



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：基于统计回归和叠前反演的力学参数预测及建模方法研究—以渤南洼陷某工区为例

作者：王彬，肖汉，钮学民，张睿璇，葛星

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025084

投稿时间：2025-07-11

录用时间：2026-02-09

预出版时间：2026-02-09

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

基于统计回归和叠前反演的力学参数预测及建模方法研究—以渤南洼陷某工区为例

王彬¹, 肖汉¹, 钮学民¹, 张睿璇¹, 葛星¹

WANG Bin¹, XIAO Han¹, NIU Xuemin¹, ZHANG Ruixuan¹, GE Xing¹

1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院 山东 东营 257022

1. Geophysical Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257022, China

Research on mechanical parameter prediction and modeling methods based on statistical regression and prestack inversion—Taking a particular area in the Bonan Depression as an example

Abstract: [Objective] In the development of unconventional oil and gas, there exist problems such as complex reservoir structure and unclear rock mechanical properties. During the design of horizontal well trajectories and fracturing schemes, it is necessary to rely on rock mechanical models for segment and cluster division and design, thereby increasing the modification volume, reducing the risk of set changes, and achieving efficient development of unconventional oil and gas. The rock mechanics model can simultaneously reflect the continuous changes of mechanical parameters in the longitudinal and transverse directions with high resolution in the target area of the horizontal well trajectory. Therefore, in response to the model requirements, this paper provides a mechanical parameter prediction and modeling method based on statistical regression and prestack inversion. [Methods] Basing on the core test data and logging data, the quantitative relationship between elastic parameters and rock mechanical parameters is established and analyzed. Then, three-dimensional prestack inversion is performed using both drilling data and seismic data to obtain precise elastic parameters, including longitudinal wave velocity, density, Poisson's ratio, and Young's modulus. [Results] The application of this method in the tight glutenite reservoirs of the Bonan Sag has yielded significant and practical results. First, a robust quantitative relationship between mechanical and elastic parameters was established. The statistical regression relationship between Young's modulus and Uniaxial Compressive Strength (UCS) demonstrated a strong correlation (e.g., $R^2 > 0.75$), validating the feasibility of predicting rock mechanical strength from elastic parameters in this glutenite formation. Statistical analysis confirmed that the mechanical parameters of these highly compacted, low-porosity glutenites are primarily controlled by lithology and gravel content, exhibiting a very weak correlation with burial depth. This justifies the use of a unified predictive model across the entire studied depth interval. Second, a high-resolution 3D mechanical parameter model was constructed. A depth-domain structural model was built using logging data and a smoothed time-depth velocity field. Following attribute extraction, a comprehensive 3D mechanical parameter model for the target block was established. This model effectively overcomes the discreteness and non-continuity

基金项目: 国家重点研发计划“深部固、液相钾盐矿层智能井震联合反演预测技术”(2023YFC2906505); 山东省自然科学基金“裂缝型各向异性页岩油气藏地震勘探与储层表征方法研究”(ZR2023QD136)

This work is supported by the national R&D project (No. 2023YFC2906505) and the Shandong Province Natural Science Foundation (No. ZR2023QD136)

第一作者: 王彬(1997—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事地球物理勘探综合研究工作。E-mail: wbin326@163.com

收稿日期: 2025-07 ; 修回日期:

inherent in core and logging data, accurately characterizing the continuous lateral and vertical variations of mechanical properties. Third, the results are directed toward engineering application. To fully leverage the high vertical and lateral resolution of the mechanical parameter volume, the calculated seismic attributes were integrated into the 3D geological model based on engineering requirements. This outcome provides an accurate model for fracturing design, enabling precise assessment of the rock mechanical distribution along horizontal well sections, rational design of stage and cluster placement, optimization of pumping parameters, and enhancement of fracture conductivity. Consequently, it significantly increases the stimulated reservoir volume, effectively boosting single-well productivity and recovery rates. [Conclusion] The study leads to the following main conclusions: The integrated methodology of pre-stack inversion and statistical regression is a viable and effective solution for predicting 3D mechanical parameters in tight glutenite reservoirs. This method builds a bridge between petrophysical and seismological parameters, effectively resolving the challenge of poorly constrained rock mechanical properties in complex unconventional reservoirs. The constructed 3D mechanical parameter model provides a more reliable geological basis for optimizing well trajectories and fracturing designs. [Significance] The primary significance of this research lies in providing a reliable and scalable method for 3D rock mechanical parameter prediction and modeling, possessing substantial theoretical innovation and practical application value. It offers a dependable data foundation and a theoretical framework for defining mechanical boundaries and optimizing fracturing designs in heterogeneous tight reservoirs. This approach holds significant potential for improving fracturing efficiency and maximizing production in challenging tight glutenite formations.

Keywords: rock mechanical parameters; statistical regression; prestack inversion; elastic parameters; geological model

摘要: 在非常规油气开发中,存在着储层结构复杂、岩石力学特性不明确等问题,在水平井的井轨迹及压裂方案设计过程中,要依靠岩石力学模型进行段簇划分与设计,从而增大改造体积,降低套变风险,实现非常规油气高效开发。岩石力学模型在井轨迹靶区能够同时在纵向及横向上以较高分辨率体现力学参数的连续变化,因此面向模型需求,提供了一种基于统计回归和叠前反演的力学参数预测及建模方法。首先,基于岩心试验数据及测井资料,建立弹性参数与岩石力学参数的定量关系并加以分析。其次,利用钻井资料及地震资料开展三维叠前反演,获取精确的纵波速度、密度、泊松比和杨氏模量等弹性参数。进而根据定量关系计算出单轴抗压强度数据体,并利用测井数据及时间域平滑速度场构建深度域构造模型,提取相关属性后进一步建立目的区块的三维力学参数模型。模型和实际数据表明研究成果表征了岩石力学参数三维空间变化,可为该区后续的油气勘探开发提供可信的基础数据与理论依据,具有较强的理论创新与实际应用价值。

关键词: 岩石力学参数; 统计回归; 叠前反演; 弹性参数; 地质模型

中图分类号: 0302

文献标识码: A

文章编号:

0 引言

目前中国东部的非常规油气勘探开发已进入中后期,实现增产难度不断加大,必须深

入挖掘并高效利用岩石力学资料，深化储层分析研究，使有利区域的评价结果更可靠准确（刘建伟等，2016）。渤海洼陷页岩油储层具有非均质性强、黏土矿物含量高、有机质成熟度低、原油流动性差等特点（王雨菡等，2019），且岩石力学参数研究薄弱，目前“水平井+分段压裂”开发技术使得页岩油产量得到一定突破，但仍存在高产井少，经济开采难度大的问题，需要力学参数预测指导后续分段压裂等综合评价（Wu et al., 2024）。

岩石力学参数是指描述岩石在外力作用下的力学行为的物理性质，包括杨氏模量、泊松比、抗压强度等（曹正林等，2009）。这些参数是进行储层地应力场模拟（廖志毅等，2016）、裂缝发育机制分析（Ye et al., 2022）以及工程甜点优选的关键因素。岩石力学参数与地下岩石特性密切相关（Shakeri et al., 2024），开展岩石力学参数定量分析是非常规油气精准勘探与高效开发的必要环节。

