

# 引信在长期贮存下老化行为的仿真模拟与分析

娄文忠<sup>1,2</sup>, 李昕哲<sup>1,2,3</sup>, 冯恒振<sup>1,2\*</sup>, 何博<sup>1,2</sup>, 苏文亭<sup>1</sup>, 吕斯宁<sup>1</sup>, 李志鹏<sup>1</sup>

(1.北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2.北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401120;  
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 目的 厘清某型引信在贮存 14 a 后的失效模式, 研究温度周期性交变对引信及其薄弱零件的影响。方法 利用 ANSYS workbench 软件, 建立基于时间硬化的蠕变仿真方法。以某型引信为研究对象, 开展周期性温度交变的蠕变仿真, 根据仿真计算结果和实物的对比分析, 找出薄弱零件, 分析其老化失效模式。结果 在每个周期内环境温度循环条件下, 仿真时长设定为 14 a, 结果显示, 引信整体蠕变应变率超过 1%, 平均压紧应力下降 21%, 松弛稳定性变弱, 密封性在一定程度上变差。其中, 引信电机外壳、电机扇叶、底部线路对接板为薄弱零件, 容易发生失效行为。结论 引信贮存在典型西南湿热环境 14 a 后, 周期性温度交变应力将导致引信出现缺陷, 缺陷集中在电机外壳、电机扇叶、底部线路对接板处, 应重点对这些部位进行防护。

**关键词:** 引信; 长期贮存; 蠕变仿真; 老化行为; 薄弱零件; 温度交变

中图分类号: TJ430.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0056-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.007

## Simulation and Analysis of Aging Behavior of Fuzes under Long-term Storage

LOU Wen-zhong<sup>1,2</sup>, LI Xin-zhe<sup>1,2,3</sup>, FENG Heng-zhen<sup>1,2\*</sup>, HE Bo<sup>1,2</sup>, SU Wen-ting<sup>1</sup>, LYU Si-ning<sup>1</sup>, LI Zhi-peng<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China;

3. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The work aims to clarify the failure mode of a certain type of fuze after 14 years of storage, and to study the effect of periodic temperature alternation on the fuze and its weak parts. A creep simulation method based on time hardening was established with ANSYS workbench. With a certain type of fuze as the research object, the creep simulation of periodic temperature alternation was carried out. According to the simulation calculation results, the weak parts were found and the aging failure mode was analyzed. Under the cyclic condition of ambient temperature in each cycle, the simulation time was set to 14 year. The results showed that the overall creep strain rate of the fuze exceeded 1%, the average compressive stress decreased by 21%, the relaxation stability became weaker, and the sealing became poor, among which the fuze motor housing, motor fan blade and bottom line docking plate were weak parts and were prone to failure behavior. After the fuze is stored in a southwestern hygrothermal environment for 14 years, the periodic temperature alternating stress will lead to defects in the fuze, and the de-

收稿日期: 2023-06-27; 修订日期: 2023-08-09

Received: 2023-06-27; Revised: 2023-08-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62304022); 2022-2024 年度中国科协创新融合学会联合体青年人才托举工程(2022QNRC001)

Fund: National Natural Science Foundation of China Youth Fund (62304022); 2022-2024 China Association for Science and Technology Innovation Integration Society Consortium Young Talent Sponsorship Project (2022QNRC001)

引文格式: 娄文忠, 李昕哲, 冯恒振, 等. 引信在长期贮存下老化行为的仿真模拟与分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 56-63.

LOU Wen-zhong, LI Xin-zhe, FENG Heng-zhen, et al. Simulation and Analysis of Aging Behavior of Fuzes under Long-term Storage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 56-63.

\*通信作者 (Corresponding author)

fects are concentrated in the motor shell, motor fan blade and bottom line docking plate. Therefore, these parts should be protected.

**KEY WORDS:** fuze; long-term storage; creep simulation; aging behavior; weak parts; temperature alternation

引信是武器系统中至关重要的组成部分, 它的设计和性能决定了武器的终端效应。通过感知目标或其他信息, 并适时引爆弹丸或战斗部, 引信能够确保武器系统与目标的有效对抗<sup>[1]</sup>。为了确保引信的可靠性和作用过程中性能及其性能参数的稳定性, 它们通常经过严格的测试和质量控制程序。对于军事应用, 引信需要具备很高的可靠性和安全性, 以确保在各种环境条件下都能正常工作。作为一次性使用产品, 引信的贮存可靠性受到各方关注。贮存可靠性是指引信在规定贮存条件下和规定贮存时间内保持规定功能的能力, 它作为强制性指标, 列入国军标《装备可靠性维修性参数选择与指标确定要求——弹药》之中<sup>[2]</sup>。我国幅员辽阔, 南北温差大, 南方仓库夏天温度可达 70 °C 以上<sup>[3]</sup>。温度的交替循环变化, 使引信材料热胀冷缩<sup>[4]</sup>, 长期贮存在这种环境下的引信, 失效率高, 会出现瞎火、过早炸等危害安全性的问题<sup>[5]</sup>。

