

湿热应力对引信老化行为的影响分析

娄文忠^{1,2}, 李昕哲^{1,2,3}, 何博^{1,2}, 冯恒振^{1,2}, 阚文星¹, 李志鹏¹

(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** 弄清某型引信在高温高湿环境下的失效模式, 研究高温高湿环境对引信薄弱部件的影响。**方法** 利用 ANSYS workbench 软件, 类比热扩散仿真, 建立湿扩散仿真方法。以某型引信为研究对象, 开展湿仿真、热仿真、湿-热-机械耦合仿真, 根据仿真计算结果, 找出薄弱部件, 分析其老化失效模式。**结果** 在环境温度为 85 °C 和相对湿度为 85% 条件下, 仿真时长设定为 1 h, 结果显示, 引信内部温度传递基本达到饱和, 湿度分布梯度明显, 产生的应力集中和变形量最大在涡轮电机外壳, 达 0.19 mm, 并产生了约 17 MPa 的应力集中, 与真实样品出现的失效部位与失效模式高度一致。**结论** 高温高湿环境下, 湿-热耦合应力将导致引信出现缺陷, 缺陷集中在电机外壳处。

关键词: 引信; 湿热耦合仿真; 老化行为; 薄弱部件; Arrhenius-Peck 模型

中图分类号: TJ430.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0047-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.006

Analysis of the Effect of Hygrothermal Stress on the Aging Behavior of a Certain Type of Fuze

LOU Wen-zhong^{1,2}, LI Xin-zhe^{1,2,3}, HE Bo^{1,2}, FENG Heng-zhen^{1,2}, KAN Wen-xing¹, LI Zhi-peng¹

(1. School of Mechatronic 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 study the effects of high temperature and high humidity on weak parts of fuze, so as to find out the failure mode of a certain type of fuze in high temperature and high humidity environment. ANSYS workbench software was used to simulate thermal dispersion and establish a wet diffusion simulation method. With a certain type of fuze as the research object, wet simulation, thermal simulation and moist-thermal-mechanical coupling simulation were carried out, and according to the simulation calculation results, the weak parts were found out and their aging failure behavior was analyzed. Under the conditions of ambient temperature of 85 °C and relative humidity of 85%, after 1 hour of simulation, the internal temperature transmission of the fuze basically reached saturated state, the humidity distribution gradient was obvious, and the maximum deformation of the product due to humid thermal stress was 0.19 mm in the turbine motor housing, and a stress concentration of about 17 MPa was generated, which was highly consistent with the failure site and failure mode of the real sample. Therefore, in high

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, 何博, 等. 湿热应力对引信老化行为的影响分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 47-55.

LOU Wen-zhong, LI Xin-zhe, HE Bo, et al. Analysis of the Effect of Hygrothermal Stress on the Aging Behavior of a Certain Type of Fuze[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 47-55.

temperature and high humidity environment, the hygrothermal stress will cause defects to the fuze, and the defects will be concentrated in the motor housing.

KEY WORDS: fuze; moist-thermal coupling simulation; aging behavior; weak parts; Arrhenius-Peck model

现代引信是指利用目标信息、环境信息、平台信息和网络信息,按预定策略引爆或引燃战斗部装药,并可给出续航或增程发动机点火指令,选择弹药飞行姿态、飞行航路及攻击点,实施攻击任务协同及敌我识别的控制系统^[1]。它作为各大弹种的配套武器,承担着控制弹药战斗部引爆的核心任务,不作用时常年被贮存在仓库,作用时仅有几秒到几十秒,作为一次性使用的产品,其贮存可靠性问题是兵器行业的重点关注的问题^[2]。近年来,多种引信在配套炮弹发射过程中,出现瞎火率高、早炸等危害安全性问题^[3],并且该类问题往往高发于长期贮存在海岛、南方边境等高温高湿地界的引信上^[4]。由于引信塑料构件多,高温高湿环境下,塑料老化较快,这极大影响了引信的作用可靠性^[5]。目前,国内对引信可靠性问题的研究多集中于膛内高温高压环境。张晋华等^[6]研究了火炮发射膛内高温对弹底引信的影响。王晓锋等^[7]研究了膛内横向压力对引信保险机构产生的震荡影响。周浪等^[8]研究了火炮膛内发射过载对弹头引信防潮片的影响。此外,长期贮存下,环境对引信产生的影响研究主要以实验为主。赵榆轩等^[9]通过自然贮存试验研究了引信各机构的失效率。李道清等^[10]通过加速寿命试验研究了引信的可靠性。通过有限元仿真模拟高温高湿环境对引信影响方面的研究较少。

针对上述现状,本文以贮存在广西壮族自治区边防的某型中大口径迫弹引信为研究对象,通过湿仿真、热仿真、湿-热-机械耦合仿真相结合^[11],使用 Ansys Workbench 软件,按照美国实验室加速寿命实验标准“JESD74 Standard”,在环境温度为 85℃和相对湿度为 85% (以下简称“双 85”)的条件下,模拟引信高温高湿环境。同时,利用 Arrhenius 加速模型和 Peck 加速模型计算湿热加速因子,确定模拟加速时长。结合仿真结果和实际观测结果,分析引信在高温高湿环境下的薄弱部件失效模式,为进一步提高引信可靠性和降低炮弹瞎火率打下坚实基础。

