引用格式：霍庭旺，汪道兵，盛茂，等，2026. 富倾斜层理深层页岩弹塑性变形与破坏规律的实验研究[J]. 地质力学学报，32（1）：159−183. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025133

Citation: HUO T W，WANG D B，SHENG M，et al.，2026. Experimental study on the elastic–plastic deformation and failure behavior of deep shale with well-developed inclined bedding[J]. Journal of Geomechanics，32（1）：159−183. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025133

富倾斜层理深层页岩弹塑性变形与破坏规律的实验研究

霍庭旺[1]，汪道兵[1,2]，盛　茂[2,3]，董永存[4]，王秋艳[5]，黄威翰[6]，宇　波[7]

HUO Tingwang[1]，WANG Daobing[1,2]，SHENG Mao[2,3]，DONG Yongcun[4]，WANG Qiuyan[5]，HUANG Weihan[6]，YU Bo[7]

1. 北京石油化工学院机械工程学院，北京 102617；
2. 中国石油大学（北京）深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室，北京 102249；
3. 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；
4. 青岛工程职业学院海洋财经学院，山东 青岛 266112；
5. 中国石化西北油田公司第三采油厂，新疆 乌鲁木齐 830011；
6. 中兵智能创新研究院（深圳）有限公司，广东 深圳 518132；
7. 长江大学石油工程学院，湖北 武汉 430100

1. *School of Mechanical Engineering*, *Beijing Institute of Petrochemical Technology*, *Beijing* 102617, *China*;
2. *State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
3. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
4. *College of Marine Finance and Economics*, *Qingdao Engineering Vocational College*, *Qingdao* 266112, *Shandong*, *China*;
5. *No.* 3 *Oil Production Plant*, *SINOPEC Northwest Oil Field Company*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
6. *China North Artificial Intelligence* & *Innovation Research Institute* (*Shenzhen*), *Shenzhen* 518132, *Guangdong*, *China*;
7. *School of Petroleum Engineering*, *Yangtze University*, *Wuhan* 430100, *Hubei*, *China*

Experimental study on the elastic–plastic deformation and failure behavior of deep shale with well-developed inclined bedding

Abstract: ［**Objective**］Deep shale reservoirs are characterized by high temperature, high pressure, and well-developed bedding structures, which jointly govern the mechanical response of rocks during hydraulic fracturing. Previous studies have primarily focused on the effects of single temperature conditions or the mechanical behavior of bedding under conventional environments. However, systematic understanding of the elastoplastic deformation behavior and anisotropic failure mechanisms of bedded shale under coupled high-temperature and high-confining-pressure conditions remains insufficient, particularly in terms of the quantitative characterization of strength parameter evolution, damage features, and fracture complexity. ［**Methods**］Therefore, this study employs a high-temperature and high-pressure triaxial rock mechanics testing system to conduct triaxial compression experiments on shale specimens with different bedding orientations. In combination with CT scanning, ultrasonic testing, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and nuclear magnetic resonance (NMR) techniques, the internal structural evolution, fracture development, and pore structure variations of the rocks are comprehensively characterized. Meanwhile, the evolution laws of strength parameters are analyzed based on the Mohr–Coulomb, Hoek–Brown, and Drucker–Prager criteria, and the fracture

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52474001，52274002）

This research was financially supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52474001 and 52274002).

第一作者：霍庭旺（1999—），男，在读硕士，主要从事岩石力学与水力压裂研究。Email：18734898726@163.com

通信作者：汪道兵（1985—），男，教授，博士生导师，主要从事油气井压裂酸化改造理论与技术方面研究。Email：upcwdb@bipt.edu.cn

收稿日期：2025−09−12；**修回日期**：2025−10−30；**录用日期**：2026−01−20；**网络出版日期**：2026−01−20；**责任编辑**：王婧

Received：2025−09−12；Revised：2025−10−30；Accepted：2026−01−20；Available Online：2026−01−20；Handling Editor：WANG Jing

complexity and thermal damage characteristics are quantitatively evaluated using fractal dimension, energy dissipation theory, and damage factor calculations. [**Results**] The results indicate that increasing temperature promotes the expansion of bedding structures and induces thermally damaged microcracks. Fracture complexity increases with temperature, accompanied by a pronounced attenuation of wave velocity, while the peak strength and elastic modulus of shale exhibit decreasing trends, demonstrating that thermal stress significantly degrades its mechanical properties. Comprehensive analysis based on the three yield criteria shows that, under high-temperature and high-confining-pressure conditions, shale cohesion gradually decreases whereas the internal friction angle increases, and the failure mode transitions from brittle-dominated behavior to elastoplastic deformation. The coupled effects of temperature and pressure enhance the accumulation of plastic strain prior to failure. Energy analysis and damage factor results further reveal that elevated temperature markedly increases the proportion of dissipated energy and intensifies rock damage, reflecting enhanced microcrack propagation and irreversible deformation processes. Fractal dimension analysis demonstrates that the fracture network becomes progressively more complex with increasing temperature, facilitating the formation and connectivity of multiscale fracture systems. Anisotropy index analysis shows that thermal stress amplifies the anisotropic differences in compressive strength and elastic modulus among shales with different bedding orientations, whereas confining pressure suppresses such directional disparities to some extent by restricting crack opening and bedding-controlled deformation. Together, these factors determine the overall anisotropic mechanical response of deep shale. [**Conclusions**] In summary, the combined effects of high temperature and high pressure intensify the elastoplastic deformation and damage evolution of bedded shale. Under such conditions, the failure mode shifts from brittle behavior to plastic-dominated deformation, accompanied by enhanced energy dissipation and damage development. This process promotes the increasing complexity of fracture networks and alters the anisotropic failure patterns governed by bedding structures. [**Significance**] This study systematically elucidates the mechanisms of elastoplastic deformation and anisotropic failure of bedded shale under high-temperature and high-pressure conditions, providing essential mechanical insights for the stability evaluation of deep shale reservoirs and the optimization of hydraulic fracturing parameters. The findings hold significant scientific relevance and engineering value for the efficient development of deep unconventional oil and gas resources.

Keywords: deep shale; elastic−plastic behavior; energy dissipation; damage factor; anisotropic characteristics

摘　要：深层页岩储层具有高温高压及发育层理结构等特征。水力压裂过程中，其岩石力学性质随温压条件动态变化，层理结构的差异进一步导致其岩石力学性质表现出明显的各向异性。该研究利用高温三轴岩石力学实验系统，结合CT扫描、超声波测试、扫描电镜（SEM）、X射线衍射（XRD）及核磁共振等多种测试手段，对高温高压环境下层理性页岩的弹塑性变形行为与破坏特征及各向异性特征开展了系统性研究。结果表明，热应力促使层理结构发生膨胀，诱发热损伤裂隙发育，从而降低深层页岩力学强度。基于Mohr−Coulomb、Hoek−Brown及Drucker−Prager准则的综合分析表明，高温高压条件下深层页岩内聚力降低、内摩擦角增加，表现出更为显著的弹塑性特征。通过分形维数分析、能量耗散与损伤因子计算评估发现，高温作用加剧了深层页岩的损伤程度，增强了人工缝网的复杂结构。各向异性指数分析进一步表明，热应力强化了岩石的各向异性，而围压在一定程度上抑制了抗压强度和弹性模量的各向异性差异。综上，高温高压作用强化了深层页岩的弹塑性变形与破坏模式，并显著改变了不同层理倾角所引发的各向异性特征。研究成果可为深层页岩储层高效开发及水力压裂工程优化提供重要的力学依据和理论支持。

关键词：深层页岩；弹塑性变形；能量耗散；损伤因子；各向异性

中图分类号：TE357.1; TD315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)01−0159−25

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025133

0　引言

随着全球能源供给紧张与需求持续增长，非常规油气资源在保障国家能源安全方面具有重要战略意义。深层页岩气通常埋深超过3500 m，赋存于高温高压环境下的页岩基质和裂隙中，具有清洁、高效等优势。据估算（Fan et al., 2022; 郭旭升等, 2023; Suo et al., 2023），国内深层页岩气资源量约为中浅层的2倍，累计探明地质储量达2.75万亿 m^3，开发潜力巨大（高芸等, 2024; Zangqa et al., 2024）。然而，深层页岩储层具有明显的层理结构和典型的“五高”特征（高弹性模量与泊松比、高地层温度、

高水平应力差、高破裂压力和高闭合压力；Hou et al., 2018）。这些因素导致裂缝“扩不高、延不远”，难以形成复杂裂缝网络，从而造成采收率低、产量递减快等问题（Meng et al., 2023）。其根本原因在于，对高温高压条件下层理性页岩弹塑性变形机制及各向异性演化规律的认识不足。

现阶段，针对深层页岩的研究主要集中在变形规律、破坏特征和各向异性 3 个方面。①在变形规律方面，大量实验研究表明，温度升高会引起页岩弹性模量和泊松比降低，削弱其弹性变形能力（Sohail et al., 2023; Ju et al., 2024）。同时，岩石在热应力的持续作用下产生了热膨胀变形（Ma et al., 2021; Deng et al., 2023; He et al., 2023），岩石内部形成了新的孔隙与微裂隙，导致整体刚度下降，塑性变形特征增强（王小军等, 2019; Chen et al., 2020; Wei, 2023）。而围压在一定程度上抑制了裂缝的生成与扩展，提升了页岩的抗压能力，增强了轴向与径向变形（王鲁男等, 2022; Zheng et al., 2023; Ye et al., 2024）。基于 Mohr–Coulomb 准则（Johnston, 1987）获取的内聚力和内摩擦角等弹塑性变形参数，可以定量分析岩石的塑性变形能力（Li et al., 2023; Zhou et al., 2025），可以定量分析岩石的塑性变形能力（Lei et al., 2021; Li et al., 2024; 梁潇等, 2024）。②在岩石破坏特征方面，已有研究指出，温度的升高会使页岩破坏模式由劈裂型逐渐转向剪切型（Jin et al., 2024; 孟祥瑞和邬忠虎, 2024; Nilankar et al., 2024; 杨少强等, 2024）。通过 CT 扫描和电子显微镜技术发现，这一转变主要源于热致矿物膨胀和黏土矿物烧结所产生的热应力，促使层理结构、孔隙及微裂隙发育演化（Vishal et al., 2022; Liu et al., 2023; Hu et al., 2024; Yuan et al., 2024）。而围压升高抑制了微裂隙的形成与扩展，促进裂缝复杂化并延缓破坏过程（Wang et al., 2020; Yang et al., 2020, 2023; Ma et al., 2022）。破坏模式的变化与裂缝复杂程度的增加均说明了围压带来的塑性转变（Kivi et al., 2018; 韩兵和杨宏伟, 2019; Bahadur et al., 2023）。③在各向异性特征方面，研究表明，不同层理倾角页岩的孔隙度、渗透率及波速等参数均表现出明显方向性差异，导致力学强度与裂缝扩展模式发生转变（李子运等, 2018; Cao et al., 2022; Zhao et al., 2023）。0°层理倾角页岩的弹性模量和硬度分别比 90°时高出 19.02% 和 51.38%，表明页岩的抗变形能力随层理方向变化明显（Memon et al., 2021; Huang et al., 2023）。页岩抗压强度随层理倾角增大呈先减小后增大的趋势，60°倾角时抗压强度最低（Hou et al., 2024）。裂纹起裂角通常沿较弱层理面发育，0°层理倾角页岩以拉伸裂纹为主，30°与 60°时剪切裂缝占主导，90°时则表现为拉伸与剪切复合型破裂（Tao et al., 2021; Ren et al., 2023）。此外，30°～60°倾角范围内，破裂过程中形成了较多的裂缝（Zhang et al., 2023b; Hou et al., 2024）。

尽管已有大量成果揭示了温度或围压对页岩变形破坏及各向异性的影响，但大多为单因素研究（Klaver et al., 2015; Iqbal et al., 2021; Zhao et al., 2021; 孙川翔等, 2023），且集中于 0°和 90°层理倾角页岩的研究，缺乏对高温高压作用下倾斜层理页岩非线性弹塑性变形与损伤演化的系统分析（Jacobs, 2018; Wang et al., 2019）。同时，对页岩从变形、损伤到破坏的完整过程仍缺乏定量化、综合性的评价体系。这在实际生产中表现为裂缝易闭合、产能不稳的问题：单井初期日产气量虽可超过 10×10^4 m^3，但产量很快出现 70% 以上递减（袁玉松等, 2018），严重制约了深层页岩气的高效开发。

综上所述，高温高压条件下产生的热应力不仅促使岩石内部形成大量损伤裂隙，削弱其整体力学性能，同时也使岩石的变形与破坏机制向塑性转变（Nie et al., 2024）。前期研究表明（Hu et al., 2024; Wang et al., 2024a, 2024b, 2024c, 2025a, 2025b, 2025c; Huo et al., 2025），在不同围压条件下，0°层理倾角页岩的抗压强度及各项力学参数均高于 30°、60°倾角层理页岩，表明层理结构对页岩力学响应具有重要影响。为此，该研究针对倾斜层理深层页岩在高温高压条件下的力学行为，开展不同温度条件下的三轴压缩实验，并结合 CT 扫描表征裂隙形态，拟建立覆盖变形—损伤—破坏全过程的定量分析框架。通过引入塑性强度理论、能量耗散原理和岩石破坏准则，系统揭示深层页岩的弹塑性变形机制与破坏特征。同时，采用超声波与核磁共振（NMR）等多尺度方法验证实验结果，实现从微观结构演化到宏观力学响应的多层次分析。

1　实验装置及方案

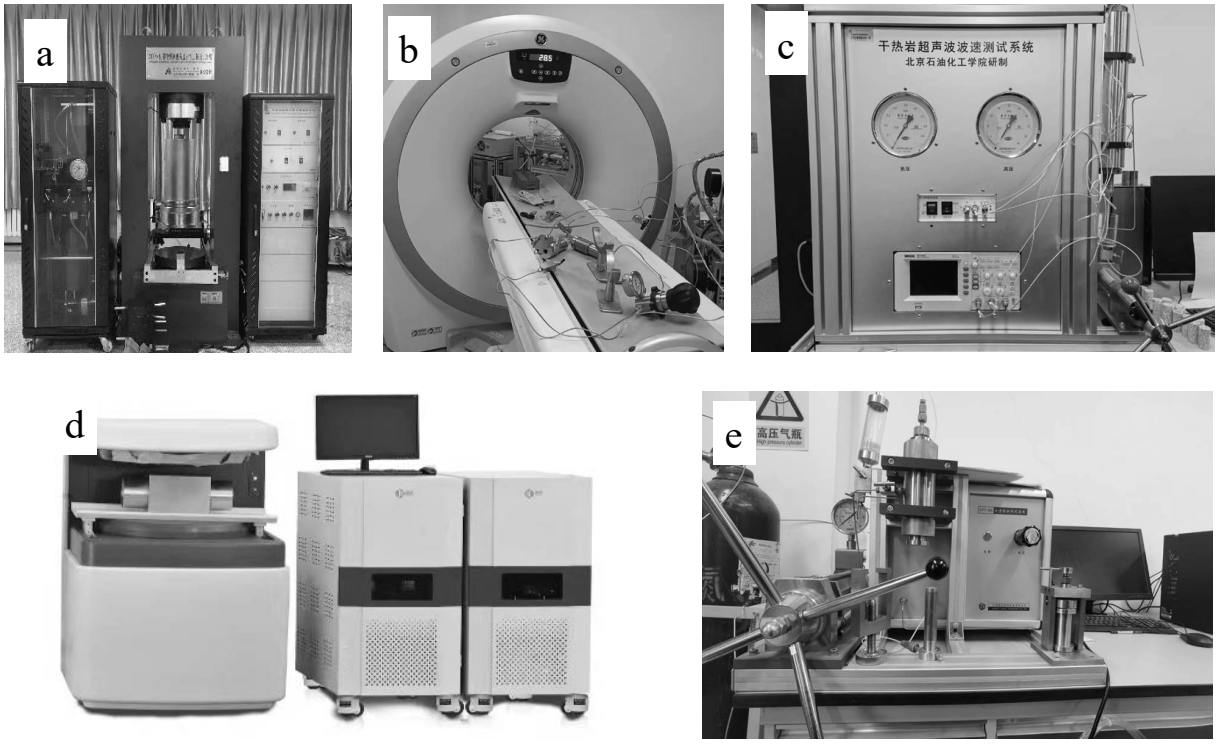
1.1　实验样品和预处理

实验所用页岩岩样采自四川省长宁县。在同一岩石样本上分别沿与层理面呈 30°、60°和 90°的方向取样（90°为垂直层理），获得不同层理倾角的页岩

样品。然后，将样品加工为直径 25 mm、高度 50 mm 的圆柱体。为减小实验误差，确保实验可靠性，采用马弗炉在 105 ℃ 下对岩样进行干燥，干燥时间超过 24h，直至岩样质量稳定。最后，选取超声波波速、孔隙度和渗透率接近的干燥岩样进行实验。

