



# 水导激光切割技术研究现状

孙博宇, 乔红超\*, 赵吉宾, 陆莹, 郭跃彬

中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室, 沈阳 110016

**摘要:** 水导激光切割技术是一项利用水束导引激光到加工平面的新型切割技术, 由于其热影响区小、加工精度高、无污染等优点受到了众多研究者的广泛关注。本文首先阐述了水导激光切割利用激光在空气和水交界面发生全发射的原理及其相对于传统激光切割的优势, 其次从理论与工艺两个方面综述了水导激光切割的国内外研究进展, 总结了水导激光设备的发展现状, 最后针对水导激光切割的技术难点进行分析并且展望了该技术未来发展的趋势。

**关键词:** 水导激光; 热影响区; 耦合技术; 喷嘴孔

中图分类号: TN305.1

文献标志码: A

## Current status of water-jet guided laser cutting technology

Boyu Sun, Hongchao Qiao\*, Jibin Zhao, Ying Lu and Yuebin Guo

Equipment Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

**Abstract:** Water-jet guided laser cutting technology is a new type of cutting method which utilizes the water jet to guide the laser to the machining plane. It has been widely concerned by many researchers for its superiorities of small heat affected zone, high precision and no pollution. In this paper, the principle of laser total reflection at the interface of air and water used by water-jet guided laser is firstly introduced, and its advantages compared with conventional laser cutting are also expounded. Besides, the domestic and international research progress of water-jet guided laser cutting is reviewed in term of theory and process. The development status of water-jet guided laser equipment is summarized. Finally, the technical difficulties of water-jet guided laser cutting are analyzed, and the future development trend of this technology is expected.

**Keywords:** water-jet guided laser; heat affected zone; coupling technology; nozzle orifice

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.001

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(11): 1039-1044

## 1 引言

随着医疗、航空、航天、半导体、能源领域的快速发展, 对于关键零部件的性能要求越来越高, 这促进了零件加工方法和设备的改进和提高。在零部件切割领域, 与传统的机械切割和高压水切割相比, 在加工效率、加工精度和环境保护方面, 激光切割具有明

显的优势。激光切割一方面可以满足零件高精度、高效率的要求; 另一方面, 对环境无污染, 符合绿色制造的理念。激光切割的优势, 使其在许多领域都有很好的应用前景。比如在医疗领域中, 随着我国逐步进入老年化社会, 近年来我国血管内支架市场增长率在20%以上, 激光切割技术在血管内支架的加工中有很大的应用潜力<sup>[1]</sup>。但传统激光切割会使材料产生一定程度的热损伤, 在加工心血管支架过程中, 激光能量会使表面形成几微米的浮渣和热影响层, 影响材料使

收稿日期: 2017-08-21; 收到修改稿日期: 2017-10-24

\*E-mail: hcqiao@sia.cn

用性能和寿命<sup>[2]</sup>,这一定程度上限制了激光切割的应用。水导激光切割技术作为一种新型切割技术可以提高材料加工后的表面质量,本文将介绍水导激光切割加工技术的原理和研究发展历程。

## 2 水导激光切割原理与优势

水导激光切割技术是一项以水射流引导激光束对待加工工件进行切割的复合加工技术<sup>[3]</sup>。由于水和空气的折射率不同,在激光束以一定角度照射在水与空气交界面时,如果入射角小于全反射临界角,激光会发生全反射而不会透射出去,这就使激光能量始终被限制在水束中从而使激光沿水束的方向进行传播。激光传导原理如图1所示<sup>[4]</sup>,激光经过凸透镜聚焦后通过石英玻璃窗体进入到耦合水腔,通过调整聚焦透镜与小孔喷嘴之间的距离,使激光焦点刚好处于小孔喷嘴上表面中心,然后进入稳定的水射流中,利用水与空气折射率的不同,在水射流中发生全反射,类似于传统玻璃光纤的传播方式。加工时,聚焦到喷嘴位置的激光束由高压水束引导传输到工件表面。