1 湿-热-机械耦合仿真和加速寿命计算模型

1.1 湿-热-机械耦合仿真

1.1.1 湿气扩散理论

湿气扩散相当于水分子从外界扩散到物体内部,描述分子扩散行为中分子浓度随时间的变化关系时,常用 Fick 第二定律^[12]。三维空间的 Fick 第二定律表

达形式为:

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(y, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C(z, t)}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

式中: $C(x, y, z, t)$ 为扩散物质的体积浓度; D 为扩散系数; t 为扩散时间; x, y, z 表示 3 个方向的扩散距离。

1.1.2 热扩散理论

温度梯度是热传导的驱动力,温度梯度与热能交换的关系由热传导的傅里叶定律给出。如图 1 所示,一小平行四边形为传热单元体,其体积为 $dV = dx dy dz$ 。用 E_{in} 表示热能进入的速率; E_{out} 表示热能离开的速率; E_{st} 表示物体储存的热能。由于物体自身在贮存情况下不产生热量,因此根据能量守恒可知:

$$E_{in} - E_{out} = E_{st} \quad (2)$$

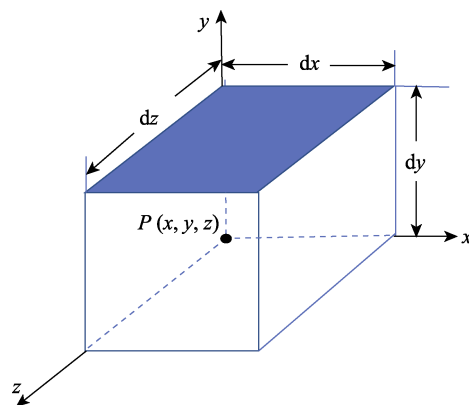


图 1 传热单元示意图

Fig.1 Schematic diagram of the heat transfer unit

假设物质没有相变化和化学变化。设 1 kg 均相物质温度升高 1 K 所需热量为 c_p , 物质的密度为 ρ , 则热量在物体中的储存率为:

$$E_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (3)$$

设 q_x 为 x 方向的能量传递速率,由傅里叶定律可得:

$$q_x = -\kappa dy dz \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4)$$

则:

$$q_{x+dx} - q_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV \quad (5)$$

同样,其他方向分别为:

$$q_{y+dy} - q_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV \quad (6)$$

$$q_{z+dz} - q_z = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV \quad (7)$$

由此,根据能量守恒定律,可以得出热扩散方程^[13]:

$$E_{in} - E_{out} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (8)$$

整理式(8)可得:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

式中: T 表示温度; t 表示时间; κ 表示导热系数;

ρ 表示密度; c_p 表示比热容; $\frac{\kappa}{\rho c_p}$ 表示热扩散率。

1.1.3 湿仿真机理

目前,市面上的仿真软件均不具备湿气扩散仿真功能,拟用类比的方法实现湿扩散仿真。由上文的分析可知,水分子扩散和热扩散理论方法相似,但是相比于温度连续性扩散,湿气扩散因为材料的饱和吸湿浓度(C_{sat})不同,在不同材料的传递界面不连续,如图2所示。

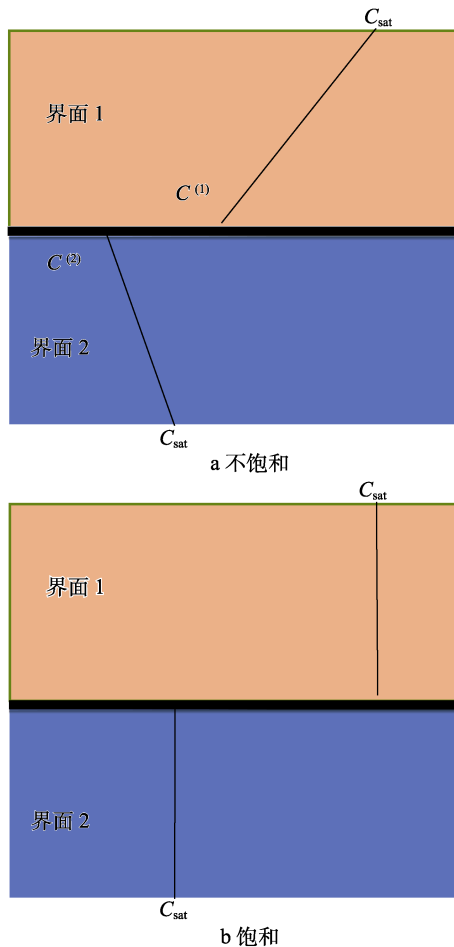


图2 界面和体内湿气分布

Fig.2 Interface and moisture distribution in the body:
a) unsaturation; b) saturation

引入了相对湿度 W 来解决界面传递不连续问题^[14]:

$$W = C / C_{sat} \quad (10)$$

当 $W=0$ 时,表示外界湿气浓度为0,处于干燥状态;当 $W=1$ 时,表示材料被湿气浸透,材料达到其饱和湿气值。基于水分扩散方程,此时相对浓度的扩散方程表征为:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad (11)$$

