

# 乌拉力克组页岩地震岩石物理特征与建模

冷建贇, 赵 灵, 张 晶

(成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059)

**摘要:** 鄂尔多斯盆地油气资源丰富, 但目前乌拉力克组页岩储层岩石物理特征及建模的相关研究不足, 限制了该地区页岩油气的勘探与开发, 因此亟需对乌拉力克组页岩展开系统的地震岩石物理实验和理论研究。通过分析样品的物性特征和岩石物理特征, 发现高 TOC 含量的乌拉力克组页岩表现出高石英含量、较高的黏土含量、低纵波阻抗和低纵、横波速度比的特征。依据微观结构特征, 建立了乌拉力克组的地震岩石物理模型, 构建了岩石物理解释量版, 提出了裂缝孔隙度反演的方法, 并在乌拉力克组 ZP1 井地下 4 220 m~4 277 m 段展开应用。对测井数据进行反演, 纵波速度的预测平均绝对误差为 1.54%, 验证了模型的有效性。研究结果可为后续乌拉力克组页岩的测井解释和力学性质评价提供依据。

**关键词:** 乌拉力克组页岩; 岩石物理特征; 岩石物理模型; 裂缝孔隙度反演

**中图分类号:** P618.13

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.02

## 0 引言

我国页岩气资源十分丰富, 针对页岩油气的勘探也受到国内油气勘探越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。研究页岩的弹性波地震特性, 可以有效地确定其储层物性特征<sup>[3-6]</sup>。Hudson<sup>[7]</sup>研究了在包含裂缝的材料中弹性波的传播问题, 推导了裂缝对波速的影响, 并给出了不同情况下的裂缝对材料弹性模量的修正公式, 讨论了裂缝内部条件不同情况下的结果。Vernik and Nur<sup>[8]</sup>提出富含干酪根的页岩可以视为横向各向同性介质, 采用 Backus 平均理论来解释页岩中有机质的特定分布导致的各向异性特征。Hornby<sup>[9]</sup>提出了一种结合了 SCA 和 DEM 理论的方法, 能够模拟具有双相的各向异性材料的性质, 预测页岩的有效弹性特性, 并通过数值模拟和与实验室实验的比较证明了其实用性。Wu<sup>[10]</sup>、Bandyopadhyay<sup>[11]</sup>使用 DEM 模型把利用 VRH 计算的其

他矿物添加到作为背景介质的干酪根中, 以研究富有机质页岩的弹性属性。邓继新等<sup>[12]</sup>使用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)技术来分析龙马溪组页岩样品的微观结构和矿物成分, 对页岩骨架做出了分类研究, 讨论了矿物组成、微观孔隙结构、TOC 和孔隙度多种因素下对页岩弹性性质的影响。Zhao<sup>[13]</sup>通过建立不同模型来描述不同成熟度水平的有机页岩的弹性特性, 模型考虑了有机页岩在热成熟过程中物理性质的演化, 可以构建不同成熟度水平的有机页岩的弹性特性曲线。尽管国内针对页岩岩石的物理实验、模拟已取得了长足进展, 但过去研究区多以龙马溪组为主, 由于不同地区页岩在沉积历史、有机质赋存状态等存在明显差异<sup>[12, 14-15]</sup>。因此, 特定储层的岩石物理实验结果是区域性的, 在实际应用中需要针对研究区地质特征建立特定的建模方案, 以增加页岩岩石物理模型在该地区的适用性<sup>[12]</sup>。

基于乌拉力克组页岩的岩石物理实验规律与微

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(41774136)

第一作者: 冷建贇(1999—), 男, 硕士, 主要从事地震岩石物理学研究, E-mail: 960433440@qq.com。

观结构特征,结合 SCA、DEM、Backus 平均、Hudson 等多种理论,提出了一套各向异性建模流程并构建了相应的解释量版,模型考虑了该地区矿物成层、黏土与有机质混合及裂缝等因素。利用岩样数据与测井资料验证了量版适用性,明确了乌拉力克组页岩的岩石物理特征,为后续乌拉力克组页岩的测井解释和力学性质评价提供依据。

### 1 岩石学特征

研究工作主要围绕 QT9、R16 和 ZP1 三口井的页岩展开工作。乌拉力克组的页岩呈现多样的岩石特征(图 1),其矿物成分异常复杂<sup>[16]</sup>,其中石英加长石的质量平均占比为 42.16%,碳酸盐矿物的质量平均占比为 29.23%,黏土矿物的质量平均占比为 20.49%。岩石的脆性整体较强,黏土矿物含量较少,矿物组分对乌拉力克组页岩各向异性的贡献不显著。

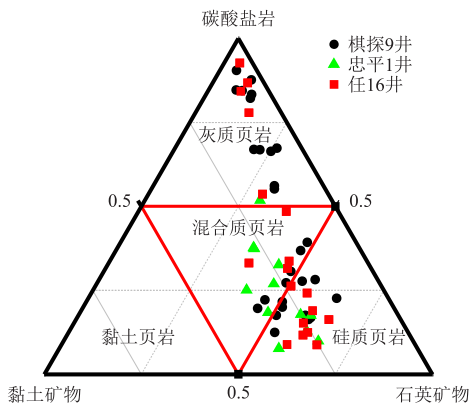


图 1 乌拉力克组页岩样品矿物组分三角图

Fig. 1 Ternary plot of the sample mineral composition of Wulalike Formation shale

通过对乌拉力克组页岩的扫描电镜的观察(图 2),可以看出,图 2(a)中微裂缝放大,主裂缝被有机质充填,发育次级微裂缝,见莓粒状黄铁矿;

图 2(b)中有机质和生物硅伴生,有机质孔较发育;图 2(c)有机质充填碎屑矿物晶间孔隙,有机质孔较发育;图 2(d)中有机质和少量黏土矿物充填碎屑矿物粒缘缝和粒间孔隙,有机质边缘发育微孔隙。

