

射流水波导表面轮廓特性对传输损耗的影响

邱禹力^{1,2} 朱广志^{1,2} 朱 晓^{1,2} 陈永骞^{1,2} 朱 琛^{1,2}

¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

²华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 基于流体理论分析不同区段的射流界面特征,利用高速数码相机拍摄射流水波导的气液交界面形态,选择恰当的图像处理算法提取并重构射流界面轮廓,根据重构的三维光学模型进行光线追迹仿真,最终获得射流波动段的损耗特性。结果表明,射流界面的波动振幅和频率将直接影响光线在其内部的全内反射传输。处于波动开始阶段的射流,由于波动幅度和频率相对较小,不能引起传输损耗。当射流界面波动达到一定程度时,其损耗特性开始逐渐显现,从而影响微细水射流作为介质波导的传输能力。

关键词 波导; 水射流; 全内反射; 光线追迹

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0116003

Influence of Water-Jet Waveguide with Turbulent Surface on the Optical Transmission Losses

Qiu Yuli^{1,2} Zhu Guangzhi^{1,2} Zhu Xiao^{1,2} Chen Yongqian^{1,2} Zhu Chen^{1,2}

¹*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

²*National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract Shapes of a water-jet in different regimes are analyzed on the basis of fluid theory. High speed photography is used to record the turbulence of the water-air interface. The water-jet contours are detected and reconstructed by using digital image processing algorithms. The ray tracing method is employed to investigate the optical losses produced by the surface perturbation. The results show that the amplitude and frequency of turbulence have a great impact on light propagation under the effect of total internal reflection. At the stage of incipient turbulence, no optical losses is caused since the wave amplitude and frequency are the relatively small. But when the amplitude and frequency of turbulence exceed certain threshold values, the power losses tend to increase so that it weakens the ability to guide light of water-jet in this kind of situation.

Key words waveguides; water jet; total internal reflection; ray-tracing

OCIS codes 230.7370; 350.4600; 140.3510

1 引言

射流水波导作为多学科交叉的一种复合新型技术,近年来在激光加工、流体光学等领域有着广泛的应用。相比于传统的加工处理方式,如高压水切割、直接激光切割等^[1-2],具有热影响区小、工作距离长的优势,能够实现金属板材、硬质材料等的高精度加工处理^[3-4]。此外,由于液态水和空气的相对折射率差较大,射流水波导通常具有较高的数值孔径(NA)(约 0.879),对传输光线的约束能力强于普通石英光纤。因此,基于这

收稿日期: 2015-09-02; 收到修改稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(61475057)

作者简介: 邱禹力(1989—),男,硕士研究生,主要从事高功率传输光纤方面的研究。E-mail: andrew.qiu@live.com

导师简介: 朱 晓(1963—),男,博士,教授,主要从事激光技术、激光加工方面的研究。

E-mail: zx@hust.edu.cn(通信联系人)

种形式的光波导器件可用于抑制拉曼散射中的背景噪声、实现光谱探测的灵敏度提升^[5-6],从而较为灵活地用于自然水体成分检测^[7]。

为了解决射流水波导在实际应用中碰到的各种问题,现有的研究主要归结为3个方面:1)通过分析射流水波导的流体动力学性质,帮助理解射流形态的演变机理^[8],优化射流系统的参数指标^[9-10]。比如,射流破碎长度与喷嘴直径、水束流速等参量均有一定关联。利用这个特点,可以确定出它们之间的最佳对应关系;2)侧重研究射流水波导与物质材料的相互作用,从传热模型^[11]、动力学仿真^[12]等角度提出加工效果的改善方法;3)探讨射流水波导具有的光学性质,如受激拉曼散射的光强阈值^[13]、传输模式特性^[14],为实际应用中的耦合参数选择提供指导。然而,这些研究中很少有射流水波导的传输损耗分析,特别是表面轮廓波动造成全反射条件破坏而引起的,因此有必要对此进行讨论分析。

在流体理论的基础上,分析了射流水波导在不同区间的表面轮廓形态,利用高速数码摄影技术获得了它在稳定、波动和破碎3个阶段的瞬态图像。采用图像处理技术提取并重构了波动段的三维实体模型,通过仿真获得了光线在水波导中的传输损耗特性,并将这种特性与其轮廓波动的影响相互联系起来。该方法对现有的射流水波导研究具有很好的补充作用,使得对它的光学特性有更深入的认识。

