

脉冲电场作用下 W/O 乳状液液滴聚结的研究进展

吴云¹, 李欢¹, 黄赛², 李少康¹, 陈凌¹, 欧阳平¹, 任博平¹, 张贤明¹

1. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备工程研究中心, 重庆 400067

2. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067

摘要:目的 液滴聚结是脉冲电场对乳状液破乳脱水的关键一步, 研究脉冲电场中液滴聚结机理、影响因素不清晰的问题, 为后续研究提供指导思路 and 方向。方法 通过全面对比分析脉冲电场中乳状液破乳脱水的相关内容, 归纳总结液滴聚结机理和影响液滴聚结的因素。结果 脉冲电场中液滴的聚结机理主要以偶极聚结、电泳聚结和介电泳聚结为主, 影响液滴聚结的主要因素为电场强度、电场频率和占空比等, 且其均存在最优值, 使得液滴聚结效果达到最佳; 针对不同物性乳液, 在进行电破乳时可对乳状液进行预处理, 以获得更佳的聚结效果, 操作参数和二次液滴的形成对液滴聚结效果的影响不可忽略。结论 采用数值仿真、分子动力学等技术手段对液滴聚结过程进行深入研究, 探索具有普适性的脉冲电场中液滴的聚结机理; 同时结合聚结机理采用新兴技术对二次液滴的形成进行深入的探索 and 拓展。

关键词:脉冲电场; 油包水(W/O)乳状液; 液滴; 聚结; 电破乳

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.006

Research Progress on the Coalescence of W/O Emulsion Droplets under Pulsed Electric Fields

WU Yun¹, LI Huan¹, HUANG Sai², LI Shaokang¹, CHEN Ling¹, OUYANG Ping¹, REN Boping¹, ZHANG Xianming¹

1. Waste Oil Resource Technology and Equipment Engineering Research Center, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract: **Objective** Droplet coalescence is a crucial step in the demulsification and dehydration of emulsions under pulsed electric fields. Due to the unclear mechanisms and influencing factors of droplet coalescence in pulsed electric fields, this study aims to provide guidance and direction for future research. **Method** By comprehensively comparing and analyzing the relevant content of demulsification and dehydration of emulsions under pulsed electric fields, this study summarizes the mechanisms of droplet coalescence and the factors affecting it. **Results** The main mechanisms of droplet coalescence in pulsed electric fields are dipole coalescence, electrophoretic coalescence, and dielectrophoretic coalescence. The primary factors affecting droplet coalescence are electric field strength, electric field frequency, and duty cycle, all of which have optimal values to achieve the best coalescence effect. For emulsions with different physical

收稿日期:2023-03-05 **修回日期:**2023-06-18 **文章编号:**1672-058X(2025)05-0043-11

基金项目:重庆市科委项目(CSTB2023NSCQ-LZX0096, CSTC2021JCYJ-BSHX0194); 重庆市教委项目(KJZD-M202300802, KJCX2020036, KJQN202100820, KJQN202300818); 重庆工商大学科研项目(2056006, 2152016)。

作者简介:吴云(1973—), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 从事油水分离技术研究。

通信作者:李欢(1998—), 男, 重庆万州人, 硕士研究生, 从事油水分离装置等环保设备关键技术方面的研究。Email: lihuan11@ctbu.edu.cn.

引用格式:吴云, 李欢, 黄赛, 等. 脉冲电场作用下 W/O 乳状液液滴聚结的研究进展[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5): 43-53.

WU Yun, LI Huan, HUANG Sai, et al. Research progress on the coalescence of W/O emulsion droplets under pulsed electric fields[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 43-53.

properties, pre-treatment of the emulsion can be performed during electro-demulsification to obtain better coalescence results. The influence of operating parameters and the formation of secondary droplets on the coalescence effect cannot be ignored. **Conclusion** Numerical simulation, molecular dynamics, and other technical means should be used to conduct in-depth studies on the droplet coalescence process and explore the universal mechanisms of droplet coalescence in pulsed electric fields. Meanwhile, emerging technologies should be employed to conduct in-depth and systematic exploration and expansion of the formation of secondary droplets based on the coalescence mechanisms.

Keywords: pulsed electric field; water-in-oil(W/O)emulsion; droplet; coalescence; electric demulsification

1 引言

原油开采及加工、冶金、机械加工、化工制品、煤加工以及食品加工等行业都会有大量水的进入,导致各种油液被水侵入,形成油包水型乳状液(W/O型乳状液)。所产生的这些乳状液中不仅含有大量的表面活性物质^[1],如沥青质、胶质等,而且还含有有机酸、固体颗粒、盐类和碱等杂质,这使得乳状液油水两相界面的形态和结构趋于复杂,W/O型乳状液的状态也愈加稳定,最后导致W/O型乳状液破乳的难度大大增加。

目前,W/O型乳状液进行破乳的方法主要有三类,分别为化学法、生物法和物理法。这些方法中,电场破乳法是通过电流产生的振荡、电磁作用等改变乳状液的性质,使得液滴碰撞,聚结成大液滴,最后实现油水分离^[2]。这种破乳法因无需添加药剂、占地面积小、无副产品产生、清洁无二次污染、周期短、能耗较低等优点,引起了研究者的广泛关注。当前,用于对W/O型乳状液进行破乳分离的电场类型主要为直流、交流和脉冲3种。其中,脉冲电场破乳具有两个明显的优势^[3]:一是脉冲电场破乳所产生的电流较小,不易引起水相的电解,因此可以施加高频高压脉冲电场,从而增强对液滴的极化;二是脉冲电场可有效增加液滴的振荡次数,为液滴创造更多的接触机会,进而获得更好的液滴聚结效果。由于液滴的聚结结果是决定W/O型乳状液破乳效果的关键因素,因此,研究人员通过各种手段在不同场景下对脉冲电场中液滴聚结的过程、效果,特别是机理等方面进行了大量研究。尤其近年来,随着分子动力学、数值仿真技术等研究手段的兴起,对液滴聚结的认识和研究更是达到了新的层次和阶段。基于此,本文针对W/O型乳状液液滴在脉冲电场作用下的聚结研究历程进行了回顾,重点论述了其研究现状;对目前在脉冲电场作用下液滴聚结的机理以及影响液滴聚结的因素进行了归纳和阐述,并对在脉冲电场作用下液滴聚结的未来研究方向以及进一步优化

聚结过程进行了展望。

2 研究历程及发展现状

20世纪80年代,Bailes等^[4]率先利用脉冲电场对W/O型乳状液进行了破乳,并与Lakai共同提出了电介质的驰豫过程决定油相中液滴聚结效果的观点^[5];此后,白希尧等^[6]发现在脉冲电场中液滴聚结的方式主要以偶极聚结、振荡聚结和电泳聚结为主;Taylor等^[7]提出诱导电荷理论,认为液滴在脉冲电场作用下两端产生诱导电荷,并驱使液滴相互吸引发生聚结;Bailes^[8]提出介电松弛理论,认为由于油水两相介电常数不同,在脉冲电场作用下液滴极化强度不同导致液滴发生振荡并接触聚结。这些成果为研究脉冲电场作用下液滴的聚结奠定了理论基础。

