

# 长时间出光条件下反射镜的热变形对 光束质量的影响

贺敏波 任伟艳 张世强 孙艳宏 张政

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要** 基于有限元 Comsol Multiphysics 软件, 模拟计算了长时间出光条件下反射镜的温度分布和热变形分布。对热变形引起的波像差采用前 65 阶 Zernike 模式分解, 计算了不同时刻对应的光束质量因子, 结果表明: 光束质量因子主要来源于离焦像差的贡献, 其他像差的影响可以忽略。在此基础上建立了光束质量因子与辐照时间的指数拟合关系, 其均方根误差为 0.0052。

**关键词** 光学器件; 反射镜; 热变形; Zernike 像差; 光束质量

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.122302

## Influence of Mirror Thermal Deformation on Beam Quality under Laser Long-Time Irradiation

He Minbo Ren Weiyan Zhang Shiqiang Sun Yanhong Zhang Zheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** The temperature field and thermal deformation distributions of mirror under laser long-time irradiation are calculated and analyzed by using Comsol Multiphysics software. After presenting the wave aberration of mirror with the first 65 order Zernike polynomials, the beam quality factor  $\beta$  at different time is obtained. The results show that beam quality factor  $\beta$  is mainly composed of defocusing aberration, while other aberrations can be neglected. Then an exponential relationship between beam quality factor  $\beta$  and laser irradiation time is offered with the value 0.0052 of room-mean-square error.

**Key words** optical devices; mirror; thermal deformation; Zernike aberration; beam quality

**OCIS codes** 230.4040; 140.3295; 140.6810

## 1 引言

强激光系统中, 内光路反射镜因吸收部分激光能量, 产生温度梯度, 镜面发生热变形, 使输出光束的波前发生畸变, 输出光束质量变差。光路中反射镜的数目一般较多, 单个反射镜的影响可能不大, 但所有反射镜的累积效应比较明显, 这严重限制了强激光系统性能的提高。

影响强激光系统中反射镜热变形的因素很多, 众多学者对激光辐照下不同基质材料镜面热变形特性<sup>[1]</sup>和反射镜夹持方式对镜面热变形的影响<sup>[2]</sup>等方面开展了较为广泛的数值模拟和实验研究。文献[3]采用等效净吸收功率密度方法研究了强激光反射镜热畸变对光束传输特性的影响。文献[4-5]研究了激光辐照下腔镜热变形对激光模式和光场特性的影响。这些研究有助于认识反射镜的热变形及其对激光光束质量的影响。但对于长时间出光条件下反射镜热变形对光束质量的影响, 仍未见定量的理论分析报道。

本文通过数值模拟分析长时热变形对光束质量因子  $\beta$  的影响, 定量地给出光束质量因子随辐照时间的变化关系, 为强激光系统的光束质量衡量提供参考依据。

**收稿日期**: 2013-06-08; **收到修改稿日期**: 2013-08-02; **网络出版日期**: 2013-11-07

**作者简介**: 贺敏波(1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: hmb203@gmail.com

## 2 理论分析

### 2.1 反射镜热变形的计算模型

反射镜的温度场和热变形可以通过求解准静态条件下的热传导方程和热弹性方程得到<sup>[6-7]</sup>。假设反射镜材料为各向同性,热物性参数为常数,不随空间位置而变化,则镜子的热传导方程和热弹性方程分别为

$$k \nabla^2 T(r, \theta, z; t) = \rho c \frac{\partial T(r, \theta, z; t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

式中  $k$  为热导率,  $\rho$  为材料密度,  $c$  为定压热容,  $T$  为温升分布,  $t$  为时间,  $u_r$  和  $u_z$  分别为径向和  $z$  向的位移,  $\epsilon$  为应变,  $\nu$  为泊松比,  $\alpha$  为热膨胀系数。

对于反射镜,由于其表面一般镀有高反膜,而膜层很薄,忽略膜层的散射和膜层升温所需的能量,则反射镜表面的热流密度为

$$q(x, y, t) = \eta I(x, y, t), \quad (4)$$

式中  $\eta$  为膜层对入射激光的吸收率,  $I$  为入射激光功率密度分布。

根据上述方程,结合相应的边界条件和初始条件,就可获得激光辐照下反射镜的温度分布和热变形分布。

### 2.2 热变形与光束质量因子的关系

#### 2.2.1 Zernike 波像差的定义

反射镜对光束质量的影响主要体现在热变形引起的波前像差,它导致输出光束的波前发生畸变,正是由于这种波前畸变导致光束质量变差。设反射镜热变形引起的波像差(以波长为单位)记为  $W(x, y)$ , 则

