

# 油储条件下岩石的波速特性及变化规律

施行觉\* 许和明 谢 端

徐果明 万永中

(中国科学技术大学)

魏建新

(地矿部石油物探研究所)

## 摘 要

施行觉,许和明,谢端,徐果明,万永中,魏建新. 油储条件下岩石的波速特性及变化规律. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3): 386~391

在储层温压条件下,于实验室中测量了岩石的波速,得出了波速随温度、压力变化的拟合公式,并取得了波速随压力上升而以对数形式增加,随温度增加以线性形式减小的结论。文中还对高温高压实验中的压力滞后效应和热平衡时间等特殊问题进行了分析和讨论,认为滞后效应是由岩石的非完全弹性所引起的,而热平衡时间则需 10min 以上。

**主题词** 波速 温度 压力 滞后效应 热平衡时间

## ABSTRACT

Shi Xingjue, Xu Heming, Xie Duan, Xu Guoming, Wan Yongzhong and Wei Jianxin. Wave velocity in reservoir-conditioned rock and its variation. *OGP*, 1995, 30(3): 386~391

The wave velocity in rock that is under the temperature and pressure conditions of reservoir was determined in laboratory. The experiment resulted in the fitted formulae showing how wave velocity varies with temperature and pressure. The conclusion was made that wave velocity increases logarithmically with pressure raise and shows linear decrease with temperature increase. Having analysed the pressure lag effect and heat balance time under high temperature and high pressure conditions, we deem that the lag effect results from the non-full elasticity of rock and heat balance time is above 10 minutes.

**Subject heading:** wave velocity, temperature, pressure, lag effect, heat balance time

实验室中岩石波速测试通常是在常温常压下进行的。但是当岩石处于地层原始状态时,却受到地层压力和地下温度的作用,因此,在实验室测试岩石波速时,需要对波速进行压力和温度的校正,才能得到地层岩石的实际波速。因技术条件所限,这方面的工作在国内开展得不多。

\* Shi Xingjue, China University of Science and Technology, Hefei City, Anhui Province, Postcode: 230026

本文于 1994 年 9 月 19 日收到。

本项目由国家自然科学基金会、中国科学院、中国石油天然气总公司、大庆石油管理局联合资助。

我们利用现有设备和仪器,对岩石进行了地层温压条件下的测试,试图找出有关地区的典型岩石,如砂岩、石灰岩等随温度、压力的变化关系,以便对常温常压下的波速值进行校正。

## 地层原始温压条件的确定

### 原始地层压力的确定

井中岩石样品一般只具有深度值,而所有参数的测试都要求将样品恢复到原始地层的压力,所得结果才更具有实际意义。因此,如何确定原始状态下的地层压力,给出压深关系方程式是一个非常重要的问题。由于实测井中压力和温度费用昂贵,一般只能根据有关理论借助少量实测数据进行推算。

根据海姆法则<sup>[1]</sup>,假定井中岩石处于流体静压力作用下,那么地层压力  $P$  和深度  $z$  的关系可以表示为

$$P = \rho g z \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为深度  $z$  以上岩石层的平均密度;  $g$  为重力加速度。若取  $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$ , 则压深关系近于

$$P = 2.5 \times 10 z = 25z \quad (2)$$

$P$  的单位为 MPa。

但是由于岩石中孔隙流体的存在,产生了孔隙压力,使原始地层中的岩石不但受到外部固体压力的作用,而且还受到内部孔隙流体的作用。此时,岩石物性与压力的关系,实际上与有效应力有关。有效应力<sup>[2]</sup>为

