第 50 卷 第 1 期：322-330　　高电压技术　　Vol.50, No.1: 322-330
2024 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221774

用于干式空心电抗器热致缺陷的可逆示温涂料制备与变色理化特性

董冰冰，武　奔，孟　岩
（合肥工业大学电气与自动化工程学院，合肥 230009）

摘　要：电抗器包封的异常发热问题较为突出，易引起匝间绝缘故障导致设备损坏。为了及时检测异常发热，提出一种用于干式空心电抗器热致缺陷的可逆示温涂料制备方法，并对其变色性能、电学及热学性能进行分析。研究结果表明：显色剂双酚 A 决定变色材料的颜色深浅，其含量的增大使得其颜色先变深后缓慢变浅；溶剂聚丙烯蜡决定变色温度，其含量越高，变色开始温度越高，变色结束温度并不明显。进一步基于变色材料的颜色变化、变色时间、复色时间、变色温度及可逆性等影响因素，优选出变色材料最佳组分(结晶紫内酯，双酚 A，聚丙烯蜡)含量配比。采用搅拌混合法制备出可用于干式空心电抗器热致缺陷的可逆示温涂料，其变色温度范围为 107~131 ℃，变色效果较为明显，并具有良好的耐酸碱性和有机溶剂性；其沿面闪络电压随变色材料组分含量的增加先增大后减小，持久性就地型防污闪复合涂料(permanent-room-temperature-valcaniced anti-contamination flashover composite coating, PRTV)与变色材料质量比为 10:3.4 时达到峰值 9.27 kV/cm；导热系数为 0.2514~0.5806 W/(m·K)，并随组分含量增加而降低。研究成果可为干式空心电抗器热致缺陷温度在线检测提供方法参考。
关键词：干式空心电抗器；热致缺陷；可逆示温；涂料；沿面闪络；导热系数

Preparation of Reversible Thermochromic Coatings for Dry Hollow Reactors with Thermal Defects and the Physicochemical Properties of Discoloration

DONG Bingbing, WU Ben, MENG Yan
(School of Electrical Engineering and automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The abnormal heat problem of reactor envelope is serious, leading to insulation failure and equipment damage. For timely detection of abnormal heat, a reversible temperature indication method using coating test is proposed to identify the thermal defect of dry hollow reactor. The colour change properties and the electrical and thermal properties are also studied and analyzed. The results show that the color shade of color changing material is determined by Bisphenol A color developer. The color first darkens and then slowly lightens as the content increases. The color change temperature is based on the polypropylene wax solvent. The higher the content is, the higher the temperature at the beginning of color change will be, which is not obvious at the end of color change. Based on the color change, color change time, recolorization time, color change temperature and reversibility of material, the best ratio of components (crystalline violet lactone, bisphenol A, polypropylene wax) are obtained. For temperature indication coating produced by stirring and mixing, the color change temperature ranges from 107 ℃ to 113 ℃. The color change is obvious, and it has good acid-alkaline resistance and organic solvent. With increasing component content of color changing material, the flashover voltage along surface increases and then drops,and it reaches the peak of 9.27 kV/cm when PRTV to colour change material mass ratio of 10:3.4. The thermal conductivity ranges 0.2514~0.5806 W/(m·K), which decreases as the component content of color changing material increases. Consequently, a reference for the temperature online detection of thermal defects in dry hollow reactor is provided.
Key words: dry hollow reactor; thermal defect; reversible temperature indication; coating; surface flashover; thermal conductivity

基金资助项目：南方电网公司科技项目(031900KK52220038(GDKJXM20220726))；国家自然科学基金(52107142)。
Project supported by Science and Technology Project of the China Southern Power Grid (031900KK52220038(GDKJXM20220726)), National Natural Science Foundation of China (52107142).

0　引言

电抗器是重要的无功补偿装置，优化电力系统运行电压质量、降低电网无功损耗，且结构简单、安装方便，在电网中得到广泛应用[1-4]。室外运行环境恶劣，且受季节性负荷波动影响，对电力设备运行要求更为严苛，其中电抗器绝缘故障问题较为突出，严重时会造成电抗器烧毁故障，易引发电网停电事故[5-7]。国内外资料表明：干式空心电抗器包封的异常发热是引发电抗器绝缘故障的重要原因[8-10]。正常运行时，其包封温度一般为 60~110 ℃，长期热效应累积作用导致绕组匝间聚酯薄膜易发生分解，匝间绝缘能力明显下降；此外，温度过高会造成局部过热鼓包，引起包封绝缘损坏，劣化发展为匝间短路事故。因此，开展干式空心电抗器的热致缺陷检测方法研究具有重要意义[11-12]。

电力设备异常发热温度检测方法主要包括红外测温、热电偶测温及光纤测温[13-15]。红外测温具有测量范围大、灵敏度高的特点，但易受环境因素影响；此外户外环境恶劣，红外测温不能实时监测设备温度，运维成本高且无法及时发现故障缺陷；热电偶结构简单，测温准确度较高、范围广，但其抗噪能力和测温灵敏度有待提高，并需要定期人工检定，运维工作量大；光纤测温测量精度高，体积小、运行方便，但存在光纤与传感器接头的光耦合问题，如轴偏离、角度倾斜造成的耦合损耗，并对机械振动较为敏感。因此，借助于变电站现有在线监控系统，开发一种可逆示温涂料的温度检测方法具有重要的应用价值。

