

水气分散体系的超声波振荡生成方法及驱油实验研究

陈兴隆^{1,2} 伍家忠^{1,2} 韩海水^{1,2} 刘 莉^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083

摘 要:针对油藏水驱开发后期的水驱优势通道明显、剩余油动用困难的问题,研制了水气分散的驱油体系,即将气体分散到水中形成均匀稳定的微米级气泡。根据超声波振荡原理,结合孔板微孔的剪切作用,实验室生成了微米级水气分散体系。由高速摄像机及体视显微镜获取图像并测量微米气泡半径均值约为 $2.5\ \mu\text{m}$,远小于常规孔板喷射法生成的气泡半径($50\ \mu\text{m}$),气泡的均匀度、分散性及稳定性均大幅提高。建立了以泡径、气泡上升速度等为关键参数的水气分散体系性能评价方法,从理论上评价了超声波振荡生成方法生成的微米级气泡的特点。根据长度 $100\ \text{cm}$ 、直径 $3.8\ \text{cm}$ 的低渗透岩心驱油实验,微米级水气分散体系在水驱结束后可继续提高采出程度 10% 以上,证明水气分散体系可通过气泡形变及调节渗流阻力等方式有效扩大波及体积,提高剩余油动用效果。

关键词:超声波振荡;水气分散体系;气泡半径;微米级;驱油实验

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.04.009

Formation of gas bubble-water dispersion system using ultrasonic vibration method and research on its impact on ultimate oil recovery

CHEN Xinglong^{1,2}, WU Jiazhong^{1,2}, HAN Haishui^{1,2}, LIU Li^{1,2}

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China;

2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing, 100083, China

Abstract: To address the issue of channelling effect and difficulties in displacing remaining oil reserves in the later stage of water flooding, a gas bubble-water dispersion system was developed, in which the gas was dispersed in water to form uniform and stable micro bubbles. According to the principle of ultrasonic vibration, combined with the shear action of micro-orifice plate, micro gas bubble dispersed in water was produced in the laboratory. Using a stereo-microscope to take measurement from photos taken by high speed camera, the average micro bubble radius is found to be approximately $2.5\ \mu\text{m}$, which is much smaller than the $50\ \mu\text{m}$ radius bubbles produced through the conventional orifice injection method. In addition, the uniformity, dispersiveness and stability of the bubbles are greatly improved. With bubble

收稿日期:2021-04-20

基金项目:国家重大专项课题“低渗—超低渗油藏提高采收率新方法 with 关键技术”(2017ZX05013003)

作者简介:陈兴隆(1974-),男,山东济宁人,高级工程师,博士,主要从事油气渗流理论及实验研究工作。E-mail:chxlhdpu@petrochina.com.cn

diameter and bubble rising velocity as key parameters, the performance evaluation method of dispersed gas bubble in water system is established. The characteristics of micro bubble generated by ultrasonic high frequency vibration method are theoretically evaluated. According to the oil displacement experiment using low permeability core with a length of 100 cm and a diameter of 3.8 cm, micro gas bubble-water dispersion system can continue after the end of water flooding and increase ultimate oil recovery by more than 10%. Therefore, it proves that the gas bubble-water dispersion system can effectively expand the swept volume and improve the ultimate recovery of remaining oil-in-place by means of bubble size change and regulation of seepage resistance.

Keywords: Ultrasonic vibration; Gas bubble-water dispersion system; Gas bubble radius; Micro size; Oil displacement experiment

0 前言

在油藏水驱开发后期,注入水已形成连通、低渗流阻力通道,剩余油动用困难^[1-11]。针对这一开发问题,研制了水气分散的驱油体系,即将气体分散到水中形成均匀稳定的微米级气泡。水气分散体系通过气泡形变以及渗流阻力增加等方式有效改变渗流通道,提高剩余油动用效果。水气分散体系与传统化学泡沫体系不同,一是其生成方法为纯物理方法,不需要加入化学起泡剂或稳泡剂,体系中只有水、气两种物质;二是其气泡半径尺寸远小于化学泡沫半径尺寸。

水气分散体系中气泡半径和稳定性是体系性能的核心体现,半径越小气泡之间越不易合并,在水中上浮速度越低,混合所形成的体系也就越稳定。目前,气泡生成方法及工艺较多,从原理上归纳起来主要有孔板喷射法、高速剪切法、溶解气的降压析出法和电解法等^[12],其中孔板喷射法和高速剪切法应用较广泛。孔板喷射法是在压差及界面张力作用下,气体通过孔眼时形成气泡,该方法工艺最简单,气泡半径主要与孔眼大小相关,生成的气泡半径通常大于 50 μm 。高速剪切法是气体在高速剪切的环境下进入液相,在紊流区内形成分散气泡。孔板喷射法和高速剪切法结合应用能产生更小的微米级气泡,邓晓辉等人^[13-15]利用系列微孔材料以及剪切装置测试了微气泡除油效果,并在油田现场有效应用。以 Xue Ziqiu 等人^[16]为代表的国外研究团队以多孔介质材料替代了单一孔板,获得了半径 15 μm 以上的微气泡。

超声波空化泡研究是持续的热点内容^[17-20],但超声波应用于生成微气泡的研究很少。本文利用超声波的振动能量结合孔板喷射法中的微孔设计,在水中生成微米级的气泡,所形成的水气分散体系具有更好的稳定性及驱油效果。

1 超声波振荡生成方法及机理

超声波振荡生成方法的实验装置见图 1。显微镜为

蔡司 Discovery 体视显微镜,最大放大 80 倍。高速摄像机为 Photron,实验条件可达 5 000 帧/s 记录速度。超声波发生器为自行研制,输出频率为 300 ~ 500 kHz,输出电压 5 V。超声波振动片由环状换能片和有微米孔阵的金属片构成,金属片为弹性较强的钢制薄片,微孔半径 5 μm ,换能片和金属片分属正负两极,超声波振动片结构见图 2。

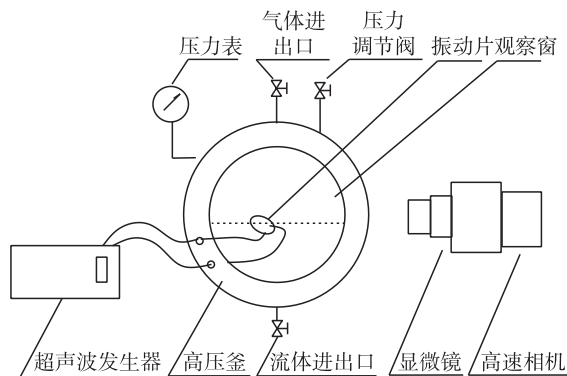


图 1 超声波振荡生成方法的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device for ultrasonic vibration method

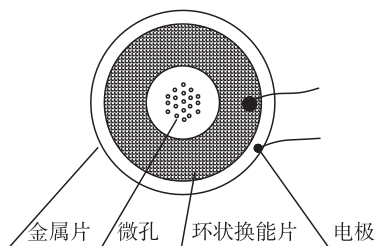


图 2 超声波振动片结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of ultrasonic vibrator

水气分散体系生成过程,首先向高压釜内注入水及气体直至设计压力。气泡生成状态示意图见图 3,振动片倾斜放置在气液界面处, θ 角小于 45° 为宜,启动超声波发生器,可见经微孔向水中喷射出微米级泡径的气泡。当气泡浓度达到设计值时,气泡及水形成稳定的水气分散体系。

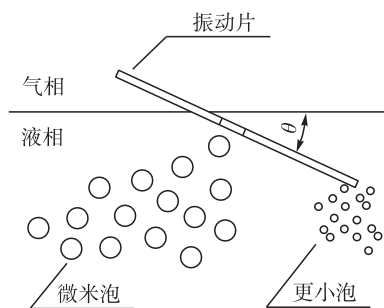


图3 气泡生成状态示意图

Fig.3 Schematic diagram of bubble formation state

常规孔板喷射法是气体经过孔眼时,受孔眼孔径的限制而生成气泡,通常气泡泡径是孔眼孔径的2~3倍。而超声波振荡机理则是:在超声波作用下,振动片在换能片的作用下发生高频振动,使振动片两侧压力交替变化,形成压力波动区。因振动片位于气液界面处,压力波动区包含了气液界面上方的部分气体区域和下方的部分液体区域。气体在低压阶段进入微孔,在超声波能量作用下,高压阶段被加速排出。通过微孔时,气泡不仅受到孔径的限制作用,而且超声波高频能量对气泡的加速作用产生撕裂效果,使其破碎成更小的气泡,以微米尺度喷射到液相中。除微孔处喷射出微米级气泡外,在振动片边缘处也产生少量微米级气泡。

图4为超声波振荡生成方法生成水气分散体系时微米级气泡生成效果实验图,是气态CO₂在超声波作用下向水中喷射气泡的过程,气泡平均半径2.5 μm。图4左边为光学放大10倍后气泡群成丝线状喷射,稳定后整体呈雾状分布;右边为光学放大80倍后分散开的气泡形态。

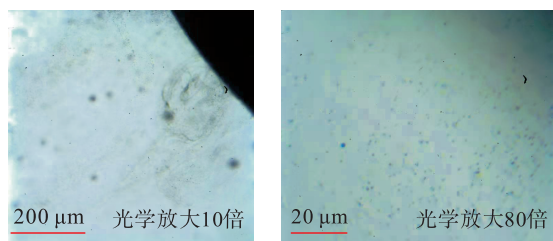


图4 微米级气泡生成效果图

Fig.4 Effect of micro bubble generation

2 水气分散体系的关键性能参数

水气分散体系是气泡分散在水中形成的混合流体,最关键的性能是稳定性,对应的参数是气泡半径和气泡间的分散程度。

气泡在液相中受气液密度差的影响,将做上浮运动。在只考虑浮力、重力和黏滞阻力作用的情况下,气泡上浮加速度 a 见式(1),由此可推导上浮加速度 a 与气泡泡径间的关系,见式(2)~(3)。

$$a = \frac{(\rho_w - \rho_g)gV_g}{\rho_g V_g + \frac{\mu A}{u}} \quad (1)$$

$$a = \frac{(\rho_w - \rho_g)g}{\rho_g + \frac{\mu A}{uV_g}} \quad (2)$$

$$a = \frac{(\rho_w - \rho_g)g}{\rho_g + \frac{3\mu}{ur}} \quad (3)$$

式中: a 为气泡上浮加速度, m/s^2 ; V_g 为气泡体积, μm^3 ; A 为表面积, μm^2 ; r 为气泡半径, μm ; ρ_w 和 ρ_g 分别为水和气体的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u 为气泡上浮速度, m/s 。

由式(3)可知,气泡上浮加速度仅与气泡半径有关,即气泡半径变小,其上升增速减小,气泡稳定性提高。

在实验中,超声波振荡生成方法生成气泡后,初始的喷射作用较强,气泡沿与孔板的垂直方向运动。在距离孔眼较远处($>10\text{ mm}$),喷射惯性作用消失,气泡运动速率明显降低,并表现为稳定的上浮状态。通过计算,图4中半径 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的气泡上浮速度为 1.5 mm/s ,与实际测量值一致。与常规孔板喷射法生成的气泡相比较,超声波振荡生成方法的气泡不仅明显减小,而且气泡上浮速度明显减慢,气泡稳定性增强。图5示意了Xue Ziqiu等人^[16]的研究成果,红色标识的半径 $250\text{ }\mu\text{m}$ 气泡上浮速度为 27 mm/s ,蓝色标识的半径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 气泡上浮速度为 5 mm/s 。

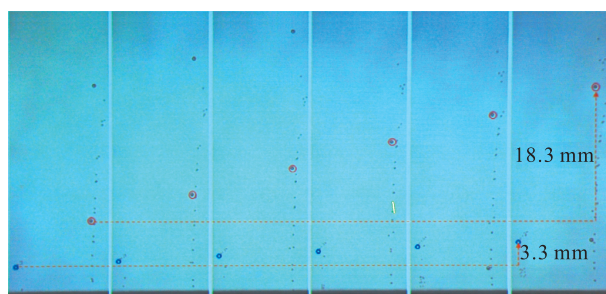


图5 常规孔板喷射法的气泡跟踪图像

Fig.5 Bubble tracking image of conventional orifice injection method

气泡的稳定性还表现在气泡之间的分散程度,即气泡间分散程度越好,合并难度越大,稳定性越好。用相邻气泡距离差异度 L_d 的概念来描述气泡间的分散程度,定量描述水气分散体系的稳定性。在单位面积图像内,选择核心气泡,利用该气泡与相邻气泡间的距离确定 L_d ,见式(4)。

$$L_d = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}} \quad (4)$$

式中: L_d 为相邻气泡距离差异度; $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为距离核心气泡最远和最近的气泡距离, mm 。

以图 4 为例,计算的 L_d 值为 0.58。由式(4)可知, L_d 值越接近 0,分散性越均匀,稳定性越好。

3 驱油实验分析

水气分散体系作为新型的驱替液,能否在水驱的基础上继续提高采收率是研究者最关心的问题。采用常

规的驱油实验方法进行研究验证,即在水驱结束后,用水气分散体系继续驱替岩心并分析驱替效果。

选取低渗岩心,长度 100 cm,直径 3.8 cm,气测渗透率 $48.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在 50 °C、10 MPa 条件下进行岩心驱替实验,在 1 PV 水驱结束后转入水气分散体系驱替,实验流程见图 6。

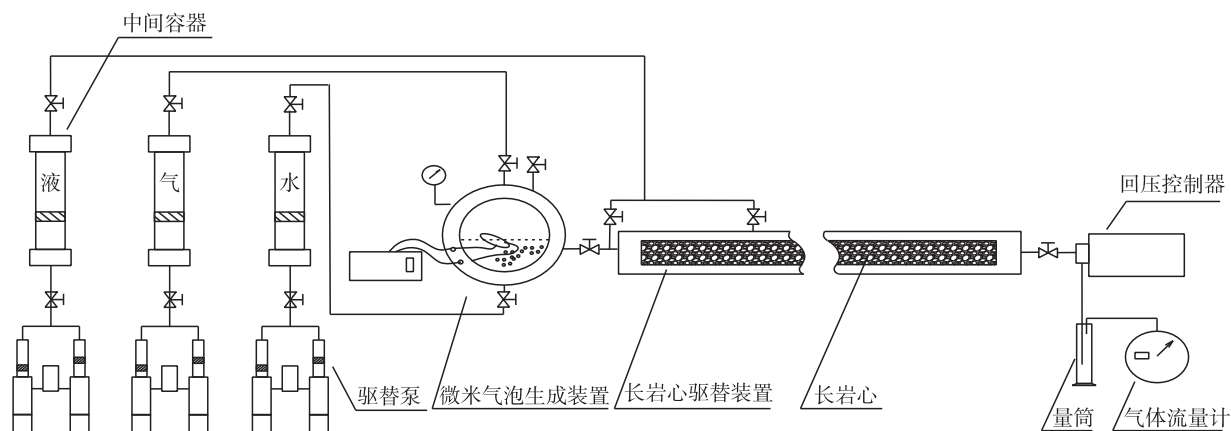


图 6 驱替实验流程图

Fig. 6 Displacement experiment process

岩心驱替采出程度及含水率变化曲线见图 7。在 1 PV 水驱结束后,产出液含水率为 98.6%,水驱阶段的采出程度为 53.0%。岩心继续用水气分散体系驱替,在总注入量 1.5 PV 后采出程度缓慢增加,含水平降。1.5~2.3 PV 是采出程度接近线性增加的过程,含水经历了由快速降低过渡至缓慢升高的过程,这一阶段充分反映出水气分散体系具有提高采收率的作用。在水气分散体系驱替结束时,采出程度达到 66.4%,较水驱方式提高 13.4%。水气分散体系机理可简述如下:在驱油时,水气分散体系中的气泡能进入注水所不能进入的微小孔隙内,将其内部的剩余油产出而提高驱油效率。另外,气泡在水驱优势渗流通道、窜流通道以及微裂缝等大孔隙空间内膨胀,在贾敏效应的作用下提高渗流阻力。后续驱替液被迫改变流动方向,进入水驱过程尚未波及的剩余油区域,实现扩大波及体积作用。

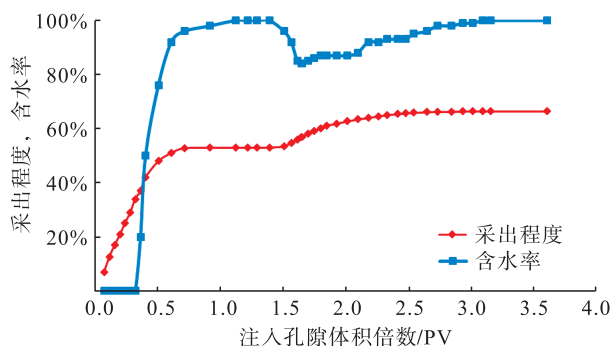


图 7 岩心驱替采出程度及含水率变化图

Fig. 7 Recovery and water cut change of core displacement

4 结论

1) 超声波振荡可在气液共存环境下持续产生微米级气泡,气泡半径均值约为 $2.5 \mu\text{m}$,远小于常规孔板喷射法生成的气泡半径($50 \mu\text{m}$),气泡的均匀度、分散性及稳定性均大幅提高。

2) 建立了以泡径、气泡上升速度等的关键参数的水气分散体系性能评价方法,从理论上评价超声波振荡方法生成的微米级气泡具有泡径小、上升速度慢和稳定性好的特点。

3) 根据低渗透岩心驱油实验,微米级水气分散体系在水驱结束后可继续提高采出程度 10% 以上,水气分散体系可通过气泡形变及调节渗流阻力等方式有效扩大波及体积,提高剩余油动用效果。

参考文献:

- [1] 沈平平,廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
SHEN Pingping, LIAO Xinwei. The technology of CO₂ geological storage and enhanced oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [2] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践[J]. 石油勘探与开发,2019,46(4):716-727.
HU Yongle, HAO Mingqiang, CHEN Guoli, et al. Technologies and practice of CO₂ flooding and sequestration in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,

- 46 (4): 716-727.
- [3] 秦积舜,韩海水,刘晓蕾. 美国 CO₂ 驱油技术应用及启示[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):209-216.
QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (2): 209-216.
- [4] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 中国 CO₂ 驱油与封存技术及实践[J]. 石油勘探与开发,2019,46(4):716-727.
HU Yongle, HAO Mingqiang, CHEN Guoli, et al. Technologies and practice of CO₂ flooding and sequestration in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 716-727.
- [5] 刘玉章,陈兴隆. 低渗透藏 CO₂ 驱油混相条件的探讨[J]. 石油勘探与开发,2010,37(4):466-470.
LIU Yuzhang, CHEN Xinglong. Miscible conditions of CO₂ flooding technology used in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (4): 466-470.
- [6] 韩海水,袁士义,李 实,等. 二氧化碳在链状烷烃中的溶解性能及膨胀效应[J]. 石油勘探与开发,2015,42(1):88-93.
HAN Haishui, YUAN Shiyi, LI Shi, et al. Dissolving capacity and volume expansion of carbon dioxide in chain n-alkanes [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (1): 88-93.
- [7] 袁士义,王 强,李军诗,等. 注气提高采收率技术进展及前景展望[J]. 石油学报,2020,41(12):1623-1632.
YUAN Shiyi, WANG Qiang, LI Junshi, et al. Technology progress and prospects of enhanced oil recovery by gas injection [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (12): 1623-1632.
- [8] 王正茂,廖广志,蒲万芬,等. 注空气开发中地层原油氧化反应特征[J]. 石油学报,2018,39(3):314-319.
WANG Zhengmao, LIAO Guangzhi, PU Wanfen, et al. Oxidation reaction features of formation crude oil in air injection development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39 (3): 314-319.
- [9] 胡文瑞,魏 漪,鲍敬伟. 中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):646-656.
HU Wenrui, WEI Yi, BAO Jingwei. Development of the theory and technology for low permeability reservoirs in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4): 646-656.
- [10] KOOTTUNGAL L. 2014 worldwide EOR survey [J]. Oil & Gas Journal, 2014, 112 (4): 79-91.
- [11] SANDREA R, DHAROD D. Approach screens reservoir candidates for EOR [J]. Oil & Gas Journal, 2016, 114 (4): 48-51.
- [12] 吴胜军,方为茂,赵红卫,等. 陶瓷微孔膜管制造微气泡的研究[J]. 膜科学与技术,2009,29(6):61-65.
WU Shengjun, FANG Weimao, ZHAO Hongwei, et al. Research on microbubbles generated by ceramic microporous tube [J]. Membrane Science and Technology, 2009, 29 (6): 61-65.
- [13] 邓晓辉,许晶禹,吴应湘,等. 动态微气泡浮选除油技术研究[J]. 工业水处理,2011,31(4):89-90.
DENG Xiaohui, XU Jingyu, WU Yingxiang, et al. Research on the technology of oil removal by dynamic state microbubbles flotation [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31 (4): 89-90.
- [14] 朱效谷,黄伟峰,李 勇. 微尺度下台阶结构对气泡的约束作用及临界失效体积[J]. 科学通报,2012,57(18):1697-1702.
ZHU Xiaogu, HUANG Weifeng, LI Yong. Bubble confinement and critical failure volume of step structure at micro scale [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (18): 1697-1702.
- [15] 吕玉娟,张雪利. 气浮分离法的研究现状和发展方向[J]. 工业水处理,2007,27(1):58-61.
LYU Yujuan, ZHANG Xueli. Trend of the flotation technique [J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27 (1): 58-61.
- [16] XUE Ziqiu, Ohsumi Takashi, Koide Hitoshi. Seismic wave velocity monitoring of CO₂ migration in porous sandstones saturated with water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (6): 1002-1007.
- [17] 梁坤峰,王全海,阮春蕾,等. 超声作用下水中微气泡的运动特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2013,34(5):96-100.
LIANG Kunfeng, WANG Quanhai, RUAN Chunlei, et al. Motion characteristics of microbubble in water under ultrasonic effect [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 34 (5): 96-100.
- [18] YU Deyang, LIU Baolin, WANG Bochun. The effect of ultrasonic waves on the nucleation of pure water and degassed water [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19 (3): 459-463.
- [19] 马正飞,殷 翔. 数学计算方法与软件的工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
MA Zhengfei, YIN Xiang. Mathematical calculation method and engineering application of software [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2002.
- [20] 杨日福,丘泰球,罗登林. 超临界 CO₂ 流体中超声空化阈值的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2005,33(12):100-104.
YANG Rifu, QIU Taiqiu, LUO Denglin. Threshold investigation of ultrasonic cavitation in supercritical fluid CO₂ [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 33 (12): 100-104.