

引用格式: 徐德龙, 高金彪, 李超, 等. 超声波应用于稠油降黏的实验研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 682-685. [XU Delong, GAO Jinbiao, LI Chao, et al. Experimental study of heavy oil viscosity reduction by using ultrasonic wave[J]. Technical Acoustics, 39(6): 682-685.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.005

# 超声波应用于稠油降黏的实验研究

徐德龙<sup>1,2,3</sup>, 高金彪<sup>1,2,3</sup>, 李超<sup>1,2</sup>, 林伟军<sup>1,2,3</sup>, 臧雨宸<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院声学研究所超声技术中心, 北京 100190; 2. 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 稠油在我国已探明的储量中占比 50%以上, 而它的高密度、高黏度等特征使得其开采和运输的难度极大, 因此, 稠油降黏意义重大。超声波技术在稠油降黏的应用中已取得了一定的成效, 但尚未得到现场大规模应用。为探究超声波在稠油降黏过程中的作用规律, 基于室内实验设计了包括超声波发生器、流变仪、电子天平、恒温水浴等仪器组成的超声稠油降黏评价测试平台。在测试平台上, 观测了超声波发电功率、超声作用时间以及油样初始黏度对稠油降黏效果的影响。结果表明, 只有在一定的条件下, 超声波技术在稠油降黏中的应用才能取得较好的效果, 说明了超声波技术对于稠油降黏以及油井的增产增注具有适用性。目前看来, 超声波降黏技术在油田现场实际井中的应用及其降黏机理还需进一步深入的研究。

**关键词:** 稠油; 超声波; 降黏率; 实验研究; 提高采收率

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-06-0682-04

## Experimental study of heavy oil viscosity reduction by using ultrasonic wave

XU Delong<sup>1,2,3</sup>, GAO Jinbiao<sup>1,2,3</sup>, LI Chao<sup>1,2</sup>, LIN Weijun<sup>1,2,3</sup>, ZANG Yuchen<sup>1,2,3</sup>

(1. Research Center for Ultrasonics and Technologies, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Beijing Deep Sea Drilling Measurement Engineering Technology Research Center, Beijing 100190, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The heavy oil accounts for over 50% in the proven reserves in China, but its high density and high viscosity makes it difficult to exploit and transport, so reducing heavy oil viscosity is of great significance. The ultrasonic technology has made some achievements in the application of heavy oil viscosity reduction, but it has not been applied on a large scale in the field. In order to investigate the effect of the ultrasonic wave on heavy oil viscosity reduction, a test platform composed of ultrasonic generator, rheometer, electronic balance, water bath etc. is designed. Based on the experiments, the influences of the electric power of the ultrasonic generator, the irradiation time and the initial viscosity of heavy oil on the reduction rate of heavy oil viscosity are investigated. The results show that the ultrasonic technology can get a better viscosity reduction effect only under certain conditions, which illustrates the applicability of ultrasonic technology in reducing heavy oil viscosity and increasing production and injection of oil wells. At present, it seems that the application of this technology in the actual wells of oil field and its viscosity reduction mechanism still need to be further studied.

**Key words:** heavy oil; ultrasonic wave; viscosity reduction rate; experimental study; enhanced oil recovery

## 0 引言

随着世界经济的发展, 能源的需求与日俱增。截至目前, 化石燃料仍然具有不可替代的作用, 特

别石油和天然气更在其中占据主要地位。作为不可再生能源, 化石燃料日益紧缺的现状, 使人们对非常规原油如稠油、超稠油等的开采更加重视<sup>[1]</sup>。据 2014 年国际能源组织(International Energy Agency, IEA)公布的数据显示, 稠油、超稠油在世界可采石油储量中占比超过 50%, 但二者所具有的高密度、高黏度等特征使得对它们的开采和运输的难度极大<sup>[2-3]</sup>, 因此成本低、效益高、见效快的稠油降黏与开采技术对于油田增产至关重要。目前人们常使用加热、掺稀油、增注降黏剂和超声处理等方法来进行稠油和超稠油的降黏开采, 借以提高他们