$$W(x, y) = \Delta L / \lambda, \quad (5)$$

式中  $\Delta L$  为反射镜热变形引起的附加光程差,  $\lambda$  为激光波长。

Zernike 多项式定义为一个单位圆上的一组正交多项式<sup>[8]</sup>。则波像差  $W(x, y)$  可用 Zernike 多项式描述为

$$W(x, y) = \sum_j a_j Z_j(x, y), \quad (6)$$

式中  $a_j$  为第  $j$  项 Zernike 多项式系数,  $Z_j$  为第  $j$  项 Zernike 多项式:

$$\begin{cases} Z_{\text{even}j} = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \cos m\theta \\ Z_{\text{odd}j} = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \sin m\theta \end{cases} \quad m \neq 0 \\ \begin{cases} Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(r) \\ R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} r^{n-2s} \end{cases} \quad m = 0, \end{cases} \quad (7)$$

式中  $n, m$  均为整数且满足,  $n \geq m \geq 0, n-m$  为偶数。

#### 2.2.2 Zernike 像差与光束质量因子的关系

光束质量因子  $\beta$  定义为测量的实际光束的远场发散角与同样尺度的理想光束的远场发散角之比:

$$\beta = \frac{\theta_{\text{act}}}{\theta_{\text{ideal}}}. \quad (8)$$

通常情况下,以包含实际光束的远场光斑总能量的 83.8% 的半径来评价实际光束的光束质量。光束质量因子  $\beta$  值一般大于 1,  $\beta$  越接近 1, 光束质量越高,  $\beta=1$  为衍射极限。

相关文献研究了 Zernike 波像差与  $\beta$  之间的关系<sup>[9-11]</sup>。对于包含多阶正交像差的组合像差,有<sup>[10-11]</sup>

$$\beta^2 = 1 + \sum (k_j \sigma_j)^2, \quad (9)$$

式中  $\sigma_j$  为各阶 Zernike 像差的均方根值,  $k_j$  为相应的拟合系数。各阶 Zernike 多项式对应光束质量因子  $\beta$  的拟合系数  $k_j$  详见文献[11]。

### 3 数值计算结果及分析

采用有限元软件 Comsol Multiphysics 对反射镜的热变形进行计算。在数值计算中,考虑镜体材料为硅,物性参数如表 1 所示。假设膜层的吸收率为  $2 \times 10^{-3}$ ,反射镜半径为 60 mm,厚度为 5 mm,实心平顶光束垂直入射,靶面功率密度为  $4000 \text{ W/cm}^2$ ,靶面光斑半径为 30 mm,光斑处于反射镜表面中心,激光波长为  $1.3 \mu\text{m}$ 。设环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,不考虑反射镜边界与周围环境之间的自然对流,且取镜体周边上下边界固定。

表 1 硅的物性参数

Table 1 Physical properties of Si

| Density /<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Specific heat /<br>( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | Heat conductivity /<br>( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | Heat expansion<br>coefficient /( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ) | Young's modulus /<br>GPa | Poisson's<br>ratio |
|--|--|---|---|--------------------------|--------------------|
| 2230   | 703  | 163   | 4.15  | 131                      | 0.27               |

由于镜子对激光能量的吸收和热传导,Si 镜将形成温度梯度,引起镜体表面的热变形。图 1 为激光辐照时间分别为 5,15,30 s 时,Si 镜表面温度的径向分布。由图可知:镜面中心区域温度较高,周边区域温度较低。镜面中心处的温度分别为  $55.75 \text{ }^\circ\text{C}$ , $84.14 \text{ }^\circ\text{C}$ , $121.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ,与边缘处的温差分别  $25.10 \text{ }^\circ\text{C}$ , $30.68 \text{ }^\circ\text{C}$ , $89.98 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 2 为激光辐照时间分别为 5,15,30 s 时,Si 镜表面热变形的径向分布。Si 镜表面中心处的热变形分别为  $1.22,1.53,1.91 \mu\text{m}$ 。

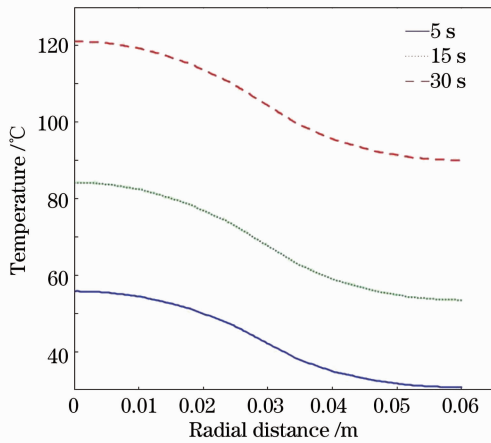


图 1 Si 镜表面温度的径向分布

Fig. 1 Distribution of temperature on the surface of silicon mirror along radial direction

