

# 原油中声衰减和声速的温度特性的测量

党长久 张海澜

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

1993 年 4 月 29 日收到

原油是一种混合物。它的一些性质随温度而变,如原油的声衰减和声速都是温度的函数。本文使用一个换能器发射声波,另一个换能器接收声波,在实验室内测得  $12^{\circ}\text{C}$ — $80^{\circ}\text{C}$  之间的声波幅度值,利用插值算法,求出该温度范围内原油声衰减的温度特性曲线;利用线性拟合算法,求出原油声速的温度特性曲线。结果表明:随着温度的升高,原油的声衰减和声速都呈下降趋势,而且测量结果与换能器的灵敏度无关。

## ABSTRACT

Crude petroleum is a kind of mixture, some features of which, such as acoustic attenuation and acoustic speed, vary with its temperature. In our work, the acoustic wave was generated by one transducer, then received by another, and the amplitude was recorded with the petroleum temperature varying between  $12^{\circ}\text{C}$  and  $80^{\circ}\text{C}$ . From these data, the acoustic attenuation versus the temperature is obtained by the interpolation method, and the acoustic speed versus the temperature by the linear fit method. It is found that both the acoustic attenuation constant and the acoustic speed of the crude petroleum decrease when its temperature increases. It is also found that the above results are independent of the sensitivity of the transducers.

## 一、引言

原油是一种混合物,以不同结构的碳氢化合物为主要成分,呈褐色、暗绿色或黑色。从不同油田采集的原油中,各种碳氢化合物的含量不尽相同,这会影响到原油的一些特性,如不同的凝固点等。

原油的一些性质与其温度有关。随着温度的升高,原油从不流动的固态逐渐变成具有流动性的粘稠状液体,流动性越来越强。原油状态的改变使原油的其它一些性质发生变化。最直观的是原油粘性的改变,温度越高,原油的粘性越小。另外,如原油的体积、密度等也随之而变。

为了解决一些原油的声测试问题,必须知

道原油的声速、声衰减及它们随温度的变化关系,但迄今未见这方面的资料。我们用胜利油田提供的原油样品,测试其声学参数及在  $12^{\circ}\text{C}$  至  $80^{\circ}\text{C}$  温度范围上的温度特性。不同产地的原油的特性是不同的,但本文介绍的声学特性参数测试方法具有普遍意义,而且测得的这些参数随温度变化的趋势对研究其它种类的原油具有参考价值。

## 二、实验装置

实验装置如图 1 所示。

原油盛于长方体的声测试槽内。槽的长、宽、高分别为  $l_1 = 182.4\text{mm}$ 、 $l_2 = 132.0\text{mm}$  和  $h = 95.0\text{mm}$ 。根据后面的测试结果,原油中声波波长小于  $2.5\text{mm}$ ; 声波脉冲包含三个周期,

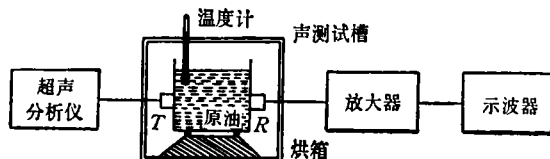


图1 实验装置示意图 T: 发射换能器 R: 接收换能器

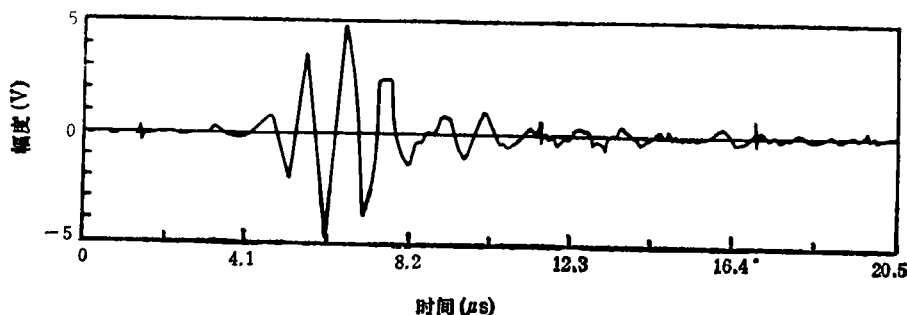


图2 水中室温下发射声脉冲波形

因而脉冲长度小于7.5mm, 满足声测试槽尺寸远大于脉冲长度的条件。

声测试槽两端各固定一个换能器: 发射换能器(T)和接收换能器(R)。这两个换能器都是由PZT压电晶片做成的, 且具有前匹配层和重背衬。在蒸馏水中测得它们的中心频率均为1MHz, 波形如图2所示。