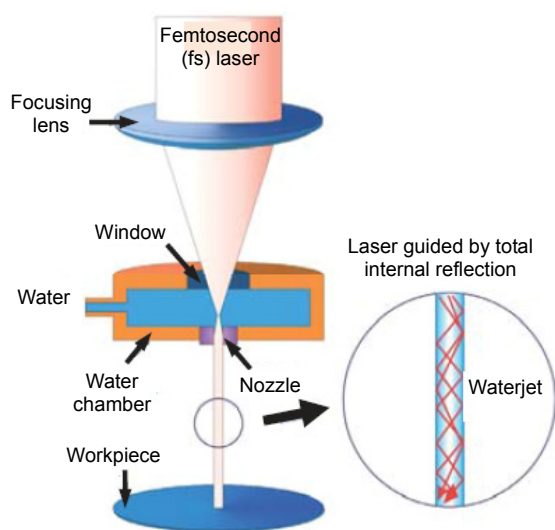


图1 水导激光切割加工的基本原理<sup>[4]</sup>。

Fig. 1 The basic principle of water-jet guided laser cutting<sup>[4]</sup>。

水导激光切割与传统激光切割<sup>[5-7]</sup>相比有以下几个优势:1)最大不同处就是它不会产生热损伤(如图2所示<sup>[8]</sup>),这是因为喷射的水流可以在激光脉冲间隙冷却材料,极大地降低材料的热变形和热损伤,使材料保持其原来结构;2)水光纤工作距离大,不需要聚焦;3)喷射水流会在切割过程中带走熔融的材料,减少了污染物;4)加工精度高于传统的激光加工精度,

特别适用于薄壁件的高精度加工。

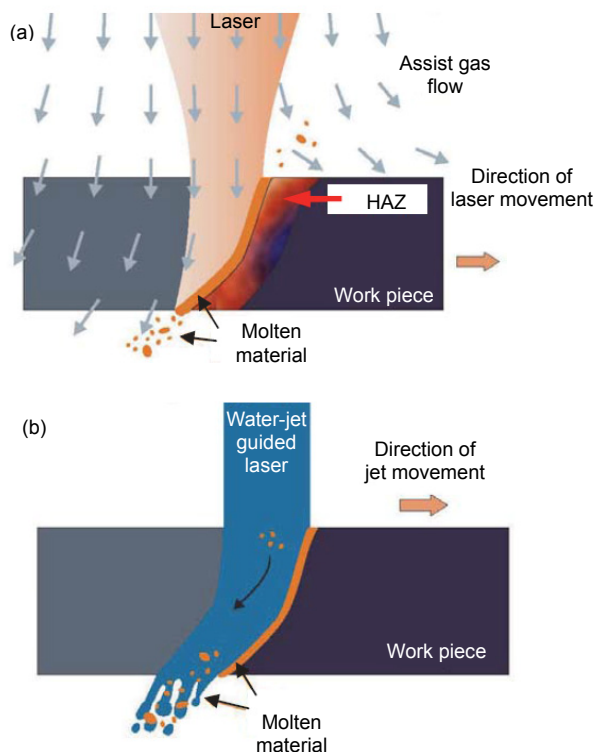


图2 激光切割与水导激光切割的加工示意图<sup>[8]</sup>。(a)传统激光(热损伤区大)。(b)水导激光(热损伤区极小)。

Fig. 2 Processing sketch diagram of Laser cutting and water-jet guided laser cutting<sup>[8]</sup>。(a) Conventional laser cutting (large thermal damage area). (b) Water-jet guided laser cutting (small thermal damage area).

## 3 水导激光切割相关理论研究

1993年,瑞士学者 Richerzhagen<sup>[9]</sup>对激光在水束中传播现象进行系统的研究,并在瑞士洛桑成立了从事水导激光研发和产业化的 Synova 公司。水导激光切割技术在加工领域中的优越性引起了国内外学者对水导激光加工相关原理和关键技术的研究兴趣,这为水导激光的发展和应用提供了相应的理论依据,极大地促进了水导激光的发展。对于激光在水中传输情况,在1996年,Richerzhagen等<sup>[10]</sup>研究了激光束在静水中聚焦的现象,并建立了热散焦数学模型,结果表明,模拟值与测试值一致性很好。2004年 Kruusing<sup>[11,12]</sup>研究了不同波长的激光在水束中的衰减程度,研究表明,波长处于绿光范围内的激光被水束吸收的能量最小。不同波长的激光在水中衰减后能量密度为

$$P_2 = P_1 \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right), \quad (1)$$

