

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.011

# 铸铁表面接触的粘弹性性质试验研究

张文革<sup>1,2</sup>, 王世军<sup>2</sup>, 于雷<sup>2</sup>, 孙夏思<sup>2</sup>, 赵金娟<sup>3</sup>, 李鹏阳<sup>2</sup>

(1. 西安职业技术学院 电子信息工程系, 陕西 西安 710077; 2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 通过试验研究了铸铁表面法向接触的动力学性质,发现接触层的变形响应幅值一直存在蠕变和恢复特性,接触层的变形响应相对于激振力的滞后角也有类似特性,接触层的刚度和阻尼与接触历史有关。通过考察接触层在阶跃激励下的变形响应规律,发现阶跃响应曲线可以分为瞬时的弹性变形和持续时间较长的粘性变形两部分,粘性变形随时间的变化关系符合衰减指数规律。此外,还发现阶跃响应中粘性变形约占总变形的30%,在激振力幅值为22.7 kPa~295 kPa,预紧力为0.45 MPa~1.68 MPa之间时,该比值基本保持恒定。通过考察接触层在简谐激励下的变形响应,发现接触层的变形幅值在法向载荷作用下存在逐渐减小的趋势,即接触刚度在法向载荷作用下不断提高,在载荷减小或者卸载后,经过一段时间后再次加载,发现接触振动的幅值有一定程度的恢复,即接触刚度有降低的趋势。通过分析简谐激振力信号和变形响应信号的相位还发现,接触层阻尼会随着载荷作用时间增大的趋势,载荷减小或者卸载后,经过一段时间后再次加载,发现接触阻尼会减小,接触层的振动幅值和滞后的相位都表现出明显的粘弹性性质。

**关键词:** 铸铁; 接触; 法向; 粘弹性; 试验

**中图分类号:** O344.1, O343.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1006-4710(2017)03-0316-05

## Experimental study of viscoelasticity characteristics of contact between surfaces of cast iron

ZHANG Wenge<sup>1,2</sup>, WANG Shijun<sup>2</sup>, YU Lei<sup>2</sup>, SUN Xiasi<sup>2</sup>, ZHAO Jinjuan<sup>3</sup>, LI Pengyang<sup>2</sup>

(1. Electronics and Information Engineering Department, Xi'an Vocational and Technological College, Xi'an 710077, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** By means of experiments, dynamic characteristics of normal contact between surfaces of cast iron are studied, and then the amplitude of deformation responses of contact layer is found to have the creep and recovery characteristics all the time, and phase lag of deformation response to exciting force is found to have similar characteristics, too. Therefore, stiffness and damping of contact layer are believed to be related to contact history. The step excitation responses of contact layer are investigated, these are found that the response curves may be divided into two parts of instantaneous elastic deformation and relationship between viscous deformation and time conforms to decline exponential. Furthermore, viscous deformation is about 30% of total contact deformation, and when the amplitude of exciting force is between 22.7 kPa and 295 kPa, pre-pressure of contact layer is between 0.45 MPa and 1.68 MPa, the ratio remains nearly unchanged. The deformation responses of harmonic excitation of contact layer are investigated, results show that the amplitudes of deformation response have a decreasing trend under normal load, in other word, contact stiffness continuously will increase gradually under normal load. Reloading after unloading or reducing load and holding for some time, amplitude of contact vibration is observed to

**收稿日期:** 2017-01-04

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51675422);陕西省科技厅科技统筹创新工程重点实验室资助项目(2014SZS10-P05)

**作者简介:** 张文革,男,副教授,研究方向为机械结构优化设计。E-mail: zwg5832@qq.com

**通讯作者:** 王世军,男,副教授,主要研究方向为结合部性质及整机性能分析方法。E-mail: wsjxaut@qq.com

have a certain degree of recovery, namely contact stiffness has a decreasing trend. The results of the phase analysis between force signal and deformation response signal show that the damping of contact layer has the tendency of increase with time under load. Reloading after unloading or reducing load and holding for some time, damping of contact vibration is observed to decrease. The both of vibration amplitude and phase of contact layer show noticeable viscous-elastic characteristics in the experiments.

