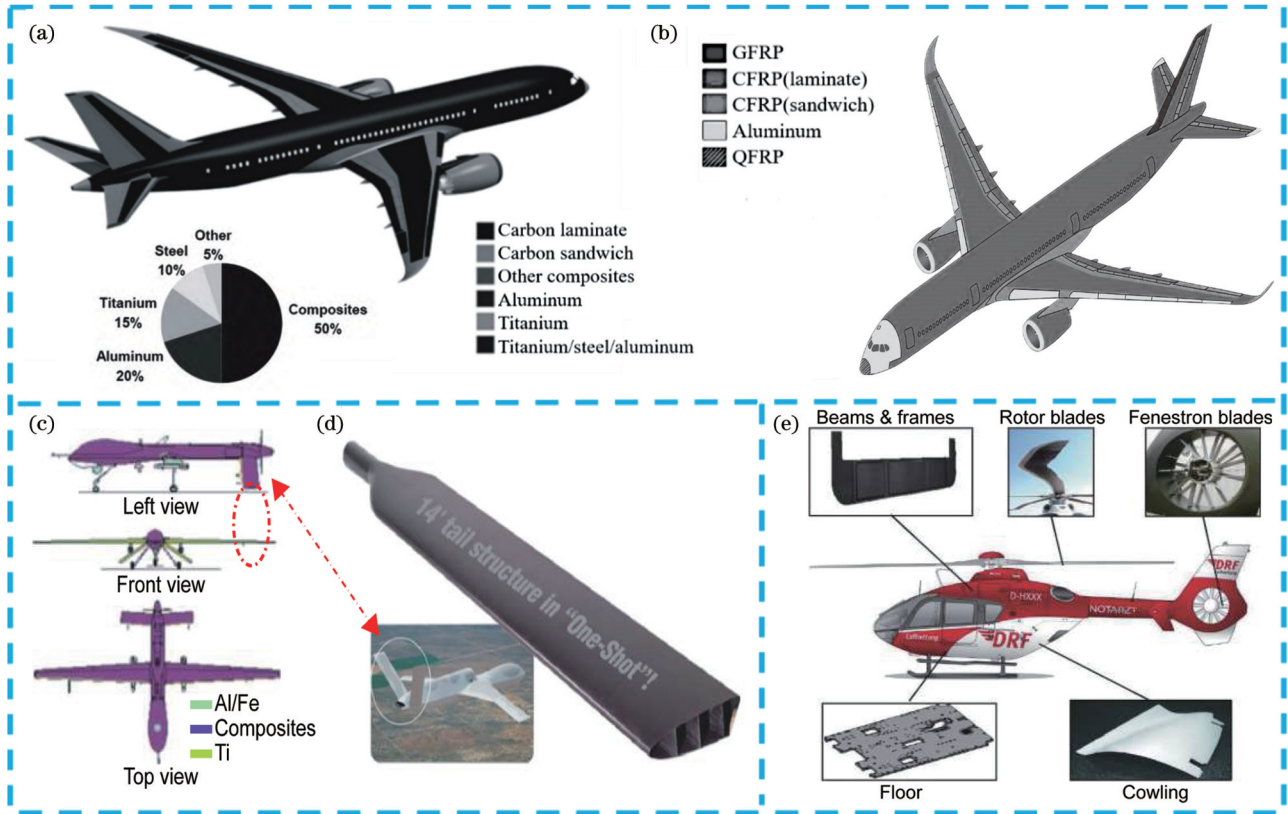


图 12 CFRP 在飞机上的应用。(a)波音 787 材料使用分布图^[116]; (b)空客 A350 材料分布图^[117];“捕食者”MQ-1 无人机的 (c) 材料分布示意图及 (d) 复合材料尾翼^[118]; (e) 直升机复合材料的应用部件^[119]
Fig. 12 Applications of CFRP in aircraft. (a) Material distribution of Boeing 787^[116]; (b) material distribution of Airbus A350^[117]; (c) material distribution and (d) composite tail of MQ-1 Predator unmanned aerial vehicle^[118]; (e) application parts of helicopter composite materials^[119]

4.2 在运载火箭上的应用

单位重量高昂的发射成本、运载火箭有限的推力、发射过程中的剧烈振动和加速过载、在轨仪器受热与振动导致的低频振动干扰等因素,使得结构轻量化与高刚度成为星、船、器等空间飞行器设计制造的基本需求。

