

静电聚结效果在线评价实验

杨东海^{1,2}, 孙永祥^{1,2}, 何利民^{1,2}, 罗小明^{1,2}, 鲁晓醒³

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 山东省油气储运安全省级重点实验室, 山东青岛 266580; 3. 中国石油华北油田公司工程技术研究院, 河北任丘 062552)

摘要: 研究在线测量连续流动聚结实验系统, 实现油包水乳状液微观形貌的在线观察和采集, 并利用该系统研究电场参数和流动参数等对油包水乳状液中水滴聚结特性的影响规律。结果表明: 高强度电场在低流量下具有显著作用, 随着流量增加其作用减弱但在高流量下依然使液滴粒径明显增大; 不同波形下, 低频范围内最优频率为 30 Hz, 但是超过 50 Hz 后随频率增加液滴聚结效果提高; 不同波形下, 液滴粒径随电场强度增加而增加, 但最优电场强度不同; 直流脉冲和正弦交流波形的最优场强约为 $200 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 而交流脉冲和方波的最优场强要高于该值; 不同波形下聚结效果不同, 相同电场频率和电场强度下直流脉冲电场中聚结效果最优, 正弦交流、交流脉冲和方波电场中聚结效果稍差。

关键词: 油包水; 电聚结器; 波形; 粒径; 频率

中图分类号: TE 24.1 **文献标志码:** A

引用格式: 杨东海, 孙永祥, 何利民, 等. 静电聚结效果在线评价实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 128-134.

YANG Donghai, SUN Yongxiang, HE Limin, et al. Experimental investigation on electrostatic coalescence effect for online evaluation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(4): 128-134.

Experimental investigation on electrostatic coalescence effect for online evaluation

YANG Donghai^{1,2}, SUN Yongxiang^{1,2}, HE Limin^{1,2}, LUO Xiaoming^{1,2}, LU Xiaoxing³

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, Qingdao 266580, China;
3. CNPC Huabei Oilfield Company Engineering Technology Research Institute, Renqiu 062552, China)

Abstract: The online measurement electrostatic coalescence flow evaluation system was designed, which can be used to observe and collect the micro-morphology of the water in oil emulsion online. We also use this system to study the effect of electric field and flow parameters on the droplet coalescence characteristics of the W/O emulsion. The results show that, the electric field with high strength is effective for the droplet coalescence when the flow rate is low. The effect of the electric field strength decreases when the flow rate increases, but the droplet diameter is still enhanced even if the flow rate is high. For the low frequency range, the optimal frequency is 30 Hz, but the coalescence effect is enhanced with the increase of the frequency when it exceeds 50 Hz under different waveforms. The droplet diameter increases with the increase of the electric field strength, but the optimal value of the electric field strength is different under different waveforms. The optimal value of the electric field strength is $200 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ for the pulsed DC and sine waveform, while those of the pulsed AC and square waveform are higher than $200 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. The coalescence effect is different under different waveforms. It is the pulsed DC electric field that is the best for droplet electrocoalescence, while it is a bit poorer for the sine, pulsed AC and square waveforms.

Keywords: water in oil; electrostatic coalescence; waveform; droplet diameter; frequency

收稿日期: 2017-08-22

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51704318); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEE008); 中央高校基本科研业务费专项(16CX02001A); 中国石油大学科研启动基金项目(Y1715005)

作者简介: 杨东海(1984-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为油水分离。E-mail: yangdonghai12@163.com。