近年来，热致变色材料成为研究人员关注的热点，作为一种新型测温技术已广泛应用于纺织、医疗和印刷领域[16-17]。目前，针对电力设备发热故障检测，已有学者对不可逆热致变色材料进行了研究[18]，但对可逆热致变色材料的研究较少。谷山强等人制备了一种变色温度为 150 ℃的不可逆热致变色涂料，并应用于输电线路金具上[19]。许哲源等人发明了一种用于电子产品外壳涂覆的可逆热敏变色涂料，变色范围为 0~39 ℃[20]。邹宝根利用特殊改性树脂、环保型溶剂和电子转移型有机化合物，制备了一种适用于金属、玻璃和陶瓷的热致变色涂料[21]。胡琴等人采用萘作为有机溶剂制备了一种三芳甲烷类有机可逆示温涂料，超过 80 ℃时变为无色，并在低于 80 ℃时恢复涂料原本颜色，为电力设备一般性发热缺陷热致变色材料制备提供了研究思路[22]。干式空心电抗器热致缺陷温度为 110 ℃，严重故障时高达 130 ℃，现有 80 ℃以下的热致变色涂料尚不能完全满足电网现场应用需求。

本文采用 3 组分可逆变色材料制备示温涂料，选取合适的发色剂、显色剂和溶剂制备并优选出最佳配比的变色材料，并以持久性就地成型防污闪复合涂料(permanent-room-temperature-vulcanized anti-contamination flashover composite coating, PRTV)作为漆基制备示温涂料样品，测试其变色性能、电学及热学性能，研究成果可为电抗器包封热致缺陷检测提供参考。

1　试验样品制备及其性能测试方法

1.1　试剂组分与试验仪器

通过资料调研并结合干式空心电抗器发热缺陷温度规定[23]，本文研究所用试剂组分包括：发色剂选用结晶紫内酯；显色剂选用双酚 A[22,24-25]；溶剂选用聚丙烯蜡；PRTV；无水乙酸；盐酸、氢氧化钠、乙酸乙酯。

试验仪器包括：集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S)；电子分析天平(FA124)；真空干燥箱(LDZF-6020)；Fourier 红外光谱仪(Nicolet iS10)；多功能快速导热系数测试仪(DRE-III)；交流沿面放电试验研究平台。

1.2　样品制备

1.2.1　变色材料的制备

本文采用 3 组分法制备变色材料，选取结晶紫内酯作为电子给予体，双酚 A 作为电子接受体，溶剂选用聚丙烯蜡，反应方程式如图 1 所示。结晶紫内酯具有内酯环结构，低温时与双酚 A 作用发生电子转移，中心碳原子的烷氧键断裂形成正碳离子结构，sp^3 转化为 sp^2 杂化，此时正碳离子不稳定，连接在中心碳原子上的 3 个取代苯能形成大的双共轭体系，对正碳离子具有稳定作用，即形成共轭发色结构，从而使得样品呈现蓝色。加入溶剂聚丙烯蜡的作用是借助溶剂固化的环境，使开环的内酯难以再恢复闭合，从而使共轭发色结构稳定存在；当温度升高溶剂软化以致液化时，分子发生电离，H^+游离并与 C—O—C 中氧原子分离，中心碳原子恢复单键，结晶紫内酯又恢复内酯环结构，共轭发色结构消失，样品颜色褪去。

采用熔融法制备变色材料，试剂制备过程如图 2 所示。将结晶紫内酯、双酚 A、聚丙烯蜡按照一

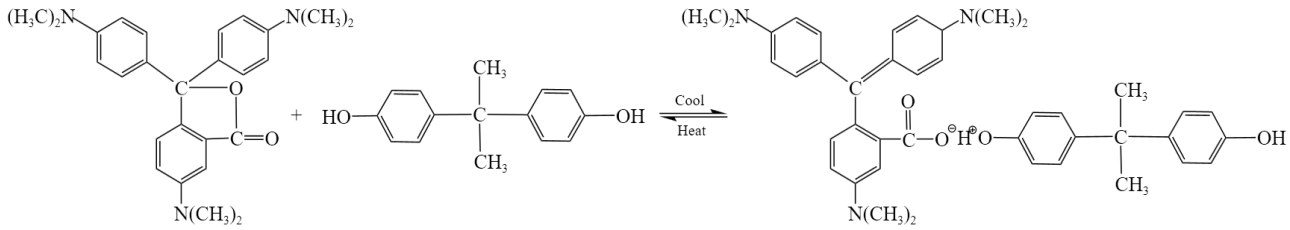


图 1 结晶紫内酯和双酚 A 反应方程式

Fig.1 Reaction equation of crystal violet lactone and bisphenol A

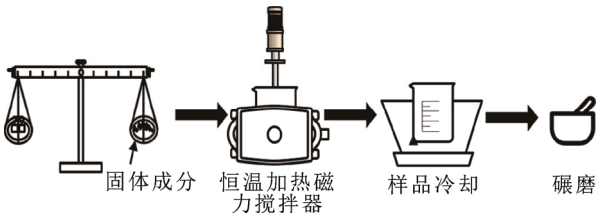


图 2 变色材料制备流程

Fig.2 Preparation process of color changing material

定质量配比称取，将称取的溶剂置于烧杯中并放入恒温加热磁力搅拌器中加热，温度设置为 145 ℃，待溶剂全部融化后依次放入结晶紫内酯和双酚 A，振荡均匀后放入搅拌子，转速设置为 800 r/min，并连续加热搅拌 30 min。然后自然冷却 24 h 得到凝固的蓝色变色材料，将其在陶瓷研钵中碾磨，并通过 80 目标准目筛筛选出小于 180 μm 的蓝色变色粉末备用。改变上述材料中的质量配比(见表 1)，制备出不同组分配比的可逆变色材料。

1.2.2 示温涂料的制备

由于变色材料本身不具备粘附性，无法在设备表面直接使用，因此为便于现场实际应用，本文将变色材料制成示温涂料。采用 PRTV 作为漆基，与变色材料混合后抽真空搅拌均匀，将其倒入自制模具中，自然情况下放置 24 h 进行固化。

1.3 样品性能测试方法

1.3.1 变色材料测试

1）红外光谱：将等摩尔比的结晶紫内酯与双酚 A 在丙酮溶剂中充分溶解混合并完全挥发形成蓝色固体，使用 Fourier 红外光谱仪 Nicolet iS10 进行测定。

