

引文格式: 王嘉乐, 陈忠安, 张广义, 等. 航空航天领域难加工材料水导激光精密加工研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 25010146.
WANG Jiale, CHEN Zhongan, ZHANG Guangyi, et al. Waterjet-guided laser precision processing of difficult-to-machine materials in aerospace applications: a review[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 25010146.

航空航天领域难加工材料水导激光精密加工研究进展

王嘉乐^{1,2}, 陈忠安^{1,2}, 张广义^{1,2,3}, 张保金^{1,4}, 陈博^{1,4}, 张文武^{1,2,3}

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所激光极端制造研究中心, 宁波 315201;

2. 全省难加工材料激光极端制造重点实验室, 宁波 315201;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310023)

[摘要] 随着航空航天技术的迅速发展, 高强度合金、陶瓷材料、复合材料等难加工材料得到了广泛应用, 但传统加工手段难以满足高质量的加工要求。水导激光加工技术因高精度和低损伤的优势, 弥补了传统机械加工和激光加工中刀具磨损和热影响区较大的缺陷, 具有重要的应用潜力。因此, 对水导激光加工技术在航空航天领域难加工材料中的作用机理与实践应用展开系统性的梳理。首先, 详细阐释水导激光加工的基本原理、多场耦合材料去除机理, 并完整介绍水导加工系统的核心构成; 其次, 从水射流特性、光学特性及水光耦合特性 3 个维度, 深入剖析其多维度作用机制; 随后, 全面总结水导激光技术在“难加工材料”切割与制孔工艺中的研究进展; 最后, 探讨该技术在精密加工领域的典型应用场景, 并结合当前研究现状, 对水导激光精密加工技术的未来发展趋势进行展望。

关键词: 水导激光; 水光耦合; 去除机理; 工艺研究; 航空航天

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010146



王嘉乐

工程师, 研究方向为水导激光加工工艺。

在常规机械加工(如切削、磨削、钻孔等)或特种加工(如电化学、电火花、激光熔覆等)过程中, 因自身物理、化学或力学性能特殊, 这些技术加工效率低、刀具/设备损耗大、加工质量(精度和表面粗糙度)难控制。常规工艺难以满足加工要求的材料统称为“难加工材料”。此类材料多具备“高端性能”, 如耐高温、高强度、高耐磨等, 是航空航天高端制造领域的核心材料, 其加工技术水平直接决定高端装备的性能上限^[1-3]。

目前航空航天领域中“难加工材料”有高强度合金类、陶瓷及陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料 3 类, 如图 1 所示。高强度合金类有钛合金^[4-5]、高温合金^[6-8]、超高强度钢^[9-10]等, 此类材料具有极高的硬度, 耐磨耐腐蚀性能好, 强度高, 常用于航空航天、医疗和化工等领域, 传统刀具难以切削, 且切削时容易产生高温, 导致刀具磨损加剧; 陶瓷及陶瓷基复合材料例如碳化硅陶瓷(SiC)^[11-12]和碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合

收稿日期: 2025-10-16; 退修日期: 2025-11-20; 录用日期: 2025-12-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDC0150201); 宁波市青年科技创新领军人才项目(2024QL056); 智能制造装备与技术全国重点实验室开放课题(IMETKF2024014)

通信作者: 张广义, 副研究员, 博士, 研究方向为水导激光加工技术及应用。

材料 (SiC_f/SiC)^[13-15], 此类材料硬度极高、脆性大、耐磨损、耐高温, 适用于航空航天、电子设备、机械耐磨部件、医疗器械等领域, 传统加工方式难以避免陶瓷脆裂; 聚合物基复合材料有碳纤维增强复合材料 CFRP^[16-18]、玻璃纤维增强复合材料 GFRP^[19-20] 等, 此类材料具有强度高、重量轻等优点, 常用于航空航天及汽车工业, 复合材料的层次结构使得切削力较大时易造成材料的脱层或破坏。水导激光加工技术凭借加工精度高、冷却效果好、能量损失少、适应多种材料、效率高及无污染等优势, 在高精度、高效能的加工需求中展现出巨大的潜力。随着技术的不断发展, 水导激光加工将会在更广泛的行业中得到应用, 特别是在高端制造业、微电子、航空航天等领域。

水导激光加工技术起源于 1842

年, Colladon^[21] 发现光可沿着高速水射流实现曲线传输, 首次验证了水导激光加工技术的可行性。1854 年, Tyndall 通过试验观察到光在流动液体中的全反射现象, 进一步证明了水射流具有光纤传输激光的特性^[22]。1990 年, Wrobel^[23] 将水射流与光纤连接, 成功将激光输出至工件表面, 实现了加工过程中能量的精准传输。1993 年, Richerzhagen 通过深入研究水射流引导激光现象, 首次提出了水导激光加工技术, 并将其应用于新型 GaAs 半导体材料切割, 成功解决了半导体材料加工时易碎的问题^[24-26]。1997 年, Synova 股份公司成立, 致力于研发水射流与高功率激光耦合系统, 并于 1999 年推出了首台商用水导激光加工设备, 这标志着水导激光加工技术商业化应用的正式开始, 也为该技术在工业界的广泛应用奠

定了基础。2001 年, Richerzhagen^[27] 全面讨论了该项技术在工业领域的广阔应用前景, 并完整构建了水导激光加工技术的科学体系。国内水导激光加工技术研究起步较晚, 哈尔滨工业大学于 2008 年率先开展了该技术的研究, 从水光耦合原理、水射流动力学及光固液相互作用原理等方面进行了详细的研究, 并研制出一套水导激光微细加工设备^[28]。利用轴棱镜产生的无衍射光束发散角小、类似于平行光等特点, 厦门大学有效解决了激光在水射流中的传输损耗问题^[29]。中国科学院宁波材料技术与工程研究所的张文武团队将空间偏振与时间相位调制技术相融合, 成功将双激光耦合至直径 100 μm 的水射流通道, 并提出了双光束高功率水导激光加工新方法^[30]。中国科学院沈阳自动化研究所的乔红超团队基于 COMSOL 仿真软件, 构建了钛合金、不锈钢、铝合金和铜 4 种典型金属材料的热态温度场与材料去除耦合模型, 系统分析了不同工艺参数对温度场分布的影响规律, 揭示了水导激光加工过程中热影响区的演变机制, 为优化加工过程产生的热影响提供了理论依据^[31]。随着水导激光加工技术的发展, 越来越多科研工作者关注此技术, 并将其应用于各种“难加工材料”的研究。

为深入探究水导激光加工技术的核心机理, 充分发挥其独特的技术优势, 本文对水导激光加工在难加工材料中的机理与应用进行系统性的总结。首先, 阐述了水导激光加工的原理及多场耦合去除机理, 并介绍了水导加工系统的构成; 其次, 从水射流特性、光学特性和水光耦合特性方面介绍了其多维度作用机理; 然后, 总结了水导激光技术在“难加工材料”中的切割和制孔工艺研究; 最后, 讨论了水导激光技术在精密加工领域的典型应用, 并基于目前研究现状, 对未来水导激光精密加工技术的

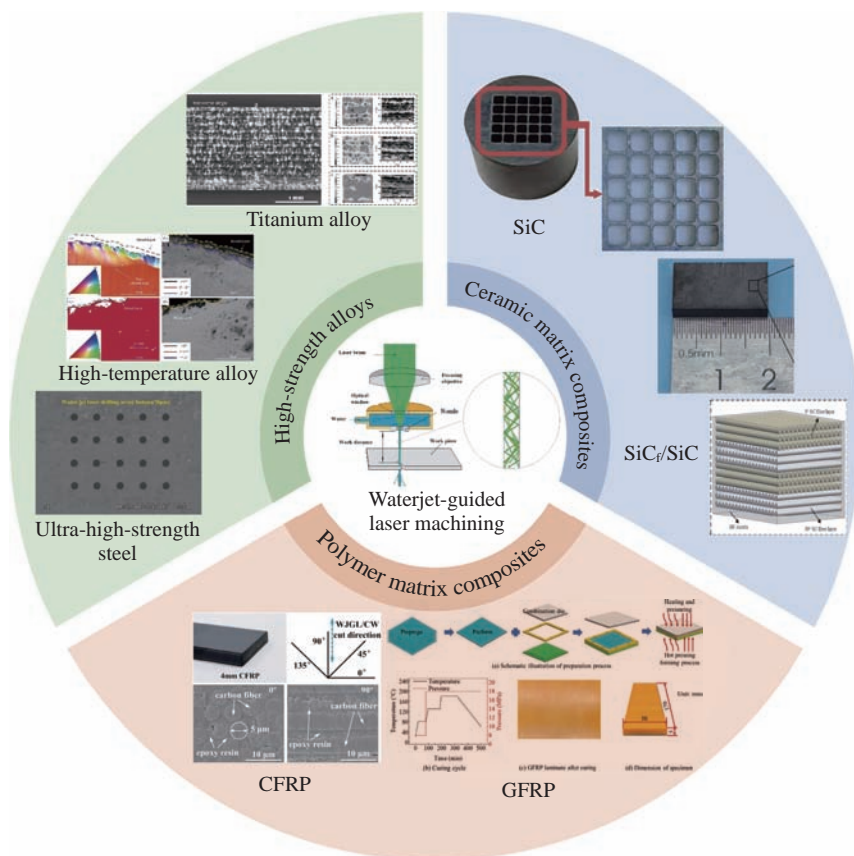


图 1 航空航天领域中难加工材料的类型^[5,10-11,20]

Fig.1 Types of difficult-to-machine materials in the aerospace industry^[5,10-11,20]

发展趋势进行了展望。

1 水导激光加工技术机理研究

水导激光加工 (Waterjet-guided laser processing, WJGL) 是一种结合了高压水射流与激光能量的复合精密加工技术, 核心原理是利用高压水束作为“能量导管”, 将激光约束在水束内部进行传输并聚焦于工件表面, 实现高精度、低损伤的材料去除。其技术本质是通过水的“导光”与“冷却/排屑”双重作用, 弥补传统激光加工和纯水射流加工的缺陷, 尤其适用于精密、超薄、易热损伤材料的加工, 如半导体、蓝宝石、陶瓷、金属箔等^[32-33]。

1.1 水导激光加工原理

水导激光加工技术的工作原理如图 2 (a) 所示^[34]。由于水和空气的折射率不同, 当激光以小于全反射临界角的入射角入射时, 光束会在水与空气的界面处发生全反射。因此, 激光能量并不是直接聚焦在工件表面, 而是通过毛细层流中的水射流传

导至工件表面, 这种传输方式类似于传统玻璃光纤中的激光传输。通常情况下, 激光在水射流中的传播模式有两种, 轴向光线和倾斜入射光线, 如图 2 (b) 所示^[34]。激光在水射流中的传播必须满足这两种模式中的一种或两种, 才能实现能量稳定传输。激光从空气介质进入耦合装置, 穿过透明玻璃窗进入薄薄的水层, 形成稳定的引导水射流^[35]。当水射流稳定并与工件表面发生碰撞, 激光能量通过水射流引导并被材料表面吸收, 吸收的激光能量使烧蚀区域的材料发生熔化或蒸发。水导激光加工中, 水射流的冲击力非常小, 其主要作用是将激光能量传输至被加工表面, 并将熔化的材料、多余的热量及残渣带走。稳定的水射流能够在水的击穿阈值内有效耦合不同波长和脉宽的激光, 通过一定的工作距离作用于不同材质的工件表面。通过调整水射流参数与激光参数的组合, 可以实现对不同材料的高质量和高效率加工^[36-38]。

率加工^[36-38]。

水导激光加工是水射流引导下利用激光与材料的相互作用实现材料去除的过程。由于水射流对激光的引导作用, 激光束能够更精确地作用于材料表面, 从而实现长工作距离而不会使光束散焦。在这种情况下, 虽然材料的去除主要是通过形成熔池、蒸汽和等离子体羽流的激光烧蚀, 但水射流具有很高的比热容, 可以显著影响烧蚀物质的热力学和动力学, 提供良好的热管理和清理工作区碎片的能力。激光加工过程中产生的高温通过水介质得到有效散热, 避免了材料过热或变形, 在高功率激光加工时尤为重要。水作为冷却介质, 还能帮助清洁加工表面, 避免了加工过程中废屑或残留物的堆积, 从而提高加工效果。

水导激光加工材料去除机制如图 2 (c) 所示^[39]。未输出激光能量时, 先形成稳定的微细水射流; 开启激光后, 激光能量由水射流引导至工件表面, 能量被材料吸收并加热目

