

伸展构造及其反转作用

刘和甫

(中国地质大学,北京,100083)

摘 要 伸展构造的演化主要发生在三个阶段:大陆裂谷阶段、大陆初始漂移和主要漂移阶段。伸展构造发育在不同构造层次:(1)在上地壳中,伸展构造呈现为位于拆离带之上脆性岩块的伸展,其周边为铲式断层、坡坪式断层或多米诺式断层所限;(2)在中地壳中,伸展构造呈现为变质透镜体,被不连续的韧性剪切带所分隔;(3)在下地壳中,伸展构造呈现为扩展变平的韧性流动和岩浆侵位。反转的伸展断层系常表现为冲断层、断弯背斜、生长断展褶皱、顶部塌陷地堑区的突隆构造和半地堑区的鱼叉构造等。

关键词 伸展构造 反转构造 拆离断层 构造层次

从全球动力学系统来看,变形体制主要有伸展构造、压缩构造和走滑构造三种。由于构造研究主要源于造山带,而造山带是以压缩构造体系为主,因而长期以来较忽视对伸展构造的研究。但从70年代后期到80年代初,马杏垣^[1,2]等在研究中国东部大陆动力学时开始提出“伸展构造”和“裂陷作用”,并提出应将伸展构造研究作为与造山带研究相对应的另一个重要侧面,从而为我国大陆伸展构造研究揭开了新的一页。本文除叙述伸展构造和反转构造研究的新进展外,还对存在不同理解的有关重要术语提出个人粗浅的看法。

1 伸展构造的基本类型

在全球引张动力系统下形成的伸展构造主要有离散板块边界的扩张中心:环绕全球长约50000km的大洋中脊及其两侧的离散(被动)大陆边缘,此外尚有壮观的大陆裂谷系,构成与造山带相对应的伸展构造体系。一些学者提出伸展构造分类方案^[2,4]。本文主要根据尺度及构造层次两个基本因素,论述全球尺度或大尺度的伸展构造主要类型,其次涉及不同层次的伸展变形特点。而诸如变质核杂岩、岩墙群及拉伸线理等则作为中、深层次的中、小尺度变形来探讨。

从全球动力学及构造演化来看,伸展构造体系中许多扩张中心起源于大陆岩石圈的张裂。因此从大陆裂谷发展到被动大陆边缘主要有三个阶段:(1)大陆裂谷阶段,浅层形成垒-堑结构,但无洋壳侵位,如东非裂谷和汾渭裂谷等;(2)大陆漂移开始,洋壳沿中脊开始侵位

收稿日期:1994-12-07

作者简介:刘和甫,男,1930年生,教授,石油地质学专业。国科联岩石圈委员会中国全国委员会裂谷和伸展构造工作组组长。

本项目受国家自然科学基金和地矿部重要基础研究项目联合资助。

和增生形成陆间洋,如红海和加利福尼亚湾等;(3)大陆漂移期,大洋及其两侧被动大陆边缘形成;(4)此外尚有未充分发育的裂谷称为夭折谷,在后期演化为拗拉槽;(5)板块边界最终碰撞时可以形成碰撞谷(图1)^[3,5]。

1.1 大陆裂谷

裂谷是指整个岩石圈遭受伸展断层破裂而产生的狭长状凹地^[5]。因此强调:(1)这一术语只适用于大尺度构造,整个岩石圈已被切穿,具有频繁火山活动;(2)处于伸展环境中,在变薄的地壳之上,具有负的布格重力异常和高的热流值;(3)主断层为伸展破裂以区别于俯冲带中深大断裂。

大陆裂谷主要有两种类型:即主动裂谷与被动裂谷(图2)。

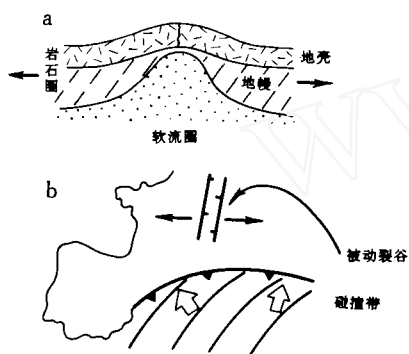


图2 裂谷形成应力状态图解

Fig. 2 Extensional conditions can be set up in different tectonic stresses

(据 K. Burke, 1983)

a—主动裂谷;b—被动裂谷

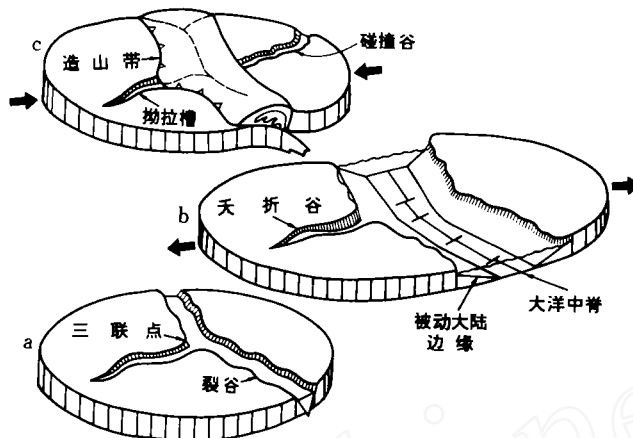


图1 伸展构造主要类型及演化图解

Fig. 1 Generalized diagram illustrating rift evolution and terminology

(据 John K. Sales, 1983 & K. Burke, 1977)

