第 49 卷 第 2 期：546-553 高电压技术 Vol.49, No.2: 546-553
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211745

极寒环境下电缆 GIS 终端界面故障分析

张世泽[1]，彭　超[1]，梁建权[2]，孙　巍[2]，李　琳[2]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074;
2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院，哈尔滨 150000）

摘　要：气体绝缘(gas insulated switchgear，GIS)电缆终端广泛地应用于高压电缆系统中，近年冬季出现了多起因低温引发的故障，绝缘界面是导致极寒环境下电缆 GIS 终端发生故障的主要原因之一。该文基于电缆 GIS 终端内部两种界面的故障，针对环氧套管/橡胶界面，制作 GIS 环氧套管试样并开展了–40 ℃的机械性能试验，利用有限元分析计算了环氧套管的应力场；针对橡胶/交联聚乙烯界面故障，制作界面模拟试样并开展了不同温度和粗糙度条件下的击穿试验。结果表明：环氧套管在温度骤降时，其金属嵌件螺母处的内应力会增大，甚至超过其抗弯强度，硅橡胶的收缩会使环氧套管/橡胶界面出现气隙，可能引发套管的击穿；低温下的温度循环是导致极寒环境下 GIS 电缆终端橡胶/交联聚乙烯界面破坏的主要原因之一。分析结果可为极寒地区的 GIS 电缆终端结构设计和运维提供参考依据。

关键词：电缆终端；环氧套管；低温；绝缘配合；复合界面；温度循环

Fault Analysis of Cable GIS Terminal Interface Under Extremely Cold Environment

ZHANG Shize[1], PENG Chao[1], LIANG Jianquan[2], SUN Wei[2], LI Lin[2]
(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150000, China)

Abstract: Gas insulated switchgear (GIS) cable terminal is widely used in high-voltage cable system. In recent years, many failures caused by low temperature have occurred in cable terminals in winter, and the insulation interface is one of the main reasons for the failure of cable GIS terminals in extremely cold environments. This paper is based on the faults of two interfaces inside the cable GIS terminal. The GIS epoxy casing simulation sample was prepared for the epoxy bushing/rubber interface, and the mechanical properties test and stress field finite element analysis were carried out at –40 ℃. In view of the failure of rubber/XLPE interface, the interface sample was prepared and the breakdown test was carried out under different temperature and roughness conditions. The results show that when the temperature of epoxy casing drops suddenly, the internal stress at the metal insert nut will increase or even exceed its bending strength. The shrinkage of silicone rubber will cause an air gap at the epoxy casing/rubber interface, which may lead to the breakdown of the casing. Temperature cycling at low temperatures is one of the main reasons for the failure of rubber/XLPE interface at GIS cable terminal in extremely cold environments. The analysis results in this paper can provide a basis for GIS cable terminal design and maintenance in extremely cold areas.

Key words: cable termination; epoxy bushing; low temperature; insulation coordination; composite interface; temperature cycle

0　引言

气体绝缘(gas insulated switchgear，GIS)电缆终端是安装在 GIS 设备上以 SF_6 气体为外绝缘的电缆附件。由于 GIS 终端结构紧凑、方便检修、受外界环境影响较小，已得到广泛应用。据电力部门调研，近年来电缆 GIS 终端故障频繁发生[1-3]，尤其是在冬季气温急剧变化或处于高寒等极端气候区域[4-5]，其故障现象主要表现为：环氧套管开裂、应力锥托上有烧蚀孔、应力锥下端的电缆本体上有较大的贯穿性裂纹等[6-9]，故障主要发生于电缆附件内部的界面。在气象专业中，将–40 ℃以下的低温定义为极寒环境，而目前对于电缆 GIS 终端在该环境下的性能参数设计和试验检测尚处于研究阶段。在当今全球变暖的大趋势下，未来各种极端气候将会愈发频

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目 (5200-201930071A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5200-201930071A-0-0-00).

繁[10]，仅 2021 年初国网公司就发布了 3 次寒潮及雨雪冰冻预警，由寒潮引发的美国德州大停电更是导致百万人停电事故。因此亟待开展电缆 GIS 终端在低温条件下故障特性的研究，以保障电缆系统的安全稳定运行。

电缆 GIS 终端一般由 5 个部分组成：一是内绝缘，其作用在于改善电缆终端电场分布，在生产时把乙丙橡胶或硅橡胶预制成橡胶增强件，预制件底部应力锥处与挤压半导电合成橡胶完全粘合成整体；二是环氧绝缘件，其与应力锥紧贴形成复合界面；三是弹簧压缩装置，其作用是给橡胶预制件一定压力，使其可以紧固地压在环氧件及电缆绝缘上，提供绝缘性能；四是密封结构；五是金具，包括出线金具、连接金具、尾管等。其中，橡胶材料直接与电缆的交联聚乙烯绝缘配合；环氧树脂材料用于橡胶应力锥外部，与橡胶绝缘件直接配合。因此，终端内部存在着环氧树脂/橡胶、橡胶/交联聚乙烯两种复合界面。