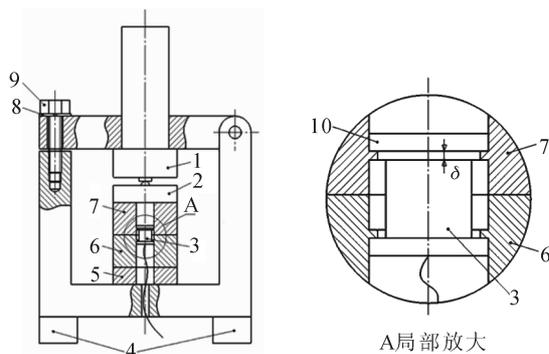
**Key words:** cast iron; contact; normal; viscoelasticity; experiment

机械系统是由各种零件组合起来的,零件之间相互接触的表面薄层区域称为接触层。这些在微观上是粗糙的接触面使得机械系统的性质不但与零件本身有关,还与零件之间的接触性质有关。在机床的结构设计和制造过程中,机床精度的稳定性、可靠性,都与接触层有密切关系。机械接触层的性质和建模方法的研究,是目前机床整机数字化设计中性能分析和预测的关键问题。

已有的试验研究表明,接触层的法向变形相对于激振力存在滞后性<sup>[1-2]</sup>,即接触变形具有粘弹性。文献[3-11]从不同角度研究了法向变形的粘弹性性质及其建模方法。到目前为止,接触的粘弹性性质研究尚不充分,尤其是试验研究的成果很少,接触粘性的试验和理论研究还没有统一的认识,接触理论的研究还只限于弹性和塑性。本文通过平面铸铁接触试样研究接触层在法向阶跃激励和简谐激励下的变形响应,考察结合部的粘弹性性质,为建立准确、合理的结合部分析模型奠定基础。

### 1 试验原理和实验装置

图1是试验装置的结构示意图。两个试样的环形接触面是研究的对象。环形接触面的内径是25 mm,外径是45 mm。试样材料均为HT250,接触表面为磨削,粗糙度Ra1.1。涡流传感器输出的位移 $\Delta\delta$ 包含了接触层和基体材料两部分的变化。基体部分的变形 $\Delta\delta_E$ 可以通过材料线性的应力应变关系求出。



1. 激振器; 2. 力传感器; 3. 涡流传感器; 4. 橡胶垫; 5. 垫块;  
6. 下试样; 7. 上试样; 8. 垫片; 9. 螺钉; 10. 涡流板

图1 试验装置示意图

Fig. 1 Principle scheme of test device

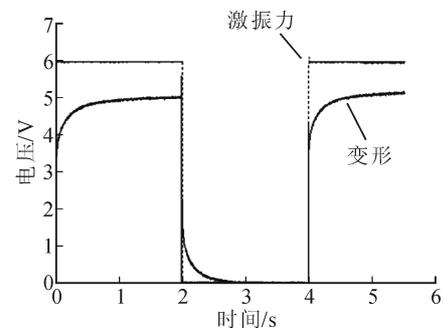
$$\Delta\delta_E = \sigma l / E \quad (1)$$

式中 $\sigma$ 为接触面上的法向应力, $l$ 是两个凸台之间的距离, $E$ 是试样的材料弹性模量。

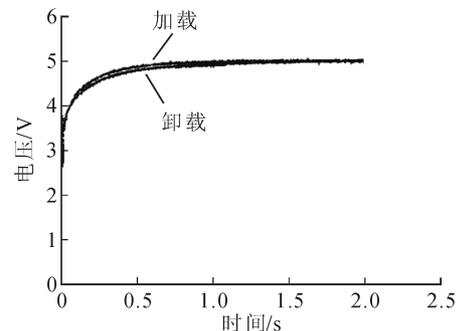
从法向变形的测量结果 $\Delta\delta$ 中减去两个试样凸台之间基体部分的法向变形就得到接触面的法向变形。事实上,前期的试验结果表明,基体部分的变形不足总变形的5%,可以认为涡流传感器输出的位移信号就是接触层的变形信号。

### 2 接触的粘弹性效应

图2(a)是信号记录仪记录的矩形激振力和接触层的变形响应信号,激振力信号的电压与接触层压应力的转换关系为454.7 Pa/mV,变形响应信号的电压与位移转换关系为240 nm/mV。图中变形响应信号相对激振力存在滞后,说明接触振动存在能量损耗。



(a) 压力和变形信号



(b) 变形信号的对比

图2 接触变形的阶跃响应

Fig. 2 Step response of contact deformation

图2(b)是将图2(a)中下降的变形信号翻转后与上升阶段的变形信号进行的对比。可以看出上升

阶段的变形响应曲线与下降的变形曲线在形状上十分接近,数值上略低于上升段曲线,可以近似认为上升阶段的曲线形状与下降阶段相同。如图 3 所示,在不同幅值的激振力作用下,变形响应曲线的上升段和下降段都有基本相同的形状。图 4 曲线形状与图 3 相似,说明法向预紧力不同时,变形响应曲线的形状与图 3 有同样的规律。

