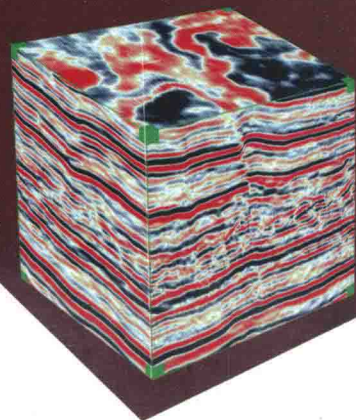
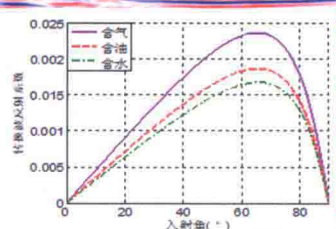
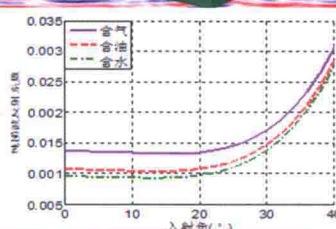
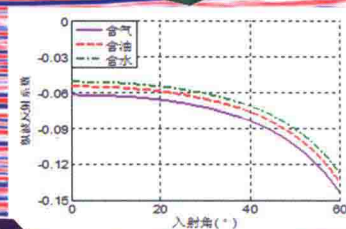
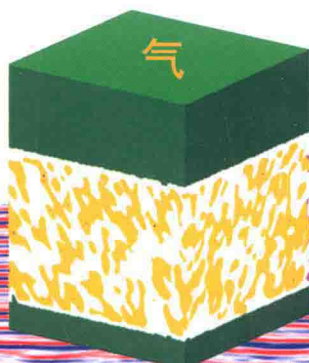
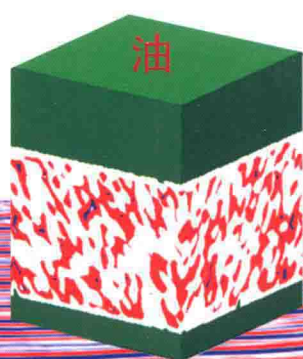


Multicomponent AVO Analysis



多波 AVO 分析

魏修成 季玉新 陈天胜 刘春园 刘 韬 刘 炯 编著



石油工业出版社

多波 AVO 分析

魏修成 季玉新 陈天胜 刘春园 刘 韜 刘 炯 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书阐述了纵波和转换波 AVO 反演的基本原理及在储层预测中的应用。内容包括：AVO 分析的岩石物理基础、多波 AVO 特征、角度域 AVO 反演、射线域 AVO 反演、频变 AVO 反演、多波 AVO 联合反演。

该书理论与实际相结合，可供地震勘探科研人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

多波 AVO 分析/魏修成等编著.

北京：石油工业出版社，2014.8

ISBN 978-7-5183-0292-5

I. 多…

II. 魏…

III. 油气勘探—地震勘探—研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 151979 号

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址：www.petropub.com.cn

编辑部：(010) 64523533 发行部：(010) 64523620

经 销：全国新华书店

印 刷：北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：7.75

字数：200 千字

定价：67.00 元

(如出现印装质量问题，我社发行部负责调换)

版权所有，翻印必究

前 言

从利用地震波研究地球内部结构开始,地震勘探技术的理论和应用就得到很大的发展,地震勘探方法成为寻找油气的主要方法。20 世纪 60 年代,地球物理学家们发现,砂岩中如有天然气存在就常常在一般振幅的背景上伴有强振幅(亮点)出现。不久人们发现除地层含天然气外,一些其他因素(如煤层、火成岩侵入等)也可能引起亮点反射。到 20 世纪 80 年代,地震勘探工作者在地震记录上发现:随着炮检距的增加,接收到的反射能量增强,称为 AVO (Amplitude Versus Offset) 现象,即反射振幅(反射能量)随炮检距的不同而变化。这是因为地层含气后地震波速度发生了变化,从而改变了岩石的物理性质,使得远炮检距相对于近炮检距的地震反射振幅具有明显的差异,出现了上述 AVO 现象。

Zoeppritz 方程是 AVO 技术的理论基础,但是由于方程的复杂性,直接应用受到了局限。Koefoed 研究了泊松比对两个各向同性介质之间的反射界面所产生的反射系数的影响。Bortfeld 利用地层厚度趋向于零逼近单界面的方法,计算平面纵波的反射系数和透射系数,给出了区分流体和固体的简化公式。Aki & Richard 给出了用于界面两侧纵波速度、横波速度和密度相对变化率表示的纵波和转换波反射系数和透射系数。Aki & Richard 公式大大推进了 AVO 技术的实际应用进程。其后,众多学者针对不同反演目的,对 Aki & Richard 公式进行了修改,出现各种 AVO 效应的近似公式。

本书是中国石化多波地震技术重点实验室多波 AVO 研究的结晶。通过 AVO 文献调研和多波 AVO 方法研究,结合实际多分量资料 AVO 应用探索,本书试图对多波 AVO 技术发展状况进行概述,进而介绍转换波 AVO 极值属性、多波 AVO 属性联合反演、射线域 AVO 反演、频变 AVO 反演等新技术和新方法。全书共 6 章,第 1 章 AVO 分析的岩石物理基础,阐述了孔隙流体性质和孔隙介质的岩石物理模型。第 2 章多波 AVO 特征,介绍了各向同性介质多波多分量 AVO 理论、饱和流体孔隙介质多波多分量 AVO 响应特征和薄互层多波多分量 AVO 响应特征。第 3 章角度域 AVO 反演,介绍了角度域纵波和转换波 AVO 方程及应用条件,纵波和转换波 AVO 属性、角度域纵波和转换波 AVO 反演方法。第 4 章射线域 AVO 反演,介绍了射线参数域 AVO 响应特征、射线 AVO 道集抽取及基于贝叶斯理论的射线 AVO 反演。第 5 章频变 AVO 反演,

介绍了地震波速度的频变特性、含油气储层的 AVO 响应随频率的变化和频变 AVO 反演含油气预测方法。第 6 章多波 AVO 联合反演,介绍了 PP 波和 PS 波 AVO 联合加权叠加反演、PP 波和 PS 波多属性联合反演和储层参数约束多波 AVO 联合反演。

