

# 地震岩石物理建模技术 在迪北阿合组致密砂岩气中的应用

陈强<sup>1</sup>, 彭盛强<sup>2</sup>, 赵光亮<sup>1</sup>, 皮学军<sup>2</sup>, 谭杨<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>

(1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院地球物理所, 库尔勒 841000;

2. 北京奥意尔信息技术有限公司, 北京 100000)

**摘要:** 塔里木盆地库车坳陷迪北地区侏罗系阿合组低孔低渗砂岩是迪北气田的主要储集层, 石油地质条件优越, 已有多口井的油气发现。由于本区阿合组砂岩裂缝较发育, 储层孔隙结构复杂, 孔速关系不单一, 常规的单一砂岩孔隙结构的 Xu-White 岩石物理建模预测的横波精度较低。针对这一问题, 笔者提出了砂岩变孔隙结构的 Xu-white 岩石物理建模方法, 首先基于微分有效介质模型, 对砂岩孔隙宽长比进行了正演模拟, 建立了模拟结果与孔隙度的拟合关系得到砂岩孔隙结构曲线; 然后利用砂岩变孔隙结构 Xu-White 岩石物理模型对阿合组地层进行弹性曲线正演, 对比单一砂岩孔隙结构的正演结果, 其模型预测精度有所改善; 最后基于建模后测井曲线和岩石物理解释图版对阿合组致密气层进行了识别, 建模后气层的弹性响应特征更明显, 泊松比明显小于 0.18, 体积模量小于  $3.0 \times 10^4$  MPa, 同时建立了阿合组地震岩石物理图版, 考察不同“干”岩石骨架下, 不同流体饱和度条件下地层弹性响应的变化规律, 基本框定了气层的弹性响应窗口, 这为后续的地震储层和流体定量预测提供了可靠的理论依据。

**关键词:** 迪北斜坡带; 致密砂岩气; 孔隙结构预测; 地震岩石物理; 气层识别

**中图分类号:** P618.13

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.08

## 0 引言

随着能源需求量的日益增大, 致密砂岩油气作为非常规油气的重要组成部分, 其勘探与开发受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。塔里木盆地迪北斜坡带侏罗系阿合组普遍发育致密砂岩气藏, 砂体发育但非均质性很强, 储层具有低孔低渗, 孔隙结构复杂等特点。由于本区井眼条件影响和泥浆性能的变化, 导致该区原始测井资料普遍较差, 使得地震岩石物理规律不明朗, 储层流体识别和预测难度较大。

地震岩石物理学是研究与地震特性有关的岩石物理性质以及这些物理性质与地震响应之间关系的

一门科学, 在地震数据与油气特征和储集参数之间架起沟通的桥梁<sup>[2]</sup>, 利用地震岩石物理可以快速实现工区内有横波井和无横波井的弹性曲线的正演, 为后续 AVO 响应分析及道集正演质控等提供准确客观的弹性曲线<sup>[3]</sup>。关于致密砂岩储层的地震岩石物理模型, 前人做了一些研究, 2010 年 Ruiz 和 Chen<sup>[4]</sup>在致密砂岩建模中引入了不同纵横比的硬孔隙和软孔隙来描述孔隙结构。2015 年边婧等<sup>[5]</sup>采用面向储层预测的测井数据评价、岩石物理扰动模拟和地震数据刻度技术, 分析了松辽盆地致密砂岩储层的岩石物理规律。2020 年 Wang<sup>[6]</sup>基于地震岩石物理模型, 考虑致密砂岩孔隙结构, 反演了储层参数。此外, 基于岩石物理模板的定量地震解释

收稿日期: 2023-02-21

第一作者: 陈强(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震岩石物理及油气藏开发研究等工作, E-mail: chqiang-tlm@petrochina.com.cn。

方法在储层属性和地震数据之间建立了联系,得到广泛应用<sup>[7]</sup>。2014年杨志芳等<sup>[8]</sup>应用修正的White模型建立含气饱和度定量预测模板,并应用于致密砂岩气储层含气饱和度的定量地震预测。2021年Ruan<sup>[9]</sup>利用泊松比与纵波阻抗建立地震岩石物理模板。2021年Cheng<sup>[10]</sup>等基于频散和衰减的频率依赖性,利用三维地震岩石物理模板预测了微观孔隙结构。

笔者针对阿合组致密砂岩气储层低孔低渗、孔隙结构复杂等特点,利用微分有效介质模型对砂岩孔隙结构进行了正演模拟,分析了不同孔隙度和孔隙结构条件下实测速度与正演速度的对比,以此为基础建立了砂岩孔隙结构模拟结果与孔隙度的正相关关系计算得到砂岩孔隙结构曲线;利用砂岩变孔隙结构的Xu-White地震岩石物理建模技术对本区阿合组致密

砂岩气地层弹性属性进行预测;最后利用建模后的弹性参数进行了单井气层的识别,并结合地震岩石物理解释图版确定了气层的弹性响应变化窗口。

## 1 阿合组致密砂岩储层特征

本区阿合组地层在纵向上自上而下可划分为四个岩性段,分别为砂砾岩夹泥岩段、上砂砾岩段、泥岩段和下砂砾岩段。由岩石薄片资料分析可知,本区阿合组发育主要的岩石类型包括泥岩、岩屑砂岩和砂砾岩类,以粗粒为主(图1(a))。据全岩X衍射资料,结合QFR鉴定图版,本区阿合组储层岩石类型主要为岩屑砂岩(图1(b)),石英含量大概在27%~52%,岩屑含量在32%~53%,长石含量较低,在6%~35%。

