

Design and Experiment of Tensile Fatigue Test Device Driven by Piezoelectric Actuated Micro Load

Xiaochao Tian¹, Zhigang Yang², Kang Li², Qinghua Li¹, Chunshan He¹, Yunguang Cai¹, Yan Zhang¹, Rui Wang³, Shuchen Yang³

¹Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun Jilin

²Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

³School of Mechanical Engineering, Changchun Normal University, Changchun Jilin

Email: tianxczb@163.com

Received: May 6th, 2018; accepted: May 21st, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

In order to realize the tensile-pressure fatigue test of micro and small components, a piezoelectric driven micro load fatigue test device was designed. The structure of this device uses a horizontal structure to avoid the effect of the fixture quality on the applied load. First, the structure design, working principle and vibration mode analysis of the fatigue test device are carried out. Then the dynamic analysis of the system is carried out, and the system displacement magnification is obtained under the natural frequency and resonance state of the system. Finally, the experimental prototype is made, and the experimental test based on Labview software is used. The experimental results show that the resonant frequency of the system is 211 Hz and the maximum output force is 42.5 N. H62 brass is taken as the test object, and the fatigue limit of the test piece is 68 MPa at the 1.21×10^6 cycle fatigue limit. It is proved that the micro load fatigue test device designed in this paper can realize the feasibility of pulling and tensile-pressure fatigue test for small components.

Keywords

Piezoelectric Actuation, Micro Load, Tensile Fatigue Test, Resonance, Experiment

压电驱动式微小载荷拉伸疲劳试验装置设计与实验

田晓超¹, 杨志刚², 李康², 李庆华¹, 贺春山¹, 蔡云光¹, 张雁¹, 王锐³, 杨树臣³

¹长春大学, 机械与车辆工程学院, 吉林 长春

²吉林大学, 机械科学与工程学院, 吉林 长春

³长春师范大学, 工程学院, 吉林 长春

Email: tianxczb@163.com

收稿日期: 2018年5月6日; 录用日期: 2018年5月21日; 发布日期: 2018年5月28日

摘要

为了实现微型与小型构件的拉伸疲劳试验与检测, 本文设计了一种压电驱动式微小载荷疲劳试验装置, 该结构采用一种卧式结构, 避免了夹具质量对施加载荷的影响。首先进行疲劳试验装置结构设计、工作原理以及振动模态的分析; 然后对系统进行动力学分析, 得出系统固有频率与共振状态下系统位移放大倍数; 最后制作了实验样机并利用Labview软件进行实验测试, 测得系统共振频率为211 Hz, 最大输出力为42.5 N。并取微小构件H62黄铜为测试对象, 测得试件疲劳极限在 1.21×10^6 周次, 疲劳极限为68 MPa, 验证了本文设计的微小载荷疲劳试验装置能实现对微小构件进行拉伸疲劳试验与检测的可行性。

关键词

压电驱动, 微小载荷, 拉伸疲劳试验, 共振, 实验

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着微机电技术的不断发展, 相关的微小执行器、微小驱动器与微小传感器以及仿生工程研究与仿生产品、生物医学产品中出现的微型与小型构件等的研究也极为活跃, 这些器件在工作中一般特点是受力小、使用频率高, 常处于交变动载荷下, 普遍存在疲劳破坏的可能, 因此有较好性能的疲劳试验与检测技术变得日益重要。

现有的疲劳试验与检测设备主要针对大尺寸器件设计的, 一般利用电磁驱动或电液伺服驱动[1] [2], 需要系统在谐振状态下工作, 受系统阻抗与磁阻的限制, 一般工作频率不高于 200 Hz, 同时普遍存在动态载荷大、加载精度低等问题, 目前均不适于对微小器件与生物器件的疲劳试验与检测。

国内外相关学者对压电驱动疲劳试验机做了大量的实验研究。日本的 S. Saito 设计了小试件高周期疲劳测试的装置[3], 该装置以压电叠堆作为激励源, 可以给定 100 μm 的微小位移。Haque 设计了利用压电驱动器进行铝膜单轴疲劳拉伸的实验设备[4]。Bagdahn 设计了可以用于测试多晶硅疲劳特性的压电驱动型疲劳试验装置[5], 该装置的最高加载频率可以达到一千赫兹。Bathias 团队的相关试验研究发现试件材料在 107 次的应力循环后仍然会发生疲劳破坏[6] [7], 得出常规疲劳实验结果认可的疲劳极限说法是不正确的结论。台湾的 Kuo-Shen Chen 研制了压电陶瓷驱动的疲劳检测设备[8], 该装置以压电驱动器的位移来代替焊点芯片受热产生的变形, 来测试电子封装中焊点的热 - 机械疲劳机理和行为。A. Nikitin 等人研制了一种新型压电驱动式纯扭转疲劳试验检测装置[9], 该装置用于检测锻造和挤压两种工况下钛合金扭转疲劳的超声波超高周疲劳检测试验, 通过实验发现, 挤压钛合金相比锻造钛合金具有更高的超高周疲劳强度。四川大学的王清远设计了可以用于高温、微动摩擦以及薄片的超声疲劳检测设备, 并进行了相

