

高温薄膜应变计应变传递过程的仿真研究



陈长源,周世威,周枳仲,蒋书文

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:薄膜应变计是一种用于高温应变测量的新型电阻式应变计,是航空发动机涡轮叶片等部件应力/应变参数测量、健康监测的先进技术。本文对航空发动机应变测量用高温薄膜应变计的应变传递过程进行了仿真研究,并与粘贴式应变计、喷涂式应变计的应变损失率进行了对比。结果表明,薄膜应变计由于其总厚度小、弹性模量水平高,在应变传递过程中应变损失率最低,应变测量准确性最高。同时,薄膜应变计的应变损失率随各膜层厚度的增加而增加。

关键词:薄膜应变计;应变传递;应变测量;仿真;剪滞理论

中图分类号:V19

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.11.010

随着先进航空发动机不断向高效率、大推重比方向发展,涡轮叶片必须工作在一个高温、高压、强振动的恶劣环境中。长期在极端环境中运行,涡轮叶片容易产生变形、裂纹等损伤,进而引起航空发动机故障。因此,监测涡轮叶片的应力应变、振动模式等状态,及时预警发动机故障的发生,对于确保航空发动机的运行状态非常重要^[1-2]。

应变测量是评估航空发动机涡轮叶片运行状态和健康状况的重要手段^[3]。目前,主要采用电阻式应变计进行接触式应变测量。电阻式应变计受到外力作用时,被测衬底发生变形,安装在表面的应变计随之发生变形,而敏感栅的变形导致其电阻值随之变化,实现将力学信号转化为电学信号。根据叶片受力发生变形后产生的反馈信息,实现对涡轮叶片运行状态和健康状况的监测。电阻式应变计通常采取粘贴^[4-5]、喷涂^[6]等方式安装在被测试件表面。近年来,通过薄膜技术直接在衬底表面制备的薄膜应变计发展很快^[7-8]。薄膜应变计具有厚度薄、灵敏度高、响应速度快、对部件干扰小等优点^[9],是用于航空发动机涡轮叶片应变监测的先进技术。

随着燃气涡轮技术的不断发展,对涡轮叶片高温应变测量的准确性提出了更高要求。应变计采用粘贴、喷涂等方式安装在被测件表面,应变测量的准确性很大程度上受

到应变计与被测部件之间应变传递情况的影响。对此,国内外学者作了大量研究。Ajovalasit等^[10]提出了一种适用于低模量结构上的校准应变测量精度的方法;Stehlin^[11]研究了一维空间时应变片与其衬底之间的作用,揭示了应变计结构特性和材料特性对应变分布的影响;Zike等^[12]研究了不同弹性模量和不同几何尺寸的应变计在试验测量时的校正方法,提高测量准确性;杨君琦^[13]通过推导表面粘贴式的电阻应变计和光纤光栅应变传感器的平均应变传递率公式,分析了几何参数和力学性能对应变测量准确性的影响;王彪等^[14]则基于剪滞理论推导了金属粘贴式应变计衬底与敏感栅之间的应变传递率公式,发现影响应变传递过程的主要因素有敏感栅、基底、胶接层的几何参数和物理特性参数;许艺青等^[15]同样基于剪滞理论建立了电阻应变计应变传递的三维模型,推导了应变传递函数,并仿真了应变计各部分的应变分布并与理论值进行比较;关于薄膜应变计的研究,多集中在其结构的制备^[16-17]及在高温环境中的稳定性^[18]和可靠性,对于其测量准确性的研究较少。

为研究薄膜应变计的应变测量准确性,分别建立粘贴式应变计、喷涂式应变计和薄膜应变计的简化模型,基于多物理场仿真方法,对不同安装方式应变计的衬底和敏感栅的应变进行仿真计算,比较不同安装方式应变计在应变传

收稿日期: 2024-04-22; 退修日期: 2024-06-28; 录用日期: 2024-08-30

基金项目: 航空科学基金(20200046080001)

引用格式: Chen Changyuan, Zhou Shiwei, Zhou Zhizhong, 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. 陈长源,周世威,周枳仲,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.

