

# 水对充油电缆终端击穿位置的影响机理分析

张 静<sup>1,2</sup>, 万成德<sup>1,2</sup>, 程 林<sup>1,2</sup>, 胡长猛<sup>1,2</sup>, 宋鹏先<sup>3</sup>, 黄勤清<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211006;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074;

3. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

**摘 要:**为研究水对充油电缆终端击穿位置的影响, 仿真分析了水引起的 220 kV 充油电缆终端的故障原因, 并在实验室搭建了电缆试验平台, 模拟验证了接地状态与电场强度对击穿位置的影响, 并采用高频电流局放检测仪及摄像机分别记录了电缆在不同接地状态和电场强度下的局部放电量与水膜高度。结果表明: 油中水含量、接地状态及电场强度是影响充油电缆终端故障点位置的重要因素。当水浸入电缆终端并达到一定量且电缆终端直接接地时, 电场强度越高, 水分子从油-水界面逸出越多, 水膜高度越高, 击穿点距离应力锥上表面的距离越长, 局部放电量越大。局部放电程度与水膜高度正相关, 可以通过局部放电评估电缆终端内硅油劣化缺陷程度, 为充油电缆终端绝缘状态评估提供参考。

**关键词:** 电缆终端; 绝缘油; 水; 电场仿真; 接地状态; 击穿位置

## Influence mechanism analysis of water on breakdown position of oil-filled cable terminal

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, WAN Chengde<sup>1,2</sup>, CHENG Lin<sup>1,2</sup>, HU Changmeng<sup>1,2</sup>,

SONG Pengxian<sup>3</sup>, HUANG Qinqing<sup>1,2</sup>

(1. Nanrui Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211006, China;

2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute,

Wuhan 430074, China; 3. Tianjin Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** To investigate the influence of water on the breakdown position of oil-filled cable terminal, this study simulated and analyzed the failure reason caused by water in the 220 kV oil-filled cable terminal. A cable test platform was established in the laboratory, and the influence of the grounding state and electric field strength on the breakdown position was simulated. The partial discharge (PD) quantity and water film height of the cable in different grounding states and at different electric field strength were recorded by using high frequency current partial discharge detector and camera. The results show that the water content in oil, grounding state, and electric field strength are the important factors affecting the fault location of oil filled cable terminal. When the water is immersed in the cable terminal and reaches a certain amount, and the cable terminal is directly grounded, the higher the electric field strength, the more water molecules escape from the oil-water interface, the higher the water film height, the longer the distance between the breakdown point and the upper surface of stress cone, and the larger the partial discharge. The intensity of PD is positively correlated with water film height, and the silicone oil degradation defects within the cable terminal can be evaluated by partial discharge, which provides a reference for evaluating the insulation status of oil-filled cable terminal.

**Key words:** cable termination; insulating oil; water; electric field simulation; grounding state; breakdown position

## 0 引言

绝缘油填充的电缆终端以其成熟的制造工艺

和运行经验, 在高压电缆终端中一直占有相当大的使用比例<sup>[1-6]</sup>。目前, 电缆终端采用的绝缘油主要有硅油与聚异丁烯, 两者具有性能稳定、绝缘强度高等优点。然而在运行过程中, 由于受到氧气、湿度、高温、强电场和杂质等外界因素的作用, 随着电缆

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-2023 26176A-1-1-ZN)。

终端运行时间的增加,绝缘油逐渐老化,造成终端的绝缘性能大幅降低,由此引起电缆终端发热甚至绝缘击穿的故障案例屡见不鲜<sup>[7-10]</sup>。E BERGIN<sup>[11]</sup>对60~500 kV户外电缆终端故障进行了统计,发现在2001年至2005年共发生7 456起击穿性故障,其中充油电缆终端的故障占到5 889起,绝缘油失效是该故障发生的重要原因之一。2011年以来,北京、上海、石家庄、深圳等多地发现运行10年左右的220 kV电缆线路的充油电缆终端被击穿,该类型电缆终端的应力锥材料为三元乙丙橡胶,填充的绝缘油为硅油<sup>[12-13]</sup>,电缆绝缘层击穿点位置距离应力锥上表面20~70 mm处。由此可见,研究电缆终端内绝缘油老化及击穿特性,对有效预防电缆终端故障、评估电缆终端运行状态具有十分重要的意义。

本文采用有限元仿真对典型的故障电缆终端进行仿真,并搭建电缆试验平台,通过模拟不同接地状态与电场强度的作用,分析两者对击穿位置的影响,同时测量局部放电图谱,为电缆终端的运行维护提供理论依据。

## 1 终端击穿原因初步分析

选取故障的220 kV瓷套电缆终端为分析对象,线路的故障相击穿状态如图1(a)所示,同线路非故障相电缆终端绝缘层劣化情况见图1(b),其绝缘层表面有大面积水树枝现象。对非故障相进行解剖还发现终端内硅油性状已发生改变,硅油内悬浮着白色絮凝物,静置一段时间后,绝缘油出现分层,且硅油内含有大量水分。对同机组的非故障相进行解剖,发现故障线路电缆终端内硅油已因老化产生白色絮凝物,且含水量也比正常硅油显著升高。对水分来源进行分析,原因可能是电缆终端密封不严、安装时潮气进入、绝缘油含水量控制不严等。因此,可初步分析故障原因是故障电缆终端内硅油含有大量水和导电粒子,其中这些导电粒子受电场与温度场的影响,在电缆终端硅油内进行布朗运动及沉降运动,引起粒子间的碰撞、接触,微观作用力使得颗粒粘结,产生絮凝,进而形成了白色絮凝物。经成分分析白色絮凝物中含有磷酸、钾、钠、氢等离子以及P-H键小分子<sup>[14]</sup>。

根据电缆终端结构,水分子和絮凝物在电缆终端内的状态包含下列过程:①硅油老化产生水及絮凝物<sup>[14]</sup>,絮凝物在电缆终端底部法兰上沉积,沉积到一定程度时应力锥底部的硅油均被水及絮凝物取