目前，岩石力学参数的测定方法主要分为静态法和动态法（归榕和万永平，2012；边会媛等，2015）。静态法是在实验室内对岩样进行加载使其变形，然后测量其横向应变与纵向应变来计算得到静态力学参数（葛洪魁等，1994）；动态法是通过地球物理测井资料测定声波在岩样中的传播速度，借助物理方程转换后得到各岩石力学参数值（王少鹤，2011），学者们统一将该方法预测的弹性力学参数称为动态参数。在国内，单钰铭和刘维国（2000）通过测试同应力、温度条件下的砂泥岩力学及声波速度后获得动静力学参数；江进等（2007）采用岩石超声波测试方法结合岩石物理力学试验方法获得了样本的动静力学参数；张超等（2024）则进一步考虑了应变率的变化，建立了能反映静动载荷条件的岩石强度准则与统计损伤本构模型，提升了不同载荷条件下岩石变形破坏过程的模拟能力；对于致密砂岩样本，边会媛等（2015）通过实验确定了储层条件下致密砂岩动静态弹性参数之间的转换关系；李凯等（2016）借助岩石力学特征建立了岩石动静态弹性参数转换模型，为钻井方案设计提供理论支持。国外学者也做了相关研究，Olsen等（2008）分析了白垩岩在干燥与饱含水不同状态下动、静态杨氏模量大小关系；Bakhorji和Schmitt则探究了动静态参数差异的因素（Bakhorji and Schmitt, 2009），Bhuiyan M H等（2013）分别对砂岩、泥岩进行了动静态参数测试并总结了不同岩性对动静态参数的规律；Brotons V等（2014）则研究了钙质岩在不同温度下的动静态参数的关系。这些研究表明，岩石力学参数在动静态转换上已经有了丰富的成果，在应用时可根据实际情况来获取。在工程应用中一般采用动态法来获取储层岩石的动态力学参数（熊力坤等，2016；李凯等2016）。在水力压裂改造设计、地应力建模（陈勉，2004）、井壁稳定性分析（卢运虎等，2023）与压裂裂缝预测（李琼等，2017）等力学问题分析时，通常采用静态力学参数来取值。

上述研究工作通常是基于岩心和测井资料进行的，无法构建支撑开发工作需要的三维模型。针对这一现状，本文通过统计回归和叠前反演建立起岩石力学参数预测及建模方法。该方法利用实验室测得的岩心试验数据，借助统计回归这一数学工具开展岩石力学参数关系分析，建立起了岩石力学参数与地震弹性参数的数学定量关系，并以研究区内测井和三维地震数据资料为基础，通过叠前反演获得纵波速度体、密度体、杨氏模量及泊松比等弹性参数的三维数据体，借助定量关系式计算抗压强度，利用测井数据、时间域速度场构建深度域构造模型，并进一步建立区域上的三维力学参数模型。

1 弹性参数与岩石力学参数定量分析

力学参数的研究主要包括对杨氏模量、泊松比、抗压强度等岩石自身的力学性质及通

过测井资料得到各岩石力学参数开展分析研究，以二者之间的定量关系来搭建起岩石与地震学参数之间的桥梁。

1.1 静态参数获取

目前，利用钻井取芯获得岩心样品，并将其加工成试验岩样，在实验室内使用专业设备（图1）开展岩心压裂试验（单轴/三轴压缩试验）。

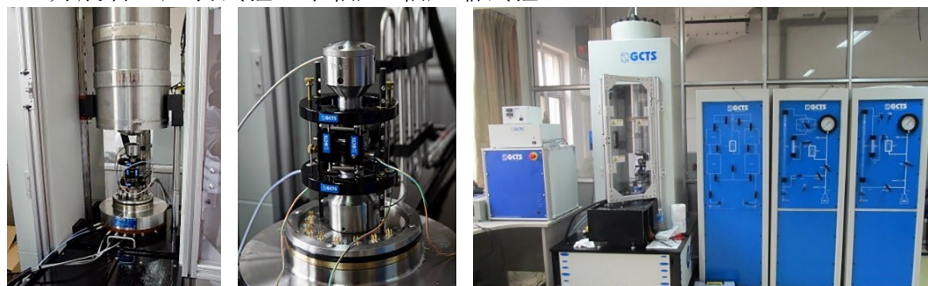


图1 岩心压裂试验设备

Fig. 1 Core fracturing test equipment

岩石的弹性参数包括杨氏模量、体积模量、泊松比等。岩石的力学参数包括抗压强度（单轴抗压强度和三轴抗压强度）、抗拉强度、抗剪强度等。在试验过程中，岩石会经历弹性阶段、蠕变阶段与破裂阶段。试验得出应力-应变全曲线（图2）。

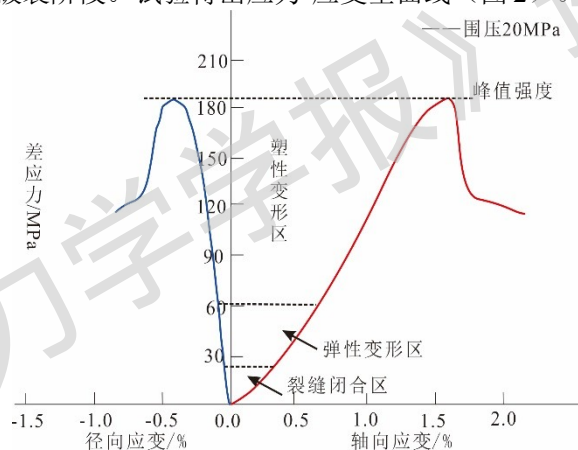


图2 单轴压缩试验所得应力-应变全曲线

Fig. 2 The full stress-strain curves obtained from the uniaxial compression test

对应力-应变曲线的弹性阶段进行处理，应力与应变的比值即岩石的杨氏模量；径向应变与轴向应变的比值为泊松比。从数据图中可以读取抗压强度、泊松比、杨氏模量、内摩擦角等数据。当对试验岩心增加动态围压后，得出的是三轴压缩试验的应力-应变曲线。借助摩尔圆可以得出内摩擦角与内聚力大小。这些岩石力学参数反映了岩石在压裂过程中的力学性质变化，在指导水平井工程压裂设计中作用显著。

1.2 动态参数获取

静态参数的测量是在实验室中通过对岩石样品施加多方向的压力进行的，该过程是低频率、高载荷的。而通过声波测井和地震资料，也可以获得连续的杨氏模量、泊松比、纵波速度和横波速度等参数曲线。该过程是高频率、低载荷的，因此即使是相同名称的参数如杨氏模量、泊松比等，其值也与静态参数有所出入，无法直接服务于工程施工，需进行动静态参数的转换。