式中: $P_1$ 、 $P_2$ 为入射前后激光功率(单位:W); $L$ 、 $L_0$

为激光距水面实际长度和吸收长度(单位: mm),从而为水导激光加工中激光波长和水束长度的选择提供了依据。Kruusing 还总结了两种激光加工技术水辅助和 underwater 激光加工的方法和特点,详细描述了水的冷却作用,并展望了此加工技术在医疗上的应用前景。Spiegel<sup>[13]</sup>研究了激光在水射流传播的拉曼散射现象,发现水射流距离较远时,相对于功率密度小的激光,功率密度大的激光会产生更强的非线性受激拉曼散射现象,从而一定程度上指导了水导激光加工激光功率参数的选择。陈笑<sup>[14]</sup>从理论和实验上研究了高功率激光与液体中物质相互作用过程中激光等离子体冲击波的传播特性,丰富了水导激光切割激光在水中传播的依据。Couty<sup>[15]</sup>系统地研究了不同直径水流和光斑偏心距离等参数对激光能量密度分布影响,发现激光在水中的传导类似于在多模光纤中的传输,并提出了一种表征水束激光能量分布的数学模型,经过参数优化后,使水导激光加工时激光在导光水束中能量分布更均匀,从而解释了水导激光切割不需要聚焦的优越性,并据此对优化水导激光加工的耦合条件提出了建议。

对于水导激光与材料相互作用的情况,部分学者建立了相关的理论模型,从而对工艺参数优化具有一定的指导作用。郭跃彬等<sup>[16]</sup>建立了一种基于脉冲激光器高斯能量分布的热通量模型,在模型中通过公式对脉冲激光器能量、体积热通量、衰减系数等参数进行定义并通过实验验证了模型的准确性,从而能够对传统激光切割中切口宽度和热影响区进行准确预测,该模型可以为水导激光切割建模提供一定的参考。Li 等<sup>[17]</sup>提出了一种水导激光切割硅的数学模型,用于研究激光、水和工件之间的相互作用和热加工过程,并通过实验验证了仿真结果的准确性,但结果仅局限于材料硅。Yang 等<sup>[18,19]</sup>建立了水导激光加工与材料之间的数值模型,研究了加工中的加工规律和温度场的分布,并通过相关实验验证了模型的可行性。王扬等<sup>[20]</sup>建立了针对水导激光切割硅片激光能量输入,水射流的冷却效果以及硅的熔化和去除的数学模型,其中水射流冷却模型如式(2)所示:

$$N_u = \begin{cases} 0.715R_e^{1/2}P_r^{0.4}, & 0.15 < P_r < 3 \\ 0.797R_e^{1/2}P_r^{1/3}, & P_r < 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N_u$  为努塞尔数,  $R_e$  为雷诺数,  $P_r$  为普朗特数。利用模型对加工参数进行优化,并在实际切割硅片中,达到几乎没有毛刺、裂纹、热影响区的加工效果,切割结果优于传统激光切割。詹才娟等<sup>[21,22]</sup>研究了水导

激光精密打孔的动力学过程和热力学过程,建立了针对打孔过程中熔池内部的流动和传热的数值模型,得到了不同时间熔池内部温度和流场的分布规律。

#### 4 水导激光切割工艺与设备的研究

在理论研究的同时,水导激光相关的工艺与设备也逐步被学者们研究与发展。Wagner 等<sup>[23]</sup>对比了水导激光切割和传统激光切割的加工效果,发现在相同切割速度切割 150  $\mu\text{m}$  不锈钢薄板时,水导激光切割件在毛刺程度、加工锥度和热影响区方面相比传统激光切割件具有一定优势,加工对比图如图 3 所示,从图中可以看出,使用传统激光切割会产生 12  $\mu\text{m}$  厚的热影响层,而使用水导激光切割技术则基本无热影响区。Reshed 等<sup>[24]</sup>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,3D 表面形貌如图 4 所示,并从加工锥角、表面形貌和粗糙度等方面表征了切割后的表面质量,发现在各个方面水导激光切割的表面质量均优于微细电火花加工,从而得出水导激光加工可以一定

