

山西地堑形成的力学模式及 山西地震带的特点*

张之立 方兴 阎虹

(国家地震局地球物理研究所)

摘要

山西地堑系又名汾渭地堑系,是新生代发育的小型大陆裂谷带,它有着大陆裂谷带的主要特征。本文根据裂谷和地堑是断裂带发展和控制结果的观测事实,应用断裂力学方法研究了山西地堑形成的力学机制。本文提出一个三维力学模式,分析了由断裂带扩展形成地堑的力学过程,并计算了山西地堑的Z形图案中的剪切段与拉伸段之间的夹角,该角度的大小与区域应力场方向、原始断裂带深度和长度的比值,以及断裂带周围介质的力学性质等因素有关,同时还发现,拉张区的总体方向总是指向区域主压应力作用方向。因此,可以根据拉张区的总体方向来确定区域主压应力方向;反之,也可以根据区域主压应力方向来判断拉张段的取向。本文同时分析了由地震资料得到的结果并进行了比较。

此外,我们还应用本文提出的方法研究了国际上一些有名的地堑,如莱茵地堑、贝加尔湖地堑和北美洲西部的利奥·格兰特裂谷等,这些地堑系的拉张区和剪切区的空间分布特征,也能得到较好地解释。

一、山西地堑系的地质和地球物理特征

裂谷的形成和发展对于地球演化、地球动力学、矿产的勘探和开发,以及地震学的研究均有重大意义。因此,国内外地学界都很重视。山西地堑属于大陆裂谷系,它是由一系列盆地组成,从北往南有大同盆地、忻县盆地、太原盆地、临汾盆地和运城盆地;东北端转为北东东向而伸入河北北部的有蔚县盆地、怀来盆地等;西南端也转为北东东延伸入陕西境内称为渭河盆地,总长度约1,000km,总体上呈“S”型展布。山西地堑的地质构造简图^[1]见图1。该地堑系的某些特征与其它一些大型地堑类似,即每一个地堑边界都是由正断层控制,且断层面的倾斜角较大。与其它大型地堑不同的是,它不是单一的地堑,而是由一系列地堑有规律地排列而成,其排列主要有两个方向:一为北北东向,另一为北东东向。更有趣地是,这两个方向的地堑几乎是等间距的相间排列,北北东向的地堑较狭窄,剖面比较对称,主要具有右旋剪切的破裂性质。而北东东向的地堑较宽阔,剖面也不对称,主要具有张破裂的性质。前者如图1中的忻县和临汾盆地,后者如大同,太原和运城盆地。

本文1985年4月25日收到,1986年7月29日收到修改稿。

* 地震学联合科学基金资助项目。

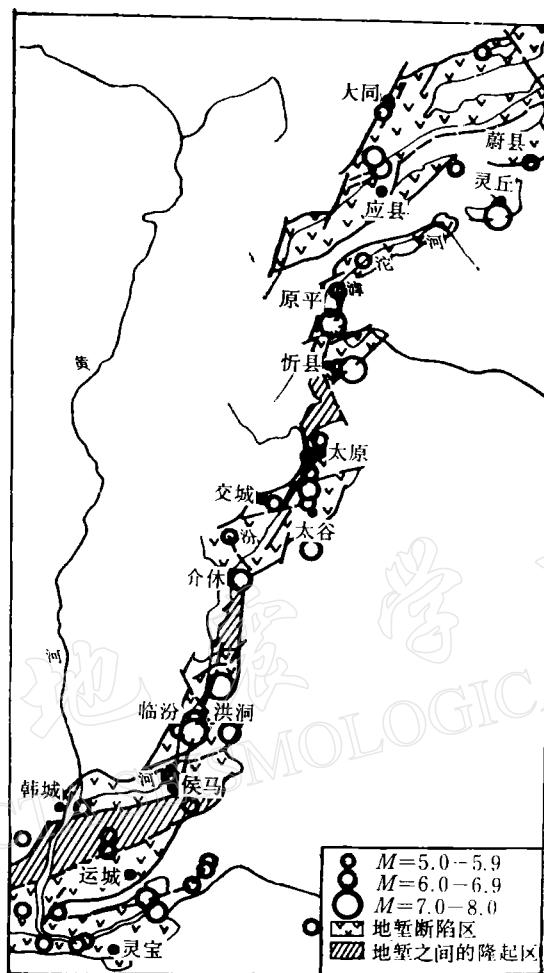


图1 山西地堑系构造和震中分布图

Fig. 1 Tectonic sketch and distribution of earthquakes in the Shanxi graben system

