

地震岩性学

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

地震岩性学

M. 格 劳 尔 等 著

石油工业出版社

石油

工

17021.44

· 32867

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

地震岩性学

M.格劳尔 等著

谢剑鸣 译

石油工业出版社

目 录

引言.....	(1)
一、发展历史.....	(3)
二、基本原理.....	(5)
1.岩石物性分析 (弹性模量到地震速度)	(5)
2.地震速度.....	(9)
3.地震振幅 (反射系数)	(26)
4.影响地震振幅随炮检距变化的其他因素.....	(37)
三、模型研究.....	(53)
1.正演模型.....	(53)
2.反演模型.....	(71)
四、解释技术和典型实例.....	(86)
1.入射角.....	(86)
2.道相加法 (为提高信噪比)	(86)
3.典型实例.....	(87)
4.与气层有关的振幅异常.....	(87)
5.与含气无关的振幅异常.....	(91)
6.宽角反射.....	(95)
五、两个问题和练习.....	(99)
1.分辨率.....	(99)
2.诺模图.....	(109)
3.练习.....	(121)
参考文献.....	(140)

引言

1970年以前,地震勘探主要用于绘制地下构造图。用于这种作图的地震资料基本上是地震波传播的时间。从反射旅行时可提取两种信息:一是零炮检距的双程反射旅行时;一是根据不同炮检距的时差求出的到达各反射层的地震速度。用这两种测量数据就可对地下地质构造形态作出合理的判断。现在世界上大部分油气储量就是用这种基本技术发现的。

近十五年来,若干新的地震分析技术投入使用,从地震资料中提取出非常有用的地层信息(表引-1)。油气勘探中应用地震地层学在石油界已很普遍,成为世界上许多沉积

表引-1 从地震得出的信息

1. 旅行时; 速度; 地震构造
2. 总的地震特征; 地震地层学
3. 反射振幅; 地震岩性学

盆地评价油气潜在力的基本工具。大量实例和应用发表在AAPG论文集^[1]中(1977年)——《地震地层学》。地震地层学是基于在常规地震剖面上识别沉积序列。分析这些沉积序列可粗分岩性,从而预测生油层和储集层的分布。早先,地震地层学主要研究剖面上总的地震特征,很少注意单个反射层。近来,常用的地震地层学已演变成一种微地震地层学的形式,有人称它为“地震岩性学”。地震岩性学把注意力放在单个的反射层或一个小的反射层组上。油气层的许多特征是包含在地震反射波中的。

1. 地震岩性学

一地震道包含两种信息形式:旅行时和振幅。另外,道的空间位置可用震源坐标和接收点坐标来确定。这两种坐标又可转变为共中心点坐标和共炮检距坐标。这里我们侧重分析在共中心点和共炮检距中反射振幅的变化。这些振幅变化包含许多信息,可用来提取岩性和各种储集层参数,如流体成分、储集层厚度、速度、孔隙度和密度(表引-2)。

表引-2 地震岩性学

- | | |
|---------|----------|
| 1. 岩性学 | 2. 储集层厚度 |
| 3. 流体成份 | 4. 孔隙度 |
| 5. 速度 | 6. 密度 |

2. 工具

为了在某一勘探项目中运用地震岩性学,工作中需要一数据库(表引-3)。首先,也是最重要的是纵波反射资料。这些资料的质量随地区有很大变化,但地震岩性学需要质量很高的反射资料。若反射层追踪起来都有困难,就难以应用地震岩性学了。其次重要的

表引-3 工具——需用的资料

1. 常规的纵波反射资料
2. 实验室和各种测井资料(包括VSP)

3. 横波反射、转换波资料

4. 模型——正演、反演

是数据库对所勘探沉积岩的岩性了解。在分析地震振幅，并寻找振幅与岩性的关系之前，必须知道在已知情况下会是什么。地震波是沉积岩物性的直接反应。通常岩性的信息源自两方面：①岩样的实验室测定结果；②各种测井资料，如电测井、VSP等。在下面章节中要讨论岩性与地震反射振幅间的关系。

另一个地震的岩性信息源是横波资料，它是最近几年被开发的。近十年发展了几种激发横波的技术。由于地震横波响应在某些方面是独立于地震纵波响应的，因此，在岩性数据库中就多了一种新的信息。这样，地震模型估计可与野外观测资料符合得更好。

地震确定岩性和许多物探上的解释一样，不是单解的。但是，运用数据库，以迭代方式通过正反演模型技术，人们可以缩小解释上的“自由度”，得出最可能的一、二种答案。正演模型是根据给定的地质模型推出地震响应，它在过去十年已取得相当进展。作反演模型较困难，但用某种数学近似法和用某些经验预测，也可作出有限几个反演模型。在下面章节中要述及实际的模型技术。

