

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.002

疏水CY184/E-PDMS环氧树脂复合材料的制备及性能

王旭华, 吴仲崙, 杨洁, 方煜, 秦诗雨, 王珊

(武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘要: 环氧树脂虽然具有良好的耐漏电流和抗击穿等电气性能和力学性能,但由于其本身缺乏疏水性,因此在户外绝缘子领域难以大范围应用。为了解决环氧树脂疏水差的问题,采用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)、六氢邻苯二甲酸双缩水甘油酯(CY184)对羟基封端的聚二甲基硅氧烷(HPDMS)进行改性,合成了含有环氧基团的疏水改性剂E-PDMS,并制备了CY184/E-PDMS复合材料。结果表明,接枝了环氧基团的E-PDMS与CY184相容性良好,当E-PDMS质量分数达到10%时,复合材料水接触角能稳定在 105° ,呈现疏水性;体积电阻率提升至 $1.36 \times 10^{14} \Omega \cdot m$,介电常数在1 000 Hz下降低至3.55,玻璃化转变温度和拉伸强度分别提升至 $117^\circ C$ 和59.4 MPa。经过E-PDMS改性后,CY184环氧树脂的疏水性、绝缘性、力学性能、热稳定性等均有明显提升,拓宽了CY184环氧树脂在绝缘子领域的应用。

关键词: 环氧树脂;有机硅氧烷;疏水性;电绝缘性;力学性能

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0008-06

Preparation and performance of hydrophobic CY184/E-PDMS epoxy resin composite

WANG Xuhua, WU Zhongkui, YANG Jie, FANG Yu, QIN Shiyu, WANG Shan

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract : Despite epoxy resin excellent electrical and mechanical properties, such as leak-proof and rupture resistance, it is difficult to be widely used in outdoor insulation because of its poor hydrophobicity. In order to solve the hydrophobic problem of epoxy resin, hydroxyl terminated polydimethylsiloxane (HPDMS) was modified by γ -aminopropyltriethoxysilane (APTES) and diglycidyl hexahydrophthalate (CY184). A hydrophobic-modifying agent E-PDMS was synthesized, and CY184/E-PDMS composite was prepared. The results show that E-PDMS grafted with epoxy group has good compatibility with CY184 epoxy resin. When the mass fraction of E-PDMS reaches 10%, the hydrophobic angle of the composites can be stabilized at 105° , the volume resistivity increases to $1.36 \times 10^{14} \Omega \cdot m$, the dielectric constant decreases to 3.55 at 1 000 Hz, the glass transition temperature and tensile strength increase to $117^\circ C$ and 59.4 MPa, respectively. After E-PDMS modification, the hydrophobic, insulating, mechanical and thermal stability properties of epoxy resin are obviously improved, which broadens the application field of epoxy resin in the field of insulators.

Keywords : epoxy resin ; organosiloxane ; hydrophobicity ; electrical insulation ; mechanical property

随着国家电网的不断发展,对输电线路中的绝缘部件提出了更高的要求^[1-4]。环氧树脂作为三大热固性树脂之一,因其优异的黏接、耐热、力学与绝缘性能,成为电气设备中应用广泛的绝缘材料^[5-7]。其中,脂环族环氧树脂不仅硬度较高,耐漏电和击穿等电气性能优良,且其分子结构中不含苯环,具

有良好的耐候性^[8]。然而脂环族环氧树脂疏水性较差,在使用过程中容易吸水导致绝缘性能降低,极大限制了脂环族环氧树脂在户外绝缘领域的应用。

为了解决脂环族环氧树脂疏水性能差的问题,研究者进行了大量的研究。陈昱等^[9]通过高压喷射法在环氧树脂表面制备 SiO_2 疏水涂层,其接触角最

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BAD028)

通信作者: 王珊,博士,副教授,博士生导师,研究方向为高分子电介质材料、高性能高分子设计与合成、树脂基复合材料

收稿日期: 2024-04-19

引用格式: 王旭华,吴仲崙,杨洁,等.疏水CY184/E-PDMS环氧树脂复合材料的制备及性能[J].工程塑料应用,2024,52(7):8-13.

WANG Xuhua, WU Zhongkui, YANG Jie, et al. Preparation and performance of hydrophobic CY184/E-PDMS epoxy resin composite[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 8-13.

