

文章编号 1004-924X(2015)02-0504-07

基于热力转换机理仿真圆柱体零件形体 边界约束的热变形

苗恩铭^{1*}, 徐祗尚¹, 周小帅¹, 雷德荣², 倪 洋¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥, 230009;

2. 中国石油新疆油田分公司, 工程技术研究院, 新疆 克拉玛依, 834000)

摘要:提出了热变形精确分析理论与一种仿真方法以保证热误差影响下机械零件的最佳配合。从微观分子力学理论出发,在充分考虑材料属性、温度以及形体边界约束对热变形影响的基础上,提出了热力转换热变形分析理论,将零件热变形问题等效为力变形问题。针对一组铝制空心圆柱体零件进行了热变形测量实验,给出了基于 ANSYS Workbench 仿真环境的热力转换热变形仿真方法,并对比分析了实验结果与仿真结果。结果显示:铝制空心圆柱体零件受高温变形时,不同内外径尺寸的空心圆柱体其热膨胀系数是不相同的;外圆径向热膨胀系数大约是内圆径向热膨胀系数的 2 倍;基于热力转换理论的仿真结果与实验结果吻合较好,吻合度达到 98% 以上,验证了热力转换热变形分析理论的合理性和有效性。提出的方法弥补了 ANSYS Workbench 传统热分析完全忽略形体边界约束影响零件热变形的缺陷,为后期热鲁棒性结构设计提供了重要参考。

关键词:空心圆柱体;热变形;热力转换;形体边界约束;仿真分析

中图分类号:TH161.24 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0504

Simulation of thermal deformation of cylindrical mechanical parts bounded by boundary constraint based on conversion mechanism of thermal into mechanics

MIAO En-ming^{1*}, XU Zhi-shang¹, ZHOU Xiao-shuai¹, LEI De-rong², NI Yang¹

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Engineering and Technology, China Xinjiang Oilfield Company, Kelamayi 834000, China)

* Corresponding author, E-mail: miaoem@163.com.

Abstract: An accurate analysis theory of thermal deformation and a simulation method were proposed to ensure the optimum performance of mechanical parts affected by thermal errors. From the view of microscopic molecular mechanics theory, an analysis theory of conversion of thermal into mechanics for thermal deformation was put forward, by which the thermal deformation of a part was equivalent to the force deformation by taking the effect of material properties, temperatures and the boundary

收稿日期:2014-04-04;修订日期:2014-05-28.

基金项目:国家自然科学基金重大项目(No. 51490660/51490661);国家自然科学基金资助项目(No. 51175142);中国石油新疆油田分公司资助项目(No. W2014JSKF0077)

constraints of shape on thermal deformation into account fully. Then, measurement experiments of thermal deformation of hollow cylinder parts were carried out, and a simulation method of thermal deformation based on ANSYS Workbench was given. Finally, simulation and experiment results were compared. The results show that thermal expansion coefficients of the outer circle are approximately twice that of the inner circle in the radial direction when an aluminum alloy hollow cylinder part is deformed under a high temperature. Meanwhile, the simulation results based on the proposed theory are consistent with the experimental results very well and the fit is more than 98%, which validates the rationality of our theory. As the method makes up the drawback that traditional thermal analysis of ANSYS Workbench completely ignores the physical boundary constraints affecting part thermal deformation, it provides an important reference for the structure design of thermal robustness subsequently.

Key words: hollow cylinder; thermal deformation; conversion of heat into force; boundary constraint of shape; simulation analysis

1 引言

由于现代精密机械与仪器的精度迅速提高,热误差在精密工程和微纳米测量技术中所占比例达总误差的70%以上,故温度对于机械装备精度的影响已难以忽略。国内外研究人员对机械热变形测量及修正进行了系统研究^[1-3]。Shinji等提出的机床高速主轴热变形测量方法被国际标准ISO230-3作为推荐方法^[4]。Miao等采用多元线性回归模型、分布滞后模型、支持向量回归模型对机床主轴热误差进行建模并补偿,提升了数控机床的精度^[5-6]。

