

文章编号 1004-924X(2008)09-1614-08

水导激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术

李 灵, 杨立军, 王 扬, 刘 备, 王 哲

(哈尔滨工业大学 机械制造及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了保证水导激光微细加工中会聚激光与水束光纤的耦合效果, 建立了由一个高精度耦合对准检测调整系统和一个特殊结构耦合装置组成的新的耦合系统, 并提出了新的耦合对准方法。由于激光要经过空气层、玻璃层、水层进入水束光纤, 因此根据计算结果, 采用激光烧斑法来确定会聚透镜与水束光纤起始端(喷嘴孔)的距离; 研究了激光在水束光纤中发生全反射的最大入射角; 通过流体动力学仿真, 设计了腔内流场分布均匀的耦合装置, 保证了直径 0.12 mm 的水束光纤的高耦合品质; 研究了激光能量在水束光纤中的衰减, 采用特定波长和脉冲能量的激光和特殊过滤的去离子水来减小激光能量在水束光纤中耦合的损耗率。实验结果表明, 水束光纤导光长度超过 100 mm; 采用该耦合技术能够在 0.2 mm 厚的硅晶片上以 2 mm/s 速度切割出缝宽为 0.12 mm 的均匀窄缝, 且几乎无裂纹、无热影响区。该耦合技术能够很好地满足水导激光微细加工的要求。

关键词: 水导激光; 激光微细加工; 全反射; 激光耦合; 光纤耦合; 仿真

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet guided laser micromachining

LI Ling, Yang Li-jun, WANG Yang, LIU Bei, WANG Zhe

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the coupling effect of focused laser and water-jet fiber, a new coupling system consisting of an accurate coupling alignment system and a special coupling unit was designed, and a special coupling alignment method also was put forward. Before laser arrives at water-jet fiber, it passes through air, glasses and water, so a laser burning method was used to determine the distance between focus lens and nozzle hole based on calculating result. The max angle of laser incidence was researched for full reflection. After fluid simulation, the coupling unit was designed to make the fluid field in the chamber symmetrically and form a high quality water-jet fiber with diameter of 0.12 mm. The attenuation of laser energy in water-jet fiber was investigated and the energy attenuation in fiber was reduced applying appropriate laser wavelength, pulse energy and filtered and deionized water. The experimental results indicate that a 100 mm long water-jet fiber is formed in this paper, and an 0.12mm wide slot without nearly crack and heat affected is cut in 0.2 mm thick Si wafer at the speed of 2 mm/s, which shows proposed coupling technology can meet the requirements for water-jet guided laser micromachining perfectly.

Key words: water-jet guided laser; laser micromachining; full reflection; laser coupling; fiber coupling; simulation

收稿日期: 2008-05-21; **修订日期:** 2008-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50675053); 武器装备预研基金资助项目 (No. 9140A18030607HT117); 高等学校博士学科点(新教师)基金资助项目 (No. 20070213027); 哈尔滨工业大学优秀青年教师基金资助项目 (No. HITQJNS. 2007; No. AUGA18601009)

1 引 言

水导激光微细加工是激光加工的一个新技术,属于特种、精密加工范畴。该技术将特定波长的会聚激光束导入作为光纤的高速流动的水束,激光在水与空气界面发生多次全反射后形成横截面能量均匀分布的高能量束流射到工件,与工件材料和水发生复杂的热、力等物理和化学作用实现加工。目前国外对该技术研究较多^[1-5],已将其应用在切割硅片、微加工医疗器械、制作核设施关键零件等领域,但国内几乎无相关研究。由于在加工过程中水束光纤射流对激光能量有均匀化作用、对工件有冷却、冲刷作用,该技术具有显著的精度和加工质量的优势,加工后的工件几乎无加工应力、无热影响区、无裂纹,在很多精密加工应用场合都优于其他微细加工方法。

