

9-14

低角度正断层的形成模式

任建业 张俊霞

P542.31

(中国地质大学, 武汉)

摘 要 低角度正断层的形成机制是大陆伸展构造研究中的热点问题之一, 关于其形成机制及其与几何学的关系争论很大。到目前为止, 人们根据北美西部及其它地区的变质核杂岩构造研究提出了许多有关低角度正断层的形成模式。本文重点介绍并评述了比较流行的三种模式: 滚动枢纽模式、低角度正断层的岩浆驱动机制模式、应力导层与低角度正断层的发育模式。

关键词 低角度正断层, 滚动枢纽模式, 岩浆作用驱动机制, 应力导层

断层

目前, 对大陆伸展构造研究的焦点集中在低角度正断层或拆离断层(detachment fault)的存在及其性质上, 争论的焦点在于目前见到的低角度正断层是代表初始形成时的几何学状态呢, 还是由高角度正断层被动旋转所致? 根据安德森模式, 地面相当于一个主应力面, 铅直方向的岩石圈负载为最大主应力。当差异应力大于岩石的破裂强度时, 则会形成倾角为 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的正断层。北美西部盆岭区构造研究中最先提出的拆离断层模式^[1]解释了现今低角度正断层的出露状态。但是这个模式与地震学研究结果不一致, 也与上述安德森模式不相符合。以往人们常强调, 低角度正断层是沿着先存的低角度软弱面, 例如逆冲断层, 是再活动所形成的。但是 Sibson^[2]的研究证实, 在多数情况下, 如果先存软弱面相对于主应力轴的方位不合适的话, 这种面上的剪切破裂强度将大于那些非先存破裂面, 即大于相对于主应力轴方位合适的面上的剪切破裂强度。因而, 沿先存破裂面再活动而形成的正断层是比较少的。

此外, 人们过去还强调, 低角度正断层即拆离断层, 是地壳中古脆-韧性转换带, 如在纯剪切模式中^[3], 拆离断层被认为是上盘的脆性变形和下盘韧性变形之间的一条明显的分界线, 而且上、下盘的变形是同时形成的。目前的研究已经基本上排除了这种可能性。首先, 地壳中的脆韧性转换带不象纯剪切模式所暗示的那样简单, 此外, 更重要的是拆离断层的上盘的脆性变形和下盘的韧性变形不是同时形成的, 而且在拆离断层形成活动时, 其上、下盘均是在脆性变形域中活动的^[4]。

笔者根据所收集到的文献综合介绍并评述了几种目前流行的有关低角度正断层的形成模式。

1 滚动枢纽模式(rolling-hinge model)

直到 1988 年以前, 所有关于低角度正断层的运动学模式都认为拆离断层是以低角度($<$

收稿日期: 1995-04-12

30°)形成并活动的^[1,4,5]。这种认识是从现今见到的拆离断层几何学特征得出来的。目前正在活动的大陆伸展区地震研究表明,地震活动主要集中在中、高角度正断层上,而在低角度正断层之上几乎没有什么活动^[6]。

Spencer^[7]在1988年发表的对科迪勒拉(Cordilleran)变质核杂岩伴生的穹窿作用研究的文章是一篇里程碑式的论著。文中详细地阐述了大陆伸展引起的地壳内物质再分配对于拆离断层及其下盘几何学的重大影响,提出在伸展作用期间拆离断层下盘的去载作用所引起的均衡回跳可以导致拆离断层及其下盘的旋转。以此为基础,并根据现今正在活动的大陆伸展区地震研究成果,1988年Buck^[8],Wernicke和Axen^[9]以及Hamilton^[10]提出了一个低角度正断层发育的新模式——滚动枢纽模型。

图1表示了滚动枢纽模型建立的低角度正断层形成的连接剖面。图中的D₁、D₂和D₃是John^[11]在研究Mojave变质核杂岩时推断的该拆离断层的3个变形阶段。B为向上翻转的分离带,MC代表变质核杂岩。从图中看出,在伸展变形期间,由于构造剥蚀作用,下盘均衡抬升,下盘岩石在接近地表时发生弹性弯曲,弯曲的凸面必然遭受拉伸作用,而凹面则遭受挤压作用,并发生破裂。因此,正断层在不断抬升过程中,主断裂便因袭了这些局部缩短而发生新的破裂面,形成了一个比一个更平缓的断面,最终在地表形成一系列低角度拆离断层。

