引用格式：侯朔阳，王小琼，鲜成钢，等，2026. 页岩油储层高精度一维地质力学建模研究[J]. 地质力学学报，32（2）：469−480. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025094

Citation: HOU S Y，WANG X Q，XIAN C G，et al.，2026. Research on high-precision one-dimensional geomechanical modeling of shale oil reservoirs[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：469−480. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025094

页岩油储层高精度一维地质力学建模研究

侯朔阳[1,2]， 王小琼[1]， 鲜成钢[1]， 葛洪魁[1]， 钟 毅[3]

HOU Shuoyang[1,2]，WANG Xiaoqiong[1]，XIAN Chenggang[1]，GE Hongkui[1]，ZHONG Yi[3]

1. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室，北京 102249；
2. 中国石油大学（北京）石油工程学院，北京 102249；
3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司，北京 102206

1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
2. *College of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
3. *CNPC Engineering Technology R&D Company Limited*, *Beijing* 102206, *China*

Research on high-precision one-dimensional geomechanical modeling of shale oil reservoirs

Abstract: ［**Objective**］The sweet spot intervals of shale oil reservoirs exhibit rapid vertical variations, centimeter-scale thin interbeds, well-developed bedding planes and strong anisotropy. Therefore, traditional isotropic models are inadequate for detailed geomechanical modeling and characterization, posing significant challenges for reservoir stimulation and hydraulic fracturing design. ［**Methods**］Geomechanics is key to the cost-effective development of oil and gas reservoirs with complex geological features. To establish a high-precision 1D geomechanical model, anisotropy experiments were conducted on shale oil reservoirs in the laboratory, and well log data were then used to extract geomechanical parameters for subsequent modeling. ［**Results**］The anisotropic rock mechanical parameters of shale were systematically obtained. Based on the rock mechanics experimental results and the anisotropic model, the depth-wise anisotropic stiffness matrix of the formation was derived from acoustic logging data, yielding anisotropic characterizations of mechanical parameters such as Young’s modulus, Poisson’s ratio, and compressive strength. Based on the acoustic-density log curves, the unloading characteristics of the study block were identified. Pore pressure was calculated using the Bowers unloading theory and calibrated with field Modular Formation Dynamics Tester data. By integrating a high-precision anisotropic rock mechanics model with pore pressure data, a higher-accuracy two-way horizontal principal stress field was derived using an anisotropic elastic model. This enabled the construction of a high-precision 1D anisotropic geomechanical model, which demonstrated significantly improved accuracy compared to the isotropic model. ［**Conclusions**］This study established an anisotropic 1D geomechanical modeling workflow that provides a theoretical basis and technical support for reservoir stimulation and fracturing program design. The model's precision was improved by approximately 7% compared to the isotropic model. Validation against field data (e.g., well history records) revealed the distribution characteristics of anisotropic geomechanical parameters and in-situ stress along the wellbore. ［**Significance**］The research findings serve as a foundational basis for geo-engineering integration, providing theoretical guidance and technical support for reservoir stimulation and hydraulic fracturing design.

基金项目：新型油气勘探开发国家科技重大专项（2025ZD1401403）；国家自然科学基金面上项目（42374132）

This research was financially supported by the National Science and Technology Major Project for New Oil and Gas Exploration and Development (Grant No. 2025ZD1401403) and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42374132).

第一作者：侯朔阳（2000—），男，在读博士。研究方向为非常规油气地质力学及储层评价。Email：hsy2269500469@163.com

通信作者：王小琼（1984—），女，博士，研究员。研究方向为非常规油气岩石物理、岩石力学与地质力学。Email：wxq4526@163.com

收稿日期：2025−07−30；**修回日期**：2025−11−29；**录用日期**：2025−12−03；**网络出版日期**：2026−03−19；**责任编辑**：王婧

Received：2025−07−30；Revised：2025−11−29；Accepted：2025−12−03；Available Online：2026−03−19；Handling Editor：WANG Jing

Keywords: shale oil reservoir; rock mechanics; geomechanics; anisotropic; 1D geomechanical modeling

摘　要：页岩油储层甜点段纵向变化快，具有厘米级薄互层和层理发育的特征，且各向异性强。传统各向同性模型难以满足精细的地质力学建模与表征需求，给油气藏改造与压裂方案设计等带来了挑战。地质力学是实现复杂地质特征油气田效益开发的关键。为了获得高精度一维地质力学模型，开展了页岩油储层各向异性室内实验，同时结合测井数据进行一维地质力学建模，分析地质力学特征。通过各向异性实验，系统获得了页岩各向异性岩石力学参数。基于实验结果及各向异性模型，利用声波测井资料等构建了沿地层深度方向的各向异性刚度矩阵，获得了杨氏模量、泊松比的各向异性表征及抗压强度等力学参数。根据声波、密度曲线确定了研究区块的卸载特征，采用 Bowers 卸载理论计算孔隙压力，并通过现场模块化动态地层测试数据进行校准。在此基础上，结合高精度各向异性岩石力学模型和孔隙压力，应用各向异性弹性模型求取了更高精度的两向水平主应力，最终构建了高精度的一维各向异性地质力学模型，其精度较各向同性模型大幅提高。该模型通过了井史资料等现场数据的验证，揭示了沿井筒的各向异性地质力学参数及原位地应力展布特点。研究成果为油气地质−工程一体化奠定了基础，并为油气藏的改造与压裂方案设计提供了理论依据与技术支撑。

关键词：页岩油储层；岩石力学；地质力学；各向异性；一维地质力学建模

中图分类号：P313.5; P618.13; P55　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0469−12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025094

0　引言

以页岩油气为代表的非常规油气资源潜力巨大，是未来增储上产的重要战略接替领域，也是中国实现“双碳”目标、保障国家能源安全的重要桥梁(邹才能等, 2012)。页岩油储层通常无自然产能，需要采用大规模体积压裂才能获得工业石油产量(何骁等, 2021; 赵文智等, 2023)。而进行大规模体积压裂的前提，是对储层的岩石力学特性及裂缝扩展规律有准确而细致的评价与认识。岩石力学主要研究岩石的变形与破坏，地质力学与其内涵一致，只是研究尺度更大。在油气田尺度上，地质力学主要研究油气藏地质体变形、破裂及运动的规律，是实现复杂地质特征油气田效益开发的关键。其核心表征参数包括岩体的杨氏模量、泊松比、岩石强度及地应力等，通常需要从实验室内岩石力学实验、测井解释与地震解释 3 个尺度开展研究。实验室内岩石力学测试是获得岩石力学性质最重要的研究手段(王小琼等, 2011, 2025; Wang et al., 2025)，因其结果对应某一特定深度，为此又称为“点”的岩石力学参数。为了能够对力学参数进行精细表征，提高油气资源的有效开发程度，北美地区引入了地质力学模型的相关概念(Suarez-Rivera et al., 2013; Zoback et al., 2019)。测井解释可以获得沿地层深度方向连续的岩石力学性质，又被称为“线”的力学数据或一维地质力学模型。如王珂等(2014)基于岩石的声学响应特征，融合测井数据，精确反演了一维岩石力学参数的空间分布规律。雍世和等(1996)通过斯伦贝谢公司提出的优化算法，显著提升了解释模型的计算效率和解释精度。基于地震解释可以获得研究区块三维地质体的力学性质，又被称为“面”或“体”的力学参数，也叫做三维地质力学模型(鲜成钢等, 2017; 曹欢等, 2024)。

