第 49 卷 第 2 期：781-792　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 781-792
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220533

油纸绝缘水分迁移特性研究综述

吴治诚[1]，周俊杰[1]，张乔根[1]，张　锐[1]，朱文兵[2]，顾朝亮[2]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；2. 国网山东省电力公司电力科学研究院，济南 250002）

摘　要：油纸绝缘作为电力变压器的主要绝缘形式，其绝缘性能与水分含量密切相关，准确获得油纸绝缘的水分含量对变压器故障预警至关重要。在油浸式变压器内部电场、温度场等多物理场梯度的驱动下，水分始终处于动态迁移过程中，时空分布复杂，难以直接测量，因此需深入研究水分迁移特性。文中综述了油纸绝缘水分迁移机理、模型及特性研究上取得的成果：水分迁移是不同存在形式的水分子与绝缘油纸微观结构相互作用的过程，受多物理场的影响显著。现有油纸绝缘水分迁移研究多基于 Fick 定律，利用扩散系数表征水分梯度及温度对水分扩散速度的影响，但未能深入耦合多物理场的作用，不能获得温度梯度下的水分不均匀分布特性。研究获得了材料性质、温度、电场等多因素作用下扩散系数的变化规律及相应水分迁移过程，但将影响因素耦合于扩散系数的方式不能准确描述多物理场对水分迁移的作用，且缺少电场作用下的宏观水分迁移规律研究。根据驱动势平衡原理建立的热湿耦合模型能够描述水分的时空分布，量化电场对水分动态迁移特性的影响。进一步需推进基于水分时空分布无损测量的实验研究，深化多物理场耦合下水分迁移建模，构建多物理场下理论体系，以准确表征油浸式变压器中油纸绝缘水分迁移的时空分布。

关键词：油纸绝缘；水分时空分布；迁移机理；水分迁移特性；多物理场模型

Review on Moisture Migration Characteristics of Oil-paper Insulation

WU Zhicheng[1], ZHOU Junjie[1], ZHANG Qiaogen[1], ZHANG Rui[1], ZHU Wenbing[2], GU Zhaoliang[2]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250002, China)

Abstract：The insulation performance of oil paper insulation,as the main insulation form of power transformer, is closely related to the moisture content. Accurately obtaining the moisture content of oil paper insulation is crucial for transformer fault early warning. Driven by the gradient of multiple physical fields such as electric field and temperature field inside the oil immersed transformer, the moisture is always in the process of dynamic migration, and the spatiotemporal distribution is complex, which is difficult to measure directly. Therefore, it is necessary to study the characteristics of moisture migration. This paper summarizes the research results on the mechanism, model and characteristics of moisture migration in oil paper insulation as follows: moisture migration is a process of interaction between water molecules in different forms and the microstructure of insulating oil paper, which is significantly affected by multiple physical fields. The existing research on moisture migration in oil paper insulation is mostly based on the Fick's law. The diffusion coefficient is used to characterize the influence of moisture gradient and temperature on moisture diffusion velocity, whereas they failed to deeply couple multiple physical fields, and the uneven distribution characteristics of moisture under the temperature gradient can not be obtained. The change law of diffusion coefficient and corresponding moisture migration process under the multiple factors such as material properties, temperature and electric field are obtained. However, the way of coupling influencing factors to diffusion coefficient can not accurately describe the influences of multi-physical fields on moisture migration characteristics, and there is a lack of research on moisture migration law under the electric field. The heat moisture coupling model based on the principle of driving potential balance can describe the spatiotemporal distribution of moisture and quantify the influence of electric field on the dynamic migration of moisture. It is necessary to further carry out the experimental research based on the nondestructive measurement of moisture spatiotemporal distribution,

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(SGSDDK00SPJS2100033)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGSDDK00SPJS2100033).

deepen the modeling of moisture migration under the coupling of multi-physical fields, and build a theoretical system under multi-physical fields, so as to accurately characterize the spatiotemporal distribution of moisture migration of oil paper insulation in oil immersed transformer.

Key words: oil paper insulation; spatiotemporal distribution of moisture; migration mechanism; moisture migration characteristics; multiphysical field model

0 引言

油纸绝缘作为电力变压器的主要绝缘形式，其绝缘性能直接影响油浸式变压器的运行可靠性[1]。油纸绝缘中水分会加快绝缘老化、增加电导率造成局部电场畸变，过高的水分含量将严重降低油纸绝缘的介电强度，诱发局部放电、沿面闪络，因此水分成为影响油纸绝缘性能的重要因素之一[2-5]。工程中由于水分引起的变压器故障危害严重，例如某330 kV 变压器因套管安装不当引起围屏局部受潮，导致围屏上出现严重的树枝状爬电碳化痕迹[6]；某220 kV 变压器因出线装置处存在严重受潮，投运后仅 30 h 便发生故障引起主变压器跳闸[7]。因此准确获得油纸绝缘中水分含量、分布状态及迁移对变压器安全运行意义重大[8-9]。

变压器油纸绝缘处于复杂的多物理场环境中[10-11]。变压器在正常运行过程中因导体产热、在绝缘纸包绕、绝缘油循环作用下，使变压器内部出现不同的温度分布[12-13]。例如变压器顶部和底部的温度差异可达 30 ℃[14]、不同负载条件的热点温度变化可达 80 ℃以上[15]。变压器内部电场分布同样十分复杂，例如油浸式换流变压器承受交直流复合电压、谐波以及极性反转等复杂工况影响，内部存在着复杂的电场应力[16-17]。在温度、电场等多物理场作用下，由水分残留、侵入和绝缘老化等因素[18-20]产生的水分发生迁移与再分布，使水分呈不均匀分布。多物理场作用引起的水分不均匀分布将导致局部水分含量超限，及油纸绝缘局部受潮引发的绝缘问题[4]。现有基于平衡曲线的水分监测方法仅反映整体水分含量，无法评估水分时空分布。因此研究水分迁移规律对准确获得油纸绝缘水分含量及分布、评估局部受潮风险具有重要意义。

综合现有研究进展，本文对油纸绝缘水分迁移机理、模型及特性规律进行综述。首先综述了在油纸绝缘水分迁移机制、平衡过程、扩散模型及动态分布方面取得的研究进展；其次，分析了材料性质、温度和电场等多因素作用下的水分迁移特性；最后，指出了油纸绝缘水分迁移特性的研究关键，对油纸绝缘水分迁移特性的研究方向进行了展望。

1 水分迁移机理及模型

油纸绝缘中水分在变压器内部多物理场的作用下始终处于动态变化，呈现复杂的分布状态。水分分布是指油纸绝缘中水分的空间分布，当外部水分侵入等因素改变水分含量、温度和电场等多物理场发生变化时，水分分布将随时间变化，即发生水分迁移，其中水分扩散是仅考虑水分含量变化引起的水分迁移过程。当变压器中多物理场条件稳定时，绝缘油纸间的水分吸附与解吸速度相等，达到水分平衡。水分动态行为如图 1 所示。

绝缘油纸中微水含量以质量分数进行表征，通常分别处于 10×10^{-6}~15×10^{-6} 及 0.2%~0.5%的范围，根据存在形式具有不同的内部水分迁移机理。本节从微观作用机制及宏观迁移模型两方面入手，解析了水分子与油纸绝缘微观层面的相互作用以水分迁移的微观机理，研究了油纸绝缘水分平衡过程以获得油纸水分迁移的稳态规律，建立耦合温度等因素的扩散模型描述绝缘纸中水分的迁移过程，获得空间分布。

1.1 绝缘油纸中水分迁移机理

水分迁移是指外部因素影响下水分在材料内部或不同材料之间的运动，即水分含量的时空变化

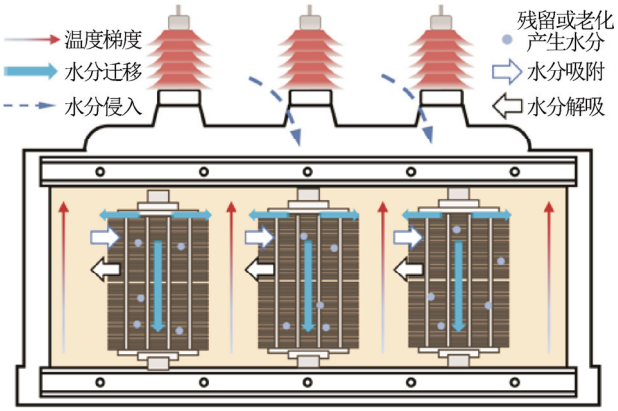


图 1 变压器中水分动态行为示意图

Fig.1 Dynamic behavior of moisture in transformer

过程。从微观机理分析，油纸绝缘中水分迁移是水分子与油纸分子、基团相互作用的过程，绝缘材料的微观结构及活性基团是影响水分迁移的重要因素。绝缘油纸相态、微观结构存在显著差异，其内部水分存在形式及与活性基团的相互作用不同，形成了不同的迁移规律。

