

水导激光微加工机理与研究进展

王水旺¹, 丁焯^{1,2*}, 程柏², 李元², 杨立军^{1,2**}

¹哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 随着我国航空航天、微电子和医疗等领域的快速发展,组成元件逐步迈向微型化和精细化,这对零部件的切割以及微米级孔、槽等结构的加工质量和加工精度提出了更高要求。与传统的机械加工、电火花加工和电化学加工相比,激光加工可实现“非接触”加工,加工材料的适应性好、柔性大。但单一的激光加工得到的切口存在明显的锥度,且易出现热影响区、毛刺、裂纹等缺陷。水导激光加工技术利用水射流“同轴”全反射导引激光,兼具高质量和高效加工的优势,因而得到了广泛研究和应用。为对水导激光加工技术进行较为详尽的综述,本文首先讨论了水射流的形成、衰减和发散过程,然后从水的光学特性、全反射形成条件以及耦合能束传输等方面对激光-水射流耦合进行了分析,最后介绍了水导激光在金属、半导体以及复合材料等领域的应用现状,并针对现有技术的不足,对其发展趋势进行了展望。

关键词 激光技术; 水导激光; 微加工; 耦合能束; 水射流; 加工应用

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002404

1 引言

随着我国航空、航天、通信、仪表和医疗等领域的快速发展,燃料喷嘴、太阳能硅光板、半导体芯片以及心脏支架等元件逐步向微型化和精细化方向发展,这对相关材料的切割质量以及孔、槽等结构的加工要求也越来越高,从而对加工技术提出了更高要求。目前的加工技术包括传统的机械加工技术、电火花加工(EDM)技术、电化学加工技术以及激光加工技术等。在传统的机械加工过程中,刀具与工件直接接触,刀具不仅会磨损,还会产生较大的应力^[1-2];电火花加工技术适用于导电材料,加工过程无明显的作用力,但加工速度一般较慢,存在电极损耗、角半径受限等缺点^[3];电化学加工的速度快,不存在阴极损耗,但加工稳定性较差,且电解产物易造成环境污染^[4]。

与以上加工方法相比,激光加工具有显著优势:1)属于非接触加工,不存在机械应力^[5];2)材料适应性好,并可以满足柔性化制造要求^[6];3)加工过程可

程序化,适合用于大面积加工^[7]。1965年,激光切割机被用于在金刚石模具上钻孔^[8]。此后,激光加工涉及的领域不断拓宽,目前已被广泛应用于航空航天、微电子、精密医疗、仪表等行业中进行钻孔、划槽、切割等作业。根据脉冲宽度的不同,激光光源一般可分为连续激光、长脉冲激光、短脉冲激光和超短脉冲激光。连续激光和长脉冲激光的加工速度快,但产生的热影响区较大,容易形成重铸层^[9]。超短脉冲激光直接将材料转化为等离子态实现材料的喷发去除,理论上可以达到“冷加工”的效果^[10],但加工效率较低。与超短脉冲激光相比,纳秒级短脉冲激光的获取成本更低,加工过程产生的材料去除率更高。但正如 Biffi 和 Previtali^[11]所述,纳秒脉冲激光加工本质上仍是一种热基工艺,具有与长脉冲激光加工相关的典型热缺陷,如明显的热影响区、重铸层、微裂纹等。

为克服“干激光”加工过程中的热问题,研究人员开发了一种复合系统,将激光和水进行结合。1842年,Colladon^[12]发现光可以沿着水射流曲线传

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2021-12-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107600)、国家科技重大专项(2019-VII-0009-0149)

通信作者: *dy1992hit@hit.edu.cn; **yljtj@hit.edu.cn

输,证明了水射流导引光的可能性。1854年, Tyndall 通过实验发现了光在流动液体中的全反射现象,证实了水射流可以作为光纤对光进行传输^[13]。1987年, Doi^[14] 尝试将激光和水融合在一起,形成了可向加工表面施加激光辐射的“激光刀”。1990年, Wrobel^[15] 成功地将射流与固体光纤相连,将激光引导到工件表面。1991年,瑞士联邦理工大学的 Richerzhagen 博士采用喷嘴结构产生射流,并将激光聚焦到喷嘴入口,对水导引光的原理进行了进一步完善^[16]。1993年, Richerzhagen 开发了水导激光加工技术^[17];1997年, Synova 公司对该技术进行商业改进,并首先将高速水射流的光波导应用于加工领域。除了水导激光加工技术以外,研究人员还提出了各种水辅助激光技术,包括液芯激光波导加工^[18]、水下激光加工^[19]、水射流辅助共轴激光加工^[20]和液滴辅助激光加工^[21]。在上述加工技术中,水导激光(WJGL)加工技术以其显著的加工优势在多个制造领域得到了广泛应用。

水导激光加工技术的工作原理如图 1^[22]所示。由于水和空气的折射率不同,当激光的入射角小于全反射临界角时,光束就在水与空气的界面处发生全反射^[23],激光能量不是直接聚焦于工件表面,而是通过毛细层流中的水射流传输到工件表面,类似于激光在传统的玻璃光纤中传输。一旦稳定范围内的水射流与工件发生碰撞,水射流引导的激光能量就被材料表面吸收,吸收的激光能量使烧蚀区域的材料熔化、蒸发。有别于传统纯水射流加工过程中通过高压或超高压水对加工材料进行冲击破碎,水导激光加工过程中的水射流冲击力极低,其主要作用是传输激光至被加工表面,同时将熔融材料、多余热量及残渣带走。稳定的水射流在水的击穿阈值内

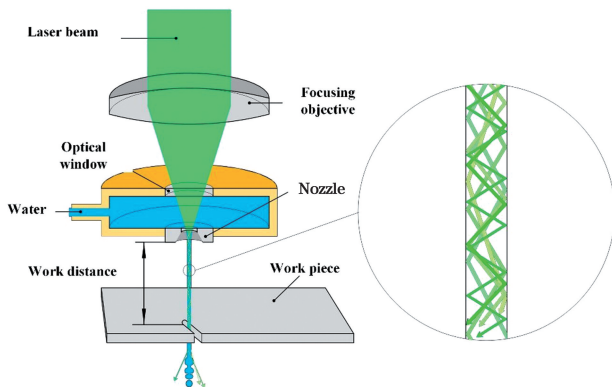


图 1 水导激光加工技术的工作原理^[22]

Fig. 1 Working principle of water-jet guided laser (WJGL) processing technology^[22]

可耦合不同波长、脉宽的激光,经过一定的工作距离作用于不同材质的工件表面。通过选取不同的水射流参数和激光参数,可以实现对不同材料的高质量、高效率加工^[24]。

相对于“干激光”加工,水导激光具有多方面优势^[25-28]:1)水束光纤的工作距离大,且无需激光焦点与加工位置高精度对准;2)水射流对激光的导向作用使得激光能量呈近似的平顶均匀分布,激光聚焦的景深长,增大了加工的深径比,不会出现“干激光”加工时的锥形切口、边缘不整齐、毛刺等现象;3)高速水射流在激光脉冲间隙冷却材料,不仅可以极大地减小热影响区,降低材料的热变形和热损伤,还可以带走熔融材料;4)水流的直径一般很小(25~150 μm),可以获得很小的切缝宽度,同时稳定的水射流可以保证很高的加工精度。

为深入理解水导激光加工技术的机理,发挥其加工优势,本文对水导激光加工技术进行了较为详尽的综述。首先对水束光纤的形成机理进行分析,包括稳定水射流的形成、喷嘴对水射流的影响、水射流的衰减发散过程等;然后针对激光与水射流的耦合过程,先后从水的光学特性、全反射形成条件、耦合能束的稳定性影响因素等方面进行了系统阐述;最后梳理了水导激光在航空航天、半导体、医疗等领域中的应用现状,并基于当前技术的不足以及面临的新要求、新挑战,对水导激光加工技术未来的发展趋势进行了展望。

2 水导激光耦合能束的形成机理分析

2.1 水射流的形成机理

耦合腔中的水在压力作用下由喷嘴射出,形成毛细水射流光纤。根据系统的配置和喷嘴的孔径,高压供水系统的输出压强一般在 1~50 MPa 之间。管路调压阀难以对水泵产生的高压水流实现压力的精确调节,因而常采用蓄能器吸收压力脉冲和其他形式的水压冲击。水导激光加工对水质非常敏感,水中的微细颗粒会干扰射流的层流状态,甚至可能堵塞喷嘴口;此外,水中的微细颗粒和气泡还会由于反射、散射或散焦而使光束传输路径发生改变,导致能量逸散损耗。因此,水导激光加工设备需要配备水净化系统,包括反渗透系统、纳米颗粒过滤器、紫外线照明灯、真空膜除气装置和活性炭过滤器等^[29]。由喷嘴射出的水射流是圆柱形的层流水束,其与空气之间的界面光滑,可以保证激光在水射流中的全反射。水分子为极性分子,为防止外电场和重力导致的水射

流弯曲,耦合系统应远离电场并保持垂直状态。曾有研究人员尝试通过介电泳力实现水射流的可控偏转,但此类研究目前仍停留在模型仿真阶段(仿真时采用 5 kV 的局部电场,水射流流速小于 20 m/s,仿真结果显示水射流传输 50 mm 后的偏转距离不足 1 mm),缺乏有效的实验验证^[30-31]。

根据伯努利方程,在一定的压力条件下,可对耦合腔喷嘴处形成的水射流流速进行粗略计算。计算公式为

$$V \approx \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (1)$$

式中: V 为喷嘴喷出的水的射流速度; p 代表耦合腔中的压强; ρ 代表流体密度。当耦合能束流经喷嘴时,由于水的折射率小于喷嘴材料的折射率,激光在水与喷嘴内壁的接触面上不再满足全反射条件,因此部分激光能量沉积在喷嘴表面。为避免壁面能量沉积导致的损耗和喷嘴材料的热损伤,要求耦合能束形成后不再与喷嘴接触,即水射流的直径小于喷嘴孔径,达到稳定的“缩流”状态。当水从耦合腔开始进入喷嘴时,耦合腔底面附近的水层具有相当大的横向动量。由于该动量的存在,水不能沿着锋锐喷嘴的边缘发生 90° 突然偏转,而是经过一段距离的过渡后,在喷嘴下端形成直径小于喷嘴直径的水射流。这种现象被称为“缩流”,其示意图如图 2(a) 所示。喷嘴结构对射流压力、流量和射流速度等射流流场参数具有重要影响,决定着能否形成稳定的

“缩流”状态的水射流。根据喷嘴的结构,可将其分为四种,即毛细型喷嘴、锥形喷嘴、上锥形喷嘴和下锥形喷嘴,如图 2(b)~(d) 所示。当水束流经毛细型和上锥形喷嘴时,水射流始终与喷嘴内壁紧密接触,激光能量沉积在喷嘴表面烧蚀喷嘴材料,不仅会降低激光的传输效率,还会影响喷嘴的使用寿命。水射流由锥形喷嘴射出时,理论上仅在喷嘴与耦合腔的连接处与喷嘴材料接触,但锥形喷嘴的结构强度低,易在高压水射流的冲击下发生变形损坏。通过对比分析可知,下锥形是最合理的喷嘴结构。当水流经下锥形喷嘴时,水的高速流动会导致空化现象的产生。当射流再附着长度小于毛细部分长度时,射流重新附着到喷嘴壁面,此时,空化气泡的破裂可能会在喷嘴表面附近形成很大的局部应力,对喷嘴造成严重的侵蚀;当射流再附着长度大于毛细部分长度时,空化作用导致水力翻转,水射流不再与喷嘴内壁接触。Anantharamaiah^[32] 使用 Fluent 软件对水在下锥形喷嘴中的流动进行了仿真计算。为得到稳定的“缩流”,喷嘴毛细长度 l_r 和喷嘴直径 d_n 应满足

$$l_r/d_n \leq 0.7. \quad (2)$$

由于喷嘴入口附近的流体冲击和空化腐蚀,喷嘴材料需要具有高强度、高硬度、耐腐蚀和耐磨损等特性。另外,为避免喷嘴被耦合激光的逸散能量烧蚀,喷嘴材料必须对所使用波长范围内的激光有很低的吸收率。