递过程中的应变损失,分析应变测量的准确性,并进一步仿真研究薄膜应变计各层薄膜厚度对应变传递损失的影响。此外,在高温合金衬底上制备薄膜应变计进行测试分析,与仿真结果加以对比。

1 仿真模型建立

建立粘贴式应变计、喷涂式应变计和薄膜应变计的几何结构时,保持敏感栅的几何尺寸一致。为简化计算,选择厚度为2mm的小尺寸长方体作为合金衬底结构。图1(a)是薄膜应变计的结构,从下到上依次为合金衬底、过渡层、绝缘层、敏感层和防护层。本文在仿真计算时忽略热生长氧化层。通过溅射等薄膜制备技术将各层薄膜沉积在衬底表

面构成薄膜应变计。其中,敏感栅在制备中一般采用两次金属掩膜法实现图形化制备。图1(b)是喷涂式应变计的结构,是将陶瓷涂层粉末用氧炔焰或等离子焰加热到熔融或半熔融状态,高速喷向部件表面,陶瓷涂层粉末一般为氧化铝微米粉末,具有很好的绝缘性能。一般喷涂形成陶瓷涂层后在涂层表面制备敏感栅和防护层结构。图1(c)是使用高温无机胶安装的粘贴式应变计,能在较高温度下使用,制备时一般直接将无机胶涂覆在衬底表面,鉴于无机胶主要成分为铝硅酸盐,其绝缘性较好,固化后直接在表面制备敏感栅和防护层结构。图1(d)是使用有机胶进行安装的粘贴式应变计结构,通过光刻等技术在有机衬底上制备敏感栅并用覆盖层保护,使用时直接将应变计用有机胶粘贴在衬底表面,是目前最常用的应变计安装方法。

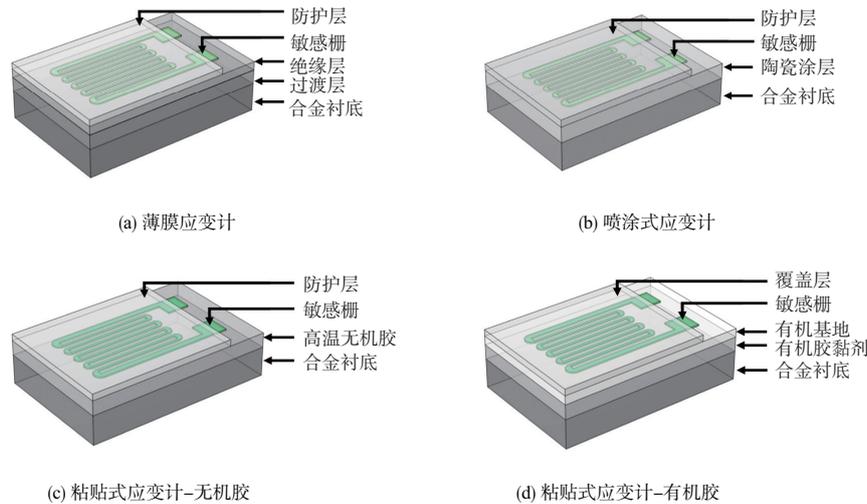


图1 电阻式应变计简化结构图

Fig.1 Simplified structure diagram of resistance strain gauges

表1~表4分别列出了薄膜应变计、喷涂式应变计和粘贴式应变计的组成及其在常温条件下的材料参数。衬底采用与叶片成分相近的GH 4169合金(Inconel 718)。敏感栅材料选择FeCrAl、PdCr、NiCr合金以及Pt金属,表5列出了材料相关参数。其中,PdCr合金的材料参数难以查找,以Pd金属的参数替代。

进行有限元仿真时,模拟实际测试环境,将合金衬底一侧固定约束,对另一侧施加不同的载荷使得衬底产生最高达到1000 $\mu\epsilon$ 以上的拉伸应变(平均值),同时检测敏感栅的拉伸应变(平均值),根据式(1)得出应变传递过程中的应变损失率。应变损失率越小,表明应变传递效率越高,应变测量越准确。

表1 薄膜应变计组成及材料参数

Table 1 Composition and material parameters of thin film strain gauges

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm
合金衬底	镍基合金	202	0.29	2
过渡层	NiCrAlY	200	0.30	0.010
绝缘层	Al ₂ O ₃	400	0.22	0.002
防护层	Al ₂ O ₃	400	0.22	0.002

$$\eta = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{\epsilon_0} \tag{1}$$

式中, η 为应变损失率, ϵ_0 为应变计衬底应变, ϵ_1 为应变计敏感栅应变。

本文在仿真计算应变传递过程时,作出以下假设:(1)应

表2 喷涂式应变计组成及材料参数

Table 2 Composition and material parameters of spray type strain gauges

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm
合金衬底	镍基合金	202	0.29	2
陶瓷涂层	Al ₂ O ₃	400	0.22	0.100
防护层	Al ₂ O ₃	400	0.22	0.002

表3 粘贴式应变计(无机胶)组成及材料参数

Table 3 Composition and material parameters of adhesive strain gauges (inorganic adhesive)

