

基于内聚力的薄膜热偶传感器脱层失效模型研究



胡听春¹, 孙宇锋²

1. 中国航空研究院, 北京 100012

2. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘要: 发动机涡轮叶片工作在高温、高离心、高振动以及气流冲刷的恶劣工作环境中, 实时测量其表面温度至关重要。但在叶片工况下, 薄膜热偶传感器存在严重的脱层失效的问题。针对应用于航空发动机涡轮叶片表面测温的微纳米级薄膜热偶传感器在高温下的失效问题, 结合高温试验与有限元分析, 研究其在航空发动机工况下的脱层失效模型。在金属基底上制备多层薄膜热电偶样件并施加不同高温载荷, 对膜层断裂脱落现象进行观测与分析。以涡轮叶片工况载荷为输入, 利用有限元仿真软件对叶片表面应变场及薄膜应力应变场进行仿真分析。采用内聚力理论建立薄膜脱层失效模型, 分别建立界面剪切失效与剥离失效函数, 以及界面的竞争型与耦合型失效函数, 并利用有限元仿真软件进行模拟与验证。研究提出了以薄膜穿透型裂纹将伴随脱层的耦合失效模型机理, 支撑传感器设计优化。

关键词: 薄膜热电偶; 涡轮叶片; 脱层失效; 内聚力; 有限元; 高温热冲击

中图分类号: TH811

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.008

航空发动机涡轮叶片工作在高温、高离心、高振动以及气流冲刷的恶劣工作环境中, 实时测量其表面参数至关重要^[1-2]。薄膜热偶传感器基于塞贝克效应进行动态测温, 其热节点在微纳米量级, 具有广阔的应用前景。但在叶片工况下, 薄膜热偶传感器存在严重失效的问题。

国内外学者研究发现, 在热-力耦合作用下, 薄膜容易发生开裂或屈曲。美国匹兹堡大学 Evans 等^[3]指出, 热障涂层主要失效机理为内部应力不匹配引起的裂纹。美国康涅狄格大学 Jordan 等^[4]分析了热障涂层的热/残余应力状态, 并观测到薄膜失效发生在不规则界面产生的拉应力区。Zheng Jia^[5]、Toth^[6]等研究了脆性薄膜的屈曲式失效, 揭示了压应力将引发膜层分离。

对于多层薄膜脱层失效, 被广泛应用的分析方法为有限元法与内聚力模型^[7]。刘斌等^[8]研究了复杂应力下叠层薄膜的损伤, 建立薄膜层间内聚力模型描述膜层分层损伤。薛秀丽^[9]基于有限元软件内聚力模型模拟了薄膜膜层断裂、屈曲和界面脱层的过程, 指出在残余压应力作用

下, 膜层将发生演化型屈曲失效, 在拉应力作用下将发生断裂伴随脱层。Jansson 等^[10]采用有限元方法模拟涂层从基板剥落的行为, 指出裂纹密度主要取决于材料弹塑性。周英强等^[11]采用内聚力模型模拟了残余应力对韧性基板上硬质薄膜界面分层的影响, 获取了考虑残余应力时硬质薄膜/韧性基底界面分层破坏失效图。陶冶^[12]推导了内聚力模型各参数关系, 并结合有限元仿真中确定了影响薄膜黏附性的关键参数为最大法向牵引力和法向特征长度。赵盼等^[13]采用有限元法研究了金属表面微结构对薄膜界面黏结强度的影响。

现有的对多层薄膜失效的研究往往单独针对薄膜界面裂纹或边缘界面脱层, 忽略了穿透型裂纹扩展并伴随界面脱层的耦合现象。本文以应用于航空发动机涡轮叶片的微纳米级薄膜热偶传感器为对象, 研究多层薄膜结构在发动机高温载荷下的脱层失效模型, 建立多层薄膜结构在叶片工作载荷下的脱层失效模型, 为传感器失效分析与优化设计提供理论支撑, 具有重要的工程价值。

收稿日期: 2024-09-05; 退修日期: 2024-11-27; 录用日期: 2025-01-20

引用格式: Hu Tingchun, Sun Yufeng. Research on failure model of delamination of thin-film thermocouple sensor based on cohesion principle [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 64-73. 胡听春, 孙宇锋. 基于内聚力的薄膜热偶传感器脱层失效模型研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 64-73.

1 薄膜热偶传感器高温试验现象分析

为探究薄膜热偶传感器高温下的脱层失效现象,在金属基底上制备薄膜样片并对其进行高温处理,样品结构信息见表1。

表1 传感器样片结构信息
Table 1 Structure of sensor sample

膜层顺序	1	2	3	4	5	6
膜层类型	过渡层	过渡层	绝缘层	绝缘层	功能层	保护层
膜层成分	NiCrAlY	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	SiO ₂	NiCr/ NiSi	SiO ₂

对样片进行700℃高温处理后,在钨灯丝扫描电镜下观察薄膜失效现象(见图1),观察到许多圆形阶梯状脱层区域,是由于基片表面及薄膜表面光洁度不够,高温下导致了以微小的杂质为中心的圆形脱落。多个区域存在保护层、功能层、绝缘层多层同时脱落的现象,并呈阶梯状脱落形貌。

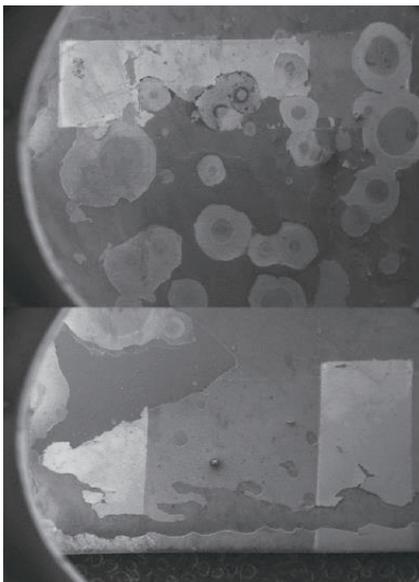


图1 电子显微镜下700℃处理后薄膜失效形貌
Fig.1 Failure morphology of sample after 700℃ thermal load under electron microscope