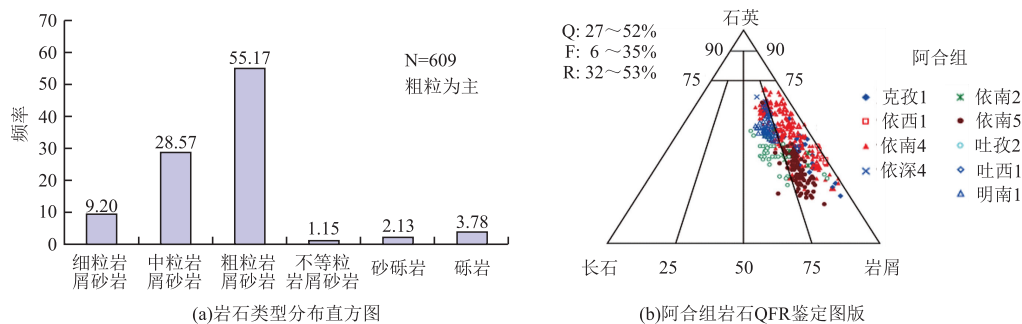


图1 阿合组储层岩石类型分布图

Fig. 1 Distribution of rock types in the Ahe formation

阿合组储层颗粒压实紧密,非均质性强烈,孔隙大小不均,通过统计本区5口井物性,其孔隙度为4%~12%,主峰值为8%,渗透率为0.1 mD~1 000 mD,主峰值为1 mD(图2(a)和图2(b))。综合岩心、薄片和扫描电镜分析资料发现,储层孔隙主要有溶蚀孔(胶结物溶蚀和颗粒溶蚀)、残余粒间孔,微裂缝和微孔隙均发育(图2(c)和图2(d)),其在储层的连通性上发挥了重要的作用。

由于致密砂岩地层中孔隙结构的复杂性造成阿合组地层孔-速关系比较分散。即使孔隙度相同时,孔隙类型的差异也可以导致纵波速度发生变化。一般来说,粒间溶孔、粒内溶孔和洞穴倾向于圆形,使岩石比颗粒间孔更坚固(更快);另一方面,微孔,如微裂纹,往往是扁平的,使岩石变弱(更慢)。从本区实测纵波速度和总孔隙度交会上可以看出(如图3),实测纵波速度与孔隙度的关系趋势偏离Wyllie

时间平均的趋势,且以孔隙度5%为例,孔隙结构可以造成纵波速度的变化达到了近1 000 m/s,且10%孔隙度以内的大部分井数据在威利趋势线以下,表现为明显的软孔隙的特征。

## 2 阿合组致密砂岩孔隙结构预测

图4显示了该区阿合组致密砂岩孔隙结构预测流程图。在本流程中,将砂岩孔隙形状用椭圆来表示,孔隙坚硬程度取决于椭圆的宽长比,即相当于椭圆短轴与长轴的比。砂岩孔隙结构预测的过程也是岩石物理建模的过程中产生的,其流程主要分为五部分:第一是固体矿物基质的混合,其弹性性质是利用Vogit-Ruess-Hill平均得到的;第二是单相流体性质的预测,是采用Fluids计算,并由气水两相流体混合方程Brie指数方程<sup>[11]</sup>进行混合得到最终混合流体性

质;第三是“干”岩石的计算,选择微分有效介质模型<sup>[12]</sup>,第四是将混合流体依据盖斯曼流体置换方程<sup>[13]</sup>置换到“干”岩石储集空间内得到饱和流体岩石