主动裂谷是指从板块下面施加外力来改变板内的应力状态。由于地幔非均质体中较轻物质上升形成热柱,热柱对岩石圈底部的撞击作用引起岩石圈变薄和地壳上隆,使地壳处于张性应力状态,进一步产生破裂,形成主动裂谷,如东非裂谷系。因此主动裂谷主要是由于热机制,由于热柱上升,使岩石圈中热流值增加,原来的热平衡受到干扰,作为岩石圈与软流圈界面标志的等温面就上升到一个新的平衡位置,热膨胀引起岩石圈上隆、变薄和破裂,进一步产生裂谷(图2a)。

被动裂谷是指从板块边界施加外力来改变板内应力状态,往往是由于板块俯冲或碰撞所引起的。由于大陆岩石圈内产生张应力状态,快速引起岩石圈变薄和破裂,从而使灼热的软流圈物质被动上升,地壳的拱曲作用和火山作用是派生形成的,所以称为被动裂谷,如莱茵裂谷是由于非洲板块和欧洲板块发生碰撞时形成阿尔卑斯造山带所派生的(图2b)。因此被动裂谷主要是由力机制在区域张应力条件下所产生的断裂,由两种应力状态所引起:纯剪切和单剪切。

纯剪切伸展是一种对称伸展作用,而单剪切伸展是一种不对称伸展作用,可以产生叠瓦正断层带,类似于压缩区的叠瓦冲断层带向一个方向扩展,因此这种不对称的伸展带可分为内带和外带:内带发生过初始的构造沉降和后来的冷却沉降,两者之间有一角度不整合;外带仅有由于上地壳变薄的初始沉降。

综上所述,要探讨裂谷形成是属于主动裂谷抑或被动裂谷,主要是确定裂谷作用与火山作用的相对时间关系。实际上主动裂谷与被动裂谷是两个理想端元,许多裂谷则属于复合

型。

1.2 被动大陆边缘与洋盆

被动大陆边缘也称为离散大陆边缘,长期以来认为这些边缘没有明显的地震和火山活动,所以称为被动。但近年来许多资料揭示,有的被动大陆边缘在大陆裂解时有过强烈的火山活动和地震活动,保存下来巨厚火山岩层和震积岩层,因此也有人称为火山型被动边缘,如果称为伸展大陆边缘似乎恰当些。

被动大陆边缘从地貌及沉积特征看,通常包括四个部分:海岸平原,包括潮汐带、泻湖和堡岛等;陆架,水深130 m左右,也可深达550 m,但坡度小于1°;陆坡,从陆架边沿坡折处延伸到

5000 m深处,坡度2°~6°;陆隆,常与深海碎屑扇的分布一致。按其构造及沉积特征又可分为:三角洲与重力构造型、盐构造型、碳酸盐岩型及火山碎屑岩型等。

1.2.1 大陆边缘演化

大陆边缘演化一般经历三个主要阶段:(1)裂谷阶段,包括岩石圈伸展和地幔热上隆;(2)漂移开始阶段,包括岩石圈裂开和洋壳初始侵位,漂移开始时代可以由裂解不整合(breakup unconformity)来标志;(3)主要漂移阶段,以大量沉降为主,通常是沉积速率超过沉降速率,这就形成进积层序,这些层序为不整合所分开,这些不整合可以用来确定层序的边界,作为划分地层单元的界线,并认为海岸上超是由海平面上升所引起^[6],但有些学者认为这是具有挠曲刚度的基底受到沉积负荷所产生,随着时间进展而产生海岸上超。沉积物是

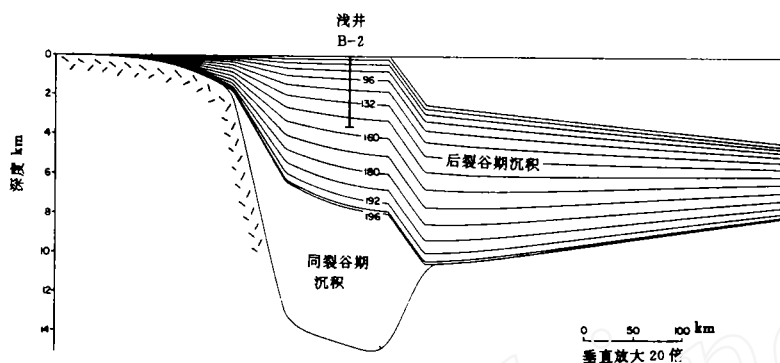


图3 北美大西洋大陆边缘发育的热模式和力学模式

Fig. 3 Simple thermal and mechanical model for the development of the U.S. Atlantic Continental Margin

(据 A. B. Watts, 1981)