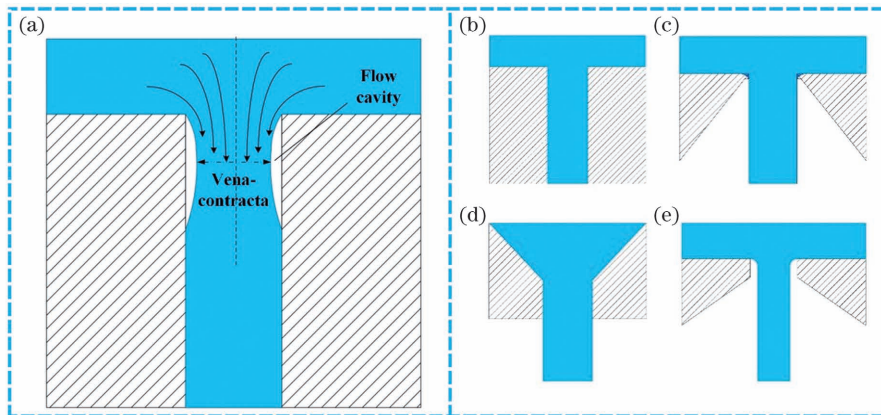


图 2 形成射流的喷嘴结构。(a)“缩流”示意图^[32];(b)毛细型喷嘴;(c)锥形喷嘴;(d)上锥形喷嘴;(e)下锥形喷嘴
Fig. 2 Nozzle structures for forming jet. (a) Schematic of vena-contracta^[32]; (b) cylindrical nozzle; (c) cone nozzle;
(d) cone-up nozzle; (e) cone-down nozzle

2.2 水射流的衰减与发散

在压强作用下,从喷嘴射出的水射流状态极不稳定。沿着出射方向,根据结构不同可将水射流分为四段^[33],如图 3(a) 所示。具有一定速度的水从喷

嘴射出时,会形成结构致密的紧密段水射流;之后,水射流与周围静态空气剧烈摩擦,进行动量、质量的交换,并发生紊动扩散;随着喷射距离的增加,紊动扩散运动加强,被射流束卷吸的空气不断增多,对射

流产生阻力,导致射流速度不断降低,并使射流边界逐渐向两侧扩展,最终离散为液滴^[34]。紧密段的水射流是水导激光加工所能利用的理想的水射流状态,该段截面上任意一点的流速基本相同,均为水射流在喷嘴处的出口速度。当射流开始进入到过渡段时,不再满足全反射条件,耦合能束失效。

为延长紧密段水射流的长度,研究人员通过引入辅助气氛来降低水气摩擦造成的动量损失,从而优化水射流的层流特性,达到延长射流稳定长度的目的。Annoni 等^[35]在稳定射流区径向吹入高压空气,结果发现,当气体压强为 0.3 MPa 时,高速气体有效分裂了水射流周围的流场,将稳定射流与空气入口的下游区域分开,从而保护稳定射流不被任何向上的水雾、液滴和颗粒破坏。Synova 公司采用与水射流平行同向的氦气流作为辅助气氛来降低射流附近的环境压力,减小了气液间的相对速度^[36];但氦气的密度较小,不足以维持水/气边界的稳定状态。Avonisy 团队^[37]采用另一种策略来保护射流免受外部干扰,水射流和气流通过两个分开的孔口离开喷嘴,压缩空气在水射流周围形成同轴环形气幕,在工作区内保持适当的水/气界面,从而避免了碎屑和向上飞溅的水滴扰乱射流状态。Zhang 等^[38]提出了一种新型的水/气收缩导向高功率激光

加工策略,该策略显著提高了激光在射流中的传输稳定性,如图 3(b)所示。此外,他们还通过仿真对比了该结构与传统水导激光结构的抗干扰能力(以耦合效率大于 95% 作为评价标准),结果发现,与传统结构相比,该结构在轴向、径向和角度偏移量上的抗干扰能力分别提高了 3.8 倍、2.3 倍和 1.5 倍。Cheng 等^[39]在水导激光加工过程中引入同轴螺旋气氛,分析后发现,辅助气氛的动力黏度越大,其对空气的屏蔽能力越强,从而可以获得更长的稳定水射流。

当紧密段的水射流冲击到加工表面时,水沿着射流轴线向四周扩散成薄层液流膜^[40],如图 3(c)所示。可根据液流膜的流动状态沿径向将其划分为射流速度为零的滞止区、表面速度等于射流速度的边界层区和表面速度逐渐降低的黏性相似区。在黏性相似区之外,液流逐渐演化为完全的湍流流动。由于黏性壁面效应减慢了液流膜的铺展速度,膜厚随半径增大而先减小后增大。水射流的强对流冷却效应是水导激光加工的关键,与射流中心对应的滞流点局部换热强度最高,随着液流膜半径 r 增大,局部换热系数从最高值单调下降,趋势逐渐减缓。同时,液流膜的存在将加工表面与空气隔绝,防止材料碎屑散入空气造成污染和氧化加工表面材料。

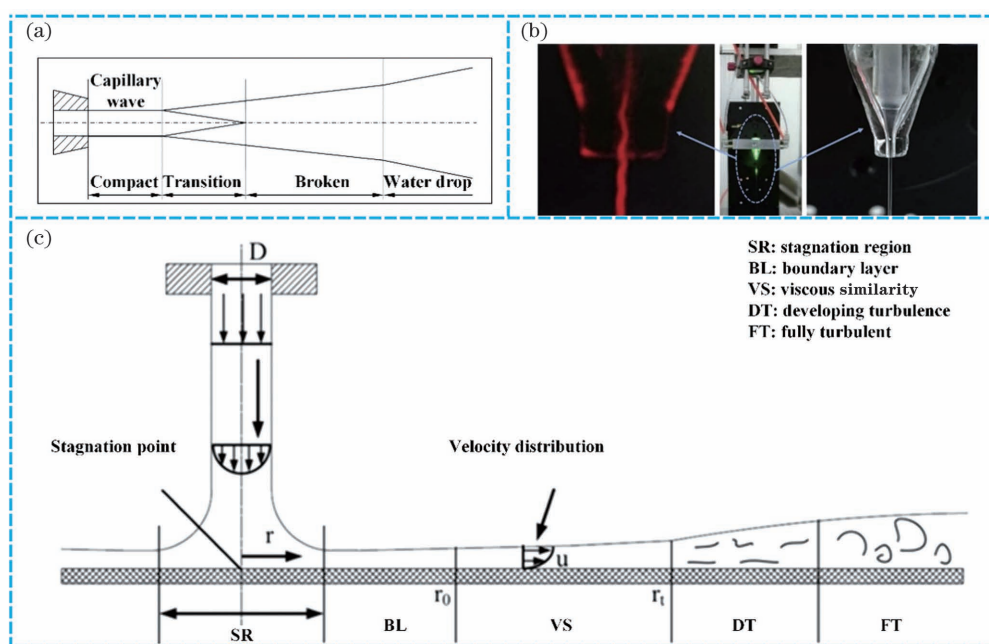


图 3 水射流分布。(a)水射流的结构示意图^[33];(b)水/气收缩导向高功率激光加工技术的射流形貌^[38];(c)射流冲击平面形成的流场^[40]

Fig. 3 Distribution of water jet. (a) Structure diagram of water jet^[33]; (b) jet morphology formed by water-gas shrinkage-guided high-power laser processing technology^[38]; (c) diagram of flow field of jet impinging on the plane^[40]

3 激光与水射流的耦合分析

3.1 耦合过程中的能量损耗分析

3.1.1 光致线性吸收引起的能量损耗

在耦合能束传输过程中,水射流本身会吸收部分激光能量,导致能量传输效率降低。水对不同波长激光的吸收程度不同,图 4 为水对激光的吸收系数与波长之间的关系曲线^[41]。从关系曲线可以看出:水对 355 nm 紫外光和 532 nm 绿光的吸收系数很小,不足 10^{-3} cm^{-1} ,且吸收系数在 1064 nm 红外光附近出现短暂降低,为 10^{-1} cm^{-1} 。由吸收系数曲线可知,绿光和紫外光以其在水中优异的穿透特性适合作为水导激光加工的激光光源,但紫外光可获得的激光功率很小,限制了它的加工能力。虽然水对 1064 nm 红外光的吸收系数远大于对绿光的吸收系数,但红外光可以获得的激光功率更大,同样也适用于水导激光加工^[42]。对于固定波长的激光,水对激光能量的吸收与水中光程有关,传输能量的变化规律可由 Beer-Lambert 法则计算得到。计算公式为

$$I_x = I_0 \exp\left(\frac{-x}{\Delta}\right), \quad (3)$$

式中: I_0 为进入水层前的激光能量; I_x 为进入水层 x 距离后的激光能量; x 为光程; Δ 为吸收系数的倒数。分析式(3)可知,随着水中光程的增加,水对激光能量的吸收也随之增加,从而使到达工件表面的激光能量减少。为使到达加工表面的激光能量能够达到材料的烧蚀阈值,需要根据吸收系数的不同控制相应的工作距离。同时,水吸收激光能量后温度升高,其折射率会发生改变,从而可能导致全反射失效。因此,为减少水层对激光能量的吸收损耗,避免耦合失败,耦合装置中的水层需要尽可能减薄^[34]。

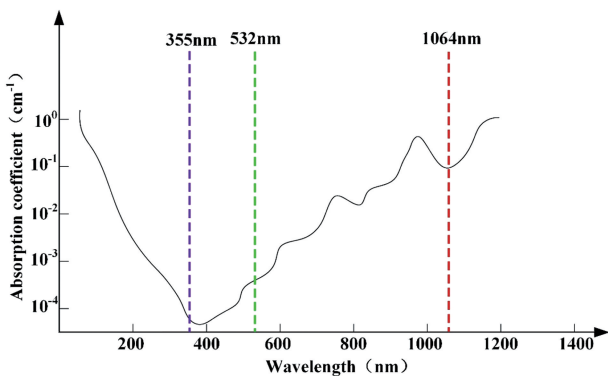


图 4 水对不同波长激光的吸收系数^[41]

Fig. 4 Absorption coefficient of water for different wavelengths of lasers^[41]

