

文章编号: 1001-4322(2005)01-0005-04

强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析*

彭玉峰¹, 程祖海²

(1. 河南师范大学 物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007; 2. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 利用有限元方法数值模拟了单晶硅(Si)、铜(Cu)、钨(W)、氧化铍(BeO)等镜体材料的热畸变特性。结果表明:当入射激光功率为 2 kW、镜面反射率为 93%、光斑直径为 17 mm、激光照射时间为 10 s 时,四种材料基板的中心最大热变形分别为 0.984、3.32、1.55、1.88 μm。相比之下, Si 镜的热变形最小,是比较理想的镜体材料; Cu 镜的热变形最大; W 和 BeO 两种材料的镜热变形介于 Si 镜和 Cu 镜之间,具有较高的强度和硬度,抗破坏能力较强。

关键词: 热畸变; 高能激光; 反射镜; 有限元法

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

高能激光(HEL)不同于短脉冲高功率激光,它一般是连续波或准连续波运行的高平均功率激光,持续时间达数 s 以上。对于数百 kW 和 1 MW 的高能激光器,腔镜及光学链中的部分反射镜需要承受几十 kW/cm² 的功率密度或几十 J/cm² 至 100 J/cm² 的能量密度。实验表明,这样高的能量密度不仅容易引起腔镜的热畸变,造成光束质量显著下降,而且会使腔镜本身致残甚至炸裂,导致激光系统无法正常工作。因此,激光腔镜与激光窗口的热畸变^[1,2]成为高能激光发展的瓶颈。

影响激光腔镜基体热畸变大小的因素很多,其中镜体结构、基体材料本身的物性参数等起决定性作用。有关激光腔镜的热特性分析不少学者^[3~4]曾进行过研究。在 1978 年,苏联科学院列别捷夫物理所的 V. V. Apollonov 等人^[5]提出了采用微孔结构冷却激光镜的设想。1981 年,他们^[6]又对采用多孔结构液态金属冷却的强光光学元件进行了数值模拟与分析。1989 年, W. W. Yuen 和 R. V. Fleishmen 等人^[7]又提出了微孔丝网夹心三明治结构的超薄多层镜结构,并获得了 9.5 W/(cm²·K)热传导效率的良好结果。本文就单晶硅(Si)、铜(Cu)、钨(W)、氧化铍(BeO)等镜体材料的热畸变特性进行有限元数值模拟与分析讨论,以探索不同镜体材料的热畸变行为及其变化规律。

1 物理模型

强激光反射镜表面一般镀有多层高反膜,镜面膜层的吸收引起的温升将占主导地位。这样,在进行有限元分析时,热源项作为表面热载荷施加。

考虑到圆形反射镜的对称性,这里选择其四分之一作为有限元分析的物理分析模型,如图 1 所示。假定镜体圆周上下边界固定,边界与周围环境之间为自然对流换热,其对流换热系数近似为 5 W/(m·K)。入射激光功率为 2 kW,镜面反射率为 93%,光斑直径为 φ17 mm,反射镜厚度为 15 mm,直径为 φ80 mm,拟选择的镜体材料:单晶硅(Si)、铜(Cu)、钨(W)、氧化铍(BeO),它们的基本特性如表 1 所示。

表 1 一些材料的物性参数

Table 1 Physical parameters of some materials

	Si	Cu	W	BeO
density/(kg·m ⁻³)	2 329	8 933	19 300	3 020
melting point/°C	1 410	1 080	3 410	2 550
specific heat/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.695	0.38	0.13	1.00
heat conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	157	391	168	230
heat expansion coefficient/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	2.33	17.6	3.5	8.0
Young's modulus/GPa	190	120	410	297

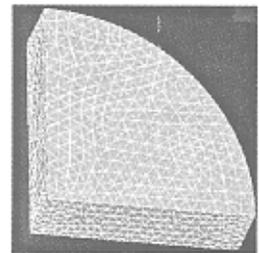


Fig. 1 Physical model for finite element analyses

图 1 有限元分析物理模型

* 收稿日期 2004-04-13; 修订日期 2004-08-13
基金项目:国家自然科学基金资助课题(69878008) 国家重点基础研究发展计划(973 计划)子课题
作者簡介:彭玉峰(1963—),男,河南人,教授,博士,主要从事高能激光器器件、激光与物质相互作用的研究工作。

