

高温ITO薄膜应变计结构参数影响研究



李剑¹, 刘志春¹, 周浩¹, 李强³, 赵鑫³, 梁军生^{1,2}, 王立鼎^{1,2}

1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024

2. 大连理工大学 精密与特种加工技术教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024

3. 中国航空工业空气动力研究院 高超声速气动/热重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

摘要:以氧化铟锡(ITO)为敏感材料制备的高温薄膜应变计被广泛应用于航空发动机涡轮叶片等热端部件应变测试。为了探究高温ITO薄膜应变计结构参数对其应变灵敏度系数(GF)的影响,采用正交试验法设计了不同敏感栅长度、不同敏感栅数量的高温ITO薄膜应变计,通过仿真分析以及试验验证的方法系统研究了应变计在25℃、600℃、800℃和900℃的差别。结果表明,应变计GF随敏感栅长度的增加而变大,随敏感栅数量的增加而先增大后减小(最优中间值为6栅),最终获得敏感栅长度5mm、敏感栅数量6栅为最佳结构参数,以最佳结构参数制备的高温ITO薄膜应变计在不同温度下的GF均保持在3.2左右。研究结果对高温ITO薄膜应变计的高温性能优化有一定的指导意义。

关键词:ITO; 应变计; 高温; 航空发动机; GF

中图分类号:V241.7

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.05.010

航空发动机是一种集复杂和精密于一体的热力机械,为保证发动机在高温、高压、强振动等极端工作环境中正常运行,需要对其热端部件产生的应变进行准确、稳定的监测^[1-2]。薄膜应变计由于其可直接沉积制备、质量基本可以忽略、灵敏度高、响应速度快、适用于恶劣环境等优点受到业内广泛关注^[3]。金属与合金材料是目前应用广泛的薄膜应变计材料,如NiCr、PbCr等。然而它们在高温环境中存在氧化等问题,从而导致应变计准确度降低甚至失效。铟锡氧化物(ITO)作为一种新型半导体材料,由于其熔点高、高温抗氧化性好、耐腐蚀等特点,被广泛应用于制备薄膜高温应变计^[4-5]和薄膜热电偶^[6]。

国内外学者研究发现,应变计的结构参数在一定程度上会对其性能产生影响。宋瑞如等^[7]通过仿真分析研究了丝式高温应变计的敏感栅结构参数变化对其结构振动及寿命的影响。结果发现,应变计结构谐振频率随敏感栅长度的减小而增大,栅丝直径对应应变计寿命影响最大。Larry^[8]利用有限元方法分析了应变计基底厚度与应变计性

能的关系。结果发现,增大应变计基底厚度时,其灵敏度系数(GF)降低。胡玉梅等^[9]分析了应变计敏感栅直径、栅丝间距和栅丝长度的变化对测量精度的影响。结果发现,栅丝直径越小,产生的应变传递误差越小,而栅丝间距、栅长对应应变传递误差均存在最优中间值。然而,目前报道的文献中并没有发现关于高温ITO薄膜应变计的结构参数在不同温度下对GF影响的相关研究。本研究为了探究高温ITO薄膜应变计结构参数对其GF的影响,采用正交试验法设计了不同敏感栅长度、不同敏感栅数量的高温ITO薄膜应变计,通过仿真分析以及试验验证的方法系统研究了在25℃、600℃、800℃以及900℃下,高温ITO薄膜应变计的敏感栅长度、敏感栅数量的变化对其GF的影响。

1 材料和方法

1.1 理论

通常,应变计是由多条敏感栅和横栅连接组成的。在实际使用中,应变计存在横向效应^[9],即基底受轴向载荷产

收稿日期: 2021-12-18; 退修日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-04-05

基金项目: 航空科学基金(2019ZD063001);高超声速气动/热重点实验室基金

引用格式: Li Jian, Liu Zhichun, Zhou Hao, et al. Investigation of structure parameters on the properties of ITO film strain gauge at high temperatures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(05): 69-75. 李剑, 刘志春, 周浩, 等. 高温ITO薄膜应变计结构参数影响研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(05): 69-75.