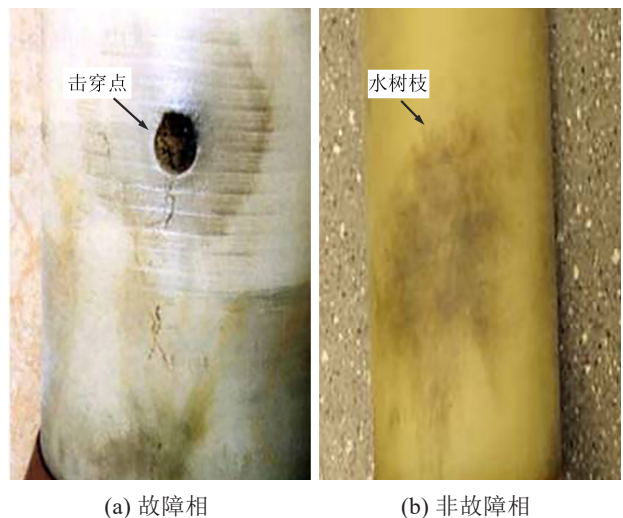


图1 电缆终端击穿位置

Fig.1 Cable termination breakdown position

代。②受电缆终端内电场、温度场作用,沉积在底部的水及絮凝物沿应力锥侧面向上爬升,在绝缘薄弱的应力锥上表面电缆绝缘层上积聚,形成一个导电通道,见图2。③电缆终端底部法兰直接接地,由于硅油及絮凝物含有导电离子,使得絮凝物形成的导电通道均接地,在电场作用下,水及絮凝物附着在应力锥上形成了“三角形”区域,而“三角形”的顶点A点电场强度大于B点,引发电缆绝缘层在A点处击穿。通过分析,电缆绝缘层击穿位置A点主要受两个重要因素影响,一是导电通道处于接地状态,二是电缆终端内的水和絮凝物在电场作用下会沿应力锥表面向上爬升,形成“三角区”。

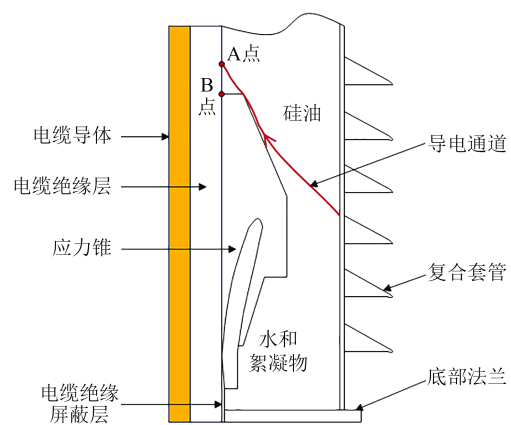


图2 导电通道示意图

Fig.2 Schematic diagram of conductive channel

## 2 有限元仿真分析

为进一步验证电缆终端内A点击穿的故障机理与水和絮凝物构成的导电通道接地状态的关联

性,采用有限元仿真的方法分析电缆终端正常状态、导电通道不接地与接地3种不同状态时的电场分布。

### 2.1 模型建立

根据故障的220 kV电缆终端的实际尺寸,建立了二维对称结构的电场仿真模型<sup>[15]</sup>。模型中材料的参数见表1。采用自由三角形网格对仿真模型进行自由网格剖分,在电缆绝缘、应力锥及伞裙处局部进行网格细化。模型边界条件根据实际运行电压设置,对电缆导体、均压环施加126 kV电位,对电缆金属护套、应力锥、金属法兰及空气场边界施加0电位。

表1 材料参数  
Table 1 Material parameters

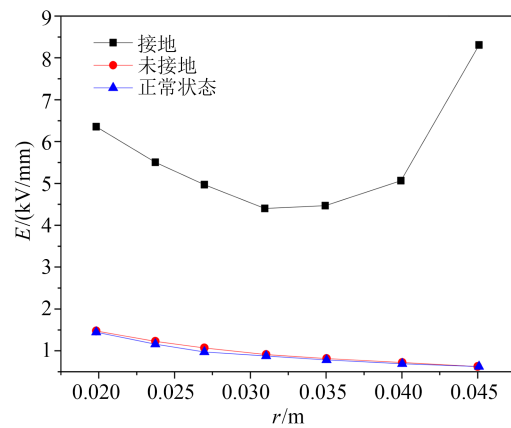
部件名称	相对介电常数
电缆绝缘层	2.3
绝缘屏蔽层	10
应力锥绝缘	3.2
硅油	2.7
水及絮凝物	80
套管	6.5
空气	1.0

### 2.2 计算结果及分析

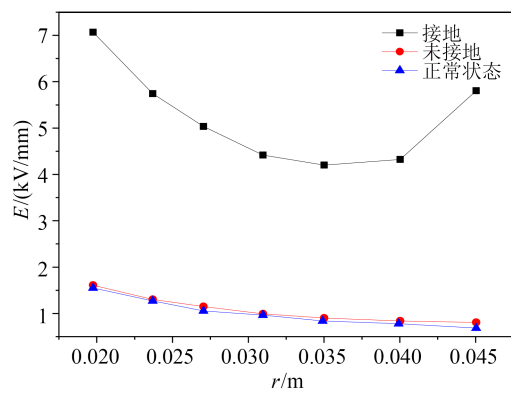
选取应力锥上部“三角区”顶点(A点)、应力锥上表面与电缆绝缘层及硅油接触点(B点)的电场强度 $E$ 与电缆绝缘层半径 $r$ 数据绘制图3。

从图3(a)可以看出,当导电通道未接地时,电缆绝缘层A点的电场分布与正常运行的电缆终端的电场分布情况相似,靠近电缆导体的电缆绝缘层内径( $r=0.020$  m)承受较高电场,其电场强度为1.48 kV/mm,靠近绝缘屏蔽层的电缆绝缘层外径( $r=0.045$  m)承受较低电场,其电场强度为0.63 kV/mm,这一分布趋势是电缆绝缘层内电场分布的典型趋势<sup>[16]</sup>。当导电通道接地时,电缆绝缘层内部A点的电场分布趋势发生明显变化,呈现绝缘层中间电场低,靠近导体及绝缘屏蔽层的两端电场高的趋势,其中电缆绝缘层内径处电场强度高达6.35 kV/mm,是未接地时的4.29倍,而电缆绝缘层外径处电场强度为8.31 kV/mm,是未接地时的13.19倍。

对比图3(a)与(b)可以看出,电缆绝缘层B点处的电场变化趋势与A点处相似,当导电通道接地时,电场强度分布趋势亦发生明显变化,呈现绝缘



(a) A点处电场强度



(b) B点处电场强度

图3 电缆绝缘层电场强度

Fig.3 Electric field strength of the cable insulation layer

层中间电场低、两端电场高的趋势,电缆绝缘层内径处电场强度高达7.07 kV/mm,是未接地时(1.56 kV/mm)的4.53倍,而电缆绝缘层外径处的电场强度为5.86 kV/mm,是未接地时(0.80 kV/mm)的7.33倍。

