

金属电学针尖杨氏模量高温特性研究

徐一峰^{1*#}, 李锦然^{1*}, 梁睿轩², 汤如俊^{1#}, 彭斌³, 张万里³

¹苏州大学, 物理科学与技术学院, 江苏 苏州

²苏州大学, 能源学院, 江苏 苏州

³电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2023年9月28日; 录用日期: 2023年11月7日; 发布日期: 2023年11月15日

摘要

在航天航空等极端条件中部分电学器件需要在高温段工作, 器件材料需要通过高温探针台进行性能测试, 金属电学探针在高温下的物理性能变化对测试结果可能会有显著影响。因此, 掌握金属探针的高温物理特性很重要。本文基于通过有限元法计算了金属探针的杨氏模量在高温情况下的变化特性。研究结果表明金属针尖的温度随时间变化呈非线性上升关系, 并逐渐趋于饱和。针尖的杨氏模量随着温度的升高而近似线性下降。同时发现, 杨氏模量的下降与针尖的位置有关系。杨氏模量下降代表金属探针越易发生形变。因此, 在高温测试前期的准备中, 需要对探针进行预加热来减少探针的伸长的影响, 最终需寻找一个探针位置的平衡点以降低探针形变对实验结果的影响。

关键词

金属探针, 温度场, 杨氏模量, 有限元法

Study of High Temperature Young's Modulus Properties of Electrical Metal Probes

Yifeng Xu^{1*#}, Jinran Li^{1*}, Ruixuan Liang², Rujun Tang^{1#}, Bin Peng³, Wanli Zhang³

¹School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou Jiangsu

²School of Energy, Soochow University, Suzhou Jiangsu

³State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

Received: Sep. 28th, 2023; accepted: Nov. 7th, 2023; published: Nov. 15th, 2023

*相同贡献。

#通讯作者。

文章引用: 徐一峰, 李锦然, 梁睿轩, 汤如俊, 彭斌, 张万里. 金属电学针尖杨氏模量高温特性研究[J]. 应用物理, 2023, 13(11): 430-438. DOI: 10.12677/app.2023.1311046

Abstract

In extreme conditions such as aerospace, some electrical devices need to work in the high-temperature range, and the material of the device needs to be tested through a high-temperature probe platform. The physical performance changes of metal electrical probes at high temperatures may have a significant impact on the test results. Therefore, it is important to master the high-temperature physical properties of metal probes. This article is based on the calculation of the variation characteristics of Young's modulus of metal probes under high-temperature conditions using the finite element method. The research results indicate that the temperature of the metal needle tip exhibits a nonlinear upward relationship with time and gradually approaches saturation. The Young's modulus of the needle tip decreases approximately linearly with increasing temperature. It was also found that the decrease in Young's modulus is related to the position of the needle tip. The decrease in Young's modulus indicates that the metal probe is more prone to deformation. Therefore, in the preparation for high-temperature testing, it is necessary to preheat the probe to reduce the impact of probe elongation, and ultimately find a balance point for the probe position to reduce the impact of probe deformation on the experimental results.

Keywords

Metal Probes, Temperature Field, Young's Modulus, Finite Element Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

航空航天材料的结构性能越来越受到关注，航空发动机中的零部件需要在发动机运转时处在高温、高转速、高压的极端环境下安全工作[1] [2] [3]。为了研究出更符合此极端环境下的结构材料，需要材料在高温探针台中进行测试[4] [5] [6] [7]。而高温探针台金属电学探针在高温下的物理性能对测试结果有影响，其中探针的杨氏模量影响尤其明显[8] [9]。

杨氏模量又称弹性模量。是宏观上描述物体受外力作用时，其抗形变的能力的物理量。测量材料的杨氏模量对于研究材料的力学特性有着重要的意义：无论是静态下固体的受力分析，还是研究力学的动态特性，都需要测量杨氏模量。杨氏模量不仅与材料本身参数相关，例如熔点和线性膨胀系数；还与材料的制作工艺和工作环境等因素有关[10] [11]。

