

与挠曲作用相关的一种特殊裂缝形成机制

董有浦^{1,2,3}, 肖安成^{2,3*}, 吴磊^{2,3}, 毛黎光^{2,3}, 徐波^{2,3}

1. 昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系, 云南昆明 650093

2. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310027

3. 教育部含油气盆地构造研究中心, 浙江杭州 310027

摘要: 浙江省临安市上侏罗统劳村组火山凝灰岩露头中发育了很多与挠曲相关的裂缝, 地层构造简单、露头良好, 为研究与挠曲相关裂缝提供了良好的条件。通过对两处野外露头的精细测量, 发现裂缝面平直、且未被充填, 均为构造裂缝, 在剖面上裂缝的组合呈扇形。裂缝面与岩层面夹角为 $44^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 裂缝密度随着地层厚度的增加而增加。根据裂缝面与层面的交切关系, 将两组裂缝分别命名为: 锐夹角指示邻层相对运动方向的 D 裂缝和锐夹角指示本层相对运动方向的 D' 裂缝。通过对地层挠曲变形的几何分析, 发现两组裂缝的形成是为了调节核部地层在变形过程中产生缩短量和剩余剪切, 地层厚度与地层中产生剩余剪切成正比。结果表明, 地层厚度越大, 形成的裂缝也越多。

关键词: 挠曲相关裂缝; 露头; 几何分析; 形成机制; 构造地质学。

中图分类号: P546

文章编号: 1000-2383(2013)04-0755-08

收稿日期: 2012-10-21

Mechanism of Formation of Special Fold Accommodation Fractures

DONG You-pu^{1,2,3}, XIAO An-cheng^{2,3*}, WU Lei^{2,3}, MAO Li-guang^{2,3}, XU Bo^{2,3}

1. Department of Earth Sciences, Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3. Research Center for the Structures in Oil and Gas Bearing Basin, Ministry of Education, Hangzhou 310027, China

Abstract: To explore the relationship between the formation of fractures and the deformation of strata, fractures data from outcrops in the Upper Jurassic strata of Lin'an are integrated with geometry modeling in this study. It is found that two main type fractures are secondary structures to the fold, which are referred to as fold accommodation fractures in this paper, and named as D and D' fractures respectively. An angle ranging $44^{\circ}\sim 80^{\circ}$ exists between fractures and stratum layers, with D' fracture directing the motion of local layer and D fracture directing the motion of adjacent layer. The fractures formed primarily because of an increase in bed curvature within fold cores. The relationship between fracture density and layer thickness is established on the basis of geometrical analysis of the fold and we find that fractures density is proportional to the layer thickness.

Key words: fold accommodation fractures; outcrop; geometry modeling; mechanism; structural geology.

近年来,很多学者对褶皱构造与裂缝发育的关系做了大量的工作(Silliphant *et al.*, 2002; Florez-Nino *et al.*, 2005; Bellahsen *et al.*, 2006; Mobasher and Babaie, 2008), 褶皱不同部位裂缝发育强度不同(Kajar and Mitra, 2009; Lin *et al.*, 2010; 马庆林等, 2012)、褶皱地层曲率也影响裂缝发育的强度(Fischer and Wilkerson, 2000)。挠曲作为地壳和

表层褶皱变形的表现形式之一,具有不同尺度的作用方式。既有岩石圈尺度的宏观规模,也有地球表层沉积层之内的相对中等的规模,还有露头尺度的微观表现(王海荣等, 2008)。地层挠曲变形如何控制构造裂缝的发育是对裂缝数值模拟的基础,对于刚性岩层而言,岩层在挠曲变形的过程中会形成特定时空分布的构造裂缝(王海荣等, 2008),但这仅是一种

