

激光与光电子学进展

水导激光可适用性光束聚焦模式对比分析

梁恩, 黄宇星, 焦辉, 张光辉, 周辽, 黄平, 常朝正, 龙芋宏*

桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 水导激光加工技术中, 高质量光束对耦合效率起着关键性的作用。为了解决水-光耦合技术的难题, 使水导激光加工技术更好地应用在具有高熔点和高硬脆性的材料的高精密度和低损伤等加工场合, 提出自聚焦-球透镜组合聚焦模式和正-负轴棱锥镜组合聚焦模式, 并传统凸透镜聚焦模式进行对比分析。根据三种可适用性聚焦模式, 推导相应的 $ABCD$ 传输矩阵, 仿真聚焦模式下的光束特性, 并讨论不同聚焦模式下的工业化应用特点。仿真结果表明, 正-负轴棱锥镜组合聚焦后的光束束腰半径最小, 传统凸透镜聚焦模式聚焦后的光束发散角最小, 且三种模式结构不同, 都存在各自的优劣性。

关键词 光学设计; 水导激光; 光束聚焦; $ABCD$ 矩阵; 光学仿真

中图分类号 0439 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1722002

Comparative Analysis of Laser Focusing Modes Applicable to Water Jet Guided Laser

Liang En, Huang Yuxing, Jiao Hui, Zhang Guanghui, Zhou Liao, Huang Ping, Chang Chaozheng, Long Yuhong*

School of Electrical and Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In water jet guided laser processing technology, high-quality beams play a key role in coupling efficiency. In order to solve the problem of water-optical coupling technology, the water jet guided laser processing technology can be better used in high-precision and low-damage processing of materials with high melting point and high hardness and brittleness, and the self-focusing-ball lens combination focusing mode and positive-negative axicons focusing mode are compared and analyzed with the traditional convex lens focusing mode. According to the three applicable focusing modes, the corresponding $ABCD$ transmission matrix is derived, the beam characteristics under the focusing mode are simulated, and the characteristics of industrial applications under different focusing modes are discussed. The simulation results show that the beam waist radius of the combined positive-negative axicon lens is the smallest, the divergence angle of the beam after the traditional convex lens focusing mode is the smallest, and the three modes have different structures, and they all have their own advantages and disadvantages.

Key words optical design; water jet guided laser; beam focusing; $ABCD$ matrix; optical simulation

OCIS codes 220.2740; 220.4830; 220.4610

收稿日期: 2020-10-21; 修回日期: 2020-11-05; 录用日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(62004050)、广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划、桂林电子科技大学研究生优秀学位论文培育项目(18YJPYSS02)、大学生训练创新项目国家级项目(202010595032)

通信作者: *longyuhong@guet.edu.cn

1 引言

近年来,工业上对硬脆性及热敏感性材料的加工要求越来越高。相比于传统激光加工和水射流加工,水导激光加工作为新型的加工技术之一,具有热影响区小、加工精度高和加工成本低等优势,广泛应用在高精密及硬脆性材料的加工场合^[1-2],如晶圆^[3]、硅片^[4]、玻璃^[5]、金刚石^[6]、碳纤维^[7]及半导体材料^[8]等微细加工和绿色制造及医疗高附加值的零部件加工^[9]。水束导引光束现象由 Colladon^[10]发现,后由 Bernold 博士进行深入研究,并提出了微水导激光加工技术,而且成立了 SYNOVA 公司^[11-12]。水导激光加工技术因其具有独特的加工优势而被国内外学者广泛关注,然而传统的水导激光加工技术采用了凸透镜来聚焦,但其调焦耦合难度大,耦合失准容易烧灼喷嘴。针对上述问题,孙冬等^[13]利用两个平凸透镜组成了双透镜离轴光学系统,使用两透镜分别对束腰轴向及径向位置进行调节,可以有效提高耦合对准的精度。Gryaznov 等^[14]使用石英光纤直接将激光束引入水束中,借助光纤连接器将激光束耦合进水束并进行实验探究,研究结果表明,直接输入激光辐射可显著降低激光损失,并提高设备的灵活性。叶瑞芳等^[15]使用轴棱镜生成具有中心光斑小和无衍射范围大的无衍射光束,并将其引入水导激光加工技术中,可以增大聚焦光束和水束的调整范围,降低耦合精度。

水导激光加工技术中,水光耦合的调整难度大,耦合效率较低,为此成为限制其发展的难题之

一,而获得高质量的聚焦光束对此起着关键性的作用。鉴于此,本文提出两种区别于传统凸透镜聚焦模式(CFM)的新方法,包括自聚焦-球透镜组合聚焦模式(GBFM)和正-负轴棱锥镜组合聚焦模式(PNAFM)。首先推导出三种不同聚焦模式的 ABCD 传输矩阵,然后仿真出三种聚焦模式下形成聚焦光束的聚焦特性并对其进行分析对比,验证不同光束聚焦模式对提高水光耦合效率以及在水导激光设备中的适用性,并为后续水导激光加工技术中光束聚焦模式的选取提供理论依据。

