

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.01.05

用于C/SiC高温复合材料应力测试的薄膜应变计制备及性能研究

张煜杰, 裴伟钦, 唐逸杰, 蒋洪川*

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件全国重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 针对C/SiC复合材料表面高温应变测量的难题, 提出基于高温无机胶平坦化处理、磁控溅射技术和原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)的薄膜应变计制备方法。采用刷涂无机胶的方式, 实现C/SiC复合材料表面的平坦化, 之后利用磁控溅射和原子层沉积技术, 制备Pt敏感层和复合绝缘层组成的薄膜应变计。Pt敏感层采用硬质掩膜和直流溅射的方式制备, 其电阻为 $75\ \Omega$, 厚度为 $450\ \text{nm}$ 。在绝缘层中, 通过直流溅射和原子层沉积的方式, 在C/SiC复合材料衬底表面分别沉积YSZ/ Al_2O_3 、 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 和 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 3种厚度为 $1.2\ \mu\text{m}$ 的复合绝缘层, 并对3种绝缘层的高温绝缘性能进行测试, 结果表明: HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的高温绝缘性能最佳, 在多次升降温循环后, $950\ ^\circ\text{C}$ 条件下其绝缘电阻可达 $32.94\ \text{k}\Omega$ 。基于 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层制备Pt薄膜应变计并开展测试, 结果表明: 在室温至 $600\ ^\circ\text{C}$ 条件下, 该Pt薄膜应变计具有最大2.93的应变敏感系数(Gauge Factor, GF), 最小应变误差为 0.01% ($600\ ^\circ\text{C}$ 、 $133.2\ \mu\epsilon$), 最大应变误差为 6.49% ($200\ ^\circ\text{C}$ 、 $133.2\ \mu\epsilon$), 具有良好的高温稳定性和应变响应。研究成果为C/SiC复合材料表面高温应变测量提供了新的技术方案, 对于促进高超声速飞行器热结构部件高精度应变测量技术发展具有积极意义。

关键词: C/SiC复合材料; 应变灵敏系数; 绝缘电阻; 复合绝缘层; 磁控溅射; 原子层沉积

中图分类号: TB93; TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 01-0080-08

Fabrication and performance study of thin-film strain gauges for strain test of high-temperature C/SiC composites

ZHANG Yujie, PEI Weiqing, TANG Yijie, JIANG Hongchuan*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A thin film strain gauge fabrication method was proposed based on high-temperature inorganic glue flattening treatment, magnetron sputtering technology and atomic layer deposition (ALD), aiming at solving the problem of high-temperature strain measurement on the surface of C/SiC composite materials. The surface of the C/SiC composite material was flattened by brushing inorganic glue, and then a thin film strain gauge consisting of a Pt sensitive layer and a composite insulating layer was prepared using magnetron sputtering and atomic layer deposition technology. Specifically, the Pt sensing layer was prepared by direct current (DC) sputtering through complex surface patterning technology with a

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3801700); 航空科学基金项目(20230046080008)

引用格式: 张煜杰, 裴伟钦, 唐逸杰, 等. 用于C/SiC高温复合材料应力测试的薄膜应变计制备及性能研究[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 80-87.

Citation: ZHANG Y J, PEI W Q, TANG Y J, et al. Fabrication and performance study of thin-film strain gauges for strain test of high-temperature C/SiC composites[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 80-87.



hard-mask, achieving a resistance of $75\ \Omega$ and a thickness of 450 nm. For the insulating layers, three types of composite insulating layers (YSZ/ Al_2O_3 , Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 , and HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 composite layers with a thickness of 1.2 μm) were prepared via DC sputtering and atomic layer deposition. A comparative study was emphatically conducted to evaluate the high-temperature insulation performance of the three insulating layers. The results indicated that the HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 composite insulating layer exhibited the best performance, with an insulation resistance of 32.94 $\text{k}\Omega$ at 950 $^\circ\text{C}$ after multiple thermal cycles. Strain testing under a temperature range from room temperature to 600 $^\circ\text{C}$ revealed that the Pt strain gauge fabricated based on HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 composite insulation layer achieved a maximum gauge factor (GF) of 2.93. The minimum and maximum measurement errors were 0.01% (600 $^\circ\text{C}$, 133.2 $\mu\epsilon$) and 6.49% (200 $^\circ\text{C}$, 133.2 $\mu\epsilon$), respectively. The strain gauge exhibited superior high temperature stability and strain response. The research results provide a new technical solution for high-temperature strain measurement on the surface of C/SiC composite materials, which possessed positive significance for promoting the development of high-precision strain measurement technology for thermal structural components of hypersonic vehicles.