一、发展历史

不容怀疑,多少年来,有经验的物探解释员早在运用地震岩性学了。他们凭经验指出反射特征在横向的细微变化(振幅和或相位变化)与地下某些东西的变化有关。通过与钻井资料控制的已知地质资料的类比,在一个新区,解释员有时可推断将会出现什么地层。但基于岩性分析的详细而科学的岩性估计,在六十年代末期以前并未得到推广。

从地震资料推导岩性信息的第一次尝试是根据正常时差分析导出的层速度来估算砂岩-页岩比。实验室分析资料支持这种努力,并在许多地区证明是成功的。从这些最初的工作,后来又发展了许多新技术,(表1-1)列出了其中主要的。

表1-1 发展历史

1. 实验室测定	2. 亮点
3. 调谐现象	4. 子波处理
5. 地震记录反演	6. 横波反射资料
7. 速度各向异性	8. 垂直地震剖面(VSP)
9. Q值估算	10. 振幅随炮检距的变化

七十年代早期,亮点技术作为第一个直接检测地下油气存在的技术进入了石油界。强振幅,相位反转,平点,时间滞后,阴影带等,成为勘探工作者发现许多新气田的“二信号”,特别是在墨西哥湾。

当人们开始研究什么原因使地震振幅发生变化时,从亮点技术派生出来的真振幅处理技术对地震解释显得非常有用。地震反射振幅分析的一个首要方面是薄层的调谐现象。在时差相当四分之一波长内的两个极性相反的反射波,其合成波形不变,但其振幅大小却包含了与两波时差大小有关的信息。因此,若对地层波阻抗特性作出若干假定,用地震振幅就可估算储集层厚度的变化。

第二个在物探界引起震动的是地震记录反演技术,或叫地震波阻抗测井。但作准确地震记录反演前,发展了与标准的最小相位反褶积技术不同的子波处理。地震记录反演是靠零相位的子波将反射系数转变成波阻抗曲线的。为此,发展了许多种“信号”反褶积技术,它们对反射系数和(或)子波特征不作严格的假定。

横波反射地震学早在六十年代后期就有了,但直到七十年代中期,它才被石油界广泛承认,今天它已成为一个很有生命力的辅助信息源。横波速度和反射系数与纵波的联合应用,可得到地下多种岩性的信息。

不论纵波和横波,地震速度在垂向与水平方向的差异,给确定地下岩性带来了更多的信息。垂向旅行时包含了垂向的速度信息,而正常时差速度分析可得出有关水平方向速度的信息,尤其对水平极化横波SH。不同岩性具有不同的速度各向异性值,纵波和横波的值亦可能不同。用已建立的实验室和测井的数据库,就可用 V_p/V_s 比值和纵波、横波的速度各向异性值得出地震岩性学的总的判断。

在过去几年,石油界满怀希望,想用垂直地震剖面(VSP)解决诸多问题。时间会告诉我们它在寻找油气方面的真正用途。应记住VSP的若干重要用途。第一,VSP的横波与

纵波联合应用可得到有价值的岩性信息，特别是泊松比。第二，若用重复性良好的空气枪或可控震源，可求出地震非弹性衰减 Q 。第三，可用各种上行波、下行波剖面来分析多次波和得出零相位的地震反射道。把这些地震道与常规的地震观测记录进行比较，有助于作出更好的解释。

表 1-1 中最后一项是振幅随炮检距的变化，于1982年正式推出的，它在地震岩性学上的应用是本书的一个主要内容。

二、基本原理

1. 岩石物性分析(弹性模量到地震速度)

1) 引言

当一地震波传向地下，地下一体积元就产生形变，其形变量与该体积元的弹性和形变传到下一体积元的方式有关，而传播方式又与介质的传播速度有关。本章作一些简明的讨论，说明形变最终是如何与弹性参量和速度发生关联的。

2) 静态应变

图2-1列出三种基本的静态应变（图上的形变量是夸大了的）。一是物体受压缩应力，产生纵向应变 ε_L 。此处 L 为物体的长度， ΔL 是受力后长度的改变量。二是物体受拉伸应力，产生横向应变 ε_W 。此处 W 是物体的宽度， ΔW 是受力后宽度的改变量。三是物体受剪切应力，产生切应变 ε_{SH} 。此处 Δy 为位移量， θ 为角位移量（或称偏转角）， x 为物体的高度。列出公式如下：

$$\text{应力} = \frac{\text{总的力}}{\text{面积}} = \frac{F}{A}$$

$$\text{纵向应变 } \varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\text{横向应变 } \varepsilon_W = \frac{\Delta W}{W}$$

