

# 聚氨酯微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料的自修复特性研究

樊开森, 付刚, 王栋, 杨威, 程思远, 陶亚光, 关弘路

(河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 环氧树脂内部和表面在强电场、机械振动复杂因素的作用下会产生裂痕, 导致绝缘性能下降。为此, 本文采用界面聚合法制备一种水触发自修复微胶囊, 通过高温固化制备水触发自修复微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料, 对其介电性能、拉伸性能、电气强度进行表征。结果表明: 复合绝缘材料在保证良好的力学、绝缘和介电性能的前提下, 还具有较好的自修复性能, 自修复效率为 93.45%。

**关键词:** 环氧树脂; 微胶囊; 复合绝缘材料; 自修复

## Study on self-healing properties of polyurethane microcapsules/epoxy resin composite insulating materials

FAN Kaisen, FU Gang, WANG Dong, YANG Wei, CHENG Siyuan, TAO Yaguang, GUAN Honglu

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Cracks will occur inside and on the surface of epoxy resin under the action of complex factors such as strong electric fields and mechanical vibrations, leading to a decline of its insulation performance. Therefore, a water-triggered self-healing microcapsule was prepared by interfacial polymerization, and a water-triggered self-healing microcapsule/epoxy resin composite insulating material was prepared through high-temperature curing. Then the dielectric properties, tensile properties, and electric strength of the composite insulating material were characterized. The results show that the composite insulating material not only maintains good mechanical, insulation, and dielectric properties, but also has excellent self-healing performance, with a self-healing efficiency of 93.45%.

**Key words:** epoxy resin; microcapsule; composite insulating material; self-healing

## 0 引言

环氧树脂具有绝缘性能优异、制造成本低廉等特点, 因此被广泛用作电气设备的外绝缘材料<sup>[1-5]</sup>。然而, 在长期运行条件下, 环氧树脂因受到强电场、机械振动等因素作用, 其内部会产生机械裂痕, 裂痕的存在会使电荷积聚, 导致击穿更容易发生, 严重威胁电气装备与电子器件的安全运行<sup>[6-10]</sup>。因此, 亟需研究具有自修复功能的复合绝缘材料, 当损伤发生时, 材料可自我修复, 从而大幅降低材料击穿风险, 对电气设备的安全稳定运行具有重要的意义。

近年来, 在自然生物自愈现象的启发下, 学者们研究了一系列自修复体系, 从修复原理上可以分为两大类: 本征型和外援型<sup>[11-16]</sup>。本征型自修复需要通过各种共价键的重组以实现材料的自修复, 其具体过程是两个或多个分子之间通过共价键的形式结合在一起, 形成一个新的分子, 材料的化学结

构也会发生改变, 很难应用于对本征性能要求较高的绝缘材料<sup>[17]</sup>。外援型自修复是指修复剂载体破裂后, 在毛细效应作用下, 修复剂流出并填充材料损伤通道, 通过某种机制聚合固化修复损伤区域<sup>[18-22]</sup>。外援型自修复中, 微胶囊自修复体系具有修复剂种类丰富、应用范围广和修复效果明显等特点, 适用于绝缘材料领域<sup>[23-27]</sup>。然而, 现有的微胶囊自修复技术多依靠催化剂、外界激励等手段才能实现固化修复, 且常见的高温<sup>[28]</sup>、pH<sup>[29]</sup>等激励手段会加速材料老化并对材料的本征性能造成不可逆的负面影响。

为解决上述问题, 本文结合现有的水触发微胶囊技术, 选择可以与水反应固化的异佛尔酮二异氰酸酯 (IPDI) 作为修复剂芯材, 选择绝缘性能良好的聚氨酯为壳材, 当损伤出现时, 壳层会破裂, 修复剂芯材流出, 与空气中的水分发生固化反应, 实现材料内部机械损伤的自感知与自修复。本文采用界

面聚合法与高温固化法制备水触发自修复微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料,研究微胶囊的微观结构、化学成分和热稳定性以及复合材料的电气本征性能,并通过对复合材料进行微尺度损伤的自修复模拟测试和绝缘击穿试验,验证其优良的电气本征特性与自修复特性。

## 1 试验

### 1.1 主要原材料

异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、甲苯2,4-二异氰酸酯(TDI)、1,4-丁二醇(BDO)由国药化学提供;氯苯(CH)、阿拉伯胶(GA)、去离子水购自麦克林生化科技有限公司;苯酚高温固化型环氧树脂(E51)、甲基六氢苯酐(MTHPA)、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30)购自阿拉丁生化科技有限公司。所有试剂均为分析纯(AR),可以直接使用。

