

# 核电站用 1E 级电缆结构设计及有关试验的探讨

王福志, 姜松奕, 郑红, 刘晓光

(浙江万马集团电缆有限公司, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 本文论述了核电站用 1E 级电力电缆、控制电缆的结构设计和试验方法, 希望能够对研制核级电缆的生产厂家制定企业标准提供一些帮助。

**关键词:** 核电站; 电缆; 结构; 试验

**中图分类号:** TM246.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-6901(2006)06-0014-05

## Constructional Design of Class 1E Cables for Nuclear Power Station and Investigation of Related Tests

WANG Fu-zhi, et al

(Zhejiang-Wanma Group, Cable Co., Ltd., Lin'an 311300, China)

**Abstract:** This paper presents the constructional design and test methods of class 1E power cables and control cables for nuclear power station in a view to render some help to the preparation of company specifications by manufacturers of nuclear power cables.

**Key words:** nuclear power station; cable; construction; test

## 1 前言

近年来我国核电工业发展迅速,到 2020 年核电在总发电容量中的比重将从目前 1.8% 上升到 4%。关于核电建设的投资问题,国外经济专家认为要完成这样大规模的核电工程建设,按保守的估计,投资也在 400 亿美元以上。中国核工业集团公司希望新建核电站的平均国产化率能够达到 60%,这样估计有 240 亿美元(约 2000 亿人民币)的货物可能国产化。从我国电线电缆行业分析,在目前电缆制造技术水平上,再进一步改进设备和产品开发,电线电缆的国产化率可达到 95% 以上,核电站用电缆市场前景广阔。因此,国内电缆厂家正在竞相开发和研制核电站用 1E 级电缆。然而,我国核电站设计受法国、美国和俄罗斯等国三方面的影响,核电设计部门对电缆技术要求并不完全统一,要制定国家标准,问题比较复杂,需要多方面进行协调。

## 2 电缆品种和结构设计

### 2.1 电缆品种

常用的品种有:6/10 kV 和 0.6/1 kV 电力电缆,0.6/1 kV 控制电缆,300/500 V 仪表电缆,300/500 V

补偿导线共 5 种。本文仅对前三种电缆的结构设计进行描述。

核电站用 1E 级电缆按核电站电气系统设备的安全类别分为三类:K1、K2、K3。安全类别 K1、K2、K3 类有如下定义:

K1 类电动执行机构。安装在核反应堆安全壳以内,在正常环境条件下和在 SL2(安全停堆地震)载荷以下及在事故期间或事故之后仍能执行其规定的功能。

K2 类电动执行机构。安装在核反应堆安全壳以内,在正常环境条件下和在 SL2(安全停堆地震)载荷下仍能执行其规定的功能。

K3 类电动执行机构。安装在核反应堆安全壳以外,在正常环境条件下和在 SL2(安全停堆地震)载荷下仍能执行其规定的功能。

三类电缆的运行环境差别很大,其中 K1 类的运行环境最恶劣,对电缆的性能要求也最为苛刻,必须通过模拟冷却剂跑失事故(LOCA)试验才可以投入运行。根据电缆的实际运行环境,核电站发生 LOCA 时,安全壳(Containment Vessel)内外的电缆都将会受到严峻考验,笔者认为,安装在核反应堆厂房内的电缆都应进行模拟 LOCA 试验;其次,只有能够生产 1E 级 K1 类电缆,才能够证明该电缆厂家完全具备了生产核级电缆的能力,电缆的结构设计和性能指标的制定最好根据反应堆厂房和核辅助厂房两个运行环境的具体条件进行确定。

收稿日期:2006-06-05

作者简介:王福志(1973-),男,辽宁沈阳人,工程师,主管工程师。

作者地址:浙江临安市万马路 2 号[311300]。

## 2.2 环境条件和应用区域

核电站用电缆的安全级别为1E级,同时应具有40年或以上的使用寿命,最近又提出核电站用1E级电缆的使用寿命为50年或以上。影响安全功能和合格寿命主要因素的老化机理是热老化和辐射老化,在同时要求电缆长期工作温度不低于90℃时,敷设区域和工作情况不同,电缆在合格寿命内接受的累计辐射剂量各不相同,对电缆的耐辐射性能要求也不同。

