

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.008

基于等效弹性模量的压电双晶片微夹钳夹持力检测方法

孙媛, 张之敬, 叶鑫, 金鑫

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为保证压电双晶片微夹钳能稳定且安全无损地夹持零件, 提出一种基于等效弹性模量的压电双晶片微夹钳夹持力检测方法。依据等效弹性模量理论提出夹持力计算模型, 提出夹持力检测方法, 通过先行实验测定所选压电双晶片的等效弹性模量等少量参数来计算夹持力, 以自行研发的宏微结合压电双晶片微夹钳为对象进行夹持力检测实验。实验结果表明, 该方法具有良好的夹持力检测精度。

关键词: 微装配; 微夹持; 夹持力; 等效弹性模量; 压电双晶片

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Gripping Force Measurement Method for Piezoelectric Bimorph Micro-Grippers Based on Equivalent Elastic Modulus

Sun Yuan, Zhang Zhijing, Ye Xin, Jin Xin

(School of Mechanical & Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to grip miniature parts stably and safely by piezoelectric bimorph micro-grippers, a gripping force measurement method for piezoelectric bimorph micro-grippers based on equivalent elastic modulus is proposed. This paper establishes a gripping force calculating model according to the equivalent elastic modulus theory, proposes a measurement method in which the bimorph's equivalent elastic modulus is tested in pre-experiments for the gripping force calculation, and conducts gripping force measurement experiments with a self-developed coarse-fine piezoelectric bimorph micro-gripper as an object. Experiment results indicate that the method has good measurement accuracy.

Key words: micro-assembly; micro-gripping; gripping force; equivalent elastic modulus; piezoelectric bimorph

0 引言

压电双晶片微夹钳在微装配领域有着广泛应用, 其夹持对象一般为几何尺寸在 $10\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 范围的微小型结构件。由于夹持对象尺寸小, 结构易被损坏, 微夹钳必须具有夹持力检测对象功能用以监控操作过程中零件所受夹持力大小, 并以此作为反馈进行对微夹钳张合量的控制。

目前针对压电双晶片微夹钳夹持力检测的研究, 一般是采用应变电桥检测双晶片应变 ε , 由压电方程、微夹钳的受力分析和相关弹性力学公式推导得到夹持力 F 与双晶片驱动电压 V 、应变 ε 之间的定量关系 $F(V, \varepsilon)^{[1]}$ 。然而压电双晶片的多层结构并不符合弹性力学基本假设中的均匀性假设和各向同性假设, 直接应用弹性力学公式推导会导致所求出的夹持力值可能会与真实值偏差较大^[2]。针对这一影响夹持力检测精度的问题, 笔者提出一种基于等效弹性模量的近似计算模型, 将双晶片的三层板结构假想成一种单层板, 以先行实验测得其等效弹性模量, 用等效弹性模量来进行对夹持力的计算。

1 基于等效弹性模量的近似计算模型

笔者以自行研发的宏微结合压电双晶片微夹钳^[3]为对象, 进行基于等效弹性模量的近似计算模型的研究。实物图如图 1 所示, 用压电陶瓷双晶片和固定支撑分别充当 2 个钳指, 实现对微小型结构件的夹持。

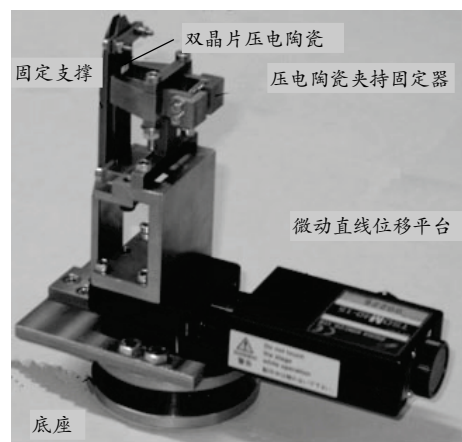


图 1 宏微结合的压电陶瓷微夹钳实物图

文献[4-5]根据刚度等效原理, 把三层板假想成

收稿日期: 2012-05-11; 修回日期: 2012-05-24

基金项目: 国防基础科研项目(B22200×××××); 国家自然科学基金(50875025); 国家自然科学基金(51075035)

