

文章编号: 0253-2239(2009)03-0682-06

# 离轴 $90^\circ$ 抛物面镜焦斑特性分析

罗 曦 陈培锋 王 英

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 随着离轴抛物面反射聚焦镜在激光加工领域的广泛应用,如何提高其聚焦光斑质量成为一个亟需解决的问题。理论上,抛物面反射聚焦方式可以消除球差的影响,得到高质量的聚焦光斑。但是抛物面反射镜是最难调整的反射镜系统之一,对光轴失准的敏感度极高。细微的失准引发的像散将大大降低焦斑的光强。为了深化对其的认识,通过几何光学和物理光学的方法,对离轴  $90^\circ$  抛物面镜应用于激光聚焦光路时,光轴的角度失准对聚焦光斑造成的影响进行分析。结果表明,细微的角度失准将导致焦斑面积大大增加,从而大大降低了焦斑的光强。并通过二阶矩法证明了角度失准将导致抛物面镜焦平面附近产生一对互相垂直的焦线,同时证明了两焦线所处  $z$  平面与焦点  $F$  的绝对距离相等,并与入射偏角  $\theta$  呈线性关系。焦线的存在使入射高斯光束转变为椭圆高斯光,降低了焦面处的峰值光强。抛物面镜对角度失准的敏感度非常高,几个 mrad 的失准角将导致焦面处的峰值光强下降一半。

**关键词** 几何光学; 角度失准; 光线追迹; 离轴  $90^\circ$  抛物面镜; 焦斑

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0682

## Analysis of $90^\circ$ Off-Axis Parabolic Mirror Focal Spot Characteristic

Luo Xi Chen Peifeng Wang Ying

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** With the wide application of off-axis parabolic mirror in laser processing, how to improve the quality of focal spot becomes a problem to be solved. In theory, the parabolic reflecting focusing approach can eliminate the influence of spherical aberration, and get high-quality focal spot. But the parabolic mirror is one of the most difficult adjustment reflector systems, and it is very sensitive to the optical axis misalignment. So that, the focal power density will decrease rapidly due to the tiny angular misalignment. In order to deepen understanding on the poor off-axis properties of the parabolic mirror, by geometrical optics and physical optics, the influence of the misalignment angle on the  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror focal spot characteristic is studied. The results indicate that the focal spot size is increased and the intensity is decreased greatly because of the tiny angular misalignment. By second-order moments, it is proved a pair of focal lines is produced near the focal plane due to the angular misalignment. It is also proved that the distances between the  $z$  planes at which the two focal lines are located and the focus  $F$  are equal, and are proportional to the misalignment angle. Because of the existence of the pair of focal lines, the incident Gaussian beam becomes elliptical Gaussian mode, which decreases the peak intensity at the focal plane. The parabolic mirror is very sensitive to the misalignment, and the misalignment angle of several mrad will make the peak intensity at the focal plane drop to the half.

**Key words** geometric optics; angle misalignment; ray tracking;  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror; focal spot

## 1 引 言

随着磨制<sup>[1]</sup>、加工<sup>[2]</sup>、测试<sup>[3]</sup>和装调<sup>[4]</sup>技术的不断涌现与快速发展,抛物面镜<sup>[5]</sup>已广泛应用于传感系统校准、辐射测量、准直<sup>[6,7]</sup>和激光的聚焦工作

中<sup>[8]</sup>。激光加工就是将激光束照射到加工物体的表面,用以除去或熔化材料以及改变物体表面性能。激光加工不同于其他方法最显著的地方,就是它可以把光的能量通过聚焦集中在很小的面积上,使被

收稿日期: 2008-04-16; 收到修改稿日期: 2008-09-17

作者简介: 罗 曦(1982-),男,博士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: luoxihust@126.com

导师简介: 陈培锋(1963-),男,博士,教授,主要从事激光加工、光电检测方面的研究。E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

