

三角剪切断层传播褶皱应变分布

张伟康,何登发

[中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083]

摘要:三角剪切断层传播褶皱是褶皱-冲断带重要的构造样式和圈闭类型,通过研究构造变形几何特征与应变分布规律可探讨其成因机制。采用修正的满足速度连续性和应变相容性的三角剪切带速度分布模型,使用柯西方程计算三角剪切带内瞬时应变速率,分析其应变差异分布;使用 MATLAB 软件对三角剪切断层传播褶皱进行正演模拟,获得不同参数影响下褶皱的几何形态与累积应变分布特点,根据应变分布特征探讨可能的断层传播模式。结果表明:三角剪切带在断层端点前方区域存在应变集中,断层端点邻近区域变形强烈,将导致断层端点向前传播,应变随远离断层端点迅速衰减,岩层以褶皱形式协调变形;影响三角剪切断层传播褶皱应变分布的参数为三角剪切角与 P/S 比值。三角剪切角决定了褶皱宽度,剪切角越小,褶皱愈紧闭,应变也愈强烈; P/S 比值影响着卷入变形的地层范围与累计应变的时间。高 P/S 比值时,断层迅速传播,地层变形微弱;低 P/S 比值时,地层累计变形时间长,变形强烈,断层下盘向斜构造明显发育,出现地层增厚的现象。

关键词:三角剪切;应变相容;应变分布;应变集中;断层;构造样式;褶皱-冲断带

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Strain distribution of tri-shear fault propagation folding

Zhang Weikang, He Dengfa

[School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The tri-shear fault propagation fold is an important type of structural pattern and trap of fold-thrust belts. Its genetic mechanism can be explored by studying the characteristics of structural deformation geometry and strain distribution patterns. Based on improved tri-shear velocity distribution model which meets the requirements of divergence-free velocity field and strain compatibility, the instantaneous strain rate within the tri-shear zone was worked out, and in turn its strain difference distribution was analyzed. The forward modeling of the tri-shear fault propagation folds was performed with MATLAB software to obtain the geometry and cumulative strain distribution of folds under the influence of various parameters. Subsequently, the possible fault propagation modes were discussed according to the strain distribution. The results show that (1) the predicted strain concentrates directly in the region near the fault tip and serious deformation occurs in the adjacent areas of the fault tip, causing the forward propagation of the tip, so the strain attenuates sharply with increasing distance from the tip, and rocks fold accordingly; (2) The parameters affecting the strain distribution of tri-shear fault propagation folds are the apical angle of the tri-shear model and the ratio of P/S . The width of the fault propagation fold is directly controlled by the apical angle; with the decrease of the apical angle, the deformation zone becomes tighter and the strain grows stronger; while the P/S ratio affects the extent of strata involved in deformation and the cumulative strain time. When the ratio is high, the fault propagates fast and there is no significant internal deformation within the tri-shear zone, but when the ratio is low, beds have sufficient time to accumulate strain and deform before being cut by fault and result in pronounced synclines on the downthrown side of the fault and bed thickening.

Key words: tri-shear, strain compatibility, strain distribution, strain concentration, fault, structural style, fold-thrust belt

褶皱与断层作为构造地质学中最典型的构造样式,二者常常出现在同一构造单元中,且具有密切的成

因联系与伴生关系。Suppe^[1]、Suppe 和 Medwedeff^[2]假设参与变形的地层依照面积守恒、层厚不变等原则,

收稿日期:2018-05-03;修订日期:2018-07-06。

第一作者简介:张伟康(1994—),男,硕士研究生,含油气盆地构造解析。E-mail:zhangwk_cugb@163.com。

基金项目:国家油气重大专项(2017ZX05036-003-005)。

使用平行膝折褶皱作用建立了以尖棱状褶皱或箱状褶皱为特点的断层转折褶皱和断层传播褶皱的几何学与运动学模型,首次定量表征了前陆褶皱-冲断带中褶皱形态与断层样式之间的几何关系与成因联系^[3]。但前陆褶皱-冲断带中还广泛发育着如图1所示的变形样式,褶皱样式不再遵循平行褶皱原则,具有光滑而连续的转折端,褶皱两翼呈现出明显的不对称性,前翼狭窄、陡峭甚至倒转,而后翼宽缓;地层连续变形,不发育统一的倾角域,地层出现增厚或减薄现象;断层下盘卷入变形,发育与断层上盘背斜成对出现的向斜构造;断层终止于褶皱核部,褶皱也随着趋向于断层,样式更趋紧闭^[13-15]。这种构造样式更加明确地显示出褶皱与断层之间具有密切的成因联系^[14,16-18]。

为了描述此类褶皱与断层的几何关系,Erslev提出了“三角剪切断层传播褶皱”的概念并初步建立了相关的几何学与运动学模型^[19]。在此模型中,断层端点前方变形不再为轴面控制,而是将褶皱变形限定于一个向上变宽的三角形连续剪切变形带内,三角形顶点固定在断层端点,此变形带随着断层端点的向前传播也不断向前迁移,从而形成光滑的褶皱转折端和更

