光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20251218001

宇航用10 kV高压光耦的可靠性验证与寿命评估

李瑞轩[1,2*],张泽迁[1,2],翁　正[1,2],朱永鑫[1,2],杜　磊[1,2],
范晓军[1,2],李　哲[1,2],刘红民[1,2]

(1. 中国科学院 国家空间科学中心,北京 100190; 2. 国家卫星有效载荷产品质量检验检测中心(筹),北京 101499)

摘　要: 为验证一款宇航应用的工业级高压光耦的固有可靠性和长期服役性能,系统开展了风险识别、环境试验与寿命评估研究。首先,通过结构分析与宇航禁限用工艺审查,识别出潜在风险。然后,通过环境试验与物理分析,揭示了以下关键失效机制:由热效应与工艺一致性差引发的参数漂移;由材料热力学响应差异导致在循环温度应力作用下的焊接界面开裂;以及由内部硅胶气隙缺陷诱发的异常放电。最后,基于线性外插法与温度-电场双应力加速模型,推算其在额定工况(4 000 V/55℃)下的伪寿命。试验结果表明:器件在加速条件下未发生功能失效,光电流衰减小于5%;通过模型外推,得到其在实际使用条件下的伪寿命约为10.6年;结合载荷间歇工作模式,可满足8～10年宇航任务寿命需求。该研究构建了一套适用于高压光耦的可靠性验证与寿命评估方法,识别了关键风险与失效机理,并通过加速模型给出了寿命预测,为同类器件的宇航应用与国产化替代提供了技术依据与工程参考。

关键词: 高压光耦;加速寿命试验;线性外推;温度-场加速模型;伪寿命;国产化替代

中图分类号: TN36　**文章编号:** 1001－5868(2026)02－0388－08

Reliability Verification and Lifetime Assessment of 10 kV High-Voltage Optocouplers for Aerospace Applications

LI Ruixuan[1,2], ZHANG Zeqian [1,2], WENG Zheng[1,2], ZHU Yongxin[1,2], DU Lei[1,2],
FAN Xiaojun[1,2], LI Zhe[1,2], LIU Hongmin[1,2]

(1. Liability and Environment Test Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, CHN; 2. National Quality Inspection and Testing Center for Satellite Payloads, Beijing 101499, CHN)

Abstract: In this study, systematic risk identification, environmental testing, and lifetime assessment were performed to verify the intrinsic reliability and long-term service performance of an industrial-grade high-voltage optocoupler for aerospace applications. First, potential risks were identified through construction analysis and a review of aerospace forbidden and restricted processes. Subsequently, environmental tests combined with physical analyses revealed key failure mechanisms, including parametric drift caused by thermal effects and poor process consistency, solder-interface cracking after temperature cycling tests (due to differences in material thermomechanical responses), and abnormal discharge induced by internal silicone-gel void defects. Finally, based on a linear extrapolation method and a dual-stress acceleration model combining Arrhenius and inverse power law relationships, the pseudo-lifetime under rated operating conditions (4 000 V/55℃) was estimated. The test results showed that the device did not experience functional failure under accelerated

收稿日期:2025－12－18.

基金项目:中国科学院可靠性保障中心种子课题基金项目(CRAC-ZZKT-KY-2023-04).

* 通信作者:李瑞轩

conditions, with photocurrent degradation of less than 5%. The pseudo-lifetime estimated under actual operating conditions via model extrapolation was approximately 10.6 years. Considering the intermittent operation mode of the payload, this pseudo-lifetime satisfies the 8～10 year design life requirement for aerospace missions. This study establishes a reliability verification and lifetime assessment framework suitable for high-voltage optocouplers, reveals key risks and failure mechanisms, and provides lifetime predictions through accelerated models, offering technical support and an engineering reference for aerospace applications and the domestic substitution of similar devices.

Key words: high-voltage optocoupler; accelerated life testing; linear extrapolation; temperature-lectric field acceleration model; pseudo-lifetime; domestic substitution

0　引言

高压光耦是静电分析式低能离子谱仪中的核心器件，用于设计高压静电场。探测粒子通过静电场时产生偏转，利用静电场对带电粒子的能量-电荷筛选特性实现离子种类探测。其可靠性和寿命直接影响科学载荷的寿命和科学目标的实现[1-6]。

光耦是以光为媒介传输电信号的器件。通过把发光芯片、光探测芯片及信号处理电路等封装在同一管壳内，实现“电-光-电”的转换，从而达到电气隔离的目的[7]。通过微组装焊接工艺将多个光探测芯片进行堆叠，可以提高光耦的工作电压（不少于8 kV），在内部使用高性能绝缘介质填充或导光管结构可以提高其隔离电压（不少于10 kV）。基于此方法制作的高压光耦，具有前后级间隔离电压高、信号可单向传输、抗干扰能力强的特点。目前，已报道的高压光耦的工作电压和隔离电压可达10～15 kV，广泛应用于需要进行高压控制和隔离的产品，如光电子显微镜、空间仪器、静电分析仪及高压电源等[8-10]。