目前, 国内对引信长期贮存后的薄弱易失效零件的研究主要是通过自然贮存试验和加速寿命试验。郭华等<sup>[6]</sup>通过步进应力加速寿命试验, 开展了引信贮存寿命评估研究, 评估其寿命为 20.1 a。李道清等<sup>[7]</sup>通过对某型无线电引信开展了长贮步进应力加速寿命试验, 得出研究引信在 30 °C 条件下贮存年限不小于 15 a, 其中起爆钽电容是该引信的薄弱零件。张福兴等<sup>[8]</sup>通过对弹上电子产品开展 10 a 的自然贮存试验, 分析了其产生故障的主要原因为长期的环境应力致使生产工艺问题扩大。以上对引信长贮失效的研究都是基于试验完成的, 而环境试验不仅耗费人力财力, 而且现代引信更新换代速度快, 往往试验还没完成, 试验引信就已经淘汰了。因此, 急需发掘模拟仿真手段对引信的长贮失效进行分析, 然而目前国内还没有通过有限元仿真模拟温度交变环境对引信的影响研究。

针对上述现状, 本文以贮存在某西南地区边防仓库的某型中大口径迫弹引信为研究对象, 通过温度交变的蠕变仿真, 基于 Ansys Workbench 软件, 使用蠕变时间硬化数学模型, 按照当地夏季仓库内温度为 75 °C, 其他四季平均温度为 30 °C, 以年为单位, 仿真时间设定为 14 a。计算 14 a 后, 引信的蠕变应变和应力情况, 再结合真实观测数据, 分析引信在贮存 14 a 后的薄弱部件及失效模式, 为预测引信长期贮存寿命和分析引信失效模式提供理论依据。

## 1 蠕变失效机理与蠕变仿真方法

### 1.1 蠕变失效机理

蠕变是指固体材料在保持应力不变的条件下, 应

变随时间延长而增加的现象。在温度周期性变化产生的应力作用下, 材料容易发生蠕变疲劳导致失效<sup>[9]</sup>。

蠕变应变的发展可以划分为 3 个阶段, 如图 1 所示。在第一阶段, 蠕变应变大小具有时间相关性, 而从曲线斜率变化可知, 蠕变速率和时间具有负相关性。这是因为材料内与时间相关的应变硬化和应变恢复会相互对抗, 随着应变增加, 相互对抗的力度也会增加。在第二阶段, 蠕变速率维持平衡状态, 这是蠕变硬化率和恢复率相互对抗平和的结果, 这个阶段涉及到扩散蠕变机制。第三阶段, 材料内的缺陷继续扩大, 蠕变恢复明显慢于蠕变硬化, 导致蠕变速率快速增加, 并且失效迅速扩展<sup>[10-11]</sup>。因此, 材料的蠕变应变在宏观上表现为裂纹和裂孔等失效形式。

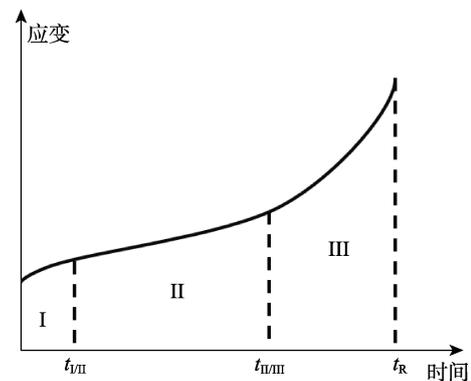


图 1 蠕变过程  
Fig.1 Creep process

交变应力指随时间周期性变化的应力。在循环的应力中, 当最大应力和最小应力都处于恒定状态, 这种应力被称为“稳定交变应力”。稳定交变应力首先引起材料原子晶格中位错的运动, 位错运动的积累导致微小裂纹的形成, 这些微小裂纹沿着结晶变化方向扩展, 最终形成宏观意义上的裂纹<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 蠕变本构模型

1) 金属蠕变模型。单轴应力状态下各向同性材料的蠕变应变<sup>[14]</sup>表示为应力、时间和温度的函数:

$$\varepsilon_j^c = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T) \quad (1)$$

其中, Bailey-Norton 模型<sup>[15]</sup> 可以表征蠕变应变与时间和应力的关系:

$$f_1(\sigma) f_2(t) = A_1 \sigma^m t^n \quad (2)$$

此外, 蠕变表现为一种热激活现象, 即蠕变变形受到激活能的影响<sup>[16-17]</sup>。因此, 蠕变应变和温度的计算表达式为:

$$f_3(T) = A_2 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3)$$

综合式(1)~(3), 得到金属材料蠕变本构模型:

$$\varepsilon_j^{cr} = B\sigma^m t^n \exp\left(\frac{-\theta}{T}\right) \quad (4)$$

式中:  $Q$  为热激活能;  $R$  为普适气体常数;  $T$  为热力学温度;  $B=A_1A_2$ ;  $\theta = \frac{Q}{R}$ 。  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B$ 、 $m$ 、 $n$  都是与温度相关的常数, 且  $0 < n < 1 < m$ 。

2) 非金属复合材料蠕变模型。连续非金属聚合物基复合材料各向异性, 用混合率模型来表示其蠕变行为<sup>[18]</sup>。假设复合材料在单轴应力作用下具有一定的串、并联关系<sup>[19]</sup>, 则可得到其蠕变本构模型:

$$\varepsilon_1^{cr}(t) = \frac{p_1}{q_1} \sigma_1 + \left(\frac{p_0}{q_0} - \frac{p_1}{q_1}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-tq_0}{q_1}\right)\right] \sigma_1 \quad (5)$$

$$\varepsilon_2^{cr}(t) = \frac{1}{E_k} \sigma_2 + \frac{v_m}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right] \sigma_2 \quad (6)$$

$$\gamma_{12}^{cr}(t) = \frac{1}{G_k} \tau_{12} + \frac{v_m}{G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right] \tau_{12} \quad (7)$$

