

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.005

中压开关设备用环保型尼龙绝缘材料改性研究

张永刚, 陆军

(江苏南瑞帕威尔电气有限公司, 南京 211100)

摘要: 纤维增强型PA66(尼龙66)复合材料由于自身的性能优势和环保价值,近年来在中压开关设备绝缘件中得到一定的应用,但相比于环氧绝缘材料而言仍有较多性能差异。文中从中压开关设备绝缘件性能需求出发,采用高性能的芳香族PA6T6I作为改性材料,研究了PA66与PA6T6I混合比例为3:7、5:5、7:3的多种配方方案,并与纯PA66材料以及环氧材料进行了基本物理特性、机械力学及电气特性以及长期电热老化和蠕变特性试验等方面的特性对比。结果表明,混合比例为5:5的配方具有较为理想的综合性能,是一种理想的环保替代绝缘材料。

关键词: PA66(聚酰胺66/尼龙66); PA6T6I(聚酰胺6T6I); 中压开关; 绝缘件; 热塑性绝缘材料。

Study on the Modification of Environmental Friendly Nylon Insulating Material for Medium Voltage Switchgear

ZHANG Yonggang, LU Jun

(Jiangsu NARI Power Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Due to its own performance advantages and environmental protection value, fiber-reinforced PA66 composite material has been applied in insulating parts of medium-voltage switching equipment in recent years. However, compared with epoxy insulating material, it still has a large performance distance. Based on the performance requirements of the medium-voltage switch equipment, we use the high-performance aromatic PA6T6I as the modified material to study the performances of the different mix ratio formula of PA66 and PA6T6I is 3:7, 5:5 and 7:3. The modification formula with the pure PA66 and epoxy basic physical properties are compared by testing their mechanical and electrical properties, long-term electric-heat aging property and creep characteristic. The results show that the formula with a mixing ratio of 5:5 has better comprehensive performance and will be an ideal alternative insulation material.

Key words: PA66(polyamide 66/nylon66); PA6T6I (polyamide 6T6I); medium - voltage switchgears; insulating parts; thermoplastic insulating material

0 引言

环氧树脂作为目前最为广泛应用的绝缘材料,在加工工艺特性、绝缘特性、耐电热老化特性以及表面耐电痕特性等方面具有显著的优势^[1]。到目前为止,环氧绝缘材料已经历了半个世纪的实际应用和开发改良,形成了较为完善的配方和工艺体系,并在输配电领域的全电压等级实现了产品的差异化系统方案^[1-2]。然而,环氧作为热固性材料在成型

后难以回收并重新利用,其固体废料在正常条件下基本无法降解为可重复利用的原料^[3],对环境造成累积型污染,无法满足环保、可持续发展型社会的发展需求^[4]。因此,环保可回收的热塑性绝缘材料近年来得到了较快的发展,以ABB为代表的开关设备制造企业采用尼龙等热塑性材料替代环氧,制备中压绝缘件产品,包括固封极柱、绝缘子、套管等^[5-7]。

具有替代潜力的环保热塑性材料包括,尼龙类材料(polyamide, P),聚酯类材料(PBT、PET等),聚醚

类(PPS、PPO等)以及聚碳酸酯类材料(PC)等^[6-8]。从综合性能来看,尼龙材料的替代价值较高,纯尼龙材料在民用低压领域(≤ 1 kV)有一定的应用,包括交流接触器、继电器、小型断路器等^[9-10]。而在中压等级(12~40.5 kV)开关上应用则需要材料具有一定的强度和耐热特性,目前已开发出采用PA66或PA6为基料的玻纤增强复合材料及固封极柱等产品^[6-8,11-12],并实现了在12 kV电压等级开关设备中的应用。这得益于短玻纤增强的尼龙复合材料所具备的高强度、高韧性、高耐温以及绝缘性能等优势^[8]。