Key words: C/SiC composite materials; gauge factor; insulation resistance; composite insulating layer; magnetron sputtering; atomic layer deposition

0 引言

高超声速飞行器的热结构部件长时间承载因震动、旋转、热冲击产生的复杂的机械载荷,载荷产生的热结构破坏性应变会严重影响飞行器的性能及使用寿命。如何准确测量飞行器飞行过程中产生的应变是研究人员重点关注的问题,目前常用的应变监测方法包括基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)传感器的测量方法^[1-3]、基于数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)的测量方法^[4-6]、基于贴片式应变片的测量方法^[7-8]、基于薄膜电阻式应变计的测量方法等。薄膜电阻式应变计基于真空镀膜技术直接沉积在待测表面实现应变测量,具有质量轻、响应快、不破坏待测表面等优点^[9],适用于高温、快响应、高精度测量^[10]。随着相关技术的快速发展,基于薄膜电阻式应变计的测量方法在航空航天等领域中的应用愈发广泛^[11]。

C/SiC复合材料具有低密度、高比强度、低热膨胀系数、高抗氧化性、耐腐蚀、耐热震以及耐高温等优点^[12]。为满足高超声速飞行器热结构件的轻量化需求,在制造机翼、发动机等关键部件时广泛地采用了C/SiC复合材料^[13]。尽管C/SiC复合材料在高温热结构领域具有巨大的应用潜力^[14],但由于其表面特性复杂、制备难度大,在该材料基底上制备薄膜应变计的研究仍处于起步阶段,相关报道较少。相比之下,在金属基底上制备薄

膜应变计的研究已较为成熟,文献[15]报道了在合金衬底上制备PtW薄膜应变计的技术,文献[16]报道了在镍基合金涡轮叶片上制备FeCrAl薄膜应变计的技术,文献[17]报道了在不锈钢基底上制备(100)择优取向的ITO薄膜应变计的技术,文献[18]报道了在蓝宝石基底上制备TiAlN薄膜应变计的技术。这些研究在高温环境下的材料选择、工艺优化以及提升薄膜应变计性能方面积累了丰富的经验,为C/SiC复合材料基底上薄膜应变计的制备提供了重要技术参考。

在高温C/SiC复合材料上进行应变测量时,普遍存在“测不到、测不准”的难题,主要体现为两方面:①由于C/SiC表面的平织纹结构存在较多孔隙,无法直接在C/SiC复合材料表面沉积薄膜^[19];②需要解决应变计在C/SiC复合材料上的应力传导问题。针对上述问题,本文提出基于高温无机胶平坦化处理、磁控溅射技术和ALD的薄膜应变计制备方案。通过高温无机胶平坦化处理的方式,有效降低C/SiC材料的表面粗糙度,改善薄膜沉积条件。YSZ/ Al_2O_3 复合材料具有良好的绝缘性能^[20],但是在800 $^\circ\text{C}$ 条件下YSZ/ Al_2O_3 复合薄膜的绝缘电阻仅约10 $\text{k}\Omega$ ^[21],因此应用ALD技术对YSZ/ Al_2O_3 复合层进行处理,以进一步改善其绝缘性能。 HfO_2 具有高熔点、优异的热稳定性、抗氧化性及高介电常数^[22],基于其制备 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层,对该复合绝缘层的高温性能进行测试及对比分析。在此基础上,制备多层复合薄膜应变

计,并对其应变敏感系数等参数进行测试。

1 薄膜应变计制备

采用的C/SiC复合材料衬底尺寸为120 mm × 20 mm × 5 mm。在C/SiC复合材料平坦化处理时,对衬底进行15 min的丙酮、酒精和去离子水超声清洗,用WC-16型高温无机胶对C/SiC复合材料衬底表面进行均匀涂覆,以填补可能存在的微小凹坑和孔隙。WC-16型高温无机胶由高纯度氧化铝粉末(纯度≥99.5%)与稀磷酸基粘合剂混合组成。刷涂方法如下:在待涂覆区域的边缘设置0.45 mm厚度参考,在表面滴加适量WC-16溶液后,使用平整的工具均匀涂覆,以确保表面平滑且厚度一致。无机胶的固化过程如下:自室温开始,以5 °C/min的升温速率加热至190 °C,在190 °C保温5 min后,继续以5 °C/min的升温速率加热至800 °C,并在800 °C保温30 min。随后,以5 °C/min的降温速率冷却至室温。平坦化后粗糙度为680 nm。随后,将处理后的C/SiC复合材料在高温炉中进行烧结处理,以增强无机胶的附着性和稳定性。在平坦化后的C/SiC复合材料衬底上,采用直流溅射以及ALD的方式制备3种绝缘层——YSZ/Al₂O₃、Al₂O₃-YSZ/Al₂O₃和HfO₂-YSZ/Al₂O₃。最后,在优选的复合绝缘层上沉积厚度为450 nm的Pt敏感层。应变敏感栅的图形采用回线型设计,应变敏感层测量栅宽度为0.1 mm,长度为3.7 mm,共9条,厚度为500 nm左右。薄膜应变计的结构示意图如图1所示,各层材料的制备参数如表1所示。最终制备C/SiC复合材料上的薄膜应变计实物如图2所示。

