

随着核电厂数量的增加及运行时间的延长,核电厂设备的老化效应越来越引起人们的关注,如何对核电厂的老化实施有效管理、确保在役核电厂的安全性和可靠性,引起了国际原子能机构(IAEA)和世界核电大国的严重关注,并已开展了广泛的工作。作为核电厂安全重要部件之一,安全壳内仪表与控制电缆的老化评估与管理也得到了深入的研究,取得了较多的研究成果。IAEA 和国际主要核能机构已发表了不多专题报告[1]-[4]。

我国的秦山、大亚湾核电厂投入运行已有 10 多年的历史,虽然运行时间不是很长,但已面临安全壳内仪控电缆的老化问题,随着服役时间的增加,这一问题会更加突出。目前,国内还没有对安全壳内仪控电缆老化评估及寿命管理的系统研究,笔者在相关文献资料的基础上,介绍核电厂安全壳内仪控电缆老化管理的内容,以期对开展这项工作有所帮助。

1 仪控电缆及其使用环境

核电厂包含了成千上万公里不同型号及规格的电缆,这些电缆构成了中压动力回路、低压动力回路、控制回路、仪表回路、接地回路等,表 1 为双机组核电厂各种回路的分布情况[3]

从表中可见,仪表及控制电缆回路占据了所有电缆回路的 4/5 以上。所以,将仪控电缆,特别是将环境条件恶劣的安全壳内仪控电缆作为研究的对象具有典型意义。

1.1 仪控电缆的用途及组成

仪表电缆是一种低压、低容量的电缆,连接各种各样的变送器、传感器,传输数字或模拟信号;控制电缆也是低压、低容量的,应用于控制开关、泵、阀门等的操作机构、继电器和接触器的控制回路。

构成仪控电缆的主要部分有:导体、绝缘材料、屏蔽、护套、多芯导体间的填充物、外部包扎带。所谓电缆的老化,指的是电缆结构中有有机材料的老化。虽然填充物和外部包扎带也是有机物,但对电缆老化的影响并不大,因此,研究的重点是针对绝缘材料和护套。

电缆所使用的绝缘体和护套的组成是由一些添加剂和填料合成的聚合材料,在核电厂中,仪控回路使用乙烯基、丙烯基合成的橡胶,玻璃纤维,以及以氯磺化聚乙烯、聚乙亚胺等为绝缘材料的电缆。

1.2 仪控电缆的工作环境

安全壳内部仪控电缆放置在不同的使用环境下,最重要的影响因素是自然环境,主要是有氧气存在时温度、湿度、核辐照的影响,温度、湿度、核辐照的值应从设计文件中取得。表 2 给出了安全壳内几处具有典型意义的温度值

在正常运行情况下,安全壳内不会受到湿度的影响。辐照的影响可从相关技术数据中获得,在 40 年时间内,正常运行情况下,安全壳内辐照的最大累计值为 $3 \times 10^7 \text{rad}$ 。安全壳内的仪控电缆一般不会受到震动的影响,除非有特殊要求,否则,不考虑由于震动引起的老化问题[5]。

2 电缆的老化机理

在现场环境下,电缆的绝缘和护套等聚合物材料随着时间的推移会发生各种缓慢的、不可逆的化学变化和物理变化,这些变化就是电缆的老化过程。从宏观上

来看，表现为材料的延伸率降低，即材料的抗拉强度减弱；护套材料的硬度或抗压模量增大；材料的密度增加；电气性能改变(如介质损耗增加)。

电缆的老化机理可分为影响分子结构的化学老化机理和影响材料混合物成分的物理老化机理。

2.1 化学老化机理

(1) 高分子链断裂：一个高分子链断裂为 2 个或多个新链，一般为烷氧基或过氧化根断链，导致物质性质的改变。

(2) 交联反应：在 2 个相邻高分子间共价键的结构发生交联，使原先物质的有效成分减少。

(3) 氧化反应：这是一种自由基的链式反应，在氧化反应开始阶段，在温度和辐照的影响下，由于共价键的断裂而产生反应性物质，即自由基，氧化反应既导致断链，又生成交联，这取决于氧化链式反应过程中各阶段的分子运动情况，它随着聚合物中添加剂的不同而不同。

(4) 氧扩散控制过程：聚合材料中自由基的初速率大于溶解氧扩散的速率时，老化快慢由氧扩散来控制。

(5) 协同效应：当各个环境因素的综合影响大于其各个单一影响之和时，会产生这种效应，如对聚合物而言，既受热，又受到辐照。

2.2 物理老化机理

(1) 增塑剂蒸发：材料表面的增塑剂向周围的空气中挥发，其留下的空隙又被由材料的核心向表面扩散的增塑剂所填满，这 2 种挥发和填满的分子运动并存，强弱由温度所决定。

