

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.035

# 基于有限元分析的热塑性绝缘套管の開発

张 贇

(麦克奥迪(厦门)电气股份有限公司, 福建 厦门 361101)

**摘要:**在中压充气柜开关设备中,绝缘套管作为输配电的接口,将电流引入或引出开关设备的金属外壳,起着载流导体和高压对地绝缘与支撑的作用。现有的绝缘套管其绝缘部分基本上使用环氧树脂材料,通过自动压力凝胶(APG)工艺成型,采用该工艺的成品重、生产效率低、能耗大、材料无法回收且难以降解,对人体和生态环境具有潜在的危害。通过使用热塑性材料,根据热塑性材料的设计准则和成型要求,对通用的充气柜绝缘套管重新建立3D模型;并使用SolidWorks和Maxwell分别进行机械强度和电场强度的仿真分析,使其满足相关标准;实现了轻量化、高效节能、利于环保等目标。研究结果可以为热塑性绝缘件的合理设计提供参考依据。

**关键词:** 充气柜; 热塑性; 绝缘套管; 有限元分析; 环保

## Development of Thermoplastic Insulated Bushing Based on Finite Element Analysis

ZHANG Yun

(Motic (Xiamen) Electric Group Co., Ltd., Fujian Xiamen 361101, China)

**Abstract:** In medium voltage gas insulated switchgear, insulated bushing acts as the connector of electric power transmission and distribution, it brings current in or out of metal shell of GIS, which also functions as current carrier, keeps insulation and support from high voltage to earth. At present, most of insulated bushings are made of epoxy resin via APG process. This process is characterized by heavy weight, low production efficiency, high energy consumption, unrecyclable and nondegradable material. It has a potential risk to human being and environment. By adopting thermoplastic material, according to design criteria and molding requirement of thermoplastic material, 3D model based on a common GIS bushing is rebuilt, mechanical strength and electrical strength are simulated by SolidWorks and Maxwell so as to meet related standards and achieve the target of light weight, high efficiency, energy saving and environmental protection. This study may provide a reference for rational design of thermoplastic insulator.

**Key words:** C-GIS; thermoplastic; insulated bushing; finite element analysis; environmental protection

## 0 引言

环氧树脂自1934年问世以来,在电力电气、化工能源等方面得到广泛的应用。在电力输配电系统中,环氧树脂作为主要的绝缘材料,其机械强度高,绝缘性能好,化学性能稳定,大量用于中高压绝缘配件,目前使用最多的是双酚A型环氧树脂。然而,在高性能、低成本的另一面,是生产效率低、能耗大、难以回收降解,威胁人类健康。其双酚A容易导致婴幼儿内分泌失调,而环氧氯丙烷具有潜在致癌作用。在国家环境保护部发布的《环境经济政策

配套综合名录(2011年版)》中,其“高污染、高环境风险”产品目录已将环氧树脂列为高污染类。被寄予对环境破坏极小的环境友好型产品在电工行业上受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。

除热固性环氧树脂外,热塑性塑料是应用更为广泛的一种塑料。热塑性塑料根据性能特点、用途广泛性和成型技术通用性等,可分为通用塑料、工程塑料、特殊塑料等。通用塑料用途广泛、加工方便、综合性能好。工程塑料和特殊塑料的某些性能突出,如高强度、高硬度、高冲击性、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等,常用于专业工程或特殊领域。与热

固性塑料成型工艺相反,热塑性塑料加热后软化,冷却后凝固,是可回收重复利用的材料。不仅如此,热塑性绝缘塑料还具有诸多优于环氧树脂固封材料的性能<sup>[3-5]</sup>:①热塑性材料耐压强度将提高50%;②热塑性材料刚性提高约100%,材料的变形量会更小;③热塑性材料强度提高300%~400%;④体积减小了30%;⑤成型工艺简单,制品成型周期短。

文中旨在对绝缘套管的绝缘材料进行研究,合理选择热塑性材料,根据其材料特性对绝缘套管结构进行重新设计并分析其机械电气强度,完成了热塑性绝缘套管的设计方案并进行了验证。

1 材料分析

绝缘套管在使用中主要承受电缆线的拖拽力及电动力,并且其内置导体长期处于通流发热状态,其自身还被强大的电场的覆盖。要满足绝缘套管的应用场合,绝缘材料主要从以下4个方面去考核:机械性能、电气性能、耐热性和吸水率。现有的环氧绝缘材料在这4个方面都有优秀的表现,结合中压常用的环氧树脂,其综合性能参数见表1。