由式(11)与热扩散方程类比,只要将湿扩散与热扩散变量等价替换,就可用现有有限元仿真软件实现湿扩散模拟^[15],模拟量替换见表1。

表1 参数对应关系
Tab.1 Parameter correspondence

特征参数	热扩散参数	湿扩散参数
场变量	温度 T	湿度 W
扩散系数	K	$D \cdot C_{sat}$
密度	ρ	1
比热容	c_p	C_{sat}

1.1.4 湿-热-机械耦合机理

假设原始产品出厂时的温度为产品的固有温度 T_0 ,该温度下产品各部分材料所受温度产生的应力和变形都为0。当温度发生变化,由于产品各部分材料受温度而产生的形变影响不同,表征为各材料的热膨胀系数 α 就会不同。当温度为 T 时,各部分产生的热应变 ε_t 可表示为:

$$\varepsilon_t = \alpha(T - T_0) \quad (12)$$

式中: ε_t 为热应变; α 为热膨胀系数; T 为外界环境温度; T_0 为材料固有温度。

湿气引起的膨胀变形称为湿应变,与热应变相似,湿应变由湿膨胀系数(CME)决定,它定义为材料的应力与湿度之比。湿膨胀的表示方法^[16]:

$$\varepsilon_c = \beta \cdot C = \beta \cdot C_{sat} \cdot W \quad (13)$$

式中: ε_c 为湿变形; β 为吸湿膨胀系数; C 为湿气浓度; C_{sat} 为饱和吸湿浓度; W 为相对湿度。

为了得到湿-热-机械耦合应变,选用线性弹性分析,将湿应变看作热应变的附加应变值,通过叠加湿、热应变,可得到湿-热-机械耦合应变^[17]:

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_c = \alpha \cdot \Delta T + \beta C = (\beta C / \Delta T + \alpha) \cdot \Delta T \quad (14)$$

因此,可以定义参数 α^* 替代 α 来进行湿-热-机械应力的有限元仿真:

$$\alpha^* = \beta C / \Delta T + \alpha \quad (15)$$

1.1.5 仿真计算流程

1) 模型建立。建立如图3所示的产品全模型,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;

中部由 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保机构和外壳。

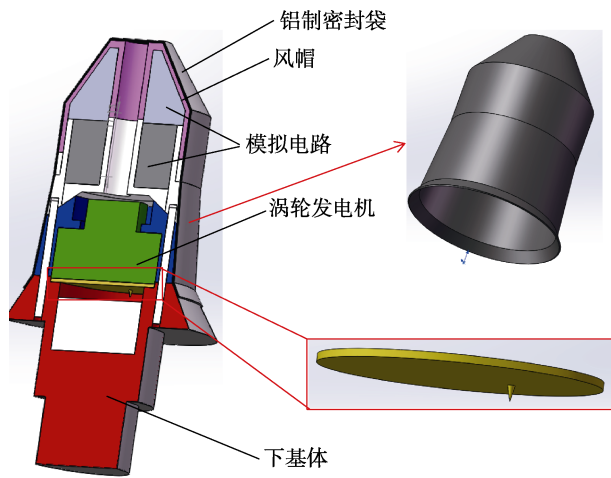


图 3 某型引信模型
Fig.3 Model of a certain type of fuze

2) 网格划分。为了获得更高的网格质量,提高结果精确度,同时保证收敛和合理的计算时间,整体采用高平滑六面体网格,如图 4 所示。全局网格最大单元边长为 5 mm,最小单元边长为 2 mm,单位平均质量为 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。

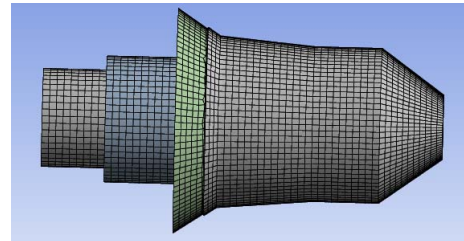


图 4 网格划分
Fig.4 Meshing

3) 材料参数。某型引信上各构件的材料类型见表 2,材料的热特性参数见表 3^[18-19],湿特性参数见表 4^[20-21],结构力学特性参数见表 5。

表 2 各构件的材料类型
Tab.2 Material type for each part

构件	风帽	电子头(灌封)	涡轮发电机	解保机构
材料类型	塑料	环氧树脂	塑料	塑料
构件	连接螺钉	击针	下壳体	固定环
材料类型	结构钢	钢	硬铝	硬铝

表 3 材料的热特性参数
Tab.3 Thermal characteristic parameters of material

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

表 4 材料的湿特性参数
Tab.4 Wet characteristic parameters of material

材料	湿扩散系数 D/(m ² ·s ⁻¹)	湿膨胀系数/(m ³ ·kg ⁻¹)	饱和吸湿参数 C _{sat} /(kg·m ⁻³)
铝	1.505×10 ⁻²⁰	6.2×10 ⁻⁶	2.17×10 ⁻⁴
环氧树脂	15.139×10 ⁻¹³	3.841×10 ⁻⁴	5.20
工程塑料	2.3×10 ⁻¹²	8×10 ⁻⁵	5.4
结构钢	1.11×10 ⁻²¹	1.2×10 ⁻⁷	4.43×10 ⁻⁶

表 5 材料的结构力学特性参数
Tab.5 Mechanical characteristic parameters of material structure

材料	密度 ρ/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比
铝	2 689	72	0.33
环氧树脂	1 840	20.4	0.11
工程塑料	950	1.1	0.42
结构钢	7 850	200	0.3

