基于离轴光学系统的水导激光耦合技术研究

孙 冬,王军华,韩福柱

(清华大学 机械工程系,北京 100084)

摘 要:在水导激光加工中,聚焦激光与微细水束的耦合对准效果是实现水导激光稳定加工的关键。为了提高水导激光的耦合对准精度,提出了一种新的耦合对准方法,即采用一种双透镜离轴光学系统,系统中一透镜进行轴向移动从而调节束腰轴向位置,另一透镜与喷嘴一起进行径向移动从而调节束腰径向位置。该方法可以有效提高对准装置的分辨率,从而实现高精度的耦合对准。对该方法进行了理论分析,并根据理论分析进行了实验装置的设计。实验结果表明该方法将耦合对准装置的径向分辨率提高了 5 倍,与预期设计相符。应用该方法成功将激光耦合进入直径 100 μm 的喷嘴中实现水导激光加工,该方法也是离轴光学系统的一个创新应用。

关键词:水导激光; 耦合对准; 离轴光学系统

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A DOI:10.3788/IRLA201847.1206001

Research on coupling technology for water-jet guided laser machining based on off-axis optical system

Sun Dong, Wang Junhua, Han Fuzhu

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The laser and water-jet coupling technology is the key to realize water-jet guided laser machining. In order to improve the coupling accuracy, a new method was put forward based on off-axis optical system. The system was mainly composed of two convex lens, one for adjusting the axial position of laser beam waist, another lens for adjusting the radial position. The method can effectively improve the resolution of the coupling device. The theoretical analysis of the method was carried out, and an experimental apparatus was designed according to the analysis. The experimental results show that this method increases the radial resolution of coupling device by 5 times, which is consistent with the design. This method has been applied successfully to couple the laser into the nozzle of 100 μm diameter, and it is also an innovative application of off-axis optical systems.

Key words: water-jet guided laser; coupling technology; off-axis optical system

收稿日期:2018-07-05; **修订日期**:2018-08-03

基金项目:国家自然科学基金(51575308)

作者简介:孙冬(1990-),男,博士生,主要从事激光水射流复合加工方面的研究。Email:sundonga@126.com

导师简介:韩福柱(1966-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事精密与特种加工方面的研究。Email:hanfuzhu@mail.tsinghua.edu.cn

0 引 言

水导激光加工技术是一种典型的非常规激光加工技术[1],它在 1993 年由瑞士的 Bernold 博士提出,该方法在微细水射流中引入激光,激光在水与空气的交界面发生全反射从而不断向前传输直至到达待加工工件表面[2]。微细水射流可将激光能量约束在水束范围内,从而可以在较长距离内没有激光发散问题,另一方面高速水射流可以冲击去除熔融产物,同时冷却工件,减小热影响区。国内外学者对该方法的加工性能进行了深入研究,表明其在微细加工领域具有很好的应用前景[3-4]。

实现水射流导引激光技术的核心问题就在于实现水射流与聚焦激光的精确耦合,即将聚焦激光的束腰位置移动到喷嘴中心。国内外学者设计了多种形式的耦合装置。最早的耦合装置由 Bernold 博士设计[5],该装置的光学系统主要由两个透镜组成,第一个透镜将光纤输出的激光进行准直,第二个透镜再进行聚焦,该装置首次实现了水导激光加工。国内哈尔滨工业大学李灵博士等通过单聚焦镜进行水束激光耦合,基于图像处理的方法,识别激光在喷片表面的烧斑位置和孔口位置,得到相对偏移进而进行耦合对准[6]。厦门大学叶瑞芳等提出使用轴棱锥代替凸透镜进行聚焦,其优点是可以产生无衍射且中心光斑直径较小的光束[7]。但不论采用何种方法,喷嘴尺寸和激光束腰直径都很小,属微米级,这对机械移动平台的精度和分辨率提出了很高的要求,耦合对中的不准确将对激光传输效率产生严重影响,甚至会将喷嘴打坏,无法进行水导激光加工。因此,文中提出一种基于离轴高斯光学的双透镜聚焦方法,可以有效地提高耦合对准精度,实现稳定可靠的水导激光加工。