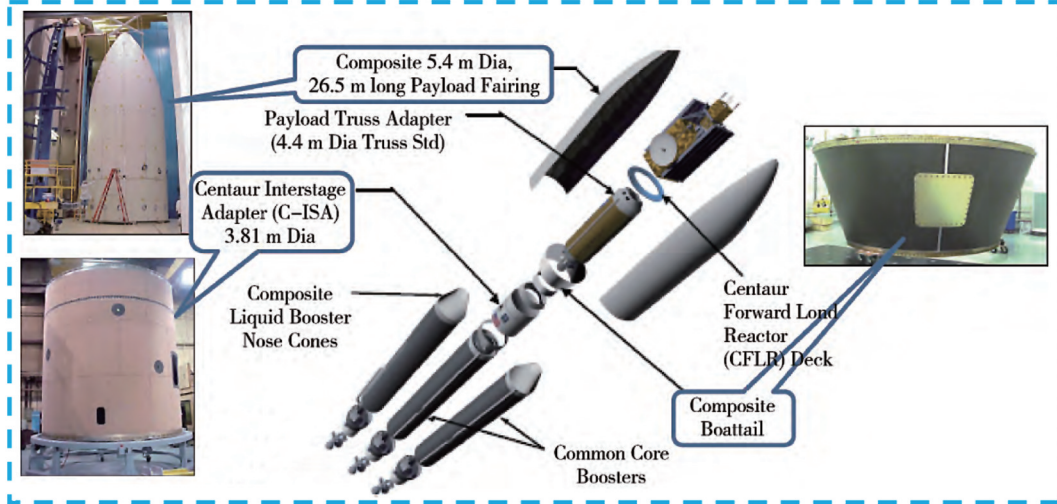
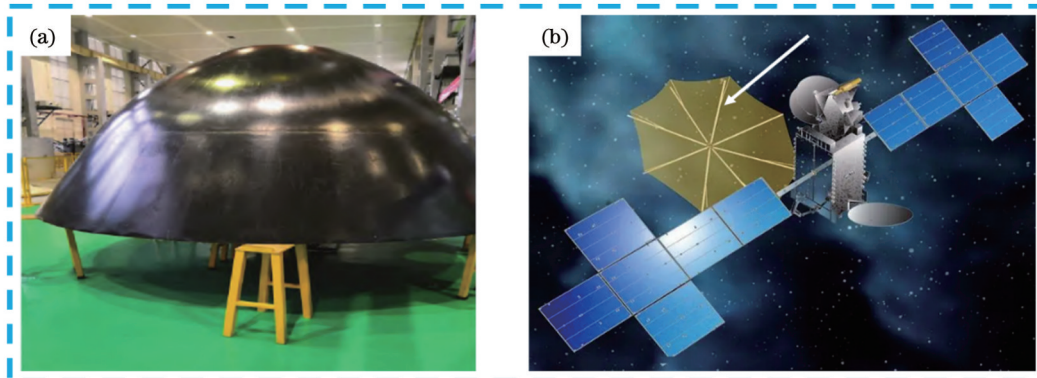
国内外许多火箭都通过使用 CFRP 来提升性能,如日本 M-5 火箭发动机和 H-2A 火箭助推器、法国的阿里安娜 2 型火箭、欧洲织女星运载火箭及俄罗斯 Proton-M 火箭的点阵圆锥壳适配器都大量使用了 CFRP,以保证火箭的轻量化和高强度。如图 13 所示,美国的大力神-4 运载火箭的整流罩、级间段舱体、锥形尾舱承载结构、级间段蒙皮和锥形尾舱壳体均采用了碳纤维 IM7/8552 复合材料^[121]。英国 Orbex Prime 火箭采用了碳纤维增强铝基复合材料,重量比同尺寸火箭降低 30%,并且能在 60 s 内从 0 加速到 1330 km/h。我国长征-11 运载火箭的全整流罩均采用了 CFRP,在

降低了装配难度的同时提高了火箭的运载能力。

4.3 在卫星领域中的应用

因碳纤维增强复合材料具有密度小、强度高、刚度大等显著优势,也常应用于人造卫星天线罩、太阳能电池板和天线桁架中,如图 14 所示。

以美国“通信卫星”(GSAT-702)为例,该卫星的天线罩就是由碳纤维增强聚合物复合材料制成,其厚度仅为 4 mm 左右,质量也只有 5 kg 左右,远低于传统的铝合金材料^[122]。同时,由于碳纤维本身就具有较强的导电性,故整个天线罩的透波率非常高,可使信号传输距离更远,提高了卫星的通信能力。在国内,CFRP 已作为卫星的主要承力部件,为中国地球资源卫星 1 号、风云二号气象卫星提供支撑。CFRP 具有优良的抗冲击性、断裂韧性和耐高温性,能够有效承担外界压力,保持稳定性,且使用寿命长,大大减小了维护工作的难度,对卫星天线轻量化、高性能、低成本制造至关重要。