实现动静态参数转换的过程是将静态参数如杨氏模量、泊松比数据与同样深度的测井数据进行拟合分析，建立定量转换公式。测量结果来自不同储层、不同埋深、不同岩性的岩样，具有显著离散性和非线性特征，且数据量小，相关性差，因此引入统计回归工具开展研究，其中典型方法有线性回归（简单线性回归与多元线性回归）、非线性回归、贝叶斯方法（王黎明等，2008），通过计算参数间的均值、方差等量化数据离散程度，提高数据可靠程度，并通过相关性分析量化参数间的线性或非线性关系拟合优度。线性回归方法具有原理清晰、数据需求低、计算效率高的特点，经对比后选择该方法分析获取的实验数据。

1.3 多元线性回归

多元线性回归的基本思想是：如果因变量 Y 是通过多个自变量 X_1, X_2, \dots, X_m 来进行预测的随机变量，则可建立 m 元线性回归模型：

$$y = c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_m X_m + \varepsilon$$

其中 c_0, c_1, \dots, c_m 为待估参数， ε 是随机误差，且可通过 SPSS、Python、MATLAB 等软件做非线性或线性回归分析，得出回归系数。回归预测模型是否可用于实际预测，可利用回归平方和、残差平方和来衡量模型的实测值和拟合值之间的偏差，偏差越小，说明预测效果越好。

回归方程的总平方和（SST）是观测值与观测值均值之差的平方和，反映了数据的波动性的大小；残差平方和（SSE）是模型拟合后观测值与预测值之差的平方和，反映了除去 Y 与 X_1, X_2, \dots, X_m 之间线性关系以外的因素引起的 Y 预测值数据的波动，回归平方和（SSR）反映了线性拟合值与它们的平均值的总偏差（王黎明等，2008），各参数及回归方程的均方和（MSR）和残差均方和（MSE）计算公式如下：

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad MSR = \frac{SSR}{k-1}, \quad MSE = \frac{SSE}{n-k}$$

式中， e_i 为残差， y_i 为实测值， \hat{y}_i 为预测值， \bar{y} 为实测值的平均值， n 为样本数量， k 为回归方程中自变量的个数。

指标 R^2 （也称为 R-squared 或拟合优度）是用来衡量一个回归模型对观测数据的拟合程度的统计指标。具体来说， R^2 表示因变量（被解释变量）的变异中有多少百分比可以由自变量（解释变量）解释（王黎明等，2008）。 R^2 的取值范围在 0 到 1 之间，越接近 1 表示模型对数据的拟合越好。在简单线性回归中， R^2 可以解释为相关系数的平方，即相关性的平方是拟合优度的度量。而在多元线性回归中， R^2 表示模型所解释的因变量的变异比例。

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

矫正 R^2 （Adjusted R-squared）可以用于修正 R^2 的不足之处，尤其是在多元回归模型中。 R^2 衡量了模型对观测数据的拟合程度，但当模型中增加了更多的自变量时， R^2 的值有可能会增加，即使这些额外的自变量对解释因变量的贡献较小。这可能导致模型出现过拟合（overfitting）的问题（Loganathan A et al., 2022）。矫正 R^2 通过考虑模型中使用的自变量数量，对 R^2 进行了修正。在选择模型时，除了普通的 R^2 之外，矫正 R^2 的使用能够更好地反映模型的质量。其计算方式如下：

$$Adjusted_R^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1}$$

2 叠前反演与建模理论

地震反演利用地震资料反求出地下波阻抗或纵横波速度的分布情况，估算储层参数，进而实现储层预测和油藏描述。叠后地震反演使用全角度叠加的地震资料，缺乏叠前数据所包含的丰富振幅和旅行时信息。叠前地震反演则更进一步，保留了地震反射振幅（反射系数）随偏移距变化特征（张广智等，2012），能够更可靠地预测地下储层的岩性、物性及流体变化规律（慎国强等，2014）。

弹性参数反演是通过叠前地震数据来得到各种弹性参数，如纵波速度、横波速度、密度、杨氏模量、体积模量、泊松比等，弹性参数反演可以使用复杂的正演模型及反演算法例如全波形反演和随机优化法，此类算法计算强度高（姚含和徐海，2022）；也可选用地震褶积模型和最小二乘反演，该方法计算强度较小。

2.1 叠前反演理论

在进行地震解释前，需要建立基本的岩石物理关系，包括：岩石特性和弹性参数间的经验公式、统计关系及理论关系。纵波速度、横波速度和密度是地震反演中最基础的三个参数，在开展反演时，由这三个参数可以计算出地层的反射系数。Aki 和 Richards 公式（Aki and Richards, 1980）给出了叠前分偏移距的反射系数近似公式：

$$R(\theta) = a \frac{\Delta V_p}{V_p} + b \frac{\Delta \rho}{\rho} + c \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (1)$$

其中： \bar{V}_p ， \bar{V}_s ， $\bar{\rho}$ 分别为反射界面两侧的纵、横波速度和密度的平均值， $\bar{V}_p = \frac{V_{p1} + V_{p2}}{2}$ ， $\bar{V}_s = \frac{V_{s1} + V_{s2}}{2}$ ， $\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ ； ΔV_p ， ΔV_s ， $\Delta \rho$ 是界面两侧 V_p ， V_s ， ρ 之差， $\Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}$ ， $\Delta V_s = V_{s2} - V_{s1}$ ， $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ ； θ 为纵波的入射角与纵波的透射角的

平均值， $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ ，公式中的系数 $a = \frac{1}{2 \cos^2 \theta}$ ， $b = \frac{1}{2} - 2 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta$ ， $c = -4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta$ 。

利用（1）式计算出地层反射系数 $R(\theta)$ ，并与子波矩阵 W_θ 褶积运算可得出合成地震记录道集 $S(\theta)$ ，该褶积模型 $S(\theta) = W_\theta * R(\theta)$ 可以完成正反演计算。将得到的合成地震道集与原始地震道集比较并计算二者的拟合差，优选出最小拟合差模型。

面向杨氏模量和泊松比预测的反射系数近似公式（Zong et al., 2013）为：

$$R(\theta) = A \frac{\Delta E}{E} + B \frac{\Delta \nu}{\nu} + C \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

其中： \bar{E} ， $\bar{\nu}$ 分别为反射界面两侧的杨氏模量、泊松比的平均值， ΔE ， $\Delta \nu$ 分别对应界面上下两侧杨氏模量、泊松比的差值，其中系数

$$A = \frac{1}{4 \cos^2 \theta} - 2 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta$$

$$B = \frac{1}{4 \cos^2 \theta} \frac{\left(2 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 3\right) \left(2 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 1\right)^2}{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \left(4 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 3\right)} - 2 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \sin^2 \theta \frac{1 - 2 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{3 - 4 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2},$$

$$C = \frac{1}{2} - \frac{1}{4 \cos^2 \theta}.$$

利用公式 (2) 可以从地震数据中直接估测杨氏模量和泊松比, 进而计算岩石脆性指数。

2.2 叠前反演方法

由于地震反演的目的具有不同的侧重点, 由经典 Zoeppritz 方程演化而来的各种近似方程被学者们加以深入研究, 对地震勘探产生了深远的影响。对钻井资料及地震资料处理后基于地质统计分析的结果, 构建地下介质的先验模型, 为反演计算提供了一个初始的参考框架; 基于贝叶斯理论, 将测井数据作为先验信息并与实际地震数据相结合, 计算后验概率分布来估计地下介质参数; 本文在叠前反演时的目标函数旨在同时最小化地震数据残差和地质模型先验信息偏差, 目标函数通用形式表述为:

$$E(m) = [d_{obs} - G(m)]^T C(d_{obs}) [d_{obs} - G(m)] + \lambda [m - m_0]^T C(m) [m - m_0] \quad (3)$$

