

机载 TR 组件散热性能退化建模与寿命预测方法

李昊¹, 周于博², 赵鹏飞¹, 张翔羽¹, 李群², 张生鹏¹

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘要: **目的** 揭示机载 TR 组件长期贮存使用条件下的散热性能退化机理, 预测组件的散热性能退化寿命。**方法** 分析确定 TR 组件散热性能退化的主要机理为外力作用导致硅脂挤出渗出, 以及硅脂中硅油挥发。采用等效导热系数为表征参数, 构建 TR 组件散热性能表征模型, 并从退化机理出发, 采用修正的 Lucas-Washburn (LW) 方程刻画硅脂挤出渗出现象, 采用经典挥发模型刻画硅油挥发现象, 构建 TR 组件层间硅脂硅油质量损失模型及等效导热系数退化模型。设计开展损伤加速试验, 利用试件质量损失数据对所构架的质量损失模型进行校验, 并基于验证后的模型预测 TR 组件散热性能退化失效寿命。**结果** 基于前 3 个循环的损伤加速试验数据拟合得到的模型, 对第 4 个循环的试件质量损失的预测结果与实测值相对误差仅 1.53%, 证明了所提模型的有效性。再使用所有循环的试验数据重新拟合 TR 组件层间硅脂等效导热系数退化模型, 并预测 TR 组件散热性能退化失效寿命。计算结果表明, 在贮存使用 9.03 a 后, 所讨论的 TR 组件会因散热性能不满足工作要求而失效。**结论** 本文所提模型具有较强物理含义, 且实验验证结果表明, 模型预测误差小, 精度高, 说明所提模型能够较好刻画 TR 组件散热性能退化过程。同时, 模型参数较少, 可通过少量试验完成参数确定, 因此具备较强指导与应用价值。

关键词: TR 组件; 导热硅脂; 散热性能; 退化建模; 加速试验; 寿命预测

中图分类号: V416

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0026-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.005

Thermal Degradation Modelling and Lifetime Prediction Method of Airborne TR Module

LI Hao¹, ZHOU Yubo², ZHAO Pengfei¹, ZHANG Xiangyu¹, LI Qun², ZHANG Shengpeng¹

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China;

2. School of Astronautics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the degradation mechanism of thermal performance in airborne TR modules under long-term storage conditions and predict their thermal degradation lifespan. The two main degradation mechanisms of TR modules were identified as thermal grease extrusion caused by external forces and silicone oil volatilization. A thermal performance characterization model was established with equivalent thermal conductivity as the key parameter. By integrating a modified Lucas-Washburn (LW) equation to describe grease extrusion phenomena and classical volatilization models to simulate oil evaporation, a comprehensive mass loss model and an equivalent thermal conductivity degradation model were developed. Ac-

收稿日期: 2025-02-23; 修订日期: 2025-03-30

Received: 2025-02-23; Revised: 2025-03-30

基金项目: 技术基础科研项目 (JSH2022209A001)

Fund: Technical Basic Scientific Research Project (JSH2022209A001)

引文格式: 李昊, 周于博, 赵鹏飞, 等. 机载 TR 组件散热性能退化建模与寿命预测方法[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 26-33.

LI Hao, ZHOU Yubo, ZHAO Pengfei, et al. Thermal Degradation Modeling and Lifetime Prediction Method of Airborne TR Module[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 26-33.

celerated degradation tests were designed and conducted to validate the mass loss model with samples weight loss data, followed by the thermal degradation lifespan prediction of TR modules based on verified models. The model calibrated with first three test cycles demonstrated the effectiveness of the proposed models, showing only 1.53% relative error between prediction results and measured results of the fourth-cycle weight loss. Then, the degradation model of equivalent thermal conductivity of silicone grease between layers of TR modules was re-fitted by the test data of all cycles, and the thermal degradation lifespan of TR modules was predicted. The calculation results showed that after 9.03 years of storage, the TR modules in question would fail because the thermal performance could not meet the working requirements. The model proposed has strong physical meaning, and the experimental results show that the prediction error of the model is small and the precision is high, which indicates that the proposed model can describe the thermal degradation process of TR modules well. At the same time, the model has few parameters, which can be determined through a few experiments, so it has strong guidance and application value.

KEY WORDS: TR module; thermal grease; thermal performance; degradation model; accelerated test; life prediction

TR 组件是机载雷达设备的核心部件,其主要用于相控阵天线的发射功率放大、接收信号低噪声放大、收发转换、阵面幅度修正和波束扫描等功能^[1]。雷达工作过程中,TR 组件的高收发功率会产生大量热量,导致组件的工作温度急剧升高,进而影响组件中电子器件的正常工作,甚至损伤或破坏器件^[2]。尽管产品设计时采取了一定的热设计和散热措施,比如通过导热硅脂、散热底板及散热结构将热量向外传出。在长期贮存使用过程中,导热硅脂容易发生被挤出、硅油干涸等问题,导致其散热性能下降而无法满足组件高功率工作的散热要求,进而导致设备工作环境恶化,造成组件功能器件和模块将处于超温环境中,并最终引起组件失效。

