引用格式：马佳，王孝臣，何登发，等，2025. 断层转折褶皱形变与应力过程数值模拟研究：基于弹塑性参数控制的定量约束[J]. 地质力学学报，31（6）：1310−1329. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025093

Citation: MA J，WANG X C，HE D F，et al.，2025. Numerical simulation of deformation and stress processes in fault–bend folding: Quantitative constraints based on elastoplastic parameter control[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1310−1329. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025093

断层转折褶皱形变与应力过程数值模拟研究：基于弹塑性参数控制的定量约束

马　佳[1,2]，王孝臣[3]，何登发[1]，张伟康[1]，鲁　国[1]，黄涵宇[4]，刘驰悦[1]

MA Jia[1,2]，WANG Xiaochen[3]，HE Dengfa[1]，ZHANG Weikang[1]，LU Guo[1]，HUANG Hanyu[4]，LIU Chiyue[1]

1. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083；
2. 大庆油田有限责任公司成都勘探开发研究院，四川 成都 610051；
3. 大庆油田有限责任公司重庆分公司，重庆 402660；
4. 成都理工大学沉积地质研究院，四川 成都 610059

1. *Institute of Energy* , *China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*;
2. *Chengdu Research Institute of Exploration and Development*, *Daqing Oilfield Limited Company*, *Chengdu* 610051, *Sichuan*, *China*;
3. *Chongqing Branch*, *Daqing Oilfield Limited Company*, *Chongqing* 402660, *China*;
4. *Institute of Sedimentary Geology*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*

Numerical simulation of deformation and stress processes in fault–bend folding: Quantitative constraints based on elastoplastic parameter control

Abstract: ［**Objective**］Fault–bend folds, characteristic structures in fold-and-thrust belts, act as key kinematic units in the analysis of compressional deformation and form structural traps at flat–ramp transitions. This makes them critical targets in the exploration of hydrocarbons in foreland basins. ［**Methods**］Using Suppe's theoretical model and finite element simulations, we developed a geomechanical model with realistic rock properties. We defined boundary conditions for fold formation and analyzed stress-strain patterns during the evolution of fault–bend folds. We applied the Mohr-Coulomb model to assess six parameters—density (ρ), Young's modulus (E), Poisson's ratio (υ), internal friction angle (ϕ), cohesion (c), and dilation angle (ψ)—for identifying dominant controls. ［**Results**］Open boundaries enable the development of fault-bend folds consistent with classical models, whereas fixed boundaries cause marked forelimb tilting and non-classical deformation. Stress-strain partitioning is distinct: Fold limbs and the upper ramp experience compression; the core and upper flat undergo extension. Both axial surfaces show upward-decreasing stress concentrations and plastic strain. The lower axial surface builds the backlimb and initiates shear fracturing; the upper axial surface shapes the anticlinal core and forelimb under tension, developing potential fracture systems. Cohesion (c) and the internal friction angle (ϕ) are key factors governing fold wavelength and forelimb steepness, respectively, with nonlinear threshold behaviors. Young's modulus and dilation angle have localized, minor influence. Density and Poisson's ratio show negligible effects. ［**Conclusion**］Fault–bend folding is a progressive deformation process in which strata adjust to adapt to the geometry of pre-existing faults under compressive stress. This results in a kinematic sequence from initial slip and backlimb growth, through fold nucleation and propagation, to final stabilization with complex derived structures. Cohesion and the internal friction angle are the decisive controlling parameters. ［**Significance**］This numerical analysis clarifies the development

基金项目：国家自然科学基金重点项目（42330810）

This research is financially supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42330810).

第一作者：马佳（2000—），女，助理工程师，主要从事构造地质学研究。Email：majia5057@163.com

通信作者：何登发（1967—），男，博士，教授，主要从事构造地质学与石油地质学研究。Email：hedengfa282@263.net

收稿日期：2025−07−28；**修回日期**：2025−10−17；**录用日期**：2025−11−03；**网络出版日期**：2025−12−02；**责任编辑**：吴芳

mechanisms, stress–strain organization, and controlling factors of fault–bend folds, deepening the theoretical understanding of compressional tectonic deformation.

Keywords: fault–bend fold; Mohr-Coulomb elastoplastic criterion; stress–strain characteristics; tectonic deformation; finite element numerical simulation

摘　要：断层转折褶皱（Fault–Bend Fold）作为褶皱–冲断带的标志性构造样式，不仅是解析挤压构造变形的关键运动学单元，更因断坪–断坡转换带的岩性错位形成构造圈闭，成为前陆盆地油气勘探的重要目标。文章基于 Suppe 提出的经典理论模型，采用有限元数值模拟方法，建立地质力学模型，赋予实际岩石力学参数，厘定控制断层转折褶皱形成的边界条件，并解析其发育过程中应力–应变分布及变形特征。结合 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型深入探讨密度（ρ）、杨氏模量（E）、泊松比（υ）、内摩擦角（ϕ）、黏聚力（c）以及剪胀角（ψ）6 项岩石力学参数对构造变形的控制程度，并提出关键控制因素。主要结论如下：开放边界条件是断层转折褶皱发育的动力学前提，当褶皱前端为开放边界条件时，该条件下滑移过程符合经典几何–运动学模型；而固定边界条件时，前翼因固定边界而向底部产生大幅度的倾斜卷入，整体变形偏离断层转折褶皱几何–运动学模型。断层转折褶皱在变形过程中应力–应变产生显著分区，褶皱两翼和断坡上部表现为挤压区，褶皱核部和断坪上部处于伸展区，2 个转折端处不仅可观察到应力集中且沿轴面向上递减现象，同时也表现为塑性应变的发育区，塑性应变沿着断层面向前扩展，产生一系列的剪切变形带；下转折端上方塑性应变带的扩展主导了后翼的构建，作为应变局部化与剪切破裂的起源，上转折端则控制了背斜核部及前翼的发育，形成张性应力场并可能发育裂缝系统。断层转折褶皱的动力学演化机制本质上是岩层在挤压应力作用下为适应先存断层几何形态而发生的递进变形过程，这一过程构成了一个从初始滑动与后翼建造，到前翼生长与褶皱雏形显现，再到稳定滑移与褶皱扩展，并最终以褶皱定型及复杂构造衍生为终点的完整动力学链条。黏聚力和内摩擦角是控制断层转折褶皱变形的关键参数，二者均表现出显著的非线性响应与临界阈值行为；黏聚力参数主要控制褶皱波长变化，内摩擦角参数主要控制褶皱前翼的陡窄程度；而杨氏模量与剪胀角的影响较弱且具局部敏感性；低杨氏模量参数有利于构造形成，剪胀角会使构造略微拓宽。密度参数与泊松比参数则不会产生影响。

关键词：断层转折褶皱；Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型；应力–应变特征；构造变形；有限元数值模拟

中图分类号：P313; P55; TD311　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1310−20

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025093

0　引言

褶皱与断层作为构造地质学中最具代表性的 2 种构造样式，前者体现为岩石的连续韧性变形，后者则以不连续脆性变形为特征(何登发等, 2005)。自 19 世纪晚期，地质学者已开始推测褶皱形成与断层活动之间可能存在成因联系。通过 Rich(1934)、King Hubbert and Rubey(1959)、Dahlstrom(1969)、Suppe(1983)以及 Jamison(1987)等学者的系统研究，逐步建立了“断层转折褶皱”的理论体系，包括其几何学模型、运动学机制以及二者之间的定量关系。这一理论不仅阐明了逆断层相关褶皱的成因机理，更奠定了挤压构造定量解析的基础。

随着构造地质学的深入发展，众多学者在上述理论研究的基础上结合野外实测地质剖面、地震剖面以及物理实验与数值模拟等实际地质证据与方法，系统地补充、修正以及完善了断层转折褶皱的几何学模型与运动学模型(Ford et al., 1997; Cristallini et al., 2004; 陈剑等, 2005; 何登发等, 2005; 张逸昆等, 2005; 何登发和 Suppe, 2007; 蔡振忠等, 2011; 王彦君等, 2012; Brandes and Tanner, 2014; Li et al., 2018; Poblet, 2020; Connors et al., 2021; Plotek et al., 2021)。随后，中国不少学者将断层相关褶皱理论运用于实际应用中，例如：油气勘探开发(卢华复等, 1999; 陈剑等, 2002, 2005; 邵雨等, 2005; 田梦娜等, 2016; 陈楩俊等, 2018; 何登发等, 2019a; 王斌等, 2019; 马立成, 2024; 石婧等, 2024)、地震灾害评估与活动构造研究(王毛毛, 2013; Wu et al., 2018; Sun et al., 2022)、工程地质与环境地质以及基础地质研究与地貌演化分析等领域(王帅杰, 2025)。随着研究与实践的不断深入，已有关于断层转折褶皱的研究大多集中于几何学与运动学分析层面，对断层转折褶皱形成

过程中实际应力–应变分布的认识仍不够清晰，所建立的模型通常基于理想化假设，缺乏以实际岩石力学参数为基础的力学背景支持(张逸昆等，2005；蔡振忠等，2011；王开等，2014；祖克威等，2014)。此外，尽管关于不同岩石力学参数在褶皱发育中发挥作用的讨论日益增多，但现有研究大多仍停留在定性阶段，不仅定量分析不足，其关键控制因素也尚未明确。为此，多位学者(何登发等，2005；袁杰和朱守彪，2014；尹力和罗纲，2018；Khalifeh-Soltani et al.，2023)指出，当前研究亟需从传统的几何–运动学分析转向力学机制的深入探讨，通过构建合理的力学模型，验证并完善现有理论，以更好地支撑地质解释与资源勘探的实际应用。

针对上述问题，文章以 Suppe(1983)的经典断层转折褶皱理论模型为基础，依据 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系构建地质力学模型，采用有限元数值模拟方法，系统分析断层转折褶皱的动力学演化机制。并定量讨论弹塑性岩石力学参数对构造变形的控制作用，同时提出关键控制因素。

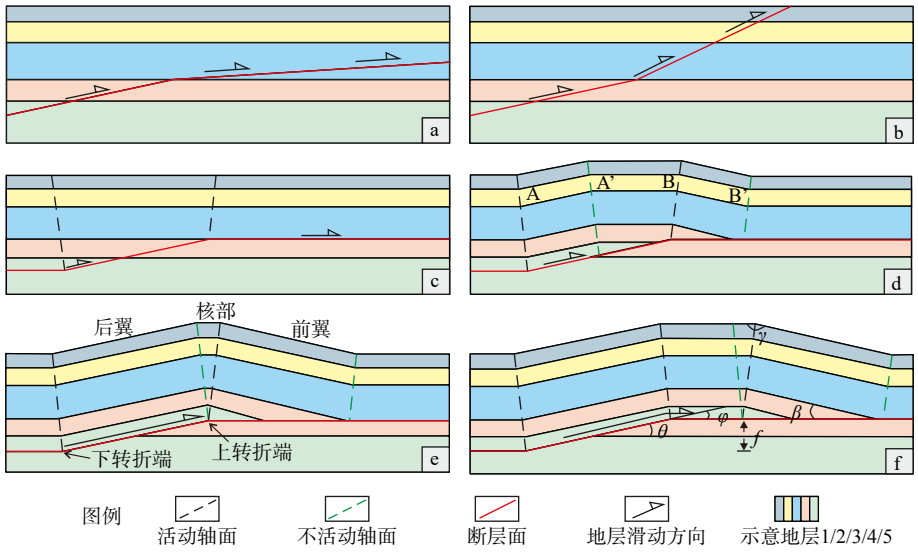
1 断层转折褶皱理论模型及研究现状

1.1 理论模型

1934 年，Rich 在研究阿巴拉契亚山脉构造变形时首次提出断层转折褶皱的概念，揭示了褶皱与断层之间的成因联系。1983 年，Suppe 在此基础上建立了断层转折褶皱的几何学与运动学定量模型，其理论框架可表述为：

(1) 断层转折褶皱几何学与运动学模型

断层转折褶皱作为断坪–断坡台阶状逆断层体系的基本构造样式，其几何构型由后断坪、下盘断坡、中断坪、上盘断坡和前断坪等构造要素组成(图 1a、1b；Suppe，1983)。依据断层面几何形态的差异，可将其划分为向斜型与背斜型 2 类：向斜型发育于上凹型断层面之上，而背斜型则形成于上凸型断层面(图 1a、1b)。此次研究采用背斜型断层转



A、B 分别代表初始的活动轴面与不活动轴面；A’与 B’分别代表地层沿断层面迁移后的活动轴面与不活动轴面；θ 代表断层切层角；φ 代表断层转折角；β 代表褶皱前翼岩层与断层的地层倾角；γ 代表翼间角，轴面与水平面之间的夹角；f 代表地层缩短量

a—背斜型断层面模型；b—向斜型断层面模型；c—未变形地层中的初始逆冲断层及轴面；d—断层滑动导致上盘岩块沿固定在 2 个断层弯曲处的活动轴面 A 和 B 发生褶皱；e—断层持续滑动导致褶皱处于抬升阶段；f—褶皱持续拓宽阶段

图 1 断层转折褶皱类型及几何学与运动学模型

Fig. 1 Fault–bend fold types and modeling of geometry and kinematics

(a) Antiform fault–bend model;(b) Synform fault–bend model;(c) Initial thrust fault and axial surfaces in undeformed strata;(d) Fault slip induces folding in the hanging wall along the active axial surfaces A and B, which remain fixed at two fault bends;(e) Continued fault slip leads to the fold uplift stage;(f) Fold widening stage during sustained deformation

A and B represent the initial active and inactive axial surfaces, respectively; A' and B' represent the active and inactive axial surfaces after strata displacement along the fault plane; θ is the fault cut-off angle; φ is the fault bend angle; β is the dip angle of the forelimb strata relative to the fault; γ is the angle between the axial surface and the horizontal plane; f denotes the stratal shortening amount.

