

文章编号:1672-058X(2011)04-0406-04

# 高压电场作用下油中液滴变形与极化

彭 焯

(重庆钢铁集团 职工培训中心, 重庆 400080)

**摘 要:**常采用圆球模型研究高压电场作用下油中液滴的极化特性,对于变形液滴的极化特性研究报道较少;针对变形液滴,建立椭球液滴模型,运用椭球坐标系得到电场中长球形液滴内部电场分布,进而研究液滴变形对其极化特性的影响;通过算例计算分析,表明液滴大变形对极化影响较大,椭球模型在研究电场破乳动力学方面优于圆球模型。

**关键词:**椭球模型;电场破乳;变形液滴;极化特性

**中图分类号:**TQ021

**文献标志码:**A

高压电场实现乳化油液脱水净化处理,被广泛应用于石油化工领域。W/O 型乳化油液中被极化的液滴产生相互作用力,致使液滴完成偶极结聚,实现高压电场结聚脱水<sup>[1]</sup>。Eow 等<sup>[2]</sup>通过实验发现,外加电场强度较高时,油中液滴会发生变形,呈椭球体。Williams 等<sup>[3]</sup>通过研究,认为电场强度越高,液滴拉伸变形越大,脱水效果较好。液滴的内部电场与液滴形状有着密切联系,对液滴极化及结聚有影响<sup>[4]</sup>。目前,在研究电场破乳动力学机理时,忽略液滴在高压电场中的变形,均以圆球形液滴模型为研究基础<sup>[5]</sup>。在此将重点讨论高压电场中液滴变形的内部电场强度分布及其极化特性。

## 1 液滴椭球模型

高压电场作用下液滴在油中被极化,受到电场力的作用,液滴被拉长,呈椭球形,如图 1。以液滴中心为坐标原点,则椭球液滴在笛卡儿坐标系中的表达式: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \leq 1 (a > b > c)$ ,外加电场方向与  $x$  轴平行。液滴表面的极化电荷在液滴内部产生极化电场  $E'$ ,方向与外电场  $E_0$  相反,则液滴内的总电场为  $E = E_0 - E'$ 。求解椭球形液滴内部的电场分布,引入椭球坐标系  $(\xi, \eta, \zeta)$ ,椭球坐标系与笛卡儿坐标系之间的换算关系:<sup>[6]</sup>

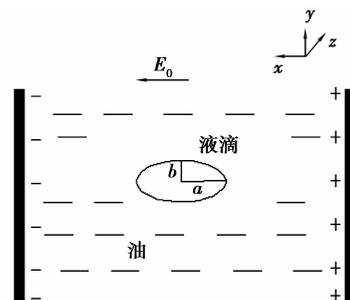


图 1 椭球形液滴模型

$$\begin{cases} x = \pm \left[ \frac{(\xi + a^2)(\eta + a^2)(\zeta + a^2)}{(b^2 - a^2)(c^2 - a^2)} \right]^{1/2} \\ y = \pm \left[ \frac{(\xi + b^2)(\eta + b^2)(\zeta + b^2)}{(a^2 - b^2)(c^2 - b^2)} \right]^{1/2} \\ z = \pm \left[ \frac{(\xi + c^2)(\eta + c^2)(\zeta + c^2)}{(b^2 - c^2)(a^2 - c^2)} \right]^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

椭球形液滴的内外电势  $U(x, y, z)$  满足 Laplac 方程,边界条件的数学表述:

$$\begin{cases} \nabla^2 U = 0 \\ U_1 = U_2 \\ \epsilon_1 \frac{\partial U_2}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial U_1}{\partial n} \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2010-10-28;修回日期:2010-12-03.

作者简介:陈友艳(1987-),女,山东临沂人,硕士研究生,从事计算数论方面的研究.

$U_1, U_2$  分别对应液滴外部和内部电位函数,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  分别为液滴和油的相对介电常数,  $n$  为粒子表面的法向量。

对于均匀液滴介质, 极化电荷的体密度为零, 根据椭球水滴的边界条件, 可解得  $U_2$ , 从而得椭球水滴内部总电场  $E$  的分布, 其方向与外电场方向一致<sup>[7]</sup>, 即

$$E = -\text{grad}U_2 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)n_x} E_0 \quad (3)$$

其中,  $n_x = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{d\xi}{R_\xi(a^2 + \xi)}$ 。当椭球液滴的两个短轴相等时, 即  $a > b = c$ , 椭球液滴变成长球液滴, 则

$$n_x = -\frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \right)^{1/2} \ln(\lambda + (\lambda^2 - 1)^{1/2}) \right] \quad (4)$$

其中  $\lambda = \frac{a}{b}$ ,  $\lambda$  称为液滴拉伸比, 等于长球形液滴长轴与短轴的比值, 是反映液滴极化变形的一项重要指标。

