

波前校正变形镜的疲劳损伤特性

陈丽霞 胡小川 张彬* 孙年春

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 以随机相位屏作为待校正畸变波前,采用有限元分析方法,利用应力分析模型得到变形镜(DM)校正过程中的应力载荷谱,并基于应力-寿命(S-N)曲线和 Miner 累积损伤理论建立了变形镜的疲劳寿命预估模型,分析了波前校正过程中变形镜的疲劳损伤特性,并详细讨论了不同驱动方式及不同结构参数对变形镜使用寿命的影响。研究表明:在波前校正过程中,变形镜基底后表面损伤的程度大于前表面,基底与极头连接部位最易损坏。当待校正畸变波前形态一定时,波前峰谷(PV)值越大,变形镜的疲劳寿命越短;而当波前 PV 值一定时,畸变波前中的高频成分越多,变形镜产生的应力集中现象越明显,其疲劳寿命也随之缩短。此外,结构参数也会对变形镜的疲劳寿命造成影响,随着基底厚度的增加,极头长度的缩短,以及极头直径的增加,变形镜的疲劳寿命逐渐缩短。其中,极头直径变化所带来的影响最为明显。

关键词 几何光学; 自适应光学; 变形镜; 疲劳; 寿命预估

中图分类号 TP273.2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1105002

Fatigue Damage Characteristics of Deformable Mirrors for Wavefront Correction

Chen Lixia Hu Xiaochuan Zhang Bin Sun Nianchun

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A distorted wavefront to be corrected is built up based on the random phase screen. Then, the stress load spectrum of deformable mirror (DM) in the correction process is obtained by the stress analysis model with finite element analysis method. The fatigue life prediction model is proposed based on stress-cycle (S-N) curve and Miner cumulative damage theory. On this basis, the fatigue damage characteristics of DM for wavefront correction process are analyzed, and the influence of the different driving ways and different structural parameters on the lifetime of DM is discussed in detail. The results indicate that, in the wavefront correcting process, the fatigue damage of rear surface of DM substrate is more serious than that of front surface, and the joints between substrate and poles are most likely to be damaged. For a given shape of the distorted wavefront to be corrected, the fatigue life of DM decreases gradually with the increasing of the peak valley (PV) value of the wavefront. On the other hand, when the PV value of the wavefront is determined, the fatigue life also decreases due to more obviously concentrated stress caused by the increasing high frequency components in the distorted wavefront. Furthermore, the fatigue life can be affected by the structural parameters of DM as well. The life of DM decreases gradually with the increasing of the thickness of substrate, the decreasing of the length of poles and the increasing of the diameter of poles, among which the effects caused by the variation of the diameter of poles are more significant.

Key words geometric optics; adaptive optics; deformable mirror; fatigue; life prediction

OCIS codes 080.3630; 010.1080; 110.1080; 140.3460

收稿日期: 2016-06-20; **收到修改稿日期:** 2016-08-08

基金项目: 中国科学院自适应光学重点实验室基金项目(LAOF201303)、苏州大学省级重点实验室开放课题(KJS1404)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)

作者简介: 陈丽霞(1991—),女,硕士研究生,主要从事变形镜热效应、疲劳损伤与控制等方面的研究。

E-mail: chen_lixia2h@163.com

导师简介: 孙年春(1961—),男,硕士,教授,主要从事军用固体激光器等方面的研究。E-mail: 8178137@163.com

* **通信联系人.** E-mail: zhangbinff@sohu.com

1 引 言

自适应光学技术是以光学波前为控制对象的自动控制技术,利用对光学波前的实时测量校正,使光学系统具有自动适应外界条件变化,始终保持良好工作状态的能力^[1]。典型的自适应光学系统包含3个主要组成部分:波前传感器、计算控制处理器和波前校正器。光学能动镜作为波前校正器件,需要实时改变自身面形以实现畸变波前的校正^[2]。通常情况下,变形镜(DM)工作频率在1 kHz左右^[3],因而驱动器对镜面的驱动作用可看作是高频循环载荷。根据疲劳损伤机理,当循环载荷达到一定次数时,变形镜的材料性能将发生变化,从而出现“疲劳”损伤。

