

断层周围的弹塑性区及其地质意义

武红岭 张利容

(中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081)

摘要 采用弹塑性有限单元方法,通过模拟符合实际状况的逐步加载过程所引起应力场和塑性形变区的研究,得出如下结果:①在塑性或韧性剪切形变情况下,断裂或形变带的共轭剪切角往往大于 45° ;②在双向挤压应力条件下,先存断裂的前缘部位没有拉伸应力存在,但可能有伸展形变发生;③与最大主压应力夹角为 $30^\circ\sim 90^\circ$ 的断层前缘是偏应力的优势方位,容易发生塑性剪切形变,特别是夹角为 60° 左右的断层是最易发生新的构造活动的断层;④多数断层两侧一定范围内以及断层内部是相对的低应力区。这些应力的低值区,非常有利于矿液和油气的运移、聚集和成藏。

关键词 断层 非线性本构关系 塑性区 有效应力 屈服应力

The Elastic - Plastic Region around Faults and Its Geological Significance

WU Hongling ZHANG Lirong

(Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081)

Abstract Using the finite element method, this paper has studied the stress field and elastic and plastic regions around faults in different orientations under slowly-loaded two-dimensional pressure. The results are as follows: ① In the case of plastic or ductile deformation, conjugate shear angle of the deformation belts is usually larger than 45° ; ② Under the above-mentioned condition there are no tensile stresses near the tip of faults, but stretch deformation is likely to occur; ③ Near the end of faults to be inclined at $30^\circ\sim 90^\circ$, especially at 60° or so to maximum principal stress, there are zones of deviatoric stress concentration. In these directions it is easier to form new shear deformation and fracture belts; ④ In areas on both sides of faults and within the interior of faults, stresses are usually lower than the regional stress. In these regions the state of lower stress is favorable for the migration, accumulation and precipitation of mineral liquids and oil-gas.

Key words fault nonlinear stress-strain relationship plastic region equivalent stress yield stress

断层内部及邻区的位移场、形变场、应力场的定量和实验研究(Anderson, 1951; Chinnery, 1963; Ren Wang, 1983; 万天丰, 1988; 武红岭等, 1993, 1999; 赵永红等, 1995)被广泛地应用于断裂的扩展, 地震灾害的孕育、发生、迁移和防治, 矿液的运移和富集带的预测等地质学领域。在这类研究中, 人们多采用线弹性理论和模型。在灾害、地震、破裂发生等快速过程中用弹性模型具合理性。但活动构造带的大部分形变是塑性或粘性等不可恢复的永久形变, 特别是在地壳、岩石圈较深层面上, 韧性剪切带是构造地质中最典型的永久形变带, 人们正是从漫长地质时期

遗留下的这类构造形迹中去追溯曾经发生过的构造变动。岩石的力学性质实验也表明, 在最初的、有限的弹性形变之后, 当荷载达到屈服极限, 岩样会发生一个阶段的塑性形变, 若继续加载达到强度极限才会发生破裂。因此, 研究先存断层在破坏前的塑性行为, 应该说更加具有实际的地质意义。

研究中采用数学模拟方法, 试图通过研究不同方位的断层在两向外加应力作用下, 塑性区的扩展规律以及应力场的变化状况, 以此揭示某些常见的地质构造现象的力学机理, 为减灾防灾、地质找矿提供理论依据。

1 力学模型和非线性本构关系

1.1 力学模型

构建一个二维方型地块(图1),坐标原点位于断裂带中点,断裂长度 $2L$,地块边长 $6L$ 。断裂方位由 θ 角代表。若假定 Y 轴方向代表南北向($\theta = 0^\circ$); X 轴方向为东西向($\theta = 90^\circ$)。断层方位可按地学习惯称为SN、NE、EW、NW向等。图中 $X'Y'$ 为断层局部坐标系, X' 代表断层延伸方向; Y' 代表与断层相垂直的方向。

