

硅基压阻式压力传感器疲劳试验与寿命预测建模研究

沈忱*, 陈晓松, 史博

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 硅基压阻式压力传感器在复杂环境下存在输出漂移、灵敏度下降等因素导致的可靠性不足与计量寿命缩短问题, 本研究旨在系统揭示其稳定性退化的物理机制, 并构建高精度寿命预测模型。运用失效物理分析理论, 采用变幅循环载荷与加速疲劳试验方法, 施加不同幅值的交变压力, 对传感器进行加速测试; 利用微观观察与性能监测完成对传感器失效退化数据集的建立, 突破了膜片开裂、压敏电阻蠕变及封装应力失效等多机制耦合作用的分析难点, 最终构建了单一压力载荷下的寿命预测模型。加速寿命试验证明: 在施加140%量程的压力载荷条件下, 约220万次循环后传感器线性度参数增长超过50%, 判定为失效。本研究构建的模型预测寿命与实测数据误差小于15%, 实现了有效的传感器失效周期预估, 具有重要的理论和工程应用价值, 为推动高可靠性硅基压力传感器在设计优化与寿命预测领域的发展提供重要支撑。

关键词: 硅基压阻式压力传感器; 可靠性; 寿命预测; 加速疲劳试验; 失效物理机制; 稳定性退化; 线性度; 非线性数值求解

中图分类号: TB93; TP212

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0052-13

Fatigue testing and life prediction modeling of silicon-based piezoresistive pressure sensors

SHEN Chen*, CHEN Xiaosong, SHI Bo

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Silicon-based piezoresistive pressure sensors suffer from insufficient reliability and reduced service life due to issues such as output drift and sensitivity degradation in harsh environments. This study aims to systematically elucidate the physical mechanisms of stability degradation and to develop a high-precision life prediction model. Utilizing the failure physics analysis theory, it adopted variable-amplitude cyclic loading and accelerated fatigue testing methods to conduct accelerated tests by applying alternating pressure with different amplitudes. It established a dataset of sensor failure degradation through microscopic examination and performance monitoring, and overcame the challenge of analyzing the coupled effects of multiple mechanisms, including diaphragm cracking, piezoresistor creep, and packaging stress failure, ultimately constructed a life prediction model under uniaxial pressure loading conditions. Accelerated life testing demonstrated that under a pressure load of 140% of the full-scale range, the sensor's linearity increased by over 50% after approximately 2.2 million cycles, which is defined as failure. The developed model achieved an error of less than 15% between the predicted and measured lifespan, enabling effective prediction of the sensor's failure cycle. This study holds sig-

收稿日期: 2025-11-06; 修回日期: 2025-11-12; 录用日期: 2026-01-28; 发表日期: 2026-06-28

引用格式: 沈忱, 陈晓松, 史博. 硅基压阻式压力传感器疲劳试验与寿命预测建模研究[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 52-64.

Citation: SHEN C, CHEN X S, SHI B. Fatigue testing and life prediction modeling of silicon-based piezoresistive pressure sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 52-64.



nificant theoretical and practical application value, providing crucial support for advancing the design optimization and life-time prediction of highly reliable silicon-based pressure sensors.

Key words: silicon-based piezoresistive pressure sensor; reliability; life prediction; accelerated fatigue testing; failure physical mechanism; stability degradation; linearity; nonlinear numerical solution

0 引言

随着我国新兴制造业的飞速发展,航空航天、船舶、电子等领域对长时、稳定的精密压力测量要求日益提高。压阻式压力传感器长期工作于循环压力载荷环境,保障其输出稳定性和寿命可靠性是工程应用中的关键问题。

武汉大学的ZHANG Y F等人^[1]通过热循环和疲劳模拟,对由热循环测试导致的MEMS压力传感器金线焊接点失效的情况进行了研究,结果表明:焊点在基板上的根部承受了最大应力和应变,随着热循环引起的应变累积,焊点的连接区域变小,导致焊接点失效。BELWANSI V等人^[2]通过试验和半导体工艺与器件仿真(Technology Computer-Aided Design, TCAD)模拟的方式,针对压阻式压力传感器因辐射而产生的性能退化问题进行了研究,结果表明:随着辐射剂量的增加,偏移电压显著变化,其原因是作为外部施加压力隔离介质的硅油性能失效,以及辐射驱动的俘获电荷在氧化层、介电层或耗尽层中产生,导致压阻体厚度减小。中北大学的吴永亮等人^[3]通过对硅压力传感器进行加速寿命试验和试验数据统计分析,结果显示:硅压力传感器的寿命服从威布尔分布,其加速模型符合阿伦尼斯方程。齐虹等人^[4]对特定结构的硅压力传感器进行综合应力寿命试验,探讨了可靠性的试验方法,确定了键合点开裂和金丝的断开是该结构压力传感器最主要的失效模式,并通过优化硅胶注入速度、金丝清洗、控温等工艺,提升了传感器的可靠性。

近年来,关于MEMS压力/应变传感器的可靠性研究主要集中在两类方向:①关注单一结构元件(如硅膜片或金属互连)的疲劳行为^[5],通过S-N曲线或累积损伤准则进行寿命估计^[6];②侧重于分析器件级的环境/封装影响(温度循环、湿热等)^[7]。这些研究为促进压力/应变传感器的性能提升提供了重要参考,但目前尚无将膜片裂纹扩展与金属互

连损伤作为并行且随时间权重转换的竞争通道建模,并结合退化曲线进行全过程验证的文献报道。在实际循环载荷工况下,器件失效常表现为多个失效机制的竞争与耦合(例如膜片的裂纹扩展会改变应变场),从而加速金属互连的局部塑形与早期断裂。

针对上述问题,本文开展硅基压阻式压力传感器疲劳试验,并进行寿命预测建模。通过气体脉动疲劳试验获取多种加载下的退化曲线,提出具有时变权重函数的双通道竞争模型,既考虑裂纹扩展动力学(Paris型行为),又考虑互连处的塑性/电阻漂移机理,同时预测传感器退化过程与最终寿命。

1 跨尺度疲劳失效机制的理论建模

压阻式压力传感器的服役寿命和输出稳定性易受疲劳损伤累积的影响,特别是在循环条件下,硅膜片裂纹扩展与金属互连损伤呈现显著的跨尺度耦合特征,在微观尺度上表现为膜片边缘位错滑移形成微裂纹,以及金属铝(Al)互连线发生疲劳断裂引发电桥失衡;在结构尺度上表现为裂纹和互连损伤引起的膜片等效刚度变化;在器件尺度上表现为膜片刚度退化导致的传感器线性度和基本误差性能演化。

1.1 单晶硅膜片的循环应力响应与微裂纹萌生

硅膜片是整个硅基压阻式压力传感器的核心转换元件和感压核心。当外界压力施加到膜片表面时,膜片本身会发生弹性形变,压力越大,膜片的挠度越大^[8]。膜片的弯曲形变在其内部产生复杂的机械应力场。

