文章编号:1673-5005(2008)04-0034-04

疏松砂岩油藏注水开发声波速度的影响因素

辛治国[1,2], 隋淑玲[2], 王维政[3], 荣 磊[3], 李世杰[2]

(1. 中国地质大学 能源学院,北京 100083; 2. 中石化胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257015;
3. 中石化胜利油田分公司 东辛采油厂,山东 东营 257015)

摘要:由于疏松砂岩声波纵、横波速度的影响因素较多,因此有必要对各影响因素进行定量研究。在模拟地层条件下直接对岩心进行饱和、驱替试验,建立不同的油、水饱和度,并在驱替过程中进行了纵、横波速度的连续测试。结果表明:水驱至含水饱和度极限时,岩心纵波速度平均增加 7.4% 左右,横波速度基本不变;在水驱过程中,由于岩石骨架发生变化,岩石变得疏松,致使岩心纵波速度降低 3.1% 左右,因此水驱至含水饱和度极限时,最终的岩心纵波速度只增加 4.3% 左右;对于注水效果好的稀油油藏,温度及压力对声波速度的影响较弱,但是对于地层能量补充不充分的区块及稠油油藏,温度及压力对声波速度的影响不能忽略。

关键词:疏松砂岩油藏; 纵波速度; 横波速度; 岩石声波特征

中图分类号:TE 34; P 631.814 **文献标识码**:A

Influential factors of acoustic velocity in the course of waterflood development of unconsolidated sandstone reservoir

XIN Zhi-guo[1,2], SUI Shu-ling[2], WANG Wei-zheng[3], RONG Lei[3], LI Shi-jie[2]

(1. *School of Energy Resources in China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying* 257015, *Shandong Province, China*;
3. *Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying* 257015, *Shandong Province, China*)

Abstract: Because there are many influential factors in experiment of acoustic velocity testing of unconsolidated sandstone, quantitative study is short of the influential factors. The core saturating and displacing experiments were done in the same core under the simulated reservoir conditions. Various water and oil saturation degree was established. And continuous measurements of compressional velocity and shear velocity were made in the course of displacing. The results show that the compressional velocity increases averagely about 7.4% because of the changing of saturation degree in the course of waterflood. Because of the changing of rock skeleton in the course of waterflood, compressional velocity decreases about 3.1%. The final compressional velocity increases about 4.3%, and shear velocity is unchangeable when water saturation degree changes. Temperature and pressure effects are weak to acoustic velocity for thin oil reservoir with efficient waterflood. But temperature and pressure effects must be considered for heavy oil reservoir and the block in which its producing energy cannot be compensated sufficiently.

Key words: unconsolidated sandstone reservoir; compressional velocity; shear velocity; rock acoustic character

随着地震勘探技术在油田开发中的应用,特别是地震油藏监测技术的发展,综合利用纵、横波资料直接识别油藏流体特征的技术便成为关注和研究的焦点。此前国内外许多专家和学者在理论上和试验中研究认为,在油田开发过程中储层孔隙度、密度以及地层压力等因素的变化,导致地震反射发生相应的变化[1-10];也有学者对饱和不同流体的人造岩心和干燥岩心样品进行了试验研究,显示饱和水岩样

收稿日期:2008-03-03

基金项目:国家科技攻关项目(2003BA613A10)

作者简介:辛治国(1977-),男(汉族),山东济南人,工程师,博士研究生,从事油田开发地质研究。

万方数据

波速最高，饱和油岩样波速次之，饱和气岩样波速最低[11-14]。由于试验条件的限制，前期的试验一般是在单轴覆压模拟地层条件下进行纵波速度测试，而且在改变流体性质时还需要将样品卸压后在其他设备上进行流体饱和。这样试验操作步骤增加，使岩样的孔隙结构及流体饱和度均发生不可预测的变化，疏松砂岩弹性波速会受到岩石成分、微观结构以及流体类型等的影响[1-2]，因此，试验结果会有一定的偏差，只能定性反映声波变化规律，不能定量反映声波的变化量。笔者在模拟地层条件下对同一岩心样品水驱进行声波特征连续测试，探讨疏松砂岩油藏声波响应特征，为定量判断油层水淹状况提供理论基础。

