

极端温度条件典型引信电参数变化规律和失效机理

李波¹, 张宏翔², 李世中¹, 张亚¹

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051;

2. 晋西工业集团有限责任公司 防务装备研究院, 太原 030027)

摘要: **目的** 研究某电子时间引信在-60~140℃下电参数的变化规律和失效机理。**方法** 利用高低温试验机开展步进应力强化试验, 增加和细化引信检测参数, 在被试引信工作状态下全程记录电参数的变化, 开展失效机理分析。**结果** 得到了引信基准频率、电能损耗率等电参数的温度特性规律和参数变化范围, 发现了-60℃低温掉电、130℃高温短路等故障模式和机理, 并提出改进建议。**结论** 验证了极端温度应力叠加电应力的强化试验方法, 获得了引信电性能参数变化规律, 发现了极端温度条件下新的失效模式和失效机理。

关键词: 极端温度条件; 典型引信; 电参数; 失效机理; 低温掉电; 高温短路; 导线破损

中图分类号: TJ430

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0034-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.005

Electrical Parameters Change Law and Failure Mechanism of Typical Fuze under Extreme Temperature Conditions

LI Bo¹, ZHANG Hong-xiang², LI Shi-zhong¹, ZHANG Ya¹

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Defense Equipment Research Institute, Jinxi Industrial Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

ABSTRACT: The paper intends to study the change rule of electrical parameters and the failure mechanism of an electronic time fuze at -60~140℃. Through the high and low-temperature testing machine, to carry out the step stress reliability enhancement test, add and refine tested parameters, record the changes of electrical parameters in the whole process under the working condition of the tested fuze, and carry out the failure mechanism analysis. The test concluded the temperature characteristic law and parameter variation range of electrical parameters such as fuze reference frequency and power loss rate, found the fault mode and mechanism of sudden voltage drop at -60℃ and short circuit at 130℃, and put forward the improvement suggestions. The test verifies the intensified test method of extreme temperature stress and electric stress, obtains the change rule of fuze electrical performance parameters, and finds the new failure mode and failure mechanism under extreme temperature

收稿日期: 2022-10-18; 修订日期: 2022-11-10

Received: 2022-10-18; Revised: 2022-11-10

基金项目: 武器装备预先研究项目(90903010102)

Fund: Advanced Research Project of Equipment(90903010102)

作者简介: 李波(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为探测与控制技术、弹箭可靠性技术。

Biography: LI Bo(1977-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: detection and control technology, missile and rocket reliability technology.

引文格式: 李波, 张宏翔, 李世中, 等. 极端温度条件典型引信电参数变化规律和失效机理[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 034-040.

I Bo, ZHANG Hong-xiang, LI Shi-zhong, et al. Electrical Parameters Change Law and Failure Mechanism of Typical Fuze under Extreme Temperature Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 034-040.

conditions.

KEY WORDS: extreme temperature conditions; typical fuze; electrical parameters; failure mechanism; low temperature sudden voltage drop; high temperature short circuit; wire damage

引信元器件在极端环境应力下的参数变化会导致引信电参数变化, 甚至引起性能失效、弹道炸、瞎火等严重后果^[1-6]。其中, 温度是造成引信在工作过程中失效的重要原因^[7-9], 而引信在野外战备状态或发射时可能遭受极端温度应力。我国极端最低温度记录在 $-50 \sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10-11], 弹底引信在膛内发射过程中引信外壳温度最高可达 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12-17]。因此, 研究典型引信在极端温度应力叠加电应力条件下的有效试验方法和测试方法, 对揭示引信在恶劣工作环境中的失效机理, 保证引信产品高可靠性要求的实现有着重要意义^[18-19]。

1 典型引信高低温强化试验

1.1 典型引信概述

被试引信为发射前开始供电的时间固定型电子时间引信, 在发射过程中需对引信二级电源(储能电容)快速感应充电, 经过固定延时, 点火电路输出点火脉冲, 引爆传爆序列。其电路由整流稳压模块、二级电源储能模块、RC 振荡电路模块、数字定时模块、点火电路模块组成, 所使用的元器件封装形式包括表面贴装和分立元件, 其模块电路、使用的元器件以及制造工艺具有一定的典型性。

