

# 一种免刻度的高温高压液体声速透射 测量方法及装置

韩学辉,李峰弼

(中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

**摘要:**常用的高温高压液体声速透射测量方法及装置采用“固定”的探头间距,测量前需要刻度探头间距(液体层厚度)和探头零时(如有晶片保护壳),使用不便。基于微分形式的速度定义和恒压舱设计,开发一种可保持测试液体温度、压力恒定的“变”探头间距的透射测量新方法和装置。通过由多个探头间距增量和走时增量比值的平均值或者应用图解法确定声速,能够避免探头零时和探头间距的刻度问题。应用结果表明,新方法测量的蒸馏水以及NaCl盐水溶液声速值与标准值和文献报导值的相对偏差小于0.5%,精度较为可靠。

**关键词:**液体声速;刻度“变”间距;恒压舱技术;高温高压

**中图分类号:**O 422.1 **文献标志码:**A

**引用格式:**韩学辉,李峰弼.一种免刻度的高温高压液体声速透射测量方法及装置[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):57-61.

HAN Xuehui, LI Fengbi. A measurement method and device with no need for calibration for acoustic velocity of liquid under the condition of high temperature and pressure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 57-61.

## A measurement method and device with no need for calibration for acoustic velocity of liquid under the condition of high temperature and pressure

HAN Xuehui, LI Fengbi

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** A fixed distance between transmitting and receiving sensor is widely adopted in measurement methods and devices for acoustic velocity of liquid under high temperature and high pressure conditions. The frequent calibration of the distance and delay time is necessary and complex thus makes it incontinent in the field measurement. A novel measurement method and device are developed based on differential velocity and isobaric chamber technology, in which the pressure and temperature keep constant while the distance between transmitting and receiving sensor can vary. The acoustic velocity of liquid can be measured by the average ratio of distance increment and travel time increment or through graphical method without the calibration of distance and delay time. The results demonstrate that the device works well: the relative deviation between the velocities of distilled water and NaCl brine is less than 0.5% compared with the published data.

**Keywords:** liquid acoustic velocity; calibration; alterable distance; isobaric chamber technology; high temperature and pressure

测量声速可了解液体的弹性<sup>[1-2]</sup>,并用于计算绝热体积弹性模量、等压与等容热容比等热物理学参数<sup>[3-7]</sup>。目前,实验室测量高温高压液体声速的方法主要有共振干涉法、相位比较法、时差

法<sup>[7-10]</sup>。其中,时差法因具有装置简单、操作容易、测量结果相对准确的特点而较为常用。脉冲透射法(以下简称透射法)是时差法的一种,现有的实验测量方法及装置多采用“固定”式的声波发射探

收稿日期:2014-09-10

基金项目:国家油气专项(2011ZX05009-003);国家留学基金管理委员会资助课题(201306455002)

作者简介:韩学辉(1974-),男,副教授,博士,研究方向为储层岩石物理。E-mail: hanxuehui@upc.edu.cn。

头和接收探头。实验研究表明,在高温、高压条件下测量液体声速时,发射和接收探头之间的距离(以下简称间距) $l$ 、声波在压电陶瓷晶片保护壳中的走时(以下简称零时) $t_0$ (有保护壳的情况)均是温度和压力的函数,需要刻度。对于无晶片保护的探头,探头晶片直接与测试液体接触, $t_0$ 值为0,仅需刻度间距 $l$ 。如Han<sup>[11]</sup>以IAPWS-IF97“水和水蒸气性质计算方法”为依据,在测量高温高压条件下的蒸馏水走时后由已知的蒸馏水速度反推计算得到间距 $l$ 。若有晶片保护壳,则必须对两种已知声速的液体做声速测量才能刻度得到间距 $l$ 与零时 $t_0$ ,刻度更为不便。由于测试声速的压力容器的重新组装、压电陶瓷晶片更换或维修后都要做不同温度、压力条件下的刻度,液体声速测量过程较为繁琐。笔者提出一种“变”间距的高温高压液体声速透射测量新方法和实验装置,可在不进行间距和零时刻度的条件下测量液体的声速,并通过实验考察应用效果。