1 双透镜离轴耦合对准系统的构成

文中设计的双透镜离轴耦合对准系统如图 1 所示,该耦合系统主要包括 45°反射镜,两个聚焦透镜以及一个成像透镜。实验中所用激光为近红外激光,波长为 1 064 nm,一束准直激光从右侧入射进入激光加工头,激光束腰直径 5 mm,经 45°反射镜反射后依次经凸透镜 1、凸透镜 2 至喷嘴上表面。其中,凸透镜 1 为焦距 200 mm 的平凸透镜,可沿 **Z** 轴作±5 mm 范围上下移动,以调节束腰轴向(**Z** 向)位置,凸透镜 2 焦距为 20 mm,通过设计的机械耦合装置使其与喷嘴位置固定,可实现 **X**、**Y** 轴独立移动,以调整激光焦斑与喷嘴的径向(**X**、**Y** 向)位置。**XY** 移动平台为手动交叉滚柱导轨式移动台,最小分度为 10 μm。喷嘴图像和喷嘴表面的反射激光,依次通过凸透镜 2、凸透镜 1、45°反射镜和成像透镜,在最上方的 CCD 中成像。通过 CCD 观察喷嘴及光斑相对位置,调整 **X**、**Y**、**Z** 移动旋钮,实现激光与喷孔的高精度耦合对准。

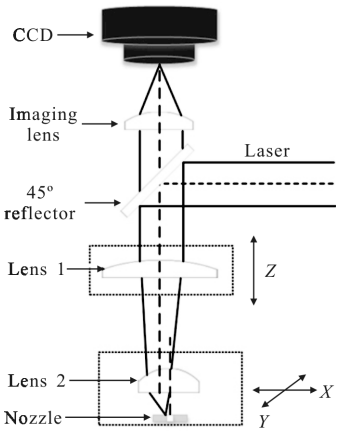


图 1 双透镜离轴耦合系统示意图

Fig.1 Schematic of two convex lens off-axis coupling system

2 离轴光学系统提高微调分辨率的理论分析

随着激光技术的广泛应用,激光束尤其是高斯光束的传输与变换研究现已经比较成熟[8-9]。对于图 2

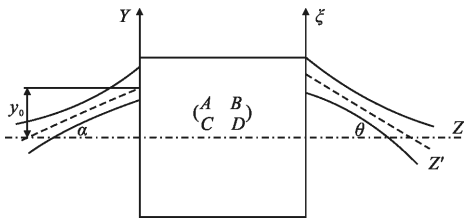


图 2 离轴高斯光束通过 **ABCD** 光学系统示意图

Fig.2 Schematic of off-axis Gaussian beam passing through **ABCD** optical system

所示的离轴高斯光束通过 **ABCD** 光学系统的情况,可以得到其出射面的光束复振幅为:

$$u(\xi)=u_0\cdot\exp\left\{-ik\frac{[\xi-(\xi_d-i\xi_\theta)]^2}{2q(z)}\right\} \tag{1}$$

式中：$q(z)=\frac{A(q_{i0}/\cos^2\alpha)+B}{C(q_{i0}/\cos^2\alpha)+D}$；$\xi_d=\frac{y_0D}{D^2+C^2z_{i0}^2/\cos^4\alpha}$；$\xi_\theta=\frac{y_0Cz_{i0}/\cos^2\alpha}{D^2+C^2z_{i0}^2/\cos^4\alpha}$，$z_{i0}$ 为入射高斯光束瑞利长度；u_0 为常数；ξ_d 为光束束腰在 ξ 方向上的位移，出射偏心高斯光束与 Z 轴的夹角 $\theta=\arctan(\xi_\theta/z_\theta)$。

基于以上原理，文中设计了如图 1 所示的双透镜离轴耦合对准系统，下面对该系统中高斯光束的传输与变换进行定量分析。准直高斯光束经过 45°反射镜后以同轴方式经过透镜 1，透镜 1 对高斯光束进行第一次压缩，使其束腰直径减小。当喷嘴与透镜2 在 X、Y 方向与光束中心没有重合时，高斯光束便以离轴方式进入透镜 2，但入射高斯光束的中心轴线与透镜 2 光轴平行，如图 3 所示。