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm
合金衬底	镍基合金	202	0.29	2
无机胶	铝硅酸盐	224	0.28	0.030
防护层	Al ₂ O ₃	400	0.22	0.002

表4 粘贴式应变计(有机胶)组成及材料参数

Table 4 Composition and material parameters of adhesive strain gauges (organic adhesive)

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm
合金衬底	镍基合金	202	0.29	2
有机胶	环氧树脂	3.3	0.38	0.030
有机基底	聚酰亚胺	2.2	0.34	0.050
覆盖层	聚酰亚胺	2.2	0.34	0.020

表5 应变计敏感栅材料

Table 5 Strain gauge sensing grid material

敏感栅材料	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm
FeCrAl	220	0.30	0.003
NiCr	218	0.33	0.003
Pt	168	0.38	0.003
PdCr	125	0.39	0.003

应变计各层材料均为线弹性材料且各向同性;(2)各层界面之间光滑平整且结合紧密,无相对滑移;(3)衬底仅受拉伸方向载荷作用,应变通过各层结构传递给敏感栅;(4)仿真中检测的所有应变均为平均值。

2 仿真分析

2.1 不同安装方式应变计的应变损失率

为比较薄膜应变计、喷涂式应变计和粘贴式应变计在应变传递过程中的应变损失率大小,分别用FeCrAl、NiCr、Pt和PdCr作为敏感栅材料进行仿真,并根据式(1)计算应变损失率。常温条件下,计算结果如图2所示。

根据图2所知,不论采用何种敏感栅材料,薄膜应变计在应变传递过程中的应变损失率最低,即在实际测试环境

中通过薄膜应变计进行应变测量的准确性最高。基于剪滞理论的分析认为^[14],薄膜应变计整体厚度比较薄,且整体弹性模量水平高,因此应变传递效率高,应变损失少。

另外,图2(c)和图2(d)中两种粘贴式应变计应变损失率存在差异。根据剪滞理论,以铝硅酸盐为主要成分的高温无机胶弹性模量达到200GPa以上,而环氧树脂胶和聚酰亚胺基底和覆盖层弹性模量仅有2~3GPa,因此使用无机胶的粘贴式应变计在应变传递过程中应变损失较少。此外,敏感栅材料的不同对有机胶粘贴式应变计造成的影响更加明显,不同敏感栅材料弹性模量相差最高达几十吉帕斯卡,这相对于弹性模量仅有2~3GPa的有机材料,变动显著,从而导致应变传递过程变化明显,应变损失率变化较大。

从图2也可以看出,在1200 μe 范围内,随着施加载荷的逐步增大,衬底应变逐步升高,但应变损失率保持基本稳定,说明应变传递过程中应变损失也在等比例增加,符合材料线弹性的假设,说明了外加载荷的变化基本不会对应变传递过程造成显著影响。

2.2 不同温度下应变计的应变损失率

上文已经说明,常温条件下薄膜应变计在应变传递过程中应变损失率最低,应变传递效率最高。为了更全面地比较不同安装方式应变计的应变传递情况,以FeCrAl合金为敏感栅材料,分别仿真计算4种安装方式应变计在不同温度条件下的应变损失率。

图3是不同安装方式FeCrAl应变计在25 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、600 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ 和1000 $^{\circ}\text{C}$ 时的应变损失率结果。其中,有机胶粘贴式应变计受到本身材料的限制,不能应用于较高温,仅考虑温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 和200 $^{\circ}\text{C}$ 情形。由图3可知,这几种安装方式的应变计应变损失率均随着温度的升高而变大。但薄膜应变计在1000 $^{\circ}\text{C}$ 时应变损失率也远低于其他三种安装方式在常温条件下的应变损失率。结果说明,薄膜应变计在高温环境中应变传递效率也较高,可以保证应变测量的准确性。

此外,根据图3可知,以200 $^{\circ}\text{C}$ 为一间隔,随着温度的升高,几种安装方式应变计的应变损失率增加的幅度也在逐渐变大。分析发现,几种安装方式应变计的组成材料多为合金、氧化物陶瓷和有机材料,这些材料的物理性能和力学性能参数对温度变化敏感。温度变化时,材料的性能会随之改变,根据剪滞理论^[14,19],材料性能的变化会改变剪滞系数,导致应变传递过程发生变化,表现为应变损失率的变化。应变损失率增幅的变大是因为部分材料性能的变化并非线性的,温度越高,材料性能的变化幅度越大。