4) 边界条件。为了较好地模拟该产品在高温高湿环境下的变化,分析其薄弱部件,仿真设置环境条件采用“双 85”试验条件,即环境温度为 85 °C,相对湿度为 85%,初始温度为 22 °C,初始相对湿度为 0,仿真时长为 1 h,螺钉为固定支撑。

5) 仿真流程。本方案利用 ANSYS workbench 模拟,先分别对产品进行湿和热的扩散分布仿真,再分别计算其湿应力和热应力,最后耦合 2 个应力结果^[20]。流程如图 5 所示。

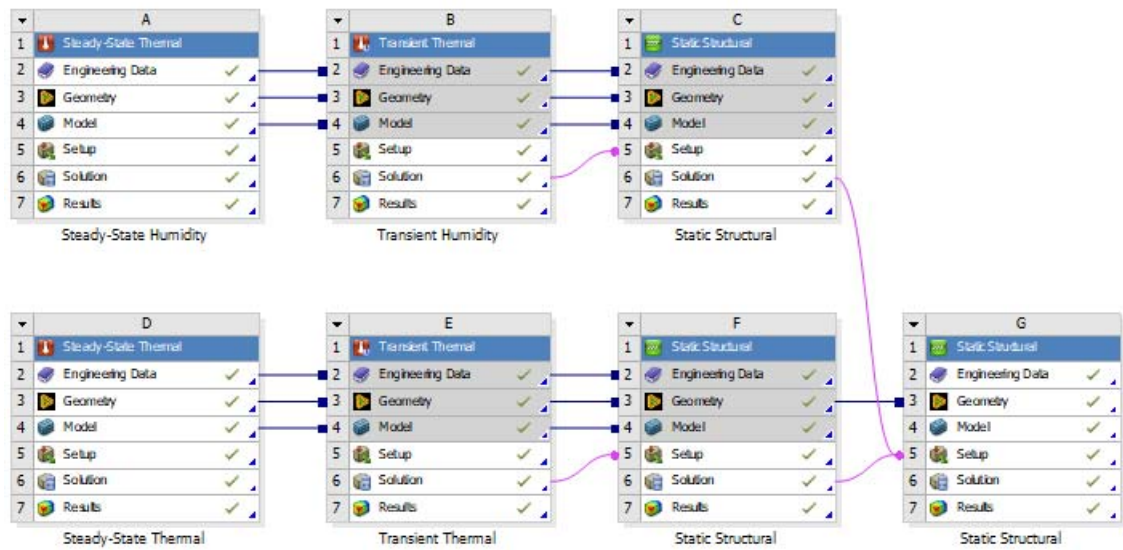


图 5 湿热耦合仿真流程

Fig.5 Simulation of moist-thermal coupling

1.2 加速寿命计算模型

为了短时间内获取产品的寿命参数,一般采用提高温度和湿度的方法来加速老化,加速老化的速率大小用加速因子 $R_{AF}^{[22]}$ 表征:

$$R_{AF} = t_u / t_t \quad (16)$$

式中: t_u 为使用寿命; t_t 为加速条件下的寿命。

1) Arrhenius 加速模型。Arrhenius 模型常用于描述温度加速因子的模型^[23-24]为:

$$R_{AF,T} = \exp(E_a / k) \times (1/T_U - 1/T_A) \quad (17)$$

式中: $R_{AF,T}$ 为温度加速因子; E_a 为活化能; k 为玻尔兹曼常数,取 $k=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; T_U 为正常使用条件下的温度; T_A 为加速条件下的温度。

2) Peck 加速模型。Peck 模型^[25-26]可用于描述湿度加速因子,其模型为:

$$L(H) = AH^{-n} \quad (18)$$

式中: $L(H)$ 为寿命,通常用时间表征; A 、 n 为常数,模型参数之一; H 为相对湿度。

基于上述公式,得到湿度的加速因子计算公式:

$$R_{AF,H} = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{AH_u^{-n}}{AH_A^{-n}} = \left(\frac{H_A}{H_U} \right)^n \quad (19)$$

式中: $R_{AF,H}$ 为湿度加速因子; n 为模型参数,取值一般在 1~5,由腐蚀特性决定; H_U 为使用环境相对湿度; H_A 为加速实验环境相对湿度。

综合上述 2 个加速模型,可以得到温湿度双应力加速模型。假设温度和湿度所导致的失效机理相对独立,将 2 个模型相乘来获得温湿度双加速模型:

$$R_{AF} = R_{AF,H} \times R_{AF,T} = \left(\frac{H_A}{H_U} \right) \times e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (20)$$

2 结果及分析

在“双 85”条件下,对产品进行了 1 h 的湿气和温度扩散的仿真,加速时间为 1 h,实际自然条件下的试验数据见表 6。由计算可知,“双 85”下对该产品进行 1 h 的湿热加速,相当于自然条件下,放置 8.5 d。

产品内部相对湿度和温度扩散的云图如图 6 和图 7 所示。由图 6、图 7 可知,湿传递过程表现出不均匀的扩散,且相对湿度传递最小为 0,表现为材料不吸湿,相对湿度传递最大为 85%,最小和最大差距