的弹性属性(密度、纵波速度和横波速度等)。第五是砂岩孔隙结构预测,其通过纵波速度、横波速度和总孔隙度及前述得到的矿物弹性属性等得到。

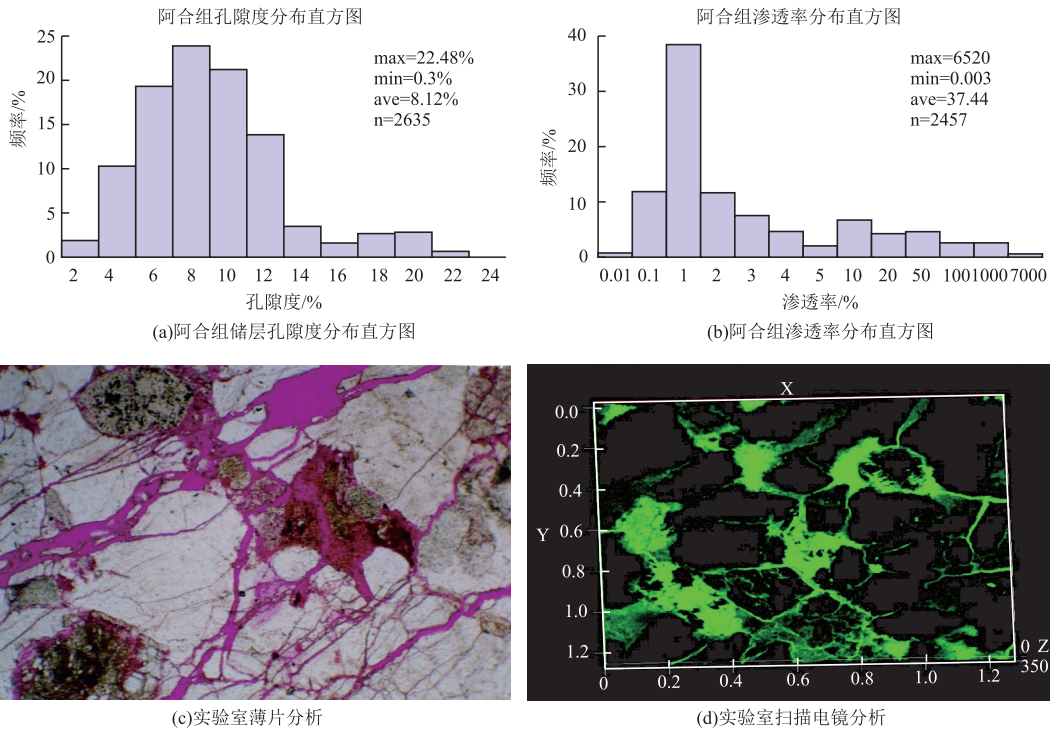


图 2 阿合组储层孔隙度、渗透率分布直方图、实验室薄片和扫描电镜分析

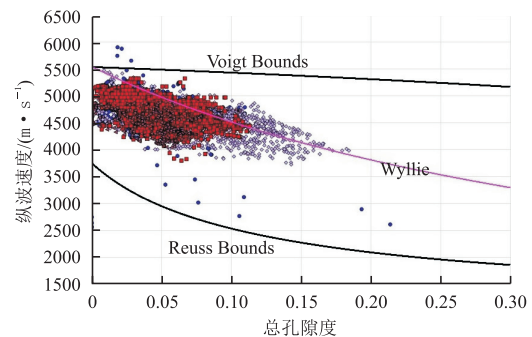
Fig. 2 Histogram of reservoir porosity and permeability distribution in the Ahe Formation are a and b, c and d are sheet rock and scanning electron microscopy, respectively

基于纵波速度、横波速度和测井解释评价的孔隙度,采用微分有效介质模型不断的迭代,可以预测不同孔隙形状下弹性响应的变化。图 5 显示了不同孔隙结构下纵波速度和孔隙度的变化关系,从图版上显示大部分砂岩孔隙形状基本分布在 0.02~0.2 左右;图 6 显示了不同孔隙条件下,砂岩孔隙宽长比分别 0.08、0.15 和 0.2,其模型正演纵波速度与实测纵波速度的对比,分析发现孔隙度越大,宽长比就较大;反之,宽长比越小。于是将预测的砂岩宽长比与孔隙度进行交会分析表明,两者有较好的正相关关系。通过两者的回归关系,就可以得到阿合组地层砂岩段孔隙宽长比曲线。

要远小于孔隙宽长比,因此该方程只在孔隙度很小时适用,为克服这一应用条件的限制, Xu 和 White<sup>[12]</sup>利用差分等效介质理论克服了这种限制, Xu-White 模型建立在双相介质(岩石骨架和孔隙流体)理论的基础上,考虑了孔隙度、泥质含量、孔

### 3 阿合组致密砂岩地震岩石物理模型对比分析

常用横波速度预测方法分为经验模型和理论模型,经验模型预测速度简单,但通常只适合某个区域,推广应用很难,而理论模型虽然比较复杂,但具有普遍性,更适合广泛推广。K-T 方程要求孔隙度



▲ 依南2C: PORT VP:阿合组    ◆ 迪探1: PORT VP:阿合组  
■ 迪北102: PORT VP:阿合组    ● 依南2: PORT VP:阿合组

图 3 阿合组地层实测纵 E 波速度与总孔隙度趋势关系分析  
Fig. 3 Analysis of the relationship between measured P-velocity and total porosity trend in the Ahe Formation

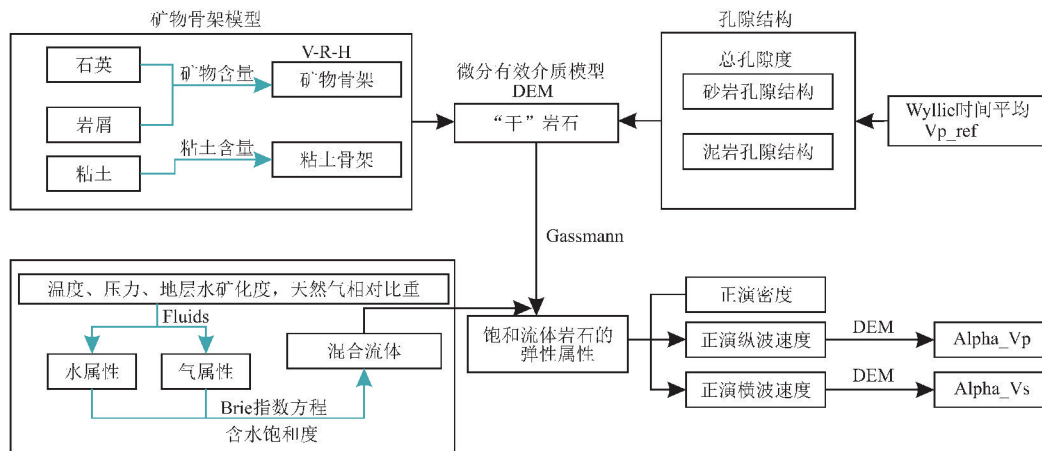


图 4 阿合组致密砂岩孔隙结构预测流程图

Fig. 4 The workflow of the prediction of tight sandstone pore structure in the Ahe Formation

