

李炳颖, 涂齐催, 刘江, 等. 低渗储层岩石物理建模新方法及其在东海 Z 气田中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 59-67.

LI Bingying, TU Qicui, LIU Jiang, et al. A new method of rock physics modeling and its application in low permeability reservoirs of Z Gas-field, East Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 59-67.

低渗储层岩石物理建模新方法及其在东海 Z 气田中的应用

李炳颖¹, 涂齐催¹, 刘江¹, 姜敏^{1*}, 张佳佳², 黄鑫¹, 王腊梅¹

(1 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘要:低渗储层孔隙结构复杂, 非均质性强, 不同类型低渗储层之间也常存在较大物性变化, 难以采用统一的岩石物理模型表征储层参数与弹性参数之间的关系。针对上述难题, 提出了低渗储层分层岩石物理建模方法: 针对中低孔-中低渗储层采用基于 DEM 理论的流体均匀饱和模型; 针对特低孔、特低渗储层采用基于 KT 理论的流体非均匀饱和模型。基于分层岩石物理建模预测的纵、横波速度与测井真实速度吻合较好, 验证了该方法的可靠性。在建立准确岩石物理模型的基础上, 进一步分析了弹性参数受泥质含量、孔隙度、孔隙形状等因素影响的变化规律, 从而指导低渗储层的岩性及“甜点”预测。

关键词:低渗储层; 孔隙结构; 岩石物理建模; 弹性参数; 体积模量; 剪切模量

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.009

0 引言

地震岩石物理学是研究储层储集、流体参数(孔隙度、饱和度、泥质含量等)与地震弹性参数(纵、横波速度等)响应关系的一门学科^[1-5]。地震岩石物理研究是地震响应与储层参数之间的桥梁^[6-8], 为储层预测方法优选提供依据^[9-11]。合适的岩石物理模型不仅可以为地震正反演提供基础, 同时能降低地震解释的风险。针对低渗储层的研究, 岩石物理研究更是“甜点”储层预测的关键^[12-14]。地震岩石物理建模是地震岩石物理研究的重要内容之一, 本质上是为模拟实际岩石弹性模量提供一个等效的介

质模型。通常采用的方法是将岩层简化为具有固体状态与流体状态的双相介质^[15]。流体会与固体产生相互作用从而弱化岩石力学属性。因此, 基于双相介质理论的岩石物理模型与实际模型更接近, 有利于识别储层和流体。由于不同类型储层的岩石矿物成分、孔隙度、孔隙结构、孔隙流体等存在差异, 因此选择正确适用的岩石物理模型显得至关重要。

1 区域地质概况

本文研究目标为东海 Z 气田花港组储层(H1-H6), 目的层埋深 > 3 500 m, 储层整体物性差, 总体属于低渗储层, 但局部发育中高渗“甜点”储层。其中, H1-H3 储层为中低孔、中低渗储层, 孔隙类型主要为原生孔隙, 孔隙度相对较大, 孔隙流体分布相对均匀, H3 层可细分为 H3a、H3b 和 H3c 小层, 其主力气层 H3b 孔隙度为 5%~18.3%, 渗透率为 $(0.2 \sim 261) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; H3b “甜点”储层孔隙度 > 12%, 渗透率 > $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。H4、H5 储层属于特低孔、特低渗储层, 孔隙类型主要为次生孔隙, 孔隙度相对较小, 储层孔隙中流体分布不均匀, H4、H5

收稿日期: 2023-01-09

资助项目: 国家自然科学基金“东海深层低渗-致密气储层体系质量差异性成因机制及演化模式”(41672129、41602135); 中海石油(中国)有限公司重大科技项目“西湖凹陷在生产油气田中后期综合调整关键技术研究与实践”(CNOOC-KJ135ZDXM39SH03)

第一作者: 李炳颖(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田开发地震方面的研究工作。E-mail: liby9@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 姜敏(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震解释和储层方面的研究工作。E-mail: loumin2@cnooc.com.cn

孔隙度为 4.9%~10.9%，渗透率为 $(0.05\sim 3.77)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；H4、H5“甜点”储层孔隙度 $> 8\%$ ，渗透率 $> 1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图 1)。由于研究区储层具有低孔、低渗以及孔隙结构复杂等特性，且不同层段孔隙类型及流体分布特征存在较大差异，常规岩石物理建模过程中往往针对某一储层只构建一个岩石物理模型，而本研究区储层不同层段具有不同的孔隙结

构及流体分布差异，常规的岩石物理建模思路在本工区并不适用。因此，本文提出了对低渗储层分层进行岩石物理建模的技术思路，即针对不同低渗储层层段，建立相应的低渗岩石物理模型；在此基础上进一步开展弹性参数影响因素及变化规律的分析，可用于指导东海地区低渗储层的岩石物理分析、地震反演与储层描述。