中国陆相页岩油储层呈沉积层状发育特征，页岩、碳酸盐岩、碎屑岩等高频旋回，甜点段纵向变化快，厘米级薄互层和层理发育，层间力学性质差异大，且具有强各向异性，使得压裂改造难度极大(Vernik et al., 1992; 邹贤军等, 2018; 王小琼等, 2021; 胡素云等, 2022; 马永生等, 2022; 张佳亮等, 2023; 张少龙等, 2023; 洪宇等, 2025; 刘卫华等, 2025)。国内外学者针对页岩油储层的强各向异性进行了大量的研究。研究表明，页岩地层是典型的横观各向同性(TIV)地层(Vernik et al.,1997)，层理对其力学参数各向异性具有重要影响，平行与垂直层理方向的模量、泊松比及强度等力学性质存在明显差异(衡帅等, 2015; 李庆辉等, 2021; 唐洪明等, 2022; 冯少柯等, 2025)。随着埋深增加，钻井轨迹控制难度加大，地震、测井等资料受各向异性的影响也会更为显著(张少龙等, 2023; 刘卫华等, 2025)。此外，各向异性不仅对水力压裂裂缝网络的扩展及油气的开采具有重要的影响，也使其地应力剖面的求取有别

于常规均质各向同性模型，需要开展各向异性地质力学建模。舒红林等（2021）剖析了龙马溪组储层各小层的各向异性特征及其力学参数间的内在关联，基于岩心分析结果并融合测井数据，建立了单井各向异性地质力学模型。Shad et al.（2023）基于伊朗西南部 Ilam 组和 Sarvak 组探井的测井资料，结合统计学方法和经验相关性分析，建立了用于评估井壁稳定性并预测储层破裂压力的地质力学评价模型。

综上，一维地质力学模型可以获得连续的沿地层深度方向的力学剖面，是储层甜点评价、甜点段选取和压裂设计的基础，也是三维地质力学建模的必要前提。目前针对一维地质力学建模中系统考虑各向异性的研究仍较为有限。为此，文章以页岩油储层为对象，系统开展各向异性岩石力学实验，获得了页岩各向异性岩石力学参数，并对测井结果进行校准。结合实验数据和测井资料等，获得了沿井筒方向的杨氏模量、泊松比的各向异性表征以及抗压强度等力学参数；进一步采用各向异性弹性模型获得了高精度的两向水平主应力，从而构建了高精度的一维各向异性地质力学模型。研究成果可为油气藏的改造与压裂方案设计提供理论依据与技术支撑，是油气地质工程一体化的基础。

1　页岩岩石力学各向异性实验

为校准测井结果，开展了页岩油储层各向异性实验，系统获得了页岩的各向异性岩石力学参数。以中国南方某页岩油区块为研究区，采集实验样品。区块内页岩油储层岩石纹层发育，各向异性特征显著。为表征不同方向的岩石力学性质及各向异性，分别沿平行地层和垂直地层方向取样。其中，在平行地层方向上，以某一个角度为基准，设为 0°样品；另在与基准方向呈 45°和 90°的方向上各钻取 1 个样品，共获得 3 个不同角度的样品。该组不同角度的样品主要用于声发射 kaiser 效应实验，旨在求取最大、最小水平主应力，进而计算构造应力系数（详见 1.3 节）。实验分两步进行：首先，对平行和垂直地层的岩样进行岩石力学无损测试，包括室内声波测试及声波各向异性测试，获得岩样的各向异性动态弹性力学参数及各向异性特征。然后，对岩样开展单轴及三轴压缩实验，获得岩芯的各向异性静态弹性力学参数、单轴抗压强度、内聚力和内摩擦角等，用于测井岩石力学参数校准。

1.1　波速及其各向异性测量

岩石超声波速监测系统主要由 Olympus 5077PR 脉冲发生器、Tektronix DPO2024B 数字示波器、发射和接收换能器组成。采用经典的超声波脉冲法测量样品的纵波波速和横波波速，实验示意图见图 1。通过纵、横波时差以及超声波在样品中的传播长度计算波速，进而求取储层岩芯的动态力学参数。

动态弹性模量及动态泊松比的计算公式如下：

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{\rho V_{\mathrm{s}}^2\left(3V_{\mathrm{p}}^2-4V_{\mathrm{s}}^2\right)}{V_{\mathrm{p}}^2-V_{\mathrm{s}}^2} \tag{1}$$

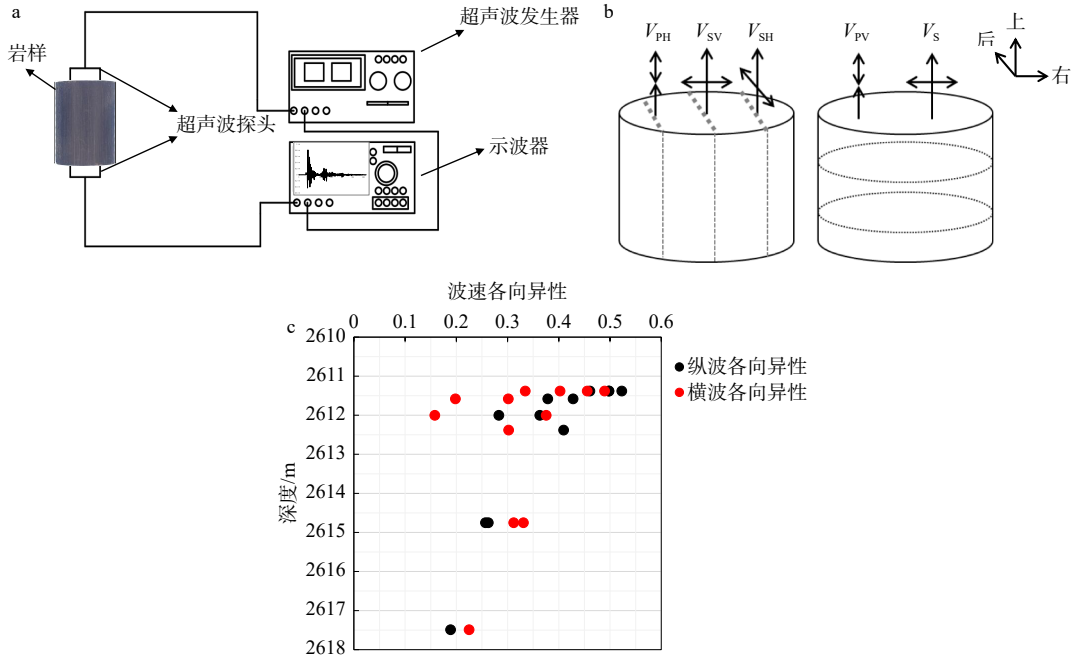
$$\nu_{\mathrm{d}}=\frac{V_{\mathrm{p}}^2-2V_{\mathrm{s}}^2}{2\left(V_{\mathrm{p}}^2-V_{\mathrm{s}}^2\right)} \tag{2}$$

式中，E_{d}—岩芯的动态弹性模量，GPa；ν_{d}—岩芯的动态泊松比，无量纲；ρ—岩芯的体积密度，g/cm^3；V_{p}—岩芯的纵波波速，km/s；V_{s}—岩芯的横波波速，km/s。

已有研究（Vernik and Nur, 1992；邹贤军等，2018；王小琼等，2021）表明，页岩的弹性性质总体上具有横观各向同性的特征（以垂直层理方向为对称轴）。根据超声波传播方向、质点振动方向和层理方向的空间关系（王小琼等，2021），测量了 5 个方向的波速：V_{PH}、V_{SV}、V_{SH}、V_{PV} 和 V_{S}（图 1b）。基于这 5 个波速，求取 5 个独立的弹性参数（C_{11}、C_{33}、C_{44}、C_{66} 及 C_{13}），并计算获得纵波波速各向异性系数 ε 和横波波速各向异性系数 γ（Thomsen, 1986）。研究区块储层样品的波速各向异性结果显示，页岩油储层样品正体表现出较强的各向异性，多数样品的各向异性系数大于 0.3（图 1c）。因此，各向同性模型难以精细刻画储层的力学特征，需要采用各向异性模型进行表征。

