

文章编号 1004-924X(2012)09-2029-07

压电驱动共振式高频疲劳试验机构的设计与实验

接 勳^{1,2}, 刘 焱^{1,3}, 谢海峰¹, 杨志刚^{1*}, 杨鲁义¹

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025;

2. 吉林化工学院 机电工程学院, 吉林 吉林 132022

3. 东北电力大学 机械工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:针对在小振幅、高频受力工况下微小与硬脆材料构件的疲劳检测,提出利用压电振子(PZT、PLZT或PMN)作为高频疲劳试验机构的驱动力源,并利用系统共振方法设计高频疲劳试验机构。首先,介绍压电共振式疲劳试验机构的工作原理,建立了动力学模型,获得了系统的动态特性。然后,设计和制作了样机。最后,利用样机测量了作用在试件上的动载荷。实验结果表明:改变输入交流电压幅值(100~250 V)和板弹簧厚度(1.1~0.6 mm),可施加在试件上的动载荷为24.7~99.2 N。本文制成的样机适用于测试动载荷在为24.7~99.2 N,且在小振幅、高频受力工况下试件的拉伸和弯曲疲劳性能。

关键词:压电驱动;压电振子;共振式疲劳试验机;拉伸和弯曲疲劳测试

中图分类号: TN384; TH871.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.2029

Design and experiment of piezoelectric resonance high frequency fatigue testing machine

JIE Meng^{1,2}, LIU Yan^{1,3}, XIE Hai-feng¹, YANG Zhi-gang^{1*}, YANG Lu-yi¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130025, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China;

3. School of Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

* Corresponding author, E-mail: yzg@jlu.edu.cn

Abstract: To get fatigue properties of the small and hard brittle components working at conditions of little amplitudes and high frequency forces, this paper presents a novel kind of resonance and high frequency fatigue testing machine driven by a piezoelectric vibrator (PZT, PLZT or PMN). First, the working principle of the piezoelectric resonance and high frequency fatigue testing machine was introduced, and the dynamic model of the machine was established and its systemic dynamic characteristics were obtained. Then, a prototype was designed and produced. Finally, the dynamic load on the specimen was measured by the prototype. The results indicate that the dynamic load on the specimen is

收稿日期:2012-05-08;修订日期:2012-06-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075175)

24.7—99.2 N by changing the AC voltage amplitude (100—250 V) and the thickness of the plate spring (1.1—0.6 mm). The prototype designed in this paper is suitable for the tensile and bending fatigue testing under conditions of little amplitudes and high frequency forces with the dynamic load mentioned above.

Key words: piezoelectric driving; piezoelectric vibrator; resonance fatigue testing machine; tensile and bending fatigue testing

1 引言

目前,国内外现有的高频疲劳试验机主要有电磁驱动型与电液伺服驱动型两大类,其中电磁驱动型动态位移大、响应快,适用于一般零部件的检测,是最为常用的疲劳检测设备^[1];电液伺服驱动型输出功率大、载荷平稳,适用于大中型、重载构件的检测,但工作频率低、试验时间长,其应用受到较多限制^[1]。两种高频疲劳试验机均需系统在共振状态下工作,由于受系统阻抗与磁阻的限制,一般工作频率不大于 250 Hz,同时普遍存在振幅控制性差、共振稳定性不好、加载精度不高等问题,目前均不适于对微小与硬脆材料构件、高频受力构件的检测^[2]。

随着科学技术与工业水平的不断发展,高速、硬脆以及微小零部件的使用逐步增多,能够反映其工况要求的更高工作频率的疲劳检测需求也随之不断增加。比如飞机引擎的转速在每分钟几万转以上,其叶片受力频率为 170~2 000 Hz;一般汽油发动机的转速也在 3 000 r/min 以上,其相关部件的受力频率大于 200 Hz。此外如工业玻璃、功能陶瓷、硅等硬脆材料所构成的机械零部件或微小结构件,大多工作于 200 Hz 以上的小振幅、高频受力状态。这些特殊性能构件的出现,使得与其相应的能够模仿实际工况、并具有较高效率的疲劳检测机构的开发变得日益重要^[2]。在仿生领域,也需要具有小振幅、低载荷的疲劳检测机构检测诸如蜻蜓翅、蝗虫翅、蝉翅等昆虫翅膀的纳米力学性能^[3]。

