



电场作用下电流变液滴的变形及力学行为

危卫^{①③}, 张云伟^②, 顾兆林^{②*}

① 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;

② 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710049;

③ 武汉科技大学国际钢铁研究院, 武汉 430081

* 联系人, E-mail: guzhaolin@mail.xjtu.edu.cn

2012-05-25 收稿, 2012-08-09 接受

国家自然科学基金(10872159)和教育部科学技术研究重点(重大)项目(708081)资助

摘要 外加电场作用下的液滴变形及力学行为是电流体动力学研究的重要内容. 基于 volume-of-fluid(VOF)方法, 将电场力作为源项添加到流体运动的 Navier-Stokes 方程中, 提出了电流体流场与电场双向耦合的数值方法, 分别研究了外加均匀电场与非均匀电场作用下, 中性漏电液滴和带电液滴的变形/运动及其力学行为. 小变形条件下, 数值模拟得到的外加均匀电场中性漏电液滴的变形系数接近于理论值, 验证了本文方法的正确性. 研究表明, 电场作用下, 液滴与周围介质物理属性的差异导致液滴表面不同的自由电荷再分配形式及其变形状态; 相对于电场方向, 中性漏电液滴可能会发生“扁长型”或“扁平型”变形. 均匀电场下, 中性漏电液滴内部形成稳定的回转运动, 液滴不会发生宏观运动; 对于存在净电荷的液滴, 由于库仑力的作用, 液滴不仅会发生变形, 同时也会沿电场线方向运动. 非均匀电场下, 中性漏电液滴与带电液滴都会沿电场线运动, 并发生不同的变形. 本文所提出电流体流场与电场双向耦合的数值方法为静电喷雾、电泳等复杂的工程电流体动力学研究提供了理论基础.

关键词

电流体动力学
液滴
电荷分布
力学行为

在外加电场的作用下, 流体运动会使流体内部电荷的转移与再分布; 反之, 随着流体运动和内部电荷的再分布, 流场中的电场分布会发生改变. 这种流场与电场的耦合作用称为电流体动力学, 在工业中有广泛的用途, 如静电喷雾^[1]、喷墨式打印^[2]、电液动力泵^[3]等, 研究液滴在电场中的运动行为对于深入了解这些过程具有重要意义. 事实上, 在外加电场作用下, 不带电的液滴(中性)悬浮在周围介质中时, 由于液滴与周围介质介电常数、导电率等物理属性的差异, 液滴表面上的电荷分布导致其表面电场不连续, 使液滴发生变形. 如果液滴是绝缘体, 则液滴表面不存在自由电荷, 电场力作用在液滴界面的法向存在不连续; 当液滴形状稳定时, 法向电场力与液滴表面张力平衡, 液滴被拉长, 处于扁长状^[4]. 如果液

滴是导体, 在电场力的作用下, 液滴内部的自由电子/离子聚集到液滴表面, 外加电场与液滴自生电场的耦合, 液滴表面产生切向电场力, 同时引起液滴和其周围流体的运动.

研究人员采用不同的方法和不同的模型研究了在外加电场作用下, 液滴悬浮在另外一种不同属性的黏性流体中的变形行为. 在假设中性液滴、准静态电场、小变形和无对流电荷的情况下, Taylor^[5]提出了描述外加均匀弱电场作用下液滴发生小变形的漏电模型. 当液滴的导电率比较小, 而且与周围黏性流体的介电常数相差不太小时, Taylor 提出的漏电模型可以对发生小变形液滴的变形系数做出合理的预测^[6]. 但是, Torza 等人^[7]通过实验发现当液滴的变形较大时, Taylor 模型的理论解与实验值之间存在较大偏差,

引用格式: 危卫, 张云伟, 顾兆林. 电场作用下电流变液滴的变形及力学行为. 科学通报, 2013, 58: 197–205

Wei W, Zhang Y W, Gu Z L. Deformation and mechanical behavior of electrohydrodynamic droplet under external electric field (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 197–205, doi: 10.1360/972012-107

Ajayi^[8]将 Taylor 所采用的线性理论扩展到高阶, 提出含二阶量的理论模型, 但是这个模型仍然没有从本质上解释理论解与实验值之间存在偏差的问题. 随着计算机的发展, 数值模拟成为一种重要的研究方法, Feng 和 Scott^[6]利用有限元方法研究了均匀电场中流体黏性对漏电液滴变形规律的影响. 假设流动为蠕动流, Lac 和 Homay^[9]采用边界积分法, 通过同时求解电场和流场, 得到了均匀电场中中性漏电液滴的变形与稳定性规律. Fernández 等人^[10]分析槽道中电场力对液滴分布状态的影响, 并模拟了液滴的变形过程, 但是其模拟方法不能计算液滴与液滴之间的合并行为. 结合 level set (LS) 和 volume-of-fluid (VOF) 方法, Tomar 等人^[11]模拟了导电液滴在电场作用下的变形行为. 采用间断跟踪法 (front-tracking method) 并求解完整的 Navier-Stokes 方程, Hua 等人^[12]分别模拟了均匀电场绝缘液滴、中性漏电液滴和导电液滴的变形行为. 黄伟峰等人^[13]利用格子 Boltzmann 方法研究了均匀电场中液滴的变形和失稳. 值得一提的是, 前述的理论研究和数值模拟中, 在电场作用下液滴内部自由电子/离子的迁移行为以及外加电场与液滴自生电场的耦合均未涉及, 忽略了液滴表面电荷的再分布, 将导致理论或数值模拟与实验结果之间出现差异, 而且绝大多数的研究仅限于外加均匀电场的作用, 对外加非均匀电场作用下液滴力学行为的研究却很少.