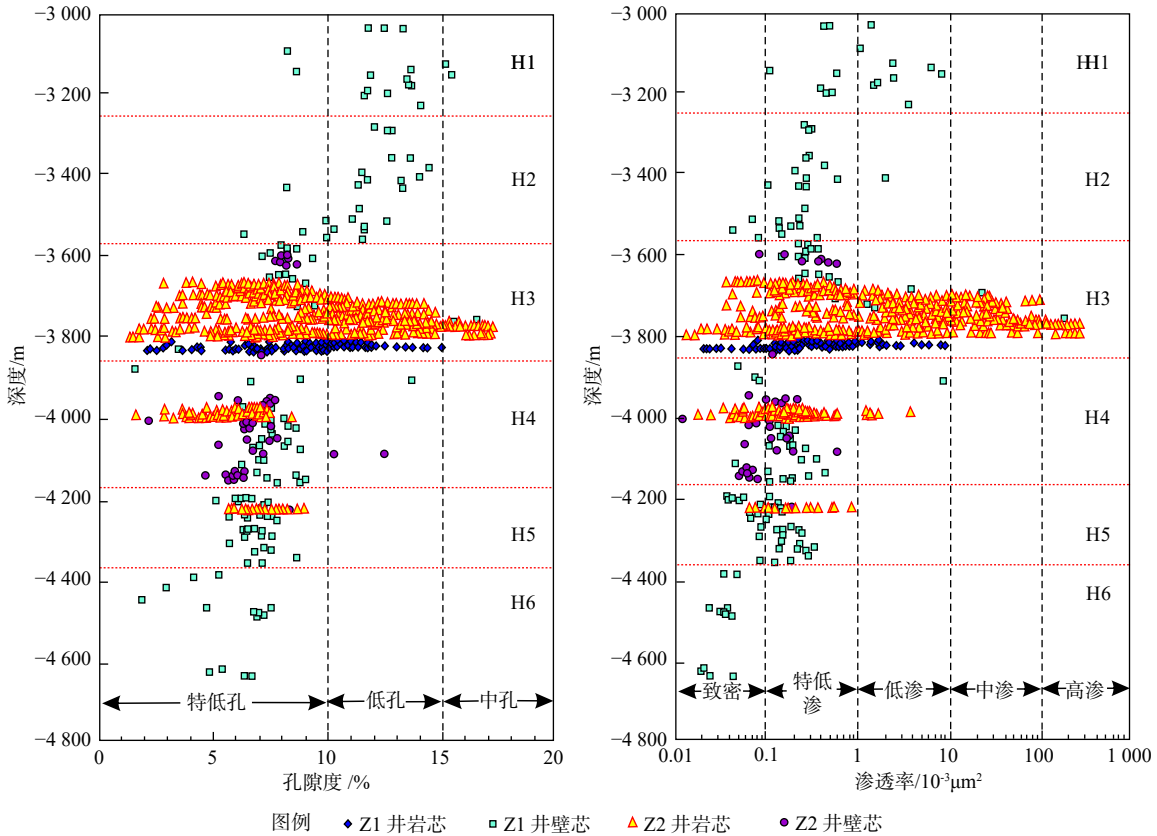


图 1 研究区花港组地层岩芯孔隙度和渗透率分布

Fig.1 The core porosity and permeability distribution of Huagang Formation in the study area

2 分层岩石物理建模技术

根据铸体薄片鉴定、图像分析和扫描电镜资料分析，研究区花港组低渗储层矿物成分主要为刚性颗粒(石英)和塑性颗粒(黏土)，孔隙类型主要为原生孔隙(扁平孔隙)和溶蚀孔隙(较圆孔隙)。H3 低渗储层原生孔隙相对较多，孔隙度较大，孔隙流体分布相对均匀；H4、H5 特低渗储层原生孔隙少，孔隙度小，储层孔隙中流体分布不均匀。H3 与 H4、H5 层的孔隙度、孔隙流体分布都存在明显差异，若采用统一岩石物理模型无法估计各层精确的弹性参数。为此提出了分层岩石物理建模技术，对不同性质的低渗储层建立相应的岩石物理模型，使储层

参数与地震弹性参数之间的响应关系更加准确。岩石物理建模分为 3 步：①计算基质的弹性参数与密度；②采用理论或经验公式计算岩石骨架的弹性参数^[16-20]；③分析流体分布特征及孔隙结构，估算含流体后岩石的弹性参数^[21-23]。图 2 给出了针对研究区低渗储层分层岩石物理建模的技术流程，可以看出，在计算岩石骨架、孔隙流体与饱和岩石方面，H3 层与 H4、H5 层分别采用了不同的计算模型或方程：H3 层岩石物理建模与常规建模思路相似，主要适用于孔隙度相对较大、孔隙内流体分布相对均匀的情况；H4、H5 层的岩石物理建模更多考虑了低孔低渗、复杂孔隙结构以及孔隙内流体分布的不均匀性等情况。

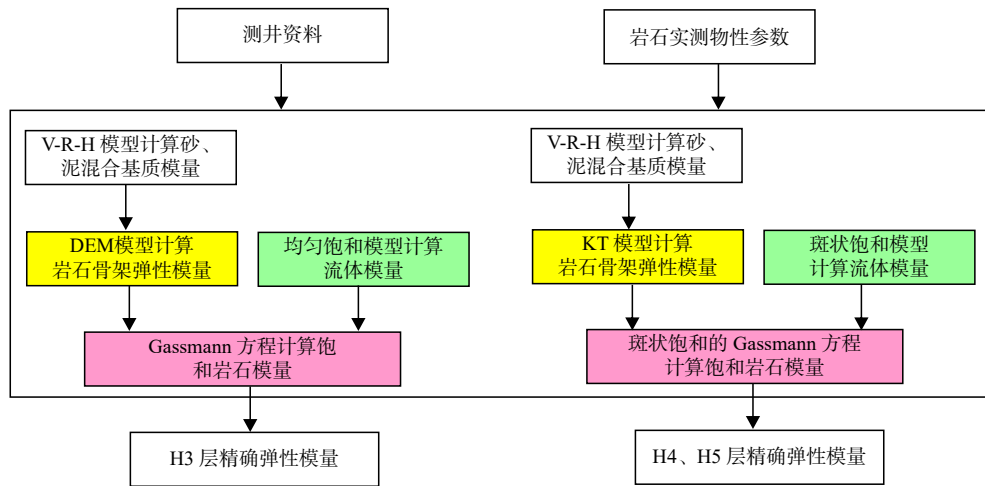


图 2 低渗储层分层岩石物理建模技术流程

Fig.2 Technological flowchart of petrophysical modeling for low permeability reservoir

