

基于动态 S-S 键的自修复抗藻型 RTV 涂料制备及性能研究

彭磊, 李智, 付强, 林木松, 钱艺华, 唐念

(广东电网有限责任公司电力科学研究院 广东省电力设备可靠性重点实验室, 广东 广州 510080)

摘要:为解决绝缘子表面藻类附着的问题,本研究制备了一种适用于电力设备外绝缘的自修复抗藻涂料,并对涂料的热力学性能、力学性能、抗藻性能、自修复性能、电气性能等方面进行了测试。结果表明:频率为 50 Hz 时,质量分数为 0.5% 自修复抗藻涂料的抗藻性能、力学性能、介电性能和电气性能最优。同时,该涂料能自我修复微裂纹,降低矿物盐、苔藓孢子等的附着,抑制苔藓的生长。

关键词:自修复;涂料;抗藻;电力设备

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.008

Preparation and properties of self-healing algae resistant RTV coating based on dynamic S-S bonds

PENG Lei, LI Zhi, FU Qiang, LIN Musong, QIAN Yihua, TANG Nian

(Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to solve the problem of algae adhesion on the insulator surface, a self-healing algae resistant coating suitable for external insulation of power equipment was prepared, and the thermodynamic properties, mechanical properties, algae resistance, self-healing properties, and electrical properties of the coating were tested. The results show that when the frequency is 50 Hz, the algae resistance, mechanical properties, dielectric and electrical properties of the self-healing algae resistant coating with a mass fraction of 0.5% of anti-algae agent are the best. At the same time, the coating can self-heal micro-cracks, reduce the adhesion of mineral salts and moss spores, and inhibit the growth of moss.

Key words: self-healing; coating; algae resistant; power equipment

0 引言

中国南方地区湿润的气候环境非常适宜青苔与霉菌的生长^[1]。近年来,在中国南方电网公司部分变电站内的支柱绝缘子与悬式绝缘子表面,即使已经涂上了一层 RTV/PRTV 防污闪涂料,仍出现生长青苔的情况,如图 1 所示。由于苔藓类寄生植物对环境具有极强的适应性,当其寄生于输变电外绝缘表面时,会吸收空气中的水分与盐分,一方面降低设备的绝缘裕度,提高沿面闪络概率,另一方面加速设备外绝缘老化,威胁电网设备的安全稳定运行^[2-5]。目前针对电气设备外绝缘的清扫通常采用带电水冲洗的方式,但是该方法给设备运维人员带来了巨大的工作量,且耗时费力^[6]。

国内外对于输变电设备绝缘子表面苔藓类寄生植物附着的研究主要集中在微生物的生长习性以及青苔对设备外绝缘特性的影响,暂未系统地研究抑制青苔生长的方法。S M GUBANSKI 等^[7-8]研究表明,微生物污染不会造成复合绝缘子橡胶外壳

明显劣化,且对其干闪电压的影响较小,但绝缘子的湿闪电压大幅降低。OUYANG X G 等^[9]研究了苔藓等生物污秽对涂覆 RTV 涂料绝缘子的影响,结果表明生物污秽能大幅降低绝缘子的闪络电压。张星海等^[10]对附着青苔的绝缘子进行电气性能测试,结果表明青苔本身不影响绝缘子的电气性能,但会通过吸附空气中的水分和无机盐,使绝缘子的污闪电压大幅降低。目前,尚未有较好的方法抑制绝缘子上的青苔生长,也没有专门防治绝缘子上青苔生长的绝缘涂料^[11]。



图1 生长苔藓的输变电设备外绝缘表面

Fig.1 External insulation surface of power transmission and transformation equipment growing moss