超声分析仪作为脉冲发射电源发射负尖脉冲(幅度约为300V)。该脉冲激励发射换能器发射声信号。声信号穿过原油由接收换能器接收, 并经放大显示于示波器上。在示波器上可测出声信号在原油中的走时和幅度。

整个声测试槽置于能控温的烘箱内。声测试槽内有一温度计测量原油温度。通过改变烘箱温度而改变油温, 从而测定原油的声学参数与温度的关系。

测量之前, 使油温升至80℃, 原油处于液态。然后自然冷却, 保证实验过程中换能器表面与原油充分耦合。因原油导热性差, 在实验中以很慢的速度(约0.25℃/h)升高或降低油温, 保证每次测量时原油内部温度均匀。

测量原油的声衰减特性需要改变发射换能器和接收换能器之间的距离。声测试槽是一长方体容器, 具有长边和短边, 我们分别沿长边和短边的方向放置发射换能器和接收换能器组,

由此测量不同距离处的声信号。

已知声信号在原油中的传播距离、传播时间及其幅度, 那么可得到原油的声衰减系数和声速。

### 三、测量原油的声衰减系数

通常声波在原油中传播时, 其幅度随距离按指数衰减。衰减系数为 $\alpha$ , 单位为Np/m。如果发射换能器在原油中发射的声波幅度为 $A_0$ , 则接收换能器在距发射换能器 $l_1, l_2 (l_1 > l_2)$ 时接收到的声波幅度分别为

$$A_1 = A_0 e^{-\alpha l_1} \quad (1)$$

$$A_2 = A_0 e^{-\alpha l_2} \quad (2)$$

于是声衰减系数

$$\alpha = \frac{1}{\Delta l} \ln \frac{A_2}{A_1} \quad (3)$$

其中 $\Delta l = l_1 - l_2$ 。由上式, 如果得到 $A_1, A_2$ 随温度变化的关系, 即可求得衰减系数 $\alpha$ 的温度特性曲线。

首先把发射换能器和接收换能器放在声测试槽的长度方向上, 其间距为 $l_1 = 182.4\text{mm}$ , 升高原油温度并控制在一定的温度上, 测得信号幅度 $A_1$ 的一个数据点(峰峰值, 下同)。如此继续升温, 得到 $A_1$ 随温度变化的关系(图3中诸

“△”所示)。然后把发射换能器和接收换能器放在声测试槽的宽度方向上,这时间距  $l_2=132.0\text{ mm}$ ,重复上述过程,得到信号幅度  $A_2$  随温度变化的关系(图 3 中诸“■”所示)。由图 3 直观地看出,随着温度的升高,声波幅度增大,在高温端趋于平稳。降温测试及随后反复几次的实验均得与上类似结果。

$A_1(t)$  和  $A_2(t)$ 。这里使用的是二次插值公式,即由每相邻的三个离散点,求其间的未知数据点。

$A_1(t)$  和  $A_2(t)$  曲线如图 3 中实线所示。已知  $\Delta l = 50.4\text{ mm}$ , 由(3)式得到衰减系数  $\alpha$  随温度变化的关系,如图 4 所示。

图 4 表明,随着温度的升高,衰减系数下降很快,其中伴随着起伏。这些起伏可能是原由升降温时形成的气泡所致。

图 4 中  $\alpha(t)$  的经验公式  $\alpha'(t)$  列在表 1 中。我们使用对数、指数、乘方和多项式等四种类型的经验公式来拟合  $\alpha(t)$ 。表中的最后两栏分别