大量地质和地球物理资料表明^[1-2],山西地堑至今仍在强烈活动,有着地热流值高,地幔上隆,地壳减薄和布格重力异常相对高等现象。尤其是地堑系内常有破坏性地震发生。据统计, $M \geq 7$ 的地震主要发生于北北东向的临汾和忻县地堑内,5—6 级地震主要发生在北东东向的大同,太原和运城地堑内。地震活动性表现在北北东向地堑的地震强度大,频度低;北东东向地堑的地震强度低频度高,其中太原地堑频度最高(见图 1 的震中分布图)。根据近代地震的震源机制结果及其它地质和地球物理资料判定,当前山西地堑带的主应力方向为北东东-南西西方向,这与已知的华北地区的区域应力场一致。已发生地震的震源深度多数介于 10—30km 之间,最深 38km,均属浅源地震。

山西地堑系形成机制的研究，前人已做过许多工作。本文主要参考了文献[1—4]的结果。刘光勋等^[1](1979)及光谱^[1](1979)根据地质、物探和地震资料，提出山西地堑系是

1) 刘光勋、肖振敏,山西地堑系及其地质构造,国家地震局地震地质大队,1979.

由一条北北东向的大型剪切带发生顺时针水平错动而形成,即东侧地块向南,西侧地块向北运动,地块在重力作用下陷落形成完整的地堑系。该地堑系的破裂方式可由图 2(a) 所示的构造模式来描述。地质学家张文佑等^[4](1975) 根据他们的野外观察和室内泥饼模拟试验结果提出,山西地堑系是由一条剪切-拉张的锯齿状断裂带形成的,北北东向的较窄的地堑表现以剪切为主的特点,而北东走向的较宽地堑主要呈现拉张性质。他们认为,山西地堑系的破裂机制可用图 2(b) 所示的构造模式来描述。构造模式 A 是山西地堑系的粗略描述,它只突出了地堑系的主要特征。构造模式 B 要比 A 完整得多。为了从力学上对山西地堑系形成机制及地震发生规律进一步剖析,下面运用断裂力学方法,从断裂扩展角度对这两种模式进行分析计算和比较。