进一步放大倍数对薄膜脱层区域边缘进行观察(见图2),从电镜结果可知,样件各膜层间存在明显的脱落及裂纹等现象,脱层边缘薄膜翘起。

利用聚焦离子束分析系统切割并扫描膜层截面,观测到Al₂O₃薄膜内部存在多条横向裂纹,造成膜层内部断层。脱层阶梯状边缘的薄膜翘起,出现起皮现象,观测到一条9.5μm的界面裂纹(见图3)。

利用能谱仪对脱层部分元素进行扫描分析,发现残留

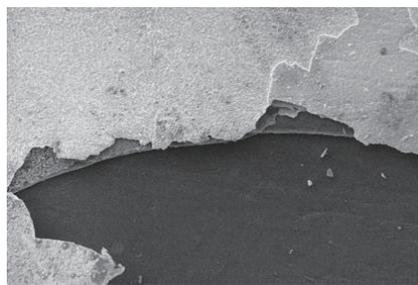


图2 薄膜脱层失效现象形貌

Fig.2 Appearance of film delamination failure phenomenon

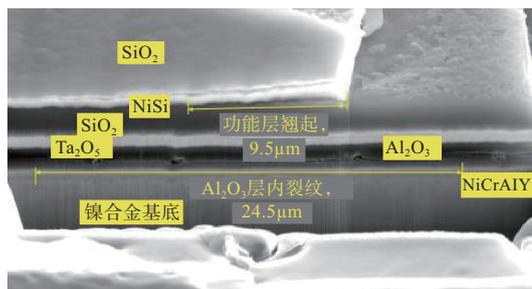


图3 薄膜截面裂纹形貌

Fig.3 Crack morphology in thin film cross section

底层的薄膜成分为过渡层的NiCrAlY膜层与Al₂O₃膜层,其上的保护层、功能层以及绝缘层各层均有脱落(见图4)。

综上所述,过渡层与基片间的黏附力相对较好,在高温下基本不会出现脱落。出现脱层的界面多为过渡层与绝缘层之间的界面、功能层与绝缘层之间的界面,以及保护层与功能层之间的界面。

2 薄膜脱层失效内聚力模型

在界面应力的作用下,当单位面积的应变能超过薄膜界面断裂能后,薄膜将会脱离基底或下层薄膜,界面发生分层破坏,又称界面开裂或界面脱层。基于内聚力理论,对薄膜脱层现象进行理论分析与仿真模拟。

2.1 薄膜内应力分析

薄膜失效主要原因为应力作用,对于本文研究的薄膜热偶传感器,其应力主要来自高温引起的热应力,以及叶片变形带来的拉应力的耦合作用。燃气轮机在工作时,其涡轮叶片受到高温高速燃气引起的热载荷、气动载荷、高速旋转产生的离心载荷以及环境的高频振动载荷的作用,本文基于有限元仿真软件进行加载并分析(见表2)。

有限元分析可得,热载荷引起叶身拉应变集中在叶片压力面,热应变量级在10⁻⁵~10⁻⁴,叶根处应变最大;气动、离心载荷引起叶身的耦合应变量级在10⁻³~10⁻⁴,压力面叶根

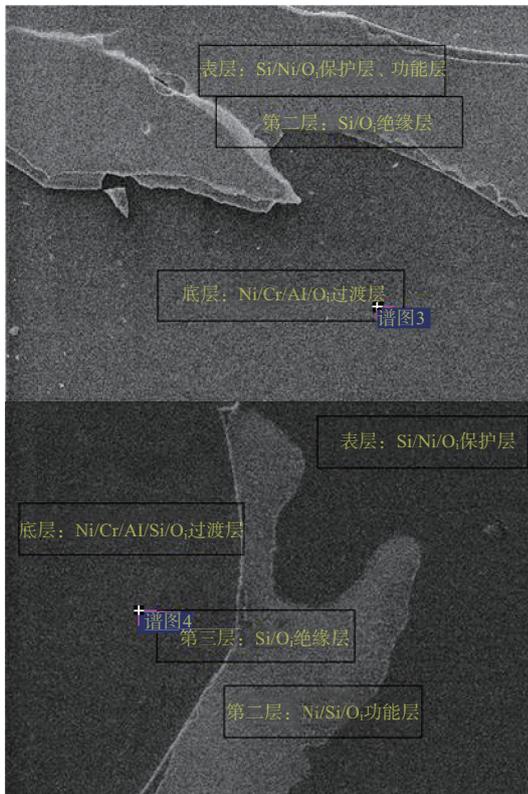


图4 薄膜脱层部分能谱仪分析

Fig.4 Analysis on thin film delamination by EDS

表2 模型加载类型及大小

Table 2 The type and size of the load

载荷类型	加载大小
热载荷	通过示温漆法测量得到,设置叶尖位置温度为850°C,缘板位置温度为700°C,榫头底部温度为550°C
离心载荷	加载工作转速6000r/min
气动载荷	叶片压力面施加载荷1.66MPa,吸力面施加载荷0.98MPa
振动载荷	依据国军标150.16A,对叶片施加PSD谱

处应变最大;由高周振动产生的振动应变,量级在 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 。

薄膜内应力将引起结构发生断裂、屈曲、翘曲剥离等失效模式,当薄膜相对于基底呈压缩状态,膜内将产生拉应力作用,容易造成膜层开裂;当薄膜相对于基底呈膨胀状态,膜内将产生压应力作用,容易造成薄膜褶皱,如图5所示。