目前，满足宇航应用的高压光耦仅有美国Amptek公司的产品，尚无国产化替代方案。HVM Technology公司开发的工业级OPTO-150，内部集成了低压LED驱动、高压光电二极管和内部限流电阻器，工作电压高达15 kV。Southwest Research Institute®（SwRI®）开发的宇航用高压光耦100 SW1502/1602，将定制的玻璃钝化多结高压二极管与玻璃透镜LED阵列配对，工作电压高达10 kV，隔离电压高达15 kV，使用抗质子位移损伤的异质结LED结构，以满足对空间环境应用高压光耦合器的需求。Amptek公司生产的宇航用高压光耦合器HV801RH，由多个结的高压二极管组成，通过光学介质耦合到三个串联的红外LED，可以提供对高达8 kV电压的线性控制，隔离电压高达12 kV，电离总剂量效应达到100 krad（Si），采用小型化、高介电强度、适合太空使用的环氧封装，以满足宇航应用[11-12]。

面对空间应用，除常规性能退化和失效模式之外，需重点关注电离总剂量和位移损伤效应[13]。很多科学卫星的设计寿命是8～10年，为保证器件寿命满足设计要求，还需重点关注高压光耦的工作寿命指标。由于无法获得国外产品的寿命指标，这对产品寿命的评估和计算带来一定困扰。

本文以一款宇航应用的10 kV工业级高压光耦为研究对象，从工作原理和内部结构出发，对其固有可靠性、失效模式和寿命开展试验和研究。旨在解决宇航级高压光耦国产化替代中的可靠性评估难题，为同类器件的宇航适配提供技术参考。

1　工作原理和典型结构

高压光耦的三个关键参数为反向击穿电压V_{BR}、隔离电压V_{ISO}、电流传输比R_{CT}。工作原理上用到电介质击穿和电流传输比计算两个核心公式。

电介质击穿计算公式为：

$$V_{ISO}=\varepsilon\delta d \tag{1}$$

式中，V_{ISO}为击穿电压；ε为介电强度；δ为电极常数，由电极的表面粗糙度、电极形状等决定；d为两极间的距离。

电流传输比计算公式：

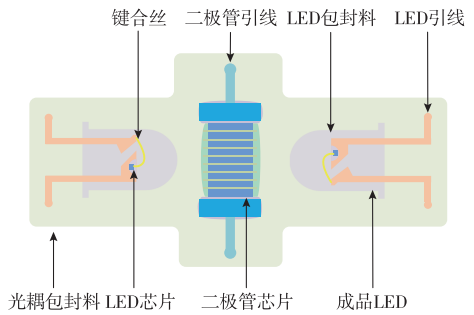
$$R_{CT}=\frac{I_C}{I_F}=\frac{\alpha I_F\omega(d)A\beta}{I_F}=\alpha\omega(d)A\beta \tag{2}$$

式中，I_C为探测器的输出电流，I_F为光源的输入电流，α为光源的发光效率，$\omega(d)$为与d有关的函数，A为探测器的响应度，β为探测器的放大倍数。

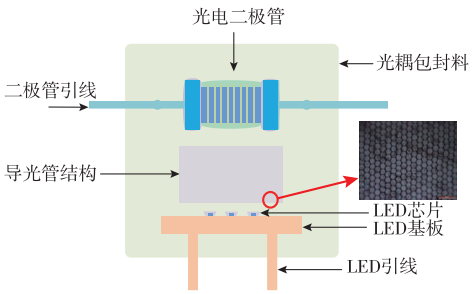
由式(1)和(2)可知，要提高隔离电压必须通过选择绝缘性能好的材料和增大两极间的距离来实现，但增大两极间的距离会导致R_{CT}急剧下降。考

虑空气的介质强度约为3 kV/mm，为满足高压光耦高压需求，并提高耦合效率以提高R_{CT}，需要高透明高耐压介质材料进行填充。常用技术方案有透明有机硅胶（或环氧树脂）填充和导光管结构[8-10]。

