

doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2018.02.006

## 匀强电场下分散相液滴的聚并

王贞涛<sup>1,2</sup>, 朱忠辉<sup>1</sup>, 夏磊<sup>1</sup>, 郑俊<sup>1</sup>, 王晓英<sup>1</sup>, 李睿<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 洁华控股股份有限公司 博士后科研工作站, 浙江 海宁 314419)

**摘要:** 为了探究运行参数对分散相液滴的运动、聚并过程的影响,采用 VOF (volume of fluid) 方法捕捉分散相与连续相的流体间界面,利用漏电介质模型模拟均匀静电场,研究了电场强度、液滴粒径、液滴表面间距和液滴相对位置(液滴中心连线与电场强度方向夹角)对处于均匀电场中离散相多液滴聚并行为的影响,通过理论分析了液滴聚并过程影响因素,并与数值计算结论进行了对比。结果表明:分散相液滴聚并效率与电场强度、液滴粒径比、液滴表面间距以及液滴的相对位置有关;随着电场强度的增加,液滴的聚并效率显著增强;随着液滴表面间距以及液滴相对角度的增大,聚并效率有所降低;液滴粒径比对聚并效率亦产生影响,当液滴粒径差距较大时,液滴的聚并效率有所降低;电场强度对聚并过程的影响较为复杂,当外加电场强度持续增大时,液滴难以发生聚并,液滴被拉长后产生破碎或者弹开现象,存在阻碍液滴聚并的临界场强。

**关键词:** 离散相液滴; VOF 方法; 数值模拟; 聚并; 均匀电场

**中图分类号:** TE624.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2018)02-0155-08

**引文格式:** 王贞涛,朱忠辉,夏磊,等. 匀强电场下分散相液滴的聚并[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(2):155-162.

## Coalescence of dispersed phase droplet under uniform electric field

WANG Zhentao<sup>1,2</sup>, ZHU Zhonghui<sup>1</sup>, XIA Lei<sup>1</sup>, ZHENG Jun<sup>1</sup>, WANG Xiaoying<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Postdoctoral Scientific Research Workstation, Jiehua Holdings Co., Ltd., Haining, Zhejiang 314419, China)

**Abstract:** To explore the influence of operation parameters on the movement and coalescence of droplets, the effects of electric field intensity, droplet size, distance and relative location between two droplets on coalescence were numerically investigated by the volume-of-fluid (VOF) method to track the interface and by leaky dielectric model to simulate the electric field. The factors of electric field intensity, droplet size, droplet surface spacing and droplet relative position on the droplets coalescence were analyzed theoretically and compared with the numerical results. The results indicate that the efficiency is increased with the increasing of electric field intensity and decreased with the increasing of droplet diameter ratio, distance and relative angle between two droplets. The influence of field intensity on coalescence is complicated. When the electric field intensity is large enough, the two droplets can not produce coalescence process, and the droplet is elongated or rebounded by the other droplet. There is a critical value of electric field intensity for droplets coalescence.

**Key words:** dispersed phase droplet; volume-of-fluid method; numerical simulation; coalescence; uniform electric field

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106064,11502097); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171301,BK20150511); 江苏大学科技项目青年扶持基金资助项目(FCJJ2015001); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王贞涛(1978—),男,山东齐河人,教授(zhentao.wang@ujs.edu.cn),主要从事多相流理论及应用的研究。

朱忠辉(1990—),男,山东肥城人,硕士研究生(18252585521@163.com),主要从事多相流数值计算的研究。

当分散相多液滴悬浮于另一种不相溶的黏性液体并处于静电场中时,由于两相流体间界面特性与电特性的不同,在界面处会产生切向力和法向力,液滴在这种力的作用下发生变形或诱导表面不稳定现象从而导致聚并的产生<sup>[1-2]</sup>.这种分散相液滴在另一种液体中的聚并行为是原油乳化液破乳脱水工艺中关键技术环节.电破乳的基本原理是通过给乳化液施加外加电场,使分散相液滴极化变形、相互碰撞,使小液滴聚合为大液滴并在重力作用下脱离出来,最终实现油水两相分离.电破乳法以高效、无污染等优点广泛应用于原油的生产中.因此,探讨分散相液滴在电场中的聚并行为对于研究电破乳机理、提高电破乳效率具有重要意义.