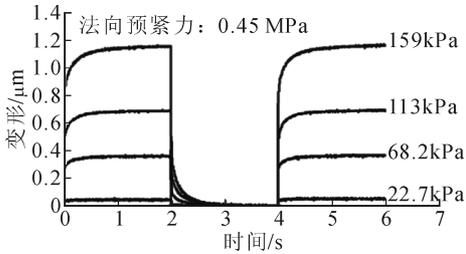


图 3 不同激振力幅值的变形响应  
Fig. 3 Deformation response to different amplitudes of exciting pressure

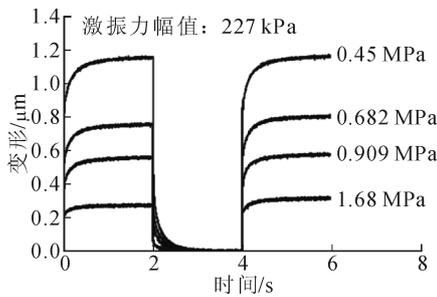


图 4 不同预紧力下的变形响应  
Fig. 4 Deformation response to different pretightening pressures

从图 2 还可以发现,阶跃响应曲线在幅值上可以分为两部分:瞬时变形部分和渐变部分,瞬时变形部分持续的时间很短,与渐变部分的持续时间相比可以忽略,与文献[3-5]表达的粘弹性关系并不相同。笔者认为,瞬时变形部分与接触层的弹性相联系,渐变部分与接触层的粘性相联系,接触层具有粘弹性性质,接触层在振动时的能量损耗是粘性阻尼造成的。

图 5 是变形响应中粘性段的试验曲线与拟合曲线的对比。试验数据是取自图 2 中变形响应曲线的衰减部分,拟合曲线采用衰减指数函数:

$$v = v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

其中粘性段的最大变形  $v_0 = 1.5 \text{ V}$ ,通过最小二乘法拟合变形响应试验数据后可得  $\tau = 198.2 \text{ s}$ 。由图可见,粘性段的响应基本符合衰减指数规律。

图 6 显示了不同预紧力和激振力时变形响应中瞬时的弹性变形相对于总变形所占的比重。可以看

到,在激振力幅值从 22.7 kPa 到 295 kPa,预紧力从 0.45 MPa 到 1.68 MPa 时,粘性变形所占比重基本不变,约为总变形的 30%,持续的时间超过 1 s,表明在亚微米精度的机床设计和性能分析中,接触层的粘性变形对机床精度的稳定性和保持性有重要影响。

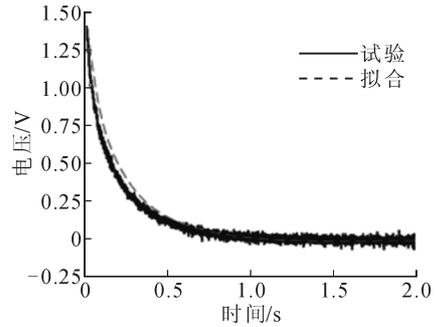


图 5 变形响应曲线的拟合  
Fig. 5 Fit of deformation response curve

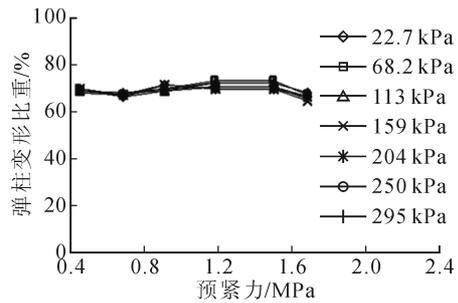


图 6 弹性变形的比重  
Fig. 6 Proportion of elastic deformation

图 7 是试验获得的激振力和接触层变形信号,激振频率是 50 Hz,电压与压应力和位移的转换关系与前述相同。相位分析表明,图中变形信号仅滞后激振力  $3.9^\circ$ ,不是  $90^\circ$ ,力传感器和位移传感器自身的滞后均在 0.5% 以内,说明文献[3-5]并不能够正确反映稳态接触振动中位移与力之间的相位关系。

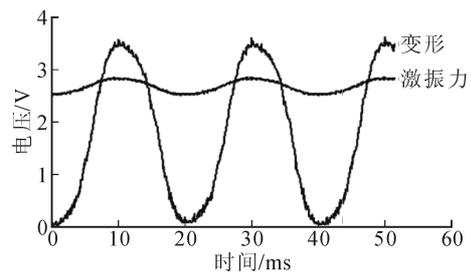


图 7 50 Hz 简谐激振时的力与变形信号  
Fig. 7 Pressure and deformation signal and 50 Hz harmonic exciting

