

# 核用管状熔断器寿命评估的 方法研究与系统开发

石 颀

(苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 对核用管状熔断器的寿命评估方法进行了深入研究, 找出了基于金属电迁移理论的熔断器寿命预测模型。并开发了 1 套熔断器寿命评估系统, 该系统能够采集精确的、全面的寿命试验数据, 经数据分析与处理, 能得到该组熔断器的预测寿命。最后以 TDP44-1A 型熔断器为例, 对所述寿命评估方法进行了验证, 说明了方法的有效性。

**关键词:** 管状熔断器; 寿命评估; 金属电迁移; 寿命预测模型; 寿命评估系统

中图分类号: TL35 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0399-06

## Method and System Development of Lifetime Evaluation for Tube Fuse in Nuclear Power Plant

SHI Jie

(Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** Based upon comprehensive studies on the lifetime evaluation methods of nuclear tube fuses, a fuse lifetime anticipation model based on the theory of electromigration was determined, and a set of fuse lifetime evaluation system was developed. This system enables the collection of accurate and completed lifetime test data which can be analyzed and processed, from which the anticipated fuse lifetime can be evaluated. Finally, an example of lifetime tests for TDP44-1A type fuse was given to verify the effectiveness of the evaluation methods mentioned above.

**Key words:** tube fuses; lifetime evaluation; electromigration; lifetime anticipation model; lifetime evaluation system

熔断器是一种串联于被保护电路中的过电流保护电器, 当被保护电路的电流超过规定值, 并经一定时间后, 由熔体自身产生的热量熔断熔体, 使电路断开, 起到保护的作用<sup>[1]</sup>。熔断器广泛用于低压配电系统和控制系统及用电设备中, 作为短路和过电流保护, 是应用

最普遍的保护器件之一。

在使用过程中, 由于自身流过的电流及外界环境的影响, 熔断器不可避免的发生老化降级, 改变熔断器的保护特性, 影响其使用寿命<sup>[2]</sup>, 在随后的运行中易发生误动作 (指熔断器在未达到最小约定熔断电流的条件下就出现熔断的

现象),对核电站的安全、经济运行造成潜在威胁。

熔断器主要由陶瓷或玻璃、石英砂及熔丝材料组成。陶瓷与玻璃均需经高温烧结,强度高、耐高温、具有良好的化学稳定性与机械强度,不易老化,使用寿命约30 a。石英砂是一种坚硬、耐磨、耐高温、热膨胀系数小、高度绝缘、化学性能稳定的硅酸盐矿物,其主要矿物成分是SiO<sub>2</sub>,使用寿命约30 a。所以,熔断器的寿命主要取决于熔体的状态。

熔体材料主要包括铅、锡、锌、铜、银及相应的合金材料。铅、锡、锌熔化温度较低(铅:327.4 ℃;锡:231.9 ℃;锌:419.5 ℃)、热导率小、电阻率大、尺寸大,常温下蒸汽压较高,易老化、寿命短,熔断时金属蒸汽较多,不利于灭弧;铜、银及其合金制成的熔丝熔点较高(铜:1 083.4 ℃;银:960 ℃)、热导率大、电阻率小、截面积小,相对而言不易老化、寿命较长,熔断时金属蒸汽较少,有利于灭弧。

熔断器测试技术主要是生产厂家对新熔断器产品进行性能测试、型式试验等。在老化测试方面,主要针对电极接触老化问题,并未考虑熔断器寿命的主要决定因素——熔体的老化问题。在熔断器寿命评估方面更是鲜有报道,这也是导致了大量熔断器超龄服役的原因。因此,有必要对熔断器进行寿命预测,评估熔断器寿期内主要寿命点的特征数据,从而能制定更加合理的维修维护策略,从根本上解决熔断器超龄服役的问题。

鉴于此,本工作提出1种熔断器寿命评估系统,能够为串联的熔断器组提供精确的试验电流,自动检测每个熔断器个体的通断状态,通过短接熔断个体自动恢复供电;能够实时采集试验中的试验电流、熔体温度、各个熔断器当前的状态(是否熔断)以及熔断个体的熔断时间;并能够对采集到的数据进行分析与处理,得出该型号熔断器的预测寿命。