迄今为止,人们在机械、航空、铁路和土木工程等领域开展了大量的疲劳损伤研究^[4-6]。其中,因其突发性以及损失的惨重性,钢结构疲劳破坏备受国内外学术界和工程界的关注^[7-8]。然而,在光学领域关于光学材料及元件的疲劳损伤研究却鲜有报道。变形镜在波前校正过程中,镜面会受驱动器的机械驱动作用,从而产生不均匀的应力分布。该应力的重复作用不仅会导致其表面薄膜的色裂、脱落,使变形镜表面薄膜损坏,而且还会作用于其基底,使基底材料发生形变,致使通过该元件的光场发生畸变,从而影响传输特性。本文运用应力分析模型得到变形镜校正过程中的应力载荷谱,并基于应力-寿命(S-N)曲线和 Miner 累积损伤理论,建立了变形镜的疲劳寿命预估模型,初步探索波前校正过程中变形镜疲劳损伤机理。通过对变形镜驱动方式及其结构参数的分析,明确了波前校正过程中影响变形镜疲劳寿命的关键因素。

2 理论模型

2.1 变形镜的应力分析模型

在应力低于比例极限的情况下,固体中的应力与应变成正比,即满足广义胡克定律

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_x - (3\zeta + 2G)\alpha T, \\ \sigma_y &= \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_y - (3\zeta + 2G)\alpha T, \\ \sigma_z &= \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_z - (3\zeta + 2G)\alpha T, \\ \tau_{xy} &= 2G\zeta_{xy}, \tau_{yz} = 2G\zeta_{yz}, \tau_{xz} = 2G\zeta_{xz},\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为对应的正应变; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 为切应力; $\zeta = E\mu/(1 + \mu)(1 - 2\mu)$; $G = E/2(1 + \mu)$; α 为膨胀系数; G 为剪切弹性模量; μ 为泊松比。

广义胡克定律又称为固体的物理方程,可以给出固体内部应变与应力的关系。材料的状态由准静态的热弹性方程组决定,固体内部应变和位移关系可由几何方程给出

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right), \epsilon_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}\right), \epsilon_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right), \epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$ 为对应的切应变;物体处于平衡状态时, x, y, z 各方向的各力的平衡方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_y = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0, \end{cases}\quad (3)$$

式中, F 为作用在微元体上的外力。

变形镜为三维实体结构,在后续处理时选择 von Mises 等效应力来表征变形镜在不同驱动作用下的受力情况。该等效应力更全面地考虑了各主应力对强度的影响,进行分析计算时更接近实际情况。经典的 von Mises 等效应力是应力张量的函数,在平面应力状态下,其表达式为^[9]

$$\mathbf{S}_{eq} = \sqrt{\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{S}}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_{xy})^T$, $\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & 0 \\ -1/2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$, S_x, S_y 为正应力分量, S_{xy} 为剪应力分量。该等效准则在

静强度理论中具有较好的适用性,因而得到广泛的应用。

2.2 疲劳寿命预估模型

在实际工作中,变形镜主要受变幅应力循环作用,从而产生疲劳效应,甚至会出现疲劳损伤,而变幅应力循环下的疲劳寿命预测主要依据累积损伤理论。采用基于 S-N 曲线与 Miner 累积损伤理论^[10]对光学变形镜的疲劳效应进行建模分析。在等幅载荷下, n 个循环造成的损伤由参数 D 来表征,即

$$D = \frac{n}{N}, \quad (5)$$

式中, N 为当前载荷水平下的疲劳寿命;当 $n = N$ 时,元件将发生疲劳破坏。

对于变幅载荷,假定光学元件承受 l 个不同应力水平的作用,在应力水平 $\Delta\sigma_i$ 作用下经历了 n_i 个循环,对应恒定幅值应力 $\Delta\sigma_i$ 的疲劳循环次数为 N_i ,每一次循环造成的损伤为 $1/N_i$,则 n_i 个循环造成的疲劳损伤为 $D_i = n_i/N_i$,用 D_i 来度量的应力水平循环作用下的损伤,当 $D_i = 1$ 时,将发生疲劳破坏,即

$$D = \sum_{i=1}^l D_i = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (6)$$