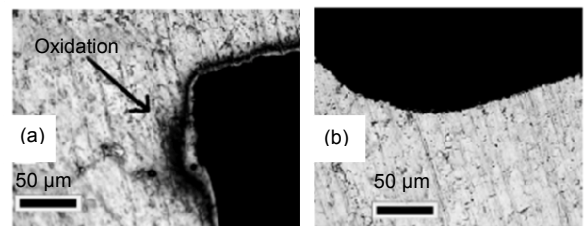


图 3 激光切割与水导激光切割加工不锈钢对比图<sup>[23]</sup>。(a) 传统激光切割。(b) 水导激光切割。

Fig. 3 Processing stainless steel comparison of laser cutting and water-jet guided laser cutting<sup>[23]</sup>. (a) Conventional laser cutting. (b) Water-jet guided laser cutting.

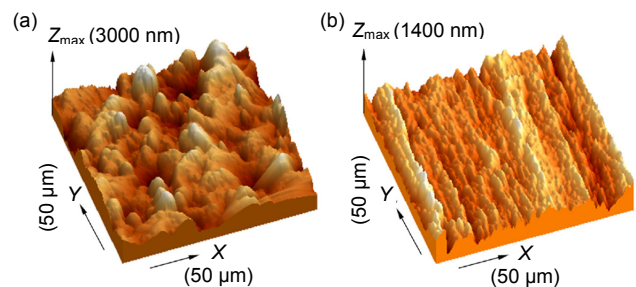


图 4 微细电火花加工与水导激光切割加工不锈钢表面形貌对比图<sup>[24]</sup>。(a) 微细电火花加工。(b) 水导激光切割。

Fig. 4 Stainless steel surface morphology comparison of micro EDM and water-jet guided laser cutting<sup>[24]</sup>. (a) Micro EDM. (b) Water-jet guided laser cutting.



程度上代替电火花加工。李灵等<sup>[25]</sup>针对水导激光技术进行了试验研究,发现了激光能量衰减与水射流稳定性有关的实验现象,并对硅片的切割中脉冲能量、加工速度、工作距离等工艺参数进行了优化,切割后的硅片毛刺、裂纹、热影响区较少,加工效果良好。Weiss等<sup>[26]</sup>研究了使用大功率激光器的水导激光加工对不锈钢表面氧化和相位变化的影响,详细分析了在加工过程中铁的相变情况,并发现氧化区的宽度与切割速度成比例的实验现象。Adelmann<sup>[27]</sup>研究了激光功率等工艺参数对切割深度的影响,并通过实验分析了三种不同材料的最大切割深度,结果显示,切割铝片的宽深比为 66.7 远大于切割钛片的 39.2 和钢片的 12.5, Adelmann 还发现切口宽度通常在 100  $\mu\text{m}$ ~120  $\mu\text{m}$  之间,与所选择的工艺参数和切割深度无关。Ng<sup>[28]</sup>研究了喷嘴直径为 30  $\mu\text{m}$  的水射流最长稳定长度以及最佳喷嘴水流速度,喷嘴直径减少使切割宽度减少,从而提高了水导激光切割的精度。



图5 Synova公司LCS300微水导激光加工机床<sup>[37]</sup>.  
Fig. 5 The Synova's LCS300 laser-microjet machine<sup>[37]</sup>.

近年来,学者们对水导激光切割不同材料不同工艺进行了广泛的研究,材料从最初的钢、硅发展到镁、钛合金再到金刚石、PCBN等多种难加工材料<sup>[29,31]</sup>,很多学者对于扩大水导激光的应用领域做出了贡献。2007年,Kray等<sup>[32]</sup>将水导激光技术应用于硅太阳能电池板磨边加工领域,优化了工艺参数,发现使用该技术在中结构损伤和稳定性方面都有更好的效果。Porter等<sup>[33]</sup>研究了水束长度在50mm以内,加工参数对切割薄钢片的加工效果的影响,文中还研究了倾斜