滞滞模型可用于描述薄膜内应力的产生与规律,其应力分布如图6所示,该模型提出膜层内应力的来源为基底,途径为界面的剪切作用,薄膜内正应力 σ 在边缘迅速减小为0,界面剪切应力 τ 在边缘达到最大值;法向应力 p 在边界

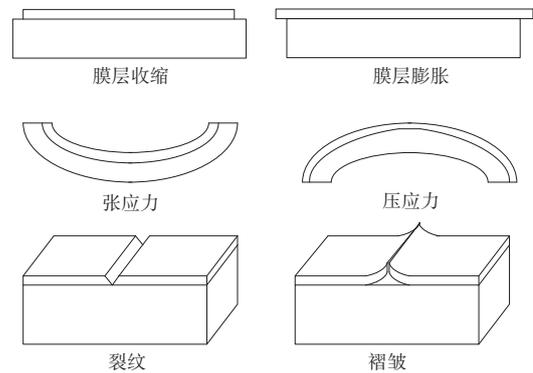


图5 薄膜受应力作用示意图

Fig.5 Diagram of thin film subjected to stress

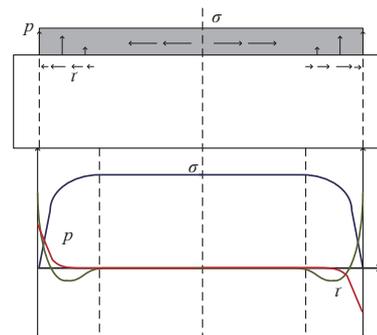


图6 应力在薄膜上的分布

Fig.6 Distribution of stress on thin films

处为张应力并朝中部迅速减小,内部是压应力,产生开口式剥离力矩^[14]。

薄膜传感器由不同材料的膜层构成,由于各层热膨胀系数不同,热载荷将造成薄膜结构热应力失配。此外,薄膜热偶传感器直接镀于叶片上,叶片表面的应变将由界面剪切传到薄膜之上,在薄膜内部产生弹性应力作用。由于各层薄膜材料弹性模量不同,基底表面应变将在膜层结构中造成弹性应力失配。

基于有限元仿真软件对薄膜传感器界面应力进行仿真分析,建立二维截面模型,并根据膜层厚度分别对各膜层网格进行细化。各膜层材料的热膨胀系数、密度、弹性模量、泊松比^[15],见表3。其中,NiCrAlY过渡层采用相似材料NiCoCrAl参数。

对二维截面模型加载1300°C温度载荷,仿真得到其法向应力(S22)/剪切应力(S12)分布,如图7所示。

由仿真结果可知,热载荷作用下靠近基底薄膜的界面剪切应力与剥离力较大,往上呈现减小趋势。界面剪切应力向边缘迅速增大,在接近边缘处达到最大,随后有轻微的下落。法向应力边缘处迅速达到最大值,并朝中部迅速减小为零,随后恢复为零。

表3 各层薄膜材料参数

Table 3 Material parameters of each film layer

膜层顺序	材料	热膨胀系数/ K^{-1}	密度/ (kg/m^3)	弹性模量/GPa	泊松比
基底	MAR247	1.49×10^{-5}	8540	144	0.27
1	NiCrAlY	1.27×10^{-5}	8180	207	0.21
2	Al_2O_3	8.6×10^{-6}	3965	400	0.22
3	Ta_2O_5	3.6×10^{-6}	8400	140	0.23
4	SiO_2	5×10^{-7}	2500	73	0.2
5	NiCr	1.7×10^{-5}	8100	206	0.3
6	SiO_2	5×10^{-7}	2500	73	0.2

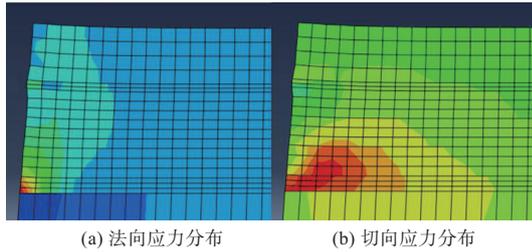


图7 薄膜界面应力分布

Fig.7 Interfacial distribution of sections

为探究基底变形对界面应力的影响,在施加温度载荷的基础上,对基底叠加 3×10^{-3} 的应变变量,以模拟离心作用下基底拉应变,得到耦合载荷作用下的界面耦合应力值。NiCrAlY-基底与 SiO_2 -NiCr界面作应力曲线图如图8、图9所示。

对比各界面应力仿真结果可知,基底变形将导致薄膜界面应力增大,且下层界面应力增大最为显著,影响效果从下往上逐渐减小。

2.2 薄膜内聚力模型

分析高温下失效叶片的脱层现象观测结果,将界面脱层表现归纳为以下两种破坏形式(见图10):(1)薄膜结构边缘处膜层翘起、脱层,分离区域沿着界面向内扩展;(2)薄膜中部的穿透型裂纹沿界面发生偏转,或因贯穿厚度的裂纹产生新边缘,在裂纹边缘处发生翘起、脱层。

根据Griffith的理论,假设界面的分离是通过界面裂纹扩展而增长,且膜基材料都为弹性变形,则界面的断裂能为

$$\Gamma = \gamma_f + \gamma_s - \gamma_{fs} \quad (1)$$

式中, Γ 为界面的断裂能, γ_{fs} 为薄膜-基结构的界面特征自由能, γ_f 和 γ_s 为薄膜和基底的每一自由表面具有特征表面能密度。

与薄膜内穿透型裂纹不同的是,对薄膜脱层进行分析是在多层薄膜结构的截面方向进行的,脱层前缘的膜系结

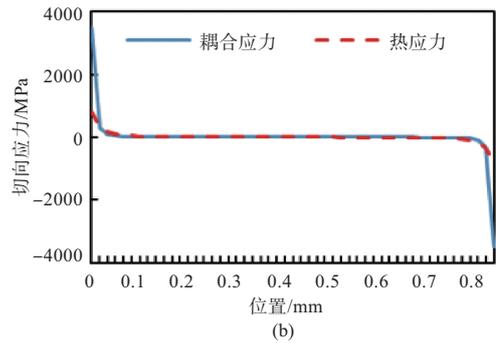
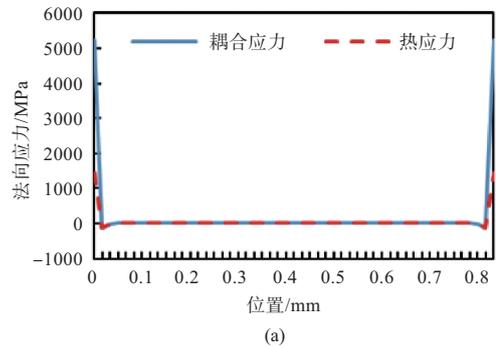


