



·强激光物理与技术·

## 抗拉可压型压电陶瓷性能测试及疲劳试验\*

李国会<sup>1</sup>, 李国荣<sup>2</sup>, 徐宏来<sup>1</sup>, 张秋实<sup>1</sup>, 杜应磊<sup>1</sup>, 时雪<sup>2</sup>, 向振佼<sup>1</sup>, 吴晶<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

**摘要:** 压电陶瓷是自适应光学系统中的核心器件变形镜的主要作动元件, 其性能的好坏直接影响变形镜甚至自适应光学系统校正能力。开展了加载电压为 $\pm 350$  V、外形尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 38\text{ mm}$ 的抗拉可压型压电陶瓷的性能测试, 包括位移、迟滞、电容、阻抗和热膨胀系数等, 对压电陶瓷的抗拉能力进行了考核, 获得三个样品抗拉能力均大于 $250\text{ N}$ 。采用疲劳测试仪对同批次生产的压电陶瓷进行疲劳试验, 在此过程中获得了压电陶瓷的压电效应并对试验数据进行了分析, 最后对 5# 样品进行了 $1\ 000$  万次疲劳试验( $\pm 150\text{ N}@5\text{ Hz}$  正弦载荷), 试验后压电陶瓷的位移减小约 $5\%$ , 其他指标变化较小。通过抗拉能力测试和疲劳试验, 初步考核了该型压电陶瓷的抗拉压特性和疲劳特性以及压电陶瓷的使用寿命, 为变形镜的研制提供一定的数据支撑。

**关键词:** 压电陶瓷; 自适应光学; 变形镜; 疲劳特性; 压电效应

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230099

## Performance test and fatigue test of tensile/compressible piezoelectric ceramics

Li Guohui<sup>1</sup>, Li Guorong<sup>2</sup>, Xu Honglai<sup>1</sup>, Zhang Qiushi<sup>1</sup>, Du Yinglei<sup>1</sup>, Shi Xue<sup>2</sup>, Xiang Zhenjiao<sup>1</sup>, Wu Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, P. O. Box 919-1002, Mianyang 621900, China;

2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Piezoelectric ceramic is the main actuator of deformable mirror, which is the core device of adaptive optics system. Its performance directly affects the correction ability of deformable mirror and even adaptive optics system. Performance parameters of the tensile/compressible piezoelectric ceramics ( $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 38\text{ mm}$ ) with loading voltage of  $\pm 350\text{ V}$  were tested, including displacement, hysteresis, capacitance, impedance and coefficient of thermal expansion, etc. The test results show the tensile capacity of three samples was more than  $250\text{ N}$ , and  $10$  million fatigue tests ( $\pm 150\text{ N}@5\text{ Hz}$  sinusoidal load) were carried out on 5# sample. The experimental results show that the displacement and capacitance of the sample reduced than  $5\%$ . Through the tensile/pressure and fatigue test, the properties and service life of the piezoelectric ceramic were examined, which provides some supporting data for the development of deformable mirrors.

**Key words:** piezoelectric ceramics, adaptive optics, deformable mirror, fatigue characteristics, piezoelectric effect

压电陶瓷作为微位移器件, 具有谐振频率高、推力大、体积小、分辨率高及功耗低等特点<sup>[1-3]</sup>, 可以用作电调镜、变形镜以及快反镜的驱动器件<sup>[4-5]</sup>, 在自适应光学系统中常用于光轴稳定、光路耦合以及光束质量闭环校正<sup>[6-8]</sup>, 在精密加工以及自动控制领域也得到了广泛的应用<sup>[9-10]</sup>。根据工作电压的不同, 压电陶瓷一般分为低压陶瓷和高压陶瓷两类, 其主要指标包括位移量、响应速度、精度、工作电压、线性度以及迟滞等性能等<sup>[9, 11-13]</sup>, 位移特性与压电陶瓷的晶体结构、烧结工艺等内在结构有关<sup>[14-15]</sup>。通常, 低压陶瓷一般工作在 $-20\sim 120\text{ V}$ , 是由每层为数十微米厚度的多层压电陶瓷叠堆而成, 这种器件由于每层的厚度薄、电容大, 响应速度慢, 而高压陶瓷的工作电压上千伏, 是由每层为数百微米厚度的多层压电陶瓷叠堆而成, 这种器件的电容小、响应速度快、位移精度高。通过一定的补偿控制策略和优化算法, 可以减小压电陶瓷的迟滞特性或非线性效应<sup>[2, 12, 16-19]</sup>, 更有利于提高光学系统或其他