放置工件的加工效果,为后续水导激光切割复杂曲面零件提供了研究基础。Mai等<sup>[34]</sup>用水导激光技术加工了砷化镓、硅等不同材料的小尺寸结构,均取得良好的效果,扩展了水导激光切割的应用。Brecher<sup>[35]</sup>针对现有的水导激光切割无法匹配大功率激光器的问题,建立了激光在水束中传热的数学模型,并通过实验研究了喷嘴孔直径、水压力、激光初始能量等工艺参数对水束温度和激光能量损失率的影响,此外,他还展望了大功率水导激光切割具有很高的应用潜力和市场。在环境保护方面,水导激光切割技术也具有一定优势,Chida<sup>[36]</sup>等研究使用水导激光切割退役核反应堆钢板的加工情况,在激光切割中产生的放射性烟雾会被水吸收,与传统激光切割相比更有利于环境保护,经过工艺参数的优化,该技术能够切割50mm厚的钢板。

在国际上,瑞士在设备开发方面取得比较大的进展,1997年,瑞士Synova公司对微射流水导激光技术进行系统的开发,其用一束低压(50~500 bar)(1 bar=10<sup>5</sup> Pa)、经过过滤的水射流用来引导双频Nd:YAG产生的激光束加工工件。Synova公司将水导激光切割技术应用到难加工材料激光切割和晶圆切割领域,推出了一系列设备,如LCS系列的水导激光切割系统(图5)和LDS系列的激光划片系统<sup>[37]</sup>。Synova公司的水导激光技术已达工业应用标准,比如其LCS300型号设备,加工精度为 $\pm 3 \mu\text{m}$ ,重复精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ ,适合多种难加工材料的切割、钻孔、开槽、打标等精细加工。使用该设备切割难加工材料如多晶金刚石刀具的加工速度在5 mm/min以上,切口宽度小于30  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度小于0.15  $\mu\text{m}$ ,加工表面无热影响区。但是其价格非常昂贵,一台水导激光加工切割机床需要100万瑞士法郎以上,而且很多工艺和技术对我国并不开放。

国内相关设备发展较为缓慢,我国现阶段还没有达到制造工业级水导激光设备的水平。李灵等<sup>[38]</sup>研究了水导激光光液耦合技术,针对现有的光液耦合问题,设计了一个激光束通过聚焦凸透镜直接进入水射流的耦合装置并通过相应的耦合对准检测系统对其进行调整。该整体耦合系统能够较好地满足加工硅片加工需求。叶瑞芳等<sup>[39]</sup>针对现有的水导激光切割耦合装置制造难度大的缺点,设计了一种通过轴棱镜代替聚焦透镜的耦合装置,实现水射流与无衍射光束的耦合,从而扩大了激光与水束的耦合区域,降低了耦合装置制造难度。Li等<sup>[40]</sup>发明了一种检测光电耦合的方法,具

体结构为在路径上放置一个透射镜,阻止水流流过并通过观测光斑图案来调节光液相对位置,从而使光液更好的耦合,该方法具有一定的实用性但实际应用时会影响加工效率。杨保健等<sup>[41]</sup>设计一种双注水口水导激光切割耦合装置,并通过 FLUENT 软件进行耦合腔内的多场分析,得到了相关的工艺参量。

## 5 水导激光切割的技术难点及发展趋势

1) 激光在水束衰减问题:大功率密度激光在水束中能量衰减幅度较大,限制了水导激光技术的加工效率和应用范围,导致目前使用该技术切割难加工材料速度较慢,如切割 18 mm 厚碳纤维复合材料速度仅为 5 mm/min。激光在水中的衰减问题没有很好地解决,未来或选用导光效果更好的介质引导激光。

2) 水射流微细化:水导激光的水射流的直径影响切割宽度,从而影响切割精度,目前工艺可以使喷嘴直径达到 30  $\mu\text{m}$ 。喷嘴直径越小,水射流直径越小,切割精度越高。但缩小喷嘴直径会影响水束稳定性、水束长度、光斑直径等一系列问题,在此方面有很大的研究潜力,从而提高水导激光加工精度。

3) 喷嘴孔加工:为了保证高品质的水束,要求喷嘴孔的厚度很薄,圆柱形喷嘴孔无锥度、圆度好、具有一定的刚度抵御水流冲击,喷嘴孔的圆柱表面粗糙度很小,具有较高的制造精度和安装精度。以上高精度高质量要求增加了喷嘴孔制造的难度。

