

用于储能电站热失控预警的热敏涂层材料研究

牛朝露¹, 李泽浩^{1,2}, 司马文霞¹, 孙魄韬^{1,✉}, 袁涛¹, 杨鸣¹, 方正¹, 刘奇昌¹, 金云帆¹
(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 611133)

摘要: [目的] 磷酸铁锂电池储能电站是新型电力系统消纳大规模新能源的重要基础, 然而电池单元的热失控严重威胁储能电站的运行安全。对储能电站局部过热进行实时监测和科学预警具有重要意义。[方法] 在此工作中, 制备了一种具有感知过热温度并产生颜色变化的热敏微胶囊, 将其适量添加到环氧树脂基体中构成具有感知外部过热温度场特性的复合绝缘材料。[结果] 测试结果表明, 所制备的热敏微胶囊/环氧树脂绝缘示温涂层的颜色可以灵敏地随外界温度变化而发生变化, 在 60 °C 左右时发生颜色突变。当热敏微胶囊的掺杂质量分数为 0.25% 时, 复合涂层的绝缘强度、介电特性和纯环氧树脂材料相当, 保持良好的本征电气性能。[结论] 研究提出的热敏变色复合绝缘涂层可对外界局部过热状态的温度可视变化, 为储能电站的热失控预警应用提供了一条新的技术路线, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 热失控; 过热监测; 环氧树脂; 热敏微胶囊; 复合绝缘涂层

中图分类号: TM7; TM21

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0106-10

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Thermosensitive Coatings for Thermal Runaway Warning in Energy Storage Power Station

NIU Chaolu¹, LI Zehao^{1,2}, SIMA Wenxia¹, SUN Potao^{1,✉}, YUAN Tao¹, YANG Ming¹, FANG Zheng¹, LIU Qichang¹, JIN Yunfan¹

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company Technical Training Center, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract: [Introduction] Lithium iron phosphate battery storage power plants are an important basis for new power systems to consume large-scale new energy, however, the thermal runaway of battery cells seriously threatens the operational safety of storage power plants. It is important to conduct real-time monitoring and scientific warning of local overheating in storage power plants. [Method] In this work, a thermal microcapsule with the ability to sense overheating temperature and produce colour changes was prepared and added in appropriate amounts to an epoxy resin matrix to form a composite insulating material with the characteristics of sensing external overheating temperature fields. [Result] Test results show that the colour of the prepared thermosensitive microcapsule/epoxy insulating temperature indication coating can change sensitively with external temperature changes, with a sudden colour change occurring at around 60 °C. When the doping mass fraction of the thermosensitive microcapsules is 0.25%, the insulation strength and dielectric properties of the composite coating are comparable to those of the pure epoxy resin material, maintaining good intrinsic electrical properties. [Conclusion] The thermosensitive colour-changing composite insulation coating proposed in the study can visibly change the temperature of the external local overheating state, providing a new technical route for the application of thermal runaway warning in energy storage power plants, which has certain engineering application value.

Key words: thermal runaway; overheat monitoring; epoxy resins; thermosensitive microcapsules; composite insulating coatings

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“电网大规模实测过电压统计分布特性及其对典型绝缘影响的基础研究”(51837002); 国家自然科学基金面上项目“氮化硼/桥联型硅基聚合物高性能复合电介质的分级异质嵌套结构设计与其构效机制研究”(52077014); 中国南方电网有限责任公司重点实验室基金“融合靶向热感知微纳单元的智能复合绝缘材料”(CSGULAEMEST-2021-KF-01)

0 引言

习近平总书记强调构建以新能源为主体的新型电力系统,明确了我国能源电力转型发展的方向^[1-2]。电力系统中风能、太阳能等新能源的比例不断增加,高占比可再生能源、高占比电力电子装置的特征将更加明显^[3]。间歇性、波动性新能源并入新型电力系统时引起电网电能质量波动、负载失衡等问题^[4-6],储能电站的应用可增强电力系统灵活性、适应性,为用户提供安全可靠的电源^[7-9]。目前,应用于电力领域的新型储能装置多采用磷酸铁锂电池技术路线^[10-12]。然而,以磷酸铁锂电池局部过热、过充过放为代表的热失控极易诱发连锁火灾、爆炸,并且电池内部电解液燃烧剧烈,蔓延速度快,严重威胁储能电站的安全^[13-15]。因此,解决磷酸铁锂电池局部热失控的预警问题成为推动新型电力系统构建的迫切需求^[16-18]。

然而目前用于储能电站热失控预警的方法存在以下问题:(1)磷酸铁锂电池的管理系统过分依赖价格高昂的传感器,难以有效地在 MW 级储能电站中大规模普及传感器;(2)传统的传感器布置需要相应电路单元配套应用,而大量有源电路单元的串接会影响磷酸铁锂电池的绝缘性能,威胁储能电站的绝缘安全;(3)传统电池单体缓变内短路、荷电状态、健康状态、剩余寿命等状态基于运行的历史数据及相关特征量进行估计,但数据庞大,且其中热失控阶段前期状态的数据样本占比少,导致算法计算精度有限;(4)算法精确性依赖于大量实际机器学习的训练次数,经济成本偏高,难以有效实现大规模在线监控。

针对上述问题,为提高储能电站安全稳定性,推动新型电力系统大规模储能技术的发展,降低热失控预警成本,亟需探索新的研究思路。变色龙适应外界环境变化而改变自身相应颜色的现象,引起国内外专家学者广泛关注^[19-21]。受此启发,智能变色材料中的热致变色材料^[22-24],可为实现磷酸铁锂电池单元局部过热的动态预警提供一种新策略。在此思路下,文章构筑一种用于储能电站热失控预警的热敏涂层。首先,实验制备了热致变色微胶囊,并研究了热敏微胶囊的微观结构、化学成分和热稳定性。其次,以环氧树脂为基体,在内部掺杂热敏微胶囊构筑