其中,  $\varepsilon_1^{cr}(t)$  为沿材料伸长方向的蠕变本构模型,  $p_0 = E_1 + E_2$ ,  $q_0 = E_1 E_2 v_m + E_1 E_3 (1 - v_m) + E_2 E_3 (1 - v_m)$ ,  $p_1 = \eta_1$ ,  $q_1 = [E_2 v_m + E_3 (1 - v_m)] \eta_1$ ,  $E_1$ 、 $E_2$  和  $\eta_1$  为非金属材料基体拉伸黏弹性参数,  $E_3$  为玻璃纤维的弹性模量,  $v_m$  为非金属材料基体的容积含量。  $\varepsilon_2^{cr}(t)$  为垂直于材料伸长方向的蠕变本构模型,  $\tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$ ,

$E_k = \frac{E_2 E_3}{E_3 v_m + E_3 (1 - v_m)}$ 。  $\gamma_{12}^{cr}(t)$  为面内垂直伸长方向的蠕变本构模型,  $\tau_2 = \frac{\eta_2}{G_1}$ ,  $G_k = \frac{G_2 G_3}{G_3 v_m + G_2 (1 - v_m)}$ ,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\eta_2$  为非金属基体剪切黏弹性参数,  $G_3$  为玻璃纤维的剪切模量。

幂律模型用于宏观物理现象, 认为单向纤维复合材料不同纤维方向上的蠕变变形规律均可用时间指数函数的形式来表示<sup>[20]</sup>。

$$\varepsilon_i^{cr} = (J_0 + J' t^n) \sigma_i = J_i(t) \sigma_i \quad (8)$$

式中:  $J_0$  为初始蠕变柔量;  $J'$ 、 $n$  均为材料参数, 与环境温度和材料的特性有关。

3) 复合时间硬化蠕变模型, 是描述蠕变应变与温度、应力、时间的函数关系, 结合上述金属和复合材料的蠕变模型<sup>[21]</sup>, 可以得出具体表达式:

$$\varepsilon^{cr} = \frac{c_1 \sigma^{c_2} t^{c_3+1} \exp\left(\frac{-c_4}{T}\right)}{c_3+1} + c_5 J(t) \sigma^{c_6} \exp(-c_7/T) \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon^{cr}$  为材料的蠕变应变;  $c_1 \sim c_7$  为拟合参数, 其中  $c_1 > 0$ ,  $c_5 > 0$ ;  $T$  为工作温度。

### 1.3 实例计算

某西南地区边防某仓库贮存的某型引信主要由铝合金和工程塑料 2 种材料构成。贮存时, 整个引信由铝制密封袋密封保存了 14 a, 出仓后外观检查, 密封袋密封性无异常, 说明引信干燥性良好。开包 5 个后, 发现其中 1 个引信的电机外壳有裂纹出现, 实物部分如图 2 所示。该西南地区为南亚热带季风气候区, 气候温暖, 空气潮湿。由于当时仓库条件简陋, 不具备恒温条件, 夏季平均气温为 38℃, 仓库属密闭环境, 室内温度可达 75℃左右, 冬春秋仓库气温回缓, 平均气温在 30℃左右<sup>[22]</sup>。其贮存环境条件剖面如图 3 所示。

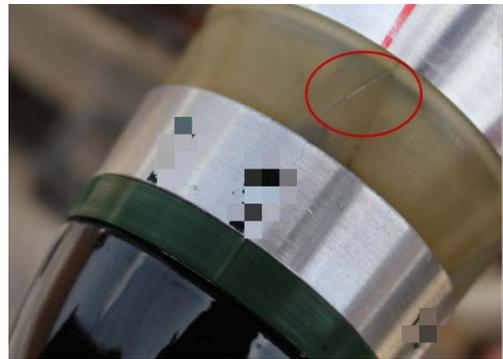


图2 贮存在某西南地区的某引信部分实物  
Fig.2 Physical diagram of a fuze part stored in a southwestern environment

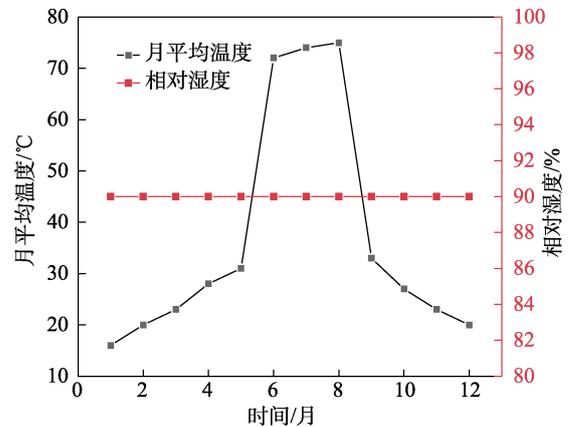


图3 贮存环境剖面  
Fig.3 Profile of storage environment

### 1.4 仿真计算流程

建立的产品全模型如图 4 所示。模型外部由 0.12 mm 铝制密封袋包裹, 头部由钢制保护罩保护风帽不受损。整个产品主要分成 3 个部分, 上部包括风帽、电子头、灌封电路板和一些塑料外壳; 中部有 4 颗螺钉连接到下壳体, 内部包括涡轮发动机, 发动机底部固连线路对接板, 板上安装击针; 下部分包括安全与解除隔离装置和外壳。