图8 NiCrAlY-基底界面应力变化对比

Fig.8 Comparison between stress variation at NiCrAlY-substrate interface

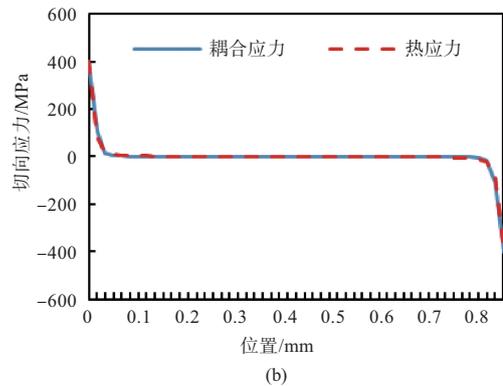
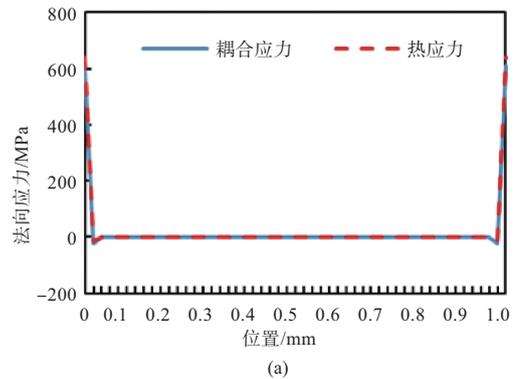


图9 SiO_2 -NiCr界面应力变化对比

Fig.9 Comparison between stress variation at SiO_2 -NiCr interface

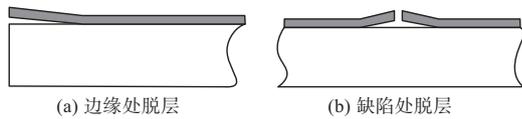


图10 两类薄膜脱层形式

Fig.10 Two kinds of film delamination forms

构尺度在微纳米量级。现有表征薄膜材料界面结合性能的参数主要有界面结合强度、临界应力强度因子和能量释放率等,而后两者在微纳米尺度的应用有一定的局限性。基于热力学能量平衡分析方法对薄膜失效更为通用,其表征薄膜界面结合力的界面结合强度参数不受尺度影响^[1]。因此,本文采用内聚力理论对界面脱层破坏进行建模分析。

内聚力模型具体表达为内聚力-位移曲线,它针对线性弹性断裂力学中裂纹尖端奇异性理论的不足,在裂纹尖端划定了一个小范围的内聚区域。本文选用双线性内聚力模型(见图11)描述线弹性材料的薄膜界面断裂过程^[6],其本构模型包括损伤起始和损伤演化两部分。考虑张开型(I型)及剪切型(II型)裂纹,其界面断裂能相互独立。

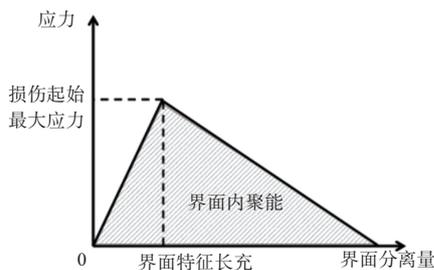


图11 双线性内聚力模型示意图

Fig.11 Diagram of bilinear cohesion model

薄膜与基底的界面韧性取决于它们自身的材料特性、厚度等。当薄膜厚度远小于基底厚度时,薄膜与基底的界面韧性不受薄膜厚度变化的影响。因此,在固定的镀膜工艺下,当薄膜结构与材料确定后,也确定了其界面韧性。

2.3 基于纳米划痕法的薄膜界面参数确定

薄膜-基底结构界面抵抗分离的能力称为界面结合强度,通常用单位面积的薄膜从基底上剥离下来所需的应力或能量来表征。镀膜工艺的差异和不稳定性会对薄膜-基底结构界面结合强度产生影响,如界面杂质、膜基材质、界面微观结构、制备条件与环境等因素,本文采用试验测试法得到传感器界面结合强度。

本文选用纳米划痕法对薄膜黏附性进行测试,其压头顶端半径 $R=200\mu\text{m}\pm 5\mu\text{m}$ 。试验实施示意图如图12所示。

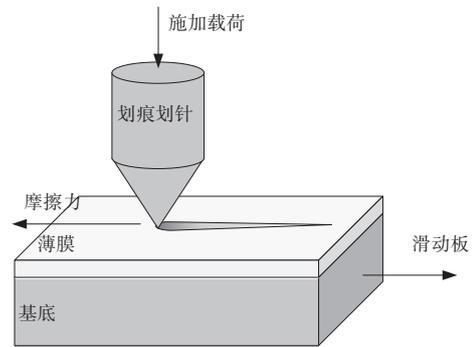


图12 纳米划痕测试示意图

Fig.12 Schematic of nanoscratch test

试验时选择20N/min的加载速率以及10mm/min的划痕速率进行自动连续加载,确定划痕试验的平均临界载荷。纳米划痕法测试结果可表征界面结合能^[17]。

本文制备了单层 SiO_2 薄膜样片,并对样片进行了 550°C 的热处理。选取三片经过热处理的 $4\mu\text{m}$ 样片进行划痕测试,测试得到其平均界面强度 L_c 为31.7MPa。得到其界面结合能 $\Gamma=2.75\times 10^{-5}\text{mJ}/\text{mm}^2$ 。假设在薄膜制备工艺固定的条件下, SiO_2 薄膜-陶瓷基底界面强度代表了本文研究的薄膜的切向界面强度。