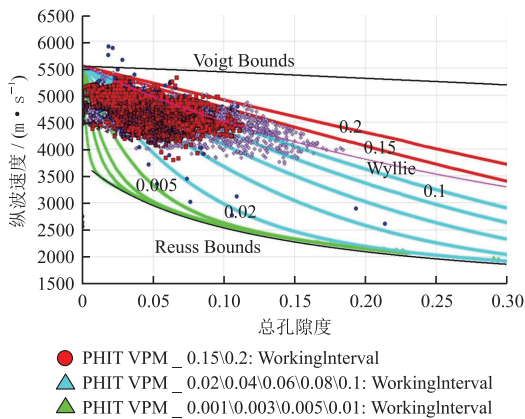


图 5 阿合组地层不同孔隙结构纵波速度和孔隙度关系图版  
Fig. 5 Template of the relationship between P-velocity and porosity in different pore structures in the Ahe Formation

隙形状等对岩石弹性属性的影响。大多数岩石物理模型预测横波的方法假定地下流体的物性参数(速度和密度)不受地层深度的影响,且孔隙形状是恒定的,实际上这并不科学。因为矿物的体积模量和剪切模量随着所处地层深度发生改变,而对于孔隙形状则随颗粒形状、孔隙度等有较大变化<sup>[14]</sup>。

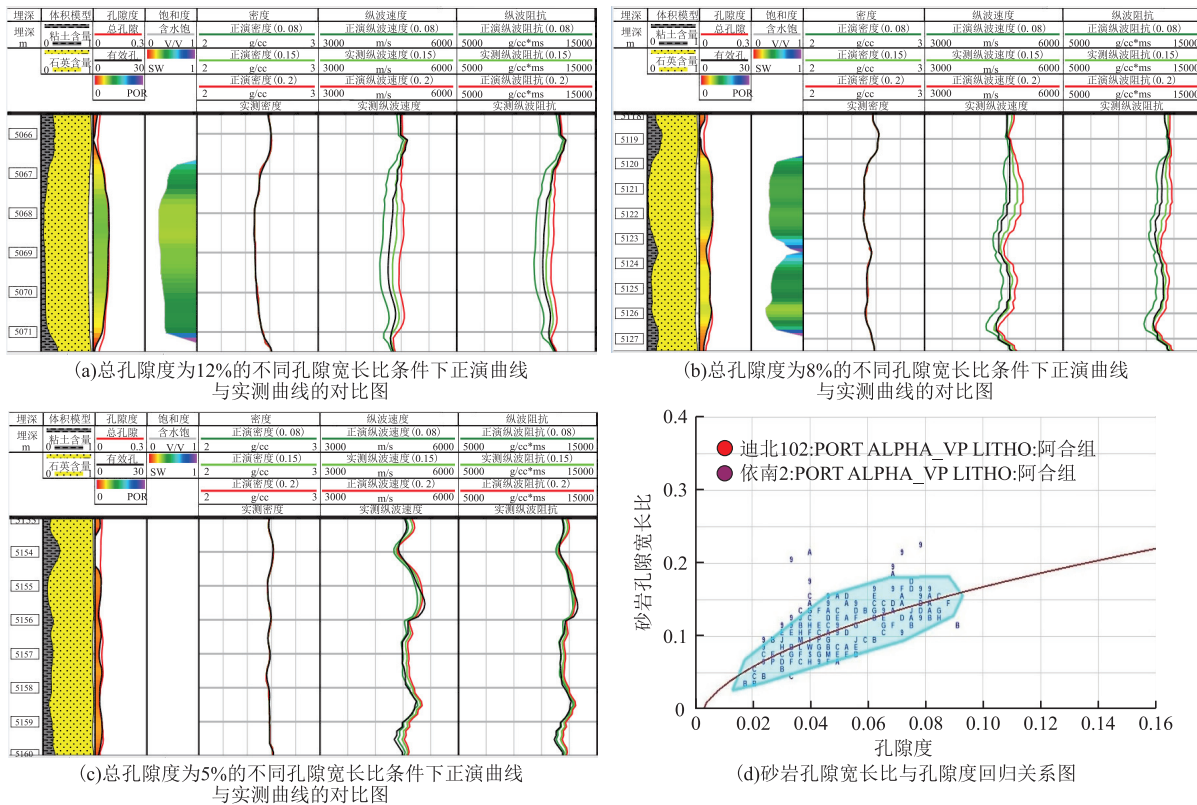
根据前述对阿合组孔一速关系的分析,确定了砂岩孔隙结构不是单一固定值,而是与孔隙度密切相关的变量。下面对比单一砂岩孔隙宽长比和变化的砂岩孔隙宽长比的 Xu-White 横波预测成果(图 7),图 7(a)红色曲线是采用固定孔隙纵横比的 Xu-White 模型预测的横波速度,砂岩孔隙宽长比取为 0.12,泥岩孔隙宽长比为 0.04;图 7(b)红色曲线是