3.1.2 非线性吸收引起的能量损耗

当激光功率密度高于一定值时,水射流对激光的强烈非线性吸收也会造成能量衰减。在连续激光或者高平均功率的长脉冲光源作用下,物体吸收激光能量后发生升温、熔融、蒸发和电离等,该过程称为“热击穿”^[33]。水导激光加工技术使用的激光的脉宽主要在纳秒量级,当激光功率密度较大时,水射流中主要发生受激拉曼散射。受激拉曼散射是一个级联的频率变换过程^[43],可在多个位置同时发生,且散射过程中有一部分光从水射流中逸散损失。Wang 等^[44]通过研究得到了 532 nm 绿光在水射流中的能量传输效率随传输距离的变化规律,结果如图 5 所示。在相对低的峰值功率密度 (36 MW/cm^2) 下,随着耦合能束传输距离的增加,激光传输效率始终保持在 85% 以上;在相对高的峰值功率密度 (410 MW/cm^2) 下,激光传输效率明显下降,传输 8 cm 后的激光传输效率仅为 60%。传输过程的分析结果显示,受激拉曼散射对长相互作用距离后的激光功率损失具有显著影响。当脉冲宽度降至 20 ns 及以下时,激光在水射流传输过程中发生多光子电离,产生自由电子,自由电子密度增加到一定程度后雪崩电离占据主导地位,会导致电子密度激增。脉冲宽度越小,多光子电离的作用越明显^[45]。当自由电子密度超过阈值时,就会形成光致等离子体。等离子体的形成过程被称为“光学击穿”^[46]。等离子体的形成过程被称为“光学击穿”^[46]。等离子体由于具有高反射性和逆致韧辐射吸收作用而损耗激光能量,对激光传输产生了“屏蔽”。

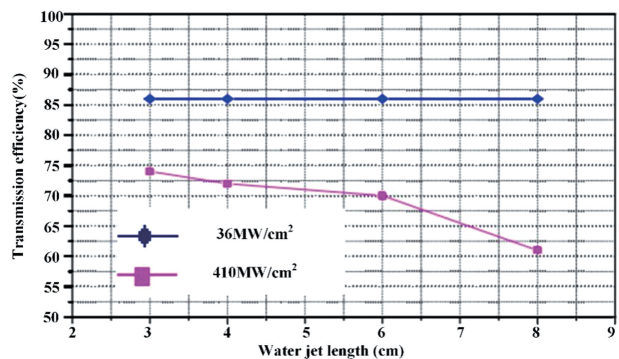


图 5 不同功率密度下激光能量传输效率与水束长度的关系^[44]

Fig. 5 Relationship between laser energy transmission efficiency and water beam length under different laser power densities^[44]

以上分析说明,要形成理想的耦合能束,应严格控制激光功率和脉冲宽度。然而,相对较低的激光平均功率会限制加工速度,甚至难以成功加工厚度

较大的材料,这使得大功率以及超大功率激光与水射流的耦合研究引起了广泛关注。Brecher 等^[47]建立了大功率激光水束光纤的温度和能量分布模型,确定了任意坐标位置处的温度与射流流速、激光功率的关系,对大功率水导激光系统的设计具有重要参考。一年后,其团队首次设计、建造了用于宏加工的激光-水射流激光头,成功地实现了功率为 5 kW 的纳秒激光与水射流的耦合。

3.2 全反射形成条件

聚焦后的激光在与水射流耦合之前,先后经过空气层、透光玻璃层和水层。空气、玻璃、水的折射率不同,因此激光会在空气/玻璃界面、玻璃/水层界面发生两次折射,从而导致焦点偏离了激光在空气中聚焦的位置,同时也导致激光束的发散角和聚焦光斑的尺寸发生改变。根据光纤耦合理论,激光与水射流的成功耦合需要满足两个条件:1)聚焦光斑半径小于喷嘴半径;2)入射激光发散角小于全反射临界角^[48]。高斯光束经聚焦镜聚焦后,其束腰位置处的光腰半径即为聚焦光斑半径。考虑到实际应用中的光束一般为多模光束,可以引入光束质量因子 M^2 来评价光束质量。此时,焦点半径 ω' 采用式(4)计算。

$$\omega' \approx \frac{\lambda f M^2}{\pi \omega}, \quad (4)$$

式中: M^2 为光束质量因子, $M^2 \geq 1$; ω' 为聚焦后束腰位置处的光斑半径, μm ; λ 为激光波长, μm ; f 为聚

焦镜的焦距, mm ; ω 为入射光束在聚焦镜镜面上的光斑半径, μm 。

激光在水射流中传输时,可根据其传输轨迹将其分为子午光线和斜射光线,图 6(a)、(b)为两种光线在水射流截面面上的投影^[49]。将通过中心轴的光线称为子午光线,其他光线称为斜射光线。实际光束在水射流中传输时,子午光线和斜射光线同时存在,只是二者比例有所不同。两种光线的全反射传输^[50]如图 6(c)所示,任何光线在水射流内发生全反射的条件是:由水射流内部射向水/气界面的光线的入射角小于或等于全反射临界角。李春奇^[49]对光线在水射流中的全反射进行了详细的分析和计算,并得出了子午光线和斜射光线在水射流中发生全反射的临界条件。子午光线在水射流中发生全反射的临界条件为

$$n_a \sin \theta_a \leq \sqrt{n_w^2 - n_a^2}, \quad (5)$$

斜射光线在水射流中发生全反射的临界条件为

$$n_a \sin \theta_a \leq \frac{\sqrt{n_w^2 - n_a^2}}{\cos \alpha}, \quad (6)$$

式中: n_a 为空气的折射率; n_w 为水的折射率; θ_a 为激光束从空气进入玻璃的入射角; α 为斜射光线传输中相邻反射光线在横截面上投影夹角的半角。可见,当 $\cos \alpha = 1$ 时,斜射光线就会转化为子午光线。由式(5)、(6)可知激光束满足子午线全反射条件,即

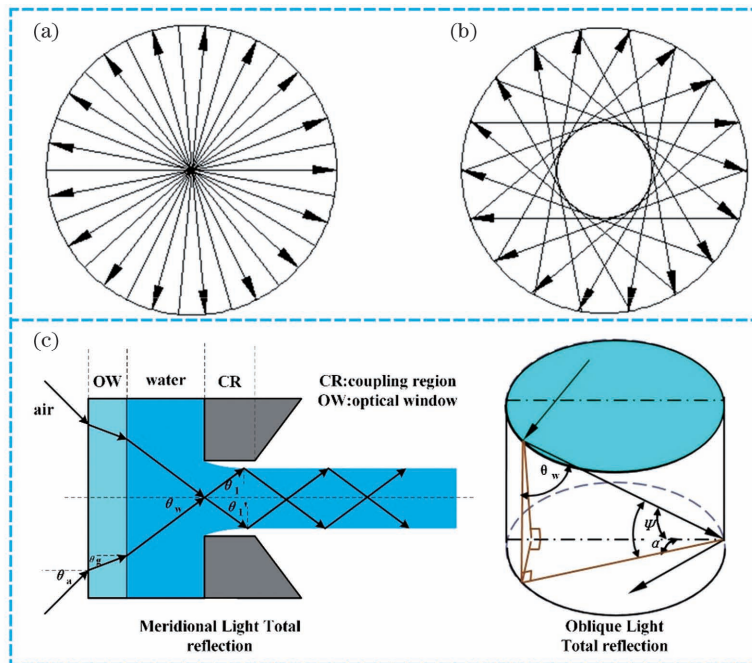


图 6 射流中的光线分布。(a)子午光线示意图^[49];(b)斜射光线示意图^[49];(c)射流中的光线全反射传输示意图^[50]

Fig. 6 Light distribution in the jet. (a) Schematic of meridian rays^[49]; (b) schematic of oblique rays^[49];

(c) total reflection propagation of meridian rays and oblique rays in a water jet^[50]

认为该激光束可在水射流中发生全反射。

3.3 耦合能束的传输分析

以下对耦合能束的传输分析将从激光与水射流的耦合误差以及耦合误差对耦合能束光强分布和传输稳定性的影响等方面进行。

Yang 等^[50]对激光耦合入水射流的耦合误差进行了深入研究,他们将耦合过程中的几何误差分为横向误差、纵向误差、轴向角度误差和端面角度误差,各类误差的示意图如图 7(a)~(d)所示。其中, ω 代表焦点位置处的光腰直径, R 是水射流的半径, d 代表激光轴线与水射流轴线之间的横向间距误差, s 代表激光焦点与水射流端面之间的径向间距误差, β 代表激光轴线与水射流中轴线之间的轴向角度偏差, α 是水射流斜面法线与垂直面法线之间的端面角度误差。对于端面角度误差,端面倾斜角

与水射流的临界激光入射角有如下关系:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{n_a}{n_w} \sin \theta\right)^2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_a}{n_w}\right)^2} - \frac{n_a}{n_w} \sin \theta. \quad (7)$$

由式(7)可知水射流的数值孔径因为端面倾斜角的增大而减小,因此可以通过调节激光入射角度或者提高耦合腔制造的端面精度来减小端面角度误差。提高激光与水射流对准装置的精度,可以使激光轴线与水射流中轴线尽可能重合,从而减小或避免横向误差的影响。耦合时的纵向误差存在三种形式,即近场耦合误差、远场耦合误差和端面耦合误差。近场耦合、远场耦合和端面耦合示意图如图 7(e)~(g)所示。端面耦合是激光-水射流耦合的理想形式,近场耦合和远场耦合易导致激光能量损失,甚至烧蚀喷嘴周围的表面,限制了光束数值孔径的大小。

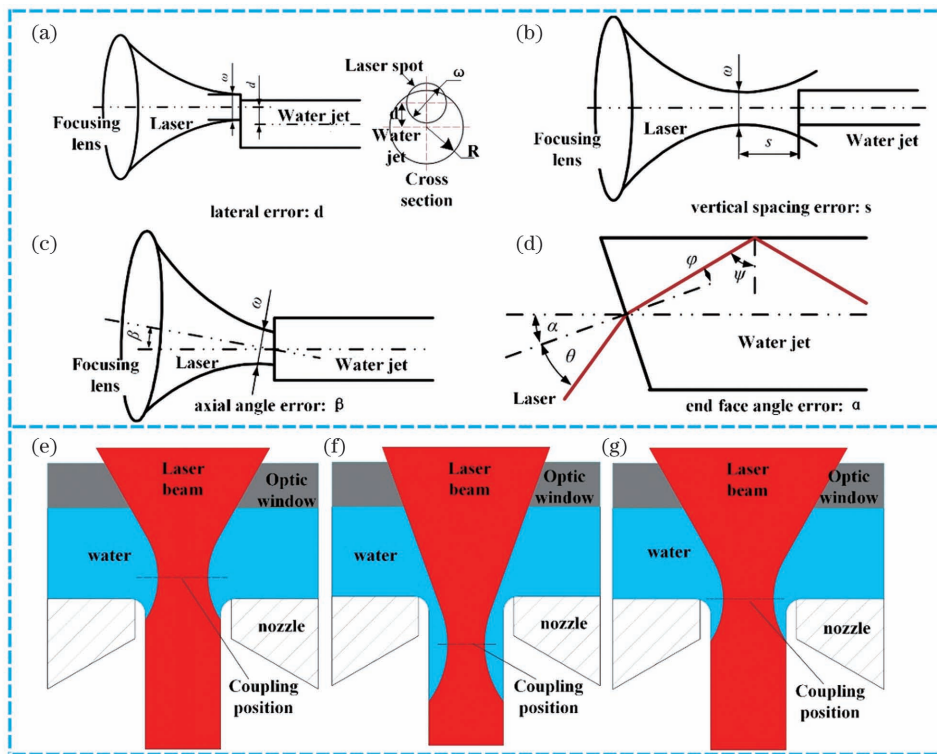


图 7 光线与水射流的耦合。(a)轴向误差示意图^[50]; (b)径向误差示意图^[50]; (c)角度误差示意图^[50]; (d)端面角度误差示意图^[50]; (e)近场耦合示意图^[29]; (f)远场耦合示意图^[29]; (g)端面耦合示意图^[29]