图 8 是用 100 个周期的变形信号和力信号合成的滞回曲线,滞回曲线形成的封闭面积反映了接触

振动过程中的能量损耗,它与变形滞后的相位角有关,滞回角度越大,滞回面积越大。文献[9]的试验结果中,加载刚度与卸载刚度形成的滞回只是在最初的10次加载-卸载循环中比较明显,随着加载-卸载循环次数的增多,滞回逐渐减小。在10次以后的加载-卸载循环中,能量损耗很小,基本可以视为弹性接触,并且认为加载刚度与卸载刚度形成的滞回是接触塑性造成的。笔者的试验结果表明,图2的变形响应中曲线的渐变部分以及图7和图8中的相位滞后一直存在,表明振动的能量损耗一直存在,这与文献[9]的研究结果不同。文献[9]的研究中,法向载荷较大,为5~400 MPa,远高于本文不足2 MPa的预紧力,并且载荷是分步施加,没有考虑粘性导致的变形滞后带来的影响,本文研究结果与文献[9]的差异应该与这两个原因有关。

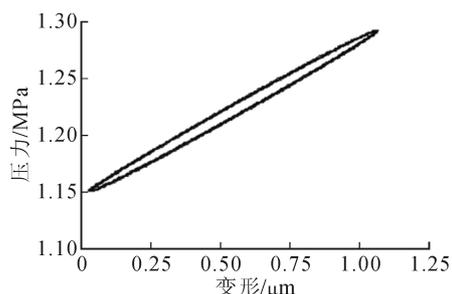


图8 力与变形信号的滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis loop of pressure and deformation signal

### 3 粘弹性的长期性

图9给出了不同时刻测得的接触层变形幅值,横轴的序号表示各次测量的顺序,纵轴的电压与接触层压应力之间的转换系数仍为454.7 Pa/mV。图10是与图9对应的各次测量结果中变形信号滞后力信号的相位角。

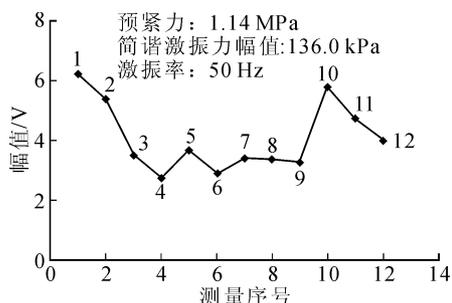


图9 接触层的振动幅值

Fig. 9 Vibration amplitude of contact layer

图9中第1点和第2点的幅值是连续激振时的测量结果,两次测量间隔为5 min,幅值有明显下降,在预紧力和激振力不变的条件下,接触刚度有明

显提高,对应图10中的相位也有所提高,接触阻尼在逐渐增大。

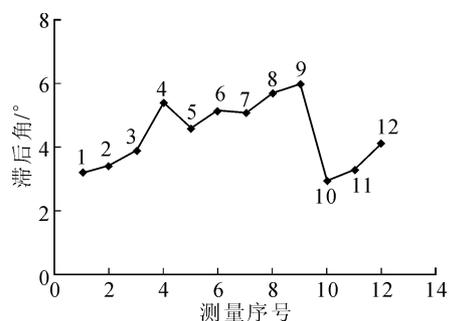


图10 接触变形滞后的角度

Fig. 10 Lag angle of contact deformation

第3点是停止激振但是保持预紧力,经过4 h后再次激励的结果。由图9可以看到响应的幅值进一步降低,图10中的相位进一步增大,表明接触刚度继续提高,接触阻尼继续增大。

第4点是连续激振5 min后的测量结果,幅值继续降低,相位继续增大。

第5点是停止激振,保持预紧力,10 min后再次激励的结果,由图9和图10可以发现幅值增大,相位减小。这个现象表明,接触振动的幅值除了具有蠕变特性以外,还存在恢复特性。

第6点是连续激振10 min后再次测量的结果。这一次变形幅值降低,相位角增大。

第7点是卸载10 h后再次激励的测量结果。这一次是幅值有所恢复,相位减小,再次表明接触振动的幅值有恢复特性。

第8点和第9点都是保持预紧,但是不激振,间隔10 min后测量的结果,由图9和图10可以看到,变形响应的幅值在连续降低,相位角连续增大。

第10点是卸载3个月之后的测量结果。这个时候的变形响应幅值恢复到接近第一点的水平,相位也降低到第1点的水平。

第11点和第12点是连续激振,间隔5 min测量的结果,幅值连续降低,相位连续增大。

由上述试验结果可以发现,法向载荷作用下,法向接触振动的幅值一直存在下降的趋势,变形响应滞后于激振力的角度也随之增大。载荷降低或者卸载后,接触振动的幅值又存在逐渐恢复的趋势,变形响应滞后的角度也随之减小。同时,在载荷降低或者卸载后,接触振动的幅值存在逐渐恢复的趋势,变形响应滞后的角度又随之减小。接触振动的幅值表现出典型粘弹性材料特有的蠕变和恢复特性,并且可以持续很长时间。在本文的试验中,接触层粘弹性的长期性使得接触振动的幅值和变形滞后角变化