复杂的变形特征^[19-20]。

为了定量描述三角剪切变形带内的变形过程,建立更完善的三角剪切运动学模型,许多学者通过具体描述参与变形的标志点速度的连续变化,建立三角剪切带速度场,进一步实现对位移场的模拟,从而完成三角剪切断层传播褶皱的正演和反演的数值模拟。Hardy和Ford建立了三角剪切带的速度模型,提出了断层三角剪切带内褶皱形态受控于断层传播量和断层滑动量之比(P/S)^[21];Hardy和McClay使用粘土对三角剪切断层传播模型展开构造物理模拟实验,对模型进行合理性检验,同时表明此模型还可应用于正断层传播褶皱几何形态的正演模拟^[22-24];Zehnder和Allmendinger基于三角剪切带内参与变形的地层面积守恒,提出了二维速度场连续性方程,并以此为基础描述了非线性变化的速度场特征^[25];Cristallini和Allmendinger、Cardozo分别将二维速度场描述方法拓展到三维空间,在三维速度场连续性方程基础上,进行了三角剪切断层传播褶皱三维空间中的几何特征描述与运动学模拟^[26-28]。

三角剪切带内满足物质连续性的速度分布模式的确立,明确了标志点间相对位置的变化,使得褶皱变形

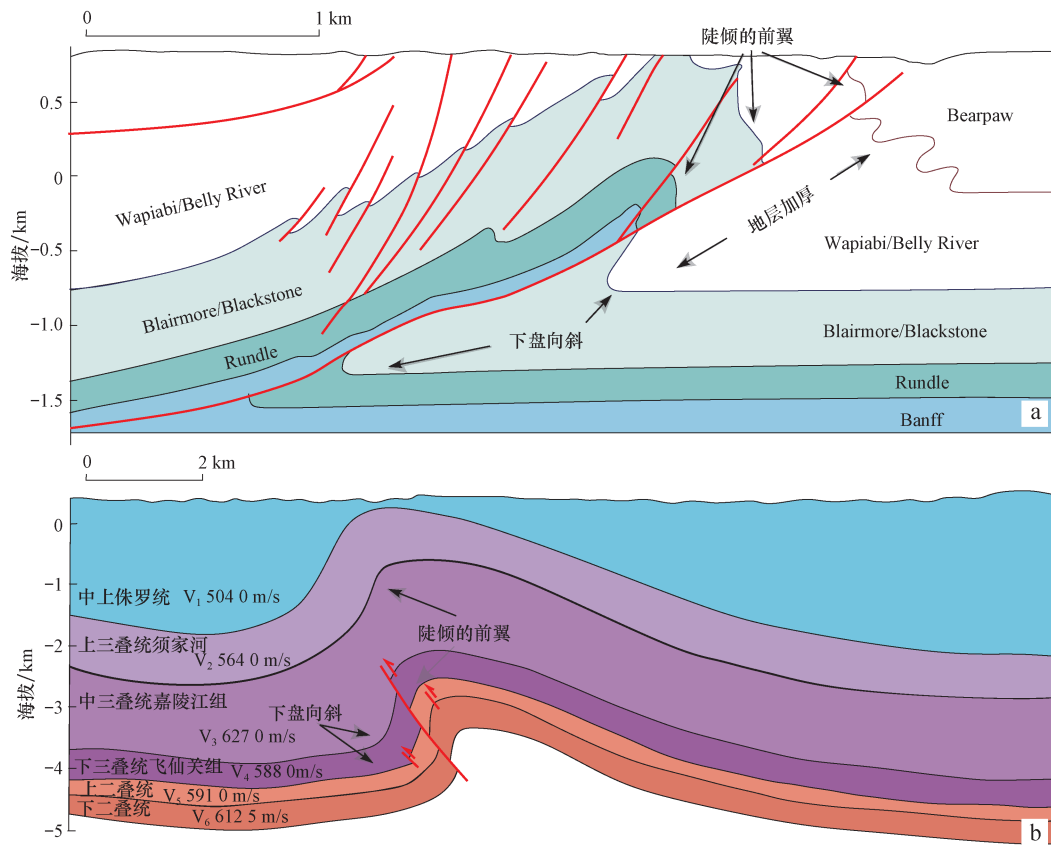


图1 典型的三角剪切断层传播褶皱

Fig. 1 Typical tri-shear fault propagation folds

a. 加拿大落基山脉 Turner Valley 背斜剖面^[4-7]; b. 四川盆地卧龙河背斜地质模型^[8-12]

过程中应变分布的定量表征成为可能^[29-32]。这是对平行膝折褶皱作用的重要补充,使用速度连续变化的三角剪切模型可以解决膝折带褶皱模型中地层经活动轴面时运动方向突变的问题^[30]。这如同将控制膝折带变形的轴面“打开”,可以进一步观察岩层经轴面时速度连续变化的细节和应变分布的特征,进而为变形区裂缝预测与次级断裂的发育提供研究思路与手段^[33-34]。

本文采用 Jin 和 Groshong 改进的满足面积守恒的非线性三角剪切带速度分布模式^[23],应用柯西方程计算三角剪切带内的瞬时应变速率,讨论三角剪切带内应变分布规律,并借助 MATLAB 软件大量的功能函数和强大的数据处理能力,实现对三角剪切断层传播褶皱的正演模型的开发,并分别进行不同三角剪切角和断层传播量和滑移量之比(P/S)条件下的正演模拟,反映断层生长与褶皱变形过程中构造几何特征随时间的变化规律;通过不同阶段三角剪切带内应变椭圆形态变化,反映褶皱发育过程中断层前翼应变的分布差异,讨论三角剪切角与断层传播量和滑移量之比(P/S)对三角剪切断层传播褶皱形态与应变分布的影响。

1 三角剪切带速度场模型

三角剪切断层传播褶皱模型的基本几何学模型如图2所示,三角剪切带固定于断层端点前方,上盘岩层沿断层面作刚体运动,速度为 v_0 ,经三角剪切带上盘边界后逐渐地非线性减少,于下盘边界趋于0,具有整体内部连续变形特征。因此,须建立固定坐标系 $\zeta O\eta$ 描述断层端点的向前传播,其坐标原点为起始断层端点,

