

低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性 实验研究

刘向君, 刘洪, 徐晓雷, 韩林, 梁利喜

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 以低孔低渗砂岩在不同围压条件下的岩石力学测试实验及力学实验过程中岩石纵、横波时差和波形等的采集实验为基础, 研究低孔低渗砂岩在三轴和单轴加载过程中声波波速、幅度、频谱特性的变化特征。研究发现: (1) 低孔低渗砂岩的声波纵、横波速及频谱特性随岩石变形和破坏的阶段变化而变化。在岩石中裂隙、孔洞压密阶段, 纵、横波波速都快速上升; 纵、横波速达到峰值时的轴向应力与岩石抗压强度的比值随孔隙度与渗透率乘积的增大而减小。(2) 声波纵、横波波形的变化与岩石的变形紧密相关。随着轴向载荷增大, 岩石内部裂纹的产生和扩展, 当岩石轴向应力为极限强度的60%左右时, 横波波形末端出现明显的散射波信号。(3) 随着轴向载荷增大, 岩石被压实, 频谱曲线上的振幅呈增大趋势; 随着岩石轴向载荷进一步增加, 裂纹产生, 频谱曲线上低频端较高频端活跃。(4) 岩石达到峰值强度前阶段, 纵波首波振幅和频谱主振幅都表现出上升趋势, 且弹性压缩阶段, 首波振幅和频谱主振幅上升速率较快, 裂纹不稳定扩展阶段, 主振幅表现出比首波振幅低的上升趋势。低孔低渗砂岩加载过程中表现出来的声波传播特性的变化特征, 对其内部裂缝动态变化的预测和稳定性评价都具有重要的指导意义。

关键词: 岩石力学; 低孔低渗砂岩; 加载; 岩石变形; 声波速度; 频谱曲线; 振幅

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)03 - 0560 - 08

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ACOUSTIC WAVE PROPAGATION CHARACTERISTIC OF LOW POROSITY AND PERMEABILITY SANDSTONE UNDER LOADING CONDITIONS

LIU Xiangjun, LIU Hong, XU Xiaolei, HAN Lin, LIANG Lixi

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on the rock mechanical experiment on low porosity and low permeability sandstone under different confining pressures and synchronous collecting experiments of transit time intervals of longitudinal and transverse waves and wave patterns of those rocks, the behaviors of acoustic velocity, amplitude and frequency spectrum properties under triaxial and uniaxial loadings are studied. The following conclusions can be drawn. (1) The velocity and frequency spectrum properties of longitudinal and transverse waves change with rock deformation and failure stages. In the stage of fracture and pore compaction inside rock, the velocities of the longitudinal and transverse waves increase rapidly. The ratio of axial stress corresponding to peak velocity of

收稿日期: 2008 - 08 - 16; **修回日期:** 2008 - 11 - 22

基金项目: 霍英东青年教师基金项目(101051); 四川省青年学科带头人培养基金项目(04ZQ026 - 051)

作者简介: 刘向君(1969 -), 女, 博士, 1990年毕业于西南石油学院测井专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学及岩石物理、井壁稳定和防砂完井、测井交叉学科方面的教学与研究工作。E-mail: liuxiangjunsmpi@163.com

longitudinal and transverse waves to compressive strength of rock decreases as the arithmetic product of porosity and permeability increases. (2) The changes of longitudinal and transverse waves patterns are closely related to rock deformation. As the axial load increases, the fractures in rock generate and develop; when the axial stress reaches 60% of the limit strength, obvious scattered wave signal appears at the end of the transverse wave pattern. (3) As the axial load increases, rock is compacted, and the amplitude of frequency spectrum curve increases as well. When the axial load increases further, the fractures will appear in rock; and low frequency signal is more active than the high frequency one in frequency spectrum curve. (4) In the stage before rock strength reaches peak value, both the first arrival wave amplitude and the principal amplitude tend to increase. In the stage of elastic compression, the two kinds of amplitudes increase rapidly, while in the stage of unsteady fracture expansion, the principal amplitude tends to increase more slowly than the first arrival wave amplitude. It is of theoretical and practical significance to predict rock fracture and its long-term stability.

Key words: rock mechanics; low porosity and permeability sandstone; loading; rock deformation; acoustic wave velocity; frequency spectrum curve; amplitude

1 引言

地层岩石所处的应力环境十分复杂, 当岩石受到的力超过其承载能力时, 岩石将发生破坏。对油气的开发过程来说, 钻井过程中, 井眼剖面岩石的破坏可能诱发井塌、井漏; 对油气的生产过程来说, 井眼剖面岩石的破坏可能导致套管损坏, 进而影响油气井的正常生产。因此, 如何有效监测岩石的变形, 并及时预测岩石的就地稳定性具有重要的意义。但岩石的变形破坏在发生前往往十分隐蔽, 在井下高温高压的环境下直接测量岩石变形的手段也不具备。为此, 通过对岩石受压过程中声学参数的变化规律进行研究, 实现岩石变形和破坏的声波特征化, 对利用声波变化特征监测油气井井周岩石变形、及时预测岩石的就地稳定性、确保复杂应力环境下的油气井长期安全开采具有重要意义。