## 1 测量方法原理

一般地,声波在介质中的传播速度的微分形式可写为

$$v = dl/dt. \quad (1)$$

可见,若间距发生变化时能够确保介质的声速不变,则可由间距增量 $dl$ 除以走时增量 $dt$ 得到介质的声速。

对应给定组分的油、水等液体,Han<sup>[11]</sup>、Wang和Nur<sup>[12]</sup>、Batzle等<sup>[13]</sup>的理论计算和实验观测结果表明,其声速仅与温度、压力有关。应用透射法测量高温高压条件下的液体声速时,若采用“变”间距的方式并确保测试液体的温度、压力恒定,测量得到间距增量和走时增量即可由式(1)计算得到液体的声速,不需要对间距和零时做刻度(图1)。

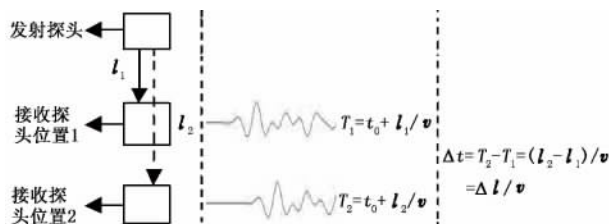


图1 “免”刻度的高温高压液体声速的透射测量法示意图

Fig. 1 Schematic diagram for measurement method with no need for calibration for acoustic velocity of liquid under the condition of high temperature and pressure

## 2 实验测量装置及测量方法

### 2.1 实验测量装置

若在高温高压条件下实现“变”间距的“免”刻度透射测量方法,在通用测量装置的基础上应增加两个基本功能:“变”间距及间距增量监测;“变”间距时保持测试腔内液体压力、温度恒定。图2为“免”刻度的高温高压液体声速透射法实验测量装置示意图。该装置主要由液体声速测量夹持器、声波信号发射和采集子系统(脉冲发生器、数字示波器、数据线)、探头位移和间距增量监测子系统(液压泵和微位移传感器)、温度施加及测量子系统、压力施加及测量子系统组成。为实现上述两个基本功能,其中:液体声速测量夹持器中的声学探头相对放置,一个固定安装,另一个固定在可移动活塞上,因此可用液压泵实现“变”间距并可用微位移传感器监测间距增量;夹持器内部的测试腔与可移动活塞后部的稳压舱连通设计,二者组成恒压舱,活塞移动改变探头间距时引起的测试腔的体积变化由稳压舱等体积补偿以保持恒压舱整体的体积不变,从而使测试液体的压力、温度保持恒定(据Tait方程<sup>[14]</sup>)。

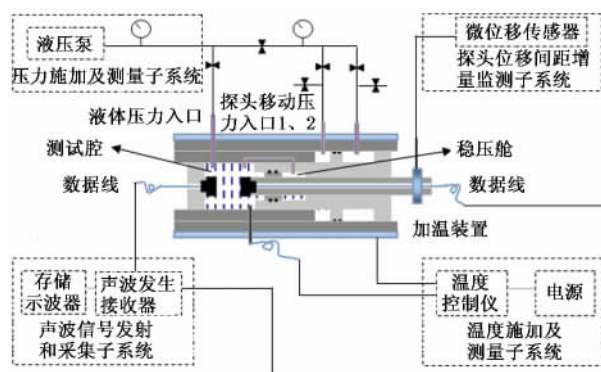


图2 “免”刻度的高温高压液体声速透射法实验测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram for experimental measurement device with no need for calibration for acoustic velocity of liquid under the condition of high temperature and pressure

### 2.2 装置关键性能的设定和检测结果

#### 2.2.1 间距测量的不确定度要求

间距增量和走时增量的测量不确定度直接决定声速的不确定度。由式(1)可以得到透射法液体声速测量的相对不确定度为

$$E_v = \sqrt{\left(\frac{\sigma l}{\Delta l}\right)^2 + \left(-\frac{\sigma t}{\Delta t}\right)^2}. \quad (2)$$