## 1 熔体老化机理

### 1.1 金属电迁移

熔丝金属在通电状态下存在金属电迁移现象,即金属中的离子迁移,这种迁移会在局

部区域发生质量亏损而出现空洞,或产生质量堆积而出现小丘或凝固态毛刺,造成熔丝缺陷,引发局部过热,高温又会加速金属电迁移的过程,使缺陷进一步增大,逐渐累积至发生熔丝熔断。

金属电迁移是导致熔丝老化的主要机理。Black给出了直流模型下描述金属电迁移失效中值时间MTTF的经典公式<sup>[3-5]</sup>:

$$MTTF = \frac{A}{J^n} \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (1)$$

其中: $A$ 为材料相关的常数; $J$ 为电流密度; $n$ 为电流密度指数,其值取决于电流密度 $J$ ; $E_a$ 为激活能; $K$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为绝对温度。

由式(1)可知,金属电迁移主要影响因素包括运行温度、电流密度。另外,熔丝尺寸与形状也会对电迁移的进程产生影响。

### 1.2 银离子迁移

另一种电迁移的形式是银离子在潮湿环境下的迁移,又称银迁移。潮湿环境中,水分子渗入含银导体表面电解形成氢离子和氢氧根离子,银在电场及氢氧根离子的作用下离解产生银离子,并产生式(2)所示的可逆反应,在电场的作用下,银离子从高电位向低电位迁移,并形成絮状或枝蔓状扩展,这就是所谓的银迁移现象。



### 1.3 焊剂冶金效应

在高温条件下,熔断器内部焊锡挥发至熔体某处,发生冶金效应,导致该点熔体在较低温度下熔化,进而造成局部缺陷,在随后的运行中易发生误动作。

### 1.4 金属蒸发

对于慢速熔断器,初始瞬态电流会使某些低熔点熔丝金属出现蒸发而使金属材料减少,熔丝材料不断减少将使有效熔断容量降低,在后面的使用过程中易发生误动作。

### 1.5 化学腐蚀

熔断器内部残留助焊剂以及密封胶会在高温条件下挥发至熔丝表面,造成熔丝的局部化学腐蚀,引起熔丝局部电流密度过大,在随后

的运行中易发生误动作。

核电站所用熔断器质量等级较高, 密封性能好, 潮气不易进入, 焊剂与助焊剂较少使用, 所以熔体金属在此条件下, 最主要的老化机理就是金属电迁移。

## 2 寿命评估系统

熔断器寿命期内特征数据评估系统包括 1 个熔断器寿命试验模块、1 套数据采集模块以及寿命期内特征数据评估模块, 还包括显示模块、存储与打印模块及键盘输入模块等辅助模块 (图 1)。

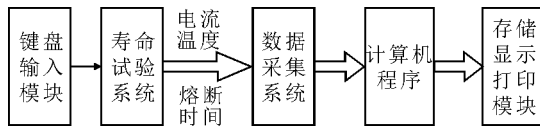


图 1 熔断器寿命评估系统

Fig. 1 Lifetime test evaluation system

### 2.1 熔断器寿命试验模块

该模块能够精确提供试验电流, 可以自动检测熔断个体通断状态并恢复供电, 该模块包括中央控制单元、电源单元、取样单元、监测与隔离单元、驱动单元以及执行单元 (图 2)。

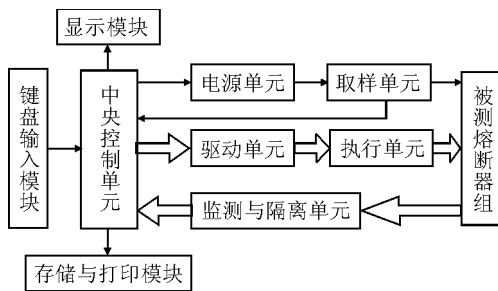


图 2 熔断器寿命试验模块

Fig. 2 Lifetime test module of fuse

寿命试验模块主要实现以下 4 方面的功能:

- 1) 指定试验终止条件, 计算实际使用条件下以及加速应力条件下的电流密度, 记为  $J_U$ 、 $J_S$ ;
- 2) 测量实际使用条件下的熔体温度, 记为  $T_U$ ;

3) 记录加速老化试验的开始时间, 测量加速应力下的熔体温度, 记为  $T_S$ ;

