

环氧树脂在湿热环境中的老化特性与失效机理

李光茂, 杜 钢, 周鸿铃, 杨 杰, 庞志开, 陈 璐
(广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510420)

摘要: 环氧树脂在湿热环境下易吸水进而导致材料性能劣化, 为了研究环氧树脂在湿热环境中的吸水特性与失效机理, 文中对环氧树脂进行了湿热老化实验。实验结果表明, 环氧树脂的吸水满足 LangmuirEXT1 等温吸附模型, 饱和吸水率与温度成二次函数关系。环氧树脂吸水老化后, 在微观层面, 表面与切面出现很多微孔隙, 孔隙数量与体积和老化温度成正相关; 在宏观层面, 老化后体积电阻率快速下降, 而相对介电常数与介质损耗角增大, 有低频色散现象。出现微小孔隙后, 水分就会通过呼吸作用大量进入材料内部, 内部孔隙的存在也会给水分提供存储空间, 吸水量进一步增大, 介电特性和击穿强度也随着劣化, 最终导致材料失效。

关键词: 环氧树脂; 湿热老化; 吸水特性; 老化特性; 失效机理

Aging Characteristics and Failure Mechanism of Epoxy Resin in Humid and Hot Environment

LI Guangmao, DU Gang, ZHOU Hongling, YANG Jie, PANG Zhikai, CHEN Lu
(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: Epoxy resin is prone to absorb water in humid and hot environment, thus leading to the deterioration of material properties. In order to study the water absorption characteristics and performance deterioration mechanism of epoxy resin in humid and hot environment, the humid and hot aging test on the epoxy resin is performed in this paper. The experimental results show that the water absorption of epoxy resin satisfies the LangmuirEXT1 isotherm adsorption model, and the saturated water absorption is a quadratic function of temperature. After the water absorption and aging of the epoxy resin, many tiny voids appear on the surface and section at the microscopic level, and the number of voids is proportional to the volume and aging temperature. Meanwhile, at the macroscopic level, the volume resistivity decreases rapidly after aging, the relative dielectric constant and dielectric loss angle increase, with the phenomenon of low frequency dispersion. After appearance of tiny voids, the moisture will enter into the material in large quantities through respiration, and the existence of internal void will also provide storage space for the moisture, the water absorption will further increase, and the dielectric properties and breakdown strength will also deteriorate, which eventually leads to material failure.

Key words: epoxy resin; humid and hot aging; water absorption properties; aging properties; failure mechanism

0 引言

环氧树脂因具有粘接性能强、收缩率小、介电性能、机械性能和耐热性能优良、化学稳定性好和易于加工等特点, 被广泛应用于电工领域的绝缘封装^[1-3]。环氧树脂作为绝缘封装材料, 可以有效隔绝

器件和外界复杂环境接触, 但本身的老化问题却制约着设备运行的可靠性和使用寿命。在湿热环境中环氧树脂的老化问题尤为突出^[4-6]。

目前国内外学者对环氧树脂的湿热老化现象研究较多。王黎明^[7]对环氧树脂进行了吸湿试验, 结果表明环氧树脂的吸湿规律可以用朗缪模型描

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-03-27

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20190110)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZHKJXM20190110).