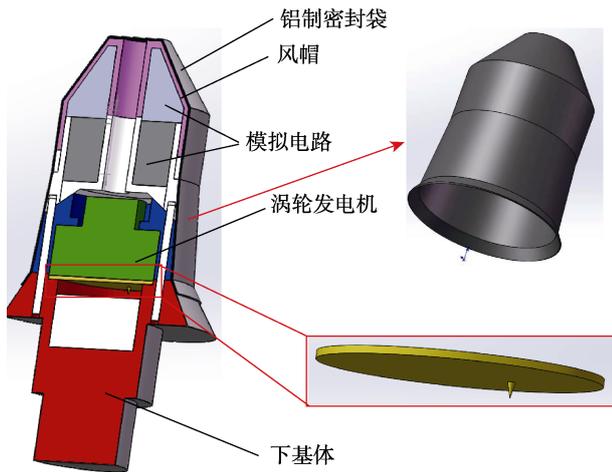


图 4 某型引信模型  
Fig.4 Model of a certain type of fuze

为了获得高质量网格, 保证结果准确性, 同时确保收敛性和合理的计算时间, 整体采用高平滑六面体网格, 如图 5 所示。全局网格最大单元边长 5 mm, 最小单元边长 2 mm, 单位网格平均质量为 0.802 3, 网格纵横比为 3.778 6。该网格质量适用于当前仿真计算。

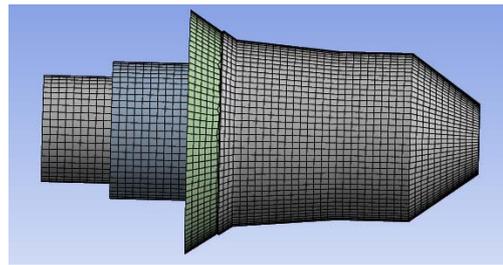


图 5 网格划分  
Fig.5 Meshing diagram

某型引信上各构件的材料类型见表 1, 材料的热特性<sup>[23]</sup>参数见表 2, 该材料参数来源为 ANSYS workbench 数据库。材料蠕变特性参数<sup>[24-25]</sup>见表 3。

表 1 各构件的材料类型

构件	材料类型	构件	材料类型
风帽	工程塑料	连接螺钉	结构钢
电子头 (灌封)	环氧树脂	击针	结构钢
涡轮发电机	工程塑料	下壳体	硬铝合金
安全与解除隔离装置	工程塑料	固定环	硬铝合金

表 2 材料的热特性参数

Tab.2 Thermal characteristic parameters of materials

材料	热传导系数/(K·W <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	热膨胀系数/°C	比热容 c <sub>p</sub> /(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
铝	237.5	2.41×10 <sup>-5</sup>	951
环氧树脂	x: 0.38, y: 0.38, z: 0.3	x: 1.25×10 <sup>-5</sup> , y: 1.14×10 <sup>-5</sup> , z: 8.2×10 <sup>-5</sup>	550
工程塑料	0.28	0.000 23	2 300
结构钢	60.5	1.2×10 <sup>-5</sup>	434

表 3 材料蠕变特性参数

Tab.3 Creep characteristic parameters of materials

材料	Creep constant 1	Creep constant 2	Creep constant 3	Creep constant 4
硬铝合金 5086	7.29×10 <sup>-18</sup>	11.258	0	0
环氧树脂	3.3×10 <sup>-6</sup>	0.43	-0.4	571
工程塑料	7.75×10 <sup>-6</sup>	1	-0.979 72	0

为了模拟仓库环境, 并简化计算, 作出如下设定, 如图 6 所示。初始环境温度设为 22 °C, 4 000 s 后温度到仓库常温 30 °C, 这用于模拟引信最初被放置进入仓库时环境的变化。30 °C 维持 21 600 000 s (250 d), 升为 75 °C, 维持 7 776 000 s (90 d), 这用于模拟西南地区夏季高湿热特性, 常年夏季仓内温度能达到 70 °C 以上。总计 340 d (约为 1 a) 为 1 循环, 循环 14 个周期。螺钉在该温度下几乎不发生变形, 设置为固定支撑面。

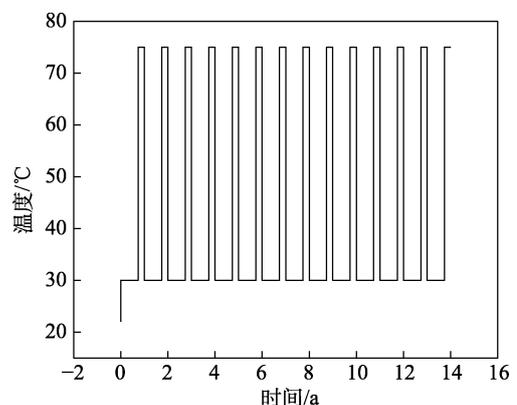


图 6 温度周期性交变设置

Fig.6 Periodic alternation setup diagram of temperature

## 2 结果及分析

运用 ANSYS workbench 软件模拟了上述引信贮

存在某典型西南湿热环境仓库 14 a 的时间里, 由于温度交变而发生的蠕变变形。外界温度为 30、75 °C 时, 引信的温度扩散情况如图 7 所示。可以看出, 从外界 30 °C 转变为 75 °C 和外界 75 °C 转变为 30 °C 时, 温度从外界扩散至引信内部至饱和的时间为 2 500 s,

而每个恒温周期为 29 376 000 s。这说明在 1 个周期内的 2 个阶段, 温度转换所花时间相对恒定温度贮存时间很短, 转换过程中的温度变化引起的形变突变可忽略不计, 引信主要产生的形变由恒定温度下的蠕变应变导致。