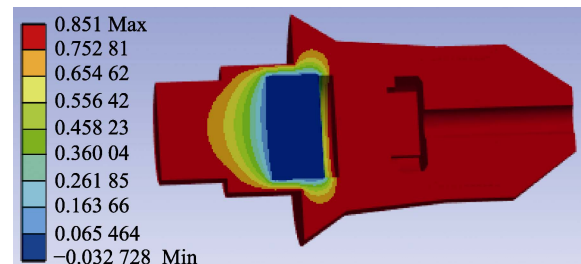


图 6 某型引信内部相对湿度分布云图
Fig.6 Cloud of relative humidity distribution inside a type of fuze

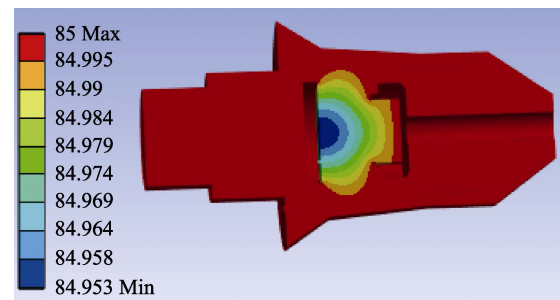


图 7 某型引信内部温度分布云图
Fig.7 Cloud of temperature distribution inside a type of fuze

大,说明湿扩散梯度明显。热扩散1h后,内部扩散温度梯度小于0.1,可认为热扩散完全浸透产品。

分别将产品温度场和湿度场与静态力学场耦合,计算热应力和湿应力对产品各部位的影响,以此分析应力集中和变形集中部位,结果如图8所示。从图8a、b可知,在模拟湿热环境中,热应力和变