绝缘纸中水分主要以表面吸附水、水蒸气、毛细管游离水及纤维吸收游离水[21]4 种形式存在。内部水分迁移是一个表面极性基团或活性位点吸附继而在多孔结构扩散的过程。微观上，绝缘纸中存在较多难以充分浸渍的毛细微管，水分子主要吸附在毛细微管中，形成吸附与脱附的动态平衡过程，而水分子在纸中的扩散过程则相对较慢，错综复杂的毛细微管阻碍了水分子快速移动[22]。此外，水分吸附、迁移过程受纤维微结构表面水分子数量的影响，所有活性位点被占据后，余量水分子仅能与结合水分子相互作用形成多层结构，吸附作用降低，迁移速度提高[23]。

水分主要以结合态、溶解态和分散态的形式存在于绝缘油中[24]。绝缘油中溶解态水分含量是影响绝缘性能的关键，随温度升高而上升，即油中饱和含水量对应的水蒸汽压与温度呈指数增长关系[25]。同时，高温下部分结合态水转化为溶解水，使油中溶解态水含量升高[26]。绝缘油作为水分输送的介质，在变压器中循环流动，因此通常不考虑绝缘油内部的水分梯度，油中水分迁移主要为变压器油与绝缘纸间的水分交换[4]。

绝缘油纸内部的水分迁移因微观结构特征而具有不同的特点，对于其稳态水分交换过程可采用水分平衡曲线描述。

1.2 水分平衡

鉴于绝缘油纸与水的亲和性及水分存在形式不同，绝缘纸比绝缘油含有更多水分[27]。为了量化温度对水分在绝缘油纸间迁移交换过程的影响，提出了描述油纸间稳态水分含量对应关系的水分平衡曲线。其中水分平衡指不同材料中的水分含量达到相对稳定，水分交换达到动态平衡，是稳定的水分分布状态。平衡曲线建立了不同温度下绝缘油纸水分含量的对应关系，平衡点决定了油纸间水分迁移的方向以及绝缘纸内部水分迁移的边界条件。

水分平衡曲线由 Fabre 通过油−空气−绝缘纸的间接平衡实验首次获得[28]。间接平衡是指在空气环境恒温恒湿的前提下，当油、纸水分含量分别与空气达到平衡时，油纸水分也达到平衡状态。该假设已被通用电气公司通过实验证明[29]。1983 年，Oommen 发现不同平衡方向的水分交换过程存在差异，将曲线分为吸附曲线和解吸曲线。解吸曲线略高于吸附曲线的现象被归因于纤维素对水分较强的吸附能力[30]。Fabre 与 Oommen 获得的水分平衡曲线如图 2 所示。

在此基础上，Fessler 等人首次提出了油纸绝缘水分平衡公式[31]，通过测量绝缘纸中水分和蒸汽压的平衡关系，拟合了来自 Houtz[27]、Ewart[27]、Oommen[30]等人的实验结果，确定了水分平衡方程，如式(1)所示，以表征水分蒸汽压与含水率的关系。

$$C_{\mathrm{p}} = 2.173\times10^{-7} P_{\mathrm{vp}}^{0.6685} \exp\left(\frac{4725.6}{T}\right) \tag{1}$$

式中：C_{p} 为绝缘纸含水率(质量分数，下同)，%；P_{vp} 为水分蒸汽压相对值，以标准大气压为参考值；T 为温度，K。

图 3 为不同温度下式(1)所对应的曲线，表明当

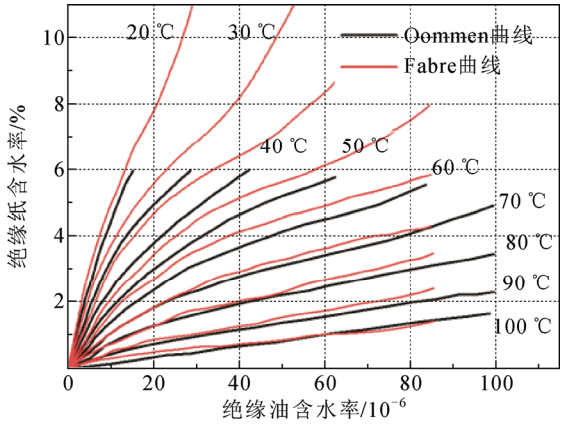


图 2 油纸绝缘水分平衡曲线[28,30]

Fig.2 Moisture equilibrium curves of oil-paper insulation[28,30]

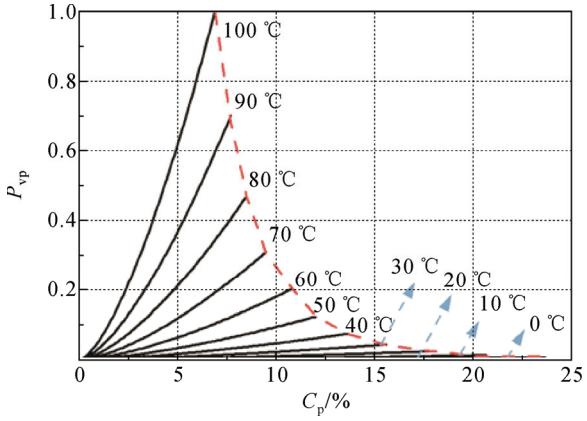


图 3 纸中蒸汽压与水分的关系[31]

Fig.3 Vapor pressure versus moisture in paper[31]

温度为 100 ℃时绝缘纸对应水分饱和蒸汽压等于大气压，与 100 ℃时水分饱和蒸汽压等于大气压的规律相符合[27]。相同温度下绝缘油纸水分平衡时蒸汽压相等，因此，式(1)中参数 P_{vp} 可通过绝缘油对应温度下的水分饱和蒸汽压乘以相对湿度得到，进而以蒸汽压为中间量，能够得到油、纸中水分的数值对应关系[32]。

材料性质变化及多物理场作用会改变油纸水分平衡，需考虑上述因素影响，对平衡曲线进行修正。现有研究多采用在特定温度平衡曲线下，等效修正水分平衡点的方式[33-34]。文献[33]认为 Oommen 曲线不适用于老化绝缘纸板：在绝缘油含水率不变的条件下，纸板含水率需按 20 年等效老化负向修正 27%，40 年等效老化负向修正 35.5%后使用。针对直流电压作用下的水分平衡，文献[34]在 50 ℃和 70 ℃下对比研究了直流电场作用下的油纸水分平衡过程，10 kV 直流电压作用下 50 ℃和 70 ℃时绝缘油中水分浓度分别降低了 22.91 mg/L 和 17.63 mg/L，表明 Oommen 曲线在存在直流电场时应正向修正后使用。

水分平衡曲线及方程指出了绝缘油纸间稳态水分含量的对应关系，而水分在绝缘油纸中的迁移过程需使用扩散模型描述。

1.3 水分扩散模型

变压器中的多物理场梯度随负载循环发生改变，使绝缘油纸中水分存在形式相互转化，因此水分分布始终处于动态变化过程[19,35]。为描述水分动态变化特性，需由水分迁移规律出发，建立绝缘油纸的水分扩散模型。扩散是仅考虑浓度梯度作用下的水分迁移过程，考虑到绝缘油中水分分布较为均匀，因此重点关注绝缘纸内部水分迁移过程。

为了描述绝缘纸中水分迁移过程，基于 Fick 定律可描述水分的扩散特性，方程如式(2)所示[36-37]。方程表征了水分在浓度梯度下的扩散过程，以获得水分趋于平衡分布的速度。

