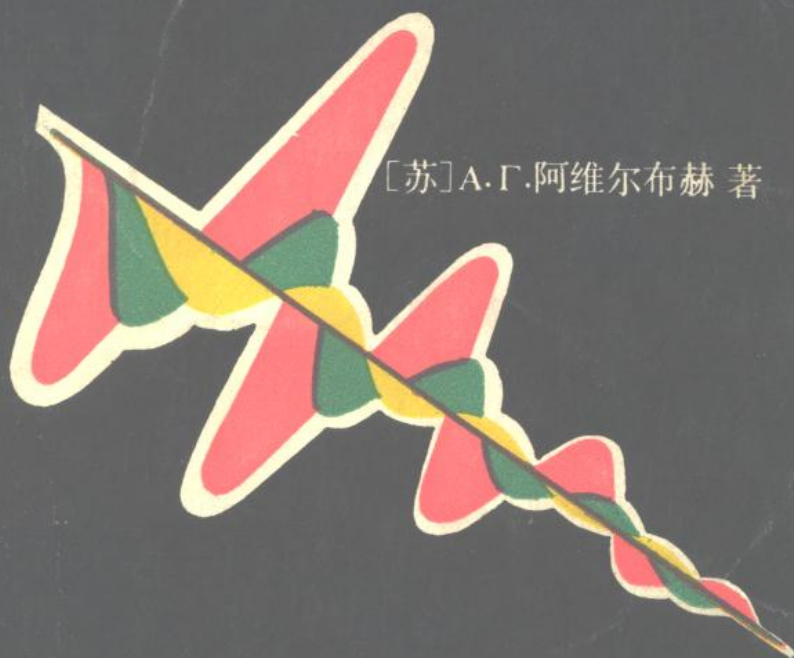




[苏] A. Γ. 阿维尔布赫 著

地震勘探中 岩石成分和 性质的研究

石油工业出版社

地震勘探中 岩石成分和性质的研究

〔苏〕 A. Γ. 阿维尔布赫 著

蒋宏耀 译 马在田 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以反射弹性波的性质变化与岩石的岩性成分和物理状况有关为基础,比较系统地阐述了用地震勘探资料实现直接找油、气藏,预测地层压力、岩性、时代和岩石其它地质特征的可能性。

本书可供地球物理、地质研究人员、工程技术干部及有关院校师生参考。

А. Г. АВЕРБУХ
ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ
МОСКВА «НЕДРА»

1982

*

地震勘探中
岩石成分和性质的研究

〔苏〕 А.Г. 阿维尔布赫 著

蒋宏耀 译 马在田 校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
北京顺义燕华营印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 7 3/4 印张 192 千字 印 1—1,000

1986 年 10 月北京第 1 版 1986 年 10 月北京第 1 次印刷

书号:15037·2524 定价 1.90 元

目 录

序	(1)
第一章 沉积岩成分和性质预测的地震地质基础	(4)
一、地震波的传播速度	(4)
1. 波速与固体成分和结构的关系	(5)
2. 油气饱和度对速度的影响	(17)
3. 速度、密度和声阻抗的关系	(23)
4. 速度的各向异性	(25)
二、吸收及散射	(29)
1. 吸收	(29)
2. 散射	(34)
第二章 介质的结构和性质对反射波运动学及动力学特征的影响	(38)
三、反射波的运动学特征	(39)
1. 波前的曲率	(39)
2. 均匀层状介质中的有效速度	(44)
3. 介质中含有不均匀地层时的有效速度	(54)
四、反射波的动力学特征	(57)
1. 波前曲率对振幅的影响	(57)
2. 与频率有关的衰减对地震波性质的影响	(67)
3. 反射系数	(75)
五、薄层介质中波的性质的研究	(79)
1. 计算合成地震记录的方法	(79)
2. 模型的选择	(86)
第三章 野外资料处理方法	(89)
六、振幅恢复	(90)
1. 几何扩散及转换影响的补偿	(94)
2. 有效吸收影响的估算	(100)
3. 振动的激发和接收条件多变性的校正	(103)