成复合绝缘涂层,并验证复合绝缘涂层良好的电气性能。最后,通过对复合绝缘涂层进行温度梯度升温实验,验证了其优良的热敏特性,对复合材料进行热老化测试,验证其长期耐老化性能。研究表明可在磷酸铁锂电池组外绝缘层上刷层较薄的热敏涂层,以实现温度场的可视表征,实时反馈电池组状态,提高热失控预警效率,降低技术成本。

1 实验制备及测试

1.1 试剂与仪器

文章中的实验所用材料:双酚 A(BPA),6'-(二乙氨基)-1',2'-苯并芴(F-red)和 1-十八烷醇均购自上海阿拉丁公司。苯乙烯马来酸酐共聚物(SMA-820)和三乙醇胺购自 Sigma-Aldrich 公司。甲醛溶液、三聚氰胺、乙酸、氢氧化钠、柠檬酸、环氧树脂(E-51)、4-甲基六氢苯酐、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚和去离子水均购自上海麦克林公司。

用扫描电子显微镜(Quattro S,美国赛默飞世尔)观测热敏微胶囊形貌。采用粒度粒形图像分析仪(QICPIC/L02-OM,德国新帕泰克)测试样品的粒径及其分布。使用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS50,美国赛默飞世尔)对热敏微胶囊进行结构组成分析。使用热重分析仪(NETZSCH STA 449 F5/F3 Jupiter,德国耐驰)对于热敏微胶囊的热稳定性进行分析。使用宽频介电谱仪(德国 Novocontrol GmbH)测量复合绝缘涂层在室温下的介电常数与介电损耗,工频交流击穿试验平台测量复合绝缘涂层的绝缘强度。

1.2 热敏微胶囊的制备

热敏微胶囊选择以 F-red、BPA、十八烷醇作为热致变色体系,其中 F-red 为成色剂、BPA 为显色剂、十八烷醇为有机溶剂。热致变色的颜色转换由 F-red 的分子结构决定,即 F-red 中内酯环的打开和闭合^[22]。这种结构变化热敏微胶囊在可见光内的发射和吸收光谱发生变化,从而呈现不同颜色的现象。在室温时 F-red 与 BPA 两者相接触,微胶囊呈现红色,颜色鲜明;而在高温时(60 °C 以上)F-red 与 BPA 两者相分离,微胶囊呈现白色(或无色),颜色变化分辨率高。同时,十八烷醇的作用是通过自身固液相变特性控制促进 F-red 和 BPA 两者间的接触和分离。热敏微胶囊的制备过程总结如下。

热敏微胶囊的制备过程总结如下。首先,将 0.25 g F-red、0.5 g BPA 和 10 g 十八烷醇在 85 °C 的恒温水浴中机械缓慢搅拌约 20 min, 作为油相。同时,将适量的苯乙烯马来酸酐共聚物和 NaOH 加入去离子水中,在 55 °C 水浴中磁力搅拌 40 min, 作为水相。然后将油相缓慢倾倒入水相中,在 75 °C 水浴中快速机械搅拌约 20 min 形成水包油(O/W)体系,同时,将柠檬酸水溶液用移液器缓慢滴加到上述混合体系中,将整体的 pH 值调整到 5.5~6。其次,将适量配比的甲醛溶液与三聚氰胺溶解在去离子水中,并在 40 °C 的恒温水浴中机械搅拌 40 min。用移液器缓慢滴加适量三乙醇胺溶液,调整溶液 pH 值达到 9,从而获得三聚氰胺-甲醛(MF)预聚物。最后,将适量制备好的 MF 预聚物缓慢滴加到上述水包油体系的烧杯中,保持 75 °C 水浴加热,接着使用移液器将柠檬酸水溶液缓慢滴加到上述混合物中,将 pH 值调整到 4~4.5,维持水浴 75 °C 加热 2 h。然后缓慢滴加 NaOH 溶液,直至混合溶液呈中性。维持水浴加热 30 min,再将制备好的微胶囊静置,过滤,洗涤 3~5 次,最后放置在阴凉处干燥保存。

1.3 热敏微胶囊/环氧树脂复合涂层的制备方法

首先称取 100 份 E51 环氧树脂、86 份 4-甲基六氢苯酐(作为固化剂)、2 份 2,4,6-三(二甲氨基甲基)

苯酚催化剂(作为促进剂)于烧杯中混合。在 65 °C 恒温下机械搅拌 15 min 后加入适量制备好的热敏微胶囊继续搅拌 15 min。混合均匀后,放入真空干燥箱中真空处理,充分去除环氧树脂基体内部的杂质气泡。将脱气后的复合材料缓慢倾倒入定制的方形金属模具中(外 35 mm×35 mm×1 mm,内 25 mm×25 mm×1 mm)。然后,将上述复合材料放置到干燥箱中进行梯度升温固化(90 °C 加热 2.5 h, 110 °C 加热 2.5 h)。交联固化完成后,将样品冷却至室温,随后进行脱模处理,取出复合材料样品并使用 75% 乙醇溶液擦拭,放置阴凉处保存。文章将制备得到复合材料作为实验测试中的热敏涂层样品,其中掺杂热敏微胶囊的质量分数 ω 分别设置为 0.00%、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%。

2 热敏微胶囊性能表征

2.1 微胶囊微观形貌

扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观测热敏微胶囊的形貌如图 1 所示。微胶囊的微观形态类似圆球形,大小均一。粒度粒形图像分析仪得到微胶囊的粒径分布如图 2 所示,微胶囊粒径分布近似呈现正态分布,粒径累计频率 80% 集中在 1.542~4.492 μm 范围内,统计得到制备的热敏