2 水导激光原理及聚焦特性分析

2.1 水导激光原理

水导激光加工技术是一项新型的水辅助激光加工技术,使用微水射流导引激光对工件进行加工。激光束通过扩束器准直后被聚焦镜聚集到耦合腔的喷嘴孔中,并与高速水射流所形成的水束光纤进行耦合。该技术利用空气与水的折射率不同,使激光束在稳定的水射流所形成的水-空气界面实现全反射,使用水束光纤导引激光束到工件表面进行加工。水导激光加工的原理及特性分析如图 1 所示,其中 n_0 为空气折射率, n_1 为两透镜折射率, ρ_0 和 ρ_1 分别为平凹透镜(PEL)和平凸透镜(PXL)的曲率半径, n_a 、 n_g 和 n_w 分别为空气、光学窗口和水的折射率, θ_a 为能够发生全反射的最大光线入射角, θ_w 为光线在水中的折射角, θ_{max} 为水-空气界面发生全反射的临界角, d_{laser} 为光束聚焦光斑的直径, d_{core} 为水束的直径。

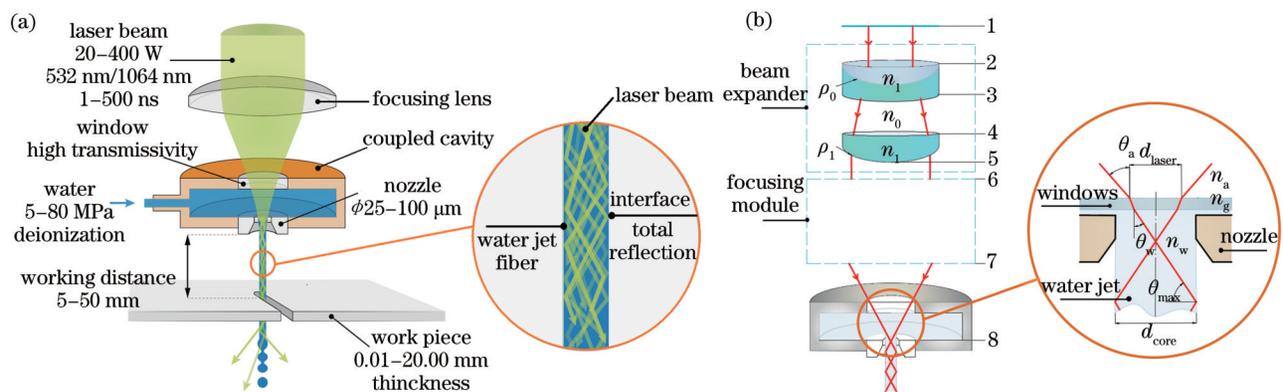


图 1 水导激光的加工原理及特性分析图。(a)加工原理;(b)光束传播

Fig. 1 Processing principle and characteristic analysis diagram of water-guided laser. (a) Processing principle; (b) beam propagation

激光束经光学系统变换聚焦后聚焦到喷嘴的入口端面,实现水束-光束耦合,如图 1(b)所示。根

据光纤耦合理论,耦合光纤需满足 d_{laser} 值小于 d_{core} 值,入射激光光束的发散角 θ_{laser} 需小于某个值而确

保激光光束耦合进水束后都能发生全反射的最大入射角 θ_a , 表达式为

$$\begin{cases} d_{\text{laser}} \leq d_{\text{core}} \\ \theta_{\text{laser}} \leq \theta_a \end{cases} \quad (1)$$

结合几何知识及 Snell 理论可得, 满足耦合条件的聚焦激光最大入射角为

$$\theta_a = \arcsin \left\{ \frac{n_a}{n_w} \cos \left[\arcsin \left(\frac{n_a}{n_w} \right) \right] \right\} \approx 61.274^\circ \quad (2)$$

为了满足(1)式的耦合要求, 需要在相互制约的发散角和束腰之间寻求一个平衡值, 使得光束质量达到最佳且耦合效率达到最大, 则对其中的光束聚

焦模块提出要求, 且聚焦光束的光线角也要满足一定条件。因此, 实验主要分析 CFM、GBFM 与 PNAFM 三种模式的聚焦光束特性以及在设备生产上的可适用性。

2.2 光路系统及扩束准直模块的理论分析

在水导激光加工技术的光路系统中, 扩束准直系统是必不可少的部分之一^[16]。一般的扩束系统有伽利略式和开普勒式两种, 由于伽利略式的扩束系统在空间上所具有的优势, 使其应用更普遍。为了尽可能降低像差, 选用 PEL 和 PXL 并使平面一面对面放置。利用光学理论计算 PEL 及 PXL 的光学传输矩阵 M_{CVEX} 和 M_{CAVE} , 表达式为

$$M_{\text{CAVE}} = M_3 M_{23} M_2 = \begin{bmatrix} 1 + (n_1 - n_0) l_{23} / n_1 \rho_0 & l_{23} n_0 / n_1 \\ (n_1 - n_0) / n_0 \rho_0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$M_{\text{CVEX}} = M_5 M_{45} M_4 = \begin{bmatrix} 1 & l_{45} n_0 / n_1 \\ (n_0 - n_1) / n_0 \rho_1 & 1 + (n_0 - n_1) l_{45} / n_1 \rho_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: M_3 为透镜 3 的传输矩阵; M_{23} 为透镜 2 和 3 之间的传输矩阵; M_2 为透镜 2 的传输矩阵; l_{23} 为 PEL 的厚度; M_5 为透镜 5 的传输矩阵; M_{45} 为透镜 4 和 5 之间的传输矩阵; M_4 为透镜 4 的传输矩阵; l_{45} 为 PXL 的厚度。扩束模块的光学传输矩阵为

$$M_E = M_{56} M_{\text{CVEX}} M_{34} M_{\text{CAVE}} M_{12} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: M_{56} 为透镜 5 和 6 之间的传输矩阵; M_{34} 为透镜 3 和 4 之间的传输矩阵; M_{12} 为透镜 1 和 2 之间的传输矩阵;