式中, N_i 为应力水平 $\Delta\sigma_i$ 在 S-N 曲线上对应的循环次数。

通常,材料的 S-N 曲线呈现如图 1 所示的分布规律。可以看出,当最大应力幅值减小到一定程度时疲劳寿命趋于无限,此时,对应的应力值为材料的疲劳极限。将图 1 所示的不带缺口的 Si 材料的 S-N 曲线代入有限元疲劳分析软件可得到 Si 材料的疲劳寿命分布。

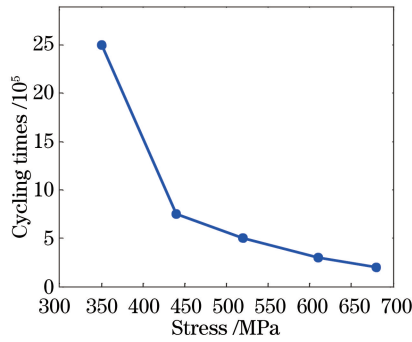


图 1 Si 材料的 S-N 曲线^[11]

Fig. 1 S-N curve of silicon^[11]

描述材料 S-N 曲线最常用的形式是幂函数形式^[12],即

$$S^m \cdot N = C, \quad (7)$$

式中, m 和 C 是与材料性质、应力比和加载方式等密切相关的拟合常数。

一般情况下,虽然名义应力处于弹性范围,但从局部、微观的角度看来,塑性形变仍然存在。因此,在计算应力循环次数时采用雨流计数法^[13],即认为塑性的存在是疲劳损伤的必要条件,且其塑性性质表现为应力—应变的滞后回线。雨流法是将应力历程转动 90° ,取时间为纵坐标,垂直向下。应力如雨滴一般,以峰、谷为起点向下流动,从而确定循环载荷。

计算中,设最大应力为 S_{\max} ,最小应力为 S_{\min} ,则应力幅值 S_a 、平均应力 S_m 、应力比 R 分别为

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}, \\ S_m &= \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}, \\ R &= \frac{S_{\min}}{S_{\max}}. \end{aligned} \quad (8)$$

若应力比 $R = -1$,则称为对称循环疲劳载荷;若 $R = 0$,则为脉动循环疲劳载荷。

姜年朝等^[14]基于正弦载荷激励、Miner 累积损伤理论和雨流计数法,分析了无人机机翼的疲劳寿命特性。根据文献给定的相关参数,采用上述预估模型对文献^[14]给出的疲劳寿命进行复算,得到的寿命预估结

果与该文献结果一致,由此说明该研究方法的正确性和有效性。

2.3 变形镜建模

以 109 单元变形镜为例进行研究,其结构如图 2(a)所示。镜面包括膜系和基底,镜面后方依次为极头、驱动器以及基座。其中,基底由 Si 材料制成;极头为镜面与驱动器间的连接单元,其材料与镜面相同;驱动器是控制变形镜面形的主要元件,其材料为压电陶瓷。图 2(b)为该 109 单元变形镜极头分布示意图,极头间距为 20 mm,直径为 8 mm,长度为 10 mm,镜面直径为 220 mm,厚度为 2.5 mm。基底材料 Si 的热物理参数如表 1 所示。

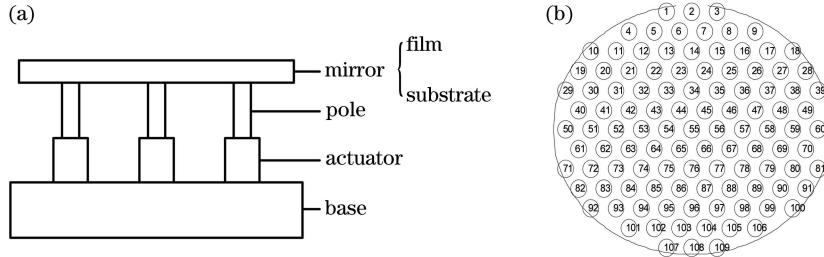


图 2 变形镜模型。(a)结构示意图;(b)驱动器分布示意图

Fig. 2 Model of DM. (a) Structure diagram; (b) distribution schematic illustration of actuators

表 1 基底材料的热物理参数

Table 1 Thermo-physical properties of substrate material

Material	Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific heat /[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	Heat conductivity /[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	Thermal expansion / K^{-1}	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Refractive index
Si	2329	733	173.6	4.15×10^{-6}	130.9	0.266	$3.44-i2.4\times 10^{-8}$

