

高压脉冲静电破乳过程水滴的破碎临界电场参数

孙治谦, 金有海, 王振波

(中国石油大学 化学工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:通过显微试验考察水滴在高压高频脉冲电场作用下的极化变形及失稳破碎过程,研究水滴破碎临界场强、占空比及电场频率的变化规律。结果表明:随占空比的增加,作用于水滴的电场能随之增大,同一脉冲周期内电场施加时间增长,水滴破碎临界场强减小;随电场强度的增加,水滴的极化变形效应愈加明显,水滴的变形弛豫时间缩短,破碎临界占空比减小,临界占空比最小值所对应的电场频率逐渐降低;电场强度一定时,随占空比的增大,水滴的破碎临界频率呈现先增大、后减小的趋势;电场强度、占空比及电场频率三者共同决定了水滴的极化弛豫状态、作用于水滴的电场能以及水滴的振荡频率,其交互作用对水滴的破碎具有重要影响。

关键词:水处理; 脉冲; 静电破乳; 极化; 临界电场参数

中图分类号:TE 642.1 **文献标志码:**A

Critical electric field parameters of water droplet broken-up in high voltage impulse electrostatic demulsification process

SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Zhen-bo

(College of Chemical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on microscopic experiment, the polarization deformation and destabilization process of water droplet under high-voltage and high-frequency electric field were deeply investigated, and the variation characteristics of critical electric field parameters were summarized. The results show that, with duty ratio increasing, electric field energy acting on the droplet and acting time of electric field in a impulse cycle simultaneously increase, and the broken-up critical field intensity decreases. With electric field intensity increasing, the polarization deformation effect of water droplet becomes increasingly important, deformation relaxation time shortens, broken-up critical duty ratio decreases, and the electric field frequency corresponding to the minimum value of critical duty ratio gradually decreases. The critical frequency increases firstly and reduces afterward with the increase of duty ratio in condition of constant electric field intensity. The polarization and relaxation state, electric field energy acting on the droplet and droplet oscillation frequency are dependent on electric field intensity, critical duty ratio and field frequency. The interaction plays an important role in the destabilization behavior of water droplet.

Key words: water treatment; impulse; electrostatic demulsification; polarization; critical electric field parameter

高压静电聚结脱水技术广泛应用于油田地面工程以及石油石化领域原油乳状液的脱水、脱盐处理过程^[1-2]。然而,随着各大油田进入采油中后期,油田采出液的物性日趋复杂,乳状液破乳分离难度大大增加,静电聚结脱水技术面临着日益严峻的挑战^[3-4]。Bailes^[5]提出了脉冲静电聚结技术,对于高压高频脉冲静电聚结过程中水滴的破乳聚并微观机

制,尚未得到深入而全面的分析^[6-11]。水滴在高压脉冲电场作用下的破碎,是静电破乳过程发生的重要现象之一。水滴的聚并破乳、电分散等过程均伴随着水滴破碎、扯裂、油水界面膜破裂等现象的出现^[12-13]。基于此,笔者通过显微试验考察水滴在高压高频脉冲电场作用下的极化变形及失稳破碎过程,在此基础上总结水滴破碎临界场强、占空比及电

场频率的变化规律。

1 试验装置与方法

采用质量分数为 200×10^{-6} 的 OP-10 蒸馏水溶液作为分散相,透光性较好的导热油作为连续相,常温下导热油的密度为 856.0 kg/m^3 ,表观黏度为 $89.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。采用电压、频率和占空比连续可调的高压高频矩形波脉冲脱水电源,其电压幅值调节范围为 $1.2 \sim 7.0 \text{ kV}$,脉冲频率调节范围为 $1.8 \sim 6.3 \text{ kHz}$,占空比调节范围为 $0.1 \sim 0.875$ 。试验单元采用 $85 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 的双绝缘平板电聚结单元,电极材料为铜片,电极形式为平板电极,聚结单元上部不封口,其主体材质和绝缘材料为玻璃,通过调节电压幅值,可改变测试单元内部的电场强度。显微成像系统由凤凰光学集团有限公司生产的 PH50 型数码显微镜、计算机以及 PHMIAS2008 显微图像处理分析软件组成,用以记录试验过程中的图像信息,并通过后处理软件量化试验结果。

