

研究论文

# 高频脉冲电场作用下乳状液液滴动力学模型

张 建<sup>1,2</sup>, 董守平<sup>1</sup>, 甘琴容<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国石油大学机电工程学院, 北京 102249; <sup>2</sup> 胜利工程设计咨询有限公司, 山东 东营 257026)

**摘要:** 基于乳状液中液滴在电场中的受力情况的分析, 建立了 W/O 乳状液中液滴振荡固有频率公式, 从理论角度分析和解释了高频脉冲电场对 W/O 乳状液的破乳机理, 从力学的角度分析了最佳频率存在的理论基础, 并推导出了最佳频率的计算公式。该固有频率与液滴尺寸、界面张力、黏度、温度、密度等有关。为了验证最佳频率公式的可靠性, 用正辛烷乳状液进行了室内实验。实验结果表明, 理论最佳频率公式的预测结果与实验测得的最佳频率结果吻合, 经修正后与白油实验结果也非常接近。

**关键词:** 乳状液; 高频脉冲; 破乳机理; 电场

中图分类号: TQ 021.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 04-0875-06

## Dynamic model of liquid droplets of water-in-oil emulsions with high-frequency pulsating electrical field

ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, DONG Shouping<sup>1</sup>, GAN Qinrong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

<sup>2</sup> Shengli Engineering and Consulting Co. Ltd., Dongying 257026, Shandong, China)

**Abstract:** A mathematical model of the inherent frequency of liquid droplets in water-in-oil (W/O) emulsions was developed from the force balance analysis of the liquid droplets with the presence of external electrical field. The demulsification mechanism of high-frequency pulsating electrical field was proposed and it was proved theoretically that there existed an optimum frequency for the best demulsification performance. A prediction model was developed for calculating this optimum frequency. It was also shown that the inherent frequency was dependent on droplet size, surface tension, viscosity, temperature and density. The experiments of the *n*-octane and the white oil W/O emulsion were carried out to prove the reliability of the prediction model. The theoretical prediction of the mathematical model for optimum frequency agreed well with both the experimental results of the *n*-octane W/O emulsion and the modified experimental results of the white oil W/O emulsion.

**Key words:** emulsion; high-frequency pulsate; demulsification mechanism; electrical field

### 引 言

在原油生产过程中, 原油的矿场脱水是重要生产环节, 为使油井生产出的原油成为合格的商品原

油, 出矿矿场必须及时地对含水、含盐、含机械杂质的原油进行净化处理。目前油田矿场和炼厂对原油乳状液进行净化脱水处理的最佳方法就是静电脱水。自 Bailes<sup>[1]</sup> 在 1981 年首先提出高频脉冲交流

电破乳更有效的结论以来,关于脉冲电场破乳机理的研究从未间断。在含水量高或者乳化严重的情况下,乳状液进入电破乳器后极易发生短路。

如果电极加绝缘材料,势必削弱乳状液中的电场强度;当脉冲电压加于乳状液之后,水珠即变形、拉伸、开孔,形成短路。短路的形成需要一定的时间,称为短路形成时间,短路一旦形成就会引发电能泄漏,不但电场强度减弱、能耗大,而且易破坏电极,不能进行平稳破乳。若使用脉冲高压电不会出现上述问题,而且脱水效果良好;适当选择脉冲电的频率,在短路形成前脉冲电场处于间断期,适当的时间再施加下一次脉冲,这样可以避免短路造成的危害,使电场强度在脉冲输出时始终维持高状态。

以脉冲电破乳理论为基础,国内外对此进行了大量的实验研究<sup>[2-12]</sup>,主要应用于石油乳状液的破乳脱水工艺上,但对高频脉冲电场理论上的研究针对性不强,没有形成较为系统的理论,已有成果对于高频脉冲电场破乳技术的开发与现场应用缺少指导意义。因此,对高频脉冲电场破乳机理进行研究,以指导高频脉冲电破乳设备的工业化开发是十分必要的。

本文基于乳状液中液滴在电场中的受力情况的分析,通过建立 W/O 乳状液中液滴振荡固有频率公式,从全新的理论角度上分析和解释了高频脉冲电场对 W/O 乳状液的破乳机理,并推导出了最佳频率的计算公式。通过实验表明,理论最佳频率公式的预测结果与实验测得的最佳频率结果吻合,经修正后与白油实验结果也非常接近。

