

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2012.04.010

## 低含水 W/O 乳化液电脱水实验研究\*

许庆华<sup>1</sup>, 孙焕强<sup>2</sup>, 许晶禹<sup>2</sup>, 邓晓辉<sup>1</sup>, 吴应湘<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067, Email: xuqh@cnooc.com.cn;  
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 针对低含水 W/O 型乳化液, 通过高压脉冲电脱水实验, 对影响脱水过程的关键因素进行了实验研究, 绘制了不同电场参数下的电流曲线与脱水效率曲线。实验是在直径 80 cm 的圆筒脱水器中进行的。实验结果显示了与高含水时不同的电流特征。作为辅助手段, 通过三目显微镜与成像系统对电场中微小水滴的运动进行了观察, 还观察和分析了电极附近水滴在电泳力作用下的运动。

**关键词:** W/O 乳化液; 高频脉冲电场; 脱水性能; 裸电极

**中图分类号:** O359+.1

**文献标识码:** A

## Experimental study of electric dehydration for low water content W/O emulsion

XU Qing-hua<sup>1</sup>, SUN Huan-qiang<sup>2</sup>, XU Jing-yu<sup>2</sup>,  
DENG Xiao-hui<sup>1</sup>, WU Ying-xiang<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen, 518067;  
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

**Abstract:** The factors acting on the performance of high voltage and impulse electrostatic dewatering process was investigated for the low water content W/O emulsion. The experiments were carried out in a cylindrical tank with 80 cm diameter. The current vs. dewatering efficiency curves under difference electric field parameters have been draw. The experiment results show the different current feature from high water content. As an adjunct, by trinocular microscope and imaging system for the movement of the electric field in tiny water droplets was observed. The movement of the water droplets near electrode under the action of the electrophoretic force also was observed and analyzed.

**Key words:** W/O emulsion; high frequency impulse; dewatering performance; bare electrode

\* **收稿日期:** 2012-02-15(2012-05-11 修改稿)

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置(SSM)”(2011YQ120048)

**作者简介:** 许庆华(1964 - ), 男, 广东省湛江人, 高级工程师, 学士.

**通信作者:** 许晶禹, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**Received:** February 15, 2012 (**Revised** May 11, 2012)

**Project supported by foundation:** Supported by the Subsea High Efficiency Oil/Gas/Water Separating and Metering Device by the Special Development of National Key Scientific Instruments in China (2011YQ120048-02)

**Biography:** XU Qing-hua (1964-), Male, Senior Engineer, Bachelor.

**Corresponding author:** XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

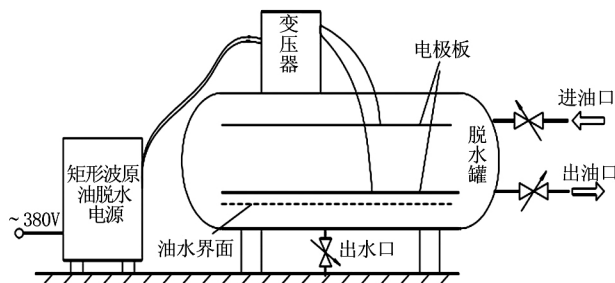


图 1 实验装置示意图

Fig.1. Sketch map of the experimental device

## 1 引言

在原油生产过程中, 原油的矿场脱水是重要的生产环节。为使油井生产出的原油为合格的商品原油, 出矿场必须及时地对含水及含盐的原油进行净化处理。目前油田矿场和炼油厂对原油乳化液进行净化脱水处理的最佳方法就是静电脱水<sup>[1]</sup>。

在“十·五”和“十一·五”期间, 中国科学院力学研究所与中国海洋石油总公司在重大科技合作项目中, 提出并设计了一种小型、快速的复合式高效油水分离器<sup>[2]</sup>。该分离器综合利用了离心、重力和膨胀等多种分离原理, 其技术指标达到了油中含水小于 1% 和水中含油小于 1000 ppm 的要求, 并在陆上及海上油田得到了成功应用, 其中柱型旋流器是该新型管道式油水分离器的重要组成部分<sup>[3]</sup>。对于低含水的油水分离来说, 在高速旋流场的作用下, 柱型旋流器的上隘口存在高度乳化的特性, 这为进一步的分离带来了困难。因此, 本文针对这种低含水的乳化液开展了电脱水的实验研究工作。