2）变色温度：取 2 g 同一组分样品，设定油浴锅起始温度为 100 ℃，采用匀速升温法对样品进行加热，升温速度为 1 ℃/min，记录变色材料开始和终止变色温度值，测试 3 组样品取平均值。

3）变色时间：变色材料自然冷却凝固后，将

表 1 可逆变色材料的质量配比

Table 1 Mass proportioning of reversible color changing material

编号	配比	编号	配比
1	1:1:30	9	1:1:50
2	1:2:30	10	1:2:50
3	1:4:30	11	1:4:50
4	1:6:30	12	1:6:50
5	1:1:40	13	1:1:60
6	1:2:40	14	1:2:60
7	1:4:40	15	1:4:60
8	1:6:40	16	1:6:60

注：表中配比为结晶紫内酯、双酚 A、聚丙烯蜡的质量比。

真空干燥箱设置成 140 ℃，样品开始发生变色时计时，直至完全变色的时刻即为变色时间，测试 3 组取平均值。

4）复色时间：将完全褪色的变色材料样品迅速放置在常温(25±1) ℃中自然冷却，样品局部发生变色计时，直至完全复色的时刻即为复色时间，测试 3 组取平均值。

5）变色可逆性：将同一组分的 3 组样品置于 140 ℃的恒温油浴锅中加热至变色，随后取出放入 60 ℃恒温水浴中冷却，直至颜色完全恢复，上述样品循环测试 20 次。

6）颜色表征：为对变色材料颜色变化准确表征，采用色调(H)、饱和度(S)和明度(V)(hue saturation value，HSV)颜色空间模型。样品颜色变化过程使用尼康 D750 相机记录，利用 python 软件对图像提取饱和度 S 值，通过 S 值定量表征示温涂料变色深浅[26-27]。

1.3.2 示温涂料测试

1）耐候性能：根据 GB/T 9274—1988《色漆和清漆耐液体介质的测定》，本文采用浸泡法对涂料样品测试耐酸碱性，同一组分测试 3 组，每组测试时间为 12 h。

2）绝缘性能：涂料样品的沿面放电试验原理

如图 3 所示，由控制台、100 kV 试验变压器、5 kΩ 保护电阻和 1000 pF 电容分压器构成试验回路，样品为直径 40 mm、厚度 2 mm 的圆片，测试在(25±1) ℃环境下进行，按照标准 GB/T 1408.1—2016/IEC 60243-1: 2013，采用慢速升压试验方法，升压速率为 0.5 kV/s，测试 3 组取平均值。

3）散热性能：根据 GB/T 32064—2015 和 ISO 22007-2: 2008，导热系数的测量技术标准[28-29]，采用 DRE-III 导热系数测试仪测量涂料样品的导热系数，测试平台如图 4 所示，其分辨率可达 0.001 W/(m·K)。样品为直径 40 mm、厚度 2 mm 的圆片，测试采用瞬态平面热源法，探头半径为 15 mm，测试时探头置于两片相同样品之间，测试功率为 0.1 W，分析样本次数为 110，测试 3 组取平均值。

4）导热应用测试：将样品置于微加热台上加热，设置恒定温度并加热 20 min 使样片表面温度稳定，测定样品表面温度。样品为均匀涂覆示温涂料的长 100 mm、宽 50 mm、厚度 0.5 mm 的环氧树脂玻璃纤维板，涂覆厚度为(0.4±0.05) mm，并设置未涂覆示温材料的环氧树脂玻璃纤维板作为对照，测试 5 组取平均值。

2　试验结果及分析

2.1　材料变色性能

2.1.1　Fourier 红外光谱测试结果

结晶紫内酯及与双酚 A 反应后产物的红外光谱如图 5 所示。对比结晶紫内酯的红外光谱可以发现，结晶紫内酯和双酚 A 反应产物分子结构发生了改变，结晶紫内酯中的酯羰基伸缩振动吸收峰在 1742 cm^{-1} 消失，在 1722 cm^{-1} 出现新的吸收峰，同时在 3300~2500 cm^{-1} 也存在部分—COOH 的特征峰。由此可以看出，在双酚 A 的作用下，结晶紫内酯发生开环形成了共轭发色结构。

此外，在 1608 cm^{-1} 处出现苯环共轭体系的 C=C 振动吸收峰，苯环与 C=C 相邻时，由于苯环与之的共轭作用，因此 1608 cm^{-1} 的吸收峰进一步分裂，在 1582 cm^{-1} 处出现一个新的吸收峰，羧酸盐的反对称伸缩谱带在 1610~1560 cm^{-1} 范围内，也同样说明结晶紫内酯与双酚 A 反应发生开环并产生了共轭发色结构。

2.1.2　不同组分配比变色材料的颜色特性

不同组分配比的可逆变色材料变色前饱和度值 S 变化如图 6 所示。分析得到，结晶紫内酯和双酚 A 的质量配比保持不变时，增大聚丙烯蜡质量，变色材料的饱和度逐渐降低，即样品颜色渐进变浅；而结晶紫内酯和聚丙烯蜡质量配比不变时，随着双酚 A 质量的增加，其饱和度值将先增大后缓慢减小，即样品颜色先变深后逐渐变浅，并较改变聚丙烯蜡含量时引起的颜色变化幅度更为明显。

分析原因主要是，变色材料中共轭发色结构含量决定了样品颜色深浅，取固定质量变色材料样品测试，在结晶紫内酯与双酚 A 质量配比相同时，增加聚丙烯蜡质量，则结晶紫内酯与双酚 A 组分质量