采用静电聚结技术处理油包水乳状液是一种高效、常用的物理分离方法,在石油、化工行业中普遍应用^[1]。Kvaerner Process Systems 公司发明的带有绝缘层的紧凑型静电聚结器(CEC),具有结构紧凑、节能降耗等优点,能够有效防止短路的发生。Urdahl,常俊英等^[2-3]通过静态聚结实验系统对 CEC 的工作特性进行了研究,但在静态条件下进行实验,忽略了流动对油包水乳状液聚结效果的影响规律;而在实际生产中流动状态对聚结效果的影响是不可忽略的。Urdahl 等^[4]研究指出,紊流流动可以增加乳状液中水滴的聚结,且在未稳定(不含表面活性剂)的乳状液中,紊流混合的贡献比在含表面活性剂的乳状液中大。何利民等^[5-7]研究了电场强度、流量和聚结器结构等对液滴聚结效果的影响,但测试液滴粒径时采用的是取样观察,容易造成误差。同时,除了这些参数,波形和频率^[8-9]对液滴聚结效果也有重要影响。Lee 等^[10]发现高压交流电场比高压直流脉冲电场在提高聚结分离效率方面更有效。而 Bailes 等^[8-9]发现直流脉冲电场中的聚结效果要优于直流、三角波和交流电场。Cédric 等^[11]利用流变仪通过黏度的降低评价破乳效果。发现方波的效果好一些,正弦次之,三角波最差。Gunnar 等^[12]通过微观实验研究了正弦、方波和交流脉冲电场作用下烃类液体中水滴的界面流变特性和动态变形行为,方波能更有效地促进静电聚结。Mehdi 等^[13]通过模拟方法研究了方波、正弦波、三角形波、锯齿波和直流脉冲 5 种波形对静电聚结效果的影响规律,发现聚结效果由好到差的顺序为方波、正弦波、直流脉冲、三角形波和锯齿波。Bailes 等^[14]通过实验发现,不同系统的最优频率不同,这与整个分离系统的结构有关。Friedemann 等^[15]对频率可调的聚结系统的研究表明最优频率下聚结效果是工频实验效果的 4 倍。Noik 等^[16-17]发现 1 000 Hz 时效果比较好。由于实验系统和实验介质不尽相同,得到的结果也不一致,同时取样拍照的方法也会影响测量精度,因此有必要对静电聚结系统进行优化设计,实现液滴聚结的在线流动测量和拍照。笔者对在线连续流动聚结实验系统进行设计和加工,研究电场参数、流动参数等对液滴聚结效果的影响规律。

1 实验系统、方法及介质

1.1 实验系统及方法

实验系统的主要设备包括聚结器、乳化系统、微量泵和在线拍照系统等(图 1)。其中聚结器的高压

电极包覆有 5 mm 厚的绝缘层,金属电极直径为 25 mm,绝缘层外径为 35 mm,接地电极内径为 50 mm,电极长度为 145 mm。通常静电聚结器中油包水乳状液的电场停留时间为几十秒,因此本实验设计的电场作用时间为 20 ~ 60 s,可以通过调整微量泵的转速调节流量。

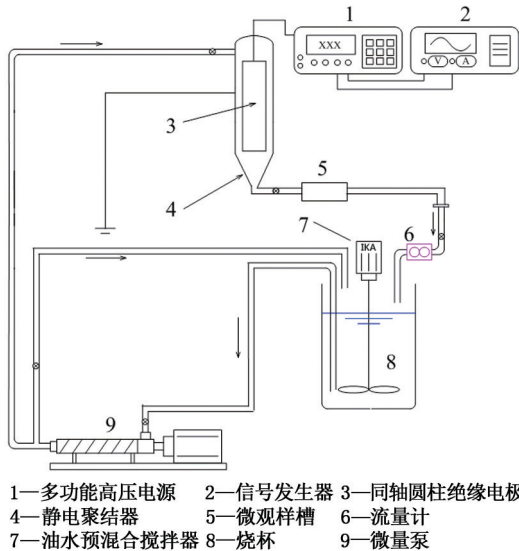


图 1 在线测量连续流动聚结实验系统

Fig. 1 Inline measurement electrostatic coalescence flow evaluation flow loop

乳化系统使用 IKA 的乳化机,转速可调。底部采用桨叶进行搅拌,转速为 700 r/min。为了使液滴粒径满足实验要求,在油相中加入了表面活性剂 Span 80 的质量分数为 $1\,000 \times 10^{-6}$ 。实验过程中为了保证实验结果的准确性,烧杯中的油水乳状液体积恒定,为 1 000 mL。

微量泵是柱塞泵,通过调节转速可以调节流量,同时微量泵设有旁通,保证实验过程中的安全。

在线拍照系统主要包括微观样槽和高速摄像系统。为了保证实验结果的准确性,微观样槽的横截面积(12 mm^2)与管路的横截面积相同,保证乳状液流速一致。

任意波形发生器(北京普源精电,型号 DG1022A)可输出正弦波、方波、直流脉冲及交流脉冲等波形(图 2)。高压电源放大器(美国 Trek,型号 20/20C)实现升压作用。用泰克 TDS1002B-BC 双踪数字示波器可以实时观测并记录电流及电压。