生未知应变 $\varepsilon_{\text{real}}$ 时,敏感栅沿轴向产生拉应变 ε ,电阻变化 ΔR_1 ,而横栅沿轴向产生压应变 $-\varepsilon'$,电阻变化 $-\Delta R_2$,所以应变计的总电阻变化量为 $\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2$ ^[10]。

$$\varepsilon_{\text{test}} = \frac{\Delta R}{R} \times \frac{1}{GF} \quad (1)$$

现有商用标准应变计的初始电阻 R 和 GF 是确定值,由式(1)可知横向效应使应变计测量得到的应变值 $\varepsilon_{\text{test}}$ 小于实际应变值 $\varepsilon_{\text{real}}$,因此产生了测量误差,降低了应变计的测量精度。

而在应变计的制备测试过程中,为确定其 GF 值,需要给应变计施加一个确定的应变值 ε_d

$$GF = \frac{\Delta R}{R} \times \frac{1}{\varepsilon_d} \quad (2)$$

由于横向效应的存在,应变计总电阻变化量 ΔR 减小,导致计算得到的 GF 小于应变计实际灵敏度系数 GF_{real} ,减小了应变计的 GF 值。

为了提高应变计的 GF 和测量精度,需要对应变计的结构参数(如敏感栅长度、数量等)进行设计选取最优值,尽可能降低横向效应的干扰。

1.2 结构设计及仿真分析

为排除应变计整体尺寸的影响,首先确定了 $13.5\text{mm} \times 8.6\text{mm}$ 的高温ITO薄膜应变计整体尺寸,然后根据应变计结构参数设计理论和正交试验原理,分别设计了三种不同敏感栅长度、4种不同敏感栅数量的高温ITO薄膜应变计结构尺寸参数^[11]。表1、表2分别显示了不同应变计的详细结构参数。

表1 不同敏感栅长度的ITO薄膜应变计结构参数

Table 1 Structural parameters of ITO strain gauge with different measuring gate lengths

样品	敏感栅长度/mm	边栅宽度(0.6mm)		
		横栅/mm	敏感栅宽度/mm	栅丝数量
1	3	1.4×1.2	0.3	6
2	4			
3	5			

表2 不同敏感栅数量的ITO薄膜应变计结构参数

Table 2 Structural parameters of ITO strain gauge with different number of sensitive grids

样品	敏感栅数量	边栅宽度(0.6mm)		
		横栅/mm	敏感栅宽度/mm	敏感栅长度/mm
1	4	1.4×1.2	0.3	5
2	6			
3	8			
4	10			

利用COMSOL仿真软件分别建立不同结构参数的应变计及其附着的氧化铝(Al_2O_3)等强度梁基底模型。表3是

表3 相关材料特性

Table 3 Properties of related materials

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	热膨胀 系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$
Al_2O_3	350	0.22	3.5	8.2×10^{-6}
ITO	140	0.35	1.2	9.0×10^{-6}

仿真中使用的 Al_2O_3 、ITO的相关材料特性^[12]。

在仿真过程中,用固体力学物理场模拟使应变计产生微应变的载荷施加过程,用固体传热物理场模拟应变计所处高温环境,用电流-单层壳物理场模拟ITO薄膜应变计的电学特性变化。通过定义广义热通量及温度来设定应变计的温度环境为 25°C 、 600°C 、 800°C 、 900°C ,将等强度梁基底的宽端设置为固定约束,在另一端指定位移 1.5mm ,在应变计两端设置输入 0.5A 电流,输出应变计两端电压状况。通过应变计电压变化来计算其电阻变化,根据式(2)得到ITO薄膜应变计的 GF 值。

1.3 试验程序

选用耐高温、绝缘电阻高的 Al_2O_3 作为基底,将其设计为等强度梁形状。依次采用丙酮、乙醇、去离子水对基底进行超声清洗,用氮气吹拂并烘干。利用磁控溅射系统以及ITO靶材(纯度 $\geq 99.99\%$, $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2=90:10$ (质量分数))在 Al_2O_3 基底上沉积薄膜。沉积前将溅射室的气压抽真空至 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$,然后通入氩气,在 0.65Pa 气压的室温环境中沉积 1h ,得到 $3\mu\text{m}$ 厚的ITO薄膜。之后利用光刻工艺将ITO薄膜应变计在薄膜上图形化,用王水($\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$)进行腐蚀得到高温ITO薄膜应变计。之后,将制备得到的应变计在 1000°C 中退火 2h 。采用自行设计的高温标定设备进行高温应变试验,如图1所示。