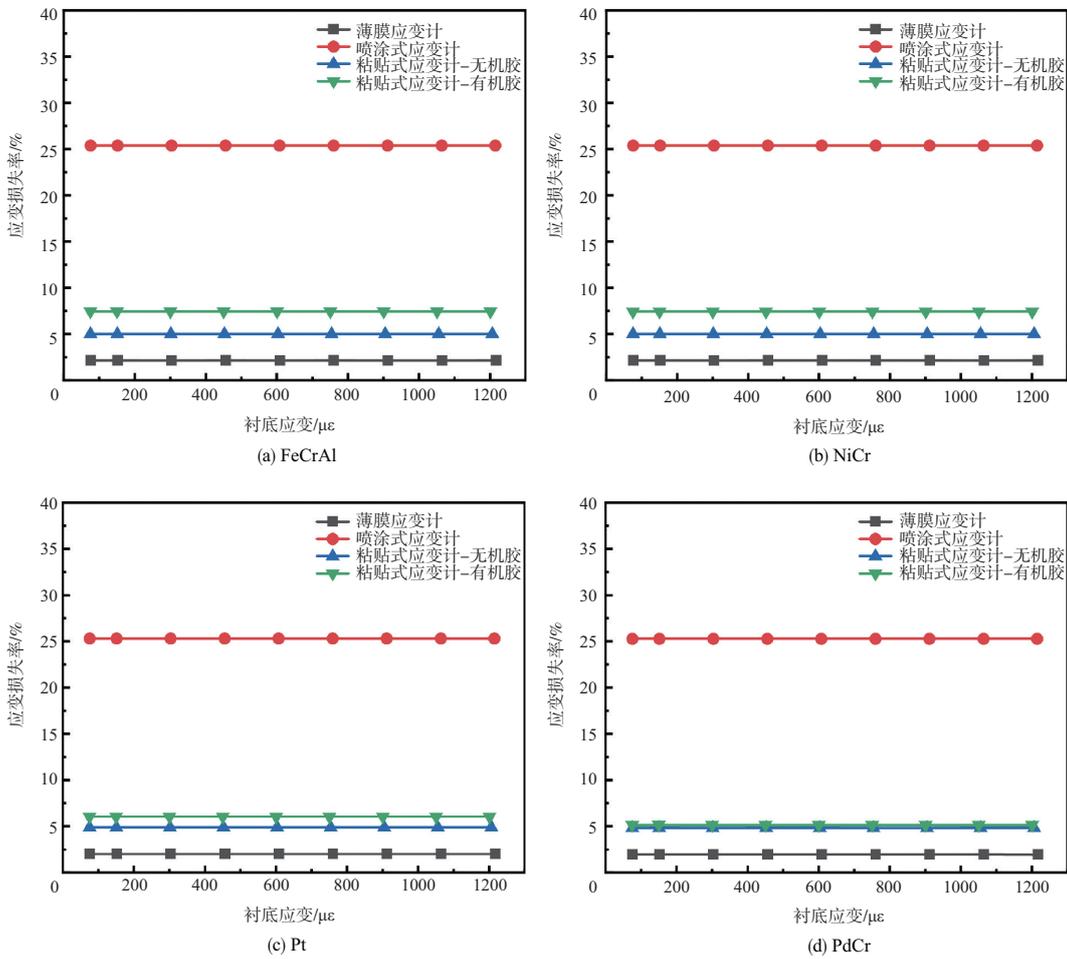


图2 不同敏感栅材料4种安装方式应变计的应变损失率

Fig.2 Strain loss rates of four mounting strain gauges with different sensitive grid materials

2.3 薄膜应变计结构对应变损失率的影响

综合上述仿真结果可知,薄膜应变计在应变传递过程中应变传递效率最高,应变测量的准确性最高,表现为应变从衬底传递到敏感栅过程中损失率最低。

剪滞理论的研究表明,粘贴式应变计的基底、胶黏剂和敏感栅的厚度会影响其应变传递过程,导致应变传递效率的不同^[14]。据此,同样考虑薄膜应变计结构参数对应变传递效率的影响。分别建立薄膜应变计过渡层、绝缘层、敏感层和防护层不同厚度的结构模型,仿真计算1000℃时的应变损失率。

表6~表10分别是薄膜应变计几何模型及材料参数。敏感栅材料为FeCrAl合金。

图4是薄膜应变计过渡层、绝缘层、敏感层和防护层厚度不同时对应的应变损失率。根据图4可知,应变从衬底传递到敏感栅过程中,应变损失率随着薄膜应变计各层厚度的增加而增加,与剪滞理论对粘贴式应变计应变传递规