2 薄膜应变计表征和性能测试

复合绝缘层的物相组成通过X射线衍射仪(X-

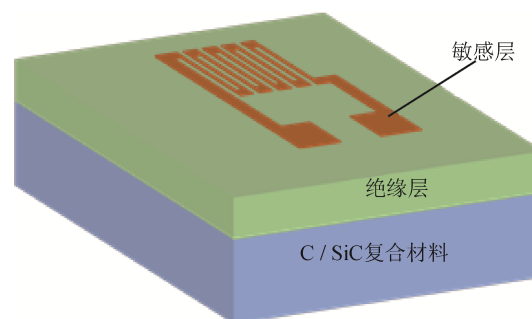


图1 薄膜应变计结构示意图

Fig.1 Thin film strain gauge structure

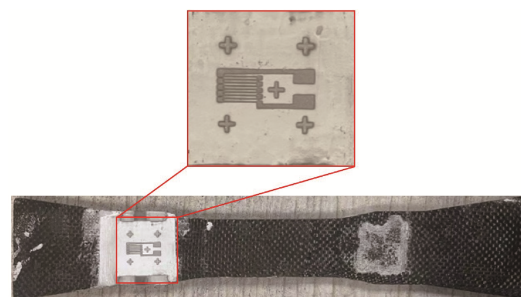


图2 C/SiC衬底上制备的应变计实物图

Fig.2 Picture of strain gauge fabricated on C/SiC substrate

Ray Diffractometer, XRD, 型号为Ultim IV)测定,设置入射波长 $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$,在25°~70°范围内进行检测。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 型号为Zeiss Sigma 360)、能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS, 型号为Oxford Ultim max 40)对退火后复合绝缘层薄膜的微结构与成分进行表征分析。膜厚和粗糙度采用台阶仪(型号为Veeco Dektak 150)测定。应变测试系统由高温炉、夹具、推杆和电阻计构成,通过PX4型温度调节计控制高温炉内的温度。首先,将C/SiC复合材料衬底固定在夹具上,并放入高温炉中,使温度升至设定值并稳定。然后,通过螺旋测微仪精确控制推杆推进,使C/SiC材料产生弯曲应变,记录其对应的推进位移 y 。悬臂梁原理如图3所示。

表1 薄膜应变计各层的制备参数

Tab.1 Fabrication parameters of each layer of thin film strain gauge

材料	制备方式	靶材或源	气氛环境	气压/Pa	功率/W	厚度/nm	制备温度
YSZ/Al ₂ O ₃	直流溅射	Y _{0.08} Zr _{0.92} + Al	O ₂ + Ar	0.4	100	1 100	室温
Al ₂ O ₃	ALD	三甲基铝		20		119	150 °C
HfO ₂	ALD	四(二甲胺)铪		27		106	200 °C
Pt	直流溅射	Pt	Ar	0.4	120	450	室温

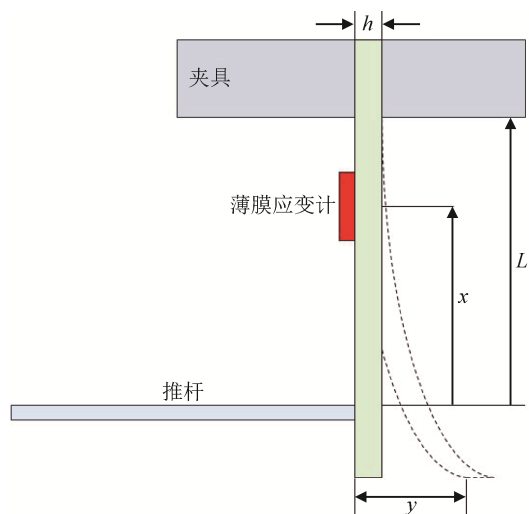


图3 悬臂梁原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of cantilever beam principle

图3中， x 为薄膜应变计中心到推杆的距离， h 为样品厚度， L 为推杆到夹具的距离。根据式(1)计算得到应变 ε 。

$$\varepsilon = \frac{3xyh}{2L^3} \quad (1)$$

每次推进后，利用日置RM3545-02电阻计测量薄膜应变计的实时电阻变化 ΔR ，连续记录50次测量数据并取平均值，以降低随机误差。在 $\Delta R/R$ -应变坐标系中绘制数据点，采用线性拟合得到斜率，斜率即为应变敏感系数。以拟合得到的应变敏感系数作为基准，与测量得到的数据进行对比，计算测量误差。