有机硅胶填充是在器件腔体内灌注高介电强度的绝缘导光胶，在保证充分绝缘的同时控制光源与探测器的间距，使探测器接收到足够的光功率，以满足信号传输特性的要求。为提高隔离电压指标，则要增加光源与探测器的间距，从而降低探测器接收到的光功率，进而引起信号传输特性的降低，而导光管可以很好地解决这一问题。通过在光源和探测器间引入导光管，导光管一般为Al_2O_3陶瓷材质，其轴线与芯片连线重合，利用其聚光特性弥补光源与探测器的间距增大导致的探测器对光源发散角的降低，使探测器接收到足够的光功率，以提高前后级间的电流传输比。两种典型结构分别如图1所示。



（a）有机硅胶填充结构



（b）导光管结构

图1 有机硅胶填充和导光管结构

2 试验与分析

2.1 样品介绍与风险分析

本文研究对象是一款10 kV高电压光耦合器。该器件为塑封工业级器件，内部集成2个低压砷化镓LED与高压光电探测二极管堆栈（13个硅光电二极管串联组成），采用对射式光传输结构，内部填充有机硅胶在单一封装内实现了12 kV绝缘耐受能力（LED端至探测器端），全黑塑封外壳阻断外部杂散光干扰，电流传输比（CTR）典型值为0.48%@I_{LED}=50 mA，同时具备微秒级快速响应特性。工作温度覆盖－40℃～85℃，满足工业级及车载环境要求。内部结构如图1（a）所示，关键参数如表1所示，内部材料信息如表2所示。

表1 高压光耦关键参数

序号	参数	测试条件	数值
1	绝缘电压V_{ISO}/V	LED驱动器至光探测器	12 000
2	峰值反向电压/V		10 000
3	反向电流I_R/μA	V_{DR}=V_{RRM}，I_{LED}=0 mA	25
4	电流传输比R_{CT}/%	I_{LED}=50 mA，持续1 s	0.48
5	(t_{on}/t_{off})/μs		2
6	工作温度范围T_{OP}/℃		－40～85

表2 高压光耦内部材料

部位	材料
LED管脚	钢（Fe，C，Ni）
LED管脚镀层（内）	铜、镍、银（Cu，Ni，Ag）
高压二极管管脚	铜（Cu）
LED/高压二极管堆栈外管脚镀层	纯锡（Sn），限用
LED芯片	砷化镓（GaAs）
LED芯片金属化	金（Au）
LED芯片键合丝	金（Au）
LED芯片粘接料	银浆（Ag，Si，O）
高压二极管堆栈	硅（Si）
高压二极管堆栈金属化层	铝（Al）
高压二极管堆栈焊料	锡铅焊料（Sn，Pb）
高压二极管堆栈涂覆材料	有机材料（C，O）

通过结构分析和宇航禁限用工艺审查，主要识别出以下风险。

风险1：塑封料和有机材料的吸潮问题。吸潮后产品在高温焊接条件下，水汽挥发引起蒸汽压力，容易在不同材料的结合界面上出现分层，产生“爆米花效应”，导致器件失效。此外，表面和内部吸潮还会导致高压介质击穿，故应注意存储和使用中的防潮问题。

风险2：器件外引脚镀层为纯锡，属于宇航禁用材料，存在锡须生长风险，造成意外短路，建议应用前进行搪锡铅处理。

风险3：有机材料和工艺限制了器件的工作温度范围，应用时应注意其适用的环境条件，避免超温度范围使用。

风险4：长寿命工作条件下参数退化。LED光效下降导致的R_{CT}下降，光电探测二极管堆栈暗电

流增加导致探测效率的下降，光学耦合介质 VOC 释放引起黄化、裂纹导致的光传输效率下降和绝缘性能下降。

风险 5：热真空释气危害。进行热真空释气测试，质损指标不超过 1.0%，实测指标为 1.538 9%，超标不多。收集可凝挥发物指标要求需低于 0.1%，实测可凝挥发物 0.008 3%，符合要求。器件在装机之前应采取工艺措施尽量进行释气处理。安装位置应远离感光、探测类、成像类、气体探测类产品，防止挥发物对该类产品产生影响。

风险 6：二极管堆栈与引线焊接端面开裂风险。器件内部硅堆二极管芯片和引线柱通过 PbSn 焊料焊接，引线柱材料为 Cu，焊接界面生成了 Cu-Sn 金属间化合物，且存在连续空洞，如图 2 所示，在后续使用应力下存在焊接开裂的风险。

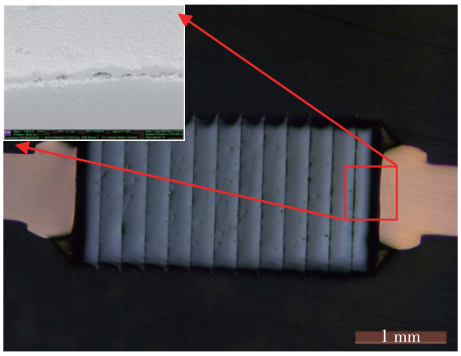


图 2　焊接界面及空洞

风险 7：面对空间应用，需考虑电离总剂量和位移损伤效应。由于高压光耦是由 LED，PD 及耦合媒质组成，其辐射响应由多个部分的辐射响应构成。因器件发热，位移损伤引入的晶格缺陷可能存在退火现象。

