

耐辐照照明灯具的机电系统辐射损伤抑制与寿命预测模型研究

陈进操 王海峰 吴灵华

中科核泰技术(杭州)有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】耐辐照照明灯具是核设施、空间探测等高辐射场景的关键设备,其机电系统稳定性直接关系作业安全。本文聚焦辐射损伤机理、耦合效应、抑制策略与寿命预测,通过理论分析构建系统性解决方案。研究表明:辐射损伤源于高能粒子对材料原子结构、载流子行为及机械应力的综合作用;提出“材料-结构-控制”三位一体损伤抑制体系;建立融合多源参数、耦合效应与抑制措施修正的寿命预测模型。经案例验证,模型预测偏差 $<1\%$,可精准表征系统性能衰减规律,为高可靠性照明设备设计与全生命周期管理提供理论支撑。

【关键词】耐辐照照明灯具;机电系统;辐射损伤抑制;寿命预测模型;耦合效应

Research on Radiation Damage Suppression and Life Prediction Models for Electromechanical Systems in Irradiation-Resistant Lighting Fixtures

Chen Jincuo Wang Haifeng Wu Linghua

Zhongke Hetai Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000.

【Abstract】 Irradiation-resistant lighting fixtures serve as critical equipment in high-radiation environments such as nuclear facilities and space exploration, where the stability of their electromechanical systems directly impacts operational safety. This study focuses on radiation damage mechanisms, coupling effects, suppression strategies, and life prediction, developing systematic solutions through theoretical analysis. Findings indicate that radiation damage results from the combined effects of high-energy particles on material atomic structure, carrier behavior, and mechanical stress. A tripartite damage suppression system integrating "materials-structure-control" is proposed, alongside a life prediction model incorporating multi-source parameters, coupling effects, and suppression measure corrections. Case validation demonstrates that the model exhibits a prediction deviation $<1\%$, accurately characterizing system performance degradation patterns and providing theoretical support for high-reliability lighting equipment design and lifecycle management.

【Key words】 radiation-resistant lighting fixtures; electromechanical systems; radiation damage suppression; life prediction models; coupling effects

引言

核反应堆、空间站等场景中,照明系统需在强辐射环境下长期稳定运行。传统灯具设计难以应对辐射导致的不可逆损伤,现有研究多聚焦单一材料或元件,缺乏机电系统级的损伤机理阐释、系统性抑制方案及高精度寿命预测方法。本文以耐辐照照明灯具机电系统为对象,系统解析辐射损伤机理与耦合演化规律,构建覆盖全系统的损伤抑制体系,提出融合多因素的寿命预测模型,为特殊环境照明装备研发提供理论依据与工程指导。

1 耐辐照照明灯具机电系统组成及辐射环境特征

1.1 机电系统核心组成

系统为功能强耦合集成体,由四大模块构成:

光源模块: 核心发光单元,常用 InGaN LED 或石英氙灯;辐射下芯片晶格缺陷、封装黄变、电极氧化导致亮度衰减、光谱红移,是光效退化主因。

驱动控制模块: 系统“大脑”,含恒流 IC、MCU 与保护电路;对 γ 射线和中子高度敏感,易引发调光失灵、LED 熄灭等故障。

机械支撑模块: 含灯壳、支架、密封结构,承担防护与环境隔离;辐射致 316L 不锈钢脆化、硅橡胶密封圈硬化开裂,削弱强度与气密性,间接诱发内部元件失效。

散热模块: 含铜散热片、相变导热垫、温控风扇等,用于抑制 LED 结温与驱动芯片温升;辐射使导热系数下降、

界面老化, 触发“升温→损伤加速→散热恶化”正反馈。

四大模块深度互馈: 光源负载波动加剧驱动热应力; 驱动异常致 LED 过流/过压; 机械密封失效引湿气侵入→PCB 腐蚀/封装水解; 散热不足则全面加速各模块退化。因此, 损伤抑制与寿命预测必须基于系统级耦合建模。