1 试验样品

试验样品取自胜利油区孤岛油田，储层埋深 1.4 ~ 1.7 km，岩心孔隙度 30% ~ 36%，平均孔隙度 34%，渗透率 0.96 ~ 6 μm^2，平均渗透率 3.8 μm^2，岩石密度 1.75 ~ 2.28 g/cm^3，平均密度 2.08 g/cm^3，平均泥质含量 1.1%，属于胶结疏松的高孔、高渗砂岩。截至取心时，所在区块综合含水率为 96.6%，采出程度为 35.0%，岩心测试含油饱和度为 30% ~ 45%。

2 试验装置及试验方法

2.1 试验方案设计

2.1.1 三轴应变试验条件

室内试验所用设备是胜利油田有限公司地质科学院从美国引进的具有世界先进水平的三轴岩石力学测试系统。在整个试验过程中，三轴岩石力学测试系统都是由计算机自动控制，加压、降压、卸载以及在各试验路径过程中，都采用液压伺服控制，可以控制模拟岩石所受的上覆压力、水平压力、孔隙流体压力和测试岩石样品的力学、声学、压缩等特性的多项参数。

2.1.2 试验流程

声波测试原理见图 1。由脉冲发波器发出频率为 1 MHz 的电压脉冲，同时触发示波器扫描和岩心样品上的发射探头，发射探头的压电晶体将接收到的电脉冲转换成适当的机械脉冲，机械脉冲经过样品传播后被接收探头接收，接收探头的压电晶体又把机械脉冲转换回电信号并传到示波器上。声波在端帽和耦合层中的传播时间 t_0 可以预先测得，这样可以获得声波在岩样中的传播时间 t，根据岩样的长度可以计算出声波在该岩样中的传播速度。

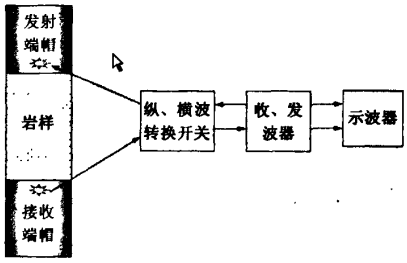

图 1 声波测试原理图

在计算机自动控制下，模拟地层条件下的温度、压力状态，进行岩心的超声波测试，从而得到试验岩心的纵、横波速度以及弹性参数。为了消除在饱和、驱替拆卸和封装等过程中饱和度及岩石骨架等参数的改变，对三轴岩石力学测试系统进行了改进，实现了在三轴测试仓内直接对岩心进行饱和、驱替，建立不同的油、水饱和度，并可在驱替过程中同时进行纵、横波速度的连续测试，从而可消除诸多外因对测试结果的影响。

2.2 试验方法

(1)钻、切、磨岩心。试验采用液氮浇注法，即岩心首先用液氮冷冻，在试验岩心柱钻取、切割和端面磨制的同时往岩心上浇注液氮，确保岩心成型，同时也避免了岩心内原状流体的改变。

(2)封装、洗油。常规的处理方法是煮蜡法，即蜡液在高温下渗入岩心，冷却后用水作循环液，钻切成小圆柱，在岩心外封装铅皮后封压成型，然后洗油洗蜡。对于声波测试来说，铅皮的存在不但影响声波在岩心中的传播速度，同时也影响岩心应变的测试结果。为此，提出了“热缩套封装法”，并专门设计加工了环铅皮法的热缩套状铝合金端帽，以方便洗油液的渗流。声波测试封样时，可以取下铝合金端帽，直接装上声波测试端帽(图 2)，这样不但保证了洗油质量，更保证了声波测试结果的准确性和岩心骨架维持原状。

(3)波速测量。将洗油、烘干的砂岩岩样在天平上称重后，抽空饱和水或煤油，再称重。将岩样封装到三轴压力测试舱中，模拟至地层有效应力条件且应力平衡后，以 0.2 mL/min 的速度用煤油驱替 2 倍孔隙体积，然后用盐水驱替煤油，建立不同的油、水饱和度，在环境条件模拟和驱替的不同阶段，随时进行声波速度测试。

