

单轴压缩下砂岩的P波动力学特征的实验研究

吕广廷 汤 泉 李刘玉 赵广堃 胡存德 蒋续媛

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文详细介绍了在单轴压缩下砂岩的P波动力学特征的实验结果。有关的动力学特征参数包括:振幅、振动持续时间、振幅谱、尾波走时持续时间及衰减系数 α 。观测了水对这些参数的影响。

主要实验结果如下:

1. 扩容后压力的增加将使通过岩石标本的P波最大振幅和振动持续时间增加。
2. 压力的增加将使P波振幅谱中的低频分量增加。
3. 水对P波动力学特征的影响是十分显著的, 它将使P波振幅减小, 振幅谱中的高频分量减少。
4. 压力的增加将使P波尾波持续时间增长, 衰减系数 α 减小。

主要实验结果和理论分析、野外观测结果比较一致。这对于探讨地震波动力学特征的前兆异常是有益的

一、引 言

有关地震波的各种前兆信息的一个共同特点是它们都是直接来自于震源处的。这个特点是目下我们采用的绝大多数其他前兆方法所不可比拟的。

人们已在许多地震前观测到了波速异常, 相应地也发表了不少关于岩石破裂前波速变化的实验结果^[1-8]。地震前地震波动力学特征的各种异常显示也不断地被发现^[4-7]。

在地震预报中应用地震波的动力学特性作为一种预报指标是一项有意义并有希望的工作。但是, 目前关于这方面的实验结果却很少。本文详细研究了砂岩在单轴压力下, P波各种动力学参数随压力的变化特征, 这些参数包括: 振幅、振幅谱、波的持续时间及尾波的有关特

*邵顺妹、周建国、金铭、丁伯阳参加了部分实验工作。

征等。还观测了水对上述这些参数的影响。最后本文讨论了实验结果在地震预报中的应用。

二、实验方法

实验采用的岩石标本系兰州西固砂岩,其岩性描述及标本的处理可见文献[8]。试件的尺寸为 $6 \times 6 \times 12$ 厘米,端面的不平行度不超过0.07毫米。

试件分三组。第一组为干燥砂岩标本;第二组为部分水饱和的,试件在自来水中浸泡一天,其平均吸水率 η^* 为0.94%;第三组为饱和的岩石标本,试件在自来水中浸泡三天,平均吸水率达1.05%。

实验采用湘潭无线电厂生产的频率为700KC的探头作为发射和接收换能器,用黄油将其耦合在标本中部相对的两个面上。探头接SYC—3型超声波岩石参数测定仪。接收信号同时送入SBM—10型多用示波器,并由SB—408—1型示波器照相机拍摄振动波形。当载荷以一定增量加至破裂时,我们便可得到一系列的振动图形。实验装置框图见图1。

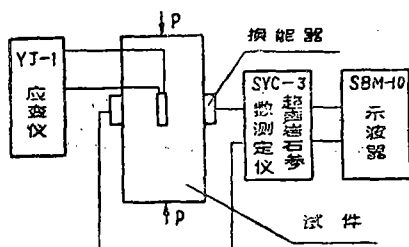


图1 实验装置框图

Fgi. 1 A sketch of equipments.

根据岩石试件的大小及P波在砂岩中的传播速度,选用700kc的探头即能满足 $L > 10\lambda$ (λ 为P波波长)又能满足 $\lambda > 5d$ (d 为岩石颗粒最大直径)的条件,因此探头频率的选用是合适的。应用SYC—3型测定仪可直接测定P波的走时,其精度为0.1微秒。

岩石标本的变形是通过贴在标本上的两组电阻应变片并用YJ—1型电阻应变仪测量。

量。

加载方向垂直于砂岩的层理面,每次加载的间隔为55巴,加载率约为1.8巴/秒。

三、实验结果

1. 干试件的实验结果

干试件的应力、应变曲线及波速随压力的变化与文献[8]的实验结果相同。即加载至破坏应力的50—60%时,体积开始膨胀(扩容),同时波速开始下降,直至破裂。

干燥试件P波动力学参数的主要实验结果如下:

(1) 最大振幅 A_{max} 最大振幅 A_{max} 随压力的增加呈现一个上升的趋势,这种趋势一直保持到临破裂前(图2)。当 $P/P_B = 0.9$ 时,振幅开始明显下降。这时在试件内部,宏观的裂缝实际上已经形成。

(2) 振动持续时间 T_E 本文取P波的初动到双振幅降为5毫米的时间为振动持续时间 T_E 。 T_E 随压力的变化可以分成三个阶段(图3)。加载初期,随着压力的增加 T_E 逐渐减

*吸水率 $\eta = \frac{W_{湿} - W_{干}}{W_{干}}$, $W_{湿}$ 为浸泡后标本重量, $W_{干}$ 为浸泡前标本重量。

小, 在 $P/P_B = 0.6$ 的附近, T_E 取得极小值。随后, T_E 将逐渐增大, 直到破坏载荷的95%以后, 又急剧地下降。

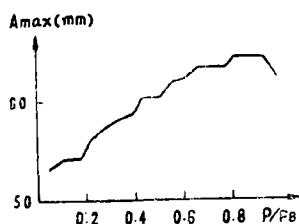


图2 最大振幅(A_{max})随压力变化曲线

Fig. 2 Curve of variation of maximal amplitude of p wave (A_{max}) with compression.

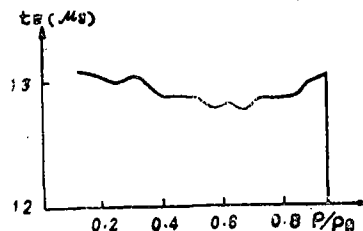


图3 振动持续时间 T_E 随压力的变化曲线

Fig. 3 Curve of variation of vibration continuous time T_E with compression.

(3) 振幅谱的变化特征 将拍摄的P波图形经放大后, 通过读数仪转换成数值信号, 然后用计算机进行富里哀分析, 便可得到P波的振幅谱。图4给出了压力为55巴时P波的振幅谱。从图中可以看出, 干试件的振幅谱明显地分成两部分, 即右边的低频部分(周期长)和左边的高频部分。而中间部分的振幅谱值很低, 这表明P波中包含这些频率的成分很少。低频部分有两个极值, 它们的周期 T 分别为1.4微秒和2.8微秒; 高频段也有极值, 它们的周期为0.3微秒和0.4微秒。这四个峰值中, 尤以 $T = 0.3$ 微秒的幅值为最高, 其幅值比其他三个峰值大一个数量级, 表明 $T = 0.3$ 微秒的振动是P波中最主要的频率成分。

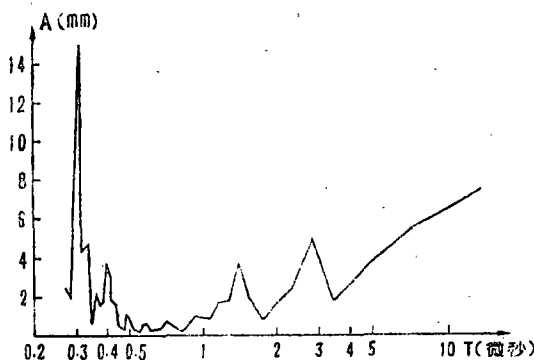


图4 P波振幅谱曲线

Fig. 4 Curve of amplitude spectrum of p wave.