利用前述砂岩变孔隙纵横比曲线的 Xu-White 模型预测的横波速度,图 7 中黑色曲线为实际测量的横波速度。从预测结果和与测量数据的平均相对误差可见,图 7(a)预测的横波速度的相对误差平最大为 0.102,最小值为 -0.083 5,图 7(b)预测的横波速度相对误差最大 0.053,最小值为 -0.064 4,采用单一砂岩孔隙宽长比的 Xu-White 所预测的横波速度,其精度不如采用砂岩变孔隙宽长比的 Xu-White 所预测的横波速度。

图 8(a)中为砂岩变孔隙结构的 Xu-White 岩石物理建模流程示意图,其中砂岩孔隙形状较圆的为硬孔隙,多为粒间溶孔等,较扁的为软孔隙,多为裂缝-溶蚀孔隙等。图 8(b)为迪北 102 井阿合组致密砂岩气地层岩石物理正演效果图,其中红色曲线为正演曲线,黑色为实测曲线,整体两者较为吻合,能够满足后续叠前反演的需求。

### 4 气层的识别

众所周知,气层一般具有低密度和低中子的特征,即所谓“挖掘效应”,但是该类特征有些特殊情况不适用,尤其是地质条件相对复杂的致密储层,因此致密气层的识别和评价一直是测井评价面临的技术难题。利用上述岩石物理建模正演的弹性曲线,可建立更加准确的基于敏感参数分析的气层识别方法;同时基于前述地震岩石物理建模流程,可以确立阿合组致密砂岩岩石物理图版,最终准确识别致密砂岩气的弹性响应变化趋势。



a、b和c图为迪北102井不同孔隙度和宽长比条件下实测和正演弹性曲线对比,d图砂岩孔隙宽长比与孔隙度回归关系;数据点以频次显示:1-9以数字表示,A-Z代表频次10-35

图6 阿合组不同孔隙和砂岩孔隙宽长比条件下弹性曲线变化规律

Fig. 6 Variation of elastic curves under different pore and pore alpha in the Ahe Formation

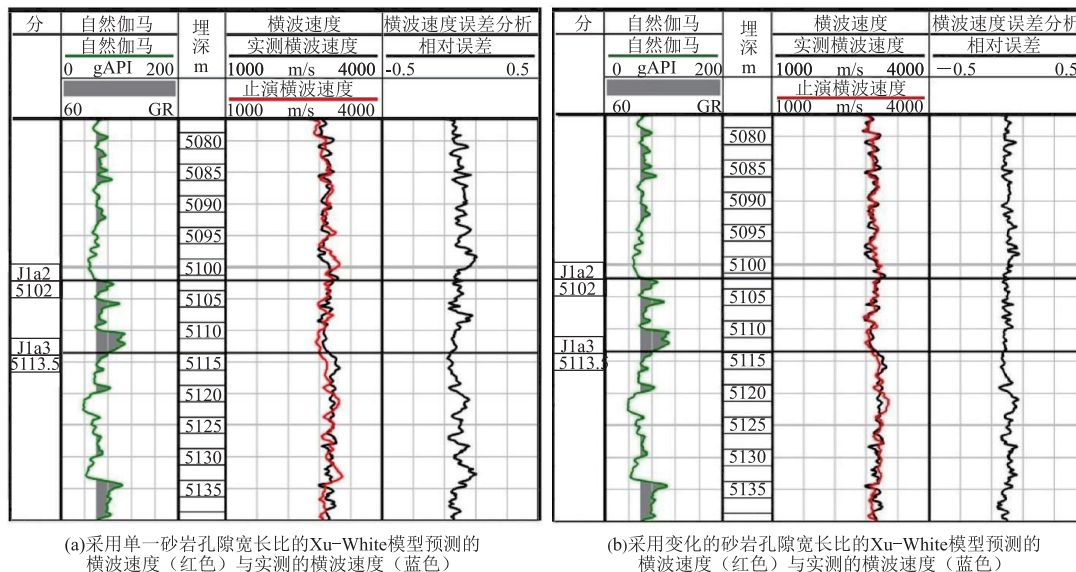
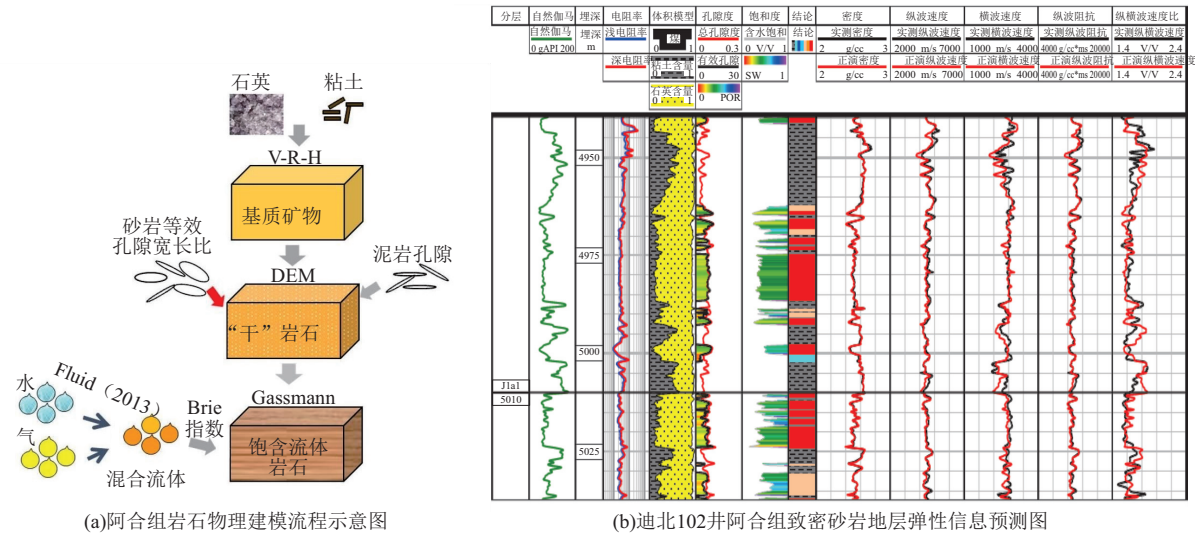