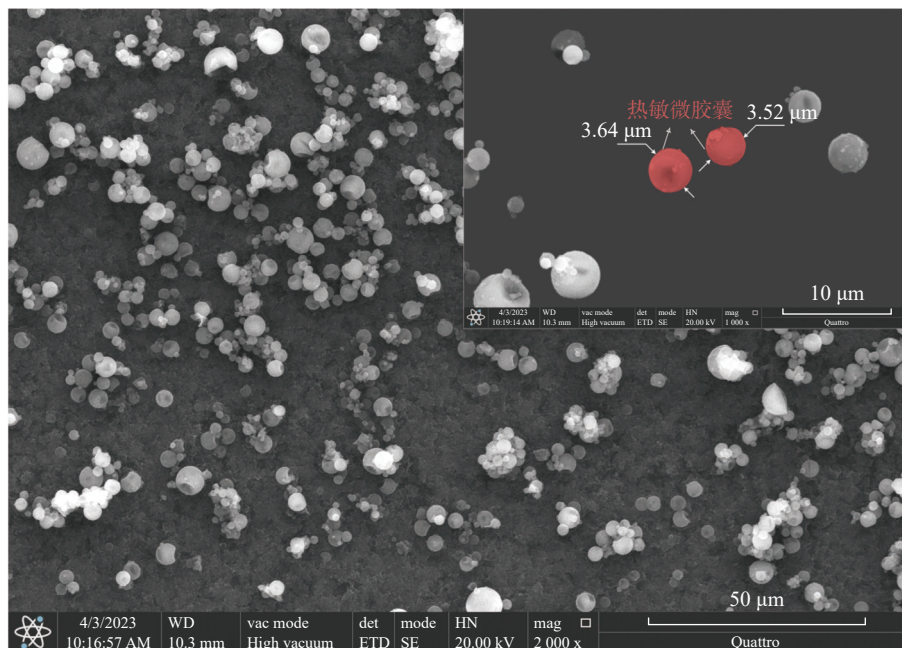


图 1 热敏微胶囊的 SEM 形貌图

Fig. 1 SEM morphology of thermosensitive microcapsules

微胶囊的平均粒径为 $3.712\ \mu\text{m}$, 与图 1 扫描电子显微镜中观测得到的粒径分布情况保持一致。

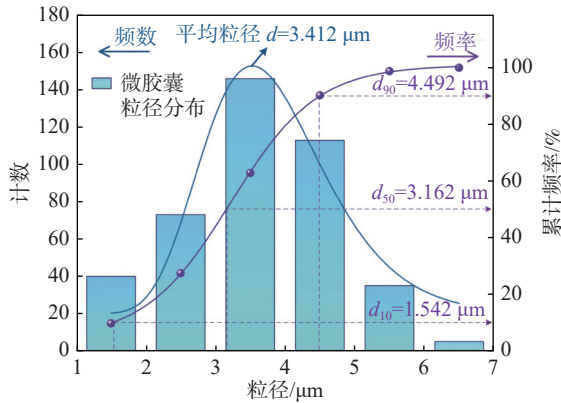


图 2 热敏微胶囊的粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution of thermosensitive microcapsules

2.2 微胶囊的化学成分分析

由图 3 微胶囊的傅里叶变换红外光谱 (Fourier Transform Infrared, FTIR) 可知, 波数 $3394.47\ \text{cm}^{-1}$ 处是 N—H 和 O—H 基团重叠在一起的伸缩振动吸收峰; 波数 $2917.86\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2849.45\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2360.54\ \text{cm}^{-1}$ 处是 C—H 的伸缩振动吸收峰。波数 $1556.62\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1509.42\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰代表中—C=N—的伸缩振动吸收峰以及芳香环的骨架振动; $1472.25\ \text{cm}^{-1}$ 处是苯环上 C—H 面外弯曲振动吸收峰, 表明微胶囊中含有热致变色核心材料。波数 $1340.98\ \text{cm}^{-1}$ 和 $813.95\ \text{cm}^{-1}$ 处代表 MF 树脂三嗪环上 C—N 伸缩振动吸收峰以及环的骨架振动吸收峰, 表明 MF 树脂包覆了热致变色材料。此外, 在描述醛类的光谱中, $1740\sim 1720\ \text{cm}^{-1}$ 范围内没有出现 C=O 吸收峰, 即表示不含自由甲醛, 表明合成的热敏微胶囊的壁材为 MF 树脂, 且具有良好的包裹效果。

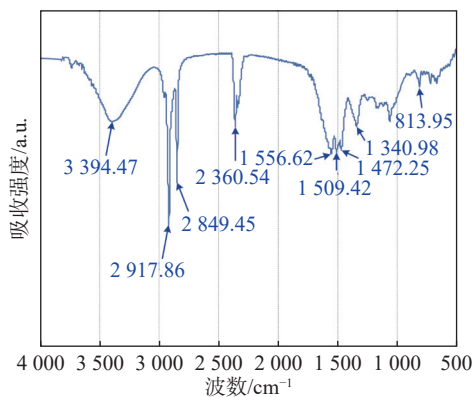


图 3 微胶囊的傅里叶红外光谱

Fig. 3 FTIR spectra of the microcapsules

2.3 微胶囊热稳定性分析

图 4 所示为热敏微胶囊的热重分析 (Thermo Gravimetric Analyzer, TGA) 曲线。当样品温度达到 $153.46\ ^\circ\text{C}$ 时质量分数损失仅为 4.08% , 热失重相对有限, 这可能是未完全反应的有机物和表面的水分挥发所致^[25-26]。随着施加温度的进一步升高, 在 $354.52\ ^\circ\text{C}$ 附近时开始出现严重的失重, 这是因为腔室蒸气压力增加导致微胶囊破裂, 微胶囊内部核心材料开始泄漏并发生显著的分解导致重量损失。随着施加温度的继续上升, 外壳材料进行降解并被碳化, 最终剩余质量逐渐下降到原质量的 8.759% 。综上所述, 热敏微胶囊具有良好的热稳定性, 可作为后续环氧树脂高温固化工作的提供基础材料。