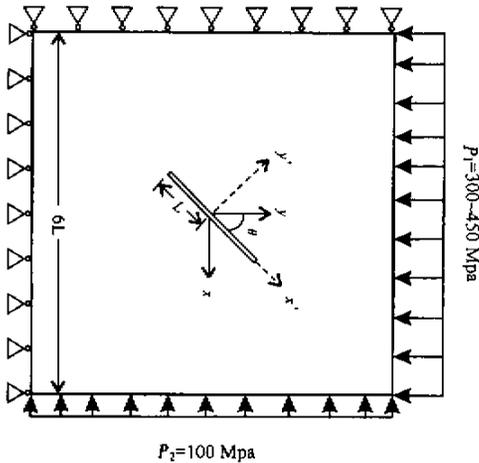


图1 有限元计算模型和边界条件

Fig.1 The modal for finite element calculation and boundary condition

1.2 边界条件

为了使区域的外力平衡,在西边界的 X 方向施加约束,使其只能沿 Y 方向移动;在南边界则施加 Y 方向约束, X 方向自由;左下角点固定约束。活动构造历史的研究表明,在中国所处的纬度上,南北向挤压力似乎是一种占主导地位的动力作用方式,因此,沿东边界施加向西的不变的压应力 $P_2 = 100$ MPa,北边界则逐步施加 $P_1 = 300 \sim 450$ MPa向下的压力。这样,区域应力差 $P_1 - P_2$ 约为 $200 \sim 350$ MPa,压力比 $P_1/P_2 = 3 \sim 4.5$ 。

1.3 选取弹塑性岩石材料模型

Von Mises 屈服准则是塑性理论中常用的塑性判据(王仁等,1982),在一定的假设条件下(例如不卸载),它可以被简化地表述为:当等效应力 σ_{eqv} 达到屈服应力 σ_y 时,岩体将在屈服面上发生塑性流动

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{3J_2} = \sigma \quad (1)$$

式中 J_2 为第二偏应力不变量。

$$J_2 = -(S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1) = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)/2$$

$$= [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/6 \quad (2)$$

其中 $S_i, i = 1, 2, 3$,为主偏应力; $\sigma_i, i = 1, 2, 3$ 为主应力。

从以上公式可看出有效应力、偏应力一般反映的是构造差应力的综合效果及岩石介质接近塑性永久变形的程度,它一般引起介质的剪切形变。屈服应力则表示岩石发生塑性流动时,对偏应力的承载能力。还有一个应力指标叫做平均应力 σ_m ,用公式表示为

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (3)$$

平均应力一般引起介质的体积形变,即使是在塑性流动发生时,它的应力应变关系也仍旧被假定遵从弹性规律。

岩体发生塑性形变,其应力应变关系与弹性阶段不同,参考岩石力学实验的研究结果(王连捷等,1998)根据程序要求选取2种岩石材料分别对应于围岩和断裂带,模型统称为双线性随动强化本构模型。与刚塑性材料不同,其特点是材料发生屈服之后有一定程度的硬化,能承受略大于屈服点的应力,直到破裂发生,材料模型的图示(图2)和列表如下:

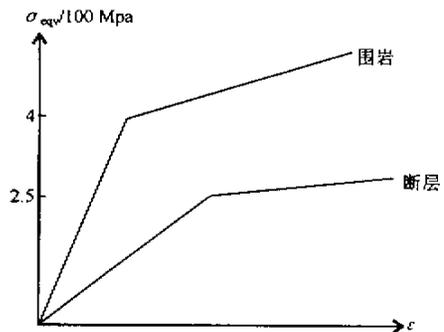


图2 岩石材料的非线性应力-应变关系示意图

Fig.2 Nonlinear Stress-strain curves for rocks

表1 岩石材料的力学参数表

Table 1 Mechanic parameter of rocks

岩体	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa	屈服模量/MPa
围岩	80000	0.25	400	5000
断裂	10000	0.35	250	1000