本文基于 volume-of-fluid (VOF) 方法, 将作用在液滴上的电场力作为源项添加到流体运动的 Navier-Stokes 方程中, 提出电流体流场与电场双向耦合的数值方法, 考察在外加电场作用下液滴表面自由电子的再分配规律, 并精确捕捉两相流体界面位置, 研究中性漏电液滴和带电液滴在均匀电场和非均匀电场下的变形/运动规律, 为静电喷雾、电泳等复杂的工程电流体动力学研究提供理论基础.

1 问题描述

图 1 所示密度为 ρ_i , 黏度为 μ_i , 介电常数为 ϵ_i , 导电率为 K_i 的液滴悬浮在密度为 ρ_o , 黏度为 μ_o , 介电常数为 ϵ_o , 导电率为 K_o 的流体介质中, 假设液滴的初始形状为球形, 液滴与周围流体介质互不相溶. 在上下极板施加外加电压, 产生稳定的外加电场, 液滴在电场作用下会发生变形/运动. 液滴与周围流体间的表面张力系数为 σ , 定义 $R = K_o/K_i$, $Q = \epsilon_i/\epsilon_o$, $M = \rho_i/\rho_o$, $\lambda =$

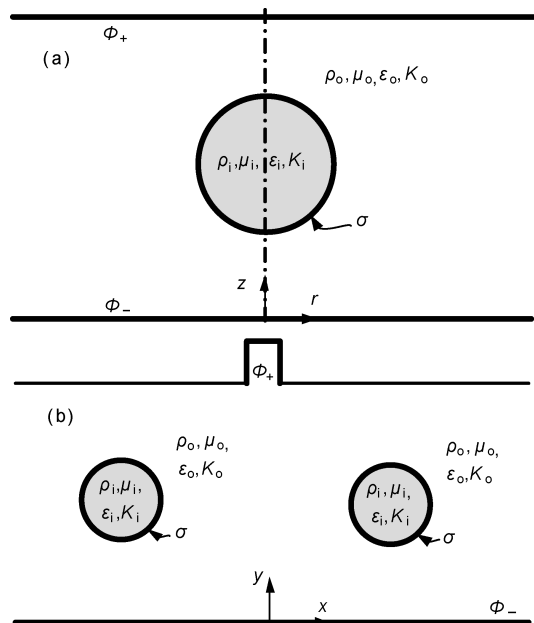


图 1 外加电场作用下液滴悬浮于外部流体中的计算模型

(a) 均匀电场; (b) 非均匀电场

μ_i/μ_o . 本文研究外加电场作用下, 在不同物理属性的周围介质中液滴的变形/运动及力学行为. 在上下两平板上施加电势差, 即可在极板间形成均匀电场; 采用倒 T 型上极板, 并在极板上施加电压, 可产生非均匀电场. 图 1(a) 和 (b) 分别为液滴在外加均匀电场下和非均匀电场下的计算模型示意图.

2 数学模型

2.1 流体运动控制方程

电流体动力学中, 流体运动受到耦合的惯性力、黏性力和电场力支配, 这些力对流体的运动状态产生直接影响. 对于不可压缩流体, 流体运动的质量守恒方程和动量守恒方程可以表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}^f + \boldsymbol{\sigma}^e) + \mathbf{f}_b, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{U}$ 为流体的速度, p 为流体压力, ρ 为流体密度, $\mathbf{f}_b$ 为流体受到的总的体积力.

黏性应力张量 $\boldsymbol{\sigma}^f$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\sigma}^f = \mu \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I}, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为单位张量, μ 为流体的动力黏度.

麦克斯韦应力张量 $\boldsymbol{\sigma}^e$ 和其对应的电场力 $\mathbf{f}_e$ 分别为

$$\sigma^e = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \left(1 - \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon \varepsilon_0}{\partial \rho} \right) \mathbf{I}, \quad (4)$$

$$f_e = \nabla \cdot \sigma^e = q_v \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \varepsilon_0 + \nabla \left(\frac{1}{2} \rho \frac{\partial \varepsilon \varepsilon_0}{\partial \rho} E^2 \right), \quad (5)$$

其中, ε 为流体的相对介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 为真空中的介电常数. q_v 为流体内部的体积电荷密度, $\mathbf{E}$ 为外加电场. (5) 式中右边第一项是在电场作用下产生的库仑力, 沿着电场线的方向; 右边第二项是电场的极化应力, 它沿着流体与周围介质界面的法向方向; 右边第三项是由于介质密度变化引起的, 本文假设流体不可压缩, 故可忽略这一项的影响.