目前,机械零件形体结构参数对热膨胀系数的影响在精密工程应用中极受重视,形体结构对零件热变形的影响已被国内外许多研究证实。YAO等论述了不同形体结构的孔径和轴径产生的不同热变形规律^[7];Yi等用解析法探讨了不锈钢-碳钢材料双层管在-50℃~200℃的径向热变形行为,认为管间隙不仅与材料热膨胀系数有关,还与内外管径之比有关^[8];Jakstas等使用热模态法证实了在精密长度测量系统中温度对测量精度的影响,建议采用低膨胀系数材料、对称式结构、隔离CCD的方式来减小温度的影响^[9];Li等采用有限元方法分析了普通平板、井型带筋平板、环形带筋平板的热应力分布,结果显示环形带筋平板抵抗热变形的能力最强^[10];刘文田等人应用热-结构耦合有限元方法对压磁式板形测量仪中的板形环受热后的温度场分布及热变形进行仿

真,在结构设计时就给出配合尺寸的温度补偿值^[11]。由于目前国内外关于形体结构对热变形的影响分析大多局限于试验,现有有限元仿真软件如ANSYS等也是以忽略零件热变形非相似性特征为仿真假设前提,故难以获得形体结构对热变形约束的精确仿真,极大地限制了精密机械装备在进行零件结构设计之初所依据的热变形预测结果,使得非相似性变形特征极少在实践中获得应用,从而影响了设备的运行精度和动态性能。

本文在明确了材料属性、温度以及形体边界约束参数对热变形的影响基础上,提出了热力转换理论的仿真算法,将零件热变形与同等程度的力变形进行等效变换,以现有有限元仿真软件为平台,通过施加附加约束力,实现了零件热变形的非相似性特征仿真过程。论文基于ANSYS Workbench仿真平台,针对一组内径相同、外径不同的铝制空心圆柱体零件进行了热力转换理论的热变形仿真,同时与实际实验结果进行了比对分析。该方法弥补了ANSYS Workbench热分析时零件热膨胀特性与实际情况不符的缺陷。

2 形体热变形非相似性特性分析

传统的热变形误差计算公式如下:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (1)$$

其中: α 为材料热膨胀系数; L 是原始尺寸; ΔT 是引起形变的温度差。

然而,传统的热变形误差线性计算方法由于没有考虑形体边界条件的影响,有很大近似性,已

经不能适应现代高精度测量的要求。本课题组经过多年的研究发现^[12],机械零件的受热变形量 ΔL 与零件尺寸 L 、组成该零件的材料热膨胀系数 α 、环境温度 T 、形体边界约束参数 Ω 有关,即:

$$\Delta L = f(L, \alpha, T, \Omega), \quad (2)$$

其中:形体边界约束参数 Ω 和形体边界形状、尺寸和材料厚度等特征有关。

热变形后形体不再保持原有形状特征,会呈现出非相似性特征,根据论文作者试验验证,方体零件热变形后,表面不再平整,而是呈鼓状凸起;空心圆柱体零件热变形后,内外径尺寸的变化不成比例,相差很大。此种现象被称为形体热变形非相似性特征。

3 热变形热力转换机理分析

由材料热膨胀机理可知^[12],原子间相互作用势能曲线的不对称性会导致原子间距随温度升高而增大的现象,宏观上则表现为体积的膨胀。依据分子静力学理论,温度升高,原子振动加剧,原子间作用力不再平衡,原子在非平衡作用力下移动至新的受力平衡位置,此时系统总势能最低,达到新的平衡状态,所以宏观物体的热膨胀过程在微观上本质就是原子受力的再平衡过程。通过能量最小化过程,可以由实际试验获得的材料热膨胀系数寻找系统的平衡状态,以获得微观仿真效果,这就是分子力学理论与数值模拟方法。该方法目前可达到纳米级精度^[13-14],但由于计算时间太长,故主要用于纳米尺度的仿真计算,对于宏观物体,无法实际应用;其次,宏观物体中存在大量材质不均和晶格缺陷等问题,微观分子静力学仿真很难模拟真实材料属性。由以上分析知,宏观物体的热膨胀过程在微观上本质是原子受力的再平衡过程,故可以根据变形量等效原理,将热变形问题转化为受力变形问题,这就是本文提出的机械形体热变形热力转换概念。