1.2　单轴及三轴压缩实验

通过单轴及三轴压缩力学试验，可获得岩芯的应力−应变曲线，进而确定样品的静态弹性模量、静态泊松比及抗压强度等力学参数；同时，根据莫尔圆准则，可计算得到内摩擦角、黏聚力等岩石力学参数。上述试验结果也为后续地质力学模型的建立提供了基础参数。单轴及三轴压缩试验采用 ZTR-1000 致密岩石可改造性测试系统。该系统是一套闭环数字伺服控制装置，具有独立的孔压、围压和轴压控制系统，轴向最大载荷为 1000 kN，最大围压为 70 MPa。关于该设备的图片等详细信息可参考 Wang et al.（2025）。基于测井数据计算得到的



a—超声波测试实验示意图；b—样品波速测量示意图；c—纵、横波波速各向异性统计图

图 1 波速各向异性实验测量及结果图

Fig. 1 Experimental measurement results of wave velocity anisotropy

(a) Schematic of ultrasonic velocity testing; (b) Schematic of wave velocity measurement of samples; (c) Statistical chart of P-wave and S-wave velocity anisotropy

均为动态结果，与实际地层的静态结果存在较大的差异，需要利用室内岩石力学实验所得到的静态力学参数来校准测井计算值。该研究通过对室内声波实验获得的动态弹性参数以及单轴压缩实验获得的静态弹性参数进行拟合，建立了符合其研究区块的动、静态弹性参数转换关系。平行地层（横向）和垂直地层（纵向）方向上的动、静态杨氏模量转换关系分别如图 2a、2b 所示，动、静态泊松比转换关系分别如图 2c、2d 所示。

不同方向上的动、静态杨氏模量转换关系如下：

$$E_{hs} = 0.6725E_{hd} \tag{3}$$

$$E_{vs} = 0.6305E_{vd} + 0.419 \tag{4}$$

式中，E_{hs}—横向静态杨氏模量，GPa；E_{hd}—横向动态杨氏模量，GPa；E_{vs}—纵向静态杨氏模量，GPa；E_{vd}—纵向动态杨氏模量，GPa。

不同方向上动、静态泊松比转换关系如下所示：

$$\nu_{hs} = 1.1479\nu_{hd} + 0.025 \tag{5}$$

$$\nu_{vs} = 1.0512\nu_{vd} - 0.0218 \tag{6}$$

式中，ν_{hs}—横向静态泊松比，无量纲；ν_{hd}—横向动态泊松比，无量纲；ν_{vs}—纵向静态泊松比，无量纲；ν_{vd}—纵向动态泊松比，无量纲。

将以上动、静态转换关系应用到相应测井数据，对测井数据校准，可以得到更为准确的静态杨氏模量和静态泊松比。

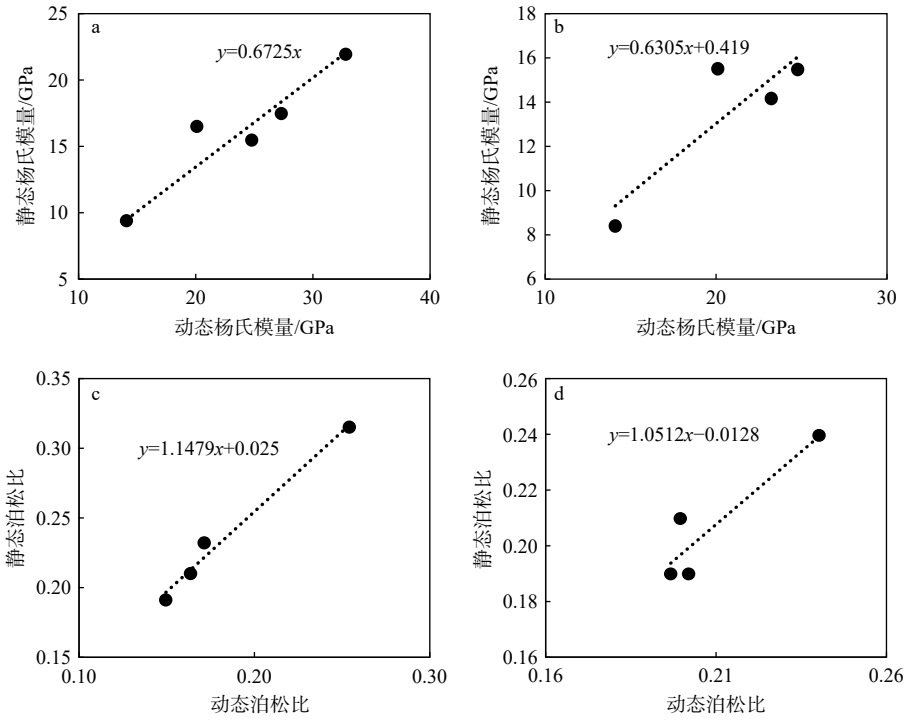
1.3 岩石地应力测试

利用岩石声发射 Kaiser 效应测量地应力是一种重要的室内测量方法。声发射 Kaiser 效应指的是岩石具有“应力记忆”能力：若当前加载应力未达到历史所受的最大应力，声发射数较少；而当加载应力超过历史所受最大主应力时，岩石内部微破裂急剧增多，声发射信号增加，有显著的声发射事件发生，表现为声发射率、累积声发射数及能量参数等出现明显的突跳点（王小琼等，2011）。通过识别水平方向上不同角度样品在加载过程中声发射 kaiser 点对应的应力值，并基于弹性力学原理进行应力转换，可获得水平方向上的最大、最小主应力。其主应力计算表达式为

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} + \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} \times (1 + \tan^2 2\theta)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} - \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} \times (1 + \tan^2 2\theta)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ} - 2\sigma_{45^\circ}}{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}} \tag{9}$$



a—横向动、静态杨氏模量转换关系；b—纵向动、静态杨氏模量转换关系；c—横向动、静态泊松比转换关系；d—纵向动、静态泊松比转换关系

图 2　动、静态杨氏模量及泊松比转换关系图

Fig. 2　Dynamic-static conversion of Young's modulus and Poisson's ratio

(a) Horizontal dynamic-static Young's modulus conversion; (b) Vertical dynamic-static Young's modulus conversion; (c) Horizontal dynamic-static Poisson's ratio conversion; (d) Vertical dynamic-static Poisson's ratio conversion

式中，σ_{0°—0°样品声发射 kaisr 点对应的应力值，MPa；σ_{45°—45°样品声发射 kaisr 点对应的应力值，MPa；σ_{90°—90°样品声发射 kaisr 点对应的应力值，MPa；σ_{H}—最大水平主应力，MPa；σ_{h}—最小水平主应力，MPa；θ—最大水平主应力方向，(°)。

地应力建模需要基于研究区块储层岩的构造应力系数。为了获得相对准确的构造应力系数，该研究利用声发射 kaiser 效应实验测得较为准确的最大、最小水平地应力，进而反算出储层岩石的构造应力系数，其表达式为

$$\varepsilon_{\mathrm{h}}=\frac{1}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{h}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right)+\frac{v_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{H}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right)-\frac{v_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{v}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right) \tag{10}$$

