

换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述

杜伯学, 姜金鹏

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 换流变压器是高压直流输电系统中的核心设备, 起到连接交直流系统的关键作用。油纸绝缘作为换流变压器的主绝缘, 其绝缘性能的优劣对整个输电系统具有重要意义。水分会由于绝缘老化和外部水分侵入等原因不可避免地存在于油纸绝缘系统中, 不仅使绝缘本身的绝缘强度显著降低, 还会吸附在绝缘纸表面, 增加界面缺陷数量, 畸变局部电场, 严重时引发局部放电甚至绝缘失效, 对油纸绝缘系统的可靠性和换流变压器的安全稳定运行都构成了极大的威胁。为此综合国内外研究现状, 分析了换流变压器中的水分来源、存在状态和分布特点, 探讨了油纸绝缘中水分平衡与迁移的内在机制和动态规律, 总结了水分对油纸绝缘运行工况下电荷和局部放电特性的影响规律和作用机制, 特别论述了油纸绝缘交界面处水分动态行为, 指出运行工况下水分迁移的暂态过程对油纸绝缘界面电荷和局部放电的影响不容忽视。

关键词: 换流变压器; 油纸绝缘; 水分; 空间电荷; 局部放电

Research Progress on Influence of Water Content of Oil-paper Insulation on Partial Discharge of Converter Transformer

DU Boxue, JIANG Jinpeng

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Converter transformer is the core equipment in HVDC transmission system, which plays a key role in connecting AC and DC system. Oil-paper insulation is the main insulation of converter transformer, whose insulation performance is of great significance to the transmission system. Moisture will inevitably exist in the oil-paper insulation system due to insulation aging and external moisture intrusion. Meanwhile, moisture not only significantly reduces the dielectric strength of the insulation, but also is adsorbed onto the surface of the insulation paper, increases the number of interface defects and distorts the local electric field, and causes partial discharge or even insulation failure, which pose a great threat to the reliability of the oil-paper insulation system and the stable operation of the converter transformer. We review its research status in the world, analyze the source, existing state and distribution characteristics of moisture in converter transformers, explore the internal mechanism and dynamic law of moisture balance and migration in oil-paper insulation, and summarize the law and mechanism of moisture effect on the characteristics of charge and partial discharge of oil-paper insulation under operating conditions. The dynamic behavior of moisture at the interface of oil-paper insulation is emphasized especially. It is pointed out that the influence of transient process of water migration on the charge and partial discharge of oil-paper insulation under operating conditions can not be neglected.

Key words: converter transformer; oil-paper insulation; moisture; space charge; partial discharge

0 引言

由于我国能源和电力负荷分配不均, 一直以来, “西电东送”成为维持电力供需平衡的重要手段。随着西南水电资源开发殆尽, 其传统的辐射供能区域需寻找新的供能方向。未来跨省跨区输电通道布局除了要稳定“西电东送”外, 还需增加“北电南

送”, 以适应我国电力新格局^[1]。根据《中国电力行业年度发展报告 2020》, 预计 2035 年我国非化石能源发电装机比重>60%, 发电能源占一次能源消费比重>57%。特高压工程投资占比将继续提高^[2]。目前, 我国正积极设计着以特高压技术为核心的能源互联网, 其中特高压直流输电是指±800 kV 及以上直流输电工程, 具有输送距离远、输电容量大、输电损耗低、走廊宽度小等优点, 已成为能源大规模调配的首选输电方式^[3-5]。

换流变压器是特高压直流输电工程的核心设

基金资助项目: 国家自然科学基金(51537008; U1966203)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51537008, U1966203).

备, 它的主要作用包括: 提供交流和直流系统间的电流隔离, 阻止直流电压进入交流系统; 提供足够宽的分接头范围, 为换流阀提供正确的电压; 限制稳态交流电压的改变对换流阀运行条件的影响; 提供故障限流阻抗, 减小短路电流并控制换流时阀侧电流的增长率; 通过星形和三角形绕组提供 12 脉冲操作所需的 30°相移^[6]。因此, 换流变压器的可靠运行对于整个输电系统的安全稳定至关重要。

国际大电网组织指出: 换流变压器内部连接件、阀侧绕组和出线套管的绝缘失效占其总故障的 65%, 主要是由沿面闪络、介质击穿等绝缘破坏所致^[7]。国家电网公司对 2006—2015 年不同电压等级换流变压器的故障进行统计发现, 阀侧绕组类故障占总故障的 76%, 其中油纸绝缘放电和局部过热引起的故障率达 65%^[8]。

油纸绝缘是换流变压器的主绝缘形式, 在电场、热场、磁场和机械应力等复杂工况的长期作用下, 很容易产生缺陷。绝缘缺陷引起的局部放电会造成绝缘系统的潜伏性故障或直接导致故障。由于水分侵入和绝缘老化等, 水分广泛存在于换流变压器的绝缘油和纤维素绝缘中, 是油纸绝缘中最常见的绝缘缺陷之一。油纸绝缘水分含量的增加不仅会加速油纸绝缘的老化进程、降低油纸绝缘的绝缘强度, 还会畸变局部电场, 诱发局部放电, 并加速局部放电发展速度, 最终导致沿面闪络或击穿的发生。因此, 水分是影响油纸绝缘性能的重要因素。目前, 国内外学者针对电力变压器中水分对油纸绝缘电荷特性、介电特性、电导特性以及局部放电特性等都进行了较为全面的研究, 但是由于换流变压器中油纸绝缘所处的运行工况比较复杂, 复杂工况下水分对油纸绝缘特性的影响规律和机理尚不清晰。

本文综合国内外研究现状, 总结了油纸绝缘中的水分状态和分布特性, 探讨了油纸绝缘中水分平衡和迁移的内在机制, 分析了水分对油纸绝缘电荷和局部放电特性的影响规律和作用机理。其次, 本文聚焦暂态过程中油纸绝缘的界面水分动态特性, 分析了界面水分积聚的负面影响。最后得出结论并对未来发展方向进行展望。由于换流变压器和电力变压器中的油纸绝缘特性有一定的相似性, 为了更好地指导换流变压器中水分影响下油纸绝缘特性的研究, 本文也总结了电力变压器油纸绝缘中关于水分的代表性研究成果, 以期为换流变压器中油纸绝缘的后续研究提供一定的理论基础。

1 换流变压器油纸绝缘的水分来源

换流变压器油纸绝缘中的水分主要来源于三方面: 绝缘结构的残留水分、外部水分的侵入和油纸绝缘的老化裂解。

1.1 残留水分

在换流变压器的制造、运输、储存及运行一系列过程中, 虽然会经过真空干燥、真空注油和热油循环等一系列除水工艺, 但是油纸绝缘中仍然会残留一定量的水分^[9]。按照工艺控制要求, 换流变压器油中剩余水分质量分数一般需要控制在 $10 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ 范围内, 固体绝缘中残留水分质量分数一般需要控制在 0.2%~0.5% 范围内^[10]。

1.2 水分侵入

空气中的水分是油纸绝缘水分的主要来源。换流变压器在升高座和套管安装时, 油箱内部会暴露在空气中^[11]。在换流变压器运行过程中, 箱盖、套管、法兰等部位密封不严, 会发生水分泄漏或潮湿空气的吸入。此外在维修过程中, 打开封盖或实施吊罩、吊芯检查处理时, 器身暴露在大气中, 绝缘纸会直接从空气中吸收水分。湿空气在压力梯度作用下的进入是水分入侵的主要机制^[12]。文献[13]通过试验和仿真手段研究了换流变压器运输和存放过程中密封良好、密封失效以及抽真空情况下变压器内部与大气水分的交互作用。研究结果表明换流变压器内外压力差是导致水分侵入的决定性因素, 温度下降过快直接引起压力变化, 导致大气水分进入到换流变压器内部。

1.3 绝缘老化裂解

在换流变压器运行过程中, 油纸绝缘在电场、温度、磁场、机械振动等因素的作用下发生老化。由于直流偏磁和谐波损耗等原因, 换流变压器油纸绝缘中的热点问题显著, 加速了油纸绝缘的老化进程。老化过程中纤维素分子的降解和变压器油的氧化裂解都会生成水, 水分又会加速油纸绝缘的老化进程, 进而产生更多水分^[14-15]。

2 换流变压器油纸绝缘的水分分布与状态

2.1 换流变压器中的水分分布

文献[12]将变压器中的油纸绝缘结构分为 3 种, 分别为“厚结构”、“薄-热结构”和“薄-冷结构”。“厚结构”主要是起支撑作用的绝缘结构, 约占整体绝缘质量的 50%。由于其中的水分迁移系数较低, 因此, “厚结构”对整体水分的贡献较少。“薄-热结