在周期性压力载荷作用下,硅膜片边缘区域的应力集中易导致局部的交变应力幅值超越材料的疲劳极限,造成压力传感器发生性能漂移甚至失效。根据位错滑移理论,材料在外力作用下通过位错运动将产生永久变形,这能够解释应力集中导致的压阻式压力传感器微结构损伤的积累过

程。图1展示了压阻式压力传感器膜片的受力示意图。

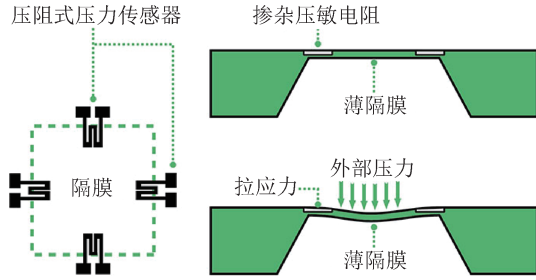


图1 压阻式压力传感器膜片受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of the force on a piezoresistive pressure sensor diaphragm

在位错滑移理论中,位错指晶体中的线缺陷,分为刃型位错(位错线垂直于滑移方向)和螺型位错(位错线平行于滑移方向);滑移指位错沿特定晶面和方向运动,导致晶体局部剪切变形。启动滑移所需的最小分切应力(即临界分切应力)服从施密特定律^[9],公式为

$$\tau_{\text{crit}} = \sigma \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (1)$$

式中: τ_{crit} 为临界分切应力, σ 为外加正应力, ϕ 为滑移面法线与应力轴的夹角, λ 为滑移方向与应力轴的夹角。

根据施密特定律,在传感器使用过程中,膜片边缘等应力集中区域所受切应力一旦达到 τ_{crit} ,则引发滑移;外部循环压力载荷导致位错往复运动,形成位错缠结,缠结进一步阻碍位错运动,使得膜片局部应力进一步升高,进而萌生微裂纹^[10]。位错密度演化方程为

$$\frac{d\rho}{dN} = k_1 \rho^{1/2} - k_2 \rho \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度, N 为循环次数, k_1 为增值系数, k_2 为动态恢复系数。

积分至临界位错密度 ρ_c 时裂纹萌生,公式为

$$N_f = \int_0^{\rho_c} \frac{d\rho}{k_1 \rho^{1/2} - k_2 \rho} \quad (3)$$

式中: N_f 为材料临界循环次数。

在疲劳裂纹萌生阶段, ρ_c 主要受微结构缺陷尺寸和应力梯度影响,采用基于Griffith控制条件与临界应力强度比的理论估算方法,可将临界裂纹长度与等效位错密度关联,估算 ρ_c 的数量级在 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 。

1.2 跨尺度裂纹扩展动力学建模

在循环载荷作用下,单晶硅膜片中的微裂纹沿特定晶面扩展,其动力学行为由局部应力强度因子范围主导^[11]。根据线弹性断裂力学,裂纹尖端应力场强度表征量 ΔK 的几何修正表达式为

$$\Delta K = Y(\theta) \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中: $\Delta \sigma$ 为远场交变应力幅值,取裂纹位置最大主应力值; a 为裂纹长度,从初始缺陷尺寸开始演化; $Y(\theta)$ 为几何修正因子,表征裂纹形状与载荷方向的关系^[12]。

为表征单晶硅各向异性对断裂行为的影响,引入晶向修正系数 S ,即

$$S = \sin^2 \beta + \frac{2(1-\nu)}{2-\nu} \cos^2 \beta \quad (5)$$

式中: β 为裂纹面与晶面夹角,在本研究中取 $\beta = 60.0^\circ \pm 0.5^\circ$; ν 为泊松比,本研究中取 $\nu = 0.28$ 。最终得到晶向修正系数的典型取值在 $0.9 \sim 1.3$ 。

最终有效应力强度因子 ΔK_{eff} 为

$$\Delta K_{\text{eff}} = S \cdot \Delta K \quad (6)$$

裂纹扩展速率遵循Paris幂律方程,即

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (7)$$

式中: da/dN 为裂纹扩展速率,即每个载荷循环的裂纹增量; C 和 m 为材料参数,取值依赖于材料特性、几何结构和工况条件等因素。

已有研究人员在不同几何条件与载荷条件下,对硅基MEMS薄膜及其相近尺度结构的疲劳裂纹扩展的Paris常数进行了统计拟合分析^[13],多项试验结果表明:脆性硅在稳态裂纹扩展阶段的 m 通常介于 3.5 至 6.5 之间,而 C 的取值大致位于 10^{-8} 至 10^{-6} 量级,这反映了裂纹扩展的敏感性水平。值得注意的是,这些参数在不同形状及不同加工工艺的试样中展现出显著的统计一致性。基于此,本研究中取初步拟合值 $m = 5.0 \pm 1.0$ 与 $C = (2.0 \pm 1.0) \times 10^{-7}$ (m 、 C 均为无量纲材料参数)作为主模型参数,并在后续敏感性分析中评估其对寿命预测的影响。

本研究的疲劳试验以单晶硅为承载材料,其弹性和断裂力学参数与晶向密切相关;硅膜片材料的弹性模量 E 取 165 GPa (单晶硅 $[100]$ 方向的典型值)^[14]。

1.3 电-力耦合退化机制

裂纹在硅膜片中的扩展本质上是能量耗散过程。随着裂纹长度的增长,结构有效刚度呈现非线性衰减。这种刚度退化直接改变了膜片的应变分布特性,原本均匀的应变场在裂纹尖端区域产生显著梯度,导致压敏电阻区域承受异常高的局部应变^[15]。试验观测表明:当裂纹长度达到临界值的40%时,压敏电阻栅边缘的局部应变增幅可达230%。刚度衰减与应变重分布的耦合作用,构成了机械损伤向电学特性退化传递的物理基础。

此外,应变重分布对金属互连线将产生较大影响。压敏电阻区域的异常应变使金属互连线承受远超设计阈值的塑性形变。微观分析揭示,铝制互连线在循环应力下发生位错滑移,互连线发生约45°的颈缩变形。聚焦离子束截面分析显示:颈缩区域的横截面积损失高达32%,同时伴随氧化加剧,这种渐进性损伤最终导致两种电学失效:①电阻漂移,颈缩变形使导电截面积减小,表现为电阻值的阶梯式增长;②接触失效,反复塑性形变会使焊盘界面出现微裂纹,导致接触电阻剧增。金属互连失效具有自加速特性,当局部塑性形变超过0.15%时,每个应力循环造成的损伤增量提升约6倍。

2 压阻式压力传感器循环载荷疲劳试验研究

压阻式传感器循环载荷疲劳试验是对传感器样品施加单一的或综合的极限机械应力、快速激发出样品潜在缺陷的试验。疲劳试验为通过传感器故障原因分析、失效模式分析进行传感器使用寿命的预测提供了重要的试验数据支撑^[16],并为后续类似传感器可靠性预测、视情计量模式的探索提供重要手段。