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) \tag{2}$$

式中：C 为含水率，%；D 为扩散系数，m^2/s。

扩散系数是决定迁移速度的核心参数，对扩散系数进行的大量实验研究表明，水分扩散系数具有式(3)所示形式[38]。

$$D=D_0\exp\left(kC+E_0\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right) \tag{3}$$

式中：D_0 为常数，m^2/s；K 为无量纲因子；E_0 为表征温度对扩散系数影响程度的活化能；T_0 为参考温度，通常取 298 K；T 表示绝对温度，K。

通过绝缘纸吸潮实验可测得扩散系数。Guidi 和 Fullerton 使用浸渍绝缘油的多层牛皮纸作为试品，对干燥样品与湿润样品分别进行水分吸附及解吸实验，研究了绝缘纸板中水分变化过程[39]。采用卡尔费休法测定了绝缘纸深度方向上水分随时间的演变规律，结果如图 4 所示。

图 4 为在 50%相对湿度和 22 ℃空气环境下含水率与深度、时间的关系，采用最小二乘法将数据拟合为高次多项式。Guidi 和 Fullerton 采用 Crank 计算方法，将拟合多项式对 C 求导得到 dx/dC，得到扩散系数与含水率的函数关系为[22]

$$D(C)=-\frac{1}{2t}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}C}\Bigg|_C\int_{C_0}^{C}x\mathrm{d}C \tag{4}$$

式中：D 为扩散系数，m^2/s；x 为绝缘纸深度，m；t 为时间，h；C_0 为初始含水率，%。

结合多个温度下的函数关系，获得了扩散方程的相关常数，k=0.5，D_0=6.441×10^{-14} m^2/s，E_a=7700。

扩散系数与绝缘材料性质密切相关，不同形式的油纸绝缘扩散系数存在较大差异，因此对各类绝缘形式的扩散系数进行了实验测量。表 1 列举了部分扩散系数实验值。

考虑到实际变压器中多采用层叠绝缘纸包绕绕组的绝缘结构，文献[44]获得了多层油浸纸的扩散系数，发现对于总厚度相同但层厚不同的层叠绝缘纸结构，扩散系数与绝缘纸层数正相关。相邻纸层间微油隙阻碍了水分在绝缘纸层厚度方向的移过程。以 0.08 mm 层叠绝缘纸的扩散系数为例，将恒

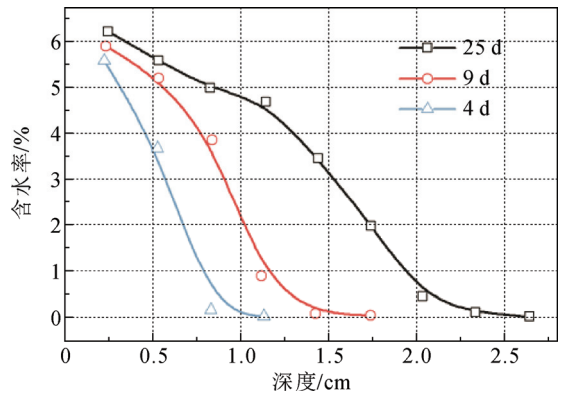


图 4 吸附实验下水分分布及拟合结果[39]

Fig.4 Moisture distribution and fitting results under adsorption experiment[39]

表 1　多种绝缘形式的扩散系数

Table 1　Diffusion coefficient of various insulation forms

作者	绝缘形式	D_0/(m²·s⁻¹)	k	E_0/K
Foss[38]	油浸纸	1.34×10^{-13}	0.5	8074
Guidi[39]	油浸纸	6.64×10^{-14}	0.5	7700
Du[40]	无油纸	0.67×10^{-12}	0.45	7646
Li Jian[41]	植物油浸纸	7.34×10^{-14}	0.497	6940
R. Villarroel[42]	忽略厚度油浸纸	1.49×10^{-13}	0.2	7599
R. Villarroel[43]	忽略厚度无油纸	9.30×10^{-12}	0.43	7110

定温度下获得的各绝缘纸层的水分含量变化代入离散化的 Fick 定律通解公式中，采用最小二乘法拟合公式系数从而获得扩散系数与含水率的函数关系，得到 k=0.552。将不同温度下得到的扩散系数方程进行式(5)所示对数变换，对多个温度下的扩散系数方程的系数进行线性拟合，结果如图 5 所示。由线性拟合结果可得 E_0=4061，$D_0=4.35\times10^{-12}$ m²/s。

$$\ln D = E_0\left(1/T_0 - 1/T\right) + \ln D_0 \tag{5}$$

基于 Fick 定律建立的扩散模型从宏观角度描述了绝缘纸水分在浓度梯度下的迁移过程。耦合温度、含水率的扩散系数形式能够描述温度对水分迁移速度的影响规律。扩散系数描述了水分迁移的速度，仅描述了绝缘纸中水分含量随时间的变化过程。准确描述油纸绝缘水分迁移特性还需进一步解析水分空间分布的演变过程[45]。

1.4　水分空间分布演变过程

在时变多物理场梯度的影响下，油纸绝缘中水分空间分布总处于动态演变状态，需要研究水分空间分布演变过程。在扩散模型确定的基础上，学者们采用有限元拟合、多次扩散及暂态模型法等方法研究了水分迁移分布，获得了油纸绝缘水分的空间分布演变过程[36,46-48]。

有限元拟合法通过绝缘纸吸湿实验结果与计算结果的比对，自适应地调整扩散系数数值，进行参数辨识。文献[36]实验得到不同水分边界条件下的绝缘纸水分分布，采用遗传算法优化扩散系数取值以拟合模型分布与实验分布。实验时长 16 h 时，绝缘纸微水浓度随厚度及绝缘油微水含量变化的分布曲面如图 6 所示。图 6 为单侧水分扩散的分布结果，绝缘油含水率、绝缘纸含水率、绝缘纸厚度进行了归一化处理。

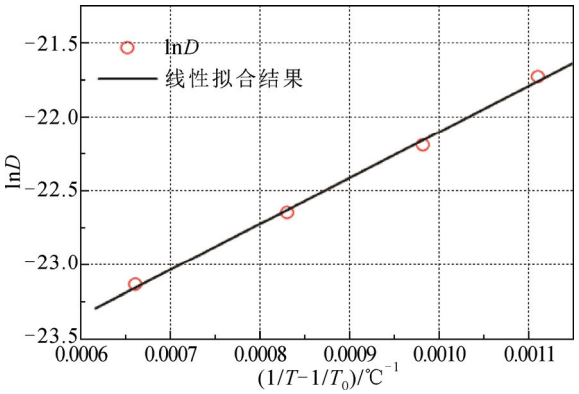


图 5　不同温度下扩散系数线性拟合[44]

Fig.5　Linear fitting of diffusion coefficient at different temperatures[44]

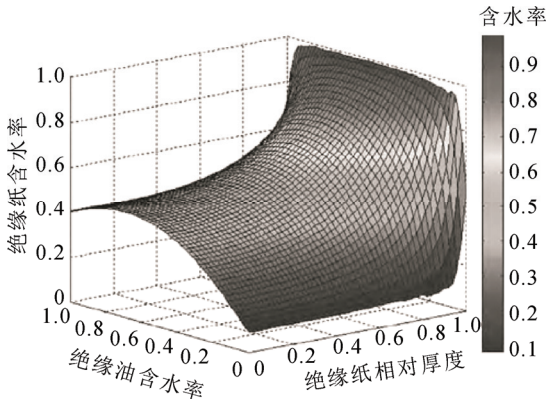


图 6　基于有限元方法的单侧微水扩散曲面[36]

Fig.6　Unilateral moisture diffusion surface based on finite element method[36]

多次扩散法通过改变绝缘纸的水分边界条件以研究水分空间分布变化。因水分迁移是长时间的过程，当绝缘纸中水分未达平衡时其边界含水率就可能发生变化，使水分重新分布，该方法仅考虑水分边界条件的变化。文献[46]采用二次扩散法研究了水分的动态分布特性，当初次水分迁移到一定程度时，改变绝缘纸的水分边界条件，使绝缘纸中水分重新分布。代表性结果如图 7 所示，其中初始边界含水率高于绝缘纸中含水率，二次扩散时边界含水率则低于纸中含水率。二次扩散开始后，纸边界部位迅速达到稳态值，中间部位因初次扩散尚未完成而含水率较低，因此二次扩散开始后一段时间内，绝缘纸中水分分布呈现双峰型。