电脱水是一个复杂的过程, 它涉及到电磁学、水动力学和表面化学等学科。以现有的理解它主要分为三个过程: 水滴碰撞聚集、合并和沉降与连续相合并<sup>[4]</sup>。每一个过程都涉及诸多物理化学过程, 很难用某一理论统一解释。目前的理论基本分为两类: 第一类是统计性的, 以液滴粒径分布为基础, 探讨碰撞概率粒径分布变化; 第二类是以低雷诺数流理论为基础, 研究单液滴变形双液滴的运动与聚合等局部现象, 但总的来说没有一个完善的理论模型可以对电破乳过程进行完整的描述。最近的综述文章见文献<sup>[5,6]</sup>。

理论上的不完善促使研究人员在实验上进行了大量工作。Cottrell 等早在 1911 年就进行了电破乳尝试。1981 年, Bailes 等引入了脉冲电场, 使得电脱水效率有了很大提高<sup>[7]</sup>。近年来人们围绕电场类型与参数、乳化液含水率以及水中离子含量

进行了大量实验, 为工程设计提供了重要依据。电脱水实验与技术请参见文献<sup>[8]</sup>。

但是目前国内外的研究主要集中在高温条件下高含水和低粘性的油包水型 (W/O) 乳化液, 而对于常温条件下的电脱水开展较少。因此本文针对常温条件下的低含水的稠油乳化液开展了较为系统的实验工作, 通过调节电场参数考察脱水率和电流随时间的变化情况。此外通过显微成像系统对脱水过程进行了可视化研究, 观察了裸电极附近水滴的运动情况进行了初步分析。

## 2 实验装置与方案

脱水实验装置主要由矩形脉冲电脱水电源、变压器以及平板带孔电极板组成 (见图 1)。实验中采用电压和频率连续可调的, 占空比为 50% 的矩形方波电源。实验用的乳化液用白油与水加乳化剂配制而成, 其常温下的各参数见表 1。

表 1 20°C 时乳化剂的物性参数

Table 1. Physical parameters of emulsion at 20°C

流体	白油	水
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	0.81×10 <sup>3</sup>	0.98×10 <sup>3</sup>
粘度 (mPa·s)	215	1
电导率 (us/cm)	98	2000
相对介电常数	2.65	81
界面张力 (mN/m)	31.5	

配制时采用搅拌器搅拌 15 分钟, 静置 24 小时后无游离水析出即满足实验要求。

实验中本应考虑电场强度对脱水的影响, 但是乳化液的介电常数与含水率、水中离子含量、油相介电常数和水滴粒径分布等等因素相关, 它本身就是一个有待研究的课题。因此在实验中采用的电压为变量, 极板间距为 20 cm。

此外，本文还对裸电极附近液滴的运动进行了分析与实验观察，其中的实验采用 ZX-117 三目生物显微镜与 CCD 成像系统。

### 3 实验结果与分析

实验中记录的脱水率  $P$  为沉降到脱水罐底部的游离水占总含水量的比例

$$P = \frac{h_w}{h_e \eta} \tag{1}$$

其中的  $h_w$ 、 $h_e$  和  $\eta$  分别是水层高度、乳化液总高度和含水率。脱水率反映的是水滴聚集沉降的综合结果，它对电脱水器的设计至关重要。

#### 3.1 常温下电脱水总体趋势与特征

常温下电脱水与高温条件下是十分不同的。由于黏性较大，且乳化液呈现一定的弹性，水滴的沉降也存在一个时间上的阈值，如图 2 所示（其中脉冲频率为 15 kHz，脱水电压为 50 kv，含水率为 14.2%）。可以看到，在虚线所标时间处电流急剧下降，同时水层开始显著上升。这一时间值与脱水电压和脉冲频率的关系见下文。