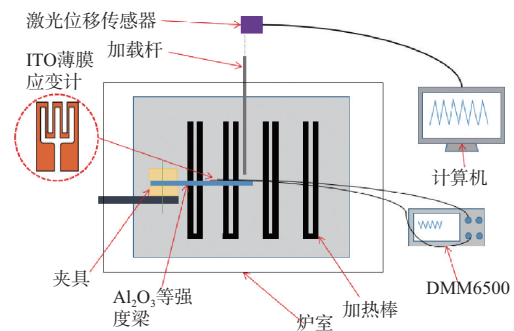


图1 高温标定设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of high temperature calibration equipment

利用 Al_2O_3 夹具固定等强度梁基底,采用热电偶监测炉内温度,将炉升温至 900°C ,通过直线丝杆电机连接加载杆对等强度梁施加 1.5mm 的位移载荷,使应变计产生微应变,通过激

光位移传感器检测电机丝杆末端的位移,进而得到等强度梁产生的弯曲变形量,用高精度数字万用表DMM6500来记录高温ITO薄膜应变计电阻随时间的变化。同时,应变计产生的应变 ε 可以通过等强度梁的弯曲变形量来计算得到^[13]

$$\varepsilon = \frac{y \times h}{L^2} \quad (3)$$

式中: y 为等强度梁的弯曲变形量; h 为等强度梁基底的厚度; L 为等强度梁未固定部分的长度。

2 结果与讨论

图2是在不同温度环境下对敏感栅长度为3mm、4mm、5mm的高温ITO薄膜应变计施加 $210\mu\varepsilon$ 时,不同敏感栅长度应变计的GF仿真与测试结果对比图。

可以发现,在不同温度下,改变敏感栅的长度会对高温

ITO薄膜应变计的GF产生影响,随着敏感栅长度的增加,应变计GF也在增大。在 25°C 、 600°C 、 800°C 和 900°C 时,对比测试结果可以发现,相比3mm敏感栅长度的应变计,5mm敏感栅长度的应变计GF分别提高了40%、28%、36%、79%。这是因为随着敏感栅长度的增加,横栅产生的压应变不变,而敏感栅产生的拉应变增大,使测量得到的总应变更加接近真实值,提高了测量精度。同时应变计总电阻变化量也随之增大,使计算得到GF值也增大,更加接近真实GF值。图3是施加 $210\mu\varepsilon$ 时,不同温度下高温ITO薄膜应变计电阻变化率随施加微应变的结果,可以发现,在受载时,不同敏感栅长度的应变计电阻变化率与微应变呈现一定的线性关系,由式(2)可知,图3中斜率即为应变计GF,说明在不同高温环境中,敏感栅长度均对应变计GF有较大的影响,增大敏感栅长度能够使高温ITO薄膜应变计在不同高温下的GF有一定的提升。

