

# 变斑变焦激光切割光学系统的设计

葛佳琪<sup>1,2</sup>, 秦应雄<sup>1,2\*</sup>, 刘晓东<sup>1,2</sup>, 唐霞辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518057

**摘要** 为了满足不同材料、不同厚度板材加工的需求,设计了一种光斑大小和焦点位置可变的激光切割光学系统,该变斑变焦激光切割光学系统由复合准直镜组、变焦镜组、补偿镜组和聚焦镜组组成;采用在普通光学聚焦系统的准直镜组与聚焦镜组中间放置可调倍率扩束系统,再将准直镜组和可调倍率扩束系统合并成一个复合准直镜组的方案,简化了系统设计;建立了四镜组可变斑变焦光学系统的物理模型,推导了各镜组之间的移动规律,并利用 MATLAB 软件进行理论验证;在现有切割光学系统的基础上,设计一种变斑变焦激光切割光学系统,并利用软件优化像差。结果表明:通过移动变焦镜组和补偿镜组,得到了放大倍率为 1.000~3.750、焦点上下可调范围为 -20~+10 mm 的焦斑,实现了焦斑大小和焦点位置的精准可调。

**关键词** 光学设计; 变斑变焦; 激光切割; 光学系统; 焦斑; 放大倍率; 焦点位置

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0222001

## Design of Variable Spot and Zoom Optical System for Laser Cutting

Ge Jiaqi<sup>1,2</sup>, Qin Yingxiong<sup>1,2\*</sup>, Liu Xiaodong<sup>1,2</sup>, Tang Xiahui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>Research Institute of Huazhong University of Science and Technology in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

**Abstract** To meet the needs of metal processing with different materials and different thicknesses, we design a variable spot and zoom laser cutting optical system which consists of a composite collimating lens group, a zoom lens group, a compensated lens group, and a focusing lens group. We adopt an adjustable magnification expansion beam system in the middle of the collimating lens group and the focusing lens group of the ordinary optical focusing system, and then combine the collimating lens group and the adjustable magnification beam expanding system into a composite collimating lens group to simplify the system. We establish a physical model of the variable spot and zoom optical system with four lenses, derive the geometric locus of zoom group and compensated group. Theory verification is performed with MATLAB software. Based on the existing cutting optical system, we design a variable spot and zoom laser cutting optical system, and optimize the aberrations by using software. The results show that when we move the zoom lens group and the compensated lens group, the magnification is from 1.000 to 3.750, and the focus up and down adjustable range is from -20 mm to +10 mm. The precise adjustment of the focal spot size and focus position is thus realized.

**Key words** optical design; variable spot and zoom; laser cutting; optical system; focal spot; magnification; focus position

**OCIS codes** 220.2740; 220.4830; 350.3390

## 1 引 言

激光切割是目前激光加工应用领域的一个重要

技术,其原理是利用聚焦的高功率密度激光束照射待加工板材,使被照射的材料迅速熔化或气化,同时借助辅助气体吹除材料的熔融物质,在工件上形成

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-09-20; 录用日期: 2018-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100302)、国家自然科学基金(61575072)、中央高校基本科研业务费专项资金(2016YXMS209)、深圳市科技计划(JCYJ20160531194407693)

\* E-mail: qyx@hust.edu.cn

一个孔,再通过激光切割头与加工工件的相对移动完成整个切割过程<sup>[1-3]</sup>。激光切割一般由激光穿孔和激光切割两部分组成。在激光穿孔过程中,为了提高效率,希望激光焦点随穿孔过程实时下降至一个合适的负离焦位置。对于不同的材料,所需要的离焦量不同<sup>[4]</sup>。在激光穿孔穿透之前,切割喷嘴离工件越远越好,以避免熔融的工件材料飞溅而污染镜片。在切割过程中,喷嘴与工件之间的距离较小,一般为0.5~1.5 mm,这样的距离有利于辅助气体吹除材料的熔融物质。传统的激光切割穿孔效率低,而且容易污染镜片<sup>[5]</sup>,整体升降切割头的方式也无法调节激光焦点与喷嘴的相对位置。为了提高穿孔效率,研究人员希望可以在穿孔过程中调节激光焦点的位置,以达到快速穿孔的目的。激光切割变焦方法主要有移动聚焦镜调焦(F轴技术)、变曲率发射镜(VRM)调焦、准直调焦。

在激光切割中,光斑大小的调节对切割不同厚度的板材具有一定帮助。在进行薄板切割时,一般采用光斑直径小且能量密度高的焦斑,得到的切缝窄,切割效率高,在高速切割中发挥着重要作用。在进行厚板切割时,一般采用光斑直径大的焦斑,得到的切缝宽,有助于吹走熔融的金属材料,同时可以获得较大的焦深,切割断面的垂直度好,可以大幅提高切割质量<sup>[6]</sup>。传统的激光切割头通过人工更换聚焦镜的方式来适应不同厚度和材料的工件。上述3种变焦方法虽然可以调节焦点位置,但焦斑大小和焦深只能小幅变化,不能主动地改变焦斑的大小。因此,在激光切割过程中,控制激光焦斑大小和焦点位置是一项非常关键的技术,即通过某种变焦变焦技术对激光焦斑大小和焦点位置进行精确控制,使激光切割机无需人工干预就可切割不同厚度和种类的板材,从而大幅提高切割效率和切割质量。近年来,美国II-VI HIGHYAG公司推出的BIMO-FSC-MZ系列以及德国Precitec公司推出的Zoom品牌激光切割头,均可实现变焦与变焦的结合<sup>[7-8]</sup>,从而可以满足不同材料、不同厚度板材的激光切割需求,这也是未来激光切割发展的趋势。

