

核电厂1E级设备热老化寿命模型的建立方法

介绍了核电站1E级设备热老化寿命的确立原则，依据IEEE 317—2003，描述如何建立特定材料与特定设备的阿伦纽斯热老化模型；并通过数理统计方法——最小二乘法（回归分析）确定热老化寿命曲线，追溯最接近真实情况的热老化寿命与其所处温度之间的关系；最后将热老化寿命方程应用于LOCA事故后期，采用等效加速热老化的方式，在满足考核指标的同时，大大缩短了试验时间。

鲁金枝/中核核电运行管理有限公司
方福春/国核工程有限公司

0 引言

热老化寿命试验和加速热老化试验是核电厂1E级设备合格鉴定试验的基础和重要组成部分，热老化寿命模型的建立为确定加速热老化试验方法提供坚实的理论依据。不准确的热老化寿命模型将使得被研究对象的整套鉴定试验的结果失去参考意义，进而造成经济成本和时间成本的巨大损失。

目前已有部分国际国内标准，用以指导热老化寿命模型的建立，例如IEEE 323—2003《核电站1E级设备的质量鉴定》、IEEE 101—1987 (R2010)《热寿命测试数据的统计分析指南》等。目前核电厂开展的老化管理主要体现在维修、检查、监测、监督、水化学、经验反馈、设备合格鉴定和定期安全审查等活动中，虽然部分安全重要设备已有老化管理大纲，但是仍缺少系统且全面的老化管理大纲和实践^[1]。但是由于这些标准适用范围广，描述的比较笼统和模糊，所以在面对具体的研究对象时，往往会感觉无法操作。本文为热老化寿命模型的建立提供了完整的操作步骤和技

巧原则，特别是在样件规格数量的选择、失效判定准则的确立、试验温度和时间的选择及试验数据回归分析等方面，给出了切实可行的指导意见，进而对核电厂1E级设备的热老化寿命试验和加速热老化试验方案的确定产生积极的指导作用。

1 热老化的概念

温度升高提升了分子动能，使碰撞后发生反应的可能性提高，从而导致大多数化学反应速率的提高。在温度（包括环境温度和设备自身运行发热）的长期作用下，材料的特性因上述化学反应而间接地改变的过程称之为热氧老化，简称热老化。热老化主要通过分子键的交联和断链作用来改变有机材料的化学特性，这会影 响材料的硬度、脆性、抗拉强度、延伸性、抗压性、弹性模量、绝缘电阻、高压介电强度以及材料的吸水性等。但是金属和无机材料一般不具备热敏感性，即在物理特性不发生改变的前提下，这类材料的特性改变与温度的关系不大。

2 热老化模型

目前最为成熟和广泛使用的热老化模型是阿伦纽斯（Arrhenius）模型，用于预测热老化导致的非金属材料性能的劣化。其主要假设：在一定的温度范围内，材料的热降解是由单一的化学反应所主导，反应速率取决于运行温度以及材料的特定老化参数（活化能），即

$$R = D e^{-\Phi/KT} \quad (1)$$



鲁金枝/高级工程师

关键词/Keywords

核电厂设备 ·
热老化寿命 ·
阿伦纽斯热老化模型 ·
最小二乘法 ·

式中, R 为化学反应速率; Φ 为活化能, eV; K 为玻尔兹曼常数, 8.617×10^{-5} eV/K; T 为运行温度, K; D 为常数。

当假设非金属材料化学反应速率 R 与平均热寿命 t 成反比时, 式(1)可转化为

$$\ln(t) = C + (\Phi/K)/T \quad (2)$$

式中, C 为常数。

假设材料在某一相对较高的温度 T_a 时, 寿命为 t_a ; 运行温度为 T_b 时, 材料寿命为 t_b 。将这两个条件分别代入式(2)中, 得到

$$\ln(t_a) = C + (\Phi/K)/T_a \quad (3)$$

$$\ln(t_b) = C + (\Phi/K)/T_b \quad (4)$$

式(4)减去式(3), 可得到阿伦纽斯模型的另一种较实用的表述方法, 即

$$t_b/t_a = e^{(\Phi/K)(1/T_b - 1/T_a)} \quad (5)$$

式中, t_a 为加速热老化所能够达到的寿命; t_b 为等效模拟的运行时间(即在运行温度下的材料或设备的寿命); T_a 为加速热老化所应用的温度; T_b 为材料或设备的运行温度。