4) 耦合对准控制系统:激光束与水束快速精确耦合对准问题到现在为止还没有彻底解决,设计装备时需要选用高精度的伺服驱动控制机构,配合十分精确、可靠的水束光纤与聚焦激光耦合对准检测系统、工件定位检测系统,从而保证光液耦合的准确性。

5) 工艺研究:水导激光加工过程工艺控制方面存在很多问题,缺乏完整的加工工艺与评价体系,加工效率、加工精度、材料表面完整性等指标很难保证,需要进行系统的研究和总结。

## 6 结论

水导激光切割技术在国外已经实现工业化应用,而在我国对相关技术的研究还比较落后。在设备制造方面,我国尚未完全掌握水导激光切割设备开发的核心关键技术,特别是光液耦合技术和喷嘴孔制造技术,其制造装备完全依赖进口,核心技术对我国封锁,阻

碍该技术在我国的的发展。本文首先从理论和工艺两个方面详细阐述了国内外研究人员对水导激光切割的研究进展。研究者们针对水导激光切割的加工质量,从不同的角度进行了实验和理论研究,并研发了一些相关装备。然而,一些问题解决得并不彻底,仅适用于特定的实验条件。最后针对水导激光切割的技术难点进行分析并且展望了该技术未来发展的趋势。在将来的研究中,还需要进一步开展水导激光切割的理论实验研究,加快装备的开发,缩小与国外上的技术差距。

## 基金项目

国家自然科学基金(51501219) ;国家科技支撑计划(2015BAF08B01-01)资助课题。

## 参考文献

- Zhou Yongheng, Liao Jianhong, Meng Hongyun, et al. Laser micro-fabrication of endovascular stent [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(3): 161-164.  
周永恒, 廖健宏, 蒙红云, 等. 血管内支架的激光精细切割技术[J]. *应用激光*, 2005, **25**(3): 161-164.
- Sealy M P, Guo Y B, Liu J F, et al. Pulsed laser cutting of magnesium-calcium for biodegradable stents[J]. *Procedia CIRP*, 2016, **42**: 67-72.
- Sun Hongxin. Water-jet guided laser processing technology[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 1998, **11**(3): 35-38.  
苏红新. 水导激光加工技术[J]. *光电子技术与信息*, 1998, **11**(3): 35-38.
- Perrotet D, Housh R, Richerzhagen B, et al. Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5713**: 285-293.
- Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 603004.  
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): 603004.
- Wang Xuhuang, Yao Jianhua, Zhou Guobin, et al. Numerical simulation and experiment of laser cutting liquid crystal display glass substrates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(6): 603003.  
汪旭煌, 姚建华, 周国斌, 等. 液晶玻璃基板激光切割数值模拟与实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 603003.
- Wang Yang, Li Chunqi, Yang Lijun, et al. Research on unconventional laser machining[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 448-454.  
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.
- Li Ling. Study on water-jet guided laser micromachining technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.  
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.
- Richerzhagen B. Entwicklung und konstruktion eines systems zur uebertragung von Laserenergie für die Laserzahnbehandlung[D]. Lausanne: EPFL, 1994.