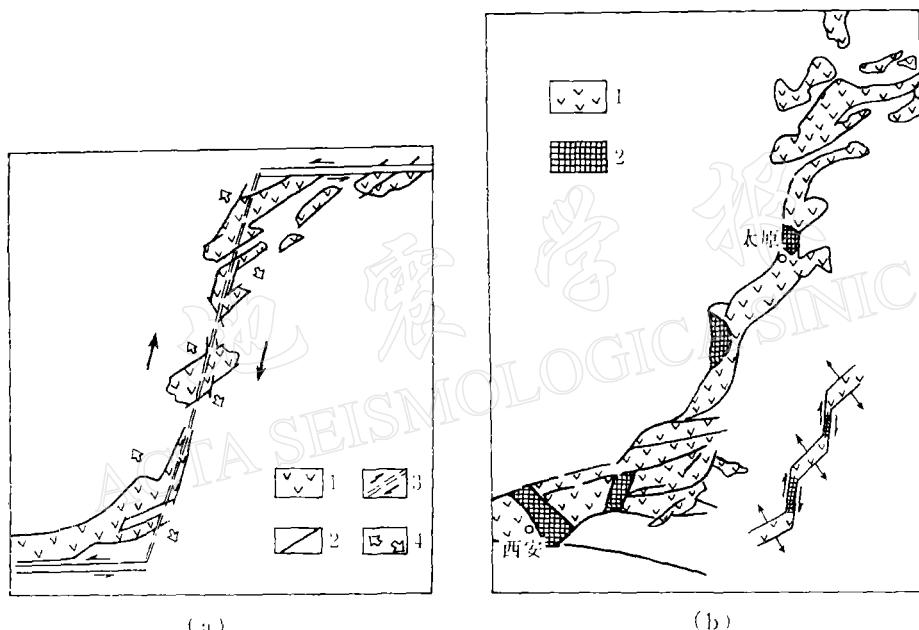


图 2 山西地堑系的简化构造模式

(a) 构造模式 A(据刘光勋等,1979)

1——断陷盆地 2——主要断裂 3——剪切带 4——张应力方向

(b) 构造模式 B(据张文佑等,1975)

1——断陷盆地 2——相对隆起区

Fig. 2 Tectonic model simplified from the Shanxi graben system

(a) Tectonic model A (after Liu Gongxian, 1979)

1—Fault basins 2—Main fault 3—Shear belt 4—Tension direction

(b) Tectonic model B (after Chang Weyou, 1975)

1—Fault basins 2—Relatively uprising areas

二、构造模式的分析和计算

构造模式 A 把山西地堑系简化为一条大型的顺时针旋转的剪切破裂带,该剪切带的走向约为北东 15° ,深切至莫霍面,总长度约为 800km。因此,我们用一个短半径和长半径之比为 0.1 左右的扁椭圆面来模拟这个断裂面,也可以简化为具有穿透裂纹的平板问

题。这样就把问题归结为一个具有北东 15° 走向的断裂面。在北东东向(约 60° — 70°)的主压应力作用下的断裂扩展问题。对于二维穿透裂纹及三维椭圆裂纹面的扩展方向的理论计算方法和公式，本文第一作者已在文献[4]和[5]中分别给予详细论述，这里仅给出简要结果及必要的参数替换。

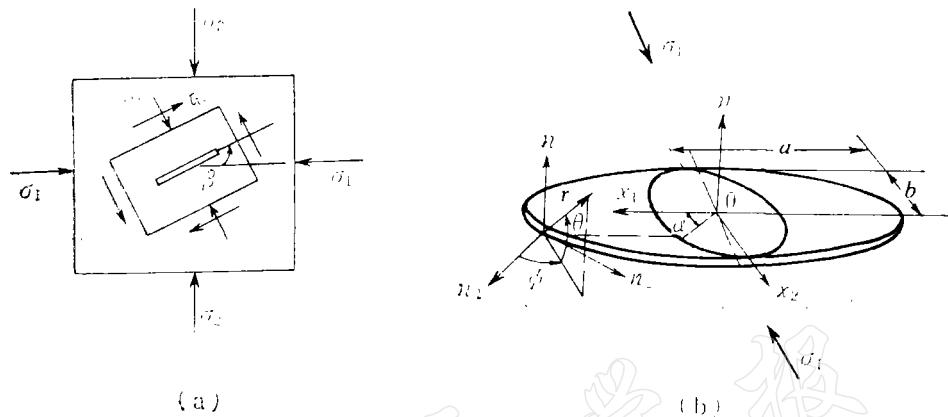


图3 研究断裂扩展方向的力学模式

(a) 二维穿透裂纹 (b) 三维椭圆盘裂纹面

Fig. 3 Mechanical models for studying fracture propagation direction
(a) Two-dimensional through crack (b) Three-dimensional elliptical crack

研究断裂的初始扩展方向问题，国际上通用最大应力准则和最小应变能密度因子准则^[6]。这里我们选用后者。该准则认为，裂纹起始扩展方向是应变能密度因子取极小值的方向。对于二维穿透裂纹和三维椭圆盘裂纹，应变能密度因子都可以写成用应力强度因子表达的统一格式，即：

$$S = \alpha_{11}K_1^2 + 2\alpha_{12}K_1K_2 + \alpha_{22}K_2^2 + \alpha_{33}K_3^2 \quad (1)$$

