

# 冷缩型电力电缆附件的技术与应用

陈羽中, 谢忠巍

(深圳市长园新材料股份有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 简述了电力电缆附件的概况, 阐述了冷缩型电缆附件的发展简史、产品的特性及应用范围, 系统介绍了冷缩型电缆附件的制备工艺, 重点叙述了产品原料的筛选及模具的设计。

**关键词:** 电力电缆; 冷缩型电缆附件; 硅橡胶

**中图分类号:** TM215; TM247; TQ324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-9239(2004)06-0060-04

## The technique & application of cold-shrinkable cable accessories

CHEN Yu-zhong, XIE Zhong-wei

(Shenzhen Changyuan New Material Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** This text states the brief of the cable accessories, expatiates the developing history of the cold shrink power cable accessories, specification and applying area. It introduces the construction and researching, especially expatiates the selection of the raw material and designing.

**Key words:** power cable; cold-shrinkable power cable accessories; silicones.

### 1 引言

电力电缆附件是指电缆线路中各种电缆的中间接续及终端接头, 它与电缆一起构成输电网络; 电缆附件主要是依据电缆结构的特性, 既满足及恢复电缆的性能, 又保证电缆长度的延长及终端的连接。按其用途一般分为终端接头及中间接续, 终端接头分为户内、户外终端和设备终端<sup>[1]</sup>; 电缆附件的种类繁多, 常见的有如下几种, 各种类型各有各的特点及局限性, 任一种技术均不能相互取代。①绕包式电缆附件; ②热收缩式电缆附件; ③冷收缩式电缆附件; ④预制件装配式电缆附件; ⑤预制件插入式电缆附件(又称插入式可分离连接器); ⑥树脂浇铸式电缆附件; ⑦模塑式电缆接头; ⑧瓷套式终端。现阶段常用的电缆附件主要是热收缩式电缆附件(热缩式)、冷收缩式电缆附件(冷缩式)、预制件装配式电缆附件(预制式, 见表1)。

本世纪七十年代初, 美国 3M 公司发明了冷收缩技术, 同时把该技术应用于不能动用明火场合(矿山、

化工)的交联电缆附件, 揭开了冷收缩电缆附件应用的新纪元; 1993 年在上海成立公司, 生产和销售冷收缩电缆附件。2000 年前后, 湖南长沙、浙江万马、深圳长园等国内厂家也相继研发生产同类产品, 因该产品使用简便快捷、运行安全可靠而深受用户的广泛欢迎, 与热缩式、预制式在电缆附件行业里形成并驾齐驱的趋势, 并迅速在 10~35 kV 交联电缆附件应用领域里形成主导地位。2004 年 2 月下旬, 冷缩型电力电缆附件安装在中国第一条 35kV 超导电缆、世界(美国、丹麦)第三条 35kV 超导电缆在云南省昆明市普吉变电站挂网运行, 这是电力行业的又一个经典之作, 揭开了中国电力输送领域的新篇章!

### 2 冷收缩原理

众所周知, 橡胶具有“弹性记忆”即弹性回缩力的特性, 利用该特性而形成冷收缩技术。冷收缩技术也是预扩张技术, 即把成型的橡胶部件在弹性范围内扩张成型内致支撑件, 使用时, 套入橡胶件抽去支撑物, 橡胶件在常温下迅速收缩在被包覆的物体上, 形成一个整体。利用橡胶的“弹性记忆”原理制备成冷缩型电缆附件。

