

轴向压力下砂岩波速的实验研究

杨宏峰¹, 施行觉

(中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026)

摘要 对轴向压力下的砂岩波速进行了实验研究. 结果表明, 波速随着压力的增加而增加, 并且与加卸载循环有关. 对非线性模量与应变的关系进行了拟合. 用非线性模量来替代弹性模量, 推导出了轴向压力下干燥砂岩样品的波速计算公式, 得到了速度和应变的关系曲线. 实验数据与理论曲线有较好的一致性.

关键词 轴向压力, 波速, 非线性模量

中图分类号 PU45, P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2004)02-0481-05

Experimental research on wave velocity under axial pressure

YANG Hong-feng, SHI Xing-jue

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract In this article, experimental researches are made on the wave velocity of sandstones under axial pressure. The results show that, the wave velocity will increase with the increase of pressure and is closely related to the circulation of loading and unloading. The fitting is also made on the relations between the nonlinear modulus and strain. By replacing the traditional elastic model with the nonlinear model, the new formulas are deducted to calculate the wave velocity of dry sandstones under axial pressure and the relation curves of velocity and strain are given. The experimental data matches well with the theoretical curves.

Keywords axial pressure, wave velocity, non-linear modulus

0 引言

波速是地球物理勘探中应用非常广泛的物理量,它不仅与岩石物理性质有关,而且受到压力、温度、流体饱和度等一系列因素的影响.对于波速—压力的关系,已经有过大量的研究^[1-3].结果表明,在低应力阶段(< 100 MPa),波速随压力的增加而增加,并且在循环载荷下,波速与压力之间并非是单值函数.但多数研究都针对围压对波速的影响.本文中设计了一个轴向压力下波速测量的实验,分别测量了干燥和饱水砂岩在不同压力下的波速,并引入非线性弹性模量,提出了轴向压力下干燥砂岩的波速计算公式,实验数据与拟合曲线有较好的一致性.

1 实验样品及实验设备

实验中使用了两种不同的砂岩样品,分别标号

为 VE 和 NSV,加工成直径为 30 mm 的圆柱样品,长度 30 ~ 39 mm 不等.用烘箱以 50 的温度烘干 20 d,同时利用真空泵将烘箱中的空气抽出,保持烘箱中的真空状态,以此制备干燥样品.选取两块样品 VE3 和 NSV4 作为待测干燥样品,密度分别为 2.55 g/cm^3 和 2.59 g/cm^3 .

上述干燥样品制备完成后,将一部分干燥样品放入玻璃容器中,将容器内抽真空,利用大气压将水压入容器内,至完全淹没样品上端面为止,浸泡 24 h,制备成水饱和样品.选取样品 VE1 作为待测水饱和样品,密度为 2.60 g/cm^3 .实验时样品侧表面用塑料薄膜进行包裹,防止水分流失.

测量岩石样品的超声波速度采用如下装置:MF-1A 脉冲信号发生器发出两路脉冲信号,一路激发发射换能器产生超声波,另一路触发计算机以记录波形.超声波经过样品后,由接收换能器接收并转化为

收稿日期 2004-04-10; 修回日期 2004-05-10.

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 40274057)资助.

作者简介 杨宏峰,1978年生,男,汉族,辽宁海城人,中国科学技术大学地球与空间科学学院硕士研究生,主要从事岩石力学方面的研究.
(Email: yhf@mail.ustc.edu.cn)

电信号. 电信号经过高频线性放大器放大, 由 F-902 型高速采样板以 20 MHz 的频率进行采样, 输入计算机中显示并储存. 走时的测量精度为 $0.05 \mu\text{s}$.

轴向压力下测量岩石超声波速度的一个难点就是发射换能器和接收换能器都只能承受有限的压力 (最大为 10 kg), 压力过大将致使换能器被压碎, 从而无法进行波速的测量. 本文从这一实际问题出发, 根据换能器的尺寸大小设计了一对换能器保护环. 保护环采用 45 # 钢制造. 为了使岩石样品均匀受力, 在样品与保护环之间垫上两块刚垫块. 测量装置图示如图 1 所示.