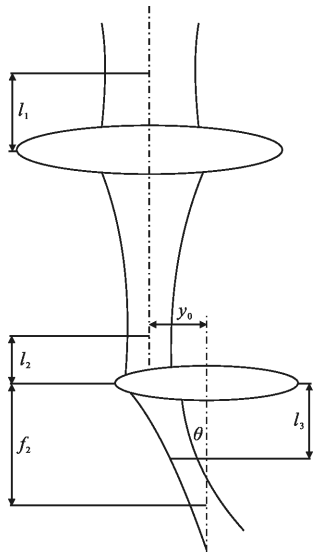


图 3 离轴高斯光束通过双透镜变换原理

Fig.3 Principle of off-axis Gaussian beam conversion passing through two convex lens

由高斯光束的 ABCD 矩阵变换定律可知，入射光束经过透镜 1 的 q 参数为：

$$q_{out1}=\frac{Aqi_0+B}{Cq_{i0}+D} \tag{2}$$

式中：$\begin{pmatrix}A & B\\ C & D\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & l_1\\ -1/f_1 & 1-l_1/f_1\end{pmatrix}$，$q_{i0}=iz_{i0}$。由 q_{out1} 可以得到变换后的激光束瑞利尺寸为 $z_{i1}=z_{i0}/((1-l_1/f_1)^2+z_{i0}^2/f_1^2)$。

光束以离轴方式进入透镜 2，假设偏移量为 y_0，束腰距透镜入射面距离为 l_2，由于光束轴线与透镜 2 轴线平行，因此 $\alpha=0$，则从光束束腰到透镜 2 后端面的变换矩阵为：

$$\begin{pmatrix}A & B\\ C & D\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & l_1\\ -1/f_2 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1 & l_2\\ 0 & 1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & l_2\\ -1/f_2 & 1-l_2/f_2\end{pmatrix} \tag{3}$$

将其代入公式(1)可得：

$$q_{out2}=\frac{iz_{i1}+l_2}{(-iz_{i1}/f_2)+(1-l_2/f_2)}$$

$$\xi_d=\frac{y_0(1-l_2/f_2)}{(1-l_2/f_2)^2+z_{i1}^2/f_2^2}$$

$$\xi_\theta=\frac{y_0(-z_{i1})/f_2}{(1-l_2/f_2)^2+z_{i1}^2/f_2^2} \tag{4}$$

出射光束轴线 Z′相对于 Z 轴的倾斜角为：

$$\theta=\arctan(\xi_\theta/z_\theta)=\arctan(-y_0/f_2) \tag{5}$$

由 q_{out2} 可以得到出射光束束腰到透镜 2 右端面距离为：

$$l_3=\frac{l_2(1-l_2/f_2)-z_{i1}^2/f_2}{(1-l_2/f_2)^2+z_{i1}^2/f_2^2} \tag{6}$$

由公式(5)可知，不论偏移量 y_0 为何值，出射光束均经过透镜 2 焦点，但其束腰并不在透镜焦点处，其束腰的 Z 向位置和横向位置分别由 ξ_d 和 l_3 决定。由公式(4)可知，偏心高斯光束的束腰位置偏移量与 y_0 成正比，其比例系数由透镜焦距和透镜相对位置决定。由公式(6)可知，束腰 Z 方向位置与 y_0 无关，只与透镜焦距和透镜相对位置有关。

根据上述原理，可以通过设计透镜焦距及透镜相对位置对比例系数进行调整，使比例系数小于 1，从而使激光束腰与喷嘴相对位置的最小分度小于机械移动平台自身的最小分度，即提高移动分辨率，实现更高精度的耦合对准。文中使用的光路参数如表 1

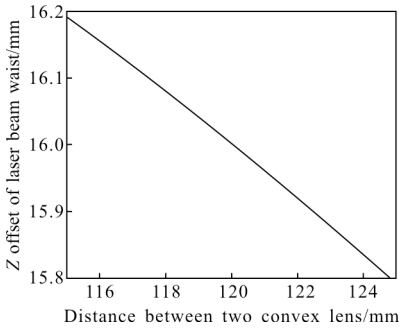
表 1 实验装置光路参数

Tab.1 Optical parameters of experimental apparatus

Optical parameters	Values
Focal length (Lens 1)/mm	200
Focal length (Lens 2)/mm	20
Distance between two convex lens/mm	120
Axial moving range (Lens 1)/mm	±5
Radial moving range (Lens 2)/mm	±3