$$P_e = P - P_p = (2.5 - 1.0)z = 1.5z$$

式中  $P_p$  为孔隙压力。

当孔隙流体压力为零时,有效应力与上覆固体压力相等;当存在孔隙压力时,有效应力小于固体压力,这时压深方程可写作

$$P = 15z \quad (3)$$

式中:  $P$  的单位为 MPa;  $z$  的单位为 km。

实际地层压力则介于式(2)与式(3)两者之间。图1示出了岩石处于流体静压力及存在孔隙压力时的压深关系曲线。

### 原始地层温度的确定

由于深井中地温资料较少,且各地的地温梯度相差较大,平均值大致在  $dT = 2^\circ\text{C}/100\text{m}$  左右<sup>[3]</sup>。这样,我们就可以利用井中温深关系

$$T = T_0 + 20z \quad (4)$$

来计算地层的温度。式中温度  $T$  的单位为  $^\circ\text{C}$ ;  $dT = 20$  为地温梯度,单位为  $^\circ\text{C}/\text{km}$ ; 深度  $z$  的单位为 km。

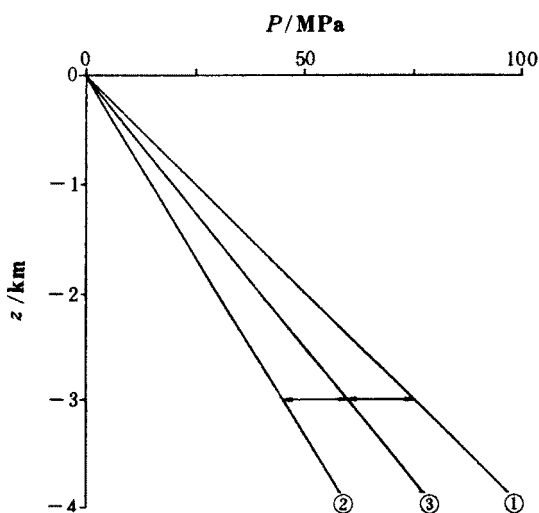


图1 地层岩石的压深关系曲线

曲线①为干燥岩石的压深关系,是最大值;曲线②为完全饱和岩石的压深关系,是最小值;曲线③表示实际地层岩石的压深关系的变化范围

## 波速随温压的变化规律

我们使用的高温、高压三轴仪能产生 300MPa 的压力、200℃ 的温度,可装置直径为 38mm 的样品,足以满足油田样品测试的需要。在实验室测试时,将被测岩样连同换能器一起密封后装入高温高压的容器中。当容器内达到所设定的温度、压力后,用 SP-1 声波仪以 0.1μs 的速率进行数值化采样,然后根据波的初至时来计算波速。测试精度约为 1%。

### 波速随压力的变化规律

取砂岩样品 3 块,其物性并非完全相同,故它们的初速度不等。但实验结果表明,波速随压力的变化规律却基本相近,其曲线可用公式

$$v(P) = v_0 + A \ln \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

来拟合。式中:  $A$  为压力影响系数,量纲为 km/s; 压力  $P$  的单位为 MPa;  $P_0$  取 1MPa; 波速  $v$  的单位为 km/s。图2示出了砂岩样品的波速随压力的变化情况。

### 波速随温度的变化规律

温度对速度的影响规律如图3所示。图中纵坐标为  $v(T)/v_0$ ,称之为归一化速度,其中  $v_0$  是室温时各种压力条件下的速度平均值,  $v(T)$  是某温度时各种压力下的速度平均值。从图中可见,其归一化速度随温度升高而略有下降,曲线可用公式