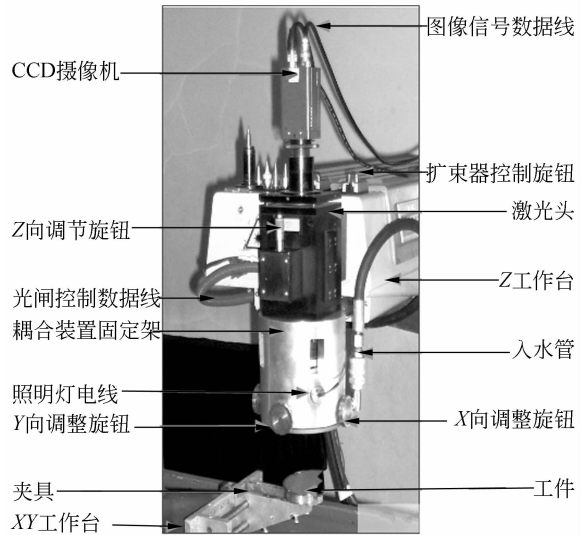
激光与水束光纤的精确耦合是实现水导激光微细加工的关键技术,本文研制了水导激光微细加工用的耦合检测与调整系统和一个特殊的耦合装置。研究了实现阶跃多模水束光纤的凸透镜耦合关键技术。讨论了确定会聚透镜与喷嘴孔相对位置的方法,确定了激光在水束光纤中全反射所需的最大入射角,研究了激光能量在水束光纤中的衰减规律,提出了基于图像处理的脉冲激光与水束光纤耦合对准新方法,介绍了水束光纤的生成技术,最终形成了一套独特的耦合技术。使用该耦合技术进行了耦合实验和加工实验,良好的实验结果验证了该耦合技术的实用性和稳定性。

2 耦合系统的构成及其工作原理

2.1 耦合对准检测调整系统构成与工作原理

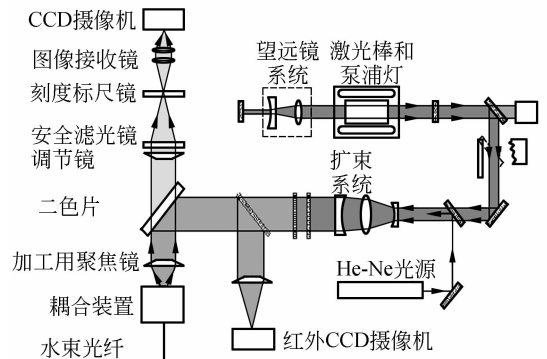
该耦合系统由两大部分组成:耦合对准检测调整系统和耦合装置。图 1(a)为本文研制的耦合对准检测调整系统,主要由图像采集子系统、光学成像子系统、机械运动子系统、照明子系统等组成。图 1(b)为耦合对准检测光路图。

进行 XY 平面耦合对准的工作原理为:先在一幅采集图像中同时获取喷嘴孔画面和激光在喷嘴片上表面的烧斑画面,然后对图像进行处理;再通过耦合对准软件在图像中测量喷嘴孔中心和激光烧斑中心的 XY 平面相对位置;最后将两个中



(a) 照片

(a) Photo



(b) 光路图

(b) Light path

图 1 耦合对准检测调整系统

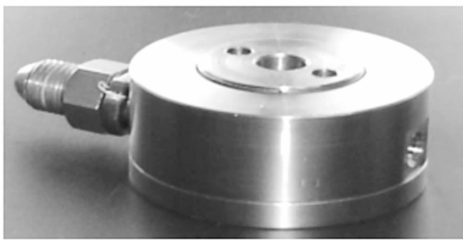
Fig. 1 Coupling alignment system

心在 XY 平面调整到重合或偏离一定距离。进行 Z 向(竖直方向)对准的工作原理为:在 XY 平面耦合位置调整好之后,调整激光焦斑中心和喷嘴孔中心的 Z 向相对位置,同时通过放置在水束光纤下一定距离的能量计检测耦合传导激光能量的效率,使得耦合传导激光能量的效率最高的 Z 向相对位置,即为耦合对准所需的 Z 向相对位置。为避免出现会聚激光轴线和喷嘴孔轴线不平行,在进行耦合对准之前,对水束光纤和激光束的垂直度进行调整。喷嘴孔中心和激光烧斑中心 X、Y、Z 向和沿 X、Y 两个旋转方向的相对位置调整是通过耦合装置固定架上的 5 个微调旋钮实现的。