2 数值模拟结果

有限元网格划分时,选择网格单元 SOLID70 类型(热分析),利用 Mesh Tools 自动生成,如图 1 所示。

2.1 温度分布

2.1.1 Si 镜

单晶硅由于具有较高的热导率(与金属相当)和较小的热膨胀系数,因此常常被用作强激光反射镜的基板材料。图 2(a)给出了当反射镜吸收功率 $P=140\text{ W}$,光斑半径 $r=8.5\text{ mm}$,激光照射时间 t 分别为 2 s, 4 s, 10 s 时, Si 镜表面温升径向上的分布情况。由图可以看出,镜面的中心区域温升较高,周边区域温升较低,形成明显的温度梯度。镜面中心处的温升分别为 29.36, 33.08, 41.14 °C; 镜面中心处与边缘处的温差分别为 28.68, 30.30, 30.86 °C。温度梯度的形成是造成镜面热畸变的主要根源。

2.1.2 Cu 镜

Cu 在金属类材料中具有较高的热导率,但其热膨胀系数较高,因此常被用作强迫冷却反射镜的基板材料。图 2(b)表示基板材料为 Cu 时不同激光照射时间情况下的温升在镜面径向上的分布情况。当反射镜吸收功率 $P=140\text{ W}$,光斑半径 $r=8.5\text{ mm}$,激光照射时间 t 分别为 2 s, 4 s, 10 s 时,镜面中心处的温升分别为 11.96, 13.64, 17.51 °C; 镜面中心处与边缘处的温差分别为 11.49, 12.11, 12.38 °C。

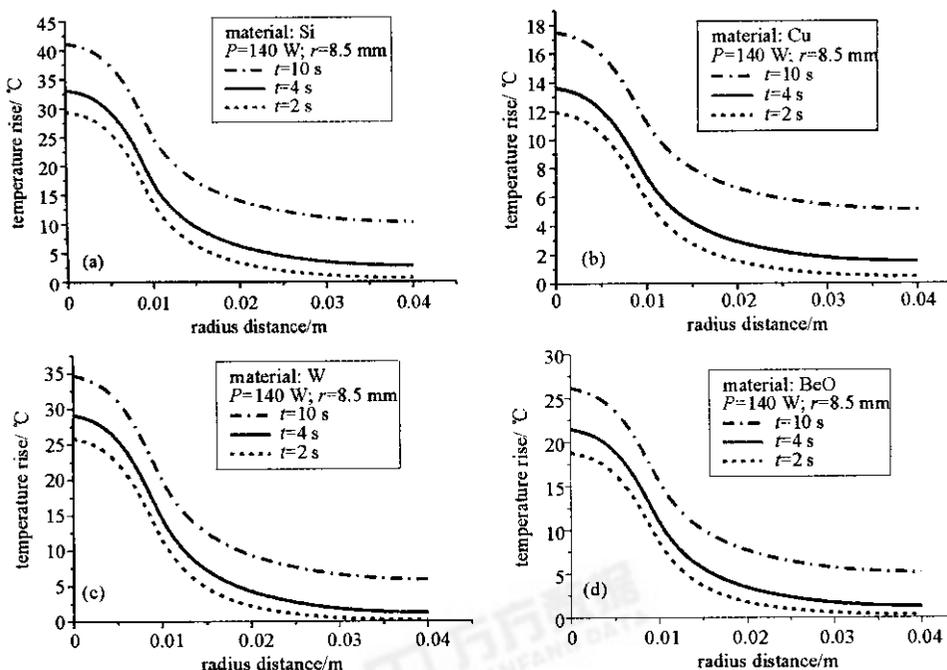


Fig. 2 Distribution of temperature rise on the surface of the silicon mirror(a) copper mirror(b) tungsten mirror(c) BeO mirror(d) along radial distance