述,渗水速率与厚度成反比。谢耀恒^[8]采用分子模拟方法研究了湿热环境中水分子的扩散行为以及湿热老化对环氧树脂交联系统的影响,结果表明在水分子与环氧极性基团结合形成氢键前,两者之间存在吸引力,随着水分子含量的增加,吸引力不断增大,两者结合形成的氢键数量增加。吸湿初期,主要是水分子占据环氧树脂系统的自由体积(FFV),导致系统的FFV减小,而后期主要是溶胀作用导致系统的FFV增大。刘玉^[9]研究了环氧树脂的吸湿特性与性能劣化规律,并将吸水分3个阶段:浓度差导致的物理扩散、裂纹出现后的通道扩散和化学吸湿扩散,对老化样品内部的裂纹进行处理,结果表明裂纹的周长和面积都随着老化时间的增加呈指数增长,湿热老化后环氧树脂的链运动能力增加,导致系统稳定性下降。谢伟^[10]的研究也表明环氧树脂随老化时间的增加,表面分裂形成颗粒状物质,裂隙增多,间距加大,因此裂纹可以为环氧树脂的绝缘状态监测提供参考。李亚丰^[11]对环氧树脂进行湿热老化,发现水分子对环氧树脂基体的塑化作用使其玻璃化转变温度降低,湿热老化后环氧树脂的体积电阻率下降,而相对介电常数和介质损耗因数增大,低频区尤为明显,湿热老化温度升高加速了环氧树脂的吸湿进程,使其平衡状态的吸湿量增大,造成介电性能进一步下降。

目前的研究都表明环氧树脂在潮湿环境中易吸水进而导致材料性能下降,包括介电常数增大、体积电阻率下降、玻璃化温度降低,但是对于环氧树脂在湿热环境中的失效机理并没有进行深入研究^[12]。

环氧树脂种类繁多,其中成本低廉绝缘性能优异的双酚A是目前应用最多的环氧树脂,尤其在干式绝缘设备中被大量应用^[13]。因此文中用双酚A环氧树脂进行实验,设置了不同温度的湿热老化条件,研究环氧树脂的吸水规律,从微观和宏观层面分析环氧树脂的性能劣化情况,最终根据性能劣化情况得到材料在湿热环境下的失效机理。研究结果将为环氧树脂材料性能提升、状态检测提供一定的理论依据。

1 试样制备

环氧树脂样品由佛山某公司提供,固化时先将双酚A环氧树脂和咪唑固化剂按照100:13的比例混合均匀,将混合液放入到超声清洗仪器中边超声边搅拌0.5 h,脱去部分气泡。然后将混合液放入到60℃的烘箱中真空脱泡半小时,脱去残余气泡。最后将脱泡后的混合液倒入已刷脱模剂的聚四氟乙

烯模具中,小心刮平表面,放入到烘箱中分布固化,首先80℃固化2 h,然后120℃固化2 h。固化结束后待样品冷却后取出样品。

2 实验方法和内容

湿热老化前将环氧树脂试样放入60℃的烘箱中烘干48 h。环氧树脂耐老化特性较好,因此设计3个老化温度(50℃、75℃、100℃),在水浴锅中水煮加速环氧树脂的老化,环氧树脂的吸水主要与两侧的溶液浓度差有关,将环氧树脂完全浸泡在水中可以使环氧树脂快速吸水^[14],也能达到更高的含水率。

2.1 吸水率

老化过程中认为样品质量不会变化,样品质量的增加仅为样品吸收的水分,则样品的吸水率可计算求得。

$$w = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: m_t 为 t 时刻样品的质量; m_0 为样品初始时刻的质量。质量用精度为0.000 1的天平测量。在每次测量前用干燥纸巾擦干样品表面水分,每次求取3个样品的平均值以减小实验误差。

2.2 表面与切面微观样貌

利用冷场发射扫描电子显微镜SU8010对老化前后的环氧树脂进行表面与切面的微观样貌观察,表面放大500倍,切面放大2 000倍。

2.3 体积电阻率

采用《GB/T 1410—2006》标准规定的三电极测试系统测量环氧树脂样品体积电阻率,施加电压为1 000 kV,读取60 s后的体积电阻值,体积电阻率由计算求得

$$\rho_v = R_v \frac{\pi}{4t} (d_1 + g)^2 \quad (2)$$

式(2)中: d_1 为测量电极直径,cm; t 为试样厚度,cm; g 为测量电极与保护电极的间距,cm;本实验中体积电阻率系数 R_v 为1 512 $\Omega \cdot m$ 。

