

# 在大幅面激光加工中获得稳定高质量聚焦的方法

赵 侠

(华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 武汉, 430074)

摘要: 从理论上分析和讨论了在大型激光加工系统中, 导光距离对激光束聚焦性能的影响, 描述了当前代表国际先进水平的多种提高和控制激光束聚焦性能的方法。

关键词: 激光加工 飞动导光 导光系统 发散角 聚焦光斑

## The methods of obtaining the stable high quality focus in large field laser processing

Zhao Xia

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The influence of the delivery distance on the focus quality of laser beam in large field laser processing machine has been discussed and analyzed theoretically. Several kinds of international leading methods for improving the focus quality of laser beam have been described in this paper.

**Key words:** laser processing flying optics beam delivery system divergence angle focus spot

### 引 言

在不同的激光加工应用中, 对激光光束的要求各不相同, 尤其是激光光束的聚焦性能。在激光切割加工系统中, 特别是在大幅面的激光切割加工系统中, 要达到具有高稳定性的聚焦光斑直径和焦深是比较困难的。

### 1 问题的提出与分析<sup>[1, 2]</sup>

近年来, 无论是二维或是三维的大型激光加工机床, 大都采用光束移动的方法, 称为“飞动导光”(flying optics)。在大功率激光加工中, “飞动导光”系统同光束固定的导光系统相比, 具有更大的灵活性、更高的加工速度以及更低的制造成本, 但在这样的系统中, 光束的传输距离是变化的, 变化范围是几米或上十米。以幅面为  $1.5\text{m} \times 3\text{m}$  的激光切割机为例(如意大利 PRIMA 公司生产的 Rapido 5 三维激光切割加工机和澳大利亚 LASER LAB 公司 Profile PLUS 3015 二维激光切割加工机), 最近点与最远点的激光传输距离相差  $4.5\text{m}$  以上。由于激光束总是存在远场发散角, 在这样大的传输距离下, 如果不采取一定的措施, 激光的聚焦光斑直径、焦平面和聚焦焦深, 在不同的位置将发生很大的变化, 这会对激光加工质量带来严重的影响。下面, 我们就光束传输距离对激光束的聚焦参数的影响进行理论分析和讨论。

为了分析方便, 我们先以基模( $\text{TEM}_{00}$ ), 并且不考虑球差时的情况进行分析。如图 1 所示, 谐振腔内束腰的半径  $R_0$  为<sup>[3, 4]</sup>:

$$R_0 = R / [1 + (\pi R^2 / \lambda r)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $R = R_1 = R_2$  为两腔镜表面的光束半径,  $r = r_1 = r_2$  为两腔镜的曲率半径。

光束离开束腰后在距离  $z$  处的半径为:

$$R_z = R_0 [1 + (\lambda z / \pi R_0^2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

其远场发散角用弧度表示为:  $\theta = \lambda / \pi R_0$  (3)

在距束腰  $l_0$  处放置一焦距为  $f$  的透镜, 在距透镜中心  $l_f$  处得到一聚焦后的束腰半径  $R_f$ , 则有:

$$1/R_f^2 = (1/R_0^2)(1 - l_0/f)^2 + 1/(f\theta)^2$$
$$l_f = f + (l_0 - f)f^2 / [(l_0 - f)^2 + (R_0/\theta)^2]$$

一般规律是  $l_f > f$ , 在焦平面内的焦斑直径大于  $2R_f$ , 由于  $\theta$  很小, 一般只有  $2 \sim 5$  mrad,  $l_f$  与  $f$  相差很小, 故在工程技术要求的误差范围内, 上面的公式可简化为:  $R_f = f\theta$  或  $R_f = f\lambda / \pi R$  (4)

对于发散角  $\theta$  很小的基模(TEM<sub>00</sub>)激光束, 用入射透镜表面的光束半径  $R$  代替束腰半径  $R_0$ , 更易于估算焦斑直径。

当透镜半径  $a \geq 2.8R$  时, 受到衍射极限限制的焦斑直径为:  $R_{\text{diff}} = 1.22\lambda / (2a)$ 。

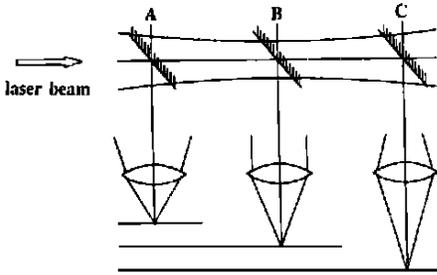


Fig. 2 Focused point on different position

截出的长度  $Z$  作代表, 可得:  $Z = \pm 0.32\pi R_f^2 / \lambda$  (5)