经研究发现,苔藓类寄生植物主要从绝缘子或RTV/PRTV涂料表面的微裂纹中开始生长,进而附着于整个绝缘子表面。对于绝缘材料上微裂纹修复的处理,研究者们进行了相关的研究,如彭磊等^[12]基于主-客体分子间的包合作用,以环糊精聚合物(Poly-CD)为主体分子,2-羟基乙基-甲基丙烯酸酯和金刚烷(HEMA-Ad)为带双键的客体分子,以单取代的丙烯酸羟乙酯(HEA)为柔性单体,在催化作用下聚合得到一种具有自愈行为的电缆护套材料;林木松等^[13]基于主-客体分子间的相互作用,以 β -环糊精(β -CD)- Al_2O_3 纳米粒子(NPs)为主体,HEMA-Ad为客体,通过主客体相互识别进行组装后再通过自由基共聚得到一种新型的聚乙烯吡咯烷酮/聚2-羟基乙基-甲基丙烯酸酯-丙烯酸丁酯PVP/p(HEMA-co-BA)自修复电缆护套材料。两者都是采用主-客体分子间的相互作用制备自修复材料,但并未探索该材料与其他基材的附着效果。林木松等^[14]以环糊精修饰的二氧化钛纳米粒子作为光屏蔽剂,利用环糊精与金刚烷的包合作用制备了一种具有自愈行为的光屏蔽涂料;夏宇等^[15]制备了可以用于电缆绝缘缺陷修复的低密度聚乙烯(LDPE)/微胶囊复合材料。但是,这些研究都无法解决苔藓类生物附着问题。

为彻底解决上述苔藓类寄生植物的附着问题,本研究拟制备一种适用于电力设备外绝缘用的自修复抗藻涂料。一方面,通过筛选高效的高分子抗藻剂,降低抗藻剂的迁移速度,解决涂料中抗藻剂流失的问题;另一方面,通过构建动态化学键,实现涂料表面微裂纹的自修复,降低矿物盐、苔藓孢子等的附着,抑制苔藓类寄生植物的生长。

1 实验

1.1 主要原材料与仪器

室温硫化硅橡胶(RTV)、咪唑、氢氧化钠、1,4-二溴丁烷、双-[3-(三乙氧基硅)丙基]-二硫化物(Si-75)、三氧化二铁(600目)、氢氧化铝,均为分析纯,购自上海麦克林生化科技有限公司;二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砷、正硅酸乙酯(TEOS)、乙酸钾、甲苯、丙酮、甲醇、乙酸乙酯、无水乙醇,均为分析

纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

扫描电子显微镜(SEM),型号为MERLIN Compact,德国蔡司仪器公司;傅里叶变换红外光谱仪(FTR),型号为Spectrum 100,美国PE仪器公司;热重仪,型号为TGA/DCS3+,瑞士METTLER TOLEDO公司;宽频介电谱仪,型号为Concept 40,德国NOVOCONTROL公司;水滴接触角测量仪,型号为DSA100,德国KRÜSS公司;导热仪,型号为DTC-300,美国TA仪器公司。

1.2 纳米抗藻复合粉末制备

(1)1,4-二(1H-咪唑-1-基)丁烷单体的合成:称取咪唑(3.45 g, 0.05 mol),配置质量分数为50%的NaOH溶液(NaOH(4 g, 0.1 mol); H_2O (4 mL)),向100 mL单口烧瓶中加入溶剂甲苯(12 mL)和二甲基亚砷(12 mL),将单口烧瓶放在旋转蒸发仪上,设置温度为55℃反应1 h。然后将上述混合反应液转移至三口烧瓶中,并加入1,4-二溴丁烷(3 mL, 0.025 mol),60℃下恒温搅拌2 h。反应结束得到固液混合物,过滤除去溴化钠白色沉淀,将滤液加入100 mL去离子水,静置后出现白色针状固体,用超纯水洗涤3次,置于真空干燥箱干燥7 d,干燥得到白色针状固体,产率为84.6%。

(2)聚1,4-二(1-丁基-咪唑)丁烷溴盐(II)的合成:以30 mL甲醇和10 mL DMF为溶剂,将步骤(1)中单体(3.8 g, 0.02 mol)和1,4-二溴丁烷(4.32 g, 0.02 mol)加入三口烧瓶中,在80℃油浴中反应120 h。反应结束后,减压蒸馏除去甲醇。加入丙酮,生成浅黄色油状液体,放入真空干燥箱中保存II,II最终产率为53.9%。

(3)抗藻剂聚1,4-二(1-丁基-咪唑)丁烷醋酸盐(IM1)的合成:以50 mL乙醇为溶剂,将II(2.456 g)和乙酸钾(5 g, 0.051 mol)加入到100 mL的三口烧瓶中,在40℃条件下反应5 h。反应结束后得到白色悬浊液,静置一段时间,溶液分层,上层是无色透明液体,下层为白色沉淀。通过过滤,取上层清液先用硝酸银标准溶液滴定,无沉淀产生;后用旋转蒸发仪将滤液减压旋干,得到白色油状液体IM1,放入真空干燥箱中保存,IM1最终产率为77.2%,合成方法如图2所示。