在有限元计算程序中,处理这种非线性应力-应变关系是通过增量加载,在每个载荷步内进行迭代计算,求得收敛解,再进行下个载荷步的计算,直至目标区全部进入塑性。

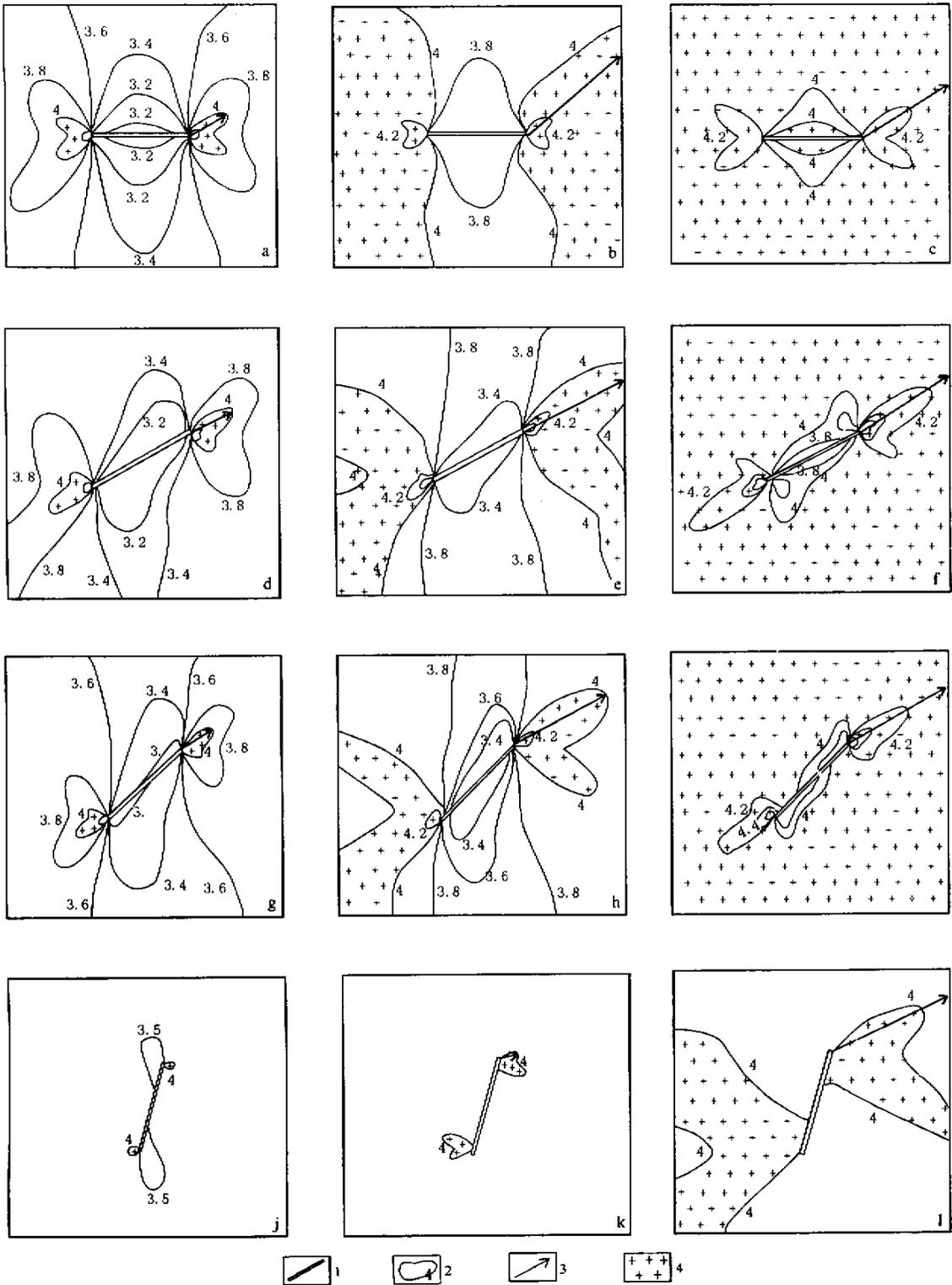


图 3 不同方位断层周围的等效应力和塑性区特征

Fig. 3 Equivalent stress and plastic zone around faults in different directions

a- $\theta=90^\circ$, $P=4$ b- $P=4.375$ c- $P=4.5$ d- $\theta=60^\circ$, $P=4$ e- $P=4.25$ f- $P=4.5$ g- $\theta=45^\circ$, $P=3.75$ h- $P=4.25$ i- $P=4.5$;
 j- $\theta=15^\circ$, $P=4$ k- $P=4.25$ l- $P=4.375$;