2.2 介面追踪

Volume-of-fluid (VOF)^[14] 方法是一种可以处理任意自由表面流的方法, 其基本原理是利用计算网格单元中流体体积量的变化与网格单元本身体积的比值函数来确定自由面的位置和形状. 在整个流场中定义一个追踪网格单元中流体体积的变化函数 γ , 它满足如下方程:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \gamma) = 0, \quad (6)$$

其中, γ 表示一种流体体积与网格体积的比值, 称为体积分数, γ 的取值范围为 $0 \leq \gamma \leq 1$, 当值为 0 或 1 时表示区域中只存在一相, 否则就代表界面.

区域中两种不相溶的流体可以认为只有一种为主要流体 ($\gamma = 1$), 在区域内流体的物理属性可以通过流体体积分数的加权平均来求得, 因而流体属性只在界面上有变化.

$$\rho = \rho_l \gamma + \rho_g (1 - \gamma), \quad (7)$$

$$\mu = \mu_l \gamma + \mu_g (1 - \gamma), \quad (8)$$

$$K = K_l \gamma + K_g (1 - \gamma), \quad (9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_l \gamma + \varepsilon_g (1 - \gamma), \quad (10)$$

其中, “l” 和 “g” 分别代表液滴与周围流体介质.

在 VOF 计算中, (2) 式中的体积力 f_b 包含了流体重力和存在于两相流体界面上的表面张力. 气液两相界面上的表面张力会产生附加的压力梯度, 表现为体积力, 可以通过连续表面力模型^[15]求得:

$$f_{st}^v = \sigma \kappa \nabla \gamma, \quad (11)$$

其中, σ 为表面张力系数, κ 为界面的曲率, 可以由下式得出:

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \right). \quad (12)$$

2.3 电场力模型

(i) 漏电模型. 电流体中动力学产生的动态电流通常比较小, 可以忽略磁致效应的影响^[16]. 因而可认为电场 $\mathbf{E}$ 是无旋场 ($\nabla \times \mathbf{E} = 0$), 则高斯定理可用静电位移 ($\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$) 表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q_v, \quad (13)$$

其中, q_v 为体积电荷密度.

电场强度 $\mathbf{E}$ 可以由电势的梯度 ϕ 得出:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi. \quad (14)$$

电荷的守恒方程可写为以下形式:

$$\frac{Dq_v}{Dt} + \nabla \cdot (\mathbf{K} \mathbf{E}) = 0, \quad (15)$$

其中, K 为流体的导电率, $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{U} \cdot \nabla$ 为物质导数.

根据麦克斯韦方程, 电场的特征时间 $\tau_c = \varepsilon \varepsilon_0 / K$, 可以认为是流体介电常数与导电率的比值, 运动过程的时间尺度可认为是黏度弛豫时间 τ_p . 对于各向同性的非电介质连续性流体, 电荷再分配达到稳态的时间远小于流体运动的时间 ($\tau_p \gg \tau_c$), 因此可以忽略电荷随时间的变化量^[12]. 因此, 电荷守恒方程 (15) 可以简化为^[17]

$$\nabla \cdot (\mathbf{K} \mathbf{E}) = 0. \quad (16)$$

在外加电场作用下, 流体中产生的电场应力可以由麦克斯韦应力张量 ((4) 式) 给出, 本研究中其等效的体积力可写为

$$f_e^v = q_v \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \varepsilon_0. \quad (17)$$

由于电荷分布在液滴表面, (17) 式中第一项电荷与电场的作用力实际上是表面电荷与电场的作用力, 是一个面积力. 液滴表面电荷密度可以由通过界面的电位移的法向分量的差值求得:

$$q_s = \mathbf{n} \cdot \|\mathbf{D}\|, \quad (18)$$

其中, q_s 为面积电荷密度, $\|\mathbf{D}\|$ 为液滴与周围流体界面上电位移的差值, $\mathbf{n}$ 表示界面的单位法向量.

采用与表面张力相同的处理方式, 将液滴表面上的电场力转化为体积力:

$$f_e^v = q_s \mathbf{E} \nabla \gamma - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \varepsilon_0. \quad (19)$$

(ii) 常电荷模型. 导电性液滴与电极接触时,

会在液滴表面形成净电荷. 在外加电场作用下, 带电的液滴与中性液滴的变形行为不一样. 本文假设初始自由电荷均匀分布在液滴表面, 即液滴的表面电荷密度为常数, 或者(18)式中 q_s 为常数. 其余求解方式与漏电模型相似.

3 求解过程

电流体动力学中, 流场和电场是相互耦合的. 液滴的运动受外部电场分布和液滴表面电荷密度影响; 反过来, 液滴的运动又会改变界面上的表面电荷密度分布. 初始形状为球体的中性漏电液滴或带电液滴位于电场中, 研究电场力作用下液滴的变形和力学行为. 在上下极板间施加电势差, 使极板间产生均匀或非均匀的电场, 即

$$\phi_{\pm} = \phi_0, \phi_{\mp} = 0. \quad (20)$$

上下极板的速度边界满足无滑移边界. 左右两侧分别设置为对称边界, 以消除左右边界对液滴力学行为的影响. 对于均匀电场的情况, 计算区域取为 $0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$, 液滴直径为 0.005 m , 计算网格为 400×400 , 在液滴附近局部加密; 对于非均匀电场情况, 计算区域取为平板尺寸 $0.05 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$, 上部突起的尺寸为 $0.0015 \text{ m} \times 0.003 \text{ m}$, 液滴直径为 0.002 m , 计算网格为 800×200 , 在液滴附近局部加密.

