

文章编号 1004-924X(2016)12-2948-08

## 氧碘化学激光器腔镜表面缺陷的观察与分析

王刚<sup>1,2\*</sup>, 陈真<sup>2</sup>, 李艳娜<sup>2</sup>, 公发全<sup>3</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;  
3. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**为了明确氧碘化学激光器腔镜损伤的原因,对腔镜表面的缺陷进行了研究。利用扫描探针显微镜观察了激光器腔镜表面缺陷,分析了腔镜表面微观形貌,讨论了常见缺陷的形状及成因。然后,建立了简化的带污染物腔镜的模型。利用 COMSOL Multiphysics 软件对环形光束辐照腔镜进行了仿真计算。最后,给出了缺陷大小、功率密度和腔镜表面温度的关系,分析了吸附层对腔镜熔融损伤的影响。计算结果表明:腔镜表面污染物大小不变时,激光辐照的功率密度越大,温度增长越快,薄膜表面越容易出现熔融损伤;腔镜表面污染物半径达到 2.3 mm 时,腔镜薄膜即可出现熔融损伤。另外,吸附层吸收系数增加 1%,腔镜最高温度增加约 210 K。本文所得结论可为分析腔镜损伤原因和制定腔镜更换依据提供参考。

**关键词:**氧碘化学激光器;腔镜;表面缺陷;腔镜污染;熔融损伤;激光辐照

**中图分类号:** TN248.5; O484.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.2948

## Observation and analysis of surface defects on cavity mirror of chemical oxygen-iodine laser

WANG Gang<sup>1,2\*</sup>, CHEN Zhen<sup>2</sup>, LI Yan-na<sup>2</sup>, GONG Fa-quan<sup>3</sup>

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*  
2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;*  
3. *Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: linkwg@126.com*

**Abstract:** To figure out the causes of cavity mirror defects in a Chemical Oxygen-iodine Laser (COIL), the surface defects on the cavity mirror were studied. A Scanning Probe Microscopy (SPM) was used to observe the surface defects on the cavity mirror, and its micro topography was analyzed. The shapes of the surface defects and the reasons why the defects appeared were discussed. Then, a simplified model of cavity mirror with defects was established. The ring beam irradiating the cavity mirror was simulated by using COMSOL Multiphysics. The relationship between the defect size, power density and the surface temperature of the cavity mirror was given and the influence of an adsorption layer on the melting damage of the cavity mirror was analyzed. The calculated results show that when the defect area is a constant, the larger the laser radiation power is and the faster the tem-

收稿日期:2016-10-27;修订日期:2016-11-17.

基金项目:国防预研资金资助项目(No. 201521001)

perature grows, the more the melting damage of film surface is. Moreover, the mirror film has the possibility of melting damage at the defect radius of 2.3 mm. The absorption coefficient of the absorption layer increases by 1%, then the maximum temperature of the mirror increases about 210 K. The conclusion provides a reference for the analysis of the causes of cavity mirror damage and the replacement of the cavity mirror in the COIL system.

**Key words:** Chemical Oxygen-iodine Laser (COIL); cavity mirror; surface defect; melting damage; laser radiation

## 1 引 言

氧碘化学激光器具有波长短、效率高、光束质量好等优势,在军事、工业、医疗等领域有着很好的发展和应用前景。氧碘化学激光器通过氯气和碱性过氧化氢溶液反应产生的电子激发态氧分子与碘原子近共振传能,产生激发态碘原子,在光学谐振腔中实现受激辐射<sup>[1]</sup>。在系统运行过程中,由于光腔处于增益区两端,受增益介质、反应物、水汽等物质流动的影响,腔镜表面存在被污染的风险,不可避免地会存在一些缺陷。在激光的辐照下,这些缺陷会对腔镜造成一定的影响,甚至造成腔镜损伤,影响激光器出射激光的功率和光束质量<sup>[2,3]</sup>。在缺陷诱导光学元件损伤方面,国内外学者已开展大量的研究,但是对于氧碘化学激光器中腔镜表面缺陷及其对腔镜损伤的研究目前还鲜有报道。黄伟等根据薄膜界面吸收系数的近似计算式对环状强激光辐照下光学薄膜元件的温度场以及损伤机理进行了详细的理论分析<sup>[4]</sup>。周丽丹等针对神光原型装置助推放大级分析了光学元件缺陷分布的统计参量与光束近场质量的关系<sup>[5]</sup>。苗心向采用有限元软件模拟分析了激光辐照过程中熔石英表面的温度场和应力场分布,通过实验观测薄膜状、颗粒状污染物造成的损伤斑形貌,得出污染后的熔石英样品的损伤以热烧蚀作用为主<sup>[6]</sup>。王艳茹等采用格林函数法理论上求解了有限尺寸高反射光学元件在激光作用下的热传导方程,获得了样品内的温度场分布<sup>[7]</sup>。张梁等在入射激光功率密度相同的条件下,定量地描绘了长脉冲激光辐照硅材料的温度分布,以及前表面的温度历史,并对气化现象进行了数值模拟<sup>[8]</sup>。