本书第 1 章由刘春园编写,第 2 章、第 3 章和第 6 章由陈天胜编写,第 4 章由刘炯编写,第 5 章由刘韬编写;季玉新对第 4 章、第 5 章进行了校编;魏修成负责全书内容安排及统编;实际地震资料由张雅勤、谢飞、高鸿、赵艳萍和庞海玲等处理;多分量地震资料处理软件由黄忠玉和刘兰锋负责技术支持。

感谢中国石化科技开发部和国家科技计划项目相关管理部门的支持,感谢中国石化石油勘探开发研究院领导及同事们的关心与指导,感谢中国石油大学(北京)李向阳教授在频变 AVO 理论方面的指导。

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

1	AVO 分析的岩石物理基础	(1)
1.1	孔隙流体的弹性性质	(1)
1.2	等效介质理论	(4)
1.3	纵横波速度经验公式	(9)
1.4	储层参数及其相互关系分析	(9)
2	多波 AVO 特征	(15)
2.1	各向同性多波反射系数	(15)
2.2	各向同性单界面多波 AVO 响应	(18)
2.3	薄互层多波 AVO 响应	(21)
2.4	黏弹介质 AVO	(28)
3	角度域 AVO 反演	(32)
3.1	纵波 AVO 近似公式	(32)
3.2	转换波 AVO 近似公式	(35)
3.3	纵波和转换波 AVO 属性	(37)
3.4	加权叠加叠前反演	(48)
3.5	非线性叠前反演	(49)
4	射线域 AVO 反演	(52)
4.1	基本原理	(52)
4.2	射线波阻抗	(54)
4.3	射线域道集抽取	(56)
4.4	射线域 AVO 反演	(60)
4.5	射线域 AVO 反演效果分析	(65)
5	频变 AVO 反演	(78)
5.1	各向同性双相介质频散理论	(78)
5.2	纵波频变 AVO 反演	(80)
5.3	纵波和转换波联合频变 AVO 反演	(83)
5.4	SPWVD 高分辨率谱分解	(84)
5.5	模型数据分析	(86)
5.6	实际数据应用	(94)
6	多波 AVO 联合反演	(96)
6.1	PP 波和 PS 波 AVO 联合加权叠加反演	(96)
6.2	PP 波和 PS 波多属性联合反演	(101)
6.3	储层参数统计关系约束多波叠前联合反演	(106)
	参考文献	(113)

1 AVO 分析的岩石物理基础

AVO 分析的目的是识别岩性和烃类, 需要对反映岩石物理学特征的地震参数与岩性及烃类的关系有深刻的理解, 这是进行 AVO 分析的岩石物理基础。在地震勘探中, 地震波以旅行时间、反射振幅及相位变化等形式带来了地下岩石和流体的信息。然而, 这些信息受到岩石颗粒的胶结程度、颗粒的接触状况、压力、温度、孔隙度、孔隙类型、流体类型、饱和度、地震波频率等诸多因素的综合影响。因此, 地震岩石物理学搭建了地震信息与岩石最基本参数相联系的桥梁, 是叠前储层预测的物理基础及连接地震与油藏工程的纽带。

地震岩石物理研究可划分为理论研究和应用两大部分。理论研究大约开始于 20 世纪 50 年代, 主要是用数学方法描述含流体岩石的特性。应用研究主要包括: (1) 在实验室中模拟现场储层条件下的不同流体饱和情况时对岩石物理参数和储层内流体特性进行测试; (2) 样本测试数据分析, 建立地震岩石物理参数与地震属性参数之间的经验关系模型; (3) 叠前地震正演时流体替换和横波资料求取, 储层岩石物理特征表征和储层含油气性预测; (4) 岩石物理试验系统的开发研制等。

20 世纪 90 年代以来, 地震岩石物理学的许多理论与试验结果极大地推动了亮点 (暗点) 技术、AVO 技术、DHI 技术、4D 地震和注采监测技术的发展。从 SEG 和休斯敦大学与科罗拉多矿业学院 Fluids/DHI 专题中的文章来看, 研究人员已在岩石物理模型、岩石物性测定、储层参数分析、各向异性、衰减 5 个方面开展了广泛的研究。

1.1 孔隙流体的弹性性质

孔隙流体主要由地层水、天然气和石油中的一种或多种流体组成。孔隙中的水、石油和天然气的弹性性质存在根本上的区别。当不同流体填充孔隙时的地震属性特征也是不同的, 这就是利用地震技术检测天然气的基础。Batzle 和 Wang (1992) 详细总结了孔隙流体的弹性性质。Han 和 Batzle (2005) 开发了计算流体属性的 FLAG 软件。

1.1.1 地层水的弹性性质

地层水是地层中最常见的孔隙流体, 其密度受温度、压力及矿化度的影响。Batzle 和 Wang (1992) 使用 Potter 等人的试验结果, 建立了地层水的密度和声波速度的经验关系。

$$\rho_w = 1.0 + 10^{-6} (-80T - 3.3T^2 + 0.00175T^3 + 489T - 2TP + 0.016T^2P - 1.3 \times 10^{-5}T^3P - 0.333P^2 - 0.002TP^2) \quad (1.1.1)$$

$$\rho_b = \rho_w + 0.068S + 0.44S^2 + 10^{-6}S [300P - 2400PS + T(80 + 3T - 3300S - 13P + 47PS)] \quad (1.1.2)$$

$$v_b = v_w + S(1170 - 9.6T + 0.55T^2 - 8.5 \times 10^{-5}T^3 + 2.6P - 0.0029TP - 0.047P^2) + S^{1.5}(780 - 10P + 0.16P^2) - 820S^2 \quad (1.1.3)$$

式中, $v_w = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^3 w_{ij} T^i P^j$; ρ_w 为纯水的密度, g/cm^3 ; ρ_b 为地层水密度, g/cm^3 ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为压力, MPa ; S 为矿化度; v_b 为地层水的声波速度, m/s ; v_w 为纯水的声波速度, m/s ; w_{ij} 为权系数常量。

少量的气体也可溶于盐水。Sultanov (1972) 认为, 溶于盐水的气体随压力增大而增大, 随矿化度增大而减少。温度低于 250°C 时, 气体溶于水的气水比满足以下公式, 即

$$\lg(R_G) = \lg(0.712P |T - 76.71|^{1.5} + 3676P^{0.64}) - 4 - 7.86S(T + 17.78)^{-0.306} \quad (1.1.4)$$

