

Application of Highly Efficient Adaptive Mini-Swirl Flotation Deoil Technology in Produced Water Treatment of Offshore Heavy Oil-Field

Yaru Wang¹, Dayan Lu², Jinpeng Zhang², Pinyi Dai³, Yiqian Liu³, Qiang Yang^{3*}

¹Qinhuangdao 32-6 Operating Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin

²Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin

³School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai
Email: wangyr12@cnooc.com.cn, *qyang@ecust.edu.cn

Received: Mar. 17th, 2020; accepted: Apr. 20th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

This paper introduces the application of a new compact and highly efficient adaptive mini-swirl flotation deoil (AMFD) technology in the process of produced water treatment in a heavy oil-field in Bohai Sea. Under the conditions of 1500~2500 mg/L oil content of inlet produced water, flow rate of 250 m³/h, pressure of 250 kPa and crude oil density of 0.92~0.96 g/cm³, the average oil content of export is 106.1 mg/L. The processing capacity parameter FA of offshore platform devices is 16.85 m/h. The evaluation parameter FV of occupied space is 5.61. While improving the oil removal efficiency, AMFD separator is 16.7% smaller than the traditional slant plate deoiler. In terms of volume, it is only 50% of the volume of the cyclone deoiler. This technology can adapt to the condition of large flow fluctuation and provides technical support for the produced water expansion and transformation of the existing offshore oil field platform.

Keywords

Produced Water, Adaptive Mini-Swirl Flotation Deoil, Offshore Heavy Oil-Field, Deoiling

*通信作者。

高效自适应微气浮除油技术在海上重质油田生产水处理中的应用

王亚儒¹, 卢大雁², 张金鹏², 代品一³, 刘懿谦³, 杨 强^{3*}

¹中海石油(中国)有限公司秦皇岛32-6作业公司, 天津

²中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津

³华东理工大学机械与动力工程学院, 上海

Email: wangyr12@cnooc.com.cn, *qyang@ecust.edu.cn

收稿日期: 2020年3月17日; 录用日期: 2020年4月20日; 发布日期: 2020年6月15日

摘 要

本研究介绍了一种新型紧凑式高效自适应微气浮除油技术在渤海某重质油田平台生产水处理过程中的应用。该成套技术设备在入口生产水含油1500~2500 mg/L, 流量250 m³/h, 压力250 kPa, 原油密度0.92~0.96 g/cm³的条件下, 出口平均油含量106.1 mg/L; 海上平台设备处理能力及占地空间的综合评价指标FA为16.85 m/h, FV为5.61 h⁻¹, 较传统斜板除油器, 在提升除油效率的同时, 占地面积缩小了61.1%; 在体积上, 仅为旋流除油器体积的50%。该技术可适应较大流量波动及较宽范围油含量的条件, 为现有海上油田平台生产水扩能改造提供了技术支撑。

关键词

生产水, 自适应微气浮, 海上重质油田, 除油

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

渤海油田 1985 年投入开发, 是目前中国海上最大的油田, 也是全国第二大原油生产基地[1]。迄今为止, 渤海油田已经发现了多个亿吨级大油田, 形成四大生产油区和八个生产作业单元, 在生产油田超过 50 个, 拥有各类采油平台 100 余座。经过三十五年的开发, 渤海油田已经进入高含水期, 部分油田采出液中含水量超过 90% [2] [3], 多数平台拟对生产水系统扩能进而提升原油产量。

由于我国渤海油田大多为稠油油田, 因此现有的生产水中含有以石油类为主的种类复杂的有机物, 以及胶质悬浮物、大颗粒物[4]等, 处理较为困难。目前处理流程大致分为四段: 预处理、达标除油处理、深度净化处理和回注, 对应技术设备分别为三相分离器、斜板除油器、气浮除油器以及核桃壳过滤器[5]。

近年来随着研究人员对旋流场的理解逐渐深入, 发现旋流场可以应用于分散相的分选及排序, 并进一步协助提高分离性能[6]。将旋流离心场与不同形式的电场相结合, 使得旋流器对油水混合物的分离进一步强化, 广泛应用于油水两相分离[7] [8] [9]; 通过引入弱旋流场和气浮技术融合在一台设备中, 形成

