

强激光系统中硅镜变形数值分析

夏金安 程祖海 丘军林

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉, 430074)

摘要: 本文运用数值传热学中全隐差分格式交替方向块迭代法, 对周边绝热强激光照射非稳态条件下硅镜的温度及挠变形进行了数值模拟, 给出了形变随激光功率、光斑直径、镜片直径、镜片厚度以及照射时间等参数的变化规律, 并对镜片局部最高温度的变化作了探讨和分析。

关键词: 强激光 硅镜 挠变形

Numerical analysis on silicon mirror in high power laser system

Xia Jinan, Cheng Zuhai, Qiu Junlin

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: The temperature distribution and deflection of a high power laser silicon mirror are predicted numerically by the finite difference method when its boundary is kept insulated. It is shown how the deflection of a mirror varies with laser power, optical spot diameter, mirror thickness and how its temperature distribution and deflection change with laser run time.

Key words: high power laser silicon mirror deflection

一、引言

强激光照射下, 镜片吸收其部分能量产生局部应力和变形。激光功率高, 单位时间内镜片

阈值有所提高外, 另一个更重要的原因, 是薄膜吸收了激光能量, 温度迅速升高, 高温下膜的微观结构发生了变化^[7], 表面缺陷得以修复, 均匀性得到改善, 使膜的表面结构变得均匀而完整, 从而提高了抗激光损伤的能力。作者认为激光预辐照的机制最终是热因素在起作用。这种热作用不同于一般的加热, 这是由激光本身的特性所决定的。

参 考 文 献

- 1 Jones S C, Branulich P, Casper R T *et al.* Opt Engng, 1989; 28: 1039
- 2 Kuper S, Stuke M. Appl Phys, 1989; A49: 221
- 3 李仲伢, 李成富, 郭聚平. 光学学报, 1991; 11(3): 264
- 4 李仲伢, 李成富, 郭聚平 *et al.* 中国激光, 1991; 18(1): 30
- 5 Walker T W, Guenther A H, Nielsen P E. IEEE J Q E, 1981; QE-17(10): 2041
- 6 Kerr N C, Emmong D C. NIST Sp801, SPIE, 1989; 1438: 164
- 7 李仲伢, 李成富, 龚 辉. 光学学报, 1994; 14(3): 281
- 8 范正修, 吴周令. 激光对光学薄膜破坏的热过程研究. 第三届激光的热和力学效应学术会议论文集. 上海, 嘉定, 1991

作者简介: 夏晋军, 男, 1971年5月出生。硕士研究生。主要从事光学材料和薄膜的激光损伤研究。

吸收热量就多,产生较大的变形。当变形量超过一定范围,将大大影响激光器输出光束质量。故如何有效地控制镜片的变形成为强激光研究领域的一项重要课题。目前,有关强激光照射下镜片变形,国内外研究仅局限于变形机理探讨^[1]和镜片散热定性实验分析。如文献[2]采取通水冷却使镜片不发生变形或变形最小。文献[3]则通过选用不同材料达到变形小的目的。它全面比较硅、钨、钼、铜、碳化硅、铍、铝、镍等材料的导热能力、热膨胀系数、应力参数和加工工艺等综合性能后,认为硅具有热膨胀系数小、导热率高等特点,是解决强激光照射下镜片发生小变形的一种较有吸引力的材料。对强激光照射下镜片变形尤其是非稳态温度场分布条件下镜片变形数值分析和探讨尚未见报导,为此,本文在文献[3]工作的基础上,以硅镜作为本文研究对象,建立非稳态传热学方程模型后,引入结构力学中同类构件的挠曲变形公式,将镜片划分网格,采用数值计算方法中稳定性好、收敛速度快的全隐差分格式交替方向块迭代法,对镜片变形进行全面系统的数值计算和分析,以便为强激光器腔镜的配套使用提供指导依据。