核电站用电缆分别敷设在核辅助厂房和反应堆厂房内,核辅助厂房环境条件为:温度0~40℃,相对湿度20%~80%,射线累计辐射剂量 $4.0 \times 10^4$  Gy,压力为0.086~0.106 MPa。反应堆厂房的环境条件见表1。

表1 反应堆厂房环境条件

项目名称	正常条件	事故条件	严重事故条件
温度/℃	0~49	150	140
相对湿度/%	30~85	100	100
累计辐射剂量 /Gy	$2.5 \times 10^5$	$8.0 \times 10^4$	$2.88 \times 10^5$
压力/MPa	0.086~0.106	0.30	0.48
含硼浓度/( $1 \times 10^{-4}$ %)	—	2000~4000	—
NaOH/%	—	0.6	—
pH值	—	8.5~10.5	—

事故条件中包含两类事故,即LOCA(冷却剂跑失事故)和MSLB(主蒸汽管道破裂),其中,辐照剂量为一次事故(LOCA)后30天的射线和射线的累计辐射剂量。

严重事故条件是指反应堆堆芯熔化事故发生后的条件。

0.6/1 kV 电力电缆和0.6/1 kV 控制电缆的敷设区域:核辅助厂房或反应堆厂房,因此,其耐辐射等级应满足核辅助厂房或反应堆厂房正常辐射剂量环境条件要求。

6/10 kV 电力电缆的敷设区域:核辅助厂房,因此,其耐辐射等级应满足核辅助厂房正常辐射剂量环境条件要求。

## 2.3 电缆结构设计

(1) 导体。采用绞合圆形铜导体或绞合紧压圆形铜导体,其性能应符合GB/T 3956的规定。

(2) 绝缘。电力电缆和控制电缆的绝缘设计要考虑到导体的正常运行温度和短路允许温度。电力电缆和控制电缆在正常运行状态下,长期导体温度90℃,在事故运行状态下,导体温度250℃,时间不超过4s。

6/10 kV 电力电缆的绝缘结构应符合GB/T 12706.2-2002的规定,绝缘材料为交联聚乙烯。

0.6/1 kV 电力电缆和控制电缆的绝缘要求具有低烟无卤阻燃功能,型式一般有四种:无卤阻燃交联聚乙烯;无卤阻燃热塑性材料;完全粘合的双层无卤材料,外层应阻燃;阻燃乙丙橡胶。

其中,第2和第3种绝缘型式是不合适的,容易引起争议,因此0.6/1 kV 电力电缆和控制电缆的绝缘材料宜选择低烟无卤阻燃交联聚乙烯或低烟无卤阻燃乙丙橡胶。绝缘材料在20℃和80℃时分别测得的氧指数数值之差的绝对值应不大于2。

低烟无卤阻燃交联聚乙烯绝缘材料最好采用辐照交联方式。交联的方式分为两大类,即化学交联和物理交联。化学交联又分为干法交联和温水交联两种。干法交联的方法是在温度达300~400℃的高压气体中,经过一定的时间使聚乙烯分子链交联。在此状况下,低烟无卤阻燃交联聚乙烯材料里面的氢氧化物已分解为金属氧化物和水,因此电缆表面将出现裂纹及水泡,所以干法交联的方法是不可用于低烟无卤材料的。而温水交联的方法是将电线电缆置于80~90℃的温水中浸泡5~7h,在此状况下,氢氧化物将吸收大量的水分,导致绝缘电阻下降,直接影响到电缆的综合性能。