1.2 实验装置

完成上述温压预处理后，首先利用 SPT-80 型孔渗联测仪测量不同处理方式下岩石的基本物性，随后使用 2000 kN 伺服控制高温高压岩石力学三轴试验机开展岩石力学实验。利用 CT 扫描仪观测岩石破坏后的内部损伤和裂缝扩展规律，并结合超声波波速测试仪和核磁共振测试仪对以上的岩石力学特性进行验证，具体仪器如图 1 所示。



a—2000 kN 伺服控制高温高压岩石三轴测试系统；b—CT 扫描测试仪；c—超声波波速测试仪；d—核磁共振测试仪；e—孔渗联测仪

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

(a) Servo-controlled high-temperature and high-pressure rock triaxial testing system (2000 kN); (b) CT scanner; (c) Ultrasonic wave velocity measurement system; (d) Nuclear magnetic resonance (NMR) tester; (e) Porosity–permeability simultaneous tester

1.3 实验方案与技术路线

实验研究技术路线包括基本物性实验、力学实验、验证性实验（超声波波速和核磁共振）及 CT 扫描实验。三轴压缩力学实验共设置 3 组不同层理倾角的岩样（表 1），每组 8 块，共 24 块样品。为模拟深层页岩地层温压条件（200～300 ℃、50～60 MPa），实验设定 2 个温度点（200 ℃、300 ℃）、3 个层理倾角（30°、60°、90°）及 4 个围压（0 MPa、20 MPa、40 MPa、60 MPa）。在测定完基本物性参数和超声波波速后，开展不同围压下的三轴压缩力学实验，并对破坏后的岩样进行 CT 扫描分析。核磁共振实验共使用 6 块岩样，分别对应 3 个层理倾角和 2 个温度条件，获得不同处理方式下的横向弛豫时间（T_2）图谱曲线和二维灰度云图。

在完成上述实验的基础上，开展了以下分析工作：利用 Mohr−Coulomb、Hoek−Brown 及 Drucker−Prager 准则对岩石的弹塑性变形破坏行为进行拟合，获取关键弹塑性参数；基于能量耗散原理，计算塑性变形破坏过程中所消耗的耗散应变能；结合损伤力学理论与主成分分析法，构建具有综合评价能力的损伤因子；基于 CT 扫描图像，并应用分形维数方法，定量评估页岩破坏裂缝的复杂程度。通过以上 4 个方面的定性与定量分析，结合各向异性指数，揭示温度与围压对层理性深层页岩变形破坏规律和各

表 1　实验方案

Table 1　Experimental scheme

实验类型	层理倾角/(°)	温度/℃	围压/MPa
三轴压缩力学实验	30	200/300	0/20/40/60
	60	200/300	0/20/40/60
	90	200/300	0/20/40/60
核磁共振实验	30	200/300	–
	60	200/300	–
	90	200/300	–

向异性特征的影响。

1.4　理论与方法

1.4.1　强度准则

研究综合采用 Mohr−Coulomb、Hoek−Brown 及 Drucker−Prager 准则，从不同角度系统解析深层页岩在高温高压条件下的强度演化与弹塑性响应特征：通过 Mohr−Coulomb 准则获取岩石宏观强度趋势与破坏包络线；通过 Hoek−Brown 准则揭示强度随围压变化的非线性特征；并借助 Drucker−Prager 准则对塑性屈服应变演化进行定量刻画。通过多准则对比，可系统辨析不同准则对岩石弹塑性参数的表征差异，并能量化内聚力、内摩擦角和塑性应变等关键指标，为揭示深层页岩在高温高压作用下的非线性弹塑性响应机制提供更加完整的理论依据。

(1) Mohr−Coulomb 准则

Mohr−Coulomb 准则认为(Johnston et al., 1987; Vachaparampil et al., 2017)，岩石的变形破坏并非由单一应力引起，而是正应力与剪应力共同作用导致的。通过绘制莫尔圆，判断岩石当前的应力状态，并结合破坏包络线确定其破坏条件。在三轴压缩条件下(最小主应力 σ_3 等于中间主应力 σ_2)，当岩石所受剪应力达到极限强度时，即满足公式(1)所示的破坏准则，岩石将进入破坏阶段。

$$\tau = k\sigma + c \tag{1}$$

式中：τ—剪应力，MPa；σ—正应力，MPa；k—内摩擦系数，无量纲；c—内聚力，MPa。

(2) Hoek−Brown 准则

Mohr−Coulomb 准则是应用最广泛的线性准则。然而，大量实验研究表明(Liu et al., 2023; Zhang et al., 2015)，岩石破坏过程中正应力与剪应力之间并不严格呈线性关系。为更准确描述岩石材料的非线性强度行为，Hoek−Brown 准则被广泛采用。该准则通过非线性经验关系表达主应力之间的关系，其基本形式如下：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_i\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \tag{2}$$

式中：σ_1—岩石破坏时的最大水平主应力，MPa；σ_3—岩石破坏时的最小水平主应力，MPa；σ_{ci}—完整岩石材料的单轴抗压强度，MPa；m_i、a 和 s—材料常数，无量纲。

借鉴 Mohr−Coulomb 准则的推导思路(Griffiths et al., 1990; Tian et al., 2023)，在 Hoek−Brown 准则 τ−σ 空间示意图(图 2a)中，可通过拟合包络线与莫尔圆的切点来定义剪应力与法向应力的关系。具体而言，在拟合曲线某一切点处的剪应力与法应力可分别通过以下表达式确定：

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \tag{3}$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \tag{4}$$

将公式(2)带入公式(3)和(4)，可以得到：

$$|\tau| = \frac{1}{2}\left[\sigma_{ci}\left(m\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \sin 2\beta\right] \tag{5}$$

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{1}{2}\left[\sigma_{ci}\left(m\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a (1+\cos 2\beta)\right] \tag{6}$$

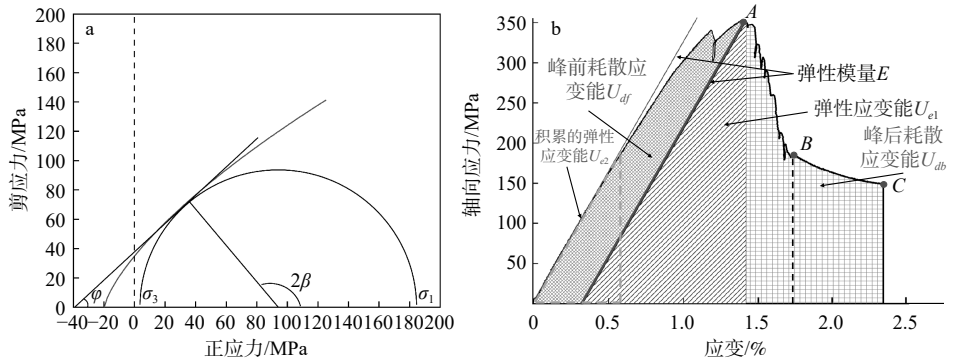
将公式(6)代入公式(5)，可以得到：

$$\sigma = \frac{\sigma_{ci}}{m}\left(\frac{2}{\sigma_{ci}\sin 2\beta}\right)^{\frac{1}{a}}\tau^{\frac{1}{a}} + \left(\frac{1+\cos 2\beta}{\sin 2\beta}\right)\tau - \frac{\sigma_{ci}}{m}s \tag{7}$$

在 τ−σ 空间示意图中可见，$\beta = \pi/4 + \varphi/2$，因此，公式(7)可以转换为：

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\sigma_{ci}}{m}\left(\frac{2}{\sigma_{ci}\cos\varphi}\right)^{\frac{1}{a}}\tau^{\frac{1}{a}} + \left(\frac{1-\sin\varphi}{\cos\varphi}\right)\tau - \frac{\sigma_{ci}}{m}s \\ &= a(\sigma_{ci}, m, \varphi)\tau^{\frac{1}{a}} + b(\varphi)\tau + c(\sigma_{ci}, m, s)\end{aligned} \tag{8}$$

式中：2β—切点与横坐标的夹角，(°)；φ—内摩擦角，(°)；$a(\sigma_{ci}, m, \varphi)$—剪应力的 $1/a$ 次项系数；$b(\varphi)$—剪应力的一次项系数；$c(\sigma_{ci}, m, s)$—常数项系数；其余变量符号同上。这些系数与材料的单轴抗压强度以及 Hoek−Brown 准则材料系数相关。



a—Hoek–Brown 准则 τ–σ 空间示意图; b—能量耗散原理示意图

图 2 Hoek–Brown 准则与能量耗散原理示意图

Fig. 2 Diagrams of the Hoek–Brown criterion and energy dissipation principle

(a) τ–σ space diagram of the Hoek–Brown criterion; (b) Diagram of the energy dissipation principle

在三轴压缩实验中, Hoek–Brown 准则通常取材料常数 $a=0.5$（Hoek, 1965; Hoek et al., 2014）, 此时其正应力与剪应力的关系呈现二次多项式形式[公式(8)]。该关系在一定围压范围内能较好描述岩石强度的非线性演化特征, 但由于二次多项式存在峰值, 随着围压持续增大, 预测的强度可能出现非实际的下降趋势, 存在一定局限性。为此, 研究基于泰勒展开思路, 将 Hoek–Brown 准则中的二次关系式转化为对数型表达式, 以更准确地表征岩石强度随围压变化的非线性特征。转化后的关系式如下:

$$\sigma=\frac{\sigma_{ci}m}{4}(1-\sin\varphi)^2\ln\left(1+\frac{{\sigma_{ci}}^2m^2\cos\varphi}{16}(1-\sin\varphi)^2\tau\right)-\frac{\sigma_{ci}}{m}s$$
$$=d(\sigma_{ci},m,\varphi)\ln(1-\frac{d(\sigma_{ci},m,\varphi)}{e(\sigma_{ci},m,\varphi)})\tau+c(\sigma_{ci},m,s) \quad (9)$$

式中: $d(\sigma_{ci}, m, \varphi)$ —剪应力的对数幅值项系数, 利用公式(8)中的 $a(\sigma_{ci}, m, \varphi)$ 和 $b(\varphi)$ 计算得到, $d=-b^2/2a$; $e(\sigma_{ci}, m, \varphi)$—剪应力的对数速率控制项系数, 利用公式(8)中的 $a(\sigma_{ci}, m, \varphi)$ 和 $b(\varphi)$ 计算得到, $e=-2a/b$, 其余变量符号含义同上。

(3) Drucker−Prager 准则

Drucker−Prager 准则在岩石力学中应用广泛, 作为一种非线性准则(Ding et al., 2017; Liu et al., 2019), 尤其适用于弹塑性有限元计算。其数学表达式为:

$$f(\alpha)=\alpha I_1+\sqrt{J_2}-k \quad (10)$$

式中, $f(\alpha)$—屈服函数; I_1—第一不变量(体积应力), 其值为 3 个主应力之和, 即 $I_1=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$, MPa; J_2—第二不变量, 其表达式为 $J_2=[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/6$, MPa^2; α—材料的压力相关系数, 无量纲; k—黏聚屈服强度, 无量纲, 与强化函数有关。

基于该准则进行弹塑性分析时, 其屈服条件为 f=0, 塑性变形条件为 f>0。

1.4.2 能量耗散

岩石的破坏本质上是持续应力加载下能量积累与耗散的结果。从能量的角度来看, 应力加载为岩石提供了外部能量输入, 当输入能量达到临界阈值后, 岩石将发生变形破坏。根据热力学第一定律, 总能量=储存能量+耗散能量(Luo et al., 2023; Gao et al., 2024b)。其中, 储存能量主要用于弹性变形, 而耗散能量则与塑性变形、微裂纹扩展及热效应等不可逆过程相关。具体定义为:

$$U=U_1+U_3=U_e+U_d \quad (11)$$

$$U_e=\frac{1}{2}\sigma\varepsilon_e=\frac{1}{2E}\sigma^2 \quad (12)$$

$$U_d=U-U_e=\int_0^{\varepsilon}\sigma d\varepsilon \quad (13)$$

式中: U—总能量, MJ/m^{-3}; U_e—弹性应变能, MJ/m^{-3}; U_d—耗散应变能, MJ/m^{-3}; U_1—主应力输入的总能量, MJ/m^{-3}; U_3—径向应力输入的总能量, MJ/m^{-3}; ε—总应变, %; ε_e—弹性应变阶段的轴向应变, %; E—弹性模量, MPa; 其余变量符号含义同上。

耗散应变能分为峰前耗散应变能 U_{d1} 和峰后耗散应变能 U_{d2}(图 2b):

$$U_{d1}=U_1-U_{e1}=\int_0^{\varepsilon_A}\sigma d\varepsilon-\frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (14)$$

$$U_{d2}=\int_{\varepsilon_A}^{\varepsilon_C}\sigma d\varepsilon \quad (15)$$

式中: U_{e1}—峰前弹性应变能, MJ/m^{-3}; ε_A, ε_C—对应节点的应变, %; 其余变量符号含义同上。

根据能量耗散定义岩石的塑性指数:

$$B_e = \frac{U_{d2} + U_{d1} + U_{e1} - U_{e2}}{U} \tag{16}$$

式中：B_e—塑性指数，无量纲；U_{e2}—线性阶段积累的弹性应变能，MJ/m^{-3}；$U_{d2}+U_{d1}+U_{e1}-U_{e2}$—加载过程中整个损伤破坏阶段的能量增量，MJ；其余变量符号含义同上。

1.4.3　各向异性指数

为定量分析温度和围压对页岩各向异性特征的影响，采用各向异性指数（Zhao et al., 2024），基于弹性极限应力、弹性模量和抗压强度等变形参数，以及分形维数、损伤因子和能量耗散等损伤破坏参数，分别构建了变形与损伤破坏 2 类各向异性指数。各向异性特征通过不同层理倾角下相应参数的最大值与最小值之比进行表征，具体计算公式如下：

弹性极限应力各向异性指数：

$$T_{\sigma e} = \frac{\mathrm{Max}(\sigma_e)}{\mathrm{Min}(\sigma_e)} \tag{17}$$

弹性模量各向异性指数：

$$T_E = \frac{\mathrm{Max}(E)}{\mathrm{Min}(E)} \tag{18}$$

抗压强度各向异性指数：

$$T_{\sigma c} = \frac{\mathrm{Max}(\sigma_c)}{\mathrm{Min}(\sigma_c)} \tag{19}$$

