

核电站用电缆料的性能特点

□ 王柏东¹,程仁良²,刘鹏²,彭立新¹,郭雪娥¹

(¹湖南工学院,衡阳,421008,²大亚湾核电站,深圳,518124)

摘要 本文阐述了核电站用电缆料的性能特点,简要介绍了常用的无卤电缆材料。

关键词 核电站 无卤低烟 阻燃电缆料 耐环境性

1 前言

核电站用电缆,种类、数量繁多。据估算,一座百万千瓦级的核电机组,所需各类电缆,型号有 100 余种,总长近 200 千米,价值约 1 亿元左右。如果按用途划分,有电力电缆,控制电缆,测量电缆,通信电缆,防火电缆(硅绝缘电缆)等五大类。它们不仅应具有普通电缆的一般特性,还要具有低烟、无卤、阻燃等特性,并要具有特定的耐环境性(如耐辐射性、耐 LOCA 性)。这些特殊的性能要求,使得核级电缆与一般工业用电缆相比,最大的不同在于电缆所用的绝缘及护套材料不同。

2 核电站用电缆材料的性能要求

(1) 低烟无卤阻燃性

普通的低压阻燃电缆一般以 PVC 等含氯聚合物作绝缘和护套。PVC 电缆在发生火灾事故时会产生大量烟雾,析出氯化氢等有毒气体,除对人的生命构成直接威胁外,还会溶解形成

稀盐酸附着在各种电器设备及建筑物的钢结构上,严重降低设备的安全性及建筑物的使用寿命,特别是当烟气进入通讯技术设备和数据技术设备后,将会使它们丧失正常功能,甚至引发“二次灾害”。

核电站用电缆的绝缘和护套材料,必须采用低烟、无毒、无腐蚀性的无卤阻燃电缆料,如热塑阻燃无卤素或交联阻燃无卤素材料,才能满足特殊的核安全要求。无卤电缆在发生火灾时,燃烧释放的烟雾量很低,不带毒性及腐蚀性,其阻燃成分可有效发挥阻燃作用,不会使电缆成为火焰蔓延的通道。无卤阻燃电缆料的主要技术特性有:

a. 烟密度

它是材料燃烧产生烟雾的一种量度,是在一定试验条件下,借助于光学方法,来测量由于烟雾积聚而产生的光束衰减,用给定时刻的比光密度 D_s 和最大比光密度 D_m 来评定, D_m 表示烟的总累积。 D_m 越大,燃烧时的发烟量越大。一般低烟低卤电缆料的 $D_m < 300$,核电站用

王柏东 程仁良 刘 鹏 彭立新 郭雪娥：核电站用电缆料的性能特点

电缆要求 $D_m < 150$ 。

有关实验表明,一根 1 米长约含 0.85 千克 PVC 的电缆,从燃烧着火起所产生的烟气可在不到 5 分钟的时间内完全笼罩容积为 100m^3 的房间。此时烟的浓度将造成呼吸困难,严重阻碍人员疏散和灭火救援。无卤电缆不存在这一问题。

b. 毒性及腐蚀性

普通 PVC 电缆在燃烧时,产生的氯和氢会结合释放出氯化氢气体,同时其添加剂还产生一些其它的有毒及腐蚀性气体。而无卤电缆采用不含卤素的聚合物作为基料,在燃烧时不会产生酸性气体,因而其毒性及腐蚀性大大低于普通 PVC 电缆。毒性的大小通常用毒性指数来衡量。根据英国海军工程标准(NES713),毒性指数就是 100g 材料在 1m^3 体积中充分燃烧所产生的各种气体的浓度与暴露在相应气体中 30min 致人死命的浓度比值的总和。PVC 电缆燃烧时所释放出大量的有毒气体有 HCl、CO 等,测试表明:HCl 的浓度达到 1300-2000ppm 时,能使生灵迅速致死,CO 浓度达到 400ppm 并作用 30 分钟或达到 2000ppm 并作用 5 分钟,也会伤及人脑危及生命,而且 CO 无 HCl 刺激感,不易为人察觉,故更具有危害性。电缆的无卤化,使燃烧析出的气体中不存 HCl,又降低了 CO 的含量。

c. 阻燃性

无卤阻燃电缆的阻燃机理是,在不含卤素的聚合物中加入大量的氢氧化铝或氢氧化镁等填充剂,它们在电缆燃烧时释放结晶水,吸收大量热量,从而抑制聚合物温度上升,延缓热分解,降低燃烧速度。另外,脱水分解产生的水蒸汽,能稀释可燃性气体,产生阻燃效果。聚合物的阻燃性,通常用氧指数法来评定,它表示试样在氧气和氮气的混合物中燃烧时所需要的最低含氧量,指数越大,表示可燃性越小,阻燃性越好。一般氧指数(OI)至少为 28 才具有不燃特性。

d. 耐火特性

当人们要求电缆线路在发生火灾时能继

续发挥作用,并且当电缆由于使用上的需要架设在高危区域的线路上时,电缆必须具备耐火性能。一旦遇上火警,此种耐火电缆仍能在一定时间内继续安全运行,为人员及设备的抢救提供电能。核电缆的耐火性能按使用要求不同,分一般耐火性能要求和特殊耐火性能要求。特殊耐火性能要求为:在对电缆撞击条件下进行 1000°C , 5min 燃烧试验,火焰熄灭后继续撞击 5min,同时用规定压力的高压水冲电缆,要求在整个试验过程中电缆能保持继续通电。