其中， S 是应变能密度因子； K_1, K_2 和 K_3 分别是 I, II, III 型裂纹的应力强度因子； α_{11} , α_{12} , α_{22} 和 α_{33} 是与裂纹端部应力场有关的系数，它们是：

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} = \frac{\xi + 1}{16\mu\lambda\xi^2\cos\theta} \left[2(1 - 2\nu) + \frac{\xi - 1}{\xi} \right] \\ \alpha_{12} = \frac{(\xi^2 - 1)^{1/2}}{8\mu\lambda\xi^2\cos\theta} \left[\frac{1}{\xi} - (1 - 2\xi) \right] \\ \alpha_{22} = \frac{1}{16\mu\lambda\xi^2\cos\theta} \left[4(1 - \nu)(\xi - 1) + \frac{1}{\xi}(\xi + 1)(3 - \xi) \right] \\ \alpha_{33} = \frac{1}{4\mu\lambda\xi\cos\theta} \end{array} \right. \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \lambda &= \cos\phi + \frac{b^2 - a^2}{2ab} \sin\phi \sin 2\alpha \\ \xi &= \operatorname{sgn}(\cos\theta) \left[1 + \left(\frac{\tan\theta}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

ϕ, θ 和 α 是如图 3(b) 所示的球角坐标, a 和 b 是椭圆盘的长半径和短半径, λ, μ 和 ν 是弹性常数。对于二维问题, 由于 $\phi = 0$, 则 $\lambda = 1$ 及 $\xi = 1/\cos\theta$, 所以(2)式简化为仅与 θ 角有关的表达式。对于图 3(a) 所示的二维裂纹, 应力强度因子为:

$$K_1 = 0, K_2 = \tau_c \sqrt{a} \quad (4)$$

其中, τ_c 是克服裂纹面摩擦力后的有效剪应力, 它的大小由 $\tau_c = \tau_n - f\sigma_n$ 决定, 这里 f 是裂纹面之间的摩擦系数, σ_n 和 τ_n 分别是与裂纹面垂直和平行的正应力和剪应力。将以上结果代入(1)式并取 S 的极小值, 求得扩展角 θ_0 为:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{1 - 2\nu}{3} \right) \quad (5)$$

θ_0 随介质泊松比 ν 的变化见表 1。表明图 3(a) 所示的裂纹不是沿原有方向扩展, 而是在两端按 θ_0 的方向扩展。偏离原裂纹方向扩展的部分称之为扩展分支。按照由试验得到

表 1 扩展角 θ_0 随泊松比 ν 的变化

Table 1 The variations of fracture angle θ_0 with Poisson's ratio ν

ν	0.0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
θ_0	70.5°	75.6°	79.3°	80.4°	83.3°	87.2°	90°

的扩展分支长与原裂纹长的比值关系, 及计算得到的初始扩展角的数值, 可以作出裂纹扩展过程图 [图 4(a)], 其形态与 Brace (1963)^[7] 的追踪最大张应力方法的试验结果 [图 4(b)], 以及 Hoek (1965)^[8] 的岩板试验结果 [图 4(c)] 比较一致, 都表明受压斜裂纹是按表 1 所给的 θ_0 方向初始扩展, 渐弯向最大主压应力方向, 当扩展至与最大主压应力方向平行时终止扩展。