本文选取氧碘化学激光器折叠腔中的 45°反射镜为研究对象,通过扫描探针显微镜对激光器

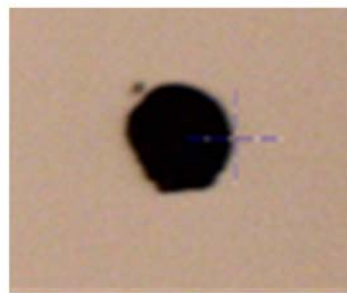
腔镜表面的缺陷进行了观察,分析了腔镜表面缺陷的微观形貌,并通过模拟计算给出了缺陷大小、功率密度和腔镜表面温度的关系,同时分析了吸附层对腔镜损伤的影响。模拟和分析的结果可为氧碘激光器中腔镜损伤判据的制定提供支持。

## 2 腔镜表面观察

由于所选腔镜为 45°反射镜,体积较大,本文使用 Veeco 扫描探针显微镜 (SPM) 对反射镜表面进行观察。显微镜型号为 DI3100,扫描范围 100  $\mu\text{m}$   $\times$  100  $\mu\text{m}$ ,非线性不均匀性小于 1.5%,噪声小于 0.05 nm。实验过程为:先通过仪器自带的光学显微镜对腔镜表面进行观察,选取形状较为典型的“点子”进行标记,然后使用扫描探针显微镜进行三维扫描。通过实验观察得出,腔镜表面主要存在 3 种不同形貌的缺陷、圆形黑点,黑色线条及肉眼可见的明显“点子”缺陷。下面将详细分析 3 种缺陷。

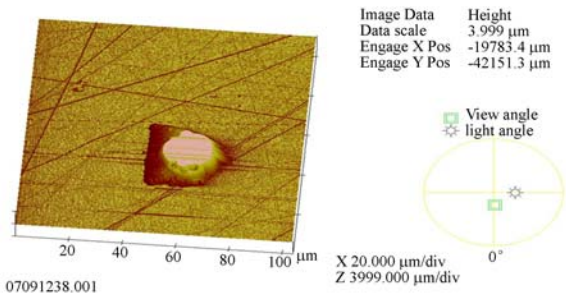
### (1) 圆形黑点

通过三维形貌扫描分析发现,圆形黑点实质为膜层表面的污染物,在污染物周围具有明显的薄膜断裂的裂纹,其在图像上显示为平顶凸起是因为其高度已经超过了原子力显微镜的扫描范



(a) 光学显微镜图像

(a) Microscopy photograph



(b) 扫描探针显微镜图像

(b) SPM photograph

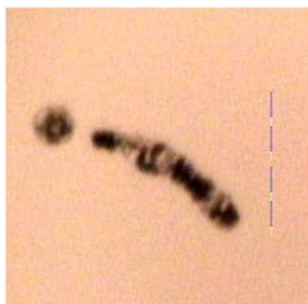
图 1 “黑点”图像

Fig. 1 Photographs of “black point”

围。该缺陷大小约为  $26 \mu\text{m}$ 。初步分析认为此类型黑点应该是镀膜后异物的侵入造成的,并且由于该污染物的存在,导致反射镜薄膜出现了永久性的断裂损伤。