上述模型是阿伦纽斯化学反应速率等式与等效人工加速老化要求相结合的产物。在这里, 表征化学反应速率的活化能表达了材料性能的热老化劣化速度。其假设前提是: 一定温度作用下所发生的主导化学反应与材料性能的劣化程度之间存在一定的关系, 并且在一定的温度范围内, 可通过提高温度缩短作用时间的方法来等效地获得材料的这种热老化劣化状态, 即“加速热老化”的方法, 也即式(5)所描述的方法。

该模型应用的一个关键是在确定加速热老化温度时, 必须保证所选择的老化温度不超出特定阿伦纽斯等式所依托的主导化学反应的有效温度范围。当直接采用阿伦纽斯曲线外推材料或设备的寿命时, 外推温度范围不应超出用以获得该曲线的最高或最低试验温度30 K。当采用试验方法进行热老化模拟时, 试验温度的选择在考虑材料或设备的耐受能力的同时, 还应充分考虑加速率(即等效寿命时间与加速模拟耗时之比)的控制, 以避免过度加速。

阿伦纽斯模型应用的另一个关键是材料的

活化能取值。值得注意的是, 在获取特定材料的活化能值时, 不同的参考物理特性(如断裂伸长率、抗拉强度、电阻值及介电强度等, 均分属不同的工程特性)和/或不同的失效判定准则(如当老化期间测得的上述物理特性值与初始值之比即保留率为75%、50%或25%时判定失效, 一般采用50%的保留率作为失效判定点), 将导致截然不同的数值^[2]。因此, 在进行活化能取值时, 应尽量采用那些与设备功能相关联的材料特性和失效判定准则所确定的活化能值。如电动机绝缘材料应尽量采用以电阻值或介电强度作为判定手段所获得的活化能值, 而电缆材料则应以断裂伸长率作为判定依据。一般情况下, 活化能值可由有关的材料手册或数据库查得, 亦可通过IEC 216、IEEE 98或IEEE 99等标准所规定的多温度点耐热性评定试验获得。当没有确切的数据来源时, 亦可通过保守取值的方式来进行热老化评价。普遍认同的最保守取值是0.5 eV, 因为该值几乎覆盖了所有的非金属材料, 但却由于过于保守, 该活化能推荐值的可操作性并不强。在实际应用中, 多以型式试验辅助数理统计的方法来求得比较接近真实情况的非金属材料的活化能。

3 热老化寿命模型建立的方法解析

3.1 研究对象的基本情况

核电站某设备包含绝缘导体、组件密封、电缆支架和密封部件等, 所有的部件应有均衡的热寿命特性。也就是说, 整个设备需要完成由目标确立的上述每一部件的热寿命试验。

3.2 热老化寿命试验方法的确立

热老化寿命试验应包含如下步骤和内容: 试验样品的选择、试验样品的准备、试验样品的数量、加温暴晒的要求、失效标准、热寿命特性的确定及热寿命的确定。

3.2.1 试验样品的选择

选择试验样品时应考虑以下原则: 试验样品应是同一类型的产品设计, 试验样品应是由具有代表性的生产能力和生产设备制作而成, 试验样

品应能够承受由设计限制而产生的有代表性的热应力、电动应力和机械应力。

同时应注意：有些部件的材料（例如弹性体）在加速热老化期间升高温度时会产生变形，这并不是正常热老化下会发生的典型现象。这种情况下，应进行部件的加速热老化而不是整个设备的热老化。