图 13 CFRP 在大力神-4 运载火箭上的应用^[121]Fig. 13 Application of CFRP on Hercules-4 launch vehicle^[121]图 14 CFRP 在卫星上的应用^[123]。(a)某卫星探测器被罩 CFRP 蒙皮；(b)卫星天线 CFRP 支撑肋条Fig. 14 Applications of CFRP on satellites^[123]. (a) A certain satellite probe is covered with CFRP skin; (b) satellite antenna CFRP support ribs

除此以外,CFRP 还应用于轨道交通^[124]、医疗器械^[125]、风电叶片^[126]等领域。在轨道交通领域,CFRP 应用于车体蒙板、车辆转向架、燃料储罐、传动轴等结构件,CFRP 材料制造的车体实现了轻量化,具有高强度、隔热、隔音、防腐等性能;在医疗器械领域,CFRP 应用于 X 射线检查仪用移动平台、医疗担架、骨科医疗器械配件等;在风电叶片领域,CFRP 材料制造的叶片,其重量降低 10%,能够承担比普通叶片高出 20% 的压力,可满足风力发电装置的大功率需求。为了发展先进制造业,开发新能源、高效能、高安全的装备,并提升 CFRP 在各个领域中的装配性能,需进一步研究和探索 CFRP 高质高效加工新方法新工艺。

5 结束语

碳纤维增强复合材料以其轻质高强、热膨胀系数低及出色的耐腐蚀性能,在飞机、火箭、卫星等航空航天领域中得到了广泛应用,已成为该领域轻量化、高性能、低成本制造的关键材料之一。然而,CFRP 的非均质性、各向异性和层合结构的特性,使其在加工过程中

易产生分层、毛刺、热损伤等缺陷,严重影响 CFRP 构件的机械性能和应用表现。

综述了机械加工、超声振动辅助加工、水射流加工、电火花加工、激光加工等多种方法加工 CFRP 的研究进展,对比分析了 CFRP 不同加工方法的优缺点。与其他加工方式相比,激光加工具有精度高、无机械应力/变形、无刀具磨损、灵活快速、非接触等特点,在 CFRP 钻孔/切割、表面处理、焊接等多种工艺中得到广泛应用。超快激光以其超快超强的特性缩短了激光与材料的作用时间,可实现非接触“冷”加工,减少热积累,有望成为提升 CFRP 加工质量的有效手段。然而激光加工 CFRP 的热损伤机理尚不明确,缺乏对激光加工 CFRP 非线性、非平衡、非均质能量传输过程的深入认识。为进一步提升 CFRP 的加工质量和效率,须更深入地探索与研究超快激光加工和激光复合加工等新方法新工艺。

参 考 文 献

- [1] Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, et al. Polymer composite materials: a comprehensive review[J]. Composite Structures,

