第 52 卷 第 2 期：836-845　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 836-845
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250029

直流电场下长油隙中纤维颗粒运动积聚特性

孟　旋，王昊天，张轩瑞，周　阳，韩旭涛，李军浩
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：油中固体颗粒会显著降低变压器油的绝缘性能，是引发换流变压器出线端故障的主要原因之一。针对直流电场下长油隙中纤维颗粒的运动与积聚行为，基于离散元方法构建了三维计算模型，研究了油中多颗粒的运动特征及颗粒链的形成过程，并与实验结果进行了对比分析。首先分析了纤维颗粒的受力情况，外部场作用力主导了颗粒的运动，颗粒间作用力显著影响了其积聚行为，同时考虑了双极性电荷积聚的作用。计算模型采用拉格朗日计算框架，并基于软球模型处理颗粒接触问题。计算结果表明，颗粒链的发展过程伴随着延伸和断裂的动态变化。随着颗粒链在电极间的往复运动，油中游离颗粒逐渐减少，纤维颗粒链逐步增多，并经历快速延伸后进入缓慢增长阶段。统计结果显示，颗粒链由短链占主导逐渐向长链演化，较短颗粒链的最大速度相对更高。实验结果与计算结果一致，表明该计算模型能够较好地描述长油隙中纤维颗粒的运动积聚特性。
关键词：直流电场；长油隙；污染变压器油；纤维颗粒；离散元；颗粒运动

Migration and Accumulation Characteristics of Cellulose Particles in a Long Oil Gap Under DC Electric Field

MENG Xuan, WANG Haotian, ZHANG Xuanrui, ZHOU Yang, HAN Xutao, LI Junhao
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Solid particles significantly affect the insulating performance of transformer oil, becoming one of the main causes of converter transformer outlet terminal faults. This study focuses on the migration and accumulation behavior of cellulose particles in a long oil gap under a DC electric field. A three-dimensional computational model is developed based on the discrete element method to investigate the motion characteristics of particles in oil and the formation process of particle chains, with comparative analysis against experimental results. The model first analyzes the forces acting on cellulose particles, where external field forces dominate particle motion, and inter-particle forces significantly influence particle accumulation. The effects of bipolar charging are also taken into account in the model. The discrete element model adopts a Lagrangian computational framework and uses a soft-sphere model to handle particle contact interactions. Computational results show that the development of particle chains involves dynamic processes of extension and breakage. With the reciprocating movement of particle chains between electrodes, the number of free particles in the oil gradually decreases, while cellulose particle chains increase, undergoing rapid extension followed by slower growth. Statistical results indicate that particle chains evolve from being dominated by short chains to longer chains, with shorter chains exhibiting relatively higher maximum velocities. Experimental results are consistent with the computation, demonstrating that the model effectively reflects the migration and accumulation characteristics of cellulose particles in a long oil gap.
Key words: DC electric field; long oil gap; contaminated transformer oil; cellulose particles; discrete element; particle move

0　引言

变压器油具有优异的绝缘性能和热传导能力，其质量直接关系到换流变压器的安全运行[1-5]。然而在长期运行过程中，受多种因素的影响，变压器油中不可避免地会产生和累积微小固体颗粒[6-10]。在高场强的作用下，极化的纤维颗粒发生定向迁移会引起纤维小桥的形成，从而导致变压器油绝缘性能的下降[11-14]。由于换流变压器出线端电场分布较为集中，变压器出线端对固体颗粒尤为敏感。CIGRE 的统计报告表明，固体颗粒是引发换流变压器出线端故障的主要原因之一[15-16]。故障变压器油样中的固体颗粒以纤维颗粒为主，粒径主要分布在 100 μm 以下，同时伴有少量铁、铜等金属颗粒[17]。多台换

基金资助项目：陕西省杰出青年科学基金（2024JC-JCQN-42）。
Project supported by Shaanxi Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(2024JC-JCQN-42).

流变压器的故障报告表明，与固体颗粒有关的故障多发生于高压引线与筒壁之间，油隙长度可达 400 mm。

国内外学者对于直流电场下变压器油中纤维颗粒的运动积聚特性已开展了较多的研究。S. Mahmud 研究了直流、交流和直流偏置交流电场影响下 10 mm 油间隙中纤维颗粒积聚成桥的过程，并构建了直流电场下球电极间纤维颗粒运动仿真模型，计算了不同条件下单个纤维颗粒在电极之间的往复运动轨迹[18-20]。黄宇辰基于两相流仿真模型研究了均匀和非均匀直流电场下 5 mm 油间隙中纤维杂质颗粒的运动特性[21]。结果表明，直流电场下颗粒更容易与电极发生碰撞并发生电荷转移，从而显著增加小桥形成的概率。张国治对直流电场下 5 mm 油间隙中纤维颗粒的往复运动轨迹进行仿真研究，发现纤维颗粒在电极之间的往复运动与电场力密切相关，杂质颗粒在电极上充满电荷后在电场力的作用下远离该电极，在此过程中颗粒在电极之间反复运动传递电流[22]。李原构建了动力学分析模型来计算 4 mm 油间隙中纤维杂质的运动轨迹，并对纤维杂质的速度、偏移距离和其他参数进行定量分析[23]。结果表明，在双极性电荷积聚的作用下，当纤维杂质所受的电场力足以抵消重力时会脱离绝缘纸板并沿电场线方向运动。

现有研究主要集中于变压器内常规结构中颗粒的运动特性，油隙长度通常小于 10 mm[24]。然而，换流变压器中存在升高座区域，该区域高压引线与筒壁之间为长油隙结构，且存在油循环死区。实验研究表明，油间隙的长度对颗粒链的成桥过程存在显著影响。在 10 mm 的短油隙中，颗粒之间积聚形成颗粒链后能够快速在电极之间连接形成纤维小桥；而在 30 mm 长油隙中，颗粒首先积聚形成较长的颗粒链，随后颗粒链沿电场方向在电极之间往复运动，并逐渐向高场强区域汇聚。最终，随着局部颗粒浓度的显著增加，颗粒在电极之间形成纤维小桥。此外，目前的颗粒动力学计算模型大都聚焦于单颗粒的运动轨迹，缺乏对多颗粒间相互作用的模拟和分析，使现有模型难以准确反映实际工况中颗粒间复杂的碰撞与积聚过程。为此，构建能够模拟油中多颗粒相互作用的动力学计算模型，将有助于深入揭示颗粒的运动规律及成链机制。