关的超声加速疲劳实验[10]。吉林大学的王书鹏设计了一种基于自锁效应及斜块箝位原理的新型压电驱动疲劳检测机构,对纯铜材料进行了原位拉伸以及疲劳测试[11],刘丕新设计了基于柔性铰链的压电驱动型疲劳检测装置,该装置利用双压电叠堆驱动柔性铰链产生变形来对合金试件进行原位疲劳测试,分析了试件在各个阶段的载荷谱[12]。

本文提出了一种利用压电振子作为驱动力源并且整体结构采用横向布置方式,可对微小器件与生物器件进行往复拉压疲劳试验与检测,能够实现交变载荷的精确施加与控制。

2. 结构与模态仿真

2.1. 结构与工作原理

本文设计的压电驱动式微小载荷疲劳试验装置结构示意图如图 1 所示。该结构主要由左右侧板、加载手柄、精密螺杆、加载座、传感器、横向导柱、卡具、板弹簧、质量块、连接环、压电振子和被测试件等组成。其中预加载座和加载手柄配合对试件进行预加载。压电振子在外加交变电压的作用下产生周期往复弯曲变形,当驱动频率与系统固有频率一致或者相近时系统处于共振状态,压电振子往复变形通过系统谐振放大并作用于被测试件上,其变形量由传感杆传到载荷放大模块,其微小位移经放大后作用到试件上,来实现对试件的往复拉压疲劳试验与检测。

2.2. 模态仿真分析

为了分析系统振动模态,对系统进行了模态仿真,相关结构参数如表 1 所示,材料属性表如表 2 所示。

将三维模型导入到 ANSYS 仿真分析软件中,选取单元类型为 solid185 单元,对其进行了网格划分,如图 2 所示。将装配体不同零件之间的接触类型定义为绑定不分离接触,所选算法为 MPC 算法,模态分析的分析方法选择为 Block Lanczos 法,对两侧板底面施加三自由度的全约束,提取系统的前四阶模态,求解结果如图 3 所示,其前四阶模态云图如图 4 所示。

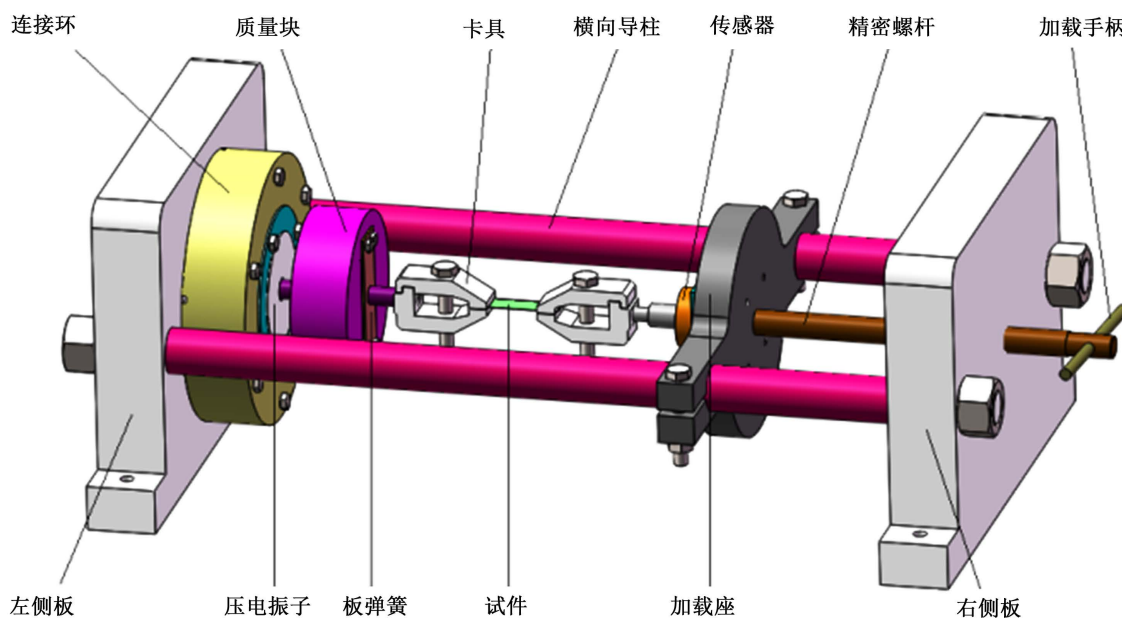


Figure 1. Schematic diagram of a piezoelectric micro load tensile fatigue test device driven by piezoelectric actuation
图 1. 压电驱动式微小载荷拉伸疲劳试验装置结构示意图