3.2.2 试验样品的准备

试验样品应是由具有代表性的制造能力和生产设备制造而成。

3.2.3 试验样品的数量

在每一温度下，每一电压等级或每一规格的试验样品应不少于3件，每一样品应具备电气参数和机械尺寸的代表性。

3.2.4 加温暴晒的要求

加温暴晒的要求如下：对于热寿命试验应选择不少于4个温度值，且温度间隔不得小于25℃；最低温度的统计结果应作为其平均热寿命，应不少于5 000 h；在暴晒时间少于100 h的最高温度下，不应导致样品失效^[3]。

对于某些试验对象，存在寿命突变点，即在某一温度点（例如125℃）之前寿命很长，但在另一温度点（例如165℃）后寿命急剧下降。这种情况下应适度压缩温度间隔，例如可以选取{125℃，135℃，145℃，155℃，165℃}这几个试验温度点。但是一定要保证适度原则，试验温度取值应覆盖所有的典型温度点，否则试验结果的可参考性将大大降低。

3.2.5 失效标准

每一试验样品应在每一次加温暴晒的周期末进行失效判定试验。

对于被研究的试验对象，由于其主要的有机零部件执行的是密封功能和绝缘功能，所以失效判定指标应设定为在设计压力和环境温度条件下的泄漏率指标、介电强度指标和绝缘电阻指标，具体的合格判定指标值不得低于产品鉴定样机施加应力后的基础功能试验值。

3.2.6 热寿命特性的确定

从失效数据可确定热寿命曲线：按回归分析得到的平均热寿命曲线，以及置信界限降低到95%的平均热寿命曲线。

热寿命的所有评估应基于平均热寿命曲线或者置信界限降低到95%的平均热寿命曲线，具体如下图所示。

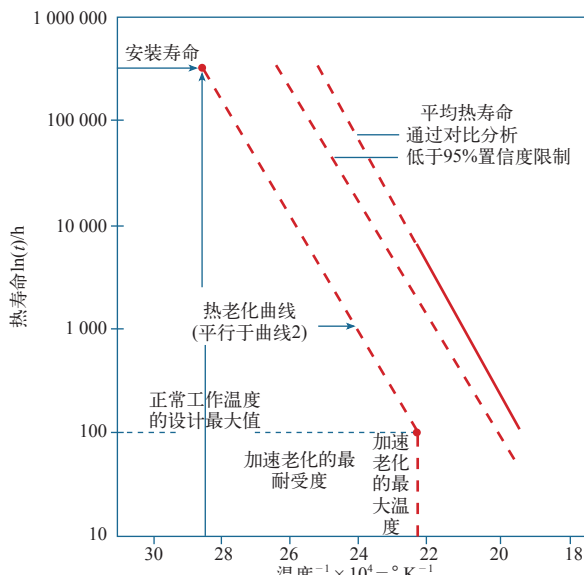


图 热老化曲线

如何依据回归分析得到平均热寿命曲线？这需要用到最小二乘法（Least Squares, LS）。

LS最早是由Karl Gauss为进行行星轨迹预测的研究而提出的一种数据处理方法。由于计算机的普遍使用LS被广泛应用于科学计算、工业控制和信号处理中的数据拟合、系统辨识和参数估计^[4]。

LS可以用来处理一组数据，可以从一组测定的数据中寻求变量之间的依赖关系，这种函数关系称为经验公式。

以下将介绍如何用LS寻求自变量 X 与应变量 Y 之间近似成线性关系时的经验公式。

在研究两个变量（ X ， Y ）之间的相互关系时，通常可以得到一系列成对的数据（ X_1 ， Y_1 ），（ X_2 ， Y_2 ），…，（ X_m ， Y_m ）；将这些数据描绘在 X - Y 直角坐标系中，若发现这些点在一条直线附近，可以令这条直线的函数曲线如下

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (6)$$

式中, a_0 、 a_1 为任意实数。

为建立此方程就要确定 a_0 和 a_1 。应用LS原理, 将实测值 Y_i 与利用式(6)得到的计算值($Y = a_0 + a_1X$)的离差($Y_i - Y$)的平方和 $\sum(Y_i - Y)^2$ 最小为优化判据。