为了便于理论分析与公式推导,提出如下假设:(1)忽略电场中的重力因素;(2)流体不可压缩;(3)乳状液中的液滴呈球形。

## 1 电场力作用下单液滴受力与变形

### 1.1 内压力与界面张力

乳状液中的液滴,特别是小液滴在静止状态下呈球形,取球面坐标,直径方向为  $x$ ,其界面张力  $\gamma$  与内压力  $p_0$  平衡,有

$$p_0 = \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

式中  $R$  为小液滴半径。

### 1.2 电场力与液滴变形

如图 1 所示,液滴在沿  $Ox$  的电场力  $f$  的作用

下有变形  $\delta x$ ,考虑到变形的轴对称性,在  $Oy$  及  $Oz$  方向上应有相同变形  $-k\delta x$ 。考虑到不可压缩流体,可设液滴在变形过程中体积不变,于是

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(R+\delta x)(R-k\delta x)^2$$

关于  $k$  解出

$$k = \frac{R-R\sqrt{1-\frac{\delta x}{R+\delta x}}}{\delta x} \quad (2)$$

对于液滴的小变形 ( $R \gg \delta x$ )

$$k = \frac{R}{\delta x} \frac{\delta x}{2(R+\delta x)} = \frac{1}{2}$$

式中  $k$  为液滴变形收缩系数,简称收缩系数。

此刻,右半椭球液滴上的静力平衡关系为

$$f + \pi\left(R - \frac{\delta x}{2}\right)^2 p_0 = 2\pi\left(R - \frac{\delta x}{2}\right)\gamma$$

式中  $p_0$  为液滴原始内压。于是由式 (1) 并略去高阶小量后得

$$f = \pi\gamma\delta x \quad (3)$$

式 (3) 描述了施于液滴上的电场力与液滴变形、界面张力及原始内压之间的静力平衡关系。

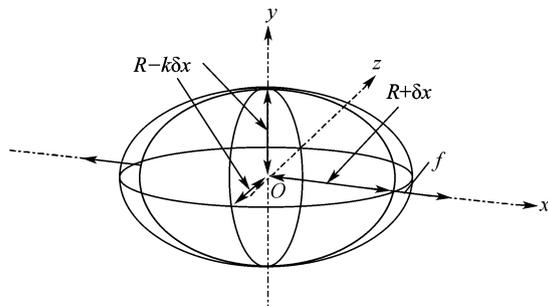


图 1 液滴受力和变形

Fig. 1 Force balance and deformation of liquid droplet

### 1.3 液滴变形运动的惯性力

假设液滴半球体内位于垂直于  $Ox$  轴并过  $(x, 0, 0)$  点的截面上的变形位移量  $\delta x'$  沿  $Ox$  轴呈线性分布,  $\theta$  为截面与水平面的倾角

$$\delta x' = \frac{x}{R} \delta x = \cos\theta \delta x$$

液滴  $Ox$  轴的母线椭圆 (图 2) 为

$$\frac{x^2}{(R+\delta x)^2} + \frac{y^2}{\left(R - \frac{1}{2}\delta x\right)^2} = 1$$

在  $x > 0$  上的半椭球的质心位置

$$X'_c = \frac{\int_0^{R+\delta x} x\pi y^2(x) dx}{\frac{2}{3}\pi\left(R - \frac{1}{2}\delta x\right)^2 (R+\delta x)}$$

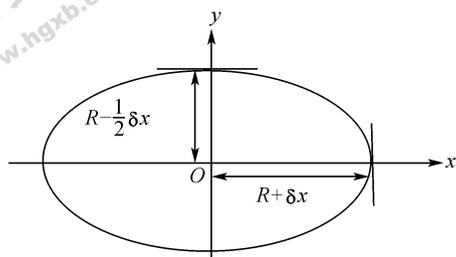


图 2 液滴变形示意图

Fig. 2 Deformation of liquid droplet

其中

$$\int_0^{R+\delta x} x \pi y^2(x) dx = \frac{\pi \left(R - \frac{1}{2} \delta x\right)^2 (R + \delta x)^2}{4}$$