2 理论模型

处于稳定状态的射流水波导多呈现圆柱状,没有明显的发散趋势,因此在气液交界面上光线容易产生全内反射现象。这段的传输损耗以介质吸收、散射衰减为主^[13]。但随着传输距离的逐渐增加,射流受到的各种扰动开始增强。在表面张力的作用下,射流界面会出现非周期性的波动^[15]。Sterling等^[16]提出的线性稳定理论中认为,射流界面上的波动形式可分解为若干傅里叶分量的线性叠加。如果忽略波动随时间的变化,关注某一特定时刻的射流形态,则其轮廓曲线近似描述为

$$h(z) = h_0 + \sum_{i=1}^n h_i \cdot \sin(k_i z + \varphi_i), \quad (1)$$

式中 h_0 为稳定射流的轮廓宽度, h_i 为扰动分量的基准幅值, k_i 和 φ_i 分别为正弦扰动的波数和初相位。射流坐标的原点规定为平口喷嘴的出口处,即 $z=0$ 。

光线在上述波动段中传输,很可能因为射流界面的弯曲变形而发生泄漏,从而使几何偏折损耗成为主导损耗。如图1所示,光线在弯曲界面上的损耗特性类似于圆形波导中的微弯损耗^[17],只不过微弯损耗源自制造缺陷,而非波导的固有属性。假设轮廓曲线的一阶导数为 $h'(z)$,有

$$\tan \theta = \frac{-1}{h'(z)}, \quad (2)$$

$$\theta = \alpha + \beta, \quad (3)$$

式中 θ 为界面法线同射流轴线的夹角。而当射流全内反射角 α_m 不变时,处于下降趋势的波动界面,即 $h'(z) < 0$,将更容易发生漏光。

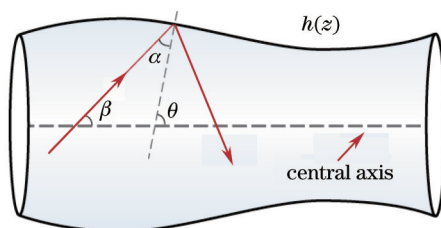


图1 光线在波动射流界面上的全内反射特性

Fig.1 Total internal reflection at the water - air interface

当射流界面的波动幅度过大时,又会引起断裂现象发生,缺乏基本的导光能力。因此,获取射流形态将是分析的关键步骤。如图2所示,整个分析流程按如下步骤进行:

1) 把采集到的射流图像应用适当的灰度变换,以增强目标物体的对比度。再利用 Canny 边缘检测算法^[18]提取出相应的轮廓图样;

2) 通过3次样条插值算法计算轴线上各点的射流宽度 $h(z)$ 以及对应的垂线与边界的交汇点。根据获得的轮廓数据, 重构出具有旋转对称性^[19]的三维射流模型, 应用到下一步的光学仿真分析中;

3) 由于射流宽度远大于激光波长, 且数值孔径较大, 一般很难用波动理论对数目庞大的传输模式进行精确分析。在这种情况下, 蒙特卡洛三维光线追迹法成为了较好的分析手段^[20]。这种方法通过追迹具有代表性的光线经过光学系统的准确路径, 记录整个过程的能量变化, 来反映射流破碎前的传输特性, 具有简单高效的優勢;

4) 探讨光线在射流界面的波峰与波谷之间传输具有何种损耗特点。

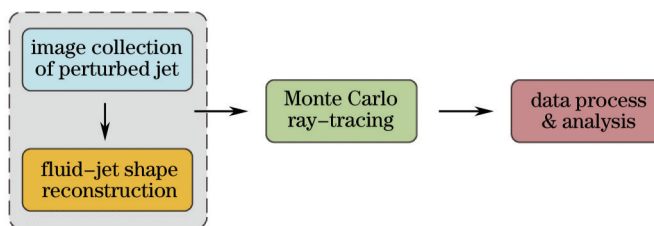


图2 射流波导的传输特性分析实现框图

Fig.2 Schematic diagram of beam propagation analysis in water-jet waveguide

3 射流水波导的轮廓重构及光学仿真分析

3.1 光学模型重构

实验装置如图3(a)所示, 采用的平口喷嘴直径约 $800\ \mu\text{m}$, 流速选取为 $4.3\ \text{ml/s}$ ^[21-22], 此条件下获得的锥形缩流能有效避免激光束与喷嘴壁的接触^[23], 利于获得良好的射流水波导。射流水波导的瞬间界面波动用NAC公司的高速摄影相机记录, 参数设定为曝光时间 $10\ \mu\text{s}$ 、采集帧率 $500\ \text{fps}$ 、分辨率 $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$; 微距镜头放大率为 $1:1$; 辅助光源采用功率为 $70\ \text{W}$ 的发光二极管(LED)冷光源。进行拍摄时, 高速相机、辅助光源沿垂直方向整体移动, 捕捉射流从稳定、波动到破碎的变化趋势, 其示意图如图3(b)所示。