2.1 试验系统组成

为获取压阻式压力传感器在不同压力循环载荷条件下的疲劳退化与失效数据,本研究团队构建了一套气体压力循环疲劳试验系统,该系统能够实现压力幅值与循环频率的精确控制,并同步采集传感器输出信号,用于分析线性度、基本误差等性能参数随循环次数的演化规律。

整个试验系统设计、试验流程和试验后性能

检测方法均依据GB/T 26807-2011《硅压阻式动态压力传感器》^[17]、GB/T 42191-2023《MEMS压阻式压力敏感器件性能试验方法》^[18]、GB/T 15478-2015《压力传感器性能试验方法》^[19]以及GJB 3849-1999《飞机液压作动筒、阀、压力容器脉冲试验要求和方法》^[20]等标准制定。

2.1.1 总试验系统设计

本系统作为一种自动化装置,其核心功能是通过精确控制压力脉冲的幅值、频率、波形及循环次数,实现对被测件循环压力载荷的加载和疲劳寿命的定量评估。本系统采用模块化系统集成设计,依据功能耦合度划分为3个核心子系统:气体传动系统、控制电路系统和数据采集分析系统。气体传动系统负责控制、调节和引导高压气体,通过电磁阀控制高压气体的周期性变化;控制电路系统负责装置的电路集成与控制逻辑;数据采集分析系统负责试验过程中数据的采集、分析以及信号的收发和传递。疲劳试验机主体如图2所示,三视图如图3所示,实物如图4所示,待测试传感器安装示意图如图5所示。

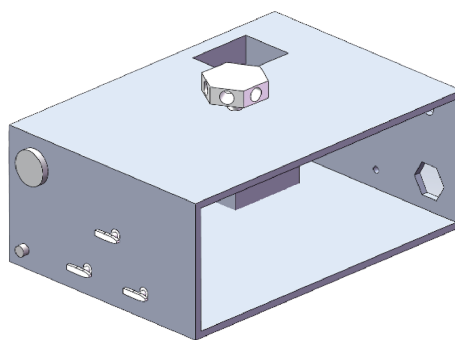


图2 疲劳试验机主体

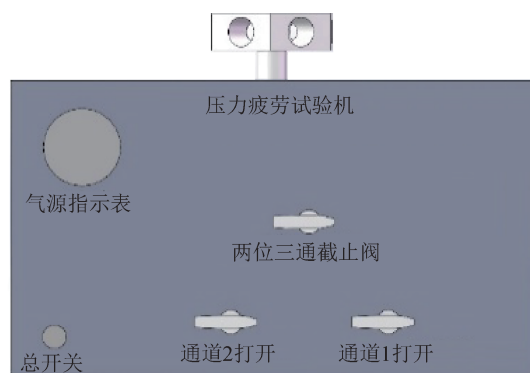
Fig.2 Main body of fatigue testing machine

2.1.2 分系统设计

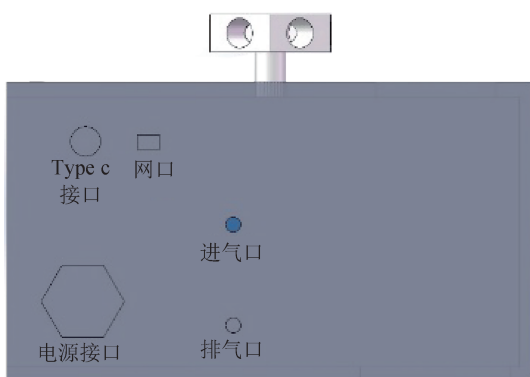
1) 气体传动系统

气体传动系统是装置实现预定功能的核心系统,由气源、机械阀门、电磁阀门、高压硬管等部分组成,如图6所示。

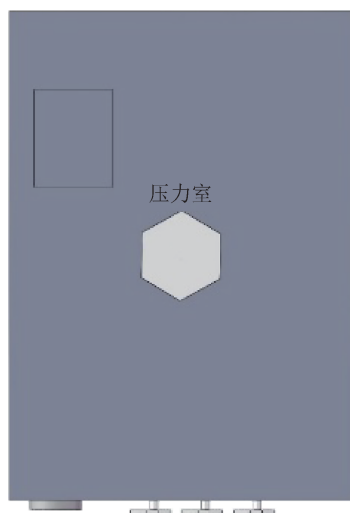
具体的功能实现流程如下:高压气源通过减压阀调制后接入装置气源输入口,经由三通接头,一端连接高精度压力表,实时监控气源输入压力大小,另一端连接两位三通截止阀,将气体通向2



(a) 主视图
(a) Front view



(b) 后视图
(b) Rear view



(c) 俯视图
(c) Top view

图3 疲劳试验机三视图

Fig.3 Three-view drawing of fatigue testing machine

个相互独立的气路,由两位三通截止阀控制气体的通向。每条气路装有电磁阀,通过交变控制信号输入,可控制电磁阀的周期性开闭,使安装传感器的压力室与高压气周期性连通与隔断。

构建符合ISO 4414:2010标准^[21]的闭式气动回

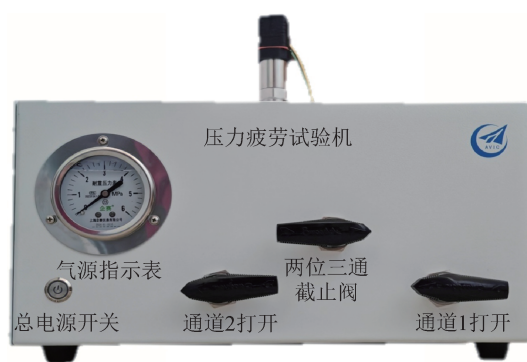


图4 疲劳试验机实物图

Fig.4 Physical diagram of the fatigue testing machine



图5 待测试传感器安装示意图

Fig.5 Sensor installation illustration

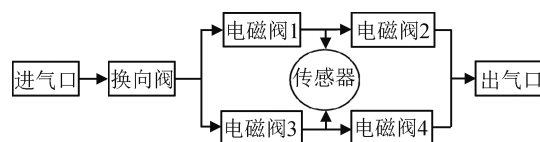


图6 气路结构图

Fig.6 Pneumatic circuit diagram

路,实现工作压力0.1~10 MPa的高压气体介质传导;配置多级调压阀组(含先导式比例调压单元)实现动态压力调节;集成高精度压力表,配合高速电磁阀执行机构完成毫秒级气体通断控制。

2) 控制电路系统

电路系统由220 V电源供电,通过220 V转24 V电源向控制板和电磁阀供电。以电磁继电器作为开关,控制24 V供电实现对电磁阀的周期性控制。通过光耦、二极管等元件组合,实现5 V脉冲信号控制24 V供电通断。其中,控制元件输出加装续流二极管,防止感性负载放电;输入端加装反向保护二极管,防止电源反接;输入限流电阻用1206封装(1/4 W),提升可靠性;电路板背面焊接直排针,便于控制元件实现在主板上的快