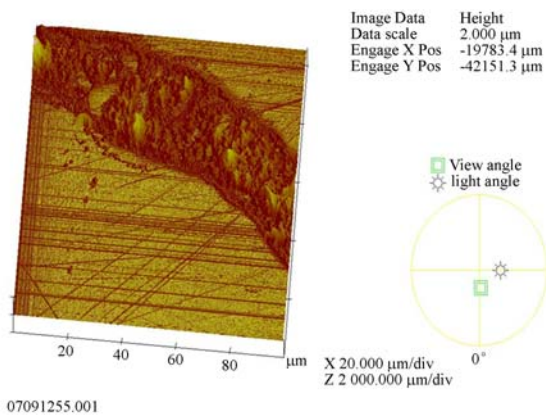
(2) 黑色线条

通过三维形貌扫描结果知,该缺陷长约  $100 \mu\text{m}$ ,宽约  $36 \mu\text{m}$ 。对该线条状点子进行高度分析



(a) 光学显微镜图像

(a) Microscopy photograph



(b) 扫描探针显微镜图像

(b) SPM photograph

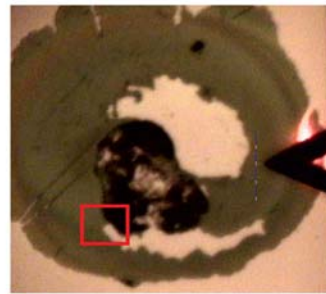
图 2 “条状点子”观察图像

Fig. 2 Photographs of “black line”

发现其由凸起的污染物组成,且在凸起周围存在少量的凹坑,高度差约为  $0.6 \mu\text{m}$ 。

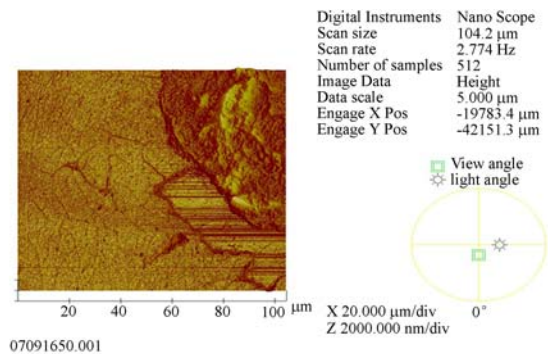
(3) 肉眼可见的明显“点子”

由于该“点子”较大,直径约为  $600 \mu\text{m}$ ,整体形貌无法使用原子力显微镜观察,这里选取图 3 (彩图见期刊电子版)中红色方框标注的部分作为分析对象观测其三维形貌。



(a) 光学显微镜图像

(a) Microscopy photograph



(b) 扫描探针显微镜图像

(b) SPM photograph

图 3 “大点子”观察图像

Fig. 3 Photographs of “large point”

有横向条纹的部分是反射镜正常的薄膜部分,条纹为基底材料打磨留下的,右上角凹凸不平的地方是杂质,说明该“大点子”中间黑色部分为污染物,周围褐色部分为附着的一层未知材料的薄膜,其中污染物的高度约为  $1.8 \mu\text{m}$ ,褐色薄膜厚度约为  $0.45 \mu\text{m}$ 。初步分析认为,该“大点子”是由污染物烧灼后产生的,膜系局部受热后产生不完全烧蚀和变形,周围形成褐色薄膜是污染物吸收热量融化的结果,也可能是多次烧蚀引起膜层产变形成的突起。

通过实验观察知,激光器腔镜表面的损伤或缺陷主要是由污染造成的,这与化学激光器容易

受腔内物质污染具有一定的关系。受反射镜体积和实验条件的影响,无法继续分析表面污染物的组成成分。根据激光器的运行情况可推测,腔镜表面容易受到碘颗粒、氢氧化钾溶液等物质的污染,所以腔镜表面的污染物应该是由碘、钾和膜层材料等组成的混合物。这些污染物长期存在于腔镜表面,并随着激光器出光次数的增加,数量和形态上有所变化。根据使用经验知,只有当缺陷达到一定大小或者缺陷被较高能量的激光辐照时,镜子才会出现严重的损伤。所以,本文将重点分析污染物大小、激光功率密度对镜子损伤的影响。

### 3 腔镜温度模拟计算

氧碘激光器腔镜采用硅作为基体,表面镀有高反射率薄膜,薄膜为多层介质膜,选用  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  分别作为高、低折射率膜料,膜层厚度约为  $10\ \mu\text{m}$ 。对常用的  $1/4$  膜系高反膜的电场分布研究表明,空气/膜层界面,以及膜层/基底界面处的场强为零,膜层中场强最大值都分布在高低折射率材料的交界面<sup>[9]</sup>。反射膜的表面场强出现在第一层膜与第二层膜的界面上。当污染物附着在反射镜表面时,污染物成为吸收激光能量的热源。如果吸收的能量足够多,则会在反射镜表面造成较大的温升,导致薄膜表面融化,出现熔融损伤,进一步增加吸收。在连续出光的情况下,可能导致反射镜元件出现严重的烧蚀坑,影响正常使用。实际损伤情况如图 4 所示,在图中可观察到明显的烧蚀坑和坑底部的熔融材料。