照射物体瞬间接受极高的激光功率密度照射,从而达到加工的目的。目前,连续、大功率激光器广泛应用于切割、焊接<sup>[9,10]</sup>、快速成型和金属表面改性<sup>[11]</sup>等。不同加工方式的要求不同,对激光束聚焦采取的方式也不一样。抛物面反射聚焦方式可以消除球差的影响,得到高质量的聚焦光斑。理论上,抛物面反射镜应把激光束聚焦到光束的衍射极限(衍射极限是对特定激光束直径和模式所能达到的最小焦斑)。但是实际中抛物面反射镜是最难调整的反射镜系统之一,其对光轴失准的敏感度极高,细微的失准引发的像散将大大降低焦斑的光强,从而大大影响激光加工的效率与效果。因此在进行激光聚焦时,需要对抛物面镜光轴进行精密调节,以期得到高质量的聚焦光斑,提高激光加工的效率,改善激光加工的效果。本文拟从几何光路追迹和物理光学出发,对离轴 90° 抛物面镜应用于激光聚焦光路时,光轴的角度失准对聚焦光斑造成的影响进行分析,以期深化对激光加工应用的指导意义。

## 2 光路追迹

建立如图 1 所示的坐标系。选入射光一波振面  $AO'C$ , 将坐标系原点平移至  $O'$  点, 得到新坐标系  $O'x'y'z'$ 。假设入射光束为均匀分布的圆光束<sup>[12]</sup>, 选取入射光点阵如图 2 所示。

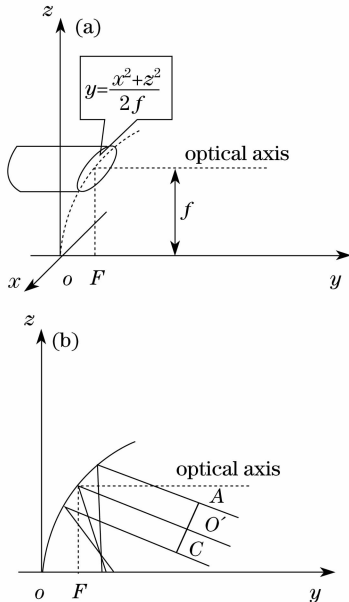


图 1 90° 离轴抛物面镜示意图(a)坐标系;  
(b)抛物面反射镜对激光束的聚焦

Fig. 1 Schematic diagram of 90° off-axis parabolic mirror  
(a) coordinates; (b) laser beam focused by the parabolic mirror

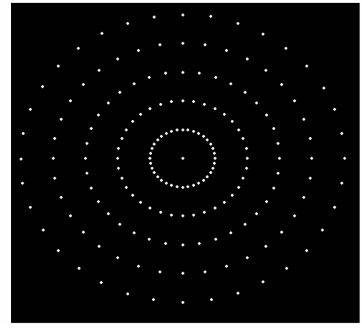


图 2 入射点光阵

Fig. 2 The incident-light lattice

取图 2 中任意一点, 则可假设其入射光线方程为

$$\frac{x-x_0}{\cos \alpha} = \frac{y-y_0}{\cos \beta} = \frac{z-z_0}{\cos \gamma}, \quad (1)$$

又由图 1 中抛物面方程为

$$x^2 + z^2 = 2fy. \quad (2)$$

联立式(1)、(2), 则可得入射光线与抛物面的交点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。

于是由式(2), 可得  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  处抛物面的法线方程为

$$\frac{x-x_1}{x_1} = \frac{y-y_1}{-f} = \frac{z-z_1}{z_1}. \quad (3)$$

利用光线矢量的夹角关系, 便可以唯一的解出反射光线的方向角  $(\cos \alpha_1, \cos \beta_1, \cos \gamma_1)$ , 于是, 就可以求得反射光线为

$$\frac{x-x_1}{\cos \alpha_1} = \frac{y-y_1}{\cos \beta_1} = \frac{z-z_1}{\cos \gamma_1}. \quad (4)$$

由式(4)可求得任意  $z$  平面内对应光点位置, 取遍图 2 中各点, 就可以得到任意  $z$  平面内光斑的形状。

在以下的讨论中, 取抛物面镜的焦距  $f = 200 \text{ mm}$ 。

## 3 入射光束失准角对焦斑的影响

### 3.1 入射失准角与焦斑大小

这里比较关心  $z=0$  平面即焦平面上的光斑分布。忽略入射光束发散角的影响, 将入射光束视为平行均匀分布圆光束。分别考虑两种光轴失准条件下, 平行光束经 90° 离轴抛物面镜的聚焦, 分别如图 3(a)、(b) 所示。其中图 3(a) 表示入射光方向垂直于  $x$  轴, 且与抛物面镜光轴间的偏角为  $\theta$ ; 图 3(b) 表示入射光方向垂直于  $z$  轴, 且与抛物面镜光轴间的偏角为  $\varphi$ 。

