

· 光电器件与材料 ·

## 激光器腔镜变形分析及热管冷却方法研究

刘 丽, 安朝卫, 宋洁冰, 毕祥丽

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘 要:**激光器运行中,腔镜的变形造成激光输出功率下降和光束质量变坏,大大制约了高功率激光器性能的提高。通过对激光器腔镜吸热产生的热变形及冷却流体对镜片压力变形分析,提出了热管冷却腔镜的方法,介绍了热管冷却原理和热管在导热方面的优点,设计了热管冷却腔镜方案,为有效控制强激光系统中镜片表面变形提供了有效途径。

**关键词:**热变形;压力;热管冷却;导热系数

中图分类号: TG151.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)06-0055-03

## Deformation Analysis of Laser Cavity Mirror and Method of Heat Pipe Cooling

LIU li, AN Chao-wei, SONG Jie-bing, BI Xiang-li

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The cavity deformation can lead to the decline in the laser output power and the beam quality deterioration when the laser operates, so the performance enhancement of the high power laser is restricted greatly. The heat deformation based on the heat absorption of the laser cavity and the lens pressure deformation based on cooling fluid are analyzed, the method of the heat pipe cooling cavity mirror is proposed. The principle of the heat pipe cooling and the advantage of heat pipe in heat conductivity are introduced, the solution of heat pipe cooling cavity mirror is designed, which provides the effective way to effectively control the lens surface deformation of the high power laser system.

**Keys words:** heat deformation; pressure; heat pipe cooling; coefficient of heat conductivity

高功率激光器中的腔镜在激光器运行中,镜片吸收部分能量产生局部热应力和热变形,引起光束反射光场和光斑图样变化,激光功率高,单位时间内镜片吸收的热量就多,引起的变形就大,导致谐振腔激光模式扰动和损耗增加,造成激光输出功率下降和光束质量变坏,激光器腔镜的热变形制约了高功率激光器性能的提高<sup>[1]</sup>。在不断提高单脉冲能量,维持一定重复频率的同时,如何对腔镜进行更有效的冷却、减少腔镜热畸变来获得优质的光束质量成为了高能激光器的研究重点之一。传统冷却技术虽然已经取得了很好的镜面变形抑制效果,但是随着高功率激

光技术的发展,激光输出功率不断提高,对输出激光光束质量要求越来越高。因此文中提出了采用热管冷却腔镜的方法冷却强激光腔镜,消除了冷却介质压力及振动对镜体带来的变形,同时也加强了传统主动水冷却的冷却能力。

### 1 激光器腔镜的变形分析

控制强激光照射引起的热变形,水冷一直是高功率激光器常用的主动冷却方案,但是冷却过程中镜片会因冷却流体的压力产生附加变形,因此采用

收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 重点实验室基金项目(9140C150201110C1505)

作者简介: 刘丽(1977-)女,河北人,专业方向为机电一体化。

流体冷却方式的镜面变形主要由两部分因素构成:一是激光热作用,二是冷却流体的压力作用。

### 1.1 激光作用引起的热变形

激光腔镜受强激光的直接辐照,除大部分激光被镜面反射,总还有部分光穿入镜体内部或在其表面被吸收后产生局部蓄热,引起腔镜的温升,形成温度和应力梯度,激光加热产生非均匀温度分布,使材料中不同位置发生不同程度的膨胀,产生不同的热应力,当应力超过某一值时,还会使材料屈服而出现挠曲变形和损伤。因此镜片由于吸热引起的轴向( $z$ 轴)热变形  $\Delta d$  由3部分组成<sup>[2]</sup>: (1)材料受热在沿 $z$ 轴方向的线膨胀  $\Delta d_f$ ; (2)轴向温度分布的不均匀产生的热应力引起的热弹性位移  $\Delta d_t$ ; (3)镜体周边受限,在径向上不能自由膨胀而产生的挠曲变形  $\Delta d_a$ , 即

$$\Delta d = \Delta d_f + \Delta d_t + \Delta d_a \quad (1)$$

这三种变形的大小决定于镜片的几何形状、支撑方式、材料的热力学性质等因素。在镜片被强制冷却时,温升受到控制,热膨胀要小得多。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,挠变形比较显著。当镜片的几何形状、支撑方式、材料等都优化确定后,冷却方式是抑制镜片变形的主要因素。