此次测试人造岩心 2 块次；原状地层流体的砂岩岩样 30 块次；洗油后干燥饱含气岩样 20 块次；饱

万方数据

和盐水的岩样 21 块次;建立不同油、水饱和度岩样 19 块次。

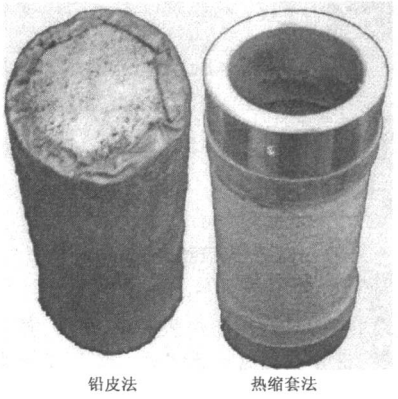

图 2 松散岩心的封装方法

3 测试结果分析

3.1 水驱过程中声波响应特征

水驱过程中,测试到的岩心样品纵波速度随着含水饱和度的增加而增大(图 3),增大幅度在 2.3% ~ 7.3%,平均增大 4.3%。其中第 169 号样品埋深 1.4769 km,岩性为深灰色油斑粗砂岩,孔隙度为 37.7%,密度为 2.099 g/cm^3,在含水饱和度为 0 ~ 75% 时,测试其纵波速度增加 159 m/s,增大 7.4%;第 353 号样品埋深 1.5289 km,岩性为棕褐色油浸细砂岩,孔隙度为 30.0%,密度为 2.148 g/cm^3,含水饱和度为 0 ~ 70% 时,测试其纵波速度增加 73 m/s,增大 2.3%。改变岩心中的油、水饱和度,横波速度几乎没有变化。这一认识与 Gass 的研究成果是一致的,他认为低速岩石(疏松砂岩)含有饱和液体的体积模量较大时(如油或水)纵波速度增幅会超过 10%,但是本次试验 10 块连续水驱岩心样品纵波速度变化结果均远小于 10%,这也是目前地球物理技术条件下预测剩余油比较困难的原因。

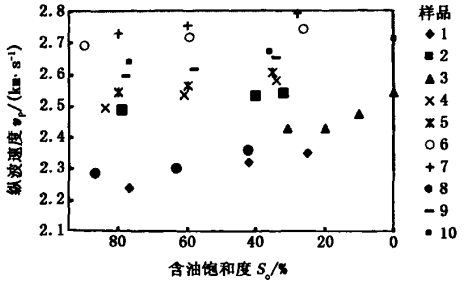

图 3 水驱过程中纵波速度变化规律

试验过程中温度、压力条件保持不变,造成纵波速度变化的原因主要有两个:一是岩石骨架变化;二是流体成分变化。

3.2 岩石骨架变化对纵波速度的影响

随着注水开发的进行,储层的物性条件将会发生变化,对纵波速度产生影响的主要是颗粒间填隙物被驱替液携带出来,造成颗粒骨架接触关系发生变化,部分点-线式接触的颗粒变成点-点式接触(图 4),颗粒骨架变得更加松散,使得纵波速度降低。

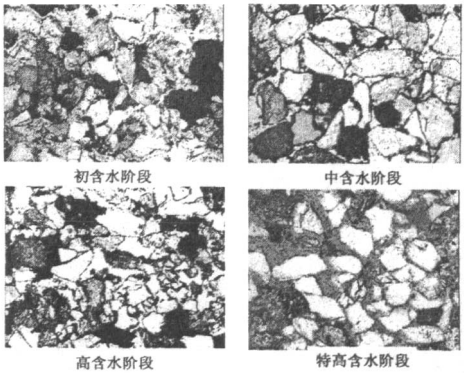

图 4 水驱过程中孔隙结构变化规律

试验表明:注水冲刷以后岩石骨架的纵波速度由 2.306 km/s 降低为 2.237 km/s,降低 69 m/s,降低幅度为 3.1%;横波速度由 1.284 km/s 降低为 1.273 km/s,变化不大。

3.3 流体成分变化对纵波速度的影响

(1)气液交换的影响。气液交换对纵波速度的影响非常明显,气层开发最终成为水层后纵波速度可以增加 10% ~ 30%,平均增加 16.5%(图 5),横波速度变化不大,平均增长 1%。

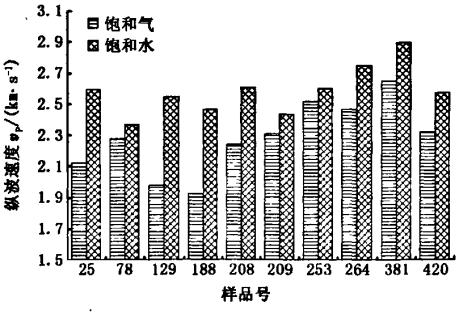

图 5 气层开发纵波速度变化特征

(2)含油饱和度变化的影响。在水驱过程中,随着含油饱和度的降低,纵波速度增加,而横波速度基本不变。根据人造岩心水驱试验研究发现,从岩心饱含油到含水饱和度达到 59.2% 时,纵波速度增