国内外不少科研工作者对电场作用下分散相液滴在另外不相溶液体中的运动行为进行了大量的研究,并取得了一定的进展.G. TAYLOR<sup>[2]</sup>首先提出了漏电介质模型,并准确预测了均匀电场作用下分散相液滴在连续相中的微小变形,但当分散相液滴产生较大变形时,预测结果与试验测量值存在较大的偏差.文献[3]通过采用有限元方法,详细研究了均匀电场中流体黏性对分散相液滴变形规律的影响.文献[4]采用高压直流产生的电场,讨论了不同物性分散相液滴在油相中的变形特性与破碎现象.文献[5]采用小型静态直流电脱水装置,对含水率、含铁率和温度等因素进行了试验研究,发现原油含水量过高造成电极板短路,发生垮电场,而降低含铁率提高温度可降低脱水能耗.文献[6]运用 level set 与 VOF(volume of fluid)耦合的方法,数值计算分析了电场作用下导电液滴的变形行为.文献[7]采用前缘追踪/有限体积法数值分析了在电场作用下漏电介质、绝缘体及完美导体等3种不同电特性分散相液滴的变形与运动.文献[8]试验研究了电场强度、界面张力和液滴粒径对液滴变形度的影响,探讨了影响液滴变形行为的主要因素及其对电脱水工艺的影响.文献[9]采用 VOF 方法分析了均匀与非均匀电场作用下分散相液滴的变形与力学行为,研究表明分散相液滴与周围连续相介质之间物理属性的差异导致了液滴表面电荷的再分配,进而影响液滴的不同变形状态,并分别探讨了中性漏电介质及存在净电荷的液滴的运动与变形情况.文献[10]试验研究了电场强度对原油乳化液破乳脱水的影响,发现当外施加电场强度小于临界电场强度时,随着外施加电场强度的增加,脱水率呈上升趋势,但当外施加电场强度超过水滴破裂临界电场强度时,脱水率

随电场强度的增加而下降.文献[11]采用多物理场耦合软件研究了电场强度、液滴粒径和界面张力对液滴变形的影响,并分析了液滴的2种破裂方式.文献[1]采用 VOF 模型研究了静电场分散相液滴的内部流动与雾滴的变形情况,详细表述了静电场对液滴界面速度场与内部流场的影响.显然,电场作用下液滴的变形与聚并过程及其在原油脱水的应用已经取得了不少的进展,但液滴粒径、液滴间距以及液滴相对位置等对液滴聚并的影响研究尚处于起步阶段,还需要进一步探讨和分析.

笔者采用基于 VOF 追踪界面的方法,通过静电场和流场的耦合作用,利用漏电介质模型计算不同操作参数下悬浮在另一种不相溶黏性液体中的分散相2个液滴的聚并行为,给出不同操作参数下液滴的聚并过程,详细探讨液滴聚并与电场强度、液滴粒径、液滴间距以及液滴间相对角度的关系,并将计算结果与试验结果进行对比.

## 1 数学模型

### 1.1 基本假设

假定初始状态时,分散相液滴处于另一种不相溶的黏性液体中,外加静电电场为均匀电场.为了建立合适的数学模型,对研究对象作假设:分散相液滴与连续相液体均为均质不可压缩黏性牛顿流体;分散相与连续相液体在运动中保持物性参数不发生改变;分散相液滴与连续相液体密度相近,在计算过程中可以忽略重力的影响;分散相液滴与连续相液体的运动状态均为层流;分散相液滴的尺度为毫米级.

### 1.2 两相流动的控制方程

该模型是基于 VOF 建立的,故采用体积分数法来追踪分散相与连续相的界面.

分散相与连续相的体积分数方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度; $\alpha$ 为体积分数.

分散相与连续相的动量方程为

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_s, \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为密度; $p$ 为压强; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切应力张量; $\mathbf{F}_e$ 为源相; $\mathbf{F}_s$ 为表面张力源相.

剪切应力张量为

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T ]. \quad (3)$$

由麦克斯韦应力公式可知,源相 $\mathbf{F}_e$ 为

$$F_e = -\frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \nabla (\varepsilon_0 \varepsilon_r) + q_v \mathbf{E} + \nabla \left[ \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \frac{\partial (\varepsilon_0 \varepsilon_r)}{\partial \rho} \rho \right], \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为场强;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ ;  $\varepsilon_r$  为相对介电常数;  $q_v$  为液体电荷密度; 第1项为极化应力, 第2项为电场作用于电荷产生的库仑力, 第3项是由于物性的变化产生的电约束力, 文中假设流体为不可压缩流体, 所以第3项被忽略。

### 1.3 静电场的控制方程

在电动流体力学中, 由于液体流动速度很小, 磁场效应忽略不计. 对于弱电导率的电介质流体电荷的弛豫时间远小于流体运动的时间尺度, 并且电荷在界面处不断积累且不受流体运动的影响, 故流体中的电荷密度能够在短时间内达到稳定状态<sup>[1-2]</sup>.

电荷守恒方程为

$$\frac{D}{Dt}(q_v) = \frac{\partial q_v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla q_v = -\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}), \quad (5)$$

式中  $\sigma$  为电导率.

根据漏电介质理论的假设<sup>[2]</sup>, 式(5)可简化为

$$\frac{D}{Dt}(q_v) = -\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0. \quad (6)$$

电场强度与电势的关系为

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (7)$$

式中  $V$  为电势.