### 1.2 冷却流体压力对镜片变形的影响

高功率激光腔镜主动冷却中水冷技术因其稳定、价廉、高效、无污染、可循环等优点而得到广泛应用,但是在采用流体冷却镜片方式达到消除或控制强激光系统热变形的同时,还会产生附加变形即压力变形,在无激光作用下,冷却流体压力导致的镜面变形随压力增加几乎呈线性增加。如直径30 mm,厚2 mm普通水冷铜镜在冷却水压力为0.1 MPa时,压力导致的镜面变形量为达1.45  $\mu\text{m}$ ,而压力为0.2 MPa时,变形量达到2.77  $\mu\text{m}$ 。激光器运行时,冷却水水压和压力波动等因素引起的镜面面型是非均匀形变。对于大功率激光器腔镜而言,水冷镜由于结构和空间制约,冷却水流量的增加受到空间和压力限制。随着强激光输出功率的不断提高,为了抑制或消除冷却介质带来的镜面压力变形,增强腔镜冷却效果,提出了热管冷却方法,转移了腔镜吸收的热量和减小其内部的热梯度,解决镜面热吸收大、腔镜

长时间工作的冷却和控制变形问题。

## 2 热管冷却镜

利用热管的高传热能力将镜体热量导出,再进行流体冷却方法来完全消除沟道冷却方法中冷却介质压力带来的变形。

### 2.1 热管冷却原理及理论分析

热管由管壳、吸液芯(或称管芯)和传递热能的工作液体(工质)等组成的一个高真空封闭系统<sup>[3]</sup>,其结构和工作原理示意图如图1所示。热管工作时,让其一端置于较高温度处,而另一端置于较低温度处,传热现象便开始产生。热流由高温处首先穿过金属管壁传给吸液芯,吸液芯内的工作液受热开始蒸发,蒸气向热管的冷凝段流动,由于热管的冷凝段置于低温处,所以当气体到达冷凝段时便开始冷凝成液体,同时热量由气体传给吸液芯及金属管壁,进而传给热管外部的低温体。冷凝后的液体因毛细作用自冷凝段又流回了蒸发段,如此流体循环不息,热量便由高温处传到了低温处。

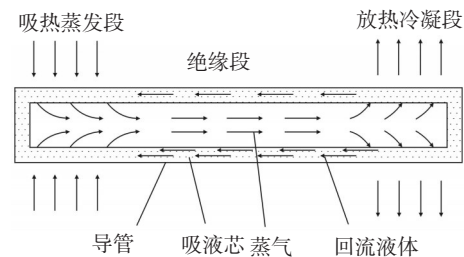


图1 热管工作原理示意图

热管是一种利用工作物质相变,进行热量传递的高效传热器件。由于其高导热性,它在电子设备散热系统中有广泛的应用<sup>[4]</sup>。目前,对热管传热性能的评价标准通常采用等效导热系数,其实质是综合考虑热管内部工作机理,由于热管的热阻基本上与长度无关,取决于传过蒸发区和冷凝区管壁及毛细结构厚度方向的热阻。将热管等效为一根具有高导热系数的实心圆棒,热量以单纯的传导方式从热端传向冷端。热管的热阻网络如图2所示。图2中, $R_1$ 、 $R_3$ 分别为热管管壳蒸发段和冷凝段的热阻; $R_2$ 、 $R_4$ 分别为蒸发段的沸腾换热热阻和冷凝段的冷凝换热热阻; $R_5$ 为蒸气从蒸发段到冷凝段的传热热阻,由于 $R_5$ 值相对较小,在计算热管总热阻时通常忽略,因此,热

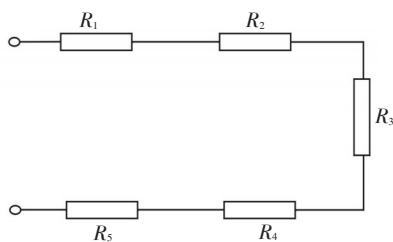


图2 热管热阻网络

管总热阻  $R$  为

$$R = R_1 + R_2 + R_4 + R_5 = \frac{\ln(d_0/d_i)}{2\pi k l_E} + \frac{1}{a_E \pi d_i l_E} + \frac{1}{a_c \pi d_i l_c} + \frac{\ln(d_0/d_i)}{2\pi k l_c} \quad (2)$$