万方数据

长幅度为3.7%。根据以往取心研究成果,当油层剩余含油饱和度达到40%,驱油效率在30%时,河流相油藏的采出程度只有17%~20%,仅相当于胜坨油田20世纪80年代初的开发程度。随着开发程度进一步增强,含油饱和度会进一步降低,纵波速度将会进一步增加,当注水至含水饱和度极限时,其对纵波速度的影响可以达到5.4%~10.4%,平均为7.4%。

3.4 压力变化对纵波速度的影响

在开发过程中,高孔、高渗储层能量补充比较容易,注采对应程度较高,因而压力变化对纵波速度的影响较弱。但是对于地层能量补充不充分的区块,这种影响还是非常显著的。

随着平均有效应力的增加,岩石孔隙度减小,岩石的杨氏模量、体积模量和剪切模量均增大,波速随之增大,增大的程度随岩样及其中流体性质的不同而各异。干燥饱和气岩样的波速随平均有效应力的增加,变化幅度最大,饱和液体的砂岩波速变化较为平缓(图6)。

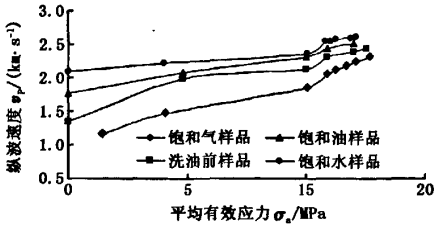

图6 纵波波速与平均有效应力关系曲线

4 结 论

(1)水驱至含水饱和度极限时,岩心纵波速度平均增加7.4%左右,横波速度基本不变;在水驱过程中,由于岩石骨架发生变化,岩石变得疏松,致使岩心纵波速度降低3.1%左右,这样水驱至含水饱和度极限时,最终的岩心纵波速度只增加4.3%左右。

(2)对于注水对应好的稀油油藏,温度及压力对声波速度的影响较弱,但是对于地层能量补充不充分的区块及稠油油藏,温度及压力对声波速度的影响不能忽略。

致谢 在研究过程中得到了胜利油田地质科学研究院程会明、曲岩涛高级工程师的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] GUTIERREZ. Rock physics and 3-D seismic characterization of reservoir heterogeneities to improve recovery efficiency [D]. Dalo Alto: Stanford University, 2002.

[2] AVSETH. Combining rock physics and sedimentology for seimic reservoir characterization of North Sea turbidite systems [D]. Dalo Alto: Stanford University, 2000.

[3] 赵群. 疏松砂岩储层物性参数敏感性物理模拟试验[J]. 石油学报,2006,27(4):93-96.
ZHAO Qun. Physical modeling experiment on sensitivity of physical parameters of loose sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(4):93-96.

[4] 王大伟,刘震,赵伟,等. 利用时移地震资料划分油藏流体流动单元的可行性分析[J]. 地球物理学报,2007,50(2):592-597.
WANG Da-wei, LIU Zhen, ZHAO Wei, et al. Feasibility analysis on division of flow units using time lapse seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007,50(2): 592-597.

[5] BATZLE M, WANG Z. Seismic properties of pore fluids [J]. Geophysics, 1992,57(11):1396-1408.

[6] WANG Z. Fundamentals of seismic rock physics[J]. Geophysics, 2001,66(2):398-412.

[7] SMITH Tad M, SONDERGELD Carl H, CHANDRA S R. Gassmann fluid substitutions: atutorial[J]. Geophysics, 2003,68(2):430-440.

[8] HAN D, BATZLE M. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities [J]. Geophysics, 2004,69(2):398-405.

[9] 马中高,解吉高. 岩石的纵横波速度与密度的规律研究[J]. 地球物理学进展,2005,20(4):905-910.
MA Zhong-gao, XIE Ji-gao. Relationship among compressional wave, shear wave velocities and density of rocks[J]. Progress in Geophysics, 2005,20(4):905-910.