\* 收稿日期: 2023-04-23; 修订日期: 2023-06-30  
联系方式: 李国会, hitliguohui@163.com。

精密仪器的精度。疲劳特性是压电陶瓷的另一个重要指标,特别是自适应光学中使用的变形镜面形稳定性以及性能持久性,都跟压电陶瓷的疲劳特性有极大的关系,一些科研人员已经开展了压电陶瓷疲劳特性的技术研究<sup>[20-21]</sup>。当前,多数低压陶瓷不具备抗拉能力,需施加预紧力后方可提供拉力,而预紧力的加载,会使压电陶瓷的迟滞和非线性效应更加明显<sup>[17]</sup>。本文讲到的工作电压为 $\pm 350$  V 的一款新型抗拉可压型压电陶瓷,最大的特点是不需要施加预紧力,加载正负电压,压电陶瓷可以产生伸缩,即输出正负位移,同时该陶瓷迟滞较小,约 6%。

当前,在自适应光学系统中,变形镜研制单位的技术路线中对压电陶瓷的选型不大一致,有的选择 0~1000 V 或者 $\pm 500$  V 的高压陶瓷,有的选择 $-20\sim 120$  V 或 0~150 V 的低压陶瓷。不管哪种压电陶瓷,在变形镜设计时首先要考虑压电陶瓷的外形尺寸,便于满足变形镜的分辨率,其次是压电陶瓷的位移指标,得满足系统的校正动态范围,同时,需要考虑压电陶瓷的迟滞特性<sup>[9]</sup>,该指标跟变形镜响应频率直接相关,这几个指标是变形镜的主要指标。高压陶瓷和低压陶瓷在正式使用前变形镜镜面状态不一样,正负电压工作的压电陶瓷,未加载控制电压时,镜面位置即为变形镜的工作零位,使用时不会引入额外像差;0~1000 V、0~150 V 以及 $-20\sim 120$  V 的压电陶瓷,在变形镜正式参与像差校正前需要加载偏置电压,偏置电压加载完成后的镜面位置才是变形镜的工作零位。由于变形镜中压电陶瓷较多,加载相同的偏置电压,每根压电陶瓷的伸长量难以控制到完全一致,即会引入额外像差,通过自展平可以去除绝大部分额外像差,但一方面会“牺牲”变形镜的动态范围,另一方面有可能会引入少量高阶像差。根据实际情况,提出了电压为 $\pm 350$  V 的一款新型抗拉可压型压电陶瓷的应用需求,其指标包括位移大于 5  $\mu\text{m}$ ,外形尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 38 mm(正方形截面,高度为 38 mm),迟滞小于 10% 等,随后开展了技术攻关并研制出了该型压电陶瓷。这款压电陶瓷最大的特点是不加载预紧力即可提供拉力,且尺寸较小,有利于提高变形镜的分辨率,同时,迟滞和电容较小,有利于提高变形镜的闭环带宽,跟国外的同类陶瓷相比,迟滞和抗拉能力是它的主要优势。

本文重点对 $\pm 350$  V 抗拉可压型压电陶瓷的疲劳特性和压电效应进行测试与分析,初步了解压电陶瓷的疲劳性能和压电性能,同时为该型压电陶瓷的广泛使用提供一定的支撑数据。

