

文章编号: 0253-9985(2005)06-0730-06

含气地层弹性性质及其波场响应

王尚旭

(中国石油大学中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京 102249)

摘要: 根据储层条件下天然气及地层水弹性参数变化特征的分析, 通过含气地层纵、横波速度的计算, 采用物理模拟与实验分析, 含气地层具有以下波场响应特征: 同一地层条件下相对比重较大的天然气比相对比重轻的天然气具有更高的纵波速度; 含盐水岩石的纵波速度随盐水矿化度的增高而增大; 流体性质不同对纵波速度影响较大, 而对横波速度影响很小。地层所含流体不同其波场响应具有一定的差异, 含气地层具有较强的反射能量, 含水地层反射能量相对减弱; 非均质性含气地层其波场响应中绕射波比较发育。

关键词: 体积模量; 密度; 速度; 地震响应; 含气地层

中图分类号: P631.445 **文献标识码:** A

Elastic properties of gas-bearing strata and seismic response

Wang Shangxu

(China University of Petroleum, Beijing)

Abstract Based on analysis of variation of elastic properties of natural gas and formation water under reservoir conditions, calculation of compressional velocity and shear velocity through gas-bearing strata and physical simulation and experimental analysis, it is believed that gas-bearing strata are characterized by the following seismic responses: compressional velocity of gas with larger specific gravity is higher than that of gas with smaller specific gravity; compressional velocity in rocks containing saline water increases with increasing water salinity, and fluid properties have relatively large influence on compressional velocity, but have little influence on shear velocity. There would be a certain different seismic responses in strata bearing different fluids. Reflected energy in gas-bearing strata is relatively strong while that in water-bearing strata is relatively weak. Seismic response in heterogeneous gas-bearing strata would be characterized by relatively well developed diffracted wave.

Key words bulk modulus; density; velocity; seismic response; gas-bearing strata

地震勘探的目的之一是从复杂多变的地震信息中识别和提取地下流体响应, 进而预测地层中的流体变化。岩石骨架、孔隙结构及其所含流体性质决定含流体岩石弹性性质及波场特征^[1]。研究孔隙流体变化对岩石综合弹性性质的影响作用, 对于油气藏勘探和开发具有重要意义。

许多学者^[2,3]通过实验观测的方法, 研究了不同性质流体及岩石饱和度对含流体岩石弹性性质的影响。Knight等人^[4]对部分饱和和流体岩石的地

震响应进行了研究。King等^[5,6]使用实验观测数据对部分与完全饱和和流体岩样的纵、横波速度进行了分析。还有其他许多作者^[7]对岩石中流体分布进行了研究。但这些分析主要针对流体饱和度变化所引起的岩石物性差异而进行的。有关流体性质对岩石物理特征(如密度、模量、速度等)影响的研究成果很少。这从另一方面说明, 油(气)自身的物理性质是非常复杂的。Batzie^[8]根据观测数据和前人总结的经验关系式, 提出了油、气、水

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB209105)

作者简介: 王尚旭, 男, 43岁, 教授(博士生导师), 地震波传播理论及地球物理勘探

收稿日期: 2005-07-27

的密度、速度计算关系式。该经验关系式已被广泛地应用于地震勘探的解释之中。

1 理论基础

含气砂岩的弹性性质主要取决于岩石骨架性质、孔隙特征及孔隙中气体的弹性性质。地震波在含气砂岩中传播时,与含气砂岩之间的作用关系可通过含气砂岩的体积形变定量表示。Gassmann-Biot^[9]将波动引起的孔隙介质体积模量变化用构成岩石的矿物成分、岩石骨架性质和孔隙流体性质来表示。其中矿物颗粒的性质、大小、分选及胶结性质决定了岩石骨架的体积模量或不可压缩性,而孔隙流体类型及饱和度对矿物颗粒的接触性质有较大影响。