### 1.4 物理模型与边界条件

均匀静电场中分散相液滴之间聚并过程可以基于商业软件 Fluent 的 UDF 模块进行实现. 该问题所建立的二维几何模型为正方形, 如图1所示. 图中,  $R_1, R_2$  分别为分散相液滴聚并前对应的半径;  $L$  为圆心距离;  $S$  为表面距离;  $\theta$  为液滴中心连线与垂直

方向之间的夹角. 分散相液滴为玉米油, 连续相为硅油, 其物性参数如表1所示. 几何模型边界对应的边长为分散相液滴圆心距离  $L$  的10倍以上, 以保证计算过程中分散相液滴的聚并行为不受边界的影响. 分散相液滴悬浮于另一种不相溶的液体中, 当两平板正电极 a 与接地零电极 c 之间施加均匀电场后, 分散相液滴在电场作用下产生聚并行为, 其对应的边界条件设置为 a, c 为 wall, b, d 分别为压力进口和出口. 求解电场的边界条件: 在平板正电极 a,  $V_+ = V_0$ ; 在底部平板零电极 c,  $V_- = 0$ ; 在左右 d, b 两端,  $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ . 聚并过程中分散相液滴与连续相流体的计算采用基于瞬态问题建立的压力隐式算子分割 (PISO) 算法, 迭代时间步长为  $10^{-5}$  s, 以保证准确捕捉到液滴的几何变形与聚并过程. 在数值计算之前, 必须进行模型的适用性与网格无关性验证. 数值计算结果表明: 采用的模型能够精确地预测液滴聚并过程, 并且具有网格独立性<sup>[12]</sup>.

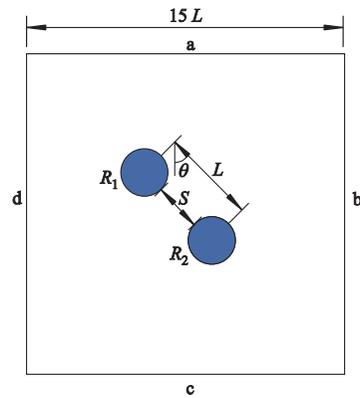


图1 计算的物理模型

表1 两相流体的物性参数

液滴	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	相对介电常数	电导率/( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	表面张力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	真空介电常数
玉米油(离散相)	914	0.042 1	3.24	$1.06 \times 10^{-11}$	$1.45 \times 10^{-3}$	$8.854 \times 10^{-12}$
硅油(连续相)	941	0.016 7	2.66	$2.67 \times 10^{-12}$		

## 2 液滴的变形与聚并原理

### 2.1 单液滴的变形与拉伸

处于两平行平板电极电场中分散相液滴, 在电场作用下产生极化, 在电场力作用下分散相液滴表面不同位置会堆积与电极板极性相反的电荷. 液滴表面堆积电荷受到平板电极的吸引作用, 在液滴两端产生的作用力是一对大小相等方向相反的力, 液

滴沿着电场强度的方向产生拉伸变形, 其原理如图2所示. 液滴受到的合力为0, 其位置并不会发生任何变化. 液滴的极化强度由偶极子转向极化程度决定, 仅与施加电场强度有关, 所以液滴的表面极化电荷不受液滴形变量的影响. 分散相液滴在电场力作用下拉伸变形, 随着电场强度的增加, 液滴拉伸程度增加, 液滴会产生分裂的趋势. 液滴在拉伸时会受到表面张力与流体阻力的阻碍作用, 表面张力维护液滴稳定状态, 黏性会产生流动阻力, 因此表面张力与

黏性阻力与电场力作用相反.图3为不同电场强度下分散相液滴的拉伸变形( $\lambda = l_a/l_b$ ,  $l_a$ 为椭圆长轴,  $l_b$ 为短轴)的计算值,可以明显看出随着电场强度的增大,液滴沿着电场强度方向被拉长.

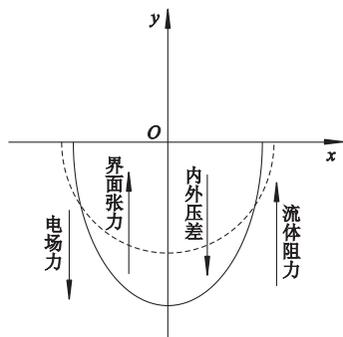


图2 单个液滴的拉伸受力示意图

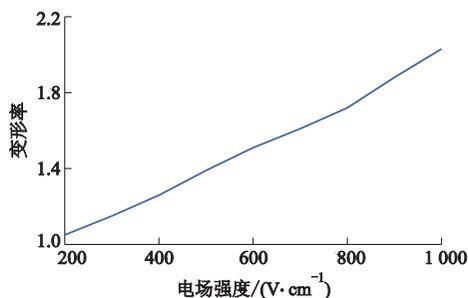


图3 电场强度与变形率的关系

当电场力与表面张力达到平衡时,液滴开始产生破裂的趋势.将沿液滴长轴方向的表面张力等效为在此方向的最大圆周截面积上的力,可得出液滴破裂的临界条件为

$$|E|Q = 2\pi l_b \gamma, \quad (8)$$

式中:  $\gamma$  为表面张力;  $Q$  为极化电荷量.