乌拉力克组页岩的孔隙类型、有机质分布特征的差异较大,岩石结构较为复杂。乌拉力克组页岩的孔隙类型主要包括有机质孔隙、发育于有机质中的裂缝,晶间孔隙以及粒间孔隙。乌拉力克组页岩存在有机质与黏土矿物充填的现象。

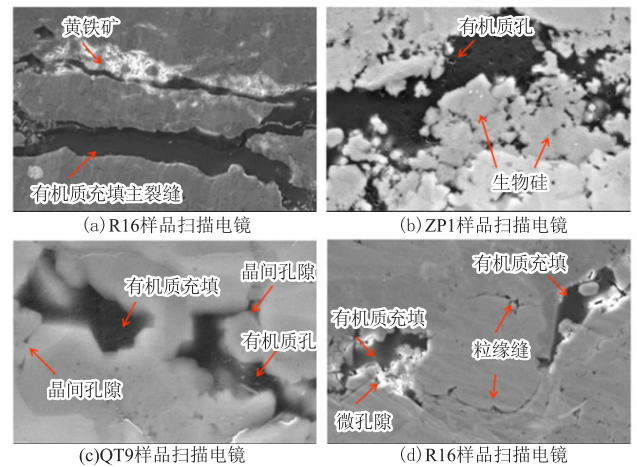


图 2 乌拉力克组页岩微观结构特征

Fig. 2 Microstructure of Wulalike Formation shale sample

通过对乌拉力克组页岩的样品和显微镜下观察(图 3),我们发现它具有三种主要的纹层结构:富有有机质加钙质纹层(图 3(a))、钙质纹层(图 3(b))、粘土纹层加凝灰质纹层(图 3(c))。在考虑复杂的地质成岩作用的同时简化纹层构造,将以上特征归纳为两大类矿物互层:①脆性矿物层,包括长石、石英、方解石、白云石等;②黏土有机质层,包括黏土与干酪根。因此在建模时需要考虑矿物成层现象对弹性各向异性的影响,并建立相应的图版定量分析其对岩石弹性特征的影响。

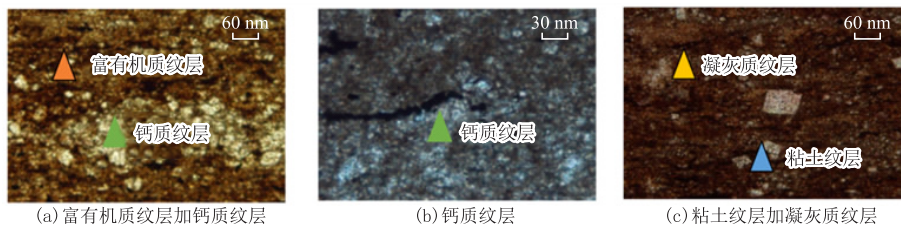


图 3 乌拉力克组页岩纹层构造特征

Fig. 3 Shale grain structure of Wulalike Formation shale

## 2 岩石物理特征

乌拉力克组页岩样品孔隙度小于 4%<sup>[16]</sup>,变化范围不大,页岩样品中有机质含量较低。乌拉力克组的 QT9、R16、ZP1 三口井虽然物理特性差异较大,但由图 4 中给出的拟合线,可以看出乌拉力克组页岩总体趋势一致。图 4(a)和图 4(b)表明了页岩样品中孔隙度与 TOC 含量、石英矿物含量与 TOC 含量都有着明显的正相关关系。随着 TOC 含量的增加,三口井的页岩样品的孔隙度和石英矿物含量都会有不同程度的增加。

图 4(c)和图 4(d)给出页岩样品中碳酸盐岩和黏土矿物随 TOC 含量的变化关系。随着碳酸盐岩含量的减小、黏土含量的增大,TOC 含量均增大。页岩 TOC 含量越高,有机质孔隙越发育<sup>[17]</sup>,有机质常常充填在黏土矿物,黏土矿物含量的增加为 TOC 的发育创造有利条件。因此,高石英含量、高黏土含

量和低碳酸盐岩含量的乌拉力克组页岩会有着更高的 TOC 含量。

页岩岩石矿物组分是影响岩石物理特征的主要因素,不同矿物组分具有不同的影响特征<sup>[18]</sup>。图 5 给出了乌拉力克组页岩的岩石物理特征。图 5(a)为石英含量对于纵波阻抗的影响,可以看出,在石英含量从 0 增长至 60%的过程中,纵波阻抗随石英含量的变化趋势出现了一个反转,转折点大概为 47%。变化趋势近似于“V”型趋势。

当石英含量小于 47%时,石英含量的增大表明 TOC 含量和孔隙度的增大(图 4(b)),对地震波的衰减作用增强,从而降低纵波速度和纵波阻抗,这时微观结构对弹性性质的变化起到关键作用。然而,当石英含量超过 47%时,由于石英替换掉较小弹性参数的黏土,岩石的刚度会显著提升,从而抵消 TOC 和孔隙度对地震波的衰减作用,导致纵波速度和纵波阻抗有小幅度的提升,这时矿物成分的弹性特征对弹性性质的变化起到关键作用。