环氧套管是由环氧树脂浇注在金属嵌件上生产的，由于环氧树脂与金属材料膨胀系数相差较大，生产时其固化交联收缩应力及热应力难以完全释放，难免出现局部应力集中[11]。当处于低温环境下时，由于金属与环氧树脂膨胀率的差异，容易导致在两者的结合面处产生缝隙，同时在使用时金属嵌件又处于电磁力及机械力的双重作用下[12]，在低温下是最容易损坏的部位。

对于电缆 GIS 故障的研究，文献[1]通过试验得出常规运行条件下导致环氧套管开裂是由于安装偏差和套管的顶部异常受力；文献[13]通过电性能试验对干式绝缘电缆 GIS 终端界面应力进行了设计和验证；文献[14]认为–40 ℃下电缆终端内局放发展过程与其放电相位、不对称度等参量密切相关；文献[15-16]采用多种频段的局放检测对 GIS 电缆终端进行长期的监测分析，提出适用于电缆 GIS 终端的故障诊断方案；文献[17]利用最小二乘法构建多元非线性回归模型，提出电缆终端故障损伤评价方法；文献[18]建立电缆 GIS 终端等效热路模型，得出 GIS 电缆终端的轴向传热特性，文献[19-20]分别研究了绝缘老化和缺陷对电缆终端电场的影响，文献[21]通过电缆电容变化对电缆附件缺陷进行检测分析，文献[22]研究了 80~120 ℃温度循环下电缆附件的界面压力变化情况。上述研究侧重于常规运行条件，对于低温下电缆 GIS 终端的运行状况研究较少，根据目前搜集的故障案例，低温下 GIS 终端界面故障现象主要有两类：一是环氧套管的开裂和击穿；二是橡胶与电缆绝缘配合界面性能降低，产生局部放电，在长期运行过程中逐渐使电缆绝缘材料进一步分解、劣化，直至超出该位置电缆绝缘材料的击穿强度后，引发电缆绝缘本体击穿。初步分析是因为橡胶/环氧树脂材料会随着温度下降而失去弹性或脆裂[23]，材料性能的改变让电缆与附件的绝缘配合界面性能发生改变，使得产品质量难以保障。另外，由于早晚、夏冬温差较大，材料还会随着温度的变化热胀冷缩，而电缆附件的界面由不同的材料组成，材料的膨胀系数不同，也可能会影响到界面结构，造成系统故障发生。

本文基于电缆 GIS 终端内部存在的两种界面：针对环氧套管/应力锥界面，首先制作了 3 种不同玻璃化温度的 GIS 环氧套管试样，开展–40 ℃的机械性能试验，分析了材料和工艺对环氧套管机械性能的影响；然后利用有限元分析计算环氧套管的应力和位移，分析了其在低温条件下的应力分布和结构变形，研究其结构变形对绝缘性能及电性能的影响；针对橡胶/交联聚乙烯界面，制作复合界面模拟试样进行低温和温度循环后的击穿电压试验，分析了极寒环境下电缆 GIS 终端界面故障的原因，为低温下电缆 GIS 终端的结构设计、选型和检测提供了理论支撑。

1　环氧套管故障

已有研究表明，环氧树脂材料随着温度的降低，其击穿场强在 25 ℃到–60 ℃呈逐渐升高趋势，–40 ℃时的击穿场强约为 25 ℃时的 1.2 倍，且在该低温下，Al_2O_3 含量对其击穿场强的影响极小，添加 Al_2O_3 的环氧树脂与纯环氧树脂击穿强度基本一致[23-25]。另外，环氧树脂沿面闪络电压随温度降低而逐渐增大，且低温下的纯环氧树脂材料相比添加 Al_2O_3 的环氧树脂材料闪络电压更高，Al_2O_3 的含量越高，其闪络电压越低，电气性能不是极寒环境下环氧套管故障的主要原因。因此，本文首先选择低温冲击试验、弯曲试验对环氧套管低温下的机械性能进行检验，然后通过膨胀系数测试和仿真来研究环氧套管界面在极寒环境下的性能变化。

1.1　环氧套管低温机械性能及影响因素

由于 GIS 终端套管体积较大，直接用实物进行试验研究不仅对检测设备要求高，而且成本较高。

但是仅用环氧树脂试片，又无法模拟 GIS 终端的实际运行情况。设计试验模型时，需模拟金属和环氧树脂的膨胀系数、导热系数参数不一致的状态，而不能仅考虑环氧树脂在低温环境下的性能参数变化，因此本文参考 GIS 终端实际结构，将金属嵌入环氧树脂套管，其制作工艺也严格按照成品 GIS 终端的制作工序进行，开展模拟环氧套管低温特性试验时，样品结构尺寸见图 1。

在低温条件下，环氧树脂材料主要的特征温度体现为玻璃化温度。据调研，目前各大电缆附件厂均以玻璃化温度大于 105 ℃作为环氧树脂性能的考核指标之一。因此，本文以玻璃化温度对不同环氧套管样品进行区分，制作不同玻璃化温度的环氧套管开展性能分析。