## 1 压电陶瓷性能测试

压电陶瓷的主要性能指标包括位移、迟滞、电容、阻抗、热膨胀系数和抗拉强度等。位移指标是表征压电陶瓷的伸缩量随电压的变化量,它是压电陶瓷最核心的指标,将位移转换成机械运动,是压电陶瓷最常用的用法;迟滞是指压电陶瓷在升压降压过程中,同一电压下最大位移差值与压电陶瓷总位移的百分比,该指标对机械运动的控制来说是负面的,由于迟滞的存在,总会存在控制残差,通常需要采用非线性补偿或迟滞前馈等措施消除迟滞带来的这种不利影响。采用自研的压电陶瓷位移测试系统可测试位移和迟滞。该设备内置具有 nm 级分辨率的光栅尺进行读数,给压电陶瓷加载 $\pm 350$  V 电压,陶瓷的伸缩带动光栅尺前后移动,控制软件读取光栅尺的输出脉冲并通过标定脉冲与位移的对应关系,即可绘制出压电陶瓷位移和电压的对应关系曲线,随后对测试数据进行处理,即可获得压电陶瓷的迟滞。图 1(a)是压电陶瓷位移测试系统,图 1(b)是压电陶瓷的电压位移曲线,其正位移为 5.44  $\mu\text{m}$ ,负位移为 5.06  $\mu\text{m}$ ,迟滞为 6.12%。

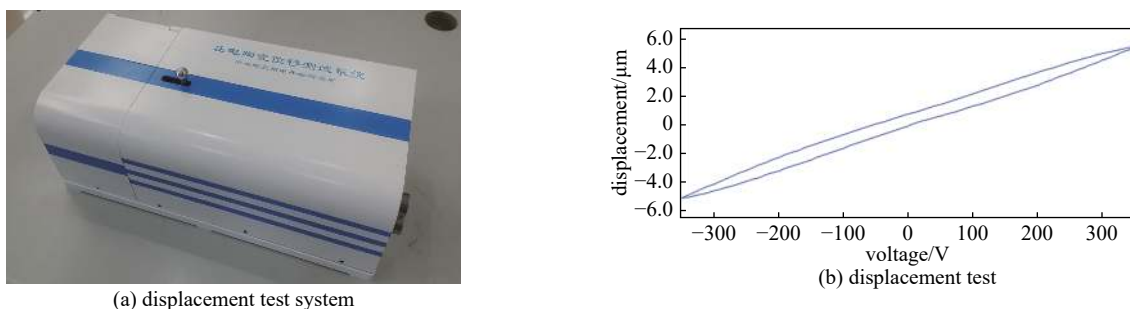


Fig. 1 Piezoelectric ceramic displacement test system and the test curve

图 1 压电陶瓷测试系统和测试曲线

电容也是压电陶瓷的重要指标,其值的大小影响充放电的快慢,也即是电容与压电陶瓷的工作频率息息相关,所以在压电陶瓷驱动电源工作带宽的设计时,必须充分考虑电容指标。阻抗是压电陶瓷的一个内在指标,通过阻抗测试,可以判断压电陶瓷内部是否存在缺陷或者压电陶瓷是否受损。采用电容测试仪和阻抗分析仪夹住压电陶瓷的电极即可读取电容值和阻抗。图 2(a)是该压电陶瓷电容测试截图,图 2(b)是阻抗测试曲线,其电容为 11.95 nF,阻抗为 18.59  $\Omega$ 。



Fig. 2 Capacitance and impedance curve of piezoelectric ceramics

图2 压电陶瓷电容和阻抗曲线

热膨胀系数是所有材料的通用特性, 采用热膨胀仪测压电陶瓷的热膨胀系数, 热膨胀系数测试结果如图3所示。将测试数据通过专用数据分析软件即可获得压电陶瓷的热膨胀系数, 测试的两根压电陶瓷在 $-40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内的热膨胀系数分别为 $4.16\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 和 $3.41\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 。

抗拉强度是该型压电陶瓷的重要指标, 同时也是这款压电陶瓷的主要特点, 具备一定的抗拉强度, 就不用施加预紧力即可产生拉力, 既可以节约压电陶瓷安装空间, 又可以减小产品的结构复杂程度。采用万能材料试验机对该型压电陶瓷的抗拉能力进行测试。图4是两根压电陶瓷样品抗拉性能测试试验及测试曲线。