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11474305), 中石化重大科技项目(ZDP17005), 国家科技重大专项课题(2011ZX05032-003)和国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-1-07-01)资助项目。

作者简介: 徐德龙(1976—), 男, 山东蓬莱人, 博士, 研究员, 研究方向为处理超声学及工程应用。

通讯作者: 高金彪, E-mail: gaojinbiao@mail.ioa.ac.cn

的流动性，从而进行开采<sup>[4]</sup>。

加热降黏方法是基于稠油的黏度随着温度的升高而降低的原理，通过向油层提供热能，升高油层的温度，降低流体的黏度，增大原油的流动能力，从而提高稠油采收率，该方法在稠油开发和运输中存在耗能大并且会对地层产生破坏等问题<sup>[5]</sup>。掺稀油降黏法是自上世纪 30 年代就开始使用的稠油的开发和运输处理方法<sup>[6-7]</sup>，这种方法是基于相似相溶原理，通过向稠油中掺入稀油降低黏度。该方法的优点是可以直接使用常规的原油管道进行降黏，但后续需对轻质油和稠油进行分离处理，操作复杂，能源消耗大。增注降黏剂的方法可以使稠油形成水包油型(O/W)乳化状态，从而达到降黏目的，其优点是可根据实际情况制备不同的降黏剂，也可与其他方法混合使用，但面临着环保、降黏体系动态稳定性和后期大处理量的挑战<sup>[8]</sup>。与上述三种方法相比较，超声处理方法的优点是环保、节能，并且在适当的条件下可提高上述方法改善稠油流变性的效果<sup>[9-10]</sup>。

超声波采油技术已经在石油开发领域中得到初步的应用，但在稠油降黏和开采方面尚未得到现场大规模的使用，特别是井筒中的稠油降黏方面，尚处在起步阶段<sup>[11]</sup>。本文以中国西部某油田的原油为研究对象，通过对超声波在稠油降黏中的室内实验研究，尝试为超声降黏技术在油田井筒中的应用做一些探索。

## 1 实验平台与过程

实验平台如图 1 所示，所用的仪器主要有流变仪(BROOKFIELD-RV DV-III)、智能数控超声波发生器(TJS-3000)、电子天平(AND GR-202)、托盘天平(JPT-1000)、恒温水浴、烧杯、玻璃棒等，在实验中使用的油样为中国西部某油田提供的稠油和稀油。20℃时，稀油的密度和黏度分别为 0.883 0 g·m<sup>-3</sup>、13.3 mPa·s，稠油的密度和黏度如表



图 1 超声评价测试平台

Fig.1 The experimental test platform for ultrasonic evaluation

1 所示。

表 1 本文实验中用到的稠油的密度和黏度

Table 1 The density and viscosity of heavy oil used in this paper

井编号	地层温度/℃	稠油地层密度/g·cm <sup>-3</sup>	稠油地层黏度/(mPa·s)	稠油地面黏度/(mPa·s) (60℃时)
1#	150.8	0.9472	26.0	470 000
2#	140.3	1.0085	584.0	535 000
3#	149.9	0.9787	261.0	280 000
4#	141.8	1.0238	736.0	900 000
5#	142.8	1.0180	395.0	1 300 000
平均值	145.12	0.9952	400.4	697 000

实验流程如图 2 所示。在实验开始前根据不同的稀稠比、使用电子天平或托盘天平分别配制不同初始黏度的油样，将其在 90℃的恒温水浴中放置 6 h 左右，并使用玻璃棒不断搅拌，当油样混合均匀后即可开始实验(本文中所有实验样品的黏度均在温度为 50℃、扭矩约为 50%的条件下测定)。