了气浮旋流一体化设备(CFU)新型气浮工艺[10]。CFU 实现了气浮和旋流分离技术的优势互补,进一步降低油滴直径去除下限,提高油水分离效率,已经在海上平台获得广泛的工业化应用,并取得了良好的效果[11]。由于生产水中油滴密度大、粘度大,为了满足进气浮处理的要求,保证油含量和悬浮物浓度,一般选用斜板除油器作为气浮除油器的预处理设施。但斜板除油器存在体积大、除油效率低的问题,限制了旧平台水系统的扩能提产,而对于新平台来说存在综合造价高的问题。

本工作介绍了一种新式高效自适应微气浮除油技术(Adaptive Mini-swirl Flotation Deoil, 简称 AMFD)在渤海某重质油田平台生产水扩能改造中的应用。研究了进口流量、压力、含油量,以及清水剂的使用量对该技术处理效果的影响,并讨论了海上平台核心指标处理量及占地空间的综合评价指标 FA、FV [12]与传统斜板除油技术的比较。

2. AMFD 技术简介

在海上重质油田,由于生产水中油滴密度大、粘度大以及生产水来液波动,旋流分离器不适用,因此一般选用斜板除油器作为紧凑气浮除油器(CFU)的预处理技术,其除油原理源于 Boycott 效应[13],即在倾斜通道中,可以增大颗粒的沉降面积,减少沉降距离,明显地促进矿粒在悬浮液中的沉降,从而增大处理量。设计方法多采用多组斜板平行放置的 TPI 形式[14] [15],设计指标一般要求从进口 2000 mg/L 降低到 300 mg/L 以内,静止分离时间一般为 10~15 分钟,占地面积大。华东理工大学杨强教授团队利用生产水中存在的溶解气降压时可产生微米级气泡,将旋流、气浮有机结合在一起,研发了 AMFD 技术,原理如图 1(a)所示。

AMFD 基于粒径分级分离,分为主分离腔及副分离腔两部分。油水气从主分离腔的底部进入分离器内部,在旋转叶片作用下,形成旋转流运动,大粒径气泡、油滴在旋流作用下被快速分离,从主分离腔的上部排出;而未分离的小粒径油滴及气泡进入旋转半径较小的副分离腔,在较大离心力作用下实现快速分离。当所处流场较低时,主分离腔旋转流速较小,只起到分配作用,副分离腔起到主要分离作用,因此可适应较大的流量波动范围,从而保证了 AMFD 分离器对大粒径和小粒径的气泡、油滴均具有较高的分离效率以及对入口工况变化的适应性。AMFD 与水力旋流器类似,通过多芯管并联形式实现较大的处理量,如图 1(b),具有在入口流量波动大、油含量范围宽的条件下保持高效的除油性能的优势。

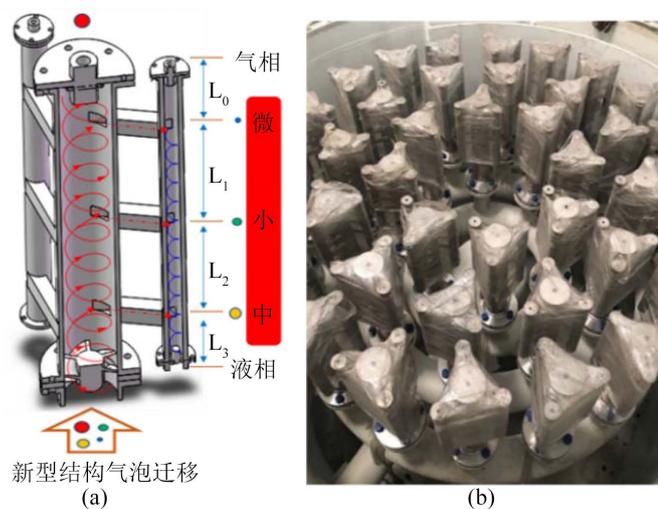


Figure 1. AMFD. (a) Structural schematic diagram; (b) Multi-tube integrated device diagram