声波在介质中传播时的波速、能量、频谱特征变化是研究介质机械力学性质、介质结构完整性及均质性的重要依据。自 20 世纪 60 年代以来, 在岩体工程领域, 国内外就将岩石受力变形与岩石声学性质的变化结合起来, 围绕声波在多孔介质中的传播特性开展了广泛的实验研究和理论分析, 尤其对多孔介质中声波的速度特性开展了大量卓有成效的研究工作。A. Nur 等^[1~4]在理论研究方面首次从岩石中微裂纹闭合出发, 提出了岩石压密阶段波速随应力呈二次函数关系; 蔡忠理等^[5~7]通过岩石单轴压缩过程中的声学特性研究发现: 纵、横波波速和声波幅值随加载过程的变化有明显的阶段性, 并与岩石中原有微裂隙的变化过程密切相关; 王宏图^[8]

通过选取不同的应力加载条件, 对准各向同性裂隙岩石和各向异性裂隙岩石进行了波速与应力关系的实验研究和初步理论探索, 认为岩石中裂隙和孔隙的变化将引起岩石有效弹性参数的变化, 岩石中波速与应力的关系受岩石中裂隙密度、裂隙分布状况、岩石的孔隙率以及应力加载条件等控制; 赵明阶和吴德伦^[9, 10]运用断裂力学理论对岩石在单轴加载条件下的变形特性进行分析后认为, 在单轴作用下, 岩石纵波波速能够反映岩石裂隙变化规律及其力学性质; 刘维国等^[11, 12]通过对砂岩进行加温三轴实验, 指出横波波速峰值点及其后波速减小现象说明载荷作用下的砂岩产生了新的微裂纹, 体积应变最大值点的差应力大于横波波速最大值点的差应力, 可以用检测横波波速最大值的办法确定岩石的应力门槛值。现有的研究主要集中在纵波波速及其变化^[13, 14]方面, 对横波波速及纵、横波频谱特征的研究较少。本文以低孔低渗砂岩在不同围压条件下的岩石力学测试实验及在力学实验过程中岩石纵、横波时差和波形等信号的采集实验为基础, 对低孔低渗砂岩在三轴和单轴加载过程中的声波波速、幅度、频谱特性的变化特征进行了系统研究。

2 实验原理及方法

实验采用 GCTS RTR - 1000 三轴岩石力学测试系统完成。所不同的是, 实验机标准的水力压头由承压型声波换能器替换。换能器纵波激发中心频率为 960 kHz, 横波激发中心频率为 620 kHz, 测量精度为 0.1 μ s。该换能器轴向工作压力可达 430 MPa。实验过程中, 同步采集纵、横波时差及波形。

声波采集使用北京普源精电科技有限公司的DS5022M示波器，示波器与计算机相联，进行波形实时采集。

3 实验样品的基本物性

将实验选用砂岩切割、打磨制成 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件。低温烘干处理后采用 HKGP-3 型孔隙测定仪，测量孔隙度和渗透率。测量介质采用氮气。岩芯孔隙度和渗透率数据见表 1。

表 1 岩芯孔隙度和渗透率数据

Table 1 Core porosities and permeabilities

岩芯编号	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	测量围压/MPa
1 [#]	5.300 0	0.042 28	5
2 [#]	5.400 0	0.052 31	
3 [#]	5.800 0	0.198 70	
4 [#]	4.900 0	2.633 00	
6 [#]	5.500 0	0.037 79	
7 [#]	4.500 0	0.043 36	
22 [#]	0.075 3	0.503 00	
23 [#]	0.064 2	0.413 00	
24 [#]	0.020 6	0.511 00	
25 [#]	0.022 7	0.580 80	

4 不同加载条件下的纵、横波波速研究

4.1 岩芯加载过程中波速的拾取及处理方法

岩芯加载过程中的波速可表示为

$$v = \frac{L(1 - \varepsilon)}{T - T_0} \times 10^3 \quad (1)$$

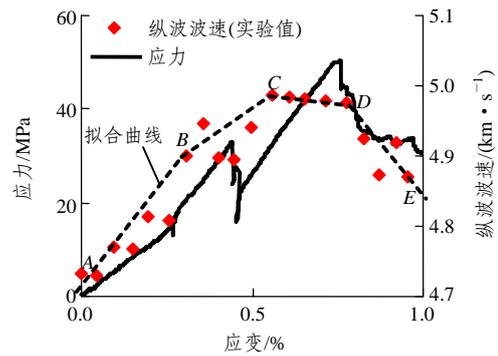
式中： v 为声波波速(km/s)， T 为电子线路及试件的总延迟时间(μs)， T_0 为电子线路本身的延迟时间(μs)， L 为岩石试件的纵向尺寸(mm)， ε 为岩样在受压过程中的轴向应变(%)。