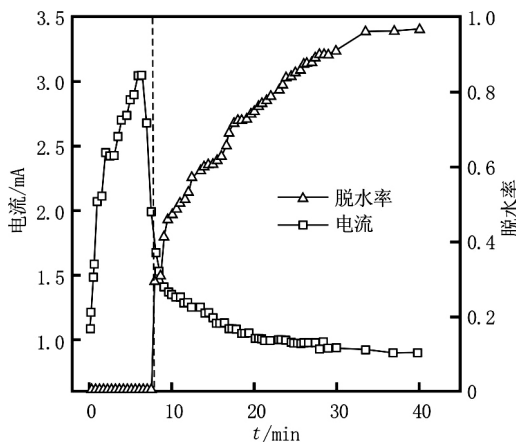


图 2 常温脱水实验的结果

Fig.2. Dehydration experimental results at room temperature

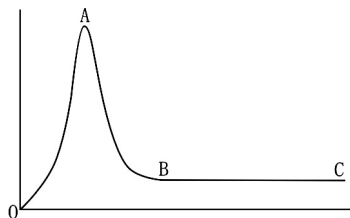


图 3 理想条件下的电脱水电流曲线

Fig.3. Dehydration current curve under ideal condition

在理想情况下随着乳化液中水滴的聚集，乳化液总体电导率增大，随着水滴直径的增长，水滴的沉降开始发生。因此电导率到达一个高峰后开始下降并趋于稳定，如图 3 所示。

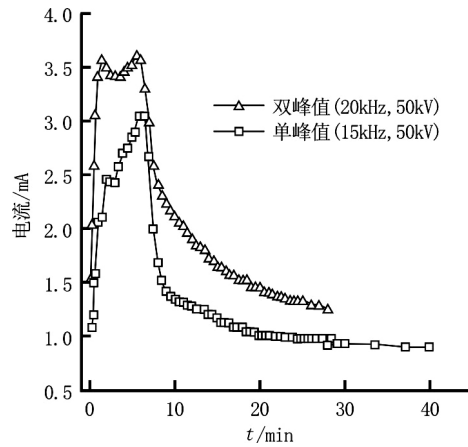


图 4 电流曲线类型

Fig.4. Types of the current curve

实验中的电流曲线总体趋势与此分析相似，但曲线形态有不同。曲线主要分为两类：双峰值和单峰值（见图 4），其原因在于水滴合并与沉降存在时间差。在较长的电场作用下，水滴的聚结合并只是几分钟甚至十几秒钟的过程而沉降则需要较长的时间。因此双峰值可以解释为：第一个峰值为较大水滴发生合并，第二个峰值为初始时刻临界直径以下的水滴缓慢合并积攒到一定程度后的又一次大规模合并。峰值的个数与电场参数密切相关。实验中观察到高电压且低频率的情况下更易出现双峰值的现象，实验结果见表 2。

表 2 两种电流曲线类型  
Table 2. Two types of current curve

电压 (kv)	频率 (Hz)			
	100	150	200	250
40	2	2	1	1
50	1	1	1	1
60	1	1	1	2
70	2	2	2	2
80	2	2	2	2

注：1 代表单个峰值 A 型，2 代表两个峰值 B 型

#### 3.2 脉冲频率的影响

脉冲频率对电脱水的影响学者们有着不同的看法。陆岗等从能量角度分析认为频率越大则乳化液获得的能量越多，越有利于破乳<sup>[9]</sup>。更多的研究表明对特定的乳化体系存在最优频率<sup>[7,10,11]</sup>。但以上分析都是基于乳化液温度较高，粘性相对较

小的情况。

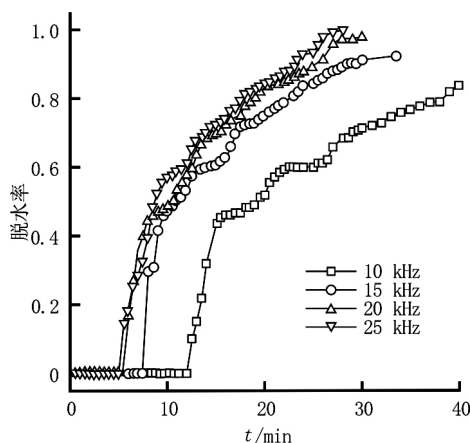


图 5 不同频率下脱水率随时间的变化  
Fig.5. Variation of dewatering efficiency with time at different frequencies