其中 $E(m)$ 为目标函数, $C(d_{obs})$ 为地震数据协方差矩阵的逆矩阵, m_0 为测井数据构建的低频初始模型, $C(m)$ 为模型参数协方差矩阵的逆矩阵, 涵盖了模型参数的空间结构和变差函数等先验地质信息, λ 是用于平衡数据残差项和模型先验项权重的正则化参数。

当前生产中使用的叠前三参数同时反演方法是基于地震信号不同角度反射系数与纵、横波速度和密度之间的关系, 直接利用叠前道集反演出弹性参数 (公式 (1)), 为保证反演结果的可靠性, 在反演前对使用的 CRP 道集进行质控 (根据实际资料叠前道集信噪比、覆盖次数以及偏移距 (或入射角度) 综合考虑), 有效避免了间接反演的误差累积和传递问题。在计算时, 通过反演算法对模型参数进行迭代优化, 不断更新纵波速度、横波速度和密度的值, 使公式 (3) 趋最小化, 直至满足预设的收敛条件; 通过交会图及相关系数体来监控反演结果与地震数据的匹配度, 计算观测数据与反演计算数据之间的残差, 分析残差的分布特征和大小, 评估反演结果并进一步优化。

通过叠前反演获得的地震弹性参数体, 借助第 1 部分讨论的弹性参数与岩石力学参数定量关系, 可以计算出岩石力学参数体, 有效克服了岩心及测井数据中力学参数的离散性与不连续性缺点。此外, 为充分发挥岩石力学参数体在纵、横向的高分辨率优势, 根据工程需要, 可以进一步将力学参数体的属性采集到三维地质模型中, 构建深度域的属性模型。

2.3 深度域模型构建

深度域地质建模基于多学科数据融合与三维空间插值理论, 旨在构建高精度、量化的地下储层精细模型。其建模的基本原理是通过整合地震解释成果、测井资料及地质先验知识, 在三维网格框架内表征地质构造、岩相及物性参数的空间分布规律 (郑杨和简季, 2024)。相较于时间域模型, 深度域建模直接以实际地下深度为基准, 避免了时深转换过程中速度模型误差的传递 (孟凡彬, 2020), 可以显著提升构造形态与储层空间定位水平, 极大增加了地质模型的工程适用性。在建模过程中, 采用确定性方法与随机模拟算法相结合 (吴志春等, 2020), 利用地震反演属性与测井数据的空间相关性约束模型趋势, 且模型构建时严格遵循地质沉积规律与岩石物理关系, 并采用变差函数表征储层属性的各向异性特征, 最终形成兼具地质合理性与统计可靠性的三维数字地质体 (王功文等, 2021),

为储层数值模拟与工程决策提供基础。

在应用过程中，三维地质建模可以呈现出逼真的三维动态效果，但针对岩石力学参数的三维分布特征研究方法较少，且在浅层建模实践中，存在着近地表建模精度不高的问题（崔庆辉等，2023）。常规方法是将测井资料计算及三轴抗压试验获得的岩石力学参数，通过高斯插值随机模拟得到其三维分布（曹正林等，2009），该方法难以表征岩性复杂、储层非均质性强及井点数据不足的区块的三维非均质岩石力学场。针对这一问题，本文采用叠前反演获取岩石力学参数敏感数据体，充分保留地震资料横向连续性好的优势，将其延伸到三维的力学参数模型中。

在建模前期，需要建立精细的三维地质框架，应用局部迭代算法和矢量场算法及断层锯齿化使模拟网格达到更好的正交性，并设置不同的参数控制网格化程度，确保层位的一致性。在区内的最新地震解释成果的基础上，对目的层位进行追踪，并利用构造解释成果建立起构造模型。若是时间域的层位数据，需要借助准确的平滑速度场进行时深转化，并用井分层数据加以校正，得到深度域的层位后继续建模；也可以使用深度域层位直接建立构造模型。在地层格架上将地震属性如：杨氏模量、泊松比、孔隙度，渗透率等内插到网格中。内插的基本方法依靠克里金方程组的求解来实现，以分布的期望偏差最小为目的来计算地质模型的确解（邹艳红等，2017）。

3 渤南洼陷某工区应用分析

3.1 工区概况及岩心数据准备

研究区位于渤南油田北部，区内地势较洼，环境较为复杂，含油面积大，储量丰富，但岩体非均质性强、储集性能差异大，储层及含油性认识有待进一步加深，前期压裂效果不理想，改造段缺少关于可压性的评价优选标准。

本文研究对象为渤南洼陷沙四段致密砂砾岩，具有高压实、低孔渗的显著特点。根据该区地质沉积模式和储层展布规律进行取样，开展了样品岩心分析测试 120 块次，有效识别砂砾岩岩性类型 12 种，统计分析 21 口井试油试采数据，开展不同岩性、砾石含量、砾石大小的三轴岩石力学实验 36 块次。在此基础上，优选十余块能够在平面及纵向上覆盖工程开发的目标层段的代表性岩样进行系统的单轴抗压强度试验。

单轴抗压强度试验主要用于评估岩石的基本力学性质，如强度分级和岩性描述等。本研究涉及的岩心单轴压缩实验在室温（25° C）、无围压条件下进行，实验操作严格遵循国家标准《GB/T 23561.7-2009》的相关规范，以获取岩石在表生环境下的基准力学参数。

利用统计回归和叠前反演建立起岩石力学参数的预测及建模方法，可以有效利用区域的地震资料和测井资料，预测研究区地下岩石特性和分布，并进一步建立区域上的三维力学参数模型，为下一步区域内的钻井施工和压裂施工提供技术支持。

3.2 岩心数据分析

从不同埋深储层钻孔采样所获取的实际岩心入手，收集了工区 6 口井数十块岩样的实验数据（表 1）进行分析整理，获取了岩石的力学参数。基于测井资料，从井曲线上获取了弹性参数连续曲线，包括：杨氏模量、泊松比等。由于动静态参数转换公式已经有了很好的研究基础，故本文重点建立抗压强度与弹性参数的转换公式。

表 1 部分岩心试验数据

Table.1 Partial cores' test data

岩心号	深度 m	抗压强度 MPa	密度 g/cm ³	泊松比	杨氏模量 MPa	纵波速度 m/s
3	4612.3	79	2.43	0.08	20.687	3912.225
1	3784.9	33	2.35	0.248	15.48	3718.661
5	3797.1	30	2.45	0.293	7.962	3223.363
8	3788.8	15	2.5	0.177	25.253	3207.832
9	3370	54	2.53	0.1	15.8	3464.137
18	3378.1	50	2.55	0.19	21.1	4167.546
13	3374	37	2.58	0.24	14	4100.432
19	3381	87	2.42	0.13	22.5	3236.335

