

地球物理技术汇编

(7)

《石油地球物理勘探》编辑部

《石油地球物理勘探》编辑部

30694

地球物理技术汇编

5456/05 (7)



00302425



200402000



《石油地球物理勘探》编辑部

1987年

地球物理技术汇编(7)登载了26篇文章,主要包括地震资料解释、数字处理、VSP技术、微机在地震资料解释中的应用和有关石油仪器方面的内容;另外还介绍了一些与石油物探有关的岩石物理学方面的内容。本书可供从事地球物理勘探的同志和大专院校有关专业的师生参考

地球物理技术汇编

(7)

《石油地球物理勘探》编辑部编辑出版

*

石油部物探局制图印刷厂印刷

1987年8月出版

内部发行

冀出内字第1164号

目 录

岩石物理学的进展及研究综述(上) ——

- 弹性波在岩石中的传播特性王之敬等 (1)
- 彩色剖面的解释及其在岩性油藏预测中
的应用辛连发 (18)
- 地震技术在油气开发中的应用戈 盾 (29)
- 三维数据体的显示方法吴国民等 (46)
- 地震资料在地层划分对比中的应用周长祥 (80)
- 陕甘宁盆地西缘掩冲构造带的地震勘探方法 钟愚荣 (97)
- 复杂断块区老资料构造图的编制王良全 (115)
- 散布矩阵聚类法——用于石油勘探的一种模
式识别方法郑良春 (125)
- 地震折射波法叠加技术刘光鼎等 (133)
- 均方根速度负变化率问题讨论李建齐等 (141)
- 廊固凹陷地震反射发散体的构造成因张振生 (152)
- SIDIS 解释系统概况刘永生 (158)
- 对“剖面法作构造图”的讨论崔世权 (181)
- 浅层折射法在高寒地区的应用孟宪禄 (188)
- 海域沉积盆地地震波与声速和岩性的关系姚春森 (191)
- 克雷 (CRAY) 巨型机各型号软、硬件的特点及
其在地震数据处理中的应用前景王志英 (201)
- 一条模型试验剖面说明的问题邹家建 (211)

PC-1500计算机在地震测井资料解释中的应用	黄建华 (214)
ROTAT——三维时间切片转换模块	新栋梁 (225)
AZNMO——方位角动校正模块	新栋梁 (231)
DIPSE——倾角分析模块	新栋梁 (238)
微机在VSP设计与预测中的应用	丁善根 (245)
VSP初至拾取与速度计算	王成礼 (253)
VSP的地面采集仪器及采集中的有关技术	谢明道 (260)
用可靠性数学方法探讨地震检波器的失效分布 和寿命特征	葛福如 (272)
乔洛克H ₃ 型三分量探测器的工作原理及调校	姜天平 (285)

岩石物理学的进展及研究综述（上）

——弹性波在岩石中的传播特性

王之敬 韩德华 Amos Nur

岩石物理学是近年来新发展起来的一门综合性的边缘学科，它专门研究岩石的各种物理性质以及这些性质间的相互关系及作用。目前，许多岩石物理学方面的研究成果已被广泛应用于地球物理勘探、天然地震、石油开发、及地球构造研究等诸方面。本文综述了国外在岩石物理学方面的研究进展，特别是最近几年来的研究成果。

绪 论

随着石油工业及现代科学技术的飞速发展，地球物理测量精度也在不断提高。在实际测量中，人们已开始逐步利用波振幅与炮检距之间的变化关系、垂直地震剖面（VSP）、横波、全波形声波和电解法测井等最新技术所提取的地下油田信息。为了利用所得的地球物理数据精确反演地下岩层的性质，人们必须真实了解各种岩石物性参数，诸如岩石矿物组分、孔隙度、渗透率、密度、孔隙形状、岩石颗粒的胶结程度及颗粒的接触状况等，还要知道外界的物理参数，如孔隙