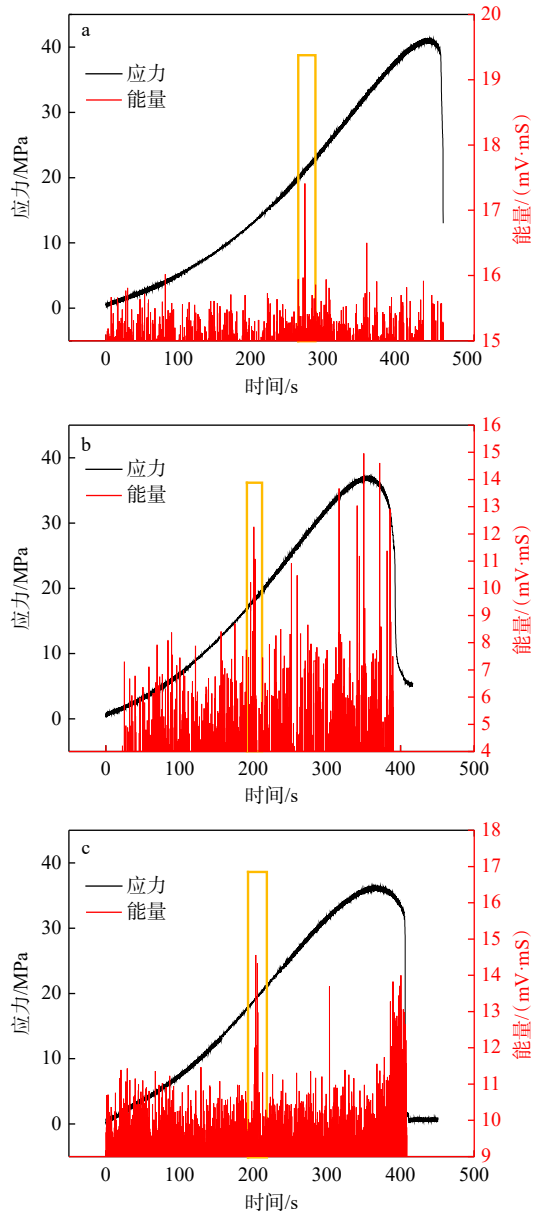
$$\varepsilon_{\mathrm{H}}=\frac{1}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{H}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right)+\frac{v_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{h}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right)-\frac{v_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{s}}}\left(\sigma_{\mathrm{v}}-\alpha P_{\mathrm{p}}\right) \tag{11}$$

式中，ε_{h}—最小水平主应力构造应力系数，m^{-1}；ε_{H}—最大水平主应力构造应力系数，m^{-1}；α—Biot 系数，无量纲；P_{p}—孔隙压力，MPa；σ_{v}—垂向应力，MPa；E_{s}—静态杨氏模量，MPa；v_{s}—静态泊松比，无量纲；其余变量含义同上。

文中采用单轴压缩试验，联合美国物理声学公司(PAC)生产的声发射系统进行声发射监测。水平方向上不同角度的应力、能量曲线与时间的关系如图 3 所示，能量曲线上存在若干突跳点。结合样品所在深度，可初步确定地应力的取值范围；再根据能量突跳特征，将黄色框指出的能量突跳点识别为该实验的声发射 kaiser 点。将该点对应的应力值代入公式(7)—(9)，可求得最大、最小水平主应力，计算结果见表 1。最后，根据公式(10)和(11)计算最大、最小水平主应力的构造应力系数，用于后续测井地应力的建模研究。

2　一维各向异性地质力学建模

基于实验数据及研究区块的测井、压裂等相关资料，建立了一维地质力学精细化模型(图 4)。在计算地质力学相关参数时，考虑到工区储层各向异性的特点，因此采用各向异性 TIV 模型计算弹性模量；同时，在应用多孔线弹性模型计算地应力时，同样考虑了各向异性的影响。



黄色方框为 Kaiser 效应点

a—0°样品声发射实验结果；b—45°样品声发射实验结果；c—90°样品声发射实验结果

图 3 声发射实验结果

Fig. 3 Acoustic emission test results

(a) Acoustic emission results for 0° sample; (b) Acoustic emission results for 45° sample; (c) Acoustic emission results for 90° sample

The yellow rectangles mark the Kaiser Effect Point.

2.1 岩石力学参数建模

利用弹性波传播方程给出的纵、横波速、密度与岩石杨氏模量、泊松比之间的理论关系[公式(1)和(2)]，基于声波测井资料得到的纵波时差与横波时差，以及密度测井得到的体积密度数据，可以计算岩石弹性参数。

表 1 基于声发射 Kaiser 效应的地应力测试实验结果表

Table 1 Experimental results for in-situ stress measurement using the acoustic emission kaiser effect

取样方向	Kaiser点对应的应力值/ MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/ MPa
0°	21.00		
45°	18.00	51.13	49.07
90°	19.20		

由于研究区块具有较强的各向异性(图 1c)，水平方向与垂直方向的力学性质存在较大差异，因此采用各向异性 TIV 模型。

在各向异性模型中，弹性刚度系数可简化为 5 个参量：C_{11}、C_{13}、C_{33}、C_{44}和C_{66}(王小琼等，2021)。不同方向的杨氏模量和泊松比可以通过 ANNIE 模型或 V-reg 模型求取。ANNIE 模型应用更广，V-reg 模型则适用于研究区块无斯通利波的情况。由于该研究区块进行了斯通利波测井，符合 ANNIE 模型的应用前提(Schoenberg et al., 1996)，故采用此模型进行计算。在水平井中，可通过测井数据直接计算 C_{33}、C_{44}和C_{66}；在垂直井中，则可直接计算 C_{11}、C_{44}和C_{66}。同时，采用 C_{33}和C_{44}来计算 C_{13}，以改善垂向泊松比与横向泊松比之间较高线性相关的局限性。

垂直井中C_{33}、C_{44}和C_{66}的计算方法分别为

$$C_{33}=\rho V_{\mathrm{p}}^2 \tag{12}$$

$$C_{44}=\rho V_{\mathrm{slow_s}}^2=\rho V_{\mathrm{fast_s}}^2 \tag{13}$$

$$C_{66}=\rho V_{\mathrm{shear_{Stoneley}}}^2 \tag{14}$$

式中，$V_{\mathrm{slow_s}}$—慢横波波速，km/s；$V_{\mathrm{fast_s}}$—快横波波速，km/s；$V_{\mathrm{shear_{Stoneley}}}$—斯通利波波速，km/s；其余变量含义同上。

水平井中C_{11}、C_{44}和C_{66}的计算方法分别为

$$C_{11}=\rho V_{\mathrm{P}}^2 \tag{15}$$

$$C_{44}=\rho V_{\mathrm{slow_s}}^2 \tag{16}$$

$$C_{66}=\rho V_{\mathrm{fast_s}}^2 \tag{17}$$

式中，$V_{\mathrm{slow_s}}$—慢横波波速，km/s；$V_{\mathrm{fast_s}}$—快横波波速，km/s；其余变量含义同上。

根据 ANNIE 模型的假设，$C_{12}=C_{13}$、$C_{13}=C_{33}-2C_{44}$。据此求得横向和纵向的动态杨氏模量和动态泊松比，公式如下：

$$E_{\mathrm{v}}=\frac{C_{11}C_{33}-2C_{13}^2+C_{12}C_{33}}{C_{11}+C_{12}} \tag{18}$$

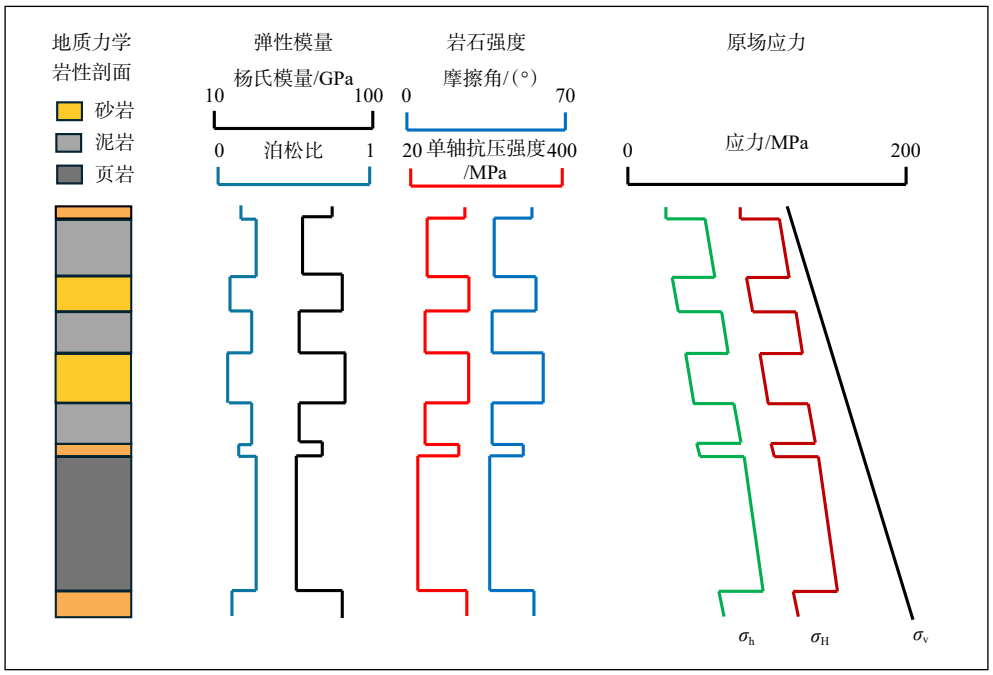


图 4　一维地质力学模型示意图

Fig. 4　Schematic of 1D geomechanical model

$$E_h = \frac{(C_{11}-C_{12})\cdot\left(C_{11}C_{33}-2C_{13}^2+C_{12}C_{33}\right)}{C_{11}C_{33}-C_{13}^2} \tag{19}$$