TR 组件的散热性能主要受填充在其与散热结构间的导热硅脂决定,在长期贮存、值班过程中,导热硅脂会出现硅脂泵出与硅油干燥 2 种情况^[3-5],导致层间硅脂流失与干涸。Wunderle1 等^[5]设计了一套用于快速激发芯片层间硅脂失效的试验装置,并观察到硅脂在外界载荷作用下的泵出流失现象。Li 等^[6]则结合平滑粒子流体动力学与有限元方法,利用仿真软件分别对功率循环与温度循环条件下铜板与热沉间硅脂泵出现象进行了分析。然而上述研究并未提出一种数学模型用于刻画硅脂泵出流失的退化过程,无法实现对层间硅脂散热性能退回到寿时间的预测。Jiang 等^[7]则更关注硅脂中硅油挥发干涸的现象,并推导了 3 组分硅脂等效导热计算公式,构建了一种考虑毛细力作用的硅油干涸退化模型,但其仅对退化模型开展了理论分析,缺乏一定的试验支撑。在工程应用中,开展获取产品性能退化规律通常是先通过加速试验快速获得产品关键性能的退化数据,再运用数据驱动的方法对试验数据进行拟合,以得到表征性能参数随时间变化的关系式^[8-9]。例如, Song 等^[10]与 Bian 等^[11]利用线性轨迹模型刻画了微机电系统 (MEMS) 及其组件的退化过程。蔡忠义等^[12]则分别采用 Wiener 过程、Gamma 过程以及逆高斯过程对产品关键性能的退化过程进行建模。然而数据驱动的建模方法存在数

据量需求大,且缺乏具体物理机理支撑,难以指导产品可靠性改进提升等问题^[13]。

为弥补传统基于数据驱动的评估方法的不足,本文综合机理推导与试验校验开展 TR 组件散热性能退化建模与寿命评估。首先从 TR 组件散热性能下降的物理机理层面开展性能退化建模研究,参考文献[7]建模思路,构建综合考虑泵出效应与干燥效应的 TR 组件散热性能退化模型。接着设计开展复杂应力场景下的加速试验,对模型进行校验,并完成参数估计。最终给出 TR 组件散热性能下降到寿的预测模型。

1 机载 TR 组件散热性能退化建模

1.1 TR 组件散热性能退化机理

TR 组件散热结构主要包括散热底板、导热硅脂和均温板等部分。其中,底板与均温板通过螺纹连接进行固定和安装,均温板则连接至天线阵面上的热沉进行集中散热,TR 组件散热结构及散热通道如图 1 所示。其中,导热硅脂是一种绝缘有机复合材料,其一般是通过将导热填料与聚合物基体进行物理和机械混合制成的,具有较高的热稳定性和较低的表面能,能够良好地润湿接触界面,故能显著降低接触热阻^[14-15]。

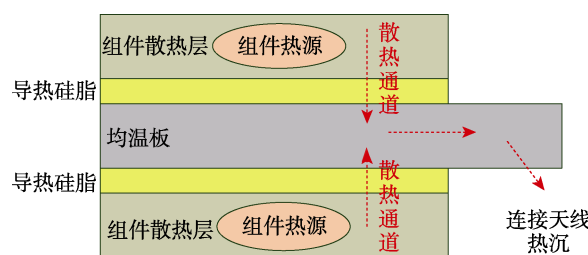


图 1 机载 TR 组件散热结构

Fig.1 Heat dissipation structure of airborne TR modules

然而,在长期贮存值班过程中,TR 组件层间导热硅脂会因硅脂挤出与硅油干燥等原因损失流失,引

起 TR 组件散热性能下降。其中, 硅脂泵出主要表现为 2 个连接表面发生相对位移而导致导热硅脂从接触间隙中流失的现象^[16]。该现象通常由热应力和机械应力共同驱动, 常见于高热负荷或不当装配的情况^[18]。在外力作用下, 硅脂沿着毛细通道不断向外转移, 而毛细通道的产生主要有 2 种途径: 一种为热界面处表面粗糙度导致的空隙腔体; 另一种为因长时间使用使导热硅脂内部结构发生变化而形成通道。硅油干燥则表现为硅脂中硅油挥发。随着时间推移, 硅油分子从中心向外逐渐减少, 最终导致硅油的不断流失, 如图 2 所示。随着硅油的流失, 导热颗粒之间的连接被破坏, 接触热阻增大, 导热硅脂的有效导热系数随之发生变化, 散热性能也逐步下降^[17]。