内聚力模型的关键特征参数有内聚强度 $T_{n,t,s}^0$ 、内聚能 $G_{I,II}^c$ 及 $\delta_{n,t,s}^f$,而界面特征长度 $\delta_{n,t,s}^f$ 为计算不敏感参数,界面裂纹大小主要受界面切向强度影响。

本文以界面切向强度为主要影响参数,并假设薄膜界面法向界面强/刚度与切向界面强/刚度相等。在界面强度与界面能确定后,界面刚度确定了内聚力曲线的形状,而其形状不影响界面脱层行为。参照文献取一较大值($3\times 10^6\text{MPa}/\text{mm}$)。

则根据试验结果,界面内聚强度 $T_n^0/T_{t,s}^0$ 取值31.7MPa,内聚能 G_I^c/G_{II}^c 取值 $2.75\times 10^{-5}\text{mJ}/\text{mm}^2$ 。界面特征长度参数 $\delta_n^f/\delta_{t,s}^f$ 为 $1.74\times 10^{-6}\text{mm}$ 。其计算方法如下

$$\begin{cases} \delta_n^f = \frac{2G_I^c}{T_n^0} \\ \delta_{t,s}^f = \frac{2G_{II}^c}{T_t^0} \end{cases} \quad (2)$$

以上界面参数代表了本文薄膜制备工艺下的界面强度。

2.4 基于内聚力模型的薄膜脱层分析

本文研究的薄膜热偶传感器共存在6类界面,其中NiCrAlY过渡层与合金基底材料性质相似,为起黏结作用的层,与基底不易发生脱层。且NiCrAlY层在制备时,会在其表面生成 Al_2O_3 热生长层,进一步增加了与 Al_2O_3 层的结

合性。因此,结合试验观测结论,本文重点针对 Ta₂O₅-Al₂O₃、SiO₂-Ta₂O₅、NiCr-SiO₂ 和 SiO₂-NiCr 的 4 类界面进行分析。由 2.1 节分析结果可知,在薄膜边缘一个较小的区域同时存在剪切应力与法向应力的集中现象,同时作用于界面,引起界面脱层失效。

对于界面剪切失效与剥离失效,本文提出两种共同作用的模式,即竞争失效模式与耦合失效模式。假设界面失效函数 $F(x)$ 以反映失效程度,其取值范围为 0~1, x 代表界面位置坐标。

对于二维界面模型,假设界面剥离失效函数 $F_t(x)$,其表达式为

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, T_n(x) \leq 0 \\ \frac{T_n(x)}{T_n^0(x)}, 0 < T_n(x) < T_n^0(x) \\ 1, T_n(x) \geq T_n^0(x) \end{cases} \quad (3)$$

界面剪切失效函数 $F_{n,s}(x)$ 表达式为

$$F_t(x) = \begin{cases} \frac{|T_{t,s}(x)|}{T_t^0(x)}, |T_{t,s}(x)| < T_t^0(x) \\ 1, |T_{t,s}(x)| \geq T_t^0(x) \end{cases} \quad (4)$$

竞争型失效模式考虑两种失效模式单独作用,则其失效函数 $F(x)$ 的表达式为

$$F(x) = \{F_n(x), F_{t,s}(x)\}_{\max} \quad (5)$$

耦合型失效模式考虑两种失效模式的累加效应,其失效函数 $F(x)$ 的表达式为

$$F(x) = \begin{cases} F_n^2(x) + F_{t,s}^2(x), F_n^2(x) + F_{t,s}^2(x) \leq 1 \\ 1, F_n^2(x) + F_{t,s}^2(x) > 1 \end{cases} \quad (6)$$

基于二维界面模型仿真结果,分别计算出 4 类界面的失效函数。以 Ta₂O₅-Al₂O₃ 界面为例,其应力及失效函数曲线如图 13 所示。

对计算结果进行整理,得到 4 类界面脱层长度以及主要失效模式,见表 4。

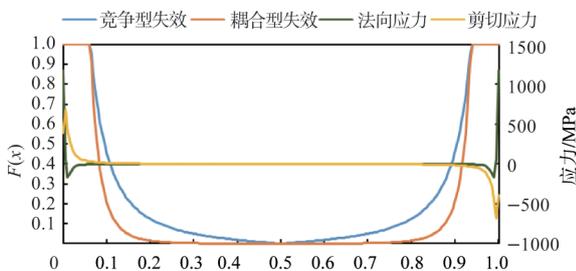


图 13 Ta₂O₅-Al₂O₃ 界面应力及失效函数曲线图

Fig.13 Stress and failure function curves of Ta₂O₅-Al₂O₃ interface

表 4 4 类界面脱层分析

Table 4 Delamination analysis on 4 types of interfaces

界面类型	剪切失效 脱层 长度/mm	剥离失效 脱层 长度/mm	竞争型 脱层 长度/mm	耦合型 脱层 长度/mm	主要失效 模式
Ta ₂ O ₅ -Al ₂ O ₃	0.0665	0.0102	0.0665	0.0665	剪切型
SiO ₂ -Ta ₂ O ₅	0.0511	0.0102	0.0511	0.0511	剪切型
NiCr-SiO ₂	0.0460	0.0102	0.0460	0.0460	剪切型
SiO ₂ -NiCr	0.0358	0.0051	0.0358	0.0358	剪切型