折褶皱作为几何模型(图 1a)，其形成机制为上盘地层沿具有坪–坡–坪几何结构的基底断层滑移所致。几何学特征主要通过翼间角(γ)、切层角(θ)和地层缩短量(f)等参数表征，其完整的运动学演化序列如图 1c—1f 所示。

(2)几何学与运动学定量关系

Suppe(1983)通过定量化方法建立了断层转折褶皱的几何学与运动学耦合关系，构建了理想的平衡剖面模型，实现了构造变形前原始状态的恢复。该模型已广泛应用于区域构造解析(刘长磊等，2018)，不仅为构造解析提供了理论基础，更有效指导了油气勘探实践。该理想化运动学模型需满足以下 4 个基本假设条件：①断坪–断坡–断坪的断层几何形态形成于断层滑动前或滑动初始阶段；②上盘相对于固定下盘发生位移；③下盘保持刚性不变形；④上盘断坪部位位移量恒定，而断坡部位位移量向上递减。在此限定条件下，断层转折褶皱的几何特征与下伏断层形态存在如下对应关系：

$$\varphi = \tan^{-1}\left\{\frac{-\sin(\gamma-\theta)\left[\sin(2\gamma-\theta)-\sin\theta\right]}{\cos(\gamma-\theta)\left[\sin(2\gamma-\theta)-\sin\theta\right]-\sin\gamma}\right\} \quad (1)$$

$$\beta = \theta-\varphi+(180-2\gamma) \quad (2)$$

式中，θ 为断层切层角；φ 为断层转折角；β 为褶皱前翼岩层与断层的地层倾角；γ 为翼间角，轴面与水平面之间的夹角。通过上述 2 个公式，只要确定 4 个角度参数(θ、φ、β、γ)中的 2 个参数值，即可算出其他 2 个参数，从而在实际地震解释时可以确定其运动的几何形态。

1.2　研究现状

基于上述理论框架，众多学者在野外地质调查和地震剖面解释中相继识别出了典型的断层转折褶皱构造(何登发等，2019b; Mukherjee, 2020; Waldron and Snyder, 2020; 杨少航等，2024; 图 2)。通过对断层转褶皱力学方面的研究调研表明，构建高精度力学模型的关键在于赋予模型符合实际地层特征的岩石力学参数(Schmalholz et al., 2002; 张必龙等，2009)。现有研究通过力学模拟手段已证实岩石力学参数对断层转折褶皱发育具有显著影响：Bonini et al.(2000)通过物理模拟实验建立了断坪–断坡–断坪构造模型，发现除断坡角外，上盘岩层能干性对构造变形具有重要控制作用；Khalifeh-Soltani et al.(2023)采用有限元数值模拟证实内摩擦角显著影响褶皱构造演化，决定褶皱紧闭度和前翼厚度。然而，综合分析现有成果可以发现，这些探讨多数停留在定性描述与概念模型阶段，导致对褶皱发育的关键控制因素的认识仍不明确。为此，文章基于 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，运用 ABAQUS 有限元数值模拟方法构建断层转折褶皱地质力学模型，系统分析断层转折褶皱的动力学演化机制，定量探究弹塑性岩石力学参数对构造变形的控制程度，并提出关键控制因素。

2　断层转折褶皱地质力学模型建立

2.1　地质模型

地质模型的构建是开展构造力学数值模拟研究的首要环节和关键基础，其精确程度直接决定着后续数值分析的可靠性和计算结果的科学性。

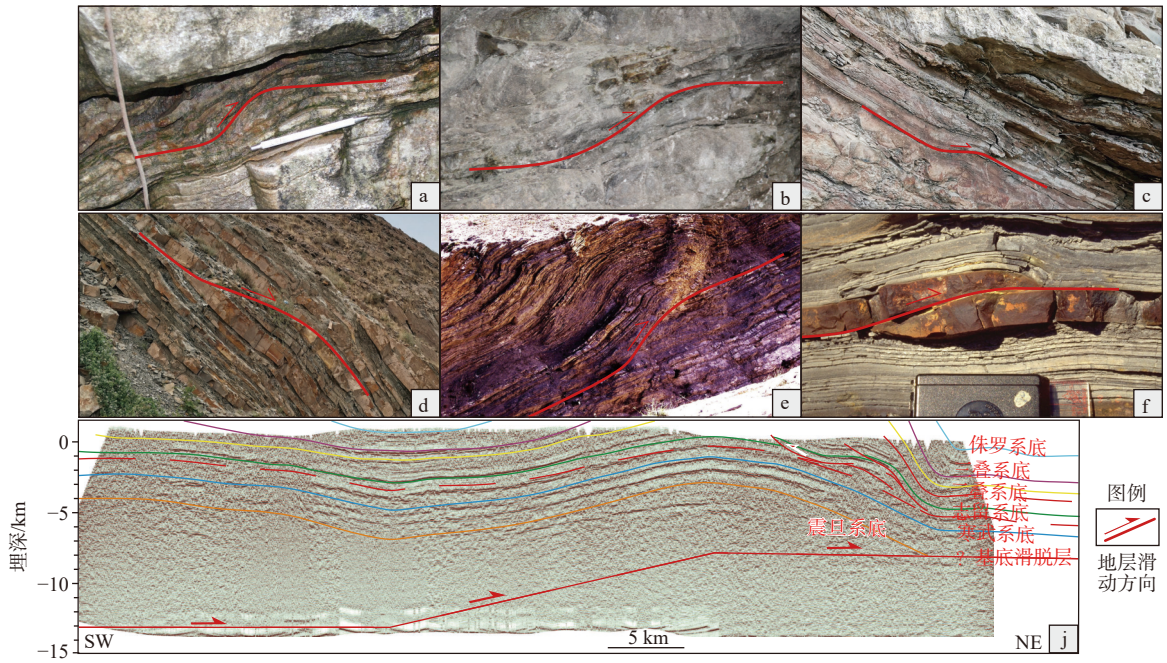
文章建立了单层均质二维地质模型，其几何学与运动学规则严格遵循 Suppe(1983)的断层转折褶皱理论。模型中断层面设置为先存断裂面，转折端采用坡–坪直接连接的几何构型，断坡角取 15°(图 3)。上、下盘之间采用通用接触类型中的面–面接触方式，为更好地增加模型的可收敛性，将下盘转折断面设置为主面，上盘转折断面设置为从面。同时，根据 Khalifeh-Soltani et al.(2023)对构造模型中摩擦系数的选取及文中研究的主要内容综合考虑选取摩擦系数为 0.015。模型右侧上、下盘之间的预留空间既避免了地质上不合理的"悬空"现象，又防止了有限元模拟过程中可能出现的网格畸变和收敛性问题。此次研究着重探究上覆地层沿着断层面推移时产生褶皱变形的地质过程，因此在运动过程中不考虑断层的生长与扩展、同构造沉积作用及流体等复杂地质因素。

2.2　力学模型

ABAQUS 有限元力学建模方法作为构造地质学研究的重要数值模拟手段，在处理构造地质学问题时具有方便操作、可进行多尺度模拟，能够处理复杂边界条件并考虑岩性等因素的特点，可有效地将结构变形和应力分布进行定量化研究(马佳等，2024)。此次研究以图 3 所示的地质模型为对象，通过赋予岩石力学参数、设定边界条件与网格划分，构建了断层转折褶皱的地质力学模型。

2.2.1　*岩石力学参数*

岩石力学参数的合理选取是确保数值模拟可靠性的关键要素，这些参数不仅决定着岩石在外力作用下的应力–应变响应特征与变形演化规律，更



a—川西龙门山石板滩构造带野外露头断层转折褶皱；b—川西龙门山金马–鸭子河构造带野外露头断层转折褶皱；c—鄂尔多斯西缘陇县景福山背斜构造野外露头断层转折褶皱；d—鄂尔多斯西缘乌海苏拜沟桌子山背斜构造野外露头断层转折褶皱；e—斯特拉顿菱铁矿逆冲断层上的断层转折褶皱野外露头（Waldron and Snyder, 2020）；f—特提斯–喜马拉雅地区断层转折褶皱野外露头（Mukherjee, 2020）；j—川南长宁地区地震反射剖面地质构造解释（据何登发, 2019b 修改）

图 2 典型的断层转折褶皱实例

Fig. 2 Typical examples of fault–bend folds

(a) Outcrop of a fault–bend fold in the Shibantan Structural Belt, Longmen Shan, western Sichuan; (b) Outcrop of a fault–bend fold in the Jinma–Yazihe Structural Belt, Longmen Shan, western Sichuan; (c) Outcrop of a fault–bend fold in the Jingfushan Anticline, Longxian, western Ordos Margin; (d) Outcrop of a fault–bend fold in the Zuozi Shan Anticline, Subaigou, Wuhai, western Ordos Margin; (e) Outcrop of a fault–bend fold on the Strathcona Siderite Thrust (Waldron and Snyder, 2020); (f) Outcrop of a fault–bend fold in the Tethyan–Himalayan Region (Mukherjee, 2020); (j) Structural interpretation of a seismic reflection profile from the Changning Area, southern Sichuan (modified after He, 2019b)

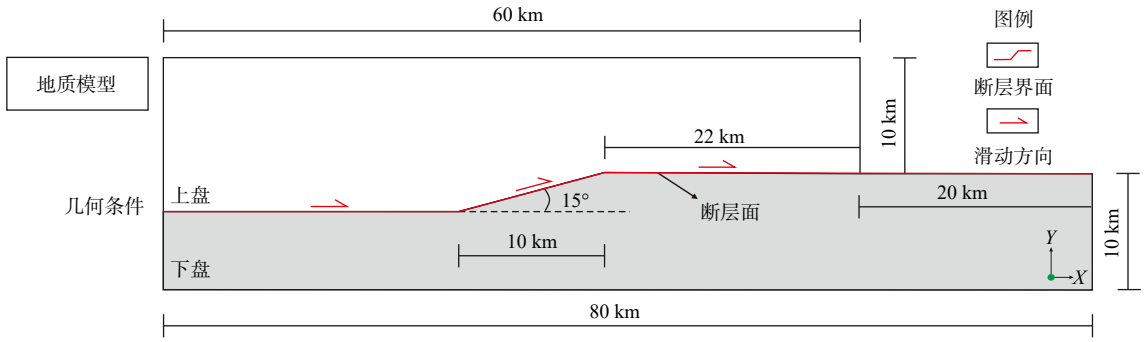


图 3 单层均质断层转折褶皱地质模型

Fig. 3 Geological model of a homogeneous single-layer fault–bend fold

是判定岩石屈服或破坏状态的重要依据。此次研究所建立的模型采用能够较好体现岩石材料强度特性和变形破坏行为的 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型进行控制，在此变形过程中，岩石首先发生弹性变形；当内部应力达到屈服应力后，塑性变形逐渐成为主要变形机制。ABAQUS 中所采用的 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，是在经典 Mohr-Coulomb 屈服准则的基础上进行了扩展，能够描述岩石屈服后由流动法则及硬化/软化模型所控制的力学行为（王仁和殷有泉, 1981; 张汝清和詹先义, 1990; 王勖成, 2003; 庄

茁等，2009；王红才等，2012；柏东良，2014；童亨茂等，2024）。下面将给出该模型在 ABAQUS 中的主要公式表达：

（a）弹性部分

ABAQUS 中的弹性部分通常采用线弹性模型，其应力–应变关系由胡克定律给出：

$$\Delta\sigma_{ij} = D^{e}_{ijkl}\Delta\varepsilon^{e}_{kl} \tag{3}$$

其中，$\Delta\sigma_{ij}$为应力增量，$\Delta\varepsilon^{e}_{kl}$为弹性应变增量，$D^{e}_{ijkl}$为弹性刚度矩阵。而弹性刚度矩阵由杨氏模量$E$与泊松比$v$确定。

（b）塑性部分

屈服准则采用 Mohr-Coulomb 的屈服函数，公式如下：

$$F = R_{mc}q - p\tan\phi - c = 0 \tag{4}$$

其中，p为平均应力（压为正），q为 Mises 等效应力，ϕ为内摩擦角，c是为黏聚力，R_{mc}为控制屈服面形状的函数。

流动准则采用非关联流动，塑性应变增量方向由塑性势函数决定：

$$\Delta\varepsilon^{p} = \Delta\lambda\frac{\partial G}{\partial\sigma} \tag{5}$$