基于以上理论,21世纪初,研究人员开始加强对脉冲电场中液滴聚结的研究。Bailes等^[9]研究了在脉冲直流电场中液滴的迁移聚结行为,发现在该过程中,电极附近会发生电泳响应。随后,Eow、朱岳麟等^[10-12]发现脉冲电场中液滴聚结的方式主要以偶极聚结、振荡聚结、水链聚结和强场冲击为主。这些研究成果进一步丰富了脉冲电场中液滴聚结的理论,同时也为后续的研究指明了方向。

自2010年开始,研究重点侧重于电场参数、操作参数、物性参数等对液滴聚结效果的影响。Berg、Mohammadi等^[13-14]认为在高压下,不同波形的脉冲电场均可获得良好的聚结效果;孙治谦、杨东海等^[15-16]认为合理的电场强度可以使液滴的聚结效果更佳,含水率、无机盐浓度、表面活性剂、酸碱性以及流动情况等也会对液滴的聚结效果有影响;龚海峰等^[17-18]发现液滴在变频脉冲电场作用下的聚结效果优于恒频脉冲电场。上述研究结论对液滴聚结过程的优化、提高电破乳效率提供了指导。脉冲电场中液滴聚结的研究发展历程如图1所示。

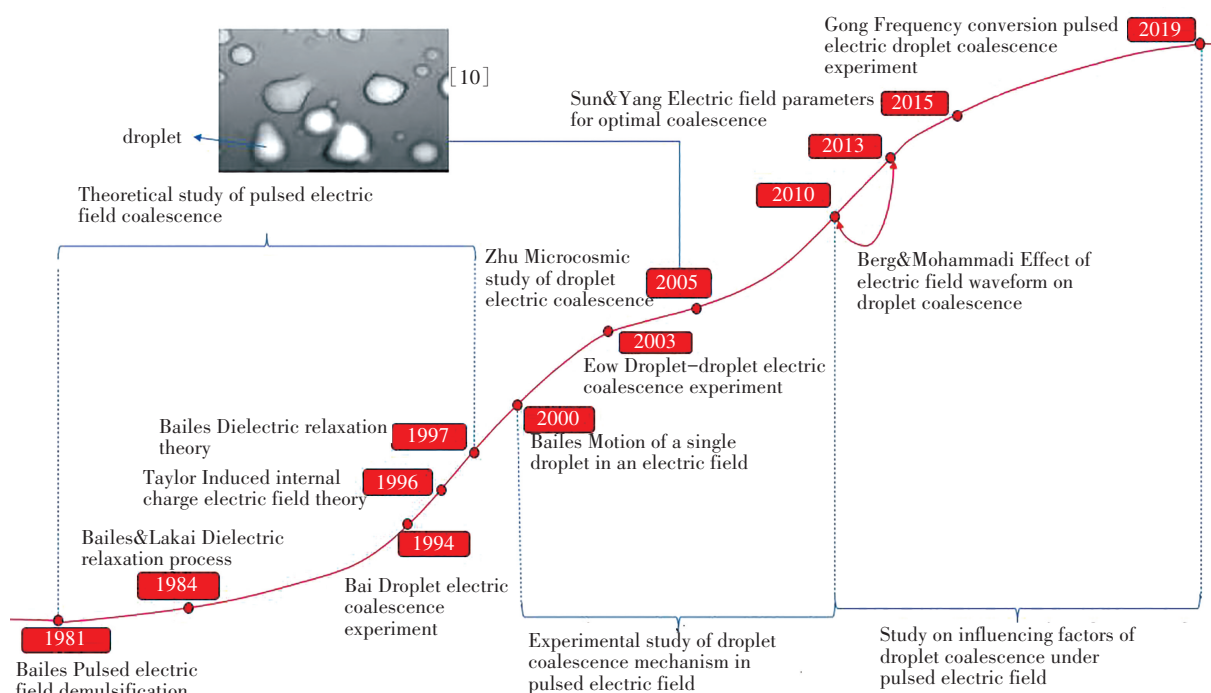


图1 脉冲电场中液滴聚结的研究发展历程

Fig. 1 Research and development of droplet coalescence in pulsed electric field

近年来,针对脉冲电场中的液滴聚结,研究者主要聚焦于对微观聚结过程的研究,包括液滴-液滴聚结、液滴-界面聚结和迁移聚结等。Wang, He 等^[19-20]采用分子动力学技术研究了液滴-液滴聚结行为,发现在方波电场形式下液滴-液滴的聚结效果最佳,同时也对液滴-液滴间的聚结动力学进行研究,发现液滴在电场作用下两个液滴先接近,然后相互接触。由于负曲率的存在,两个液滴合并成一个大液滴,同时在脉冲持续时间内液滴从球形到椭球,而在脉冲间隔内液滴从椭球到球形。Mousavi、李彬等^[21-22]采用显微实验、数值模拟技术对液滴-界面的聚结行为进行研究,发现在锯齿波形脉冲电场中,液滴聚结可有效避免二次液滴的形成,同时还发现完全聚结和部分聚结取决于泵吸和颈吸的相互作用。Vivacqua、杜联盟等^[23-24]通过显微实验研究了液滴群的迁移聚结行为,发现液滴群的聚结形式取决于电场强度、流动参数、含水量、表面活性剂等,这些是影响液滴群迁移聚结效果的重要参数。

综上所述,研究人员对脉冲电场中的液滴聚结研究主要经历了以下3个阶段:1)液滴聚结的理论研究。探究在施加脉冲电场后液滴发生聚结的基本理论,阐明液滴会发生聚结的机理。2)液滴聚结过程中工艺参数的优化选择。电场强度、频率、占空比、含水率等都会对液滴的聚结效果产生影响,只有合理选择工艺参数才可以达到预期的聚结效果,进而大幅度提高电破乳脱水效率。3)液滴聚结过程的微观研究。理想情况下液滴的聚结效果可以为实际工业中液滴

聚结效果的提高提供指导方向,从而提高电破乳脱水效率。其中,对分散相液滴的聚结机理研究是目前研究的关键。

3 分散相液滴在脉冲电场作用下的静电聚结机理

通过对脉冲电场中液滴聚结相关内容的总结、归纳及分析,发现其聚结机理主要分为以下6种。

(1) 偶极聚结^[25]。在脉冲电场中,液滴发生极化变形,液滴两端会产生极化电荷,形成偶极子。两液滴之间,相异偶极子距离较近时,由于偶极聚结力的作用,两液滴不断靠近,最终聚结成一个大液滴。在电场作用下,两近似球形水滴的偶极聚结力可由偶极-诱导-偶极(DID)模型推导得出^[26]:

$$F_{\text{dipole}} = \frac{12\pi\beta^2\epsilon_c E^2 r_1^3 r_2^3}{\delta^4} (3K-1) \quad (1)$$

