

文章编号： 100124322(2004) 1221523204

相变致冷镜的有限元结构优化^x

余文峰， 孙 峰， 程祖海， 刘倚红， 张耀宁

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要： 镜体的结构决定了相变致冷镜抑制腔镜在 高能激光辐照下的热变形的效果。比较不同结构形式的相变致冷镜镜面热变形的有限元软件计算结果,并通过一阶非线性优化方法,得到较优的放射状结构:硅基基底外径 80mm,厚度 12.5mm,光斑直径 40mm,吸收功率密度为 79.58kW/m²,当其最优沟槽深度为 919mm,宽度为 0.4mm 时,光照 10s 时镜面热变形达到最小值 0.37μm。

关键词： 高能激光器； 相变致冷镜； 热变形； 结构优化； 有限元

中图分类号： TN248 **文献标识码：** A

相变致冷镜技术^[1,2]是克服连续波高能激光器腔镜热变形的有效手段之一。硅基相变致冷镜采用单晶硅作为基底材料,在基底背面沟槽内填注相变储能物质来吸收镜体热量,达到减小镜面温升、降低镜面热变形的目的。通常镜面热变形与基底和相变物质的材料性质以及它们的几何结构有关。因此,如何优化相变致冷镜镜体结构从而使镜面变形最小是相变致冷镜设计的关键问题。

ANSYS 有限元软件,非常适合于计算具有复杂边界条件和几何形状 的模型,以 ANSYS 为分析工具,分别对相变致冷镜内部结构形式和尺寸进行优化设计,力求得到镜面变形最小的镜体结构。

1 结构形式优化

结构形式优化是指硅基底背部沟槽形式方案的优化。相变镜常用的沟槽形式有蜂窝状、放射状和其它形状等,外形如图 1 所示。由于沟槽内的相变物质的材料性质与硅基底性质存在较大的差别,因此不同的沟槽形式对热变形的影响不相同。

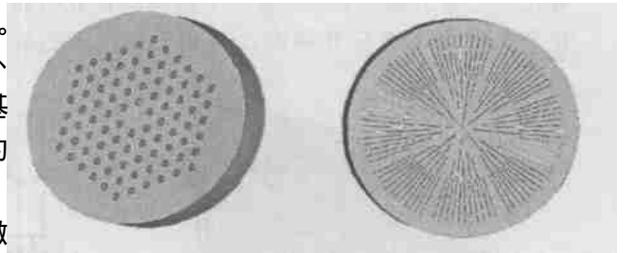


Fig. 1 Outshape of phase change cooling mirrors
图 1 相变致冷镜外形示意图

相变致冷镜具有复杂的几何结构,相变致冷镜对强激光的响应是一个伴有相变的导热问题,非常适合于用 ANSYS 进行模拟计算。当温度场越过相变区间时,物质会吸收或放出大量的潜热,所以在数学上是强非线性问题。相变导热问题的模型包括焓法模型和显热容法模型,ANSYS 中采用的是焓法模型,它适用于多维问题的计算并在整个区域(包括固液和两相界面)建立一个统一的能量方程。焓法模型利用已知的焓与温度(h 与 T)关系曲线,把焓和温度同时作为待求函数,代入热传导方程,即可得到相应边界条件和初始条件下的温度场。相变物质的物性参数见表 1。

表 1 相变物质的物性参数

Table 1 Basic parameters of the phase change material

density	794 kg/m ³	melting point	301 K
specific heat	2 160 J/(kg·°C)	enthalpy at 273 K	0
heat conductance	0.15 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	enthalpy at 300.5 K	4.545 ×10 ⁷ J/m ³
melt latent heat	2.43 ×10 ⁵ J/kg	Enthalpy at 301.5 K	2.401 ×10 ⁸ J/m ³