$A = 1 + \frac{l_{56}(n_0 - n_1)}{n_0 \rho_1} - \frac{(n_0 - n_1)(l_{34} + l_{45})}{n_0 \rho_0} -$

$\frac{(n_0 - n_1)(l_{23} + l_{45})}{n_1 \rho_0} - \frac{l_{56}(n_0 - n_1)^2(l_{23} + l_{45} \rho_0)}{n_0 n_1 \rho_0 \rho_1}$, l_{34} 为

PEL 和 PXL 之间的距离, l_{56} 为 PXL 与聚焦模块之间的

距离; $B = l_{12} + l_{34} + l_{56} + \frac{l_{56}(n_0 - n_1)(l_{34} + l_{12})}{n_0 \rho_1} +$

$\frac{l_{34}(n_0 - n_1)(l_{56} + 1)}{n_0 n_1 \rho_0} + \frac{l_{56}(n_0 - n_1)(l_{23} + l_{45})}{n_1 \rho_1} +$

$\frac{l_{34} l_{45}(n_0 - n_1)}{n_1^2 \rho_0} + \frac{n_0(l_{23} + l_{45})}{n_1} + \frac{(n_0 - n_1)^2(n_1 + l_{45}) l_{34} l_{56}}{n_0^2 n_1^2 \rho_0 \rho_1} -$

$\frac{l_{12} l_{23} l_{56}(n_0 - n_1)^2}{n_0 n_1 \rho_0 \rho_1} - \frac{l_{12} l_{23}(n_0 - n_1)}{n_1 \rho_0}$, l_{12} 为入射点与

PEL 之间的距离; $C = \frac{n_0 - n_1}{n_0 \rho_1} -$

$\frac{(n_0 - n_1)^2(l_{23} + l_{45})}{n_0 n_1 \rho_0 \rho_1} - \frac{l_{34}(n_0 - n_1)}{n_0^2 \rho_0 \rho_1} - \frac{n_0 - n_1}{n_0 \rho_0}$; $D = 1 +$

$\frac{(n_0 - n_1)^2(l_{23} + l_{45}) l_{12}}{n_0 n_1 \rho_0 \rho_1} + \frac{(n_0 - n_1)^2 l_{12} l_{34}}{n_0^2 \rho_0 \rho_1} +$

$\frac{(n_0 - n_1)(l_{23} + l_{45})}{n_1 \rho_1} + \frac{(n_0 - n_1)(l_{34} - l_{12})}{n_0 \rho_1} + \frac{l_{12}(n_0 - n_1)}{n_0 \rho_0}$ 。

2.3 光束聚焦模块理论分析

根据激光原理及高斯光束性质, 定义参数 q 为

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{\rho(z)} - i \frac{\lambda}{\pi R^2(z)}, \quad (6)$$

式中: $R(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径; $\rho(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的曲率半径; λ 为波长。高斯光束可由参数 q 确定, 当 q 值已知时, 求解相应的光斑半径和曲率半径, 表达式为

$$\frac{1}{\rho(z)} = \text{Re} \left[\frac{1}{q(z)} \right], \quad (7)$$

$$\frac{1}{\omega^2(z)} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left[\frac{1}{q(z)} \right]. \quad (8)$$

2.3.1 凸透镜聚焦模式

传统的水导激光加工技术使用双凸透镜 (BXL) 对光束进行聚焦, 该装备简单, 聚焦光束易得, 大大降低水导激光加工设备的成本, 传输路径如图 2(a) 所示, 其中 n_2 、 n_3 和 n_4 为不同透镜的折射

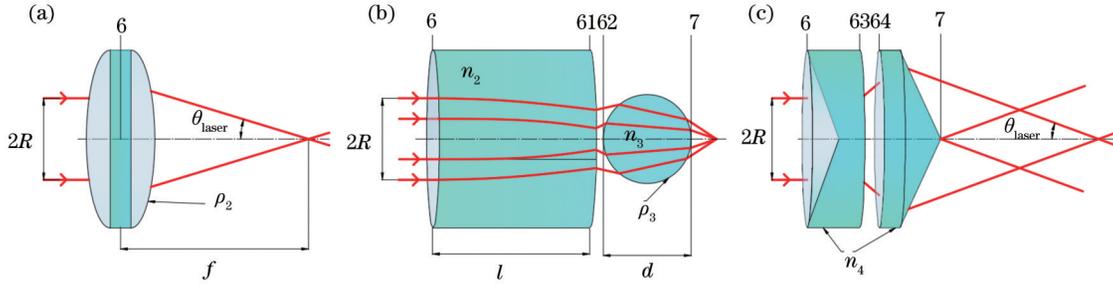


图 2 平行光束经过不同聚焦透镜的路径。(a) CFM; (b) GBFM; (c) PNAFM

Fig. 2 Paths of parallel beams of light through different focusing lenses. (a) CFM; (b) GBFM; (c) PNAFM