本文于1986年11月19日收到。

流体的种类、饱和度、压力、温度等，以及所列诸参数间的相互作用对岩石中弹性波及电磁波传播的影响。岩石物理学是专门研究这些因素影响的学科，它还是一门涉及到多学科的边缘科学，与地质学、勘探地球物理学、力学、声学、电磁学、核物理、地球化学、测井、岩样分析、石油工程等学科密切相关。

近年来，岩石物理学的研究所包括的主要内容有：（1）岩石和流体性质对弹性波传播的影响；（2）岩石和流体的性质对电导率或电阻率及电磁波传播的影响。在这篇文章里，我们首先将综合论述岩石物理学研究的发展及其成果，然后对它的研究现状及发展前景提出一些看法。

由于篇幅有限，本文将分上、下两部分：第一部分主要论述弹性波在岩石中的波速和衰减；第二部分包括岩石的弹性模型、岩石的电性及其它性质，岩石物理学研究中存在的问题及其发展前景等。

此文只讨论与石油工业有关的内容，而不涉及与天然地震，地球构造等方面有关的岩石物理学内容。

弹性波在多孔隙介质中的传播

——Biot 理论

Biot 于 1956 年建立了弹性波在多孔隙介质中的传播理论。此理论既包含了介质骨架及孔隙流体的单独作用，也包含了它们之间的耦合作用。Biot 认为，波在介质中传播的能量损失是由粘性孔隙流体与介质骨架耦合的驰豫造成的。这个理论还预测，介质中弹性波速及衰减与介质骨架及孔隙

流体的弹性性质、粘滞系数、孔隙度、渗透率、有效应力及波的频率等有关。

Biot 从理论上证明，在流体饱和的多孔隙介质中存在两种纵波，一种叫做快速纵波，即我们经常观测到的纵波；另一种叫慢速纵波，实际上是扩散波，衰减得特别快。Plona (1980) 首次用实验证实了这种慢速波的存在。另外，Biot 理论预测当弹性波的趋肤深度与岩石孔隙的直径相近时，其衰减最大。在低频时，粘性趋肤深度远大于孔隙直径，因此孔隙流体好象是“锁”在骨架上，这时波的衰减很小。在高频时，趋肤深度小于孔隙直径，孔隙流体的惯性使其本身的运动落后于骨架的运动，因此使速度升高造成波速的频散现象。

Biot 理论的低频形式与 Gassmann (1951) 的结果是一致的，这个 Gassmann—Biot 关系已被广泛用于解释流体饱和和对岩石弹性性质的影响。

岩石中的弹性波速度

随着地震勘探和测井技术的发展，人们对于研究波速与岩石物性的关系特别关注。弹性波在岩石中的传播速度与岩石的孔隙度、孔隙形状、岩石的矿物组分、渗透率及岩石颗粒的胶结程度有关，也与孔隙流体、饱和的状况及环境的温度、压力、以及波本身的频率有关。实际介质中的弹性波速是上述诸参数综合作用的结果。下面分别叙述这些关系，但希望这种分类叙述不要导致概念上的错觉。

岩石密度、年龄及岩性与波速的关系

Gardner 和 Gregory (1974) 通过对白云岩、石灰岩、

石膏、页岩及砂岩等几种沉积岩的弹性波速度测量，发现在同一种岩石中，纵波速度随岩石密度的升高而升高，并建立了一个经验公式，用来估计不同岩性岩石中的纵波速度（或密度）。

在同一篇文章中，Gardner 和 Gregory 还认为岩石中的纵波速度与岩性有关，在同样条件下，白云岩的纵波速度最高，然后依次为石灰岩、砂岩和砂团。这种速度的区别是与构成岩石的矿物成分直接有关（Yale, 1985）。