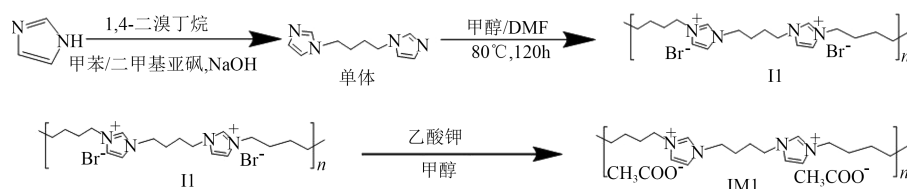


图2 抗藻剂合成方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of the synthesis method of the algae resistant agent

(4)将高分子抗藻剂 IM1、二氧化硅气凝胶、无水乙醇在 60℃ 条件下,按照质量比为 5:10:30 混合搅拌并超声分散 2 h,抽滤后真空干燥得到纳米抗藻复合粉末。

1.3 聚合物前驱体制备

将乙酸乙酯溶剂、RTV、三氧化二铁(600目)、Si-75、氢氧化铝按照质量比为 10:15:1:1.5:0.5 在 60℃ 条件下混合搅拌并超声分散 30 min,在真空下静置 2 h 后制得聚合物前驱体,密封保存。

1.4 自修复抗藻型 RTV 涂料制备

将聚合物前驱体加入强力分散机中分散

30 min,升温至 100~150℃,抽真空下保持 1~2 h 脱水,将分散机中混合物冷却到室温,再按照质量比为 15:1 加入纳米抗藻复合粉末,混合均匀后抽真空 5~10 min 制得自修复抗藻型 RTV 涂料。

2 自修复机理

自修复抗藻涂料的制备示意图如图 3(a)所示,其中可逆动态化学键 S-S 键在一定温度下具有分子重构的特性(如图 3(b)所示),可实现涂料内部局域空间的微裂纹自修复。

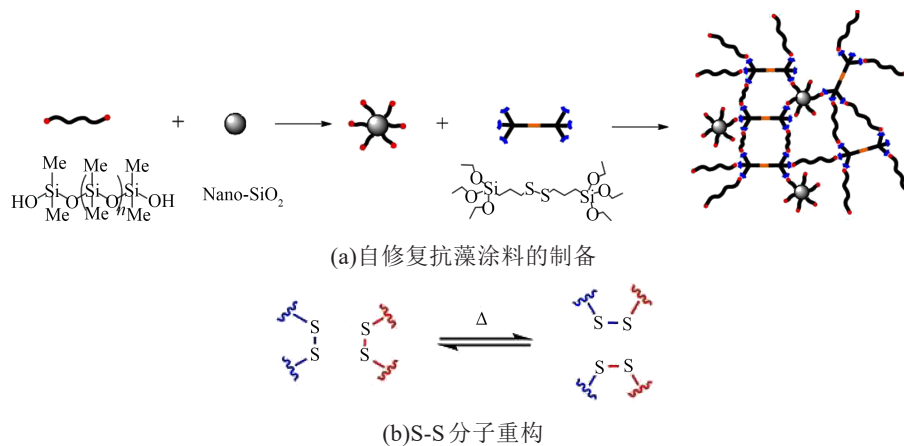


图3 材料制备示意图

Fig.3 Schematic diagram of materials preparation

采用红外光谱对自修复抗藻涂料和常规 RTV 涂料的特征官能团进行检测。图 4 为常规 RTV 涂料和纳米抗藻复合粉末质量分数为 7.5% 的自修复抗藻涂料 FTIR 测试结果。

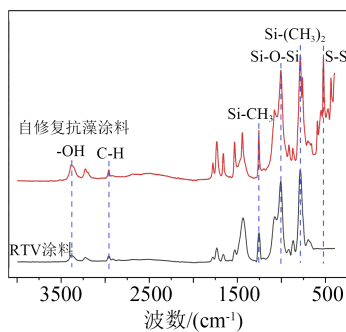


图4 涂料的红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of coating

从图 4 可以看出,自修复抗藻涂料和 RTV 涂料的吸收峰基本相同,都出现了 -OH 的伸缩振动峰(3 389 cm^{-1})、C-H 的伸缩振动峰(2 960 cm^{-1})、Si-O-Si 的伸缩振动峰(1 000 cm^{-1})、Si-C 的伸缩振动峰(790 cm^{-1})、Si-C 的变形振动峰(1 260 cm^{-1})。但是,在波数为 520 cm^{-1} 处,自修复抗藻涂料出现了一个

