

一种岩心样品横波速度的实验室测量方法

郭 健, 乔文孝, 车小花, 段文星

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 准确测量声波在不同类型岩心中的传播速度是岩心声学性质分析的基础。一般实验室利用超声波透射法所测试的岩心样品均为小尺寸岩心样品。在测量小尺寸岩心样品横波波速时, 难以消除的纵波余震信号会对横波的识别产生干扰。提出了一个在实验室内测量小尺寸岩心样品中横波波速的“辅助块”超声波透射波测试方案, 较好地实现了纵横波的分离, 减小了横波波速的测量误差, 提高了岩心样品横波波速测试的精度。给出了上述测量方案和测量实例分析, 该方法亦可用于一般固体样品中横波波速的测量。

关键词: 横波测量; 辅助块; 小尺寸岩心

中图分类号: O422.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-04-0341-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.04.011

A method of testing the S-wave velocity of the core samples in laboratory

GUO Jian, QIAO Wen-xiao, CHE Xiao-hua, DUAN Wen-xing

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Accurate measurement of the ultrasonic in different types of cores is the basis for the analysis of the acoustic properties of the core. In general, the core samples used for the ultrasonic transmission test in laboratory are small-sized core samples. When measuring the S-wave of the small-sized core sample, the aftershock of the compression wave, which is hard to be eliminated, may interfere with the recognition of S-wave. In this paper, a method of adding an 'auxiliary block' in the transmission ultrasonic wave test is provided for measuring the S-wave velocity of the small-sized core samples in laboratory, with which the compression and shear waves can be effectively separated to reduce the measuring error of the S-wave velocity in the core sample and to improve the test accuracy. This paper presents the measuring programme mentioned above and makes the analyses of several test examples. This method can also be used for measuring the S-wave velocities in general solid samples.

Key words: shear wave measurements; auxiliary block; small core

0 引言

基于透射法的超声波速度测试技术在地球物理实验中已被广泛应用。尤其是在岩石中的传播速度的研究更加深入。目前这些研究中主要以纵波测试为主, 相对而言横波波速的测量显得困难一些。究其原因主要是实验室对横波波速的测试要比纵波复杂^[1-2]。一般实验室测试的样品直径和长度都比较小, 这就导致了透射波波形中纵波波形与横波波

形有重叠, 纵波的存在会对横波到时的准确提取产生一定的负面影响^[3]。

魏建新^[4]对实验室横波测试技术研究比较深入, 主要是通过改变耦合剂以及横波换能器来消除横波波速测量中纵波的影响, 但仍然不能解决透射波波形中纵横波难以分辨的问题。本文提出了一种在透射波波形中分离纵横波的方案, 通过在测试中加入辅助测量物块, 实现纵波与横波的较好分离, 以达到准确测量横波波速的目的。

在实际岩心样品测试过程中, 横波换能器也会产生幅度较小的纵波。纵波的传播速度要比横波传播速度快, 横波会紧跟在纵波之后。虽然纵波振幅很小, 但是它也会影响横波的初至起跳点的识别^[5]。因此, 我们设想可以通过增加测试辅助块来增大波的传播距离, 从而实现纵横波较好分离的目的。

图 1 是未添加辅助块直接测量岩心样品得到的纵波、横波波形图。图中的对零波形代表的是直接

收稿日期: 2015-09-20; 修回日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(11204380、11374371、11134011 和 61102102)、国家油气重大科技专项(2011ZX05020-009)、中国石油科技创新基金(2013D-5006-0304、2014D-5006-0307)和中国石油天然气集团公司项目(2014B-4011、2014D-4105、2014A-3912)资助。

作者简介: 郭健(1987-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为应用声学。

通讯作者: 乔文孝, E-mail: qiaowx@cup.edu.cn

将换能器辐射面和接收面对接得到的接收波形，1~5 的波形代表 5 个岩心样品测试得到的波形。图中黑色箭头所指点为波至点。图 1(a)中使用纵波探头测得首波到时在 12 μs 附近，图 1(b)中使用横波探头首波到时在 12 μs 附近，很显然图 1(b)中最先到达的仍然是纵波，无法从图 1(b)中判断横波到时。通过图 1(a)和 1(b)的比较可见，直接测量岩心样品得到的横波波速并不准确，纵波对横波到时的读取干扰很大。