### 1.2 试验仪器

金相显微镜,型号为XM-30;扫描电子显微镜(SEM),型号为SU8020;傅里叶红外光谱仪,型号

为IRAffinity-1;热重分析仪,型号为1600LF;抗拉强度测试机,型号为CRS-UTM200MA;宽频介电谱分析仪,型号为Concept 80;工频击穿试验平台。

### 1.3 微胶囊的制备

在圆底烧瓶中加入一定量的去离子水和阴离子表面活性剂GA,机械搅拌3 h,得到水相溶液;将一定量的甲苯2,4-二异氰酸酯(TDI)溶解于油性溶剂氯苯(CH)中,磁力搅拌10 min,然后将溶液加入到圆底烧瓶中,并加入适量的异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),磁力搅拌2 h后得到油相溶液;将水、油两相溶液共混于55℃水浴锅中并磁力搅拌(低速)30 min,随后将适量1,4-丁二醇(BDO)缓慢加入上述溶液中,以1℃/min的速率升温至65℃反应1 h,期间持续搅拌。待溶液冷却至室温后,用去离子水重复洗涤微胶囊至无明显浑浊液,然后抽滤3次,最后置于空气中干燥48 h得到微胶囊样品。

图1为微胶囊壳层合成原理图,在上述65℃加热过程中,油相中反应活性较高的TDI与水相中的BDO发生界面聚合反应,形成聚氨酯(PU)壳体。

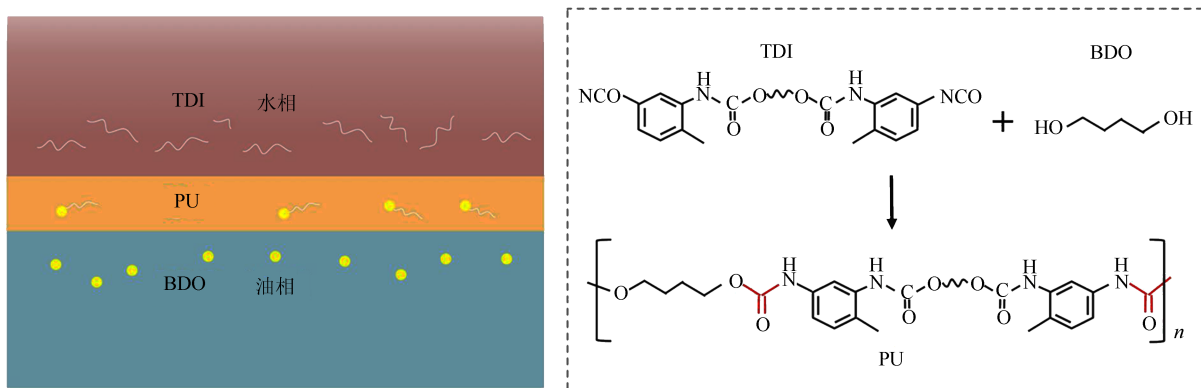


图1 微胶囊成壳原理图

Fig.1 Schematic diagram of the microcapsule shell formation

### 1.4 水触发微胶囊/环氧树脂复合材料的制备

首先,用电子天平按质量比为1:0.80:0.015分别称取E51、MTHPA和DMP-30并置于烧杯中,然后向烧杯中加入一定质量分数的微胶囊样品,加入磁力搅拌子并将烧杯置于磁力搅拌器上,均匀搅拌1 h直至溶液混合均匀(温度选取为60℃;转速选取为300 r/min)。随后将烧杯置于真空干燥箱进行真空脱气处理,直至混合溶液中无气泡存在,静置备用。用无水乙醇对不锈钢模具进行清洗擦拭,在其表面喷涂脱模剂并置于电子加热平台加热至100℃,使得脱模剂在模具表面分散均匀,待脱模剂蒸发至无液体痕迹后,将模具从加热平台上取下冷

却至室温,然后将混合溶液倒入不锈钢模具。将模具放置于数字加热平台上,在90℃下加热2 h,然后升温至110℃再加热2 h使材料固化(从温度达110℃后计时)。固化结束后,采用梯度降温法将模具降温至室温,以防温度骤降导致样品裂化,最终得到水触发微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料样品。