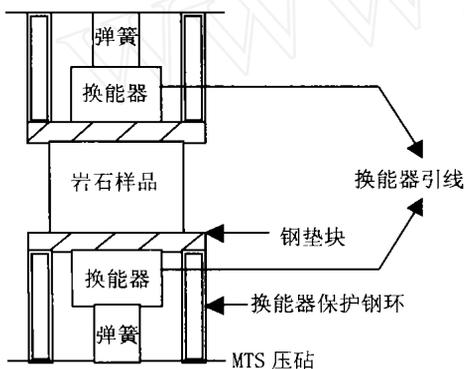


图 1 单轴压力下波速测量装置图示

Fig. 1 General view of device to measure wave velocity under uniaxial pressure

将待测样品放在两块钢垫块中间, 然后将换能器放在保护环中, 并用弹簧对换能器施加一定的压力. 整套装置放在 MTS (Material Test System) 热液闭环伺服压机上, 对样品进行循环加卸载, 同时测量样品的波速与应力、应变.

2 实验结果

实验中采取的加载曲线如图 2 所示. 应力以 0.5 KN/s 的速率变化, 分别在 8 KN, 15 KN, 22 KN, 29 KN, 36 KN, 29 KN, 22 KN, 15 KN, 8 KN 的水平上保持一分钟, 在此期间对样品进行波速测量, 采样并存储于计算机中. 为了克服采样量化误差的隐伏效应^[4], 本次实验使用了线性放大器, 放大倍数为 10.

从采样数据中可以得到走时 t , 这个走时是波通过钢垫块和砂岩样品的走时; 实验中去除砂岩样品后, 直接测量两块钢垫块的走时 t_0 , 得到通过砂岩样品的走时 $t - t_0$. 样品的长度 L 已知, 从 MTS 得到的数据可以计算出样品随着压力的形变 L ,

所以, 砂岩的波速为

$$V = \frac{L - L_0}{t - t_0} \quad (1)$$

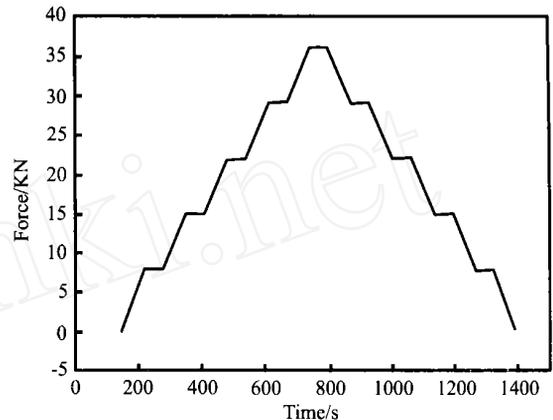


图 2 波速测量实验加卸载曲线

Fig. 2 Loading and unloading curve in experiment of wave velocity measuring

实验中单独对钢环和钢垫块进行了循环加卸载, 计算了钢的变形量, 对砂岩的长度变化 L 进行修正. 实际上, 在实验应力范围内, 由砂岩样品的长度变化而引起的速度变化是很小的. 假设砂岩的波速为 4500 m/s , 在 50 MPa 下, 砂岩的应变为 5×10^{-3} , 样品长度为 30 mm , 这样的长度变化量能引起的走时变化为 $30 \times 5 \times 10^{-3} / 4500 = 0.03 \mu\text{s}$, 在我们波速测量的精度以内.

分别对干燥砂岩样品 NSV4, VE3, 饱和砂岩样品 VE1 进行了如图 2 形式的循环加卸载, 测量其走时、应变, 计算出单轴应力下样品的波速, 与应力作图, 得到结果可见图 3、图 4.