多重相关系数 R 反映因变量与自变量之间整体的线性关系强度，范围[-1, 1]。决定系数 R^2 衡量模型拟合优度，范围[0,1]。矫正 R^2 通常略低于 R^2 ，更适用于多自变量模型，降低过拟合的发生概率。标准误差是回归模型中残差的标准差，值越小模型越精确。这些指标共同评估回归模型的拟合优度和预测精度。F-统计量与 P 值用于评估回归模型的解释力和显著性。

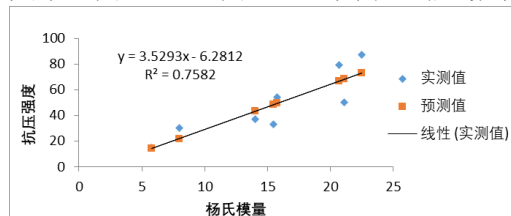
三组数据的回归统计及方差分析结果如表 2 所示，从数据中可知：线性拟合及解释最显著的是抗压强度与杨氏模量模型。

表 2 回归统计及方差分析表

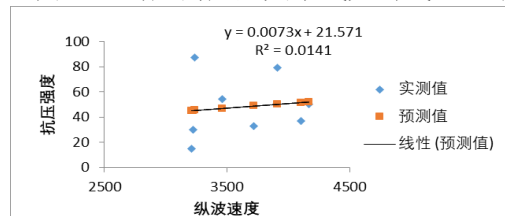
Table.2 Regression statistics and analysis of variance

评价指标	杨氏模量与抗压强度	纵波速度与抗压强度	泊松比与抗压强度
Multiple R	0.870754	0.118560	0.697835
R^2	0.758213	0.014056	0.486973
Adjusted R^2	0.717915	-0.150267	0.401469
标准误差	13.134310	26.522633	19.132003
SSR	3245.814349	60.174543	2084.673812
MSR	463.687764	8.596363	292.667687
F-统计量	18.815212	0.085542	5.695308
P-value	0.655199	0.821027	0.003008

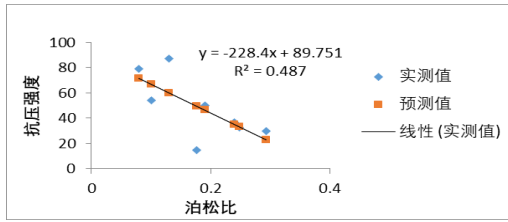
从现有数据进行统计回归分析，得出抗压强度与杨氏模量、纵波速度与泊松比的相关关系（图 3a） - （图 3c）。其中，非线性关系（图 3d）对应的定量关系式如公式（4）所示。



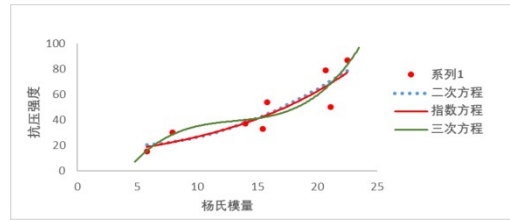
(a) 杨氏模量与抗压强度线性关系



(b) 纵波速度与抗压强度线性关系



(c) 泊松比与抗压强度线性关系



(d) 杨氏模量与抗压强度非线性关系

图3 抗压强度与杨氏模量、纵波速度及泊松比的相关性

Fig. 3 The correlations of compressive strength with Young's modulus, longitudinal wave velocity and Poisson's ratio

$$\begin{cases} UCS = 0.1609E^2 - 1.047E + 20.793 \\ UCS = 0.0429E^3 - 1.6879E^2 + 23.036E - 69.51 \\ UCS = 11.398e^{0.085E} \end{cases} \quad (4)$$

进一步，将密度、泊松比及杨氏模量作为自变量，抗压强度作为因变量进行多元回归分析，得出相关性指数 $R^2=0.5785$ ，拟合的关系式如公式 (5) 所示：

$$UCS = -73.7423\rho - 283.1658\nu - 1.1214E + 302.3516 \quad (5)$$

式中， UCS 为抗压强度， E 为杨氏模量， ρ 为岩石密度， ν 为泊松比。

利用上述岩石力学参数计算流程，再结合实际数据需要，可以得出研究区的岩石力学参数与弹性参数之间的定量关系。

3.3 力学参数预测结果

本文通过统计回归分析，获得了杨氏模量与单轴抗压强度的定量关系式如公式 (4) 所示，该关系能实现由叠前反演的杨氏模量体计算单轴抗压强度数据体。若考虑其他变量，在保证精确性的同时也可通过公式 (5) 计算单轴抗压强度。根据叠前反演获得的杨氏模量三维模型 (图4)，利用公式 (5) 计算得到单轴抗压强度的三维模型 (图5)。

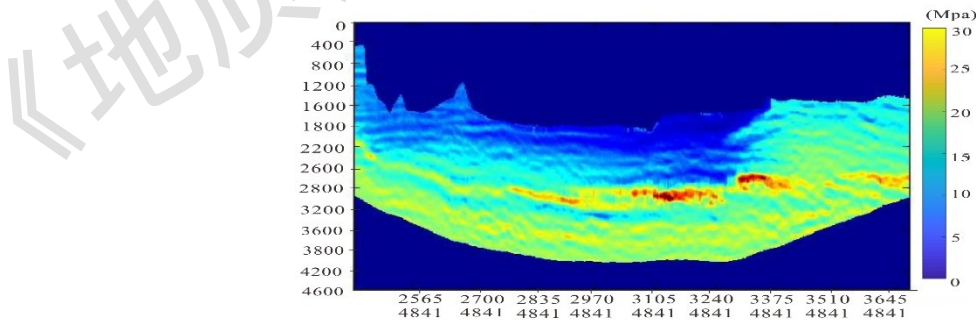


图4 杨氏模量地震剖面图

Fig. 4 Seismic section profile of Young's modulus seismic profile

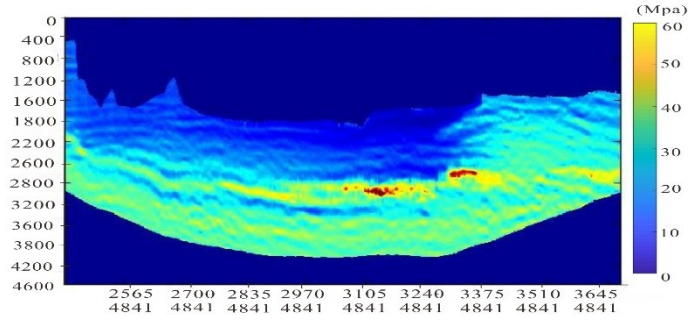


图5 单轴抗压强度地震剖面图

Fig. 5 Seismic section profile of uniaxial compressive strength

3.4 力学参数模型

结合区域地质上的构造模型、储层模型，加以地震速度进行约束，便可得到相应条件下的区域上三维力学参数模型。首先在建立深度域构造模型时，借助平滑三维速度场（图6b）将时间域的目的层位（图6c）转到深度域中，并根据实际的测井中井分层数据（图6a）加以校正，得到高精度的深度域构造模型（图6d），在此基础上，导入叠前反演出的力学参数地震数据体并提取地震属性，得出相应力学参数的属性模型（图7）。