2.1 岩石基质混合弹性模量计算

Voigt-Recuss-Hill(V-R-H)平均模型是对 Voigt 等应变模型和 Recuss 等应力模型所估算的岩石有效弹性模量的算术平均^[24],该模型比较适合计算矿物成分的有效体积模量及可能的最大上下限,因此,各地层岩石基质的混合矿物弹性模量均采用 V-R-H 模型来计算,公式如下:

$$J_m = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N f_i J_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{J_i}} \right) \quad (1)$$

式中: J_m 为岩石基质的弹性模量;

f_i 与 J_i 分别为第 i 种矿物的体积分数与弹性模量;

N 为矿物的种类。

2.2 针对中低渗储层的岩石物理建模及弹性模量计算

研究区 H3 层为中低孔、中低渗储层,原生孔隙相对较多,孔隙度较大,孔隙流体分布相对均匀,可采用 DEM(Differential Effective Medium)模型计算该层岩石骨架弹性模量,采用均匀饱和模型计算流体弹性模量,最后利用 Gassmann 方程计算饱和岩石弹性模量,进而估算纵、横波速度。

DEM 理论是将包含物相逐渐加入至固体矿物相,进而对双相混合物开展模拟,至岩石的各组成含量均达饱和值为止。该模型适用于孔隙度较高的情况。计算公式如下:

$$(1-y) \frac{d}{dy} [K_{Dry}^*(y)] = (K_i - K_{Dry}^*) P^i(y)$$

$$(1-y) \frac{d}{dy} [\mu_{Dry}^*(y)] = (\mu_i - \mu_{Dry}^*) Q^i(y) \quad (2)$$

初始条件是 $K_{dry}^*(0) = K_m$ 和 $\mu_{dry}^*(0) = \mu_m$ 。

式中: K_{Dry}^* 和 μ_{Dry}^* 分别为干岩石骨架的体积模量和剪切模量;

K_m 和 μ_m 分别为岩石基质的体积模量和剪切模量;

i 为不同纵横比的孔隙, K_i 和 μ_i 分别为第 i 种孔隙的体积模量和剪切模量;

P^i 和 Q^i 为极化因子,描述了在等效介质 K_{Dry}^* 和 μ_{Dry}^* 中加入第 i 种孔隙之后的效果,考虑了包含物(孔隙)之间的相互作用。

流体弹性模量(K_f)计算采用均匀饱和模型计算,该模型对于孔隙流体分布相对均匀的中低孔、中低渗储层是适用的。计算公式如下:

$$K_f = \left(\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{K_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: K_i 、 S_i 分别为不同流体的体积模量及饱和度。

在求取岩石骨架和流体弹性模量后,利用 Gassmann 公式完成 H3 层中低渗层饱和岩石弹性模量(K_{sat})的计算:

$$K_{sat} = K_{Dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{Dry}}{K_m}\right)^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1-\varphi}{K_m} - \frac{K_{Dry}}{K_m^2}} \quad (4)$$

式中: K_{sat} 、 K_{Dry} 、 K_m 、 K_f 分别为饱和岩石、干岩石骨架、岩石基质和孔隙流体的体积模量, φ 为孔隙度。

最后利用速度公式计算饱和流体状态下的岩石纵波速度 V_p 和横波速度 V_s :

$$V_P = \sqrt{\frac{\left(K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu\right)}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (5)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (6)$$

式中: V_P 、 V_S 和 ρ 分别为饱和岩石的纵波速度、横

波速度和密度;

K_{sat} 和 μ 分别为饱和岩石的体积模量和剪切模量。

基于上述岩石物理模型重构 H3 层纵波速度和横波速度如图 3 所示, 图中蓝线代表测量值, 红线代表预测值, 可以看到预测的纵、横波速度与测井真实值之间吻合较好, 验证了中低渗储层岩石物理模型的可靠性。