为满足不同厚度材料的切割要求,本文建立了变焦变焦光学系统的物理模型,推导了各镜组之间的移动规律,通过MATLAB软件仿真进行理论验证,并利用Zemax软件进行设计优化,分析像质;此外,本课题组在普通两镜组激光切割光学系统的基础上,设计了一个变焦变焦激光切割光学系统,以实现焦斑大小和焦点位置的精准可调。

## 2 基本原理

### 2.1 系统结构分析

普通两镜组激光切割光学系统由准直镜组和聚焦镜组组成,如图1所示,其中 $d_{\text{fiber}}$ 为光纤的内芯直径, $d_{\text{focus}}$ 为最终得到的焦斑直径。激光从光纤端口出射后,通过准直镜 $L_c$ 准直为平行光束,再由聚焦镜 $L_f$ 聚焦成高能量的光点用于切割。本研究采用在准直镜与聚焦镜中间插入一个扩束系统的方法,组合得到了一个激光变焦变焦切割系统。目前最常用的扩束系统采用三镜组结构,即由固定镜组 $L_1$ 、变焦镜组 $L_2$ 和补偿镜组 $L_3$ 组成<sup>[9-10]</sup>,如图2所示。当变焦镜组相对于固定镜组移动时,补偿镜组要随之移动相应的距离,使新的焦点稳定在补偿镜组的焦点位置上,得到不同的扩束比<sup>[11-14]</sup>。普通激光切割系统与扩束系统组合后得到的五镜组激光变焦变焦系统如图3所示。

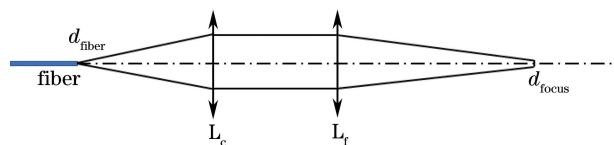


图1 两镜组激光切割系统

Fig. 1 Laser cutting system with two lens

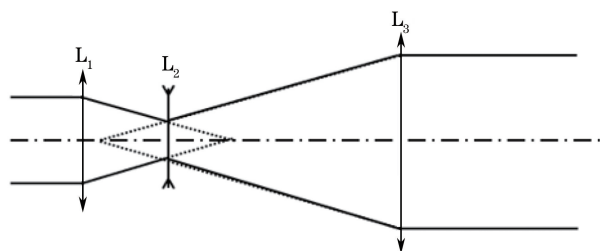


图2 变焦扩束系统

Fig. 2 Zoom beam expander system

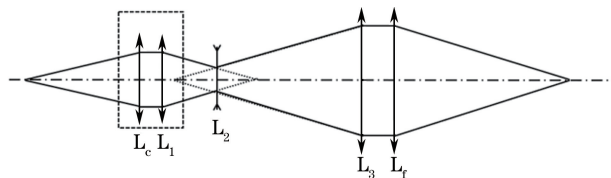


图3 五镜组激光变焦变焦系统

Fig. 3 Variable spot and zoom laser system with five lens

设准直镜的焦距为 $f_c$ ,聚焦镜的焦距为 $f_f$ ,可以得到

$$d_{\text{focus}} = \frac{f_f}{f_c} d_{\text{fiber}} \quad (1)$$

设扩束系统的扩束比为 $M$ ,插入扩束系统后,准直镜与扩束系统可以看成是一个复合的准直镜

组。对于多个镜组组成的复合系统,其总焦距等于第 1 个镜组的焦距乘以后面各镜组的放大倍率<sup>[15]</sup>,因此可以得到复合准直镜组的有效焦距  $f_{\text{eff}}$  为

$$f_{\text{eff}} = M f_c. \quad (2)$$

对于整个系统来说,

$$d_{\text{focus}} = \frac{f_f}{M f_c} d_{\text{fiber}}. \quad (3)$$

变焦系统焦点的大小相对于光纤端口的入射光斑的

$$\text{放大倍率 } k = \frac{f_f}{M f_c}.$$

本研究采用的准直透镜焦距为 100 mm,聚焦透镜焦距为 150 mm,光纤芯径为 50  $\mu\text{m}$ ,光束质量为 2.0 mm · mrad,对应的发散角为 80 mrad。因此,为了使整个系统的焦斑放大倍率  $k$  达到 1.000 ~ 3.750,中间插入的扩束系统的扩束比  $M$  应为  $\frac{1.5}{3.75} \sim \frac{1.5}{1}$ ,即 0.4 ~ 1.5。

由于系统中准直透镜与扩束系统的固定镜组的位置均不发生改变,因此,可以将两个镜组看成一个组合镜组,成为新的固定镜组  $L_1$ ,五镜组的结构可以简化为四镜组。本课题组设计的激光变斑变焦系统的最终结构如图 4 所示。