微观试验测试装置见图 1。试验前,将导热油置于试验单元内,并通过医用注射器向聚结单元内油相中置入水滴,控制水滴的粒度在 $(550 \pm 20) \mu\text{m}$

内。将试验单元置于 PH50 数码显微镜的载物台上,调好物镜焦距,开启数字摄像头,将其与计算机相连。试验时,控制其他条件不变,缓慢升高所考察的电源参数,直至水滴发生失稳破碎,记录破碎时的各电场参数,同时利用 PHMIAS2008 显微图像处理分析软件观察试验现象、记录试验过程中所需要的视频和图片。试验结束后,利用显微图像处理分析软件进行数据后处理工作。

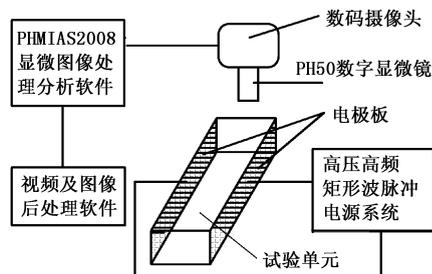


图 1 微观试验测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram experimental set-up of microscopic test

2 试验结果及其讨论

图 2 为高压高频脉冲电场作用下水滴的极化变形及失稳破碎的显微图像。

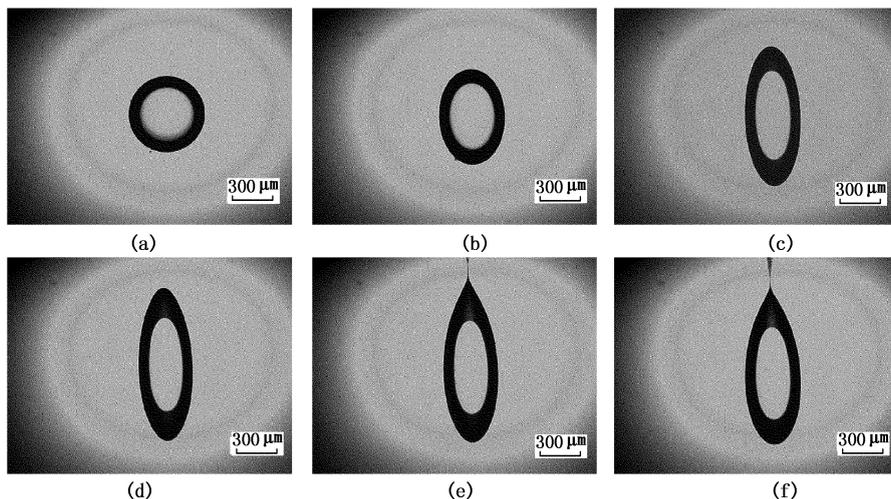


图 2 水滴的极化变形及失稳破碎

Fig. 2 Polarization and destabilization of water droplet

由图 2(a)可知,水滴在没有施加电场的情况下呈球形。由于球形水滴的折射率沿径向有所不同,水滴中间部位透光性强,水滴在光学显微镜下呈现出“环形”,不同的连续相和分散相种类、不同的透光强以及不同的水滴粒度,均会导致水滴透光性质的不同。施加高压高频脉冲电场后,水滴呈椭球形变形,随电场强度的增加,水滴的变形度随之增

大,如图 2(b)~(c)。随着电场强度的进一步增大,椭球形水滴上端的静电拉应力超过油水界面张力所形成的附加压应力,水滴出现尖端破碎现象,自破碎尖端喷射出一连串粒径为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 的微小水滴(图 2(d)~(e))。伴随着微小水滴的喷射,水滴的变形度略有降低,形成“反弹”效应,最终达到平衡状态(图 2(f))。

2.1 水滴破碎临界场强

保持高压高频脉冲电场的频率和占空比不变, 逐渐增大作用于水滴的电场强度, 水滴的变形度将逐渐增加。当水滴出现尖端破碎时, 所对应的电场强度即为水滴破碎临界场强 E_c 。

图3为不同电场频率下水滴破碎临界场强随占空比的变化曲线。由图3可知, 随占空比的增加, 水滴破碎临界场强减小。其原因在于, 占空比增大, 同一脉冲周期内电场施加时间增长, 作用于水滴的电场能随之增大, 水滴的极化变形及破碎趋势愈加明显, 临界电场强度随之降低。低占空比、高频条件下的水滴的破碎临界场强最高。其原因在于, 高频条件下水滴的极化电荷弛豫时间较短, 水滴的振荡变形效应较弱, 且低占空比时作用于水滴的电场能较低, 两因素共同作用下水滴的极化变形效应受到抑制, 水滴破碎所需要的电场强度显著增高。