$$v_v = \frac{C_{13}}{C_{11}+C_{12}} \tag{20}$$

$$v_h = \frac{C_{12}C_{33}-C_{13}^2}{C_{11}C_{33}-C_{13}^2} \tag{21}$$

式中，E_v—纵向杨氏模量，GPa；E_h—横向杨氏模量，GPa；v_v—纵向泊松比，无量纲；v_h—横向泊松比，无量纲；C_{11}、C_{12}、C_{13}、C_{33}—弹性刚度系数，无量纲。

通过测井获得不同方向上杨氏模量和泊松比后，结合 1.2 节中获得的动、静态转换关系式，得到沿井筒深度方向的各向异性杨氏模量与泊松比曲线（图 5）。结果显示，不同方向上的参数具有明显差异。红点为岩石力学实验测得的各向异性结果（图 5a），用于对模型结果进行校准，以验证模型的可靠性，从而获得可信的各向异性岩石力学参数。

2.2　孔隙压力建模

地层孔隙压力是计算坍塌压力、破裂压力和地应力的基础数据，可依据地层孔隙异常压力的形成机理进行地层孔隙压力预测，其基本原理见樊洪海（2001）。通过分析研究区块的声波速度与密度交汇曲线，发现密度变化不大，而波速呈明显下降趋势。据此判断该区域主要存在生烃增压导致的卸载机制。因此，采用 Bowers（1994）提出的卸载理论公式对研究区块页岩储层地层孔隙压力进行预测，公式如下：

$$\sigma' = \sigma_{max}\left[\frac{1}{\sigma_{vmax}}\left(\frac{V_v-V_0}{A}\right)^{\frac{1}{B}}\right]^U \tag{22}$$

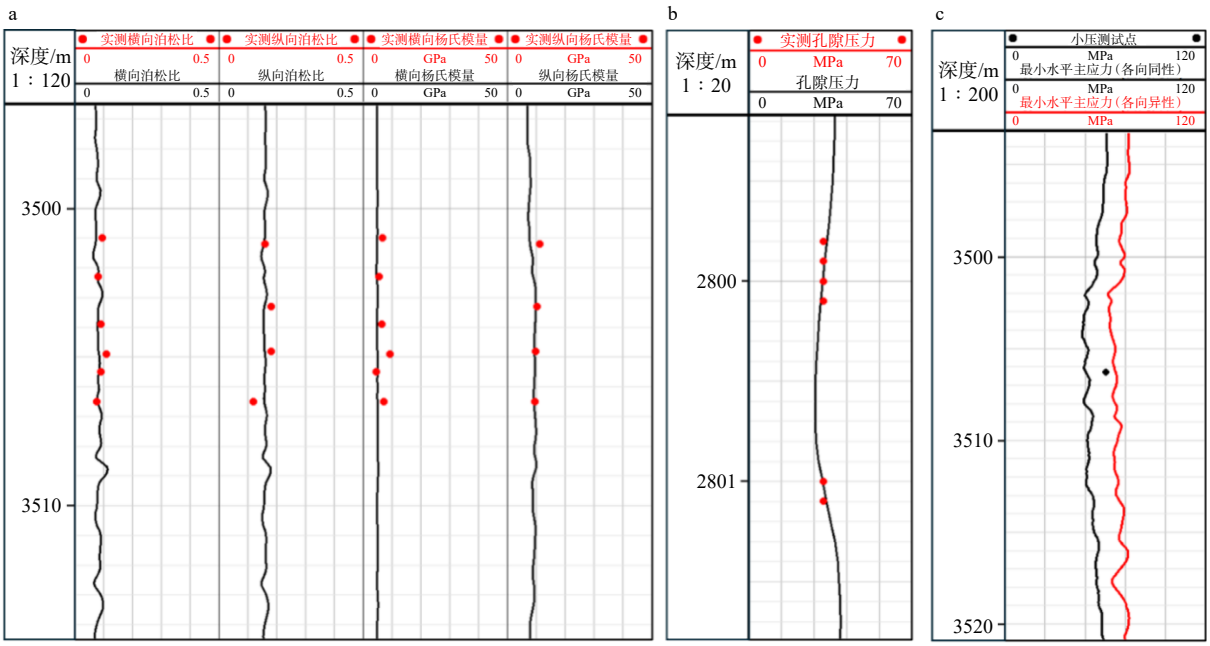
$$P_p = \sigma_v - \sigma' \tag{23}$$

式中，σ'—有效应力，MPa；σ_{vmax}—卸载开始时的最大垂直有效应力，MPa；V_v—卸载开始时最大垂直有效应力相应的声波波速，m/s；P_p—孔隙压力，MPa；A、B、V_0—经验系数，无量纲；U—弹塑性系数，无量纲；其余变量含义同上。应用 Bowers 卸载理论公式时，需针对每个研究区块，根据实际资料确定公式（22）中的模型参数 A、B、V_0 和 U。

利用研究区现有的地层压力实测资料，结合公式（23）和上覆岩层应力数据，计算得到有效应力 σ'；进一步通过测井资料进行拟合，获得改区块的 Bowers 卸载理论公式的模型参数分别为：A=10.5、B=0.8、U=8、V_0=5000。基于该模型计算得到的孔隙压力剖面如图 5b 中黑色曲线所示，红点为实际测量获得的孔隙压力数据，用于对建模结果进行校准以控制模型质量。建模结果与实测结果的对比见表 2，二者误差均在 5% 以内，表明孔隙压力模型具有较好的可靠性和准确性。

2.3　两向水平地应力建模

目前应用较为广泛的水平应力计算模型为组合弹簧模型，主要适用于各向同性地层。其公式如



a—岩石力学参数；b—地层孔隙压力；c—研究区块典型井小压测试

图 5 地质力学典型参数校核图

Fig. 5 Verification diagram of typical geomechanical parameters

(a) Rock mechanical parameters; (b) Formation pore pressure; (c) Mini-frac test of a typical well in the study area

下所示：

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v}\sigma_v - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2}\varepsilon_h + \frac{vE}{1-v^2}\varepsilon_H \tag{24}$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v}\sigma_v - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2}\varepsilon_H + \frac{vE}{1-v^2}\varepsilon_h \tag{25}$$

式中，α—Biot 系数，无量纲；ε_h、ε_H—构造应力系数，无量纲；其余变量含义同上。

由于研究区块具有强各向异性，因此采用各向异性 TIV 的多孔线弹性模型，来计算储层的最小和最大水平主应力，具体公式如下：

$$\sigma_h - \alpha P_p = \frac{E_{sh}}{E_{sv}}\frac{v_{sv}}{1-v_{sh}}\left[\sigma_v - \alpha P_p\right] + \frac{E_{sh}}{1-v_{sh}^2}\varepsilon_h + \frac{E_{sh}v_{sh}}{1-v_{sh}^2}\varepsilon_H \tag{26}$$

$$\sigma_H - \alpha P_p = \frac{E_{sh}}{E_{sv}}\frac{v_{sv}}{1-v_{sh}}\left[\sigma_v - \alpha P_p\right] + \frac{E_{sh}}{1-v_{sh}^2}\varepsilon_H + \frac{E_{sh}v_{sh}}{1-v_{sh}^2}\varepsilon_h \tag{27}$$