$$v(T) = v_0 [1 - B(T - 20)] \quad (6)$$

来拟合。式中:  $B$  为温度影响系数,单位是 1/℃; 温度  $T$  的单位是℃。

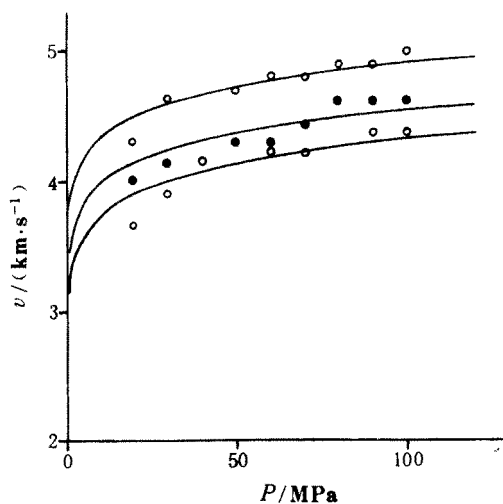


图2 典型砂岩样品的波速随压力的变化规律

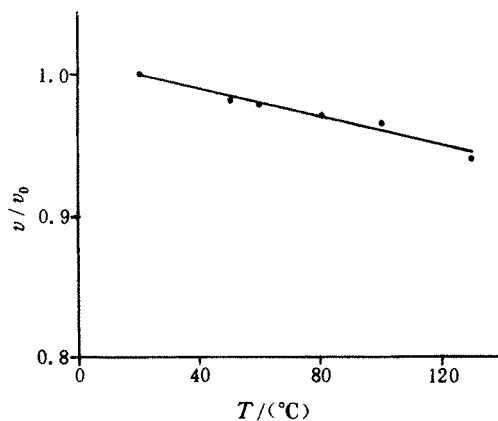


图3 砂岩样品归一化速度随温度的变化

### 温度、压力同时作用对波速的影响

当温度、压力同时作用时,两者对速度的影响相当于它们各自影响的线性叠加,可表示为

$$v(P, T) = v_0 + A \ln \frac{P}{P_0} - B(T - 20)v_0 \quad (7)$$

等式右边:第一项是常温常压时的速度,与岩石样品的物性有关;第二项表示压力的影响使速度以对数的形式增加;第三项则表示温度的影响使速度以线性形式下降。式中系数 $A$ 、 $B$ 对于不同岩类应取不同值。经实测,对于砂岩, $A \approx 0.25$ ,  $B \approx 0.0005$ ;对于灰岩, $A \approx 0.013$ ,  $B \approx 0.0004$ 。由此可以看出,砂岩的压力影响系数约为灰岩的20倍。这可能与岩石的孔隙率有关,所测砂岩的平均孔隙率约为15%,而灰岩仅为2%。

测试结果还表明,压力对速度的影响要比温度大得多。当压力变化100MPa时,速度可增加1.15km/s;而当温度变化100℃时,速度减少仅为5%,约为0.2km/s。

我们用拟合公式计算的值与实测值进行了比较,其结果见表1。

表1 砂岩波速实测结果与计算结果的比较

$P$ MPa	$T$ ℃	实测值 km/s	计算值 km/s	误差 %
1	20	3.571	3.571	0.0
80	20	4.629	4.666	0.1
80	50	4.545	4.510	1.5
50	50	4.464	4.495	0.7
50	80	4.385	4.442	1.4