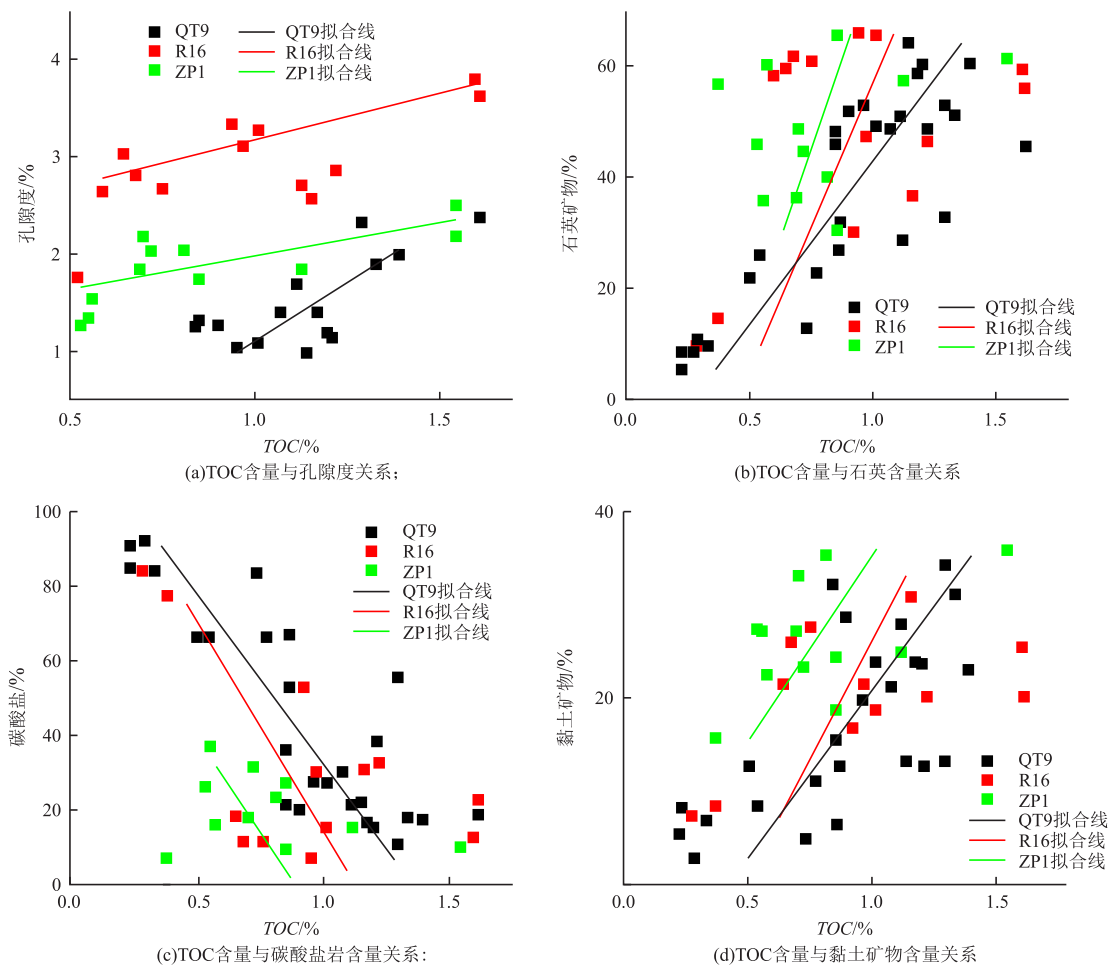


图 4 乌拉力克组页岩样品物性特征

Fig. 4 Reservoir properties of Wulalike Formation shale sample

图 5(b)表明了纵、横波速度比与石英含量存在着明显的负相关关系。在矿物的弹性性质中,石英颗粒的速度比既小于粘土颗粒,又小于钙质矿物颗粒。同时,因为石英含量的增加造成页岩孔隙度的增大(图 4(b)),也会使纵波速度比横波速度衰减的更为明显。因此,页岩样品中石英含量的增加将导致岩石的纵、横波速度比下降。图 5(c)表明 TOC 含量增大时,纵波阻抗下降,两者为负相关关系,少数高纵波阻抗的页岩样品也有着高 TOC 含量,原因是页岩样品中石英和碳酸盐矿物较高,黏土含量

十分低。图 5(d)表明纵、横波速度比与 TOC 含量总体呈负相关,石英矿物和黏土矿物都有利于有机质的发育(图 4(b)、图 4(d)),而石英颗粒的速度比小于粘土颗粒,当石英矿物含量相对于粘土矿物含量较小时,就会出现部分高 TOC 含量页岩样品也显示出相对较高的纵、横波速度比的特征。但由于乌拉力克组页岩样品的黏土含量较低,所以主要以石英矿物的弹性性质为主。综上所述,高 TOC 含量的乌拉力克组页岩表现出高石英含量、较高的黏土含量、低纵波阻抗和低纵、横波速度比的特征。