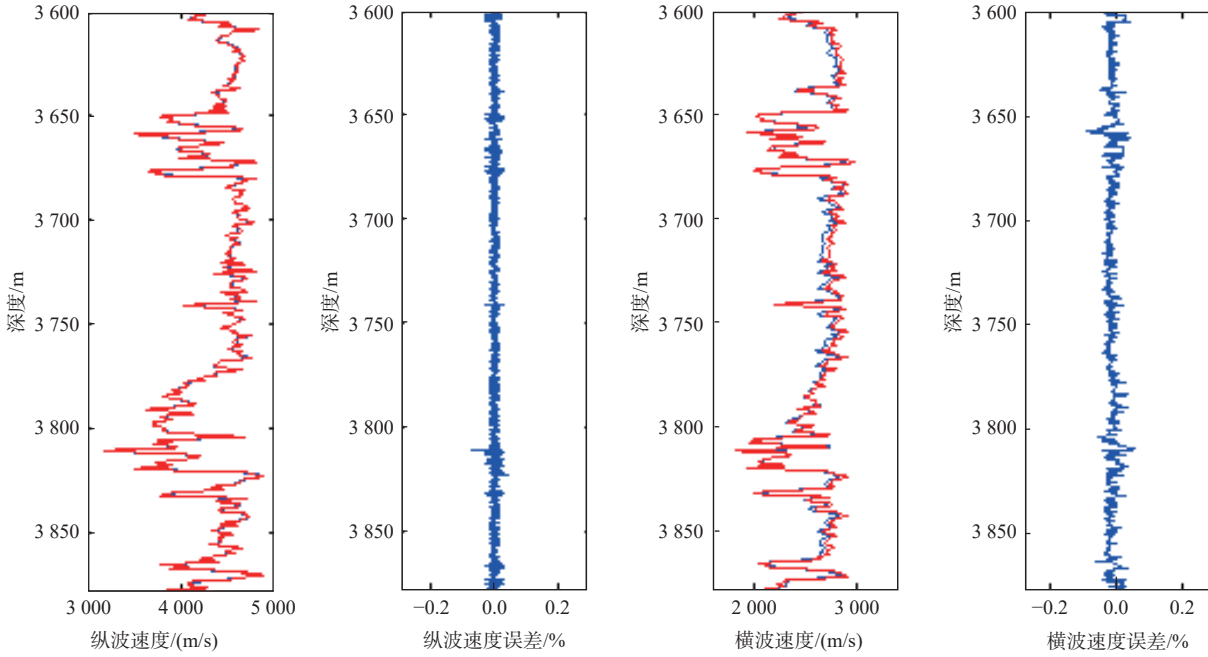


图 3 研究区 H3 层纵、横波速度重构结果

Fig.3 Reconstruction results of P- and S-wave velocities of H3 layer in the study area

2.3 特低渗储层的岩石物理建模及弹性模量计算

研究区 H4、H5 层为特低孔、特低渗储层, 原生孔隙少, 孔隙度小, 储层孔隙中流体分布不均匀。可采用 KT(Kuster-Toksöz)模型计算该层岩石骨架弹性模量, 采用斑块饱和模型计算流体弹性模量, 最后利用斑块饱和 Gassmann 方程计算饱和岩石弹性模量并估算纵横波速度。

KT 模型将不同纵横比的孔隙加进岩石基质, 满足低孔隙度限制, 同时可以考虑孔隙之间的相互作用, 更适用于低孔隙岩石。计算公式如下:

$$\begin{aligned} (K_{\text{Dry}}^* - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_{\text{Dry}}^* + \frac{4}{3}\mu_m} &= \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) \\ P^i (\mu_{\text{Dry}}^* - \mu_m) \frac{\mu_m + \frac{4}{3}\xi_m}{\mu_{\text{Dry}}^* + \frac{4}{3}\xi_m} &= \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^i \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\xi_m = \frac{\mu_m}{6} \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m}$$

流体弹性模量 (K_f) 计算采用斑块状饱和模型, 该模型将不均匀分布的各相流体单独处理, 其岩石等效模量为单独各相流体成“斑块”状时对应的等效平均岩石模量, 对于流体分布不均匀的特低渗储层更为适用。计算公式如下:

$$K_f = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N S_i K_i + 1 \left/ \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{K_i} \right. \right) \quad (8)$$

H4、H5 特低渗层饱和岩石弹性模量则利用斑块饱和 Gassmann 方程来计算:

$$K_{\text{sat}} = \sum_{i=o,w,g} \left(\frac{S_i}{K_{\text{sat},i} + \frac{4}{3}\mu_i} \right)^{-1} - \frac{4}{3}\mu_i, \mu = \mu_i \quad (9)$$