式(1)中, ϵ_c 和 ϵ_d 分别为油相和分散相的介电常数, E 为施加的电场强度, r_1 和 r_2 分别为两水滴半径, δ 为两水滴间中距, $\beta = \frac{\epsilon_d - \epsilon_c}{\epsilon_d + 2\epsilon_c}$ 为 Clausius - Mossotti 无量纲因子, K 为电聚结系数。脉冲电场中液滴的偶极聚结如图2所示。

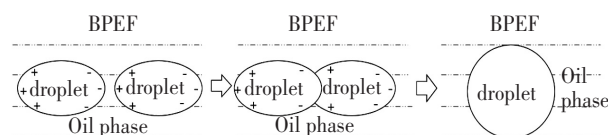


图2 偶极聚结

Fig. 2 Dipole coalescence

(2) 振荡聚结^[25]。在高频高压脉冲电场作用下,一部分带电液滴不能及时转向,由于外加电场周期性的变化,液滴中的正负离子随着电场的变化而周期性地撞击油水界面膜,导致油水界面膜的机械强度降低,最终小液滴聚结为大液滴。脉冲电场中液滴的振荡聚结如图 3 所示。

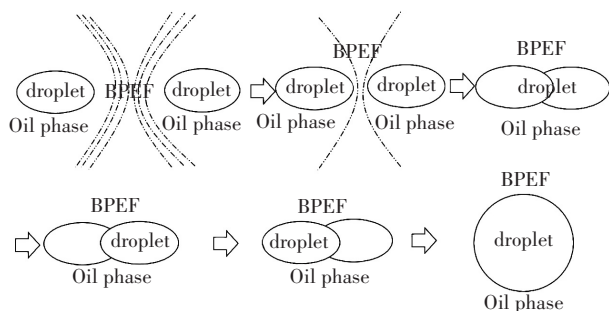


图 3 振荡聚结

Fig. 3 Oscillatory coalescence

(3) 水链聚结^[12]。在脉冲电场作用下,液滴发生极化变形,液滴两端会产生极化电荷,形成偶极子。在电场力的作用下,偶极子会沿着电场方向排列,由于偶极子之间存在电势差,产生静电引力,使得液滴及其周围的液滴之间相互聚结形成水链,即水链聚结。水链聚结有 3 种形式^[16],即水链内部进行聚结,水链吸引周围液滴发生聚结,两个水链之间相互吸引发生聚结。脉冲电场中水链聚结如图 4 所示。

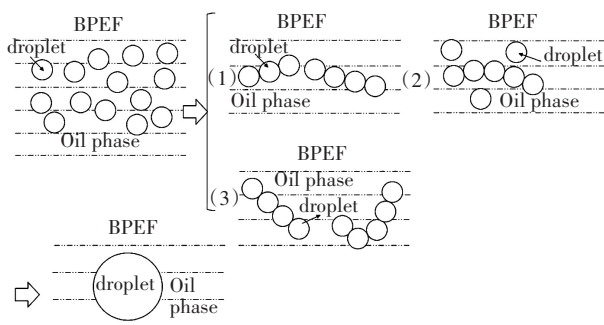


图 4 水链聚结

Fig. 4 Water chain coalescence

(4) 电泳聚结^[27]。在脉冲电场作用下,液滴若带有电荷,则带正电荷的液滴有向负极板迁移,带负电荷的液滴有向正极板迁移的趋势。在带电液滴向电极板方向迁移中会发生碰撞,液滴聚结为大液滴。由于液滴粒径和所带电荷量的不同,导致液滴受到的合力有所差异,液滴的迁移速度存在差异,因此液滴间相互碰撞、聚结形成更大的液滴。液滴在脉冲电场作用下受到的电泳力为^[28]

$$F_{\text{ele}} = q \cdot E = \frac{2}{3} \pi^3 r^2 \epsilon_c E^2 \quad (2)$$

式(2)中, q 为极板带电量, E 为乳状液外加场强, ϵ_c 为油相介电常数, r 为水滴半径。脉冲电场中液滴的电泳聚结如图 5 所示。

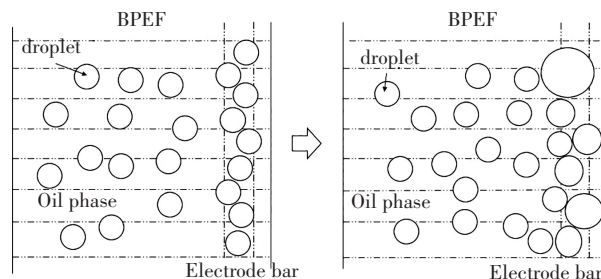


图 5 电泳聚结

Fig. 5 Electrophoretic coalescence

(5) 介电泳聚结^[29]。当液滴处于非均匀脉冲电场中时,极化后的液滴两端所受的电场力不同,液滴受到的电场合力不为零,液滴向电场强度大的方向迁移,在迁移过程中与其他液滴进行碰撞,聚结成为大液滴。在非均匀脉冲电场作用下液滴的介电泳力^[19]为

$$F_{\text{dep}} = \frac{\pi \times d^3 \times \epsilon_c \times (\delta_d - \delta_c) \times E^2}{2 \times (\delta_d + 2\delta_c) \times R \times \ln^2(D_j/D_c)} \quad (3)$$

式(3)中, D_j 为外壳直径, D_c 为反应器直径, ϵ_c 为原油的介电常数, d 为液滴粒径, R 为液滴中心与电极棒的距离。非均匀脉冲电场中液滴的介电泳聚结如图 6 所示。

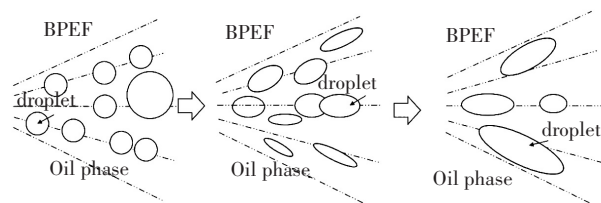


图 6 介电泳聚结

Fig. 6 Dielectrophoresis coalescence

(6) 强场冲击^[6]。在高频高压脉冲电场作用下,连续相液滴极化形成偶极子,由于电场强度可在很短时间内达到较高的峰值,液滴间的吸引力突然变大,加速了液滴间的冲击碰撞,从而增强了液滴的聚结效果。

白希尧、周文俊等^[6,30]通过宏观实验认为在脉冲电场中液滴聚结主要以偶极聚结、振荡聚结和强场冲击共同作用。朱岳麟^[12]通过显微实验认为在脉冲电场作用下液滴聚结主要以偶极聚结、振荡聚结、电泳聚结和强场冲击共同作用。以孙治谦、Vivacqua 等^[15-16,19,21-22,31-32]为代表的研究人员认为在脉冲电场作用下液滴主要以偶极聚结和电泳聚结为主;当乳化液中的含水率较高时,液滴会出现水链聚结;当电场频率较高或电场波形为正弦波时会出现振荡聚结;当电场强度较高时,会出现强场冲击,而当电场为非均匀脉冲电场时,则会出现介电泳聚结。