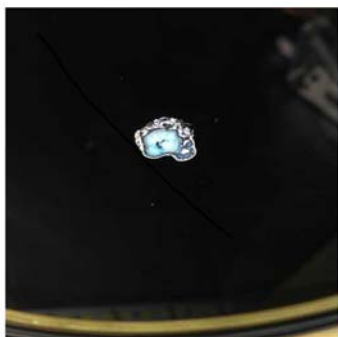


图 4 镜子损伤图像

Fig. 4 Damage morphology of mirror

由于污染物的影响主要发生在膜层表面,所



图 5 激光辐照模型

Fig. 5 Model of mirror irradiated by laser

以将反射镜的模型简化为由一层薄膜和基底组成,在薄膜表面设强吸收区作为带污染物的腔镜模型。当强吸收区为圆点形式时,可根据第 2 节分析模拟上述观察到的污染物对镜子的影响。受镀膜工艺、膜层设计等因素的影响,不容易获得准确的  $Ta_2O_5$ 、 $SiO_2$  膜层的热物性参数<sup>[10]</sup>,故该模型中将薄膜材料简单设定为  $SiO_2$ ,厚度取  $10\ \mu\text{m}$ ,热物性参数如参考文献[9]中所述,基体材料为硅,厚度与腔镜一致。如图 5 所示。

材料热物性参数如表 1 所示。

表 1 材料热物性参数

材料名称	Si	$SiO_2$
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.329	2.12
热传导率 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	137	1.7
比热容 $c_p/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.71	0.775

利用 COMSOL multiphysics 软件建立上述模型的受激光辐照的腔镜模型,腔镜大小取  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ ,厚度与腔镜一致,杂质处于腔镜中心位置,设定为圆形,直径取  $1\ \text{mm}$ ,并进行网格划分,结果图 6 所示。

边界条件设置为:上表面边界设置为热绝缘,下表面和四周边界设为连续边界,材料选择为基底材料,其中上表面考虑辐射热损失。选择边界热源模拟激光照射,取腔镜吸收率为  $0.05\%$ ,杂质处吸收率为  $90\%$ ,根据激光辐照功率密度计算腔镜表面的能流密度作为仿真输入。

考虑没有缺陷的情况,镜子整体被环形光束照射,计算得到镜子纵剖面在照射  $5\ \text{s}$  后的温度分布如图 7 所示。

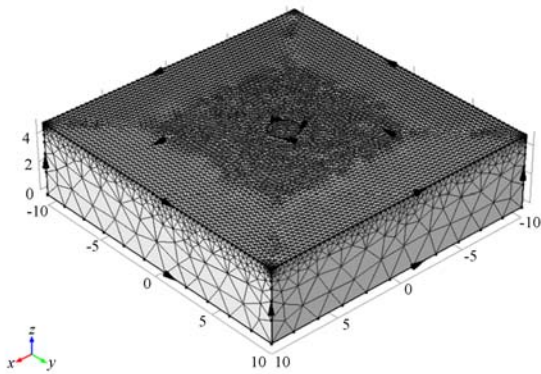


图 6 腔镜网格划分

Fig. 6 Meshing grid of cavity mirror

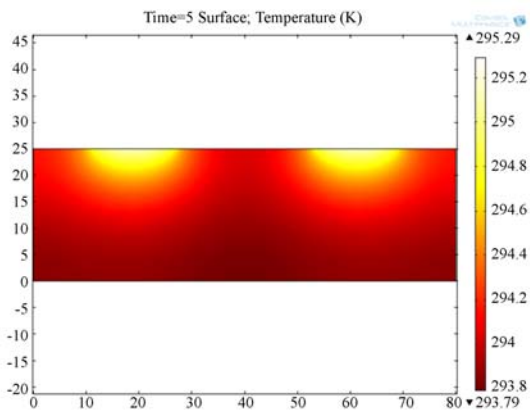


图 7 截面温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution of section plane