为了便于与实心硅镜比较,所有结构的直径同为 <80mm,厚度都为 12.5mm,其中两种相变镜背面槽内填注 相同性质的相变物质,其孔深均为 10mm。光照区为镜面中心直径为 <40mm 的圆形区域、吸收功率密度为

x 收稿日期:2004204207; 修订日期:2004208211
基金项目:国家 863 计划项目资助课题
作者简介:余文峰(1970—),男,副教授,从事气体激光器关键光学元器件研究; E2mail:gdlaser@hotmail.com。

79158kW/m²。蜂窝状结构均布圆孔,其孔径为 ≤ 3.4 mm,孔间距为6mm,孔个数为91;放射状镜体的放射状槽深为10mm,槽宽为1mm,槽个数为88。镜体采用固支约束。

从图2中热变形分布和时间变化曲线看出,实心镜面温升最大,蜂窝状相变镜次之,放射状相变镜温升最小;在激光辐照第10s时,放射状相变镜中心温度比蜂窝状相变镜低1.5,比实心镜低4。与温升分布情况对应,放射状相变镜具有最小的镜面热变形。

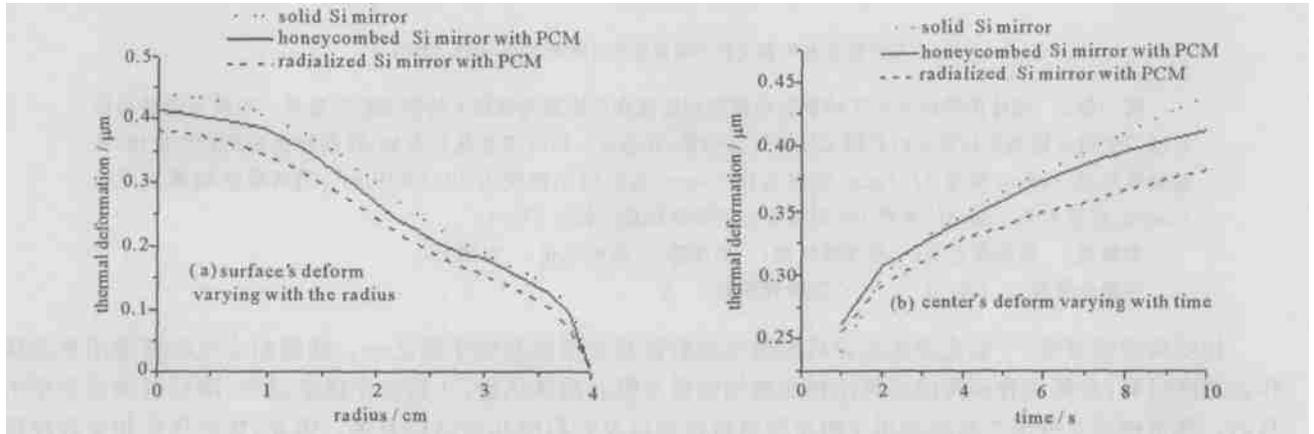


Fig. 2 Surface's deform varying with the radius and center's deform varying with time

图2 镜面热变形沿径向分布曲线和镜面中心热变形随时间变化曲线

2 尺寸优化

采用了ANSYS提供的一阶优化方法,对放射状相变镜进行具体结构尺寸优化。一阶方法基于目标函数对设计变量的敏感程度,适合于精确的优化分析。本例中目标函数是镜面中心轴向热变形,使之最小;设计变量是在镜体外径 D 和厚度 d 一定的情况下的放射状沟槽宽度 w 和深度($d-h$),见图3。