$$\text{切应变 } \varepsilon_{SH} = \frac{\Delta y}{x} = \tan \theta$$

$$\text{泊松比 } \sigma = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_L}$$

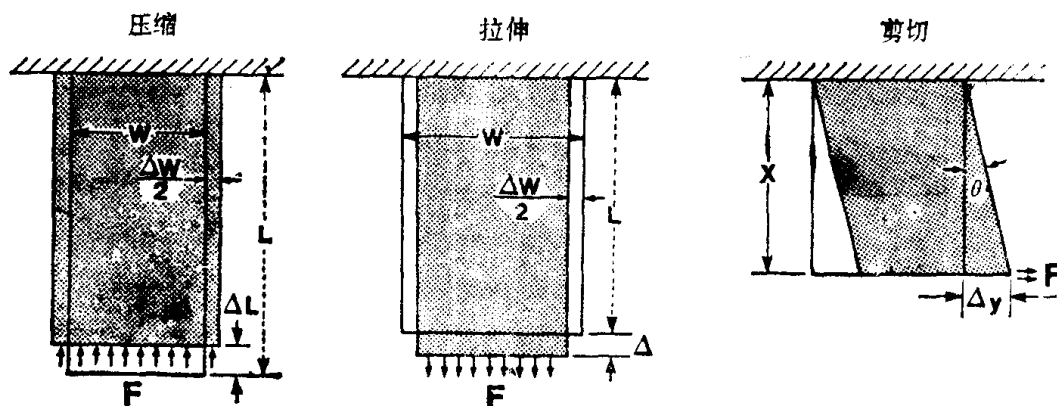


图 2-1 静态应变

这个应变的定义不能很好满足包含运动的动态条件，因为若这矩形块有移动，但不产生形变，就必需用另一些方法来描述这一作用。这是应变值作为空间坐标的函数所需的。

3) 作用于一点的应变

如图2-2,当应力作用于增量体积时，质点A和B都产生形变。这形变（或质点位移）发生在增量体积空间位置的任一点，可简化地用一斜线来表示应变大小（见图2-2右边）。因此，可用质点位移的空间导数来描述应变，即：

$$\text{应变} = \frac{U_B - U_A}{X_B - X_A} = \frac{\Delta U}{\Delta X} \approx \frac{\delta U}{\delta X}$$

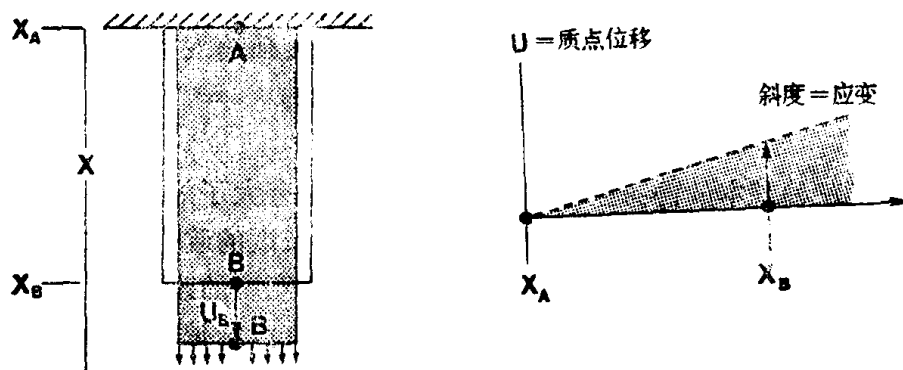


图2-2

同样可用质点位移的斜度与空间关系来描述应变（见图2-3）。不考虑纯平移问题，此时，应变值为零（如图2-3右边）。

再者，地震子波可视为给定瞬间许多质点的空间位移过程。位移量U是空间位置X的函数，它同样与应变有关。

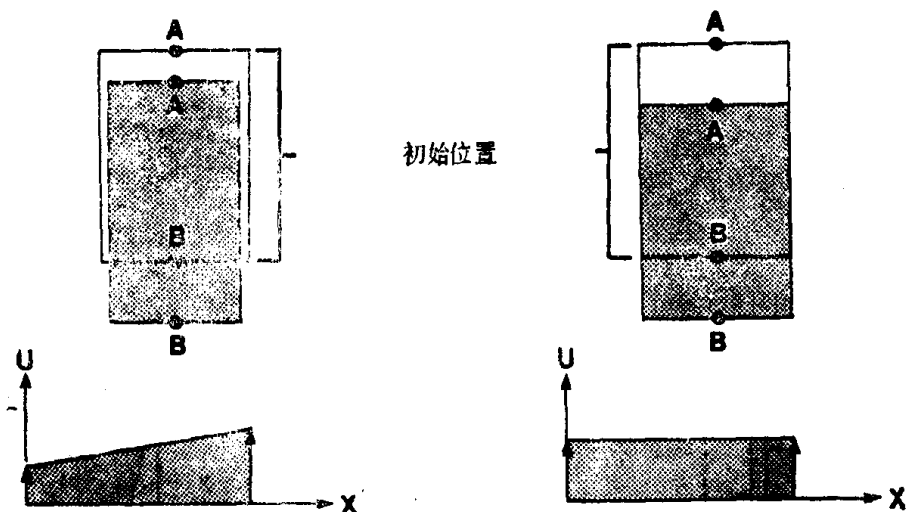


图2-3

4) 应力—应变关系

用公式表示介质中波动理论之前，需要说明一下应力与应变的关系。实验证明，对有限振幅的波，可用虎克定理来描述：应力 = E × 应变。

此处比例系数E叫杨氏模量。定量描述一物体强度最常用的三个弹性参量是：

$$\text{杨氏模量 } E = \frac{\text{拉伸应力}}{\text{拉伸应变}} = \frac{\text{拉伸应力}}{\epsilon_L} = \frac{\text{拉伸应力}}{L/L}$$