于是

$$X'_c = \frac{3}{8} (R + \delta x)$$

容易得到原始（变形前）半球质心位置及外力  $f$  作用下半球质心位移分别为

$$X_c = \frac{3}{8} R, \delta X_c = \frac{3}{8} \delta x$$

### 1.4 乳状液液滴的附加质量

乳状液液滴在具有黏性的连续相中运动时，连续相介质会因黏性而附着在液滴表面形成液滴运动的附加质量。如果把因黏性而附着在液滴表面运动的连续相介质折算成与液滴表面以相同速度运动的厚度为  $y_{\delta m}$  的一层附加质量<sup>[11]</sup>，令  $\eta = y \sqrt{\frac{\rho_c}{\mu_c t}}$ ，那么

$$y_{\delta m} = \sqrt{\frac{\mu_c t}{\rho_c}} \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-v^2} dv\right) \delta \eta = 0.57 \sqrt{\frac{\mu_c t}{\rho_c}} = 0.403 \sqrt{\frac{\mu_c}{\rho_c f}} \quad (4)$$

式中  $y_{\delta m}$  为动量折算厚度； $\mu_c$  及  $\rho_c$  为界面上连续相的黏度和密度；并取  $t$  作为液滴运动的半周期，则

$$y_{\delta m} = \frac{0.57}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_c}{\rho_c f}} = 0.403 \sqrt{\frac{\mu_c}{\rho_c f}}$$

因此，液滴运动质量体系还应加上动量折算厚度  $y_{\delta m}$  以内的因黏性附着在液滴半球面上的连续相介质的质量

$$m_a = \frac{2\pi}{3} [(R + y_{\delta m})^3 - R^3] \rho_c$$

于是，附加质量系数  $C_m$ （附加质量与液滴半球质量之比）为

$$C_m = \left[ \left(1 + \frac{y_{\delta m}}{R}\right)^3 - 1 \right] \frac{\rho_c}{\rho} = C_V \frac{\rho_c}{\rho} \quad (5)$$

$$C_V = \left(1 + \frac{y_{\delta m}}{R}\right)^3 - 1 = (1 + y_{\delta m}^+)^3 - 1 \quad (6)$$

式中  $C_V$  为附加体积系数； $y_{\delta m}^+ = \frac{y_{\delta m}}{R}$  为量纲 1 动

量折算厚度。

那么，乳状液液滴在具有黏性的连续相中运动时总的惯性力就为

$$F_I = \left(m_a + \frac{2}{3} \pi R^3 \rho\right) \frac{d^2 \delta X_c}{dt^2} = [(\rho - \rho_c) + (1 + y_{\delta m}^+)^3 \rho_c] \times \frac{1}{4} \pi R^3 \frac{d^2 \delta x}{dt^2} \quad (7)$$

### 1.5 液滴变形运动所受阻力

设液滴变形过程中液滴半球面上任意一点的变形位移量  $\delta x'$  沿  $Ox$  轴呈线性分布

$$\delta x' = \frac{x}{R} \delta x$$

则在球面上沿过  $Ox$  轴截面椭圆切线方向上液滴变形相应的运动速度的分布为（ $r$  为液滴质心距液滴内任一点距离）

$$V_\theta = \frac{x}{R} \frac{d\delta x}{dt} \left(1 - \frac{3R}{4r} - \frac{R^3}{4r^3}\right) \sin\theta = \frac{d\delta x}{dt} \left(1 - \frac{3R}{4r} - \frac{R^3}{4r^3}\right) \sin\theta \cos\theta$$

相应的沿法线方向（半径方向）的速度梯度则为

$$\left. \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{d\delta x}{dt} \left(\frac{3R}{4r^2} + \frac{3R^3}{4r^4}\right) \sin\theta \cos\theta \Big|_{r=R} = \frac{3}{2R} \frac{d\delta x}{dt} \sin\theta \cos\theta$$

于是，液滴变形运动在右半球面上的阻力和为<sup>[11]</sup>

$$F_D = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mu \frac{\partial V_\theta}{\partial r} 2\pi R \sin\theta \sin\theta R d\theta = \frac{3}{4} \pi R \mu \frac{d\delta x}{dt} \quad (8)$$