此外,研究人员还对液滴-界面聚结进行了研究。

以 Hosseini、李彬等^[33,22]为代表的研究人员认为液滴-界面间的聚结方式取决于泵吸和颈缩的相互作用。因此,若想液滴-界面完全聚结则应该最大程度地保证泵吸过程占主导作用。

综上所述,脉冲电场中液滴的聚结方式主要以偶极聚结、电泳聚结和介电泳聚结为主。诚然,不同的电破乳脱水实验条件,液滴的聚结机理也会出现明显差异。在高压脉冲电场中,液滴会通过强场冲击实现液滴聚结;在含水率较高时,液滴易出现水链聚结;当液滴的电场频率较高时,液滴会出现振荡聚结。同时,液滴-界面间的完全聚结对液滴的聚结效果也有影响。因此,为了使得液滴获得较好的聚结效果,对液滴聚结过程中的影响参数选择十分重要。

4 影响分散相液滴在脉冲电场中聚结的因素

液滴聚结的结果对乳状液的破乳效率起着关键作用,获得更佳的聚结效果是广大研究人员一直以来追求的目标。目前,研究人员认为影响液滴聚结效果的因素有很多,主要有4类,分别是电场参数、物性参数、操作参数和二次液滴。

4.1 电场参数

当前,国内外研究人员认为影响液滴聚结的电场参数主要有电场强度、电场频率和占空比。

(1) 电场强度。Mohammadi 等^[14]认为液滴在较高电场强度下的聚结效果较优。魏庆彩^[34]通过数值模拟发现仅当电场强度大于连续相的介质击穿强度时,液滴才会聚结。以孙治谦、刘帆、杨东海、樊玉新、肖雪和金有海等^[15,25,35-41]为代表的研究人员认为在一定范围内增加电场强度,液滴的聚结效果持续增强;当电场强度超过临界电场强度时,乳状液出现电分散现象,阻碍液滴的聚结,液滴聚结效果下降。李彬、杜联盟、周衍涛等^[22,24,42]通过实验也发现这一现象。王冰冰、丁艺、常俊英、杨东海、张驰、王磊、Kang、Li、龚海峰等^[19,43-50]研究人员认为在一定范围内增加电场强度,液滴的聚结效果会持续增强,同时存在最佳电场强度,使得液滴的聚结效果最佳。综上所述,发现在电场破乳过程中施加的电场强度不应过低,以免使液滴不能吸收足够的电场能而发生聚结,同时所施加的电场强度也不应过高,以免乳状液出现电分散现象而抑制液滴的聚结。要想获得最佳的液滴聚结效果,应在反应装置中施加最佳电场强度,最佳电场强度主要与电极的排布形式有关,同时还需考虑电场的能耗问题。

(2) 电场频率。Bailes 等^[5]通过实验发现液滴聚结存在一个最佳频率。以 Zhong、张驰和 Eow 等^[51,46,10]为代表的研究人员认为当电场频率接近液滴的固有

频率时,液滴的聚结效果最佳,最佳频率的大小与连续油相的种类有关。孙治谦、金有海、龚海峰、Li、樊玉新、李彬、杜联盟、周衍涛、韩凤杰和王磊等^[15,22,24,31,35-37,39,41-42,47,49-50,52]认为在未达到最佳电场频率时,液滴的聚结速率持续增大,液滴聚结效果越佳。最佳电场频率和液滴的振动频率相关,当电场频率和液滴振动一致时,聚结效果最佳。杨东海、Vivacqua、丁艺、肖雪、Kang 和常俊英等^[38,23,43,40,48,44]认为在液滴聚结过程中存在最佳电场频率。杨东海认为液滴在高频和低频下均存在一个最佳电场频率,使得液滴的聚结效果最佳。肖雪认为影响液滴的最佳频率主要有两个方面:一是液滴分子受电场力振动强度的影响,二是脉冲电场频率与原油乳液自身频率相近而产生共振的影响。综上所述,电场频率的增加会增加液滴间聚结作用力的作用次数,使得液滴聚结效果更优;在高频和低频均存在一个最佳电场频率,使得液滴的聚结效果最佳。最佳电场频率主要受电场力振动、电场强度、含水率以及乳液的固有频率共同影响,电场强度以及油相的种类均会影响液滴聚结的最佳电场频率,故电场频率是影响液滴聚结效果的重要因素。

(3) 占空比。周衍涛等^[31,42]认为随着占空比的增加,液滴的聚结效果越优。而孙治谦、杨东海、张驰、樊玉新和王磊等^[15,16,37,39,45-47]认为在高频高压脉冲电场作用下,在一定范围内增加占空比,可以促进液滴吸收更多的电场能,使得液滴的聚结效果进一步提高。丁艺、常俊英和孙治谦等^[36,43-44]认为随着占空比的增加,液滴的聚结效果先升高后降低,且存在最佳占空比。杜联盟^[24]通过实验发现在不同流量下,液滴的聚结效果会随着占空比的增加先上升后降低。肖雪^[40]认为占空比过小,液滴不能吸收足够的电场能而发生聚结,聚结效果差;当占空比过大时,液滴受力时间太长,没有足够的时间发生聚结,聚结效果亦差。刘洋^[53]认为在高场强下,占空比对液滴聚结效果没有影响。综上所述,应该施加合适的占空比,占空比过高或者过低都会阻碍液滴的聚结,使得液滴的聚结效果变差。

电场参数对液滴聚结效果的影响是不可忽略的,电场强度、电场频率和占空比对液滴聚结效果是相互影响的。总体而言,对液滴聚结效果影响最大的主要电场参数是电场强度。

4.2 物性参数

乳状液的物性参数是指乳状液自身所包含的物质成分及其性质。目前,研究人员认为对液滴聚结过程有影响的物性参数主要有以下3类,分别是液滴粒径及含水率、乳液粘度和添加剂。

(1) 液滴粒径及含水率。以孙治谦、杨东海、李彬、王磊、樊玉新等^[15-16,22,39,47,54]为代表的研究人员认为随着液滴粒径的增大,液滴间的聚结作用力也会变大,液滴的聚结速率加快,使得液滴聚结效果越佳。孙治谦等^[55]认为液滴粒径过大会使得液滴的临界变形度和临界破碎电场强度降低。乳状液的含水率对液滴聚结也有影响,孙治谦、金有海、胡佳宁和 Shi 等^[41,56-58]学者认为乳状液的含水率过低或者过高都会阻碍液滴的聚结过程。孙治谦、李彬和杜联盟等^[22,24,59-60]认为随着乳状液中水含量的上升,使得液滴的聚结作用力增大,液滴间的碰撞机会增加,液滴的聚结效果越优。综上所述,液滴粒径增大使得液滴聚结效果变优,存在最佳的液滴聚结粒径;同时液滴粒径的增大会促进聚结作用力变大,使得液滴聚结的机会变小,进而降低液滴聚结效果。存在一个最佳的含水率,使得液滴的聚结效果最佳;最佳含水率会随着电场参数的变化而发生变化,电场强度是影响最佳含水率选取的主要因素。

