

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0318

薄膜热电偶热氧化可靠性及结构优化

王一丹, 孙宇锋*, 雷东阳, 薛雨晴

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 航空发动机涡轮叶片处于发动机温度最高的部位, 将薄膜材料制备于待测物表面形成热电偶传感器, 可及时有效的对涡轮叶片进行测温。薄膜热电偶多层膜间的热氧化界面扩散失效是导致薄膜可靠性不高的主要原因之一, 基于 Fick 第二定律提出多层膜扩散可靠性模型, 定量描述薄膜热电偶扩散失效机理, 通过仿真计算, 结合粒子群算法, 以薄膜寿命最大为目标, 寻优得到各膜层对应的最佳结构, 为结构工艺上提高薄膜热电偶寿命的研究提供了一定的借鉴。

关 键 词: 薄膜热电偶; 界面扩散; 可靠性; 粒子群; 优化仿真

中图分类号: V23; TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)04-0943-06

薄膜热电偶传感器是具有广阔前景的动态测温组件, 在燃气涡轮测温、航空航天器外表面测温和切削刀具测温等领域中具有重要的意义^[1-2]。其具有长度长、宽度窄、厚度薄的特点。在航空涡轮发动机测温方面, 薄膜热电偶传感器的使用可以避免在涡轮叶片上开槽加工, 降低了测温组件对叶片的结构强度和气动外形的影响, 具有响应时间短、测量精度高、热残留小的优势^[3]。

近年来, 对于高可靠薄膜热电偶的工艺制备成为国内外专家学者的研究热点。20 世纪 70 年代, 美国的惠普公司率先将薄膜热电偶传感器制备在汽轮机一级叶片上用于测量温度。2011 年, 大连理工大学崔云先^[4]研究了 K 型薄膜热电偶传感器的尺寸效应与制备工艺, 实现了其在切削刀具上能够有效工作 10 h。2014 年, 高杨^[5]对制备在镍基合金上的 ZrO_2 、 $NiCrAl$ 薄膜进行高温处理, 利用 X 射线衍射、X 射线光电子能谱分析和色散谱等手段分析了不同时间、温度下涂层间的扩散情况, 建立了退化模型, 并探究了 Al_2O_3 扩散障层对 Al_2O_3 扩散的阻挡效果。崔云先等^[6]研究出一种制备高致密、高

绝缘性能的 Al_2O_3 薄膜的方法, 绝缘性可达兆欧级别。汪若兰^[3]制备出可与异构件共形的柔性高温薄膜热电偶传感器, 研究了大气和氮气退火后的薄膜电阻率, 结果表明氮气退火后的薄膜电阻率较小。杨柯^[7]对薄膜制备工艺进行研究, 结果表明, 氮气/大气退火处理能有效改善 In_2O_3 /ITO 薄膜热电偶的热电稳定性。张瑶^[8]确定了氧化铟锡(ITO)薄膜性能最优的沉积条件, 研究发现氮气热处理能更好地改善 ITO 薄膜的结晶性能。

薄膜热电偶传感器的结构是磁控溅射等技术所形成复杂的微尺度薄膜复合体系, 由于其尺寸小、不易观察, 且各层之间的失效关联性大, 难以对其进行系统的测量与分析, 此外, 其必须同时满足高温防护与测试灵敏度等极端测试要求, 在材料的选择和薄膜尺寸的确定上都存在难度, 从而加大了多层薄膜可靠性研究的难度^[9]。现阶段, 对薄膜可靠性的研究主要分为失效物理(physics of failure, POF)和系统可靠性 2 个方向。

启发式智能优化算法涉及到自然和生物的一系列智能研究, 可以解决在工程实践中遇到的多

收稿日期: 2021-06-10; 录用日期: 2021-09-24; 网络出版时间: 2021-10-14 13:52

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20211014.1202.001.html

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003100, 2018YFB2003101)

*通信作者. E-mail: syf@buaa.edu.cn

引用格式: 王一丹, 孙宇锋, 雷东阳, 等. 薄膜热电偶热氧化可靠性及结构优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4): 943-948.