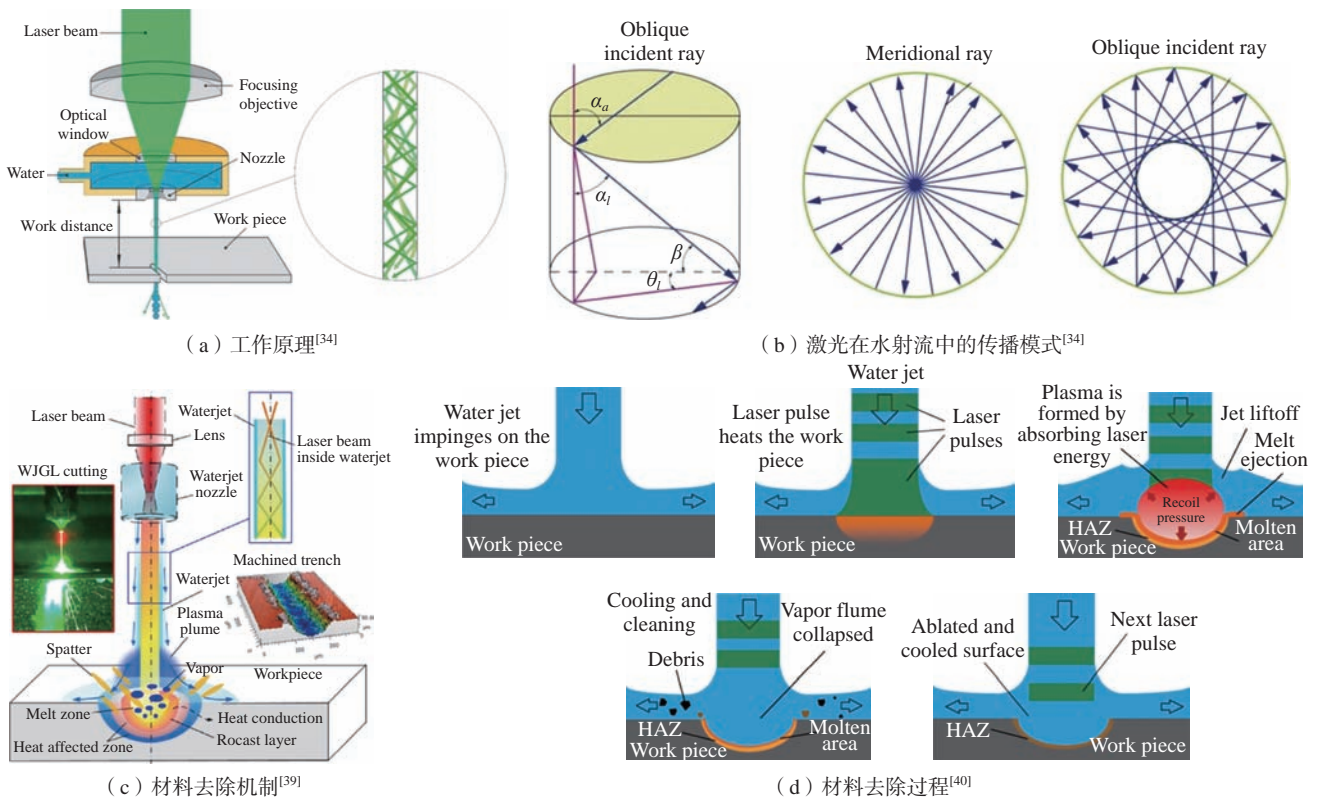


图 2 水导激光加工原理

Fig.2 Principle of waterjet-guided laser processing

标区域,当热量持续积累时,工件表面发生熔化和汽化现象;在低激光通量下,材料被吸收的激光能量加热并蒸发或升华,在高激光通量下,材料通常转化为等离子体,吸收的激光能量在表面产生水蒸气或等离子体,将水射流和工件分开,水蒸气和膨胀的等离子体的反冲压力将熔体排出,防止材料在切割处重铸;由于冲击波在水膜中产生的压力远大于空气中的压力,因此水膜也起到了约束层的作用,将冲击波重新定向到加工材料上,有效地提高了激光烧蚀效果。每个激光脉冲结束时,蒸汽槽坍塌,等离子体消失;水射流会喷出熔融物质,并将烧蚀区域冷却到水温,减少了多脉冲和热膨胀引起的局部积

热;碎屑被水流冲走,防止了毛刺的形成。当下一个激光脉冲到达时,新一轮的消融过程再次开始。整个加工过程经历了加热和冷却的连续交替,如图2(d)所示^[40]。激光脉冲持续时间和脉冲之间的间隔时间的比率可以调整,从而可以优化加工速度和材料冷却效果^[40-41]。

1.2 水导激光多场耦合去除机理

通过试验无法有效观察材料的内部温度及流体变化,限制了对激光烧蚀机制的深入研究。数值模拟方法通过建立热传导模型,模拟激光照射到材料表面后热量的分布情况,有效预测热效应对材料的影响,避免材料过热或热损伤等缺陷,优化冷却过程,揭示了水导激光加工过程中温度

分布和烧蚀界面变化^[42-43]。WJGL加工过程涉及热能的传导、对流和辐射等物理现象,以及材料的熔化、汽化和相变。

Yang等^[44]从激光和水射流的热效应出发,分析了等离子体冲击波和空蚀效应在水射流制导激光加工中的作用机理,建立了水射流制导激光与材料相互作用的数值模型,如图3(a)所示,模拟水射流制导激光微细加工过程中的温度场分布。研究表明,水导激光的能量可以均匀分布在水射光纤的横截面上,加工出的孔较浅,锥度较小。Zhang等^[45]利用有限元中的“生死单元”技术,模拟了水导激光加工过程中碳纤维增强塑料(CFRP)复合材料瞬态热效应

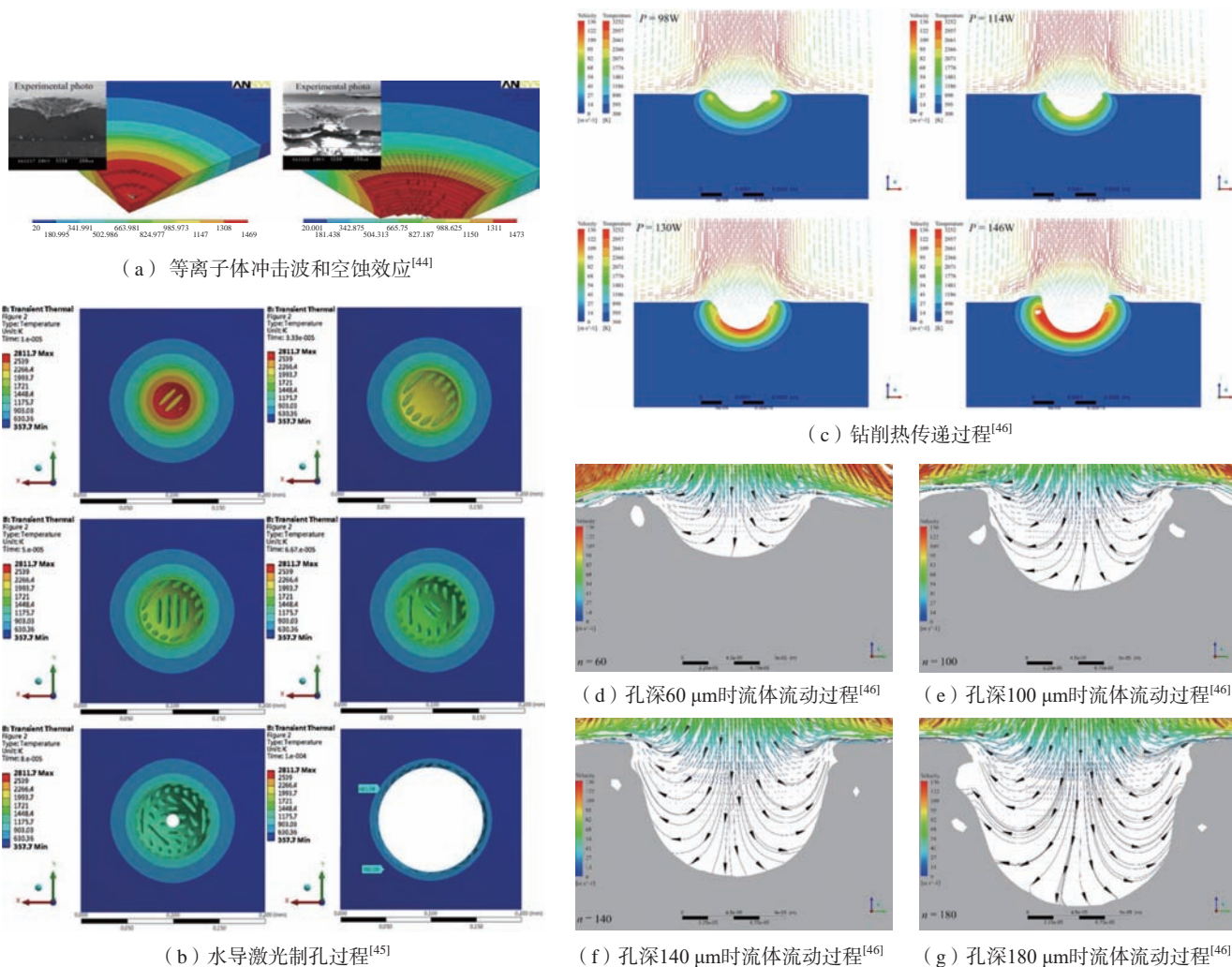


图3 水导激光多场耦合去除机理

Fig.3 Mechanism of waterjet-guided laser multi-field coupling removal

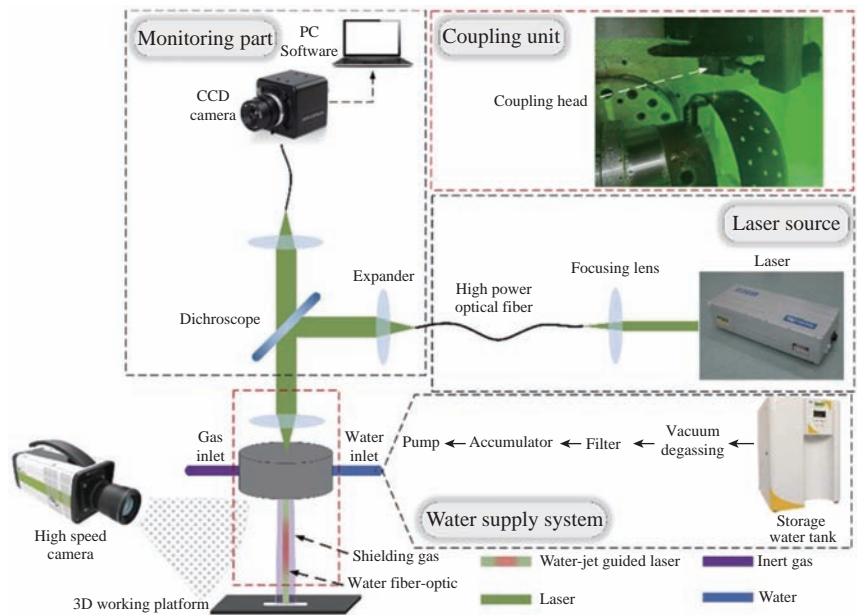
及其去除机制,加工过程如图 3 (b) 所示。结果表明,水射流引导激光加工技术钻孔 CFRP 材料时,水射流能迅速冷却材料表面的余热并带走加工残留物,使孔洞周围区域干净,不存在热影响区,加工效果良好,通过调整激光脉冲的占空比可实现无损加工。Jiao 等^[46]建立了 304 不锈钢 WJGL 钻削过程的三维瞬态模型,描述了 WJGL 与 304 不锈钢的相互作用过程;该模型首次实现激光和水射流同时作用于基体,并模拟出材料的熔化和汽化过程,以及钻井过程中的热传递、相变和流体流动过程,如图 3 (c) ~ (g) 所示。基于模拟结果,探讨了 304 不锈钢表面重铸层的形成机理和演变规律。研究结果有助于加深对 WJGL 钻孔的认识,为提高加工质量提供理论参考。Jiao 等^[47]建立了 WJGL 切割硅的三维有限体积模型,来模拟水导激光切割硅片过程中的温度场演变和去除过程,研究激光、水射流和基体之间的相互作用机理。模拟结果表明,凹槽截面呈“V”字形,随着切割次数的增加,凹槽深度从 52 μm 非线性增加到 385 μm 。此外,随着扫描次数从 1 次增加到 10 次,硅衬底的残余温度从 837 K 上升到 1345 K。这一发现为 WJGL 切割研究提供了有价值的见解,揭示了激光-水射流-基体相互作用机制。Wang 等^[48]建立了 WJGL 和 TBC IC21 镍基高温合金之间的瞬态相互作用的理论模型,研究烧蚀形态的演变过程,该研究结果有助于提升 WJGL 技术的效率和精度。

1.3 水导激光加工系统

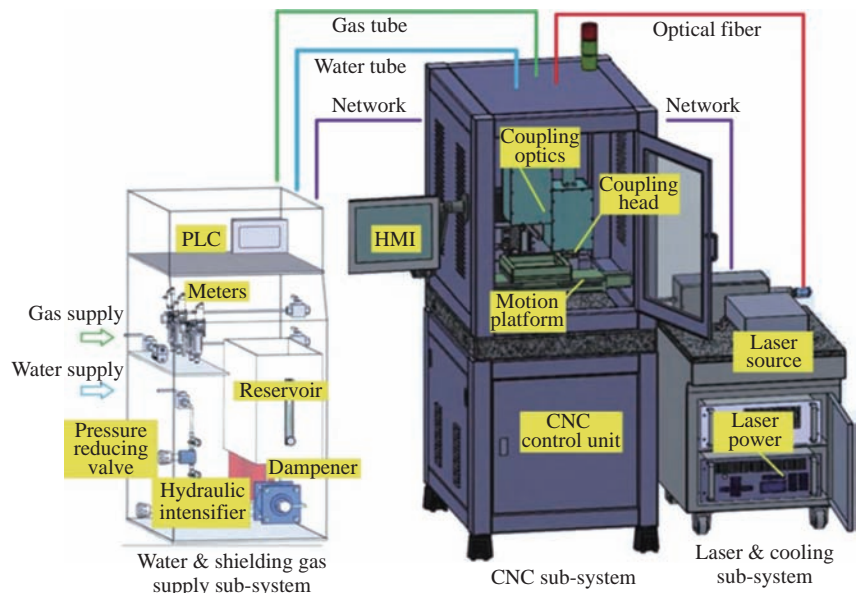
水导激光加工系统主要由激光系统、光学系统、水射流系统、辅助气体系统、激光耦合系统及运动控制系统等组成。激光系统主要包括激光器、激光控制器、光纤等。光学系统主要包括准直器、二向色镜、反射镜、聚焦镜、镜架等,起到传输与聚焦激光的作用。水射流系统主要由纯水