率, ρ_2 和 ρ_3 为不同透镜的曲率半径, f 为薄凸聚焦透镜的焦距, l 为圆柱透镜的厚度, d 为球型透镜的直径。然而凸透镜所产生的聚焦光束的束腰半径大, 焦深小, 工作距离短, 有效加工长度短, 对水光耦合的对准精度要求高, 这增加了水光耦合的难度, 在一定程度上限制了设备的发展生产, 为此需要对其进行创新型的光学设计。对于扩束后半径为 R 的光束和焦距为 f 的薄凸聚焦透镜, 其聚焦光斑的光线角 $\theta_{\text{laser}} \approx \arctan(R/f)$, $ABCD$ 传输变换矩阵

$$M_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}.$$

2.3.2 自聚焦-球透镜组合模式

自聚焦透镜(GL)又名径为径向梯度折射率透镜, 其折射率具有沿径向逐渐减小的特点, 能够实现出射光线被平滑且连续地会聚到一点^[17]。GL具有体积小、易安装和耦合效率高等特点^[18], 广泛应用在光学、通信和医学等领域^[19]。然而, 由于市场上自聚焦透镜的尺寸很小, 对入射光束的准直度要求更高, 不利于工业生产。对于轴上介质折射率为 n_2 , 长度为 l , 聚焦参数平方为 a , 近轴自聚焦透镜沿子午方向上的 $ABCD$ 传输矩阵为

$$M_G = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{a}l) & \sin(\sqrt{a}l)/n_2\sqrt{a} \\ -n_2\sqrt{a}\sin(\sqrt{a}l) & \cos(\sqrt{a}l) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

球透镜(BL)是一个抛光后的球体, 根据材料的不同分为石英球透镜、玻璃球透镜和蓝宝石球透镜等。球透镜具有结构简单、易制造、价格低、质量小以及不需严格的校准等特点^[20], 可用于提高光纤、发射器及检测器之间的信号耦合^[21]以及生物光纤探头的制备^[22]。对于直径为 d 、曲率半径为 ρ_2 和折射率为 n_2 的球透镜, 其 $ABCD$ 传输矩阵为

$$M_B = \begin{bmatrix} 1+(n_3-n_0)D/n_3\rho_2 & n_0D/n_3 \\ -(n_0-n_3)^2D/n_0n_3\rho_2^2 & 1+(n_0-n_3)/n_3\rho_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

使用 GBFM 对水导激光束进行聚焦, 光线传输路径如图 2(b) 所示。GBFM 结合了自聚焦透镜和球透镜的优点, 为此更适用于水导激光光路系统。由几何关系可得, 聚焦光束的光线角 $\theta_{\text{laser}} \approx \arctan[R/(l+D+t)]$, 其中 t 为两透镜间距离与球透镜后焦距之和, 组合透镜的传输矩阵为

$$M_{GB} = M_B M_{6162} M_G = \begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: M_{6162} 为自聚焦透镜和球透镜之间的传输矩阵;

$$E = \sqrt{a} n_2 \sin(\sqrt{a}l) \left[l_{6162} \left(\frac{D(n_0-n_3)}{n_3\rho_2} - 1 \right) - \frac{n_0D}{n_3} \right] -$$

$$\cos(\sqrt{a}l) \left[\frac{D(n_0-n_3)}{n_3\rho_2} - 1 \right], l_{6162} \text{ 为自聚焦透镜和球透镜之间的空间距离;}$$

$$F = -\cos(\sqrt{a}l) \left[l_{6162} \left(\frac{D(n_0-n_3)}{n_3\rho_2} - 1 \right) \right] - \frac{n_0D}{n_3} -$$

$$\frac{\sin(\sqrt{a}l)}{n_2\sqrt{a}} \left[\frac{D(n_0-n_3)}{n_3\rho_2} - 1 \right]; \quad G =$$

$$\frac{D(n_3-n_0)^2 \left[n_2\sqrt{a}l_{6162}\sin(\sqrt{a}l) - \cos(\sqrt{a}l) \right]}{n_0n_3\rho_2^2} -$$

$$\frac{D\sqrt{a}n_2\sin(\sqrt{a}l)(n_0-n_3) - \sqrt{a}n_2\sin(\sqrt{a}l)}{n_0n_3\rho_2};$$

$$H = \cos(\sqrt{a}l) + \frac{D(n_0-n_3)\cos(\sqrt{a}l)}{n_3\rho_2} -$$

$$\frac{Dl_{6162}\cos(\sqrt{a}l)(n_3-n_0)^2}{n_0n_3\rho_2^2} - \frac{D\sin(\sqrt{a}l)(n_3-n_0)^2}{n_0n_2n_3\rho_2^2\sqrt{a}}.$$