本文构建了直流电场下长油隙中多颗粒运动积聚三维计算模型。通过分析油中纤维颗粒的受力情况，基于离散元方法建立了动力学计算模型，对纤维颗粒群在油中的运动过程及颗粒链的形成过程进行了研究。本文还构建了纤维颗粒运动积聚实验平台，通过对比计算与实验结果，验证了计算模型的合理性。

1　变压器油中纤维颗粒动力学分析

在直流电场作用下，变压器油中的纤维颗粒会受到多种力的影响，包括外部场作用力和颗粒间的相互作用力。

然而，在以往的研究中，通常只关注外部场作用力对颗粒运动的影响，而忽略了多个纤维颗粒之间的相互作用。前者可以用来分析颗粒在电极间的运动过程，但难以解释颗粒在变压器油中的积聚行为。相应地，颗粒间作用力则是多颗粒成链的关键。对以上作用力的分析有助于理解油中颗粒的运动积聚等行为特征。用于描述油中纤维颗粒运动过程的动力学方程如下：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{DEP}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{Drag}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}+\sum_{j=1,j\neq i}^{N}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}_ij}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{dip}_ij})=m_{\mathrm{p}}\boldsymbol{a} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}$ 为外部电场力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{DEP}}$ 为介电泳力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Drag}}$ 为流体曳力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}$ 为重力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$ 为浮力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}_ij}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{dip}_ij}$ 分别为目标颗粒 i 与其他颗粒 j 之间的库仑力和偶极力；N 为颗粒的总数量；m_{p} 为颗粒的质量；$\boldsymbol{a}$ 为颗粒的加速度。

1.1　外部场作用力

外部场作用力主要包括外部电场力、介电泳力、流体曳力和重力、浮力[11,23]，计算式如下：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}=kq\boldsymbol{E} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{DEP}}=(\boldsymbol{p}\cdot\nabla)\boldsymbol{E} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Drag}}=-6\pi\eta_{\mathrm{oil}}r_{\mathrm{eff}}\boldsymbol{v} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}=(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{oil}})V_{\mathrm{p}}\boldsymbol{g} \tag{5}$$

式中：参数 k 为考虑表面电荷影响的修正系数；q 为颗粒的电荷量；$\boldsymbol{E}$ 为颗粒所在位置的外部电场强度；$\boldsymbol{p}$ 为颗粒的电偶极矩；η_{oil} 是变压器油的动力粘度；r_{eff} 是计算流体曳力时颗粒的有效半径；$\boldsymbol{v}$ 是颗粒相对于流体的速度；ρ_{oil} 和 ρ_{p} 分别是变压器油和纤维颗粒的密度；V_{p} 是颗粒的体积；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度。

在前人的研究中，纤维颗粒的受力分析通常通过将其等效为金属颗粒的方法进行处理[20]，同时较少关注颗粒电荷量随时间的动态变化。然而，这种简化处理忽略了纤维颗粒间电荷量的差异，导致计算结果与实际情况存在显著偏差。此外，忽略颗粒

电荷量的变化过程会导致电极表面颗粒电荷量的瞬时变化，致使颗粒在接触电极后立即向远离该电极的方向运动，这使得难以解释颗粒链在电极表面的附着现象。因此，以上简化处理难以准确描述颗粒的运动规律和成链机制。

本文考虑了油中纤维颗粒带电荷量的变化过程。颗粒最初不携带电荷，因此不会受到电场力的作用。随着颗粒沉降到电极表面，颗粒与电极之间发生电荷转移。当颗粒的带电量逐渐增加，所受电场力也随之增大。当电场力足以使颗粒脱离电极表面时，颗粒将在电场力的作用下向另一电极方向运动，如图 1 所示。进一步地，颗粒在不同极板表面电荷量的变化均会引起其所受外部电场力的变化，从而导致颗粒在电极之间的往复运动。

纤维颗粒是非金属颗粒，其荷电过程并非瞬间完成，颗粒的电荷量 q_0 会随时间 t 发生变化：

$$q_0(t) = q_s(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{6}$$

$$q_s = \frac{2}{3}\pi^3 \varepsilon_0 \varepsilon_m r_p^2 E \tag{7}$$

$$\tau = \frac{\varepsilon_p \varepsilon_0}{\sigma_p} \tag{8}$$

式中：q_s 为颗粒的饱和电荷量[25]；ε_m 和 ε_p 分别为变压器油和纤维颗粒的相对介电常数；r_p 为纤维颗粒的半径；σ_p 为纤维颗粒的电导率。

介电泳力是一种与电场梯度相关的非均匀电场作用力。在稍不均匀电场下，电场的梯度较小，因此介电泳力的作用相对较弱，对颗粒的影响也较为有限。纤维颗粒电偶极矩 $\boldsymbol{p}$ 的计算式为：

$$\boldsymbol{p} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_m r_p^3 \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_p + 2\sigma_m}\boldsymbol{E} \tag{9}$$

式中：σ_m 为变压器油的电导率。

1.2 颗粒间作用力

在纤维颗粒群运动积聚的计算中，颗粒间作用力是多颗粒积聚并形成颗粒链的关键。颗粒间作用力主要包括库仑力和偶极力，计算式如下：

$$\boldsymbol{F}_{C_ij} = q_i \boldsymbol{E}_j \tag{10}$$

$$\boldsymbol{F}_{dip_ij} = (\boldsymbol{p}_i \cdot \nabla)\boldsymbol{E}_j \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{E}_j$ 表示颗粒 j 在颗粒 i 位置处产生的电场强度；q_i 和 $\boldsymbol{p}_i$ 分别为颗粒 i 的电荷量和电偶极矩。

两颗粒带有不同极性的电荷时，颗粒之间的库仑力表现为吸引作用。然而，颗粒之间存在电荷的传递，临近的颗粒带有相同极性的电荷时，库仑力表现为排斥作用。当两颗粒沿电场方向排列，颗粒之间的偶极力表现为吸引作用[26]。颗粒间作用力的影响范围极为有限，当颗粒之间的距离较为接近时，在颗粒间作用力的吸引作用下，多个纤维颗粒积聚成为颗粒链。

此外，颗粒链内的电荷分布并不均匀，而是表现出明显的双极性电荷积聚特性[23]。具体而言，在电场作用下，颗粒链两端的电荷分别呈现不同的分布特征。当颗粒链的一端朝向高压正电极，此端由于静电感应而积聚负电荷；另一端则朝向接地电极，并积聚正电荷。这种双极性电荷积聚作用导致颗粒链两端受到较强的外部电场力，从而显著影响颗粒链的运动行为和结构稳定性。