(2) 增塑剂迁移：在使用增塑材料的多层电缆中，增塑剂在不同材料层间迁移，直到各层材料中的增塑剂达到均衡状态。

3 环境鉴定

为了保证电缆的设计裕度，必须采用环境鉴定的方法，通过加速老化试验，模拟电缆在运行寿期末经受设计基准事件，验证电缆可以保证其功能，从而证明电缆在服役期的可靠性能。许多国家环境鉴定依据的标准是 IEEE-323[6]、IEEE-383[7]，前者是针对核电厂所有 1E 级设备的一个通用的标准，后者叙述了针对 1E 级电缆的试验方案。

3.1 加速老化试验

在正常运行时，湿度、化学物质等对电缆的老化影响很小，加速老化试验是模拟电缆在实际运行中受到的热、辐照等环境因素，表 3 为主要核电大国进行热老化和辐照老化的试验条件[8]。

不管是热老化还是辐照老化，试验容器都是通风的，这样可以模拟安全壳内氧气的存在。

(1) 进行聚合物的热老化，普遍应用 Arrhenius 方程：

$$t_s/t_a = \exp[E_a/B(1/T_s - 1/T_a)]$$

其中： T_s 为在役温度， T_a 为加速老化温度， t_s 为对应于在役温度 T_s 的老化时间， t_a 为对应于加速老化温度 T_a 的老化时间， E_a 为活化能， B 为波尔茨曼常数。

Arrhenius 方程既可用于在给定的测试时间下求取加速老化温度，也可用于在给定的加速老化温度下求取测试时间。但该方程受制于以下 3 个条件：老化仅由单一化

学反应所引起；就是对同一种材料，在不同的温度范围内，其活化能是不同的；通过在不同温度和时间范围内对材料的样本进行试验，得到诸如老化时间及温度条件的试验参数。这样，某一材料在一定范围内的时间与温度的对应关系外推至另一范围时，有可能不一定成立。

确定活化能的精确值是加速老化试验的关键，除了通常采用的伸长测量法之外，还有微观量热法、气体分析法、化学发光法等。

(2) 对大多数有机材料而言，辐照的影响仅与材料受到的辐照总量有关，而与辐照率及种类无关，这就是等量剂量/等量损伤的模式。辐照老化采用伽玛源，如钴 60，在辐照率不大于 1Mrad/hr 的情况下，针对正常运行条件，加速老化剂量可达 50Mrad。如果不止一种放射源，则可依此进行试验。

(3) 对大部分材料来说，对其进行热老化及辐照老化的试验并没有严格的先后次序，一般来说，先进行热老化试验，再进行辐照老化试验，然后是主管道破裂 (MSLB) 及失水事故 (LOCA) 条件下的试验。

在某些情况下，如有氧环境，对于某些材料如 PVC 制成的护套，加速老化时要考虑辐照率和老化次序的协同效应的影响。氧气对老化的作用很显著，在试验容器中，要保证氧气的供给。

3.2 设计基准事件试验

经过人工老化的电缆应能承受最严重的设计基准事件，如 LOCA、HELB、MSLB，在这些事件中，将会受到高能辐照、热的气体或蒸汽、喷水、化学溶液以及其它流体的作用。下面介绍 LOCA 试验的情况。

(1) 在热老化过程完成之后，电缆需承受整个服役期应受到的辐照加上 LOCA 时的辐照量，即 50Mrad 加上 150Mrad，辐照速率在 1Mrad/hr 之内，一般也使用钴 60 作为放射源。被照射过的试样在特别设计的压力容器中进行试验，以承受发生设计基准事件时产生的压力、温度、湿度以及喷出的化学物质。不同种类的反应堆，LOCA 的环境条件变化很大，就是在同一个安全壳内，各个部位的 LOCA 的环境条件也不一样，如果实际情况有所不同，可以做出相应的调整。

(2) 在 LOCA 试验之后，应能承受 IEEE-383 中规定的耐压试验。

4 状态监测

环境鉴定是目前证明核电厂内电缆可以完成其设计使用功能的通用的方法，但是，由于受试验条件的限制以及存在的不确定因素，环境鉴定中的加速老化试验是建立在一些假设条件之上的，因此必然带来一些鉴定结果与实际情况的差异，这就提出了对电缆进行现场监测的要求，以保证其正常运行的能力。

在安全壳内环境下，聚合物首先出现氧化、交联、断链、氢过氧化物分解以及其它的化学结构和分子的变化；化学结构的变化引起物理参数的变化，如分子量或密度、玻璃转化温度及熔点温度、耗氧量及其消耗速度；化学及物理变化会影响绝缘材料的电气性能的变化。针对这些变化，相应应有各种监测的方法[8]。