图7 单一砂岩孔隙宽长比和变化的砂岩孔隙宽长比的 Xu-White 横波预测成果

Fig. 7 Xu White shear wave prediction results of single sandstone pore width to length ratio and changing sandstone pore width to length ratio



(a)阿合组岩石物理建模流程示意图

(b)迪北102井阿合组致密砂岩地层弹性信息预测图

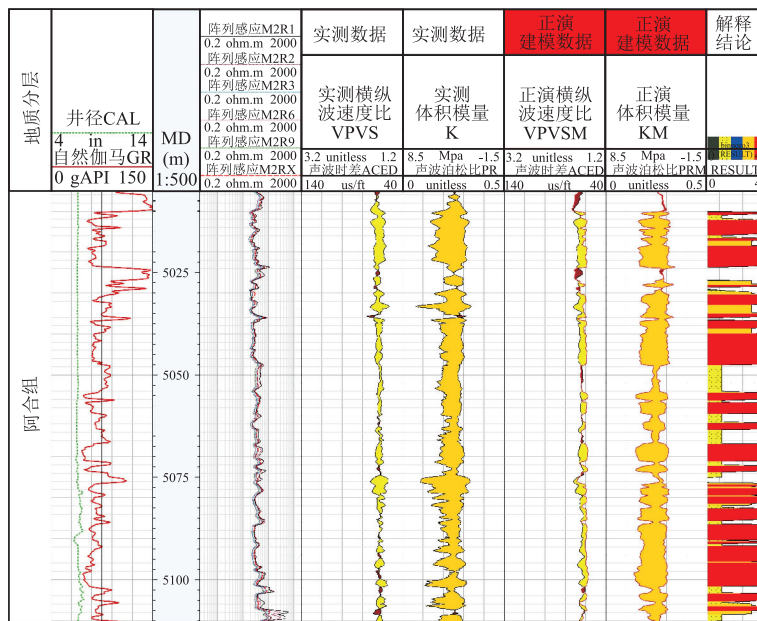
图 8 阿合组岩石物理建模流程示意图和迪北 102 井阿合组致密砂岩地层弹性信息预测图

Fig. 8 Schematic diagram of rock physics modeling process for the Ahe Formation and prediction diagram of elastic information for the tight sandstone formation of the Ahe Formation in the Dibe 102 well

4.1 基于敏感参数分析的单井气层识别

在砂泥岩地层中气层处往往纵波时差变大,横波时差则变化极小,可利用纵波时差、横纵波时差比重叠法来作为探测气层的一个重要指标;另外泊松比和体积模量在气层处反映也比较敏感,气层处泊松比减小,体积模量减小,可利用泊松比、体积模量重叠法识别气层,如图 9,实测数据(第 5 和第 6 道)虽然指示有气层发育,但分层能力不强,甚至在非储层泥岩段也

指示有含气特征,明显不如正演建模后数据(第 7 和第 8 道);另外从气层泊松比与体积模量交会(图 10)可以得出:该区建模后的气层识别效果更好,而且典型气层泊松比数值一般小于 0.18,体积模量数值一般小于  $3.0 \times 10^4$  MPa。最终对迪北 102 井(4 923 m~5 220 m)进行测试,3 mm 油嘴放喷求产,折日产凝析油  $8.16 \text{ m}^3/\text{d}$ (相对密度 0.81/20 °C),折日产天然气  $1 491 \text{ m}^3/\text{d}$ (相对密度 0.792),测试结论为低产油气



解释结论道红色为气层,黄色为差气层或干层

图 9 迪北 102 井敏感参数—参数重叠法识别气层

Fig. 9 Sensitive parameter and parameter overlap method to identify the gas layer in in well Dibe 102