- 2021, 262: 113640.
- [2] Zhao W N, Ma T, Song H W, et al. Effects of tangential supersonic airflow on the laser ablation of laminated CFRP[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1985-1997.
- [3] Gupta M K, Srivastava R K. Mechanical properties of hybrid fibers-reinforced polymer composite: a review[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, 55(6): 626-642.
- [4] Yao S S, Jin F L, Rhee K Y, et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142: 241-250.
- [5] Papon E A, Haque A. Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 41-52.
- [6] Yu K, Shi Q, Dunn M L, et al. Carbon fiber reinforced thermoset composite with near 100% recyclability[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(33): 6098-6106.
- [7] 林刚. 国产碳纤维何以突围: 2022 全球碳纤维复合材料市场报告[J]. *纺织科学研究*, 2023, 34(5): 16-35.
- Lin G. Why domestic carbon fiber breakthrough: 2022 global carbon fiber composite material market report[J]. *Textile Science Research*, 2023, 34(5): 16-35.
- [8] 张和善. 复合材料在 F-22 上的实际应用[J]. *航空工程与维修*, 1999(2): 23-25.
- Zhang H S. Practical application of composite materials in F-22[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 1999(2): 23-25.
- [9] Maria M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry[J]. *Incas Bulletin*, 2013, 5(3): 139-150.
- [10] 中华人民共和国人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-03-13]. <https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content5592681.htm>.
- The State Council the People's Republic of China. Outline of the 14th five year plan for national economic and social development of the People's Republic of China and the long range objectives for 2035[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-03-13]. <https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content5592681.htm>.
- [11] 周辽, 龙芋宏, 焦辉, 等. 激光加工碳纤维增强复合材料研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(1): 110-119.
- Zhou L, Long Y H, Jiao H, et al. Research advancement on laser processing carbon fiber reinforced plastics[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(1): 110-119.
- [12] Li M J, Chen L M, Yang X J. A feasibility study on high-power fiber laser cutting of thick CFRP laminates using single-pass strategy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106889.
- [13] Oh S, Lee I, Park Y B, et al. Investigation of cut quality in fiber laser cutting of CFRP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 129-140.
- [14] Cepero-Mejias F, Curiel-Sosa J L, Blázquez A, et al. Review of recent developments and induced damage assessment in the modelling of the machining of long fibre reinforced polymer composites[J]. *Composite Structures*, 2020, 240: 112006.
- [15] Ferreira J R, Coppini N L, Levy Neto F. Characteristics of carbon-carbon composite turning[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109(1/2): 65-71.
- [16] Zhang J G, Yuan Y G, Zhang J J. Cutting performance of microcrystalline, nanocrystalline and dual-layer composite diamond coated tools in drilling carbon fiber reinforced plastics[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1642.
- [17] 贾振元, 何春伶, 付饶, 等. 基于 CFRP 层合板钻削轴向力时变曲线的钻头几何形状分析[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(12): 2757-2765.
- Jia Z Y, He C L, Fu R, et al. Analysis of drilling bit geometry based on time varying curve of drilling thrust force for CFRP composite laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(12): 2757-2765.
- [18] Jia Z Y, Fu R, Niu B, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 110: 55-65.
- [19] Gara S, Tsoumavev O. Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1): 451-461.
- [20] Morkavuk S, Köklü U, Bağcı M, et al. Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: a comparative study[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 147: 1-11.
- [21] Karpat Y, Bahtiyar O, Değer B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 79-93.
- [22] Calzada K A, Kapoor S G, DeVor R E, et al. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(2): 141-149.
- [23] Jin F, Bao Y, Li B H, et al. Tool wear prediction in edge trimming of carbon fiber reinforced polymer using machine learning with instantaneous parameters[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 277-295.
- [24] 贾振元, 付饶, 王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(19): 348-374.
- Jia Z Y, Fu R, Wang F J. Research advance review of machining technology for carbon fiber reinforced polymer composite components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(19): 348-374.
- [25] Xu J Y. A review on tool wear issues in drilling CFRP laminates [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 990773.
- [26] Singh R, Khamba J S. Ultrasonic machining of titanium and its alloys: a review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(2): 125-135.
- [27] Yang Z C, Zhu L D, Zhang G X, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 156: 103594.
- [28] 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.
- [29] Wang H, Zhang D Z, Li Y Z, et al. The effects of elliptical ultrasonic vibration in surface machining of CFRP composites using rotary ultrasonic machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11/12): 5527-5538.
- [30] Lotfi M, Charkhian A, Akbari J. Surface analysis in rotary ultrasonic-assisted milling of CFRP and titanium[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 174-182.
- [31] Wang H, Hu Y B, Cong W L, et al. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: effects of ultrasonic frequency[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9/10/11/12): 3759-3772.
- [32] Geng D X, Lu Z H, Yao G, et al. Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of thick CFRP[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 160-170.
- [33] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(19): 3-21.
- Feng P F, Wang J J, Zhang J F, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 3-21.
- [34] Sui H, Zhang X Y, Zhang D Y, et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 111-120.
- [35] 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.