## 岩石非弹性对测试值的影响

实验过程中发现,在压力的上升和下降阶段,同一应力下的波速值是不同的(图4)。同时还发现,电阻率和孔隙率的测试也有类似的滞后效应(图5和图6)。

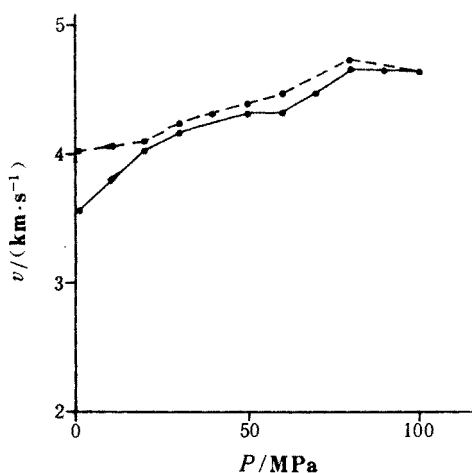


图4 加、卸载循环应力对波速的影响

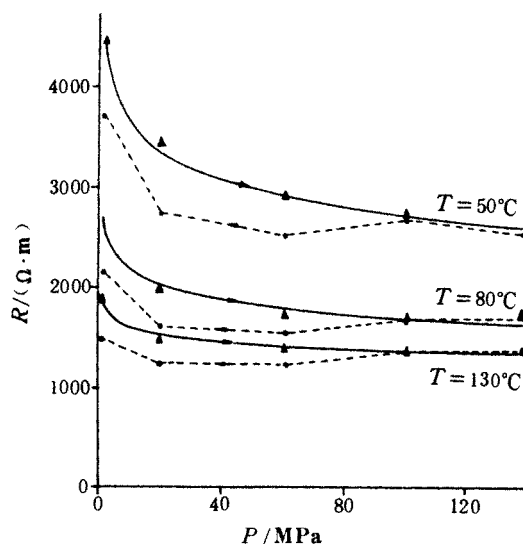


图5 不同温度时加、卸载应力对电阻率的影响

以上现象说明,测量值并非是压力的单值函数,而是与样品受压的“历史”有关,如样品受压次数,应力升降的大小等。这些因素会给样品的重复测试带来较大的误差,也给相互间的比较带来了不便。

分析产生滞后效应的原因,主要因为岩石是属于多孔介质,并非是完全弹性体。在岩石受应力作用后,尽管外部应力可以很快释放,但其内部仍有残余应变存在,应力下降阶段的测量值还保留着过去高应力的“痕迹”,使波速值偏高、电阻值偏低、孔隙率减小较多(图4、图5、图6)。我们的经验认为,要想克服高压测量中的非弹性滞后效应,可以先循环加载数次,使岩石

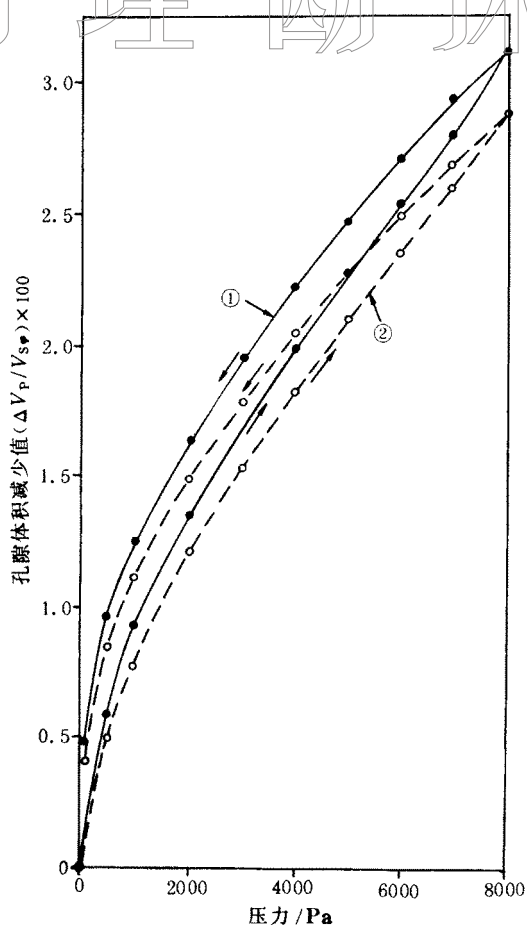


图6 加、卸载应力对孔隙体积减少的影响

①(实线)、②(虚线)表示两块不同的样品,箭头指示加卸载的方向; $\Delta V_p$ 表示在流体静压力作用下孔隙体积的减小值; $V_{sp}$ 表示岩石在常压下的孔隙体积

“压实”,残余应变相对固定,然后再测试数据。同时在实验过程中应注意每次加载的程序和加载的时间,尽量做到彼此相同,以减少滞后引进的误差。

## 岩石的热平衡时间

高温高压实验在技术上有其特殊性,除了上述的压力滞后效应外,热平衡时间也是需要考虑的一个问题。由于岩样置于容器中,而测量温度的热电偶是放在岩样的外表面,所以所测量的结果只反映液压介质的温度,而不反映岩样内部的温度。考虑岩石的导热系数很低,内外的温差趋于一致需要一段时间。那么达到指定