总剂量试验在中国科学院上海应用物理研究所的 60Co γ 辐射源上进行。辐照剂量率为 50 rad(Si)/s，辐射剂量点包括：0 krad(Si)、40 krad(Si)、60 krad(Si)。辐照过程中，对加偏置的三只试验样品施加最恶劣偏置条件。辐照后，进行 168 h、80℃的加速退火试验。退火结束后测得电参数无明显变化，辐照后的受试器件在 3 500 V 电压下，带 100 M 负载的最大驱动电流仍低于 50 mA。试验结果表明，抗电离总剂量能力能够达到 60 krad(Si)。

位移损伤试验在中国科学院新疆理化所的质子位移损伤效应模拟试验装置(PREF)上进行。选用能量为 60 MeV 的质子，辐照注量率为 7.564×10^{7} p/cm^2/s，累积总注量为 1×10^{11} p/cm^2，试验样品数量均为三只。60 MeV 质子的非电离能损 NIEL 为 3.6×10^{-3} MeV·cm^2/g，累积的位移损伤剂量为 3.6×10^{8} MeV·g(Si)$^{-1}$。辐照过程中，器件处于不加电的偏置状态，为保证试验条件一致性，试验时采用面积为 6×4 cm^{2}的质子束流同时对三只器件进行辐照。试验后进行功能测试，判据为：直流电源输出电流在 0～55 mA 范围内，且高压光耦在 200 MΩ 负载下输出电压不低于 3 800 V。试验结果表明，在能量为 60 MeV 的质子辐照至 1×10^{11} p/cm^{2}注量(对应的位移损伤剂量为 3.6×10^{8} MeV·g(Si)$^{-1}$后，器件输出电压符合器件的合格判据。

2.2　试验方法与问题分析

2.2.1　参数漂移

对样品进行编号(1#～100#)，并进行性能和功能测试。使用高压电源、源表和示波器搭建测试电路，设计专用测试板进行参数和功能测试，测试项目为表 1 中第 3～7 项，测试条件为 V_{DR}=6 000 V，I_{LED}=50 mA。为测量 R_{CT}，需测量器件工作时的反向电流，常温测试中发现部分样品在 LED 开启后，反向电流出现先增大后减小或持续减小后趋于恒定的现象，稳定时间约 5～10 min，如图 3 所示。期间 37#样品在 LED 开启后反向电流为 175 μA，随着时间推移，反向电流先上升后下降，最后趋于平稳；51#样品在 LED 开启后反向电流为 172 μA，随着时间推移，反向电流不断下降，约 10 min 后趋于平稳。随后发现样品均存在不同程度的参数漂移现象。

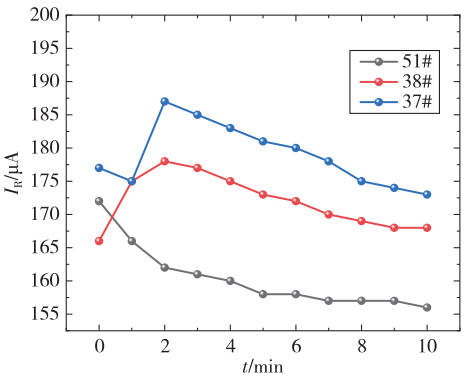


图 3　反向电流随时间的变化

经分析参数漂移原因如下：

(1)反向电流的变化热效应为主要原因。反向电流上升和下降过程均与器件温度特性有关。上升阶段，器件开始工作后，LED 功耗约 0.125 W，高压光电管堆栈功耗约 1 W，由于热效应，内部温度缓慢上升，高光电二极管内部热激发载流子增加，运

动增强，反向电流增加；下降阶段，随着温度升高，内部温度场变均匀，高压光电管产生的热量影响到LED，导致LED光效缓慢下降，造成反向电流降低，最后器件温度达到平衡，反向电流趋于稳定。

（2）多数样品有与38#器件相似的反向电流变化趋势，但初始值和变化速率存在个体差异，各器件参数一致性较差。这可能与器件加工工艺、装配精度所导致的光和热传输特性有关。