孔隙流体的弹性性质可以用体积压缩系数来表示

$$\frac{1}{K_f} = - \frac{1}{V_f} \left| \frac{\partial V_f}{\partial P} \right|_T$$

或

$$K_f = - \left[\frac{dP}{dV_f/V_f} \right] = \rho \frac{dP}{d\rho}$$

式中 K_f 为流体不可压缩系数, Pa; V_f 为体积, m^3 ; P 为压力, Pa; ρ 为密度, g/cm^3 。

当流体所受压力变化较小时(如声波传播等),流体所受压力与流体密度关系可以通过声波速度联系起来,即

$$dP = v_f^2 d\rho \quad (2)$$

式中 v_f 为流体的声波速度, m/s 。

因此,流体速度、体积模量及密度关系可表示为

$$K_f = \rho v_f^2 \quad (3)$$

确定流体体积压缩系数的方法主要有 3 种:

(1) 模拟储层条件直接在实验室对流体进行测试;
(2) 根据流体状态方程进行理论计算;
(3) 根据实验结果的经验关系式进行计算。目前广泛使用的方法是利用经验关系式确定单项流体体积压缩系数。

2 介质弹性性质

含气储层孔隙中通常以气-水、气-油或气-油-水混合物存在,极少出现孔隙中仅存天然气情况。例如苏里格气藏,气层孔隙中多以气-水共存。确定混合流体弹性性质的常用方法是:首先分别确定单相流体(如气体或地层水)弹性参数,

然后采用理论模型确定混合流体弹性参数。

2.1 天然气

理想气体状态方程描述了气体体积变化与温度及压力之间关系,由理想气体状态方程可以推导出气体体积模量及密度与流体所处温度、压力的关系,即

$$\frac{1}{K_f} = - \frac{1}{V_f} \left| \frac{\partial V_f}{\partial P} \right|_T \quad (4)$$

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (5)$$

式中 M 为质量, g ; R 为气体常数; T 为温度, $^{\circ}C$ 。式中下标 T 表示等温条件。

实际天然气因其组分复杂往往与理想气体状态方程所表示关系有较大差异,消除此差异的方法之一是引入一个校正压缩因子 Z ;此外,波在流体中传播过程一般近似为瞬间的绝热过程。等温条件下气体模量与绝热条件下气体模量关系可以通过热容系数 γ 联系起来。为了方便引入热力学有关结果,在计算绝热条件下气体体积模量及密度时,常引入伪折减温度 T_p 和压力 P_p 。气体密度及体积模量计算公式^[2]如下

$$\rho_g = \frac{28.8GP}{8.314SZT_a} \quad (6)$$

$$K_g = \frac{p\gamma}{(1 - P_p \partial Z / \partial P_p)_T} \quad (7)$$

式中 G 为气体比重,无量纲。

由上述方程可知,天然气的体积模量和密度主要受地层温度、压力和气体比重 G 的影响。实际天然气的气体比重变化范围为 0.56(近似纯甲烷)至 1.8(高碳原子数构成的碳氢化合物)。

根据上述方程可计算不同储层条件下天然气体积模量与密度变化范围。计算过程中,温度变化为 $0 \sim 160^{\circ}C$,孔隙压力分别取 0.1 MPa、25 MPa 及 50 MPa 为了便于对比,气体比重考虑了 0.6 和 1.2 两种情况。计算结果如图 1 所示。

由图 1 可知,天然气体积模量和密度均随着温度的增加而降低,特别是在 $0 \sim 60^{\circ}C$,模量的减小尤为突出;随压力的增加,体积模量和密度显著增大,随气体相对比重 G 的增加而急剧增大。因此,相对比重较轻的气体相比于较重的气体,所受温度和压力的影响较小。当然,影响天然气物理性质的因素还包括构成天然气的复杂的各种化学组分,本文未予讨论。