外部电场作用下，纤维颗粒链断裂并形成游离颗粒链的过程如图 2 所示。颗粒链内的颗粒之间受到颗粒间作用力的影响而维持链状结构。双极性电极积聚作用导致颗粒链的一端受到较强的外部电场力。随着电荷的变化，当颗粒链中的某一点达到受力平衡时，颗粒间作用力不再足以维持颗粒链的结构稳定。此时，颗粒链断裂并形成游离颗粒链。游离颗粒链带有电荷，并在外部电场力的主导作用下

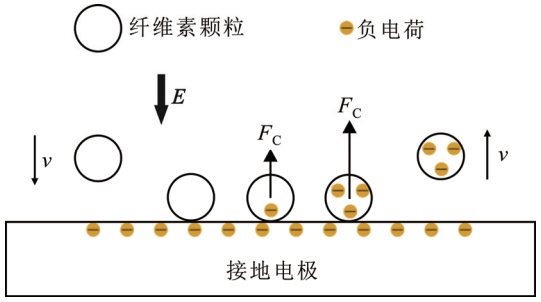


图 1 颗粒脱离电极表面过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the process of particles detaching from the electrode surface

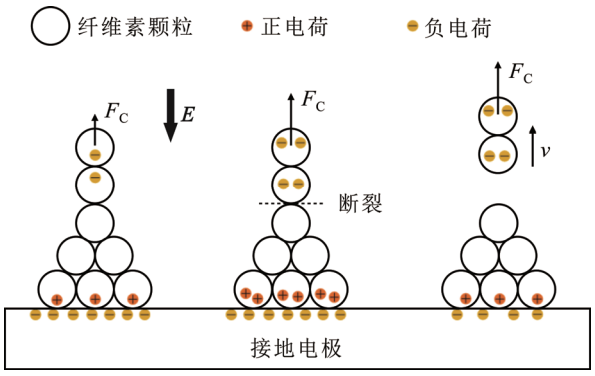


图 2 颗粒链断裂过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the particle chain breaking process

向另一侧电极方向运动。

2　颗粒运动积聚计算模型

离散元方法通过精确计算颗粒所受的外部场作用力及颗粒间相互作用力，能够细致模拟颗粒的行为特征，在分析颗粒系统的动态行为方面展现出显著优势。在升高座区域，由于变压器油未参与油循环，其流动可以视为静止状态。纤维颗粒的体积分数远小于 10%，可以认为离散相是分散的，因此拉格朗日方法是求解油中颗粒运动的理想选择。相应的，油流的行为在此过程中并不作为主要考虑因素，在模型中忽略颗粒对油流运动的影响。

2.1　颗粒接触模型

颗粒之间的接触问题是多颗粒运动积聚计算的重点。在离散元仿真计算中，每个纤维颗粒被视为独立的“质点”。为了防止颗粒之间、颗粒与壁之间发生不合理的重叠，确保颗粒的真实物理行为，需要在计算中引入适当的接触模型。硬球模型认为碰撞过程是瞬时的，仅考虑两颗粒间的相互作用，难以处理多重碰撞问题。相较而言，软球模型是硬球模型的拓展，它假设颗粒在碰撞时能够发生一定的弹性变形，允许碰撞过程持续一段时间，并能够考虑多个颗粒之间的相互作用。文中基于软球模型处理颗粒的碰撞问题。

软球模型中 Hertz-Mindlin 接触模型常用于描述颗粒间的接触行为，能够有效处理颗粒之间、颗粒和壁之间不合理的重叠问题。Hertz 模型描述了弹性体在接触区域的应力分布，假设当颗粒发生接触时，重叠量与法向力之间存在非线性关系，随着重叠的增加法向力也会增加，从而避免了颗粒的重叠。Mindlin 模型描述了弹性体接触时的切向力问题，考虑了颗粒的滑动和滚动摩擦，当切向力超过摩擦力时，颗粒会发生滑动。Hertz-Mindlin 接触模型中，对于颗粒-颗粒之间的碰撞接触问题，法向力 F_{n} 和切向力 F_{t} 的计算式如下：

$$F_{\mathrm{n}}=\frac{4}{3}E^{*}\sqrt{R^{*}}\delta^{\frac{3}{2}} \tag{12}$$

$$F_{\mathrm{t}}=\mu F_{\mathrm{n}} \tag{13}$$

式中：δ 是纤维颗粒的法向重叠量；μ 是颗粒之间的摩擦系数；E^{*}是等效弹性模量；R^{*}是颗粒的等效半径。E^{*}和 R^{*}定义如下：

$$\frac{1}{E^{*}}=\frac{(1-v_i^2)}{E_i}+\frac{(1-v_j^2)}{E_j} \tag{14}$$

$$\frac{1}{R^{*}}=\frac{1}{R_i}+\frac{1}{R_j} \tag{15}$$

式中：E_i、v_i、R_i 和 E_j、v_j、R_j 分别是颗粒 i 和 j 的杨氏模量、泊松比和半径。颗粒与壁之间的碰撞接触采用同样的模型，壁面可以被视为半径无穷大的球体，进而对法向力和切向力进行相应的调整。

2.2　双极性电荷积聚作用

模型中的每个颗粒被视为一个独立个体，计算过程中难以判断多个颗粒是否形成纤维颗粒链，因此无法直接模拟颗粒链上局部电荷的积聚过程。为了实现这一效果，当两颗粒发生接触时，基于颗粒的位置关系，对每个颗粒分别施加大小相同、极性相反的电荷，从而模拟电场作用下颗粒之间电荷的迁移现象。对于由多个颗粒连接形成的颗粒链，链中相互接触的颗粒之间电荷会发生迁移，在经由多个时间步后，颗粒链内的电荷分布趋于稳定，从而表现出双极性电荷积聚的效果。

2.3　模型构建

较大的计算区域和大量的颗粒会显著增加计算时间和复杂度。为提高计算效率，文中对模型进行了简化，缩小了计算规模并选取局部区域。尽管升高座筒壁与套管底座之间的电场为稍不均匀场，然而在局部区域内均匀场与稍不均匀场之间的差异对颗粒链运动和积聚特征的影响较为有限。基于此，为了简化计算过程并聚集关键物理现象，文中对模型施加均匀电场。