分形维数各向异性指数：

$$T_F = \frac{\mathrm{Max}(F)}{\mathrm{Min}(F)} \tag{20}$$

损伤因子各向异性指数：

$$T_D = \frac{\mathrm{Max}(D)}{\mathrm{Min}(D)} \tag{21}$$

能量耗散各向异性指数：

$$T_{Ud} = \frac{\mathrm{Max}(U_d)}{\mathrm{Min}(U_d)} \tag{22}$$

式中：Max、Min—不同层理倾角的最大与最小值；σ_e—弹性极限应力，MPa；σ_c—抗压强度，MPa；F—分形维数，无量纲；D—损伤因子，无量纲；其余变量符号含义同上。

2　实验结果及验证

2.1　基础物性特征

采用孔渗联测仪和导热测试仪，系统测定了层理性深层页岩再不同温度和层理倾角下的孔隙度、渗透率和导热系数等基础物性，以分析其孔隙结构和渗流特性。

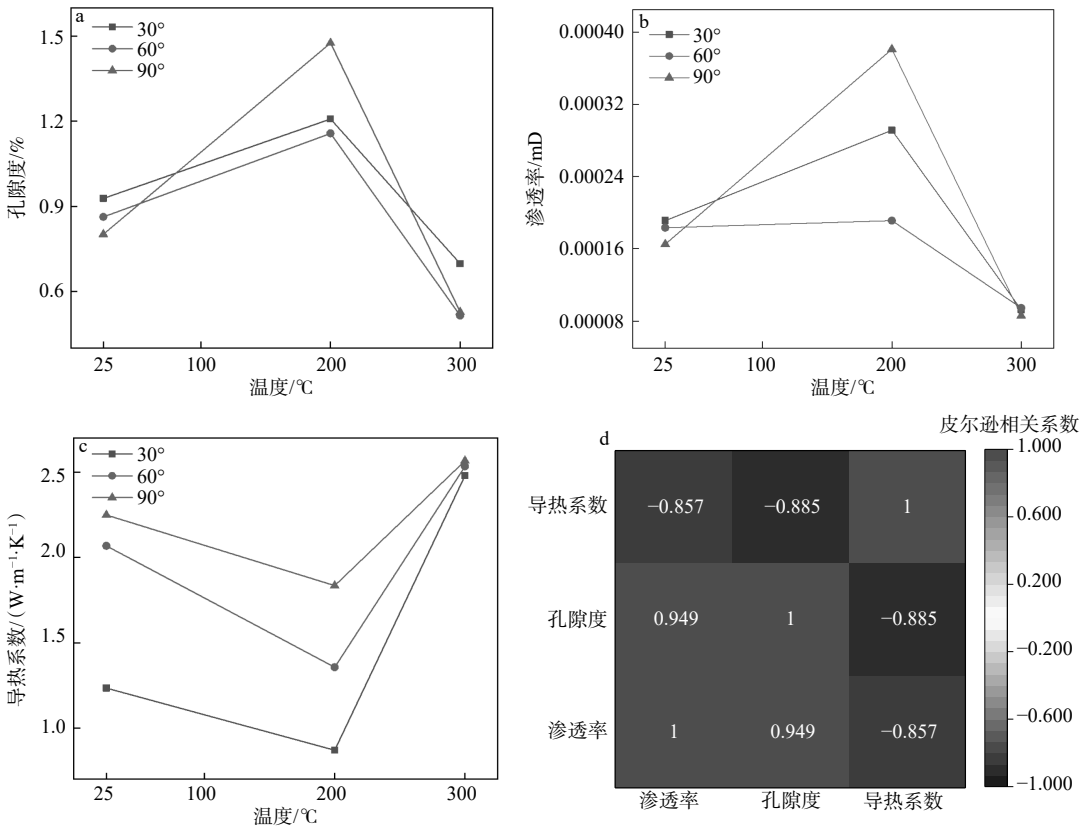
通过孔渗联测仪获得的孔隙度与渗透率随温度与层理倾角的变化趋势（图 3a、3b）显示，二者随温度升高均呈现先增大后减小的趋势。其原因主要包括：首先，热膨胀作用下岩石可能产生新的孔隙或微裂隙，但深层页岩层理发育，膨胀至一定程度时，层理可能发生闭合；其次，高温会引发有机质热解和黏土矿物脱水反应，导致矿物结构收缩、硬化甚至发生胶结（Jiang et al., 2024; Zhang, 2024a）。孔隙度和渗透率随层理倾角（30°、60°、90°）呈“凹”型分布，其中 60°倾角时对应的数值显著低于另外 2 个倾角，显示出层理性深层页岩的各向异性特征。通过比较在 25 ℃ 至 200 ℃ 区间内不同层理倾角下的孔隙度和渗透率变化发现，30°、60°、90°层理倾角的增幅分别为 41.3%、19.3% 和 107.6%，表明 90°倾角的页岩对热应力的反应更加敏感。

利用导热系数测试仪，获得不同温度和层理倾角下深层页岩的导热系数。岩石内部孔隙和微裂隙越多，其导热系数通常越低。随着温度升高，深层页岩的导热系数先下降后上升（图 3c），这一趋势与孔隙度和渗透率的变化规律一致。同时，90°层理倾角时导热系数对温度的响应更为敏感。为进一步验证各物性参数间的关联性，分别计算了 3 种基础物性参数的皮尔逊相关系数（Zhang et al., 2023a; Sun et al., 2024; Pan et al., 2025），结果表明孔隙度与渗透率之间的相关系数超过 0.9，呈现出极强的正相关关系；而导热系数与孔隙度、渗透率的相关系数均小于−0.85，表现出强烈的负相关关系（图 3d）。这表明，实验测得的孔隙度、渗透率和导热系数之间具有较好的相关性，且相互验证的结果具有较高的可信度。

2.2　岩石力学参数和变形特征

通过高温高压岩石力学三轴试验机，开展了深层页岩力学实验研究，获得了不同温度、围压和层理倾角下的应力−应变曲线（图 4）。以图 4a 为例，深层页岩的应力−应变曲线主要分为 5 个阶段：裂纹压密阶段（*OA*）、线性变形阶段（*AB*）、裂纹稳定扩展的非线性变形阶段（*BC*）、裂纹加速扩展直至破裂阶段（*CD*）以及峰值后变形破坏阶段（*DE*）。其中，*B* 点为弹性极限，*C* 为屈服极限，*D* 为峰值强度。

总体而言，深层页岩表现出明显的峰后塑性特征，峰后应变较大。经过 300 ℃ 处理后的应力−应变曲线整体高于 200 ℃，且随着围压增加，二者间差



a—孔隙度；b—渗透率；c—导热系数；d—皮尔逊相关系数

图 3 基础物性实验结果

Fig. 3 Experimental results of basic physical properties

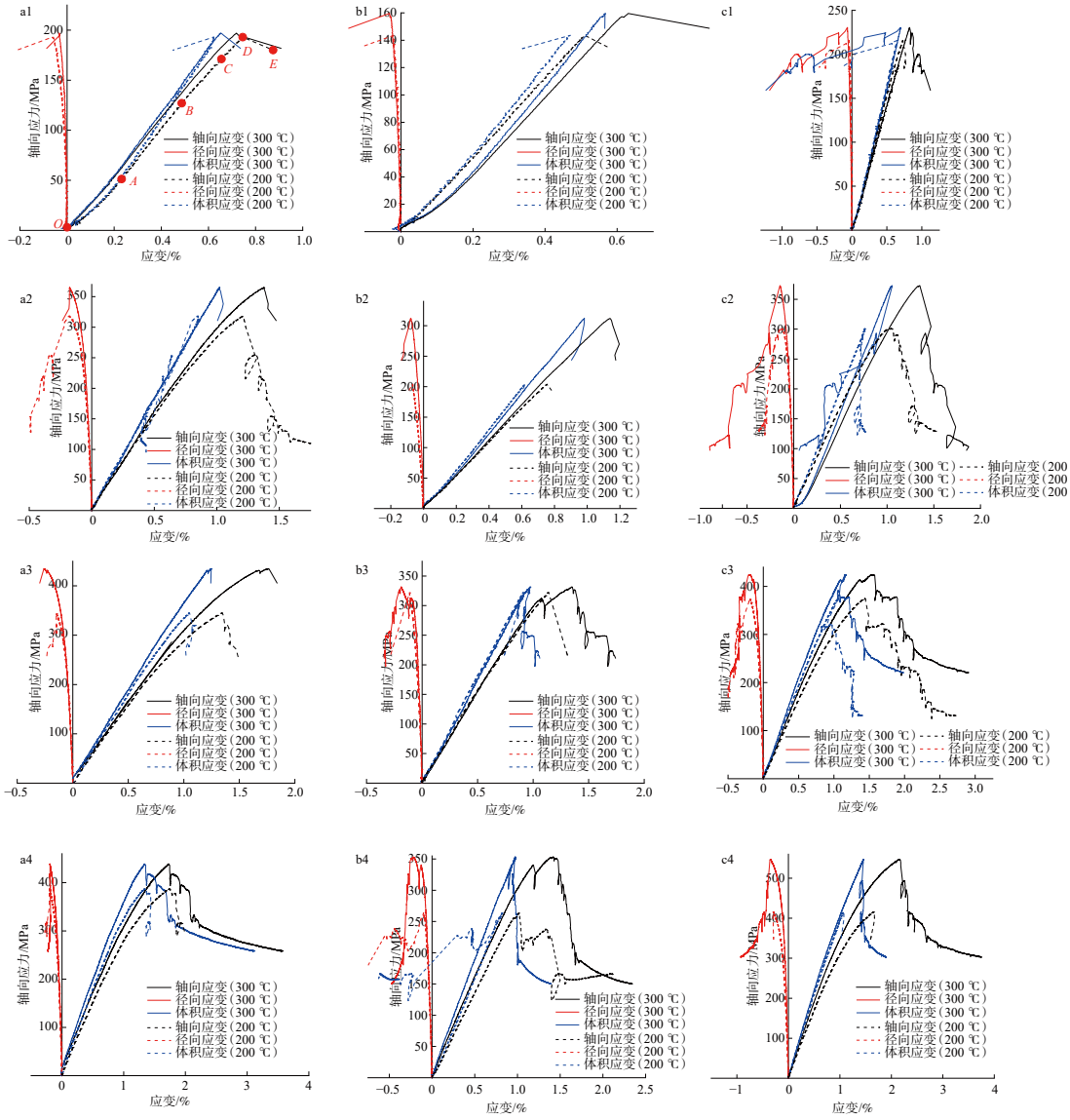
(a) Porosity; (b) Permeability; (c) Thermal conductivity; (d) Pearson correlation coefficient

异更加明显。特别是，90°层理倾角时深层页岩在峰后阶段表现出更长且更复杂的变形过程，突显了层理倾角对岩石力学性能的各向异性影响。

在 B 点之后，体积应变曲线的斜率发生变化（图 4a），表明岩石进入非线性变形阶段，开始产生塑性变形与裂纹扩展。弹性极限应力可用于评估岩石的抵抗塑性变形的能力和可压性：该值越低，说明岩石越容易进入塑性变形阶段；对应的体积应变值越大，岩石的可压性越强，能够在较低的应力下发生显著变形。

对比不同层理倾角下的弹性极限应力（图 5）发现，60°倾角时深层页岩弹性极限应力低于 30°和 90°，而对应的体积应变显著高于其他倾角，表明 60°层理倾角的深层页岩在应力作用下更易沿层理方向发生剪切滑移和变形，表现出较强的可压性，容易发生膨胀破坏，同时凸显了深层页岩的各向异性特征。300 ℃ 处理后的岩样的弹性极限应力普遍高于 200 ℃ 处理组，但对应的体积应变更大，说明高温下部分孔隙、层理发生闭合，同时黏土矿物脱水和有机质热解导致的硬化效应使其更难进入塑性变形阶段，但可压性增强，膨胀破坏更为显著。随着围压增加，弹性极限应力呈上升趋势，表明围压增强了深层页岩的整体强度。

从不同条件下的抗压强度与应变可知，随着围压增加，样品的抗压强度及轴向、径向应变逐渐增大。不同层理倾角的深层页岩表现出明显差异，其中 60°层理倾角深层页岩的抗压强度及轴向、径向应变明均显著低于 30°、90°层理的岩样。这表明，60°层理倾角的深层页岩更容易发生变形破坏，抗压强度较低，岩石脆性较强，且应变较小；而 90°层理倾角的深层页岩则表现出较高的抗压强度和更强的塑性，破坏时（即峰值应力）的变形量较大。温度作用进一步增加了这一差异性：相较于 200 ℃ 的结果，300 ℃ 时深层页岩抗压强度显著增加，塑性变形也相应增大。结合孔隙度和渗透率结果可知，热应力显著提高了深层页岩的塑性强度。300 ℃ 时岩样



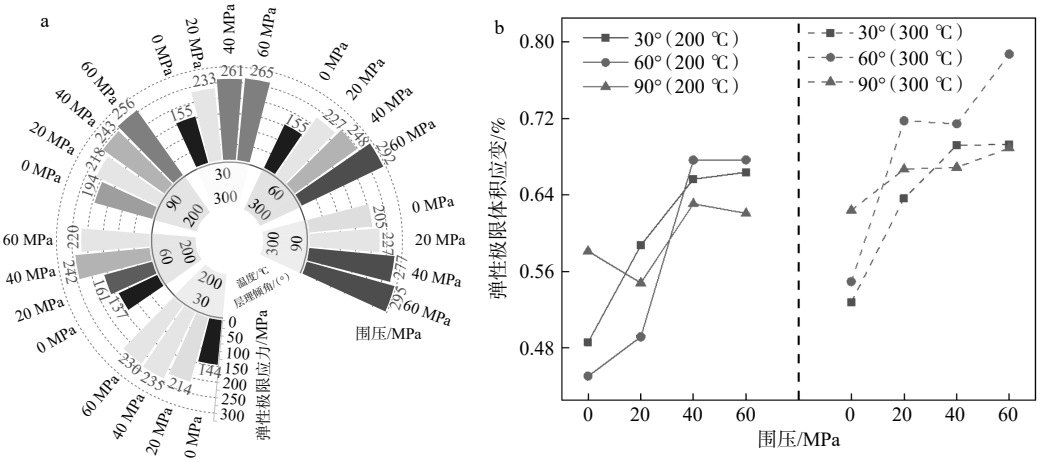
a1—30°层理倾角，围压 0 MPa；a2—30°层理倾角，围压 20 MPa；a3—30°层理倾角，围压 40 MPa；a4—30°层理倾角，围压 60 MPa；b1—60°层理倾角，围压 0 MPa；b2—60°层理倾角，围压 20 MPa；b3—60°层理倾角，围压 40 MPa；b4—60°层理倾角，围压 60 MPa；c1—90°层理倾角，围压 0 MPa；c2—90°层理倾角，围压 20 MPa；c3—90°层理倾角，围压 40 MPa；c4—90°层理倾角，围压 60 MPa

图 4　不同层理倾角和围压条件下深层页岩的应力−应变曲线

Fig. 4　Stress–strain curves of deep shale under different bedding dip angles and confining pressures

(a1) 30° bedding dip angle, confining pressure 0 MPa; (a2) 30° bedding dip angle, confining pressure 20 MPa; (a3) 30° bedding dip angle, confining pressure 40 MPa; (a4) 30° bedding dip angle, confining pressure 60 MPa; (b1) 60° bedding dip angle, confining pressure 0 MPa; (b2) 60° bedding dip angle, confining pressure 20 MPa; (b3) 60° bedding dip angle, confining pressure 40 MPa; (b4) 60° bedding dip angle, confining pressure 60 MPa; (c1) 90° bedding dip angle, confining pressure 0 MPa; (c2) 90° bedding dip angle, confining pressure 20 MPa; (c3) 90° bedding dip angle, confining pressure 40 MPa; (c4) 90° bedding dip angle, confining pressure 60 MPa