## 2 微胶囊结构与性能表征结果

### 2.1 微胶囊微观形貌

图2为微胶囊的扫描电子显微镜(SEM)观测结果。由图2可知,微胶囊均为球形,包覆完好,粒径分布均一,直径约为160 μm。

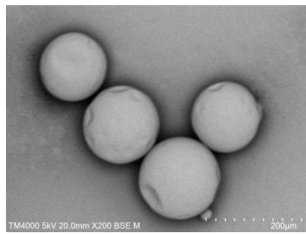


图2 微胶囊的扫描电子显微镜图

Fig.2 SEM image of microcapsules

## 2.2 微胶囊化学成分

图3为微胶囊的红外光谱图。从图3可以看出,在 $3430\text{ cm}^{-1}$ 处的红外振动吸收峰对应C-O的特征吸收峰;在 $2255\text{ cm}^{-1}$ 处的红外振动吸收峰对应C=O的特征吸收峰;在 $1640\text{ cm}^{-1}$ 处的红外振动吸收峰对应N-H的特征吸收峰。3种特征吸收峰同时出现证明了微胶囊中存在氨基甲酸(NHCOO)基团,即聚氨酯壳层形成。

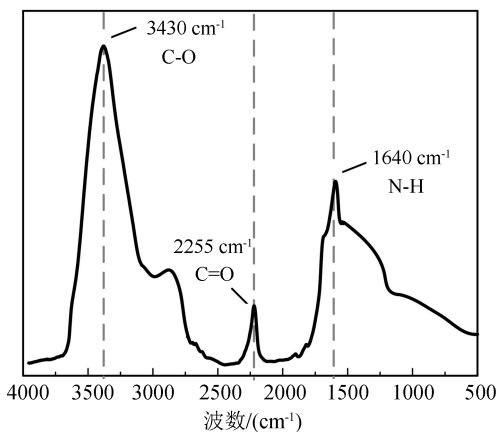


图3 微胶囊的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectrum of the microcapsule

## 2.3 微胶囊热稳定性

通过热重分析的方法来对微胶囊的热稳定性进行分析,图4为微胶囊的TGA质量损失曲线。从图4可以看出,随着温度不断升高,微胶囊的质量不断降低。从室温到 $150^\circ\text{C}$ ,微胶囊的质量基本没有发生变化,证明在 $150^\circ\text{C}$ 之前微胶囊的热稳定性良好,为后续环氧的高温固化提供有利条件。随着温度的升高,在 $150^\circ\text{C}$ 到 $450^\circ\text{C}$ 之间,微胶囊出现了明显的质量损失,在 $150^\circ\text{C}$ 到 $275^\circ\text{C}$ 区间,微胶囊的质量损失是由于芯材的蒸发;在 $275^\circ\text{C}$ 到 $450^\circ\text{C}$ 区间,微胶囊的质量损失是由于壳材的破裂和分解。当温度为 $275^\circ\text{C}$ 时,微胶囊的质量损失速率达到峰值,其原因主要为在 $275^\circ\text{C}$ 温度附近,芯材蒸发和壳材破裂、分解同时进行,此时质量损失速度最快。

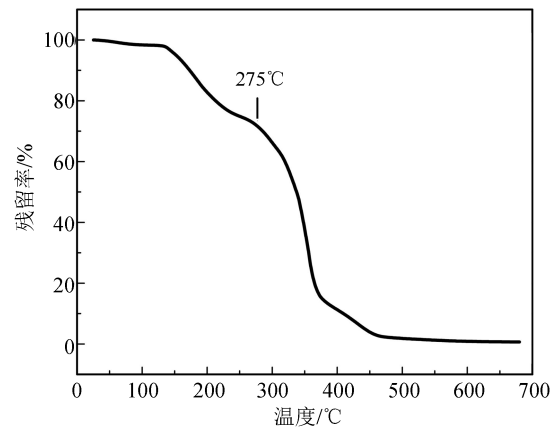


图4 微胶囊的热失重曲线图

Fig.4 Thermogravimetric curve of the microcapsule

## 2.4 微胶囊芯材含量

微胶囊芯材比重测试方法如下:取适量微胶囊置于数字加热平台上进行低温干燥处理,用电子天平称得微胶囊初始质量 $M_0$ 。将微胶囊置于研磨器中进行研磨处理,用去离子水和丙酮对研磨后的微胶囊进行反复洗涤,然后再对其进行多次过滤和烘干处理(温度为 $100^\circ\text{C}$ ,时间为6 h),直至微胶囊质量不再发生明显变化,记下此时的微胶囊质量 $M_1$ ,按式(1)计算得到微胶囊芯材含量 $C_m$ 。

$$C_m = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

通过上述测试方法,测得本文制备的微胶囊样品芯材含量约为80%。为测试微胶囊的长期稳定性,将自修复微胶囊样品置于常温的真空干燥箱中60天后,用相同的方法测得微胶囊芯材含量约为75.6%,微胶囊芯材含量仅下降4.4%。