(2) 乳液粘度。樊玉新^[39]认为随着乳状液粘度的增大,液滴间的靠近时间增大,液滴的聚结效果变差。综上所述,乳液粘度的增大会使得液滴的阻力增大,降低液滴靠近的速率,使得液滴难以快速打破油水界面张力,增加液滴靠近的时间,液滴聚结效果变差。故在对高粘度乳状液进行电破乳时,可先对其进行预处理,降低乳状液粘度,以获得更佳的液滴聚结效果。

(3) 添加剂。乳状液的添加剂主要包括酸碱、表面活性剂、无机盐、聚合物和电解质。以孙治谦、王磊等^[15,47]为代表的研究人员认为乳状液的酸性或者碱性较强时,液滴的聚结效果均不佳。杜联盟^[24]认为在一定范围内增加酸的浓度,液滴聚结效果越佳。杜联盟和杨东海等^[24,61]认为在乳状液中加碱会降低液滴的聚结效果。而胡佳宁^[57]认为中性乳状液中的液滴聚结效果最佳。以孙治谦、王磊和周衍涛等^[15,31,47,60]为代表的研究人员认为表面活性剂浓度的上升会增大油水界面的机械强度,使得液滴的聚结效果下降。孙治谦^[60]、杜联盟等^[24]认为应选择亲水性表面活性剂作为乳状液的表面活性剂,其可在一定浓度范围内促进液滴的聚结效果。而杨东海^[61]认为在一定浓度范围内可促进液滴的聚结。以孙治谦、李彬、杜联盟、王磊等^[22,24,47,49,62]为代表的研究人员认为在一定范围内增加无机盐浓度,液滴的聚结效果越优,且存在最佳无机盐浓度。同时,孙治谦^[15]还认为无机盐的价态越高,液滴的迁移速率越快,液滴的聚结效果越佳。高尚^[63]认为当乳状液中含有聚合物时,液滴聚结的速率下降,液滴的聚结效果不佳。周龙大等^[64]通过实验发现在乳状液中加入电

解质会减弱液滴的偶极作用,从而降低液滴的聚结效果。综上所述,乳状液为中性溶液或趋于中性溶液时,液滴的聚结效果最佳。相比于亲油性表面活性剂,亲水性表面活性剂的加入会在一定范围内促进液滴的聚结,使得液滴的聚结效果较佳,存在最佳的亲水性表面活性剂浓度。故在对乳状液进行破乳前,应该先对其进行预处理,再进行电破乳脱水,以此获得最佳的破乳效果。在一定范围内,无机盐的加入会使得液滴的电导率增大,液滴的迁移聚结加快,促进液滴的聚结,进而使得液滴的聚结效果越佳;当无机盐超过一定浓度后,液滴远端的带电量过高,使得液滴发生过度极化现象,液滴不发生聚结。液滴聚结的最佳无机盐浓度与电场参数有关,电场参数越大,最佳无机盐浓度越小,反之,则最佳无机盐浓度越大。

乳状液的物性参数对液滴的聚结影响不可忽略,其中添加剂和乳液粘度对液滴聚结的影响可通过预处理使得液滴获得更佳的聚结效果。应选择高价位的无机盐和最佳的无机盐浓度,应选择适宜的液滴粒径,使得液滴聚结效果更佳。

4.3 操作参数

操作参数是指在实验过程中可人为改变的因素。近年来,研究人员认为影响液滴聚结的操作参数主要有乳化强度及静置时间、电场作用时间、液滴初始操作参数、操作温度和流量及极板结构。

(1) 乳化强度及静置时间。孙治谦等^[15,59]认为乳化强度过低或过高均会使液滴聚结效果不佳。在一定范围内,液滴聚结效果随乳化强度的升高而增强。孙治谦还认为随着静置时间的增加,油水界面的机械强度会增加,在静电聚结过程中会形成中等粒径组成的水链,阻碍液滴的聚结。综上所述,乳化强度较低时,液滴分布范围较大,液滴粒径较大,液滴聚结效果不佳;乳化强度过大时,液滴主要以小颗粒为主,在电场作用下,液滴间的作用力小,液滴的聚结效果亦不佳。故存在最佳乳化强度,乳化强度最佳值与乳状液的物性参数有关。同时,在保证实验正常进行的情况下减少乳状液的静置时间,以此达到最佳的液滴聚结效果。

(2) 电场作用时间。杨东海^[16]认为在一定范围内随着电场作用时间的增加,液滴的聚结效果变优,施加电场的时间过长,液滴的聚结效果变差。综上所述,认为液滴在高场强作用下,电场作用时间越长,液滴会出现电分散现象,降低液滴的聚结效果,从而使得液滴聚结效果变差;液滴在低场强作用下,电场作用时间长短并不影响液滴的聚结效果。

(3) 液滴初始操作参数。以李彬、孙治谦、樊玉新、王磊等^[22,35,39,47,65]为代表的研究人员认为随着液滴初始中心距的增大,液滴的聚结作用力变小,液滴的聚结效果变差。李彬、樊玉新、王磊等^[22,39,47]研究人员认为随着液滴初始夹角的增加,液滴聚结效果变差。樊玉新认为当液滴夹角与电场方向正交时,液滴不发生聚结。综上所述,认为液滴初始中心距增大使得液滴聚结效果变差;同时,液滴初始夹角变大,液滴间的聚结作用力减小,液滴间的聚结机会减少,会降低液滴的聚结效果。故在今后的实验中,应保持一定的液滴初始中心距,液滴的粒径不能过小,同时也需保证液滴的初始夹角与电场方向一致,从而获得最佳的聚结效果。

(4) 流量。以杜联盟、胡佳宁和姜明慧等^[24,57,66]为代表的研究人员认为在保持乳状液成分不变的情况下,在一定范围内增加流量,可显著提升聚结速率,液滴的聚结效果越佳。同时胡佳宁认为,当电场方向和流量方向正交时,液滴聚结效果最佳;同时还认为,电场梯度的存在可以改善液滴受力情况,促进液滴的聚结。孟浩等^[67]考虑了流量和液滴停留时间的关系,认为在满足最短停留时间下,增加流速,液滴聚结效果最佳。周衍涛等^[42]认为当液滴相聚较远时,流量的增加会使得液滴的聚结机会变多,聚结效果越优。综上所述,认为流量的增加在一定范围内可以促进液滴的聚结过程,存在最佳流量使得液滴的聚结效果最佳,最佳流量会随着工艺参数的不同而发生变化。研究者还需注重流场与电场的夹角,合适的夹角可以显著提高液滴的聚结效果。

(5) 操作温度。肖雪、胡佳宁、孙治谦等^[40,57,59]研究人员认为随着操作温度的升高,原油的粘度下降,乳状液内部的摩擦力、剪切力变小,使得乳状液的流动性升高,稳定性降低,进而乳液液滴受到的运动阻力变小,碰撞接触的机会变大,油水界面膜的机械强度降低,液滴聚结的速率增加,聚结效果越佳。综上所述,认为随着操作温度的升高,乳液液滴的聚结效果并非一直持续提高,存在一个临界操作温度。在此操作温度下,乳液液滴的聚结效果最佳,超过临界温度后,乳液液滴聚结效果变差。临界温度还与电场参数和物性参数有关,需要研究者在后期的实验中进一步探索。