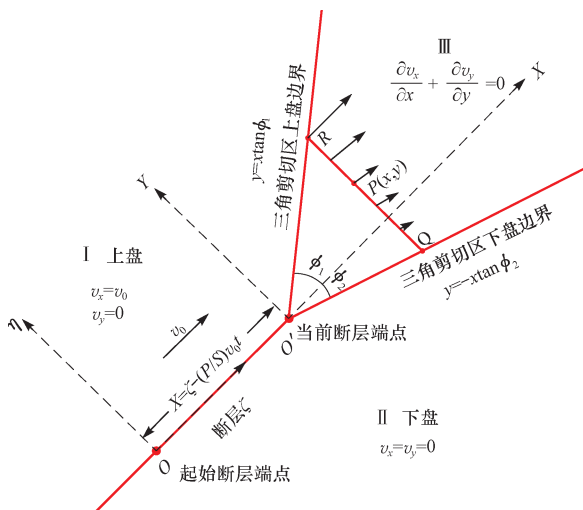


图2 三角剪切区速度分布模型及坐标系

Fig. 2 Velocity distribution model of the tri-shear zone and its coordinate system used in the text

和以当前断层端点为原点的 $XO'Y$ 活动坐标系, ζ 轴、 X 轴均与断层延伸方向一致。三角剪切带沿 X 轴被分为 ϕ_1 、 ϕ_2 ,二者在构造物理模拟实验和天然的褶皱形态中,常具有非对称的特点^[35]。

断层端点附近速度场可分为3个区,Ⅰ区、Ⅱ区速度为常量,Ⅰ区位于断层上盘,平行于断层面呈刚体运动;Ⅱ区位于断层下盘,处于静止状态;Ⅲ区处于断层端点前三角剪切带内,岩层连续,无明显破裂,为协调Ⅰ区和Ⅱ区差异运动而表现出围绕断层端点的褶皱变形,速度表现为由上盘边界向下盘边界发生旋转并且逐渐减小,最终趋于零,其速度场可表示为:

$$v(x, y) = v_x(x, y) \vec{i} + v_y(x, y) \vec{j} \quad (1)$$

式中: $\vec{i}$ 与 $\vec{j}$ 分别为 X 与 Y 方向的单位向量,断层上盘速度可表示为 $v = v_0 \vec{i}$,下盘为 $v = 0$,其边界条件为:

$$v_x = v_0; \quad v_y = 0; \quad y = x \tan \phi_1 \quad (\text{上盘边界}) \quad (2)$$

$$v_x = v_y = 0; \quad y = -x \tan \phi_2 \quad (\text{下盘边界}) \quad (3)$$

三角剪切断层传播褶皱主要发育在脆韧性过渡带之上,变形过程中无明显的物质迁移转化,在二维剖面中,假设岩层仅在平面内发生运动,那么在三角剪切带内将满足物质守恒;若岩层不可压缩,则满足面积守恒,由此可得,三角剪切带内速度场散度 $\text{div}(v)$ 为零,即三角剪切带速度的连续性方程为:

$$\text{div}(v) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

满足式(4)速度连续性方程的速度分布有很多种,但并非所有的速度分布都符合具有复杂岩石力学性质的岩层在构造应力作用下真实的变形过程^[35]。当假设 v_x 呈幂函数形式时,模拟得到的褶皱样式能与构造模拟实验和天然的三角剪切传播褶皱较好匹配^[36],且形式简单,可视为褶皱形态的一级近似。目前,在常用的构造模拟软件如Midland Valley发行的MOVE商业软件、康乃尔大学Rick Allmendinger编写的Fault-Fold-Forward软件在三角剪切断层传播褶皱模块均采用这样的算法,本文采用的是上述软件算法基础上Jin和Groshong提出的改进算法,此算法的优点在于可描述关于 X 轴非对称的三角剪切区速度分布特征,并明确了决定 v_x 分布方式的参数 r 的表达式。三角剪切带内 v_x 的幂函数的一般形式为:

$$v_x = v_0 \left(1 - \frac{L_{PR}}{L_{QR}} \right)^{\frac{1}{r}} = v_0 \left[\frac{y - m_2 x}{(m_1 - m_2)x} \right]^{\frac{1}{r}} \quad (5)$$

式中: L_{PR} 、 L_{QR} 为 PR 、 QR 之间的距离, m_1 、 m_2 为 $\tan \phi_1$ 、 $\tan \phi_2$;参数 r 用于表征 v_x 的分布特征,当 $r = 1$ 时, v_x 将关于 y 呈线性减小,随着 r 的增大,速度将呈

非线性变化, v_x 的梯度将随着 x 的增大而增大, 如图3所示。联立式(4)和式(5), 并对 dv_y 不定积分, 考虑边界条件, 可得:

$$v_y = v_x \left[\frac{y - m_1 x}{(r + 1)x} \right] \quad (6)$$

$$r = -m_1/m_2 \quad (7)$$

由此, 影响三角剪切带速度场分布的主要参数为三角剪切角($\phi_1 + \phi_2$), 其速度场以矢量形式表示为:

$$v(x, y) = v_0 \left[\frac{y - m_2 x}{(m_1 - m_2)x} \right]^{\frac{1}{r}} \left[\vec{i} + \frac{y - m_1 x}{(r + 1)x} \vec{j} \right] \quad (8)$$