物理交联即辐照交联,是利用电子加速器产生的高能电子束流,轰击绝缘层,将高分子链打断,被打断的每一个断点称为自由基。自由基不稳定,相互之间要重新组合,重新组合后由原来的链状分子结构变为三维网状的分子结构而形成交联,此交联方式既无高温又无水,既能使聚烯烃交联,又不影响阻燃性能和电气性能,所以低烟无卤阻燃交联聚乙烯绝缘材料采用辐照的交联方式为宜。

低烟无卤阻燃交联聚乙烯绝缘材料性能见表2。

表2 低烟无卤阻燃交联聚乙烯绝缘材料性能

试验项目	指标
老化前	
抗张强度/MPa	9.0
断裂伸长率/%	160
老化后(135±2℃,240h)	
抗张强度变化率/%	±25
断裂伸长率变化率/%	±25
体积电阻率(90℃)/(Ω·cm)	$10^{12}$
热延伸(200℃,20MPa,15min)	
载荷下伸长率/%	175
冷却后永久伸长率/%	15
氧指数	28
释出气体的pH值	4.3
电导率/μS	10

- (3) 填充。填充层采用低烟无卤阻燃材料。
- (4) 护套。护套采用低烟无卤阻燃热塑性或热固性聚烯烃材料,护套材料在 20 ℃和 80 ℃时分别测得的氧指数数值之差的绝对值应不大于 2。

### 3 试验的内容、程序和方法

#### 3.1 试验内容

- (1) 电缆基本性能型式试验;
- (2) 电缆应能通过 IEEE 383 规定的成束电缆垂直燃烧试验<sup>[1]</sup>;
- (3) 烟浓度试验;
- (4) 成品电缆护套材料燃烧时释放气体的试验;
- (5) 电力电缆电老化试验;

- (6) 绝缘和护套材料的长期耐热性评定试验;
- (7) 等效 50 年运行的热老化模拟试验;
- (8) 等效 50 年运行的放射线照射老化模拟试验;
- (9) 模拟抗震试验;
- (10) 等效 50 年运行 LOCA 时的放射线照射试验、模拟 LOCA 试验(高温、高压的水蒸汽);
- (11) 性能检查试验。

其中,(1)~(3)为型式试验,(7)~(10)为环境模拟试验,(8)和(10)两项试验都是经过第7项试验后进行的。性能检查试验包括电压试验、燃烧试验、绝缘和护套的抗拉强度、断裂伸长率的测量等。

#### 3.2 试验程序

核电站用 1E 级电缆试验程序见图 1。

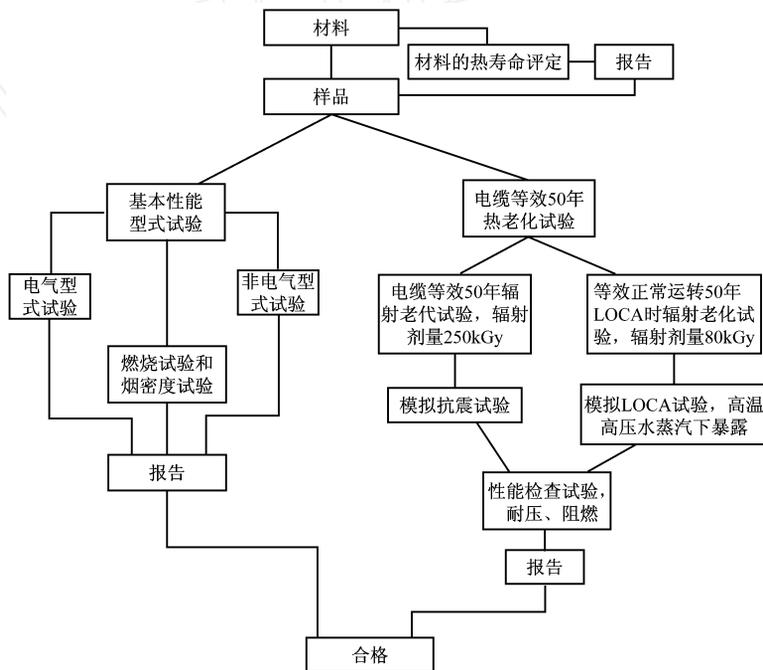


图 1 核电站用 1E 级电缆试验程序

#### 3.3 试验方法

##### 3.3.1 电力电缆 5000 h 电老化试验

电力电缆应通过 5000 h 的电老化试验,试验按 IEC 60502 规定进行测试。试验条件为:

- (1) 电缆试样的长度:不小于 30 m;
- (2) 施加电压:相与相之间施加电压  $2U$  ( $U$  为电缆导体间的额定工频电压);
- (3) 施加电流:电流通过电缆,要使导体温度达到 95~100 ℃;
- (4) 一个循环的持续时间:8 h 加热,然后 16 h 冷却;
- (5) 试验持续时间:不少于 5000 h(即 209 个温度循环)。

试验结果:试验期间电缆应不击穿。

试验电压和试验时间是依据电缆绝缘的寿命指数  $n$  来确定的,并留有一定的安全裕度,电老化寿命方程式为:

$$U^n t = C \quad (1)$$

式中, $U$  为电缆上施加的电压; $n$  为寿命指数; $t$  为电击穿时间; $C$  为常数(与结构等有关)。

我们采用的交联聚乙烯的寿命指数  $n = 9$ ,核电站要求电缆使用寿命为 50 年,可利用式(1)来推算电压与时间的关系。例如:工作电压  $U = 10$  kV,则要求工作时间  $t = 348000$  h(50 年);试验电压  $U_1 = 20$  kV,则要求试验时间  $t_1 = 5000$  h。

将上述参数代入式(1)  $U^n t = U_1^n t_1 = C$  可

得:

$$10^n \times 348000 = 20^n \times 5000$$

求解可得  $n = 6.45$ , 小于 9, 说明该试验方法有安全裕度。

### 3.3.2 绝缘和护套材料的长期耐热性评定试验

根据 IEC 60216 标准和 IEEE 383-74 标准<sup>[1]</sup>推荐用于非金属材料加速老化规律的数学模型为阿伦纽斯 (Arrhenius) 经验推算公式:

$$\ln = a + b/T \quad (2)$$

式中, 为产品在温度  $T$  条件下工作的寿命 (h);  $T$  为工作温度 (K);  $a, b$  为待定系数。

式(2)已应用了几十年, 很多情况下验证有效。在设定的工作温度下, 通过试验和推导, 可计算出待定系数  $a$  和  $b$ , 然后利用式(2)可算出寿命, 若的数值大于期望值, 也就满足了设计寿命要求。

(1) 试验温度和时间的确定。常规老化试验为 135 °C、168 h, 因此可确定 135 °C 为最低试验温度。试验方案参考 IEC 60216“确定热老化试验程序和评定试验结果的一般规程”和 IEEE 383 标准。寿命评定试验温度的每个级差取 15 °C, 共有 4 个试验温度点, 最高试验温度为 180 °C。试验时间延续到 5000 h 左右。

(2) 寿命终止参数的选择。绝缘材料热老化过程中有两个特征参数, 即抗张强度和断裂伸长率, 在本试验过程中, 断裂伸长率的下降速率比抗张强度高, 故取断裂伸长率作为寿命评定参数。按电缆敷设弯曲半径计算, 绝缘实际伸长率不超过 10%。测得试样原始断裂伸长率为 160%, 假设取断裂伸长率保留率 50% 作为寿命终止点, 此时断裂伸长率仍有 80%, 对运行中电缆有足够的安全系数。

(3) 数据处理及寿命推算。按 IEC 60216-1 导则及相关数学原理处理, 先应用作图法, 根据假设的寿命终止点绘出 Arrhenius 曲线图。同时计算出待定系数  $a, b$ , 确定试验材料的温度与寿命关系式, 当 90 °C 时计算寿命值不小于 50 年时, 材料即判定为具有 50 年合格寿命。