Dodson 和 Standing (1945) 发现含气体地层水模量 K_G 与气水比基本为线性关系, 即

$$K_G = \frac{K_B}{1 + 0.049R_G} \quad (1.1.5)$$

式中, R_G 为气水比; K_B 为不含气时地层水的体积模量。

地层水体积模量和密度主要受地层温度、孔隙压力和地层水矿化度影响。采用上述公式, 分别计算了不同温度、压力及地层水矿化度条件下, 地层水体积模量和密度。计算结果见图 1.1.1, 图中矿化度量纲为 10^{-6} 。地层水体积模量和密度受地层水矿化度的影响比较大。矿化度越高, 地层水体积模量和密度也越大; 在相同矿化度和温度条件下, 地层水体积模量和密度随孔隙压力增大而增大; 在相同矿化度和压力条件下, 地层水体积模量和密度与温度的关系比较复杂, 低温时都随温度增大而增大, 高温时都随温度增大而减小, 其值在 $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 之间达到最大值。

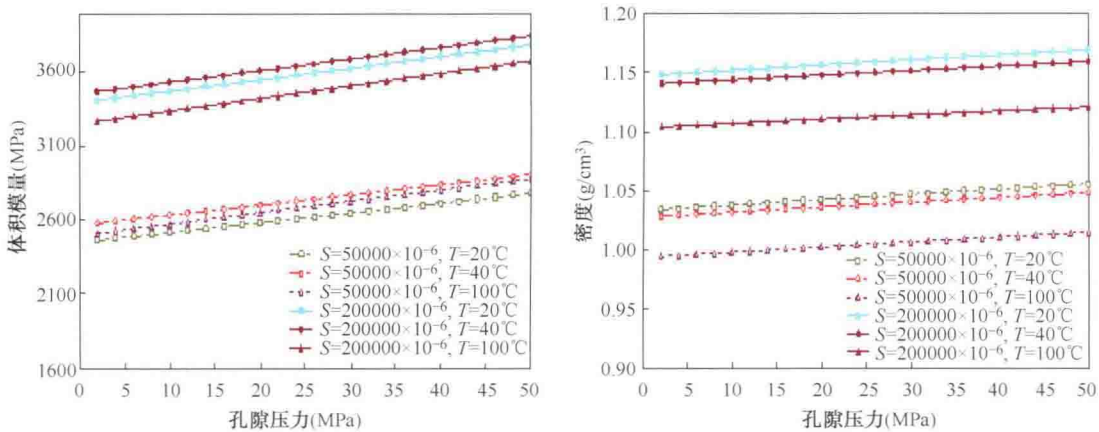


图 1.1.1 地层水体积模量和密度与温度、压力及矿化度的关系

1.1.2 天然气的弹性性质

由理想气体状态方程可以推导出气体体积模量和密度与流体所处温度、压力的关系, 即

$$\rho = \frac{M}{\bar{V}} = \frac{MP}{RT_a}, \quad \frac{1}{K_T} = \frac{-1}{\bar{V}} \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial P} \right)_T \quad (1.1.6)$$

式中, $\bar{V}$ 为摩尔体积; P 为压力; R 为气体常量; $T_a = T + 273.15$; ρ 为密度; 下标 T 表示等温条件。实际天然气因其组分复杂与理想气体状态方程描述的关系有较大的差异, 因此引入一个校正压缩因子 Z 、热容系数 γ_0 、归一化的压力 P_{pr} 。天然气密度及体积模量计算公式为

$$\frac{1}{K_T} = \frac{P\gamma_0}{\left(1 - \frac{P_{pr}}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P_{pr}}\right)_T}, \quad \rho = \frac{28.8GP}{ZRT_a} \quad (1.1.7)$$

根据公式 (1.1.7)，天然气的体积模量和密度主要受地层温度、压力和气体相对密度 G 的影响。实际天然气相对密度变化范围为 0.6~2。我们计算了不同储层条件下天然气的体积模量和密度。计算中压力范围为 2~50MPa，温度为 20℃、40℃，气体相对密度分别为 0.6、1.0 等 6 种情况。计算结果见图 1.1.2。从图中可知，体积模量和密度随温度、压力及气体相对密度的关系类似。在相同压力和温度条件下，气体相对密度越大，天然气的体积模量和密度越大；在相同压力和相对密度条件下，温度越低，天然气的体积模量和密度越大；在一定温度和气体相对密度条件下，孔隙压力越大，天然气的体积模量和密度越大。相对密度大的气体，天然气的体积模量和密度在低压时存在一个很大的变化梯度。但是随着压力增大，变化梯度越小。

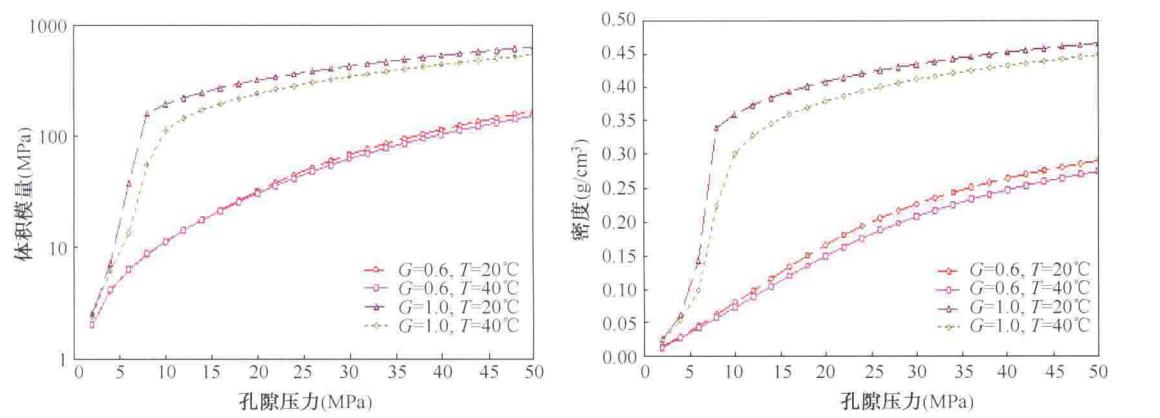


图 1.1.2 天然气体积模量和密度与温度、压力及气体相对密度的关系

1.1.3 石油的弹性性质

石油是由多种有机化合物混合而成的。对于一种给定的原油，在其组成成分保持不变的条件下，其随压力变化的原油密度 ρ_p 是互相独立的。

$$\rho_p = \rho_0 + (0.00277P - 1.71 \times 10^{-7}P^3)(\rho_0 - 1.15)^2 + 3.49 \times 10^{-4}P \quad (1.1.8)$$