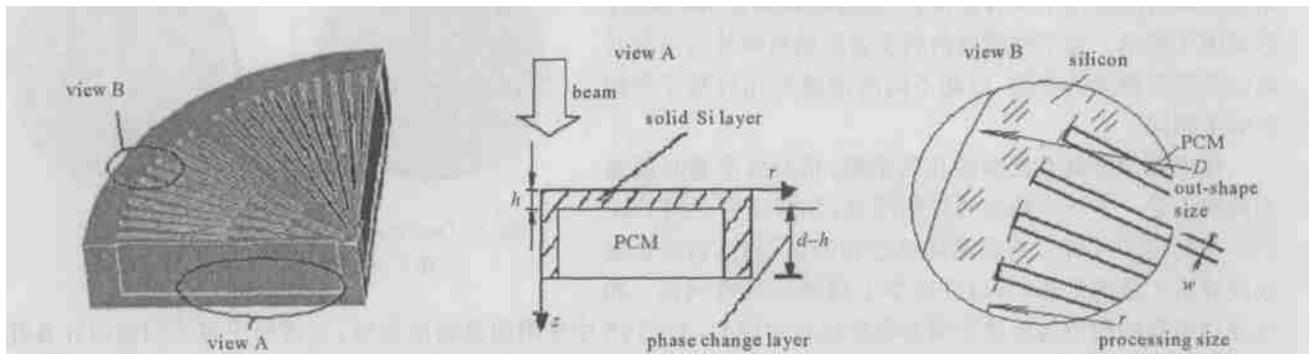


Fig. 3 Outshape of the radialized mirror

图3 放射状相变镜外形图

不同沟槽深度($d-h$)时的镜面第10s时温升和热变形如图4所示。可以看到,温升分布并不与热变形一致,图4(a)曲线说明沟槽越深,镜面温升就越小;而图4(b)显示当 $h=0.5$ mm即沟槽最深时的变形并非最小。经过优化计算后,得出沟槽深度存在一个最优值,即当 $h=2.6$ mm,沟槽深度为9.9mm时,镜面热变形达到最小,在吸收功率密度为79.58kW/m²下的最小变形值为0.37 μ m。

图5为不同沟槽宽度 w 时的镜面温升和热变形分布曲线。与图4中类似也显示出温升与变形的不一致性。沟槽宽度优化结果的最优值为0.4mm。

文献[3]提到由吸热引起的镜面变形主要由三部分组成:材料受热在沿轴向的线膨胀;温度变化产生热应力引起的形变;镜体周边受限,在径向上不能自由膨胀而产生的挠曲变形。温度场分布不均匀时,热应力变形比较大;镜片厚度和刚度小时,挠曲变形比较显著。经分析可知,当相变镜沟槽深度或宽度增加时,镜片刚度减小,使以上第三种挠曲变形增大;但是,同时也增加了相变物质的热容量,增加了热吸收的能力,使镜面温度降低,从而导致以上前两种变形值减小。所以,沟槽尺寸存在使总热变形最小的最优值。我们得到优化结果:外径 ≤ 80 mm,厚度12.5mm的放射状相变致冷镜,其最优沟槽深度为9.9mm,宽度为0.4mm。

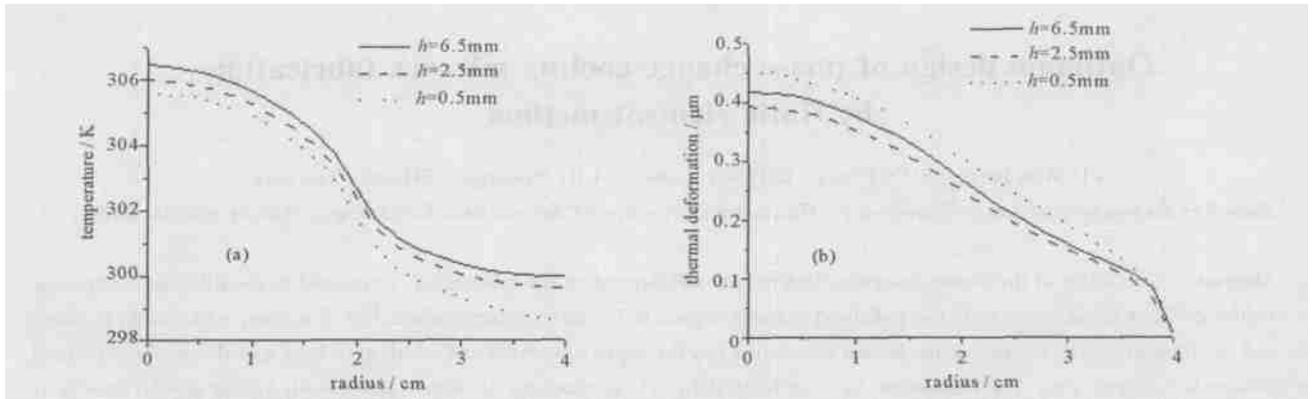


Fig.4 Mirror's surface temperature and thermal deformation varying with the radius at different h
图 4 不同沟槽深度时镜面温度和热变形沿径向分布曲线