长油隙中纤维颗粒运动积聚动力学三维计算模型由 10 mm×1 mm×30 mm 的变压器油区域，以及分别位于两端的高压电极与接地电极组成。根据某 400 kV 电压等级换流变压器的数据开展计算，对模型施加 13.3 kV/cm 的电场强度。运行中的变压器油内纤维颗粒的粒径分布范围为 5~100 μm，其中大粒径纤维颗粒在成桥过程中起到了重要作用，因此文中纤维颗粒的粒径设置为 100 μm。在直流电场作用下，纤维颗粒会向电场集中分布的区域运动，使该区域颗粒的质量分数显著高于平均值。本文计算了 500 个纤维颗粒在 60 s 内的运动积聚过程，计算中所涉及的参数见表 1。

3　长油隙中多颗粒运动积聚计算结果

3.1　颗粒运动积聚过程

0 s 时，纤维颗粒被均匀释放到电场中的油隙内，纤维颗粒链的形成过程及其在电极之间的往复

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	数值	单位
r_p	50	μm
ε_0	8.85×10^{-12}	F/m
ε_m	2.2	
ε_p	4.5	
ρ_p	1 500	kg/m^3
ρ_{oil}	885	kg/m^3
η_{oil}	0.02	Pa·s
σ_p	5×10^{-5}	S/m
σ_m	1×10^{-13}	S/m
E	13.3	kV/cm

运动过程如图 3 所示。初始时刻，纤维颗粒在油中的分布呈随机状态，相距较近的纤维颗粒在偶极力的作用下相互吸引，并在碰撞后连接形成较短的颗粒链。1 s 时，图中已经出现少量由纤维颗粒组成的短链。由于纤维颗粒不携带电荷，在重力作用下，颗粒缓慢沉降并逐渐附着在接地电极表面。

随着时间的推移，电极表面颗粒链的带电荷量发生变化。伴随颗粒链带电荷量的不断增加，附着在接地电极表面的颗粒链发生断裂，游离的颗粒链开始向高压电极方向运动。5 s 时，两条颗粒链已经运动至高压电极并附着在其表面。当这些短颗粒链靠近油中分散的纤维颗粒时，在偶极力的吸引下相互连接，颗粒链的长度随之增加。

伴随颗粒链在电极之间的往复运动，纤维颗粒短链的数量逐渐增多。在计算进行至 10 s 时，短链数量相比 5 s 时显著增加。同时，电极表面的颗粒链数量也有所增加。如图 3 中所示，10 s 时高压电极表面附着了一条较长的纤维颗粒链。随着颗粒链与游离颗粒间吸引过程的不断进行，颗粒链长度不断增长。在 20 s 时，油中及电极表面均出现了 2.0 mm 以上的较长纤维颗粒链。然而，由于油中离散纤维颗粒的数量减少，可供颗粒链进一步延伸的游离颗粒数量逐渐不足，从而抑制了颗粒链长度的进一步增长。25 s 后，纤维颗粒链的长度增加缓慢，其运动以在电极之间的往复运动为主。25 s 时，一条附着在接地电极表面的长颗粒链于 30 s 时运动至油隙中部，并在电极之间完成往复运动后，于 40 s 再次附着在接地电极表面。

3.2 油中颗粒链的延伸过程

初始阶段，相距较近的纤维颗粒在偶极力 F_{inner} 的作用下相互吸引，从而形成较短的颗粒链，图 4

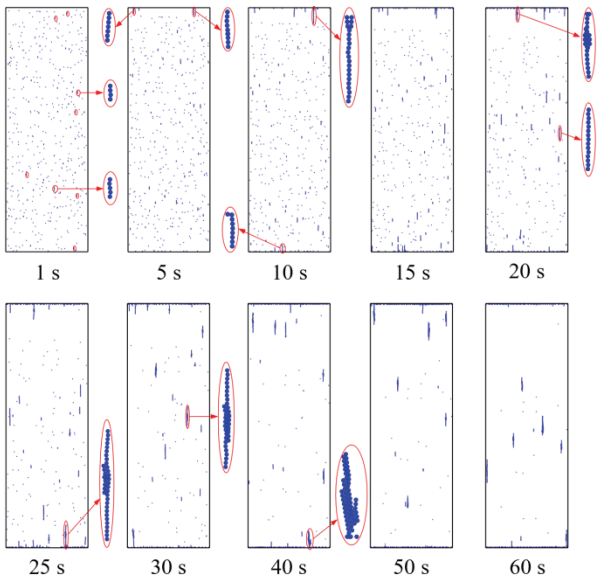
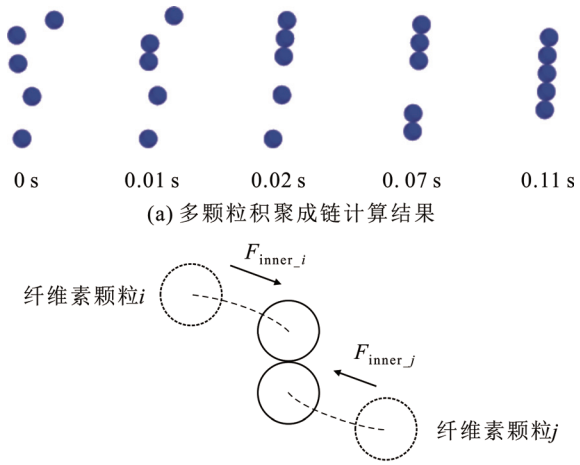


图 3 纤维颗粒群运动积聚过程

Fig.3 Migration and accumulation process of multiple cellulose particles



(a) 多颗粒积聚成链计算结果

(b) 多颗粒积聚成链过程示意图

图 4 游离纤维颗粒积聚成链过程

Fig.4 Chain formation process of free cellulose particles

展示了其中一条颗粒链的形成过程。初始时刻，5 个纤维颗粒以离散分布的形式存在，呈非共线排列，彼此间的空间位置较为分散。在偶极力的作用下，这些纤维颗粒相互吸引并向彼此靠近，于 0.07 s 形成了两条纤维颗粒短链。由于两条短链之间的距离接近，在随后的运动中，短链之间进一步靠近并在 0.11 s 时发生碰撞，最终连接成为一条完整的纤维颗粒链。

颗粒链的积聚与延伸过程既会在变压器油中发生，也会在电极表面附近出现。变压器油中颗粒链的积聚与延伸过程如图 5 所示。在电极之间的运

动过程中，变压器油中的游离颗粒链会与其他游离颗粒链相遇。在颗粒间相互作用力的作用下，两条游离颗粒链会彼此吸引并最终连接，形成一条更长的颗粒链。值得注意的是，变压器油中游离颗粒链之间的碰撞与连接过程具有较强的随机性，这与颗粒链的空间位置和运动速度密切相关。当两条颗粒链的运动路径相对接近且速度较慢时，在库仑力或偶极力等吸引作用的驱动下，颗粒链更容易相互靠近并完成连接。然而，当两条颗粒链的运动速度较快时，尽管存在吸引作用，但由于吸引时长不足，它们无法靠近并完成连接。随后，两颗粒链会各自沿原先的方向继续运动，未能形成更长的颗粒链，如图 6 所示。