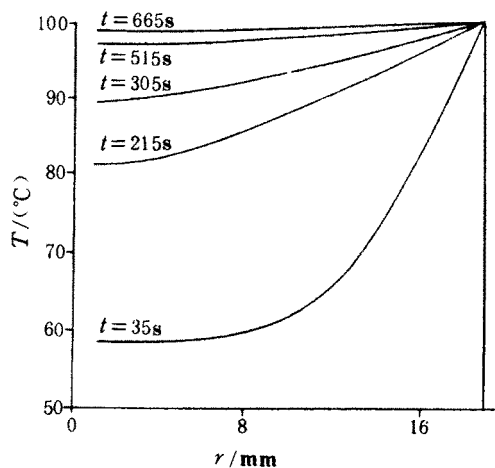


图7 岩石热平衡时间的计算曲线

岩石半径  $r=17\text{mm}$ , 中间小孔的半径  $d=1.25\text{mm}$

的温度(此时油的温度可以显示,而岩石内部的温度无法显示)需等待多长时间才能进行数据测量?为此,我们在实测导热系数的基础上进行了理论计算<sup>[4]</sup>(图7)。我们还在岩样中间钻了孔,单独测量了岩石内部的温度变化情况,测量结果与计算结果大致相等,即至少需等待10min以上才能使岩样的内外基本上达到热平衡。

## 结 束 语

实验得出了以下几点结论:

(1)岩石的波速受压力和温度的影响可用  $A$  和  $B$  两个系数来定量地表示,压力升高会使波速以对数形式上升,温度升高则使波速以线性形式下降,但压力对波速的影响要比温度大得

多;

(2)不同的岩石具有不同的压力影响系数  $A$ ,其值与岩石的孔隙率有关;

(3)高温高压实验有其特殊的复杂性,为了提高测试精度,必须考虑压力的滞后效应和温度的热平衡时间;

(4)波的初动稳伏效应对波的到达时间有明显的影响,此问题将另文讨论。

大庆石油勘探开发研究院吴永刚总工程师和其他有关同志对本项实验提出了建设性的指导意见,特此致谢。

#### 参 考 文 献

- 1 耶格 J.C. 岩石力学基础,科学出版社,1981,456~470
- 2 陈颢. 地壳岩石的力学性能,地震出版社,1988,69~73
- 3 张少泉. 地球物理学概论,地震出版社,1987,283~288
- 4 邦特巴思 G. 地热学导论,地震出版社,1988,7~12

·消息·

### 在 GeoQuest 工作站实现 Seislog 剖面的有效彩色分辨显示

GeoQuest 工作站上的地震数据彩色显示是利用变强度 VI 显示方式进行的。这种显示方式中所用的色标从左到右是按数据的对称正负区间均匀分配的,也就是说,只有地震剖面的数据落在区间 $(-A, A)$ 时,才能充分将相应的色标利用上。而 Seislog 或类似的岩性数据是在正数区间落值的,所以在利用 VI 显示方式时,只能用到少于半数的颜色。显然,此时的色彩分辨率是很低的,无法用于解释及从事其它深入研究。为了克服这种缺陷,我们利用工作站上 PDS 发展库编写一个色标非均匀分配的显示程序,并对 Seislog 剖面数据作简单的中位数漂移和按需要进行拉伸压缩处理,即可实现该剖面的有效彩色分辨显示,同时含有与原剖面所有信息完全等价的新数据。这项显示功能的改进,为拓宽利用 GeoQuest 工作站或其它具有类似显示的工作站进行 Seislog 数据处理和解释提供了方便。有意进一步了解此项改进技术的单位和个人,请直接与石油勘探开发科学研究院地球物理所联系。

龙建东