吸收峰,为 S-S 的伸缩振动吸收峰,而 RTV 涂料中并没有。表明添加二硫键硅烷交联剂后,自修复抗藻涂料具有动态的 S-S 键,其赋予了涂料自修复效果。

3 结果与讨论

3.1 纳米抗藻复合粉末的抗藻性能

为表征纳米抗藻复合粉末的抗藻性能,配置纳米抗藻复合粉末质量分数为 0% 和 0.5% 的溶液,并加入到青苔的培养基中,通过显微镜观察纳米抗藻复合粉末的抗藻性能,结果如图 5 所示。

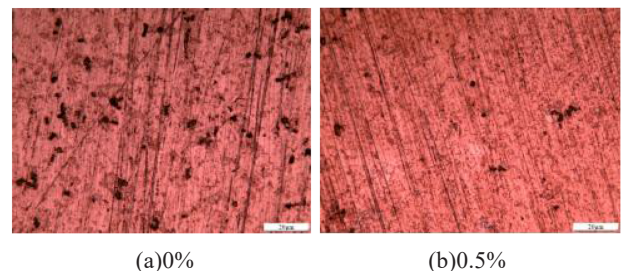


图5 不同质量分数纳米抗藻复合粉末溶液的抗藻性能
Fig.5 Anti algae properties of solutions with different mass fraction of nano algae resistant composite powders

从图5可以看出,未添加纳米抗藻复合粉末的培养基在24 h后仍有大量的苔藓菌落存在;而加入质量分数为0.5%的纳米抗藻复合粉末溶液的培养基在24 h后观察不到苔藓菌落,即基材中的苔藓在24 h内基本死亡,证明纳米抗藻复合粉末具有显著的抗藻效果。

3.2 自修复抗藻涂料的理化性能

3.2.1 自修复性能

在制备好的自修复抗藻涂料表面制作不同深度(1、4、7 mm)的划痕,在80℃条件下放置4 h后观察自修复情况,结果如图6所示。同时,采用SEM对微裂纹的自修复情况进行观察,结果如图7所示。

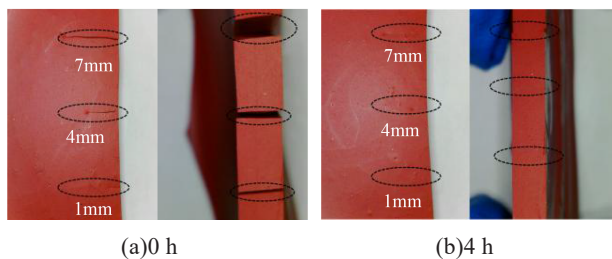


图6 自修复抗藻涂料损伤后的修复效果
Fig.6 Repairing effect of self-healing algae resistant coating after damage

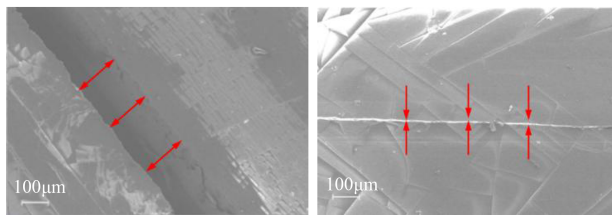


图7 自修复抗藻涂料损伤后的扫描电镜图
Fig.7 SEM images of self-healing algae resistant coating after damage

从图6可以看出,随着时间的增加,硅橡胶表面的划痕深度逐渐变浅,划痕得到愈合,说明自修复抗藻涂料具有很好的自修复效果。从图7可以看出,损伤4 h后的微裂纹已经进行了自我修复,裂缝变窄。这是由于二硫化物中S-S键在高温下发生断裂并重排,使涂料的断裂面之间重新弥合,实现了涂料的自修复。

3.2.2 疏水性

为验证自修复抗藻涂料的疏水性能,对其水滴接触角进行表征,结果如图8所示。从图8可以看出,水滴接触角的3次测试结果分别为120.86°、122.63°、125.78°,均大于120°,表明该涂料具有优异的疏水性。

3.2.3 附着力

为验证自修复抗藻涂料在基材(以玻璃为例)