暂态模型法是建立水分边界条件及温度变化的暂态水分迁移模型，进一步获得绝缘纸中水分的动态分布。根据温度对油纸水分平衡点的改变，将温度变化转变为绝缘纸水分边界条件的改变，从而

实现温度对水分分布的耦合计算。文献[47]采用Fick定律和数值分析法建立了油纸绝缘微水扩散的暂态模型，获得了油纸绝缘水分平衡时间的影响因素，将温度对平衡时间的影响解耦为对扩散系数和水分边界条件的双重影响。文献[48]实验模拟了5 h内从80 ℃至20 ℃的温度骤降，采用Fick定律计算水分分布，研究了水分的暂态迁移过程。对0.5~5 mm各处绝缘纸的含水率的测量结果表明，温度骤降条件下水分由绝缘油进入绝缘纸，降温条件可以等效为水分边界条件的升高。

现有研究从二次扩散、暂态模型的角度部分描述了水分空间分布的演变过程，但难以量化水分在多物理场梯度下的不均匀分布状态。为了充分描述温度、电场作用下水分的空间分布规律，本课题组提出了热湿耦合计算模型，其原理基于驱动势平衡，即绝缘纸水分平衡等价于水分蒸汽压梯度势、浓度梯度势及电场梯度势达到平衡[49]。其中，含水率相同的绝缘纸在不同温度下的蒸汽压不同，能够描述温度梯度对水分的驱动作用。

热湿耦合计算模型由传热方程与水分输运方程组成，耦合了传热过程中潜热和显热对热量的传递作用、温度和电场对水分的驱动作用及直流热效应。计算过程中，首先实现传热与水分输运耦合，水分输运以潜热的形式促进热量传递，并将导热系数等传热参数作为水分含量的函数；温度梯度的形成改变了绝缘纸中的水分蒸汽压分布，对水分产生驱动作用，使水分产生不均匀分布状态；电场以电磁热和电势驱动作用耦合入传热方程的热源项及水分输运方程。

采用该模型，获得了水分在温度梯度下的分布规律。绝缘纸两端温度梯度设为20 K，绝缘纸初始含水率设为2%。获得了绝缘纸厚度方向上典型水分分布结果，如图8所示。结果表明，在20 K温度梯度作用下，绝缘纸水分含量呈现“趋冷”规律，即当总水分含量一定时，水分分布与温度分布呈负相关关系，高、低温端含水率差达0.8%。

现有水分迁移的研究多基于Fick定律，以平衡曲线获得的稳态结果作为边界条件，通过实验拟合和仿真计算的方式获得水分迁移过程，从宏观角度分析了水分的迁移分布[49]。基于热湿耦合的计算模型基于驱动势平衡原理，能够量化温度、电场等多物理场梯度下水分时空分布，更充分地模拟实际变压器复杂物理场环境下的水分迁移特性。

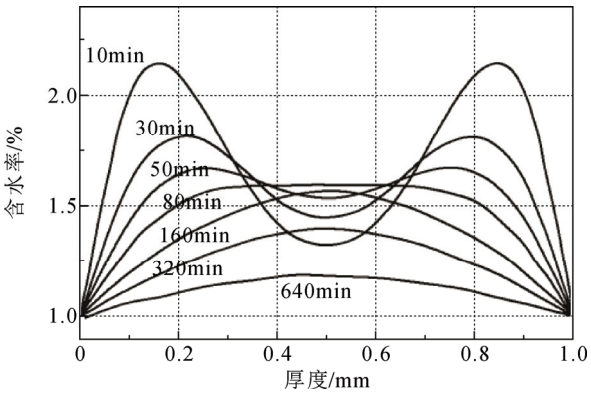


图7 绝缘纸二次扩散的水分分布曲线[46]

Fig.7 Moisture distribution curve of secondary diffusion in insulating paper[46]

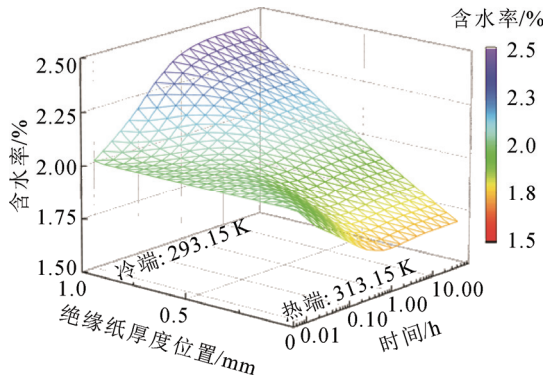


图8 采用热湿耦合计算温度梯度下水分不均匀分布

Fig.8 Calculation of moisture uneven distribution under temperature gradient

2 水分迁移特性

油纸绝缘中水分迁移是受多因素影响的复杂时空过程，与材料性质、温度、电场等作用密切相关。运行中变压器内部存在复杂温度场及电磁场[15-16]，长期运行的变压器因绝缘老化导致材料性质改变[50-53]。现有研究考虑了绝缘材料性质[54]、温度场及电场等因素对水分迁移的影响。

2.1 绝缘材料性质

绝缘纸老化、绝缘材料差异等材料性质影响水分迁移过程。绝缘纸老化是纤维素解聚的过程[55]，老化过程会导致水分迁移速度上升[4]。而绝缘材料引起的水分迁移变化是由于材料与水分的亲和性差异，内部极性基团的水分吸附速度与材料亲水性正相关[56]。

随着绝缘老化程度的加深，纤维聚合度不断降低，绝缘微观结构松散化，内部毛细通道增多，会使绝缘纸结构逐渐损坏，增强绝缘纸的吸湿能力，

从而影响水分迁移。文献[57-58]研究了绝缘纸老化对油浸纸和未浸油绝缘纸水分扩散系数的影响，提出了考虑以聚合度为老化因子的扩散系数表达式。以油浸纸为例，式(6)—式(8)为考虑老化因子的扩散系数方程。

$$D = D_1 \exp(kC - \frac{D_2}{T}) \tag{6}$$

$$D_1 = \left(2.3\times10^{-6} L^{0.9}\right)\exp\left(\frac{D_P}{758.22L^{0.054}}\right) + 9.2\times10^{-7}\exp\left(3.18L\right) + 4.1\times10^{-6} \tag{7}$$

$$D_2 = 4700.63L^{0.9} D_P^{\,0.05L^{-0.143}} \tag{8}$$

式中：L 表示绝缘纸厚度，mm；D_P 为聚合度值。

以新型绝缘油为例讨论绝缘材料对水分迁移特性的影响。文献[59]获得了 BIOELECTRA™及BIOTEMP™两种植物油浸纸的水分扩散系数，考虑了不同绝缘厚度的影响。实验采用热油干燥实验，在油浸纸表面通过恒定温度流量、低含水率的植物油，交换出绝缘纸中水分，测量绝缘纸厚度方向上含水率随时间的变化，最后根据 Crank 计算方法获得扩散系数[21]，如式(9)和(10)所示。结果表明植物油浸渍绝缘纸的水分扩散系数较矿物油浸纸大 1~2 个数量级。

$$D_{BE} = 1.6\times10^{-10} L^{2.9}\exp\left(0.18C - 1884L^{0.34}/T\right) \tag{9}$$

$$D_{BT} = 2.2\times10^{-10} L^{2.8}\exp\left(0.16C - 2041L^{0.27}/T\right) \tag{10}$$

式中：D_{BE}、D_{BT} 分别表示两种植物油的扩散系数；L 为绝缘纸厚度，mm；C 为绝缘纸含水率，%；T 为绝对温度，K。

从扩散系数的角度获得了材料性质对水分迁移的影响，绝缘纸老化、植物油浸纸等对水分扩散存在增强效应。绝缘纸老化、种类等性质对水分迁移规律影响较小，但扩散系数会发生变化。

2.2 温度

温度是影响油纸绝缘水分迁移的重要因素，其影响机制包括 3 个方面：从平衡曲线角度，温度变化会改变油纸绝缘的水分平衡点，影响迁移方向[30]；从微观分子相互作用角度[60]，温度通过影响水分子在绝缘油纸活性位点上的吸附能力改变水分迁移速度；温度与水分蒸汽压成指数关系，温度梯度通过产生水分蒸汽压梯度对水分产生驱动作用。温度变化使油纸绝缘水分始终处于动态变化中，因此有必要研究温度对水分迁移特性的影响[61]。