二、物 理 模 型

硅镜及坐标系如图 1 所示,其厚度为 L ,物理半径为 R 。一般情况下,镜片表面还镀上一层薄膜以增强镜片对激光光束的反射率 a ,其值可高达 99.5%。不难看出,镜片表面反射率愈高,激光入射功率愈小,镜片吸收热量愈小,镜片的热变形就愈小,反之亦然。

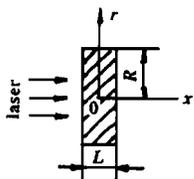


Fig. 1 A silicon mirror and its coordinate system

在某些特殊场合,强激光连续照射的时间只有几秒到几十秒钟,镜片吸热后温度上升达不到平衡状态,温度分布随时间变化即镜片的温度场是非稳态的,它的物理方程为^[4]

$$(\partial^2 t / \partial x^2) + (\partial^2 t / \partial r^2) + (1/r)(\partial t / \partial r) = (1/a)(\partial t / \partial \tau) \quad (1)$$

式中, $a = \lambda / (\rho c)$, λ 为硅的导热系数, ρ 为密度, c 为比热, t 为温度, r 为纵坐标, x 为横坐标, τ 为时间。

图 1 中非冷却硅镜,如 UR90 腔镜,由于激光作用时间短,硅镜又处于真空环境中,镜片与环境之间的对流换热系数很小,因此,可以认为边界处于绝热状态,其数学表述如下^[4]:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} = q = (1-2)P \quad (0 \leq r \leq r_0) \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} = 0 \quad (r_0 < r \leq R) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L/2} = 0 \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (5)$$

式中, q 为镜片吸热量, P 为激光功率, r_0 为光斑半径。镜片受激光照射吸热后产生的热变形(挠曲)计算公式为^[5]

$$w = (1 + \nu) \alpha' \left[C_1 + C_2 r^2 + \int_r^R \frac{H(r)}{r} dr \right] \quad ho \quad (6)$$

$$H(r) = \int_0^r m_0(r) r dr$$

$$m_0(r) = \frac{12}{L^3} \int_{-L/2}^{L/2} \theta x dx$$

$$\theta = t - t_0$$

式中, w 为挠度, ν 为泊松比, α' 为热膨胀系数, C_1, C_2 为待定系数, 取决于镜片的固定方式, θ 为温升, t_0 为镜片起始温度。

当镜片为简支时, $C_1 = -R^2 C_2 = (1 - \nu) / [2(1 + \nu)] \cdot H(R)$ (7)

当镜片为周边固定夹紧时, $C_1 = -R^2 C_2 = -H(R) / 2$ (8)

三、硅镜变形数值计算结果及分析

1. 方程离散

因镜片形状规则, 可对镜片划分网格后将方程(1)离散, 利用有限差分法在计算机上进行迭代求解。本文网格划分如图2所示。

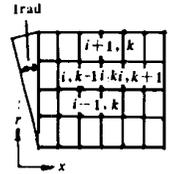


Fig. 2 Grid and mesh

本文讨论的是非稳态导热问题, 控制方程的离散过程中, 温度函数除空间差分格式有不同形式外, 每一时层初始时刻之值的选取方案亦不相同, 温度时间差分按显式和隐式格式划分。显式差分格式离散所获得的差分方程在迭代过程中只有当网格尺寸和时间步长满足一定的要求后, 迭代才能稳定和收敛。隐式格式则不受此限制, 它是无条件稳定和收敛的^[5]。因此, 本文在对控制方程(1)离散处理时间差分时, 采用全隐差分格式, 空间差分则采用中心差分, 其离散方程如下:

$$a_S t_{i-1, k}^{n+1} + a_P t_{i, k}^{n+1} + a_N t_{i+1, k}^{n+1} + a_W t_{i, k-1}^{n+1} + a_E t_{i, k+1}^{n+1} = S_C \quad (9)$$