沉积岩中的纵波速度与岩石埋藏深度和年龄乘积的六分之一次方成正比（Faust, 1951），其试验公式为

$$V = K(Z T)^{1/6}$$

其中， $K = 125.3$ ，为一经验系数； Z 为岩石埋藏深度，单位为 ft； T 是岩石的年龄，单位为 a；纵波速度的单位是 ft/s。

压力与岩石中波速的关系

实验结果表明，干燥岩石纵、横波速都随压力的增高而升高。其升高的程度被认为与岩石中扁平孔隙和微裂隙的含量有关。Han 和 Nur（1986）在测量了大量砂岩样品的基础上发现，当压力低于 20MPa 时，波速一般随压力的增高而很快上升。在更高压时，这种上升则变得较为缓慢。与此同时，岩石的孔隙度在低压时，随压力升高而降低的速度也比在高压时要大。孔隙度随压力的这种变化是很难用微裂隙随压力升高而闭合来解释的。因为微裂隙只占很小的体积，不足以解释孔隙度在低压下的减少。实验的结果表明，波速与压力的关系不仅与孔隙形状有关，还与岩石颗粒的胶结程度、压实程度等成岩作用的结果有关。对于胶结程度好的岩石，波

速随压力变化很小。

在液体饱和岩石中，波速不但与围压有关，还与孔隙流体的压力有关，与波速有关的有效压力被定义为

$$P_{\text{有效}} = P_{\text{围}} - nP_{\text{孔}}$$

式中 n 称为内变形系数。Wyllie (1958) 通过波速测量表明，同时升高等量的围压和孔隙压，纵波速度保持不变，即有效应力等于围压与孔隙压之差压， n 等于 1。然而，这个结论与 Brandt (1955) 用 n 小于 1 得到的结果是矛盾的。Banthia 等人 (1965) 测量三种砂岩的横波速度表明， n 是小于 1 的。King (1966) 所测的一种砂岩 (Banthia 所测样品之一) 中的纵横波波速表明， n 是大于 1 的。Chistensen 和 Wang (1985) 对 King (1966) 所测砂岩再次进行测量，结果表明，对纵波， n 是小于 1 的；对横波， n 是大于 1 的。他们认为， $n > 1$ 是由砂岩中的粘土引起的 (不含粘土时 $n < 1$)。随着压力差 (围压与孔隙压之差) 的增加， n 逐渐趋近于 1。

Han (1985) 对 60 种砂岩测量结果表明，对纵波速度而言， n 略小于 1；对横波速度而言， n 近似等于 1，对不同的岩石， n 值的离散是不可忽略的。对纵波和横波， n 值均随粘土含量的增加而趋于减小。这可能与岩石的胶结程度有关。

温度与岩石中波速的关系

一般说来，岩石及砂中的地震波速度都随温度的升高而下降，但下降的幅度则受矿物组分、孔隙度、孔隙饱和物等许多其它条件的影响。

在干燥的砂岩及砂中，当温度从 20℃ 升至 100℃ 时，其纵波与横波速度下降约 2%—8% 左右。一般认为这种速度

下降是由于砂及砂岩的构成矿物被“软化”所引起的。此外当温度升高时砂及砂岩中的各种矿物组分的膨胀程度不同，造成孔隙度升高也会引起速度下降（Kern, 1982）。

在完全水饱和的岩石中，Timur (1977) 对 Berea 砂岩的实验结果表明，在100℃的温度范围内，纵波速度下降了约2%，而横波速度只下降了约1%。Wang和Nur (1986) 的实验结果表明，在Boise和Massillon砂岩中，纵波速度下降分别为7%和4%，其横波速度下降分别为5%和4%。当孔隙中的一部分水变成蒸汽时，纵波速度急剧下降而横波速度则变化不大（DeVibiss, 1980），因而整个岩石和水的组合的体变弹性模量下降而切变模量则无大的变化；另一方面，当孔隙中水完全变成冰时，整个组合的切变弹性模量升高以及密度减小，而使得纵波和横波速度都上升很多。Zimmerman和King (1956) 注意到了在冰冻砂层中的波速还与砂层的孔隙度及砂中含水的程度有关，并且做了有关的速度模型。