式中  $\mu$  为连续相的黏度。

## 2 乳状液液滴大变形动力学分析

### 2.1 乳状液液滴的变形

在电场力的作用下，乳状液液滴会发生变形，根据变形程度的不同，可以分为大变形和小变形，这里只考虑大变形。根据前面的分析，可以得到在大变形条件下液滴的作用力。

2.1.1 液滴变形的收缩比 乳状液液滴在大变形情况下，液滴变形收缩比  $k$  为

$$k = \frac{2R - \sqrt{4R^2 - 4\delta x \frac{R^2}{R + \delta x}}}{2\delta x} = \frac{1}{(\sqrt{1 + \epsilon} + 1) \sqrt{1 + \epsilon}} = \frac{1}{1 + \epsilon + \sqrt{1 + \epsilon}} \quad (9)$$

式中  $\epsilon = \frac{\delta x}{R}$ ，为液滴拉伸率。

2.1.2 液滴大变形的恢复力 根据液滴上的电场力与液滴变形、界面张力及原始内压之间的静力平

衡关系，液滴大变形时的恢复力为

$$f = \frac{2\pi k(R - k\delta x)\gamma}{R}\delta x = 2\pi\gamma \frac{1}{1 + \epsilon + \sqrt{1 + \epsilon}} \left( \frac{\sqrt{1 + \epsilon} + 1}{1 + \epsilon + \sqrt{1 + \epsilon}} \right) \delta x = C_R \pi \gamma \delta x \quad (10)$$

其中  $C_R = \frac{2}{(\sqrt{1 + \epsilon} + 1)(1 + \epsilon)}$

显然系数  $C_R < 1$ ，它表示液滴大变形的恢复力衰减系数。

2.1.3 液滴大变形的惯性力 液滴的质量分布体系的惯性力在大变形时，仍维持变形位移量  $\delta x'$  沿  $Ox$  轴呈线性分布的假设。

$$F_I = \frac{\rho\pi R^3}{4} \frac{d^2 \delta x}{dt^2} (1 + \epsilon) \left( 1 - \frac{\epsilon}{1 + \epsilon + \sqrt{1 + \epsilon}} \right)^2 = \frac{\rho\pi R^3}{4} \frac{d^2 \delta x}{dt^2} \quad (11)$$

这表明，液滴大变形半椭球体质量分布体系所表现出的惯性力与质心质量集中体系的惯性力相同。

2.1.4 液滴大变形的附加质量及附加质量系数 液滴在大变形时动量折算厚度  $y_{\delta m}$  以内的因黏性附着在液滴半椭球面上的连续相介质的附加质量为

$$m_a = \frac{2\pi}{3} [(R - k\delta x + y_{\delta m})^2 (R + \delta x + y_{\delta m}) - R^3] \rho_c = \frac{2\pi R^3 \rho_c}{3} \left[ \left( 1 - k\epsilon + \frac{y_{\delta m}}{R} \right)^2 \left( 1 + \epsilon + \frac{y_{\delta m}}{R} \right) - 1 \right]$$

附加质量系数  $C_m$  则为

$$C_m = y_{\delta m}^+ \left( 2\sqrt{1 + \epsilon} + \frac{2 + \epsilon + 2\sqrt{1 + \epsilon}}{1 + \epsilon} y_{\delta m}^+ + y_{\delta m}^{+2} \right) \frac{\rho_c}{\rho} = y_{\delta m}^+ \left( 2\sqrt{1 + \epsilon} + \frac{2 + \epsilon + 2\sqrt{1 + \epsilon}}{1 + \epsilon} y_{\delta m}^+ + y_{\delta m}^{+2} \right)$$

其中， $C_V$  为附加体积系数

$$C_V = \left[ \left( 1 - k\epsilon + \frac{y_{\delta m}}{R} \right)^2 \left( 1 + \epsilon + \frac{y_{\delta m}}{R} \right) - 1 \right]$$

于是，液滴在大变形时的附加质量系数  $C_m$  为

$$C_m = y_{\delta m}^+ \left( 2\sqrt{1 + \epsilon} + \frac{2 + \epsilon + 2\sqrt{1 + \epsilon}}{1 + \epsilon} y_{\delta m}^+ + y_{\delta m}^{+2} \right) \frac{\rho_c}{\rho} \quad (12)$$

## 2.2 乳状液液滴大变形的自由振动

由前面所得到的乳状液液滴在大变形下的恢复力及惯性力的表达式 (11) 和式 (12) 可以直接得到乳状液液滴在大变形时的自由振动角频率

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_R 4\gamma}{(1 + C_m)R^3 \rho}} = C_f \sqrt{\frac{4\gamma}{(1 + C_m)R^3 \rho}} \quad (13)$$