3 结果分析与讨论

3.1 物相分析

在WC-16无机胶上制备绝缘层，图4为YSZ/ Al_2O_3 、 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 和 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 3种复合绝缘层的XRD图谱。在衍射角度 $2\theta = 50^\circ$ 和 $2\theta = 63^\circ$ 时，检测到YSZ/ Al_2O_3 样品具有明显的四方晶型 ZrO_2 的峰，表明合成了具有稳定结构的 ZrO_2 。此外，YSZ/ Al_2O_3 样品XRD图谱中并未检测到 Y_2O_3 的峰，说明 Y_2O_3 进入到 ZrO_2 的晶格位中，形成了钇稳定氧化锆。然而，也存在一些单斜晶型 ZrO_2 峰，这可能是由于热力学因素造成的。在 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 样品中，同样能检测到四方晶型 ZrO_2 峰和单斜晶型 ZrO_2 峰。在 $2\theta = 37^\circ$ 和 $2\theta = 65^\circ$ 时，检测到 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 样品具有明显的单斜晶型

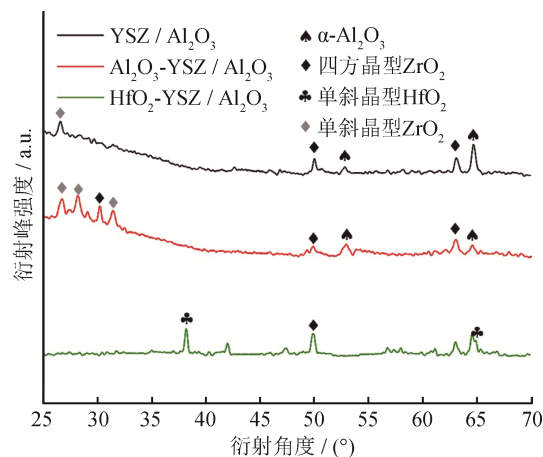


图4 升降温循环处理后3种复合绝缘层的XRD测试结果

Fig.4 XRD test results of three composite insulation layers after high temperature cycling

HfO_2 峰，说明制备出了 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层。

3.2 形貌分析

图5为升降温循环3次后YSZ/ Al_2O_3 、 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 和 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜SEM图。从图5(a)中可以看出，通过溅射制备的YSZ/ Al_2O_3 样品表面较为致密，晶粒尺寸小于 $5\mu\text{m}$ 。从图5(d)中可以看出，溅射制备的YSZ/ Al_2O_3 薄膜与无机胶粘接性较好，没有明显孔隙。在YSZ/ Al_2O_3 薄膜的基础上，通过ALD溅射制备的 Al_2O_3 和 HfO_2 薄膜表面形貌如图5(b)和图5(c)所示，可以看出ALD制备的薄膜相较溅射制备的薄膜在致密性方面有较为明显的改善。从图5(e)和图5(f)中可以看出 Al_2O_3 、 HfO_2 与YSZ/ Al_2O_3 薄膜兼容性较好，未观察到明显的裂纹等缺陷。总体而言，通过溅射和ALD制备的薄膜均具有较好的致密性，能够有效防止绝缘层上的敏感层向下渗透并与基底连通导致敏感层失效。图6为 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜EDS图，其中Al、Hf、Y、Zr元素分布均匀，没有明显的聚集现象。

3.3 绝缘性能测试

对3种绝缘层进行升降温循环，以测试多次升温后绝缘层是否失效。自室温开始，以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 1000°C ，随后以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至室温。该过程重复3次，即总计经历3轮升温至 1000°C 并冷却至室温的循环处理。图7为YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层在 $215\sim 950^\circ\text{C}$ 的温度-电阻曲线。在 215°C 时，YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的绝