2.3.3 正-负轴棱镜组合模式

轴棱锥镜是形成无衍射光束的常用元件之一, 无衍射光束由 Durnin^[23]于 1987 年提出, 具有中心光斑小、光强集中、方向性好和工作距离长等特点, 广泛应用在各种场合。厦门大学叶瑞芳团队^[15]提出

将轴棱锥镜引入水导激光加工技术中,旨在解决传统水导激光光路系统中透镜的调焦和对中耦合等难题。使用轴棱锥镜所产生的无衍射光束具有光斑直径小和准直度高等优点,可降低水导激光加工中水-光耦合的损耗。提出的 PNAFM 为负轴棱锥镜(NAL)与正轴棱镜(PAL)的结合,光线传输路径如图 2(c)所示。组合轴棱锥镜在结构上比单轴棱锥镜更容易安装固定,且对锥角的要求更低。对于折射率为 n_4 的薄轴棱锥透镜,由几何关系得到其聚焦光斑的光线角 $\theta_{\text{laser}} \approx (n_4 - 1)\gamma$,其中 γ 为轴棱锥镜的锥角度数。单个正负轴棱镜的 ABCD 传输矩阵分别为 $\mathbf{M}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_4 - 1)\gamma_1/r_1 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{M}_N =$

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n_4 - 1)\gamma_2/r_2 & 1 \end{bmatrix}$,其中 r_1 和 r_2 分别为正、负轴棱锥镜的入射光线径向坐标^[24]。将正、负轴棱锥镜按照图 2(c)的方式进行组合,该光学系统的 ABCD 传输矩阵为

$$\mathbf{M}_C = \mathbf{M}_P \mathbf{M}_{6364} \mathbf{M}_N = \begin{bmatrix} U & V \\ X & Y \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: \mathbf{M}_{6364} 为正、负轴棱锥镜之间的传输矩阵; $U = 1 + (n_4 - 1)\gamma_2 l_{6364}/r_2$; $V = l_{6364}$; $X = -\left[(n_4 - 1)(\gamma_1 r_2 - \gamma_2 r_1) + (n_4 - 1)^2 \gamma_1 \gamma_2 l_{6364}\right]/r_1 r_2$; $Y = 1 - (n_4 - 1)\gamma_1 l_{6364}/r_1$ 。

当两透镜紧密胶合,即 $l = 0$ 时, $r_1 = r_2 = r$,此时系统的 ABCD 传输矩阵为

$$\mathbf{M}_C = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n - 1)(\gamma_1 - \gamma_2)/r & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n - 1)\gamma/r & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ 为系统的等效锥角^[25]。所述系统采用伽利略式望远镜模式对光束进行扩束准直,透镜分布情况如图 1(b)所示。根据三种不同聚焦模式下透镜的结构模型,相应模式下的光束传输矩阵

及聚焦光束光线角如表 1 所示。

在 $z = 0$ 处的 q 参数值 $q_0 = i\pi\omega_0^2/\lambda$; 如图 1(b) 2 处的 q 参数值 $q_1 = q_0 + l_{12} = i\pi\omega_0^2/\lambda + l_{12}$, 聚焦后的 q 参数值遵循 $q_2 = (Aq_1 + B)/(Cq_1 + D)$ 规律。

表 1 不同聚焦模式下的传输矩阵及聚焦光线角

Table 1 Transmission matrix and focusing ray angle in different focusing modes

Focusing model	ABCD transmission matrix	Ray angle
CFM	$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_F \mathbf{M}_E = \begin{bmatrix} A & B \\ -A/f + C & -B/f + D \end{bmatrix}$	$\theta_{\text{laser}} \approx \arctan(R/f)$
GBFM	$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{GB} \mathbf{M}_E = \begin{bmatrix} AE + CF & BE + DF \\ AG + CH & BG + DH \end{bmatrix}$	$\theta_{\text{laser}} \approx \arctan[R/(l + D + t)]$
PNAFM	$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_C \mathbf{M}_E = \begin{bmatrix} AU + CV & BU + DV \\ AX + CY & BX + DY \end{bmatrix}$	$\theta_{\text{laser}} \approx (n_4 - 1)\gamma$

3 仿真分析

第 2 节简要分析三种不同模式下的基本原理、结构优劣性以及满足水-光耦合的条件。本节针对全反射满足的条件,对三种不同聚焦模式进行可适用性分析,借助 ZEMAX 软件对不同聚焦模式下聚焦光束的聚焦特性进行模拟仿真,包括聚焦光斑直径、光束发散角和有效加工距离等。

3.1 三种聚焦模式的仿真分析

光学仿真过程中,入射平行光束的波长为 1064 nm,入瞳直径为 3 mm,经扩束准直系统后再由聚焦模块进行聚焦。其中扩束模块与聚焦模式

的透镜参数如表 2 所示。

由表 2 透镜参数组成的扩束准直系统,其扩束倍率 $M = 175/50 = 3.5$ 倍。经过扩束准直后,光束直径为 $2R = 10.5$ mm。将各透镜参数代入表 1 的聚焦光束光线角中,得到经过 CFM、GBFM 和 PNAFM 聚焦后的光束光线角分别约为 3.005° 、 11.124° 和 2.575° ,均满足耦合要求。为了分析三种模式下的聚焦光束特性,经过仿真得到三种聚焦模式下 X 截面的物理光学传播及点列,如图 3 所示。