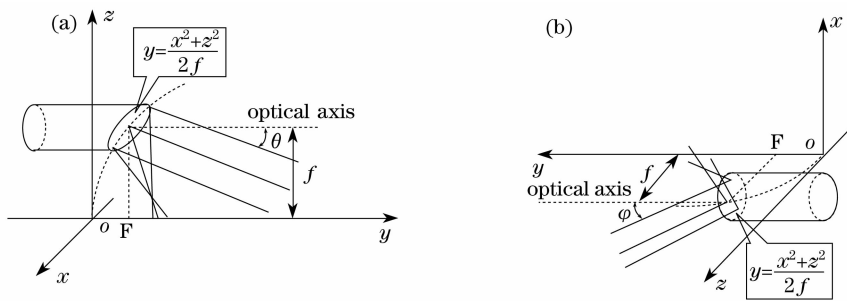


图 3 90°离轴抛物面镜聚焦示意图(a)有偏角  $\theta$  时,光束经过抛物面镜聚焦;(b)有偏角  $\varphi$  时,光束经过抛物面镜聚焦

Fig. 3 Laser beam focused by the 90° off-axis parabolic mirror (a) laser beam focused at misalignment  $\theta$ ; (b) laser beam focused at misalignment  $\varphi$

图 4(a)是直径为 40 mm 的匀布圆光束在不同偏角  $\theta$ (即入射光矢量与光轴间的夹角)时焦平面上的光斑图(坐标原点均在过抛物面镜焦点 F 的光轴上)。

图 4(b)是直径为 40 mm 的匀布圆光束在不同偏角  $\varphi$ (即入射光矢量与光轴间的夹角)时焦平面上的光斑图。

两种光轴失准条件下(即存在偏角  $\theta$  时或偏角  $\varphi$  时)焦面处的光斑只在坐标上有细微差别,大致形状相同;焦面处的焦斑半径随着入射偏角  $\theta$ (或偏角  $\varphi$ )的增大而增大,焦斑半径大致与入射偏角  $\theta$ (或偏角  $\varphi$ )成正比<sup>[12]</sup>;在相同入射光功率的情况下,入射偏角  $\theta$ (或偏角  $\varphi$ )的存在大大降低了焦斑的光强。

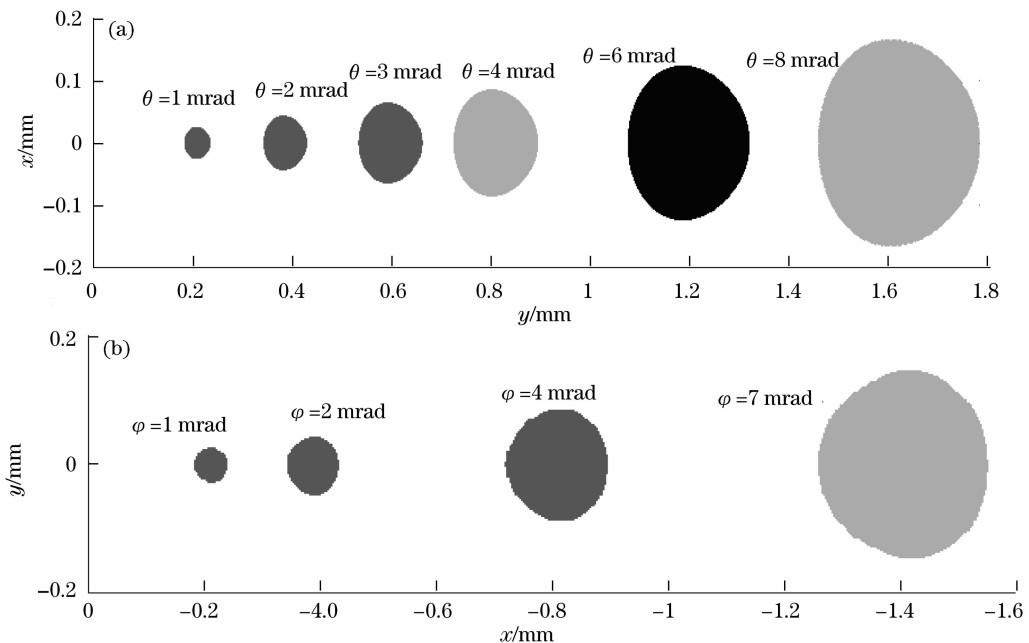


图 4 不同偏角  $\theta$ (a)不同偏角  $\varphi$ (b)下,焦面处的光斑图样

Fig. 4 Spot pattern at the focal plane for various misalignment angle  $\theta$  (a)  $\varphi$ (b)