综上所述，R_{CT}是偏置电压、电流和温度的函数且存在制造差异性。

2.2.2 温度循环导致失效

考核温度循环对器件功能的影响，将22只样品按照GJB548C方法1010进行温度循环。试验条件为：温度范围为－55℃～＋100℃，循环次数共100次，50次后中止进行外观检查和性能测试，极限温度保持时间为15 min，转换时间不超过1 min。50次温度循环后测试发现9只样品LED正向电压V_{FLED}参数测试异常，LED引脚间呈开路状态。测试数据如图4所示，测试时使用交流测压方法，I_{LED}＝50 mA。

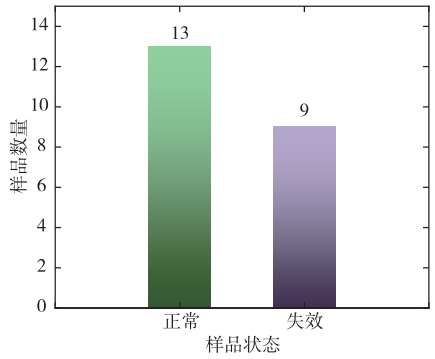


图4 温度循环后LED状态

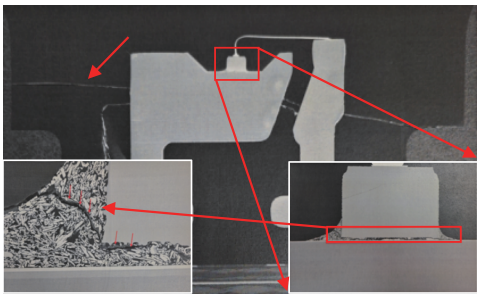


图5 芯片粘接位置分层断裂形貌

失效现象为LED开路失效，通过物理切割分离出失效的LED，并对失效样品制样研磨和SEM检查发现，外观透明硬质树脂存在裂纹，LED键合点连接正常，LED芯片背面（负极）与基板间银浆粘接处存在分层脱离情况，有贯穿性裂纹，如图5所示。

结合材料热力学响应进行失效特征分析和原因分析。样品内部集成了封装成品LED，内部材料体系、热膨胀系数（α）和热导率参数（λ）如表3所示。LED各层材料因热导率差异导致温度传递不同步，变温阶段产生瞬时巨大温度梯度（ΔT）。

材料体系间的热力学响应差异是导致失效的根本原因。快温变速率导致LED内部温度场严重不同步，并在结合面和内部产生瞬时高应力，引发脆性断裂和界面剥离。解决方案是更改产品设计，减少热力响应差异，或按照使用环境剖面计算温变速率以满足使用要求。

表3 高压光耦内部材料热力学参数[14-15]

材料层	成分	α/（×10^{-6}/℃）	热导率λ/（W/m•K）	热冲击敏感性
LED芯片	砷化镓（GaAs）	5.8～6.0	55	低（相应快）
粘接层	银浆（Ag，Epoxy）	25～50	25	高（响应慢）
基板	可伐合金	5.1～5.5	17	高（响应慢）
封装胶体	环氧树脂	15～35	0.2	极高

2.2.3 高温老炼

高温老炼关键是确定筛选应力强度，其原则是能有效激发隐藏于产品中的潜在缺陷，并使其暴露出来，且又不破坏性能好的产品。失效概率与其使用的应力（如电应力、温度应力及机械环境应力等）密切相关，使用应力越高，其失效率也越高[7]。

高压光耦在使用过程中面临温度应力和高压电应力，因此在高温老炼筛选试验中施加温度应力和高压电应力。由于手册缺少热阻信息，使用“电压法”进行结温估算，以防止超过结温限制。测量在25℃～85℃温度范围内、LED与光电二极管堆栈通过100 μA电流时的结电压，并采用最小二乘法进行线性拟合，结果如图6所示。得到光电二极管堆栈温度系数约为－33.10 mV/℃，LED的温度系数为－2.254 mV/℃，表明当温度每升高1℃，正向结电压分别下降约33.10 mV和2.254 mV。在室温条件下，对光电二极管堆栈反向施加6 000 V电压，同时对LED正向施加50 mA电流，稳定工作30 min

后，测得光电二极管堆栈的 ΔV 约为 2 336 mV，LED 的 ΔV 约为 14.2 mV，对应的结温温升分别约为 5.5℃和 6.3℃。考虑测量误差，温升均小于 10℃，因此判断在 85℃环境条件下不会超过结温限制。