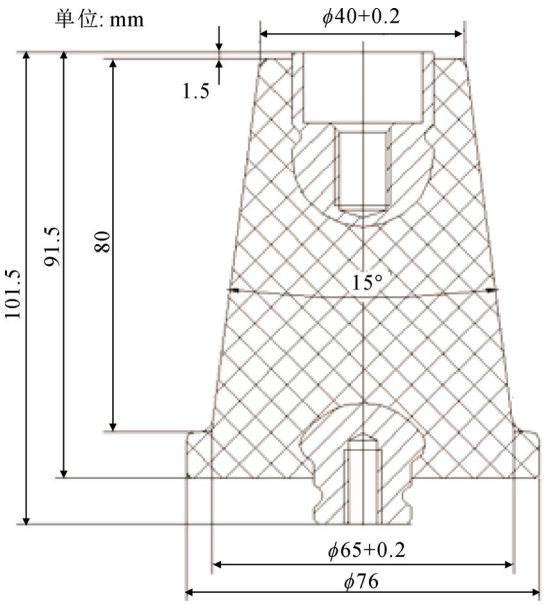
共制作了 3 组试验样品，均采用平均粒径为 400 目(约 38 μm)的填料。A 组填料为硅微粉加入色粉料调色，B、C 组填料为氧化铝未加入色粉料，氧化铝填料质量分数为 75%。A、B 组均采用真空浇注成型工艺，C 组采用压力凝胶成型工艺。金属嵌件采用膨胀系数与环氧套管接近的铝合金材料，固化剂则根据各自原料成分按照比例计算加入。玻璃化温度检测结果如表 1 所示，可以看出，A 组、B 组材料玻璃化温度存在一定差异，但差异较小，C 组玻璃化温度明显低于 A、B 组。因此，玻璃化温度同时受到配方和工艺的影响，真空浇注成型工艺的玻璃化温度明显高于压力凝胶成型工艺。

对 A 组和 B 组样品分别进行–40、–20、0、20 ℃下的低温冲击试验，试验按照标准 ASTM D5420–16 执行，根据标准和制作样品厚度计算选择采用 3352 J 的能量冲击模拟试样，试验结果见表 2。

环氧树脂 A 组材料试样抗冲击能力明显不如 B 组材料，同样的冲击能量，A 组材料在 0 ℃时开始有轻微撞痕，而 B 组在–40 ℃时依然保持试样完好，无任何变化，因此以 Al_2O_3 为填料可显著提高环氧套管的低温冲击性能。

分别测量 3 组样品在–40、–20、0 和 20 ℃的抗弯强度如图 2 所示。

由图 2 可见，3 组样品的抗弯强度均随温度的降低逐渐增大，–40 ℃下最大(增加约 10%)。其中，B 组的抗弯强度大于 A 组。即相同工艺加工后，玻璃化温度较高的树脂材料抗弯强度较大。C 组的抗弯强度与 B 组接近，但玻璃化温度明显低于 A、B 两组(见表 1)，C 组采用的是压力凝胶工艺，A、B 两组均为真空浇注工艺，可见环氧树脂材料的抗弯强度受到玻璃化温度和材料基料、成型工艺的共同影响。



(a) 环氧套管结构尺寸



(b) A 组



(c) B、C 组

图 1 环氧套管模拟试样

Fig.1 Epoxy bushing simulation sample

表 1 玻璃化温度测量结果

Table 1 Glass transition temperature measurement results

序号	A 组温度/℃	B 组温度/℃	C 组温度/℃
1	105.25	107.78	89.83
2	104.86	106.85	92.08
3	103.38	107.51	91.95
4	103.34	106.81	90.53
5	103.29	106.22	91.23

表 2 低温冲击试验结果

Table 2 Low temperature impact test results

试验温度/℃	A 组外观	B 组外观
20	有轻微撞痕	无变化
0	有轻微裂纹和撞痕	无变化
–20	有裂纹和撞痕	无变化
–40	有裂纹和撞痕	无变化

由上述两项性能试验得出，在低温下不同配方和工艺的环氧套管抗弯强度均随温度降低逐渐增大，玻璃化温度符合要求的环氧套管的机械性能满足其在极寒环境下的使用要求。因此低温机械性能并非导致环氧套管故障的原因。

1.2　低温对环氧套管/橡胶界面的影响

从模拟试样上取样，采用热机械分析仪分别测量 3 种样品环氧树脂的膨胀系数，得到平均线膨胀系数如表 3 所示。

由表 3 可见，玻璃化温度大的环氧套管膨胀系数更小，金属嵌件的线膨胀系数一般为 24×10^{-6} K^{-1} 左右，即环氧树脂的线膨胀系数约为金属嵌件的 1~2 倍。而电缆终端在安装时处于常温，此时环氧套管与金属嵌件的螺母紧密贴合，当环境温度突然下降时，环氧树脂的收缩程度大于金属嵌件，环氧树脂外壳在金属嵌件螺母作用下变形。体膨胀系数约为线膨胀系数的 3 倍，因此环氧套管和金属嵌件的相对体积形变量 ΔV 近似为

$$\Delta V \approx 3\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2) \tag{1}$$