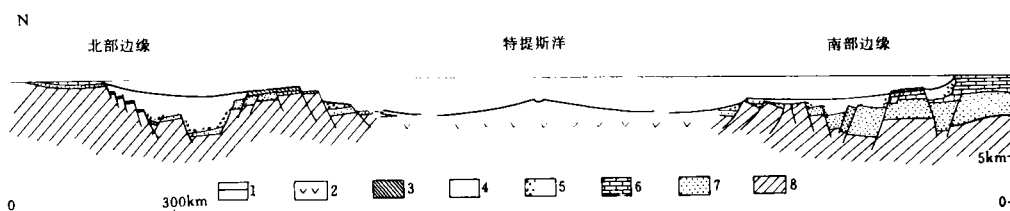


图4 晚侏罗世(基米里期)横过古地中海构造古地理再造横剖面图

Fig. 4 Palispastic section through Mediterranean area in the Late Jurassic (Kimmeridgian)

(据 Daniel Bernoulli, 1981)

1~5—侏罗纪:1—放射虫岩;2—洋基底;3—深水灰岩;4—盆地泥灰岩和石灰岩;
5—海相角砾岩;6—浅水碳酸盐岩,侏罗纪;7—三叠纪;8—华力西基底和古生界

充填在陆架、陆坡和陆隆区^[7](图3)。在裂谷阶段大陆边缘沉积物是加载在一个比较软弱的

板块之上, 并形成一个比较狭的盆地, 而后裂谷阶段沉积物是加载在一个比较坚硬的板块之上, 也就形成一个较宽阔的盆地, 前期与地壳均衡的艾里模式有关, 而后者与挠曲模式有关。

1.2.2 大陆边缘伸展与洋盆形成

对大陆边缘伸展, 习惯上采用的裂谷系大致呈对称分布的地堑和地垒, 其间为转换断层所分隔, 这适用于板块构造伸展模式, 但反射地震剖面显示半地堑系似乎更为主要, 并更适用于研究被动大陆边缘基底变化, 也反映了半地堑系极性的变化和差异^[8]。

被动大陆边缘发育与联合古陆的裂解有关, 全球由一个大陆和一个海洋变为几个大陆和几个海洋, 其结果是被动大陆边缘及其间洋盆的广泛分布, 其裂解早期主要是形成原始洋盆或小洋盆, 常称为陆间海洋, 具有减薄的陆壳和洋壳侵位, 其上常为熔岩和碎屑沉积物所覆盖。在水流循环受到限制和干燥气候条件下形成大量蒸发岩, 如现代的红海和加利福尼亚湾即为典型例子。但在古代也曾广泛发育有小洋盆, 特别在欧亚大陆南部发育陆间小洋盆及

古被动大陆边缘, 其中大部分潜没在碰撞带之下, 部分隆升, 出露在喜马拉雅高山上。特提斯洋的发育为蛇绿岩套存在所证实, 洋壳形成时代根据蛇绿岩的放射性年代测定和最老海洋沉积物时代所确定, 由于后期遭受强烈变动需进行构造古地理再造(图4)。大陆边缘上角砾岩的发育证实了伸展断块作用, 在南部大陆边缘发育有碳酸盐台地, 其相邻海槽中发育有深水碳酸盐岩及浊积岩。推测洋盆宽度大约为1000km, 形成典型的陆间洋或小洋盆, 成为特提斯域洋盆的特色。

1.3 拗拉槽与碰撞谷

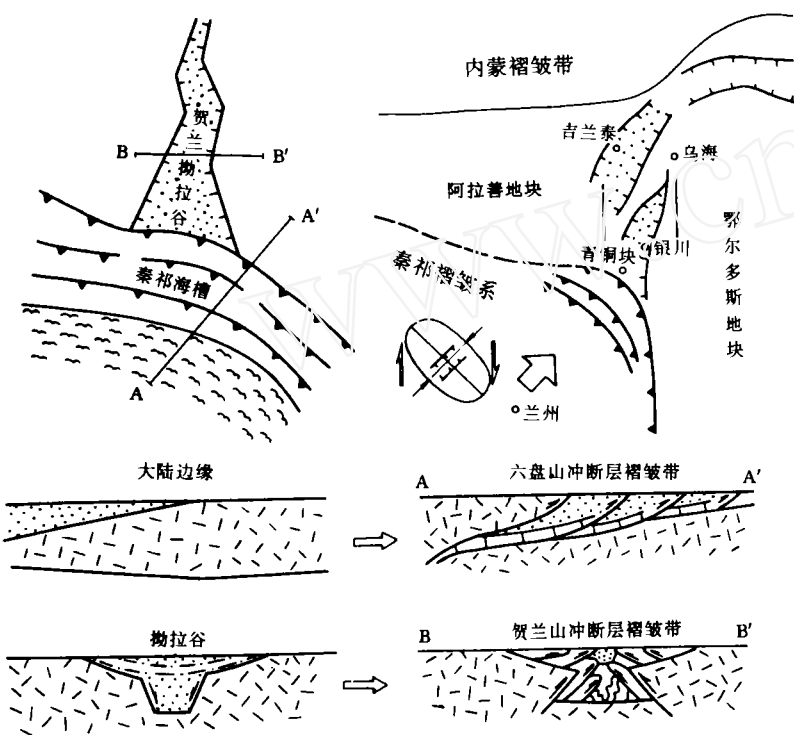


图5 贺兰拗拉槽与银川碰撞谷简图

Fig. 5 Schematic map showing Helan aulacogen and Yinchuan impactogen

上, 平面图示贺兰拗拉槽与秦祁海槽及银川地堑(碰撞谷)与秦岭褶皱带; 中, 大陆边缘及反转后六盘山前陆冲断带; 下: 拗拉槽及反转后贺兰山冲断带与银川地堑 (据刘和甫等, 1990)