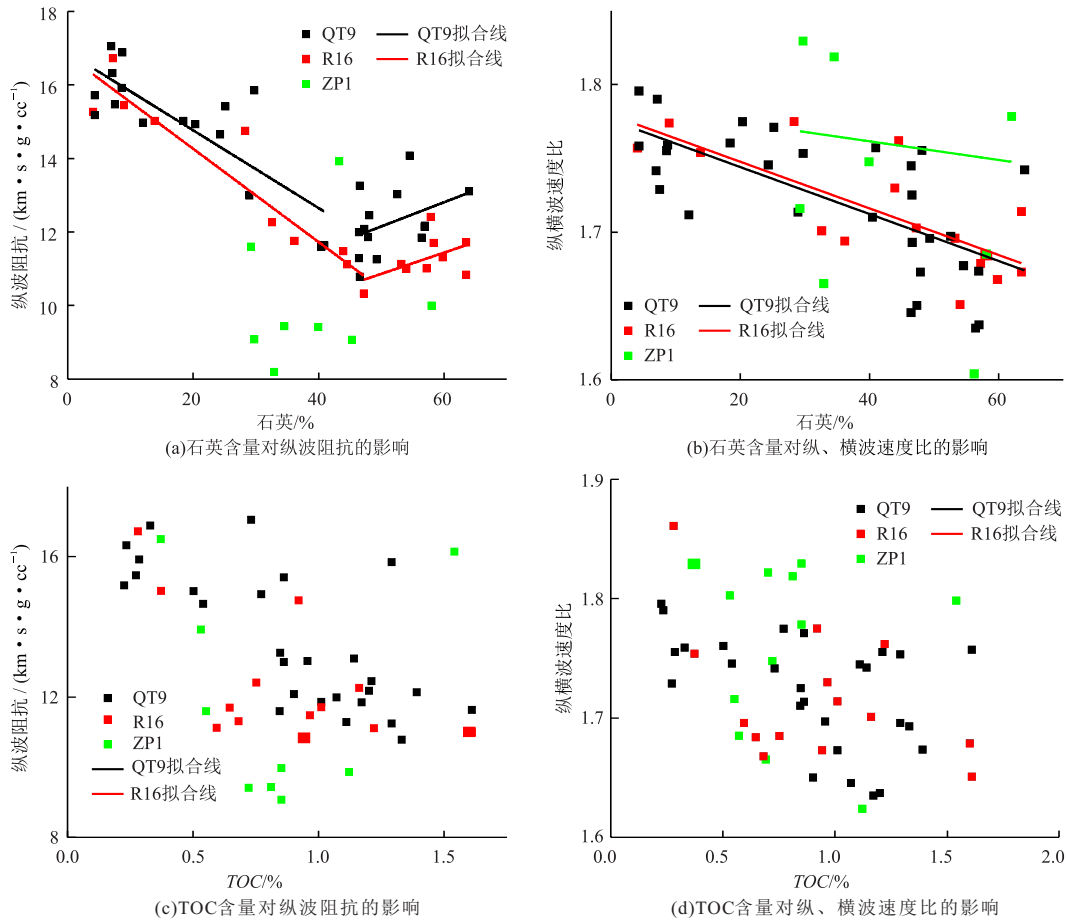


图 5 乌拉力克组页岩样品岩石物理特征

Fig. 5 Rock physical properties of Wulalike Formation shale sample

图 6 给出 R16 页岩的一块样品在水平和垂直传播方向下的纵、横波速度随压力的变化。在相同压力下,所有页岩样品纵横波速度均表现出相同的变化关系(以此样品为代表): $V_{P-90} > V_{P-0} > V_{SV-90} > V_{SV-0}$ ,依据此速度关系,可将所研究页岩样品的弹性性质按照横向各向同性介质来处理,可以进一步计算 Thomsen 各向异性参数<sup>[19]</sup>,这也为后续各向异性建模与分析提供依据。随着页岩样品压力从

0 MPa 上升到 60 MPa,四个方向的速度都有相似趋势的上升,并且在其他样品也有这样的规律。

粘土矿物的定向排列是导致页岩样品呈现各向异性的重要原因<sup>[12,20-21]</sup>,乌拉力克组页岩中有机质和粘土含量都相对较低,使页岩的各向异性特征较小(图 7)。虽然样品中能观察到明显的层状构造特征,但各层矿物成分的岩石物理特性相差不大,从而对各向异性特性的贡献也较小。

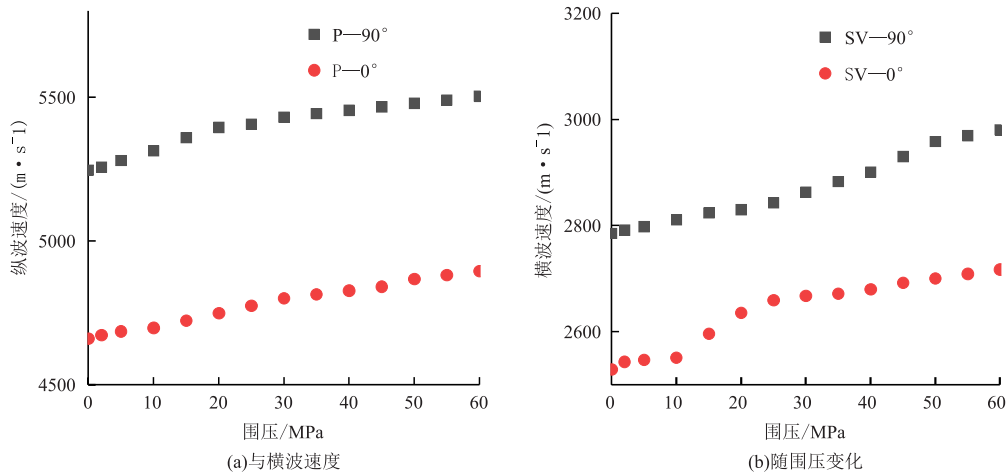


图 6 R16 样品在不同方向上的纵波速度

Fig. 6 The longitudinal wave velocity of R16 in different directions

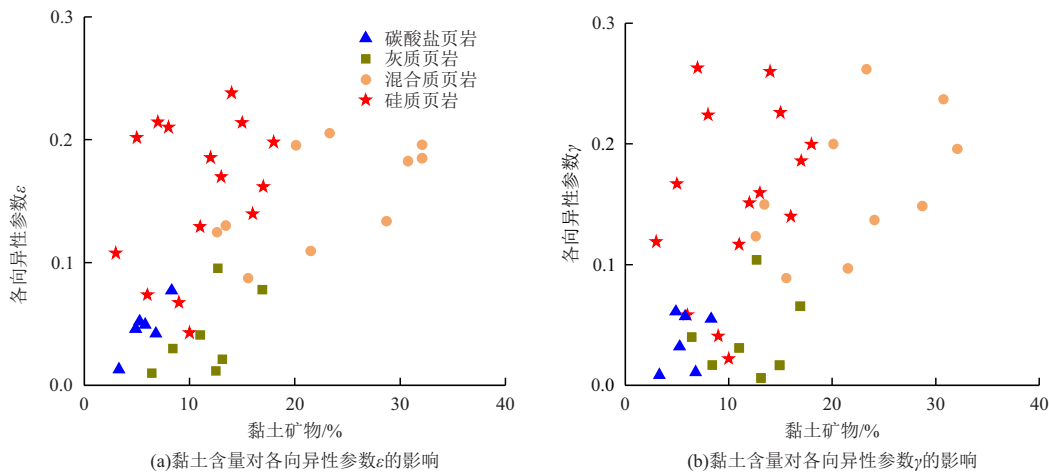


图 7 乌拉力克组页岩样品各向异性特征

Fig. 7 Anisotropy properties of Wulalike Formation shale samples

### 3 地震岩石物理模型

#### 3.1 页岩岩石物理建模

基于页岩样品的组分特征和微观结构特征,采用 SCA 模型、DEM 模型、Backus 平均模型和 Hudson 模型,建立岩石物理模型,以达到更好地模拟乌拉力克组页岩储层的目的。由于干酪根通常充填在黏土里,因此利用 SCA 模型和 DEM 模型模拟黏土和干酪根混合物<sup>[15]</sup>,得到黏土有机质层;采用 SCA 模型对脆性矿物混合物进行模拟,得到脆性矿物层;并根据样品的纹层结构特征,将脆性矿物层与黏土有机质层利用 Backus 模