### 3.2 聚焦光斑横向尺寸 $D_y$ 及纵向尺寸 $D_x$

为了考察焦平面(即  $z=0$  平面)附近聚焦光斑形状的变化情况,利用强度二阶矩<sup>[13]</sup>的方法定义聚焦光斑尺寸:

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint (x - \bar{x})^2 I dx dy}{\iint I dx dy}, \quad (5)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\iint (y - \bar{y})^2 I dx dy}{\iint I dx dy}, \quad (6)$$

$$D_x = 4\sigma_x, \quad D_y = 4\sigma_y,$$

其中  $D_y$  为聚焦光斑横向尺寸,  $D_x$  为聚焦光斑纵向尺寸,并且有

$$\bar{x} = \frac{\iint x I dx dy}{\iint I dx dy}, \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y I dx dy}{\iint I dx dy}.$$

图 5(a)、(b)分别为直径为 40 mm 的均布圆光束以偏角  $\theta=3$  mrad 入射时焦平面附近聚焦光斑横向尺寸  $D_y$  和纵向尺寸  $D_x$  的变化曲线(图 5(a)、(b))

均以  $z=0$  平面即焦平面为参考面)。

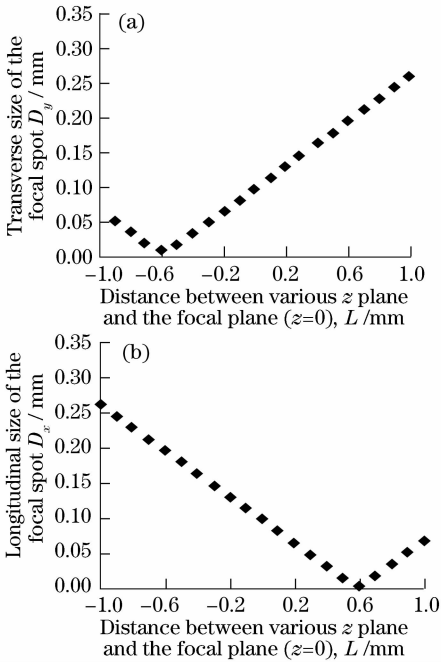


图 5 焦平面附近聚焦光斑尺寸的变化(a)  $D_y$ , (b)  $D_x$

Fig. 5 Variation of the focal spot size by the focal plane (a)  $D_y$ , (b)  $D_x$

对称于抛物面镜焦面(即  $z=0$  平面)两侧, 分别存在一对互相垂直的焦线。其一位于焦平面与镜面之间( $z=0.6$  mm 平面处): 平行于  $y$  轴, 为子午焦线; 其二在焦面下方( $z=-0.6$  mm 平面处): 平行于  $x$  轴, 但有一定的弧度, 为弧矢焦线。两条焦线分别如图 6 所示。

考察不同焦距  $f$  下, 子午焦线(弧矢焦线)所处  $z$  平面与焦点  $F$  之间的距离  $L_1$  ( $L_2$ ) 同入射偏角  $\theta$  之间的关系, 分别如下图 7(a)、(b) 所示。

对于同一焦距  $f$ , 1) 两焦线所处  $z$  平面分居抛物面镜焦平面(即  $z=0$  平面)的两侧; 2) 两焦线所处  $z$  平面到焦平面的距离相等:  $|L_1| = |L_2|$ ; 3) 两焦线所处  $z$  平面到焦点  $F$  的距离均同入射偏角  $\theta$  成线性关系, 可设其关系式如下:

$$L_{1,2} = \pm K(f)\theta, \quad (8)$$

其中  $L_1$  表示子午焦线所处  $z$  平面到焦点  $F$  的距离;  $L_2$  表示弧矢焦线所处  $z$  平面到焦点  $F$  的距离,  $K(f)$  是与抛物面镜焦距  $f$  相关的比例系数。