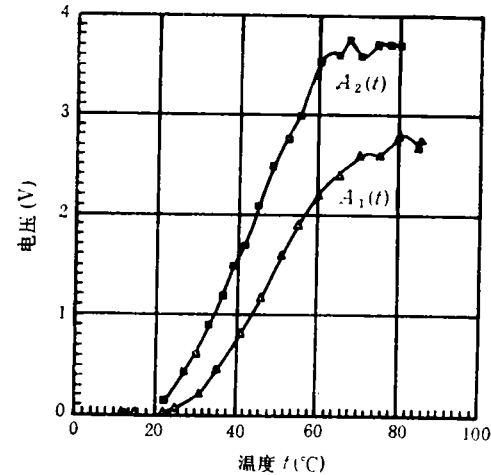


图 3 接收声信号幅度与温度的关系  
△、■,分别对应声信号幅度  $A_1$  和  $A_2$

利用(3)式求  $\alpha$  需要知道同一温度下的  $A_1$  和  $A_2$  值,而上面的两组测量结果没有这种确定的温度对应关系。因而,应对所得数据做插值处理,以便直接利用(3)式求  $\alpha$ 。我们使用牛顿插值公式<sup>[1]</sup>,根据相邻的离散点,求出在同一温度  $t$  下不同距离  $l_1$ 、 $l_2$  处接收到的声波幅度

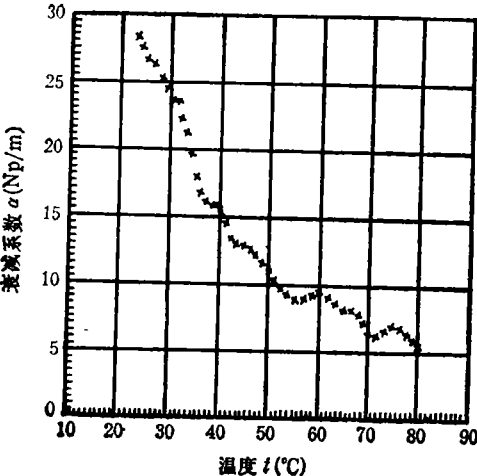


图 4 衰减系数  $\alpha$  与温度的关系

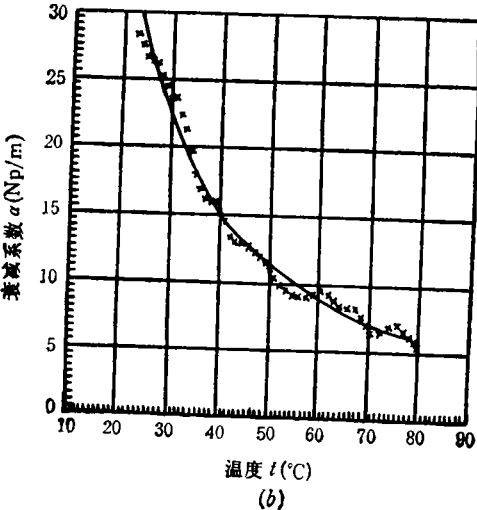
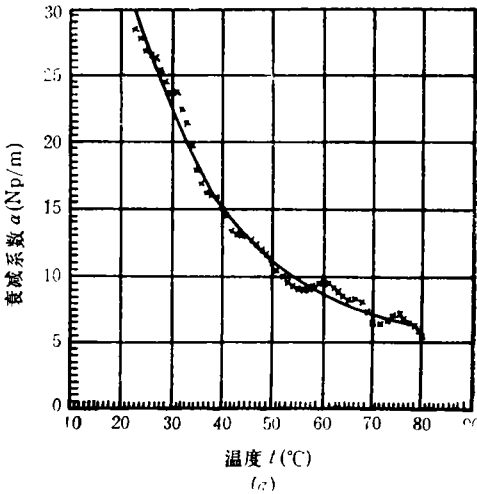