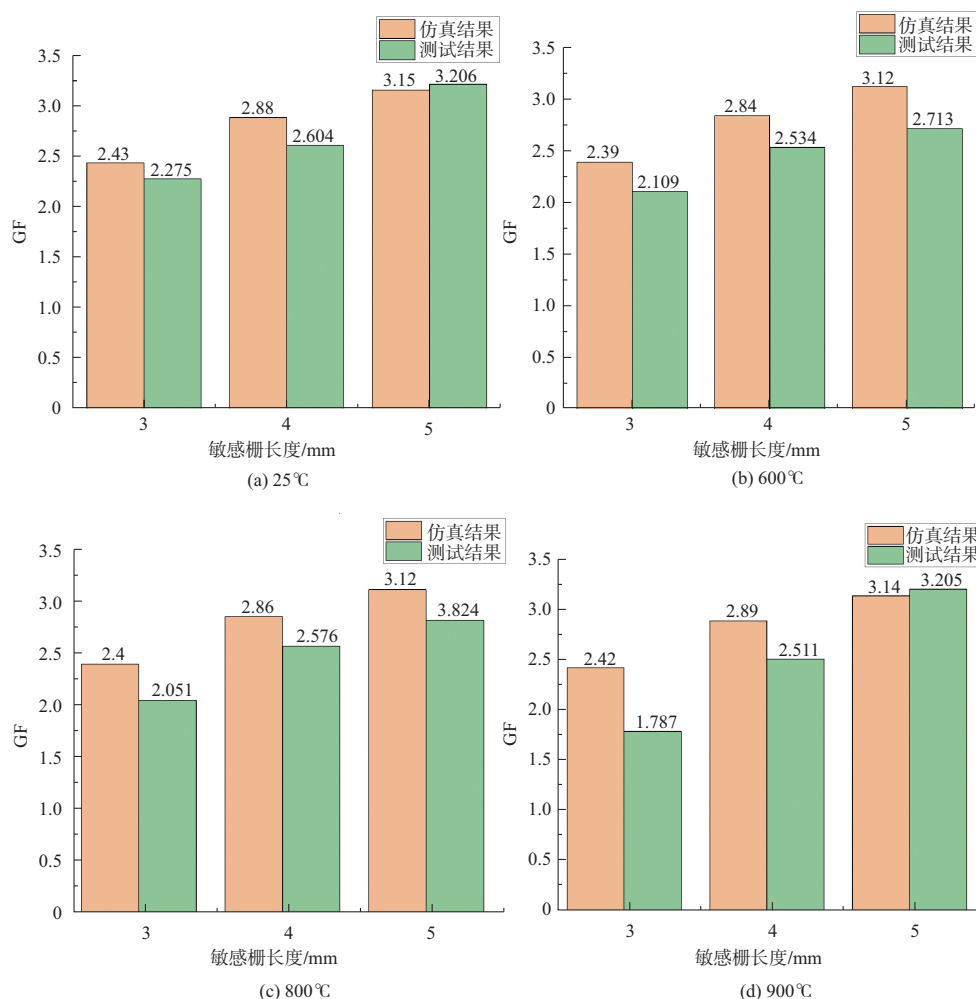


图2 不同温度下不同敏感栅长度的ITO薄膜应变计GF仿真及测试

Fig.2 Simulation and test results of GFs in ITO strain gauges with different sensitive grid lengths at different temperatures