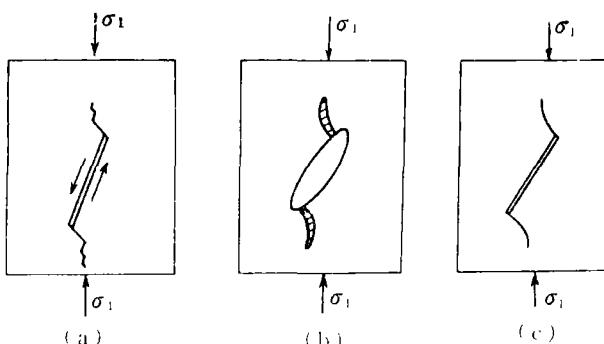


图 4 二维复合型裂纹的扩展图形
Fig. 4 Propagation pattern of two-dimensional crack

对于图 3(b) 的椭圆盘裂纹面, 应力强度因子有如下形式^[6]:

$$\begin{cases} K_1 = 0, \\ K_2 = \frac{m^2 m'^{\frac{1}{2}} \tau_c b \cos \alpha}{(a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)^{1/4} [(m^2 - \nu) E(m) + \nu m'^2 K(m)]}, \\ K_3 = \frac{(\nu - 1) m^2 m'^{\frac{1}{2}} \tau_c a \sin \alpha}{(a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{4}} [(m^2 - \nu) E(m) + \nu m'^2 K(m)]} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$m^2 = 1 - (b/a)^2 \quad m' = b/a \quad (7)$$

$K(m)$ 和 $E(m)$ 是第一, 二类椭圆积分。

将以上结果代入(1)式, 并对 $S(\phi, \theta)$ 求极小值, 就可以得到沿裂纹面周界各点的初始扩展方向 (ϕ_0, θ_0) 。表 2 列出 $\nu = 0.25$ 时的扩展角 ϕ_0, θ_0 随 a 和 b/a 的变化结果。该

表 2 扩展角 ϕ_0, θ_0 随 a 和 b/a 的变化 ($\nu = 0.25$)

Table 2 The variation of fracture angle (ϕ_0, θ_0) with a and b/a ($\nu = 0.25$)

ϕ_0, θ_0	$b/a = 0.01$		$b/a = 0.1$		$b/a = 0.5$		$b/a = 1.0$	
$\alpha = 0^\circ$	0°	80.4°	0°	80.4°	0°	80.4°	0°	80.4°
$\alpha = 5^\circ$	-83.4°	0°	-40.7°	80.4°	-7.4°	80.4°	0°	80.4°
$\alpha = 15^\circ$	-87.7°	0°	-68.0°	0°	-20.6°	80.4°	0°	80.4°
$\alpha = 30^\circ$	-88.7°	0°	-76.9°	0°	-33°	80.4°	0°	80.4°
$\alpha = 45^\circ$	-88.8°	0°	-78.7°	0°	-36.9°	0°	0°	80.4°
$\alpha = 60^\circ$	-88.7°	0°	-76.9°	0°	-33°	0°	0°	0°
$\alpha = 75^\circ$	-87.7°	0°	-68.0°	0°	-20.6°	0°	0°	0°
$\alpha = 90^\circ$	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°

结果指出, 在裂纹面长轴端部的 α 角域内的裂纹面前缘各点, 是按照与原裂纹面偏离一个角度 (ϕ_0, θ_0) 的方向扩展, 但在 α 角域外的各点是沿原裂纹面方向扩展的。图 5 给出 α 角域的位置及椭圆裂纹面的扩展图形。 α 角域的大小与裂纹面的几何尺度比 b/a 有关。 b/a 小, 扩展分支的 α 角域小; b/a 大, 扩展分支的 α 角域也大。对于山西地堑系的构造

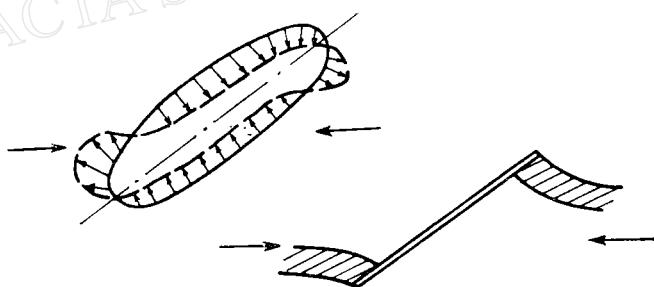


图 5 椭圆裂纹面的扩展图形(阴影区表示扩展分支区)