- [36] Niranjan C A, Srinivas S, Ramachandra M. Effect of process parameters on depth of penetration and topography of AZ91 magnesium alloy in abrasive water jet cutting[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(4): 366-374.
- [37] Hlavacova I M, Geryk V. Abrasives for water-jet cutting of high-strength and thick hard materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5): 1217-1224.
- [38] Wang J. A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 94(1): 30-35.
- [39] Sambruno A, Bañon F, Benyahya F, et al. Analysis of technological capabilities of AWJM in the microdrilling of composites used for the aeronautical engineering[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 41: 241-248.
- [40] Doluk E, Kuczmazewski J, Pieńko P. The influence of changing the parameters of water-abrasive cutting on the quality of cutting composite cross-section structures[J]. *Mechanik*, 2018(7): 476-478.
- [41] Kumaran S T, Ko T J, Uthayakumar M, et al. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 724: 1037-1045.
- [42] Demiral M, Abbassi F, Saracyakupoglu T, et al. Damage analysis of a CFRP cross-ply laminate subjected to abrasive water jet cutting [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(10): 7669-7684.
- [43] Hejjaji A, Zitoune R, Crouzeix L, et al. Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 1356-1364.
- [44] Sourd X, Zitoune R, Hejjaji A, et al. Multi-scale analysis of the generated damage when machining pockets of 3D woven composite for repair applications using abrasive water jet process: contamination analysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 139: 106118.
- [45] Youssef H A, El-Hofy H A, Abdelaziz A M, et al. Accuracy and surface quality of abrasive waterjet machined CFRP composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55(12): 1693-1703.
- [46] Abbas N M, Solomon D G, Bahari M F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47 (7/8): 1214-1228.
- [47] 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.
- [48] Yue X M, Yang X D, Tian J, et al. Thermal, mechanical and chemical material removal mechanism of carbon fiber reinforced polymers in electrical discharge machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 133: 4-17.
- [49] Sheikh-Ahmad J Y. Hole quality and damage in drilling carbon/epoxy composites by electrical discharge machining[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(7): 941-950.
- [50] Kumar R, Agrawal P K, Singh I. Fabrication of micro holes in CFRP laminates using EDM[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 859-866.
- [51] 赵一锦, 耿家宝, 杨晓冬. CFRPs 电火花加工热影响区抑制方法 [J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 525660.
Zhao Y J, Geng J B, Yang X D. Inhibition method of heat affected zone in electrical discharge machining of CFRPs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 525660.
- [52] Teicher U, Müller S, Münzner J, et al. Micro-EDM of carbon fibre-reinforced plastics[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 320-325.
- [53] Roldan-Jimenez L, Bañon F, Valerga A P, et al. Design and analysis of CFRP drilling by electrical discharge machining[J]. *Polymers*, 2022, 14(7): 1340.
- [54] Sugioka K. Progress in ultrafast laser processing and future prospects[J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(2): 393-413.
- [55] 胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500008.
Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500008.
- [56] Nagimova A, Perveen A. A review on laser machining of hard to cut materials[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 2440-2447.
- [57] Faisal N, Zindani D, Kumar K, et al. Laser micromachining of engineering materials: a review[M]//Kumar K, Zindani D, Kumari N, et al. *Micro and nano machining of engineering materials. Materials forming, machining and tribology*. Cham: Springer, 2019: 121-136.
- [58] Li M J, Gan G C, Zhang Y, et al. Thermal damage of CFRP laminate in fiber laser cutting process and its impact on the mechanical behavior and strain distribution[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, 19(4): 1511-1522.
- [59] Li M J, Jiang X Y, Su T. The influence of hole quality on mechanical behavior and strain distribution of open-hole CFRP laminates subject to different machining processes[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(12): 9218-9230.
- [60] 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.
- [61] El-Hofy M H, El-Hofy H. Laser beam machining of carbon fiber reinforced composites: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(9): 2965-2975.
- [62] 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.
- [63] Riveiro A, Quintero F, Lusquinos 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.
- [64] Leone C, Mingione E, Genna S. Laser cutting of CFRP by Quasi-Continuous Wave (QCW) fibre laser: effect of process parameters and analysis of the HAZ index[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 224: 109146.
- [65] Heiderscheit T, Shen N G, Wang Q H, et al. Keyhole cutting of carbon fiber reinforced polymer using a long-duration nanosecond pulse laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 120: 101-109.
- [66] Schneider F, Wolf N, Petring D. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 415-420.
- [67] Ye Y X, Du T T, Li H N, et al. Factors influencing the tensile strength of carbon fiber reinforced plastic laminates for laser machining method and the underlined mechanisms[J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(4): 042011.
- [68] Ouyang W T, Jiao J K, Xu Z F, et al. Experimental study on CFRP drilling with the picosecond laser “double rotation” cutting technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107238.
- [69] 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.
- [70] Wang X H, Chen H, Li Z Y, et al. Helical drilling of carbon fiber reinforced polymer by a femtosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(1): 302-307.
- [71] Jiang H, Ma C W, Li M, et al. Femtosecond laser drilling of cylindrical holes for carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. *Molecules*, 2021, 26(10): 2953.
- [72] Wolynski A, Herrmann T, Mucha P, et al. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 292-301.
- [73] 张瑄珺, 沈佳骏, 王健超. 碳纤维复合材料皮秒激光加工工艺研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(1): 86-90.
Zhang X J, Shen J J, Wang J C. Study on the process and wear