4. 使用振幅恢复方法的特点	(112)
七、有效速度 (v_{ort}) 及区间速度的分析	(120)
1. 求 v_{ort} (X)	(121)
2. 计算区间速度	(127)
八、衰减参数的估算	(138)
九、由反射波的动力学特征求弹性的详细分布	(144)
十、数据处理结果的总体显示	(153)
第四章 直接寻找油、气田	(156)
十一、油、气藏引起的波场异常	(158)
1. 储层反射波强度的变化	(159)
2. 含油、气性对脉冲的频率成分和长度的影响	(166)
3. 油、气藏对求速度的影响	(167)
4. 透射波强度和主频的变化	(173)
十二、地震探测的方法	(175)
十三、直接寻找油、气的有利地震地质条件	(187)
1. 波场振幅	(189)
2. 干扰和对地震勘探方法的要求	(189)
3. 对先验信息的要求	(190)
第五章 地层高压异常的预测	(192)
十四、发现异常压力的前提条件	(192)
十五、标准关系的建立和应用	(197)
第六章 岩性、时代和沉积条件的研究	(214)
十六、厚层岩石成分和时代的预测	(215)
1. 岩性和时代的预测	(215)
2. 岩相变化的预测	(216)
3. 孔隙度的预测	(217)
4. 有效吸收参数的利用	(222)
十七、剖面薄层结构的确定	(223)
十八、沉积条件的研究	(226)
结论	(229)
参考文献	(231)
符号注释	(237)
人名中、俄文对照	(244)

序

自从油气综合普查勘探工作中出现地震方法以来，它的主要作用就是构制地层的构造图和发现可能存在的烃类圈闭。但是，甚至在地震勘探发展的初期就已清楚，该方法不但可以研究地层产状的特征，而且还可以研究岩石的物理性质，包括由于含油气所引起的这些物理性质的变化。五十年代末，巴拉赫（И. Я. Баллах）、麦多夫斯基（И. Г. Меговский）和穆斯塔法耶夫（К. А. Мустафаев）提出了关于记录油—水 and 气—液接触面反射的可能性、关于水层与油气层反射强度的区别、关于地震波通过油气层时衰减增大等一些设想，从而对可能由地震勘探资料预测岩性、孔隙度和油气层的兴趣大为增长。六十年代，泽姆佐夫（Е. Е. Зеицов）及其他作者报导了由实验证实用反射资料根据上述判据发现油气层的可能性。不过，当时主要由于缺乏能够保证可靠地把异常从干扰背景中提取出来的仪器和方法，因而用地震勘探直接寻找油气层和预测岩石的其他特性未能在生产中应用。但自从采用信号迭加的多次覆盖观测系统以及野外数据的数字记录和处理之后，情况就发生了显著的变化。

采用数字记录和处理，非常明显地提高了地震测量的可靠性和精度。成功地实现了各种操作的自动化和成倍地加快这些操作的速度，有效地压制了干扰，保持了脉冲的形状和强度，并缩短了脉冲的延续时间。研究并广泛采用了能够测量波的速度、衰减以及研究界面反射性质的数字方法。制造出完善的信息提取装置，从而才有可能方便地把成果显示出来，使解释员能掌握更多的资料并揭示以往被掩盖着的一些内在联系。随着技术和方法的进步，对自然埋藏条件下岩石性质的规律性，也增加了一些认识。

地震勘探的新的方法技术基础，使我们有可能在比以往高得多的水平上解决勘探问题。岩层几何的研究仍然是应用地震学的首要问题，但是现在已经不限于只解决这个问题。近年来，已经肯定了广泛应用反射波法的数字地震勘探资料来发现和圈定油气田的可能性。实践业已证明，预测岩性、预估地层的压力异常和根据波的运动学及动力学的综合特征把剖面划分为各个地层组合的可能性。不过，即使在地震勘探发展的当前水平下，要从地震资料中提取岩石物理方面的信息，也往往是很困难的；而在复杂的地震地质条件下，有时甚至是一项不能完成的任务。