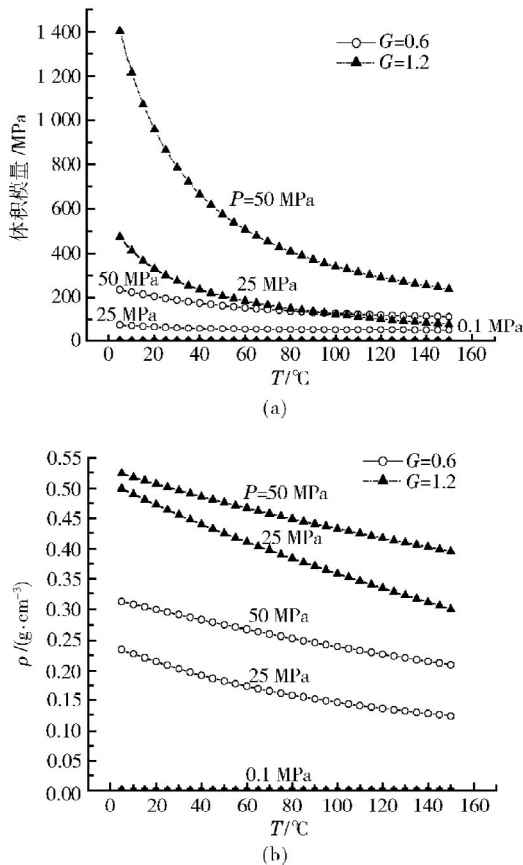


图 1 天然气体积模量 (a) 和密度 (b) 与温度、压力及气体比重关系

Fig. 1 Bulk modulus (a) and density (b) of natural gas vs temperature, pressure and specific gravity of gas

2.2 地层水

储层孔隙中地层水物理性质变化较大。Bat-zle和Wang^[7]使用Zarembo等人^[10]对氯化钠溶液进行的实验结果,建立了计算地层水密度的经验关系式,并采用Wyllie等人^[11]的高温、高矿化度水溶液实验结果,对地层水声波速度计算公式进行扩展。得到计算地层水密度及体积模量的经验公式。

$$\rho_b = \rho_w + 0.668S + 0.44S^2 + 10^{-6}S[300P - 2400PS + T(80 + 3T - 3300 - 13P + 47PS)] \quad (8)$$

$$K_b = \left[\sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 w_{ij} T^i P^j + S(1170 - 9.6T + 0.055T^2 - 8.5 \times 10^{-5}T^3 + 2.6P - 0.0029TP - 0.0476P^2) + S^{1.5}(780 - 10P + 0.16P^2) - 1820S^2 \right] \cdot \rho_b \quad (9)$$

式中 ρ_b 为地层水密度; K_b 为体积模量; T 和 P 分别为地层温度与压力; S 为地层水矿化度, 10^{-6} ; w_{ij} 为系数常量; ρ_w 为淡水密度。

地层水体积模量与密度主要受地层温度、孔隙压力和地层水矿化度影响。地层水性质与矿化度(或盐浓度)有关。采用上述经验公式,分别计算了不同温度、压力及地层水矿化度条件下,地层水密度与体积模量的变化范围(图2)。

地层水的体积模量与密度随温度和压力的不同,所产生的变化趋势与天然气相仿(图2)。但其取值范围远大于天然气的体积模量和密度。实际地层水总是含有不同程度的盐浓度。地层水矿化度的不同对地层水的体积模量和密度有较大影响,地层水密度随矿化度的增大近似呈线性增加,如图2(b)所示;而模量的变化较为复杂,模量同时受压力和矿化度的综合影响,其变化形态如图2(a)所示。