图 5 衰减系数  $\alpha(t)$  的拟合曲线  $\alpha'(t)$   
(a) 多项式拟合曲线  
(b) 乘方拟合曲线

是平均误差

$$\frac{1}{t'' - t'} \int_{t'}^{t''} |\alpha'(t) - \alpha(t)| dt \quad (4)$$

和方差

$$\frac{1}{t'' - t'} \int_{t'}^{t''} |\alpha'(t) - \alpha(t)|^2 dt. \quad (5)$$

综合这两项指标，多项式类型和乘方类型的经验公式最接近实测值  $\alpha(t)$ ，相应的拟合曲线分别示于图 5(a) 和 (b) 中(见图中实线)。

表 1 衰减系数  $\alpha(t)$  的经验公式

| 类型  | 经验公式 $\alpha'(t)(\text{Np/m})$           | 平均误差  | 方差    |
|-----|------------------------------------------|-------|-------|
| 对数  | $84.4 - 18.3 \ln t$                      | 1.38  | 2.30  |
| 指数  | $48.3 e^{-0.0276t}$                      | 1.18  | 2.13  |
| 乘方  | $1980 t^{-1.32}$                         | 0.662 | 0.825 |
| 多项式 | $71.2 - 2.48t + 0.0336t^2 - 0.000159t^3$ | 0.569 | 0.489 |

四、测量原油的声速

原油声速的测量很简单。记录原油中声波的走时  $T$  和传播的距离  $l$ ，然后用下式

$$v = l/T \quad (6)$$

即可求得原油的声速。

图 6 是测量声波幅度  $A_2$  的同时所记录的

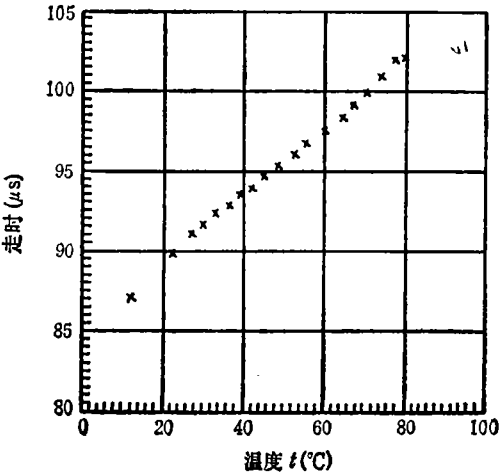


图 6 石油中的声波走时

声波走时  $T$  随温度变化的关系。该图表明，随着温度的升高，原油中声波走时近似线性增加。已知两个换能器的间距  $l_2 = 132.0\text{mm}$ ，于是得到原油声速随温度变化的关系，如图 7 中“+”所示。这里显示出，原油声速随温度升高而近似线性下降。根据图 7 中的数据点求出原油声速的经验公式(见图中实线)：

$$v = 1.54 - 0.0031t \quad (7)$$

其中声速  $v$  的单位是  $\text{km/s}$ ，温度  $t$  的单位是  $^{\circ}\text{C}$ 。

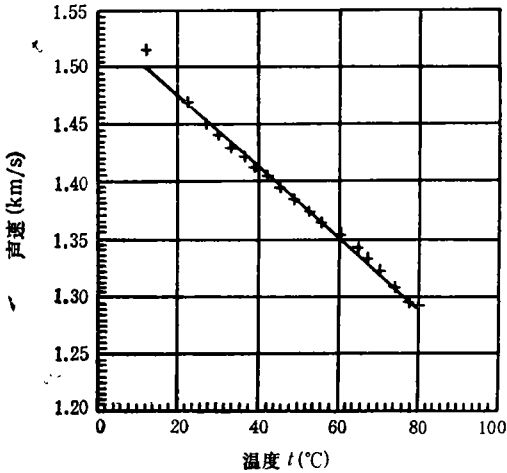


图 7 石油的声速与温度的关系

五、讨论

为了探讨换能器的灵敏度及其温度特性对本次实验结果的影响，我们把声测试槽中的原油换为蒸馏水，放入烘箱中，在  $12^{\circ}\text{C}$  至  $80^{\circ}\text{C}$  的范围内测试换能器的灵敏度。与原油的声衰减系数相比，蒸馏水的声衰减系数非常小(对频率为  $1\text{MHz}$  的声波，蒸馏水的声衰减系数小于  $10^{-5}\text{Np/m}^2$ )，可认为无衰减。实验结果表明，随着温度的升高，发射声波的幅度降低不到  $10\%$ ，即换能器的灵敏度随温度升高而稍有下降，而原油中声波幅度增大几十倍。相比之下，换能器灵敏度的改变对所测幅度值的影响很小。