式中：α_1 和 α_2 分别为二者的线膨胀系数；ΔT 为温度的变化量，代入上述测量结果可得，当温度下降达 40 ℃时，最大的相对体积形变量为 0.23%。此时，环氧套管会在嵌件螺母拐角出现应力集中现象，其应力约为低应力区的 10 倍以上。而环氧树脂弹性模量 E 一般为 2.87 GPa，由此可估算出膨胀系数导致的最大内应力(单位为 MPa)约为

$$F = 10\Delta VE = 66.01 \tag{2}$$

环氧套管受到拉应力的作用，由上述抗弯强度检测结果可知，在低温环境下正常运行时环氧树脂的抗弯强度能够满足要求。而当温度下降幅度大于 50 ℃时，比如电缆线路在低温环境下突然失电，代入计算内应力最大可达 80.3 MPa，已经大于部分环氧树脂的抗弯强度，此时环氧套管可能会发生开裂，裂纹会起始于金属嵌件螺母并沿环向开裂。在选型时采用玻璃化温度大的环氧套管可有效降低环氧件与金属嵌件之间膨胀系数差异的影响。

另外，由于硅橡胶的膨胀系数在 5.9×10^{-4}~7.9×10^{-4} K^{-1} 之间，该数值远大于环氧套管的膨胀系数，因此温度下降时，硅橡胶收缩更严重。由于环氧套管/橡胶界面为一个锥形，套管的高压电极处于锥形顶部侧边，处于高电位，沿着该界面向下，电位均匀降低，到地电极减小为 0。本文以某厂家 220 kV 干式绝缘 GIS 终端的环氧套管作为研究对象，建立如图 3 所示环氧套管(含硅橡胶应力锥)模型，其尺寸与实际相同，模型主要参数设置如表 4 所示。

仿真结果如图 4 所示。图中，由于该界面呈锥形，此时界面不会同步收缩，取硅橡胶膨胀系数平均为 6.5×10^{-4} K^{-1}，进行有限元热应力仿真，设置套

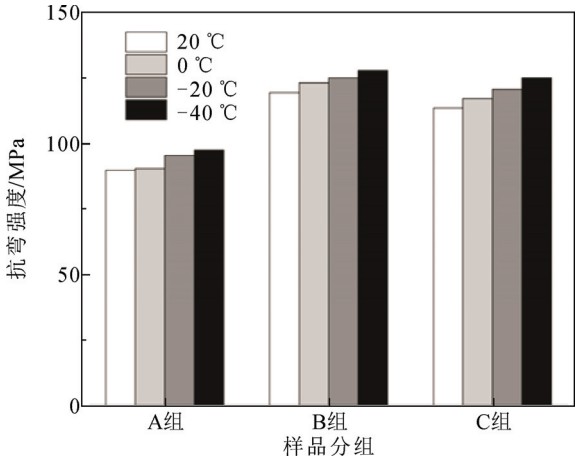


图 2　抗弯强度随温度变化情况

Fig.2　Variation of bending strength with temperature

表 3　膨胀系数测试结果

Table 3　Expansion coefficient test results

样品序号	平均线膨胀系数/(10^{-6} K^{-1})(温度区间–30~70 ℃)
A 组	39
B 组	33
C 组	43

表 4　环氧套管主要参数

Table 4　Main parameters of Epoxy bushing

材料	杨氏模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
环氧树脂	2.87×10^{9}	0.38	1.23×10^{3}
金属嵌件	2.0×10^{11}	0.35	8.6×10^{6}
硅橡胶	1.2×10^{9}	0.48	0.98×10^{3}

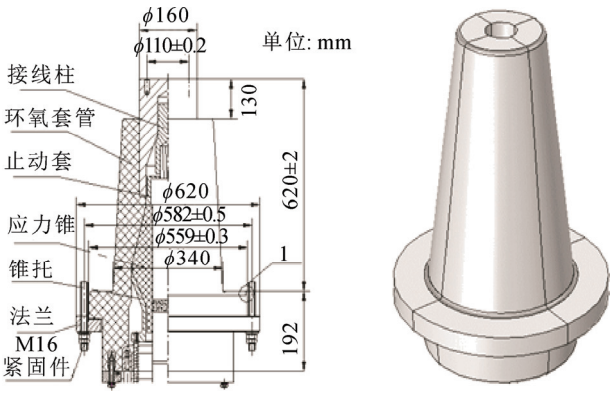


图 3　环氧套管结构参数及模型

Fig.3　Structural parameters and model of epoxy casing

管初始温度为 20 ℃，采用自然冷却方式，直至温度降低至环境温度，分别设置环境温度为 0、–20、–40 ℃。

由图 4 可以看出，在套管内部，锥形面的上半部分收缩量远大于下半部分的收缩量，随着温度的降低，套管表面应力逐渐增大，0 ℃时由于收缩产生应力引起的位移约为 2 mm，到–40 ℃达到在界面处可达 7 mm。随着温度降低幅度的增加，其收缩引起界面处的位移增大，从而形成气隙，该气隙位于终端高压电极附近，导致界面电场发生畸变，可能会引发局部放电，进而击穿环氧套管。

2 橡胶/聚乙烯界面故障

2.1 模拟试样设计

采用聚乙烯绝缘棒模拟电缆绝缘，将橡胶套管与聚乙烯绝缘棒组合，如图 5 所示模拟橡胶与电缆绝缘的界面，其中黑色为导电橡胶。共制作橡胶套管及绝缘棒各 90 个，每种表面粗糙度各 30 个，组合试验制作过程如下：