作者简介: 孙媛(1985—), 女, 湖北人, 土家族, 博士生, 从事微装配研究。

单层板,并用 E_c 、 h_c 、 μ_c 分别表示其等效弹性模量、板的厚度和等效泊松比,从而直接利用单层壳体理论公式计算三层板的结构。笔者在这种方法的基础上,首次提出了用于压电陶瓷双晶片夹持力计算的近似模型。

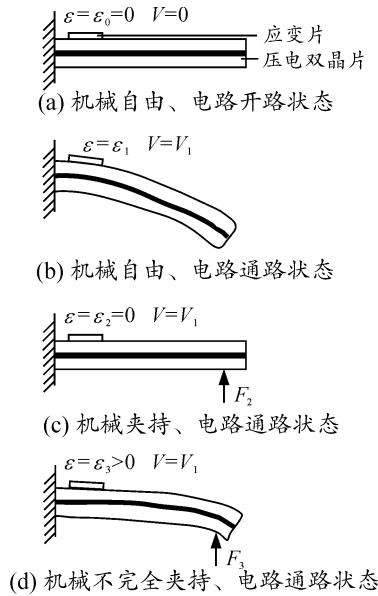


图 2 压电双晶片微夹钳的几种工作状态

在微夹钳中,将压电陶瓷双晶片作为执行器使用,其初始状态为机械自由、电路开路,如图 2(a)所示。压电双晶片上贴有应变片构成应变电桥,初始状态下应变片应变 $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0$ 。在加上驱动电压 $V = V_1$ 且机械自由情况下,双晶片发生纯弯曲,应变片应变变为 ε_1 ,如图 2(b)所示。在加上驱动电压 $V = V_1$ 且机械夹持状态下,双晶片不发生变形,应变片应变变为 $\varepsilon = \varepsilon_2 = 0$,此时逆压电效应带来的影响完全以力的形式输出,根据应力公式和应力应变关系可得 $F_2 = 2I_z E_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / [h_c (l - l_0)]$,如图 2(c)所示,式中 l 为压电双晶片长度, l_0 为电阻应变片中心位置与双晶片固定端的距离, I_z 为双晶片截面的惯性矩。在作为微夹钳的实际应用中,加上驱动电压 $V = V_1$ 后,双晶片先发生部分变形,待接触到零件以后变形量不再增加,输出夹持力。此时双晶片上应变片的应变 $\varepsilon = \varepsilon_3 > 0$,双晶片输出力 $F_3 = 2I_z E_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) / [h_c (l - l_0)]$,如图 2(d)所示。而纯弯曲状态下,应变 ε 正比于驱动电压 V ,即 $\varepsilon = \varepsilon(V)$,所以在实际夹持中,双晶片微夹钳的夹持力可用式 (1) 描述:

$$F_3 = 2I_z E_c (\varepsilon(V_0) - \varepsilon_3) / [h_c (l - l_0)] \quad (1)$$

其中, E_c 为等效弹性模量, E_c 和 $\varepsilon(V_0)$ 均可通过先行实验求得。

2 实验研究

2.1 实验研究总体方案

实验研究总体方案如图 3 所示。在上一小节中建立的基于等效弹性模量的夹持力近似计算模型中,压电双晶片的等效弹性模量 E_c 以及双晶片应变与驱动电压的定量关系 $\varepsilon(V_0)$ 是由双晶片的不同而变化的,需要通过等效弹性模量测定实验和双晶片应变与驱动电压关系测定实验预先测得,从而获得针对具体型号双晶片的完整的近似计算模型。然后进行夹持力检测精度评定实验,评定近似计算模型的检测精度。最后进行夹持力控制实验,证明本节研究的针对微细轴类块类零件的夹持力控制方法的有效性。