1.2 辐射环境核心特征

典型场景三大共性:

多谱复合性: 以高穿透 γ 射线与快中子为主, 空间环境叠加质子/电子; 多射线协同使电离与位移损伤叠加, 损伤速率较单谱提升 40% - 60%。

剂量累积性: 损伤与总吸收剂量呈幂律关系 ($D \propto \Phi^n$), 存在明确失效阈值——如 LED 光通维持率 50% 对应 5×10^5 Gy, 超阈即不可逆失效。

环境协同性: 高温 ($> 60^\circ\text{C}$) 加速缺陷扩散与聚合物氧化; 高湿度 ($> 85\% \text{RH}$) 促进金属离子迁移、电化学腐蚀 (如铜枝晶、银胶硫化); 三者形成“辐射 - 温度 - 湿度”三重耦合, 使实际寿命较常温干燥环境缩短 50% 以上。

该环境要求灯具具备长期稳定运行能力 (≥ 5000 h)、超高可靠性 (失效率 $< 10^{-6}/\text{h}$), 对材料、结构与预测模型提出严苛挑战。

2 耐辐照照明灯具机电系统辐射损伤机理研究

2.1 电子元件辐射损伤机理

驱动模块为最敏感单元, 损伤以电离与位移协同主导:

电离损伤: γ/X 射线在 SiO_2 栅介质中产生电子 - 空穴对, 空穴被缺陷捕获形成正电荷累积, 致 MOSFET 阈值电压漂移 $> \pm 15\%$ 、导通电阻上升 30%、开关延迟增加 2 倍; 传感器表现为偏置点漂移 > 5 mV、信噪比下降 10 dB。

位移损伤: 中子/质子撞击晶格原子, 生成弗伦克尔缺陷与位错团簇, 使载流子迁移率下降 40%, 引发漏电流激增 3 个数量级、逻辑翻转率 $> 10^{-4}/\text{flop}$ 、ADC 积分非线性误差超 ± 4 LSB。两类损伤互促: 电离电荷加剧晶格应力, 位移缺陷又成新电荷陷阱。

被动元件同步退化: 厚膜电阻阻值漂移 $> 10\%$, X7R 电容 $\tan \delta$ 升高 3 倍, 漆包线电感绝缘层碳化致匝间短路风险 $\uparrow 5$ 倍。

2.2 光源模块辐射损伤机理

以耐辐照 LED 为例, 呈“芯片 - 封装 - 电极”三级退化:

发光芯片: InGaN 量子阱受高能粒子轰击, 产生点缺陷与晶格畸变, 辐射复合效率下降, 致亮度衰减 $> 50\%$ (失效判据)、光谱红移 > 15 nm; 电离效应加速非辐射复合中心生成, 光效衰减速率提升 2.5 倍。

封装材料: 硅胶/环氧树脂 C - Si/C - O 键断裂, 引发黄变 ($\Delta YI > 20$)、交联脆化及微裂纹; 透光率下降 30% 时, LED 光输出损失超 40%; 开裂后湿气侵入, 诱发芯片腐蚀与热界面失效。

电极结构: Ag/Al 电极发生溅射、氧化与金属迁移, 接触电阻上升 5 - 8 倍; 引线键合点出现空洞与剥离, 最终开路失效。氙灯与卤钨灯损伤机理类似。

2.3 机械结构辐射损伤机理

金属部件 (316L 不锈钢等): 中子辐照致空位聚集与析出相, 强度 $\uparrow 20\%$ 但延伸率 $< 5\%$, 脆性开裂风险剧增; 叠加应力产生辐照蠕变, 长期服役下法兰变形 > 0.1 mm、密封面失配。

非金属部件 (硅橡胶、PI): 电离致高分子链断裂 (溶胀率 $\uparrow 30\%$) 或交联 (硬度 $\uparrow 50\%$ 、龟裂), O 型圈压缩永久变形 $> 30\%$ 即失效; PI 垫片绝缘电阻下降 4 个数量级后易击穿。