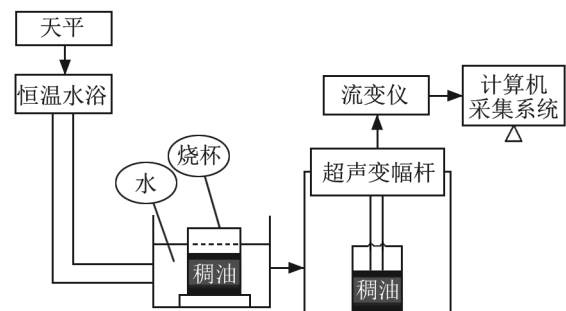


图 2 实验流程示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental process

## 2 实验结果与讨论

对 50℃、200 mL 的油样进行超声处理。考察超声波发生器电功率、超声作用时间和油样初始黏度对油样黏度的影响。采用控制变量法设计实验，部分实验结果如图 3。

从图 3(a)、3(b)可知，初始黏度分别为 22 050 mPa·s、15 667 mPa·s 的油样，用电功率为 1 000 W 的超声波发生器作用 20 s 时，油样黏度分别下降至 17 333 mPa·s 和 14 767 mPa·s；从图 3(c)和图 3(d)可知，当超声波发生器电功率为 2 000 W、作用时间为 20 s 时，油样黏度分别由 7 400 mPa·s、3 200 mPa·s 下降为 6 600 mPa·s、2 800 mPa·s。

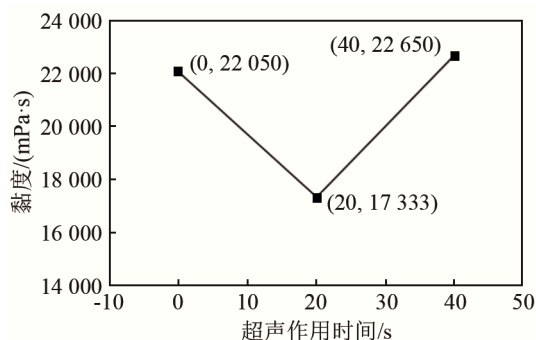
初步分析表明，超声波可在一定情况下降低本文实验所用稠油的黏度，在以上结果基础上开展下一步实验研究。

为具体分析超声波发生器电功率、超声作用时间、油样初始黏度在稠油降黏过程中的作用规律，

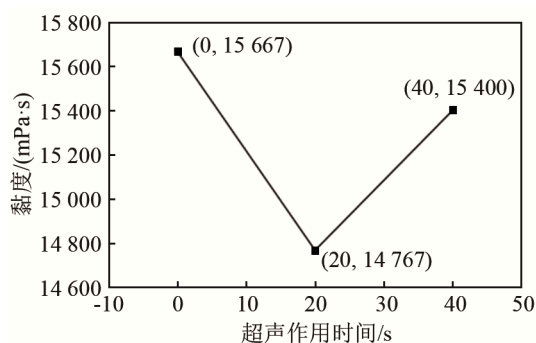
引入“降黏率”作为评价降黏效果的指标:

$$R_{VR} = \frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0} \times 100\% \quad (1)$$

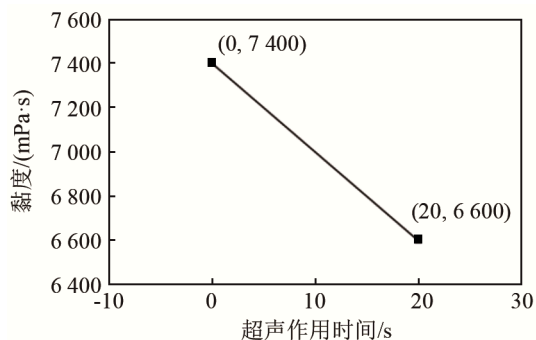
其中:  $R_{VR}$  为降黏率;  $\mu_0$  为油样初始黏度;  $\mu$  为超声处理后油样黏度。



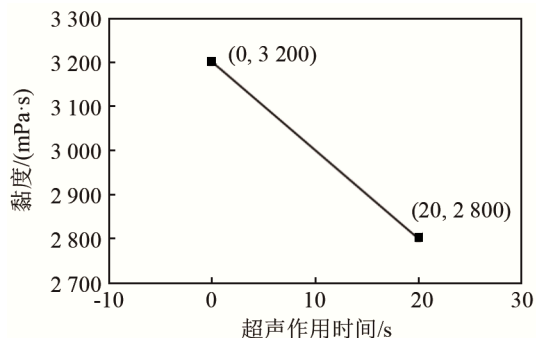
(a) 稀稠比 1:2, 处理量 200 mL, 温度 50 °C, 电功率 1 000 W