电极表面附近颗粒链的积聚与延伸过程如图 7 所示。图中，游离的纤维颗粒链在外部场作用力的影响下向接地电极方向运动，并逐渐靠近电极表面的颗粒链。如果游离颗粒链继续沿原先的运动轨迹向前运动，会直接越过接地电极表面的颗粒链，并与接地电极发生接触。然而，由于库仑力和偶极力等颗粒间作用力的存在，游离纤维颗粒链的运动路径发生偏转，逐渐向电极表面颗粒链的端部方向靠拢。当两者在端部接触后，连接成为一条更长的纤维颗粒链。

3.3　油中颗粒链的断裂过程

颗粒链的断裂过程通常发生在电极表面附近。沉降并附着在电极表面的纤维颗粒链，在双极性电荷积聚的作用下，颗粒链垂直于电极表面分布。由于颗粒链的带电荷量逐渐变化，受外部电场力的作用不断增强，当颗粒间的偶极力不足以维持颗粒链结构的稳定时，颗粒链发生断裂，如图 8 所示。由于不同颗粒链的结构存在差异，其断裂位置也有所不同。在图 8(a)中，颗粒链在底部位置断裂，形成的游离颗粒链长度相对较长，且运动速度相对较慢。而在图 8(b)中，颗粒链在中部发生断裂，断裂后形成了一条由两个颗粒组成的短链，并以较快的速度向高压电极方向运动。

3.4　速度-链长分布统计结果

统计不同时间段内颗粒链的速度-链长分布情况，并对不同链长颗粒链运动速度的最大值曲线进行拟合，如图 9 所示。图中直观展示了纤维颗粒链的链长与运动速度之间的关系，以及其随时间的演化规律。对于链长接近的颗粒链，其在变压器油中的运动速度也存在显著差异。统计结果表明，不同

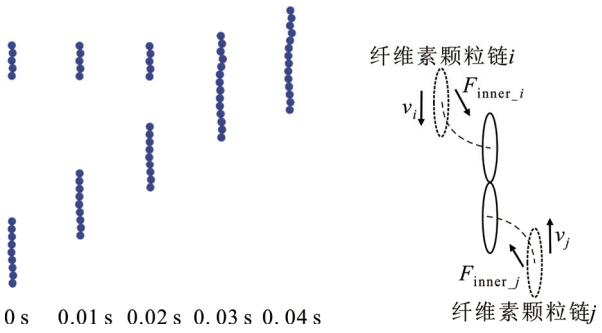


图 5　颗粒链连接形成较长颗粒链的计算结果及示意图

Fig.5　Simulation results and schematic diagram of particle chains connecting to form longer chains

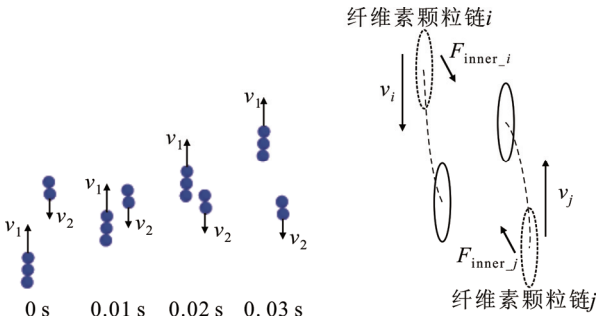


图 6　颗粒链未连接形成较长颗粒链的计算结果及示意图

Fig.6　Simulation results and schematic diagram of particle chains which does not connect to form longer chains

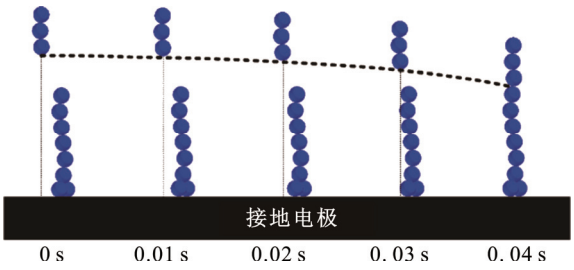


图 7　电极表面附近颗粒链延伸过程计算结果

Fig.7　Simulation results of the extension process of particle chains near the electrode surface

链长的颗粒链运动速度均存在一个最大值，且链长较短的颗粒链通常具有更高的速度最大值。随着时间推移，颗粒链在长度和速度分布上均存在动态变化，比较不同时间段变压器油中颗粒链的速度-链长分布规律，结果如下所述。

1）0~10 s：颗粒链长度集中在 2.0 mm 以下，速度-链长曲线附近仅有少量散点，多数颗粒链速度趋近于 0。少量颗粒链附着于电极表面后电荷量发生变化，断裂形成游离颗粒链的速度显著增加。

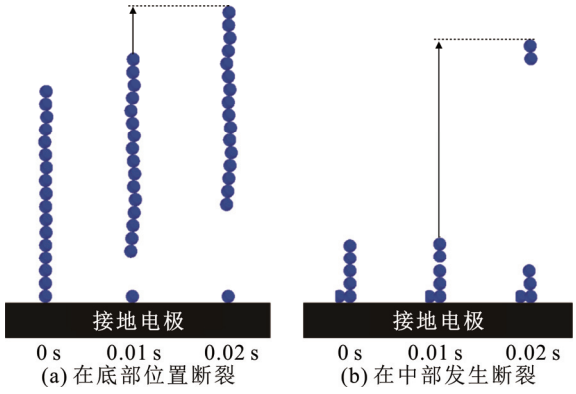


图 8 电极表面附近颗粒链断裂过程计算结果

Fig.8 Simulation results of the breakage process of particle chains near the electrode surface

2）10~20 s：链长仍集中在 2.0 mm 以下，速度-链长曲线略上移，曲线附近的散点增多。颗粒链缓慢延伸，表明该时间段内颗粒链主要与游离颗粒积聚。不同长度颗粒链的速度最大值均有小幅提升。

3）20~30 s：链长扩展至 3.0 mm 以下，出现少量 2.0~3.0 mm 颗粒链，但速度-链长曲线基本不变。颗粒链长度分布范围的增加表明，短颗粒链之间发生积聚和延伸，存在向长颗粒链发展的趋势。