1-断裂 2-应力等值线 3-塑性区长轴方向 4-塑性区

万方数据

1-fracture 2-stress contour 3-orientation along long axis of plastic zone 4-plastic zone

2 断层周围的弹塑性区及地质意义

2.1 断层前缘塑性区的总体特征

用逐步增加的边界载荷 $P = P_1/P_2$ 表示北边界的加载过程,当 P 增至 3.25~3.75 时,多数方位的断层端部先后出现塑性区(图 3),随着 P 值的进一步增大,断层前缘的塑性区不断扩大着它们的地盘。当 P 增至 4.5 时,除了断层两侧的小部分地区,全区均进入塑性区。从图 3 可以看出,当塑性区的范围较大时,其第一象限内的长轴方向始终落在方位角为 $55^\circ \sim 65^\circ$ 之间的方向上,其方向取决于主应力方向。由于是否产生塑性形变是由有效应力是否达到屈服应力来判断的,因此,在塑性区的长轴方向上应该是偏应力的优势方位,塑性剪切形变将沿此方向扩展。如果进一步加载超过极限强度,在这个方向上极易发生剪切破坏。这与弹性情形下的压缩似乎不尽相同。根据以往的研究,认为最大主压应力指向共轭剪切断裂的锐角,但野外地质勘察也观测到共轭剪切角为钝角的情况(李四光,1973;万天丰,1988)且不是个别现象。此次研究则进一步从理论上证实了 Ramsay(1980)的论断,塑性或韧性剪切情况下,共轭剪切角大于 45° 。在此次研究条件下,此角大约为 60° 左右。

2.2 断层前缘塑性区的扩展因断层方位而异

用图 3 中塑性区长轴长度表示塑性区范围大小,图 4 表明塑性区的出现受断层方位影响。最早发生塑性形变的是 NE 向、NEE 向 $\theta \approx 45^\circ \sim 75^\circ$ 之

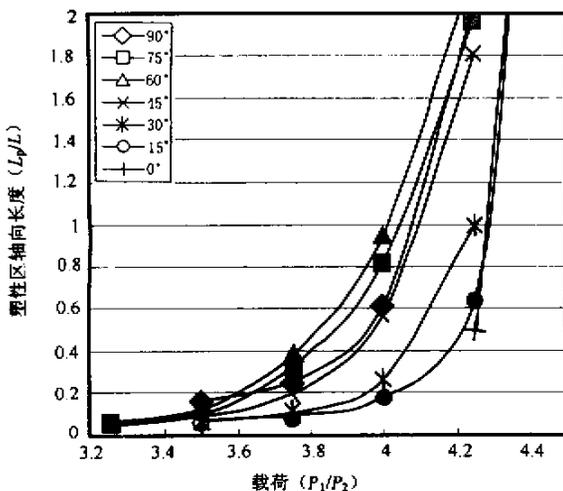


图 4 不同方位断层塑性区的扩展

Fig. 4. Plastic zone extending around faults
方位数据

间的断层($P = 3.25$),随后是近 EW 向($\theta \approx 75^\circ \sim 90^\circ$)以及 NNE 向断层($\theta \approx 30^\circ$),在 $P = 3.5$ 时开始出现塑性形变。而近 SN 向断层($\theta \approx 15^\circ$),在 P 值为 3.75 时,才发生塑性变形。更有甚者,SN 向断层($\theta = 0^\circ$)直到 $P = 4.25$ 时,才开始出现塑性区。这就意味着,近 SN 向断裂不发生塑性形变则已,一旦进入塑性,就会由于很小的载荷增量,将塑性行为突发性地扩展至全区大部分地区。