近二十年来,国外的相关理论与技术^[4,5] 研究重点逐步转向于针对特殊构件或特殊材料进行疲劳检测的新方法^[6-11] 与新型高频疲劳试验机构等方面^[12-16],其中针对压电体及其构件疲劳检测的方法与机构也开始出现^[10-11],并获得了一些基本经

验。压电驱动型的高频疲劳试验机构最早出现于 1991 年(日本)^[17],是以压电叠堆为驱动力源,直接作用于试验构件上的高频交变加载机构。2000 年,日本东京工业大学压电材料研究所与日本特殊陶业公司合作开发出了具有三元系固溶体结构的 PZT 与 PMN 材料,制作出了相应的双压电晶片与压电叠堆器件,其变形能力扩大到原有的 10 倍以上,滞环大幅度缩小为 2% 以下,同时计算机控制速度与效能也获得了极大提高,为压电型高频疲劳试验机的发展提供了良好条件。目前已出现利用压电体构造的超声波加载疲劳试验机^[18],以及利用压电体驱动的专用于小试件检测的高频疲劳试验机^[19]等方面的研究,但总体来说相关的研究文献及成果还较少,市场上也还没有专业化的产品。为此,本文提出了利用压电振子(PZT、PLZT 或 PMN)作为高频疲劳试验机构的驱动力源,由此构造形成一种可提供较小振幅、较高频率,适用于对微小与硬脆材料构件、高频受力构件进行检测的疲劳试验装置,并对样机进行了实验。

2 压电驱动共振式高频疲劳试验机构的构成及其工作原理

图 1 所示为压电驱动共振式高频疲劳试验机结构图。由基座、夹具、弹性加载器、压电振子、加载座、顶梁、加载轮盘、调整螺杆、锁紧螺钉、联接环、传振杆、板弹簧、导柱、加载头、载荷传感器等构成。它的工作原理是:以圆环形双晶片压电振子为驱动力源,同时设置预置载荷调整机构(由加载座、加载轮盘构成)、弹性加载器等。当此机构处于工作状态时,它们与被测试件、夹具等构成共振系统,当试件处于共振状态时,弹性加载器的质量在共振状态下产生较大的惯性力反复地作用于试件上,使得试件在较大的交变力作用下进行疲劳试验。

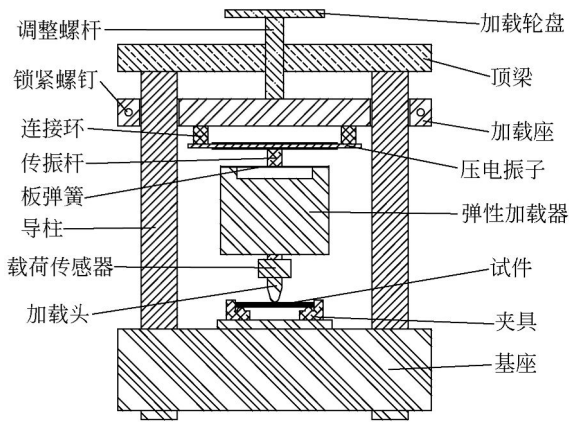


图 1 压电驱动共振式高频疲劳试验机构结构图

Fig. 1 Structural schematics of piezoelectric resonance high frequency fatigue testing machine

其工作过程如下:

(1)把试件装夹在夹具上,手动旋转加载轮盘使调整螺杆旋转,借助于顶梁的螺纹联接,驱动加载座沿导柱上下滑动,从而形成对试件的初期加载(拉伸疲劳试验向上加载,弯曲疲劳试验则向下加载)。

(2)通过前述过程将规定的初期载荷加到试件上之后,旋紧锁紧螺钉,使加载座固定在导柱的某一位置,则加载在试件上的初期载荷被锁定,并转化为对试件的静载荷。

(3)打开电源,使外部交变的激励电压作用于压电振子上,驱动由传振杆、板弹簧、弹性加载器、加载头、试件构成的共振系统,并由载荷传感器提取作用在试件上的受力数据,从而实现疲劳检测与试验。

3 压电驱动共振式高频疲劳试验机构的动力学模型

该机构在试验过程中整机要在一定共振频率下运行,所以在设计阶段应把试验机的动态特性纳入考虑范围,通过调整机器的结构参数来获取整机良好的动态特性,使其能够符合试验频率要求。本文采用集中质量法来研究整机的动态特性。