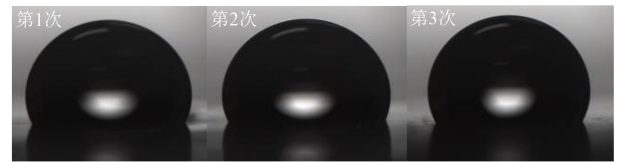


图8 自修复抗藻涂料水滴接触角
Fig.8 Water droplet contact angle of self-healing algae resistant coating

表面的附着力,按照GB/T 9286—2021相关要求进行分类测试,结果如图9所示。从图9可以看出,涂层表面的切割边缘完全平滑,网格内无脱离,附着力等级达到0级,说明自修复抗藻涂料具有优异的附着力。

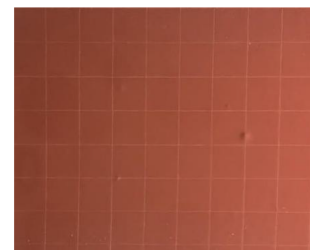


图9 自修复抗藻涂料附着力测试结果
Fig.9 Adhesion test results of self-healing algae resistant coating

3.3 自修复抗藻涂料的力学性能

对涂料自修复前后的应力-应变性能进行检测,结果如图10所示。在拉伸试验中,进行多次自修复实验,以确保修复后的样品从裂缝中断裂。

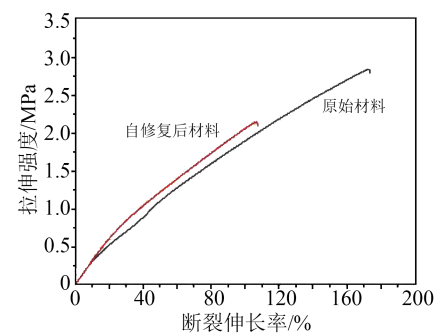


图10 自修复抗藻涂料应力-应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves of self-healing algae resistant coating

从图10可以看出,自修复后,涂料的断裂伸长率从170%下降到110%,拉伸强度从2.8 MPa下降到2.1 MPa,表明自修复后试样的力学性能可以恢复到原始材料的75%。

3.4 自修复抗藻涂料的热学性能

3.4.1 耐热性能

采用热重分析(TGA)对涂料的耐热性能进行分析,结果如图11所示。

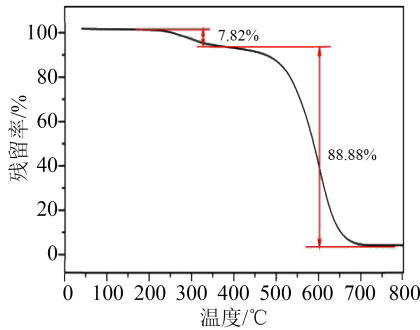


图 11 自修复抗藻涂料的热重分析

Fig.11 Thermogravimetric analysis of self-healing algae resistant coating

从图 11 可以看出,涂料在 200℃ 之前残留率几乎维持在 100%,表明在 200℃ 之前,涂料具有良好的热稳定性,能满足实际运行的需求。

3.4.2 导热性能

涂料的导热性能在一定程度上会影响涂层表面沿面闪络(特别是污闪)的发展过程。这是由于涂料表面污层的分布不均匀,且各处受潮情况也有差别,导致污层表面电阻不均匀,在运行电压作用下,表面会产生泄漏电流。若涂层导热效果不良,污层电阻高的局部区域由于“积热”被烘干,形成“干燥带”,使污层的泄漏电流减小,并在干燥带区域形成很大的电压降,当电压差超过沿面闪络场强时即会发生电弧放电甚至形成闪络。因此涂层良好的导热性能会使涂层表面的热量分布均匀,抑制闪络的发生。

采用导热仪测试自修复抗藻涂料与纯 RTV 涂料在 50℃ 下的热导率(以模拟涂料在绝缘子最高使用环境温度下的导热性能)。对每个样品进行 3 次测试,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,自修复抗藻涂料的热导率较纯 RTV 涂料增大了约 7.4%,表明自修复抗藻涂料的散热性能更好,满足电气设备的常规需求。

表 1 涂料的导热性能

Tab.1 Thermal conductivity of coatings

涂料	W/(m·K)		
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量
纯 RTV	0.188	0.188	0.188
自修复抗藻涂料	0.202	0.202	0.201