4) 记录每个熔断器的熔断时间, 直至达到试验截止条件。

### 2.2 数据采集模块

实时采集熔断器寿命试验模块的各种数据信息, 包括试验电流、熔体温度、各个熔断器当前的状态 (是否熔断)、每个熔断器的熔断时间; 当该组熔断器寿命试验到达截止条件时, 自动将上述数据传送给寿命评估模块。

### 2.3 寿命评估模块

基于金属电迁移寿命模型编制专用的熔断器寿命预计程序, 对数据采集模块提供的该组熔断器样品的寿命试验数据进行分析与处理<sup>[6-8]</sup>, 可得出该组熔断器的预测寿命。

#### 1) 加速寿命试验

首先设定试验截止条件 (一般采用定时截尾), 给熔断器组加正常工作电流, 待温度达到稳定后, 测量熔丝温度  $T_U$  并记录; 加大电流应力 (小于最小约定熔断电流), 此电流为试验电流, 并记录试验开始时间, 待温度达到稳定后, 记录该电流下的  $T_S$ 。计算正常工作电流条件下以及试验电流条件下的电流密度  $J_U$ 、 $J_S$ , 确定  $n_U$  与  $n_S$ 。将得到的数据分别带入式 (1) 可得到正常工作电流下的综合加速因子为:

$$AF = \frac{J_S^{n_S}}{J_U^{n_U}} \exp\left[\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_S}\right)\right] \quad (3)$$

试验过程中要记录每个样品熔断的时间, 作为失效数据, 用于统计样品的失效分布规律。

#### 2) 加速试验数据分析与处理

采用平均秩法进行计算定时截尾试验的经验故障分布函数, 计算方法如下:

$$\Delta A_k = \frac{n+1-A_{k-1}}{n-i+2} \quad (4)$$

$$A_k = A_{k-1} + \Delta A_k \quad (5)$$

$$F(t_k) = \frac{A_k - 0.3}{n + 0.4} \quad (6)$$

$$R(t) = 1 - F(t_k) \quad (7)$$

式中:  $A_k$  为故障样品的平均秩次;  $k$  为故障样品的顺序号;  $\Delta A_k$  为平均秩次增量;  $i$  为所有样品的按退出首次时间顺序排列号;  $t_k$  为第  $k$  个样品的故障前运行时间,  $h$ 。

采用双参数威布尔分布模型进行可靠性参数估计, 该分布的失效率函数  $\lambda(t)$  与可靠度函数  $R(t)$  的表达式为:

$$\lambda(t) = \beta t^{\beta-1} / \alpha^\beta \quad t \geq 0 \quad (8)$$

$$R(t) = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad t \geq 0 \quad (9)$$

根据式(4)~式(7)计算出经验可靠性指标, 通过作图法, 进行直线拟合, 可得出双参数威布尔分布的两个参数  $\alpha$  与  $\beta$ , 从而得到式(8)与式(9)的  $\lambda(t)$  与  $R(t)$ , 最终通过式(10)得到加速应力下熔断器的寿命:

$$\bar{T} = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt = \alpha \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (10)$$

式中:  $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt$ , 为伽马函数。

### 3) 正常工作条件下的寿命

通过加速因子可将加速应力下的寿命转化为正常工作条件下的寿命:

$$T_{\text{life}} = AF \times \bar{T} \quad (11)$$

## 2.4 显示模块

能够实时显示电源模块输出电流的大小、各个熔断器的编号、熔体温度、电位差、各个熔断器的通断状况、每个熔断器的熔断时间, 当寿命试验截止时, 还可显示该组熔断器的预测寿命。

## 2.5 存储与打印模块

能够自动存储与打印电源模块输出电流的大小、各个熔断器的编号、熔体温度、电位差、各个熔断器的通断状况、每个熔断器的熔断时间, 当寿命试验截止时, 还可存储并打印该组熔断器的预测寿命。

## 2.6 键盘输入模块

通过键盘输入试验电流设定值等需试验前制定的信息。

## 3 实例分析

将 16 只 TDP44-1A 型熔断器装入系统进

行加速寿命试验, 对熔断器组分别加试验电流 0.8 A 和 1 A 进行试验, 待温度达到稳定后, 测量各熔体温度, 分别记  $T_{U0.8}$ 、 $T_{U1}$  为各熔体的平均温度。将试验电流增加至 1.3 A (最小熔断电流为 1.4~1.8 A), 并记录加速试验开始时间, 待温度达到稳定后, 记录下各熔体温度, 记  $T_S$  为各熔体的平均温度。