快速评价实验用静电聚结器可以认为是由多层介质组成的同心圆柱电容(图 3),当施加交流电场时,会产生一定的容抗和阻抗。其等效电路图如图 4。

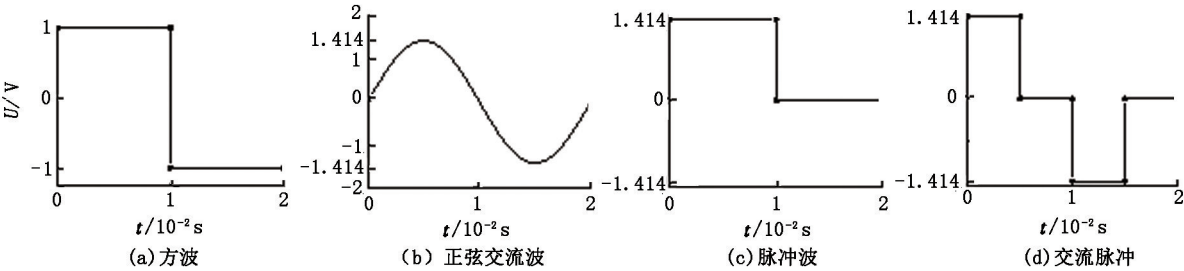


图 2 输出波形

Fig. 2 Output waveforms

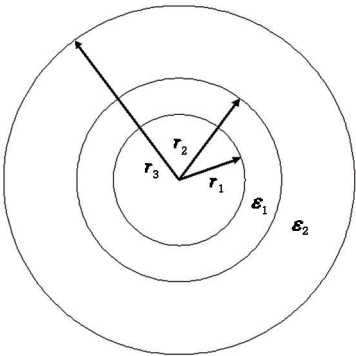


图 3 同心圆柱电容示意图

Fig. 3 Diagram of cylindrical electrostatic capacitance

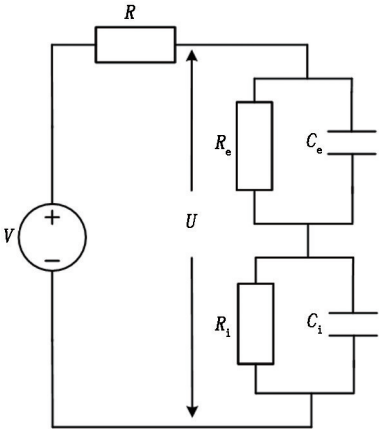


图 4 静电聚结器电路模型

Fig. 4 Circuit model of coalescer

带有夹层同心圆柱体的电容^[5]为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_e} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\epsilon_1 l} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi\epsilon_2 l} = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\epsilon_2} \right). \quad (1)$$

式中, C 为电容, F ; l 为电极长度, m ; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为不同层半径, m ; ϵ 为介电常数, $F \cdot m^{-1}$ 。

第一层介质中不同半径处的场强为

$$E = \frac{U_1}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{U}{r \epsilon_1 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, r_1 < r < r_2. \quad (2)$$

第二层介质中不同半径处的场强为

$$E = \frac{U_2}{r \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{U}{r \epsilon_2 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)}, r_2 < r < r_3. \quad (3)$$

由于电场是非线性变化的,故乳状液中的电场强度取最大值与最小值的平均值进行计算。

1.2 实验介质性质

为了实现在线拍摄,实验介质为葵花籽油与蒸馏水,配制含水率为 10% 的油包水乳状液。为了使液滴维持稳定,在油相中加入了表面活性剂 Span 80。油水界面张力为 27.99 mN/m,实验温度为 20 ℃。黏度采用 Malvern Instruments 公司生产的 Bohlin CVO 流变仪测量。实验介质物性如表 1 所示。

表 1 实验介质物性参数

Table 1 Physical properties of oil and water

介质	电导率/ ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	黏度/ ($mPa \cdot s$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	表面张 力/($mN \cdot$ m^{-1})	介电常 数/ ($F \cdot m^{-1}$)
蒸馏水	1	1.269	1000	72	80
葵花籽油	7.62×10^{-7}	71.38	909.3	24.66	4.9

实验过程中施加电压分别为 2、4 和 6 kV 时,对应的电场强度分别为 75.13、150.256 和 225.39 $kV \cdot m^{-1}$ 。实验介质流量分别为 414、290、200 和 145 $mL \cdot min^{-1}$ 时,在聚结器中的停留时间分别为 21、30、43.5 和 60 s。