另外, 由几何光学也可直观地看出, 在一束有远场发散角的激光束的不同位置进行聚焦(见图2), 聚焦平面也将发生变化。

从上面的分析可知: 由于远场发散角的存在, 距离越远, 激光束的直径越大; 在衍射极限范围内, 入射于聚焦透镜表面的光束半径  $R$  愈大, 聚焦光斑半径  $R_f$  愈小; 聚焦光斑半径  $R_f$  愈小, 焦深愈短; 对于有远场发散角的激光束, 其在不同光程位置上的聚焦点不同。

## 2 解决问题的办法

针对以上的分析, 为了获得稳定的聚焦性能, 即要保证最终的聚焦光斑的稳定, 可以从下列几个方面入手。

### 2.1 设计长光路激光器

从激光发生器的谐振腔入手, 针对长光路进行谐振腔的设计, 减小激光束的发散角, 提高激光束的光束质量, 使之适合于大范围内进行的激光加工。具体的做法是在谐振腔内, 采用可变曲率的反射镜, 以减少或补偿热透镜效应, 从而减小发散角; 另外, 改变谐振腔设计, 使光束在整个加工区域内的发散程度一致, 从而减少因图2中发散角的变化而造成的聚焦斑点的变化。两种措施并用, 可减小光束的发散角及发散角的变化, 使聚焦光斑保持稳定。德国的 Rofin-Sinar 公司生产的新型 DC 系列板条 CO<sub>2</sub> 激光器(CO<sub>2</sub> Slab Laser) 和日本的 FANUC 公司生产的长光路 CO<sub>2</sub> 激光器就是采用这种设计方法生产的<sup>[2]</sup>。其中 Rofin-sinar 的 DC 系列板条

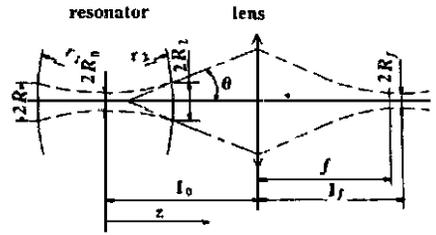


Fig. 1 The divergence and focusing of TEM<sub>00</sub> laser beam  
 $R = R_1 = R_2 \quad r = r_1 = r_2$

CO<sub>2</sub> 激光器在 10m 远距离的全角发散角只有 0.5mrad。使用这种激光器的大幅面激光切割加工机的导光系统中,不需加入扩束准直器也可达到很高的加工精度。

## 2.2 保证光程不变

在早期的激光加工设备中,大量采用的是工件移动,而激光束不动的方法,或者激光束只是作某个单方向的运动,以尽量减少光程的变化。现在这种方法已经较少采用。因为在大型激光加工系统中,要使机床台面在高负荷的情况下进行高速、精确的运动是非常困难的,如果仍采用工件运动,则会大大限制加工速度与加工精度。

但现在某些国外大公司(如日本的 NTC,德国的 MESSER 公司<sup>[2]</sup>) 在大型激光加工设备中,还是采用固定光程的办法来获得稳定的聚焦光斑,不过原理是不一样的。现在的方法是采用光关节臂(NTC 公司)或类似于光关节臂的方式,如 MESSER 公司是通过在导光系统中加入两个受制的、可以自动移动的反射镜来调整光程,以保证进行激光加工时光程不变。

有些加工系统采用的是激光头在一个方向(如 Y 方向)运动,而由工作台完成另一个方向(如 X 方向)。但该方法对工作台的要求很高,且对激光加工的速度有限制,一般较少采用。

## 2.3 减小激光束的远场发散角

在激光加工系统的导光系统中加入一个倒相式望远镜,即扩束系统,可以减小激光束的发散角。扩束系统对激光束发散角的影响如图 3 所示,经过扩束系统前后,光束的发散角的关系为:

$$\theta_2 = \theta_1 / (R_2 / R_1) = \theta_1 / K$$

式中,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  为进入扩束系统前后的光束发散角,

$R_1$ ,  $R_2$  为进入扩束系统前后的光束半径,  $K$  为扩束系统的放大倍数。即经过扩束系统后,光束的发散角与扩展倍数成反比,通过降低光束的发散角,将光束的束腰位置(焦点位置)变换到加工所允许的范围,从而提高激光束的加工范围和有效焦深。

