

文章编号: 1006-6616(2003)02-0161-10

盐源-宁蒭地震共轭破裂及极限 主应力随地壳深度变化

谢新生

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要:许多震例表明,地震可以形成于共轭破裂。地震震源处,其温度和压力与地壳浅处及地表不同,温、压越高,共轭破裂角越大,随着深度的变浅(温、压减小),地震共轭破裂角减小;高烈度等震线共轭角也减小。用数学力学方法和岩石力学实验结果,探讨了1976年盐源-宁蒭6.7和6.4级地震共轭破裂及极限主应力随地壳深度变化。

关键词:共轭破裂;盐源-宁蒭地震;共轭等震线;极限主应力

中图分类号:P315

文献标识码:A

0 引言

共轭破裂由相互交叉的两组断裂组成,在地壳岩石中十分常见。李四光^[1]称其为“棋盘格式构造”;张文佑^[2]称其为“X”型构造系,并做出共轭破裂形成的实验^[3];丁国瑜^[4]认为我国广大区域普遍存在现今正在活动的北东和北西方向共轭的地壳破裂网络图象;张四昌^[5]对我国11次强震共轭破裂特征进行了总结,认为主震前后出现与主震有关的中、小地震震中分布的共轭图像是较为普遍的现象;李荣安^[6]认为海城地震是两组其轭构造活动的结果;杨仕升等^[7]通过有限元法研究了共轭发震构造的相互作用。此外,晏凤桐^[8]、刘正荣等^[9,10]、钟以章等^[11]、章光月^[12]、张四昌等^[13-15]、谢新生^[16]等许多学者对地震共轭破裂现象进行过讨论。

1 地震共轭破裂现象

发生强震的震源断层,不会在主震破裂错动后立即停止活动,在震源岩体中仍有剩余能量的释放产生余震,从而构成地震序列。前人曾根据地震序列的震源位置,描述了震源断层

收稿日期:2002-06-19

基金项目:地震科学联合基金资助课题(198046)。中国地震局地壳应力研究所论著号:2003B0003

作者简介:谢新生(1953-),男,1975年武汉地质学院地质力学系毕业,中国地震局地壳应力研究所副研究员,中国地质学会地质力学专业委员会委员,中国地震学会构造物理专业委员会委员。主要从事地震地质以及地壳动力学研究。

的产状、埋深和规模。如，刁桂苓等^[17]利用 1995 年云南武定 6.5 级地震序列中地震的震源分布、震源机制，从三维空间、时间进程研究了该地震的震源断层的产状以及破裂过程（图 1）。

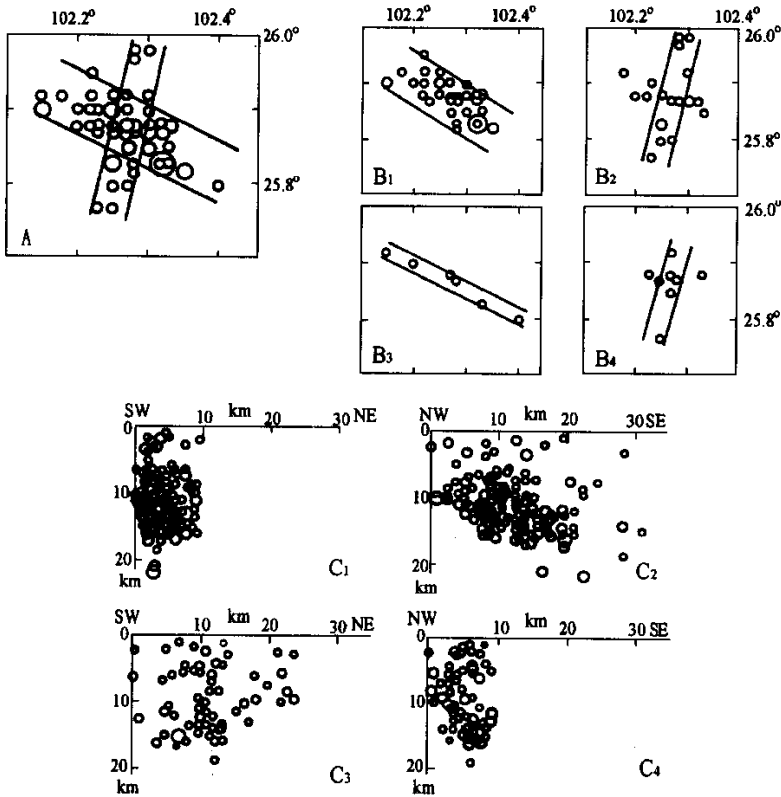


图 1 1995 年武定 6.5 级地震的震源破裂^[17]