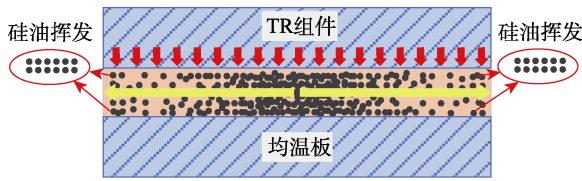


图 2 导热硅脂中硅油挥发模型

Fig.2 Silicone oil volatilization model in thermal grease

1.2 TR 组件散热性能退化机理

导热硅脂的有效导热系数下降是 TR 组件散热性能退化的主要特征。因此, 本节首先构建了一个理论模型, 用于确定导热硅脂有效导热系数表征模型。导热硅脂由导热填料颗粒与硅油充分混合制备而成, 在本文中, 将硅脂中的导热填料颗粒假设为均匀堆积起来形成一个固体的矩阵结构, 其理想分布如图 3a 所示。随着退化发生, 边缘的硅脂会被挤出, 且硅油不断流失与挥发, 在层间硅脂中形成“干涸区域”, 如图 3b 所示。在该区域, 硅脂主要有 2 种状态: 一种为硅脂在外界载荷作用下随着毛细通道不断向外挤出, 即图中阴影区域; 另一种为硅油不断挥发干涸形成的区域, 即图中的灰色区域。

相应的, 本文中将层间硅脂中硅油未流失的部分称为“正常区域”。假定此区域内导热性质保持不变, 并令该区域导热系数为 k_{eff1} , 而硅脂缺失与硅油流失所形成“干涸区域”的导热系数则假定为 k_{eff2} 。随着退化的发生, “正常区域”导热硅脂界面将会从外围向中心逐渐收缩。此时, 将整个热界面的面积记作 A_0 , “正常区域”面积记作 A_1 , “干涸区域”面积记作 A_2 。

TR 组件的散热性能主要采用热界面有效导热系数 k_{eff} 进行表征。考虑到组件与均温板间厚度较薄, 故假设不同区域厚度均匀, 且组件散热层和均温板上的温度均匀分布并保持恒定, 则时间 Δt 内沿着散热通道传递的总热流量 Φ 可由式 (1) 计算:

$$\Phi = \frac{k_{\text{eff}} A_0 \Delta t}{h} = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (1)$$

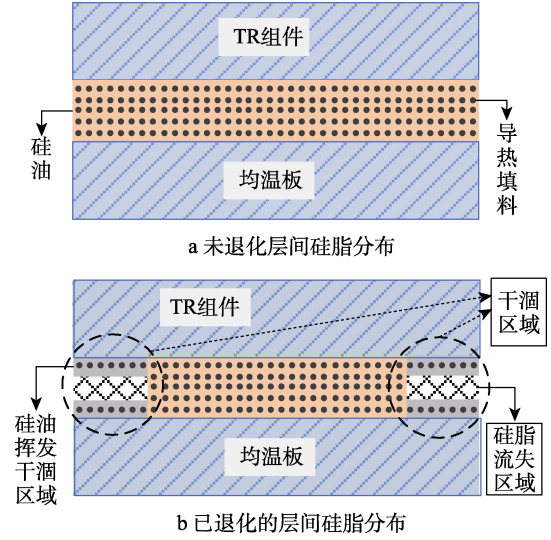


图 3 层间导热硅脂分布

Fig.3 Distribution diagram of interlayer thermal grease:
a) distribution of non-degraded interlayer silicone grease;
b) distribution of degraded interlayer silicone grease

式中: h 为层间厚度; Φ_1 为“正常区域”的热流量; Φ_2 为“干涸区域”的热流量。其分别满足:

$$\Phi_1 = \frac{k_{\text{eff1}} A_1 \Delta t}{h} \quad (2)$$

$$\Phi_2 = \frac{k_{\text{eff2}} A_2 \Delta t}{h} \quad (3)$$

综合式 (1) ~ (3), 可以推导得到有效导热系数 k_{eff} 的表征模型为:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff1}} A_1}{A_0} + \frac{k_{\text{eff2}} A_2}{A_0} = k_{\text{eff1}} + \frac{A_2(t)}{A_0} (k_{\text{eff2}} - k_{\text{eff1}}) \quad (4)$$

式中: V_0 为初始状态下的硅脂的体积; $V_2(t)$ 为 t 时刻“干涸区域”的总体积。 k_{eff1} 与 k_{eff2} 分别为“正常区域”与“干涸区域”的导热系数。“正常区域”的导热系数可用 Maxwell^[19]、Buggeman^[20] 或 Agari^[21-22] 等模型来描述, 其中, Maxwell 模型被广泛应用于材料热性能设计和评估^[23]。因此, 本文也采用 Maxwell 模型计算“正常区域”的导热系数, 其具体方程为:

$$k_{\text{eff1}} = k_2 \frac{\left[2 \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) \varepsilon_1 + \frac{k_1}{k_2} + 2 \right]}{\left[\left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) \varepsilon_1 + \frac{k_1}{k_2} + 2 \right]} \quad (5)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为“正常区域”硅脂中填料颗粒与基体的导热系数; ε_1 为硅脂中填料的体积分数。