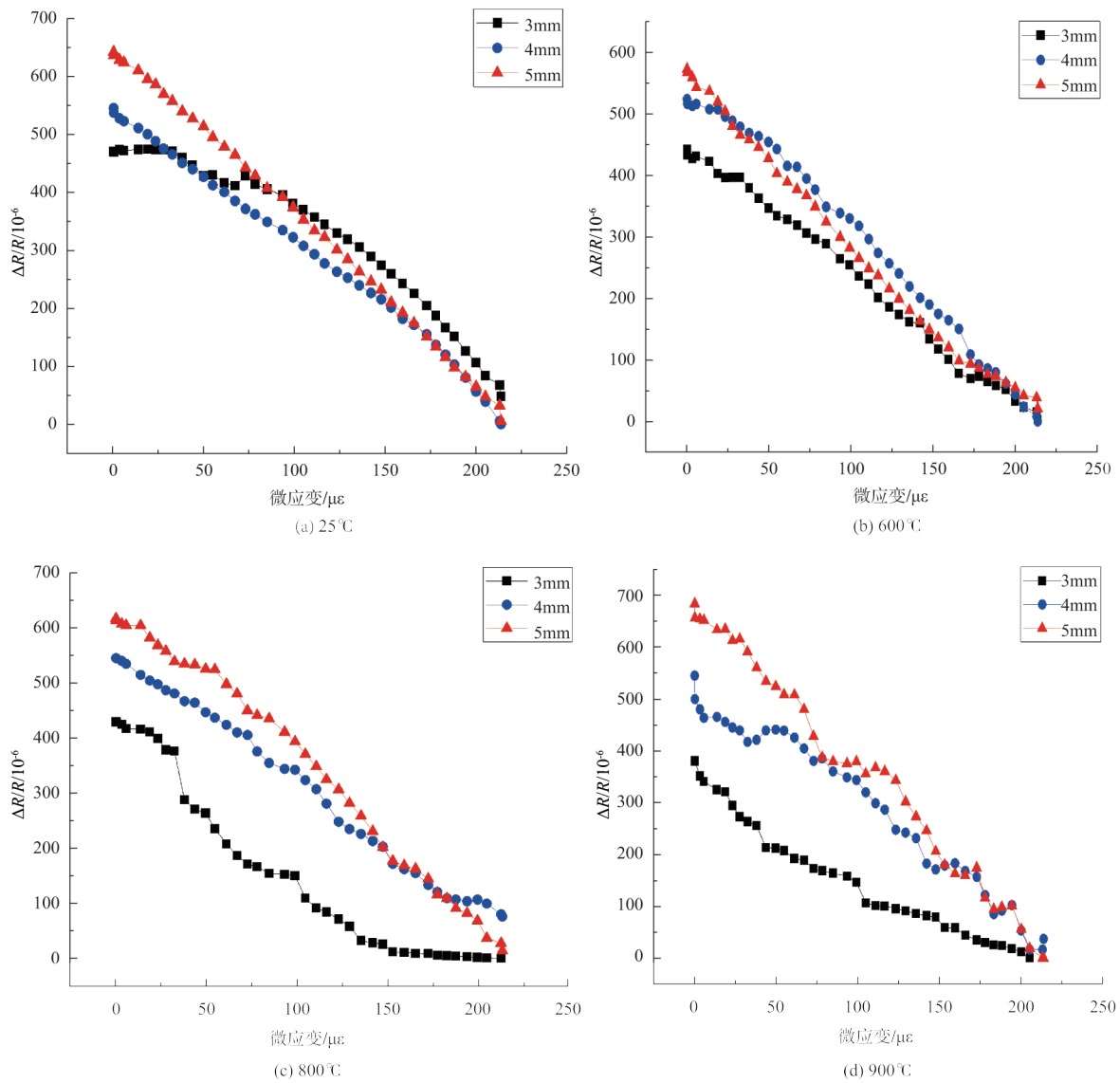


图3 不同温度下不同敏感栅长度的ITO薄膜应变计电阻变化率随微应变增加的变化

Fig.3 Resistance change rate with strain of ITO strain gauges with different sensitive grid lengths at different temperatures

图4分别是不同温度环境下,敏感栅数量为4栅、6栅、8栅、10栅的应变计受载时GF仿真与测试结果。可以发现,在不同温度下,高温ITO薄膜应变计敏感栅数量的不同均会对其GF产生影响。随着敏感栅数量的增加,GF先增大后减小,存在最优中间值,最优值是6栅,测试结果与仿真结果相符。由测试结果可以发现,在25°C、600°C、800°C和900°C时,对比10栅的高温ITO薄膜应变计,6栅的应变计GF分别提高了21%、35%、38%和55%。这是因为敏感栅数量的增加间接增加了敏感栅的长度,使应变计测得的应变值更加接近真实值,提高了测量精度,也使得计算得到的GF值更加接近真实值,使GF增大。然而,当敏感栅数量超过6栅时,敏感栅数量的增加使高温ITO薄膜应变计与

Al₂O₃基底的接触面积过大,应变从基底向应变计的传递中,应变传递误差增大,降低了测量精度,使GF下降。

图5是加载210με时不同温度下不同敏感栅数量的高温ITO薄膜应变计电阻变化率输出情况,可以发现各个应变计电阻变化率与微应变呈现一定线性关系。对比图3发现,在同一温度下,不同敏感栅数量的应变计斜率差别较小,这表明相比敏感栅长度对应变计GF的影响,敏感栅数量的改变对其影响较小。

综上所述,可以得到最优的高温ITO薄膜应变计参数,即敏感栅长度为5mm,敏感栅数量为6栅。在不同温度下,对具有最优参数的高温ITO薄膜应变计进行高温循环测试,其均表现出良好的压阻变化,响应迅速,滞后时间较短。