从图 4 还可以看出,在不同方位的断层中,尤以 $\theta \approx 60^\circ$ 的断层在同样载荷情况下,塑性区范围最大,且塑性区长轴方向与断层方位非常的一致(图 3-d, e, f)。图 4 还表明,塑性区随载荷扩展,存在一个突变点,在 $P \approx 4$ 时,塑性区的范围急剧扩大;当 $P \approx 4.5$ 时,全区大部分区域均进入塑性区。

2.3 断层内外弹塑性区的应力特征

由于所取断层内的屈服应力低于断层外围岩(表 1)从沿断层延伸路径上的应力图(图 5)中可以看出,在 $\theta \geq 30^\circ$ 的断层内,有效应力全部大于屈服值,就是说除了 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 的断层中段外,断层内部都进入塑性区。另外 $\theta = 75^\circ \sim 90^\circ$ 的断层应力在接近端点时有一个先降后猛增的过程。其他方位断层的应力则是一路飙升上去。当路径通过断层端点时,有效应力陡然增加,其中 $30^\circ \sim 90^\circ$ 的断层出现峰值,达到或超过屈服点($\sigma_y/P_2 = 4$),特别是 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间的断层应力增幅最大,而 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的断层虽然增幅不小,但绝对值低,且变化平稳,未形成峰值。这进一步说明,在南北向主压应力作用下 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ 之间的先存断层容易发生较大的剪切形变,成为重新活动的韧性剪切带。其中 NEE 向 60° 断层最为活动,其前缘的塑性区将会沿着断层方位迅速扩展。而 NNE、SN 向的断层前缘不容易发生塑性剪切形变,但有可能发生有限的伸展形变,虽然在本文研究条件下(双向挤压)断裂端部并未出现拉张应力(武红岭,1999),与前人的研究结果(Anderson,1951;赵永红,1995)并不一致。

平均应力 σ_m (图 5-b)与 σ_{eqv} 的变化趋势一致,只是应力量级减小了大约三分之一。一个例外是 60° 的断裂,应力值在通过端点时发生突跳。

以上对断层内和端部附近的应力状况的研究能够解释为什么地震常沿着活动断裂带以及断层切入深度处的端部附近发生,亦也能够解释断裂的扩展方向并不与断层走向一致,从而断层大多并不平直,而呈现多级分叉、雁行、羽裂状发育的构造现象。

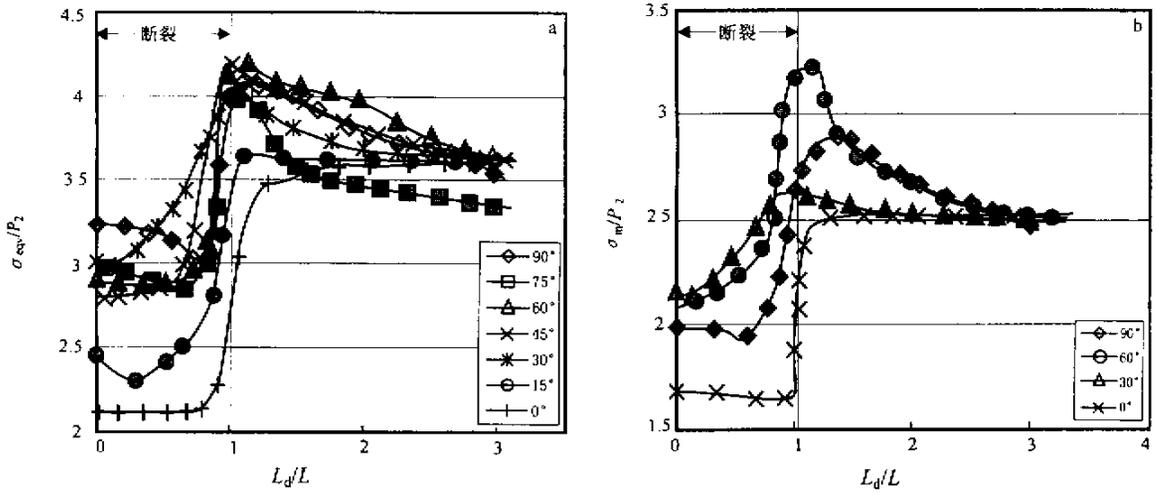


图 5 沿断层延伸方向断层内外的应力特征

Fig.5 Stress along fault's direction
a-等效应力 b-平均应力
a-equivalent stress b-average stress