1）采用硅橡胶材料制备橡胶套管，保证橡胶管内、外表面光滑无缺陷，内表面半导电与绝缘结合处光滑过渡。

2）聚乙烯绝缘棒表面进行打磨处理，分别用 240 目、800 目、2000 目的砂纸将聚乙烯绝缘棒打磨处理成 3 种粗糙度，每号砂纸需打磨至上一号砂纸的痕迹消失，每种粗糙度打磨 30 根。

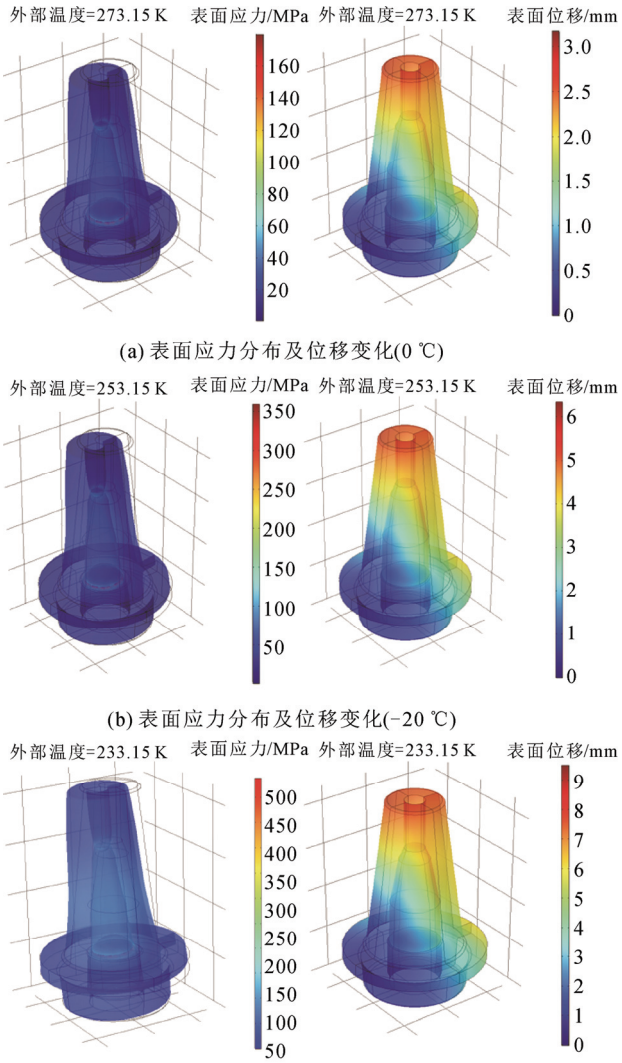
3）在聚乙烯绝缘棒表面涂抹硅油后装进橡胶套管，在安装时均取 2 mm 的过盈量，严格控制各个样品的绝缘橡胶取相同的过盈量和厚度。

2.2 试验过程及结果

1）低温下的界面击穿试验

向绝缘容器内倒入干净硅油，硅油深度能完全浸没试样。将试样与硅油分别在 25、–15、–45 ℃下一起放入高低温循环箱中冷却 24 h 之后，直接在箱中进行绝缘击穿测试。

将试样两端半导电用铜导线扎紧，并引出两根导线，一端连接高压，一端连接地线，将试样悬在硅油中，不触碰到容器且完全浸没在硅油中，如图 6 所示。试验采用串联谐振连续均匀升压，按照标准 GB/T 1695 要求，试验电压从零开始，击穿电压<20 kV 时，按 1 kV/s 升压；击穿电压≥20 kV 时，按 2 kV/s 升压。3 种粗糙度样品分别在 25、–15、–45 ℃各进行 10 次试验，绘制组合试样的 Weibull 分布如图 7 所示。



(a) 表面应力分布及位移变化(0 ℃)

(b) 表面应力分布及位移变化(−20 ℃)

(c) 表面应力分布及位移变化(−40 ℃)

图 4 环氧套管应力计算

Fig.4 Stress calculation of epoxy casing

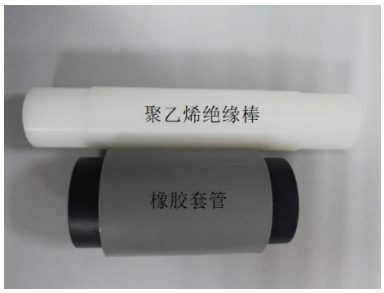


图 5 橡胶套管结构及试验样品

Fig.5 Rubber sleeve structure and test sample

由图 7 可以看出，相同温度下，交联聚乙烯棒打磨得越精细，击穿电压越高；当表面粗糙度达到 800 目以上时，粗糙度的提升对击穿电压的提升幅度影响较小；随着温度降低，同种粗糙度下样品的