虽然从目前产品的应用看,PA66等常规尼龙材料的性能满足了中压开关产品绝缘件的大部分需求,但相比于环氧材料,热塑性环保材料的多项特性仍有待验证、考核与提升。包括基本物理特性、机械力学和电气特性以及长期电热老化、蠕变特性等,这些性能都会影响中压绝缘制件的长期稳定性^[13],因此需要针对性进行优化。该研究选用了与PA66基料适配性优异的芳香族尼龙材料PA6T6I^[14]进行共混改性,在保证工艺特性的基础上,制备了性能有明显提升的复合材料,对提高环保热塑性中压绝缘件产品的长期稳定性和安全裕度具有较强的应用价值。

1 材料改性方法及性能测试表征

1.1 主要原材料

环氧树脂,ARALDITE CW 229 CI,亨斯曼公司;PA66,EPR27,平顶山神马工程塑料有限责任公司;PA6T6I,自主合成;抗氧化剂168,克莱恩化学公司;短切玻璃纤维:E7CS10-03-534,中国巨石股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

Haake 双螺杆挤出机,PTW 28,德国ThermoScientific公司;注射机,SA900 II/260,海天机械有限公司;热变形温度测试仪,RHY-303,深圳市瑞格尔仪器有限公司;工频耐压试验仪,GC-15KVA/100KV,北京冠测仪器有限公司;悬臂梁冲击试验仪,XJV5.5,承德市金建检测仪器有限公司;漏电起痕试验仪,SH5200,广州电器科学研究院;高精度高压电容电桥,BR34,上海精密科学仪器有限公司;万能力学测试机,AG-50 KNE,日本岛津公司;IZOD冲击仪,UJ-40,河北承德试验机厂。

采用自制的绝缘材料高温高压老化设备(结构简图见图1),对试样长期加载高温和电压电场,老化一定时间后取出样件进行介电强度的测试,以对比考核试样对高温、高电压工况的耐受特性。

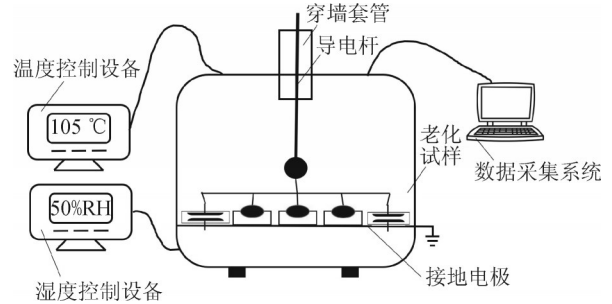


图1 控温湿条件的电场老化装置的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric field aging device under controlled temperature and humidity conditions

1.3 共混改性及试验制备

按照材料配方表见表1,将PA66、PA6T6I基料以及抗氧化剂等混合在混合机中预混合均匀,送入双螺杆机喂料口,玻纤从侧喂料口送入双螺杆机。在一定的转速和分段温度条件下混合挤出并水冷切粒,形成不同配方的复合材料颗粒。

表1 尼龙复合材料配方表(质量分数)

Table 1 Formulation of nylon composites (mass fraction)

配方号	简称	PA66	PA6T6I	抗氧化剂色母等助剂	玻纤
1	PA66	70	0	2	28
2	PA66/6T6I(7:3)	50	20	2	28
3	PA66/6T6I(5:5)	35	35	2	28
4	PA66/6T6I(3:7)	20	50	2	28
5	环氧	环氧树脂及固化剂,高温成型固化。			

完成制备的混合粒料在120 °C下干燥6 h后,在塑料注射机上完成所需试验样条的注射成型制备。由于不同特性材料所需要的注射工艺条件有所差异,根据配方差异按照表2所列出形成的成型工艺参数制备试样,以达到每种配方试样各自最佳的性能。

表2 尼龙复合材料注射成型参数表

Table 2 Table of injection molding parameters for nylon composites

配方号	简称	压力/MPa	料温/°C	模温/°C	保压压力/MPa	保压+冷却时间/s
1	PA66	100	280	90	80	30
2	PA66/6T6I(7:3)	100	320	140	80	60
3	PA66/6T6I(5:5)	100	300	140	80	60
4	PA66/6T6I(3:7)	100	300	140	80	60
5	环氧	60 °C下混料、脱气,注模后140 °C, 30 min,出模后固化12 h。				