随着压力的增加, 振幅谱的这种分布特征没有多大改变, 但是各个主要频率的幅值将产生一些规律性的变化。图5给出了上述四个峰值频率的幅值随压力的变化。其中 $T = 2.8$ 微秒的曲线(图5(1))大体上可分成两部分: 破坏载荷60%以前, 幅值呈下降的趋势, 以后转为上升。 $T = 1.4$ 微秒的曲线(图5(2))在接近破坏载荷的60%时, 曲线由平转为上升。由此我们可以得出, 扩容将使振幅谱中的低频率分量增加。二者在临破裂前均显著下降。图5中的(3)、(4)分别为高频段 $T = 0.4$ 微秒和 $T = 0.3$ 微秒的变化曲线。其中0.3微秒的

曲线始终呈下降的趋势, 但 $T = 0.4$ 微秒的曲线却表现出增加的趋势, 只是在临破裂前才显著下降。

2. 水对P波动力学参数的影响

(1) 水对P波振幅的影响 实验时, 先将试件在水中浸泡三天, 使其达到基本饱和并测出其吸水量。然后让其自然蒸发, 测出在不同含水量下的振幅大小。实验结果表明, P波通过含水的试件时, 其振幅将减小(图6)。

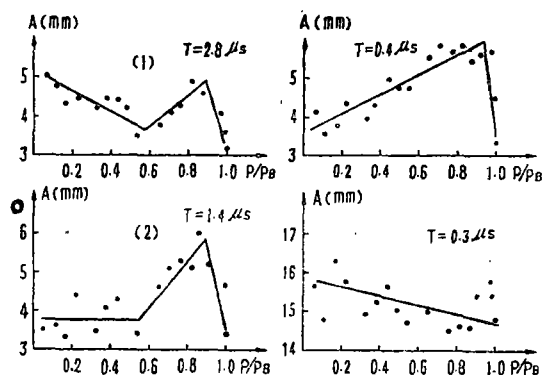


图5 振幅谱的峰值频率幅值随压力的变化

Fig. 5 Curve of variation of peak value frequency of amplitude spectrum of p wave with compression.

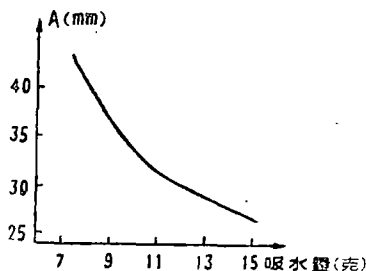


图6 P波最大振幅和试件吸水量的关系

Fig. 6 Relationship between maximal amplitude of p wave and absorbing volume of sandstone.

图7是含水试件的P波最大振幅随压力的变化曲线。其中(1)是部分饱和试件的实验结果, (2)是饱和试件的。和图2相比, 二者的变化趋势是相同的, 即P波最大振幅都是随着压力的增加而增加。不同点在于最大振幅开始下降的时间不同, 干试件是在 $P/P_0 = 0.9$ 时开始下降, 而湿试件振幅开始下降的压力比值为70—80%。

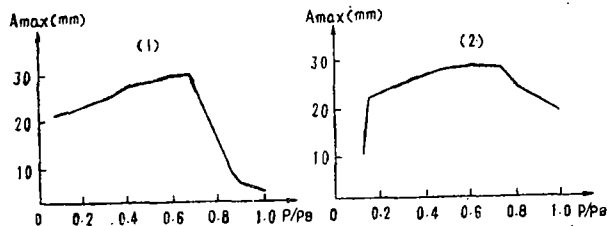


图7 湿试件P波振幅随压力的变化

(1) 部分饱和试件; (2) 饱和试件

Fig. 7 Curve of variation of amplitude of p wave in wet sandstones with compression.

(2) 水对振幅谱的影响 当试件含水后, P波的振幅谱将发生明显的变化。这是由于水的存在使振幅谱中的低频分量大大增加, 高频分量明显地减少。由图8中可以明显看出, 干试件在 $T = 0.3$ 微秒处的振幅谱的最高峰值, 在湿试件的振幅谱中已不存在。同时, 湿试件的低频分量 ($T = 10$ 微秒左右) 的幅值又高于干试件相同频率的幅值。