Fig. 5 Propagation pattern of the elliptical crack plane. (Shadow zone denotes branching fracture zone)

模式 A, b/a 约等于 0.1, 则扩展分支的 α 角域约为 8° 左右。按照最大应力准则可知, 断裂扩展方向是受裂纹端的最大周向张应力制约的。因此, 扩展分支区具有拉张性质, 除受有剪应力作用外, 还受有与扩展分支方向垂直的张应力作用。在张应力作用下, 扩展分支区有明显的垂向变形。对于模式 A 来说, 一条北北东向右旋的剪切带, 可在它的东北端和西南端产生两个反对称的与该剪切带成 70° 左右的扩展分支区, 由于扩展分支区不断地受有张应力作用, 扩展分支区内断裂增多, 地面下沉, 地壳减薄, 地热流和布格重力增高, 逐渐形成盆地。图 1 中的大同盆地和运城盆地, 恰好与这两个扩展分支区相对应, 因而盆地形状比较宽阔, 走向与剪切带成 70° 左右, 但却与区域主压应力方向相同, 盆地内断层

密集且多,具有正断层性质,中小地震多而强震少。但模式 A 仍不能解释太原盆地的地质、地球物理和地震等方面所显示出来的特征。

模式 B 实际上是两个模式 A 的组合,但并不是简单的叠加,它们之间的互相影响必须考虑。雁行排列的忻县和临汾地堑可以看做两条雁列式的裂纹系。该裂纹系在区域压应力作用下的扩展问题,仿照前述方法,仍然可以转化为求解有效剪应力作用下裂纹系的扩展问题。对于两条雁列的平面内剪切裂纹,应力强度因子已在文献[6]中给出。应力强度因子与裂纹长度、裂纹排列的几何间距有关。它随参数 $2a/d$ 和 e/f 的变化曲线见图 6。对

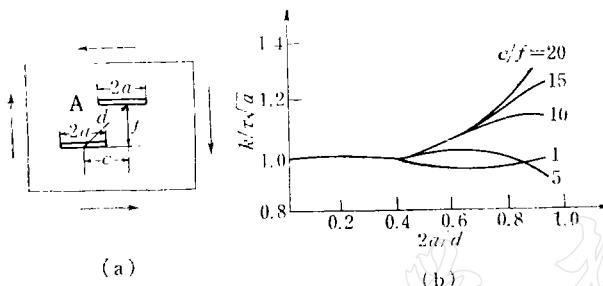


图 6 雁列平面内剪切裂纹的应力强度因子
Fig. 6 Stress intensity factor of en echelon cracks

于山西地堑系,可近似取 $2a/d = 0.6$, $e/f = 5$, 则从图 6 的曲线可得到两裂纹相邻端的应力强度因子 $K_A = 1.05K$, 表明另一条裂纹的存在将会导致与其相邻端的应力强度因子增加,这意味着裂纹系的相邻端要比非相邻端更容易发生扩展。同单裂纹一样,仍然可以运用最小应变能密度因子准则,研究雁行裂纹的初始扩展方向。初始扩展角的数值以及两裂纹远端处的扩展形态与单裂纹的结果相同,只是在两裂纹的相邻端的扩展形态与单裂纹不同,这是因为在相邻端存在裂纹之间的互相作用,因而往往发生一条裂纹的扩展分支区与另一条裂纹的端部相连接或是两裂纹的扩展分支区的相互连接和贯通为一体的情形,这视两裂纹的相互几何位置而定。不言而喻,当两裂纹的间距相当大时,即 $e/f < 4$ 或 $2a/d < 0.4$ 时,裂纹之间的互相作用可以忽略不计。忻县地堑和临汾地堑的长度各为 120km 左右,深度仍取 40km,每个断裂面的尺度比 $b/a = 0.33$,按照上述计算方法,得到每个断裂面端部的扩展分支区的 α 角域约为 25° 。B 模式表明,在忻县地堑和临汾地堑的两端存在比较宽阔的扩展分支区。该两个地堑的非相邻端的扩展分支区正好对应大同盆地和运城盆地,相邻端的扩展分支区对应太原盆地。这些盆地都比较宽阔,显然比由模式 A 得到的较窄的扩展分支区 ($\alpha = 8^\circ$) 更加符合实际。由于雁列断裂相邻端的扩展分支区是这两断裂扩展效果的叠加,是每条断裂端扩展分支相互联接和贯通的结果,因此它所受到的张应力要比非相邻端扩展分支区的大。张应力能使断裂面之间的摩擦应力减小,使断裂面在较小的剪应力水平时发生剪切错动。因而在张应力较大的地区,能量难予积累孕育成大地震,而易经常发生一些小震和震群。这就是为什么太原盆地内小断裂很多,中小地震频度很高,经常发生小震群,但从未发生六级以上地震的原因;也是为什么它和大同盆地、运城盆地同样属于扩展分支区的位置,而中小地震的频度却比大同盆地和运城盆地高得多的原因。山西地堑系的扩展示意图见图 7。