3.5 自修复抗藻涂料的环境适应性

3.5.1 耐紫外性能

采用紫外老化试验箱对自修复抗藻涂料进行不同时间(0、24、48、72 h)的人工模拟紫外老化试验(功率为 40 W),并采用傅里叶红外光谱仪检测紫外

辐射前后涂层特定基团(如 S-S 键)的变化,测试结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,相较于未进行紫外老化的自修复抗藻涂料,紫外老化 72 h 后,其红外光谱图上 S-S 的伸缩振动吸收峰(520 cm^{-1})并没有发生明显的变化,表明在一定时间内自修复抗藻涂料具有耐紫外性能,紫外光不影响 S-S 的重构效果。

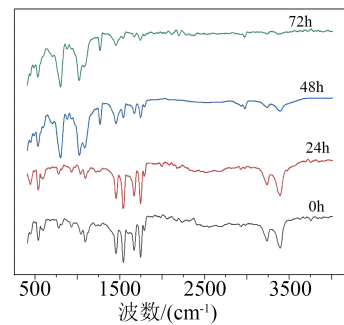


图 12 不同紫外老化时间自修复抗藻涂料的红外光谱图

Fig.12 Infrared spectrum of self-healing algae resistant coating at different UV ageing time

3.5.2 抗藻性能

为表征自修复抗藻涂料的抗藻性能,对苔藓细胞破损率和苔藓在涂层表面的出现时间进行测试。

(1) 苔藓细胞破损率

以常规 RTV 涂层为对照组,在实验室条件下对不同高分子抗藻剂含量涂层的抗藻性能进行检测。使用人工气候培养箱在涂层表面培养青苔,使用碘化丙啶对细胞进行染色并通过流式细胞仪监测苔藓细胞的破膜率 x , $x=(N_0-N)/N_0 \times 100\%$,其中 N_0 为原细胞密度, N 为时间 t 后苔藓细胞的测量密度,结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,自修复抗藻涂层上苔藓细胞的破损率均随着培养时间的增加而不断提高,其中高分子抗藻剂 IM1 质量分数为 0.5% 时,涂层的抗藻性能最好(可能是该质量分数下 IM1 在涂料中分散效果最好,无团聚现象),在 20 d 左右时破损率达到了 90% 以上;而在常规 RTV 涂层上细胞破损率呈现先上升后下降的趋势,破损率最高时不到 14%。表明含抗藻剂的抗藻涂层均能够有效抑制苔藓细胞的生长,其中抗藻剂质量分数为 0.5% 时,涂料的抗藻性能最优。

(2) 苔藓在涂层表面的出现时间

取 IM1 质量分数为 0.5% 的自修复抗藻涂料以及常规 RTV 涂料进行室外苔藓培养,测试苔藓在不同涂层表面的出现时间,结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,常规 RTV 涂层表面在 5 d 后出现了苔藓的附着,随着时间的增加,苔藓的附着面积越来越