存在微小入射偏角  $\theta$  时,  $K(f)$  随抛物面镜焦距  $f$  的变化关系, 如图 8 所示。

比例系数  $K(f)$  与抛物面镜焦距  $f$  成正比, 经过拟合<sup>[14]</sup>, 可得如下关系式:

$$K(f) = 0.001f \quad (9)$$

于是, 公式(8)可以改写为:  $L_{1,2} = \pm K(f)\theta =$

$\pm 0.001f\theta$

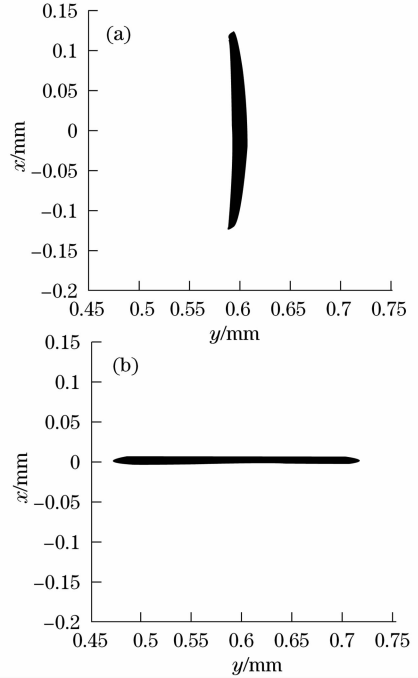


图 6 焦线图. (a)  $z=-0.6$  mm 平面处的弧矢焦线; (b)  $z=0.6$  mm 平面处的子午焦线

Fig. 6 Total focal line diagram. (a) The sagittal focal line at the plane  $z=-0.6$  mm; (b) meridian focal line at the plane  $z=0.6$  mm

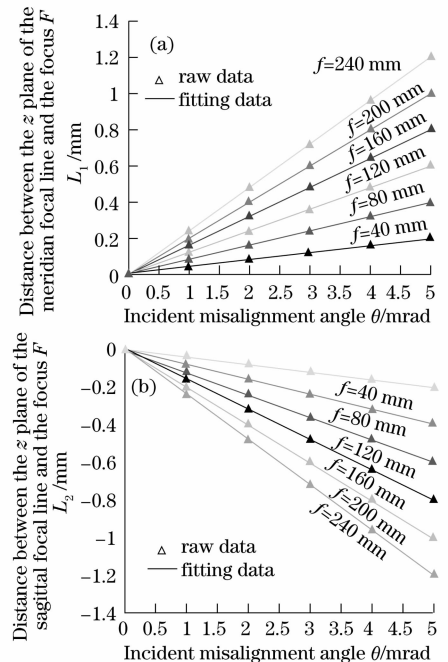


图 7 焦线所处  $z$  平面离焦点  $F$  之间的距离  $L$  随偏角  $\theta$  的变化。(a)  $L_1$ ; (b)  $L_2$

Fig. 7 Distance  $L$  between the  $z$  plane at which the focal lines are located and the focus  $F$  varies with the misalignment angle  $\theta$ . (a)  $L_1$  (b);  $L_2$

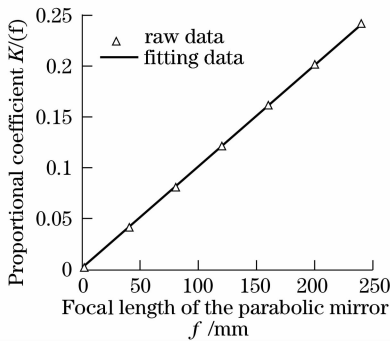


图 8 比例系数  $K(f)$  随抛物面镜焦距  $f$  的变化关系

Fig. 8 Proportional coefficient  $K(f)$  varies with the focal length  $f$

### 3.3 入射失准角与焦面处的峰值光强

由上述分析可知,若入射基模高斯光束经抛物面反射聚焦后,在焦平面处(即  $z=0$  平面)所形成的类圆斑也可看作高斯分布。由图 4(a)可知,当入射偏角  $\theta$  趋近于 0 时,焦斑的半径也应趋近于 0,这是不合理的。因为当焦斑半径小于衍射极限时,我们应该考虑衍射的影响,此时焦斑的半径不可能无穷小。