表1 环氧树脂性能参数表

| Table 1 Main properties of epoxy resin |                          |                |
|----------------------------------------|--------------------------|----------------|
| 性能                                     | 参考值                      | 测试标准           |
| 拉伸强度/MPa                               | 70~80                    | ISO 527—2012   |
| 断裂伸长率/%                                | 1.0~1.3                  | ISO 527—2012   |
| 拉伸模量/GPa                               | 10~12                    | ISO 527—2012   |
| 弯曲强度/MPa                               | 110~125                  | ISO 178—2010   |
| 弯曲模量/GPa                               | 11~12                    | ISO 178—2010   |
| 冲击强度(23℃)/(kJ·m <sup>-2</sup> )        | 7~10                     | ISO 179—2010   |
| 击穿强度/(kV·mm <sup>-1</sup> )            | 18~20                    | IEC 243-1—1990 |
| 介电常数                                   | 4                        | —              |
| 体积电阻率/(Ω·cm)                           | >1×10 <sup>15</sup>      | IEC 93—1980    |
| 相对起痕指数/CTI                             | >600                     | IEC 60112—2009 |
| 玻璃化转变温度/℃                              | 105~110                  | IEC 1006—1991  |
| 热变形温度/℃                                | 105~120                  | ISO 75—2013    |
| 线性膨胀系数/K <sup>-1</sup>                 | (35~37)×10 <sup>-6</sup> | DIN 53752—1980 |
| 吸水率(质量分数)/%                            | 0.10~0.15                | —              |
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )               | 1.75~1.80                | DIN55990—1979  |

首先,从机械强度上看,几乎所有的塑料都要考核拉伸性能的各项指标,这些指标的高低很大程度上决定了该种塑料的使用场合<sup>[6]</sup>。常用的环氧树脂其拉伸强度约80 MPa,拉伸模量约11 GPa,通用的热塑性塑料无法满足要求,工程塑料原米也不易达到相应的参数标准,因此有必要对其原料进行加强。对塑料原米进行的改善方法有多种<sup>[7-9]</sup>,最常用的改善方法为增加玻璃纤维、矿物纤维等填充剂。

填充玻璃纤维对材料的强度有明显改善,当复合材料收到外力冲击时,可以通过其界面将应力传递给纤维,从而起到增强作用<sup>[10]</sup>。不仅如此,玻璃纤维还能降低复合材料的吸水率和产品收缩变形,提高耐热稳定性,但对材料的流动性、成品外观和电性能都有影响。研究表明,吸水性对材料的电气性能影响较大,在产品的设计过程中需要进行安全裕度的考量<sup>[11-13]</sup>。随着玻纤含量的提升其力学性能和尺寸稳定性也进一步提升,但随着玻纤含量进一步提升,一般50%以上之后,其力学性能会出现拐点,由于材料粘度增加,加工工艺也产生很大的局限性,通常玻纤含量控制在30%~50%进行力学性能的调节<sup>[14]</sup>。考虑到加工的难易度以及成品关键面的外观质量,文中在选用短切玻璃纤维含量30%的基础上,列出符合表1机械强度的3种材料M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>。三者的性能参数对比参见表2。

表2 3种塑料性能参数对比

Table 2 Properties comparison of three thermoplastic materials

| 性能                          | M <sub>1</sub>            | M <sub>2</sub>           | M <sub>3</sub>            |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 拉伸强度/MPa                    | 185/125                   | 140                      | 175                       |
| 断裂伸长率/%                     | 3/6                       | 2.7                      | 2.1                       |
| 拉伸模量/GPa                    | 10.6/7.0                  | 10.0                     | 11.5                      |
| 弯曲强度/MPa                    | 290/200                   | 200                      | 225                       |
| 弯曲模量/GPa                    | 8.4/5.9                   | 9.0                      | 11.0                      |
| 冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> )  | 90                        | 70                       | 50                        |
| 击穿强度/(kV·mm <sup>-1</sup> ) | 32~38                     | 32                       | 36                        |
| 介电常数                        | 4.00                      | 4.1                      | 3.7                       |
| 体积电阻率/(Ω·cm)                | 1×10 <sup>15</sup>        | >1×10 <sup>13</sup>      | >1×10 <sup>13</sup>       |
| 相对起痕指数                      | 600                       | 475                      | 175                       |
| 熔融温度/℃                      | 263                       | 225                      | 280                       |
| 热变形温度 1.8 MPa/℃             | 250                       | 205                      | 265                       |
| 线性膨胀系数/K <sup>-1</sup>      | (25~100)×10 <sup>-6</sup> | (30~90)×10 <sup>-6</sup> | (18~120)×10 <sup>-6</sup> |
| 吸水率/%                       | 2.00                      | 0.35                     | 0.02                      |
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )    | 1.36                      | 1.53                     | 1.55                      |

从三者的综合机械强度看,M<sub>1</sub>>M<sub>3</sub>>M<sub>2</sub>。三者的综合电气性能接近,但其中M<sub>3</sub>的CTI明显偏低,当材料表面存在潮湿与污秽、电场足够大时,容易引起表面电痕劣化。耐热性方面,三者都有较高的熔融温度和热变形温度,其长期使用温度均可超过110℃,三者排名为M<sub>3</sub>>M<sub>1</sub>>M<sub>2</sub>。吸水率方面,很明显M<sub>1</sub>>M<sub>2</sub>>M<sub>3</sub>,对M<sub>1</sub>而言,其吸水率大容易引起吸水后机械强度和电气强度的下降。成本方面,M<sub>3</sub>比较贵,M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>的价格差异不大。综合以上分析,文中设计选用M<sub>2</sub>作为绝缘套管的外壳材料。