热力转换热变形仿真机理中等效压强的推导过程如下。设零件体的初始体积为 V ,体热膨胀系数为 β ,温升为 ΔT ,则体积热膨胀变化量为:

$$dV = \beta \cdot V \cdot \Delta T. \quad (3)$$

根据体积模量定义,得到体积模量:

$$K = \frac{dp}{dV/V}. \quad (4)$$

体积模量 K 和弹性模量 E 、泊松比 μ 之间的关系表达式为:

$$E = 3K(1 - 2\mu). \quad (5)$$

综合式(3)、式(4)、式(5),解得热力转换热变形机理的等效压强为:

$$dp = \frac{E \cdot \beta \cdot \Delta T}{3(1 - 2\mu)}. \quad (6)$$

体膨胀系数 β 与线膨胀系数 α 之间有如下关系^[15]:

$$\beta = 3\alpha. \quad (7)$$

把式(7)代入式(6),简化得到等效压强的表达式为:

$$dp = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 - 2\mu)}. \quad (8)$$

在下文的热力转换仿真分析中,由于只分析空心圆柱体的径向热变形,所以可以忽略泊松效应的影响,即令 $\mu = 0$ 。充分考虑形体边界约束参数 Ω 的影响,对于空心圆柱体和方体等简单形体零件,热力转换机理等效压强表达式可以修正为:

$$dp = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot \Omega. \quad (9)$$

依据热力转换机理,在 ANSYS Workbench 仿真环境中加载约束载荷 $P = dp$,即:

$$P = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \cdot \Omega. \quad (10)$$

式中: P 为约束载荷;单位为 Pa; α 为材料热膨胀系数,单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E 为材料弹性模量,单位为 Pa; ΔT 为温差,单位为 $^{\circ}\text{C}$; Ω 为形体边界约束参数。

结合本文研究对象,铝制空心圆柱体零件的弹性模量 E 和热膨胀系数 α 均采用 Workbench 材料库中铝合金材料默认值,分别为: $E = 7.1 \times 10^{10}$ Pa, $\alpha = 2.3 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。 Ω 大小与具体的形体结构有关,可用实验的方法获得。

4 铝制空心圆柱体零件热变形测量实验

以内圆直径为 30 mm、外圆直径为 50 mm 的铝制空心圆柱体(编号为 I,本文出现的所有空心圆柱体模型的轴向高度均为 20 mm)为试验对象,零件实物如图 1 所示。热变形测量方案如图 2 所示,热变形实验使用 ESPEC 公司生产的型号为 ZL-04AGT 的恒温箱,其温度可控制在 $-40 \sim +150 ^{\circ}\text{C}$;控温精度为 $\pm 0.5 ^{\circ}\text{C}$;测温精度为 $\pm 0.2 ^{\circ}\text{C}$;内部有效尺寸为 $600 \text{ mm} \times 850 \text{ mm} \times$

800 mm;热变形数据采集系统由德国 Mahr Federal 高精度位移传感器与 Mahr Millitron832 数显放大器组成,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,测量精度为 $1 \mu\text{m}$,线性误差小于 0.025% FS。

恒温箱内置自主研发的三坐标微进给测量装置,运动精度为 $1 \mu\text{m}$ 。零件固定在平台上,测量外圆径向热变形时,两个传感器置于外圆两侧,调整三坐标微进给工作平台,保证传感器测头位于直径方向上。实验温升为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (从 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $70 \text{ }^\circ\text{C}$),保持各点温度值恒温 3 h,保证零件充分热膨胀。

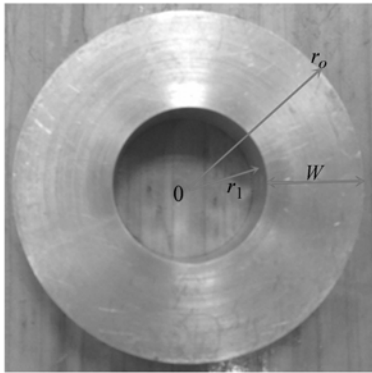


图1 铝制空心圆柱体零件

Fig. 1 Hollow cylinder part of aluminum

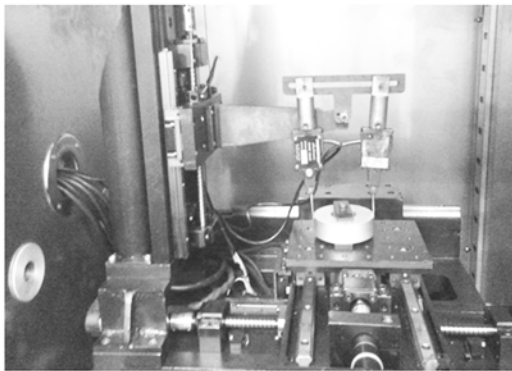


图2 实验方案照片

Fig. 2 Experimental scheme photo

经过标定实验误差修正和数据处理,热变形测量结果如表 1 所示。

表 1 I 号空心圆柱体径向热变形实验结果

Tab. 1 Radial thermal deformation of hollow cylinder (No. D)