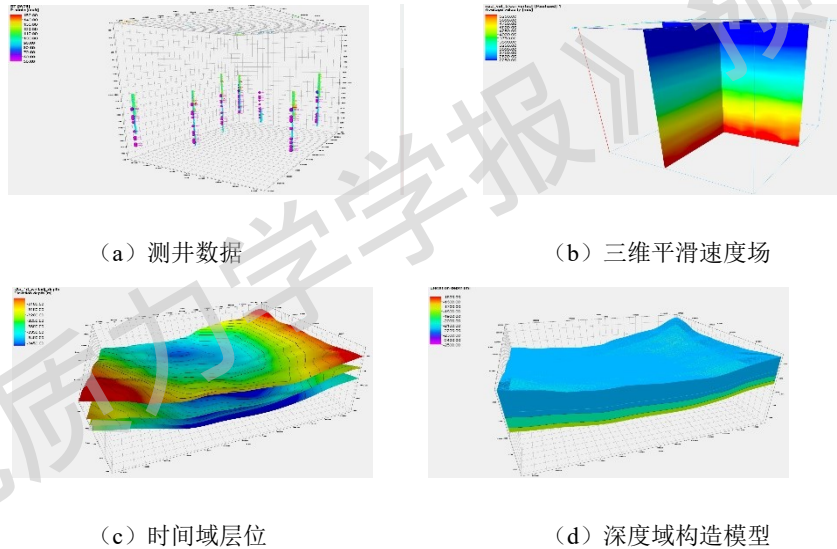


图6 深度域构造模型

Fig. 6 Construction model in depth domain

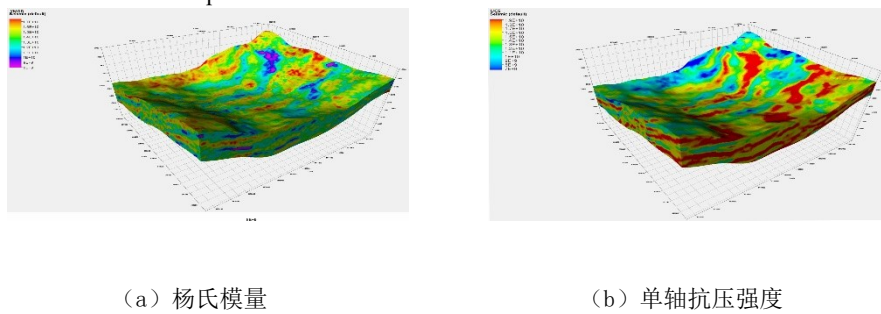


图7 力学参数属性模型

Fig. 7 Property models of mechanical parameters

3.5 力学参数模型的应用分析

岩石力学模型在水平井轨迹的靶区能够同时在纵向及横向上以较高分辨率体现力学参数的连续变化。在工程中，水平井的井轨迹及压裂方案设计需要借助岩石力学模型进行段簇划分与设计，依据水力裂缝扩展模拟结果（图 8）可知，第 2、3 段的段间距较大，而第 3 段的应力分布相对均衡，主要通过排量、液量控制裂缝的扩展；第 13 段在东西方向上地层存在明显应力差异，应选择强化缝内暂堵、提高缝网改造体积。通过合理设计压裂方案可以增大改造体积，降低套变风险，有效助力非常规油气的高效开发。

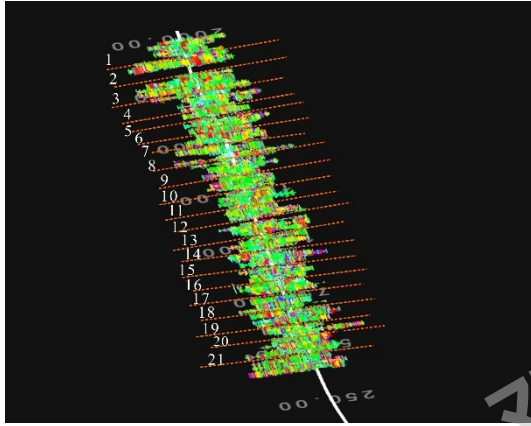


图 8 水力裂缝模拟效果图

Fig. 8 Simulation effect of hydraulic fractures

4 讨论

研究工区的岩性构成以砂砾岩体为主体，在实际地质条件中，致密砂砾岩普遍呈现出低孔隙度与低渗透率的典型物性特征（边会媛等，2015），这一特性对其力学行为具有显著影响。基于此，本研究将核心关注点置于杨氏模量、泊松比等关键岩石物理参数之上通过构建相应的力学模型来揭示其内在力学响应规律。对于工区发育的泥岩、页岩等其他岩性，由于其岩性特征与砂砾岩存在明显差异，将采用岩石物理分析方法结合曲线交汇技术，系统筛选能够有效表征其力学性质的敏感参数，为后续研究奠定基础。本文通过实验与理论分析已建立起抗压强度与杨氏模量、泊松比、密度之间的定量关系模型，考虑将这一研究思路与方法进一步拓展应用到横波速度、体积模量、拉梅常数、抗剪强度、孔隙度渗透率等更多岩石物理与力学参数中，构建更为全面的参数间定量关联体系，从而为岩石力学性质在矿产资源开发、地质工程设计等领域的应用（Wu et al., 2024）提供更为系统的理论依据。

本文综合运用统计学方法与叠前反演技术，探索岩石力学参数模型的构建思路与实现路径，并将所构建的模型应用于水力压裂改造工程实践中。研究的核心突破点在于，针对实验样本数量有限这一实际制约条件，通过统计学方法建立岩石力学参数与地震弹性参数之间的定量关联模型，同时借助地震反演技术获取地下岩石力学属性在横向空间上的变化规律，实现对地下介质真实状态的精准刻画。未来，当能够获取丰富且充足的实验样本时，将进一步拓展研究维度：一，开展复相关分析，重点探究三个及以上因素间的关联性以揭示多因素交互作用下的参数响应机制；二，引入主成分分析法对类型多样的实验数据进行变量重组与降维处理（王黎明等，2008），根据实际研究目标与工程需求，筛选出能

够最大限度保留原始信息的关键变量，提升数据处理效率与分析精准度；三，运用因子分析法挖掘多变量实验数据中潜藏的内在规律，通过识别那些无法直接观测但对可测变量具有显著影响的潜在因子，定量估计潜在因子对可测变量的作用程度及其相互间的相关性（王黎明等，2008）。