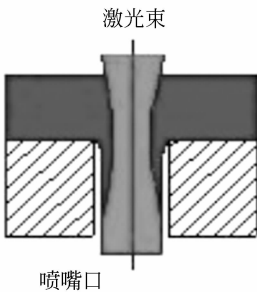
耦合对准软件的工作原理为:首先对检测图像进行二值化处理,然后对二值化图像进行局部的重心法中心拟合,得到喷嘴孔和烧斑的中心坐标,之后计算喷嘴孔中心和激光烧斑中心的 XY 平面相对位置并显示。该软件在加工过程中还检测激光束的焦点是否和喷嘴孔始终对准、加工过程中的发光情况、耦合水腔内的气泡产生情况、喷嘴的损耗情况、玻璃窗口的完好性等。

2.2 耦合装置的构成与工作原理

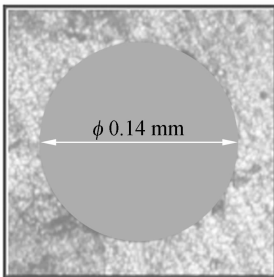
耦合装置是水导激光微细加工系统的关键部分,其结构对水束光纤能否生成、水束光纤传输模式、耦合对准难度都影响很大。本文研制的耦合装置如图 2 所示,液体腔很小,腔内流场根据 Flu-



(a)照片
(a)Photo



(b)水束缩流效果
(b)Contract effect



(c)喷嘴孔锋利边缘
(c)Sharp edge of nozzle hole

图 2 耦合装置

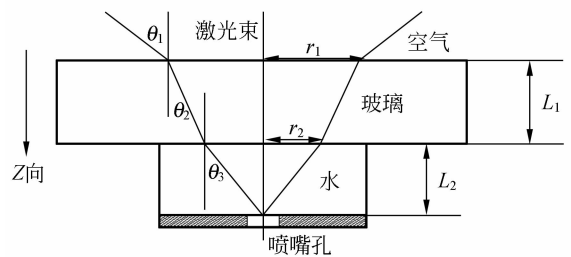
Fig. 2 Coupling unit

ent 仿真结果优化,稳定、对称;齐整、锋利的喷嘴孔口边缘保证返流式缩流射流的形成^[6],水束光纤直径比喷嘴孔径小,且与孔壁不接触。本文喷嘴片选用对光反射率较高的铜材料,喷嘴孔直径有 0.1、0.12、0.15、0.18、0.2 mm 几种。利用日本微研公司的 μ -spark2000 精密电火花机床,采用优化的加工参数制作喷嘴孔。喷嘴片表面光洁度、中心孔圆柱表面粗糙度、中心孔的圆柱度、中心孔圆柱表面与喷嘴片平面表面的交界处过度圆弧半径等指标都很高,如图 2(c)所示。耦合装置的基本工作原理为:将从液压系统进入耦合装置入口的高压去离子水稳定地引导到喷嘴孔口,形成高速缩流射流水束光纤;同时将经过耦合装置的玻璃窗口和耦合腔内的水层后的激光引导至喷嘴孔口,使得脉冲激光全部进入水束光纤。

3 水导激光微细加工耦合关键技术

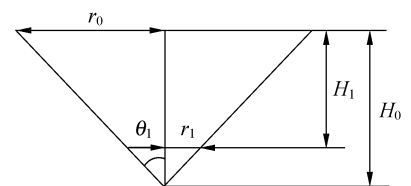
3.1 会聚透镜中心与窗口玻璃片上表面的 Z 向距离

水束光纤采用凸透镜耦合对准的基本要求是会聚激光束焦点位于光纤入口端面的中心位置。而会聚光束在不同介质中传播时,因介质不同,折射率也不同,所以焦点 Z 向位置会发生改变,如图 3(a)所示。激光束经过空气层、玻璃层、水层



(a)焦点位置

(a)Focus position



(b)凸透镜与喷嘴距离

(b)Coupling length

图 3 耦合原理图

Fig. 3 Coupling principle

后进入到水束光纤的开始端,与激光束在单一空气介质中聚焦相比,焦点位置下移。图3(b)为会聚透镜中心与窗口玻璃片上表面距离图示。根据斯奈尔折射定律:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}, \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} = \frac{n_3}{n_2}, \theta_1 = \arctan \frac{r_0}{H_0},$$