**收稿日期:** 2004-08-31; **修回日期:** 2004-10-11

**作者简介:** 陈羽中, 男, 高级工程师, 从事高分子材料辐射加工工程研究工作(Tel: 0755-26719435)。

表 1 3种电缆附件的特性比较

项目比较	热 缩 式	冷 缩 式	预 制 式
适用电压, kV	1~35	10~35	10~35
适用电缆	油纸、交联电力电缆及交、油电缆对接	交联电力电缆	交联电力电缆
主体材料	橡塑改性	液态硅橡胶	液(固)态硅橡胶
邵氏硬度, A	80~90	40~45	40~50
设计结构	应力管、半导体、绝缘管、复合管、伞裙、支套、护套管、单独成型	应力锥、(内、外)半导体、绝缘管或伞裙一次成型, 支套、护套管单独成型	应力锥、内半导体、绝缘管或伞裙一次成型、外半导体喷漆成型、支套、护套管采用热或冷缩材料配套
安装工艺	套装在经过处理的电缆上, 需动用明火或加热, 部件逐一收缩, 施工场地所有限制(如刮风、下雨、防爆), 施工时间(2~4h)长	套装在经过处理的电缆上, 抽取支撑物即可, 无需专用工具及施工场地所有限制(特别适用于石油、化工、煤矿), 施工时间(1~2h)短	套装在经过处理的电缆上, 需配用特殊的安装工具(硅脂膏、氮气、压力枪等)及熟练的安装技能, 施工时间(2~3h)中
产品规格	规格少(以10kV为例, 4种), 适用性强	规格少(以10kV为例, 4种), 适用性强	规格繁多(以10kV为例, 十几种), 适用性差
产品性能	良	优	优
产品价格	便宜	贵	贵

### 3 冷缩电缆附件的制备

冷缩型电力电缆附件的生产工艺流程如下:

支撑条挤出 → 支撑管焊接 → 模具设计 → 橡胶注射 → 二次硫化 → 扩张定型 → 配套成品 → 检验 → 出厂

#### 3.1 模具设计

户外、内终端和中间连接涉及到恢复电缆的结构及电场的系列问题, 应考虑到导体屏蔽、主绝缘、绝缘屏蔽、应力控制及雨裙防爬电距离的综合因素, 而且不同材料和结构的成型问题, 一次成型比二、三次成型可以减少层面间隙从而大大提高产品运行质量。

(1) 对爬电距离和电缆终端相间的安装距离的设计参照国家高压电力设备外绝缘污秽等级<sup>[2]</sup>的规定。不同的污秽等级, 在同一个电压等级下, 污染程度越高爬电的距离就越长。电缆终端、中间接续的绝缘长度应以表面泄露距离而定并有一定的绝缘裕度。户内、外终端、中间绝缘要分开设计, 对于较恶劣的户外环境条件, 容许最大的表面应力为 200V/mm<sup>[3]</sup>; 户内、外终端、中间接续绝缘均按比值计算从带电端子到接地部分之间的表面距离; 另外, 电缆终端安装位置于海拔 1000 米以上时, 由于空气气压降低, 气体电气强度随着下降, 终端的长度必须增长, 海拔每增加 300 米, 长度应增加 3%; 中间接续绝缘长度一般按最小公称爬电比距分级最低等级数值低 20%~50% 设计。户内、外终端都设计伞裙, 既可增加沿面放电路径, 户外淋雨时还可能保留个别干燥区; 10kV 户内终端设计 3 个伞裙, 户外终端设计 5 个伞裙。

#### (2) 模具材料

模具采用硬金属材料, 同时应考虑到橡胶的流动速率、注射压力和摩擦系数, 模具寿命至少要工作 50 万次以上; 模具制造的关键点: ①流道: 半圆形, 直径 1.5~3.2mm, 深度 1.28mm; ②注胶口: 圆形或锥形直径 0.75~2.05mm, 深度 1.28~2.55mm; ③排气: 宽度 1.55~3.2mm, 深度 0.0051~0.0128mm; ④电脉冲加工有助于产品脱模。