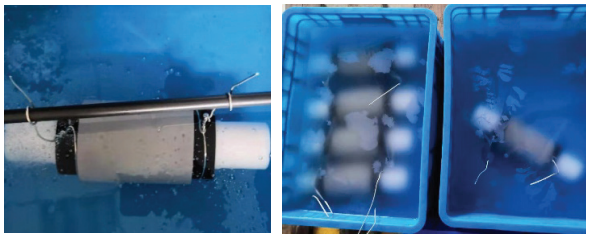


图 6　样品低温处理过程

Fig.6　Low temperature treatment of samples

击穿强度升高。主要原因如下：一是硅橡胶材料的膨胀系数为 5.9×10^{-4}~7.9×10^{-4} ℃$^{-1}$，交联聚乙烯膨胀系数为 1.0×10^{-4}~2.2×10^{-4} ℃$^{-1}$，当样品在低温下收缩时，膨胀系数的差异会导致硅橡胶套管与交联聚乙烯棒的界面压力增大，使界面缺陷变小；二是由于温度降低使硅油的粘度大大升高，硅橡胶套管与交联聚乙烯棒界面之间硅油的填充效果进一步增强，因此正常运行的电缆终端在低温下出现故障概率较低。

2）冷热循环后的绝缘击穿试验

该试验目的是观察温度循环下橡胶材料性能的改变对电缆界面电气性能的影响，试验时在试样中放入压力传感器，见图 8。此次试验共做了 20 个试样，分成 2 组，均采用 800 目的砂纸打磨至相同的表面粗糙度，一组在记录试样压力之后，直接测试其击穿电压。另一组记录试样压力后，再放入冷热循环箱，进行冷热循环试验，低温–40 ℃下冷却 4 h，然后在 2 h 内升温至 25 ℃，保持 4 h，2 h 内降温至–40 ℃，共 2 个循环。取出试样，记录此时压力数据，观察界面压力的变化趋势。然后进行耐压试验，测量击穿电压，并记录击穿电压值。测量结果如表 5 所示。

对于相同表面粗糙度的样品，区别于常规条件下的电缆附件的温度循环[22]，在低温下的循环后各试样的界面压力均呈现轻微的下降趋势，但下降幅度不明显，可近似为没有发生变化，而击穿电压的降低则较明显，击穿电压平均下降幅度为 1.4%。击穿电压中位数为 72.5 kV。按照标准 IEC 60243，选取测量结果在中位数 15%以内的测试结果，绘制出冷热循环后击穿电压的 Weibull 分布曲线如图 9 所示。观察界面击穿电压的分布可以看出，在冷热循环后，其击穿电压分布位于循环前击穿电压的左侧。击穿电压同时受到界面压力、绝缘粗糙度等多种因素影响，虽然在本次试验结果中数据有一定的分散

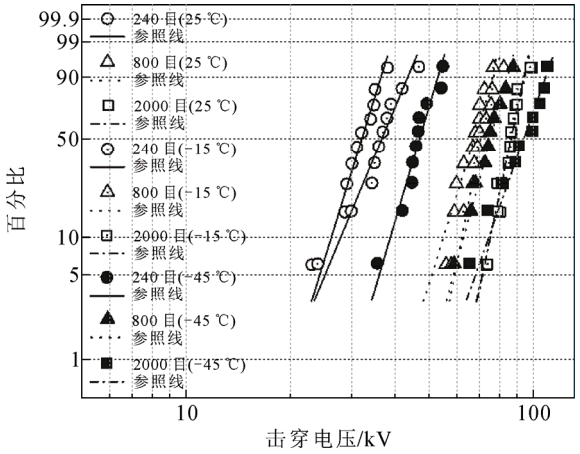


图 7　击穿电压 Weibull 分布

Fig.7　Weibull distribution of breakdown voltage

表 5　冷热循环试验结果

Table 5　Cold and hot cycle test results

样品序号	循环前界面压力/MPa	循环后界面压力/MPa	循环前击穿电压/kV	循环后击穿电压/kV
1	0.0619	0.0617		82
2	0.0564	0.0561		63
3	0.0552	0.0535		63
4	0.0545	0.0543		62
5	0.0581	0.0550		64
6	0.0579		83	
7	0.0561		62	
8	0.0576		73	
9	0.0588		72	
10	0.0547		63	