从上式可以看出，压力变化对原油的密度影响比较小。与此相反，温度的变化对原油密度的影响比较大。在储层条件下，温度对密度的影响可由 Dodson 和 Standing (1945) 的公式得出，即

$$\rho = \rho_p / [0.972 + 3.81 \times 10^{-4}(T + 17.78)^{1.175}] \quad (1.1.9)$$

当原油中含有天然气时，其密度 ρ_G 由下列公式计算，即

$$\rho_G = (\rho_0 + 0.0012GR_G) / B_0 \quad (1.1.10)$$

式中， ρ_0 为 1 个大气压下，温度为 15.6℃ 时测得的密度； G 为天然气的密度和空气的密度在 15.6℃ 时的比值； R_G 为气水比； B_0 为体积因子。

$$R_G = 0.02123G [P \exp(4.072/\rho_0 - 0.00377T)]^{1.205} \quad (1.1.11)$$

$$B_0 = 0.972 + 0.00038 [2.4R_G (G/\rho_0)^{1/2} + T + 17.8]^{1.175} \quad (1.1.12)$$

石油的纵波速度与温度及压力的关系为

$$v = 2096 \left(\frac{\rho_0}{2.6 - \rho_0} \right)^{1/2} - 3.7T + 4.64P + 0.0115 \left[4.12 \left(\frac{1.08}{\rho_0} - 1 \right)^{1/2} - 1 \right] TP \quad (1.1.13)$$

通过以上研究可知，孔隙中的水、石油和天然气的弹性性质存在根本上的区别。当不同流体填充孔隙时的地震属性特征也是不同的，这就是利用地震技术检测天然气的基础。

1.1.4 混合流体的弹性参数模型

在天然地层中，单相流体几乎是不存在的，研究多相混合流体的弹性性质更有实际意义。一般而言，含天然气岩石的体积模量和密度最低，含盐水岩石的体积模量和密度次之，含油岩石的体积模量和密度最高。也就是说，随着流体的可压缩性增强，其体积模量逐渐减小。混合流体的密度和模量采用 Wood 公式，根据单相流体的算术平均计算，即

$$\rho_f = \sum_i V_i \rho_i, K_f = \sum_i V_i / K_i \tag{1.1.14}$$

式中， ρ_f 为混合流体密度； V_i 为每一流体的体积含量； ρ_i 为每一流体密度； K_i 为每一流体的体积模量； K_f 为混合流体的体积模量。

根据公式 (1.1.14) 和以上得到的孔隙流体弹性属性公式，计算了不同含水饱和度条件下，气水混合后的体积模量和速度变化特征。计算结果如图 1.1.3 所示。气水混合流体的体积模量随含水饱和度增大而增大。当含水饱和度小于 60% 时，混合流体体积模量变化缓慢；当含水饱和度达到 80%~100% 时，混合流体体积模量出现急剧增加。这表明当流体中含有少量气体后，混合流体体积模量将急剧下降。产生这种现象的原因是由于天然气的体积模量通常较低，且其可压缩性最大，低含气饱和度的混合流体体积模量实际上由天然气的体积模量所决定。混合流体的速度变化趋势和体积模量变化趋势类似。需要指出的是在含水饱和度为 0~25% 时，混合流体的速度随饱和度增大略有减小，之后随含水饱和度增大而增大。

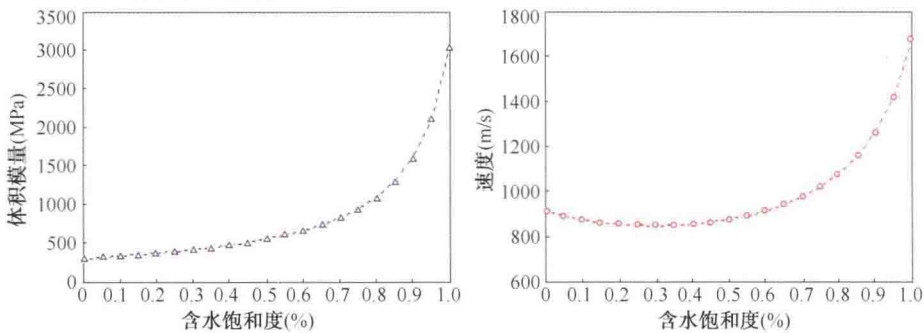


图 1.1.3 气水混合物的体积模量和速度随含水饱和度变化关系

1.2 等效介质理论

地下储层是由固体颗粒的骨架、孔隙及其充填流体组成的多相孔隙介质。通常将它们近似为弱弹性介质，采用等效介质理论描述其岩石物理性质。等效介质理论就是根据不同的岩石物理模型，在一定的条件下，定量求取岩石的等效弹性模量、密度和速度，建立地震响应与储层岩石参数之间的联系，进行定量储层预测。如果缺乏空间几何分布信息，则只能预测等效弹性模量的上限和下限。

1.2.1 岩石物理模型的基本框架

按照弹性介质理论，岩石的密度和声波速度可由下面的岩石弹性参数表述，即

$$\rho_s = (1 - \phi) \rho_0 + \phi \rho_f \tag{1.2.1}$$

式中， ρ_0 、 ρ_f 分别表示骨架密度和流体密度； ϕ 表示孔隙度； ρ_s 为含饱和流体岩石的密度。

$$v_p^2 = [K_s + (4/3)G]/\rho_s, v_s^2 = G/\rho_s \quad (1.2.2)$$

式中, v_p 为饱和流体岩石的纵波速度; v_s 为饱和流体岩石的横波速度; K_s 、 G 、 ρ_s 分别为含饱和流体岩石的体积模量、剪切模量和密度。

1.2.2 岩石基质模量

到目前为止, 在假设各种组成成分为各向同性、线性、弹性的条件下, 主要采用平均的方法确定岩石中组成矿物体积模量 K_m 和剪切模量 μ_m 。

岩石基质的体积模量 K_m 和剪切模量 μ_m 由已知岩石矿物成分的模量按 Voigt - Reuss - Hill (VRH) 公式计算。

Voigt 公式:

$$M_V = \sum_{i=1}^N C_i M_i \quad (1.2.3)$$

Reuss 公式:

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{M_i} \quad (1.2.4)$$

Voigt - Reuss - Hill (VRH) 平均公式:

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (1.2.5)$$

式中, M 是有效基质模量, 可以是 K_m 或 μ_m ; C_i 和 M_i 分别是第 i 种矿物成分的体积比例和模量 (体积模量或剪切模量)。Reuss (1929) 认为各组分所受的应力相同时, 其模量为

$$K_{Rn}^{-1} = \sum_{i=1}^N K_i^{-1} f_i, \mu_{Rn}^{-1} = \sum_{i=1}^N \mu_i^{-1} f_i, \sum_{i=1}^N f_i = 1 \quad (1.2.6)$$

式中, K_{Rn} 为有效基质体积模量; K_i 和 f_i 分别为第 i 种矿物成分的体积模量和体积比例; μ_{Rn} 和 μ_i 分别为有效基质剪切模量和第 i 种矿物剪切模量。

Hill (1952) 对 Voigt 上边界和 Reuss 下边界进行了数学平均, Kumazawa (1969) 对 Voigt 和 Reuss 的上下边界进行了几何平均。

1.2.3 等效介质模型

1.2.3.1 Gassmann 理论

Gassmann (1951) 提出了孔隙岩层充满流体的弹性模量公式, 奠定了近代沉积弹性理论与物性之间研究的基础。该理论假设岩石是一个封闭的系统, 近似于各向同性、均匀条件, 孔隙的形状是球形的, 所有孔隙都充满流体而且流体是紧附在孔壁上的, 地震波通过时流体与骨架之间的相对运动可以忽略。

饱和流体的多孔介质的体积模量、剪切模量和密度通常用 Boit - Gassman 方程求解。通过流体替代模型, 我们可以分析和了解流体成分改变对地震响应特征的影响。反之, 从地震不同的响应分析流体饱和情况。

Boit - Gassman 方程只适应于零频率情况, 它要求:

- (1) 岩石 (基质和骨架) 宏观上是均匀的;
- (2) 所有的孔隙内部是连通的;
- (3) 孔隙中填充无摩擦的流体;
- (4) 岩石 - 流体系统是封闭的;
- (5) 孔隙流体不与岩石固体部分发生作用。

在这样的假设条件下, 饱和流体岩石的体积模量 K_{sat} 为

$$K_{\text{sat}} = K_d + \frac{(1 - K_d/K_m)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1-\phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (1.2.7)$$

式中, K_d 为干岩石的体积模量; K_m 为岩石基质的体积模量; K_f 为流体的体积模量; ϕ 为孔隙度。

饱和流体岩石的剪切模量不受流体的影响, 等于干岩石剪切模量 μ_d , 即

$$\mu_{\text{sat}} = \mu_d \quad (1.2.8)$$

饱和流体岩石的密度为

$$\rho_{\text{sat}} = (1 - \phi)\rho_m + \phi\rho_f \quad (1.2.9)$$

式中, ρ_m 表示骨架密度; ρ_f 表示流体密度。

混合流体的体积模量 K_f 可由 Wood 方程计算, 即

$$\frac{1}{K_f} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \quad (1.2.10)$$

式中, K_o 、 K_g 和 K_w 分别是油、气和水的体积模量; S_o 、 S_g 和 S_w 分别是油、气和水的饱和度。

混合流体的密度 ρ_f 为

$$\rho_f = S_w\rho_w + S_o\rho_o + S_g\rho_g \quad (1.2.11)$$

式中, ρ_o 、 ρ_g 和 ρ_w 分别是油、气和水的密度。

Mavko (1998) 对上面的公式进行了重新排列, 将其修改为

$$\frac{K_{\text{sat}}}{K_m - K_{\text{sat}}} = \frac{K_d}{K_m - K_d} + \frac{K_f}{\phi(K_m - K_f)} \quad (1.2.12)$$

1.2.3.2 Kuster - Toksöz 理论

Kuster - Toksöz (1974, 1976) 根据耗散理论推导了长波长一阶近似条件下饱和流体和孔隙介质的弹性模量方程。该方程能够方便地改变岩石中裂隙的大小、形状及分布。饱和流体的岩石弹性模量可用表示为

$$(K_{\text{sat}} - K_m) \frac{(K_m + 4/3\mu_m)}{(K_{\text{sat}} + 4/3\mu_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P^{\text{ni}} \quad (1.2.13)$$

$$(\mu_{\text{sat}} - \mu_m) \frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_{\text{sat}} + \zeta_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^{\text{ni}} \quad (1.2.14)$$

式中, $\zeta_m = \frac{\mu_m(9K_m + 8\mu_m)}{6(K_m + 2\mu_m)}$; P^{ni} 、 Q^{ni} 表示孔隙填充物对岩石基质的影响系数; K_m 和 μ_m 分别为岩石骨架的体积模量和剪切模量; K_i 和 μ_i 为包裹体的体积模量和剪切模量; x_i 为包裹体的体积百分比含量。

1.2.3.3 Xu - White 理论

Xu 和 White (1995) 考虑到泥质砂岩中泥质含量、孔隙度大小和形状及孔隙饱含流体性质对岩石速度的影响, 利用 Kuster - Toksöz 理论求干岩石模量, 结合 Gassmann 理论进行流体替代, 计算等效介质的速度和密度。

1.2.4 孔隙空间刚度

孔隙岩石中存在任意形状的孔隙。有孔岩石可压缩性包括矿物内在的可压缩性和孔隙空间的存在所引起的可压缩性。定义孔隙空间刚度为 $K_\phi = v_p \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}}$ 。其中 v_p 为孔隙总体积。对于不同形状的孔隙其空间刚度分别为

$$\text{球形孔隙空间刚度: } \frac{1}{K_\phi} = \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}} = \frac{1}{K_0} \frac{3(1-\nu)}{2(1-2\nu)}$$

$$\text{硬币状孔隙空间刚度: } \frac{1}{K_\phi} = \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}} = \frac{4(c/a)(1-\nu^2)}{3\pi K_0(1-2\nu)}$$

$$\text{针状孔隙空间刚度: } \frac{1}{K_\phi} = \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}} = \frac{1}{3K_0(1-2\nu)}$$

式中, K_0 为固体介质体积模量; ν 为固体介质泊松比; a 、 c 分别表示孔隙的高、宽。

1.2.5 岩石骨架的体积模量

因孔隙形状影响, 各向同性的弹性介质中岩石骨架的体积模量可表示为

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_m} + \frac{\phi}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}} \quad K_d = K_m(1-\beta) \quad K_d^{-1} = K_m^{-1} + \phi/K_\phi \quad (1.2.15)$$