在这个模式中,与核杂岩伴生的拆离断层既有高角度部分,也有低角度部分,最活动的部位是高角度断层部分,或者是枢纽区。这个活动枢纽随时间沿拆离断层面顺倾向迁移,构造剥蚀产生的下盘快速的均衡上隆导致拆离断层近水平不活动区段之上的滑移地块停止运动。这个模式认为大多数地震活动集中在陡倾断面上,而被保存下来的断层呈大区域近水平展布。

这个模式成功地解释了下列地质事实:①在现今正在活动的大陆伸展区的缓倾斜断面上无正向滑移地震发生^[6];②拆离断层面上有大规模剪切位移;③现今已有的某些拆离断层的裂变径迹热等时年代学研究所确定的陡倾角特征。

与滚动枢纽模式类似的一个模式是所谓的多米诺模式^[12](见文献[3]中的图5)。该模式认为,低角度正断层是地壳规模的掀斜断块类似多米诺式旋转所致,这意味着拆离断层是高角度正断层被动旋转的结果。这个机制可以解释现代地震观察到的事实,但这个机制不是普遍适用的。一般来说,多米诺旋转只适用于拆离断层面上盘内的脆性断块的旋转。Lister和Davis^[13]对Whipple山拆离断层的研究证实,该区最年轻的断层不是多米诺模式所预测的最陡倾断层,而是缓倾拆离断层。另外这个模式也不能解释拆离断层下盘在大范围内变质级别没有明显差异的事实。

滚动枢纽模式与地震观察事实和安德森模式相一致,因而是目前大家比较认可的一个低

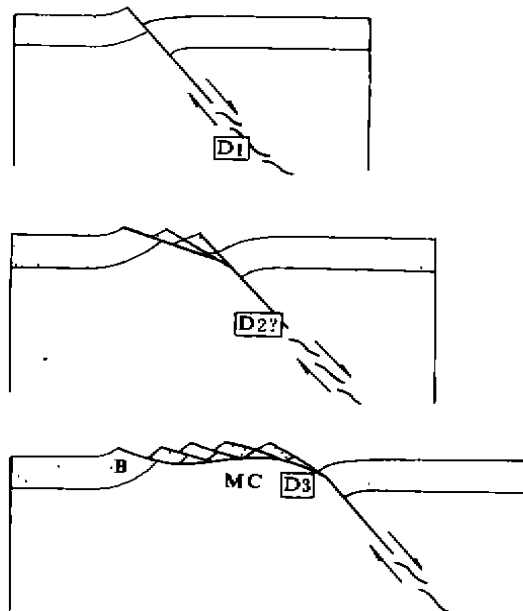


图1 低角度正断层形成的滚动枢纽模式^[11]

(说明见正文)

角度正断层形成模式。但这个模式也存在对一些野外地质事实解释不了的问题,如在变质核杂岩中低角度正断层是最年轻的断层,常常切割较老的高角度断层^[4,5];同伸展期沉积物往往与拆离断层并置而没有明显的掀斜。John 等^[13]使用裂变径迹热等时年代学方法确定了 Cheme-huevi 山拆离断层的原始倾角 $\leq 30^\circ$,并认为低角度正断层形成时就是缓倾角的。

2 低角度正断层的岩浆驱动机制

高角度正断层区不一定有岩浆活动相伴,但几乎所有的低角度正断层发育区均有岩浆活动相伴。这一特征被认为是变质核杂岩构造的基本特征之一^[14~17]。Tom 和 George^[14]研究了岩浆作用与低角度正断层之间的关系,提出了低角度正断层形成的岩浆驱动机制。

图 2 表示了拉伸构造应力场中的应变分布剖面。当岩石圈遭受拉伸作用时,脆性上地壳中

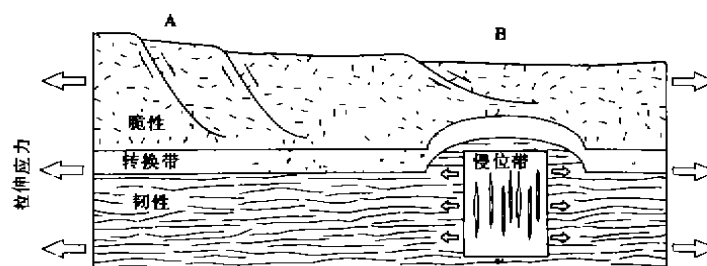


图 2 拉伸构造应力场中的变形剖面^[14]