1.2 高低温强应力场模拟

采用 CZ-A 型高低温试验机可实现 $-60 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 任意温度值的设定, 试验箱留有测试孔, 可外接导线进行在线测试。在高低温环境试验中, 2 个热电偶分别置于被试引信的外表面和内部, 同时置于高低温试验机内, 通过热电偶补偿导线与试验机外部的测试系统相连。当 2 个温度传感器与试验机设定温度一致时, 表明引信温度达到试验箱设定温度, 达到测试条件。

1.3 在线测试方法

在实验过程中, 利用自主开发的测试系统模拟发射过程的充电脉冲为引信二级电源充电, 同时全程记录引信电参数随时间变化曲线, 自动提取引信电参数, 并输出保存^[20]。

1.4 高低温强化试验方案

试验在常温、标准大气压下进行, 参考厂家对该引信进行的实验室试验项目和测试方法进行试验。

1) 试验样件。随机抽取引信作为样件, 增加测

试接口, 埋入热电偶温度传感器探头, 焊接测试线缆和专用插头, 改装后测试合格。

2) 检测项目。取基准频率、定时时间、点火脉冲、工作电压为被测电参数, 可进一步细化为基准频率、定时时间、初始工作电压、点火时工作电压、点火脉冲初始电压、点火脉冲结束电压、点火脉冲持续时间等被测参数。

3) 试验前性能参数测试。选取改装后的样件, 对其主要电参数进行测试, 并记录样件的初始参数。

4) 试验方法。在高低温试验机可设定的温度极限 $-60 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内进行试验, 将试验样件放入高低温试验机, 对典型引信进行步长为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的步进应力强化试验。在每一阶应力处, 待引信温度达到试验箱设定温度时, 通过外接测试线缆和自主开发的测试系统对箱内引信进行参数测试, 得到电参数随时间变化曲线。

5) 终止判据。 $1/2$ 以上的受试样件达到破坏极限或步进试验应力达到设备极限。

1.5 高低温强化试验操作

采用高低温试验机, 依据引信强化试验的方法和步骤, 在 $-60 \sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内, 对典型引信进行步长为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的步进应力强化试验。在每一阶应力处, 待引信温度达到试验箱设定温度时, 对箱内引信进行参数测试。高低温正式试验中试验样件数为 6 个, 测试系统和被试引信样件分别置于高低温试验机外部和内部, 测试线缆通过高低温试验机测试孔进入高低温试验机内部完成测试, 如图 1 所示。

2 典型引信电参数在高低温条件下变化规律

2.1 典型引信电参数选择依据

电子时间引信验收检测参数为定时时间和点火脉冲峰值电压^[21-23]。对于电子时间引信, 定时时间和基准频率之间一般存在强相关性, 对于靠储能电容供电的引信, 点火脉冲峰值电压与引信工作电压也存在关联关系。为了能揭示引信参数变化机理, 在实验过程中增加了基准频率和工作电压的监测, 以获取更多有价值数据。