构”在与导体温度相近的温度下运行，如绕组绝缘、匝间绝缘和层间绝缘等，占固体绝缘总质量的5%。约5%的“薄-热结构”运行在热点温度下。“薄-冷结构”包括运行在油温下的绕组和匝间绝缘、绝缘隔板和绝缘顶盖等，占固体绝缘总质量的20%~30%，是水分的主要存储位置。约10%的“薄-冷结构”水分质量分数高于变压器平均水分质量分数(1%~1.5%)，属于“潮湿区域”，一般存在于温度较低的位置。

换流变压器阀侧绕组油纸绝缘承受着复合电压的作用，与交流变压器普遍采用的“薄纸筒小油隙”结构相比，其绝缘结构存在显著的特点。在直流电压分量的作用下，电场按照油纸绝缘的电导率反比分布，电导率较小的绝缘纸或纸板承受着更高的电场分量。因此，换流变压器阀侧绕组主绝缘的油浸纸板的厚度和数量都显著增加以提高其电压耐受能力，普遍采用“多层厚纸筒小油隙”结构^[16]。此外，阀侧绕组和阀侧套管的连接处也需要额外的绝缘纸包覆或绝缘成型件^[17]。

水分不仅影响介质本身的绝缘耐受能力，也会改变油纸绝缘中的电场分布。文献[18]研究了水分平衡条件下水分含量对换流变压器油纸绝缘电场分布的影响。如图1所示，在相同的交流分量峰值与复合电压峰值之比 η 下，油浸纸中的电场强度随油纸绝缘中水分含量的增加而降低，而油中电场强度逐渐增加。随着 η 的增加，油纸中的电场强度变化率变小； η 减小时，油纸中电场强度变化率变大。由此可知，直流分量越大，水分含量对油纸绝缘中的电场分布影响越大。因此，水分对换流变压器绝缘性能的影响要大于普通电力变压器。

2.2 油纸绝缘中的水分状态

水分在绝缘油中的状态可总结为：结合态、溶解态、分散态和自由态。结合态包括团簇态、吸附态、包含态和化学吸附态。团簇态指水分与有机物的极性部分(羟基、羰基、羧基和不饱和键等)通过极性作用相结合^[19]；吸附在固体杂质(如纤维素纤维)的水分状态为吸附态；包含化合物结构内部的水分状态为包含态，水合物中的水分状态为化学吸附态。上述4种水分状态中水分子通过键合力与分散介质相结合，并且键合力从团簇态到化学吸附态逐渐增强^[20]。溶解态分为分子分布态和关联态。分子分布态指单个水分子在绝缘油中的扩散状态；关联态指若干水分子通过氢键连接的聚集状态。这两种状态

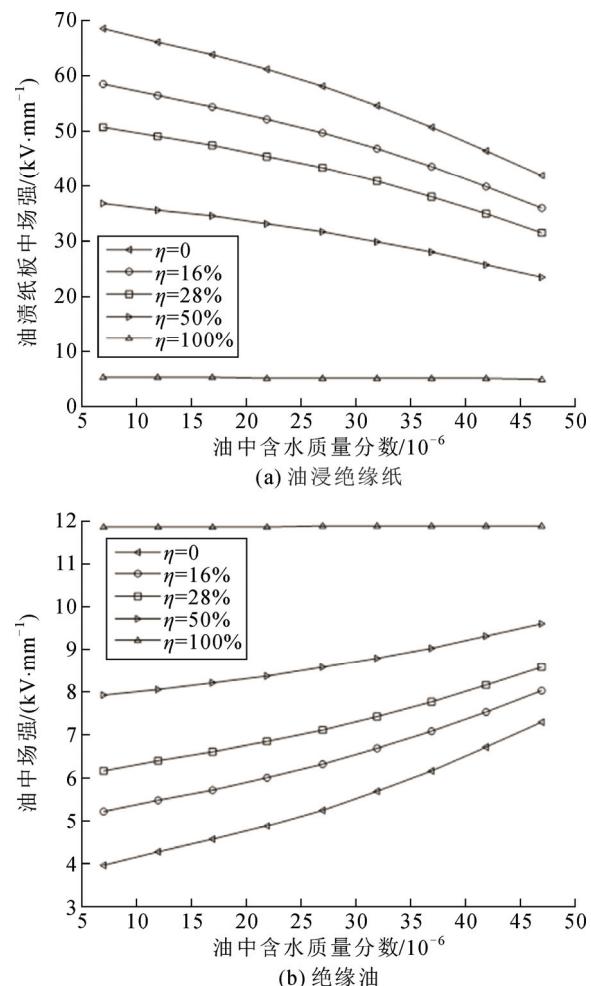


图1 油纸绝缘中场强与油中含水量的关系^[18]

Fig.1 Relationship between water content in oil and electric field in oil-paper insulation^[18]

与水蒸气的状态相似，可以统称为溶解态。分散态包括胶体态和乳浊态，当关联态中水分含量增加时，水分子簇逐渐增大，水分以胶团形式存在；当胶体态中水分含量进一步增加时，水分以小液滴的形式分散在绝缘油中，形成一种液态非均相的自由态水。当油中水分溶解度随油纸绝缘系统的温度下降，致使油中水分相对湿度>100%时，水分由溶解态向分散态转变，在界面或温度急剧下降的位置，水分会进一步凝结成水滴(自由水)。这些自由水随油流迁移至各个位置会造成换流变压器的严重的绝缘问题^[21-22]。

纤维素无定形区中分子间作用力较小，存在较多空隙，有较多暴露的羟基，对水分的吸附作用强，是水分吸附的主要位置^[23]。水分在绝缘纸或纸板中的状态也与水分含量有关，包括水蒸气、单层吸附、多层吸附、凝结水和自由水5种状态。水分含量较

低时, 水分子通过氢键与纤维素的羟基基团结合, 并在纤维素孔隙内壁上形成单分子层。当水分含量较高时, 水分子在弱范德华力的作用下形成多分子层, 这种较弱的范德华力源自分子和偶极子之间的静电作用, 这时的水分子层更接近于液态水的性质。随着水分含量的增加, 吸附的水分在亚微观和微观的纤维素孔隙中凝结, 出现毛细凝结现象。水分含量进一步增加时, 凝结的水分充满纤维素孔隙, 出现自由水^[24-25]。

油浸绝缘纸中水分主要以水分子簇和结合态的形式存在。前者存在于绝缘纸的纤维素纤维的空隙(自由体积)之间, 后者通过氢键与纤维素的羟基相结合^[26]。

换流变压器中包覆绕组的绝缘纸在热点温度的作用下脱附产生气态水。潮湿的绝缘纸(水分质量分数>2.0%)在高于140℃的热点温度下会释放水蒸气(如图2所示), 而干燥的绝缘纸(水分质量分数<0.5%)在热点温度下几乎不产生水蒸气。气泡的介电强度很低, 极易造成局部放电甚至闪络的发生^[21]。

3 换流变压器油纸绝缘的水分平衡与迁移

3.1 水分平衡

变压器中的热力学平衡包括热平衡、机械平衡、相平衡和化学平衡。这4种平衡条件都会影响变压器中的水分平衡。由于时刻变化的负载系数和较大的水分平衡时间常数存在, 运行过程中变压器中各部位始终存在温度差和压力差, 因此, 宏观上的热力学平衡不可能达到。然而, 若负载系数能在一段时间内保持不变, 局部区域中可能存在热力学平衡。因此, 变压器局部区域内的油纸绝缘会达到水分平衡。油纸绝缘的水分平衡曲线如图3所示。

水分活度描述的是水分从一处迁移到另一处的趋势, 是水分在材料中的热力学状态。水分迁移试图在系统中的不同材料间建立起相同的水势。水势与温度、渗透势、压力和基体效应(如内聚力和表面张力)等因素有关, 如式(1)所示。

$$\psi_{\text{gas}} = \psi_0 + RT \ln(p/p_s) \quad (1)$$

式中: ψ_0 为参考势; R 为理想气体常数; T 为绝对温度; p 和 p_s 分别为水蒸气压强和水蒸气的饱和蒸气压。 p/p_s 表示相对湿度或相对饱和度。在一定温度和压强条件下, 水分平衡时相邻介质具有相同的相对饱和度、水势和水蒸气压强。



图2 160.5 ℃下绝缘纸表面的气泡^[27]

Fig.2 Bubbles on paper surface at 160.5 °C^[27]

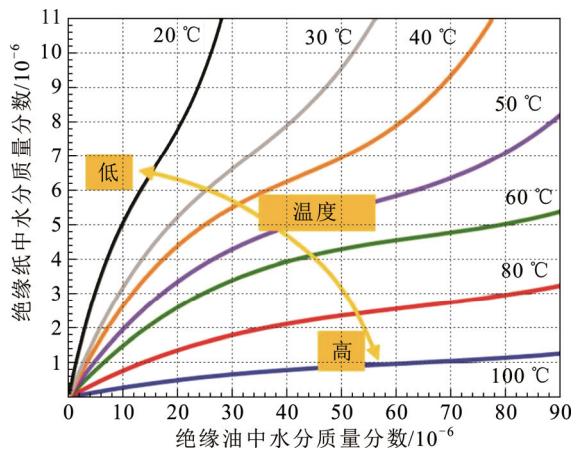


图3 油纸绝缘水分平衡曲线^[28]