综合对比电缆终端内导电通道不同接地状态下电缆绝缘层电场演变规律表明:电缆终端内硅油的水及絮凝物构成的导电通道未接地时,对终端内部电缆绝缘层电场分布影响不大,电场强度相较于正常运行的电缆终端变化也不大;而水及絮凝物中的导电离子构成的导电通道接地后,靠近电缆绝缘屏蔽层的绝缘层电场强度急剧增加,在高电场与硅油内部水的共同作用下引发电缆绝缘层表面的水树枝放电,且A点处的电场高于B点处的电场,从而引发A点处电缆绝缘层击穿。

## 3 实验分析

### 3.1 实验设计

为验证水及絮凝物在电场作用下会向上爬升

形成“三角区”，结合接地状态的仿真，按照电缆终端的设计思路研制了用于模拟电缆终端外壳模型的小型实验箱，实验箱由厚度为5 mm的5块透明高聚物板组成，箱体尺寸为150 mm×150 mm×150 mm。在底板上开孔，将实验电缆穿入。实验箱内部放置铜管模拟接地极，并在实验箱侧壁开孔，使接地线与接地极相连，如图4所示。实验采用YJV1×95 8.7/10 kV型电缆，其导体直径为13.1 mm，绝缘层厚度为4.45 mm。

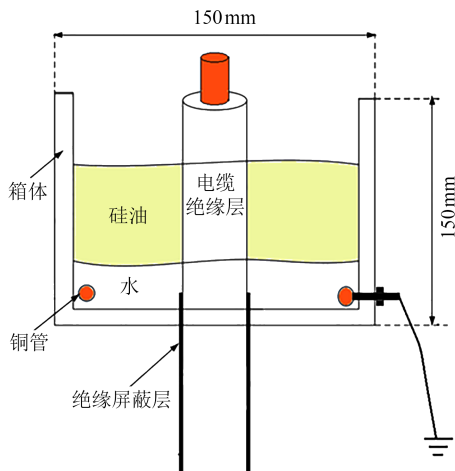


图4 实验箱

Fig.4 Test chamber

为模拟故障电缆终端内部的水及絮凝物，采用质量分数为3%的氯化钠(NaCl)水溶液构成具有导电离子的水<sup>[17-18]</sup>，实验采用德国瓦克公司生产的TR50型低黏度硅油，此硅油闪点高、稳定性强、电气强度高，也是220 kV故障电缆终端内部填充硅油。控制实验箱内水面高度为43 mm，油面高度为100 mm，导体屏蔽层高度为23 mm。

实验平台如图5所示，由模型终端、变压器、100 pF并联耦合电容器、局放检测仪、实验箱、摄像机构成。实验开始前，测得局放背景噪声为2~4 pC。电压从0开始以3 kV为升压步进梯度逐步增加到30 kV，使电缆绝缘层外径处的径向电场强度从0.53 kV/mm增加到5.26 kV/mm。实验过程中采用摄像机监控电缆状态。每个电压水平维持30 min后，进行局部放电测量和录像。

### 3.2 实验结果

实验模拟2种接地状态，一种为实验箱中的水不接地，将实验箱外部的绝缘屏蔽层接地，另一种为实验箱中的水与绝缘屏蔽层通过接地线接地。

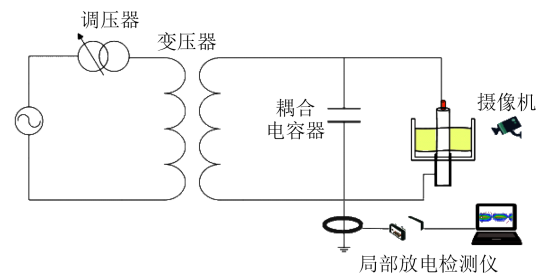
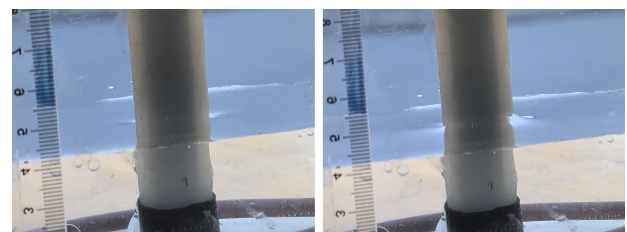


图5 实验平台

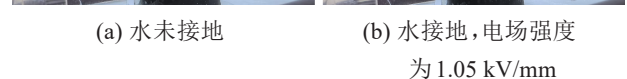
Fig.5 Test platform

#### 3.2.1 界面状态

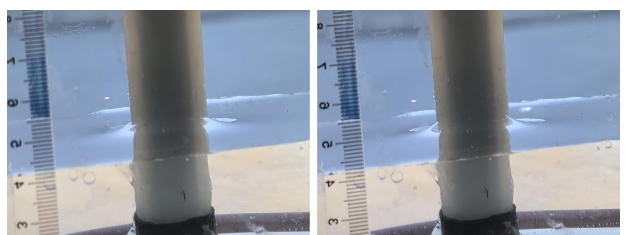
当实验箱中的水未接地时，实验电压从0增加到30 kV(相当于5.26 kV/mm的电场强度)时，观察到随着电压升高，实验箱内油-水界面并未发生改变，如图6(a)所示。而将实验箱内水接地，外施电压为6 kV，电场强度为1.05 kV/mm时，油-水界面发生改变，水沿电缆绝缘层表面上形成一层不规则的薄水膜，如图6(b)所示。在电场强度为2.63 kV/mm和5.26 kV/mm时，相应的状态图像如图7(c)和(d)所示，可以看到水沿交联聚乙烯电缆表面上向上拉伸，在油中形成锥形水电极，剖面为三角形，与图2应力锥上表面导电通道形状一致。