2.4 相对介电常数与介质损耗角

利用Concept 50&40型宽频介电阻抗谱仪对环氧树脂试样的介电性能进行测试,测试频率从 10^{-1} ~ 10^7 Hz,室温测量,测量时在试样上下表面放置辅助电极形成类似三明治结构并固定在试样腔的上下电极之间,保证样品与电极充分接触。

2.5 交流击穿场强

对在不同温度下老化的环氧树脂进行耐压实验,根据IEEE标准推荐的Weibull分布函数处理工频击穿场强的测量值。相较于三参数Weibull分布函数,两参数分布函数的参数估计更容易、置信区

间更小且数据拟合的质量更高^[15-16]。

两参数 Weibull 累积分布函数与工频场强为 E 时的样品击穿可能性有关。样品击穿可能性 $F(E)$ 为^[17-18]

$$F(E)=1-\exp[-(\frac{E}{E_0})^\beta]$$

(3)

式(3)中, E_0 和 β 分别为尺度参数和形状参数且两者均为正值。尺度参数 E_0 代表击穿可能性为 63.2%时的工频场强,文中采用 E_0 作为样品的击穿场强值。

3 实验结果与讨论

3.1 吸水特性

环氧树脂在不同温度下吸水率随时间变化的规律见图1。样品吸水速率和饱和吸水量与温度成正相关,温度越高,样品吸水速率越快,饱和吸水率也越大。环氧树脂的吸水过程可以用渗透方程来描述,扩散系数与温度的关系遵循 Arrhenius 公式^[11],温度越高,分子热运动越剧烈,分子扩散速率也就越快,这也是升温能加快环氧树脂湿热老化的重要原因。

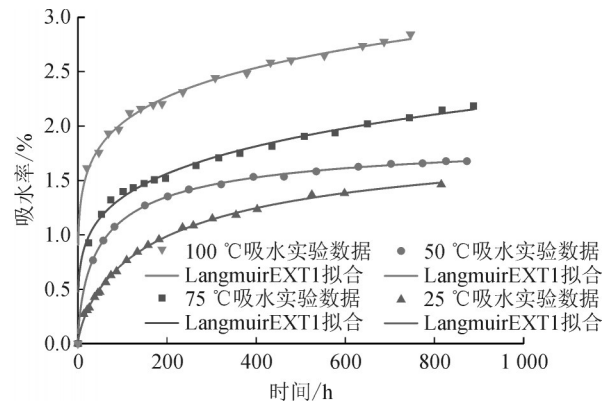


图1 环氧树脂在不同温度下的吸水曲线

Fig. 1 Water absorption curve of epoxy resin at different temperatures

从图1可以看出,环氧树脂在不同温度下的吸水曲线满足 LangmuirEXT1 等温吸附模型。LangmuirEXT1 等温吸附模型是对朗格缪尔方程 (Langmuir)的进一步扩展,其吸附时间与吸附饱和度的指导公式为^[19]

$$y=\frac{abt^{1-c}}{1+bt^{1-c}}$$

(4)

式(4)中: a 、 b 、 c 无明确物理意义,仅为模型特征参数; t 为自变量; y 为因变量。

从图1可以看到温度越高,环氧树脂的饱和吸水量越大,温度与饱和吸水量的关系见图2。从图2中可以看出,饱和吸水量与温度近似成二次关系,

相关系数为 99.7%,拟合关系式为

$$w=1.29+0.003\ 7T+0.000\ 1T^2$$

(5)