高达到156°。Zheng等^[10]通过溶胶-凝胶法在环氧树脂表面制备纳米SiO₂疏水层,获得了超疏水性。疏水涂层虽然能使环氧树脂获得较高的疏水性能,但在使用过程中涂层会不断磨损,最终导致涂层失效,无法长期使用。氟材料中的C—F键键长、键能高、极化率低,使氟材料具有极低的表面能和极性以及极强的耐候性,是优良的疏水改性剂^[11]。Wang等^[12]以十二烷基氟-1-戊醇和环氧氯丙烷为原料合成了十二烷基氟缩水甘油酯(FGE),制备了FGE/EP复合材料。当FGE质量分数达到10%时,水接触角从45°提高到102°。然而含氟树脂的制备工艺复杂,无法大量应用。

有机硅氧烷分子中的Si—O—Si基本骨架同样赋予了有机硅氧烷耐高低温性、耐候性、疏水性、低表面能等性能,且制备工艺简单,被广泛应用于疏水改性^[13-15]。Shon等^[16]将使用氨基支化聚二甲基硅氧烷(ASP)对环氧树脂进行改性,使得环氧树脂呈现疏水性。黄月文等^[17]合成了羟基封端的聚二甲基硅氧烷用于改性环氧树脂,当羟基封端的聚二甲基硅氧烷的添加质量分数为30%时,水接触角达到96°。张燕等^[18]使用三种不同的硅氧烷合成了含有氨基活性功能基团的有机硅低聚物,并用于改性环氧树脂,改性后的环氧树脂水接触角最高达到109.8°。然而由于硅氧烷与环氧树脂的溶度参数相差较大,上述工作中随着硅氧烷添加量的增大,硅氧烷与环氧树脂均出现明显的相分离,导致环氧树脂的力学性能降低。

为了解决有机硅氧烷与环氧树脂相容性差的问题,通过γ-氨丙基三乙氧基硅烷与六氢邻苯二甲酸双缩水甘油酯环氧树脂(CY184)对羟基封端的聚二甲基硅氧烷进行改性,合成了环氧基聚硅氧烷E-PDMS。然后以CY184环氧树脂为基体,E-PDMS为改性剂,制备CY184/E-PDMS复合材料,并研究E-PDMS添加量对复合材料的疏水性、绝缘性以及力学性能等影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CY184:纯度95%,郑州阿尔法化工有限公司;

甲基六氢邻苯二甲酸酐(MHHPA):纯度98%,上海源叶生物科技有限公司;

N,N-二甲基苄胺(BDMA):纯度99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

γ-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES):纯度95%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

羟基封端的聚二甲基硅氧烷(HPDMS):纯度98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

二月桂酸二丁基锡(DBTDL):纯度98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电子天平:FA2004N,上海精密科学仪器有限公司;

恒温磁力搅拌仪:SZCL-2A,武汉科尔仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050,上海索普仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:SPECTRUM TWO,美国Perkin Elmer公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM):JSM-7500 F,日本电子公司;

接触角测量仪:DSA 100S SN,德国克吕士公司;

介电频谱测试仪:E4980A,安捷伦科技(中国)有限公司;

差示扫描量热(DSC)分析仪:DSC 25,美国TA仪器公司;

万能拉力试验机:MTS E44,美国美斯特股份有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 E-PDMS的合成

将6 g CY184,1 g APTES和6 g HPDMS加入到烧瓶中,滴加2 mL DBTDL作为催化剂。通入氮气进行保护,加入磁子进行搅拌,在80 °C油浴加热的条件下反应3 h,反应如图1所示。反应完成后倒入梨形分液漏斗中,静置0.5 h,分离出下层乳白色液体。经过水洗后获得E-PDMS。

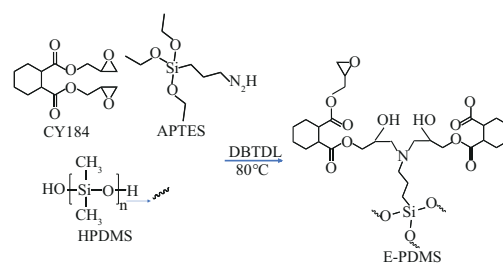


图1 E-PDMS合成路线

Fig. 1 Synthetic route of E-PDMS

1.3.2 CY184/E-PDMS复合材料的制备

取10 g CY184加入到烧杯中,将疏水改性剂E-PDMS以环氧树脂质量的0,2.5%,5%,7.5%,10%加入环氧树脂中,按照环氧基团:酸酐=1:1的比例加入固化剂MMHPA和0.1 g固化促进剂BDMA。磁力搅拌混合20 min,反复抽真空直至混合液中无气泡,浇铸入模具中,在90 °C固化2 h,120 °C固化3 h,150 °C固化1 h。