式中, $\frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}}$ 、 v_p 、 $K_\phi = v_p \frac{\partial v_p}{\partial \sigma} \bigg|_{\text{dry}}$ 、 $\beta = \frac{\phi K_{\text{dry}}}{K_\phi}$ 分别表示孔隙体积在一定静水压力条件下的导数、孔隙体积、孔隙空间刚度和比奥 (Biot) 系数。

在实际应用中, 通常利用干岩石的纵横波速度和经验关系计算干岩石模量。许多学者提出用孔隙度与基质体积模量计算岩石骨架体积模量 (Geertsma, 1961; Krief, 1990; Murphy, 1993; Han, 2004)。Nur (1998) 提出了临界孔隙度概念。Lee (2005) 对 Pride 等 (2004) 经验关系式进行归一化处理, Mavko 等 (1998) 对 Krief 和 Nur 的关系进行了比较, 并给出了多种矿物的临界孔隙度。图 1.2.1 不同模型中岩石骨架归一化模量和 Biot 系数与孔隙度之间的关系。从图中可知, 归一化模量随孔隙度增大而减小, Biot 系数随孔隙度增大而增大。在低孔隙度时 (0~15%), 3 种模型得到的结果基本相同; 在高孔隙度时 (40%~60%) 都趋向于零。

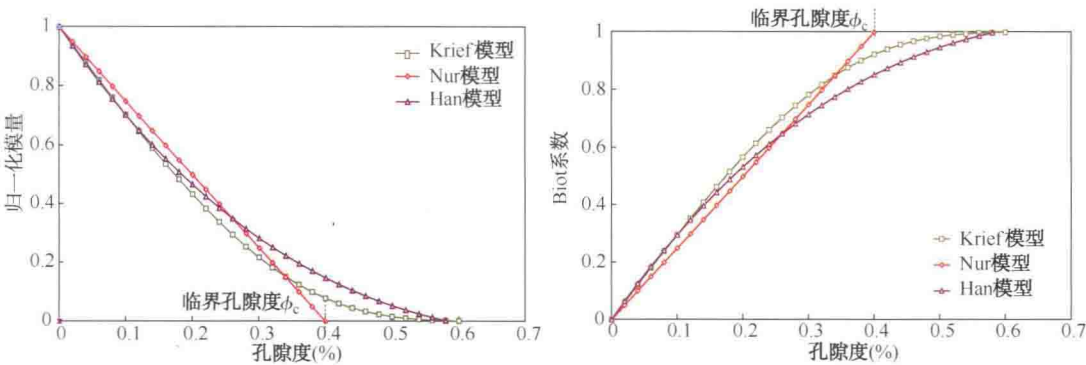


图 1.2.1 岩石骨架归一化模量和 Biot 系数与孔隙度的关系

表 1.2.1 是砂岩物理模型参数, 砂岩中含有水和气两种流体, 干砂岩主要成分是石英矿物。图 1.2.2 是孔隙度等于 10% 时, 含水饱和度对泊松比、纵横波速度比、纵波速度、横波速度、纵波阻抗、横波阻抗、 λ/μ 、 $\rho\lambda$ 和 $\rho\mu$ 的影响。

表 1.2.1 砂岩物理模型

模型项	干砂岩	盐水	气	石英矿物
岩石参数				
K [$10^9 \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$]	15.78	2.25	0.06	40
μ [$10^9 \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$]	11.25	—	—	—
ρ (g/cm^3)	2.65	1.0	0.2	—