基金项目:“十一五”国家重大科技专项(No. 2008ZX05009-001)。

作者简介:董有浦(1983-),男,博士,主要从事构造地质学研究。E-mail: dongypzju@gmail.com

* 通讯作者:肖安成, E-mail: xiaoanch@zju.edu.cn

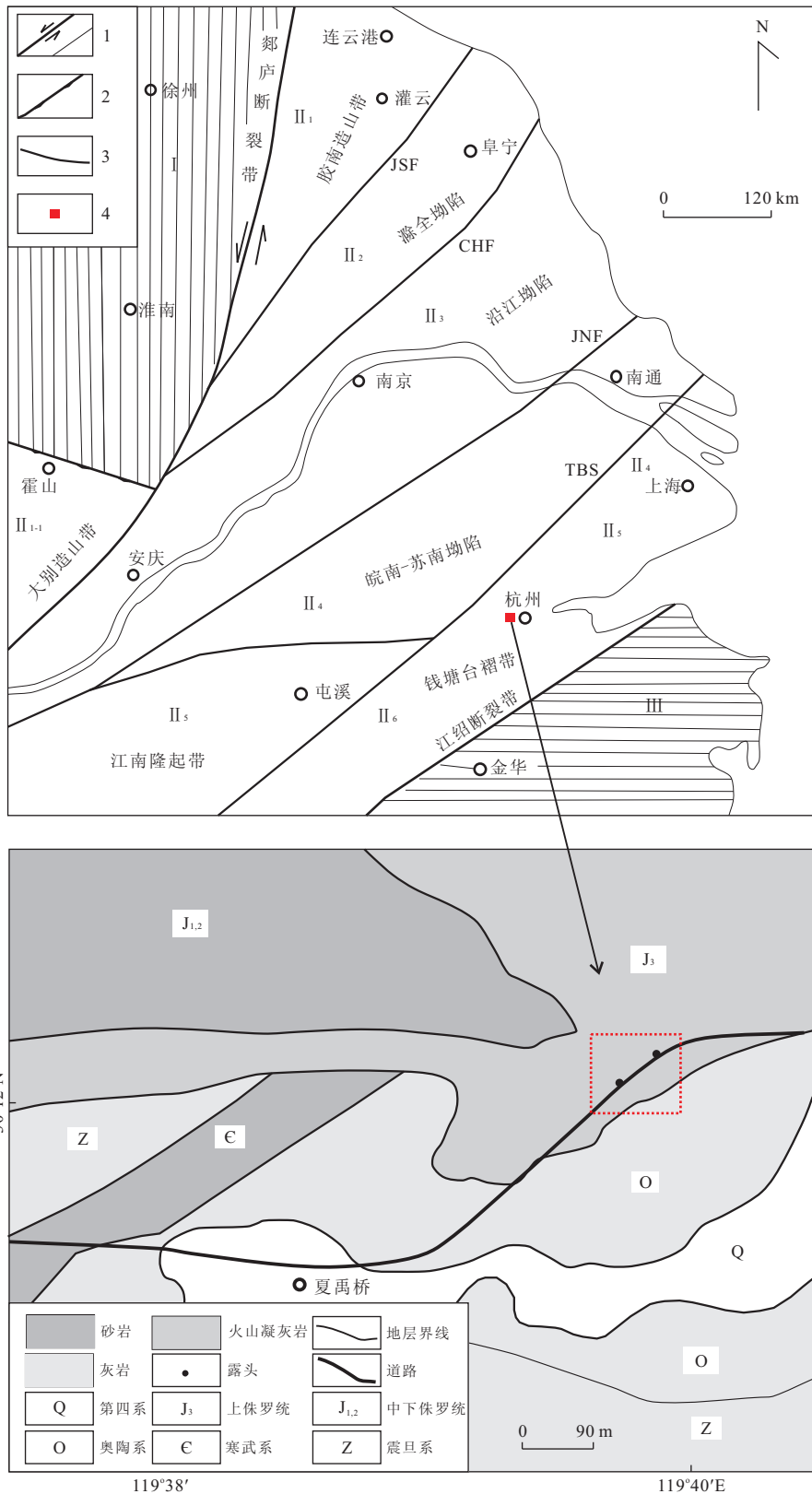


图 1 研究区位置(据朱光等,1999)

Fig. 1 The geological map of study area

I. 华北板块; II. 扬子板块; II₁₋₁. 大别山造山带; II₁. 胶南造山带; II₂. 滁全坳陷; II₃. 沿江坳陷; II₄. 皖南—苏南坳陷; II₅. 江南隆起带; II₆. 钱塘台褶带; III. 华南板块; JSF. 嘉山—响水断裂; CHF. 滁河断裂; JNF. 江南断裂; TBS. 天目山—白际山剪切带, 1. 断裂; 2. 缝合线; 3. 边界断层; 4. 研究区

定性的认识. 本文通过对与挠曲相关裂缝的测量, 详细分析了地层厚度、地层产状、裂缝产状与裂缝密度等的关系, 然后从几何学的角度出发, 分析了地层在挠曲变形过程中产生的剪切作用, 研究挠曲地层发育裂缝的机制.

本文所选取的研究对象为临安市上侏罗统劳村组火山凝灰岩, 属于露头尺度的微观表现. 岩层中发育了很多与挠曲作用相关的裂缝, 地层构造简单、露头良好, 为研究与挠曲作用相关的裂缝提供了良好的条件.

1 野外露头中裂缝的特征

研究区位于浙江省西北部的临安市玲珑镇附近, 区域构造位置处于江绍断裂北部, 属于下扬子地区的次级构造单元——钱塘台褶带(陈沪生, 2002; 叶芳, 2009). 下扬子地区北部边界为嘉山—响水断裂、西部边界为郟庐断裂、南部边界为江绍断裂(图1). 钱塘台褶带北部为江南隆起带和皖南—苏南坳陷, 南部为华南板块, 主要出露震旦系——下古生界, 南侧保留有上古生界, 发育了一系列 EW-NEE 走向, 向北逆冲推覆构造, 如大型的有马金—乌镇断裂、球川—萧山断裂等, 褶皱以侏罗山式为主(朱光等, 1999; 汤济广等, 2012).