岩芯加载过程中的波速获取过程为：采集各应力点声波波形数据→绘制声波波形图并提取首波时差→将时差与应力、应变值对应，由式(1)计算波速。

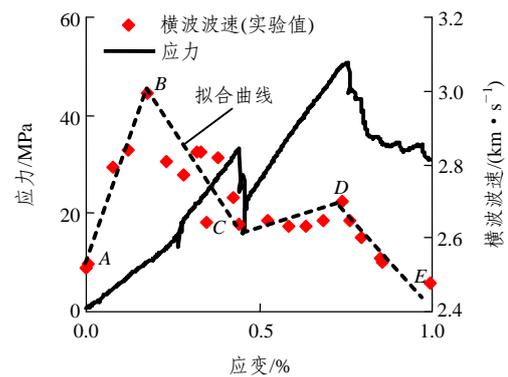
由于声波时差提取和波速计算由人工进行，因此，与连续高密度自动采集的应力、应变相比，实验中得到的波速为一些离散的数据点。

4.2 加载条件下的声波纵、横波波速特性

3[#]，23[#]，25[#]岩芯加载条件下的声波纵、横波波速随岩石变形而变化的特征见图 1，2。



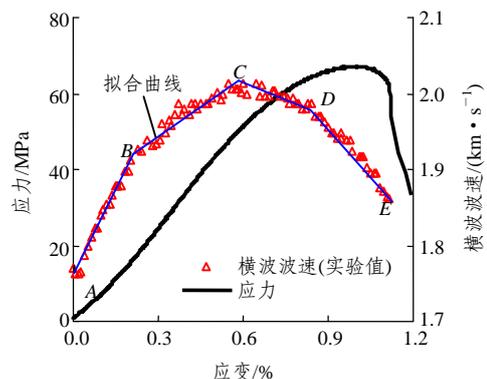
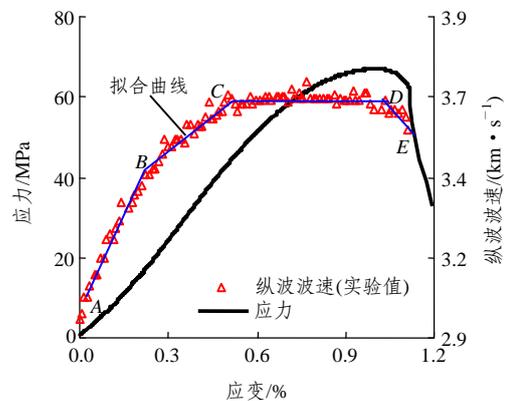
(a) 纵波



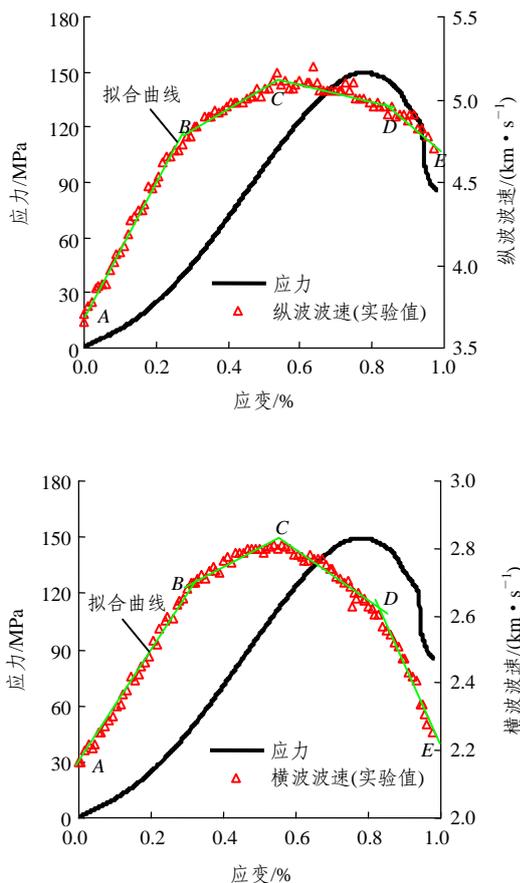
(b) 横波

图 1 3[#]岩芯波速-应力-应变曲线(单轴抗压强度 50.5 MPa)

Fig.1 Wave velocity-stress-strain curves of rock core #3(uniaxial compression strength is 50.5 MPa)



(a) 23[#]岩芯(三轴抗压强度 67.12 MPa)



(b) 25#岩芯(三轴抗压强度 149.62 MPa)

图 2 23#, 25#岩芯波速-应力-应变曲线

Fig.2 Wave velocity-stress-strain curves of rock cores #23, #25

3#岩芯为红褐色细砂岩, 单轴加载, 峰值抗压强度为 50.5 MPa。从图 1 所示应力-应变曲线看, 该岩芯在单轴加载过程中经历了两次破坏: 初始的小规模裂纹的产生和后来大规模裂纹的产生、发展至贯通破坏。观察破坏后的岩样, 发现有多条张性破裂缝。在波速曲线上, 纵、横波曲线都有明显的两次上升和下降过程, 且横波波速受裂缝形成影响显著。纵波波速在该岩样极限强度的 64.5%处达到峰值后开始下降, 波速变化率(波速的峰值与峰值后最小值的差值与峰值的比值)为 2.35%, 当达到极限强度时, 波速下降幅度急剧增加; 横波波速只在第一次破坏前有峰值点, 之后总体呈下降趋势, 波速变化率为 17.12%。从整个加卸载过程看, 纵、横波波速曲线都呈现了 AB, BC, CD, DE 这 4 个变化阶段。