$r_1 = r_2 + L_1 \tan \theta_2, r_2 = L_2 \tan \theta_3, H_1 = H_0 - r_1 \cot \theta_1$
 根据上述关系式,可得:

$$H_1 = H_0 - (L_2 \tan(\arcsin(\frac{n_1}{n_3} \sin(\arctan \frac{r_0}{H_0}))) + L_1 \tan(\arcsin(\frac{n_1}{n_2} \sin(\arctan \frac{r_0}{H_0})))) \cot(\arctan \frac{r_0}{H_0}), \quad (1)$$

式中, n_1 为空气折射率; n_2 为玻璃折射率; n_3 为水折射率; r_0 为激光束聚焦前半径(m); r_1 为玻璃上表面激光光斑半径(m); θ_1 为激光入射角($^\circ$); L_1 为玻璃厚(m); L_2 为水层厚(m); H_0 为凸透镜焦距(m); H_1 为凸透镜中心与耦合装置窗口玻璃上表面的 Z 向距离(m)。

将已知数据 H_0, L_1, L_2, r_0 代入式(1)即可求出 H_1 。减少水层厚度 L_2 , 可以减小激光焦点下移量。通过实验验证, 根据计算结果来进行 H_1 调节, 之后再根据能量计对激光传输效率的监测进行 H_1 的精密微调, 能够将激光成功地全部耦合进水束光纤中。

3.2 激光在水束光纤中全反射所需最大入射角

入射光线通过光纤轴线为子午光线。在入射角大于临界角时, 子午光线在柱体界面上不断发生全反射, 形成曲折光路, 其轨迹始终在光纤的主截面。本文用发生全反射的临界角 θ_a 检验激光的入射角度是否满足在水束光纤中的全反射条

件。图4(a)所示为发生全反射的原理图。通过式(2), 可求出 θ_a :

$$\theta_a = \arcsin(\cos \theta_b) = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2}, \quad (2)$$

由图3所示, 可得到子午光线进入水束光纤时入射角 θ_3 :

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_3} \sin(\arctan \frac{r_0}{H_0})\right), \quad (3)$$

当 $\theta_3 < \theta_a$, 激光在水束中实现全反射。由式(3), 选择合适的 r_0, H_0 , 能够保证聚焦光束全部发生全反射。当 $n_1 = 1, n_3 = 1.33$ 时, $\sin \theta_a = 0.6593, \theta_a = 41.25^\circ$ 。选用 $r_0 = 16 \text{ mm}, H_0 = 80 \text{ mm}$ 时, $\theta_3 = 8.476^\circ$, 远小于发生全反射的临界角。

在一些特定情况下, 入射光线要求与光纤轴线有一个偏心距, 这样的光线称作斜光线。由于斜光线和水束中心轴是异面直线, 因而斜光线在水束中进行一次全反射, 斜射光线所在平面方位就改变一次, 方向角改变 2γ , 其光路轨迹是与水束中心轴线等距的空间螺旋折线。斜光线的全反射条件如图4(b)所示, QK 为入射在水束内的斜光线, H 为 K 在横截面上的投影, $\angle QKH = \theta$, 是斜光线与水束中心轴之间的夹角, $\angle KQT = \varphi$, 是光线在水束内壁发生全反射的临界角, $\angle HQT = \gamma$, 是入射平面与子午面之间的夹角。

光线在水束内壁发生全反射的临界角是不变的, $\cos \varphi = \sqrt{1 - (n_1/n_3)^2}$, 从而得到斜光线的全反射条件为 $\cos \gamma \cdot \sin \theta = \sqrt{1 - (n_1/n_3)^2}$, 由此可得:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{\sqrt{1 - (n_1/n_3)^2}}{\cos \gamma}\right), \quad (4)$$

θ_c 为斜光线在水束端面的入射临界角。由于 $\cos \gamma \leq 1$, 因此 $\theta_c > \theta_a$ 。当 $\theta_3 < \theta_c$, 斜射激光束在水束光纤中实现全反射。选择合适的 r_0, H_0 , 能够理论上保证聚焦后的斜光束在水束光纤壁面第一次折射时全部发生全反射。

水束光纤发生全反射最大入射角与传统光纤相比要大, 这有利于使用大数值孔径的聚焦激光光束。

3.3 导光水束光纤生成技术

水束光纤的生成, 是实现耦合的前提。首先需要考虑耦合腔水压的稳定性, 如果压力稳定性控制不好会形成单相流或者空穴流, 不能生成水束光纤。压力稳定性只有达到返流射流流型的要求, 才会形成水束光纤。本文采用柱塞泵、蓄能