2 实验结果及其讨论

停留时间为 60 s 时,不同工况下聚结器出口处液滴图片如图 5 所示。可以发现,随电场强度增加液滴粒径明显增大。图片的分辨率为 1504×1128 ,像素与实际长度间的关系为 $1.4583 \mu m/pixel$ 。

为了评价粒径变化,常用个数平均粒径 d 、面积平均粒径 d_{32} 和体积平均粒径 d_{43} 进行分析:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} d_{43} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3}. \quad (4)$$

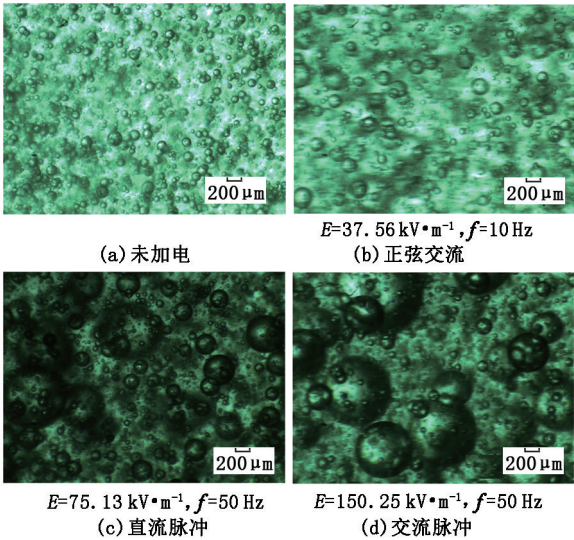


图 5 在线拍摄的显微照片
Fig. 5 Pictures of emulsion

2.1 电场强度影响

实验过程中主要用直流脉冲、正弦交流、交流脉冲和方波等4种波形,以研究电场参数对液滴聚结

的影响(图 6)。

由图 6 可以发现,随电场强度增加,平均粒径 d 缓慢增加,但 d_{32} 和 d_{43} 增加较明显。主要原因在于,通过显微图像(图 5)可知,电场增加后会产生大量的大液滴(图 5(d)),在计算 d_{32} 和 d_{43} 过程中,大液滴对粒径计算贡献较大,因此 d_{32} 和 d_{43} 增加明显。而平均粒径 d 是对所有粒径加权平均,由于粒径个数较多,即使有较多大液滴,但小液滴数量远高于大液滴,因此随着大液滴数量增加,平均粒径增加缓慢,斜率较小。

当电场强度足够高时,液滴粒径随电场强度增加而增加的趋势放缓,甚至有可能因为电场强度超过临界场强而使大液滴发生破裂,导致液滴变小。在几种波形中,对于直流脉冲和正弦交流波形,电场强度到 $200\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 后液滴粒径基本不变,但对交流脉冲和方波波形, $200\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 之后仍增加明显,即直流脉冲和正弦交流波形的临界场强约为 $200\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,而交流脉冲和方波要高于该值。