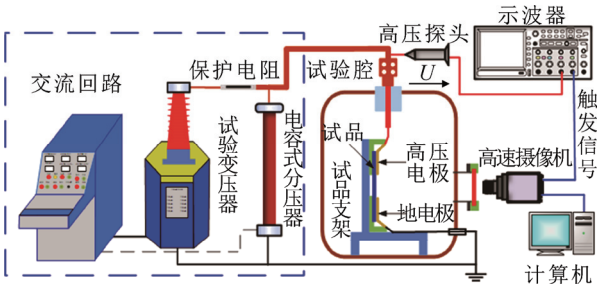


图 3　交流沿面放电试验平台

Fig.3　Test platform of AC discharge along the surface

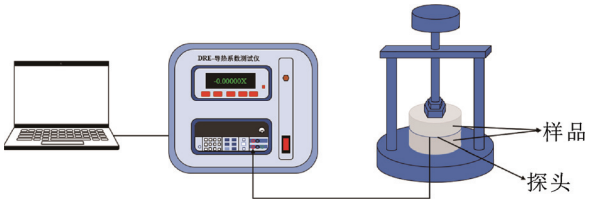


图 4　导热系数试验平台

Fig.4　Test platform of thermal conductivity

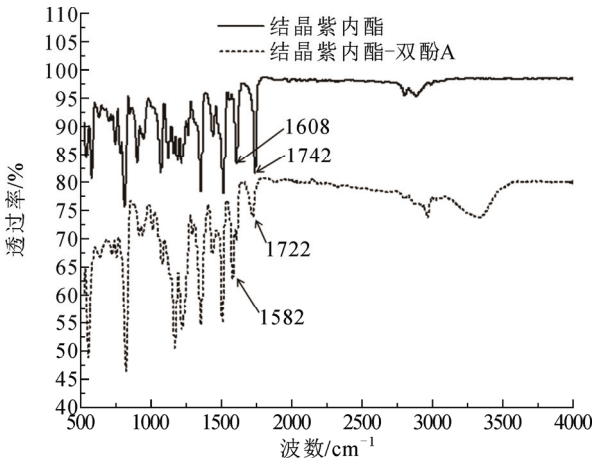


图 5　结晶紫内酯及与双酚 A 反应产物红外光谱图

Fig.5　Infrared spectra of crystalline violet lactone and reaction products with bisphenol A

占比同步降低，所产生的共轭发色结构数量越少，即样品颜色越浅。此外，结晶紫内酯的摩尔质量为 416 g/mol，双酚 A 的摩尔质量为 228 g/mol，当结晶紫内酯和聚丙烯蜡组分比例不变时，双酚 A 质量增加，样品中的共轭发色结构含量也随之增加，即材料颜色越深。但当结晶紫内酯与双酚 A 比例达到饱和后，其饱和度逐渐减小，这是因为在一定样品质量条件下，双酚 A 质量的增加将导致结晶紫内酯和溶剂含量略微减小，但溶剂含量远大于其他组分含量，因此结晶紫内酯含量的下降对共轭发色结构的形成影响更大，引起发色结构的含量减小，故相较于饱和状态颜色会略微变浅。

2.1.3 不同组分配比材料变色温度特性

不同组分配比变色材料的变色开始温度、变色结束温度变化如图 7 所示。分析得到：各组分变色材料变色开始温度在 104~117 ℃之间，变色结束温度在 130~133 ℃之间，变色温度范围为 16~26 ℃。结晶紫内酯和双酚 A 质量配比保持不变时，随着溶剂聚丙烯蜡质量的增加，变色开始温度逐渐上升，最大变色温度差异为 13 ℃，而变色结束温度最大偏差仅为 3 ℃。结晶紫内酯和聚丙烯蜡质量配比保持不变时，双酚 A 质量增加会造成变色开始温度略微上升，但差异较小，最大偏差仅为 2 ℃；相较于双酚 A 质量的变化结果，聚丙烯蜡质量的变化对变色开始温度的影响更加明显，其组分含量越低，越易优先发生变色。

分析原因主要是：1）低分子量聚丙烯蜡的熔点范围为 140~145 ℃，在 130 ℃时可达到完全软化态，尽管此时变色材料尚未处于熔化状态，但在分子热运动的作用下，H^+处于游离状态，与 C—O—C 中氧原子分离，中心碳原子恢复单键，共轭发色结构消失，变色材料发生完全褪色。因此，随着双酚 A 和聚丙烯蜡质量配比的变化，材料变色结束温度未见明显变化。2）变色材料只有在软化和熔化状态下才会发生电子转移，进而引起共轭发色结构消失，样品褪色，溶剂聚丙烯蜡质量对材料的变色开始温度影响更为明显。随着聚丙烯蜡质量的增加，其他组分含量占比随之减少，共轭发色结构数量缩减，相同温度下发生电子转移的概率降低，必须继续提高温度以增加分子热运动，进而使得材料的起始变色温度上升。