Fig.3 Equilibrium curves for moisture partition between insulating oil and insulating paper^[28]

3.2 水分迁移

水分在水分浓度梯度、温度梯度和压力梯度的作用下发生迁移。在变压器正常运行过程中, 温度差是驱使油纸绝缘中水分迁移的主要原因^[29]。在相同温度条件下, 体系中介质材料对水分子的束缚效应用体系中水分子的扩散系数来衡量。束缚作用越大, 水分子就越容易留在材料介质内部; 反之束缚作用越小, 则水分子越容易扩散到材料外部。

油分子主要表现为非极性, 而水分子的极性较强, 因此两者的相互作用主要为范德华力吸引作用。油对水分子的束缚作用受油中的自由体积和油水分子的相互作用共同影响。温度升高, 油中自由体积分数的增加, 油和水分子的相互作用能减小, 因此, 油中水分子扩散系数增大^[30]。

纤维素绝缘中的水分可能存在气液固3种状态, 只有气液状态的水分能够迁移。根据绝缘纸中不同的水分含量, 水分迁移的主要机制包括水蒸气扩散、毛细水吸力和2种机制的结合。在水分与纤维素的相互作用中, 库仑相互作用和氢键相互作用为主要作用机制。水分在绝缘纸中的扩散系数与温

度和水分含量有关。温度升高,纤维素介质中的自由体积增加,纤维素对水分子的束缚作用减小。但是纤维素对水分的束缚作用仍然远大于油分子^[28]。水分含量较低时,水分以水分子簇的形式存在,水分子主要位于纤维素的吸附位上,与纤维素紧密键合,导致水分子的扩散系数较低。但是随着水分含量的增加,水分子簇开始合并,总体数量减少但是尺寸增大,在吸附能、空间排斥力和内聚力的相互作用下,纤维素表面的水分子吸附位增加。同时,纤维素链间距变大,大量未与纤维素作用的水分子有了较大的迁移空间,水分子扩散系数显著增加,可在多孔网络中迁移^[31-32]。另外,纤维素吸附水分会降低水分迁移势垒和氢键能量,缩短氢键的存在时间,导致水分扩散系数的提高^[33]。图4为水分子在纤维素无定型区的迁移示意图^[34]。

油纸绝缘之间的水分交换只能通过溶解水^[20]。绝缘油的水分溶解度和纤维素的水分吸附都会随温度变化。当温度升高时,纤维素吸附水分的势能下降而绝缘油上升,因此热平衡促使水分子从纤维素绝缘迁移至绝缘油中。温度下降时,上述过程则相反。介质的微观结构(如元素组成、分子结构和分子链聚集态等)的差异导致介质对水分子的束缚作用(如氢键、范德华力和静电力等)不同,宏观上体现为介质中水分扩散系数的不同。在水分的迁移过程中,不同介质扩散系数的差异会使介质交界面处水分迁移行为呈现出与均匀介质不同的特点,进一步影响油纸界面附近的电气特性。文献[30]中的分子动力学模拟结果表明,初始水分分布于油中时,水分向油纸的界面移动,当移动到界面的时候,水分将被吸附在纤维素的表面,但并没有进入到纤维素体内与纤维素充分“融合”。文献[35]利用对升温过程($20\sim80^{\circ}\text{C}$)中油纸绝缘的水分扩散行为进行了分子动力学研究。如图5所示,仿真结果表明随着温度的上升,水分子与纤维素间的氢键数量减少,绝缘纸对水分子的束缚作用减弱,导致初始水分向绝缘油中扩散;同时,油纸界面区水分子之间的氢键数量增加,分散的水分子聚集成水分子簇,从而在油纸界面区出现高水分区。文献[36]研究表明当纤维素中水分质量分数>4%时,快速升温会导致水分子在油纸界面通过分子间氢键作用聚集成水分子簇,形成局部液态水;当水分质量分数>5%时,则会形成较大的液态水分区。文献[37]研究发现,在升温过程($20\sim80^{\circ}\text{C}$, 5 h)中,水分由纸板向油中迁

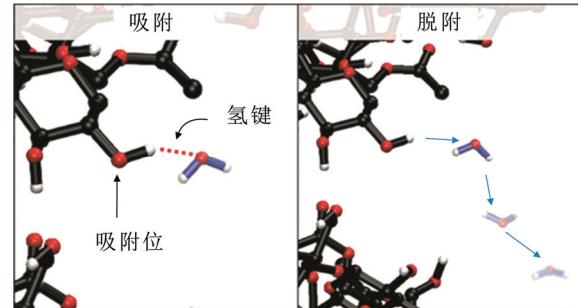


图4 水分子在纤维素无定型区的迁移^[34]

Fig.4 Migration of H_2O in the amorphous region of cellulose^[34]

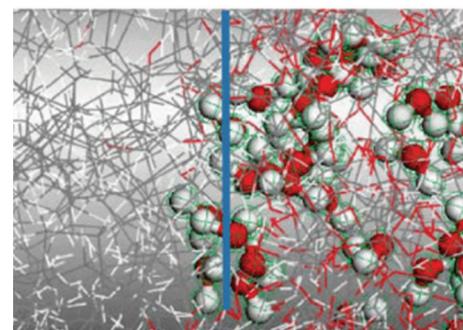


图5 油纸交界面处的高水分区^[35]

Fig.5 High water zone by hydrogen bonds at the oil-paper interface^[35]

移过程存在滞后性,会在油纸界面的油层中形成高水分区;降温过程($20\sim80^{\circ}\text{C}$, 5 h)中,水分在由油向纸板迁移过程中,在纸板层间方向不均匀分布,在纸板表层形成高水分区。文献[38]研究发现,升温过程($20\sim90^{\circ}\text{C}$)初期,油浸纸板表面水分扩散到油中,在纸板表面形成干燥区。

4 换流变压器油纸绝缘的水分与电荷

4.1 水分对油纸绝缘微观结构的影响

油纸绝缘中电荷的动态行为与其微观结构密切相关。水分吸附会改变油纸绝缘内分子结构,进而影响电荷输运特性。

水分子的电离能(约1 eV)小于矿物绝缘油的电离能(约7 eV)^[39],因此在电场作用下,水分子容易发生电离形成离子基团,这些离子基团与变压器油分子或纤维素分子结合形成带电离子团。

随着绝缘纸中水分含量的增加,水分子簇合并导致尺寸增大,使纤维素链间距变大。无定形区内的水分会切断氢键导致结构重组织,使其有序度增

加。水分容易吸附在不定型区以及结晶区与不定型区的界面处, 特别是在高水分含量下, 水分会优先占据自由能较低的界面区域。吸附在界面处的水分产生排斥力使分子链分离, 引起氢键的断裂, 并导致结晶区-无定型区界面处的孔隙率增加。文献[40-41]的研究表明吸附水会影响聚合物的玻璃态转化温度和纤维素表面的构象变化, 如羟基的转向。另外, 水分在纤维素葡萄糖环平面形成层状结构, 这些层状结构有助于氢键结构的蔓延, 水分与纤维素成键之前会先破坏原有的链间链内的氢键。这些过程将显著改变纤维素材料的整体性质。文献[42]中分子模拟结果显示水分子与 $\beta-D$ -吡喃型葡萄糖基 3 号和 6 号位上的羟基形成氢键。这些氢键的形成代替了纤维素链内少部分氢键, 削弱了纤维素链内及链间氢键的相互作用, 使纤维素链的卷曲程度降低。文献[43]认为, 油纸绝缘中部分水分子以离子形式存在, 并随浓度变化而不断与纤维素的各个官能团发生反应。水分质量分数由 0.31% 上升至 1.12% 的过程中, 一部分水分子分解为离子形式, 与纤维素上的氢氧根反应, 提高了甲基和亚甲基官能团含量, 而氢键数量减少。当水分质量分数进一步上升(1.12%~3.12%)时, 氢氧离子密度明显上升, 上述反应逆向进行, 甲基与亚甲基的数量减少, 由于反应产物与羟基的作用, 氢键数量有所增加。