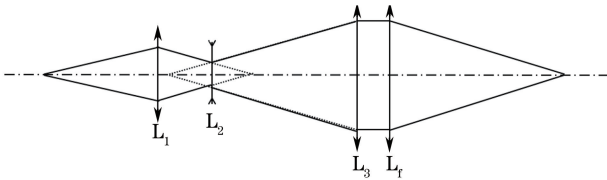


图 4 四镜组激光变斑变焦系统

Fig. 4 Variable spot and zoom laser system with four lens

## 2.2 镜组移动规律

本课题组设计的变焦变斑系统主要通过移动扩束系统中变焦镜组和补偿镜组的位置来完成焦斑大小的调节。扩束系统的原理如图 5 所示。 $L_1$  为固定镜组, $L_2$  为变焦镜组, $L_3$  为补偿镜组, $s_1$  为  $L_2$  的物点位置到  $L_2$  的距离, $s_2$  为  $L_2$  的像点位置到  $L_2$  的距离。 $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  的像方焦距分别为  $f'_1$ 、 $f'_2$  和  $f'_3$ ,其中  $f'_1 > 0$ ,  $f'_2 < 0$ ,  $f'_3 > 0$ 。透镜  $L_1$  与透镜  $L_2$  之间的距离为  $d_1$ ,透镜  $L_2$  与透镜  $L_3$  之间的距离为  $d_2$ <sup>[16]</sup>。

将  $L_1$  和  $L_2$  看成一个组合透镜,则组合透镜的焦距  $f'_{12}$  为

$$f'_{12} = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d_1}. \quad (4)$$

系统的扩束比  $M$  为

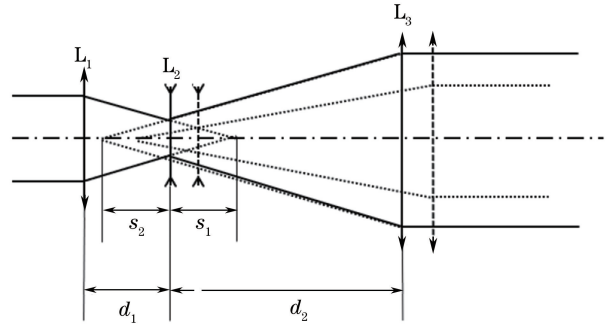


图 5 扩束系统的原理

Fig. 5 Principle of beam expander system

$$M = \left| \frac{f'_3}{f'_{12}} \right|. \quad (5)$$

由高斯公式可以得到

$$\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'_2}. \quad (6)$$

在变焦镜组移动过程中, $L_2$  的物点位置在坐标轴上的位置保持不变,与  $L_1$  的焦点位置重合。为了保持  $L_2$  的像点位置与  $L_3$  的物方焦点位置重合,需要满足

$$s_1 = f'_1 - d_1, \quad (7)$$

$$s_2 = d_2 - f'_3. \quad (8)$$

将(7)~(8)式代入(6)式可以得到

$$d_2 = f'_3 + \frac{f'_2(f'_1 - d_1)}{f'_1 + f'_2 - d_1}. \quad (9)$$

考虑  $f'_1 + f'_2 > 0$  的情况,分析变焦镜组从靠近固定镜组的方向逐渐向右移动过程中扩束比  $M$  的变化:

1) 当  $d_1 = 0$  时,扩束比  $M = \frac{f'_3(f'_1 + f'_2)}{f'_1 f'_2}$ ;

2) 当  $0 < f'_1 + f'_2 - d_1 < f'_1 + f'_2$ ,即  $0 < d_1 < f'_1 + f'_2$  时, $f'_{12} < 0$ ,在变焦镜组向右移动过程中, $d_1$  变大,  $|f'_{12}|$  变大,  $M$  变小,  $d_2 = f'_3 + \frac{f'_2(f'_1 - d_1)}{f'_1 + f'_2 - d_1} < f'_3$ ;

3) 当  $d_1 = f'_1 + f'_2$  时, $f'_1 + f'_2 - d_1 = 0$ ,不能构成系统;

4) 当  $f'_2 < f'_1 + f'_2 - d_1 < 0$ ,即  $f'_1 + f'_2 < d_1 < f'_1$  时, $f'_{12} > 0$ ,在变焦镜组向右移动过程中, $d_1$  变大,  $|f'_{12}|$  变小,  $M$  变大,  $d_2 = f'_3 + \frac{f'_2(f'_1 - d_1)}{f'_1 + f'_2 - d_1} > f'_3$ ;

5) 当  $d_1 = f'_1$  时,  $f'_1 + f'_2 - d_1 = f'_2$ ,  $M = \left| \frac{f'_3}{f'_1} \right|$ ;

6) 当  $f'_1 + f'_2 - d_1 < f'_2$  时,即  $d_1 > f'_1$  时,  $f'_{12} >$

0,在变焦镜组向右移动过程中, $d_1$  变大, $|f'_{12}|$  变小, $M$  变大, $d_2 = f'_3 + \frac{f'_2(f'_1 - d_1)}{f'_1 + f'_2 - d_1} < f'_3$ 。

通过以上分析可以看出,在变焦镜组由靠近固定镜组位置逐渐向远离固定镜组位置移动的过程中,2)、4)、6)段均可以完成变焦。但是由于6)段中 $d_1$  的取值较大,4)段中的 $d_2 > f'_3$ ,这两种情况均会导致系统长度过大,因此在实际应用中,2)段是最可取的。