$$\text{体积模量 } K = \frac{\text{围压应力}}{\text{体积应变}} = \frac{\text{压应力}}{V/V} \quad (V \text{ 是体积})$$

$$\text{切变模量 } \mu = \frac{\text{切应力}}{\text{切应变}} = \frac{\text{切应力}}{\epsilon_{SH}}$$

它们示于图2-4。

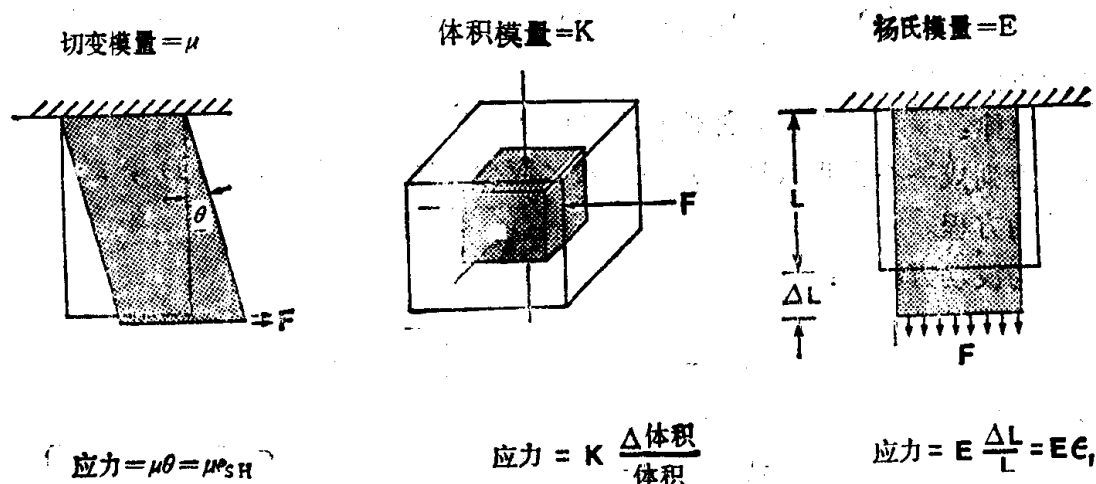


图2-4

体积模量 K 是一切物质都有的特性，以后将述及，在气体、液体和固体内部都可产生纵波。切变模量 μ 是固体物质具有的特性，对流体来说 $\mu = 0$ ，以后将述及， $\mu = 0$ 就是横波速度等于零，所以流体内部没有横波。

除上述三个常用的弹性参量外，还有两个弹性参量：一是泊松比 σ （在前面已述及），一是拉梅系数 λ （它与弹性体的热力学有关）。

对均匀各相同性介质，只要知道其中二个参量，就可导出另外三个参量，如：

已知 λ 和 μ ，则可求出：

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$$

若已知 E 和 σ ，则可求出：

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\sigma)}$$

从理论上来说，弹性模量是表示介质性能的物理量。

上述就是应力—应变的变化关系。Ricker的理论用了虎克定律（但还有附加部分），他预言应力是应变变化率的函数。

5) 建立波动方程

由概念上来说，推导弹性波方程从牛顿第二定律开始。质点受力后产生的位移是时间、空间位置和介质弹性的函数。牛顿的力是由于不等的或随时间变化的力作用于物体而产生的。它是位移的函数（在我们的模型中，物质的质量是不变的，其密度是常数）。即，

牛顿定律： 力 = 质量 × 加速度

（应力 = 密度 × $f[\text{位移}(t)]$ ），此处 t 为时间。虎克的力是介质的弹性产生的。即：

虎克定律： 应力 = 弹性常数 × 应变

把这两种力列成一个方程（即：弹性常数 × 应变 = 密度 × $f[\text{位移}(t)]$ ），经过一番推导就可得出波动方程。

纵波的波动方程为：

$$\nabla^2 \theta - \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{或 } \nabla^2 \theta - \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0$$

这里，纵波速度 $V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$

式中 θ ——体应变 = $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ；

∇^2 ——拉普拉斯算符 = $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ；

ρ ——密度。

横波的波动方程为：

$$\nabla^2 \phi - \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{或 } \nabla^2 \phi - \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