研究区岩性为上侏罗统劳村组的火山凝灰岩, 挠曲地层受到燕山晚期(晚侏罗世—早白垩世)

NW-SE 挤压运动、晚白垩世—渐新世 NW-SE 向拉伸运动以及中新世以后的 SW 向挤压应力作用(叶芳, 2009). 挠曲地层中发育了两组裂缝, 其在剖面上的组合呈扇形. 在本研究中, 根据裂缝与岩层层面夹角的关系, 将裂缝面与岩层层面锐角指示邻层相对运动的方向裂缝称为 D 裂缝, 将裂缝面与岩层层面锐角指示本层相对运动方向的裂缝称为 D' 裂缝.

1.1 露头 1 裂缝特征

露头 1 中断面走向为 45° , 地层挠曲变形. 倾角较大一侧地层产状为 $355^\circ \angle 25^\circ$ 、倾角较小的地层产状为 $356^\circ \angle 17^\circ$. 地层厚度为 50 cm(图 2). 挠曲地层中主要有两组裂缝, 两组裂缝走向相同均为 NW 向. 但裂缝倾向不同, 一组裂缝倾向为 NE 向、另一组为倾向为 SW 向, 裂缝面平直且未被充填, 均为构造裂缝; 还有 3 条平行于层面发育的裂缝. 其中, NE 倾向裂缝分布在倾角较大一侧的地层中, 为 D 裂缝, 而 SW 倾向裂缝分布在倾角较小的地层中, 为 D' 裂缝(图 3). D 裂缝面与岩层层面的夹角为 $61.5^\circ \sim 80.0^\circ$, D' 裂缝面与岩层层面的夹角为 $65.0^\circ \sim 78.7^\circ$. 两组裂缝在剖面上的组合呈扇形, 裂缝密度为 12 条/m.

1.2 露头 2 裂缝特征

露头 2 中断面走向为 45° , 地层挠曲变形. 其中, NE 侧地层产状为 $350^\circ \angle 24^\circ$ 、SW 侧地层产状为 $341^\circ \angle 22^\circ$ 、中间地层产状为 $350^\circ \angle 19^\circ$ (图 4). 两侧地层发育两组裂缝, 一组裂缝倾向为 NE 向、另

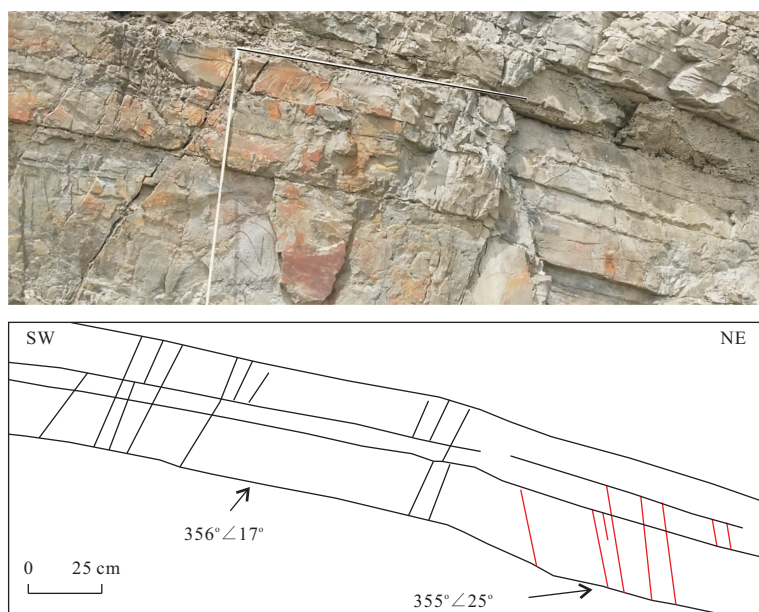


图 2 建德群劳村组挠曲地层野外露头 1 简图

Fig. 2 Map showing the overview of the outcrop1

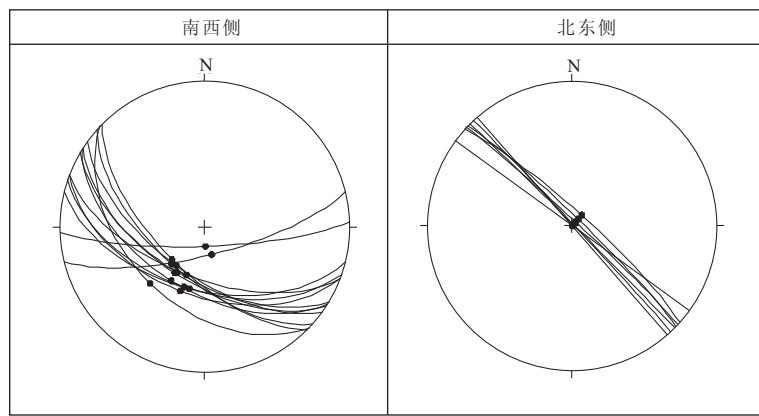


图 3 露头 1 裂缝产状特征(下半球投影)