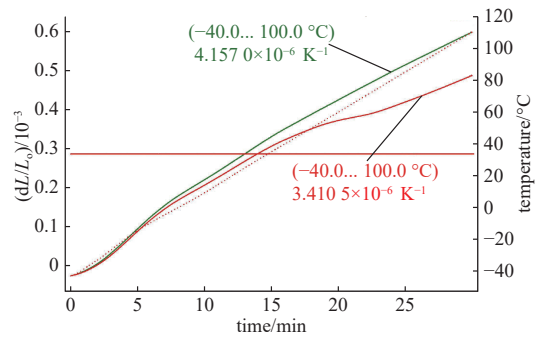


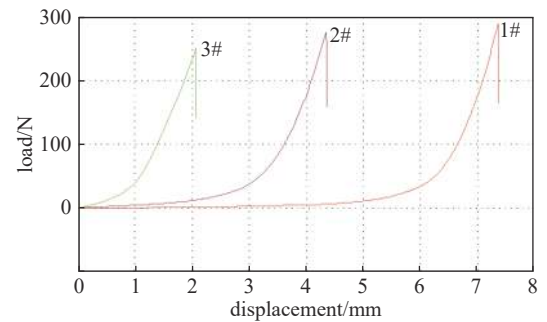
Fig. 3 Thermal expansion coefficient test curve

图3 热膨胀系数测试曲线



(a) tensile test

(b) tension-broken piezoelectric ceramics



(c) displacement-load curves of three ceramics

Fig. 4 Tensile test and test curves

图4 拉力试验及测试曲线

三根压电陶瓷样品被拉断时, 1#最大拉力为289 N, 2#最大拉力为276 N, 3#最大拉力为251 N, 均超过设计指标150 N, 当然, 抗拉能力越强, 压电陶瓷失效的几率也就越小, 也即是可靠性越高。拉力试验测试数据汇总于表1。

表1 拉力试验测试数据汇总表

Table 1 Tensile test summary table

No.	maximum tensile stress/MPa	maximum pulling force/N
1	12.3	289
2	11.7	276
3	10.7	251

## 2 压电陶瓷疲劳试验

### 2.1 试验件设计与装夹

为了了解压电陶瓷在长时间推拉力作用下的位移指标变化情况, 采用疲劳测试仪对抗拉可压型压电陶瓷进行疲劳性能测试。由于压电陶瓷是脆性材料, 疲劳测试仪的气动夹具无法直接对压电陶瓷进行夹持, 需采用特殊装

夹对压电陶瓷进行固定后方可承受拉力和压力。图 5 是压电陶瓷疲劳试验的装夹方式, 结构件中间是压电陶瓷, 陶瓷两端为金属块, 金属块开槽后采用粘胶方式将其固定, 为了防止疲劳测试仪的气动夹具在夹持过程中出现扭摆产生扭矩对试验件造成损坏, 压电陶瓷两端的金属块必须具备微米级的加工、装调和共面精度。

试验时, 将压电陶瓷测试结构件安装到疲劳测试仪的气动夹具上, 上下移动气动夹具并缓慢充气, 夹头慢慢合拢并逐步夹紧金属块, 启动相关程序即可开展疲劳试验。图 6 是试验件装夹方式。