分别计算 0.8、1 A 及试验电流下的电流密度  $J_{U0.8}$ 、 $J_{U1}$ 、 $J_S$ , 试验数据为:  $T_{U0.8} = 302.25$  K;  $T_{U1} = 318.15$  K;  $T_S = 368.15$  K;  $J_{U0.8} = 6518.99$ ;  $J_{U1} = 8148.73$ ;  $J_S = 10593.35$ 。据此确定  $n_{0.8} = n_1 = n_S = 1$ 。最终根据式(1)、(3)可得到 0.8 倍及 1 倍额定电流下的综合加速因子分别为:

$$AF_{0.8} = \frac{J_S^{n_S}}{J_{U0.8}^{n_{0.8}}} \exp\left[\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{U0.8}} - \frac{1}{T_S}\right)\right] = \frac{1.3}{0.8} \cdot \exp\left[\frac{0.6}{8.62 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{302.25} - \frac{1}{368.15}\right)\right] = 100.263$$

$$AF_1 = \frac{J_S^{n_S}}{J_{U1}^{n_1}} \exp\left[\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{U1}} - \frac{1}{T_S}\right)\right] = \frac{1.3}{1} \cdot \exp\left[\frac{0.6}{8.62 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{318.15} - \frac{1}{368.15}\right)\right] = 25.374$$

表 1 列出试验过程中每个样品出现熔断的时间, 作为失效数据, 用于统计样品的失效分布规律。

采用平均秩法进行计算定时截尾试验的经验故障分布函数, 首先对表 1 的故障退出的数据进行整理, 计算出表 2 所列的结果。

采用双参数威布尔分布模型进行可靠性参数估计, 根据表 3 的结果, 以  $\ln[-\ln R(t)]$  为纵轴,  $\ln t$  为横轴, 进行直线拟合(图 3)。直线拟合方程为:  $\ln[-\ln R(t)] = 5.543 \ln t - 39.596$ , 可得到双参数威布尔分布的两个参数为:  $\alpha = 1265.755$ ,  $\beta = 5.543$ 。

由此得到威布尔分布拟合结果为:

$$\lambda(t) = \beta t^{\beta-1} / \alpha^\beta = 3.527 \times 10^{-13} t^{4.543}$$

$$R(t) = \exp[-(t/1265.755)^{5.543}]$$

所以, 加速应力下的平均寿命为:

$$\bar{T} = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt = \alpha \Gamma(1 + 1/\beta) = 1265.755 \Gamma(1 + 1/5.543) = 1169.1 \text{ h}$$

0.8 倍额定电流下的平均寿命为:

$$T_{0.8} = AF_{0.8} \times \bar{T} = 100.263 \times 1\ 169.1 = 117\ 217.47\ \text{h} = 13.38\ \text{a}$$

额定电流下的平均寿命为:

$$T_1 = AF_1 \times \bar{T} = 18.577 \times 1\ 169.1 = 29\ 664.74\ \text{h} = 3.39\ \text{a}$$

表 1 熔断器加速寿命试验熔断时间表

Table 1 Open time of fuse at accelerated ageing test

设备编号	投运时间	首次退出时间	运行时间 $t_i/\text{h}$	故障序号 $i$	备注
1	2009-12-12 17:18	2010-01-20 16:11	934	4	故障退出
2	2009-12-12 17:18	2010-01-16 15:45	838	2	故障退出
3	2009-12-12 17:18	2010-01-29 19:20	1 154	7	故障退出
4	2009-12-12 17:18	2010-01-26 10:33	1 073	6	故障退出
5	2009-12-12 17:18	2010-02-03 0:00	1 254	11	正常退出
6	2009-12-12 17:18	2010-02-03 0:00	1 254	12	正常退出
7	2009-12-12 17:18	2010-02-03 0:00	1 254	13	正常退出
8	2009-12-12 17:18	2010-01-22 15:35	982	5	故障退出
9	2009-12-12 17:18	2010-01-19 10:05	904	3	故障退出
10	2009-12-12 17:18	2010-02-03 0:00	1 254	14	正常退出
11	2009-12-12 17:18	2010-02-03 0:00	1 254	15	正常退出
12	2009-12-12 17:18	2010-01-31 19:25	1 202	8	故障退出
13	2009-12-12 17:18	2010-01-14 16:20	791	1	故障退出
14	2009-12-12 17:18	2010-2-2 15:53	1 246	10	故障退出
15	2009-12-12 17:18	2010-2-3 0:00	1 254	16	正常退出
16	2009-12-12 17:18	2010-2-1 15:56	1 222	9	故障退出