下面分析变焦镜组移动过程中 $d_2$  的变化。对

表 1 变焦镜组移动时各项数据的变化

Table 1 Change of all items when zoom group is moved

| $d_1$                                    | $d_2$                        | $f'_{12}$                           | $M$               |
|--|------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| $0 < d_1 < f'_1 + f'_2, d_1 \uparrow$    | $d_2 < f'_3, d_2 \downarrow$ | $f'_{12} < 0,  f'_{12}  \uparrow$   | $\downarrow$      |
| $f'_1 + f'_2 < d_1 < f'_1, d_1 \uparrow$ | $d_2 > f'_3, d_2 \downarrow$ | $f'_{12} > 0,  f'_{12}  \downarrow$ | $\uparrow$        |
| $d_1 = f'_1$                             | $d_2 = f'_3$                 | $f'_{12} = f'_1$                    | $M =  f'_3/f'_1 $ |
| $f'_1 + f'_2 - d_1 < f'_2, d_1 \uparrow$ | $d_2 < f'_3, d_2 \downarrow$ | $f'_{12} > 0,  f'_{12}  \downarrow$ | $\uparrow$        |

### 3 设计实例分析

本研究设计的是一个整体放大倍率 $k$  为1.000~3.750 的激光变焦变斑系统。激光波长为1.07  $\mu\text{m}$ 。确定系统的准直透镜和聚焦透镜焦距分别为100 mm 和150 mm。根据2.1 节中讨论的内容,已经确定需要插入的扩束系统的变焦范围为0.4~1.5。根据2.2 节的分析可以确定 $d_1$  的范围为0~ $f'_1 + f'_2$ 。结合实际应用,整个系统的长度应控制在150 mm 以内,镜片之间的距离应控制在合适的长度,即 $d_1$  和 $d_2$  的取值不能过小,补偿镜组的变化曲线应注意不能出现拐点。同时,为了防止镜片被烧坏,系统中的光束直径不能小于5 mm。根据这些条件,以及第2 节总结得到的变焦镜组与补偿镜组之间的移动规律,即(4)式、(5)式和(9)式,拟取 $f'_1 = 100 \text{ mm}, f'_2 = -28 \text{ mm}, f'_3 = 150 \text{ mm}$ 。由于系统中固定镜组与系统的准直透镜在整个变焦过程中的位置和焦距大小均保持不变,因此,将这两个镜组合成一个新的固定镜组,以简化系统。组合后的固定镜组焦距为 $f'_1 = \frac{100 \times 100}{100 + 100} = 50 \text{ mm}$ 。

当扩束比 $M$  为0.4~1.5(对应整个系统的放大倍率 $k$  为1.000~3.750)时,根据理想数据计算得到 $d_1$  和 $d_2$  的值如表2 所示。

以激光出射的光纤端口位置作为光轴的原点,根据表2 中的数据,可以计算变焦镜组和补偿镜组

(9)式关于 $d_1$  求导数,可以得到

$$d'_2 = -\frac{f'^2_2}{(f'_1 + f'_2 - d_1)^2} \quad (10)$$

在变焦镜组移动过程中, $d'_2$  的值小于0,因此, $d_2$  的值在整个过程中一直减小。在 $d_1$  由0 增大到 $f'_1 + f'_2$  位置过程中, $d'_2$  的变化量增大;在 $d_1$  从 $f'_1 + f'_2$  位置一直增大到大于 $f'_1$  位置过程中, $d'_2$  的变化量减小。

在变焦镜组移动过程中,各项数据的变化情况如表1 所示,其中 $\uparrow$  表示变大, $\downarrow$  表示变小。

在光轴上的坐标位置,如表3 所示。

表 2 不同放大倍率时 $d_1$  和 $d_2$  的值

Table 2 Values of  $d_1$  and  $d_2$  with different magnifications

| $M$ | $k$   | $d_1/\text{mm}$ | $d_2/\text{mm}$ |
|-----|-------|-----------------|-----------------|
| 0.4 | 3.750 | 64.53           | 17.00           |
| 0.6 | 2.500 | 60.80           | 52.00           |
| 0.8 | 1.875 | 57.07           | 69.00           |
| 1.0 | 1.500 | 53.33           | 80.07           |
| 1.2 | 1.250 | 49.60           | 87.00           |
| 1.4 | 1.070 | 45.87           | 92.00           |
| 1.5 | 1.000 | 44.00           | 94.00           |

表 3 不同放大倍率时变焦镜组和补偿镜组的坐标位置

Table 3 Coordinate positions of zoom group and compensated group with different magnifications

| $M$ | $k$   | Coordinate position /mm |                   |
|-----|-------|-------------------------|-------------------|
|     |       | Zoom group              | Compensated group |
| 0.4 | 3.750 | 164.53                  | 181.53            |
| 0.6 | 2.500 | 160.80                  | 212.80            |
| 0.8 | 1.875 | 157.07                  | 226.07            |
| 1.0 | 1.500 | 153.33                  | 233.40            |
| 1.2 | 1.250 | 149.60                  | 236.60            |
| 1.4 | 1.070 | 145.87                  | 237.87            |
| 1.5 | 1.000 | 144.00                  | 238.00            |