- resistance of picosecond laser surface texturing[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(1): 86-90.
- [74] 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.
- [75] 蒋翼, 陈根余, 周聪, 等. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 821-825.
Jiang Y, Chen G Y, Zhou C, et al. Research of carbon fiber reinforced plastic cut by picosecond laser[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 821-825.
- [76] 朱德志, 胡俊. 皮秒激光加工碳纤维复合材料工艺试验[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(20): 54-59.
Zhu D Z, Hu J. Experimental study on picosecond pulsed laser machining of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(20): 54-59.
- [77] Tabie V M, Koranteng M O, Yunus A, et al. Water-jet guided laser cutting technology—an overview[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 6(2): 189-203.
- [78] Sun D, Han F Z, Ying W S, et al. Surface integrity of water jet guided laser machining of CFRP[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 71: 71-74.
- [79] Wu Y W, Zhang G Y, Wang J X, et al. The cutting process and damage mechanism of large thickness CFRP based on water jet guided laser processing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107140.
- [80] Zhang Y N, Qiao H C, Zhao J B, et al. Numerical simulation of water jet-guided laser micromachining of CFRP[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101456.
- [81] 王水旺, 丁焯, 程柏, 等. 水导激光微加工机理与研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002404.
Wang S W, Ding Y, Cheng B, et al. Mechanism and research advances of water-jet guided laser micromachining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002404.
- [82] Sobri S A, Heinemann R, Whitehead D. Sequential laser-mechanical drilling of thick carbon fibre reinforced polymer composites (CFRP) for industrial applications[J]. *Polymers*, 2021, 13(13): 2136.
- [83] Chen L M, Li M J, Yang X J. The feasibility of fast slotting thick CFRP laminate using fiber laser-CNC milling cooperative machining technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107794.
- [84] Zhu M H, Guo W, Ouyang J L, et al. Low carbon high quality simultaneous laser and mechanical hybrid drilling of carbon fibre reinforced polymer composite[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 46: 1-18.
- [85] Zheng Q Z, Mei X S, Jiang G D, et al. Investigation on ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser polishing of C/SiC composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(11): 4656-4672.
- [86] Matsusaka S, Watanabe T. Improvement in laser micromachinability of borosilicate glass by electric-field-assisted solid-state ion exchange[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(3): 141-143.
- [87] 王银飞, 朱浩, 张朝阳, 等. 旋转磁场辅助激光加工微孔的机理及试验研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1602001.
Wang Y F, Zhu H, Zhang Z Y, et al. Mechanism and experimental research of magnetic field rotation assisted laser machining of micro-holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602001.
- [88] Stone R, Krishnamurthy K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(9): 985-1003.
- [89] Salama A, Yan Y Z, Li L, et al. Understanding the self-limiting effect in picosecond laser single and multiple parallel pass drilling/machining of CFRP composite and mild steel[J]. *Materials & Design*, 2016, 107: 461-469.
- [90] Qiao Y Q, Chen T T, Ma H R, et al. Experimental study on the sidewall quality of femtosecond laser drilling CFRP[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 266: 110972.
- [91] Tao N R, Chen G Y, Yu T Y, et al. Dual-beam laser drilling process for thick carbon fiber reinforced plastic composites plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 281: 116590.
- [92] Li W Y, Zhang G J, Huang Y, et al. UV laser high-quality drilling of CFRP plate with a new interlaced scanning mode[J]. *Composite Structures*, 2021, 273: 114258.
- [93] See T L, Liu Z, Cheetham S, et al. Laser abrading of carbon fibre reinforced composite for improving paint adhesion[J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(3): 1045-1054.
- [94] Li Y Y, Meng S, Gong Q M, et al. Experimental and theoretical investigation of laser pretreatment on strengthening the heterojunction between carbon fiber-reinforced plastic and aluminum alloy[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(24): 22005-22014.
- [95] Xie Y X, Yang B B, Lu L S, et al. Shear strength of bonded joints of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates enhanced by a two-step laser surface treatment[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111559.
- [96] Hauschwitz P, Jagdheesh R, Alamri S, et al. Fabrication of functional superhydrophobic surfaces on carbon fibre reinforced plastics by IR and UV direct laser interference patterning[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 508: 144817.
- [97] 邹鹏远, 张华, 雷敏, 等. 树脂基 CFRP/金属异种材料激光连接工艺研究现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(5): 1853-1859.
Zou P Y, Zhang H, Lei M, et al. A review: prospect on laser direct joining of resin-based CFRP/metal[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(5): 1853-1859.
- [98] Jung K W, Kawahito Y, Katayama S. Laser direct joining of carbon fibre reinforced plastic to stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(8): 676-680.
- [99] Tan X H, Zhang J, Shan J G, et al. Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 70: 35-43.
- [100] Wang D, Xu J J, Huang T, et al. Effect of beam shaping on laser joining of CFRP and Al-Li alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107336.
- [101] Tan C W, Su J H, Liu Y F, et al. Enhanced interfacial bonding strength of laser bonded titanium alloy/CFRTP joint via hydrogen bonds interaction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 239: 109966.
- [102] Su J H, Tan C W, Wang X B, et al. Enhanced the bonding reliability of titanium alloy and CFRTP via interfacial multiple modification: Synergy of physical interlocking and chemical interaction[J]. *Composite Structures*, 2023, 310: 116778.
- [103] Zhang F K, Lin Y, Huang Y X, et al. Forming characteristics of channel-section CFRP-aluminum hybrid profiles manufactured by inflatable mandrel assisted hot-pressing process[J]. *Composite Structures*, 2022, 296: 115895.
- [104] 宋清华, 刘卫平, 陈吉平, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料激光加热原位成型过程中的温度场[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(2): 283-292.
Song Q H, Liu W P, Chen J P, et al. Temperature field for laser heating of carbon fiber reinforced polyphenyl sulphide matrix composite in an automated fiber placement process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(2): 283-292.
- [105] Wei J C, Wang F, Liu J Y, et al. A laser arrays scan thermography (LAsST) for the rapid inspection of CFRP composite with subsurface defects[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111201.
- [106] Wang Q, Zhang Z J, Yin W L, et al. Defect detection method for CFRP based on line laser thermography[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 612.