WANG Y D, SUN Y F, LEI D Y, et al. Thermal oxidation reliability and structure optimization of thin film thermocouple[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(4): 943-948 (in Chinese).

维、复杂、难以优化解算的问题,其在薄膜领域应用研究还非常少,简春菲等^[10]采用蚁狮(ant lion optimizer, ALO)算法来优化支持向量机(support vector machine, SVM)的惩罚因子和核函数,建立了一种基于蚁狮算法优化支持向量机的模拟电路故障诊断模型。王伟等^[11]通过粒子群优化算法,求解了考虑车辆限速区间的危险品运输网络的双层规划模型。赵鑫等^[12]利用粒子群优化算法,对多能互补系统运行费用进行优化,得到了成本最低的设备运行模式。

薄膜热电偶传感器的失效机理主要分为热氧化失效和应力导致的断裂脱层失效,对断裂脱层失效,薄膜厚度对裂纹的起始应变和密度有很大影响^[13-16],膜层间、膜层与基底间的热膨胀系数差异导致的热应力容易引起脱层。而热氧化反应引起的失效常常会导致电阻率和赛贝克系数等的变化,且难以通过透镜进行微观观察,不易发现,是影响产品寿命的关键因素^[7]。目前,薄膜产品热氧化的工艺参数优化研究还处于初步阶段,与寿命相关的结构设计研究不够深入,因此,本文研究立足于热氧化失效,对多层膜结构的薄膜热电偶的热氧化界面扩散失效机理进行探索,建立多层膜间的界面扩散模型与薄膜失效模型,通过仿真分析验证,并以薄膜寿命最大为目标,采用粒子群智能优化算法,优化薄膜各层结构参数,为结构工艺上提高薄膜热电偶寿命提供了一定的依据。

1 薄膜热电偶界面扩散模型

1.1 薄膜热电偶界面扩散失效机理

高温引起的原子扩散是热氧化失效的一种,常温环境下,薄膜热电偶传感器的多层膜结构几乎不会发生热氧化反应;但高温下,膜层内原子跃迁频繁,极易发生热氧化反应,使得各膜层的功能性质、结构强度等发生偏移,引起传感器测量误差,最终导致传感器失效。采用扫描电子显微镜对 1 000 ℃ 不同处理时长下的 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 膜层间的分界面进行观测,如图 1 所示。

由截面形貌可知,处理 1 h 后的界面分层清晰,扩散现象不明显;处理 3 h 后的界面边缘有轻微地扩散现象;处理 5 h 后的界面趋于模糊,有明显的界面扩散现象。

薄膜热电偶传感器的结构分为保护层、功能层、绝缘层和过渡层。对保护层,界面扩散导致保护层的理化性质发生改变,如隔热性、热膨胀系数和熔点等。对功能层,其工作原理主要为赛贝克效应,其中赛贝克系数与材料密切相关,界面扩散导致功能层的成分发生入侵和变化,导致其测温参数

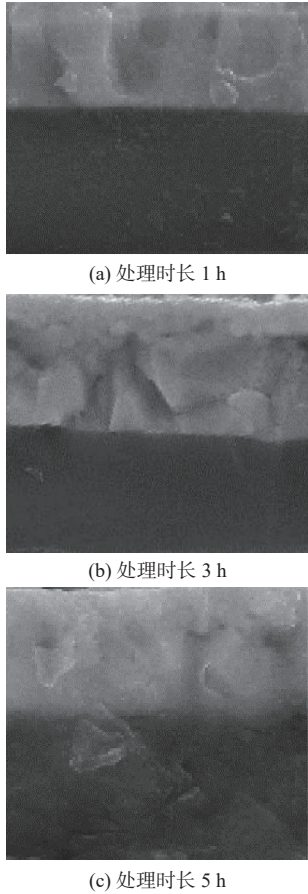


图 1 Ta₂O₅ 与 SiO₂ 的扩散界面
Fig. 1 Diffusion interface between Ta₂O₅ and SiO₂

漂移,引起误差,以 ITO 薄膜热电偶传感器为例,在大气氛围下高温处理,大气氛围中的 O₂ 扩散进入 ITO 薄膜占据薄膜中的氧空位,使载流子浓度降低,最终,功能层的 ITO 薄膜电阻率不断增加,导致测量误差,最终引起传感器失效^[17]。对于绝缘层,其作用主要是阻止电学信号向基底传输,界面扩散导致功能层和基底的导电物质入侵绝缘层,使其性能退化,电学信号流失,最终丧失绝缘效果。