另外，Shumway (1958) 的实验还发现，在水饱和的淤泥中的纵波速度随温度的升高而升高（实验温度0—35℃）——基本规律和水中的纵波速度—温度曲线平行。这是因为淤泥的孔隙度很高（大于5%），所以在水饱和的情况下，其性质是被水控制的。

在实验室的条件下，当温度升高100℃时，纵波速在重油饱和的砂及砂岩中下降可达20—45%。Wang和Nur认为，纵波波速随温度升高而急剧下降是由于重油中固体或半固体腊的熔化而导致其弹性模量，特别是切变弹性模量的剧降所造成的。Yale (1986) 则发现，由于温度升高100℃而造成

的一种30℃（美国石油研究所标准）原油的压缩率的变化，可导致其饱和砂岩中的纵波波速多下降1—3%。由于温度升高时，纵波速度在重油饱和的砂及砂岩中下降很大（20—45%）因而Wang和Nur（1986）认为用地震法来探测热驱油藏的高温前峰是有可能的。

岩石孔隙度与波速的关系

Wyllie等人于1956年提出了时间平均公式

$$\frac{1}{V} = \frac{\varphi}{V_f} + \frac{1-\varphi}{V_m}$$

其中 φ 是孔隙度； V 是岩石在液体饱和时的纵波波速； V_f 是孔隙流体的波速； V_m 是构成岩石骨架的固体物质的纵波速度。时间平均公式是一个经验公式，在声波测井中，曾被广泛用于计算岩层的孔隙度。但人们很快发现此公式的不足之处，特别是这个公式过高估计了波在含粘土砂岩中的速度。粘土含量的作用将在下面专门介绍。

Raymer（1980）提出了一个非线性的经验公式用于描述孔隙度和波速的关系

$$V = (1 - \varphi^2)V_m + \varphi V_f$$

该公式可适用于更大的孔隙范围，包括高孔隙度的非固结沉积物。但是这个公式也忽略了其它参数的作用。

Domenico（1984）把时间平均公式修改为纯经验公式，用于描述横波波速和岩石孔隙度的关系

$$\frac{1}{V} = A + B\varphi$$

其中常数A和B可由回归分析得到。这个公式也过分简化了横波速度和岩石物性的关系，特别是忽略了粘土含量对砂岩

横波速度的作用 (Han和Nur, 1986)。

孔隙度与波速只有在高有效压力下才呈现相关性。Han和Nur (1986) 在测量纯砂岩波速的基础上发现, 在 40 MPa 围压和 1 MPa 孔隙压条件下, 它们的纵波和横波波速都与岩石孔隙度线性相关。其中纯砂岩波速和岩石孔隙度的关系如下

$$V_p = 6.08 - 8.6 \varphi \text{ (km/s)}$$

$$V_s = 4.06 - 6.28 \varphi \text{ (km/s)}$$

相关系数为 0.99。此公式在很宽孔隙范围内, 对固结的纯砂岩是有效的。

液体饱和与岩石中波速的关系

在五十年代, Gassmann (1951) 和 Biot (1956) 提出了多孔隙介质中孔隙流体影响弹性波传播的理论。Biot—Gassmann 理论的最大贡献在于为“亮点”法直接找天然气提供了理论依据。

Biot—Gassmann 理论预示: 在水或油饱和的岩石中, 孔隙中极少量的气可以使得岩石中的纵波速度大大降低。这显然是由于少量气体混入液体使得整体的压缩率显著升高而造成的。此理论还认为当岩石从液体饱和变成部分气体饱和时, 只有在低波速的岩石 (如非固结砂、浅层岩石) 中, 含有饱和液体的体积弹性模量较大时 (如水或油), 纵波的变化才会超过 10%, 这就解释了为什么“亮点”经常出现在水饱和岩层以上的浅砂层中这种现象。声频情况下的实验室结果以及对非固结砂的实验结果表明, 当液体饱和岩石的孔隙中出现少量气体时, 其纵波速度下降很多。随着孔隙中气体量的不断增加, 纵波速度随之上升。这是由于岩石密度的影响