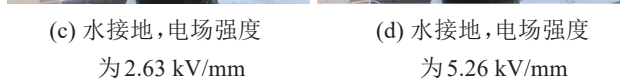
(a) 水未接地



(b) 水接地，电场强度为1.05 kV/mm



(c) 水接地，电场强度为2.63 kV/mm



(d) 水接地，电场强度为5.26 kV/mm

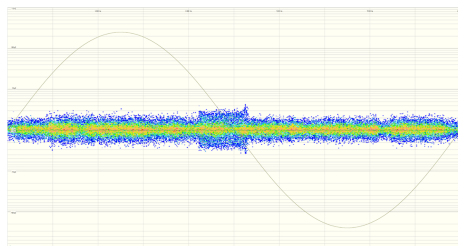
图6 油-水界面状态

Fig.6 Oil-water interface status

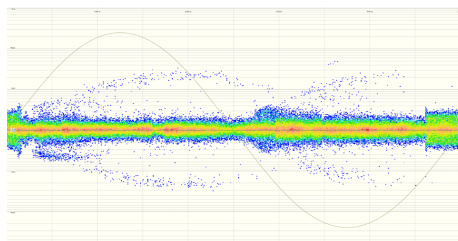
#### 3.2.2 局部放电

图7是局部放电图谱。从图7(a)可以看出，当实验箱内水不接地，而电缆绝缘外屏蔽层接地，外施电压低于27 kV时，测得局部放电水平变化很小，

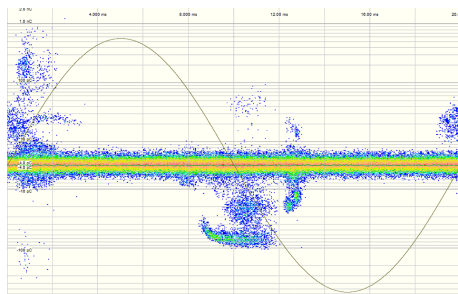
基本维持背景噪声水平。而当实验箱内水接地,随着外施电压升高,局部放电特征发生显著变化,首先在第三象限出现局部放电信号,见图7(b)。当电场强度增至5.26 kV/mm时,在第一象限和第三象限出现局部放电信号,见图7(c),此时放电类型与表面放电相近。



(a) 水未接地



(b) 水接地,电场强度为2.63 kV/mm



(c) 水接地,电场强度为5.26 kV/mm

图7 局部放电图谱

Fig.7 Partial discharge images

进一步研究水在电场作用下沿电缆绝缘层表面向上运动的不规则薄水膜的形成过程,对比分析其不同电场作用下测得的局部放电量和膜高度如表2所示。从表2可以看出,当电缆绝缘层外径处电场强度超过2.10 kV/mm时,水分子从油-水界面逸出并迅速向上移动。随着外施电压增大,电场强度不断增加,水分子进一步向上移动,局部放电也显著增大,可见,水膜高度与局部放电密切相关,放电起始可能与锥形水电极的形成有关。

通过对比仿真与实验结果可以推断,当水浸入电缆终端并达到一定量后,无论硅油是否老化形成絮凝物沉积在应力锥上方,在电场作用下都能形成

表2 水膜高度与局部放电量的关系

Table 2 Relation between water film height and partial discharge

电压/kV	电场强度 $E$ /(kV/mm)	水膜高度/mm	局部放电量/pC
3	0.53	0	2.23
6	1.05	1.8	2.72
9	1.58	2.6	4.29
12	2.10	3.6	7.75
15	2.63	5.7	14.91
18	3.16	6.4	20.99
21	3.68	7.3	31.42
24	4.21	8.6	58.73
27	4.73	9.4	153.21
30	5.26	10.8	224.64

图2中的“三角区”。结合图3仿真得到故障电缆终端电场,当未形成导电通道,即“三角区”未接地时,电缆绝缘层外径电场约为0.62 kV/mm,根据模拟实验,水未接地时外施电压低于27 kV并不会产生明显局部放电。而当形成导电通道后,即“三角区”接地时,220 kV充油电缆终端内A点处,电缆绝缘层外径电场强度高达8.31 kV/mm,在高电场作用下,水膜高度将被拉伸很高,产生较大水平的局部放电,局部放电量超过200 pC。经过一段时间后,电缆绝缘层表面将在局部放电作用下被水分子劣化,最终引起电缆在A点处击穿。

#### 4 结论

(1)充油电缆终端内电缆绝缘层击穿受导电通道接地状态影响。水分子沿应力锥及电缆绝缘层表面向上运动形成导电通道,且当电缆终端直接接地时,电缆绝缘层电场畸变,可引发电缆绝缘击穿。

(2)击穿点位置与电缆绝缘层外径处电场强度相关。电场强度越高,水膜高度越高,电缆绝缘层击穿点距离应力锥上表面的距离越长。

(3)在电场作用下,水对充油电缆终端绝缘的劣化可以通过局部放电进行检测与诊断,缺陷形成导电通道后会在第一、三象限出现放电特征,且局部放电程度与水膜高度正相关。

#### 参考文献 References

- [1] 杨勇,曹俊平,江航,等.110 kV交联聚乙烯电缆终端悬浮电位缺陷试验[J].绝缘材料,2019,52(5):59-64.  
YANG Yong, CAO Junping, JIANG Hang, et al. Experiment on floating potential defect in 110 kV XLPE cable terminal[J]. Insulating Materials,2019,52(5):59-64.