Fig. 7 Coupling of light and water jet. (a) Schematic of lateral error^[50]; (b) schematic of vertical spacing error^[50]; (c) schematic of axial angle error^[50]; (d) schematic of end face angle error^[50]; (e) schematic of near-field coupling^[29]; (f) schematic of far-field coupling^[29]; (g) schematic of end-face coupling^[29]

由于水射流的直径远大于激光波长,因此可将水射流视为多模光纤。多模光纤的优点是不保持高斯光束的空间特性,多模模式在光纤中分散,从而使得激光能量在水射流中呈平顶型分布而非高斯分布。Couty 等^[51]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 8(a)所示。数值孔径是光强分布的主导影响参数,其值越大,模式分布越均匀。通过增大射流直径以及激光焦点与水射流中心的间距,可以在整个水射流剖面上获得更好的模式均匀性;但

间距过大可能会导致激光聚焦在水/气界面,从而加剧耦合能束传输过程中的扰动^[52]。Deng 等^[53]选用 1064 nm 激光及其两倍频 532 nm 激光作为仿真光源,采用时域有限差分(FDTD)法求解麦克斯韦方程组,模拟了不同水射流柱直径下激光与水射流的耦合效应,模拟结果如图 8(b)所示。随着水射流直径的增大,耦合效率增大,这是因为激光束更容易被限制在较大的水射流内。但由于激光在水射流中发生了多重反射,因此直径更小的水射流可以提供更

强、更均匀的能量分布。为分析水射流形态对能量损耗的影响规律,邱禹力等^[54]利用高速数码相机拍摄了耦合能束气/液界面的形态,并根据三维光学模型重构进行了光线追迹仿真,最终获得了射流波动段的损耗特性。在射流形成的开始阶段,界面波动的幅度和频率都相对较低,不足以引起辐射损耗;当射流界面波动达到临界范围时,能量损耗开始显著增加。在水导激光加工过程中,由于水射流稳定长度和传输损耗的限制,工作距离一般不大于 10 cm。

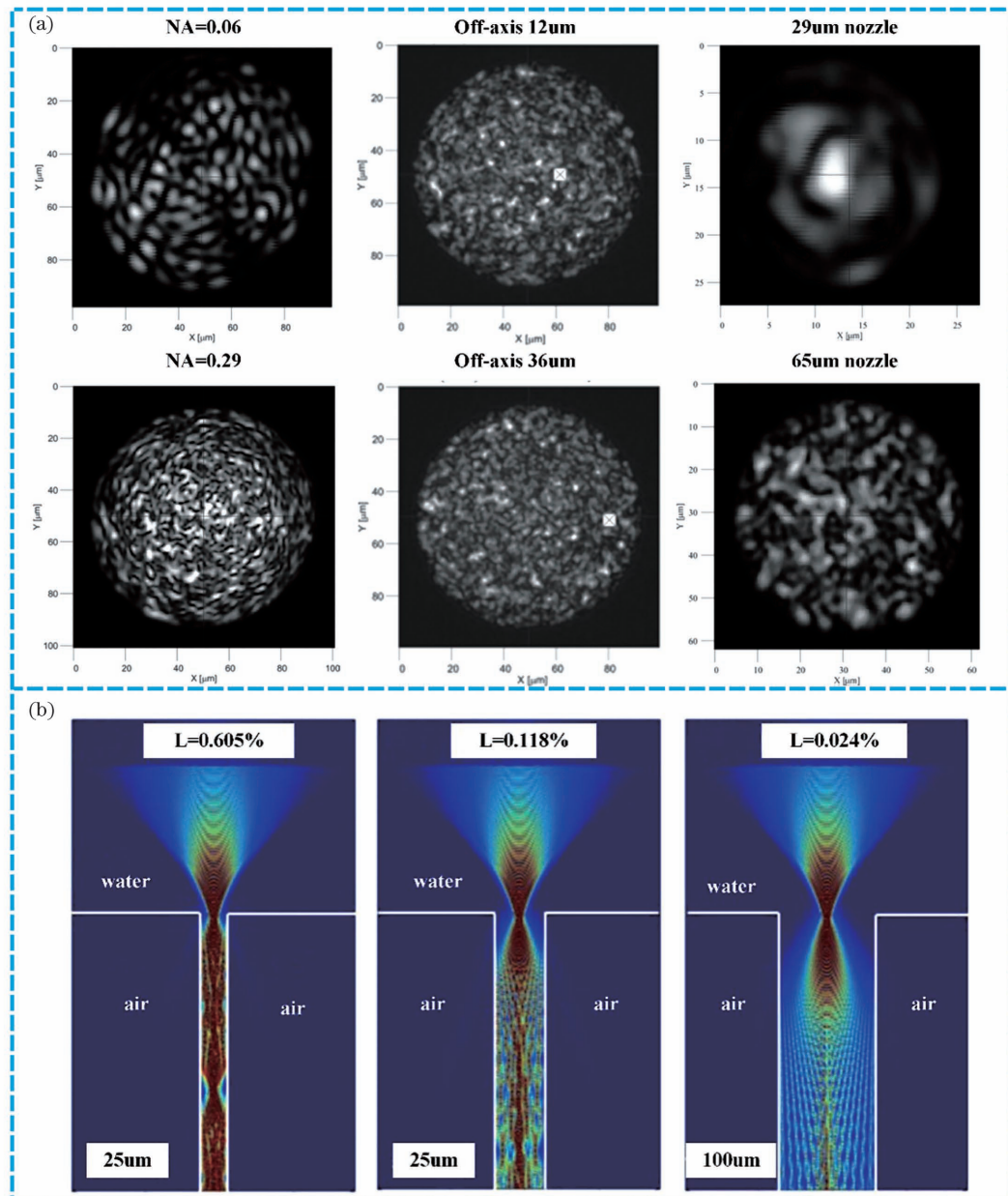


图 8 激光在水射流中的分布。(a)不同数值孔径、偏心距以及水射流直径下的能量强度分布^[51]; (b)不同射流直径下激光和水射流的耦合测试图^[53](波长为 532 nm,数值孔径为 0.665, L 为能量损耗率)

Fig. 8 Distribution of laser in water jet. (a) Intensity distribution under different numerical apertures, eccentric distances and water jet diameters^[51]; (b) diagrams of test results of laser and water jet coupling under different jet diameters^[53] (wavelength is 532 nm, numerical aperture is 0.665, and L represents energy loss rate)

4 水导激光加工技术的应用分析

4.1 水导激光在金属材料加工中的应用

水导激光对金属材料的加工涉及精密仪表、医疗以及航空航天等众多领域,涵盖了不锈钢、铝合金、黄铜以及钛合金等金属材料。Rashed 等^[55]对比了水导激光切割和微细电火花加工不锈钢的表面质量,对比结果如图 9(a)所示。从加工锥角、表面形貌和粗糙度等方面对其进行表征后发现,水导激光切割得到的表面质量在各个方面均优于微细电火花加工的表面质量。Wagner 等^[56]对比了水导激光和“干激光”切割 150 μm 厚不锈钢薄板的加工效果,结果发现,在切割速度相同时,水导激光切割件在毛刺显著程度、材料氧化和热影响区大小方面比“干激光”切割件更具优势。“干激光”与水导激光加工不锈钢的孔缘质量对比如图 9(b)所示,可知:“干激光”切割会产生 12 μm 厚的热影响区,且孔缘处存在材料与空气作用形成的氧化层。水导激光加工由于水射流的冷却冲洗作用以及隔离空气的作用,

使得切割件基本无热影响区且材料未发生氧化。Weiss 等^[57]研究了 400 W 大功率水导激光加工设备对不锈钢表面氧化和相位变化的影响,详细分析了热影响区中铁的瞬态相变。此外,他们在实验过程中发现了磁铁矿和赤铁矿的形成,并发现氧化区的宽度随着进给速度的提高而减小:当进给速度为 0.3 m/min 时,氧化区宽度为 1.5 mm;当进给速度提高至 0.9 m/min 时,氧化区宽度不足 0.25 mm。Porter 等^[58]采用水导激光对铝板、黄铜板以及不锈钢板进行切割实验,研究了不同的工作距离、进给速度和射流偏角对加工效果的影响规律;他们通过对比发现相同加工参数下黄铜板的截面相对粗糙,如图 9(c)所示。这可能是由于铜的熔点更高,熔融材料在水射流将其带走之前就已经凝固,从而导致了更明显的材料重铸和再沉积。Adelmann 等^[59]通过实验分析了铝板、钛合金板和不锈钢板的最大切割深度,结果显示,切割铝板的深宽比为 66.7,远大于切割钛合金板的 39.2 和切割钢板的 12.5。这可能是因为铝的比热容和熔点更低,更易达到烧蚀阈值。

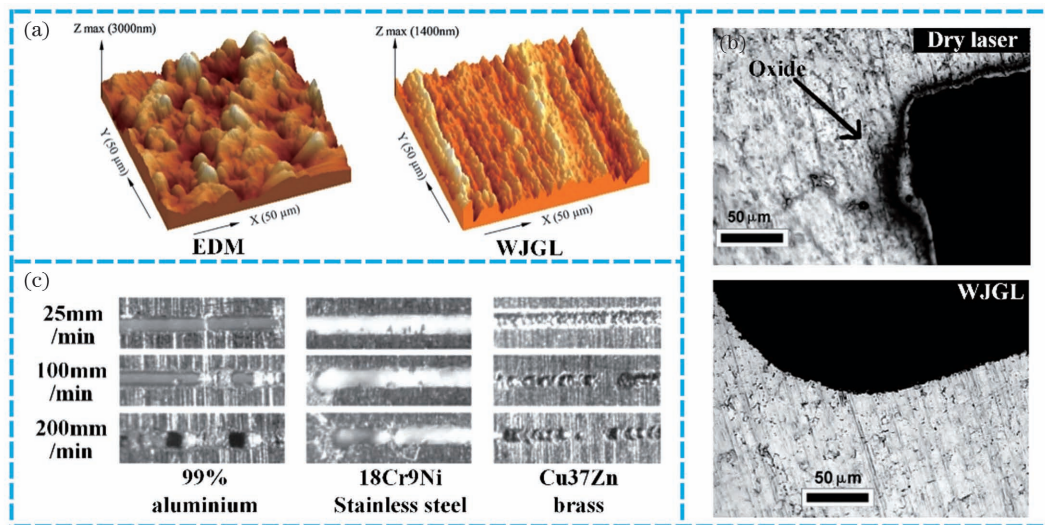


图 9 传统金属材料的加工表面形貌。(a)微细电火花加工与水导激光切割加工不锈钢表面形貌对比^[55]; (b)“干激光”与水导激光加工不锈钢的孔缘质量对比^[56]; (c)相同工艺参数下,铝、不锈钢和黄铜的加工表面质量对比(工作距离为 90 mm)^[58]

Fig. 9 Processed surface morphologies of traditional metal materials. (a) Comparison of surface morphology of stainless steel processed by electrical discharge machining (EDM) and water-jet guided laser (WJGL) cutting^[55]; (b) comparison of hole edge quality of stainless steel processed by “dry laser” and WJGL^[56]; (c) comparison of surface quality of aluminium, stainless steel, and brass under the same technological parameters (working distance is 90 mm)^[58]