在干涸区域中, 由于层间硅脂实际包含“硅油挥发干涸区域-硅脂流失区域-硅油挥发干涸区域”3 层, 因此, 需分别计算每层的导热系数后, 再综合计算“干涸区域”的等效导热系数 k_{eff2} 。对于硅脂流失区域, 可直接采用空气的导热系数 k_3 作为该区域的导热系数 k_{eff21} 。对于硅油挥发干涸区域, 同样可依据式 (5)

进行计算, 不过因为此区域硅油基体的流失, 式(5)中基体的导热系数应取空气的导热系数, 则此时硅油挥发干涸区域的导热系数 $k_{\text{eff}22}$ 可由式(6)进行计算:

$$k_{\text{eff}22} = k_3 \frac{2 \left(\frac{k_1}{k_3} - 1 \right) \varepsilon_1 + \frac{k_1}{k_3} + 2}{\left[\left(1 - \frac{k_1}{k_3} \right) \varepsilon_1 + \frac{k_1}{k_3} + 2 \right]} \quad (6)$$

式中: k_3 为空气的导热系数。若进一步假设硅油挥发干涸区域厚度为 $h/4$, 硅脂流失区域厚度为 $h/2$, 则“干涸区域”等效导热系数 $k_{\text{eff}2}$ 可由等效热阻换算得到:

$$k_{\text{eff}2} = \frac{h}{R_{\text{eff}2}} = \frac{h}{\frac{h_2}{k_{\text{eff}22}} + \frac{h_1}{k_{\text{eff}21}} + \frac{h_2}{k_{\text{eff}22}}} = \frac{2k_3 k_{\text{eff}22}}{k_3 + k_{\text{eff}22}} \quad (7)$$

式中: h 为层间厚度; $R_{\text{eff}2}$ 为“干涸区域”等效热阻; h_1 ($h_1=h/2$) 与 h_2 ($h_2=h/4$) 分别为硅脂流失区域以及硅油挥发干涸区域厚度。

由式(4)可知, TR 组件导热硅脂的有效导热系数与层间“干涸区域”(或“正常区域”)面积呈线性关系。因此, 只需确定“干涸区域”面积 $A_2(t)$, 即可确定 TR 组件有效导热系数 k_{eff} 。

1.3 TR 组件散热性能退化模型

根据 TR 组件散热性能退化机理分析结果可知, 导热硅脂有效导热系数的退化主要是硅脂硅油损失形成“干涸区域”导致的。其中, 硅脂的损失主要源自硅脂挤出, 硅油损失则主要考虑硅油的挥发。

1) 硅脂挤出损失量。根据前文分析, 硅脂的挤出渗出主要由毛细力引起。通常, 毛细管流的质量流量使用 Lucas-Washburn (LW) 方程描述^[24], 本文采用 Schwiebert 提出的平行板件间的 LW 方程对此现象进行建模, 有:

$$L(t)^2 = \frac{h_1 \gamma \cos \theta}{3\mu} \cdot k_c \quad (8)$$

式中: L 为硅油在平行板间的移动距离; t 为时间; μ 为硅油黏度; γ 为硅油的表面张力; θ 为接触角; k_c 为硅油渗透爬行时间修正系数, 其主要用于考虑 TR 组件在实际工作环境中受到温度交变、振动和冲击等载荷的影响, 而对 LW 方程进行修正。假设“正常区域”是均匀向内部收缩, 则硅脂挤出渗出的区域面积即为“干涸区域”面积。当层间区域为矩形时, 有:

$$\begin{aligned} A_2(t) &= ab - [a - 2L(t)][b - 2L(t)] = \\ &2 \left[(a+b)L(t) - 2L(t)^2 \right] = \\ &2(a+b) \sqrt{\frac{h_1 \gamma \cos \theta k_c}{3\mu} t} - 4 \frac{h_1 \gamma \cos \theta k_c}{3\mu} t \end{aligned} \quad (9)$$

式中: a 和 b 分别为层间硅脂原始初始矩形区域的长与宽。当硅脂密度为 ρ 时, 则可得到硅脂流失区

域中损失的质量为:

$$\Delta m_l(t) = h_1 A_2(t) \rho = (a+b) h_1 \rho \sqrt{\frac{h_1 \gamma \cos \theta k_c}{3\mu} t} - 2 h_1 \rho \frac{h_1 \gamma \cos \theta k_c}{3\mu} t \quad (10)$$

2) 硅油挥发损失量。针对硅油挥发造成的硅油损失, 本文基于经典的蒸发与冷凝理论^[7,25]对此区域的质量变化进行描述。该理论假设在气-液界面上, 饱和蒸汽在气相压力 p_g 和液相温度 T_l 下冷凝, 同时气相和液相分子之间的质量流率差异是挥发过程的驱动力。硅油分子的净质量流率为:

$$j = k_e (p_l - p_g) \left(\frac{M}{2\pi R T_l} \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中: p_l 与 p_g 分别为液相压力与气相压力; M 为物质的量质量; R 为气体常数; T_l 是液相温度; k_e 为蒸发冷凝时间修正系数。从图 4 可以看出, 硅油挥发干涸区域包括上下 2 层, 故有 2 个与外界接触并造成硅油的挥发损失。由此可得挥发造成的质量损失体积 Δm_e 为:

$$\begin{aligned} \Delta m_e(t) &= 2 A_2(t) j \cdot t = \\ &2 k_e (p_l - p_g) \left(\frac{M}{2\pi R T_l} \right)^{1/2} A_2(t) \cdot t \end{aligned} \quad (12)$$