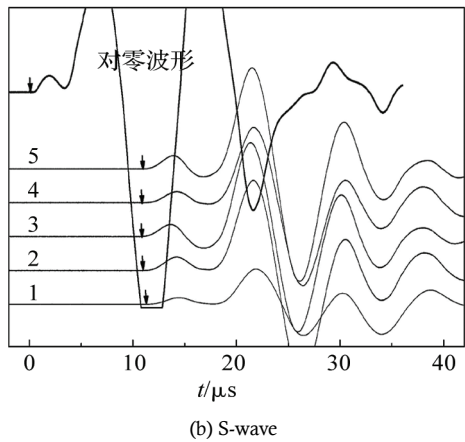
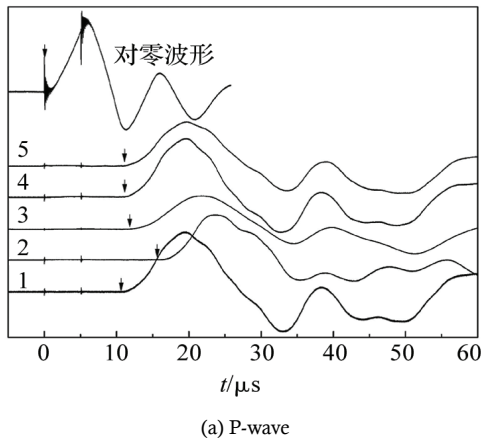


图 1 直接测量岩心样品所得到波形图
Fig.1 Waveforms from directly measuring rock samples

1 测试方案和步骤

岩心样品的横波速度测试采用脉冲透射法，我们采用如图 2 所示的实验装置进行测试。试验中用到的是信号源 (HP 214B)、示波器 (Tektronix DPO3012)、超声波换能器 (PANAMETRICS V1548 0.1 MHz)、声波耦合剂 (蜂蜜)、辅助块以及待测岩心样品。激励信号为半方波 (脉宽 5 μs)。激励信号源接到发射换能器 T 上，同时与示波器的一个端口同步，接收换能器 R 接在示波器的接收端口。这样

就可以在示波器上同时显示激励信号以及接收的波形。各个接触界面之间均采用蜂蜜作为耦合剂。实验过程中要用夹持设备使发射换能器、辅助块、岩心样品、接收换能器的轴线在同一直线上。夹持设备为两个夹持面在一个水平板上的 U 型设备，一夹持面固定，另一面可以轴向移动并固定。辅助块为一矩形柱，表 1 给出了辅助块的物理参数。

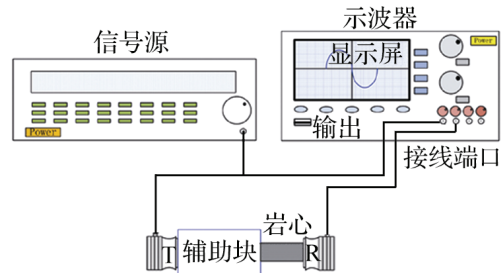


图 2 测试实验装置简图
Fig.2 Schematic diagram of laboratory test equipment

表 1 辅助块物理参数
Table 1 Physical parameters of auxiliary block

长/ mm	宽/ mm	高/ mm	密度/ (g/cm^3)	V_s / (m/s)	V_p / (m/s)
159.83	80.15	52.55	1.35	2638	1173

在波速测量实验中通过耦合剂将换能器与测试样品连接起来，以达到将换能器的能量充分传递给样品的目的。耦合剂按照以下原则进行选取：纵波换能器一般选用液体和油脂作为耦合剂；而横波换能器一般采用蜂蜜作为耦合剂。本次测量方案中用蜂蜜作为耦合剂。