1.4 主要试验参照标准

按照表3所示的试验标准或方法进行规定样品的性能测试。其中电热老化特性试验和高温蠕变性能为文中定制的试验方案。

表3 材料性能测试参照标准列表

Table 3 List of reference standards for material performance testing

测试项目	参照标准	备注
热变形温度/°C	ISO 75 GB/T	加载载荷 1.8 MPa
拉伸性能	ASTM D-638—2010(GB/T 1040.1—2006)	—
冲击强度/(kJ·m ⁻²)	ASTM D6110-04	—
介电强度/(kV·mm ⁻¹)	IEC 60243-1—2013(GB/T 1408.1—2006)	—
体积电阻率/(Ω·cm)	IEC 60093—1993 (GB/T 1410—2006)	—
相比漏电起痕指数	GB/T 4207—2012	—
严酷环境条件下耐电痕化和蚀损	IEC 60587—2007(GB/T 6553—2003)	—
吸水率/%	ISO 62—2008(GB/T 1034—2008)	方法2,方法3测试。
电热老化特性试验	105 °C条件下,介电强度样片,罗氏电极加载 10 kV/mm 电场。1 000 h后,取出冷却,测试介电强度数据。	
高温蠕变性能定制试验方案	标准拉伸样条在 105 °C下,加载 10 MPa 固定载荷,1 000 h后测试样品的蠕变量。	

2 基本物理特性

环氧树脂在中、高压开关用绝缘件产品的应用研究已经发展了近40年,在中压领域环氧树脂—硅微粉复合体系的配方、工艺技术已经较为成熟。采用热塑性材料替代环氧材料体系应用于绝缘件产品,可将环氧复合材料特性作为性能评判的重要参考。选用PA66作为基料主要由于其各项综合特性(主要包括电气、力学和热特性等)较好,同时其工艺性、易得性以及回收复用特性都较为理想^[14]。

文中所研究的PA系列配方和环氧材料的多项基本物理特性数据见表4。玻璃化温度(glass transition temperature, T_g)是绝缘件用材料的重要评价指标,一般要求环氧树脂的 T_g 高于设备的最大温升数值(中压开关设备中与导体接触的环氧 T_g 应高于105 °C)。对于PA这种结晶性聚合物, T_g 可表征材料中非晶相结构中的分子链的相态;由于PA66的重复单元为脂肪族碳链,其 T_g 相对较低,仅为70 °C;随着PA6T6I比例的增加,刚性结构的苯环比例提高, T_g 不断提高,达到与环氧材料可比的水平。

表4 尼龙复合材料注射成型参数表

Table 4 Table of injection molding parameters for nylon composites

配方	*玻璃化温度 (DSC)/°C	熔融温度 (DSC)/°C	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	*长期使用温度 (ISO 2578—1993)/°C	**吸水率/%
PA66	70	250	0.32	100~120	1.8/5.5
PA66/6T6I(7:3)	90	280	0.35		1.2/3.5
PA66/6T6I(5:5)	110	300	0.42	140~160	0.7/2.2
PA66/6T6I(3:7)	115	310	0.45		0.6/2.0
环氧	108	—	0.67	200	0.2/0.5

注:* PA混合料的长期使用温度为参照国外类似配方材料的物性参数数值,文中未进行实测;**吸水率数据“/”前后数据分别为室温下50%湿度下饱和吸水率,沸水浸泡条件下饱和吸水率。

与开关设备导体相连的绝缘材料需要具有一定的热传导能力,从而有效散热防止温升超标,从表4数据,可知随着PA6T6I比例的提高,配方材料导热系数有所提升,但相比环氧材料仍有一定差距。该项参数可通过添加高导热无机填料的改性进行提高,文中暂不做深入研究。基于目前材料的导热系数,需要将产品的绝缘层厚度减薄才能实现与环氧绝缘件接近的散热特性,局部材料过厚的设计容易导致产品温升超标,甚至会危害到开关设备