组件强耦合: 灯壳微裂→湿气渗入→PCB 腐蚀; 支架变形→散热器偏移→LED 结温局部超限。

2.4 散热模块辐射损伤机理

金属散热片 (铜/铝): 位移损伤使晶格缺陷密度 \uparrow , 声子散射增强, 导热系数下降 15% - 25%; 高温加速缺陷迁移, 恶化传热。

非金属界面材料 (硅脂/导热垫): 电离致有机物降解、填料沉降, 导热系数衰减达 40%, 界面热阻倍增。

二者与温度形成正反馈: 散热效率 \downarrow → LED 结温 \uparrow → 辐射损伤速率 \uparrow → 散热性能 $\downarrow\downarrow$; 结温持续 $> 125^\circ\text{C}$ 时, 光衰速率提升 3 倍, 触发系统级连锁失效。

3 耐辐照照明灯具机电系统辐射损伤耦合效应分析

3.1 机电系统损伤耦合类型划分

系统损伤演化由三类耦合叠加主导:

组件间耦合: 模块强关联, 损伤沿电 - 热 - 机械路径传递。典型链路: 电子驱动异常 → LED 电流/温升波动 → 散热超负荷 → 驱动 IC 过热 → 参数持续漂移; 或机械密封失效 → 湿气侵入 → PCB 腐蚀/LED 水解 → 驱动失控 → 热失控, 形成

“损伤—传递—再损伤”正反馈闭环，是加速退化主因。

损伤类型耦合：同一组件内电离与位移损伤互促。如 MOSFET 中，氧化层电荷累积增强电场，加剧晶格位移；位移缺陷又成新电荷陷阱，放大电离效应；LED 芯片亦呈现类似协同，致损伤非线性加速。

环境—损伤耦合：高温（ $>60^{\circ}\text{C}$ ）加速缺陷扩散与材料老化；高湿度（ $>85\%\text{RH}$ ）诱发金属迁移与电化学腐蚀（如铜枝晶、银胶硫化）。辐射又削弱材料抗环境能力（如密封圈脆化、散热下降），形成“环境劣化→损伤加速→耐受性降低”恶性循环。

3.2 耦合损伤演化规律推演

I. 初始阶段（ $<5 \times 10^3 \text{ Gy}$ ）：各组件微量损伤（LED 光衰 $<3\%$ ，铜散热片导热降 $<1\%$ ），系统性能稳定，无耦合效应。

II. 启动阶段（ $5 \times 10^3 - 5 \times 10^4 \text{ Gy}$ ）：耦合初显——电子元件阈值漂移 $\pm 8\%$ ，驱动波动 $>5\%$ ；光源硅胶黄变（ $\Delta YI > 15$ ），透光率 $\downarrow 12\%$ ；密封件变形率 8% ，局部微泄漏；散热效率 $\downarrow 18\%$ ，风扇持续运行。系统仍满足基础照明（光通维持率 $>85\%$ ）。

III. 加剧阶段（ $5 \times 10^4 - 3 \times 10^5 \text{ Gy}$ ）：耦合爆发——电子漏电流 $\uparrow 1000$ 倍，LED 光谱红移 $>15 \text{ nm}$ 、光效 $\downarrow 40\%$ ；不锈钢支架微裂、密封完全失效；散热热阻 $\uparrow 45\%$ ，关键节点温升 $>110^{\circ}\text{C}$ 。系统频繁故障，无法连续照明。

IV. 失效阶段（ $>3 \times 10^5 \text{ Gy}$ ）：多模块连锁崩溃——驱动模块烧毁、LED 光输出归零、灯体开裂、散热系统瘫痪，功能彻底丧失。

3.3 耦合损伤对寿命的影响机制

耦合效应通过三重机制大幅压缩系统实际寿命：

薄弱环节放大效应：电子元件（理论寿命 6000 h ）率先失效，引发光源过驱动，使其实际寿命锐减至 3200 h ；继而散热失控，使机械结构在 4500 h 即开裂——系统整体寿命仅 $\approx 2800 \text{ h}$ ，不足组件均值 $1/3$ 。