由式(8)可得电场强度为

$$|E| = \frac{2\pi l_b \gamma}{Q}. \quad (9)$$

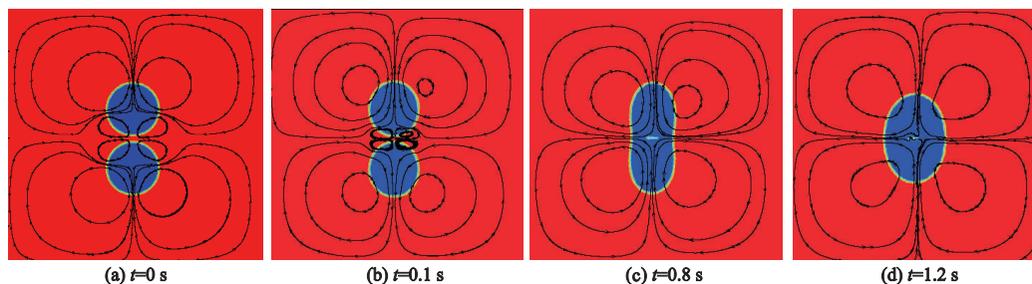


图5 液滴聚并过程及对应的流线图

分散相液滴在接触前排液过程中,液滴在中心部位的电场力最大,液滴在电场力的驱动下,克服流动阻力和界面张力,驱动液滴彼此靠近.从图5a, b

## 2.2 液滴的聚并原理与过程

为了确保液滴聚并时会不受到单液滴破裂的影响,电场强度应该维持某一特性值之下,同时也能保证2个分散相液滴相邻的外表面之间形成的电偶极子在电场力作用下产生相互吸引直至发生接触.当液滴发生接触时液滴两端不同性质的电荷发生中和作用,此为聚并的第I阶段,如图4a所示.当2个分散相液滴接触后,在2个液滴接触的界面在表面张力作用逐渐恢复球形,此为聚并的第II阶段,如图4b所示.在第II阶段过程中,分散相液滴作为整体受到电场的极化作用,大液滴两端会重新形成不同极性的电荷,大液滴会受到电场拉伸力的作用,但此时大液滴中间区域表面张力大于此时所受的拉伸力作用,因此液滴最终出现聚并融合,而不是被持续拉伸.因此,2个分散相液滴聚并的过程中,必须保证外加均匀电场小于某个临界场强,以保证界面张力大于外部电场的拉伸作用,液滴顺利发生聚合.

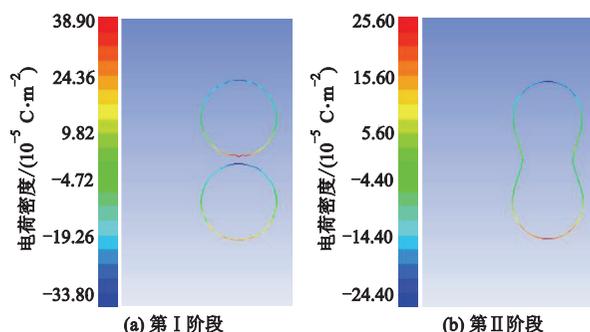


图4 液滴表面电荷分布

根据所受驱动力的不同,分散相液滴的聚并过程分为接触前排液和接触过程.分散相液滴在外电场作用下聚并的过程如图5所示(箭头表示流体的流动方向,图5a-d表示不同时刻的聚并图像).

中可以看出:分散相液滴在电场力作用下,连续相流体从两极(垂直方向的最高点与最低点)流向赤道(圆的左右最远端),并沿轴向从液滴中心流向液滴

左右两侧,从而引起液滴的变形;在2个分散相液滴靠近过程中,液滴间的连续相流体从中间流向外侧,推动了2个液滴的聚结速度,完成了液滴间的排液.随着分散相液滴的靠近到接触,液滴的接触部位的电位小于两侧电位,电场力开始对液滴的聚结起阻碍作用.所以在液滴接触过程中,在界面张力的驱动下,液滴克服电场力和流动阻力,来完成液滴间的聚并.图5c,d为液滴的接触过程的流场分布图,流体沿着从计算域的两极朝向赤道运动,然后流线由轴向从液滴最外侧流向中间,推动液滴间的聚并;与此同时,2个液滴中间外侧的连续相流体从中部流向外侧,完成排液过程,最终聚并为一个大液滴.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 电场强度对液滴聚并的影响

为了验证电场强度对分散相液滴聚并产生的影响,采用不同电场强度对同一组分散相液滴的聚并过程进行数值计算.将分散相液滴和另一种不相溶的电介质流体置于矩形空间内研究其聚并过程.该矩形空间尺寸为 $100.0\text{ mm} \times 100.0\text{ mm}$ ,在两平行板电极间形成电场强度 $E$ 分别为 $200, 500, 1\ 000, 2\ 000\text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的均匀电场;半径为 $R_1 = R_2 = 5\text{ mm}$ 的2个分散相球形液滴悬于两极板间.为了避免液滴粒径对液滴聚并的影响,选用2个分散相液滴最近的外表面进行定义,分散相液滴最近外表面相距 $S = 1.0\text{ mm}$ .不同场强作用下分散相液滴在不同时刻的聚并状态如图6所示.