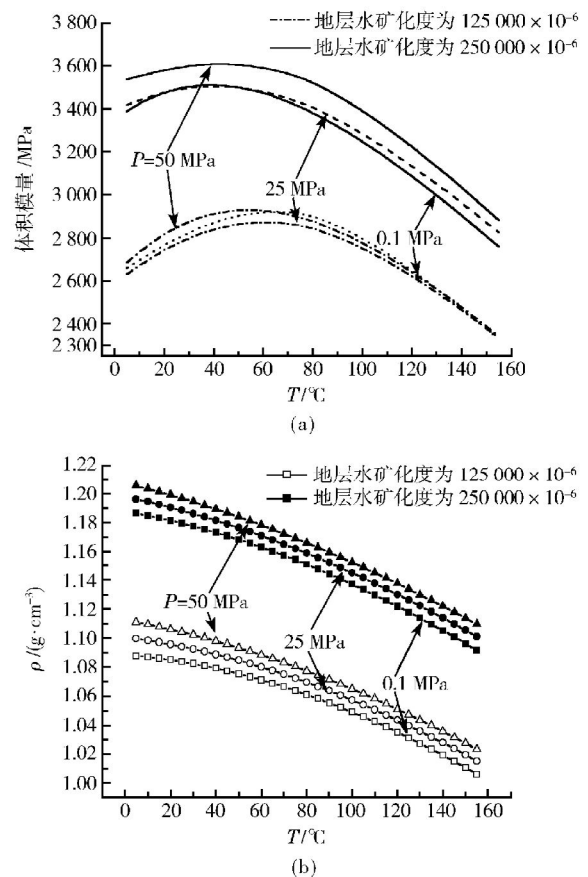


图 2 地层水体积模量 (a) 和密度 (b) 与温度、压力及矿化度关系

Fig. 2 Bulk modulus (a) and density (b) of formation water vs temperature, pressure and salinity

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最高, 含单相流体岩石体积模量与密度的分布特征说明, 随着流体的可压缩性增强, 其体积模量逐渐减小。

2.3 混合流体的体积模量和密度

油、气及水的混合相态在实际油气藏中更为普遍。因此, 研究混合流体相态的物理性质更有应用价值。对于岩石孔隙中混合流体, 当不同单相态流体共存且受力平衡时, 混合流体的密度可根据各相态流体的算术平均进行计算, 即

$$\rho_f = \sum_i V_i \rho_i \quad (10)$$

混合流体体积模量可采用悬浮状态的 Ruess 模型或 Wood 公式计算, 即

$$\frac{1}{K_f} = \sum_i \frac{V_i}{K_i} \quad (11)$$

根据天然气与地层水的体积模量与密度变化特征, 结合上述混合流体体积模量与密度计算公式, 分别计算了不同含水饱和度条件下, 气-水混合后体积模量与密度变化特征。计算结果如图 3 所示。

当气-水混合后, 混合流体的体积模量随含水饱和度增加而增大; 混合流体密度随含水饱和度

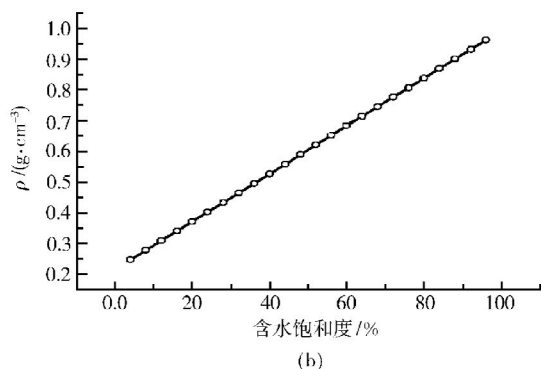
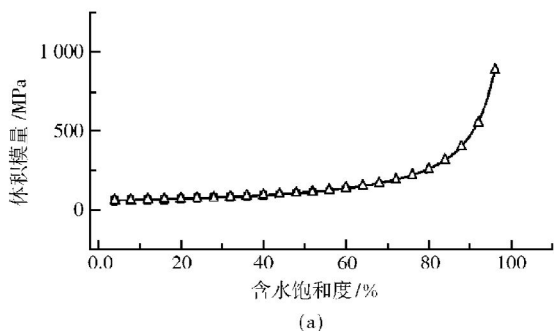


图 3 气-水混合的体积模量 (a) 和密度 (b) 与含水饱和度关系

Fig. 3 Bulk modulus (a) and density (b) of gas-water mixture vs. water saturation