令

$$\varphi = \sum(Y_i - Y) \quad (7)$$

把式(6)代入式(7)中, 得到

$$\varphi = \sum(Y_i - a_0 - a_1X_i)^2 \quad (8)$$

当 $\sum(Y_i - Y)^2$ 最小时, 可用函数 φ 对 a_0 、 a_1 求偏导数, 令这两个偏导数等于零, 即

$$\sum(a_0 + a_1X_i - Y_i) = 0 \quad (9)$$

$$\sum X_i(a_0 + a_1X_i - Y_i) = 0 \quad (10)$$

亦即

$$ma_0 + (\sum X_i)a_1 = \sum Y_i \quad (11)$$

$$(\sum X_i)a_0 + (\sum X_i^2)a_1 = \sum(X_iY_i) \quad (12)$$

于是得到关于 a_0 和 a_1 的二元一次方程组, 解这个方程组, 可求得 a_0 和 a_1 。

对于平均热寿命模型, 即本文的式(2), C 为式(6)中的 a_0 ; Φ/K 为 a_1 ; $\ln(t)$ 为 Y (即 $t = e^Y$); $1/T$ 为 X (即 $T = 1/X$)。

热老化寿命试验的温度点选择, 依据本文3.2.4节的规定: “对于热寿命试验应选择不少于4个温度值, 且温度间隔不得小于25℃; 最低温度的统计结果应作为其平均热寿命, 应不少于5 000 h; 在暴晒时间少于100 h的最高温度下, 不应导致样品失效。”实际选取温度点时, 应根据试验对象的特点, 通过试探性试验来确定, 同时兼顾均匀性和完整性原则。例如, 可选取5个温度点组成的数据组: {70℃, 95℃, 120℃, 145℃, 170℃}。相应变换后, 可得到 $\{X_i\} = \{1/343.15 \text{ K}, 1/368.15 \text{ K}, 1/393.15 \text{ K}, 1/418.15 \text{ K}, 1/443.15 \text{ K}\}$ 。

试验样品的数量, 依据本文3.2.3节的规定:

“在每一温度下, 每一电压等级或每一规格的试验样品应不少于3件, 每一样品应具备电气参数和机械尺寸的代表性。”因此, 每一电压等级或每一规格的产品可选取20件, 每一温度点选取其中4

件进行试验, 测得4个寿命值后取算术平均值作为该规格产品在此温度点的平均热寿命值 t_i 。

热老化寿命试验后得到一组数据 $\{t_i\}$, 相应变换后, 可得到数据组 $\{Y_i\} = \{\ln(t_i)\}$ 。将 $\{X_i\}$ 、 $\{Y_i\}$ 和 $m = 5$ 代入二元一次方程组式(11)和式(12), 可求得式(2)中的 C 和 Φ/K , 此曲线即为图中的平均热寿命曲线。

3.2.7 热寿命的确定

热寿命曲线可作线性延伸至其所需安装寿命, 以证明被测试部件在其最高正常运行温度下的热寿命超过所需安装寿命。

这也可通过另外一种更为直观的方法加以论证说明。例如, 被研究的设备要求在85℃ (该设备的最高正常运行温度) 下工作60年, 将此数据 $1/T = 1/(85 + 273.15) \text{ K}$, $\ln(t) = \ln(60 \times 365 \times 24 \text{ h})$ 代入 $\ln(t) = C_2 + (\Phi/K)/T$, 其中 Φ/K 的取值与平均热寿命方程中 Φ/K 的取值相同, 可求得 C_2 。此方程 $\ln(t) = C_2 + (\Phi/K)/T$ 对应的函数曲线即为本文上图中的热老化曲线。