## 3 水触发微胶囊/环氧树脂复合材料性能表征

### 3.1 本征性能表征

复合材料的本征性能随着微胶囊掺杂含量的升高大致呈下降趋势,同时考虑到修复效率,本文选取5%作为微胶囊最优掺杂质量分数,以下试验中复合材料样品的微胶囊掺杂质量分数均为5%。

使用Novocontrol Concept 80型宽频介电谱仪测量水触发微胶囊/环氧树脂复合材料和纯环氧树脂材料的介电参数。将样品置于测试台,调节测试频率范围( $10^0 \sim 10^7\text{ Hz}$ ),得到复合材料的相对介电常数随频率变化规律曲线。为防止泄漏电流造成测量误差,本试验采用标定转换模块,样品的相对

介电常数测试结果如图5所示。从图5可以看出,微胶囊的引入在一定程度上使复合材料的介电性能下降,这主要是因为引入微胶囊会在一定程度上带来杂质与缺陷,从而使得泄漏电流增大,这也意味着泄漏电流通过绝缘材料时,电荷的聚集程度下降,导致复合材料的相对介电常数升高。

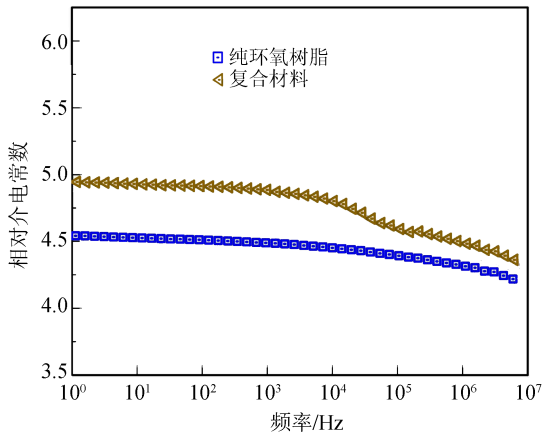


图5 样品的相对介电常数

Fig.5 Relative dielectric constant of samples

图6为复合材料交流电气强度测试平台示意图,本节通过此平台测试两种样品(纯环氧树脂、水触发微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料)的交流电气强度,试验按照 GB/T 1408.1—2016<sup>[31]</sup>进行。将样品置于两个铜质圆柱电极之间,通过交流调压器控制试验变压器改变电极电压,电压升高速率为1 kV/s,直至样品发生击穿。样品击穿瞬间记录工频交流电气强度并静置15 min以防止电荷干扰影响下次试验结果。每种样品进行交流击穿试验9次,每次测试前需测量样品厚度。为降低样品发生沿面闪络的概率,测试单元的罐子中装有25#绝缘油,样品和电极均浸没在绝缘油中,试验在室温下进行。

用 Weibull 模型对交流电气强度和失效概率进行分析。首先将击穿试验得到的电气强度数据由小到大排列,然后按照式(2)计算样品失效概率。

$$P(i) = \frac{i}{n + 1} \times 100\% \quad (2)$$

式(2):中  $P(i)$  代表样本失效概率;  $i$  代表样本的秩;  $n$  代表样本总量。

两参数 Weibull 分布概率可通过式(3)计算。

$$P(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

式(3)中:  $P(x)$  为累计失效概率值;  $x$  为交流电气强度;  $\beta$  为形状参数;  $\alpha$  为尺度参数,代表失效概率为

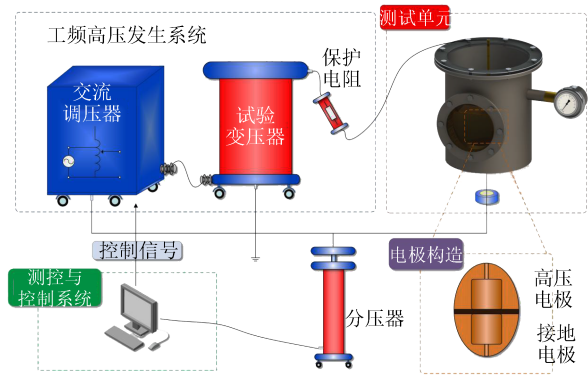


图6 复合材料电气强度测试平台

Fig.6 The electric strength test platform for composite materials

63.2%时的  $x$  值,通常被视为样品的特征电气强度。

对式(3)等号两端取对数,可得式(4)。式(4)中,令  $Y = \ln(-\ln(1 - P(x)))$ ,  $X = \ln x$ , 则  $X$  与  $Y$  呈线性关系,可表示为  $Y = \beta X - \beta \ln \alpha$ , 通过最小二乘法计算可得  $a$  和  $\beta$ 。