对比M<sub>2</sub>和环氧树脂的性能参数,可以发现M<sub>2</sub>的

机械性能和环氧树脂相比具有较大的优势:①拉伸强度和弯曲强度提高了80%左右;②断裂伸长率增加了约100%;③冲击强度提高了约600%。而在电气性能方面,提升比较明显的是击穿强度,涨幅约为50%。此外, $M_2$ 的热变形温度远高于环氧树脂。因材料密度的降低和设计壁厚的减薄,由 $M_2$ 制作的产品的重量预计也会减轻30%以上。

## 2 结构设计分析

### 2.1 塑料套管设计

通过调查,市场上销售量较大的一款欧式C型充气柜用绝缘套管,其外形和主要技术参数见图1和表3。

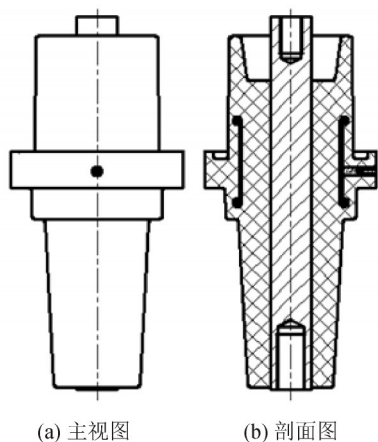


图1 欧式C型充气柜用绝缘套管

Fig. 1 European type C insulated bushing for GIS

表3 环氧绝缘套管主要技术参数

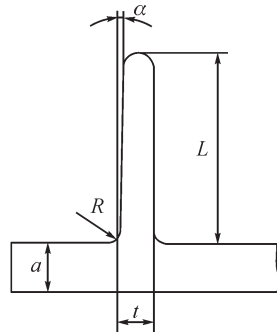
Table 3 Main technical specification of epoxy bushing

| 性能             | 数值              |
|----------------|-----------------|
| 额定电压/kV        | 12              |
| 额定电流/A         | 630             |
| 工频耐压(1 min)/kV | 42              |
| 局部放电(15 kV)/pC | ≤10             |
| 雷电冲击(±15次)/kV  | 85              |
| 工作介质           | SF <sub>6</sub> |
| 气体压力(绝对值)/bar  | 1.4             |
| 工作温度/℃         | -25 ~ +40       |
| 接口类型(EN 50181) | C <sub>1</sub>  |

注:1 bar=10<sup>5</sup> Pa。

该绝缘套管主要由3部分组成:绝缘外壳、屏蔽网和导体。屏蔽网和大部分导体都被绝缘外壳包覆,彼此之间要求粘接良好无缝隙。环氧树脂由于厚度设计范围较大,厚的区域存在气泡和缩孔的风险远小于热塑性材料,其设计的自由性远远大于热塑性材料。考虑到热塑性塑料的壁厚一般在6 mm以内,绝缘外壳内部高达20 mm的壁厚必须减薄,其减薄带来的直接影响就是机械强度的显著下降,因此

外壳内部的空腔还需增加加强筋来提高整体的强度。加强筋的设计还需遵循加强筋设计准则<sup>[15]</sup>,见图2。否则在筋条的背面即产品外表面容易留下缩痕,造成产品外表的凹陷,于是在套管与电缆插接时存在狭小缝隙的可能,从而产生局部放电的隐患。



$\alpha=0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ ;  $L=(2.5\sim 5.0)a$ ;  $t=(0.40\sim 0.75)a$ ;  
 $R\geq(0.25\sim 0.40)a$ ; 两筋中心的间距 $C=(3\sim 4)a$ 。

图2 塑料加强筋设计准则

Fig. 2 Design principal of thermoplastic rib

除机械强度受到影响之外,由于绝缘外壳内部挖空后,其绝缘强度也会下降,即使充气柜内存在SF<sub>6</sub>填充气体,而SF<sub>6</sub>气体的电气强度相对环氧树脂较低。在SF<sub>6</sub>电器结构中,电场的均匀性是影响SF<sub>6</sub>气体间隙绝缘的最重要因素,不良的设计有可能出现极不均匀电场,因此设计时必须避免出现这一现象,注意事项如下<sup>[16]</sup>。

1)零部件不能有尖角,尽量加大零部件外形圆角半径,实在避免不了的尖角应加电场屏蔽件;

2)努力避免棒-板间隙设计,采用电场稍不均匀的同轴圆柱形或同心球形结构设计。

3)在稍不均匀电场中,随着电场距离的增大,击穿电压增长逐步变慢而出现电压增长饱和的现象。

稍不均匀电场中,SF<sub>6</sub>气体间隙的击穿电压与电极间的最大场强密切相关,因此应在可能的情况下尽量降低最大场强。实际上,电气设备中,经常采用的数据是:对同轴圆柱结构, $R=3r$ ;对同心圆球结构, $R=2.2r$ <sup>[17]</sup>(内、外电极半径分别为 $r$ 、 $R$ )。

文中的绝缘套管为同轴圆柱结构,属于稍不均匀电场,电极间的距离除了采用经验值之外,其尺寸设计还受充气柜的相间距限制。设计采用的相间距为110 mm,绝缘套管的外径控制在100 mm以内,总长控制在200 mm。