本文在计算流体力学开源软件 OpenFOAM^[18]框架下, 采用非结构化网格的有限容积法, 非稳态项用二阶隐式算法, 对流项采用 QUICK 格式, 扩散项采用中心差分格式, 时间步长取为 10^{-4} s . 首先通过求解电场方程(14)和(16)式, 得出上下极板之间的电场分布, 利用(19)式计算电场作用于流场的体积力, 然后计算流体的运动方程(1)和(2)式, 采用 VOF 方程(6)式追踪液滴与周围流体介质之间的界面, 得到液滴变形/运动后的形状与位置.

4 数值模拟结果与分析

4.1 均匀电场中中性漏电液滴的变形

定义电毛细管数 Ca_E 来描述电场应力与表面张力之间的关系:

$$Ca_E = \frac{a\varepsilon_0 E_{\infty}^2}{\sigma}, \quad (21)$$

其中, E_{∞} 为外加电场. 液滴在外加电场 E_{∞} 作用下会

发生变形, 如图 2 所示, 定义液滴的变形系数 D :

$$D = \frac{L-B}{L+B}, \quad (22)$$

其中, L 为液滴沿电场方向的变形量, B 为液滴垂直于电场方向的变形量, 当 $D > 0$ 时液滴为扁长型(图 2)形变; 当 $D < 0$ 时液滴为扁平型形变.

假设液滴为球形并发生小变形, Taylor^[5] 和 Ajayi^[8] 分别提出了求解液滴变形系数 D 的一阶和二阶理论公式, Lac 和 Homsy^[9] 指出一阶和二阶理论公式分别可以对液滴变形量 $D < 0.02$ 和 $D < 0.1$ 进行准确的预测.

下面是二阶公式:

$$D = k_1 Ca_E + k_2 Ca_E^2, \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{9}{16} \frac{F_d(R, Q, \lambda)}{(1+2R)^2}, \\ k_2 &= \frac{k_1}{(1+2R)^2} \left[\left(\frac{9}{5} \frac{1-R}{1+2R} - \frac{1}{16} \right) F_d + R(1-RQ)\beta(\lambda) \right], \\ F_d(R, Q, \lambda) &= (1-R)^2 + R(1-RQ) \left[2 + \frac{3}{5} \frac{2+3\lambda}{1+\lambda} \right], \\ \beta(\lambda) &= \frac{23}{20} - \frac{139}{210} \frac{1-\lambda}{1+\lambda} - \frac{27}{700} \left(\frac{1-\lambda}{1+\lambda} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中, $F_d(R, Q, \lambda)$ 为判别函数, 用来判定液滴发生扁长或者扁平变形, 它的值取决于液滴与周围流体介质的物理属性.

为了验证本文数值方法的正确性, 图 3 给出了不同电毛细管数 Ca_E 下, 本文模拟的变形系数 D 与一阶和二阶公式计算的变形系数 D 的对比. 可以看出, 随着外加电场的增加, 液滴的变形越来越大. 当液滴的变形量较小($D < 0.12$)时, 本文模拟结果与理论预测的结果吻合较好, 但当液滴的变形量较大时, 本文模拟

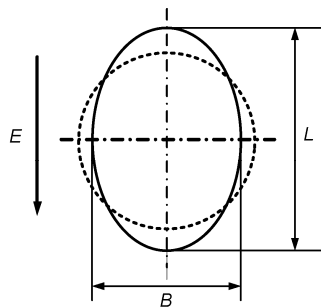


图 2 液滴变形示意图

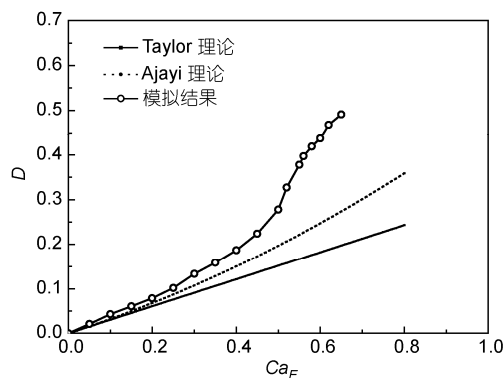


图3 电毛细管数 Ca_E 与液滴变形系数 D 关系的模拟值与理论值的对比

计算条件: $R = 0.2, Q = 2.0, M = 1.0, \lambda = 1.0$

结果开始偏离理论值, 不一致的原因可能是理论公式基于小变形假设, 不适用于发生大变形的液滴. 另外, 液滴在电场下变形行为的实验研究集中在液滴变形系数 $D < 0.15$ 的情形^[7,19], 对于大变形的情况, 仍然缺乏合适的实验数据, 因此, 对于液滴大变形的变形系数只给出数值结果.