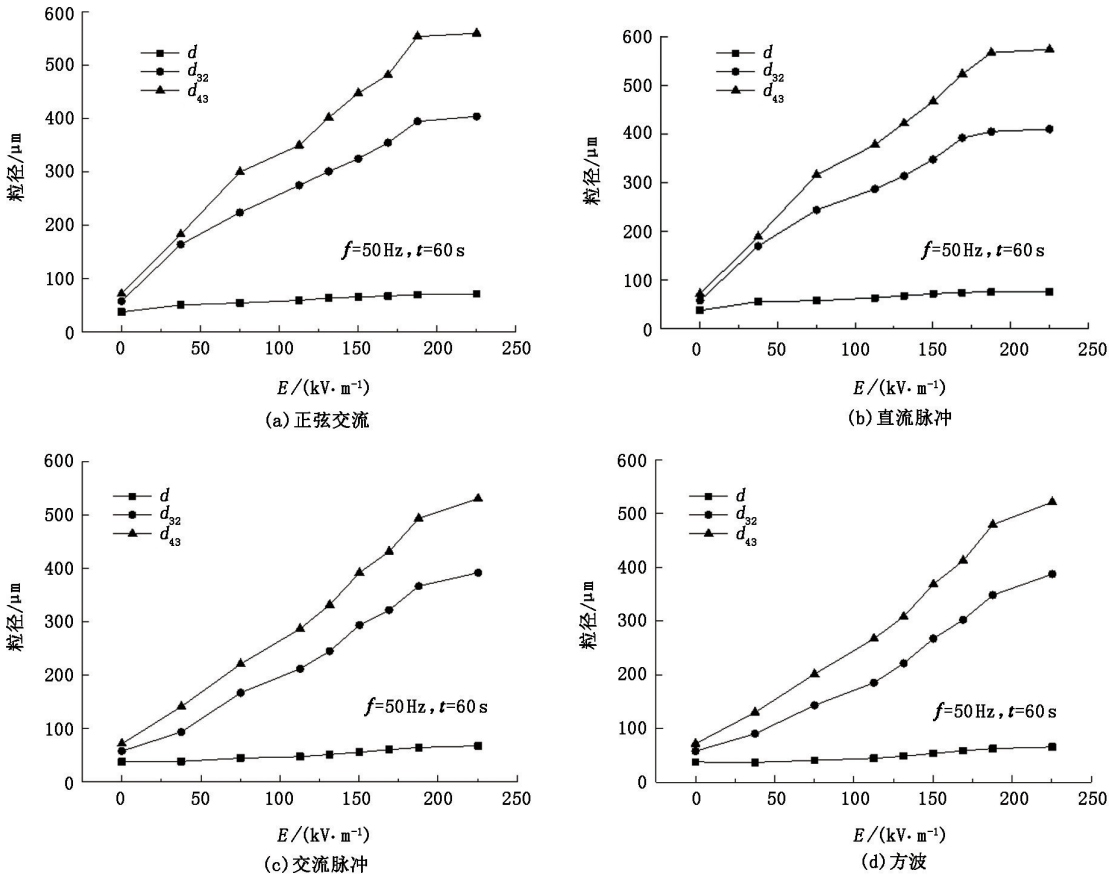


图 6 电场强度对液滴聚结效果影响规律

Fig. 6 Effect of electric field strength on droplet electrostatic coalescence

2.2 频率影响

当停留时间为 60 s 时,不同波形下液滴经过电场作用后的粒径变化如图 7 所示。可以发现,随频率增大液滴粒径并非简单的增加关系,而是在低频时出现了一个局部最优值。几种波形下在 30 Hz 均出现了局部最优值。然后液滴粒径会变小,直到 50 Hz 之后,液滴粒径会随电场的频率增加而增加。这种现象出现的主要原因是含水率为 10% 时,乳状液

的介电常数较小,因此乳状液中的电场强度较大;另外,由于含水率较低,乳状液的黏度也较小,此时带电液滴在乳状液中的偶极聚结和电泳聚结占主导地位。当脉冲频率低于最优频率时,液滴有部分时间是不带电荷的,因此聚结效率不高;当脉冲频率高于最优频率时,根据弛豫时间理论,液滴充放电不够充分,液滴之间的聚结力较小,也会影响聚结效果。因此,会有一个最优的脉冲频率。