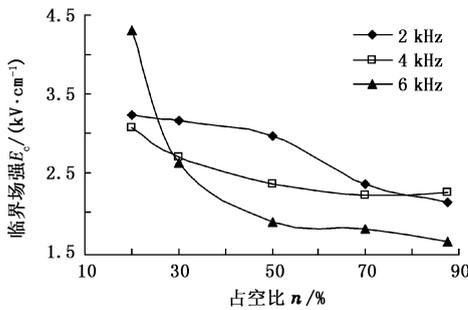


图3 不同频率下临界场强随占空比的变化

Fig.3 Critical field intensity variation with duty ratio in different frequency conditions

不同占空比下水滴破碎临界场强随频率的变化曲线见图4。由图4可知, 随电场频率的增加, 不同

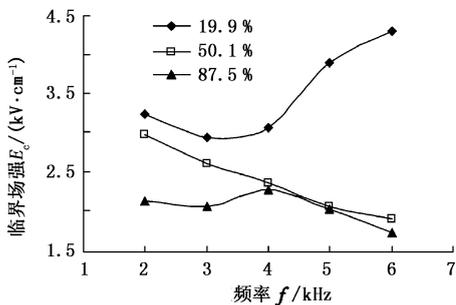


图4 不同占空比下临界场强随频率的变化

Fig.4 Critical field intensity variation with frequency in different duty ratio conditions

占空比条件下, 水滴破碎临界场强呈现出较为复杂的规律。高占空比($n=87.5%$)条件下, 随着频率增加, 临界破碎场强先升高后降低, 当频率为4 kHz时, 临界破碎场强存在最大值; 中等占空比($n=$

50.1%)条件下, 随频率的增大, 临界破碎场强随之减小; 低占空比($n=19.9%$)条件下, 随频率的增大, 临界破碎场强先降低后升高, 当频率为3 kHz时, 临界破碎场强存在最小值。可见, 不同占空比条件下, 电场频率对水滴临界破碎场强的影响十分显著, 占空比和频率间的交互作用不可忽略。

2.2 水滴破碎临界占空比

保持电场强度和电场频率不变, 逐渐升高占空比, 水滴的变形度将逐渐增大。当水滴出现尖端破碎时, 所对应的占空比即为水滴破碎临界占空比 n_c 。图5为不同频率下临界占空比随场强的变化。由图5可知, 随电场强度的增加, 水滴的破碎临界占空比减小。其原因在于, 随着作用于水滴的电场强度的增大, 水滴的极化变形效应愈加明显, 水滴的变形弛豫时间缩短, 故水滴破碎所需的电场导通时间随之减少。当电场强度低于3.22 kV/cm时, 随频率的增大, 临界占空比减小; 当电场强度大于或等于3.2 kV/cm时, 频率为6 kHz时的临界占空比较大, 而频率为2 kHz和4 kHz的临界占空比较小。可见在低场强条件下, 水滴的极化弛豫时间较长, 随频率的增加, 水滴破碎所需的电场能降低, 临界占空比较小; 在高场强条件下, 随频率的增加, 水滴极化电荷的弛豫时间较短, 水滴需要较高的电场能以维持其极化变形, 故其破碎临界占空比较大。

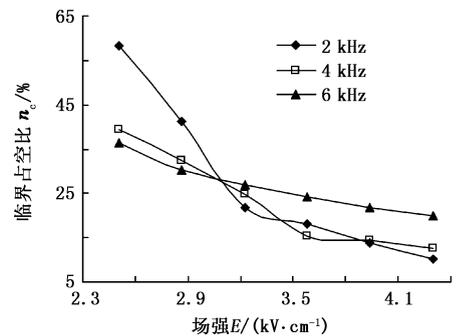


图5 不同频率下临界占空比随场强的变化

Fig.5 Critical duty ratio variation with field intensity in different frequency conditions