(6) 极板结构。孙治谦等^[68]认为保持乳状液在反应装置中停留时间不变,增加极板长度可以提升反应装置内乳状液的湍流程度,进而增加乳状液液滴的静电聚结机会。当极板倾斜放置时,电场梯度的存在改善了分散相液滴的受力状况,液滴的聚结效果越佳。综上所述,认为研究者需要继续研究极板的倾斜角度

对乳液液滴聚结的影响规律,从而找到最佳的极板倾斜角度,使得液滴的聚结效果最佳。

操作参数的选取可以进一步优化液滴的聚结效果,故在进行电破乳脱水实验中应选择合适的操作参数,提高液滴的聚结效果,进而提高电破乳脱水效率。

4.4 二次液滴

除上述影响因素外,二次液滴的形成也会影响液滴的聚结。乳状液在电场作用下,液滴的迁移速率和极化作用均会增大,当电场强度或液滴粒径过大,液滴内部的压力则会促使在液滴表面形成一条液柱,当受到瑞雷波干扰时,液滴随即破碎成一系列微小的二次液滴。液滴的聚结有完全聚结和不完全聚结两种,二次液滴会在不完全聚结中产生,二次液滴的形成会阻碍液滴的聚结,进而降低液滴的聚结效果。Mousavi等^[21]通过实验对比了不同波形脉冲电场对液滴聚结效果的影响,发现锯齿波形的脉冲电场可以减少二次液滴的形成,同时发现在脉冲电场作用下存在一个阈值频率使得液滴完全聚结。而李彬等^[22,54]认为二次液滴的形成除了与电场波形和工艺参数有关外,还和电导率、SiO₂浓度、表面活性剂和液滴粒径等有关。随着电导率的增加,二次液滴的数量会出现先增加后减少的情况,存在临界电导率。SiO₂颗粒的存在会冲击油水界面膜,使得界面膜的机械强度下降,进而使得二次液滴的体积变大;同时二次液滴的数量随着SiO₂颗粒浓度的增加会出现先增加后减少的情况,二次液滴的形成会影响乳液的电破乳脱水效率,其他因素也会增加二次液滴的数量,故需对二次液滴形成的因素继续研究,使乳液液滴得到更好的聚结。

综上所述,在脉冲电场中影响液滴聚结的主要因素有电场参数、操作参数、物性参数和二次液滴。电场强度对液滴的聚结效果起着关键性作用,电场频率、占空比等均存在最佳值,使得液滴的聚结效果最优。乳状液自身的物性条件对液滴的聚结效果不可忽略,故在进行电破乳脱水前应进行预处理,从而获得最佳的聚结效果。操作参数和二次液滴对液滴聚结效果的影响不可忽略,二次液滴的形成会降低液滴的聚结效果,需进一步探究二次液滴形成的原因以及减少二次液滴形成的方法;操作参数可以进一步优化液滴的聚结效果,使得液滴的聚结效果最佳。

5 结束语

脉冲电场中液滴的聚结研究主要经历了理论研究、工艺参数的优化选择和微观研究。液滴聚结的微观研究是未来液滴聚结研究的主要发展方向。工艺参数的优化选择亦可在微观条件下进行探索。

脉冲电场中液滴的聚结机理主要有以下 3 种,分别为偶极聚结、电泳聚结和介电泳聚结。液滴聚结的机理需要进一步探索,可采用数值仿真、分子动力学等技术手段对液滴的聚结过程进行深入研究,探索脉冲电场作用下具有普适性的液滴聚结机理,从而对优化液滴聚结过程提供理论指导,为液滴的更好聚结提供理论突破。

脉冲电场中影响液滴聚结的最主要因素为电场强度、电场频率和占空比等,均存在最佳值使得液滴的聚结效果最优。此外,针对不同物性的乳液,在进行电破乳时可对乳化液进行预处理,以此获得最佳的聚结效果。操作参数和二次液滴的形成对液滴的聚结效果也有较大的影响。影响液滴聚结的操作参数虽多,但均较为分散和趋于表象,需要进一步结合聚结机理进行深入系统的探索和拓展;可采用新兴技术对二次液滴的形成原因进行全面深入探索,从而对如何提高液滴的聚结效果和电破乳脱水效率提供指导。

参考文献(References):

- [1] 冯城,郑焕令,王加宁,等. 原油乳状液稳定性及破乳机理研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4316-4325.
FENG Cheng, ZHENG Huan-ling, WANG Jia-ning, et al. Research progress on stability and demulsification mechanism of crude oil emulsions[J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4316-4325.
- [2] 潘诗浪,张贤明,吴峰平. W/O 乳化液破乳方法及机理研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2010, 27(2): 158-163.
PAN Shi-lang, ZHANG Xian-ming, WU Feng-ping. The study of demulsification in oil-water emulsion[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2010, 27(2): 158-163.
- [3] 刘沙沙,张恒,苑世领,等. 脉冲电场 O/W 乳状液破乳的分子动力学模拟[J]. 高等学校化学学报, 2021, 42(7): 2170-2177.
LIU Sha-sha, ZHANG Heng, YUAN Shi-ling, et al. Molecular dynamics simulation of pulsed electric field O/W emulsion demulsification[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 42(7): 2170-2177.
- [4] BAILES P J, LARKAI S K L. An experimental investigation into the use of high voltage dc fields for liquid phase separation[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1981, 59(4): 229-237.
- [5] BAILES P J, LARKAI S K L. Influence of phase ratio on electrostatic coalescence of water/oil dispersions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1984, 62(1): 33-38.
- [6] 白希尧,熊利民,赵巧玲. 高压脉冲聚结脱水试验[J]. 油田地面工程, 1994, 13(2): 22-24, 76.
BAI Xi-yao, XIONG Li-min, ZHAO Qiao-ling. High pressure pulse coalescence dehydration test[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1994, 13(2): 22-24, 76.
- [7] TAYLOR S E. Theory and practice of electrically enhanced phase separation of water-in-oil emulsions[J]. Institution of Chemical Engineers, 1996, 74(22): 526-540.
- [8] BAILES P J. Pulsed dc fields for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions[J]. Chemical Engineer, 1997, 38(644): 34-39.
- [9] BAILES P J, LEE J G M, PARSONS A R. An experimental investigation into the motion of a single drop in a pulsed dc electric field[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(3): 99-505.
- [10] 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.
- [11] 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: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 219(1-3): 253-279.
- [12] 朱岳麟,黄欣,熊常健,等. 航空油品高频/高压电脱水微观机理[J]. 石油炼制与化工, 2005, 36(4): 19-22.
ZHU Yue-lin, HUANG Xin, XIONG Chang-jian, et al. Micromechanism of crude oil dehydration under high-voltage high-frequency electric field[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2005, 36(4): 19-22.
- [13] BERG G, LUNDGAARD L E, ABI-CHEBEL N. Electrically stressed water drops in oil[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(12): 1229-1240.
- [14] MOHAMMADI M, SHAHHSEINI S, BAYAT M. Numerical prediction of the electrical waveform effect on electrocoalescence kinetic[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(5): 904-918.
- [15] 孙治谦. 电聚结过程液滴聚并及破乳机理研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
SUN Zhi-qian. Research on droplets coalescing and demulsification mechanism during electrocoalescence process[D]. Beijing: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [16] 杨东海. 电场作用下油包水乳状液聚结特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
YANG Dong-hai. Investigation on coalescence characteristics of water in oil emulsion under electric field[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [17] GONG H, YU B, PENG Y, et al. Promoting coalescence of droplets in oil subjected to pulsed electric fields: Changing