当前工程实践中，对地质模型分辨率的精度要求持续提升，具体表现为需要能够清晰刻画2米范围内的地层岩性、物性及构造细节，而常规反演方法对薄储层的有效识别厚度通常局限在4米以上，即便在局部地质条件有利区域，对3米级储层也仅有一定程度的响应，难以满足精细勘探开发的实际需求。针对这一矛盾，亟需通过算法优化、参数校正及多源数据融合等技术手段，对现有地震反演方法进行系统性改进，引入高精度的波阻抗反演算法，通过提升算法对弱信号的捕捉能力来增强薄地层的响应特征（姚含和徐海，2022）；结合测井资料与地震数据进行联合反演，利用测井数据的高纵向分辨率优势弥补地震数据的不足，实现两者的优势互补；同时，采用叠前地震反演技术，充分利用地震波的振幅、相位等多属性信息，提高反演结果的分辨率和可靠性（慎国强等，2014）。通过这些改进手段，重点增强数据采样过程中的信号保真性，以提升对薄层地质体的识别精度与表征能力。

5 结论

（1）本文研究了一种基于统计回归和叠前反演的岩石力学参数预测及建模方法，通过实验数据拟合与理论分析，构建了岩石力学参数与弹性参数之间的定量关系。在此基础上利用叠前弹性反演取的高精度三维弹性参数数据体，结合已建立的定量关系模型，精确计算得到单轴抗压强度三维数据体，并进一步构建起力学参数的三维地质模型，有效实现了岩石力学参数从一维测井数据到三维空间分布的转换。

（2）对于本文采用的数学方法，综合了岩石物理实验、测井数据和地震叠前反演，实现从地震弹性参数反演到力学参数反演转换，得出的应力场结果包含更多地震横向信息，为储层地质评价中力学特征的精细刻画、水力压裂设计中施工参数的优化选取等工程实践提供了可靠的数据保障。

（3）以渤南洼陷某工区为研究对象，得出三维力学参数模型，并在压裂设计中加以应用。根据压裂分析和物性特征，优化施工参数，提高导流能力，加沙强度从 $1.9\text{m}^3/\text{m}$ 提高至 $9.2\text{m}^3/\text{m}$ ；排量从 $5\text{m}^3/\text{min}$ 提高至 $16\text{m}^3/\text{min}$ ；改造体积大幅提高，从 59.2 万 m^3 提高至 373.5 万 m^3 。投产试验并取得良好的生产效果，单井日增油 7.2 吨，自喷时间提高 424.7 天，递减率下降 29.3% ，有效提升了单井产能和采油速度。

References

- AKI K, RICHARDS P G, 1980. Quantitative seismology-theory and methods [M]. San Francisco: W. H. Freeman: 801.
- BAKHORJI A M, SCHMITT D R, 2009. Laboratory measurements of static and dynamic bulk moduli in carbonate [M], SEG Technical Program Expanded Abstracts. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2040-2044.
- BHUIYAN M H, HOLT R M, LARSEN I, et al, 2013. Static and dynamic behaviour of compacted sand and clay: Comparison between measurements in Triaxial and Oedometer test systems[J]. Geophysical Prospecting, 61(2): 329-340.
- BIAN H Y, WANG F, ZHANG Y H, 2015. Experimental Study of Dynamic and Static Elastic Parameters of Tight Sandstones under Reservoir conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(S1): 3045-3054. (in Chinese with English abstract)
- BROTONS V, TOMAS R, IVORRA S, et al, 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 791-799.

- CAO Z L, ZHENG H J, GOU Y C, et al, 2009. Method of Prediction and Application on Stochastic Simulating 3D Parameter Field of Rock Mechanics[J]. *Geoscience*, 23(6): 1126-1130. (in Chinese with English abstract)
- CHEN M, 2004. REVIEW OF STUDY ON ROCK MECHANICS AT GREAT DEPTH AND ITS APPLICATIONS TO PETROLEUM ENGINEERING OF CHINA[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(14): 2455-2462. (in Chinese with English abstract)
- CUI Q H, SHANG X M, ZHAO S T, et al, 2023. Dual-parameter scanning static correction method based on shallow reflected waves in desert area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 62(5): 866-877. (in Chinese with English abstract)
- GE H K, HUANG R Z, ZHUANG J J, et al, 1994. Experimental Study on Dynamic and Static Elastic Parameters of Saturated Water Sandstone under Triaxial Stress[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 18(3):41-47. (in Chinese)
- GUI R, WAN Y P, 2012. ROCK MECHANICS PARAMETER CALCULATION BASED ON CONVENTIONAL LOGGING DATA: A CASE STUDY OF UPPER PALEOZOIC IN ORDOS BASIN[J]. *Journal of Geomechanics*, 18(4): 418-424. (in Chinese with English abstract)
- JIANG J, SUN J Z, QIAO Y H, et al, 2007. COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF GRAND BUDDHA ROCKMASS SPECIMENS IN WEST JINYANG MOUNTAIN IN TAIYUAN[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(S1): 3452-3460. (in Chinese with English abstract)
- LI K, RAN C, SHAO M J, et al, 2016. Study on Rock Mechanics and Dynamic-static Parameter Transformation Models in the Second Member of Xujiahe Formation in West Sichuan Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(6): 17-22. (in Chinese)
- LI Q, HE J J, CHEN J, 2017. Simultaneous ultrasonic experiment of dynamic and static elastic parameters of coal under formation pressure conditions in Qinshui Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(7): 2897-2903. (in Chinese with English abstract)
- LIU J W, ZHANG Y Y, ZENG L B, et al, 2016. Geophysical prediction of stress and stress desserts in unconventional reservoirs:an example in Bonan area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 51(4): 792-800. (in Chinese with English abstract)
- LOGANATHAN A, SUMITHRA P. A, DENESHKUMAR V, 2022. Estimation of Air Quality Index Using Multiple Linear Regression[J]. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 10(12): 717-722.
- LU Y H, JIN Y, XIA Y, et al, 2023. Dynamic analysis model of wellbore instability in deep tight sandstone: effect of intrinsic frequency and high stress[J]. *Mechanics in Engineering*, 45(5): 1033-1043. (in Chinese with English abstract)
- MENG F B, 2020. Interpretation method of high density 3D seismic depth domain data in coal mining districts[J]. *COAL GEOLOGY & EXPLORATION*, 48(6): 80-86. (in Chinese with English abstract)
- OLSEN C, CHRISTENSEN H F, FABRICIUS I L, 2008. Static and dynamic Young's modulus of chalk from the North Sea. *Geophysics*[J], 73: E41-E50.
- SHAKERI J, PEPE G, FARADONBEH R S, et al, 2024. Intelligent Approaches for Predicting the Intact Rock Mechanical Parameters and Crack Stress Thresholds[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57: 8499-8528.
- SHAN Y M, LIU G W, 2000. Experimental study of dynamic and static mechanics parameters of rocks under formation conditions[J]. *JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 27(3): 249-254. (in Chinese)
- SHEN G Q, TANG J, WANG Y M, et al, 2014. Application of pre-stack and post-stack joint inversion in reservoir detailed description-a case study in Yong3 area of Dongying depression[J]. *PETROLEUM GEOLOGY AND RECOVERY EFFICIENCY*, 21(2):87-90. (in Chinese with English abstract)
- WANG G W, ZHANG S T, YAN C H, et al, 2021. Resource-environmental joint forecasting in the Luanchuan mining district, China through big data mining and 3D/4D modeling[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 139-155. (in Chinese with English abstract)
- WANG S H, 2011. On Static Fracturing Parameters Prediction with Multipole Array Acoustic Log Data[J]. *Well Logging Technology*, 35(3): 270-274. (in Chinese with English abstract)
- WANG L M, CHEN Y, YANG N, 2008. *Applied regression analysis*[M]. Shanghai: Fudan University Press. (in Chinese)
- WANG Y H, DING W M, LIU X, et al, 2019. Lithofacies and causal mechanism of organic matter enrichment in the lower submember of