超过50%。此外,在激振力幅值从22.7 kPa到295 kPa,预紧力从0.45 MPa到1.68 MPa,激振频率从0.25 Hz到128 Hz的范围内的试验研究中,振动幅值和滞后角度也有类似的变化规律。

#### 4 结 论

蠕变和恢复特性是粘弹性材料的两个基本性质<sup>[12]</sup>。铸铁材料在常温和结构应力远低于屈服极限的条件下,粘弹性性质并不显著。本文的研究表明,通常作为脆性材料的铸铁接触层表现出显著的粘弹性性质,与基体材料的性质有较大区别。在阶跃激振力作用下,接触层的变形响应在加载和卸载过程中都明显具有两个不同的部分:弹性变形和粘性变形,粘性变形是稳态接触振动中产生能量损耗的主要原因。此外,接触层在长时间的载荷作用下,接触振动的幅值逐步减小,接触刚度和阻尼逐步提高。反之,当接触层的载荷降低后经过一段时间再次加载,接触振动的幅值会显著提高,接触刚度和接触阻尼会降低。

接触层具有的长期性的粘弹性性质使得接触层的法向刚度和阻尼长时间处在变化过程中,并且使得接触层的刚度和阻尼与其接触历史有关,给法向接触刚度和阻尼的研究和预测带来困难。

#### 参考文献:

- [1] 廖伯瑜,周新民,尹志宏. 现代机械动力学及其工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2004:235-255.
- [2] 张学良,徐格宁,温淑花. 机械结合面静态特性研究回顾及展望 [J]. 太原重型机械学院学报,2002(9):276-279.  
ZHANG Xueliang, XU Gening, WEN Shuhua. Review and prospect of the research on the static and dynamic characteristics of machine joint surfaces [J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2002, (9): 276-279.
- [3] FU W P, HUANG Y M, ZHANG X L, et al. Experimental investigation of dynamic normal characteristics of machined joint surfaces [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2000, 122: 393-398.
- [4] 张广鹏,史文浩,黄玉美. 机床导轨结合部的动态特性解析方法及其应用 [J]. 机械工程学报,2002,38(10):114-117.
- ZHANG Guangpeng, SHI Wenhao, HUANG Yumei. Analysis method of dynamic behaviors of guideway joint and its application in machine tools design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38 (10): 114-117.
- [5] 赵宏林,丁庆新,曾鸣,等. 机床结合部特性的理论解析及应用 [J]. 机械工程学报,2008,44(12):208-214.  
ZHAO Honglin, DING Qingxin, ZENG Ming, et al. Theoretic analysis on and application of behaviors of machine tool joints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 208-214.
- [6] OSAMA M A, PETER E. Linear viscoelastic creep model for the contact of nominal flat surfaces based on fractal geometry: standard linear solid (SLS) material [J]. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 2007, 129: 461-466.
- [7] TAHER A A, OSAMA M A, MAHMOUD B. A linear viscoelastic relaxation-contact model of a flat fractal surface: a maxwell-type medium [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(5/6): 423-430.
- [8] CHENG W, FARHANG K. A contact model of nominally flat rough surfaces based on a visco-elasto-adhesive Interaction [J]. Journal of Tribology, Transactions of the ASME, 2009, 131, 044504.
- [9] GONZALEZ-VALADEZ M, BALTAZAR A, DWYER-JOYCE R S. Study of interfacial stiffness ratio of a rough surface in contact using a spring model [J]. Wear, 2010, 268(3/4): 373-379.
- [10] 王世军,于雷,孙夏思,等. 铸铁表面接触法向阻尼特性试验 [J]. 农业机械学报,2013,44(12):321-325.  
WANG Shijun, YU Lei, SUN Xiasi, et al. Damping characteristics of cast iron surface in contact normal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 321-325.
- [11] MYKLESTAD N O. The concept of complex damping [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1952, 19 (3): 284-286.
- [12] 蔡峨. 粘弹性力学基础 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1989:1-6.

(责任编辑 王卫勋)