为了查明油层和研究岩性，如果要象圈定构造那样单靠分析波的到时是不够的，必须解释振动的动力学参数。而要可靠地测定动力学参数，只有在干扰强度很低的情况下才有可能。此外，对反射时间的测定精度也提高了。岩性研究过程的一个组成部分是测定振动的传播速度。这项工作要求(以明显的或隐含的形式)测定时距曲线的二阶导数，而测定二阶导数与测定波的到时相比是一项抗干扰性很差的工作。对圈定构造来说，在大多数情况下，测定波的到时就够了。

由于上述以及某些其他特点，预测岩石成分和性质的地震研究，特别是在资料处理和解释阶段，与研究构造关系时所用的传统方法可能有显著的差别。看来，仿照用《金属矿地震勘探》或《工程地震勘探》这样的名词来表示一些特殊类型的地震勘探方法的办法，我们采用《岩石物性》地震勘探这个名词也是合适的。岩石物性地震勘探的对象是用地震波数据求岩石的弹性、能量衰减及其他物理性质，并根据已知的岩石物理的规律性和判据来解释所得的资料，以预测岩石的非构造地质特征：岩石的成分、油田的存在和埋藏的热力学条件等。

近年来，国内外积累了一些用地震勘探来解决岩石成分及性质问题的研究经验。在一些期刊上，围绕地震研究的实施、观测结果的处理方法和解释方法的物理地质依据，发表了不少的文章。

毫无疑问，需要总结用地震勘探来预测岩石成分及性质的有关资料的时机已经成熟了。本书包括六章，试图系统地论述解决预测问题的地震地质（第一章）和理论（第二章）依据，阐述求岩石物性参数所用的算法和方法（第三章）。后几章则研究一些与解决具体地质问题有关的问题：直接找油（第四章）、查明地层压力异常（第五章）和预测岩石的岩性及年代（第六章）。根据上述要求，阐述了野外探测和资料处理方法的特点以及地质解释的特殊性，并列举一些有效地利用地震勘探直接寻找油气层、预测压力等等的实例。在有关资料处理和解释的那些章节里，对误差的估计和现行方法的局限性的讨论给予了极大的注意。由于缺乏岩石成分和性质预测方法实际应用的经验，精度及可靠性问题，就具有特别重要的意义。

书中使用了石油部中央物探大队及其他单位在我国各个不同地区进行的野外工作及专题研究资料。不可能把曾与我们合作并在本书涉及的问题所作的工作中起过重要作用的所有的人都列出来。但仍想指出，许多成果之能够取得，是有赖于戈果年科夫（Г. Н. Гогоиенков）、卢金兹（А. И. Лугинц）、拉勃科夫斯基斯（Б. З. Лабковскис）、埃尔曼诺维奇（С. С. Эльманович），他们在发展和推广用地震勘探资料预测岩石成分和性质的方法方面，作出了有分量的贡献。

虽然本书研讨的问题是多方面的，但它不可能彻底研究所有的问题，综合解释问题尚未触及，但它在一系列发表的著作中^(16,15)，已被详细地讨论过了。还没有研讨横波及转换波的应用，毫无疑问，它们是很有希望的，但它们的预测能力，由于一系列原因，尚未成为现实。

第一章 沉积岩成分和性质预测

的地震地质基础

在油气勘探中，用地震方法预测岩石物性，其原理上的可能性和局限性是在分析下述规律性的基础上提出来的。这些规律性把沉积岩的弹性及能量衰减与岩石的成分、孔隙度、埋深、埋藏的热力学条件、填充孔隙的流体性质、岩石的不均匀性以及其它地质特征联系起来了。

影响岩石物理性质的地质因素很多，它们之间关系复杂，从而给岩石物性相互关系的理论研究造成明显的困难。作为理论分析基础的模型，往往简化得很厉害，因而反映实际存在的岩石物理规律性主要是定性的。所以，岩石的物理特性与决定这些特性的地质因素之间的经验关系具有极重要的意义。由于上述原因，可以用来预测岩石成分及其性质的地震地质依据只能是综合的：理论的资料必须用来查明某些岩石物性存在相关性的物理原因和阐明它们的定性特征；而实验资料则需用来反映实际存在的相关性的定量特征和评价理论模型的适应性。