表 2 平均秩法计算结果

Table 2 Result of mean rank order calculation

$i$	$k$	$t_k$	$A_k$	$\Delta A_k$	$F^*(t_k)$	$R^*(t_k)$	$\ln t_i$	$\ln[-\ln R(t)]$
1	1	791	1	1	0.042 7	0.957 3	6.673 3	-3.132 2
2	2	838	2	1	0.103 7	0.896 3	6.731 0	-2.212 4
3	3	904	3	1	0.164 6	0.835 4	6.806 8	-1.715 4
4	4	934	4	1	0.225 6	0.774 4	6.839 5	-1.363 8
5	5	982	5	1	0.286 6	0.713 4	6.889 6	-1.085 6
6	6	1 073	6	1	0.347 6	0.652 4	6.978 2	-0.850 9
7	7	1 154	7	1	0.408 5	0.591 5	7.051 0	-0.644 1
8	8	1 202	8	1	0.469 5	0.530 5	7.091 7	-0.455 8
9	9	1 222	9	1	0.530 5	0.469 5	7.108 2	-0.279 6
10	10	1 246	10	1	0.591 5	0.408 5	7.127 7	-0.110 7

#### 4 结论

1) 熔断器熔体的主要老化机理是金属电迁移。

2) 熔断器寿命评估系统, 能够提供精确的

试验电流, 自动短接熔断个体自动恢复供电, 使试验中断时间足够小; 能够实时采集各种试验数据及各个熔断器的熔断时间; 并能够对采集到的数据进行分析与处理, 得出该型号熔断

器的预测寿命。

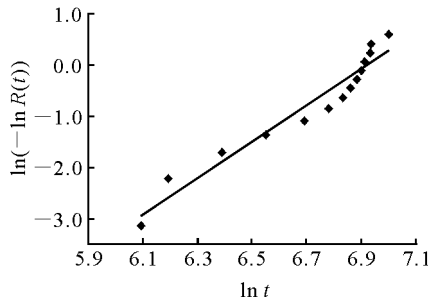


图3 双参数威布尔分布直线拟合

Fig. 3 Fitted line of failure data with two-parameter Weibull distribution model

3) 对熔断器进行寿命评估, 确定科学的维修更换周期, 有利于克服目前普遍存在的过度维修或维修不足现象。

#### 参考文献:

- [1] 王季梅. 低压熔断器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [2] NUREG-1760. Aging assessment of safety-related fuses used in low- and medium-voltage applications in nuclear power plants[R]. [S. l.]: NUREG, 2002.
- [3] BLACK J R. Physics of electromigration[C]//Proceeding of the IEEE Int Reliability Physics Symp. [S. l.]: [s. n.], 1983: 142-149.
- [4] 刘静, 吴振宇, 汪家友, 等. 铜互连电迁移可靠性的研究进展[J]. 微电子学, 2007, 37 (3): 364-368. LIU Jing, WU Zhenyu, WANG Jiayou, et al. Overview of research on electromigration reliability of copper interconnects[J]. Microelectronics, 2007, 37 (3): 364-368(in Chinese).
- [5] 王涛, 李斌, 罗宏伟. 高温恒定电流电迁移可靠性试验及结果分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004 (6): 49-52. WANG Tao, LI Bin, LUO Hongwei. An investigation of high temperature and constant current electromigration reliability assessment technique[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2004(6): 49-52(in Chinese).
- [6] 石颀, 谌登华, 施海宁, 等. 核电站仪控开关可靠性数据分析与处理[J]. 核动力工程, 2010, 31 (2): 54-57. SHI Jie, SHEN Denghua, SHI Haining, et al. Reliability data process and analysis of instrument and control switch in nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(2): 54-57(in Chinese).
- [7] GB2689 寿命试验和加速寿命试验方法[S]. 北京: 标准出版社, 1981.
- [8] ANSI/IEEE Std 101—1987 IEEE guide for the statistical analysis of thermal life test data[S]. [S. l.]: [s. n.], 1987.