1.4 测试与表征

(1) FTIR表征:将溴化钾(KBr)粉末干燥后进行压片,取适量HPDMS和E-PDMS,滴涂在KBr片上进行测试,扫描范围为400~4 000 cm^{-1} 。

(2) SEM表征:使用SEM附加Max N80能谱仪对CY184/E-PDMS复合材料的表面微观结构和元素成分进行分析,观察CY184/E-PDMS复合材料的表面微观结构、相容性以及表面元素分布。

(3)水接触角测试:根据GB/T 42694-2023对复合材料表面水接触角进行测试,在样品表面滴加5 μL 液滴,稳定30 s后测量其接触角,取5次平均值为该样品的静态水接触角。样品表面需保证平整。

(4)体积电阻率表征:根据GB/T 31838.2-2019对复合材料的体积电阻率进行表征,样品直径30 mm,厚度为5 mm。

(5)介电性能表征:根据GB/T 31838.6-2021测试样品的介电性能,衡量指标为复相对介电常数实部、虚部及介电损耗。测试电压1 kV,测试频率范围100 Hz到1 000 Hz。

(6) DSC表征:采用DSC仪对复合材料热学性能进行表征,取少量不同组分的复合材料分别放入铝制坩埚中进行测试,研究其玻璃化转变温度的变化。测试温度范围40~200 °C,升温速率为10 °C/min。

(7)拉伸强度测试:根据GB/T 2567-2021对复合材料的力学性能进行测试,拉伸速率为10 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 E-PDMS FTIR表征

图2为HPDMS与E-PDMS的FTIR谱图。由图2可知,E-PDMS在2 941 cm^{-1} 和2 862 cm^{-1} 处的一 CH_3 和 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动峰相比与HPDMS有所增强。E-PDMS在3 510 cm^{-1} 处出现的峰是由于反应过程中有部分环氧基团开环生成了一OH。E-

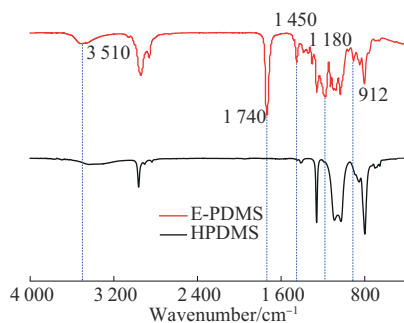


图2 HPDMS与E-PDMS的FTIR图

Fig. 2 FTIR spectra of HPDMS and E-PDMS

PDMS在1 740 cm^{-1} 处和1 450 cm^{-1} 处出现的新峰分别对应的是 $\text{C}=\text{O}$ 键和 $\text{C}-\text{N}$ 键的特征峰,而1 180 cm^{-1} 和912 cm^{-1} 处出现了新的特征峰,对应的是 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的特征峰^[19]。这些峰的出现标志着E-PDMS的成功合成。

2.2 CY184/E-PDMS复合材料微观结构分析

图3为不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料表面SEM图。由图3a可知,CY184环氧树脂表面比较光滑平整。由图3b~图3d可知,在E-PDMS较低添加量的条件下,E-PDMS与CY184基体相容性良好,没有出现明显的相分离现象。这是由于E-PDMS中存在环氧基团,这些基团可以参与