的安全运行。目前依据国外主流厂家的芳香族改性的PA66长期使用温度分别为100~120 °C和140~160 °C,可见芳香族PA的添加有效提高了材料的耐温性能,可满足在开关设备最高温升工况下长期使用,但相比环氧的数值仍有一定差距。

采用纯PA66配方在室温下50%湿度下的饱和吸水率为1.7%,而在沸水条件下饱和吸水率高达5.5%。这会造成材料关键性能的降低^[15-16]。通过添加PA6T6I,可以显著降低饱和吸水率,当PA6T6I混

合比例达到50%以上时,饱和吸水率可降低到0.7%。虽然在沸水条件下的吸水性仍然较高,同时相比于环氧材料,吸水性仍然较大,但由于开关设备的运行温度一般较高,会适度缓解材料吸水对性能的影响。PA材料的吸水性对于开关设备安全运行的影响仍有待长时间实际运行的检验和考核。

3 机械力学及电气特性

3.1 机械力学特性

材料的机械力学特性关系到绝缘件产品的结构设计,尤其对于绝缘子、固封极柱等力学支撑产品,需要以材料的强度、模量参数为重要参数依据。对比了材料在干湿状态下的断裂拉伸强度性能见图2,拉伸强度、模量和断裂伸出数据见表5。随着芳香族PA混比的提高,拉伸强度、模量均明显提高,同时干、湿状态下的力学性能差异也显著降低。由于PA复合材料中添加了玻璃纤维增强材料,力学性能约为环氧材料的2倍多,这使产品的设计厚度大大减薄,从而使产品具有轻量化的优点,同时也能弥补热塑性材料导热性稍弱的缺点。

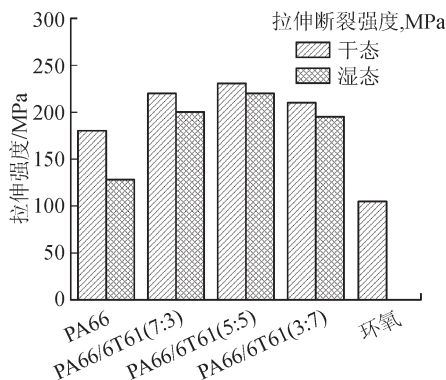


图2 复合材料干湿状态下断裂拉伸强度对比

Fig. 2 Comparison of fracture tensile strength of composites in wet and dry state

表5 复合材料断裂拉伸测试数据

Table 5 Fracture tensile test data of composite materials

配方	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂伸长率/%
PA66	180/128	9.9/8.9	2.60/3.20
PA66/6T6I(7:3)	220/200	15.5/14.6	2.20/2.30
PA66/6T6I(5:5)	230/220	18.8/18.0	2.10/2.20
PA66/6T6I(3:7)	210/195	19.2/18.8	1.85/2.00
环氧	85/—	10.0/—	1.30/—

注:表5中“/”前后是材料在干态和湿态(50%湿度下饱和吸水后)下的测定数据。

复合材料热形变温度和冲击强度对比见图3,随着PA6T6I含量的增加,复合材料的热形变温度呈

现先下降后升高的趋势。这主要是由于PA6T6I的结晶程度相比PA66较低,虽然两者属于同系聚合物,相容性较好,但内部分子结构仍有较大差异。当PA6T6I作为异相介质添加入PA66基料中时,造成的影响主要体现在两点,一是对原有PA66结晶相的破坏,造成复合材料结晶度的降低和整体高温力学强度的下降;二是PA6T6I本身相对较高的耐热特性和力学强度,使复合材料高温力学强度有所提高。当PA6T6I含量达到50%时,热变形温度与原PA66材料保持不变,进一步提高PA6T6I含量,热变形温度可进一步提高。由于冲击强度属于常温下的力学特性,其随PA6T6I含量的变化趋势与断裂拉伸特性基本保持一致,即PA6T6I有效提高复合材料的抗冲击性能。由数据可知,纤维增强PA体系的热形变温度和冲击强度均远高于环氧材料,在更高的温度下和更薄的设计厚度下可达到环氧绝缘件相同的力学特性。