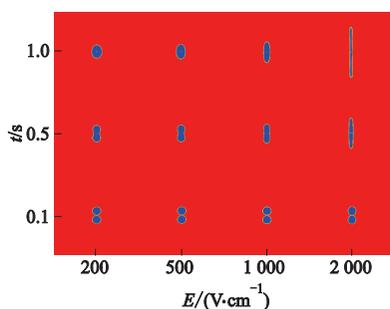


图6 不同电场强度下分散相液滴的聚并状态

从图6可以看出:电场强度对分散相液滴的聚并效果产生了显著的影响,分散相液滴聚并过程与电场强度的大小紧密相关,随着平行平板间电场强度的增大,液滴的变形速度加快,分散性液滴变形量增加,2个分散相液滴变形接触进而形成一个大液滴的时间变短,在外加均匀电场小于某值时,液滴在界面张力的作用下可逐渐形成一个具有一定变形率

的大液滴.显然此大液滴的变形率与外加均匀电场的强度紧密相关.这说明随着电场强度的增加,分散相液滴聚并效率有所增加.液滴的聚并是由于分散相液滴受到电场力的极化作用,在液滴两端产生的极化电荷,液滴在电场力作用下拉长,同时在液滴间电荷吸引力的作用下逐渐靠近,进而形成一个大液滴.在不同电场强度下,液滴变形率和液滴间的驱动力不同,因此聚并的速度不同.随着电场强度的增加,极化电荷分布密度越大,液滴变形率和液滴间的驱动力变大,液滴的聚并速度加快.当电场达到 $2\ 000\text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,拉长后分散相液滴先在电场力的驱动下产生聚并,形成一个细长的大液滴;此时界面张力不能抵消细长液滴两端产生的拉伸力,因此聚并产生的细长液滴将发生破碎,从而导致聚并失败.当电场强度继续增大时,单个分散相液滴将显著被拉长,液滴之间的引力也未将液滴吸引在一起,单个分散相液滴未形成聚并即发生破裂现象.这是因为在电场作用下,电场克服分散相液滴周围的液体阻力,使得分散相液滴变形,并且电场力越大引起的液滴形变量就越大.当电场力引起的拉伸变形大于界面张力和流动阻力时,液滴发生破碎,最终液滴无法完成聚并.因此电场强度对聚并的影响存在一个聚并的临界极值,当大于此值时,分散相液滴无法完成聚并.

图6中采用VOF模拟计算的液滴聚并趋势的结果与其他研究者试验结果基本一致<sup>[8,11]</sup>.随着电场强度的增加,液滴变形率不断增加,促使聚并的效率不断提高.但是存在一个聚并的临界场强,在超过临界场强的情况下液滴之间的斥力占主导地位,不利于聚并的完成.研究表明只有适当的电场强度才能非常有效地促进液滴的碰撞聚合.电场促进分散相液滴聚合的效果与电场强度有关,在临界场强以下,液滴相互吸引,碰撞后聚合;超过临界场强,液滴先是相互吸引直至接触,接触瞬间并没有聚合发生,而是迅速弹开,且速度明显大于液滴相互接近的速度,受到较大的反力作用.

#### 3.2 液滴表面间距对聚并的影响

将分散相液滴和另一种不相溶的电介质流体置于矩形空间内,尺寸为 $100.0\text{ mm} \times 100.0\text{ mm}$ ,在两平行板电极间形成的电场强度选定为 $E = 500\text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,分散相液滴半径 $R_1 = R_2 = 5\text{ mm}$ .为了更好地比较分析液滴表面间距 $S$ 对分散相液滴聚并的影响,选用4组不同液滴表面间距进行对比分析, $S$ 分别为 $0.1, 0.4, 1.0, 2.0\text{ mm}$ .不同液滴间距下分散

相液滴在不同时刻的聚并状态如图7所示.