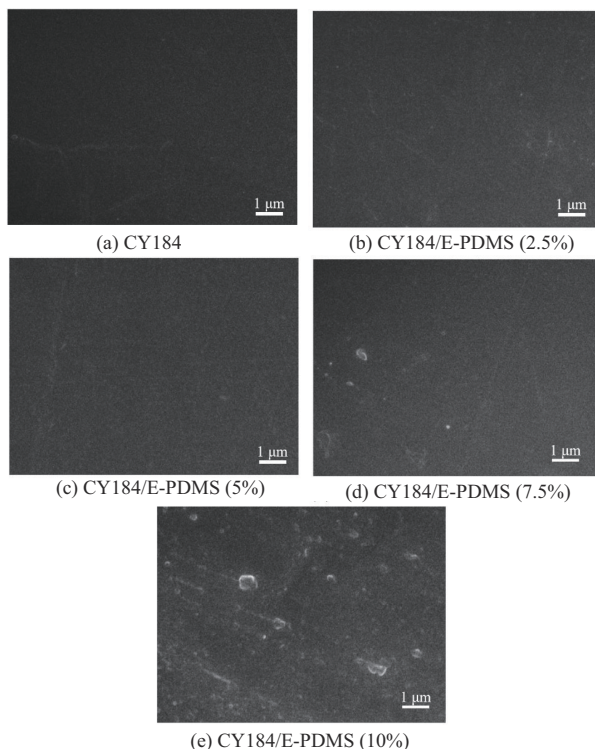


图3 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料SEM图

Fig. 3 SEM images of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

到CY184环氧树脂的固化过程中,提升了E-PDMS与CY184环氧树脂的相容性。但随着E-PDMS添加量的增大,部分E-PDMS未与CY184环氧树脂基体结合,与CY184环氧树脂发生相分离^[20]。当E-PDMS质量分数达到10%时,CY184/E-PDMS复合材料表面形成白色区块,如图3e所示。

图4为添加了质量分数10% E-PDMS的CY184/E-PDMS复合材料的表面SEM与元素分布图。从图4a可以看出,白色区块与CY184环氧树脂基体发生了相分离,结合图4b分析可以得知,发生相分离的小块表面出现Si元素富集,说明该白色区块为E-PDMS团聚物。此外,从图4b还可以得知,除发生相分离的部分外,CY184/E-PDMS复合材料表面仍广泛且均匀地分布着Si元素,说明在未发生相分离区域的E-PDMS与CY184环氧树脂的相容性良好。

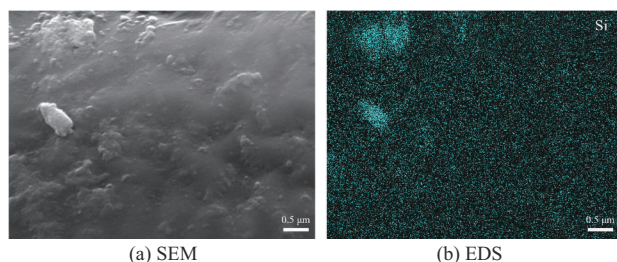


图4 CY184/E-PDMS (10%)复合材料SEM与EDS图

Fig. 4 SEM and EDS of CY184/E-PDMS (10%) composite

2.3 CY184/E-PDMS复合材料疏水性能分析

图5为添加了不同含量E-PDMS的CY184/E-PDMS复合材料的表面水接触角。从图5可以看出,在添加了E-PDMS后,复合材料表面水接触角相比于纯CY184环氧树脂得到了明显的提高。这表明E-PDMS的加入可以有效改善CY184环氧树脂的表面疏水性。这是由于E-PDMS的Si—O—Si骨

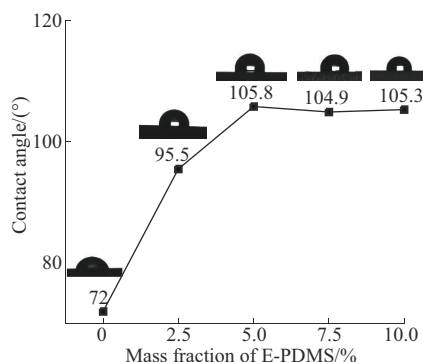


图5 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料表面水接触角

Fig. 5 Water content angle of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

架具有低表面能的特性,能改善环氧树脂基体的疏水性。此外,随着E-PDMS添加量的增大,CY184/E-PDMS复合材料的水接触角逐渐增大,并在质量分数为5%时达到峰值,水接触角为105.8°。当E-PDMS质量分数超过5%时,复合材料的表面水接触角基本保持不变。这可能是由于当E-PDMS质量分数达到5%时,Si—O—Si链段在表面已经达到饱和,即使添加量继续增大,水接触角仍保持不变。