- and matching optimal electric field intensity and frequency for demulsification[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2019, 40(9): 1236–1245.
- [18] PENG Y, LIU T, GONG H, et al. Effect of pulsed electric field with variable frequency on coalescence of drops in oil[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(40): 31318–31323.
- [19] WANG B B, WANG X D, WANG T H, et al. Electro-coalescence of two charged droplets under constant and pulsed DC electric fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 98: 10–16.
- [20] HE X, WANG S L, YANG Y R, et al. Electro-coalescence of two charged droplets under pulsed direct current electric fields with various waveforms: A molecular dynamics study[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 312: 113429.
- [21] MOUSAVI S H, GHADIRI M, BUCKLEY M. Electro-coalescence of water drops in oils under pulsatile electric fields[J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 120: 130–142.
- [22] 李彬. 直流脉冲电场作用下的油水乳状液内液滴及液滴群行为研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- LI Bin. Investigation of the behavior of single droplet and multiple droplets in water-in-oil emulsions under pulsatile electric fields[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [23] VIVACQUA V, MHATRE S, GHADIRI M, et al. Electrocoalescence of water drop trains in oil under constant and pulsatile electric fields[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 104: 658–668.
- [24] 杜联盟. 高频脉冲动态电聚结过程液滴群迁移聚并行为研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- DU Lian-meng. Investigation on migration and aggregation behavior of droplet group during dynamic electrocoalescence process of high frequency pulse[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [25] 刘帆. 油田油水乳状液高频电场破乳技术多尺度机理及实验研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2021: 27–36.
- LIU Fan. Multi-scale mechanism and experimental study on high frequency electric field demulsification technology of oil-water emulsion in oilfield[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2021: 27–36.
- [26] NOIK C, CHEN J, DALMAZZONE C. Electrostatic demulsification on crude oil: A state-of-the-art review[C]// *Proceedings of the Proceedings of International Oil & Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers, 2006: 1–12.
- [27] WILLIAMS T J, BAILEY A G. Changes in the size distribution of a water-in-oil emulsion due to electric field induced coalescence[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1986, IA-22(3): 536–541.
- [28] ZHANG X, BASARAN O A, WHAM R M. Theoretical prediction of electric field-enhanced coalescence of spherical drops[J]. *AIChE Journal*, 1995, 41(7): 1629–1639.
- [29] GREEN N G. Dielectrophoresis of sub-micrometre particles[J]. *University of Glasgow*, 1998, 22(3): 44–56.
- [30] 周文俊, 曹顺安, 刘水兵. 高压电脉冲原油脱水试验及机理探讨[J]. *高电压技术*, 1995, 21(2): 24–26.
- ZHOU Wen-jun, CAO Shun'an, LIU Shui-bing. Mechanism of water removal from petroleum by high voltage pulse[J]. *High Voltage Engineering*, 1995, 21(2): 24–26.
- [31] 周衍涛. 蜂窝-悬针电极中液滴及液滴群电聚结行为研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- ZHOU Yantao. Investigation for electrocoalescence behavior of droplets in honeycomb-needle electrode[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [32] 杨东海, 徐明海, 何利民, 等. 油包水乳状液中水滴微观电聚结特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(7): 1348–1352.
- YANG Dong-hai, XU Ming-hai, HE Li-min, et al. Investigation on micro electrostatic coalescence characteristics of water droplets in W/O emulsion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(7): 1348–1352.
- [33] HOSSEINI M. Coalescence behaviour of water droplets in water-oil interface under pulsatile electric fields[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(9): 1147–1153.
- [34] 魏庆彩. 高频脉冲电场作用下液滴动力学研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- WEI Qing-cai. Study on droplet dynamics in high-frequency pulsed electric field[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [35] 孙治谦, 王磊, 金有海, 等. 脉冲电场下W/O乳状液中水滴聚并行为的可视化研究[J]. *石油学报(石油加工)*, 2013, 29(5): 905–910.
- SUN Zhi-qian, WANG Lei, JIN You-hai, et al. Visualization investigation on coalescence behavior of the water droplets in W/O emulsion under pulsed electric field[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2013, 29(5): 905–910.
- [36] 孙治谦, 金有海, 王振波, 等. 高压高频动态电脉冲电场参数对水滴聚并速率的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(4): 823–829.
- SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Zhen-bo, et al. Impact of electric field parameters on water droplets coalescing velocity in dynamic pulse electrocoalescence process[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, 29(4): 823–829.
- [37] 孙治谦, 蒋燕, 刘伯川, 等. 电场参数对高频脉冲水滴电聚结行为的影响[J]. *化学工程*, 2019, 47(8): 11–15.
- SUN Zhi-qian, JIANG Yan, LIU Bo-chuan, et al. Effects of