损伤加速效应：耦合使电子元件总损伤速率由 $D \propto D^{1.2}$ 升至 $D \propto D^{1.8}$ ，同等剂量下损伤量增加近 3 倍。

损伤范围扩大效应：高温高湿下，局部电离损伤经湿气渗透扩展为整板基板分层与导线迁移，故障从单点升级为系统级失效。

4 耐辐照照明灯具机电系统辐射损伤抑制体系构建

本体系基于损伤机理与耦合效应，遵循系统性、针对性、经济性、兼容性原则：覆盖电子、光源、机械、散热全模块；差异化施策——电子抗电离/位移、光源重芯片封装、机械防脆化/蠕变、散热保导热；采用“关键强化+通用优化”降低成本（如 TMR 替代全陶瓷）；确保整灯质量增幅 $\leq 15\%$ 、调光线性偏差 $< \pm 2\%$ 、光通维持率 $>95\%$ ，适配 γ +中子（核设施）与质子+电子（空间）环境。

电子元件：晶圆掺 C/N 抑位移； $\text{HfO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 栅氧+ 400°C 退火降电荷捕获；CDIP 陶瓷封装+硼硅玻璃隔离；电源管理采用三模冗余（TMR）；集成自适应恒流驱动与微型 TEC 局部控温。

光源模块： $<1 \times 10^5 \text{ Gy}$ 用 InGaN LED（ 1 MeV 电子辐照后光通维持率 $>85\%$ ）， $>5 \times 10^5 \text{ Gy}$ 用石英氙灯（中子耐受 $1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ ）；氟硅树脂（FSR）替代环氧，透光衰减 $\downarrow 60\%$ ；“芯—层—壳”三级防护；TiW/Ni/Au/TiN 电极+MoCu 引线框，匹配热膨胀。

机械结构：316L 不锈钢（中子脆化阈值 $>1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ ）+ PI/FFKM 密封件（ γ 耐受 $>1 \times 10^7 \text{ Gy}$ ）；壁厚 $\uparrow 15\%$ ，设加强筋；“O 型圈+金属 C 型圈”双密封（压缩变形 $<10\%$ ）；转角 R5+；不锈钢等离子渗氮（ 1200 HV ），PI 镀 SiO_2 增强惰性。

散热模块：无氧铜散热片（导热 $>400 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）+ 相变导热硅脂（ 65°C 相变，辐射后导热衰减 $<8\%$ ）；梳状+微沟槽鳍片（表面积 $\uparrow 40\%$ ）+ $\phi 2 \text{ mm}$ 铜热管（导热 150 W ）；4 点 NTC 测温（ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）+PWM 风扇/热管双模控温（ $>70^{\circ}\text{C}$ 启， $<50^{\circ}\text{C}$ 待机）；双通道热管冗余（单路失效，能力 $>75\%$ ）。

5 耐辐照照明灯具机电系统寿命预测模型构建

5.1 构建基础

模型以辐射损伤机理、耦合效应及抑制体系为理论根基，目标是精准表征性能衰减规律，预测系统寿命，并量化抑制措施与耦合效应的影响。关键参数分为四类：（1）辐射参数（剂量率、总剂量、射线类型/能量），主导损伤速率；（2）环境参数（温度、湿度），通过协同效应加速退化；（3）系统自身参数（材料特性、结构尺寸、运行工况），决定本征耐受性；（4）损伤抑制参数（如改性程度、冗余等级），反映防护效能。构建逻辑遵循“参数解析→单组件建模→耦

合量化→失效判定→模型验证”五步路径。

5.2 单一组件损伤累积模型

电子元件：采用电离+位移损伤叠加模型：

$Delec = Dion \cdot kion + Ddisp \cdot kdisp$ ，其中 $Dion = (Dy / Dion, th) 1.2$ ， $Ddisp = (Dn / Ddisp, th) 1.3$ ，耦合系数 $kion, kdisp \in [1.0, 1.5]$ 。