2.4 CY184/E-PDMS复合材料电绝缘性能分析

图6为不同含量E-PDMS的CY184/E-PDMS复合材料的体积电阻率。从图6可以看到,随着E-PDMS的添加量的增加,CY184/E-PDMS复合材料的体积电阻率呈现先增高后降低的趋势,并在添加质量分数为5%时达到最高,为 $1.41 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 。这是由于E-PDMS存在Si—O—Si链段,这些链段提高了CY184/E-PDMS复合材料的体积电阻率。随着E-PDMS的添加量的增加,E-PDMS与CY184基体逐渐出现相分离的现象,最终导致复合材料了体积电阻率降低^[21]。在添加质量分数为10%时,复合材料的体积电阻率为 $1.36 \times 10^{14} \Omega \cdot m$,高于纯CY184环氧树脂。

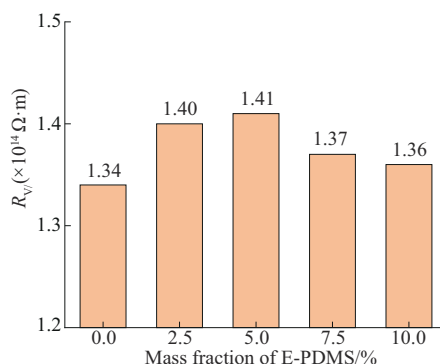


图6 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料体积电阻率

Fig. 6 Volume resistivity of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

不同含量的CY184/E-PDMS复合材料的介电常数和介电损耗同频率之间的关系如图7所示。由图7可知,CY184/E-PDMS复合材料的介电常数随着频率的升高呈现降低的趋势。这是由于随着频率的增加,偶极子极化逐渐跟不上电场频率的变化,导致了介电常数的降低^[22]。在E-PDMS质量分数为10%、测试频率为 10^3 Hz的条件下,CY184/E-PDMS复合材料的介电常数与介电损耗分别降低至3.55与 1.27×10^{-2} 。这可能是随着E-PDMS含量的增加,CY184/E-PDMS复合材料中的Si—O—Si链段

和Si—C键含量增加,降低了CY184/E-PDMS复合材料的极性链段的含量,从而降低了整体的极化程度,进而降低了介电强度和介电损耗^[23]。从图7还可以发现,在 10^6 Hz的频率下,介电损耗的降低更为明显。这可以归因于E-PDMS中的环氧基团参与到CY184环氧树脂的固化过程中,提高了CY184/E-PDMS复合材料的交联度。这使得CY184/E-PDMS复合材料的链段运动变得困难,进一步降低了CY184/E-PDMS复合材料的介电损耗。

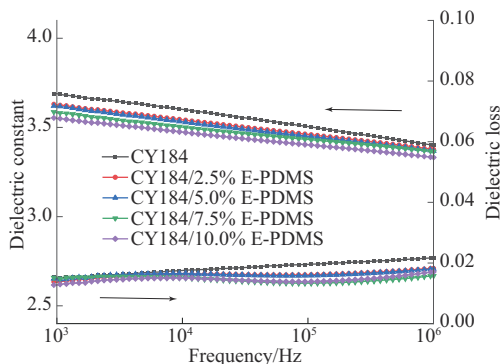


图7 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料介电性能

Fig. 7 Dielectric properties of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

2.5 CY184/E-PDMS复合材料DSC分析

图8为不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料DSC曲线。从图8可以看出,随着E-PDMS添加量的增大,CY184/E-PDMS复合材料的玻璃化转变温度逐渐升高。纯CY184环氧树脂的玻璃化转变温度为 108.7°C ,而当E-PDMS的添加质量分数达到10%时,CY184/E-PDMS复合材料的玻璃化转变温度达到了 117°C 。这一结果进一步证明了E-PDMS中的环氧基团参与到了CY184基体的固化过程中,分子体积较大的E-PDMS使得CY184/E-PDMS复合材料的链段运动变得更加困难,玻璃化转变温度升高。

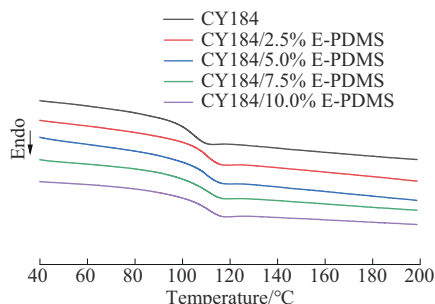


图8 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料DSC曲线

Fig. 8 DSC curves of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

2.6 CY184/E-PDMS复合材料力学性能分析

添加不同含量E-PDMS的CY184/E-PDMS复合材料的拉伸强度如图9所示。从图9可知,E-PDMS的加入显著提升了复合材料的拉伸强度,随着E-PDMS添加量的增加,复合材料的拉伸强度呈升高的趋势,纯CY184环氧树脂的拉伸强度为 43.9 MPa ,而添加了10% E-PDMS后,CY184/E-PDMS复合材料拉伸强度达到了 59.4 MPa ,相比于纯CY184环氧树脂提升了35.43%。这是由于E-PDMS中的环氧基团参与了环氧树脂的交联固化反应,提高了CY184/E-PDMS复合材料的交联密度,从而提升了复合材料的拉伸强度。