美国 1974 年制订 IEEE383 电缆标准后,1975 年发生核电厂电缆着火延燃事故,促使人们重视难燃性试验标准的严格性问题。对于核岛用电缆成品,达到无卤/低烟/阻燃,即要求电缆成品能通过 IEC332-3 成束燃烧试验,燃烧烟浓度达到 IEC1034-2 的技术要求,燃烧腐蚀性气体达到 IEC754-2 规定的推荐值的要求,绝缘线芯通过 IPCEAS-19-81 规定的单根垂直燃烧试验。

(2) 耐环境性

核电站电缆用材料必须具有核电站固有工作环境所要求的耐环境性,即耐热性、耐辐照性、耐 LOCA 性。

a. 耐热性

由于核电站电缆常在高温环境下工作,因此需要它们具有长期耐热使用性能,要选用耐热性满足要求的聚合物,并可让电缆具有四十年以上的使用寿命。

b. 耐辐照性(缓和环境,严酷环境)

核电站用电缆受到大量 γ 射线时,会使绝缘和护套材料变脆,机械性能变差。因此,作为核电站电缆用的绝缘和护套材料,必须具有优良的耐辐照性。各种不同的高聚物,其耐辐照性能不同。人们通常在高聚物里添加抗辐照剂,改进其耐辐照性能。人们通常用 Co-60 作辐射源,对电缆材料进行辐照试验。辐照剂量依缓和环境和(正常运行)和严酷环境(发生事故时)而不同,不同国家有关吸收剂量的规定和辐射程序也有差异,见表 1。

表1 辐照试验条件(γ 射线)

国别		美国	法国	德国	日本
吸收剂量/Mrad	正常运行	70	25(70°C)	5(35°C)	50
	LOCA/HELB	30	60(70°C)	20(35°C)	150
总吸收剂量/ Mrad		100	85	25	200
吸收剂量率 /(Mrad/h)	正常运行	<1.0	0.05-0.15	0.5	<1.0
	LOCA/HELB	<1.0	0.15-0.75	0.5	<1.0

c. 耐 LOCA 性

在核电站里,通常将冷却剂损失事故(Loss of Cooling Accident,缩写为 LOCA)和高能管破裂事故(High Energy line Break,缩写为 HELB)统称 LOCA。在发生 LOCA/HELB 时,电缆会受到高温高压蒸汽的冲击和腐蚀性化学药剂的作用,并且要受到比正常运行情况下更高 γ 射线剂量的辐射。因此,核电站电缆应具有耐 LOCA 性。交联聚乙烯、乙丙橡胶、EVA 弹性体(醋酸乙烯-醋酸乙烯共聚物)等无卤交联材料都具有较好的耐 LOCA 性。较多的非交联型无卤材料,经过 LOCA 作用后,会变脆。有关电缆的耐 LOCA 性,不同核电站的要求也不相同。

综上所述,核电站的电缆除要具有普通电缆所具有的性能之外,还要具有无卤、低烟、阻燃的特性,并满足根据其在敷设区域的正常和事故环境下完成安全功能所必需的性能要求,也就是须满足以下要求:

- (1) 耐地震;
- (2) 耐正常和事故工况的 γ -射线照射;
- (3) 耐 LOCA/HELB 事故工况的环境;
- (4) 90°C 工作温度下具有电站设计寿命内的使用寿命。

3 无卤阻燃电缆材料种类

无卤阻燃电缆的绝缘和护套,通常使用橡胶或塑料,主要有乙丙橡胶(EPR)、EVA 弹性体(醋酸乙烯-醋酸乙烯共聚物)、交联聚乙烯塑料(XLPE)、聚烯烃类(PO)等。这些材料均具有良好的抗辐照性能,但其本身并不具有阻燃性,须加入大量阻燃剂进行阻燃化,方可满足核电站用电缆材料的阻燃性能要求。下面分别对这

些材料作简要介绍:

(1) 乙丙橡胶

乙丙橡胶(ethylene propylene rubber)是主链具有饱和结构的橡胶。它有各种优良的特性:极高的化学稳定性,优良的耐热老化性、耐臭氧性、抗辐照性、耐高压水蒸汽性,非常好的电绝缘性,适宜作绝缘材料。它不具备阻燃性,因此,须加入大量的水合金属氧化物作为阻燃剂,制成阻燃乙丙橡胶。但这些阻燃剂的大量加入,会使乙丙橡胶的机械性能、电气性能、抗辐照性能下降。因而,须同时添加其它特殊的阻燃剂和有效的抗辐照剂,使原来性能不下降,满足使用要求。