式中, $a_S = 1 - 1/(2i)$, $a_N = 1 + 1/(2i)$, $a_W = (\Delta r^2) / (\Delta x^2)$, $a_E = (\Delta r^2) / (\Delta x^2)$
 $a_P = -[2 + 2(\Delta r^2) / (\Delta x^2) + (\Delta r^2) / (a \cdot \Delta \tau)]$, $S_C = -(\Delta r^2) / (a \cdot \Delta \tau) t_{i, k}^n$

上式中, i, k 为网格节点位置, $\Delta r, \Delta x$ 为网格尺寸, $\Delta \tau$ 为时间步长, n 为迭代次数。

2. 数值计算结果及分析

本文数值迭代网格节点数为 30×20 , 时间步长取 $0.01s$, 为加快计算迭代收敛速度, 本文采用全隐差分格式交替方向块迭代法进行迭代求解^[6], 数值计算结果如图3~8所示, 其中, 图3~6的激光照射时间均为 $10s$, 并假设入射激光为基模。

图3a为镜片直径、厚度、光斑直径一定硅镜最大挠度随激光输入功率的变化规律。图中 D 为镜片物理直径, d 为光斑直径, L 为镜片厚度, q 为镜片吸热量。当镜片表面反射率 a 一定时, q 的变化实质上就是激光光束功率的变化, 因为 $q = (1 - a)P$ 或 $P = q / (1 - a)$ 。设镜片表面反射率为 99.5% , 则图中对应的激光功率变化范围为 $10kW \sim 60kW$ 。镜片周边固定方式分为简支(simply supported)和周边固定夹紧(clamped)两种方式。图3a表明, 无论是简支还是周边固定夹紧, 镜片的挠变形随激光功率的增加而增大, 且近似为线性关系。这是因为激光功率增加, 一定时间内镜片吸收热量就多, 温度升高较快, 由此引起的热变形就比较严重。此图还表明, 镜片的变形与它的固定方式有关, 同样条件下, 简支时的形变量大于

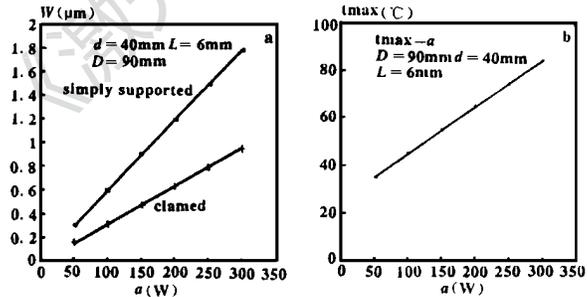


Fig. 3 a-The maximum deflection vs laser power
b-The maximum temperature vs laser power

图3a为镜片直径、厚度、光斑直径一定硅镜最大挠度随激光输入功率的变化规律。图中 D 为镜片物理直径, d 为光斑直径, L 为镜片厚度, q 为镜片吸热量。当镜片表面反射率 a 一定时, q 的变化实质上就是激光光束功率的变化, 因为 $q = (1 - a)P$ 或 $P = q / (1 - a)$ 。设镜片表面反射率为 99.5% , 则图中对应的激光功率变化范围为 $10kW \sim 60kW$ 。镜片周边固定方式分为简支(simply supported)和周边固定夹紧(clamped)两种方式。图3a表明, 无论是简支还是周边固定夹紧, 镜片的挠变形随激光功率的增加而增大, 且近似为线性关系。这是因为激光功率增加, 一定时间内镜片吸收热量就多, 温度升高较快, 由此引起的热变形就比较严重。此图还表明, 镜片的变形与它的固定方式有关, 同样条件下, 简支时的形变量大于

周边固定夹紧的变形值,图4,5,6也反映出类似这种规律。图3b为相应条件下镜片局部最高温度随激光功率变化曲线。

图4为镜片直径、厚度、激光功率一定硅镜最大挠度和最高局部温度随光斑直径的变化规律。图中激光功率以镜片吸热量描述,以下类同。图4a说明,硅镜挠变形随光斑直径增加呈减小趋势。这是由于