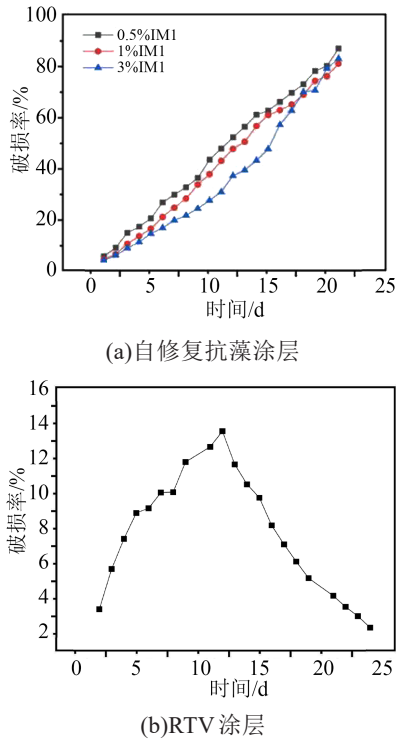


图 13 苔藓细胞在不同涂层上破损率
Fig.13 Breakage rate of moss cells on different coatings

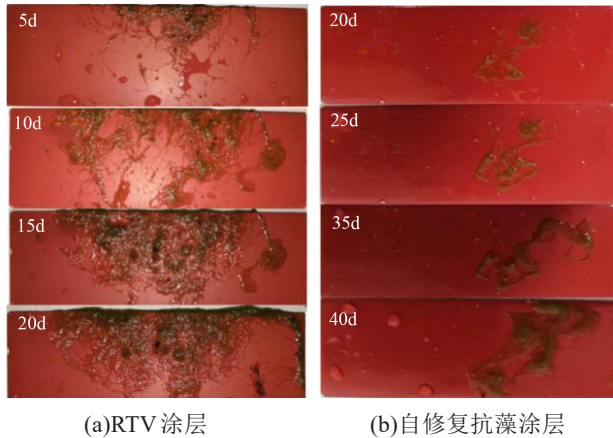


图 14 苔藓在不同涂层表面的生长情况

Fig.14 The growth of moss on different coating surfaces

大,在生长 20 d 后,常规 RTV 涂层表面 2/3 的区域都有苔藓附着。而添加有 IM1 的自修复抗藻涂层表面 20 d 后才出现苔藓附着,并且附着面积较小,在生长 40 d 后,涂层表面苔藓附着面积有所增大,但所占面积远小于对照组涂层生长 5 d 的面积,表明该自修复抗藻涂料能够很好地抑制苔藓生长,至少能延长苔藓出现时间 8 倍以上。

3.6 自修复抗藻涂料的电学性能

3.6.1 介电性能

对高分子抗藻剂 IM1 质量分数分别为 0.5%、1%、3% 的自修复抗藻涂料的介电性能进行测试,测试的介电性能包括电阻率、相对介电常数、介质损

耗因数,结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,在频率为 50 Hz 时,IM1 质量分数为 0.5% 自修复抗藻涂料的电导率为 8.76×10^{-11} S/cm,相对介电常数为 4.15,介质损耗因数为 0.04,相较于其他两种自修复抗藻涂料的电导率、相对介电常数以及介质损耗因数均最小,介电性能最好。

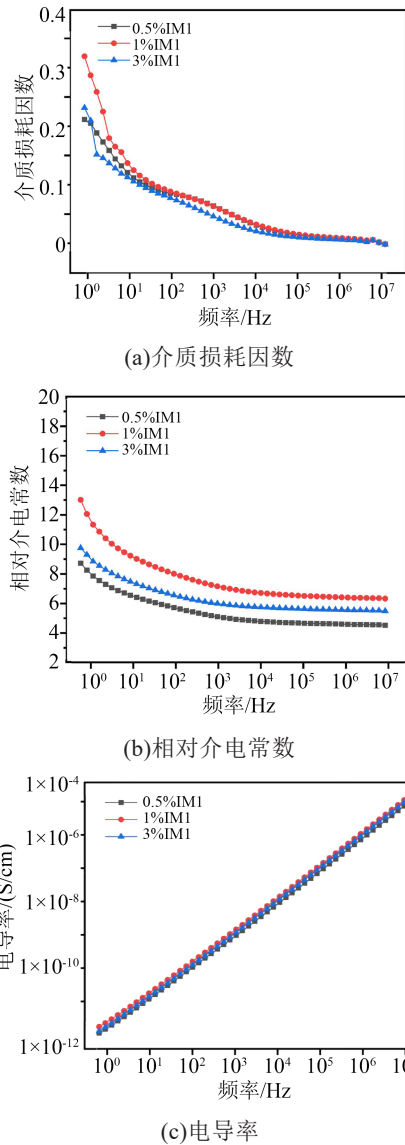


图 15 涂层的介电性能

Fig.15 Dielectric properties of coatings

3.6.2 闪络电压

使用人工加压闪络平台对高分子抗藻剂 IM1 质量分数分别为 0.5%、1%、3% 的自修复抗藻涂料进行干闪电压和湿闪电压测试,常规 RTV 涂料作为对照组,测试结果如图 16 所示。从图 16 可以看出,IM1 质量分数为 0.5% 时,自修复抗藻涂料的干闪电压为 13.18 kV,湿闪电压为 8.39 kV,其闪络电压最高,电气性能最好。

