

岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系

史 诒¹ 沈文略¹ 杨东全²

1 北京大学地质学系, 北京 100871

2 清华大学工程力学系, 北京 100084

摘 要 在实验室对 6 种砂岩进行了连续的进水和失水实验, 测量了两个过程的纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 。进水和失水速率随饱和度 S_w 的变化; 分析了低饱和度时流体对岩石弹性性质的影响。实验表明, 进水和失水过程显示不同的纵、横波速度与饱和度关系, 速度不仅与饱和度有关, 还与不同饱和阶段的孔隙流体分布有关, 而且也是水和岩石骨架之间的物理及化学作用所致。

关键词 波速 饱和度 孔隙流体分布 岩石物理

文章编号 0001-5733(2003)01-138-05 **中图分类号** P584 **收稿日期** 2001-05-18, 2002-06-20 收修定稿。

THE RELATIONSHIP OF WAVE VELOCITIES WITH SATURATION AND FLUID DISTRIBUTION IN PORE SPACE

SHI GE¹ SHEN WENLUE¹ YANG DONGQUAN²

1 Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

2 Department of Engineering Mechanics of Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Continuous imbibition and dehydrating experiments are carried out for six samples in laboratory. Compressional wave velocity (V_p) and shear wave velocity (V_s), the imbibition's and dehydrating rate with water saturation are measured during the two processes. The influence of pore fluid on rock elastic properties at low saturation is analyzed. The experiments show that different saturation process leads to different velocity-saturation relationship. The velocities are not only related to water saturation, but also related to pore fluid distribution during different saturation stage. The velocities are also related to the physical and chemical interaction between water and rock skeleton.

Key words Velocity, Saturation, Pore fluid distribution, Rock physics.

1 引 言

根据 Biot 理论和 Gassmann 方程, 孔隙流体使岩石的纵波速度 V_p 增加, 而横波速度 V_s 略有降低^[1,2]。这一结论是建立在流体在孔隙中均匀分布的假设基础之上的。许多实验证实纵、横波速度和饱和度有关^[3-6]。Gregory^[7]认为, 饱和度对低孔隙岩

石速度的影响要大于对高孔隙度岩石的影响; 完全水饱和岩石的 V_p 明显大于部分饱和的岩石; V_s 并不总是随饱和度的增加而降低, 而是和压力、孔隙度、孔隙流体与岩石骨架之间的化学作用等因素有关。

Domenico^[8]的研究表明, 含水饱和度较低时, 随着饱和度增加, 样品密度的增加使 V_p 有所降低; 但当饱和度达到较高值时, 岩石的孔隙度明显增加, 超

基金项目 国家自然科学基金资助项目(49774239)。

作者简介 史 诒, 女, 1943 年生, 1966 年毕业于北京大学地球物理系, 教授, 博士生导师, 从事地球物理教学和超声波地震模型实验及岩石物理性质的研究工作。E-mail: gshi@geoms.geo.pku.edu.cn

过了密度增大引起的速度变化,从而使 V_p 有明显增大. 对于横波,由于剪切模量和饱和度的关系不大,所以,当密度随饱和度的增加而增加时 V_s 随饱和度的增加有所降低.

速度随饱和度的变化规律并不完全由孔隙流体的饱和度决定. Domenico^[8] 的实验结果表明,不同的饱和过程会导致速度的变化,认为速度与孔隙流体在孔隙尺度范围的微观分布有关. Knight 和 Nolen-Hoeksema^[3] 的实验表明,在进水过程中,含水饱和度达到 80% 时 V_p 值急剧上升,而在其他饱和度范围没有明显的变化. 在失水过程中,砂岩显示出明显的弛豫现象.

本文应用不同频率的换能器对 6 种砂岩进行了连续的进水和失水实验,测量了岩石进水和失水过程与弹性波速度的对应关系,分析速度分段特征与孔隙流体微观几何分布的关系.