1.2 界面扩散模型

原子浓度梯度的差异会引起与时间相关的质量运输现象,这种现象导致系统自由能大小降低,系统趋于稳定。固体中的质量输运以扩散形式进行,对于薄膜材料,其扩散规律与固体材料基本一致,薄膜材料法向尺寸极小,原子数量较小,膜间的浓度梯度很大,导致扩散进行迅速,视为非稳态扩散,其基本理论为 Fick 第二定律。常用的扩散第二方程有高斯解、误差函数解、正弦解和指数解。其中,误差函数解用于分析已知扩散界面两侧浓度分布的情况,且不用考虑扩散过程中原子的数量。

恒温下,设当层 B 深度为 x 处的 A 物质浓度到达 α 时,视为 x 上方被物质 A 完全扩散,根据 Fick 第二定律,此时的扩散深度 x 可表示为

$$x = \sqrt{4D_0 e^{(-Q/k_B T)} \text{erf}^{-1}(1-\alpha)} \quad (1)$$

变温下,设温度为时间的函数 $T(t)$,则有

$$dx = \sqrt{D_0 e^{(-Q/k_B T(t))} \text{erf}^{-1}(1-\alpha)} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} + \frac{Q}{k_B} \cdot \frac{\sqrt{t} T'(t)}{T^2(t)} \right) dt \quad (2)$$

式中: D_0 为前置常数与成分、工艺有关; Q 为扩散的激活能; k_B 为玻尔兹曼常量; T 为绝对温度; $\text{erf}(x)$ 为误差函数; x 为扩散深度; t 为扩散时间; $T'(t)$ 为函数 $T(t)$ 的一阶导数。

以恒温下的扩散深度为基础,以大气氛围向传感器扩散为例,在实际情况下,扩散还发生在基底向传感器和薄膜热电偶传感器层内间的相互扩散。对于 n 层薄膜传感器,设与其接触的大气氛围编号为1,层1编号为2,...,层 n 编号为 $n+1$,基底结构为 $n+2$,薄膜热电偶传感器的层 n 厚度为 d_n ,扩散系数 D_{ij} 表示编号为 i 的物质在编号为 j 的物质中的扩散系数。 t_{ij} 为编号为 i 的物质对编号 j 的物质进行完全扩散所用时间, $\alpha_{i,j}$ 以此类推。大气氛围向下扩散,其完全扩散穿过层 i 的时刻为

$$t_{1,i+1} = \sum_{k=1}^i \frac{(d_k)^2}{(2\sqrt{D_{1,k+1}} \text{erf}^{-1}(1-\alpha_{1,k+1}))^2} \quad (3)$$

根据式(3)得到各层被大气氛围完全扩散穿过的时刻为 $(t_{1,2}, t_{1,3}, \dots, t_{1,n+1})$,大气氛围向下扩散的深度与时间关系可表示为

$$x_1 = \sqrt{4D_{1,i+2} t} \text{erf}^{-1}(1-\alpha_{1,i+2}) + \sum_{k=1}^i d_k \quad t_{1,i+1} < t \leq t_{1,i+2} \quad (4)$$

2 基于界面扩散的可靠性模型

薄膜产品的相关功能与有效厚度密切相关,扩散使得薄膜有效厚度减少,导致薄膜产品的性能与最初完好的状态产生偏差。

2.1 各层可靠性模型

1) 保护层性能误差

保护层被扩散示意图如图2所示。设某时刻大气氛围对保护层的扩散深度为 x_1^1 ,功能层的物质对保护层扩散深度为 x_{k+1}^2 ,保护层初始厚度总和为 d_p 。上标中的1和2分别为向下扩散与向上扩散,故保护层的剩余厚度可表示为

$$d'_p = d_p - x_{k+1}^2 - x_1^1 \quad (5)$$

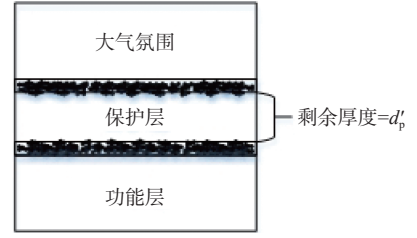


图2 保护层被扩散示意图

Fig. 2 Diagram of protective layer being diffused

故保护层的性能误差可表示为

$$\delta_p(t) = \left| \frac{d_p - d'_p}{d_p} \right| = \frac{x_1^1 + x_{k+1}^2}{d_p} \quad (6)$$