机、空气压缩机、增压泵、压力表等组成,提供稳定、高压纯水。辅助气体系统主要由高纯氮气(压缩空气)、减压阀、压力表等组成,通过水射流同轴气道起到保护和延长层流的作用,目前有同轴系统和旁轴系统两种类型。激光耦合系统是水导激光加工系统的核心,水射流、激光、辅助气体在该模块上集成。激光耦合系统主要由窗口片、水腔、水射流喷嘴、辅助

气喷嘴、XY 平移台等组成。窗口片隔绝空气和高压水,聚焦激光首先穿透窗口片进入高压水层,激光束束腰位置在水射流起始段附近。激光与水射流的同轴耦合能够确保大功率耦合的可靠性。运动控制系统以五轴加工系统为主,实现水导激光高精度、高效率加工^[49-50]。水导激光加工系统装置示意图和装备示意图分别如图 4 (a)^[51]和图 4 (b)^[52]所示。



(a) 系统装置示意图^[51]



(b) 装备示意图^[52]

图 4 水导激光加工系统

Fig.4 Waterjet-guided laser processing system

2 水光耦合特性研究

2.1 水射流特性

水的光学特性使其成为理想的激光传输介质,可替代传统固体光纤,实现复杂路径的能量输送与局部能量增强,是水导激光加工的技术基础。水束不仅传输激光,还直接参与材料去除过程,通过“机械冲刷”与“激光热效应”协同作用,提升去除效率与加工质量,避免传统激光加工的重铸层、熔渣等缺陷。通过高效热传导与冷却,水束成为加工区域的“热保护屏障”,并通过多维度作用优化加工性能,解决传统激光加工(热损伤和精度不足)的痛点^[53-54]。

喷嘴是决定层流质量的关键因素,通过流体动力学优化设计,将高压水流转化为高稳定性、低湍流的微米级水射流,为激光传输提供可靠的“柔性光导介质”,是水导激光加工的物理基础。目前喷嘴结构主要有4种:毛细型喷嘴、锥型喷嘴、上锥型喷嘴和下锥型喷嘴,如图5(a)所示^[55]。毛细型和上锥型喷嘴的水始终与喷嘴内壁紧密接触,激光传递过程中能量逸出,易烧蚀喷嘴。锥型喷嘴在靠近耐高压水腔的部分强度较低,在水射流的冲击下易导致形变损坏。下锥型喷嘴相较于以上3种更为合理,但其上端圆柱段的长径比对于形成稳定低速回流致“缩流”至关重要^[55]。张晓斌等^[56]对喷嘴出射的水射流进行数值模拟,研究空化现象的产生机理及对微水束稳定性的影响,该研究对设计水导激光喷嘴结构有着重要的参考价值。杨林帆等^[57]采用有限元方法模拟毛细带锥角喷嘴内流场分布,生成了高速稳定水束的参量数据,该研究为水导激光工艺中高压条件下的光滑稳定的微细缩流水束生成提供了有效的数据参考。张家铭等^[58]设计了一种全新的喷嘴结构,如图5(b)所示,该结构可以在小于1 MPa的压力下产生较为稳定的水

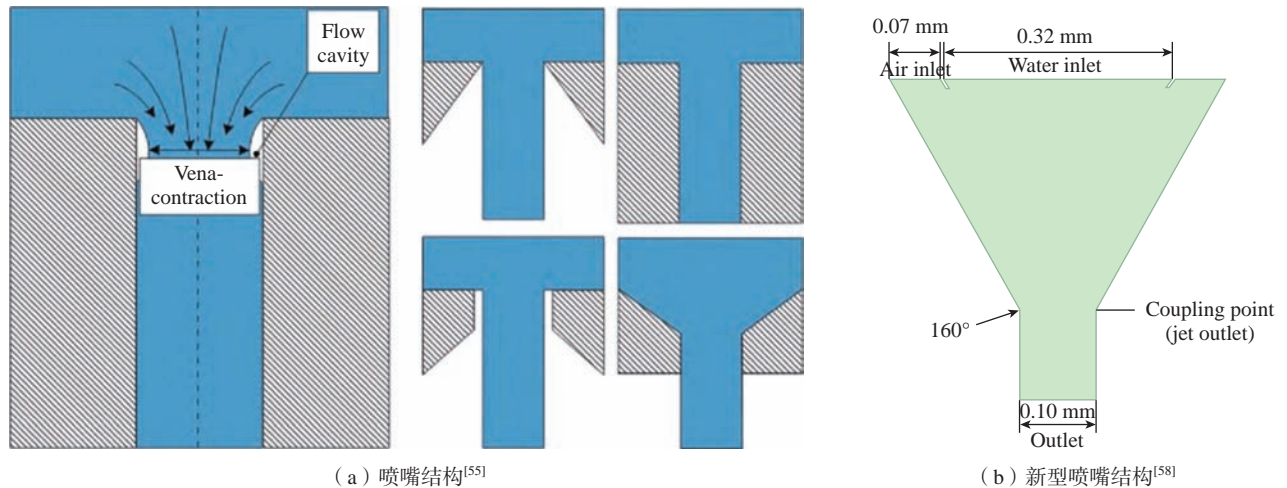
射流。当水射流在刚离开喷嘴时,由于表面张力的作用仍会生成涡流,但是在高压气体的推动下,涡流逐步扩大并后移,随着射流逐步稳定,涡流最终消失,生成稳定的水射流,如图5(c)所示^[58]。该方法加工难度小,所需压强低,对喷嘴的结构设计有重要的参考价值。

稳定的水射流是激光全反射传输的基础,但加工过程中水层的堆积和喷射飞溅会影响激光的传输效率,削弱激光的加工能力,辅助气体通过约束流场与隔离环境减少大气干扰,增加层流长度,并有助于清除试样表面积累的水层,抑制水流溅射,从而提升工件表面质量并降低缺陷率^[59-61]。张广义等^[62]提出了一种新型水-气缩流导光加工技术,并通过仿真验证了水-气缩流与全反射导光的可行性,该技术为水导激光低损伤、高精度、大厚度材料加工奠定理论基础。Li等^[63]提出了一种新型的同轴环气辅助(CAAA)气氛,并建立了氩气和水射流两相流动的理论模型。通过试验与模拟研究发现,同轴环形气氛可以主动干扰水射流,并能有效保持工作长度内的芯层速度,提高了水导激光加工能力。Liang等^[64]针对水束光纤外排液体干扰的问题,提出了一种基于双错轴气辅的水导激光加工方法,如图5(d)所示,在同轴氩气辅助系统的基础上,增加了一种外部错轴辅助气体。外部错位气体在吹走结构内部沉积水的同时,还可以阻止外部排出的液体接近水束,从而提高水导加工的材料去除效率。试验结果表明,与单轴和双轴气辅相比,微孔加工效率分别提高了35.1%和15.6%。赵臻等^[65]采用有限元方法建立水-光耦合模型,探究水束中高功率激光的热损失问题,调控高功率激光水-光耦合的热稳定性,保证激光能量有效地传输至工件表面。Zhao等^[66]提出了一种利用环形气辅水射流引导激光在Inconel 718合金

表面加工沟槽结构的新方法;该方法利用气体辅助去除基材表面的水层,减少毛边,提高材料去除效率,环形气辅空腔的水-气两相流线如图5(e)所示。在此基础上,对1 mm厚的Inconel 718金属板进行了坡口加工试验,结果表明,采用该工艺后,毛刺平均尺寸减小了36%,坡口深度增加了13%。

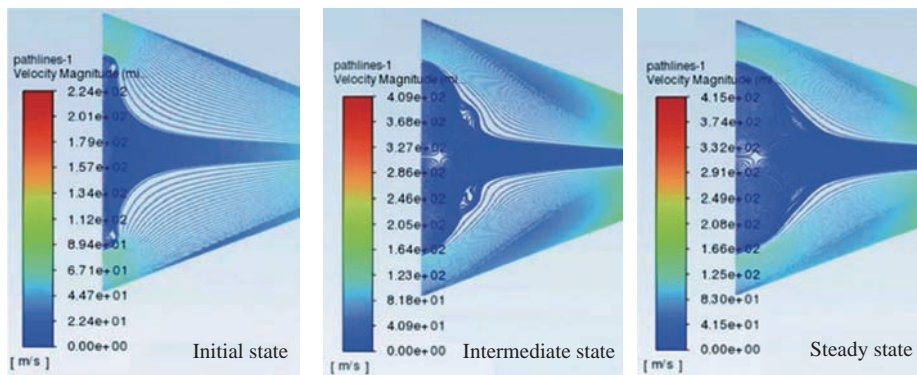
2.2 光学特性

激光具有良好的相干性、单色性和准直性等,能够在极小的光斑内产生高功率密度,从而有效促进材料的加热、熔化和汽化^[67]。激光是水导激光加工的“能量核心”,激光能量被水束“约束”在极小的作用区域(水束直径通常20~200 μm),能量密度更高且分布更均匀,避免了传统激光“能量发散”的问题,加工精度提升1~2个数量级,大部分单束激光光斑能量形式呈高斯分布,而水导激光在水射流截面上能量分布均匀,呈现类平顶光的形态,如图6(a)所示^[68]。由于水束的吸收特性,不同波长的激光能量传输效率不同。纯水的吸收系数与激光波长的关系如图6(b)所示^[52]。在波长300~500 nm的范围内,纯水对激光的透过率较高。然而,当光波长进入近红外到中红外区域(700 nm以上)时,光子容易与水分子发生共振吸收,水分子会显著吸收光能,导致激光能量损失。由于激光的高强度,光学击穿进一步放大了实际能量损失,这是WJGL加工系统中不可避免的问题。因此,光源的选择需要评估激光波长与水束的吸收特性,以实现能量传输效率的最大化。当水射流长度2.5 cm时,532 nm的激光透过率接近99.9%,但1064 nm的激光透过率只有60%左右^[68-69]。李靖怡等^[70]针对光源选型问题,对激光与纯水的耦合机制进行了理论研究与试验验证,探究了多光子电离、雪崩电离、电子扩散及电子重组等物理进程对自由电子密度的影

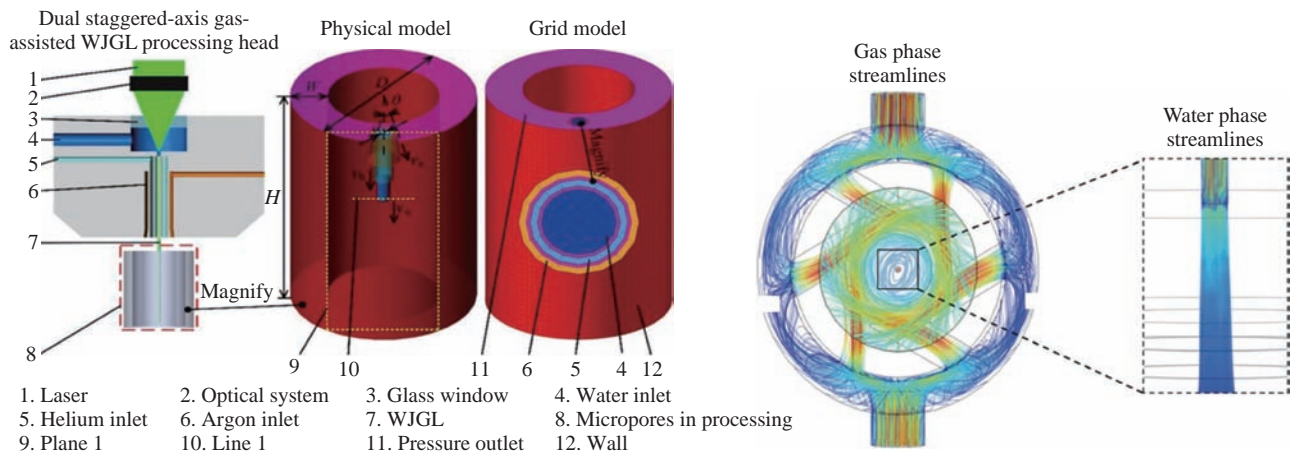


(a) 喷嘴结构^[55]

(b) 新型喷嘴结构^[58]



(c) 喷嘴结构处的涡流状态^[58]



- 1. Laser
- 2. Optical system
- 3. Glass window
- 4. Water inlet
- 5. Helium inlet
- 6. Argon inlet
- 7. WJGL
- 8. Micropores in processing
- 9. Plane 1
- 10. Line 1
- 11. Pressure outlet
- 12. Wall

(d) 双错轴气辅的水导激光加工方法^[64]

(e) 水-气两相流线^[66]