辅助块按照以下原则进行选取：

- (1) 辅助块波速较小时，辅助块的长度可以短一些，可实现纵横波较好的分离。
- (2) 辅助块波速较大时，辅助块的长度要长一些，方可实现纵横波较好的分离。
- (3) 实际测量时要选取一个折衷的方案，选择一个合适的长度既要满足纵横波能够分离，又要尽量减少能量在辅助块中的损耗。

测试步骤：

- (1) 将收发横波探头直接耦合，使横波发射探头发出脉冲波形、接收探头接收到“对零波形”；
- (2) 将收发探头与“辅助块”经过耦合剂直接耦合，使横波发射探头发出脉冲波形，接收探头接收到横波穿过辅助块的波形并获取横波到时 t_0 ；
- (3) 将收发探头与“辅助块”、待测样品经过耦合剂耦合，使横波发射探头发出脉冲波形，接收探头接收到横波先后穿过辅助块和待测样品后的波形并获取横波到时 t_1 ；

在以上测量中，始终注意横波发收探头的偏振化方向保持一致。

求出横波在岩心样品中的传播时间 Δt ， $\Delta t=t_1-t_0$ 。用岩石样品的长度 L ，除以所用时间 Δt ，即为横波在岩心样品中的传播速度 v ， $v=L/\Delta t$ 。

在测试过程中判断横波信号与提取波至时间是精确测试横波速度的关键^[4]。

2 测试实例分析

2.1 对 5 块岩心样品的测量

为了验证通过添加辅助块能够使纵横波分离，选取了 5 块岩心样品进行测试。表 2 给出了岩心样品的物理参数。

表 2 岩心物理参数
Table 2 Physical parameters of the core

编号	直径/mm	长度/mm	密度/(g/cm ³)
1	25.70	50.17	2.53
2	25.71	50.42	2.54
3	25.70	49.69	2.55
4	25.70	50.66	2.53
5	25.71	49.33	2.52

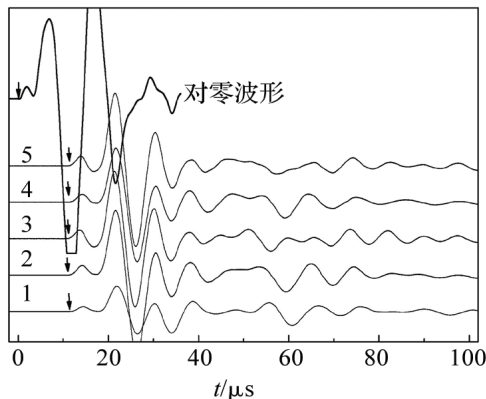
采用辅助块与未采用辅助块测量岩心样品得到的波形图如图 3 所示。对比图 3(a)与图 3(b)可以看出，增加辅助块测量，实现了纵波与横波的较好分离。

图 3(b)中箭头所指的分别为纵波与横波的波至点。可以读出辅助块的横波波至时间 t_0 以及测试样品的波至时间 t_1 。

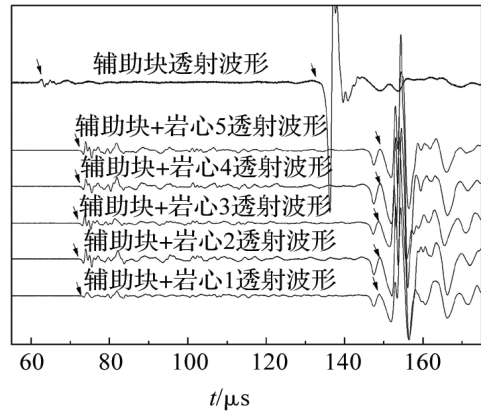
岩心样品声速测量结果如表 3 所示。

2.2 对有机玻璃样品的测量

为了检验本测量方法，选取了速度参数已知的



(a) 未加辅助块直接测试得到的波形



(b) 添加辅助块测试得到的波形图

图 3 测试得到波形图

Fig.3 Tested waveforms with and without auxiliary block

表 3 岩心样品声速测量结果

Table 3 Velocity measurements results of the core samples

编号	长度/mm	V_S (m/s)	V_P (m/s)
1	50.17	2790	4483
2	50.42	2793	4730
3	49.69	2807	4848
4	50.66	2800	4678
5	49.33	2744	4522