式中 $E_v$ 为声速测量相对不确定度,%; $\sigma l$ 为样品长

度测量不确定度  $\mu\text{m}$ ;  $\Delta l$  为实验测量过程间距增量  $\mu\text{m}$ ;  $\sigma t$  为走时测量不确定度  $\mu\text{s}$ ;  $\Delta t$  为实验测量过程走时增量  $\mu\text{s}$ 。

式(2)表明,对于给定的微位移和走时计量精度,间距增量越小,走时增量越小,则声速测量相对误差越大。声波走时是通过辨认采集波形中纵波到达波形的起跳点来确定的,其误差是设备噪音误差和声波起跳识别误差的总和,其走时测量不确定度一般为  $0.01 \mu\text{s}$ 。走时增量按  $5 \sim 25 \mu\text{s}$  计(可通过调节间距控制),则相对不确定度不超过  $0.2\%$ 。

常见液体的声速一般大于  $1000 \text{ m/s}$ ,按最小走时增量  $5 \mu\text{s}$ ,则间距增量最小为  $5 \text{ mm}$ 。若要求声速测量相对不确定度不超过  $0.5\%$ ,则微位移传感器计量精度达到  $0.02 \text{ mm}$  即可,具体见表 1。推荐使用精度  $0.01 \text{ mm}$  或者更高精度的微位移传感器。

表 1 微位移传感器测量精度对声速测量的影响

Table 1 Effect of precision of micro displacement sensor on measurement for acoustic velocity

序号	传感器计量精度 /m	间距增量相对不确定度 $E_1/\%$	声速测量相对不确定度最大值 $E_v/\%$
1	0.1	2	2.01
2	0.05	1	1.02
3	0.04	0.8	0.82
4	0.025	0.5	0.54
5	0.02	0.4	0.45
6	0.01	0.2	0.28
7	0.005	0.1	0.22

2.2.2 “变”间距时的恒压舱的工作效果

为了检验恒压舱的工作效果,在  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ MPa}$  条件下考察了间距变化后引起的温度和压力变化(表 2)。结果表明,“变”间距后压力保持不变,温度变化在温度测量传感器的精度范围(实验使用温度传感器测量精度为  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )之内,且不足以引起液体声速变化,可以忽略不计。

表 2  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ MPa}$  条件下恒压舱压力、温度随探头间距移动变化

Table 2 Variation of temperature and pressure of constant cabin with probe spacing changing ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$   $30 \text{ MPa}$ )

序号	视探头间距 $l/\text{mm}$	温度 $T/^\circ\text{C}$	压力 $p/\text{MPa}$
1	0	100.2	30
2	8.15	100.1	30
3	17.83	100.4	30
4	26.94	100.1	30

2.3 实验测量步骤和速度确定方法

为了确保在某一温度、压力下测量的液体声速比较准确,避免操作失误引起较大误差,取  $i(i \geq 3)$

个“变”间距的间距增量与走时增量的平均值较为稳妥,按以下实验步骤测量:

(1) 组装仪器,控制、监测测试腔液体的温度、压力条件为设计值,测量声波波形,以此时探头位置为零点,确定声波到时间为  $t_1$ 。

(2) 移动探头至间距增量为  $\Delta l_1$ (微位移传感器读数,下同),测量声波波形读取声波到时间为  $t_2$ ,记录走时增量为  $t_2 - t_1$ 。

(3) 移动探头至间距增量为  $\Delta l_2$ ,测量声波波形读取声波到时间为  $t_3$ ,记录走时增量为  $t_3 - t_1$ 。

(4) 重复步骤(3),移动探头至间距增量为  $\Delta l_i$ ,测量声波波形读取声波到时间为  $t_{i+1}$ ,记录走时增量为  $t_{i+1} - t_1$ 。

则声速为

$$v = \frac{\Delta l_1 / (t_2 - t_1) + \Delta l_2 / (t_3 - t_1) + \dots + \Delta l_i / (t_{i+1} - t_1)}{i} \quad (3)$$