- [2] 宋鹏先,贺春,李隆基,等.极寒环境下户外充油电缆终端故障机理研究[J].绝缘材料,2022,55(6):71-77.  
SONG Pengxian, HE Chun, LI Longji, et al. Research on failure mechanism of outdoor oil-filled cable terminal under extremely cold conditions[J]. Insulating Materials,2022,55(6):71-77.
- [3] HOSIER I L, MA H, VAUGHAN A S. Effect of electrical and thermal ageing on the breakdown strength of silicone oil[C]//2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids. Bled, Slovenia: IEEE,2014.
- [4] SUWARNO, DARMAWAN M A. Effect of water content on dielectric properties and partial discharge characteristics of silicone oil[C]//2016 3rd Effect of Water Content on Dielectric Properties and Partial Discharge Characteristics of Silicone Oil. Yogyakarta, Indonesia: IEEE,2016.
- [5] LILAND K B, BJORKE A, HVIDSTEN S, et al. Failure modes and condition assessment of high voltage oil filled XLPE terminations[C]//2009 IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada: IEEE,2009.
- [6] 张静,蔡玉汝,张小军,等.密闭环境下高压电缆终端硅油劣化特性[J].绝缘材料,2023,56(6):40-45.  
ZHANG Jing, CAI Yuru, ZHANG Xiaojun, et al. Deterioration characteristics of silicone oil for high voltage cable terminal in closed environment[J]. Insulating Materials,2023,56(6):40-45.
- [7] 王彦伟,魏成文,戴静旭,等.轧管1344线高压电缆终端套管异常发热机理初探[J].高电压技术,2004,30(136):65-98.  
WANG Yanwei, WEI Chengwen, DAI Jingxu, et al. Study on abnormal heating mechanism of tube-rolling 1344 high voltage cable terminal bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(136):65-98.
- [8] 罗真海,陆国俊,王晓兵,等.高压电缆瓷套式终端发热原因[J].高电压技术,2007,33(11):240-244.  
LUO Zhenhai, LU Guojun, WANG Xiaobing, et al. High voltage cable porcelain bushing terminal heating reason[J]. High Voltage Engineering,2007,33(11):240-244.
- [9] 申积良,罗俊华,汤美云,等.110kV电缆终端头爆炸事故分析[J].高电压技术,2005,31(11):74-75.  
SHEN Jiliang, LUO Junhua, TANG Meiyun, et al. Explosion accident analysis of 110kV cable terminal[J]. High Voltage Engineering,2005,31(11):74-75.
- [10] YOSHIDA H, YANABU S. The breakdown characteristics of the silicone oil for electric power apparatus[J]. IEEE Transactions on Power and Energy,2004,124(4):582-587.
- [11] BERGIN E. Guidelines for maintaining the integrity of extruded cable accessories[M]. Berlin, Germany: Springer,2021:262-263.
- [12] 付朝霞.220kV电缆终端硅油老化鉴定试验与分析[J].电力安全技术,2013,15(7):27-29.  
FU Zhaoxia. Aging test and analysis of silicone oil in 220kV cable terminal[J]. Power Safety Technology,2013,15(7):27-29.
- [13] 张若兵,辛鸿帅,郭国化.气体绝缘开关设备电缆终端绝缘硅油老化问题试验研究[J].高电压技术,2015,41(11):3746-3752.  
ZHANG Ruobing, XIN Hongshuai, GUO Guohua. Test and research on the aging of silicon oil in the cable terminal of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3746-3752.
- [14] 张静,程林,宋鹏先,等.基于硅油劣化特性对高压电缆终端热状态的测试分析[J].绝缘材料,2020,53(3):89-93.  
ZHANG Jing, CHENG Lin, SONG Pengxian, et al. Test and analysis of thermal state of high voltage cable terminal based on silicon oil degradation characteristics[J]. Insulating Materials, 2020,53(3):89-93.
- [15] 张静,李忠群,王伟.冲击电压作用下应力锥位置对高压电缆终端电场分布的影响[J].高压电器,2014(7):51-56.  
ZHANG Jing, LI Zhongqun, WANG Wei. Influence of stress cone location on the electric field distribution in HV cable terminal under impulse voltage[J]. High Voltage Apparatus,2014(7): 51-56.
- [16] 王伟.交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础[M].西安:西北工业大学出版社,2011:121-127.  
WANG Wei. XLPE insulated power cable[M]. Xi'an: Northwest-ern Polytechnical University Press,2011:121-127.
- [17] 邓凯,阎孟昆.NaCl溶液对XLPE电力电缆工频击穿特性和水树的影响[J].电线电缆,2013(5):17-19.  
DENG Kai, YAN Mengkun. The effects of NaCl solution on breakdown characteristic of power frequency and water tree of XLPE power cables[J].Electric Wire & Cable,2013(5):17-19.
- [18] 刘洋,陈杰,王凌志,等.3.5% NaCl溶液中电缆铝护套的交流腐蚀特性[J].腐蚀与防护,2021,42(7):20-24.  
LIU Yang, CHEN Jie, WANG Lingzhi, et al. AC corrosion characteristics of cable aluminum sheath in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion & Protection,2021,42(7):20-24.

收稿日期:2024-06-21;修回日期:2024-08-29。

作者简介:

张静(1986-),女(汉族),黑龙江佳木斯人,高级工程师,主要从事电力设备状态检测与评估技术的研究。

## 行业动态

### 世界首台 110kV 节能型非晶合金立体卷铁心油浸式电力变压器研制成功

3月中上旬,广东电网公司、海鸿电气、华中科技大学、华北电力大学、安泰科技联合成功研发 110kV 节能型非晶合金立体卷铁心油浸式电力变压器,并顺利通过全项试验。这一成果标志着我国在高压节能变压器技术领域迈入了新阶段,在电气装备研发领域具有跨时代的里程碑意义。产品将在汕头市潮南区 110kV 红场变电站投入运行。

该变压器是全球首台应用于 110kV 电压等级的节能型非晶合金立体卷铁心电力变压器,其核心创新在于高电压等级变压器领域内,将低损耗非晶合金材料与立体卷铁心结构深度融合,通过新型铁心悬挂结构,实现重量 10 吨以上的非晶合金立体卷铁心可靠悬挂,并有效控制噪音和改善变压器抗短路能力。

### 国内首条 110 千伏低副产物国产料交联聚乙烯电缆通过挂网试运行评审会

3月8日,由国网山东临沂供电公司联合国网电科院、特变电工、山东鲁能泰山电缆有限公司研制的国内首条 110 千伏低副产物国产料交联聚乙烯电缆在山东临沂成功通过挂网试运行评审会,标志着我国节能环保低副产物国产料交联聚乙烯电缆研制技术已经达到国内领先水平。

当前我国高压电缆广泛使用交联聚乙烯绝缘材料,其生产周期长、耗能大,产生的甲烷等副产物对环境有害。与之相比,低副产物交联聚乙烯电缆生产时,采取新型交联及脱气工艺,相较传统电缆生产工艺,交联过程中产生的甲烷等副产物降低 80% 以上、电缆脱气时间降低 70% 以上,具有绿色环保、节能低碳等优点。此外,低副产物国产料交联聚乙烯电缆单次挤出长度更大,可大幅减少电缆接头数量、提高电缆运行可靠性。该新型电缆与传统交联聚乙烯电缆、电缆附件有较好的相容性,具有较高的应用价值和发展前景。

### 江苏电网全电压等级继电保护装置全部实现国产化

3月上旬,随着苏州 500 千伏太仓变电站继电保护改造完成,江苏电网在华东地区率先实现全电压等级继电保护装置国产化率 100%。

在电力系统发生故障或异常运行时,继电保护装置能作出故障判别并迅速隔离故障点,相当于人体的免疫系统。2006 年以前,江苏电网继电保护装置大多依赖进口,随着设备老化和行业技术标准提升,进口继电保护装置已无法适应国内电网复杂工况,且存在部分备品备件停产导致的运维难题,严重影响电网安全运行。为避免核心技术“卡脖子”问题,2011 年起,国网江苏省电力有限公司大规模实施全省继电保护装置国产化改造。

据悉,江苏电网继电保护装置国产化改造工作历时 14 年,仅 500 千伏变电站就涉及保护设备更换 786 套、电缆改造两万余根,由此彻底解决了进口设备“水土不服”问题,保障电网安全稳定运行的同时,在能源关键领域设备国产化方面作出了示范。

### 世界首条柔性直流特高压线路工程正式开工

3月6日,国家“十四五”电力发展规划的重点工程——

甘肃-浙江±800 千伏特高压直流输电工程首个线路标段在杭州市富阳区环山乡双林村正式开工建设。该工程不仅是世界首条柔性直流特高压输电工程,也是我国能源战略布局的重要一环。工程始于甘肃武威市,终于浙江绍兴市,全长约 2370 千米,输电容量达 800 万千瓦。

柔性直流技术具有调节灵活、稳定性强、适应性强等优势,能够有效解决新能源并网带来的波动性问题,提高电网的稳定性和可靠性,这一技术的应用标志着我国在特高压输电领域的技术创新迈上新台阶。