所致。然而在较高频情况下(超声波)对固体岩石的测量结果表明,当岩石孔隙中的气体增加时,纵波速度随之渐降。这显然是与Biot理论不相符的。Toksöz等人(1976)认为这是由于Biot—Gassmann模型中没有包括微细孔隙和微裂隙的作用所致。而其他人士则认为是由于气体在孔隙中的分布不均所引起的。Biot—Gassmann理论假设孔隙中流体的压缩率是液体和气压缩率的平均体积,而Domenico(1976)和Mochizuki(1982)则认为在高频情况下,孔隙中流体的体积模量是液体和气体体积模量的平均体积。因而预测纵波速度随着气体饱和的增大而几乎是直线下降。

Yale(1986)发现固结岩中的纵波数据(Gregory, 1976)只有在气体饱和度大于40%或50%时,气体在孔隙中的分布才会较为均匀。

Devibiss(1982)的超声波速度数据表明,在水饱和的岩石中注入少量的蒸汽会使得纵波速度急剧下降。这种结果与Biot—Gassmann理论是一致的。但其先决条件是气体在岩石的孔隙中必须均匀地分布,例如气体直接从孔隙液体中逸出,而不是象在许多实验中那样靠液体蒸发。另外Tittmann等(1981)也发现在千赫频率范围内的声波测量中,在液体饱和的岩石中注入CO₂气体同样会造成纵波速度的急剧下降。

Biot—Gassmann理论认为岩石的剪切模量与液体饱和状态无关。但是,液体饱和会使岩石整体的密度增加,这样饱和岩石的横波波速低于干燥岩石的横波波速。Gregory(1977)发现在压力较低时,液体饱和岩石中横波波速可能高于干燥岩石中的横波速度。Han和Nur在测量含粘土砂

岩的基础上发现, 液体饱和干燥岩石的超声波速与砂岩的粘土含量及胶结程度有关。在有效差压为 39MPa 条件下, 随粘土含量增加, 纵波速度比从 1.2 增加到 1.5。对胶结程度差的砂岩, 这个比值增加的更为显著。而横波速度比, 随粘土含量的增加而减小, 但对胶结差的砂岩来说, 横波速度比有可能大于 1。这可能是由于部分颗粒边界的粘土在压力下可能移动, 促使砂粒更好的接触, 造成纵横波的相对增加。这种变化除了水与粘土的相互作用有关外, 还与波的频率有关。Han 和 Nur 的研究还表明, 对于水饱和的岩石, 速度的频散随粘土含量的增加, 可增加到 8%。Wang 和 Nur (1986) 的实验结果发现, 在原油饱和的砂岩中横波速度高于水饱和的同种砂岩。他们认为这是由于原油的粘性大大高于水的粘性, 因而横波在岩石孔隙液体中的趋肤深度 (正比于粘性的平方根) 增加, 使得横波可以穿过岩石中微裂隙中的液体而不必“绕道”, 从而使横波速度升高。从对两种微裂隙含量不同的砂岩的实验结果来看, 含微裂隙多的原油饱和岩石中的横波波速明显高于水饱和中的波速, 而对含微裂隙少的岩石, 这种差别就很小。