从图 3 可以看到,在相同条件下,PNAFM 下的聚焦光束的束腰半径最小,GBFM 次之,CFM 下的聚焦光束的束腰半径相对最大;CFM 下的聚焦光束

表 2 透镜参数
Table 2 Lens parameters

Type	PEL	PXL	BXL	GL	BL	PAL	NAL
Semidiameter /mm	12.70	12.70	12.70	12.70	6.35	12.70	12.70
Material	N-BK7	F_SILICA	N-BK7	SLS-1.0	N-BK7	F_SILICA	N-BK7
Focal length /mm	-50	175	100	10			
Cone angle /($^{\circ}$)						10	5
Radius /mm	-25.75	80.20	102.40	Infinity	6.35	Infinity	-1×10^{-5}
Conic	0	0	0	0	0	33.163	-131.646
Center thickness /mm	3.5	4.0	3.6			8.0	3.0
Edge thickness /mm	6.9	3.0	2.0			3.0	6.9

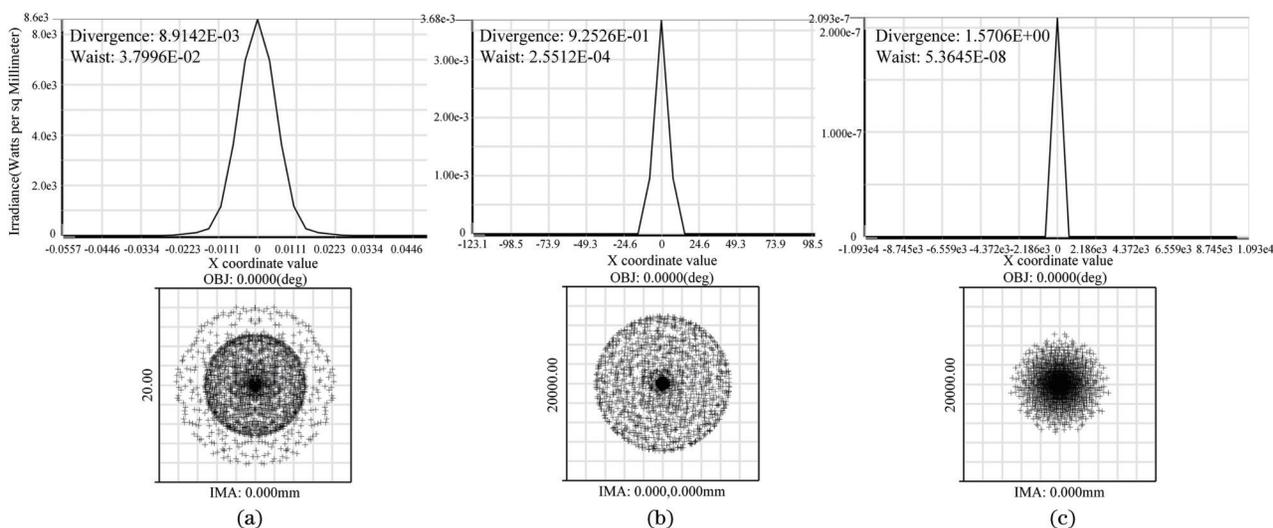


图 3 三种模式下的 X 截面物理光学传播及点列。(a) CFM; (b) GBFM; (c) PNAFM

的发散角最小,GBFM 次之,PNAFM 下的聚焦光束的发散角相对最大。分析仿真得到的束腰半径及发散角,自聚焦球透镜组合模式下所产生的光束更适用于水导激光加工中,更利于光束与水束的高效耦合。吴杏等^[25]利用了自聚焦-球透镜组合的优点,将其从多模光纤耦合到单模光纤中,将耦合效

率从 0.3% 提高到 57.2%。水导激光技术中的水束光纤属于液体光纤,相比于固体单模光纤具有更大的数值孔径和光线接收角,更容易耦合,能够达到更高的耦合效率。

经过同一扩束准直系统后,不同模式下的聚焦光束二维仿真结果如图 4 所示。从图 4 可以看到,在

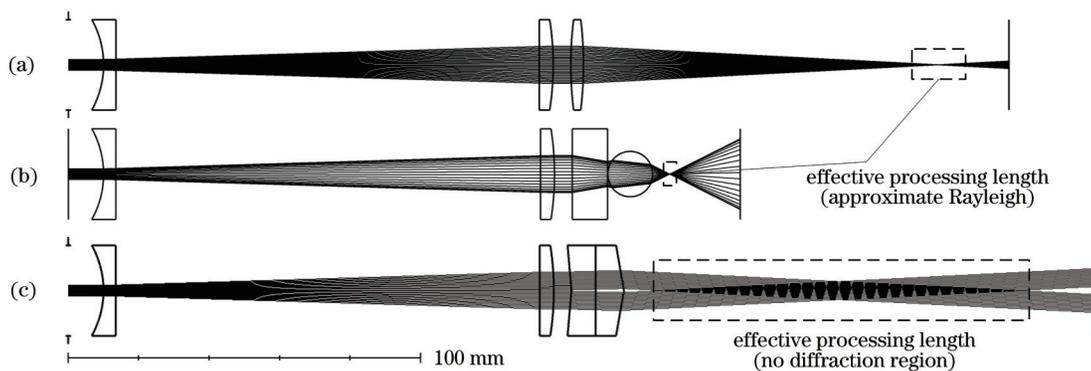


图 4 三种模式下的光学仿真二维图。(a)CFM;(b)GBFM;(c)PNAFM

Fig. 4 Optical simulation of two-dimensional diagram in three modes. (a) CFM; (b) GBFM; (c) PNAFM

