

圆柱轴类零件径向与轴向热变形异常现象研究

罗 哉 陆 艺 郭 斌 范伟军

中国计量学院,杭州,310018

摘要:通过实验发现了直径和长度相同的轴在径向和轴向具有不同的热变形量,传统的热力学理论不能解释这一现象。利用固体物理学晶格振动理论,推导了晶体体积膨胀系数与线膨胀系数之间的关系;将金属材料近似为晶体材料,利用线膨胀系数与体积膨胀系数的关系并结合对材料线膨胀系数研究的成果,建立了轴类零件径向热变形模型,理论分析证实了轴类零件径向热膨胀系数与轴向热膨胀系数不同。实验结果表明:轴类零件径向热变形模型计算结果较传统热力学计算结果更接近实验结果,且径向和轴向具有不同的热膨胀系数,在高精度领域,轴类零件的径向热变形不能使用轴向热膨胀系数进行计算。

关键词:线膨胀系数;体积膨胀系数;轴类零件径向热变形;异常现象

中图分类号:TH161.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.019

Study on Abnormal Phenomena of Radial and Axial Thermal Deformation of Cylindrical Parts

Luo Zai Lu Yi Guo Bin Fan Weijun

China Jiliang University, Hangzhou, 310018

Abstract: A phenomenon was found by experimental results that the same size of cylindrical parts had different radial and axial thermal deformations under the same conditions. And the traditional thermodynamic theory could not explain this phenomenon. The relationship between volume expansion coefficient and linear expansion coefficient of crystal was built up by using the Lattice vibration theory of solid-state physics. Based on this relationship, a radial thermal deformation of cylindrical model was set up. The model was different with the traditional model. The experimental results show that the value which calculated by the model is closer to the experimental results than that by the traditional model, and cylindrical parts have different radial and axial thermal expansion coefficient. Traditional model of axial thermal deformation can not be used in micro-field when calculating the radial thermal deformation of cylindrical parts.

Key words: linear expansion coefficient; volume expansion coefficient; radial thermal deformation of cylindrical part; abnormal phenomena

0 引言

随着现代高科技的发展,机械行业对零件精度的要求越来越高,温度对机械精度的影响也表现得越来越明显。在精密加工中,热变形引起的误差已占加工总误差的40%~70%^[1],特别是机械精度进入纳米级精度时代,热变形误差影响更大,其中,由温度变化引起配合精度的变化又在机械热变形误差中占很大的比重,已成为机械学科前沿领域的研究热点之一^[2]。

目前,零件热变形研究的主要理论基础是热力学,而热力学是建立在五个基本假设的基础上的,据此理论,零件某尺寸的热变形仅与其所处温度场、零件材料和零件尺寸大小有关,热变形量计算公式相同^[3],即传统理论中,材料相同、尺寸相同的轴长度和直径在相同温度变化下的热变形量是一样的。但罗哉等^[4]在研究过程中发现了一些

热力学理论不能够解释的现象,如:相同条件下,长度与直径相等的圆柱轴在径向的变形量与在轴向的变形量不一样。

1 轴类零件径向热变形模型

由固体物理学晶格振动理论知,当晶体的体积改变时,晶格的格波频率也会改变。

晶格的状态方程如下^[5]:

$$p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right), \quad (1)$$

式中, p 为压力; F 为晶体的自由能函数 $F(t, V)$; V 为晶体的体积。

格律乃森从热力学出发将式(1)简化为^[6]

$$p = -\frac{dU}{dV} + \gamma \frac{\bar{E}}{V} \quad (2)$$

式中, U 为原子处于晶格格点时的位能; \bar{E} 为原子偏离晶格格点时的平均振动能; γ 为格律乃森常数。

当外力 $p=0$ 时

$$\frac{dU}{dV} = \gamma \frac{\bar{E}}{V} \quad (3)$$

收稿日期:2011-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005220)

由于一般热膨胀 $\Delta V/V$ 很小,可把式(3)左边的 $\frac{dU}{dV}$ 在 V_0 处展开,且只保留到 ΔV 的一次项,得

$$\frac{dU}{dV} = \left(\frac{d^2U}{dV^2}\right)_{V_0} \Delta V \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\gamma \bar{E}}{B_0 V} \quad (5)$$

$$B_0 = V_0 \left(\frac{d^2U}{dV^2}\right)_{V_0}$$

式中, V_0 为 $T = 0K$ 时平衡状态晶格的体积; B_0 为静止晶格的体积模量。

式(5)等式两侧对温度求微分,且考虑到定容比热:

$$C_V = \frac{\bar{E}}{V \Delta T}$$

则

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\gamma C_V}{B_0 V} \quad (6)$$