根据图 2 所示变形镜结构,建立变形镜有限元分析模型如图 3 所示。作为对光学元件疲劳损伤特性的初步探索,主要研究变形镜基底的疲劳损伤,暂不考虑薄膜的疲劳损伤。



图 3 变形镜有限元模型

Fig. 3 Finite element model of DM

3 变形镜机械驱动作用仿真分析

将随机相位屏作为待校正波前,根据变形镜的影响函数模型,利用最小二乘法得到变形镜各驱动器的驱动位移,其中,影响函数由高斯函数构造^[15],再利用有限元方法对机械驱动作用下变形镜的形变与应力分布进行仿真,进而获得机械应力载荷谱。在此基础上,将应力载荷谱导入基于 S-N 曲线和 Miner 累积损伤理论的疲劳寿命预估模型,即可模拟分析变形镜的疲劳损伤特性。具体分析流程如图 4 所示。

图 5 给出了待校正畸变波前及变形镜拟合面形分布,其中,图 5(a)中假设畸变波前峰谷(PV)值为 4λ ($\lambda=3.8\ \mu\text{m}$),通过计算得到变形镜拟合面形分布如图 5(b)所示。

从图 5 可以看出,变形镜的拟合面形与畸变波前基本一致,说明采用该方法能对变形镜的波前校正过程进行近似模拟。此时,变形镜 von Mises 等效应力分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在驱动器作用下,变形镜表面的应力呈不规则分布。前表面应力最大值为

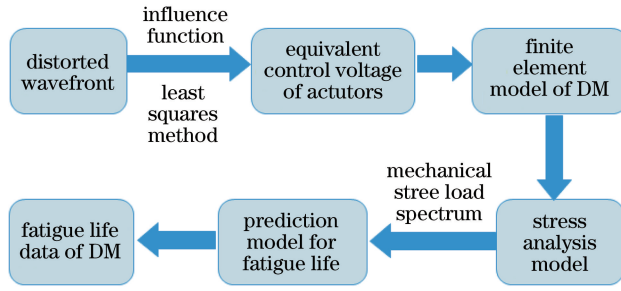


图 4 分析流程图

Fig. 4 Analysis flowchart

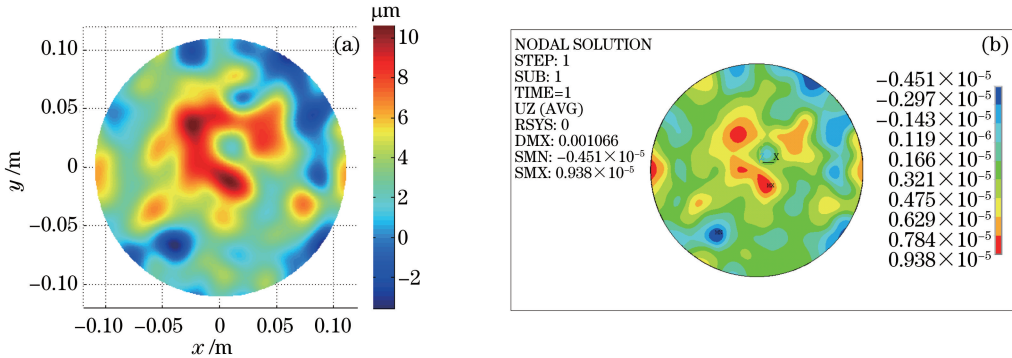


图 5 畸变波前与变形镜拟合面形。(a)畸变波前;(b)拟合面形

Fig. 5 Distorted wavefront and fitting wavefront. (a) Distorted wavefront; (b) fitting surface shape