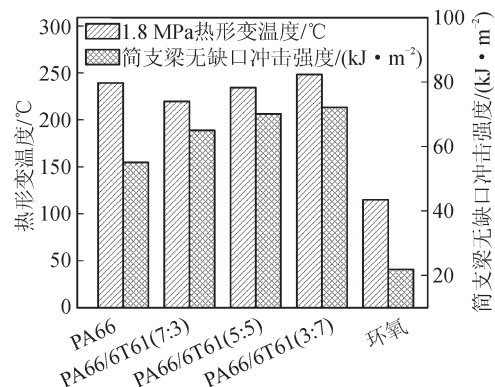


图3 复合材料热形变温度和冲击强度对比

Fig. 3 Comparison of thermal deformation temperature and impact strength of composites materials

3.2 电气特性

作为高压绝缘用复合材料,其电气绝缘性能是一类重要的性能指标。见图4,复合材料的饱和吸水状态的体积电阻率相比干态的测试数值均有一定降低。而对比表4数据可知,饱和吸水率高的材料体积电阻率下降幅度大,当PA6T6I含量达到50%后,复合材料因饱和吸水而造成的电阻率降低的数量级与环氧材料相当。同时相关研究表明^[15-17],饱和吸水后PA材料的介电强度随吸水率的提高而线性降低,当吸水率达到4%以上时,介电强度降低到干态数值的一半以下。从吸水性对体积电阻率和介电强度影响来看,PA6T6I混合比达到50%后能够满足的中压绝缘材料的一般需求。

漏电起痕试验表征了在含有电解质水滴附着或流过表面的情况下,绝缘材料表面对于放电的耐受特性,较为真实地模拟了绝缘件在污秽、盐雾、降

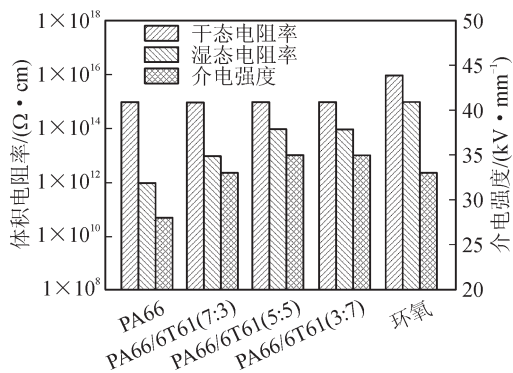


图4 复合材料的体积电阻率和介电强度测试数据

Fig. 4 Measurement data of volume resistivity and dielectric strength of composites

水和凝露等条件下发生闪络放电的实际情况。PA6T6I由于结晶比例和结晶速率相比PA66较低,同时由于具有较高材料致密度,不易造成纤维在表面的富集和裸露,因此所形成的材料表面更为光洁和平滑。这样的表面不易形成局部放电点,发生局部烧蚀时纤维的灯芯引燃效应也相对较低。但另一方面由于PA6T6I分子中苯环结构的含碳量相对较高,一旦发生烧蚀相比PA66更容易形成积碳和烧蚀通道,导致绝缘失效。由试验结果(见图5)可知,PA6T6I的添加能够有效提高复合材料的耐电痕能力,最佳的添加量为50%。