一、地震波的传播速度

波的传播速度值，取决于构成岩石的矿物的弹性、矿物颗粒的相互排列、岩石骨架的孔隙度、节理以及填充孔隙的液体和气体的性质。上覆岩石的压力和使矿物颗粒接触面上的弹性力发生变化的其他外部的机械的、热的作用对波的传播速度也有影响。

岩石是不均匀的，其内部结构不但可以看到有规律的、重复出现的夹层，而且还可以看到组分或者颗粒与孔隙取向的随机变化。为了评价各个因素的作用，我们首先假定岩石是均匀、各向同性的，并研究岩石固体部分的矿物组成、岩石的孔隙度、埋藏的深度和热力学条件对波的传播速度的影响。然后，评价填充孔

隙的液体性质对速度的影响。

1. 波速与固体成分和结构的关系

(1) 岩性和孔隙度的影响

假如没有孔隙和节理，则地震波的传播速度就只取决于岩石的矿物成分。通过将实验得到的速度与孔隙度的关系外推到孔隙度为零时的办法，得到下列致密岩石中纵波速度的平均值：

岩石	v , 公里/秒	岩石	v , 公里/秒
页岩	3.5—4.2	白云岩	7.0—7.5
砂岩	5.2—6.2	盐	4.3—4.7
石灰岩	6.2—7.0	硬石膏	5.8—6.8

岩石往往是不纯的，是某种中间的变种，如泥质石灰岩，灰质砂岩等等。在这种情况下，波的传播速度具有中间的数值，并取决于各个组分的百分含量。

与上述数值比较，孔隙的存在导致速度值下降。我们采用孔隙度来描述孔隙的特征，它定义为岩石总体积中被孔隙空间占据的份额：

$$k_n = \frac{V_n}{V_{TB} + V_n}$$

式中， V_n —岩石样品中孔隙的体积； V_{TB} —岩石样品中固体组分的体积。

k_n 值用小数或百分数来度量。有孔隙时， k_n 值可用来反映岩石的空心度特征。孔隙往往彼此相通。彼此隔离的孔隙，其体积一般不超过孔隙总体积的百分之几，可是，当 k_n 值小时 ($k_n < 0.1$)，此值可能增大。处于地面附近的疏松岩石，孔隙度很大。这些岩石是粒状集合体，其中各个颗粒彼此胶结得不好，或者完全没有胶结。疏松沉积及风化层中的 k_n 值，一般大于 30%，而且往往可达 45~60%。在位于地下某个深度的沉积层里，由于矿物颗粒压实和胶结，往往形成硬而固结的岩石骨架（它还被称为岩石的骨骼或基质）。在未被风化的胶结沉积层里，孔隙体积达 30~35%。

岩石埋深增大时，孔隙度一般变小。此外，孔隙度的随机变化不仅沿垂线方向，而且沿岩层层理方向都很大。处于原生埋藏状态的沉积岩，孔隙里始终充填着液体，如矿化水，有时还有石油或天然气。

岩石成分不变时，固结岩石中速度 v_p 和孔隙度间的相关系数为0.7~0.8⁽⁸⁷⁾。假如考虑到岩性构造特点，并根据这些特点，把岩石划分为不同的岩性类型（例如，按颗粒的矿物成分和胶结物的数量及成分将砂岩分为几组），则在这些岩性相同的岩组内，相关系数高达0.90以上⁽¹⁸⁾。因此，孔隙的总体积对速度的影响是主要的，孔隙及矿物颗粒的大小以及它们的形状对速度的影响要小得多。考虑到这一点，在进行理论研究时，作为第一级近似可以假定，固结岩石的固体物质成分和性质是均匀的，而其骨架则为孔隙同等分布的宏观均匀，且各向同性的介质。在这种情况下，在地震波频率范围内纵波速度^(57,107)为