2.1.4 不同组分配比材料的变色可逆性

不同组分质量配比的变色材料变色后的饱和度如图 8 所示。分析可知：结晶紫内酯与双酚 A 质

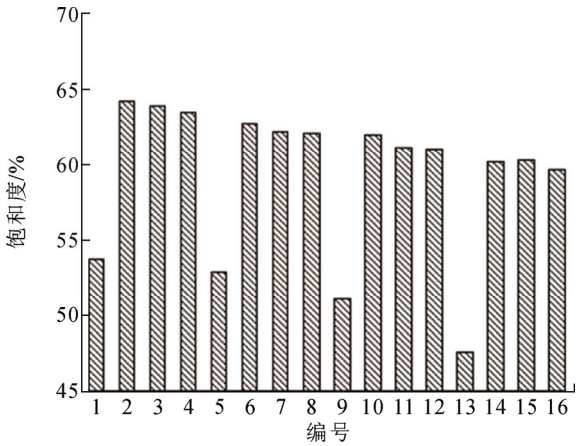


图 6 不同材料组分质量配比的饱和度

Fig.6 Saturation with different content ratios of material components

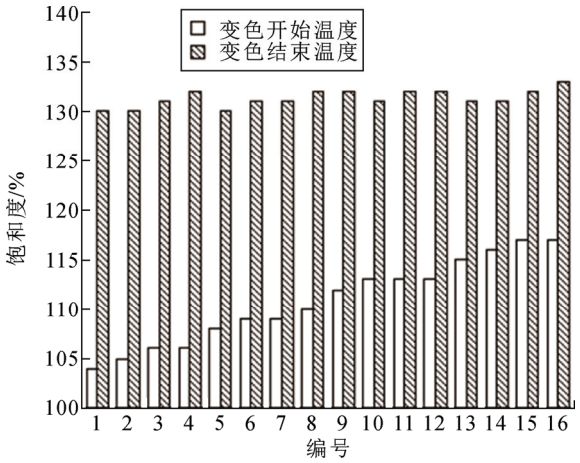


图 7 不同材料组分质量配比的变色温度变化

Fig.7 Variation of discoloration temperature for different material component content ratios

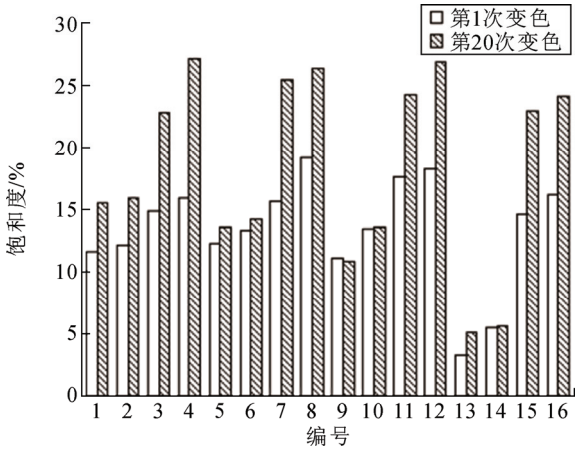


图 8 不同材料组分质量配比对变色可逆性的影响

Fig.8 Effect of color change reversibility for different material component content ratios

量配比为 1:1、1:2 时，第 20 次变色后和第 1 次变色后饱和值差异并不明显，说明此组分质量配比的变色材料可逆性较好。结晶紫内酯与双酚 A 质量配比为 1:4 和 1:6 时，样品变色后的饱和度相较于含量配比为 1:1 和 1:2 时会显著提高，变化范围为 16.5%~220%。分析原因主要是，结晶紫内酯和双酚 A 摩尔质量比低于 1:1 时，双酚 A 含量远大于理论反应值，残留在溶剂中的双酚 A 逐渐达到饱和，与结晶紫内酯继续反应生成共轭发色结构，进而引起变色材料变色后仍显色。

2.1.5　不同组分配比材料变色时间

不同组分质量配比的变色材料变色时间对比如图 9 所示。分析可知：1）各组分变色材料的变色时间为 41~65 s，复色时间为 22~32 s。随着双酚 A 质量的增加，变色时间和复色时间均呈现先增大后稳定的趋势。这是因为，随着双酚 A 质量的增加，变色材料体系内共轭发色结构数量不断增加，同一温度下，只有提高加热时间或延长冷却时间，共轭发色结构才会完全恢复或消失，故变色材料完全变色和复色的时间随之增大。而共轭发色结构达到饱和之后，其数量会趋于稳定，变色和复色时间也将趋于稳定。2）随着聚丙烯蜡质量的增加，变色材料变色时间和复色时间随之降低。主要是因为，溶剂聚丙烯蜡的比热容和导热系数随着温度的上升而增大，与外界进行热交换的速率也随之提升，变色材料自身温度更趋向于稳定，温度发生变化需要吸收更多能量。因此，随着溶剂比例的不断增加，材料的变色时间和复色时间也会相应提高。

综上，通过对比不同组分质量配比的变色材料变色性能，优选出变色材料最佳质量配比为 1:2:60。

2.2　示温涂料理化性能

2.2.1　涂料耐候性能

在 2.1 节基础上，采用质量配比为 1:2:60 的变色材料制备示温涂料，变色材料与 PRTV 质量配比为 10:3，混合搅拌后加入自制模具中自然冷却 24 h，制备成直径为 40 mm、厚度为 2 mm 的圆形样品，并测试其变色性能。测试得到涂料的变色温度范围为 107~131 ℃，变色时间为 57 s，复色时间为 33 s，变色过程如图 10 所示。分析得到：该配比的示温涂料温度变色范围为 24 ℃，温度升高时，涂料颜色由蓝色渐变为白色，温度升高引起的颜色变化较为明显，变色温度可以满足干式空心电抗器热致缺陷温度检测技术要求。

可逆示温涂料样品耐酸碱性测试结果如表 2 所示。分析得到：可逆示温涂料具有良好的耐酸碱性，经过无水乙酸浸泡之后同样具有较好的变色性能，但乙酸乙酯浸泡后，涂料表层与乙酸乙酯接触部分发生褪色，涂料内部颜色保持不变，仍具有良好的可逆变色性能。

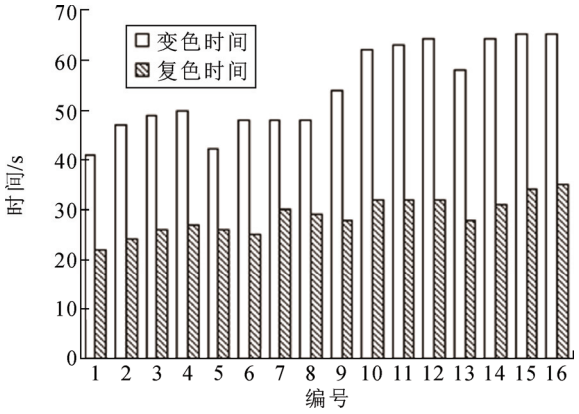


图 9　不同材料组分质量配比的变色时间变化

Fig.9　Variation of discoloration time for different material component content ratios