为避免筋条所在位置产生轻微的收缩而造成屏蔽网和绝缘外壳之间产生缝隙,在屏蔽网和导体之间,只在导体外周保留绝缘层,这样就可以大大减小高低压之间由缝隙引起局放的风险。因此,加强筋所在区域被限制在屏蔽网下端到锥部底面。另外,为了便于塑料套管在安装时朝向一致,可在法兰盘上设计凹槽或

凸台用于定位。塑料套管的设计示意图见图3。

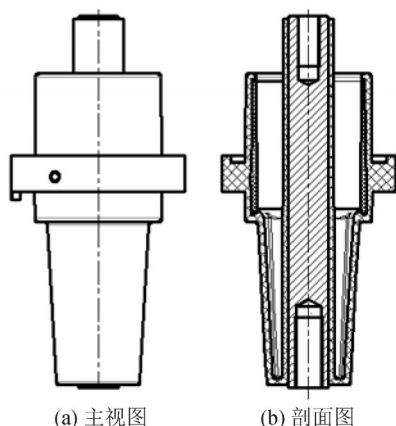


图3 充气柜用塑料绝缘套管

Fig. 3 Thermoplastic bushing for GIS

## 2.2 机械强度仿真

如前所述,绝缘套管在使用中主要承受电缆线的拖拽力及电动力,GB/T 4109—2008 中型式试验规定了绝缘套管需进行的悬臂负荷耐受试验,对于12 kV/630 A的绝缘套管,其水平Ⅱ(重负荷)对应的悬臂试验负荷为1 000 N<sup>[18]</sup>。要求无损坏(变形、破裂或泄漏)且能重复耐受全部逐个试验项目并且与先前的结果相比没有明显变化。绝缘套管在法兰约束固定的情况下,在靠近锥面端的螺纹处安装一螺钉,螺钉头部扁平处承受1 000 N的竖直压力,其仿真结果见图4。

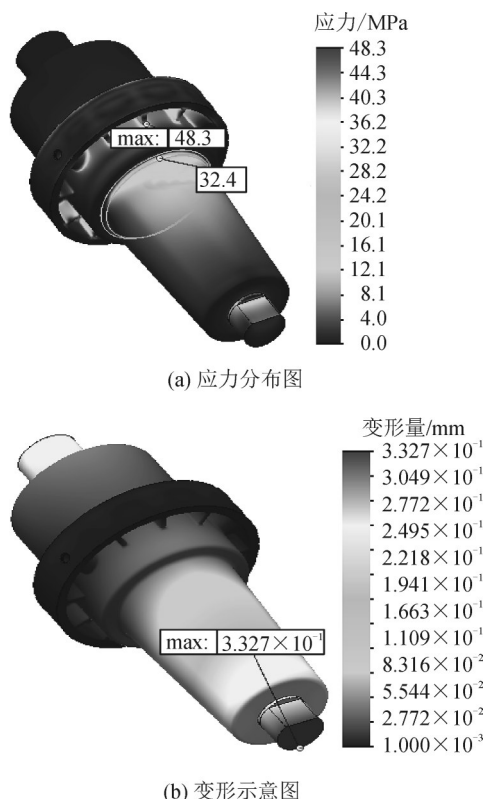


图4 悬臂试验仿真结果

Fig. 4 Simulation result of bending test

从图4(a)的应力分布可以看出,最大的应力

48.3 MPa 位于在法兰盘的筋条根部,这是因为法兰被固定后,壁厚相对较薄的筋条需承受由导体头部施加压力后形成的弯矩,而筋条根部的圆角较小,容易形成应力集中。由应力图分布可知,筋条根部的区域只是很小一部分,如外力继续增大,也只有小部分区域发生屈服,并不影响产品的使用。而对于整体结构而言,由于绝缘套管内部的加强筋只延伸到锥部末端,在负载足够大的情况下,套管锥部的末端即锥面大端圆角过渡区域存在更大的断裂风险。从应力数值看,该圆角区域的最大值为32.4 MPa,而材料的拉伸强度为140 MPa,考虑到在注塑过程中纤维取向不均匀造成材料的各向异性,其强度有所衰减,假定其衰减系数为20%,材料的许用强度减小为112 MPa,安全系数为3.5左右。从图4(b)的变形示意图看,最大变形量发生在悬臂负荷加载的螺栓头上,其值为0.33 mm,考虑到实际安装中的零件配合以及约束刚度,实际的变形量可能会更大些。上述国标中未给出关于变形量的标准,建议将变形量控制在1.5 mm以内。

除了考核绝缘套管端部承受的负载之外,在套管的安装过程中,导体和电缆头的连接以及导体和母线的连接都是通过螺纹连接来完成。因此,还需要考虑以上连接在实施时绝缘套管承受的扭矩。根据EN 50181—2010中欧式C型绝缘套管的尺寸要求,对于12 kV/630 A的绝缘套管,靠近锥部的导体螺纹大小为M16,而电缆头安装时的扭力一般控制在100 N·m以内。绝缘套管在法兰固定约束的情况下,螺纹处施加100 N·m的扭矩,其仿真结果见图5。