这里，横波速度 $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

式中： ϕ ——角位移矢量。

我们也可把介质的速度 V 写成：

$$V = \sqrt{\frac{M}{\rho}},$$

式中 M ——弹性参数。

要注意的是，若在波的传播过程中引入衰减因素，上述波动方程形式都将改变，纵波和横波速度公式中的弹性参量将变成复变数形式。

2. 地震速度

1) 引言

Yorston^[33]写过一篇精辟的文章，他总结了储集层的速度、密度及其中的问题。他的主导思想和主要结论至今仍适用。他说：

“自根据地震资料进行油气检测日益普及以来，以气层速度为题已写过大量文章或进行过反复讨论。”

“对新区的储集层进行地震模型研究时，需要估算速度和密度，在开发区，特别在浅气层中仍需要估算它们。”

“可测出被水或油饱和的储集层中的速度，在类似的气层中可作出良好的速度估算。”

在新区的碎屑岩储集层中经常可求得速度和密度，用在地震剖面上作构造和地层学上的解释。为估算盖层和储集层的地震参数推荐以下步骤。这些参数是地震模型研究所必需的。

共包括四个步骤：

- (1) 估算盖层的速度和密度；
- (2) 估算储集层的孔隙度；
- (3) 估算水饱和储集层的速度和密度；
- (4) 估算油或气饱和储集层的速度和密度。

关于油气层的速度有以下几点观测结果和结论：

- (1) 混合物的可压缩性和速度是接近最可压缩的及速度较低的成份；
- (2) 具有坚固骨架的岩石的可压缩性和速度是接近骨架的可压缩性和速度；
- (3) 时间平均公式（即Wyllie公式）是以实验为根据的，并不表示物理上的关系。

假如用于胶结差的岩石就需要校正，且不能用于计算含气砂层的速度；

- (4) Gassman方程建立起速度与弹性的关系，可用来求含气砂层的速度；
- (5) 在固结良好的岩石中的流体类型，不会使速度有明显改变；
- (6) 部分饱和气及全饱和气，在液—气混合物的速度和可压缩性方面产生同样的效果；

(7) 在通常地震频率范围，速度并不随频率而变，但声波测井用的频率和在实验室测定速度所用的频率对速度就有变化；

(8) 裂隙孔隙和裂缝使速度明显降低（可超过20%），而它们的存在只增加一点孔隙度或毫无增加；

(9) 在储集层中增加不同岩性的颗粒可以影响也可以不影响速度，速度取决于颗粒对骨架的分布或颗粒占有的空间；

- (10) 通常的地震波和声波测井是检测不出空穴孔隙率的；
- (11) 欠压实的、超压的储集层具有异常低的速度；
- (12) 过压实的、超压的储集层可以有异常高的速度（对其埋深言）；

(13) 经后期隆起的储集层，在新的深度下可以有正常的速度值，但很可能比正常的速度高一些；

(14) 后期隆起的、未压实的储集层可能是欠压实的、正常压实的或者是过压实的（在更浅处）。

2) 弹性波的速度

资料解释时物探家用两种弹性波。即纵波（P或叫压缩波）和横波（S或叫剪切波）。假设每种地层都是各向同性的、均质的和弹性的。每种地层在地震上都可用其密度和纵、横波速度来定义它们。

在六十年代末期，随着亮点技术的出现，有几位学者详细研究了不同岩性是如何影响速度的问题，像P波速度的变化是孔隙度、水饱和度、埋深等的函数。但早在1955年Koefoed*^[3]，就提出用P波和S波速度的比值来区分岩性（见图2-5）。图上可看出不同岩性的 V_p/V_s 值和泊松比值是不同的。因此可预计不仅是P波速度，还有S波速度在作详细的地震模型研究中都是很重要的。

本章大部分内容取自以下四篇精粹的文章（登在Geophysics杂志上）：

Domenico, S. N.,^[48] Gardner, G. H. F.,^[10] Domenico, S. N.,^[8] Gregory, A. R..^[11]

通常用泊松比和 V_p/V_s 值来描述岩石的类别，其公式如下：

$$\text{泊松比 } \sigma = \frac{0.5 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{(1 - \sigma)}{(0.5 - \sigma)}}$$

总的说，岩石愈固结其泊松比也愈小。风化表层的泊松比可高达0.45（见图2-5）。

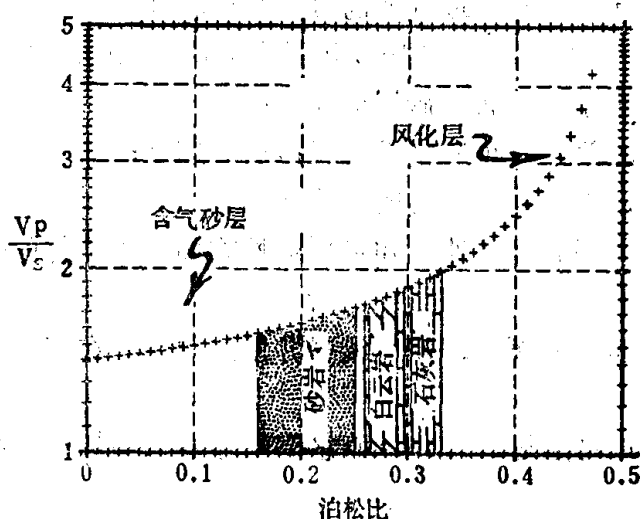


图2-5

根据经验，固结岩石的 V_p/V_s 小于2.0（泊松比小于0.333）。当岩石中孔隙充水时， V_p/V_s 值可从1.4变到2.0。当孔隙中充以气时， V_p/V_s 值可从1.3变到1.7。饱和水的非固结矿层的特征是 V_p/V_s 大于2.0。