式中  $C_f = \sqrt{C_R}$ 。

液滴在大变形时其振动频率要低于小变形时，这时相应的圆频率则为

$$f_0 = C_f \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\gamma}{(1 + C_m)R^3 \rho}} \quad (14)$$

式中  $C_f$  为液滴大变形频率系数。

## 2.3 乳状液液滴大变形的阻尼振动

按照液滴大变形运动时恢复力和惯性力的表达式 (11) 和式 (12)，液滴大变形运动所受阻力可以表示为

$$F_D = C_D \frac{3}{4} \pi R \mu \frac{d\delta x}{dt} \quad (15)$$

其中， $C_D$  称为液滴大变形阻力系数，或简称阻力系数。需要说明的是目前尚未得到椭球表面的速度分布及其速度梯度的理论求解，因此，液滴大变形阻力系数还不能准确确定。

由式 (11)、式 (12) 和式 (15) 有

$$(1 + C_m)R^3 \rho \frac{d^2 \delta x}{dt^2} + C_D 3R\mu \frac{d\delta x}{dt} + C_R 4\gamma \delta x = 0 \quad (16)$$

容易得到当  $\frac{(1 + C_m)C_R 16R\rho\gamma}{C_D 9\mu^2} > 1$  时，液滴变形量  $\delta x$  在电场力撤销后会出现阻尼的振动，其幅值按负指数形式衰减趋于零，角频率为

$$\omega_D = \frac{\sqrt{(1 + C_m)C_R 16R\rho\gamma - C_D 9\mu^2}}{2R^2 \rho}$$

当  $\frac{(1 + C_m)C_R 16R\rho\gamma}{C_D 9\mu^2} > 1$  时，液滴变形量  $\delta x$  在

电场力撤销后将一致单调地按负指数形式衰减于零。

## 2.4 大变形液滴在脉冲电场力作用下的受迫振动

大变形液滴在脉冲电场力作用下的受迫振动，其策动力主要由其基频分量  $f \sin(\omega_1 t + \theta_0)$  表示 ( $\theta_0$  为初时相位)，即大变形液滴动力学方程为

$$(1 + C_m)R^3 \rho \frac{d^2 \delta x}{dt^2} + C_D 3R\mu \frac{d\delta x}{dt} + C_R 4\gamma \delta x = f \sin(\omega t + \theta_1) \quad (17)$$

式中  $\theta_1$  为迟后策动力相位角；相应的液滴振动角频率  $\omega_1$  和液滴变形量  $x_1$  为

$$\omega_1^2 = \frac{C_R 8R\rho\gamma - C_D 9R^2 \mu^2}{2(1 + C_m)R^3 \rho^2} \quad (18)$$

$$x_1 = \frac{f}{\sqrt{[C_R 4\gamma - (1 + C_m)R^3 \rho \omega_1^2]^2 + (C_D 3R\mu \omega_1)^2}} \quad (19)$$

在电场力作用下，液滴将产生变形，电场力越大，液滴变形也越大；而界面张力大，界面黏度大，都使液滴不易变形。在脉冲交变电场力作用下，频率也影响着液滴界面膜强度，当电场力频率

接近或等于液滴的固有频率时，会发生共振现象，此时液滴变形所需的电场力会大幅度降低，相应地，也就需较少的外界电场能的供给和消耗。

### 3 高频脉冲电场破乳实验研究

#### 3.1 实验介质的配制

下面通过实验考察不同粒径的乳状液在脉冲电场作用下，使乳状液破乳率达到极大值的峰值频率与相应粒径液滴自然频率的内在关系，以揭示直流脉冲电场破乳的液滴动力学机理。

选用正辛烷为连续相配制了油包水乳状液来进行实验研究。配制乳状液条件：温度 30℃，搅拌转速 2400 r·min<sup>-1</sup>，搅拌时间 20 min。乳状液中加入表面活性剂 span 80，配制 4 种不同粒径的乳状液，乳状液加入浓度均为 0.1%，其中乳状液中油水比分别为 1:1、3:2、7:3 和 4:1，液滴平均直径分别为乳状液 1 (1:1) 平均直径 17.54 μm、乳状液 2 (3:2) 平均直径 18.34 μm、乳状液 3 (7:3) 平均直径 18.95 μm、乳状液 4 (4:1) 平均直径 19.69 μm。