的伸展应变将由高角度正断层系调节(图 2 中的 A),而在韧性下地壳中的伸展应变则由韧性流变调节。当大规模岩浆活动在中、下地壳快速侵位时,不仅调节伸展应变,加热围岩,引起热软化作用,而且导致韧—脆性转换带抬升,并使上地壳中的应力重新配置。图 3 表示了一个规则形态岩墙周围应力场的主应力轨迹线。图中小十字的长线代表最大主应力,短线代表最小主应力。从这个图我们可以看出由于岩墙的侵位原先近直立状态的最大主应力和近水平的最小主应力方位发生了偏转。对于形状不太规则的侵入体,应力场会复杂一些,但基本特征同图 3

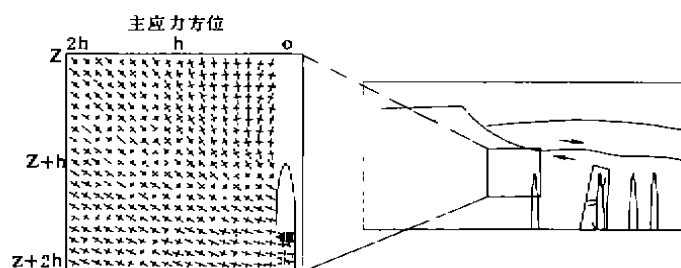


图 3. 侵位直立岩墙之上的主应力迹线^[14]

表示的一样。由此可见,岩浆侵位作用导致了侵入体之上主应力轴的偏转。这时如果产生足够的偏应力,即可形成低角度的正断层(图 2 中的 B 处和图 3)。低角度正断层一旦形成,那么上盘的伸展应变就可能集中在一个单一—滑移面上,这时低角度正断层面上就会产生大规模、远

距离的位移,而断层面之下的应变则由岩浆侵位作用调节。

假设整个地壳内的应变是均匀的,则低角度正断层之下侵入体的宽度必定等于断层面上的总位移。但低角度正断层之上的位移一般都很大,因而这是不可能的。因此 Tom^[14]认为,岩浆侵位作用只是低角度正断层的引发触动机。制。

低角度正断层形成的岩浆作用驱动模式较好地解释了岩浆作用与低角度正断层在时空上密切相伴的关系。最近 Hill 等^[18]对巴布亚新几内亚 D'Entrecasteaux 变质核杂岩的研究证实了岩浆侵位在变质核杂岩形成中的重要作用。但是这一作用难以解释低角度断裂带上大规模的位移,也难以解释在同一区域构造背景中的变质核杂岩为何具有相同方位的拉伸线理特征。

3 应力导层与低角度正断层的发育

应力导层(stress guide)是 Lister 和 Davis^[4]提出来的。他们认为岩石的断裂强度随深度而增大,当到达某一深度时,由于温度的增加将使岩石变形由脆性转变为韧性。在地壳中,这一脆—韧性转换边界不是一个界面而表现为一个层带,该带的岩石破裂强度最大,带的上、下应力均指向这个带,因而被称之为应力导层。

Lister 和 Davis^[4]认为拆离断层就是由于脆韧性转换所确定的应力导层之下近水平韧性剪切带的形成而衍生出来的,其形成时就是缓倾角的。由此可见,在他们的模式中,近水平韧性剪切带的形成是这个模式的关键。

图 4 表示了这一模式的基本思想。在应力导层之上岩石主要为脆性变形,其之下则通常为韧性流变。当大陆地壳岩石圈遭受伸展时,将导致应力导层之上的相对位移穿过应力导层而系统转移,这必定要被韧性变形所调节。由于各向异性的存在及应变的相容性要求,这种韧性剪切带将以缓倾角或近水平产状发育(图 4-a)。

近水平剪切带形成之后,沿剪切带的剪切作用将使剪切带中的主应力轴转成倾斜位态。在理想状况下,即均匀介质中的水平流动面,递进简单剪切变形, σ_1 将被旋转成 45° 倾斜。据库仑—莫尔准则,在韧性剪切带中简单剪切派生出来的同向断层呈 $15^\circ \sim 25^\circ$ 产出(图 4-b)。这条缓倾斜的低角度同向断层被称之为主断裂(master fault),它控制了拆离断层系随后的发展演化(因为在整个岩石圈中,最大主应力轴被认为是直立产出的)。因而,从应力导层中向上扩展的低角度正断层向地表方向逐渐变陡。