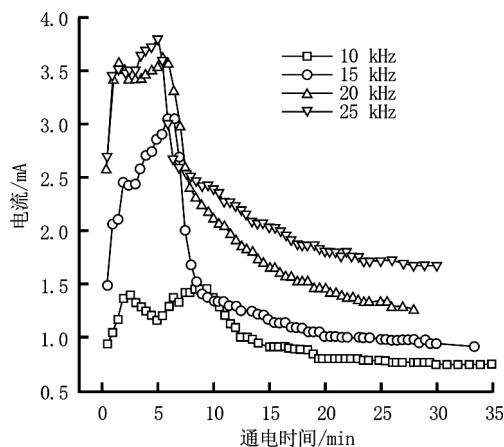


图 6 不同频率下电流随时间的变化  
Fig.6. The variation of current with time at different frequencies

图 5 显示了不同频率下脱水效率随时间的变化, 图 6 为不同变频下电流强度随时间的变化。从图 5 中可以看出, 随着频率升高, 脱水效率也有所提高, 但脱水效率的提升幅度越来越减小。此外水滴沉降时间所形成的时间阈值会发生较明显的变化。由于此阈值与水滴沉降密切相关, 所以它主要决定于水滴的直径变化。随着频率的变化, 时间阈值存在一个临界值, 在此频率以上启动时间将不再改变。这一频率应与乳化液中某一特征粒径有关。由于实验设备的频率所限, 对这一问题未能开展精细实验。从图 6 可以看到在主要的电脱水区域, 电流随着频率的增长而增长, 但增长趋势越来越慢, 脱水时间也有所减少。这与高含水的乳化液有很大区别, 严忠等研究了含水率 50% 情况下的电能消耗, 得出频率越大电能消耗越来越严重的结论<sup>[11]</sup>。

### 3.3 电压的影响

电压对脱水的影响, 前人进行了大量的研究工作。当电场超过临界场强之后, 水滴不仅变形成旋转椭球体, 而且在达到一定偏心程度之后, 水滴两端变尖, 甩出一连串较原来小得多的微滴, 从而发生电分散现象。Taylor 推导出了临界电场  $E_c$  的表达式如式<sup>[12]</sup>

$$E_c = K_p \sqrt{\lambda(\epsilon_0 \epsilon_c r)^{-1}} \quad (2)$$

但乳化液中水滴直径并非一个定值, 它随着配制工艺的不同会有复杂的分布, 并且乳化液中电场强度的计算也是一个有待解决的问题。因此通过实验寻找一个最佳电压而非一个场强是一个更好的选择。

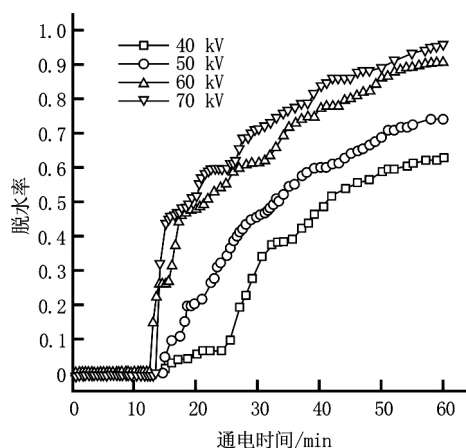


图 7 不同电压下脱水率随时间的变化  
Fig.7. Variation of dewatering efficiency with time at different voltages

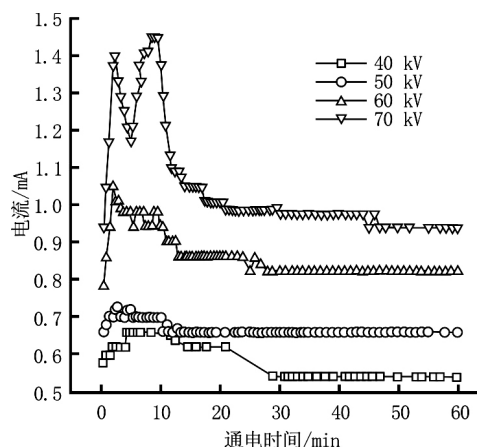


图 8 不同电压下电流随时间的变化  
Fig.8. Variation of current with time at different voltages

从图 7 中可以看到电压较低的时候脱水效率

随电压的增大有明显的提高,但随着电压的继续增大,脱水效率提高的幅度越来越小,当电压增大至 70 kV 时,脱水效率仅比电压 60 kV 时稍有提高,这表明一部分水滴已经开始发生电分散现象。注意到时间阈值基本没有变化,表明影响时间阈值的因素主要是频率,但效率曲线上初始时刻的斜率变化还是很明显的。对于电流的变化,将图 8 与图 6 做一个有意思的对比,可以看到在峰值区域上的电流近似与电压的平方成正比,这是和图 6 完全不同。这表明我们选择工作电压时要慎重权衡效率与能耗的关系。在图 8 中还有一个重要的信息即峰值的特征:随着电压的升高,双峰现象越来越明显,这一现象可从电压对水滴聚集速率的影响上得到解释。