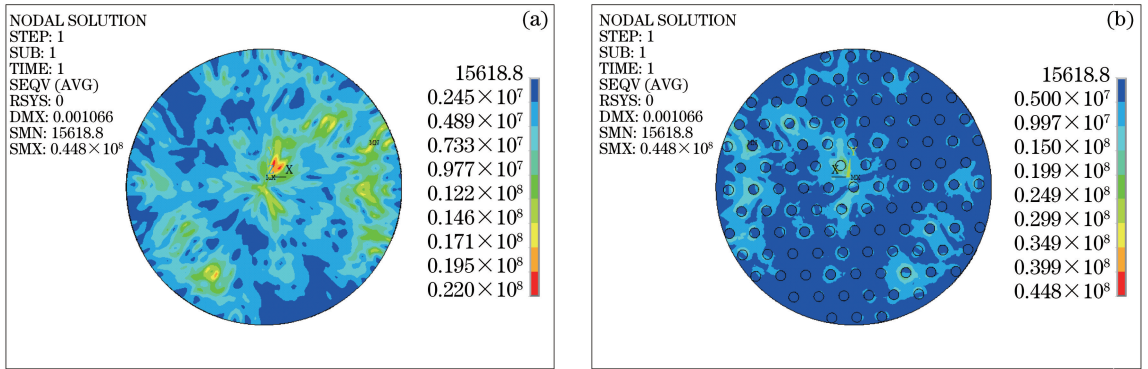


图 6 机械驱动作用下变形镜应力分布云图。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 6 Stress distribution of DM under mechanical drive. (a)Front surface; (b) rear surface

21.96 MPa,而后表面应力整体大于前表面应力,最大应力位于 55 号极头与后表面连接处,其值为 44.00 MPa。对比图 5(b)可以看出,变形镜形变量较大的区域所对应的 von Mises 等效应力值也较大。由此可见,由于极头对镜面的约束作用,应力较大区域大多集中在极头与镜面后表面连接处附近。

利用有限元分析软件模拟得到的变形镜机械应力载荷谱,其数值上与文献[16]中的变形镜应力结果量级一致,由此可以说明该计算得到的应力载荷谱的有效性,并进一步结合文献[11]测得的 S-N 曲线,即可开展机械运动状态下光学变形镜的疲劳效应研究,典型的仿真计算结果如图 7 所示。在疲劳寿命云图中,疲劳寿命的计算结果通常用对数疲劳寿命 $\lg N$ 表示,它表征了元件不同位置的安全循环次数,参考轴数据为 10 的指数,单位为次。

如图 7 所示,变形镜对数疲劳寿命范围为 8.53~12.00。对比图 6 可以发现,对于应力越大的区域,其疲劳寿命会越小。在机械驱动作用下,由于极头的约束作用,变形镜疲劳寿命最小值出现在极头附近。

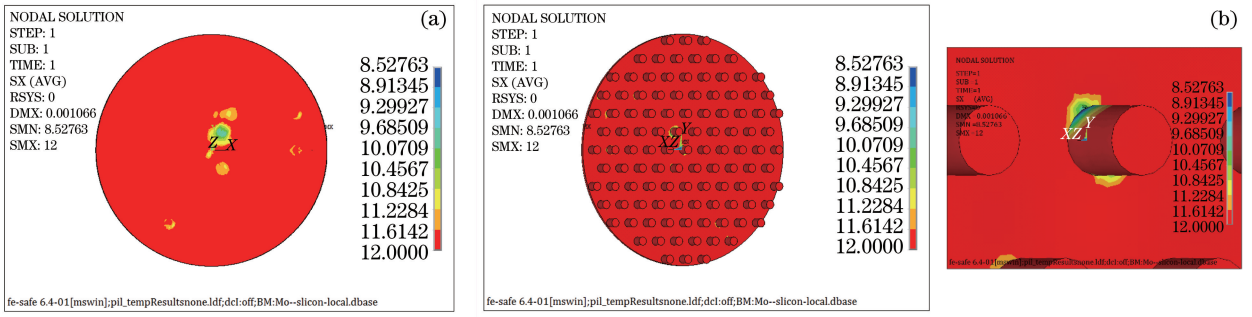


图 7 变形镜疲劳寿命云图。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 7 Fatigue life nephogram of DM. (a) Front surface; (b) rear surface

3.1 不同机械驱动方式对变形镜疲劳寿命的影响

畸变波前包含的高频成分越多,则相邻极头间相对位移越大,该处产生的应力也越大,从而导致极头与镜体连接处应力集中现象更加明显。由于 Si 材料是组织均匀的脆性材料,不存在屈服,因而应力集中将大大降低元件的强度,从而影响其使用寿命。