图 2 Si 镜(a)Cu 镜(b)W 镜(c)BeO 镜(d)表面温升的径向分布

2.1.3 W 镜

由表 1 可以看出, W 具有高的熔点、较高的热导率以及较小的热膨胀系数,因此也可用作镜体基板的候选材料。图 2(c)给出了 W 镜在不同激光照射时间情况下的温升在镜面径向上的分布情况。当反射镜吸收功率 $P=140\text{ W}$,光斑半径 $r=8.5\text{ mm}$,激光照射时间 t 分别为 2 s, 4 s, 10 s 时,镜面中心处的温升分别为 25.88, 29.16, 34.72 °C; 镜面中心处与边缘处的温差分别为 25.66, 27.94, 28.83 °C。

2.1.4 陶瓷(BeO)镜

在陶瓷材料中, BeO 具有较高的熔点和热导率,强度与硬度均比较大,易于成型,可根据需要制造较为特殊的镜体结构。由图 2(d)可以看出,当反射镜吸收功率 $P=140\text{ W}$,光斑半径 $r=8.5\text{ mm}$,激光照射时间 t 分别为 2 s, 4 s, 10 s 时,镜面中心处的温升分别为 18.81, 21.47, 26.15 °C; 镜面中心处与边缘处的温差分别为 18.48, 20.19, 21.01 °C。

2.2 热变形分布

当反射镜吸收功率 $P=140\text{ W}$,光斑半径 $r=8.5\text{ mm}$,激光照射时间 t 分别为 2 s, 4 s, 10 s 时, Si 镜面中心处的

热变形分别为 0.646 0.748 0.984 μm (如图 3(a)所示);Cu 镜面中心处的热变形分别为 2.15 2.49 3.32 μm (如图 3(b)所示);W 镜面中心处的热变形分别为 1.13 1.28 1.55 μm (如图 3(c)所示);BeO 镜面中心处的热变形分别为 1.33 1.53 1.88 μm (如图 3(d)所示)。

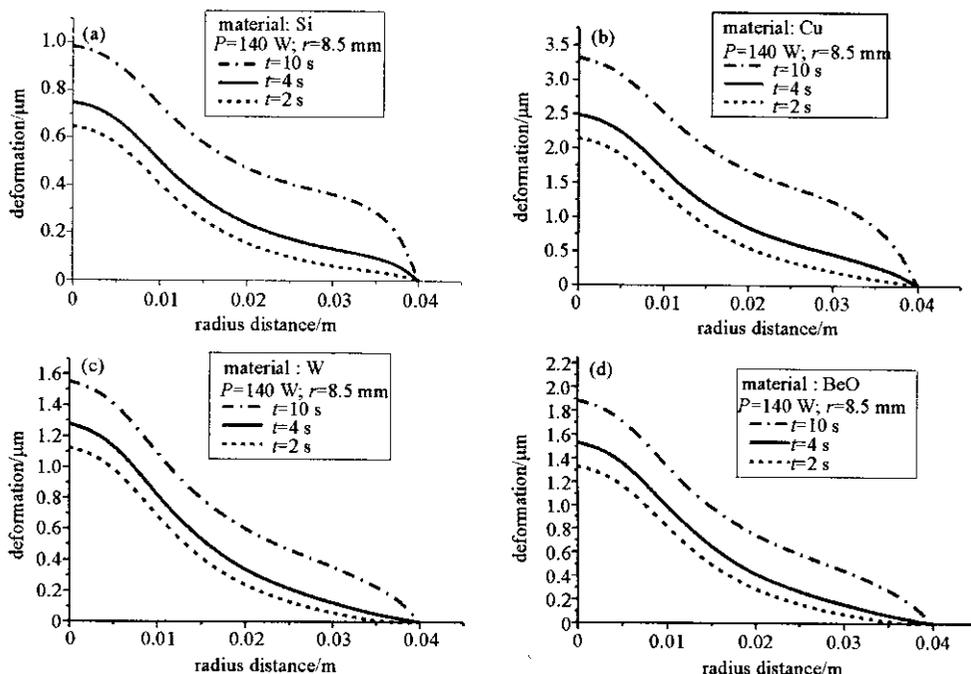


Fig. 3 Distribution of thermal deformation on the surface of the silicon mirror

(a) copper mirror (b) tungsten mirror (c) BeO mirror (d) along radial distance

图 3 Si 镜 (a)Cu 镜 (b)W 镜 (c)BeO 镜 (d)热变形的径向分布

为了验证数值模拟结果的正确性,我们采用泰曼-格林干涉仪测试系统,测量了 2 kW 的 CO_2 激光照射下 Si 镜的最大热变形(吸收激光功率 210 W)随时间的变化情况,结果如图 4 所示。由图可见,数值模拟与实验结果符合较好。