由于工作电压曲线为非线性曲线, 曲线上存在多个拐点。为描述其变化情况, 可进一步细化为初始工作电压、点火时工作电压等被测参数, 还可以计算出

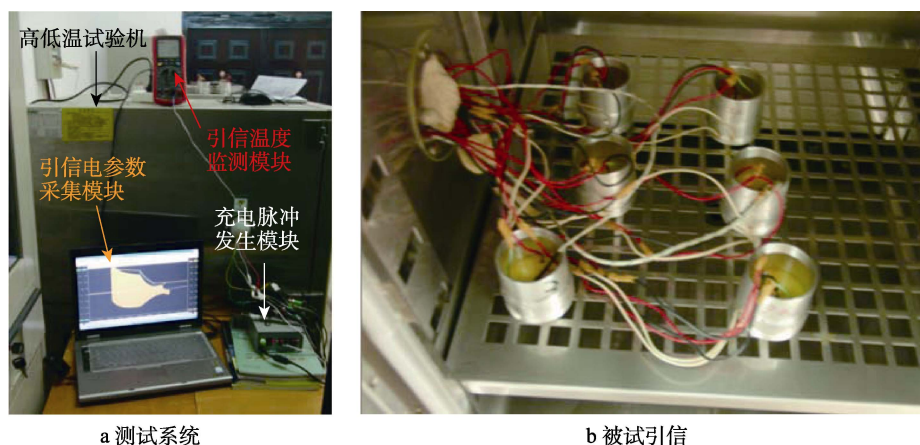


图1 试验中的测试系统和被试引信
Fig.1 (a) Test system and (b) tested fuze

引信电路在点火前的电能损耗率（工作电压下降斜率）等参数。

2.2 引信参数在不同温度条件下变化的表征方法

对于引信特征参数的定量描述和评估,可借鉴电子元器件高低温试验中的描述和评估方法^[24-25]。当参数变化近似线性时,采用温度系数进行表征;当参数变化规律较复杂时,采用温度变化百分率和温度稳定性系数进行描述。

2.2.1 温度系数

当引信电参数 Y 随温度 t 变化,温度稳定性较好,且近似呈线性时,引信电参数是温度的函数。在电参数-温度关系曲线上,任一点的斜率即表示该温度时电参数变化的大小。温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,电参数的相对变化率就称为该电参数的温度系数,即:

$$\alpha_c = \frac{1}{Y} \cdot \frac{dY}{dt} \quad (1)$$

在实际情况下,工程上希望知道某一较宽温度范围内的温度系数。如果电参数 Y 随温度 t 的变化是线性的,则该电参数温度系数可表示为:

$$\alpha_c = \frac{1}{Y_1} \cdot \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: Y_1 为常温 t_1 时的电参数,或负极限工作温度 t_1 时的电参数; Y_2 为正极限工作温度 t_2 时的电参数。

2.2.2 温度变化百分率 $\Delta Y/Y$

对一些随温度变化规律复杂的电参数,可用温度变化百分率表示,即:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Y_1 为常温时的电参数,或负极限工作温度时电参数; Y_2 为正极限工作温度的电参数。

2.2.3 温度稳定性系数

以上讨论的2个参数均为可逆变化情况,即产品从高低温状态恢复到常温状态时,其电参数变化自行消失。当引信电路在工作状态下受到一系列外界因素影响时,还可能引起电参数的不可逆变化。例如,储能电容在极端温度环境下由于介质内部发生物理、化学或电化学变化,使介质的结构性能改变,从而使介电常数发生变化。这些变化一经产生就不再消失,从而引起电容量的不可逆变化。

为了表征电参数不可逆变化的程度,采用稳定性系数,即:

$$\beta_c = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Y_1 为试验前常温时的电参数; Y_2 为经过试验后恢复到常温时的电参数。

2.3 基准频率在高低温条件下变化规律

被试引信基准频率的温度特性是其内部RC振荡回路中所有元器件及材料温度特性的集中体现,如图2所示。在 $-60\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,基准频率 f 相对 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化百分率为 $\Delta f/f < 5\%$,总体呈现非线性。由于该引信定时时间为基准频率的计数,基准频率的变化也

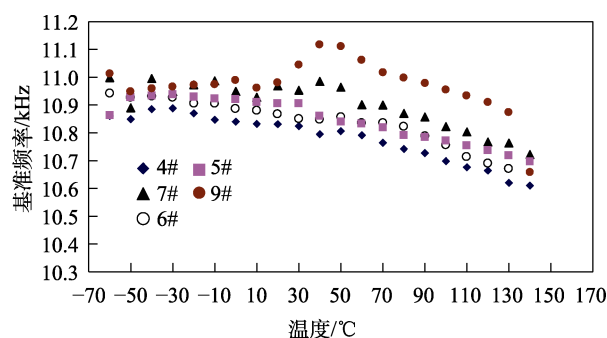


图2 引信基准频率的温度特性曲线
Fig.2 Reference frequency temperature characteristic curve of fuze