4.2 水分对油纸绝缘电导的影响

文献[44-45]认为当油纸绝缘中有水分存在时, 由于油水表面能的较大差异(30 和 70 mN/m), 一部分水分子倾向于形成纳米尺寸的水分子簇, 水分子簇的平均水分子数量为 220, 平均间距为 2.32 nm。在直流电压的作用下, 油纸绝缘中的电子在水分子簇形成的势阱之间跳跃传导, 进而影响油纸绝缘的电导。文献[46]针对纳米尺度下水分对电介质的影响提出“水壳”模型。如图 6 所示, 在“水壳”模型中, 灰色部分的纳米粒子作为内核, 水分子包裹在纳米粒子周围并形成 3 层结构。约 5 个水分子与纳米粒子键合形成第 1 层结构(如图 6 中粗线所示); 高密度的水分子在范德华力的作用下与第 1 层结构相互连接, 形成第 2 层结构(如图中细线所示); 第 3 层结构水分子密度较小并分散在基体中。在上述 3 层结构中, 第 1、2 层结构为电荷和载流子提供迁移路径, 其中第 2 层结构是主要的导电通道。文献[43]研究发现水分含量的上升增加了油纸绝缘的直流电导率, 另外由于水分含量的上升导致离子浓度的增

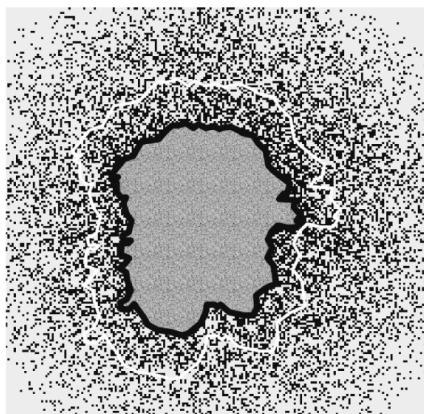


图 6 包裹纳米粒子的“水壳”结构^[44]

Fig.6 Schematic of a water shell surrounding a nanoparticle^[44]

加, 在电场作用下更为明显, 从而增加了场强上升过程中油纸绝缘上升速率。文献[47]发现水分的增加会促进试样内部杂质离子电离, 导致离子数目增加, 水分含量的增加还会使油浸绝缘纸的陷阱能级变浅。此外, 文献研究了-40~100 °C 温度区间内变压器油的电导率变化, 总结了油中水分状态对其电导率的影响规律。研究结果表明, 高温(50~100 °C)下, 水分以溶解态的形式分布在油中, 溶解态的水分对变压器油的电导率影响较小; 随着温度的降低(-10~50 °C), 变压油中水分转变为悬浮水(分散态), 油中水分的析出过程使其电导率上升; 当温度 <-10 °C 时, 油中水分继续析出, 但此时电导率主要受变压器油粘度变化的影响。文献[18]认为水分对油纸绝缘电导率的影响远高于其对相对介电常数的影响, 从而导致水分对直流分量较高的复合电场下的油纸绝缘电场分布产生较大影响。

4.3 水分对油纸绝缘空间电荷的影响

换流变压器阀侧绕组油纸绝缘处在直流电压分量的作用下, 绝缘油和油浸绝缘纸内部和界面处会产生空间电荷的积聚。界面电荷的积聚存在明显的极性效应, 由于绝缘纸板表面含有羟基(-OH)、醛基(-CHO)和羧基团(-COOH), 电负性较大的氧原子吸引氢原子中的电子, 使氢原子呈正极性, 所以绝缘纸板表面的氢原子容易吸引负电荷^[48]。

表 2 是水分影响下油纸绝缘空间电荷特性的研究总结, 从样品水分含量、试验温度、施加电压、研究方法和主要研究结论几个方面进行归纳。研究对象以不同水分含量的油纸绝缘为主, 试验条件集中在恒定温度。试验施加电场包括直流电压、交直

表 2 水分影响下油纸绝缘空间电荷特性研究总结

Table 2 Summary of researches on the space charge characteristics of oil-paper insulation under the influence of water

文献	水分质量分数/%	试验温度	电压	场强	研究方法	主要结论
[43]	0.31~3.12	室温		直流: 5、10、20 kV/mm; 交流: 5、10、20、30 kV/mm; 混合: 5 kV/mm(直流)+ 11.5 kV/mm (交流)、 10 kV/mm (直流)+ 23 kV/mm(交流)	电声脉冲法	水分质量分数由 0.31%上升至 1.12%时, 电荷注入阈值下降而陷阱总量增加; 水分质量分数从 1.12%上升到 3.12%, 电荷注入阈值升高而陷阱总量减少。
[47]	1.47, 2.54, 3.74	$\pm 20^{\circ}\text{C}$		直流: 10、20 kV/mm	电声脉冲法 等温表面电位衰减法	水分质量分数为 1.47%及 2.54%时油浸纸靠近电极附近积累异极性电荷, 水分质量分数为 3.74%时电极附近积累同极性电荷。随着含水率的增加, 油浸纸陷阱能级逐渐降低, 空间电荷衰减速率随之加快。
[49]	$3.8 \times 10^{-4} \sim 15.4 \times 10^{-4}$ (绝缘油) 0.35~1.42	室温	直流: $\pm 4\text{ kV}$		克尔效应	油纸绝缘水分含量的增加导致界面电荷密度下降。
[50]	$10 \times 10^{-4}, 70 \times 10^{-4}$ (绝缘油)	室温	直流: 1、2、4、 10 kV		克尔效应	电场下水分子解离使变压器油中离子含量的增加, 导致电场畸变。
[51]	0.3~1.7	室温	直流: 15 kV		压电压力波法	油浸纸板的水分含量越高空间电荷注入的越深, 电荷稳态分布的建立速度越快。
[52]	5.40	$30, 70^{\circ}\text{C}$		直流: 7.5、 20 kV/mm	电声脉冲法	电场下, 水分状态和分布的改变导致局部界面的产生, 造成阳极附近负极性空间电荷的积聚。
[53]	0.28, 1.32, 4.96	15°C		直流: 20、 30 kV/mm	电声脉冲法	油纸绝缘的水分含量越高, 油纸绝缘介质内部正负电荷的注入和迁移就越显著, 内部慢速运动电荷的量就越少。
[54]	0.91, 5.21	室温	直流: 5、10 kV		电声脉冲法	水分含量降低了空间电荷的注入壁垒, 加快了同极性空间电荷的注入, 抑制了油纸内部正极性感应电荷的积累。
[55]	1, 3, 5, 7, 9	室温		直流: 10 kV/mm	电声脉冲法	由于水分对陷阱分布的影响, 在一定范围内, 增大油纸中的含水量, 将加速油纸中的空间电荷到达稳态, 继续加大含水量则减缓此过程。
本课 题组	0, 1.2, 3.2, 4.8	室温	6.6 kV(直流)+ 2.2 kV(谐波 (1,3,5,7 次))		等温表面电位 衰减法	水分子与纤维素链上羟基形成氢键, 引入物理和化学缺陷, 改变浅陷阱能级密度, 对深陷阱能级密度改变较小。随着吸潮时间增大, 纤维素结构缺陷增多, 浅陷阱能级密度继续增大, 电荷脱陷概率提高。

流复合电压以及直流叠加谐波电压等。电荷测量方法包括克尔电光效应法、电声脉冲法和等温表面电位衰减法等, 其中, 电声脉冲法仍然是观察油纸绝缘空间电荷的主要方法。但是, 当有油层存在时, 由于声波在液体中传播时衰减较强, 克尔电光效应法是主要电荷测量方法。研究主要结论分为以下几类: 1) 水分子在电场作用下的分解增加了载流子浓度; 2) 水分改变了金属-介质界面处的空间电荷的注入势垒, 进而影响注入电荷浓度; 3) 水分与油纸分子的相互作用改变其微观结构, 影响油纸绝缘中的陷阱能级和密度, 进而导致电荷迁移行为的改变。

5 换流变压器油纸绝缘的水分与局部放电

5.1 内部放电

文献[56]的研究表明油纸绝缘中的水分含量将

直接影响油纸绝缘气隙缺陷的局部放电特征。水分含量增加时, 油纸绝缘气隙缺陷的起始放电电压降低, 放电相位分布变宽, 平均放电量幅值提高, 放电次数增加。同时, 水分含量的增加使油纸绝缘的体电阻率降低, 载流子受到的阻碍作用减弱, 容易积聚到油纸绝缘气隙缺陷处引起局部场强畸变, 引发局部放电。文献[57]研究了直流电压下变压器油中水分含量对油纸绝缘匝间放电特性的影响。试验结果表明变压器油中水分含量的增加使界面电荷密度减小, 局部放电起始电压降低, 放电次数增加, 产气量增加。作者认为油纸绝缘界面电荷密度下降, 形成的与外加电场反向的电场减弱, 从而对直流电场的抑制作用下降, 导致放电增强。文献[58]研究了交直流复合电压作用下水分对油纸绝缘气隙局部放电特性的影响, 研究发现水分含量的增加会加速