中性漏电液滴的变形方式取决于液滴与周围流体的物理属性. 图4给出了中性漏电液滴的两种典型的变形形式及其对应的液滴表面电荷分布和速度场分布. 液滴与周围流体属性的关系为 $R = 2.0, Q = 2.0, M = 1.0, \lambda = 1.0$ 时, 如液滴为硅油、周围流体为酞酸酯的硅油-酞酸酯体系, 电场作用下球形液滴上的自由

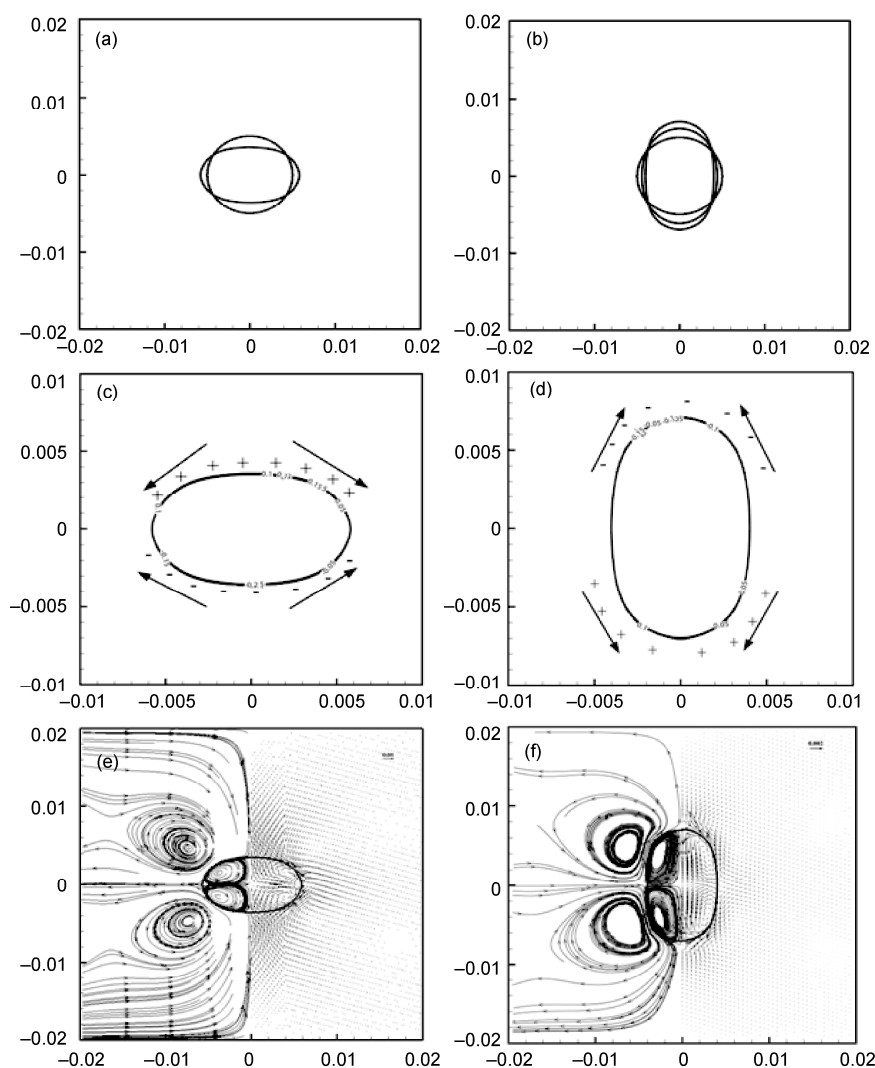


图4 漏电液滴在均匀电场中变形的模拟结果

扁平型(a)和扁长型(b)液滴形状; 扁平型(c)和扁长型(d)液滴表面自由电荷分布; 扁平型(e)和扁长型(f)液滴周围流场, 图中左边为速度流线, 右边为速度矢量. 计算条件: (a), (c), (e) $R = 2.0, Q = 2.0, M = 1.0, \lambda = 1.0, Ca_E = 0.65$; (b), (d), (f) $R = 0.1, Q = 2.0, M = 1.0, \lambda = 1.0, Ca_E = 0.5$

电荷发生转移与再分配,正电荷聚集液滴上半部,负电荷聚集液滴下半部,如图4(c)所示.由于上极板带正电,下极板带负电,液滴在外加电场力的作用下被“压”成扁平状,如图4(a)所示.由于电荷聚集液滴表面,外加电场作用下会在液滴表面产生切向电场力,在液滴内部和周围流体内部形成回转运动,如图4(e)所示,流体沿着液滴表面从两极朝赤道运动,沿着轴向从液滴中心朝液滴表面运动.

对于液滴与外部流体属性的关系 $R = 0.1$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$, 如液滴为蓖麻油、周围流体为硅油的蓖麻油-硅油体系,电场力作用下负电荷聚集液滴的上半部,正电荷聚集液滴的下半部(图4(d)),液滴会被“拉”长,形成扁长型,如图4(b)所示.此时液滴内部的流场正好与扁平型液滴内部的流场相反,流体沿着液滴表面从赤道朝两极运动,沿着轴向从

液滴表面朝液滴中心运动,如图4(f)所示.在外加电场作用下液滴内部产生回转运动的现象可以作为使液滴内部流体充分溶解并免受外部流体污染的混合方式的依据.

值得注意的是,上述两种电流体体系中,液滴总体上呈中性,液滴表面没有净电荷,在外加均匀电场下,液滴只会发生变形,不会发生运动.