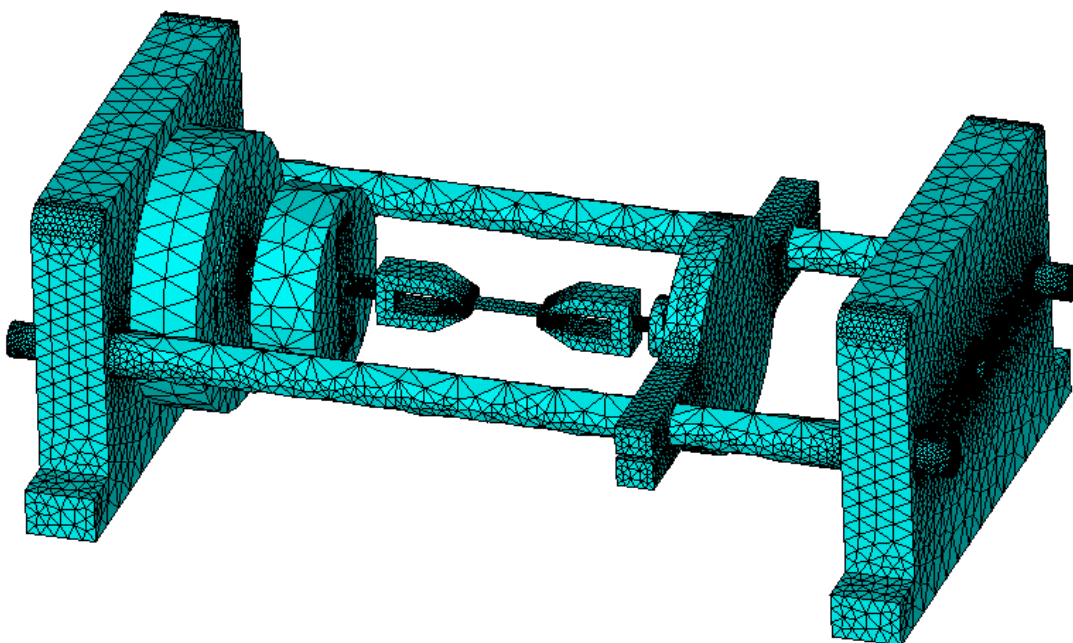


Figure 2. Grid partition model diagram

图 2. 网格划分模型图

Table 1. Size parameter list of prototype structure

表 1. 样机结构尺寸参数明细表

零件名称	参数名称	参数值
压电振子	材料	PZT5
	尺寸	$\Phi 40$ mm
	材料	60Si ₂ Mn
	尺寸	$\Phi 60$ mm
左侧板	材料	Q 235
	尺寸	124 mm × 224 mm × 30 mm
连接环	材料	45 钢
	尺寸	$\Phi 118$ mm × $\Phi 44$ mm
	厚度	22 mm
板弹簧	材料	65 Mn
	尺寸	18 mm × 42 mm
质量块	材料	Q 235
	厚度	25 mm
	直径	$\Phi 70$ mm
横向导柱	材料	45 钢
	尺寸	$\Phi 20$ mm
	中心距	156 mm
加载座	材料	45 钢
	中心圆台直径	$\Phi 100$ mm
	长度	220 mm
右侧板	材料	Q 235
	尺寸	124 mm × 224 mm × 30 mm
试件	材料	黄铜
	尺寸	46 mm × 10 mm × 0.15 mm

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	78.480	1	1	1
2	103.38	1	2	2
3	113.50	1	3	3
4	218.31	1	4	4
5	292.89	1	5	5
6	482.35	1	6	6