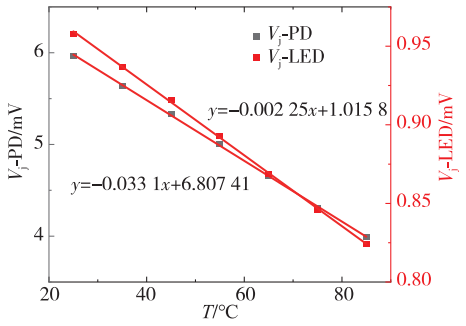


图 6　“电压法”温度系数计算

为防止空气中的尖端放电和电晕放电，设计并制作老炼板，采取高介电材料，提高电气间隙和爬电距离，高压焊点包圆处理等措施。确定高温老炼试验条件为：$V_{DR}=V_{stress}$=6 000 V，T_s=85℃，时间为 336 h，并监测过程中的光电流，设备及老化板如图 7 所示。

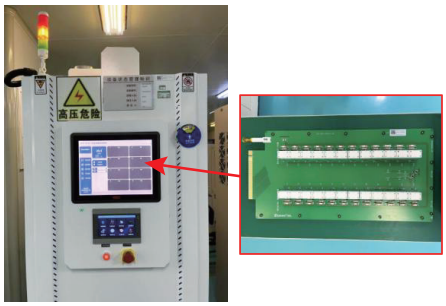


图 7　老炼设备和老化板

高压光耦内部填充高介电性能绝缘胶，但受工艺影响，易因空气残留形成气隙缺陷，进而引发局部放电和介质烧蚀[8-9]。硅胶中的气隙导致树枝状放电和器件内部的异常放电，是典型的早期失效模式之一，如图 8 所示。

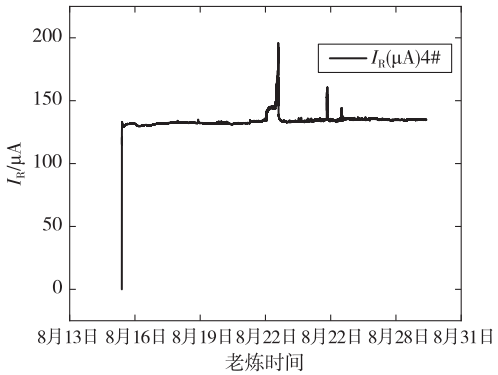


图 8　异常放电现象

2.2.4　寿命评估

应力水平也是伪寿命计算的关键，使用高温加速寿命试验进行寿命评估。器件实际使用条件为 $V_{DR}=V_{stress}$=4 000 V，T_s=55℃，寿命试验设定条件为 $V_{DR}=V_{stress}$=6 000V，T_s=85℃，时间为 1 000 h。器件试验前后 R_{CT} 变化率大于 10%，或光电流下降至初始值的 10% 视为器件失效，过程中监测样品光电流。寿命试验前后 R_{CT} 变化率和过程中光电流监测如图 9 和 10 所示，由数据可知试验前后 R_{CT} 变化率小于 5%，寿命试验 1 000 h 后未发生失效，光电流下降小于的 5%，需通过拟合曲线外推失效点。

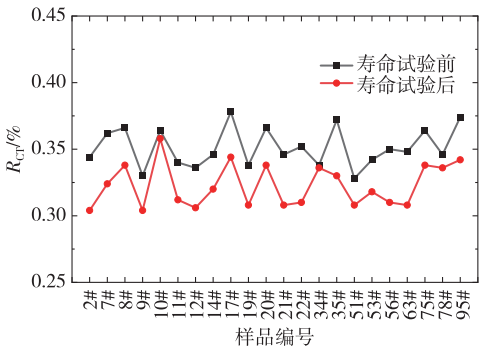


图 9　试验前后 R_{CT} 的变化

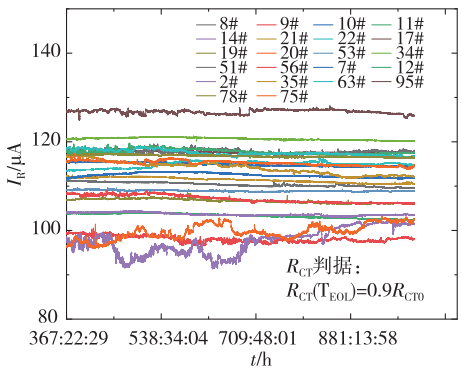


图 10　试验过程中光电流监测

由于时间成本原因无法通过 3×3 温压组合试验温度和电压的加速因子，进而使用加速模型进行计算。在航天领域样本量极小的背景下，采用单应力水平加速寿命试验是一种经济且切合实际的选择[16]。目前，尚未形成专门针对高压光耦的成熟独立寿命评估标准，但高压光耦作为光电耦合器的一个细分品类（侧重高压隔离特性），其寿命评估可参考通用电子元器件可靠性测试标准及光电耦合器行业通用规范，并结合自身“高压”特性进行针对性调整。本文参考 ISO/FDIS 17526 使用线性外推法对高温加速寿命进行预估，并假设高温、高压不引入新的失效机制，使用温度-电场加速模型进行伪