型计算,得到页岩基质;使用 DEM 模型将空孔隙添加到页岩基质中;使用 Hudson 模型加入裂缝;使用 DEM 模型加入流体,得到乌拉力克组页岩岩石物理模型。

岩石物理模型构建流程如图 8 所示。

1)首先在黏土和干酪根的体积含量都是 50% 时使用各向异性 SCA 模型混合,再使用各向异性 DEM 模型进行调整至体积含量的真实值。

2)在 DEM 模型中,矿物添加顺序不同会模拟出不同的弹性模量,而 SCA 模型可以很好的消除这种误差,因此采用各向同性 SCA 模型计算脆性矿物混合物的等效弹性模量。

3)Backus 平均理论给出了由五种有效刚度分

量可以很好地描述横向各向同性等效介质,因此用 Backus 平均模拟脆性矿物层与黏土有机质层计算,来考虑纹层结构对有机页岩弹性性质的贡献。

4)分别使用 DEM 模型和 Hudson 模型在页岩

基质分别加入空孔隙和裂缝,最后使用 DEM 模型加入流体,得到乌拉力克组页岩岩石物理模型,上述理论模型计算公式见参考文献<sup>[22]</sup>,主要矿物和流体的弹性参数如表 1 所示。

表 1 乌拉力克组页岩中主要矿物和流体的弹性参数

Tab. 1 Elastic parameters of main minerals and fluids of Wulalike Formation shale

	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
方解石	2 710	76.8	32.0
白云石	2 870	94.9	45.0
黏土	25	9	2.55
石英	2 650	37	44
长石	2 630	75.6	25.6
黄铁矿	4 930	147.4	132.5
干酪根	1 100	3.5	1.75
气	0.1	0.01	0

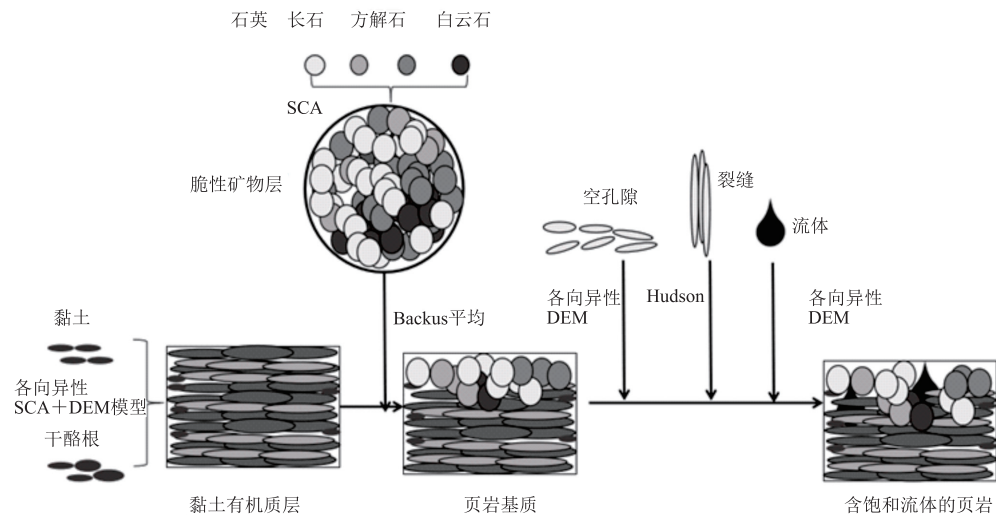


图 8 乌拉力克组页岩岩石物理模型构建流程

Fig. 8 Modeling procedure of rock physics modeling of Wulalike Formation shale

### 3.2 裂缝孔隙度的反演

测井资料中的纵波速度可作为裂缝孔隙度反演的约束条件<sup>[23]</sup>。在设定裂缝孔隙度初值后利用岩石物理模型计算纵波波速;分析预测纵波速度和测井纵波速度间的误差;如果误差未达到精度要求则增加裂缝孔隙度的含量,再进行正演,直至达到精度要求,得到裂缝孔隙度,再计算裂缝密度。

### 3.3 岩石物理解释量板

图 10 为通过岩石物理模型所绘制的岩石物理解释图版,图版能够较好地反映乌拉力克页岩样品矿物组分、孔隙度变化对地震弹性性质的影响。图中黑色实线和粉色虚线分别代表干酪根含量为 0 和干酪根含量为 4%的页岩在不同的孔隙度和黏土含

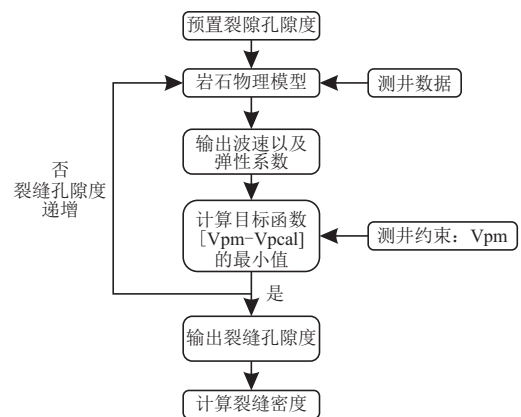


图 9 裂缝孔隙度的反演流程

Fig. 9 Inversion process of porosity density

量变化情况下的纵波阻抗和速度比(图 10(a))以及泊松比和杨氏模量变化趋势(图 10(b))。图 10 中的实际数据点是来自 QT9 的页岩样品的 TOC 含量利用式(1)计算得到的干酪根含量。

$$K = \frac{TOC}{C_k} \frac{\rho_b - \rho_f \varphi}{\rho_k (1 - \varphi)} \quad (1)$$