Fig.1 The rupture at the focus of 1995 Yunnan Wuding earthquake $M_S = 6.5$

A. 武定地震序列 $M_L \geq 4$ 震中分布；B. 该序列 4 个时段震中分布（B₁.1995 年 10 月 24 日 - 30 日；B₂.1995 年 10 月 31 日 ~ 11 月 10 日；B₃.1995 年 11 月 11 日 ~ 30 日；B₄.1995 年 12 月 1 日 ~ 1996 年 2 月 1 日）；C. 该地震序列 NWW（C₁，C₂）和 NNE（C₃，C₄）共轭条带纵、横向震源剖面

从图 1 中可以看出：1) 该地震的震源断层为共轭破裂（余震分布长、短轴共轭角为 75°）；2) 各时段以一条破裂为主，先发生主破裂，而后单侧向 NWW 方向破裂扩展，形成 N65°W 方向主破裂面；3) 地震大部分发生在 5 ~ 15km 深度，主震震源深度为 15km，绝大部分余震位于其上部，表明主破裂自深处开始而后沿 NWW 和往上扩展；4) 主破裂面倾向 NNE，倾角很陡，次破裂面倾向 SEE，倾角也较陡。

1995 年云南武定 6.5 级只是一个发生共轭破裂的震例，实际上，地震共轭破裂过程有两种，一种是在主震发生时，地表出现共轭破裂，或地表虽表现为单组破裂，但极震区等震线或其余震分布的长、短轴方向呈共轭形态。例如日本 1927 年北丹后 7.5 级地震时地表出现左旋的 NW 向断层及右旋的 NE 向断层^[18]；1927 年甘肃古浪 8 级地震时出现 NWW 向逆左旋

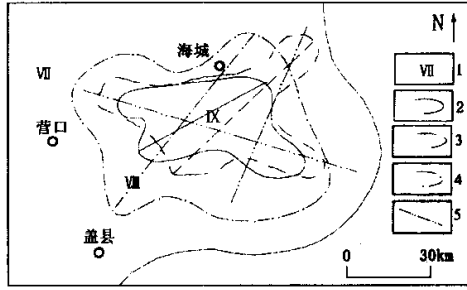


图 2 1975 年海城 7.3 级地震等震线及余震分布范围

Fig.2 Distribution of isoseismal lines and aftershocks of the M7.3 Haicheng earthquake in 1975

1. 地震烈度值^[20]; 2. 高烈度线及共轭轴; 3. 余震分布范围及共轭轴^[14]; 4. 低烈度线及共轭轴; 5. 震源机制节面

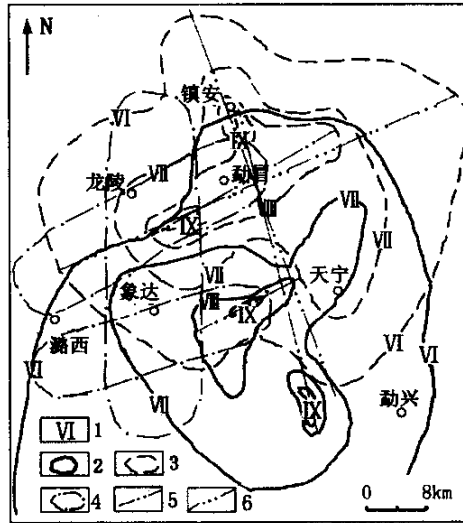


图 3 1976 年 5 月 29 日龙陵-路西 7.3 和 7.4 级地震等震线及余震分布范围

Fig.3 Distribution of isoseismal lines and aftershocks of the

Longling-Luxi M7.3&7.4 on May, 29, 1976

1. 烈度值; 2. 7.3 级地震等震线^[21]; 3. 7.4 级地震等震线^[21]; 4. 余震分布范围^[14]; 5. 高烈度共轭轴; 6. 低烈度共轭轴