近年来,我国在特高压领域取得了举世瞩目的成就,已成为全球特高压输电技术的引领者。该工程的建设将进一步巩固我国在这一领域的技术领先地位,为全球能源转型提供“中国方案”。

据测算,工程建成后,每年可向浙江输送电能约 360 亿千瓦时,约占浙江省年用电量的 6%。其中,风电、光伏等新能源电力超过 212 亿千瓦时,可替代 640 万吨燃煤、减少 1700 万吨碳排放,相当于植树造林约 50 万公顷,为浙江能源结构优化和绿色发展转型作出重要贡献。

甘浙特高压工程的建设将带动相关产业链发展,创造大量就业机会,助力经济社会高质量发展。

### 世界首套! 柔直输电工程有了新“心脏”

2月18日,南方电网超高压公司牵头研发的基于 6.5kV/3kA IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的柔性直流换流阀装备,顺利通过中国机械工业联合会组织的新产品技术鉴定,由中国工程院院士李立涅等 11 位行业权威专家组成的鉴定评审委员会一致认为:产品性能总体达到国际领先水平。该装备的成功研发,实现了我国重大装备研制的突破,促进了电工装备产业升级,有力支撑新型电力系统建设,助力“双碳”战略目标实现。

柔性直流换流阀是柔性直流输电工程的“心脏”。当前柔直工程中广泛应用 4.5kV/3kA IGBT 的柔直换流阀,为了实现紧凑化、低损耗的目标,研究更高电压、更大电流 IGBT 的柔直换流阀为柔性直流发展的重要攻关方向。通过研发更高电压等级的器件,研制新序列柔直换流阀装备,可有效减少柔直换流阀模块数量、减小换流阀尺寸及降低损耗。目前,国内外 6.5kV/3kA IGBT 器件与柔直换流阀研制、试验技术可借鉴的经验少,研发难度大,需要突破诸多技术挑战。

南方电网超高压公司联合许继电气、南网科研院、株洲中车半导体组建了横跨“产学研用”的攻关团队,历时 3 年攻克了 6.5kV 沟槽栅 IGBT 芯片、高压 PIC 二极管芯片及“电-磁-结构”多复杂耦合物理场综合优化的 6.5kV/3kA IGBT 柔直阀结构、多级协同旁路保护、纳秒级数字驱动器等关键技术难题,在国际上率先研制出基于 6.5kV/3kA IGBT 的柔性直流换流阀,实现 6.5kV/3kA 新序列柔直阀装备完全自主可控,推动柔性直流输电创新发展。据了解,新研制的 6.5kV/3kA IGBT 的柔性直流换流阀,相比于 4.5kV/3kA IGBT 的柔直换流阀,功率密度提升约 27.8%,单桥臂单塔占地面积减少约 18.6%,使柔直换流阀更加紧凑,解决了在土地资源稀缺和减重需求较高的应用场景下新能源远距离输送难题,对构建新型电力系统具有十分重要的作用。

据介绍,6.5kV/3kA IGBT 的柔直换流阀除了节约用地之外,同时在节能降耗及技术经济方面具有显著优势。相比于 4.5kV/3kA IGBT 的柔直换流阀可以降低损耗 23%,以 5GW 换流站为例,年节约电量约 0.4 亿度电,增加直接经济效益超 2000 万元。该产品未来可广泛应用于大型水电站、大型新能源基地和海上风电柔性直流送出工程,推广应用前景广阔。

## 国内文摘与专利

**±400kV 直流穿墙套管用环保气体的绝缘特性/程显,刘赛,葛国伟,等/电工技术学报,2025(3)**

该文首先仿真分析了±400kV 直流穿墙套管的电场分布,得到穿墙套管内部整体电场分布呈现出两端低中间高的特征,电场强度最大值出现在中间穿墙筒体屏蔽罩端部圆弧处,并根据穿墙套管典型位置电场强度与不均匀度设计了不同类型的电极;其次,在正负极性直流电压下通过试验研究了0.5~1.0MPa 气压范围内不同电极形式、不同电极距离的干燥空气和CO<sub>2</sub>的击穿特性,以及0.1~0.6MPa 气压范围内球板电极、同轴电极下不同电极距离的C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体击穿特性,并将三种气体在相同条件下进行对比。试验结果表明:在气压过高时,干燥空气、CO<sub>2</sub>及C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体的击穿电压会呈现饱和现象;在相同条件下,干燥空气的绝缘性能是CO<sub>2</sub>的1.18倍,球板电极下,0.9MPa 干燥空气直流负极性击穿电压可达0.4 MPa SF<sub>6</sub>混合气体负极性击穿电压的77.2%,可用于±400kV 直流穿墙套管中。

**电磁线耐热绝缘涂层的现状与发展趋势/谢历,李福,瞿晓芬/电工材料,2025(1)**

本文综述了现有电磁线领域绝缘涂层材料的应用情况,分析了有机型、有机-无机型、无机型三种不同组成类型的绝缘涂层材料的性能特点以及电磁线在使用过程中存在的问题。通过对比不同类型绝缘涂层材料的耐热性能,展望了电磁线绝缘涂层的发展方向。

**IGBT 封装用聚酰亚胺胶的制备及性能表征/刘杰,江乾,胡峰,等/轨道交通材料,2025(1)**

以含醚二胺、含硅氧烷二胺和含酮基二酐作为共聚单体,含羟基的单酐作为封端剂,调控聚酰亚胺胶各项性能之间的平衡关系,研制出一款固化温度低、绝缘等级高、黏附性能优异、与IGBT 器件匹配性高且可长期稳定储存的封装用聚酰亚胺胶。研究表明:通过在刚性主链上引入醚键和硅氧烷结构,使得PI 的玻璃化转变温度降至238℃;通过引入羟基、酮基等强极性基团、端胺基硅氧烷结构提升PI 与基材的黏附性,黏结强度高达13MPa,划格试验结果达到0级;成功解决了普通PI 树脂固化温度高、易剥离、易产生气泡等行业难题;且可在-18℃条件下长期稳定储存。

**环保型绝缘气体的研究进展/马腾,王泉高,王伟民/低温与特气,2025(1)**

介绍了目前该领域较为关注的几种环保型绝缘气体,分别从单一常规气体、SF<sub>6</sub>混合气体和新型环保气体及其混合气体3个方面展开讨论。对目前最有潜力取代SF<sub>6</sub>的环保型气体C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N及其混合气体进行了分析研究,并着重对C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N目前的合成工艺进行了讨论。