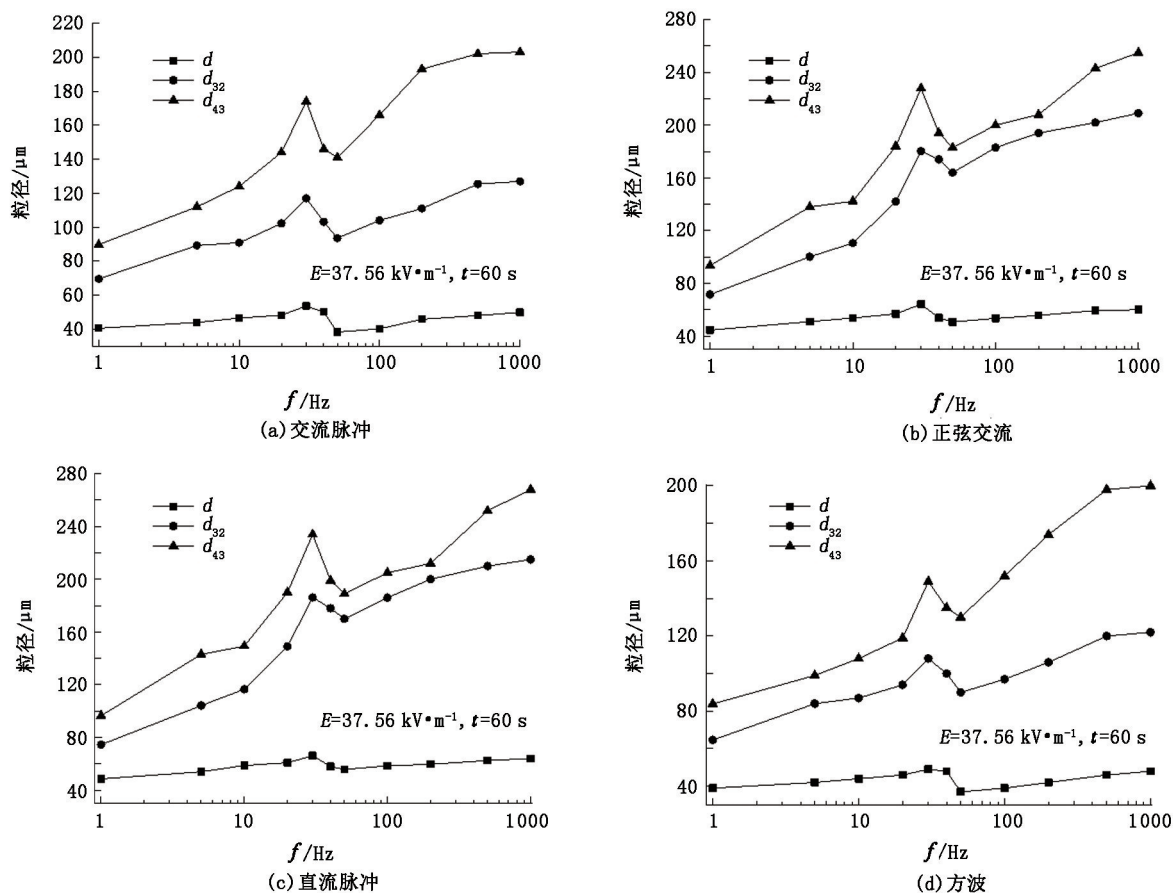


图 7 频率对液滴聚结效果影响规律

Fig. 7 Effect of frequency on droplet electrostatic coalescence

当频率超过 50 Hz 后,继续增大时,液滴平均粒径反而增大。主要原因是,频率增加以后,虽然电压降低、界面积积电荷减小,会降低偶极聚结和电泳聚结;但高频时,水滴间的界面膜会受到频繁的拉伸,液滴内的离子进行频繁的往复运动,这都会促使水滴间发生振荡聚结,使液滴粒径变大。

聚结器内电极半径 $r_1 = 12.5$ mm, W/O 乳状液-绝缘层分界面半径 $r_2 = 17.5$ mm, 接地电极内径 $r_3 = 25$ mm。查得 20 °C 时,绝缘层的相对介电常数 $\varepsilon_1 = 2.4$, 电导率为 $\kappa_1 = 1 \times 10^{-20}$ s/m。20 °C 下 W/O 乳状液的相对介电常数为 6.48, 电导率为 $\kappa_2 = 1.45 \times 10^{-8}$

s/m。

绝缘层电容为

$$C_i = \frac{2\pi\varepsilon_1 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5)$$

绝缘层电阻为

$$R_i = \frac{1}{2\pi\kappa_1} \ln \frac{r_2}{r_1} l \quad (6)$$

根据式(5)、(6)可求得乳状液电容 C_e 和电阻 R_e 。

静电聚结器弛豫时间为

$$\tau_{\text{OFF}} = \frac{(C_i + C_e) R_i R_e}{R_i + R_e} \quad (7)$$

由式(7)可以得到含水率 10% 的弛豫时间为 0.005 63 s。

使用直流脉冲电场时,其频率影响电极的内表面绝缘覆盖层的弛豫时间(Maxwell-Wanger 效应)和最优脉冲频率分别由式(7)和下式得出^[18]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\tau_{OFF}} \tag{8}$$