Fig. 3 Stereographic projection of fractures in outcrop 1

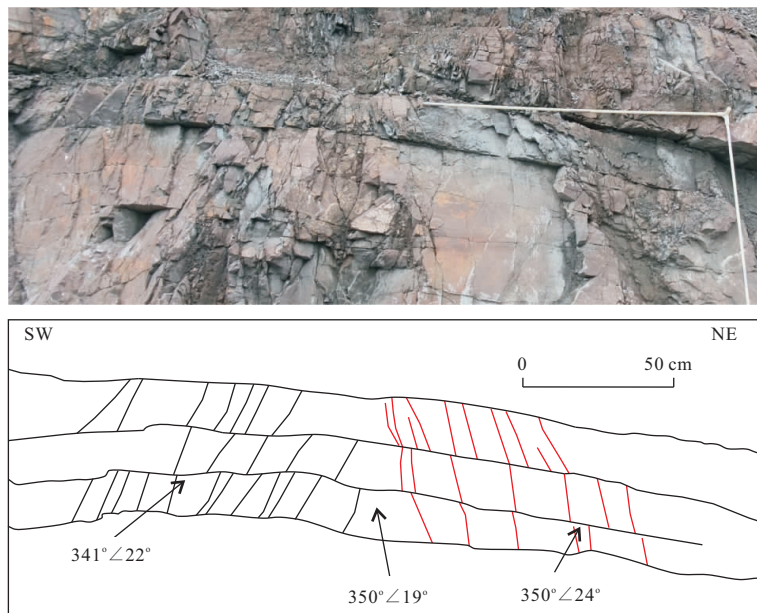


图 4 建德群劳村组挠曲地层野外露头 2 简图

Fig. 4 Map showing the overview of the outcrop 2

一组倾向为 SW 向, 裂缝面平直, 均为充填和为构造裂缝. 其中, NE 倾向裂缝发育在 NE 侧地层中, 为 D 裂缝, 裂缝面与岩层层面的夹角为 $44^{\circ}\sim 66^{\circ}$; 而 SW 倾向裂缝发育在南西侧地层中, 也为 D 裂缝, 裂缝面与岩层层面的夹角为 $46^{\circ}\sim 67^{\circ}$ (图 5). 两组裂缝在剖面上的组合呈扇形. 在露头点上共测量了 3 层地层的厚度, 地层厚度分别为 30、24、25 cm, 其对应的裂缝密度分别为 9、6、7 条/m.

根据对以上两露头点中裂缝的分析, 均未被充填, 所发育的裂缝均为构造裂缝, 在剖面上裂缝的组合呈扇形 (图 2 和图 4). 地层厚度与裂缝密度的统计关系为: $Y=0.2099X+1.7317, R^2=0.9244$; 其中, Y 代表裂缝密度、X 代表地层厚度 (图 6); 裂缝

密度随着地层厚度的增加而增加, 可见 D 和 D' 裂缝密度与地层厚度相关.

2 讨论

2.1 D 和 D' 裂缝的形成机制

本研究从地层挠曲变形的几何学角度出发, 分析 D 和 D' 裂缝的形成机制. 从野外露头观察中, 发现 D 和 D' 裂缝均为构造裂缝, Price (1965) 认为这种断裂的形成与地层曲率的增加有关. 褶皱核部地层具有较高的曲率, 这种较高的曲率往往是通过减少地层中的轴面来实现的 (Mitra, 2002). 根据前人

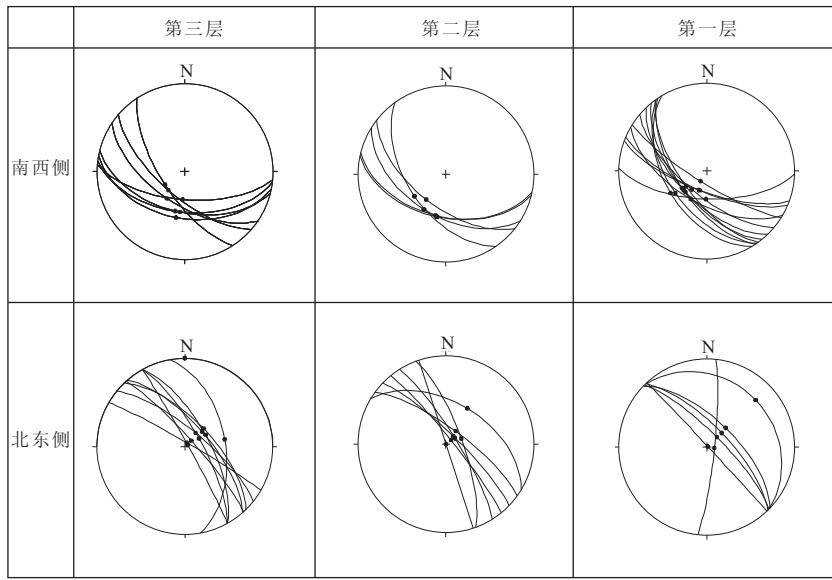


图 5 露头 2 裂缝产状特征(下半球投影)