在三角剪切断层传播褶皱模型中, 因三角剪切带将随断层端点的向上传播而不断迁移, 这将导致不断有断层端点前方岩层卷入变形, 也将有岩层退出三角剪切带的变形域, 由三角剪切带下盘边界退出变形区的岩层将保持静止, 由上盘边界退出变形区的岩层将平行于断层作刚体平移。由此可见, 断层端点的传播方式将直接决定卷入变形的岩层范围与变形区内岩层的累计变形时间。因此, 还需建立 $\zeta O\eta$ 固定坐标系与 $XO'Y$ 活动坐标系之间的关系:

$$\begin{cases} x = \zeta - P = \zeta - (P/S)v_0 t \\ y = \eta \end{cases} \quad (9)$$

式中: P 即为断层端点的传播量, 为断层最大断距; S 为岩层沿断层滑移量, 可表示为, $S = v_0 t$ 。在使用地震剖面进行构造解释时, 大型断层位置处与强变形带资料信噪比往往较低, 同相轴反射连续性差, 使得断层端点传播量的估算误差较大, 而滑移量却可以通过构造反演、使用平衡剖面技术得到较为准确的估算。因此, 在构造正演模拟过程中设置 P/S 值与滑移量(S)以估

算断层端点传播量(P), 减少误差。

以初始相互平行的标志点来模拟未变形的水平岩层, 通过追踪这些标志点在式(8)与式(9)速度场控制下的瞬时速度分布特征, 对速度进行时间积分, 或对微小时间间隔内标志点位移进行累加, 可以模拟得到断层端点前方产生的褶皱形态。图4显示了在断层倾角为 45° , 滑移量 $S = 0.16$, $P/S = 1.5$, $\phi_1 = 40^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$ 条件下, 地层标志点速度矢量图与三角剪切带褶皱变形的叠加, 三角剪切带内速度不仅减小, 方向发生旋转, 而且由于 $r > 1$, 在经过 X 轴后, 其速度变化更为迅速。

2 三角剪切带应变分布

在三角剪切带模型中, 岩层无显著的体积变化, 即变形前后, 岩层均连续变形。变形过程中, 位移亦为连续分布, 由此可以认为应变也应是连续的、相容的, 其应变应满足应变相容方程为:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (10)$$

否则, 将出现岩层的破裂或嵌入现象。这是连续变形的构造模型应满足的必要条件, 可以作为检验模型合理性的标准之一。膝折带褶皱模型的缺陷即通过轴面的岩层速度大小不变、方向瞬间改变, 在轴面处岩层变形强烈, 但两侧均无应变, 应变不连续, 这也使得该模型无法描述岩层褶皱过程中的应变分布。而三角剪切模型相较于平行膝折褶皱作用的优势体现在岩层速度变化更为连续, 使得断层端点前方褶皱形态更为光滑, 变形也更为连续。

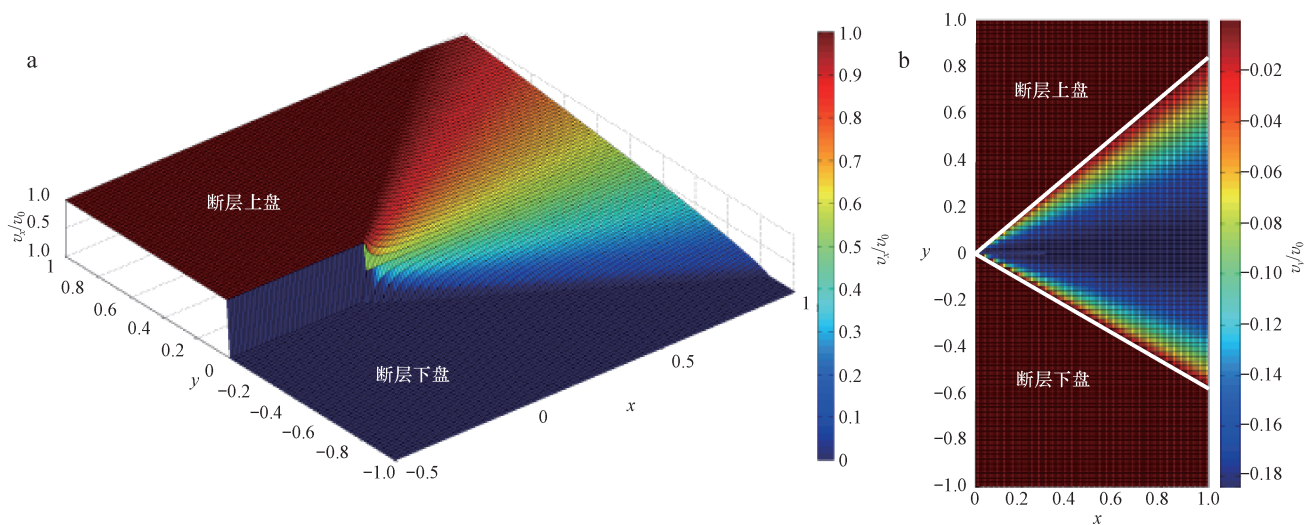


图3 三角剪切区速度分布($\phi_1 = 40^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$)

Fig. 3 Velocity distribution in the tri-shear zone($\phi_1 = 40^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$)

a. v_x 分布; b. v_y 平面分布

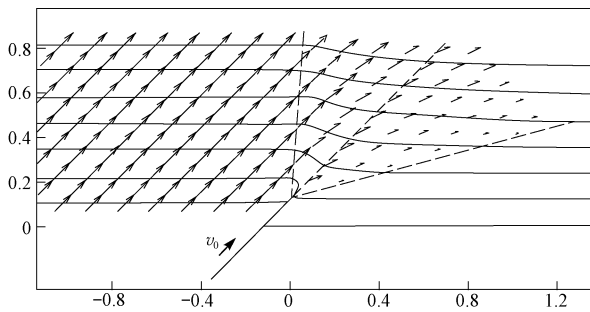


图4 地层速度矢量与褶皱变形的叠合

Fig. 4 Velocity vectors for the asymmetric v_x field and related deformation

当模型中速度分布确定后,各质点间相对位移确定,进而可应用柯西方程描述三角剪切带内瞬时变形特征,包括沿活动坐标系坐标轴方向的线应变速率和剪应变速率。若已知变形持续时间,即可计算三角剪切带累计应变变量。