式中，v_{sh}、v_{sv}—各向异性水平和垂直方向的静态泊松比，无量纲；E_{sh}、E_{sv}—各向异性水平和垂直方向的静态杨氏模量，GPa；其余变量含义同上。

利用室内地应力测试实验获得的最大、最小水平主应力，反演得到研究区块的构造应力系数 ε_h=0.00018、ε_H=0.00062（见 1.3 节）。通过公式（24）—（27），分别计算沿井筒方向的各向同性模型与各向异性模型最小水平主应力（图 5c）。为校准模型的可靠性，采用小型压裂测试结果对计算得到的最小水平主应力进行验证。水力压裂过程中，可根据井眼的受力状态及其破裂机理推算地应力：随着施工压力的增大，当井内液柱压力升高至足以压裂地层时，地层发生破裂，裂缝逐渐延伸或形成新的裂缝；当裂缝延伸至井壁应力集中区外并进行瞬时停泵时，施工压力迅速下降。裂缝闭合后，施工压力趋于稳定，此刻的压力为停泵压力，地层承受的压力为闭合应力。停泵后，压裂过程中的摩阻最小，可忽略不计，裂缝闭合应力与垂直于裂缝的最小水平主应力相平衡，此时地层最小水平主应力等于裂缝闭合压力与静水压力之和（Yang et al., 2025; 孙东生等，2025; 杨跃辉等，2025）。基于上述方法，对研究

表 2 计算孔隙压力与实测孔隙压力对比结果

Table 2 Comparison of calculated and measured pore pressure

深度/m	孔隙压力/MPa	实测孔隙压力/MPa	误差分析/%
2799.80	33.56	32.16	4.33
2799.90	32.54	32.16	1.17
2800.00	31.71	32.16	1.41
2800.10	30.85	32.16	4.08
2801.00	31.71	32.17	1.42
2801.10	33.29	32.17	3.49

区块进行的小型压裂测试通过分析压力衰减过程中系统刚度的变化识别闭合压力，获得最小水平主应力值为 59.32 MPa。各向同性模型和各向异性模型计算得到的最小水平主应力分别为为 50.55 MPa 和 64.38 MPa(图 5c)，误差分别为 15.7% 和 8.5%。各向异性模型的精度更高。这表明，对于各向异性较强的地层，采用各向同性模型难以精确获得地应力。

3　模型的现场资料校准

为进一步对一维地质力学模型进行质控，开展了井眼稳定性评价工作，并将评价结果与钻井工程历史数据、高分辨率成像测井资料等进行综合对比。先基于多孔线弹性理论，精确计算井壁的应力集中状况，再对井眼是否处于失稳状态进行判定。采用莫尔-库伦准则判断岩石的剪切破坏，结合最大拉伸应力准则，全面考量井眼周围岩石在不同应力条件下的力学行为，从而准确评估井眼的稳定性。基于上述分析，计算获得了研究井段的泥浆密度窗口(图 6)。

泥浆密度在钻井过程中至关重要，其取值直接影响井眼稳定性与作业安全。当泥浆密度低于孔隙压力梯度时，地层流体在压差作用下涌入井筒，可能引发井涌。若不及时采取有效措施，会导致井喷等严重事故。当泥浆密度低于崩落压力梯度时，井壁岩石无法承受周围地层应力，易导致井壁崩落，不仅影响井眼完整性，还可能导致卡钻等次生事故。当泥浆密度高于最小水平主应力时，泥浆会在压力差的作用下进入地层裂缝，引发漏失，导致钻井液的大量损失并可能引起地层压力失衡，增加钻井风险。当泥浆密度高于拉伸破坏压力梯度时，井壁岩石承受过大的拉伸应力，从而发生拉伸破坏。

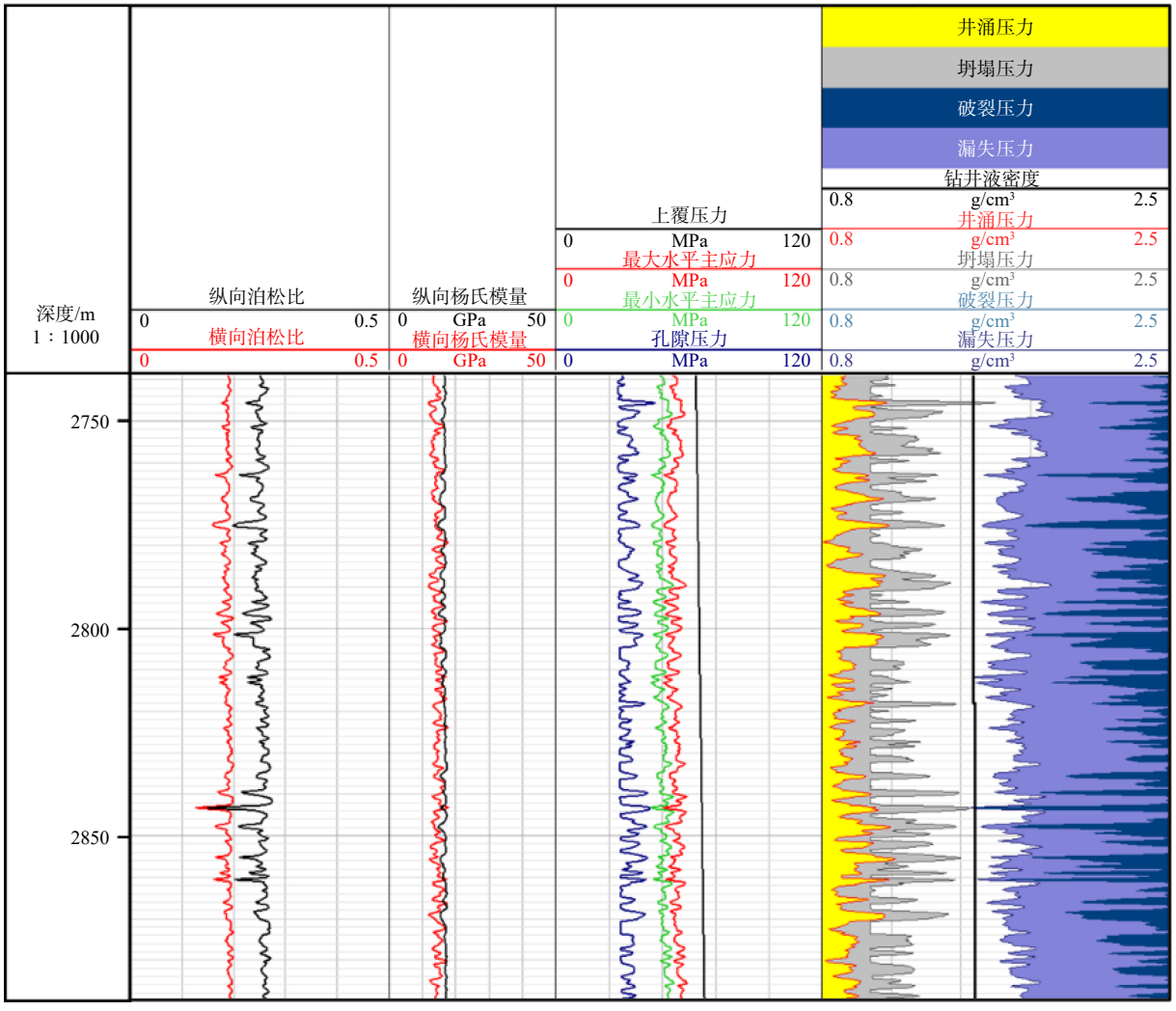


图 6　典型井的一维地质力学模型及井壁稳定性分析

Fig. 6　1D geomechanical model and wellbore stability analysis for a typical well

在钻井工程实施过程中，地质力学因素诱发的钻井复杂事故有较多关联，典型表征包括井涌、缩径卡钻、井壁失稳坍塌、阻卡、泥浆漏失及井眼扩张等异常工况。通过对已完钻井中地质力学诱发事故的特征识别与成因机制分析，可为地层应力场反演和地质力学模型验证提供高精度标定依据。