局部放电的发展, 尤其是交直流复合电压下的局部放电发展过程; 且直流成分越高, 放电越迅速和剧烈。文献[59]认为高含水量的纤维素纤维有较高的离子浓度, 电导电流较大, 这使得电极/介质界面附近气体的产生速率大于气体的溶解速率, 体积较小的气体产生的小幅值局部放电不易被探测, 随着气体体积逐渐增大, 高幅值的放电才能被发现。放电过程中离子和电子不断轰击空腔壁, 导致空腔体积的增大。文献[60]认为水分含量的增加导致泄漏电流上升, 利于气泡或水滴放电产生的电荷消散, 电荷建立的退电场的存在时间缩短, 从而使放电次数增加, 另外, 水分含量的增加导致油中缺陷增加, 使平均局部放电量增大。

大量研究表明气隙放电特性与气隙中的电荷特性密切相关^[61]。图 7 展示了气隙内电场的建立过程和电荷消散方式。气隙缺陷中的电荷建立的内电场以一定的时间常数 τ_p 衰减, 气隙中的电荷可能通过离子漂移(时间常数为 τ_d)、表面电导(时间常数为 τ_s)、复合、入陷(时间常数为 τ_t)和体电导(时间常数为 τ_c)几种方式消散^[62]。文献[63]研究发现气隙中水分含量的增加会缩短放电时延, 导致小幅值的放电脉冲增加。这是由于气隙表面电导提高, 电子容易从气隙表面消散, 减弱了表面电荷建立的内电场的阻碍作用。文献[64]的研究表明气隙湿度增加时, 局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)和放电幅值均下降, 放电脉冲数增加, 放电时延缩短(如图 8 所示)。正极性下的放电时延对湿度变化更敏感。这可能与气隙壁表面电导率有关。文献[65]认为在潮湿气隙中, 局部放电行为受介质的介电常数、表面电导率以及水分对放电基本过程影响的共同作用。水分影响下的介电常数的提高导致电场分布的改变, 使得 PDIV 下降。同时, 水分子在电子贴附解离作用下生成 3 种离子(H^+ 、 O_2^- 和 OH^-)。这些产物具有较大的碰撞截面, 容易吸附放电过程中的电子, 这可能引起高绝对湿度下放电幅值的降低。类似地, 文献[66]研究发现气隙湿度的提高, 不仅造成有效电子被水分子吸附而减少, 还会引起绝缘介质表面形貌的改变, 导致局部放电幅值下降、平均放电脉冲数增加、放电相位范围变宽以及放电起始相位的后移。文献[67]认为局部放电导致聚合物链段断裂, 改变聚合物表面的亲水性, 使得介质表面吸附水分含量变化, 导致介质表面电导率以及气隙电场分布的改变, 进而影响气

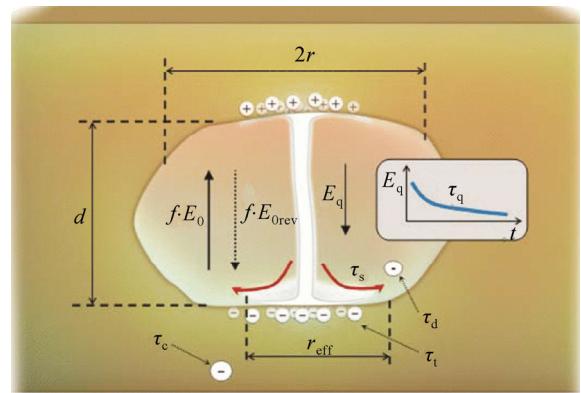


Fig. 7 气隙缺陷内电场与电荷消散^[62]

Fig. 7 Electric field and charge dissipation in void defect^[62]

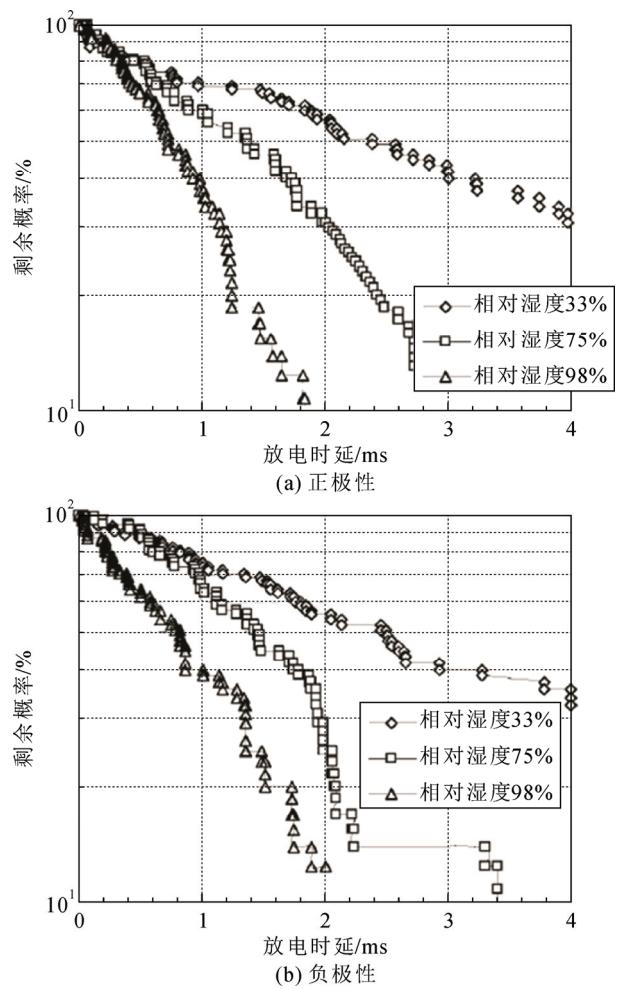


图 8 局部放电时延的 Laue 图^[64]

Fig. 8 Laue plots of the partial discharge time-lag^[64]

隙放电行为。文献[68]研究表明, 随着气体湿度的增加, 微放电次数减少, 单次微放电的平均电荷转移量增加。文献[69]研究了水分吸附对聚合物电树枝生长过程中局部放电特性的影响。试验结果表明

水分吸附量的增加导致聚合物基体电导率上升，减少了电荷在电树枝通道周围中的积聚，减弱了对外施电场的抵消作用，电树枝生长速度得到增强。与干燥的试样相比，水分吸附引起局部放电起始相位的后移。

综上所述，水分含量对油纸绝缘气隙放电的影响可总结为三方面。首先，水分含量的变化影响不同介质的介电常数和电导率，改变气隙中的电场强度；其次，水分通过影响气隙壁上的表面性质和表面电荷的动态特性，影响气隙内部的电场强度；最后，水分含量的变化影响放电过程中的电子的行为，进而改变气隙放电特性。

5.2 电晕放电

文献[70]对针-球电极下不同含水量的变压器油中局部放电特性进行了研究，研究表明，低压下局部放电幅值随水分含量的增加而降低。高压下局部放电幅值随水分含量的增加而升高。相比于PDIV和放电脉冲幅值，放电重复频率对水分含量更敏感。文献[71]认为水分子会在氢键作用积聚形成水分子簇，当液体电介质中的水分子簇分子数由11增加至69时，水分子簇的电子亲和能从0.75 eV升至1.92 eV。正的电子亲和能意味着水分子容易吸附自由电子形成阴离子，此外，氢键具有较大的电子俘获截面，因此有效电子数减少，负流柱放电得到抑制。文献[72]研究了针板电极下水分含量对矿物绝缘油局部放电特性的影响。试验结果表明随着油中水分含量的增加，局部放电脉冲数增加，局部放电脉冲宽度从11 μm缩短至约8.5 μm，而脉冲幅值基本不变，导致视在放电量下降。该研究认为存在水分较高的相对介电常数(约为81)，水分子会在电场作用下向高场强区域移动，积聚的水分进一步畸变电场分布，引发局部放电。可以看出，水分对油中电晕放电特性的影响具有一定的极性效应。其中水分对电晕放电脉冲幅值的影响并没有统一的规律，这可能和极不均匀场下局部放电特性的分散性和随机性有关。

5.3 沿面放电

文献[73]研究了直流电压下球板模型油纸绝缘局部放电发展规律，试验结果表明潮湿纸板的沿面放电重复频率和放电幅值显著增加。文献[74]研究了交直流复合电压下水分对油浸纸板沿面放电行为的影响。研究结果表明，随着纸板水分含量的增加，局部放电重复频率、幅值和总放电量均增大，局部放电起始电压明显下降。此外，当直流电压分量增