律的分析相一致。此外,分析发现,薄膜应变计微米级厚度的增加并不会导致应变损失率的大幅增加。如图4所示,过渡层厚度增加到30μm,绝缘层、敏感层和防护层厚度增加到10μm,应变损失率也均在10%以内,这对薄膜应变计的结构优化、试验制备具有重要指导意义。

3 仿真与实测结果对比

采用磁控溅射在高温合金衬底上制备FeCrAl薄膜应变计试验样品。过渡层、绝缘层、敏感层和防护层的厚度分别为15μm、2μm、3μm、2μm。图5是制备在合金衬底上的薄膜应变计。通过ZwickRoell-Z050万能材料试验机标定得到FeCrAl薄膜应变计在25℃、200℃、600℃和800℃时的应变灵敏系数分别是2.73、2.80、2.95和3.25。

试验过程中,利用激光引伸计测量衬底应变,薄膜应变计敏感栅应变根据电阻值通过式(2)计算

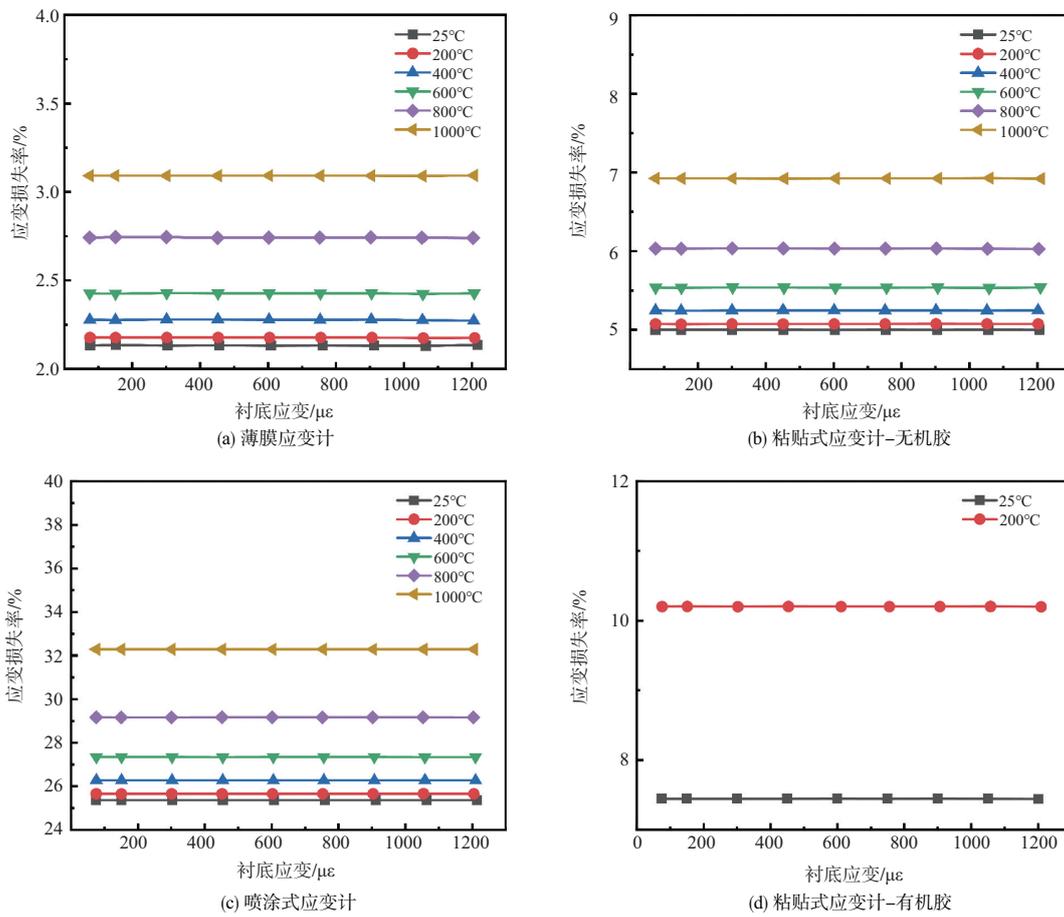


图3 FeCrAl合金为敏感栅材料时,4种安装方式应变计在不同温度条件下的应变损失率

Fig.3 Strain loss rate of four mounting strain gauges at different temperature when FeCrAl alloy is the sensitive grid material

表6 1000℃时薄膜应变计各结构材料参数

Table 6 The parameters of structural materials of thin film strain gauges at 1000℃

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比
合金衬底	镍基合金	125	0.35
过渡层	NiCrAlY	120	0.33
绝缘层	Al ₂ O ₃	340	0.24
敏感层	FeCrAl	120	0.33
防护层	Al ₂ O ₃	340	0.24