目前，得益于社会飞速发展，材料能在更高的温度工作，但是高温测量杨氏模量非常困难。因此本文就杨氏模量在仿真模拟实验平台进行温度与杨氏模量的研究，即高温下材料不同位置的杨氏模量的变化规律，并且为高温探针台的探针受温度的影响和力学特性的变化提供一定的参考[12] [13]。

2. 理论模型

2.1. 信号频率的影响

图 1 为金属探针的结构图，探针长 70 mm，针杆半径 2.5 mm，针尖顶半径为 0.1 mm。材料为钨钢。考虑到探针主要受温度和作用力影响，其具体参数见表 1。

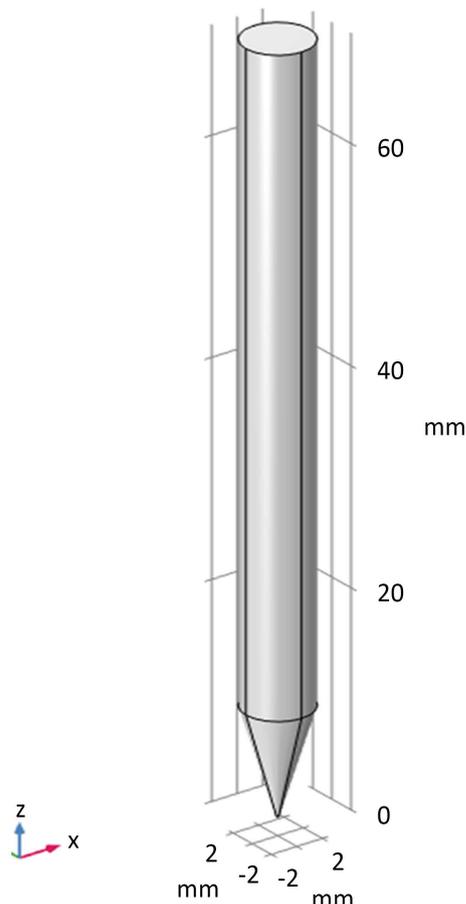


Figure 1. Structure diagram of metal probe
图 1. 金属探针结构图

Table 1. Specific parameters of metal probes

表 1. 金属探针的具体参数

材料类别	导热系数/(W/(m·K))	泊松比 λ	密度/(g/cm ³)
钨钢	110	0.28	15.63

2.2. 网格划分及其精准性

采用 COMSOL 自带的网格划分功能，序列类型选择物理场控制网格，单元大小为超细化；共生成 27,163 个单元，并用该网格进行独立性检验(质量越接近 1 计算结果越准确)。平均单元质量为 0.67，能在有限元分析计算中得到较为精准的结果[14]。

2.3. 计算假设

为了模拟金属探针在实验中准确的环境条件，采用了固体力学和固体传热两个物理场接口。固体力学主要分析金属探针在高温环境下受到热应力的影响，计算金属探针的应力分布；固体传热则是模拟金属探针在高温探针台里测试过程中温度分布情况。

设置好物理场后，便可在模拟平台进行计算，求解方法通常为有限元法。有限元法是目前最常见、计算能力强、涉及领域最多的一种工程分析算法。当需要模拟仿真和计算特定的工程问题时，建立基本

方程和边界条件相对比较简单。但因为模型复杂的几何形状、材料本身的性能参数和对环境因素的考虑，导致精确解难以求出。于是，求近似解成为了一种可靠的解决途径。

本文主要探究金属探针的杨氏模量特性，测量杨氏模量需要观察金属探针的小形变。在这类问题中，运用线弹性有限元法更适合解决问题。金属探针的应力和应变都服从胡可定律的线性关系，微小应变和小位移具有线性关系。线弹性有限元法预算步骤如下：1) 结构离散化；2) 选择位移插值函数；3) 分析单元的力学特性；4) 集成所有单元平衡方程，得到整体结构平整方程；5) 由平衡方程求解点位移；6) 单元应变和应力的计算。

2.4. 边界条件的确定

1) 高温探针台的工作温度往往在 1000 摄氏度，金属探针的针尖接触高温物体，尾部则是被固定在夹具[15] [16]。为了简化模型和减少计算量，设置了整个针尖及倾斜壁为 1000 摄氏度，而不是针尖的顶端为 1000 摄氏度。因为针尖的顶端的单元数仅为 4 个，温度进行传热需要更长的步长，且热量传递效率低。故选择将整个针尖设置温度，有较好的温度传热模型，也减少了计算量。尾部则添加了固定的约束模拟金属探针被固定在夹具上。