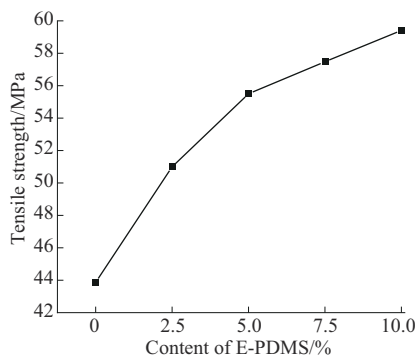


图9 不同E-PDMS含量的CY184/E-PDMS复合材料拉伸强度

Fig. 9 Tensile strength of CY184/E-PDMS composite with different E-PDMS contents

3 结论

(1)成功合成了含有环氧基团的有机硅氧烷E-PDMS,提高了与CY184的相容性,制备了CY184/E-PDMS复合材料。当E-PDMS质量分数达到5%时,CY184/E-PDMS复合材料的水接触角达到 105.8° ,E-PDMS添加量继续增大,CY184/E-PDMS复合材料的水接触角保持不变。

(2)E-PDMS的加入提高了CY184环氧树脂的绝缘性能,当E-PDMS质量分数达到10%时,CY184/E-PDMS复合材料体积电阻率为 $1.36 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$,1 000 Hz介电常数为3.55,均优于纯CY184。

(3)E-PDMS的加入提高了CY184的热稳定性和力学性能,相较于纯CY184,当E-PDMS质量分数达到10%时,CY184/E-PDMS复合材料的玻璃化转变温度和拉伸强度分别提升了 8.3°C 和 15.5 MPa 。

参考文献

- [1] 梁曦东,高岩峰,王家福,等.中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J].高电压技术,2016,42(9):2 888-2 896.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of silicone Rubber composite insulator in China[J]. High