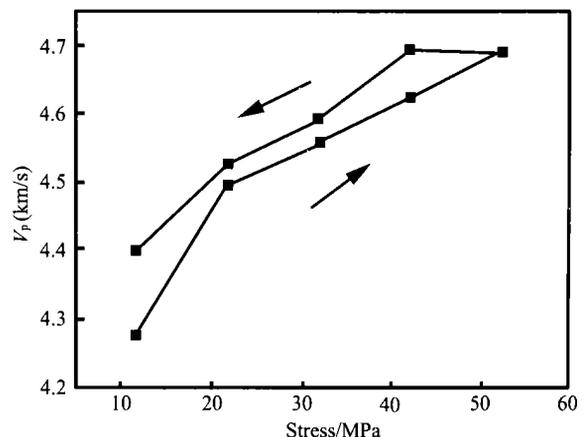


图 3 砂岩 NSV4 波速与应力的实验曲线

Fig. 3 Experimental Curve of Velocity and Stress of Sandstone NSV4

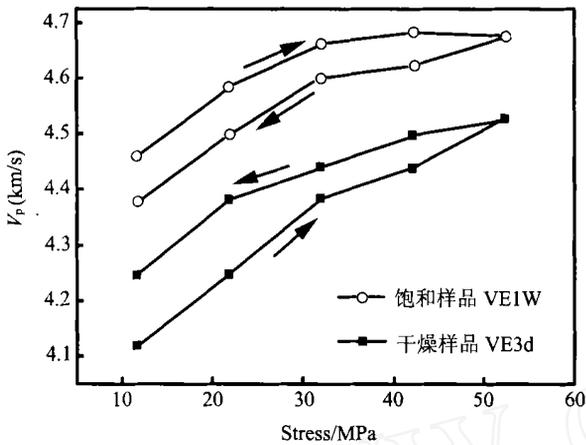


图4 砂岩 VE3d 和 VE1W 速度与应力的实验曲线
Fig.4 Experimental Curve of Velocity and Stress of Sandstone VE3d and VE1W

从实验结果可以看出,砂岩的波速随着应力的增加而增大,并且波速不只与应力的大小有关,和加载、卸载过程也有关系.对于干燥样品,卸载过程中的波速要比加载过程的波速大;而饱和样品则恰好相反,加载过程的波速要大于卸载过程的波速.而且,饱和样品的速度要比干燥样品的速度大.

干燥样品在循环应力下的这种速度差异,可以用 P-M 模型^[5]来解释.在加载时,岩石样品内部的裂隙随着应力的上升而关闭,假定对应某一裂隙的关闭应力为 P_c ,样品被“压实”,速度随着压力增加;但卸载时裂隙随着应力张开,却对应另外一个压力 P_o ,且有 $P_o < P_c$.因此,在同样的压力下,样品内部的裂隙状态在加载和卸载这两个过程中分布不同,导致了卸载过程中,样品的波速要高于加载过程中的速度.

但对于饱和样品来说,由于孔隙水的存在,纵波通过岩石颗粒与水介质耦合直接传播.这样,纵波通过岩石的整个“路径”变短,宏观上表现为走时变小,速度增大^[6].而且加载时孔隙内的水提高了孔隙对闭合趋势的阻力;卸载时由于液体的粘滞作用,导致孔隙与孔隙液体之间有了间隙,波的走时增加,速度减小.

3 干燥砂岩的波速计算公式

波速是介质的一个重要参数,但受到非线性弹性的影响,使得波速-应力曲线与应力-应变曲线类似,形成了一个滞回圈.波速成为压力的多值函数,给实际问题的处理带来了不确定性,因此在此节我们希望将波速对应力的多值函数转化成对某参量

的单值函数.施行觉等^[7]曾利用非线性模量对松散介质及砂岩的波速进行研究,并得到了波速对应变的单值函数.下面将利用非线性模量来进行波速计算的推导.

Mccall^[5], Meegan^[8]等在进行非线性弹性波传播问题的研究时,用非线性模量代替传统的弹性模量,得到了非线性弹性波的传播方程.对于较硬的砂岩^[7],非线性模量为

$$G = G_0(1 + \beta \epsilon), \tag{2}$$

其中 β 为介质的非线性系数, ϵ 为样品的应变.

由应力差与应变差之比 $\Delta \sigma / \Delta \epsilon$ 来计算模量,与应变作图,然后利用(2)式进行拟合,得到 G_0 和 β .下面两图分别给出了干燥砂岩样品 NSV4 和 VE3d 的模量与应变的关系.