#### 3.2 原料的选择

因为冷收缩技术利用橡胶“弹性记忆”的特性, 所以冷缩型电缆附件的原料采用硅橡胶。硅橡胶其分子结构带有端乙烯基, 最主要是由 Si-O(硅-氧)键连成的链状结构, Si-O 键能为 443.5kJ/mol, 比一般橡胶 C-C 键能 384kJ/mol 高, 比太阳能量 398kJ/mol 高得多, 使得硅橡胶比其他普通橡胶具有更好的耐紫外线、耐热性、电绝缘性、化学稳定性等。典型的硅橡胶即聚二甲氧硅氧烷, 具有一种螺旋形分子构型, 其分子间力较小, 因而具有良好的回弹性, 同时指向螺旋外的甲醛可以自由旋转, 分子链外面有一层非极性的有机基团, 对水的溶解度极小, 与水不相亲, 难以吸收水份, 当它和水滴接触时, 形成各自分离的小水珠, 只能凝聚而不会润湿表面, 与此同时还具有憎水性的迁移性, 即大面积的尘埃或杂质堆落在材料表面上, 材料的憎水性约在 8h 后迁移到污秽表面上使污秽表面也具有憎水性, 因而使硅橡胶具有独特的表面性能, 即憎水性、憎水性迁移及表面防粘性。美国 GE 公司、Dow Corning 公司, 德国 Warker 公司, 日本信越, 韩国海龙, 罗地亚, 国内晨光公司等, 产品质量稳定, 性能优越, 但价格昂贵。

硅橡胶按物理特性可分为浆糊状和橡皮泥状, 其

中浆糊状硅橡胶包括加热固化的液态硅橡胶(LSR)、室温固化的室温固化硅橡胶(RTV)和密封胶(SEALANT),橡皮泥状硅橡胶即为高温硫化硅橡胶(HTV);因室温固化硅橡胶(RTV)和密封胶(SEALANT)的物理机械强度差,特别是抗撕裂强度太小无法扩张成型2~3倍,故不能采用。

表2 液态硅橡胶(LSR)和高温硫化硅橡胶(HTV)的性能比较

名称	LSR	HTV
组分	一般为双组分	单组分
主体聚合物	乙烯基封端硅油	甲基乙烯基生胶
分子量	200~1500	3000~10000
填料白	白炭黑(或Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	白炭黑(或Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
催化剂	铂化合物	有机过氧化物
交联剂	含氢硅油	硅生胶上的甲基和乙烯基
阻聚剂	有	无
副产物	理论上无产物	有副产物

因以高温硫化硅橡胶(HTV)一次成型制作的电缆附件在二次硫化中的不同材料和不同形状的层与层面之间生成副产物(有机过氧化物加热分解)而产生气隙,在运行电压下必然产生局部放电直至击穿;再者制品扩张储存半年后永久变形太大,达到20%~30%,即收缩不到扩张前的尺寸,这对需要有一定抱紧力要求的电缆附件是致命的缺陷,故选用液态硅橡胶(LSR)一次成型制作冷缩型电缆附件是安全可靠的。

液态绝缘硅橡胶用于具体的端接和接续时,必须充分考虑下列3种不同类型的环境:A.不受气候影响<sup>[5]</sup>;B.受气候影响;C.地下的应用。

表3 液态绝缘硅橡胶(LSR)的性能

项 目	实测值	检测方法
密度, g/cm <sup>3</sup>	1.15	ASTM D 792
硬度, 邵氏A	40	DIN 53505
拉伸强度, MPa	10.5	ASTM D 2671
断裂伸长率, %	555	ASTM D 2671
撕裂强度, kN/m	48	ASTM D 624B
体积电阻率, Ω·cm	5.5 × 10 <sup>15</sup>	IEC 60093
介电常数	2.7	IEC 60250
介质损耗因数	1 × 10 <sup>-3</sup>	IEC 60250
电气强度, kV/mm	28	IEC 60243
耐漏电起痕指数	1A4.5	IEC 60587
永久变形(365天/300%拉伸), %	5	ASTM D412
阻燃性	FV-0	UL 224