泊松比值大于0.5或是负值表示存在各向异性，这是不常见的。

3) 影响速度的因素

本小节采用“菜谱”的形式对影响速度的诸因素作一番讨论，并用示意图（见图2-6从(a)到(i)）表明这些因素与速度的变化关系。

每当在地震剖面看到一振幅异常，就要设法辨别是什么参数变化使振幅有改变。因此，就必需定量计算速度与弹性模量的关系、与密度的关系，以及速度与岩石所处的各种环境的关系。

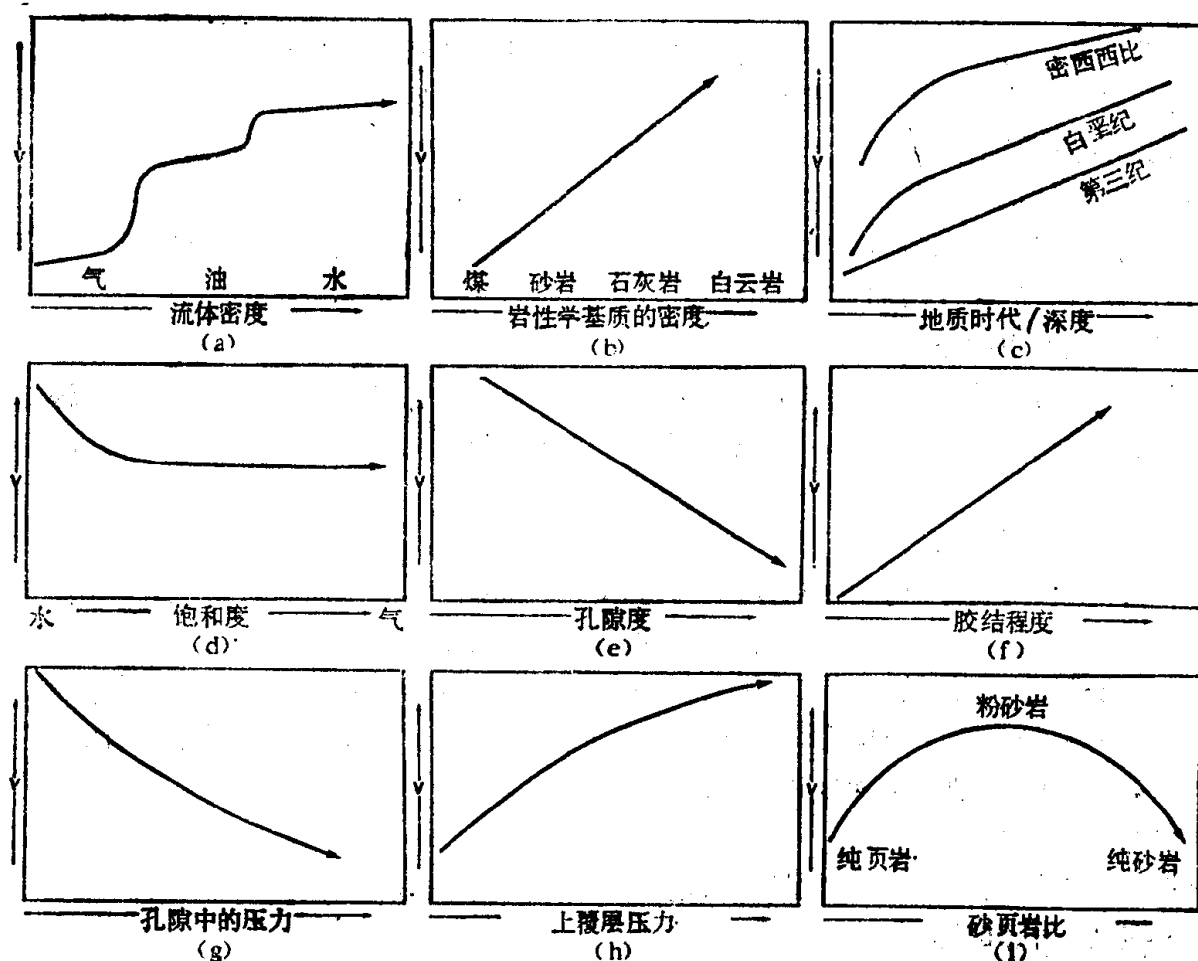


图1. 影响速度的因素

对纵波速度来说，有以下几点评论。

(1) 流体密度

对浅层非固结的、时代新的碎屑岩来说，流体密度(孔隙中流体的改变)对岩石速度有显著影响。根据经验，深6000ft[●]以下的孔隙中流体的改变对速度影响已较小，而孔隙度本身对速度的影响倒要大些(图2-6(a))。