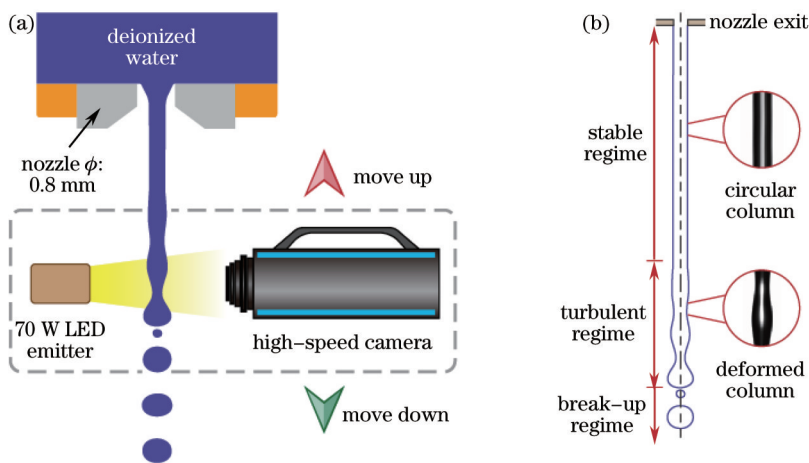


图3 射流图像采集原理示意图。(a) 高速摄影系统; (b) 射流水波导不同区间的轮廓特性

Fig.3 Schematic diagrams of water-jet image collection. (a) High-speed photography system; (b) dissimilar shapes in different parts of water-jet waveguide

忽略射流的破碎区域不计, 高速数码相机采集的射流长度为 $255\ \text{mm}$, 其中包含稳定段 $193\ \text{mm}$ 、波动段 $62\ \text{mm}$ 。由于波动段的界面轮廓发生了形变, 不再是稳定段里的圆柱状, 所以把它的不同波动阶段提取出来研究, 如图4(a)所示。根据图示的提取结果, 用(1)式描述的波动形式进行数值拟合, 其轮廓重构数据如图4(b)~(d)所示, 其中方差(SSE)用以表征拟合误差。

为了对射流界面的波动程度进行评价, 这里定义两个特征参量: 波动振幅 h_{max} 表示各个波峰的幅值, 射流波长 λ_p 表示波峰之间的轴向距离。将图4(b)~(d)中的对应数据提取出来, 其界面波动规律如图5所示。