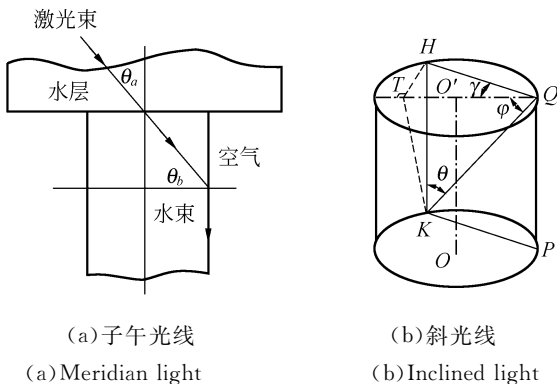


图4 光线发生全反射原理图

Fig. 4 Full reflection light in water-jet fiber

器、长导管和高阻尼过滤器组合使用的液压系统,提供稳定的高压水输入,如图 5 所示。耦合腔的特殊、对称结构起到进一步稳压的作用,本文应用 FLUENT 软件,通过流体动力学仿真,对耦合装置内水腔进行了优化设计。其次喷嘴孔边缘的高锋利程度和耦合腔内表面的高光洁度也保证了水束光纤的长导光长度。水束光纤的长度还和入口水压有关,针对每种耦合装置,都存在使得水束光纤导光距离最长的最佳压力。

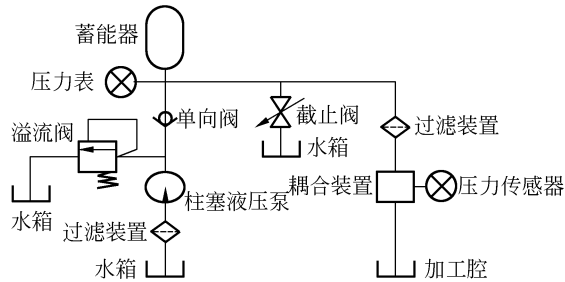


图 5 液压系统

Fig. 5 Structure of hydraulic system

水束光纤与传统光纤的不同在于水束光纤的直径要远大于一般光纤,因此,是作为多模光纤来传导激光的^[4]。本文采用了大数值孔径的会聚激光,微小的偏心距来使水束多模光纤横截面的激光颗粒状能量分布均匀;水束光纤不存在弯曲问题,传输距离不很长,不需要传输准确信号,因此没有传统光纤对光纤质量的严格要求;但水束光纤是动态的,水束光纤中每一点的密度、折射率等光学参数都会随着水的流动发生微小变化,这是水束光纤耦合困难之处。

3.4 激光能量在水束光纤中的衰减

纯水对不同波长激光吸收程度不同,因此采用合适波长的激光能降低激光在水束中的衰减^[7],同时避免由于水束吸收激光能量过多引起的流动不稳定现象。纯水对绿光的吸收最小,其对绿光的吸收深度为 10 m 以上。在一定水深度激光能量可由下式算出:

$$I_x = I_0 \exp\left(\frac{-x}{\Delta}\right), \quad (5)$$

式中, I_0 为入射光能量密度(J/m^3); I_x 为在深度 x 处的光能量密度(J/m^3)。本实验采用波长 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光, Δ 约为 35 mm, 满足

水导激光加工的要求。

当激光功率密度高时,水束光纤对激光的非线性吸收造成的衰减不可忽视。这时在水束中会发生黎曼散射。图 6 所示为不同激光功率密度时水束对激光传输率的对比^[5]。在水束的稳定段,使用小功率密度 $36 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 激光时,传输率只与水束的线性吸收系数有关,传输率高,曲线接近水平直线;当使用大功率密度 $410 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 激光时,水束的非线性吸收很明显,黎曼散射强烈,约 30% 的激光能量被水束光纤衰减掉,且随着距离增加,衰减的激光能量显著增加。因此,在使用高能量密度时,工件与喷嘴距离应尽量短,以减少黎曼散射造成的水束非线性吸收。