2 样品和仪器

本文选取 6 种砂岩样品,144、140、132 和 297 号样品来自秘鲁某油田,S1 和 S2 来自国内某油田. 表 1、表 2 分别为岩样参数分析和岩样薄片分析. 仪器为湘潭市无线电厂生产的 SYC-2 型超声波岩石参数测定仪,实验误差 $\Delta t/t < \pm 0.5\%$,纵波换能器的频率为 54 ~ 1200kHz,横波换能器的频率为 50 ~ 500kHz.

表 1 岩样参数分析

Table 1 Parameters analysis of samples

样号	岩样密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙度 (%)	高度 (cm)	直径 (cm)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)
144	2.11	20.9	4.99	2.52	403
140	2.17	18.7	4.94	2.52	134
132	2.25	16.3	4.98	2.52	20.2
297	2.37	10.4	4.95	2.52	0.881
S1	2.38	8.5	4.47	3.78	
S2	2.52	3.5	4.34	2.99	

表 2 岩样薄片分析

Table 2 Thin section analysis of samples

样号	矿物组成(%)				致密情况	直径(mm)	磨圆度	分选性	镜下定名
	石英	云母	长石	胶结物					
144	75	3	2	20	疏松	0.6 ~ 1.6(主) 0.3(次)	尖	很差	含中砂-粗粒砂岩
140	70	10		20	较疏松	0.5 ~ 0.6(主) 1.5(次)	次圆	差	含粗砂-中粒砂岩
132	55	2	3	40	致密	0.1(主) < 0.1(次)	圆	很好	含粉砂-细粒砂岩
297	70	5	5	20	致密	0.2(主) 0.8 ~ 1.0(次)	次圆	较差	中-粗粒混合砂岩
S1	80	3	7	10	致密	0.1 ~ 0.2	次棱角	好	中细粒石英砂岩
S2	45	5	15	35	致密	0.2(主) 0.1 ~ 0.3	次棱角	较好	中细粒长石石英砂岩

3 实验方法

在实验室常温常压下做了岩石的进水和失水过程实验,测量了相应的纵、横波速度和进水、失水速率随饱和度的变化. 进水实验时,为了分析低饱和度的流体对岩石弹性性质的影响,把通过烘箱干燥的样品暴露于相对湿度比较高的空气中,通过吸收水蒸气来得到极低的含水饱和度,紧接着将样品浸入蒸馏水中逐渐增加饱和度. 失水实验时,首先将样品在真空干燥箱烘干,再用蒸馏水浸没数天,直到重量不再发生变化. 然后将高饱和度样品置于空气中,使其自然干燥. 由于进水、失水速率无法适时测量和控制,所以同一岩样曾进行多次反复试验. 饱

和度的计算公式为 $S_w = \frac{m - m_d}{m_s - m_d}$,式中 m_d 是干样重量, m 是样品部分饱和时的重量, m_s 是样品饱和时的重量.

4 结果与讨论

4.1 进水过程

现以 140、144、132 和 297 样品为例,讨论进水过程. 图 1 为 144、140、132、297 号样品的进水速率曲线. 从图 1 看到样品从干燥状态开始吸渗水时,进水速率非常快,随着时间增加进水速率减慢. 样品的孔隙度和致密程度不同会导致样品的进水速率不同,疏松样品 140 和 144 号的进水速率大于致密样品

132 和 297 号.

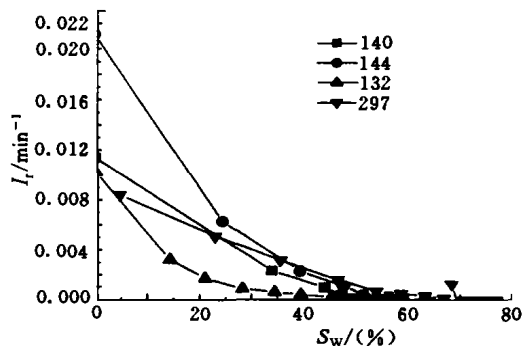


图 1 144、140、132 和 297 号样品的
进水速率 I_t 曲线

Fig.1 Imbibition's rate of samples 144、140、132 and 297 versus saturation during imbibition's experiment

进水实验表明,所有样品的纵波、横波速度-饱和度关系曲线在形式上是相似的. V_p 、 V_s 与水饱和度变化有一定的规律,但个别测量数据很分散,如图 2(a,b)所示,图中示出换能器的不同频率值.