通过上述分析可以得出,各层界面边缘均存在脱层失效危险,而脱层长度与应力传递距离均在几十微米的量级。此外,剪切型脱层长度均大于剥离型脱层长度,法向应力从边缘急速减小,甚至内部一段区域呈现压应力,抑制剥离型脱层的作用,而剪切应力传递距离较长。无论是竞争型失效还是耦合型失效,界面脱层长度均取决于剪切应力作用,与薛秀丽的研究结果一致。

2.5 基于内聚力单元的薄膜脱层有限元模拟

为验证 2.3 节结论,并将脱层的演化考虑在内,利用某有限元仿真软件中的内聚力单元进行模拟,其本构关系为双线性内聚力模型。在界面层间加入一层黏性内聚力单元,设置堆叠方向为沿着法向分量方向。基于 2.3 节描述的初始破坏准则,对于竞争型失效,采用 Maxs Damag 准则对内聚力单位损伤起始进行判断,当任意一个方向的应力比达到 1 时,损伤开始并转变为损伤演变过程。

$$\max \left\{ \frac{|T_n|}{T_n^0}, \frac{T_s}{T_s^0}, \frac{T_t}{T_t^0} \right\} = 1 \quad (7)$$

对于耦合型失效,采用 Quade Damage 准则,当三个方向应力比的平方和达到 1 时,损伤开始并转变为损伤演变过程。

$$\left(\frac{|T_n|}{T_n^0} \right)^2 + \left(\frac{T_s}{T_s^0} \right)^2 + \left(\frac{T_t}{T_t^0} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

本文选择基于能量的损伤演化准则描述界面单元的损伤演化过程,幂次准则是界面裂纹扩展最常用的能量判据,表示为各方向的临界断裂能和当前状态断裂能之比的幂函数如下

$$\left(\frac{G_n}{G_{nc}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_s}{G_{sc}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_t}{G_{tc}} \right)^\alpha = \frac{G}{G_c} \quad (9)$$

式中, α 为能量指数,常用取值为 1^[18]。

建立带有内聚力界面单元的多层薄膜二维界面模型。考虑到模型收敛能力问题,本文采用位移加载法,对界面脱层损伤演化进行仿真分析。将加载温度载荷的界面法向/切向应力与加载等效位移载荷的界面法向应力/切向进行

对比,并计算等效位移下界面法向/切向失效函数,以保护层 SiO_2 -NiCr界面为例,得到曲线如图14所示。

从图14可以看出,用加载等效切向与法向位移的方法得到的界面剪切与法向应力分布与加载温度载荷得到的应力分布近似一致。此外,用剪切失效函数与剥离失效函数计算得到的脱层距离,切向脱落距离大于法向脱落距离,与前节结论一致。

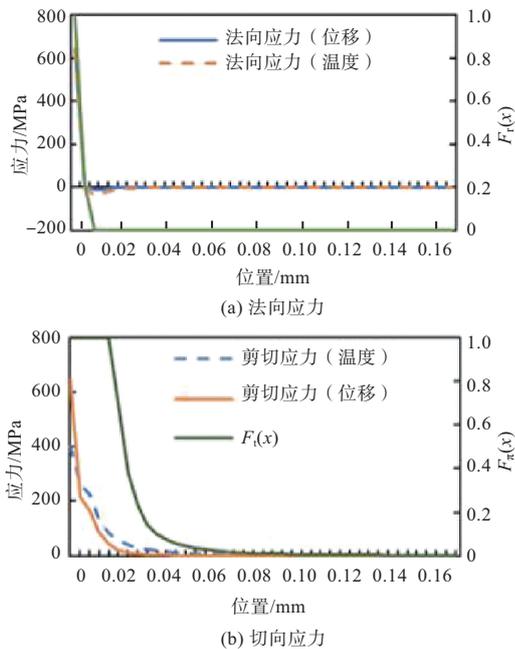


图14 SiO_2 -NiCr界面应力与失效函数

Fig. 14 Stress and failure function of SiO_2 -NiCr interface

将等效切向位移与法向位移分别加载到含内聚力界面单元的模型中,仿真模拟其损伤演化结果如图15所示。同时施加切向与法向载荷,可以看出各层界面边缘均有不同程度的损伤,最下层界面损伤最严重。仿真结果如图16所示。

从理论分析与仿真得到的损伤演化后的脱层长度结果

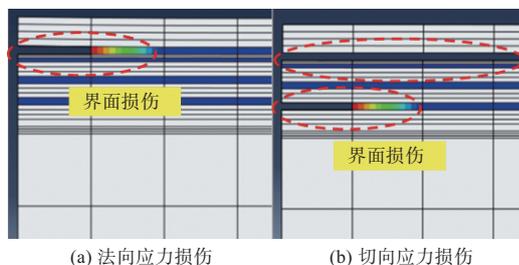


图15 损伤演化结果

Fig.15 Evolution of damage

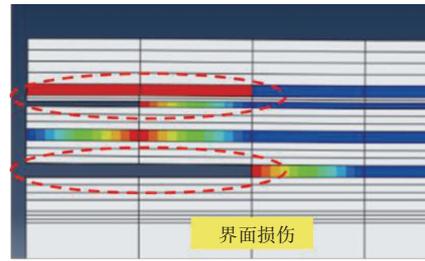


图16 法向与切向损伤共同作用演化结果

Fig.16 The evolution of normal damage and shear damage

可知,剪切应力导致的脱层失效长度大于法向应力导致的脱层失效距离。对于薄膜热偶传感器边缘脱层,剪切型失效占主导作用。仿真分析验证了本文建立的内聚力模型符合界面脱层规律。

3 薄膜耦合失效模型与有限元分析

3.1 薄膜断裂脱层耦合失效模型

薄膜在内应力下的失效模式,取决于裂纹扩展驱动力与裂纹扩展阻力的相对大小^[19]。薄膜裂纹既可以沿着膜层扩展,造成薄膜断裂,也可以偏转到界面沿着界面扩展,造成薄膜脱层。依据 Hutchinson 提出的界面裂纹扩展理论,在界面强度较大的情况下,薄膜中倾向于形成穿透型裂纹;在界面强度适中的情况下,将形成穿透型裂纹并伴随着显著的界面脱层;对于界面强度较弱的情况,裂纹倾向于沿着界面平面蔓延。