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = v_0 \frac{m}{r(m_1 - m_2)x} \left[\frac{m - m_2}{(m_1 - m_2)x} \right]^{\frac{1}{r}-1} \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} = -v_0 \frac{m}{r(m_1 - m_2)x} \left[\frac{m - m_2}{(m_1 - m_2)x} \right]^{\frac{1}{r}-1} \quad (12)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) = \frac{v_0}{2r} \frac{1 - m^2}{(m_1 - m_2)x} \left(\frac{m - m_2}{m_1 - m_2} \right)^{\frac{1}{r}-1} \quad (13)$$

式中: $m = \tan(\gamma/x)$; $m = \tan(\gamma/x)$; $\dot{\varepsilon}_x$ 和 $\dot{\varepsilon}_y$ 分别为沿 X 和 Y 轴方向的线应变速率; $\dot{\gamma}$ 为剪应变速率。从剪应变与线应变速率的表达式可以观察到, $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\gamma}$ 在三角剪切带内具有连续分布特点,分布均受因子“ $1/x$ ”的影响明显,这意味着其在断层端点附近存在着显著的应变集中,且会在断层端点处出现应变的奇异点。图5与图6显示了 $v_0 = 1$, $\phi_1 = 40^\circ$ 和 $\phi_2 = 30^\circ$ 时,三角剪切带内的剪应变速率分布,剪应变速率关于 X 轴并非均匀分布,而是偏向于断层下盘位置,在断层端点周围应变最为强烈,出现应变集中,随着逐渐远离断层端点,应变迅速衰减,这与经典弹性理论中在无限长裂隙在端点处在应力作用下应力集中,趋于无穷大,构成应力奇异性存在相似性。在断层端点附近由于应变集中程度很高,岩层变形强烈,导致岩层损伤、裂隙开始发育、扩展、组合,形成宏观破裂面,最终使得岩层破裂,断层端点向前传播,但由于应变速率迅速衰减,使得高应变速率区分布范围相当有限,使得断层端点前方岩层的在低应变速率下以褶皱变形方式协调变形。

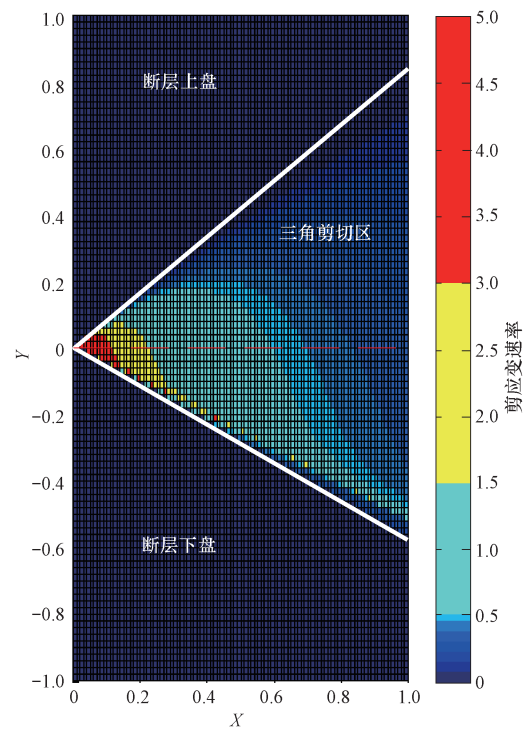
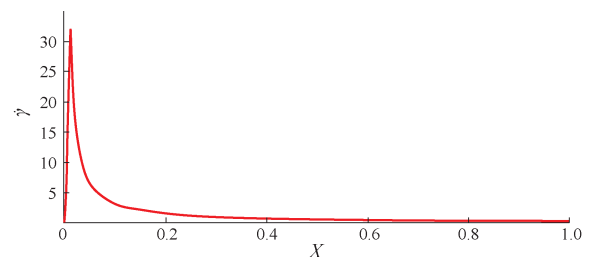


图5 三角剪切带剪应变速率分布

Fig. 5 Distribution of shear strain rates in the tri-shear zone

($\phi_1 = 40^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$, $v_x = 1$; X 轴位置粉色虚线为图6的位置。)

图6 沿 X 轴剪应变速率分布Fig. 6 Distribution of shear strain rates along Axis X

3 讨论

3.1 三角剪切角对褶皱几何形态和应变的影响

为反映参数变化对三角剪切模型褶皱变形与应变的影响,研究采用控制变量法,对同一断层设置不同的三角剪切角,断层倾角 45° , $P/S = 0.5$, $r = 1.5$,三角剪切角分别为 20° , 40° 和 60° ,在相同滑移量下,其变形特征如图7所示。

从模拟结果可以看到三角剪切角的大小直接决定了断层端点前方褶皱的宽度。若三角剪切角较小,在狭小的变形域内,为协调变形,地层须更强烈的旋转,其褶皱翼部陡峭;在相同滑移量下,随着三角剪切角的