增加近似呈线性增加。根据上述计算结果, 当含水饱和度小于 60%, 混合流体的体积模量变化较缓慢; 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特征, 表明当流体中含有微量的气体后, 混合流体的体积模量将急剧下降, 特别是地层水中少量天然气 (含气量小于 0.1) 的存在将引起体积模量非常大的变化。产生体积模量骤然下降的原因一方面可归因于方程 (11)。因为, 天然气的体积模量通常较低 (如图 1 所示), 当含气饱和度较低时, 混合流体的体积模量实际上由天然气的体积模量所决定; 另一方面, 正如在分析单相流体的可压缩性所述, 气体的可压缩性最大。当其他可压缩性低的流体中加入天然气后, 混合流体的可压缩性便随着含气量的增加迅速增大。

3 地震响应

利用上述不同饱和度条件下气-水混合物体积模量, 采用 Gassmann 方程计算得到不同含水饱和度条件下含气地层体积模量, 结合公式 10 和公式 3 进一步确定含气地层纵、横波速度。计算结果如图 4 所示。

计算含气地层的纵、横波速度时, 假定含气地层的孔隙度、颗粒和骨架弹性不变。因此, 含气地层的纵、横波速度变化特征基本反映了气-水混合流体弹性性质的变化。由图 4 可知, 随含水饱和度的增加, 含气地层纵波速度呈增加趋势, 横波速度略降低。含气地层纵波速度变化规律与气-水混合流体的体积模量变化特征类似, 即当地层水中加入微量气体 (约小于 10% 气体) 将引起地层

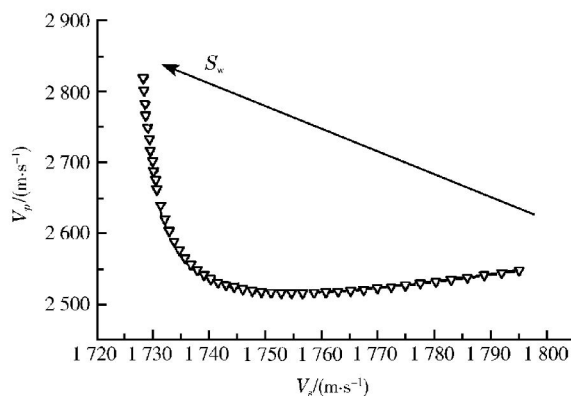


图 4 含气地层的纵、横波速度随含水饱和度不同的变化

Fig. 4 Compressional and shear velocities in gas-bearing strata vary with water saturation

纵波速度急剧下降,当含水饱和度降至 70% 以后,含水饱和度对含气地层纵波速度的影响相对较小。含水饱和度变化不影响含气地层剪切模量,含水饱和度引起横波速度的改变主要是通过改变含气地层体积密度实现的。上述含气地层纵、横波速度变化特征,特别是纵波速度随含气量的增大骤然下降的特征则是振幅随偏移距变化 (AVO) 分析的物理基础。

根据含气地层纵波速度变化规律可知,当含气饱和度较小时,使用纵波速度有利于识别含气地层,当含气饱和度较大时 (如含气饱和度大于 30%), 利用纵波速度差异识别含气地层具有一定困难。综合利用纵、横波速度可区分不同含气饱和度地层。在含气饱和度相对较大地层中,横波速度差异是识别含气地层的一个非常有效的指标。

含气地层的速度差异特征必然引起地震响应的变化。图 5 反映了气-水混合流体随含水饱和度的不同而引起的地层波阻抗变化特征。含气地层波阻抗变化特征实际上反映了含气地层密度对速度变化规律加权的结果。因此,含气地层波阻抗随不同含水饱和度的变化规律与含气地层速度变化规律总体趋势一致,即随含水饱和度的增加,含气地层波阻抗对混合流体中含气饱和度的变化愈敏感。但在含气饱和度较小时,含气地层波阻抗变化相对于速度变化特征而言,变化比较缓慢。