速插拔。

电磁继电器控制单元是影响气体压力疲劳试验机整体寿命的重要元件，电路板单元如图 7 所示，电路板设计如图 8 所示。基于设计需求条件，编制控制程序。

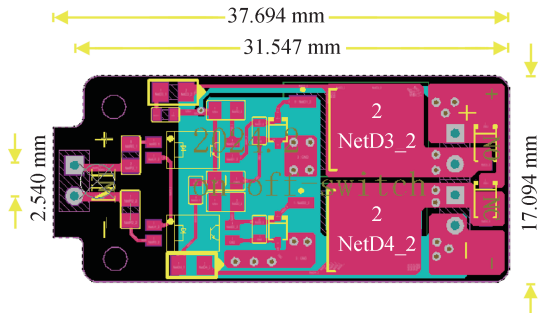


图 7 电路板单元
Fig.7 Printed circuit board unit

3) 数据采集分析系统

在高、低压室内安装压力传感器，在压力室内安装标准传感器与被测传感器，并监测每个电磁阀的工作状态。因为脉动压力的频率不高，所以数据采集分析系统基于PCIe9759B数据采集卡搭建，其采样频率为1 MHz，具有模拟输出功能，输出脉冲为± 5 V，符合气体压力疲劳试验机的指标要求。

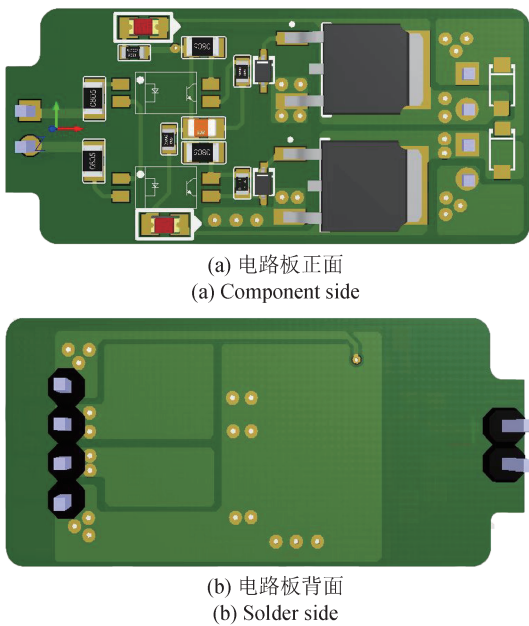


图 8 电路板设计图
Fig.8 Printed circuit board design diagram

2.2 恒幅值压力循环载荷疲劳试验

2.2.1 试验样品及试验方案

恒幅值压力循环载荷疲劳试验以气体循环载荷压力疲劳试验系统为基础，以同一批次的4支压阻式压力传感器为测试样品，进行恒定幅值的循环压力加载测试，并定期拆卸进行性能检测。被试样品的参数如表 1 所示。

表 1 试验样品参数

Tab.1 Test sample parameters

量程 /kPa	综合误差	工作温度 /℃	供电电压 /V	输出电压 /V
0 ~ 20	± 0.3%FS	0 ~ 40	24	0.5 ~ 4.5

循环载荷试验方案参考 GB/T 15478-2015《压力传感器性能试验方法》和 GB/T 42191-2023《MEMS 压阻式压力敏感器件性能试验方法》中相关规定：开展循环寿命试验时，需将传感器安装于专用的压力疲劳试验机上，按规定的压力范围、压力循环次数和变化速度(每分钟循环次数)进行压力循环。试验后按标准规定进行压力敏感器件的零点输出、满量程输出、线性度、迟滞、重复性、准确度和灵敏度等静态性能的检测，或按产品技术条件规定进行项目检测。试验结果应符合传感器详细规范规定的要求。

考虑到试验时间有较大限制，本试验设计了 4 组压力峰值，分别为 180、200、220、240 kPa，通过适当提高压力峰值上限，加速传感器的疲劳演变过程。根据传感器试验样品性能参数，设定压力循环载荷疲劳试验参数，如表 2 所示。

性能测试时，根据 GB/T 15478-2015《压力传感器性能试验方法》给出的静态性能试验原则，对传感器施加 3 次预压，使压力值升到测量上限值，待压力稳定后降压，返回零点；随后在全量程范围内选择均匀分布的 6 个试验点，测量与输入压力点对应的传感器输出，并重复 3 次升降压校准

表2 疲劳试验参数设置

Tab.2 Fatigue test parameter settings

压力峰值/kPa	压力循环频率/Hz	环境温度/℃	环境湿度/%	供电情况/V
180~240	2	20±5	≤75	DC 24

循环,进而计算得到传感器线性度、灵敏度、基本误差等静态性能。参考相关标准,结合工程实际,定义传感器疲劳失效的判据为满足以下任一条件:①传感器灵敏度相对于初始值的变化量超过±15%;②线性度出现相对于初始值20%以上的变化;③基本误差出现相对于初始值20%以上的变化;④传感器出现信号突然消失、输出异常等物理损坏。

2.2.2 试验结果分析

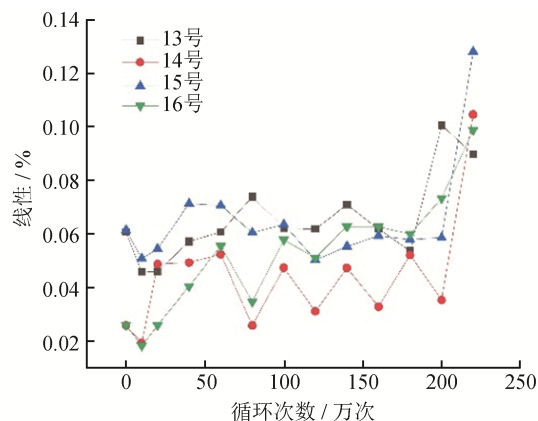
以压力循环峰值为240 kPa的试验工况为例,当循环压力载荷作用次数达到220万次左右时,4支被试传感器均出现了较为明显的性能漂移,具体表现为线性度和基本误差参数的急剧变化,传感器的线性度相较初始值分别发生了57.44%、100.36%、111.35%、93.27%的变化,基本误差相较初始值分别发生了104.23%、655.03%、626.70%、255.96%的变化,判断可知此时传感器出现疲劳失效。图9展示了13号~16号传感器在压力循环峰值为240 kPa的情况下,线性度和基本误差随循环次数的变化趋势。

传感器的灵敏度参数在传感器承受220万次压力循环载荷作用后未发生明显变化。试验结果表明:压阻式压力传感器发生疲劳失效后,典型特征是线性度以及与之相关联的基本误差率先发生漂移,这与前述失效原因分析结果相吻合。循环载荷下传感器的性能退化并非单一机制导致,而是裂纹扩展与金属互连损伤共同作用的结果。疲劳试验中观测到的线性度和基本误差变化,为后续跨尺度模型中裂纹长度和互连损伤变量的演化分析提供了试验依据。