上述计算结果显示,表面最大温度为 295.29 K,相比初始温度 293.15 K,上升了 2.14 K,与文献[11]中的结果一致,初步验证了模型计算的正确性。

## 4 计算结果分析

### 4.1 不同污染物大小对表面温度的影响

同样对上述模型进行分析,杂质大小分别取为 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm, 得到杂质大小和薄膜、基底最高温度的关系,如图 8、图 9 所示。

从图中可以看出,杂质导致的温度上升与杂质大小近似呈线性关系。根据计算结果做线性拟合,得到薄膜最高温度与污染物大小的关系为:

$$T_f = 476.78x + 652.90, \quad (1)$$

基底最高温度与污染物大小的关系为:

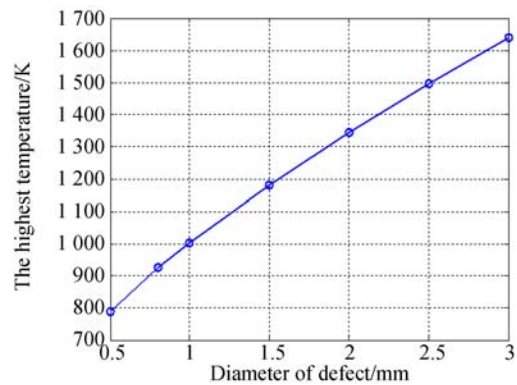


图 8 薄膜最高温度随污染物大小的变化

Fig. 8 Top temperature of thin film varies with defect sizes

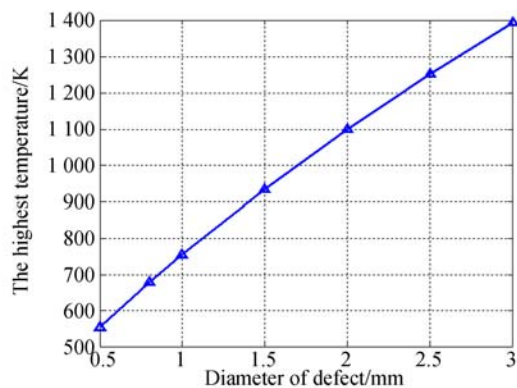


图 9 基底最高温度随污染物大小的变化

Fig. 9 Top temperature of substrate varies with defect sizes

$$T_s = 473.23x + 411.55, \quad (2)$$

式中,  $x$  为污染物大小,  $T_f$  为薄膜的最高温度,  $T_s$  为基底的最高温度。在式(1)、(2)中代入硅、二氧化硅的熔点,计算得到:杂质半径在 2.3 mm 时,薄膜温度达到熔点,会出现熔融损伤;杂质半径为 2.7 mm 时,硅基底达到熔点。这与实际试验中观察到的烧蚀坑都至少在 5 mm 以上的情况相符合。

### 4.2 不同功率密度与表面温度的关系

对于大小分别为 1、2、3 mm 的杂质,功率密度取 1 000~5 000 W/cm<sup>2</sup>,计算得到几种杂质尺寸下,最大温度随功率密度的变化,如图 10 所示。

从图中可以看出,最大温度与功率密度呈线性关系,功率越大,斜率越大,也就是说造成熔融损伤所需的杂质越小,即损伤阈值降低。做线性拟合,对于 1 mm 大小的杂质来讲,拟合得到最大

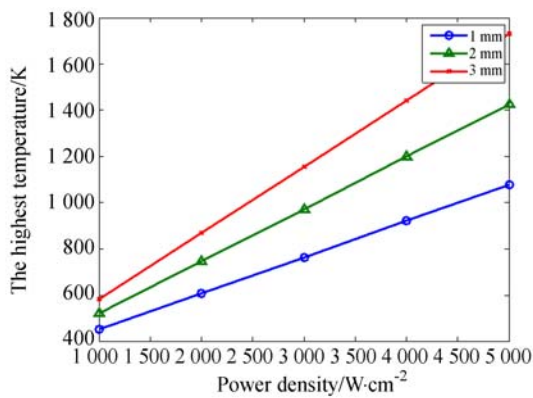


图 10 不同大小污染物表面最高温度随功率的变化  
Fig. 10 Top temperature varies with laser power density at different defect sizes