在进水的最初阶段,样品的进水速率大.相应地,岩石的 V_p 也有明显的变化.如 140 号样品(图 2a), V_p 是上升后略有下降,而对 297 号样品(图 2b), V_p 呈明显的下降,这一阶段持续非常短,在低饱和度时有这种现象.低饱和度时的速度变化机制比较复杂,但无论 Gassmann^[2] 方程还是 Geertsma-

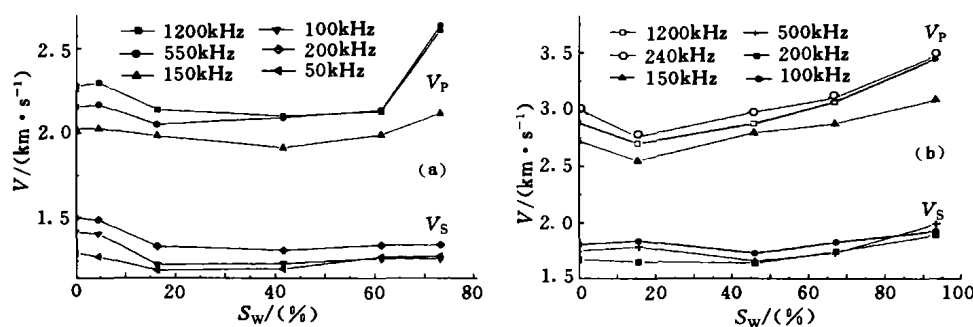


图 2 样品进水的纵、横波速度和饱和度的关系

(a) 140 号样品; (b) 297 号样品.

Fig.2 Compressional and shear wave velocities versus saturation during continuous imbibition's experiment for sample 140 (a) and for sample 297 (b)

144 和 140 号样品在进水之前没有经烘箱烘干,开始时的状态是处于实验室的空气湿度下.进水后饱和度增加对速度的影响遵守 Biot^[1] 和 Gassmann^[2] 理论, V_p 值上升后的略微下降是由于样品尺度范围内水分布的不均匀性引起的.

当进水速率从非常快的阶段进入到较缓变化的阶段时,即饱和度的变化范围约 5% ~ 60% 时, V_p

Smit^[9] 方程都无法解释在低饱和度时岩石的速度变化.为了说明速度在非常低的饱和度范围为何有较大的变化,Clark^[10] 认为是处于颗粒之间的黏土矿物的脱水作用和固化造成的.但有人在不含有黏土的多孔隙玻璃中和干净的砂岩中也观察到了同样的速度变化^[11].本文认为低饱和度时速度的变化是水和岩石骨架之间的物理、化学作用以及样品尺度范围不同部位的孔隙流体分布的不均匀性引起的.132 和 297 号样品的波速测量是从完全干燥的状态开始的.实验前,132 和 297 号样品在 150℃ 的烘箱中烘干 24h,这时岩石的刚度较大,据 Murphy 等^[12]、Gregory^[7] 分析,刚度增加导致速度增加 2% ~ 3%.当样品从完全干燥状态到较小的饱和度时,由于干燥的岩石骨架和水之间的物理和化学作用,导致弹性模量和波速急剧下降:一方面,当完全干燥的岩石充以流体(尤其是水等化学活性流体),即使非常之少,岩石骨架也会发生某种化学软化,使其体积模量明显减少,样品速度下降,这在相反的干燥过程也会发生;另一方面,当进入极少量的水时(例如对于砂岩,在石英颗粒表面只需 3 ~ 4 层水分子),由于水的作用(如润滑作用)使岩石颗粒之间的紧密接触结合变弱,从而使岩石的刚度变小,使体积模量及速度相应降低.