水导激光在航空航天领域中的应用主要集中在高比强度、耐腐蚀、耐高温的钛合金和镍基高温合金等材料上。Li 等^[60]对比了水导激光和“干激光”切割钛合金板的切缝质量,如图 10(a)所示,水导激光加工的截面质量更具优势,切割截面更平整光滑,且切缝底部不存在材料的熔融凝结现象。这些特点奠

定了水导激光加工技术在钛合金零件微细加工领域中的优势地位。Diboine 等^[61]在采用水导激光对镍基高温合金划槽的实验过程中发现了明显的“壁面效应”,如图 10(b)所示。耦合能束在靠近壁面过程中的加工能力逐渐降低,使得加工表面的“脊谷”结构逐渐明显。这是因为在靠近壁面过程中,薄雾在

喷嘴出口处汇聚成水滴的进程不断加快,水滴的滴落扰乱了水射流的导光能力,导致耦合能束失稳和能量逸散,进而削弱了加工能力。Gurav 等^[62]分别采用“干激光”、水导激光和电火花加工技术在镍基高温合金上钻孔,并采用扫描电镜(SEM)对形成的重铸层进行了表征,表征结果如图 10(c)所示。水导激光克服了“干激光”加工过程中的颗粒飞溅和电火花加工的脉冲能量不匹配问题,加工形成的重铸层很薄,厚度仅为 5~8 μm,且不存在微裂纹。Liu^[63]研究了镍基高温合金加工过程中水射流流速对热影响区厚度和加工表面材料相变的影响,得到如下结论:流速的改变影响了氧化成核和熔融材料的凝固时间,进而改变了氧化层和重铸层的形成顺序。Liao 等^[64]对水导激光切削镍基高温合金时切削表面的形成机理进行了深入研究,结果发现:水射

流的快速冷却使得晶格在材料凝固过程中发生迁移,形成高密度位错;膨胀的高压等离子体羽流在水的限制下对基底产生冲击波,形成机械孪晶,不同方向排列的机械孪晶相互交叉形成了亚微米菱形块体,如图 10(d)所示。位错和交叉孪晶延长了工件的低周疲劳寿命,从而大幅提升了材料的性能。镍基高温合金是制造涡轮叶片的主要材料,通常会涂覆陶瓷涂层,以增强其耐高温能力。Marimuthu 等^[65]根据航空发动机部件对冷却孔的要求,采用水导激光在涂覆陶瓷涂层的镍基高温合金上进行了多角度(15°、30°、60°)打孔,并对分层特征进行了评估;结果表明,在其他加工参数相同的情况下,增大脉冲频率可以有效减少涂层/基体界面附近的热累积,使孔轮廓更平滑,且不会出现涂层分层或重铸层等热缺陷,如图 10(e)所示。

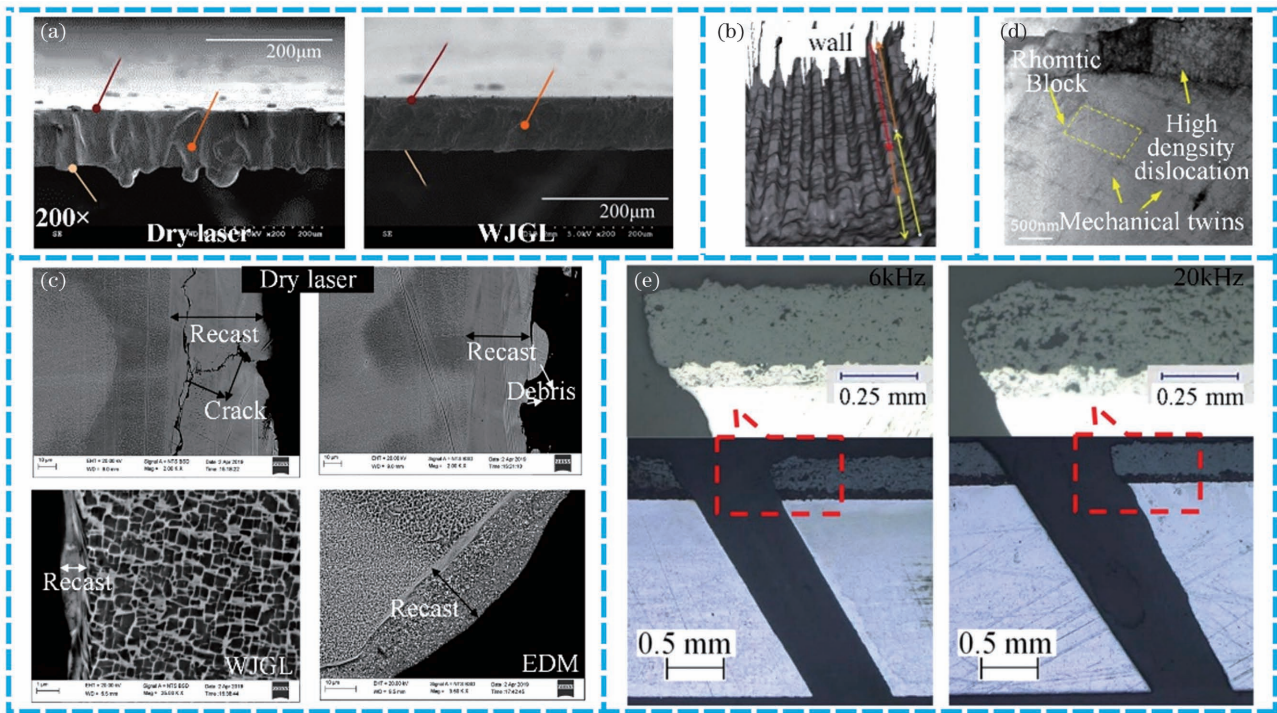


图 10 航空航天金属材料的加工表面形貌。(a)“干激光”与水导激光切割钛合金切口截面的 SEM 图像^[60]; (b)“壁面效应”的细节图示^[61]; (c)“干激光”、电火花加工和水导激光工艺下孔洞重铸层的 SEM 图像^[62]; (d)SEM 下的高密度位错和交叉机械孪晶^[64]; (e)脉冲频率对涂层分层的影响^[65]

Fig. 10 Processed surface morphologies of metal materials used in aerospace field. (a) SEM images of incision cross-section of titanium alloy cut by “dry laser” and WJGL^[60]; (b) detailed illustration of the “wall effect”^[61]; (c) SEM images of recast layers of holes processed by “dry laser”, EDM, and WJGL processes^[62]; (d) high density dislocations and cross mechanical twins under SEM^[64]; (e) effect of pulse frequency on coating delamination^[65]

4.2 水导激光在半导体材料加工中的应用

传统加工方法加工硬脆性或有毒半导体材料时面临着工件漂移、毒性气溶胶污染等严重问题,采用水导激光加工技术可有效提升加工质量、避免环境

污染,同时能保持较高的生产效率。Dushkina 等^[66]对比了水导激光和传统精密锯切工艺切割砷化镓(GaAs)晶片的表面质量,如图 11(a)所示。水导激光切割得到的切缝更整齐,无毛刺和碎屑,切割速度

比锯切高 7~10 倍;同时,水射流的存在避免了有毒砷化镓颗粒向空气中扩散,保证了工业生产中工作环境的安全性。Li 等^[67]利用 ANSYS 软件建立了水导激光刻划硅片的模型,并采用该模型准确预测了 5 mm/s 和 150 mm/s 进给速度下的沟槽深度,如图 11(b)所示,但模型给出的低速进给(5 mm/s)条件下的截面锥度与实验结果有较大差异,且未预测到沟槽边缘的质量随进给速度增加而变差的现象。这也提示了模型可能的修正方向。Wang 等^[68]针对水导激光加工硅片时不同对流换热系数下的温度场和材料去除情况进行了仿真,仿真结果如图 11(c)所示。当换热系数过小时,热影响区较大;当换热系数过大时,加工区域的温度过低而无法实现材料的去除。仿

真结果对激光功率和射流速度的匹配提供了指导。Zhou 等^[69]采用 Stillinger-Weber 势和 Z 层能量模型对水导激光烧蚀硅过程中的分子动力学变化进行了数值模拟,结果发现热波、密度波的传递速度与声子速度基本一致,从而确定了声子能量传输的主导地位。相较于“干激光”加工,水导激光加工后的硅片密度波位置基本不变,如图 11(d)所示,从而从分子动力学角度证明了水射流的冷却作用可以减少烧蚀过程的热损伤,维持硅晶体的原有结构。Qiao 等^[70]采用波长为 532 nm 的 Nd:DPSS 激光系统对单晶硅进行了水导激光划槽实验,由于水射流边缘的能量较低以及高速水射流的冷却作用,加工截面呈“V”形,如图 11(e)所示。此外,通过设置单因素实验,Qiao 等

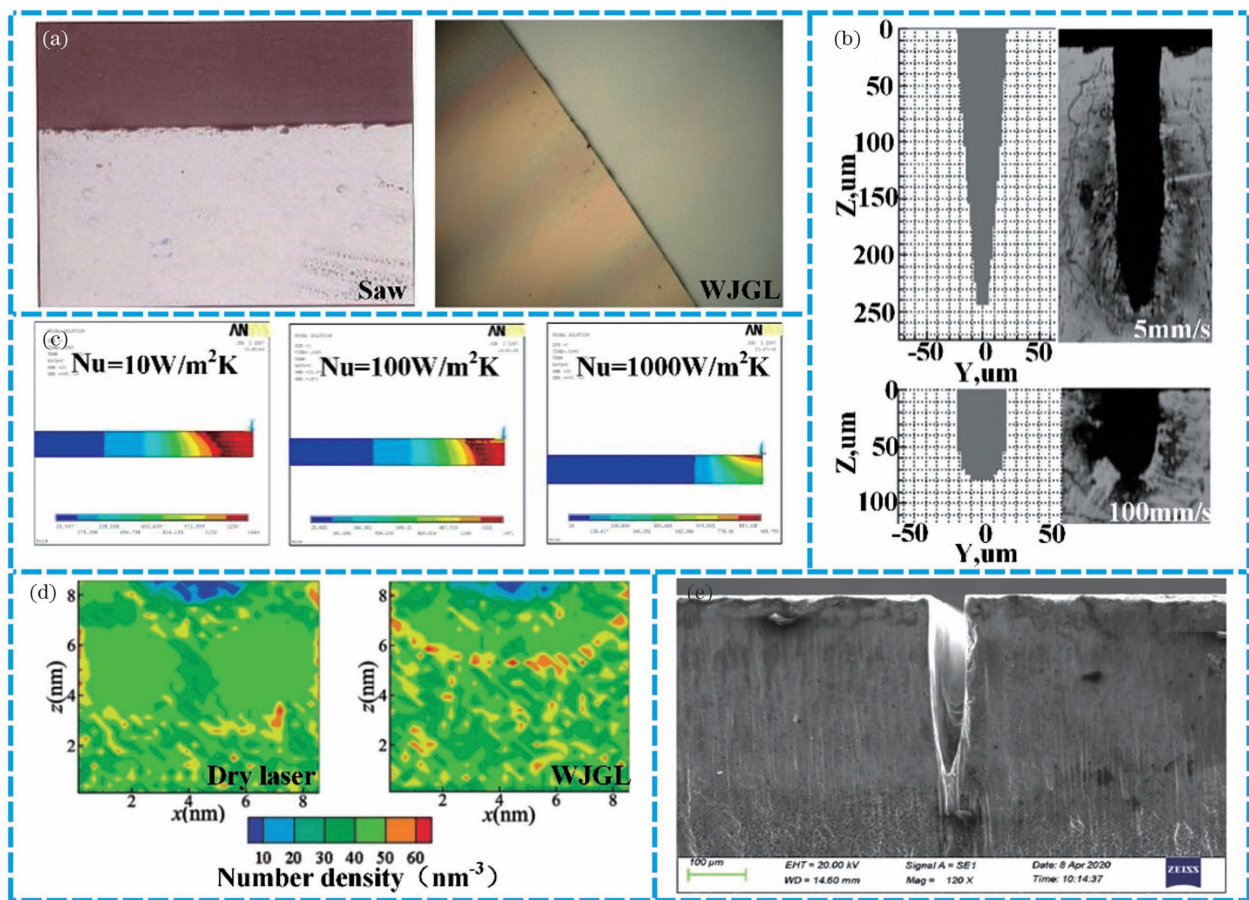


图 11 半导体材料的加工结果。(a)精密锯切和水导激光切割砷化镓的前表面质量对比^[66]; (b)不同进给速度下刻划硅片的仿真和实验截面形貌对比^[67]; (c)不同水射流热导率下得到的温度场和材料去除仿真结果^[68]; (d)加工开始 1.65 ps 后的密度波分布^[69]; (e)硅片划槽得到的“V”形截面^[70]