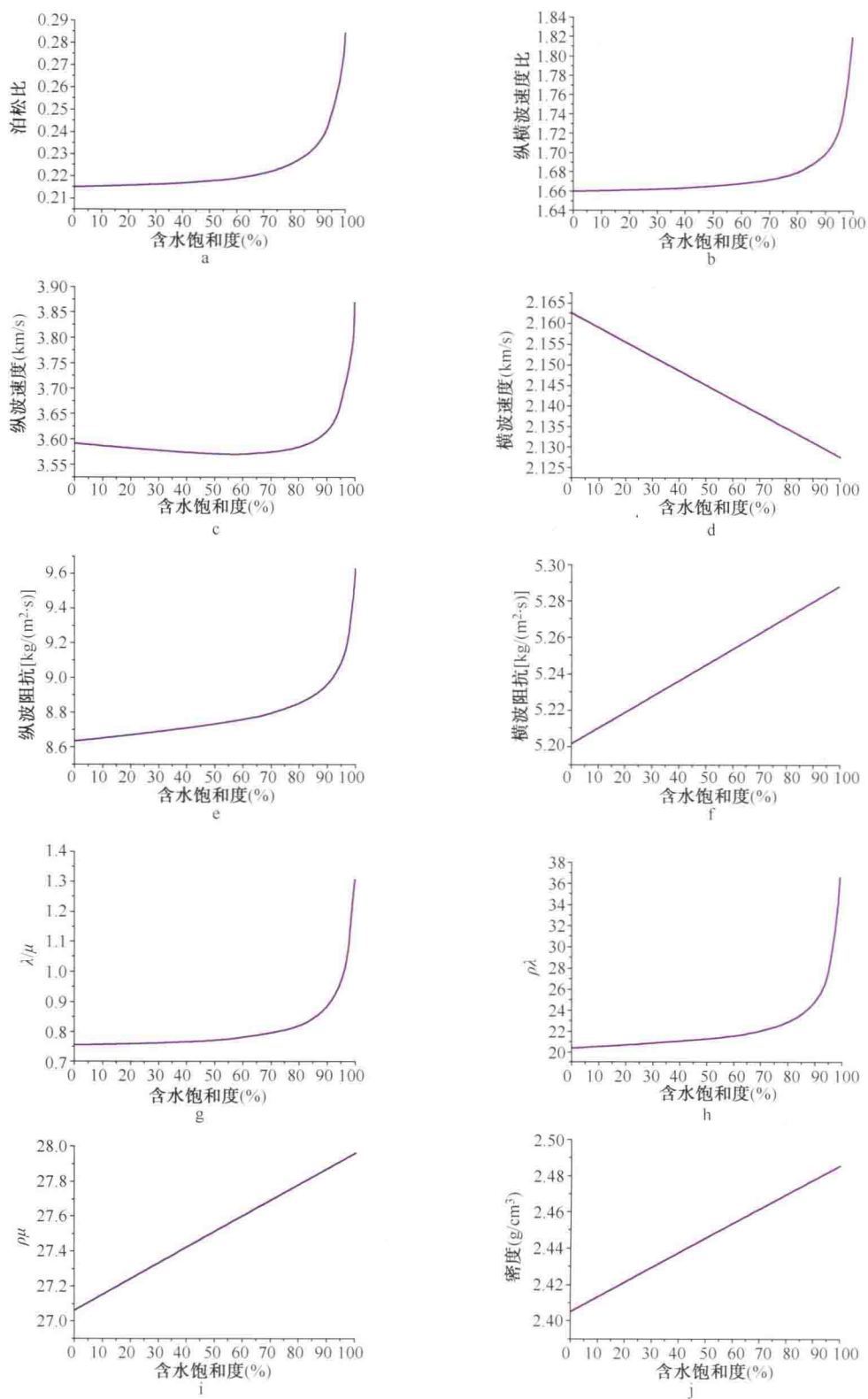


图 1.2.2 含水饱和度对岩石物性参数的影响

岩石孔隙度 $\phi = 10\%$

含水饱和度变化对纵波速度、纵横波速度比、泊松比、纵波阻抗、 λ/μ 和 $\rho\lambda$ 的影响大。含水饱和度大于 90%（含气饱和度小于 10%）时，纵波速度、纵横波速度比、泊松比、纵波阻抗、 λ/μ 和 $\rho\lambda$ 随含水饱和度的减小（含气饱和度的增加）急剧减小，变化幅度很大。含水饱和度大于 70%，小于 90%（含气饱和度大于 10%，小于 30%）时，纵波速度、纵横波速度比、泊松比、 λ/μ 和 $\rho\lambda$ 随含水饱和度的减小（含气饱和度的增加）而缓慢减小。含水饱和度小于 70%（含气饱和度大于 30%）时，它们的振幅几乎不变。含水饱和度小于 90%（含气饱和度大于 10%）时，纵波阻抗随含水饱和度减小（含气饱和度增加）呈线性关系减小。通过上述变化，可以识别含少量气和富含气储层。

含水饱和度对横波速度、横波阻抗、 ρ 和 $\rho\mu$ 几乎没有影响，其微小的减小量是由于混合流体的体积密度微小改变引起的。

1.3 纵横波速度经验公式

以上根据理论模型计算岩石特性参数（ K 和 μ ），然后再利用 K 和 μ 计算纵横波速度比（泊松比）的方法，需要一些岩石物性参数。在没有化验分析资料的地区和新探区，如果要用理论模型法，只能借用其他地区的岩石物理参数，计算精度受到影响，而且理论模型有应用局限性。因此许多学者研究和总结了岩石纵横波速度规律，推导了一些纵横波速度关系的经验公式。

(1) Castagna 经验公式

$$v_p = 1.36 + 1.16v_s \quad (1.3.1)$$

(2) Smith 经验公式

$$v_p = 0.79 + 1.425v_s \quad (1.3.2)$$

(3) 甘利灯经验公式

$$v_p = 0.937 + 1.35v_s \quad (1.3.3)$$

(4) 李庆忠综合了上述三人的资料，采用抛物线拟合，得到

$$v_p = 1.25 + 0.994v_s + 0.0874v_s^2 \quad (1.3.4)$$

这类经验公式是利用理论模型进行岩石物理模拟的有利补充。

1.4 储层参数与其相互关系分析

1.4.1 深度和压力与速度关系

控制储层岩石弹性性质的是上覆岩层压力和储层流体压力的差压力或有效压力，严格意义上差压力并不等于有效压力。如果上覆压力增加而孔隙压力保持不变，那么固体基质将被挤压得越致密，岩石弹性模量将增加，但密度变化不大；如果孔隙压力增加而上覆压力不变，则岩石就会变软，地层速度变低。如果有效压力保持不变，那么速度将不会有明显变化。

Biot (1957) 提出有效应力系数为 $n = 1 - K_d/K_m$ 。Todd (1972) 和 Christensen (1985) 都认为有效应力系数 n 可表示为

$$n = 1 - \frac{\partial Q / \partial P_p | P_d}{\partial Q / \partial P_d | P_p} \quad (1.4.1)$$

式中, Q 为任意岩石属性; P_p 为孔隙压力; P_d 为施加压力与孔隙压力差。

Nur (1995) 根据临界孔隙度的概念, 得出的有效应力系数为 $n = \phi / \phi_c$ 。Eberhart (1989) 和 Singh (2006) 得出纵横波速度与有效压力之间经验关系。Furre (2002) 运用球体叠和理论分析认为: 随着差压力增大, 球体之间的接触面变平, 孔隙压力对速度的影响减少。

Han (2002, 2004) 认为地震特性和上覆岩层净压力之间的关系是非线性的。在差压力值相对小的压力段, 由于孔隙度的变化 (孔隙闭合效应), 岩石地震特性随差压力增加较快 (高斜率), 呈非线性变化; 在差压力值相对高的压力段, 由于岩石的孔隙基本闭合, 岩石的地震特性随差压力的变化呈线性、平缓变化, 体积模量对含水饱和度非常敏感, 含水时其体积模量较干岩石的体积模量增加一倍, 而剪切模量基本不变, 如图 1.4.1 所示。

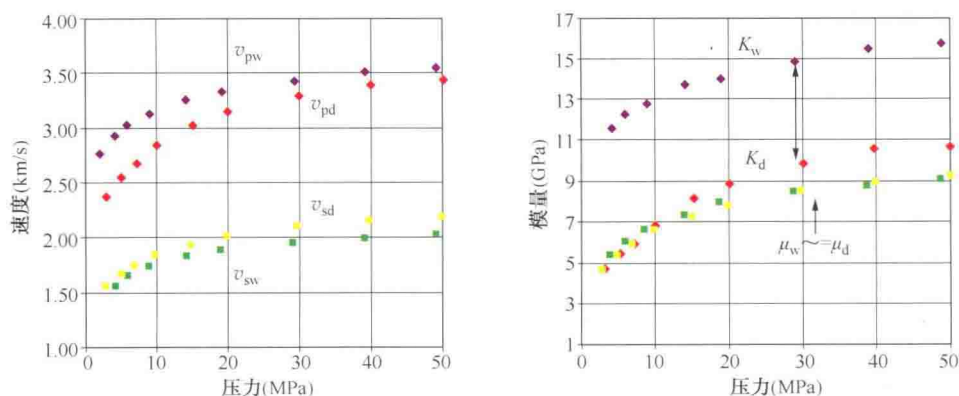


图 1.4.1 压力与速度和模量之间的关系 (Dehua Han 等, 2004)