决定了定时时间的变化范围。如在 50~140 °C 高温条件下, 随温度升高, 基准频率降低, 定时时间延长。

2.4 电能损耗率在高低温条件下变化规律

被试引信工作电压随时间变化的实测曲线如图 3 所示。充电结束后, 工作电压曲线的第 1 个拐点对应初始工作电压。在引信工作过程中, 随着电能的消耗, 引信工作电压呈近似线性下降, 下降速率可用电能损耗率表示。当到达定时时间, 引信输出点火脉冲, 工作电压曲线的第 2 个拐点对应点火时工作电压。电能损耗率过大易导致点火时工作电压和点火脉冲初始电压过低, 引起引信瞎火。随着温度的升高, 受引信基准频率下降、引信电路中的负温度系数元件在高温条件下功耗下降等综合因素的影响, 引信电能损耗率总体呈现低温高损耗率和负温度系数特性, 如图 4 所示。排除 5#样件粗大误差后, 在损耗率最大的-60 °C, 相对 20 °C 的变化百分率为 9%~35%。

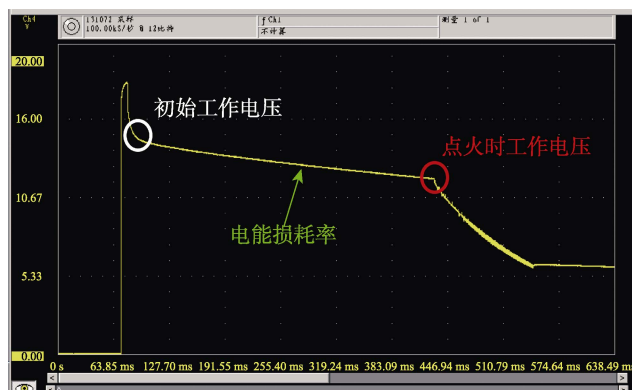


图 3 -60 °C 下 1#样件工作电压随时间变化曲线
Fig.3 Power supply voltage change curve of sample 1 # with time under -60 °C

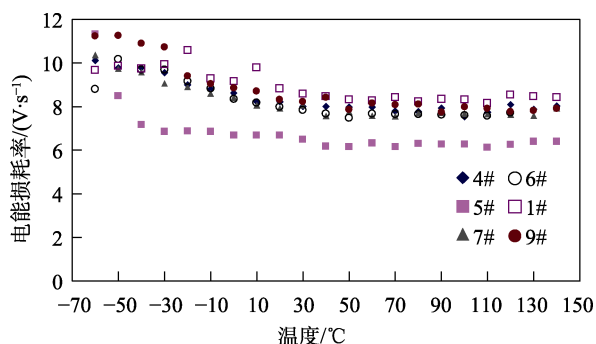


图 4 引信电能损耗率的温度特性曲线
Fig.4 Electric energy loss temperature characteristic curve of fuze

3 典型引信极端温度下故障分析

3.1 低温掉电故障分析

在-60~-30 °C 内, 当 19 V 充电脉冲结束后, 试

验样件的初始工作电压均出现 2~4 V 瞬间压降的掉电故障。由图 3 可见, 在引信充电结束时, 初始工作电压突然降低, 引起引信工作电压和点火电压低于正常值, 引信点火能量不足, 严重时将导致引信点火不充分或瞎火。

经分析发现, 造成“低温掉电”故障原因为: 在外部脉冲电源充电结束后, 型号为 BZX84-18 的 18 V 稳压管在-60 °C 雪崩击穿, 稳压值降为 15~17 V, 稳压管启动, 消耗电能, 低温掉电造成的电压损失在引信工作过程中不能恢复。同时, 随着温度升高, 稳压管稳压值也逐步升高, 其温度系数为 $8 \times 10^{-4} \sim 9.5 \times 10^{-4} / \text{K}$, 而外部脉冲电源最高充电电压为 19~19.5 V 左右。在高温条件下, 稳压管击穿电压高于 19 V, 稳压管处于不导通状态, 此时引信初始工作电压与外部脉冲电源充电电压相等, 如图 5 所示。