电场作用下, 油中液滴发生极化变形, 液滴的形状近似长球形。由式(4)可见, 长球形液滴的内部电场强度分布与  $\lambda$  密切相关。当  $a = b$  时, 即  $\lambda = 1$ , 长球液滴变成圆球液滴, 有

$$\lim_{\lambda \rightarrow 1} n_x = \frac{1}{3} \quad (5)$$

代入式(3), 所得结果与圆球模型计算液滴内部电场强度分布<sup>[8]</sup>的结果一致。

## 2 液滴变形对极化特性的影响

在圆球模型中, 油中液滴的内部电场强度  $E$ , 圆球形液滴的极化强度:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E = \frac{3\varepsilon_0\varepsilon_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \cdot E_0 \quad (6)$$

令  $\alpha_s = \frac{3\varepsilon_0\varepsilon_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}$ ,  $\alpha_s$  称为圆球液滴的单位体积极化率, 是反映液滴在油中极化特性的重要指标, 其中

$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ , 为真空介电常数。考虑到液滴的介电常数要比油的介电常数大很多, 即  $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$ ,  $\alpha_s$  可简化为:

$$\alpha_s = 3\varepsilon_0\varepsilon_2 \quad (7)$$

由式(7)可得出, 圆球形液滴的极化率只与油的介电常数有关。

在椭球模型中, 当变形液滴的两个短轴相等, 可得长球液滴的单位体积极化率  $\alpha_s$  为:

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)n_x} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_2(1 - k)}{k + (1 - k)n_x} \quad (8)$$

$k$  为油-液滴的介电常数比, 即  $k = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ 。长球液滴的

单位体积极化率不仅与液滴的形状有关, 还与  $k$  有关, 三者之间的变化关系, 如图 2 所示。

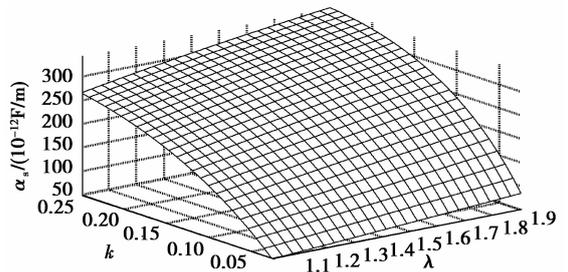


图 2 椭球液滴单位极化率三维变化曲面

## 3 算例及分析

有一半径为 0.6 mm 的液滴 ( $\varepsilon_1 = 80$ ) 分别置于向日葵油、棕榈油和校准油中, 3 种介质油的相对介电常数  $\varepsilon_2$  相应分别为 4.9, 5.5, 3.0。在 Eow 的实验<sup>[9]</sup>中, 液滴在 3 种油中的变形量  $\lambda$  如表 1。

表 1 Eow 实验中液滴的变形量  $\lambda$

$E_0$ (kV/m)	0	50	100	150	200	250	300	350
向日葵油	1.00	1.03	1.05	1.06	1.10	1.16	1.32	1.93
棕榈油	1.00	1.02	1.05	1.10	1.17	1.30	1.46	1.79
校准油	1.00	1.03	1.05	1.06	1.12	1.23	1.41	1.90

圆球模型得出液滴单位体积极化率只与油的介电常数有关,而椭球模型所得结果不仅与液滴变形相关,还与介电常数比  $k$  有关。为深入分析高压电场中液滴在两种不同模型下的极化特性,根据圆球模型和椭球模型,分别计算两种模型下液滴在向日葵油、棕榈油和校准油中的单位体积极化率  $\alpha_s$ ,如图 3 所示。