3 结论

本文通过对不同基板材料的腔镜热特性有限元分析,可以看到:对于不同的基板材料,反射镜的温升与热变形情况各不相同。比较 Si,Cu,W,BeO 四种材料,在相同条件下 Si 镜的热变形最小,是比较理想的镜体材料。Cu 镜的热导率高,温升较低,但由于其热膨胀系数比其它材料大得多,因此镜面的热变形较大。而 W,BeO 两种材料的镜体热变形情况基本相当,介于硅镜与铜镜之间。由于 W,BeO 两种材料的强度与硬度较高,因此抗破坏能力较强。

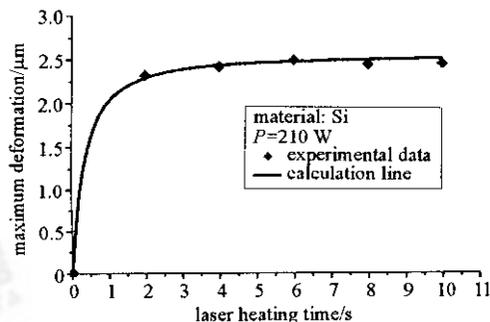


Fig. 4 Maximum thermal deformations of the silicon mirror vs laser heating time

图 4 Si 镜面最大热变形与激光辐照时间的关系

参考文献:

[1] Peng Y F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. Temperature distributions and thermal deformations of mirror substrates in laser resonators[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(27): 4824—4830.

[2] Peng Y F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. Laser-induced temperature distributions and thermal deformations in sapphire, silicon, and calcium fluoride substrates at 1.315 μm [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(12): 2822—2829.

[3] 于德利,桑凤亭,金玉奇,等. 高能量密度激光器腔镜有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2): 129—132. (Yu D L, Sang F T, Jin Y Q, et al. Finite element analysis of the mirror in high energy density laser resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 129—132)

[4] 马毅勇,程祖海,张耀宁. 高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(1): 6—10. (Ma Y Y, Cheng Z H, Zhang Y N. Finite element method in thermal deformation analysis of high power laser windows. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(1): 6—10)

6—10)

- [5] Apollonov V V , Barchukov A I , Lukanin V N , et al. Possibility of using structures with open pores in construction of cooled mirrors [J]. *Sov J Quantum Electron* ,1978 ,**8**(5) :573—580.
- [6] Apollonov V V , Bystrov P I , Brovalskii Y A , et al. Feasibility of using liquid-metal heat carriers to cool power optics components made of porous structures [J]. *Sov J Quantum Electron* ,1981 ,**11**(6) :796—798.
- [7] Yuen W W , Fleishman R V. A parametric study of mesh enhance forced convection heat transfer for the cooling of high power density mirrors [A]. *Proc of SPIE C*]. 1989 ,**1047** :43—45.

Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers

PENG Yu-feng¹ , CHENG Zu-hai²

(1. *College of Physics and Information Engineering , Henan Normal University , Xinxiang 453007 , China ;*

2. *State Key Lab of Laser Technology , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)*

Abstract : The thermal distortions of mirror substrates with such materials as silicon , copper , tungsten and beryllium oxide are calculated and analyzed by use of finite element methods. The results show that when the power of input laser with the diameter of 17 cm gets up to 2 kW , and the reflectivity of the mirrors is 93% , the central maximum thermal distortions of the mirror substrates are separately 0.984 μm , 3.32 μm , 1.55 μm and 1.88 μm , respectively , under the radiation time of 10 seconds. By comparison , the thermal distortion of silicon substrate is the smallest , which would be a kind of more promising material for mirror substrates. And the thermal deformation of Cu substrate is the largest , while those of W and BeO are between Si and Cu. But the materials of W and BeO have high force intensity , flexural rigidity , and great anti-destructive capability.

Key words : Thermal distortion ; High-power laser ; Mirrors ; Finite element methods