根据图 4 中不同含水饱和度地层速度变化规律,采用物理模拟技术^[12]进行含气层与含水层波场响应正演,结果如图 6 所示。

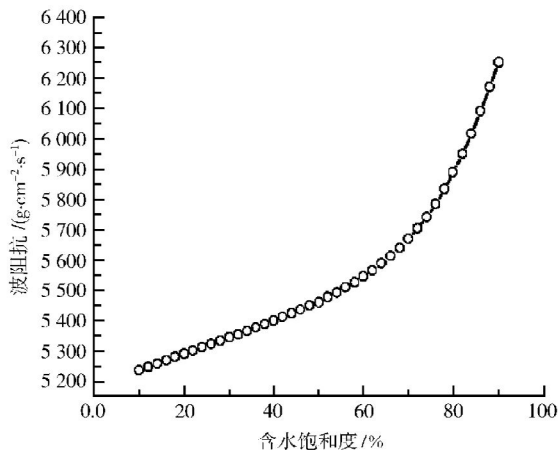


图 5 含气地层的阻抗随含水饱和度不同的变化

Fig. 5 Impedance in gas-bearing strata varies with water saturation

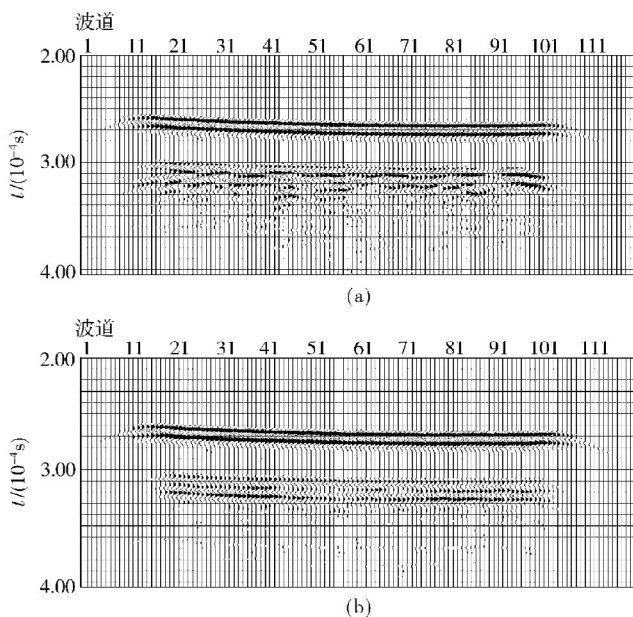


图 6 含气地层 (a) 与含水地层 (b) 地震响应正演记录

Fig. 6 Forward records of seismic responses in gas-bearing strata (a) and water-bearing strata (b)

正演结果表明,含气地层反射能量强、反射界面连续性差,反射振幅在纵横方向变化很大,特别是在横向上,波形散乱不规则,未形成可识辨的反射同相轴 (图 6a); 含水地层反射能量相对较弱,能量变化均匀、横向上波形形态相似且稳定,反射同相轴连续性好 (图 6b)。

含气地层引起的强反射与含气地层可压缩性较大有关。地层孔隙中饱和气体后,气体对骨架影响作用可不计,含气地层的声学性质主要受地层骨架、气体可压缩性、孔隙度大小及温压条件影响。由上述分析可知,对于同一岩石,孔隙中充填天然气或水后,其阻抗差异较大 (图 5)。一般而言,相同埋深的地层,地层速度差异不大。因此,含气地层相比于含其他流体地层往往会形成强反射界面。当含气层孔隙横向分布不均匀时,反射系数在横向上形成强弱间断,在气层位置引起绕射波发育。