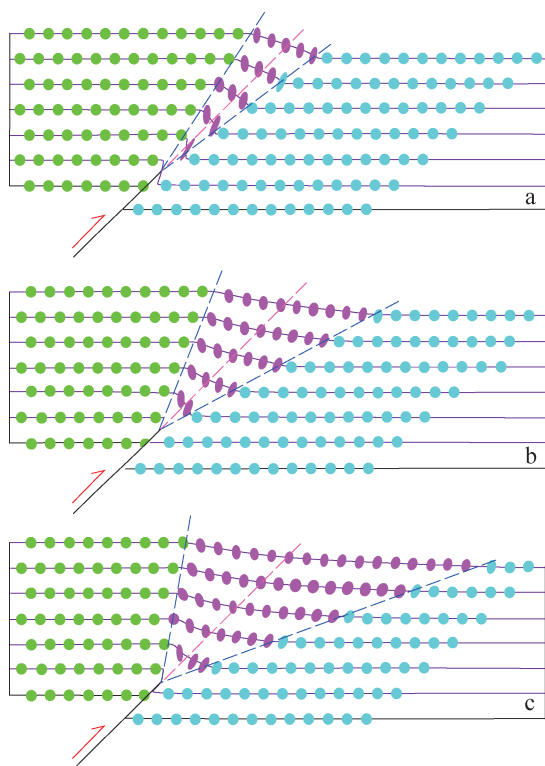


图7 不同三角剪切角褶皱形态和应变分布

Fig. 7 Fold geometry and strain distribution for varying tri-shear apical angles

a, b, c 分别对应断层三角剪切角为 20° , 40° , 60°

增加,卷入变形的地层范围迅速增加,褶皱更为开阔、平缓;在断层附近应变椭圆长轴逐渐趋向于平行断层的方向,在断层端点变形最强,出现地层增厚的现象,应变逐渐向外减弱。

3.2 断层传播量/断层滑动量比值(P/S)的影响

为表明 P/S 值的变化对三角剪切断层传播褶皱形态与应变的影响,分别对同一断层,倾角 45° ,三角剪切角 60° , $r=1.50$,进行 P/S 分别为 0.5 , 2.5 和 5.0 的模拟,其变形特征如图8所示。

当 P/S 很小时,岩层具有充分时间在断层端点前方累积应变,发生显著的旋转和变形,在断层下盘出现明显的向斜构造,地层增厚显著,具有韧性变形特征;随着 P/S 增大,断层端点向上传播速度更快,断层快速切过地层,缩短了应变累积时间,三角剪切带内累计变形减小,使得下盘向斜趋于平缓,地层增厚现象减弱,但在上盘边界开始出现光滑的背斜枢纽;当高 P/S 时,断层端点快速向前传播,迅速形成宏观破裂面,地层无明显增厚、变形,整体上表现出更明显的沿断裂面的块体滑移。

在断层端点周围始终为变形最强烈区域。随着三角剪切带不断向上传播,将不断有岩层从上盘边界与

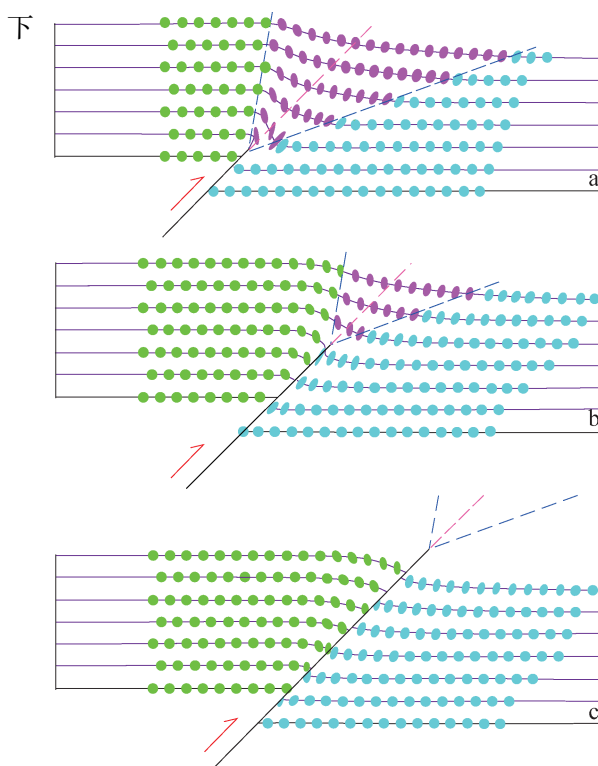
图8 不同 P/S 比值下三角剪切带内褶皱形态和应变分布

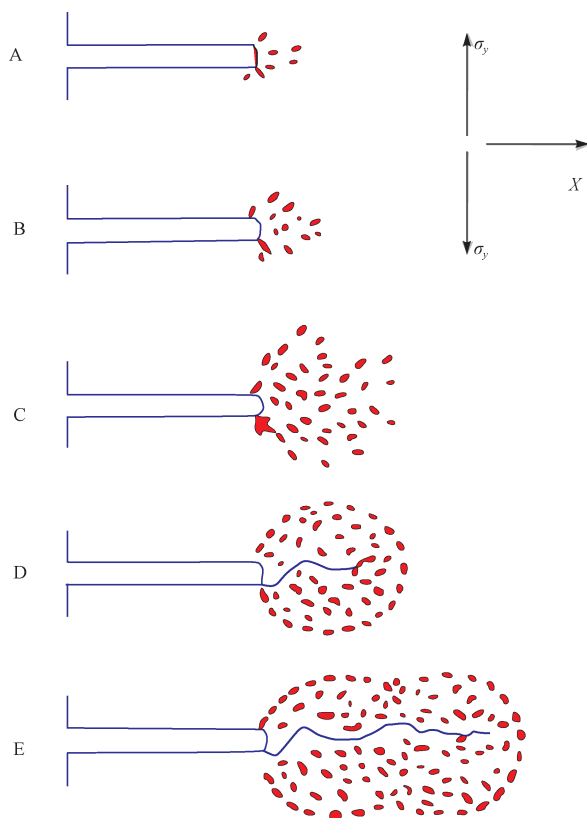
Fig. 8 Effect of different P/S ratios on the fold geometry and strain distribution in the tri-shear zone