地表形变带和 NNW 向右旋的形变带^[19]; 1975 年海城 7.3 级地震 (图 2) 的地表破裂带表现为 NNW 向左旋破裂, 但其地震等震线^[20]和余震分布^[14]长、短轴方向 (NNW 和 NE) 组成共轭图象; 1976 年龙陵-路西 7.3 和 7.4 级地震与海城地震一样, 其地震等震线^[21]和余震分布^[14]长、短轴方向 (NEE 和 NNW) 组成共轭图像 (图 3)。另一种是共轭破裂为双震型, 即两次强震或一次强震及另一次接近强震的强余震发生两组方向共轭破裂, 如 1937 年山东菏泽 7 级地震和其后 14 小时发生的 6.7 级地震, 在地表呈现 NW 和 NNE 两组方向的共轭等震线^[22]; 1976 年盐源与宁蒗 6.7、6.4 级地震 (图 4a, b) 形成近 SN 和 NW 两个方向的地震等

震线^[23]，而且其余震也基本上沿这两个方向分布^[14]。

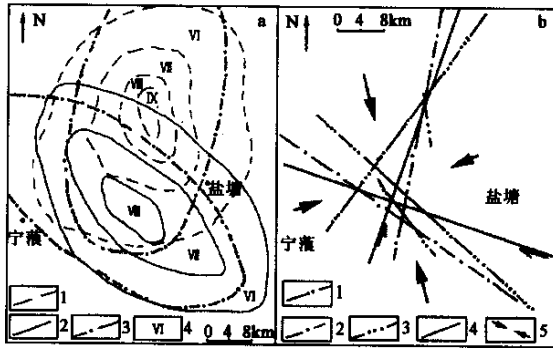


图4 1976年11月7日和12月13日盐源、宁蒭6.7和6.4级地震等震线及其共轭轴、余震分布范围及其共轭轴和震源两节面走向

Fig.4 Distribution of isoseismal lines and aftershocks of the M6.7& M6.4 Yanyuan-Ninglang earthquake on November, 7 and December, 13, 1976

a : 1.6.7级地震等震线^[23]; 2.6.4级地震等震线^[23]; 3. 余震分布范围^[23]; 4. 烈度值;
b : 1. 高烈度轴向; 2. 余震分布轴向; 3. 低烈度轴向; 4. 震源两节面走向; 5. 主应力方向

从上述两种共轭破裂震例中选择1976年龙陵-潞西地震、1976年盐源-宁蒭地震及1975年海城地震进行分析，这三个地震有两个共同特征：其一是高、低烈度等震线长、短轴的夹角、余震分布区长、短轴夹角呈共轭型态（表1）。其二是高烈度线长、短轴交角、余震分布区长、短轴交角、低烈度等震线长、短轴交角以及震源机制解的两组节面交角各不相同（表2），如盐源与宁蒭6.7、6.4级地震，这四个共轭角分别为45°、60°、80°和86°。共轭角为什么存在这些变化？研究其成因对认识强震机理及强震地表效应有积极意义。以下试图用数学力学方法和高温、高压岩石力学实验结果探讨共轭角差别的成因，并以1976年盐源与宁蒭6.7、6.4级地震为例对共轭破裂和极限主应力随地壳深度的变化进行定量分析。

表1 3次强震序列的共轭参数^[14]

Table 1 Conjugate parameters from three strong earthquakes^[14]

地点	发震时间	震级	震中烈度	余震带轴向(°)	等震线轴向(°)	主震震源参数			
						节面 I	节面 II	P 轴	T 轴
						走向/倾向 ∠倾角(°)	走向/倾向 ∠倾角(°)	方位, 倾角(°)	方位, 倾角(°)
盐源	1976.11.07	6.7	IX	N11E	SN	20/SE∠74	296/SW∠70	158, 26	248, 4
宁蒭	1976.12.13	6.4	VIII	N51W	N53W	32/SE∠70	118/NE∠80	166, 6	73, 22
龙陵	1976.05.29	7.3	IX	NNW	NNW	101/NE∠78	14/SE∠72	148, 3	56, 21
	1976.05.29	7.4	IX	NEE	NEE	97/NW∠67	14/SE∠45	141, 12	35, 51
海城	1975.02.04	7.3	IX	N67W	NWW	290/NE∠81	23/SE∠75	66, 18	157, 4
				N40E	NNE				