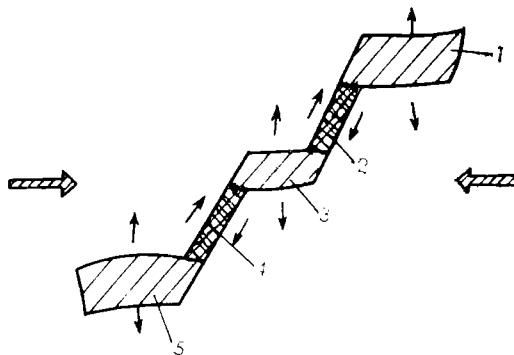


图 7 山西地堑系的扩展图形(双线箭头代表区域应力场的最大主压应力方向)
1—大同盆地；2—忻县盆地；3—太原盆地；4—临汾盆地；5—运城盆地

Fig. 7 Propagation pattern of Shanxi graben system (Double line

arrows denote the major principal compression stress)

1—Datong basin; 2—Xin Xian basin; 3—Taiyuan basin;
4—Linfen basin; 5—Yuncheng basin

三、结果分析和应用

对于山西地堑系的上述理论分析和结果，亦可适用于其它地堑系的分析，如莱茵地堑^[9]，贝加尔湖地堑系^[10,11]和利奥·格兰特裂谷^[12]等，都存在明显的剪切段和拉张段，剪切段狭窄，拉张段宽阔并且相间排列，拉张段往往位于剪切段端部且与剪切段方向偏离 80° 左右并逐渐趋向于区域最大主压应力方向。但是这些地堑都不如山西地堑系典型，往往只在剪切段的一端形成拉张的扩展分支区，我们称它为半 Z 形。若用 Z 与半 Z 形来说明地堑系的空间分布特征，则莱茵地堑和利奥·格兰特裂谷都是半 Z 形，贝加尔湖地堑系是 $1\frac{1}{2}$ 个 Z 形，山西地堑系则为两个完整的 Z 形。贝加尔湖地堑系由于两条剪切断裂不是互相平行的，则它们邻近端的扩展分支拉张区是相接，但相交一个角度（见图 8）。

地堑形成机制的力学分析工作，不仅能解释已有的观测事实，而且能对地堑的未来活动趋势及地堑带内的地震预报工作提供理论根据。例如，山西地堑带的强震危险区应是忻县地堑和临汾地堑，因为它们是地堑系内的剪切段，剪切段是地堑系中的能够积蓄能量发生大地震的部位。而大同、太原和运城盆地则是地堑系的拉张扩展部位，是易于释放能量的地方，因此是中小地震经常发生和火山活动的地区。尤其应注意的是，太原盆地位于两个剪切段的相邻部位，任何一个剪切段的活动都会对它有影响，是历史上、当前及今后中小地震频繁发生的地区。太原、平遥、和顺、太谷、北格和介休等小震群都是在太原盆地内发生的，这是实际观测对本文理论的验证。

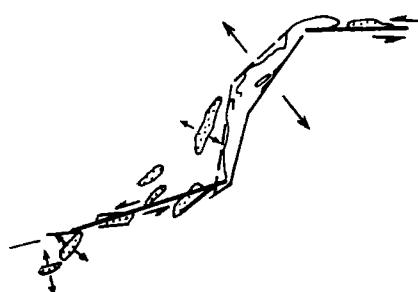


图 8 贝加尔湖地堑系的构造简图
Fig. 8 Tectonic sketch of Baikal rift valley (after Logatchev, N. A.)