a, b, c 分别对应 $P/S=0.5, 2.5, 5.0$

盘边界退出三角剪切带,在断层上盘形成光滑的背斜转折端,在断层下盘的形成向斜,这些构造变形为早期变形特征。围绕着断层两侧,岩层具有递进变形特点。

3.3 断层传播量/断层滑动量比值(P/S)的意义

随着 P/S 的变化,褶皱变形样式发生着变化,断层相关褶皱三端元(滑脱褶皱、断层传播褶皱与断层转折褶皱)可能是 P/S 值由低至高连续变化的结果^[9-10]。在不同的构造环境,相同的滑移量下却能产生不同的断层传播量,这是否意味着 P/S 能够反映不同岩石的宏观变形行为的差异性?考虑模型中断层端点周围区域强烈的应变集中,与岩石断裂力学中裂纹端部的应力集中具有相似的特点,类比岩石断裂力学中裂纹扩展机制讨论断层传播机制。在单晶以及多晶体的微观尺度上,脆性裂纹是原子级尖锐的,裂纹的扩展借助于键的依次断裂来实现;在宏观尺度上,岩石作为多晶多相材料,具有更复杂的结构,其变形过程的形态也更为复杂。在受到平行于断层面方向的剪切作用时,最初在断层端点由于应变集中,在端点前方高应变区形成彼此孤立的微观裂隙,介质仍保持线性性质;进一步加载时,断裂端点应变进一步累加,裂缝密度增加,断裂端部区域呈现非线性性质^[37]。最终,由于非

图9 过程区发展过程及其对宏观裂隙扩张影响示意图^[39]Fig. 9 Development of fracturing zone and its effect on macrofracture expansion^[39]

线性区内的裂隙间扩展、连通从而导致宏观断裂的向前扩展(图9)。在微破裂大量产生的过程中,若存在应力扰动的疲劳作用或孔隙流体的应力腐蚀作用,断裂可能进入失稳扩展状态^[38-39],Andrews表明平面内剪切裂纹的传播速度可接近在相应介质中P波速度^[40-41],如此,则断层传播量将远远大于滑移量。不同的断裂扩展模式,将直接影响到断裂活动时地层变形特征。

4 结论

1) 基于速度连续性方程建立的三角剪切带速度模型,应满足应变相容原理;通过三角剪切带内标志点速度对时间的积分与断层传播量的计算可模拟三角剪切带褶皱变形形态。

2) 采用满足面积守恒与应变相容原理的速度分布模型,使用柯西方程计算三角剪切带内瞬时应变速率,应变在断层端点前方区域存在应变集中,断层端点变形强烈,趋向断层的区域应变椭圆长轴方向发生旋转、与断层趋向一致,应变随远离断层端点迅速衰减。

3) 影响三角剪切断层传播褶皱应变分布的参数

为三角剪切角与 P/S 比值,三角剪切角决定了褶皱宽度,三角剪切角越小,褶皱愈紧闭,应变也愈集中、强烈; P/S 比值影响着卷入变形的地层范围与累计应变的时间,高 P/S 时,断层迅速传播,地层变形小,形成光滑的背斜枢纽;低 P/S 时,地层累计变形时间长,变形强烈,断层下盘向斜构造明显,地层增厚。

参 考 文 献

- [1] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 1983, 283(7): 684-721.
- [2] Suppe J, Medwedeff D A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 1990, 83(3): 409-454.
- [3] 何登发, Suppe J, 贾承造. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 353-364.
He Dengfa, Suppe John, Jia Chengzao. New advances in theory and application of fault related folding[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 353-364.
- [4] Brandenburg J P. Trishear for curved faults[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 53(8): 80-94.
- [5] Allmendinger R W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds[J]. Tectonics, 1998, 17(4): 640-656.
- [6] Gallup W B. Geology of Turner Valley oil and gas field, Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 1951, 35(4): 797-821.
- [7] Tippet C R, Jones P B, Frey F R. Strains developed in the hanging-walls of thrusts due to their slip/propagation rate: a dislocation model: discussion[J]. Journal of Structural Geology, 1985, 7(6): 755-758.
- [8] 唐泽尧, 杨天泉. 卧龙河气田地质特征[J]. 天然气勘探与开发, 1994, 16(2): 1-12.
Tang Zeyao, Yang Tianquan. Geological characteristics of Wolonghe gas field in Sichuan basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1994, 16(2): 1-12.
- [9] 唐泽尧. 四川卧龙河气田地质图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-78.
Tang Zeyao. Geologic atlas of Wolonghe gas field in Sichuan Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry, 1993: 1-78.
- [10] 胡安平, 陈汉林, 杨树峰, 等. 卧龙河气田天然气成因及成藏主要控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 643-649.
Hu Anping, Chen Hanlin, Yang Shufeng, et al. Origin of natural gas and main controlling factors of reservoirs in Wolonghe Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 643-649.
- [11] 农成吉, 程邦荣, 黎洪珍, 等. 运用多学科知识综合解释卧龙河构造陡断带[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 80-82.
Nong Chengji, Cheng Bangrong, Li Hongzhen, et al. Comprehensive interpretation of steep faulted zone of Wolonghe Structural by use of multiple disciplines knowledge [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 80-82.
- [12] 赵从俊, 张健, 沈浩, 等. 川东卧龙河构造形成机制与裂缝分布规律的定量研究[J]. 天然气工业, 1993, 13(6): 1-8.
Zhao Congjun, Zhang Jian, Shen Hao, et al. Quantitative study on the mechanism of forming Wolonghe structure and fracture distribution