控制方程：

$$pC_p \frac{\partial T}{\partial t} + pC_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{red}, \quad (1)$$

$$q = -k\nabla T, \quad (2)$$

式(1)中： p 为金属探针密度， C_p 为热容量， T 为温度， u 为流速场， ∇T 为不同方向的温度梯度， $\nabla \cdot q$ 为热传导速率， Q 为热源， Q_{red} 为增加热源，式(2)中， q 为热通量矢量场， k 为物质的导热系数，单位均为国际单位。

2) 为了更进一步简化模型，将不考虑环境温度的变化，环境温度固定在 20 摄氏度。

2.5. 多物理场的耦合

COMSOL Multiphysics 除了能建立仿真模型，还能将多个物理场耦合在一起。常见的有固体力学和固体传热的耦合，简称热固耦合。还有流-固耦合(流体流动-固体力学)。对于本文设计的模拟实验则需要热固耦合。固体传热方程形式为瞬态，为了模拟金属探针的热传导的过程，设置了在 180 秒内每隔 6 秒就会输出一个结果。通过时间进行一个耦合，结果作为固体力学场的因变量，再和固体传热所设置相同的间隔计算出结果。固体力学的方程形式为稳态。

3. 结果与讨论

3.1. 应力和位移分布和结果分析

图 2、图 3 表明，当金属探针加热到 1000 摄氏度时，经过 180 s 后金属探针在温度作用下由于不同位置存在一定的温差产生了热应力，尾部有向外膨胀的趋势。而其他位置整体受到方向向下的应力。在位移场上，因为尾部固定约束的影响，金属探针有向下的位移。这对应着应力向下的方向，越接近尖端位移越大。

见图 4，每个点初始位置为参照点，绘制了不同位置的移动位移图。可以看出最大的位移为 0.23 mm，而且位移变化趋于稳定。若加热时间增至 360 s 后，定义金属探针的伸长率为某时间点下金属探针的长度和初始状态的长度，得到图 5。图 5 表明加热到 200 s 时，金属探针伸长率已经稳定为 100.445%，说明

探针的长度已稳定。认为金属探针承受温度剧烈的变化，会导致在高温晶圆测试中，探针的伸长会给晶圆带来异常针痕。所以在测试前要对金属探针进行预加热，来解决升温产生的问题。