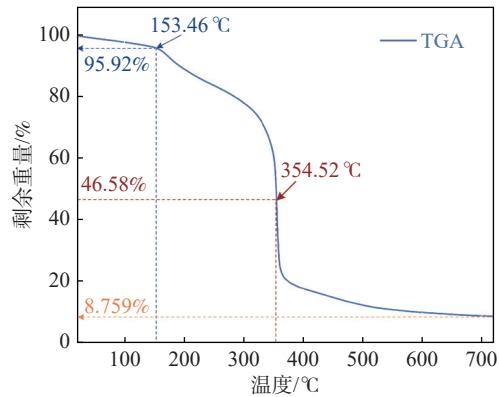


图 4 热敏微胶囊的热重分析曲线

Fig. 4 TGA curve of thermosensitive microcapsule

3 复合涂层性能测试

3.1 复合涂层的绝缘强度

文章采用工频耐压实验平台测量复合涂层样品的绝缘击穿场强 (表征绝缘强度), 该平台由工频变压器系统、耐压测试系统、控制和测量系统三大部分构成, 其具体结构如图 5 所示。根据 GB/T 1408.1—2016 标准^[27], 对样品施加幅值可控的交流电压, 为防止试验样品发生沿面闪络, “板—板电极” 浸入矿物油中, 电压升高速率 $1\ \text{kV/s}$, 样品击穿后静置 $2\ \text{min}$, 所有实验在室温 $25\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 下进行^[28-30]。

为减小偶然因素产生的试验误差, 每组试样进行重复试验 9 次^[31], 对样品的击穿电压进行统计, 以失效概率 63.2% 时击穿场强作为特征击穿场强, 进行双参数 Weibull 分布参数计算如下:

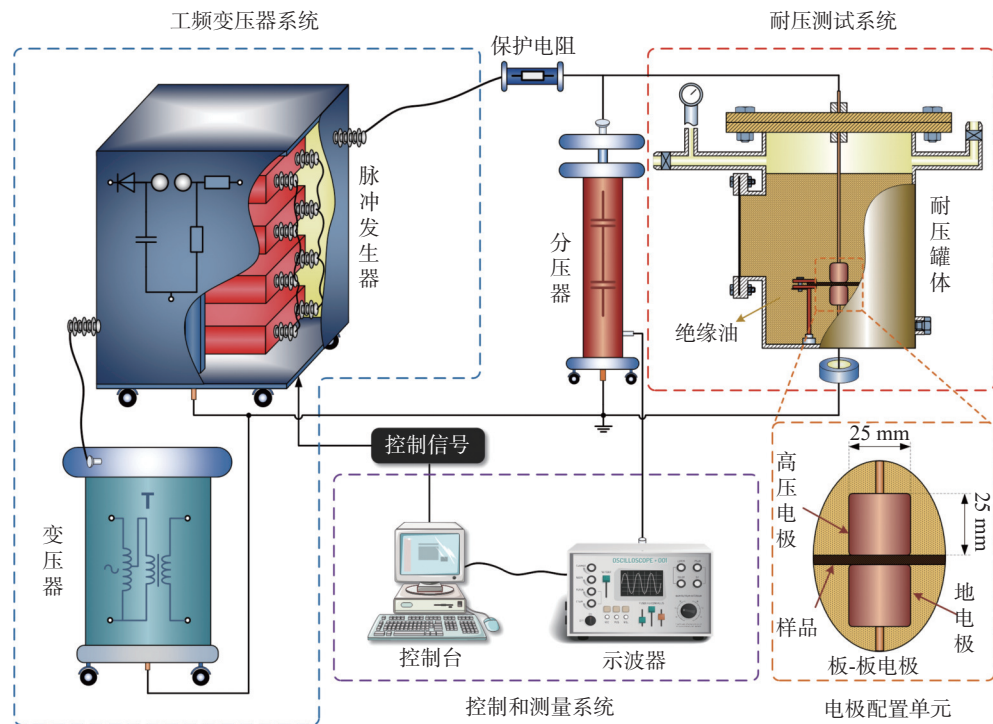


图 5 交流工频击穿试验平台

Fig. 5 AC frequency breakdown test platform

$$P(U) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{\eta}\right)^\beta\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$P(U)$ ——累积概率值(%);

U ——击穿电压场强值(kV/mm);

η ——尺度参数,代表特征击穿场强值(kV/mm);

β ——形状参数,表征数据分散性。

经过耐压测试,掺杂不同质量分数热敏微胶囊的复合涂层的绝缘强度 Weibull 分布情况如下图 6 所示。由图 6 可知,随着热敏微胶囊的掺杂质量分数的增加,复合涂层的绝缘强度随之下降。相较于纯环氧树脂的击穿场强,掺杂质量分数为 0.25% 热敏微胶囊的复合涂层的击穿场强仅下降 0.77%,绝缘强度几乎不变;而掺杂质量分数为 1.00% 热敏微胶囊的复合涂层的击穿场强下降了 6.76%,绝缘强度显著下降。这可能是由于掺杂微胶囊质量分数较小时,微胶囊在环氧树脂基体中分散均匀,导致其 MF 外壳上的极性基团与环氧分子产生相互渗透的分子链,从而形成互穿网络^[32-34],使得绝缘性能保持不变。随着掺杂微胶囊质量分数的增加,微胶囊会在基体中发生团聚情况,且交联过程中引入基体大量内部缺