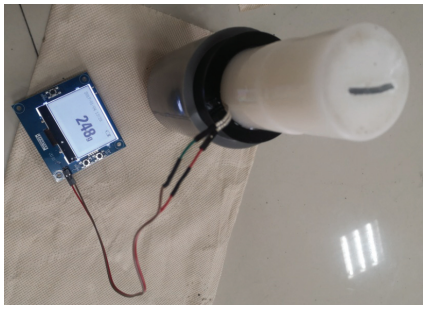


图 8　界面压力测量

Fig.8　Interface pressure measurement

性，但数据拟合的趋势有参考意义。结合低温下的绝缘击穿试验可知，在极寒环境下，温度的变化是导致电缆附件绝缘配合出现故障的主要原因之一。

3　结论

1）环氧树脂在极寒环境下的机械和电气性能变化不是导致环氧套管开裂的原因，其玻璃化温度

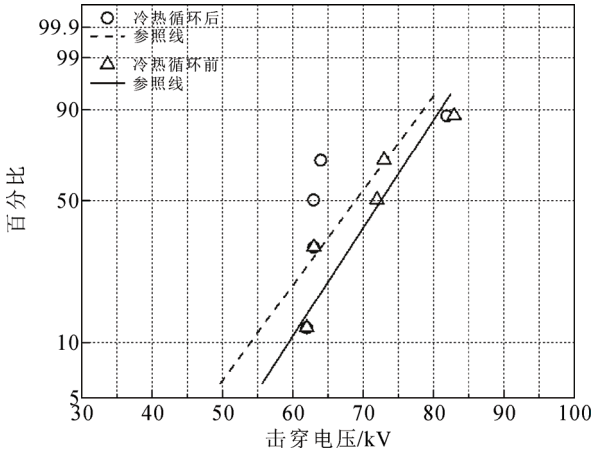


图 9 击穿电压 Weibull 分布

Fig.9 Weibull distribution of breakdown voltage

对其抗弯性能、低温冲击等性能都有较大的影响，而玻璃化温度符合要求的环氧套管能够满足极寒环境下的使用要求。

2）环氧套管的温度下降幅度达 50 ℃时，由于套管金属嵌件与环氧树脂膨胀系数的不同，在金属嵌件螺母拐角处的拉伸应力可能大于环氧树脂的抗弯强度导致套管开裂，裂纹起始于金属嵌件螺母处并沿环向开裂。

3）由于橡胶和环氧树脂膨胀系数的差异，终端内的橡胶/环氧套管界面在温度降低时的收缩可能导致环氧套管靠近高压电极的界面附近出现气隙，随着温度降低的幅度增大，收缩引起界面的位移增大，造成电场畸变，进而引发局部放电，甚至击穿环氧套管。

4）在相同的绝缘表面粗糙度和过盈量下，随着温度降低，电缆附件橡胶/交联聚乙烯界面的击穿强度逐渐升高，绝缘性能增强。虽然交联聚乙烯的膨胀系数小于橡胶，但是在温度循环后，橡胶/交联聚乙烯的界面压力反而会略微减小，界面的击穿强度降低，低温环境不是导致橡胶/交联聚乙烯击穿的原因，而温度的循环变化可能是导致极寒环境下 GIS 电缆终端故障的主要因素。

参考文献 References

[1] 胡 鹏，李成钢，陈大兵. 电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术，2017，36(1)：102-105.
HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabin. Cause analysis and countermeasure study of cracking accident of cable GIS terminal epoxy casing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 102-105.

[2] 张 锋，张志永. 电缆终端故障分析及反思[J]. 应用能源技术，2012(12)：8-10.
ZHANG Feng, ZHANG Zhiyong. Cable terminal fault analysis and reflection[J]. Applied Energy Technology, 2012(12): 8-10.

[3] 周利军，朱少波，白龙雷，等. 低温下应力管界面对车载电缆终端局部放电的影响[J]. 高电压技术，2019，45(4)：1266-1273.
ZHOU Lijun, ZHU Shaobo, BAI Longlei, et al. Influence of stress tubes interface on partial discharge of vehicle cable terminal at low temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1266-1273.

[4] 李 涟，刘志能，曹 皓. 严寒地区电缆 GIS 终端接地短路原因分析[J]. 湖南电力，2014，34(1)：48-50.
LI Lian, LIU Zhineng, CAO Hao. Analysis on ground short trouble of GIS terminal cable in severe cold zone[J]. Hunan Electric Power, 2014, 34(1): 48-50.

[5] 李宏峰，胡建彬，杨博超，等. 电缆 GIS 终端大法兰盘龟裂的分析与研究[J]. 电子制作，2015(4)：55.
LI Hongfeng, HU Jianbin, YANG Bochao, et al. Analysis and Research on cracking of flange of cable GIS terminal[J]. Electronic Production, 2015(4): 55.

[6] 周凤争，孟峥峥，宋鹏先，等. 高压电缆 GIS 终端环氧套管典型缺陷仿真与故障分析[J]. 合成材料老化与应用，2020，49(6)：91-92，41.
ZHOU Fengzheng, MENG Zhengzheng, SONG Pengxian, et al. Simulation of typical defects and analysis of insulation breakdown in epoxy bushing of high voltage GIS cable accessory[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(6): 91-92, 41.

[7] 白龙雷，周利军，邢立勋，等. 高寒环境下低温对乙丙橡胶电缆终端界面放电特性的影响[J]. 电工技术学报，2020，35(3)：646-658.
BAI Longlei, ZHOU Lijun, XING Limeng, et al. Effect of low temperature on interface discharge characteristics of ethylene-propylene rubber cable termination in high-cold environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 646-658.

[8] 王伟敏，郭 蕾，白龙雷，等. 低温下含尖刺缺陷的 EPR 电缆终端主绝缘局部放电发展特性研究[J]. 绝缘材料，2019，52(10)：65-72.
WANG Weimin, GUO Lei, BAI Longlei, et al. Development characteristics of partial discharge in main insulation of EPR cable terminals with spike defect at low temperature[J]. Insulating Materials, 2019, 52(10): 65-72.

[9] 梁 英，崔春艳，董良太. 基于 ANSYS 的复合套管裂纹发展趋势仿真分析[J]. 高电压技术，2015，41(1)：178-183.
LIANG Ying, CUI Chunyan, DONG Liangtai. Development trend's simulation analysis of composite bushing crack by ANSYS[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 178-183.