式中: i 为不均匀分布的各相流体 (o 为油层、w 为气层、a 为水层)。

最后, 利用公式 5 和公式 6 重构 H4、H5 层饱和流体状态下的岩石纵、横波速度。如图 4 所示, 图中蓝线代表测量值, 红线代表预测值, 可以看到,

预测的纵、横波速度与测井真实值之间吻合较好, 验证了特低渗储层岩石物理模型的可靠性。

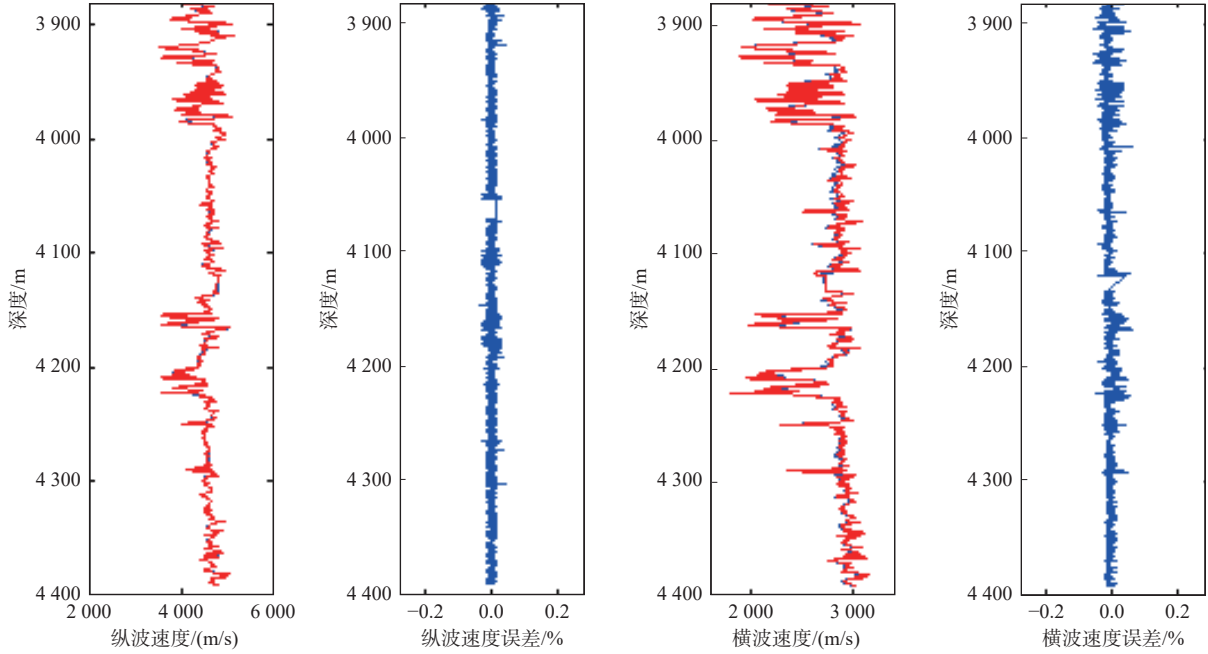


图 4 研究区 H4、H5 层纵、横波速度重构结果

Fig.4 Reconstruction results of P- and S-wave velocities of H4 and H5 layer in the study area

3 弹性参数的影响因素及变化规律

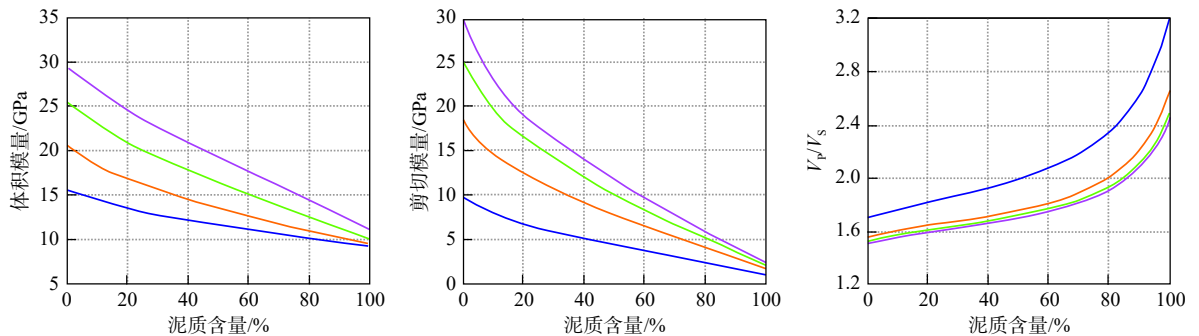
基于上述分层岩石物理建模技术建立的岩石物理模型, 可进一步计算得到各弹性模量以及弹性模量受储层物性参数(泥质含量、孔隙度、孔隙形状、饱和度等)影响的变化规律量版图。本文重点分析体积模量与剪切模量受泥质含量、孔隙度及孔隙形状影响的变化规律情况。

质含量对弹性模量及速度的影响时, 其余参数均假设为固定值, 模型假设岩石基质由较为坚硬(速度较快)的砂质矿物与较软(速度较慢)的黏土矿物组成, 泥质含量由 0 到 1 变化。图 5 显示了饱和岩石的体积模量、剪切模量、纵横波速度比随泥质含量和孔隙纵横比 α 的变化曲线, 图中每条曲线的孔隙纵横比 α 值是固定的, 不同曲线的 α 值介于 0.05~0.5。

3.1 弹性参数随泥质含量的变化规律

由图 5 可知, 在低渗储层岩石物理模型中, 当其他因素不变时, 泥质含量对饱和岩石弹性模量的影响非常显著: 随着泥质含量的不断增加, 岩石的体积模量和剪切模量均不断减小。岩石的实际纵、横波速度同时也会减小; 同时随着泥质含量的增加,

泥质含量是岩石速度的重要影响因素, 分析泥



图例 — $\alpha=0.05$ — $\alpha=0.1$ — $\alpha=0.2$ — $\alpha=0.5$

图 5 泥质含量对岩石体积模量、剪切模量及纵、横波速度比的影响

Fig.5 Effect of mud content on volume modulus, shear modulus, and velocity ratio of rock

岩石的 V_p/V_s 值逐渐增大, 泥岩的 V_p/V_s 值一般总大于砂岩, 这与实际测井岩石物理分析一致(图 6), 因此, 利用 V_p/V_s 值可以区别岩性。砂岩 V_p/V_s 值多 < 1.75 , 泥岩 V_p/V_s 值 > 1.75 。

3.2 弹性参数随孔隙度的变化规律

分析孔隙度对弹性模量及速度影响时, 其余参数均假设为固定值。模型假设孔隙度在 $0 \sim 0.2$ 间变化。图 7a 表示某井 H3 储层孔隙度对体积和剪切模量的影响, 图 7b 表示某井 H4、H5 储层孔隙度对体积和剪切模量的影响。不同颜色曲线由上至下表示孔隙纵横比逐渐减小, 其中蓝色的点表示某井相应储层段的非“甜点”的实际测井数据, 红色的点表示相应储层段的“甜点”的实际测井数据。孔隙度与体积模量和剪切模量成负相关。随着孔隙度不断增大, 体积模量和剪切模量均不断减小。根据图版上的实际测井数据分布, “甜点”孔隙度值整体相对较大, 体积模量与剪切模量