Fig. 5 Stereographic projection of fractures in outcrop 2

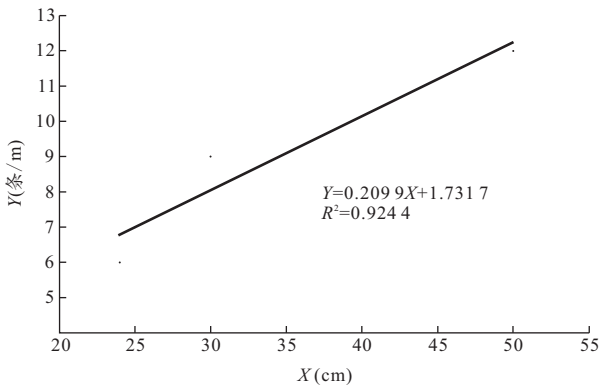


图 6 地层厚度与裂缝密度的关系(X 轴代表地层厚度、Y 轴代表裂缝密度)

Fig. 6 Map shows that the thickness to fracture density ratio

值;当 Φ_{12} 值不固定,但 $\Phi_1 = \Phi_2$ 时,上式变为:

$$\Delta S = 2t[2\tan(\Phi_{12}/4) - \tan(\Phi_{12}/2)], \quad (3)$$

(3)式的函数图像如图 8 所示,当 Φ_{12} 值很小, $\Delta S/t$ 很小. 当 $\Delta S/t$ 值不变时,地层厚度越大, ΔS 也越大.

如图 7a 和 7b 所示,在挠曲地层中,由于轴面的减少导致了在靠近核部的地层具有较高的曲率,同时也导致了上部地层长度向上逐渐变短. 地层的缩短则通过形成的裂缝来进行调节,裂缝形成于靠近轴面的部位,并且向背离轴面的方向发育. 由于单条裂缝的位移很小,因此,单条裂缝的对长度和剪切的调节量也很小. 如(4)式所示,当地层中的存在较多剩余剪切和较大长度缩短时,形成的裂缝数量也就越多.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \Delta S_{11} + \Delta S_{12} + \Delta S_{13} + \dots + \Delta S_{21} + \Delta S_{22} + \Delta S_{23} + \dots \quad (4)$$

2.2 D 和 D' 裂缝的性质

在剪切作用下能够形成的裂缝类型包括里德尔型裂缝(R 和 R', 在剖面上呈共轭关系)、T 型裂缝(张裂缝)以及 X 和 P 型裂缝(图 9; Bartlett *et al.*, 1981; Keller *et al.*, 1997; Ahlgren, 2001). 本研究 D 裂缝和 D' 裂缝中, D 裂缝和前人提到的 X 裂缝有相似之处,都能指示相邻地层运动的方向. 但是两者在形成机制上存在差异,根据本文的研究, D 裂缝是剩余剪切作用下形成的裂缝,而对于 X 裂缝形成机制的问题上,学者们一直存在争论, Dresen(1991)认为根据 X 裂缝是由里德尔型裂缝渐变而成. 裂缝

(Suppe, 1985; Mitra and Namson, 1989)的研究成果,挠曲地层总剪切(S)如下所示,其中, Φ_1 和 Φ_2 为地层夹角变化(图 7a 和 7b),并且 $\Phi_{12} = \Phi_1 + \Phi_2$.

$$S = 2t[\tan(\Phi_1/2) + \tan(\Phi_2/2)]. \quad (1)$$

如果挠曲地层中轴面相同时,向斜产生的剪切可以通过相邻背斜的地层吸收掉(Suppe, 1985). 但是当挠曲地层中的轴面不同时,轴面的减少就会导致剩余剪切(ΔS)形成(图 7c 和 7b). 剩余剪切数学表达式为:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2t[\tan(\Phi_1/2) + \tan(\Phi_2/2) - \tan(\Phi_{12}/2)], \quad (2)$$

(2)式中, Φ_{12} 值固定时,当 $\Phi_1 \neq \Phi_2$ 时, Φ_1 、 Φ_2 的差值越大, $\Delta S/t$ 值增大越小;当 $\Phi_1 = \Phi_2$ 时, $\Delta S/t$ 取最大