- Voltage Engineering, 2016, 42(9):2 888–2 896.
- [2] LIN Y, YIN F, LIU Y, et al. Effect of ultraviolet a radiation on surface structure, thermal, and mechanical and electrical properties of liquid silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(24). DOI:10.1002/app.47652.
- [3] 罗传旭. 超疏水表面绝缘子研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 317–319.
- LUO Chuanxu. Research progress of super hydrophobic surface insulators[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1):317–319.
- [4] 杜伟, 于鑫悦, 王阳阳, 等. 不同材质绝缘子积污特性与积污比研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(1):208–213.
- DU Wei, YU Xinyue, WANG Yangyang, et al. Study on pollution characteristics and pollution ratio of insulators of different materials [J]. Energy Environmental Protection, 2024, 46(1):208–213.
- [5] ZHAO S, ABU-OMAR M M. Recyclable and malleable epoxy thermoset bearing aromatic imine bonds[J]. Macromolecules, 2018, 51(23):9 816–9 824.
- [6] 张福增, 王婷婷, 曾向君, 等. 阻燃剂对环氧树脂绝缘子护套材料耐热氧化性能的影响[J]. 高压电器, 2023, 59(1):154–160.
- ZHANG Fuzeng, WANG Tingting, ZENG Xiangjun, et al. Effect of flame retardant on thermal and oxidative aging properties of epoxy resin insulator sheath material[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (1):154–160.
- [7] WANG Y, ZENG Z, HUANG Z, et al. Preparation and characteristics of silicone-modified aging-resistant epoxy resin insulation material[J]. Materials Science, 2022, 57:3 295–3 308.
- [8] 曾向君, 王婷婷, 张福增, 等. 新型脂环族环氧树脂和硅橡胶材料性能对比研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2):146–152.
- ZENG Xiangjun, WANG Tingting, ZHANG Fuzeng, et al. Comparison of properties of new alicyclic epoxy resin and silicone rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2):146–152.
- [9] 陈昱, 袁志庆, 黄娟. 超疏水环氧树脂复合材料的制备[J]. 湖南包装, 2017, 32(1):106–108, 111.
- CHEN Yu, YUAN Zhiqing, HUANG Juan. Preparation of superhydrophobic epoxy resin composite materials[J]. Hunan Packaging, 2017, 32(1):106–108, 111.
- [10] ZHENG K, ZHU J, LIU H, et al. Study on the superhydrophobic properties of an epoxy resin-hydrogenated silicone oil bulk material prepared by sol-gel methods[J]. Materials, 2021, 14. DOI: 10.3390/ma14040988.
- [11] 覃跃, 王跃川. 脂环含氟环氧化合物的光固化及其性能研究[J]. 影像科学与光化学, 2022, 40(4):714–720.
- TAN Yue, WANG Yuechuan. UV-curing and properties of fluorine-containing cycloaliphatic diepoxides[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2022, 40(4):714–720.
- [12] WANG C Z, ZUO Y. Improvement of surface and moisture resistance of epoxy resins with fluorinated glycidyl ether[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114:2 528–2 532.
- [13] 邹文杰, 丁立, 张雪姣, 等. 环氧树脂/有机硅氧烷改性阳离子丙烯酸乳液复合涂层的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(4): 922–928.
- ZHOU Wenjie, DING Li, ZHANG Xuejiao, et al. Epoxy/organosiloxane modified cationic acrylic emulsion composite coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (4):922–928.
- [14] 叶勇. 聚有机硅氧烷化合物的合成及应用的探究[J]. 大众标准化, 2020(14):231–232.
- YE Yong. Study on synthesis and application of polysiloxane compounds[J]. Popular Standardization, 2020(14):231–232.
- [15] GONG C, ZHAO Y, ZHANG S, et al. Improving the insulating performance of epoxy resin in humid environments by HTPDMS modification[J]. Journal of Applied Polymer Science. 2022, 139 (10). DOI:10.1002/app.51754.
- [16] SHON M Y, KWON H S. Effects of surface modification with amino branched polydimethylsiloxane (ABP) on the corrosion protection of epoxy coating[J]. Corrosion Science, 2007, 49(11): 4 259–4 275.
- [17] 黄月文, 刘伟区. 高渗透有机硅改性环氧防腐胶的研制与应用[J]. 化学建材, 2007(3):35–37.
- HUANG Yuewen, LIU Weiqu. Development and application of anticorrosive epoxy adhesive modified with highly permeable silicon[J]. Chemical Materials for Construction, 2007(3):35–37.
- [18] 张燕, 张云飞, 李因文, 等. 有机硅/聚醚胺复合改性环氧树脂合成及性能[J]. 精细化工, 2014, 31(10):1 188–1 191, 1 214.
- ZHANG Yan, ZHANG Yunfei, LI Yinwen, et al. Synthesis and properties of silicone/polyether amine cured epoxy resin[J]. Fine Chemical Engineering, 2014, 31(10):1 188–1 191, 1 214.
- [19] 孙鑫. 咪唑型环氧树脂潜伏性固化促进剂的合成与应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- SUN Xin. Study on synthesis and application of imidazole-type latent curing accelerator for epoxy resins[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [20] LIU Y, LIN Y, WANG Y, et al. Simultaneously improving toughness and hydrophobic properties of cycloaliphatic epoxy resin through silicone prepolymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(32). DOI:10.1002/app.52478.
- [21] 胡光凯, 张笑瑞, 徐航, 等. 端氨基液体丁腈橡胶/环氧树脂绝缘胶黏剂的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 144–150.
- HU Guangkai, ZHANG Xiaorui, XU Hang, et al. Preparation and properties of amine terminated liquid nitrile rubber/epoxy resin insulating adhesive[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2018, 34(11):144–150.
- [22] 武岳山, 于利亚. 介电常数的概念研究[J]. 现代电子技术, 2007 (2):177–185.
- WU Yueshan, YU Liya. Research on the concept of dielectric constant[J]. Modern Electronic Technology, 2007(2):177–185.
- [23] 章珂, 张喜玉, 王秉南, 等. 脂环环氧基聚二甲基硅氧烷改性环氧树脂研究[J]. 热固性树脂, 2023, 38(5):15–22.
- ZHANG Ke, ZHANG Xiyu, WANG Bingnan, et al. Cycloaliphatic epoxy polydimethylsiloxane as modifier for cycloaliphatic epoxy resin[J]. Thermosetting Resin, 2023, 38(5):15–22.