图5 水射流特性及结构优化

Fig.5 Water jet characteristics and structural optimization

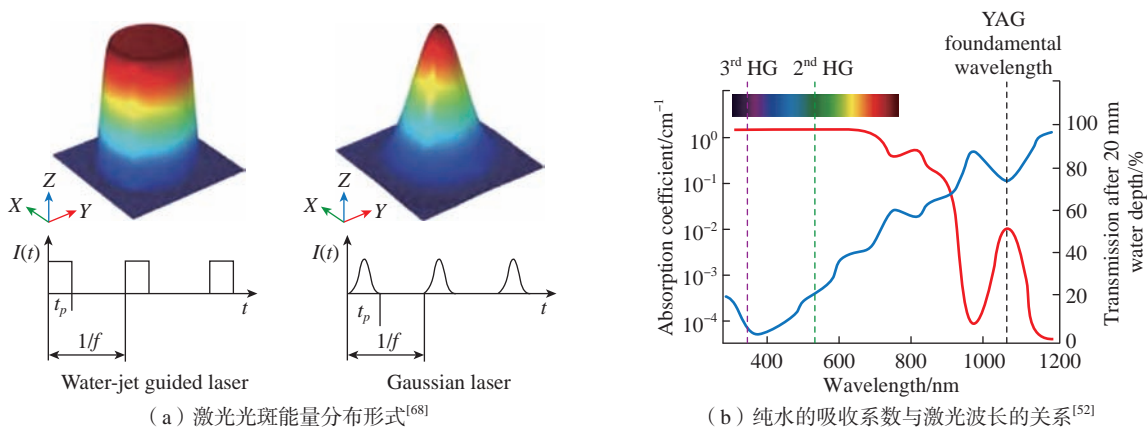
响,明确了不同激光参数下水的理论击穿阈值。WJGL系统通常使用凸透镜形成微米级光斑,从而在极细水射流中实现水光耦合。梁恩等^[71]提出自聚焦-球透镜组合聚焦模式和正-负轴棱锥镜组合聚焦模式,并对它们与传统凸透镜聚焦模式进行对比分

析,并仿真出3种聚焦模式下形成聚焦光束的聚焦特性,验证不同光束聚焦模式对水光耦合效率提高的效果和在水导激光设备中的适用性,并为后续水导激光加工技术中光束聚焦模式的选取提供理论依据。Huang等^[72]将凹轴棱镜和凸轴棱镜组合在

一起,使其产生具有微米级中心光斑的无衍射激光光束,耦合原理如图6(c)所示,成功将无衍射激光束耦合到水射流中,中心光斑实现了稳定的传输,耦合效率约为92%。

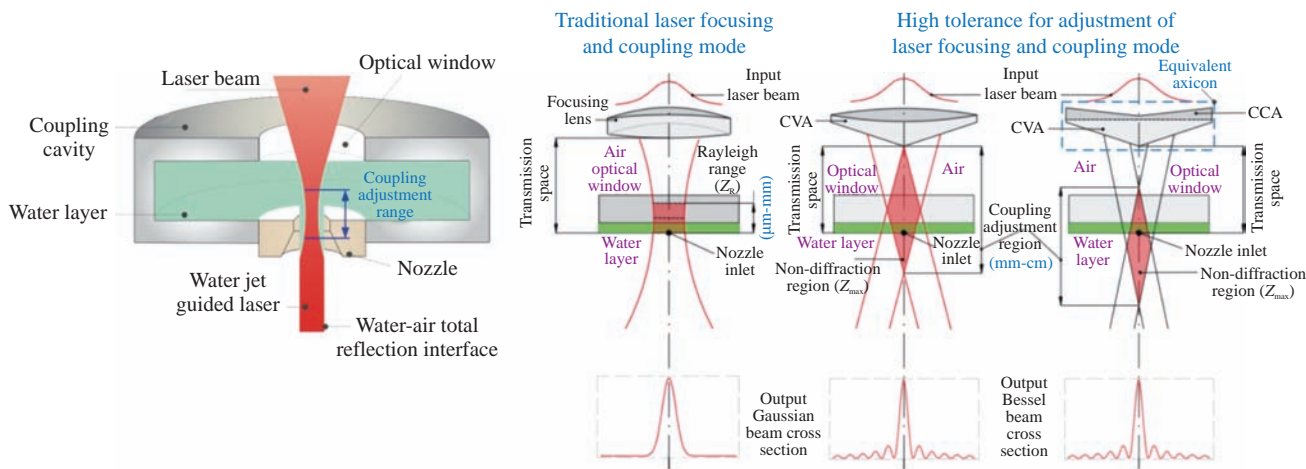
2.3 水光耦合特性

激光并非独立工作,而是与高



(a) 激光光斑能量分布形式^[68]

(b) 纯水的吸收系数与激光波长的关系^[52]



(c) 激光束聚焦与耦合调节模式原理^[72]

图6 光学特性及耦合原理

Fig.6 Optical properties and coupling principle

压水束形成协同作用体系,通过能量与介质的互补耦合达成“1+1>2”的加工增效,通过能量调控解决传统激光加工或纯水射流加工的固有缺陷,这是水导激光技术的核心优势所在。激光在水束内部通过全反射沿水束轴线传播,能量被严格限制在水束横截面范围内(能量发散角 $<0.1\text{ mrad}$),而非传统激光的“锥形发散”(发散角通常 $1\sim 5\text{ mrad}$)。水-光耦合传输效率和能量分布是实现水导激光可加工性的前提与效率保证。丁小康等^[73]设计了一种 100 W 长纳秒脉冲光纤耦合输出的 532 nm 绿光激光器,该激光器实现了 11.6 W 的 532 nm 绿光光纤耦合输出,耦合效率 92.3% , 1 h 内功率波动约为 0.83% 。Wu等^[74]研究了水-激光耦合装置和喷嘴几何

形状对水引导激光束稳定长度的影响及其机理,建立了耦合装置内部流场的数值模型。Zhang等^[75]提出了一种负离焦耦合方法,以提高激光-水-射流的耦合容限,提高系统的稳定性;采用光线追迹法模拟和试验,分析了不同离焦条件下激光光斑在水射流中的分布,轴向离焦条件下的水射流光斑分布情况如图7(a)和(b)所示。结果表明,负离焦耦合有效地降低了光学窗口和喷嘴处的激光功率密度,保护它们免受热损伤。此外,负散焦耦合提高了激光和水射流耦合效率,并增加了系统对更高激光功率水平的耐受性。这些发现验证了负离焦耦合的可行性和优势,为高效的水射流引导高功率激光加工提供了可靠的解决方案,加强了部件

保护,并提高了加工质量。

在水光耦合参数优化设计方面,Couty^[76]研究了激光在水射流中传输时数值孔径、焦深、偏心距和射流直径对激光能量分布的影响,结果如图7(c)所示。研究表明,增大射流直径及激光焦点与水射流中心的间距,有助于提高整个水射流剖面的模态均匀性;若焦距与射流中心的间距过大,可能在激光聚焦于水/气界面时导致能量传输过程发生更大的扰动。Deng等^[77]使用 1064 nm 激光及其两倍频 532 nm 激光作为仿真光源,模拟了不同水射流柱直径下激光与水射流的耦合效果,结果如图7(d)所示。随着水射流直径的增大,耦合效率逐渐提升,因为激光束更易被束缚在较大的水射流中,但由于激

光在水射流内会发生多次反射,较小直径的水射流可以提供更强且均匀的能量分布。程柏等^[78]采用波束包络法对高斯激光在耦合能束中的全反射式传播进行了数值模拟,分析激光电场在不同直径的射流中的演变规律,并获得了耦合能束不同位置处的激光能量分布。张光辉等^[79]为了得到较高的水束中激光功率传输效率和均匀的激光功率密度分布,采用光线追迹原理及物理光学传播方法,仿真分析了 1064 nm 激光束聚焦后的光束特性及水光耦合后水束中激光光斑分布形态。该研究为提高水

导激光中能量利用率提供一定的指导意义。

此外,在水光耦合仿真研究方面,Zhao 等^[80]研究水射流引导下高功率激光能量的传输损耗的问题,对高功率激光在水射流中的传播进行波动光学模拟,得到了激光束在水射流中的电场分布。同时,研究了不同激光束直径、水射流直径和长度与激光能量损失的关系,分析了高功率激光在水射流中的传输损失。该研究为优化和控制高功率激光与水射流传输耦合过程中的能量损失提供了见解。Zhang 等^[81]提出了一种新型

的水-气收缩导向高功率激光加工技术,与传统的水导激光加工方法相比,该技术在轴向、径向和角度偏移的抗扰动能力分别提高了 3.8 倍、2.3 倍和 1.5 倍,并通过试验验证了利用水-气收缩法进行激光传导和加工的可行性,在低功率条件下,激光耦合效率可达 93%,射流形貌如图 7(e)所示。Zhang 等^[82]针对水光纤稳定性难以控制的问题,建立了水光纤的有限元模型,采用涡旋气相流对流模型,得到了气相流和水光纤对流的流场分布;结果表明,在气相流的约束下,水纤维束的最大处理距离可增加

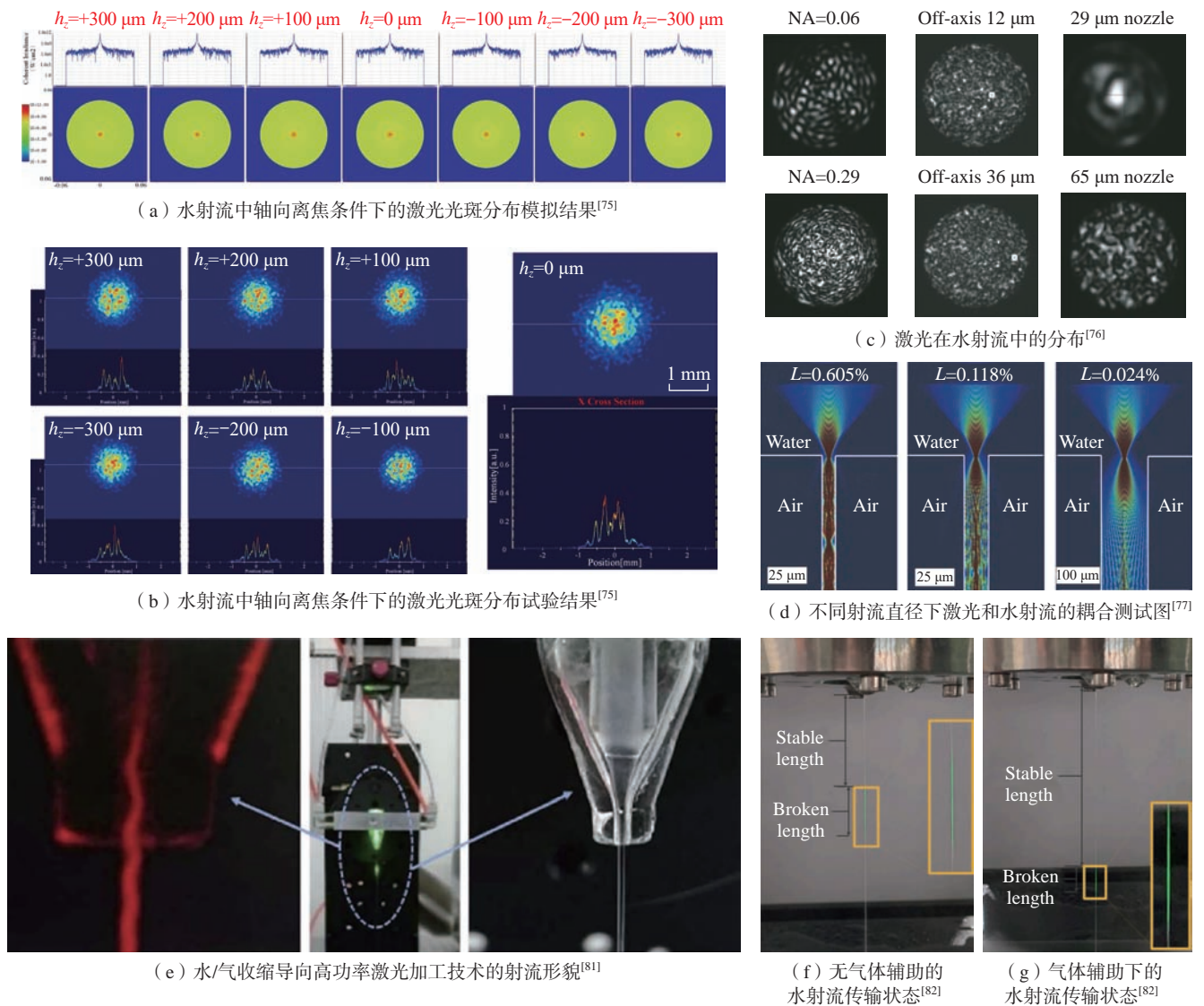


图 7 水光耦合特性

Fig.7 Water-laser coupling characteristics

3倍,水射流传输状态如图7(f)和(g)所示。同时,气相流可加速加工碎屑的清除,提高加工精度和效率。

水导激光加工中的水光耦合机制是一个复杂的物理过程,涉及激光与水射流的相互作用、能量传递及水的光学特性。正是这些多维度作用的协同,水导激光加工兼具高精度、低损伤、高效率的优势,成为精密制造领域的关键技术之一。优化水射流的稳定性、激光的特性和水光耦合机制,能够有效提高加工效率和质量。通过深入理解和控制水光耦合机制,推动水导激光技术在各种材料的高精度加工中发挥重要作用。

3 难加工材料水导激光加工工艺研究

水导激光加工技术在很多领域取得了显著的应用效果,但在难加工材料的加工中仍然面临一些挑战,如

加工大厚度材料时会出现较大的热影响区,微孔加工时水流溅射易导致加工效率低下等。因此,未来的研究将继续聚焦于优化水导激光的工艺与应用效果,实现大厚度和大深径比的微孔加工。

3.1 切割工艺

水导激光加工技术能够有效减少热积累,但处理大厚度材料时,激光能量依然会产生大量的热量。即使水有冷却作用,水冷却系统的效率依然是一个关键问题。如果冷却不充分,可能会导致材料局部过热,出现变形或烧伤现象。水导激光切割不同材料的加工效果如表1所示。Wu等^[83]采用水射流引导激光加工技术对CFRP进行了低损伤、大厚度加工的切割试验,CFRP材料去除机制如图8(a)所示。试验中,得到了激光功率、进给速度、水射流速度等工艺参数对切割效果的影响规律,并