随着系统放大倍率的改变,变焦镜组和补偿镜组的运动轨迹如图6 所示。可知,变焦镜组和补偿镜组的运动轨迹符合之前的分析,在运动过程中没

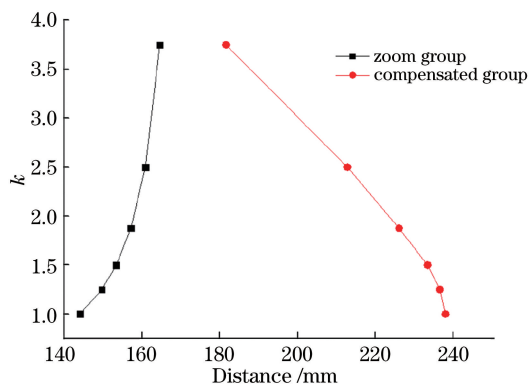


图 6 变焦镜组和补偿镜组在光轴上的运动轨迹

Fig. 6 Geometric locus of zoom group and compensated group

有出现拐点,满足了系统变焦的可行性。

将以上数据在 MATLAB 软件中用  $Q$  参数进行理论计算和仿真,系统中焦斑大小的变化如图 7 所示。由图 7 可知,在变焦镜组移动过程中,整个系统完成了 1.000~3.750 倍变焦。图中激光出射的光纤端口位置为光轴的原点。第 1 个拐点为固定镜

组的位置,第 2 个拐点为变焦镜组的位置,第 3 个拐点为补偿镜组的位置,第 4 个拐点为聚焦透镜的位置。激光从光纤端口出射,到达固定镜组时光束的半径为 8 mm,通过扩束系统后,通过变焦镜组和补偿镜组的调节,在不同扩束比时,光束半径发生相应的变化。最后通过聚焦透镜聚焦,光斑的大小会根据扩束系统扩束比的不同而不同。扩束系统扩束比为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.5,分别对应焦斑大小相对于光纤出口半径放大 3.750 倍、2.500 倍、1.875 倍、1.500 倍、1.250 倍和 1.000 倍。

图 7 中焦斑部分具体细节的放大图如图 8 所示。由图 8 可知,焦斑半径分别为 0.02513, 0.03132, 0.03747, 0.04691, 0.06251, 0.09151 mm, 与光纤端口的出射半径 0.025 mm 相比分别放大了 1.000 倍、1.250 倍、1.500 倍、1.875 倍、2.500 倍和 3.750 倍。

在得到特定光斑大小的情况下,保持变焦镜组的位置不动,移动补偿镜组的位置,可以获得焦点位

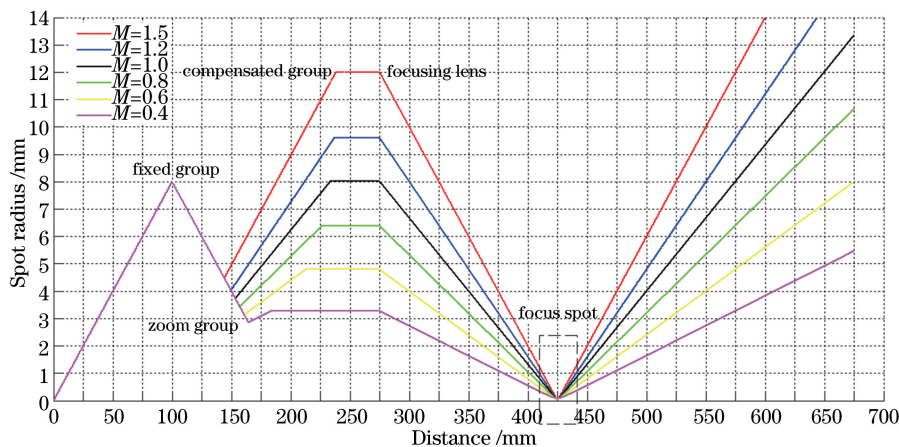


图 7 MATLAB 软件仿真结果

Fig. 7 Simulation results with MATLAB software

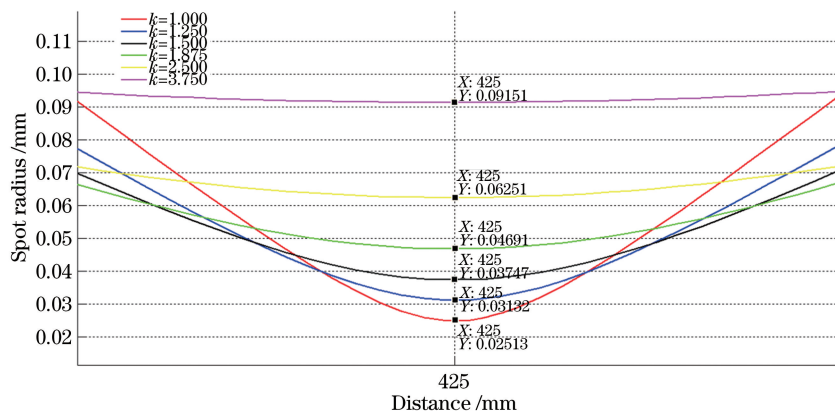


图 8 焦斑处细节放大图

Fig. 8 Amplification diagram of focal spot

置的移动。在任意一个固定的系统光斑放大倍率下,通过移动补偿镜组的位置,均可以获得焦点位置的改变,而焦斑半径基本不变。当补偿镜组向  $z$  轴正向移动时,焦点位置向  $z$  轴负向移动;当补偿镜组向  $z$  轴负向移动时,焦点位置向  $z$  轴正向移动。在不同的放大倍率下,焦点位置变化随补偿镜组移动的规律基本相同。当补偿镜组向  $z$  轴正向移动 23 mm 时,焦点位置向  $z$  轴负向移动 18 mm;补偿镜组向  $z$  轴负向移动 9 mm 时,焦点位置向  $z$  轴正向移动 10 mm。焦点位置随补偿镜组移动的变化如图 9 所示。