的抗压强度普遍高于 200 ℃ 岩样，这一趋势与基础物性参数和弹性极限应力的结果一致，表明在 200 ℃ 至 300 ℃ 存在某一阈值，超过该阈值后深层页岩内部层理可能发生闭合。此外，随着围压增加，岩石抗压强度的增幅逐渐减小，300 ℃ 时样品抗压强度的增幅平均下降了约 59%，200 ℃ 时增幅下降了约 12.7%。300 ℃ 时深层页岩抗压强度的增幅急剧减小，削弱了围压闭合孔隙的作用。这可能是由于在某一温度阈值下，深层页岩内部的层理或微裂隙在热应力作用下已提前闭合。同时，90°倾角时深层页岩表现出与其他倾角不同的规律，进一步体现了层理对岩石力学性能的各向异性影响。



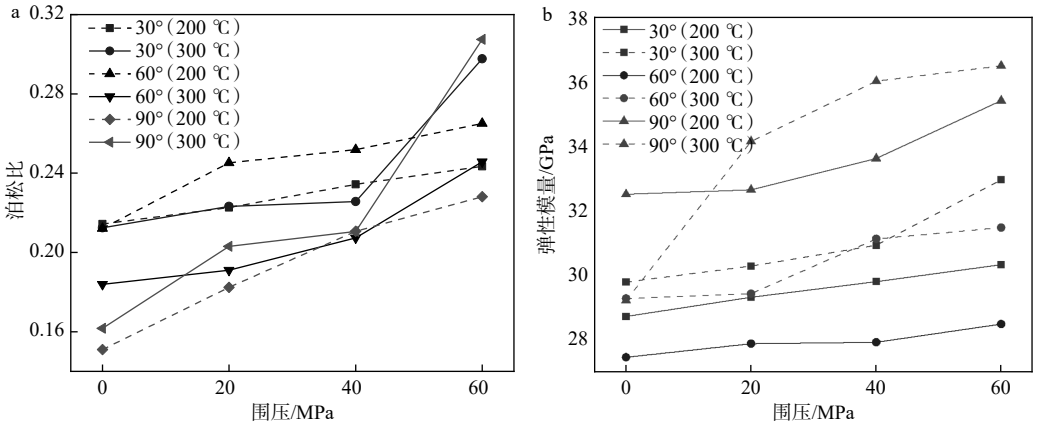
a—弹性极限应力；b—弹性极限体积应变

图 5 弹性极限应力和极限体积应变值

Fig. 5 Elastic limit stress and limit volumetric strain values

(a) Elastic limit stress; (b) Elastic limit volumetric strain

通过应力−应变曲线，可以得到衡量岩石变形特征的 2 个力学参数：弹性模量和泊松比。如图 6 所示，随着围压增加，岩石的弹性模量和泊松比均呈上升趋势，特别是 300 ℃ 时的岩样，泊松比的上升幅度更为显著。这表明，在围压作用下，岩石内部孔隙逐渐闭合，导致岩石的变形能力增强。与 200 ℃ 相比，300 ℃ 时深层页岩泊松比较低，但弹性模量较大，说明在较高温度下，岩石强度增加，弹性变形的能力增强。其原因在于：300 ℃ 时岩石的孔隙度和渗透率降低，导致径向应变减小，泊松比随之降低；而孔隙度的降低则使岩石的整体强度增大，弹性模量提高。此外，在 60°倾角时深层页岩表现出较大的泊松比和较小的弹性模量，表明该倾角的深层页岩在外力作用下抵抗能力较弱，产生的应变较大，同时伴随较大的横向变形。



a—泊松比；b—弹性模量

图 6 力学参数

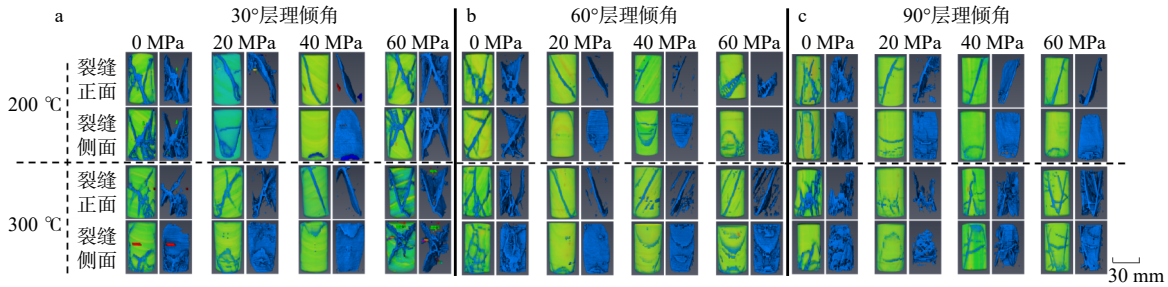
Fig. 6 Mechanical parameters

(a) Poisson's ratio; (b) Elastic modulus

2.3 破坏规律

CT 扫描图像（图 7）显示，随着围压增加，深层页岩的破坏模式由脆性破坏逐渐向塑性破坏转变，裂缝形态也由复杂的裂缝网络演化为单一的剪切裂缝。在低围压条件下，岩石内部的裂纹处于张开状态，刚度较低，张开的裂纹容易形成局部应力集中，形成张拉应力并诱导微裂纹扩展，裂纹沿主应力方向迅速贯通，最终形成宏观劈裂破坏。随着围

压增加，岩石内部裂纹和孔隙逐渐闭合，强度增强，颗粒间发生相对滑移。当局部应力集中超过一定阈值时，虽然人工裂纹起裂仍沿最大主应力方向，但在围压的约束下发生偏转，最终沿剪切方向扩展，形成约 45°倾角的剪切破坏。围压增加不仅提升了岩石的抗压强度，还促进了塑性破坏的发展。此外，裂缝形态在 20～40 MPa 的围压范围内趋于单一，而在 60 MPa 时再次呈现出复杂化趋势，该现象可结合后续能量分析进一步探讨其成因。



图中绿色代表岩石基质，蓝色代表裂缝

a—30°层理倾角深层页岩的破坏后 CT 图像；b—60°层理倾角深层页岩的破坏后 CT 图像；c—90°层理倾角深层页岩的破坏后 CT 图像

图 7　不同温度、围压下的层理性深层页岩破坏后 CT 图像

Fig. 7　Post-failure CT images of bedded deep shale under different temperatures and confining pressures

(a) Post-failure CT images of deep shale with a bedding dip angle of 30° ; (b) Post-failure CT images of deep shale with a bedding dip angle of 60°; (c) Post-failure CT images of deep shale with a bedding dip angle of 90°

Green–rock matrix; Blue–fractures

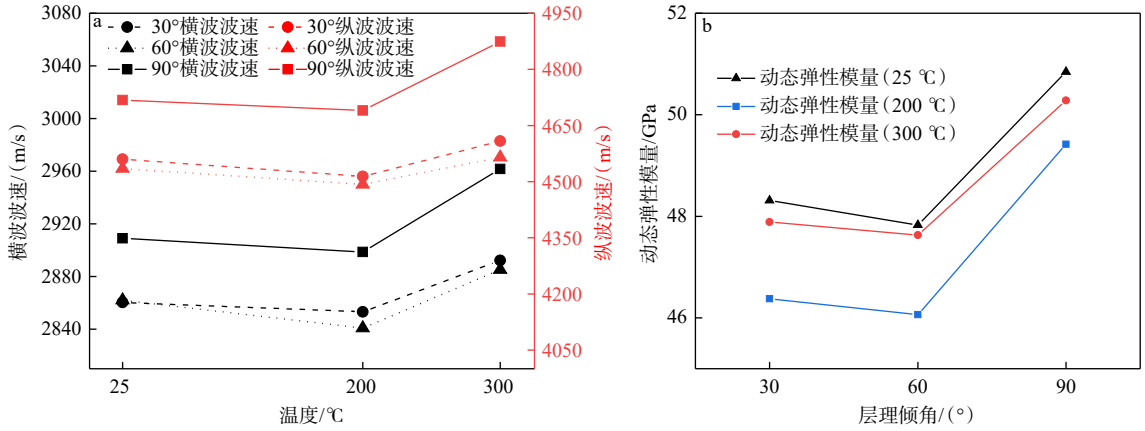
裂缝形态主要表现为“剪切”型、“X”型和“V”型，反映了深层页岩在应力作用下以塑性剪切破坏为主的特征。在 0 MPa 围压下，裂缝形态以“X”型复杂裂纹为主；围压为 20～40 MPa 时，裂缝形态趋向于单一的“剪切”型；围压升至 60 MPa 时，裂缝形态则表现为“V”型或多条“剪切”型裂缝的组合。层理倾角对破裂模式亦具有显著影响。具体而言，倾角为 30°和 90°时，深层页岩在形成“剪切”型裂缝的同时，常伴有一定数量沟通层理的短分支裂缝；而在 60°倾角时，深层页岩则更倾向于沿层理形成“剪切”型裂缝，这是其抗压强度较低的关键原因之一。值得注意的是，30°和 90°倾角条件下岩样更容易形成垂直于层理的分支裂缝，有利于水力压裂过程中形成层理贯通裂缝和复杂裂缝网络。此外，高温处理对裂缝形态也有显著影响。300 ℃ 时岩样的裂缝更加复杂，沟通层理的裂缝数量明显增多，说明高温条件下岩石的微观结构与热–力响应机制发生变化，导致破坏模式更加多样且具有不确定性。

综上所述，在高温高压作用下，深层页岩呈现明显的塑性损伤破坏特征，且层理倾角对其各向异性影响显著。然而，目前对这一规律的判断主要依赖于经验观察，尚缺乏系统、定量的评价方法。因此，文章第 4 节将引入多种损伤因子、能量耗散特征及分形维数等参数，进一步揭示深层页岩的塑性损伤破坏机制。

2.4　超声波波速特征

超声波波速测试可用于表征岩石内部结构特征，反映其热损伤程度。波速数值越大，表明岩石孔隙度和微裂隙发育程度越低，结构越致密，反之则说明岩石损伤程度较高。因此，波速变化规律可用于验证基础物性实验结果的可靠性。随着温度升高，岩石的横纵波速呈先降后升趋势（图 8a），说明岩石在 200 ℃ 时热损伤最为显著，而在 300 ℃ 时孔隙及层理趋于闭合，波速回升。这一趋势与孔隙度、渗透率和导热系数等物性参数的变化规律一致，进一步印证了实验数据的准确性。

此外，基于横纵波速可计算岩石的动态弹性参数，反映其在动态载荷下的变形响应。层理性深层页岩的动态弹性模量与动态泊松比均呈“V 型”变化趋势（图 8b）。其中，60°层理倾角岩样的动态模量最低，表明其在小振幅动态加载下的抗压能力最弱。300 ℃ 时岩石的动态弹性模量与泊松比整体高于 200 ℃，反映其抗压能力和塑性均有所增强，与静态力学参数的变化趋势一致，进一步验证了实验结论的可靠性。



a—横、纵波波速；b—动态弹性模量；c—动态泊松比；d—动态剪切模量和动态体积模量

图 8 纵、横波速度的验证与分析

Fig. 8 Validation and analysis of longitudinal and shear wave velocities

(a) Longitudinal and shear wave velocities; (b) Dynamic elastic modulus; (c) Dynamic Poisson's ratio; (d) Dynamic shear modulus and dynamic bulk modulus

2.5 核磁共振规律

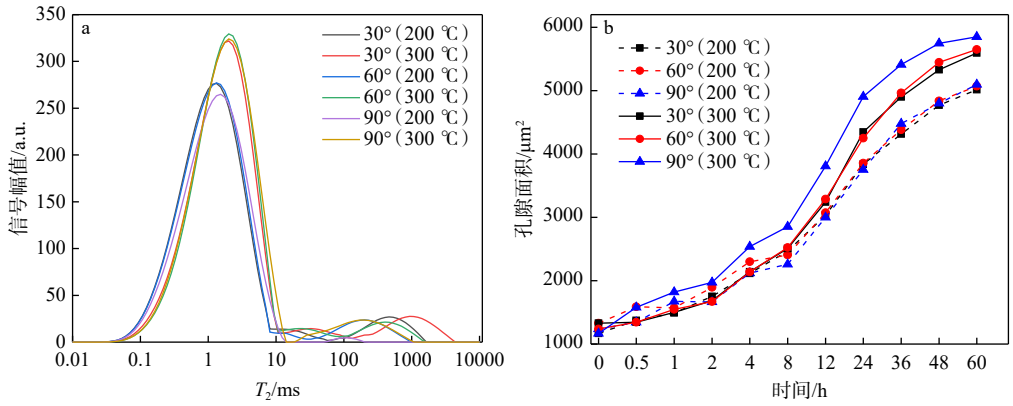
核磁共振实验通过将岩石置于均匀磁场中，使孔隙流体中的氢核(质子)与外加磁场相互作用，从而产生核磁共振信号。该方法不仅揭示了孔隙流体的存在，还可通过信号幅度和弛豫时间等特征参数，进一步表征岩石的孔隙度、孔隙结构及流体饱和度特征。

吸水饱和状态下，不同温度处理后层理性深层页岩的 T_2 图谱曲线显示(图 9a)，300℃ 时岩样的 T_2 图谱曲线整体高于 200℃ 处理组，且谱峰明显右移，反映其孔隙和微裂隙更为发育。然而，T_2 图谱为二维信号，仅通过幅值进行定性对比难以全面揭示孔隙特征。因此，需结合弛豫时间的定量指标进行综合评价。为此，文中借鉴已有研究(Singer et al., 2016; Dick et al., 2022; Yuan et al., 2023; Zhang et al., 2024a)，引入 T_2 图谱的积分面积作为“孔隙面积”表征参数，用于定量反映孔隙发育程度。鉴于 T_2 谱曲线以第一主峰为主，第二、三峰面积占比不足 1%，故将第一个峰的积分面积(小孔面积)作为主要研究对象。

随着时间延长，孔隙面积逐渐增大(图 9b)，并且曲线斜率在 48～60 h 后趋缓，结合二维灰度云图结果判断，岩样逐步达到吸水饱和状态。核磁共振实验结果表明，在吸水初期(0～4 h)，300 ℃ 时岩样的 T_2 图谱信号低于 200℃ 处理组，在 60°倾角时差异尤为显著；但随着吸水过程持续，最终在饱和状态下，300 ℃ 岩样的 T_2 图谱信号强度反而高于 200 ℃ 岩样。这一现象验证了此前的推测：深层页岩在升温过程中可能发生膨胀，而在某一温度阈值下，局部层理结构趋于闭合，影响早期吸水速率。综合孔隙度、渗透率、超声波波速及抗压强度等基础物性和力学性能实验结果可知，随温度升高，孔隙发育相关参数呈现“先升后降”的变化趋势。此外，破坏后 CT 图像显示，300 ℃ 时岩样裂缝形态更加复杂、数量更多，从微观结构角度进一步佐证了上述实验结果的可靠性和一致性。

在 200 ℃ 条件下，不同层理倾角的深层页岩孔隙面积差异较小；但当温度升至 300 ℃ 时，各倾角岩样间孔隙面积差异显著，尤其在 90°倾角下岩样孔隙面积明显大于 30°和 60°倾角。结合孔隙度、渗透率及力学参数的实验结果推测，随着温度升高，热应力引发岩石膨胀作用，在 300℃ 下矿物热膨胀效应显著增强，影响层理结构的稳定性，导致不同倾角岩样出现不同程度的层理闭合，进而形成孔隙面积差异。相较于 90°倾角，30°和 60°倾角时岩样更易出现层理闭合，说明热应力作用下深层页岩的损伤与破坏呈现更强的各向异性特征。