其中,  $C_k$  是代表页岩成熟的常数,取值 0.7~0.85 之间,  $\varphi$ 、 $\rho_b$ 、 $\rho_f$  和  $\rho_k$  分别是孔隙度、体积密度、流体密度和干酪根密度。

乌拉力克组页岩的纵波阻抗与速度比变化较为

复杂。富含有机质矿物主要包括硅质页岩与部分的混合质页岩,在弹性参数上表现为低速度比、低泊松比、低纵波阻抗和低杨氏模量的特征,速度比小于 1.72。石英含量的增大,导致干酪根和孔隙度的增大,弹性参数均降低。混合质页岩相对于硅质页岩,在图中反映为较大的速度比(泊松比)和纵波阻抗,部分混合质页岩有机质含量也比较丰富,反映黏土也对有机质的赋存也产生有利条件。灰质页岩和碳酸岩页岩则表现为高弹性参数的特征,与钙质矿物本身的弹性性质相符合。

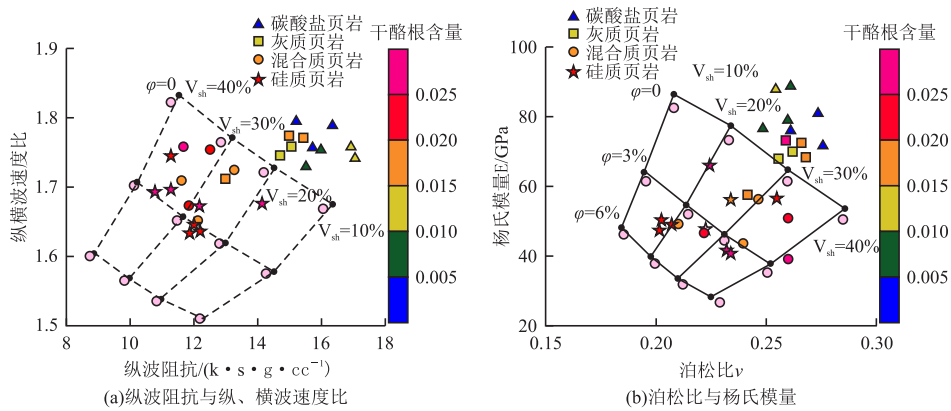


图 10 乌拉力克组页岩岩石物理解释量板

Fig. 10 Rock physics template of Wulalike Formation shale

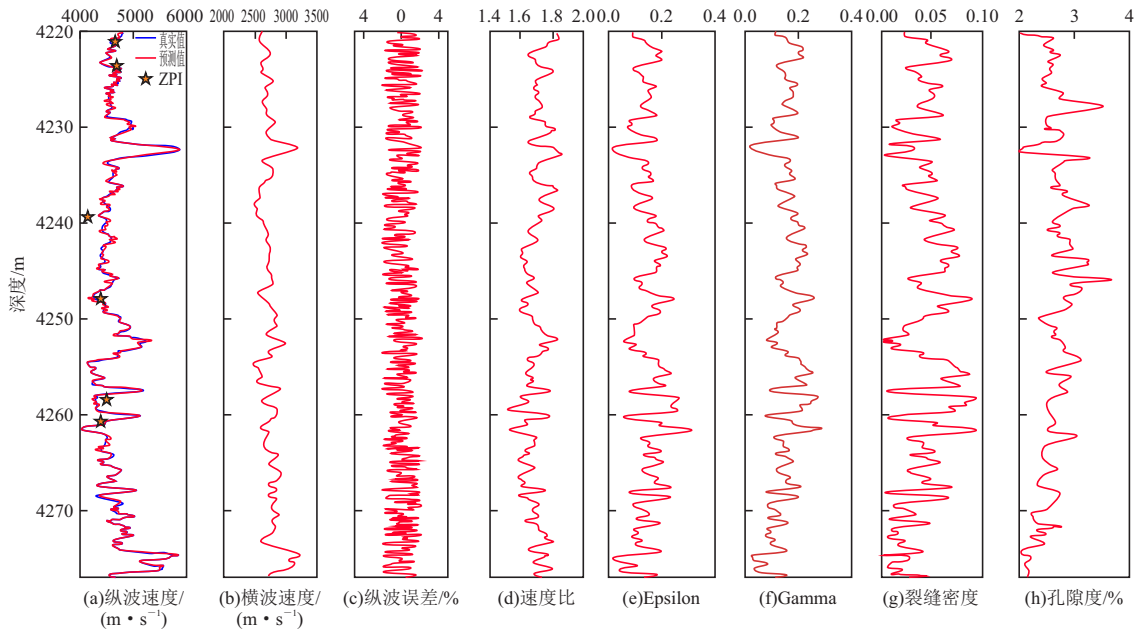


图 11 ZP1 井 4 220~4 277 m 井段乌拉力克组页岩地层反演结果

Fig. 11 Inversion results of shale formation of Wulalike shale formation in 4 220 m~ 4 277 m section of well ZP1

3.4 应用案例

笔者对 ZP1 地下 4 220 m~4 277 m 段的地层进行分析,结果如图 11 所示,图中五角星为页岩样品。图 11(c)表明预测和测井纵波波速之间误差小于 3%,平均绝对误差为 1.54%,验证了岩石物理模型的有效性。图 11(e)、图 11(f)表明该井段的各向异性特征较弱,其中纵波各向异性  $\epsilon$  为 0.031~0.311,平均值是 0.148,横波各向异性  $\gamma$  为 0.024~0.289,平均值是 0.153。