相同条件下, PNAFM 下的无衍射光束的无衍射区域大, 有效加工范围大, 在无衍射区域内, 聚焦光束的中心光斑大小不变。叶瑞芳等^[16]将无衍射光束的特性应用到水导激光加工技术中, 大大降低了焦点与喷嘴口耦合的精度要求, 减少了喷嘴的烧灼损坏。

3.2 PNAFM 下的聚焦光束仿真分析

为了分析 PNAFM 下所形成的无衍射光束特

性, 对 PNAFM 下所形成的聚焦光束进行仿真分析。PNAFM 下所产生的无衍射光束的横截面特性随距离变化情况如图 5 所示。经过计算, 无衍射光束最大的无衍射距离近似值 $Z_{\max} \approx R/(n-1)\gamma$ 。将选用的两个透镜按图 2(c) 的方式进行组合, 当两镜片平面紧密相连时, 其等效锥角 $\gamma = 10^\circ - 5^\circ = 5^\circ$, 经过计算得到最大的无衍射距离约为 117 mm。

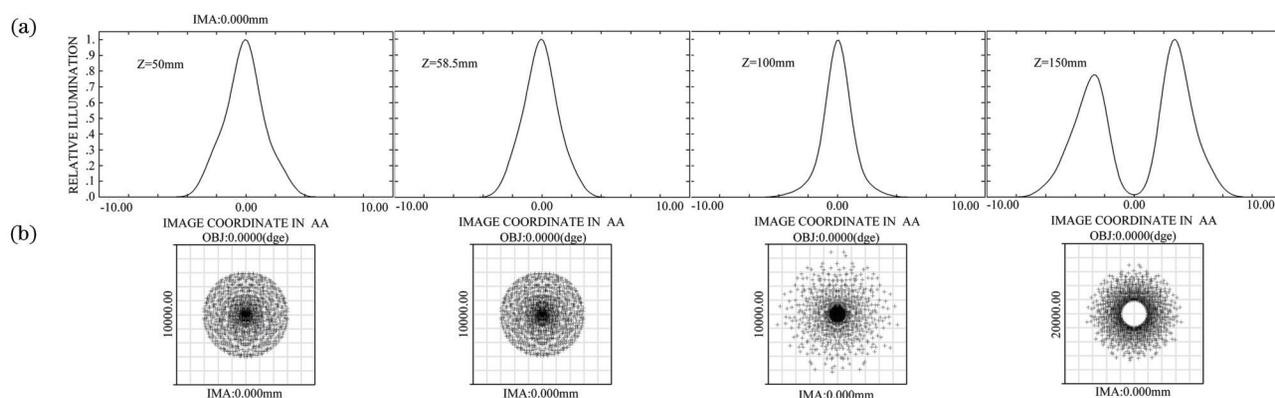


图 5 无衍射光束的 X 截面特性随传输距离变化的结果。(a) 光强图; (b) 点列图

Fig. 5 Results of X-section characteristics of non-diffracted beam varying with propagation distance. (a) Light intensity map; (b) spot diagram

从图 5 可以看到, 在无衍射区域内的光束光强基本不随传输范围的改变而改变; 当 $Z > Z_{\max}$ 时, 光束变成一束环形光束, 其相对光强呈中空分布, 近似于环状光束的特性, 其中 Z 为光线传输距离。

综上所述, 自聚焦-球透镜组合模式下所产生的光束发散角和束腰半径更符合水光耦合的要求, 理论上更适用在水导激光加工技术中。正-负轴棱镜组合模式下所产生的无衍射光束具有无衍射区域大, 工作距离长, 在无衍射区内能量分布均匀, 中心光斑小, 在无衍射区外光束呈环形分布, 实际应用上更适用于水导激光加工技术。

4 结 论

针对水导激光加工设备的光路聚焦系统, 分析传统凸透镜、自聚焦-球透镜组合及正-负轴棱镜组合三种聚焦模式下所形成的聚焦光束的聚焦特性, 推导三种聚焦模式下的 $ABCD$ 传输矩阵, 模拟仿真光束经过扩束准直聚焦后的光斑特性。仿真结果表明, 相比于传统模式, 选用的自聚焦-球透镜组合模式所形成的聚焦光束, 在满足小发散角的同时瑞利长度达到最大, 在一定程度上提升了耦合效率。正-负轴棱镜组合模式下所产生的聚焦光束为无衍射光束, 相比于传统的高斯光束具有光斑半径小且

能量均匀的优点, 形成的无衍射范围达到 117 mm, 则有效工作长度增大, 降低水-光耦合的对中难度; 同时, 组合轴棱镜在加工定位方面优于单轴棱镜, 这也进一步推进其在水导激光加工装备中的生产应用, 进而推进水导激光加工设备的工业化进程。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] Zhu S J, Zhang C Y, Chu S L, et al. Research and application of massive micropores water-assisted picosecond laser processing technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302002.
朱帅杰, 张朝阳, 储松林, 等. 海量微孔水辅助法皮秒激光加工技术的研究及应用[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302002.
- [3] Wang H Z. The technology principle and application of water-jet-guided laser scribing [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2008, 37(3): 27-31, 49.