图 1. AMFD。(a) 结构原理图; (b) 多管集成设备图

3. AMFD 应用效果

渤海某油田平台为中心处理平台，新旧共两套水处理系统，可处理生产水总量为 54,000 m³/d。采出液原油密度 0.92~0.96 g/cm³，含烃、苯、醚、酮、醛等百余种有机物，大量的颗粒悬浮物以及气泡。其中，旧系统应用斜板除油器技术，生产水处理量 36,000 m³/d；新系统采用了 AMFD 技术，生产水处理量 18,000 m³/d，处理流程如图 2 所示。含油污水从 AMFD 分离器进口进入，经 AMFD 内件分离后，油相从顶部油包排出；水相从底部排出进入下一级分离。

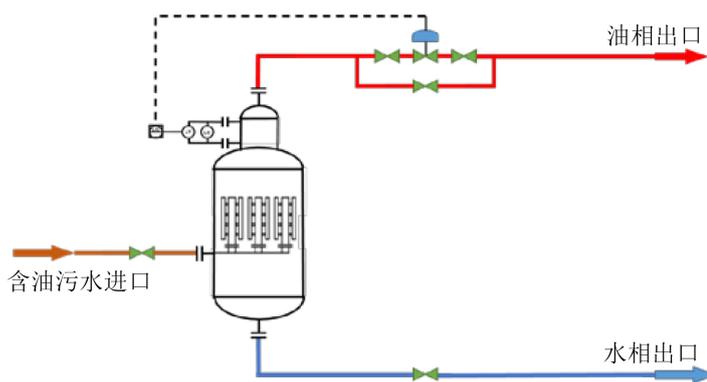


Figure 2. AMFD water treatment process

图 2. AMFD 水处理流程

3.1. 进口流量对处理效果的影响

AMFD 分离器设计处理流量为 250 m³/h，为验证设备的操作弹性，研究了在相同压力下，不同流量对分离效率的影响。流量与分离效率关系曲线如图 3 所示。

由图可以看出，当流量在 80~280 m³/h 波动范围内，设备平均分离效率为 90.2%，且分离效率稳定在 87.0% 以上。当处理流量发生变化时，不仅停留时间改变，设备内部流场以及流体流态也在变化。其中，当流量为 200~260 m³/h 时，设备内部流场以及流体流态达到实验压力下的较佳状态，此时，设备分离效率最高可达到 96.1%。因此，AMFD 分离器在设计处理范围内，该技术能有效对平台含油生产水进行处理。

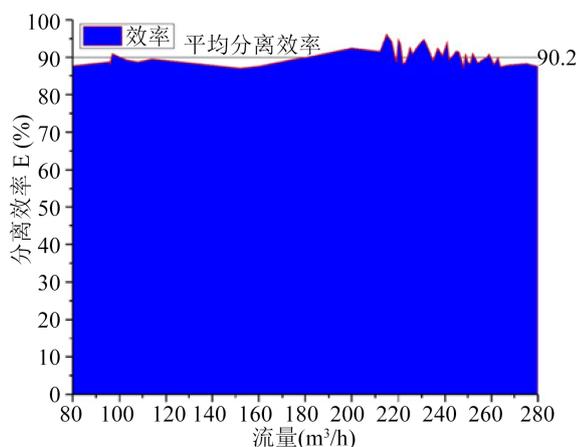


Figure 3. Area chart: AMFD separation efficiency at different flow rates

图 3. 不同流量下 AMFD 分离效率面积图

3.2. 进口油含量对处理效果的影响

在进口流量为 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 研究了进口油含量对处理效果的影响, 如图 4 所示。