4）30~40 s：链长仍集中在 3.0 mm 以下，0.7~2.0 mm 颗粒链的数量减少，2.0 mm 以上颗粒链的数量增加。长颗粒链的运动速度相对较慢，亦或是附着在电极表面，速度趋近于 0。

5）40~50 s：短颗粒链的速度最大值下降，导致速度-链长曲线小幅下移。运动颗粒链的长度分布出现了两极化的趋势，链长主要集中分布在 1.0 mm 以下和 2.2 mm 以上。

6）50~60 s：链长仍集中在 3.0 mm 以下，1.0 mm 以下颗粒链的数量减少，2.0 mm 以上颗粒链的数量增加，速度-链长曲线基本不变。

综上，纤维颗粒链的速度-链长曲线随时间的变化过程反映了颗粒链形成的动态演化规律。颗粒链的长度分布经历了从短链占主导逐渐向长链扩展的演化过程，同时链长随时间表现出一定的分化趋势。这种分化特征体现为颗粒链长度分布逐渐向短链和长链两个区间聚集，而中间长度的颗粒链比例相对减少。速度-链长拟合曲线揭示了在该条件下，不同长度颗粒链的运动速度最大值随链长变化的趋势。进一步地，不同工况下曲线的变化能够反映颗粒链运动与积聚特征的差异，以及在多种因素影响下的变化规律。

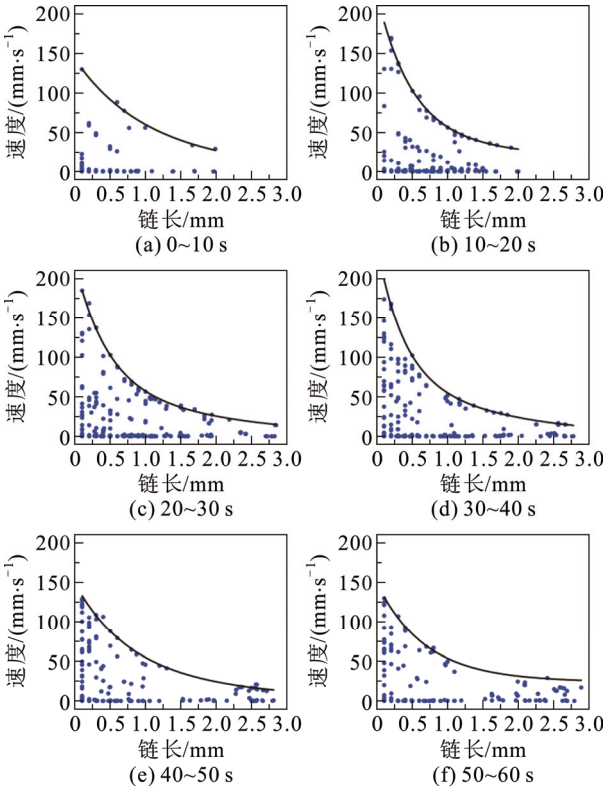


图 9 不同时间段内颗粒链速度-链长分布统计结果

Fig.9 Statistical results of velocity-chain length distribution of particle chains at different time intervals

现有研究主要集中于油中单个纤维颗粒的动力学分析，聚焦于单颗粒在电极间的往复运动过程，并分析其运动轨迹、速度变化及受力特性。尽管对单颗粒运动过程的分析有助于揭示油中颗粒的运动行为，但由于未考虑多颗粒间的相互作用，该方法在解释颗粒链的形成与演化机制方面存在局限。此外，在颗粒受力分析方面，现有模型大多仅考虑外部场作用力的影响。在外部电场力的计算过程中，通常假设纤维颗粒带有饱和电荷量，忽略了颗粒的电荷变化过程。相比之下，本文构建了直流电场下长油隙中多颗粒运动积聚三维计算模型，计算并分析了油中多颗粒的运动行为和积聚过程。在结合外部场作用力的基础上，进一步引入多颗粒间的相互作用，不仅考虑颗粒在电极间的往复运动过程，还深入分析了多颗粒积聚成链及其延伸的动态演化机制。此外，本文针对纤维颗粒作为非金属颗粒的特性，重点考虑了颗粒带电荷量的变化过程，并进一步引入双极性电荷积聚效应。在链内电荷分布不均匀的影响下，颗粒链发生局部断裂，展现了电场作用下颗粒链的断裂过程。

4　长油隙中颗粒运动积聚实验

4.1　实验平台与方法

构建了直流电场下长油隙中纤维颗粒运动积聚实验平台，如图 10 所示。该平台主要由直流电压源、试品模型和光学观测系统组成。直流电压源连接滤波电容以降低输出电压的纹波，随后通过限流电阻和电阻分压器连接到试品模型的高压电极。光学观测系统包括相机和辅助光源，用于获取纤维颗粒行为特征的光学图像。光学观测系统采用分辨率为 1 920×1 080、帧率为 59.94 帧/s 的相机，配置焦距为 35 mm，最大光圈为 f 2.0 的镜头，能够在保持较大视野范围的同时，实现对颗粒运动变化过程的清晰捕捉。

为避免纤维颗粒在平板电极边缘积聚的问题，选用球-板电极结构进行实验。试品模型由有机玻璃外壳和金属电极组成。外壳内壁为边长 200 mm 的正方形结构，高透明有机玻璃材质确保了实验观测的清晰度。上方球电极为高压电极，直径为 50 mm，底部平板电极为接地电极，电极间距为 30 mm。模型中电场的不均匀系数为 1.72，满足稍不均匀电场的条件。为确保实验结果的可重复性，在实验前需要对纤维颗粒及变压器油进行预处理。通过研磨绝缘纸板获得不同尺寸的纤维颗粒。将颗粒置于真空干燥箱中，在 80 ℃、100 Pa 的条件下处理 48 h，冷却至室温后取出。通过标准分样筛对颗粒进行筛选，以分离出 100 μm 以下的纤维颗粒。选用 KI-25X 型变压器油进行实验，并使用孔径为 0.2 μm 的微孔滤膜对油样进行抽滤，以减少油中杂质。将变压器油置于真空烘箱中，在 80 ℃、100 Pa 的条件下处理 48 h，冷却至室温后取出，实验时油温为 25 ℃。将质量分数 0.01%的干燥纤维颗粒加入 2 L 脱水脱气的变压器油中，并使用磁力搅拌器使油中纤维颗粒均匀分布，从而配制出污染变压器油样。实验过程中对模型施加 40 kV 直流电压，持续 120 s。