23#, 25#岩芯为三轴加载, 围压见表 2。从波速曲线(见图 2)看, 纵、横波波速曲线与其应力-应变曲线高度相关, 呈现 4 个典型变化阶段。加载过程

表 2 三轴加载过程中岩芯波速变化

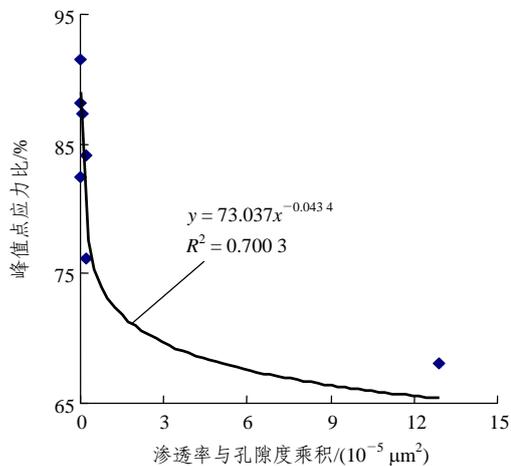
Table 2 Wave velocity changes of rock cores during triaxial loading process

岩芯编号	声波类型	峰值点应力比/%	波速变化率/%	围压 /MPa	抗压强度 /MPa	破坏方式
2#	横波	16.80	5.22	44.2	304.19	剪切
4#	纵波	68.10	3.20	52.7	260.00	剪切
6#	纵波	76.10	5.40	32.5	196.96	剪切
7#	横波	27.10	5.60	18.3	137.26	剪切
22#	纵波	87.32	6.20	5.0	69.51	剪切
	横波	78.90	7.07	5.0	69.51	剪切
23#	纵波	91.50	4.05	5.0	67.12	剪切
	横波	70.50	7.59	5.0	67.12	剪切
24#	纵波	82.50	6.50	5.0	157.21	剪切
25#	纵波	88.10	9.67	5.0	149.62	剪切
	横波	72.80	19.70	5.0	149.62	剪切

注: 峰值点应力比为纵、横波波速达到极大值时的应力与岩石抗压强度的比值。

中, 随着岩石空隙被压密, 纵、横波都以较高速率同步上升; 当岩石进入弹性变形阶段, 纵、横波都以较前一阶段低的速率同步上升, 并达到各自的极大值; 当岩石进入塑性变形阶段, 纵、横波又都以一定的速率同步下降, 但横波波速下降速率明显高于纵波波速; 随着岩石塑性变形增加, 内部裂纹的逐渐扩展, 纵、横波都将以较高速率迅速下降, 且横波波速下降速率明显高于纵波波速。三轴加载过程中各岩芯的波速变化分析见表 2。

从图 3 可见, 峰值点应力比随孔隙度与渗透率乘积增大而减小。也即, 对低孔低渗砂岩, 随着岩石物性变好, 加载过程中, 其纵、横波波速达到峰值速度的轴向应力将越小。



(a) 纵波

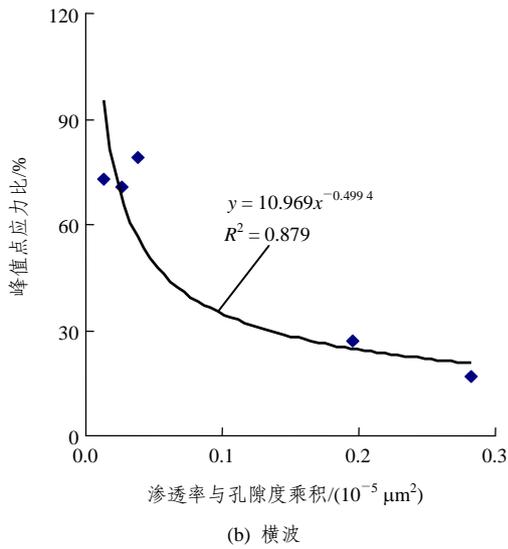


图3 三轴加载条件下峰值点应力比与岩石渗透率与孔隙度乘积的关系

Fig.3 Relationship between the ratio of stress at peak wave velocity to compressive strength and product of porosity and permeability

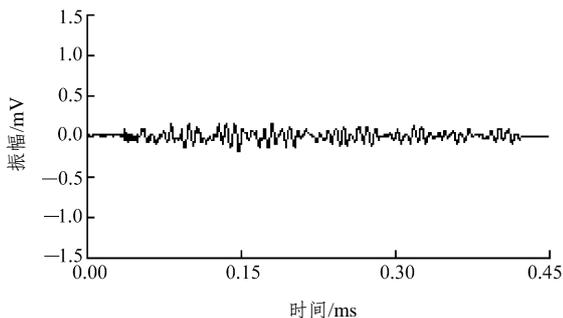
5 加载条件下的声波波形特征及频谱特性研究

5.1 频谱特性分析方法

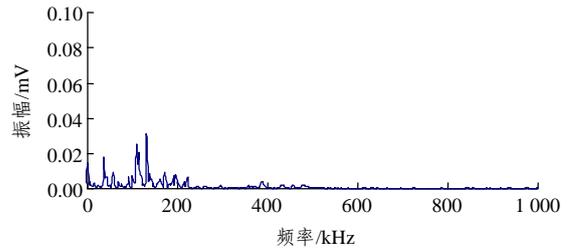
采用 FFT 法对声波信号进行时频域转换。频谱分析过程如下：采集各应力点声波波形数据→对波形信号进行 FFT 处理→提取各应力点对应的频谱曲线的主频和主振幅。