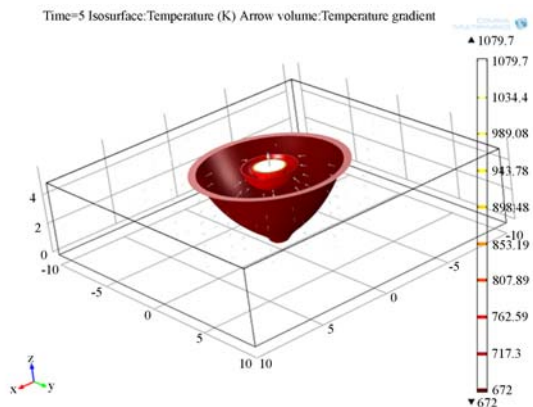
的温度与输入功率的关系式为:

$$T_{\max} = 0.157P + 292.94 \quad (3)$$

### 4.3 吸附层对表面温度的影响

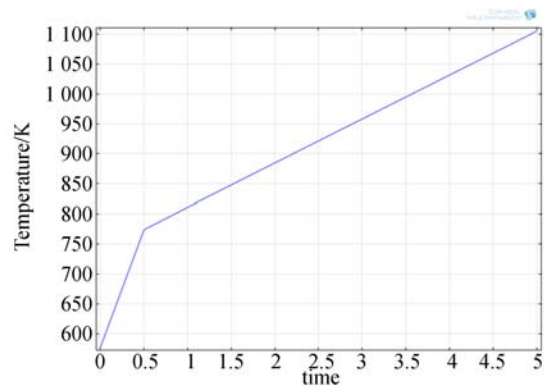
在激光器运行过程中,受污染、挥发等因素影响,镜子表面可能会存在一层吸附层。吸附层是指在薄膜表面形成的一层吸附热量的薄层,其将对薄膜温升产生影响。经过长时间使用后,薄膜的反射率下降,其也可以看作是一层吸附层。所以,这里考虑吸附层吸收热量的影响,吸收系数分别取 1%、2% 进行计算,得到的结果如图 11、图 12 所示。

从图中可以看出,存在吸附层时,元件整体的温度将显著升高,进而导致杂质处出现更高的温度。吸附层吸收系数为 1% 时,薄膜、基底的最高温度增加约为 210 K,吸收系数为 2% 时,薄膜、基底的最高温度增加约为 420 K,是前者的两倍。



(a) 镜子温度分布

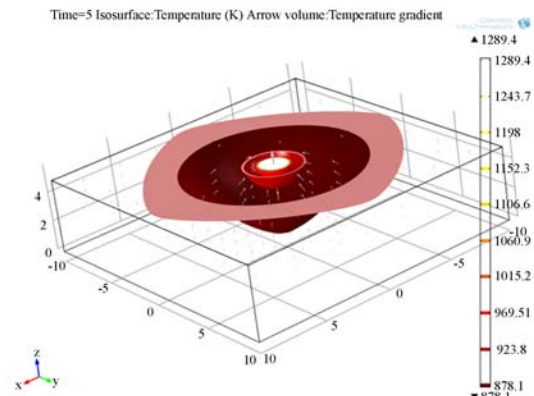
(a) Temperature field distribution of mirror



(b) 污染物处温度随时间变化

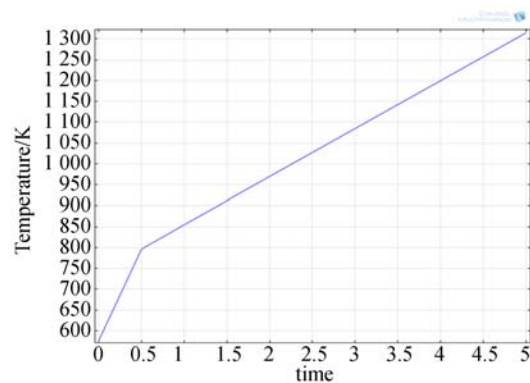
(b) Temperature of defects varies with time

图 11 吸附层吸收系数为 0.01 时对腔镜温度的影响  
Fig. 11 Influence of absorption coefficient 0.01 on temperature of mirror



(a) 镜子温度分布

(a) Temperature field distribution of mirror



(b) 污染物处温度随时间变化

(b) Temperature of defects varies with time

图 12 吸附层吸收系数 0.02 时对腔镜温度的影响  
Fig. 12 Influence of absorption coefficient 0.02 on temperature of mirror