表 2 3 次强震的余震范围、高低地震等震线两轴夹角以及震源机制解

Table 2 The range of aftershocks, angles between axes of the lowest and the highest isoseismal lines and focal mechanics from three strong earthquakes

发震时间 (年)	地点	震级 <i>M</i>	高烈度线 夹角 (°)	余震范围 夹角 (°)	低烈度线 夹角 (°)	震源机制解 两节面夹角
1976	龙陵 路西 盐源	7.4	65 ^②	72 ^①	87 ^②	65 ^②
		7.3				87 ^②
		6.7				84 ^③
1976	宁蒭	6.4	45 ^③	60 ^①	80 ^③	86 ^③
		7.3				60 ^①

表内的角注为资料出处，据下述资料量出：①张四昌，1979^[14]②陈立德等，1979^[21]③盐源-宁蒭地震编辑组，1988^[23]④朱凤鸣，1982^[20]

2 共轭破裂形成的力学条件及共轭破裂角与极限应力关系

2.1 共轭破裂形成的力学条件

地壳岩体在极限主应力作用下发生变形或断裂。岩石力学试验结果表明，由于岩石的物性和所处的应力环境不同，其断裂极限曲线的形态也不一样^[24]。从实验可知，大多数地壳岩石的断裂极限曲线形态接近抛物线（图 5）。抛物线断裂极限方程为^[24]：

$$\tau_n^2 = \frac{k^2}{\sigma_1} (\sigma_1 - \sigma_n) \tag{1}$$

或

$$\tau_n = k \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_1^2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_1} \right)^{1/2} \tag{2}$$

式中 σ_n 、 τ_n 分别为共轭破裂面上各点的极限应力分量， σ_1 、 σ_3 为相应的极限主应力。 k 为当 $\sigma_n = 0$ 时岩体的抗纯剪切强度， σ_1 为相应温压状态下的抗张强度（在处理深部构造问题引用破裂准则时，应考虑环境因素，如应力、温度等对岩石物性的影响；故这里的抗张强度不

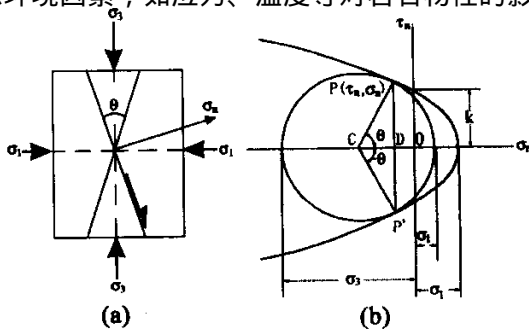


图 5 岩石共轭破裂及抛物线断裂极限示意图

Fig.5 Sketch map of conjugate ruptures in rocks and parabola from fault limit

(a): 应力状态及共轭破裂示意；(b): 抛物线断裂极限示意

是传统的单轴抗张强度 λ 。(2)式表明,剪断裂形成的条件不仅与应力有关,还与两个物性常数 k 和 σ_I 有关。共轭破裂发生时应满足的力学条件是^[24]:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 2 \frac{k^2}{\sigma_I} (\sigma_1 + \sigma_3) = k^2 \left(4 - \frac{k^2}{\sigma_I^2} \right) \quad (3)$$