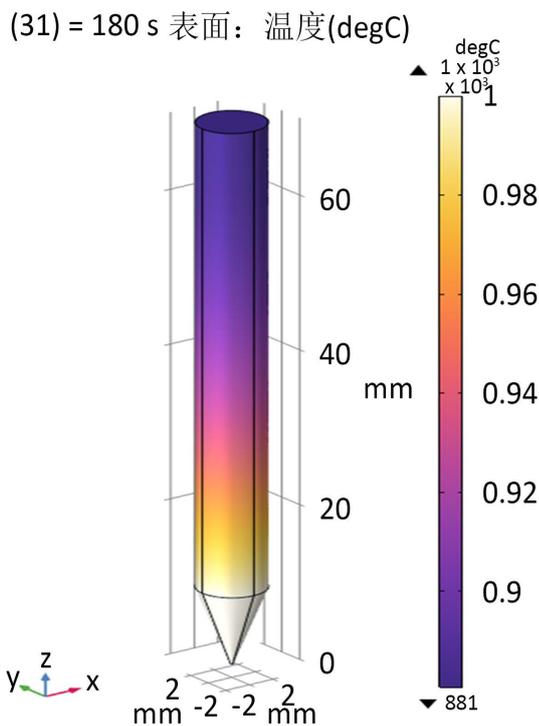


Figure 2. Stress distribution at 1000 degrees celsius
图 2. 1000 摄氏度下应力分布

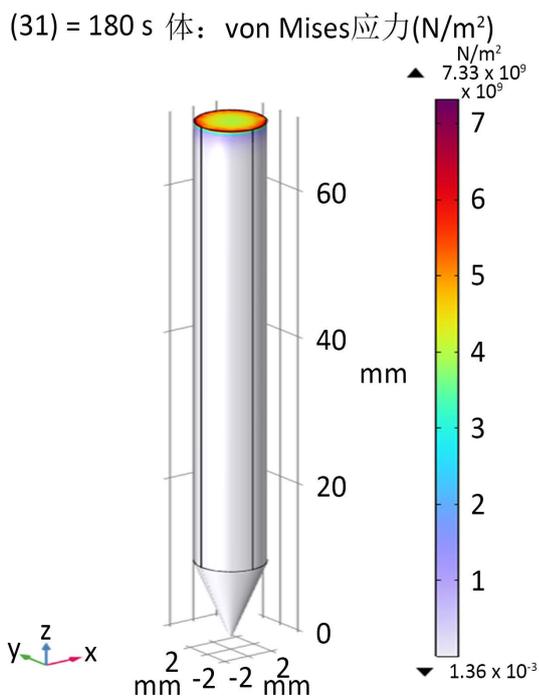


Figure 3. Displacement at 1000 degrees celsius
图 3. 1000 摄氏度下位移大小

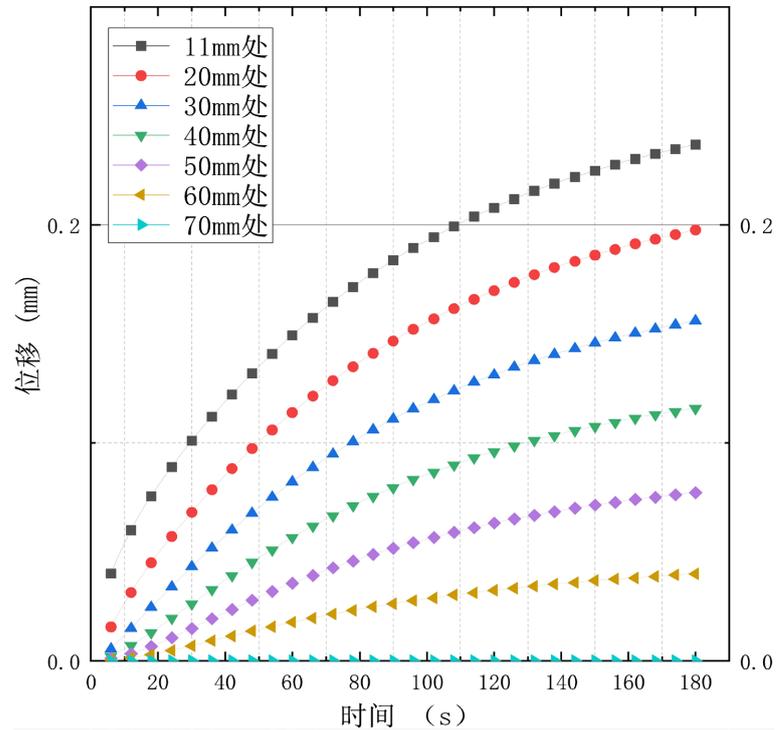


Figure 4. Plot of displacement at different positions of the probe over time
图 4. 探针不同位置的位移随时间的变化图