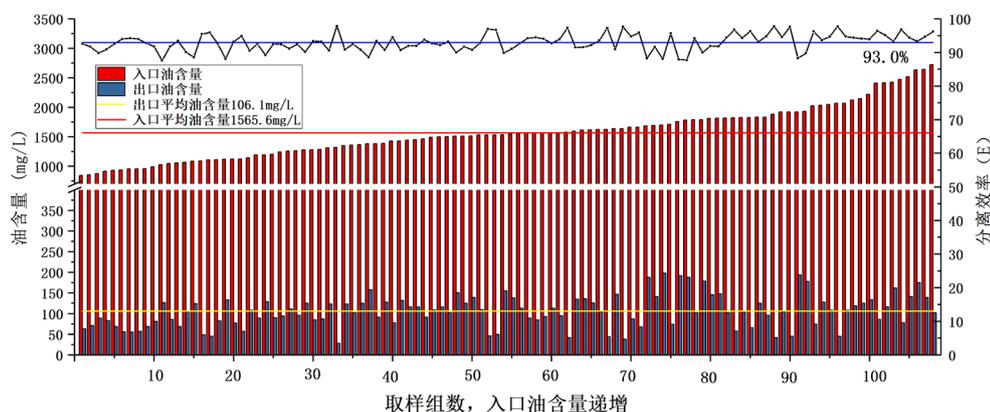


Figure 4. Effect of inlet oil content on separation efficiency

图 4. 进口油含量对分离效率的影响

进口生产水油含量从 800 mg/L 逐渐提升至 2700 mg/L , 出口油含量随之由 70 mg/L 逐渐缓慢增长至 160 mg/L , 平均进口油含量 1565.6 mg/L , 平均出口油含量 106.1 mg/L 。测试中, 出口最低油含量 28 mg/L , 出口最高油含量 224 mg/L , 平均分离效率 93.0% 。

AMFD 技术主要针对悬浮态、分散态和粒径在 $3 \mu\text{m}$ 以上的乳化态油滴的去除, 在分离精度上无法对粒径小于 $3 \mu\text{m}$ 的油滴进行高效分离。随着油含量的升高, 更多的油是以前者存在, 因此, 出口油含量虽然随着进口油含量增加而有所增加, 但分离效率却在稳步增长, 当进口油含量增长到 2000 mg/L 以上, 分离效率能够稳定在 95% 以上。

3.3. 进口压力对处理效果的影响

AMFD 分离器设备进口压力决定了生产分离器与 AMFD 设备之间的差压, 进而影响了生产水进入 AMFD 设备的气体的体积流量及气泡尺寸, 因此 AMFD 分离器设备进口压力波动对分离性能影响较大。生产分离器与 AMFD 分离器不同差压下的分离效率曲线参见图 5。

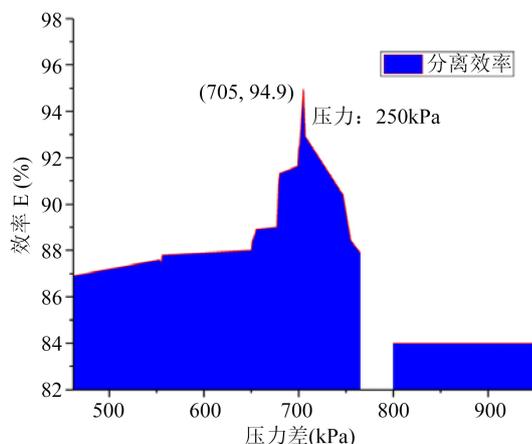


Figure 5. Curve: separation efficiency under different pressure difference

图 5. 不同压差下分离效率曲线图

依图可知,生产水分离器与 AMFD 分离器实验压力差在 450 kPa~765 kPa 分布。随着 AMFD 分离器进口压力的降低,压差逐渐升高,分离效率先增加后降低。当压力差较低时,进入 AMFD 分离器气体量较少,且未分离的气体以微小气泡形式存在流体中,黏附并夹带大量油滴从水相出口外排,导致分离效率降低。当压力差较大时,进入 AMFD 分离器气体量增加,大量气体无法及时外排,导致分离效率下降。当压力差超过 760 kPa 时,进入 AMFD 分离器气体量过大超过设计排放流量。当压力差为 705 kPa 时,进入 AMFD 分离器气体量刚好全部被排出,因此设备分离效率最高,为 94.9%。表明此状态下 AMFD 分离器对生产水处理效果最佳。由此得出,与上游压差产生的闪蒸气量是影响 AMFD 分离器的关键参数,设备与上游生产分离器最佳差压为 705 kPa。

3.4. 进口增加清水剂对处理效果的影响

药剂在海上平台生产水处理中起到重要的作用,清水剂尤为关键[16]。清水剂分散在水中,中和微小的原油粒子和固体悬浮物的表面电荷,使其利用粒子和粒子之间的范德华吸引力而凝结,小油滴凝结成大油滴,并在重力的作用下上浮,以达到除油的效果。为探究清水剂对 AMFD 技术处理效果的影响,在设备进料管线增设清水剂加药点,保证设备加药前后进液一致、操作参数一致,对比分析增加清水剂前后设备分离效率。