零件 编号	公称尺寸/mm	测量值/ μm		径向平均热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	
		内圆	外圆	内圆	外圆
I 号	内径 30, 外径 50	9.5	30.1	10.6×10^{-6}	20.1×10^{-6}

根据表 1 可知,空心圆柱体热变形内外径尺寸变化差距较大,内圆径向热膨胀系数仅为 10.6×10^{-6} ,远小于外径径向热膨胀系数 20.1×10^{-6} ,数值相差近一倍。而采用 ANSYS Workbench 传统稳态热分析,空心圆柱体温升为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,热变形结果如表 2 所示。

表 2 I 号空心圆柱体 ANSYS Workbench 传统热分析仿真结果

Tab. 2 Traditional thermal analysis results simulated by ANSYS Workbench of hollow cylinder (No. I)

公称尺寸/ mm	热变形仿真值/ μm		径向平均热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	
	内圆	外圆	内圆	外圆
内径 30	22.025	36.708	24.472×10^{-6}	24.472×10^{-6}
外径 50				

传统稳态热分析结果表明:内外圆径向热膨胀系数相同。对比表 1 和表 2 可见,显然空心圆柱体实际变形值与现有的有限元仿真值有较大差距。这种现象在其它形状零件中同样存在,机械零件热变形的非相似性属性在现有的仿真软件中无法体现。

5 基于 ANSYS Workbench 环境的精确热变形仿真方法

对于上述空心圆柱体零件热变形仿真,本文采用热力转换机理在边界施加与热变形等效的约束力,以实现相同的仿真效果。由于空心圆柱体模型比较简单,故采用自由网格划分,有限元网格划分单元数为 6 578,节点数为 31 151。若利用有限元方法分析,必须确定边界条件。边界条件包括约束边界条件和载荷边界条件。由于实际热变形测量实验时,须将零件固定在恒温箱内部的工作台上,故在空心圆柱体的两个底面施加位移约束,以限制其轴向位移;在内圆表面和外圆表面分别施加载荷 P_1 和 P_2 ,两者均为拉力,如图 3。

本课题组根据内径为 30 mm,不同外径的系列空心圆柱体零件热变形的大量实验,获得其内外圆边界约束参数 Ω ,如图 4 所示。由图 4 可知,在外径为 50 mm 时,内圆形体的边界约束参数 $\Omega_1 = 3.027 2$,外圆形体的边界约束参数 $\Omega_2 = 2.697 5$,将仿真零件温度升高 $\Delta T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的热

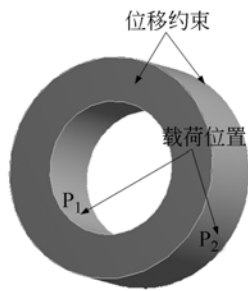


图 3 空心圆柱体边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of hoolow cylinder

变形分别代入式(10),求得 $P_1 = 296.6 \text{ MPa}$, $P_2 = 264.3 \text{ MPa}$,再将 P_1 、 P_2 分别加载于整个内圆表面和整个外圆表面。