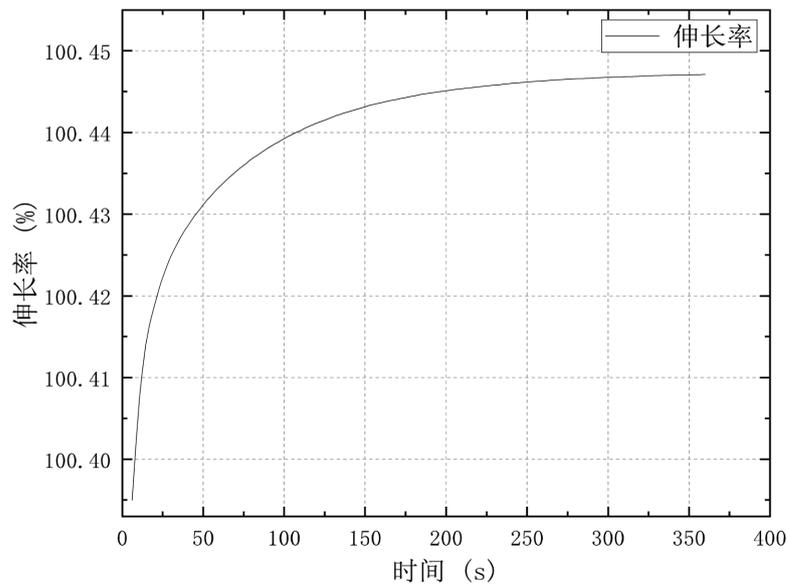


Figure 5. Graph of elongation of metal probes over time
图 5. 金属探针的伸长率随时间的变化图

3.2. 温度分布及分析

设置针尖温度为 1000 摄氏度，模拟金属探针在高温探针台工作 180 s 后温度分布情况。且对距离针尖 11 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 处的温度变化规律进行测量，得到图 6。可以观察到金属探针的温度梯度变化情况。

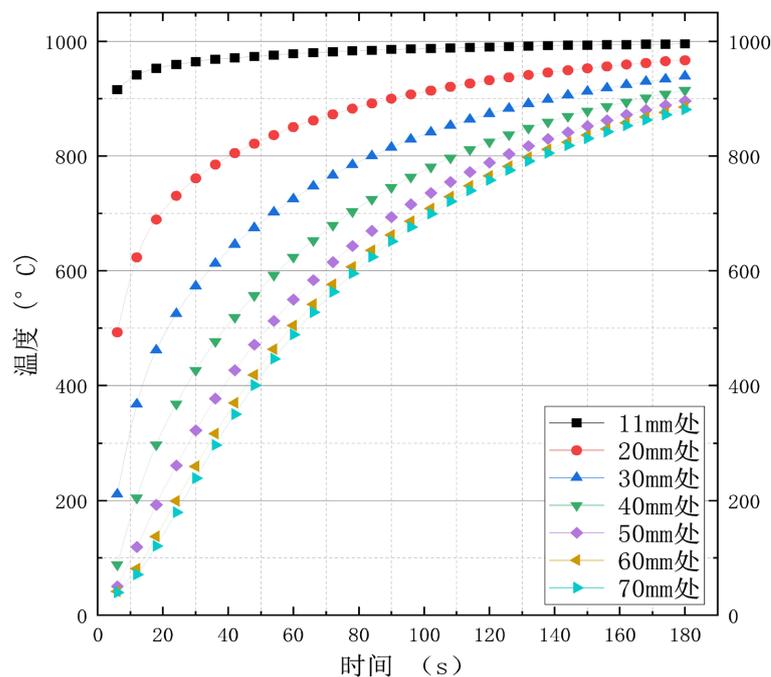


Figure 6. The variation of temperature at different positions of the probe over time
图 6. 探针不同位置的温度随时间的变化规律