而

$$\alpha = \frac{1}{3} \frac{\gamma C_V}{B_0 V} \quad (7)$$

所以

$$\beta = 3\alpha \quad (8)$$

式中, α 为晶体材料线膨胀系数; β 为晶体材料体积膨胀系数。

将金属材料近似为晶体材料,利用式(8)线膨胀系数和体积膨胀系数的关系式,可将零件的热变形与零件几何尺寸联系起来。

对于直径为 d_0 、长度为 h_0 的圆柱轴类零件,当温度相对标准温度变化 ΔT 后,其直径变为 d_1 ,长度变为 h_1 ,利用晶体材料线膨胀系数和体积膨胀系数的关系可知:

$$d_1 = \sqrt{\frac{3h_1 - 2h_0}{h_1}} d_0 \quad (9)$$

由于现行的材料热膨胀系数是测量径长比在 1 : 5 左右的圆柱在轴向的变形量获得的,具有相当高的精度,因此轴类零件轴向的变形完全可以采用计算材料热膨胀系数的公式:

$$h_1 = h_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (10)$$

因此,式(9)化简为

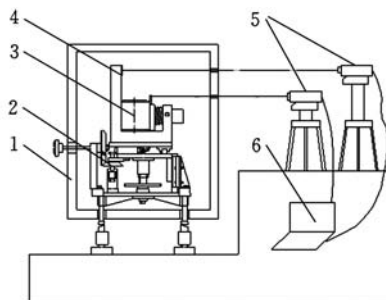
$$d_1 = \sqrt{\frac{1 + 3\alpha \Delta T}{1 + \alpha \Delta T}} d_0 \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知,轴类零件径向的膨胀系数与轴向膨胀系数不一样,不能采用轴向的热膨胀系数进行计算。

2 实验分析

实验选用直径 200mm、长度 50mm 和直径 50mm、长度 200mm 的圆柱轴各一个,圆柱零件

材料为铝合金,其线膨胀系数为 $\alpha = 23.6 \times 10^{-6} K^{-1}$,零件表面进行了人工时效处理和一年左右的自然时效处理,避免了加工残余应力对实验的影响。为获得较好的测试效果,实验在高温恒温箱中进行,最高温度可达 300℃,控温精度为 $\pm 1^\circ C$,温度梯度为 $\pm 1^\circ C$ 。实验选取的温度范围为 120~200℃,每隔 5℃ 进行一次测量,被测工件放入高温恒温箱恒温 4h 后进行测量。被测轴放入专用夹具内,热变形测量采用两个测量精度为 $\pm 0.1\mu m$ 的单频激光干涉仪进行,干涉仪的光线直接照射到夹具的两个基准面上,通过检查两台激光干涉仪距离来检测轴零件的直径,每组测量 5 次,测量结果为 5 次测量的平均值。实验装置如图 1 所示。



1. 恒温箱 2. 调整机构 3. 被测轴零件 4. 专用夹具
5. 激光干涉仪 6. 电脑

图 1 实验装置示意图

对直径为 50mm、长度为 200.0024mm 的轴零件的长度热变形量进行测量,实验结果如表 1 所示。

表 1 直径 50mm、长度 200.0024mm 轴零件的长度热变形量

温度(K)	变形量(mm)	
	传统计算	实验值
393	0.4720	0.4723
398	0.4956	0.4958
403	0.5192	0.5196
408	0.5428	0.5434
413	0.5664	0.5669
418	0.5900	0.5908
423	0.6136	0.6143
428	0.6372	0.6379
433	0.6608	0.6612
438	0.6844	0.6850
443	0.7080	0.7090
448	0.7316	0.7323
453	0.7552	0.7563
458	0.7788	0.7795
463	0.8024	0.8026
468	0.8260	0.8271
473	0.8496	0.8507