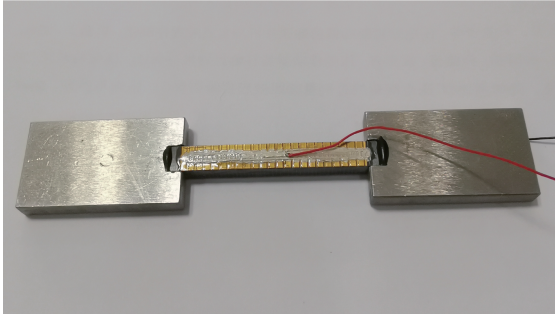


Fig. 5 Fatigue test structure of the piezoelectric ceramic  
图 5 压电陶瓷疲劳试验结构件



Fig. 6 Clamping mode of test pieces  
图 6 试验件装夹方式

## 2.2 疲劳试验结果与分析

### 2.2.1 正弦载荷下压电陶瓷的形变及压电效应

疲劳试验前, 首先开展 $\pm 150\text{ N}@10\text{ Hz}$  正弦载荷试验, 主要考察压电陶瓷粘接是否牢固、安装精度是否到位、金属块是否夹紧以及是否能够承受 $\pm 150\text{ N}$  的推拉力等, 同时也可获取正弦载荷下压电陶瓷的形变和压电效应, 为后续变形镜研制提供数据。压电陶瓷形变的测试, 可直接读取疲劳测试仪的输出位移即可; 压电效应的测试, 需将示波器的表笔夹住压电陶瓷的线缆, 设置示波器合适的电压档位, 在加载正弦载荷时, 通过示波器即可读取推拉力作用下压电陶瓷产生的电压。图 7(a) 是 $\pm 150\text{ N}@10\text{ Hz}$  正弦载荷曲线, 图 7(b) 是压电陶瓷的形变量曲线, 图 8 是压电陶瓷的输出电压(压电效应)。从图上可以看出, 在 $\pm 150\text{ N}@10\text{ Hz}$  正弦载荷下, 压电陶瓷的形变量和压电效应输出的电压频率仍为 $10\text{ Hz}$ , 均为正弦曲线, 形变量幅值约 $\pm 11.9\text{ }\mu\text{m}$ , 电压峰-峰值为 $250\text{ V}$ 。

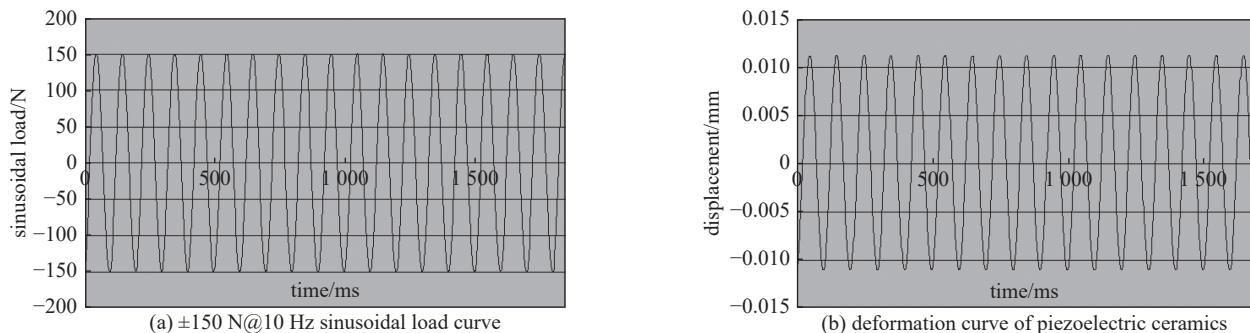


Fig. 7  $\pm 150\text{ N}@10\text{ Hz}$  sinusoidal load curve and deformation curve of piezoelectric ceramics

图 7  $\pm 150\text{ N}@10\text{ Hz}$  正弦载荷曲线及压电陶瓷形变曲线

### 2.2.2 正弦载荷下压电陶瓷的疲劳试验

压电陶瓷疲劳试验时, 正弦载荷为 $\pm 150\text{ N}$ , 频率为 $5\text{ Hz}$ , 总加载次数为 $1000$  万次, 装夹方式同图 6。图 9(a) 是疲劳试验载荷曲线, (b) 是压电陶瓷疲劳试验时承受推/拉力后产生的最大/小形变量曲线, 绿线是拉力作用下最大形变量曲线(陶瓷伸长, 形变量为正), 红线是推力作用下最大形变量曲线(陶瓷缩短, 形变量为负)。从形变量曲线可以看出, 最大/小形变量基本不变, 维持在 $\pm 11\text{ }\mu\text{m}$ , 且两条曲线基本平行。

随着时间的推移, 加载次数的增加, 白天、晚上以及不同时间段的环境温度有所变化, 疲劳测试仪的位移读数头随温度将会产生一定的飘移, 压电陶瓷形变量曲线将会发生偏移, 但两条曲线基本上仍然保持平行, 见图 10(a) 所示。由于压电陶瓷为脆性材料, 试验开始前, 在疲劳测试仪程序中设置有极限位移保护措施, 防止位移量过大拉断或压断压电陶瓷, 为此, 将位移极限设置为 $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ , 当曲线向上偏移触碰到 $+25\text{ }\mu\text{m}$  或者向下触碰到 $-25\text{ }\mu\text{m}$  时, 疲劳测试仪将会出现报警并自动停止工作, 所以, 在接近 $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$  位移保护点时, 需要提前将疲劳测试仪的位

移读数示值进行清零, 此时曲线会出现拐点(图 10(b)中正弦载荷约 30 万次位置), 两条曲线逐渐向 0 位靠近, 正弦载荷约 40 万次时, 两条曲线基本上均衡的分布于 0 位上下且保持平行。