2.2 共轭破裂角与极限主应力关系

设共轭破裂角为 θ ,其两个破裂面的外法线与最大主应力 σ_1 (最大张应力,下同)的方位角分别成 $\pm \theta/2$,共轭破裂面钝角等分线与最大主应力(以张为正)方位一致,锐角等分线与最小主应力(以压为负)方位一致,则共轭破裂角与极限主应力的关系^[24]为:

$$\tan \theta = \frac{\tau_n}{\sigma_n - p} = \frac{2\sigma_I}{k} \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_I^2} - \frac{p}{\sigma_I} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中符号的意义同前,其中 $p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ 为平均主应力,从(4)式可以看出,当 p 增大时, θ 相应变小。但 p 不能无限制地增加,即:

$$p \leq \sigma_I - \frac{k^2}{2\sigma_I} \quad (5)$$

当(5)式为等式时, $\theta = 0$,两个断裂面重合,此时 $\sigma_n = \sigma_I$ 而 $\tau_n = 0$,破裂转化为张断裂。纯剪切破裂共轭角为^[24]:

$$\theta_0 = \arctg(2\sigma_I/k) \quad (6)$$

式中 θ_0 为纯剪切共轭破裂角, k 、 σ_I 、 p 、 σ_n 、 τ_n 意义同前, $0 < \theta < \theta_0$ 时,为张剪切破裂, $\theta > \theta_0$ 时为压剪切破裂。当 p 减小时, θ 相应变大。当 p 达到一定高负值时,岩石将由脆性状态过渡到韧性状态,产生接近正交断裂。因此,根据共轭破裂角大小和地壳岩石物性,可以计算其曾经形成时的极限主应力^[24],即 σ_1 、 σ_3 分别为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_I - \frac{k^2}{4\sigma_I} + \frac{k^2}{2\sigma_I} \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - \frac{1}{2\cos^2(\theta)} \right) \\ \sigma_3 &= \sigma_I - \frac{k^2}{4\sigma_I} - \frac{k^2}{2\sigma_I} \left(\frac{1}{\cos(\theta)} + \frac{1}{2\cos^2(\theta)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 k 、 σ_I 、 θ 意义同前。

3 1976年盐源-宁蒭6.7和6.4级地震的极限主应力

地壳由不同力学性质的岩层组成。在构造应力场作用下,由于其所处的力学环境不同,即温度和压力不同而呈现复杂的破裂性质,地壳深处温度、压力较高,岩石为粘弹性破裂或塑性变形,地壳浅处温度、压力较低,岩石出现脆性破裂。

岩石力学实验表明:地壳岩石共轭破裂角以及破裂面与最大压应力之间的夹角是地壳深度的函数,随着温度的升高、围压的增加,共轭破裂角和破裂面与最大压应力之间的夹角也随之变大。当围压、温度分别为400~600MPa与350℃~550℃时,花岗岩出现一对夹角为80°的共轭破裂面,此时发生破裂的温度和围压,相当于地表以下约13~22km的深度^[25]。在室温条件下试验^[25],当围压小于200MPa时,破裂面与主压应力夹角为15°~20°,为张剪切破裂;突发失稳的稀疏共轭破裂发生在地壳脆延性转变深度上,共轭破裂角80°左右^[26-28]。地壳浅层一般为70°~75°左右的共轭张剪切破裂。黄忠贤^[29]也做过类似实验。

岩石力学实验研究认为，地壳岩石物性常数以及地壳应力场，在地壳一定的深度内是地壳深度的线性函数^[30]，即在这深度段内随着深度的增加，岩石的抗压强度 σ_c 、抗剪强度 k 也线性增加。（见表 3^[30]），表 3 的拟合公式见（8）式。

$$\sigma_t = \frac{k^2}{\sigma_c - 2k} \tag{8}$$

$$\sigma_c = -41.47Z + 108.354$$

$$k = -17.96Z + 46.9244$$

$$r = 0.9189$$

式中 σ_c 为抗压强度 (MPa)， r 为相关系数， σ_t 为抗张强度 (MPa)， k 为抗剪强度 (MPa)， Z 为地壳深度 (km)。不同岩石有不同的物性常数，一般认为，浅源地震震源地壳岩石为花岗岩或花岗片麻岩，1976 年盐源-宁蒗 6.7 和 6.4 级地震震源深度为 15km，是浅源地震，震源地壳岩石应该与李彪等^[30]试验的花岗岩样品相似。假定共轭破裂是自地壳深处至地表的连续破裂，震源处共轭破裂角 $\theta = 84^\circ$ ，地表共轭破裂角 $\theta = 80^\circ$ ，由（8）、（7）以及（2）式，得出盐源-宁蒗地震震时极限主应力随地壳深度的变化（图 6 和表 4）。从图 6 和表 4 得出以下认识：