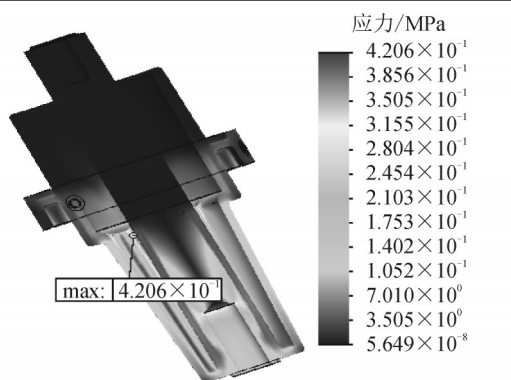
从图5(a)的应力分布可看出,最大应力发生在内腔加强筋的根部,最大值为42.1 MPa,距参考许用强度112 MPa还有很大的余量,安全系数为2.7左右。从图5(b)的变形示意图看,最大变形量0.13 mm,考虑到实际安装中的零件配合以及约束刚度,实际的变形量可能会更大些。

从以上两种工况的仿真分析可知,该塑料套管在机械强度方面能够满足相关标准和规定的负载要求,且留有足够的安全裕度,可认为结构相对合理。

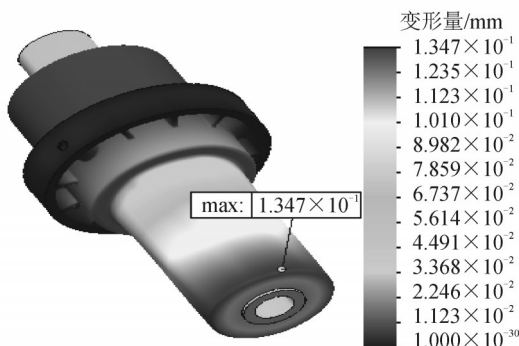
## 2.3 电气强度仿真

考虑到欧式C型环氧绝缘套管已经有了成熟的应用,对于尺寸与环氧树脂绝缘套管近似的塑料绝缘套管而言,塑料绝缘套管对其内部电场强度的考核更加严苛,而对其外部电场强度分布的影响相对较小,文中的分析对象只限于部分柜体、安装压板、塑料套管和母线装配件,加载的电压为85 kV,相间距离为110 mm,柜体宽度360 mm,电气仿真模型见图6。

由于内部空腔的存在以及绝缘气体的填充,塑



(a) 应力分布图



(b) 变形示意图

图5 扭力试验仿真结果

Fig. 5 Simulation result of torque test

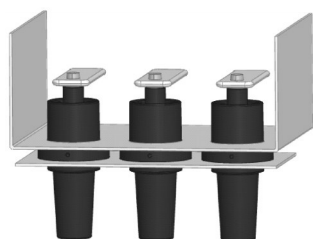


图6 雷电冲击试验仿真模型

Fig. 6 Simulation model of BIL test

料绝缘套管的内部场强相比实心的环氧绝缘套管的内部场强发生了明显的变化,这对于壁厚较薄的塑料来说是更为严峻的考验。要使绝缘套管的绝缘强度满足要求,不但绝缘层的电场强度要小于塑料的击穿强度,而且绝缘气体的场强也要在其耐压强度范围之内。文[19-21]总结了计算稍不均匀电场中临界击穿场强的几种方法,根据一些公司的实验数据,场强设计基准 $E_1$ 可由下式计算得出<sup>[16]</sup>。

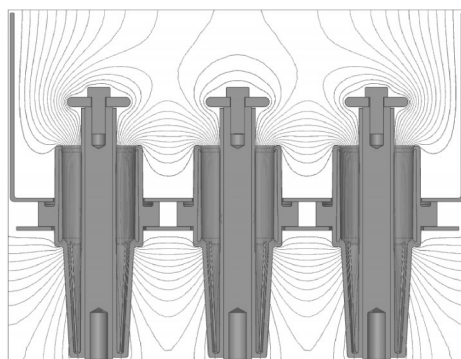
$$E_{50\%}=63p+2.4 \quad (1)$$

$$E_B=E_{50\%}(1-3\sigma) \quad (2)$$

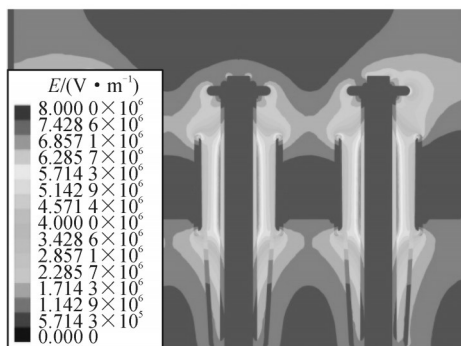
$$E_1=-K_1E_B \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $E_{50\%}$ 为导体在雷电冲击负极性电压下的50%击穿场强, kV/mm;  $p$ 为绝对气压, MPa;  $E_B$ 为耐受场强,一般取闪络概率为0.16%的场强值作为耐受场强(电压),耐受电压与50%击穿场强两者之