纵波有效压力系数与差压力近似呈线性关系, 差压力越大, 有效压力系数越小; 横波对孔隙压力变化没有纵波敏感, 有效压力系数接近于 1, 基本不随差压力的变化而变化; 较小差压力的 Biot 系数远小于有效压力系数; 差压力比较大时的 Biot 系数接近有效压力系数。在缺少实际测量的有效压力系数时, 可以用 Biot 系数替代; 在相同差压力的条件下, 具有

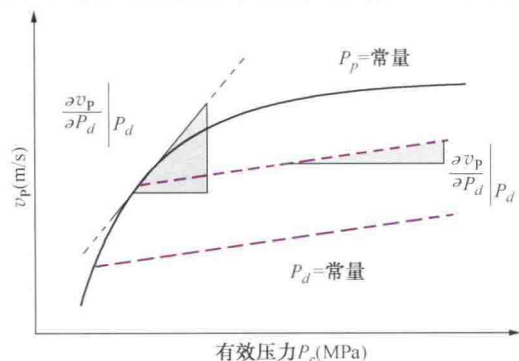


图 1.4.2 有效压力系数计算示意图
(Xiaoxia Xu 等, 2004)

裂隙的岩石的有效压力系数要比没有裂隙岩石的大。当储层中存在高密度的裂隙, 有效压力系数接近 1; 在相同差压力条件下, 岩石骨架模量的有效压力系数与孔隙压力无关; 盐水比丁烷导致更低的有效压力系数。究其原因可能是不同的流体活动性导致了不同的有效压力系数, 而丁烷具有比盐水更强的活动能力; 在相同的孔隙条件下, 碳酸岩盐有效压力系数要比砂岩大。对泥岩的测量还比较少, 但存在类似结果。图 1.4.2 为有效压力系数计算示意图。

1.4.2 温度与速度的关系

一般来说，岩石的地震特性随着温度的增加而减小，用这种方法可以提高热采率。干燥和水饱和的岩石，随温度增加通常显示小的地震特性；重油饱和岩石随温度增加显示出大的地震特性；温度对饱和油砂岩的影响比对饱和盐水岩石的影响大。Han（2002）通过试验测量手段，研究了低饱和气储层的特点。他们认为随着气容量的增加，气水的模量和速度都会降低；低温时，模量和速度都随温度增加而增加，高温时随温度增加而减小，在 60~80℃ 之间达到最大值；模量和速度随压力的增大而增加，如图 1.4.3 所示。

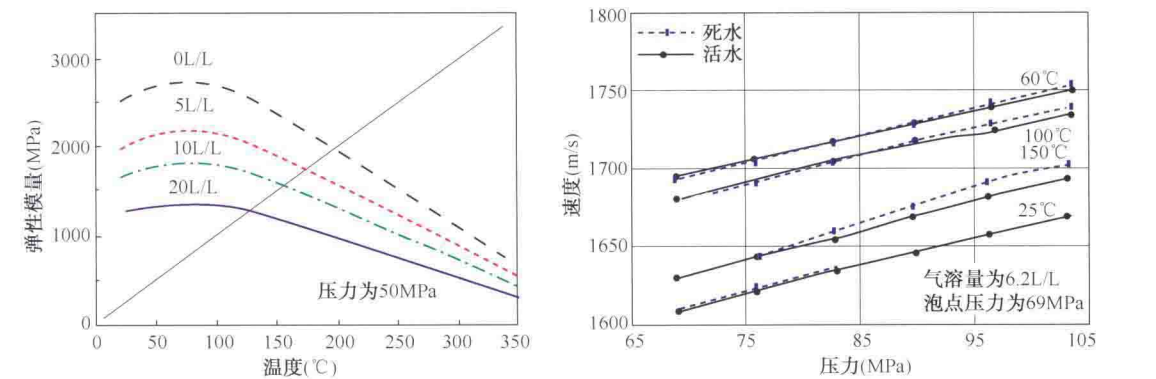


图 1.4.3 压力和温度与岩石弹性模量和速度之间的关系（Han 等，2002）
图中 L/L 为气容量单位，表示每升水含有气体体积

1.4.3 孔隙度和孔隙形状与速度的关系

试验测试结果和理论计算均表明岩石的速度、模量和密度随孔隙度的增大而减小。Kuster 和 Toksöz（1974）推导了描述孔隙形状的变化对岩石模量影响的理论公式，认为岩石地震特性受孔隙形状的影响更大。孔隙的形状用纵横比描述，即扁球体的短轴与长轴的比。球形孔隙的纵横比是 1.0，硬币形孔隙的纵横比为 0.1 或更小。由于扁平孔隙的压缩率要比球形孔隙的压缩率大，具有扁平孔隙的岩石可能具有更低的地震速度。Mavko（1998）总结了不同形状孔隙的孔隙空间刚度。Wyllie（1956）提出了时间平均方程和密度与孔隙度的关系。Raymer（1980）为了改进高孔地层中孔隙度的估计而修改了 Wyllie 方程。Saleh 和 Castagna（2004）认为 Wyllie 方程没有考虑孔隙尺寸及其排列的变化，引入孔隙形状因子概念，对 Wyllie 方程进行校正。

1.4.4 黏土与速度的关系

黏土对岩石地震特性的影响取决于黏土微粒的类型及其在岩石中的位置。如果黏土是岩石基质的一部分，岩石速度和波阻抗将随着黏土含量的增加而减小。如果是孔隙填充物，则降低岩石的渗透性和孔隙度，且含有水分时黏土将会膨胀，导致岩层变形。

Tosaya 和 Nur（1982）等最早研究孔隙度和黏土含量对地震速度的联合影响，众多学者总结了纵横波速度与孔隙度和泥质含量之间的经验关系式（徐伯勋等，2001；黄绪德，2003）。这些关系式没有考虑黏土微粒在岩石中的位置，仅仅是经验性的。Prasad（2003，2004）研究了黏土矿物的属性后，发现黏土矿物在不同的方面影响着岩石性质。当玻璃介质之间增加水饱和的黏土层后，地震信号出现明显降低，并且对 S 波的影响比 P 波更大。然