Figure 3. Modal simulation results of prototype
图 3. 模态仿真结果

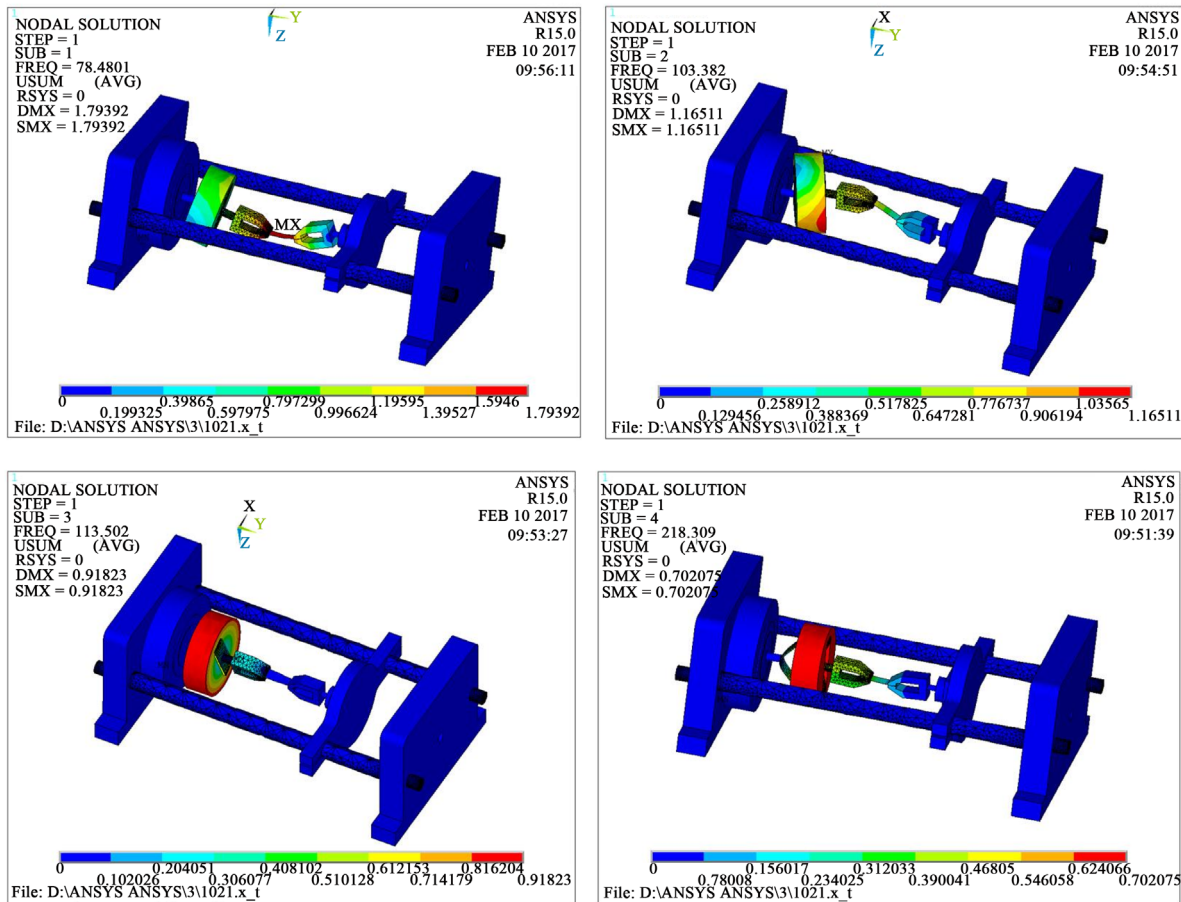


Figure 4. The first order modal nephogram of the system
图 4. 系统前四阶模态云图

Table 2. Detailed list of material properties
表 2. 材料属性明细表

材料名称	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
压电陶瓷片	7600	63	0.32
60Si ₂ Mn	7800	194	0.28
65Mn	7800	197	0.28
45 钢	7850	195	0.27
Q235	7800	195	0.28
黄铜	8500	100	0.32

从模态振型仿真结果可知,一阶振型为质量块通过卡具带动试件的上下摆动,不是我们需要的振型;二阶振型为质量块通过卡具带动试件在水平面内的摆动,没有实际意义;三阶振型为质量块通过卡具带动试件的扭转运动,也不是我们需要的模态;第四阶模态为质量块沿试件拉伸压缩方向的运动,此种运动通过卡具作用到试件上,周期性的持续给试件加载、卸载,正好是我们所需要的模态振型,固有频率为 218.3 Hz。

3. 动力学分析

微小载荷拉伸疲劳试验装置简化物理模型如图 5 所示。其中, k_1 为压电振子的等效刚度, k_2 为质量块中板弹簧的等效刚度, k_3 为试件的等效刚度。为了研究的方便,假设在弹簧 k_1 和 k_2 之间有一个质量为零的质点 m_1 , k_2 和 k_3 之间的等效质量为 m_2 , 设质点 m_1 和质量块 m_2 的位移分别是 x_1 、 x_2 , 系统阻尼为 c_3 , 取向右为正方向。

系统振动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \\ m_2 x_2'' + c_3 x_2' - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $F_1 = k_2 A \cos \omega t$ 为作用在压电振子上的外电场提供的谐波激振力。

当没有外加交流电场时,忽略其运动阻尼,其自由振动的微分方程可以写成如下形式:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \\ m_2 x_2'' - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

令 $m_1 = 0$, 则上式转化为:

$$m_2 x_2'' + c_3 x_2' + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_1 + k_2} x_2 = \frac{k_2}{k_1 + k_2} F_1 \quad (3)$$

将上式整理得:

$$x_2'' + \frac{c_3}{m_2} x_2' + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{(k_1 + k_2)m_2} x_2 = \frac{k_2}{(k_1 + k_2)m_2} F_1 \quad (4)$$