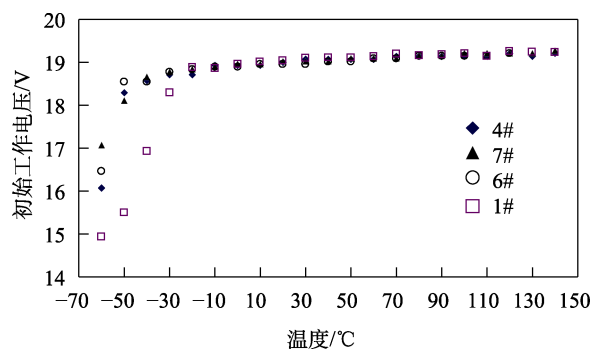
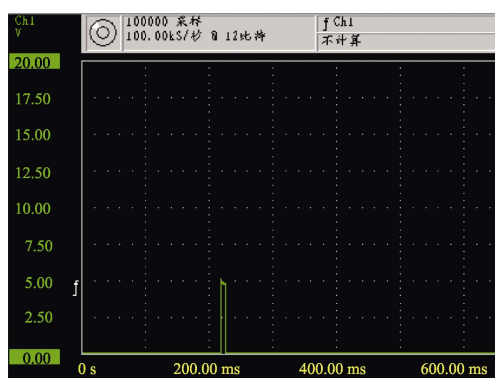


图 5 引信初始工作电压的温度特性曲线
Fig.5 Temperature characteristic curve of initial working voltage of fuze

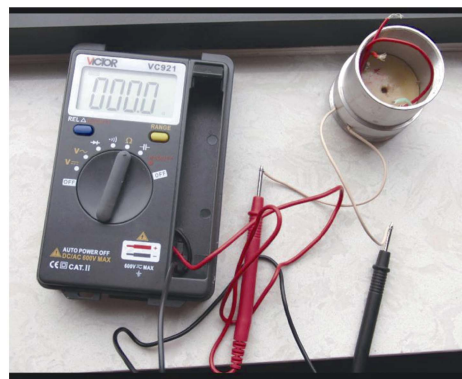
一般稳压管稳压值低于 6 V 属齐纳击穿, 温度升高时, 耗尽层减小, 耗尽层中原子的价电子上升到较高的能量, 较小的电场强度就可以把价电子从原子中激发出来, 产生齐纳击穿, 因此它的温度系数是负的。如 BZX84-C3V6 的 3.6 V 稳压管稳定系数为 $-8 \times 10^{-4} \sim -3 \times 10^{-4} / \text{K}$ 。高于 6 V 的属雪崩击穿, 雪崩击穿发生在耗尽层较宽、电场强度较低时, 温度增加使晶格原子振动幅度加大, 阻碍了载流子的运动。这种情况下, 只有增加反向电压, 才能发生雪崩击穿。因此, 雪崩击穿的电压温度系数是正的。如 BZX84-C15 的 15 V 稳压管稳定系数为 $7 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4} / \text{K}$ 。可将 BZX84-18 的 18 V 稳压管, 换为串联的 2 只 BZX84-C3V3 稳压管和 BZX84-C3 稳压管, 这 2 只稳压管合计稳压值为 17.2~19.4 V。由于其温度系数相反, 通过温度补偿, 达到在高低温条件下得到稳定 18 V 电压的作用^[26]。

3.2 高温短路故障分析

在高低温强化试验过程中, 引信在低温极限-60 °C 仍能正常工作, 但在高温 (130~140 °C) 条件时, 出现确定性故障, 如图 6a 所示。1#、3#、9#、6#样件 2 条外部充电导线之间呈现低阻和短路特性,



a 故障充电脉冲信号



b 充电线之间短路

图 6 1#、3#、9#、6#样件对应的故障充电脉冲信号和充电线之间短路

Fig.6 (a) 1#, 3#, 9#, 6# samples corresponding to the fault charging pulse signal and (b) the charging line short circuit