(2) EVA 弹性体

乙烯-乙酸乙烯酯(ethylene-vinyl acetate copolymer,简称 EVA)是乙烯和乙酸乙烯酯的共聚物。它具有优良的抗辐照、耐化学品等性能,用作电缆的护套,同样须加入较多的阻燃剂使具有阻燃性。

(3) 交联聚乙烯(XLPE)

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene)是将线型结构聚乙烯经适当方法处理后,生成网状或体型结构的高聚物。它具有优良的耐热性(软化点为 200°C),优良的电绝缘性、耐低温性和耐化学性,良好的耐辐射性,用作电缆的绝缘材料。

(4) 聚烯烃类(PO)

在聚烯烃类共聚物中加入阻燃材料,可制成无卤阻燃聚烯烃,用作电缆的护套。

通常,核级电缆用乙丙橡胶作绝缘(也有采用双层绝缘的,如内层 EPR 外层 EVA),用交联 EVA 橡胶作护套。这是因为,橡胶类材料在事

王柏东 程仁良 刘鹏 彭立新 郭雪娥: 核电站用电缆料的性能特点

故环境的高温高压蒸气试验里,不易产生永久变形,可保证电缆的正常结构,比塑料类材料更为安全。而不用安全壳内的核级电缆的绝缘和护套主要使用热塑阻燃无卤素或交联阻燃无卤素材料,如绝缘用XLPE,外护套用低烟无卤阻燃聚烯烃,也有用EPR作绝缘而且交联EVA橡胶作护套的。

4 应关注的问题

非交联型热塑性材料如聚烯烃类,生产工艺相对简单,但实际应用表明,此类材料存在着环境应力开裂现象。比如20世纪80年代末,我国核电站进口的一大批电缆,还未使用就有一部分发生了外护套开裂现象,显然不能满足使用要求。从一些进口电缆的应用现状来看,也有一些在使用几年后,发生了严重的外护套开裂现象,绝缘也有开裂的。这是应该非常关注的问题。从核电站的安全要求出发,最好采用交联型材料,并严格控制生产工艺。

其次,要重视材料的耐光性能。现有的标准没有充分考虑到电缆的这种敷设使用要求。当电缆敷设于室内(外)不可避免的有光照时,必须考虑这种要求。交联聚乙烯的耐光性差,最好采用经过耐紫外线处理的乙丙阻燃橡胶作线芯绝缘。当然,也可在敷设时采取一些必要的措施,如不让线芯绝缘裸露。这一点很容易被用户所忽视。

另外,核电缆的使用寿命,原来的设计指标是40年以上,下一代核电站要求达到60年,因此,原来的设计是否能满足使用要求,尚有待于

进一步的实验验证。如何延长电缆的使用寿命,已成为重要的研究课题。

低烟无卤阻燃核电缆,是一种性能水平高、制造难度大的特种电缆,即使是进口产品,在应用过程中也暴露出了不少问题,有的甚至是很严重的问题。如何处理解决好这些问题是不能回避的。

过分强调电缆料的低烟无卤阻燃性能是导致电缆产品出现上述问题的主要症结。是否可以考虑采用低烟低卤阻燃材料来生产核电站的特种电缆,这是电缆行业工作者可以探讨的一个想法。这样做,可以降低电缆材料的配方设计难度,可以使生产工艺较易实现,产品质量会更可靠,在实际应用上也会更安全。

5 结束语

(1) 核电站用电缆材料必须具有低烟无卤阻燃的性能,并具有核电站固有的工作环境所要求的耐环境性。

(2) 核级电缆是性能水平高、制造技术难度大的电缆品种,目前生产技术上并未完全成熟,有待于更深入的探讨研究。

参考文献:

- [1] 连培生. 核电厂建设的特点[J]. 核科学与工程, 2001(3):200-210
- [2] 王春江主编. 电线电缆手册第一分册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [3] 黄淑贞. 核电站用电缆的结构设计和性能要求[J]. 电线电缆, 1998(2)
- [4] 核岛电气设备设计和建造规范, RCC-E. 1987

The Characteristics of Cable Materials for Nuclear Power Plant

Wang Baidong¹, Cheng Renliang², Liu Peng², Peng Lixing¹, GUO Xue-e¹

¹Hunan Institute of Technology, Hengyang, 421008; ²Daya Bay Nuclear Power Plant, Guangdong, 518124

Abstract: This paper states characteristics of cable materials for nuclear power plants and briefly presents the common halogen-free cable materials.

Keywords: Nuclear power plant, LSZH, Flame-resistant cable materials, Resistance to environment.