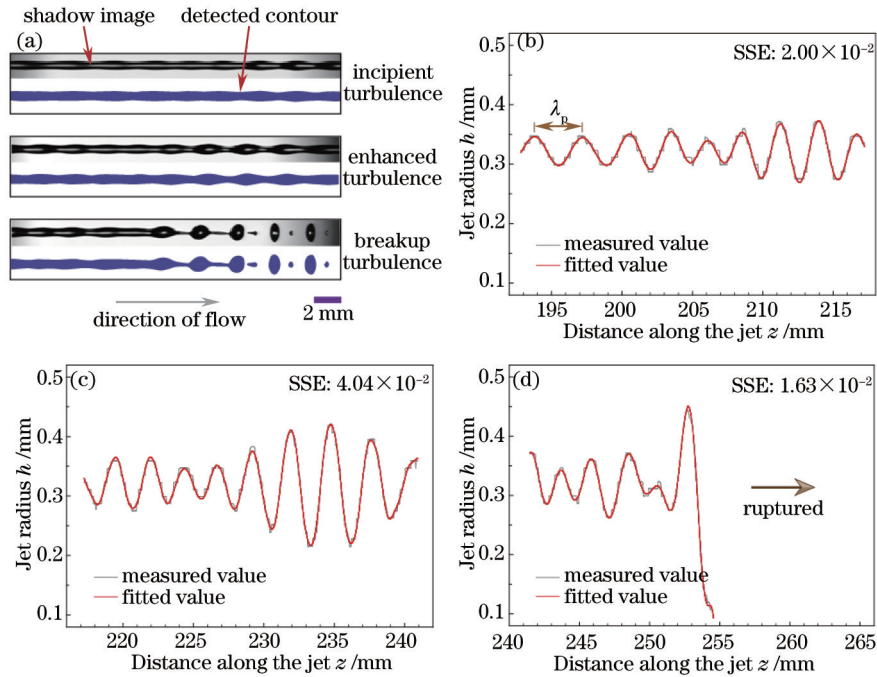


图4 射流波动段的界面形态提取结果。(a) 3个不同波动阶段的原始照片和轮廓提取结果;(b) 波动开始阶段的射流宽度随喷射距离的变化曲线;(c) 波动增强阶段的射流宽度随喷射距离的变化曲线;(d) 破碎形成阶段的射流宽度随喷射距离的变化曲线
 Fig.4 Detected edges of water-jet waveguide in the turbulent regime. (a) Shadow images and contours of the three turbulent regimes; (b) jet radius versus distance along the jet at the stage of incipient turbulence; (c) jet radius versus distance along the jet with the enhanced turbulence; (d) jet radius versus distance along the jet before water-jet breakup

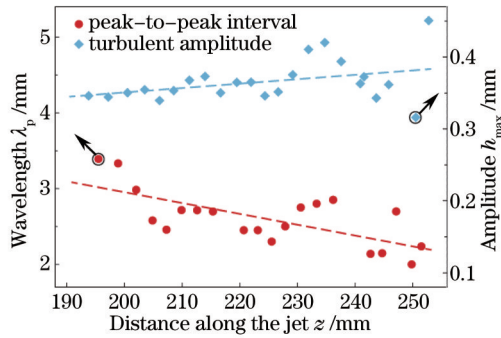


图5 界面波动振幅和射流波长的变化规律

Fig.5 Turbulent amplitude and wavelength versus distance along the jet

从图5中可以看出,在射流出现波动的开始阶段,气液交界面的波动幅值(h_{max})较小、波峰间距(λ_p)较大,说明波动变化的程度还比较弱。随着喷射距离的逐渐增加,射流在受到外界干扰后,交界面上的波动开始变得剧烈,波动幅值和波动频率($\sim 1/\lambda_p$)均有明显上升。由于这种波动变化可能会使光线偏折出去,因此有必要使用光线追迹仿真获得更进一步的分析结论。

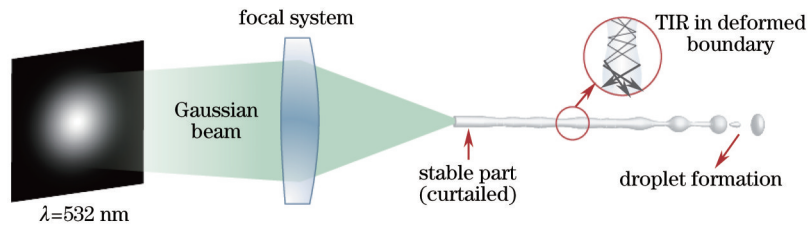


图6 三维光线追迹仿真模型示意图

Fig.6 Three-dimensional ray-tracing propagation model in the turbulent regime

3.2 基于光线追迹的传输损耗分析

图6为对射流水波导的三维光线追迹模拟原理图。高斯光源的波长设定为532 nm,这样能够降低纯水对谱线的吸收影响,减少热积累带来的干扰因素^[13]。同时,在考虑一定的光束发散角时,就要保持石英镜组的有效焦距(EFL)固定。否则,当耦合角度改变时,喷嘴处的聚焦光斑尺寸也会改变,这样不利于进行对比分析。根据这种思路,设计了两组仿真模型参数如表1所示。

表1 追迹仿真采用的两组设定参数

Table 1 Two sets of parameters for ray-tracing simulation

Incidental NA	Source light-emitting area /mm	Beam divergence /mrad	EFL of coupler /mm
0.16	12.8	10	40
0.30	24.8	10	40

以上两种条件下射流界面轮廓(灰色区域)与传输损耗的对应关系如图7所示,它们分别对应了图4(b)~(d)所示的射流区间。同时,为了较为直观地评估射流损耗特性,定义传输效率 η 来表征损耗变化:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (4)$$