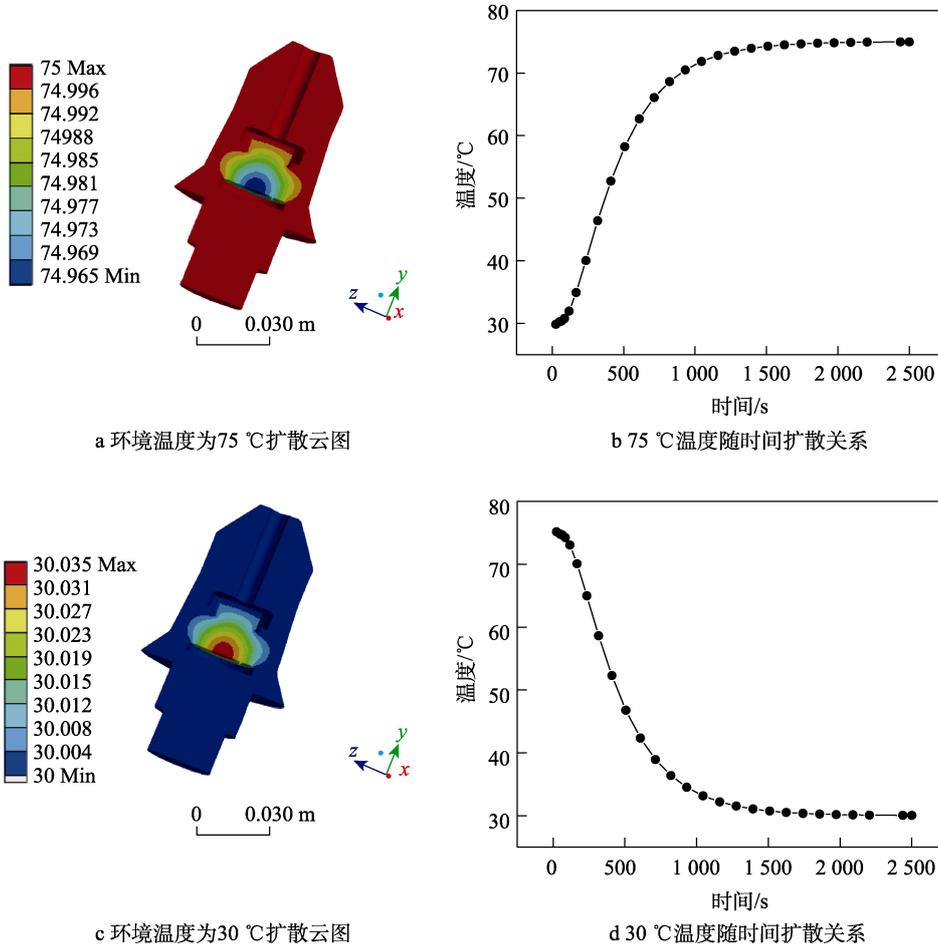


图 7 温度交变扩散图

Fig.7 Alternating diffusion plot of temperature: a) diffusion plot at ambient temperature of 75 °C; b) diffusion plot over time at 75 °C; c) diffusion plot at ambient temperature of 30 °C; d) diffusion plot over time at 30 °C

引信在 14 a 的循环中, 总形变变化量大的集中在中间塑料外壳、涡轮电机上端和发动机下部固连的线路转接板, 如图 8 所示。引信整体平均压紧应力随时间的变化情况如图 9 所示。可以看出, 引信整体的平均压紧应力值随时间的增加正逐渐变小, 从开始的 957.22 MPa 减小为 756.54 MPa, 下降为原来的 21%, 故可知产品的松弛稳定性变弱, 密封性在一定程度上可能变差。由螺钉或销子连接的各部分的紧合程度可能会变小, 若压紧应力小于预紧压力, 各部分组件的紧合处可能会产生细缝, 引信的起爆功能可能会受到影响, 比如爆炸序列传热到下一级时, 能量通过细缝溢出, 导致下一级接收能量不够等。