圆形双晶片压电振子的金属基板的圆周边缘用联接环、螺栓联接到加载座上,而加载座已经固定在导柱的某一位置,所以将压电振子简

化为一弹性元件。板弹簧在振动过程中产生较大的变形,其质量相对于本系统来说可以忽略不计,所以将其简化为一个弹性元件。由于弹性加载器相对于板弹簧来说弹性很小,质量很大,所以将其视为一无弹性的集中质量。相对于系统的共振总质量和整机机架总质量,试样的质量很小,刚度较大(跟板弹簧相比,刚度不能忽略不计),所以将其简化为一弹性元件。此外,当此机构工作时,把系统的结构阻尼按黏性阻尼计算。

根据上述假设,建立该疲劳试验机构共振系统的动力学模型如图 2 所示:

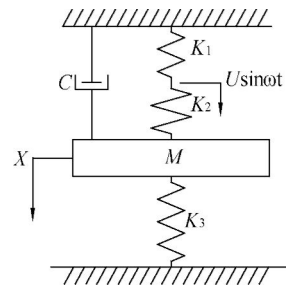


图 2 压电驱动式高频疲劳试验机构动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of piezoelectric resonance high frequency fatigue testing machine

此机械振动系统可认为是单自由度系统对位移激励的响应,其运动微分方程为:

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + \left\{ \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)^{-1} + K_3 \right\} X = (K_1 + K_2) U \sin \omega t. \quad (1)$$

则系统的稳态位移响应方程为:

$$X = \frac{(K_1 + K_2)^2 U}{(K_1 K_2 + K_1 K_3 + K_2 K_3) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \cdot \sin \left[\omega t - \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2} \right]. \quad (2)$$

系统在压电振子位移 U 的激励下所产生的振幅 A 与位移 U 之比,称为振幅放大率,即:

$$\beta = \frac{A}{U}$$

则:

$$\beta = \frac{A}{U} = \frac{(K_1 + K_2)^2}{(K_1 K_2 + K_1 K_3 + K_2 K_3) \sqrt{1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}, \quad (3)$$

式中: M 为机械振动系统的总质量,包括弹

性加载器、加载头和载荷传感器的等效质量; C 为系统阻尼系数; K_1 为压电振子刚度; K_2 为板弹簧刚度; K_3 为试件刚度; X 为加载头位移; U 为压电振子提供的位移激励; ω 为激振频率; ω_n 为无阻尼固有频率; λ 为频率比, $\lambda = \omega / \omega_n$; C_c 为临界阻尼系数,

$$C_c = 2\sqrt{M\left\{\left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right]^{-1} + K_3\right\}},$$

ζ 为阻尼比, $\zeta = C / C_c$; A 为振幅;

由公式(3)可知:当激振频率 ω 远小于无阻尼固有频率 ω_n , 即 λ 很小时, $\beta = \frac{(K_1 + K_2)^2}{K_1 K_2 + K_1 K_3 + K_2 K_3}$, 振幅不大; 当激振频率 ω 接近但小于固有频率 ω_n 时, 系统在亚共振区工作, 弹性元件和质量元件以及阻尼元件开始发挥作用; 当激振频率 $\omega = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$, 即频率比 $\lambda \approx 1$, $\beta = \frac{(K_1 + K_2)^2}{2\zeta(K_1 K_2 + K_1 K_3 + K_2 K_3)}$, 系统共振, 振幅达到最大值, 此时施加在试件上的动载荷

$$F_{\text{dynamic}} = K_3 \beta U = \frac{K_3 (K_1 + K_2)^2 U}{2\zeta (K_1 K_2 + K_1 K_3 + K_2 K_3)}. \quad (4)$$

在压电振子刚度 K_1 、试件刚度 K_3 、机械振动系统的总质量 M 确定的情况下, 由公式(4)可知, 施加在试件上的动载荷与系统的阻尼比 ζ 、压电振子的位移 U 、板弹簧刚度 K_2 有关。而压电振子的位移与施加的交流电压幅值有关, 板弹簧的刚度在材质、有效长度、宽度确定的情况下与厚度有关。

4 实验测试与结果分析

4.1 样机的参数和实验设备

制成的样机参数为: 压电振子的最大工作电压为 250 V, 输入电压为正弦交流电, 压电双晶片的材料为 PZT-5, 外径为 60 mm、内径为 9 mm、厚度为 0.6 mm; 压电振子基板外径为 90 mm、内径为 6 mm、厚度为 2.0 mm; 弹性加载器外径为 70 mm、高度为 32 mm, 材质为普通碳钢; 板弹簧片有效长度为 35 mm、宽度 11 mm, 材料为 65Mn; 某型陶瓷试件长度为 48 mm、宽度为 8 mm、厚度为 2.0 mm。经计算, 共振系统总质量 M 为 3.935 kg, 压电振子刚度 K_1 为 2.74×10^7 N/m, 试件刚度 K_3 为 8.62×10^6 N/m。实验所使