此次研究所建的典型井的一维地质力学模型及其井壁稳定性分析如图 6 所示，包括井涌压力、坍塌压力、破裂压力以及漏失压力剖面。在当前使用的钻井液密度条件下，未出现井壁崩落现象，与井史资料记录吻合，验证了所建地质力学模型的可靠性。

综上所述，通过页岩油储层各向异性实验研究，系统获得了页岩各向异性岩石力学参数。基于实验结果及各向异性模型，结合声波测井资料，反演得到沿地层深度方向的各向异性刚度矩阵，进而获得杨氏模量、泊松比各向异性表征及抗压强度等力学参数。孔隙压力由孔隙压力模型计算求得，并用实测孔隙压力数据进行校准。采用各向异性岩石力学模型，计算得到更高精度的两向水平主应力。高精度一维地质力学建模流程如图 7 所示。在建模过程中，各关键环节均依靠实验数据、实测孔隙压力以及小型压裂测试结果等进行校准，精度较各向同性模型大幅提高。该模型已通过井史资料等现场数据的验证，能够有效揭示沿井筒方向的各向异性地质力学参数及原位地应力展布特征。一维地质力学模型可提供连续的沿地层深度方向的力学剖面，是钻完井设计、储层甜点评价、甜点段选取和压裂设计的基础，也为三维地质力学建模提供支撑。因此，开展高精度的一维地质力学建模具有重要的研究意义与工程应用价值。

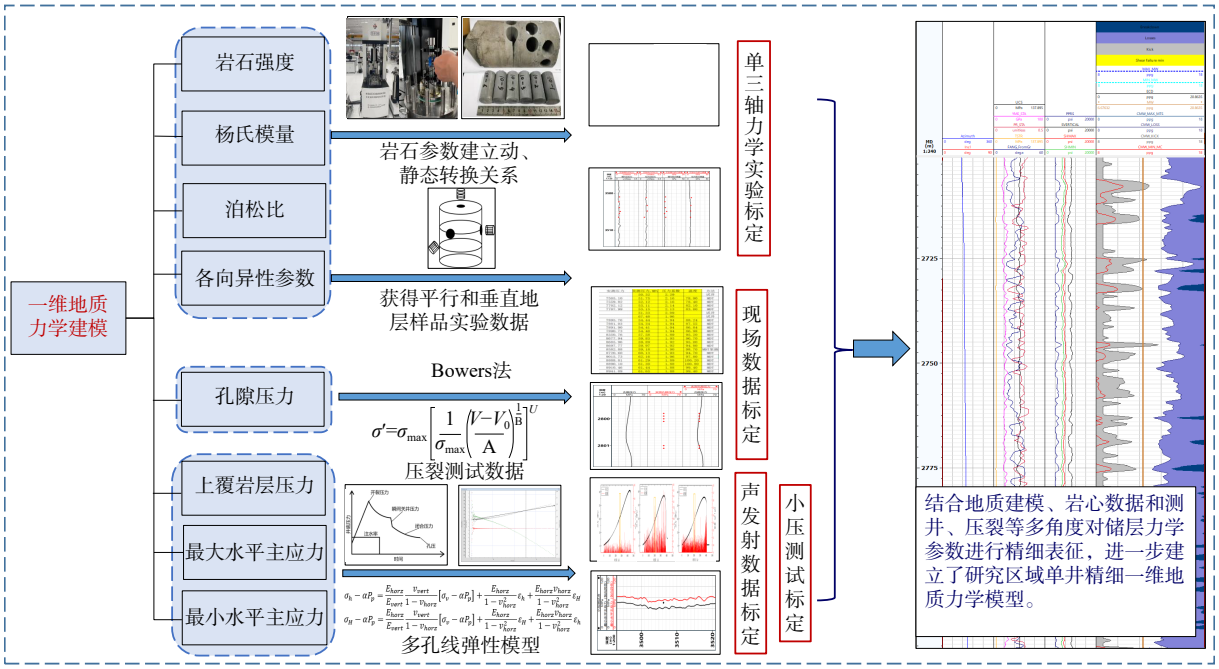


图 7 高精度一维地质力学建模流程图

Fig. 7 High-precision 1D geomechanical modeling flowchart

4 结论

(1)通过页岩油储层各向异性实验，系统获取了页岩各向异性岩石力学参数，并建立了动、静态转换关系。基于实验结果及各向异性模型，结合声波测井资料等，获得测井杨氏模量、泊松比各向异性表征，为一维地质力学建模提供了数据基础与校准依据。

(2)基于声波密度曲线确定研究区块的加卸载特征，采用 Bowers 加卸载理论进行孔隙压力计算，并利用现场实测数据进行校准。

(3)基于高精度的各向异性岩石力学模型和孔隙压力计算结果，采用各向异性弹性模型获得了更高精度的两向水平主应力，进而构建了一维各向异性地质力学模型，精度较各向同性模型提升约 7%。因此，对于页岩储层，考虑力学各向异性是获得可靠地应力场的必要条件。

(4)经井史资料等现场数据验证，该模型的井壁稳定性分析结果与钻井历史记录一致，能有效揭示沿井筒方向的各向异性地质力学参数及原位地应力展布特点，从而有力支撑地质–工程一体化高效开发。

作者贡献声明：侯朔阳、王小琼负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；侯朔阳、钟毅参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；王小琼、鲜成钢、葛洪魁参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: HOU Shuoyang and WANG Xiaoqiong conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; HOU Shuoyang and ZHONG Yi participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; WANG Xiaoqiong, XIAN Chenggang and GE Hongkui were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BOWERS G L, 1994. Pore pressure estimation from velocity data: accounting from overpressure mechanisms besides undercompaction: *Proceedings of the IADC/SPE drilling conference, Dallas, 1994*, (IADC/SPE), 1994, pp 515–530[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 31(6): 276.

CAO H, ZHAO Y, SHUAI D, et al., 2024. Using 3D seismic data to estimate stress based on seismic curvature attribute of HTI medium: application to the Weiyuan, southern Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(5): 1970-1986. (in Chinese with English abstract)

FAN H H, 2001. New methods for prediction and evaluation of formation pore pressure[D]. Beijing: China University of Petroleum: 92-99. (in Chinese)

FENG S K, XIONG L, DONG X X, et al., 2025. Quantitative evaluation of Young's modulus and Poisson's ratio for deep shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Exploration and Development, 48(3): 64-75. (in Chinese with English abstract)

HE X, LI W G, DANG L R, et al., 2021. Key technological challenges and research directions of deep shale gas development[J]. Natural Gas Industry, 41(1): 118-124. (in Chinese with English abstract)

HENG S, YANG C H, ZHANG B P, et al., 2015. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 36(3): 609-616. (in Chinese with English abstract)

HONG Y, YAN J P, GUO W, et al., 2025. Mechanical parameters and anisotropy of deep shale-gas reservoir rocks, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 48(1): 30-39. (in Chinese with English abstract)

HU S Y, BAI B, TAO S Z, et al., 2022. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 49(2): 224-237. (in Chinese with English abstract)

LI Q H, LI S X, LIU W Z, 2021. Rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs and their influence on fracturing stimulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 28(3): 130-138. (in Chinese with English abstract)

LIU W H, WANG Y, CHEN Z Q, et al., 2025. Anisotropic dynamic-static elastic parameter correlations for Jurassic lacustrine shales[J]. Chinese Journal of Geophysics, 68(1): 213-228. (in Chinese with English abstract)

MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, et al., 2022. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 155-171. (in Chinese with English abstract)

SCHOENBERG M, MUIR F, SAYERS C M, 1996. Introducing ANNIE: a simple three-parameter anisotropic velocity model for shales[J]. Journal of Seismic Exploration, 5(1): 35-49.