表7 薄膜应变计组成及厚度(过渡层厚度不同)

Table 7 The composition and thickness of thin film strain gauges(different thickness of transition layer)

组成部分	厚度/mm
过渡层	0.005,0.010,0.015,0.020,0.025,0.030
绝缘层	0.002
敏感层	0.003
防护层	0.002

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (2)$$

式中,K为应变计的应变灵敏系数;ΔR为应变计敏感栅的电阻

表8 薄膜应变计组成及厚度(绝缘层厚度不同)

Table 8 The composition and thickness of thin film strain gauges(different thickness of insulation layer)

组成部分	厚度/mm
过渡层	0.010
绝缘层	0.001,0.002,0.004,0.006,0.008,0.010
敏感层	0.003
防护层	0.002

表9 薄膜应变计组成及厚度(敏感层厚度不同)

Table 9 The composition and thickness of thin film strain gauges(different thickness of sensitive layer)

组成部分	厚度/mm
过渡层	0.010
绝缘层	0.002
敏感层	0.001,0.002,0.003,0.004,0.006,0.008,0.010
防护层	0.002

变化;R为应变计敏感栅初始电阻;ε为应变计测得的应变。

将试验结果与仿真结果进行比较,见表11和表12。

表10 薄膜应变计组成及厚度(防护层厚度不同)

Table 10 The composition and thickness of thin film strain gauges(different thickness of protective layer)

组成部分	厚度/mm
过渡层	0.010
绝缘层	0.002
敏感层	0.003
防护层	0,0.001,0.002,0.004,0.006,0.008,0.010

25°C时试验与仿真得到的应变损失率结果存在差异但较为接近。分析认为,在试验过程中采用的衬底并非仿真中所用的规则长方体,且试验中在制备过渡层后会经热处理再形成热生长氧化层,这些造成了试验结果和仿真结果的差异。随着温度的升高,试验得到的应变损失率与仿真结果

差距越来越大。分析认为,一方面仿真模型中设定的泊松比、弹性模量等材料力学参数与实际情况差别比较大;另一方面高温应变测量过程中,应变计可能存在重结晶、表面氧化的现象,导致应变测量误差。同时,激光引伸计测量衬底应变以及计算应变计敏感栅应变时,也受到试验过程中可能存在的扭曲应变、高温散斑和应变计电阻信号采集误差的影响。