综合式(10)与(12), 可以得到“干涸区域”的总质量损失量为:

$$\begin{aligned} \Delta m(t) &= \Delta m_l(t) + \Delta m_e(t) = \\ &h_1 \rho A_2(t) + 2 k_e (p_l - p_g) \left(\frac{M}{2\pi R T_l} \right)^{1/2} A_2(t) \cdot t = \\ &- P_4 B k_e t^2 + P_3 k_e \sqrt{B} t^{3/2} - P_2 B t + P_1 \sqrt{B} t^{1/2} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: 仅参数 B 与修正参数 k_e 为待估计参数, P_1 、 P_2 、 P_3 以及 P_4 均可通过材料及环境相关参数直接计算得到。

$$\begin{aligned} B &= \frac{h_1 \gamma \cos \theta k_c}{3\mu} \\ P_4 &= 8 (p_l - p_g) \left(\frac{M}{2\pi R T_l} \right)^{1/2} \\ P_3 &= 4 (p_l - p_g) \left(\frac{M}{2\pi R T_l} \right)^{1/2} (a+b) \\ P_2 &= 2 h_1 \rho \\ P_1 &= (a+b) h_1 \rho \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(9), 估计确定参数 B 即可得到“干涸区域”面积 $A_2(t)$ 的计算表达式, 进而可对 TR 组件的散热性能进行评价, 如式(15)所示。相应的, 若给定阈值 k_H , 则通过求解方程即可得到 TR 组件散热性能退化到寿的时间。

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{eff1}} + \frac{A_2(t)}{A_0}(k_{\text{eff2}} - k_{\text{eff1}}) =$$
$$k_{\text{eff1}} + \frac{2(a+b)\sqrt{Bt} - 4Bt}{ab}(k_{\text{eff2}} - k_{\text{eff1}})$$

(15)

2 实验验证

2.1 加速试验设计

为了对模型进行校验与参数估计,本研究以某型 TR 组件贮存使用基准剖面为基础,设计开展了组件散热结构损伤加速试验,以模拟散热装置中硅脂在 TR 组件全寿命周期中经历的库房贮存、户外值班以及任务飞行等工况。经分析确定,库房贮存时的温度应力以及户外值班时的湿热应力对硅油挥发的影响较大,而飞行过程中产生的温度循环应力、随机振动以及冲击等载荷则容易造成层间硅脂的挤出流失。基

于产品设计手册和实测环境数据得到的产品贮存使用 12 a 基准剖面,利用 Arrhenius 模型和 Peck 模型设计了等效贮存值班 12 a 的恒温加速试验与湿热试验。此外,基于 COFFIN-MANSON 模型设计了温度循环试验,并考虑产品 12 a 中耐久振动总时长与冲击试验总次数,得到可等效产品 12 a 内总飞行次数的试验条件。由此,形成可模拟等效该型产品贮存使用 12 a 的损伤加速试验综合剖面,共包含 5 个试验项目,即恒定温度加速试验、湿热加速试验、温度交变加速试验、振动试验以及冲击试验。以总试验时间的 1/10 时长作为最小循环时间,最终确定损伤加速试验分 4 个循环开展,每个试验循环中各试验项目的试验条件及试验时间见表 1。

本次试验采用 TR 组件散热结构的 3 层模拟件为试验对象,其外观及尺寸如图 4 所示,各组成材料如见表 2。

表 1 试验条件及试验时间
Tab.1 Test conditions and test time

试验项目	试验条件	试验时间			
		第 1 个试验循环	第 2 个试验循环	第 3 个试验循环	第 4 个试验循环
恒定温度加速试验	温度 95 ℃	31 h	31 h	62 h	93 h
湿热加速试验	温度 90 ℃, 相对湿度 90%	48.3 h	48.3 h	87.6 h	131.4 h
温度循环加速试验	-55~+85 ℃	15 个循环	15 个循环	30 个循环	45 个循环
振动试验	垂向条件 1 (8.51g)	10.8 min	10.8 min	21.6 min	32.4 min
	垂向条件 2 (8.042g)	7.2 min	7.2 min	14.4 min	21.6 min
冲击试验	18g	45 次	45 次	90 次	135 次
	13.5g	132 次	132 次	264 次	396 次
等效贮存使用时间/a		1.2	1.2	2.4	3.6