陷,导致复合涂层的整体绝缘击穿强度下降。

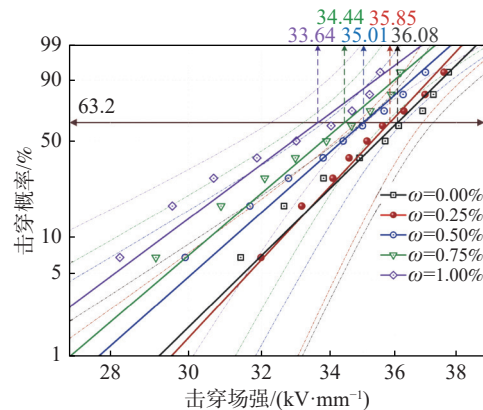


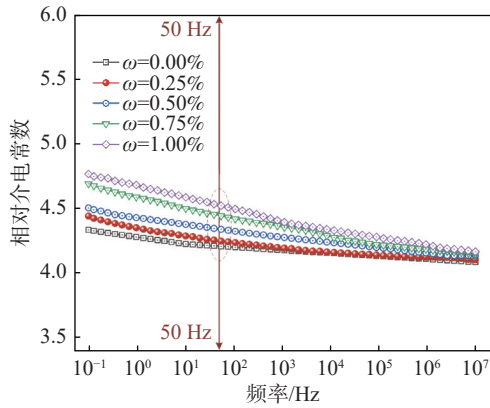
图 6 复合涂层绝缘强度的威布尔分布图

Fig. 6 Weibull distribution of the insulation strength of composite coatings

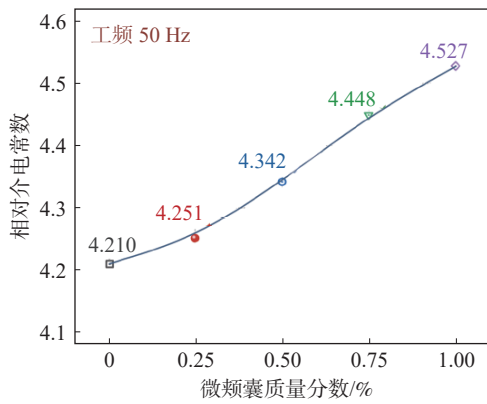
3.2 复合涂层的介电性能

文章采用 Novocontrol Concept 80 宽频介电谱仪分析复合材料的介电性能。采用标定转换模块进行校准,防止泄漏电流造成测量误差。实验频率设置为 $10^{-1} \sim 10^7$ Hz,测试环境温度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,湿度为 $(60 \pm 3)\% \text{RH}$ 。测得掺杂微胶囊不同质量分数的复合涂层的相对介电常数和介电损耗角正切值 $\text{Tan}\delta$ 分

别如图 7、图 8 所示。在测试电压频率为 50 Hz 时, 纯环氧树脂(EP)和掺杂质量分数为 0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00% 热敏微胶囊的复合涂层的相对介电常数分别为 4.210、4.251、4.342、4.448 和 4.527。



(a) 不同频率下复合涂层的相对介电常数



(b) 50 Hz 时复合涂层的相对介电常数

图 7 复合涂层的相对介电常数曲线

Fig. 7 Relative dielectric constant curves for composite coatings

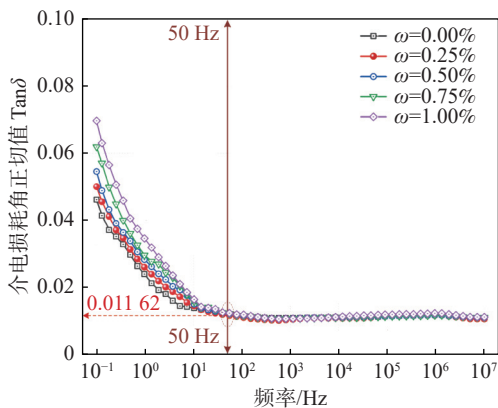


图 8 复合涂层的介电损耗角正切值曲线

Fig. 8 Dielectric loss angle tangent curves for composite coatings

用介电损耗正切值表征介电损耗的大小, 在测试电压频率 < 50 Hz 时, 随着热敏微胶囊掺杂质量分

数的增加, 复合涂层的介电损耗越大; 在测试电压频率 ≥ 50 Hz 时, 纯环氧树脂(EP)和掺杂质量分数为 0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00% 热敏微胶囊的复合涂层的介电损耗角的正切值近似一致。在工频 50 Hz 条件下, 掺杂质量分数为 0.25% 热敏微胶囊的复合涂层介电损耗最小。图 7、图 8 共同表明在微胶囊掺杂质量分数为 0.25% 时保持了环氧复合涂层的优良介电性能。

3.3 复合材料的可逆热变色性能

图 9、图 10 分别显示了掺杂质量分数为 0.25% 热敏微胶囊的复合涂层样品在升温 and 降温过程中的颜色变化。

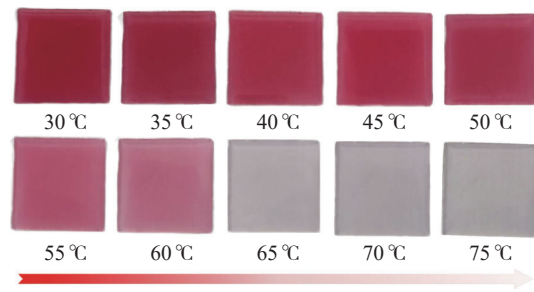


图 9 0.25% 质量分数的微胶囊样品升温变色过程

Fig. 9 Ramp-up discoloration of microencapsulated samples with a mass fraction of 0.25%