图 11(g)为反演后的裂缝密度曲线,详细的统计结果如图 12 所示,地层的裂缝密度介于 0~0.1 之间,主要分布在 0.02~0.06 之间,平均值为 0.047。根据图 13 得知,各向异性与纵波速度之间具有负相关关系,并且在低纵波波速与高各向异性的地层,裂缝含量会有所上升,为流体流通和储集提供有利条件。

纵、横波速度比受矿物组分的影响,由于矿物组分的差异,储层速度比存在明显差异,速度比与石英矿物含量成反比,与碳酸盐岩矿物和黏土矿物含量

成正比。如图 11(d)、图 14 所示,地层的纵、横波速度比介于 1.524~1.837 之间,在速度比处于低值时,裂缝密度的反演结果显示为高值,原因可能是此时石英含量较高,岩石的刚度较强,而石英颗粒的抗压实作用为裂缝的发育创造有利条件,同时也使速度比处于低值。

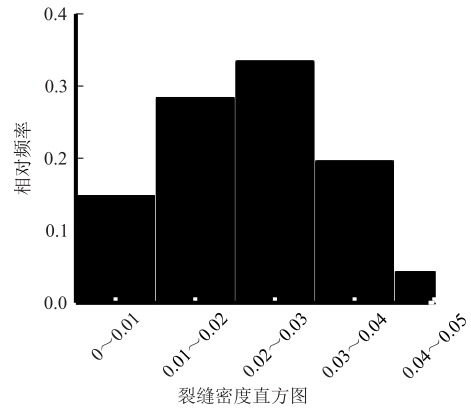


图 12 裂缝密度统计直方图

Fig. 12 Statistical histogram of fracture density

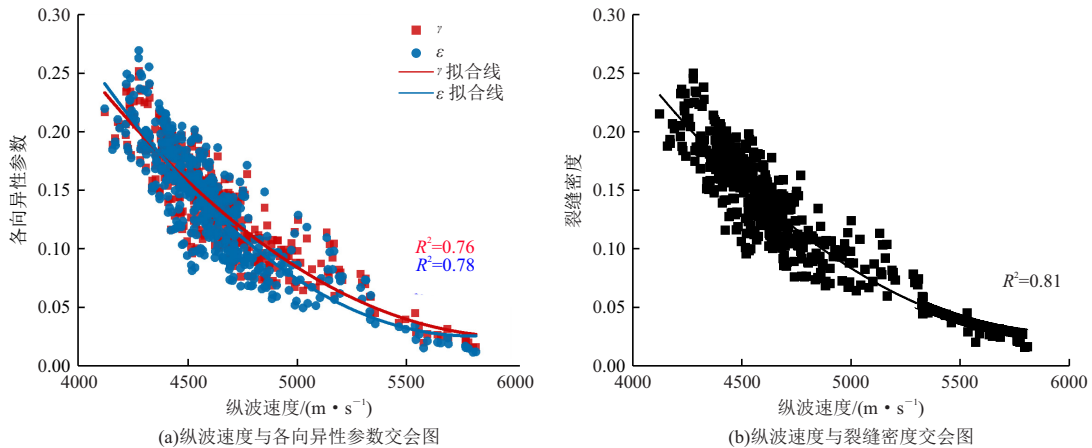


图 13 纵波速度与各向异性参数交会图、纵波速度与裂缝密度交会图

Fig. 13 Crossplot of P-wave velocity and anisotropy parameters, Crossplot of P-wave velocity and fracture density

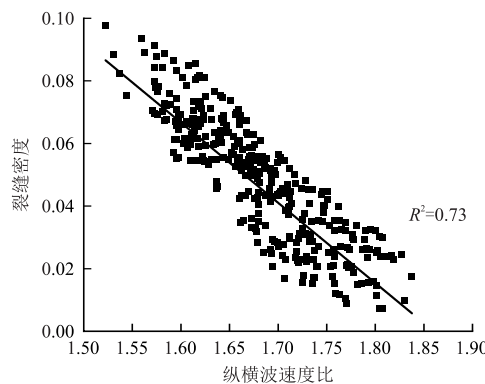


图 14 纵、横波速度比与裂缝密度交会图

Fig. 14 Crossplot of the ratio of P-and S wave velocity and fracture density

## 4 结论

笔者基于乌拉力克组页岩的岩石学、孔隙结构等微观特征,结合岩石物理实验,得到物性特征和岩石物理特征,建立了乌拉力克组的岩石物理模型,构建了相应的解释量表,并通过测井资料进行验证取得如下认识:

1)在乌拉力克组页岩样品中,页岩的石英含量与孔隙度、TOC 含量之间具有明显的正相关性。高 TOC 含量的乌拉力克组页岩表现出高石英含量、较高的黏土含量、低纵波阻抗和低纵、横波速度比的特征。

2)页岩样品各向异性系数主要受控于黏土颗粒定向排列的程度,由于乌拉力克组页岩的黏土含量较低,各向异性特征较弱。ZP1 井 4 220 m~4 277 m 井段乌拉力克组页岩地层反演结果表明该井段的各向异性特征较弱,其中纵波各向异性  $\epsilon$  为 0.031~0.311,平均值是 0.148,横波各向异性  $\gamma$  为 0.024~0.289,平均值是 0.153。

3)该井段地层的裂缝密度介于 0~0.1 之间,主要分布在 0.02~0.06 之间,平均值为 0.047。在低纵波波速、高各向异性和低纵、横波速度比的地层中,裂缝含量会有所上升。

4)采用 SCA 模型和 DEM 模型,模拟黏土和干酪根的弹性特征。此外,Backus 模型可以有效地处理样品的纹层现象,使用 Hudson 模型加入裂缝,从而构建出一个针对乌拉力克组页岩更加准确、精度更高的页岩岩石物理模型。