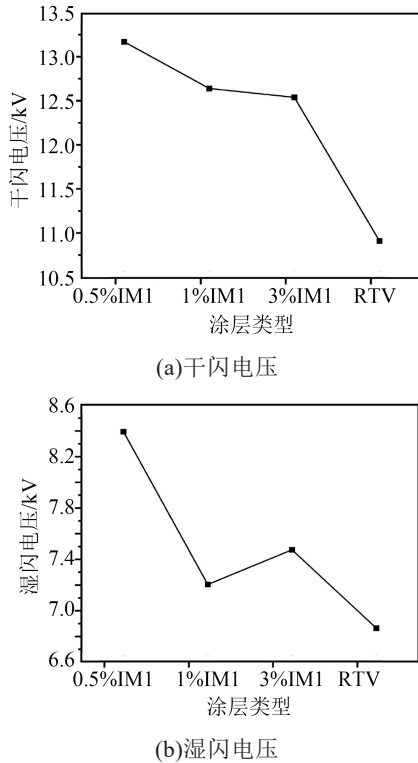


图 16 涂料的电气性能

Fig.16 Electrical properties of coatings

4 结论

本研究制备了一种适用于电力设备外绝缘用的自修复抗藻涂料,采用扫描电子显微镜、热重量分析仪、傅里叶变换红外光谱和宽频介电谱仪等手段对涂料的热力学性能、力学性能、抗藻性能、自修复性能、电气性能等进行表征。研究表明该自修复抗藻涂料具有自我修复微裂纹的能力,修复后力学性能能恢复75%左右;耐热温度为200℃;具有较好的疏水性,水滴接触角大于120°;当抗藻剂质量分数为0.5%时,涂料对苔藓的抑制效果最好,且介电性能与电气性能最佳;相比于常规RTV涂料,该自修复抗藻涂料可延长苔藓出现时间8倍以上。

参考文献:

[1] 伍红雨,李文媛,段海来,等.2021年广东省气候概况[J].广东气

- 象,2022,44(2):1-5
- [2] 刘宁,高源,陈伟,等.表面生长微生物对电气设备外绝缘性能的影响[J].电工材料,2019(3):41-46
- [3] 项阳,郭洁,温定筠.污秽潮湿状态下有机复合绝缘子周围电场分布研究[J].南方电网技术,2010,4(S1):36-40
- [4] 张东东,刘欣,杨成顺,等.典型粉尘污染源下绝缘子积污粒径特征及其影响研究[J].绝缘材料,2022,55(1):95-100.
- [5] 田亮,刘岩,陕华平,等.不同环境条件下特高压换流站用绝缘子积污特性研究[J].绝缘材料,2021,54(4):36-40.
- [6] 王远东,史文江,杨忠毅,等.典型不溶污秽染污绝缘子在不同环境湿度下的吸水和闪络特性研究[J].绝缘材料,2021,54(5):92-97.
- [7] GUBANSKI S M, KARLSSON S, FERNANDO M A R M. Performance of biologically contaminated high voltage insulators [C]/First International Conference on Industrial and Information Systems. Tirtayasa, Indonesia:IEEE,2006.
- [8] GUBANSKI S M, DERNFALK A, WALLSTROM S, et al. Performance and diagnostics of biologically contaminated insulators [C]/2006 IEEE 8th International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia:IEEE,2006.
- [9] OUYANG X G, YIN F H, JIA Z D, et al. Research of biological contamination and its effect on the properties of RTV-coated insulators[J]. Electric Power Systems Research,2019,167:138-149.
- [10] 张星海,李亚伟,白欢,等.四川部分变电站涂覆RTV绝缘子的自然积污成分及其对闪络特性的影响[J].高电压技术,2016,42(9):2922-2928
- [11] 池招荣,覃显南,李捷睿,等.青苔对变电站绝缘子的影响分析及防治对策[J].机电信息,2022(14):9-11.
- [12] 彭磊,林木松,李丽,等.具有自愈行为的智能电缆护套材料[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7405-7412,7513.
- [13] 林木松,钱艺华,范圣平,等.电缆护套材料超分子自修复技术研究[J].绝缘材料,2019,52(8):60-65.
- [14] 林木松,彭磊,张晟,等.电缆护套光屏蔽自愈涂层的制备及性能[J].高等学校化学学报,2019,40(8):1766-1774.
- [15] 夏宇,李伯男,李熙,等.自修复型微胶囊内部微裂纹损伤特性的仿真分析[J].绝缘材料,2020,53(10):75-81.

收稿日期:2023-03-09;修回日期:2023-05-10。

作者简介:彭磊(1989-),男(汉族),湖北仙桃人,高级工程师,博士,主要从事电工材料的研究;付强(1972-),男(汉族),河南长垣人,正高级工程师,主要从事电力化学管理与试验研究的工作。