的变化较小,且无规律,这一阶段岩石的刚度没有大的变化,此时,弹性波速度按 Biot 和 Gassmann 理论发生变化.当样品的水饱和度在 60% ~ 80% 时, V_p 都有明显的上升.这一阶段对应于图 1 中进水速率非常低的阶段.这种现象的产生是由于高饱和度时所有尺度大的孔隙都已被饱和,水已代替空气而成为孔隙中连通的液相,裂隙状的小孔隙开始被饱和.

由 Kauster 和 Toksoz^[13] 理论, 弹性波速度和裂隙状孔隙的刚度有非常大的关系, 裂隙状孔隙刚度的增加会明显增加岩石的弹性波速度. 所以, 当裂隙状孔隙开始被水饱和增加其刚度时, V_p 值有明显的上升.

4.2 失水过程

现以 S1 和 S2 样品为例讨论失水过程. 液体水通过气-液界面的蒸发和流体连通形成的毛细管中的迁移是干燥过程中主要的质量迁移机制^[5]. 刚开始干燥时, 样品表面孔隙形成水-空气弯月形界面, 并从样品表面开始水的蒸发, 蒸发失水主要发生在岩石粒间孔隙度较大的纵横比的孔隙中. 在高饱和度阶段, 气-液界面进入样品内部, 并贯穿所有孔隙, 这一阶段, 孔隙水总体减少, 样品的失水速率随着饱和度的降低迅速下降, 孔隙水对大纵横比孔隙的弹性性质影响微弱, 所以 V_p 变化不大. 从能量的观点看, 因为气-液界面的张力总是试图减小这一界面而达到最低表面能状态, 而水对因体骨架的浸润性则有增大液-固界面面积的趋势, 孔隙水向更细小的孔隙集中时气-液表面积减小了, 而固-液界面的总面积却相对增加了, 这是一个能量降低的

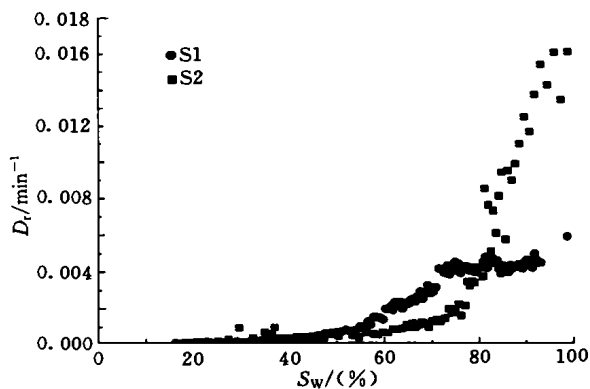


图3 S1 和 S2 样品的失水速率 D_t 曲线

Fig.3 Dehydrating rate of samples S1 and S2 versus saturation during dehydrating experiment

过程. 随着进一步干燥失水, 孔隙中流体的连通性将遭到破坏, 这一阶段失水发生在纵横比极小的微裂隙、颗粒接触处和小孔隙中, 无论是孔隙中的热对流还是水蒸气扩散都相当缓慢, 这时进入了低速率的稳定失水过程. 图3为S1和S2样品的失水速率曲线.