持久强度尤其是持久塑性在 14 a 后下降了 1.014 9%。从云图中还可以看出, 应变主要集中于引信的电机外壳, 这与实物图中电机外壳产生狭小裂纹相吻合。

由图 10 可以看出, 引信整体的蠕变应变率随时间增加而增加。14 a 后, 引信蠕变应变率增加至 1.014 9%。由于蠕变变形属于塑性变形, 据此可认为材料

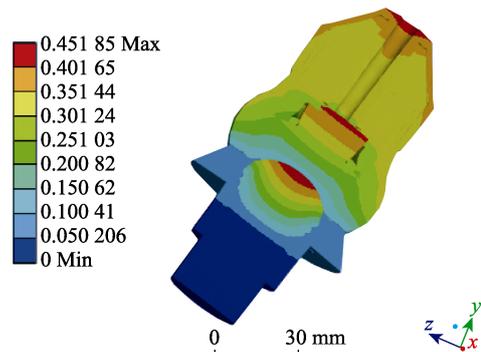


图 8 引信总形变云图  
Fig.8 Total deformation plot of fuze

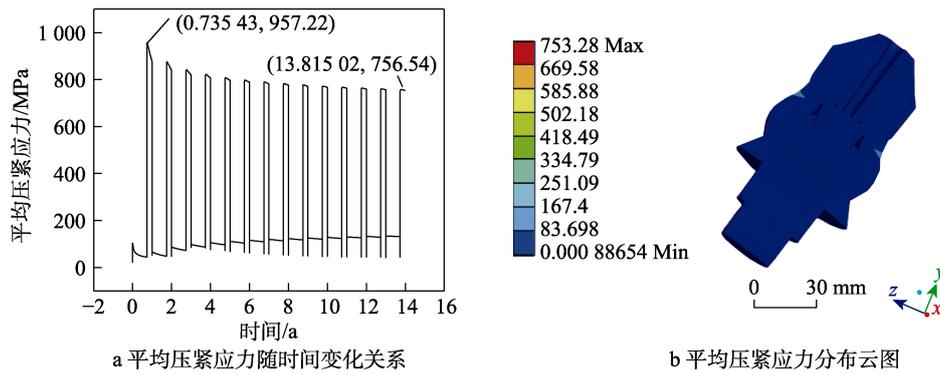


图 9 引信平均压紧应力

Fig.9 Average compressive stress of fuze: a) average compressive stress over time; b) distribution of average compressive stress

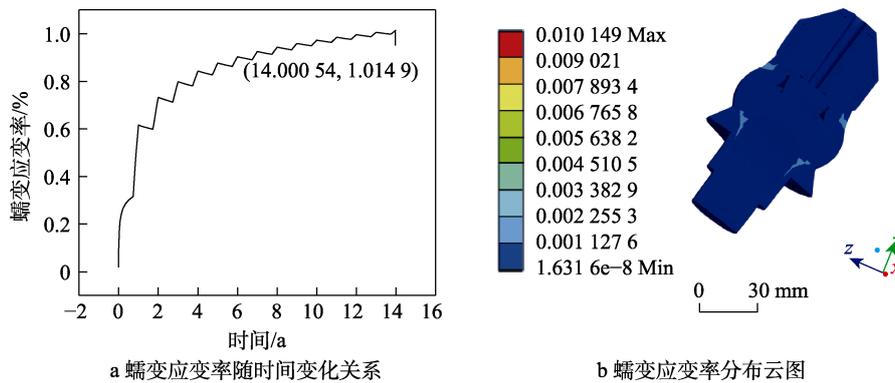


图 10 引信蠕变应变率

Fig.10 Creep strain rate of fuze: a) creep strain rate over time; b) distribution of creep strain rate

引信底部线路对接板(含击针)的蠕变情况如图 11a~图 11c 所示。可以看出,在 14 a 的时间,线路对接板发生了蠕变变形,板底有向下凹陷趋势。由于线路对接板上固连着发火击针,这可能导致该引信作战

时,发火击针戳击角度发生变化,不能正对发火雷管,导致瞎火等问题。线路对接板的平均压紧力和蠕变应变率变化情况如图 11d、e 所示,可以看出,线路对接板与发动机底座平均压紧力由 24 MPa 下降至

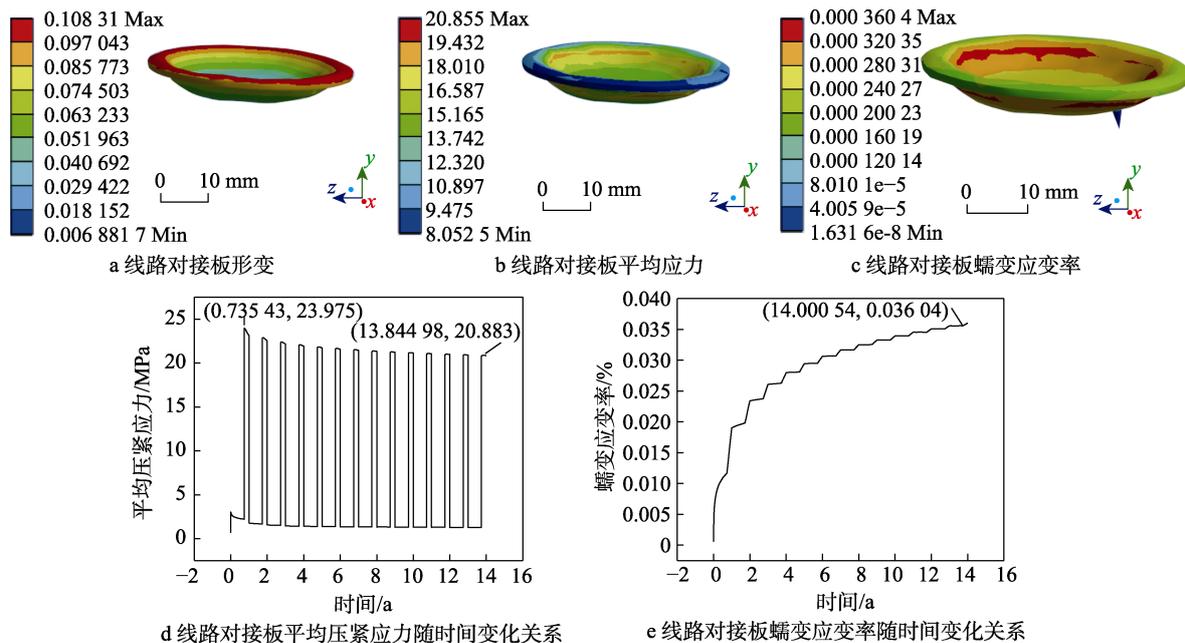


图 11 引信电机底部线路对接板老化情况

Fig.11 Aging of wiring butt plate at the bottom of the fuze motor: a) deformation of line docking plate; b) average stress of line docking plate; c) creep strain rate of line docking plate; d) average compressive stress of line butt plate over time; e) creep strain rate of line docking plate over time