**高性能聚酰亚胺绝缘纸板制备及性能研究/韩立新,李广斌,李志强,等/高科技纤维与应用,2025(1)**

本文以不同型号聚酰亚胺短切纤维为原料,制备聚酰亚胺绝缘纸板(PI 绝缘纸板)。通过在浆料中添加分散剂聚氧化乙烯(PEO)、增强剂阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)及羧基丁苯胶乳,并与芳纶浆粕混抄制备原纸,经不同树脂浸渍及多层复合热压结合,获得力学、电气性能优良的PI 绝缘纸板。结果表明,当芳纶浆粕用量为6.0%、PEO 用量为0.06%、丁苯胶乳用量8.0%,选用K0506型号(细度更小)聚酰亚胺短切纤维,聚酰亚胺树脂浸渍浓度4.0%,热压条件为200℃、5MPa、5min时,所制备定量为120g/m<sup>2</sup>绝缘纸板的抗张指数达39.996N·m/g,撕裂指数为43.208mN·m<sup>2</sup>/g,挺度为1.424mN·m,击穿强度为4.471kV/mm。SEM 图显示,热压后

纸板表面树脂覆盖均匀,且分解温度 $T_{max}$ 高达616℃,可长期在高温环境下保持优异稳定性。

**天然酯绝缘油浸渍电容式电压互感器的电气性能研究/杨硕亮,刘水平,杨晓静,等/电力电容器与无功补偿,2025(1)**

本文通过对电容式电压互感器(CVT)常用浸渍剂二芳基乙烷和天然酯绝缘油进行对比,研究电容器介质在不同温度下浸渍天然酯绝缘油的绝缘性能及介质损耗,得出浸渍天然酯绝缘油的电容器介质的绝缘性能基本满足CVT 电容分压器的耐压和介损使用要求,制作天然酯绝缘油的CVT 样机进行相应的例行试验项目,为后续的冲击试验以及批量试验验证提供数据支撑。

**硼酚醛树脂/玄武岩纤维复合材料的制备及性能测试/田佳元,管勇,吴晓亮,等/辽宁化工,2025(2)**

采用水杨醇法制备硼酚醛树脂(BPF),通过红外光谱和高分辨质谱推测出产物结构,并进行热失重及差示扫描量热分析。采用层压成型的方法制备硼酚醛树脂/玄武岩纤维(BPF/CBFTC)复合材料,通过SEM 观察其表面形貌,并进行力学性能及绝缘性能测试。结果表明:在BPF 树脂合成过程中硼酸与水杨醇羟基的反应活性更高;BPF 树脂玻璃化转变温度为61℃,固化温度为160℃,N<sub>2</sub>气氛下以5℃/min 升温至800℃仍有47.4%的质量残留率。BPF/CBFTC 复合材料拉伸强度为319.3MPa,弯曲强度为255.4MPa,在人造海水中长期浸泡仍具有良好的电绝缘性能。

**GIS 环氧浇注主要原料性能测控应用分析/袁志兵,孙荣春,王光明/黑龙江水利科技,2025(2)**

针对环氧浇注原材料的主要性能环氧当量、酸酐当量、粒度分布等作为主要性能控制指标,增加了红外光谱、分子量分布检测,控制其处于可比对测控状态,使生产的环氧浇注绝缘件力学性能、电性能稳定,提高了环氧浇注绝缘件质量,保证了GIS 运行可靠。

**国内聚丙烯绝缘电力电缆及材料标准规范概述/黄上师,张熙宇,童成,等/电线电缆,2025(2)**

聚丙烯绝缘电力电缆因其优异的电气性能、环境友好及可回收等性能得到国内外相关领域的广泛关注。随着聚丙烯电缆的推广应用,目前已形成部分关于聚丙烯电缆及其材料的标准规范。文中针对国内行业已发布的多项热塑性聚丙烯电缆及聚丙烯电缆材料相关的团体标准,对比分析了各标准文件的试验项目、条件和要求,深入讨论了当前业内对聚丙烯电缆工程应用的疑虑,并提出了聚丙烯电缆标准化进程的研究方向,为未来聚丙烯电缆更科学的标准化发展提供参考指引。

**一种氮化硼-超支化聚酰亚胺耐高温高导热绝缘浸渍漆及其制备方法/CN119505688A/浙江荣泰科技企业有限公司**

本发明提供的绝缘浸渍漆耐热等级可达200(C级)且导热系数 $\geq 0.60\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,热失重(以质量损失5%计算) $\geq 330^\circ\text{C}$ ,工频电气强度 $\geq 22\text{MV}/\text{m}$ ,可满足未来驱动电机及时高效的散热和绝缘安全要求。

**一种汽车驱动电机用C级耐油槽绝缘复合材料及其制备方法/CN119526855A/四川东材新材料有限责任公司**

本发明公开的复合材料依次由聚芳酰胺纤维纸层、高耐热高阻隔性胶粘剂层、聚酰亚胺薄膜层、高耐热高阻隔性胶粘剂层、聚芳酰胺纤维纸层复合组成。具有良好的耐油性、耐热性和加工性,特别适用于电动汽车等新能源汽车油冷驱动电机槽绝缘,也适用于电动汽车等新能源汽车油冷驱动电机相绝缘、匝间绝缘。

**一种低密度聚乙烯绝缘材料直流电气性能的提升方法/CN119463338A/哈尔滨理工大学**

本发明技术要点是:包括在低密度聚乙烯中添加有机小分子填料进行共混,低密度聚乙烯作为基底,得到低密度聚

乙烯复合绝缘材料,具有基体和填料之间具有较好的相容性,避免了无机填料在低密度聚乙烯基体中发生团聚现象,避免了传统的接枝中复杂的化学反应以及接枝率难以控制的问题,同时减少了化学反应带来的副产物,在实际工程中更具应用价值的优点。

#### 一种芳香胺环氧树脂固化剂及其设计方法和绝缘环氧树脂及其制备方法/CN119409580A/西安交通大学

本发明将多芳香二胺作为环氧树脂的固化剂组分,将刚性芳香结构引入环氧主链增强其热稳定性,提升玻璃化转变温度;在苯环之间引入功能桥键作为打破苯环共轭结构,提升电气性能。能够制备高热稳定性和高电阻性的高压直流用绝缘环氧树脂。有助于解决直流 GIS/GIL 中关键绝缘件在高温梯度和高电场作用下的电气性能。

#### 一种耐撕裂芳纶纳米绝缘纸及其制备方法和应用/CN119434017A/陕西科技大学

本发明充分发挥了对位芳纶纳米纤维优异的成膜性能,以及它们表面丰富的功能基团易与间位芳纶短切纤维产生强的网络交联结构的优点,改善了目前芳纶纳米绝缘纸易撕裂导致的应力集中破损、介电强度差等缺陷,同时还可以作为超薄绝缘层应用于下一代高度轻量化与集成化的特种电气设备,实现设备小型化、集成化与结构减重。