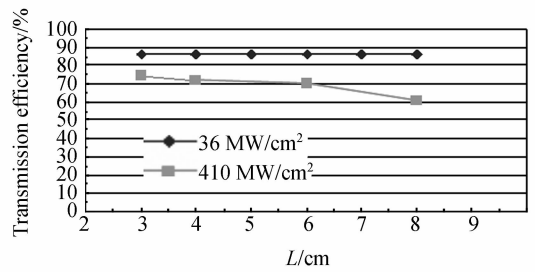
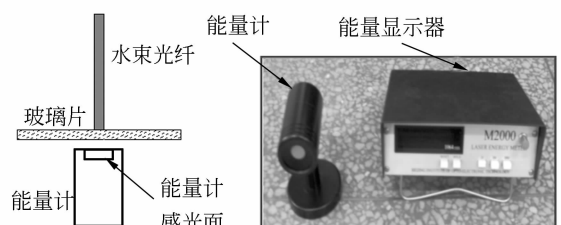
图 6 不同激光脉冲峰值功率密度时 $100 \mu\text{m}$ 水束传输率与水束长度关系

Fig. 6 Relationship of transmission efficiency and water-jet length

在水导激光微细加工时,希望使用最小的激光能量实现加工,这样聚焦光斑小、可延长泵浦灯使用寿命、能耗低。而合适的水束光纤长度,能够使小能量激光在水束中衰减很少。为了得到激光衰减与水束光纤长度的关系,本文进行了试验测试,原理如图 7 所示。测试时采用英国 Lumonics 公司的 JK702 型脉冲激光器^[8],北京光电技术研究所生产的 M2000 型激光能量计,直径 0.15 mm 的喷嘴,1 MPa 压力的自来水。

图 7 激光能量在水束光纤中衰减测量原理及装置
Fig. 7 Measurement of laser attenuation in water-jet fiber

得到的测试结果如图 8 所示,入射激光能量为 0.06 J。

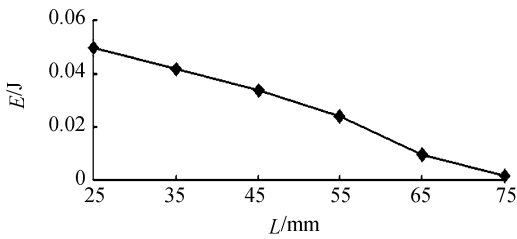


图 8 水束长度与激光能量衰减关系

Fig. 8 Relationship between laser energy attenuation and working length

分析实验结果可知,在采用自来水条件下,加工长度为 20~35 mm,激光能量衰减较小,适于加工;加工长度为 35~75 mm 时,激光衰减较大;加工长度 75 mm 以上时,激光能量大量散射,不能用于加工。另一组实验数据表明,当采用严格过滤的去离子水时,大大减少能量在水束光纤中损耗,水导激光微细加工的加工距离可以达到 100 mm 以上。这是由于光纤中质点折射率不均匀会引起散射损耗;水束中的杂质粒子会引起吸收损耗^[9]。

3.5 基于图像识别的水束光纤耦合对准新方法

由于人视觉系统的不精确性,对于水束光纤耦合这样的高精度、微小尺度对准,不能依靠目测。参考国内一些 CCD 视频采集系统的研究^[10-13],本文采用高放大倍率光学显微镜系统、高分辨率 CCD 摄像机、图像数据采集卡和自行开发的图像分析软件来进行水束光纤耦合对准,两心对准误差在 5 μm 以内,满足水导激光微细加工激光与水束光纤耦合要求。

水束光纤耦合面照明条件非常重要,本文对耦合装置采用了密闭、对称照明方式,以保证采集到的图像清晰。波长 1.064 μm 激光处于不可见光波段,且 CCD 检测到的激光光斑的大小与根据激光对喷嘴材料的损坏阈值确定的光斑大小有差别,因此本文直接将聚焦激光在喷嘴片表面烧斑的大小尺寸和形状作为耦合对准的依据,大大降低耦合对准难度。但打烧斑的激光参数需合理选择,以避免将喷嘴片烧坏。耦合对准软件利用 VC++ 工具,基于大恒公司 SDK 软件包库函数二次开发,能够实现的功能包括:在电脑屏幕上显