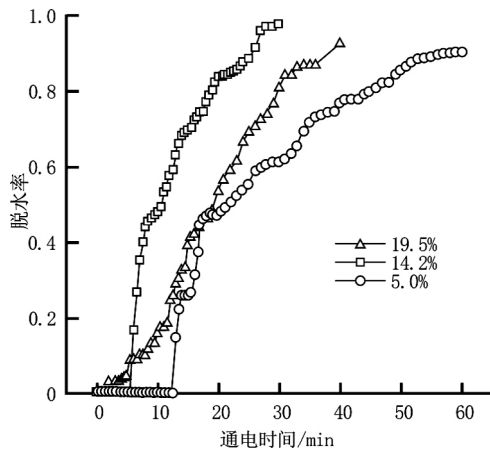


图 9 不同含水率的脱水率随时间的变化

Fig.9. Variation of dewatering efficiency with time at different water holdups

### 3.4 含水率对曲线形状的影响

最后我们对含水率对曲线形态的影响进行了实验研究。图 9 为不同含水率下脱水率随时间的变化曲线。曲线形状的不同主要取决于水滴的粒径分布与水滴间距。如果水滴粒径相同则水滴中心距、半径之比与含水率的关系为

$$\frac{d}{r} = \left(\frac{4\pi}{3\phi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

其中的  $d$  为水滴中心距,  $r$  为半径,  $\phi$  为含水率。可以看到,较高含水条件下曲线趋向于 S 型,并且高含水时脱水效率要高于低含水时。这是由于高含水情况下水滴之间距离较近,形成局部较强电场。此外大水滴的合并扰动流场产生微湍流这也有利于水滴的碰撞聚合。

### 3.5 微观实验结果

在微观实验中我们观察到存在一个裸电极影响区域,在这个区域中水滴由于接触带电会发生电泳现象。接触带电量为<sup>[13]</sup>

$$q_c = \frac{2\pi^3}{3} r^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_0 \quad (4)$$

其中:  $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $E_0$  和  $r$  分别是真空介电常数、相对介电常数、电场强度与半径。带电水滴在油中运动时电量会慢慢减少的现象称为静电松弛。根据 Williams 等<sup>[13]</sup>的研究,电量表达式为

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

其中  $\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1}{C_m}$ , 而  $C_m$  为连续相的电导率。水滴在电场中受到库仑力与流体阻力的作用。关于流体阻力,由于在本物理问题中雷诺数大约为  $10^{-4}$  量级,所以可忽略惯性效应,采用经典的 Rybczynski-Hadamard 公式<sup>[14]</sup>

$$m \frac{dv}{dt} = Eq - 6\pi\mu_0 r v \frac{1+2\sigma/3}{1+\sigma} \quad (6)$$

满足边界条件的解为

$$v = \frac{a}{b-c} (e^{bt} - e^{ct}) \quad (7)$$

其中:  $a = \frac{Eq_0}{m}$ ,  $b = -\frac{1}{\tau}$ ,  $c = -6\pi\mu_0 r \frac{1+2\sigma/3}{(1+\sigma)m}$ 。

如果水滴在运动过程中没有收到其他水滴的影响,则其运动的最远距离为

$$L = \frac{a}{bc} = \frac{2\pi^2(1+\sigma)\tau E^2 r}{9(1+2\sigma/3)\mu_0} \quad (8)$$

可见电极影响区域大小与电场强度的平方成正比。但这一分析未考虑水滴之间的相互作用以及壁面的影响。

本文在实验中观察了水滴在极板附近的运动情况,将有明显电泳现象的区域看做电极影响区,其厚度随电压的变化见图 10,变化趋势与式(8)相符合。

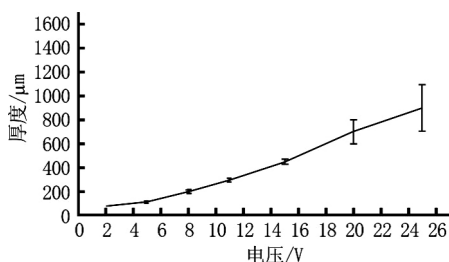


图 10 电极影响区域的厚度

Fig.10. The thickness of the domain affected by electrodes

## 4 结论

本文针对低含水 W/O 型乳化液进行了高压脉冲电脱水实验,并对影响脱水过程的关键因素进行了实验研究。通过实验观察发现:

(1) 脱水电流曲线存在两种峰值形式,这与破乳强度及水滴沉降特征时间有关。

(2) 脉冲频率不宜太高。对于本实验所用乳化液,当频率高于 15 kHz 后,进一步提高频率对脱水效率的提高不明显。电流增大的速率随频率升高而降低,这与高含水的乳化液情况不同。

(3) 电压对脱水效率的影响关系与频率类似,但电流却完全不同,在脱水区域电流近似与电压的平方成正比。

(4) 脱水效率曲线与含水率相关。在相同的配制条件下,含水率高的乳化液脱水效率更高。

(5) 水滴与裸电极接触后会发生接触带电现象。通过分析液滴运动得到了裸电极影响区域厚度表达式,其中区域厚度与油相粘度成反比,与电压的平方成正比。

本研究可对管道式多相分离器的设计提供一定的指导。

## 参 考 文 献:

- [1] BAI Zhi-shan, WANG Hua-lin, TANG Liang-rui. Review of the dewatering and desalting technologies of crude oil [J]. Chemical Machinery, 2004, 31(6): 384-387.
- [2] WANG Li-yang, WU Ying-xiang, ZHENG Zhi-chu, et al. Oil-water two-phase flow inside T-junction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2): 147-153.
- [3] 刘海飞, 邓晓辉, 罗东红, 等. 柱型旋流器内单相流场压降的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2010, 25(6): 127-132.
- [4] LIU Hai-fei, DENG Xiao-hui, LUO Dong-hong, et al. Experimental study of pressure drop of single phase in cylindrical cyclone[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(6): 127-132.
- [5] SUN D, JONG S C, DUAN X D, et al. Demulsification of water in oil emulsion by wetting coalescence materials in stirred- and packed-columns[J]. Colloids Surf. A, 1999, 150(5): 69-75.
- [6] JOHN S E, MOJTABE G, ADLE O S, et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 84(9): 173-192.
- [7] PETER F, PHILIPP E. Emulsion drops in external flow fields-The role of liquid interfaces[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2007, 12(4): 196-205.
- [8] BAILES P J, LARKAI S K. An experimental investigation into the use of high voltage d.c. fields for liquid phase separation[J]. Trans. I Chem. E, 1981, 59(9): 229-237.
- [9] EOWA J S, MOJTABA G. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85(7): 357-368.
- [10] 陆岗, 蒋楚生. 液膜乳状液电破乳的研究[J]. 膜科学与技术, 1993, 13(2): 40-45.
- [11] LU Gang, JIANG Chu-sheng. Film electrical demulsification of emulsions[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 13(2): 40-45.
- [12] 严忠, 李思芽, 李明玉. 液膜的电破乳[J]. 膜科学与技术, 1992, 12(4): 5-11.
- [13] YAN Zhong, LI Si-ya, LI Min-yu. Film electrical demulsification[J]. Membrane Science and Technology, 1992, 12(4): 5-11.
- [14] 谢琦, 严忠. 脉冲电场破乳条件的研究[J]. 膜科学与技术, 1993, 13(1): 51-55.
- [15] XIE Qi, YAN Zhong. Demulsification conditions of pulsed electric field[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 13(1): 51-55.
- [16] TAYLOR S E. Theory and practice of electrically enhanced phase separation of water-in-oil emulsions[J]. Trans. I Chem. E, 1996, 74 (A): 526-540.
- [17] WILLIMAS T J, BAILEY A G. Changes in the size distribution of a water-in-oil emulsion due to electric field induced coalescence[J]. IEEE Trans. Ind. Appl, 1986, IA-22(3): 536-541.
- [18] 严宗毅. 低雷诺数流理论[M]. 北京:北京大学出版社, 2002.
- [19] YAN Zong-yi. Low Reynolds number hydrodynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 2002.