研究结果如图 6(a)中所示,加入清水剂前,AMFD 分离器仅依靠物理内件对油水两相进行分离,分离效率约 87%~90%。加入清水剂后,促进了悬浮物和油滴的絮凝、沉降,因此增加了 AMFD 的分离效率,平均分离效率增加了 3.5%,达到 90%以上。此外,设备在运行过程中,采出液成分、气含量实时波动,如图 5 中所述影响设备的分离效率,因此,图 6(a)中分离效率曲线存在一定的波动。

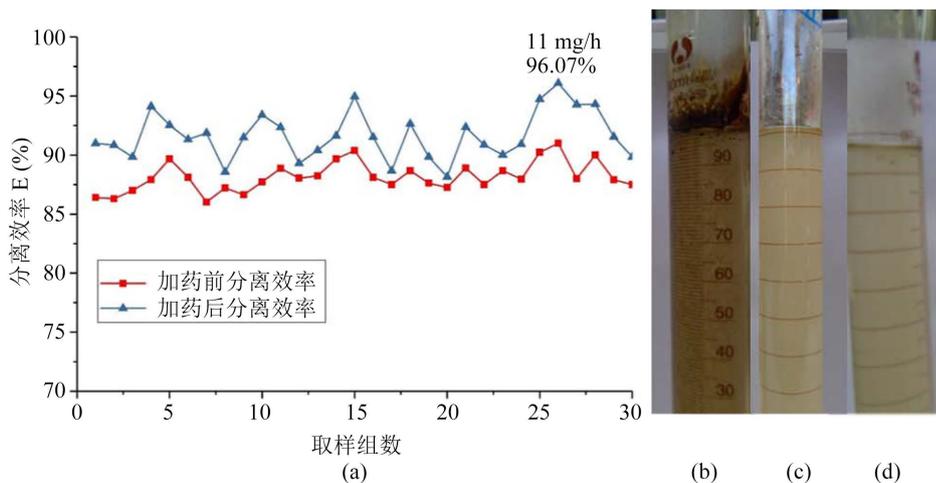


Figure 6. (a) Curve: comparison of separation efficiency before and after dosing; (b) Inlet water sample; (c) Outlet water sample before dosing; (d) Outlet water sample after dosing

图 6. (a) 加药前后分离效率对比曲线; (b) 进口水样; (c) 加药前出口水样; (d) 加药后出口水样

如图 6(b)所示,设备进口生产水油含油 2000 mg/L,外观浑浊,表面有大量浮油;在加清水剂前,设备出口水样颜色浑浊发黄,表面有微量浮油,油含量约为 200 mg/L,取样发现,设备出口水样较加药前更为澄清,表面几乎无浮油,油含量在 150 mg/L 以下。

因此,增加清水剂对 AMFD 技术起正作用,在测试 250 m³/h 流量下,清水剂 BHQ-133 用量控制在 11 mg/L,设备分离效果最佳,为 96.07%。

3.5. 设备处理量及占地空间的综合评价指标

设备处理量及占地空间的综合评价指标能反应生产水处理设备的紧凑高效性，是海上平台关键参数之一[12]。数值越大说明在相同处理规模下设备占地越小，具体计算方法如下：

面积评价参数 FA 及体积评价参数 FV 计算公式如(1) (2)所示：

$$FA = Q_{ave}/A \quad (1)$$

$$FV = Q_{ave}/V \quad (2)$$

Q_{ave} 代表平均流量，A 代表设备撬体面积，V 代表设备撬体体积。

Table 1. Equipment performance comparison data of 12,000 m³/d processing flow
表 1. 12,000 m³/d 处理流量下设备性能对比数据

设备名称	撬块尺寸	设备干重	综合评价指标 FA	综合评价指标 FV
斜板除油器	14.7 m × 5.2 m × 7.1 m	48,000 Kg	6.54 m/h	0.92 h ⁻¹
旋流除油器	9.5 m × 3.3 m × 5.0 m	24,200 Kg	15.95 m/h	3.19 h ⁻¹
AMFD 分离器	9.0 m × 3.3 m × 3 m	14,000 Kg	16.85 m/h	5.61 h ⁻¹

按照计算数据所得见表 1，AMFD 分离器面积评价参数 FA 是斜板除油器的 2.58 倍，旋流除油器的 1.06 倍；AMFD 分离器体积评价参数 FV 是斜板除油器的 6.10 倍，旋流除油器的 1.68 倍。在同等处理流量下，AMFD 分离器比斜板除油器和旋流除油器可提升分离效率约 10%~12%。