寿命计算。

对样品中光电流下降最快的样品进行线性拟合和外推。初始阶段高压光耦的光电流往往出现小幅的增加或减少，这一阶段不做外推考虑，之后当光电流稳定到一个接近恒定的值时，进行寿命外推。按照光电流下降为初始值的10%进行外推，得到寿命时间约为38 000h。为避免过度外推导致的评估风险，参考ISO/FDIS 17526中外推的方法，将本次试验外推到测试时间的7倍，见表4，这被认为是遵循光输出功率的线性退化[17-19]。通过线性外推可得理想高温寿命时间不小于7 000 h。

表4 允许扩展外推以获得寿命数据的要求[19]

测试数量	退化率的标准偏差	允许的外推范围
5～10	5%～10%	3
5～10	<5%	5
>10	5%～10%	5
>10	<5%	7

对于温度场、电场共同作用下的加速老化模型，通常的做法是不考虑其间的耦合作用，整体的加速因子由温度加速因子A_T、电场加速因子AFV直接相乘得到[16,20-21]。

温度应力加速通常使用阿伦尼乌斯方程(Arrhenius Equation)，用于描述与温度相关的半导体器件的化学/物理失效(如电迁移、界面反应)。温度加速因子A_T的计算公式：

$$A_T = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right] \quad (3)$$

式中，E_a为激活能(eV)，由失效机制决定；k为玻尔兹曼常数(8.617×10^{-5} eV/K)；T_{use}为使用条件下的结温(K)；T_{stress}为温度应力(K)。

电压应力加速通常使用电场加速模型和逆幂律模型。电场加速模型适用于低压电子器件中薄栅氧化层的击穿机制，用于描述高电压增强电场效应，加速介电层击穿；逆幂律模型适用于高压功率器件中电介质材料(如绝缘体、电容器、电子元件)的失效[22-23]。电压加速主要通过两种途径：加速电化学反应，高电压加速材料内部离子迁移或化学反应(如绝缘层老化)；增加电应力相对强度，当施加电压超过材料的介电强度时，直接引发击穿失效(如闪络、短路)。有研究表明光耦器件电压应力对R_{CT}衰减的加速效应强于温度应力[24]。

逆幂律模型电压加速因子A_V的计算公式：

$$A_V = \left(\frac{V_{stress}}{V_{use}}\right)^n \quad (4)$$

式中，n为加速常数，V_{stress}为电压应力，V_{use}为使用电压。

总加速因子A是温度与电压加速因子的乘积：

$$A = A_T \times A_V \quad (5)$$

E_a参考JEDEC JEP122中LED退化机制取0.6，n参考介质击穿机制，取2进行保守估算[25]。可得伪寿命为93 240 h，约10.6年，考虑到载荷间歇开机使用情况，可以满足长寿命使用要求。

3 结论

本研究针对一款宇航应用的10 kV工业级高压光耦，系统开展了风险识别、环境试验与寿命评估研究。通过结构分析与试验验证，识别出材料吸潮、锡须风险、焊接界面开裂及内部气隙放电等关键失效机制。基于线性外推法与温度-电场双应力加速模型，推算出器件在额定工况下的伪寿命约为10.6年，结合间歇工作模式可满足8～10年宇航任务寿命需求。研究构建了一套适用于高压光耦的可靠性验证与寿命评估方法，为其宇航应用与国产化替代提供了技术依据与工程参考。

参考文献：

[1] 李世勋，宗 朝，周 颖，等. 基于光电耦合的多通路高速扫描高压电源设计[J]. 空间电子技术，2021，18(1)：28-35.
Li Shixun, Zong Chao, Zhou Ying, et al. Design of multi-channel high speed scanning high voltage power supply based on photoelectric coupling[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(1): 28-35.

[2] Kong L, Zhang A, Tian Z, et al. Integrated Ion and Neutral Particle Analyzer for Chinese Mars Mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019.

[3] 章伟杭，郝新军，李毅人，等. 半空间低能离子谱仪高压电源设计[J]. 核电子学与探测技术，2018，38(4)：459-463.
Zhang Weihang, Hao Xinjun, Li Yiren, et al. Design of high-voltage power supply board for a half-sky low-energy ion spectrometer[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, 38(4): 459-463.

[4] McFadden J P, Kortmann O, Curtis D, et al. MAVEN SupraThermal and thermal ion compostion (STATIC) instrument[J]. Space Science Reviews, 2015, 195(1): 199-256.

[5] Pollock C, Moore1 T, Jacques1 A, et al. Fast plasma in vestigation for magnetospheric multiscale[J]. Space Science

Reviews, 2016, 199: 331.