20.8 MPa, 下降了约原来的 13.3%, 线路对接板蠕变应变率上升为 0.03%, 线路对接板材料强度有所降低。电机 14 a 的蠕变情况如图 12 所示, 应力主要集

中在涡轮电机扇叶尖端和底座与线路对接板固连处, 平均压紧应力下降为原来的 12%, 蠕变应变上升 0.028%。

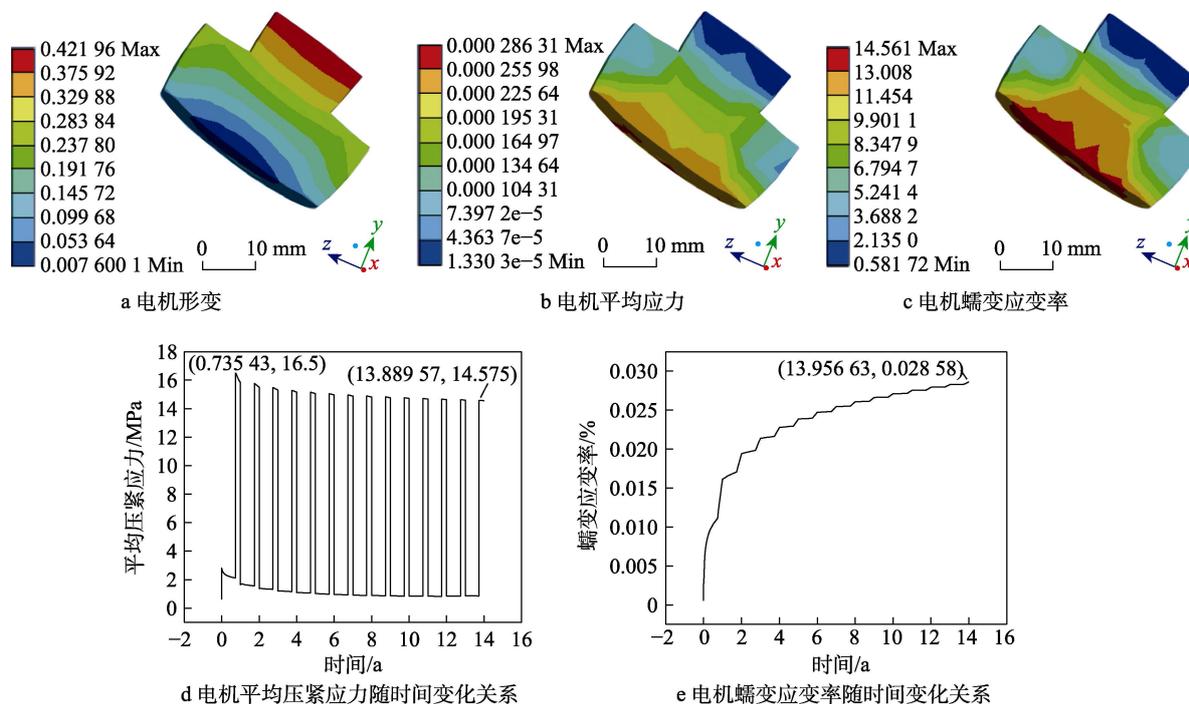


图 12 引信电机老化情况

Fig.12 Fuze motor aging: a) deformation of motor; b) average stress of motor; c) creep strain rate of motor; d) average compressive stress of motor over time; e) creep strain rate of motor over time

### 3 结论

1) 引信在某典型西南地区贮存 14 a 后, 随温度周期性交变会产生蠕变变形。整体仿真结果表明, 该引信贮存 14 a 后容易失效的薄弱零件为电机塑料外壳、涡轮电机上端和发动机下部固连的线路转接板。

2) 在贮存期间, 引信的蠕变应变率呈周期性上涨, 14 a 时间引信整体蠕变应变率上升 1.014 9%, 压紧应力呈周期性下降, 14 a 下降 21%。应变主要集中在电机外壳, 这与实物电机外壳产生狭小裂纹的缺陷相吻合。

3) 其他薄弱零件的仿真结果显示, 线路对接板与发动机底座的平均压紧力由 24 MPa 下降至 20.8 MPa, 下降了约原来的 13.3%, 线路对接板蠕变应变率上升为 0.03%。电机的应力主要集中在涡轮电机扇叶尖端和底座与线路对接板固连处, 平均压紧应力下降为原来的 12%, 蠕变应变上升 0.028%。

4) 薄弱零件的材质为工程塑料和环氧树脂, 建议防护方法: 严格控制温湿度保存条件; 对老化部位在达到规定材料年限时, 及时更换。

#### 参考文献:

[1] 马宝华. 现代引信的控制功能及特征[J]. 探测与控制

学报, 2008, 30(1): 1-5.

MA Bao-hua. Control Function and Characteristics of Modern Fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(1): 1-5.

[2] 王军波, 施聚生. 关于开展引信长期贮存试验的探讨[J]. 制导与引信, 1995, 16(4): 27-29.

WANG Jun-bo, SHI Ju-sheng. Discussion on Long-Term Storage Test of Fuze[J]. Guidance and Fuze, 1995, 16(4): 27-29.

[3] 李维京, 刘景鹏, 任宏利, 等. 中国南方夏季降水的年代际变率主模态特征及机理研究[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 859-876.