### 3.3.3 等效 50 年运行的热老化模拟试验

根据 IEEE 383-74 标准, 成品电缆样品的热老化模拟试验使用 Arrhenius 技术制定的数据, 在一定温度和时间内将电缆放置在空气循环烘箱内来进行模拟试验。

绝缘和护套材料热特性数据应建立在热寿命评定结果的基础上。将已确立的材料具有 50 年使用寿命的 Arrhenius 曲线图和温度与寿命关系式, 作为确定成品电缆样品运行老化模拟试验数据的依据。

已经确立的 Arrhenius 曲线图和温度与寿命关系式, 是在材料的断裂伸长率保留率为 50% 时的假定寿命终止点, 成品电缆样品等效 50 年运行热老化模拟试验应选择在 90 °C 时, 假定寿命终止前的一个点。在 Arrhenius 曲线图中, 根据式(2)和已知的斜率, 建立新的曲线和温度与时间关系式来选择模拟试验的温度和时间。

### 3.3.4 等效 50 年运行的放射线照射老化模拟试验

辐射试验的成品电缆样品应经过等效 50 年运行的热老化模拟试验。等效 50 年运行的辐射老化模拟试验以  $Co^{60}$  作为放射源, 辐射的速率不大于  $1.0 \times 10^4$  Gy/h。辐射剂量为  $2.5 \times 10^5$  Gy, 满足电缆在核辅助厂房和反应堆厂房中正常辐射剂量环境条件的耐辐射性能要求。

### 3.3.5 模拟抗震试验

电缆样品缠绕直径  $20D$  ( $D$  为电缆外径) 的试验圆柱体至少一圈, 再反方向重复此过程, 为一个循环, 共三个循环。缠绕循环后, 将绕在圆柱体上的试样放入加热至电缆额定运行温度的烘箱中 24 h, 冷却后进行第 3.3.7 节规定的性能检查试验。

### 3.3.6 等效 50 年运行 LOCA 时的放射线照射试验、模拟 LOCA 试验(高温、高压水蒸汽下暴露)

LOCA (Loss of coolant accident) 是冷却剂跑失事故, 在轻水反应堆中也称为失水事故。无论是在沸水堆 (BWR) 还是在压水堆 (PWR) 体系中, 由于管道渗漏或其它原因, 冷却剂跑失事故有时会发生。在这种情况下, 电缆, 无论是在安全壳内或外, 都要受到严峻的考验, 即承受不同程度的高温、高压, 化学物质喷射和更大剂量的放射线照射。只有通过这种模拟 LOCA 条件试验的电缆才能安全使用在核电站<sup>[2]</sup>。因此, 反应堆厂房内的电缆, 无论在安全壳内还是在安全壳外都应进行 LOCA 试验。

LOCA 时的放射线照射试验: 以  $Co^{60}$  作为放射源, 辐射的速率不大于  $1.0 \times 10^4$  Gy/h, 辐射剂量为  $8.0 \times 10^4$  Gy。

模拟 LOCA 试验: 试验条件及时间见图 2, 图 2 中的横坐标为非连续时间, 5 h 处加“0”, 表示第一阶段终止, 即第二阶段的开始; 19 h 处加“0”, 表示第三阶段的开始, 试验时间总计为 25 d。在额定运行电压下进行, 图 2 中有 2 次升温过程, 温度在 10 s 内从 50 °C 骤升到 150 °C, 蒸汽压力增至 0.5 MPa, 保持 15 min; 并在升温后 12 min 开始化学喷淋, 化学溶液是由浓度为 2000 ~ 4000 ppm (1 ppm =  $1 \times 10^{-4}$  %) 的  $H_3BO_3$  加 NaOH 配制而成, 碱溶液的 pH 值为 8.5 ~ 10.5, 喷射流量对水平投影面为  $34.2 \text{ L/min} \cdot \text{m}^2$ 。