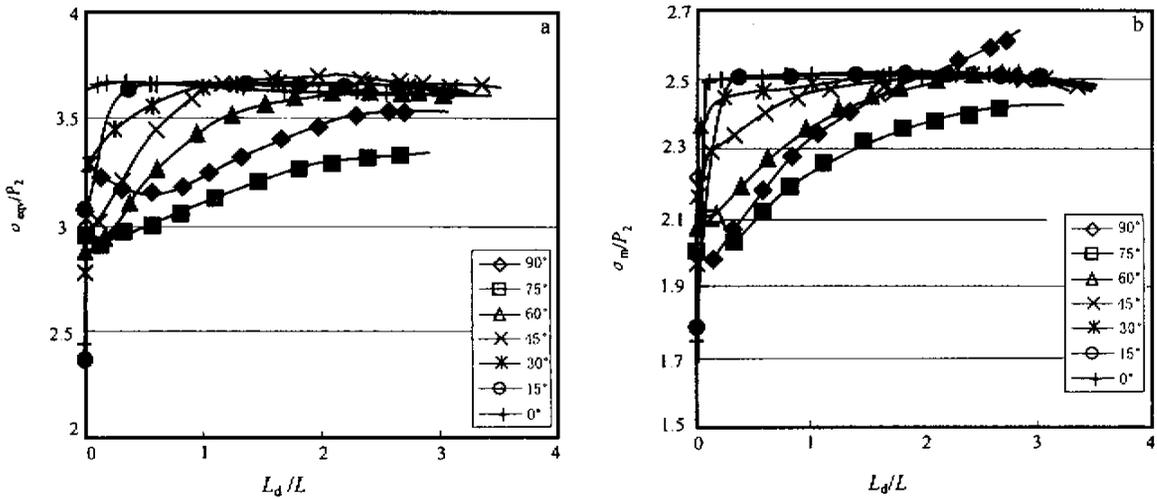


图 6 断层两侧垂直断层路径上的应力特征

Fig.6 Stress on path perpendicular to fault
a-等效应力 b-平均应力
a-equivalent stress b-average stress

再来看与断层垂直路径(图 1 的 Y'轴)上的应力变化情况。从图 3 和图 6 中可以看出,SN 向主压应力的作用,使断层两侧一定范围内(大约 2L 内)的应力普遍降低,在这一路径上没有塑性形变发生,除非 P 大于 4.5。其中,近 EW 向的断层应力降幅和影响范围均较大。而近 SN 向断层两侧的应力除

紧靠断裂处外几乎没有变化,与区域应力场一致。断层两侧一定距离内的低应力状况,给我们解释断裂的等间距现象以一定的启示,在这个距离内一般不会有同等规模和方向的断层出现(王仁等,1982;武红岭,1993)。同时,断层两侧的低平均应力状态能够解释矿区和油田中的矿点、油气田以及油气富

集区为什么与断裂系的排列分布密切相关(武红岭等,1999)。

3 结论和建议

对在平面应力条件下,通过模拟符合实际状态的逐步加载过程所引起应力场和塑性区的扩展研究,有新认识如下:

(1)进一步从理论上证实了前人的论断,在塑性或韧性剪切形变情况下,共轭剪切角往往大于 45° 。在本文条件下,共轭剪切角大约为 60° 左右,与先存断裂的方位无相关性。

(2)与以往单轴压缩和弹性破裂的实验和研究不同,在两向挤压应力作用下,先存断裂的前缘部位没有拉伸应力存在,但是并不否认在与主压应力夹角 30° 范围内的断层内外会有伸展形变发生。