4 结论

通过研究,可以得到以下结论:(1) 本文基于多物理场仿真方法,计算了不同安装方式应变计在应变传递过程中的应变损失率。结果表明,薄膜应变计在应变传递过程中

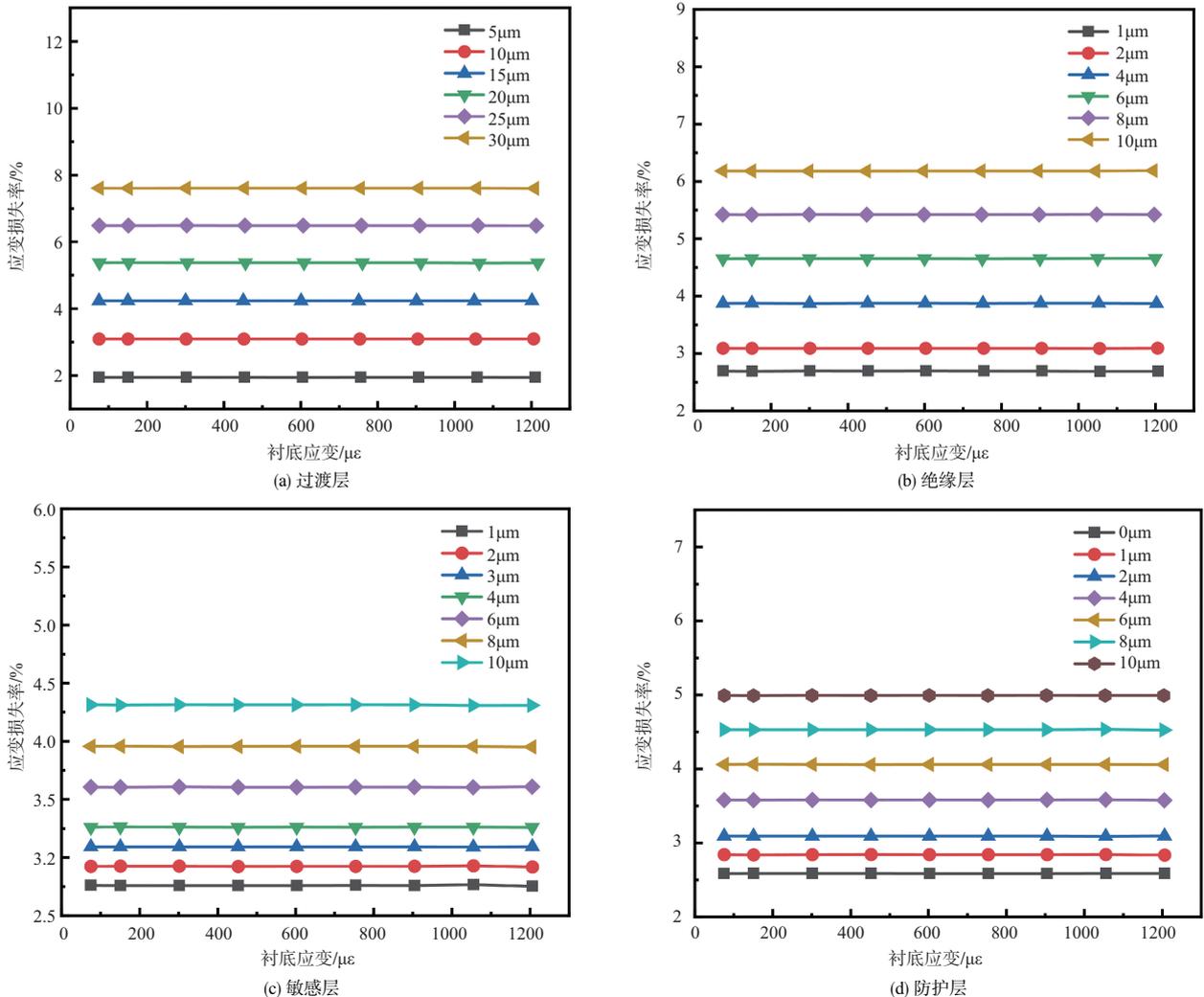


图4 薄膜应变计过渡层、绝缘层、敏感层和防护层不同厚度时的应变损失率

Fig.4 Strain loss rates of thin film strain gauges with different thicknesses of transition layers, insulation layers, sensitive layers, and protective layers

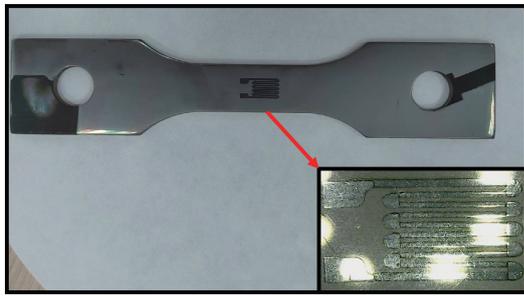


图5 高温合金衬底上薄膜应变计

Fig.5 The thin film strain gauge on superalloy substrate

表11 仿真结果

Table 11 Simulation results

温度/°C	仿真结果/ $\mu\epsilon$		应变损失率/%
	衬底应变	应变计应变	
25	600.30	583.09	2.87
200	600.35	582.65	2.94
600	600.72	580.92	3.30
800	600.11	578.28	3.64

表12 试验结果

Table 12 Test results

温度/°C	试验结果/ $\mu\epsilon$		应变损失率/%
	衬底应变	应变计应变	
25	600.58	579.39	3.53
200	600.15	576.80	3.89
600	600.53	560.16	6.72
800	600.63	549.75	8.47

应变传递效率最高,应变损失率最低。因此,薄膜应变计相比于粘贴式和喷涂式应变计,应变测量准确性更高。

(2) 仿真计算了薄膜应变计1000°C条件下不同组成厚度的应变损失率。结果表明,薄膜应变计的厚度越大,应变传递过程中的应变损失率越高,应变测量准确性越低。仿真结果对试验制备有指导作用。

(3) 试验制备了合金衬底上FeCrAl薄膜应变计。因试验过程与理想仿真过程存在区别,试验得到的应变损失率与仿真结果存在些许差异。但试验结果也表明,薄膜应变计的应变损失率随着温度的增加而增加。

AST

参考文献

[1] 徐建新,许立敬. 基于流热固耦合的航空发动机涡轮叶片仿真分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 26-33.
Xu Jianxin, Xu Lijing. Simulation analysis on aero-engine turbine blades based on fluid-thermal-solid coupling[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (2) : 26-33. (in