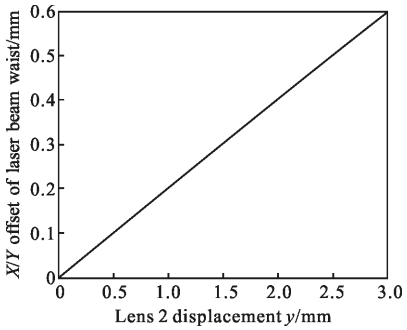
所示,根据入射激光参数和光路参数,计算可得理论聚焦激光束腰直径为 12 μm, 但近红外激光在水中传播时会产生热散焦效应, 因此实际束腰直径会略大于理论值。

根据公式(2)~(6),在 matlab 中进行编程得到透镜 2 在移动范围内变化时激光束腰位置相对喷嘴位置的 **X**、**Y** 方向变化范围, 透镜 1 在移动范围内变化时激光束腰位置相对喷嘴位置的 **Z** 方向变化范围。计算结果如图 4 所示,从图 4(b)可以看到透镜 2 偏移量与束腰横向偏移量呈线性关系, 其分辨率约提高 5 倍,可使 **XY** 最小分度达到 2 μm。从图 4(a)可以看到透镜 1 的间距调整量与束腰的 **Z** 向位移也基本呈线性关系,其分辨率约提高了 25 倍。



(a) 透镜 1 调整束腰轴向位置

(a) Axial position of beam waist adjusted by lens 1



(b) 透镜 2 调整束腰径向位置

(b) Radial position of beam waist adjusted by lens 2

图 4 平台移动距离与激光束腰位置关系

Fig.4 Laser beam waist position in different platform displacements

3 激光水射流耦合实验系统

为验证双透镜离轴耦合方式的对准效果, 设计了相应的水导激光实验装置,如图 5 所示。该实验装置主要包括 CCD 图像采集系统,**X**、**Y** 向微调装置, **Z**向微调装置,耦合水腔(形成微细水射流)等四部分,以上所有部分全部固定在 **Z** 工作台上,以便进行整体 **Z** 向移动,靠近待加工工件。透镜 1 安装在切割头中,可以通过 **Z** 向调节旋钮进行 **Z** 向移动,透镜 2 安装在水腔结构件内部,与喷嘴位置相对固定,可以通过 **X**、**Y** 向调节旋钮进行横向移动。

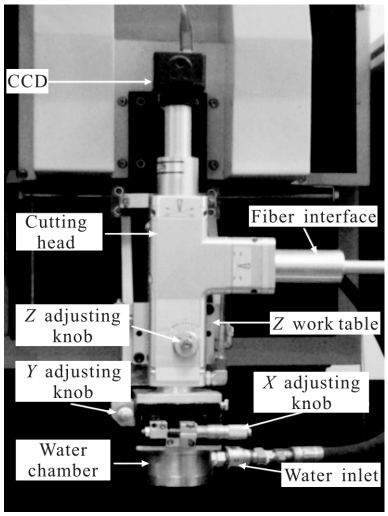


图 5 水导激光实验装置

Fig.5 Experimental apparatus of water-jet guided laser machining

对水导激光技术而言, 水射流的稳定与否是决定加工效率和精度的关键因素,因此,在水导激光加工过程中要求水射流表面光滑、波动小,而且其稳定段长度要满足加工距离要求。经国内外科研工作者前期大量研究发现,在各种射流形式中,缩流射流被认为是最符合水导激光要求的射流形式, 其水束直径与喷嘴直径之比约为 0.83,喷嘴直径越小,水束也越细。为了使水射流单位横截面积上激光能量增大,需要尽量减小喷嘴直径,当然喷嘴直径越小,耦合对准也越困难,文中选用的喷嘴直径为 100 μm。

为了在耦合对中过程中便于清晰观察激光光斑和喷嘴的相互位置,所用的 CCD 可探测波长范围为 350~1 100 nm, 分辨率为 2 048×1 536, 45°反射镜选用反射率 98%透过率 2%的分光镜, 以保证 CCD 能够同时采集到喷孔和激光光斑的图像。在耦合对准过程中,降低激光器的输出能量,使激光不至于烧坏喷嘴表面,同时其在喷嘴表面的反射光能够在 CCD 中呈较清晰的像。实验中 CCD 检测到的图像如图 6 所示。