示采集图像;采集图像的放大、缩小显示;图像的二值化处理;喷嘴孔中心和激光烧斑中心的自动拟合、两点间距离的计算与显示等,图 9 所示为软件界面。

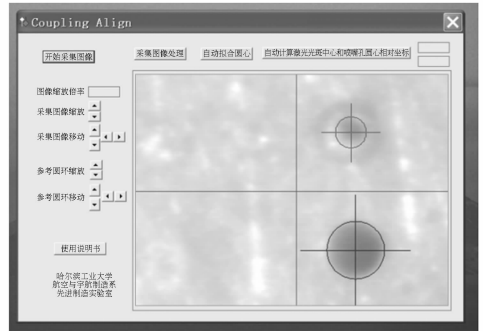


图 9 耦合对准软件界面

Fig. 9 Coupling alignment software interface

二值化处理时选取的区域中像素的灰度值大于阈值的像素,用“1”代替其灰度值,其余像素用“0”代替。本文所用阈值由所选区域所有像素平均灰度值确定。本文中心拟合采用重心法计算,特点是重心法计算区域通过鼠标拖出的选择框来确定。拟合中心 (x_0, y_0) 可由式(6)计算得出。所选区域的像素为 M 行 N 列,

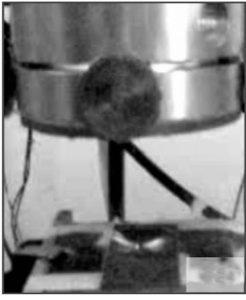
$$g(i, j) = \begin{cases} 1, \text{亮斑} \\ 0, \text{背景} \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N jg(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ig(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)} \end{cases} \quad (6)$$

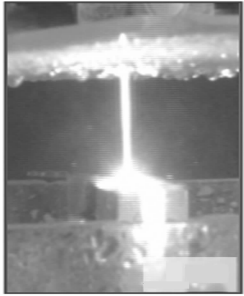
4 激光与水束光纤耦合实验

4.1 水束光纤耦合实验

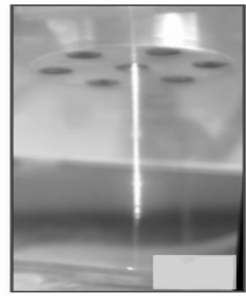
图 10 为采用本文耦合技术进行实验得到的激光与水束光纤耦合效果照片。从照片可以看到,采用该耦合技术能够在水束光纤中传输足够实现加工的激光能量,如图 10(a)、(b)所示,水束光纤传导的激光(起始脉冲能量为 0.15 J)在工件上打出飞溅的火花。实验还表明利用本文研制的系统,采用合适的水压(4 MPa)和激光脉冲能量(起始脉冲能量为 0.15 J),导光水束光纤长度很长,可以达到 100 mm 以上,如图 10(c)所示。



(a) 可见光 CCD 拍摄加工火花(光纤长度 > 100 mm)
(a) CCD photo of spark (fiber length is more than 100 mm)



(b) 红外 CCD 拍摄加工火花
(b) Infrared CCD photo of spark



(c) 红外 CCD 拍摄光纤最长导光距离图像(光纤长度 > 100 mm)
(c) Infrared CCD photo of water-jet fiber (fiber length is more than 100 mm)

图 10 水束光纤耦合效果图
Fig. 10 Coupling effect photos

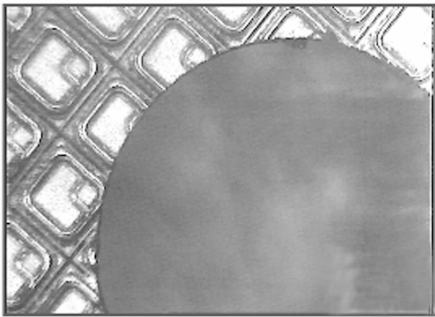
4.2 水束光纤耦合加工效果实验验证

为了验证水束光纤和激光耦合的稳定性与可靠性,进行了水导激光切割硅基晶片的实验。采用经大量实验总结的优化加工参数,如表 1 所示。切割硅基晶片效果如图 11 所示。

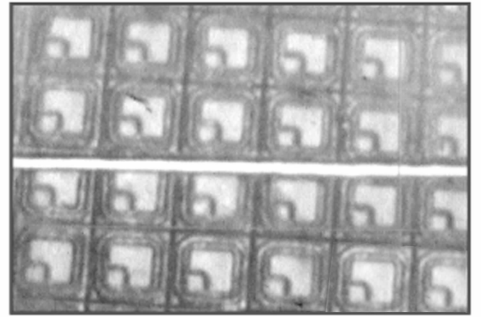
表 1 水导激光切割硅基晶片加工参数

Tab. 1 Machining parameters of cutting Si wafer

切割参数	波长	频率	脉宽	脉冲能量	水压	喷嘴直径	水束长度	切速
数值	1 064 nm	35 Hz	1.4 ms	0.2 J	3.5 MPa	0.14 mm	28 mm	0.3 mm/s