SHAD S, KOLAHKAJ P, ZIVAR D, 2023. Geomechanical analysis of an oil field: numerical study of wellbore stability and reservoir subsidence[J]. Petroleum Research, 8(3): 350-359.

SHU H L, QIU K B, LI Q F, et al., 2021. A method for evaluating the geomechanical characteristics of shale gas: the geomechanical characteristics of the mountain shale in the intensively reworked marine area of South China[J]. Natural Gas Industry, 41(S1): 1-13. (in Chinese with English abstract)

SUAREZ-RIVERA R, HANDWERGER D, HERRERA A R, et al., 2013. Development of a heterogeneous earth model in unconventional reservoirs, for early assessment of reservoir potential[C]//47th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. San Francisco: ARMA.

SUN D S, LI A W, YANG Y H, et al., 2025. Research progress and prospects of deep stress measurement technology[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1111-1126. (in Chinese with English abstract)

TANG H M, TANG Y, ZHENG M J, et al., 2022. An experimental study on lamina and fracture mode of shale[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 44(4): 51-61. (in Chinese with English abstract)

THOMSEN L, 1986. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 51(10): 1954-1966.

VERNIK L, LIU X Z, 1997. Velocity anisotropy in shales: a petrophysical study[J]. Geophysics, 62(2): 521-532.

VERNIK L, NUR A, 1992. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks[J]. Geophysics, 57(5): 727-735.

WANG K, DAI J S, FENG J W, et al., 2014. Research on reservoir rock mechanical parameters of Keshen foreland thrust belt in Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 38(5): 25-33. (in Chinese with English abstract)

WANG X Q, GE H K, SONG L L, et al., 2011. Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and Kaiser effect point recognition approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(3): 580-588. (in Chinese with English abstract)

WANG X Q, GE H K, WANG W W, et al., 2021. Experimental study on stress-related and matrix-related anisotropy in tight reservoirs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4239-4251. (in Chinese with English abstract)

WANG X Q, ZHONG Y, HOU S Y et al., 2025. The experimental study of shale laminae influence on the mechanical properties and brittle failure of shale oil reservoirs[J]. Physics of Fluids, 37(5): 056623.

WANG X Q, ZHONG Y, WAN Y Y, et al., 2025. Influence of laminae on mechanical properties and its implications for hydraulic fracturing of shale oil reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 49(1): 92-100. (in Chinese with English abstract)

XIAN C G, ZHANG J H, CHEN X, et al., 2017. Application of geomechanics in geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 22(1): 75-88. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, MA X D, et al., 2025. A total system stiffness approach for determining shut-in pressure in hydraulic fracturing stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 192: 106160. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, WU B C, et al., 2025. Determination of hydraulic fracture closure pressure based on total system stiffness method: Case studies[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1168-1176. (in Chinese with English abstract)

YONG S H, ZHANG C M, GAO C Q, et al., 1996. Logging data processing and comprehensive interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press: 120-348. (in Chinese)

ZHANG J L, GE H K, ZHANG Y J, et al., 2023. Experimental evaluation on EOR medium grading of shale in Jimusaer Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 45(2): 244-250, 258. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S L, YAN J P, GUO W, et al., 2023. Logging evaluation method of geological-engineering sweet spot parameters for deep shale gas based on petrophysical facies: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in LZ block of Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 58(1): 214-227. (in Chinese with English abstract)

ZHAO W Z, ZHU R K, ZHANG J Y, et al., 2023. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 28(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, KOHLI A H, 2019. Unconventional reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al., 2012. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 33(2): 173-187. (in Chinese with English abstract)

ZOU X J, CHEN Y L, 2018. Geostress logging evaluation method of Longmaxi Formation shale in Fuling area based on transversely isotropic model, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 29(12): 1775-1780, 1808. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹欢, 赵杨, 帅达, 等, 2024. 基于HTI介质地震曲率属性的地应力估算方法及其在威远地区的应用[J]. 地球物理学报, 67(5): 1970-1986.

樊洪海, 2001. 地层孔隙压力预测检测新方法研究与应用[D]. 北京: 石油大学: 92-99.

冯少柯, 熊亮, 董晓霞, 等, 2025. 深层页岩气储层杨氏模量、泊松比定量评价[J]. 天然气勘探与开发, 48(3): 64-75.

何骁, 李武广, 党录瑞, 等, 2021. 深层页岩气开发关键技术难点与攻关方向[J]. 天然气工业, 41(1): 118-124.

衡帅, 杨春和, 张保平, 等, 2015. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 36(3): 609-616.

洪宇, 闫建平, 郭伟, 等, 2025. 川南深层页岩气储层岩石力学参数及各向异性特征[J]. 天然气勘探与开发, 48(1): 30-39.

胡素云, 白斌, 陶士振, 等, 2022. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 49(2): 224-237.

李庆辉, 李少轩, 刘伟洲, 2021. 深层页岩气储层岩石力学特性及对压裂改造的影响[J]. 特种油气藏, 28(3): 130-138.

刘卫华, 王洋, 陈祖庆, 等, 2025. 侏罗系陆相页岩各向异性动静态弹性参数建模[J]. 地球物理学报, 2025, 68(1): 213-228.

马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等, 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 96(1): 155-171.

孙东生, 李阿伟, 杨跃辉, 等, 2025. 深部应力测量技术研发进展与展望[J]. 地质力学学报, 31(6): 1111-1126

舒红林, 仇凯斌, 李庆飞, 等, 2021. 页岩气地质力学特征评价方法: 中国南方海相强改造区山地页岩地质力学特征[J]. 天然气工业, 41(S1): 1-13.

唐洪明, 唐园, 郑马嘉, 等, 2022. 页岩纹层与破裂方式实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 44(4): 51-61.

王珂, 戴俊生, 冯建伟, 等, 2014. 塔里木盆地克深前陆冲断带储层岩石力学参数研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(5): 25-33.

王小琼, 葛洪魁, 宋丽莉, 等, 2011. 两类岩石声发射事件与Kaiser效应点识别方法的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 30(3): 580-588.

王小琼, 葛洪魁, 王文文, 等, 2021. 致密储层岩石应力各向异性与材料各向异性的实验研究[J]. 地球物理学报, 64(12): 4239-4251.

王小琼, 钟毅, 万有余, 等, 2025. 纹层对页岩力学性质的影响及其对水力压裂的启示[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 49(1): 92-100.

鲜成钢, 张介辉, 陈欣, 等, 2017. 地质力学在地质工程一体化中的应用[J]. 中国石油勘探, 22(1): 75-88.

杨跃辉, 孙东生, 吴邦宸, 等, 2025. 总系统刚度法在水力裂缝闭合压力测定中的应用[J]. 地质力学学报, 31(6): 1168-1176

雍世和, 张超谟, 高楚桥, 等, 1996. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社: 120-348.

张佳亮, 葛洪魁, 张衍君, 等, 2023. 吉木萨尔页岩油注入介质梯级提采实验评价[J]. 石油钻采工艺, 45(2): 244-250, 258.

张少龙, 闫建平, 郭伟, 等, 2023. 基于岩石物理相的深层页岩气地质—工程甜点参数测井评价方法: 以四川盆地LZ区块五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油地球物理勘探, 58(1): 214-227.

赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 等, 2023. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 28(4): 1-13.

邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等, 2012. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 33(2): 173-187.

邹贤军, 陈亚琳, 2018. 四川盆地涪陵地区龙马溪组页岩横向各向同性地应力测井评价方法[J]. 天然气地球科学, 29(12): 1775-1780, 1808.