(2) 基质的密度

较重岩石的速度要比较轻的高。虽然根据弹性波方程，密度与速度是倒数关系，但通常分子中的弹性模量要比分母中的密度增加得快。深层反射的反射系数经常主要是由密度变化控制的(图2-6(b))。

(3) 地质时代/深度

这两个参数通常是影响速度的次要因素，它们的增加使岩石胶结程度增加，孔隙度减小和增加固结程度(图2-6(c))。

(4) 水饱和度

在浅层，非固结沉积物中含一点点气就会使岩石速度产生显著变化(速度减小)。一旦岩石含有5%的气，再增加含气饱和度只对岩石速度产生很小影响。所以很遗憾，有经济价值的气藏与枯竭的气藏在地震参数上是相似的(图2-6(d))。

[●] 1ft=0.3048m——译注。

(5) 孔隙度

多少年来,测井分析人员根据孔隙度与声波测井的旅行时推导出几个经验公式(如时间平均公式)。孔隙度不只与岩石密度有关,也会引起弹性模量的显著变化。含水饱和度和孔隙度对弹性模量的影响,将在后面详细探讨(图2-6(e))。

(6) 胶结程度

通常胶结程度随地质时代而增加,从而使孔隙度减小和岩石的弹性模量增加。因此增加胶结度使岩石的速度增加(图2-6(f))。

(7) 孔隙中的压力

当上覆压力保持不变而孔隙中的压力增加时,表明存在异常压力地层。此时流体往往引起震动产生更多的弹性摄动,以致岩石变得更不固结似的,其速度也就比正常压力下的低(图2-6(g))。

(8) 上覆层压力

若增加上覆压力,而孔隙中的压力保持不变,那末固体的基质将被挤压在一起,使岩石的弹性模量增加,密度也有小变化。因此速度随上覆压力的增加而增大。但是,若上覆压力减去孔隙压力为常量(即有效压力保持常数),则视速度就看不出变化。如上覆压力的梯度为每英尺 $K1\text{lb/in}^2$ ①,孔隙压力梯度为每英尺 0.47lb/in^2 ,那末作用于岩石的有效压力增加 0.53lb/in^2 。速度随深度逐渐增大(图2-6(h))。

(9) 砂页比

纯页岩和纯砂岩的速度要比粉砂岩的低(图2-6(i))。

4) 无孔隙岩石的速度

Voigt和Reuss的理论都是在孔隙度为零的情况下,把岩石中各种矿物的弹性参量进行平均,然后得出岩石的弹性模量。就是说把岩石的速度视为岩石中所含矿物百分比的函数。所以引用这些速度时绝对要注意,因为沉积岩极少是毫无孔隙的。而孔隙的影响(从零起很小的变化)可明显地改变速度值。美国麻省理工学院的岩性研究小组还把小裂缝对速度的影响定量化了。

Kim^[35]提出一个求石灰岩速度的实验(石灰岩的成份是:石英4%,长石2%,粘土1%,碳酸钙57%,白云岩36%)。结果其速度与纯碳酸钙(方解石)的石灰岩有明显的差别。

无孔隙岩石的速度公式为:

$$V_p = \left[\frac{\bar{K} + \frac{4}{3}\bar{\mu}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{此处} \quad \bar{K} = \frac{(K_v + K_r)}{2} \quad \text{平均体积模量,}$$

$$V_s = \left[\frac{\bar{\mu}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \bar{\mu} = \frac{(\mu_v + \mu_r)}{2} \quad \text{平均切变模量,}$$

K_v, μ_v 为Voigt上限

$$\begin{cases} K_v = N_1 K_1 + N_2 K_2 + \dots + N_n K_n \\ \mu_v = N_1 \mu_1 + N_2 \mu_2 + \dots + N_n \mu_n \end{cases}$$

K_r, μ_r 为Reuss下限,

① $1\text{b} = 0.4536\text{kg}$ ——译注。

$$\begin{cases} \frac{1}{K} = \frac{N_1}{K_1} + \frac{N_2}{K_2} + \dots + \frac{N_n}{K_n} \\ \frac{1}{\mu} = \frac{N_1}{\mu_1} + \frac{N_2}{\mu_2} + \dots + \frac{N_n}{\mu_n} \end{cases}$$

$$\rho = N_1 \rho_1 + N_2 \rho_2 + \dots + N_n \rho_n$$

请见本节最后面的两个附录：

附录2-1 常见矿物的弹性模量和速度。

附录2-2 常见无孔隙性岩石的弹性模量和速度。

早年的物探家已知道把弹性参量平均起来。但是人们期望能用一简单的公式求出岩石的平均速度再求出其孔隙度，于是导致根据声波测井的时间平均公式的发现。

5) Gassman-Biot-Geertsma 方程

(适用于地震的频率范围)