Chinese)
[2] 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(5): 69-75.
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 (5): 69-75. (in Chinese)
[3] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(1): 电阻应变计的由来、发展及展望[J]. 传感器世界, 1998(8) : 27-32.
Yin Fuyan. Sixty years of electric resistance strain gage technique(1) : The origin, development and prospect of resistance strain gauges[J]. Sensor Word, 1998(8) : 27-32. (in Chinese)
[4] 宋瑞如. 应变计敏感栅结构及粘贴工艺参数对寿命影响研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
Song Ruiru. Research on the influence of strain gauge sensitive grid structure and bonding process parameters on life[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020. (in Chinese)
[5] 何思龙, 宁交贤. 750°C高温电阻应变计的研究与应用[J]. 仪表材料, 1983(4) : 42-48.
He Silong, Ning Jiaoxian. Research and application of 750°C high temperature resistance strain gauges[J]. Journal of Instrument Materials, 1983(4) : 42-48. (in Chinese)
[6] 孙婧妍. 高温电阻应变片应力监测可靠性测试实验研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2022.
Sun Jingyan. Experimental study on reliability test of high temperature resistance strain gauge stress monitor[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
[7] Cui Yunxian, Li Xin, Zhang Tengyun, et al. Development of high-temperature wire-grid thin film strain gauges[J]. Sensors, 2022, 22(19): 75-95.
[8] 杨伸勇. 高温薄膜应变传感器压阻稳定性和温度效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Yang Shenyong. Study on piezoresistive stability and temperature effect of high temperature thin film strain gages [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
[9] Liu Hao, Jiang Shuwen, Zhao Xiaohui, 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: 272-277.

- [10] Ajovalasit A, Zuccarello B. Local reinforcement effect of a strain gauge installation on low modulus materials[J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2005, 40(7): 643-653.
- [11] Stehlin P. Strain distribution in and around strain gauges [J]. *Journal of Strain Analysis*, 1972, 7(3) :228-235.
- [12] Zike S, Mikkelsen L P. Correction of gauge factor for strain gauges used in polymer composite testing[J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54: 393-403.
- [13] 杨君琦. 应变传感器的应变传递理论及传感特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
Yang Junqi. Strain transfer theory and sensing property research of strain sensor[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [14] 王彪, 刘腾, 徐敬龙, 等. 金属粘贴式电阻应变计应变传递分析[J]. *中国测试*, 2016, 42(8) :1-6.
Wang Biao, Liu Teng, Xu Jinglong, et al. Strain transferring analysis of metallic bonded resistance strain gauges[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(8) :1-6. (in Chinese)
- [15] 许艺青, 杨晓翔, 韦铁平, 等. 电阻应变式传感器应变传递影响因素分析[J]. *中国测试*, 2018, 44 (1) :136-142.
Xu Yiqing, Yang Xiaoxiang, Wei Tieping, et al. Analysis of strain transfer influence factor of resistance strain sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44 (1) :136-142. (in Chinese)
- [16] Liu Hao, Mao Xiling, Cui Jinting, et al. Effect of thickness on the electrical properties of PdCr strain sensitive thin film[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30 (11) :10475-10482.
- [17] Wu Chao, Pan Xiaochuan, Lin Fan, et al. High-temperature electrical properties of polymer-derived ceramic SiBCN thin films fabricated by direct writing[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(11) :15293-15302.
- [18] Liu Hao, Mao Xiling, Cui Jinting, et al. Influence of a heterolayered $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic protective overcoat on the high temperature performance of PdCr thin film strain gauges[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(13) :16489-16495.
- [19] 王昕宇, 武文革, 李学瑞. 应变栅结构参数对合金薄膜传感器应变传递的影响[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(9) :83-87.
Wang Xinyu, Wu Wenge, Li Xuerui. Effect of strain grid structural parameters on strain transfer in alloy thin film sensors [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(9) :83-87. (in Chinese)

Simulation Study on the Strain Transfer Process of High Temperature Thin Film Strain Gauges

Chen Changyuan, Zhou Shiwei, Zhou Zhizhong, Jiang Shuwen

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: The thin film strain gauge is a novel resistive strain gauge used for high-temperature strain measurements, it is an advanced technology for measuring stress/strain parameters and health monitoring of aeroengine turbine blades. In this paper, the strain transfer process of high temperature thin film strain gauges used in aeroengine were simulated and compared with the strain loss rate of adhesive strain gauges and spray strain gauges. The results show that, due to their small total thickness and high elastic modulus level, the thin film strain gauges exhibit the lowest strain loss rate and the highest accuracy in strain measurement. Meanwhile, the strain loss rate of the thin film strain gauges increases with the thickness of each film layer.

Key Words: thin film strain gauge; strain transfer; strain measurement; simulation; shear-lag theory

Received: 2024-04-22; **Revised:** 2024-06-28; **Accepted:** 2024-08-30

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200046080001)