形主要集中在产品的涡轮电机外壳、涡轮电机扇叶尖端以及底部线路对接板处。图8c、d示出了基于湿度场的湿应力和变形分布,湿应力主要集中在涡轮电机处。

高湿和热的耦合作用下,湿热应力和变形主要集中在风帽尖端、涡轮电机和线路对接板处,如图9所

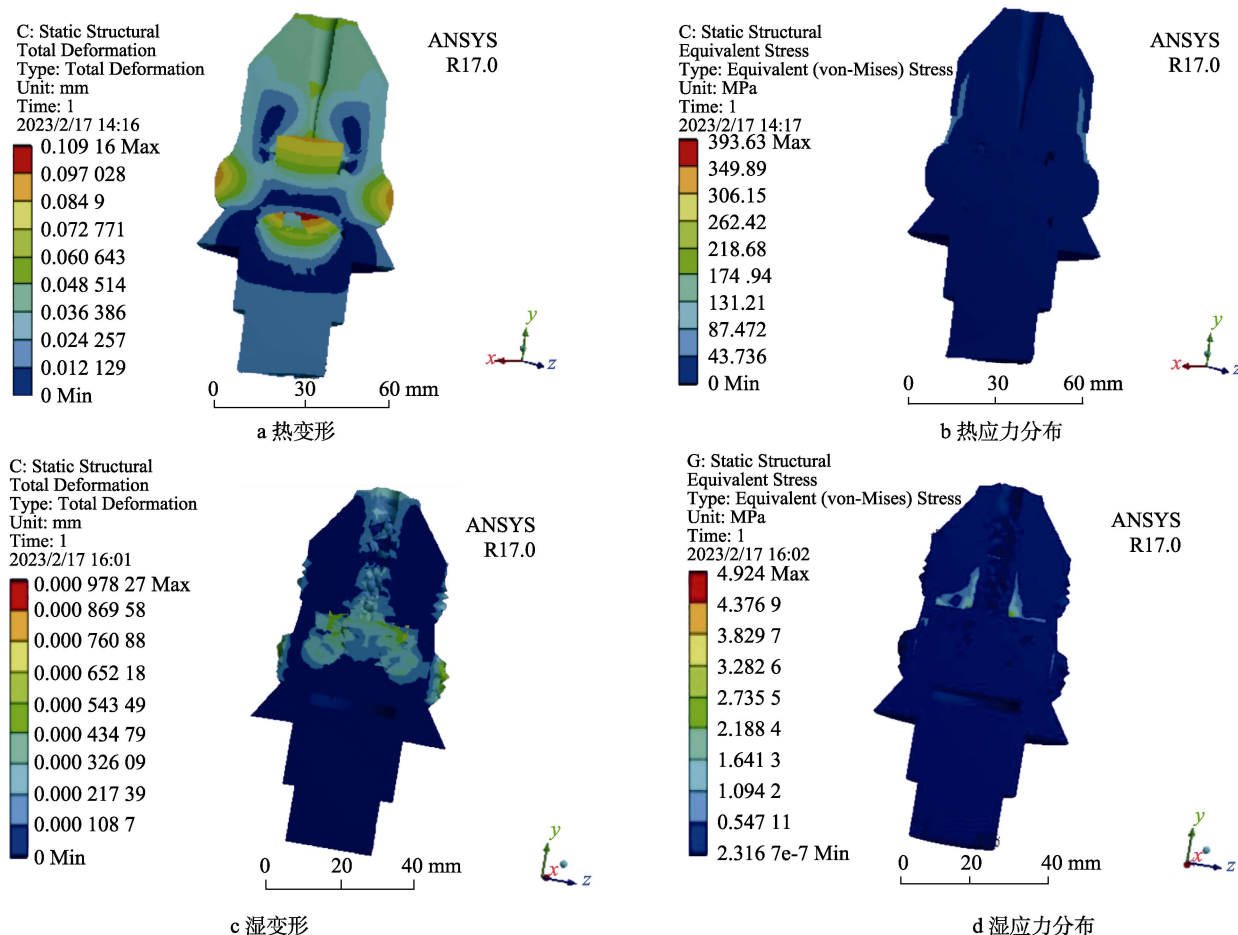


图8 某型引信湿、热变形与应力集中云图

Fig.8 Moist-thermal deformation and stress concentration cloud of a certain type of fuze: a) thermal deformation; b) thermal-stress distribution; c) moist deformation; d) moist-stress distribution

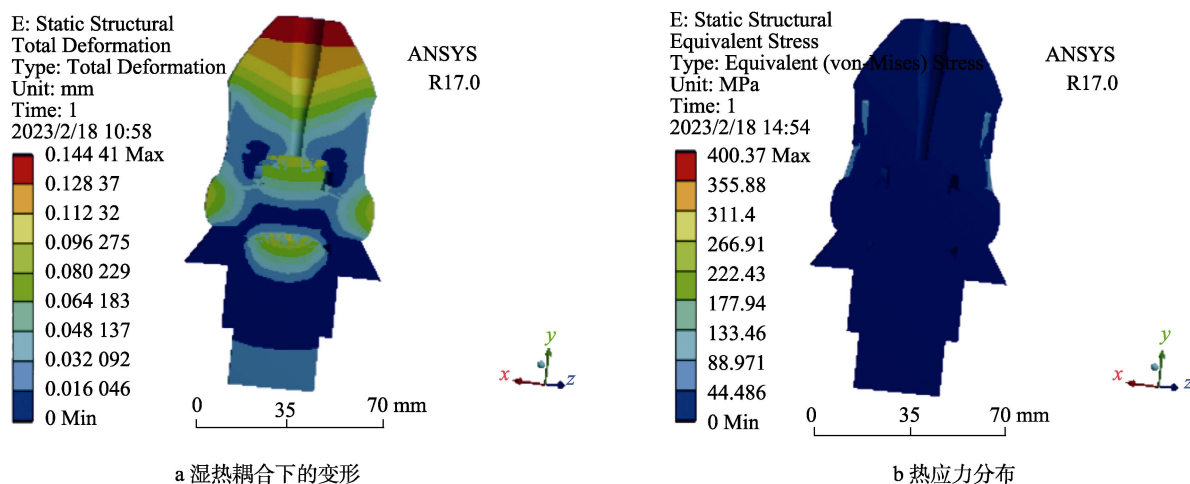


图9 某型引信湿热耦合变形与应力集中云图

Fig.9 Thermally coupled deformation and stress concentration cloud of a certain type of fuze: a) deformation under moist-thermal coupling; b) thermal-stress distribution

示。从上述仿真结果还可以看出, 热导致引信形变最大约为 0.11 mm, 最大平均应力集中在涡轮电机外壳处, 约 15 MPa, 而单独的湿导致的引信变形量较低, 约 0.000 9 mm, 最大平均应力集中在涡轮电机外壳处, 约 3 MPa。由两者应力集中对比可知, 温度导致引信应力集中影响的占比大, 达到 83.3%, 湿度导致引信应力集中影响占比较小, 约为 16.7%。

通过上述对产品整体的应力集中和变形分析, 确定该产品在高温高湿环境下容易产生失效的部位在

涡轮电机外壳、线路对接板以及涡轮尖端, 下面对这些地方放大应力和形变仿真, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 涡轮电机外壳的螺钉连接处受到其两边由于湿热膨胀变形而产生的拉应力作用而可能产生裂纹、裂孔等故障。涡轮尖端实际为细小曲形扇叶, 扇叶尖端本身强度较低, 抗弯曲能力弱, 受到湿热膨胀后, 尖端可能产生移位、弯曲变形等故障。线路对接板下固连着发火击针, 线路对接板在湿热影响下发生变形, 如中部下凹等, 会严重影响发火击针的作用效能。