4.2　实验结果

直流电场下长油隙中纤维颗粒运动积聚的实验结果如图 11 所示。在实验初期，纤维颗粒在变压器油中均匀分布，游离颗粒的分布较为分散，油液呈现轻微浑浊。在重力的作用下，颗粒开始沉降，随后出现一些较短的颗粒链在电极之间进行往复运动。施加直流电压 10 s 后，变压器油中出现少量短颗粒链，图中白色方框标注的游离颗粒链长度为

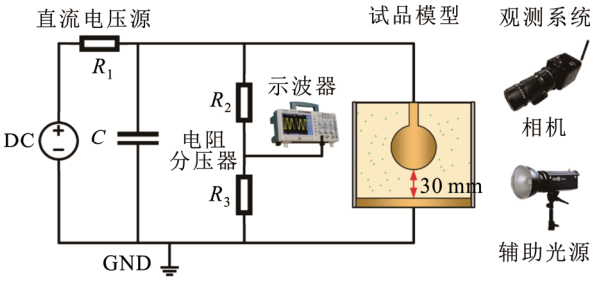


图 10　直流电场下长油隙中纤维颗粒运动积聚实验平台

Fig.10　Experimental platform for the migration and accumulation of cellulose particles in a long oil gap under a DC electric field

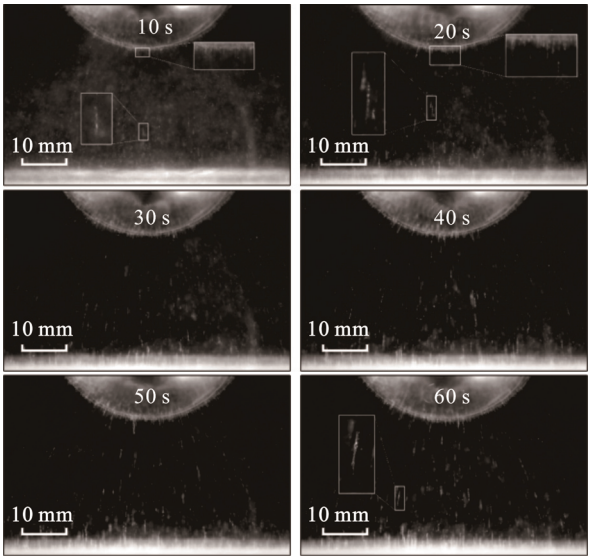


图 11　纤维颗粒运动积聚实验结果

Fig.11　Experimental results of cellulose particle migration and accumulation

1.63 mm，此外电极表面也附着了一些较短的颗粒链。20 s 时，油液透明度有所提高，表明油中游离纤维颗粒的数量减少。随着颗粒链在油间隙中的往复运动，颗粒链的数量略有增加，较长颗粒链的长度可达 3.28 mm。30 s 后，油中离散纤维颗粒的数量进一步减少，颗粒链的分布更加清晰。颗粒链的数量继续增加，但其延伸速度有所减缓。实验进行到 60 s 时，油中颗粒链的数量显著增加，颗粒链的长度增长趋于平缓，图中白色方框标注的游离颗粒链长度为 3.6 mm。

4.3　实验结果与计算结果的对比分析

拍摄完成后，对图像进行处理与分析，以提取颗粒链的行为特征。首先，通过图像增强技术提升颗粒链在背景中的对比度，并进行滤波处理以降低

背景噪声。随后，采用阈值分割方法将颗粒链从背景中分离，并提取其边缘轮廓，以获取颗粒链的形状参数。在此基础上，利用运动轨迹追踪算法分析颗粒链在变压器油中的运动轨迹，并计算该时间段内颗粒链的运动速度。统计 60 s 时油中颗粒链的速度-链长分布情况，并与计算结果中的速度-链长曲线进行对比，如图 12 所示。图中，蓝色圆点为实验测得的颗粒链速度-链长分布数据，红色虚线为计算结果中不同链长颗粒链运动速度最大值的拟合曲线，黑色实线为实验结果中不同链长颗粒链运动速度最大值的拟合曲线。

由于实验中的纤维颗粒形状并非规则的球形，与计算中假设的理想球形颗粒略有不同，使实验结果与计算结果之间存在差异。在实验结果中，纤维颗粒短链的数量分布较为密集，而较长颗粒链的数量相对较少。此外，与长颗粒链相比，较短纤维颗粒链的速度最大值相对更高。对比计算中的速度-链长拟合曲线，实验结果中不同长度颗粒链的运动速度最大值分布及变化趋势与计算结果较为一致，表明计算模型能够较好地反映油中颗粒链的运动积聚特性。

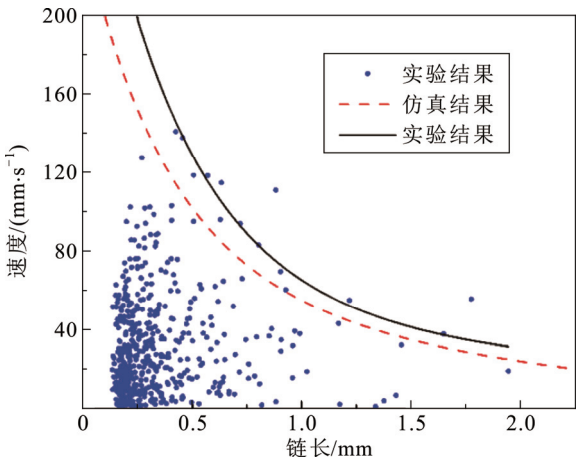


图 12 颗粒链速度-链长分布实验与计算结果

Fig.12 Experimental and simulation results of velocity-chain length distribution of particle chains

5 结论

1）直流电场下变压器油中的纤维颗粒受到外部场作用力和颗粒间作用力的共同作用。前者主导颗粒在电极之间的运动行为，而后者则影响颗粒的积聚行为。此外，双极性电荷积聚作用使得颗粒链两端的电荷呈现不同的分布特征。

2）本研究基于离散元方法构建了计算模型，采用拉格朗日方法对离散相进行计算，并忽略了颗粒对油流运动的影响。通过 Hertz-Mindlin 接触模型处理颗粒之间及颗粒与壁面之间的碰撞问题。通过模拟纤维颗粒之间自由电荷迁移的效果，使颗粒链在多个时间步的演化后呈现双极性电荷积聚特征。

3）根据多颗粒运动积聚的计算结果，伴随着纤维颗粒链的延伸与断裂过程，颗粒链在电极之间往复运动。长油隙中游离颗粒数量逐渐减少，颗粒链们在快速延伸后进入缓慢增长阶段。速度-链长的统计结果反映了颗粒链从短链占主导逐渐向长链过渡的演化过程。与长颗粒链相比，较短颗粒链的速度最大值相对更高。

4）构建了长油隙中纤维颗粒运动积聚的实验平台。实验结果与计算结果一致，随着实验的进行，游离纤维颗粒的数量不断减少，油中大量形成纤维颗粒链。实验结果的变化趋势与计算结果相符，表明计算模型能够较好地反映油中颗粒链的运动积聚特性。

参考文献 References

[1] 李 原，杨森鸿，周 浩，等. 直流电压下油纸绝缘纤维杂质成桥放电特性综述[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1645-1652.
LI Yuan, YANG Senhong, ZHOU Hao, et al. Review on bridging and discharging characteristics of cellulose impurities in oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1645-1652.