其中，$\Delta\varepsilon^{p}$为等效塑性应变，$\Delta\lambda$为塑性乘子，G为塑性势函数。

G形式为：

$$G = R_{mw}q - p\tan\psi \tag{6}$$

其中，p是平均应力（压为正），q是 Mises 等效应力，R_{mw}为与R_{mc}类似的函数；ψ为剪胀角。

硬化/软化准则通常是定义了材料在屈服后，其强度参数（黏聚力、内摩擦角）如何随着塑性应变的发展而变化。

因此，通过上述公式与实际操作 ABAQUS 模拟软件可得：Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型涉及的主要岩石力学参数包括密度（ρ）、杨氏模量（E）、泊松比（v）、内摩擦角（ϕ）、黏聚力（c）以及剪胀角（ψ）6 个弹塑性参数。基于已有研究成果（李本亮等，2001；Schmalholz et al., 2002；Erickson et al., 2004；张必龙等，2009）和反复实验验证，最终选取了符合实际地质条件且能避免上盘运动过程中产生非地质性界面间隙的合理参数组合（表 1）。

表 1　断层转折褶皱模型参数设置表

Table 1　Parameters for the fault–bend fold model

	密度/(kg/m^3)	杨氏模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪胀角/(°)
上盘	2500	20	0.34	21.38	34.31	42.78
下盘	2700	55	0.28	40	20	50

2.2.2　网格划分

在 ABAQUS 有限元数值模拟中，网格划分是确保计算精度和收敛性的关键环节。研究依据有限元网格划分原理，采用自适应三角网格算法对模型进行网格划分处理（图 4）。为提高上盘应力–应变场的计算精度，对上盘区域实施了网格加密处理。通过多次网格优化测试，最终确定模型网格参数：上盘包含 2973 个节点和 5658 个单元，下盘包含 846 个节点和 1513 个单元。同时，为便于后续模拟结果数据成图，在网格模型中的上盘顶部取 25 个监测点。

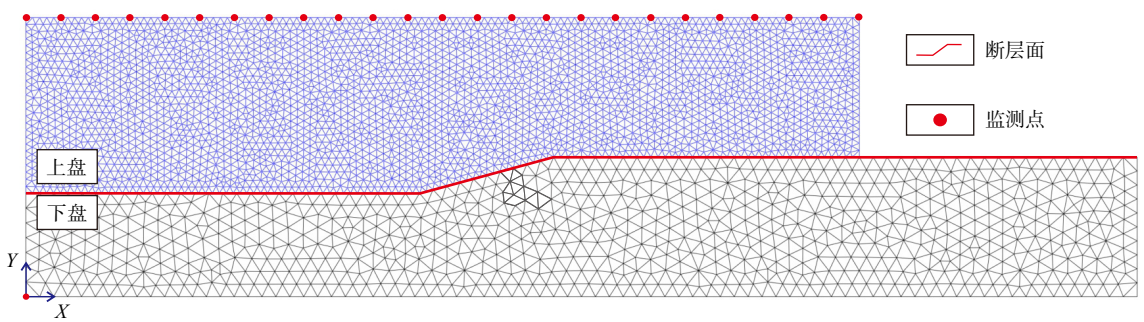


图 4　单层均质断层转折褶皱模型网格划分

Fig. 4　Mesh generation for the homogeneous single-layer fault-bend fold model

2.2.3 边界条件

边界条件的设置是控制模型自由度、确保数值模拟符合实际地质约束的关键环节。通过合理设定边界条件，既能有效限制模型在计算过程中产生非物理性位移和旋转，又能显著提高数值稳定性和计算效率。在 ABAQUS 数值模拟中，边界条件的定义需与分析步（代表构造运动的不同演化阶段或期次）协同设置，这种组合关系使得模型能够准确刻画具有复杂边界条件和多期构造运动的地质过程。

基于文章地质模型的运动学分析，设定了 2 个分析步：初始状态和加载状态（图 5，图 6）。初始状态采用三边固定约束条件：模型左右边界垂向固定、下边界三向固定、上边界自由，以确保加载前模型处于力学平衡状态。通过系统梳理已有研究成果（Erickson et al., 2004; Ju et al., 2014; 杨晓强 等，2020; Khalifeh-Soltani et al., 2023），发现现有断层转折褶皱力学模型的边界条件设置主要分为 2 种典型方案：①（以 Erickson 等为代表）采用上盘右侧开放边界，即上盘滑动方向前端自由；②（以 Khalifeh-Soltani 等为代表）采用上盘右侧固定边界，即上盘滑动方向前端固定。为此，此次研究设计了 2 种边界条件方案（图 5，图 6）：方案 1 在加载阶段对上盘左边界施加 10km 右向位移，右边界开放；方案 2 在加载阶段施加相同位移，但保持右边界垂向固定。除加载阶段的边界条件差异外，2 种方案在岩性参数、网格划分和数值计算方法等方面均保持一致。

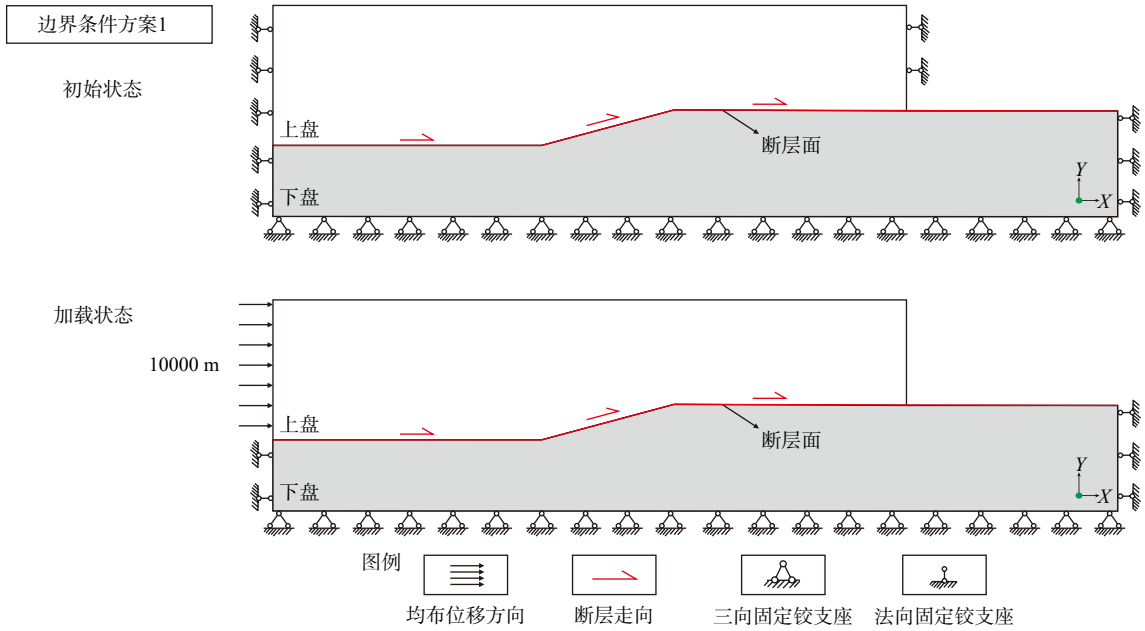


图 5 单层均质断层转折褶皱边界条件方案 1

Fig. 5 Boundary condition scheme 1 for the homogeneous single-layer fault-bend fold model

3 模拟结果分析

基于上述建立的单层均质断层转折褶皱地质力学模型，采用 ABAQUS 有限元分析软件进行数值模拟研究。通过对比 2 种边界条件方案下的模拟结果（包括应力–应变特征、变形特征以及等效塑性区分布），系统分析有利于断层转折褶皱形成的动力学边界条件，并揭示该边界条件下断层转折褶皱的动力学演化机制。其中，最大主应力（Maximum Principal Stress）作为关键力学参数，体现了岩石的变形机制与破裂方位等特征，其中，岩石通常沿最大主应力垂直方向发生张性破裂，或与之呈特定夹角方向产生剪切破裂；等效塑性应变（Plastic Equivalent Strain）则表征岩石构造变形的塑性累积程度，其高值区往往对应于剪切带或断层带等构造薄弱带，这些区域是应力集中与应变局部化的典型表现。基于此，可通过提取最大主应力场（包括量值和方位）与等效塑性应变场分布特征进行结果分析。由于此次研究聚焦于断层转折褶皱的构造变形力学机制，后续分析将仅针对上盘变形响应展开讨论。

3.1 边界条件方案 1 模拟结果分析

根据边界条件方案 1 模型的模拟结果可知（图 7，图 8）：①从几何形态分析发现，上盘岩层沿断层面

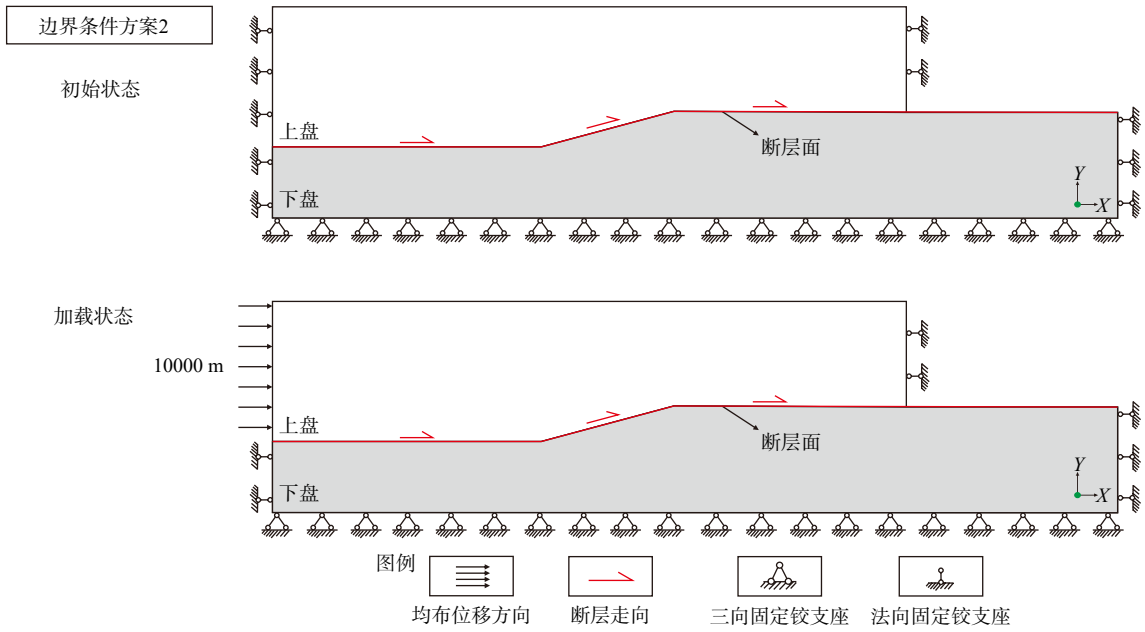


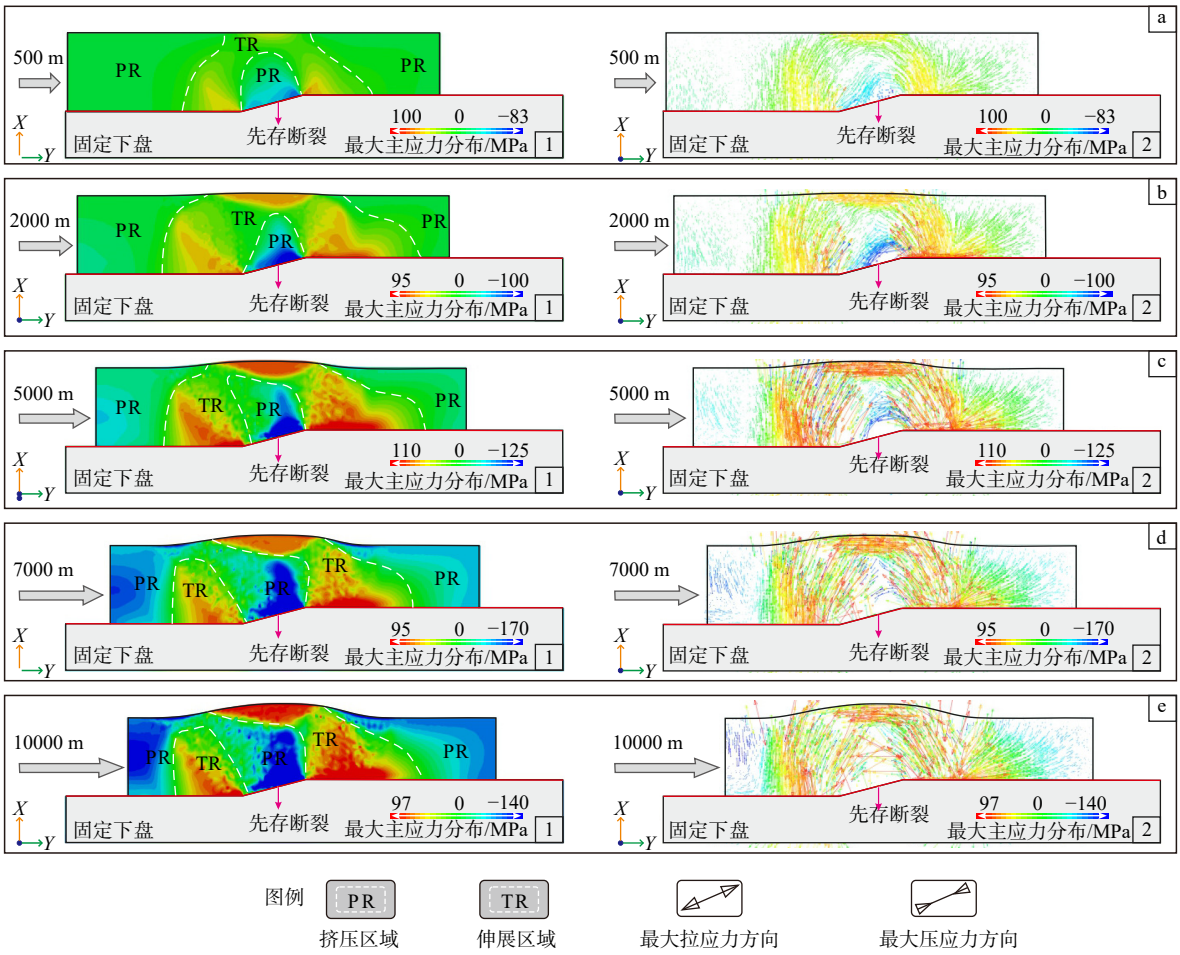
图 6　单层均质断层转折褶皱边界条件方案 2

Fig. 6　Boundary condition scheme 2 for the homogeneous single-layer fault–bend fold model

滑动并经过断层转折端时，受几何约束作用发生明显褶皱变形，且随着位移量增加，褶皱幅度逐渐增大。测量结果显示褶皱形态呈不对称特征：前翼（相对于运动方向）较陡，倾角为 11.84°；后翼较缓，倾角为 10.04°。②从最大主应力分布图（图 7a1、7b1、7c1、7d1、7e1）分析发现，上盘沿断层面运动过程中，应力首先在 2 个断层转折端处集中，集中强度向上逐渐衰减。随着位移增大，上盘逐渐形成挤压区、伸展区及二者之间的过渡带（韧性变形带），分区特征趋于显著。具体而言，伸展区分布于下转折端左侧、上转折端右侧及褶皱顶部；挤压区则主要位于褶皱两翼、断坡面及其余区域。从最终的最大主应力分布图可见，褶皱两翼挤压区最大压应力达 140 MPa，而褶皱核部顶面伸展区最大拉应力为 97 MPa。值得关注的是，在左侧位移边界条件施加过程中，最大拉应力呈现先增大后减小的周期性波动。由于应力集中区域通常为构造薄弱带，易引发破裂，据此推测上盘应力集中区可能发育局部裂缝，从而释放部分应力。此外，结合最大主应力方向演化图（图 7a2、7b2、7c2、7d2、7e2）分析发现，最大主应力方向在 2 个转折端及褶皱顶部区域较为集中。鉴于岩石通常沿垂直最大主应力方向发生张性破裂，或沿与最大主应力呈一定角度方向发生剪切破裂，推测褶皱顶部可能发育垂向张裂缝，下转折端可能形成与 X 轴呈钝角的裂缝，而上转折端则可能发育与 X 轴呈锐角的裂缝。③从等效塑性应变分布结果（图 8a1、8b1、8c1、8d1、8e1）分析发现，塑性应变首先出现在 2 个断层转折端，并向上呈递减趋势。随着位移量增大，转折端处逐渐形成一系列累积的剪切变形带，其强度和分布范围不断扩大，最终等效塑性应变最大值达 0.52。因此，在构造演化过程中，2 个转折端属于构造薄弱带，可能发育次级断裂，以调节构造变形及应力–应变分布。

3.2　边界条件方案 2 模拟结果分析

根据边界条件方案 2 模型的模拟结果可知（图 8，图 9）：①从几何形态分析发现，上盘沿转折断层面推移过程中，在 2 个转折端均出现隆起构造。随着位移量增大，最终形成前翼陡倾、后翼缓倾的构造形态。实测数据显示，模型前翼倾角为 40.9°，后翼倾角为 12.4°。②从最大主应力大小分布图（图 9a1、9b1、9c1、9d1、9e1）夫人逆袭发现，在位移较小时，其应力分布特征与方案 1 模型较为一致。随着位移增大，方案 2 模型在褶皱前翼发育出分布范围较大的拉应力区，该拉应力区甚至减弱了断坡面上的压应力分布。最终，模型最大压应力为 74 MPa，最大拉应力达 190 MPa。同时，结合最大主应力方向分布图（图 9a2、9b2、9c2、9d2、9e2）分析发现，该模型中最大主应力方向近乎垂直，自 2 个转折端向外呈排列分布样式，破裂方向接近水平，表明该构造条件下易发生沿水平方向的剪切破坏。③从等效塑



a—左侧位移为 500 m 时最大主应力分布图(a1—大小分布图, a2—方向分布图); b—左侧位移为 2000 m 时最大主应力分布图(b1—大小分布图, b2—方向分布图); c—左侧位移为 5000 m 时最大主应力分布图(c1—大小分布图, c2—方向分布图); d—左侧位移为 7000m 时最大主应力分布图(d1—大小分布图, d2—方向分布图); e—左侧位移为 10000 m 时最大主应力分布图(e1—大小分布图, e2—方向分布图)

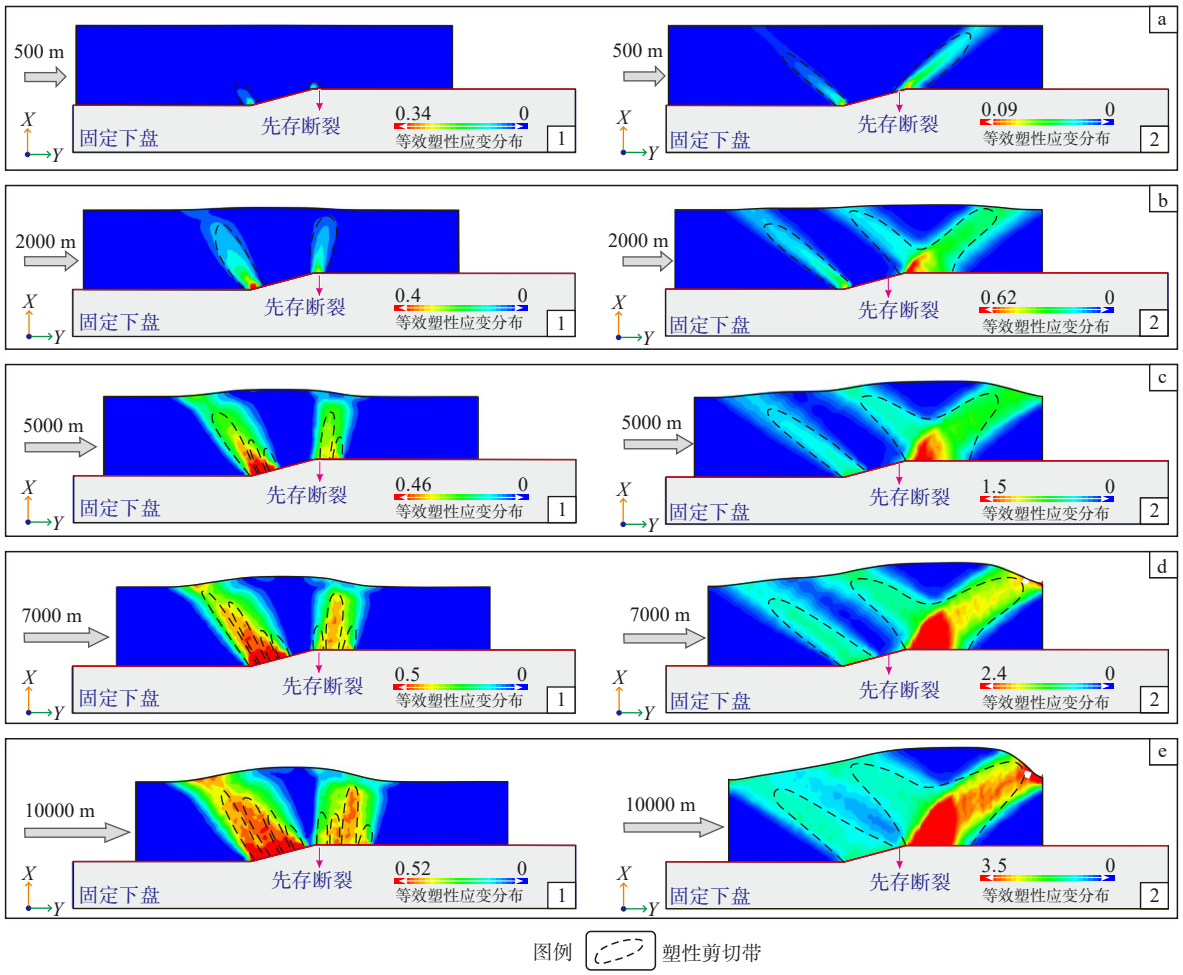
图 7 方案 1 边界条件下单层均质断层转折褶皱最大主应力大小及方向分布图

Fig. 7 Distribution of the magnitude and orientation of the maximum principal stress in a homogeneous single-layer fault–bend fold under boundary condition scheme 1

(a) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 500 m (a1–magnitude distribution, a2–orientation distribution); (b) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 2000 m (b1–magnitude distribution, b2–orientation distribution); (c) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 5000 m (c1–magnitude distribution, c2–orientation distribution); (d) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 7000 m (d1–magnitude distribution, d2–orientation distribution); (e) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 10000 m (e1–magnitude distribution, e2–orientation distribution)

性应变分布图(图 8a2、8b2、8c2、8d2、8e2)分析发现, 在位移较小时, 其应变分布与方案 1 模型基本一致。随着位移增加, 模型在褶皱前翼发育 2 条塑性剪切带, 其中右侧区域塑性应变最为强烈, 最大等效塑性应变达 3.5。与方案 1 模拟结果相比, 该模型在应变分布特征与数值大小上均存在显著差异。

通过对上述 2 种边界条件下模型的模拟结果进行对比分析, 可得出以下认识: 当上盘前端为固定边界条件时, 所生成的褶皱变形在几何形态上不符合经典断层转折褶皱的几何学与运动学样式(图 1; Suppe, 1983; Chester, 1995), 其应力–应变分布也与已有研究结果(如祖克威等, 2014; 杨晓强等, 2020)存在显著差异。而在前端为自由边界的模型中, 褶皱形态与经典断层转折褶皱样式基本一致, 应变分布亦与基于运动学应变椭圆模拟的结果相吻合(Yang J H et al., 2022)。因此, 综合分析表明, 上盘前端设置为开放边界条件(方案 1)更有利于断层转折褶皱的发育。



a—左侧位移为 500 m 时等效塑性应变分布图（a1—方案 1，a2—方案 2）；b—左侧位移为 2000 m 时等效塑性应变分布图（b1—方案 1，b2—方案 2）；c—左侧位移为 5000 m 时等效塑性应变分布图（c1—方案 1，c2—方案 2）；d—左侧位移为 7000 m 时等效塑性应变分布图（d1—方案 1，d2—方案 2）；e—左侧位移为 10000 m 时等效塑性应变分布图（e1—方案 1，e2—方案 2）

图 8　方案 1 和 2 边界条件下单层均质断层转折褶皱等效塑性应变分布图

Fig. 8　Distribution of equivalent plastic strain in a homogeneous single-layer fault–bend fold under boundary conditions schemes 1 and 2

(a)Equivalent plastic strain distribution at a left-side displacement of 500 m (a1–scheme 1, a2–scheme 2); (b)Equivalent plastic strain distribution at a left-side displacement of 2000 m (b1–scheme 1, b2–scheme 2); (c)Equivalent plastic strain distribution at a left-side displacement of 5000 m (c1–scheme 1, c2–scheme 2); (d)Equivalent plastic strain distribution at a left-side displacement of 7000 m (d1–scheme 1, d2–scheme 2); (e)Equivalent plastic strain distribution at a left-side displacement of 10000 m (e1–scheme 1, e2–scheme 2)

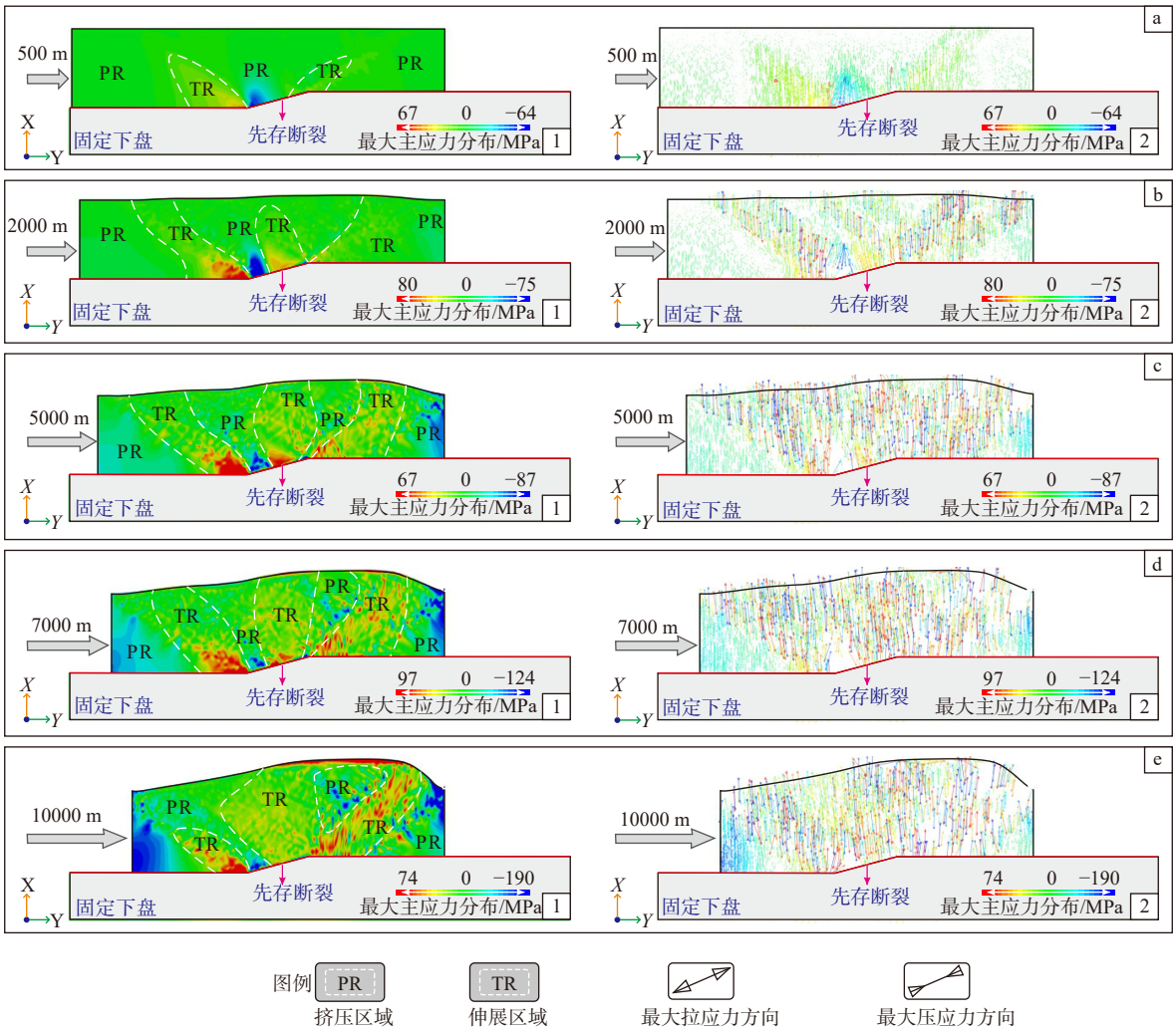
3.3　断层转折褶皱动力学演化机制

基于此次研究模型的数值模拟结果（图 7，图 8），并参照经典的 Suppe 断层转折褶皱理论（Suppe, 1983）可以发现：断层转折褶皱的整个动力学演化过程表现为上盘沿“断坪–断坡–断坪”系统滑动。为适应断层面的几何形态变化，上盘岩层被迫发生弯曲、旋转和内部变形，从而在断层转折部位（如下断坡上方）形成褶皱。这表明，褶皱演化是上盘沿断层面滑动过程中几何学与动力学机制共同作用的必然结果，而非独立的变形机制。

基于几何学、运动学及力学模拟结果综合分析，断层转折褶皱的动力学演化机制主要可分为 4 个阶段。

（1）初始滑动与后翼形成阶段

在初始阶段整体地层较为稳定，进入加载阶段后，随着左侧挤压应力的加载，上盘岩层开始沿下断坪发生近水平剪切滑动，岩层基本保持原始状态，无明显弯曲，变形以弹性为主。当滑动前缘抵达下断坡底部时，动力学机制发生根本转变，岩层由水平滑动转为沿断坡爬升，下转折端开始出现塑性变形。为适应从水平到倾斜的断层几何变化，岩层在断坡底部发生膝折，同时固定轴面形成，见图 1d 中



a—左侧位移为 500 m 时最大主应力大小分布图(a1—大小分布图, a2—方向分布图); b—左侧位移为 2000 m 时最大主应力大小分布图(b1—大小分布图, b2—方向分布图); c—左侧位移为 5000 m 时最大主应力大小分布图(c1—大小分布图, c2—方向分布图); d—左侧位移为 7000 m 时最大主应力大小分布图(d1—大小分布图, d2—方向分布图); e—左侧位移为 10000 m 时最大主应力大小分布图(e1—大小分布图, e2—方向分布图)

图 9 方案 2 边界条件下单层均质断层转折褶皱最大主应力大小及方向分布图

Fig. 9 Distribution of the magnitude and orientation of the maximum principal stress for a homogeneous single-layer fault–bend fold under boundary condition scheme 2

(a) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 500 m (a1–magnitude distribution, a2–orientation distribution); (b) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 2000 m (b1–magnitude distribution, b2–orientation distribution); (c) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 5000 m (c1–magnitude distribution, c2–orientation distribution); (d) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 7000 m (d1–magnitude distribution, d2–orientation distribution); (e) Maximum principal stress distribution at a left-side displacement of 10000 m (e1–magnitude distribution, e2–orientation distribution)

A 轴线。通过该轴面的岩层进入倾斜断坡段, 形成后翼, 而上盘上部岩层仍保持水平。随着滑动持续, 更多岩层进入断坡段, 后翼逐渐发育(图 7a1, 图 8a1)。

(2)前翼生长与褶皱初步形成阶段

上盘岩层持续沿断坡向上滑动, 当到达断坡顶部时, 面临上转折端, 即由倾斜断坡转为水平上断坪。此时在断坡顶部形成活动轴面, 见图 1d 中 B 轴线, 该轴面随上盘物质向前迁移。固定轴面与活动轴面之间的岩层构成褶皱的前翼和转折端, 形成完整的不对称褶皱形态, 表现为前翼较陡、后翼较缓(图 7b1, 图 8b1)。

(3)稳定滑移与褶皱扩展阶段

随着挤压作用持续, 上盘岩层持续沿上下 2 个转折端发生变形, 活动轴面不断前移, 见图 1d 中 A'

与 B’轴线，褶皱前翼持续向前扩展。该研究模型为理想弯滑褶皱，变形主要通过层间滑动和转折端旋转实现，岩层厚度基本保持不变（图 7c1、7d1，图 8c1、8d1）。然而在自然界中，受岩石力学差异影响，褶皱在核部与翼部常会出现增厚与减薄的现象（王莉等，2021；马佳等，2024）。

（4）褶皱形成与复杂构造衍生阶段

至此，断层转折褶皱已完整形成（图 7e1，图 8e1）。在该过程中，下转折端作为应变局部化与剪切破裂的起源，其上方塑性应变带扩展主导了后翼的构建；上转折端则控制背斜核部及前翼的发育，形成张性应力场并可能发育裂缝系统。随着挤压应力持续作用，褶皱前翼应变能不断累积，岩层弯曲程度达到极限。当局部应力超过岩石强度时，在应变集中的陡峭前翼将产生突破断层。该断层可能进一步发育为新的台阶状断层（黄蝶芳等，2020；杨金赫，2021），并在其下盘发育次级断层转折褶皱，形成复杂叠瓦构造。

综上所述，断层转折褶皱的动力学演化本质上是岩层在挤压应力作用下为适应先存断层几何形态而发生的递进变形过程。该过程始于断坡底部的初始膝折，通过轴面实现物质由后翼向前翼的传递与褶皱的垂向生长，最终常以突破断层发育进入新的变形阶段。通过将已建立的几何学与运动学模型（Suppe，1983）与此次研究的力学模型相结合，有效将断层作用与褶皱作用统一于连续的动力学框架中，为后续挤压构造的定量分析提供了良好基础。

4　弹塑性参数控制的定量研究

经典断层转折褶皱模型为理解挤压构造的几何学与运动学过程提供了坚实的定性框架。但其多建立在理想的岩层假设之上，侧重于几何形态的演化，在一定程度上忽略了真实的岩石力学性质对变形的控制作用。为弥补这一局限，文中在系统剖析其动力学演化机制的基础上，采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，旨在定量揭示关键岩石力学参数对断层转折褶皱变形的控制规律。

为定量评估上述 6 项弹塑性参数对断层转折褶皱构造变形的影响，此次模拟综合考虑各参数取值范围，分别对每项参数独立选取 11 组梯度值（表 2），通过对比各组数值模拟结果，来识别主导褶皱变形的关键参数，并厘定各参数有利于断层转折褶皱发育的阈值区间。其中，在进行单因素参数分析时，每次仅改变一个参数的取值，其余参数均保持为基准模型的设定值。（表 1）。

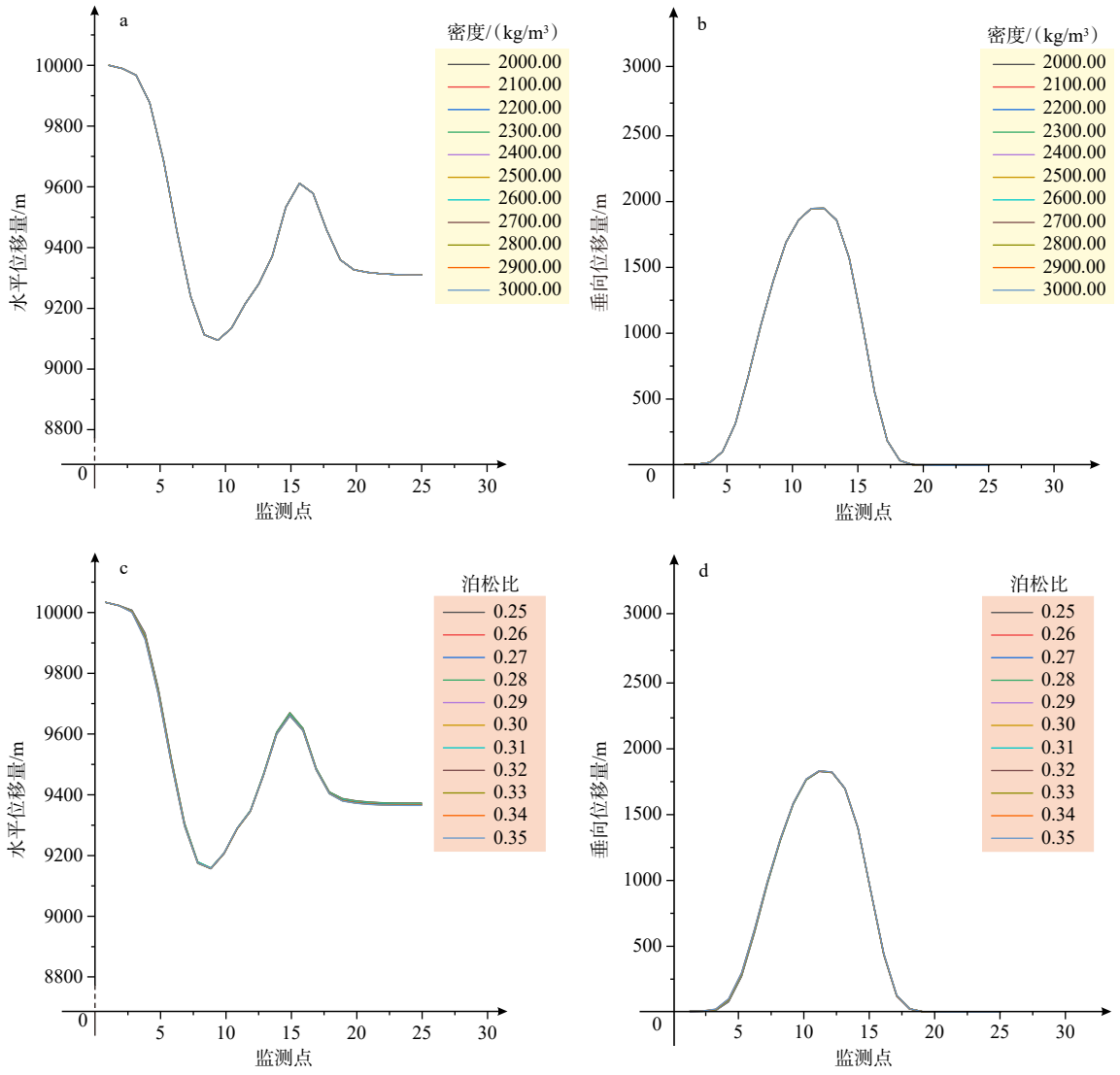
表 2　断层转折褶皱模型上盘单一参数变量取值表

Table 2　Values of single-parameter variables for the hanging wall in the fault–bend fold model

密度/(kg/m^3)	杨氏模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪胀角/(°)
2000.00	1.00	0.25	15.00	1.00	15.00
2100.00	10.00	0.26	20.00	5.00	17.50
2200.00	20.00	0.27	25.00	10.00	20.00
2300.00	30.00	0.28	30.00	20.00	22.50
2400.00	40.00	0.29	35.00	30.00	25.00
2500.00	50.00	0.30	40.00	40.00	27.50
2600.00	60.00	0.31	45.00	45.00	30.00
2700.00	70.00	0.32	50.00	50.00	32.50
2800.00	80.00	0.33	55.00	60.00	35.00
2900.00	90.00	0.34	60.00	70.00	37.50
3000.00	100.00	0.35	65.00	80.00	40.00

4.1　密度与泊松比

根据对不同密度（ρ）与泊松比（υ）的位移数据结果曲线图可以看出（图 10），密度与泊松比的改变基本不影响褶皱的变形。该模拟结果与张必龙等（2009）利用 FLAC 有限差分数值模拟方法对川东南褶皱带变形研究所用参数的模拟结果以及 Schmalholz et al.（2002）基于几何参数的相图所得结果基本吻合。



a—密度参数下褶皱顶部水平位移；b—密度参数下褶皱顶部垂向位移；c—泊松比参数下褶皱顶部水平位移；d—泊松比参数下褶皱顶部垂向位移

图 10 密度与泊松比参数单因素下多组实验褶皱顶部位移数据曲线图

Fig. 10 Displacement data curves at the fold crest from multiple sets of experiments under the single-factor condition of density and Poisson's ratio parameters

(a) Horizontal displacement at the fold crest under the density parameter; (b) Vertical displacement at the fold crest under the density parameter; (c) Horizontal displacement at the fold crest under the Poisson's ratio parameter; (d) Vertical displacement at the fold crest under the Poisson's ratio parameter

4.2 杨氏模量、剪胀角

(1)杨氏模量

不同杨氏模量下的几何响应分析(表 3)显示，杨氏模量为 1 GPa 时，褶皱半波波长 w 达到 38.44 km，且前、后翼部倾角基本一致(θ_1=8.79°，θ_2=8.5°)，整体呈现对称宽缓形态，随着杨氏模量增加至 10 GPa，褶皱的半波波长 w 相对 1GPa 时减小了 13.25%(W 为 33.94 km)，前、后翼部倾角增大，但始终保持$\theta_1 > \theta_2$；随着杨氏模量增至 100 GPa，褶皱半波波长变化相对于 10 GPa 时的结果来说仅变化 2.6%，前翼倾角始终保持略大于后翼倾角。褶皱顶部位移变化进一步揭示出(图 11a、11b)，杨氏模量从 1 GPa 到 10 GPa 时，褶皱隆升幅度之差达到约 0.35 km(最大增长 27%)，褶皱最右侧滑移量在 9.4～9.5 km 之间(最大增长 1%)；随着杨氏模量增长到 100 GPa 时，褶皱隆升幅度仍逐渐增加，但增长幅度

表 3　不同弹塑性参数单因素下多组实验几何参数结果表

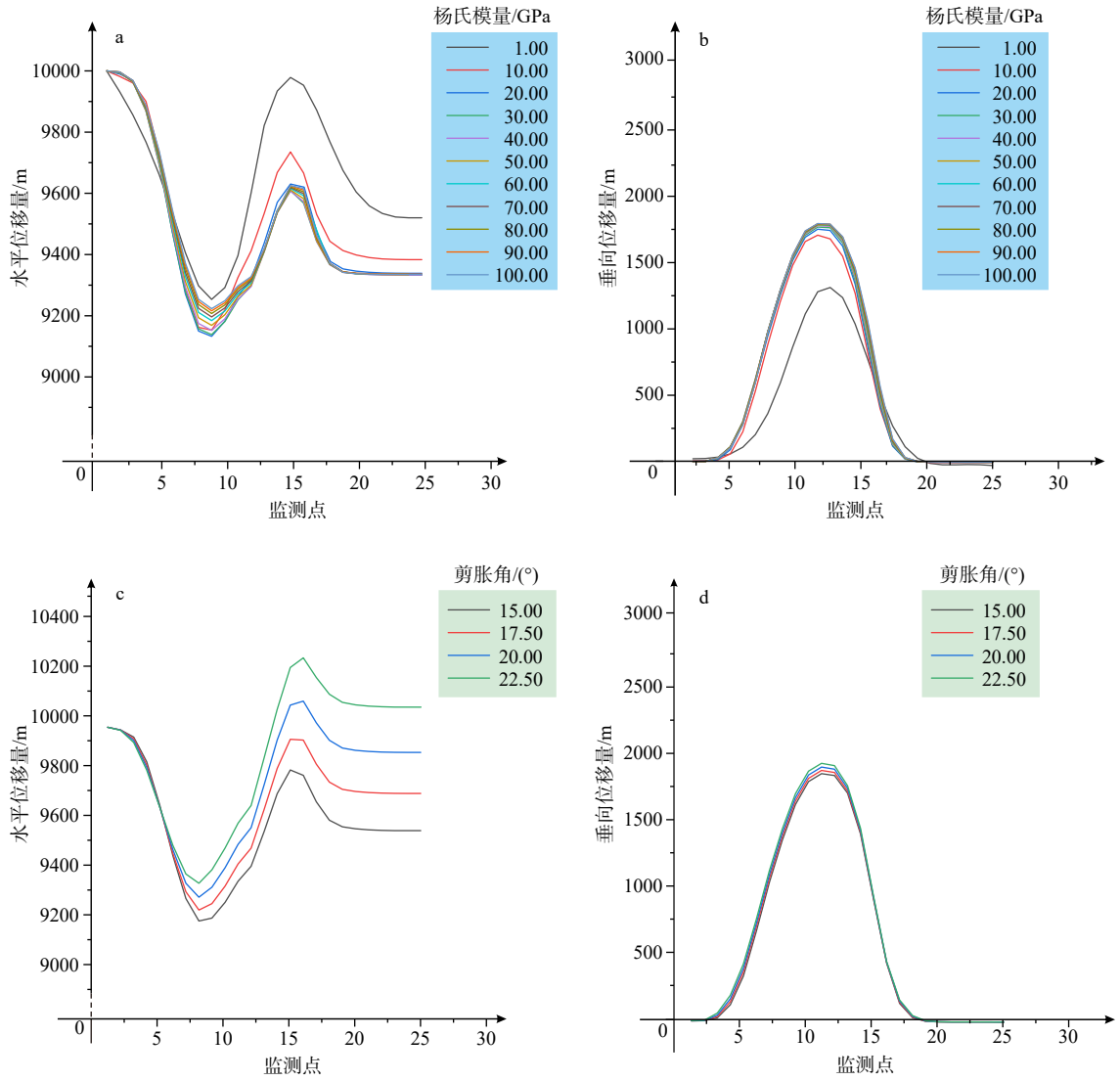
Table 3　Results of geometric parameters from multiple single-factor experiments with different elastoplastic parameters

参数名称	几何参数取值	半波长W	倾角θ		
			后翼θ_2	前翼θ_1	差值($\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$)
杨氏模量	1 GPa	38.44 km	8.50°	8.79°	0.21°
	10 GPa	33.94 km	11.19°	15.27°	4.08°
	20 GPa	33.88 km	12.44°	15.47°	3.03°
	30 GPa	34.08 km	12.92°	16.37°	3.45°
	40 GPa	34.33 km	11.39°	14.25°	2.89°
	50 GPa	34.41 km	12.28°	15.25°	2.97°
	60 GPa	34.61 km	10.67°	14.95°	4.28°
	70 GPa	34.62 km	11.12 °	14.43°	3.31°
	80 GPa	34.82 km	11.51°	14.07°	2.56°
	90 GPa	34.81 km	11.96°	14.64	2.68°
	100 GPa	34.84 km	11.42°	16.59°	5.17°
剪切角	15.0°	35.85 km	11.06 °	14.06°	3.00°
	17.5°	36.77 km	11.09°	14.33°	3.24°
	20.0°	37.47 km	12.01°	15.51°	3.50°
	22.5°	38.51 km	12.09°	15.97°	3.85°
黏聚力	1 MPa	35.86 km	12.88°	14.62°	1.74°
	5 MPa	35.97 km	12.25°	14.38°	1.83°
	10 MPa	34.71 km	12.86°	14.64°	1.78°
	20 MPa	34.65 km	11.66°	15.19°	3.53°
	30 MPa	34.36 km	11.49°	15.00°	3.51°
	40 MPa	34.08 km	11.03°	14.87°	3.84°
	45 MPa	33.89 km	12.24°	14.99°	2.75°
	50 MPa	34.35 km	12.09°	13.92°	1.83°
	55 MPa	35.25 km	12.49°	14.10°	1.61°
	60 MPa°	46.86 km	12.15°	5.29°	−6.86°
	70 MPa	47.97 km	10.62°	5.17°	−5.45°
内摩擦角	10°	33.76 km	9.46°	10.68°	1.22°
	15°	34.04 km	9.16°	10.76°	1.6°
	20°	34.09 km	9.40°	11.39°	1.99°
	25°	34.16 km	9.88°	11.40°	1.52°
	30°	34.93 km	9.32 °	11.58°	2.26°
	35°	36.42 km	10.01°	12.75°	2.74°
	40°	37.79 km	11.57°	18.84°	7.27°
	45°	38.84 km	11.32°	24.39°	13.07°
	50°	39.68 km	11.87°	25.54°	13.67°

注: 前翼是指褶皱运动方向

相对 10 GPa 时的结果来说仅增长了 9%, 且褶皱最右侧滑移量仅有 9.3±0.1 km。

综上所述, 杨氏模量对断层转折褶皱变形的控制作用相对较弱, 且表现出明显的局部敏感性。当杨氏模量处于 1～10 GPa 范围内时, 褶皱形态参数(如半波波长和隆升幅度)变化显著; 而当其值超过



a—杨氏模量参数下褶皱顶部水平位移；b—杨氏模量参数下褶皱顶部垂向位移；c—剪胀角参数下褶皱顶部水平位移；d—剪胀角参数下褶皱顶部垂向位移

图 11 杨氏模量与剪胀角参数单因素下多组实验褶皱顶部位移数据曲线图

Fig. 11 Displacement data curves at the fold crest from multiple sets of experiments under the single-factor condition of Young's modulus and dilation angle parameters

(a) Horizontal displacement at the fold crest under the Young's modulus parameter; (b) Vertical displacement at the fold crest under the Young's modulus parameter; (c) Horizontal displacement at the fold crest under the dilation angle parameter; (d) Vertical displacement at the fold crest under the dilation angle parameter

10 GPa 后，形态变化趋于平缓，但仍未改变断层转折褶皱的基本运动学样式。这一结果与已有基于剪切模量和体积模量的模拟结论相吻合（张必龙等，2009）。此外，在合理的岩性取值范围内（杨氏模量为 1～100 GPa），该参数区间均有利于断层转折褶皱的发育。

（2）剪胀角

根据不同剪胀角（ψ）的模拟结果发现，当剪胀角大于 22.5°时，模型接触界面出现畸变，已不利于断层转折褶皱的发育，因此模拟结果不考虑剪胀角大于 22.5°时的结果。

不同剪胀角下的几何响应分析（表 3）显示，随着剪胀角的增加，褶皱半波波长、前翼倾角与后翼倾角均呈现递增的趋势，且前、后翼倾角的差值基本不变（均在 3.4°左右）。同时，剪胀角增大，褶皱最右侧滑移量随着剪胀角的增大而增大（最大增长 5.2%；图 11c），褶皱隆升幅度也随之增大，但增加幅度较小（最大增长 8.3%；图 11d）。

综上所述，剪胀角是断层转折褶皱变形的一个弱控因素。其增大会促使褶皱形态呈现逐步拓宽的趋势。这是由于材料进入塑性变形阶段后，剪胀角所引发的剪胀效应：剪胀角越大，体积膨胀越显著。该数值模拟规律与真实岩石的力学行为相符，且在当前参数取值范围内，并未改变断层转折褶皱基本的运动学样式。

4.3　黏聚力与内摩擦角

（1）黏聚力

根据不同黏聚力（c）的模拟结果发现，当黏聚力大于 70 MPa 时，模型接触界面则出现畸变，已不利于断层转折褶皱的发育，因此模拟结果仅考虑黏聚力小于 70 MPa 时的结果。

不同黏聚力下的几何响应分析（表 3）显示，黏聚力取 1～5 MPa 时，褶皱半波波长呈现增大趋势（最大增长 0.3%）；黏聚力取 10～45 MPa 时，褶皱半波波长呈现减小趋势（最大减小 2.4%）；黏聚力取 50～60 MPa 时，褶皱半波波长又呈现增大趋势（最大增长 38%），整体呈现先增大再减小后又增大的趋势。这与已有利用黏聚力参数探究川东南隔挡式背斜与隔槽式背斜变形的主控因素所得出的结果较为吻合（张必龙等，2009）。值得注意的是，当黏聚力大于 60 MPa 时，前翼倾角突然变缓，且小于后翼倾角，已脱离断层转折褶皱基本的运动学样式。同时，从褶皱顶部位移变化进一步揭示（图 12a、12b），黏聚力大于 60 MPa 时，褶皱前翼隆升幅度急速下降，整个上盘前翼基本不变形且使得上下接触面出现畸变，已不利于断层转折褶皱的发展。

综上所述，黏聚力是控制断层转折褶皱变形的关键参数，其影响具有显著的局部敏感性与非线性特征。当黏聚力低于 45 MPa 时，其对褶皱变形的影响较弱；而当其增至 50～60 MPa 的临界区间时，控制作用显著增强。

（2）内摩擦角

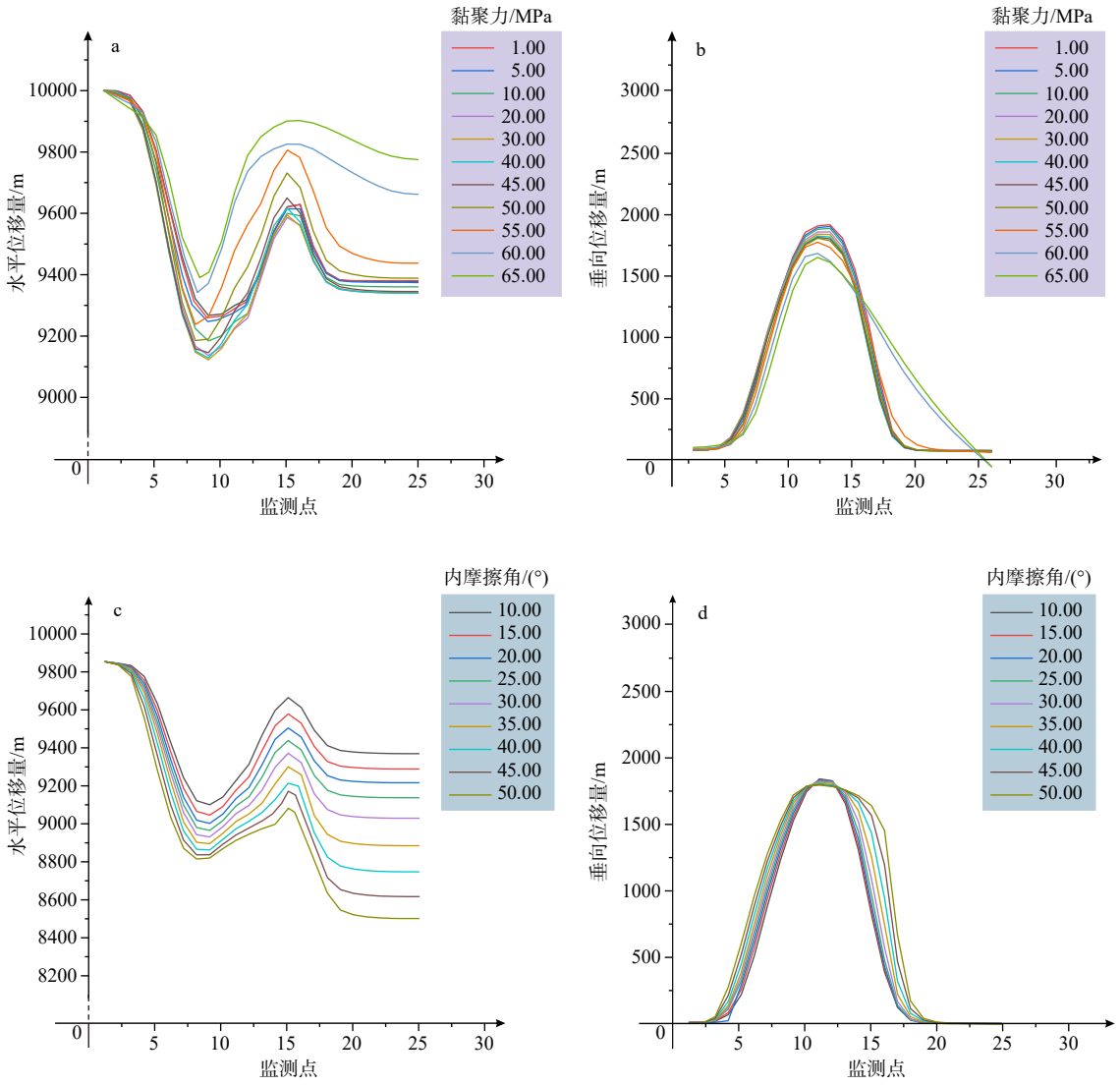
根据不同内摩擦角（ϕ）的模拟结果发现，当内摩擦角大于 50°时，模型接触界面则出现畸变，已不利于断层转折褶皱的发育，因此模拟结果仅考虑内摩擦角小于 50°时的结果。

不同内摩擦角下的几何响应分析（表 3）显示，随着内摩擦角的增加，褶皱半波波长呈现递增的趋势（最大增长 17.5%），且前、后翼倾角也逐渐由平缓变得陡倾（θ_1=10.68°、θ_2=25.54°；$\Delta\theta$=14.86），特别是前翼变得陡而窄，且当内摩擦角取大于等于 45°时，前翼倾角与后翼倾角差值较大，已不利于断层转折褶皱的发育。同时，从褶皱顶部位移变化进一步揭示（图 12c、12d），内摩擦角的增加会导致两翼位置的隆升幅度增加而褶皱顶部的隆升幅度减小，使得褶皱形态逐渐变得较不对称。

综上所述，内摩擦角是控制断层转折褶皱变形的关键参数。其增大会直接导致褶皱半波波长随之增加，并使前、后翼倾角（尤其是前翼倾角）明显变陡，形成前翼陡窄的形态。

根据上述 6 项弹塑性参数对褶皱变形的影响模拟结果综合分析得出：黏聚力和内摩擦角是控制断层转折褶皱变形的关键参数，二者均表现出显著的非线性响应与临界阈值行为。黏聚力低于 45 MPa 时，对褶皱半波波长的影响较弱（0.3%～2.4%）；在 50～60 MPa 区间内其控制作用显著增强，影响幅度达 38%；超过 60 MPa 则导致模型畸变，阻碍褶皱发育。内摩擦角增大会使褶皱半波波长增大（最高 17.5%），同时前翼趋于陡窄；超过 45°时易引发褶皱畸变，不利于构造发育。相比之下，杨氏模量与剪胀角的影响较弱且具局部敏感性。杨氏模量在 1～10 GPa 范围内对半波波长和隆升幅度的影响较显著（分别达 13.25% 和 27%），超过 10 GPa 后效应明显减弱（隆升幅度变化仅 9%）。剪胀角增大虽可略微拓宽褶皱形态并增加位移量，但不改变基本运动学样式。同时，密度和泊松比参数则对断层转折褶皱变形无明显影响。

对上述模拟结果进行分析可知，该结论与模型所采用的 Mohr-Coulomb 弹塑性屈服准则密切相关。在力学模拟过程中，变形可分为弹性变形和塑性变形 2 个阶段，其中塑性变形是控制褶皱形成的核心机制。黏聚力和内摩擦角共同决定了岩层在应力作用下发生的不可逆塑性变形；杨氏模量则影响岩层的刚度与变形方式，这解释了该参数在特定区间内变化显著的原因，初始变形与该阶段应力积累主要由刚度控制，超过一定阈值后，岩石趋于极度坚硬，弹性变形量显著减小，其影响也随之减弱；剪胀角主要定义断层面的几何形态，影响位移传递的路径和效率，因此会略微拓宽褶皱形态并增加位移量，但不改变岩层本身的力学行为；密度所产生的重力载荷相较于侧向构造挤压作用贡献较小，因而影响微弱；泊松比主要调控横向应变，对整体变形样式的影响不如直接控制屈服强度的黏聚力和内摩擦角显著。因此，该模型的模拟结果较为可



a—黏聚力参数下褶皱顶部水平位移；b—黏聚力参数下褶皱顶部垂向位移；c—内摩擦角参数下褶皱顶部水平位移；d—内摩擦角参数下褶皱顶部垂向位移

图 12 黏聚力与内摩擦角参数单因素下多组实验褶皱顶部位移数据曲线图

Fig. 12 Displacement data curves at the fold crest from multiple sets of experiments under the single-factor condition of cohesion and internal friction angle parameters

(a) Horizontal displacement at the fold crest under the cohesion parameter; (b) Vertical displacement at the fold crest under the cohesion parameter; (c) Horizontal displacement at the fold crest under the internal friction angle parameter; (d) Vertical displacement at the fold crest under the internal friction angle parameter

靠，可为断层转折褶皱的动力学机制及相关岩石参数对其发育影响的研究提供参考。

5 结论

此次研究以 Suppe(1983)的经典断层转折褶皱理论为基础，结合 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系构建了断层转折褶皱的地质力学模型，并采用有限元数值模拟方法，系统揭示了其动力学演化机制，进而定量评估了弹塑性岩石力学参数对构造变形的控制作用，并提出了关键控制因素，主要得出以下结论。

(1)开放边界条件是断层转折褶皱发育的动力学前提。当褶皱前端为开放边界条件时，该条件下滑移过程符合经典几何–运动学模型；而固定边界条件时，前翼因固定边界而向底部产生大幅度的倾斜卷入，整体变形偏离断层转折褶皱几何–运动学模型。

(2)断层转折褶皱在变形过程中应力–应变产

生显著分区。褶皱两翼和断坡上部表现为挤压区，褶皱核部和断坪上部处于伸展区，2 个转折端处不仅可观察到应力集中且沿轴面向上递减现象，同时也表现为塑性应变的发育区，塑性应变沿着断层面向前扩展，产生一系列的剪切变形带。下转折端上方塑性应变带扩展主导了后翼的构建，作为应变局部化与剪切破裂的起源，上转折端则控制背斜核部及前翼的发育，形成张性应力场并可能发育裂缝系统。

（3）断层转折褶皱的动力学演化机制本质上是岩层在挤压应力作用下为适应先存断层几何形态而发生的递进变形过程。这一过程构成了一个从初始滑动与后翼建造，到前翼生长与褶皱雏形显现，再到稳定滑移与褶皱扩展，并最终以褶皱定型及复杂构造衍生为终点的完整动力学链条。

（4）黏聚力和内摩擦角是控制断层转折褶皱变形的关键参数，二者均表现出显著的非线性响应与临界阈值行为。黏聚力参数主要控制褶皱波长变化，内摩擦角参数主要控制褶皱前翼的陡窄程度；而杨氏模量与剪胀角的影响较弱且具局部敏感性。低杨氏模量参数有利于构造形成，剪胀角会使构造略微拓宽。密度参数与泊松比参数则不会产生影响。

References

BO D L, 2014. Elastic-plastic analysis of gravity stress of spherical shell based on the Mohr-coulomb yield criterion[J]. Value Engineering, 33(32): 316-318. (in Chinese with English abstract)

BONINI M, SOKOUTIS D, MULUGETA G, et al., 2000. Modelling hanging wall accommodation above rigid thrust ramps[J]. Journal of Structural Geology, 22(8): 1165-1179.

BRANDES C, TANNER D C, 2014. Fault-related folding: a review of kinematic models and their application[J]. Earth-Science Reviews, 138: 352-370.

CAI Z Z, HUANG S Y, WANG Y R, 2011. A simple geometry method for analyzing angle relationship of fault-bend fold model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 47(4): 684-688. (in Chinese with English abstract)

CHEN J, LU H F, WANG S L, 2002. Testing of cut-off angles of the Kuqa fault-related folds[J]. Geological Review, 48(1): 74-79. (in Chinese with English abstract)

CHEN J, LU H F, YU J Z, et al., 2005. Geometric models of fault-related folds and their application[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(1): 89-92. (in Chinese with English abstract)

CHEN J J, HE D F, SUN F Y, et al., 2018. Geometry and kinematics of Wensu swell in North Tarim uplift[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 39(3): 318-325. (in Chinese with English abstract)

CHESTER F M, 1995. A rheologic model for wet crust applied to strike - slip faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B7): 13033-13044.

CONNORS C D, HUGHES A N, BALL S M, 2021. Forward kinematic modeling of fault-bend folding[J]. Journal of Structural Geology, 143: 104252.

CRISTALLINI E O, GIAMBIAGI L, ALLMENDINGER R W, 2004. True three-dimensional trishear: a kinematic model for strike-slip and oblique-slip deformation[J]. Geological Society of America Bulletin, 116(7-8): 938-952.

DAHLSTROM C D A, 1969. Balanced cross sections[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 6(4): 743-757.

ERICKSON S G, STRAYER L M, SUPPE J, 2004. Numerical modeling of hinge-zone migration in fault-bend folds[M]//MCCLAY K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists: 438-452.

FORD M, WILLIAMS E A, ARTONI A, et al., 1997. Progressive evolution of a fault-related fold pair from growth strata geometries, Sant Llorenç de Morunys, SE Pyrenees[J]. Journal of Structural Geology, 19(3-4): 413-441.

HE D F, SUPPE J, JIA C Z, 2005. New advances in theory and application of fault-related folding[J]. Earth Science Frontiers, 12(4): 353-364. (in Chinese with English abstract)

HE D F, SUPPE J, 2007. Theory and application of tri-shear fault propagation folding[J]. Earth Science Frontiers, 14(4): 66-73. (in Chinese with English abstract)

HE D F, SHAO D B, KAI B Z, et al., 2019a. Structural style and trap distribution in Majiatan area on the western margin of ordos basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(1): 219-235. (in Chinese with English abstract)

HE D F, LU R Q, HUANG H Y, et al., 2019b. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 993-1006. (in Chinese with English abstract)

HUANG D F, JIANG M L, SHAO M J, et al., 2020. Structural style and evolution of northern piedmont belt in Turpan-Hami basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41(6): 651-657. (in Chinese with English abstract)

JAMISON W R, 1987. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes[J]. Journal of Structural Geology, 9(2): 207-219.

JU W, HOU G T, ZHANG B, 2014. Insights into the damage zones in fault-bend folds from geomechanical models and field data[J]. Tectonophysics, 610: 182-194.