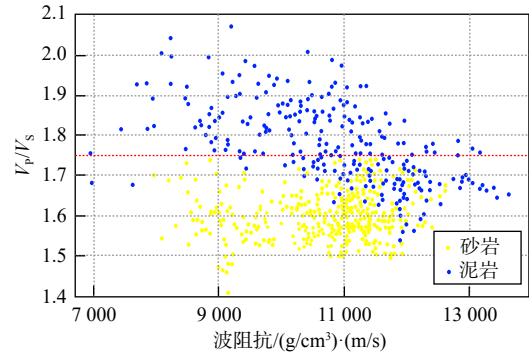
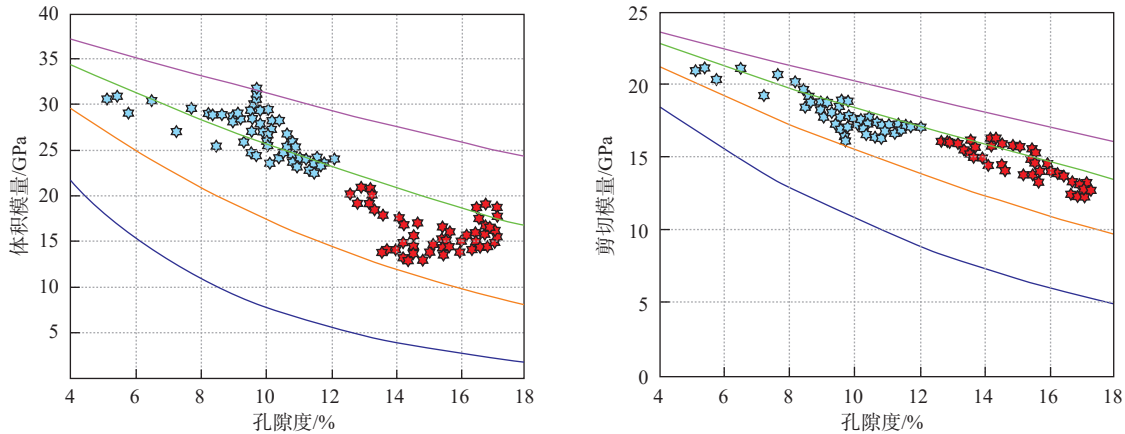
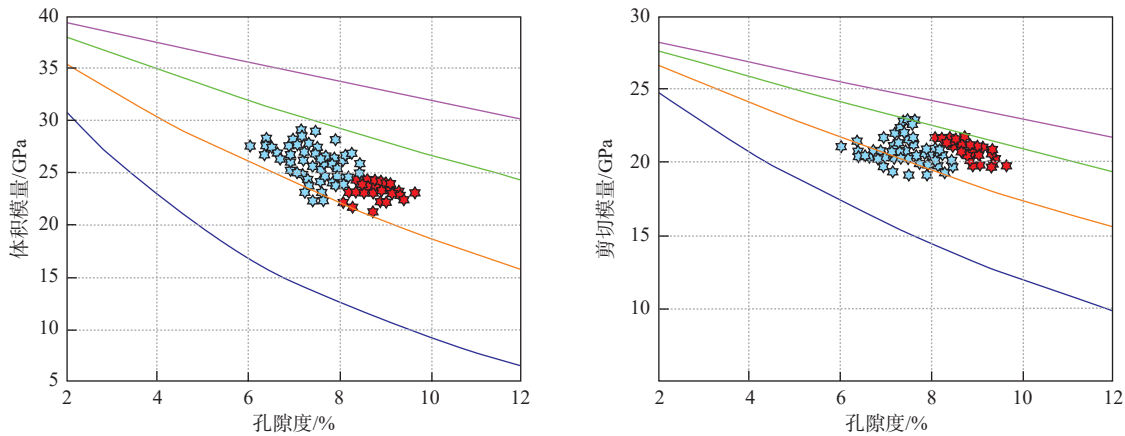


图 6 纵波阻抗与纵、横波速度比的测井岩石物理交汇
Fig.6 Logging petrophysical crossplot of P-wave impedance and P-wave velocity ratio

相对较小; H3 层“甜点”与非“甜点”在图版上较易区分; H4、H5 层的“甜点”与非“甜点”在图版上出现重叠。因此, 基于弹性模量对中低孔-中低渗的 H3 层开展“甜点”预测与识别是可行的, 而对特低孔-特低渗的 H4、H5 层难度较大。



(a) H3 层孔隙度对体积模量和剪切模量的影响



(b) H4、H5 层孔隙度对体积模量和剪切模量的影响

图例 — $\alpha=0.05$ — $\alpha=0.1$ — $\alpha=0.2$ — $\alpha=0.5$ ★ 甜点 ☆ 非甜点

图 7 孔隙度对岩石体积模量和剪切模量的影响

Fig.7 Effect of porosity on volume modulus and shear modulus of rock

3.3 弹性参数随孔隙形状的变化规律

图 5 和图 7 中每条曲线的 α 值为孔隙纵横比, 可定量表征孔隙形状, 小的 α 值代表扁平孔, 大的 α 值代表较圆孔。由图 5、图 7 可知, 在泥质含量、孔隙度以及其余因素不变时, 随着孔隙形状即孔隙纵横比变大, 岩石的体积模量与剪切模量相应变大; 而 V_p/V_s 值随孔隙纵横比变大而减小, 在孔隙纵横比 >0.1 以后, V_p/V_s 值变化不大。因此, 孔隙形状也是影响岩石弹性参数变化的一个非常重要的因素, 值得进一步开展研究。