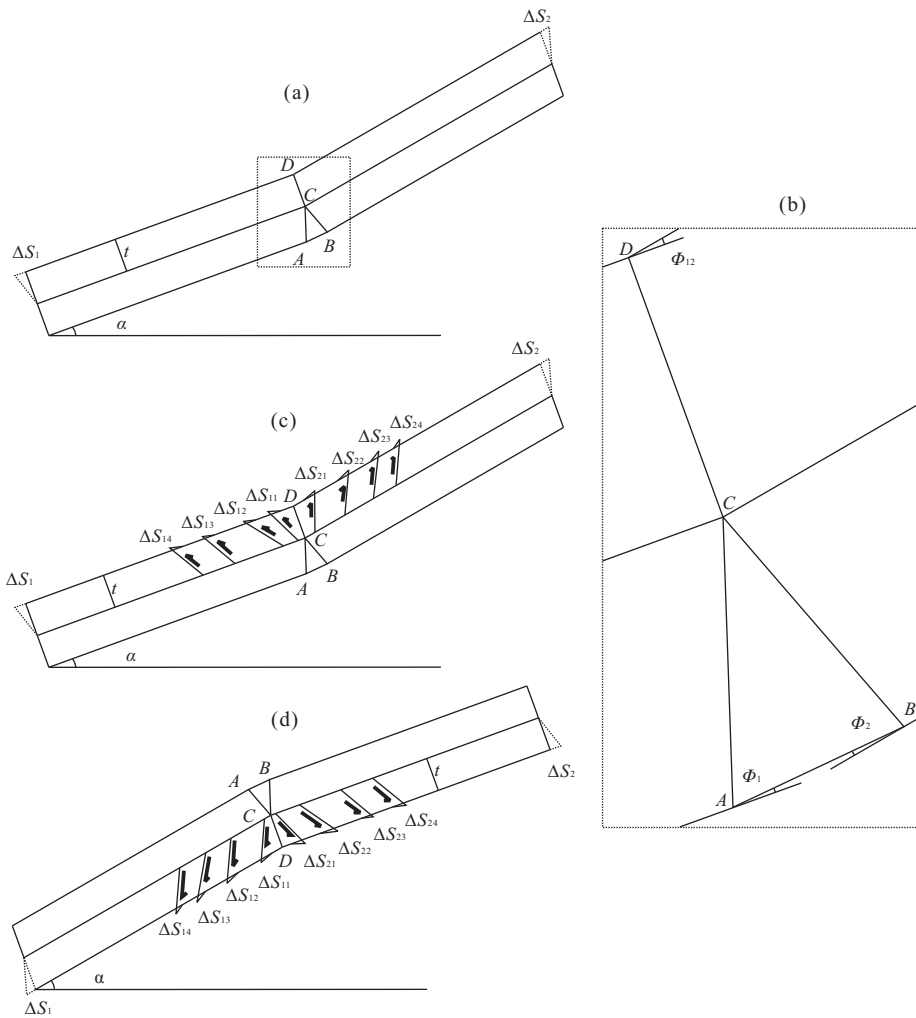


图 7 D 和 D' 裂缝的形成机制

Fig. 7 Mechanism of formation of D and D' fracture

a. 下部地层轴面为 AC、BC，上部地层轴面为 CD，导致上部地层曲率增加；b. 上下地层夹角的变化是剩余剪切 ($\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$) 形成的原因；c、d 剩余剪切致使 D 和 D' 裂缝的形成

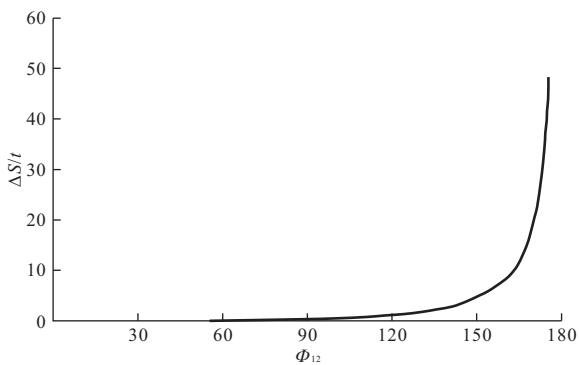


图 8 $\Delta S/t$ 值与 Φ_{12} 的关系

Fig. 8 Map shows that the $\Delta S/t$ to the layer thickness ratio

应力向相对滑动面方向旋转，并且在应力旋转的过程中，形成了 X 裂缝，而该认识也无法解释 X 型裂缝的形成。根据 X 裂缝与相对滑动面的角度，其与应力旋转分析的结果不符。而本文中 D 裂缝可能就是前人提到的 X 裂缝 (Bartlett *et al.*, 1981; Keller *et al.*, 1997; Ahlgren, 2001)，本文所研究的剩余剪切作用机制可能是 X 型裂缝形成的机制。