用的主要设备为 SDVC40 型数字压电调频控制器、安捷伦 HP4294 精密阻抗分析仪、电阻应变式载荷传感器和记录仪。

4.2 作用在试件上动载荷 F_{dynamic} 的测试

利用样机进行实验以测试作用在试件上的动载荷 F_{dynamic} , 实验装置如图 3 所示。



图 3 作用在试件上的动载荷测试实验装置图
Fig. 3 Test devices of dynamic load on the specimen measured by prototype

实验步骤如下:

(1) 装夹试件, 旋转加载轮盘对试件初期施加静载荷 $F_{\text{static}} = 19$ N, 锁紧加载座;

(2) 使用精密阻抗分析仪测试不同板弹簧厚度下样机的阻抗特性以获得其固有频率, 测试结果分别为 208.7、226.1、230.4、252.9、273.3 和 289.8 Hz (对应的板弹簧的厚度为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 和 1.1 mm);

(3) 使用数字压电调频控制器以步骤(2)测得的固有频率向压电振子施加交变电压, 使样机发生共振, 产生交变载荷作用在试件上;

(4) 用载荷传感器和记录仪测量作用在试件上的动载荷 F_{dynamic} ;

(5) 改变施加在压电振子的交流电压幅值 (100、110、120……240、250 V)、板弹簧的厚度 (1.1、1.0、0.9、0.8、0.7、0.6 mm), 重复步骤(1)~(4)。

4.3 实验结果及分析

实验结果如图 4 所示, 施加在试件上的动载荷 F_{dynamic} 可调节范围为 24.7 N (输入交流电压幅值为 100 V、板弹簧厚度为 1.1 mm 时) 至 99.2 N

(输入交流电压幅值为 250 V、板弹簧厚度为 0.6 mm 时)。当初期施加在试件上的静载荷 F_{static} 确定后,板弹簧厚度一定时,作用在试件上的动载荷 F_{dynamic} 随着输入的交流电压幅值增大而增大;输入的交流电压幅值一定时,动载荷 F_{dynamic} 随着板弹簧厚度增加而减小。这是由于压电振子产生的位移 U 与输入的交流电压幅值近似成正比,板弹簧的刚度 K_2 与厚度的 3 次方成反比的原因。

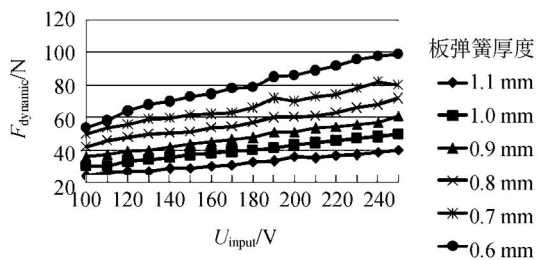


图4 输入交流电压幅值和板弹簧厚度不同时作用在试件上的动载荷

Fig. 4 Dynamic load on specimen with different input AC voltage amplitudes and thicknesses of the plate spring

由实验结果可知:使用此种压电共振式疲劳试验机构对试件进行疲劳测试时,可通过调节共振系统中元件参数来对试件施加不同载荷,以满足疲劳试验施加载荷的要求,即可通过调节输入交流电压幅值和板弹簧刚度(通过改变板弹簧有效长度、厚度、宽度)实现。

5 结 论

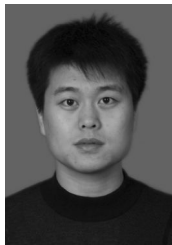
提出了利用压电振子(PZT、PLZT 或 PMN)作为高频疲劳试验机构的驱动力源,设计制造了一种可提供小振幅、高频率,适用于对微小与硬脆材料构件、高频受力构件进行检测的疲劳试验装置,它使弹性加载器的质量在共振状态下产生的惯性力反复作用于试件上,从而使得试件可在较大的交变力作用下进行疲劳试验。实验表明:改变交流电压幅值(100~250 V)和板弹簧厚度(1.1~0.6 mm),施加在试件上的动载荷可在 24.7~99.2 N 调节。制成的样机可对动载荷在上述载荷可调节区间内且在小振幅、高频受力工况下的试件进行拉伸、弯曲疲劳试验。

参考文献:

- [1] 李跃光,姬战国. 国内高频疲劳试验机的技术现状及其发展[J]. 实验技术与试验机, 2006, 1: 1-4. LI Y G, JI ZH G. The technical present situation and development of China's domestic high frequency fatigue testing machines[J]. *Test Technology and Testing Machine*, 2006, 1: 1-4. (in Chinese)
- [2] 神谷秀博,高津学,大矢宽二. 日本陶瓷学会论文集[C], 2008, 109(5): 456-463. KAMIYA, HIDEHIRO. *Symposium of Japan ceramics academic conference* [C]. 2008, 109(5): 456-463. (in Japanese)
- [3] 赵彦如. 蜻蜓膜翅结构特征和纳米力学行为及仿生分析[D]. 长春:吉林大学, 2007. ZHAO Y R. *Structural characters, nanomechanical behaviors and biomimetic analysis of dragonfly membranous wing* [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [4] TOMMY J G, JEREMY S, et al.. Development of a novel vibration-based fatigue testing methodology [J]. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26: 477-486.
- [5] LEE S B. Stress analysis and design for a structural fatigue testing machine[J]. *Journal of Mechanical science and Technology*, 1991, 5(2): 115-124.
- [6] 通佟玲,张本华,杨玉芬. 疲劳试验研究进展[J]. 实验室科学, 2006, 4: 53-55. TONG T L, ZHANG B H, YANG Y F. Research development of fatigue test [J]. *Laboratory Science*, 2006, 4: 53-55. (in Chinese)
- [7] UWE H, PETRA S. Nondestructive monitoring of fatigue damage evolution in austenitic stainless steel by positron-lifetime measurements [J]. *Physical Review. B*, 2004, 69(9): 94-110.
- [8] KOHJI M, YOSHIHIRO M, KENJIRO K. The influence of vacuum on fracture and fatigue behavior in a single aramid fiber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22: 757-765.
- [9] BUTLE J E, KEATING J. Preliminary data derived using a flexural cyclic loading machine to test plain and fibrous concrete [J]. *Materials and Structures*, 1981, 14(1): 25-33.
- [10] PAVEL M, CHAPLYA, MILAN M, et al.. Du-

- rability properties of piezoelectric stack actuators under combined electromechanical loading [J]. *Journal of applied physics*, 2006, 100: 111-124.
- [11] WANG H, ANDREW A W, LIN H T. Fatigue response of a PZT multilayer actuator under high-field electric cycling with mechanical preload[J]. *Journal of applied physics*, 2009, 105: 112-114.
- [12] LEE S B. Development of a deflection controlled multi-axial fatigue testing machine [J]. *KSME Journal*, 1990, 4(2): 103-108.
- [13] CHUNG Y K, SONG J H, DO-YOUNG LEE. Development of a fatigue testing system for thin films [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 736-742.
- [14] YONEKAWA M, ISHII T, OHMI M, *et al.*. Development of a remote-controlled fatigue test machine using a laser extensometer for investigation of irradiation effect on fatigue properties [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, 307-311: 1613-1618.
- [15] BERCHEML K, HOCKING M G. A simple plane bending fatigue and corrosion fatigue testing machine[J]. *Measurement science and technology*, 2006, 17: 60-66.
- [16] KOENEN A, VIRMOUX P H, GRAS R, *et al.*. A machine for fretting fatigue and fretting wear testing in cryotechnical and normal environment[J]. *Wear*, 1996, 197: 192-196.
- [17] SRIRAM T S, FINE M E, CHUNG Y W. A flange-mounted UHV-compatible axial fatigue apparatus using a piezoelectric actuator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(8): 2008-2010.
- [18] CLAUDE B. Piezoelectric fatigue testing machines and devices [J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 1438-1445.
- [19] SAITO S, KIKUCHI K, ONISHI Y, *et al.*. Development of piezoelectric ceramics driven fatigue testing machine for small specimens[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, 307-311: 1609-1612.

作者简介:



接 勳(1980—),男,吉林人,博士研究生,讲师,2003年于长春工业大学获得学士学位,2006年于新疆农业大学获得硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:jiemeng1980@126.com



杨鲁义(1983—),男,吉林长春人,硕士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:harlem5678@sina.com



谢海峰(1984—),男,山西繁峙人,博士研究生,2006,2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:xhf821@126.com



杨志刚(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1998年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:yzg@jlu.edu.cn



刘 焱(1973—),女,吉林人,博士研究生,副教授,1995年于吉林化工学院获得学士学位,2006年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:lyjlict@163.com

导师简介: