

文章编号: 1001 - 6112(2006)02 - 0191 - 05

超声波对油层作用效应的实验研究

王瑞飞¹, 孙卫¹, 尤小健², 张荣军³, 程华⁴

(1. 西北大学 地质学系, 西安 710069; 2. 胜利油田 桩西采油厂, 山东 东营 257237;
3. 西安石油大学 石油工程学院, 西安 710065; 4. 中国石油 长庆油田分公司, 西安 710021)

摘要: 利用超声波可以改变介质渗流特性和流体流变性的原理, 研究了超声波作用前后岩心渗透率变化曲线和压力梯度变化曲线, 探讨了超声波在油层中作用的有效距离。研究结果表明, 超声波处理后, 原油的视粘度显著降低, 反映了明显的声流变特性; 超声波的作用功率越高, 原油的降粘作用越大; 超声波作用频率越低, 原油的降粘幅度越大; 原油粘度越高, 降粘幅度越大。

关键词: 超声波; 渗透率; 流变性; 解堵; 视粘度

中图分类号: TE31

文献标识码: A

1 实验装置

应用超声波技术处理油井和油层可提高原油产量 40% ~ 50%, 提高原油采收率 10% 以上, 其油井(或油层)施工成功率可达到 80% [1~3]。为系统研究超声波对油层流体的作用效应及超声波在油层中的传导特性, 建立了图 1 所示的超声波采油实验装置。岩心夹持器共有 4 个测量段, 5 个测压点, 并与超声波换能器相连。利用该装置可在恒温条件下进行超声波传导特性和渗流特性实验研究。

实验采用 UG— 型功率超声发生器, 它可以在 8 ~ 100 kHz 频率范围内输出 0 ~ 500 W 的功率信号, 并可变换多种输出阻抗及匹配参数。实验岩心为长度 40 cm、渗透率分别为 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以及 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的天然岩心和人造岩心。

2 超声波对岩心渗流特性的影响

以水为实验液, 在室温条件下, 用不同频率的超声波作用于天然岩心进行渗流实验。实验结果如图 2 所示。

经超声波处理可恢复或提高岩心渗透率 [4]。超声波作用时, 岩心渗透率明显提高; 停止作用时, 岩心渗透率有所下降, 但最终渗透率比超声波作用前渗透率有所提高。对于被钻井液、蜡、机油、微粒、聚合物等污染的岩心, 通过超声波作用其渗透率也可以得到明显提高。

由以上实验及参考文献 [4] 可知, 渗流过程中超声波对于流体在多孔介质中的渗流速度及渗透率具

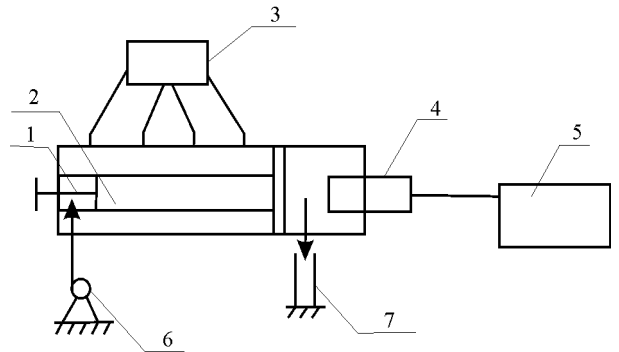


图 1 超声波作用实验装置

1. 岩心夹持器; 2. 岩心; 3. 测压系统; 4. 超声波换能器;
5. 超声波发生器; 6. 高压泵; 7. 量筒

Fig. 1 Schematic map of the experimental devices

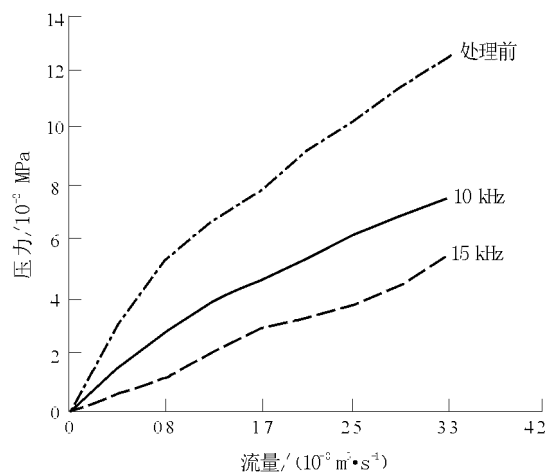


图 2 超声波作用下的岩心渗流曲线

Fig. 2 Curves of the core flow under the ultrasonic reaction

收稿日期: 2005 - 09 - 30; 修订日期: 2006 - 02 - 11。

作者简介: 王瑞飞 (1978 —), 男 (汉族), 黑龙江兰西人, 博士生, 主要从事油田开发研究工作。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2003CB214600)。

有较明显的影响。在同一注入量条件下,15 kHz 的超声波作用于岩心可将压差降低 50% 左右;超声波作用于受伤害的地层岩心后,其渗透率明显高于原始渗透率,提高幅度一般在 6%~40% 之间。

实验分析认为,超声波作用后岩心渗流特性的改善,除了超声波的解堵和造缝作用外,还有机械作用、空化作用和热作用等^[5]。

2.1 机械作用

未受声波扰动前,岩心柱压力(外压)和油藏压力(内压)及岩石骨架所承受的压力(外压与内压的压差)处于平衡状态。在声波的作用下,平衡遭到破坏。声压的周期性变化使毛管孔径随压差发生周期性的胀大和缩小,流体的渗流特性得到改善。

2.2 空化作用

强声场在流体中传播时,由于媒质吸收了波的动量和能量,流体会产生非周期流动,形成声流。声流通常具有涡旋性质,由物体振动所引起的流体运动在物体周围某一层内具有有旋性质,而经过一个较大的距离就迅速变为势流。有旋流穿透深度的量级^[6]为:

$$= \quad (1)$$

式中:为运动粘度, m^2/s ; 为振动角频率, s^{-1} ; 为声附面层厚度, m 。

声波的产生必须满足 $2 < d$ (d 为孔隙直径, m)。只有这样,才能构成闭合回路,出现环流。储层孔隙中能否产生声流,主要取决于声附面层厚度与孔隙直径的相对大小。流体粘度对声流的影响是双重的。粘度增大,媒质吸收波的能量和动量都增加,从而提高声流速度。同时,粘度大,流体运动所受的粘滞阻力就大,从而降低它的速度。固-液界面上由于吸收波的能量而使界面温度升高,粘度降低,声附面层厚度减小。这样,孔隙中产生声波的机率大大增加。

2.3 热作用

热作用主要是由边界摩擦所造成的。声波进入饱和流体多孔介质后能量衰减方式主要有 2 种:一是基质矿物的固有粘弹性衰减;二是颗粒与颗粒及颗粒与裂缝间相对运动的摩擦损耗。岩石的固有粘弹性很小,因此在研究岩石骨架衰减时,只考虑颗粒表面间的衰减。界面间相对运动的摩擦损耗是能量衰减的主要因素。

当在多孔介质中传播慢纵波时,固体骨架和其中饱和的流体之间运动呈反向,而在快纵波中也可发生相对位移,这种相对运动必然造成弹性能量耗

散。通过计算得到,振动平面上单位面积、单位时间内耗散能量^[7]为:

$$I = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho u \quad (2)$$

式中: A 为振动波的振幅, m ; ω 为振动角频率, s^{-1} ; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; u 为波速, m/s ; I 为波的强度, W/m^2 。

假定这些能耗全部转化为热能,则:

$$Q = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho u \quad (3)$$

式中: Q 为热流量密度, W/m^2 。

由上式可得出因振动而转化的热能或固-液系统温度升高值。边界摩擦产生的程度取决于固-液界面,因而也就决定于多孔介质本身的孔隙结构、表面润湿性及饱和于其中的流体性质。

上述对超声波作用机理的分析和实验结果均表明,超声波可以明显地改善流体在岩心中的渗流特性。

3 超声波对原油流变性的影响

超声波改善原油流变性主要表现为热效应和解聚效应。超声波在传播介质内部的吸收、在不同介质分界处和边界的摩擦作用都可产生热,使原油温度上升,粘度降低。在高频、高温超声波作用下,机械振动使原油分子产生较大的加速度,形成分子间的相对运动。由于分子惯性,使得分子链断裂,大分子变成小分子,其粘度降低。另外,在声场中由于剧烈振荡,原油分子结构产生周期性排列组合,这种分子结构的变化也会使其粘度发生明显的变化。为了研究声波对原油流变性的影响,建立了如图 3 所示的实验装置。

实验样品为某油田原油,在变频率、变功率的

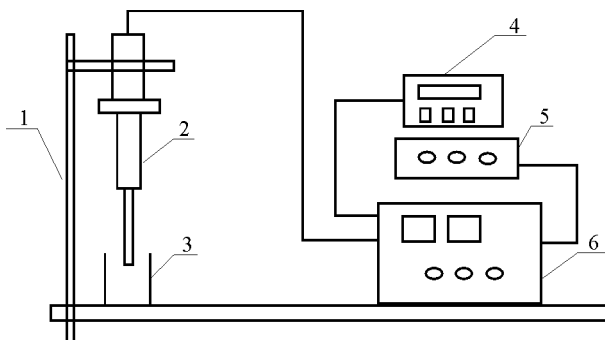


图 3 超声波处理原油实验装置

1. 支架; 2. 超声波探头; 3. 样品;
4. 频率计; 5. 匹配箱; 6. 超声波发生器

Fig. 3 Experimental apparatus of treating crude oil by ultrasonics

条件下处理 4 h。将处理后的原油在 RS150H 型流变仪上测量其流变曲线,如图 4 所示。由实验结果可知,经超声波处理后的原油视粘度明显下降,下降幅度在 51.4% ~ 65.4% 之间。原油粘度越大,下降幅度越大。超声波作用功率越高,原油的降粘幅度越大,说明大功率超声波对原油分子具有较强的破坏作用。超声波频率越低,原油的降粘幅度越大。

4 超声波在油层中有效作用距离

以上几个实验均表明,超声波对于提高渗流速度、提高岩心渗透率、降低原油粘度都是十分有效的。但它在实际生产中能否改善水驱效果,关键取决于超声波场的有效作用距离^[8]。目前功率超声的检测技术还属国际难题,尚未攻克,无法直接测量超声波在岩心中的传播衰减规律。为此,用一种间接方法来评价超声波在油层中的有效作用距离。设计适当长度的岩心,用超声波进行处理,

测量各段岩心的表观渗透率 K_i ,将 K_i 与该段岩心的原始渗透率 K_{0i} 相比,定义参数 $R = K_i / K_{0i}$ 作为超声波在岩心中有效作用距离的评价标准。若 $R > 1$,则表明超声波对改善岩心渗透率没有明显效果。

图 5 是超声波作用下岩心渗透率变化曲线。从图中可以看出,在 5 cm 左右距离内,超声波的影响较大,而大于这一距离后超声波的影响很小,说明超声波的有效作用距离不大于 6 cm。从图中还可以看出超声波的作用时间对有效作用距离的影响不大。

图 6 是不同排量时超声波作用前后压力梯度的变化情况。图中虚线为超声波作用前的压力梯度曲线,实线为超声波作用后的压力梯度曲线。从图中可以看出,第一段岩心压力梯度降低幅度最大,而其它测量段压力梯度变化幅度很小。这一实验结果也间接证明了超声波的有效作用距离很小,大约 6 cm 左右。

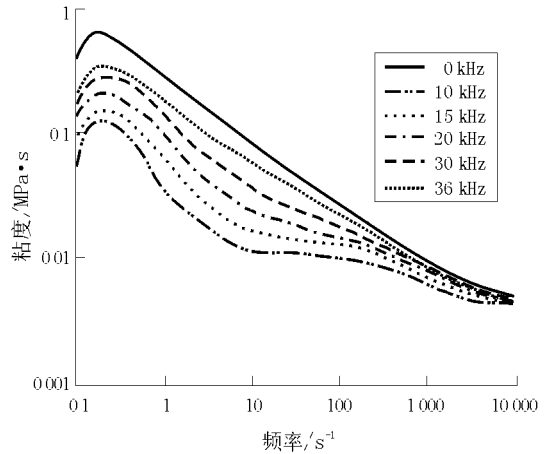
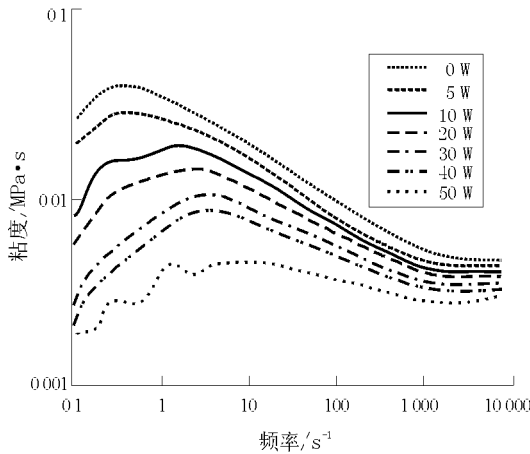


图 4 超声波对原油流变性的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonics on the rheological property of crude oil

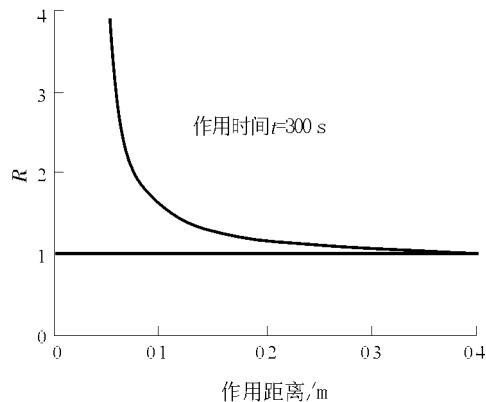
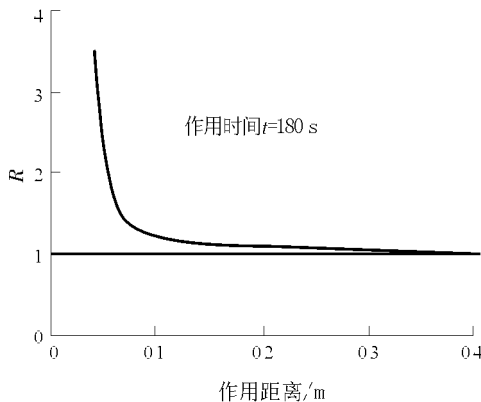


图 5 超声波作用下岩心渗透率变化曲线

Fig. 5 Curves of core permeability change under ultrasonic reaction

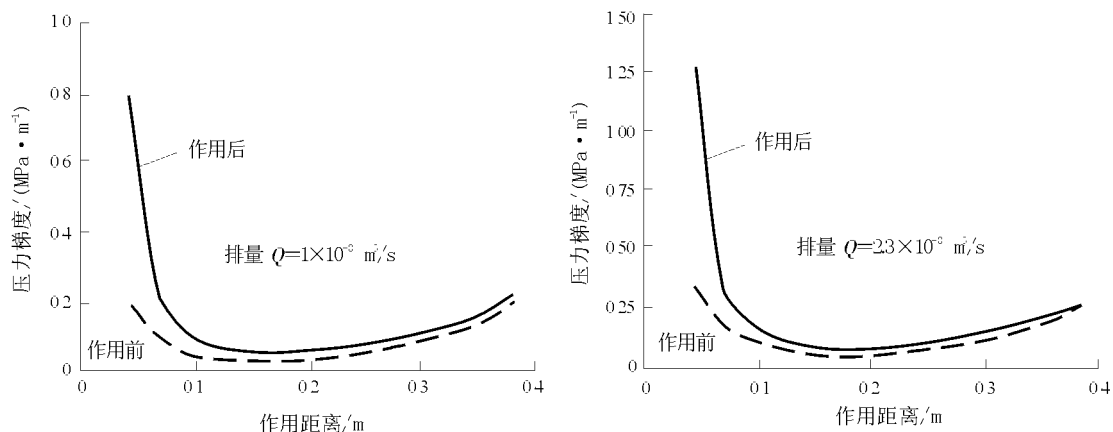


图6 超声波作用前、后压力梯度变化曲线

Fig. 6 Curves of pressure gradient before and after ultrasonic reaction

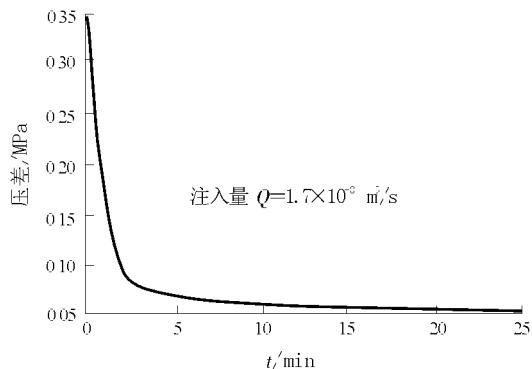


图7 超声波解堵实验曲线

Fig. 7 Experimental curve of braking down by ultrasonics

5 超声波的解堵效应

实验中,超声波如果作用于注入端,很容易造成岩心堵塞。测得各段岩心压力升高,而且作用时间越长这种堵塞就越严重。在岩心形成堵塞后,将超声波作用于采出端,由于超声波的作用又使得形成的堵塞逐渐解除。在解堵实验中,可以观察到流出的流体中携带着大量的黑色杂质,并且压差急剧降低,在5 min内便趋于稳定,表明堵塞解除(图7)。

6 结论

1) 超声波是一种非常有效的解堵技术。注水井应用超声波技术时应注意,超声波作用后必须及时返排,否则将造成水井周围深部的地层堵塞。

2) 超声波作用功率越高,原油降粘幅度越大;超声波作用频率越低,原油降粘幅度越大;原油粘度越高,降粘幅度越大。

3) 对于那些无法应用化学驱技术的低渗及其它复杂油藏,超声波结合水力振动增产、增注技术^[9~12]可能更有发展前景。

参考文献:

- 1 钟 锴,徐鸣洁,王 宏等. 岩样中孔隙、裂缝声波特征的实验研究[J]. 石油实验地质,2002,24(2):164~171
- 2 庄爱民. 超声波采油技术装备的应用及发展前景[J]. 石油机械,1995,23(2):55~57
- 3 向 阳,向 丹,黄大志. 裂缝—孔隙型双重介质应力敏感模拟试验研究[J]. 石油实验地质,2003,25(5):498~504
- 4 顾春元,虞建业,任永林等. 超声波采油技术研究与应[J]. 钻采工艺,2003,26(6):59~61
- 5 杨永超,宋新华,刘明锋. 超声波油层解堵技术的应用[J]. 油气井测试,1999,8(3):46~48
- 6 Frank M White. 流体力学[M]. 陈建宏译. 台北:晓园出版社,1986.127~136
- 7 程守洙,江之水. 普通物理学第三册[M]. 第5版. 北京:高等教育出版社,1997.87~98
- 8 孙仁远,严焱培. 超声波对岩石渗透率影响的研究[J]. 石油钻采工艺,1996,18(1):101~103
- 9 Guo Xiao, Du Zhimin, Li Guangquan. High frequency vibration recovery enhancement technology in the heavy oil fields of China[A]. In: SPE ed. International thermal operations and heavy oil symposium and western regional meeting treatise[C]. California: SPE,2004.86956-MS
- 10 Schembre J M, Kovscek A R. Thermally induced fines mobilization: Its relationship to wettability and formation damage [A]. In: SPE ed. International thermal operations and heavy oil symposium and western regional meeting treatise[C]. California: SPE,2004.86937-MS
- 11 张守鹏,王伟庆,夏 云. 提高油层渗透率的酸—岩作用原理与油层改造应用实例[J]. 石油实验地质,2000,22(1):77~80
- 12 徐守余. 渤海湾盆地胜坨油田二区储层微观渗流场演化研究[J]. 石油实验地质,2003,25(4):381~384

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTRASONIC EFFECT IN OIL RESERVIOR

Wang Ruifei¹, Sun Wei¹, You Xiaojian², Zhang Rongjun³, Cheng Hua⁴

(1. *Department of Geology, Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China;*

2. *Zhuangxi Oil Production Plant, Shengli Oil Field, Dongying, Shandong 257237, China;*

3. *Faculty of Petroleum Engineering, Xian Petroleum University, Xian, Shaanxi 710065, China;*

4. *Changqing Oil Field, CNPC, Xian, Shaanxi 710021, China)*

Abstract :By means of the principle that ultrasonic reaction can change the flowing of fluids through porous media and fluid rheological behaviours, the changes of the curves of core permeability and pressure gradient before and after ultrasonic reaction have been researched. The efficient distance of ultrasonics in the oil layer was discussed in the paper. The study results show that the apparent viscosity of crude oil after ultrasonic reaction decreased greatly, and that the sound rheological behavior of the oil is obvious. The bigger the ultrasonic reaction power is, the stronger the effect on viscosity reduction of crude oil is. The lower the ultrasonic frequency is, the greater the extent of viscosity reduction of crude oil is. The higher the oil viscosity is, the greater the extent of viscosity reduction of crude oil is.

Key words :ultrasonics; permeability; rheological behavior; plug removal; apparent viscosity

(上接第 190 页)

11 李明成,孙大明. 地流体、封隔体和油气系统与油气运移的关系[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(4):29~34

12 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormal pressure fluid compartment[J]. AAPG Bull,1990,74(1):1~12

13 秦建中,钱志浩,曹寅等. 油气地球化学新技术新方法[J]. 石油实验地质,2005,27(5):519~528

14 蒋有录,张一伟,冉隆辉等. 川东地区志留系—石炭系含气系统天然气运移聚集机理[J]. 石油学报,2001,22(1):25~30

RELATIONSHIPS BETWEEN FORMATION WATER VERTICAL ZONING AND OIL AND GAS ENRICHMENT IN LANGGU SAG OF THE BOHAIWAN BASIN

Zhang Xiaoli^{1,2}, Zha Ming¹, He Shuanzhu³, Wang peng²

(1. *China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;* 2. *Key Laboratory for Continental*

Dynamics of the Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China; 3. *The 4th Production Plant, Huabei Oilfield, PetroChina, Langfang, Hebei 065000, China)*

Abstract :Formation water vertical characteristics are complex in Langgu sag, Jizhong depression. The vertical distributions of the formation water chemic and dynamical belts have obvious zoning features. According to the vertical characteristics of the formation water chemic and dynamical belts and the relations with fluid compartment and distribution of oil and gas in Gu'an-Jiuzhou, Liuquan-Caojiawu and Hexiwu tectonic belts, it is considered that formation water can be divided into four belts vertically. They are formation water alternate fluency belt, formation water alternate blocking belt, formation water alternate tardy belt and formation water frequency alternation belt. It is also considered that formation water alternate blocking belt tallies with fluid compartments and is the beginning segments of oil and gas enrichment. Meanwhile, formation water alternate tardy belt basically locates under the fluid compartment and it is the favorable area of oil and gas enrichment. Furthermore, the area with relatively high value of salinity in the lower salinity background is available to oil and gas enrichment.

Key words :formation water; chemic and dynamical belts; salinity; fluid compartment; oil and gas enrichment; the Langgu Sag; the Bohaiwan Basin