$$v_p = \sqrt{\frac{u_n + u_{ck}}{\rho_n + \rho_{ck}}} \quad (I.1a)$$

此处

$$u_n = \frac{(1 - \beta_{TB} / \beta_{ck})^2}{\beta_{TB} (1 - \beta_{TB} / \beta_{ck} - k_n) + \beta_\phi k_n} \quad (I.1b)$$

$$u_{ck} = \frac{1}{\beta_{ck}} + \frac{4}{3} G_{ck}$$

$$\rho_n = \rho_\phi k_n,$$

$$\rho_{ck} = \rho_{TB} (1 - k_n)$$

式中： β_{TB} ——构成骨架的物质的压缩系数，即固相物质组成的致密样品体积的相对变化与施于样品上弹性静水压力之间的比例系数；

β_{ck} ——骨架的压缩系数，即骨架体积的相对变化与所施应力之间的比例系数；

β_ϕ ——流体的压缩系数；

G_{ck} ——骨架的切变模量；

ρ_ϕ ——充填孔隙的流体的密度；

$\rho_{\Gamma B}$ ——固相物质的密度。

β_{CK} 与 β_{TB} 之间的关系为⁽³⁷⁾: $\beta_{CK} = \beta_{TB} + k_n \beta_n$ (β_n 为孔隙空间的压缩系数)。

因此, u_{CK} 及 ρ_{CK} 的数值与反映岩石固相物质和骨架的弹性及密度特征的五个参数 (β_{TB} , β_{CK} , G_{CK} , k_n , ρ_{TB}) 有关, 而 u_n 与 ρ_n 的数值与孔隙填充物的弹性和密度 (β_ϕ , ρ_ϕ) 有关, 也与骨架的性质及固相物质的压缩系数有关。

图1为含矿化水的泥质砂岩计算的结果。根据文献数据^(37,57,58), 取下列参数值:

$$\beta_{TB} = 3 \times 10^{-6} / \text{兆帕}^\bullet, \quad \rho_{TB} = 2.65 \text{克/立方厘米};$$

$$\beta_\phi = 4.4 \times 10^{-4} / \text{兆帕}, \quad \rho_\phi = 1.05 \text{克/立方厘米};$$

$$H = 0.5 \text{公里时}, \quad \beta_n = 3.2 \times 10^{-3} / \text{兆帕};$$

$$H = 3.0 \text{公里时}, \quad \beta_n = 0.6 \times 10^{-3} / \text{兆帕}.$$

切变模量的数值

$$G_{CK} = \rho v_s^2$$

由 v_s 与 v_p 相互关系的数据来确定。由图1中计算得到的速度值与由测井资料得到的速度值相符, 可以证实各个参数数值的正确性。

广泛使用 (I.1) 式是困难的。因为, 要有根据地选择该式中所包含的几个量, 难度很大。因此, 得到广泛应用的是近似的经验关系式。用得最多的是平均时间方程式:

$$\frac{1}{v_p} = \frac{k_n}{v_\phi} + \frac{1-k_n}{v_{TB}} \quad (\text{I.2})$$

式中: v_ϕ ——液体中波的传播速度;