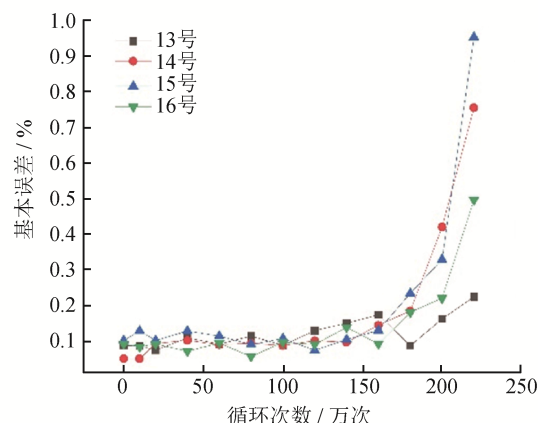
3 双通道竞争失效寿命预测模型构建

3.1 模型总体框架

基于上述膜片裂纹扩展与互连损伤的传感器失效机制,提出双通道退化寿命预测模型。该模



(a) 线性度随压力循环次数的变化趋势
(a) Variation trend of linearity with the number of pressure cycles



(b) 基本误差随压力循环次数增加的变化趋势
(b) Variation trend of basic error with the number of pressure cycles

图9 被测传感器静态性能参数随压力循环次数的变化趋势
Fig.9 Variation curves of static performance parameters of the measured sensor with the number of pressure cycles

型的核心思想在于:系统的总退化量并非由单一机制线性主导,而是两种机制相互竞争、此消彼长的结果。其总体数学模型为

$$D_{\text{total}}(N) = \max [\omega_1 \cdot D_{\text{crack}}(N) + \omega_2 \cdot D_{\text{interconnect}}(N)] \quad (8)$$

式中: $D_{\text{total}}(N)$ 为系统在循环 N 次后的总退化度; $D_{\text{crack}}(N)$ 和 $D_{\text{interconnect}}(N)$ 分别为由膜片裂纹和互连损伤引起的独立退化量; ω_1 和 ω_2 分别为与材料属性、工艺参数相关的竞争权重因子,满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

该模型的构建遵循“单机制建模-性能映射-竞

争耦合”的逻辑框架：首先，基于 Paris 裂纹扩展定律建立裂纹长度随循环次数演化的力学模型，进而通过裂纹长度-刚度-线性的映射关系，刻画裂纹扩展对传感器性能退化的影响机制；其次，针对金属互连在循环载荷下的疲劳损伤行为，构建以电阻漂移为表征的性能退化模型；鉴于两种失效机制在不同疲劳阶段的主导作用存在差异，本文引入随裂纹长度演化的权重因子，对裂纹扩展通道与互连损伤通道进行竞争耦合，从而统一描述对传感器全寿命周期退化行为。

本模型的基本假设有：

1) 独立性假设

在传感器使用初始阶段，两种退化机制独立发生与发展，互不干扰。

2) 竞争性假设

系统的最终失效由首先达到临界条件的退化通道决定。

3) 线性累积假设

在各通道内部，损伤服从帕姆格伦-麦因纳线性累积法则，即每一次循环应力都会消耗材料一定比例的“疲劳寿命”，当所有消耗的寿命比例之和达到 100% 时，材料就会发生疲劳破坏^[22]。

3.2 膜片裂纹扩展模型

基于 Paris 裂尖塑形区疲劳裂纹扩展理论，结合本研究中硅膜片的特定几何约束(平面应力状态)，建立裂纹扩展速率方程，得到裂纹扩展速率和压力载荷循环次数的关系。

裂纹扩展会导致有效承载截面积的减小，并改变局部应力场分布，直接引发膜片等效刚度衰减。根据 Irwin 的等效模型理论，刚度衰减率与裂纹长度存在如下关系^[23]

$$\frac{k(a)}{k_0} = [1 + \beta(\frac{a}{a_0})^n]^{-1} \quad (9)$$

式中： $k(a)$ 为不同裂纹长度对应的不同膜片刚度， k_0 为无损膜片刚度， β 和 n 为拟合参数。

对于压阻式压力传感器而言，膜片是应变的主要来源，其局部应变被 4 个电阻敏感区域采样并构成惠斯通电桥。因此，膜片刚度下降会导致两方面的变化：一方面，整体挠度在相同压力下增大，非线性挠度项更为显著；另一方面，应变场分布不再呈对称或线性分布，而是因裂纹产生局

部应变集中与远场应变削弱，导致电桥四臂输出不再成线性比例关系。因此，膜片刚度的相对下降会直接导致输出电桥的线性度指标出现增量，且在裂纹扩展后期表现为加速趋势。在裂纹长度尚未引起膜片大范围失稳的阶段，膜片平均应变增量与刚度衰减的比例系数变化在较小范围内波动。因此，其关联模型可简化为

$$\delta_{NL}^{crack}(a) = \alpha \cdot [1 - \frac{k(a)}{k_0}] \quad (10)$$

式中： $\delta_{NL}^{crack}(a)$ 为传感器线性度； α 为比例系数，其物理意义为膜片柔化对电桥输出线性误差的耦合灵敏度系数。在疲劳初期和中期，通过静态加载试验测得实际膜片刚度，同步测量传感器线性度，对参数 $[1 - k(a)/k_0]$ 和 $\delta_{NL}^{crack}(a)$ 做最小二乘线性拟合，得到试验拟合系数 α ，最终确定 α 的数值在 0.85 ~ 1.20。

推导得到裂纹长度与压力循环次数的显式关系($m \neq 2$)，公式为

$$a(N) = [a_0^{1-m/2} + (1 - m/2)C_{eq}(\Delta\sigma)^m N]^{\frac{1}{1-m/2}} \quad (11)$$

式中： C_{eq} 为等效裂纹扩展系数， $C_{eq} = CS^m Y^m \pi^{m/2}$ ， Y 为几何修正因子(无量纲系数)，反映裂纹的几何形状、构件的几何尺寸及力的加载方式对裂纹尖端应力场的影响。

计算得到压力循环次数和线性度之间的函数关系，公式为

$$\delta(N) = \alpha\beta \left\{ \frac{[a_0^{1-m/2} + (1 - m/2)C_{eq}(\Delta\sigma)^m N]^{\frac{1}{1-m/2}}}{a_0} \right\}^n \quad (12)$$