KHALIFEH-SOLTANI A, ALAVI S A, GHASSEMI M R, et al., 2023. Stress and strain evolution in fault-related folds: insights from 2D geomechanical modelling[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1249446.

KING HUBBERT M, RUBEY W W, 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting[J]. GSA Bulletin, 70(2): 115-166.

LI B L, SUN Y, ZHU W B, et al., 2001. Study on the layer-slip parameter systems in the eastern Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 23(1): 29-33. (in Chinese with English abstract)

LI Y, HOU G T, HARI K R, et al. , 2018. The model of fracture development in the faulted folds: the role of folding and faulting[J]. Marine and Petro-

leum Geology, 89(Pt 2): 243-251.

LIU C L, ZHANG Y Q, ZHANG Y, et al., 2018. Analysis of regional structural cross section of the North and Central Tarim Basin and new insights into paleo-uplift origin[J]. Oil & Gas Geology, 39(5): 1001-1010. (in Chinese with English abstract)

LU H F, JIA D, CHEN C M, et al., 1999. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures[J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 215-221. (in Chinese with English abstract)

MA J, HE D F, ZHANG W K, et al., 2024. Numerical simulation of present-day stress field on the top surface of Ordovician Wufeng Formation shale in the Shilongxia anticline area, Southeast Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geology, 59(3): 792-803. (in Chinese with English abstract)

MA L C, JIANG W, SHI H, et al,2024. The Relationship Between Cenozoic Superimposed Folds and Hydrocarbon Migration in the Gahainanshan Area, Eastern Qaidam Basin, China[J]. Geoscience, 38(05): 1209-1220. (in Chinese with English abstract)

MUKHERJEE S, 2020. Atlas of structural geology[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier: 1-2.

PLOTEK B, GUZMÁN C , CRISTALLINI E, et al. , 2021. Analysis of fault bend folding kinematic models and comparison with an analog experiment[J]. Journal of Structural Geology, 146: 104316.

POBLET J, 2020. Cartographic pattern of terminations of simple, parallel fault-bend folds, fault-propagation folds and detachment folds[J]. Journal of Structural Geology, 138: 104135.

RICH J L, 1934. Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee[J]. AAPG Bulletin, 18(12): 1584-1596.

SCHMALHOLZ S M, PODLADCHIKOV Y Y, BURG J P, 2002. Control of folding by gravity and matrix thickness: implications for large-scale folding[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B1): ETG 1-1-ETG 1-16.

SHAO Y, CHEN W, ZHANG B Y, 2005. Application of the geometry of fault-related folding to the southern Junggar Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 27(1): 26-29. (in Chinese with English abstract)

SHI J, HE D F, BAO H P, et al., 2024. Tectonic analysis of the eastern boundary of Ordos Basin: a case study of northern region of Shilou area[J]. Journal of Palaeogeography, 26(1): 150-164. (in Chinese with English abstract)

SUN C W, LING S X, ZHAO S Y, et al., 2022. Quantitative evaluation of coseismic deformations induced by seismogenic faulting in mining exploration area during the 2018 Xingwen and 2019 Changning earthquakes, Sichuan, China[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 880692.

SUPPE J, 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 283(7): 684-721.

TIAN M N, SUN W, MENG X W, et al., 2016. Research of fault-related folds characteristics in Chishui area, Southeast Sichuan basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(4): 644-651. (in Chinese with English abstract)

TONG H M, ZHANG H X, HOU Q L, et al., 2024. Generalized fracturing activation criteria[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 3-14. (in Chinese with English abstract)

WALDRON J, SNYDER M, 2020. Geological structures: a practical introduction[M]. Edmonton: University of Alberta: 143.

WANG B, WANG W, ZHU L C, et al., 2019. Fault-related fold and its application to Madong fold and thrust belt[J]. Geological Journal of China Universities, 25(2): 268-275. (in Chinese with English abstract)

WANG H C, ZHAO W H, SUN D S, et al., 2012. Mohr-Coulomb yield criterion in rock plastic mechanics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4231-4238. (in Chinese with English abstract)

WANG K, JIA D, LUO L, et al., 2014. Magnetic fabric and finite strain analysis of the Qiongxi fault-bend fold in the southern Longmen mountain[J]. Geological Bulletin of China, 33(5): 629-640. (in Chinese with English abstract)

WANG L, WU Z Y, YIN H W, et al., 2021. Compressional salt structures of salt-bearing sedimentary basins and its significance to hydrocarbon accumulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 136-150. (in Chinese with English abstract)

WANG M M, 2013. Active fault-related folding in the South Longmen Shan fold-and-thrust belt and earthquake hazard risk analysis in the Sichuan basin[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)

WANG R, YIN Y Q, 1981. On the elasto-plastic constitutive equation of engineering rock-like materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 17(4): 317-325. (in Chinese with English abstract)

WANG S J, YAN D P, ZHOU Z C, et al, 2025. Tectonic Characteristics and Evolution of the Qiyueshan Fault in the Xuefengshan Foreland Fold-and-Thrust Belt: Insights from Discrete Element Numerical Simulations[J]. Geoscience, 39(1): 18-30. (in Chinese with English abstract)

WANG X C, 2003. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)

WANG Y J, WEI D T, PAN J G, et al. , 2012. A quantitative modeling method for fault-related fold and its application[J]. Lithologic Reservoirs, 24(4): 99-103, 128. (in Chinese with English abstract)

WU Y Q, JIANG Z S, LIANG H B, et al., 2018. Deformation response of seismogenic faults to the Wenchuan M_S 8.0 earthquake: a case study for the southern segment of the Longmenshan fault zone[J]. Remote Sensing, 10(6): 894.

YANG J H, 2021. Characteristics and genetic mechanism of tectonic deformation in basin-mountain transitional zone: a case study of Sangmuchang Anticline in southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(2): 416-429. (in Chinese with English abstract)

YANG J H, HE D F, ZHANG W K, et al., 2022. Three-dimensional geometry and kinematics of the Changning anticline in the southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 96(4): 1432-1450.

YANG S H, LUO L, MA S J, et al., 2024. Structural deformation and shale gas preservation conditions in the Changning area of the southern Sichuan Basin[J]. Geoscience, 38(6): 1458-1472. (in Chinese with English abstract)

YANG X Q, CHEN W, YU Y L, et al., 2020. Finite element simulation of plastic strain distribution characteristics and structural significance of fault turning fold[J]. Chemical Engineering Design Communications, 46(1): 232-233. (in Chinese with English abstract)

YIN L, LUO G, 2018. Crustal deformation across the Longmen Shan fault

zone from finite element simulation of seismic cycles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(4): 1238-1257. (in Chinese with English abstract)

YUAN J, ZHU S B, 2014. FEM simulation of the dynamic processes of fault spontaneous rupture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 138-156. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B L, ZHU G, JIANG D Z, et al., 2009. Numerical modeling and formation mechanism of the eastern Sichuan jura-type folds[J]. Geological Review, 55(5): 701-711. (in Chinese with English abstract)

ZHANG R Q, ZHAN X Y, 1990. Nonlinear finite element analysis[M]. Chongqing: Chongqing University Press. (in Chinese)

ZHANG Y K, SUPPE J, JIA D, et al., 2005. Geometric forward modeling of generalized " fault-bend folding" [J]. Geological Journal of China Universities, 11(4): 608-616. (in Chinese with English abstract)

ZHUANG Z, YOU X C, LIAO J H, et al. , 2009. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)

ZU K W, ZENG L B, ZHAO X Y, et al., 2014. Discussion on development models of the shearing fractures in fault bend folds[J]. Journal of Geomechanics, 20(1): 16-24. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

柏东良，2014. 基于摩尔库伦准则的球壳自重应力弹塑性分析[J]. 价值工程，33(32)：316-318.

蔡振忠，黄少英，王月然，2011. 断层转折褶皱角度参数关系的一种几何学分析方法[J]. 北京大学学报(自然科学版)，47(4)：684-688.

陈槚俊，何登发，孙方源，等，2018. 温宿凸起构造几何学与运动学特征[J]. 新疆石油地质，39(3)：318-325.

陈剑，卢华复，王胜利，2002. 库车断层相关褶皱的切角检验[J]. 地质论评，48(1)：74-79.

陈剑，卢华复，于景宗，等，2005. 断层相关褶皱的几何学模型及其应用[J]. 地球学报，26(1)：89-92.

何登发，SUPPE J，贾承造，2005. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. 地学前缘，12(4)：353-364.

何登发，SUPPE J，2007. 三角剪切断层传播褶皱作用理论与应用[J]. 地学前缘，14(4)：66-73.

何登发，邵东波，开百泽，等，2019a. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报，40(1)：219-235.

何登发，鲁人齐，黄涵宇，等，2019b. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发，46(5)：993-1006.

黄蝶芳，姜萌蕾，邵满军，等，2020. 吐哈盆地北部山前带构造样式及演化特征[J]. 新疆石油地质，41(6)：651-657.

李本亮，孙岩，朱文斌，等，2001. 川东地区层滑参数系统研究[J]. 西南石油学院学报，23(1)：29-33.

刘长磊，张艺琼，张永，等，2018. 塔北-塔中区域构造地质大剖面解析及古隆起成因新解[J]. 石油与天然气地质，39(5)：1001-1010.

卢华复，贾东，陈楚铭，等，1999. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘，6(4)：215-222.

马佳，何登发，张伟康，等，2024. 川东南石龙峡背斜区奥陶系五峰组页岩顶面现今应力场数值模拟研究[J]. 地质科学，59(3)：792-803.

马立成，江万，施辉，等，2024. 柴达木盆地东部尕海南山地区新生代叠加褶皱与油气运移[J]. 现代地质，38(05)：1209-1220.

邵雨，陈伟，张伯友，2005. 断层相关褶皱理论在准噶尔盆地南缘山前带构造研究的应用[J]. 地球科学与环境学报，27(1)：26-29.

石婧，何登发，包洪平，等，2024. 鄂尔多斯盆地东部边界的构造学分析：以石楼北地区为例[J]. 古地理学报，26(1)：150-164.

田梦娜，孙玮，孟宪武，等，2016. 川东南赤水地区断层相关褶皱特征分析[J]. 桂林理工大学学报，36(4)：644-651.

童亨茂，张宏祥，侯泉林，等，2024. 广义破裂活动准则[J]. 地质力学学报，30(1)：3-14.

王斌，汪伟，朱礼春，等，2019. 断层相关褶皱在塔里木盆地玛东地区的应用[J]. 高校地质学报，25(2)：268-275.

王红才，赵卫华，孙东生，等，2012. 岩石塑性变形条件下的 Mohr-Coulomb 屈服准则[J]. 地球物理学报，55(12)：4231-4238.

王开，贾东，罗良，等，2014. 龙门山南段邛西断层转折褶皱磁组构及其有限应变[J]. 地质通报，33(5)：629-640.

王莉，吴珍云，尹宏伟，等，2021. 含盐沉积盆地挤压盐构造及其对油气成藏的意义[J]. 地质科技通报，40(5)：136-150.

王毛毛，2013. 龙门山南段活动断层相关褶皱与四川盆地地震灾害风险分析[D]. 南京：南京大学.

王仁，殷有泉，1981. 工程岩石类介质的弹塑性本构关系[J]. 力学学报，17(4)：317-325.

王帅杰，颜丹平，周志成，等，2025. 基于离散元数值模拟的雪峰山前陆褶皱冲断带齐岳山分界断裂性质与形成过程[J]. 现代地质，39(1)：18-30.

王勖成，2003. 有限单元法[M]. 北京：清华大学出版社.

王彦君，魏东涛，潘建国，等，2012. 一种断层相关褶皱定量建模的方法及应用[J]. 岩性油气藏，24(4)：99-103，128.

杨金赫，2021. 盆-山转换带构造变形特征及成因机制：以四川盆地东南部桑木场背斜为例[J]. 石油与天然气地质，42(2)：416-429.

杨少航，罗良，马诗杰，等，2024. 川南长宁地区构造变形特征及对页岩气保存条件的影响[J]. 现代地质，38(6)：1458-1472.

杨晓强，陈伟，余养里，等，2020. 断层转折褶皱塑性应变分布特征及构造意义的有限元模拟[J]. 化工设计通讯，46(1)：232-233.

尹力，罗纲，2018. 有限元数值模拟龙门山断裂带地震循环的地壳变形演化[J]. 地球物理学报，61(4)：1238-1257.

袁杰，朱守彪，2014. 断层自发破裂动力过程的有限单元法模拟[J]. 地球物理学报，57(1)：138-156.

张必龙，朱光，JIANG D Z，等，2009. 川东"侏罗山式"褶皱的数值模拟及成因探讨[J]. 地质论评，55(5)：701-711.

张汝清，詹先义，1990. 非线性有限元分析[M]. 重庆：重庆大学出版社.

张逸昆，SUPPE J，贾东，等，2005. 广义"断层转折褶皱"的几何学正演数值模拟[J]. 高校地质学报，11(4)：608-616.

庄茁，由小川，廖剑晖，等，2009. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京：清华大学出版社.

祖克威，曾联波，赵向原，等，2014. 断层转折褶皱剪切裂缝发育模式探讨[J]. 地质力学学报，20(1)：16-24.