$$\ln(-\ln(1 - P(x))) = \beta \ln x - \beta \ln \alpha \quad (4)$$

两种样品交流电气强度的 Weibull 分布如图7所示。

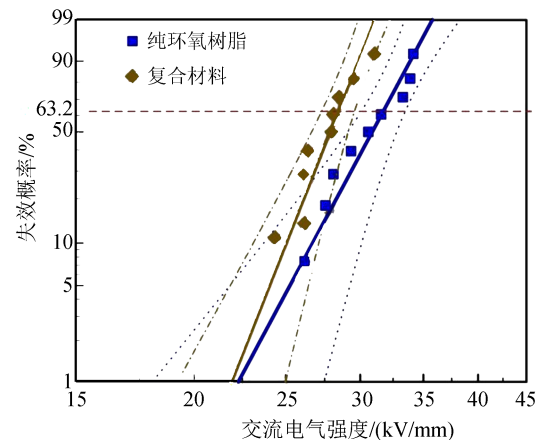


图7 样品的交流电气强度威布尔分布图

Fig.7 Weibull distribution of AC electric strength of samples

从图7可以看出,纯环氧树脂的电气强度为31 kV/mm,水触发微胶囊/环氧树脂复合材料的电气强度为29 kV/mm。水触发微胶囊/环氧树脂复合材料的电气强度相较于纯环氧树脂下降了9.3%。主要原因为微胶囊的掺杂势必将液体的芯材介质和固-液界面引入基体绝缘材料中,液体介质具有较高的电导率,施加工频交流电压时,复合绝缘材料样品的微胶囊区域容易形成导电通道,导致击穿更容易发生。

使用型号为CRS-UTM200MA的抗拉强度测试机,测试样品的抗拉强度,样品为哑铃型,拉断面为圆形(半径 $r$ 为5 mm)。在常温下进行测试,采用式(5)计算样品的抗拉强度。

$$\sigma = F^{\max}/S \quad (5)$$

式(5)中: $\sigma$ 为试验样品抗拉强度(MPa); $S$ 为拉断面面积,用 $\pi r^2$ 替换( $\text{mm}^2$ ); $F^{\max}$ 为试验样品断裂前的最大载荷(N)。

为防止拉伸数据的偶然性对真实拉伸性能的影响,本次试验对每种样品重复测试5次,取其平均值,结果如图8所示。

从图8可以看出,水触发微胶囊/环氧树脂复合材料的拉伸性能(载荷为3 962.7 N)相较于纯环氧树脂(载荷为3 612.3 N)提升了9.7%,这是由于在微胶囊的外壳和环氧树脂基体掺杂相融时,聚氨酯与环氧树脂之间可以形成聚氨酯/环氧树脂交联互穿

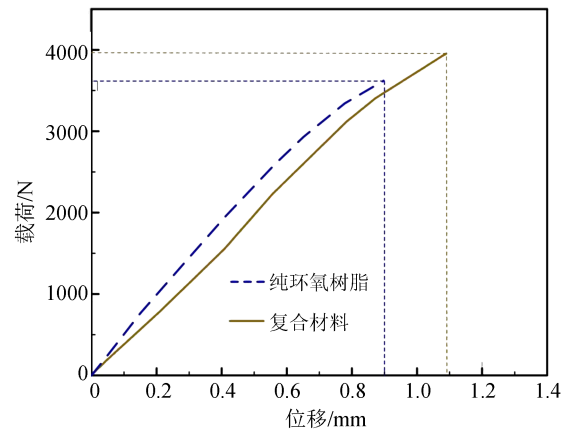


图8 复合材料的拉伸性能曲线

Fig.8 Tensile performance curves of composite materials

网络结构,具体反应机理如图9所示,聚氨酯中的-NCO与EP中的-OH反应生成-NHCOO,使得分子链之间相容性提高,两者之间的协同作用阻碍外力破坏,使复合材料的拉伸性能得到提升<sup>[32]</sup>。