2) 功能层性能误差

功能层主要通过热电效应来实现对温度的测量,当冷热端温差为 ΔT 时,薄膜热电偶传感器输出的热电势为

$$e = \Delta T \left| S_{b1} \left(1 - \frac{9\lambda_1}{8d_k} \right) - S_{b2} \left(1 - \frac{9\lambda_2}{8d_k} \right) \right| \quad (7)$$

随着扩散的进行,功能层的有效厚度发生变化,从而会引起热电势的变化,最终导致功能层的测温参数发生漂移,因此,功能层的性能误差 $\delta_f(t)$ 可以表示为

$$\begin{cases} \delta_f(t) = \left| \frac{e' - e}{e} \right| = \left| \frac{M_1 - M_2 - (S_{f1} - S_{f2})}{S_{f1} - S_{f2}} \right| \\ M_i = \frac{d_k}{8d_k - 9\lambda_i} \left(8 - \frac{9\lambda_i}{d'_k} \right) S_{fi} \\ d'_k = d_k - x_{pfi} - x_{rfi} \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (8)$$

式中:下标1、2分别表示电极1、2; x_{pf} 为电极上表面被保护层扩散的厚度; x_{rf} 为下表面被绝缘层扩散的厚度; S_b 为薄膜材料的块体赛贝克系数; S_f 为薄膜电极的初始赛贝克系数; λ 为电极材料的平均自由程。

3) 绝缘层性能误差

绝缘层实现了对电信号的隔离作用,通过电阻来实现对其性能的衡量。未发生扩散前,绝缘层的电阻值 r 可表示为各分层的电阻值之和,扩散发生后,各层厚度发生变化,电阻值发生变化为 r' 。设绝缘层共有 m 层,某一时刻绝缘层上表面被功能层自上而下完全扩散了 u 层,第 $u+1$ 层被扩散的厚度为 d'_{u+1} ,下表面被基底自下而上完全扩散了 v 层,且第 $m-v$ 层被扩散的厚度为 d'_{m-v} ,此时绝缘层的性能误差函数为

$$\delta_r(t) = \left| \frac{r' - r}{r} \right| = \left[\rho_{u+1} (d_{u+1} - d'_{u+1}) + \rho_{u+2} d_{u+2} + \dots + \rho_{m-v} (d_{m-v} - d'_{m-v}) \right] / \sum_{k=1}^m \rho_k d_k - 1 \quad (9)$$

式中: ρ 为电阻率; $r = \sum_{k=1}^m \rho_k \frac{d_k}{s}$, s 为横截面积。

设保护层、功能层、绝缘层的性能许用偏差分别为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 , 则各层的寿命与可靠度可以表示为

$t_p = \delta_p^{-1}(\delta_1), R_p(t) = P\{\delta_p(t) < \delta_1\}$ (10)

$t_f = \delta_f^{-1}(\delta_2), R_f(t) = P\{\delta_f(t) < \delta_2\}$ (11)

$t_i = \delta_i^{-1}(\delta_3), R_i(t) = P\{\delta_i(t) < \delta_3\}$ (12)

2.2 薄膜热电偶传感器可靠性模型

功能层是测温的主要部件, 功能层失效则导致整个薄膜传感器失效; 绝缘层起到隔绝电信号的作用, 绝缘层失效, 则有电信号通过功能层, 影响正常测温, 因此, 绝缘层失效也一定会导致整个薄膜传感器失效。而对于保护层, 保护层起到隔绝外部杂质的作用, 保护层失效, 此时功能层的剩余寿命为 t_s , 随着时间的推移功能层或绝缘层发生失效才能导致整个系统的失效, 这种情况下, 功能层的寿命为 $t_f = t_p + t_s$ 。