说明元件表面存在油污、灰尘等大面积吸附层时,光学元更容易受损伤。

## 5 结 论

本文使用扫描探针显微镜对氧碘激光器腔镜表面的缺陷进行了观察,经分析得知,腔镜表面常见缺陷多是由污染物造成的。通过 COMSOL Multiphysics 软件进行了模拟计算,结果表明:污染物导致的温度上升与污染物大小近似呈线性关

系,腔镜表面杂质半径为 2.3 mm 时,腔镜薄膜将可能出现熔融损伤;在污染物大小一定的情况下,激光辐照的功率密度越大,温度增长越快,薄膜表面越容易出现熔融损伤,此时镜子表面存在大面积污染时更容易造成腔镜损伤。

由于实验条件的限制,本文无法获取准确的薄膜热物性参数,建立的模型相对简单,计算结果与实际情况相比较为保守,后期可根据薄膜实际情况开展进一步研究。本文所得结论可为氧碘激光器腔镜的更换维护以及损伤的分析提供支持。

### 参考文献:

- [1] 桑凤亭,金玉奇,多丽萍. 化学激光及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
SANG F T, JIN Y Q, DUO L P. *Chemical Laser and Its Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 张国文,卢兴强,曹华保,等. 高功率激光光束经颗粒污染后的近场衍射效应[J]. 物理学报. 2012, 61(2):024201.  
ZHANG G W, LU X Q, CAO H B, *et al.*. Diffraction effect of high-power laser beams through contamination particles[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(2):024201. (in Chinese)
- [3] 尤科伟,张艳丽,张雪洁,等. 光学元件表面缺陷相对位置分布对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3):0308004.  
YOU K W, ZHANG Y L, ZHANG X J, *et al.*. Influence of relative position of optical component surface defects on near field beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3):0308004. (in Chinese)
- [4] 黄伟,张云洞. 连续波强激光辐照下光学薄膜元件损伤机理和热畸变研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(5):61-66.  
HUANG W, ZHANG Y D. Study of the damage mechanism and thermal distortion of optical coating components under CW high power laser radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(5):61-66.
- [5] 周丽丹,粟敬钦,刘兰琴,等. 光学元件“缺陷”对助推放大级光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3):326-330.  
ZHOU L D, SU J Q, LIU L Q, *et al.*. Effects on beam quality of booster stage induced by defects on optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3):326-330. (in Chinese)
- [6] 苗心向,袁晓东,吕海兵,等. 激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6):0602001.  
MIAO X X, YUAN X D, LV H B, *et al.*. Experimental study of laser-induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high power laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6):0602001. (in Chinese)
- [7] 王艳茹,李斌成,刘明强. 激光照射有限尺寸高反射光学元件的温度场[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2):335-340.  
WANG Y R, LI B CH, LIU M Q. Laser-induced temperature distributions in finite radia-size optical mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2):335-340. (in Chinese)
- [8] 张梁,倪晓武,陆建,等. 长脉冲激光与硅相互作用气化过程的数值模拟[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2):437-443.  
ZHANG L, NI X W, LU J, *et al.*. Numerical simulation of vaporization effect of long pulsed laser interaction with silicon[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):437-443. (in Chinese)

- [9] 陆启生,范正修,孙承纬,等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002.  
LU Q SH, FAN ZH X, SUN CH W, *et al.*. *Laser Irradiance Effect*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 胡明雨,陈震,杨决宽,等. 二氧化硅薄膜导热系数试验研究[J]. 东南大学学报,2005,35(3),396-399.  
HU M Y, CHEN ZH, YANG J K, *et al.*. Experimental study on thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> thin film [J]. *Journal of Southeast University*, 2005, 35(3): 396-399.
- [11] 齐文宗,黄伟,张彬,等. 红外连续激光反射镜热畸变的有限元分析[J]. 强激光与粒子束,2004,16(8),953-956.  
QI W Z, HUANG W, ZHANG B, *et al.*. Finite element analysis of thermal distortion of infrared CW laser reflectors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8): 953-956. (in Chinese)

## 作者简介:



王 刚(1985—),男,山西闻喜人,博士研究生,工程师,2007年于北京大学获得学士学位,2007年于西北核技术研究所获得硕士学位,现为中国科学院大学博士研究生,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: linkwg@126.com



陈 真(1988—),男,河北正定人,硕士,工程师,2011年、2016年于河北工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail:776960091@qq.com