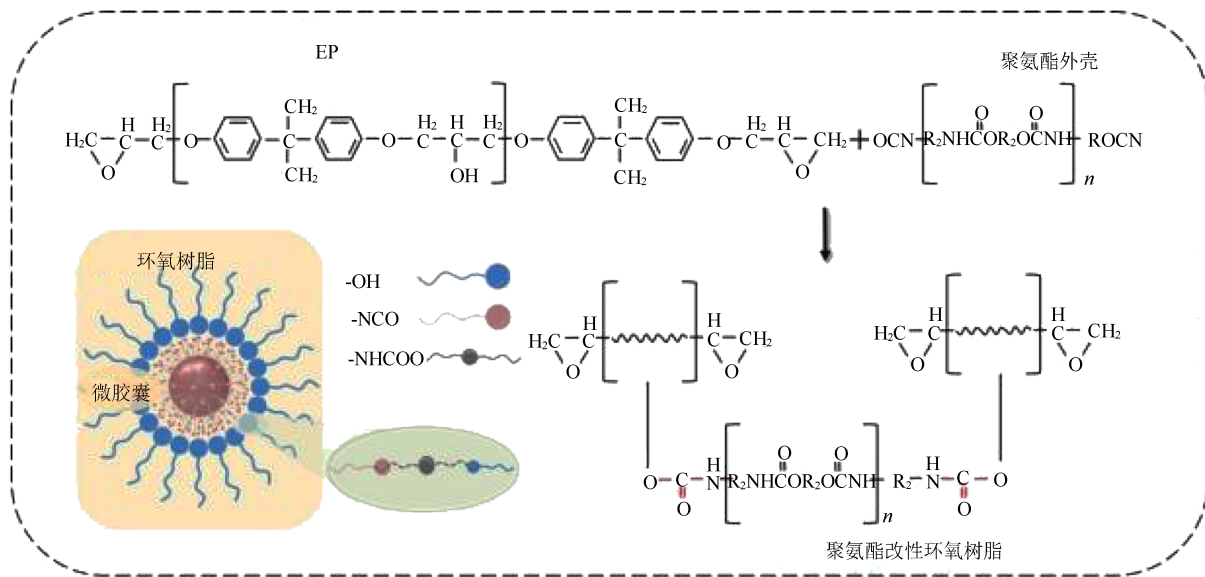


图9 交联互穿网络结构形成机理

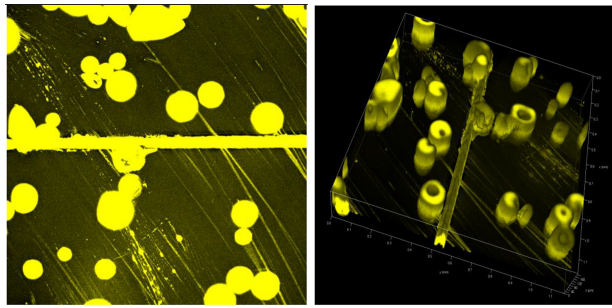
Fig.9 Formation mechanism diagram of cross-linked interpenetrating network

### 3.2 自修复性能表征

用手术刀片(医用碳钢11号)对复合绝缘材料进行划痕处理,以模拟材料受到的机械损伤。为验证复合材料机械损伤后的自修复效果,将修复后的样品置于双光子倒置共聚焦荧光显微镜进行观测,结果如图10所示。从图10可以看出,微胶囊和划痕通道均呈现相同的黄色荧光,这是因为修复剂在553 nm波长的激光照射下呈现荧光现象,进一步证明了划痕通道被修复剂填充,复合材料的自修复效

果良好。

机械损伤自修复原理如图11所示,当损伤发生时,微胶囊壳层破裂,修复剂流出并填充划痕通道,与水发生固化反应,从而实现机械损伤的自修复。水触发固化过程可分为两步:①异氰酸酯与水发生反应,形成不稳定的酸性胺基,酸性胺基迅速解离成 $\text{CO}_2$ 和带有胺基的分子链(-NH-COOH);②生成的胺基进一步和IPDI反应生成PU,实现机械损伤的自修复<sup>[31]</sup>。