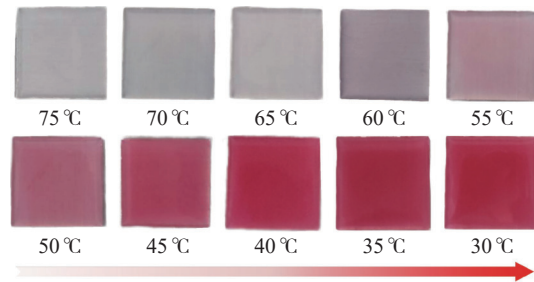


图 10 0.25% 质量分数的微胶囊样品降温变色过程

Fig. 10 Cooling discoloration of microencapsulated samples with a mass fraction of 0.25%

从图 9 中可以看出, 复合涂层升温变色过程。受热温度逐渐升高, 涂层从红色逐渐变得白色透明, 颜色的突变在 60 ~ 65 °C 之间完成。从图 10 中可以看出, 随着温度的降低, 样品颜色逐渐恢复到红色, 与加热前相比, 颜色几乎没有差别, 其颜色的突变同样在 60 ~ 65 °C 之间完成。反复测试表明, 即使在经过多次加热和冷却循环, 该样品仍保持热敏变色的特性, 即制备的复合涂层拥有可逆的变色能力。

3.4 热敏复合绝缘涂层的人工模拟老化特性

本节按照 GB/T 11026.1—2016 标准设计复合材料热老化试验,探索复合材料耐老化性能^[35]。复合涂层样品尺寸为 2.5 mm×2.5 mm×1 mm(长宽厚),样品的热敏微胶囊质量分数为 0.25%。设置老化温度为超过变色温度约 10 ℃、40 ℃,分别确定老化温度为 70 ℃、100 ℃,热老化实验环境为电热干燥箱。设置老化时间周期设置为 1 天,3 天,5 天,⋯,15 天,测量试验前后的质量损失率。为减小实验误差,每组 7 个样品取平均数。

在 70 ℃、100 ℃ 两种不同的老化温度下,复合涂层的质量损失率如图 11 所示。复合涂层的质量损失率均随着老化时间的延长而逐渐增高,质量损失率仍然保持在 0.20% 以下。老化温度越高,复合涂层的质量损失率随之越高。这可能是因为人工模拟的老化在高温下进行,复合涂层内部的局部区域的分子链将会发生断裂、重排,导致试样的质量有所降低。由 2.3 可知热敏微胶囊外壳(三聚氰胺-甲醛树脂)热稳定性好,热分解温度为 300 ℃ 左右。在老化实验时,热敏微胶囊内部尚处于熔融态,但由于老化温度远未达到胶囊外壳的热分解温度,微胶囊外壳仍呈现出致密坚固形态,进而保护内部热敏变色芯材。综上所述,复合涂层具有长期耐老化特性,可实际用于磷酸铁锂电池储能电站的状态监测与局部过热预警。

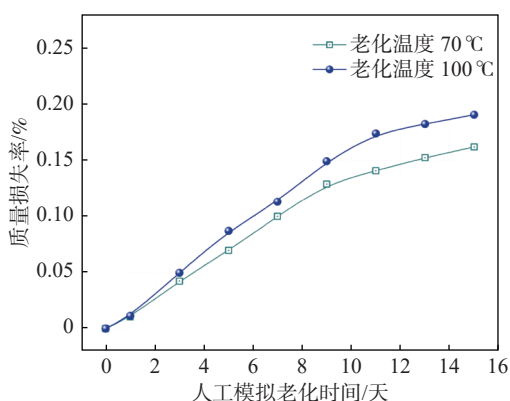


图 11 复合涂层热老化后的质量损失率

Fig. 11 Quality loss rate of composite coatings after thermal ageing

制备的热感知变色涂层材料是以环氧树脂为基体掺杂质量分数为 0.25% 热敏微胶囊构成的,材料本身的制备成本较为低廉。而且,在磷酸铁锂电池

模组外绝缘层上再刷层较薄的热敏涂层后,在锂电池组模块外绝缘层达到 60 ℃ 时立即发生颜色突变,不需要施加外界激励或传感器检测,即可实现对温度场的“无源”可视化表征,实时反馈温度场信息。文章提供了一种局部过热预警技术路线,相比于外施加制作成本和运维成本均高昂的传感器而言,可从材料本身性能出发,赋予电池模组温度感知特性,显著降低储能电站局部过热预警的技术成本。

4 结论

1) 成功制备了热敏微胶囊,其粒径分布均匀,平均粒径为 3.712 μm,在 300 ℃ 以下具有良好的热稳定性能。

2) 热敏复合涂层以环氧树脂作为基体,当掺杂质量分数为 0.25% 的热敏微胶囊时,具有良好的绝缘耐击穿性能及介电性能。热敏复合涂层在热老化 15 天后质量损失率在 0.20% 以下,具有较强耐老化特性。

3) 热敏复合涂层颜色随温度可逆变化,受热后从红色变为白色透明,冷却后重新变回红色,颜色的突变在 60 ℃ 左右完成。后续将研究微胶囊的多温度变色能力,以期实现复合涂层在多温度梯度下变色预警的功能。

4) 热敏涂层的各项性能测试仅是在实验室环境下进行,因此后续将设计模拟储能设备实际运行环境,探究热敏绝缘涂层的预警效果。

5) 热敏涂层后续可应用于锂电池模组内部或舱体内不同位置,将结合色度传感器从而形成模组或整舱温度场建模,实时把控温度状态。

参考文献:

- [1] 李学斌,赵号,陈世龙. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 71-77. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010.
- LI X B, ZHAO H, CHEN S L. Research on energy consumption calculation of prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station [J]. Southern energy construction, 2023, 10(2): 71-77. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010.
- [2] 蔡绍宽. 新型电力系统下的储能解决方案探讨 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 17-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.