充电脉充峰值由正常状态的 19 V 降为 5 V, 引信电路不上电, 不工作。

对于故障引信, 测量引信 2 根充电导线以及充电导线和外壳之间的电阻值均近似为 0, 存在短路现象, 如图 6b 所示。由此可确定短路位置为充电导线穿过引信外壳的引线孔处。通过解剖和显微分析发现, 被试引信铝合金外壳引线孔内没有经过绝缘处理, 而充电导线的绝缘层为耐温 80 °C 的聚氯乙烯, 在高温条件下有热缩现象, 同时引信外壳受热膨胀, 在 130~140 °C 时产生的热应力将充电导线绝缘层从引线孔附近拉断, 导致绝缘层破损, 导线与引信壳体接触短路。在图 7 中可看到充电导线绝缘层断裂, 金属导线露出。在实际工作过程中, 该故障会引起引信不上电和瞎火。在对该引信 0.22 mm² 聚氯乙烯充电导线进行验证试验时, 复现了该故障: 120 °C 保温 3 h 后, 聚氯乙烯绝缘外套由 10 cm 缩短至 9.8 cm; 140 °C 保温 3 h 后, 聚氯乙烯绝缘外套缩短至 9.5 cm。

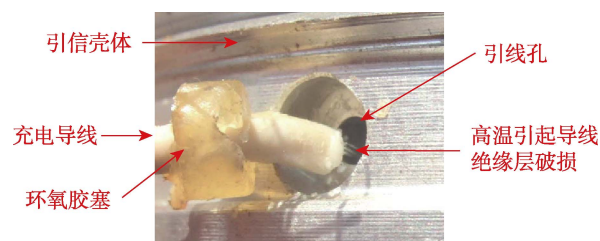
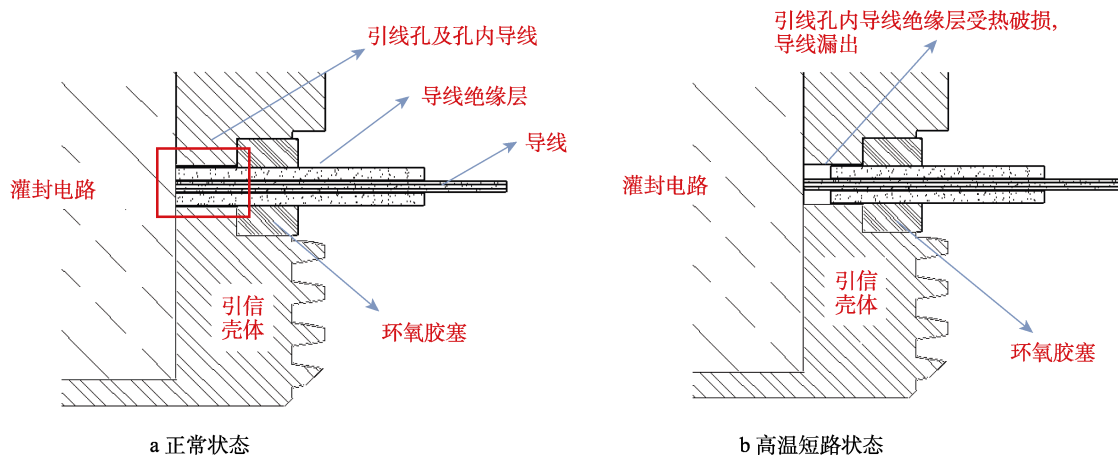


图 7 充电导线高温短路失效照片

Fig.7 Photo of high temperature short circuit failure of power line

故“高温短路”所对应的失效机理和解决方法如下: 在 130~140 °C 时, 引信外壳受热膨胀, 充电导线绝缘层受热收缩, 由于环氧胶塞和灌封电路将充电导线两端固定, 引线孔位置的导线绝缘层受热变形破损, 金属导线与引信壳体接触短路, 如图 8 所示。可通过换用耐高温硅胶导线, 或引线孔内涂覆阻焊油墨的工艺方法解决该故障。



a 正常状态

b 高温短路状态

图 8 正常状态与高温短路状态

Fig.8 (a) Schematic diagram of normal state and (b) high temperature short circuit state