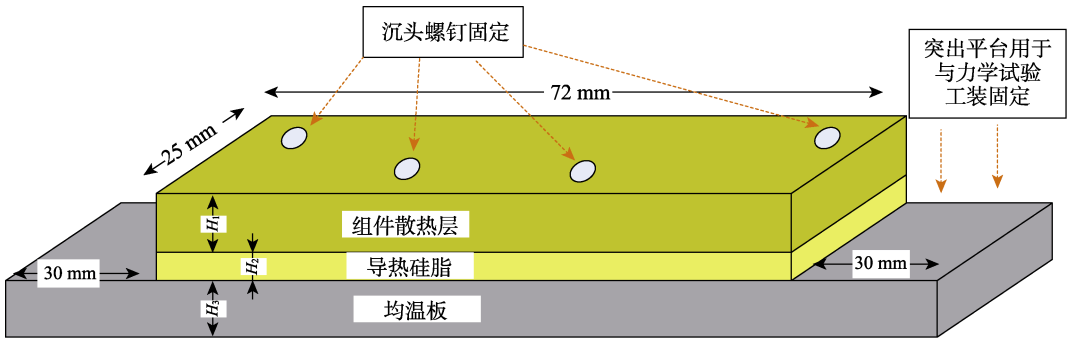


图 4 TR 组件散热结构模拟件
Fig.4 Simulation of TR module heat dissipation structure

表 2 试验试件材料组成
Tab.2 Composition of test specimen material

序号	组成	材料	备注
1	组件散热层	铝合金 6063	$H_1=6.9\text{ mm}$
2	导热硅脂	TC-5021 导热硅脂	$H_2=0.5\text{ mm}$
3	均温板	铝合金 6063	$H_3=5\text{ mm}$

2.2 试验结果与参数估计

本文通过测量损伤加速试验后试件的质量变化获取硅脂硅油的损失量。包括初始状态在内,各试验循环后试件质量见表 3。

表 4 列出了模型已知参数,及可计算的模型参数,再根据试验实测数据对未知参数 B 与 k_e 进行估

计。为对模型进行验证, 本文采用初始状态以及前 3 个循环的试验数据对模型参数进行拟合估计, 并利用第 4 个循环的试验数据对模型结果进行校验。

表 3 损伤加速试验后试件质量

Tab.3 Weight of specimen after damage acceleration test

循环数	累计等效贮存 使用时间/a	质量/g	质量总 损失量/g
0	0.00	84.2	/
1	1.20	83.9	0.3
2	2.40	83.7	0.5
3	4.80	83.5	0.7
4	8.40	83.2	1

表 4 模型参数信息

Tab.4 Model parameter information

序号	参数符号	参数名称	参数值
1	k_1	导热填料颗粒导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	60.00
2	k_2	基体导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.70
3	k_3	空气导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.023
4	ε_1	导热填料颗粒体积比	0.26
5	a	TR 组件层间宽度/m	0.025
6	b	TR 组件层间长度/m	0.072
7	h	TR 组件层间厚度/m	5.00×10^{-4}
8	ρ	导热硅脂平均密度 $/(g \cdot m^{-3})$	3.50×10^6
9	$p_l - p_g$	液相与气相压力差/Pa	9.55×10^{-3}
10	R	气体常数 $/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	8.314
11	M	硅油组分平均物质的量 质量 $/(g \cdot mol^{-1})$	74.10
12	P_1	模型参数 (见公式 (14))	$1.697 5 \times 10^2$
13	P_2	模型参数 (见公式 (14))	$3.500 0 \times 10^3$
14	P_3	模型参数 (见公式 (14))	$2.382 4 \times 10^{-4}$
15	P_4	模型参数 (见公式 (14))	$4.912 1 \times 10^{-3}$

利用 MATLAB 拟合工具对 0~3 个循环的数据进行拟合, 得到参数 B 拟合结果为 $3.034 6 \times 10^{-6}$, 参数 k_e 的拟合结果为 2.733×10^4 。同时将模型外推得到的第 4 循环预测数据与实测数据进行对比, 如图 5 所示。第 4 循环曲线预测结果为 1.015 3 g, 与实测数据 1 g 相比相对误差仅为 1.53%。

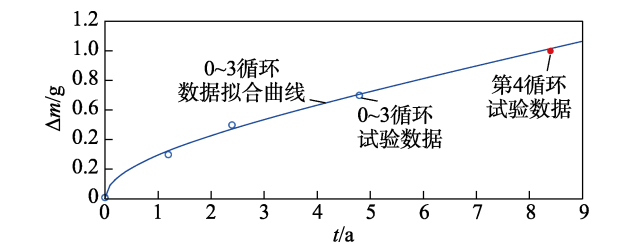


图 5 “干涸区域”总质量损失模型拟合结果 (0~3 循环)
Fig.5 Fitting results of the total mass loss model of the "dry zone" (0 to 3 cycles)