拗拉槽(aulacogen)一词原义指大型狭长断陷, 其走向与相邻地槽(或大陆边缘)呈高角度相交。最初由尼古拉·沙茨基(Шацкий, 1946)所提出^[5], 后来米兰诺夫斯基将 aulacogen 一词定义为: “古地台上地堑状拗陷, 后期受到沉积覆盖和构造回返”, 但这一定义没有阐明拗拉槽的走向与大陆边缘或地槽的关系, 其含义近似于裂陷槽或裂陷地槽(taphrogeosyncline)^[9, 10]。

Burke 和 Dewey 以及 Hoffman 等从全球板块构造背景上和成因上定义拗拉槽是三联点的夭折枝^[5]。现在的拗拉槽与造山带连接呈 T 形或 Y 形,暗示了“古三联点”的存在,为我们提供了一个研究古板块构造演化的重要线索,如我国贺兰拗拉槽与秦祁造山带的关系,以及美国南俄克拉何马与瓦奇塔(Ouachita)造山带的关系。这也是目前国际上广泛采用的含义。因此建议将拗拉槽一词按原来定义限于与地槽或造山带有一定几何关系的克拉通内断陷。

拗拉槽发育的主要特点为:(1)与大陆边缘或地槽呈高角度相交且位于大陆边缘的凹角处;(2)由于拗拉槽形成与大陆裂解是同期进行,所以拗拉槽中较老沉积,特别在接近出口处,与大陆边缘的沉积非常相似;(3)拗拉槽的沉积在后期发生挤压变形;(4)拗拉槽不具洋壳侵位,这是与地槽或陆间洋的根本区别。

拗拉槽形成机制概括起来主要有两种成因,即张裂与剪裂,这与三联点的两种情况有关^[11]:(1)裂谷—裂谷—裂谷(RRR)和(2)裂谷—转换断层—裂谷(RRF),其中两枝进一步扩展成为大陆边缘,而一枝废弃成夭折谷。

因此夭折谷是拗拉槽发育的早期,没有遭受构造反转,而拗拉槽则在造山作用同时遭受构造反转,与此同时有可能在造山带一侧形成碰撞谷(impactogen),但碰撞谷物源及水流来自造山带,而夭折谷古水流是流向大陆边缘或地槽的,这就是拗拉槽与夭折谷及碰撞谷的关系(图5)^[12]。

2 不同层次中伸展构造样式与形成机制

伸展构造样式主要表现为各种伸展断层性质及其伴生的不同地壳结构特征。其特征常随地壳深度而发生变化,自浅层次至深层次主要呈现为脆性滑脱正断层、脆—韧性拆离断层及韧性剪切带。

应该指出:拆离断层在法文中称为 decollement, 在英文中近似同义语称为 detachment fault。这里将拆离断层专指盖层与基岩之间的滑脱断层,可以以断坡方式切割地壳,因此,具有脆—韧性过渡性质,也可以称为剥离断层(denudation fault)^[13]。而将 detachment fault 按其原意指盖层岩石中的脆性破裂,称为滑脱断层,更深层次的韧性变形则称为韧性剪切带(ductile shear zone)(图6)。

2.1 滑脱正断层及伸展断块——上地壳伸展构造样式

正断层是上地壳伸展构造的主要样式,按其几何形态可以分为三种类型:(1)铲式正断

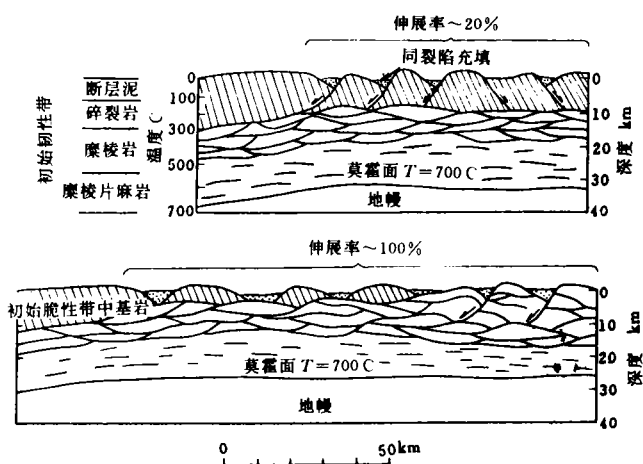


图6 大陆地壳不同层次伸展变形模式

Fig. 6 Cross-section of extending crust

(据 Hamilton, 1987)

上地壳脆性断块旋转滑离; 中地壳透镜体
沿韧性剪切带滑离; 下地壳韧性伸展变平

层及箕状凹陷/掀斜断块;(2)多米诺断层及垒-堑组合;(3)坡-坪断层(ramp-flat fault)及裂陷盆地。这些断层常以叠瓦状正断层系出现,伴生滚动背斜或反向正断层,其底部常出现平缓的脆-韧性拆离断层,将各种正断层系连锁在一起,常构成半地堑连锁组合的裂陷盆地^[14]。