将 $F_1 = k_2 A \cos \omega t$ 带入上式, 可得:

$$x_2'' + 2\zeta \omega_n x_2' + \omega_n^2 x_2 = \frac{k_2^2}{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3} A \omega_n^2 \cos \omega t \quad (5)$$

式中:

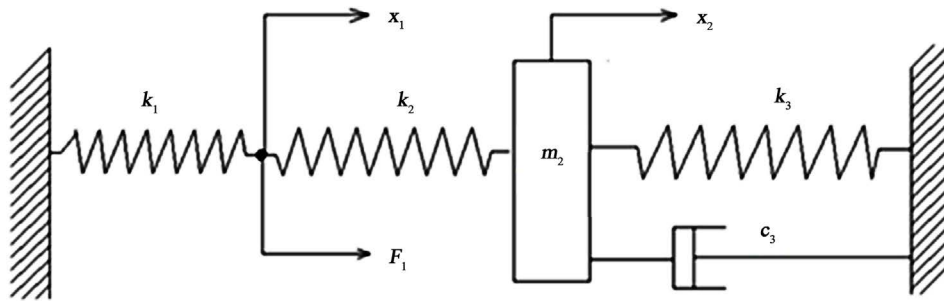


Figure 5. Physical model diagram of system

图 5. 系统物理模型

$$\begin{cases} \zeta = \frac{c_3}{2m_2\omega_n} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3}{m_2(k_1 + k_2)}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, c_3 为粘性阻尼因子, ω_n 为固有频率, ζ 为阻尼系数。

得到系统单自由度系统的稳态响应为:

$$x_2 = \frac{k_2^2}{k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3} \frac{A}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \left\{ 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega t + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] \cos \omega t \right\} \quad (7)$$

可以将上式写为简洁形式:

$$x_2 = X_2 \cos(\omega t - \phi) \quad (8)$$

其中, $\tan \phi = \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$ 。

则有:

$$X_2 = \frac{k_2^2}{k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3} \frac{A}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 激励的幅值越大, 响应的幅值就越大, 在其它条件一定的情况下, 二者成线性关系。同时, 还可以得到系统放大倍数为:

$$|H(\omega)| = \frac{X_2}{A} = \frac{\frac{k_2^2}{k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 放大倍数不仅与激励频率以及响应频率有关, 还与系统阻尼比及压电振子等效刚度 k_1 , 板弹簧刚度 k_2 , 试件刚度 k_3 有关。

4. 实验测试

实验装置在实验时, 将装置固定到隔震平台上, 以消除外界因素对本实验的影响。本实验主要是采用 Labview 软件进行测试, 实时采集实验数据和波形。测试的主要参数是样机的共振频率和加载到试件上的最大载荷, 如图 6 所示。

测试时, 首先将试件装卡到卡具上, 然后启动自行设计的 Labview 测试软件, 接着转动加载手柄对试件进行预加载, 当试件的受力值达到预定目标时, 锁紧加载座两端的紧定螺钉。然后用阻抗分析仪测试样机的固有频率, 再调整电源的驱动频率与样机固有频率一致, 将交变信号施加到压电振子上, 观察软件显示面板的读数, 相关的测试装置实物图如图 7 所示。