图 4-c 表示从深部的主断层分支出来的一系列不同时代的犁式正断层(1~5),其中每一条新形成的断层都通过逐渐切入到先存断层下盘来扩大伸展区的面积。

所以,在 Lister 和 Davis 的模式中,拆离断层发育的关键是深部缓倾斜主断层的形成,正是从这一主断层衍生出了多时代低角度正断层,形成了现今我们在地表所见的大规模的拆离断层。而深部缓倾斜韧性剪切带发育的意义在于建立了力学上适合于低角度正断层成核扩展

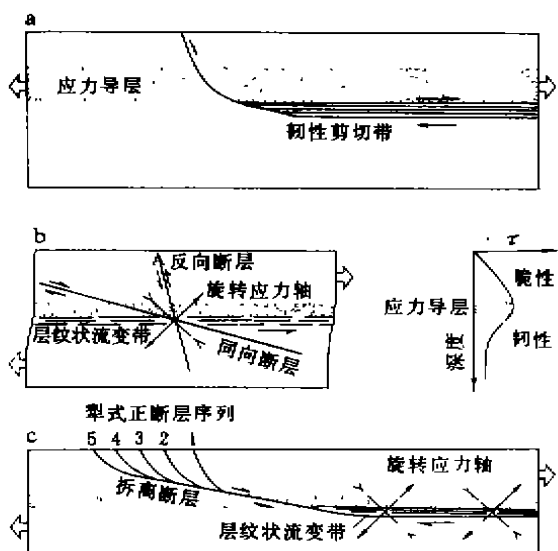


图 4 缓倾斜韧性剪切带派生的低角度正断层^[4]

的应力场。

为解决这一模式与现今活动伸展区地震研究结果所产生的矛盾, Lister 和 Davis⁽⁴⁾设想了大陆伸展的两阶段模式。当大陆地壳开始遭受伸展时, 首先由陡倾、深切正断层系调节应变。由于应变相容性的制约形成了缓倾斜韧性剪切带。当从这一剪切带派生出来的低角度正断层形成时, 大陆伸展应变开始由拆离断层上的滑移所调节。这一拆离断层演化的结果, 使伸展区内大陆地壳的一半从另一半的下部由下到上被抽拉出来。

4 讨 论

变质核杂岩构造提出已近 20 年了, 大量的野外工作已经证实, 大陆伸展区确实存在许多大规模低角度拆离断层。但是对其成因仍然不完全清楚。这种构造与岩石力学概念明显矛盾, 也与现今活动的大陆伸展区地震研究结果不一致。野外地质观察研究是解决这一问题的关键, 但是实地观测又有许多的困难和限制, 结果对于低角度正断层的成因提出了许多不同的理论模式。到目前为止, 还没有一个模式能完全解决目前的有关争论。

从本文上面的介绍来看, 尽管有各种成因模式, 但概括起来只有两种基本观点: 一种观点认为, 它们起始就与低角度活动有关; 另一种观点则认为它们初始是高角度活动断层, 在后来被动旋转成了低角度。这两种观点都力图满足岩石力学概念。对于第一种观点来说, 低角度产出状态只不过是某些因素, 如岩浆侵位、缓倾斜韧性剪切带等使主应力轴发生旋转的结果。看来确定断层的初始倾角是解决低角度断层成因的关键。目前人们已经开始了这一方面的一些探索^(13,16)。使用的方法主要是⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析和裂变径迹热等时年代学研究相结合。使用这种方法需要计算精确的地温梯度, 这在古老变质核杂岩区是比较困难的。

近几年来, 我国变质核杂岩的研究取得了很大进展, 发现了多时代不同区域构造背景上的变质核杂岩构造, 从目前所发现的近 20 个变质核杂岩构造来看⁽¹⁶⁾, 这些变质核杂岩大多位于中国大陆的东部, 一般具有三层式结构⁽²⁰⁾, 而且以晚中生代发育为主, 多受控于中国东部 NNE 向走滑断裂带, 并与晚中生代中国东北断陷盆地系⁽²¹⁾和华南红盆一起构成了中国东部晚中生代伸展事件的一个组成部分。目前的研究已经开始显示出以国外典型地区的研究所建立起来的低角度正断层模式并不完全适合于我国变质核杂岩构造的实际情况。中国的盆岭构造与美国的盆岭构造相比有其特殊的地方, 因而立足于我国大陆实际, 从中国大陆构造的总体背景中探讨低角度正断层的形成机制, 可能会有所突破。