4 基于弹性参数反演的岩性及“甜点”预测

明确了低渗储层弹性参数受储层物性参数影响的变化规律, 从而可进一步指导低渗储层的岩性

和“甜点”预测。由前述分析可知, 研究区纵横波速度比 V_p/V_s 能较好地地区分砂泥岩; 弹性模量(体积模量、剪切模量)能较好地识别 H3 低渗层“甜点”, 而 H4、H5 特低渗层“甜点”难以识别。因此, 针对研究区 H3—H5 层开展叠前 V_p/V_s 反演进行岩性预测(图 8), 针对 H3 层开展叠前剪切模量反演进行“甜点”预测(图 9)。反演结果与井上岩性及“甜点”吻合度高, 开发井实钻“甜点”与预测结果吻合度达 80% 以上, 证实了弹性参数规律认识的准确性和反演结果的可靠性。

5 结论

(1) 针对研究区中低渗储层 H3 层与特低渗储层 H4、H5 层在孔隙物性及流体分布等方面存在的差异性, 提出了分层进行岩石物理建模的技术思路, 建立了各层可靠的岩石物理模型。

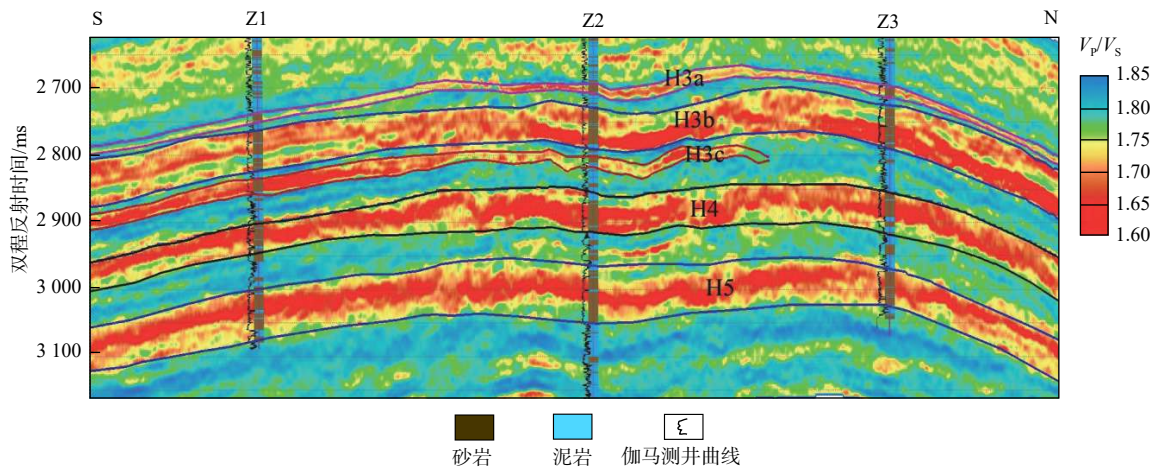


图 8 研究区 H3—H5 层基于 V_p/V_s 反演的岩性预测剖面

Fig.8 Lithology prediction profile of H3-H5 layers based on V_p/V_s inversion in the study area

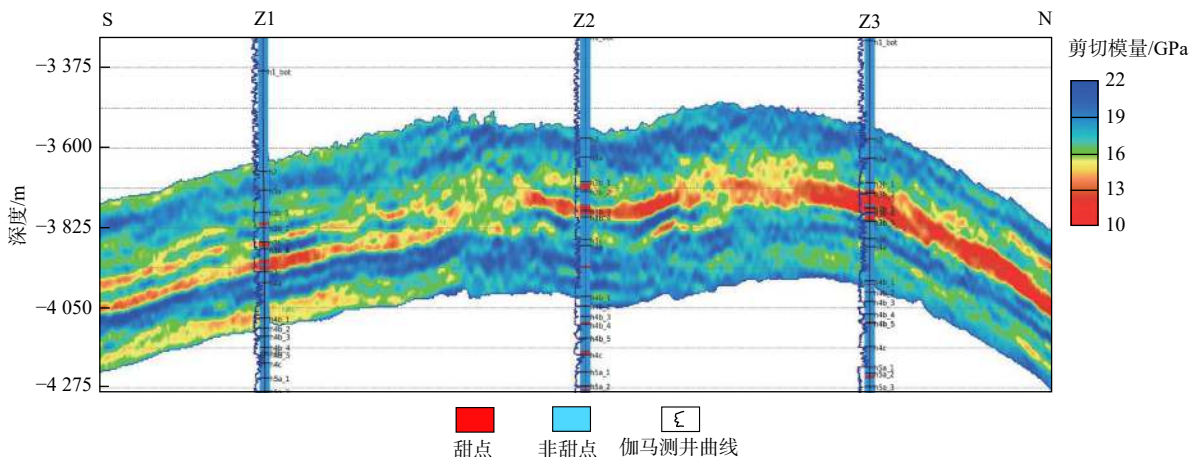


图 9 研究区 H3 层基于剪切模量反演的“甜点”预测剖面

Fig.9 "Sweet spot" prediction profile based on shear modulus inversion in H3 layer in the study area