- 王宏智. 微水导激光划片工艺原理及应用[J]. 电子工业专用设备, 2008, 37(3): 27-31, 49.
- [4] Hopman S, Fell A, Mayer K, et al. Comparison of laser chemical processing and laser micro jet for structuring and cutting silicon substrates[J]. Applied Physics A, 2009, 95(3): 857-866.
- [5] Yang B J, Xie S D, Dai F. 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.
- [6] Shi G F, Han D D, Zhu K K. Comparative analysis of laser and water jet-guided laser cutting natural diamond[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(2): 57-59.
石广丰, 韩冬冬, 朱可可. 激光与水射流引导激光切割天然金刚石对比分析[J]. 制造业自动化, 2018, 40(2): 57-59.
- [7] Sun D, Han F Z, Ying W S. Numerical simulation of water jet-guided laser cutting of carbon fiber-reinforced plastics [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(10): 2023-2032.
- [8] Lai K X. Water jet guided laser technology and its applications in semiconductor[J]. Chinese Materials Science Technology & Equipment, 2012(2): 12-14.
来克嫻. 水导激光技术及其在半导体中应用[J]. 中国材料科技与设备, 2012(2): 12-14.
- [9] Zhou Y H, Liao J H, Meng H Y, 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.
- [10] Colladon D. On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream [EB/OL]. [2020-10-20]. https://www.researchgate.net/publication/284079824_On_the_Reflections_of_A_Ray_of_Light_Inside_A_Parabolic_Liquid_Stream.
- [11] SYNOVA. Technology benefits-synova SA [EB/OL]. (2020-03-12) [2020-10-20]. <https://www.synova.ch/technology/technology-benefits.html>.
- [12] Wagner F, Sibailly O, Vágó N, et al. The laser microjet® technology-10 years of development[C]// International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 13-16, 2003, Jacksonville, Florida, USA. [S.l.: s.n.], 2003.
- [13] Sun D, Wang J H, Han F Z. Research on coupling technology for water-jet guided laser machining based on off-axis optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1206001.
孙冬, 王军华, 韩福柱. 基于离轴光学系统的水导激光耦合技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1206001.
- [14] Gryaznov N A, Goryachkin D A, Sosnov E N, et al. Laser-jet device with direct input of radiation into a liquid beamguide [J]. Journal of Optical Technology, 2018, 85(12): 752.
- [15] Ye R F, Shen Y, Wang L, 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(自然科学版), 2009, 48(3): 369-372.
- [16] Ge J Q, Qin Y X, Liu X D, et al. Design of variable spot and zoom optical system for laser cutting [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0222001.
葛佳琪, 秦应雄, 刘晓东, 等. 变斑变焦激光切割光学系统的设计[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0222001.
- [17] Zhang M L, Zou H. Research of gradient refractive index lens [J]. Optoelectronics, 2016, 6(2): 101-111.
张美玲, 邹华. 梯度折射率透镜的研究[J]. 光电子, 2016, 6(2): 101-111.
- [18] Mao Y X. Analytical method for designing gradient-index fiber probes [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 094202.
- [19] Nowosielski J M, Buczynski R, Hudelist F, et al. Nanostructured GRIN microlenses for Gaussian beam focusing [J]. Optics Communications, 2010, 283(9): 1938-1944.
- [20] Liu A M. Ball lenses: calculation of index of refraction and analysis of image [J]. Journal of Xiaogan University, 2007, 27(3): 35-37.
刘爱梅. 球透镜的折射率计算与成像分析[J]. 孝感学院学报, 2007, 27(3): 35-37.
- [21] Zheng C, Hu A M, Chen T. Fabrication and application of embedded microball lens fabricated with femtosecond fiber laser [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1846-1851.
郑崇, 胡安明, 陈涛. 内嵌式微球透镜的光纤飞秒激光加工技术及应用[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1846-1851.
- [22] Xu H, Zhu Y K, Lu Y F, et al. Development and biomedical application of Raman probe [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110005.
徐浩, 朱勇康, 陆燕飞, 等. 拉曼探头的发展及其生

- 物医学应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110005.
- [23] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4): 651.
- [24] Ma L, Wu F T, Huang Q L. A new type of combined axicon for generating non-diffracting Bessel beams[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2417-2420.
- 马亮, 吴逢铁, 黄启禄. 一种产生无衍射贝塞尔光束的新型组合锥透镜[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2417-2420.
- [25] Wu X. A research of the multi-mode fiber coupling to single-mode fiber system based on ZEMAX software[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- 吴杏. 基于 ZEMAX 的多模光纤到单模光纤耦合系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.