式中,  $d_0$  和  $d_i$  分别为热管的外直径和内直径;  $l_E$  和  $l_c$  分别为蒸发段和冷凝段的长度;  $k$  为管壁铜的导热系数;  $a_E$  为蒸发段沸腾换热系数;  $a_c$  为冷凝段的冷凝换热系数.以普通热管为例进行计算,  $d_0 = 6 \text{ mm}$ ,  $d_i = 5 \text{ mm}$ , 热管  $l_c = 100 \text{ mm}$ ,  $l_E = 60 \text{ mm}$ ,  $k = 386 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ , 在近似计算中可令  $a_E = a_c = 5.8 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ , 代入式(2), 计算得  $R = 0.295 \text{ C}/\text{W}$ .

热阻定义式为

$$R = \Delta\theta/Q \quad (3)$$

式中,  $Q$  为导热热量, 即

$$Q = KA\Delta\theta/L \quad (4)$$

即傅里叶热传导方程,  $\Delta\theta$  为热端和冷端温差.根据热管实际情况, 热流路径长度为  $L = l_E + l_c$ , 直热流方向的横截面积  $A = \pi d_0^2/4$ , 由此得到热传导系数为

$$k = 4L/R\pi d_0^2. \quad (5)$$

从而计算得  $k \approx 19.2 \text{ kW}/(\text{m} \cdot \text{C})$ .由此可以看出热管的热传导系数远远高于任何金属的导热能力.

热管在导热方面具有以下优点:

(1) 具有极高的导热性.由于热管的传热主要靠工作液体的气、液相变来吸收和释放潜热<sup>[5]</sup>, 所以它的传热能力较其他导热材料(比如纯铜)高几十倍, 甚至几百倍.

(2) 优良的等温性.热管工作时, 管内蒸汽处于饱和状态, 饱和蒸汽流动和相变时的温差很小, 所以沿热管蒸发端表面的温度梯度很小, 可自动地形成均匀的热流温度.

(3) 具有可变热流密度的能力.由于热管中的蒸发和冷凝空间是分开的, 通过改变蒸发段和冷凝段的传热面积, 可以实现热流密度的变换.

(4) 具有良好的恒温特性.一种可控制温度热管, 当输入端的热量变化时, 因蒸汽压力的变化使冷凝端的冷凝面积改变, 以维持热源温度的恒定.

## 2.2 热管冷却腔镜方案

热管采用恒温微型热管如图3所示, 每个微型热管内有微槽群结构.把一定数量和尺寸相同的微型热管并排排列并彼此独立, 即使出现其中某个微型热管损坏的情况, 其他独立的微型热管仍然可以正常工作, 可靠性高<sup>[6]</sup>.

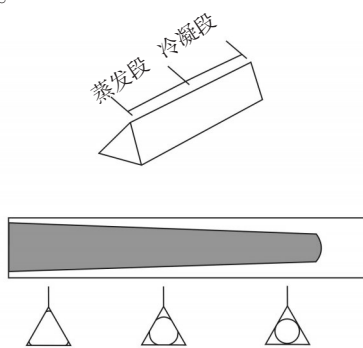


图3 单根微型热管

如图4所示.蒸发端内嵌于镜体中, 冷凝端植入水冷热交换器.水冷热交换器可以通过控制水流量和冷却水温度来控制热管导热速度.激光器工作时, 镜面吸收热量首先由镜体材料传导至热管槽附近, 并使热管蒸发端有热量吸收, 引起蒸发端微小温升, 工作液受热开始蒸发, 蒸气向热管的冷凝段流动, 由于热管热阻极小, 热量迅速被传递到热管冷凝端, 位于冷凝端的热交换器中的低温高速冷却液体很快将热管吸收的热量吸收, 如此循环, 镜体与热管接触面基本保持恒温.