- CAI S K. Discussion on energy storage solutions under the new power system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl. 1): 17-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.
- [3] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 555-580. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716.
- LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 555-580. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716.
- [4] 许周, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 53-59. DOI: 10.7500/AEPS20190620005.
- XU Z, SUN Y H, XIE D L, et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(2): 53-59. DOI: 10.7500/AEPS20190620005.
- [5] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨 [J]. *高压技术*, 2021, 47(8): 2751-2759. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201056.
- REN D W, HOU J M, XIAO J Y, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power [J]. *High voltage engineering*, 2021, 47(8): 2751-2759. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201056.
- [6] 张东辉, 徐文辉, 门锬, 等. 储能技术应用场景和发展关键问题 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001.
- ZHANG D H, XU W H, MEN K, et al. Application scenarios of energy storage and its key issues in development [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001.
- [7] 何勇琪, 张建成, 鲍雪娜. 并网型风光储混合发电系统中储能系统容量优化研究 [J]. *华北电力大学学报*, 2012, 39(4): 1-5.
- HE Y Q, ZHANG J C, BAO X N. Optimization of storage capacity in grid-connected wind/PV/storage hybrid system [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2012, 39(4): 1-5.
- [8] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 91-97. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.34.015.
- HAN X J, CHENG C, JI T M, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 91-97. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.34.015.
- [9] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制 [J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(14): 95-100.
- LIU X, JIANG Q Y. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system [J]. *Automation of electric power systems*, 2012, 36(14): 95-100.
- [10] 陈银, 肖如, 崔怡琳, 等. 储能电站锂离子电池火灾早期预警与抑制技术研究综述 [J]. *电气工程学报*, 2022, 17(4): 72-87. DOI: 10.11985/2022.04.009.
- CHEN Y, XIAO R, CUI Y L, et al. Research review on early warning and suppression technology of lithium-ion battery fire in energy storage power station [J]. *Journal of electrical engineering*, 2022, 17(4): 72-87. DOI: 10.11985/2022.04.009.
- [11] 陆志刚, 王科, 刘怡, 等. 深圳宝清锂电池储能电站关键技术及系统成套设计方法 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 65-69. DOI: 10.7500/AEPS201208160.
- LU Z G, WANG K, LIU Y, et al. Research and application of megawatt scale lithium-ion battery energy storage station and key technology [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(1): 65-69. DOI: 10.7500/AEPS201208160.
- [12] 王刚. 磷酸铁锂电池储能系统的设计和研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- WANG G. Design and research of energy storage system of lithium iron phosphate battery [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [13] 王康康, 高飞, 杨凯, 等. 不同健康状态等级的储能磷酸铁锂电池熵变系数及放电产热研究 [J]. *高压技术*, 2017, 43(7): 2241-2248. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170628020.
- WANG K K, GAO F, YANG K, et al. Research of LiFePO₄/C energy storage batteries' entropy coefficient and discharge heat generation based on the state of health [J]. *High voltage engineering*, 2017, 43(7): 2241-2248. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170628020.
- [14] 余毫. 磷酸铁锂储能电池热行为模拟分析 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.001436.
- YU H. Thermal behavior simulation of lithium iron phosphate energy storage battery [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.001436.
- [15] 于子轩, 孟国栋, 谢小军, 等. 磷酸铁锂储能电池过充热失控仿真研究 [J]. *电气工程学报*, 2022, 17(3): 30-39. DOI: 10.11985/2022.03.005.
- YU Z X, MENG G D, XIE X J, et al. Simulation research on overcharge thermal runaway of lithium iron phosphate energy storage battery [J]. *Journal of electrical engineering*, 2022, 17(3): 30-39. DOI: 10.11985/2022.03.005.
- [16] 李奎杰, 楼平, 管敏渊, 等. 锂离子电池热失控多维信号演化及