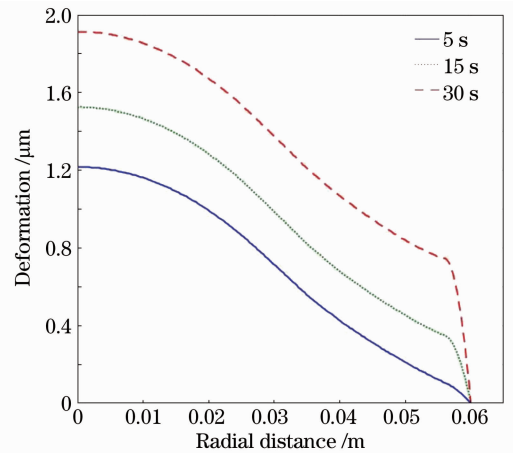


图 2 Si 镜表面热变形的径向分布

Fig. 2 Distribution of thermal deformation on the surface of silicon mirror along radial direction

有限元模拟结果表明:在强激光系统中,反射镜的热变形非常显著,且随辐照时间不断加剧。反射镜热变形会导致输出光束质量下降,因此有必要讨论长时间出光条件下反射镜热变形与光束质量的关系。图 3 为 30 s 时刻镜面波像差的前 65 阶 Zernike 多项式系数。由图可看出,只有整体相移和离焦两项比较显著,但仅离焦像差影响激光光束质量。依据(9)式,可计算不同时刻的光束质量因子,如表 2 所示,其中  $\beta$  是前 65 阶 Zernike 波像差的计算结果, $\beta_m$  是仅考虑离焦像差的计算结果。由表 2 可知,两者之间的偏差很小,即用镜面热变形引起的主像差(离焦项)就可衡量光束质量因子。

研究在长时间出光条件下反射镜热变形对光束质量的影响,就是要分析光束质量因子  $\beta$  随激光辐照时间的变化关系。假设光束质量因子与时间的关系可以用指数函数来拟合:

$$\beta = Ae^{Bt} + Ce^{Dt}, \quad (10)$$

式中  $A, B, C, D$  为拟合系数。用该拟合公式对表 2 中的光束质量因子  $\beta$  进行拟合,拟合结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着激光辐照时间的增大,光束质量因子  $\beta$  逐渐增大,特别是前 10 s 内  $\beta$  的增速较快,而后增速比较缓慢。拟合结果与计算结果具有很好的一致性,均方根误差为 0.0052,其中,拟合系数分别为  $A = 2.749, B = 0.0004711, C = -0.8328, D = -0.3043$ 。一般情况下,针对不同的具体问题,反射镜热变形引起的光束质量因子依然可用(10)式来拟合,只是拟合系数不同而已。值得说明的是,该拟合公式不适用于激光辐照初始时刻,原因是在激光辐照初始时刻反射镜热变形存在快速变化,导致整体拟合误差偏大。