式中： $\delta(N)$ 为不同压力循环次数对应的传感器线性度。

将该通道的传感器失效判据定义为：裂纹长度 a 达到临界 a_{cr} 时，膜片发生贯穿性破裂；或者由式(12)计算出的传感器线性度超过性能要求的阈值。

3.3 互连损伤演化模型

3.3.1 基于应变幅的 Coffin-Manson 模型

金属互连线的低周疲劳损伤主要由塑性应变幅驱动^[24]，采用经典的 Coffin-Manson 关系^[19]，并引入尺寸效应修正因子 $\lambda(d)$ (d 为互连线宽度)来描述其疲劳寿命，即

$$\Delta \varepsilon_p \cdot N_f^c = \theta \cdot \lambda(d) \quad (13)$$

式中： $\Delta \varepsilon_p$ 为局部塑形应变幅； c 和 θ 为材料常数，对Al互连线， c 值在0.5~0.7； N_f 为失效循环次数。

由于互连所处的应变状态受膜片整体变形控制， $\Delta \varepsilon_p$ 与膜片中心最大应变 $\Delta \varepsilon_{\max}$ 存在以下关系

$$\Delta \varepsilon_p = \Gamma \cdot \Delta \varepsilon_{\max} \quad (14)$$

式中： Γ 为应变集中系数。

3.3.2 电阻漂移与损伤互连方程

包括颈缩、孔洞、裂纹在内的互连损伤会导致电阻值发生漂移，故将此通道的退化量 $D_{\text{interconnect}}$ 定义为电阻相对变化率，即

$$D_{\text{interconnect}}(N) = \frac{\Delta R}{R_0}(N) \quad (15)$$

式中： ΔR 为电阻的绝对变化量， R_0 为无损状态电阻初始值。

电阻漂移率与累积塑形应变能密度 $\sum \Delta W_p$ 相关，其演化方程可以表示为

$$\frac{dD_{\text{interconnect}}}{dN} = C_2 \cdot (\Delta W_p)^{m_2} \quad (16)$$

式中： C_2 和 m_2 为待定参数； ΔW_p 为塑形应变能密度，可通过循环应力-应变曲线计算得到。

该通道的失效判据定义：电阻值的相对变化率 $\Delta R/R_0$ 超过允许阈值，或者金属互连线直接发生电气开路。

3.4 竞争耦合机制和寿命模型集成

3.4.1 时变权重因子模型

为实现膜片裂纹扩展通道与金属互连损伤通道之间的非线性耦合，本文采用了基于裂纹长度 a 的时变权重函数 $\omega_1(a)$ 和相对应的 $\omega_2(a) = 1 - \omega_1(a)$ 作为互连权重。该分配方法在本质上属于“机制混合/加权合成”策略，即在不同失效尺度或不同裂纹尺度下，物理控制方程的主导项发生切换。文献[25]关于通过非线性加权算子实现不同相态或物性插值的理论框架，证明了本方法兼具工程可实施性和理论可接受性。

为使权重函数具有明确的物理含义且便于参数化，采用sigmoid/Logistic转换函数作为模型形式，即

$$\omega_1(a) = \frac{1}{1 + e^{[-\gamma \cdot (a - a_c)]}} \quad (17)$$

$$\omega_2(a) = 1 - \omega_1(a) \quad (18)$$

式中： a_c 为竞争转换的特征裂纹长度， γ 为形状调节因子。当 $a \ll a_c$ 时， $\omega_1(a) \approx 0$ ，性能退化主要由互连损伤主导；当 $a \gg a_c$ 时， $\omega_1(a) \approx 1$ ，裂纹扩展成为主要退化来源。 γ 控制机制转换的“陡峭程度”， γ 越大，主导机制转换过渡形式越接近阶跃。

在疲劳试验中，用早期-中期的多数样本数据得到裂纹长度 $a(N)$ 与对应互连电阻 $R(N)$ 的加速上升点之间的关系。以“裂纹长度到互连性能突变点”的统计均值作为 a_c 。 γ 的物理含义是“转换宽度”的倒数，用实测的线性度退化曲线在 a 空间回归拟合，得到 γ 的经验值。

通过对 a_c 和 γ 进行网格化敏感性分析，可以得到： a_c 主导转换发生时刻与中期退化形态， γ 主要影响转换区的陡峭性；在推荐的物理区间内，最终寿命预测对两者均保持相对稳健。

3.4.2 寿命预测集成与求解

压力传感器总寿命 N_f 为满足式(19)条件的最小循环次数 N 。

$$D_{\text{total}}(N) = \max \left[\omega_1(a) \cdot \frac{a(N)}{a_{\text{cr}}} + \omega_2(a) \cdot \frac{\Delta R(N)/R_0}{(\Delta R/R_0)_{\text{cr}}} \right] \geq 1 \quad (19)$$

式中： $D_{\text{total}}(N)$ 为总归一化损伤度， a_{cr} 为临界裂纹长度， $(\Delta R/R_0)_{\text{cr}}$ 为临界电阻相对变化率。

由于方程耦合且非线性，解析求解难度较大，可采用数值迭代方法进行求解。求解流程如图10。

3.4.3 寿命预测结果对比

采用仅考虑裂纹扩展对传感器性能退化影响的单通道物理模型，对13号~16号传感器进行线性度参数的演化预测，并和试验实测的线性度参数进行对比，结果如图11所示。

分析结果表明：只考虑裂纹扩展对传感器性能退化影响的单通道物理模型预测的线性度参数，随着试验压力载荷循环次数的增加，呈现先缓慢增长、后迅速增长的趋势，与实测结果大致相符，模型预测曲线与试验数据在整体趋势和加速阶段具有较好的一致性。但在试验初期，预测结果均偏低，这也证明了在裂纹扩展到临界尺寸之前，裂纹扩展并非传感器性能退化的主导因素。其次，

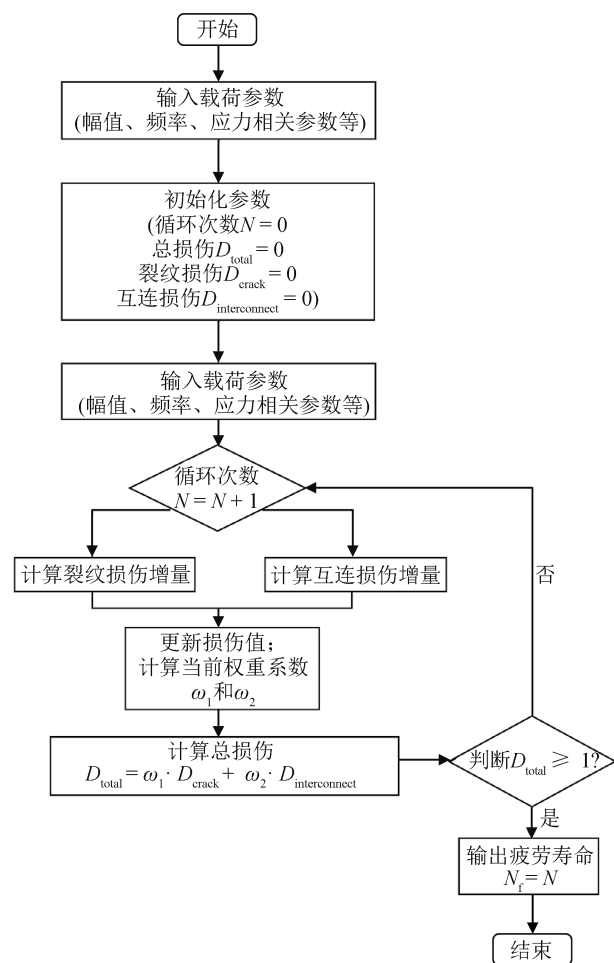
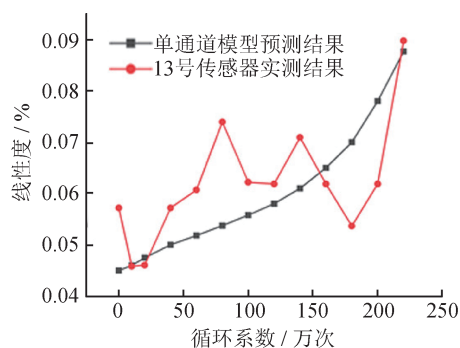