如果该曲线位于平均热寿命曲线与置信界限降低到95%的平均热寿命曲线的左侧, 则证明该设备在其最高正常运行温度下的热寿命超过其所需安装寿命。

注意: 应对整个设备的每一部件进行此项评估。

3.2.8 加速热老化参数的确定

在得到3.2.7节所述的热老化曲线—— $\ln(t) = C_2 + (\Phi/K)/T$ 后, 可在此曲线上选择适当的稍偏高的温度点以及对应的热老化寿命值, 进行加速热老化试验。

注意: 加速热老化试验选取的温度点对应的试验时间 (热老化寿命值) 应不少于100 h, 所选取的温度点也不得超过该设备关键材料的关键特性发生突变的温度点。

3.2.9 加速热老化试验的冷却剂丧失事故条件仿真

冷却剂丧失事故 (Loss Of Coolant Accident, LOCA) 试验后期, 在温度与压力峰值瞬变工况后, 会有一段长时间保持在某一温度点的试验持

续期，应用加速热老化的方法可以有效地缩短试验时间，同时也可保证得到同样的试验目的和结果。

依据本文的式(5)，其中 Φ/K 的取值与平均热寿命方程中 Φ/K 的取值相同。查得LOCA试验后期的温度值 T_a 和持续时间值 t_a ，然后选取合适的加速热老化温度值 T_b ，便可求得对应的加速热老化持续时间值 t_b （即LOCA试验后期的持续时间值）。也可选取合适的加速热老化持续时间值 t_b ，反过来求得加速热老化温度值 T_b 。

例如，对于某设备，LOCA试验后期的温度值 $T_a = (273.15 + 110) \text{ K} = 383.15 \text{ K}$ ，持续时间为 $t_a = 360 \text{ h}$ 。此时，可初步选定加速热老化的温度值为 $T_b = (273.15 + 130) \text{ K} = 403.15 \text{ K}$ ，将 T_a 、 t_a 和 T_b 代入式(5)，可求得对应的加速热老化持续时间值 t_b 。如果感觉试验时间压缩得不够，仍可适当提高试验温度，再计算出合适的加速热老化持续时间值 t_b 。

4 结束语

本文介绍了核电站1E级设备热老化寿命的确立原则，依据IEEE 317—2003，描述如何建立特定材料与特定设备的阿伦纽斯热老化模型。通过

数理统计方法——LS（回归分析）确定平均热寿命曲线及其方程。进而根据设备在其最高正常运行温度下的热寿命，求得该设备的热老化曲线，也同时得到了加速热老化试验的依据。最后将热老化寿命方程应用于LOCA事故后，采用等效加速热老化的方式，在满足考核指标的同时，大大缩短了LOCA试验的时间。

参考文献

- [1] 马明俊，周永辉，张建，等．核电厂老化和寿命管理现状与进展[J]．核安全，2011(2)：40-46．
- [2] 顾申杰．核电厂1E级电气设备鉴定要素研究[J]．核电工程与技术，2006(2)：20-29．
- [3] IEEE Standards Association．IEEE Std 317TM—2013 IEEE standard for electric penetration assemblies in containment structures for nuclear power generating stations[S]．USA：Nuclear Power Engineering Committee of the IEEE Power and Energy Society，2013．
- [4] 王桂增，叶昊．主元分析与偏最小二乘法[M]．北京：清华大学出版社，2012．

(收稿日期：2016—08—14) **EA**

(上接第20页)

- versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers[J]．IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2)：903-915．
- [5] Larson E V, Swan D A．Applying power system stabilizer[J]．IEEE Transactions on PAS, 1981, 100(6)．
 - [6] 吴书清，吉望西，刘达伦，等．绝对重力仪数值计算及不确定度评定方法[J]．计量学报，2009，

30(3)：212-215．

- [7] 李艳，基于最优化方法的结构可靠度及Matlab程序实现[D]．武汉：武汉工业学院，2012．
- [8] 刘取．电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]．北京：中国电力出版社，2007：67-70．
- [9] Q/GDW 143—2012 电力系统稳定器整定试验导则[S]．

(收稿日期：2016—04—26) **EA**