- law in East Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, 1993, 13(6): 1–8.
- [13] Bump A P. Reactivation, trishear modeling, and folded basement in Laramide uplifts: Implications for the origins of intra-continental faults[J]. *GSA Today*, 2003, 13(3): 4–10.
- [14] 李一泉, 贾东, 罗良, 等. 川西盐井沟断层传播褶皱的三维构造建模与磁组构分析[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 74–84.
- Li Yiquan, Jia Dong, Luo Liang, et al. Three dimension construction and magnetic fabrics analysis of the Yanjianggou fault-propagation fold in western Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 74–84.
- [15] 贾东, 李一泉, 王毛毛, 等. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 732–740.
- Jia Dong, Li Yiquan, Wang Maomao, et al. Three-dimensional structural geometry of fault-related folds: Examples from 3–D seismic explored blocks in the western Sichuan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 732–740.
- [16] Brandes C, Tanner D C. Fault-related folding: A review of kinematic models and their application[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 352–370.
- [17] Li Y, Jia D, Plesch A, et al. 3–D geomechanical restoration and paleomagnetic analysis of fault-related folds: An example from the Yanjinggou anticline, southern Sichuan Basin[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 54(5): 199–214.
- [18] Allmendinger R W, Zapata T R, Manceda R, et al. Trishear kinematic modeling of structures, with examples from the Neuquén Basin, Argentina[C] // McClay K R. Thrust tectonics and hydrocarbon systems. Tulsa: AAPG Memoir, 2004: 356–371.
- [19] Erslev E A. Trishear fault-propagation folding[J]. *Geology*, 1991, 19(6): 617–620.
- [20] 何登发, Suppe John. 三角剪切断层传播褶皱作用理论与应用[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 66–73.
- He Dengfa, Suppe John. Theory and application of tri-shear fault propagation folding[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 66–73.
- [21] Hardy S, Ford M. Numerical modeling of trishear fault propagation folding[J]. *Tectonics*, 1997, 16(5): 841–854.
- [22] Hardy S, McClay K. Kinematic modelling of extensional fault-propagation folding[J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21(7): 695–702.
- [23] Jin G, Groshong R H. Trishear kinematic modeling of extensional fault-propagation folding[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(1): 170–183.
- [24] Sharp I R, Gawthorpe R L, Underhill J R, et al. Fault-propagation folding in extensional settings: Examples of structural style and synrift sedimentary response from the Suez rift, Sinai, Egypt[J]. *GSA Bulletin*, 2000, 112(12): 1877–1899.
- [25] Zehnder A T, Allmendinger R W. Velocity field for the trishear model[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(8): 1009–1014.
- [26] Cristallini E O, Allmendinger R W. Pseudo 3–D modeling of trishear fault-propagation folding[J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23(12): 1883–1899.
- [27] Cristallini E O, Giambiagi L, Allmendinger R W. True three-dimensional trishear: A kinematic model for strike-slip and oblique-slip deformation[J]. *GSA Bulletin*, 2004, 116(7–8): 938–952.
- [28] Cardozo N. Trishear in 3D. Algorithms, implementation, and limitations[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(3): 327–340.
- [29] Cristallini E O, Allmendinger R W. Backlimb trishear: A kinematic model for curved folds developed over angular fault bends[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(2): 289–295.
- [30] Hardy S, Connors C D. Short note: A velocity description of shear fault-bend folding[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(3): 536–543.
- [31] Ziesch J, Tanner D C, Krawczyk C M. Strain associated with the fault-parallel flow algorithm during kinematic fault displacement[J]. *Mathematical Geosciences*, 2014, 46(1): 59–73.
- [32] Bump A P, Davis G H. Late Cretaceous-early Tertiary Laramide deformation of the northern Colorado Plateau, Utah and Colorado[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(3): 421–440.
- [33] Williams G, Chapman T. Strains developed in the hangingwalls of thrusts due to their slip/propagation rate: A dislocation model[J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(6): 563–571.
- [34] 孙健, 罗兵. 四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 809–819.
- Sun Jian, Luo Bing. Structural deformation and its influences on gas storage in Fuling shale gas play, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 809–819.
- [35] Liu C, Yin H, Zhu L. TrishearCreator: A tool for the kinematic simulation and strain analysis of trishear fault-propagation folding with growth strata[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 49(4): 200–206.
- [36] Johnson K M, Johnson A M. Mechanical models of trishear-like folds[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(2): 277–287.
- [37] 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 等. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 387–393.
- Liu Zhongchun, Lyu Xinrui, Li Yukun, et al. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 387–393.
- [38] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 10–15.
- Li Shiyu, He Taiming, Yin Xiangchu, et al. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 10–15.
- [39] 阿特金森 B K. 岩石断裂力学[M]. 尹祥础, 修济刚, 译. 北京: 地震出版社, 1992: 116–120.
- Barry Kean Atkinson. Fracture mechanics of rock[M]. Yin Xiangchu, Xiu Jigang, Translated. Beijing: Seismological Press, 1992: 116–120.
- [40] Andrews D J. Dynamic plane-strain shear rupture with a slip-weakening friction law calculated by a boundary integral method[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(1): 1–21.
- [41] Andrews D J. Rupture velocity of plane strain shear cracks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(32): 5679–5687.