表 3 花岗岩岩石力学实验^[30]

Table 3 The experiment of rock mechanics from the granite^[30]

温度 (°C)	围压 (MPa)	模拟深度 (km)	抗压强度 σ_c (MPa)	抗剪强度 k (MPa)
130	104	4	345.0	149.39
284	260	10	495.0	214.34
320	310	12	555.0	240.32
366	360	14	615.0	266.3
480	520	20	1020.0	441.66

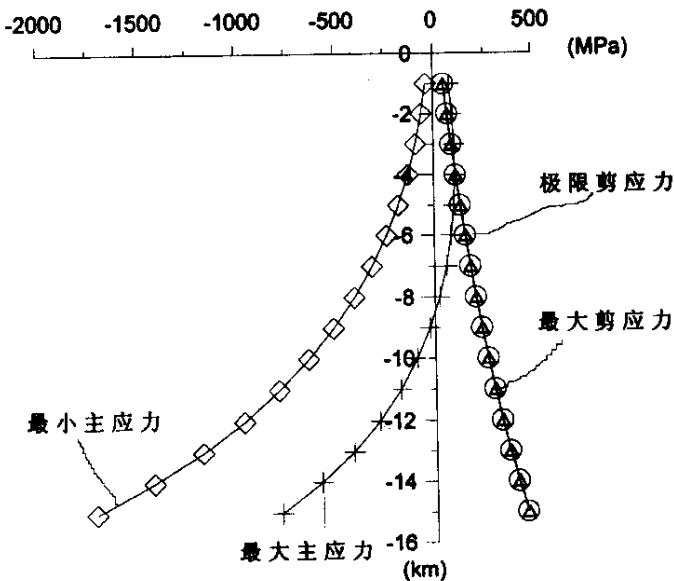


图 6 盐源-宁蒗地震极限主应力随地壳深度变化（以张应力为正）

Fig.6 Limiting principal stresses of the Yanyuan-Niglang earthquake accompanying variations of depth in the crust (Tension stresses as positive)

表 4 盐源-宁蒍地震极限主应力随地壳深度变化 (单位为 MPa)

Table 4 Limiting principal stress of the Yanyuan-Ninglang earthquake accompanying variations of depth in the crust (unit : MPa)

H (km)	θ°	θ_0°	σ_1	σ_3	τ_n	τ_{max}	σ_c	k
-1	80.27	81.21	88.6	-30.0	58.5	59.3	149.8	64.9
-2	80.53	81.21	102.7	-53.1	76.8	77.9	191.3	82.8
-3	80.80	81.21	110.9	-84.0	96.2	97.5	232.8	100.8
-4	81.07	81.21	112.5	-124.0	116.8	118.2	274.2	118.8
-5	81.33	81.21	106.5	-174.0	138.7	140.3	315.7	136.7
-6	81.60	81.21	91.8	-235.6	161.9	163.7	357.2	154.7
-7	81.87	81.21	66.9	-310.3	186.7	188.6	398.6	172.6
-8	82.14	81.21	30.5	-400.1	213.3	215.3	440.1	190.6
-9	82.40	81.21	-19.6	-507.2	241.7	243.8	481.6	208.6
-10	82.67	81.21	-85.5	-634.3	272.1	274.4	532.1	226.5
-11	82.94	81.21	-170.0	-784.6	304.9	307.3	564.5	244.5
-12	83.20	81.21	-276.5	-962.0	340.3	342.7	606.0	262.4
-13	83.47	81.21	-409.1	-1171.2	378.6	381.1	647.5	280.4
-14	83.74	81.21	-572.6	-1418.0	420.2	422.7	688.9	298.4
-15	84.00	81.21	-773.5	-1709.5	465.5	468.0	730.4	316.3

表 4 中 H (km)、 θ° 、 θ_0° 、 σ_1 、 σ_3 、 τ_n 、 τ_{max} 、 σ_c 、 k 分别为地壳深度、共轭破裂角、纯剪切共轭破裂角、最大主应力、最小主应力、极限剪应力、最大剪应力、抗压强度、抗剪强度。