五十年代中期，Biot (1956) 提出多孔岩石中固体与流体间的形变关系公式。可惜在他的公式中有几个系数（指介质的粘滞特性等参数），它们显而易见但又不可能求得。Geertsma (1961) 提出纵波速度与频率关系的理论公式，频率很低时（波长远远大于孔隙的尺寸）的所谓零频率 Geertsma 方程，在地震上尤为重要，这个方程 Gassman (1951) 也导出过。本书中我们统称为 Gassman 方程，即：

$$\begin{cases} V_p^2 = \frac{1}{\rho} \left[K_b + \frac{4}{3} \mu_b + \frac{\left(1 - \frac{K_b}{K_s}\right)^2}{\left(1 - \phi - \frac{K_b}{K_s}\right) \frac{1}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}} \right] \\ V_s^2 = \frac{\mu_b}{\rho} \end{cases}$$

式中 K = 体积模量；

μ = 切变模量（刚度）；

ϕ = 孔隙度；

ρ = 密度；

b = 干岩石；

f = 孔隙中的流体；

s = 岩石基质。

Gassman 方程可用来求被油气饱和的储集层的速度，因为它充分考虑到通常地震勘探中控制速度的那些参数（但仍未将粘滞特性等影响地震波特性的参数考虑进去）。Gassman 理论有以下几方面假定：

- (1) 岩石是均质的；
- (2) 孔隙中的流体是紧附在孔壁上的；
- (3) 气和液体在孔隙中均匀分布；
- (4) 孔隙中的流体不影响切变模量；
- (5) 孔隙的形状是球形的等。

即使经过这样的简化，仍有两个弹性参量是不易求得的，即体积模量和干岩石骨架的

切变模量（刚度）。其他参数值可在本节最后附录2-1到2-4的表中找到。

在本章最后面另两个附录叫：

附录2-3 墨西哥湾页岩的平均特性。

附录2-4 典型孔隙中流体参数值（第三系碎屑砂岩）

6) Gassman公式的Gregory-Pickett解（求速度与孔隙度、含水饱和度的关系）

这是人们感兴趣的思路：得到一条速度变化曲线。即假设在给定深度，某孔隙度和含水饱和度情况下速度值是已知的。模型研究就是要求出在不同孔隙度和含水饱和度情况下的纵波和横波的速度。从Gassman公式可求出100%含水情况下的速度值。

由于在给定条件下，已估算出初始的速度值，反过来可用Gassman公式求体积模量和干岩石的切变模量。若只改变含水饱和度，这些弹性模量保持不变。但若改变孔隙度，那末干岩石就具有新的弹性模量（估算干岩石的弹性模量可用Pickett^[36]公式，这样可避免在估算中渗入特大的误差）。

下一步就要估算干岩石的泊松比值。由于它不是公式中的关键参数，建议用0.12（正常情况下接近此值）。该法与Gregory^[11]的相似，改变孔隙度时不至于提高干岩石的弹性模量。

Domenico和Wyman^[37]也给出另一些求干岩石弹性模量的方法。

7) 用Gassman公式求孔隙的体积模量(K_r)

步骤如下：已知： V_p （给定孔隙度 ϕ 和含水饱和度SW情况下），

$$\sigma = 0.12 \text{ (假定干岩石的泊松比值)}$$

所用公式和推导如下：

$$\rho_t = SW \cdot \rho_{H_2O} + (1 - SW) \cdot \rho_{Gas \text{ or oil}}$$

$$\rho = \phi \rho_t + (1 - \phi) \rho_s$$

$$\frac{1}{K_r} = \frac{SW}{K_{H_2O}} + \frac{(1 - SW)}{K_{Gas \text{ or oil}}}$$

$$S = \frac{3(1 - \sigma)}{(1 + \sigma)} \quad (S \text{ 无岩性上的含义})$$

$$M = V^2 \rho \cdot 929 \times 10^{-10}$$

$$A = S - 1$$

$$B = \phi \cdot S \cdot \left(\frac{K_s}{K_r} - 1 \right) - S + \frac{M}{K_s}$$

$$C = -\phi \cdot \left(S - \frac{M}{K_s} \right) \left(\frac{K_s}{K_r} - 1 \right)$$

$$Y = [-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}] / 2A$$

$$K_s = (1 - Y) K_r \quad (K_s \text{ 为干岩石的体积模量})$$

$$\text{最终得出} \quad \frac{\phi}{K_r} = \frac{1}{K_s} - \frac{1}{K} \quad (K_r \text{ 为孔隙的体积模量})$$

这里所用的符号和单位同前。

举例：用上述公式可求出基质石英的体积模量为36（参见附录2-1到2-4）。

在计算中为了避免孔隙度出现零值，给孔隙度一个很小的值如0.0001。