- electric field parameters on the droplet electrocoalescence behavior at high frequency pulse[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2019, 47(8): 11–15.
- [38] 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 Dong-hai, SUN Yong-xiang, HE Li-min, 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.
- [39] 樊玉新. 基于高频脉冲电脱法的 SAGD 采出稠油深度脱水研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- FAN Yu-xin. Investigation of dehydration of SAGD produced ultra-heavy oil under high-frequency pulsed electric fields[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East Chia), 2018.
- [40] 肖雪. 脉冲破乳实验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- XIAO Xue. Experimental study on pulse demulsification[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [41] 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实验研究[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]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2010, 24(6): 917–922.
- [42] 周衍涛, 范玉玲, 李宁, 等. 高频脉冲动态电聚结显微实验研究[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 39–47.
- ZHOU Yan-tao, FAN Yu-ling, LI Ning, et al. Microscopic experimental study on high frequency pulse dynamic electrocoalescence[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 40(6): 39–47.
- [43] 丁艺, 陈家庆, 常俊英, 等. 高压/高频脉冲交流电场中 W/O 型乳化液的静电聚结特性研究[J]. *高校化学工程学报*, 2011, 25(5): 775–780.
- DING Yi, CHEN Jia-qing, CHANG Jun-ying, et al. Research onto the electrostatic coalescing characteristics of water-in-oil emulsions under high-voltage and high-frequency pulsed alternating current electric field[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2011, 25(5): 775–780.
- [44] 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 Jun-ying, CHEN Jia-qing, LI Rui-feng, et al. Electric dehydration experiment for offshore crude oil emulsions by using high frequency/high voltage AC electric field[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2012, 28(5): 844–850.
- [45] YANG D, XU M, HE L, et al. The influence and optimisation of electrical parameters for enhanced coalescence under pulsed DC electric field in a cylindrical electrostatic coalescer[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 138: 71–85.
- [46] 张驰. 高压电场在润滑油净化中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- ZHANG Chi. Applied research of high voltage electric field in lubricant purification[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [47] 王磊. 重质劣质原油乳状液脉冲静电破乳机理研究[J]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013: 20–43.
- WANG Lei. Research on mechanism of pulse electrostatic demulsification of heavy and inferior crude oil emulsions[J]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013: 20–43.
- [48] KANG W, LI M, YANG H, et al. Coalescence behavior of aqueous drops in water-in-oil emulsions under high-frequency pulsed AC fields[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, 93: 415–422.
- [49] LI B, VIVACQUA V, WANG J, et al. Electrocoalescence of water droplets in sunflower oil using a novel electrode geometry[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 152: 226–241.
- [50] 龚海峰, 杨智君, 彭辉, 等. 高压脉冲电场中乳化油最佳破乳电场参数[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(1): 78–83.
- GONG Hai-feng, YANG Zhi-jun, PENG Ye, et al. Optimal parameters of high pulse electric field in oil demulsion[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, 29(1): 78–83.
- [51] YAN Z, LI S, YU Y, et al. An investigation into the breaking-down of water-in-oil type emulsions by means of pulsed voltage[J]. *Desalination*, 1987, 62: 323–328.
- [52] 韩凤杰. 管道式静电聚结器的研制与聚结特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- HAN Feng-jie. Development of tube type electrostatic coalescer and study on coalescing characteristics [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [53] 刘洋. 不同类型电场下原油乳化液中液滴运动行为与聚结机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022: 27–31.
- LIU Yang. Study on droplet motion behavior and coalescence mechanism in crude oil emulsion under different electric fields[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022: 27–31.
- [54] 李彬, 任瑞娟, 孙治谦, 等. 直流脉冲电场下液滴-界面聚并行为[J]. *化工学报*, 2018, 69(2): 815–822.
- LI Bin, REN Rui-juan, SUN Zhi-qian, et al. Drop-interface electrocoalescence under pulsatile electric fields[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(2): 815–822.

- [55] 孙治谦, 刘伯川, 李宁, 等. 粒径对液滴静电聚结微观特性影响的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(5): 1175-1181.
- SUN Zhi-qian, LIU Bo-chuan, LI Ning, et al. Effects of droplet size on microscopic characteristics of water droplets electrostatic coalescence[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34(5): 1175-1181.
- [56] 孙治谦, 金有海, 王振波, 等. 不同含水率下电场参数对动态脉冲电脱水的影响[J]. 化学工程, 2014, 42(4): 18-22.
- SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Zhen-bo, et al. Impact of electric field parameters on dynamic pulse electric dehydration performance in different water ratio conditions[J]. Chemical Engineering (China), 2014, 42(4): 18-22.
- [57] 胡佳宁. 高压高频脉冲电脱水实验研究及机理分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- HU Jia-ning. Experimental study and mechanism analysis of high voltage high frequency pulse electrostatic dehydrator[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [58] SHI Y, CHEN J, MENG H. Experimental study on the performance of an electric field enhanced separator for crude oil production fluid[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 21(2): 1-10.
- [59] 孙治谦, 周衍涛, 刘伯川, 等. 操作参数对W/O乳状液水滴静电迁移聚并的影响[J]. 过程工程学报, 2019, 19(3): 597-602.
- SUN Zhi-qian, ZHOU Yan-tao, LIU Bo-chuan, et al. Effects of operating parameters on the electrostatic migration and coalescence of water droplets of W/O emulsion[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3): 597-602.
- [60] 孙治谦, 金有海, 王振波. 表面活性剂体系下高频脉冲静电聚结规律[J]. 精细石油化工, 2013, 30(5): 49-53.
- SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Zhen-bo. High frequency pulse electrostatic coalescence in surfactant system [J]. Speciality Petrochemicals, 2013, 30(5): 49-53.
- [61] 杨东海, 徐明海, 何利民, 等. 驱油剂对油包水乳状液静电聚结特性的影响[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(1): 48-55.
- YANG Dong-hai, XU Ming-hai, HE Li-min, et al. Influence of oil displacement agents on electrostatic coalescence characteristics of water/oil emulsion under electric field[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, 30(1): 48-55.
- [62] 孙治谦, 金有海, 王振波, 等. 无机盐浓度和种类对静电破乳的影响[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(5): 755-760.
- SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Zhen-bo, et al. Impact of type and concentration of inorganic salt acting on electrostatic demulsification process[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(5): 755-760.
- [63] 高尚. 含聚合物高凝油高频脉冲电聚结特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021: 61-72.
- GAO Shang. Study on high frequency pulse electric coalescence characteristics of high point oil containing polymer[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021: 61-72.
- [64] 周龙大, 赵立新, 刘琳, 等. 脉冲非均匀电场下水滴运动及碰撞特性研究[J]. 流体机械, 2023, 51(6): 6-12.
- ZHOU Long-da, ZHAO Li-xin, LIU Lin, et al. Study of motion and collision characteristics of water droplets under pulsed non-uniform electric field[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(6): 6-12.
- [65] 孙治谦, 魏露晨, 李宁, 等. 水滴间距对高压高频脉冲静电聚结特性的影响[J]. 化学工程, 2021, 49(4): 40-45.
- SUN Zhi-qian, WEI Lu-chen, LI Ning, et al. Effect of droplet spacing on electrostatic coalescence characteristics of high voltage and high frequency pulse[J]. Chemical Engineering (China), 2021, 49(4): 40-45.
- [66] 姜明慧, 毕雪庆, 郑海霞, 等. 电场流场协同下油包水乳液聚并机制及数值模拟[J]. 山东化工, 2023, 52(23): 24-28.
- JIANG Ming-hui, BI Xue-qing, ZHENG Hai-xia, et al. Mechanism and numerical simulation of water in oil emulsions synergistic electric and fluid fields[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(23): 24-28.
- [67] 孟浩, 张明, 陈家庆, 等. 非均匀高频电场下W/O型乳液动态破乳聚结特性的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(2): 347-357.
- MENG Hao, ZHANG Ming, CHEN Jia-qing, et al. Dynamic demulsification and aggregation of water-in-oil emulsions under non-uniform high-frequency electric field[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2018, 32(2): 347-357.
- [68] 孙治谦, 黄峰, 王振波, 等. 极板结构及布置方式对动态脉冲电脱水的影响[J]. 化工机械, 2013, 40(5): 565-568, 667.
- SUN Zhi-qian, HUANG Feng, WANG Zhen-bo, et al. Impact of plate structure and layout on dynamic pulse electric dehydration performance[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2013, 40(5): 565-568, 667.

责任编辑:李翠薇