为避免操作引起的较大误差,能够直观检查测量结果,建议采用式(3)的图解法得到声速。具体做法如下:绘制间距增量与走时增量的交会图,若测量系统工作正常和操作无误,二者应该有很好的线性相关关系,做线性拟合后取斜率作为速度。图 3 给出了应用图解法确定蒸馏水( $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ MPa}$ )声速的实例。测量时共变了 3 次间距,测量得到 3 个走时增量,间距增量与走时增量有很好的线性相关关系( $R^2 = 0.9995$ ),表明操作无误且测量精度可靠,确定蒸馏水声速为  $1525.8 \text{ m/s}$ ,与标准值( $1530 \text{ m/s}$ )相对偏差小于  $0.28\%$ 。

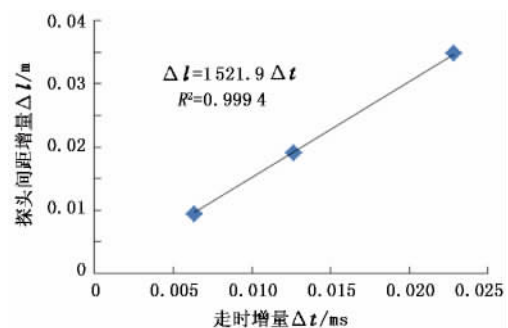


图 3 蒸馏水( $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ MPa}$ )探头间距增量与走时增量交会图

Fig. 3 Cross plot of spacing increment between probes and travel time increment of distilled water ( $26 \text{ }^\circ\text{C}$   $20 \text{ MPa}$ )

3 实验测量效果分析

为了考察本文中方法和装置的应用效果,在不

同温度(26 ~ 150 °C)、压力(5 ~ 50 MPa)条件下测量了蒸馏水、NaCl 盐水的声速(表3)。以 Batzle 和 Wang 等文献<sup>[13]</sup>中公布的声速值为标准,按下式计算实验测量的相对偏差:

$$\delta = \frac{|v_2 - v_1|}{v_2} \times 100\% \quad (4)$$

表3 蒸馏水、NaCl 盐水声速测量结果

Table 3 Measured results of acoustic velocity for distilled water and NaCl salt solution

序 号	质量浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	温度 $T/^\circ C$	压力 $p/$ MPa	$v_1/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$v_2/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\delta/$ %	序 号	质量浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	温度 $T/^\circ C$	压力 $p/$ MPa	$v_1/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$v_2/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\delta/$ %
1	0	26	20	1526	1530	0.26	8	170	100	45	1736	1729	0.40
2	0	85	25	1611	1605	0.37	9	190	30	25	1717	1710	0.41
3	0	125	30	1592	1586	0.38	10	210	105	10	1692	1689	0.18
4	0	150	50	1588	1595	0.44	11	40	90	5	1593	1590	0.19
5	110	60	45	1717	1711	0.35	12	5	26	20	1539	1535	0.26
6	130	120	25	1672	1665	0.42	13	75	60	15	1647	1642	0.30
7	150	30	12	1664	1668	0.24	14	95	115	5	1603	1602	0.06

## 4 结束语

常用的脉冲透射法由于采用“固定”间距测量高温高压液体的声速,需要对间距(无晶片保护壳)或者同时对间距和零时(有晶片保护壳)做刻度,使用很不方便。基于微分形式的速度定义和恒压舱技术研制的“变”间距测量方法和装置能够在确保温度和压力恒定条件下准确测量液体的声速,避免了间距和零时刻度的繁琐工作,更易于使用。该方法和装置“免”刻度的特点不仅适用于实验室高温高压液体声速的测量,也具备在井筒、输油管线等复杂温度、压力环境下测量原油、钻井液以及地层水等液体声速的能力。此外,理论上该方法也可用于确定流体,特别是稠油等流体的声衰减系数,相关研究有待于进一步开展。