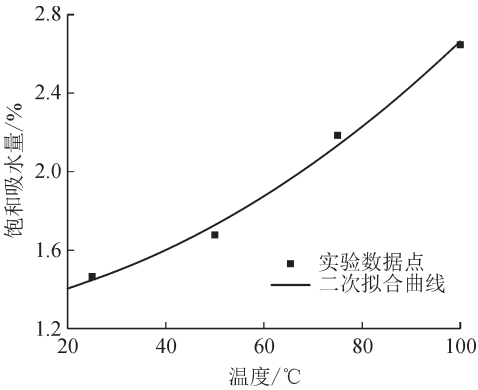
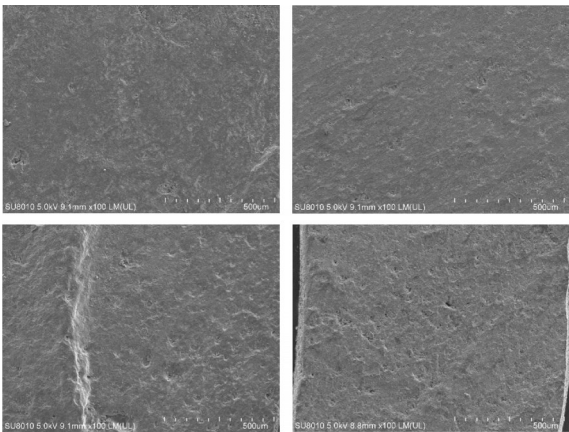


图2 饱和吸水量与老化温度关系曲线

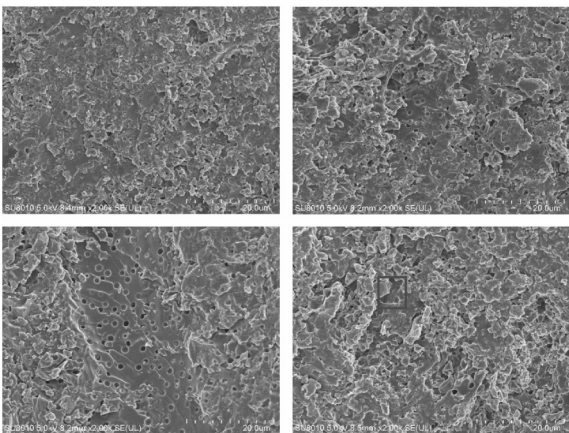
Fig. 2 Relationship between saturated water absorption and aging temperature

3.2 表面与切面微观样貌

环氧树脂在不同老化环境中老化 800 h 后其表面与切面微观样貌见图3(从左至右、从上往下依次为老化前、50、75、100 °C 老化后的样貌)。



(a) 表面样貌(×500)



(b) 切面样貌(×2 000)

图3 环氧树脂老化后表面与切面微观样貌变化

Fig. 3 Changes in surface and section microscopic appearance of epoxy resin after aging

从表面来看,老化前环氧树脂表面基本比较平整,但在不同温度下吸水老化 800 h 后,其表面出现了许多微孔,表面变得凹凸不平,而且老化温度越高,老化现象越明显,表面的微孔数量越多。

从切面来看,环氧树脂在老化前内部存在数量较少的微孔隙,通过电镜图片标尺测量空隙的直径在 0.3~0.6 μm 间,在不同温度下吸水老化后,内部的孔隙数量越来越多,孔隙直径越来越大,50 $^{\circ}\text{C}$ 老化后微孔直径在 0.3~1 μm 间,75 $^{\circ}\text{C}$ 老化后微孔直径在 0.3~1.3 μm 间,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 的老化条件下,一些微孔隙出现了破裂,相邻微孔直接相连,最大孔隙甚至达到了 4.6 μm ,见图 3(b)中方框。

环氧树脂老化后出现微孔隙,水分更易通过这些孔隙在内外压差的作用下进入材料内部,孔隙也为水分在材料的存储提供了空间,这又进一步促进孔隙的产生与扩大^[20],最终有可能会造成材料性能下降而失效。

3.3 交流击穿场强

每个样品做至少 6 次击穿实验,采用快速升压方式,保证在 1 min 内样品就被击穿,实验采用针板电极,样品处于不均匀电场中,样品的击穿场强可近似计算为^[21]

$$\hat{E}_{\text{BD}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{BD}}}{s\eta} \quad (6)$$