4.2 非均匀电场中中性漏电液滴的变形/运动

当中性漏电液滴处于非均匀电场中时,液滴表面受到的电场力是非均匀分布的,此时液滴除了自身发生变形以外,还沿着电场线方向运动,与4.1节类似,由于液滴与外部流体属性的不同,液滴上的自由电荷在电场力的作用下以电场线法向为对称轴线发生重新分布(如图5(c)和(d)),液滴的自由电荷在尖角处产生

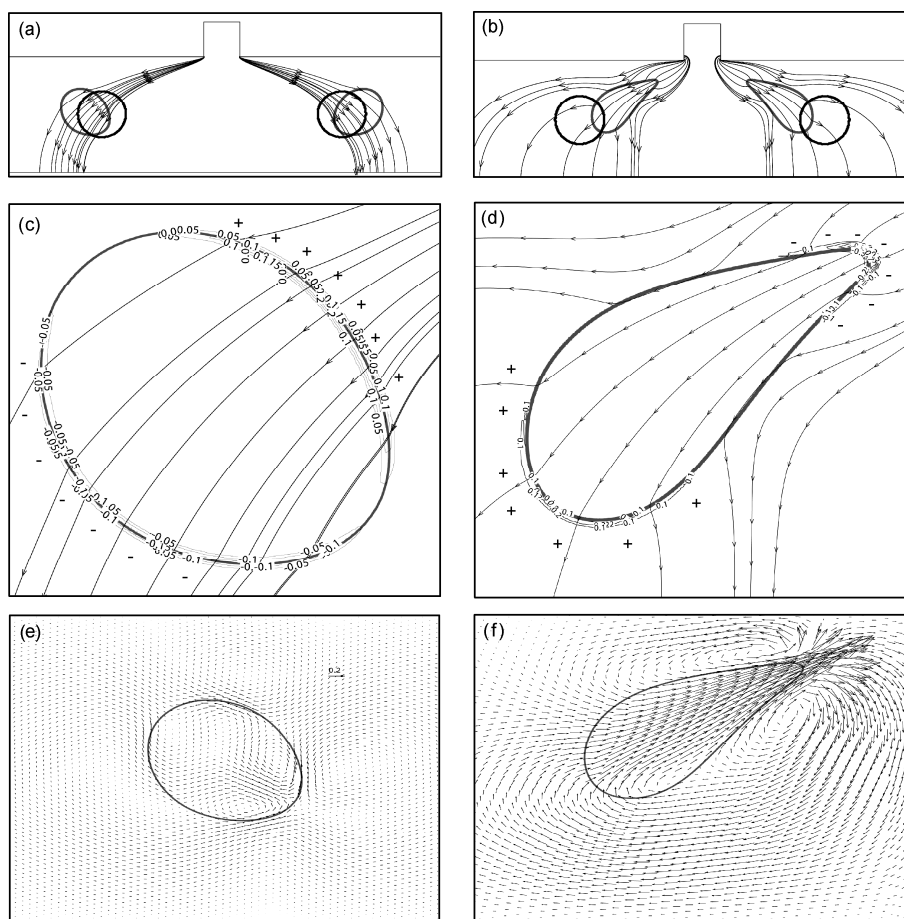


图5 非均匀电场中漏电液滴变形的模拟

(a)和(b) 液滴变形与运动形状与电场线分布; (c)和(d) 液滴表面自由电荷分布(局部放大图); (e)和(f) 液滴内部和周围流体流场速度矢量分布图(局部放大图). 计算条件: (a), (c), (e) $R = 2.0$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$; (b), (d), (f) $R = 0.1$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$

聚集(如图 5(d)所示), 最终出现图 5(a)和(b)所示的两种不同的变形/运动. 由于液滴表面受到电场力的非均匀性, 液滴不再保持静止, 同时由于电场切应力的作用, 液滴内部流体与外部流体依然会发生回转运动, 液滴内外流体速度矢量分布图如图 5(e)和(f)所示.

4.3 均匀电场中带电液滴的变形/运动

事实上, 导电性液滴与极板接触, 或者长时间暴露在高压电场下, 都会使液滴表面荷电, 产生净电荷. 外加电场作用下, 带电液滴会同时发生变形与运动, 图 6 示出了液滴与外部流体属性的关系 $R = 10$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$, 如液滴为润滑油、周围流体为硅油的润滑油-硅油体系, 表面电荷密度为 $q_s = 0.8 \text{ C/m}^2$ 的带电液滴在外加电场作用下的变形与运动. 从图