核磁共振成像技术可有效表征岩石孔隙中流体的赋存状态及其动态变化过程。通过分析云图中的灰度变化，可定量评估流体饱和度及其空间分布特征。图像灰度值与流体饱和度呈正相关，即灰度值越高，表明局部饱和度越大。不同层理倾角深层页岩在核磁共振图像中的灰度差异(表 2)，证明了层理结构式调控流体渗流行为的重要因素。实



a—饱和条件下深层页岩的 T_2 图谱；b—孔隙面积曲线

图 9　饱和条件下深层页岩的 T_2 图谱和孔隙面积曲线

Fig. 9　T_2 spectrum and pore area curves of deep shale under saturation condition

(a) T_2 spectrum of deep shale under saturation condition; (b) Pore area curves

验结果显示，90°倾角时深层页岩在渗吸过程中具有更高的饱和度和更均匀的流体分布，其图像灰度值更高、亮度更强，且流体波及范围更广。

表 2　核磁共振二维灰度云图

Table 2　Two-dimensional grayscale nuclear magnetic resonance image

倾角	30°	60°	90°	30°	60°	90°
温度	200℃	200℃	200℃	300℃	300℃	300℃
12 h						
24 h						
36 h						
48 h						
60 h						

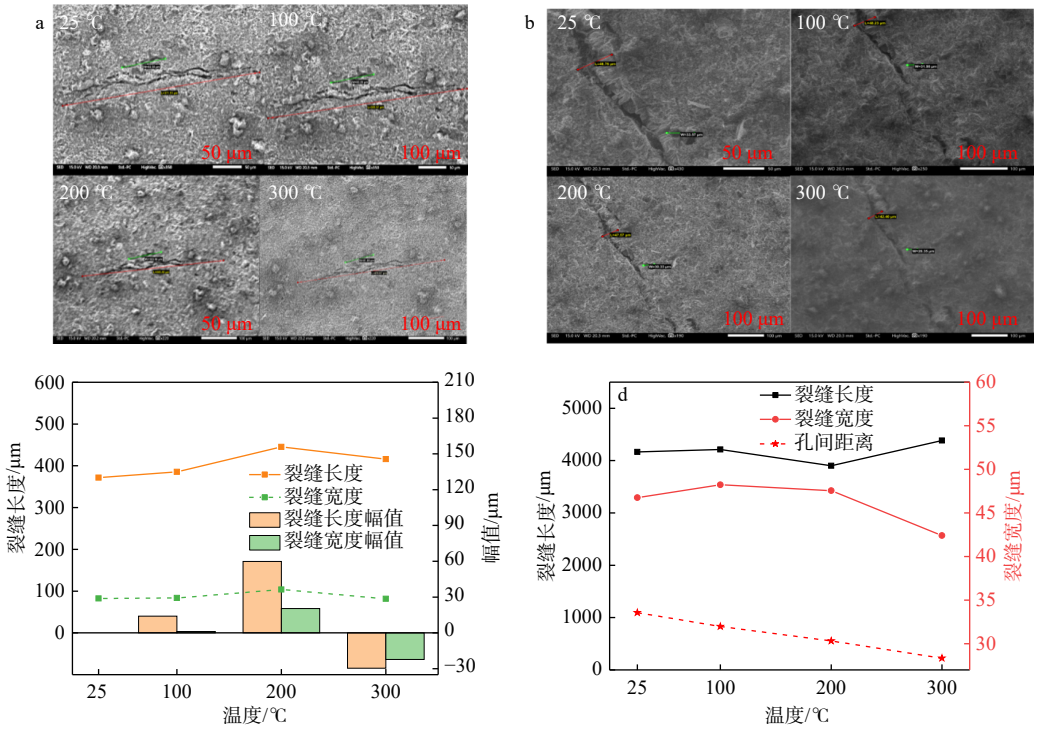
300 ℃ 时层理性深层页岩的孔隙结构发生显著改变，表现为孔隙空间拓展、图像灰度分布范围增大、图像灰度分布扩展速率加快，岩石的渗吸速率和吸水能力显著提升，流体波及范围明显扩大。相比之下，200 ℃ 时深层页岩的孔隙结构较差，孔隙空间分布不均匀，图像灰度分布扩展速率较慢，流体

波及范围有限。上述结果表明，高温热应力能够有效重构岩石内部孔隙网络，优化流体运移通道，从而改善层理性深层页岩的渗流特性，为深层页岩气的高效开发提供了理论支持。

2.6 X 射线衍射与电镜扫描验证

测试在高真空条件下进行，通过不同放大倍数下的成像，观察页岩中矿物颗粒的接触关系、层理界面形貌及裂隙空间分布特征，从而为后续的力学响应与损伤机理分析提供微观依据。需要说明的是，在制备 XRD 与 SEM 测试所需的粉末和切片样品过程中，由于 30°和 60°层理样品仅在层理取向上存在角度差异，结构特征无本质区别，因此在分析时将层理倾角归为 2 类：垂直层理（0°、90°）与倾斜层理（30°、60°），以便于对比不同层理类型下的矿物组成与显微结构差异。

SEM 结果（图 10）显示，不同层理倾角的页岩样品在裂隙倾角与孔隙连通性方面存在差异。倾斜层理样品中，初始微裂隙多沿特定角度分布，随着温度升高，新生裂隙亦倾向于沿相同方向扩展；温度升高过程中，样品内部层理结构与微裂隙均出现明显的扩展现象；但当温度升至某一阈值后，微裂隙的长度与宽度均出现减小趋势，表明裂隙在高温下发生了部分闭合。值得注意的是，垂直层理与倾斜层理样品的裂隙演化阈值温度并不相同，这也是 90°层理倾角岩样抗压强度普遍高于 30°与 60°岩样的重要原因之一。



a—垂直层理电镜扫描结果；b—倾斜层理电镜扫描结果；c—垂直层理几何参数；d—倾斜层理几何参数

图 10 扫描电镜结果

Fig. 10 SEM Results

(a) SEM image of vertical bedding; (b) SEM image of inclined bedding; (c) Geometric parameters of vertical bedding; (d) Geometric parameters of inclined bedding

进一步分析发现，倾斜层理样品在 300 ℃ 处理后，虽裂缝宽度有所减小，但裂缝长度仍持续增长。这主要归因于热应力驱动下的裂隙持续扩展，即矿物颗粒受热膨胀导致的热裂隙形成与延伸作用所致。与此同时，随着温度进一步升高，部分矿物因热膨胀不均引起层理面间的闭合现象，该结果也验证了热应力与矿物组成共同作用下的层理热响应机理。

XRD 定量分析结果（表 3、表 4）显示，岩样的主要矿物为石英、方解石、白云石及少量黏土矿物和黄铁矿。随着温度升高，石英含量逐渐增加（由 30.1% 升至 44.3%），黏土矿物总体略有增加，表明高

表 3　全岩矿物 XRD 测试结果

Table 3　XRD test results of whole-rock minerals

编号	层理倾角/(°)	温度/℃	矿物含量/%						
			石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物
1	90	25	30.1	0.1	0.6	19.5	42.0	1.3	6.4
2	90	100	35.0	0.3	0.6	17.0	38.0	1.1	8.0
3	90	200	44.3	0.6	1.1	16.8	23.9	0.5	12.8
4	90	300	38.6	0.4	0.3	18.7	29.7	1.1	11.2
5	60	300	37.7	0.3	0.3	17.6	33.1	0.9	10.1

表 4　黏土矿物 XRD 测试结果

Table 4　XRD test results of clay minerals

编号	层理倾角/(°)	温度/℃	黏土矿物相对含量/%					
			S	I/S	It	Kao	C	C/S
1	90	25 ℃	/	/	100	/	/	/
2	90	100 ℃	/	/	100	/	/	/
3	90	200 ℃	/	/	100	/	/	/
4	90	300 ℃	/	/	96	/	4	/
5	60	300 ℃	/	/	88	8	4	/

注: S—蒙皂石类; I/S—伊蒙混层; It—伊利石; Kao—高岭石; C—绿泥石; C/S—绿蒙混层

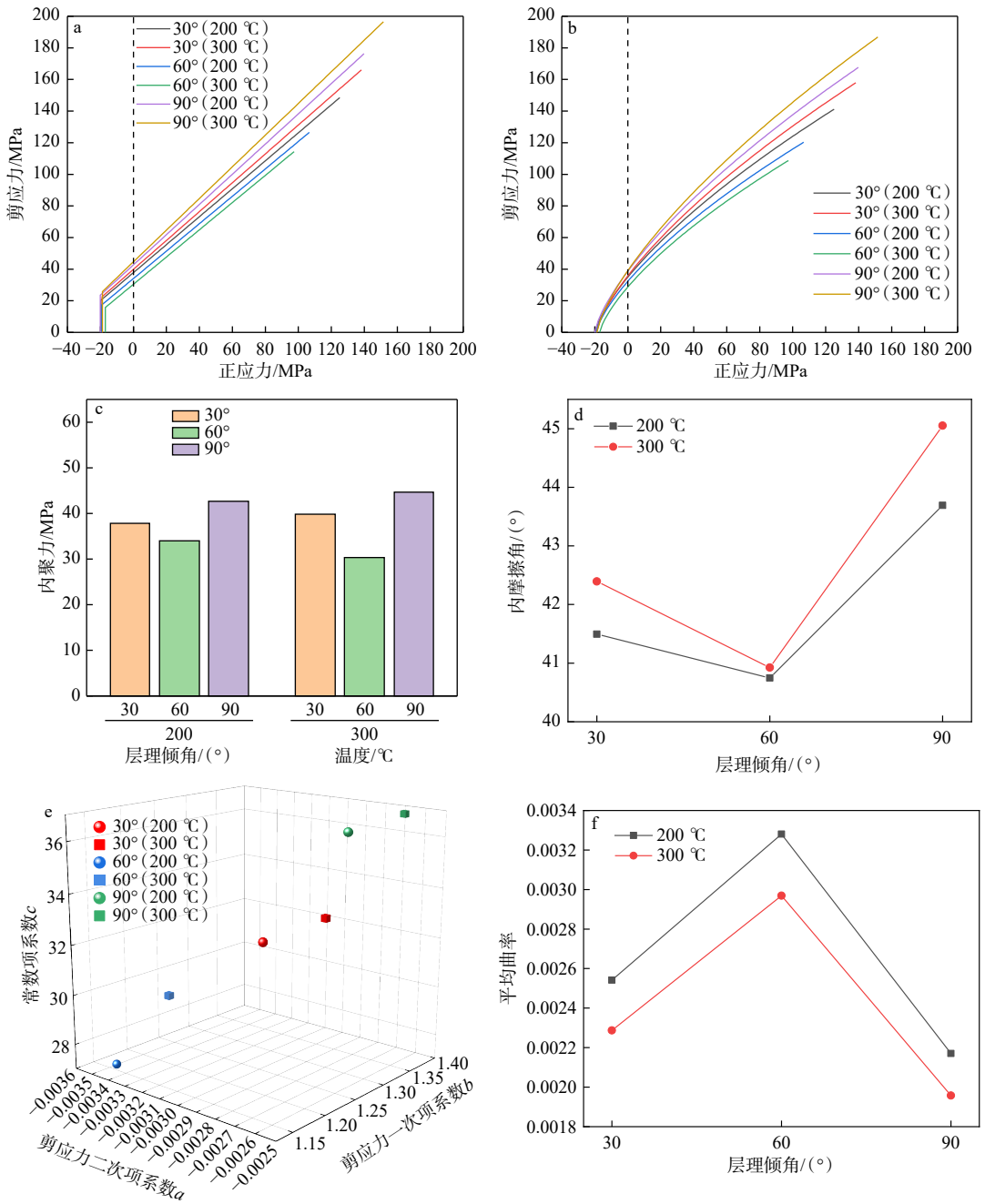
温促进了石英的晶化与黏土脱水反应，但二者在 300 ℃后相对含量下降。碳酸盐矿物含量(方解石与白云石)随温度升高整体下降。黏土矿物以伊利石为主，25～200 ℃区间内结构稳定，至 300 ℃时部分转化为绿泥石及高岭石。黄铁矿含量变化不大，表明其在该温度范围内较为稳定。倾斜层理岩样在 300 ℃时，高岭石和绿泥石含量更高，石英与白云石含量略高，而方解石与黏土含量略低，说明倾斜层理下热应力作用更显著，促进了矿物反应与层间滑移。

综合 XRD 与 SEM 结果可知，温度与层理倾角共同控制了页岩的矿物热响应：升温导致碳酸盐矿物分解、黏土脱水及石英晶化增强；而层理倾角决定了热应力分布与裂隙扩展方向，使倾斜层理页岩在高温下更易发生矿物转化和微裂隙贯通。上述变化不仅揭示了页岩在高温下的矿物组分演化规律，也为解释弹塑性变形与热裂隙发育提供了微观依据。前者从矿物组成角度揭示了页岩高温结构演化的物质基础，后者从微观形态层面验证了热处理及层理结构对孔裂隙发育的影响。二者相结合，共同为页岩在高温及各向异性条件下的基础物性和力学参数提供了可靠的微观依据。

3　讨论与分析

3.1　弹塑性变形分析

剪切应力−正应力空间中 2 种准则的拟合结果(图 11)显示，Hoek−Brown 准则对实验数据的非线性拟合效果优于 Mohr−Coulomb 准则，能更准确反映岩石实际的破坏与变形特征。基于 2 种准则提取的弹塑性变形参数，说明不同温度与层理倾角条件下岩石的强度特征存在显著差异。内聚力反映岩石内部微结构的黏结能力，其值越高，岩石整体强度越大；内摩擦角表征岩石颗粒间的摩擦阻力，其值越大，岩石抵抗剪切应变的能力越强。实验结果表明，60°倾角的深层页岩内聚力与内摩擦角均较低，表现出较弱的抗剪强度与弹塑性变形能力；温度升高至 300 ℃时，岩石内聚力有所降低，但内摩擦角显著增大，表明高温作用促使颗粒接触面滑移，从而提升其剪切变形能力和弹塑性响应。此外，300 ℃时不同倾角岩石表现出更强的各向异性特征。这这主要归因于高温下矿物颗粒的非均匀热膨胀效应，该效应会引发新的微裂缝，并促使这些微裂缝发生定向扩展或闭合，进而显著增强了层



a—Mohr-Coulomb 准则；b—Hoek-Brown 准则；c—内聚力；d—内摩擦角；e—Hoek-Brown 准则剪应力系数；f—平均曲率

图 11 剪切应力−正应力空间下强度准则拟合效果

Fig. 11 Fitting effect of strength criteria in shear–normal stress space

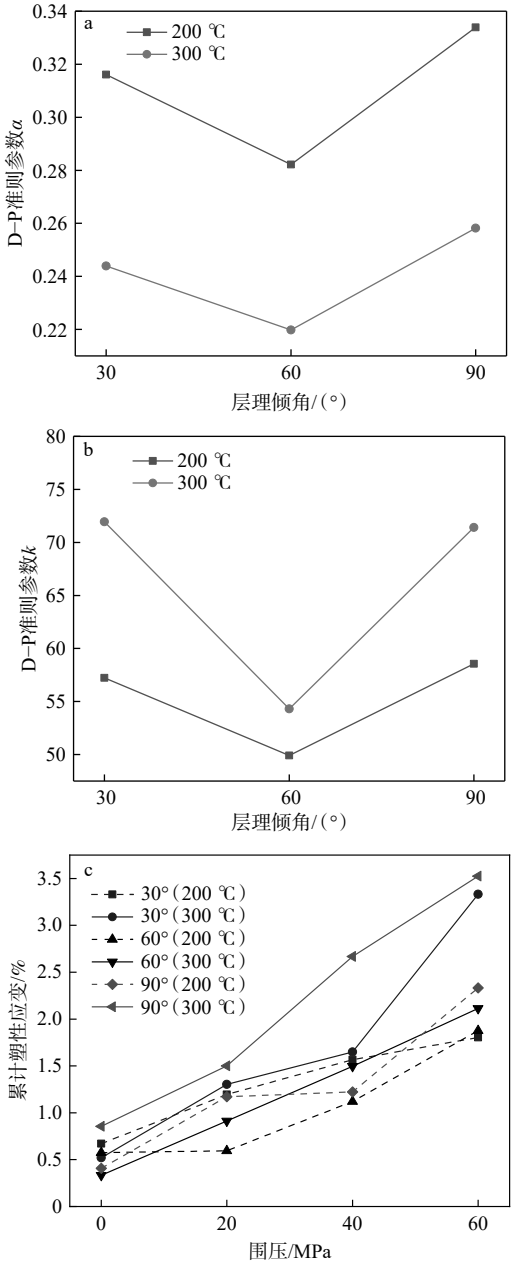
(a) Mohr-Coulomb criterion; (b) Hoek-Brown criterion; (c) Cohesion; (d) angle of internal friction; (e) Hoek-Brown shear stress coefficient; (f) average curvature