为了明确不同畸变波前中高频成分对疲劳寿命的影响,分别比较 PV 值一定而高频成分不同时的变形镜疲劳寿命,计算中,以截止频率 $\Delta\nu=0.03 \text{ mm}^{-1}$ 为例,将空间频率高于 $\Delta\nu$ 的部分划分为高频,典型计算结果列于表 2。

表 2 不同驱动方式下变形镜疲劳寿命

Table 2 Fatigue life of DM in different driving models

Parameters	Group 1		Group 2	
PV of distorted wave-front / λ	3	3	4	4
Proportion of high-frequency /%	25.59	4.20	19.53	2.08
Deformation range of DM / μm	-5.04~6.50	-4.61~8.84	-4.51~9.38	-7.14~8.21
Maximum stress in front surface of DM /MPa	18.47	9.53	21.96	8.96
Maximum stress in rear surface of DM /MPa	36.20	15.50	44.00	14.20
Logarithmic fatigue life	9.13	11.85	8.53	11.90

对比两组数据可以发现,畸变波前 PV 值相同的情况下,面形包含的高频成分越多,其表面产生的应力值越大,疲劳寿命也越小,变形镜更易损坏。这是由于畸变波前空间高频成分越多,对其校正时的变形镜相邻极头间的相对位移就越大,由此产生的应力集中现象也越明显,从而加速了元件的破坏。

由于极头对镜面的驱动作用不同会影响元件的寿命,因而可以进一步讨论在保证畸变波前形态不变的前提下,不同畸变波前 PV 值带来的影响。此时,变形镜应力与疲劳寿命变化如图 8 所示。

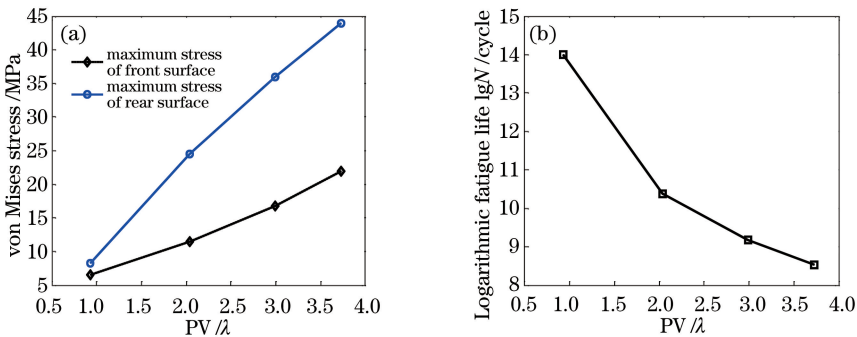


图 8 不同波前 PV 值所对应的变形镜(a)最大应力与(b)疲劳寿命

Fig. 8 (a) Maximum stress and (b) fatigue life of DM with different PV of wavefront

从图 8 可以看出,在畸变波前形态一定的前提下,随着波前 PV 值的增大,变形镜表面应力最大值也会增大,且后表面应力增长幅度大于前表面。随着应力值的增加,变形镜受到的动态循环载荷越强,其疲劳寿命越短。

3.2 变形镜结构参数对其疲劳寿命的影响

当驱动器间距与排布方式一定时,变形镜基底厚度以及极头的长度与直径的改变会对其使用寿命产生一定影响。一方面,结构参数的改变会改变变形镜的交连值,从而对变形镜影响函数产生一定的影响^[15],进而会影响变形镜拟合面形与使用。然而,通过进一步分析可知,变形镜基底厚度以及极头的长度与直径对其使用寿命的影响较小,几乎可忽略不计。另一方面,在驱动位移与影响函数一定的前提下,变形镜结构参数的改变会导致其受力情况发生变化,致使应力循环载荷谱发生变化,进而影响其使用寿命。对此,首先分析了基底厚度对应力分布与疲劳寿命的影响,其最大应力与疲劳寿命随基底厚度的变化如图 9 所示。