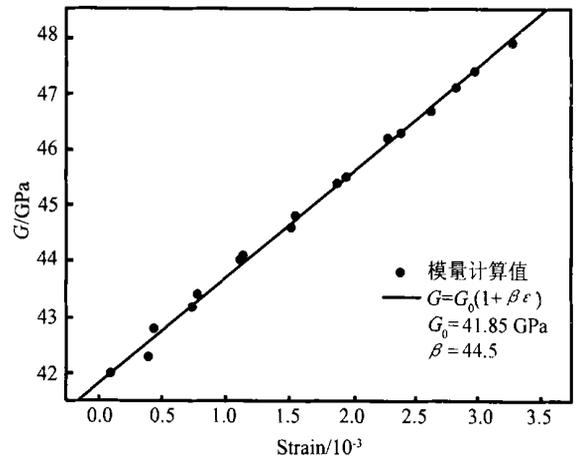


图 5a 砂岩 NSV4 模型—应变关系
Fig. 5a Modulus-strain relation of sandstone NSV4

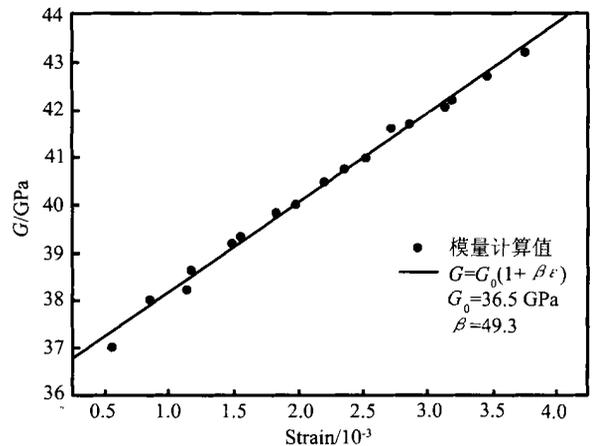


图 5b 砂岩 VE3d 的模量—应变关系
Fig. 5b Modulus-strain relation of sandstone VE3d

对于弹性介质,纵波速度为

$$V_p = \sqrt{\frac{+2\mu}{\rho}}, \tag{3}$$

由各弹性参数之间的关系可知,

$$+2\mu = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

上式可以改写成

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \tag{4}$$

其中 E 为样品的杨氏模量, ν 为泊松比. 利用非线性模量 $G = G_0(1 + \dots)$ 代替(4)中的杨氏模量 E , 就可以得到波速

$$V_p = \sqrt{\frac{G_0(1 + \dots)(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \tag{5}$$

在循环过程中, 密度与应变的关系也可推导得到. 设 ρ_0 是初始密度, 则有

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \dots}, \tag{6}$$

其中

$$\dots = \dots + \dots + \dots$$

为样品的体应变. 利用泊松比, 将体应变转化为线应变,

$$\dots = (1 - 2\nu) \dots,$$

代入(6)式中则有,

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - (1 - 2\nu) \dots}, \tag{7}$$

因此波速表达式可以改写成

$$V_p = \sqrt{\frac{G_0(1 + \dots)(1-\nu)(1 - (1 - 2\nu) \dots)}{\rho_0(1+\nu)(1-2\nu)}}. \tag{8}$$

由式(8)可以看出, 纵波速度只与应变有关, 并且是应变的单值函数, 其余的参数都已知或者可以确定. 假设 $\nu = 0.25$, 利用上式对干燥砂岩样品 NSV4 和 VE3d 进行计算, 得到实测速度与理论速度曲线如图 6.

由图 6a, b 可以看到, 当样品应变大于 1 000 微应变(10^{-3})时, 利用非线性模量计算得到的速度数值与实测速度基本吻合. 因此, (8) 式给出了砂岩的速度与应变、密度之间的单值函数, 对于通过应力、应变数据来计算循环载荷下的样品速度具有重要的意义.

但需要指出的是, 当样品处于较低的应力(应变)时, 由于样品内部裂纹的影响, 致使速度 - 应变呈现非线性变化, 这是式(8)所不能解决的. 并且, 式(8)只能对干燥样品的速度 - 应变进行计算, 对于饱和样品而言, 则不存在这样一个关系.