(2)在上述基础上,分析了泥质含量、孔隙度及孔隙形状等因素对弹性参数的影响及变化规律:岩石中泥质含量与孔隙度增加都会导致体积模量与剪切模量减小(速度会相应减小),纵、横波速度比对泥质含量敏感,是开展岩性预测的有效参数;孔隙形状是影响岩石弹性参数变化的潜在因素之一,随着孔隙纵横比变大,岩石体积模量与剪切模量相应增大;体积模量与剪切模量能有效识别中低孔、中低渗储层中的“甜点”,但随着埋深加大,岩性更加致密,开展“甜点”预测的难度会越来越大,特低渗和致密层中的“甜点”则难以识别。

(3)本文方法及规律认识对于东海低渗油气储层的岩性和“甜点”预测有一定指导意义,可在勘探开发中进一步深化研究、推广和验证,寻求有效预测特低渗和致密储层中“甜点”的方法。

参考文献:

- [1] 欧阳健. 加强岩石物理研究提高油气勘探效益[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 1-5.
- [2] 马淑芳, 韩大匡, 甘利灯, 等. 地震岩石物理模型综述[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 460-471.
- [3] BATZLE M, WANG Z. Seismic properties of pore fluids[J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 1396-1468.
- [4] 印兴耀, 刘欣欣. 储层地震岩石物理建模研究现状与进展[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 309-325.
- [5] 姜仁, 曾庆才, 黄家强, 等. 岩石物理分析在叠前储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 322-328.
- [6] 刘军, 刘杰, 曹均, 等. 基于岩石物理实验的储层与孔隙流体敏感参数特征: 以珠江口盆地东部中-深层碎屑岩储层为例[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 197-205.
- [7] 张益明, 秦小英, 郭智奇, 等. 针对致密砂岩气储层复杂孔隙结构的岩石物理模型及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 927-939.
- [8] 王震宇, 刘俊州. 岩石物理建模技术在致密砂岩储层预测中的应用: 以鄂尔多斯盆地北部H区块为例[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(1): 34-40.
- [9] 陈昌. 叠前地震反演在清水地区砂砾岩优质储层预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(6): 59-64.
- [10] 肖张波, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 泊松阻抗属性在陆丰南古近系低渗砂岩储层“甜点”识别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 70-77.
- [11] 姜雨, 涂齐催. 利用岩石物理分析及叠前反演技术解决致密砂岩气储层预测问题: 以西湖凹陷A区块为例[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(11): 36-42.
- [12] 印兴耀, 刘倩. 致密储层各向异性地震岩石物理建模及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 52-58.
- [13] 张龙海, 刘忠华, 周灿灿, 等. 低孔低渗储集层岩石物理分类方法的讨论[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 763-768.
- [14] 李芳, 邓勇, 胡林, 等. 地球物理技术预测莺歌海盆地低孔低渗储层孔隙度[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 84-90.
- [15] 杨志芳, 曹宏, 姚逢昌, 等. 复杂孔隙结构储层地震岩石物理分析及应用[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 50-56.
- [16] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168-191.
- [17] XU S, WHITE R. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. *Geophysical prospecting*, 1995, 43(1): 91-118.
- [18] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [19] KUSTER G T, TOKSÖZ M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: part I. theoretical formulations[J]. *Geophysics*, 1974, 39(5): 587-606.
- [20] BERRYMAN J G. Long - wavelength propagation in composite elastic media I. spherical inclusions[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68: 1809-1819.
- [21] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673-685.
- [22] CIZ R, SHAPIRO S A. Generalization of Gassmann's equations for porous media saturated with a solid material[J]. *Geophysics*, 2007, 72(6): 75-79.
- [23] 印兴耀, 刘欣欣, 曹丹平. 基于Biot相洽理论的致密砂岩弹性参数计算方法[J]. 石油物探, 2013, 52(5): 445-451.
- [24] HILL R. The elastic behavior of crystalline aggregate[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1952, 65: 349-354.

A new method of rock physics modeling and its application in low permeability reservoirs of Z Gasfield, East Sea Basin

LI Bingying¹, TU Qicui¹, LIU Jiang¹, LOU Min^{1*}, ZHANG Jiajia², HUANG Xin¹, WANG Lamei¹

(1 Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China;

2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Low-permeability reservoirs have complex pore structure characteristics for which conventional petrophysical modeling methods are not suitable for detection. In addition, physical properties among different layers of low-permeability reservoirs vary considerably, so it is difficult to use unified petrophysical model to characterize the relationship between reservoir parameters and elastic parameters. We proposed a new technical approach to stratified rock physics modeling of low permeability reservoirs: for medium-low porosity and medium-low permeability reservoirs, the fluid uniform saturation model based on DEM theory was adopted; for extra-low porosity and extra-low permeability reservoirs, the fluid non-uniform saturation model based on KT theory was adopted. The predicted P-wave and S-wave velocities based on stratified rock physical modeling were in good agreement with the real logging data, which verified the reliability of the method. Based on the accurate petrophysical models, the laws of elastic parameters variations with shale content, porosity, and pore shape were further analyzed, to guide the prediction of lithology and "sweet spot" in low permeability reservoir.

Key words: low permeability reservoir; pore structure; rock physics modeling; elastic parameter; bulk modulus; shear modulus