理结构与微裂缝之间的相互作用。同时，高温加剧了岩石内部水分的迁移与逸散过程，也可能进一步放大其各向异性强度特征。

文中推导了 Hoek–Brown 准则的剪切应力−正应力的非线性关系式[公式(9)]，从中可以获得剪应力破坏包络的非线性特征参数。如图 11e 所示，其相关系数包括二次项系数 a、一次项系数 b 和常数项 c：系数 a 代表塑性阶段曲线的弯曲程度，体现了剪切强度随围压增加呈现的非线性增强趋势；系数 b 表征剪切强度对围压的线性响应能力，可视为摩擦系数的量化反映；常数项 c 类似于 Mohr–Coulomb 准则中的内聚力，代表岩石内部的黏结强度。拟合

结果发现，300℃ 时岩石表现出更显著的非线性增强趋势，线性响应能力提高，且内部黏结强度也随之增强，说明高温处理显著提升了岩石的塑性变形能力与非线性特征。相比之下，60°倾角时岩石的剪应力相关系数均低于 30°与 90°倾角，表明该层理倾角下的岩石塑性变形能力较弱，非线性特征也相对较弱。Hoek–Brown 曲线的平均曲率（图 11f），进一步验证了上述趋势：300℃ 条件下曲线平均曲率较低，表明热处理增强了深层页岩的非线性塑性行为；而 60°倾角下曲线平均曲率较高，反映出其塑性较弱，剪切变形倾向集中于沿层理方向的滑移破坏，验证了三轴压缩实验的结果。

在深部储层高温高压环境中，岩石逐渐由线性弹性向非线性塑性演化，呈现出明显的塑性增强与非线性变形特征。屈服点作为岩石弹性行为与塑性行为的分界，既是弹性响应的极限状态，也是非线性塑性变形的起始点。文章基于应力−应变曲线中弹性极限邻近区域的数据，利用最小二乘法对 Drucker-Prager 准则进行参数拟合，从而获得材料参数 α 和 k[公式（10）]。参数 α 表示岩石对围压的敏感性，数值越大表示对围压响应越强；参数 k 为黏聚屈服强度，兼具 Mohr−Coulomb 准则中内聚力与内摩擦角的物理意义，用以衡量岩石的初始屈服强度。不同温度和层理倾角条件下拟合得到的模型参数分布情况显示（图 12），300℃ 时岩样的 α 值降低而 k 值升高，表明岩石的黏聚屈服强度增强，对围压的敏感性减弱，因此高温条件下岩石强度随围压增加的幅度趋缓，体现出更强的塑性特征；相同温度下，60°倾角岩样的 α 与 k 值均低于 30°和 90°倾角岩样，表明其黏聚屈服强度较弱，对围压的敏感性也较弱，塑性特征较弱，破裂模式趋于单一。此外，300 ℃ 时岩样在三轴压缩过程中累积塑性应变显著提高，较 200℃ 时平均提高约 47.3%（图 12c），定量表征了高温作用对深层页岩弹塑性响应能力的强化效应。而在相同温度下，60°倾角岩样的累积塑性应变远低于其余 2 组倾角，进一步验证了其塑性变形能力较弱、破坏机制以沿层理滑移为主的特点。



a—模型参数 α; b—模型参数 k; c—累积塑性应变

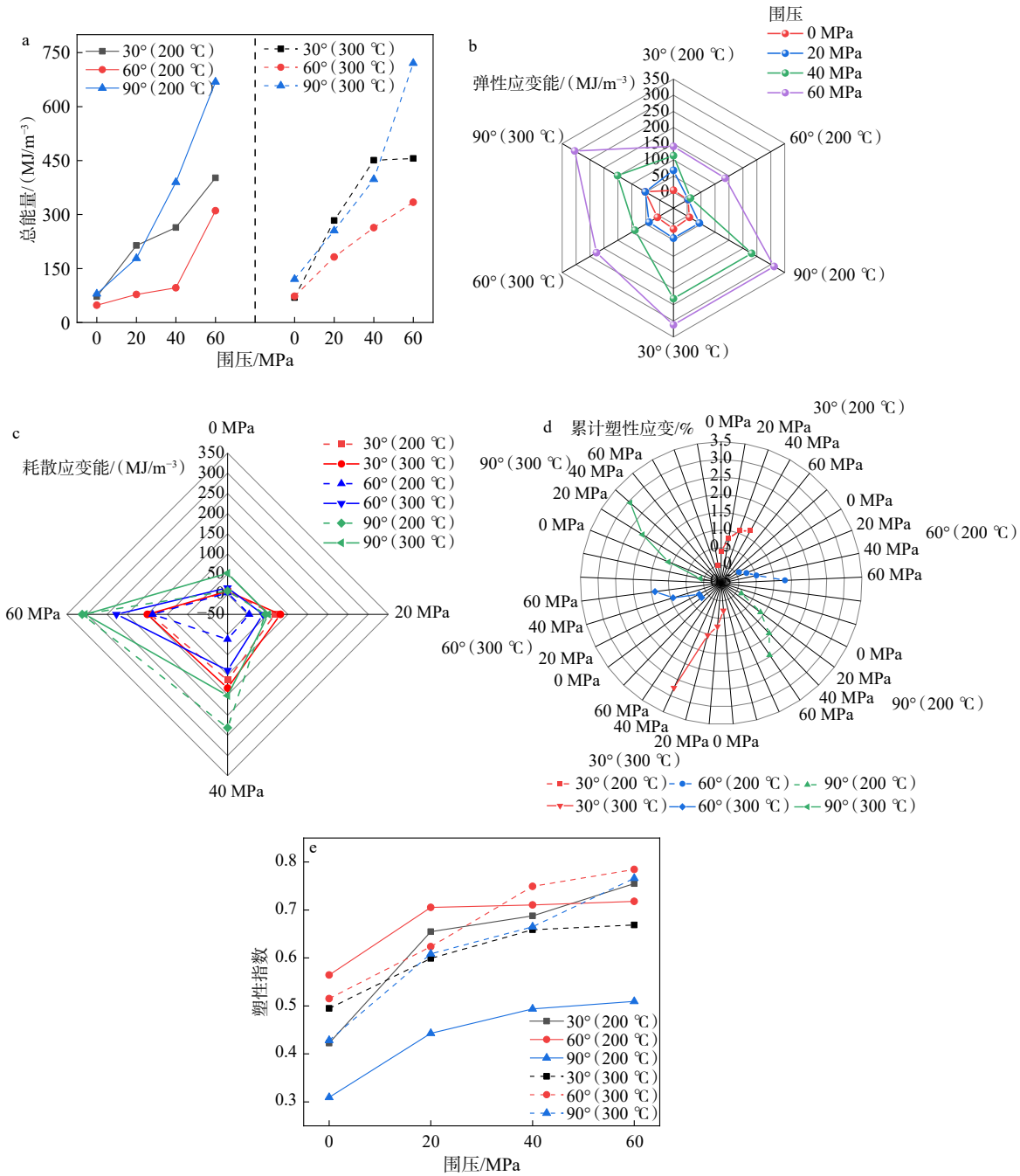
图 12　Drucker-Prager 屈服准则的相关参数

Fig. 12　Results of the Drucker-Prager yield criterion

(a) Model parameter α; (b) Model parameter k; (c) Cumulative plastic strain

3.2　能量耗散原理

通过对各类能量的定量计算与对比（图 13）发现，随着围压与温度的增加，岩石的总输入能量、弹性应变能与耗散应变能均显著增加。结合三轴力学压缩实验的结果，围压增加促使岩石内部微裂隙闭合，提升了整体抗压强度，从而使岩石在变形破坏过程中储存与耗散更多能量，反映出高温高压下岩石需克服更大阻力才能发生破坏。特别是在 300 ℃ 时，部分层理结构发生闭合，岩石破坏所需能量显著提升，最终形成更复杂且多样的裂缝形态。进一步比较不同层理倾角的能量分布可知，30°与 90°倾角页岩的耗散应变能和弹性应变能高于 60°倾角时的结果，这表明深层页岩的各向异性在围压作用下更明显。不同倾角岩石在能量响应机制



a—总能量；b—弹性应变能；c—耗散应变能；d—累积塑性应变；e—塑性指数

图 13 不同处理方式下的能量变化

Fig. 13 Energy changes under different treatments

(a) Total energy; (b) Elastic strain energy; (c) Dissipative strain energy; (d) Cumulative plastic strain; (e) Plasticity index

上存在显著差异，导致30°与90°倾角时页岩更容易形成垂直于层理方向的复杂裂缝结构。综上，能量分析有效揭示了温度与围压对岩石变形破坏行为的调控机制，并从根本上反映了层理性深层页岩的各向异性响应增强过程。

从总能量、弹性应变能和耗散应变能的变化趋势来看，耗散应变能的占比具有关键意义，其占比大小反映了岩石的脆塑性特征。具体而言，耗散应变能占比越高，表明岩石在变形过程中发生更多不可逆的能量耗散，体现出更明显的塑性破坏；反之，占比越低则说明岩石更易发生脆性破坏。因此，围压与温度的变化不仅影响岩石的强度性能，还在一

表 5　各种损伤因子计算方法

Table 5　Calculation methods of damage factors

定义方式	损伤因子	公式	符号注释
弹性模量	D_E	$D_E = 1 - \frac{E_1}{E_0}$	E_0、E_1分别是温度或围压处理前后的弹性模量
泊松比	D_v	$D_v = 1 - \frac{v_1}{v_0}$	v_0、v_1分别是温度或围压处理前后的泊松比
抗压强度	$D_{\sigma c}$	$D_{\sigma c} = 1 - \frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c0}}$	σ_{c0}是单轴的抗压强度，σ_{c1}是其他处理下的抗压强度
总能量	D_U	$D_U = 1 - \frac{U_1}{U_0}$	U_0、U_1分别是温度或围压处理前后的总能量
耗散应变能	D_{Ud}	$D_{Ud} = 1 - \frac{U_d}{U_c}$	U_d是耗散应变能，U_c是强度劣化所对应的临界耗能
弹性极限应力	$D_{\sigma e}$	$D_{\sigma e} = 1 - \frac{\sigma_{e1}}{\sigma_{e0}}$	σ_{e0}、σ_{e1}分别是温度或围压处理前后的弹性极限应力

表 6　不同损伤因子的权重

Table 6　Weights of different damage factors

权重		$\omega(D_E)$	$\omega(D_v)$	$\omega(D_{\sigma c})$	$\omega(D_U)$	$\omega(D_{Ud})$	$\omega(D_{\sigma e})$
倾角	温度	弹性模量	泊松比	抗压强度	总能量	耗散应变能	弹性极限应力
30°	200 ℃	0.1981	0.1995	0.1963	0.1950	0.0451	0.1659
	300 ℃	0.1562	0.1361	0.1761	0.1752	0.1784	0.1777
60°	200 ℃	0.1607	0.1723	0.1678	0.1697	0.1669	0.1624
	300 ℃	0.1591	0.1728	0.1728	0.1680	0.1538	0.1732
90°	200 ℃	0.1697	0.1712	0.1594	0.1691	0.1596	0.1707
	300 ℃	0.1665	0.1562	0.1701	0.1727	0.1671	0.1673
平均值		0.1684	0.1681	0.1737	0.1749	0.1451	0.1695

定程度上调控其能量耗散机制，从而决定其脆性与塑性响应特征。

通过对耗散应变能的计算，可识别岩石发生塑性变形破坏的起始时刻，并据此推导出累积塑性应变。随着温度和围压增加，岩石的累积塑性应变呈现出明显的上升趋势（图 13d），表明在高温高压作用下，页岩逐渐由脆性破坏向塑性变形过渡。同时，60°倾角页岩的累积塑性应变整体小于 30°和 90°倾角样本，且 300℃ 时差异最为明显，反映出层理倾角引发的各向异性响应。这一趋势与基于 Drucker–Prager 准则所获得的规律相一致。

塑性指数通过衡量耗散应变能在总能量中的占比，定量反映岩石在变形破坏过程中的塑性程度［公式（17）］。随着温度升高，岩石的塑性指数持续上升（图 13e），说明高温热应力显著增强了其塑性特征。在低围压条件下，塑性指数在不同样本之间差异较大；而在高围压下，塑性指数整体大幅上升，说明高围压下岩石的塑性行为突出。

3.3　损伤分析

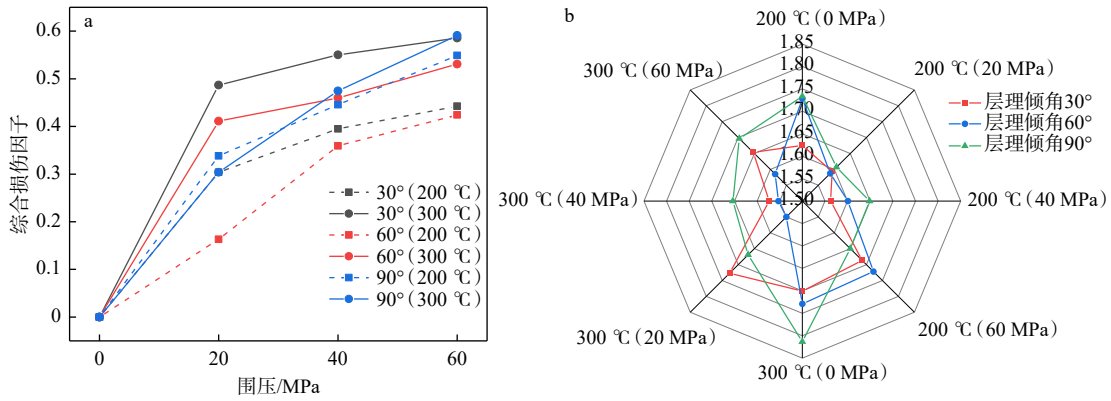
通过不同损伤因子（表 5）对深层页岩的损伤程度进行对比分析。利用多种损伤因子的计算结果，结合主成分分析法确定各因子的权重，最终加权合成得到综合损伤因子，用以量化评估温度、围压及层理倾角等因素对深层页岩损伤破坏的影响程度。

综合损伤因子的变化趋势（图 14a）表明，随着围压增加，损伤因子呈非线性上升趋势，说明围压作用加剧了层理性深层页岩的损伤演化。这一趋势进一步表明，围压不仅影响岩石的整体力学性能，还加速了岩石内部微裂隙的扩展与聚合，从而导致更严重的损伤。温度 300 ℃ 时，综合损伤因子较 200 ℃ 时提高了 37.8%，表明高温下的热应力显著增强，促使岩石内部损伤快速积累。该结果为高温高围压条件下水力压裂的可行性提供了实验支撑，也为压裂参数优化提供了依据。