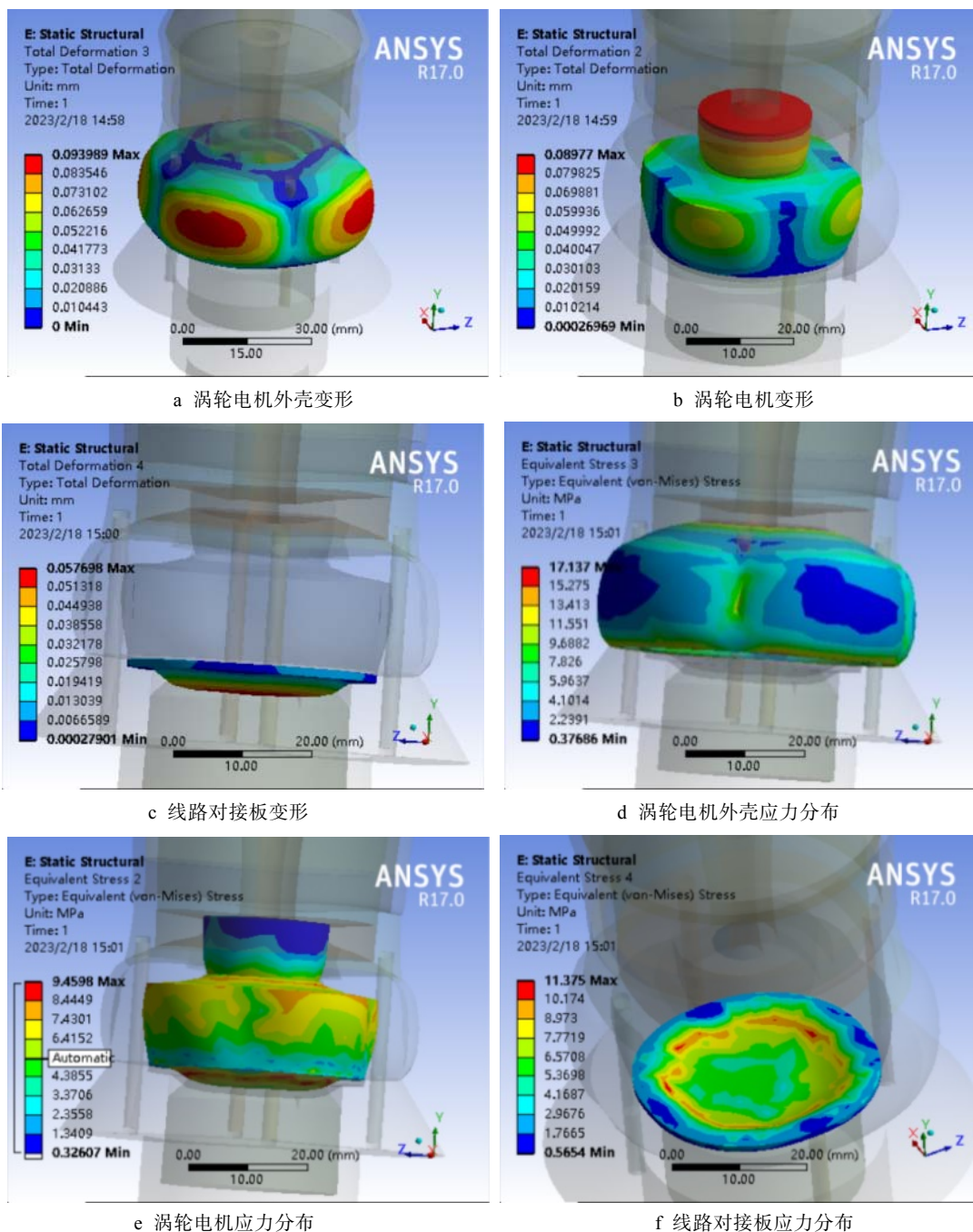


图 10 某型引信薄弱部件变形和应力集中云图

Fig.10 Deformation and stress concentration cloud of weak parts of a certain type of fuze: a) turbine motor housing deformation; b) turbine motor deformation; c) deformation of circuit docking plate; d) stress distribution of turbine motor housing; e) stress distribution of turbine motor; f) stress distribution of circuit docking plate

真实产品生产后,由铝制密封袋密封保存在仓库,在试验前从仓库内取出,试验分2批次,分别在北方和南方试验。放置1周后,北方批次开包后未见引信异常,在南方当地(此地气温和相对湿度分别为25℃和85%)开包后,部分产品如图11所示。可以看出,涡轮电机外壳出现了约15 mm长的表面裂纹,该裂纹呈张开型^[27]。由于南北差异主要表现为气温和湿度,因此这与高温高湿仿真结果中涡轮外壳应力和变形集中一致,很好地验证了仿真方法的可行性。



图11 某型引信真实样品缺陷

Fig.11 Illustration of a real sample defect of a type of fuze

3 结论

1) 基于Fick第二定律,类比温度扩散和热-机械耦合仿真方法,建立了湿传递、湿-机械耦合以及湿-热-机械耦合的仿真方法。

2) 以广西某地贮存的产品为研究对象,计算了其在“双85”加速试验条件下,1 h后的各部位应力集中和变形情况。产品由于湿热耦合产生大形变量和应力集中的部位分布在涡轮电机外壳、涡轮电机口和下部粘接的线路对接板,各部位形变分别为0.19、0.08、0.05 mm左右,内部上升引起的最大拉伸应力分别为17、9.5、11 MPa左右。

3) 基于广西真实贮存的产品,与北方开包样品相比,南方的样品中发现了引信涡轮外壳处出现约15 mm张开型裂纹。南北环境差异主要表现为高温高湿,这与仿真条件和结果都高度一致,以此验证了仿真方法的可行性和准确性。

本文研究所用的湿-热-耦合仿真模型未考虑温度对湿度的影响,这将导致仿真结果与实际情况之间的匹配存在一定的局限性,未来可将此影响纳入考虑,使仿真模型更加精确计算现实问题。