(1) 极限主应力值随地壳深度增加呈曲线变化, 最大主应力 σ_1 最大为 112.5MPa, 震源处为挤压 (-773.5MPa); 最小主应力 σ_3 一直处于挤压状态, 震源处为 -1709.5MPa。最大剪应力值自地表往下呈线性增加, 并且其值一直超过破裂准则, 这表明自震源往上都可以产生破裂。

(2) 表 4 的震源主应力为双向挤压, 图 4b 盐源-宁蒍震区烈度轴向、余震分布轴向和震源两节面走向夹角的锐角等分线为 NNW 向, 因此可以认为, 盐源-宁蒍震源为 NNW 和 NEE 双向挤压形成的, 最小主应力为 NNW 向。在该应力场作用下, NNW 向破裂作右旋剪切, NNE 向破裂作左旋剪切。

4 结论与讨论

(1) 许多震例表明, 地震可以形成于共轭破裂。有的两组共轭破裂均出露地表, 有的其中一条破裂断错地表, 而另一条成为盲断层或隐伏断裂, 共轭形态的烈度等震线和余震分布表明了共轭破裂的存在。

(2) 地震震源处, 其温度和压力与地壳浅处或地表不同, 温、压越高, 其共轭破裂角越大, 随着深度的变浅即温度和压力减小, 地震共轭破裂角也减小。

(3) 低烈度等震线长、短轴共轭角较大, 高烈度等震线长、短轴共轭角较小, 表明地震烈度与地震波传播和破裂传播两者有关。震源首先发生破裂, 地震波传播到地表时, 在地表每点有一个初始烈度, 离震源越近烈度越高, 反之越低; 此后, 破裂沿水平和垂直方向以极

短的时间传播地震波, 破裂传播地震波产生的烈度又叠加在以前的烈度上。同时, 破裂直至形成一定规模的地震断层。有的地震断层错断地表, 离地震断层越近烈度值越高, 反之越低, 地表的烈度值是地震序列破裂传播地震波产生烈度的总和。地表地震断层的共轭破裂角最小, 因此高烈度等震线长、短轴共轭角也最小。低烈度区由于离地表地震断层较远, 其烈度值主要是最初发生纯剪切破裂时的初始烈度值, 因此其烈度值较低。由此可以得出, 地壳介质的物性、温度和压力的差异是形成地震高、低烈度长、短轴共轭角差别的原因。余震震源沿共轭破裂在地表下一定深度分布, 其震源深度可能比主震浅, 因此, 余震分布长、短轴共轭角在高、低烈度长、短轴共轭角之间。