式(6)中: U_{BD} 为击穿电压; s 为电极击穿距离; η 为电场利用系数, η 值由仿真结果给出。环氧树脂样品在不同的老化温度下击穿场强随着时间的变化情况见图 4。

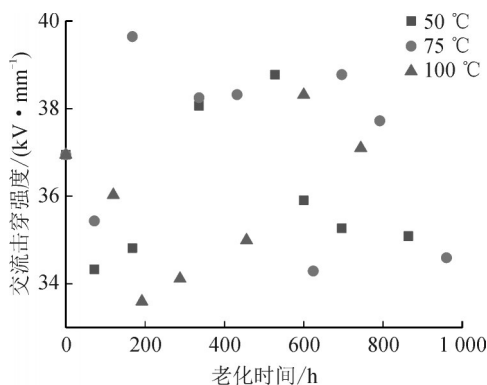


图4 不同老化温度下击穿场强随着时间的变化情况

Fig. 4 Variation of breakdown field strength with time at different aging temperatures

从图 4 可以看出,环氧树脂在不同的温度下吸水老化时,击穿场强变化与温度、时间均没有明显的规律,且击穿场强变化幅度在 5 kV/mm 内(小于 15%),这个可能是个体差异导致的。

3.4 体积电阻率

体积电阻率在不同的老化温度下随着时间的变化情况见图 5。从图 5 中可以看出,环氧树脂样品在不同的老化温度下,体积电阻率首先快速降低,然后达到一个稳定值。温度越高,体积电阻率下降程度越大。在 50 $^{\circ}\text{C}$ 和 75 $^{\circ}\text{C}$ 的吸水老化下,体积电阻率在老化 800 h 后保持在 $3 \times 10^{16} \sim 4 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$,而在 100 $^{\circ}\text{C}$ 的吸水老化下,体积电阻率最终保持在 $4 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 量级,这说明老化温度大于环氧树脂的玻璃化温度时,老化效果更明显,但环氧树脂体积电阻率在不同老化温度下都能保持在 $10^4 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,仍然保持着较高的电阻率,交流击穿实验也表明老化过程中击穿强度变化较小的结论是相吻合的。

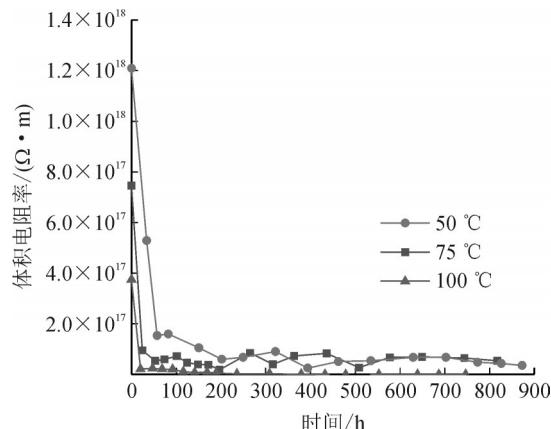


图5 体积电阻率在不同老化温度下的老化情况

Fig. 5 Aging of volume resistivity at different aging temperatures

3.5 介电常数与介质损耗角

环氧树脂在不同老化条件下老化 800 h 后的宽频介电谱见图 6。

从实验结果可以看出,环氧树脂在老化前后,介电常数和介质损耗角都会增大,低频区尤其明显,介电常数在低频阶段的增幅与老化温度成正相关,也就是老化温度越高,吸水量越大,其介电常数也越大。从介质损耗角可以看出,老化前后松弛特征频率略微向低频移动,损耗角也随着老化含水量的增加而增大,介电常数和介电损耗的增大,说明在交流电场下材料的损耗也会增大。