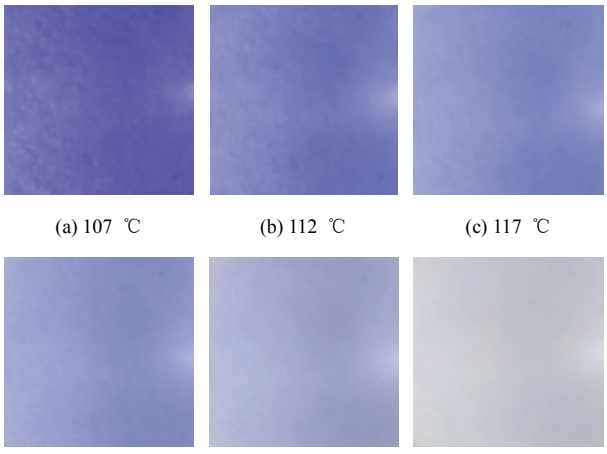


图 10　不同温度下的颜色变化

Fig.10　Color change at different temperatures

表 2　可逆示温涂料浸泡试验结果

Table 2　Immersion test results of reversible thermochromic coatings

试剂	浸泡时间/h	变色可逆性	是否褪色
10%NaOH	12	可逆	不褪色
10%HCl	12	可逆	不褪色
无水乙酸	12	可逆	不褪色
乙酸乙酯	12	可逆	表面褪色

2.2.2 涂料电气性能

采用质量配比为 1:2:60 的变色材料与 PRTV 进行不同质量比混合搅拌，进而制备成示温涂料，并对样品进行沿面闪络测试，结果如图 11 所示。分析可知：

1）样品的沿面闪络电压在 9.07~9.27 kV/cm 范围内，随着变色材料与 PRTV 质量配比的增大，沿面闪络电压先增大后减少。根据电子触发极化松弛理论，沿面闪络形成过程为：阴极电极与绝缘材料结合处产生一次电子，一次电子在电场作用下向阳极运动，并不断与绝缘材料表面发生碰撞产生二次电子，进而形成电子雪崩，最后引发绝缘材料表面贯穿性闪络放电。由于变色材料粉末粒径为 0.18 mm，导致涂料样品表面存在细微颗粒凸起，增加了表面粗糙度。提高变色材料含量，表面粗糙度随之增大，即增加了样品表面沟槽的数量和深度，致使电子的爬电距离增大，同时二次电子倍增过程受到阻碍，使得形成贯穿性放电的难度增大。同时，入射进槽内电子的运动轨迹会被槽壁束缚，这部分电子在运动的过程中无法获得足够的能量，导致二次电子倍增过程受限；此外，部分二次电子从槽内沿不合适方向发射，无法产生新的二次电子倍增，也会显著降低二次电子的数量，进而影响贯穿性通道的形成，因此沿面闪络电压逐渐增大。

2）当 PRTV 与变色材料质量比增加到 10:3.4 后，沿面闪络电压随着变色材料含量的增加而减小。这是因为继续增大样品表面粗糙度，表面的凹凸不平将使得电场分布更加不均匀，易造成局部场强发生严重畸变。同时，由于样品表面粗糙度增加，阴极无法与样品表面完全贴合，造成阴极和样品之间空隙增加，此处间隙场强大大提升，为绝缘薄弱区，易先产生初始电子。外施电压较低时，在这些绝缘薄弱区处早已产生了初始电子发射，这些初始电子在电场作用下，会不断撞击样品表面，产生二次电子倍增现象，进而导致贯穿性放电通道。因此随着变色材料含量的增加，沿面闪络电压有所降低。

2.2.3 涂料导热性能

对不同质量配比的样品进行导热系数及应用测试，结果如图 12 及表 3 所示。分析可知：

1）纯 PRTV 涂料导热系数为 0.6452 W/(m·K)，4 种组分配比涂料的导热系数随着变色材料组分含量的增加而减小，约为 0.2514~0.5806 W/(m·K)，均小于所使用的 PRTV。这是因为变色材料中的聚丙烯蜡占比较大，对示温涂料导热性能影响占据主导地位。聚丙烯蜡属于高分子聚合物，导热系数为 0.15~0.24 W/(m·K)，其导热性能较差，示温涂料中加入聚丙烯蜡会降低导热系数，且随着组分含量的增加，其导热系数随之减小。2）变色材料组分含量增加，使示温涂料体系中粒子数目增多，促进了两相界面的产生，声子在相界面的散射作用增强，降低了能量传递效率，因此涂料的导热系数不断下降。