(4) 1976 年盐源-宁蒗 6.7 和 6.4 级地震主要是在 NNW 和 NEE 双向挤压作用下形成的, 最小主应力为 NNW 向。

(5) 根据现场绝对应力测量得到的结果与表 4 中计算的极限主应力值比较, 如果接近计算值, 则表明该地区可能又有一个强震将要来临。

感谢王维襄教授在百忙中对本文的审阅。

参 考 文 献

- [1] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1969. 74~81.
- [2] 张文佑, 叶洪, 钟家猷. 断块与板块 [J]. 中国科学, 1978, No.2.
- [3] 张文佑, 钟家猷, 单家增, 等. 构造物理模拟实验图册 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] 丁国瑜, 李永善. 我国地震活动与地壳现代网络 [J]. 地质学报, 1979, 53 (1).
- [5] 张四昌. 中国大陆共轭地震构造研究 [J]. 中国地震, 1991, 7 (2).
- [6] 李荣安. 海城地震双向构造活动的研究 [J]. 地震学报, 1985, 7 (4).
- [7] 杨仕升, 秦保燕. 共轭发震构造相互作用的有限元分析 [J]. 西北地震学报, 1993, 15 (1).
- [8] 晏凤桐, 等. 龙陵地震的震源机制 [J]. 地震研究, 1978, 1 (1).
- [9] 刘正荣, 等. 1974 年 5 月 11 日云南永善-大关地震 [J]. 地球物理学报, 1977, 20 (2).
- [10] 刘正荣, 等. 龙陵共轭地震群的特征 [J]. 地震研究, 1978, 1 (2).
- [11] 钟以章, 丛传喜. 从海城地震裂缝特征探讨 1975 年海城 7.3 级地震的发震构造 [A]. 中国地震断层研究 [C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1988. 163~171.
- [12] 章光月. 在地震孕育和发生过程中共轭活动断层的作用 [J]. 地震地质, 1980, 2 (1).
- [13] 张四昌, 等. 1976 年龙陵地震地质特征的探讨 [J]. 地震研究, 1978, 1 (3).
- [14] 张四昌. 大地震与共轭性构造活动 [J]. 地震地质, 1979, 1 (3).
- [15] 张四昌. 华北地区的地震分布图象与共轭孕震构造 [J]. 华北地震科学, 1985, 3 (2).
- [16] 谢新生. 共轭破裂及极限主应力随地壳深度变化——以 1975 年海城 7.3 级地震为例 [J]. 中国地震, 2002, 18 (3).
- [17] 刁桂苓, 张四昌, 王绍晋, 等. 1995 年云南武定 6.5 级地震震源断层的三维特征 [J]. 地震学报, 1999, 21 (4): 361~366.
- [18] 小出仁, 山崎晴雄, 加藤一. 地震与活断层 [M]. 北京: 地质出版社, 1985. 33~40.
- [19] 戴华光. 1927 年古浪 8 级地震 [A]. 祁连山-河西走廊活动断裂系 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 175~180.
- [20] 朱凤鸣, 吴戈. 一九七五年海城地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [21] 陈立德, 赵维城, 等. 一九七六年龙陵地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [22] 胡长和, 许坤福. 1937 年菏泽地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [23] 盐源-宁蒗地震编辑组. 一九七六年盐源-宁蒗地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [24] 王维襄, 韩玉英. 棋盘格式构造的力学解析 [A]. 地质力学论丛 (4) [C]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [25] 蒋海昆, 张流, 周永胜. 地壳不同深度温压条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征 [J]. 地震学报, 2000, 22

(4): 395 ~ 403.

- [26] 王绳祖. 岩石共轭剪切的实验研究 [A]. 现代地壳运动研究 [C]. 北京:地震出版社, 1985. 171 ~ 178.
- [27] 王绳祖. 岩石的脆性-延性转变及塑性流动网络 [J]. 地球物理学进展, 1993, 8(4).
- [28] 王子潮, 王绳祖, 王威. 地壳岩石的脆延性转变、失稳型式及浅源强震震源深度的估计 [A]. 第二届构造物理学术讨论会文集 [C]. 北京:地震出版社, 1990. 103 ~ 112.
- [29] 黄忠贤. 构造应力方向与震源机制解 [J]. 地震学报, 1980, 2(2).
- [30] 李彪, 张流, 马宝林. 临汾地区主要地壳岩石的变形特性及潜在孕震层 [A]. 山西临汾地震研究与系统减灾 [C]. 北京:地震出版社, 1993. 430 ~ 437.

VARIATION OF CONJUGATE RUPTURES AND LIMITING PRINCIPAL STRESSES WITH THE CRUSTAL DEPTHS IN THE YANYUAN-NINGLANG EARTHQUAKE

XIE Xin-sheng

(*Institute of Crustal Dynamics, China Seismological Bureau, Beijing, 100085, China*)

Abstract: Many examples show that earthquakes can form conjugate ruptures. The temperature and pressure at the focus are different from that of the shallow part of crust and the ground. The higher temperature and pressure, the larger conjugate rupture angles. Accompanying decrease of depth, temperature and pressure become small and the conjugate rupture angles also become small and same as the conjugate angles of isoseismic lines on the ground and the tensile-shear ruptures are near ground. Based on the method of mathematical mechanics and the result of rock mechanic experiments, variation of the conjugate ruptures of the Yanyuan-Ninglang earthquake and its limiting principal stresses with the depth of crust is discussed.

Key words: conjugate ruptures; conjugate rupture angles; conjugate isoseismal lines; limiting principal stresses