最优频率为 28.3 Hz,与实验值非常接近。

2.3 流量影响

当流量提高时,油水乳状液在电场中的作用时间会降低。电场强度为 150.25 kV · m⁻¹,频率为 50 Hz 时,聚结效果随停留时间的变化如图 8 所示。可以发现:几种波形下不同流量时,均为直流脉冲较好,正弦交流、交流脉冲和方波效果依次降低。平均粒径均随流量增加(停留时间减小)而减小,且减小幅度随流量降低而提高,特别是停留时间超过 30 s 后,增加更为明显。原因是流量较大时,乳状液在电场中的停留时间变短,使得邻近水滴发生碰撞与聚结的时间很短,因此其影响作用随着流量的增加而降低,即此时流场的影响更大一些。这意味着在较低流速下液滴混合不太激烈,并且碰撞不太频繁,更有助于电场力对液滴施加作用,因此将促进液滴的靠近与聚结,提高液滴聚结效果。如果流量继续增

加,液滴碰撞加剧,运动更加无序,流场和电场将共同影响液滴的聚结,电场力的作用会相应削弱。

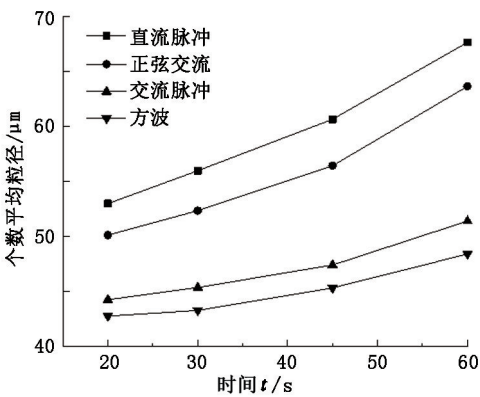


图 8 停留时间对液滴聚结效果影响
Fig. 8 Effect of resident time on droplet electrostatic coalescence

2.4 波形影响

停留时间为 60 s 时,不同电场强度和频率下几种波形的液滴聚结效果如图 9 所示。可以发现,直流脉冲的聚结效果普遍优于其他 3 种波形,而方波和交流脉冲的聚结效果差一些。主要原因在于当几种波形的有效值相同时,方波的实际电压最低,电场强度较低,液滴所受电场力较小,液滴变形较小,伸缩幅度较小,液膜较难破裂发生聚结。而直流脉冲的实际电压最高且高压持续时间较长,因此聚结效果较好。

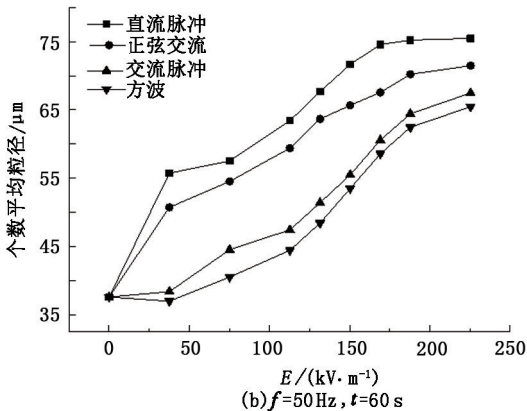
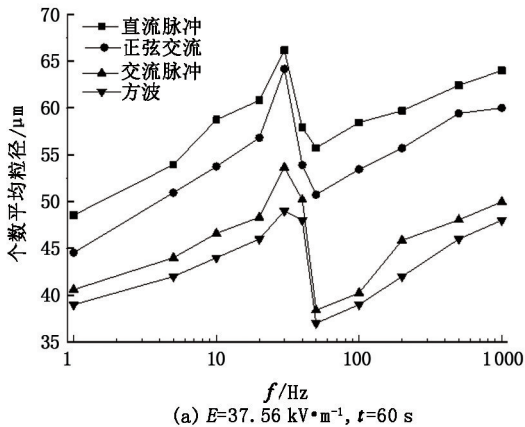


图 9 波形对液滴聚结效果影响

Fig. 9 Effect of waveform on droplet electrostatic coalescence

图 9(a)中几种波形在低频时的最优频率均为 30 Hz,经过局部降低后,当频率高于 50 Hz 时,液滴聚结效果又明显增加。这主要是受实验系统的弛豫时间和高频下液滴的振荡聚结影响。图 9(b)中,随电场强度增加平均粒径增加,但对于直流脉冲和正弦交流电场由于实际电场强度较高,因此在 200 kV · m⁻¹ 时平均粒径趋于稳定,而方波由于实际电场强度较低,