5.2 波形及频谱曲线特性分析

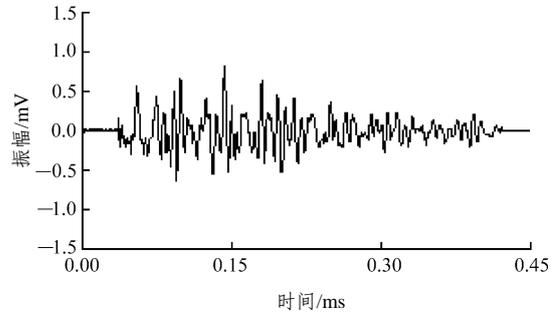
1#岩芯采用单轴加载，峰值强度为 88.5 MPa。加载过程中，载荷 1.33, 27.21, 50.33 MPa 条件下的纵波波形及 1.79, 52.40, 88.50 MPa 条件下的横波波形分别见图 4(a), (c), (e)和 5(a), (c), (e)，对应的由 FFT 处理得到的频谱曲线分别见图 4(b), (d), (f)和 5(b), (d), (f)。



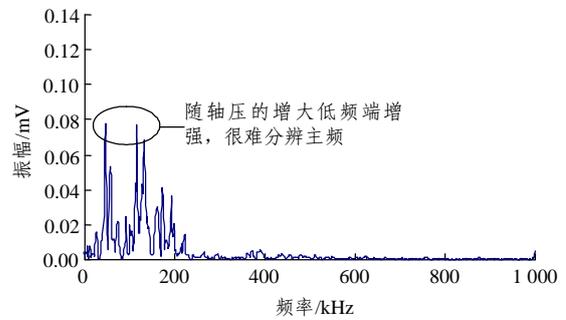
(a) 1.33 MPa 时波形



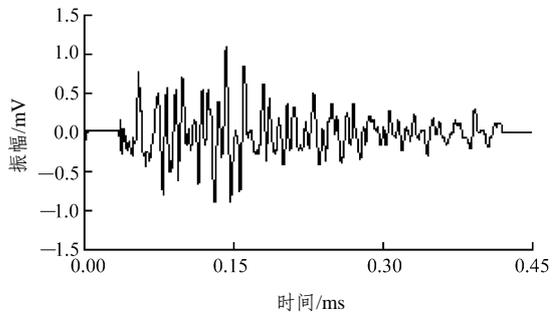
(b) 1.33 MPa 时频谱曲线



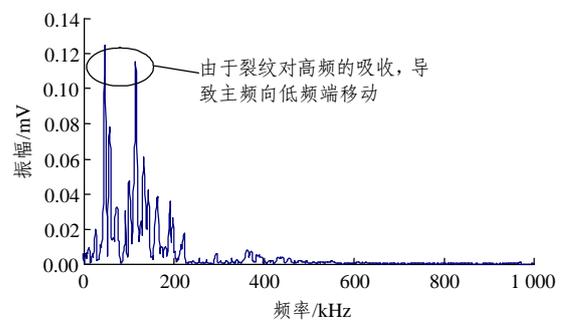
(c) 27.21 MPa 时波形



(d) 27.21 MPa 时频谱曲线



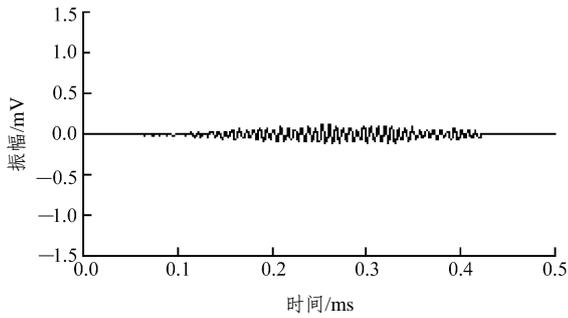
(e) 50.33 MPa 时波形



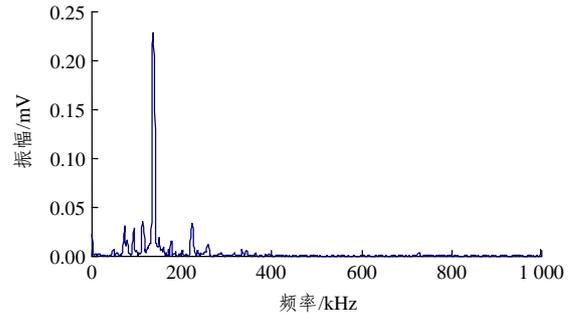
(f) 50.33 MPa 时频谱曲线

图4 1#岩芯纵波波形及频谱特征

Fig.4 Longitudinal wave patterns and frequency spectrum characters of rock core #1