滑脱正断层的发展序列主要有两种方式:一种是在主滑脱断层下盘向后扩展^[15],而另一种是在滑脱断层上盘向前扩展(图7)^[17],这可以由断层上盘充填层序沉积物特征予以判别。其沉积模式常以伸展掀斜岩块/半地堑构造斜坡为特征。

2.2 拆离断层及变质核杂岩——中地壳伸展构造样式

中地壳变形是以不连续韧性剪切伸展为主,呈现为缓倾斜的网状韧性剪切与其间大型透镜体,在透镜体内部仍保留原有组构,其顶界则为拆离断层,中地壳结晶岩石沿断层上升变浅时可呈现为变质核杂岩,这可能与局部热异常有关,也可以认为与地壳伸展呈现为香肠化或透镜体化^[17]有关。

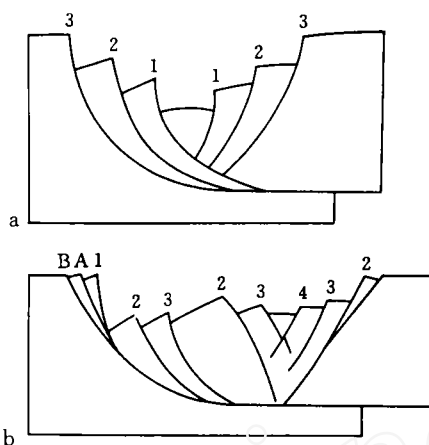


图7 滑脱正断层发育序列

Fig. 7 Generalized normal fault sequence

a—后裂式:向下盘方向发展(据 Gibbs, 1984);
b—前裂式:向上盘方向发展(据 McClay, 1987)

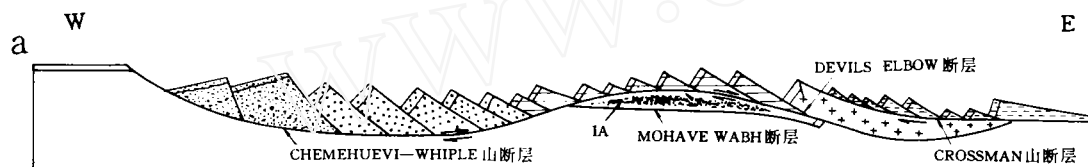
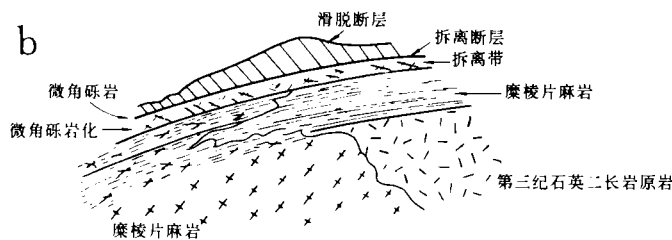


图8 北美西部拆离断层带及变质核杂岩

Fig. 8 Schematic diagrams showing decollement and metamorphic core complex in Western U. S.

a—拆离断层带与叠瓦正断层系(据 Howard, 1987); b—变质核杂岩组成及特征(据 Davis, 1987)

拆离断层常呈拱形或波形,不具冲断层性质,因为拆离断层使地层缺失而不使地层重复,具有伸展构造特点。拆离断层面之上岩层常向同一方向旋转,形成叠瓦状正断层系,其断层倾角为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ (图8a)。在伸展构造体系中,拆离断层可以随时间而上升,形成浅层低温状态下的脆性断层,相应地出现断层泥—碎裂岩—糜棱岩—糜棱片麻岩(图8b)。在拆离断层以下的岩石,其埋藏深度在10~15 km 以下,但可以上升出露在地表,因此也称为变浅断层(shoaling fault),如华北云蒙山断层^[18]。因此拆离断层可能是切割整个地壳的断坡

(ramp)的一部分^[19],成为有根断层模式,符合于单向滑动特征,但也可能存在方向相反的共轭滑动。从区域构造应力场来看,拆离断层也可以作为从压缩冲断层系转化为伸展断层系的反转初始期。

变质核杂岩为近圆形或椭圆形穹隆状变质岩。其上为脆—韧性过渡的拆离断层,变质核杂岩可以通过拆离断层由原来10~15 km的古深度上升到地表,因此为研究中地壳伸展构造特征提供一个窗口,如对华北盆地周缘燕山及太行山中阜平变质核杂岩及赞皇变质核杂岩等研究中充分说明了这一点^[20]。

由于变质核杂岩上升幅度达10~15 km,这些剥蚀岩石将充填到相邻盆地中去,这为伸展构造体系中盆—岭结构的共轭机制提供了佐证。拆离断层下岩石的构造剥蚀年代则可通过 K-Ar 年代和裂变径迹年代来获得。而拆离断层带附近则可以出现混杂角砾岩或巨型角砾岩带,可称为张性混杂岩带(extensional chaos zone)。同时其上的高角度正断层也可以形成显著的断层崖。中国东部及美国西部出现的拆离断层带与变质核杂岩,是处于从压缩构造体系的冲断带转化为上叠伸展构造体系时的转化阶段^①。