从式 (13) 中可知, “干涸区域”总质量损失模型仅包含 2 个未知参数, 且基于前 3 循环试验数据所得第 4 循环结果预测结果与实测结果接近, 说明本文所提模型有效且准确, 能够反映 TR 组件层间硅脂质量损失的变化规律。为此, 补充第 4 循环试验数据后对模型参数进行更新, 参数 B 估计结果更新为 $3.055 5 \times 10^{-6}$, 并得到质量损失模型, 如式 (16) 所示, 得到质量损失变化曲线如图 6 所示。

$$\Delta m(t) = -3.849 8 \times 10^{-4} t^2 + 1.07 \times 10^{-2} t^{3/2} - 1.07 \times 10^{-2} t + 0.296 7 t^{1/2}$$

(16)

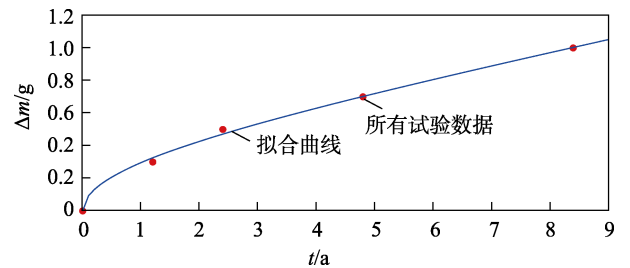


图 6 “干涸区域”总质量损失曲线 (所有试验数据)
Fig.6 Total mass loss curve for "dry zone" (all test data)

2.3 寿命预测

根据表 4 参数信息及参数 B 拟合估计结果, 利用公式 (15) 即可得到 TR 组件散热性能退化模型, 并对其散热性能评估与预测。模型各参数计算结果汇总至表 5, 得到 TR 组件散热性能退化模型, 如式 (17) 所示。

$$k_{eff} = 3.302 5 - 3.271 5 (0.188 4 \sqrt{t} - 6.8 \times 10^{-3} t)$$

(17)

表 5 TR 组件散热性能退化模型参数信息

Tab.5 Thermal degradation model parameter information of TR modules

序号	参数符号	参数名称	参数值
1	k_{eff1}	“正常区域”等效导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	3.302 5
2	k_{eff21}	硅脂流失区域导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.023
3	k_{eff22}	硅油挥发干涸区域导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.047 20
4	k_{eff2}	“干涸区域”等效导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.030 90
5	B	模型拟合参数	$3.055 5 \times 10^{-6}$

一般认为, 当 TR 组件层间导热系数下降至初始值的 50%时, 即认为散热性能不满足正常工作要求。根据式 (17), 以初始等效导热系数的 50%作为退化失效阈值对 TR 组件寿命进行预测, 得到到寿时间为 9.03 a, 退化轨迹如图 7 所示。

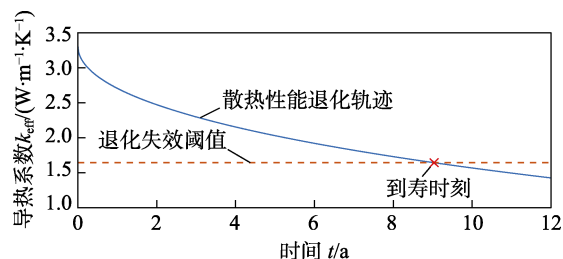


图7 TR组件散热性能退化轨迹

Fig.7 Thermal performance degradation track of TR modules

3 结论

本文针对机载TR组件散热性能退化现象开展了研究,分析确定了造成TR组件散热性能退化的主要机理,采用修正的LW方程与经典挥发模型完成了TR组件层间硅脂散热性能退化规律进行建模,并通过开展损伤加速试验对模型进行验证与校正,最终实现了TR组件基于散热性能退化的寿命预测,得出如下结论:

1) TR组件散热性能退化的主要机理为,层间导热硅脂在外力作用下挤出渗出及硅油挥发导致硅脂硅油损失,在TR组件散热结构层间存在“干涸区域”,影响组件热源热量沿散热通道的传递,进而直接表现为TR组件层间等效导热系数的下降。

2) 本文构建了硅脂硅油总质量损失模型,以及TR组件层间等效导热系数退化模型,通过设计开展的加速试验对模型进行校验。试验结果显示,基于第0~3循环的试验数据拟合得到的模型对第4循环的预测结果较好,相对误差仅为1.53%,证明了所提模型的有效性与准确性。

3) 利用所有的损伤加速试验结果对模型参数进行更新后,以50%初始导热系数为阈值对TR组件寿命进行预测评估,结果表明,在贮存使用9.03 a后,所研究讨论的TR组件会因散热性能不满足工作要求而失效。

4) 本文所提TR组件散热性能退化模型从层间硅脂硅油损失机理出发,能够直观描述TR组件散热性能退化过程。模型物理含义明确,能够有效指导产品的设计改进。此外,模型未知数少,仅需少量试验即可确定等效导热系数退化模型有关参数值,能够有效节约试验成本。本文所开展研究,对机载TR组件寿命预测与评价,散热性能设计改进有较大的指导意义与工程应用价值。

参考文献:

[1] 朱赛, 孟亚峰, 韩春辉, 等. T/R 组件性能退化试验系统设计与实现[J]. 陆军工程大学学报, 2023, 2(4): 47-54.

