

# 建筑用长寿命电缆的研制与寿命预测

高振军<sup>1</sup> 余德平<sup>2</sup>

浙江万马股份有限公司 浙江 杭州 311305

**摘要：**根据建筑技术规程的相关要求，设计试制了一种建筑用长寿命电缆，绝缘采用3：7黄金比例的双层辐照工艺，经试验：电缆在导体平均工作温度为70℃时，其运行寿命可达到107.3年，远高于XLPE绝缘电缆47.1年的使用寿命，极大满足了满足了民用建筑耐久性的需求。

**关键词：**长寿命；双层辐照绝缘；阿累尼乌斯曲线；建筑用电缆

## 1 引言

挤包型XLPE绝缘电力电缆在建筑领域中担当着电能分配和传输的重任，是现代化社会发展和建设中不可或缺的关键元件。而在建筑物高度超过100米的高层建筑以及低于100米的民用建筑：如一定规模的医院、公共娱乐场所、地下商场、图书馆、高铁站、长途汽车站、大型超市、航站楼、办公大楼等等敷设管道中，广泛应用着无烟低卤阻燃电缆或无烟低卤阻燃耐火电缆。

众所周知，市场上普遍采用交联聚乙烯绝缘电力电缆和聚氯乙烯绝缘电力电缆，前者的运行温度为90℃，后者运行温度仅有70℃。但这样的产品，从各供电公司定期的运行维护检测来看，电缆正常运行15~25年间，但绝缘层的性能呈线性下降趋势，为产品的质量埋下了隐患。国内建筑物根据房屋用途的不同，使用寿命有所差异，一般性建筑为40~100年，特殊建筑物的使用寿命要求达到100年以上，显眼，现用XLPE绝缘和PVC绝缘的电力电缆的使用寿命无法满足民用建筑设计通则规定的耐久性和建筑物同寿命的需求，高可靠性、运行寿命长的电力电缆在未来在建筑工业领域的需求量将逐年上升。从实际需求出发，本工作结合GB/T 12706.1、JG/T 442相关规定，研制了一种建筑用长寿命电缆，并在电缆的寿命方面进行深入的探讨和验证，型号为WDZA-GYJSYJ(F)-B1 0.6/1kV 4×50+1×25，其结构示意图见图1。

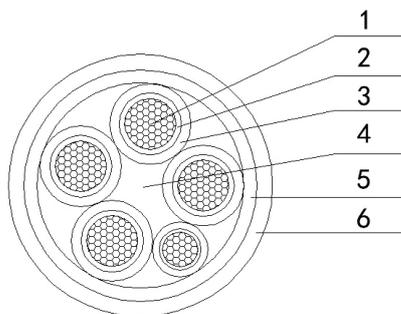


图1 建筑用长寿命电缆结构示意图

图中：1—导体；2—辐照内绝缘；3—辐照外绝缘；4—无卤填充材料；5—阻燃绕包层；6—辐照外护套。

## 2 产品设计

### 2.1 绝缘材料与设计

绝缘材料的选用和生产工艺是建筑用长寿命电缆研发成功的关键，并能有效解决电缆与建筑物同寿命、耐久性问题，根据电缆敷设运行环境特点，绝缘材料采用辐照型105℃无卤阻燃聚烯烃材料，材料主要由高VA含量的EVA（乙烯-醋酸乙烯酯共聚物）、相容剂、超细氢氧化镁、抗氧剂、抗铜剂、助剂等等混合组成，其介电强度在38kV·mm<sup>-1</sup>以上。绝缘材料应具有优异的绝缘、抗老化、阻燃、无卤、无毒性能。

实际生产过程中，根据线芯规格大小，绝缘层厚度控制在0.70mm~2.8mm之间，为了提高绝缘层的使用寿命，绝缘采用3：7黄金比例双层绝缘，其内绝缘占比25%~35%和外绝缘占比65%~75%，挤塑温度140℃~180℃，螺杆转速控制在17Rpm~25Rpm，双层绝缘包覆性更紧密，在相容剂和助剂的调合下绝缘层的相容性更好，延缓了绝缘层物理机械性能的衰减。

建筑用长寿命电缆的辐照交联工艺是将冷却后的绝缘线芯，均匀地通过2.0MeV高能射线加速器，其产生的高能电子束有效穿透绝缘层，通过能量转换产生交联反应，由于电子束带有很高的能量，均匀地穿过绝缘层，形成的交联键结合能量高，稳定性好，其物理机械性能优于温水交联电缆，辐照后绝缘的耐热性能由于90℃提升至105℃，交联度不大于80%，永久变形不大于7%，在整个辐照交联过程中，没有水的介入，其绝缘中的水分子小于100ppm，绝缘纯度高，使辐照后的绝缘电性能、机械性能方面特别优异，绝缘层寿命可达110年，大大延长了绝缘层的击穿强度和运行寿命。