2.3 韧性流动及熔浆作用——下地壳伸展构造样式

下地壳的伸展作用则以普遍发育的韧性展平作用(ductile flattening)来实现,在地震反射中显示网状结构及平缓起伏的强反射结构,可以解释为各种糜棱岩化和韧性剪切迁移作用,其中残留有破裂的结晶透镜体,有些反射作用来自透镜体内部。

岩石圈深部伸展过程可能与地幔软流圈的部分熔化作用有关。这种熔浆可能是许多伸展环境中火山作用的岩浆源,并相应形成岩墙群及火山岩层,如广泛分布于华北太行山—五台山—云中山—吕梁山的辉绿岩岩墙群^[1]。而华北盆地第三纪玄武岩层则是上升到浅层次中的火山活动。

在均匀伸展模式中伸展量 β 值随时间而稳定增加时,熔浆量也随之逐渐增大(图9)^[21]。熔浆量可以用相当的玄武岩厚度来表示,如在川西峨嵋山一带,玄武岩层厚度可达2000 m,则表示 β 值约3左右,扩展量已达200%。当厚度达到最大值为5.5 km时, $\beta \rightarrow \infty$,也就是说大陆岩石圈完全破裂,达到产生洋壳的厚度。因此在川西甘孜—理塘及金沙江一带已扩展为洋壳。

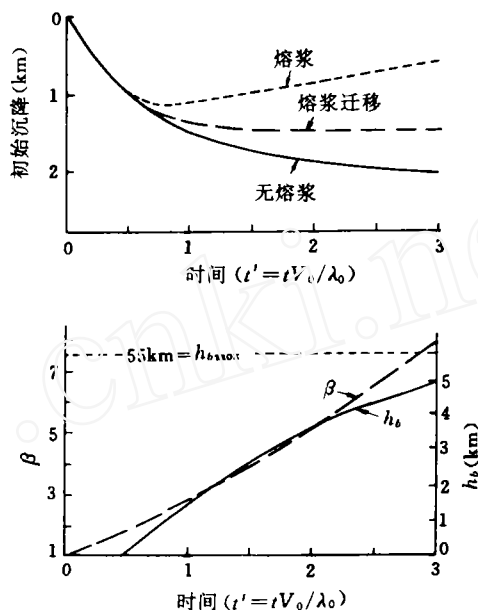


图9 裂谷沉降、 β 值及熔浆量与时间关系曲线

Fig. 9 Illustration of the rift subsidence, β , and amount of melt produced versus time.

(据 Keen, 1987)

① 笔者于1994年6月与 G. H. Davis 教授、聂上游博士在洛杉矶加州大学讨论时共识。

3 反转作用及反转构造样式

在我们研究中国东部中、新生代伸展构造时,就发现伸展转化为挤压问题,并指出在松辽盆地、渤海湾盆地及华南等地表现明显^(2,3)。这种由伸展转化为挤压现象称为反转构造(inversion tectonics),在欧洲也通俗地称为手风琴(accordion)构造。近年来由于对北海盆地、松辽和华北等地油气勘探工作进展,地震剖面揭示出大量反转构造已成为油气评价重要依据之一。根据构造转化特点,又进一步分为正反转(positive inversion)和负反转(negative inversion),前者指由伸展转化为挤压,后者则指由挤压转化为伸展。

3.1 大陆裂谷的反转作用

关于大陆裂谷或裂陷盆地的边界断层,在60年代国际上一直沿用两条倾向相对的正断层地堑模式,但我国通过对华北渤海湾盆地反射地震剖面解释,早在60年代就发现由一条主断层构成的不对称半地堑模式,曾称之为“箕状地陷”,并认为这是具有中国特色的一种类型。但在70~80年代,国际上逐渐认为半地堑更为普遍。这种半地堑模式表现在沉积样式上的不对称结构,也表现在不同时期、不同断层的倾滑量不同,形成极性反转现象,如银川地堑⁽¹²⁾。

因此当大陆裂谷沉积体反转时可以采用半地堑模式的几何学特征,其主边界断层遭受反向滑动。当同裂谷期沉积物上升反向滑动时,其同裂谷层序可以向前挤出到下盘之上,也可以向后挤出到上盘沉积楔之上。向前挤出到下盘之上时可以形成断坡背斜,如松辽盆地中大庆长垣,有时在下盘形成截短断层(short-cut fault)(图10)。向后挤出到上盘时,可以叠加在先存滚动背斜之上,形成大型褶皱或后冲断层(back thrust)。这时褶皱变紧,幅度增大,冲断层在深部断面陡倾,而向浅部断面变平缓。

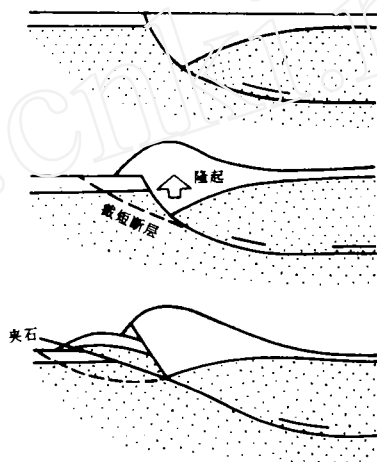


图10 半地堑反转构造发育模式

Fig.10 Model for the development of half graben

(据 Hayward & Graham, 1989)