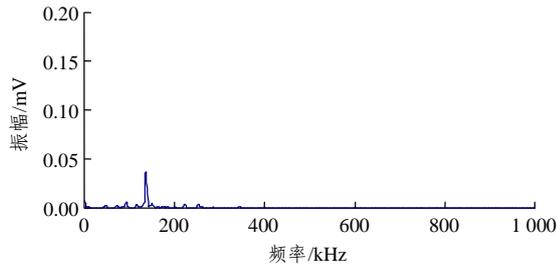
(a) 1.79 MPa 时波形



(f) 88.5 MPa 时频谱曲线

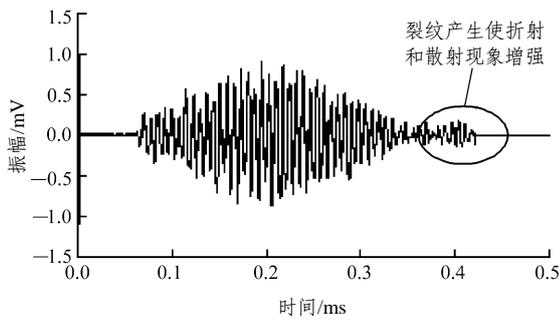
图 5 1#岩芯横波波形及频谱特征

Fig.5 Transverse wave patterns and frequency spectrum characters of rock core #1

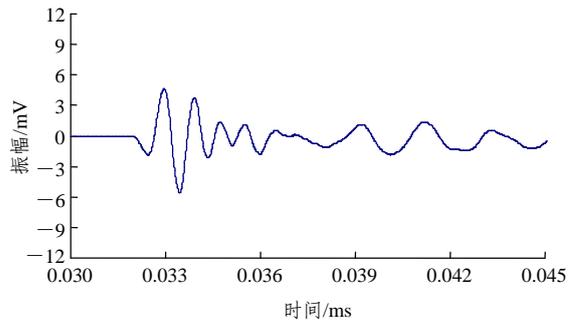


(b) 1.79 MPa 时频谱曲线

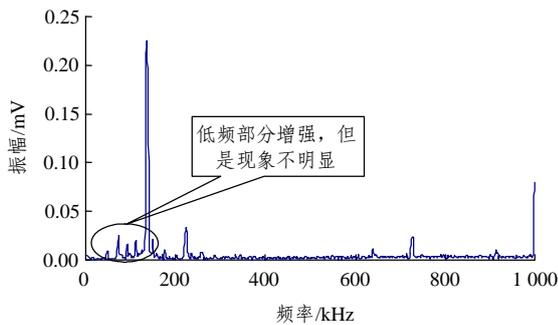
图 6 为 4#岩芯在围压 52.7 MPa, 峰值强度 260 MPa, 轴向载荷为 10.96, 50.40, 260.06 MPa 时的纵波波形及频谱曲线。