在平面方向,正应力将引起薄膜断裂失效。受制备工艺的影响,薄膜在初始状态下其内部存在微裂纹与缺陷,在工作载荷下,初始缺陷处存在应力集中现象。当裂纹尖端应力达到薄膜断裂强度,裂纹将开始扩展,形成穿透型裂纹,并在薄膜平面方向扩展。在薄膜截面方向,界面剪切与法向应力将造成薄膜脱层失效。薄膜在受载情况下,边缘将产生法向与切向应力集中现象,当应力大于界面强度,界面开始损伤,最终在薄膜边缘产生脱层现象,如图17所示。同时,穿透型裂纹将在膜层内形成新的界面,并伴随着脱层现象。随着穿透型裂纹继续向下层薄膜扩展,又将在下层薄膜形成新界面,最终造成多层薄膜的阶梯型脱落。薄膜的断裂-脱层耦合失效过程如图18所示。

本节描述了薄膜损伤演化的全过程,由1.1节观测结果可知,膜层同时存在裂纹引起的边缘脱层与初始缺陷引起的阶梯状脱层,与本节提出的机理一致。此外,对于薄膜温度传感器来说,当顶层保护层达到失效判据,整个传感器的功能将丧失,虽然整体结构还未完全破坏,但是传感器寿命

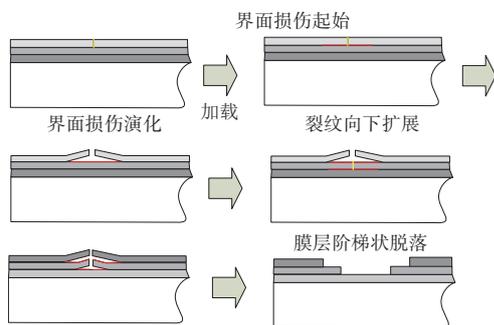


图 17 薄膜边缘脱层失效过程示意图

Fig. 17 Diagram of the delamination failure process at the edge of the film

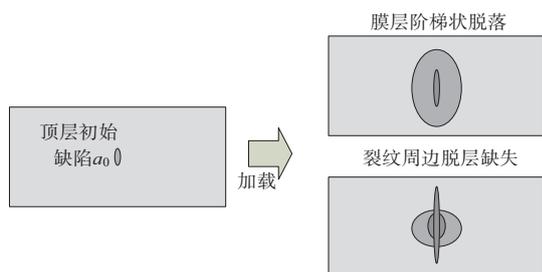


图 18 薄膜断裂脱层失效耦合过程示意图

Fig. 18 Diagram of coupling process of thin-film fracture delamination failure

已经终结。

3.2 薄膜耦合失效有限元分析

利用某有限元仿真软件有限元软件仿真模拟薄膜裂纹对界面应力的影响。基于二维界面模型,预置一条裂纹使其穿透四层薄膜,仿真分析界面应力分布如图 19 所示。从仿真结果可以看出,穿透型裂纹将造成界面剪切应力与法向应力集中,使界面破坏。

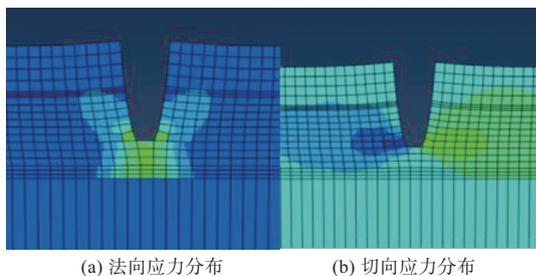
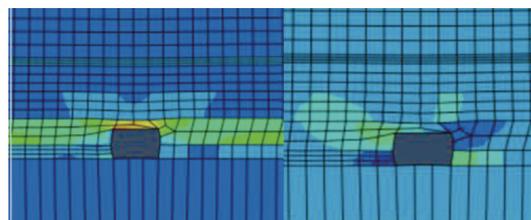


图 19 穿透裂纹对界面剪切与法向应力的影响

Fig. 19 Effect of penetration crack on interfacial shear and normal stress

在膜层内部预置一个空洞,模拟薄膜内部缺陷对应力分布的影响,仿真结果如图 20 所示。从仿真结果可以看出,薄膜内部的缺陷将造成等效应力与界面应力集中的现



(a) 法向应力分布 (b) 切向应力分布

图 20 内部缺陷对应力分布的影响

Fig. 20 Distribution of peak electron number densities

象,使其容易产生裂纹,并伴随着界面脱层。

综上所述,膜层的缺陷将对多层薄膜结构内应力分布产生显著影响,进一步解释了薄膜穿透型裂纹将伴随脱层的耦合失效模型机理^[19]。

4 结论

本文以发动机涡轮叶片上溅射的微纳米级多层薄膜电偶型温度传感器为对象,基于内聚力理论研究多层薄膜结构在叶片工作载荷下的断裂脱层失效模型,并结合有限元方法进行仿真分析。结论如下:

(1) 薄膜在高温下主要失效模式为断裂脱层耦合型失效。

(2) 穿透型裂纹将在膜层内形成新的界面,并伴随脱层现象。随着穿透型继续向下层薄膜扩展,又将在下层薄膜形成新界面,最终造成多层薄膜的阶梯型脱落。

(3) 穿透型裂纹将造成界面剪切应力与法向应力集中,使界面破坏。薄膜内部的缺陷将造成等效应力与界面应力集中的现象,使其容易产生裂纹,并伴随着界面脱层。

本文研究得到的脱层距离为将界面结构完整的情况下的界面应力瞬时作用于界面,求得将会发生失效的脱层距离,而未考虑脱层的进一步演化。实际上,在界面发生脱层失效释放界面应力的过程中,随着界面损伤的演化,脱层范围还将往前推进一段距离。真实脱层距离将大于本文研究方法得到的脱层距离。