圆柱形有机玻璃块进行测量，并将测量结果与有机玻璃样品的给定速度进行了对比。待测样品的具体参数表 4 所示，测得的波形图如图 4 所示。

表 4 有机玻璃物理参数

Table 4 Physical parameters of the organic glass

直径/mm	长度/mm	质量/g	密度/(g/cm ³)
52.51	30.83	78.66	1.18

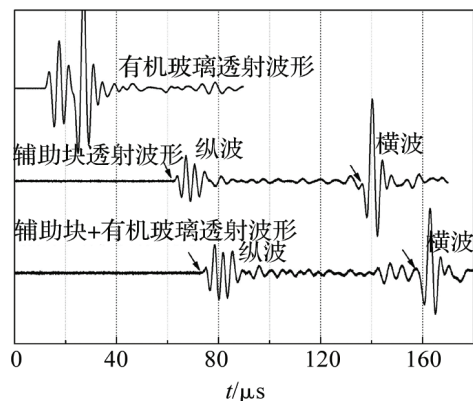


图 4 纵横波波形图

Fig.4 S-wave and P-wave graphs

对比图 4 中有机玻璃直接透射波形与有机玻璃加辅助块透射波形，可以发现加辅助块测试可以使纵横波较好分离。

在图 4 辅助块透射波形与有机玻璃加辅助块透

射波形两道波形中,箭头指示的分别是纵波与横波的波至点。通过计算两道波形中横波到时差与纵波到时差,即纵波横波在有机玻璃中的传播时间 Δt ,利用公式 $v=L/\Delta t$,可求出纵波与横波在有机玻璃中的传播速度。

计算出的波速见表 5。相关资料^[6]中给出的标准有机玻璃,密度 $1.18(\text{g}/\text{cm}^3)$,横波速度为 1300 m/s ,纵波速度为 2700 m/s 。我们的测试结果与上述资料中给出的结果基本相符。

表 5 实验测得有机玻璃的声速
Table 5 The velocity of organic glass by testing

长度 /mm	横波到时差 / μs	纵波到时差 / μs	V_s /(m/s)	V_p /(m/s)
30.83	22.33	11.09	2780	1381

3 结 论

通常脉冲透射法在小尺寸岩心样品测试中由于纵波的存在无法准确读取横波到时,影响横波波速的测量。我们设计了一个在实验室内小尺寸岩心样品横波波速的辅助块透射波测试方案,并对多块岩心样品进行了测试。从测试结果中可以看出在加

了辅助块后,纵波与横波已经分开,能够实现准确读取横波到时的目的,为实现横波波速的准确测量提供了保证。

参 考 文 献

- [1] Robert H, Tatham M D, Matthews K K, et al. Aphysical model study of shear-wave splitting and fracture intensity [J]. *Geophysics*, 1992, **52**(4): 647-652.
- [2] Rai C S, Hanson K E. Shear-wave velocity anisotropy in sedimentary rocks: a laboratory study [J]. *Geophysics*, 1988, **53**(7): 800-806.
- [3] 魏建新. 横波测试技术的实验室研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, **38**(6): 630-636.
Wei Jianxin. The study of Acoustic testing technology in laboratory[J]. *OGP*, 2003, **38**(6): 630-636.
- [4] 魏建新, 狄帮让. 岩石柱塞样品超声横波波速测试精度分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, **47**(6): 918-925.
WEI Jianxin, DI Bangrang. Accuracy analysis of ultrasound shear-wave velocity measurement of rock plug sample[J]. *OGP*, 2012, **47**(6): 918-925.
- [5] Yale D P, Sprunt E S. Prediction of fracture direction using shear acoustic anisotropy[J]. *The Log Analyst*, 1989, **30**(2): 65-70.
- [6] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 2 版. 南京: 南京大学出版社, 2001: 542-543.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. The basic of acoustics(second edition)[M]. 2nd edition. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 542-543.