(a) 二维图 (b) 三维图

图10 机械损伤通道自修复效果图

Fig.3 Images of self-healing effect of mechanical damage channel

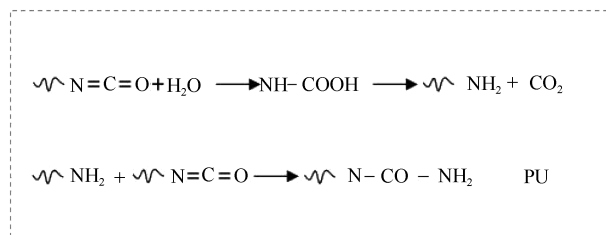


图11 机械损伤自修复原理图

Fig.11 Mechanical damage self-healing principle diagram

图12为纯环氧树脂、未损伤复合材料、机械损伤后纯环氧树脂和自修复后复合材料电气强度的威布尔分布。

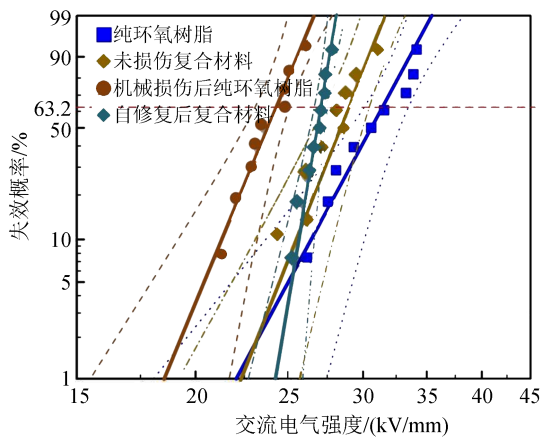


图12 机械损伤前后样品的交流电气强度威布尔分布图

Fig.12 Weibull distribution of AC electric strength of samples before and after mechanical damage

从图12可以看出,纯环氧树脂的电气强度在划痕后下降了约24.7%(从32.0 kV/mm下降到24.1 kV/mm),其原因主要是损伤位置处局部电场集中,电子容易获得高能量形成电子雪崩,从而导致材料击穿,因此机械损伤后的纯环氧树脂电气强度大幅降低;自修复后复合材料的电气强度在划痕后下降了约6.55%(从29.0 kV/mm下降到27.1 kV/mm),电

气强度降幅较小,其原因主要是修复剂在划痕中被固化,损伤位置处没有局部电场集中,这大幅减少了电子雪崩的发生。经计算可得,复合材料的自修复效率可达到93.45%。

#### 4 结论

(1)本文成功制备了具有核壳结构的IPDI/聚氨酯微胶囊,微胶囊包覆完好,粒径分布均一,直径约为160 μm。

(2)微胶囊包裹的自修复芯材无需额外施加激励,仅靠空气中的水分便可实现自我固化,为后续复合材料的自修复提供了有利条件。

(3)在保证良好的力学性能、绝缘性能和介电性能的前提下,复合绝缘材料具有较好的自修复性能,自修复效率为93.45%。

#### 参考文献 References

- [1] 律方成,詹振宇,张立国,等.等离子体氟化改性微米 AlN 填料对环氧树脂绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报,2019,34(16):3522-3531.  
LÜ F C, ZHAN Z Y, ZHANG L G, et al. The effect of plasma fluorination modified micrometer AlN filler on the insulation performance of epoxy resin[J]. Journal of Electrical Engineering Technology,2019,34(16):3522-3531.
- [2] MOHANTY A, VIVEKANANDHAN K, MISRA M. Composites from renewable and sustainable resources: challenges and innovations[J]. Science,2018,362,536-542.
- [3] WANG Z D, WANG X Z, WANG S L, et al. Simultaneously enhanced thermal conductivity and dielectric breakdown strength in sandwich AlN/epoxy composites[J]. Nanomaterials,2021,11(8): 11081898.
- [4] LI S T, YU S H, FENG Y. Progress in and prospects for electrical insulating materials[J]. High Voltage,2016,1(3):122-129.
- [5] 曾亮,何勇,刘亮,等.环氧灌封胶及在 IGBT 功率模块封装中的应用[J]. 绝缘材料,2022,55(4):29-34.  
ZENG L, HE Y, LIU L, et al. Epoxy potting adhesive and its application in IGBT power module packaging [J]. Insulating Materials,2022,55(4):29-34.
- [6] PALLON L K, NILSSON F, YU S, et al. Three-dimensional nanometer features of direct current electrical trees in low-density polyethylene[J]. Nano Letters,2017,17(3):1402-1408.
- [7] DU B X, SU J G, TIAN M, et al. Understanding trap effects on electrical treeing phenomena in EPDM/POSS composites[J]. Scientific Reports,2018,8:1-11.
- [8] CHEN J L, FILIPPINI J C. The morphology and behavior of the water tree[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1993,28 (2):271-286.
- [9] SAETBAK J. A theory of water tree initiation and growth[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1979,98(4):