(b) 稀稠比 1:3, 处理量 200 mL, 温度 50 °C, 电功率 1 000 W



(c) 稀稠比 1:2, 处理量 200 mL, 温度 50 °C, 电功率 2 000 W



(d) 稀稠比 2:3, 处理量 200 mL, 温度 50 °C, 电功率 2 000 W

图 3 不同因素对稠油降黏效果的影响

Fig.3 The effects of different factors on viscosity reduction

## 2.1 超声波发生器电功率对稠油降黏率的影响

当超声作用时间为 20 s、油样为 200 mL 时, 超声波发生器电功率分别为 500、1 000、2 000 W 时的降黏率分别为-18%、6%、11%, 如图 4 所示。可以看出, 大功率是降黏的必要条件和保证, 电功率为 500 W 时不但不能对本稠油油样起到降黏作用, 反而会促进黏度升高, 其原因初步分析可能是超声波发生器电功率低时, 有可能形成稠油包稀油的油包油状态, 具体需进一步验证。

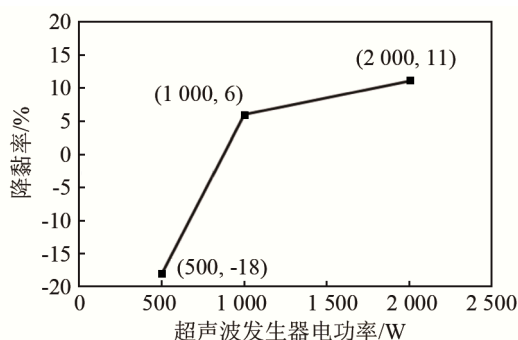


图 4 超声波发生器电功率对稠油降黏率的影响

Fig.4 The effect of the electric power of ultrasonic generator on viscosity reduction rate

## 2.2 超声波作用时间对稠油降黏率的影响

超声波作用时间对稠油降黏率的影响如图 5 所示。当超声波发生器电功率为 1 000 W、处理量为 200 mL 时, 随着时间的增加, 降黏率逐渐增大, 在 20 s 时降黏效果最好, 降黏率为 21%。在此之后, 随着作用时间继续增加时, 降黏率反而降低, 在 40 s 时降黏率为-3%。

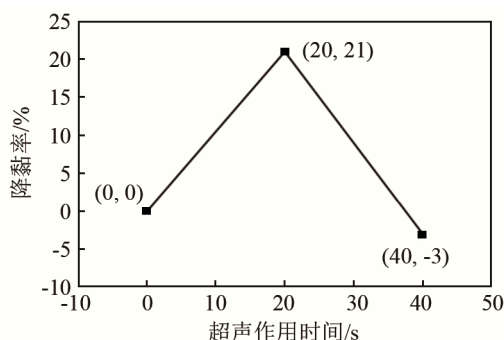


图 5 超声波作用时间对稠油降黏率的影响

Fig.5 The effect of the ultrasonic irradiation time on viscosity reduction rate

## 2.3 油样初始黏度对稠油降黏率的影响

在超声波发生器电功率为 1 000 W、作用时间为 20 s、处理量为 200 mL 的条件下, 进行稠油降黏效果评价。

不同稠油油样初始黏度对降黏率的影响曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出: 1 000 W 电功率的

超声对 200 mL 油样作用 20 s 时，初始黏度为 17 333 mPa·s 的油样降黏效果最好，降黏率为 21%，其次是在 14 767 mPa·s 时。从图 6 中可知，初始黏度介于 10 000~20 000 mPa·s 之间的稠油油样经过超声处理后，降黏率是正值，超声可以起到降黏的作用。