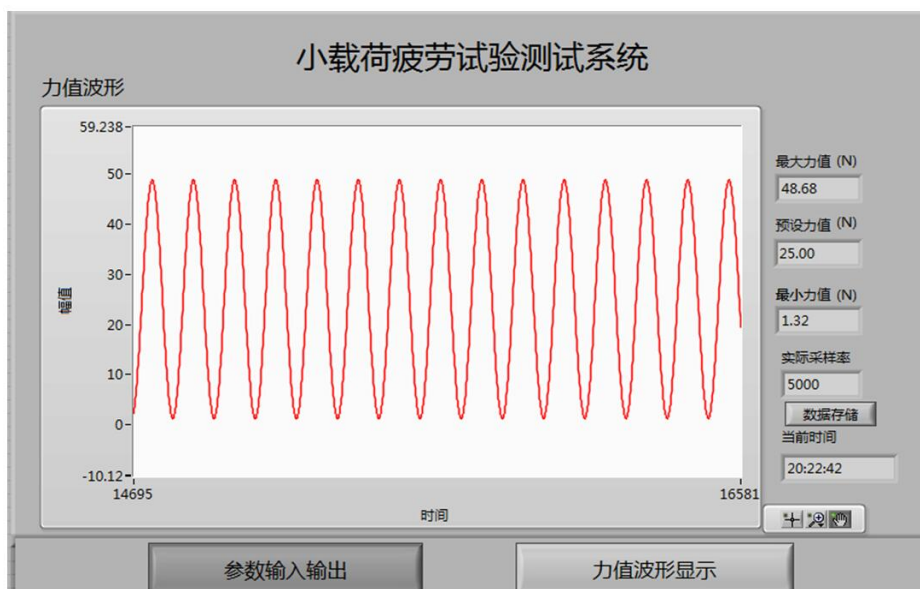


Figure 6. Software interface panel
图 6. 软件界面面板

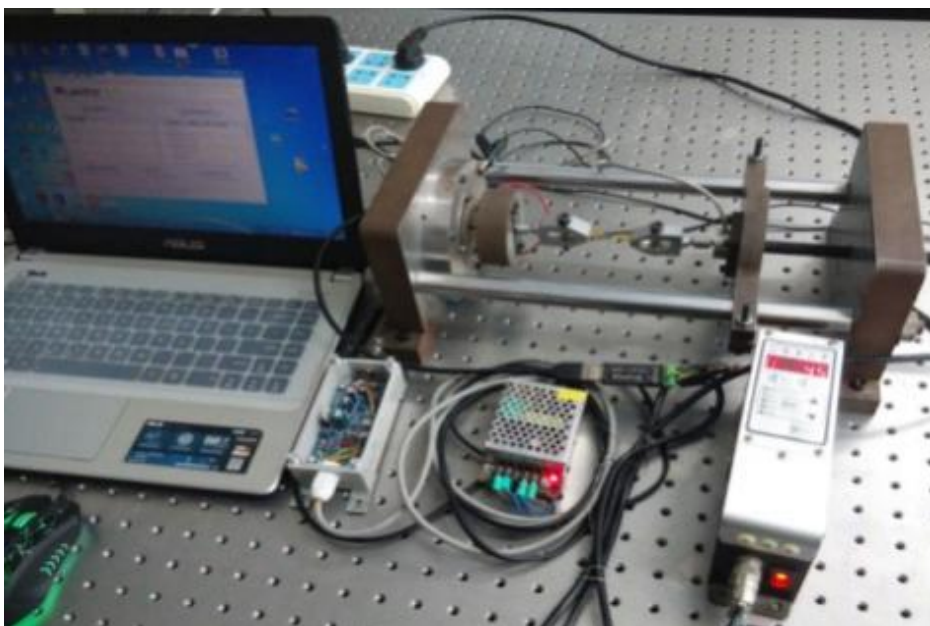


Figure 7. The physical map of the test device
图 7. 测试装置实物图

4.1. 频率对载荷影响

将电压调至 120 V，保持其它参数不变，电源控制器每间隔 0.5 Hz 测试一次，并读取软件上载荷值示数，所得结果如图 8 所示。

从图 8 可看出，频率变化对加载效果影响显著，疲劳试验机工作在共振频率 211.5 Hz 效果最佳，继续增加或减小驱动频率值，均会导致试件所受的最大载荷减小。效果最佳工作频率区间 210 Hz~213 Hz 之间。

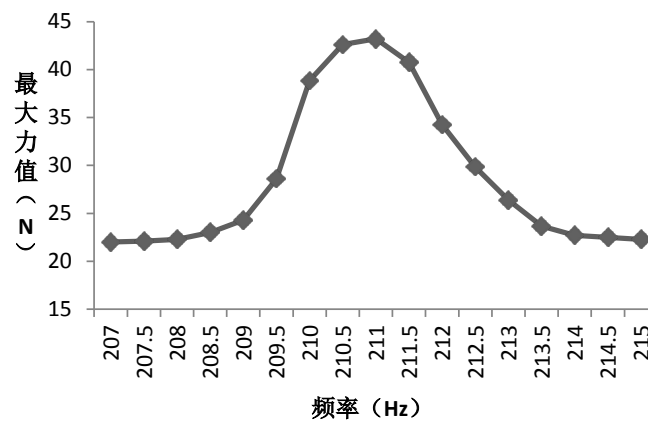


Figure 8. Influence of frequency on output load
图 8. 频率对输出载荷影响关系

4.2. 电压对输出载荷影响

首先将驱动频率调至系统的共振频率，然后在其它参数都不变的条件下，从 85 V 开始，每间隔 5 V 读取一次最大载荷，得出电压对输出载荷影响关系曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出，试件受到最大载荷随驱动电压的增大而增大，近似成线性变化。这是因为驱动电压提高压电振子等效输出力值。因此，可以通过改变驱动电压的值来改变试件的最大载荷值，进而进行不同要求的疲劳试验。

4.3. 质量块对共振频率的影响

质量块质量对系统的共振频率有较大影响，然后在其它参数都不变的条件下，测试不同质量块对样机共振频率的影响，测试结果如图 10 所示。

由图 10 可知，随着质量块质量的增大，系统的共振频率显著减小，可以通过调整质量块的质量来改变系统的固有频率。

5. 试件拉伸疲劳试验

黄铜具有较好的塑性和强度，广泛应用于各种仪器仪表、日常五金制品以及汽车零部件中。因此本文选取了薄的黄铜带(H62)，将其加工成标准试件，模拟微小载荷受力情况，对其进行了循环特性为 $R = 0.1$ 的拉压疲劳试验。