#### 3.2 高频脉冲电破乳实验结果及分析

将配制的 4 种不同粒径的乳状液置于脉冲电场下，温度在 30℃，在一定的电场强度和占空比的条件下进行破乳实验，考察不同频率下的破乳率。破乳实验的操作条件是脱水时间 120 s、电压 675 V、占空比 0.3。

通过破乳实验，找出每种乳状液在脉冲电场作用下，使破乳率达到最大值时的频率值，其实验结果如图 3、图 4 所示。

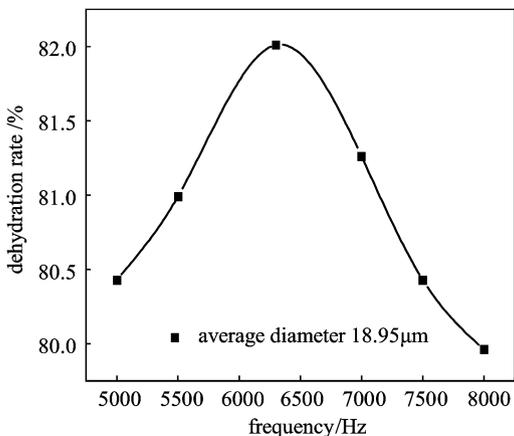


图 3 乳液 3 频率与脱水率的关系  
Fig. 3 Demulsification efficiency vs frequency for emulsion 3

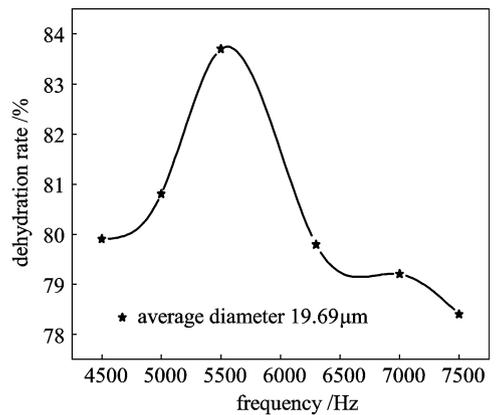


图 4 乳液 4 频率与脱水率的关系  
Fig. 4 Demulsification efficiency vs frequency for emulsion 4

由图 3 和图 4 能够看出，对粒径不一样的乳状液来说，外加脉冲电场的频率对乳液破乳有很大的影响，它们均在某一频率处破乳率达到最大，也就是在此频率处，液滴聚结最显著，将此处频率称作峰值频率。小于或超过这一峰值，液滴聚结概率变小，破乳率降低。图 5 表示了 4 种不同乳液液滴平均直径与峰值频率的关系。

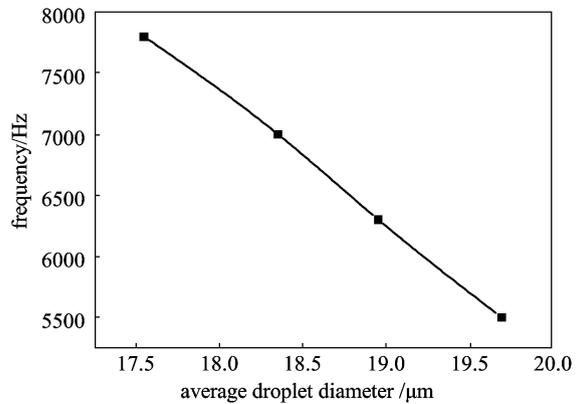


图 5 平均直径与峰值频率的关系  
Fig. 5 Variation of peak frequency with average droplet diameter

由图 5 可知，随着液滴平均直径的增大，峰值频率减小，也就是使破乳达到最大时的外加电场的频率随液滴平均直径的增大而减小。

另一方面，根据乳化液液滴变形的动力学分析，不同粒径的乳化液液滴的大变形自由频率由式 (14) 表示。这时，根据破乳实验的正辛烷+水的 4 种不同乳液液滴粒径的平均直径计算得到计算值与实验值的对比如下：乳状液 1、2、3、4 中液滴界面张力  $\gamma$  测得值分别为 2.13、2.12、2.11、