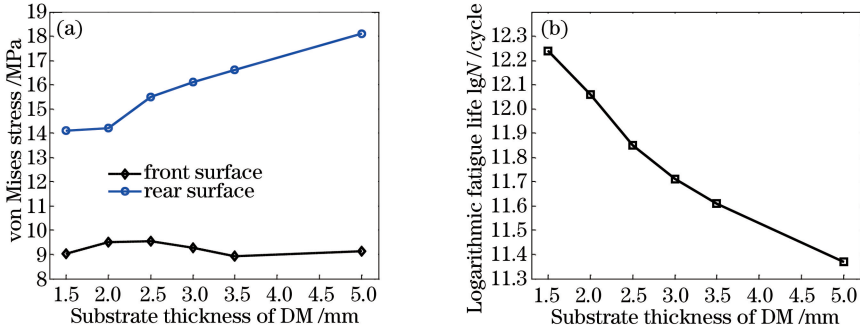


图 9 不同基底厚度对应的变形镜(a)最大应力和(b)疲劳寿命

Fig. 9 (a) Maximum stress and (b) fatigue life of DM with different substrate thicknesses

从图 9(a)可以看出,随着基底厚度的增大,变形镜后表面产生的最大应力值呈现明显增大的趋势,而前表面的应力变化则较小。由此可见,改变基底厚度,主要影响的是后表面的应力分布特性。由于变形镜应力较大的区域主要分布在后表面与极头连接处,因此,随着基底厚度的增加,疲劳寿命也会随之减小。在实际应用中,在保证面形精度的前提下,应尽可能减小镜体厚度,以利于延长变形镜的使用寿命。

极头是连接驱动器与镜面的重要器件,极头形状变化必然会导致变形镜表面应力分布产生差异,从而影响其疲劳寿命。针对相同的待校正波前,通过改变极头长度,得到前、后表面应力最大值变化如图 10(a)所示,对应的寿命变化趋势如图 10(b)所示。

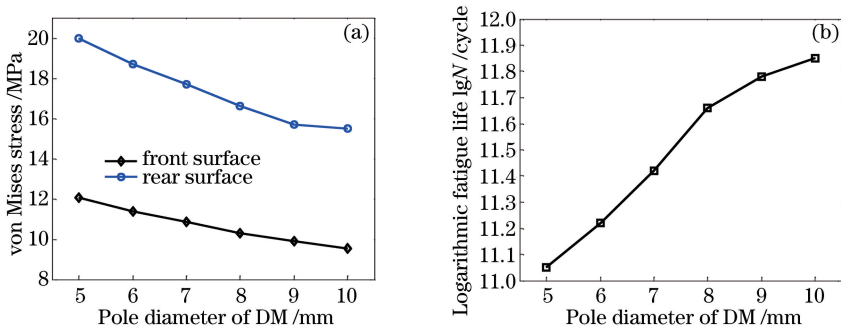


图 10 不同极头长度对应的变形镜(a)最大应力和(b)疲劳寿命

Fig. 10 (a) Maximum stress and (b) fatigue life of DM with different pole lengths

从图 10 可以看出,随着极头长度的增加,变形镜表面产生的应力值呈现减小的趋势,疲劳寿命也随之减小。分析图 10(b)可知,极头长度在 5~8 mm 范围内增加时,变形镜的疲劳寿命增加较为明显,而当极头长度大于 8 mm 后,变形镜疲劳寿命的增加趋势逐渐放缓。

在驱动器形变量一定时,极头直径越大,驱动器作用面积更大,变形镜受力更明显,从而影响其使用寿命。图 11 给出了不同极头直径对应的最大应力与疲劳寿命变化。

如图 11 所示,变形镜极头直径越大,其表面的应力值越大,疲劳寿命也会越短。对比图 10 可以看出,改变极头直径对变形镜寿命的影响程度远大于改变极头长度。针对所用变形镜模型,极头直径最好控制在 6 mm 以内。另一方面,由已有文献^[15]可知,增大变形镜极头直径能一定程度上降低变形镜热形变带来的影响。因此,设计极头直径时应综合考虑。

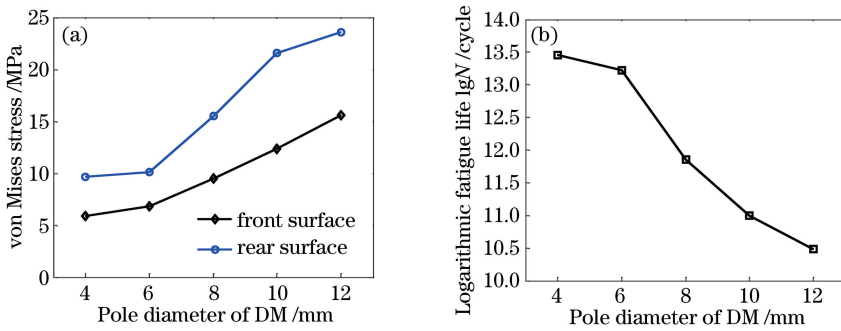


图 11 不同极头直径对应的变形镜(a)最大应力和(b)疲劳寿命

Fig. 11 (a) Maximum stress and (b) fatigue life of DM with different pole diameters

