

# 水力空化强化稠油加碱乳化降黏的研究

秦宗禹<sup>1</sup>, 董波<sup>1</sup>, 金曷曦<sup>2</sup>, 王逸伟<sup>2</sup>, 徐振<sup>2</sup>, 郭绪强<sup>2</sup>, 刘爱贤<sup>2\*</sup>

(1. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**利用碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )乳化稠油,采用机械搅拌法探究稠油质量分数、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数、乳化温度和搅拌速率对水包油(O/W)型乳状液的影响;利用水力空化技术强化制备乳状液,探究 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数、空化入口压力、空化次数对乳状液的影响。基于机械搅拌法确定最优实验条件为:稠油质量分数为70%、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数为2 000  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、乳化温度为30 $^\circ\text{C}$ 、搅拌速率为1 000 r/min。水力空化技术制备乳状液的实验结果表明,随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数的增加,乳状液表观黏度升高、分水率降低。空化入口压力为0.3~0.7 MPa时,随着空化次数的增加,乳状液的表观黏度升高,分水率降低;入口压力为0.9 MPa时呈相反规律。结果表明,与机械搅拌法相比,水力空化所制备乳状液油滴粒径小且分布均匀,在大规模制备稠油O/W型乳状液领域有很大的应用潜力。

**关键词:**稠油;碳酸钠;水力空化;水包油型乳状液

中图分类号:TE39;TQ02

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)01-0128-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.01.023

## Hydrodynamic cavitation enhanced viscosity reduction of heavy oil with alkali emulsification

QIN Zong-yu<sup>1</sup>, DONG Bo<sup>1</sup>, JIN Bing-xi<sup>2</sup>, WANG Yi-wei<sup>2</sup>, XU Zhen<sup>2</sup>, GUO Xu-qiang<sup>2</sup>, LIU Ai-xian<sup>2\*</sup>

(1. College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;

2. Faculty of Engineering, Karamay Campus, China University of Petroleum-Beijing, Karamay 834000, China)

**Abstract:** Heavy oil is emulsified by sodium carbonate, and the effects of the mass fraction of heavy oil, the mass fraction of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , emulsification temperature and stirring speed on oil-in-water (O/W) emulsions are investigated by means of mechanical stirring method. Hydrodynamic cavitation technology is utilized to enhance the preparation of emulsion, the effects of the mass fraction of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , cavitation inlet pressure and cavitation times on the emulsion are investigated. Based on mechanical stirring method, the optimal experimental conditions are determined as follows: the mass fraction of heavy oil is 70%, the mass fraction of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  is 2 000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , the emulsification temperature is 30 $^\circ\text{C}$ , and stirring speed is 1 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ . Experimental results using hydrodynamic cavitation technology show that the apparent viscosity of the emulsion increases but the water separation rate decreases with the increase of mass fraction of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . The apparent viscosity of the emulsion increases and the water separation rate decreases with the increase of cavitation times when the cavitation inlet pressure is in the range of 0.3–0.7 MPa. While the cavitation inlet pressure is 0.9 MPa, an opposite rule is shown. Final results show that compared with mechanical stirring method, the oil droplets of emulsion prepared by hydrodynamic cavitation technology are smaller in size and evenly distributed, showing that the hydrodynamic cavitation technology has great application potential in the field of large-scale preparation of heavy oil O/W emulsion.

**Key words:** heavy oil; sodium carbonate; hydrodynamic cavitation; O/W emulsion

随着世界常规原油储量的日益减少,稠油储量丰富,是一种潜力巨大的非常规油气资源<sup>[1-2]</sup>。然而稠油性质复杂、黏度高、蜡含量高,给开采和集输带来很大的困难<sup>[3]</sup>。常用输送稠油方法有加热法、掺稀法、改质降黏法等<sup>[4]</sup>,这些方法普遍高能耗、高成本、高技术需求<sup>[5-6]</sup>。

稠油乳化降黏是一种工艺简单、安全性高的管输方法,其是向稠油中加入乳化剂,在适当的温度和

强度作用下,使稠油变成微小油滴悬浮于连续的水相中,形成O/W型乳状液,大幅度降低黏度<sup>[7-8]</sup>。在管输过程中,表面活性剂分子吸附在管道内壁形成一层水膜<sup>[9]</sup>,将原油与管壁间的摩擦转化为水与管壁间的摩擦,从而降低管输过程中的阻力<sup>[10]</sup>。

传统制备乳状液的方法有机械搅拌、均质器、胶体磨等<sup>[11-13]</sup>,以上方法能耗较高、难以大规模制备乳状液<sup>[14]</sup>。近年来,水力空化成为一种能够大规模

收稿日期:2022-09-01;修回日期:2022-10-30

基金项目:新疆维吾尔自治区创新环境建设专项自然科学基金计划青年科学基金项目(2020D01B64);国家自然科学基金青年基金(22008257);新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学基金项目(XJEDU2020Y044);中国石油大学(北京)克拉玛依校区科研启动项目(XQZX20190043)

作者简介:秦宗禹(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水力空化技术及稠油降黏,526696684@qq.com;刘爱贤(1963-),女,硕士,副教授,研究方向为石油与天然气的物理性质、相平衡特性以及加工处理工艺,通讯联系人,1854@cupk.edu.cn。

制备乳状液的新兴技术<sup>[15]</sup>,其是指液体流经空化器(文丘里管、孔板等)时,受到节流作用,流速急剧上升,压力迅速下降,当压力达到某一临界值(相应温度下液体的饱和蒸汽压)时,液体汽化产生大量的空化气泡,气泡随液体进一步流动,当液体周围的压力恢复,气泡急剧塌缩、溃灭。在气泡溃灭过程中其周围附近区域形成局部的高温( $10^3 \sim 10^4$  K)和高压( $10^8 \sim 10^{10}$  Pa)环境,同时还伴随有强大的冲击波、高速微射流以及自由基的产生<sup>[16-17]</sup>。

乳状液性能还取决于表面活性剂类型和含量、含油量、乳化温度、乳化强度等因素<sup>[18]</sup>。笔者使用 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 对克拉玛依稠油进行乳化,基于机械搅拌法探究稠油质量分数、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数、乳化温度、搅拌速率对乳状液的影响。此外,利用水力空化技术强化制备O/W型乳状液,探究 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数、空化处理次数、空化入口压力对乳状液的影响,并对2种方法所制备的乳状液油滴粒径进行比较。

## 1 实验仪器及试剂

### 1.1 实验仪器

实验所用的仪器如表1所示。

表1 实验仪器

实验仪器	型号	生产厂家
电子分析天平	F2004	湖南力辰仪器科技有限公司
电子天平	YP10002	上海衡际科学仪器有限公司
数显机械搅拌器	JJ-1A-100W	上海予申仪器有限公司
数字恒温水浴	HH-601	常州金坛良友仪器有限公司
旋转黏度计	ViscoQC300-R	奥地利安东帕公司
激光粒度仪	DP-02	珠海欧美克仪器有限公司

### 1.2 实验试剂

实验使用油为新疆克拉玛依稠油,在 $50^\circ\text{C}$ 测得稠油的表观黏度随剪切速率变化情况如图1所示。

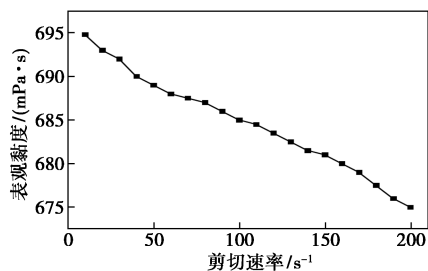


图1 稠油表观黏度和剪切速率关系

无水碳酸钠,分子式为 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,纯度99.8%,国药集团化学试剂有限公司生产;实验用水为去离子水。

## 2 实验过程及装置

### 2.1 机械搅拌法实验过程

称取一定量稠油,按照质量比称取去离子水及 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 配成水相溶液,分别于 $50^\circ\text{C}$ 的水浴中恒温30 min。恒温后将两相混合,继续恒温30 min。恒温后搅拌10 min,制成O/W型乳状液,测量其表观黏度及分水率。

### 2.2 水力空化技术实验过程及装置

实验所用水力空化装置为课题组自行设计,实验装置和空化器示意图分别如图2和图3所示。

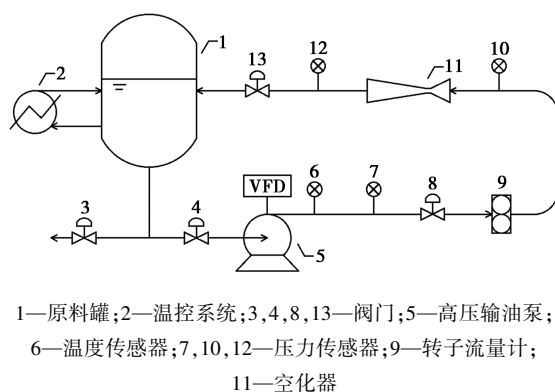


图2 水力空化装置

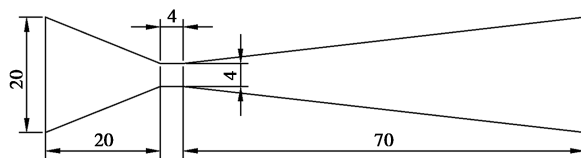


图3 空化器结构

称取一定量稠油加入原料罐中,按照体积比称取去离子水及 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 配制水相溶液,分别设置 $30^\circ\text{C}$ 恒温30 min。将恒温后水相溶液加入原料罐中与稠油混合,温度控制在 $30^\circ\text{C}$ 。将空化入口压力分别设定为0.3、0.5、0.7 MPa和0.9 MPa。空化处理一次的时间计算式为:

$$t = [(V_{\text{油}} + V_{\text{水}})/Q] \times 3600 \quad (1)$$

式中: $t$ 为空化处理一次时间,s; $V_{\text{油}}$ 为稠油体积,L; $V_{\text{水}}$ 为去离子水体积,L; $Q$ 为转子流量计所测流量,L/h。

在空化处理15、30、45、60、75、90次时分别取样,用于测量表观黏度及分水率。

### 2.3 分析与评价

#### 2.3.1 表观黏度

设置旋转黏度计剪切速率为 $10 \sim 200 \text{ s}^{-1}$ ,黏度计及配套温控设备调至相应温度。恒温20 min后,

测量表观黏度,并计算降黏率<sup>[19]</sup>。

$$\eta = [(\mu_0 + \mu_{0/W}) / \mu_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta$  为降黏率,%; $\mu_0$  为稠油表观黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  
 $\mu_{0/W}$  为相同温度及剪切速率下乳状液表观黏度,  
 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

### 2.3.2 稳定性

采用“瓶试法”分析 O/W 型乳状液稳定性,将乳状液倒入 50 mL 比色管并放在所对应乳化温度恒温水浴中,测量其 24 h 和 48 h 的分水高度和总高度,计算分水率<sup>[20]</sup>:

$$f = (V_1/V_0) \times 100\% = (h_1/h_0) \times 100\% \quad (3)$$

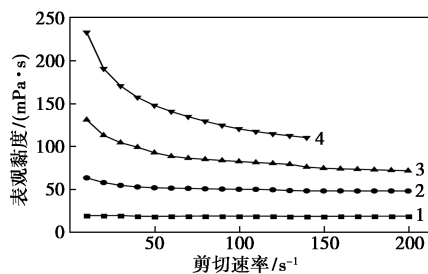
式中: $f$  为分水率,%; $V_1$  为析出水体积, mL;  $V_0$  为总水体积, mL;  $h_1$  为析出水高度, cm;  $h_0$  为总水高度, cm。

分水率越高,乳状液的稳定性越差。

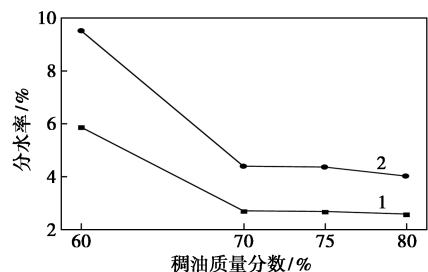
## 3 结果与分析

### 3.1 含油量对乳状液的影响

在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 2 000  $\mu\text{g/g}$ 、乳化温度为 50℃、搅拌速率为 1 000  $\text{r/min}$  的条件下,制备 4 组不同稠油质量分数(60%、70%、75%、80%)的 O/W 型乳状液,测得其表观黏度及分水率如图 4 所示。



1—60%; 2—70%; 3—75%; 4—80%  
(a) 对表观黏度的影响



1—24 h; 2—48 h  
(b) 对分水率的影响

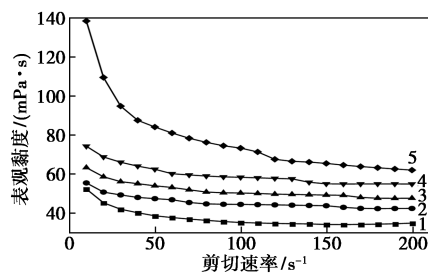
图 4 稠油质量分数对乳状液的影响

从图 4(a) 中可以看出,随着稠油质量分数的增加,乳状液的表观黏度升高。表观黏度不仅取决于连续相(水相),还与分散相(油相)有关<sup>[21]</sup>,增大稠

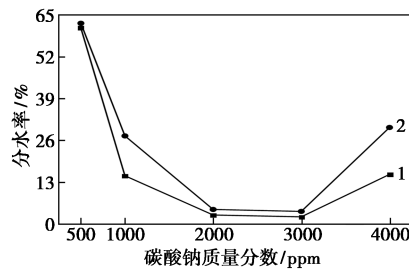
油质量分数,其油滴数量增多、间距变小,油滴间碰撞次数增加,摩擦阻力增大,使表观黏度升高<sup>[21-22]</sup>。从图 4(b) 中可以看出,稠油质量分数为 60%~70%,乳状液的分水率大幅度降低;稠油质量分数为 70%~80%,分水率小幅度降低。当稠油质量分数小于 70%,乳状液的油滴碰撞后易聚集变成大油滴,并且过量的水相易沉降<sup>[23]</sup>,导致分水率高。当稠油质量分数大于 70%,油滴数量增加、间距减小,产生静电排斥小油滴聚并为大油滴<sup>[24]</sup>,且水相比较少被油相所包裹,不易聚集,所以分水率低。

### 3.2 碳酸钠质量分数对乳状液的影响

在稠油质量分数为 70%、乳化温度为 50℃、搅拌速率为 1 000  $\text{r/min}$  的条件下,制备 5 组不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数(500、1 000、2 000、3 000、4 000  $\mu\text{g/g}$ )的 O/W 型乳状液,测得其表观黏度及分水率,结果如图 5 所示。



1—500  $\mu\text{g/g}$ ; 2—1 000  $\mu\text{g/g}$ ; 3—2 000  $\mu\text{g/g}$ ;  
4—3 000  $\mu\text{g/g}$ ; 5—4 000  $\mu\text{g/g}$   
(a) 对表观黏度的影响

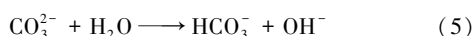
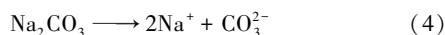


1—24 h; 2—48 h  
(b) 对分水率的影响

图 5 碳酸钠质量分数对乳状液的影响

从图 5(a) 中可以看出,随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数的增加,乳状液表观黏度升高。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数增加, $\text{Na}_2\text{CO}_3$  发生电离,使乳状液中  $\text{OH}^-$  增多, $\text{OH}^-$  与稠油中胶质、沥青质、环烷酸、脂肪酸等成分形成更多的皂类物质<sup>[25-27]</sup>,如式(4)~式(6)所示,其是天然的表面活性剂,生成的表面活性剂附着在油水界面,使油水界面膜增厚并将稠油分成更小的油滴,增加了油滴的数量,抑制了小油滴的聚并<sup>[28]</sup>,

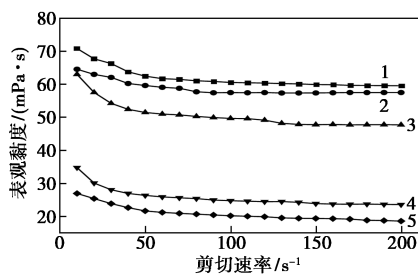
使油滴碰撞几率增加,导致表观黏度升高。



从图 5(b) 中可以看出,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 500~2 000  $\mu\text{g}/\text{g}$  时,乳状液分水率大幅度降低。在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数较低时,所生成的表面活性剂分子少,油水界面膜弱,油滴易聚集分相,分水率高;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 2 000~3 000  $\mu\text{g}/\text{g}$  时,分水率小幅度降低。油水界面的表面活性剂达到饱和状态,过量的表面活性剂形成胶束<sup>[28]</sup>,仅增加了黏度,分水率变化不大;当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数大于 3 000  $\mu\text{g}/\text{g}$  时,过量的  $\text{Na}^+$  影响了油滴间的静电排斥作用<sup>[7]</sup>,使油滴加速聚集分相,分水率升高。笔者还考察了  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 5 000  $\mu\text{g}/\text{g}$  所制备的乳状液发现,其在高  $\text{Na}^+$  质量分数的影响下, O/W 型乳状液发生反相变为油包水(W/O)型乳状液。

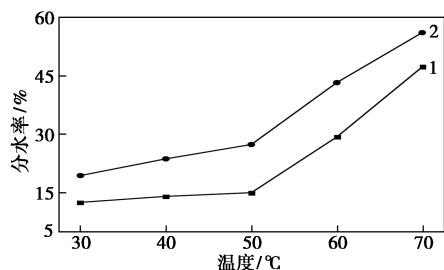
### 3.3 乳化温度对乳状液的影响

在稠油质量分数为 70%、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 1 000  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、搅拌速率为 1 000 r/min 的条件下,制备 5 组不同乳化温度(30、40、50、60、70℃)的 O/W 型乳状液,测得其表观黏度及分水率如图 6 所示。



1—30℃;2—40℃;3—50℃;4—60℃;5—70℃

(a) 对表观黏度的影响



1—24 h;2—48 h

(b) 对分水率的影响

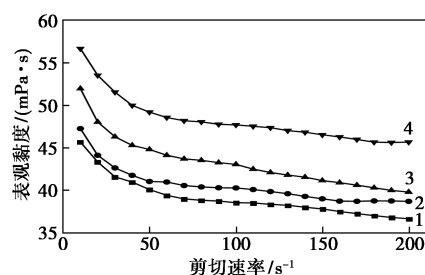
图 6 乳化温度对乳状液的影响

从图 6(a)、图 6(b) 中可以看出,随着乳化温度的升高,乳状液的表观黏度降低、分水率升高。升高乳化温度,使稠油中胶质、沥青质、环烷酸、脂肪酸等

成分溶解度增大,与碱生成的天然表面活性剂物质减少<sup>[21]</sup>,且表面活性剂分子热运动增强,易从油水界面脱离,界面膜结构变弱;并使油相黏度降低,且油滴的布朗运动更剧烈<sup>[29]</sup>。油滴更易絮凝、聚集,形成大粒径油滴,使乳状液表观黏度降低,分水率升高。

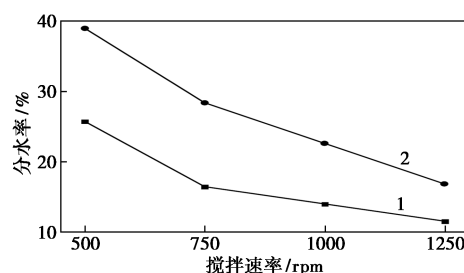
### 3.4 搅拌速率对乳状液的影响

在稠油质量分数为 70%、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 1 000  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、乳化温度为 50℃ 的条件下,制备 4 组不同搅拌速率(500、750、1 000、1 250 r/min)的 O/W 型乳状液,测得其表观黏度及分水率如图 7 所示。



1—500 r/min;2—750 r/min;3—1 000 r/min;4—1 250 r/min

(a) 对表观黏度的影响



1—24 h 分水率;2—48 h 分水率

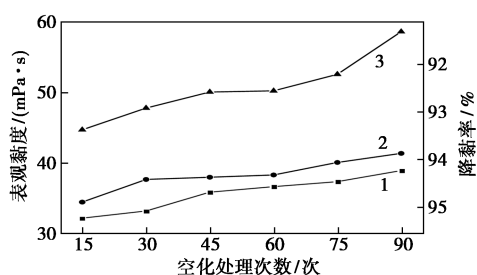
(b) 对分水率的影响

图 7 搅拌速率对乳状液的影响

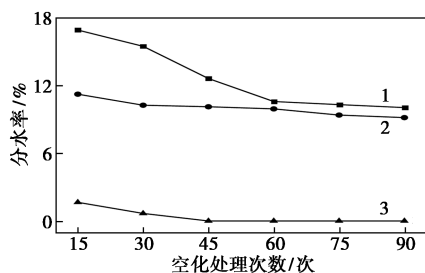
从图 7(a)、图 7(b) 中可以看出,随着搅拌速率的增大,乳状液的表观黏度升高、分水率降低。低搅拌速率下,向体系传输能量较低,所制备乳状液的油滴粒径较大且分布不均匀,易聚集为大油滴,分水率高。随着搅拌速率的增大,油滴粒径变得更小、数量增加、更细密,且均匀地分散在水相中<sup>[29-30]</sup>,油滴间静电排斥力增大,不易聚集变成大油滴,分水率降低。但油滴碰撞次数增多,摩擦力增大,导致其表观黏度升高。

### 3.5 水力空化制备不同碳酸钠质量分数的乳状液

利用课题组组装的水力空化装置制备 3 组不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数(1 000、1 500、2 000  $\mu\text{g}/\text{g}$ )及不同空化次数的 O/W 型乳状液,在剪切速率 200  $\text{s}^{-1}$  测得乳状液的表观黏度及 48 h 分水率如图 8 所示。



(a) 表观黏度及降黏率



(b) 48 h 分水率

1—1 000 µg/g; 2—1 500 µg/g; 3—2 000 µg/g

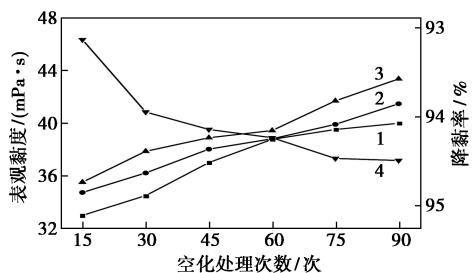
图 8 不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数及空化次数对乳状液的影响

从图 8(a)、图 8(b) 中可以看出, 在不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数下, 乳状液的表观黏度均随空化次数增加而升高, 降黏率、分水率降低。空化处理次数增加, 更多的能量输入至乳状液中<sup>[31]</sup>, 使得油滴粒径变小且分布均匀, 不易聚集成大油滴, 表观黏度升高、分水率降低。在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数为 1 000 µg/g 时, 空化 30 次以上所制备的乳状液的分水率比机械搅拌法低。表明水力空化技术可以使用相同的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数制备出稳定性更好的乳状液。

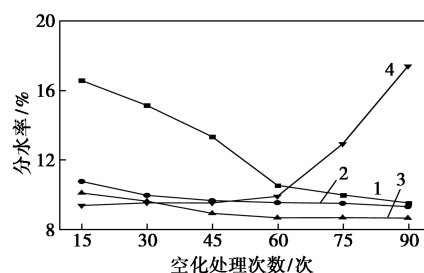
### 3.6 水力空化不同入口压力制备乳状液

利用水力空化技术制备 4 组不同入口压力 (0.3、0.5、0.7、0.9 MPa) 及不同空化次数的 O/W 型乳状液, 并测得其表观黏度及分水率, 结果如图 9 所示。

从图 9(a)、图 9(b) 中可以看出, 入口压力为 0.3~0.7 MPa 时, 随着入口压力、空化次数的增加, 乳状液的表观黏度升高, 降黏率、分水率降低; 入口压力为 0.9 MPa 时, 空化次数增加, 乳状液的表观



(a) 对表观黏度及降黏率的影响



(b) 对 48 h 分水率的影响

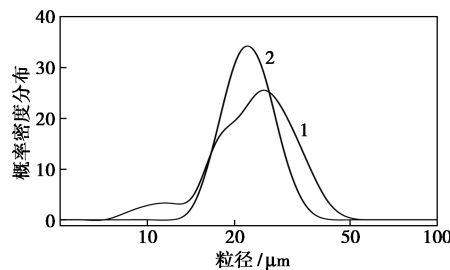
1—0.3 MPa; 2—0.5 MPa; 3—0.7 MPa; 4—0.9 MPa

图 9 不同入口压力及空化次数对乳状液的影响

黏度降低, 降黏率、分水率升高。增大入口压力, 使液体通过空化器时流速上升, 压力下降, 产生更多的空化气泡, 气泡溃灭产生更多的能量输入乳状液, 且增大了湍流程度使油水两相更好的混合。在此压力下增加空化次数, 所制备油滴粒径变小、分布更均匀。但增加入口压力至 0.9 MPa 时, 由于压力过大, 产生了过度的能量输入, 增加空化次数时, 过度能量破坏了稳定的油水界面膜<sup>[32]</sup>, 使油滴发生聚集分相, 乳状液表观黏度降低、分水率升高。

### 3.7 油滴粒径比较

在稠油体积分数为 70%、乳化温度为 30℃、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数为 1 000 µg/g 的条件下, 利用激光粒度仪测得 2 种方法所制备乳状液油滴粒径分布如图 10 所示。由图 10 中可以看出, 水力空化技术所制备的乳状液油滴粒径分布范围小, 油滴粒径为 20.75 µm, 占全部油滴的 32.64%, 平均粒径 ( $D_{4,3}$ ) 为 20.91 µm; 机械搅拌法所制备的乳状液油滴粒径分布范围大, 油滴粒径为 24.8 µm, 占全部油滴的 25.45%,  $D_{4,3}$  为 23.02 µm。表明用水力空化技术制备 O/W 乳状液比机械搅拌法向乳状液中输入更多的能量, 使油滴粒径更小且分布均匀, 不易聚集成相, 稳定性高。



1—机械搅拌法; 2—水力空化技术

图 10 乳状液油滴粒径分布

## 4 结论

利用机械搅拌法并以 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 对克拉玛依稠油

进行乳化降黏,实验结果表明:随着稠油质量分数、搅拌速率的升高,乳状液的表观黏度升高,分水率降低;乳化温度升高,乳状液表观黏度降低,分水率升高。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数增加,乳状液的表观黏度升高,分水率先降低后升高。因此,确定最佳实验条件为:稠油质量分数为70%、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量分数2 000  $\mu\text{g}/\text{g}$ 、乳化温度为30℃、搅拌速率为1 000 r/min。

使用本课题组组装的水力空化装置,入口压力为0.3~0.7 MPa时,随着入口压力、空化次数的增加,乳状液的表观黏度升高、分水率降低;入口压力为0.9 MPa时,随着空化次数的增加,乳状液的表观黏度降低、分水率升高。确定最佳入口压力为0.7 MPa,最佳空化次数为45次。对比2种方法所制备油滴粒径,水力空化技术所制备油滴粒径更小且分布均匀,表明水力空化技术在稠油乳化降黏领域有很大的应用前景。

### 参考文献

- [1] Hasan S W, Ghannam M T, Esmail N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation[J]. *Fuel*, 2010, 89(5): 1095-1100.
- [2] Hart A. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, 4(3): 327-336.
- [3] Shi H, Ruban A, Timoshchenko S, et al. Numerical investigation of the behavior of an oil-water mixture in a venturi tube[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(11): 15061-15067.
- [4] 李崎, 王晓冬, 李秋叶, 等. 稠油降黏技术研究进展及发展趋势[J]. *化学研究*, 2018, 29(5): 441-454.
- [5] Yaghi B M, Al-Bemani A. Heavy crude oil viscosity reduction for pipeline transportation[J]. *Energy Sources*, 2002, 24(2): 93-102.
- [6] 王帅, 赵金柱, 王荣元, 等. 乳化/润湿耦合作用稠油流动减阻新思路[J]. *化工进展*, 2021, 40(S2): 126-139.
- [7] Ashrafzadeh S N, Kamran M. Emulsification of heavy crude oil in water for pipeline transportation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 71(3-4): 205-211.
- [8] Hoshyargar V, Ashrafzadeh S N. Optimization of flow parameters of heavy crude oil-in-water emulsions through pipelines[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(4): 1600-1611.
- [9] Kumar S, Mahto V. Emulsification of Indian heavy crude oil in water for its efficient transportation through offshore pipelines[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 115: 34-43.
- [10] Chen X, Wang N, Xia S. Research progress and development trend of heavy oil emulsifying viscosity reducer: A review[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2021, 39(15-16): 550-563.
- [11] 王军. 乳化与微乳化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 57-60.
- [12] Zhang Z, Wang G, Nie Y, et al. Hydrodynamic cavitation as an efficient method for the formation of sub-100 nm O/W emulsions with high stability[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(10): 1477-1480.
- [13] Tang S Y, Shridharan P, Sivakumar M. Impact of process parameters in the generation of novel aspirin nanoemulsions-comparative studies between ultrasound cavitation and microfluidizer[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 485-497.
- [14] Carpenter J, Saharan V K. Ultrasonic assisted formation and stability of mustard oil in water nanoemulsion; Effect of process parameters and their optimization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35: 422-430.
- [15] Carpenter J, George S, Saharan V K. Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion; Effect of geometry and cavitation number[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2017, 116: 97-104.
- [16] 董波, 刘爱贤, 张家辉, 等. 空化技术在重油改质降黏领域的研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(1): 53-56, 61.
- [17] Carpenter J, Badve M, Rajoriya S, et al. Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2017, 33(5): 433-468.
- [18] Azodi M, Nazar A R S. An experimental study on factors affecting the heavy crude oil in water emulsions viscosity[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 106: 1-8.
- [19] 孙娜娜, 蒋华义, 解亚鹏, 等. 两性表面活性剂/聚合物对稠油水包油型乳状液分水率和降黏率的影响[J]. *石油学报(石油加工)*, 2018, 34(3): 600-606.
- [20] 何刚, 李华斌, 付红, 等. 碱-表面活性剂对鲁克沁稠油乳状液稳定性的影响[J]. *石油化工*, 2020, 49(10): 992-997.
- [21] 张婉莹, 李小玲, 吴玉国. 乳化条件对稠油乳状液黏度和稳定性的影响[J]. *应用化工*, 2021, 50(3): 660-664.
- [22] Domian E, Brynda-Kopytowska A, Oleksza K. Rheological properties and physical stability of o/w emulsions stabilized by OSA starch with trehalose[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 49-58.
- [23] 赵选烽. LD 稠油乳化降黏实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [24] 陈锐, 邢晓凯, 张坤勋, 等. 分散相微观形态对稠油乳状液流变性的影响[J]. *石油化工高等学校学报*, 2014, 27(4): 57-60.
- [25] Razi M, Rahimpour M R, Jahanmiri A, et al. Effect of a different formulation of demulsifiers on the efficiency of chemical demulsification of heavy crude oil[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, 56(6): 2936-2945.
- [26] Ashrafzadeh S N, Motaee E, Hoshyargar V. Emulsification of heavy crude oil in water by natural surfactants[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 86: 137-143.
- [27] 翟文琪, 马贵阳. 有机碱和无机碱对稠油性能的影响[J]. *油田化学*, 2018, 35(4): 671-675.
- [28] Vegad G D, Jana A K. Viscosity reduction of indian heavy crude oil by emulsification to O/W emulsion using polysorbate-81[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2021, 24(2): 301-311.
- [29] 蒋华义, 张兰新, 孙娜娜, 等. 稠油水包油型乳状液稳定性与流变性影响因素[J]. *油气储运*, 2018, 37(10): 1121-1127.
- [30] Kumar S, Mahto V. Use of a novel surfactant to prepare oil-in-water emulsion of an Indian heavy crude oil for pipeline transportation[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(11): 12010-12020.
- [31] Ramisetty K A, Pandit A B, Gogate P R. Novel approach of producing oil in water emulsion using hydrodynamic cavitation reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(42): 16508-16515.
- [32] Tang S Y, Sivakumar M. A novel and facile liquid whistle hydrodynamic cavitation reactor to produce submicron multiple emulsions[J]. *AIChE Journal*, 2013, 59(1): 155-167. ■