3.2 大陆边缘的反转作用

近年来在前陆盆地中广泛采用薄皮构造模式,但是应用这种模式的先决条件是前陆地区应具有贯通的平缓基底面,而没有先存的伸展断层或断块,沉积作用是由平缓挠曲的被动边缘所控制。但事实上有许多被动边缘具有伸展垒-堑结构,对后来前陆褶皱-冲断带构造样式有着控制作用,如龙门山前陆褶皱-冲断带、祁连山前陆褶皱-冲断带及南天山-库车前陆褶皱-冲断带等⁽²²⁾,在不同程度上都出现有卷入基底的厚皮构造,如龙门山彭灌杂岩体侵位到薄皮褶皱-冲断带中⁽²⁴⁾。

此外从欧洲阿尔卑斯褶皱-冲断层系中可以看到,单个冲断席之间地层沉积相有明显差异,可以认为是与先存的构造古地理有关。其中以 Digne 冲断系最为明显,呈现中生代陆坡相的黑色页岩推覆到台地相的碳酸盐岩层之上,使上盘与下盘之间的岩性发生突变,这是从伸展盆地反转挤出成为冲断层席的典型例子,而不仅仅是伸展断层的简单的再活动(图

11)^[23]。大陆边缘伸展断块的存在控制了前陆褶皱-冲断层带发育的无序性以及冲断带方向的复杂性。

3.3 反转构造样式

伸展构造体系中由于反转作用而形成的冲断层与褶皱,在几何形态和序列等方面不同于前陆薄皮褶皱-冲断层带,比起简单的叠瓦冲断层的几何学更为复杂,主要受先存的伸展断层几何形态所控制,如冲断层的断坡位于先存的坡坪式正断层的断坡位置。但在发生强烈反转时,深部陡倾的断面向上变为平缓,而不是按常见的坡-坪轨迹,在前陆薄皮冲断带中断面呈向上凹曲,而反转冲断层中断面常呈向上凸曲。在冲断层发育顺序上,当后继的新断层

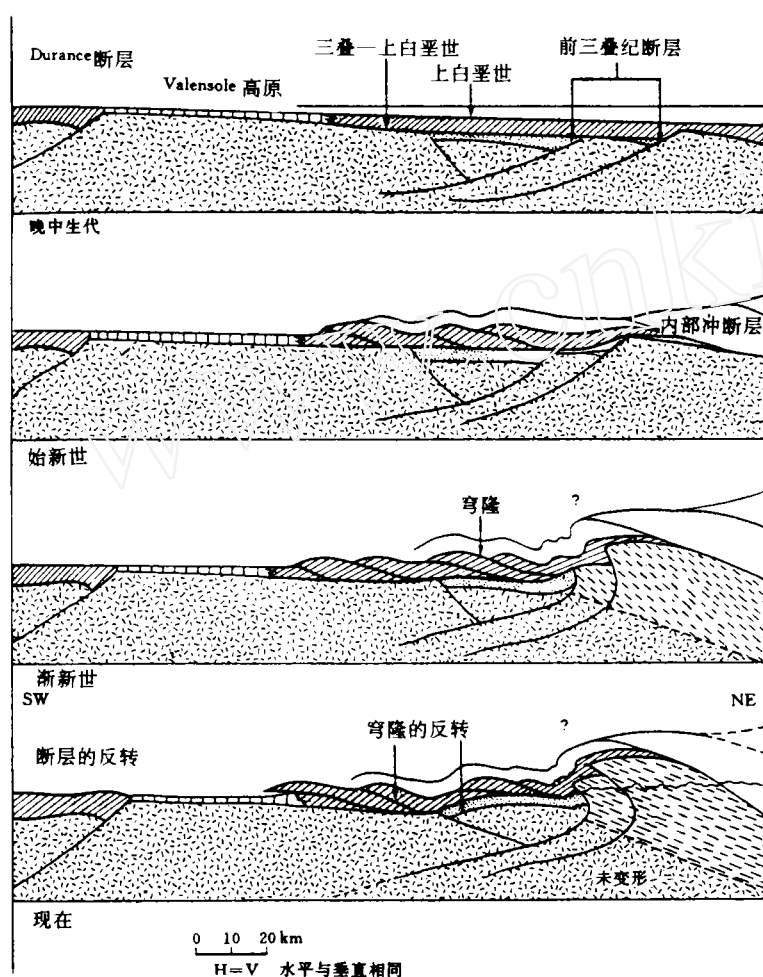


图11 Digne 盆地构造演化

Fig. 11 Possible structural evolution of the Digne Basin

(据 Hayward & Graham, 1989)

形成在老断层前方则称为前裂式(forward breaking),反之,则称为后裂式(break-back)^[24](图12)。

3.3.1 铲式正断层反转

伸展构造体系中铲式断层的伸展作用在上盘呈现为滚动构造时,常具顶部塌陷地堑。随着区域应力场变化,由伸展转化为压缩,相继出现下列序列:(1)伸展主断层发生倾向反转,形成鱼叉式构造(harpoon structure),该处同裂谷期沉积楔抬升,断层上部具有冲断层位移,下部仍为正断层;(2)主断层下盘发育截短断层(short cut fault);(3)顶部塌陷地堑发生再活动,向上冲起,可产生假花状构造;(4)在主断层上盘发育倒向上盘的反冲断层(back thrust);(5)同反转(syn-inversion)层序中在主断层下盘沉积较厚,而在上盘变薄并形成断坡背斜(ramp-anticline)及断展生长褶皱(fault-propagation growth fold)。