水分进入材料内部以后,水的极性要大于环氧树脂分子的极性,而且水分占据材料的自由体积,也会增大材料的电导率,因此含水量越高,介电常数和介损值越大。根据‘Maxwell-Wagner’界面极化理论,填料粒子和树脂基体界面附近的带电离子积累能够影响局部电场分布,所以介质损耗因数随含湿量增大而增加。

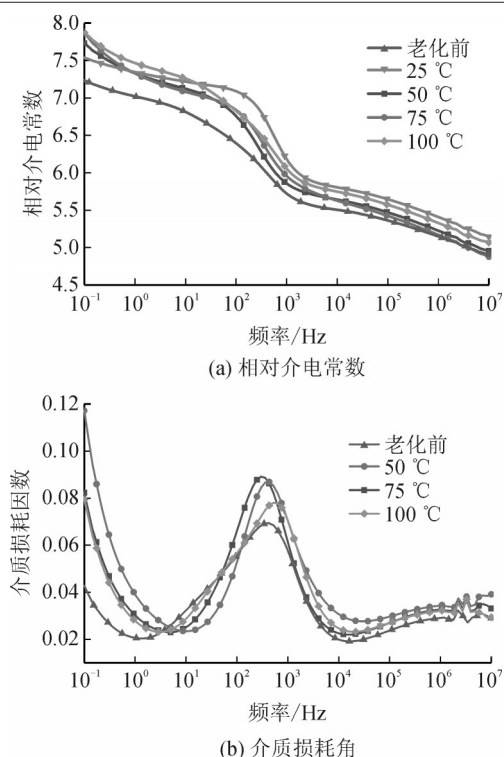


图6 老化前后样品宽频测试结果

Fig. 6 Broadband test results of samples before and after aging

从图6中也可以看出,在高频($10^3 \sim 10^7$ Hz)频段,相对介电常数与介损角相互平行,而在低频频段,不同温度下的介电常数与损耗角相差较大,尤其是介质损耗角分散性更大,出现低频色散现象^[22]。

3.6 失效机理分析

从实验结果来看,在不同温度下吸水后,表面出现了许多微小孔隙,而且温度越高,孔隙数量与孔隙直径越大,切面方向也出现了孔隙,在100 °C的吸水环境中部分孔隙还发生了断裂现象,说明材料硬度降低。

材料出现微裂纹以后,除了渗透作用吸水外,水分也会通过裂纹在内外压差的作用下大量进入材料内部,通过理论计算,发现水分通过后者进入到材料内部的水分含量和速率要远大于前者,而且裂纹的出现也会为水分在材料内部的存储提供空间。在长时间的老化下,水分大量进入材料内部,会最终导致材料的失效。

因此,环氧树脂在湿热环境中的失效机理可以概述为:水分首先通过渗透作用进入到材料内部,部分占据自由体积,介电常数和介质损耗因数也会随之增大,导致交流电场下介损损耗增大,这就有可能产生局部的温度升高,局部温度的升高会导致应力分布不均,长期作用下就可能由于应力不均产生裂纹;此外,部分水分子与材料发生化学反应,发

生主链的断裂和重组,导致环氧树脂材料逐渐产生微裂纹。裂纹产生后,水分就会在内外压差的作用下大量进入材料内部(并且远大于渗透作用吸收的水分),而且内部裂纹的存在也会给水分提供存储空间,随着含水量的增大,裂纹逐渐在原先裂纹的基础上继续发展,在这个过程中也会继续产生新的裂纹,最终材料出现大量裂纹,此时材料防水性能、介电特性和击穿电压也都会随之劣化,导致材料失效。

4 结论

1) 环氧树脂在不同温度下的吸水规律满足LangmuirEXT1等温吸附模型,饱和吸水率与温度的关系满足: $w = 1.29 + 0.0037T + 0.0001T^2$;

2) 环氧树脂湿热老化后,表面与切面出现许多微小孔隙,微孔直径与数量和温度成正相关,50 °C老化800 h后微孔直径在0.3~1 μm间,75 °C老化800 h后微孔直径在0.3~1.3 μm间,100 °C老化条件下微孔出现了破裂,最大微孔直径甚至达到4.6 μm;