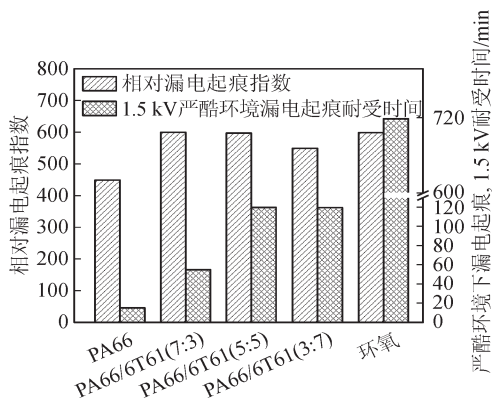


图5 复合材料表面耐漏电起痕特性数据

Fig. 5 Data of resistance to tracking on the surface of composites

值得注意的是,PA的严酷环境下耐电痕化性能远远低于环氧树脂,虽然对于户内用中压开关而言,该项材料性能暂未做要求和限定,但无法通过该测试限制了PA材料更多场景下的应用。从上述表面结构分析同理可知,环氧优异的严酷环境下耐电痕化性能主要归功于其光洁、平滑的表面,球状的无机填料形态,致密的交联结构以及较高的无机填料比例(~65% w.t.)。而PA的增强填料为高长径比的玻璃纤维,容易在表面形成极细微的突起,造成局部电场集中。多方面的影响因素综合造成的PA

材料的严酷环境下耐电痕化性能较差的结果,当PA材料应用于严酷环境或者户外场景时,需要进行重点的改性提升研究,甚至考虑更换基料。

4 长期运行条件下的老化和蠕变特性

开关设备用绝缘材料在长期运行工况下,持续受到电、热以及机械力学方面的作用,材料内部发生物理、化学方面的变化而导致绝缘特性下降,称之为绝缘劣化。对比了几种材料在高温—电场和高温—受力蠕变两种综合条件下的长期性能变化数据,见图6和表6。在105℃,10kV/mm(约为介电强度的30%)电场条件下1000h后,测试绝缘材料样品的介电强度,发现几种材料的介电强度都发生一定的降低。其中PA66材料的介电强度剩余量低于85%,混合PA6T6I后介电强度剩余量提高到95%以上,高于环氧的长期电热老化特性。由于该项实验加载的温度为设备最高温升数值,而10kV/mm的电场强度也远远高于复合绝缘件产品的内部电场强度,且高于绝缘材料的公认设计许用数值^[18-19],因此该实验属于严酷于正常工况的加速老化测试。

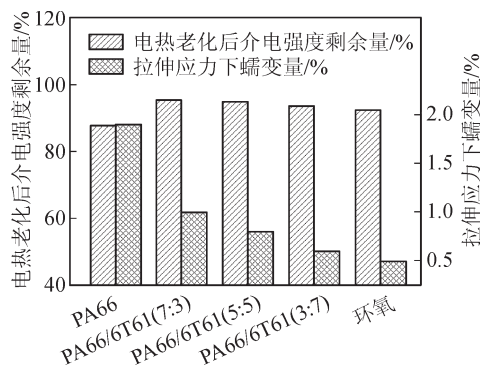


图6 复合材料电热老化及高温蠕变特性对比

Fig. 6 Comparison of electrothermal aging and high temperature creep properties of composites

高温—受力蠕变实验也同样加载远高于运行工况的温度和应力。这样设计实验的目的在于,在较短的时间内获得不同种材料的差异化数据结果,以达到筛选材料的目的。由结果可知,环氧的抗蠕变特性最优,这是由于交联聚合材料内部大量的化学交联点能有效阻止分子链间的受力滑移。因为芳香族材料中刚性基团结构具有较强的抵抗滑移的特性,随着PA6T6I的添加量上升,复合配方的抗蠕变特性呈线性提高。

5 结论

采用芳香族尼龙PA6T6I高性能材料与PA66共混进行改性研究,多项性能测试结果得到如下关键

表6 复合材料电热复合老化及蠕变特性数据

Table 6 Data of electro-thermal aging and creep properties of composites

配方	介电强度/(kV·mm ⁻¹)	电—热老化后介电强度/(kV·mm ⁻¹)	老化后介电强度剩 余量/%	10 MPa拉伸应力下 蠕变量/%
PA66	28	24.6	88	1.9
PA66/6T6I(7:3)	33	31.5	95	1.0
PA66/6T6I(5:5)	35	33.2	95	0.8
PA66/6T6I(3:7)	35	32.8	94	0.6
环氧	33	30.5	92	0.5

结论:

1)随着PA6T6I掺混比例提高,复合材料的玻璃化转变温度、导热系数和长期使用温度等关键热学指标均有所提高,并明显改善饱和和吸水率特性。在PA6T6I含量达到50%后基本物理特性与环氧特性可比。