式中 P_{in} 和 P_{out} 分别为注入和输出的光功率。

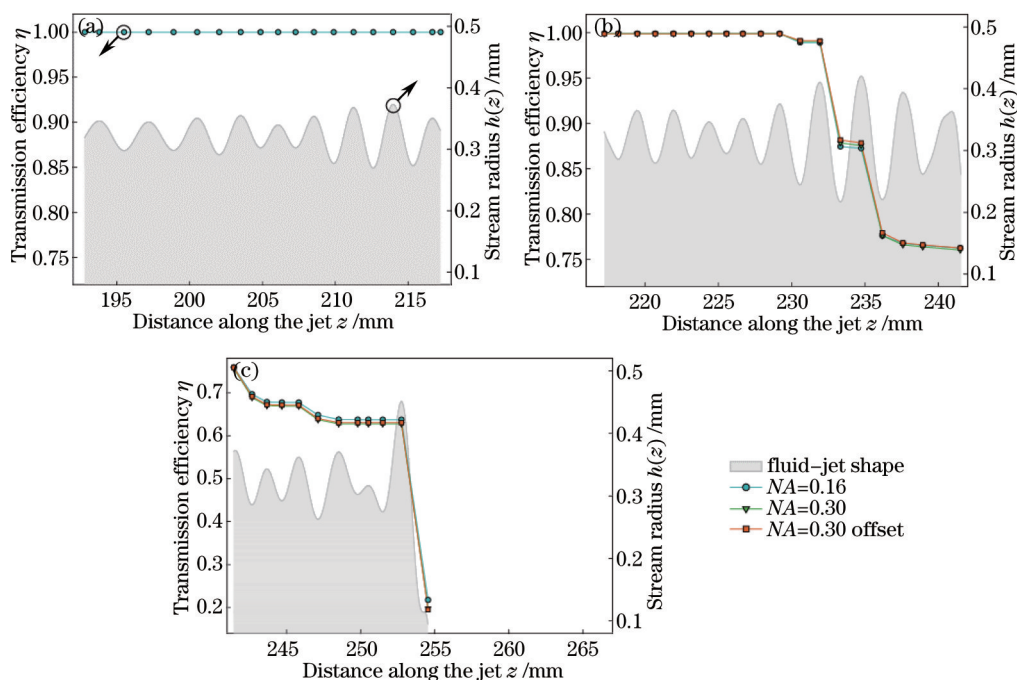


图7 传输损耗与射流轮廓的对应关系。(a) 波动开始阶段;(b) 波动增强阶段;(c) 破碎形成阶段

Fig.7 Relationships between transmission loss and water-jet shape. (a) At the stage of incipient turbulence;

(b) with the enhanced turbulence; (c) before water-jet breakup

计算结果表明,在射流波动的开始阶段,由于气液交界面的宽度 $h(z)$ 处于0.29~0.35 mm之间,且波动频率相对较低,即使以较大的角度耦合入射,光线在其内部传输也几乎没有能量损耗,此阶段的射流水波导对光线还保持着较强的束缚能力。

随着波动振幅扩大至0.21~0.41 mm这个范围,同时波峰间距下降到2.5 mm附近,传输光线的全内反射条件就会发生破坏,导致射流水波导的损耗特性开始显现。从图7(b)可以看出,光线在传输过程中如果遇到下降趋势的波动界面,将会出现更大的能量衰减,这与(2)~(3)式所描述的关系吻合。此外,耦合角度的改变或发生偏心耦合时,射流波导对传输光线的约束能力也会改变,但这种影响不太明显。这是因为,传输光线与射流界面的交汇位置和法线夹角在不同入射条件下,产生传输光泄漏的几率是不同的。

在射流接近产生断裂的地方,由于波动变化过大(界面宽度已降至0.09 mm),从而阻止了光线在其内部的继续传输,波导的传输损耗也就急剧增加,光线追迹过程随即结束。

4 结 论

采用高速相机拍摄平口喷嘴形成的一段射流水波导,运用图像处理技术提取射流界面轮廓的形态特征,并重构成为三维光学模型。根据三维光线追迹的计算结果,分析射流波动段的界面轮廓变化对光线传输的影响。结果表明,在射流波动的开始阶段,由于界面波动的幅度和频率都相对较低,不足以引起辐射损耗。当射流界面波动变得越发剧烈,达到某个临界范围时,能量衰减也开始显著增加,从而影响光线在波导中的传输。因此,选取合理的射流参数对控制射流波导的损耗较为重要。