ZHU S, MENG Y F, HAN C H, et al. Design and Implementation of Performance Degradation Test System for T/R Module[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2023, 2(4): 47-54.

[2] 王美妮. 电子设备高温环境热控制技术实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.

WANG M N. Experimental Study on Thermal Control Technology of electronic equipment in High Temperature Environment[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.

[3] MIZUUCHI K, INOUE K, AGARI Y, et al. Thermal Conductivity of Cubic Boron Nitride (cBN) Particle Dispersed Al Matrix Composites Fabricated by SPS[J]. Materials Science Forum, 2016, 879: 2413-2418.

[4] LI H K, ZHENG W D. Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy/Alumina Composite through Multiscale-Disperse Packing[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(1): 17-25.

[5] WUNDERLE B, MAY D, HEILMANN J, et al. Accelerated Pump out Testing for Thermal Greases[C]//2019 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). Hannover: IEEE, 2019: 1-11.

[6] LI J, MYLLYKOSKI P, PAULASTO-KRÖCKEL M. Study on Thermomechanical Reliability of Power Modules and Thermal Grease Pump-out Mechanism[C]// 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Budapest: IEEE, 2015.

[7] JIANG Z Y, LI J Y, QU Z G, et al. Theoretical Analysis on Thermal Grease Dry-out Degradation in Space Environment[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179: 107694.

[8] LU C J, MEEKER W O. Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-Failure Distribution[J]. Technometrics, 1993, 35(2): 161-174.

[9] YE Z S, XIE M. Stochastic Modelling and Analysis of Degradation for Highly Reliable Products[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2015, 31(1): 16-32.

[10] SONG S L, COIT D W, FENG Q M. Reliability for Systems of Degrading Components with Distinct Component Shock Sets[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132: 115-124.

[11] BIAN L N, WANG G J, LIU P. Reliability Analysis for Multi-Component Systems with Interdependent Competing Failure Processes[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 94: 446-459.

[12] 蔡忠义, 项华春, 王攀, 等. 竞争失效下多元退化建模的导弹贮存寿命评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1183-1188.

CAI Z Y, XIANG H C, WANG P, et al. Missile Storage Lifetime Assessment of Multivariate Degradation Model-

- ing under Competition Failure[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(5): 1183-1188.
- [13] 张清源, 文美林, 康锐, 等. 基于确信可靠性的功能、性能与裕量分析方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(5): 1413-1419.
- ZHANG Q Y, WEN M L, KANG R, et al. Function, performance and Margin Analysis Method Based on Belief Reliability[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(5): 1413-1419.
- [14] NARUMANCHI S, MIHALIC M, KELLY K, et al. Thermal Interface Materials for Power Electronics Applications[C]// 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando: IEEE, 2008: 395-404.
- [15] 陈冉冉, 郭成, 陈砚朋, 等. 低迁移绝缘导热硅脂界面材料的制备及其性能研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(20): 20176-20182.
- CHEN R R, GUO C, CHEN Y P, et al. Preparation and Characterization of Insulating Thermal Conductive Grease with Low Migration[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(20): 20176-20182.
- [16] HAMILTON R L, CROSSER O K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1962, 1(3): 187-191.
- [17] 刘建峰, 邓智, 谢晓霞, 等. 导热硅脂高温稳定性评价研究[J]. *有机硅材料*, 2024, 38(1): 37-40.
- LIU J F, DENG Z, XIE X X, et al. Study on High Temperature Stability Evaluation of Thermal Conductive Silicone Grease[J]. *Silicone Material*, 2024, 38(1): 37-40.
- [18] TONG Z, LIU M, BAO H. A Numerical Investigation on the Heat Conduction in High Filler Loading Particulate Composites[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 355-361.
- [19] LEVY F L. A Modified Maxwell-Eucken Equation for Calculating the Thermal Conductivity of Two-Component Solutions or Mixtures[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1981, 4(4): 223-225.
- [20] ORDÓÑEZ-MIRANDA J, ALVARADO-GIL J J, MEDINA-EZQUIVEL R. Generalized Bruggeman Formula for the Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with an Interface Layer[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2010, 31(4): 975-986.
- [21] AGARI Y, UEDA A, NAGAI S. Thermal Conductivity of a Polymer Composite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1993, 49(9): 1625-1634.
- [22] AGARI Y, TANAKA M, NAGAI S, et al. Thermal Conductivity of a Polymer Composite Filled with Mixtures of Particles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, 34(4): 1429-1437.
- [23] XU J Z, GAO B Z, KANG F Y. A Reconstruction of Maxwell Model for Effective Thermal Conductivity of Composite Materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 972-979.
- [24] SCHWIEBERT M K, LEONG W H. Underfill Flow as Viscous Flow between Parallel Plates Driven by Capillary Action[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C*, 1996, 19(2): 133-137.
- [25] PERSAD A H, WARD C A. Expressions for the Evaporation and Condensation Coefficients in the Hertz-Knudsen Relation[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(14): 7727-7767.