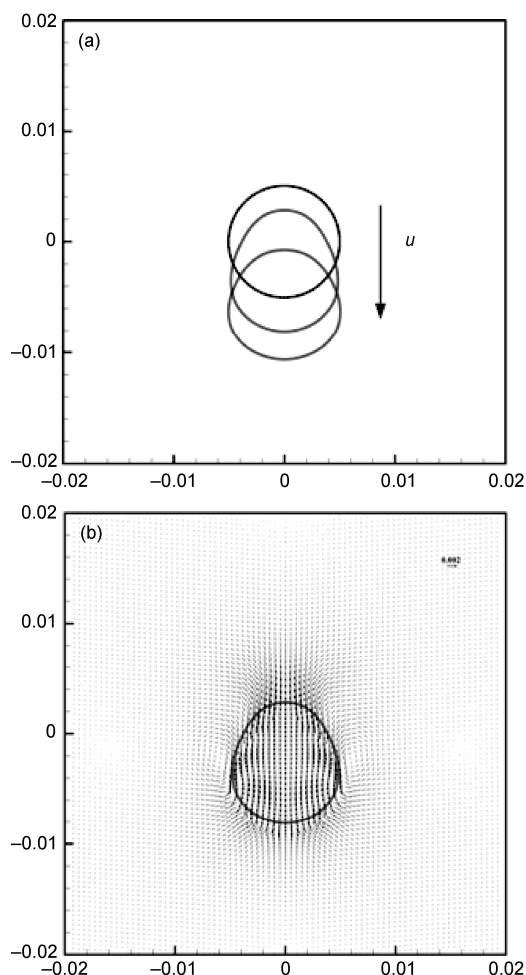


图 6 均匀电场中带电液滴变形与运动的模拟

(a) 液滴变形及运动状态; (b) 液滴内外流场速度矢量分布. 计算条件: $R = 10.0$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$, $Ca_E = 1.0$, $q_s = 0.8 \text{ C/m}^2$

6(a)可以看出, 带电液滴在外加电场作用下变成扁长型, 并沿着电场线方向运动, 液滴的运动带动外部流体向下运动, 并在电场切应力的作用下使外部流体产生回转, 但此时液滴内部不存在回转运动, 如图 6(b)所示.

4.4 非均匀电场中的带电液滴

与均匀电场类似, 带电液滴在非均匀电场中发生变形, 但液滴主要受到库仑力的支配, 沿电场方向运动, 如图 7 所示. 此种情况下, 外加电场强度比较大, 或者液滴的电荷密度相对较大时, 液滴的宏观运动占主导地位. 因此, 在研究此类问题时, 可以将液滴看为质点而忽略其自身的变形, 只考虑电场力对液滴运动轨迹的影响.

5 结论

外加电场作用下液滴变形及力学行为是电流体动力学研究的重要内容, 本文将液滴上受到的电场力作为源项添加到流体运动 Navier-Stokes 方程, 提出了电流体流场与电场双向耦合, 并采用 VOF 方法追踪液滴界面变化的方法, 分别研究了中性漏电液

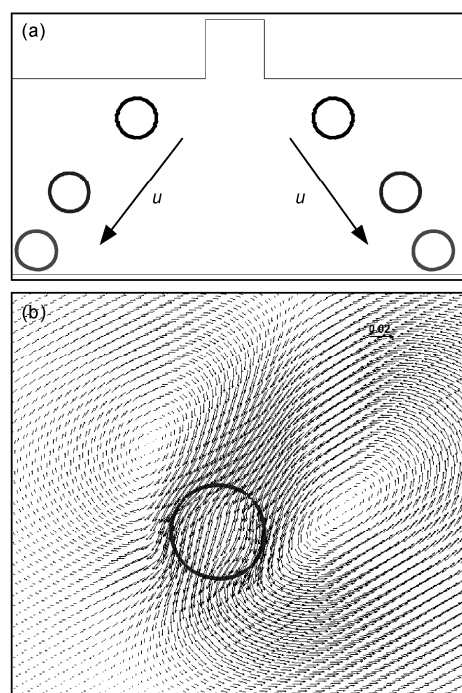


图 7 非均匀电场中带电液滴变形与运动的模拟

(a) 液滴变形及运动状态; (b) 液滴内外流场速度矢量分布(局部放大). 计算条件: $R = 10.0$, $Q = 2.0$, $M = 1.0$, $\lambda = 1.0$, $q_s = 0.8 \text{ C/m}^2$

滴和带电液滴在外加电场作用下的变形/运动情况. 利用本文方法模拟得到了中性漏电液滴在外加电场中的变形系数, 与基于小变形假设的理论值对比, 结果表明当液滴发生小变形($D < 0.12$)时, 本文的数值模拟结果与理论值吻合良好, 验证本文方法的正确性; 当液滴的变形量较大时, 本文模拟结果偏离理论值, 这种不一致的原因反过来证明理论公式不适用于液滴的大变形估计.

中性漏电液滴和带电液滴在外加均匀电场和非均匀电场中的运动规律和力学行为的研究结果表明, 由于液滴与外部流体物理属性的关系不同, 自由电荷在液滴表面再分配的形式不同, 导致中性漏电液

滴可能会发生“扁长型”或“扁平型”的变形. 在均匀电场作用下, 中性漏电液滴内部形成稳定的回转运动, 液滴不会发生宏观运动; 而对于带电液滴, 由于库仑力的作用, 液滴不仅会在外加电场的作用下发生变形, 同时也会沿电场线方向运动. 非均匀电场下, 不管是中性漏电液滴, 还是带电液滴, 都会沿着电场线方向运动, 并产生自身的形变.

本文提出的电流体流场与电场双向耦合的数值方法, 考察外加电场作用下液滴表面自由电子的再分配规律, 并捕捉两相流体界面位置, 不仅可以分析液滴在电场中的变形/运动规律, 还适用于模拟静电喷雾、电泳等复杂的工程电流体动力学问题.