图6为不同场强下临界占空比随频率的变化。由图6可知, 随电场强度的增大, 水滴的破碎临界占空比愈小。当作用于水滴的电场强度为2.507 kV/cm时, 随电场频率的增大, 水滴破碎临界占空比降低; 当场强为3.581 kV/cm时, 随频率的增加, 临界占空比先减小、后增大; 当频率为4 kHz时, 临界占空比存在最小值15.4%。当场强为4.298 kV/cm时, 随频率的增大, 临界占空比呈现小幅升高的趋

势。可见,随电场强度的增大,临界占空比最小值所对应的电场频率逐渐降低,这是由极化电荷的弛豫状态、水滴固有频率及脉冲振荡效应所共同决定的。

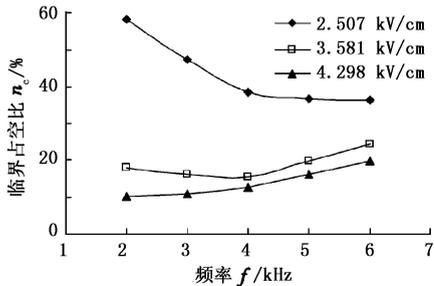


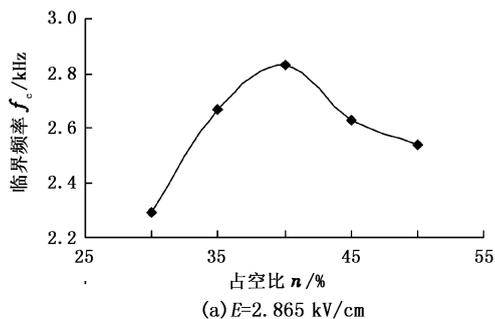
图6 不同场强下临界占空比随频率的变化

Fig.6 Critical duty ratio variation with frequency in different field intensity conditions

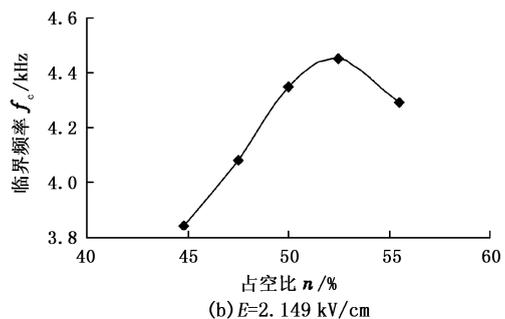
2.3 水滴破碎临界频率

固定电场强度和占空比,由低到高增加电场频率,水滴的变形度将逐渐增大。当水滴出现尖端破碎时,所对应的电场频率即为水滴破碎临界频率 f_c 。图7为不同场强下临界频率随占空比的变化曲线。

由图7(a)可知,当电场强度为2.865 kV/cm



(a) $E=2.865$ kV/cm



(b) $E=2.149$ kV/cm

图7 不同场强下临界频率随占空比的变化曲线

Fig.7 Critical frequency variation with duty ratio in different field intensity conditions

3 结论

(1) 随占空比的增加,作用于水滴的电场能随之增大,同一脉冲周期内电场施加时间增长,水滴破碎临界场强减小,低占空比、高频条件下的水滴的破碎临界场强最高;不同占空比条件下,电场频率对水滴破碎临界场强的影响十分显著,占空比和频率间的交互作用不可忽略。

(2) 随电场强度的增加,水滴的极化变形效应愈加明显,水滴的变形弛豫时间缩短,破碎临界占空比减小;随电场强度的增大,临界占空比最小值所对应的电场频率逐渐降低。

(3) 电场强度一定的条件下,随占空比的增大,

时,随占空比的增大,水滴的破碎临界频率先增大、后减小,当占空比为40%时,存在最大临界频率2.83 kHz。由图7(b)可知,在电场强度为2.149 kV/cm条件下,随占空比的增大,水滴的破碎临界频率也呈现出先增大、后减小的趋势,当占空比为52.5%时,存在最大临界频率4.45 kHz。对比图7可知,电场强度较低时,水滴的极化变形效应减弱,水滴最大临界频率值及其对应的占空比值均有所增大,以保证水滴在足够的电场能作用下发生破碎。此外,低场强条件下,占空比过低和过高时,试验条件下(电场频率1.8~6.3 kHz),水滴均未发生破碎现象;而高场强条件下,临界频率所对应的占空比范围较宽,这是水滴在高场强条件下更易于发生破碎现象的又一例证。