[6] McComas D J, Alexander N, Allegrini F, et al. The Jovian auroral distributions experiment (JADE) on the Juno mission to Jupiter[J]. Space Science Reviews, 2017, 213(1): 547-643.

[7] 付桂翠. 电子元器件可靠性技术教程[M]. 北京航空航天大学出版社, 2010.

[8] 曹湘腾, 李应辉, 吴　健, 等. 高压隔离光电耦合器的研制[J]. 半导体光电, 2005, 26(5): 394-396.
Cao Xiangteng, Li Yinghui, Wu Jian, et al. High-voltage isolation optocoupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(5): 394-396.

[9] 李　冰, 赵瑞莲, 詹萍萍, 等. 导光管式高隔离电压光电耦合器击穿机理研究[J]. 半导体光电, 2018, 39(2): 174-177.
Li Bing, Zhao Ruilian, Zhan Pingping, et al. Research on breakdown mechanics of light-pipe-type high-isolation-voltage optocoupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(2): 174-177.

[10] 李　冰, 龚　磊, 欧　熠, 等. 22 kV 高压隔离光电耦合器的研制[J]. 半导体光电, 2013(3): 388-391, 395.
Li Bing, Gong Lei, Ou Yi, et al. Design of 22 kV high-voltage isolation optocoupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013(3): 388-391, 395.

[11] Amptek. HV801 high voltage optocoupler specifications: Rev. D7 [EB/OL]. 2018-12 [2026-3-25]. https://www.amptek.cn/-/media/ametekamptek/documents/resources/products/specs/hv801-specs-dec-2018-rev-d7.pdf dmc=1&la=en&revision=bebe3f16-b50b-43a9-b9db-fb4f6f1e884d&hash=9D95ABCE9F000A29ABEE02A64608B206.

[12] Southwest Research Institute. High voltage optocoupler[EB/OL]. [2026-3-25]. https://www.swri.org/sites/default/files/brochures/high-voltage-optocoupler.pdf.

[13] Barbero J, Cordero E, Peñate L, et al. Low temperature radiation test of high voltage optocouplers for space applications[J]. Proc. of SPIE, 2017, 10563: 1056359.

[14] Henkel Loctite. Hysol® epoxy potting compounds: Design guide[EB/OL]. (2018) [2026-3-25]. https://www.henkel-adhesives.com.

[15] Dow Chemical Company. Silicone and epoxy encapsulants for electronics: Technical data sheet[EB/OL]. (2020) [2026-3-25]. https://www.dow.com.

[16] 黄首清, 郭振伟, 刘庆海, 等. 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用(一)[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(5): 541-549.
Huang Shouqing, Guo Zhenwei, Liu Qinghai, et al. Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (I) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(5): 541-549.

[17] Kissel H, Seibold G, Biesenbach J, et al. A comprehensive reliability study of high-power 808 nm laser diodes mounted with AuSn and indium [J]. High-Power Diode Laser Technology and Applications VI, 2008, 6876: 687618.

[18] International Standardization Organization. Optics and optical instruments-lasers and laser-related equipment-lifetime of lasers: ISO/FDIS 17526: 2003(E)[S]. Geneva: ISO, 2003.

[19] 周泉材, 李　阳, 袁崇献, 等. 高功率衬底转移 VCSEL 阵列失效分析与早期筛选[J]. 中国激光, 2024, 51(13): 42-51.
Zhou Quancai, Li Yang, Yuan Chongxian, et al. Failure analysis and early screening of high power substrate-transferred VCSEL arrays [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(13): 42-51.

[20] Escobar L A, Meeker W Q. A review of accelerated test models[J]. Statistical Science, 2006, 21(4): 552-577.

[21] JESD74. Semiconductor Device Mechanical Outline Dimensions [S]. JEDEC Solid-State Technology Association, 2000.

[22] 王延浩, 邓二平, 严雨行, 等. 功率器件高温可靠性测试加速老化模型及其测试条件综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 68-77, 86.
Wang Yanhao, Deng Erping, Yan YuHang, et al. Review on accelerated aging models and test conditions for power Devices' High temperature reliability test[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(5): 68-77, 86.

[23] JEDEC Solid State Technology Association. Semiconductor components early life failure rate calculation procedure: JESD74A[S]. 2007; Reaffirmed 2019.

[24] Kang M, Lee S, Park H, et al. Lifetime estimation for optocouplers using accelerated degradation test [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2022, 38 (1): 560-573.

[25] JEDEC Solid State Technology Association. Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices: JEP122H[S]. 2016.

作者简介：

李瑞轩(1987—)，男，河北省邯郸市人，工程师，主要从事宇航元器件可靠性方面的研究。