因此, 薄膜热电偶传感器的寿命为

$MTTF = \begin{cases} \min(t_f, t_r) \\ \min(t_p + t_s, t_r) \end{cases}$ (13)

式中: $\min(t_f, t_r)$ 为保护层最后失效的情况; $\min(t_p + t_s, t_r)$ 为保护层最先失效的情况。

3 粒子群优化算法

粒子群优化算法源于对鸟群捕食行为的研究, 其基本思想是: 通过群体中个体之间的协作和信息共享来找到问题的最优解。粒子模拟运动的鸟类, 具有 2 个属性: 速度和位置。在搜索空间内, 每个粒子代表所求问题的一个潜在解, 每个粒子在搜索空间中单独的搜寻最优解, 记为当前个体极值, 将个体极值与整个粒子群里的其他粒子共享, 得到当前全局最优解, 粒子群中的所有粒子根据自己找到的当前个体极值和整个粒子群共享的当前全局最优解, 来调整自己的速度和位置, 最终找到全局最优解。

对于薄膜热电偶传感器而言, 以各层厚度为粒子建立一系列粒子群, 以薄膜寿命最大为优化目标, 能够对薄膜热电偶的制备工艺提供一定的指导参考。

结合界面扩散模型, 适用于薄膜热电偶的粒子群算法思路为: 假设薄膜热电偶具有 n 层结构, 则此时粒子的运动状态为 n 维结构向量, 其中下标 o 表示寻优的粒子编号, 则粒子可以表示为

$\begin{cases} X_o = [x_{o1}, x_{o2}, x_{o3}, \dots, x_{on}] \\ V_o = [v_{o1}, v_{o2}, v_{o3}, \dots, v_{on}] \end{cases} \quad o = 1, 2, \dots, N$ (14)

式中: X_o 为粒子位置向量; V_o 为粒子速度向量。
在一定的搜索范围内, 得到粒子的个体极值 **pbest** 和粒子群全局最优解 **gbest**, 并通过式 (15) 不断迭代更新位置:

$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + V_k \\ V_{k+1} = \omega V_k + c_1 \eta_1 (\text{pbest}_k - X_k) + c_2 \eta_2 (\text{gbest}_k - X_k) \end{cases}$ (15)

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; $\omega \in [0, 1]$ 为惯性因子, 其值越大, 全局寻优能力越强, 局部寻优能力越弱, 可以采用线性递减权值策略来获得更好的寻优结果; η_1 和 η_2 为随机数。

4 仿真分析

采用保护层从上到下依次为 Al_2O_3 、 SiC 、 ZrB_2 、 Al_2O_3 、 Ta_2O_5 , 功能层为 ITO 、 In_2O_3 , 绝缘层为 Ta_2O_5 、 SiO_2 的薄膜热电偶传感器结构, 仿真结果如图 3 和图 4 所示。图 3 中, 大气氛围向保护层扩散的图线拐点表示扩散侵入保护层不同物质的时间, 交点表示在 31.93 h 时, 大气氛围和功能层物质在保护层中相遇, 此时功能层早已完全失效。扩散得到各层膜平均寿命与仿真统计次数的关系如图 4 所示, 可以看出, 功能层寿命 > 绝缘层寿命 > 薄膜热电偶寿命 > 保护层寿命, 其中薄膜热电偶传感器的寿命略高于保护层寿命。因此, 在实际的制备过程

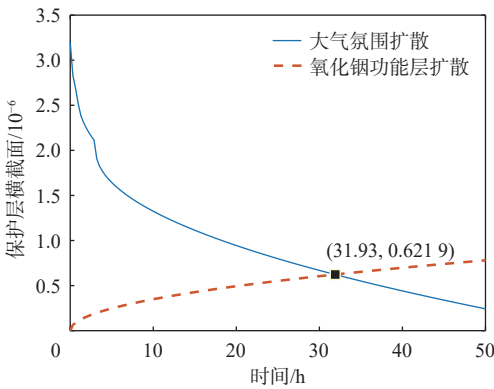


图 3 保护层被扩散情况的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of diffusion of protective layer