图8中湿试件的两条曲线是比较接近的,尤其是在高频段,二者吻合得较好。但在低频段二者还是存在一定差异的,表现在饱和试件的曲线有较高的幅值。这表明试件中水的含量饱和时,波形中具有更丰富的低频分量。当试件开始扩容以后,形成了新的裂隙,这就改变了原试件的饱和度。随着扩容裂缝的增加,饱和度将下降,因而饱和试件和部分饱和试件在低频分量上的差异也将缩小。表1给出了P波振幅谱中两个主要频率的幅值差异的变化。表中的数值表示了饱和试件与部分饱和试件振幅谱幅值之差,单位为毫米。

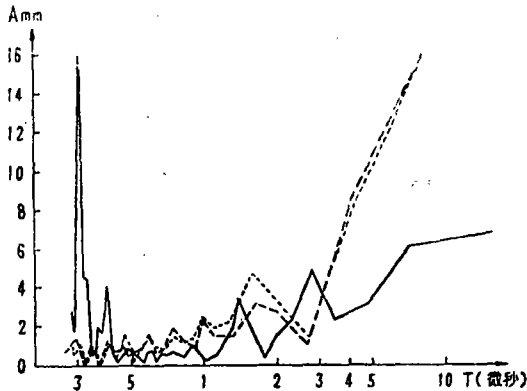


图8 干湿试件的振幅谱曲线

.....饱和试件.....部分饱和试件——干试件;

Fig.8 Curve of amplitude spectrum of p wave in wet and dry sandstones.

P/P _B		表 1		
		60%	85%	97%
周期T (微秒)	8.3	0.3	0	0.1
	1.6	2.68	1.90	1.90

由于水的存在,湿试件的振幅谱幅值随压力的变化与干燥试件不同,振幅谱中的高频分量的幅值已大大减小,对波形的影响已不大。而低频分量的幅值随着压力的增加基本上保持不变(图9)。

3. 尾波的变化特征

(1) 尾波走时持续时间 本文根据文献[7]采用的方法,对P波通过岩石标本后的尾波走时持续时间进行了分析处理。我们取从发射极发射超声波的时刻到振幅衰减到最大振幅的三分之一的时刻为尾波的走时持续时间 τ 。得到了在不同饱和度下 τ 随压力的变化曲线

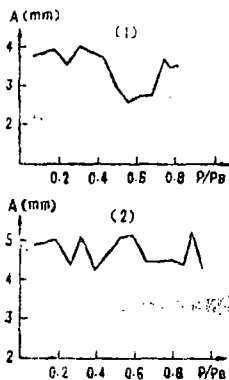


图9 湿试件振幅谱幅值随压力的变化

(1) 部分饱和试件; (2) 饱和试件

Fig.9 Variations of amplitude spectrum in wet sandstone with compression.

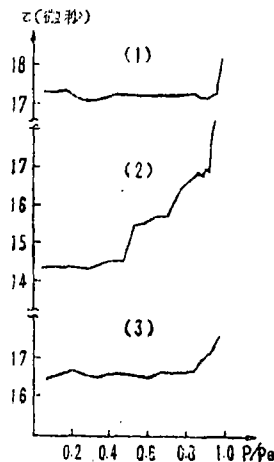


图10 尾波走时持续时间变化特征

(1) 干燥试件; (2) 部分饱和试件; (3) 饱和试件;

Fig.10 Characteristics of variation of coda continuous time.

(图10)。从我们实验所得的资料来看,不管是干燥试件还是含水的试件,扩容后 τ 均随着压力的增加而增大。不过干试件的增长幅度很小,只是在 $P/P_B=0.9$ 以后,增长幅度才急剧加大。

(2) 振幅衰减系数 α 地震波振幅的衰减不仅与距离、时间有关,而且与波的频散等许多因素有关。要想把这些因素所造成的振幅衰减成分去掉,一般是很困难的。这里,我们暂且先不考虑这些因素,而把振幅的衰减看成是距离和时间的函数。又由于发射探头和接收探头之间的距离变化不大,这样振幅的衰减就只是时间的函数了。选用文献〔7〕所使用的尾波形状函数

$$A = A_0 e^{-\alpha t}$$

式中 α 为衰减系数。这样就可以根据P波振幅 A 的变化来求 α 。

我们首先作出P波的包络线,根据文献〔9〕的结果,选取最大振幅为量图的起点,等距地量出包络线上各点的数值 A_i 。然后由下式计算 α_i ;