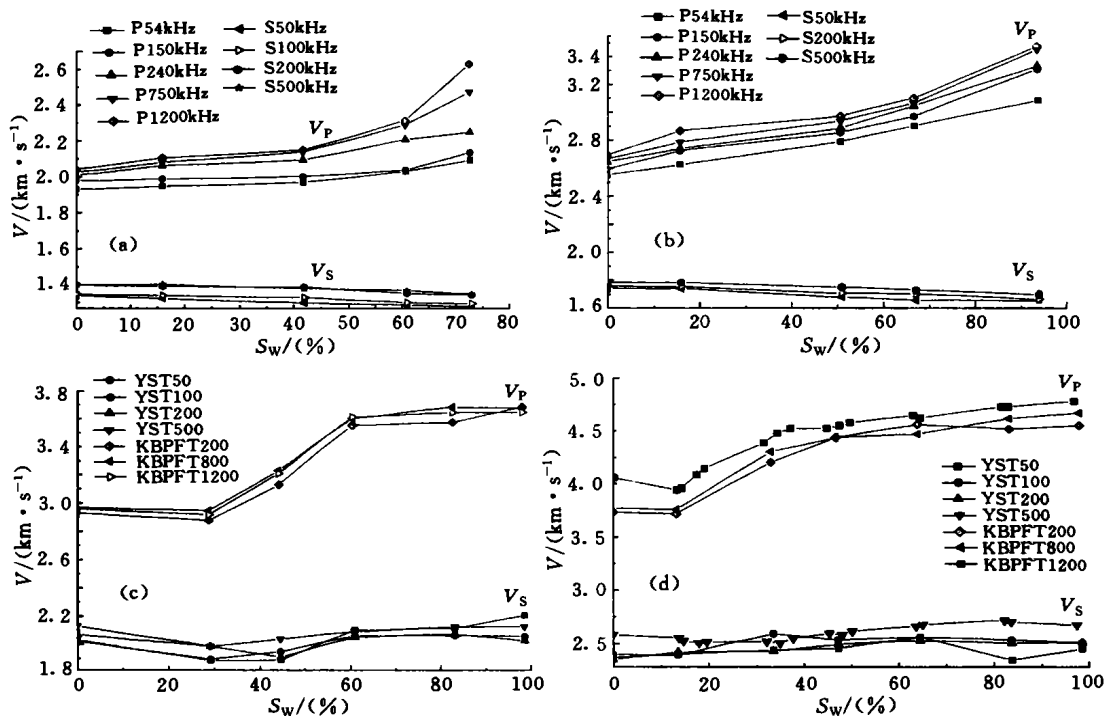


图4 样品失水时纵、横波速度和饱和度的关系

(a) 140 号样品; (b) 297 号样品; (c) S1 号样品; (d) S2 号样品. P54kHz、P150kHz、P240kHz、P750kHz、P1200kHz、KBPFT200、800、1200 为纵波换能器的不同频率值. S50kHz、S100kHz、S200kHz、S500kHz、YST50、100、200、500 为横波换能器的不同频率值.

Fig.4 Compressional and shear wave velocities versus saturation during continuous dehydrating experiment

由图 3 看出, S1 样品从衰减失水到稳定失水有一圆滑的过渡区, 在饱和度为 50 % 左右发生转折, S2 样品在饱和度 75 % 左右发生转折, 说明 S1 样品的孔隙连通性更好. S1 砂岩属典型的颗粒支撑结构, 当饱和度降至 60 % 以下, 大约 40 % 的孔隙水被蒸发后, 剩余的水大部分将保留在非常细小的毛细管网络中, 岩石总体的体积模量随着饱和度的降低显著减小, 导致 V_p 迅速减小. S2 砂岩为杂基式支撑, 石英、长石颗粒分散于钙质胶结物中, 以裂隙式为主的狭长孔隙主要分布在矿物-胶结物界面和少量的矿物颗粒接触面内. 高饱和度区内, V_p 衰减缓慢, 从 $S_w = 60\%$ 开始, V_p 迅速下降. 当饱和度降至 15 % ~ 20 % 时, 自然干燥不能使样品完全失水, 岩石中仍保留的一部分束缚水基本上以骨架表面吸附水的形式存在, 失水速率近似为零. 通过进一步的人为烘干, 吸附水的丧失将使岩石的骨架硬化, 使 V_p 回升. 由于剪切模量与饱和度的关系不大, 介质密度随饱和度的减少使 V_s 略有增加(见图 4).