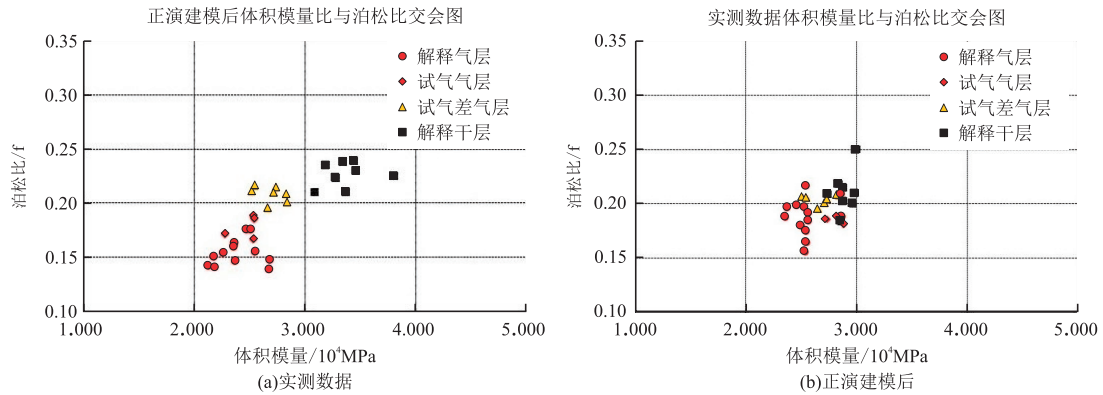


图 10 气层泊松比与体积模量交会图版

Fig. 10 Gas layer crossplot between the Poisson's ratio and bulk modulus

层。虽然测试为低产层,但依据岩石物理建模成果,如对该层储层进行改造,将有望获得高产。

#### 4.2 基于地震岩石物理量版的多井气层识别与预测

岩石物理解释图版描述的是岩石弹性性质与各类地层参数之间的关系,其中包括不同物性、不同岩性、不同含气性等。基于前部分讲述的岩石物理建模方法和流程,就可以确立阿合组致密砂岩地层不同粘土含量条件下的纵波阻抗和纵横波速度比叠前反演成果定量解释模板(图 11)。图中最下方的一条为粘土含量的饱和水的纯砂岩线,最上方一条为饱和水 70% 粘土含量线,反映出随着粘土含量的增加,纵波阻抗减小,纵横波速度比变大。线簇中还包括了 3 条垂直方向的等孔隙度变化线,从右到左分别代表了 5、10、15 个孔隙度单位时泥岩弹性响应的变化规律。从图 11 可以看出,砂岩的粘土矿物含量大都在 30% 以内,较泥岩为明显

的低纵横波速度比,大多在 1.7 以下。那么以阿合组砂岩段为例,考察不同饱和度条件对叠前和叠后参数的影响。由于阿合组砂体中粘土矿物含量在不同井间存在差异,在 2%~15% 在左右,这种矿物含量差异会导致弹性参数的敏感变化。图 12 中假设了三种情况,分别为以黄色(100% 石英)、绿色(90% 石英和 10% 粘土)和粉色散点(80% 石英和 20% 粘土)为起始的线簇,对于每一个线簇包含三条线,为饱和度、60% 水饱和度和饱和含气条件下弹性参数的定量变化。这些线簇体现的是,不同“干”岩石框架下,流体饱和度的定量变化引起的弹性参数的定量变化。从图中可以看出,气层(黄色散点)主要分布在黄色区域范围内,纵横波速度比在 1.62 以下,纵波阻抗小于 13 000 g/cc \* m/s ( $1.3 \times 10^7$  kg/m<sup>3</sup> \* m/s)。

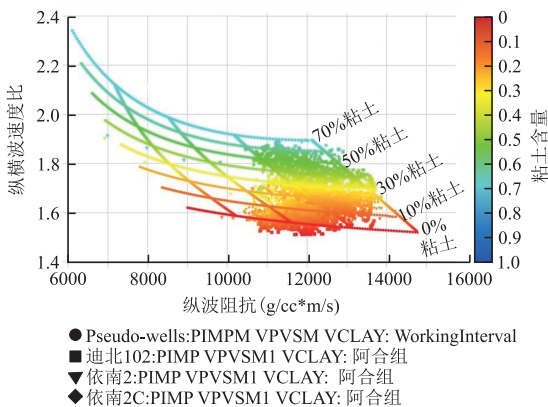


图 11 不同粘土矿物含量下弹性参数定量变化图版

Fig. 11 Quantitative variation plate of elastic parameters at different clay mineral content

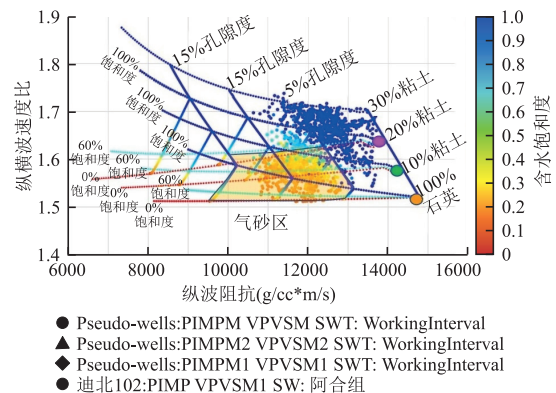


图 12 不同“干”岩石和饱和度条件下弹性参数定量变化图版

Fig. 12 Quantitative variation plate of elastic parameters at different dry rock and saturation conditions

## 5 结 论

采用砂岩变孔隙结构 Xu-White 岩石物理建模算法,通过对实际工区的迪北阿合组致密砂岩气井进行计算和分析,得到以下几点结论和认识:

1)致密砂岩储层物性偏差,且颗粒压实紧密,非均质性强烈,但一般微裂缝和微孔隙发育。

2)基于微分有效介质模型,通过建立孔隙结构模拟结果与孔隙度相关性的方法,可得到砂岩孔隙结构曲线,进而完成砂岩变孔隙结构的储层各弹性参数正演计算。

3)基于砂岩变孔隙结构的 Xu-White 建模计算结果,结合岩石物理各种交会图技术,通过对实际井进行检验,气层的弹性响应更加明显,解释的气层与实验结果相符。

4)利用砂岩变孔隙结构的模型计算成果,建立了适合于本区阿合组的地震岩石物理图版,框定了气砂岩的弹性响应窗口,这为后续储层和流体的地震定量预测提供了可靠的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 文小龙. 致密砂岩气发展现状研究[J]. 水电与新能源, 2015(10): 73-75.  
WEN X L. Development status of the tight sandstone gas[J]. Hydropower and New Energy, 2015(10): 73-75. (In Chinese)
- [2] 唐建伟. 地震岩石物理学研究有关问题的探讨[J]. 石油物探, 2008, 47(4): 398-404.  
TANG J W. Discussion on several issues about seismic rock physics[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(4): 398-404. (In Chinese)
- [3] 谢月芳, 张纪. 岩石物理模型在横波速度估算中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(1): 65-70.  
XIE Y F, ZHANG J. Application of rock physical model in S-wave velocity estimation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 65-70. (In Chinese)
- [4] RUIZ F, CHENG A. A rock physics model for tight gas sand[J]. The Leading Edge, 2010, 29(12): 1484-1489.
- [5] 边婧. 地震岩石物理分析在致密砂岩储层预测中的应用[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(5): 63-70.
- BIAN J. Application of rock physics analysis in the prediction of tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(5): 63-70. (In Chinese)
- [6] WANG P, LI J Y, CHEN X H, et al. Joint probabilistic fluid discrimination of tight sandstone reservoirs based on Bayes discriminant and deterministic rock physics modeling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 191: 107218.
- [7] KEMPER M. Rock physics driven inversion: The importance of workflow[J]. First Break, 2010, 28(10): 68-81.
- [8] 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.  
YANG Z F, CAO H, YAO F C, et al. Seismic rock physical analysis of complex porous reservoir and its application[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 50-56. (In Chinese)
- [9] RUAN C T, BA J, CARCIONE J M, et al. Microcrack porosity estimation based on rock physics templates: A case study in Sichuan Basin, China[J]. Energies, 2021, 14(21): 7225.
- [10] CHENG W, BA J, CARCIONE J M, et al. Estimation of the pore microstructure of tight-gas sandstone reservoirs with seismic data[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 646372.
- [11] BRIE A, PAMPURI F, MARSALA A F, et al. Shear sonic interpretation in gas-bearing sands[C]//Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. October 22-25, 1995. Society of Petroleum Engineers, 1995:701-710.
- [12] XU S Y, WHITE R E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91-118.
- [13] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673.
- [14] 石双虎, 邓志文, 白光宇, 等. 测井资料 Xu-White 模型预测横波速度的一些新观点[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1109-1114.  
SHI S H, DENG Z W, BAI G Y, et al. New viewpoints on S-wave velocity prediction using xu-white model based on well logging data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1109-1114. (In Chinese)

## Application of seismic rock physical modeling technology in tight sandstone gas of Dibeí Ahe Formation

CHEN Qiang<sup>1</sup>, PENG Shengqiang<sup>2</sup>, ZHAO Guangliang<sup>1</sup>, PI Xuejun<sup>2</sup>, TAN Yang<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>

(1. Petrochina Talim Oilfield Company, Geophysical Research Institute, Korla 841000, China;

2. Beijing Aoyier Engineering Technology Co., Ltd, Beijing 100000, China)

**Abstract:** The low porosity and low permeability sandstone of Jurassic Ahe formation in the Dibeí area of Kuqa depression in Tarim Basin is the main reservoir of the Dibeí gas field. The petroleum geological conditions are superior, oil and gas have been observed in many wells. Due to fractures in the sandstone of Ahe formation in this area, the complex pore structure of the reservoir, no singular relationship between porosity and velocities, and the conventional Xu-White modeling with a single sandstone pore structure generally poor shear wave data. This article proposes a method based on the Xu-White modeling of sandstone with variable sand pore structure in response to this issue. Firstly, this paper conducts a forward simulation of the sandstone pore aspect ratio based on the differential effective medium model and calculates the sandstone aspect ratio curve using the fitting relationship between the simulation results and porosity. Then, based on the Xu-White modeling of sandstone with variable sand pore structure, elastic curves of Ahe formation is modeled, compared with the Xu-White modeling with a single sandstone pore structure, it has a higher degree of agreement with measured curves. Finally, based on the modeled logging curves and rock physics interpretation plates, the tight gas reservoir of the Ahe formation was identified. After modeling, the elastic response characteristics of the gas reservoir are more pronounced, manifested as Poisson's ratio is less than 0.18, and the bulk modulus value is generally less than  $3.0 \times 10^4$  MPa. Seismic rock physics interpretation templates are established in this area to investigate the quantitative changes in elastic parameters caused by quantitative changes in fluid saturation under different "dry" rock matrices. This basically frames the elastic response window of gas reservoir, providing a reliable theoretical basis for reservoir and fluid prediction for following seismic reservoir inversion.

**Keywords:** Dibeí slope; tight gas; pore structure modeling; seismic rock physical; gas reservoir identification