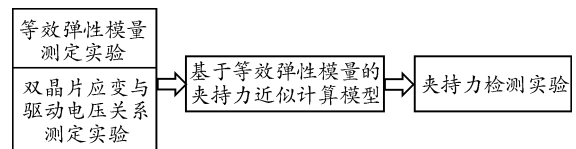


图 3 实验研究总体方案

2.2 等效弹性模量测定实验

用北京理工大学细观力学实验室所购置的 MTS Tytron 250 微力万能试验机(如图 4 所示)对压电陶瓷双晶片进行等效弹性模量的测定。MTS Tytron 250 微力万能试验机具有高精度的位移控制器和灵敏的微力传感器,可以测量微米尺度下的材料机械性质。



图 4 MTS Tytron 250 微力万能试验机

实验中用微力万能试验机给压电双晶片悬臂梁加载,载荷逐渐增大。记录全过程中双晶片悬臂梁所受载荷和末端的挠度(即试验机加载端的加载进给量),应用材料力学的相关公式计算得到压电双晶片的等效弹性模量。所用到的公式如式 (2):

$$w = \frac{Fl^3}{3E_c I} \quad (2)$$

其中: w 为悬臂梁末端的挠度; F 为施加在悬臂梁末端的集中载荷; l 为悬臂梁伸出端的长度; E 为杨氏模量; I 是悬臂梁截面的惯性矩。

用 Tytron 250 微力试验机测得的位移-力的曲线如图 5 所示。

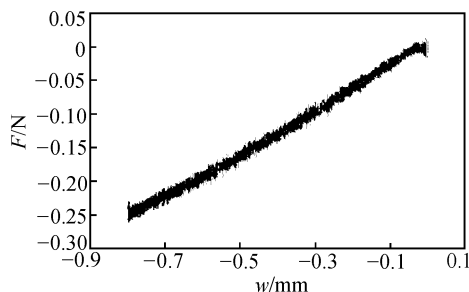


图 5 实验测得的位移-力曲线图

用 Origin 软件将曲线进行平滑处理。用相邻平均法 (adjacent averaging) 使曲线平滑, 如图 6 所示。

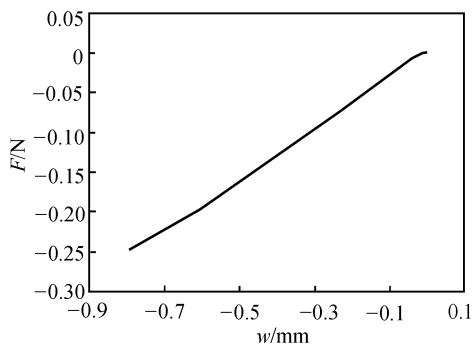


图 6 平滑处理后的位移-力曲线图

根据以上曲线和式 (2), 可以算出 $E_e = 2.9313 \times 10^{10}$ Pa。

2.3 双晶片应变与驱动电压关系测定实验

本实验通过测量不同驱动电压下双晶片的应变值, 得到双晶片应变关于驱动电压的函数关系, 以此作为基于等效弹性模量的双晶片微夹钳夹持力近似计算模型求解的基础。

实验中双晶片的应变值通过对双晶片悬臂梁末端挠度的测量而间接获得。用北京理工大学工程力学系自行搭建的光学位移计来测定驱动电压变化时双晶片悬臂梁末端的挠度。

光学位移计的测量原理是将试件的实际变形量 (即试件上各点相对位移) 转化为其在数字图像中参考点的位移, 通过数字图像处理方法对结果进行处理以得到实际的变形数据。其优点在于非接触、无磨损、不引入测量的附加误差、测量精度高和能够测量材料变形的全过程。测量示意图如图 7 所示, 实物图如图 8 所示, 通过 CCD 相机采集试件上一