当入射偏角  $\theta \rightarrow 0$  时,图 3(a)所示的聚焦光路可以等价于高斯光束经过透镜的聚焦<sup>[12]</sup>,此时抛物面镜焦距  $f$  等价于透镜焦距  $f'$ ,以  $\text{CO}_2$  激光器为例,取其束腰距离镜面的距离  $l=1$  m。如图 9(a)所示。

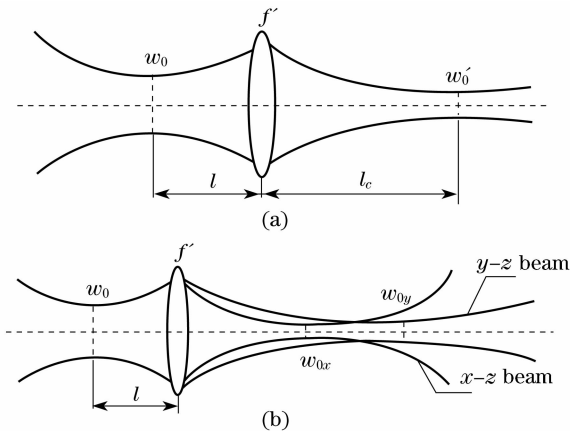


图 9 高斯光束经过抛物面镜聚焦的等效光路

(a) 无偏角  $\theta$  时; (b) 有偏角  $\theta$  时

Fig. 9 Equivalent optics schematic of Gaussian beam focused by parabolic mirror. (a) without misalignment angle  $\theta$ ; (b) with misalignment angle  $\theta$

当入射高斯光束存在偏角  $\theta$  时,由于焦面附近  $z$  平面存在一对互相垂直的焦线,如图 6 所示,使反射光在  $x$ 、 $y$  方向上的焦距不等,入射高斯光束经抛物面镜反射聚焦后变为椭圆高斯光束。其等效光路如

图 9(b)所示。

设入射高斯光束的束腰为  $w_0$ ,可得聚焦后在平行于  $x-z$  平面内的束腰为<sup>[15]</sup>

$$w_{0x} = w_0 \frac{f_1/z_0}{\sqrt{1 + (f_1 - l)^2/z_0^2}}, \quad (10)$$

那么在焦平面(即  $z=0$  平面)平行于  $x-z$  平面方向上的光斑大小为<sup>[15]</sup>

$$w_x^2 = w_{0x}^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z_1}{\pi w_{0x}^2} \right)^2 \right],$$

$$z_1 = f - f_1 - \frac{(l - f_1)f_1^2}{(l - f_1)^2 + z_0^2}, \quad (11)$$

$$f_1 = f - L_1 = f - 0.001f\theta,$$

其中  $z_1$  为平行于  $x-z$  平面内的束腰到焦平面(即  $z=0$  平面)的距离,  $f_1$  为平行于  $x-z$  平面方向上的等效焦距,  $f$  为抛物面镜的焦距。

同理,可得聚焦后在平行于  $y-z$  平面内的束腰为<sup>[15]</sup>

$$w_{0y} = w_0 \frac{f_2/z_0}{\sqrt{1 + (f_2 - l)^2/z_0^2}}, \quad (12)$$

那么在焦平面(即  $z=0$  平面)平行于  $y-z$  平面光斑大小为<sup>[15]</sup>

$$w_y^2 = w_{0y}^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z_2}{\pi w_{0y}^2} \right)^2 \right],$$

$$z_2 = f - f_2 - \frac{(l - f_2)f_2^2}{(l - f_2)^2 + z_0^2}, \quad (13)$$

$$f_2 = f - L_2 = f + 0.001f\theta,$$

其中<sup>[15]</sup>  $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ 。  $z_2$  为平行于  $y-z$  平面内的束腰到焦平面(即  $z=0$  平面)的距离,  $f_2$  为平行于  $y-z$  平面方向上的等效焦距。

设抛物面镜焦平面(即  $z=0$  平面)的椭圆高斯光束峰值光强为  $I_{\text{peak}}$ ,则焦平面处的总功率为

$$P = \iint I_{\text{peak}} \exp \left[ - \left( \frac{2x^2}{w_x^2} + \frac{2y^2}{w_y^2} \right) \right] dx dy =$$

$$\frac{\pi}{2} w_x w_y I_{\text{peak}}, \quad (14)$$

所以有

$$I_{\text{peak}} = \frac{2P}{\pi w_x w_y}. \quad (15)$$

分别取抛物面镜的焦距  $f$  为 160 mm, 200 mm, 240 mm 时,得到入射偏角  $\theta$  同抛物面镜焦面处峰值光强  $I_{\text{peak}}(\theta)$  的曲线,如图 10 所示。