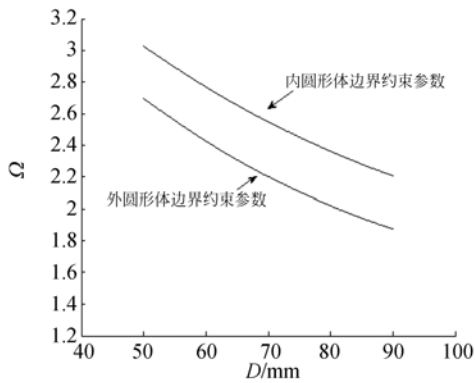


图 4 空心圆柱体形体边界约束参数 Ω 随外径尺寸 D 的变化曲线

Fig. 4 Boundary constraint parameter Ω varies with outer diameter size D

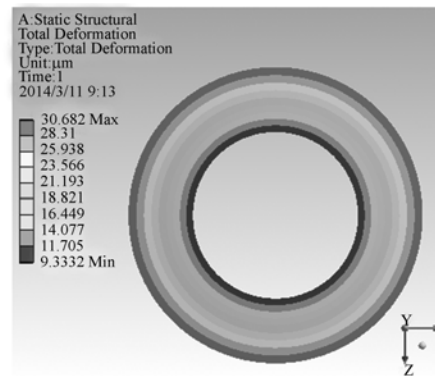


图 5 空心圆柱体零件变形云图

Fig. 5 Deformation nephogram of hollow cylindrical part

空心圆柱体零件的变形如图 5 所示,内圆径向变形量为 $\delta_1 = 9.3332 \mu\text{m}$,外圆径向变形量为 $\delta_2 = 30.6820 \mu\text{m}$ 。根据前述热力转换理论,认为此仿真过程变形结果就是空心圆柱体模型温升 60°C 的热变形。由此计算得出内、外圆径向平均热膨胀系数分别为 $\alpha_1 = 10.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2 = 20.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。结果表明,空心圆柱体热膨胀过程中,由于内外圆形体结构的差异,内圆比外圆受到的形体约束更大,内圆径向平均热膨胀系数仅为外圆的一半左右。

同理,可以对内径均为 30 mm、外径分别为 70 mm、90 mm 的空心圆柱体(编号分别为 II、III)的热变形进行仿真,当温度升高 60°C 时,形体边界约束参数因子和施加载荷,以及热变形仿真结果见表 3。

表 3 II、III号空心圆柱体热变形仿真结果

Tab. 3 Simulation results of thermal deformation for hollow cylinder (No. II & III)

模型编号	约束参数因子		载荷大小 P/MPa		热变形仿真值 $\delta/\mu\text{m}$	
	内圆	外圆	内圆载荷	外圆载荷	内圆径向	外圆径向
II号	2.5485	2.2025	249.7000	215.8000	8.2191	41.4040
III号	2.2078	1.8762	216.3214	183.8325	6.9044	48.1000

6 对比分析热变形测量结果与仿真结果

同理采用前述热变形测量方案,得到 II 号和 III 号空心圆柱体的热变形测量结果见表 4。热变形测量结果显示:1、空心圆柱体在高温环境热膨胀存在不均匀性,即内圆径向热膨胀系数远小于

外圆;2、空心圆柱体内径尺寸一定时,外径尺寸越大,其外圆径向热膨胀系数反而越小;3、空心圆柱体外径尺寸变大时,即使内径尺寸保持一定,内圆径向热膨胀系数也变小。由上述结果分析知,对于空心圆柱体零件,其内圆、外圆热变形规律不仅受到内圆尺寸参数、外圆尺寸参数的影响,还受到其内、外圆尺寸参数的耦合影响。

表4 空心圆柱体热变形测量值与仿真值吻合度

Tab. 4 Goodness of fit between measured value and simulated value of hollow cylinder

零件 编号	公称尺寸/mm	测量值/ μm		平均热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$		热变形仿真吻合度	
		内圆	外圆	内圆径向	外圆径向	内圆	外圆
I号	内径30,外径50	9.5	30.1	10.6×10^{-6}	20.1×10^{-6}	98.2%	98.1%
II号	内径30,外径70	8.3	41.3	9.2×10^{-6}	19.7×10^{-6}	99.0%	99.7%
III号	内径30,外径90	6.9	48.1	7.7×10^{-6}	17.8×10^{-6}	99.9%	100.0%

根据热力转换理论与仿真方法得到的仿真结果和计算仿真吻合度,见表4。仿真结果与实验结果的吻合度达到98%以上。结果表明了热力转换理论与仿真方法的有效性、合理性。

7 结 论

为适应现代制造业对精密机械与仪器日益增长的高精度要求,本文提出了热力转换精确热变形分析理论,并给出了基于ANSYS Workbench环境的仿真方法。此外,针对一组铝制空心圆柱体零件进行了热变形测量实验。铝制空心圆柱体零件热变形结果表明:即使材料属性一致,加工处