3) 环氧树脂老化后体积电阻率先快速下降然后基本保持稳定,在50 °C和75 °C吸水老化800 h后,体积电阻率保持在 $(3 \sim 4) \times 10^{16} \Omega \cdot m$,在100 °C老化800 h后体积电阻率保持在 $(4 \sim 5) \times 10^{14} \Omega \cdot m$,老化后击穿场强变化不大,击穿场强变化幅度在5 kV/mm内,相对介电常数与介质损耗角增大,出现低频色散现象;

4) 环氧树脂在湿热环境下的失效机理为水分首先通过渗透作用进入到材料内部占据自由体积,部分水分子与材料发生化学反应,发生主链的断裂和重组,环氧树脂材料会逐渐产生微裂纹;裂纹产生以后,水分就会在内外压差的作用下大量进入材料内部。随着含水量的增大,裂纹数量进一步增多,当材料出现大量裂纹时,材料防水性能、介电特性和击穿电压也都会随之劣化,最终导致材料失效。

参考文献:

- [1] 毕治功. 环氧树脂在电力领域中的应用[J]. 弹性体, 2020, 30(5): 75-78.
BI Zhigong. Application of epoxy resin in electric power[J]. Elastomers, 2020, 30(5): 75-78.
- [2] 李 爱, 崔华楠, 余 清, 等. 环氧树脂灌封料的固化动力学及固化工艺[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(4): 1-9.
LI Ai, CUI Huanan, YU Qing, et al. Curing kinetics and curing process of epoxy resin potting compounds[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2021, 37(4): 1-9.
- [3] 张 蔚. 基于介电谱和活化能的环氧树脂类干式绝缘设