4.1 针对化学变化的监测方法

表 4 为针对化学变化的评估材料老化的方法。除了前 3 种方法可以在现场的电缆上进行测试之外，其余的方法需要从电缆绝缘材料上刮下几毫克的试样，在实验室完成试验

4.2 针对物理变化的监测方法

表 5 是监测聚合材料物理特性以评估材料老化的方法。

除了刻压模量法之外，所有其它的方法都是破坏性的，都需要不同大小的样品。前面 2 种方法需要将样品中的铜导体去掉，并制成哑铃状的受拉样品。在以上各种方法中，延伸率是目前测量聚合物脆裂程度通行的方法，绝对延伸长度 50%被认为是试样是否老化的一个判别依据。

4.3 针对电气参数变化的监测方法

不管是化学方法还是物理方法都仅能监测电缆局部的状态，需要选取几个不同的部位以评估整根电缆的状况。电气试验则是对电缆的全部进行测量，但在现场，电气试验需要沿着电缆整个长度有良好的接地端，从而限制了这类方法的使用，另外，电气试验对绝缘材料形态上老化的反应是不敏感的。电气试验也有各种方法，如直流绝缘电阻测试法、交流电抗法、局部放电法、介质损耗法等，由于电气试验是成熟的方法，不再列表叙述。

上述 3 种监测方法最好具备以下一些条件：结果可重复性、不对被测件造成损害、不妨碍被测件正常工作、不受环境条件的影响（环境变化时可做出相应调整）、对老化是敏感的（特别对于初始阶段）、对不同的材料及结构有广泛的适应性、测试设备应是便携式的、能对整根电缆进行评估、性价比要合理。

自从开始电缆的状态监测方法研究以来，各国对此进行了大量的研究，取得了很多成果，但每种方法均有其适用性和局限性，一些物理方法，虽然可以应用于所有的材料，但研究结果显示，某一个方法对某些材料效果好，对某些材料效果就差。各国对检测方法进行了广泛的研究，人们试图能够找到一种或几种技术的组合能够对各种材料构成的电缆都能进行监测，但实践证明，这方面尚没有获得成功。

5 预测电缆剩余寿命

对人工老化或自然老化电缆的剩余寿命进行评估是电缆老化研究的一个组成部分，近年来，人们已经研究出了许多方法，这些方法均需要获得实验数据，有的是通用的，有的则适合某种或某些材料，各种方法均有其限制条件，以下是几种常用的方法。

5.1 线性模型方法

这种方法基于数据的线性拟合，不计协同效应的影响，实际老化与演绎出来的老化结果会有差异，但由于其简单化，仍然得到了应用。对热老化而言，以 Arrhenius 方法为例，使用对数时间对 $1/T$ 的坐标图形，可假定线性外推是有效的，即认为该方法在整个温度和时间范围内都是可行的。对辐照老化来说，在较低剂量率的情况下，使用时间对累计剂量的关系，通过建立预测曲线，使用线性外推的方法，能够预测电缆的使用寿命。

但这种方法的缺点也很明显，在加速热老化过程中，由于不同活化能之间的相互影响，会使得 Arrhenius 方法非线性化，大多数的试验温度在 PE 一类的半晶体聚合物的融化温度之外，使得试验失去实际工作温度的代表性。对加速辐照老化而言，由于在低剂量率和适中温度的情况下，大多数聚合物的老化表现为沿壁厚方向的均匀氧化，如果加速试验的剂量率过高，则会带来非线性的结果。

5.2 幂定律外推法

该方法利用同一温度下几种剂量率确定终点判据值。依据以下的公式：

$$DED=KDn$$

其中，DED 是等效损伤剂量，D 是辐照率，K 为在剂量率为 1Gy/hr 下，达到终点判据时的剂量，n 是与剂量率相关的系数，K 和 n 是由试验得到的材料常数。则等效损伤时间为：

$$TED=KDn-1$$

该方法适用于所有的材料，对辐照率不敏感的材料，n 取 0，对氧化非常敏感的材料，n 取 0.3。

5.3 以时间为变量的叠加法

该方法将热老化和辐照老化的数据结合起来，产生一系列被乘的转换系数，该转换系数是温度及辐照率的函数，可以用一个半经验公式得出转换系数与老化条件之间的关系。这种方法考虑了辐照率以及辐照和受热老化协同效应的影响。该方法适用于不管是热老化还是辐照老化都仅有一种占主导地位的老化机理的材料。

5.4 终点剂量叠加法

该方法通过叠加方法，产生一些最终点剂量的曲线，最终点剂量是对应于不同温度的剂量率的函数，被乘的转换系数仅是温度的函数，这样可以和简单的 Arrhenius 方程联系起来，该方法适用于不是仅有一种占主导地位的老化机理的材料，对有强烈的辐照率效应的材料也特别有效。

6 结束语

我国在核电厂 10 年定期评审中规定，要对核电厂设备的老化进行评价，这就需要进行核电厂安全重要部件之一的仪控电缆的老化管理工作。目前国际上相关机构在该领域已进行了大量的工作，我国核电界应消化吸收并积极跟踪这方面的先进技术，争取早日全面开展安全壳内仪控电缆老化评估及寿命管理的工作，以保证核电厂安全可靠地运行。