参 考 文 献

- [1] 光谱,漫话山西地堑,地震战线,1979,3: 1—3.
- [2] 巩玉琪,山西地堑带地质构造特征及地震活动性,山西地震,1980,1: 22—26.
- [3] 张文佑、钟嘉猷、叶洪、从柏林,初论断裂的形成和发展及其与地震的关系,地质学报,1,17—27,1975.
- [4] 张之立、李钦祖、谷继成、靳雅敏、杨懋源、刘万琴,唐山地震的破裂过程及其力学分析,地震学报,2,111—129,1980.
- [5] 张之立、刘新美,三维断裂扩展方向的理论分析和余震分布图象的预报,地球物理学报,25,增刊,569—581,1982.
- [6] Sih, G. C., Mechanics of fracture, Noordhoff Int. Pub., 1973.
- [7] Brace, W. F., and E. G. Bombolakis, A note on brittle crack growth in compression, *J. Geophys. Res.*, 68, 3709—3713, 1963.
- [8] Hoek, E. and Z. T. Bieniawski, Brittle fracture propagation in rock under compression, *Int. J. of Fracture Mech.*, 3, 137—155, 1965.
- [9] Ahorner, L., Seismotectonic relations between the graben zones of the Upper and Lower Rhine valley, In: H. J. Illies and S. Mueller (Eds). *Graben Problems*, Schweizerbart, Stuttgart, 155—156, 1970.
- [10] Logatchev, N. A., and N. A. Florensov, The Baikal system of Rift valleys, *Tectonophysics*, 45, 1—13, 1978.
- [11] 张文佑、李荫槐、马福臣、钟嘉猷,地堑形成的力学机制,地质科学,1, 1—11, 1981.
- [12] Golombek, M. P., G. E. McGill, and L. Brown, Tectonic and geologic evolution of the Espanola basin, Rio Grande rift: Structure rate of extension, and relation to the state of stress in the western United States, *Tectonophysics*, 94, 483—507, 1983.

A MECHANICAL MODEL OF THE FORMATION MECHANISM OF THE SHANXI GRABEN ZONE AND THE CHARACTERIS- TICS OF SHANXI EARTHQUAKE ZONE

ZHANG ZHILI, FANG XING AND YIAN HONG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

The Shanxi Graben zone in North China is a small continental rift valley. Its principal characteristics are the same as that of the other continental rift valleys of the world. Based on the observed facts that the formation and development of the rift valleys and grabens are the results of the propagation of the fracture system existing in the crust, it is possible to study the mechanism of their mechanical formation by using the method of fracture mechanics. In this paper, a three-dimensional mechanical model is presented in order to study the formation and development processes of the Shanxi graben and explain the zigzag pattern of the Shanxi graben system. The angles between the segments of shear and tension are calculated from this model and their magnitude depends on such factors as the direction of the regional stress field, the aspect ratio between the depth and length of the graben fracture zone, the mechanical properties of the materials etc. The general direction of the tension segments always directs to that of the maximum principal compression stress of this region, so that the direction of the maximum principal compression stress of the region can be given from the general direction of the tension segments and vice versa. The characteristics of earthquake distribution in the Shanxi graben zone are also analysed by means of the seismicity data.

Besides the Shanxi graben system, the Rhine graben, the Rio Grande rift valley and the Baikal rift valley are also analysed by using the same method. The results show that there also exist obvious segments of shear and tension in grabens and rift valleys.