### 2.2 护套材料选用与设计

为满足建筑需求和运行的长寿命，护套采用无卤、

辐照生产工艺。护套选用105℃无卤低烟阻燃聚烯烃护套材料，该材料阻燃剂采用的是粒径为1 μm~3 μm超细氢氧化铝和超细氢氧化镁的混合阻燃剂，使产品具有优异的阻燃自熄性能；在护套中添加低配比的白炭黑和陶瓷化硼酸锌，实现了优异的阻燃结壳性能。经3.0MeV高能射线加速器，其产生的高能电子束可有效穿透0.9mm~6.0mm护套层，通过能量转换产生交联反应，电子束带有很高的能量，均匀地穿过护套层，形成的交联键结合能量高，稳定性好，其护套的物理机械性能符合GB/T12706.1，且远优于热塑性护套材料，辐照后护套的耐热性能由于原来70℃或90℃提升至105℃，交联度不大于80%，永久变形不大于10%，护套包覆性更紧密、硬度和光洁度更高，增强了护套应用场景和使用寿命。

### 2.3 传输容量

本工作研制的建筑用长寿命电缆，结合建筑领域运行环境，相同环境下传输电流值有一定提升，为了方便设计方产品选型，载流量的计算条件选择与传统XLPE绝缘电力电缆相同，运行温度由原来90℃提升至105℃。根据如下公式，可推导出长寿命电缆的最大运行载流量：

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_d \left[ \frac{T_1}{2} + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4) ]}}$$

I为一根导体中流过的电流，A；

$\theta_c$ 为导体长期工作温度，℃；

$\theta_0$ 为环境温度，℃；

$W_d$ 为导体绝缘单位长度的介质损耗，W.m<sup>-1</sup>；

n为电缆中载有负荷的导体芯数；

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 分别为一根导体和金属套之间、金属套和铠装之间衬垫层、电缆外护套、周围媒质的单位长度热阻，m.K.W<sup>-1</sup>；

R为单位长度导体在 $\theta_0$ 温度时的直流电阻，Ω.km<sup>-1</sup>；

$\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为电缆金属套和铠装总损耗分别相对于该电缆所有导体总损耗的比率。

将相关数据代入公式进行综合计算后，可得出工作温度105℃时长寿命电缆的建筑物内运行时（40℃）载流量为187A，在相同敷设运行环境下，相同规格，硅烷交联绝缘电力电缆的空气中（40℃）载流量仅有170A，在建筑工程中运行的载流量可提升10%，提高了电缆的传输容量和电缆运行时的安全裕度。

### 2.4 运行寿命

在实际应用过程中，XLPE或PVC电缆的绝缘老化不仅仅是受单一应力作用，会受到周围运行环境变化（过热）、工作载流量大小及负荷变化（超负荷）的影响，长期在电应力、热应力，机械应力以及环境因素的联合作用下，绝缘层会逐渐老化、运行可靠性慢慢降低，最终造成绝缘破坏。为了提高电缆绝缘材料的可靠性、延长使用寿命，提高电缆长期允许载流量的值，可有效提高电缆的使用寿命。

在理想状态下，导体采用高导电材料或增加导体截面、采用高耐高温绝缘材料以提高电缆绝缘工作温度、采用低介损绝缘材料，都可以提升电缆的传输能力和延长使用寿命，但从材料属性和实现运行状态下，将主流XLPE绝缘电力电缆的工作温度由90℃提升至105℃或更高（125℃、150℃），不会增加产品选型、敷设运行空间以及给设计、制造、施工带来较大影响。为了更好地预测和评估建筑用长寿命电缆的实际使用寿命，本工作采用阿累尼乌斯（Arrhenius）曲线推导出此次研制电缆的使用年限，以电压0.6/1kV，规格4×50+1×25，型号WDZA-GYJSYJ（F）-B1为例，试验数据见表1，绝缘热寿命曲线图见图2。

表1 电缆WDZA-GYJSYJ（F）-B1寿命评定试验检测表

检测项目	技术条件	技术要求	检测结果
绝缘寿命评定试验：断裂伸长率保留率	试验条件： ——温度：170±3℃ ——时间：168 h	≤ 50%	68 60 68 69 70
护套寿命评定试验：断裂伸长率保留率	试验条件： ——温度：170±3℃ ——时间：168 h	≤ 50%	81
绝缘热寿命试验：70℃下电缆使用寿命	试验方法：IEC60216-1:2013 试验参数：试验温度/老化时间 ——170℃/119h ——160℃/685h ——140℃/1600h	≥ 70年	107.3