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] 石建康, 汪锐. 常规弹药与引信技术发展趋势[J]. 国防技术基础, 2003(5): 42.
SHI Jian-kang, WANG Rui. Development Trend of Conventional Ammunition and Fuze Technology[J]. Technology Foundation of National Defence, 2003(5): 42.
[3] 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 Electromechanical Fuze Components Based on Performance Degradation[J]. Journal of Detection & Control, 2022, 44(3): 17-21.
[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] 杜道忠, 陈新, 王智勇, 等. 高潮湿环境下电力设备绝缘材料劣化分析[J]. 电工技术, 2021(3): 149-150.
DU Dao-zhong, CHEN Xin, WANG Zhi-yong, et al. Analysis on Deterioration of Insulation Materials of Power Equipment in High Humidity Environment[J]. Electric Engineering, 2021(3): 149-150.
[6] 张晋华, 闻泉, 王雨时, 等. 火炮发射膛内高温对弹底引信的影响[J]. 火箭与控制学报, 2016, 36(1): 77-81.
ZHANG Jin-hua, WEN Quan, WANG Yu-shi, et al. Effect of High-Temperature Propellant Gas in Bore on Base Fuze of Projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(1): 77-81.
[7] 王晓峰. 引信膛内动力过程的理论与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
WANG Xiao-feng. Theoretical and Applied Research on Dynamic Processes in Fuze Chambers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.
[8] 周浪. 触发引信弹道炸故障成因及机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
ZHOU Lang. Research on the cause and mechanism of trigger fuze ballistic explosion failure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
[9] 赵榆轩. 长期贮存后引信质量分析[J]. 兵工学报(引信分册), 1984, 6(1): 8-11.
ZHAO Yu-xuan. Quality Analysis of Fuze after Long-Term Storage[J]. Journal of Detection & Control, 1984, 6(1): 8-11.
[10] 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.
[11] SU Yun, LI Jun, ZHANG Xiang-hui. A Coupled Model for Heat and Moisture Transport Simulation in Porous Materials Exposed to Thermal Radiation[J]. Transport in

- Porous Media, 2020, 131(2): 381-397.
- [12] ZHANG G Q, van DRIEL W D, FAN X J. Mechanics of Microelectronics[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2006.
- [13] BERGMAN T L A S. Introduction to Heat Transfer[M]. 6th Edition, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [14] WONG E H, RAJOO R. Moisture Absorption and Diffusion Characterization of Packaging Materials—Advanced Treatment[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(12): 2087-2096.
- [15] SHARMA J, TEWARI K, ARYA R K. Diffusion in Polymeric Systems—a Review on Free Volume Theory[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 111: 83-92.
- [16] LUO Xiao-bing, WU Bu-long, LIU Sheng. Effects of Moist Environments on LED Module Reliability[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2010, 10(2): 182-186.
- [17] WANG Yan-lei, ZHU Jin-song, SUN Ya-dan. Multi-Scale Modeling and Simulation of Bidirectional Coupled Moisture and Heat Transfer in Concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 74: 106856.
- [18] 郑俊旺, 马贵春, 王政, 等. 6061 铝合金增材制造温度场仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 209-215.
- ZHENG Jun-wang, MA Gui-chun, WANG Zheng, et al. Simulation of Temperature Field in 6061 Aluminum Alloy Additive Manufacturing[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 209-215.
- [19] 周洲, 巨嘉璐, 魏要伟, 等. 先进复合材料格栅结构力学性能仿真分析[J]. 塑料工业, 2014, 42(12): 123-126.
- ZHOU Zhou, JU Jia-lu, WEI Yao-wei, et al. Simulation Analysis for Mechanical Performance of Advanced Composite Grid Structures[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(12): 123-126.
- [20] ZHANG Qiang, PAN Kai-lin. Analysis of the Effect of Hygrothermal Stress on Delamination of Plastic Sealed Devices[C]// 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Dalian: IEEE, 2022.
- [21] TANG Hong-yu, YANG D G, ZHANG G Q, et al. Multi-Physics Simulation and Reliability Analysis for LED Luminaires under Step Stress Accelerated Degradation Test[C]// 2012 13th International Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Cascais: IEEE, 2012.
- [22] MOURA E C. A Method to Estimate the Acceleration Factor for Subassemblies[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 396-399.
- [23] ARRHENIUS S. Über Die Dissociationswärme Und Den Einfluss Der Temperatur Auf Den Dissociationsgrad Der Elektrolyte[J]. Zeitschrift Für Physikalische Chemie, 1889, 4U(1): 96-116.
- [24] LIBRE T C. The Arrhenius Law-Activation Energies[C]// 2013 International Conference on Electronic Packaging Technology. [s. l.]: IEEE, 2022.
- [25] 李芳, 张蕊, 张晶鑫, 等. 火工品温湿度加速老化模型和算法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 1-6.
- LI Fang, ZHANG Rui, ZHANG Jing-xin, et al. Research on Accelerated Aging Model and Algorithm of Temperature and Humidity of Initiators & Pyrotechnics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 1-6.
- [26] ESCOBAR L A, MEEKER W Q. A Review of Accelerated Test Models[J]. Statistical Science, 2006, 21(4): 552-577.
- [27] 李茜, 赵全成, 陈星昊, 等. 改性塑料在典型自然环境中的老化现象研究[J]. 环境技术, 2020, 38(5): 45-51.
- LI Qian, ZHAO Quan-cheng, CHEN Xing-hao, et al. Study on Aging Phenomena of Modified Plastics in Typical Climates[J]. Environmental Technology, 2020, 38(5): 45-51.

责任编辑: 刘世忠