5.1. 试件的制备

H62 黄铜是铜锌合金，其中铜的成分大约占 62%，其他成分以锌为主，也包含少量诸如镍、铅一类的微量元素，本文选择 0.15 mm 厚的薄铜带，在查阅相关资料的基础上，设计了本疲劳试验用的微小载荷标准试件，其相关尺寸如图 11 所示。试件制备的过程是使用精密电火花线切割机床进行加工，在加工完成后对其边缘部位进行抛光处理，疲劳试验用的试件实物图如图 12 所示。

5.2. 试验过程与结果

本实验的试验过程如下：

1) 将试件装卡到卡具上，打开测试软件，对试件进行拉断试验，取 3 个相同型号的试件依次试验，测得其断裂载荷平均值为 $F_b = 32.68 \text{ N}$ 。

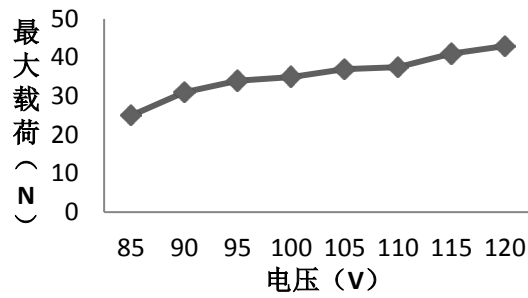


Figure 9. Influence of voltage on output load
图 9. 电压对输出载荷影响关系

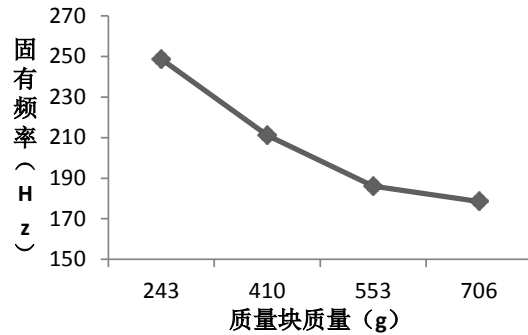


Figure 10. The influence of mass block on resonance frequency
图 10. 质量块对共振频率影响关系

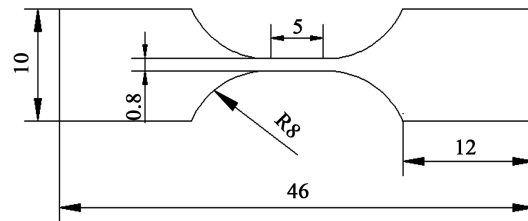


Figure 11. Structure size diagram of specimen
图 11. 试件结构尺寸图



Figure 12. Physical structure drawing of specimen
图 12. 试件结构实物图

- 2) 按照表 3 中给出的平均载荷水平, 对试件施加初始拉力为 F_m 的静载荷, 同时锁紧紧定螺钉。
- 3) 使用阻抗分析仪测得系统的固有频率 f_s , 将频率值输入到自制的系统测试软件中。
- 4) 打开专用电源, 给压电振子施加频率为 f_s 的交变电流, 调整电压幅值, 使被测试件所受的最大载荷为 F_{max} , 同时打开软件的频率计数按钮, 开始计数。

5) 观察记录试件拉断时的载荷循环次数 N 。

更换新试件, 重复上述步骤 1)~5)。

相关的载荷水平如表 3 所示。

试验结果疲劳 S-N 曲线图如图 13 所示。

分析试验结果可知, 试件的拉伸应力疲劳特性曲线首先是快速的下降, 然后缓慢的减小, 其拐点发生在 10^6 周次循环次数下, 其 1.21×10^6 周次的拉伸疲劳极限为 68 MPa, 在 1×10^8 循环周次后仍会发生疲劳破坏。说明所设计的微载荷拉-伸疲劳试验检测装置样机符合设计要求, 可以进行微小载荷的疲劳试验, 能够准确可靠的工作。

6. 结论

本文设计的压电驱动式微载荷拉伸疲劳检测装置共振频率 211 Hz, 最大输出力为 42.5 N, 最佳工作频率区间为 210 Hz~213 Hz 之间。取微小构件 H62 黄铜为测试对象, 测得试件疲劳极限在 1.21×10^6 周次, 疲劳极限为 68 MPa。验证了本文设计的疲劳试验装置能实现对微小构件进行拉伸疲劳试验与检测。