参 考 文 献

- 1 Cai Zhixiang, Gao Xunying, Yang Wei, *et al.*. Study on fiber laser cutting of sapphire substrate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081403.
蔡志祥, 高勋银, 杨 伟, 等. 光纤激光切割蓝宝石基片的工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081403.
- 2 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. *Chinese J Lasers*, 2014(6): 0603004.
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(6): 0603004.
- 3 Pauchard A. Precise thin metal cutting using the laser microjet[C]. *The LEF Conf Furth*, 2009.
- 4 Li C F, Johnson D B, Kovacevic R. Modeling of waterjet guided laser grooving of silicon[J]. *Int J Mach Tool Manu*, 2003, 43(9): 925-936.
- 5 Psaltis D, Quake S R, Yang C. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 381-386.
- 6 Persichetti G, Testa G, Bernini R. Optofluidic jet waveguide enhanced Raman spectroscopy[J]. *Sens Actuators B Chem*, 2015, 207: 732-739.
- 7 Liang Zhongcheng, Zhao Rui. Optofluidics and its potential applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(6): 16-23.
梁忠诚, 赵 瑞. 微流控光学及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(6): 16-23.
- 8 Eggers J, Villermaux E. Physics of liquid jets[J]. *Rep Prog Phys*, 2008, 71(3): 036601.
- 9 Vágó N, Spiegel A, Couty P, *et al.*. New technique for high-speed microjet breakup analysis[J]. *Exp Fluids*, 2003, 35(4): 303-309.
- 10 Couty P, Spiegel Á, Vágó N, *et al.*. Laser-induced break-up of water jet waveguide[J]. *Exp Fluids*, 2004, 36(6): 919-927.
- 11 Lu Xizhao, Jiang Kaiyong, Jiang Feng, *et al.*. Laser micro-jet enhanced processing laser energy distribution[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(2): 230-235.
卢希钊, 江开勇, 姜 峰, 等. 微射流水导改善加工激光能量分布[J]. *应用激光*, 2015, 35(2): 230-235.
- 12 Zhan Caijuan, Li Changfeng, Pan Yongchen, *et al.*. Analysis of fluid flow in micro-water jet guided laser precision drilling process[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2011, 32(2): 159-165.
詹才娟, 李昌烽, 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.
- 13 Spiegel Á, Vágó N, Wagner F R. High efficiency Raman scattering in micrometer-sized water jets[J]. *Opt Eng*, 2004, 43(2): 450-454.
- 14 Couty P, Wagner F, Hoffmann P. Laser coupling with a multimode water-jet waveguide[J]. *Opt Eng*, 2005, 44(6): 068001.
- 15 Lin S P, Reitz R D. Drop and spray formation from a liquid jet[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30(1): 85-105.
- 16 Sterling A M, Sleicher C A. The instability of capillary jets[J]. *J Fluid Mech*, 1975, 68(03): 477-495.
- 17 Gardner W B. Microbending loss in optical fibers[J]. *Bell System Technical Journal*, 1975, 54(2): 457-465.
- 18 Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L, *et al.*. *Digital Image Processing Using MATLAB*[M]. Ruan Qiuqi Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 289-296.
冈萨雷斯, 伍 兹, 埃丁斯, 等. *数字图像处理: MATLAB版*[M]. 阮秋琦译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 289-296.
- 19 Hoeve W, Gekle S, Snoeijer J H, *et al.*. Breakup of diminutive Rayleigh jets[J]. *Phys Fluids*, 2010, 22(12): 122003.
- 20 Durana G, Zubia J, Arrue J, *et al.*. Dependence of bending losses on cladding thickness in plastic optical fibers[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(6): 997-1002.
- 21 Lin Guangsen. Study on the Key Technology of Water-Jet Guided Laser Machining[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 47-48.
林广森. 水导激光加工关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 47-48.
- 22 Luo Yinchuan, Mi Shaogui, Zhang Rongzhu. Numerical simulation analysis of oblique impinging jet flow field of different nozzle structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s122003.
罗银川, 牟绍桂, 张蓉竹. 不同喷嘴结构斜冲击射流流场数值仿真分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s122003.
- 23 Li Ling. Study on Water-Jet Guided Laser Micromachining Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 40-43.
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: 40-43.