通过手动清零, 可确保疲劳测试仪一天 24 小时不间断的对压电陶瓷进行  $\pm 150 \text{ N}@5 \text{ Hz}$  正弦加载, 经过 24 天连续工作后, 完成 1 000 万次的疲劳试验, 压电陶瓷形变量曲线如图 11 所示, 图中出现很多个清零拐点, 但位移偏移量始终未触碰  $\pm 25 \mu\text{m}$  极限位移报警点。疲劳试验完成以后, 再次对压电陶瓷位移、电容和迟滞等重要指标进行测试, 测试结果表明, 位移减小约 5%, 其他指标均无明显变化。

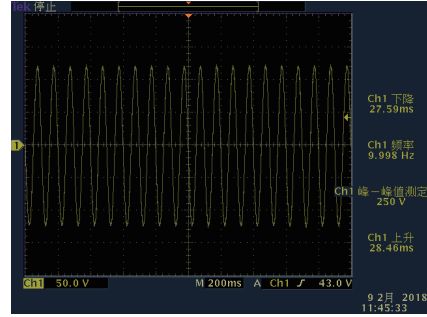
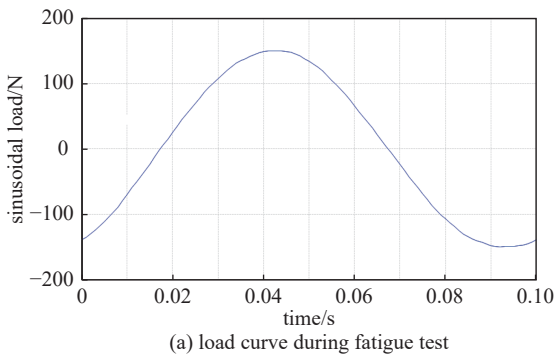
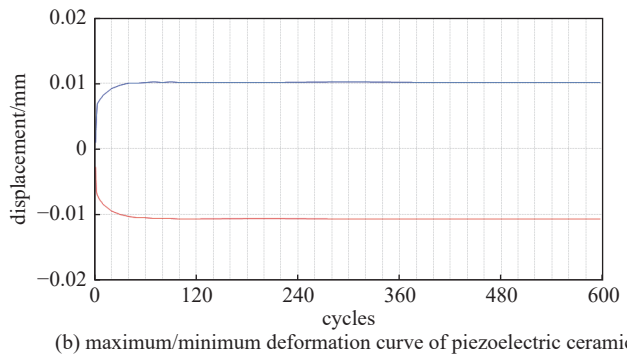


Fig. 8  $\pm 150 \text{ N}@10 \text{ Hz}$  output voltage curve of piezoelectric ceramics under sinusoidal load (positive piezoelectric effect curve)

图 8  $\pm 150 \text{ N}@10 \text{ Hz}$  正弦载荷下压电陶瓷的输出电压曲线(正压电效应曲线)



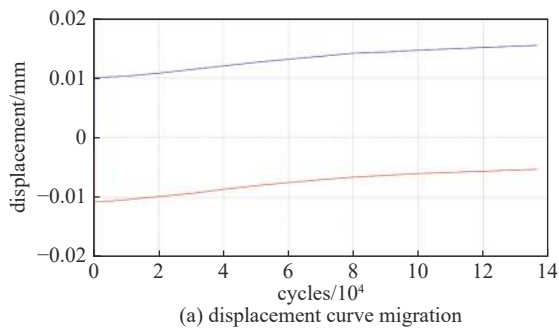
(a) load curve during fatigue test



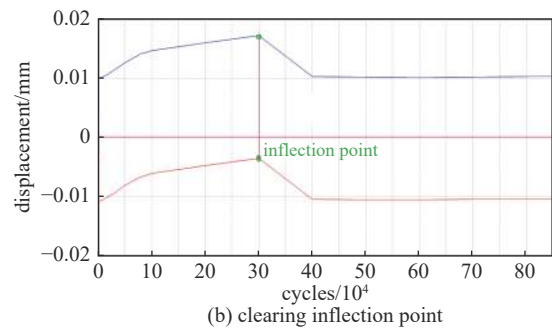
(b) maximum/minimum deformation curve of piezoelectric ceramics