4 结 论

变形镜对畸变波前进行实时校正时,由于机械驱动作用,会导致其应力分布不均匀,经过长期的重复驱动下元件会出现疲劳损伤现象。基于 S-N 曲线和 Miner 累积损伤理论建立了变形镜的疲劳寿命预估模型,分析了波前校正过程中变形镜的疲劳损伤特性,并讨论了不同驱动方式及不同结构参数对变形镜使用寿命的影响。研究表明:1) 在机械驱动作用下,变形镜基底后表面损伤程度明显大于前表面,基底与极头连接部位最易损坏;2) 在待校正畸变波前 PV 值一定的情况下,畸变波前中的高频成分越多、相邻极头间的相对位移越大,则产生的应力集中现象越明显,致使元件寿命越短;3) 当畸变波前形态一定时,波前 PV 值越大,元件疲劳寿命越短;4) 变形镜结构参数也会对其疲劳寿命造成影响,随着基底厚度的增加、极头长度的缩短,以及极头直径的增加,变形镜的疲劳寿命逐渐缩短,其中,以极头直径变化所带来的影响最为明显。

参 考 文 献

- Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(1): 7-13.
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
- Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.* Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 267-273.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
- Zhang Ming, Li Zhiyong, Cui Shuai, *et al.* Analysis on contact fatigue life of aerospace bearing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 938-941.
张 明, 李志勇, 崔 帅, 等. 航空航天轴承接触疲劳寿命分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 938-941.
- Nishikawa K, Murakoshi J, Matsuki T. Study on the fatigue of steel highway bridges in Japan[J]. Constr Build Mater, 1998, 12(2): 133-141.
- Petermann J, Plumtree A. A unified fatigue failure criterion for unidirectional laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(1): 107-118.
- Hwang W, Han K S. Cumulative damage models and multi-stress fatigue life prediction[J]. J Compos Mater, 1986, 20(2): 125-153.
- Lei Honggang, Fu Qiang, Liu Xiaojuan. Research progress of steel structure fatigue in past 30 years in China[C]. Journal of Building Structures, 2010, (s1): 84-91.
雷宏刚, 付 强, 刘晓娟. 中国钢结构疲劳研究领域的 30 年进展[C]. 建筑结构学报, 2010, (s1): 84-91.
- Mises R. Mechanics of solid bodies in the plastically-deformable state[J]. Göttin Nachr Math Phys, 1913, 1: 582-592.
- Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. J Appl Mech, 1945, 12(3): 159-164.
- Wu Hao, Meng Yonggang, Su Caijun, *et al.* An out-chip method for measuring fatigue property of polysilicon thin film [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(4): 592-594.
吴 昊, 孟永钢, 苏才钧, 等. 多晶硅薄膜疲劳特性片外测试方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(4): 592-594.
- Chen Chuanyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005. 17-21.
陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005. 17-21.

- 13 Amzallag C, Gerey J P, Robert J L, *et al.* Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis[J]. *Int J Fatigue*, 1994, 16(4): 287-293.
- 14 Jiang Nianchao, Xie Qinwei, Dai Yong, *et al.* The fatigue analysis of UAV composite wing based on ANSYS/FE-SAFE [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2009, 6: 3-4.
姜年朝, 谢勤伟, 戴 勇, 等. 基于 ANSYS/FE-SAFE 的无人机复合材料机翼疲劳分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2009, 6: 3-4.
- 15 Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.* Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0514001.
彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0514001.
- 16 Zeng Zhige, Ling Ning, Research of analysis method for stress of discrete deformable thin mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 21-29.
曾志革, 凌 宁. 分立式变形反射镜薄镜面的应力分析方法研究[J]. *光学 精密工程*, 1997, 5(5): 21-29.