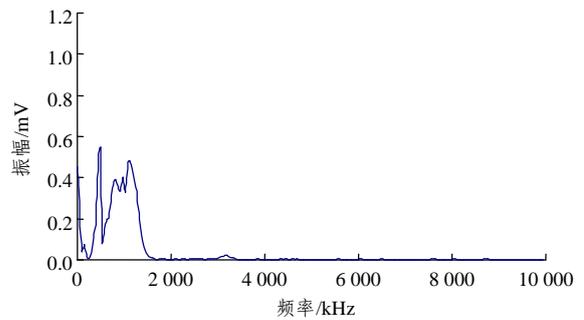
(c) 52.40 MPa 时波形



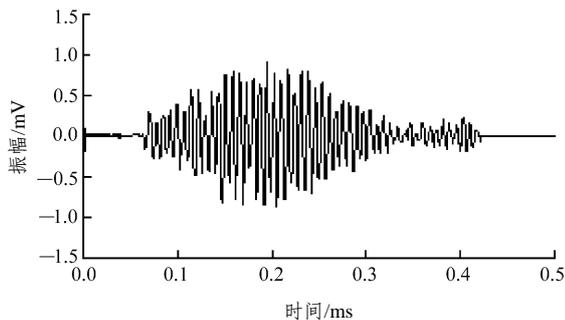
(a) 10.96 MPa 时波形



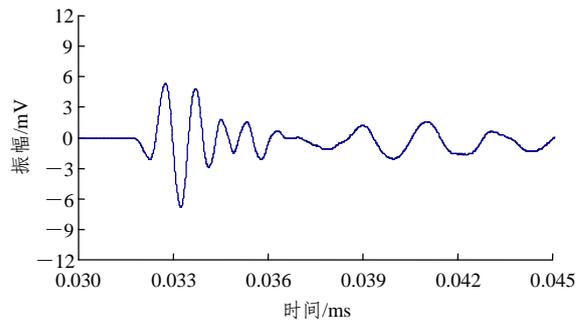
(d) 52.40 MPa 时频谱曲线



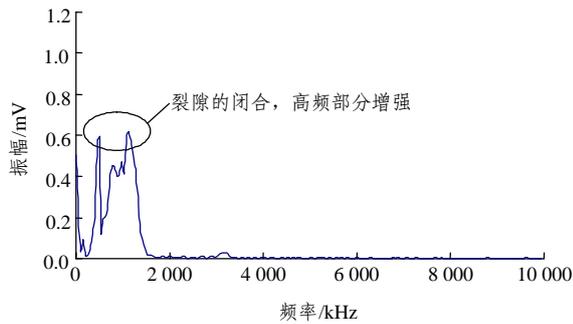
(b) 10.96 MPa 时频谱曲线



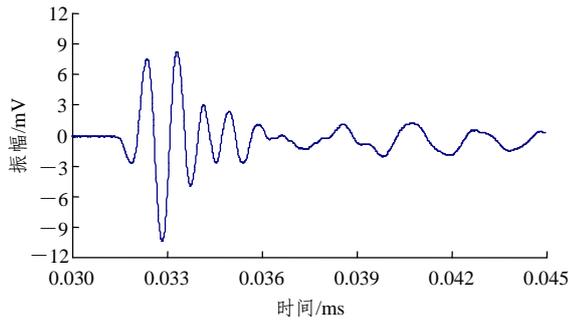
(e) 88.50 MPa 时波形



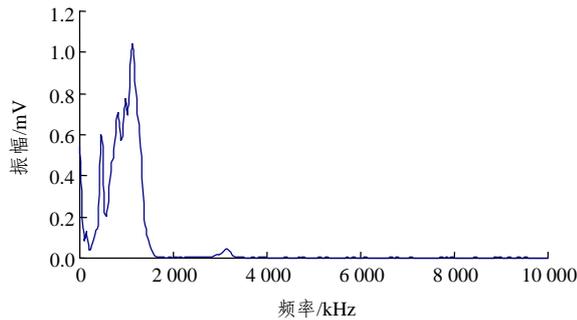
(c) 50.40 MPa 时波形



(d) 50.40 MPa 时频谱曲线



(e) 260.06 MPa 时波形



(f) 260.06 MPa 时频谱曲线

图 6 4#岩芯纵波波形及频谱特征

Fig.6 Longitudinal wave pattern and frequency spectrum characters of rock core #4

从 1#, 4#岩芯的波形曲线看, 随着轴向差应力增加, 纵波波形信号强度变化缓慢, 横波变化明显, 横波比纵波能更好地反映岩样内部结构变化。1#岩芯的横波波形曲线在极限强度的 59.2%左右的应力区域内, 波列尾部的“鱼尾”状波形信号增强, 见图 5(e)。

将 4#岩芯波形和频谱曲线的振幅提取出来, 得到的曲线见图 7, 8。从图 7, 8 可见, 加载过程中, 首波振幅、频谱主振幅随应变的变化关系与岩石的应力 - 应变曲线具有高度的一致性。达到岩芯极限强度前振幅曲线可分为 3 段: 第 1 阶段 AB 段对应于岩样压密阶段, 首波振幅和主振幅都增大, 首波振幅比主振幅的增大更快; 第 2 阶段 BC 段对应于

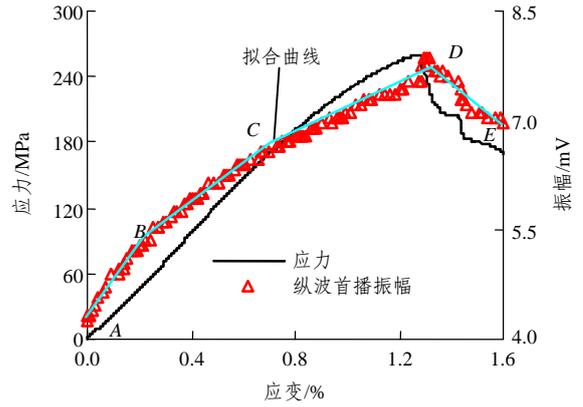


图 7 4#岩芯纵波首波振幅与变形关系

Fig.7 Relationship between head wave amplitude of longitudinal wave and deformation of rock core #4

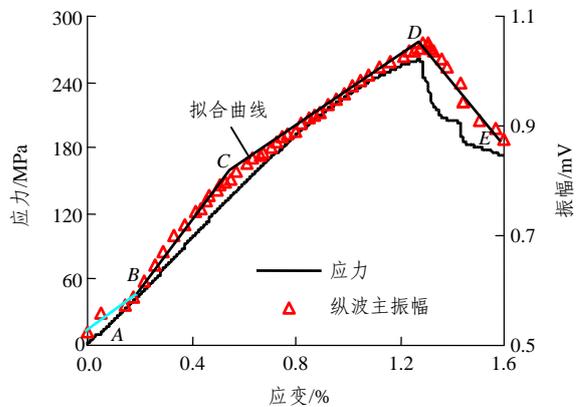


图 8 4#岩芯纵波主振幅与变形关系

Fig.8 Relationship between principal amplitude of longitudinal wave and deformation of rock core #4