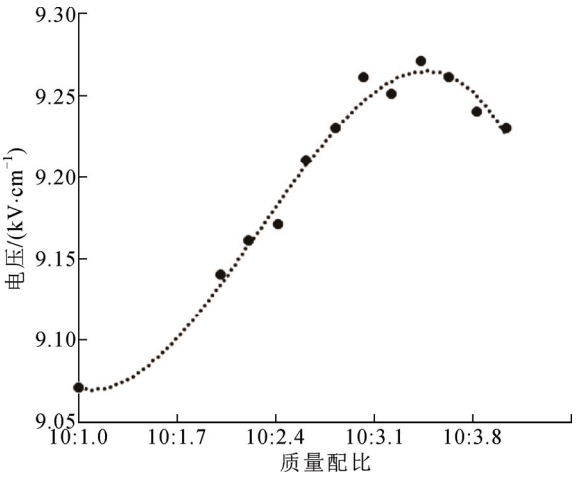


图 11 样品的沿面闪络电压

Fig.11 Flashover voltage along the surface of the sample

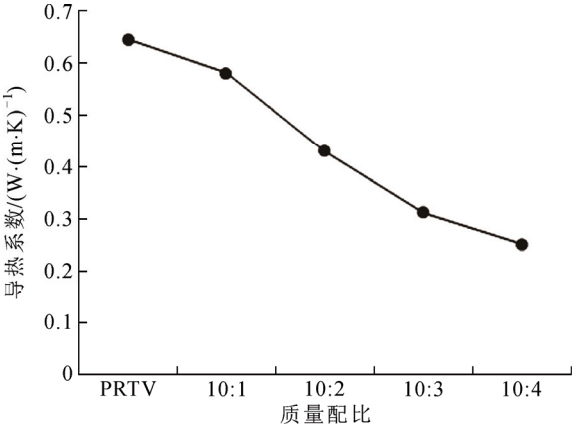


图 12 样品的导热系数变化

Fig.12 Variation of the sample thermal conductivity

表 3 导热性能的应用试验结果

Table 3 Application test results for thermal conductivity

温度设置/℃	不同质量配比下的导热系数/(W·(m·K)⁻¹)									
	无涂覆	10:2.2	10:2.4	10:2.6	10:2.8	10:3.0	10:3.2	10:3.4	10:3.6	10:3.8
50	44.2	43.8	42.8	44.2	44.1	43.9	44.0	44.7	43.8	44.6
80	74.8	75.4	71.2	75.0	74.2	75.0	74.8	76.5	73.0	76.1
110	106.2	106.3	101.0	105.3	106.8	105.7	104.2	107.3	103.0	107.8
140	134.3	135.3	128.2	132.2	133.7	134.5	132.9	135.5	130.7	137.4

此外，分子之间存在相互作用，导致粉体颗粒在漆基 PRTV 中出现团聚现象，随着变色材料组分含量增加，团聚发生概率增加，无法有效分散，导致变色材料表面很难被 PRTV 中高分子基体所湿润，粉体颗粒与基体间存在一定的空气间隙，增加了材料的界面热阻，导致示温涂料导热系数下降。变色材料的增加使得涂料导热性能下降，但是对比电力设备中常用的环氧树脂导热系数 0.18 W/(m·K)，示温涂料仍具备良好的散热性能。3）由表 3 可知，微加热台设置为 50、80、110、140 ℃时，涂覆示温材料的样品与无涂覆样品最大相对温差百分比分别为 3.2%、4.8%、4.9%和 4.5%，涂覆示温涂料对设备散热具有较小影响，散热性能良好。

3　结论

1）采用 3 组分法制备可逆变色材料，发色剂选用结晶紫内酯，显色剂双酚 A 决定变色材料颜色深浅，其含量增大导致颜色先变深后缓慢变浅；溶剂聚丙烯蜡决定变色温度，其含量越高，变色开始温度越高，而变色结束温度未见明显变化。结晶紫内酯与双酚 A 质量配比为 1:1 和 1:2 时，变色材料具有较好的可逆变色性能。双酚 A 和聚丙烯蜡均影响变色开始时间和复色时间，随双酚 A 含量增加，变色开始时间和复色时间呈先增大后稳定趋势；而随聚丙烯蜡含量增加，变色开始时间和复色时间均下降。

2）结晶紫内酯及与双酚 A 反应后产物红外光谱表明，在双酚 A 的作用下结晶紫内酯发生开环形成共轭发色结构。综合考虑变色材料性能，确定变色材料最佳质量配比(结晶紫内酯：双酚 A：聚丙烯蜡)为 1:2:60，其变色温度范围 115~131 ℃，颜色由蓝色渐变至白色，变色效果明显，可用于干式空心电抗器示温涂料的制备。

3）采用变色材料最佳质量配比 1:2:60 制备可逆示温涂料，其变色范围 107~131 ℃，温度提高至变色温度，涂料由深蓝色渐变为白色且变色效果较为明显，并具有良好的耐候性。随着变色材料占比的增加，示温涂料沿面闪络电压先增大后减小，PRTV 与变色材料质量配比为 10:3.4 时，闪络电压达到最大值 9.27 kV/cm。不同组分质量配比的示温涂料导热系数随着变色材料组分含量的增加而降低，范围为 0.25~0.58 W/(m·K)；涂覆应用测试显示最大相对温差百分比为 4.9%，具有良好的散热性能，有望用于干式空心电抗器热致缺陷温度检测。

参考文献　References

[1] 王　梓，刘　溟，邹建明，等. 基于 TVOC 检测的干式空心电抗器过热故障诊断方法[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3756-3762.
WANG Zi, LIU Ming, ZOU Jianming, et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactors overheating fault based on monitoring TVOC[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3756-3762.

[2] 姜雄伟，刘　黎，王文浩，等. 热老化下双层聚酯薄膜的冲击击穿特性[J]. 高电压技术，2022，48(3)：892-901.
JIANG Xiongwei, LIU Li, WANG Wenhao, et al. Impulse breakdown characteristics of two-layer polyester films under thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 892-901.

[3] 郭佳熠，耿江海，律方成，等. 基于气隙结构的特高压并联电抗器铁芯减振技术[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3892-3900.
GUO Jiayi, GENG Jianghai, LÜ Fangcheng, et al. Vibration reduction technology of UHV shunt reactor core based on air gap structure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3892-3900.

[4] DAS S, SIDHU T S, ZADEH M R D, et al. A novel hybrid differential algorithm for turn to turn fault detection in shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6): 2537-2545.

[5] ALMEIDA M L S, PERES L M, SILVA K M. On applying an enhanced generalized alpha plane to shunt reactor protection[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108387.

[6] 邹　亮，宫　攀，张　黎，等. 干式空心电抗器空间磁场缩比试验与模型简化[J]. 高电压技术，2014，40(6)：1675-1682.
ZOU Liang, GONG Pan, ZHANG Li, et al. Smal-scale experiment and model simplification of space magnetic fields around air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1675-1682.

[7] ZHAO Y Z, MA X K, YANG J C. Online detection of inter-turn short circuit faults in dry-type air-core reactor[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1/4): 443-449.