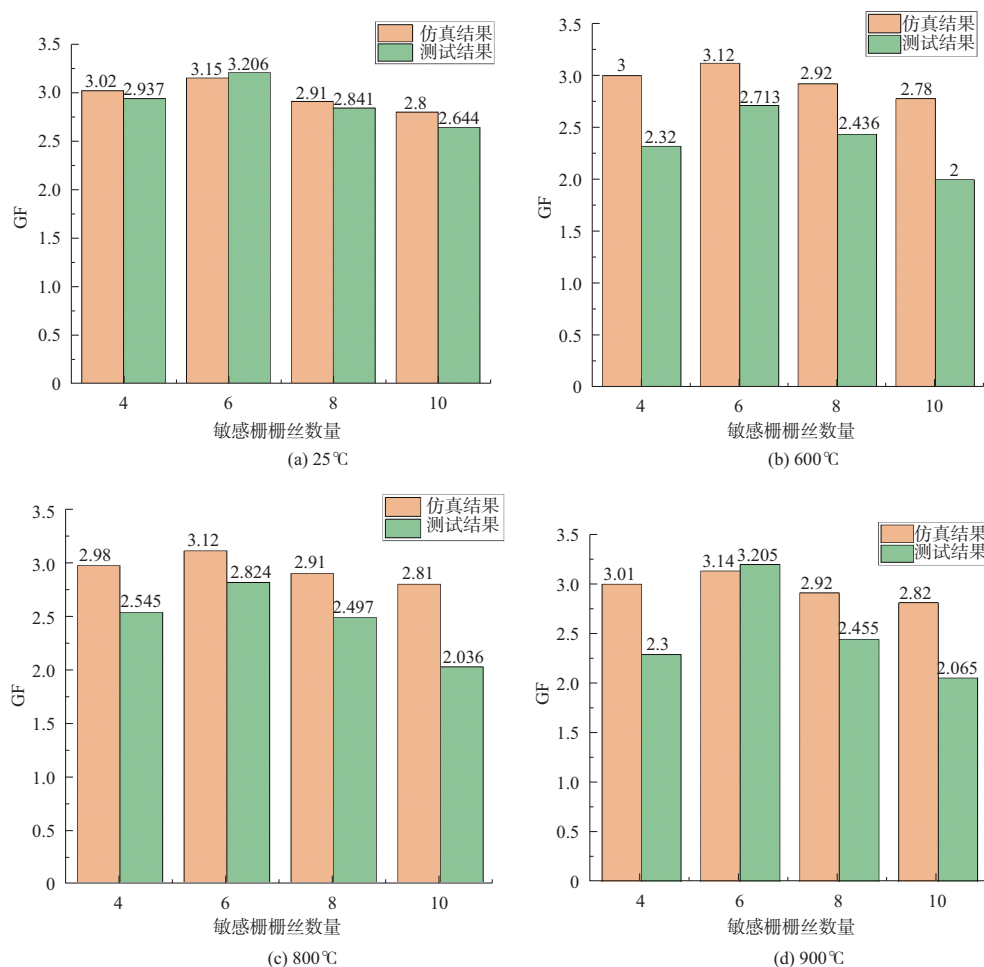


图4 不同温度下不同敏感栅数量的ITO薄膜应变计GF仿真及测试结果

Fig.4 Simulation and test results of GF in ITO strain gauges with different number of sensitive grids at different temperatures

经计算,该参数的高温ITO薄膜应变计在25°C、600°C、800°C和900°C下的GF分别为3.207、3.174、3.238、3.214,均在3.2左右,稳定性较好。

3 结论

本文旨在研究高温ITO薄膜应变计的结构参数变化对其在不同温度下的GF影响,从而提高高温ITO薄膜应变计在高温环境的GF值。通过COMSOL仿真分析和正交试验法对结构参数的影响进行论证。结果发现,在同一整体尺寸下,ITO薄膜应变计敏感栅长度、敏感栅数量的变化均会对其在不同高温环境下的GF产生影响。不同温度下,随着敏感栅长度的增加,高温ITO薄膜应变计的GF随之增加;随着敏感栅数量的增加,应变计的GF先增大后减小,最优中间值是6栅。选择敏感栅长度5mm,敏感栅数量6栅作为整体尺寸13.5mm×8.6mm的高温ITO薄膜应变计最优结构参数,使应变计在不同温度下循环受载,其GF均保持在

3.2左右,稳定性较好。该研究方法和成果对于应用于航空领域的高温ITO薄膜应变计及其他材料应变计的结构参数设计及性能提高有一定的指导意义。

AST

参考文献

- [1] 蒋聪,熊欣,刘冕,等.空气涡轮起动机超高速涡轮包容结构性能分析与研究[J].航空科学技术,2021,32(8):37-42.
Jiang Cong, Xiong Xin, Liu Mian, et al. Performance analysis and research on ultra-high speed turbine containment structure of air turbine starter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(8):37-42.(in Chinese)
- [2] 喻成璋,刘卫华.高超声速飞行器气动热预测技术研究进展[J].航空科学技术,2021,32(2):14-21.
Yu Chengzhang, Liu Weihua. Research progress of aerothermal prediction technology for hypersonic vehicle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(2):14-21.(in Chinese)