交流脉冲高压持续时间较短,在 200 kV · m⁻¹ 后平均粒径依然增加明显。

3 结 论

(1)搭建的在线测量连续流动聚结实验系统能够在多电场、宽频率下对油包水乳状液照片进行在线采集。

(2)增加电场强度和电场作用时间能促进液滴聚结,但要防止电场强度高导致液滴破碎。

(3)不同波形下低频范围内最优频率为 30 Hz,但超过 50 Hz 后随频率增加,液滴聚结效果提高。直流脉冲和正弦交流波形的最优场强约为 $200 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,而交流脉冲和正弦交流的最优场强要高于该值。

(4)不同波形下聚结效果不同,相同电场频率和电场强度下,直流脉冲电场中聚结效果最优。

参考文献:

- [1] 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(2/3): 357-368.
- [2] URDAHL O, NORDSTAD K, BERRY P, et al. Development of a new, compact electrostatic coalesce concept [R]. SPE 69196, 2001.
- [3] 常俊英,陈家庆,李锐锋,等. 海洋油田原油乳化液高频/高压交流电脱水实验[J]. 石油学报(石油加工), 2012,28(5):844-850.
CHANG Junying, CHEN Jiaqing, LI Ruifeng, et al. Electric dehydration experiment for off shore crude oil emulsion by using high frequency/high voltage AC electric field[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2012,28(5):844-850.
- [4] URDAHL O, WILLIAMS T J, BAILEY A G, et al. Electrostatic destabilization of water-in-oil emulsions under conditions of turbulent flow[J]. Chemical Engineering Research & Design, 1996,74(2):158-165.
- [5] 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 Limin, YANG Donghai, LUO Xiaoming, et al. Effects of structural parameters of new electrostatic coalesce on coalescence characteristics of water droplet [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(6):105-111.
- [6] YANG D H, XU M H, HE L M, et al. The influence and optimization of electrical parameters for enhanced coalescence under pulsed DC electric field in a cylindrical electrostatic coalesce [J]. Chemical Engineering Science, 2015,138(12):71-85.
- [7] 杨东海,何利民,罗小明,等. 新型静电聚结器中水滴聚结特性研究[J]. 高校化学工程学报,2012,26(2): 222-227.
YANG Donghai, HE Limin, LUO Xiaoming, et al. Investigation on coalescence characteristics of water droplets in new type electrostatic coalesce[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012,26(2): 222-227.
- [8] BAILES P J, LARKAI S K L. An experimental investigation into the use of high voltage d. c. fields for liquid phase separation [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1981,59(4):229-237.
- [9] BAILES P J, LARKAI S K L. Liquid phase separation in pulsed d. c. fields[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1982,60(2):115-121.
- [10] LEE C M, GARY W S, WAGNER J P. Power consumption measurements for AC and pulsed DC for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions [J]. Journal of Electrostatics, 2001,53(1):1-24.
- [11] CÉDRIC L, WILHELM R G, LARS E L, et al. Dehydration efficiency of AC electrical fields on water-in-model-oil emulsions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009,352(1/2/3):64-68.
- [12] GUNNAR B, LARS E L, NICOLAS A. Electrically stressed water drops in oil[J]. Chemical Engineering and Processing:Process Intensification, 2010(49):1229-1240.
- [13] MEHDI M, SHAHROKH S, MAHMOUD B. Numerical prediction of the electrical waveform effect on electrocoalescence kinetic[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013(91):904-918.
- [14] BAILES P J, LARKAI S K L. Influence of phase ratio on electrostatic coalescence of water-in-oil dispersions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1984,62(1):33-38.
- [15] FRIEDEMANN J D, NILSEN P J, PIASECKI W. Electrostatic attraction of particles: the implications of field theory on coalesce design[J]. Petroleum Science and Technology, 2004,22(7):1087-1096.
- [16] NOIK C, DALMAZZONE C, GLENAT P, et al. Development of a methodology of the optimization of dehydration of extra heavy oil emulsion [R]. SPE 121669, 2008.
- [17] NOIK C, DALMAZZONE C, GLENAT P. Pre-electrocoalescer unit adapted to the extra-heavy oils characteristics[R]. SPE 117563, 2008.
- [18] EOW J S, GHADIRI M, SHARIF A O, et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding[J]. Chemical Engineering Journal, 2001,84(3):173-192.

(编辑 沈玉英)