v_{TB} ——固相物质中波的传播速度。

(I.2) 式及与之类似的公式, 通过选择合适的与研究条件相

●原文单位为克/立方厘米, 应为/兆帕。——译者注

应的 v_{TB} 值的办法,间接地考虑了一系列因素(例如,密度)对

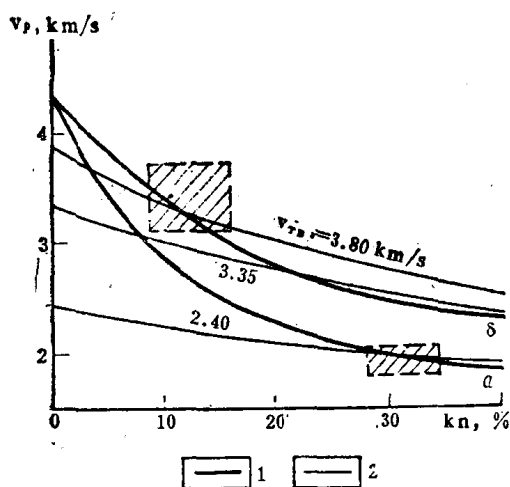


图1 纵波传播速度与孔隙度的关系

1—(a)深度为0.5公里及(b)深度为3.0公里时由(1.1)式算得的曲线;2—用不同的 v_{TB} 值由平均时间公式算得的曲线;影线表示的是深度为0.5公里及3.0公里时典型的速度及孔隙度数值范围

方面,固相成分不同的岩石也可能有比较接近的速度值,如 $k_n \approx 20\%$ 时的石灰岩与 $k_n \approx 10\%$ 时的砂岩。

当孔隙度相同时,粒细、孔隙小的岩石的速度值,比岩性相同、粒粗、孔隙大的岩石要高百分之几。速度还随着岩石年龄的变老而增高(图2)。例如,当年龄增长百万年时,速度值升高350米/秒。当岩石的埋深相同,年龄各异,但岩性相同时,其特征一般是孔隙度值接近。显然,年龄的影响是在压力、温度及地球化学因素的作用下,由于物质次生(后生)转化过程相当长期地作用,使组成岩石固相的矿物性质发生变化而造成的。

疏松的岩石,既由于它的孔隙度大,也由于其固相颗粒之间结合强度小,其波速比固结的岩石低。在干燥或含水少的未胶结的沉积中,纵波速度显得比较低,达每秒几百米或甚至几十米[55]。而同一类岩石,如果完全被水饱和,纵波速度显著升高(达1500~1900米/秒),因为总的说来,液体的存在使体积弹性迅速变大,

速度的影响。这一点从图1可以明显地看到。

当 v_{TB} 选择得合适时,(I.2)式给出的关系曲线在一定的 k_n 值范围内,在某种程度上与精确解一致。当在砂岩类的胶结粒状岩石中确定速度而 k_n 值比较大($k_n = 0.2 \sim 0.4$)时,才能保证最佳近似[20,42]。

由图1可得,随着孔隙度的不同,同一种岩石的速度值可以在很大的范围内变化。另一

(2) 埋深的影响

沉积岩成分不变, 埋深增加时, 岩石中波的传播速度一般都要增大。在实际介质中岩石成分往往随深度而变化。因此, 速度的增长不呈单调变化的性质, 而表现为一种均值。埋深很大时, 速度的垂直梯度往往完全被成分和孔隙度的变化所引起的速度值的分散所掩盖。

为了定性地估计速度随深度的增长 (见图2),

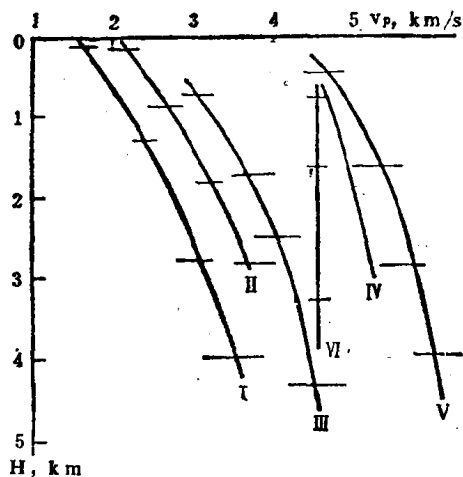


图2 由地震测井资料得到的不同岩石的速度与埋深的平均关系曲线图

I—新生代碎屑岩; II—中生代碎屑岩; III—古生代碎屑岩; IV—中生代碳酸盐岩; V—古生代碳酸盐岩; VI—盐; 水平短线—平均值幅值的95%置信区间

使用了大量岩石年代相同、岩性相近的地震测井资料。埋深不大时, 速度增长最明显。在2~3公里以内, 速度增长是非线性的, 而且梯度显然逐步变小。再深, 速度与埋深的关系几乎呈线性的关系。速度随深度增加而变化的主要原因是后生作用变化及非弹性变形而引起骨架的弹性变形及孔隙度下降 (压实)。深度达数百米时, 胶结程度增高, 即疏松岩石过渡为固结岩石, 也可能产生显著的影响。