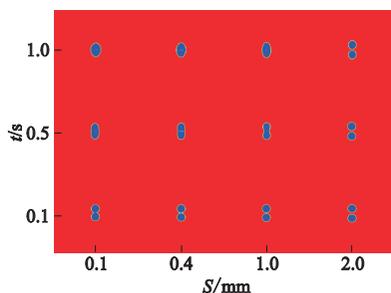


图7 不同液滴表面间距下的聚并状态

从图7可以看出:在平行平板间施加均匀电场后,分散相液滴两侧受到极化作用产生感应电荷,液滴之间产生相互吸引的作用力.分散相液滴表面间距越大,液滴间的偶极引力越小.在液滴接触前过程中,分散相液滴在电场力的驱动下不断靠近.在 $t = 0.1$  s时,随着 $S$ 的不断增大液滴聚并速率也在不断降低,分散相液滴完成聚并所需时间也就越长.这是因为在相同电场强度下,随着分散相液滴间距的增大,分散相液滴间的偶极引力越微弱,液滴受到的引力越小,液滴的变形速率也就减小,在相同时间点,液滴越不容易发生接触.显然,表面间距小的液滴最先完成接触和聚并,如图7中 $t = 0.5$  s所示,可见表面间距小的液滴聚并效率最高.另一方面,电场作用下漏液滴表面由于累积电荷产生切应力促使界面产生运动,界面运动带动周围流体运动,同时液滴内部形成循环流动.当液滴接触时液滴内部循环涡流加快了2液滴内部流体的相互融合,促进了聚并过程.表面间距越小的液滴,其接触越容易,内部流动越容易形成,液滴越容易形成聚并.此外,当施加的电场强度与液滴表面张力达到一定的平衡时,分散相液滴间产生一定的变形但无法碰触时,液滴之间无法完成聚并,如图7中 $S = 2.0$  mm所示.当液滴的间距大到一定程度且电场强度达到一定的阈值时,即所施加的电场强度引起的液滴拉伸大于界面张力时,分散相液滴可以一直拉伸变形,从而使分散相液滴达到破裂值,分散相液滴无法完成聚并.

### 3.3 液滴粒径比对聚并的影响

在实际的原油脱水操作工艺中,分散相液滴粒径十分不均匀.为了探讨液滴相对大小对聚并过程的影响,选择粒径比 $R_1/R_2$ 分别为 $5/3$ , $7/3$ , $10/3$ , $15/3$ 等4组不同的分散相液滴进行计算与对比分析.所采用矩形空间仍保持不变,在两平行板电极间形成的电场强度 $E$ 选定为 $500 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,2个分散相液滴表面之间的距离 $S$ 为 $1.0$  mm,采用 $R_2 = 3$

mm为基准,改变 $R_1$ 的大小实现不同的粒径比.不同粒径比下2个分散相液滴聚并过程如图8所示.

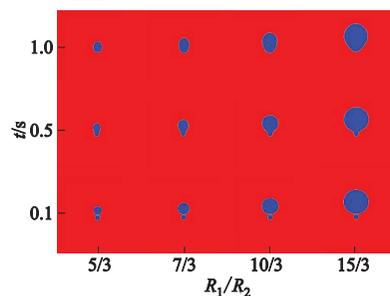


图8 不同粒径比下的液滴聚并状态

从图8可以观察到不同液滴粒径比下的分散相液滴在不相溶液体中的聚并过程.当 $t = 0.1$  s时,不同粒径比的各组聚并情况大致相同,大小粒径均已经开始接触,通过图像很难确定聚并速度的快慢.当 $t = 0.5$  s时,可以观察到不同粒径比的液滴聚并速度有所区别,液滴粒径比越小,聚并进程较快.当 $t = 1.0$  s时,可以较清楚地观察到不同粒径比对液滴聚并效果的影响.2个分散液滴完成聚并后其形状为椭圆形,在 $t = 1.0$  s时,液滴粒径比 $R_1/R_2 = 7/3$ 的分散相液滴已经基本为椭圆形态,表明2个分散相液滴已经完成聚并;液滴粒径比 $R_1/R_2 = 5/3$ 的液滴形状呈现出与液滴粒径比分别为 $10/3$ , $15/3$ 的液滴形状恰好相反,表明液滴聚并过程为一非稳态的过程.滴粒径比 $R_1/R_2 = 5/3$ 的2个分散液滴在 $t = 1.0$  s前已经完成聚并,然后在电场力与重力的作用下产生了拉伸变形;而液滴粒径比分别为 $10/3$ , $15/3$ 的分散相液滴还未完成聚并,处于聚并过程的第II阶段,在表面张力的作用下形成椭圆形.因此,随着分散相液滴差距的增大,液滴实现聚并所需的时间也就越长,2个液滴粒径之间差距越小,液滴更容易聚并.粒径差距愈小,临界场强愈高,粒径之间差距愈大,临界场强则愈低,越不利于聚并的形成.

### 3.4 液滴间的相对角度对聚并的影响

其他条件不变时,采用电场强度 $E = 1000 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,液滴表面间距 $S = 2.0$  mm,分散相液滴半径 $R_1 = R_2 = 5$  mm.对不同液滴相对角度下分散相液滴的聚并过程进行了数值计算,不同时刻的聚并状态如图9所示.考虑分散相液滴位置的对称性,故只考虑 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围.由图9可以看出:当液滴中心线与电场方向的夹角达到一定程度,液滴在电场力的驱动下相互靠近时,液滴间聚并的效率下降.在相同的时间点内随着液滴间角度的增大聚并效率越低. $t = 0.1$  s时,不同相对角度下液滴之间的距离差