参考点在试件变形前和变形后的 2 幅图像, 对其进行处理就可得到参考点在不同时刻的位移, 即试件在不同载荷情况下的变形量, 最后将数据乘以物面分辨率就可得到试件的实际变形尺寸。

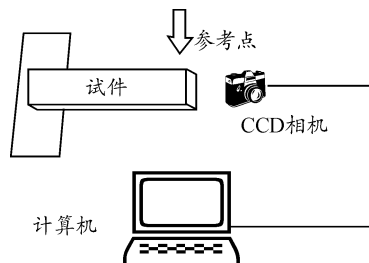


图 7 光学位移计装置示意图

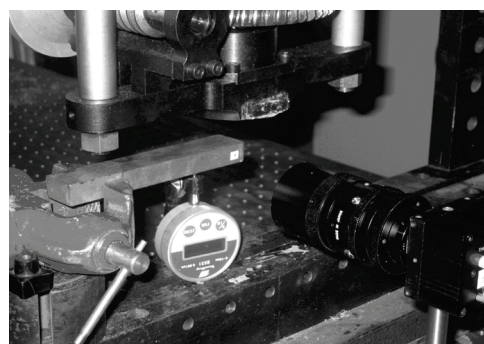


图 8 光学位移计

具体实验步骤为: 在压电双晶片侧面末端用白漆点一小点作为参考点, 如图 9 所示。将贴有应变片的双晶片按照悬臂梁的形式固定住, 调节 CCD 相机的位置, 在计算机上就能得到清晰的图像。用 CCD 相机采集一张带有游标卡尺的图像, 用来标定采集到的图像中的绝对长度, 如图 10 所示。给双晶片接通驱动电压, 驱动电压从零递增至额定电压, 再从额定电压递减到零, 同时用 CCD 相机采集每次改变电压后的图像, 如图 11 所示。最后用 Matlab 软件对采集到的图像进行处理, 得到参考点在不同驱动电压下的位移。



图 9 标记参考点

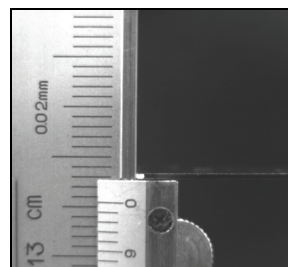


图 10 设置标尺图

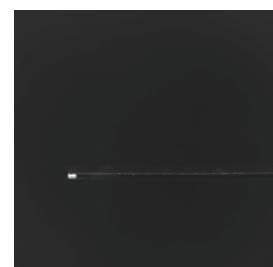


图 11 CCD 相机采集的图像

根据挠度与应变的关系公式 (3), 可间接求得与驱动电压对应的应变值。

$$\varepsilon = \frac{h_c X}{l^2} \quad (3)$$

从实验数据得到双晶片应变与驱动电压的拟合曲线和残差分析如图 12 所示。

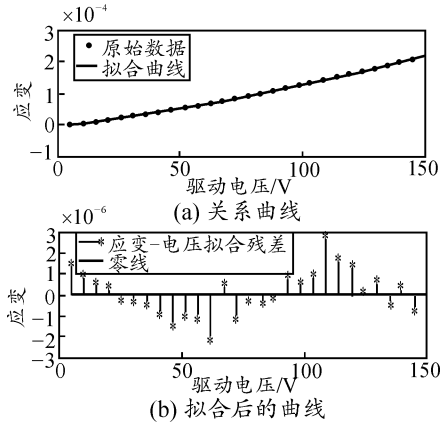


图 12 双晶片应变与驱动电压的关系曲线和拟合后的直线
经过拟合, 得到应变 ε 关于驱动电压 V 的函数如式 (4):

$$\varepsilon(V) = 3.452e - 009V^2 + 9.794e - 007V \quad (4)$$

由拟合结果可以看出, 实际中双晶片的应变与驱动电压并不是线性关系, 这一点是可以由压电双晶片所具有的迟滞效应来解释。通常, 在压电双晶片驱动电压逐渐增大的过程中, 其应变-电压曲线是一条凹曲线, 而当驱动电压逐渐减小时, 应变-电压曲线是一条凸曲线。目前还没有出现能够自动补偿迟滞效应的压电双晶片产品, 而不同压电双晶片之间这种效应带来的影响不尽相同, 因此对于不同的双晶片要获得其真实的输出位移, 以及后续的夹持力计算, 用本实验介绍的方法先做标定, 才能获得较为理想的效果。