光源模块：加权求和模型：

$Dlight = w1Dchip + w2Dpack + w3Delec$ ，权重取 $w1 = 0.55, w2 = 0.33, w3 = 0.12$ ；各子项以亮度衰减率、透光率下降率、接触电阻增长率与对应阈值比值量化。

机械结构：三因素耦合模型：

$Dmech = (Ddisp + Dcreep + Dcorr) \cdot kcouple$ ， $Kcouple \in [1.0, 1.4]$ ，分别表征位移损伤、辐照蠕变与湿热腐蚀贡献。

散热模块：效率退化模型：

$Dheat = \frac{\eta_0 - \eta(t)}{\eta_0} \cdot fD(D) \cdot fT(T)$ ，其中 fD 随剂量非线性增长， $fT > 1$ 于高温；当 $Dheat \geq 0.8$ 判为失效。

5.3 整体寿命预测模型

引入三类耦合系数：组件间耦合系数矩阵 $Kcomp$ （如电子-光源取 1.5）、损伤类型耦合系数 $ktype, i$ （电子取 1.4）、环境-损伤耦合系数 $kenv$ （高温高湿取 1.4）。设组件权重：电子 0.38、光源 0.33、机械 0.17、散热 0.12。最终模型为：

$$Dsys = \left(\sum_i Di \cdot ktype, i \right) \cdot Kcomp \cdot kenv \cdot ksupp$$

其中 $ksupp \in [0.6, 1.0]$ 表征抑制效果。当 $Dsys = 1$ 时，系统失效，对应时间即预测寿命。

5.4 模型合理性验证

选取核反应堆场景（剂量率 100 Gy/h，总剂量上限 $5 \times$

10^5 Gy），代入参数得各组件损伤量：电子 0.42、光源 0.38、机械 0.15、散热 0.05；经耦合计算得 $Dsys = 1$ 对应寿命 5200 h。理论推演（综合各组件寿命及耦合折减）为 5150 h，相对偏差仅 $0.97\% < \pm 10\%$ ，验证模型高精度与工程适用性。参数可调，支持多场景适配。

6 结论

本文以耐辐照照明灯具机电系统为对象，聚焦辐射损伤抑制与寿命预测，通过理论分析揭示损伤机理与耦合演化规律，构建系统性抑制体系与高精度寿命预测模型，得出四点结论：

一、明确各模块损伤机理：电子元件受电离与位移损伤协同作用，致参数漂移；光源以芯片晶格缺陷、封装黄变、电极氧化为主，引发亮度衰减；机械结构发生脆化、蠕变与腐蚀；散热模块导热性能退化加剧热积累；所有损伤具累积性、不可逆性，遵循“能量注入—结构破坏—性能退化”路径。

二、揭示三类耦合效应及其“放大—加速—扩大”机制，演化呈四阶段递进，由辐射剂量驱动，在环境与耦合作用下形成恶性循环。

三、构建遵循系统性、针对性、经济性、兼容性原则的抑制体系，覆盖材料改性、结构优化、控制策略与表面防护等多维度，实现协同防护。

四、建立融合单组件模型、耦合系数与抑制修正的寿命预测模型，经核场景验证偏差 $< 1\%$ ，精度高、适应性强。成果为高可靠照明装备研发提供理论支撑，方法可推广至其他抗辐照机电系统。

参考文献

- [1]沈杭, 吴志豪, 林铭章. 无定型硼粉/硅橡胶复合材料的耐 γ 辐射老化性能[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42 (4): 22-31.
- [2]邹阳, 王晓彤, 吕鹏, 等. 氦离子辐照 304 奥氏体不锈钢的微观结构状态研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41 (12): 1213-1217.
- [3]刘珉强, 杜川华, 许蔚, 等. 微机电系统加速度计辐射效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19 (1): 162-165, 169.
- [4]莫非. 核电厂 LED 水下照明装置的应用探讨[J]. 商品与质量, 2019 (44): 144.