采用平行路径分层扫描法实现了1,2,4,10 mm厚度CFRP的切割。此外,首次分析了碳纤维排列方向和激光切割路径对CFRP切割损伤机理的影响,总结了暴露、脱落和拔出3种损伤机理,为大厚度CFRP的高精度切割提供了参考。Zhao等^[84]采用响应面法建立了水压、激光功率、脉冲频率和进给速度对切割Inconel 718合金深度的回归模型,该模型的预测率为92.67%,并分析得出不同参数对切割深度的影响效果,激光功率>脉冲频率>进给速度>水压;通过切削试验,得到最大切削深度为774.4 μm,切缝形貌如图8(b)所示,与预测值的误差为5.5%,验证了模型的有效性。Cheng等^[85]对3 mm厚的SiC/SiC陶瓷基复合材料(CMCs)进行了单排和多排划线试验,来验证水导激光的加工能力。试验表明,单束划线在槽深2461 μm处

表1 水导激光切割不同材料的工艺参数及加工效果

Table 1 Process parameters and cutting results for waterjet-guided laser cutting of different materials

材料	厚度	波长/脉冲频率/激光功率/进给速度	水射流参数	加工效果
CFRP ^[83]	1~10 mm	532 nm 40 kHz 30 W 20 mm/s	喷嘴直径: 100 μm 水速: 160 m/s	切割内壁干净,碳纤维截面整齐,未出现热膨胀现象
Inconel 718 合金 ^[84]	774.4 μm	1070 nm 4 kHz 350 W 0.1 mm/s	喷嘴直径: 500 μm 水压: 1.66 MPa	与干式激光相比,切口边缘的烧蚀程度降低,切口更整齐,热损伤减少,切割质量升高
CMCs ^[85]	3 mm	532 nm 50 kHz 50 W 10 mm/s	喷嘴直径: 60 μm 水压: 20 MPa	加工表面未出现热影响区或重熔层,碳化硅纤维也未出现拉拔或分层现象
CFRP ^[86]	4 mm	532 nm 40 kHz 30 W 5 mm/s	喷嘴直径: 150 μm 水速: 160 m/s	实现4 mm厚度的碳纤维增强复合材料的无锥度切割
Ti-6Al-4V 合金 ^[88]	2 mm	532 nm 10 kHz 2 GW/cm ² 5 mm/s	喷嘴直径: 150 μm 水压: 15 MPa	加工后表面形成了一层厚度仅为几百纳米的超薄氧化层,使表面粗糙度降低至12 μm
CFRP ^[89]	6 mm	532 nm 16 kHz 240 W 0.35 mm/s	喷嘴直径: 100 μm 水压: 40 MPa	加工过程中,出现了严重的纤维断裂和热损伤现象,当激光功率240 W、频率16 kHz和水压40 MPa时,可获得最佳的切割性能
CFRP ^[90]	10 mm	532 nm 30 W 800 mm/s	喷嘴直径: 80 μm 水压: 15 MPa	耦合能束在切割深度方向上的衰减、切槽形貌在不同阶段对能量吸收的差异和射流飞溅现象对加工过程的干扰会降低加工效率

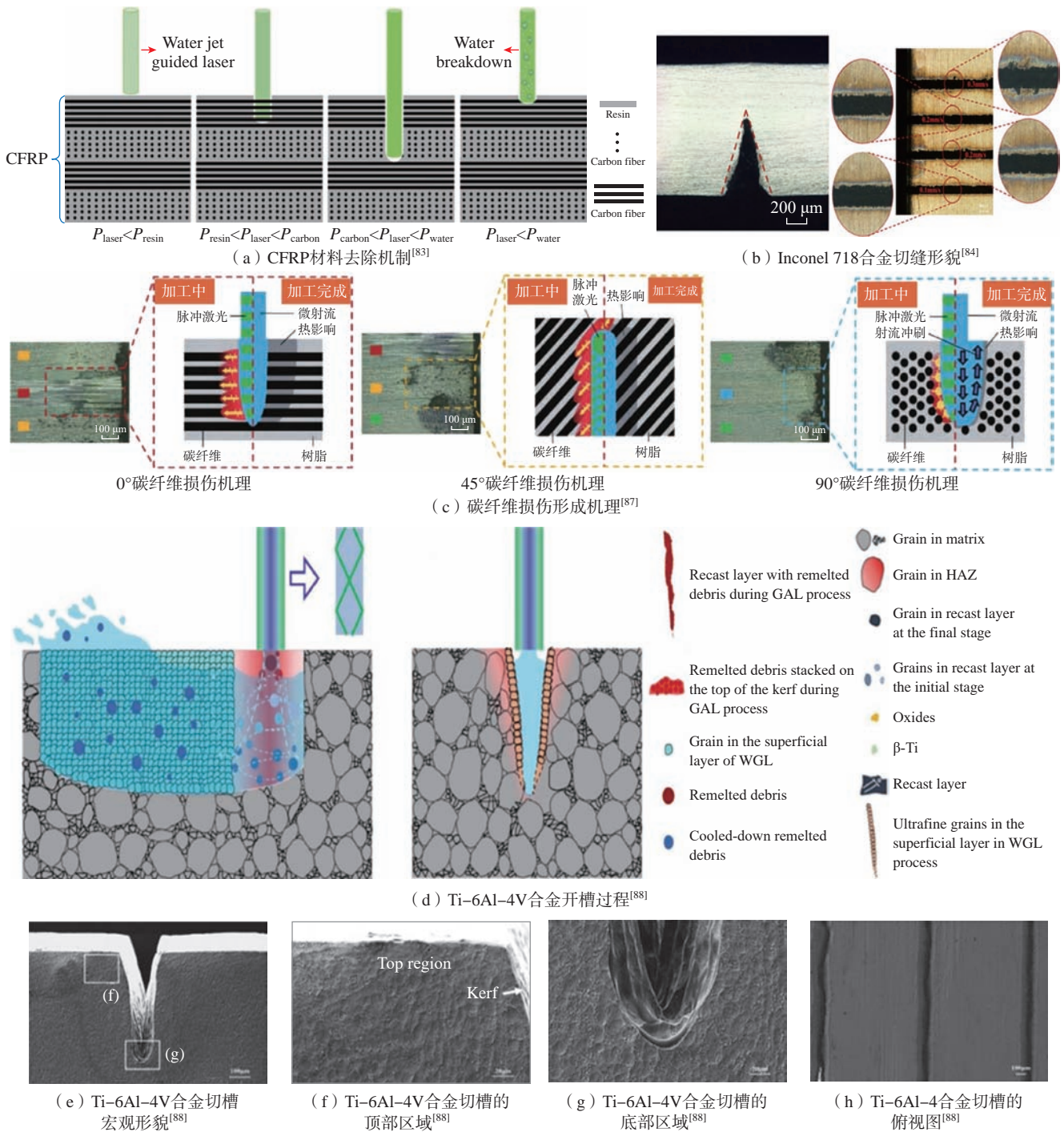


图8 水导激光切割原理及应用

Fig.8 Principles and applications of waterjet-guided laser cutting

有一个极限值,采用多排划线才能实现完全切断。此外,水导激光切割的CMCs的横截面呈现无重铸层、无SiC纤维拔出、无分层的表面形貌。汪建新等^[86]通过正交试验方法研究进给速度、水射流速度、脉冲频率和激光功率对CFRP材料切割的影响

规律,得到最优参数,即进给速度5 mm/s、水射流速度160 m/s、脉冲频率40 kHz、激光功率30 W时,实现4 mm厚CFRP材料无锥度切割,且材料切割表面几乎无热影响区和纤维拔出等缺陷。

陈忠安等^[87]研究水导激光切

割CFRP材料沟槽表面和横截面的热损伤形成机理,结果表明,激光与材料的相互作用和水射流的冲刷作用是形成沟槽表面热损伤的主要原因。在2 mm厚CFRP切割试验中发现:横截面热影响区宽度与纤维排布方向有关,0°碳纤维热影响区

宽度最大,45°和135°碳纤维热影响区宽度次之且宽度相近,90°碳纤维热影响区宽度最小;另外,提高水射流速度有利于抑制热影响区的扩展,水射流速度由80 m/s提高至120 m/s,最大热影响区宽度缩小35.7%,碳纤维损伤形成机理如图8(c)所示^[87]。Chao等^[88]使用WJGL加工技术对Ti-6Al-4V合金进行超薄缺口加工;结果表明,在水射流的帮助下,重熔的碎屑和热量可以立即排出,从而抑制了再铸层和热影响区的形成。表面形成了几百纳米的超薄氧化物外层和超细的 α -Ti颗粒内层,使表面粗糙度降至12 μm ,而表层为残余压应力,加工过程如图8(d)所示^[88]。WJGL处理后的开槽具有较低的深度与宽度之比,取值为1.9~2.5,且深度可随WJGL处理时间的增加而增加,5次加工后,开槽深度为543 μm ,宽度为202 μm ,开槽形貌如图8(e)~(h)所示^[88]。Elkington等^[89]采用平均功率为400 W的高功率纳秒激光器,

研究了WJGL切割CFRP的基本特性。研究表明,在水射流和热应力相互作用的条件下,WJGL切割CFRP材料去除机制是基于熔融、汽化和纤维断裂的结果。在约240 W、16 kHz和40 MPa工艺参数下,实现6 mm厚度CFRP材料的最佳切割,总体切割速度为21 mm/min,工艺影响区约为1 mm。这强调了工艺变量之间的微妙平衡以及为获得理想结果而进行权衡的必要性。王宗炼等^[90]针对水导激光切割CFRP的过程中,加工效率会随着切割深度的增加而非线性降低的问题,开展了水导激光切割10 mm厚的CFRP板试验。结果表明,使用水导激光切割10 mm厚的CFRP时,切槽形貌会依次经历平整期、波动期和凹陷期3个阶段,且最终是从切缝的中部率先切穿。进一步分析发现,加工效率的降低主要由3个因素共同作用导致:耦合能束在切割深度方向上的衰减;切槽形貌在不同阶段对能量吸收的差异;射流飞溅现象对加工过程的干扰。

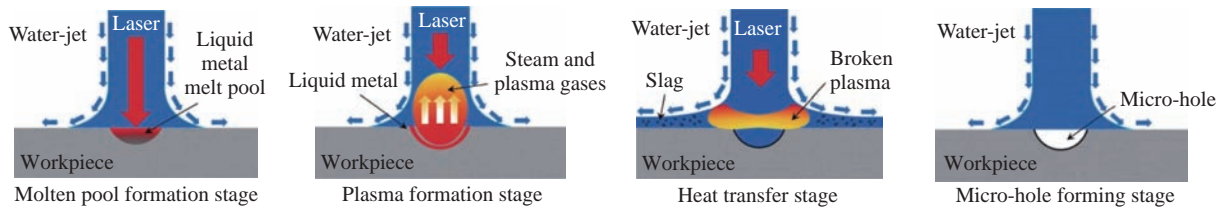
3.2 制孔工艺

水导激光加工是激光与水相互作用的结果,水提高了激光的聚焦效果,同时降低激光束的反射效果。然而,如何精确控制激光能量的密度,使其能够在水介质中高效传输并在材料表面形成微孔,这仍是一个挑战。不同材料水导激光制孔工艺参数如表2所示。在金属材料加工领域,Yu等^[91]采用水射流导引激光技术优化GH4169高温合金微小孔加工,加工原理如图9(a)所示,通过正交试验,分析了激光功率、重复频率和水束压力对微小孔加工深度和内壁粗糙度的影响。然后,基于响应面方法建立了微孔内壁粗糙度预测模型,优化工艺参数。通过响应面模型优化,当激光功率为260 W、重复频率为6 kHz、水束压力为1.6 MPa时,可加工内壁粗糙度仅为0.675 μm 的微小孔,三维轮廓如图9(b)所示^[91]。该模型为WJGL加工技术在微小孔的高精度、低损伤加工中的应用提供了一种工艺优化方法。王水旺等^[92]自行

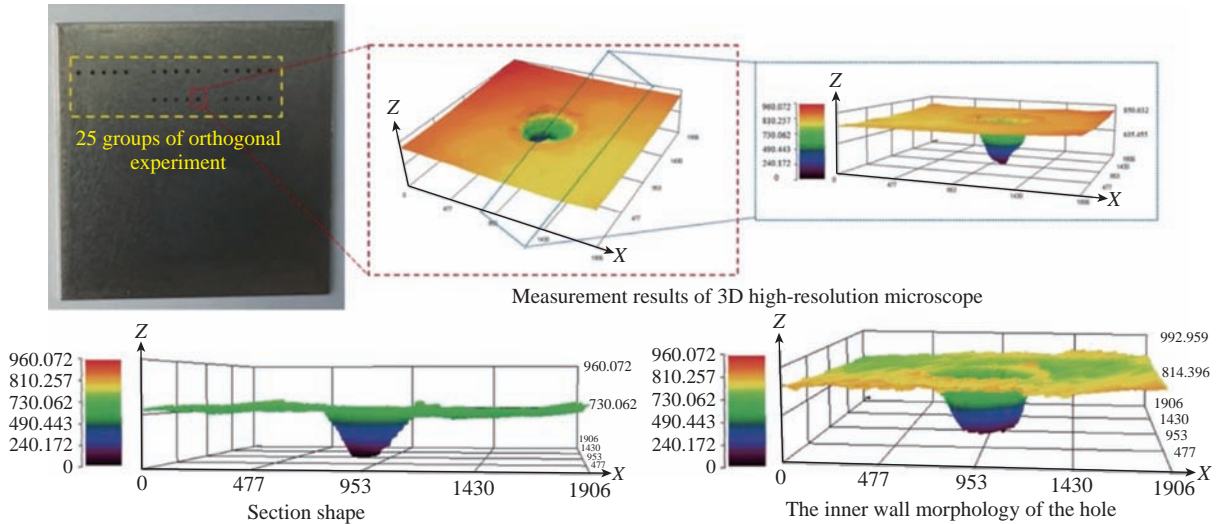
表2 不同材料水导激光制孔的工艺参数及加工效果

Table 2 Waterjet-guided laser drilling process parameters and machining results for different materials