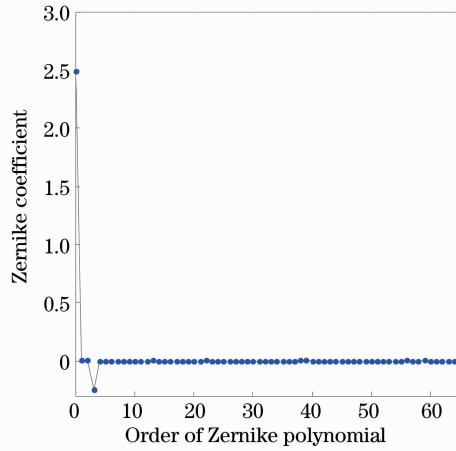


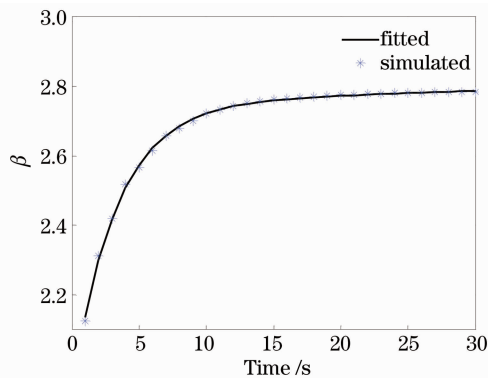
图3 在30 s时刻镜面波像差的前65阶Zernike多项式系数

Fig. 3 Coefficients of Zernike polynomials for wavefront error at 30 s

表2 不同时刻的光束质量因子

Table 2 Beam quality factor at different time

| Time /s | $\beta$ | $\beta_m$ | Time /s | $\beta$ | $\beta_m$ |
|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| 1       | 2.126   | 2.121     | 16      | 2.767   | 2.761     |
| 2       | 2.314   | 2.310     | 17      | 2.769   | 2.764     |
| 3       | 2.419   | 2.416     | 18      | 2.772   | 2.766     |
| 4       | 2.519   | 2.516     | 19      | 2.774   | 2.768     |
| 5       | 2.567   | 2.564     | 20      | 2.775   | 2.769     |
| 6       | 2.614   | 2.611     | 21      | 2.777   | 2.770     |
| 7       | 2.659   | 2.656     | 22      | 2.778   | 2.771     |
| 8       | 2.681   | 2.678     | 23      | 2.780   | 2.772     |
| 9       | 2.703   | 2.699     | 24      | 2.781   | 2.773     |
| 10      | 2.723   | 2.719     | 25      | 2.782   | 2.774     |
| 11      | 2.733   | 2.729     | 26      | 2.782   | 2.774     |
| 12      | 2.743   | 2.739     | 27      | 2.783   | 2.775     |
| 13      | 2.752   | 2.748     | 28      | 2.784   | 2.775     |
| 14      | 2.757   | 2.752     | 29      | 2.785   | 2.775     |
| 15      | 2.762   | 2.757     | 30      | 2.786   | 2.776     |

图4 光束质量因子 $\beta$ 与激光辐照时间的关系Fig. 4 Relationship between beam quality factor  $\beta$  and laser irradiation time

## 4 结 论

分析了长时出光条件下内光路反射镜的热变形,依据 Zernike 波像差与光束质量因子  $\beta$  的关系,理论上

给出了光束质量因子与激光辐照时间的指数拟合公式。结果表明:随着激光辐照时间的增大,反射镜热变形更加显著,输出光束质量因子 $\beta$ 也更越大,但 $\beta$ 值的变化首先较快而后趋于平缓。对于具体的问题,若能确定拟合公式的拟合系数,就可估计出任意辐照时刻下反射镜热变形引起的波像差对光束质量因子的影响。本研究从理论上解决了分析长时间出光条件下反射镜热变形的动态变化对光束质量因子影响的难题。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 5-8.  
彭玉峰,程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 5-8.
- 2 Yu Wenfeng, Sun Feng. Effects on the mirror's thermo-deformation and deflection in different supporting way [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 29-32.  
余文峰,孙 锋. 夹持方式对镜面热变形及偏转的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 29-32
- 3 Zhou Ciming, Cheng Zuhai. Influence of thermal deformations of high power laser mirror on beam transfer characteristic [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(10): 969-972.  
周次明,程祖海. 强激光反射镜热畸变对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 969-972.
- 4 Du Shaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong, *et al.*. Laser mode changing with deformation of resonator mirrors under irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(1): 53-57.  
杜少军,陆启生,舒伯宏,等. 激光辐照下非稳腔镜变形对激光模式的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(1): 53-57.
- 5 Du Yanyi, An Jianzhu, Shu Xiaojian. Effect of thermal distortion of mirror on characteristics of laser beam in unstable resonator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1333-1338.  
杜燕贻,安建祝,束小建. 腔镜热变形对非稳腔光场特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1333-1338.
- 6 He Minbo, Jiang Houman. Scaling law in thermal deformation of high reflecting mirror under laser irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2043-2046.  
贺敏波,江厚满. 激光辐照下高反镜热变形问题的尺度律[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2043-2046.
- 7 Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for  $Al_2O_3$  mirror in an optical system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1002001.  
周 琼,姜宗福,刁锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002001.
- 8 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.  
苏 毅,万 敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- 9 Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wavefront aberration and beam quality factor [J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(5): 415-419.  
鲜 浩,姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. 中国激光, 1999, 26(5): 415-419.
- 10 Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong, *et al.*. The relationship between beam quality factor  $\beta$  and wavefront error [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 798-802.  
李新阳,鲜 浩,王春鸿,等. 波像差与光束质量 $\beta$ 因子关系研究[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 798-802.
- 11 Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao, *et al.*. Relationship between Zernike wavefront errors and beam quality factors  $\beta$  for optics system [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1420-1427.  
叶红卫,李新阳,鲜 浩,等. 光学系统的 Zernike 像差与光束质量 $\beta$ 因子的关系[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1420-1427.