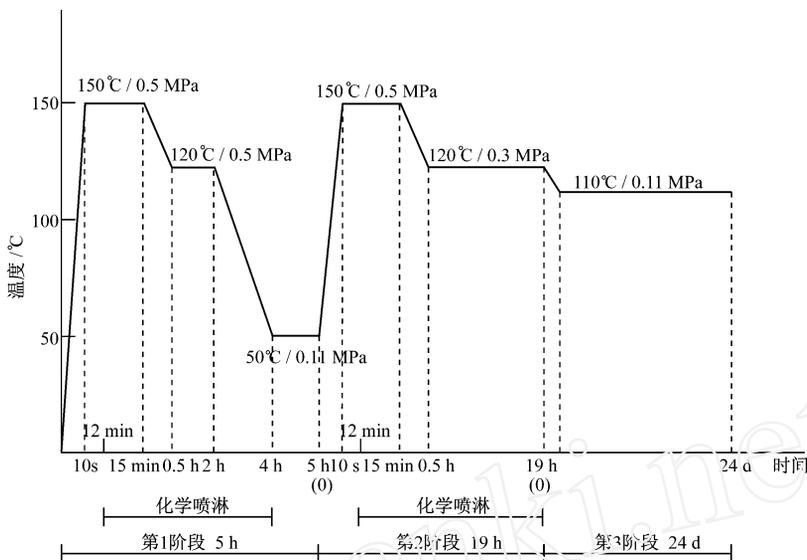


图2 模拟 I.G.C.A. 试验条件曲线图

### 3.3.7 性能检查试验

性能检查试验包括耐压试验、燃烧试验、绝缘电阻、绝缘和护套的抗张强度、断裂伸长率的测试,其中绝缘电阻、抗张强度和断裂伸长率测试仅作参考。

**耐压试验:**将样品弯曲,其弯曲直径为样品中电缆直径的40倍,然后以3.15 kV/min 梯度施加电压,持续5 min,电缆应不击穿。

**燃烧试验:**通过 IEEE 383 规定的成束燃烧试验。

## 4 结束语

核电站用1E级电缆有很多品种,本文仅对其中

一个绝缘类型进行了粗浅描述,希望能够给开发1E级电缆的生产厂家带来一些启发和帮助。

我国即将进入核电站建设高潮时期,1E级电缆全面国产化是必然趋势,开发1E级电缆,采用新材料、新工艺是我们电缆行业面临的一大课题,同样也盼望核电站用1E级电缆的国家标准早日颁发。

### 参考文献:

[1] IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 383-1974[S].

[2] 娄尔康. 现代电缆工程[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1989, 213-229.

(上接第4页)

厂在烟台近期召开的500 kV 电缆企标审查会,与上缆所、武高所和西安交大的多名资深专家参加讨论,对本文提供了宝贵的参考信息和资料,在此表示感谢;天津-西门子电缆公司的顾总和 ALCATAL 公司顾问李工曾分别提供了两个公司的电缆的设计工艺资料和参考信息,在此也表示感谢。

### 参考文献:

[1] Occhini. High voltage cables with extruded insulation statistical controls and reliability evaluation[J]. PAS-94, 1975, (3): 967-970.

[2] Kaneko. Statistical consideration on impules breakdown characteristics of cross-link polyethylene insulated cables[J]. PAS-94, 1975, (3): 367-370.

[3] Peschke E, Schroth R. Extension of XLPE cables to 500 kV based on progress in technology[Z]. Jicable 1995, SIEMENS Germany.

[4] IEEE Power Delivery[J]. 1994, 9, (4).

[5] Peschke E, Schroth R. XLPE Cable systems upto 500 kV; State of the art and latest developments[Z]. SIEMENS Germany.

[6] Rvon O1shausen Peschke E, Schroth R. Development of EHV XLPE cables: Dimensioning and Test Philosophy[Z]. SIEMENS Germany.