在不同层理倾角条件下的对比分析中，损伤因子随倾角增加呈下降趋势。其中，倾角为 90°和 30°的页岩损伤因子明显高于 60°的，两者的平均损伤因子较 60°高出约 25.8%。该现象表明，层理性深层页岩的损伤行为具有明显的各向异性特征，且在高温高压环境中这种差异更为突出。通过综合损伤因子的量化分析，清晰揭示了围压与热应力对深层页岩损伤演化的具体影响，有助于进一步理解其损伤破坏机制。

3.4　裂缝复杂性分析

通过分形维数理论可定量描述岩石破坏过程



a—综合损伤因子; b—分形维数原理与结果

图 14 损伤与破坏定量表征

Fig. 14 Quantitative characterization of damage and failure

(a) Comprehensive damage factor; (b) Principle and results of fractal dimension

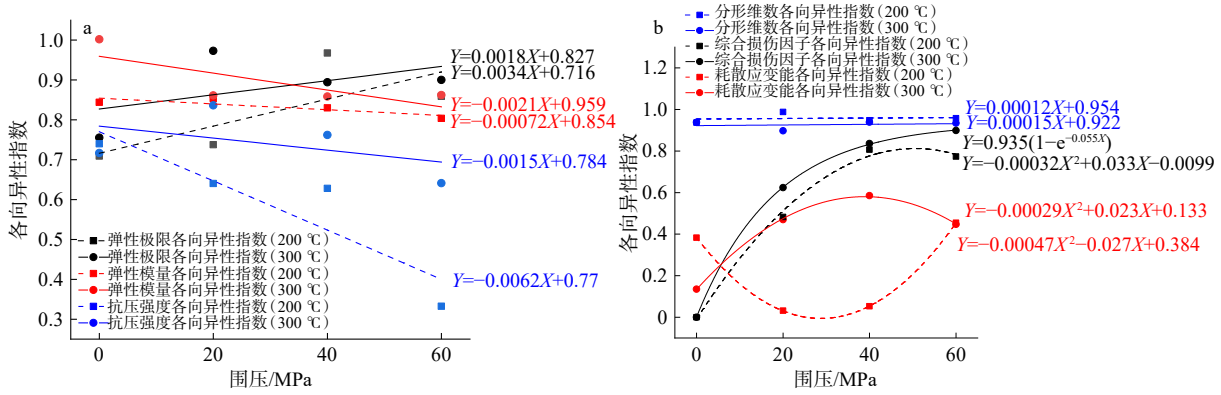
中裂缝的复杂性。分形维数 D 反映了裂缝网络的复杂程,其数值越大,表明裂缝分布越密集、结构越复杂。根据图 14b 的计算结果,300℃ 时岩样的分形维数整体高于 200℃ 时,说明尽管其抗压强度更高,但裂缝形态更复杂,分布更密集,表明高温作用下层理结构发生不同程度的闭合或破坏,进而加剧裂缝系统的复杂性。随着围压增加,分形维数呈现出先减小后增大的趋势。在单轴和 60 MPa 围压条件下,分形维数相对较高。单轴条件下的高分形维数源于脆性破坏主导机制,其促使裂缝快速扩展并形成复杂网络;而在 60 MPa 下,围压提升增强了岩石的塑性,使其能够耗散更多应变能,裂缝形态因而更加复杂,分形维数也随之升高。此现象表明,围压不仅影响岩石的强度和变形模式,还会影响裂缝的生成机制及空间分布特征。

不同层理倾角的岩样在分形维数上表现出显著差异。总体来看,90°倾角深层页岩具有最高的分形维数,表明层理倾角对裂缝网络结构具有重要影响。进一步分析不同温度和围压条件下的表现可见,30°倾角岩样在 200 ℃ 与 300 ℃ 时分形维数的变化较小,而 60°和 90°倾角岩样的分形维数受温度影响更为显著。具体而言,200 ℃ 时,60°倾角岩样的分形维数较高;而在 300 ℃ 时,90°倾角岩样的分形维数最高。结合裂缝形态分析,30°与 90°层理倾角页岩中,裂缝多以穿层形式扩展,破坏形态穿过层理面,形成较高的分形维数,表明裂缝网络更为复杂、连通性更强;60°层理倾角页岩则主要沿层理面产生剪切滑移裂缝,分形维数相对较低,表明层理倾角直接影响裂缝的扩展与连通性。另外,在低围压(0~20 MPa)条件下,裂缝主要沿层理面起裂、扩展,形成沟通层理的裂缝网络;而在高围压(40~60 MPa)下,裂缝扩展受到约束,沿层理方向的连通性减弱,更多呈现剪切破坏特征。综上所述,分形维数不仅定量刻画了裂缝复杂度,也反映了层理倾角、围压与温度三者共同作用下的裂缝空间演化特征。

3.5 各向异性特征

深层页岩的各向异性特征是指在不同方向上(尤其在物理和力学性质方面)表现出的显著差异性,主要源于其层理结构、矿物组成及微观构造。这种各向异性深刻影响其力学响应、裂缝扩展路径及水力压裂效果。上文的分析已充分表明,温度与围压的变化显著影响页岩的力学性质,进而影响其各向异性行为。在高温高压条件下,热应力增强可能促使层理结构发生扩展或闭合,从而重塑其各向异性特征。为定量评估温度与围压对深层页岩各向异性的影响,文中引入“各向异性指数”作为表征指标,结合弹性极限应力、弹性模量和单轴抗压强度等参数,对 6 种不同工况下的深层页岩进行了计算与拟合分析(图 15)。

结果表明,300 ℃ 时深层页岩的各向异性指数普遍高于 200 ℃ 时的结果,说明高温条件显著增强了深层页岩的各向异性特征。随着围压增加,弹性极限应力($T_{\sigma e}$)呈现上升趋势,而弹性模量(T_E)和抗压强度($T_{\sigma c}$)则逐渐减小。这表明高围压下,不同层理倾角深层页岩间的抗压强度和弹性模量差异逐渐缩小,但弹性极限差异反而被放大,反映出高围压下深层页岩更为显著的塑性变形特征。进一步



a—变形特征的各向异性指数；b— 损伤破坏特征的各向异性指数

图 15　各向异性指数

Fig. 15　Anisotropy index

(a) Anisotropy index of deformation characteristics; (b) Anisotropy index of damage and failure characteristics

分析发现，围压不仅有助于减弱力学参数的各向异性，还通过改变弹性模量的分布模式，重塑了深层页岩的整体变形机制。与此同时，岩石的损伤与破坏行为也呈现出复杂的各向异性演化特征。随着围压增加，损伤因子（T_D）持续上升，而能量耗散指标（T_{Ud}）则呈现出“凹−凸”型非线性变化特征。这说明在高温高压作用下，深层页岩的塑性损伤与能量耗散过程的各向异性被进一步放大，反映出岩石在复杂加载路径下的显著各向异性演化规律。

3.6　局限与展望

该研究系统探讨了不同温压条件下深层页岩的弹塑性行为与各向异性特征，构建了一套适用于深层页岩“变形−损伤−破坏”全过程的弹塑性行为与各向异性特征的定量分析方法。然而，仍存在以下局限性：首先，受实验条件限制，部分设备尚无法实现高温与高压的同步加载，部分岩样需预处理后实验，可能对结果的准确性产生一定影响；其次，尽管研究涵盖了较多实验工况，但所选温度、围压及层理倾角参数仍存在覆盖范围不足的问题，尚不能全面反映各类地质条件，具有一定的局限性；最后，部分定量分析方法仍有进一步完善和深入挖掘的空间。尽管上述限制客观存在，其影响仍处于可控范围内，并不影响该研究的分析方法与定量表征技术，后续工作将在现有基础上进一步升级实验装置、增加实验变量、完善分析方法。基于现有实验条件和数据，文章初步构建了深层页岩在高温高压作用下的弹塑性与各向异性响应分析框架，为后续深入揭示高温高压作用的演化机制提供了理论基础与方法支撑。未来研究将进一步拓展参数范围，增加实验样本量，优化分析路径，从而更系统地揭示高温高压作用下深层页岩力学行为的演化规律，为复杂储层高效开发提供理论依据。

从工程角度来看，研究结果可为深层页岩储层的水力压裂参数优化、裂缝网络调控以及增产措施设计提供参考。首先，层理分析表明，30°和 90°层理倾角更易形成垂直裂缝，有利于多层理连通，而 60°层理倾角储层强度较低，易沿层理面剪切破坏。因此，实际压裂中应结合层理特征合理调整射孔方式与簇间距，降低单缝能量集中效应，促进多缝扩展。在 60°层理区，宜采用加密井网或多簇压裂以增强裂缝连通性和改造体积；其次，温度作用结果表明，300 ℃ 条件下岩石强度提高且裂缝网络更复杂，说明通过调控注入流体温度（如高温或冷热交替注入）可有效提升裂缝复杂度，提升储层改造效率，为交变温载压裂等工艺提供了实验依据。此外，损伤规律表明，深层页岩在高温高压下损伤加剧且具有各向异性。现场可结合声发射、微地震及分布式光纤（DAS/DTS）等手段实时监测裂缝扩展与损伤演化，并利用损伤定量指标预测产能与裂缝导流能力衰减规律，从而指导后期压裂参数优化与重复压裂设计。

4　结论

为研究高温高压作用下层理性深层页岩的变形破坏规律，优化深层页岩储层常规水力压裂裂缝结构以提升储层开采效率，文章围绕深层页岩的物理力学性质、弹塑性变形特征、损伤破坏机制及各

向异性特征展开研究。通过孔渗联测仪和高温高压三轴压缩系统,获取基本物性和力学特性参数;结合强度准则分析岩石的弹塑性变形特性,利用多种损伤因子和能量耗散分析揭示损伤破坏机制;最后通过量化指标分析围压和热应力的各向异性特征,结合超声波波速、CT扫描和核磁共振等手段进行验证。构建了一套涵盖“变形—损伤—破坏”全过程的定量分析体系。

(1)基本物性特征方面。在不同温度下,层理倾角为30°、60°、90°的深层页岩孔隙度和渗透率呈“凹”型分布,其中90°层理倾角深层页岩对温度最为敏感。超声波、核磁共振、电镜扫描和X射线衍射实验表明,高温作用会增加深层页岩的损伤,但当温度超过临界值后,部分层理会闭合。

(2)弹塑性变形特征方面。三轴压缩实验结果表明,60°层理倾角深层页岩强度最低,易发生膨胀破坏。高温处理(300℃)可提升岩石抗压强度,主要归因于微裂隙闭合效应。基于改进Hoek–Brown与Drucker–Prager准则的拟合分析表明,高温高压增强了岩石的非线性弹塑性响应,300℃处理样本的累积塑性应变提升了47.3%。

(3)岩石破坏规律方面。在高温高压作用下,60°层理倾角深层页岩易沿层理面剪切破裂;而30°和90°层理倾角岩样更易形成垂直于层理的次生裂缝。300℃时裂缝网络更为复杂,层理间连通性增强。分形维数与耗散能分析揭示了塑性破坏主导下裂缝网络的复杂化趋势。

(4)岩石损伤规律方面。基于弹性模量、抗压强度和能量耗散等参数的综合损伤因子分析表明,300℃时深层页岩损伤因子较200℃时增加了37.8%,定量揭示了高围压和热应力作用下岩石损伤加剧的规律。

(5)各向异性响应特征方面。各向异性指数计算结果显示,温度与围压对岩石弹塑性行为及损伤机制的各向异性影响显著,围压的提升促使不同层理角岩样的弹性模量和强度差异减小,但塑性变形与损伤差异扩大,而高温增强了塑性破坏行为的各向异性特征。

作者贡献声明: 霍庭旺、汪道兵、宇波负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;霍庭旺、汪道兵、董永存、王秋艳参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图;霍庭旺、汪道兵、盛茂、黄威翰参与数据分析、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: HUO Tingwang, WANG Daobing and YU Bo conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; HUO Tingwang, WANG Daobing, DONG Yongcun and WANG Qiuyan participated in data analysis, practical application of technicalapproaches, and figure generation; HUO Tingwang, WANG Daobing, SHENG Mao and HUANG Weihan were involved in data analysis, refinement of the researchmethodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submision and publication of themanuscript.

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 noconflict of interests.

References

BAHADUR J, CHANDRA D, DAS A, et al., 2023. Pore anisotropy in shale and its dependence on thermal maturity and organic carbon content: a scanning SAXS study[J]. International Journal of Coal Geology, 273: 104268.

CAO W K, LIU W, LIU H L, et al., 2022. Effect of formation strength anisotropy on wellbore shear failure in bedding shale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109183.

CHEN R, REN Z W, MENG Z H, et al., 2020. Oblique-incidence reflectivity difference method combined with deep learning for predicting anisotropy of invisible-bedding shale[J]. Energy Reports, 6: 795-801.

DENG H C, YANG B G, GAO Y N, et al., 2023. Mechanical weakening behavior and energy evolution characteristics of shale with different bedding angles after microwave irradiation[J]. Gas Science and Engineering, 119: 205141.

DICK M J, VESELINOVIC D, GREEN D, 2022. Review of recent developments in NMR core analysis[J]. Petrophysics, 63(3): 454-484.

DING X, ZHANG G Q, 2017. Coefficient of equivalent plastic strain based on the associated flow of the Drucker-Prager criterion[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 93: 15-20.

DU M, YANG Z M, JIANG E Y, et al., 2024. Using digital cores and nuclear magnetic resonance to study pore-fracture structure and fluid mobility in tight volcanic rock reservoirs[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 259: 105890.

FAN Z D, XIE H P, REN L, et al., 2022. Anisotropy in shear-sliding fracture behavior of layered shale under different normal stress conditions[J]. Journal of Central South University, 29(11): 3678-3694.

GAO Y, WANG B, HU Y D, et al., 2024a. Development of China's natural

gas: review 2023 and outlook 2024[J]. Natural Gas Industry, 44(2): 166-177. (in Chinese with English abstract)

GAO H, XIE H P, ZHANG Z T, et al., 2024b. True triaxial energy evolution characteristics and failure mechanism of deep rock subjected to mining-induced stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 176: 105724.

GRIFFITHS D V, 1990. Failure criteria interpretation based on Mohr-Coulomb friction[J]. Journal of geotechnical engineering, 116(6): 986-999.

GUO X S, HU Z Q, LI S J, et al., 2023. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 8(4): 461-474. (in Chinese with English abstract)

HAN B, YANG H W, 2019. Study on distribution characteristics of shale triaxial compression acoustic emission energy under different confining pressures[J]. Coal Science and Technology, 47(4): 90-95. (in Chinese with English abstract)

HE S, LI M, SHI S L, et al., 2024. Experimental study on the influence of rock pore structure on pressure stimulated voltage variations based on nuclear magnetic resonance[J]. Engineering Geology, 341: 107736.

HE X, CHEN G S, WU J F, et al., 2023. Deep shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin: new progress and challenges[J]. Natural Gas Industry B, 10(1): 32-43.

HOEK E, 1965. Rock fracture under static stress conditions [M]. Council for Scientific and Industrial Research Report MEG 383, 5751509.

HOEK E, MARTIN C D, 2014. Fracture initiation and propagation in intact rock–a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6(4): 287-300.

HOU B, ZHANG R X, ZENG Y J, et al., 2018. Analysis of hydraulic fracture initiation and propagation in deep shale formation with high horizontal stress difference[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 170: 231-243.

HOU L L, LIU X J, ZENG W, et al., 2024. Investigation of the effect of bedding and confining pressure on the energy evolution of shale during the unloading process[J]. Natural Gas Industry B, 11(4): 385-393.

HU C E, TAN J Q, LYU Q, et al., 2024. Evolution of organic pores in Permian low maturity shales from the Dalong Formation in the Sichuan Basin: Insights from a thermal simulation experiment[J]. Gas Science and Engineering, 121: 205166.