若将 AMFD 分离器独立成撬，12,000 m³/d 处理流量下设备尺为 3 m × 3.3 m × 9 m，则 AMFD 分离器占地面积评价指标 FA 为 50.51 m/h。适用于平台狭小空间内现有生产水处理系统的扩能改造。

4. 结论

本文总结了 AMFD 技术在渤海某重质油田平台生产水处理过程中的应用。根据现场实际运行情况，该技术对处理流量、进口油含量有较强的自适应能力。且 AMFD 分离器进口压力是影响该技术的关键参数，在压力 250 kPa，清水剂 BHQ-133 用量 11 mg/L 条件下，除油效率最高，达 95% 以上。

与此同时，该技术的占地空间的综合评价指标 FA 是斜板除油器的 2.58 倍，FV 是斜板除油器的 6.10 倍。较水力旋流器固定操作参数区间扩大了 1 倍，可有效替代现有斜板除油设施，为海上油田扩能改造，或者新建高效海油处理平台提供了一种新颖可靠的技术途径。

基金项目

国家重点研发项目(2019YFA0705800)、国家自然科学基金(51678238、51722806)。

参考文献

- [1] 梅文博. 大位移井技术在渤海油田的应用及发展探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 39(10): 221-222.
- [2] McCormack, P., Jones, P., Hetheridge, M.J., et al. (2001) Analysis of Oilfield Produced Waters and Production Chemicals by Electrospray Ionisation Multi-Stage Mass Spectrometry (ESI-MSⁿ). *Water Research*, **35**, 3567-3578. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00070-7)
- [3] Nasiri, M. and Jafari, I. (2017) Produced Water from Oil-Gas Plants: A Short Review on Challenges and Opportunities. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, **61**, 37-81.
- [4] Ottaviano, J.G., Cai, J. and Murphy, R.S. (2014) Assessing the Decontamination Efficiency of a Three-Component Flocculating System in the Treatment of Oilfield-Produced Water. *Water Research*, **52**, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.004>

- [5] 余焱冰, 高建崇, 孟祥海, 等. SZ36-1 油田注入水与储层配伍性实验研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(10): 68-71.
- [6] Wang, H.L., Zhang, Y.H., Wang, J.G., *et al.* (2012) Cyclonic Separation Technology: Researches and Developments. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **20**, 212-219. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60381-4](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60381-4)
- [7] Gong, H.F., Dai, F. and Yu, B. (2018) Equipment and Experiment for Demulsification and Dewatering by Combining High Voltage Pulsed Electric Field with Seirl Centrifugal Field. *Modern Chemical Industry*, **38**, 178-181.
- [8] Gong, H.F., Yu, B., Dai, F., *et al.* (2018) Simulation on Performance of a Demulsification and Dewatering Device with Coupling Double Fields: Swirl Centrifugal Field and High-Voltage Electric Field. *Separation and Purification Technology*, **207**, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.049>
- [9] 张贤明, 李文龙, 龚海峰. 双场耦合破乳脱水装置中乳化油液滴聚结与破碎的数值分析[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(2): 357-366.
- [10] 蔡小垒. 气浮旋流一体化水处理技术理论及工程应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [11] 王永磊, 王文浩, 代莎莎. 微纳米气泡发生机理及其应用研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(5): 475-479.
- [12] Judd, S., Qiblawey, H., Al-Marri, M., *et al.* (2014) The Size and Performance of Offshore Produced Water Oil-Removal Technologies for ReInjection. *Separation and Purification Technology*, **134**, 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.037>
- [13] Boycott, A.E. (1920) Sedimentation of Blood Corpuscles. *Nature*, **104**, 532-532. <https://doi.org/10.1038/104532b0>
- [14] 洛阳石化一公司设计研究所, 抚顺石油二厂, 抚顺石油研究所. 波纹斜板隔油池——油水分离新设备[J]. 辽宁化工, 1975(5): 14-20.
- [15] 戚向前. 液固流化床中浓度对倾斜通道中颗粒运动影响研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [16] 丁正功. 聚驱采出乳化液稳定机理及 SCL-1 药剂作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2009.