### 3.3 电场应力控制

电应力控制是指对电场分布及电场强度的控制,也就是采用适当措施,使电场分布和电场强度的电力线与等位线处于最佳状态,从而提高整体运行的可靠性和使用寿命;由于电缆屏蔽断口处、末端绝缘断口处的电场发生畸变,不均匀的杂乱电场同时存在轴向和径向分布,其中50%~60%分布在径向屏蔽断口处,为了消除不均匀电场的影响,必须进行电应力控制;不采用电应力控制,这时终端的寿命便取决于屏蔽层端部处的电应力及主要电介质的放电电阻,其寿命一般不超过一年<sup>[4]</sup>。为了改善电缆绝缘屏蔽层切断处的电应力分布,一般采用:(1)几何形状法——采用应力锥缓解电场应力集中(即曲率半径增大);(2)综合控制法——采用电容锥缓解电场应力集中;(3)参数控制法——①采用高介电常数材料电阻材料缓解电场应力集中;②采用非线性电阻材料缓解电场应力集中。冷缩型电缆附件的应力控制一般采用参数型或几何形状的方法,但参数型方法要在硅橡胶中添加大量的高介质材料而降低机械强度,扩张时容易开裂或造成层面裂纹,质量较不稳定,现多采用几何形状的方法。

液态半导体硅橡胶的导电机理不同于导体也不同于绝缘体,是由电子从一个炭黑集聚体跃迁到一个炭黑集聚体的方式通过聚合物产生的。交联电缆的整体结构中有导体屏蔽(内半导体层)和绝缘屏蔽(外半导体层),所以冷缩型电缆附件需要半导体硅橡胶。根据半导体屏蔽电阻率限定的理论依据<sup>[6]</sup>,半导体屏蔽层上将分配到电压为绝缘层上的千分之一,这是相当安全而不至于引起绝缘层击穿,所以一般为保证电缆安全运行,要求半导体层的电阻率 $\rho_s \leq 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ <sup>[7]</sup>;但冷缩型电缆附件的半导体屏蔽层经扩张后以20%~30%的限制性收缩在电缆本体上,因存在20%~30%的扩张(拉伸),半导体屏蔽碳间距增大,必然导致半导体屏蔽体积电阻率增大,必须选用电阻率 $\rho_s \leq 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 才能满足标准要求。

表4 液态半导体硅橡胶(LSR)的性能

项 目	实测值	检测方法
密度, g/cm <sup>3</sup>	1.08	ASTM D 792
硬度, 邵氏A	40	DIN 53505
拉伸强度, MPa	6.0	ASTM D 2671
断裂伸长率, %	410	ASTM D 2671
撕裂强度, kN/m	31	ASTM D 624B
体积电阻率, Ω·cm	1.7 × 10	IEC 60093
永久变形(365天/300%拉伸), %	6	ASTM D412

### 3.4 橡胶注射成型

液态硅橡胶经供料计量泵或注射机注射进入模具,经加热 120℃ 保压 10min 脱模成型,再经 200℃ 加热 4h 的二次硫化,确保交联度达到 90% 以上,制品的永久变形(50℃/48h/200% 定拉伸)在 2% 以下;供料计量泵主要有德国 2KM 公司、美国 ENGER-SOLLRAND 公司,注射机主要有德国 2KM、DES-MA 公司、法国 REP 公司,日本 SANJO 公司、奥地利 ENGEL 公司、台湾 MULTIPLAS 公司。

### 3.5 扩张定型

冷缩型电缆附件扩张设备是非标设备,而扩张设备的设计是否科学、扩张工艺控制的好坏与否,直接影响产品的质量,对电缆长期安全运行起到积极的作用。冷缩型电缆附件的生产制造方法,大体上可归纳为气压扩张法、机械扩张法等。