(a) 在 0.2 mm 厚硅基晶片上切出的圆弧(半径 1.5 mm)
(a) An arc with radius of 1.5 mm cut in 0.2 mm thick Si wafer



(b) 0.2 mm 厚硅基晶片上切出的缝(宽 0.12 mm)
(b) A slot with width of 0.12 mm cut in 0.2 mm thick Si wafer

图 11 水束光纤耦合加工效果图
Fig. 11 Machining effects

可以看到在表面有金属布线的硅基晶片上切割出的圆弧边缘齐整、弧度准确、几乎无热影响

区、无裂纹;切割出的切缝宽度小(0.12 mm)、均匀、宽度一致性好。这样的加工效果间接地验证

了激光与水束光纤耦合的稳定性和可靠性。

5 结 论

本文对水导激光微细加工的关键耦合技术进行了深入研究,研制了新型的耦合装置和特殊的对准系统;提出了水束光纤耦合时准确计算凸透镜与喷嘴孔相对位置的方法和确定凸透镜和激光束参数(保证激光在水束光纤中全反射)的方法;采用了偏心、大数值孔径耦合的方式使多模水束

光纤截面颗粒状能量均匀分布;采用合适的激光波长、能量和去离子水减小激光在水束光纤中能量衰减;最后进行了耦合对准的实验和加工实验,实验结果表明:采用该耦合技术,能够产生长度100 mm以上、直径0.12 mm以下的导光水束光纤;耦合对准的精度在微米级,系统比例尺标定精度为 $0.5\ \mu\text{m}$;采用0.2 J的脉冲能量,切割厚0.2 mm硅基晶片的速度可达到2 mm/s以上,切缝均匀稳定、几乎无热影响区和裂纹,效果远远好于传统的金刚石刀片切割。

参考文献:

- [1] RICHERZHAGEN B. Industrial applications of the water-jet guided laser [J]. *The Industry Laser User*, 2002, 28: 28-30.
- [2] KRAYA D, HOPMANA S, SPIEGEL A, *et al.*. Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with water jet-guided laser [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2007, 91:1638-1644.
- [3] 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]. *Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2007, 33: 961-967.
- [4] COUTY P, WAGNER F, HOFFMANN P, *et al.*. Laser coupling with a multimode water-jet waveguide [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(6):1-8.
- [5] SPIEGEL Á, VÁGŰ N, WAGNER F R. High efficiency raman scattering in micrometer-sized water jets [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43:450-454.
- [6] Fluent Inc. *Fluent 6.1 User's Guide* [M]. USA: Fluent Inc, 2003.
- [7] KRUSING A. Underwater and water-assisted laser processing: part 1-general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41:307-327.
- [8] LUMONICS. LTD. *JK702 Nd-YAG Laser Operation & Maintenance Manual* [M]. England: Lumonics. LTD, 2000.
- [9] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
LAN X J. *Laser Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [10] 郭锐, 赵万生, 李刚. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6):998-1003.
GUO R, ZHAO W SH, LI G. Micro electrodes on-line measurement in micro EDM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):998-1003. (in Chinese)
- [11] 赵岩, 梁迎春, 白清顺, 等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):894-902.
ZHAO Y, LIANG Y CH, BAI Q SH, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):894-902. (in Chinese)
- [12] 刘瑞安, 靳世久, 吴晓荣, 等. 视线跟踪系统中 CCD 摄像机的自适应调节[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):966-971.
LIU R A, JIN SH J, WU X R, *et al.*. Adaptive regulation of CCD camera in eye gaze tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):966-971. (in Chinese)
- [13] 段瑞玲, 段惠波, 李庆祥, 等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):468-472. (in Chinese)

作者简介:李 灵(1979—),男,博士研究生,主要从事水导激光微细加工相关技术研究。E-mail: liling1@hit.edu.cn

导师简介:王 扬(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微细加工相关技术研究。E-mail: wyyh@hope.hit.edu.cn