#### 4 系统参数优化

根据之前的设计和计算结果,选用一个焦距为 50 mm 的透镜作为固定镜组,通光孔径为 20 mm;以焦距为 -28 mm 的透镜作为变焦镜组,通光孔径为 5.5 mm;以焦距为 150 mm 的透镜作为补偿镜组,通光孔径为 36 mm;以焦距为 150 mm 的透镜作为系统的聚焦透镜,通光孔径为 36 mm。变焦镜组的口径较小,采用单片式,其余镜组可以采用双分离型透镜组,相比于单透镜,可以更好地校正系统的像差。

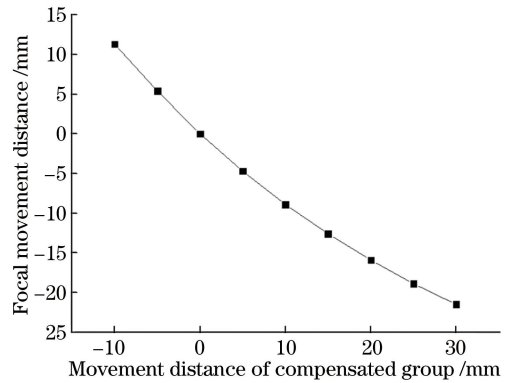


图 9 焦点移动距离随补偿镜组移动距离的变化  
Fig. 9 Change of focal movement distance with the movement distance of compensated group

首先根据给定的参数,利用 Zemax 软件分别优化所设计的各镜片。由于系统对像差的要求较高,利用普通的球面透镜难以达到需要的条件,因此在透镜的一个面加入 Conic 系数,利用非球面获得更好的优化像差的结果。最终得到的镜片参数如表 4~6 所示,其中:OBJ 为物面,OBJ 的厚度为物距;STO 为孔径光阑,STO 的厚度为光阑距单透镜第一面的距离;IMA 为像面。

表 4 利用 Zemax 软件设计的固定镜组的参数

Table 4 Parameters of fixed group calculated by Zemax software

| Item | Surface type | Radius /mm | Thickness /mm | Glass material | Conic coefficient |
|------|--------------|------------|---------------|----------------|-------------------|
| OBJ  | Standard     | Infinity   | Infinity      |                | 0                 |
| STO  | Standard     | 107.35     | 3.00          | Silica         | 0                 |
| 2    | Standard     | -85.81     | 1.00          |                | 0                 |
| 3    | Standard     | 39.17      | 3.00          | Silica         | -0.94             |
| 4    | Standard     | 518.98     | 47.33         |                | 0                 |
| IMA  | Standard     | Infinity   |               |                | 0                 |

表 5 利用 Zemax 软件设计的变焦镜组的参数

Table 5 Parameters of zoom group calculated by Zemax magnification

| Item | Surface type | Radius /mm         | Thickness /mm | Glass material | Conic coefficient |
|------|--------------|--------------------|---------------|----------------|-------------------|
| OBJ  | Standard     | Infinity           | Infinity      |                | 0                 |
| STO  | Standard     | $2.94 \times 10^7$ | 2.00          | Silica         | 0                 |
| 2    | Standard     | 13.04              | -29.00        |                | -2.10             |
| IMA  | Standard     | Infinity           |               |                | 0                 |

表 6 利用 Zemax 软件设计的补偿镜组和聚焦透镜的参数

Table 6 Parameters of compensated group and focusing lens calculated by Zemax magnification

| Item | Surface type | Radius /mm | Thickness /mm | Glass material | Conic coefficient |
|------|--------------|------------|---------------|----------------|-------------------|
| OBJ  | Standard     | Infinity   | Infinity      |                | 0                 |
| STO  | Standard     | 98.94      | 5             | Silica         | 0                 |
| 2    | Standard     | 58.34      | 2             |                | 1.86              |
| 3    | Standard     | 38.68      | 5             | Silica         | 0                 |
| 4    | Standard     | 240.66     | 144           |                | 0                 |
| IMA  | Standard     | Infinity   |               |                | 0                 |

将这些镜组直接组合后,系统仍存在较大的像差。为了使系统可以达到焦斑大小相对于出射光斑半径放大 1.000~3.750 倍的条件,需要采用 Zemax

软件设置评价函数,利用自动优化的功能,对整个系统中的镜组参数进行进一步优化。最终的优化结果如表 7 所示。

表 7 优化后的系统结构参数

Table 7 Parameters of system after optimization

| Item | Surface type | Radius /mm | Thickness /mm | Glass material | Conic coefficient |
|------|--------------|------------|---------------|----------------|-------------------|
| OBJ  | Standard     | Infinity   | Infinity      |                | 0                 |
| STO  | Standard     | 107.35     | 3.00          | Silica         | 0                 |
| 2    | Standard     | -85.81     | 1.00          |                | 0                 |
| 3    | Standard     | 39.17      | 3.00          | Silica         | -0.94             |
| 4    | Standard     | 518.98     | 39.38         |                | 0                 |
| 5    | Standard     | -45.68     | 2.00          | Silica         | -22.44            |
| 6    | Standard     | 17.43      | 87.12         |                | 0                 |
| 7    | Standard     | 703.05     | 5.00          | Silica         | 0                 |
| 8    | Standard     | 95.62      | 2.00          |                | 0                 |
| 9    | Standard     | 76.59      | 5.00          | Silica         | 0                 |
| 10   | Standard     | -94.75     | 25.00         |                | 0                 |
| 11   | Standard     | 98.94      | 5.00          | Silica         | 0                 |
| 12   | Standard     | 58.39      | 2.00          |                | 1.86              |
| 13   | Standard     | 38.68      | 5.00          | Silica         | 0                 |
| 14   | Standard     | 240.66     | 144.01        |                | 0                 |
| IMA  | Standard     | Infinity   |               |                | 0                 |