- the 3rd member of Shahejie Formation, Bonan Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 40(5): 1106-1114. (in Chinese with English abstract)
- WU H M, ZHANG N, LOU Y S, et al, 2024. Optimization of fracturing technology for unconventional dense oil reservoirs based on rock brittleness index[J]. Scientific Reports, 14: 1-14.
- WU Z C, GUO F S, ZHANG W L, et al, 2020. 3D geological modeling based on multi-source data merging of Xiangshan volcanic basin in Le'an of Jiangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 40(2): 310-322. (in Chinese with English abstract)
- XIONG L K, WANG S, XU F L, et al, 2016. Dynamic and Static Elastic Modulus Conversion for Shale in the Jiaoshiba Block, Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 44(5): 40-44. (in Chinese with English abstract)
- YAN Z Y, ZHU J B, TANG C A, 2016. Dynamic behavior and response of rock and underground openings subjected to high initial stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 38(z2): 260-265. (in Chinese with English abstract)
- YAO H, XU H, 2022. Total variation regularized full waveform inversion based on gradient projection method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 46(4): 977-981. (in Chinese with English abstract)
- YE D Y, LIU G N, ZOU X, et al, 2022. A Dual Fractal Approach to Thermal-Hydrological-Mechanical Interactions of Unconventional Reservoir[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55: 7081-7101.
- ZHANG C, ZHU D P, YANG C Q, et al, 2024. Applicability of statistical damage simulation method of deformation process for rock deformation process considering strain rate variation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 41(6). doi: 10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.019. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G Z, CHEN H Z, YIN X Y, et al, 2012. Method of Fracture Elastic Parameter Inversion Based on Anisotropic AVO[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 42(3): 845-851. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG Y, JIAN J, 2024. Spatial interpolation methods for 3D geological modeling of complex strata structures[J]. UNBAN GEOLOGY, 19(1): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- ZONG Z Y, YIN X Y, WU G C, 2013. Elastic impedance parameterization and inversion with Young's modulus and Poisson's ratio[J]. Geophysics, 78(6): 35-42.
- ZOU Y H, HUANG W, YANG K D, et al, 2017. 3D geological implicit modelling based on spatial interpolation by Yang Chizhong estimation method[J]. Journal of Geology, 41(3): 384-393. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 边会媛, 王飞, 张永浩, 等, 2015. 储层条件下致密砂岩动静弹性力学参数实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 34(S1): 3045-3054.
- 曹正林, 郑红军, 苟迎春, 等, 2009. 三维岩石力学参数场随机模拟预测方法及应用[J]. 现代地质, 23(6): 1126-1130.
- 陈勉, 2004. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 23(14): 2455-2462.
- 崔庆辉, 尚新民, 赵胜天, 等, 2023. 沙漠区基于浅层反射波的双参数扫描静校正方法[J]. 石油物探, 62(5): 866—877.
- 单钰铭, 刘维国, 2000. 地层条件下岩石动静力学参数的实验研究[J]. 成都理工学院学报, 27(3): 249-254.
- 葛洪魁, 黄荣樽, 庄锦江, 1994. 三轴应力下饱和水砂岩动静弹性参数的试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 18(3): 41-47.
- 归榕, 万永平, 2012. 基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 地质力学学报, 18(4): 418-424.
- 江进, 孙进忠, 乔艳红, 等, 2007. 太原晋阳西山大佛岩石动静力学参数的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 26(S1): 3452-3460.
- 李凯, 冉超, 邵孟璟, 等, 2016. 川西须二段岩石力学及动静参数转换模型研究[J]. 科学技术与工程, 16(6): 17-22.
- 李琼, 何建军, 陈杰, 2017. 地层压力条件下沁水盆地煤岩动静弹性参数同步超声实验研究[J]. 地球物理学报, 60(7): 2897-2903.
- 廖志毅, 朱建波, 唐春安, 2016. 高地应力作用下岩石和地下洞室的动力学行为和响应[J]. 岩土工程学报, 38(z2): 260-265.
- 刘建伟, 张云银, 曾联波, 等, 2016. 非常规油藏地应力和应力甜点地球物理预测——渤南地区沙三下亚段页岩油藏勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 51(4): 792-800.
- 卢运虎, 金衍, 夏阳, 等, 2023. 超深硬岩地层井壁失稳的动力学分析模型: 本征频率和高应力的影响[J]. 力学与实践, 45(5): 1033-

1043.

孟凡彬, 2020. 煤矿采区高密度三维地震深度域资料解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 48(6): 80-86.

慎国强, 汤婕, 王玉梅, 等, 2014. 叠前叠后联合反演技术在油气藏精细描述中的应用——以东营凹陷永安镇油田永3井区为例[J]. 油气地质与采收率, 21(2): 87-117.

王功文, 张寿庭, 燕长海, 等, 2021. 柴川矿集区地质大数据挖掘和三维/四维建模的资源-环境联合预测与定量评价[J]. 地学前缘, 28(3): 139-155.

王黎明, 陈颖, 杨楠, 2008. 应用统计学[M]. 上海: 复旦大学出版社.

王少鹤, 2011. 利用阵列声波测井资料预测静态压裂参数[J]. 测井技术, 35(3): 270-274.

王雨菡, 丁伟铭, 刘璇, 等, 2019. 渤海湾盆地渤南洼陷沙河街组三段下亚段岩相特征及有机质富集成因[J]. 石油与天然气地质, 40(5): 1106-1114.

吴志春, 郭福生, 张万良, 等, 2020. 江西乐安相山火山盆地多源数据融合三维地质建模[J]. 桂林理工大学学报, 40(2): 310-322.

熊力坤, 王升, 徐烽淋, 等, 2016. 涪陵焦石坝区块页岩动静弹性模量转换关系研究[J]. 石油钻探技术, 44(5): 40-44.

姚含, 徐海, 2022. 基于梯度投影法的全变差正则化全波形反演[J]. 物探与化探, 46(4): 977-981.

张超, 朱东平, 杨楚卿, 等, 2024. 考虑应变率变化的岩石变形统计损伤模拟适用性分析[J]. 应用力学学报, 2024, 41(6). doi: 10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.019.

张广智, 陈怀震, 印兴耀, 等, 2012. 基于各向异性 AVO 的裂缝弹性参数叠前反演方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(3): 845-851.

郑杨, 简季, 2024. 复杂地层结构三维地质建模空间插值方法研究[J]. 城市地质, 19(1): 121-128.

邹艳红, 黄望, 阳宽达, 等, 2017. 基于杨赤中推估法空间插值的三维地质隐式建模[J]. 地质学刊, 41(3): 384-393.

《地质力学学报》预出版