[10] 沈柏竹，廉 毅，张世轩，等. 北极涛动、极涡活动异常对北半球欧亚大陆冬季气温的影响[J]. 气候变化研究进展，2012，8(6)：434-439.
SHEN Baizhu, LIAN Yi, ZHANG Shixuan, et al. Impacts of arctic oscillation and polar vortex anomalies on winter temperature over Eurasian continent[J]. Climate Change Research, 2012, 8(6): 434-439.

[11] 赵 颖，吴雪峰，白晓萍. 环氧浇注体与嵌件间粘接强度的研究[J]. 高压电器，2014，50(1)：52-55.
ZHAO Ying, WU Xuefeng, BAI Xiaoping. Investigation into bonding intensity between epoxy casting and metal inserts[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 52-55.

[12] 李宝宝. 户外 GIS 套管导线拉力计算[J]. 电气技术，2016(7)：163-165.
LI Baobao. Calculation of tensile force of outdoor GIS casing conductor[J]. Electrical Technology, 2016(7): 163-165.

[13] 王海鱼，张金梅，吕玉春，等. 220 kV 交联电缆干式 GIS 终端界面应力的设计与验证[J]. 高压电器，2011，47(10)：106-110.

WANG Haiyu, ZHANG Jinmei, LÜ Yuchun, et al. Design and verification of the stress on terminal interface of 220 kV XLPE cable dry type GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 106-110.

[14] 白龙雷，周利军，曹伟东，等. −40 ℃条件下 EPR 电缆终端气隙放电发展特性[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3605-3614.
BAI Longlei, ZHOU Lijun, CAO Weidong, et al. Characteristics of Partial Discharge in Air Gap Defects in EPR Cable Termination Under −40 ℃ Condition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3605-3614..

[15] 邓世聪，朱正国，陈腾彪，等. 110 kV XLPE 电缆 GIS 终端局部放电检测技术综合应用[J]. 南方电网技术，2012，6(3)：38-42.
DENG Shicong, ZHU Zhengguo, CHEN Tengbiao, et al. The integrated application of partial discharge detection techniques in 110 kV XLPE cable GIS terminal[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(3): 38-42.

[16] 任志刚，丛　光，李华春，等. GIS 电缆终端缺陷综合局放诊断与分析[J]. 高压电器，2014，50(3)：44-49，57.
REN Zhigang, CONG Guang, LI Huachun, et al. Combined diagnosis of partial discharge for GIS cable terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 44-49, 57.

[17] 周利军，邢立勐，白龙雷，等. 基于多元非线性回归模型的 XLPE 电缆终端环形损伤故障特征[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3124-3133.
ZHOU Lijun, XING Limeng, BAI Longlei, et al. Fault characteristics of XLPE cable terminal ring damage based on multiple nonlinear regression model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3124-3133.

[18] 许鹏飞，杨　帆，刘　刚，等. 110 kV 插拔式 GIS 电缆终端轴向传热分析[J]. 电力工程技术，2020，39(5)：30-35.
XU Pengfei, YANG Fan, LIU Gang, et al. Assessment on axial heat transfer of 110 kV plug-in GIS cable terminal[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 30-35.

[19] STANCU C, NOTINGHER P V, NOTINGHER P. Computation of the electric field in aged underground medium voltage cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1530-1539.

[20] BOZZO R, GEMME C, GUASTAVINO F. The effects of temperature on the tree growth phenomena and relevant PD[C]// Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach, USA: IEEE, 1995: 69-72.

[21] BATALOVIĆ M, ZILDŽO H, MATORUGA H, et al. Detection of defect presence inside the insulation of cable accessories through changes in cable capacitance[C]//2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: IEEE, 2019: 1-4.

[22] 王子康，周　凯，朱光亚，等. 冷热循环对电缆附件界面压力及带材材料特性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2198-2207.
WANG Zikang, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Effect of thermal cycling on the interface pressure of cable accessories and their strips' material properties[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2198-2207.

[23] 李志伟. 环氧树脂及其复合材料的低温力学性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2018.
LI Zhiwei. The study on cryogenic mechanical properties of epoxy resin and its composites[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2018.

[24] 刘文斌. 低温环境下环氧树脂绝缘材料的电气特性研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
LIU Wenbin. Study on the electrical properties of epoxy resin insulation materials in low temperature environment[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[25] 邹　林，涂　扬，孟永鹏，等. 界面压强和表面粗糙度对聚乙烯与硅橡胶界面的局部放电的影响[J]. 绝缘材料，2014，47(3)：94-98，102.
ZOU Lin, TU Yang, MENG Yongpeng, et al. Effects of interface pressure and surface roughness on the partial discharge between polyethylene and silicone rubber[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 94-98, 102.



张世泽(通信作者)
1989—，男，硕士，工程师
主要从事电力电缆及附件试验检测技术、电气设备在线监测与试验研究
E-mail: zshize12232@163.com

ZHANG Shize
Corresponding author

收稿日期　2021-10-28　修回日期　2022-07-10　　编辑　卫李静