(1)气压扩张法:通过压缩空气和抽真空提供一定的压力对制品进行扩张,即管内充一定空气压力,管外施加负压扩张,放入支撑管,该方法径向扩张倍率大,管材内外壁光滑无缺陷,是较为实用的扩张方法,是扩张工艺发展的趋势;

(2)机械扩张法:利用机械运动对制品进行扩张或拉伸方法,即以钢丝支撑骨架锥体杆插入扩张法,放入支撑管,纵向拉伸几乎为零,但致命缺点是钢丝易损伤管材内壁,造成严重缺陷。

## 4 冷缩型电缆附件的性能

冷缩型电缆附件分别通过了电力工业部电气设备质量检验测试中心、KEMA T & D TESTING SERVICES(荷兰 KEMA 实验室)的型式试验、中国船级社检测认证,是国内首家通过国际权威机构的检测的产品,检测所依据的标准为 IEC60502-4。

## 5 结束语

冷缩型电力电缆附件技术日臻成熟,以稳定的质量,快捷的安装,安全可靠的服务,已经为电力工业建设的繁荣发展作出了很大贡献,并将有更广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] JB/T8640-1997 1-2. 额定电压 26/35kV 及以下电力电缆附件型号编制方法[S].
- [2] 中国电力百科全书输电与配电卷[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [3] 武汉高压研究所. 35 千伏及以下热缩电缆附件[R]. 第 3 次全国电力电缆运行经验交流会资料汇编,1982.
- [4] 电线电缆手册(第 1 册)[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [5] 陈羽中. 热缩型电缆附件的技术与应用[J]. 绝缘材料,2002(2):34~39.
- [6] 徐刚,等. 中高压电力电缆半导体屏蔽电阻率特性分析[J]. 电线电缆,2004,(3):25~26.
- [7] GB/T12706.2-3-2002. 额定电压 1kV( $U_m=1.2kV$ )以上至 36kV( $U_m=40.5kV$ )挤出绝缘电力电缆及其附件[S]. GB/T 11017.1-2-2002. 额定电压 110kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件[S].

(上接第 56 页)

从以上的一系列的试验结果来分析可知,要避免由灌封材料引起的压敏电阻劣化现象,一是调整压敏电阻的瓷料配方。瓷料配方决定电阻器的性能好坏,是解决劣化现象的关键之一。二是选择与压敏电阻相匹配的绝缘灌封材料。它必须具有很高的绝缘电阻,能将压敏电阻边沿微间隙堵住,还必须具有化学稳定性好,不会破坏晶界势垒。三是先用绝缘釉对压敏电阻进行侧面处理,再用灌封材料进行封装,这样可避免灌封材料沿着微间隙渗入电阻体。

## 4 结论

(1)合格的压敏电阻器,经绝缘灌封材料封装以后,引起漏电流持续上升,不能趋于稳定,是由于灌封材料沿着微间隙渗入电阻体,引起压敏电阻的性能劣化。

(2)流过 SPD 的电流,不全是流过压敏电阻的,

仍有一部分是流过灌封材料的侧面电流,这两部分电流相互并联。

(3)要选择与压敏电阻相匹配的绝缘灌封材料,或者先用侧面绝缘釉进行侧面处理后,再用灌封材料对压敏电阻进行灌封,可避免由于灌封材料引起的压敏电阻性能劣化。

### 参考文献

- [1] T K Gupta, Application of zinc oxide varistors [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1990, 73(7):1817~1840.
- [2] 徐廷献. 电子陶瓷材料[M]. 天津:天津大学出版社,1993. 324~352.
- [3] IEC61643-1, Surge Protective Devices connected to Low-Voltage Power Distribution System, Part 1: Performance requirements and testing methods[S]. 1998.
- [4] 王智明. 低压电源避雷器的应用技术[J]. 低压电器,2000,(6):57~59.
- [5] 邹晨. 封装材料的改进及其对压敏电阻耐受性能的影响[J]. 绝缘材料,2003,(2):44~47.