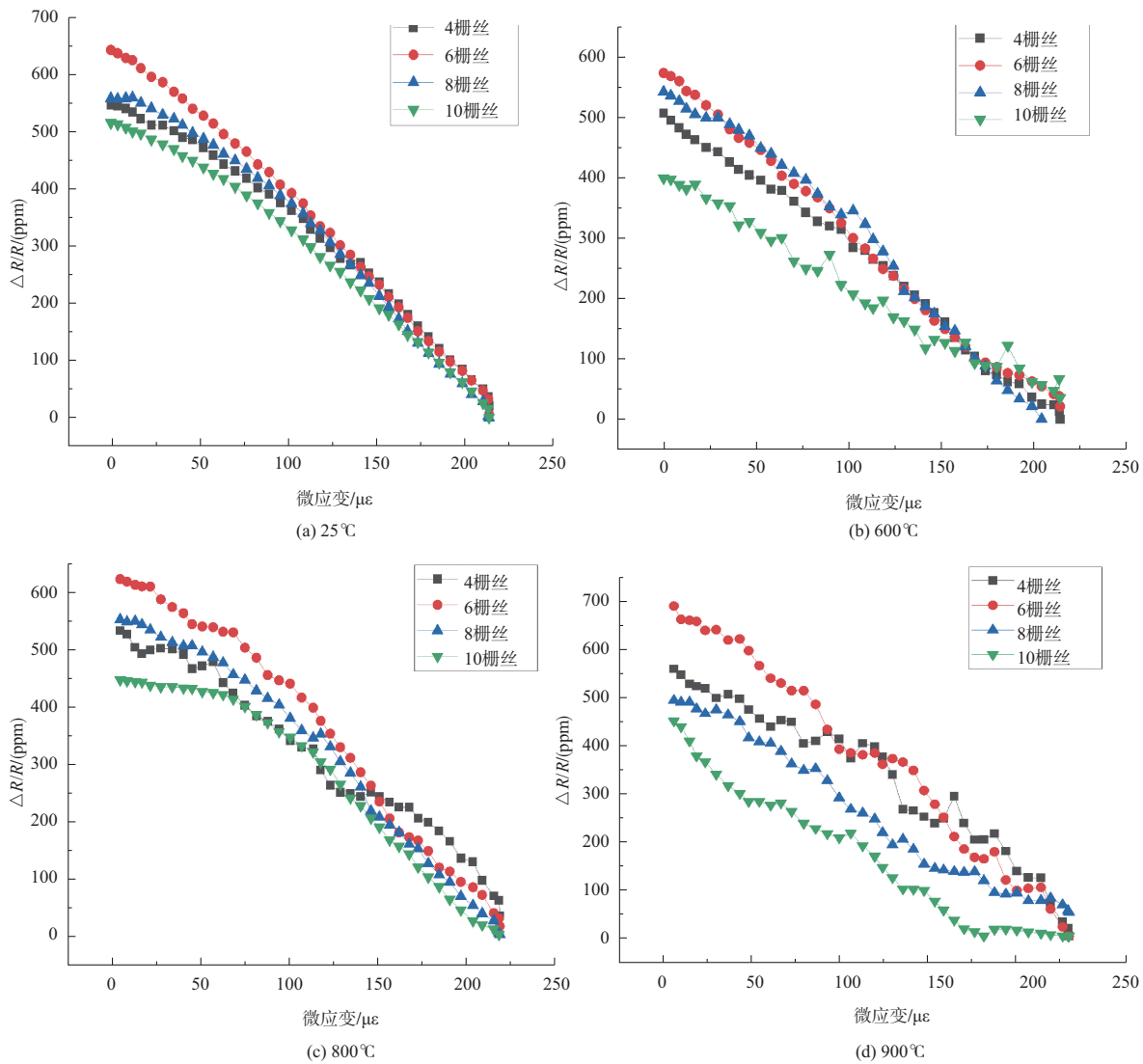


图5 不同温度下不同敏感栅数量的ITO薄膜应变计电阻变化率随微应变增加的变化

Fig.5 Resistance change rate with strain of ITO strain gauge with different number of sensitive grid at different temperature

- [3] 刘豪. 与航空发动机涡轮叶片一体化集成的薄膜应变计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

Liu Hao. Research on thin film strain gauge integrated with aero-engine turbine blade[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

- [4] Yang S, Zhang C, Yang Z, et al. Effect of nitrogen doping temperature on the resistance stability of ITO thin films[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778(1): 90-96.