$$\alpha_i = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (2)$$

求出每段的 α_i 后,再求其平均值 $\bar{\alpha}$,便得到了在每一个压力值的衰减系数。

图11给出了本文的实验结果。由图中可见,随着压力的增加 α 均表现为下降的趋势。干试件的这种下降一直持续到破裂,而湿试件在 $P/P_B=70-80\%$ 处, α 值开始回升。值得注意的是, α 值的变化与振幅的变化有很好的同步性。

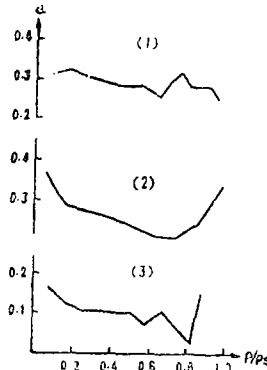


图11 衰减系数 α 随压力变化曲线
(1)干燥试件; (2)部分饱和试件; (3)饱和试件;
Fig.11 Curve of variations of
attenuation coefficient α
with compression.

四、讨 论

在岩石的应力、应变曲线上,在破坏应力的50—60%和破坏应力的90%附近是两个十分有意义的位置,因为前者是扩容的开始,表示在岩石样品中新的裂纹的形成;而后者往往和宏观裂缝的产生所联系。同时,人们发现岩石的许多特性的变化也往往和它们有关。如文献〔8〕中P波速度的下降就是从扩容开始的。米雅奇金等提出的裂缝串通模式(IPE模式)〔10〕把扩容视为多种前兆开始产生的原因,而异常的回返则是从宏观裂缝的形成开始的。

本文的实验中,有许多变化恰好也是和扩容、宏观破裂形成这两种力学现象相联系的。例如振动持续时间由下降变为上升的转折点,振幅谱中一些主要频率的幅值开始上升的起点等均和岩石的扩容开始相吻合。而临破裂宏观裂缝的形成引起了P波最大振幅的突然下降、振动持续时间的急剧减小、振幅谱幅值的下降等现象。

冯德益等曾对两相介质中地震波传播的动力学特征进行了理论上的研究〔5〕。其主要结果是:如在孔隙中充满气体时,地震波通过这种介质后的振幅将大于通过单相介质的振幅;如果孔隙中充满液体时,则得到相反的结果。本文试图以此来解释实验中所观测到的一些主要结果。

扩容以后, 试件中形成新的裂隙中充满了空气, 因此使振幅不断地增加。当临近破裂时, 由于宏观裂纹已经形成, 波的传播通道已有多处被切断, 使波的传播越来越困难, 因而使最大振幅下降。当试件完全破裂时, 波形就观测不到了。

振动持续时间、尾波走时持续时间和衰减系数在扩容后显示出一定的同步变化。这可能是由于扩容造成了新的裂隙, 这种裂隙在试件中的分布及其本身的大小显然是不均匀的, 这些介质的不均匀部位使波发生散射, 形成次生波。均匀性越差, 次生波的迭加效应也越明显。这就形成了持续时间的延长和衰减系数的减小。

水对振幅的影响是十分明显的, 理论和实验结果均表明, P波通过湿试件后, 其振幅要比干试件小。不过在扩容以后, 水的介入将使介质成为三相, 因此在整个动力学过程中, 也会表现出更复杂的现象。例如, 湿试件在 P/P_0 等于70—80%时最大振幅值就开始下降, 同时 α 值回升。

本文观测到的振幅谱的结果表明, 扩容裂隙形成后, 将使振幅谱中的低频分量增加。水对振幅谱的影响是十分显著的, 其效果也是使振幅谱中的低频分量增加。实验结果还表明, 水的影响远大于应力的作用, 这也可能就是湿试件的振幅谱幅值随应力变化不大的原因。