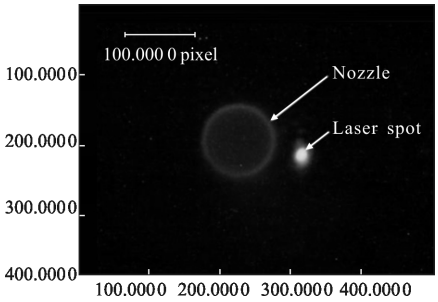


图 6 CCD 中耦合对准图像

Fig.6 CCD photo in the process of coupling

耦合对准的原理为在 **X** 方向分别移动光斑到喷嘴左右边界,记录对应 **X** 值,其平均值即为喷嘴 **X**坐标。**Y** 方向对准方法与 **X** 方向相同,因此提高 **X**、**Y** 方向的微调分辨率对提高对准精度非常重要。在 **X**、**Y** 方向对中完毕后,进行 **Z** 方向调整,**Z** 方向的调整原理为在水束光纤下放置激光功率计, 中间用石英玻璃片隔开, 调整透镜 1 的位置使耦合到水束中的激光能量最高,此时认为达到耦合对准的 **Z** 向位置。

4 水导激光耦合实验结果

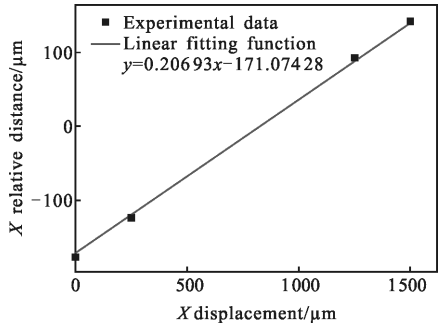
4.1 分辨率测量实验

为验证双透镜离轴光学系统对分辨率提高的作用,文中进行了测量实验,由于实验条件限制轴向束腰位置无法测量, 因此主要针对径向分辨率提高进行测量实验。在得到如图 6 所示的图像后,以喷嘴直径为基准对 CCD 图像进行标定,得到单位像素所代表的实际距离。**X**、**Y** 方向各选择 4 个点进行测量,移动平台的移动间距分别为 250、1 000、250 μm, 中间两点间距较大是因为喷孔在中间两点之间, 选择较大间距使光斑不至落在喷孔中。测量 4 个位置处光斑中心和喷嘴中心的相对位置, 实验数据如表 2 所示,表中的移动距离以第一个点为基准,则移动距离分别表示为 0、250、1 250、1 500 μm。平台移动距离与光斑喷嘴相对距离关系如图 7 所示,可以看到平台移动距离与光斑喷嘴相对距离的线性关系非常好,对数据进行线性拟合,斜率分别为0.206 93 和 0.201 12,即径向移动分辨率为移动平台的 4.83 倍和 4.97 倍。实验测量得到的分辨率提高倍数与理论计算有微小差距,分析其原因,一是实验装置中两透镜的实际安装距离与设计尺寸可能有一定误差, 二是在进行图像标定过程中,对喷嘴直径的测量可能有一定误差。这两种误差的存在不会对平台移动距离与光斑喷嘴相对距离的线性度产生影响, 但会使移动分辨率增大或减小。测量数据与理论计算误差小于 5%,可认为实验结果与理论分析结果相符。

表 2 光斑喷嘴 X、Y 方向相对距离数据

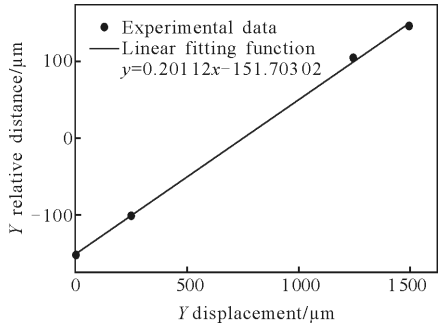
Tab.2 Data of X/Y direction relative distance between spot and nozzle center