Fig. 9 Sinusoidal load curve and maximum/minimum deformation curve of piezoelectric ceramics

图 9 正弦载荷曲线及压电陶瓷最大/最小形变量曲线



(a) displacement curve migration



(b) clearing inflection point

Fig. 10 Deviation and zero clearing curve of piezoelectric ceramics

图 10 压电陶瓷形变量曲线偏移及清零曲线

### 3 结论

针对特制的  $\pm 350 \text{ V}$  抗拉可压型压电陶瓷, 开展了需求指标的测试, 其中正位移为  $5.44 \mu\text{m}$ , 负位移为  $5.06 \mu\text{m}$ , 迟滞为 6.12%, 外形尺寸  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ , 其指标满足设计输入。为了对该新型压电陶瓷的性能进行全面的摸底, 同时开展了阻抗、热膨胀系数以及抗拉能力的测试, 与普通压电陶瓷比较, 该型压电陶瓷迟滞相对较小, 对非线性控制来说具有较大优势; 电容较小, 有利于提高变形镜的闭环带宽; 抗拉能力较强, 这是普通压电陶瓷所不具备的, 可以在无预紧力的情况下, 提高变形镜的分辨率; 位移相对较小, 这是该款压电陶瓷的弱点。最后开展了 1 000 万次  $\pm 150 \text{ N}@5 \text{ Hz}$  疲劳试验, 试验后压电陶瓷的位移减小约 5%, 这一数据在一定程度上

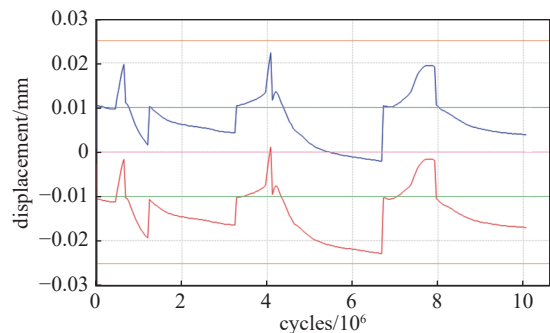


Fig. 11 Displacement and deformation curve of piezoelectric ceramics during 10 million fatigue tests

图 11 1000 万次疲劳试验过程中压电陶瓷位移形变量曲线

上表征了该型压电陶瓷的可靠性和寿命。如果将该型压电陶瓷用作变形镜的作动器,根据经验,对变形镜每天的工作时长、工作频率以及加载电压的大小进行预估,1 000 万次的疲劳试验,可大致判断变形镜的寿命至少大于2年,这为后续变形镜的研制提供一定的数据支撑。