[10] 宋丽莉,葛洪魁,王宝善. 疏松砂岩弹性波速的实验研究[J]. 测井技术,2004,28(6):487-491.
SONG Li-li, GE Hong-kui, WANG Bao-shan. Experimental study of unconsolidated sandstone's elastic wave velocities[J]. Well Logging Technology, 2004,28(6): 487-491.

[11] 云美厚,管志宁. 油藏注水开发对储层岩石速度和密度的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2002,37(3): 280-287.
YUN Mei-hou, GUAN Zhi-ning. Effect of water flood development on velocity and density of reservoir rock [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002,37(3):280-286.

(下转第41页)

万方数据

表 2 胜利油区某井核磁共振分析及密闭取心分析数据

埋深 H/km	样品号	孔隙度 φ/%	T2 截至值 t/ms	渗流孔隙占总孔隙 Ø/%	密闭取心分析含油饱和度 S_o/%
3.106 38	16	14.72	7.0	52.40	63.00
3.252 89	62	13.00	11.0	44.40	64.50
3.268 34	108	12.23	11.0	44.70	66.80
3.275 18	129	12.75	7.0	69.30	70.10
3.288 14	212	13.87	13.0	49.70	72.20

4 结 论

(1)在汞、汞蒸气、岩石这 3 种介质中,汞对于岩石是湿润性的,故在用压汞资料求含油饱和度时 σ_{Hg} 和 θ_{Hg} 应为有汞蒸气存在时的汞与岩石的界面张力及湿润角。

(2)在胜利油区,除浮力以外,烃源岩的高压是烃类运移的主要动力之一;现今储层的孔隙度比油气成藏时普遍要小;油气成藏后,其密度、界面张力均发生了较大的变化。

参考文献:

[1] 杨通佑,范尚炯,陈元千. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社,1998:96-102.

[2] 秦积舜,李爱芬. 油层物理学[M]. 东营:石油大学出版社,2001:192-197.

[3] 中华人民共和国国土资源部. 石油天然气储量计算规范 DZ/T0217-2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005-4-1.

[4] 李传亮. 压汞过程中湿润性问题研究[J]. 天然气工业,1994,14(5):84.
LI Chuan-liang. Study of wettability in the course of mercury intrusion[J]. Natural Gas Industry,1994,14(5):84.

[5] 曾溅辉,金之钧. 油气二次运移和微聚集物理模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2000:2-10.

[6] 李丕龙,张善文,宋国奇,等. 断陷盆地隐蔽油气藏形成机制——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油实验地质,2004,26(1):3-10.
LI Pi-long, ZHANG Shan-wen, SONG Guo-qi, et al. Forming mechanism of subtle oil pools in fault basins—taking the Jiyang depression of the Bohaiwan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment,2004,26(1):3-10.

[7] 隋风贵. 东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):17-21.
SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science),2004,28(3):17-21.

[8] 李丕龙,庞雄奇. 隐蔽油气藏形成机理与勘探实践[M]. 北京:石油工业出版社,2004:142.

[9] 石砥石. 山东济阳凹陷第三系碎屑岩储层油气成藏的孔渗门限研究[J]. 现代地质:2005,19:37-41.
SHI Di-shi. Study of porosity and permeability threshold for hydrocarbon accumulation of clastic rocks in tertiary system, Jiyang depression, Shandong [J]. Geoscience, 2005,19:37-41.

[10] 陆大卫,江国法. 核磁共振测井理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,1998:79-81.

(编辑　刘为清)

(上接第 37 页)

[12] 李生杰、岩性、孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):760-764.
LI Sheng-jie. Influence of lithology, porosity and variation of pore fluid saturation on rock elastic property[J]. Oil & Gas Geology, 2005,26(6):760-764.

[13] 刘丽娟,闫桂京,陈建文. 流体对地震波速度的影响[J]. 海洋地质动态, 2005,21(9):8-12.
LIU Li-juan, YAN Gui-jing, CHEN Jian-wen. Influence of variation of fluid saturation on rock elastic property [J]. Marine Geology Letter, 2005,21(9):8-12.

[14] 石玉梅,刘雯林,姚逢昌. 用地震法监测水驱薄互层油藏剩余油的可行性研究[J]. 石油学报, 2003,24(5):52-56.
SHI Yu-mei, LIU Wen-lin, YAO Feng-chang. Feasibility of seismic monitoring for remaining oil in alternate thin-beds reservoir with water-flooding recovery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(5):52-56.

(编辑　刘艳荣)

万方数据