## 2.4 采用聚焦补偿

在加工机的导光系统中,加入可控曲率或焦距的聚焦装置,对激光束的聚焦进行自动补偿,从而保证在各点的聚焦性能稳定性。主要有两种方法实现聚焦补偿:(1)在导光系统中采用  $F$  轴浮动聚焦(意大利 Prima 公司<sup>[2]</sup>),即在垂直于工件表面的  $Z$  轴上增加一个由控制系统自动控制的浮动聚焦头,自动地对聚焦位置进行调整,使之始终保持在最佳的范围内。LUMONICS(英国)公司的设备中也有类似的装置<sup>[2]</sup>。(2)采用一组可变曲度的聚焦镜,通过控制聚焦镜的冷却剂的压力,有选择地改变聚焦镜的曲率,从而改变焦点位置的聚焦系统(如德国的 TRUMPF 公司<sup>[2]</sup>),改变光束直径,对焦点的偏移进行补偿,保证了在整个激光加工区域内焦点稳定。

综合考查国际上有代表性的各大激光加工系统生产商的现状,在采用“飞动导光”的大型大幅面激光加工系统中,均采用了在导光系统中加入扩束的技术措施,扩束系统成为大型激光加工系统中一个必需的光学单元。在此基础上,再加上各自研究出的改善和控制聚焦点偏移的方法,从而保证了激光加工系统的加工质量。

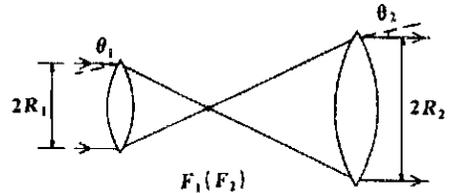


Fig. 3 The changes of beam divergence in beam expander

## 参 考 文 献

1 王智勇,陈 涛. 激光与光电子学进展, 1997; 12: 10~ 14

# 对称双圆孔傅里叶变换干涉条纹法测焦距

董永绵

(烟台师范学院物理系,烟台, 264025)

**摘要:** 提出用照相缩微法制作一个小孔距对称双圆孔作为待测透镜傅里叶变换输入函数,利用其傅里叶变换频谱面上的干涉条纹间距的测量值计算透镜焦距。该法装置简单,调节方便,测量精度较高。分析了测量原理和测量误差,并给出了与理论分析相符的结果。

**关键词:** 傅里叶变换 干涉条纹 焦距

## Focal length measurement by calculating Fourier transform spectrum interference fringes of symmetric double circular apertures

*Dong Yongmian*

(Department of Physics, Yantai Teachers' College, Yantai, 264025)

**Abstract** A method of focal length measurement by calculating Fourier transform spectrum interference fringes of symmetric double circular apertures with small distance is presented. The setup is simple with high accuracy. The principle is described and the error is analyzed. The consistent experimental results are also given in the paper.

**Key words:** Fourier transform interference fringes focal length

### 引 言

焦距是光学系统最基本的参数之一,焦距的测量与标定是光学仪器设计的重要工作,焦距测量的精确性直接影响到光学系统的性能,提高测量精度,一直是光学工作者研究的课题,特别是航空航天仪器和军用光学系统中焦距值测量的准确性尤为突出。焦距的测量方法有很多,如放大率法、精密测角法、散斑法、光栅法、莫尔偏折法等。最近几年又出现了单狭缝傅里叶变换频谱法<sup>[1]</sup>和联合傅里叶变换频谱法<sup>[2]</sup>。其中,狭缝傅里叶变换频谱法是通过测量频谱面上暗纹之间距离来计算透镜焦距的,该法需要精确测定狭缝宽度,但狭缝的不规则和不平行常引起较大的测量误差。另外,条纹平面不易精确确定是否在透镜后焦面上。联合傅里叶变换频谱法需要电寻址液晶光阀在计算机控制下产生完全相同的输入函数。输出端采用 CCD 摄像机采集条纹数据并经计算机分析计算焦距。该法测量精度较高,测量过程自动化程度高,

2 NTC(日本), FANUC(日本), PRIMA(意大利), TRUMPF(德国), MESSER(德国), LU MONICS(英国) 等公司的相关产品样本。

3 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992: 440~ 445

4 闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用. 天津: 天津科学出版社, 1994: 66~ 69

\* \* \*

作者简介: 赵 侠, 男, 1965 年 5 月出生。硕士, 副教授。从事激光加工及其应用的研究。