- 备的状态评估技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
- ZHANG Wei. Research on state evaluation technology of epoxy resin dry - type insulation equipment based on dielectric spectrum and activation energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [4] 喻 健,何宇廷,冯 宇,等. 环氧树脂基复合材料加筋板结构吸湿行为研究[J]. 北京航空航天大学学报,2020(9):1-12.
- YU Jian, HE Yuting, FENG Yu, et al. Moisture absorption behavior of epoxy resin matrix composite stiffened panels [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020(9): 1-12.
- [5] 王有元,刘 玉,王施又,等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J]. 电工技术学报,2018,33(16): 3906-3916.
- WANG Youyuan, LIU Yu, WANG Shiyu, et al. Effects of electrothermal aging on the properties of epoxy resins in dry-type transformers[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2018, 33(16): 3906-3916.
- [6] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Influence of absorbed water on volume resistivity of epoxy resin insulators[C]//10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE, 2010: 1-4.
- [7] 王黎明,聂章翔,赵晨龙,等. 水分在环氧树脂复合绝缘子护套中的渗透特性[J]. 高电压技术,2019,45(1):173-180.
- WANG Liming, NIE Zhangxiang, ZHAO Chenlong, et al. Penetration characteristics of moisture in epoxy resin composite insulator sheath[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 173-180.
- [8] 谢耀恒,雷红才,黄海波,等. 环氧树脂湿热老化过程分子模拟仿真研究[J]. 绝缘材料,2019,52(9): 70-77.
- XIE Yaoheng, LEI Hongcai, HUANG Haibo, et al. Molecular simulation of epoxy resin wet-heat aging process[J]. Insulation Materials, 2019, 52(9): 70-77.
- [9] 刘 玉. 湿热环境中环氧树脂的老化特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- LIU Yu. Research on the aging characteristics of epoxy resin in humid and hot environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [10] 谢 伟,杨 征,程 显,等. 环氧树脂材料热氧老化特性研究[J]. 电工技术学报,2020,35(20): 4397-4404.
- XIE Wei, YANG Zheng, CHENG Xian, et al. Study on the thermal oxidative aging characteristics of epoxy resin materials[J]. Chinese Journal of Electrotechnical Technology, 2020, 35(20): 4397-4404.
- [11] 李亚丰. 绝缘封装用环氧树脂固化物的湿热老化特性[J/OL]. 高 电 压 技 术 .1 - 8. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1239.TM.20210112.1027.003.html>. 2021-01-12.
- LI Yafeng. Moisture - heat aging characteristics of epoxy resin cured products for insulation encapsulation[J/OL]. High Voltage Engineering. 1 - 8. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1239.TM.20210112.1027.003.html>. 2021-01-12.
- [12] 费晓春,孙德文,李 波,等. 环氧树脂及其复合材料老化失效机制研究进展[J]. 江苏建材,2020(1): 9-13.
- FEI Xiaochun, SUN Dewen, LI Bo, et al. Research progress on aging failure mechanism of epoxy resin and its composites[J]. Jiangsu Building Materials, 2020(1): 9-13.
- [13] 陈 波,陈 洁. 环氧树脂复合材料在变电站电气设备中的应用[J]. 当代化工研究,2021(24): 79-81.
- CHEN Bo, CHEN Jie. Application of epoxy resin composites in electrical equipment of substations[J]. Contemporary Chemical Industry Research, 2021(24): 79-81.
- [14] 张树永,周伟舫,罗小雯,等. 环氧树脂的吸水研究[J]. 化学通报,1997(8): 31-35.
- ZHANG Shuyong, ZHOU Weifang, LUO Xiaowen, et al. Study on water absorption of epoxy resin[J]. Bulletin of Chemistry, 1997(8): 31-35.
- [15] 王 仲. 复合绝缘子硅橡胶吸水性和透水性及其影响机理研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- WANG Zhong. Water absorption and permeability of composite insulator silicone rubber and its influence mechanism [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [16] 李 浩. 干式空心电抗器的湿热老化研究[D]. 北京:清华大学,2018.
- LI Hao. Moisture-heat aging research of dry-type air-core reactor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [17] 曹 雯,宋倩文,申 巍,等. 环氧/纸复合材料直流耐压寿命模型的估计方法[J]. 电工技术学报,2019,34(18): 3750-3758.
- CAO Wen, SONG Qianwen, SHEN Wei, et al. Estimation method of DC withstand voltage life model for epoxy/paper composites[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2019, 34(18): 3750-3758.
- [18] 李忠华,陈 宇. 电气绝缘电压寿命指数 N 值的一种最小二乘估计方法[J]. 高电压技术,1997,23(1): 3-6.
- LI Zhonghua, CHEN Yu. A least squares estimation method for electrical insulation voltage life index N value [J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 3-6.
- [19] 王 俏. 颗粒煤瓦斯吸附时间与吸附饱和度关系研究[D]. 焦作:河南理工大学,2018.
- WANG Qiao. Study on the relationship between gas adsorption time and adsorption saturation in granular coal [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2018.
- [20] 王晓静,王鑫鑫,张 伟. 多孔陶瓷材料毛细吸水特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(3): 324-330.
- WANG Xiaojing, WANG Xinxin, ZHANG Wei. Research on capillary water absorption characteristics of porous ceramic materials[J]. Journal of Tianjin University(Natural Science and Engineering Technology Edition), 2021, 54(3): 324-330.
- [21] FINIS G, CLAUDI A. On the dielectric breakdown behavior of silicone gel under various stress conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 487-494.
- [22] HAO J, DAI X, YANG L, et al. Physical mechanism analysis of conductivity and relaxation polarization behavior of oil-paper insulation based on broadband frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1571-1578.
- 李光茂(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备技术管理及试验研究(E-mail:lgm19870621@qq.com)。
- 杜 钢(1990—),男,硕士,高级工程师,从事高压设备电气试验研究工作(E-mail:dudu-2566@163.com)。