结合式 (1), 针对文中实验所选用的压电双晶片, 其夹持力的近似计算模型可表示为

$$F_3 = 2l_z E_c (3.452e - 9V^2 + 9.794e - 7V - \varepsilon_3) / [h_c (l - l_0)] \quad (5)$$

2.4 夹持力控制实验

选用某引信安保机构中的驱动轮轴作为实验对象, 如图 13 所示。用双晶片微夹钳对其进行夹持, 如图 14 所示。双晶片驱动电压从 0~140 V 逐级变化(级差为 10 V), 采集每个驱动电压级所对应的应变仪读数。根据实验数据可直接得到应变随驱动电压的关系曲线, 如图 15 所示。从图 15 中可以看出: 在初期, 应变随着电压的升高而增大, 表明微夹钳

还未接触到零件; 在后期, 应变不再随着电压的升高而变化, 说明此时微夹钳已经接触零件并正在输出夹持力。

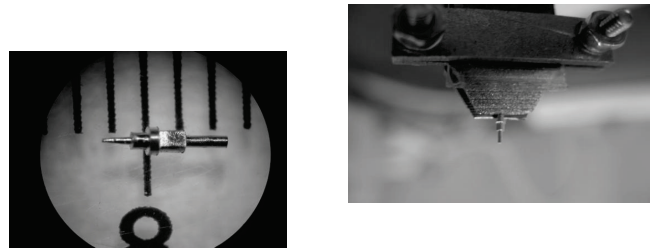


图 13 某引信安保机构中的驱动轮轴
图 14 驱动轮轴被夹持起来的

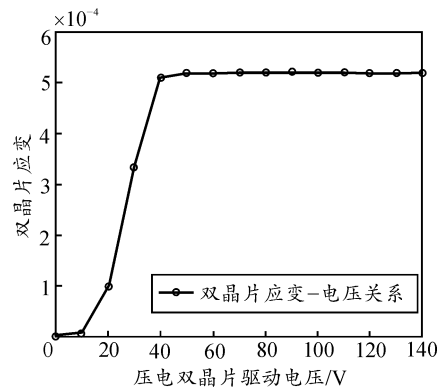


图 15 夹持过程中双晶片应变与驱动电压的关系

根据实验数据, 用基于等效弹性模量的近似计算模型式 (5) 可求得当驱动电压为 140 V 时, 夹持力为 0.683 5 N。

3 结论

针对压电陶瓷双晶片微夹爪, 笔者提出了基于等效弹性模量的夹持力近似计算模型, 在此基础上提出简化计算方法。在实际应用中, 通过先行实验测定所选压电双晶片的等效弹性模量等少量参数来计算夹持力。实验结果证明, 该方法有良好的夹持力检测精度。

参考文献:

- [1] 蔡建华, 黄心汉, 吕昶东, 等. 一种集成微力检测的压电式微夹钳[J]. 机器人, 2006, 28(1): 59-64.
- [2] 谢长林, 万生鹏, 胡霖, 等. 光纤传感解调中压电陶瓷驱动方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 119.
- [3] 张之敬, 叶鑫, 孙媛, 等. 大范围多尺度集成微力检测与无线反馈的双晶片微夹持器: 中国, ZL200810117811.4[P]. 2008-08-04.
- [4] 关世伟. 三层壳体计算的刚度等效方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006(5): 590-593.
- [5] 董永朋, 王佩艳, 刘洋, 等. 基于三维等效弹性模量的复合材料中厚层合板稳定性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2011(5): 725-728.