岩石弹性压缩阶段, 主振幅的上升幅度比首波振幅大; 第 3 阶段 CD 段两振幅曲线几乎处于相同的上升速度。

6 结 论

(1) 低孔低渗砂岩在三轴和单轴加载过程中的声波纵、横波波速及频谱特性都随岩石变形和破坏的阶段变化而变化。纵、横波波速达到极大值时的应力与岩石抗压强度的比值随孔隙度与渗透率乘积增大而减小。

(2) 随着轴压增大, 岩石内部裂纹的产生和扩展, 当应力点为极限强度的 60%左右时, 横波波形末端出现明显的散射波信号。

(3) 随着轴向载荷增加, 岩石被压实, 频谱曲

线上的振幅呈增大趋势; 随轴向载荷进一步增加, 裂纹产生, 频谱曲线上低频端较高频端活跃。

(4) 从波形曲线的首波中提取的振幅曲线和频域振幅谱中提取的主振幅曲线与波速曲线具有相似的阶段变化特征。岩石压实阶段, 首波振幅和频谱主振幅都表现出较低上升趋势; 岩石弹性压缩阶段, 振幅都表现出快速上升趋势; 裂纹不稳定扩展阶段, 主振幅表现出比首波振幅更低的上升趋势。

(5) 低孔低渗砂岩加载过程中表现出来的声波传播特性的变化特征对其内部裂缝动态变化的预测和稳定性的评价都具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] NUR A. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(8): 2 022 - 2 034.
- [2] THILL R E, BUR T R, STECKLEY R C. Velocity anisotropy in dry and saturated rock spheres and its relation to rock fabric[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1973, 10(6): 535 - 557.
- [3] MAO N. Using a sonic technique to estimate in-situ stresses[C]// *Rock Mechanics in Productivity and Protection—the 25th Symposium on Rock Mechanics*. [S.l.]: [s.n.], 1982: 167 - 175.
- [4] SU W H, PENG S S, OKUBO S, et al. Development of ultrasonic methods for measuring in-situ stresses at great depth[J]. *Mining Science and Technology*, 1983, 1(1): 21 - 42.
- [5] 蔡忠理, 刘克, 吴绵拔, 等. 单轴压缩过程中花岗岩声学特性的研究[J]. *岩土力学*, 1986, 7(2): 27 - 36.(CAI Zhongli, LIU Ke, WU Mianba, et al. Research on acoustic properties of granite under uniaxial compression condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1986, 7(2): 27 - 36.(in Chinese))
- [6] 蔡忠理. 岩土声学特性研究的回顾与展望[J]. *岩土力学*, 1989, 10(3): 20 - 24.(CAI Zhongli. Review and prospect for the research on acoustic characteristics of rock and soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1989, 10(3): 20 - 24.(in Chinese))
- [7] 罗津辉, 蔡忠理, 刘克, 等. 用声波参数确定岩石加载破坏过程的不同阶段[J]. *岩土力学*, 1992, 13(1): 51 - 56.(LUO Jinhui, CAI Zhongli, LIU Ke, et al. Determination of the various stages in the process of rock failure under loading by the acoustic parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(1): 51 - 56.(in Chinese))
- [8] 王宏图. 岩石弹性波理论及其在地应力测试中的应用[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 1995.(WANG Hongtu. The wave elastic theory of rock and application in in-situ stress measurements[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 1995.(in Chinese))
- [9] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(1): 50 - 54.(ZHAO Mingjie, WU Delun. Ultrasonic velocity and attenuation of rock under uniaxial loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(1): 50 - 54.(in Chinese))
- [10] 赵明阶, 吴德伦. 单轴受荷条件下岩石的声学特性模型与实验研究[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 540 - 545.(ZHAO Mingjie, WU Delun. Ultrasonic properties of rock under loading and unloading: theoretical model and experimental research[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 540 - 545.(in Chinese))
- [11] 刘维国, 单钰铭, 徐国盛, 等. 加温三轴试验中砂岩的微裂纹与横波速度[J]. *成都理工学院学报*, 1999, 26(4): 392 - 395.(LIU Weiguo, SHAN Yuming, XU Guosheng, et al. Relationship between wave velocities and microcracks in sandstone during triaxial heating test[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1999, 26(4): 392 - 395.(in Chinese))
- [12] 刘维国, 单钰铭, 刘荣和. 砂岩扩容过程中超声波衰减的实验研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(6): 611 - 616.(LIU Weiguo, SHAN Yuming, LIU Ronghe. Study on ultrasonic attenuation in the process of rock dilatancy by amplitude spectrum ratio[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology)*, 2006, 33(6): 611 - 616.(in Chinese))
- [13] 彭苏萍, 谢和平, 何满潮, 等. 沉积相变岩体声波速度特征的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(PENG Suping, XIE Heping, HE Manchao, et al. Experimental study on velocity characteristics of lithofacies transition rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(in Chinese))
- [14] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 458 - 467.(YOU Mingqing, SU Chengdong, LI Xiaoshuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 458 - 467.(in Chinese))