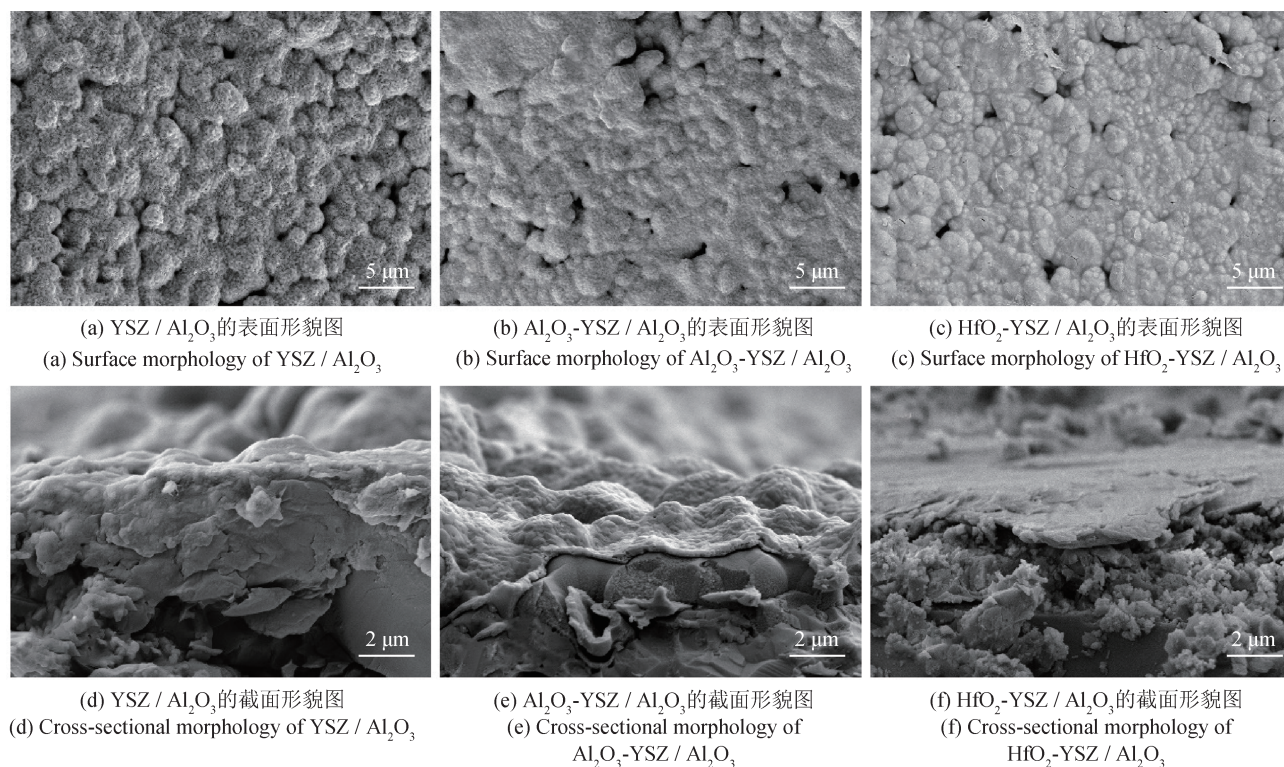


图5 升降温循环3次后YSZ/ Al_2O_3 、 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 和 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜SEM图
Fig.5 SEM images of YSZ / Al_2O_3 , Al_2O_3 -YSZ / Al_2O_3 and HfO_2 -YSZ / Al_2O_3 composite insulating layer films after 3 heating and cooling cycles

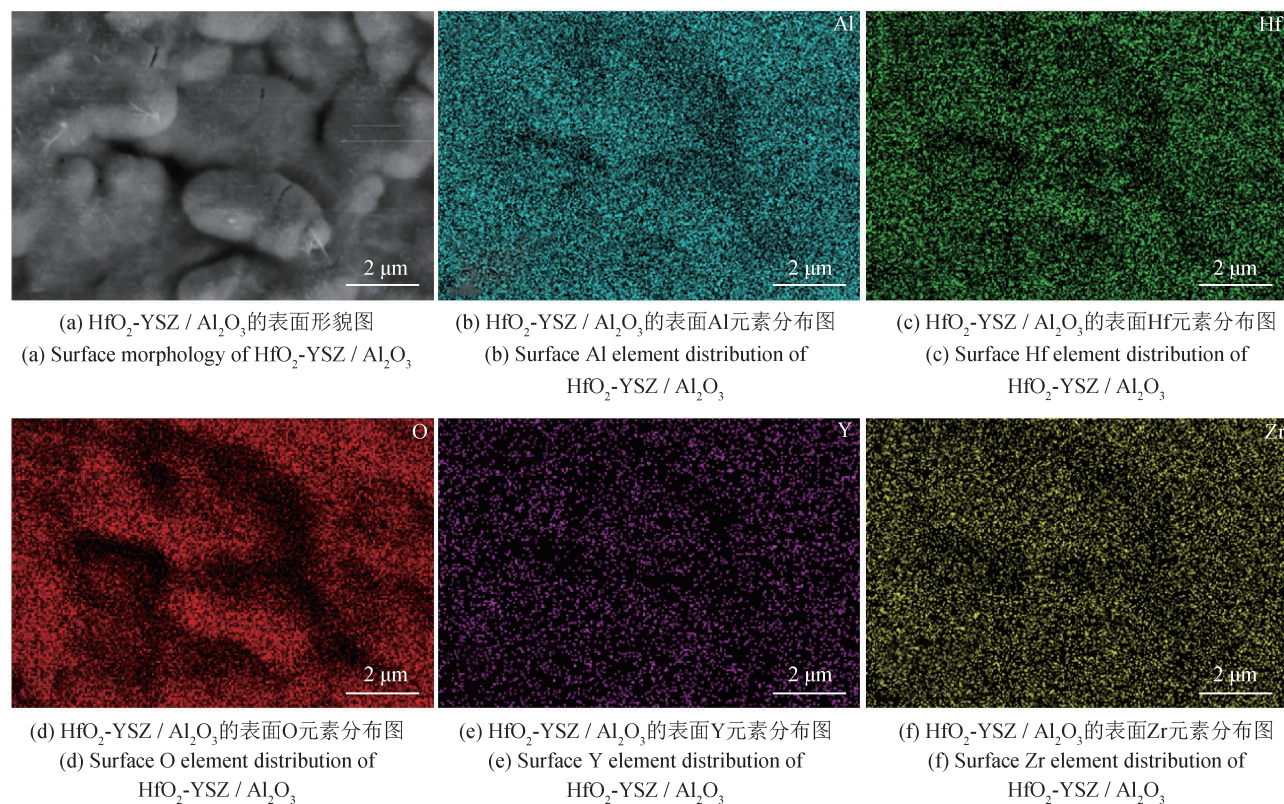


图6 升降温循环3次后 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜EDS面扫元素分布图
Fig.6 EDS surface scanning element distribution map of HfO_2 -YSZ / Al_2O_3 composite insulation layer film after 3 heating and cooling cycles