4 结语

在实验室试验中模拟引信极端温度下的工作过

程, 实现了“电应力+极端温度应力”的叠加。为研究引信电参数变化规律, 构建了实验室模拟平台和试验方法。通过增加和细化引信检测参数, 为引信失效

分析提供丰富多样的数据依据。

本文得出的引信电参数测试和试验方法、极端温度条件下参数变化规律、 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温掉电、 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温短路等新的故障模式和故障机理,为电引信总体设计、测试、故障分析和引信电子元器件、电子材料选型与应用提供参考。

参考文献:

- [1] 何荣华, 张亚, 李波, 等. 高过载下军用电容的参数变化研究及失效分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(1): 24-26.
HE Rong-hua, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Parametric Variation and Failure Analysis of Military Capacitors under High Overload[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2010, 28(1): 24-26.
- [2] 李波, 张亚, 徐建军, 等. 固钽电容在甚高温条件下参数变化机理[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(10): 921-923.
LI Bo, ZHANG Ya, XU Jian-jun, et al. Parameters Variation Mechanism of Solid Electrolytic Tantalum Capacitors in very High Temperatures[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 921-923.
- [3] 李长龙, 高世桥, 牛少华, 等. 高冲击下引信用固态钽电容的参数变化[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 419-425.
LI Chang-long, GAO Shi-qiao, NIU Shao-hua, et al. Parameters Variation of Solid Tantalum Capacitors Used in Fuze under High-Gshock[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 419-425.
- [4] 吴双, 朱贺花, 方辉. 片式钽电容短路失效故障分析及改进[J]. 电子质量, 2022(9): 37-40.
WU Shuang, ZHU He-hua, FANG Hui. Analysis and Improvement of Chip Tantalum Capacitor Short Circuit Failure[J]. Electronics Quality, 2022(9): 37-40.
- [5] 陈真, 肖应锋. 某火箭弹开仓后未正常布放原因分析及改进[J]. 电子世界, 2017(17): 33-34.
CHEN Zhen, XIAO Ying-feng. Failure Analysis without Ignition after Separation and Improvement for some Rocket Projectile[J]. Electronics World, 2017(17): 33-34.
- [6] 徐瑞, 智小琦, 于永利, 等. 热刺激下不同结构引信的响应机理[J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 127-137.
XU Rui, ZHI Xiao-qi, YU Yong-li, et al. Response Mechanism of Fuse with Different Structures under Thermal Stimulation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(5): 127-137.
- [7] 潘文庚. 温度和电磁环境对航弹失效影响分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
PAN Wen-geng. Study of the Temperature and Electromagnetic Environment on the Failure of Aerial Ammunition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [8] 李豪杰. 引信环境分析、测试与迫弹引信安全系统设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
LI Hao-jie. The Research of Fuze Environment Analysis and Measurement and Safety System Design for Mortar Fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [9] 路浩天, 卢晓青, 蔡良续. 塑封电子元器件温度失效机理研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 36-39.
LU Hao-tian, LU Xiao-qing, CAI Liang-xu. Study on Temperature Effect of Plastic Encapsulated Microcircuit[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 36-39.
- [10] 高超越, 袁梅, 顾岩梅, 等. 浅析根河市的寒冷程度[J]. 内蒙古气象, 2017(5): 35-37.
GAO Chao-yue, YUAN Mei, GU Yan-mei, et al. Briefly Analysis on the Cold Degree of Genhe City[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2017(5): 35-37.
- [11] 高庆九, 周小艳. 中国冬季最低气温观测与再分析资料的比较[J]. 气象科学, 2017, 37(3): 368-375.
GAO Qing-jiu, ZHOU Xiao-yan. Intercomparison of Winter Minimum Temperature between Observations and Reanalysis Datasets in China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(3): 368-375.
- [12] 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]. 弹箭与制导学报, 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.
- [13] 刘维维, 张亚, 李波, 等. 基于有限元分析的电子部件热应力仿真方法[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(2): 45-50.
LIU Wei-wei, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Thermal Stress Simulation of Fuze Electronic Components Based on Finite Element Analysis[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(2): 45-50.
- [14] 何君道, 闻泉, 荣竹, 等. 弹底引信底部零件膛内热-结构耦合特性[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(6): 13-17.
HE Jun-dao, WEN Quan, RONG Zhu, et al. In-Bore Thermal Structural Coupling Characteristic of Base Fuze's Bottom[J]. Journal of Detection & Control, 2013, 35(6): 13-17.
- [15] 齐杏林, 余春华, 高敏, 等. 引信风帽内表面温度分布的快速数值计算[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(1): 16-19.
QI Xing-lin, YU Chun-hua, GAO Min, et al. Fast Numerical Simulation of Fuze False Cap Inner Surface Temperature Distribution[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(1): 16-19.
- [16] 薛超阳. 引信及其等效构件的慢烤特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
XUE Chao-yang. Study on Slow Cook-off Characteristics of Fuze and Its Equivalent Components[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [17] 蒋超. 引信在烤燃环境下的不敏感性能研究[D]. 南京:

- 南京理工大学, 2019.
- JIANG Chao. Study on Insensitive Performance of Fuze in Burning Environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [18] 何荣华, 张亚, 李波, 等. 军用电子元件的可靠性强化试验方案研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(18): 5460-5464.
- HE Rong-hua, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Research Program of Reliability Enhancement Test about Military Electronic Components[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(18): 5460-5464.
- [19] 范志锋, 齐杏林, 雷彬, 等. 可靠性强化试验及其在引信中的应用[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(6): 8-11.
- FAN Zhi-feng, QI Xing-lin, LEI Bin, et al. Reliability Enhancement Test and Its Application to Fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(6): 8-11.
- [20] 王冠, 李波, 张亚. 基于虚拟仪器的引信定时器测试系统[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(5): 57-61.
- WANG Guan, LI Bo, ZHANG Ya. Fuze Timer Measuring System Based on Virtual Instrument[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(5): 57-61.
- [21] 李晨, 陈曦, 王闯, 等. 基于压电加速度计的电子时间引信计时起点确定方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 8-15.
- LI Chen, CHEN Xi, WANG Chuang, et al. A Method for Determining Timing Starting Point of Electronic Time Fuze Based on Piezoelectric Accelerometer[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S2): 8-15.
- [22] 吕晓珂, 张小禄, 刘国华. 一种提高电子时间引信定时精度的方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2011, 32(3): 23-26.
- LV Xiao-ke, ZHANG Xiao-lu, LIU Guo-hua. Research on a Method of Improving ETF Timing Accuracy[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011, 32(3): 23-26.
- [23] 王晓方, 刘秋生, 赵晓利. 某型电子时间引信检测技术研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(4): 71-73.
- WANG Xiao-fang, LIU Qiu-sheng, ZHAO Xiao-li. Study on the Electronic Time Fuse Detection Technique[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(4): 71-73.
- [24] 雷芸, 邱云峰. 基于温度变化的电子元器件参数响应研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(1): 155-158.
- LEI Yun, QIU Yun-feng. Parameter Changes of Electron Components Based on Temperature Variation[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 43(1): 155-158.
- [25] 孙博. 考虑温度影响的开关电源稳健性参数设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- SUN Bo. Robust Parameter Design of Switching Mode Power Supply Considering Temperature Influence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [26] 王水成. 稳压管的温度特性与温度补偿[J]. 家庭电子, 1998(3): 56-57.
- WANG Shui-cheng. Temperature Characteristics and Temperature Compensation of Voltage Stabilizing Tube[J]. Family Electronics, 1998(3): 56-57.

责任编辑: 刘世忠