2.10 mN·m<sup>-1</sup>; 其大变形自由振动频率  $f_L$  计算值分别为 7700、7300、6825、6300 Hz, 实验值分别为 7800、7000、6400、5650 Hz。

为进一步考察液滴动力学分析理论的正确, 采用白油作为连续相与水配制的乳液来进行实验验证, 其内部结构比正辛烷复杂得多, 白油主要由高度精炼的液态烃类混合物(环烷烃和链烷烃的饱和成分)组成。白油黏度远大于正辛烷黏度, 且随温度升高黏度减小快。针对实验配制的 4 种不同粒径的乳状液, 计算值与实验值对比如下: 乳状液 1、2、3、4 中液滴界面张力  $\gamma$  测得值分别为 1.61、1.59、1.58、1.56 mN·m<sup>-1</sup>; 其大变形自由振动频率  $f_L$  计算值分别为 5600、4800、3900、3500 Hz, 实验值分别为 6000、5000、4500、4000 Hz。

从计算值和实验值的对比, 能够看出计算值和实验值很接近, 误差均小于 8%。

## 4 结 论

(1) 深入分析了乳状液单液滴在黏性介质中的运动和变形行为, 建立了液滴变形的动力学模型。提出了直流脉冲电场破乳的液滴的动力学机制。乳状液单液滴在直流脉冲电场作用下的运动应归结为周期电场力策动下球形或椭球形液滴的受迫振动问题。

(2) 乳状液液滴在具有黏性的连续相中运动时, 连续相因界面黏性而附着在液滴表面伴随其运动而形成的液滴附加质量是液滴动力学分析(振动分析)必须加以考虑的重要物理要素。本文所提出的液滴附加质量系数  $C_m$  及动量折算厚度  $y_{om}$  等有关表达式合理、正确。

(3) 根据本文提出的液滴大变形动力学分析的理论和方法所计算出的液滴自振频率与破乳实验破乳率的峰值频率具有相当好的一致性的事实验证了所提出的液滴变形动力学理论。

## References

[1] Bailes P J. An experimental investigation into the use of high voltage DC fields for liquid phase separation.

*Trans. IChemE*, 1981, **59**: 229-237

- [2] Bailes P J, Freestone D, Sams G W. Pulsed DC fields for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions. *The Chemical Engineer*, 1997, **23** (10): 34-40
- [3] Bailes P J, Kuipa P K. The effect of air sparging on the electrical resolution of water-in-oil emulsions. *Chemical Engineering Science*, 2001, **56** (2): 6279-6284
- [4] Taylor S E. Theory and practice of electrically enhanced phase separation of water-in-oil emulsion. *Chemical Engineering Research & Design: Transaction of the Institute of Chemical Engineers*, 1996, **74** (A5): 526-540
- [5] Takeshi Kataoka, Tadaaki Nishiki. Development of continuous electric coalescer of W/O emulsions in liquid surfactant membrane process. *Separation Science and Technology*, 1990, **25** (1/2): 171-185
- [6] John S Eow, Mojtaba Ghadiri, Adel Sharif. Deformation and break-up of aqueous drops in dielectric liquids in high electric fields. *Journal of Electrostatics*, 2002, **51/52**: 463-469
- [7] John S Eow, Mojtaba Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002, **85**: 357-368
- [8] John S Eow, Mojtaba Ghadiri. The behaviour of a liquid-liquid interface and drop-interface coalescence under the influence of an electric field. *Colloids and Surface A: Eng. Aspects*, 2003, **215**: 101-121
- [9] Wang Zhi (王志), Wang Shichang (王世昌). Influence of fluid flow on forces acting on droplet and emulsification results in membrane emulsification process. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 1999, **50** (4): 505-513
- [10] Dai Qiang (戴强), Yao Shudian (姚书典). Improving efficiency of floating selection of highly-fine mineral particles by use of deformation vibration of gas bulbs. *Journal of Wuhan University of Technology* (武汉理工大学学报), 1997, **19** (1): 86-89
- [11] Dong Shouping (董守平). *Advanced Fluid Mechanics I* (高等流体力学). Beijing: Petroleum University Press, 2000: 208
- [12] Hu Mengming (胡盟明), Dong Shouping (董守平). Investigation of mechanical behaviors of droplets in the discrete phase of oil water emulsions. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics* (流体力学实验与测量), 2000, **14** (4): 46-50