文献[62]建立了温度与水分传递耦合的多物理场模型，考虑了循环载荷和过载荷下的水分迁移。文献假设温度传递速度远快于水分，因此采用分步计算法对温度与水分进行解耦。在每个时间步长内，先进行温度稳态计算，再基于 Fick 定律获得水分迁移结果。结果表明，循环载荷下油纸绝缘温度、纸中水分随载荷循环呈现类正弦变化，水分的变化趋势与温度相反，并存在一定滞后。图 9 为过载荷下绝缘纸温度突变时水分平衡值与实际计算值的变化图像，结果显示水分平衡值在温度突变的时间内均低于计算值，即温度突变下水分迁移难以达到平衡。

暂态温升作用下，油纸绝缘的水分平衡点向下移动，驱使水分向绝缘油迁移。文献[63]仿真分析了当绝缘油纸比确定情况下油纸界面水分随温度变化的规律，结果认为油纸界面水分在冷却和加热条件下分别发生聚集和分散，温度变化梯度越大，绝缘油纸中的平均含水率变化越快，油纸界面吸附或解吸的水分越多。运行变压器负载变化引起的温度循环会使绝缘油纸间也存在水分循环，文献[64]实测得到了绝缘油中水分的循环结果，如图 10 所示，图中 RS 为油中水的相对饱和度，蓝色部分是类滞回曲线形态的水分含量日循环结果的叠加。类滞回曲线的结果说明了温度驱动水从绝缘纸中吸附和解吸的相对滞后现象，即变压器温度升高时，绝缘纸中水进入油中的速度比变压器降温时纸从油中吸附的速度更快。

采用分子动力学方法模拟研究水分子在不同温度下与油纸结构的相互作用，能从微观角度深入理解温度对水分迁移的影响。文献[65]研究了 343~423 K 温度范围植物油中水分迁移特性，结果认为随着温度的升高，植物油分子和水分子间的氢

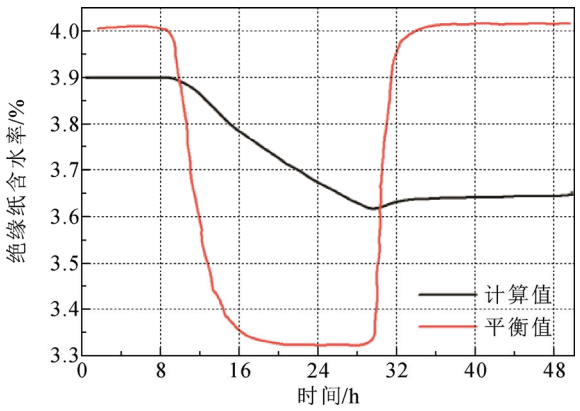


图 9 温度突变下水分含量变化[62]

Fig.9 Change of moisture content during sudden change of temperature[62]

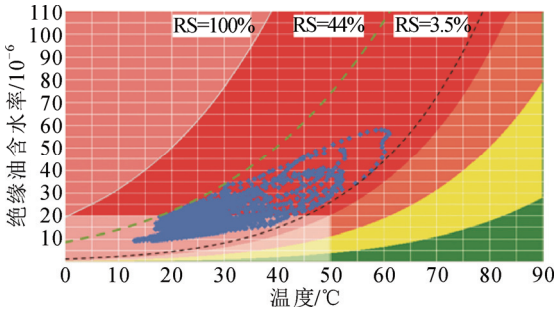


图 10 温度循环下水分云图[64]

Fig.10 Moisture cloud chart under cyclic temperature[64]

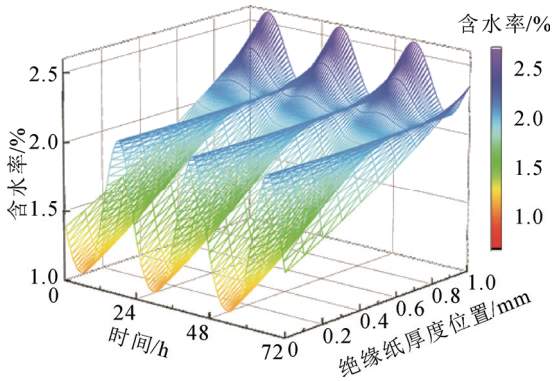


图 11 循环温升条件下水分动态演变过程

Fig.11 Moisture dynamic change under cyclic temperature rise

键数量减少、相互作用能降低、水分子运动加剧，水分更易迁移。文献[66-67]通过分子动力学计算发现水分油纸交界面处水分法向扩散系数很低，即油纸水分交换速率慢于水分在纸中迁移。体系升温时，绝缘纸中水分向绝缘油中迁移，水分子会在油纸交界面处形成水分子团簇，使界面含水率升高。

现有研究关注温度对水分迁移两方面的影响作用：一是温度改变水分平衡点影响油纸水分迁移方向，绝缘纸水分含量与温度变化呈相反趋势；二是温度影响水分在绝缘纸中的迁移速度，扩散系数随温度升高而增大。然而，研究中并未考虑温度梯度作用，温度梯度的存在会造成水分空间上的不均匀分布，目前的研究无法描述这一现象。

采用前述的热湿耦合模型能够描述温度梯度下水分空间分布不均匀现象，通过改变温度边界条件能够获得水分随温度变化的时变规律。以循环载荷下水分动态迁移过程为例，设绝缘纸厚度为 1 mm，高温端温度边界条件为正弦变化，变化幅值为 30 K，低温端恒温 293.15 K，两端含水率通量边界条件一致。获得的水分随温度的变化规律如图 11 所示，展示了 1mm 厚绝缘纸各部位含水率的变化结果。绝缘纸水分随温度变化呈类正弦变化，趋势和温度变化相反存在约 8 h 滞后，且远高温端绝缘纸水分含量高于近高温端。结果验证了热湿耦合模型能够实现循环负载下水分时空分布的准确计算。

2.3 电场

电场对水分迁移的影响主要体现在两方面：首先，由于水的介电常数远大于绝缘油，受电场梯度力作用，微水杂质向强场区域运动[19,68]，该驱动力和电场梯度正相关；其次在电渗流作用下，水合阳离子被吸引，附着于绝缘纸内部带负电的毛细微管、孔隙壁通道壁上，在电场的驱动下发生迁移，该驱动力与电势梯度正相关[69]。已有研究大多针对直流电场作用下的水分迁移特性，以仿真模拟研究为主。

文献[70]针对直流电场对水分迁移的抑制作用进行了研究，建立了考虑材料吸力势、重力势、水分浓度及电场共同作用下的水分迁移模型，如式(11)和(12)所示，通过驱动势的思想研究各因素对水分迁移的作用。

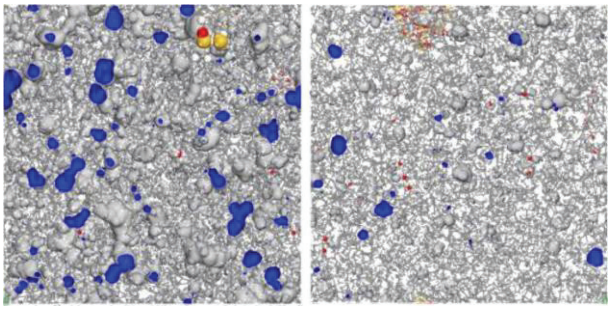
$$C_{\mathrm{P}}\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-\sigma_{\mathrm{e}}(\theta)\nabla\varphi\right)=0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-K(\theta)\nabla\psi+\left(-K_{\mathrm{e}}\nabla\varphi\right)\right)=0 \tag{12}$$

式中：C_{P}为单位体积电容量，F/m³；σ_{e}为电导率，S/m；φ为电势，V；θ为单位体积含水量，%；$K(\theta)$为渗透系数，m/s；ψ为材料的吸力势，m；K_{e}为电渗透系数，m²/(V·s)。