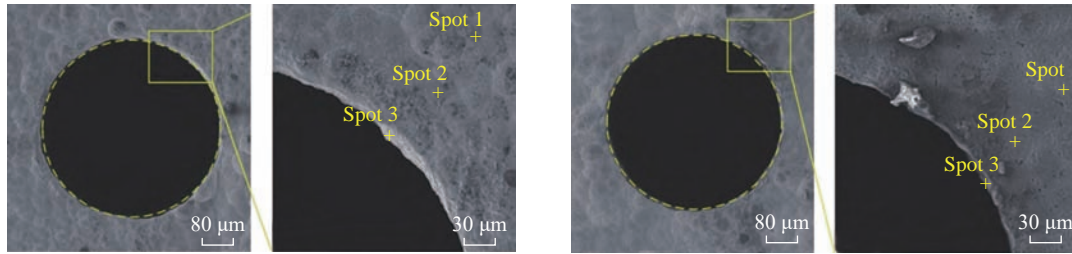
材料	孔特征	波长/脉冲频率/激光功率/进给速度	水射流参数	加工效果
GH4169 合金 ^[91]	直径: 0.5 mm 深径比: 2 : 1	1064 nm 6 kHz 260 W	水压: 1.6 MPa 喷嘴直径: 0.5 mm	优化后的微小孔内壁粗糙度仅为0.675 μm ,表面质量提高了10.2%,模型预测精度达96.27%
DD6 合金 ^[92]	直径: 400 μm 深径比: 6.5 : 1	532 nm 90 kHz 40 W 1 mm/s	喷嘴直径: 60~100 μm 水压: 15 MPa	具有高表面圆度,几乎不存在加工缺陷
TBC 镍基合金 ^[93]	直径: 0.6 mm 深径比: 20 : 1	532 nm 8 kHz 4 mJ 15 mm/s	喷嘴直径: 80 μm 水压: 20 MPa	加工出近似锥形的空气薄膜冷却孔,倾斜角度为45°
GH4169 合金 ^[94]	直径: 2 mm 深径比: 0.8 : 1	532 nm 32.7 kHz 41 W 1.8 mm/s	喷嘴直径: 100 μm	加工厚度为0.8 mm、直径为2 mm通孔时,入口圆度为2.9 μm ,出口圆度为7.5 μm ,孔壁面会产生0~10 μm 左右的重铸层,导致孔强度降低
SiC _f /SiC ^[95]	直径: 500 μm 深径比: 8 : 1	532 nm 8 kHz 2500 μJ 0.3 mm/s	喷嘴直径: 50 μm 水压: 20 MPa	在约60 s内完成几乎无锥度小孔的可加工
SiC _f /SiC ^[96]	直径: 0.3 mm 深径比: 10 : 1	1035 nm 6 kHz 17 W 3 mm/min	喷嘴直径: 50 μm 水压: 10 MPa	加工出直径约300 μm 、深径比为10 : 1的小孔,孔壁整洁但凹凸不平



(a) 水导激光加工微孔工艺示意图^[91]

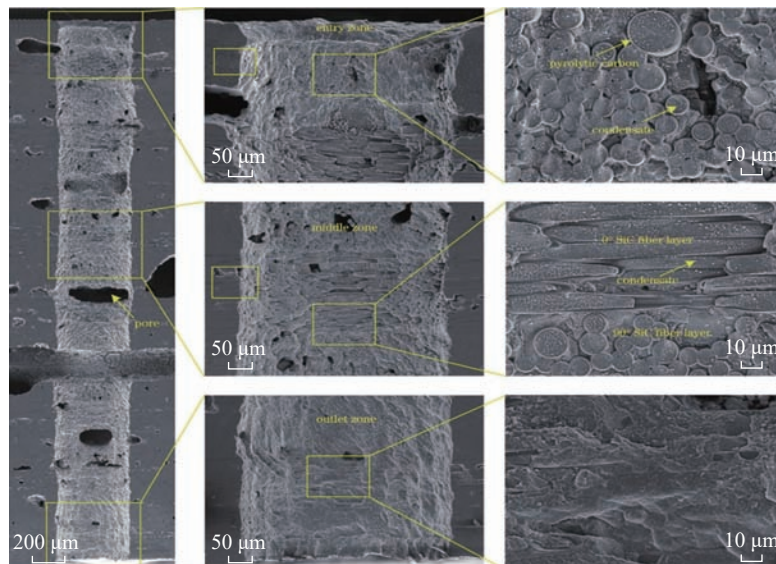


(b) GH4169高温合金微孔形貌^[91]



(c) SiC/SiC复合材料小孔入口形貌^[95]

(d) SiC/SiC复合材料小孔出口形貌^[95]



(e) SiC/SiC复合材料小孔内形貌^[95]

图9 水导激光制孔原理及应用

Fig.9 Principles and applications of waterjet-guided laser drilling

搭建了一套水导激光加工系统,进行 DD6 合金制孔试验,并加工出高质量气膜孔。试验成功制取了 400 μm 直径的直孔和 45° 斜孔,加工出的气膜孔几乎无重铸层和微裂纹,不存在热影响区,为气膜孔加工提供了一种有效的技术参考。Wang 等^[93]采用高能纳秒激光与高速水射流耦合的水射流制导激光技术,实现了大厚度 TBC 镍基合金上小锥度、有限缺陷的高质量、高效率钻削气膜冷却孔 (FCH)。通过优化加工工艺,在 8.5 mm 厚的 TBC 合金上成功地加工出了高质量 45° 倾斜 FCH,其深径比为 20 : 1,锥度、涂层破碎和分层、热影响区 (HAZ) 最小。于永飞等^[94]利用水导激光设备在不同激光功率和扫描速度下对高温合金 GH4169 进行螺旋制孔试验。结果表明:加工过程中产生了重铸层,其厚度在 0~10 μm 之间;粗糙度值 R_a 在试验范围内随着激光功率和扫描速度的增大而减小,当激光功率为 41 W、扫描速度为 1.8 mm/s 时,获得最小的 R_a 值为 5 μm ;孔壁面切削形貌特征自上而下分成 3 层,即光滑细纹层、熔融物附着层、粗纹层。研究结果为进一步提高水导激光精密钻孔工艺提供了理论依据。

在陶瓷材料加工领域,邢光浩等^[95]采用波长为 532 nm、脉宽为 100 ns、脉冲频率为 8 kHz 的纳秒激光,开展水导激光加工 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料小孔的工艺研究。研究结果表明,单脉冲能量是实现小孔打通的关键参数。当单脉冲能量为 2500 μJ 、扫描速度为 0.3 mm/s、水束压力为 20 MPa 时,大约需要 60 s 加工出直径为 500 μm 、深径比为 8 : 1 的近无锥度小孔,表面形貌如图 9 (c)~(e) 所示^[95]。水导激光在减小重铸层和热影响区以及保持孔壁清洁等方面表现出优异的性能,能够实现 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料小孔的高质高效加工。董志刚等^[96]采用了飞秒激

光旋切制孔和水导激光制孔的方法,在 3 mm 厚 SiC_f/SiC 复合材料上加工出深径比为 10 : 1 的小孔。结果表明,激光加工的孔出口质量均优于入口质量,飞秒激光旋切制孔具有孔口锋利、圆度好、锥度小等优点,水导激光制孔具有孔口光滑清洁、孔壁光洁、加工效率高等优点。

4 水导激光在精密加工中的应用

水导激光加工技术弥补了传统激光加工和纯水射流加工的缺陷,在精密、超薄、易热损伤材料的加工方面(如半导体、蓝宝石、陶瓷、金属箔等)展现出巨大优势。Rashed 等^[97]在喷油器喷嘴上加工出宽高比(厚度/孔直径)在 1.4~2 之间的微小孔,如图 10 (a) 所示。Hu 等^[98]使用水导激光切割 Cu46Zr46Al8 非晶合金,加工出通孔、微型齿轮等特殊形状,如图 10 (b) 所示。Pauchard 等^[99]利用水导激光切割 220 μm 厚蓝宝石,仅需 7 或 8 道次即可实现 75 μm 的目标刻槽深度,总切割速度为 7.5 mm/s,如图 10 (c) 所示。

水导激光加工其他材料时也展示出很大优势^[100]:加工立方氮化硼晶体 (CBN),可以保持表面原始光学透明度,呈现特征性波浪纹理,如图 10 (d) 所示,并且可以避免金刚石石墨化这种有害相变;加工镍钛合金时展现出卓越的质量控制能力,并且能有效防止氧化层形成并消除热损伤,该材料是制作人体支架的良性选择,如图 10 (e) 所示;在聚晶金刚石 (PCD) 切割方面,水导激光加工比传统 PCD 线切割展现出更优的加工效率和刃口质量,如图 10 (f) 所示。高质量气膜孔对提高航空发动机的承载能力和使用寿命至关重要,水导激光技术可高效加工圆形和异形(方形、梯形和倾斜)气膜冷却孔,孔的入口、出口、侧壁均具有优异的表面质量,如图 10 (g)^[100]

和 (h)^[92] 所示。

5 总结与展望

本文概括了近年来水导激光加工技术的研究进展,从加工机理、水光耦合特性和工艺研究 3 个方面详细介绍了水导激光加工技术的研究现状。水导激光加工技术凭借加工精度高、材料适应性好、效率高及无污染等优势,在高精度、高效能的加工需求中展现出巨大的潜力。其核心原理是:基于激光在水射流中的全反射传输机制实现激光与水射流的高效耦合,激光能量由水射流纤引导至工件表面,能量被材料吸收并加热目标区域,当热量持续积累时,工件表面产生熔化和汽化现象。

水导激光加工中的水光耦合机制是一个复杂的物理过程,涉及水射流特性、光学特性及水光相互耦合特性,正是这些多维度相互协同,使水导激光加工兼具高精度、低损伤、高效率的优势,成为精密制造领域的关键技术之一。优化水射流稳定性、分析激光特性和探究水光耦合机制,能够有效提高加工效率和质量。

高精度和低损伤加工使水导激光能够应用于航空航天、精密医疗等领域加工高强度合金类、陶瓷及陶瓷基复合材料、聚合物基复合材料等各种难加工材料。但加工高质量、高深径比的孔、槽和边时,水导激光的加工能力仍存在一定的局限性。因此,水导激光加工技术在未来将继续向更高的精度、更广泛的应用领域和更高的效率发展,未来的可能发展方向如下。

(1) 高功率耦合。水导激光加工系统存在水射流对高功率激光的吸收以及稳定性难题,当能量密度过高时会导致水射流击穿或发生湍流,影响激光传输效率。随着国产高功率激光技术的突破,高功率且高质量激光器不断发展涌现,通过高功率耦合,提升功率密度,从而提高加工速

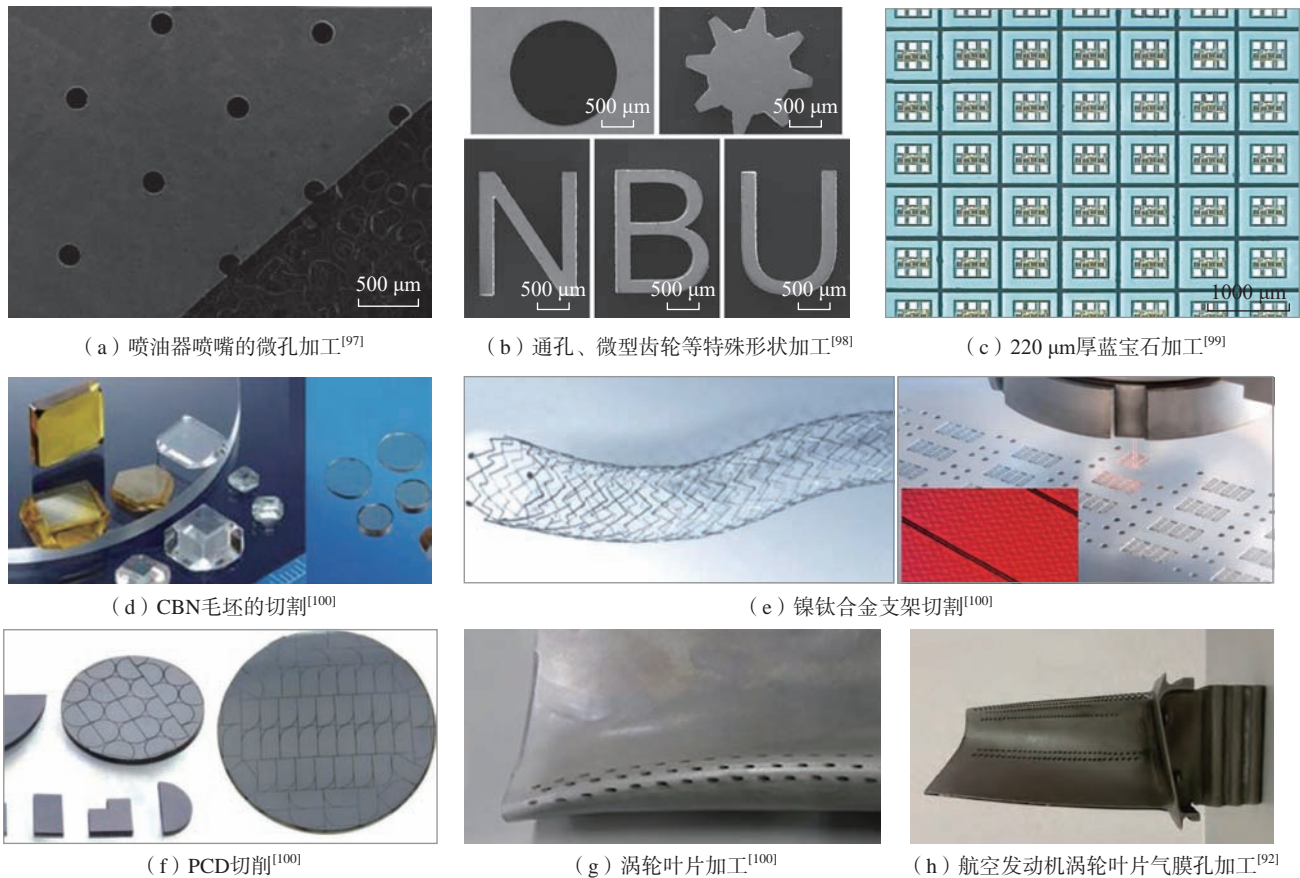


图 10 水导激光在精密加工中的应用
Fig.10 Applications of waterjet-guided laser in precision machining