- 1358-1365.
- [10] DISSADO L A, WOLFE S V, FOTHERGILL J C. A study of the factors influencing water tree growth[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1983,18(6):565-585.
- [11] KANG J H, TOK J B, BAO Z N. Self-healing soft electronics[J]. Nature Electron,2019,2:144-150.
- [12] ZHOU Y, LI L, HAN Z B, et al. Self-healing polymers for electronics and energy devices[J]. Chemical Reviews,2022,123(2):558-612.
- [13] 莫家亨,陈心渝,傅育楦,等. 基于可逆键构筑超分子弹性体的研究进展[J]. 弹性体,2019,29(6):67-75.  
MO J H, CHEN X Y, FU Y B, et al. Research progress in constructing supramolecular elastomers based on reversible bonds[J]. China Elastomer,2019,29(6):67-75.
- [14] YANG Y, URBAN M W. Self-healing polymeric materials[J]. Chemical Society Reviews,2013,17(42):7446-7467.
- [15] HAGER M D, GREIL P, LEYENS C, et al. Self-healing materials[J]. Advanced Materials,2010,22(47):5424-5430.
- [16] YANG Y, URBAN M W. Self-healing of polymers via supramolecular chemistry[J]. Advanced Materials Interfaces,2018,5(17):1800384.
- [17] 林木松,李智,彭磊,等. 具有形状记忆功能的自修复电缆护套材料研究[J]. 绝缘材料,2023,56(6):1-8.  
LIN M S, LI Z, PENG L, et al. Research on self-healing cable sheath materials with shape memory function[J]. Insulating Materials,2023,56(6):1-8.
- [18] ZHAI L, NARKAR A, AHN K. Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures[J]. Nanotoday,2020,30:100826.
- [19] CARUSO M M, DAVIS D A, SHEN Q L, et al. Mechanically-induced chemical changes in polymeric materials[J]. Chemical Reviews,2009,109(11):5755-5798.
- [20] WANG S Y, URBAN M W. Self-healing polymers[J]. Nature Reviews Materials,2020,5:562-583.
- [21] BLAISZIK B, KRAMER S L, OLUGEBEFOLA S C, et al. Self-healing polymers and composites[J]. Annual Review of Materials Research,2010,40(5):179-211.
- [22] PATRICK J F, ROBB M J, SOTTOS N R, et al. Polymers with autonomous life-cycle control[J]. Nature,2016,540(7633):363-370.
- [23] 汪海平,容敏智,章明秋. 微胶囊填充型自修复聚合物及其复合材料[J]. 化学进展,2010,22(12):2397-2407.  
WANG H P, RONG M Z, ZHANG M Q. Microcapsule filled self-healing polymers and their composite materials[J]. Progress in Chemical,2010,22(12):2397-2407.
- [24] 李志强,任彦荣. 微胶囊技术及其应用研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料,2004,2(6):19-23.  
LI Z Q, REN Y R. Research progress in microcapsule technology and its applications[J]. Chemical Propellants and Polymer Materials,2004,2(6):19-23
- [25] 韩路路,毕良武,赵振东,等. 微胶囊的制备方法研究进展[J]. 生物化学工程,2011,45(3):41-46.  
HAN L L, BI L W, ZHAO Z D, et al. Research progress on the preparation methods of microcapsules[J]. Biomass Chemical Engineering,2011,45(3):41-46.
- [26] WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature,2001,409(6822):794-797.
- [27] KELLER M W, WHITE S R, SOTTOS N R. A self-healing poly(dimethyl siloxane) elastomer[J]. Advanced Functional Materials,2007,17(14):2399-2404.
- [28] CARUSO M M, BLAISZIK B J, JIN H N, et al. Robust, double-walled microcapsules for self-healing polymeric materials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2010,2(4):1195-1199.
- [29] MATSUDA T, KASHI K B, FUSHIMI K, et al. Corrosion protection of epoxy coating with pH sensitive microcapsules encapsulating cerium nitrate[J]. Corrosion Science,2019,148:188-197.
- [30] CREDICO B, LEVI M, TURRI S. An efficient method for the output of new self-repairing materials through a reactive isocyanate encapsulation[J]. European Polymer Journal, 2013, 49(9):2467-2476.
- [31] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会. 绝缘材料电气强度试验方法第1部分:工频下试验:GB/T 1408.1—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.  
National Technical Committee 301 on Evaluation and Qualification of Electrical Insulating Material and Systems of Standardization Administration of China. Test methods for electrical strength of insulating materials - Part 1: Test at power frequency: GB/T 1408.1—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.
- [32] 管云,林郭锦,棠邵蕾,等. 聚氨酯/环氧树脂互穿网络聚合物相行为与断裂拉伸强度[J]. 材料研究学报,1996,10(3):313-318.  
GUAN Y, LIN G J, TANG S L, et al. Phase behavior and tensile strength at break of polyurethane/epoxy resin interpenetrating network polymer[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1996,10(3):313-318.
- [33] ALIZADEGAN F, PAZOKIFARD S, MIRABEDINI S M, et al. Polyurethane-based microcapsules containing reactive isocyanate compounds: study on preparation procedure and solvent replacement[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2017,529:750-759.

收稿日期:2024-04-02;修回日期:2024-05-07。

作者简介:

樊开森(1997-),男(汉族),河南开封人,助理工程师,主要从事高电压方向的研究。