让我们研究一下影响速度随深度变化的几个主要因素:

a、弹性形变

弹性变形的原因是机械应力及温度随深度的增长。机械应力的主要来源是上覆岩石的重量及孔隙内流体的压力。在某些情况下 (在新构造运动强烈的地区), 还加上另外一些机械应力, 它们是构造力引起的, 方向可能是任意的。在含油气盆地内, 盖层荷载在应力状态的形成中往往起着主导的作用, 因此, 进一步我们只研究在流体静压下速度的变化。压力对致密岩石和多孔隙

岩石中波传播速度的影响显然不同。在均匀致密介质内，影响速度的只有外压力。压力增加，使晶格的原子靠拢，从而加大弹性模量。在地震勘探所探测的深度上的压力与原子间的力相比，不算很大，因而造成原子间的距离变化不太大，对物质的弹性模量实际上没有影响。比尔奇（美国）对这个问题研究的结果，得到了反映流体静压 P 对致密物质中波速的影响的公式。经过化简之后，这些公式如下：

$$v_p = v_{p0} + 2 \frac{P}{v_{p0} \rho_0} \cdot \frac{4K^2 - 3}{3K^2 - 4} \quad (I.3)$$

$$v_s = v_{s0} + 1.5 \frac{P}{v_{s0} \rho_0} \cdot \frac{K^2 + 1}{3K^2 - 4}$$

式中： v_{p0} ——没有压力时的纵波速度；

v_{s0} ——没有压力时的横波速度；

ρ_0 ——密度；

K —— v_{p0}/v_{s0} 比值。

孔隙度低的地层（例如，盐），从其内部结构方面来看与致密介质接近。将盐的典型数值 $v_{p0} = 4.5$ 公里/秒， $\rho_0 = 2.2$ 克/立方厘米及 $K = v_{p0}/v_{s0} = 1.8$ 代入上式，得出压力增加 22 兆帕（相当于在致密盐中深度增加 1 公里）应使纵波速度上升 8 米/秒。当室验研究压力在对盐中弹性波传播速度的影响时，曾经得到压力增加 22 兆帕，速度变化 10~22 米/秒的结果⁽⁸⁾。假如考虑到实际岩石并不都是均匀的，则实验结果与理论计算值是相当接近的。显然，自然条件下盐中的波速实际上不随深度而变化，这一现象可用盐中无孔隙来解释（见图 2）。

对于有孔隙的岩石，可用公式（I.3）来估计岩石固相物质中波速的变化。这往往是一些 $\rho = 2.6 \sim 3.0$ 克/立方厘米， $v_{p0} = 5 \sim 7$ 公里/秒， $K = 1.7 \sim 2.0$ 的矿物。将这些数值代入公式（I.3），我们将得到 25 兆帕的压力变化所引起的速度变化并不太大（ v_p 变化 5~7 米/秒， v_s 变化 4~5 米/秒）。这个变化比在实

实验室中研究压力对高孔隙度及中等孔隙度沉积岩波速的影响时所观测到的变化要小得多(图3)。在有孔隙的岩石中,压力变化时波速的变化是由构成岩石的矿物颗粒间的孔隙引起的。