由表1的检测结果表明，绝缘和护套寿命试验结果符合JG/T 442规定，材料从技术要求上可实现与建筑物同

寿命；由图2寿命曲线可知，采用3：7黄金比例双层绝缘结构，在相容剂和助剂的调合下，导体平均工作温度为

70°C时，绝缘层的运行寿命可达到107.3年，远高于XLPE绝缘电缆47.1年的使用寿命。

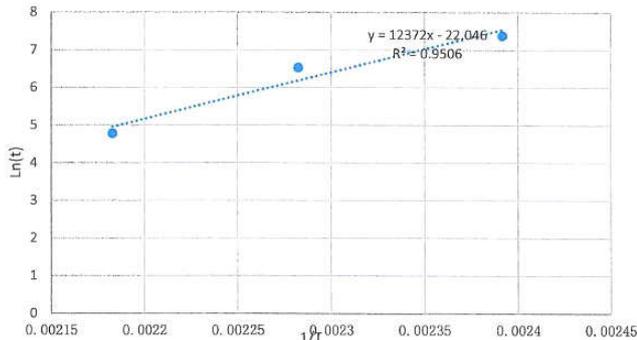


图2 绝缘热寿命曲线图

### 2.5 测试结果

本工作研制的建筑用长寿命电缆经上海的第三方检测机构进行了电气性能试验（正常运行时导体最高温度105°C、4h电压试验、导体电阻、成品耐压试验）、绝缘机械性能[老化前、空气烘箱老化后（135°C，168h）、热延伸、收缩试验（130°C，1h）、吸水试验（85°C，336h重量分析法）]、护套机械性能[老化前、空气烘箱老化后（135°C，168h）、热延伸、低温拉伸试验（-25°C，4h）、低温冲击试验（-25°C，16h）、吸水试验（70°C，24h重量分析法）、高温压力试验（80°C，6h）]、无卤阻燃性能试验（酸气含量、pH值和电导率试验、氟含量试验，其中酸气含量不大于0.5%；pH值不小于4.3；电导率不大于10μS/mm；氟含量不大于0.1%，试验在绝缘、填充、包带、外层套上进行）、成束阻燃A类试验（供火时间40min）、成品电缆的烟密度试验以及燃烧性能等级B1级（电缆在火焰蔓延试验期间的热释放和产烟特性、烟密度试验、垂直火焰蔓延、燃烧滴落物/微粒等级d0级（时间1200s）、烟气毒性等级t0级、腐蚀性等级a1级）试验结果均满足技术标准要求，绝缘和寿命评定试验的检测结果见表1。

从实际的检测数据可知：本次工作研制的电缆各项主要指标均达到了预期效果，试验结果符合GB/T 12706.1、JG/T 442、GB 31247相关规定，材料从技术要求上实现了设计要求。

### 3 结束语

本工作通过设计、研制、试验验证，研制成功了建筑用长寿命电缆，其具有优异的耐化学、耐高温、电绝缘性能，根据绝缘和护套材料特性，采用特殊绝缘层设计和辐照交联工艺，使绝缘纯度较高，且辐照后的绝缘电性能、绝缘和护套的机械性能方面特别优异，经寿命评定试验验证，电缆寿命可达100年以上，满足了民用建筑耐久性的需求。通过对绝缘载流量的研究，电缆在建筑工程中正常运行时的载流量可提升10%，提高了电缆的运行安全系数。

### 参考文献

- [1]中国电器工业协会.电气绝缘材料 耐热性：GB/T 11026-2012[S].北京：中国标准出版社，2013.
- [2]陈昕.XLPE电缆绝缘材料振动-热老化特性与寿命评估[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2018.
- [3]张宇涵.交联聚乙烯电缆与乙丙橡胶电缆剩余寿命预测的理论与研究[D].上海：东华大学，2018.
- [4]JG/T 442-2014 额定电压0.6/1kV双层共挤绝缘辐照交联无卤低烟阻燃电力电缆[S].北京：中国标准出版社出版，2014.
- [5]GB/T 12706.1—2020 额定电压1kV(Um=1.2kV)到35kV(Um=40.5kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分：额定电压1kV (Um=1.2kV)和3kV (Um=3.6kV) 电缆[S].北京：中国标准出版社出版，2020.
- [6]JB/T 10181.1-2000 电缆载流量计算 第1部分 载流量公式（100%损耗因数）和损耗计算 第1节 一般规定[S].北京：机械科学研究院出版社出版，2000.