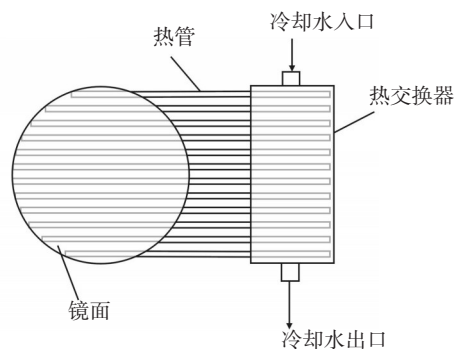


图4 热管冷却腔镜示意图

这种降低热变形的方式具有以下特点

(下转第78页)

在目标缺损 50% 的情况下, 仍然能够稳定跟踪。解决了标准 CamShift 算法缺损目标跟踪的问题, 实现了经纬仪序列测量图像中缺损目标的稳定跟踪。当然, 当目标缺损部分超过 50% 时, 有效部分必然减少, 修正模板的有效信息随之减少, 导致跟踪能力下降, 因此, 对于缺损部分超过 50% 的目标跟踪算法是将来的研究方向。

### 参考文献

- [1] 高波, 包国彬. 基于动态图像处理技术的动目标检测与跟踪[J]. 光电技术应用, 2010, 25(4): 73-76.
- [2] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Kernel-based object tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-577.
- [3] Bradski G R. Computer Video Face Tracking for use in a Perceptual User Interface[EB/OL].
- [4] Fukunaga K, Hostetler L D. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition[J]. IEEE Trans Information Theory, 1975, 21(1): 32-40.
- [5] A Kokaram, R Morris, W Fitzgerald, et al. Interpolation of missing data in image sequences[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1995, 4(11): 1509-1519.
- [6] 蒋雯丽, 郑世宝. 电影胶片中霉斑噪声的数字处理技术[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(10): 1926-1930.
- [7] 李金亮, 高文静, 王垒. 采用 Mean-Shift 算法的目标跟踪系统设计[J]. 光电技术应用, 2011, 26(1): 5-7.
- [8] 杨伟, 柴奇. 基于 Mean-Shift 的多目标粒子滤波跟踪算法设计[J]. 光电技术应用, 2009, 24(4): 67-70.
- [9] 李睿, 刘涛. 基于 Mean Shift 的粒子滤波算法在遮挡目标跟踪中的应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(14): 3957-3960.
- [10] 梁静, 支靖. 基于 Mean Shift 的抗遮挡运动目标跟踪算法[J]. 电视技术, 2008, 32(12): 82-85.
- [11] 张宏志, 张金换, 等. 基于 CamShift 的目标跟踪算法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(11): 2011-2014.
- [12] 童刚, 陈灵芝. 基于 CamShift 的跟踪系统设计[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(10): 194-196.

(上接第 57 页)

- (1) 超强的热传导(冷却)能力;
- (2) 恒温特性, 在冷却中, 在不同温度区域有不同的冷却强度, 有效减小镜面热梯度;
- (3) 消除了冷却水带来压力和振动冲击;
- (4) 适合连续长时间工作。

根据工作温度、使用场合、具体要求合理选择热管的工质、直径、长度及外型形状, 换热量可以通过增加热管的数量来提高。

### 3 结束语

利用热管超强的热传导(冷却)能力, 采用恒温微热管将腔镜吸收热量导出, 再进行强制水冷方法冷却强激光腔镜, 以期完全消除冷却水压力和扰动对镜面产生变形, 并克服镜体空间对冷却流体流量的限制。有效地抑制了镜面温度升高产生热变形。

### 参考文献

- [1] 李适民. 激光器件原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 230-280.
- [2] 陈佳元. 高功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器腔镜热稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 20-29.
- [3] 吴金星, 韩东方, 曹海亮. 高效换热器及其节能应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 155-193.
- [4] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2009: 177-191.
- [5] 伍志坚. 相变制冷在激光腔镜中应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2003: 10-28.
- [6] 赵耀华, 王宏燕. 平板微热管阵列及其传热特性[J]. 化工学报, 2011, 62(2): 337-342.
- [7] 宋小鹿, 韦光. 热管在 LD 端面泵浦固体激光器散热系统中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(3): 397-407.
- [8] 夏金安. 强激光系统中铜镜微变形实验研究[J]. 中国激光, 1996, 23(7): 461-466.
- [9] 程祖海, 张耀宁. 回流式水冷超薄多层镜的研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(3): 418-422.
- [10] 于德利, 桑凤亭. 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.
- [11] 孙峰, 程祖海. 激光器腔镜夹持方式对热变形的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 751-754.
- [12] 梦林, 郭劲. 控制高功率激光器腔镜与窗口微变形技术的探讨[J]. 电光与控制, 2007, 11(1): 81-84.