Fig. 11 Processing results of semiconductor materials. (a) Comparison of the front surface quality of sawn and WJGL-cut of gallium arsenide^[66]; (b) comparison of cross-sectional topography of scribed silicon wafers at different feeding speeds obtained by simulation and experiment^[67]; (c) temperature field and material removal simulation results obtained under different water jet thermal conductivity coefficients^[68]; (d) density wave distribution after 1.65 ps at the start of processing^[69]; (e) “V”-shaped cross-section obtained by scribing grooves on silicon wafer by WJGL^[70]

得到了激光功率、重复频率、切割次数和进给速度对加工质量的影响规律。

4.3 水导激光在先进复合材料加工中的应用

先进复合材料,如铝基碳化硅复合材料(Al MMC)、碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP)、碳碳复合材料(CMCs)等,具有比强度高、化学惰性好等优良特性,这使得其在极端环境下仍能展现出不俗的性能。传统的加工技术在对这些材料进行加工时,极易在加工区域产生毛刺、分层、撕裂及崩边等缺陷,很难获得良好的加工质量。相比之下,水导

激光加工技术综合了纳秒激光的高效蚀除和水射流的隔绝冷却作用,减轻了加工表面的石墨化,提高了加工质量,是一种优势明显的加工方案^[71]。Marimuthu 等^[72]分别采用水导激光和毫秒脉冲激光在 2 mm 厚 Al MMC 上钻孔,得到了如图 12(a)所示的截面。由于较低的激光功率和水射流冷却作用,在水导激光加工过程中,铝基体和碳化硅增强颗粒都以“冷烧蚀”的形式去除,避免了熔池对流造成的加工截面上碳化硅的颗粒迁移,从而保证了加工截面的微观形貌。此外,由于水射流对激光的限制

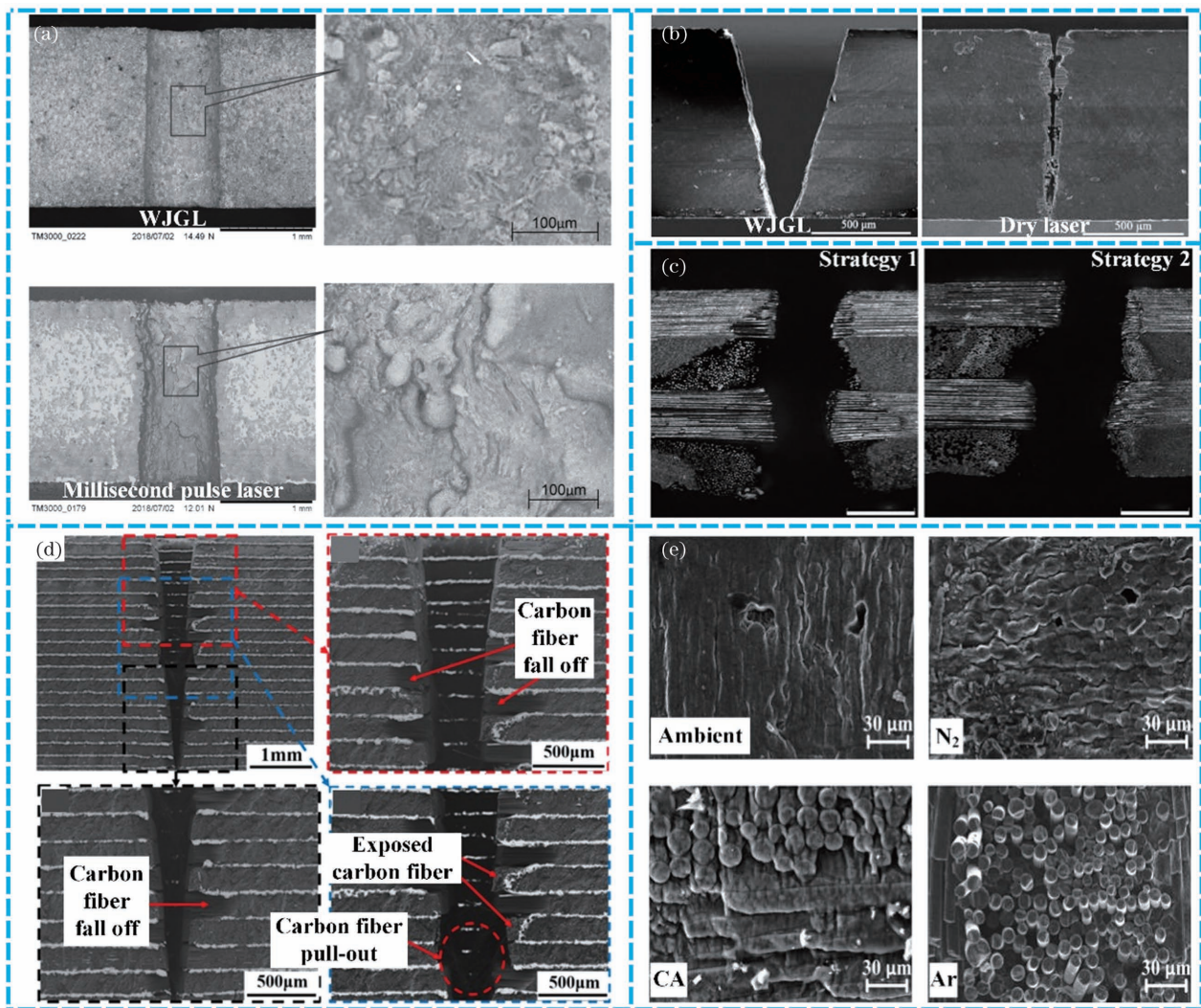


图 12 复合材料的加工结果。(a)水导激光与毫秒脉冲激光加工 Al MMC 得到的孔截面形貌特征对比^[72]; (b)水导激光与“干激光”切割 CFRP 得到的切面对比^[73]; (c)“矩形扫描”与“平行扫描”策略及其对应的切缝形貌^[74]; (d)4 mm 厚 CFRP 加工后的狭缝的外观形貌^[76]; (e)不同气体气氛下加工的 CMCs 基底的局部放大截面形貌^[39]

Fig. 12 Processing results of composite materials. (a) Morphology characteristics of hole section obtained by processing Al MMC with WJGL and millisecond pulse laser^[72]; (b) comparison of cutting surface appearance obtained by WJGL and “dry laser” cutting CFRP^[73]; (c) “rectangular scanning” and “parallel scanning” strategies and their corresponding slit morphologies^[74]; (d) overall appearance of the slit after 4 mm thick CFRP processing^[76]; (e) partially enlarged cross-sectional topography of CMCs processed under different gas atmospheres^[39]

作用,水导激光加工获得的截面锥度极小($0.1^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$),相比毫秒脉冲激光加工得到的锥度($1.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$)具有明显优势。Sun 等^[73]采用同种光源(355 nm)的“干激光”和水导激光工艺对 CFRP 材料进行了对比加工,结果表明:水导激光加工工艺获得的切缝几乎无热影响区,表面质量更好,但由于水导激光通常采用多道切割工序,且射流截面直径约为激光焦点直径的 10 倍,因此切缝宽度远大于“干激光”切割的切缝宽度。激光能量在射流中的平顶型分布导致切缝出现微小的锥度,使得水射流与材料接触截面面积增大,激光能量密度降低;当能量密度低于蚀除阈值时材料就不能被移除,最终形成了更大锥度的切缝,如图 12(b)所示。此后,Sun 等^[74]又研究了不同扫描策略对切割总厚度为 0.5 mm 的 4 层 CFRP 板材的影响,扫描策略和相应切缝形貌如图 12(c)所示。沟槽两侧的不对称性使得耦合能束随机倾斜到一侧,加速该侧材料的去除速率;由于碳纤维的排布方向不同,第一层中的热影响区只出现纤维拔出,第二层热影响区中的碳纤维由于缺乏环氧树脂的固定会被水射流冲走,出现反向锥形切缝。在“矩形扫描”策略下,激光沿矩形轨迹移动,逐层去除 CFRP 材料,切缝质量与单道切割类似。在“平行扫描”策略下,先采用多道切割切透材料,然后激光横向移动 0.1 mm,重复多次切割;在进行第 $n(n>1)$ 道切割时,由于左侧材料被完全移除,对水束光纤的直接影响较小,右侧的坡度逐渐变陡,因此右侧的切割质量更好。Zhang 等^[75]建立了非均质纤维基体的三维瞬态温度场及后续材料去除模型,分析了水导激光加工 CFRP 材料的去除机理以及脉冲占空比对材料温度场分布的影响;结果发现,小的占空比可以有效减少激光烧蚀界面的温度叠加,从而控制温度场空间分布的不均匀性和热应力累积,对减小热影响区范围、抑制裂纹、增大加工深度非常有利。Wu 等^[76]通过实验分析了水导激光切割 CFRP 过程中碳纤维排列方向和激光切割路径对损伤机理的影响,得到了激光功率、CFRP 进给速度、水射流速度等工艺参数对切割结果的影响规律,总结了露出、脱落和拔出三种损伤形成的机理,如图 12(d)所示,为大厚度 CFRP 的高精度切割提供了参考依据。针对 CMCs 材料的水导激光加工,Cheng 等^[39]对比分析了不同气氛辅助下加工质量的差异,如图 12(e)所示。相较于空气(Ambient)、氮气(N_2)和压缩空气(CA),动力黏度更大的氩气(Ar)气氛减少了水射流的动量损失,加速了碎屑的排出。此外,氩气为

基底的烧蚀提供了局部惰性环境,抑制了重铸层的形成和加工截面的氧化,显著提升了加工质量。

5 结束语

本文对水导激光加工技术的系列文献进行了综述,系统地阐述了水导激光的形成机理和应用潜力。

在水射流形成方面,主要针对水射流稳定性的影响因素以及水射流的衰减、发散和冲击过程进行研究。下锥形喷嘴容易实现水力翻转,形成“缩流”水射流,提高了射流的稳定性。水射流破碎是一种复杂的现象,与周围环境、喷嘴几何形状以及压力、流量等水力参数有关,引入辅助气氛可以减小射流与空气的动量交换,提升射流的稳定长度。稳定传输的水射流冲击加工表面后可以形成液流膜,液流膜可以排出碎屑和隔绝空气。