距很小.  $t=0.5\text{ s}$  时,  $\theta=30^\circ$  的 2 个液滴之间开始接触, 随着相对角度的增加, 聚并时间明显增长.  $t=1.0\text{ s}$  时, 不同角度的分散相液滴的聚并状态明显有很大的差异,  $\theta=30^\circ, 45^\circ$  的分散相液滴已经开始聚并, 且  $\theta=30^\circ$  的粒径组比  $\theta=45^\circ$  的粒径组聚并速度快;  $\theta=60^\circ, 90^\circ$  的液滴并没有接触相反还处于排斥状态. 这是因为在电场作用下分散相液滴形成相反的感应电荷, 当液滴相对角度为  $0^\circ$  时分散相液滴之间的吸引力最大, 在感应电荷与电场力的共同作用下, 液滴的聚并速率最大, 有利于液滴的聚并; 随着分散相液滴中心线与电场强度夹角的增大, 液滴间感应电荷的斥力逐渐变大, 而电场力恒定, 因此合力逐渐减小, 引力逐渐减小, 聚并效率逐渐下降; 当感应电荷的斥力大于电场力作用时, 合力为负, 变为斥力时液滴间的聚并就无法完成; 此外, 液滴极化力除提供液滴间的引力外, 还有一部分提供液滴沿电场方向取向的转矩. 随分散相液滴中心线与电场强度夹角的增加, 所需要的转矩越大, 液滴间的极化引力分量随之减小, 故液滴的靠近速率降低. 因此随着分散相液滴中心线与电场方向的夹角的增加分散相液滴聚并的速率也会降低.

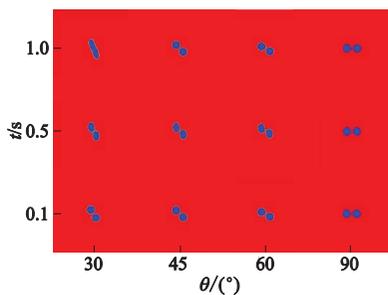


图9 不同相对位置下液滴的聚并状态

### 3.5 液滴聚并过程影响因素分析

悬浮于另一种不相溶液体中的分散相液滴在电场力的作用下将沿电场力的方向呈直线排列, 相邻液滴表面由于极化电荷的相反而相互吸引. 分散相液滴间受力模型如图 10 所示.

将分散相液滴视为 2 个不同电偶极矩的偶极子, 电偶极矩分别为

$$\xi_1 = \frac{4}{9} \frac{\xi_0^2 E \pi R_1^3}{\kappa}, \quad (10)$$

$$\xi_2 = \frac{4}{9} \frac{\xi_0^2 E \pi R_2^3}{\kappa}, \quad (11)$$

式中:  $\xi_0$  为液体固有偶极矩;  $\kappa$  为 Boltzmann 常数.

电偶极矩  $\xi_2$  在  $\xi_1$  处产生的电势为

$$V_{21} = \frac{\xi_2 L e}{4\pi \epsilon_r' L^3} = \frac{|\xi_2| \cos \theta}{4\pi \epsilon_r' L^2}, \quad (12)$$

式中:  $\epsilon_r'$  为连续相的介电常数;  $e$  为从  $\xi_2$  指向  $\xi_1$  的单位向量.

假设分散相液滴相对位置不变, 电势仅为间距  $L$  的函数, 场强为

$$E_{21} = -\nabla V_{21} = -\frac{|\xi_2| \cos \theta}{2\pi \epsilon_r' L^3} e. \quad (13)$$

2 个偶极子间的互能为

$$W = -\xi_1 E_{21} = \frac{|\xi_1| |\xi_2| \cos^2 \theta}{2\pi \epsilon_r' L^3}. \quad (14)$$

分散相液滴间的相互作用力为

$$F_w = -\nabla W = \frac{3|\xi_1| |\xi_2| \cos^2 \theta}{2\pi \epsilon_r' L^4} e. \quad (15)$$

将式(10), (11)代入式(15)可得

$$F_w = -\frac{8}{27} \left( \frac{\xi_0 |E|}{\kappa} \right)^2 \frac{\pi R_1^3 R_2^3 \cos^2 \theta}{\epsilon_r' L^4} e. \quad (16)$$