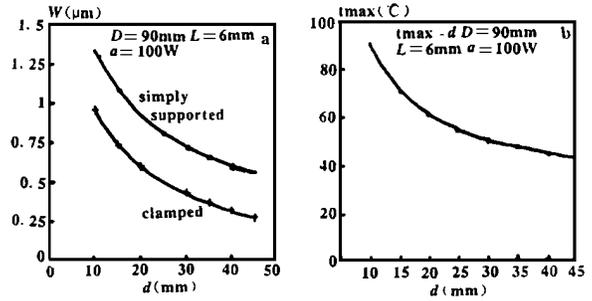


Fig. 4 a- The maximum deflection vs optical spot diameter
b- The maximum temperature vs optical spot diameter

光斑直径增加,单位镜片面积热流量减小,局部温度降低。图4b中局部最高温度随光斑直径增加而减小明显表现出这一点。镜片局部温度降低,热膨胀引起的挠变形减小,得到图4结果。

图5a为激光功率、光斑直径、镜片厚度一定硅镜最大挠度随镜片直径的变化规律。此图显示,镜片最大挠度随镜片的直径增加而增加。此暗示,在一定光斑直径的激光光束照射下,镜片直径不宜过大。图5b为同样条件下镜片局部最高温度随镜片直径变化规律。

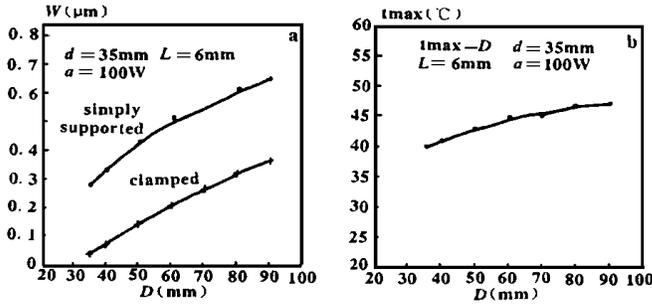


Fig. 5 a- The maximum deflection vs the diameter of a silicon mirror
b- The maximum temperature vs the diameter of a silicon mirror

光光束照射下,镜片直径不宜过大。图5b为同样条件下镜片局部最高温度随镜片直径变化规律。

图6为镜片直径、光斑直径、激光功率一定硅镜最大挠变形和最高局部温度随镜片厚度的变化规律。图6a表明,镜片厚度增加,镜片形变略有减小趋势,其最高局部温度随厚度增加而减小,如图6b所示。

一般情况下,强激光连续照射时间比较短。在短时间内,镜片的温度分布是在不断变化的,挠变形也是如此,如图7、图8所示。

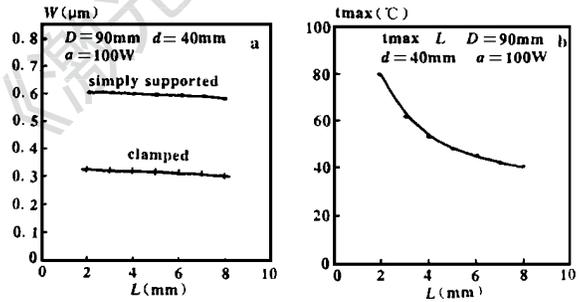


Fig. 6 a- The maximum deflection vs the thickness of a silicon mirror
b- The maximum temperature vs the thickness of a silicon mirror

图7为镜片直径等于80mm,厚度为6mm,光斑直径为35mm,吸热量 $q = 100\text{W}$,镜片初始温度为 25°C 时局部最高温度随激光照射时间变化曲线。图7表明,镜片温度随激光照射时间的增加而不断增加。图8为同样条件下,硅镜最大挠变形随激光照射时间变化关系曲线。此图说明,硅镜的挠变形在开始时随时间增加而增加较快,一段时间后变化不大。这是由于,一方面硅材料有较高的导热率,相对工程设备而言,硅镜的体积小;另一方面,计算时假设硅镜与环境之间处于绝热状态,即硅镜与环境之间无热交换。因此,虽然硅镜的局部温度随激光