图10 双通道寿命预测模型数值求解流程图

Fig.10 Flowchart of numerical solution for dual-channel life prediction model

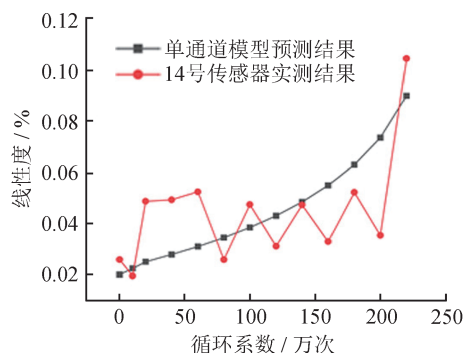
在循环疲劳初期，试验中观测到的性能退化速率较低，且未表现出明显的非线性特征，该阶段退化行为与金属互连疲劳损伤主导的电阻漂移模型相符。因此，单通道预测模型具有一定的局限性。

图12展示了考虑裂纹扩展以及金属互连损伤两种因素的双通道寿命预测模型给出的各个传感器的预测使用寿命和实际试验测得的传感器疲劳寿命的对比结果，可以看出：本模型寿命预测的精度较高，在压力循环载荷峰值为满量程的120%和140%工况下，试验实测传感器疲劳寿命与双通道模型预测寿命的平均相对误差为8.41%，最大相对误差为14.66%，整体误差水平处于可接受范围内，表明模型预测结果与实测数据具有较好的一致性。随着压力载荷的增大，传感器寿命阶梯式下降。



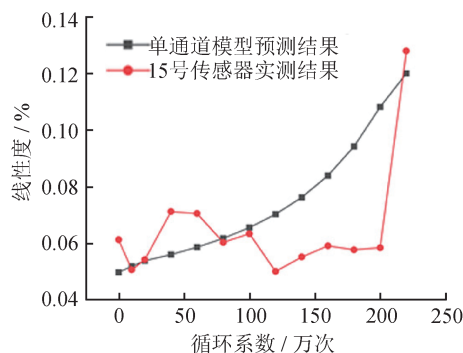
(a) 13号传感器线性度预测结果和实测结果对比

(a) Comparison of linearity prediction vs. measurement for sensor #13



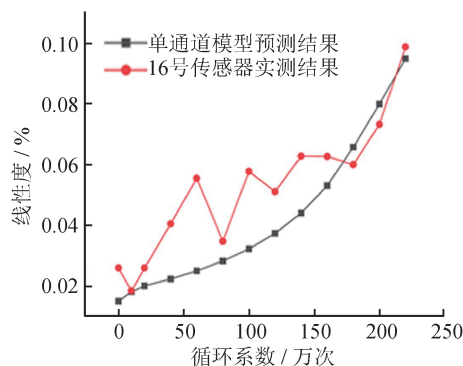
(b) 14号传感器线性度预测结果与实测结果对比

(b) Comparison of linearity prediction vs. measurement for sensor #14



(c) 15号传感器线性度预测结果与实测结果对比

(c) Comparison of linearity prediction vs. measurement for sensor #15



(d) 16号传感器线性度预测结果与实测结果对比

(d) Comparison of linearity prediction vs. measurement for sensor #16

图11 传感器单通道模型预测与实测线性度对比图

Fig.11 Comparison between predicted linearity of sensor single-channel model and experimentally measured linearity

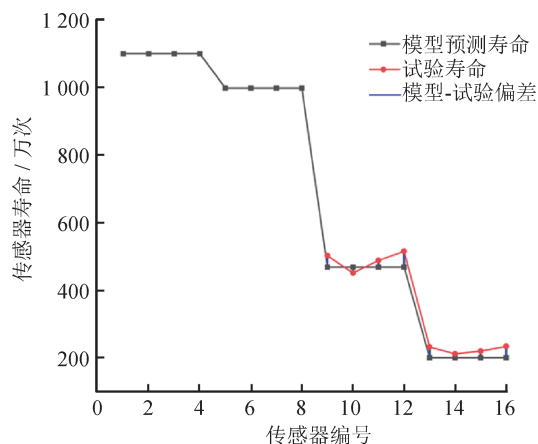


图12 传感器双通道模型预测寿命与试验实测寿命比对

Fig.12 Comparison between predicted life of sensor dual-channel model and experimentally measured life

与仅考虑单一失效机制的寿命预测模型相比,本文提出的双通道竞争失效模型能够同时刻画疲劳早期由金属互连损伤主导的性能退化行为以及后期由裂纹扩展主导的加速失效过程,从而在全寿命周期内保持更好的预测一致性。这种竞争耦合建模方法为压阻式压力传感器在循环载荷下的寿命预测提供了一种更为合理的建模思路。

4 结论

本研究通过变幅循环载荷与加速疲劳试验,结合理论分析建立了硅基压阻式压力传感器的双通道竞争失效模型。该模型耦合裂纹扩展与金属互连损伤两种机制,实现了对传感器循环载荷下寿命的精确预测。主要结论如下:

1) 失效机制随裂纹扩展发生转变,初始阶段以金属互连损伤为主,当裂纹长度超过临界长度后,转为裂纹扩展主导;

2) 损伤演化呈现非线性特征,裂纹损伤呈指数加速增长,互连损伤近似线性增长;

3) 使用寿命与压力幅值负相关,在 240 kPa 载荷下,实测失效循环约 223.25 万次,模型预测值为 198 万次,平均相对误差为 8.41%。

本研究为压力传感器加速寿命试验提供了方法与模型支持,可为传感器结构优化、材料选型、状态监测和剩余寿命评估提供依据。未来可进一步考虑多场耦合、工艺分散性等因素,发展概率寿命预测新方法。