- 10 Richerzhagen B, Delacrétez G P, Salathé R -P. Complete model to simulate the thermal defocusing of a laser beam focused in water[J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(7): 2058–2067.
- 11 Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(2): 307–327.
- 12 Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 2—Etching, cutting and rarely used methods[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(2): 329–352.
- 13 Spiegel Á, Vágó N, Wagner F R. High efficiency Raman scattering in micrometer-sized water jets[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(2): 450–455.
- 14 Chen Xiao. Studies on mechanisms of the interaction between high-power laser and matter in water[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.  
陈笑. 高功率激光与水下物质相互作用过程与机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- 15 Couty P, Wagner F R, Hoffmann P W. Laser coupling with a multimode water-jet waveguide[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(6): 068001.
- 16 Fu C H, Guo Y B, Sealy M P. A predictive model and validation of laser cutting of nitinol with a novel moving volumetric pulsed heat flux[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, **214**(12): 2926–2934.
- 17 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.
- 18 Yang Lijun, Wang M L, Wang Yang, et al. Numerical simulation on the temperature field of water-jet guided laser micromachining[J]. *Advanced Materials Research*, 2009, **69–70**: 333–337.
- 19 Yang Lijun, Wang Maolu, Wang Yang, et al. Numerical and experimental research on water-jet guided laser micromachining[J]. *Materials Science Forum*, 2009, **626–627**: 297–302.
- 20 Wang Yang, Li Ling, Yang Lijun, et al. Simulation and experimental research on water-jet guided laser cutting silicon wafer[C]// *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2008. Shanghai, China, 2008: 1–6.
- 21 Zhan Caijuan, Li Changfeng, Pan Yongchen, et al. Analysis of fluid flow in micro-waterjet guided laser precision drilling process[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2011, **32**(2): 159–165.  
詹才娟, 李昌峰, 潘永琛, 等. 微水射流导引激光精密打孔过程的流动分析[J]. *力学季刊*, 2011, **32**(2): 159–165.
- 22 Zhan Caijuan, Li Changfeng, Wang Rui, et al. Analyses of heat transfer in micro-waterjet guided laser drilling process[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(1): 111–114.  
詹才娟, 李昌峰, 王瑞, 等. 微水射流导引激光打孔的传热分析[J]. *工程热物理学报*, 2011, **32**(1): 111–114.
- 23 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**: 70–75.
- 24 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.
- 25 Li Ling, Wang Yang, Yang Lijun, et al. Experimental research on water-jet guided laser processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6595**: 659525.
- 26 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.
- 27 Adelmann 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**(9–12): 2053–2060.
- 28 Ng E Y -K, Guannan D. The stability of 30- $\mu$ m-diameter water jet for jet-guided laser machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **78**(5–8): 939–946.
- 29 Li Chunqi, Yang Lijun, Wang Yang. Experimental study on water-jet guided laser machining magnesium alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2012, **723**: 476–480.
- 30 Li Chunqi, Yang Lijun, Wang Yang. A research on surface morphology of cutting of titanium sheet with water-jet guided laser and conventional laser[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, **120**: 366–370.
- 31 Li Chunqi, Yang Lijun, Wang Yang. Investigation on water-jet guided laser cutting of titanium alloy thin sheets[J]. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 2012, **30**(1): 481–488.
- 32 Kray D, Hopman S, Spiegel A, et al. Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with waterjet-guided laser[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, **91**(17): 1638–1644.
- 33 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]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **33**(9–10): 961–967.
- 34 Mai T A, Richerzhagen B, Snowdon P C, et al. The Laser MicroJet (LMJ): a multi-solution technology for high quality micro-machining[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6459**: 64590P.
- 35 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.
- 36 Chida I, Shiihara K, Nomura K, et al. Decreasing Waste of Laser Cutting by Metal Fume Capturing With Water[C]// *American Society of Mechanical Engineers. 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering*, 2014: V004T08A004-V004T08A004.
- 37 Synova. The products of LCS 300[EB/OL]. <https://www.synova.ch/products/tool-cutting-systems/item/64-lcs-300.html>.
- 38 Li Ling, Yang Lijun, Wang Yang, et al. Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet guided laser micromachining[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1614–1621.  
李灵, 杨立军, 王扬, 等. 水导激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1614–1621.
- 39 Ye Ruifang, Shen Yang, Wang Lei, et al. Novel coupling system of water-jet guided laser[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2009, **48**(3): 369–372.  
叶瑞芳, 沈阳, 王磊, 等. 新型水导引激光耦合系统研究[J]. *厦门大学学报(自然版)*, 2009, **48**(3): 369–372.
- 40 Li Meng, Zhang Wenwu, Zhang Xiping, et al. A simple optical coupling method for water-jet guided laser machining system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **541–542**: 774–779.
- 41 Yang Baojian, Xie Shunde, Dai Fu. Design of coupling device for laser cutting guided by water beam[J]. *Laser Technology*, 2017, **41**(2): 247–250.  
杨保健, 谢顺德, 代福. 微水导激光切割玻璃的耦合装置设计[J]. *激光技术*, 2017, **41**(2): 247–250.