度和效率。

(2) 高稳定性加工。喷嘴结构、水压系统和冷却系统保障了加工过程中水射流与激光的稳定输出,避免因热积累或杂质影响导致加工质量不稳定的问题。因此,提高水射流与激光的稳定性对于水导激光加工质量和可靠性具有重要意义。

(3) 复合加工工艺。将水导激光加工与其他先进的加工技术结合,形成更加高效和灵活的复合加工系统。例如:水导激光与电解加工结合,在加工过程中实现材料更精确的去除,并且可以减少加工过程中的热影响,提高表面质量;水导激光与传统机械加工(如铣削、钻孔等)技术结合,可以实现更复杂、更高精度的零件加工,特别是在医疗器械和航天设备等对精度要求极高的领域。

(4) 数字化与工业 4.0。随着数

字化技术的发展,水导激光加工将融入工业 4.0 的框架中,实现数据的实时监控、远程控制和工艺优化。通过大数据分析、机器学习和人工智能,水导激光加工将实现自适应的工艺调整,进一步提升加工精度与效率。未来的水导激光加工设备将配备更加智能的监控系统,能够实时监控加工过程中的每个细节(如温度、激光功率、水流状态等),并通过反馈系统进行自动调整。

参考文献

- [1] 温秋玲, 杨野, 黄辉, 等. 激光复合加工硬脆性材料研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(9): 168–188.
WEN Qiuling, YANG Ye, HUANG Hui, et al. Review of research progress in laser-based hybrid machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(9): 168–188.

- [2] 张晓宇, 王子昂, 胡秀飞, 等. 面向金刚石材料高质量激光加工方法和研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(8): 2388–2409.

ZHANG Xiaoyu, WANG Ziang, HU Xiufei, et al. Methods and research progress for high-quality laser processing of diamond materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(8): 2388–2409.

- [3] 丁焯, 吴雪峰, 管延超, 等. 激光复合去除加工技术研究综述[J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 30–47.

DING Ye, WU Xuefeng, GUAN Yanchao, et al. Review of hybrid laser removal processing technologies[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(11): 30–47.

- [4] ZHANG P, GAO Y R, YU Y, et al. Effects of water-guided laser surface strengthening on surface properties and fatigue life of TC4 titanium alloy in tension-tension fatigue tests[J]. Vacuum, 2025, 232: 113863.

- [5] 郭翰铭, 邢飞, 刘伟军, 等. 水导激光切割TC4钛合金表面形貌特征分析[J]. 应用激光, 2024, 44(6): 96–102.

GUO Hanming, XING Fei, LIU Weijun, et al. Analysis of surface morphology characteristics

of TC4 titanium alloy by water jet-guided laser cutting[J]. *Applied Laser*, 2024, 44(6): 96–102.

[6] 王顺山, 乔红超, 曹治赫, 等. 水导激光制备镍基单晶高温合金微孔工艺试验研究[J]. *中国激光*, 2024, 51(16): 1602404.

WANG Shunshan, QIAO Hongchao, CAO Zhihe, et al. Experimental research on waterjet-guided laser processing of microholes in single crystal Ni-based superalloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(16): 1602404.

[7] 陈智良, 付生鹏, 夏仁波, 等. 面向高温合金的水导激光开槽加工视觉定位方法[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402122.

CHEN Zhiliang, FU Shengpeng, XIA Renbo, et al. Vision-based positioning method for water-jet guided laser grooving of superalloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(14): 1402122.

[8] ZHANG G Y, WANG J Y, PAN Z B, et al. Surface quality analysis of waterjet-guided laser processing DD6 single-crystal superalloys[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 43: 111629.

[9] PAKSOY M, ÇANDAR H, YILMAZ N F. The advancement of waterjet-guided laser cutting system for enhanced surface quality in AISI 1020 steel sheets[J]. *Materials*, 2024, 17(14): 3458.

[10] YANG L J, WANG M L, WANG Y. Research on water-jet guided laser micromachining of 65-Mn steel[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2010, 3(4): 338–353.

[11] 梅占奎, 敖荟兰, 杨志哲, 等. 水导激光加工碳化硅微孔的工艺探索[J/OL]. *激光与光电子学进展*, 2025: 1–14. (2025–08–18) [2025–11–21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGDJ20250815024&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.

MEI Zhankui, AO Huilan, YANG Zhizhe, et al. Process exploration of silicon carbide micro-hole processing by waterjet guided laser[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025: 1–14. (2025–08–18) [2025–11–21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGDJ20250815024&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.

[12] 尹泽坤, 梅雪松, 崔健磊. 碳化硅陶瓷基复合材料激光加工技术研究综述[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(14): 42–63.

YIN Zekun, MEI Xuesong, CUI Jianlei. Review of research on laser processing technology of silicon carbide ceramic matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(14): 42–63.

[13] 赵重阳, 韩基山, 王毅, 等. SiC_p/Al 复合材料高效低损伤加工技术研究进展[J]. *工具技术*, 2025, 59(3): 1–19.

ZHAO Chongyang, HAN Jishan, WANG Yi, et al. Research progress on high efficiency and

low damage processing technology of SiC_p/Al composite[J]. *Tool Engineering*, 2025, 59(3): 1–19.

[14] YIN W N, Yu Z, Xing G H, et al. Study on the microstructure evolution and ablation mechanism of SiC_p/Al composites processed by a water-jet guided laser[J]. *Materials*, 2025, 18(12): 2749–2749.

[15] 罗潇, 刘小冲, 曾雨琪, 等. 陶瓷基复合材料构件内嵌孔加工工艺研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(08): 3987–4003.

LUO Xiao, LIU Xiaochong, ZENG Yuqi, et al. Research progress on machining process of embedded holes in ceramic-matrix composite components[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8): 3987–4003.

[16] 葛佳, 傅国宇, 邹云鹤, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料特种加工综述[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(7): 77–97.

GE Jia, FU Guoyu, ZOU Yunhe, et al. A review of non-conventional machining of carbon fibre reinforced plastic composite[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(7): 77–97.

[17] 张旖诺, 乔红超, 曹治赫, 等. 水导激光加工CFRP深槽微观形貌特性[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 525144.

ZHANG Yinuo, QIAO Hongchao, CAO Zhihe, et al. Microstructure characteristics of CFRP deep groove processed by water jet-guided laser processing technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 525144.

[18] 郑志龙, 赵玉刚, 刘谦, 等. 碳纤维增强复合材料水导激光加工实验研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(3): 344–351.

ZHENG Zhilong, ZHAO Yugang, LIU Qian, et al. Experimental study on water jet guided laser processing of CFRPs[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(3): 344–351.

[19] MEHRA R, MOHAL S, SINGH H, et al. Investigations on machining of hybrid glass fiber-reinforced polymer using laser engraving machine[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(19): 22295–22308.

[20] BI R, SHEN P F, ZHU L Y, et al. Laser ablation mechanism and performance of glass fiber-reinforced phenolic composites: An experimental study and dual-scale modelling[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(8): 470–485.

[21] COLLADON D. On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream[J]. *Comptes Rendus*, 1842, 15(800–802): 15. https://www.researchgate.net/publication/284079824_On_the_Reflections_of_A_Ray_of_Light_Inside_A_Parabolic_Liquid_Stream.

[22] HECHT J. *City of light: The story of fiber optics*[M]. New York: Oxford University

Press, 1999.

[23] WROBEL W G. Process for cutting a material by means of a laser beam: US4952771A[P]. 1990–08–28.

[24] MARIMUTHU S, DUNLEAVEY J, LIU Y, et al. Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 251–259.

[25] WAGNER F, SIBAILLY O, VÁGÓ N, et al. The laser microjet® technology—10 years of development[C]//22nd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication. Orlando: Laser Institute of America, 2003: M401.

[26] BRECHER C, JANSSEN H, ECKERT M, et al. Thermal investigation of interaction between high-power CW-laser radiation and a water-jet[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 317–327.

[27] RICHERZHAGEN B. The best of both worlds—laser and water jet combined in a new process: The water jet guided laser[C]//Proceedings of the Laser Materials Processing Conference and Laser Microfabrication Conference. Orlando: Laser Institute of America, 2001: 1815–1824.

[28] 李灵. 水导激光微细加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

LI Ling. Study on water-jet guided laser micromachining technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[29] 叶瑞芳. 新型水射流导引激光加工系统光学特性与关键技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.

YE Ruifang. Research on the optical properties and key technologies of a novel water jet guided laser processing system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.

[30] WANG J, CHEN C G, WANG G L, et al. Efficient coupling of dual beam combined laser into micro water jet for deep processing[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 1083.

[31] ZHANG Y N, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Research on the mechanism of micro-water jet-guided laser precision drilling in metal sheet[J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 343.

[32] 苏子怀, 孙盛芝, 钱滨, 等. 水复合激光加工技术的原理和应用进展[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402102.

SU Zihuai, SUN Shengzhi, QIAN Bin, et al. Progress in the principle and applications of water-assisted laser machining technologies[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(14): 1402102.

[33] 苏泽文, 蒋家亮, 孙盛芝, 等. 水导激光的微射流控制技术进展[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402104.