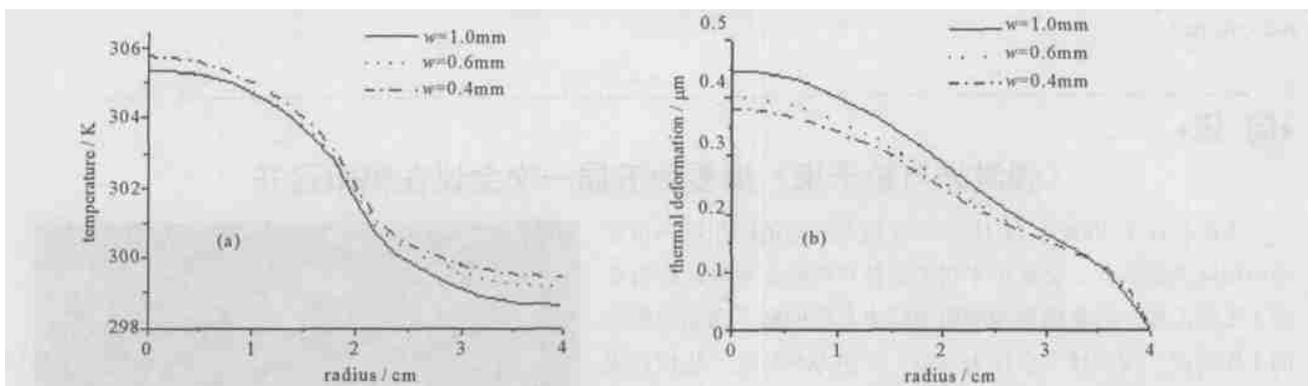


Fig.5 Mirror's surface temperature and thermal deformation varying with the radius at different w
图 5 不同沟槽宽度时镜面温度和热变形沿径向分布曲线

3 实验结果

在净吸收激光功率 140W,硅镜尺寸为 $<80\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ (45°镜),光斑尺寸为 $<40\text{mm}$,相变致冷镜的最大热变形量为 $0.40\mu\text{m}$,在光照 2s 后即达 $0.38\mu\text{m}$,而且以后基本上不变。对照通常的硅镜,尺寸为 $<70\text{mm}$ 、净吸收激光功率 140W 时,最大热变形量为 $0.76\mu\text{m}$,且发生转动。普通硅镜的角向偏转为 $140\mu\text{rad}$,采用相变致冷镜后,在功率略有增加的前提下,镜面偏转降为 $100\mu\text{rad}^{[4-6]}$ 。

4 结论

相变致冷镜镜面温升越大,热变形不一定就越严重。原因在于其镜面变形与温升和镜体刚度两方面相关,相变物质使温升减小,同时也降低了镜体整体刚度,导致变形增大。不同的相变致冷镜结构具有不同的导热结构和刚度大小,通过有限元计算模拟,可以预测出使镜面变形最小的最优相变镜结构,用以指导实验研究。

参考文献:

- [1] Apollonov V V, Bystrov P I, Broval YA, et al. Feasibility of using liquid metal heat carriers to cool power optics components made of porous structures[J]. *Quantum Electron*, 1981, 11:796—798.
- [2] Bluege J. Solid-to-liquid phase change cooled mirror arrangement[P]. U S Patent :5076348, 1991.
- [3] Takeuti Y, Zaima S, Noda N. Thermal stresses problems in industry 1: on thermoelastic distortion in machine metals[J]. *Thermal Stresses*, 1978, 1: 199—210.
- [4] 孙峰,余文峰,程祖海,等. 非均匀光斑导致相变镜镜面偏转[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(4): 331—337. (Su F, Yu W F, Cheng Z H. The deflexion of phase changing material's mirror caused by the laser with non-equal intensity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(4): 331—337)
- [5] Sun F, Yu W F, Cheng Z H. Experimental study of thermal deformation of honeycombed PCM cooled mirror in resonator[J]. *Lasers in Engineering*, 2002, 12(4): 271—280.
- [6] Sun F, Yu W F, Cheng Z H. Numerical simulation on mirror's thermal distortion cooled by organic phase change material in high power laser, high power lasers and application[A]. Proc of SPIE[C]. 2002, 4914:234—241.

Optimum design of phase change cooling mirror's fabrication by finite element method

YU Wenfeng, SUN Feng, CHENG Zuzhai, LIU Yizhong, ZHANG Yaozning

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The effect of the phase change cooling mirror will depend on the fabrication. Compared to the different computing result through finite element method, the radialized shape is chosen to be the optimum design. For Si mirror, with 80mm in diameter and 12.5mm in depth, the optimum channel fabrication has the depth of 9.9mm and width of 0.4mm and the smallest thermal deformation is 0.37 μ m after 10s irradiation by a coaxial light whose diameter is 40mm and net absorbing power density is 79158kW/m².

Key words: High power laser; Phase change cooling mirror; Thermal deformation; Optimum fabrication; Finite element method

• 简 讯 •

《强激光与粒子束》编委会五届一次会议在绵阳召开

本次会议于2004年11月22日在风景秀丽的四川绵阳市富乐山国际酒店召开。会议由本刊主编杜祥琬院士主持，编辑部做了工作汇报，与会编委和编辑部同志共同回顾了历届编委会的工作情况。四川核学会作为《强》刊主办单位之一也派代表参加了此次编委会议。

根据刊物发展的需求，经编委会研究决定，新增中科院长春光机所宣明、西安光机所赵卫、北京高能所唐靖宇、同济大学王占山与中物院范国滨、邓建军、李志民为本刊编委。编委会主任杜祥琬在会上给新编委颁发了聘书，并代表编委会对已不再担任编委的几位同志表示感谢。

经主编杜祥琬院士提议，增加中国核学会作为主办单位，以便利用一级学会的优势，扩大刊物的学术影响，这一工作得到了中国核学会、四川核学会以及四川省科协的支持。为便于广大作者、读者快捷地获取《强》刊稿件信息，编辑部正在建立工作网站，拟实现网上投稿和查询稿件状态，提高工作效率，更好地为作者服务。编委们对《强》刊自创刊以来尤其是近年来取得的进步表示肯定，并赞扬了编辑们的辛勤劳动，同时指出了刊物的不足并提出了改进建议。

编委们表示要利用自身优势，积极撰写、组织、推荐高水平论文到《强》刊发表，特别是那些前沿性的、导向性的论文。编辑部要不断完善审稿专家库，加强同作者、读者和审稿人的沟通与联系，对审稿人进行动态跟踪，缩短审稿周期。《强》刊要继续保持“强”的特色，处理好发展和对外交流的关系，更好地为本领域的学术交流服务。编委们希望编辑部要把好审稿质量关，强调来稿的学术价值、创新性，强调理论与实验的结合，以使发表论文的质量进一步提高。编委们还建议，《强》刊可采用“快讯”方式把重大研究成果的最新进展及时予以报道。



与会者合影

最后，杜祥琬院士进行了会议总结，他提出四点希望：一是编委们要积极撰写、组织、推荐高水平的论文到《强》刊发表；二是要处理好论文交流与保密的关系；三是抓好文章的学风建设，提高审稿质量，严格学术把关，强调文章的创新性；四是编辑部要努力提高编辑质量，进一步缩短出版周期，可考虑增加“快讯”栏目。

(刘金华)