样品中不同部位孔隙的饱和度是不同的, 总的趋势是样品表面的饱和程度低于内部的饱和程度, 从而形成孔隙水在岩石中的不均匀分布, 有人在低饱和度($S_w = 0.15$)时发现了这种饱和度的不均匀性^[1].

5 结 论

由样品的进水与失水实验得出, 速度随饱和度的变化与不同阶段的孔隙流体分布状况有关, 而孔隙尺度的流体分布方式又取决于孔隙空间的微观几何结构、系统的表面自由能及岩石的饱和度. 部分饱和流体分布的不均匀性还与孔隙的几何形状及其表面的化学性质有关. 实验表明, 由进水过程的速度曲线可得到岩石孔隙结构及孔隙流体分布方式、连通方式的有关信息. 影响进水过程中孔隙流体分布和弹性波速度-饱和度关系的主要因素是样品尺度范围内流体分布的不均匀性. 在干燥过程的不同阶段, 不同孔隙几何形状的失水使速度曲线形状不同, 失水速率的改变反映了孔隙流体从互相连通向互不连通状态的转化. 由波速变化可以了解岩石孔隙水的分布状况. 影响干燥过程中孔隙流体分布和

速度-饱和度关系的主要因素是孔隙的微观几何形状. 进水和失水过程的速度-饱和度曲线的不可逆, 表明了水和空气在孔隙中微观分布的不同. 所有试验都发现, 不同饱和度下都有频散现象, 尤其在 500kHz 以下更为明显, 所以孔隙流体对岩石声速度的影响还与弹性波的频率有关.

参考文献

- [1] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, 1. low frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956, 28(2): 168 ~ 178
- [2] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673 ~ 682
- [3] Knight R, Nolen-Hoeksema R. A laboratory study of the dependence of elastic wave velocities on pore scale fluid distribution. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(10): 1529 ~ 1532
- [4] 史 诒, 沈联蒂. 灰岩含水饱和度对纵横波速度影响的实验研究. 石油地球物勘探, 1990, 25(4): 469 ~ 479
Shi Ge, Shen Liandi. Experimental study of how water saturation in limestone influences the velocities of P-wave and S-wave. *Oil Geophysical Prospecting*, 1990, 25(4): 469 ~ 479
- [5] Goertz D, Knight R. Elastic wave velocities during evaporative drying. *Geophysics*, 1998, 63(1): 171 ~ 183
- [6] 刘祝萍, 吴小微, 楚泽涵. 岩石声学的测量及研究. 地球物理学报, 1994, 37(5): 659 ~ 666
LIU Zhuping, WU Xiaowei, CHU Zehan. Laboratory study of acoustic parameters of rock. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1994, 37(5): 659 ~ 666
- [7] Gregory A R. Fluid saturation on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, 1976, 41(5): 895 ~ 921
- [8] Domenico S N. Effects of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale. *Geophysics*, 1974, 39(6): 759 ~ 769
- [9] Geerstma J, Smits D C. Some aspects of elastic wave propagation in fluid saturated porous solids. *Geophysics*, 1961, 26(12): 169 ~ 181
- [10] Clark V A, Tittmann B R, Spencer T W. Effect of volatiles on attenuation(Q) and velocity in sedimentary rocks. *J. Geophysical*, 1980, 85(B10): 5190 ~ 5198
- [11] T. 布尔贝, O. 库索, B. 甄斯纳著. 孔隙介质声学. 许云译. 北京: 石油工业出版社, 1994
Bourbie T, Zinszner B, Coussy O. Acoustics in Porous Media. Translated by XU Yun. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994
- [12] Murphy W F, Winkler W F K, Kleinberg R. Frame modulus reduction in sedimentary rock-the effect of adsorption on granite contacts. *Geophys. Res. Lett.*, 1984, 11(9): 805 ~ 808
- [13] Kauster G T, Toksoz M N. Velocity and attenuation of seismic wave in two-phase media. *Geophysics*, 1974, 39(5): 607 ~ 618