SU Zewen, JIANG Jialiang, SUN Shengzhi,

- et al. Development of microjet control technology for water jet guided laser machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(14): 1402104.
- [34] 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 Shuiwang, DING Ye, CHENG Bai, et al. Mechanism and research advances of water-jet guided laser micromachining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002404.
- [35] NIE S L, WU R, JI H, et al. Cavitation characteristics of water guided laser nozzle on water jet fiber stability[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(3): 033601.
- [36] 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.
- [37] PERROTTET D, HOUSH R, RICHERZHAGEN B, et al. Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength[J]. Photon Processing in Microelectronics and Photonics IV, 2005: 285–292.
- [38] 卢希钊, 江开勇. 多能场微射流水导激光加工研究发展概况[J]. 中国科学: 物理学 天文学, 2020, 50(3): 034203.
- LU Xizhao, JIANG Kaiyong. Research and application development of compound energy field processing: laser microjet[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(3): 034203.
- [39] LIAO Z R, XU D D, AXINTE D, et al. Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy[J]. CIRP Annals, 2021, 70(1): 155–158.
- [40] 刘洋, 孙俊杰, 张朝阳, 等. 复合能场作用下激光-液体耦合制造技术综述[J]. 航空制造技术, 2025, 68(1/2): 73–88.
- LIU Yang, SUN Junjie, ZHANG Chaoyang, et al. Summary of laser-liquid coupling manufacturing technology under the action of composite energy field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(1/2): 73–88.
- [41] HU T R, YUAN S M, WEI J Y, et al. Water jet guided laser grooving of SiC_r/SiC ceramic matrix composites[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 168: 109991.
- [42] AI Y W, DONG G Y, YUAN P C, et al. The influence of keyhole dynamic behaviors on the asymmetry characteristics of weld during dissimilar materials laser keyhole welding by experimental and numerical simulation methods[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 190: 108289.
- [43] ZHAO W, YU Z, HU J. Numerical simulation and experimental analysis on nanosecond laser ablation of titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 99: 138–151.
- [44] YANG L J, WANG M L, WANG Y, et al. Numerical and experimental research on water-jet guided laser micromachining[J]. Materials Science Forum, 2009, 626–627: 297–302.
- [45] 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.
- [46] JIAO H, ZHANG G H, HUANG P, et al. A multiphase flow model simulation of water jet-guided laser drilling in 304 stainless steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 120: 170–191.
- [47] JIAO H, LIU Q Y, ZHANG G H, et al. Numerical investigations of water jet-guided laser cutting of silicon[J]. Journal of Laser Applications, 2024, 36(1): 012025.
- [48] WANG S W, DING Y, LI Y, et al. Investigations on the water-jet guided laser scribing of thermal barrier coated IC21 nickel-based superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110155.
- [49] CHENG N, YANG S L, LI Y L, et al. Water-guided laser processing mechanism and frontier research[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 139(11): 5279–5303.
- [50] 冯飞, 戴晔, 钱滨, 等. 水导激光加工中激光参数的影响及其在精密制造中的应用[J]. 中国激光, 2025, 52(14): 1402105.
- FENG Fei, DAI Ye, QIAN Bin, et al. Effect of laser parameters in water-jet guided laser processing and its application in precision manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(14): 1402105.
- [51] ZHANG Y N, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Research on the influence of the jet flow regime in the kerf on the cutting surface accuracy in WJGL[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105503.
- [52] LIU Y, WEI M R, ZHANG T, et al. Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 137: 106820.
- [53] SHAO K, ZHOU Q L, CHEN Q S, et al. Research progress of water-laser compound machining technology[J]. Coatings, 2022, 12(12): 1887.
- [54] SUBASI L, GOKLER M I, YAMAN U. Real-time measurement of laser beam characteristics for a waterjet-guided laser machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(11): 4309–4320.
- [55] 孙瑾聪, 王水旺, 谢万达, 等. 水导激光耦合、传输机理与应用研究现状(特邀)[J]. 中国激光, 2025, 52(14): 1402101.
- SUN Jincong, WANG Shuiwang, XIE Wanda, et al. Research status of coupling, transmission mechanism and application of water-guided laser(invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(14): 1402101.
- [56] 张晓斌, 史铁林, 龙胡. 空化现象对水导激光微水束稳定性的影响研究[J]. 激光技术, 2024, 48(2): 216–222.
- ZHANG Xiaobin, SHI Tielin, LONG Hu. Study on the influence of cavitation on the stability of water-guided laser micro-water beam[J]. Laser Technology, 2024, 48(2): 216–222.
- [57] 杨林帆, 焦辉, 黄宇星, 等. 基于水导激光平面缩流喷嘴内流场仿真研究[J]. 激光技术, 2020, 44(6): 754–761.
- YANG Linfan, JIAO Hui, HUANG Yuxing, et al. Simulation study of the flow field in the plane convergent nozzle based on the water guide laser[J]. Laser Technology, 2020, 44(6): 754–761.
- [58] 张家铭, 甘志银. 一种新型喷嘴结构对小尺度射流的影响[J]. 激光技术, 2025, 49(3): 458–462.
- ZHANG Jiaming, GAN Zhiyin. Influence of a new type of nozzle structure on small scale jet[J]. Laser Technology, 2025, 49(3): 458–462.
- [59] BAO B Y, ZHANG G Y, CHEN Z A, et al. Splashing effects and mechanism in water jet-guided laser processing of C_r/SiC composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 335: 118671.
- [60] GUO B, ZHANG J, WU M T, et al. Water assisted pulsed laser machining of micro-structured surface on CVD diamond coating tools[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 591–601.
- [61] LIANG J S, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Study on fluid flow characteristics and laser transmission mode of water jet-guided laser processing in blind hole[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(3): 1717–1730.
- [62] 张广义, 潮阳, 张正, 等. 水-气缩流导光机制仿真与试验研究[J]. 电加工与模具, 2020(1): 47–51.
- ZHANG Guangyi, CHAO Yang, ZHANG Zheng, et al. Simulation and experimental study on water-gas shrinkage light guiding mechanism[J]. Electromachining & Mould, 2020(1): 47–51.
- [63] LI Y, WANG S W, DING Y, et al. Investigation on the coaxial-annulus-argon-assisted water-jet-guided laser machining of hard-to-process materials[J]. Materials, 2023, 16(16): 5569.
- [64] LIANG J S, QIAO H C, ZHAO J B,

et al. Simulation and experimental study on double staggered-axis air-assisted water jet-guided laser film cooling hole machining[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 112057.

[65] 赵臻, 龙芋宏, 黄宇星, 等. 水束导引高功率激光的热效应分析[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 672–677.

ZHAO Zhen, LONG Yuhong, HUANG Yuxing, et al. Thermal effect analysis of water-jet guided high-power laser[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(5): 672–677.

[66] ZHAO C, ZHAO Y G, ZHAO D D, et al. Annular gas-assisted water-jet guided laser manufacturing groove structure of Inconel 718 alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128(9): 3969–3982.

[67] STEEN W M, MAZUMDER J. *Laser material processing*[M]. London: Springer London, 2010.

[68] 张雨露, 孙盛芝, 戴晔, 等. 水导激光精密加工工艺研究进展(特邀)[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402103.

ZHANG Yulu, SUN Shengzhi, DAI Ye, et al. Research progress on water-jet laser precision processing technology(Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(14): 1402103.

[69] LI Y J, ZHAO G Y, YU S, et al. Research progress on the mechanism and application of water jet-guided laser precision machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 139(11): 5339–5366.

[70] 李靖怡, 李元, 丁焯, 等. 水导激光加工光源选型与材料蚀除研究[J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(1): 36–45.

LI Jingyi, LI Yuan, DING Ye, et al. Research on the selection of light source and material removal in water jet guided laser processing[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(1): 36–45.

[71] 梁恩, 黄宇星, 焦辉, 等. 水导激光可适用性光束聚焦模式对比分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1722002.

LIANG En, HUANG Yuxing, JIAO Hui, et al. Comparative analysis of laser focusing modes applicable to water jet guided laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1722002.

[72] HUANG Y X, LIANG E, ZHANG G H, et al. Research on laser beams focusing and coupling technology of water jet guided laser with high adjustment tolerance[J]. *Optics Communications*, 2022, 508: 127677.

[73] 丁小康, 许昌, 王志敏, 等. 100 W 长纳秒脉冲光纤耦合输出532 nm绿光激光器[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(S1): 281–288.

DING Xiaokang, XU Chang, WANG

Zhimin, et al. 100 W long nanosecond pulse fiber coupling output 532 nm green laser[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(S1): 281–288.

[74] WU R, NIE S L, JI H, et al. Effect of multi-parameter optimization of water-laser coupling device and nozzle geometry on the stability of water-guided laser beam[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36: 013620.

[75] ZHANG G H, HUANG Y X, HUANG P, et al. Study on the coupling characteristics of water-jet guided high-power laser based on negative defocus coupling alignment method[J]. *Applied Physics B*, 2024, 131(1): 6.

[76] COUTY P. Laser coupling with a multimode water-jet waveguide[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(6): 068001.

[77] DENG C, YEO H, KIH. Electrodynamic simulation of laser beam propagation in waterjet-guided laser processing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11128–11143.

[78] 程柏, 毛晓博, 史建猛, 等. 水导激光电场分布理论分析及试验研究[J]. *制造技术与机床*, 2023(12): 73–78.

CHENG Bai, MAO Xiaobo, SHI Jianmeng, et al. Theoretical and experimental research on electric field distribution of laser water jet[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(12): 73–78.

[79] 张光辉, 黄宇星, 黄平, 等. 水导激光技术中水-光耦合传能规律研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 749–754.

ZHANG Guanghui, HUANG Yuxing, HUANG Ping, et al. Study on energy transmission law of water-laser coupling in water-jet guided laser technology[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 749–754.

[80] ZHAO Z, ZHANG G H, HUANG Y X, et al. Water jet guided high-power laser energy transmission loss analysis[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(11): 5379–5389.

[81] ZHANG G Y, ZHANG Z, WANG Y F, et al. Gas shrinking laminar flow for robust high-power waterjet laser processing technology[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38635–38644.

[82] ZHANG Y N, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Numerical simulation of the stability of water fiber-optic in water jet-guided laser machining[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(13): 7140–7150.

[83] 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.

[84] ZHAO C, ZHAO Y G, ZHAO D D, et al. Modeling and prediction of water-jet-guided laser cutting depth for inconel 718 material using response surface methodology[J]. *Micromachines*, 2023, 14(2): 234.

[85] CHENG B, DING Y, LI Y, et al. Theoretical and experimental investigation on SiC/SiC ceramic matrix composites machining with laser water jet[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1214.

[86] 汪建新, 吴耀文, 张广义, 等. 碳纤维增强复合材料水导激光切割试验研究[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(13): 1608–1616.

WANG Jianxin, WU Yaowen, ZHANG Guangyi, et al. Experimental research of CFRP cutting by using water jet guided laser processing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(13): 1608–1616.

[87] 陈忠安, 包彬颖, 张广义, 等. 碳纤维增强聚合物复合材料水导激光切割损伤机理研究[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(4): 700–710.

CHEN Zhong'an, BAO Binying, ZHANG Guangyi, et al. Study on damage mechanism of water jet guided laser cutting of CFRP[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(4): 700–710.

[88] CHAO Y, LIU Y Z, XU Z F, et al. Improving superficial microstructure and properties of the laser-processed ultrathin kerf in Ti–6Al–4V alloy by water-jet guiding[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 156: 32–53.

[89] ELKINGTON H, DIBOINE J, CHINGWENA K, et al. Water jet guided nanosecond laser cutting of CFRP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171: 110460.

[90] 王宗炼, 杨培瑞, 张广义, 等. 水导激光CFRP切割深槽形貌演化及其影响机理[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402109.

WANG Zonglian, YANG Peirui, ZHANG Guangyi, et al. Morphological evolution of deep grooves in water-guided laser cutting of CFRP and its influence mechanism[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(14): 1402109.

[91] YU S, ZHAO G Y, LI Y J, et al. Mechanism and process optimization of GH4169 superalloy water-jet guided laser micro-hole processing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113761.

[92] 王水旺, 谢万达, 丁焯, 等. DD6合金微孔的水导激光加工工艺[J]. *金属加工(冷加工)*, 2023(9): 1–5.

WANG Shuiwang, XIE Wanda, DING Ye, et al. Water-guided laser processing technology of DD6 alloy micropores[J]. *Metal Working*, 2023(9): 1–5.

- [93] WANG S W, XIE W D, DING Y, et al. Investigations on the Water-Jet Guided Laser drilling film cooling holes on the 8.5 mm-thick TBC superalloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 125: 374–388.
- [94] 于永飞, 乔红超, 曹治赫, 等. 高温合金GH4169水导激光钻孔工艺特性研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(4): 508–514.
- YU Yongfei, QIAO Hongchao, CAO Zhihe, et al. Research on process characteristics of water-guided laser drilling for superalloy GH4169[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(4): 508–514.
- [95] 邢光浩, 鲍岩, 印文典, 等. 水导激光加工SiC_t/SiC陶瓷基复合材料小孔的工艺研究[J]. *中国激光*, 2025, 52(14): 1402106.
- XING Guanghao, BAO Yan, YIN Wendian, et al. Water-jet guided laser processing of small holes in SiC_t/SiC ceramic matrix composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(14): 1402106.
- [96] 董志刚, 杨峰, 邢光浩, 等. SiC_t/SiC复合材料大深径比小孔的激光加工研究[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(7): 4010–4023.
- DONG Zhigang, YANG Feng, XING Guanghao, et al. Laser processing of small holes with large aspect ratio in SiC_t/SiC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(7): 4010–4023.
- [97] RASHED C A A, ROMOLI L, TANTUSSI F, et al. Water jet guided laser as an alternative to EDM for micro-drilling of fuel injector nozzles: A comparison of machined surfaces[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(4): 524–532.
- [98] HU H M, LIU C Y, SU Z H, et al. Crystallization-resistant water-jet guided laser processing of Cu46Zr46Al8 amorphous alloy via thermally suppressed strategy[J]. *Intermetallics*, 2025, 182: 108789.
- [99] PAUCHARD A, VAGO N, RICHERZHAGEN B. Experimental micromachining results using a UV laser with the laser microjet[®][C]//3rd Pacific International Conference on Laser Materials Processing, Micro, Nano and Ultrafast Fabrication. Orlando: Laser Institute of America, 2008: 709–714.
- [100] SYNOVA. Application of tool[EB/OL]. [2025-11-21]. <https://www.synova.ch/applications/toolmanufacturing.html>.

Waterjet-Guided Laser Precision Processing of Difficult-to-Machine Materials in Aerospace Applications: A Review

WANG Jiale^{1,2}, CHEN Zhongan^{1,2}, ZHANG Guangyi^{1,2,3}, ZHANG Baojin^{1,4}, CHEN Bo^{1,4}, ZHANG Wenwu^{1,2,3}

(1. Research Centre for Laser Extreme Manufacturing, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Laser Extreme Manufacturing for Difficult-to-Machine Materials, Ningbo 315201, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

[ABSTRACT] With the rapid advancement of aerospace technology, difficult-to-machine materials such as high-strength alloys, ceramics, and composites have gained widespread application. But traditional machining methods struggle to meet the demands for high-quality processing. Waterjet-guided laser processing technology, with its advantages of high precision and low damage, addresses the shortcomings of tool wear and large heat-affected zones inherent in conventional mechanical machining and laser machining, demonstrating significant application potential. Therefore, this paper systematically reviews the working mechanisms and practical applications of waterjet-guided laser processing technology for difficult-to-machine materials in the aerospace field. First, it elaborates on the fundamental principles of waterjet-guided laser processing, the multi-field coupling material removal mechanism, and comprehensively introduces the core components of the waterjet-guided processing system. Second, it delves into its multidimensional working mechanisms from three dimensions: water jet characteristics, optical properties, and water-optical coupling characteristics. Subsequently, it comprehensively summarizes research progress in cutting and hole-making processes for “difficult-to-machine materials” using waterjet-guided laser technology. Finally, it explores typical application scenarios of this technology in precision machining, based on current research status, and outlines future development trends for waterjet-guided laser precision machining technology.

Keywords: Waterjet-guided laser; Water-laser coupling; Removal mechanism; Process research; Aerospace

(责编 青燕)