LI Wei-jing, LIU Jing-peng, REN Hong-li, et al. Characteristics and Corresponding Mechanisms of the Leading Modes of Interdecadal Variability of Summer Rainfall in Southern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 859-876.

[4] 王乐, 丁晨, 房桂祥. 海洋自然环境下舰载武器失效模式分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 98-102.

WANG Le, DING Chen, FANG Gui-xiang. Failure Mode of Shipborne Weapons in Marine Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 98-102.

[5] 刘伟钊, 李蓉. 基于性能退化的机电引信部件贮存寿命评估方法[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(3): 17-21.

LIU Wei-zhao, LI Rong. Storage Life Evaluation of Elec-

- tromechanical Fuze Components Based on Performance Degradation[J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(3): 17-21.
- [6] 郭华, 祝逢春, 豆仁福, 等. 引信步进应力加速寿命试验无失效数据情况贮存寿命评估[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(2): 26-31.  
GUO Hua, ZHU Feng-chun, DOU Ren-fu, et al. Evaluation of Storage Life of Fuze via Step-Stress Accelerated Life Test with Zero-Failure Data[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(2): 26-31.
- [7] 李道清, 王德元. 某无线电引信加速寿命试验研究[J]. *探测与控制学报*, 2000, 22(4): 57-61.  
LI Dao-qing, WANG De-yuan. Study on the Long Term Storage Stepping Stress Accelerated Life Test of a Radio Fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2000, 22(4): 57-61.
- [8] 张福兴, 童雨. 弹上产品自然贮存试验现状研究[J]. *质量与可靠性*, 2015(6): 12-14.  
ZHANG Fu-xing, TONG Yu. Research on the Present Situation of Natural Storage Test of Missile Products[J]. *Quality and Reliability*, 2015(6): 12-14.
- [9] 刘鸿文, 吕荣坤. 材料力学实验[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2017.  
LIU Hong-wen, (LÜ/LV/LU/LYU) R K. *Material Mechanics Experiment*[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.
- [10] ANDRADE E N D C. On the Viscous Flow in Metals, and Allied Phenomena[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1910, 84(5/6/7): 1-12.
- [11] MCLEAN M, DYSON B F. Modeling the Effects of Damage and Microstructural Evolution on the Creep Behavior of Engineering Alloys[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2000, 122(3): 273-278.
- [12] 安峰辰, 张飞扬, 易浩, 等. 交变应力对套管损伤机理的影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 143-150.  
AN Feng-chen, ZHANG Fei-yang, YI Hao, et al. Effects of Alternating Stress on Casing Damage Mechanism[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 143-150.
- [13] LIU Rong, YE Heng-da, LIU Yu-qing, et al. Numerical Simulation of Concrete Creep Behaviour Using Integral Creep Algorithm with Alternating Stresses[J]. *Structures*, 2021, 29: 1979-1987.
- [14] 孙同生, 于存贵, 秦予铮, 等. 多管火箭武器储运发射箱长期储存蠕变性能预测[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(5): 60-67.  
SUN Tong-sheng, YU Cun-gui, QIN Yu-zheng, et al. Prediction of Creep Performance for Multiple Launch Rocket Canister under Long-Term Storage[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(5): 60-67.
- [15] DAI Qing-li, YOU Zhan-ping. Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture with Micromechanical Finite-Element and Discrete-Element Models[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(2): 163-173.
- [16] YU H Y, LI J C M. Computer Simulation of Impression Creep by the Finite Element Method[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12(11): 2214-2222.
- [17] 徐浩, 王崑, 马跃, 等. 高温螺栓蠕变松弛的理论分析[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(7): 57-60.  
XU Hao, WANG Wei, MA Yue, et al. Analysis of High Temperature Creep Relaxation of Bolted Joint[J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(7): 57-60.
- [18] LANGDON T G. On the Possibility of Harper-Dorn Creep in Non-Metallic Crystals[J]. *Philosophical Magazine A*, 1983, 47(6): L29-L33.
- [19] BERBON M Z, LANGDON T G. An Examination of Creep Behaviour at Low Stresses in Non-Metallic Materials[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1996, 15(19): 1664-1666.
- [20] 李昂, 张毅, 高蔚, 等. 基于可靠度的 Incoloy800H 管材蠕变性能分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(2): 675-681.  
LI Ang, ZHANG Yi, GAO Wei, et al. Analysis on Creep Property of Incoloy800H Tube by Reliability Concept[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(2): 675-681.
- [21] 梅志恒. 涡轮叶片低周疲劳及蠕变寿命预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
MEI Zhi-heng. *Prediction of Low Cycle Fatigue and Creep Life of Turbine Blades*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [22] 麻新纯. 广西气候特点与档案环境保护技术[J]. *广西民族学院学报(自然科学版)*, 1997, 3(1): 75-77.  
MA Xin-chun. The Relationship between the Climatic Characteristics in Guangxi and the Archives Preserving[J]. *Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 1997, 3(1): 75-77.
- [23] HYDE T H, BECKER A A, SUN W, et al. Finite-Element Creep Damage Analyses of P91 Pipes[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(11-12): 853-863.
- [24] 孙燕平, 庞春风. 弯曲残余应力对转子蠕变性能的影响研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(18): 162-166.  
SUN Yan-ping, PANG Chun-feng. Research on Rotor Creep Properties under Bending Residual Stress[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(18): 162-166.
- [25] EVANS H E, KNOWLES G. Dislocation Creep in Non-Metallic Materials[J]. *Acta Metallurgica*, 1978, 26(1): 141-145.

责任编辑: 刘世忠