[8] 姜志鹏，周　辉，宋俊燕，等. 干式空心电抗器温度场计算与试验分析[J]. 电工技术学报，2017，32(3)：218-224.
JIANG Zhipeng, ZHOU Hui, SONG Junyan, et al. Temperature field calculation and experimental analysis of dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 218-224.

[9] 祝令瑜，杜一鸣，高　璐，等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3201-3209.
ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry-type air-core reactor with turn-to-turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.

[10] 王亚杰，刘利强，张梦彬，等. 干式空心电抗器匝间绝缘检测综述[J]. 电力电容器与无功补偿，2018，39(1)：91-95.
WANG Yajie, LIU Liqiang, ZHANG Mengbin, et al. Review on inter-turn insulation detection of dry-type air core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 91-95.

[11] 凌　云，赵彦珍，肖利龙，等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1600-1607.
LING Yun, ZHAO Yanzhen, XIAO Lilong, et al. Online monitoring method for inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor with high voltage and large capacity[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1600-1607.

[12] 郭绍伟，牛　铮，李昊扬，等. 干式空心电抗器匝间过电压的诊断判据[J]. 高电压技术，2018，44(3)：804-811.

GUO Shaowei, NIU Zheng, LI Haoyang, et al. Diagnostic criterion of turn-to-turn overvoltage test in dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 804-811.

[13] 沈小军，于忻乐，王远东，等. 变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J]. 高电压技术，2021，47(2)：387-395.
SHEN Xiaojun, YU Xinle, WANG Yuandong, et al. Three-dimensional visualization scheme of infrared thermal temperature measurement data for substaition electric power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 387-395.

[14] DING Y H, DAI X Z, ZHANG T. Low-cost fiber-optic temperature measurement system for high-voltage electrical power equipment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(4): 923-933.

[15] JI J, YAN B, WANG B T, et al. Error of thermocouple in measuring surface temperature of blade with cooling film[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1003912.

[16] 符 瑞，胡 虔，吴 雄，等. 热致可逆变色绝缘材料在电力器材中的应用进展[J]. 胶体与聚合物，2016，34(1)：36-38.
FU Rui, HU Qian, WU Xiong, et al. Progress and application of reversible thermochromism insulating materials for power equipment[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2016, 34(1): 36-38.

[17] 宋晓丽，李字明，陈靖文，等. 热致变色材料在智能社会中的发展现状及趋势[J]. 精细化工，2020，37(3)：452-461.
SONG Xiaoli, LI Ziming, CHEN Jingwen, et al. Smart applications of thermochromic materials for intelligent society: latest development and future perspective[J]. Fine Chemicals, 2020, 37(3): 452-461.

[18] 陈媛媛. 电力系统热故障检测的示温涂料研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
CHEN Yuanyuan. Study on temperature coatings for thermal system fault detection in power system[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.

[19] 谷山强，王海涛，严碧武，等. 基于示温涂料的输电线路金具发热故障诊断[J]. 水电能源科学，2017，35(11)：186-189.
GU Shanqiang, WANG Haitao, YAN Biwu, et al. Heating fault diagnosis for hardware of power transmission line based on temperature sensitive paints[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 186-189.

[20] 许哲源，肯尼汉森，卢佑勋. 电子产品外壳：101340785 A[P]. 2009-01-07.
XU Zeyuan, HANSEN K, LU Youxun. Housing for electronic products: 101340785 A[P]. 2009-01-07.

[21] 邹宝根. 一种用于金属、玻璃和陶瓷的感温变色涂料及其制备方法：103396730A[P]. 2013-11-20.
ZOU Baogen. Thermochromic coating for metal, glass and ceramic and preparation method thereof: 103396730A[P]. 2013-11-20.

[22] 胡 琴，黄洪松，赵法强，等. 三芳甲烷类电气设备可逆示温材料的制备与性能测试[J]. 高电压技术，2022，48(1)：281-288.
HU Qin, HUANG Hongsong, ZHAO Faqiang, et al. Preparation and performance test of triarylmethane reversible temperature-indicating material for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 281-288.

[23] 国家发展和改革委员会. 带电设备红外诊断应用规范：DL/T 664—2008[S]. 北京：中国电力出版社，2008.
State Development and Reform Commission. Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment: DL/T 664—2008[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2008.

[24] 陈雅清. 三组分可逆热致变色材料的专利综述[J]. 当代化工，2015，44(4)：752-753，800.
CHEN Yaqing. Reviews of the patents about three-composition reversible thermochromic materials[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(4): 752-753, 800.

[25] PANÁK O, DRŽKOVÁ M, KAPLANOVÁ M, et al. The relation between colour and structural changes in thermochromic systems comprising crystal violet lactone, bisphenol A, and tetradecanol[J]. Dyes and Pigments, 2017, 136: 382-389.

[26] 蒋 欢. 变色纺织品及其评价方法[J]. 纺织检测与标准，2018，4(3)：1-4.
JIANG Huan. Color-changing textiles and evaluation methods[J]. Textile Testing and Standard, 2018, 4(3): 1-4.

[27] 周立亚，陈梦琴. 紫外光敏变色织物的颜色响应性能研究[J]. 纺织导报，2019(11)：85-88.
ZHOU Liya, CHEN Mengqin. Study on the color change response of ultraviolet photosensitive fabrics[J]. China Textile Leader, 2019(11): 85-88.

[28] 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. 建筑用材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法：GB/T 32064—2015[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 China. Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of building materials: transient plane heat source method: GB/T 32064—2015[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2016.

[29] ISO. Plastics-determination of thermal conductivity and thermal diffusivity-part 2: transient plane heat source (hot disc) method: ISO 22007-2: 2008[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2008.



董冰冰(通信作者)
1987—，男，博士(后)，副研究员
主要从事电力装备在线监测与故障诊断技术研究
E-mail: bndong@126.com

DONG Bingbing
Post-docorate
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2022-10-25 修回日期 2023-02-01 编辑 何秋萍