#### 一种耐热型聚氨酯绝缘漆及其制备方法/CN119505679A/广东顺德大地绝缘新材料有限公司

通过选择合适的有机硅烷及水性树脂组分,先将有机硅烷与聚氨酯树脂加热混合,使其与聚氨酯进行充分物理缠结和水解交联,然后和其他组分一起作为绝缘漆的成膜组分,有力地提升绝缘漆的耐温性能,还能提升膜层的柔韧性。本发明的制备方法简单高效,避免了复杂的化学反应条件,以及其他化学试剂的使用,确保水性绝缘漆的绿色环保。

#### 一种高绝缘填充型高导热环氧树脂复合材料及其制备方法和应用/CN118496622B/哈尔滨理工大学

以环氧树脂掺杂氮化硼与氧化铝为前驱体,将绝缘介质PI加入前驱体中,通过高温固化获得高绝缘填充型导热环氧树脂复合材料。制得的复合材料电气强度为219.9kV/mm,体积电阻率为 $3.57 \times 10^{16} \Omega \cdot m$ ,导热系数为1.918W/(m·K),有望作为一种新能源驱动电机的导热封装绝缘材料。

#### 一种应用于IGBT的低介电绝缘灌封胶及其制备方法/CN118620575B/深圳市嘉多宝科技有限公司

本申请的低介电绝缘灌封胶的制备工艺简单,制得的低介电绝缘灌封胶具有较好的耐候性、绝缘性和抗开裂性能,适用于IGBT的封装中,密封性好且功能稳定。

#### 一种高导热环氧树脂复合物的制备方法/CN117736549B/广东博汇新材料科技有限公司

本发明的酸酐固化剂在固化促进剂的作用下,可以在较低温度下,很快实现环氧树脂的固化,同时复配不同种类的特定粒径和形貌的导热粒子,在较低的添加量下,显著提高环氧树脂复合物的导热性能。

#### 一种云母纳米片及其制备方法和应用/CN119390081A/中国科学院宁波材料技术与工程研究所

本发明将云母、离子液体和溶剂混合后进行超声处理,得到大尺寸超薄云母纳米片。该方法利用离子液体作为插层剂,离子液体插层在云母片层之间,扩大了云母片层之间的间距,减弱了云母片层间的相互作用力,使得经过超声处理后的云母纳米片更容易被剥离,并且云母纳米片在剥离过程中不易产生晶格缺陷,制得的云母纳米片品质高、缺陷少、杂质含量低、分散性好,可作为导热片、导热复合材料、聚酯或防腐涂层的阻隔功能填料,具有良好的应用前景。

#### 一种含碳纤维骨架的绝缘复合材料及制备方法和应用/CN119388861A/烟台泰和新材料高分子新材料研究院有限公

司;泰和新材料(宁夏)科技研发有限公司

本发明所述绝缘复合材料同时兼具耐水性和耐油性,具有极强的电绝缘性、导热性、阻燃性和机械强度。适用于电子元器件和散热器之间的界面复合材料,具有填充界面空隙、降低界面热阻、提升芯片散热能力、保持较高的电阻率,以实现芯片高效散热的同时降低漏电风险。

#### 一种干式电抗器封装绝缘环氧树脂体系及其制备方法/CN119432006A/中国电力科学研究院有限公司;国网山东省电力公司建设公司

本发明的干式电抗器封装绝缘环氧树脂体系可以提高目前环氧树脂绝缘材料的耐湿热性和韧性,降低环氧树脂绝缘材料微裂纹和吸水率,提高绝缘材料的绝缘能力,提高电抗器耐冲击性能、抗短路能力和绝缘性能。

#### 高耐温聚酰亚胺树脂的制备方法及应用/CN119391186A/广东伟的新材料股份有限公司

通过添加改性硅基填料,得到玻璃化转变温度高于376℃,初始分解温度高于516℃,导热系数大于0.42W/(m·K),热膨胀系数小于 $32 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的高耐温聚酰亚胺树脂,其耐热性能满足航天器发动机高温部件的制造要求。

#### 一种改性聚丙烯基绝缘材料及其制备方法/CN11939118A/安徽省雯智新材料科技有限责任公司

本发明通过引入耐热老化性能良好的抗氧化聚丙烯,有效改善了绝缘层的绝缘老化现象,并改善了聚丙烯基绝缘材料的直流介电性能,此外,通过引入相容性良好的改性绝缘稳定剂,同时赋予了聚丙烯基材料良好的强度和绝缘性,有效避免绝缘层击穿现象,通过二者的协同作用,提高了聚丙烯基绝缘材料的使用寿命。

#### 一种PET电气绝缘胶带及其制备方法/CN119410297A/东莞市索高实业有限公司

为了解决现有的PET胶带导热散热差的问题,本发明制备出一种高导热的丙烯酸压敏胶,能够使得PET电气绝缘胶带快速散热。

#### 绝缘材料及其制备方法和应用/CN118421013B/特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司

本申请以乙丙橡胶作为基材,引入顺丁橡胶、反式1,4-聚异戊二烯和滑石粉等进行协同配合,有效提高绝缘材料的力学性能、加工性能和耐压绝缘性能。

#### 一种高性能绝缘油及其制备方法/CN119528723A/昆明理工大学

本发明制备得到的合成酯绝缘油具备低黏度、低倾点、高燃点(>300℃)以及高氧化稳定性优势,满足变压器等电气设备在极端环境下的应用需求。

#### 一种具有无机材料的环氧树脂复合材料及其制备方法/CN119529480A/彼得福新材料盐城有限公司

该种环氧树脂复合材料由环氧树脂、壳核无机材料、固化剂和固化促进剂为原料制得,通过制备以蒙脱土为核,聚合物受阻酚抗氧剂层为壳的壳核无机材料,使其以物理交联核心的形式均匀分布在环氧树脂网络结构中,可通过应力分散和转移,提高环氧树脂复合材料的韧性和力学性能。同时,壳核无机材料中的核层结构中含有受阻酚抗氧剂,可以有效改善环氧树脂复合材料的耐老化黄变性能,而且,由于氢键缔合网络对壳核无机材料的限域作用,抗氧剂无法发生迁移和析出的现象,可保障环氧树脂复合材料具有长效耐老化黄变效果。

#### 耐高温绝缘漆及其制备方法和应用/CN119505692A/湖南华菱线缆股份有限公司

本申请提供的耐高温绝缘漆,在有机硅树脂、疏水型气相二氧化硅、改性氧化铝和改性氧化锌的协同作用下,具有很高的耐磨性、耐高温性、绝缘性和导热性。