- [107] Xu H B, Hu J. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 46: 354-364.
- [108] Weber R, Hafner M, Michalowski A, et al. Minimum damage in CFRP laser processing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 302-307.
- [109] Wang P, Zhang Z, Hao B, et al. Investigation on heat transfer and ablation mechanism of CFRP by different laser scanning directions [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 262: 110827.
- [110] Wang P, Zhang Z, Hao B, et al. Study on anisotropic heat transfer and thermal damage in nanosecond pulsed laser processing of CFRP[J]. Polymer Composites, 2023, 44(9): 5964-5983.
- [111] 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 and Manufacturing, 2016, 84: 114-122.
- [112] Tao N R, Chen G Y, Fan L C, et al. Temperature-dependent material removal during pulsed laser processing of CFRP composites[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107445.
- [113] Bluemel S, Kuklik J, Staehr R, et al. Time resolved analysis of nanosecond pulsed laser processing of carbon fiber reinforced plastics[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022406.
- [114] Chen L, Huang Y, Li W Y, et al. Acoustic emission monitoring and heat-affected zone evaluation of CFRP laser cutting[J]. Composite Structures, 2023, 304: 116419.
- [115] 何长川, 梁伟, 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构一体化设计的若干特点[J]. 中国管理信息化, 2017, 20(4): 139-141.
He C C, Liang W, Yang N B. Some characteristics of integrated design of composite structure for a new generation of large passenger aircraft[J]. China Management Informationization, 2017, 20(4): 139-141.
- [116] 黄亿洲, 王志瑾, 刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J]. 西安航空学院学报, 2021, 39(5): 44-51.
Huang Y Z, Wang Z J, Liu G F. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2021, 39(5): 44-51.
- [117] 刘爱平, 林仁伟, 陈壁茂. 民用飞机复合材料结构在位修理环境控制方法研究[J]. 航空维修与工程, 2021(1): 60-62.
Liu A P, Lin R W, Chen B M. Study on an environmental control method for *in-site* repair of civil aircraft composite structure[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(1): 60-62.
- [118] 倪楠楠, 卞凯, 夏璐, 等. 先进复合材料在无人机上的应用[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 45-60.
Ni N N, Bian K, Xia L, et al. Application of advanced composite materials for UAV[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 45-60.
- [119] 喻媛. C919 上用了哪些新材料[J]. 大飞机, 2018(1): 29-31, 28.
Yu Y. What new materials are used in C919[J]. Jetliner, 2018(1): 29-31, 28.
- [120] 谌广昌, 姚佳楠, 张金栋, 等. 高性能热塑性复合材料在直升机结构上的应用与展望[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 24-33.
Chen G C, Yao J N, Zhang J D, et al. Application and prospect of high-performance thermoplastic composites in helicopter structure [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 24-33.
- [121] 张德刚, 陈纲. 碳纤维树脂基复合材料在防空导弹上的应用[J]. 现代防御技术, 2018, 46(2): 24-31, 164.
Zhang D G, Chen G. Application of carbon fiber reinforced polymer in anti-aircraft missiles[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(2): 24-31, 164.
- [122] 李建利, 赵帆, 张元, 等. 碳纤维及其复合材料在军工领域的应用[J]. 合成纤维, 2014, 43(3): 33-35, 40.
Li J L, Zhao F, Zhang Y, et al. Application of carbon fiber and its composites in military industry[J]. Synthetic Fiber in China, 2014, 43(3): 33-35, 40.
- [123] 张加波, 张开虎, 范洪涛, 等. 纤维复合材料激光加工进展及航天应用展望[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525735.
Zhang J B, Zhang K H, Fan H T, et al. Progress in laser processing of fiber composite materials and prospects of its applications in aerospace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525735.
- [124] Zhou S C, Demartino C, Xu J J, et al. Effectiveness of CFRP seismic-retrofit of circular RC bridge piers under vehicular lateral impact loading[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112602.
- [125] Chua C Y X, Liu H C, di Trani N, et al. Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices[J]. Biomaterials, 2021, 271: 120719.
- [126] Shen M Y, Guo Z H, Feng W T. A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 264: 110878.