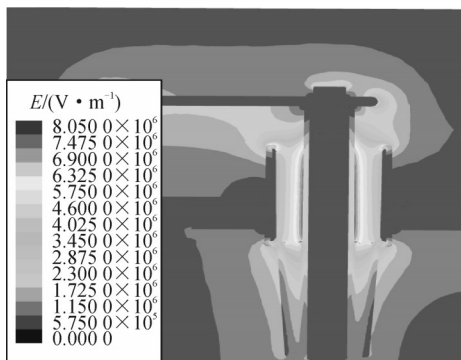
间的间隙为 $3\sigma$ ;  $\sigma$ 为雷电冲击与操作冲击的放电电压标准偏差相对值,  $\sigma=0.05$ ;  $K_1$ 为设计经验及制造经验数据,  $K_1=0.85$ 。由式(3)确定的场强设计基准 $E_1$ ,能保证产品绝缘结构按 $E_1$ 设计时,承受产品规定的雷电冲击耐受电压时放电机电率为零且稍有一些裕度。将气体绝对压力 $p=0.14$  MPa代入式(1)-(3),计算可得 $E_{50\%}=11.22$  kV/mm,  $E_B=9.54$  kV/mm,  $E_1=8.11$  kV/mm。雷电冲击试验仿真结果见图7。



(a) 等压线分布



(b) 电场强度分布(正向)



(c) 电场强度分布(侧向)

图7 雷电冲击试验仿真结果

Fig. 7 Simulation result of BIL test

图7(a)显示套管的等压线分布相对均匀;图7(b)、(c)显示,最大场强位于绝缘套管空腔内靠近导体绝缘层表面的区域,最大值为7.98 kV/mm;而塑料绝缘层内部的最大场强位于B相屏蔽网顶端,最大值为6.63 kV/mm。与场强设计基准 $E_1$ 相比,  $8.05$  kV/mm  $< 8.11$  kV/mm;与塑料的耐压强度相比,  $6.63$  kV/mm  $< 32$  kV/mm。因此,可认为塑料绝缘套管在雷电冲击试验中相对安全。

## 2.4 验证实验

为验证产品设计是否合理以及材料性能是否满足要求,在开模制造塑料套管以后,进行了一系列验证试验,综合测试结果见表4。塑料绝缘套管在悬臂负荷耐受测试、局放耐压测试和雷电冲击测试中的一些曲线图见图8。

表4 塑料套管测试结果

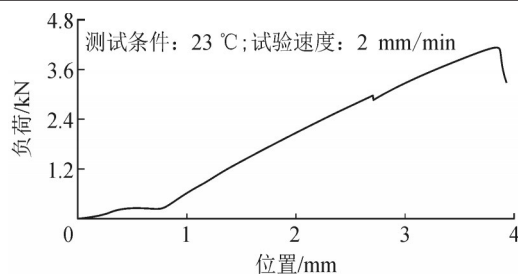
| Table 4 Test result of thermoplastic bushing |                                            |                    |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| 测试项目                                         | 测试条件                                       | 结果                 |
| 电容值/pF                                       | 23 ℃,加载电压 10 kV                            | 11.28              |
| 介质损耗因数/%                                     | 23 ℃,58%RH                                 | 0.29               |
| 泄露测试/(mbar·s <sup>-1</sup> )                 | 负压法                                        | < 10 <sup>-8</sup> |
| 工频耐压(PF)                                     | 42 kV 下持续 1 min,                           | OK                 |
| 局部放电(PD)                                     | 13.2 kV 下持续 30 s,                          | 0.6 pC             |
| 雷电冲击测试                                       | 85 kV,正负极性各 15 次                           | OK                 |
| 悬臂负荷测试 1/kN                                  | 23 ℃,2 mm/min,3 pcs                        | 平均值 3.7            |
| 悬臂负荷测试 2/kN                                  | 105 ℃,2 mm/min,3 pcs                       | 平均值 2.2            |
| 悬臂负荷测试 3/kN                                  | -25 ℃,2 mm/min,3 pcs                       | 平均值 4.2            |
| 扭力测试/(N·m)                                   | 23 ℃断裂力值                                   | > 140              |
| 低温试验                                         | -40±3 ℃持续 24 h                             | PD/PF OK           |
| 高温试验                                         | 125±2 ℃持续 24 h                             | PD/PF OK           |
|                                              | -40 ℃ ~ +105 ℃,升温<br>2 ℃/min,降温 0.5 ℃/min, |                    |
| 冷热循环                                         | 暴露时间 2 h,转换时间<br>3 min,6 个循环               | PD/PF OK           |

从电气测试结果看,塑料套管均满足工频耐压、局部放电和雷电冲击测试的要求,这与在电场仿真计算中最大场强小于场强设计基准的结果相一致。

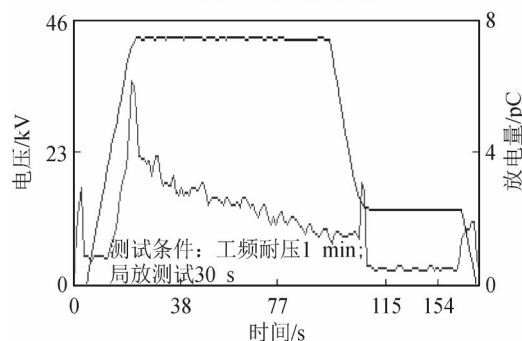
对于机械强度测试,其中在常温下悬臂负荷测试的断裂力值的平均值为 3 700 N,而仿真计算中绝缘套管在承受 1 000 N 悬臂负荷下,最大等效应力与许用强度之间的安全系数为 3.5 左右,由此可推出绝缘套管可承受 3 500 N 左右的悬臂负荷,这与实际测试的结果较为接近。而对于扭力测试,由于最大断裂扭矩在受限的条件下未能测出,但根据已测试的结果,即最大扭矩超过 140 Nm,而仿真计算中在 100 Nm 扭矩下仍有 2.7 左右的安全系数,理论上其断裂扭矩可达 270 Nm,其实际的断裂扭矩还需要通过制作相应的工装进行测试才能获得。