- [5] Gregory O, Luo Q, Crisman Everett E. High temperature stability of indium tin oxide thin films[J]. Thin Solid Films, 2002, 406(1): 286-293.

- [6] 吕智轩. 透明ITO薄膜应变计的制备与研究[D]. 大连: 大连

交通大学, 2018.

Lyu Zhixuan. Preparation and research of transparent ITO film strain gauge[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

- [7] 宋瑞如, 艾延廷, 李成刚, 等. 应变片敏感栅参数对结构振动及寿命的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(1): 1-7.

Song Ruiyu, Ai Yanting, Li Chenggang, et al. Influence of strain gauge sensitive grid parameters on structural vibration and life[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(1): 1-7. (in Chinese)

- [8] Larry B. Applying finite element analysis method strain gage design[EB/OL]. [2013-01-15]. <http://loadcelltheory.com/Load>

- Cellu Support Theory PDF/FEA-Strain Gage Design.pdf.
- [9] 胡玉梅,张方建,邵毅敏,等.应变片敏感栅结构参数对测量精度的影响[J].重庆大学学报,2013,36(12):21-27.
- Hu Yumei, Zhang Fangjian, Shao Yimin, et al. Influence of structural parameters of strain gage-sensitive grid on measuring accuracy[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(12):21-27.(in Chinese)
- [10] 周哲.电阻应变片测量影响因素及热机解耦研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- Zhou Zhe. Study on influence factors of resistance strain gauge measurement and thermo-mechanical decoupling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.(in Chinese)
- [11] Agarwala S, Liang G G, Yeong W Y, Aerosol jet printed strain sensor: simulation studies analyzing the effect of dimension and design on performance (September 2018) [J]. IEEE Access, 2018, 6: 63080-63086.
- [12] 张朝阳.叠层陶瓷薄膜高温应变传感器关键结构研制[D].大连:大连理工大学,2020.
- Zhang Chaoyang. Development of key structures of laminated ceramic film high temperature strain sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.(in Chinese)
- [13] 刘梓才,何承义.等强度标定梁计算方法[C]//四川省力学学会2008年学术大会,2008.
- Liu Zicai, He Chengyi. Calculation method of calibrated beam with equal strength [C]// The 2008 Academic Conference of Sichuan Mechanics Society, 2008.(in Chinese)

Investigation of Structure Parameters on the Properties of ITO Film Strain Gauge at High Temperatures

Li Jian¹, Liu Zhichun¹, Zhou Hao¹, Li Qiang³, Zhao Xin³, Liang Junsheng^{1,2}, Wang Liding^{1,2}

1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

3. Key Laboratory of Hypersonic Aerodynamic Force and Heat Technology, AVIC Aerodynamics Research Institute, Shenyang 110034, China

Abstract: The ITO thin film strain gauge (TFSG) has been widely used in the strain measurement of hot sections including high temperature turbine blades of aeroengines. In order to explore the effect of the structural parameters on the gauge factor (GF) of the ITO TFSG, different grid lengths and the number of the sensitive grid in the ITO TFSGs are developed, and their pezo-resistive performance are also systematically studied at 25°C, 600°C, 800°C and 900°C. Results show that the GF of the ITO TFSGs initially increases and then decreases with the increase of the number of the sensitive grid. The GF of the ITO TFSGs grows with the enhancement of the length. Consequently, the optimal structural parameters of 5mm sensitive grid length and 6 sensitive grids are obtained. Moreover, the pezo-resistive response of the ITO TFSG prepared with the optimal structural parameters is recorded, and the GF is about 3.2 at different temperatures. The results have a certain guiding significance for the high-temperature performance optimization of ITO TFSGs.

Key Words: ITO; strain gauge; high temperature; aeroengine; GF

Received: 2021-12-18; **Revised:** 2022-02-15; **Accepted:** 2022-04-05

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2019ZD063001); Hypersonic Aerodynamics/Thermal Key Laboratory Foundation