- 耦合机制研究综述 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 899-912. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0694](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0694).
- LI K J, LOU P, GUAN M Y, et al. A review of multi-dimensional signal evolution and coupling mechanism of lithium-ion battery thermal runaway [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(3): 899-912. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0694](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0694).
- [17] 程志翔, 曹伟, 户波, 等. 储能用大容量磷酸铁锂电池热失控行为及燃爆传播特性 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 923-933. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0690](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0690).
- CHENG Z X, CAO W, HU B, et al. Thermal runaway and explosion propagation characteristics of large lithium iron phosphate battery for energy storage station [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(3): 923-933. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0690](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0690).
- [18] 吴静云, 黄峥, 郭鹏宇. 储能用磷酸铁锂(LFP)电池消防技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(3): 495-499. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0010](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0010).
- WU J Y, HUANG Z, GUO P Y. Research progress on fire protection technology of LFP lithium-ion battery used in energy storage power station [J]. *Energy storage science and technology*, 2019, 8(3): 495-499. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0010](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0010).
- [19] CIVAN L, KURAMA S. A review: preparation of functionalised materials/smart fabrics that exhibit thermochromic behaviour [J]. *Materials science and technology*, 2021, 37(18): 1405-1420. DOI: [10.1080/02670836.2021.2015844](https://doi.org/10.1080/02670836.2021.2015844).
- [20] LI X H, LIU C, FENG S P, et al. Broadband light management with thermochromic hydrogel microparticles for smart windows [J]. *Joule*, 2019, 3(1): 290-302. DOI: [10.1016/j.joule.2018.10.019](https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.019).
- [21] LE T K, PHAM P V, DONG C L, et al. Recent advances in vanadium pentoxide (V_2O_5) towards related applications in chromogenics and beyond: fundamentals, progress, and perspectives [J]. *Journal of materials chemistry C*, 2022, 10(11): 4019-4071. DOI: [10.1039/d1tc04872d](https://doi.org/10.1039/d1tc04872d).
- [22] 李瑞珍, 赵珍, 娄鸿飞, 等. 有机热致变色材料的波长相关光老化机制研究 [J]. *化学工业与工程*, 2023. DOI: [10.13353/j.issn.1004.9533.20220330](https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20220330).
- LI R Z, ZHAO Z, LOU H F, et al. Wavelength-dependent photoaging mechanism of organic thermochromic materials [J]. *Chemical industry and engineering*, 2023. DOI: [10.13353/j.issn.1004.9533.20220330](https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20220330).
- [23] ABURAS M, SOEBARTO V, WILLIAMSON T, et al. Thermochromic smart window technologies for building application: A review [J]. *Applied energy*, 2019, 255: 113522. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.113522](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522).
- [24] 籍晓倩. 光诱导热变色聚氨酯制备及性能 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- JI X Q. Preparation and performance of UV-induced thermochromic polyurethane [D]. Wuxi: Jiangnan University.
- [25] 梁琛. 磁靶向紫外光敏微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料的自修复特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LIANG C. Self-healing properties of magnetic targeting UV-polymerization microcapsule/epoxy resin insulation composite [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [26] SIMA W X, LI Z H, SUN P T, et al. Thermochromic insulation materials for thermal sensing and overheat prewarning [J]. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 2022, 29(5): 1727-1734. DOI: [10.1109/TDEI.2022.3195124](https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3195124).
- [27] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 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.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Insulating materials-Test methods for electric strength-Part 1: Test at power frequencies: GB/T 1408.1—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [28] SUN P T, LI C, SIMA W X, et al. Super electrical insulating materials based on Honeycomb-inspired nanostructure: high electrical strength and low permittivity and dielectric loss [J]. *Advanced electronic materials*, 2022, 8(4): 2100979. DOI: [10.1002/aelm.202100979](https://doi.org/10.1002/aelm.202100979).
- [29] SUN P T, LIU F Q, SIMA W X, et al. A novel UV, moisture and magnetic field triple-response smart insulating material achieving highly targeted self-healing based on nano-functionalized microcapsules [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(6): 2199-2209. DOI: [10.1039/d1nr04600d](https://doi.org/10.1039/d1nr04600d).
- [30] 梁琛, 司马文霞, 孙魄韬, 等. 单组分光敏微胶囊/纳米SiO₂/环氧树脂复合绝缘介质的自修复特性 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(6): 1564-1571.
- LIANG C, SIMA W X, SUN P T, et al. Self-healing property of one-component photosensitive microcapsule/nano-SiO₂/epoxy composite dielectric [J]. *Transactions of china electrotechnical society*, 2022, 37(6): 1564-1571.
- [31] SUN P T, ZHAO M K, SIMA W X, et al. Microwave-magnetic field dual-response raspberry-like microspheres for targeted and repeated self-healing from electrical damage of insulating composites [J]. *Journal of materials chemistry C*, 2022, 10(28): 10262-10270. DOI: [10.1039/d2tc01693a](https://doi.org/10.1039/d2tc01693a).

- [32] CHIU H T, CHIU S H, WU J H. Study on mechanical properties and intermolecular interaction of silicone rubber/polyurethane/epoxy blends [J]. *Journal of applied polymer science*, 2003, 89(4): 959-970. DOI: 10.1002/app.12165.
- [33] PARK S J, JIN J S. Energetic studies on epoxy-polyurethane interpenetrating polymer networks [J]. *Journal of applied polymer science*, 2001, 82(3): 775-780. DOI: 10.1002/app.1903.
- [34] LIN S P, HAN J L, YEH J T, et al. Composites of UHMWPE fiber reinforced PU/epoxy grafted interpenetrating polymer networks [J]. *European polymer journal*, 2007, 43(3): 996-1008. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2006.12.001.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电气绝缘材料耐热性 第1部分: 老化程序和试验结果的评定: GB/T 11026.1—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electrical insulating materials-Thermal endurance properties-Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results: GB/T 11026.1—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

作者简介:



牛朝露

牛朝露 (第一作者)

1999-, 男, 博士在读, 主要从事新型电工材料微纳结构设计与调控、功能电介质材料研发与应用等方面的研究工作 (e-mail) niuchaolu@cqu.edu.cn。

李泽浩

1997-, 男, 硕士, 主要从事特高压输电变电试验及热感知绝缘材料的研究工作 (e-mail) lizehao@cqu.edu.cn。

司马文霞

1965-, 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事电磁暂态感知、建模、分析与防护等研究工作 (e-mail) cqsmwx@cqu.edu.cn。



孙魄韬

孙魄韬 (通信作者)

1989-, 男, 博士, 副教授, 博导 主要从事电力系统电力装备绝缘失效与防御技术等方面的研究工作 (e-mail) sunpotao@cqu.edu.cn。

袁涛

1976-, 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事复杂环境下的接地理论及接地材料的研究工作 (e-mail) yuantaocq@cqu.edu.cn。

杨鸣

1987-, 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事交直流电网电磁暂态特性分析与防护、变压器类装备电磁暂态建模与应用、新型直流装备电磁暂态建模与应用的研究工作 (e-mail) cqucee@cqu.edu.cn。

方正

2000-, 男, 硕士, 主要从事绝缘设备应力感知和损伤监测的研究工作 (e-mail) 202211021031@stu.cqu.edu.cn。

刘奇昌

2000-, 男, 硕士, 主要从事新型电工材料微纳结构设计与调控, 绝缘材料智能感知和损伤防护技术研究工作 (e-mail) 202211021083t@stu.cqu.edu.cn。

金云帆

2002-, 男, 电气工程专业学士学位在读, 主要从事高压输电变电试验及绝缘材料合成制备等研究工作 (e-mail) jinyunfan@stu.cqu.edu.cn。

(编辑 叶筠英)