综合水滴破碎临界场强、占空比、频率试验结果可知,高压高频脉冲电场强度、占空比及电场频率三者间相互关联、相互影响,它们共同决定了水滴的极化弛豫状态、作用于水滴的电场能以及水滴的振荡频率,其相互间的交互作用对水滴的破碎行为具有重要影响。

水滴的破碎临界频率呈现出先增大、后减小的趋势;试验范围内场强越高,水滴最大临界频率值及其对应的占空比值均有所增大,且临界频率所对应的占空比范围越宽。

(4) 电场强度、占空比及电场频率三者间相互关联、相互影响,它们共同决定了水滴的极化弛豫状态、作用于水滴的电场能以及水滴的振荡频率,其交互作用直接影响水滴的破碎行为。

参考文献:

- [1] CHRISTINE Noik, CHEN Jia-qing, CHRISTINE Dlmazzone. Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-the-art review[R]. SPE 103808, 2006;1-12.

- [2] 白志山,汪华林,唐良瑞. 原油脱盐脱水技术评述 [J]. 化工机械, 2004,31(6):384-387.
BAI Zhi-shan, WANG Hua-lin, TANG Liang-rui. Review of the dewatering and desalting technologies of crude oil [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2004,31(6):384-387.
- [3] 刘建兴,袁国清. 油田采出水处理技术现状及发展趋势 [J]. 工业用水与废水, 2007,38(5):20-23.
LIU Jian-xing, YUAN Guo-qing. Current status and development trend of oilfield produced water treatment techniques [J]. Industrial Water & Wastewater, 2007,38(5):20-23.
- [4] SUNIL K, SAUDI A. Crude oil emulsions: a state-of-the-art review [R]. SPE 77497,2005:1-9.
- [5] BAILES P J. An experimental investigation into the use of high voltage DC fields for liquid phase separation [J]. Trans I Chem E, 1981,59(A):229-237.
- [6] 张黎明,何利民,马华伟,等. 绝缘紧凑型电破乳器中液滴聚结特性研究 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(6):82-86.
ZHANG Li-ming, HE Li-min, MA Hua-wei, et al. Coalescence characteristics of droplets in insulated compact electric demulsifier [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(6):82-86.
- [7] EOW J S, GHADIRI M. Drop-drop coalescence in an electric field: the effects of applied electric field and electrode geometry [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng 2003,219:253-279.
- [8] 金有海,胡佳宁,孙治谦,等. 高压高频脉冲电脱水性能影响因素的试验研究 [J]. 高校化学工程学报, 2010,24(6):917-922.
JIN You-hai, HU Jia-ning, SUN Zhi-qian, et al. Experimental study of factors acting on the performance of high-voltage and high-frequency pulse electrostatic dewatering process [J]. J Chem Eng of Chinese Univ, 2010,24(6):917-922.
- [9] MELHEIM J A, CHIESA M. Simulation of turbulent electrocoalescence [J]. Chemical Engineering Science, 2006,61:4540-4549.
- [10] 张黎明,张凯,何利民,等. 高压静电聚结器设计、试验及现场应用 [J]. 高电压技术, 2010,36(7):1797-1802.
ZHANG Li-ming, ZHANG Kai, HE Li-min, et al. Design, experiment and practical application of high voltage electrostatic coalescer [J]. High Voltage Engineering, 2010,36(7):1797-1802.
- [11] 何利民,杨东海,罗小明,等. 新型电聚结器结构参数对液滴聚结特性的影响 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011,35(6):105-111.
HE Li-min, YANG Dong-hai, LUO Xiao-ming, et al. Effects of structural parameters of new electrostatic coalescer on coalescence characteristics of water droplet [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(6):105-111.
- [12] EOW J S, GHADIRI M, SHARIF A. Experimental studies of deformation and break-up of aqueous drops in high electric fields [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng, 2003,225:193-210.
- [13] 张军,郑捷庆. 玉米油乳化液电破乳时离散液滴的电聚结和电分散特性 [J]. 农业工程学报, 2010,26(7):374-379.
ZHANG Jun, ZHENG Jie-qing. Investigation on electric agglutination and dispersion characteristics of dispersed droplets for electrical demulsification of corn oil emulsion [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(7):374-379.

(编辑 沈玉英)