2)玻纤增强PA材料的机械力学特性明显优于环氧,随着PA6T6I的添加力学性能进一步提高,当含量达到50%时力学特性最佳。介电强度略优于环氧,CTI和严酷环境下耐电痕化等表面电气特性明显劣于环氧,随着PA6T6I的改性添加上述特性被显著改善。

3)改性后PA复合材料的长期电热老化和抗蠕变特性同样显著提升,且均达到与环氧材料接近的水平。

综上所述,通过PA6T6I改性PA66得到的复合材料达到了较为理想的综合性能,能够满足中压开关对绝缘材料的具体需求。综合各项指标来看,PA66/6T6I(5:5)配方最优,具有制备绝缘件应用于户内中压开关中替代环氧绝缘材料的潜能。

参考文献:

- 钱军民,李旭祥. 环氧树脂改性研究进展[J]. 绝缘材料, 2001(5):27-31.
QIAN Junmin, LI Xuxiang. Advances in modification of epoxy[J]. Insulating Materials, 2001(5):27-31.
- 何发达,粟时平,付航,等. 环氧树脂掺杂微纳米氧化物粒子改性研究综述[J]. 高压电器, 2020, 56(3):94-103.
HE Fada, SU Shiping, FU Hang, et al. Review on modification of epoxy resin doped micro-nano oxide particles[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):94-103.
- 吴仲伟. 热固性塑料机械物理法再生及再资源化研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2013.
WU Zhongwei. Research on regeneration and recycling of thermosetting plastics based on mechanical and physical methods[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- SEKULA R, RUEMENAPP T, LJUSLINDER M. 为了更好的环境:绝缘组件的回收利用[J]. ABB评论, 2009(2):10-16.
SEKULA R, RUEMENAPP T, LJUSLINDER M. For a better environment: Recycling of insulated components[J]. ABB Review, 2009(2):10-16.
- PETRONI F, EMMA R, DE NIGRIS M, et al. 中压开关设备性能的扩展[C]//第18届CIRED2005年配电开关设备文集. [S.l.]: [s.n.], 2005:21-24.
PETRONI F, EMMA R, DE NIGRIS M, et al. Expansion of medium voltage switching equipment performance[C]//18th CIRED2005 Distribution Switch Equipment Collection. [S.l.]: [s.n.], 2005:21-24.
- 张赟. 基于有限元分析的热塑性绝缘套管的开发[J]. 高压电器, 2020, 56(4):222-228.
ZHANG Yun. Development of thermoplastic insulated bushing based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):222-228.
- 沈建平. 热塑性工程塑料绝缘材料在12 kV手车式开关柜中的应用[J]. 高压电器, 2018, 54(4):227-232.
SHEN Jianping. Application of thermoplastic engineering plastics material in 12 kV withdrawable switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4):227-232.
- 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.
- 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. High CTI value, halogen-free flame retardant fiberglass reinforced nylon 66 and its application[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(8):50-53.
- 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.
- LI S, HASSANZADEH M, JAMES I R, et al. Thermal properties of environmentally friendly dielectrics used in medium voltage circuit breakers[C]//2007 International Confer-

- ence on Solid Dielectrics. Winchester, UK: [s.n.], 2007: 306-309.
- [12] 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, 2016, 45(4): 32-35.
- [13] 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.
- [14] 蒋姗, 谢聪, 杜欣瑶, 等. PA66/PA6I6T共混物非等温结晶动力学及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(5): 98-106.
JIANG Shan, XIE Cong, DU Xinyao, et al. Non-isothermal crystallization kinetics and properties of PA66/PA6I6T blends[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(5): 98-106.
- [15] 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.
- [16] 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, 17(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, 17(14): 36-37.
- [17] 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 nylon6[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(6): 44-46.
- [18] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
LI Bin. Design of SF₆ high-voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [19] 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.
- 张永刚(1977—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为中高压电器设备及其智能化(E-mail: Zhangyg77@sina.com)。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部