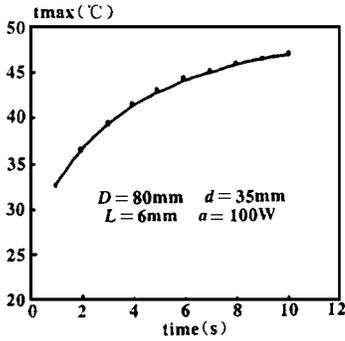


Fig. 7 The maximum temperature vs laser run time

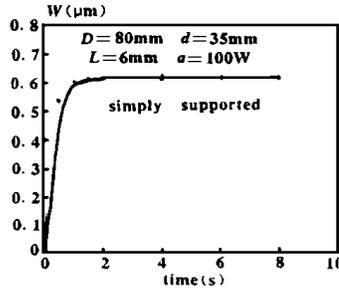


Fig. 8 The maximum deflection vs laser run time

照射时间的增加而升高,但镜片吸收的热量很快地传输到镜片其它部位,以致各处温度均匀升高,局部膨胀均匀,因而挠变形量比较稳定。但此时整个镜片表面会发生平移。事实上,除激光照射面外,镜片与周围环境接触,存

在着自然对流换热。当镜片温度升高时,镜片与环境温度

差增加,自然对流换热加强,而镜片各处局部温度不等。随着激光照射时间增加,镜片局部升温、膨胀不均匀性加剧,可能产生较大的挠变形,此时,图8中曲线会发生变化。此外,硅材料的物性参数还随温度变化,如硅的导热率随温度升高而降低,热膨胀系数随温度升高而增加,前者变化小,后者变化则比较大,这必然导致图8中曲线规律变化。本文中,因硅镜温度变化范围不大,取平均值计算,其结果是合理的,这为作者的实验所证实。限于客观条件,本文未能对所有计算结果进行实验验证,有待作者更深入的探讨。

四、结 束 语

强激光照射下,硅镜形变不仅与激光光束的输入功率、光斑直径、镜片直径、镜片厚度有关,还随激光照射时间变化。本文计算结果表明,在其它条件不变的情况下,硅镜挠变形和局部最高温度随激光功率增加而增加;随光斑直径增加而减小;随镜片直径增加而增加;随镜片厚度增加而有减小趋势。但硅镜挠变形随激光作用时间的推移,开始时增长较快,随后比较稳定;局部最高温度则始终随激光作用时间的延长而不断升高。此外,镜片的挠变形还与它的固定方式有关,周边固定夹紧时镜片的最大挠变形小于简支时的最大形变量。本文结论虽是对硅镜计算获得的,但在同样边界条件下,具有普遍意义,本文的数值计算方法也是有借鉴作用的。

参 考 文 献

- 1 Janes R P. Opt Engng, 1983; 22(4): 435~ 446
- 2 Yuen W W, Fleishman R V. SPIE, 1989; 1047: 43~ 55
- 3 Anthony F M, Hopkins A K. SPIE, 1981; 297: 196~ 203
- 4 张洪济. 热传导. 北京: 高等教育出版社, 1992
- 5 Parkus H. Thermoelasticity, 2nd edition. Wien: Springer-Verlag, 1976: 46~ 69
- 6 Patankar S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corp, 1980

* * *

作者简介: 夏金安(附照片),男,1965年12月出生。博士后。从事高功率气体激光器及强激光与物质相互作用研究。

程祖海,男,1947年出生。教授。从事高功率气体激光器研究。

丘军林,男,1936年2月出生。教授,博士生导师。现从事气体放电理论和气体激光器及谐振腔等方面的研究。