D' 裂缝产状上与 R' 裂缝相似，其与地层的夹角指示本层的运动方向，但两者存在本质的不同。具体表现在：D' 并不切过相对滑动面，Lacazette (2009) 认为里德尔型裂缝切过相对滑动面；另外，Misra *et al.* (2009) 的研究表明 R 裂缝的发育早于 R' 裂缝的发育，而野外露头地层中却并不发育 R 裂缝。综合以上可以说明 D' 裂缝并不是前人研究中提到的 R' 裂缝，而是地层挠曲变形过程形成的一组特

发生时，脆性变形过程在先而渐变塑性旋转变形在后，这与一般变形发育过程相矛盾的；而 Lacazette (2009) 根据理论分析结果和井心资料，认为最大主

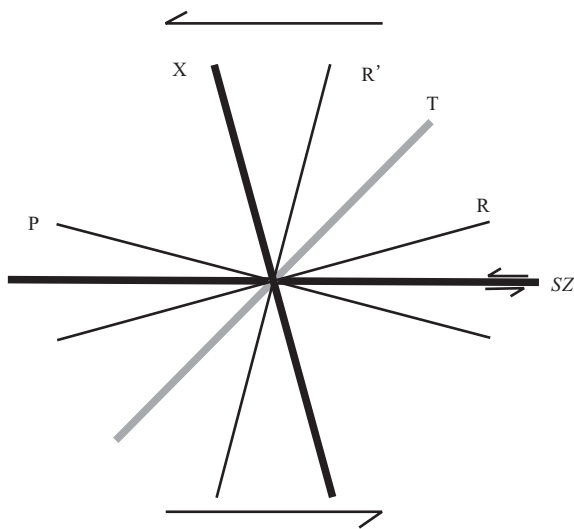


图9 左旋剪切作用下的裂缝的类型(Bartlett *et al.*, 1981; Keller *et al.*, 1997; Ahlgren, 2001)

Fig. 9 A characteristic array of shear fractures of sinistral shear SZ代表相对滑动面,R和R'代表里德尔型裂缝,T代表张裂缝

殊的与挠曲作用相关的裂缝。

3 结论

(1)根据对浙江省临安市上侏罗统劳村组火山凝灰岩挠曲地层裂缝发育的露头观测,地层中所发育的裂缝均为构造裂缝,均未被充填。地层挠曲变形后,地层中发育了能指示相对运动方向的D和D'裂缝,在剖面上的组合为扇形。地层厚度与裂缝密度的统计关系为: $Y = 0.2099X + 1.7317, R^2 = 0.9244$,其中,Y代表裂缝密度、X代表地层厚度;X和D裂缝密度与地层厚度相关,裂缝密度随着地层厚度增加而增加。

(2)通过对地层挠曲变形过程的几何学分析,发现野外露头的裂缝发育的产状特征、密度特征与几何分析的结果相吻合,我们认为D和D'裂缝的形成是为了调节核部地层在变形过程中产生缩短量和剩余剪切。地层中产生剩余剪切越多,形成的裂缝也越多。剩余剪切与地层厚度呈正比,剩余剪切随着地层厚度的增加而增加。

致谢:感谢参加野外构造裂缝测量工作的毕彪、郑清堂、刘聘和龚根辉同学。

References

Ahlgren, S. G., 2001. The Nucleation and Evolution of Riedel Shear Zones as Deformation Bands in Porous Sand-

- stone. *Journal of Structural Geology*, 23 (8): 1203—1214. doi:10.1016/S0191-8141(00)00183-8
- Bartlett, W. L., Friedman, M., Logan, J. M., 1981. Experimental Folding and Faulting of Rocks under Confining Pressure. Part IX. Wrench Faults in Limestone Layers. *Tectonophysics*, 79 (3—4): 255—277. doi:10.1016/0040-1951(81)90116-5
- Bellahsen, N., Fiore, P., Pollard, D. D., 2006. The Role of Fractures in the Structural Interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming. *Journal of Structural Geology*, 28 (5): 850—867. doi:10.1016/j.jsg.2006.01.013
- Chen, H. S., 2002. Exploration Prospects and Strategies of Reconstruct Marine Oil and Gas in Lower Yangtze Area. *Marine Origin Petroleum Geology*, 7 (2): 33—41 (in Chinese).
- Dresen, G., 1991. Stress Distribution and the Orientation of Riedel Shears. *Tectonophysics*, 188 (3—4): 239—247. doi:10.1016/0040-1951(91)90458-5
- Fischer, M. P., Wilkerson M. S., 2000. Predicting the Orientation of Joints from Fold Shape Results of Pseudo-Three-Dimension Modeling and Curvature Analysis. *Geology*, 28 (1): 15—18. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<15:PTOOJF>2.0.CO;2
- Florez-Nino, J., Aydin, A., Mavko, G., et al., 2005. Fault and Fracture Systems in a Fold and Thrust Belt an Example from Bolivia. *AAPG Bull.*, 89 (4): 471—493. doi:10.1306/11120404032
- Kajari, G., Mitra, S., 2009. Structural Controls of Fracture Orientations, Intensity, and Connectivity, Teton Anticline, Sawtooth Range, Montana. *AAPG Bull.*, 93 (8): 995—1014. doi:10.1306/04020908115
- Keller, J. V. A., Hall, S. H., McClay K. R., 1997. Shear Fracture Pattern and Microstructural Evolution in Transpressional Fault Zones from Field and Laboratory Studies. *Journal of Structural Geology*, 19 (9): 1173—1187. doi:10.1016/S0191-8141(97)00042-4
- Lacazette, A., 2009. Paleostress Analysis from Image Logs Using Pinnate Joints as Slip Indicators. *AAPG Bulletin*, 93 (11): 1489—1501. doi:10.1306/08110909087
- Lin, X., Chen, H., Cheng, X., et al., 2010. Conceptual Models for Fracturing in Fault Related Folds. *Mingxing Science and Technology*, 20 (1): 103—108. doi:10.1016/S1674-5264(09)60169-1
- Ma, Q., Zhao S., Liao Y., et al., 2012. Sequence Architectures of Paleogene Liushagang Formation and Its Significance in Fushan Sag of the Beibuwan Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*,