本文对激光-水射流耦合过程的描述是从能量损耗、耦合参数、传输模式和散斑等方面进行的。水对激光的线性吸收是激光能量损耗的重要因素,超过阈值的激光能量会导致非线性受激拉曼散射的产生。在水射流中传输时,激光光束可以分为子午光线和斜射光线,当光束满足斜射线全反射条件时即可在水射流中进行全反射传输。耦合过程中可能出现的耦合误差决定了耦合效率和能量分布,与损耗的能量共同影响耦合能束传输的稳定性。

“冷加工”和高质量加工使水导激光能够被应用于航空航天、芯片制造、精密医疗等领域加工金属、半导体、复合材料等各种难加工材料。建模和仿真为理解激光烧蚀所涉及的物理机理提供了适当帮助,促进了相关实验的进行以及水导激光应用范围的延伸。基于不同的加工材料,本课题组统计了水导激光加工过程中对应的参数和得到的加工性能,如表 1 所示。

有关水导激光的大量研究有力地证明了其在金属材料、半导体以及先进复合材料等加工领域的应用价值,但在面向高质量、高深径/宽比的孔、槽、边的加工需求以及狭小的工作空间时,水导激光的加工能力仍存在局限性;同时,针对金刚石、蓝宝石、超硬陶瓷等难加工材料的水导激光加工工艺仍需要进一步探索。为了适应更高加工质量和批量化生产的要求,未来水导激光加工技术可能的发展方向如下:

1)减小水射流直径,降低高强度激光的能量损耗。水射流直径对于加工分辨率和加工质量有显著影响,减小水射流直径的同时保持水射流的稳定性需要进一步研究水气的相互作用以及耦合参数等对射流流场、激光能场分布的影响规律。

表 1 水导激光加工不同材料所采用的加工参数以及得到的加工性能

Table 1 Processing parameters and performances obtained in WJGL processing of different materials

Material	Laser parameter	Water jet parameter	Conclusion
0.1 and 0.2 mm thick strips of 99% aluminum, Cu37Zn brass, and 18Cr9Ni stainless steel ^[54]	Nd:YAG 1064 nm, 105 W, 100 μ s, 300 Hz	Jet diameter: 120 μ m; water pressure: 20 MPa	For 1064 nm laser, 50 mm is a reliable working distance. Due to the difference in reaction mode and melting point, the recast layer of copper is thick
2 mm thick C263 coated with a 300 μ m thick TBC and 100 μ m thick BC ^[65]	Nd:YAG 535 nm, 42 W, 200 ns, 6–24 kHz	Jet diameter: 60 μ m; water pressure: 30 MPa	The increase of the pulse frequency reduces the heat accumulation between the coating and the substrate. When the frequency is 6 kHz and the spiral track is 150 times, the surface of the processed hole is smooth and there is no thermal damage
Inconel 718 (size: 100 mm \times 6 mm \times 6 mm) ^[64]	Synova MCS 300 532 nm, 90 W, 250 ns, 12 kHz	Nozzle diameter: 50 μ m; water pressure: 40 MPa	The expanded high-pressure plasma plume produces shock waves on the substrate, forming mechanical twins, and the mechanical twins arranged in different directions intersect each other to form sub-micron diamond-shaped blocks
CFRP ^[73]	AWAVE UV 355 nm, 10 W, 20 ns, 30 kHz	Jet diameter: 150 μ m water pressure: 6 MPa	Some stripes of WJGL processed specimens tend to be perpendicular to CFRP. The inner surface is clean, without melting and splashing adhesion, but the processing efficiency is relatively low
CFRP ^[76]	532 nm, 10/15/20/25/30 W, 8.6–50.3 ns, 40 kHz	Jet diameter: 100 μ m water pressure: 5 MPa	With the increase of laser power, the cutting depth gradually increases, while the gap width does not change significantly, and it can achieve high-efficiency cutting of 10 mm thick CFRP
Al MMC ^[72]	3-axis Synova MCS 300 535 nm, 60 W, 200 ns, 800 Hz	Nozzle diameter: 60 μ m; water pressure: 30 MPa	It takes up to 12 s to drill a 0.8 mm hole in a 2 mm thick Al MMC, and the drilling quality fully meets the requirements of the aerospace industry
CMCs ^[39]	PR-532-25-A 532 nm, 25 W, 20 ns, 30 kHz	Nozzle diameter: 100 μ m; water pressure: 20 MPa	The coaxial spiral argon atmosphere increases the stable length of the jet and effectively inhibits the formation of the recast layer. The cross-section of the processing zone is uniform, without silicon carbide fiber stretching and delamination
Monocrystalline silicon (size: 10 mm \times 10 mm \times 1 mm) ^[70]	Nd:DPSS laser system 532 nm, 0–25 W, 300 ns, 20–120 kHz	Jet diameter: 60 μ m water pressure: 70 MPa	Ablation depth increases with the increase of power and decreases with the increase of repetition frequency. The higher the repetition frequency, the rougher the cutting surface. Ablation depth and width decrease with the increase of cutting speed

Notes: TBC represent thermal barrier coat; BC represents bond coat.

2)耦合过程中焦点移动的确定。在激光与水射流的耦合过程中,由于聚焦后的激光对水产生热作用,水的温度会升高,从而导致其折射率和激光吸收率等光特性发生改变。在此影响下,激光焦点会偏离理论的聚焦位置,可能会导致耦合效率降低甚至耦合失败。以往的研究通常忽略耦合处水射流在高

速流动条件下的温度变化,这在更高加工质量的要求下是不适用的。

3)水导激光加工过程中激光-水射流-材料作用原理的研究。水导激光的加工过程是高能激光、水射流和材料三者之间复杂的相互作用,加工区域内存在复杂的热波动和等离子体压力波动,这对于水

导激光加工过程中的材料蚀除能力具有关键影响。深入研究三者的作用关系,对于认识水导激光加工机理以及加工表面重铸层、再沉积层的形成原因具有重要意义。

4)激光能量在加工表面分布的研究。耦合能束与工件作用后在加工表面形成一定的结构,结构形貌的演变对水射流流场的时空分布具有显著的调控作用,进而影响了激光/水射流/材料界面材料的蚀除动力学行为。进一步深入研究加工表面的激光能量分布及演变规律,可以有效提高水导激光加工的可控性。

参 考 文 献

- [1] Zielinski T, Vovk A, Riemer O, et al. An investigation on internal material loads and modifications in precision turning of steel 42CrMo4 [J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 526.
- [2] Yasir M, Danish M, Mia M, et al. Investigation into the surface quality and stress corrosion cracking resistance of AISI 316L stainless steel via precision end-milling operation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(3/4): 1065-1076.
- [3] Sahu D, Sahu S K, Jadam T, et al. Electro-discharge machining performance of nimonic 80A: an experimental observation [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(12): 10155-10167.
- [4] Rahman M Z, Das A K, Chattopadhyaya S. Fabrication of high aspect-ratio tungsten microtools through controlled electrochemical etching [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36(11): 1236-1247.
- [5] Kröniger W, Perrottet D, Buchilly J M, et al. Stress release increases advantages of laser-microjet [J]. *Semiconductor International*, 2005, 28(4): SP. 4-SP. 8.
- [6] 邹婷婷. 氧化石墨烯的飞秒激光微结构制备与应用 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021: 21-25.
Zou T T. Femtosecond laser microstructuring graphene oxide and its application [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2021: 21-25.
- [7] 矫知真, 李纪超, 陈招弟, 等. 激光加工减反射表面研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202011.
Jiao Z Z, Li J C, Chen Z D, et al. Research progress on laser processing of antireflection surfaces [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202011.
- [8] Roessler D M. Laser processing of materials for automotive applications [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1989, 4(3): 285-310.
- [9] 杨薇. 飞秒激光加工镍基高温合金微孔试验研究 [J]. *电加工与模具*, 2021(4): 56-60.
Yang W. Experimental study on femtosecond laser micro hole machining of nickel-based superalloy [J]. *Electromachining & Mould*, 2021(4): 56-60.
- [10] Fang R R, Zhang D M, Wei H, et al. Improved two-temperature model and its application in femtosecond laser ablation of metal target [J]. *Laser and Particle Beams*, 2010, 28(1): 157-164.
- [11] Biffi C A, Previtali B. Spatter reduction in nanosecond fibre laser drilling using an innovative nozzle [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9/10/11/12): 1231-1245.
- [12] Colladon D. On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream [J]. *Comptes Rendus*, 1842, 15: 800-802.
- [13] Hecht J. *City of light: the story of fiber optics* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [14] Doi Y. Laser knife: US4676242A [P/OL]. 1987-06-30. <http://www.google.co.in/patents/US4676242A>.
- [15] Wrobel W G. Process for cutting a material by means of a laser beam: US4952771A [P/OL]. 1990-08-28. <http://www.google.co.in/patents/US4952771A>.
- [16] Sander R, Poesl H, Frank F, et al. An Nd:YAG laser with a water-guided laser beam: a new transmission system [J]. *Gastrointestinal Endoscopy*, 1988, 34(4): 336-338.
- [17] Richerzhagen B. The best of both worlds-laser and water jet combined in a new process: the water jet guided laser [J]. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2001: 1815-1824.
- [18] Zhang W. Photon energy material processing using liquid core waveguide and a computer program for controlling the same: US7211763B2 [P/OL]. 2007-05-01. <http://www.google.co.in/patents/US7211763B2>.
- [19] Lü J, Dong X, Wang K D, et al. Study on process and mechanism of laser drilling in water and air [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5/6/7/8): 1443-1451.
- [20] Mullick S, Madhukar Y K, Roy S, et al. Performance optimization of water-jet assisted underwater laser cutting of AISI 304 stainless steel sheet [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 83: 32-47.
- [21] López J M L, Bakrania A, Coupland J, et al. Droplet assisted laser micromachining of hard ceramics [J].

- Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36 (11): 2689-2694.
- [22] 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.
- [23] Perrottet D, Housh R, Richerzhagen B, et al. Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5713: 285-292.
- [24] 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 力学 天文学, 2020, 50(3): 034203.
- Lu X Z, Jiang K Y. Research and application development of compound energy field processing: laser microjet [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, 50(3): 034203.
- [25] 陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- Chen C, Gao M, Gu Y Z, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
- [26] 王扬, 李春奇, 杨立军, 等. 非常规激光加工技术的研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 448-454.
- Wang Y, Li C Q, Yang L J, et al. Research on unconventional laser machining [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 448-454.
- [27] Sokołowski Z, Malinowski I. Perspectives of applications of micro-machining utilizing water jet guided laser [M] // Jabłoński R, Turkowski M, Szweczyk R. Recent advances in mechatronics. Heidelberg: Springer, 2007: 365-369.
- [28] 孙博宇, 乔红超, 赵吉宾, 等. 水导激光切割技术研究现状[J]. 光电工程, 2017, 44(11): 1039-1044, 1128.
- Sun B Y, Qiao H C, Zhao J B, et al. Current status of water-jet guided laser cutting technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(11): 1039-1044, 1128.
- [29] 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.
- [30] Huang Y X, Zhao Y W, Yang L F, et al. Theoretical study of water jet guided laser technology based on non-uniform electric field deflection water jet[J]. Optics Communications, 2019, 442: 31-39.
- [31] Huang Y X, Yang L F, Liang E, et al. Study on the mechanisms of curved water jet fiber-guided laser technology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11/12): 3137-3150.
- [32] Anantharamaiah N. An investigation of the influence of nozzle geometry in the hydroentangling process [D]. North Carolina: North Carolina State University, 2007.
- [33] 李靖怡. 纳秒激光与水射流耦合特性及蚀除材料实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Li J Y. Research on the coupling characteristics and material ablation experiments of water-jet guided nanosecond laser processing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [34] 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: 51-54.
- Ye R F. Research on the optical properties and key technologies of a novel water jet guided laser processing system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009: 51-54.
- [35] Annoni M, Arleo F, Malmassari C. CFD aided design and experimental validation of an innovative air assisted pure water jet cutting system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1647-1657.
- [36] Wang Z G. Investigation of the water guided laser micro-jet machining of aero engine components[C]// Proceedings of ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated With the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing, June 4-8, 2017, Los Angeles, California, USA. New York: ASME, 2017.
- [37] Gaebelein J, Hribar J, Avonissys A G. Pushing the envelope of liquid-jet guided laser machining applying modern IR fiber lasers [EB/OL]. (2019-05-13) [2021-10-20]. <https://www.avonissys.com>.
- [38] 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.
- [39] Cheng B, Ding Y, Li Y, et al. Coaxial helical gas assisted laser water jet machining of SiC/SiC ceramic matrix composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117067.
- [40] 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.
- [41] Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: general features, steam cleaning and shock processing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(2): 307-327.