缘电阻为 $100.5\text{ M}\Omega$ ，而升温到 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的绝缘电阻仅为 $675\text{ }\Omega$ 。在第2、3次升降温循环测量中， $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的绝缘电阻下降到 $1.95\text{ k}\Omega$ ，未能满足绝缘性能需求。

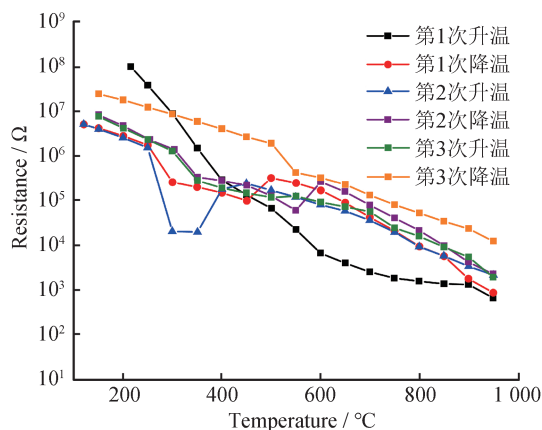


图7 YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的温度-电阻曲线

Fig.7 Temperature-resistance curve of YSZ/ Al_2O_3 insulation layer

对具有两层绝缘层结构的 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜进行温度-电阻测试，结果如图8所示。在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的绝缘电阻为 $107.6\text{ M}\Omega$ ，在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的绝缘电阻为 $12.86\text{ k}\Omega$ ，相较 YSZ/ Al_2O_3 绝缘层， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的绝缘电阻提升了2个数量级。在第2、3次升降温循环中， $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的绝缘电阻为 $16.26\text{ k}\Omega$ ，造成该现象的原因为：ALD制备的 Al_2O_3 薄膜结晶为小尺寸的等轴晶，其晶界与 YSZ/ Al_2O_3 薄膜中的柱状晶不同，提高了绝缘层的绝缘性能。但在第3次降温中， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层失效，其绝缘电阻不足 $1 \times 10^2\text{ }\Omega$ 。综上所述， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层稳定性不佳， Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层在高温下的绝缘性能无法满足薄膜应变计的需求。

图9为 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层薄膜的温度-电阻曲线。在第1次升降温循环中， $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的缘层电阻为 $106.6\text{ M}\Omega$ ，而 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时， HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的缘层电阻分别为 $57.86\text{ k}\Omega$ 与 $3.71\text{ k}\Omega$ 。在第2、3次升降温循环中， $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的绝缘电阻分别为 $335.92\text{ k}\Omega$ 与 $32.94\text{ k}\Omega$ ，与第一次升温时相比，绝缘电阻

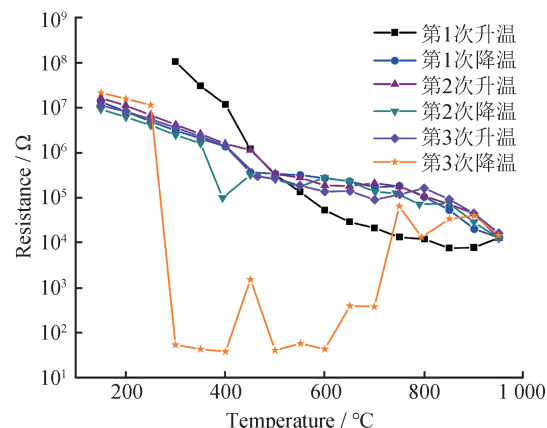


图8 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的温度-电阻曲线

Fig.8 Temperature-resistance curve of Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 insulation layer

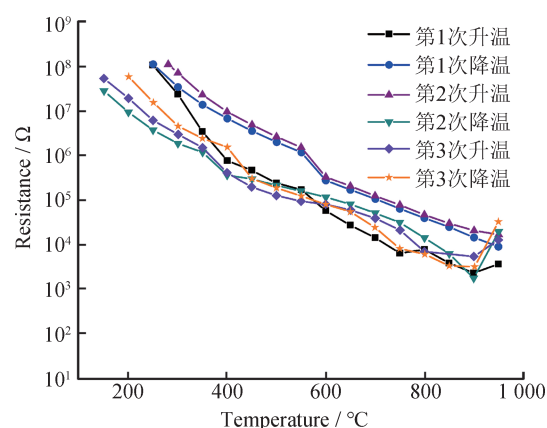


图9 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的温度-电阻曲线

Fig.9 Temperature-resistance curve of HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 insulation layer