HU S Q, WU Y, YAN Y Q, et al., 2024. Parameter optimization study of three-dimensional well network-fracture network coupled fracturing in jimsar shale oil[J]. Unconventional Resources, 4: 100102.

HUANG G T, BA J, GEI D, et al., 2023. Amplitude variation with angle and azimuth inversion to estimate fracture properties in shale-gas reservoirs[J]. Gas Science and Engineering, 111: 204919.

HUO T W, WANG D B, ZHU H Y, et al., 2025. Experimental study on the elastic-plastic deformation and damage failure mechanism of hot dry rock after alternating temperature loading (unconfined pressure condition) pretreatment[J]. SPE Journal, 30(5): 2686-2706.

IQBAL O, PADMANABHAN E, MANDAL A, et al., 2021. Characterization of geochemical properties and factors controlling the pore structure development of shale gas reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 206: 109001.

JACOBS T, 2018. In the battle against frac hits, shale producers go to new extremes[J]. Journal of Petroleum Technology, 70(8): 35-38.

JIANG C B, XU L, CHEN Y F, et al., 2024. Thermal behavior of minerals in shale and its influence on evolution of gas-flow channels under thermal shock[J]. Gas Science and Engineering, 121: 205183.

JIN J D, WANG L J, YAN Z L, et al., 2024. Effects of strain rate and bedding on shale fracture mechanisms[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 277: 109398.

JOHNSTON D H, 1987. Physical properties of shale at temperature and pressure[J]. Geophysics, 52(10): 1391-1401.

JU Y W, HOU X G, HAN K, et al., 2024. Experimental deformation of shales at elevated temperature and pressure: Pore-crack system evolution and its effects on shale gas reservoirs[J]. Petroleum Science, 21(6): 3754-3773.

KIVI I R, AMERI M, MOLLADAVOODI H, 2018. An experimental investigation on deformation and failure behavior of carbonaceous Garau shale in Lurestan Basin, west Iran: application in shale gas development[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 55: 135-153.

KLAVER J, DESBOIS G, LITTKE R, et al., 2015. BIB-SEM characterization of pore space morphology and distribution in postmature to overmature samples from the Haynesville and Bossier Shales[J]. Marine and petroleum Geology, 59: 451-466.

LEI B, ZUO J P, LIU H Y, et al., 2021. Experimental and numerical investigation on shale fracture behavior with different bedding properties[J]. Engineering Fracture Mechanics, 247: 107639.

LI J B, XIE M C, WANG S L, et al., 2024. Study on the influence of thermo-pressure coupling environment on the fracture properties of shale in deep reservoirs[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 131: 104440.

LI Y, CHENG Y F, YAN C L, et al., 2023. Triaxial creep tests and the visco-elastic-plastic constitutive model of hydrate formations[J]. Gas Science and Engineering, 115: 205006.

LI Z Y, WU G, HUANG T Z, et al. , 2018. Variation of energy and criteria for strength failure of shale under traixial cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(3), 662-670.

LIANG X, WU J, QI W C, et al., 2024. Study on the dynamic characteristics and microscopic damage features of shale under high temperature[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 44(4): 48-57. (in Chinese with English abstract)

LIU Q, SUN M D, SUN X D, et al., 2023. Pore network characterization of shale reservoirs through state-of-the-art X-ray computed tomography: a review[J]. Gas Science and Engineering, 113: 204967.

LUO S, GONG F Q, LI L L, et al., 2023. Linear energy storage and dissipation laws and damage evolution characteristics of rock under triaxial cyclic compression with different confining pressures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 33(7): 2168-2182.

LIU W J, QIAN X D, LI T, et al., 2019. Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 173: 269-278.

LIU Y, FANG Y, SU Y, et al., 2023. A quantitative analysis procedure for solving safety factor of tunnel preliminary support considering the equivalence between Hoek–Brown and Mohr–Coulomb criteria[J]. Soils and Foundations, 63(4): 101356.

MA C, ZHU C J, ZHOU J X, et al., 2022. Dynamic response and failure characteristics of combined rocks under confining pressure[J]. Scientific Reports, 12(1): 12187.

MA X H, WANG H Y, ZHOU S W, et al., 2021. Deep shale gas in China: geological characteristics and development strategies[J]. Energy Reports, 7: 1903-1914.

MEMON K R, ALI M, AWAN F U R, et al., 2021. Influence of cryogenic liquid nitrogen cooling and thermal shocks on petro-physical and morphological characteristics of Eagle Ford shale[J]. Journal of natural gas science and engineering, 96: 104313.

MENG S W, LI D X, LIU X H, et al., 2023. Study on dynamic fracture growth mechanism of continental shale under compression failure[J]. Gas Science and Engineering, 114: 204983.

MENG X R, WU Z H, 2024. Experimental and numerical simulations of the mechanical properties of shale under high temperature[J]. Soil Engineering and Foundation, 38(1): 157-162. (in Chinese with English abstract)

NIE Y X, WU B S, ZHANG G Q, et al., 2024. Influence of the CO_2–brine–rock interaction on the plastic zone of sandstone[J]. Gas Science and Engineering, 128: 205379.

NILANKAR K, SINGH D, SINGH H K, et al., 2024. Characterization and behavior of Raniganj shale under heated environment[J]. Fuel, 366: 131377.

PAN H Y, SHUAI J B, LI J H, et al., 2025. Analysis of deformation behavior characteristics of double-prevention boreholes based on pearson correlation coefficient[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(6): 6893-6915.

REN J F, LIU X J, XIONG J, et al., 2023. Experimental study on the acoustic wave propagation characteristics of bedding shales under changes in temperature and pressure[J]. Natural Gas Industry B, 10(5): 407-418.

SINGER P M, CHEN Z L, HIRASAKI G J, 2016. Fluid typing and pore size in organic shale using 2D NMR in saturated kerogen isolates[J]. Petrophysics, 57(6): 604-619.

SOHAIL G M, YASIN Q, RADWAN A E, et al., 2023. Estimating hardness and Young's modulus of shale using drill cuttings: implications for hydraulic fracturing in shale gas reservoir development[J]. Gas Science and Engineering, 118: 205116.

SUN C X, NIE H K, SU H K, et al., 2023. Porosity, permeability and rock mechanics of Lower Silurian Longmaxi Formation deep shale under temperature-pressure coupling in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 50(1): 77-88. (in Chinese with English abstract)

SUN H, ZHAO L S, WEI L C, et al., 2024. Numerical study of the influence of multiple parameters on hang-ups: insight from a structural and mechanical characteristics analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57(5): 4073-4087.

SUO Y, ZHAO Y J, FU X F, et al., 2023. Acoustic and mechanical tests of sandstone-shale composites in Songliao Basin and prediction of uniaxial compressive strength[J]. Geoenergy Science and Engineering, 228: 212034.

TAO L, LI Z J, SHI K, et al. , 2021. Experimental study on expansion law of micro-fractures induced by shale hydration[C]//Proceedings of the unconventional resources technology conference. 117-127.

TIAN D, ZHENG H, 2023. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion[J]. Applied Sciences, 13(9): 5405.

VACHAPARAMPIL A, GHASSEMI A, 2017. Failure characteristics of three shales under true-triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100: 151-159.

VISHAL V, RIZWAN M, MAHANTA B, et al., 2022. Temperature effect on the mechanical behavior of shale: implication for shale gas production[J]. Geosystems and Geoenvironment, 1(4): 100078.

WANG D B, QU Z, LIU C, et al., 2024a. A numerical investigation into the propagation of acid-etched wormholes in geothermal wells[J]. Unconventional Resources, 4: 100083.

WANG D B, DONG Y C, WEI C L, et al., 2025a. Expansion-induced fracture propagation in deep geothermal reservoirs under alternate-temperature loading[J]. Advances in Geo-Energy Research, 15(3): 261-272.

WANG L N, TAO C Q, YIN X M, et al., 2022. Evolution of deformation field and energy of organic-rich oil shale under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 43(6): 1557-1570. (in Chinese with English abstract)

WANG Q Y, WANG D B, YU B, et al., 2024b. Evolution of elastic-plastic characteristics of rocks within middle-deep geothermal reservoirs under high temperature[J]. Natural Resources Research, 33(4): 1573-1596.

WANG Q Y, WANG D B, FU W, et al., 2024c. Effects of saturated fluids on petrophysical properties of hot dry rock at high temperatures: an experimental study[J]. Geothermics, 121: 103048.

WANG Q Y, WANG D B, LI X H, et al., 2025b. Experimental investigation on the elastic-plastic failure evolution mechanism of high-temperature hot dry rocks using combined monitoring of acoustic emission and digital image correlation[J]. Geothermics, 131: 103359.

WANG Q Y, WANG D B, ZHU H Y, et al., 2025c. Experimental investigation on fracture propagation in heat-treated granite samples during true triaxial temporary plugging and diversion fracturing[J]. Journal of Energy Resources Technology, Part B: Subsurface Energy and Carbon Capture, 1(4): 041005.

WANG X J, LIANG L X, ZHAO L, et al., 2019. Rock mechanics and fracability evaluation of the Lucaogou Formation oil shales in Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 40(3): 661-668. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, FENG W K, ZHAO Z H, et al., 2019. Anisotropic energy and ultrasonic characteristics of black shale under triaxial deformation revealed utilizing real-time ultrasonic detection and post-test CT imaging[J]. Geophysical Journal International, 219(1): 260-270.

WANG Y, LIU D Q, ZHAO Z H, et al., 2020. Investigation on the effect of confining pressure on the geomechanical and ultrasonic properties of black shale using ultrasonic transmission and post-test CT visualization[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 185: 106630.

WEI J G, LI J T, ZHANG A, et al., 2023. Influence of shale bedding on development of microscale pores and fractures[J]. Energy, 282: 128844.

XI Y, XING J H, WANG H J, et al., 2024. Evaluation of pore characteristics evolution and damage mechanism of granite under thermal-cooling cycle

based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Geoenergy Science and Engineering, 241: 213101.

YANG G L, LIU J, LI X G, et al., 2020. Effect of temperature on shale strength under dynamic impact loading[J]. Arabian Journal of Geosciences, 13(12): 432.

YANG L, SHENG X C, ZHANG B, et al., 2023. Propagation behavior of hydraulic fractures in shale under triaxial compression considering the influence of sandstone layers[J]. Gas Science and Engineering, 110: 204895.

YANG S Q, ZHANG Q L, YANG D, et al., 2024. Research on the evolution law of mechanics and fracture characteristics of oil shale under real-time high temperature conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(11): 2700-2711. (in Chinese with English abstract)

YE P P, LI B B, REN C H, et al., 2024. Investigation on damage-permeability model of dual-porosity coal under thermal-mechanical coupling effect[J]. Gas Science and Engineering, 123: 205229.

YUAN S B, WANG H, LI L H, et al., 2024. Study on the formation mechanism of shale thermal cracks based on particle flow numerical simulation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 150: 107166.

YUAN Y J, REZAEE R, ZHOU M F, et al., 2023. A comprehensive review on shale studies with emphasis on nuclear magnetic resonance (NMR) technique[J]. Gas Science and Engineering, 120: 205163.

YUAN Y S, LIU J X, ZHOU Y, 2018. Brittle-ductile transition zone of shale and its implications in shale gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 39(5): 899-906. (in Chinese with English abstract)

ZANGQA S, SAFFOU E, GHOLAMI R, et al., 2024. Hydraulic fracturing potential of tight gas reservoirs: a case study from a gas field in the Bredasdorp Basin, South Africa[J]. Gas Science and Engineering, 128: 205364.

ZHANG N, GUO S H, WANG S D, et al., 2024a. Fractal and multifractal characteristics on pore structure of coal-based sedimentary rocks using nuclear magnetic resonance[J]. SPE Journal, 29(5): 2624-2637.

ZHANG P Y, ZHANG D X, ZHAO J L, 2024b. Control of fracture toughness of kerogen on artificially-matured shale samples: an energy-based nanoindentation analysis[J]. Gas Science and Engineering, 124: 205266.

ZHANG Q, HUANG X, ZHU H, et al. 2015. Analysis on Geological Condition of Rock Mass with Hoek-Brown Strength Criterion[C]. ISRM Viet-Rock International Workshop. ISRM: ISRM-VIETROCK-2015-006.

ZHANG X P, YANG X M, XIE W Q, et al., 2023a. Comparison and selection of index for macro-indentation test of brittle rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56(9): 6375-6394.

ZHANG Y, SONG Y Q, LUO S H, et al., 2024c. Core analysis using nuclear magnetic resonance[J]. Petrophysics, 65(2): 173-193.

ZHANG Y, GAO Y N, YU L Y, 2024d. Multi-stage evolution of pore structure of microwave-treated sandstone: insights from nuclear magnetic resonance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 183: 105952.

ZHANG Y K, CHEN S B, ZHAI X H, et al., 2023b. Brazilian splitting experiment and finite element simulation analysis of the influence of bedding loading angle on shale fracture mode[J]. Natural Gas Industry B, 10(6): 602-612.

ZHAO G J, CHEN C, YAN H, et al., 2021. Study on the damage characteristics and damage model of organic rock oil shale under the temperature effect[J]. Arabian Journal of Geosciences, 14(8): 722.

ZHAO P F, FAN X Y, WANG X Z, et al., 2024. Geomechanical properties of laminated shale and bedding shale after water absorption: A case study of the Chang 7 shale in Ordos basin, China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 180: 105798.

ZHAO X, SUN M D, UKAOMAH C F, et al., 2023. Pore connectivity and microfracture characteristics of Longmaxi shale in the Fuling gas field: insights from mercury intrusion capillary pressure analysis[J]. Gas Science and Engineering, 119: 205134.

ZHENG Y N, JIA C J, ZHANG S, et al., 2023. Experimental and constitutive modeling of the anisotropic mechanical properties of shale subjected to thermal treatment[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 35: 100485.

ZHOU P L, XIE H P, WANG J, et al., 2025. Thermal effects on mechanical and failure behaviors of anisotropic shale subjected to direct shear[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 17(4): 2307-2327.

附中文参考文献

高芸，王蓓，胡迤丹，等，2024. 2023年中国天然气发展述评及2024年展望[J]. 天然气工业，44(2)：166-177.

郭旭升，胡宗全，李双建，等，2023. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报，8(4)：461-474.

韩兵，杨宏伟，2019. 不同围压下页岩三轴压缩声发射能量分布特性研究[J]. 煤炭科学技术，47(4)：90-95.

梁潇，吴俊，齐文超，等，2024. 高温作用下页岩动态力学特性及微观损伤特征研究[J]. 矿产保护与利用，44(4)：48-57.

李子运，吴光，黄天柱，等，2018. 三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究[J]. 岩石力学与工程学报，37(3)：662-670.

孟祥瑞，邬忠虎，2024. 高温条件下页岩力学特性试验及数值模拟研究[J]. 土工基础，38(1)：157-162.

孙川翔，聂海宽，苏海琨，等，2023. 温压耦合作用下四川盆地深层龙马溪组页岩孔渗和岩石力学特征[J]. 石油勘探与开发，50(1)：77-88.

王鲁男，陶传奇，尹晓萌，等，2022. 单轴压缩下富有机质油页岩变形场与能量演化特征研究[J]. 岩土力学，43(6)：1557-1570.

王小军，梁利喜，赵龙，等，2019. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组含油页岩岩石力学特性及可压裂性评价[J]. 石油与天然气地质，40(3)：661-668.

杨少强，张庆伦，杨栋，等，2024. 实时高温作用下油页岩力学及破裂特性演变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，43(11)：2700-2711.

袁玉松，刘俊新，周雁，2018. 泥页岩脆-延转化带及其在页岩气勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质，39(5)：899-906.