3.3. 杨氏模量计算和变化规律

在温度的作用下，金属探针受到微小应力和形变。通过模拟出不同位置对应的微小应力和形变，即

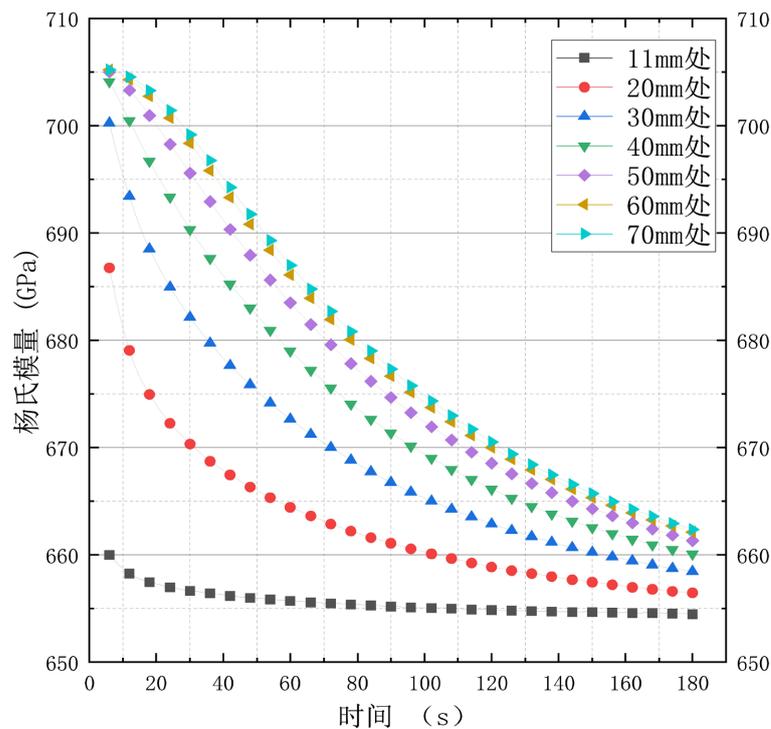


Figure 7. Changes in Young's modulus values at different positions of the probe
图 7. 探针不同位置的杨氏模量值变化曲线

可计算出不同位置杨氏模量的数据。杨氏模量计算方程为：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (3)$$

其中是 E 金属探针的平均应力，单位为 N/m^2 ； ϵ 是金属探针平均应变。

根据杨氏模量的计算方程得出下图。图 7 为金属探针不同位置的杨氏模量在加热过程中的变化曲线图。

对比图 6 和图 7 可以得出杨氏模量和温度呈线性关系。随着温度的升高，杨氏模量值逐渐下降。分析认为杨氏模量随温度升高而下降的原因主要是由于温度对分子之间的间距的影响，从而造成分子间引力作用减弱引起的变化。

图 8 为金属探针的杨氏模量与温度的关系。

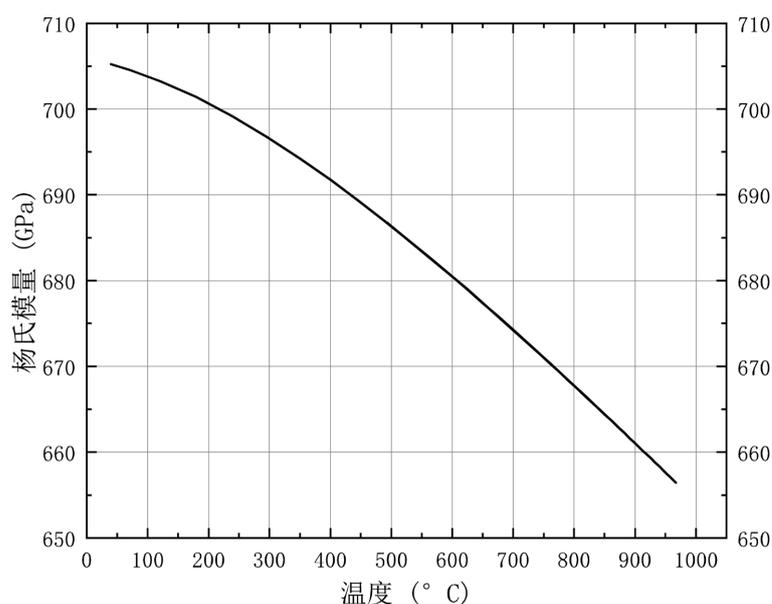


Figure 8. The relationship between the Young's modulus of metal probes and temperature

图 8. 金属探针杨氏模量与温度之间的关系

3.4. 模拟结果分析

通过模拟实验所得出的数据做分析。图 3 表明，越远离针尖一段温度跨度越大，温度变化的速率逐渐降低。温度分布的不均匀使得金属探针自身产生了热应力和细小的位移，通过分析这两者的数值即可按照公式计算出不同时间不同位置的杨氏模量值。图 5 表明，随着金属探针温度从常温升高接近 1000 摄氏度，杨氏模量从常温的 706 GPa 降到了 656 GPa，下降了约 7%。杨氏模量反映的是材料刚性，杨氏模量越小代表材料刚性差，易发生形变。考虑认为金属探针温度升高，材料内部原子热运动变得更加活跃，导致分子间的引力作用力下降，从而引起材料刚性变差。因此易形变即杨氏模量逐渐减小。

4. 总结

本文基于通过有限元法计算了金属探针的杨氏模量在高温情况下的变化特性。研究结果表明杨氏模量与加热时间和离针尖距离密切相关。首先，探针温度随时间变化呈非线性上升关系并趋于饱和，杨氏模量与温度几乎线性相关。其次，距离针尖越远，杨氏模量的下降幅度越大并趋于饱和。