提升了1个数量级。在升降温循环中， HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的高温绝缘电阻均大于 $80.91\text{ k}\Omega$ ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下) 和 $12.91\text{ k}\Omega$ ($950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下)。在多次循环测试中，未见 HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 绝缘层的高温绝缘电阻下降。此外，通过图4可以看出，在经历了升降温下循环后， HfO_2 由非晶态转变为单斜晶型结构，与高温下 Al_2O_3 的晶型结构不同，阻止了电子沿着晶界向衬底运动。有文献报道^[22]，在高温条件下， HfO_2 与 YSZ/ Al_2O_3 薄膜发生了互溶反应，在两层薄膜的界面处形成无定形的 Hf-Al-O 非晶层。该非晶层含有大量缺陷，可作为电子-空穴陷阱，阻碍电子的纵向迁移，从而进一步提高绝缘层的绝缘性能。综上所述，相较 YSZ/ Al_2O_3 与 Al_2O_3 -YSZ/ Al_2O_3 ， HfO_2 -YSZ/ Al_2O_3 复合绝缘层的绝缘性能更优。

3.4 应变性能测试

基于 $\text{HfO}_2\text{-YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合绝缘层制备薄膜应变计,并在不同温度下测量应变-电阻曲线,结果如图10所示。在温度25~600℃、应变0~1065.6 $\mu\epsilon$ 的测试条件下,薄膜应变计的电阻变化量与应变呈线性关系,说明所制备的多层薄膜应变计能够正常传递应力。多层薄膜应变计在25、200、400、600℃条件下的应变敏感系数值分别为2.00、1.72、1.97、2.93。在25~600℃的升温过程中,应变敏感系数呈现出先降低再升高的趋势,最小应变误差为0.01%(600℃、133.2 $\mu\epsilon$),最大应变误差为6.49%(200℃、133.2 $\mu\epsilon$)。造成应变敏感系数先降低再升高的原因为:多层薄膜应变计在常温下为非晶态薄膜,而随着温度的升高,Pt开始结晶,导致应变敏感系数也开始增大。

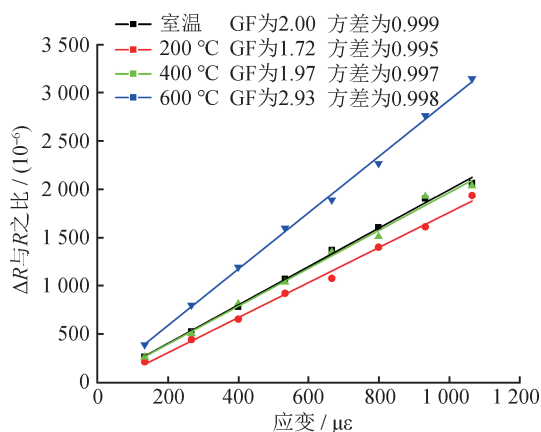


图10 不同温度条件下薄膜应变计的应变-电阻曲线
Fig.10 Strain-resistance curves of thin film strain gauges at different temperatures

4 结论

提出了基于高温无机胶平坦化处理、磁控溅射技术和ALD的薄膜应变计制备方法。针对不同材料开展绝缘性能测试,结果表明:与 $\text{YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 相比, $\text{HfO}_2\text{-YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合绝缘层具有更优异的高温绝缘性能,并表现出更好的稳定性。基于 $\text{HfO}_2\text{-YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合绝缘层制备Pt薄膜应变计,并开展应变性能测试,结果表明:该薄膜应变计最大应变敏感系数达到2.93,表现出优良的应变性能。研究成果为实现高温环境下的C/SiC复合材料应变测量提供了一种有效方案,为促进飞行器热结构部件应变传感技术发展提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 廖常锐,何俊,王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 130-138.
LIAO C R, HE J, WANG Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femto-second laser[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 130-138. (in Chinese)
- [2] 廖光萌,何建新,朱玉琴,等. 光纤光栅传感器及其应用[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 142-149.
LIAO G M, HE J X, ZHU Y Q, et al. Fiber grating sensor and application[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 142-149. (in Chinese)
- [3] HONG C, ZHANG Y, BORANA L. Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38577-38583.
- [4] 陈亚军,孙胜洁,季春明. 三维数字图像相关技术(3D DIC)在材料形变研究中的应用进展[J]. 航空材料学报, 2017, 37(4): 90-100.
CHEN Y J, SUN S J, JI C M. Progress in the application of 3D digital image correlation technology (3D DIC) in material deformation research[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(4): 90-100. (in Chinese)
- [5] PAN Z, HUANG S, SU Y, et al. Strain field measurements over 3 000 °C using 3D-digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105942.
- [6] REIS M, ADORNA M, JIROUŠEK O, et al. Improving DIC accuracy in experimental setups[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(7). DOI:10.1002/adem.201900092.
- [7] 王来志,王小平. 基于电阻应变片式传感器的电子秤设计[J]. 物联网技术, 2014, 4(2): 58-60.
WANG L Z, WANG X P. Design of electronic scale based on resistance strain gauge sensor [J]. Internet of Things Technology, 2014, 4(2): 58-60. (in Chinese)
- [8] NOLTEN U, MOKWA W. Strain gauge foil for the measurement of elastic deformations in orthopedic milling tools [C]// IEEE Sensors, 2008: 1476-1479.
- [9] 张杰,魏鑫,郑力铭,等. C/SiC 复合材料在空气中的氧化烧蚀[J]. 推进技术, 2008(8): 487-493.
ZHANG J, WEI X, ZHENG L M, et al. Ablation of C/SiC composite in oxygen-rich gas[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008(8): 487-493. (in Chinese)
- [10] 姚雪,李硕林,谭秋林,等. ITO/Pt 复合薄膜应变计制备及耐高温性能研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022 (5): 32-36, 41.
YAO X, LI S L, TAN Q L, et al. Fabrication and high