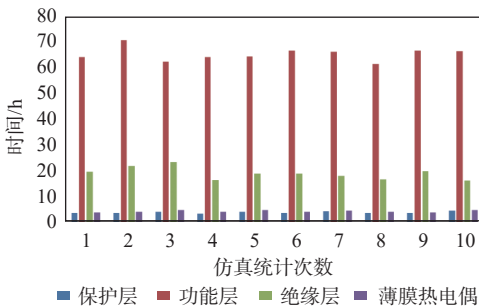


图 4 各层寿命对比
Fig. 4 Life span comparison chart of each layer

中, 应尽量考虑提高保护层的寿命。

为找到最佳寿命下对应的薄膜热电偶传感器各层厚度参数, 以能够为实际制备提供一定的参考, 采用以薄膜热电偶界面扩散模型为基础的粒子群优化算法进行结构寻优, 传感器共有 9 层结构, 其中功能层物质并行存在可视为一层, 因此, 粒子维度为 8 维。在±30% 膜厚变化约束范围内, 薄膜热电偶传感器的最佳寿命分别约为 7.93 h, 保护层寿命为 7.4 h, 功能层寿命为 110.7 h, 绝缘层寿命为 31 h, 最优结构如表 1 所示。在实际工程中, 引入粒子群等优化算法可以为薄膜热电偶的工艺制备结构参数确定提供一定指导。

表 1 各膜层结构优化结果

Table 1 Optimization results of each film structure		
物质名称	初始膜厚D/m	±30%变化寻优结果/m
Al ₂ O ₃	1×10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁸
SiC	5×10 ⁻⁷	3.5×10 ⁻⁷
ZrB ₂	5×10 ⁻⁷	3.5×10 ⁻⁷
Al ₂ O ₃	1×10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁸
Ta ₂ O ₅	2×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻⁶
ITO	5.5×10 ⁻⁷	7.15×10 ⁻⁷
In ₂ O ₃	5.5×10 ⁻⁷	7.15×10 ⁻⁷
Ta ₂ O ₃	2×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻⁶
SiO ₂	3×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁶

5 结 论

1) 通过从薄膜热电偶传感器的界面扩散失效机理入手, 基于 Fick 第二定律建立了薄膜热电偶传感器多层膜并行扩散模型。

2) 以各层膜失效机理为基础, 分别分析建立了各层膜功能、性能误差模型及相对应的可靠性模型, 同时建立了薄膜热电偶传感器的系统可靠性模型。

3) 通过 MATLAB 对模型进行可靠性仿真计算, 并基于界面扩散模型的粒子群优化算法对各层膜层厚度进行寻优, 得到各膜层对应的最佳结构, 为结构工艺上提高薄膜热电偶寿命的研究提供了一定的方法借鉴。

本文研究立足于热氧化失效对薄膜热电偶结构参数进行优化, 后续研究工作应综合考虑其他失效因素, 如由热膨胀系数差异引起的热应力而导致的脱层失效等, 进而对薄膜热电偶结构进行综合优化。

参考文献 (References)

[1] 张建国. 快速响应薄膜温度传感器技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 1-2.

ZHANG J G. Technology research of thin film temperature sensor with fast response[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 1-2(in Chinese).

[2] 黄春峰, 蒋明夫, 毛茂华. 国外航空发动机薄膜热电偶技术发展研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 53-57.

HUANG C F, JIANG M F, MAO M H. Development on thin-film thermocouples technology for foreign aeroengine[J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 53-57(in Chinese).

[3] 汪若兰. 柔性高温薄膜传感器的制备及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 1.

WANG R L. Preparation and properties of flexible high temperature film sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 1(in Chinese).

[4] 崔云先. 瞬态切削用NiCr/NiSi薄膜热电偶测温刀具研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 40-100.

CUI Y X. Development of testing temperature cutter with NiCr/NiSi thin film thermocouple for transient cutting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011: 40-100 (in Chinese).

[5] 高杨. 高温合金表面金属涂层活性扩散障研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 1-53.