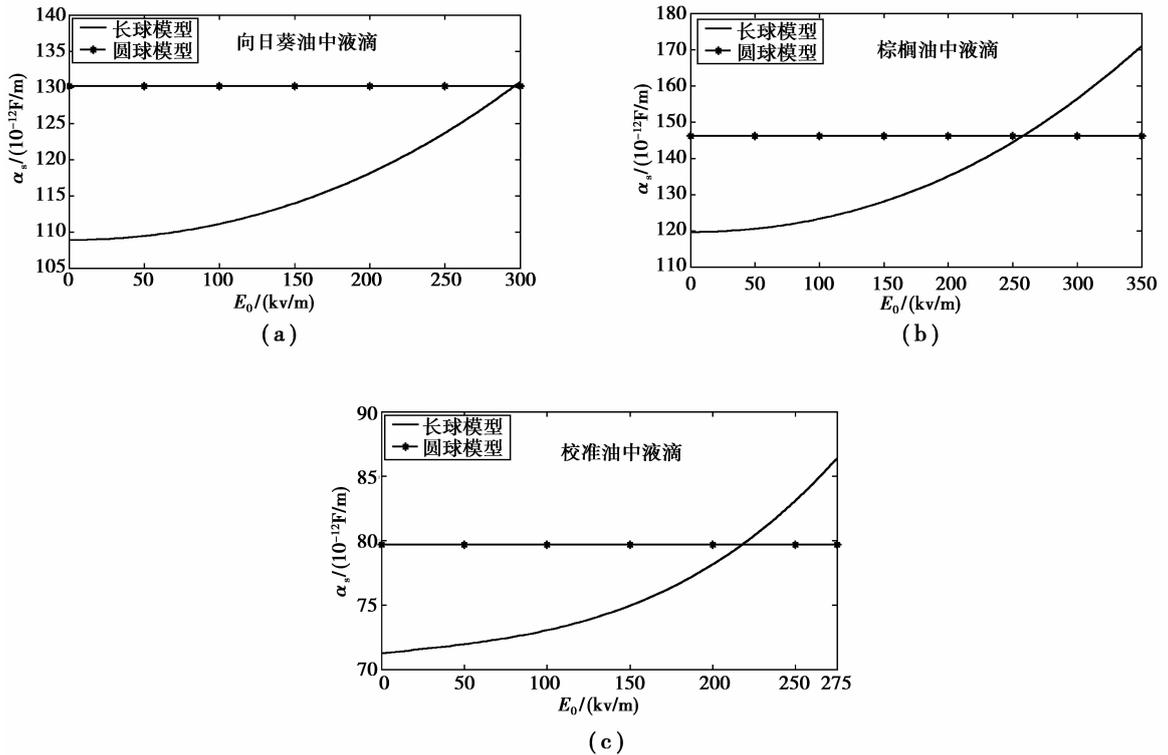


图 3 两种模型下三种油中液滴的单位体积极化率

由图 3 可知,外加电场较小时,圆球模型和长球模型得出液滴的单位极化率相差较大,液滴的变形对极化率的影响较小,而介电常数比  $k$  对极化率影响则较大,两种模型得出液滴极化率最大相对误差为 22.5% (图 3(b))。在高压区,随着电场强度的不断增大,液滴的变形将会达到稳态的临界值。此时,变形对液滴极化率的影响达到最大,两种模型下得出液滴极化率最大相对误差为 13.5% (图 3(b))。因此,在界面张力较大以及介电常数比  $k$  较小的情况下,圆球形液滴模型分析电场中液滴的极化特性误差较小。

## 4 结 论

利用椭球模型,可计算出高压电场中变形液滴内部的电场分布,液滴变形量对其内部电场强度的分布影响较大。液滴变形较大时,圆球形液滴模型分析电场中液滴的极化特性误差越大。液滴极化强度随油-液滴介电常数比的增大而增大,只有当油-液滴介电常数比较小时,液滴极化受其形状的影响明显。

### 参考文献:

- [1] 周文俊. 高压电脉冲原油脱水试验及机理探讨[J]. 高电压技术, 1995(2): 24-26
- [2] JOHN S, EOW M, GHADIRI. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil; a review of the technology[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85: 357-368
- [3] WILLIAM S. The resolution of water-in-oil emulsion by the application of an external field [D]. Ph. D Thesis, University of Southampton, 1989
- [4] GONG H F, PENG Y. Polarization Characteristic of Droplet of Water-in-Oil Emulsion in a High Uniform Electric Field[C]. 2008 International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization. US: IEEE Computer Society, 2008: 139-142
- [5] EOW J S, MOJTABA. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil; a review of the current understanding

[J]. Chemical Engineering Journal, 2001;173-192

[6] 王竹溪. 特殊函数论[M]. 北京:科学出版社, 1979

[7] 胡文江, 胡先权. 均匀电介质椭球内的极化场强的求解[J]. 重庆大学学报, 2001, 24(1): 84-88

[8] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982

[9] JOHN S, EOW M, Ghadiri Motion. Deformation and break-up of aqueous droplets in oils under high electric field strengths [J]. Chemical Engineering and Processing, 2003, 42: 259-272

## Research on Deformation and Polarization of Oil Droplet under the Action of High-voltage Electric Field

**PENG Ye**

(Training Center for Workers and Staff, Chongqing Steel and Iron Group Co. , Chongqing 400080, China)

**Abstract:** Spherical model is used to study the polarization characteristics of the droplet in oil under the action of high-voltage electric field, however, there are few reports on the researches on the polarization characteristics of deformed droplet. According to deformed droplet, ellipsoid droplet model is set up, the frame of axes of the ellipsoid is used to obtain electric field distribution in inner prolate-sphere droplet in electric field in order to further study the influence of droplet deformation on its polarization characteristics. The calculation and analysis based on examples indicated that large deformation of the droplet had bigger impact on its polarization and that ellipsoid model was better than spherical model in the research on electro-demulsification dynamics.

**Key words:** ellipsoid model; electro-demulsification; deformed droplet; polarization characteristics

责任编辑:代小红

---

(上接第 397 页)

## Comparative Analysis of WebForms, MVC and MVP Architecture in ASP.NET Development

**GU Ming-xia, CAI Chang-an**

(School of Information Science and Technology, Yancheng Teachers University, Jiangsu Yancheng 224002, China)

**Abstract:** This paper introduced working principle of WebForms, MVC and MVP architecture under the .NET platform, the characteristics of the three structures were analyzed and compared, especially, WebForms' ViewState, the performance and client ID pollution problems were expounded and their solutions were given; by combing their respective advantages, suitable scenarios of these three kinds framework were pointed out, aiming to provide reference for developing Web application system.

**Key words:** software architecture; Web system; MVC; MVP; ASP.NET

责任编辑:李翠薇

校 对:代小红