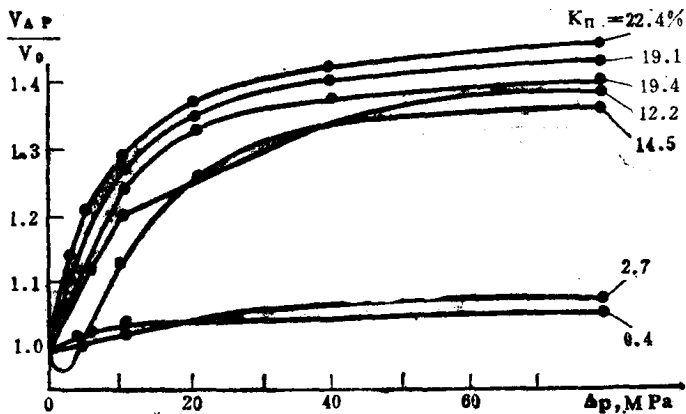


图3 压力增加对纵波速度相对变化的影响

在分析有孔隙的介质的弹性,并将理论及实验数据与野外及井中观测结果进行对比时,确定作用于岩石骨架上的与岩石埋深有关的压力具有重要的意义。岩石是处于来自围岩的外应力及孔隙内流体的内压力的作用之下的。外应力一般与方向有关。在构造运动系统平静的条件下,应力之间的差别往往不大,可以认为,外作用力就是与上覆岩石重量相等且各向相同的压力。这种外作用力称为地压。外压力引起骨架的弹性压缩,并相应地导致速度的增加。相反,流体内压力使骨架的质点错动,减小其弹性,并相应地降低其速度。外压和内压对孔隙介质的弹性同时发生作用,与有效压力的作用相当。而有效压力大体上等于外压与内压之差(图4)。正是压力差决定了孔隙粒状介质中的速度值(8)。

地压随深度递增,按照岩石的平均比重,大体上深度每增加1公里,压力增加22~25兆帕。而渗透性好的、水饱和岩石中的孔隙内压,根据矿化度的不同,则大致增加10~11兆帕。因此,在构造运动平静的条件下,深度增加1公里,作用在渗透性好的岩石骨架上的有效压力将增加12~15兆帕。在不渗透的岩石中,

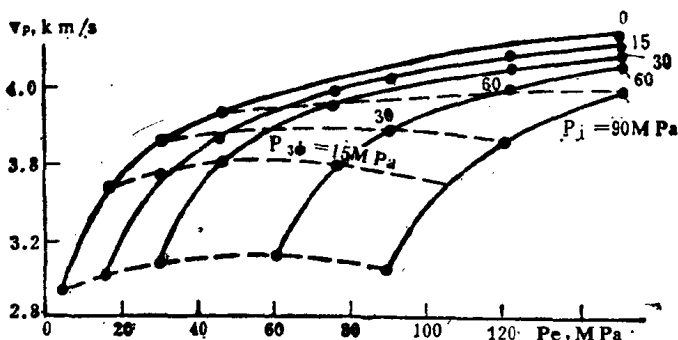


图4 外压 P_e 、内压 P_i 和有效压力 P_ϕ 对砂岩中纵波速度的影响⁽⁹⁾

液体压力可能异常地大，因之，有效压力随深度增长较慢。

使孔隙岩石中的速度比致密岩石中的速度有更明显的增长的物理机制是在压力作用下质点相互靠近，作用在质点接触点上的弹性力猛增所引起的。

现在，我们来研究一个最简单的模型：水平地层，其各个界面之间放入大量直径 d 相同的圆球。这些圆球按立体集装法则排列，即下面每个圆球的中心与其上面圆球的中心是在一条铅直线上⁽³⁷⁾。假如波长与地层厚度比圆球的直径大得多，则该介质可以认为是宏观上均匀的介质。设有一个力作用于该层的各个界面，该力均匀分布在层面上并形成引起圆球应变的应力 σ 。置于界面单位面积上的圆球数，反比于圆球直径的平方 d^2 。因此，作用于每个圆球的力将正比于 $\sigma_0 = \sigma/d^2$ 。在所加之力的作用下，应变（层面之间距离的相对减小）

$$\varepsilon = \frac{l - l_1}{l}$$

式中： l ——地层原来的垂直向厚度；

l_1 ——形变后的地层厚度。

考虑到 $l = nd$ ， $l_1 = n(d - \Delta)$ ，式中 n 是沿垂线的圆球数， Δ 是在力 σ_0 的作用下，圆球直径的缩小量，则得 $\varepsilon = \Delta/d$ 。根据赫芝原理，圆球弹性压缩时