利用本文的实验结果可对目前观测到的一些地震波动力学特征的震前异常作一定性的解释。例如, 1975年海城7.3级地震前, 从1972年4月14日盖县5.2级地震后, 营口台的振幅比一直处于低值^[11]。理论研究表明, 振幅比异常中起主要作用的是P波的振幅^[5]。因此振幅比的低值对应着P波振幅的高值。根据本文的实验结果, 这说明海城地震的震源区此时已处在扩容阶段。因为营口台位于震中区, 故我们有理由认为到达该台的地震射线是通过震源区的。1975年元月开始振幅比开始回升, 表明此时已在震源区形成大的裂隙, P波振幅下降。

五、结 论

1. 扩容后压力的增加将使通过岩石标本的P波最大振幅和振动持续时间增加, 临破裂前二者均明显下降。

2. 压力的增加将使P波振幅谱中的低频分量增加。

3. 水对P波动力学特征的影响是十分显著的, 它将使P波振幅减小, 振幅谱中的高频分量减小。

4. 压力的增加将使P波尾波持续时间增长, 衰减系数 α 减小。

本文撰写过程中, 冯德益同志曾提出宝贵意见, 特在此表示感谢。

(本文1984年3月27日收到)

参 考 文 献

- [1] I.N.Gupta, Seismic velocities in rock subjected to axial loading up to shear fracture, J.G.R., 78, 6936—6942, 1973.
- [2] K.Hadley, Vp/Vs anomalies in dilatant rock samples, Pure and Applied Geophysics, 113, 1—23, 1975.
- [3] О.Г.Шамина И Др., Ультразвуковое прозвучивание области подготовки одиночной микротрещины, сб. физика очага землетрясений, Изд., “Наука”, Москва, 1975.
- [4] 冯德益, 近地震 $\bar{S}$ 、 $\bar{P}$ 波振幅比异常与地震预报, 地球物理学报, Vol.17, No.3 1974.
- [5] 冯德益、顾瑾平、李清河, 含裂隙介质中地震波的振幅异常, 地震学报, Vol.5, No.2, 1983.
- [6] 冯德益, 地震波速异常, 地震出版社, 1981.
- [7] 顾瑾平、冯德益、虞雪君, 区域地震尾波的前兆特征, 地震研究, Vol.5, No.4, 1982.
- [8] 邵顺妹等, 单轴压缩下砂岩内部P波速度的变化特征, 西北地震学报, Vol.5, No.1, 1983.
- [9] R.B.Hessmann, Qestimators using the code of iocal earthquakes BSSA, 70, No.2.
- [10] В.И.Мячкин, Процессы подготовки землетрясений, Изд. “Наука”, Мсоква, 1978.
- [11] 李清河、冯德益, 孕震介质中地震波振幅特性的某些理论与实际研究, 西北地震学报, Vol.4, No.1, 1982.

THE EXPERIMENTAL STUDY ON P WAVE KINETIC CHARACTERISTICS OF SANDSTONE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Lu Guangting, Tang Quan, Li Liuyu, Zhao Guangkun,
Hu Cunde and Jiang Xuyuan

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological
Bureau, Lanzhou, China*)

Abstract

In this paper, the experimental results on P wave kinetic characteristics of sandstone under uniaxial compression are particularly introduced. The kinetic parameters include the amplitude, the vibration continuous time, the amplitude spectrum, the coda trail continuous time and the attenuation coefficient. The effect of water on these parameters has been studied. The results are:

1. The maximum amplitude and the vibration continuous time were increased with the compression increase, both quickly decreased near the extreme failure.

2. The low frequency composition in P wave amplitude spectrum was increased with the compression increase.

3. The P wave kinetic characteristics were greatly affected by water. The existence of water decreases P wave amplitude and high frequency composition of amplitude spectrum.

4. The coda continuous time was increased and the attenuation coefficient was decreased with the compression increase.

Chief results in the experiment and their theoretical analysis are in agreement with the results observed in field-work.

These results would be of advantage to the discussion of precursor anomaly on kinetic characteristics of the seismic wave.