采用分子动力学方法研究电场作用下油纸绝缘的水分迁移特性能够计算得到电场对水分子的短程作用[71-75]。文献[71-72]采用分子动力学模拟了在电场作用下绝缘纸纤维素晶面及无定形区水分的迁移。结果表明强电场会改变水分子的键角从而加强水分子与绝缘纸基团的相互作用，降低水分迁移能力。电场对水分子的作用表现出各向异性，沿直流场方向扩散能力降低最多。文献[73]研究了纳米SiO_2改性矿物油中水分子迁移特性受电场的影响。电场作用下对改性矿物油自由体积的影响如图 12 所示，其中蓝色部分为自由体积。结果表明电场作用下体系的自由体积分数、均方位移减小，导致水分子的扩散能力减弱。综上，外施电场会降低水分子的自由体积，增强水分子和绝缘油纸的相互作用，表现出电场对水分的束缚作用。

已有仿真研究表明电场对水分自由扩散具有抑制作用，但微观模拟并不能描述电场对水分的驱动作



(a) 无外施电场 (b) 有外施电场

图 12 电场对自由体积影响的分子模拟研究[72]

Fig.12 Molecular simulation of the effect of electric field on free volume[72]

用，水分在多物理场作用下的宏观迁移过程无法获得，仍需进一步建立耦合电场驱动作用的计算模型。

引入电场驱动势，利用前述热湿耦合模型能够计算电场对宏观迁移过程的作用。以直流电场下绝缘纸的含水率分布计算为例，直流电场与水分迁移方向相同，场强为 10 kV/mm，绝缘纸厚度为 1 mm，两侧含水率通量边界条件分别为 2%和 4%，温度恒定为 293.15 K，获得的水分空间分布如图 13 所示。结果表明直流电场会提高绝缘纸平衡含水率，同时对水分的分布有一定影响：仅有浓度梯度作用下时，水分沿厚度方向呈线性分布，电场作用下，水分偏离直线，体现出非线性。该现象是由电场驱动势及电导调制场协同造成的：额外增加的直流电场对于水分的驱动势等效为更高的绝缘纸水分梯度，相当于平衡点移动，绝缘纸整体水分含量上升；同时绝缘纸电导率与水分含量强相关，造成内部电场畸变，导致了水分的非线性分布。

2.4 电热耦合

变压器内部的温度场及电场并不是独立存在的，水分迁移受到多物理场的耦合作用。为了贴近实际变压器运行环境，还应开展电热耦合作用下的水分迁移特性研究。

文献[76]从温度场、电场及流场耦合的角度分析了多物理场耦合作用下的水分迁移特性。首先计算变压器中的温度场、电磁场的初始分布，将其作为水分迁移的环境条件，再基于 Fick 扩散定律计算水分迁移分布。根据变压器样机建立三维计算模型，得到的典型参量变化结果如图 14 所示[76]。结果表明，温度、含水率等均随负载变化而呈类正弦变化，相互之间存在一定的相位差。研究建立的三维模型考虑了多物理场对扩散系数的影响，但未准确获得

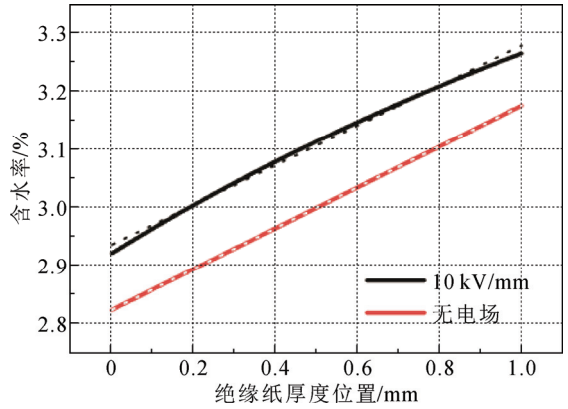


图 13 有无外施电场下稳态水分分布的对比

Fig.13 Comparison of steady moisture distribution with and without external electric field

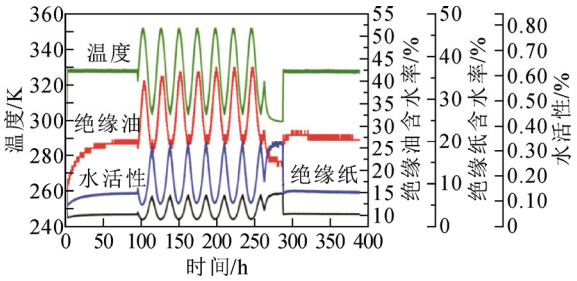


图 14 变压器样机的温度、油中水活度、油中水分和纸含水率的类正弦变化规律[76]

Fig.14 Sinusoidal variation of temperature, moisture activity in oil, moisture in oil and moisture content in cellulose paper of prototype transformer[76]

电热耦合作用下的水分迁移特性。

3 研究展望及结论

1）推进基于水分时空分布无损测量的实验研究：从测量方法角度，目前多采用卡尔费休法对油纸绝缘的整体水分含量进行表征。卡尔费休法需取样测量且响应速度慢，难以获得绝缘纸在不同时间、空间位置的水分分布演变规律，限制了多物理场作用下水分时空分布实验研究的开展。因此需要进一步发展包括介电响应测量方法在内的水分时空分布的无损测量方法，进行实时准确的水分监测，并考虑温度、水分、测量频率等因素建立水分测量数据库，推进开展多物理场作用下水分时空分布状态的实验研究。

2）深化多物理场耦合下水分迁移建模：Fick 定律表征了水分在浓度梯度下的扩散过程，获得多

物理场对水分迁移速度的影响规律，但无法体现多物理场作用下水分不均匀分布的事实。耦合多物理场的水分迁移模型采用分步计算的方式将多物理场单向耦合，本质上仅表征了水分浓度梯度的驱动作用，未能从多物理场作用机理角度获得水分迁移特性。热湿耦合模型提供了基于多物理场作用原理的多场耦合方式，更全面地描述水分迁移的时空动态过程。后续研究应在热湿耦合模型的基础上进一步拓展多物理场耦合的水分迁移模型，阐明驱动势参数与水分迁移物理过程的内禀关系，重点关注多因素影响下绝缘油纸参数性质变化规律。

3）构建多物理场下水分迁移理论体系：水分迁移受温度、电场等多种因素影响，现有研究以多场影响下的扩散过程对油纸绝缘中的水分迁移进行近似，多物理场对水分迁移的影响规律及机理尚不清楚。基于分子动力学的仿真研究能在一定程度上获得多物理场对水分子的影响，研究了恒定温度、电场条件下微水与绝缘油纸分子作用的规律。未来研究需要剖析温度、电场等多物理场耦合作用对水分驱动的微观机理，并构建微观机理与宏观影响的桥梁，建立多物理场下油纸绝缘水分迁移理论体系。

参考文献 References

[1] CHENG C H, FU M L, WU K, et al. Aging effect on interface charges between oil and oil immersed paper[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1579-1587.

[2] 李清泉，王良凯，王培锦，等. 换流变压器油纸绝缘局部放电及电荷分布特性研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2815-2829.
LI Qingquan, WANG Liangkai, WANG Peijin, et al. Review on partial discharge and charge distribution characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2815-2829.

[3] ZHOU X, WERLE P, GOCKENBACH E, et al. Study of oil/pressboard creeping discharges under divergent AC voltage—Part 1: fundamental phenomena and influencing factors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 355-363.

[4] SOKOLOV V, AUBIN J, DAVYDOV V, et al. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems[J]. Electra (France), 2008, 238: 24-33.

[5] 张 涛，张 宁，江世杰，等. 基于改进分数 Poynting-Thomson 模型的油纸绝缘受潮状态评估[J]. 高电压技术，2022，48(3)：829-838.
ZHANG Tao, ZHANG Ning, JIANG Shijie, et al. Evaluation of oil-paper insulation moisture state based on improved fractional poynting-thomson model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 829-838.

[6] 陈楚羽，刘孝为，高宏伟. 西北电网 1994～2000 年 330 kV 变压器类设备运行状况综述[J]. 电力设备，2001，2(1)：20-24.
CHEN Chuyu, LIU Xiaowei, GAO Hongwei. Operation conditions of 330 kV transformer equipment in northwest power system in 1994~2000[J]. Power Equipment, 2001, 2(1): 20-24.