Laser Processing of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites and Their Application in Aerospace Field (Invited)

Li Xin^{1*}, Song Qimeng¹, Zhang Xueqiang¹, Wang Shaoqian¹, Zhang Kaihu²

¹Laser Micro/Nano Fabrication Laboratory, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract

Significance With the development of aerospace devices with a larger size, higher load bearing capacity, and longer life, lightweight structures with high stiffness have become basic requirements in the design and manufacture of aircraft, rockets, satellites, and other aerospace products. Carbon-fiber-reinforced composites combine the advantages of a carbon-fiber-reinforced phase and polymer-matrix phase, including a light weight, high specific strength, corrosion resistance, strong designability, and other outstanding advantages, which give them a wide range of application prospects in the aerospace field, showing great potential for development. However, in the processing and manufacture of aerospace equipment, a molding process is used to form carbon-fiber-

reinforced polymer (CFRP) parts as a single piece, which makes it difficult to meet the part assembly needs. Thus, a large number of cutting, drilling, trimming, and other processes are required before the actual final assembly. At present, the most commonly used processing methods for carbon-fiber-reinforced composite materials include traditional machining, ultrasonic-vibration-assisted machining, water-jet machining, electric-discharge machining, and laser processing. However, the characteristics of CFRP, such as its heterogeneity, anisotropy, and lamination structure, make it prone to processing defects such as delamination, burrs, tearing, and heat-affected zones (HAZs) during processing, which greatly affect the load-bearing performances of CFRP parts and typically make CFRP a difficult material to process.

Laser processing is a flexible and controllable manufacturing method that eliminates the problems of tool wear and mechanical stress. It is expected to become an effective means of processing CFRP with little damage and high efficiency. However, CFRP components have different thermodynamic properties, and it is easy to produce a large HAZ during laser processing. It is necessary to comprehensively consider the change in the energy absorption of the material with temperature. Otherwise, the high-quality and high-precision processing of CFRP is difficult.

Progress At present, research on the laser processing of CFRP at home and abroad focuses on the thermal damage problem represented by HAZs and the processing quality problem represented by the slit depth and width. The common processing methods can be divided into traditional laser processing, ultrafast laser processing, and water-guided laser processing. A traditional laser relies on the thermal effect to complete the ablation, melting, and removal of materials, which usually produces a 100- μm wide HAZ (Fig. 5). An ultrafast laser has the characteristics of an ultra-short pulse width, an ultra-high instantaneous power density, and nonlinear processing, which can effectively control the HAZ and improve the processing accuracy (Fig. 6). A water-guided laser uses a water jet to homogenize the laser light field and remove the debris, which can improve the processing quality and efficiency of CFRP processing. The increase in the processing requirements in the field of aerospace strategic planning has revealed the many advantages of laser processing, including its use in drilling/cutting, surface treatment, and welding. However, the interaction mechanism between the laser and CFRP material is complex. Researchers mainly analyze the relationship between the energy transfer and temperature rise response of different components of the material during the interaction between a continuous or traditional pulsed laser and the CFRP at the macro level, or qualitatively analyze the phase of the interaction between the laser and material based on experimental phenomena (Fig. 11). The application status of carbon-fiber-reinforced composites in the aerospace field is reviewed, with a focus on CFRP laser-processing technology.

Conclusions and Prospects This study reviews the research progress of various CFRP processing methods, compares and analyzes their advantages and disadvantages; introduces the current research status of CFRP laser processing from the perspectives of methods, processes, and mechanisms; summarizes the application of CFRP in the aerospace field; analyzes and discusses the remaining challenges facing CFRP laser processing; and provides the corresponding prospects. Compared with other processing methods, laser processing, especially ultrafine laser processing, can achieve non-contact “cold” processing, reduce heat accumulation, improve the processing accuracy, and is expected to become an effective means to improve the quality of CFRP processing. However, the mechanism of the thermal damage produced by CFRP laser processing is still unclear, and the nonlinear, unbalanced, and heterogeneous energy transmission process during CFRP laser processing is not well understood. In order to further improve the processing quality and efficiency of CFRP laser processing, more in-depth exploration and research are required for ultrafast laser processing technology and water-guided laser processing technology. In view of the higher micro-machining requirements of aerospace CFRP components, further research is needed on the micro-mechanism of the interaction between the laser and heterogeneous CFRP materials, and new methods and new processes need to be further developed. These efforts are expected to further improve the processing quality, accuracy, and efficiency of CFRP laser processing.

Key words laser technique; carbon fiber reinforced polymer composites; processing technology; ultrafast laser; aerospace