应当指出, 在研究岩石中波速和部分液体饱和之间关系的实验中, 均匀的部分饱和是很难得到的。这种部分饱和的非均匀性与孔隙的几何形状及表面的化学性质有关。

岩石中粘土含量与波速的关系

时间平均公式过高估计了含粘土砂岩中的波速。实验表明, 在含粘土砂岩中, 除了孔隙度外, 波速主要与粘土含量有关。

Han 和 Nur (1986) 在测量 80 块砂岩样品基础上 (其

中 70 块是含粘土砂岩) 利用回归分析方法得到了波速 不仅与孔隙线性相关, 而且还与粘土含量线性相关的结论。在围压 40MPa、孔隙压 1MPa 的条件下,

$$V_p = 5.59 - 6.93\varphi - 2.18c \text{ (km/s)}$$

$$V_s = 3.52 - 4.19\varphi - 1.89c \text{ (km/s)}$$

相关系数分别为 0.98 和 0.96。相关标准偏差分别为 0.021 和 0.043。此公式对固结合粘土砂岩是有效的。在差压大于 10MPa 时, 公式中的各系数随压力变化不大, 这样粘土的作用与粘土在砂岩骨架中的位置无关, 所以称为骨架粘土。骨架粘土在降低波速方面的作用对纵波来说大约是孔隙度作用的 0.3 倍, 对横波而言大约是 0.4 倍。

粘土的作用主要是降低岩石的剪切模量, 而不是体积模量。相应的纯砂岩波速远高于含粘土砂岩的波速, 这表明少量粘土即可有效地降低岩石的弹性模量, 特别是剪切模量。这种作用只有在粘土位于岩石颗粒边界时才是可能的。这种粘土的作用与前面公式描述的骨架粘土的作用不同, 称为边界粘土的作用。Han (1986) 试图从理论上说明边界粘土及骨架粘土的作用。砂岩中的粘土的弹性模量, 特别是剪切模量远小于石英砂粒的弹性模量。因此当它在砂岩骨架中所占体积、份量越大、砂岩的弹性模量就越小, 即波速越小, 因此波速随粘土含量增加而减小。

和粘土含量对波速的作用相比, 其它岩石物性参数, 例如孔隙几何形状、其它矿物组分、岩石颗粒大小、岩石固结程度、粘土的种类等对波速的作用可以忽略不计。

岩石渗透率与波速的关系

这方面的文献不多。Hamdi 和 Smith (1982) 测量了纵

波在细粒海洋沉积物标本（细砂、砂性淤泥，淤粘土）中的传播速度，发现所测量的纵波速度与用 Biot 理论计算出来的零频率速度之差随渗透率的增高而增大（这也说明了纵波的频散与渗透率成正比），因此他们建立了一个用波速计算渗透率的模型。这个模型可以较好地预测细粒海洋沉积物的渗透率。当沉积物的颗粒较粗时，预测值会变得小于实测值。

Cheng (1986) 认为，由于 Biot 理论中岩石的波速与其渗透率有关，因此在全波形声波测井中，用 Stoneley 波速及衰减来反演油层的渗透率是可能的。

综上所述，岩石中波速是与许多参数有关。但总的说来，渗透率对波速的影响可能不大，然而它对弹性波在岩石的频散可能会有较大的作用。

纵、横波速比的重要性

在纵、横波速都已知的情况下，纵横波速的简单比例可以用来估测岩层是固结的还是非固结的，以及岩层是否含气或含油。Gardner 和 Harris (1968) 认为，当岩层的纵、横波速比大于 2.0 时，岩层是非固结的（砂层），而当小于 2.0 时，岩层可能是固结的或含气非固结层。Gregory (1976) 的研究结果进一步证实了固结岩石中的波速比小于 2.0，并且显示了波速比与孔隙度的关系，以及在水饱和与气饱和两种情况下波速比的差别。

Wilkins 等人 (1984) 的研究结果显示，含硅石灰岩中纵、横波速的比值取决于其碳酸钙的含量和孔隙的几何形状。因此他们认为用波速比来鉴别含硅石灰岩的组分及孔隙的几何形状是可能的。

Rafavich 等人 (1984) 则认为纵、横波速的比值可用来