参 考 文 献

- 1 Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Range province: nappe tectonics in extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645-647
- 2 Sibson R H. A note on fault reactivation. *J. Struct. Geol.*, 1985, 7: 751-754
- 3 Miller E L, Gans P B, Garing J D. The Snake Range decollement, an exhumed mid-Tertiary brittle-ductile transition. *Tectonics*, 1983, 2: 239-263
- 4 Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachments formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U S A. *J. Struct. Geol.*, 1989, 11: 65-94
- 5 Davis G A, Lister G S. *Detachment Faulting in Continental Extension: Perspectives from the Southwestern U. S. Cordillera*. Geological Society of America Special paper 218. 1988, 133-159
- 6 Jackson J A. Active normal faulting and crustal extension. In: Coward M P et al eds. *Continental Extensional Tectonics*. Geological society of London special publication 28, 1987, 3-18

- 7 Spencer J. Role of tectonic denudation in warping and uplift low-angle normal faults. *Geology*, 1984, 12: 95—98
- 8 Buck W R. Flexural rotation of normal faults. *Tectonics*, 1988, 7: 959—975
- 9 Wernicke B, Axen G. On the role of isostasy in the evolution of normal fault systems. *Geology*, 1988, 16: 848—851
- 10 Hamilton W. Detachment in the Death Valley region, California. *U. S. Geological Survey Bulletin* 1790, 1988, 763—771
- 11 John M B, John M F. Tertiary extension and contraction of lower-plate rocks in the central Mojave metamorphic core complex, southern California. *Tectonics*, 1990, 9: 521—534
- 12 Gans P G, Miller E L, McCarthy J, Ouldcott M L. Tertiary extensional faulting and evolving ductile-brittle transition zone in the northern Snake Range and vicinity: new insights from seismic data. *Geology*, 1985, 13: 189—193
- 13 John B E, David A F. Structural and thermal constraints on the initiation angle of detachment faulting in the southern Basin and Range, The Chemehuevi Mountains case study. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105: 1091—1108
- 14 Tom P, George A T. Does magmatism influence low-angle normal faulting? *Geology*, 1993, 21: 247—250
- 15 Lister G S, Baldwin S L. Plutonism and the origin of metamorphic core complexes. *Geology*, 1993, 21: 607—610
- 16 宋鸿林. 变质核杂岩研究进展, 基本特征及成因探讨. 地学前缘, 1995, 2(1): 103—111
- 17 朱志澄. 变质核杂岩和伸展构造研究评述, 地质科技情报. 1994, 13(3): 1—9
- 18 Hill E J, Baldwin S L, Lister G S. Unroofing of active metamorphic core complexes in the D'Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea. *Geology*, 1992, 20: 907—910
- 19 Roy K D. Original dip and subsequent modification of a Cordilleran detachment fault, Mojave extensional belt, California. *Geology*, 1993, 21: 711—714
- 20 Song H, Wei B. Metamorphic core complexes and its significance in the continental crustal evolution. *Journal of China University of Geosciences*, 1990, 1(1): 111—121
- 21 李思田, 杨士恭, 吴冲龙. 中国东部及邻区中生代裂隙作用的大地构造背景. 见: 王鸿祯等主编. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990, 109—125

ORIGIN OF LOW-ANGLE NORMAL FAULTS

Ren Jianye Zhang Junxia
(China University of Geosciences, Wuhan)

Abstract The origin of low-angle normal faults is one of the important questions in the study of continental extensional tectonics. There are a lot of arguments about the relationship between the origin of low-angle normal faults and their geometry. So far, a number of models have been proposed for the origin of low-angle normal faults on the basis of the metamorphic core complexes in the west of North America and other regions. In this paper, we introduce and review three the popular models: the rolling-hinge model, triggering mechanism of magmatism model and the stress guide model.

Key words low-angle normal faults, rolling-hinge model, triggering mechanism of magmatism, stress guide