(3)断裂前缘的塑性区随载荷逐步扩大。塑性区的扩展呈非线性,当载荷超过屈服点,会增大扩展的速率,直到在某一载荷点,所有方位的断层及周边地区全部被纳入塑性区。

(4)与最大主压应力夹角为 $30^\circ\sim 90^\circ$ 的断层前缘是偏应力的优势方位,容易发生塑性剪切形变,引起新的构造活动,特别是夹角为 60° 左右的断层,应是最易发生活动的断层。因此,在地震和孕震构造的研究中,应该特别关注此类走向的断裂带的活动。例如,中国华北地区现今区域最大主应力方向是近EW向的,那么NE向和NNE向断层应该都是比较活跃的,实际情况也确实如此。

(5)在断层外部,除了与主应力方向近乎平行的断层,断层两侧一定范围内是相对的低应力区。这些平均应力的低值区,非常有利于矿液和油气的运移、储集、成藏,特别是与主压应力方向成 $75^\circ\sim 90^\circ$ 角的断层两侧更值得注意。

(6)在与主应力方向近乎平行的断层($0^\circ\sim 15^\circ$)内部,也是平均应力的相对低值区(图5-b),应是矿液和油气的富集带。例如,中国东部辽河油田、西部柴达木油田冷湖花土沟,其油气藏展布方向均与最大主压应力方向一致。

参考文献

- 李四光. 1973. 地质力学概论. 北京: 科学出版社.
 万天丰. 1988. 古构造应力场. 北京: 地质出版社.
 王仁, 熊祝华, 黄文斌. 1982. 塑性力学基础. 北京: 科学出版社.
 王连捷, 崔军文, 武红岭等. 1998. 青藏高原北缘岩石圈构造应力场. 北京: 冶金工业出版社.
 武红岭. 1993. 走滑断层周围的应力场与断裂的等间距现象. 地质力学与地壳运动. 北京: 地震出版社, 90~98.
 武红岭, 王小凤, 马寅生等. 1999. 油田构造应力场驱动油气运移的理论和方法研究. 石油学报, 20(5):7~12.
 武红岭. 1999. 张性结构面的力学性质与主应力关系解析. 地质论评, 45(5):449~455.
 赵永红, 黄杰藩, 王仁. 1995. 岩石细观破裂的实验观测研究及其对认识地震活动性的启示. 地球物理学报, 38(5):627~636.

References

- Anderson E M. 1951. The dynamics of faulting. Oliver and Boyd, Edinburgh, 2nd ed.
 Chinnery M A. 1963. The stress changes that accompany strike-slip faulting. Bull. Seism. Soc. Amer., 53(5):921~932.
 Lee J S. 1973. An introduction of Geomechanics. Beijing: Science Press (in Chinese).
 Ren Wang & Hongling Wu. 1983. Displacement and stress fields due to non-uniform slip along a strike slip fault. Pageoph, 121(4):16~20.
 Ramsay J G. 1980. Shear zone geometry: a review. J. Structural Geology, 2(2):83~99.
 Wan Tianfeng. 1988. Paleotectonic stress field. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
 Wang Ren, Xong Zhuhua, Huang Wenbin. 1982. Foundational theory of plasticity. Beijing: Science Press (in Chinese).
 Wang Lianjie, Cui junwen, Wu Hongling et al. 1988. Lithosphere tectonic stress field in northern boundary in Qinghai-Tibet plateau. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese).
 Wu Hongling. 1993. Stress field along a strike slip fault and phenomenon of equalspace of faults. Geomechanics and crust movement, Beijing: Seismological Press, 90~98 (in Chinese).
 Wu Hongling, Wang Xiaofeng, Ma Yinsheng et al. 1999. Theory and method of studying hydrocarbon migration driven by tectonic stress field. Acta Petrolei Sinica, 20(5):7~12 (in Chinese).
 Wu Hongling. 1999. Analysis on mechanical properties of a tensile structure plane and its relationship to principal stresses. Geological Review, 45(5):449~455 (in Chinese).
 Zhao Yonghong, Huang Jiepan and Wang Ren. 1995. An experimental observation on rock's micro-failure and its implication on understanding seismic activity. Acta Geophysica Sinica, 38(5):627~636 (in Chinese).