[2] LI Y, ZHOU K, ZHU G Y, et al. Effect of DC discharges in mineral oil on degradation characteristics of oil-impregnated pressboard[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1701-1708.

[3] ZHAO T, LIU Y P, LÜ F C, et al. Study of cellulose particle motion effect on impulse breakdown in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 235-244.

[4] ZHANG Y, TANG J, PAN C, et al. Comparison of PD and breakdown characteristics induced by metal particles and bubbles in flowing transformer oil[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48098-48108.

[5] 刘 凯，樊立科，聂广博，等. 变压器油中电弧放电故障检测及防爆综述[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4315-4328.
LIU Kai, FAN Like, NIE Guangbo, et al. Review of arc discharge fault detection and explosion-proof technology in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4315-4328.

[6] XIA S Y, PAN C, YAO Y H, et al. Bridging characteristics of cellulosic particles in flowing transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1056-1065.

[7] LUO X Y, PAN C, YAO Y H, et al. Observation and simulation for the movement of metallic particles in flowing transformer oil under AC/DC and combined voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 1034-1043.

[8] ZHAO T, FAN M L, YUE H T, et al. Effect of cellulose particles on breakdown voltage in wet FR3 natural ester[J]. IEEE Access, 2019, 7:

119357-119366.

[9] 张国治，王　堃，闫伟阳. 换流变压器液体绝缘中纤维杂质颗粒研究[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4297-4305.
ZHANG Guozhi, WANG Kun, YAN Weiyang. Study on fiber impurity particles in liquid insulation of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4297-4305.

[10] 杨森鸿，李　原，林思衍，等. 直流电压下油纸绝缘纤维杂质迁移运动特性及动力分析模型[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1714-1722.
YANG Senhong, LI Yuan, LIN Siyan, et al. Movement characteristics and kinetic analysis model of cellulose impurities in oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1714-1722.

[11] MENG X, GUO R C, WANG H T, et al. Behavior characteristics of cellulose particles in insulating oil gaps under a DC electric filed[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 3350-3359.

[12] GUO R C, WANG Z, HE C, et al. Breakdown characteristics of transformer oil with cellulose particles in a non-uniform field under lightning impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(5): 1627-1635.

[13] DONG Z J, ZHANG Z L, XUE Z X, et al. Investigation of the microscopic dynamical behavior and bridging mechanism of cellulose particles in insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 1926-1935.

[14] 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，2022，37(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, 2022, 37(1): 266-282.

[15] CIGRE. Effect of particles on transformer dielectric strength[R]. Ref 157, Paris, France: CIGRE, 2000.

[16] 侯嘉琛，孟　旋，孙　源，等. 直流电压下绝缘油中杂质集聚特性及其影响因素[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4717-4725.
HOU Jiachen, MENG Xuan, SUN Yuan, et al. Law and factors of movement and accumulation of impurities in insulation oil under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4717-4725.

[17] 高晨洋，潘　成，姚雨杭，等. 流动变压器油中金属微粒分布规律及其对击穿电压的影响机制[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4367-4376.
GAO Chenyang, PAN Cheng, YAO Yuhang, et al. Distribution characteristics of metallic particles in flowing transformer oil and its influence mechanism on breakdown voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4367-4376.

[18] MAHMUD S, CHEN G, GOLOSNOY I O, et al. Experimental studies of influence of DC and AC electric fields on bridging in contaminated transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 152-160.

[19] MAHMUD S, CHEN G, GOLOSNOY I O, et al. Experimental studies of influence of different electrodes on bridging in contaminated transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2433-2441.

[20] MAHMUD S, GOLOSNOY I O, CHEN G, et al. Numerical simulation of charging and discharging of particles in contaminated transformer oil[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon. Fort Worth, USA: IEEE, 2017: 588-591.

[21] 黄宇辰，房俊龙，闫伟阳. 不同电压类型下油流中纤维杂质颗粒运动特性仿真研究[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4817-4828.
HUANG Yuchen, FANG Junlong, YAN Weiyang. Simulation research on the motion characteristics of fiber impurity particles in oil flow under different voltage types[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4817-4828.

[22] 张国治，闫伟阳，王　堃，等. 流动绝缘油中纤维杂质颗粒运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报，2023，38(9)：2500-2509.
ZHANG Guozhi, YAN Weiyang, WANG Kun, et al. Simulation research on movement characteristics of fiber impurity particles in flowing insulating oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2500-2509.

[23] LI Y, YANG S H, LI R R, et al. Migration and bridging characteristics of cellulose impurities in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(2): 801-808.

[24] 刘云鹏，赵家莹，刘贺晨，等. 低频电压下含纤维素颗粒变压器油绝缘特性及影响因素[J]. 电工技术学报，2024，39(4)：1198-1207.
LIU Yunpeng, ZHAO Jiaying, LIU Hechen, et al. Insulation characteristics and influencing factors of transformer oil containing cellulose particles under low-frequency voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1198-1207.

[25] SHOYAMA M, MATSUSAKA S. Agglomeration and dispersion related to particle charging in electric fields[J]. KONA Powder and Particle Journal, 2021, 38: 82-93.

[26] BIAN X M, LI H B, ZHANG X, et al. Influence of fine particulate matter on the variation of surface morphologies of conductors subjected to positive DC voltages[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(20): 204102.



孟　旋
1995—，男，博士
主要从事高电压试验技术、电力设备故障诊断方面的研究
E-mail: 690426834@qq.com

MENG Xuan
Ph.D.



李军浩(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压电力设备故障诊断和局部放电检测新技术研究
E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

LI Junhao
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-01-06　在线出版日期　2025-05-12　　编辑　曹昭君