AST

参考文献

[1] 杨柯. In₂O₃/ITO 高温陶瓷薄膜热电偶的制备与性能研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2016.
Yang Ke. Research on fabrication and properties of In₂O₃/ITO high-temperature ceramic thin-film thermocouples [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.(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] Evans A G, Mumm D R, Hutchinson J W, et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 505.
- [4] Cheng J, Jordan E H, Barber B, et al. Thermal/residual stress in an electron beam physical vapor deposited thermal barrier coating system[J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5839-5850.
- [5] Zheng Jia, Cheng Peng, Jun Lou, et al. A map of competing buckling-driven failure modes of substrate-supported thin brittle films[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(21): 6576-6580.
- [6] Toth F, Rammerstorfer F G, Cordill M J. Detailed modelling of delamination buckling of thin films under global tension [J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2425-2433.
- [7] 闫亚宾, 尚福林. PZT薄膜界面分层破坏的内聚力模拟[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2009, 39(7):1007-1017.
Yan Yabin, Shang Fulin. Cohesive zone modelling of interfacial delamination in PZT thin films [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, 39(7): 1007-1017. (in Chinese)
- [8] 刘斌, 曹立阳, 王波, 等. 基于多线性本构与损伤耦合的叠层陶瓷基复合材料数值预测方法[J]. 航空科学技术, 2023,34(6): 54-65.
Liu Bin, Cao Liyang, Wang Bo, et al. Numerical prediction method of laminated ceramic matrix composite based on the multilinear constitutive and the coupling of damage[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023,34(6):54-65. (in Chinese)
- [9] 薛秀丽. 沉积在聚合物基底上微纳米金属薄膜的屈曲和断裂行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Xue Xiuli. Buckling-delamination and fracture of micro-nano thin metal films on a polymer substrate [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [10] Jansson N E, Leterrier Y, Medico L, et al. Calculation of adhesive and cohesive fracture toughness of a thin brittle coating on a polymer substrate[J]. Thin Solid Films, 2006, 515(4): 2097-2105.
- [11] 周英强, 吴化平, 柴国钟, 等. 残余应力对压头诱导的硬质薄膜/韧性基底材料体系界面分层机制的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 69-75.
Zhou Yingqiang, Wu Huaping, Chai Guozhong, et al. The influence of residual stress on the indentation-induced interface delamination mechanism of hard thin film/ductile substrate material system [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 69-75. (in Chinese)
- [12] 陶冶. 基于内聚力模型的表面波无损表征Low-k薄膜的粘附性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Tao Ye. Study on the adhesion of Low-k thin films based on the cohesive force model using surface waves [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [13] 赵盼, 史恺宁, 史耀耀, 等. 金属表面微结构对CFRP/TC4界面黏结强度的影响分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(3): 47-54.
Zhao Pan, Shi Kaining, Shi Yaoyao, et al. The influence analysis of metal surface microstructure on CFRP/TC4 interfacial bonding strength[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(3): 47-54. (in Chinese)
- [14] Moore T D, Jarvis J L. A simple and fundamental design rule for resisting delamination in biomaterial structures[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(3): 487-494.
- [15] 张云涛. 切削力测量用薄膜应变传感器力学性能的研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
Zhang Yuntao. Research on mechanical properties of thin film strain sensor for cutting force measurement [D]. Taiyuan: North University of China, 2020. (in Chinese)
- [16] Freund L B, Suresh S. Thin film materials: stress, defect formation and surface evolution[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] 武良龙. 金属薄膜材料界面结合能的表征及界面失效分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
Wu Lianglong. The characterization of the interface adhesion energy for metal film and analysis interfacial failure [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013. (in Chinese)
- [18] 冯爱新, 张永康, 谢华琨, 等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(2):15-19.
Feng Aixin, Zhang Yongkang, Xie Huakun, et al. Characterization of interfacial adhesion and bond strength

between thin film coating and substrate by scratch testing [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2003, 24(2):15-19. (in Chinese)

[19] 吕凯, 徐颖强, 孙戡, 等. 热载荷下热障涂层表-界面裂纹间的相互影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1):132-141.

Lyu Kai, Xu Yingqiang, Sun Jian, et al. Interaction between surface and interface cracks in thermal barrier coatings on thermal load [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1):132-141. (in Chinese)

Research on Failure Model of Delamination of Thin-Film Thermocouple Sensor Based on Cohesion Principle

Hu Tingchun¹, Sun Yufeng²

1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

2. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Engine turbine blades work in the harsh working environment of high temperature, high centrifugal, high vibration and air flow, and it is important to measure its surface temperature. However, under the blade operating conditions, the thin film sensor has serious problems of delamination failure. The delamination failure model of micro thin film thermocouple sensors used in aero engine turbine blade surface temperature measurement was studied by combining high temperature test and finite element analysis. Multilayer film thermocouple samples were prepared on metal substrate and subject to different high temperature loads to observe and analyze the phenomenon of film fracture and detachment. The strain field of turbine blade surface and thin film is simulated by finite element simulation software with the input of turbine blade working load. The cohesion theory is used to establish the failure model of film delamination. The interface shear failure and discovery failure functions are established respectively, as well as the competitive and coupled failure functions of the interface, and the main factors affecting the delamination length of the film interface and the film delamination are analyzed. The cohesion unit of the finite element simulation is used to simulate the delamination behavior of the interface. The study proposed a coupled failure model mechanism of thin film penetrating cracks accompanied by delamination, supporting the design optimization of support sensors.

Key Words: thin-film thermocouple; turbine blades; delamination; cohesive principle; finite element simulation; thermal shock