因此,对于具有强非均质性或裂隙型天然气藏,绕射波的强弱可能是区别含气、油、水的一个重要地震属性。

4 小结

本文对天然气及地层水物理性质进行了讨论,分析了储层条件天然气及地层水弹性参数变化特征,并采用物理模拟方法研究了含气地层波

场响应特征。通过理论计算与实验分析得到以下初步认识: 同一地层条件下 (温度与压力不变) 相对比重较大的天然气比相对比重轻的天然气具有更高的纵波速度; 含盐水岩石的纵波速度随盐水矿化度的增高而增大; 含单相流体岩石的纵波速度随温度的增大而减小, 随压力 (或深度) 的增大而增大, 流体性质不同对纵波速度影响较大, 而对横波速度影响很小。含气地层具有较强的反射特征, 具有非均质性含气地层其波场响应中绕射波比较发育。

参 考 文 献

- 王者顺, 王尚旭, 唐文榜. 塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及频率差异分析 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 93~96
Wang Zheshun, Wang Shangxu, Tang Wenbang. Seismic response and frequency analysis of cavern-type reservoirs in carbonates in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 93~96
- 徐峰, 杨金华. 轮南地区碳酸盐岩油气藏的地震响应特征 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(3): 228~231
Xu Feng, Yang Jinhua. The characteristics of seismic responses of carbonate reservoir in Lunan area [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(3): 228~231
- 张玉芬, 凌峰, 程冰洁. 井约束地震道反演和多项式拟合的联合应用 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 388~390
Zhang Yufen, Ling Feng, Cheng Bingjie. Application of well log constrained seismic trace inversion combined with polynomial fitting [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 388~390
- King M S, Marsden J R, Dennis J W. Biot dispersion for P- and S-wave velocity in partially and fully saturated sandstone [J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(6): 1075~1089
- Mavko G, Nolen-Hoeksema R. Estimating seismic velocity in partially saturated rocks [J]. Geophysics, 1994, 59(1): 252~258
- Clark V A. The effect of oil under in-situ conditions on the seismic properties of rocks [J]. Geophysics, 1992, 57(7): 894~901
- Batzle M, Wang Z. Seismic properties of pore fluid [J]. Geophysics, 1992, 57(11): 1396~1408
- Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673~685
- Berryman J Milton G. Exact results for generalized Gassmann's equation in composite porous media with two constituents [J]. Geophysics, 1991, 66(12): 1950~1960
- Zarembo V I, Federov M K. Density of sodium chloride solutions in the temperature range 25~350°C at pressures up to 1000 kg/cm² [J]. Journal of Applied Chemistry USSR, 1975, 48: 1949~1953
- Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41~70
- 王尚旭, 狄帮让, 魏建新. 断层物理模型实验及其地震响应特征分析 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(6): 733~735, 744
Wang Shangxu, Di Bangrang, Wei Jianxin. Seismic physical modeling of fault and its analysis [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(6): 733~735, 744

(编辑 李树森)

全国油气资源战略选区早期调查与评价项目顺利开展

在国务院的支持下, 由国家给予财政支持的油气新区新领域的早期评价工作在 2002 年 4 月得以立项。该工作委托国土资源部油气资源战略研究中心负责具体组织工作, 参加单位有中国地质调查局、主要国家石油公司及相关高校。两年多来, 先后开展工作的具体项目为: 1) 松藩—阿坝地区油气资源战略调查及评价; 2) 南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价; 3) 华北前第三系油气资源调查及评价; 4) 西藏地区油气资源前景评价; 5) 东北中、新生代断陷盆地群油气资源调查及评价; 6) 柴达木盆地油气资源潜力评价; 7) 南黄海海域前第三系油气资源前景评价; 8) 中国煤层气开发利用前景研究; 及 9) 山西省沁水县端氏煤层气开发示范工程。

项目经费由最初的每年 1 亿元逐步增加至 2 亿元。随着经费的增加, 经过专家组的筛选, 涉及的地区和领域有可能扩大。在项目执行中强调其基础性、前瞻性和公益性, 其工作的目的之一就是为各公司进一步勘探创造条件。

(张 抗)