焦面处的峰值光强  $I_{\text{peak}}$  对入射偏角  $\theta$  十分敏感,其值随入射偏角  $\theta$  急剧下降,在几个 mrad 时就下降一半。焦距  $f$  越长,则无偏角时反射聚焦的光

斑越大, 从而使入射偏角  $\theta$  对光斑的影响相对减小。但在相同功率和光束直径的情况下, 大的聚焦光斑使得焦平面处的峰值光强变小。短焦距时峰值光强随入射偏角  $\theta$  的增大而急剧下降; 长焦距时峰值光强随偏角  $\theta$  变化减慢。

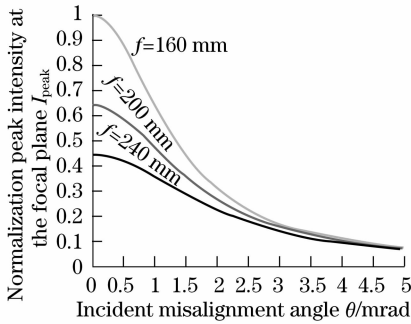


图 10 不同焦距  $f$  下, 入射偏角  $\theta$  与焦面处峰值光强  $I_{\text{peak}}$  的关系曲线

Fig. 10 relationship curve of the misalignment angle  $\theta$  and the peak intensity  $I_{\text{peak}}$  at the focal plane for various focal length  $f$

## 4 结 论

本文采用几何光路追迹和物理光学方法, 对离轴 90° 抛物面镜应用于激光聚焦光路时, 光轴的角度失准对聚焦光斑造成的影响进行分析。细微的角度失准导致焦斑面积大大增加, 从而大大降低了焦斑的光强; 角度失准导致抛物面镜焦平面附近产生一对互相垂直的焦线, 且两焦线所处  $z$  平面到焦点  $F$  的距离相等, 并与入射偏角成线性关系; 子午焦线与弧矢焦线的存在使入射高斯光束转变为椭圆高斯光, 降低了焦面处的峰值光强; 抛物面镜对入射光束失准角十分敏感, 几个 mrad 的角度失准将导致焦面处的峰值光强下降一半。

## 参 考 文 献

- Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407  
崔向群, 高必烈, 汪达兴等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709

- 陈建平, 沈林成. 大口径大非球面镜加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1475~1478
- Robert H. Barkhouser, Raymond G. Ohl. Interferometric alignment and figure testing of large (0.5 m) off-axis parabolic mirrors in a challenging cleanroom environment[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 601~614
- Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1775~1778  
刘颖, 戴景民, 郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1775~1778
- Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 909~913  
梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 909~913
- Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser antocollimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258  
敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258
- Isamu Miyamoto, Hirokuni Nanba, Hiroshi Maruo. Analysis of thermally induced optical distortion in lens during focusing high power CO<sub>2</sub> laser beam[C]. *SPIE*, 1990, **1276**: 112~121
- Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding of vehicle body[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1726~1731  
伍强, 陈根兰, 徐兰英等. CO<sub>2</sub> 激光焊接车身拼焊板[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1726~1731
- Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke *et al.*. Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 291~296  
王蔚, 陈俐, 赵兴科等. 激光焊接工艺参数对 NiTi 形状记忆合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 291~296
- Wang Shaofei, Cao Yu, Wang Xiaobao *et al.*. Microheater array fabrication by laser micro-cladding method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1567~1570  
王少飞, 曹宇, 王小宝等. 激光微细熔覆快速制造微加热器阵列[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1567~1570
- Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Study on focusing spot characteristics by off-axis parabolic mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(10): 880~886  
石鸿斌, 程兆谷, 许国良等. 激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(10): 880~886
- Siegman A. E. New developments in laser resonators[C]. *SPIE*, 1990, **1224**: 2~14
- Li Hong. Numerical Analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003, 63~70  
李红. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003, 63~70
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua *et al.*. *Laser Principle* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995, 64~73  
周炳琨, 高以智, 陈家骅等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995, 64~73