### 参考文献:

- [1] LIU H, MENG S W, SU J, et al. Reflections and suggestions on the development and engineering management of shale gas fracturing technology in China [J]. *Natural Gas Industry B*, 2019, 6(6): 539-545.
- [2] 吴建发,张成林,赵圣贤,等.川南地区典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J].*天然气地球科学*, 2023, 34(8): 1385-1400.
- WU J F, ZHANG C L, ZHAO S X, et al. Typical types of shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin and enlightenment of exploration and development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(8): 1385-1400. (In Chinese)
- [3] BA J, XU W H, FU L Y, et al. Rock anelasticity due to patchy saturation and fabric heterogeneity: A double-

- porosity model of wave propagation [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2017, 122(3): 1949-1976.
- [4] 巴晶,晏信飞,陈志勇,等.非均质天然气藏的岩石物理模型及含气饱和度反演[J].*地球物理学报*, 2013, 56(5): 1696-1706.
- BA J, YAN X F, CHEN Z Y, et al. Rock physics model and gas saturation inversion for heterogeneous gas reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1696-1706. (In Chinese)
- [5] SHI P D, YUAN S Y, WANG T Y, et al. Fracture identification in a tight sandstone reservoir: A seismic anisotropy and automatic multisensitive attribute fusion framework [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(10): 1525-1529.
- [6] SAYERS C M. The effect of anisotropy on the Young's moduli and Poisson's ratios of shales [J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61(2): 416-426.
- [7] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64(1): 133-150.
- [8] VERNIK L, NUR A. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks [J]. *Geophysics*, 1992, 57(5): 727-735.
- [9] HORNBLY B E, SCHWARTZ L M, HUDSON J A. Anisotropic effective-medium modeling of the elastic properties of shales [J]. *Geophysics*, 1994, 59(10): 1570-1583.
- [10] BANDYOPADHYAY K. Seismic anisotropy: geological causes and its implications to reservoir geophysics [M]. 2009.
- [11] WU X, CHAPMAN M, LI X Y, et al. Anisotropic elastic modelling for organic shales [C]//Proceedings, 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. June 4-7, 2012. Copenhagen, Denmark. Netherlands: EAGE Publications BV, 2012: cp-293-00656.
- [12] 邓继新,王欢,周浩,等.龙马溪组页岩微观结构、地震岩石物理特征与建模[J].*地球物理学报*, 2015, 58(6): 2123-2136.
- DENG J X, WANG H, ZHOU H, et al. Microtexture, seismic rock physical properties and modeling of Longmaxi Formation shale [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 2123-2136. (In Chinese)
- [13] ZHAO L X, QIN X, HAN D H, et al. Rock-physics modeling for the elastic properties of organic shale at different maturity stages [J]. *Geophysics*, 2016, 81

- (5): D527-D541.
- [14] 董宁, 霍志周, 孙赞东, 等. 泥页岩岩石物理建模研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 1990-1998.  
DONG N, HUO Z Z, SUN Z D, et al. An investigation of a new rock physics model for shale[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1990-1998. (In Chinese)
- [15] 桂俊川, 马天寿, 陈平. 横观各向同性页岩岩石物理模型建立: 以龙马溪组页岩为例[J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 4188-4204.  
GUI J C, MA T S, CHEN P. Rock physics modeling of transversely isotropic shale: An example of the longmaxi formation in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(11): 4188-4204. (In Chinese)
- [16] 张凤奇, 李宜浓, 罗菊兰, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系乌拉力克组页岩微观孔隙结构特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(5): 50-62.  
ZHANG F Q, LI Y N, LUO J L, et al. Microscopic pore structure characteristics of shale of Ordovician Wulalike Formation in western Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(5): 50-62. (In Chinese)
- [17] 董晓霞, 熊亮. 川南筇竹寺组页岩储集空间类型及发育影响因素[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(3): 415-422.  
DONG X X, XIONG L. Types of shale reservoir space and factors influencing development in the Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration Computational Techniques, 2016, 38(3): 415-422. (In Chinese)
- [18] 刘志远, 秦璐, 宁俊瑞, 等. 基于饱水页岩地震频段岩石物理测试的地震响应频散特征分析[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(4): 534-540.  
LIU Z Y, QIN L, NING J R, et al. Analysis of seismic response dispersion characteristics based on rock physics testing of water-saturated shale in seismic frequency bands[J]. Geophysical and Geochemical Exploration Computational Techniques, 2019, 41(4): 534-540. (In Chinese)
- [19] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 2012, 51(10): 1954-1966.
- [20] LIN S C, MURA T. Elastic fields of inclusions in anisotropic media (II) [J]. Physica Status Solidi (a), 1973, 15(1): 281-285.
- [21] BERRYMAN J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media I. Spherical inclusions[J]. Acoustical Society of America Journal, 1980, 68(6): 1809-1819.
- [22] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook [M]. Cambridge university press, 2020.
- [23] 陈怀震, 印兴耀, 张金强, 等. 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3431-3441.  
CHEN H Z, YIN X Y, ZHANG J Q, et al. Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3431-3441. (In Chinese)

## Seismic rock physical properties and modeling of Wulalike Formation shale

LENG Jianyun, ZHAO Ling, ZHANG Jing

(School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The Ordos Basin is rich in oil and gas resources, but the lack of relevant research on the rock physics characteristics and modeling of the Wulalike Formation shale reservoir has limited the exploration and development of shale oil and gas in this area, so it is urgent to carry out systematic seismic rock physics experiment and theoretical research on the Wulalike Formation shale. By analyzing the physical properties and rock physical properties of the samples, it is found that the Wulalike shale with high TOC content shows the characteristics of high quartz content, high clay content, low P-wave impedance and low P-and S wave velocity. According to the microstructure characteristics, the seismic rock physics model of Wulalike Formation is established, the rock physics interpretation version is constructed, and the method of inversion of fracture porosity is proposed, and it is applied in the underground section of well ZP1 of Wulalike Formation. The average absolute error of P-wave velocity prediction is 1.54%, which verifies the validity of the model. The results can provide a basis for logging interpretation and mechanical property evaluation of Wulalike formation shale.

**Keywords:** Wulalike Formation shale; rock physics properties; rock physics modeling; fracture porosity inversion