理过程一致,其热膨胀仍然受到其内、外圆特征尺寸的直接和耦合影响;空心圆柱体零件的热变形存在不均匀性,内外圆径向热膨胀系数差别较大。基于本文所提出的理论与仿真分析方法,对铝制空心圆柱体零件进行了热变形仿真,仿真结果与实验测量结果吻合度较高,达到98%以上。这证明了热力转换理论的合理性和有效性。

机械零件形状多样,本文仅就典型圆柱形体进行了初步的热变形非相似性规律和仿真方法的探索,热力转换概念和仿真方法仍需要进一步研究和完善,本文研究思路和方法可以对后续研究提供理论依据与设计参考。

参考文献:

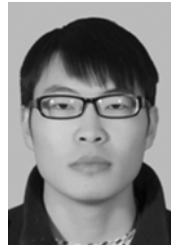
- [1] 陈诚,杨传民,张晨阳,等.考虑运行条件的Elman网络丝杠驱动系统热误差建模[J].光学精密工程,2014,22(3):704-711.
CHENG CH, YANG CH M, ZHANG CH Y, *et al.*. Modeling on thermal errors of ball screw driving system on Elman network considering operating conditions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 704-711. (in Chinese)
- [2] 吴小霞,王鸣浩,明名,等.大口径SiC轻量化主镜热变形的定标[J].光学精密工程,2012,20(6):1243-1249.
WU X X, WANG M H, MING M, *et al.*. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [3] DELBRESSINE F L M, FLORUSSEN G H J, SCHIJVENAARS L A, *et al.*. Modelling thermo-mechanical behaviour of multi-axis machine tools [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 47-53.
- [4] SHIMIZU S, IMAI N. Effective measurement method of thermal deformation of machine tools caused by linear axis motion[C]. *Proceedings of the Seventeenth American Society for Precision Engineering Annual Meeting*, St. Louis, USA: ASPE, 2002: 396-401.
- [5] 苗恩铭,龚亚运,成天驹,等.支持向量回归机在数控加工中心热误差建模中的应用[J].光学精密工程,2013,21(4):980-986.
MIAO E M, GONG Y Y, CHENG T J, *et al.*. Application of support vector regression machine to thermal error modelling of machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 980-986. (in Chinese)
- [6] MIAO E M, GONG Y Y, NIU P C, *et al.*. Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9-12): 2593-2603.
- [7] YAO H X, MIAO E M, NIU P CH. Selection of hole and axle interference fit tolerance [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 80-81: 475-479.
- [8] YI H K, KIM E H, PARK S P, *et al.*. Reliability analysis of stainless steel/carbon steel double-layered tube on the basis of thermal deformation behavior [J]. *Journal of Mechanical Science and*

- Technology*, 2013, 27(5): 1279-1285.
- [9] JAKSTAS A, KAUSINIS S, BARAUSKAS R, *et al.*. Thermal error analysis in precision length measurements[J]. *Measurement*, 2014, 51: 133-146.
- [10] LI G, YUAN H, MA X. Optimum design of the precise surface plate based on thermal deformation experiment and FEA [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2014, 37(1): 1-13.
- [11] 刘文田, 陈林, 冯少鹏, 等. 板形环受热变形有限元分析及理论计算研究[J]. *有色金属加工*, 2012, 41(4): 14-15.
LIU W T, CHEN L, FENG SH P, *et al.*. Finite element analysis and theoretical studies on thermal deformation of plate ring[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2012, 41(4): 14-15. (in Chinese)
- [12] 陆栋, 蒋平. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
LU D, JIANG P. *Solid State Physic*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [13] VINOGRADOV O. Using modified potential to account for non-zero temperature in molecular statics for crystals [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 41(4): 493-497.
- [14] LI G, VINOGRADOV O, GUBANOV A. A modified Morse potential accounting for non-zero temperature in molecular statics for Nickel crystals [J]. *Computational Materials Science*, 2012, 62: 126-130.
- [15] 费业泰, 苗恩铭, 李桂华, 等. 机械热变形理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
FEI Y T, MIAO E M, LI G H, *et al.*. *Theory and Application of Mechanical Thermal Deformation*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



苗恩铭(1971—),男,安徽阜阳人,博士,教授,2004年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密机械工程、数控机床精度理论、机械热变形理论与应用技术研究。E-mail: miaoem@163.com.



徐祗尚(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事机械热变形理论与应用技术研究。E-mail: xuzs371322@163.com.

(版权所有 未经许可 不得转载)