[7] 张建华，甘 强，秦延山. 一起 220 kV 变压器电缆出线装置故障分析[J]. 变压器，2017，54(6)：69-73.
ZHENG Jianhua, GAN Qiang, QIN Yanshan. Fault analysis of cable outlet device in 220 kV transformer[J]. High Voltage Technology, 2017, 54(6): 69-73.

[8] 郭 蕾，张传辉，廖 维，等. 基于 Dissado-Hill 模型的油纸绝缘受潮参数特征与评估方法[J]. 电工技术学报，2021，36(23)：5058-5068.
GUO Lei, ZHANG Chuanhui, LIAO Wei, et al. Oil-paper insulation moisture parameter characteristics and evaluation method based on Dissado-Hill model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 5058-5068.

[9] 高 萌. 油浸绝缘纸热致气泡形成特性与机制研究[D]. 西安：西安交通大学，2020：7-9.
GAO Meng. Study on formation characteristics and mechanisms of thermal-induced bubble in oil-immersed insulation paper[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2020: 7-9.

[10] LIAO C B, RUAN J J, LIU C, et al. 3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-Immersed triangular wound core transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8401904.

[11] RAJNAK M, TIMKO M, KOPCANSKY P, et al. Transformer oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1343-1349.

[12] 谢裕清，李 琳，宋雅吾，等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5957-5965.
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-Physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.

[13] 丁玉琴，张乔根，高 萌，等. 油浸式配电变压器分布式热路模型[J]. 高电压技术，2019，45(3)：968-974.
DING Yuqin, ZHANG Qiaogen, GAO Meng, et al. Distributed thermal circuit model of oil-immersed distribution transformer[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 968-974.

[14] DECLERCQ J, HALL S, LUNGAARD L, et al. Thermal performance of transformers[J]. Electra (France), 2009, 24(6): 38-45.

[15] IEC. Power transformers-Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers: IEC 60076-7[S]. Geneva: IEC, 2018.

[16] 李清泉，王良凯，王培锦，等. 换流变压器油纸绝缘局部放电及电荷分布特性研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2815-2829.
LI Qingquan, WANG Liangkai, WANG Peijin, et al. Review on partial discharge and charge distribution characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2815-2829.

[17] ZHANG L X, CHEN M S, PENG Z R, et al, The DC electric field analysis of valve side outlet device in converter transformer considering nonlinear and anisotropic characteristics[C] // 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Bologna, Italy: IEEE, 2013: 963-966.

[18] 于会民，王会娟，张 绮，等. 变压器油纸绝缘体系中水分和气体含量研究[J]. 绝缘材料，2019，52(3)：86-90.
YU Huimin, WANG Huijuan, ZHANG Qi, et al. Study on water and gas content in oil-paper insulation system of transformer[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 86-90.

[19] 俞剑刚. 大型油浸式电力变压器绝缘受潮的综合分析处理[D]. 杭州：浙江大学，2008.
YU Jian'gang. Comprehensive analysis and treatment of insulation moisture of large oil immersed power transformer[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2008.

[20] 梁 晨. 换流变压器长期存放绝缘受潮仿真与试验研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
LIANG Chen. Simulation and experimental study on insulation damp for converter transformers with long-term storage[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.

[21] 杜伯学，姜金鹏. 换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2932-2945.
DU Boxue, JIANG Jinpeng. Research progress on influence of water content of oil-paper insulation on partial discharge of converter trans-

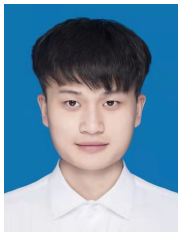
former[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2932-2945.
[22] FOSS S D, SAVIO L. Mathematical and experimental analysis of the field drying of power transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1820-1828.
[23] KULASINSKI K, GUYER R, DEROME D, et al. Water diffusion in amorphous hydrophilic systems: a stop and go process[J]. Langmuir, 2015, 31(39): 10843-10849.
[24] ITAHASHI S, MITSUI H, SATO T, et al. State of water in hydrocarbon liquids and its effect on conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(6): 1117-1122.
[25] KAUFMAN R B, SHIMANSK E J, MACFADYEN K W. Gas and moisture equilibriums in transformer oil[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, 1955, 74(3): 312-318.
[26] KASSIHIN S D, LISUNOV S D, LIPSTEIN G R, et al. Service experience and reasons of bushing failures of EHV transformers and shunt reactors[R]. CIGRE Papers, 1996: 12-105.
[27] DU Y, ZAHN M, LESIEUTRE B C, et al. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(1): 11-20.
[28] FABRE J, PICHON A. Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformers[C]// International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE), Paris, France: CIGRE, 1960: 137.
[29] EWART D N. Laboratory and factory measurements of moisture equilibrium in power transformer insulation[J]. GETIS Report 60PT44, 1960.
[30] OOMMEN T V. Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems[C]// Proceedings of the 1983 EIC 6th Electrical/Electronical Insulation Conference. Chicago, USA: IEEE, 1983: 162-166.
[31] FESSLER W A, MCNUTT W J, ROUSE T O. Bubble formation in transformers[R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 1987.
[32] PAHLAVANPOUR, MARTINS M, EKLUND. Study of moisture equilibrium in oil-paper system with temperature variation[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 1124-1129.
[33] 王 伟，马志青，李成榕，等. 纤维素老化对油纸绝缘水分平衡的影响[J]. 中国电机工程学报，2012，32(31)：100-105.
WANG Wei, MA Zhiqing, LI Chengrong, et al. Impact of cellulose aging on moisture equilibrium of oil-pressboard insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 100-105.
[34] YUAN Q, BO Q, ZHAO J S, et al. Effect of DC electric field on moisture migration characteristics in oil-pressboard[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 647-654.
[35] DU Y Q, ZHAN M. Dielectrometry measurements of effects of anti-static additives on transformer board[C] // Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Millbrae, USA: IEEE, 1996: 194.
[36] 彭 倩，李先浪，姚 晓，等. 典型油纸绝缘微水扩散特性仿真分析及试验研究[J]. 高压电器，2014，50(1)：31-36.
PENG Qian, LI Xianlang, YAO Xiao, et al. Simulation and experimental research of typical moisture diffusion in oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 31-36.
[37] WANG D Y, ZHOU L J, WANG A, et al. Effects of thermal aging on moisture diffusion in insulation paper immersed with mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1888-1896.
[38] FOSS S D. Power transformer drying model[R]. New York, USA: General Electric Company, 1987: 1-4.
[39] GARCIA D F, GARCIA B, BURGOS J C. A review of moisture diffusion coefficients in transformer solid insulation-part 1: coefficients for paper and pressboard[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(1): 46-54.
[40] DU Y, MAMISHEV A V, LESIEUTRE B C, et al. Measurement of moisture diffusion as a function of temperature and moisture concentration in transformer pressboard[C]// 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, USA: IEEE, 1998: 341-344.
[41] LI J, ZHANG Z T, GRZYBOWSKI S, et al. Characteristics of moisture diffusion in vegetable oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1650-1656.
[42] VILLARROEL R, GARCÍA D F, GARCÍA B, and et al. Diffusion coefficient in transformer pressboard insulation part 2: mineral oil impregnated[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 394-402.
[43] VILLARROEL R, GARCÍA D F, GARCÍA B, et al. Diffusion coefficient in transformer pressboard insulation part 1: non impregnated pressboard[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 360-368.
[44] 高 萌，张乔根，丁玉琴，等. 油浸式变压器匝间纸绝缘中水分扩散特性[J]. 高电压技术，2019，45(1)：117-123.
GAO Meng, ZHANG Qiaogen, DING Yuqin, et al. Moisture diffusion characteristics in turn-to-turn paper insulation of oil-impregnated transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 117-123.
[45] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M, et al. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - part I: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1417-1422.
[46] 林元棣，廖瑞金，夏桓桓，等. 油纸绝缘微水二次扩散过渡过程的分析[J]. 电工技术学报，2016，31(10)：16-25.
LIN Yuandi, LIAO Ruijin, XIA Huanhuan, et al. Analysis of transition process during secondary diffusion of moisture in oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 16-25.
[47] 周利军，汤 浩，张血琴，等. 油纸绝缘微水扩散的暂态分布模型[J]. 中国电机工程学报，2008，28(7)：134-140.
ZHOU Lijun, TANG Hao, ZHANG Xueqin, et al. Disequilibrium moisture partition in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 134-140.
[48] WANG W, MA Z Q, WANG X, et al. Distribution of moisture in oil immersed pressboard under transient temperature condition[C]// 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 897-900.
[49] 吴广宁，段宗超，崔运光，等. 应用极化/去极化电量差模型分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术，2015，41(2)：592-601.
WU Guangning, DUAN Zongchao, CUI Yunguang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization charge difference model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 592-601
[50] HOHLEIN I, KACHLER A J. Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(5): 20-24.
[51] 廖瑞金，尹建国，杨丽君，等. 油纸绝缘热老化过程中含水量变化趋势及水分转移规律[J]. 高电压技术，2010，36(4)：828-834.
LIAO Ruijin, YIN Jianguo, YANG Lijun, et al. Moisture content variation and transfer of oil-paper insulation during thermal aging process[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 828-834.
[52] 王晓剑，王 娟，石 颉，等. 油纸绝缘老化产物对油中水分饱和溶解度的影响[J]. 绝缘材料，2015，48(8)：46-50.
WANG Xiaojian, WANG Juan, SHI Jie, et al. Influence of ageing products of oil-paper insulation on water saturation solubility in oil[J]. Insulating Materials, 2015, 48(8): 46-50.
[53] YANG L J, ZOU T T, DENG B F, et al. Assessment of oil-paper insulation aging using frequency domain spectroscopy and moisture equilibrium curves[J]. IEEE Access, 2019, 7: 45670-45678.
[54] LI J, ZHANG Z T, GRZYBOWSKI S, et al. A new mathematical model of moisture equilibrium in mineral and vegetable oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1615-1622.
[55] 崔家齐，董海鹰，李帅兵，等. 基于图像特征识别的绝缘纸老化状态评估[J]. 高电压技术，2022，48(2)：636-643.