- [42] 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: 17-22.
Li L. Study on water-jet guided laser micromachining technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 17-22.
- [43] 吴志心. 基于受激拉曼散射的新型双波长激光研究[D]. 济南: 山东大学, 2019: 1-3.
Wu Z X. Study of novel dual-wavelength laser based on stimulated Raman scattering[D]. Jinan: Shandong University, 2019: 1-3.
- [44] Wang Y, Yang L J, Tang J, et al. Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet guided laser micromachining[J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 69/70: 29-33.
- [45] Noack J, Vogel A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(8): 1156-1167.
- [46] Pallav K, Han P, Ramkumar J, et al. Comparative assessment of the laser induced plasma micromachining and the micro-EDM processes [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(1): 011001.
- [47] 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.
- [48] 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 E, Huang Y X, Jiao H, et al. Comparative analysis of laser focusing modes applicable to water jet guided laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1722002.
- [49] 李春奇. 基于激光与微细水射流相耦合的加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 35-38.
Li C Q. Research on coupling processing technology of laser and micro water jet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 35-38.
- [50] Yang L J, Li C Q, Tang J, et al. Analysis on the coupling error of laser and water-jet in water-jet guided laser micromachining[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 188: 190-194.
- [51] Couty P, Wagner F R, Hoffmann P W. Laser coupling with a multimode water-jet waveguide[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(6): 068001.
- [52] Couty P, Spiegel Á, Vágó N, et al. Laser-induced break-up of water jet waveguide[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(6): 919-927.
- [53] Deng C, Yeo H, Ki H. Electrodynamics simulation of laser beam propagation in waterjet-guided laser processing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11128-11143.
- [54] 邱禹力, 朱广志, 朱晓, 等. 射流水波导表面轮廓特性对传输损耗的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0116003.
Qiu Y L, Zhu G Z, Zhu X, et al. Influence of water-jet waveguide with turbulent surface on the optical transmission losses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0116003.
- [55] 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.
- [56] Wagner F R, Boillat C, Buchilly J M, et al. High-speed cutting of thin materials with a Q-switched laser in a water-jet versus conventional laser cutting with a free running laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4977: 70-74.
- [57] Weiss L, Aillerie M, Tazibt A, et al. Surface oxidation and phase transformation of the stainless steel by hybrid laser-waterjet impact[J]. *Materials Research Express*, 2014, 1(3): 036501.
- [58] Porter J A, Louhisalmi Y A, Karjalainen J A, et al. Cutting thin sheet metal with a water jet guided laser using various cutting distances, feed speeds and angles of incidence[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(9/10): 961-967.
- [59] Adelman B, Ngo C, Hellmann R. High aspect ratio cutting of metals using water jet guided laser[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(9/10/11/12): 2053-2060.
- [60] Li C Q, Yang L J, Wang Y. A research on surface morphology of cutting of titanium sheet with water-jet guided laser and conventional laser[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 120: 366-370.
- [61] Diboine J, Martin R, Bruckert F, et al. Towards near-net shape micro-machining of aerospace materials by means of a water jet-guided laser beam [EB/OL]. (2017-06-26) [2021-10-20]. https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution169_final.pdf.
- [62] Gurav M M, Gupta U, Dabade U A. Quality evaluation of precision micro holes drilled using pulsed Nd:YAG laser on aerospace nickel-based superalloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19: 575-582.
- [63] Liu Y Z. Coaxial waterjet-assisted laser drilling of film cooling holes in turbine blades[J]. *International*

- Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 150: 103510.
- [64] 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.
- [65] Marimuthu S, Smith B. Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1/2): 177-191.
- [66] Dushkina N M, Richerzhagen B. Dicing of gallium arsenide (GaAs) wafers with the Laser MicroJet® challenges, improvements and safety issues [J]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2002: 851160.
- [67] Li C F, Johnson D B, Kovacevic R. Modeling of waterjet guided laser grooving of silicon [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(9): 925-936.
- [68] Wang Y, Li L, Yang L J, et al. Simulation and experimental research on water-jet guided laser cutting silicon wafer [C] // 2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, July 28-31, 2008, Shanghai. New York: IEEE Press, 2008: 10205878.
- [69] Zhou W G, Gong K Y, Wan J, et al. Molecular dynamics simulation study on ablation of silicon by water-jet-guided laser [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2017, 231(6): 1217-1225.
- [70] Qiao H C, Cao Z H, Cui J F, et al. Experimental study on water jet guided laser micro-machining of mono-crystalline silicon [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107057.
- [71] 翟兆阳, 梅雪松, 王文君, 等. 碳化硅陶瓷基复合材料激光刻蚀技术研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47 (6): 0600002.
- Zhai Z Y, Mei X S, Wang W J, et al. Research advancement on laser etching technology of silicon carbide ceramic matrix composite [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0600002.
- [72] Marimuthu S, Dunleavy J, Liu Y, et al. Water-jet guided laser drilling of SiC reinforced aluminium metal matrix composites [J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(26/27): 3787-3796.
- [73] 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.
- [74] Sun D, Han F Z, Ying W S. The experimental investigation of water jet-guided laser cutting of CFRP [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (1/2/3/4): 719-729.
- [75] 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.
- [76] 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.

Mechanism and Research Advances of Water-Jet Guided Laser Micromachining

Wang Shuiwang¹, Ding Ye^{1,2*}, Cheng Bai², Li Yuan², Yang Lijun^{2**}

¹ College of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

² Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract

Significance With the rapid development of the national aviation, aerospace, communications, instrumentation, and medical fields, components such as fuel nozzles, solar silicon light panels, semiconductor chips, and heart stents tend to be miniaturized and sophisticated. The quality requirements for structures, such as holes and grooves processed on related materials are increasing, which correspondingly translates into higher processing technology requirements. At present, scholars have developed a variety of processing methods, including but not limited to mechanical machining, electrical discharge machining (EDM), electrochemical processing, and laser processing. During the mechanical machining process, the tool is in direct contact with the workpieces, resulting in significant

stress. EDM is suitable for conductive materials. There is no obvious force during the machining process, but the machining efficiency is generally slow. Electrode loss exists, and the corner radius is limited. The electrochemical processing efficiency is relatively high, and cathode loss is absent. But the processing stability is poor, and the electrolysis product easily results in environmental pollution. Compared with the above processing methods, laser processing has obvious advantages. It has been widely used for drilling, grooving, and cutting operations in the aerospace, microelectronics, precision medical, instrumentation, and other industries. The continuous laser and the long-pulse laser have high processing efficiency. The continuous laser and the long-pulse laser have high processing efficiency. However, the generation of heat-affected zones and recast layers cannot be ignored. To achieve the eruption and removal of the material, the ultrashort pulse laser directly converts the material into a plasma state. The ultrashort pulse can theoretically achieve the effect of “cold processing” but the processing efficiency is low. Nanosecond-level short pulse lasers have lower acquisition costs and a higher material removal rate than ultrashort pulse lasers, but obvious defects such as heat-affected zones, recast layers, and micro-cracks still cannot be avoided. To overcome the thermal defects in the “dry laser” process, domestic and foreign researchers attempt to develop a composite system that combines laser and water. Compared with “dry laser” processing, water-jet guided laser (WJGL) has many advantages—large working distance; no obvious cone, neat cut, and no burrs; small heat-affected zone; almost no thermal deformation and thermal damage; and high processing quality. This work has provided a relatively complete overview of water-jet guided laser processing technology, allowing us to deeply understand the mechanism of water-jet guided laser processing technology, exert its processing advantages, and broaden its application fields.

Progress The work first analyzes the water beam fiber’s formation mechanism, including the formation of a stable water jet, the influence of the nozzle on the water jet, and the water jet’s attenuation and divergence process. Then the influence of the coaxial gas on the stability of the water jet and the situation after the jet hits the surface of the workpiece are analyzed. This work systematically elaborates on the optical properties of water and the conditions of total reflection formation to interpret the coupling process of the laser and the water jet. The factors affecting the coupled energy beam’s stability, as well as the influence of the coupling error on energy distribution and jet stability, are explained. The status of water-jet guided laser applications in aerospace, semiconductor, medical, and other fields is reviewed. Based on the summary of the shortcomings of the current technology and the emergence of new requirements and challenges, the future development trend of water-jet guided laser processing technology has prospected.

Conclusion and prospect This work reviews a series of literature on water-jet guided laser and systematically expounds on its formation mechanism and its application potential.

1) The formation of water jets is discussed. The “cone-down” nozzle makes it easy to form a stable “retracted flow” water jet. Factors, such as environment and nozzle geometry, are related to the breakage of the water jet. The introduction of an auxiliary atmosphere can increase the stable length of the jet, and the jet will form a liquid film after impacting the processing surface.

2) The coupling process of the laser and water jet is discussed. The linear absorption of laser by water is an important factor in energy loss, and the laser energy exceeding the threshold causes stimulated Raman scattering. The laser transmission in the jet can be divided into two types: meridian transmission and oblique ray transmission. The coupling error determines the coupling efficiency and energy distribution, and together with the loss of energy, affects the stability of the coupled energy beam transmission.

3) The excellent performance enables water-jet guided laser to be used in aerospace, chip manufacturing, precision medicine, and other fields to process various difficult-to-process materials such as metals, semiconductors, and composite materials. Modeling and simulation provide appropriate help for understanding the physical mechanisms involved in laser ablation and promote the conduct of related experiments and the extension of the application range of water-jet guided laser.

A large number of studies on water-jet guided laser have strongly proved its application value. However, the processing capabilities of water-jet guided laser are still limited under processing conditions such as high-quality processing requirements and small working spaces. At the same time, the processing technology for difficult-to-process materials such as diamonds, sapphire, and super-hard ceramics still needs to be further explored. To meet these requirements, the possible research directions of water-jet guided laser in the future are as follows:

1) Reduce water jet diameter and transmission energy loss of high-intensity input laser.

2) Research on the law of focus movement due to the thermal interaction between the laser and water during the coupling process.

3) A thorough examination of the interaction principle between laser, water jet, and material during water-jet guided laser processing.

4) Research on the law between the energy distribution of the laser on the machined surface and the evolution of the surface topography.

Key words laser technique; water-jet guided laser; micromachining; coupled energy beam; water jet; processing application