加时，水分对局部放电的影响更显著。文献[75]研究发现交直流复合电场下，随着油浸纸板水分的增加，局部放电起始电压显著降低，放电次数和放电量增加，沿面爬电的发生概率增加，碳痕面积增大。这可能是由于油浸纸板中水分含量较高时界面电荷对沿面爬电的抑制作用减弱。文献[76]的研究表明随着纸板水分含量的增加，油纸绝缘内部电荷注入数量增多，放电发展过程中载流子迁移、中和与消散速度加快，导致高幅值的沿面局部放电出现次数逐渐增加，密集出现的高幅值放电脉冲加剧了对纸板表面的破坏，加快了沿面放电的发展速度。文献[77]中的试验结果表明在油纸水分平衡状态下，当油温为40 °C时，随着水分含量的增加，沿面放电起始电压略有降低，而油温为80 °C时则变化不大。在油温较低时，油中水分由溶解态变为悬浮态，悬浮水在电场作用下很容易沿电场方向定向极化，引发油中放电。当油温升高时，油中水分溶解度增大，水分由悬浮态转变为溶解态，对局部放电的影响较小。这说明水分呈溶解态时对油的放电电压影响较小，呈悬浮态时影响较大。此外，该研究认为沿面放电与介质表面状态密切相关，当湿度增大时，沿面放电的起始电压一般要下降，但在电场极不均匀的情况下，由于介质表面上的水分使电场分布变得均匀，并不会引起放电起始电压的下降。引起变压器中围屏沿面放电的主要因素不是水分的单独作用，而可能是油中气体引发的沿面放电所致。文献[78]认为油纸界面的沿面放电受油中水分产生的离子和固体表面电荷的影响。在电场作用下，油中水分子的极性作用产生的附加力导致油流加速，影响液固界面的表面电荷行为。亲水性电介质如纤维素纸，表面容易产生较多活跃的电离点，电离过程加剧时会造成局部放电强度的增加。水分的存在还会降低油中气泡生成的电场阈值，气泡的产生更容易引发沿面放电。文献[79]认为油纸中水分含量越大，沿面放电发展越快，局部放电对纸板的破坏越严重。闪络现象最终通过击穿气体通道而出现，气体放电通道发展的中后期主要受局部放电所释放能量的影响，纸板中的水分对此阶段的影响不大，潮湿油浸纸板表面的白斑与沿面闪络现象如图9所示。文献[80]发现干燥的油浸纸板(水分质量分数<0.5%)在施加45 kV交流电压下16 h，只出现碳痕；而在同样的试验条件下，对于水分质量分数>1%的油浸纸板，白斑会在电极附近出现并向地电极生长，同时伴随

着高幅值放电的产生, 白斑的发展速度随着水分含量升高而加快。

以上关于水分对沿面放电影响的研究都在温度和水分稳态条件下进行。根据 3.2 节中对油纸界面水分行为的分析, 在温度梯度或水分浓度梯度的作用下, 油纸绝缘之间始终进行着水分迁移, 油纸绝缘内部的水分分布存在不均匀和不平衡的特点, 并且由于绝缘油和油浸绝缘纸中水分扩散系数的差异, 油纸绝缘界面处还会出现高水分区或干燥区。与其他局部放电形式相比, 沿面放电更依赖油纸界面的绝缘特性, 因此, 沿面放电行为应该对温度和水分暂态条件更为敏感。

文献[81]研究了温度变化条件下油纸绝缘的局部放电特性, 研究发现在温度变化过程中, 干燥的油纸绝缘不会引发局部放电; 当水分质量分数 $>1\%$ 时, 局部放电会在温度上升过程中出现, 并且在降温过程中依然存在, 局部放电强度随着水分含量的上升而增加; 对于水分质量分数为 5.7% 的潮湿油浸纸板, 当温度或油中水分含量达到一定阈值时, 会出现沿面击穿。文献[82]研究了自然降温过程中矿物油/绝缘纸板和天然酯/绝缘纸板的沿面局部放电特性, 并仿真分析了降温过程中油纸绝缘界面水分的积聚行为。图 10 显示了自然降温过程中油纸绝缘界面水分含量和归一化局部放电起始电压与降温时间的关系。研究结果表明, 自然降温过程中矿物油/绝缘纸板和天然酯/绝缘纸板的 PDIV 逐渐下降, 并在某一时刻突降(约下降至初始 PDIV 的 75%), 而后缓慢回升。从 PDIV 和界面水分含量的变化趋势可知局部放电与界面水分含量有较强的相关性。作者认为由于绝缘油和绝缘纸板水分扩散系数的差异, 在水分由油向纸的迁移过程中, 水分会在油纸绝缘界面发生积聚, 水分含量的增加导致局部放电起始电压显著降低。

油浸绝缘纸板具有较高的体击穿强度, 但是其沿面击穿强度相对较低, 属于油纸绝缘系统中的薄弱环节^[83]。当界面附近出现高水分区时, 一方面较大的油纸界面电导可加速界面电荷的消散, 减缓电荷造成的电场畸变; 另一方面, 水分含量的增加导致界面绝缘电阻下降。当界面附近出现干燥区时, 与上述分析相反, 较低的水分含量虽然会提高界面绝缘电阻, 但是减慢了界面电荷的消散速度, 提高了电场畸变和局部放电的概率。值得说明的是, 这种界面高水分区和干燥区是温度或水分稳态研究中

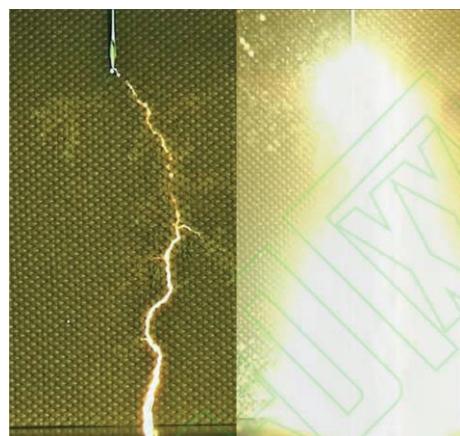
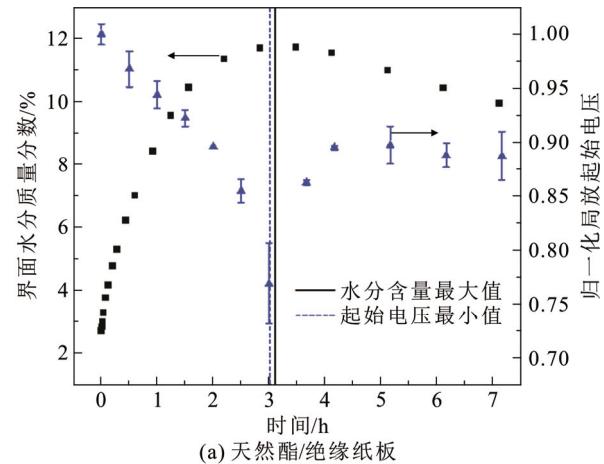
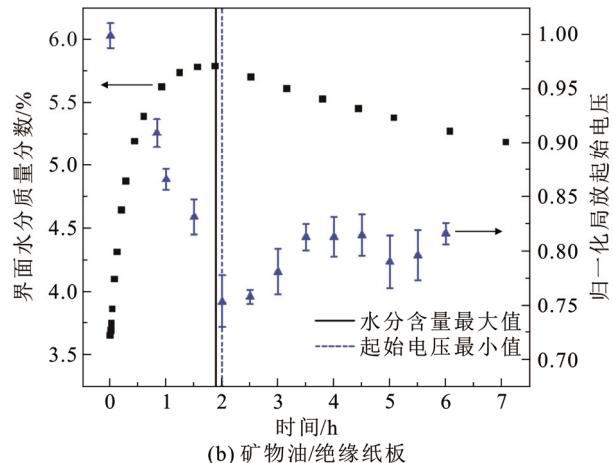


图 9 潮湿油浸纸板表面的白斑发展与沿面闪络^[79]

Fig.9 Development of white mark and flashover on the surface of wet oil-impregnated pressboard^[79]



(a) 天然酯/绝缘纸板



(b) 矿物油/绝缘纸板

图 10 降温过程中界面水分含量和 PDIV 与时间的关系^[82]

Fig.10 Water content at the oil/pressboard interface and PDIV versus time during the cooling process^[82]

无法出现的, 而国内外学者对水分迁移过程中的油纸绝缘放电特性研究几乎空白。因此, 有必要关注并研究换流变压器运行工况下油纸绝缘界面水分动

态行为,综合分析水分与界面电荷的相互作用关系,权衡水分作用的利与弊,进一步研究水分迁移对油纸绝缘局部放电特性的影响规律与机理。

6 结论与展望

本文根据国内外研究现状,基于电力变压器和换流变压器中关于水分的研究成果,总结了变压器中水分的来源与分布特点,探讨了变压器中水分的平衡与迁移规律,分析了换流变压器中水分对油纸绝缘微观结构、电荷和局部放电特性的影响机理。主要结论如下:

1) 关于水分存在状态和迁移行为的研究。目前有关油纸绝缘水分存在状态和迁移特性的结论都是在电力变压器的背景下得到的,换流变压器运行工况下(如复合电压、变温条件和电热复合场等)油纸绝缘中的水分分布与迁移规律仍不清楚。缺乏电场作用下油纸绝缘水分迁移规律、存在状态和分布特点的试验研究。另外,为了研究运行工况下换流变压器油纸绝缘中水分动态特性,需要探索开发油纸绝缘纸或纸板内部水分分布和油纸界面水分分布的表征方法或测试手段。

2) 关于水分影响下电荷和局放特性的研究。关于水分对油纸绝缘电荷特性影响的研究多集中在均匀电场和稳态条件下,缺少针对不均匀电场和暂态条件下水分对油纸绝缘电荷特性影响的研究,同时也缺乏不均匀电场和复杂工况条件下的电荷测试方法。暂态条件下油纸绝缘中的水分出现迁移行为,使油纸绝缘的局部放电行为呈现出不同于稳态的特点。因此,有必要研究温度变化、水分变化或压强变化等暂态条件下水分对换流变压器油纸绝缘局部放电特性的影响规律。此外,不同的水分存在状态对油纸绝缘微观结构、电荷和局部放电特性有着不同的影响机制,目前仍缺少关于水分存在状态对油纸绝缘特性影响规律的深入研究。

参考文献 References

- [1] 王铁辰. 西电东送要稳北电南送需增 未来 3 年电力供需将呈结构性趋紧态势 [EB/OL]. 中国财经网, (2019-06-21)[2021-01-28]. <http://finance.China.com.cn/industry/energy/20190621/5011459.shtml>. WANG Yichen. Power transmission from west to east should be stable north to south should be increased power supply and demand will be structurally tight in the next three years[EB/OL]. China Finance and Economics, (2019-06-21)[2021-01-28]. <http://finance.China.com.cn/industry/energy/20190621/5011459.shtml>
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2020[R]. 北京:中国电力企业联合会, 2019.
China Electricity Council. China power industry annual development report 2020[R]. Beijing, China: China Electricity Council, 2019.
- [3] 李进, 王泽华, 陈允, 等. 高压气体绝缘输电设备用功能梯度材料研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2471-2477.
LI Jin, WANG Zehua, CHEN Yun, et al. Research progress on functionally graded materials for high voltage gas insulated transmission apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2471-2477.
- [4] 李进, 梁虎成, 杜伯学. 气体绝缘直流设备气固界面电场分布特性与调控方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2619-2628.
LI Jin, LIANG Hucheng, DU Boxue. Progress in electrical field distribution along gas-solid interface in compact gas insulated system and its regulation methods[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2619-2628.
- [5] 李进, 赵仁勇, 杜伯学, 等. 量子化学计算在高压直流绝缘领域中的应用进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 772-781.
LI Jin, ZHAO Renyong, DU Boxue, et al. Application progress of quantum chemical calculation in the field of HVDC insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 772-781.
- [6] 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.
- [7] CIGRE Joint Working Group A2/B4.28. HVDC converter transformers guidelines for conducting design reviews for HVDC converter transformers[C]// Proceedings of the 43th Conference International des Grands Reseaux Electriques (CIGRE 2010). Paris, France: CIGRE, 2010: 10-14.
- [8] 杜伯学, 朱闻博, 李进, 等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1300-1309.
DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1300-1309.
- [9] 王粉芍, 聂三元, 张良县. 大型换流变绝缘受潮后现场批量处理方法的应用研究[J]. 变压器, 2018, 55(4): 10-14.
WANG Fenshao, NIE Sanyuan, ZHANG Liangxian. Research regarding handling method after insulation moisture of large converter transformer in station[J]. Transformer, 2018, 55(4): 10-14.
- [10] 于会民, 王会娟, 张琦, 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.
- [11] 李士杰, 李青, 张新波, 等. 换流变压器受潮后现场干燥工艺及评估方法[J]. 变压器, 2020, 57(11): 50-53.
LI Shijie, LI Qing, ZHANG Xinbo, et al. On site drying process and evaluation method of converter transformer after damp[J]. Transformer, 2020, 57(11): 50-53.
- [12] GRIFFM P, SOKOLOW V, VANIN B. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation system[R]. Budapest, Hungary: CIGRE SC12 Transformer Colloquium, 1999: 1-23.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [16] 王永红. 换流变压器油纸绝缘击穿特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- WANG Yonghong. Breakdown characteristics of oil and pressboard insulation in converter transformer[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [17] 鲍连伟. 脉动直流电压下油纸绝缘局部放电特性与多变量失效模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- BAO Lianwei. Study on partial discharge properties and multi-variable failure models of oil-paper insulation at pulsating DC voltages[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2016.
- [18] 陈庆国, 池明赫, 王刚, 等. 含水率对复合电场下油纸绝缘电场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 54-60.
- CHEN Qingguo, CHI Minghe, WANG Gang, et al. Moisture influence on the electric field distribution of oil-pressboard insulation under compound electric field[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 54-60.
- [19] 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.
- [20] ARAKELIAN V G, FOFANA I. Water in oil-filled, high-voltage equipment, part I: states, solubility, and equilibrium in insulating materials[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(4): 15-27.
- [21] SOKOLOV V, BASSETTO A, OOMMEN T V, et al. Transformer fluid: a powerful tool for the life management of an ageing transformer population[C]//Proceedings of 2003 TechCon® Asia-Pacific Conference. North America: [s.n.], 2003.
- [22] SHKOLNIK A. Determination of water content in transformer insulation[C]//Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. Graz, Austria: IEEE, 2002: 337-340.
- [23] 廖瑞金, 聂仕军, 周欣, 等. 物理改性纤维素绝缘材料亲水性行为的分子动力学模拟[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 1-7.
- LIAO Ruijin, NIE Shijun, ZHOU Xin, et al. Molecular dynamics simulation on the hydrophilicity of physical modification cellulose insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 1-7.
- [24] KOCH M. Reliable moisture determination in power transformers[D]. Stuttgart, Germany: University of Stuttgart, 2008.
- [25] SAEIDPOUR M. Experimental studies of sorption and transport of moisture in cement based materials with supplementary cementitious materials[D]. Lund, Sweden: Lund University, 2015.
- [26] ITAHASHI S, MITSUI H, SATO T, et al. Analysis of water in oil-impregnated kraft paper and its effect on conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(6): 1111-1116.
- [27] GAO M, ZHANG Q G, DING Y Q, et al. Investigation on bubbling phenomenon in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2362-2370.
- [28] N'CHO J S, FOFANA I, HADJADJ Y, et al. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. Energies, 2016, 9(5): 367.
- [29] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSON 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.
- [30] 朱孟兆. 油浸绝缘纸热老化机理的分子动力学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- ZHU Mengzhao. Molecular dynamics study of thermal aging of oil-impregnated insulation paper[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2011.
- [31] KULASINSKI K, GUYER R, DEROME D, et al. Water adsorption in wood microfibril-hemicellulose system: role of the crystalline-line-amorphous interface[J]. Biomacromolecules, 2015, 16(9): 2972-8.
- [32] TREMBLAY C, CLOUTIER A, FORTIN Y. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying[J]. Wood Science and Technology, 2000, 34(3): 253-276.
- [33] KULASINSKI K. Free energy landscape of cellulose as a driving factor in the mobility of adsorbed water[J]. Langmuir, 2017, 33(22): 5362-5370.
- [34] 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.
- [35] WANG W, DONG W Y, LI F Y, et al. Molecular dynamics study of moisture migration between transformer oil and pressboard under variation temperature[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-5.
- [36] 王伟, 董文妍, 李芳义, 等. 升温过程中水在矿物油和纤维素界面扩散和聚集行为的分子模拟[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3696-3704.
- WANG Wei, DONG Wenyan, LI Fangyi, et al. Molecular simulation of the diffusion and aggregation of water at the interface between mineral oil and cellulose during temperature rising[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3696-3704.
- [37] 王伟. 老化与水分对油纸绝缘沿面爬电的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- WANG Wei. Impact of aging and moisture on creepage discharges on oil impregnated pressboard[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2012.
- [38] PEYRAQUE L, BEROUAL A, BURET F. Static electrification of pressboard/oil interface and transient phenomena[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(3): 443-449.
- [39] HWANG J G, ZAHN M, PETTERSSON L A A, et al. Modeling streamers in transformer oil: the transitional fast 3rd mode streamer[C] //2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China: IEEE, 2009: 573-578.
- [40] BERGENSTRÄHLE M, WOHLERT J, LARSSON P T, et al. Dynamics of cellulose-water interfaces: NMR spin-lattice relaxation times calculated from atomistic computer simulations[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2008, 112(9): 2590-2595.
- [41] KULASINSKI K, KETEN S, CHURAKOV S V, et al. Molecular mechanism of moisture-induced transition in amorphous cellulose[J]. ACS Macro Letters, 2014, 3(10): 1037-1040.
- [42] 朱孟兆, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 111-115.
- ZHU Mengzhao, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Molecular dynamics simulation for influence of water on power transformer insulation paper[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(4): 111-115.
- [43] 许嘉轩. 交-直流电场下水分含量对油纸绝缘空间电荷特性的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- XU Jiaxuan. Effect of moisture content under AC and DC electric field