因此, 在高温电学测试前期的准备中, 需要对探针进行预加热来减少探针伸长的影响, 最终需寻找一个探针位置的平衡点以降低对实验结果的影响。

基金项目

本论文感谢科技部国家重点研发计划项目(2021YFB3801701)的支持。

参考文献

- [1] Kerrouche, R., Dadouche, A. and Boukraa, S. (2023) Thermal Characteristics of a 90-mm Bore Cylindrical Roller Bearings for Aerospace Applications: All-Steel versus Hybrid Bearings. *Tribology International*, **185**, Article 108495. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108495>
- [2] Zhang, H., Xue, H.Q., Qin, Z., et al. (2023) Fatigue Fracture Failure Investigation of Splitter in Engine Intermediary Casing. *Engineering Failure Analysis*, **143**, Article 106905. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106905>
- [3] Jiang, W., Xu, Y.H., Zhang, N., et al. (2022) Measurement of Health Evolution Tendency for Aircraft Engine Using a Data-Driven Method Based on Multi-Scale Series Reconstruction and Adaptive Hybrid Model. *Measurement*, **199**, Article 111502. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111502>
- [4] Li, Z.G., Peng, L.P., Zhang, J.C., et al. (2016) Electrical Transport Properties of Nickel Chromium Alloy Films. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **34**, Article 061206. <https://doi.org/10.1116/1.4964883>
- [5] Wang, Y.L., Zhang, C.C., Niu, D., et al. (2016) High Temperature Sensors Fabricated on Al₂O₃ Ceramic and Nickel-Based Superalloy Substrates. *Sensors & Actuators A: Physical*, **247**, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.048>
- [6] Chauhan, I., Kaur, M., Singh, K., et al. (2022) Temperature-Dependent Photoconductivity Studies of WTe₂/MoS₂ Nanocomposite Thin Film. *Surfaces and Interfaces*, **29**, Article 101795. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101795>
- [7] Er, I.K., Çağırtekin, A.O., Ajjaq, A., et al. (2021) Complex Electrical Impedance and Modulus Characterizations of ZnO:Sn Thin Films in a Wide Temperature Range. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **32**, 13594-13609. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05935-1>
- [8] 鲁效明. 金属探针与硅单晶片的接触电阻与测量[J]. 计量技术, 1986(8): 6-8.
- [9] 罗士凯. 晶圆针测技术之异常问题分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 林宏心, 何友武. 基于电加热法的金属丝杨氏模量温度特性测量[J]. 大学物理实验, 2018, 31(3): 49-51. <https://doi.org/10.14139/j.cnki.cn22-1228.2018.03.014>
- [11] 汪雨寒. 杨氏模量与温度关系的实验研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(1): 158-160. <https://doi.org/10.19406/j.cnki.cqkjxyxbzkb.2014.01.041>
- [12] 王兴君, 王巍然. 基于 COMSOL 的材料杨氏模量的超声测量研究[J]. 科学技术创新, 2022(23): 1-6.
- [13] 高翔, 陈棣湘, 田武刚, 潘孟春, 刘丽辉. 基于 COMSOL Multiphysics 的金属结构应力特性分析[C]//第二届中国泛西部无损检测学术交流会. 2017.
- [14] 张海峰. 基于有限元理论的杨氏模量测量方法[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [15] Sun, K., Yang, C., Zhang, D., et al. (2022) Effects of Ambient High-Temperature Annealing on Microstructure, Elemental Composition, Optical and Electrical Properties of Indium Tin Oxide Films. *Materials Science and Engineering: B*, **276**, Article 115534. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115534>
- [16] Wu, C., Pan, X., Lin, F., Chen, G., Xu, L., Zeng, Y., He, Y., Sun, D. and Hai, Z. (2022) Al₂O₃-Modified Polymer-Derived Ceramic SiCN High-Temperature Anti-Oxidative Composite Coating Fabricated by Direct Writing. *Polymers*, **14**, Article 3281. <https://doi.org/10.3390/polym14163281>