镜片有厚度,各镜组之间的距离有一定的变化,根据优化后的系统参数,利用 Zemax 软件的全局优化功能,计算得到的  $d_1$  和  $d_2$  的值如表 8 所示,其中  $d_1$  与  $d_2$  之间的距离表示前一个镜组的最后一个曲面到下一个镜组的第 1 个曲面之间的距离。由表 8 可知,计算结果与表 2 中的理论计算结果基本吻合。

表 8 优化后不同放大倍率下计算得到的  $d_1$  和  $d_2$  的值Table 8 Values of  $d_1$  and  $d_2$  calculated at different magnification after optimization

| $M$ | $k$   | $d_1/\text{mm}$ | $d_2/\text{mm}$ |
|-----|-------|-----------------|-----------------|
| 0.4 | 3.750 | 60.27           | 11.17           |
| 0.6 | 2.500 | 55.75           | 50.26           |
| 0.8 | 1.875 | 50.28           | 70.42           |
| 1.0 | 1.500 | 45.34           | 80.07           |
| 1.2 | 1.250 | 42.10           | 84.33           |
| 1.4 | 1.070 | 40.08           | 86.45           |
| 1.5 | 1.000 | 39.38           | 87.12           |

激光变斑变焦光学系统属于小像差系统,本研究利用波像差对系统的像质进行评价。放大倍率  $k$  分别为 1.000、1.875、3.750 时,Zemax 软件输出的光学系统图、聚焦面光斑的光线分布、波像差图像如图 10 所示。由图 10 可知:聚焦面的光斑光线分布均

匀,并且在不同的放大倍率时波像差的最大方均根值(RMS)为 0.2022 waves,均小于 1/4 波长;当  $k$  为 1.000 时,RMS 可以达到 0.1712 waves,满足像质评价标准。

在实际的设备制造和装配过程中,往往会产生一定的误差,使得系统的性能发生一定程度的劣化。利用 Zemax 软件对系统的公差进行分析,设定的公差范围如表 9 所示。

经过 Zemax 公差灵敏度分析后,得到了波前误差的预估变化值。目前系统的标准波相差为 0.2022 waves,预估变化值为 0.0153 waves。在给定公差范围的条件下,最终预估的系统的最大波像差为 0.2175 waves,仍小于 1/4 波长,满足要求。由此可知,系统的公差是合理的。

## 5 结 论

本课题组利用三组元的变焦扩束原理,与一般的激光准直聚焦系统相结合,设计了一个可以完成光斑半径放大 1.000~3.750 倍、焦点位置为  $-20 \sim +10$  mm 的四镜组激光变斑变焦系统。通过分析系统中变焦镜组和补偿镜组的工作原理和运动轨迹,完成了实际的系统设计。通过 MATLAB 软件进行理论计算验证,并用 Zemax 软件进行优化设计,对