## 3 结语

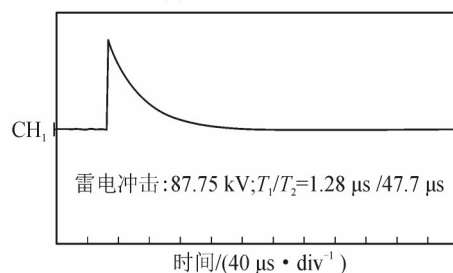
根据以上的分析和试验可知:塑料套管的设计满足相关标准要求,热塑性材料在替代环氧树脂成为绝缘套管备选的绝缘材料方面具有优秀的表现,



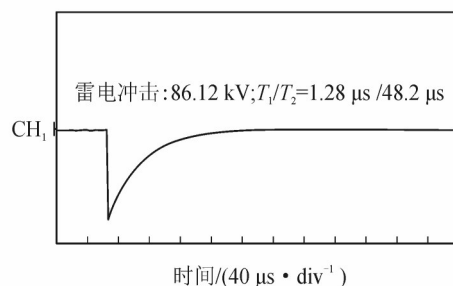
(a) 悬臂负荷耐受测试



(b) 局放耐压测试



(c) 雷电冲击测试1



(d) 雷电冲击测试2

图8 塑料套管测试附图

Fig. 8 Test results of thermoplastic bushing

用热塑性材料制作的绝缘套管重量轻、生产效率高、成品合格率高、电气性能优良、节能环保,符合国家电网及行业发展的要求。该热塑性绝缘套管的结构设计和性能分析可以为其它热塑性绝缘件的开发提供参考。

由于热塑性材料在耐候性方面不如热固性环氧树脂,塑料套管在长期高温、湿热以及带电的环境下运行效果未知,产品在投放市场之前还需要进行长时间的验证。随着对热塑性绝缘件研究进一步加深以及热塑性材料和环保型气体的开发,相信在不久的将来热塑性材料势必会掀起开关电力行

业的一场革命。

## 参考文献:

- [1] LI S, HASSANZADEH M, JAMES I R, et al. Thermal properties of environmentally friendly dielectrics used in medium voltage circuit breakers[C]//2007 International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK:[s.n.], 2007: 306-309.
- [2] YAMAGATA N K, KAGIZAKI H, YAMASHIRO K, et al. Applicability of the thermoplastic resin for GIS insulators[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2002, 34(2): 164-170.
- [3] 尹立, 杨威, 张翀, 等. 固封极柱用热塑性绝缘材料性能分析[J]. 塑料, 2016, 45(4): 32-35.  
YIN Li, YANG Wei, ZHANG Chong, et al. Analysis on properties of thermoplastic insulating material for solid insulation embedded poles[J]. Plastics, 2006, 45(4): 32-35.
- [4] 葛乐矣, 王唯贻, 杨彪. 固封极柱封装材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2014, 42(8): 4-6.  
GE Leyi, WANG Weiyi, YANG Biao. Advanced progress of encapsulation material for solid insulation embedded poles[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(8): 4-6.
- [5] 叶鼎铨. 玻璃纤维增强热塑性塑料的发展概况[J]. 中国塑料, 2005, 19(2): 8-11.  
YE Dingquan. Development of glass fiber reinforced thermoplastics[J]. China Plastics, 2005, 19(2): 8-11.
- [6] 彭治汉, 施祖培. 塑料工业手册—聚酰胺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.  
PENG Zhihan, SHI Zupei. Handbook of plastics industry—Polyamide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [7] 麦堪成, 张声春, 高庆福, 等. 聚苯硫醚/尼龙6共混物的结晶与熔融行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(3): 148-154.  
MAI Kancheng, ZHANG Shengchun, GAO Qingfu, et al. Crystallization and melting behavior of polyphenylene sulfide blends with polyamide 6[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2000, 16(3): 148-154.
- [8] 张伟, 别群梅, 袁锦瑶. 高CTI值、无卤阻燃玻纤增强尼龙66的研究及应用[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(8): 50-53.  
ZHANG Wei, BIE Qunmei, YUAN Jinyao. Study on high CTI value, halogen free flame-retardant glass fiber reinforced nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(8): 50-53.
- [9] 付杰辉, 陈晓东, 徐群杰, 等. 聚苯醚/聚酰胺合金的增容及增韧改性研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(10): 36-39.  
FU Jiehui, CHEN Xiaodong, XU Qunjie, et al. The compatibilization and toughening modification of PPO/PA alloy[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(10): 36-39.
- [10] 李方舟, 张翀, 尹立, 等. 聚苯硫醚基复合材料研究进展[J]. 塑料科技, 2015, 43(5): 90-94.  
LI Fangzhou, ZHANG Chong, YIN Li, et al. Research progress on PPS matrix composites[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(5): 90-94.
- [11] 任洛卿, 张永刚, 周柏杰. 高压绝缘用PA66复合材料的性能研究[J]. 塑料科技, 2015, 43(8): 55-59.  
REN Luoqing, ZHANG Yonggang, ZHOU Baijie. Study on properties of high-voltage insulation PA66 composite materials[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(8): 55-59.
- [12] 吴博, 庞承焕. 吸水率对尼龙6介电强度的影响研究[J]. 塑料工业, 2010, 38(6): 44-46.  
WU Bo, PANG Chenghuan. Study the influence of water absorption on the dielectric strength of nylon 6[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(6): 44-46.
- [13] 蔡凡一, 薛健, 周柏杰, 等. 吸水性对中压绝缘用尼龙66电气性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(11): 87-90.  
CAI Fanyi, XUE Jian, ZHOU Baijie, et al. Influence of moisture on electrical properties of medium voltage insulation Nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(11): 87-90.
- [14] 徐晓娜, 刘随军, 张翀, 等. 热塑性绝缘材料在中压绝缘领域的应用浅析[J]. 中国科技成果, 2016(14): 36-37.  
XU Xiaona, LIU Suijun, ZHANG Chong, et al. Study on the application of thermoplastic materials in medium voltage[J]. China Science and Technology Achievements, 2016(14): 36-37.
- [15] 成大先. 机械设计手册[M]. 第五版. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
CHENG Daxian. Handbook of mechanism design[M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [16] 黎斌. SF<sub>6</sub>高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
LI Bin. Design of SF<sub>6</sub> high-voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [17] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [18] 交流电压高于1 000 V的绝缘套管: GB/T 4109—2008[S]. 2008.  
Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V: GB/T 4109—2008[S]. 2008.
- [19] 全永刚, 赵玉柱. 稍不均匀电场中SF<sub>6</sub>气体的工程击穿场强[J]. 华通技术, 2005(4): 34-37.  
TONG Yonggang, ZHAO Yuzhu. Engineering break through field intensity of SF<sub>6</sub> gas in a slightly uneven electrical field[J]. Huatong Technology, 2005(4): 34-37.