- 37(4):667—678 (in Chinese with English abstract) . doi:10.3799/dqkx.2012.076
- Misra, S., Mandal, N., Chakraborty, C., 2009. Formation of Riedel Shear Fractures in Granular Materials; Findings from Analogue Shear Experiments and Theoretical Analyses. *Tectonophysics*, 471(3—4):253—259. doi:10.1016/j.tecto.2009.02.017
- Mitra, S., Namson, J. S., 1989. Equal-Area Balancing. *American Journal of Science*, 289:563—599
- Mitra, S., 2002. Fold-Accommodation Faults. *AAPG Bull.*, 86(4):671—693. doi:10.1306/61EEDB7A—173E—11D7—8645000102C1865D
- Mobasher, K., Babaie, H. A., 2008. Kinematic Significance of Fold- and Fault-Related Fracture Systems in the Zagros Mountains, Southern Iran. *Tectonophysics Asia out of Tethys: Geochronologic. Tectonic and Sedimentary Records*, 451(1—4):156—169. doi:10.1016/j.tecto.2007.11.060
- Price, R. A., 1965. Flathead Map Area. Columbia Geological Society of Canada Memoir, British, 336, 221.
- Silliphant, L. J., Engelder, T., Gross, M. R., 2002. The State of Stress in the Limb of the Split Mountain Anticline, Utah: Constraints Placed by Transected Joints. *Journal of Structural Geology*, 24(1):155—172. doi:10.1016/S0191—8141(01)00055—4
- Suppe, J., 1985. Principles of Structural Geology. Prentice-Hall, New Jersey, 537.
- Tang, J., Mei, L., Shen, C., et al., 2012. Response of Hydrocarbon Fluid Source to Tectonic Deformation in Multi-cycle Superimposed Basin; Example from Palaeozoic and Mesozoic Marine Strata in Yangtze Block. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(4):526—534 (in Chinese with English abstract) . doi:10.3799/dqkx.2012.059
- Wang, H. S., Shang, N., Gao, B. N., et al., 2008. Deforming Responses and Its Identification Characteristics of Flexing. *Journal of China University of Petroleum*, 32(5):22—27 (in Chinese with English abstract).
- Ye, F., 2009. Structural Analysis of Mesozoic-Palaeozoic in the Lower Yangtze Region (Dissertation). Shanghai Tongji University (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Xu, J. W., Liu, G. S., et al., 1999. Tectonic Pattern and Dynamic Mechanism of the Foreland Deformation in the Lower Yangtze Region. *Regional and Geology of China*, 18(1):73—79 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈沪生, 2002. 下扬子地区重建型海相烃源油气领域评价及勘探对策. *海相油气地质*, 7(2):33—41.
- 马庆林, 赵淑娥, 廖远涛, 等, 2012. 北部湾盆地福山凹陷古近系流沙港组层序地层样式及其研究意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(4):667—678.
- 汤济广, 梅廉夫, 沈传波, 等, 2012. 多旋回叠合盆地烃流体源与构造变形响应: 以扬子地块中生界海相为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(3):526—534.
- 王海荣, 尚楠, 高伯南, 等, 2008. 挠曲作用的形变响应及其识别特征. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 32(5):22—27.
- 叶芳, 2009. 下扬子地区中生界构造分析(硕士毕业论文). 上海: 同济大学.
- 朱光, 徐嘉炜, 刘国生, 等, 1999. 下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制. *中国区域地质*, 18(1):73—79.