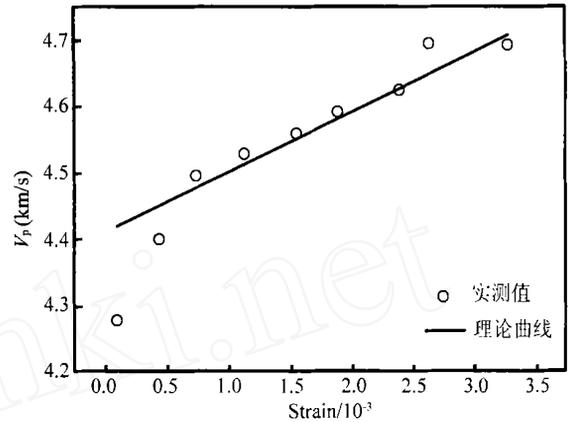


图 6a 砂岩 NSV4 的速度-应变曲线

Fig. 6a P wave velocity-strain curve of sandstone NSV4

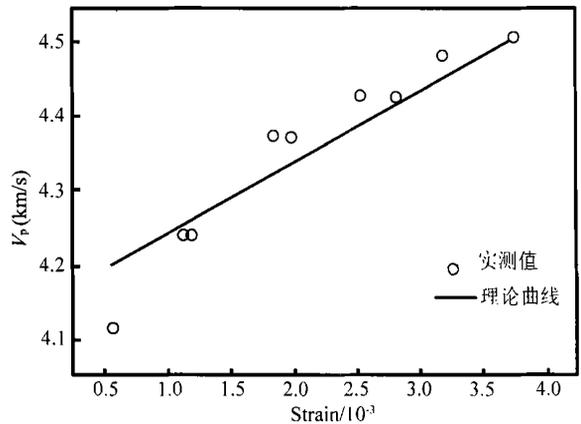


图 6b 砂岩 VE3d 的波速-应变曲线

Fig. 6b P wave velocity-strain curve of sandstone VE3d

4 结论与讨论

砂岩的波速随着应力的增加而增大, 并且波速不只与应力的大小有关, 和加载、卸载过程也有关系. 波速与应力之间并非是单值关系, 而是形成了一个滞回圈. 这种波速与应力的多值关系给实际工作带来了一系列的不确定性. 并且, 在循环应力下, 岩石的波速还受到水饱和度的影响. 同样的应力条件下, 饱和样品的速度要比干燥样品的速度大.

通常, 用于研究岩石的模型有线性弹性体、非线性弹性体、塑性体和粘弹性体. 本文采用了非线性弹性体, 对波速与应力的关系进行了研究. 引入了非线性模量, 用其代替弹性模量, 对弹性波计算公式进行了修正, 推导得到了轴向压力下波速的计算公式. 这个公式表明, 尽管波速与应力之间的关系是一多值函

数,但波速与应变的关系是单值的,唯一的.因此,可以利用非线性模量,将波速转化为应变的单值函数,可通过岩石的应力应变曲线来预测其波速在不同压力状态或不同深度时的变化.

值得指出的是,由于样品内部裂纹的影响,这种速度与应变之间的单值函数无法对小应变($< 10^{-3}$)时的情况进行模拟.并且,对于饱和样品而言,实测的波速与应变之间也并非是一个单值函数,无法用文中公式计算.针对饱和样品的波速与应力、应变的关系需要更进一步的实验研究.

致 谢 感谢中国科学技术大学信息学院朱孟潇硕士对作者的一些建议.

参 考 文 献 (References):

- [1] Meglis I L, Greenfield R J, Engelder T, *et al.* Pressure dependence of velocity and attenuation and its relationship to crack closure in crystalline rocks[J]. *J Geophy Res.*, 1996,101(B10):17 523 ~ 17 533.
- [2] 施行觉,夏从俊,吴永刚. 储层条件下波速的变化规律及其影响因素的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1998,41(2):234 ~ 241.
- [3] 刘斌,H Kern, T Popp. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减[J]. *地球物理学报*,1998,41(4):537 ~ 546.
- [4] 施行觉,卢振刚,李时灿,靳平,李娟,徐果明. 岩石的初动隐伏效应对波速测量的影响[J]. *地球物理学报*, 1995,38(Supp D):310 ~ 315.
- [5] Mccall K R, Guyer R A. Equation of state and wave propagation in hystereti nonliear elastic materials[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B12):23 887 ~ 23 897.
- [6] 伍向阳,邹勇,陈祖安,孙德明. 砂岩和大理岩纵波速度及 Q 值实验研究[J]. *地球物理学进展*,1993,8(4):186 ~ 191.
- [7] 施行觉,胡亚轩,孙道远. 非线性弹性模量对波速影响的实验研究[J]. *地震研究*,2003,26(1):1 ~ 5.
- [8] Meegan G D, Johnson P A, Guyer R A, McCall K R. Observations of nonlinear elastic wave behavior in sandstone[J]. *J Acoust Soc Am.* 1993, 94(6):3387 ~ 3391.