(下转第234页)

- 37-44.
- [16] 周莉,童雪芳,文习山,等. 断路器均压电容爆炸原因的仿真分析与研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 34-37.  
ZHOU Li, TONG Xuefang, WEN Xishan, et al. Simulation analysis of the reason for the explosion of the breaker grading capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 34-37.
- [17] 郭志红,逯怀东,王保利,等. 500 kV 断路器并联电容外绝缘击穿几率的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2382-2389.  
GUO Zhihong, LU Huaidong, WANG Baoli, et al. Analysis of the breakdown probability of the external insulation for 500 kV breakers shunt capacitance[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2382-2389.
- [18] 舒胜文,阮江军,黄道春,等. 双断口真空断路器的瞬态恢复电压分配机理与均压电容研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 252-259.  
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on transient recovery voltage distribution mechanism and grading capacitor of double-break vacuum circuit breaker[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 252-259.
- [19] 谢德馨. 三维涡流场的有限元方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
XIE Dexin. The finite analysis of three-dimensional vortex [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [20] 刘涛,杨凤鹏. 精通Ansys[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
LIU Tao, YANG Fengpeng. Conversance with Ansys[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [21] 吴文海,王娜,张浩. 特高压 1 100 kV 柱式断路器断口均压电容器配置研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 76-80.  
WU Wenhai, WANG Na, ZHANG Hao. Study on grading capacitor allocation across open contacts of 1 100 kV live tank circuit breaker[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 76-80.
- [22] 李威,张进,黄劼怡,等. 500 kV 断路器断口电容及介损测量影响因素研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 71-76.  
LI Wei, ZHANG Jin, HUANG Jieyi, et al. Study on influencing factors of measuring break capacitance and dielectric loss of 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 71-76.
- 王娜(1981—),女,高级工程师,主要从事高压开关设备的研制及产品结构仿真分析工作。
- 张浩(1981—),男,高级工程师,主要从事高压开关设备设计及新产品研制工作。
- 戴通令(1981—),男,高级工程师,主要从事高压开关设备的研制及管理工作。
- 吴文海(1977—),男,正高级工程师,主要从事高压开关设备的研制及管理工作。

(上接第 228 页)

- [20] 王艳秋,魏俊梅. 550 kV GIS用SF<sub>6</sub>断路器电场分析计算[J]. 电气开关, 2011(4): 90-92.  
WANG Yanqiu, WEI Junmei. The electric field analysis and calculation of SF<sub>6</sub> circuit breaker of 550 kV for GIS[J]. Electric Switchgear, 2011(4): 90-92.
- [21] 薛义飞. 高压绝缘套管电场计算与绝缘分析[J]. 大众科技, 2014, 16(2): 52-54.  
XUE Yifei. Electric field calculation and insulation analysis of high voltage insulating bushing[J]. Popular Science & Technology, 2014, 16(2): 52-54.
- 张赞(1985—),男,硕士,工程师,主要从事中高压热塑性绝缘件开发研究工作。