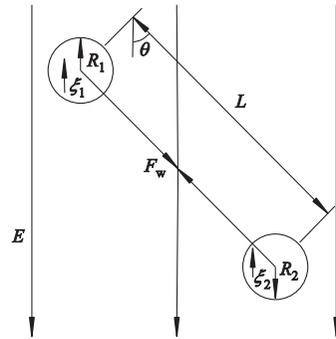


图10 液滴间偶极-偶极受力模型

电偶极力决定了分散相液滴的聚并速度, 电偶极力越大分散相液滴间的作用力越大聚并速度越快, 电偶极力越小分散相液滴间的作用力越小, 聚并时间越长. 因此由式(16)可以得出, 在 2 种黏性液体确定的情况下, 偶极子的固有偶极矩、Boltzmann 常数一定, 分散相液滴之间的作用力要受到电场强度、液滴粒径、分散相液滴间的相对角度、分散相液滴间圆心间距的影响. 分散相液滴粒径越大液滴间的电偶极力越大, 液滴聚并速度越快; 由式(16)得出分散相液滴间的角度与电偶极力间存在余弦关系, 由余弦关系可知分散相液滴间的角度与偶极力间存在一个周期性关系(周期为  $90^\circ$ ). 当液滴间相对角度为  $0^\circ$  时, 电偶极力最大, 液滴间的聚并速度最快; 随着角度的增加, 电偶极力减小, 越不容易发生聚并; 分散相液滴间的圆心距离  $L$  与电偶极力间存在反比的关系, 相对距离越远越不容易发生聚并. 通过理论分析得出的结果与数值模拟结果较吻合, 验证了数值模拟结果的可靠性.

## 4 结 论

基于 VOF 界面追踪方法建立了预测均匀电场下 2 个分散相液滴悬浮于另一种不相溶黏性液体的运动、变形与聚并模型,并采用 Fluent 平台进行数值计算.研究表明电场强度存在一个最优值,当电场强度小于此值时,增大电场强度可加速液滴聚并;电场强度大于这个值时,随着电场强度增大,液滴聚结速度降低,当电场强度持续增大至某阈值时,液滴不能产生聚并,反而产生破裂现象.在均匀电场作用下,液滴聚并过程受到液滴粒径比、液滴间距和液滴间相对位置的影响.在相同电场强度下,间距越大,液滴偶极吸引力越微弱,液滴越不容易发生碰撞接触,从而降低液滴聚并的效率;液滴粒径比越大,临界场强越低,越不利于液滴的聚并.当液滴相对角度为  $0^\circ$  时分散相液滴之间的吸引力最大,有利于液滴的聚并;随着分散相液滴相对角度的变大,液滴间感应电荷的斥力与所需的转矩逐渐变大,聚并效率逐渐下降,当感应电荷的斥力大于电场力作用时,液滴无法完成聚并.适当增大电场强度、减小液滴粒径比、减小液滴间距和减小液滴间相对角度,均可降低液滴聚结的时间.

### 参考文献(References)

- [1] 王贞涛,董庆铭,张永辉,等.静电场中液滴变形及内部流动的研究[J].高校化学工程学报,2015,29(5):1098-1105.  
WANG Z T, DONG Q M, ZHANG Y H, et al. Droplet deformation and its internal flow in electrostatic field [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015, 29(5): 1098-1105. (in Chinese)
- [2] TAYLOR G. Studies in electrohydrodynamics I the circulation produced in a drop by electric field [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1966, 291(1425): 159-166.
- [3] FENG J Q, SCOTT T C. A computational analysis of electrohydrodynamics of a leaky dielectric drop in an electric field [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 311(1): 289-326.
- [4] EOW J S, GHADIRI M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85(2): 357-368.
- [5] 宋华,马键伟,李金玲.原油静态脱水参数的考察及破乳剂的影响[J].石油炼制与化工,2005,36(2): 48-51.  
SONG H, MA J W, LI J L. Investigation on parameters of crude electrostatic dehydration and the effect of demulsifier [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2005, 36(2): 48-51. (in Chinese)
- [6] TOMAR G, GEFLACH D, BISWAS G, et al. Two-phase electrohydrodynamic simulations using a volume-of-fluid approach [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 227(2): 1267-1285.
- [7] 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 [J]. Physics of Fluids, 2008, 20(11): 113302-1-16.
- [8] 王亮,冯永训,董守平,等.电场破乳分散相液滴行为研究[J].实验流体力学,2010,24(2):28-33.  
WANG L, FENG Y X, DONG S P, et al. Investigation on behavior of dispersed phase droplets for the electric demulsification [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(2): 28-33. (in Chinese)
- [9] 危卫,张云伟,顾兆林.电场作用下的电流变液滴的变形及力学行为[J].科学通报,2013,58(3):197-205.  
WEI W, ZHANG Y W, GU Z L. Deformation and mechanical behavior of electrohydrodynamic droplet under external electric field [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(3): 197-205. (in Chinese)
- [10] 陈庆国,梁雯,宋春晖.电场强度对原油乳化液破乳脱水的影响[J].高电压技术,2014,40(1):173-180.  
CHEN Q G, LIANG W, SONG C H. Effect of electric field strength on crude oil emulsion's demulsification and dehydration [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 173-180. (in Chinese)
- [11] 梁猛,李青,王奎生,等.匀强电场作用下分散相液滴的变形和破裂[J].化工学报,2014,65(3):843-848.  
LIANG M, LI Q, WANG K S, et al. Deformation and breakup of dispersed phase droplets in uniform electric field [J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 843-848. (in Chinese)
- [12] 朱忠辉.静电场中液滴聚并过程的数值模拟及机理研究[D].镇江:江苏大学,2017.

(责任编辑 贾国方)