参考文献

- [1] ZHANG Y F, WU K K, SHEN S N, et al. Fatigue life evaluation of gold wire bonding solder joints in MEMS pressure sensors [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2023, 33(2): 025002.
- [2] BELWANSI V, SEHRA K, ARYAN, et al. Degradation mechanism of piezoresistive sensors under the influence of γ -ray irradiation [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(23): 38740-38747.
- [3] 吴永亮, 陈国光, 孟召丽. 基于步进应力加速寿命试验的硅压力传感器寿命预测[J]. 电子测量技术, 2009, 32(12): 44-47.
WU Y L, CHEN G G, MENG Z L. Life prediction for silicon pressure sensor based on step-stress accelerated life-test [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(12): 44-47. (in Chinese)
- [4] 齐虹, 王蕴辉, 易德兴, 等. 硅压力传感器的可靠性试验方法及失效分析[J]. 传感器技术, 2001(4): 31-33.
QI H, WANG Y H, YI D X, et al. Reliability test method and failure analysis for silicon pressure transducer [J]. Journal of Transducer Technology, 2001(4): 31-33. (in Chinese)
- [5] 陈传龙, 沈辉, 戴隆超, 等. 一种基于疲劳损伤的 MEMS 金属薄膜电阻退化模型[J]. 力学季刊, 2023, 44(4): 845-853.
CHEN C L, SHEN H, DAI L C, et al. A fatigue damage-based model for the degradation of resistance in MEMS metal films [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(4): 845-853. (in Chinese)
- [6] 兰之康, 唐洁影. MEMS 微梁疲劳频率特性测试与分析[J]. 功能材料与器件学报, 2008, 14(1): 89-92.
LAN Z K, TANG J Y. Test and analyse on a frequency characteristic of a micro beam of MEMS [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2008, 14(1): 89-92. (in Chinese)
- [7] 关存贺, 许高斌, 王焕章, 等. 复杂应力条件下 MEMS 加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 17-25.
GUAN C H, XU G B, WANG H Z, et al. Reliability analysis of MEMS acceleration sensors under complex stress conditions [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 17-25. (in Chinese)
- [8] 高颖, 姜岩峰. 高性能 SOI 基纳米硅薄膜微压阻式压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6):

- 839-848.
- GAO Y, JIANG Y F. Research on SOI-based nano-silicon film micro-piezoresistive pressure sensor with high performance [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 839-848. (in Chinese)
- [9] 赵泽钢, 田达晰, 赵剑, 等. 应力预释放对单晶硅片的压痕位错滑移的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 208101.
- ZHAO Z G, TIAN D X, ZHAO J, et al. Effect of prior stress-relief on the gliding of indentation dislocations on silicon wafers [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20): 208101. (in Chinese)
- [10] 雷明雨, 温斌. 位错密度演化模型的研究进展[J]. 燕山大学学报, 2023, 47(1): 1-19.
- LEI M Y, WEN B. Research progress of dislocation density evolution models [J]. Journal of Yanshan University, 2023, 47(1): 1-19. (in Chinese)
- [11] 汪自扬, 杨立云, 吴云霄, 等. 弯折裂纹尖端应力强度因子值的近似计算方法[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 10-19.
- WANG Z Y, YANG L Y, WU Y X, et al. Study on approximate method of stress intensity factor value at bending crack tip [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 10-19. (in Chinese)
- [12] 王丽丽, 黄小平, 崔维成. 复杂应力场中裂纹疲劳扩展寿命预报[J]. 船舶力学, 2011, 15(4): 383-388.
- WANG L L, HUANG X P, CUI W C. Fatigue crack growth life prediction of cracks in complex stress field [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(4): 383-388. (in Chinese)
- [13] HUY L V, KAMIYA S, GASPAR J, et al. Statistical characterization of fracture strength and fatigue lifetime of polysilicon thin films with different stress concentration fields [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2012, 6(11): 1013-1029.
- [14] MUELLER M G, ŽAGAR G, MORTENSEN A. Stable room-temperature micron-scale crack growth in single-crystalline silicon [J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(19): 3617-3626.
- [15] 郝一鸣, 雷程, 王涛龙, 等. 压敏电阻位置对压阻式压力传感器输出影响研究[J]. 仪表技术与传感器, 2025(5): 10-14.
- HAO Y M, LEI C, WANG T L, et al. Study on influence of varistor position on output of piezoresistive pressure sensors [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(5): 10-14. (in Chinese)
- [16] 刘帅, 杜晓辉, 朱敏杰, 等. 扩散硅压力传感器长期稳定性提升试验方法研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 57-62.
- LIU S, DU X H, ZHU M J, et al. Study on long-term stability improvement test method of diffused silicon pressure sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(1): 57-62. (in Chinese)
- [17] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会. 硅压阻式动态压力传感器: GB/T 26807-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Technical Committee for Industrial Process Measurement, Control and Automation of Standardization Administration of China. Silicon piezoresistive dynamic pressure sensor: GB/T 26807-2011[S]. Beijing: China Standard Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会. MEMS 压阻式压力敏感器件性能试验方法: GB/T 42191-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- National Technical Committee for Industrial Process Measurement, Control and Automation of Standardization Administration of China. MEMS piezoresistive pressure sensitive device performance test methods: GB/T 42191-2023[S]. Beijing: China Standard Press, 2023. (in Chinese)
- [19] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会. 压力传感器性能试验方法: GB/T 15478-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- National Technical Committee for Industrial Process Measurement, Control and Automation of Standardization Administration of China. Performance test methods for pressure transducers: GB/T 15478-2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015. (in Chinese)
- [20] 飞机液压作动筒、阀、压力容器脉冲试验要求和方法: GJB 3849-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- Pulse test requirements and methods for aircraft hydraulic actuators, valves, and pressure vessels: GJB 3849-1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999. (in Chinese)
- [21] International Organization for Standardization. Hydraulic fluid power — general rules and safety requirements for systems and their components: ISO 4414:2010[S]. Geneva: ISO, 2010.
- [22] 李伟平, 曹和利, 李磊, 等. 疲劳寿命预测的连续型

- Miner法[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 414-417.
- LI W P, CAO H L, LI L, et al. Continuous miner method for fatigue life estimation[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 414-417. (in Chinese)
- [23] 李亚, 易志坚, 王敏, 等. 裂纹面局部均布荷载下 I 型裂纹有限宽板应力强度因子[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(10): 1083-1091.
- LI Y, YI Z J, WANG M, et al. The stress intensity factor of a finite-width plate with a mode- I center crack subjected to uniform stress on the crack surface near the crack tip[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(10): 1083-1091. (in Chinese)
- [24] 曾文彬, 宋梁, 张西应, 等. 基于 Coffin-Manson 模型功率半导体器件可靠性评估[J]. 电力电子技术, 2022, 56(7): 138-140.
- ZENG W B, SONG L, ZHANG X Y, et al. Reliability evaluation for power semiconductor device using Coffin-Manson model [J]. Power Electronics, 2022, 56(7): 138-140. (in Chinese)
- [25] LIU J Y, SONG B F, ZHANG Y G. Competing failure model for mechanical system with multiple functional failures[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5): 1-16.

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一/通信作者: 沈忱(1999—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为动态压力计量与测试。