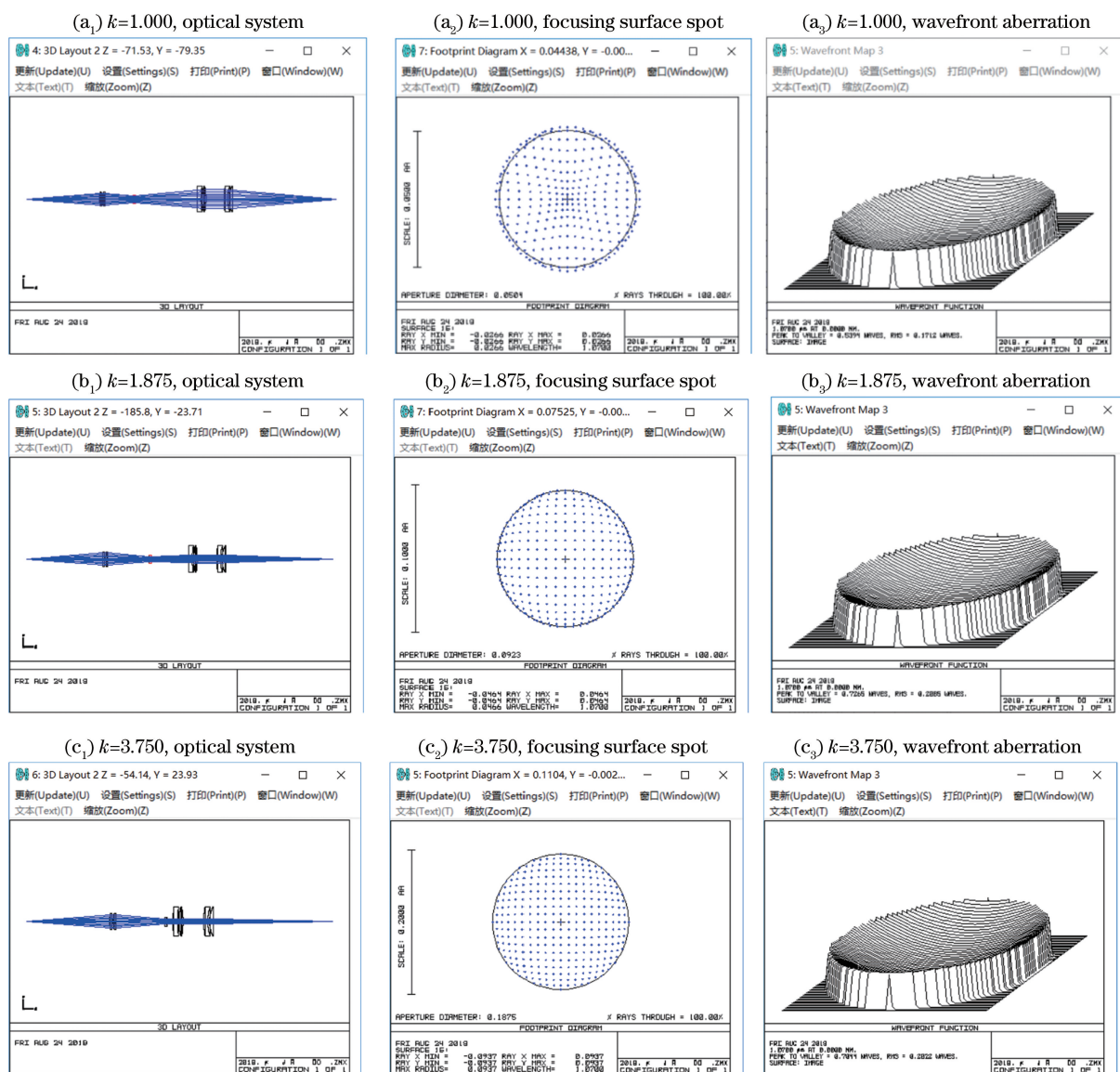


图 10 不同放大倍率时的光学系统、聚焦面光斑与波像差

Fig. 10 Optical system, focusing surface spot, and wavefront aberration with different magnifications

表 9 系统的公差参数

Table 9 Tolerance parameters of this system

| Front R /mm | Back R /mm | Thickness /mm | Decenter X /mm | Decenter Y /mm | Tilt X | Tilt Y |
|-------------|------------|---------------|----------------|----------------|--------|--------|
| ±0.15       | ±0.15      | ±0.15         | ±0.15          | ±0.15          | ±0.1   | ±0.1   |

整个系统进行了像质分析。该系统可在保证放大 1.000~3.750 倍的情况下,具有较好的成像质量。

参 考 文 献

[1] Muto S, Tei K, Fujioka T. Laser cutting for thick concrete by multi-pass technique[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(s1): 39-41.  
 [2] Li X H, Garner S. Laser cutting of flexible glass [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 8 – 13 June, 2014, San Jose, California, United States.

Washington, D. C.: IEEE, 2014: ATu3L.1.  
 [3] Fox M D T, French P, Peters C, et al. Applications of optical sensing for laser cutting and drilling [J]. Applied Optics, 2002, 41(24): 4988-4995.  
 [4] Yang L L, Zhang L, Zhu H H, et al. Influences of lens distance and tilt angle between beam expanders on laser focusing characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041401.  
 杨亮亮, 张璐, 朱海红, 等. 扩束镜间距和倾斜度对激光聚焦特性的影响 [J]. 激光与光电子学进展,



- 2018, 55(4): 041401.
- [5] Zhou Q, Zhou Z B. A way of three-steps focal position control for high speed piercing in laser cutting[J]. Mechanical Engineer, 2014(9): 223-224. 周庆, 周志兵. 一种激光切割三级变焦快速穿孔方法[J]. 机械工程师, 2014(9): 223-224.
- [6] Cai C, Zhu P C, Dong X L. Key techniques and application prospect of fiber laser cutting head [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2017, 52(3): 45-48. 蔡诚, 朱鹏程, 董香龙. 光纤激光切割机切割头关键技术及应用前景[J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52(3): 45-48.
- [7] II-VI Infrared. Optics catalog and reference guide [M]. Saxonburg: II-VI Incorporated, 2016.
- [8] II-VI HIGHYAG. Technical specifications of BIMOFSC laser cutting head [M]. Saxonburg: II-VI Incorporated, 2016.
- [9] Li L Y, Li C C, Li Y Z, *et al.* Design of laser expanding systems for multi-wave length[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(8): 714-716. 李良钰, 李常春, 李银柱, 等. 多波长激光扩束系统的设计[J]. 中国激光, 2001, 28(8): 714-716.
- [10] Wang P F, Xiang Y, Gao J, *et al.* Design of collimating and beam expanding laser system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922007. 王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922007.
- [11] Zhang T C, Liao Z B. Design of  $6\times$  cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004. 张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.
- [12] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, *et al.* A new compound zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1108001. 操超, 廖志远, 白瑜, 等. 一种新型复合变焦光学系统[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1108001.
- [13] Li Y, Zhang B, Hong Y F. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005. 李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- [14] Gao D R, Zhong L J, Zhao Z, *et al.* Zoom optical system design based on Matlab [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0416002. 高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于Matlab的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- [15] Liu H B, An Z Y, Gao Y H, *et al.* System design of a varifocal beam expander [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(4): 43-45, 49. 刘焕宝, 安志勇, 高瑀含, 等. 一种激光变焦扩束光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 43-45, 49.
- [16] Kong X L, Hao P M. Optical design of varifocal beam expander [J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(5): 7-11. 孔祥蕾, 郝沛明. 变焦扩束系统的光学设计[J]. 应用光学, 2001, 22(5): 7-11.