- temperature performance study of ITO/Pt composite film strain gauge[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022 (5): 32–36, 41. (in Chinese)
- [11] 陈长源, 周世威, 周积仲, 等. 高温薄膜应变计应变传递过程的仿真研究[J]. *航空科学技术*, 2024, 35(11): 76–83.
- CHEN C Y, ZHOU S W, ZHOU Z Z, et al. Simulation study on the strain transfer process of high temperature thin film strain gauges[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2024, 35(11): 76–83. (in Chinese)
- [12] 全文心, 余艺平, 方冰. 管状C/SiC复合材料高温空气氧化行为与宏细观建模研究[J]. *无机材料学报*, 2024, 39(8): 920–928.
- QUAN W X, YU Y P, FANG B. Oxidation behavior and meso-macro model of tubular C/SiC composites in high-temperature environment [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, 39(8): 920–928. (in Chinese)
- [13] 唐君, 袁泽帅, 黄汝超, 等. C/SiC复合材料在典型模拟环境下高温拉伸性能研究[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(2): 85–89.
- TANG J, YUAN Z S, HUANG R C, et al. Study on high temperature tensile properties of C/SiC composites under typical simulated environments [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(2): 85–89. (in Chinese)
- [14] 陈伟华, 王丽燕, 张晗翌, 等. 高温空气下C/SiC复合材料力学性能测试[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(6): 26–32, 48.
- CHEN W H, WANG L Y, ZHANG H Y, et al. Test of mechanical properties of C/SiC composites at elevated temperature air [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(6): 26–32, 48. (in Chinese)
- [15] 陈哲, 张劲宇, 赵晓辉. 高温退火对合金衬底上PtW薄膜应变计性能影响研究[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(5): 538–543, 550.
- CHEN Z, ZHANG J Y, ZHAO X H. Effect of high temperature annealing on the properties of PtW thin film strain gauge on alloy substrate [J]. *Electronic Components and Materials*, 2024, 43(5): 538–543, 550. (in Chinese)
- [16] 陈长源, 周世威, 周积仲, 等. 镍基合金上FeCrAl薄膜应变计的制备与性能[J]. *中国仪器仪表*, 2024(11): 69–73.
- CHEN C Y, ZHOU S W, ZHOU Z Z, et al. Preparation and properties of FeCrAl thin film strain gauge on nickel-based alloy [J]. *China Instrumentation*, 2024(11): 69–73. (in Chinese)
- [17] ZHAO S, ZHANG X, WANG Q, et al. Promoting ITO film strain gauge factor by (100) preferred orientation [J]. *Materials Letters*, 2019, 257. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126770.
- [18] ZARFL C, SCHMID P, BALOGH G, et al. TiAlN thin films as high temperature strain gauges [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 136–139.
- [19] 崔云先, 杨琮, 薛生俊. C/SiC复合材料表面高温瞬态温度传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 163–171.
- CUI Y X, YANG C, XUE S J. Study on high temperature transient temperature sensor on C/SiC composite surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 163–171. (in Chinese)
- [20] LIU H, JIANG S W, ZHAO X H, et al. YSZ/Al₂O₃ multilayered film as insulating layer for high temperature thin film strain gauge prepared on Ni-based superalloy [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279(15): 272–277.
- [21] LIU Y, JIANG H C, ZHAO X H, et al. High temperature electrical insulation and adhesion of nanocrystalline YSZ/Al₂O₃ composite film for thin-film thermocouples on Ni-based superalloy substrates [J]. *Applied Surface Science*: 2022, 579. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152169.
- [22] WANG Y S, ZHANG C C, YANG S Y, et al. Multilayer heterogeneous electrical insulation structure of HfO₂/Al₂O₃ for high-temperature thin-film sensor on superalloy substrate [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 642. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.158592.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张煜杰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高温应变敏感薄膜的制备应用。



通信作者: 蒋洪川(1971—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电子薄膜与器件、集成敏感薄膜材料及特种传感器、集成火工品薄膜及器件等。