原油从固态变为液态，会改变换能器与原油的耦合状态，从而影响换能器的灵敏度。显然，换能器灵敏度的改变不影响原油声速的测

量结果,可以证明也不影响声衰减的测量结果。假定发射换能器的激励电压为  $V_0$ ; 当温度为  $t$  时,发射换能器的发射声压灵敏度为  $S(t)$ ,接收换能器的接收电压灵敏度为  $M(t)$ 。接收换能器在距发射换能器  $l_1$  和  $l_2$  处接收到的信号电压分别为

$$V_1(t) = V_0 S(t) M(t) e^{-\alpha(t) l_1} \quad (8)$$

$$V_2(t) = V_0 S(t) M(t) e^{-\alpha(t) l_2} \quad (9)$$

于是衰减系数

$$\alpha(t) = \frac{1}{\Delta l} \ln \frac{V_2(t)}{V_1(t)} \quad (10)$$

该式表明,  $\alpha(t)$  只与温度为  $t$  时两次测量的电压幅度  $V_1(t)$  和  $V_2(t)$  以及两换能器间距的差值  $\Delta l = l_1 - l_2$  有关,而与换能器的灵敏度无关,这与(3)式是吻合的。

实验中发现,当原油温度变化时,其中传播的声波频率随之而变。高温时信号频率接近发射换能器的中心频率,低温时信号频率有所下降。例如,当温度  $t = 75^\circ\text{C}$  时,接收信号的频率  $f = 869\text{kHz}$ ; 当温度  $t = 15^\circ\text{C}$  时,接收信

号的频率  $f = 625\text{kHz}$ 。这反映了原油的声衰减系数与发射声波的中心频率有关。究竟是什么原因造成了这种现象,有待进一步分析和讨论。

## 六、结 论

本次实验在  $12^\circ\text{C}$  至  $80^\circ\text{C}$  的温度范围上测量了一种原油的声衰减系数和声速的温度特性。结果表明,当温度升高时,原油的声衰减系数和声速都呈下降趋势。前者下降幅度较大,后者近似呈线性。

**致谢** 作者感谢中科院声学所的杨玉瑞同志和耿学仓同志帮助制作了测量用换能器,以及胜利油田提供了原油样品。

## 参 考 文 献

[1] 曹立凡、史万明,数值分析,北京工业学院出版社,1986  
[2] Beranek, L. L., Acoustical Measurements, revised edition, the American Institute of Physics, 1988

# 声波测井资料在储集层评价中的应用

王 正 付

(河南石油勘探局技工学校,河南 473132)

1992 年 12 月 7 日收到\*

本文通过简化 Biot 定义的弹性常数,得到了综合岩石纵、横波速度估算孔隙度的公式和识别岩性的公式。实例表明,本文公式不仅适用于纯地层,而且还适用于泥质地层。因此,就估算地层孔隙度而言,可以用本文公式来取代现有的经验公式。

## 一、引 言

声波测井资料在储集层评价中的作用主要表现在估算孔隙度和识别岩性两方面。

多年来,孔隙度的估算都采用以时间平均方程为基础的线性经验公式,它不仅具有局限

性,而且还只涉及到对纵波速度的处理。岩性的识别是用纵波速度资料与其它测井资料(如:中子、密度等)制作的交会图,它最多只能是一种半定量的解释方法。

近年来,由于声波全波列测井的发展,人们逐渐把注意力转移到综合处理纵、横波方面来。

\* 最后修改稿 1994 年 2 月 1 日收到