参考文献

- 1 陈汇龙, 赵英春. 感应电荷喷雾静电场与荷电特性分析. 高电压技术, 2010, 36: 2519–2524
- 2 Minemawari H, Yamada T, Matsui H, et al. Inkjet printing of single-crystal films. *Nature*, 2011, 475: 364–367
- 3 陈效鹏, 程久生, 尹协振. 电流体动力学研究进展及其应用. 科学通报, 2003, 48: 637–646
- 4 Salipante P F, Vlahovska P M. Electrohydrodynamics of drops in strong uniform dc electric fields. *Phys Fluids*, 2010, 22: 112110
- 5 Taylor G. Studies in electrohydrodynamics. I. Circulation produced in a drop by electric field. *Proc Roy Soc Lond A*, 1966, 291: 159–166
- 6 Feng J Q, Scott T C. A computational analysis of electrohydrodynamics of a leaky dielectric drop in an electric field. *J Fluid Mech*, 1996, 311: 289–326
- 7 Torza S, Cox R G, Mason S G. Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops. *Philos T Roy Soc A*, 1971, 269: 295–319
- 8 Ajayi O O. A note on Taylor's electrohydrodynamic theory. *Proc Roy Soc Lond A*, 1978, 364: 499–507
- 9 Lac E, Homsy G M. Axisymmetric deformation and stability of a viscous drop in a steady electric field. *J Fluid Mech*, 2007, 590: 239–264
- 10 Fernández A, Tryggvason G, Che J, et al. The effects of electrostatic forces on the distribution of drops in a channel flow: Two-dimensional oblate drops. *Phys Fluids*, 2005, 17: 093302
- 11 Tomar G, Gerlach D, Biswas G, et al. Two-phase electrohydrodynamic simulations using a volume-of-fluid approach. *J Comput Phys*, 2007, 227: 1267–1285
- 12 Hua J S, Lim L K, Wang C H. Numerical simulation of deformation/motion of a drop suspended in viscous liquids under influence of steady electric fields. *Phys Fluids*, 2008, 20: 113302
- 13 黄伟峰, 李勇, 刘秋生. 格子 Boltzmann 方法在电流体动力学中的应用: 均匀电场中液滴的变形和失稳. 科学通报, 2007, 52: 1232–1236
- 14 Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys*, 1981, 39: 201–225
- 15 Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *J Comput Phys*, 1992, 100: 335–354
- 16 Melcher J R, Taylor G I. Electrohydrodynamic—A review of role of interfacial shear stresses. *Ann Rev Fluid Mech*, 1969, 1: 111–146
- 17 Saville D A. Electrohydrodynamics: The Taylor-Melcher leaky dielectric model. *Ann Rev Fluid Mech*, 1997, 29: 27–64
- 18 OpenCFD L. Openfoam: The opensource computational fluid dynamics toolbox (www.Openfoam.Com). 2011
- 19 Vizika O, Saville D A. The electrohydrodynamic deformation of drops suspended in liquids in steady and oscillatory electric fields. *J Fluid Mech*, 1992, 239: 1–21

Deformation and mechanical behavior of electrohydrodynamic droplet under external electric field

WEI Wei^{1,3}, ZHANG YunWei² & GU ZhaoLin²

¹ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

³ International Research Institute for Steel Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

Droplet deformation and mechanical behavior under external electric field are fundamental in electrohydrodynamic research. Based on the volume-of-fluid (VOF) method and adding electric force to Navier-Stokes equations as an additional source term, a simulation method considering fluid flow and electric field in two-way coupling is proposed. Using this method, the deformation/motion of leaky dielectric droplet and charged droplet under external uniform and non-uniform electric field is investigated respectively. The shape deformation coefficient calculated by the proposed method is close to the theory value of leaky dielectric droplet under uniform electric field in small deformation condition; thus the validity of the numerical method proposed in this study is verified. The results show that the charge redistribution modes of leaky dielectric droplet depend on the property difference between droplet and the around fluid, and the droplet may deform into either prolate or oblate shapes. The electric field strength only affects the droplet shape deformation coefficient. The external uniform electric field induces strong circulation motion inside the leaky dielectric droplet without moving the droplet. Because of the effect of Coulomb force, the charged droplet may deform into prolate and move along the electric field direction. However both leaky dielectric droplet and charged droplet may move along the electric field direction, resulting in different shapes simultaneously under the non-uniform electric field. The numerical method coupling fluid flow with electric field proposed in this paper could provide an effective approach to electrostatic spray, electrophoresis and other complex engineering electrohydrodynamic researches.

electrohydrodynamic, droplet, charge distribution, mechanical behavior

doi: 10.1360/972012-107

《科学通报》拟领取新闻记者证人员名单公示

根据国家新闻出版总署《关于开展新闻记者证 2012 年度核验工作的通知》(新出厅字[2012]515 号)、《新闻记者证管理办法》要求,我单位(《中国科学》杂志社)已对申领记者证人员的资格进行严格审核,现将我单位拟领取新闻记者证人员名单进行公示.新闻出版总署举报电话为 010-83138953.

拟领取新闻记者证人员名单: 闫蓓、王元火、安瑞.