CUI Jiaqi, DONG Haiying, LI shuaibing, et al. Aging state evaluation of insulating paper based on image feature recognition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 636-643.
[56] FAN X F, ZHAO H, SUN T Y, et al. Investigation on diffusion mechanisms of methanol in paper/oil insulation based on molecular dynamics simulation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 13368-13377.
[57] 周利军，陈雪骄，王　安，等. 老化状态对未浸油绝缘纸水分扩散的影响[J]. 电工技术学报，2019，34(15)：3293-3301.
ZHOU Lijun, CHEN Xuejiao, WANG An, et al. Effect of aging condition on moisture diffusion in non-impregnated insulation paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3293-3301.
[58] 周利军，李会泽，王　安，等. 纤维素老化对矿物油浸绝缘纸中水分扩散的影响[J]. 电工技术学报，2019，34(7)：1536-1543.
ZHOU Lijun, LI Huize, WANG An, et al. Effects of cellulose ageing on moisture diffusion in paper immersed with mineral oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1536-1543.
[59] VILLARROEL R, GARCÍA D F, GARCÍA B, et al. Moisture diffusion coefficients of transformer pressboard insulation impregnated with natural esters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 581-589.
[60] 刘　君，吴广宁，周利军，等. 油纸绝缘体系微水扩散的分子模拟[J]. 高电压技术，2010，36(12)：2907-2912.
LIU Jun, WU Guangning, ZHOU Lijun, et al. Moisture diffusion in oil-paper insulation using molecular simulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2907-2912.
[61] 董旭柱，张　琛，阮江军，等. 油浸式电力变压器动态载荷评估技术研究与应用[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1959-1968.
DONG Xuzhu, ZHANG Cheng RUAN Jiangjun, et al. Research and practices of dynamic thermal rating for oil-immersed power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1959-1968.
[62] GARCÍA B, VILLARROEL R, GARCÍA D. A multiphysical model to study moisture dynamics in transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1365-1373.
[63] JIANG J P, DU B X, LI J, et al. Simulation analysis of moisture dynamics in oil/pressboard system under variable temperature[C]// 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020: 625-628.
[64] ROIZMAN O, DUKARM J J. Advanced moisture assessment for transformers[J]. NETA World, 2020: 84-93.
[65] QIU Q P, YANG L, GUI Y G, et al. Molecular simulation of moisture diffusion in vegetable insulation oil at different temperatures[C]// 2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). East Rutherford, USA: IEEE, 2020: 459-461.
[66] 王　伟，董文妍，李芳义，等. 升温过程中水分子在油纸界面处的迁移和聚集行为的分子模拟[J]. 高电压技术，2019，45(11)，3539-3546.
WANG Wei, DONG Wenyan, LI Fangyi, et al. Molecular simulation of migration and aggregation behavior of water molecules at interface of mineral oil and cellulose during rapid temperature rising[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3539-3546.
[67] WANG W, DONG W Y, JIANG D, et al. Water molecules migration at oil-paper interface under the coupling fields of electric and temperature: a molecular dynamics study[J]. Molecular Physics, 2019, 117(1): 11-22.
[68] 贺　博，王　鹏，吴　锴，等. 多物理场中染污绝缘油内杂质相动力学行为研究综述[J]. 电工技术学报，2021，36(1)：266-282.
HE Bo, WANG Peng, WU Kai, et al. Reviews on impurity phase dynamics in contaminated insulating oil under multi-physical field conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 266-282.
[69] 张继红，岳湘安，陈喜玲，等. 直流电场下油藏多孔介质中渗流特性的变化[J]. 高电压技术，2005，31(5)：44-46.
ZHANG Jihong, YUE Xiang'an, CHEN Xiling, et al. Variation of seepage flow characteristics in porous media of water-drive reservoir in DC Electric Field[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 44-46.
[70] 杨冰卓. 非饱和土在直流电场作用下水分分布研究[D]. 兰州：兰州大学，2017.
YANG Bingzhuo. Moisture redistribution in the unsaturated soil subjected to DC electric field[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University, 2017.
[71] 王有元，杨　涛，田　苗，等. 电场对绝缘纸中水分扩散特性的影响[J]. 电工技术学报，2015，30(1)：195-203.
WANG Youyuan, YANG Tao, TIAN Miao, et al. Impact of electric field on the moisture diffusion properties of insulation paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 195-203.
[72] TIAN M, WANG Y Y, FAN P. Impact of electric field on the moisture diffusion properties of insulation paper: a molecular dynamics simulation study[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: IEEE, 2014: 485-488.
[73] 邱秦攀，张静文，王　谦，等. 电场和温度协同作用对纳米 SiO_2 改性绝缘油中水分子扩散行为的影响[J]. 绝缘材料，2021，54(3)：36-41.
QIU Qinpan, ZHANG Jingwen, WANG Qian, et al. Effects of electric field and temperature synergism on diffusion behavior of water molecules in nano-SiO_2 modified insulating oil[J]. Insulating Materials, 2021, 54(3): 36-41.
[74] 杨　涛. 温度及电场对油浸绝缘纸微观特性影响的分子动力学研究[D]. 重庆：重庆大学，2013.
YANG Tao. Molecular dynamics study on the impact of temperature and electric field on the microscopic properties of oil-immersed insulation paper[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2013.
[75] LIAO R J, ZHU M Z, YANG L J, et al. Molecular dynamics study of water molecule diffusion in oil-paper insulation materials[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(5): 1162-1168.
[76] CUI Y, MA H, SAHA T, et al. Multi-physics modelling approach for investigation of moisture dynamics in power transformers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1993-2001.



WU Zhicheng
Ph.D.

吴治诚
1993—，男，博士，助理教授，硕导
主要从事 GIS/GIL 设备绝缘可靠性评估提升及先进电工环氧材料制备与研发的研究工作
E-mail: hvzcwu@xjtu.edu.cn



ZHOU Junjie
Ph.D. candidate

周俊杰
1999—，男，博士生
主要从事变压器油纸绝缘放电特性的研究工作
E-mail: junjie_zhou_c@163.com



ZHANG Qiaogen
Ph.D., Professor
Corresponding author

张乔根(通信作者)
1965—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备绝缘与结构设计技术及新一代智能输变电技术等方面的研究工作
E-mail: hvzhang@xjtu.edu.cn

收稿日期　2022-04-20　修回日期　2022-10-20　　编辑　曹昭君