### 参考文献:

- [1] 曾育锋,涂辉. 超声光栅测量液体体积弹性模量实验研究[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4): 53-55.  
ZENG Yufeng, TU Hui. Experimental research on liquid bulk elastic modulus in ultrasonic grating [J]. Experimental Technology and Management, 2012, 29(4): 53-55.
- [2] 冉宪文,汤文辉. 物质剪切模量在固液混合相区内的临界行为[J]. 中国科学 G 辑: 物理学,力学,天文学, 2007, 37(5): 631-635.  
RAN Xianwen, TANG Wenhui. Behavior of aluminum shear modulus in solid-liquid mixed phase [J]. Science in China (ser G): Physics, Mechanics & Astronomy,

式中  $v_1$  为实验测量声速,  $m/s$ ;  $v_2$  为应用 Batzle 和 Wang 等<sup>[3]</sup>的盐水声速计算结果,  $m/s$ 。

结果表明,“免”刻度透射法测量的蒸馏水以及 NaCl 盐水的声速与标准值和文献报导值的相对偏差小于 0.5%, 精度可靠。

2007, 37(5): 631-635.

- [3] 张昌,段远渊,王鑫,等. HFC-125 气相声速和理想气体比定压热容的研究[J]. 制冷学报, 2001, 1: 7-11.  
ZHANG Chang, DUAN Yuanyuan, WANG Xin, et al. Study on speed of sound and ideal gas heat capacity at constant for HFC-125 [J]. Journal of Refrigeration, 2001, 1: 7-11.
- [4] 李敬茂,朱明善,邓小雪. 理想气体热容的声学测试技术研究[J]. 工程热物理学报, 1988, 9(2): 37-39.  
LI Jingmao, ZHU Mingshan, DENG Xiaoxue. Study on acoustic testing technology of ideal gas heat capacity [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9(2): 37-39.
- [5] 阎向宏,张亚萍. 有机混合液体声速混合定则的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(1): 112-113.  
YAN Xianghong, ZHANG Yaping. A multiple rule for the ultrasonic velocities in mixtures of organic liquid [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(1): 112-113.
- [6] 阎向宏. 用超声波声速法测定油品中含水率[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(1): 103-104.  
YAN Xianghong. Determination of watercut in mixed liquid of oil and water by using ultrasonical sound velocity [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998, 22(1): 103-104.
- [7] 王军,仝杰. 有机液中声速与液体分子势能关系研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 1997, 25(1): 36-38.  
WANG Jun, TONG Jie. Relation between ultrasound velocity and potential energy of molecules in organic liquids

- [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1997, 25(1): 36-38.
- [8] 谭福奎. 驻波共振干涉法测声速的研究[J]. 黔西南民族师范高等专科学校学报, 2004(1): 89-91.  
TAN Fukui. The research into measuring the sound velocity with the interference law of the stationary wave resonance [J]. Journal of Southwest Guizhou Teachers College for Nationalities, 2004(1): 89-91.
- [9] 朱鼎玉. 声速测定实验中的一个理论问题[J]. 纺织高校基础科学学报, 1991, 4(4): 356-358.  
ZHU Dingyu. A theoretical problem in sound velocity measurement experiment [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 1991, 4(4): 356-358.
- [10] 许磊, 王艳艳. 应用时差法测量声速[J]. 大学物理实验, 2006, 19(2): 48-50.  
XU Lei, WANG Yanyan. Measuring sound velocity with time difference method [J]. Physical Experiment of College, 2006, 19(2): 48-50.
- [11] HAN D H, SUN M, BATZLE M. CO<sub>2</sub> velocity measurement and models for temperatures up to 200 °C and pressures up to 100 Mpa [J]. Geophysics, 2009, 75(3): E123-E129.
- [12] WANG Z, NUR A. Effect of CO<sub>2</sub> flooding on wave velocities in rocks with hydrocarbons [R]. SPE 17345, 1989.
- [13] BATZLE M, WANG Z. Seismic properties of pore fluids [J]. Geophysics, 1992, 57(11): 1396-1408.
- [14] 刘国杰, 贺网兴. 压缩液体的状态方程式[J]. 华东化工学院学报, 1990, 16(5): 576-583.  
LIU Guojie, HE Wangxing. Equation of state for compressed liquids [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1990, 16(5): 576-583.

(编辑 修荣荣)