GAO Y. Research on active diffusion barrier of matal coating on superalloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 1-53(in Chinese).

[6] 崔云先, 郭立明, 盛晓幸, 等. 薄膜热电偶瞬态温度传感器 Al2O3绝缘膜制备工艺及性能表征[J]. 功能材料, 2014, 45(7): 7139-7142.

CUI Y X, GUO L M, SHENG X X, et al. The preparation and characterization of insulative Al2O3 film for the film thermocouple transient temperature sensor[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(7): 7139-7142(in Chinese).

[7] 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: 8-17.

YANG K. Researches on fabrication and properties of In2O3/ITO high-temperature ceramic thin-film thermocouples[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 8-17(in Chinese).

[8] 张瑶. 基于MEMS工艺的陶瓷薄膜热电偶研制[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 11-44.

ZHANG Y. Fabrication of ceramic thin film thermocouple based on MEMS technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 11-44(in Chinese).

[9] 李洪美, 孙云娜, 段力, 等. 高温复合多层膜结构传感器的热机械可靠性[J]. 仪表技术与传感器, 2015: 7-10.

LI H M, SUN Y N, DUAN L, et al. Thermal mechanical reliability of high temperature thermocouple transducer with composite multilayer film structure[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015: 7-10 (in Chinese).

[10] 简春菲, 王晓峰, 王司. 基于ALO-SVM的模拟电路故障诊断研究[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(12): 113-118.

JIAN C F, WANG X F, WANG S. Fault diagnosis of analog circuits based on ALO-SVM[J]. Techniques of Automation and Applications, 2019, 38(12): 113-118(in Chinese).

[11] 王伟, 张宏刚, 丁黎黎, 等. 考虑车辆限速区间的危险品运输网络优化[J]. 运筹与管理, 2021, 30(4): 128-134.

WANG W, ZHANG H G, DING L L, et al. Transportation net-

work optimization of the hazardous materials considering vehicle speed limit interval[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(4): 128-134(in Chinese).

[12] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究[J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 14-20.

ZHAO X, ZHENG W Y, HOU Z H, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on particle swarm optimization[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 14-20 (in Chinese).

[13] LU N S, SUO Z G, VLASSAK J J. The effect of film thickness on the failure strain of polymer-supported metal films[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(5): 1679-1687.

[14] HAMASHA M M, ALZOUBI K, SWITZER J C III, et al. A study on crack propagation and electrical resistance change of sputtered aluminum thin film on poly ethylene terephthalate substrate under stretching[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(22): 7918-7924.

[15] MOHANTY B C, CHOI H R, CHOI Y M, et al. Thickness-dependent fracture behaviour of flexible ZnO : Al thin films[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2011, 44(2): 025401.

[16] PENG C, JIA Z, BIANCULLI D, et al. In situ electro-mechanical experiments and mechanics modeling of tensile cracking in indium tin oxide thin films on polyimide substrates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(10): 103530.

[17] 王洪敏. 高温薄膜热电偶的制备及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 49-56.

WANG H M. Preparation and properties of high temperature thin film thermocouples[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 49-56 (in Chinese).

Thermal oxidation reliability and structure optimization of thin film thermocouple

WANG Yidan, SUN Yufeng*, LEI Dongyang, XUE Yuqing

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The part of an aero engine with the highest temperature is the turbine blade. The film material is prepared on the surface of the object to be measured to form a thermocouple sensor, which can timely and effectively measure the temperature of the turbine blade. The diffusion failure of the thermal oxidation interface between multilayer films of thin film thermocouple is one of the main reasons for the low reliability of thin film thermocouples. One of the main causes of the low reliability of thin film thermocouples is the diffusion failure of the thermal oxidation interface between multilayer layers. Based on Fick's second law, this paper proposes a diffusion reliability model of multilayer film to quantitatively describe the diffusion failure mechanism of thin film thermocouples. Through simulation calculation and particle swarm optimization, the optimal structure of each layer is obtained with the goal of maximizing the lifetime of thin-film, It provides a certain method reference for improving the lifetime of thin film thermocouple in structure and technology.

Keywords: thin film thermocouple; interface diffusion; reliability; particle swarm optimization; optimization simulation