- on space charge characteristics in oil-paper insulation[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [44] ŻUKOWSKI P, KOŁTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. Formation of water nanodrops in cellulose impregnated with insulating oil[J]. Cellulose, 2015, 22(1): 861-866.
- [45] ŻUKOWSKI P, KOŁTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. Assessment of water content in an impregnated pressboard based on DC conductivity measurements theoretical assumptions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1268-1275.
- [46] ZOU C, FOTHERGILL J C, ROWE S W. The effect of water absorption on the dielectric properties of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 106-117.
- [47] 张金烽. 复合电场下油纸绝缘低温介电与击穿特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
ZHANG Jinfeng. Study on dielectric and breakdown characteristics of oil-paper insulation under AC-DC combined voltage at low temperature[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [48] IEDA M, OKUGO H, TSUKIOKA H, et al. Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 23(1): 153-157.
- [49] QI B, JIAO Y Q, GAO C J, et al. Influence of moisture on the interface charge of oil-pressboard composite insulation under DC voltage[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 73-77.
- [50] MAENO T, NONAKA Y, TAKADA T. Determination of electric field distribution in oil using the Kerr-effect technique after application of DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(3): 475-480.
- [51] LIU R, JAKSTS A, TORNKVIST C, et al. Moisture and space charge in oil-impregnated pressboard under HVDC[C]//Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Västerås, Sweden: IEEE, 1998: 17-22.
- [52] MU Z, WANG Z D, LIU Q. Space charge dynamics of oil-impregnated paper insulation with high water content[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-4.
- [53] 郝建. 变压器油纸绝缘热老化的时频域介电和空间电荷特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
HAO Jian. Study on time/frequency domain dielectric spectroscopy and space charge characteristics of transformer oil-paper insulation thermal aging[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2012.
- [54] 邓云坤, 马仪, 王达达, 等. 水分含量对直流电场下油纸绝缘空间电荷动态特性的影响[J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 8-13.
DENG Yunkun, MA Yi, WANG Dada, et al. Effect of moisture content on dynamic characteristics of space charge in oil-paper insulation under direct current electric field[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(9): 8-13.
- [55] 周远翔, 黄猛, 戴超, 等. 不同含水量油纸绝缘热老化过程中的空间电荷特性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1921-1928.
ZHOU Yuanxiang, HUANG Meng, DAI Chao, et al. Effect of moisture on space charge characteristics of oil-paper insulation during thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1921-1928.
- [56] 李群, 赵宇民, 金元, 等. 基于水分含量的油纸绝缘气隙缺陷放电特性研究[J]. 变压器, 2018, 55(12): 58-62.
LI Qun, ZHAO Yumin, JIN Yuan, et al. Research on PD of gas cavity in oil-paper insulation based on moisture content[J]. Transformer, 2018, 55(12): 58-62.
- [57] 高怡. 交直流复合电场下换流变匝间放电发展过程的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
GAO Yi. Process research on complex electric field between turn to turn partial discharge in AC-DC converter transformer[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.
- [58] 张晓涵. 油纸绝缘复合电压下气隙模型局部放电发展过程研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Xiaohan. The development processes of partial discharge in gas cavity of oil-paper insulation under AC and DC combined voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2015.
- [59] KOGAN P. Behaviour of moist oil-impregnated paper under electric stress[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1963, 110(12): 2257-2266.
- [60] 刘青松, 邓军, 池明赫, 等. 水分对复合电场下油纸绝缘局部放电特性的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 82-87.
LIU Qingsong, DENG Jun, CHI Minghe, et al. Effect of moisture on PD characteristics of oil-paper insulation in complex electric field[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 82-87.
- [61] NIKONOV V, BARTNIKAS R, WERTHEIMER M R. The influence of dielectric surface charge distribution upon the partial discharge behavior in short air gaps[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(6): 866-874.
- [62] FLORKOWSKI M, FLORKOWSKA B, ZYDRON P. Chopped partial discharge sequence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3451-3458.
- [63] NAWAWI Z, MURAMOTO Y, HOZUMI N, et al. Effect of humidity on partial discharge characteristics[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 307-310.
- [64] NAWAWI Z, MURAKAMI Y, HOZUMI N, et al. Effect of humidity on time lag of partial discharge in insulation-gap-insulation system[C]//2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia: IEEE, 2006: 199-203.
- [65] KIKUCHI Y, MURATA T, FUKUMOTO N, et al. Investigation of partial discharge with twisted enameled wires in atmospheric humid air by optical emission spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 839-845.
- [66] WANG X, TAYLOR N, EDIN H. Effect of humidity on partial discharge in a metal-dielectric air gap on machine insulation at trapezoidal testing voltages[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 83: 88-96.
- [67] WAKIMOTO T, KOJIMA H, HANAI M, et al. Transition of partial discharge inception voltage under high humidity for enameled rectangular wires[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen, China: IEEE, 2013: 1181-1184.
- [68] FALKENSTEIN Z, COOGAN J J. Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen-oxygen and water-air mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(5): 817-825.
- [69] ALGHAMDI A S, DODD S J. The influence of absorbed moisture on partial discharge patterns measured during tree growth in an epoxy resin[C]//2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK: IEEE, 2007: 623-626.
- [70] LIU Z, LIU Q, WANG Z D, et al. Partial discharge behaviour of transformer liquids and the influence of moisture content[C]//2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Bled, Slovenia: IEEE, 2014: 1-4.
- [71] BOLLIGER D, BOGGS S. Partial discharge based diagnostics for

- impurities in insulating fluid[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1659-1668.
- [72] BORSI H, SCHRODER U. Initiation and formation of partial discharges in mineral-based insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(3): 419-425.
- [73] 西尼. 直流电压下球板模型油纸绝缘局部放电发展的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- XI Ni. Partial discharge developing process of oil/pressboard insulation with sphere-plane electrode arrangement under DC voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2012.
- [74] BAO L W, LI J, ZHANG J, et al. Influences of moisture content on surface partial discharge behaviors of oil-impregnated paper insulation under pulsating DC voltage[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-4.
- [75] 左健. 运行环境因素对交直流复合电场下油纸绝缘沿面爬电的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- ZUO Jian. The influence of the operating environment to the surface discharge on the oil-impregnated pressboard under combined AC-DC electric field[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2015.
- [76] 李熙宁, 汲胜昌, 崔彦捷, 等. 水分对交直流复合电压下油纸绝缘沿面放电特性影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 184-193.
- LI Xining, JI Shengchang, CUI Yanjie, et al. Effect of moisture on surface discharge characteristics of oil-paper insulation under AC-DC combined voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 184-193.
- [77] 王文瑞, 何大海. 水分对油中沿面放电的影响[J]. 变压器, 1987(7): 12-17.
- WANG Wenrui, HE Dahai. Effect of water on the surface discharge in oil[J]. Transformer, 1987(7): 12-17.
- [78] BABULA E, SIEROTA A, ZOLEDZIOWSKI S, et al. Surface partial discharges in moist dielectric liquids[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985, 20(2): 299-302.
- [79] 吴广宁, 周芃, 高波, 等. 不同水分含量油浸纸板沿面放电发展过程及特性[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 552-560.
- WU Guangning, ZHOU Peng, GAO Bo, et al. Discharge development and characteristics of oil-immersed pressboard surface with different moisture contents[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 552-560.
- [80] DAI J, WANG Z D, JARMAN P. Creepage discharge on insulation barriers in aged power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1327-1335.
- [81] SIKORSKI W, WALCZAK K, PRZYBYLEK P. Moisture migration in an oil-paper insulation system in relation to online partial discharge monitoring of power transformers[J]. Energies, 2016, 9(12): 1082.
- [82] JIANG J P, DU B X, CAVALLINI A. Effect of moisture migration on surface discharge on oil-pressboard of power transformers under cooling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(5): 1743-1751.
- [83] KOLCUNOVÁ I, KURIMSKÝ J, CIMBALA R, et al. Contribution to static electrification of mineral oils and natural esters[J]. Journal of Electrostatics, 2017, 88: 60-64.



杜伯学

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事聚合物绝缘材料的可靠性和安全性理论与试验、高温超导电介质、纳米复合绝缘材料、电气绝缘在线监测、高电压新技术等方面的研究工作

E-mail: duboxue@tju.edu.cn



姜金鹏(通信作者)

1992—, 男, 博士生

主要从事换流变压器中油纸绝缘沿面放电与抑制方法研究工作

E-mail: jjp2014@163.com

JIANG Jinpeng
Ph.D. candidate
Corresponding author