### 参考文献:

- [1] 陶帅,白鸿柏,何建设,等. 压电作动器位移输出特性分析[J]. 压电与声光, 2010, 32(5): 807-810. (Tao Shuai, Bai Hongbai, He Jianshe, et al. Analysis of the output displacement characteristics of piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(5): 807-810)
- [2] 荣伟彬,曲东升,孙立宁,等. 压电陶瓷微位移器件迟滞模型的研究[J]. 压电与声光, 2003, 25(1): 22-25,35. (Rong Weibin, Qu Dongsheng, Sun Lining, et al. Research on hysteresis model of piezoelectric micropositioning actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003, 25(1): 22-25,35)
- [3] 曲东升,孙立宁,丁庆勇. 压电陶瓷驱动器的建模分析与自适应逆控制[J]. 机器人, 2001, 23(7): 688-690,694. (Qu Dongsheng, Sun Lining, Ding Qingyong. Model analysing and adaptive inverse control of piezoelectric actuator[J]. Robot, 2001, 23(7): 688-690,694)
- [4] 李国会,杨媛,何忠武,等. 四束激光光轴高精度稳定控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 031009. (Li Guohui, Yang Yuan, He Zhongwu, et al. High accuracy optical axis stable control in beam system of four lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 031009)
- [5] 贾巍,范承玉. 应用于快速倾斜镜的压电陶瓷驱动电源[J]. 量子电子学报, 2015, 32(2): 235-240. (Jia Wei, Fan Chengyu. A PZT driving power of fast steering mirror[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(2): 235-240)
- [6] 林旭东,刘欣悦,王建立,等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 090003. (Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, et al. Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezo-ceramic actuator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51: 090003)
- [7] 李国会,徐宏来,吴晶,等. 非稳腔薄片激光器腔内像差组合式主动校正技术[J]. 中国激光, 2020, 47: 1001004. (Li Guohui, Xu Honglai, Wu Jing, et al. Active correction of intracavity aberration combination in unstable resonator thin-disk laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47: 1001004)
- [8] Tyson R. Principles of adaptive optics[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [9] 贾巍,范承玉,王海涛. 一种快速倾斜镜系统的设计与应用[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 051003. (Jia Wei, Fan Chengyu, Wang Haitao. Design and application of fast steering mirror system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 051003)
- [10] Rana M S, Pota H R, Petersen I R. A survey of methods used to control piezoelectric tube scanners in high-speed AFM imaging[J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(4): 1379-1399.
- [11] 赵彤,谭永红. 迟滞非线性动态系统神经网络自适应控制[J]. 计算机仿真, 2004, 21(8): 104-107. (Zhao Tong, Tan Yonghong. RBFNN-based adaptive control for hysteresis nonlinear dynamic system[J]. Computer Simulation, 2004, 21(8): 104-107)
- [12] 崔玉国,孙宝元,董维杰,等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 270-275. (Cui Yuguo, Sun Baoyuan, Dong Weijie, et al. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(3): 270-275)
- [13] 熊永程,贾文红,张丽敏,等. 基于深度神经网络(DNN)的压电陶瓷前馈补偿研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(1): 35-41. (Xiong Yongcheng, Jia Wenhong, Zhang Limin, et al. Research on feedforward compensation of piezoelectric ceramics based on deep neural network(DNN)[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(1): 35-41)
- [14] 巩云云,初瑞清,徐志军,等. CaCO<sub>3</sub>对TiO<sub>2</sub>系压敏陶瓷性能的影响[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(2): 212-216. (Gong Yunyun, Chu Ruiqing, Xu Zhijun, et al. Effect of CaCO<sub>3</sub> doping on TiO<sub>2</sub>-based baristor ceramics properties[J]. Journal of Ceramics, 2017, 38(2): 212-216)
- [15] 尹慧娟,徐志军,初瑞清,等. La掺杂对0.75PMN-0.25PT压电陶瓷结构及其性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1067-1071. (Yi Huijuan, Xu Zhijun, Cu Ruiqing, et al. Effects of La-doping on the structure and electrical properties of 0.75PMN-0.25PT piezoelectric ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(6): 1067-1071)
- [16] 王芳,卢庆杰,庄锦程,等. 基于迟滞非线性补偿系统的光学元件形貌检测[J]. 光子学报, 2020, 49: 0612001. (Wang Fang, Lu Qingjie, Zhuang Jincheng, et al. Morphology detection of optical components based on hysteresis nonlinear compensation system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49: 0612001)
- [17] 张桂林,张承进,赵学良. 压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 996-1001. (Zhang Guilin, Zhang Chengjin, Zhao Xueliang. Modeling of nonlocal memory hysteresis in piezoelectric actuators[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 996-1001)
- [18] 钟云,黄楠,曾俊海. 压电驱动器迟滞非线性的增强型Prandtl-Ishlinskii模型建模及实验验证[J]. 机电工程技术, 2020, 49(10): 33-35. (Zhong Yun, Huang Nan, Zeng Junhai. Enhanced Prandtl-Ishlinskii modeling and experimental verification of hysteresis nonlinearities in piezoelectric actuators[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(10): 33-35)
- [19] Al Janaideh M, Rakheja S, Su Chunyi. An analytical generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for hysteresis compensation in micropositioning control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 734-744.
- [20] 罗帅,王家秋,张彬. 压电陶瓷驱动器疲劳特性对变形镜校正能力的影响[J]. 中国激光, 2018, 45: 0905002. (Luo Shuai, Wang Jiaqiu, Zhang Bin. Influence of fatigue characteristics of piezoelectric ceramics actuators on correction ability of deformable mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45: 0905002)
- [21] 陈彩云. 硬性PZT基压电陶瓷电致疲劳特性及其机理研究[D]. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所, 2018: 47-81. (Chen Caiyun. The fatigue characteristics and fatigue mechanisms of hard type lead based piezoelectric ceramics[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 47-81)