表 1 的数据表明,对长度方向的计算采用传统计算公式,计算值和实验值具有较高的重合度,说明轴零件长度方向的计算公式可采用传统热力

学理论的计算公式,该公式具有较高精度。

对直径为 200.0013mm、长度为 50mm 的轴零件直径热变形进行测量,实验结果如表 2 所示。

表 2 直径 200.0013mm、长度 50mm 轴零件的直径热变形量

温度(K)	变形量(mm)		
	传统计算	模型计算	实验值
393	0.4720	0.4703	0.4707
398	0.4956	0.4938	0.4944
403	0.5192	0.5172	0.5171
408	0.5428	0.5406	0.5400
413	0.5664	0.5645	0.5649
418	0.5900	0.5874	0.5872
423	0.6136	0.6108	0.6113
428	0.6372	0.6342	0.6347
433	0.6608	0.6575	0.6577
438	0.6844	0.6809	0.6804
443	0.7080	0.7040	0.7038
448	0.7316	0.7276	0.7269
453	0.7552	0.7509	0.7514
458	0.7788	0.7743	0.7751
463	0.8024	0.7976	0.7970
468	0.8260	0.8209	0.8215
473	0.8496	0.8442	0.8449

表 2 中,实验数据很明显与模型计算值更加接近,比传统计算值小。

3 结语

理论分析和实验验证都表明,轴零件在径向和轴向的热变形具有不同的规律,在相同环境下,尺寸相同的轴直径和轴长度的热变形量不一样。在长度方向,可采用传统热力学热膨胀的计算公式,该公式在一定温度范围内具有较高精度,但在直径方向,如果采用传统热力学热膨胀计算公式,将会产生一定的误差,虽然,在低精度要求时,这样的误差不会产生较大的影响,但在高精度领域,特别是纳米精度领域内,由该计算带来的误差会产生较大影响,因此,在高精度要求下,对轴零件的热变形计算不宜采用传统计算公式。本文中的公式推导,也进行了一系列的近似处理,如将金属材料近似为晶体材料,将晶格振动理论中的一些复杂公式进行了近似处理,因此,本文获得的轴零件径向热变形模型也是一个近似结果。如要从根本上解决该问题,还需从零件材料更微观的方面入手进行研究。

参考文献:

- [1] Push A V. Predication of Thermal Displacement in Spindle Units[J]. Soviet Engineering Research, 1985, 5:57-61.
- [2] Tianchan N, Dai Weizhong. A Hyperbolic Two-step Model Based Finite Difference Scheme for

Studying Thermal Deformation in a Double-layered Thin Film Exposed to Ultrashort Pulsed Lasers [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(1):34-49.

- [3] Lin Chiachin, Chang Yuchoung, Liang Kunyi, et al. Temperature and Thermal Deformation Analysis on Scrolls of Scroll Compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(11/12): 1724-1728.
- [4] 罗哉,费业泰. 形状因素对精密技术中零件热变形的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 235-238.
- [5] 杜洛金. 固体热物理性质导论—理论与测量[M]. 奚同庚,王梅华,译. 北京:中国计量出版社,1987.
- [6] 方俊心,陆栋. 固体物理学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.

(编辑 王艳丽)

作者简介:罗 哉,男,1979 年生。中国计量学院计量测试工程学院副教授。研究方向为精密测试理论与技术。发表论文 20 余篇。陆 艺,男,1979 年生。中国计量学院计量测试工程学院副教授。郭 斌,男,1976 年生。中国计量学院计量测试工程学院副教授。苑伟军,男,1973 年生。中国计量学院计量测试工程学院副教授。

第十届全国气体润滑与干气密封学术交流会

会议将于 2012 年 10 月 12 日至 14 日在洛阳轴研科技股份有限公司召开。会议将重点交流与研讨我国在气体润滑和干气密封的理论与应用方面所取得的最新成果、面临的机遇和挑战以及未来的发展方向,为气体润滑的研究应用提供成果、信息和产品的交流平台。

会议征文内容:气体润滑发展现状与前瞻;静压气体润滑;动压气体润滑;动静压气体润滑;压膜气体润滑;超薄膜气体润滑;极端工况气体润滑;干气密封;气磁混合润滑;磁悬浮技术;箔片和特种气体轴承;气体润滑与干气密封的材料;气体轴承稳定性研究,包括超高速气体润滑稳定性和气锤自激稳定性研究;高压重载气体润滑;气液两相润滑;气体润滑测试技术与气体润滑状态监测;超精密和超高速气体润滑机械设计;其他气体润滑领域。

联系地址:河南省洛阳市涧西区吉林路 1 号
洛阳轴研科技股份有限公司

邮 编:471039 联系人:马文琦、宋晓波

手 机:13998563427 13623790339

电 话:0411-84728606

E-mail: rhyumf2012@126.com(会议论文投寄)

(摩擦学分会)