Position	Displacement/μm	**X** relative distance/μm	**Y** relative distance/μm
1	0	-171.551	-152.691
2	250	-119.254	-101.218
3	1 250	90.017	104.594
4	1 500	137.290	145.855



(a) **X** 方向关系曲线

(a) Relation curve in **X** direction



(b) **Y** 方向关系曲线

(b) Relation curve in **Y** direction

图 7 平台移动距离与光斑喷嘴相对距离关系

Fig.7 Relative distance between laser spot and nozzle center in different platform displacements

4.2 水导激光耦合实验

按照前文介绍的耦合对准方法进行激光水束耦

合对准,对准后增大激光能量进行加工测试,图 8 为加工时现象,可以看到水射流冲击点火星四射,水束光纤可以传输足够的激光能量到工件表面进行水导激光加工。在激光频率 100 Hz,脉宽 0.2 ms,脉冲能量 0.08 J,水压 10 MPa,切割速度 1 mm/s 情况下,0.2 mm 厚不锈钢的切割效果如图 9 所示,与传统激光加工相比,热影响区很小,表面熔渣也很少。

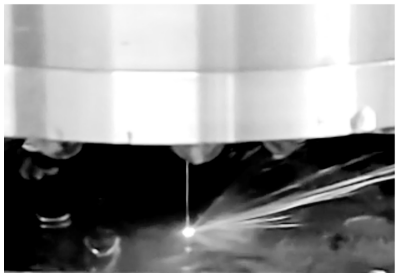


图 8 水导激光加工现象

Fig.8 Photo of water-jet guided laser machining

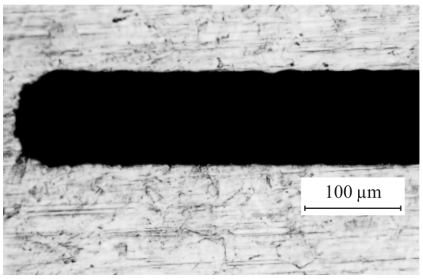


图 9 0.2 mm 厚 304 不锈钢切缝

Fig.9 A slot in 0.2 mm thick 304 stainless steel

5 结 论

文中提出了一种新颖的水导激光耦合对准方法,即双透镜离轴耦合对准方法。透镜 1 可进行 **Z** 向移动, 作用为调整束腰 **Z** 向位置并进行第一次焦斑直径减小,透镜 2 与喷嘴一起进行 **X**、**Y** 向移动,作用为调整束腰与喷嘴的 **X**、**Y** 向相对位置并进一步减小焦斑直径。从理论上分析了此种方法可以提高 **X**、**Y**、**Z** 方向移动分辨率的原因, 并且搭建实验装置对此进行了验证。实验结果表明,在文中所设计的实验装置中, 可以将耦合对准的 **X**、**Y** 向移动分辨约提高 5 倍,降低了耦合对准的难度。并基于此装置成功实现了直径 100 μm 喷嘴的水导激光加工。

参考文献:

[1] Wang Yang, Li Chunqi, Yang Lijun, et al. Research on unconventional machining [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 448-454. (in Chinese)
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.

[2] Ng E, Guannan D. The stability of 30-μm-diameter water jet for jet-guided laser machining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78 (5-8): 939-946.

[3] Romoli L, Lovicu G, Rashed C A A, et al. Microstructural changes induced by ultrashort pulsed lasers in microdrilling of fuel nozzles[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 509-514.

[4] 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.

[5] Richerzhagen B. Method and apparatus for machining material with a liquid-guided laser beam: United States, 5902499[P]. 1999-05-11.

[6] Li Ling, Yang Lijun, Wang Yang, et al. Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet laser micromachining [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16 (9): 1614-1621. (in Chinese)
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.

[7] 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. (in Chinese)
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(自然科学版), 2009, 48(3): 369-372.

[8] Ge Hua, Yang Kuntao. The research of conversion of off-axis Gaussian beam passing through optical system[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(1): 68-70. (in Chinses)
葛华, 杨坤涛. 离轴高斯光束经光学系统变换后特性研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(1): 68-70.

[9] Al-Rashed A R, Saleh B E A. Decentered Gaussian beams [J]. Applied Optics, 1995, 34(30): 6819-6825.