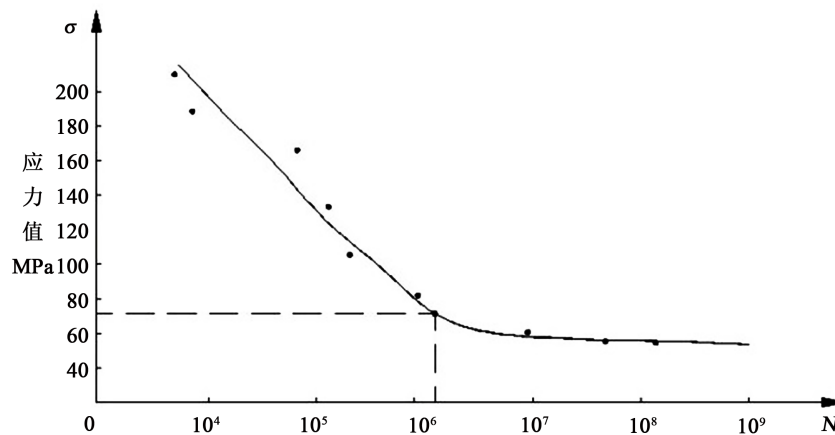


Figure 13. Tensile-pressure fatigue S-N curve of specimen

图 13. 试件拉伸疲劳 S-N 曲线图

Table 3. Horizontal table of tensile fatigue load

表 3. 拉伸疲劳载荷水平表

循环特性 R	最大载荷 F_{\max}/N	平均载荷 F_m/N	最小载荷 F_{\min}/N	载荷幅值 F_a/N	循环次数(N)/次
$R = 0.1$	$0.20F_b = 6.54$	3.60	0.66	2.94	1.02×10^8
$R = 0.1$	$0.21F_b = 6.86$	3.77	0.69	3.08	7.86×10^7
$R = 0.1$	$0.22F_b = 7.20$	3.96	0.72	3.24	9.26×10^6
$R = 0.1$	$0.25F_b = 8.17$	4.50	0.82	3.67	1.21×10^6
$R = 0.1$	$0.30F_b = 9.80$	5.39	0.98	4.41	9.62×10^5
$R = 0.1$	$0.40F_b = 13.07$	7.19	1.31	5.85	3.68×10^5
$R = 0.1$	$0.50F_b = 16.34$	9.03	1.63	7.31	1.75×10^5
$R = 0.1$	$0.60F_b = 19.61$	10.76	1.91	8.85	9.08×10^4
$R = 0.1$	$0.70F_b = 22.88$	12.56	2.23	10.32	8.75×10^3
$R = 0.1$	$0.80F_b = 26.14$	14.38	2.62	11.76	3.62×10^3

基金项目

国家自然科学基金项目(51705031, 51607010), 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20170489KJ), 长春大学国家级科研培育项目(2016JBC01L02)。

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, 46(1): 1-4.
- [2] 宝暄, 李长春, 刘晓东, 等. 电液伺服疲劳试验机的力跟随控制[J]. 液压气动与密封, 2006(6): 1-3.
- [3] Saito, S., Kikuchi, K., Onishi, Y., *et al.* (2002) Development of Piezoelectric Ceramics Driven Fatigue Testing Machine for Small Specimens. *Journal of Nuclear Materials*, **307-311**, 1609-1612. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)00992-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)00992-3)
- [4] Haque, M.A. and Saif, M.T.A. (2002) Mechanical Behavior of 30 - 50 nm Thick Aluminum Films under Uniaxial Tension. *Scripta Materialia*, **47**, 863-867. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00306-8)
- [5] Bagdahn Jr., J.W.N.S. (2003) Fatigue of Polycrystalline Silicon under Long-Term Cyclic Loading. *Sensors & Actuators A Physical*, **103**, 9-15. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00328-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00328-X)
- [6] Bathias, C. (2006) Piezoelectric Fatigue Testing Machines and Devices. *International Journal of Fatigue*, **28**, 1438-1445. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.09.020>
- [7] 黄志勇, 王清远. 低铬合金钢的超高周疲劳行为和裂纹扩展路径分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 195-199.
- [8] Chen, K.S., Chen, B.Z. and Huang, C.C. (2006) Design and Control of a Piezoelectric Driven Fatigue Testing System for Electronic Packaging Applications. *IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies*, **29**, 841-849. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2006.885965>
- [9] Nikitin, A., Bathias, C. and Palin-Luc, T. (2015) A New Piezoelectric Fatigue Testing Machine in Pure Torsion for Ultrasonic Gigacycle Fatigue Tests: Application to Forged and Extruded Titanium Alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **38**, 1294-1304. <https://doi.org/10.1111/ffe.12340>
- [10] 王清远. 超声加速疲劳实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(3): 6-11.
- [11] Wang, S., Zhang, Z., Ren, L., *et al.* (2014) A Novel *in Situ* Device Based on a Bionic Piezoelectric Actuator to Study Tensile and Fatigue Properties of Bulk Materials. *Review of Scientific Instruments*, **85**, 277-286. <https://doi.org/10.1063/1.4879935>
- [12] 刘丕新. 压电致动型原位疲劳测试仪的结构设计与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojav@hanspub.org