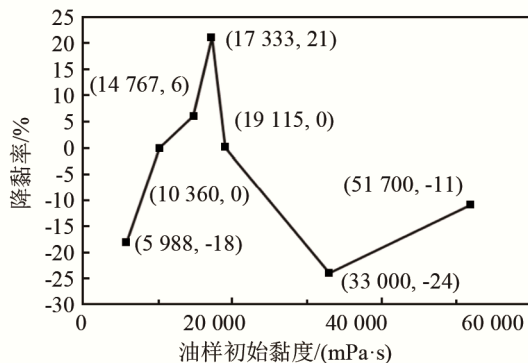


图 6 油样初始黏度对稠油降黏率的影响

Fig.6 The effect of the initial viscosity of heavy oil on viscosity reduction rate

### 3 结论

本文设计了超声波稠油降黏评价测试平台，通过实验证实了超声波技术在一定的条件下可以有效地降低稠油的黏度，并具体分析了超声波发生器电功率、超声作用时间、油样初始黏度这三个因素对稠油降黏效果的影响。通过实验，可以得出以下结论：

(1) 稠油的降黏率与超声波发生器电功率、超声波作用时间、油样初始黏度关系密切；

(2) 适用于本实验稠油样品的最佳降黏条件为超声波发生器电功率 2 000 W、超声作用时间 20 s、油样初始黏度介于 10 000~20 000 mPa·s 之间；

(3) 利用超声波技术处理稠油，在一定条件下可以降低其黏度，提高其流动性，有利于稠油的开采和运输。但是超声稠油降黏技术在油田现场实际井中的应用以及其中的降黏机理还需要进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] ALBOUDWAREJ H, FELIX J, TAYLOR S, et al. Highlighting heavy oil[J]. *Oilfield Rev*, 2006, 18(2): 34-53.
- [2] XU D L, DENG J J, LI C, et al. Research on viscosity reduction of oil in water for ultra-heavy oil by using of ultrasonic wave[C]//Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration. International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 2014: 24-26.
- [3] 徐德龙, 邓京军, 李超, 等. 超重油降黏中超声波作用的研究[J]. *声学技术*, 2014, 33(6): 517-521.  
XU Delong, DENG Jingjun, LI Chao, et al. Effects of ultrasonic wave on viscosity reduction for Venezuela and Fengcheng ultra heavy oil[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(6): 517-521.
- [4] REHMAN M M, MERIBOUT M. Conventional Versus Electrical Enhanced Oil Recovery: A Review. *J Petrol Explor Prod Technol* [J]. 2012, 2(4): 157-167.
- [5] 刘文胜, 郭东旭. 稠油输送技术及方法[J]. *石油科技论坛*, 2008(2): 53-57.  
LIU Wensheng, GUO Dongxu. The technology and method of delivery of heavy oil[J]. *The Oil Technology Forum*, 2008(2): 53-57.
- [6] 柳荣伟, 陈侠玲, 周宁. 稠油降黏技术及降黏机理研究进展[J]. *精细石油化工进展*, 2008, 9(4): 20-24.  
LIU Rongwei, CHEN Xialing, ZHOU Ning. The research progress of viscosity reduction technology and mechanism[J]. *The Progress of Fine Petrochemical Industry*, 2008, 9(4): 20-24.
- [7] RAFAEL M P, MARÍA D L M, BEATRIZ Z R, et al. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 75(3): 274-282.
- [8] 王培. 稠油降黏剂降黏技术研究[J]. *辽宁化工*, 2018, 47(9): 960-965.  
WANG Pei. Study on the viscosity reduction technology of the heavy oil viscosity agent[J]. *Liaoning Chemical*, 2018, 47(9): 960-965.
- [9] MOHAMMADREZA M S, AHMAD R, IMAN N, et al. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils[J]. *Pet. Sci.*, 2012, 9(1): 82-88.
- [10] ABRAMOV V O, ABRAMOVA A V, BAYAZTION V M, et al. Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction[J]. *Applied Acoustics*, 2016(103): 214-220.
- [11] 贺丽鹏, 丁彬, 耿向飞, 等. 新疆油田 9-7 区超稠油超声波辅助化学降黏[J]. *石油化工*, 2016, 45(1): 97-101.  
HE Lipeng, DING Bin, GENG Xiangfei, et al. Ultrasonic-assisted chemical viscosity reduction for Xinjiang block 9-7 ultra heavy oil[J]. *Petrochemical Technology*, 2016, 45(1): 97-101.