3.3.2 坡坪式正断层反转

坡坪式正断层的几何形态与铲式正断层的几何形态类似。在坡坪式断层上部的铲式断面上发育有滚动背斜和顶坍地堑,同样在坡坪式断层下部也发育有滚动背斜和上叠的地堑构造。在两者之间可以发育与断坡对应的上盘向斜。反转作用的结果与铲式正断层反转模式相似,但在倒向下盘冲断层与倒向上盘冲断层呈共轭产出,其间可以产生宽广的突隆构造(pop up structure)。当前裂谷期岩层接近断层面时,倒向下盘的冲断层可以变成薄皮构造。

3.3.3 多米诺式正断层

在伸展构造体系中常可以出现一系列多米诺式断层,并构成半地堑,其间为同裂谷期沉积楔所充填。伸展转化为挤压的过程促使多米诺式断层作反倾向滑动,并沿着下盘发育有截短断层。在断层上段后裂谷期层序和同裂谷期上部层序处于纯压;而断层下段层序则处于纯张,同时形成典型的鱼叉构造。

3.4 负反转作用

如挤压构造体系转化为伸展构造体系,则形成负反转构造,从而在先存的冲断层系上形成伸展断层系,常常使冲断层发生方向相反的倾向滑动,这种情况广泛地出现在中国东部裂谷区和北美西部落基山区和盆-岭省。

从压缩构造与伸展构造的相互关系来看,主要有两种情况:一种情况认为冲断层系向下

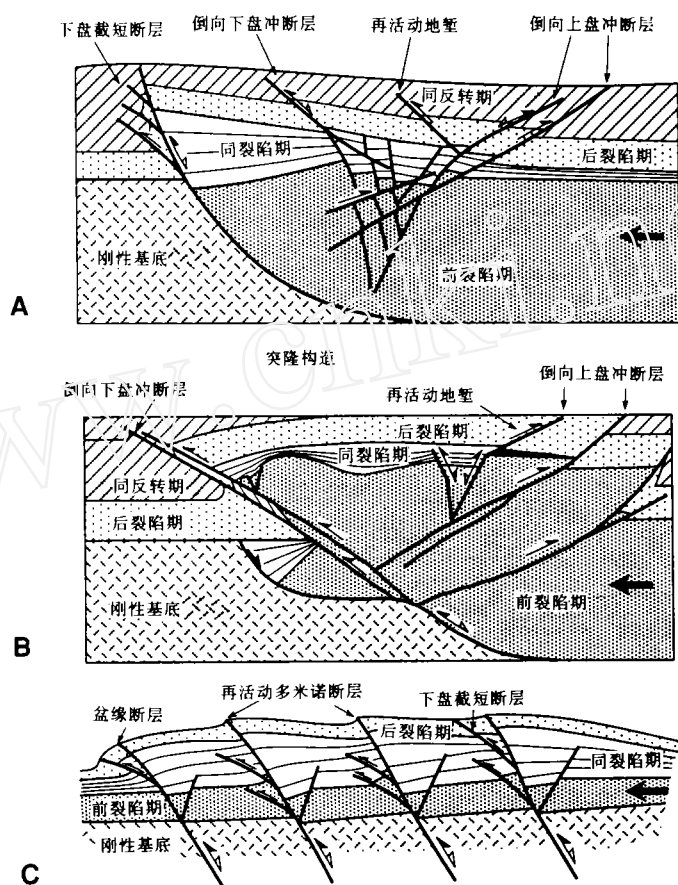


图12 反转伸展断层系图解

Fig. 12 Summary diagrams of inverted extensional fault systems.

(据 McClay, 1989)

A—反转铲式伸展断层,截短断层发育;B—反转坡坪式伸展断层,突隆构造发育;C—反转多米诺式断层,截短断层及鱼叉构造发育

汇合于底板冲断层,在负反转时可以作为伸展断层的拆离带,伸展断层常呈铲式,由上向下变得平缓并有滚动背斜出现在上盘;另一种情况则认为冲断层系的再活动是局部的,另有系列正断层切割原有的冲断层系,呈多米诺式展布,断面常呈板式,其上盘岩层产状比较均一。这些断层走向大致平行于冲断层走向,原来的压缩方向变为伸展方向,从几何学角度来看,仍受到压缩构造系的控制,因此,可以称为负反转构造,其上可以发育一些小型沉积盆地。

在对伸展构造研究中多年来得到马杏垣老师指导,在有关伸展构造不同类型演化问题上得到王鸿祯老师指导,并与 K. Bruke 及 A. W. Bally 就大陆裂谷及大陆边缘等问题进行探讨,并承 G. A. Davis 邀请赴洛杉矶加州大学对北美西部变质核杂岩与华北变质核杂岩对比问题、盆地与山岭共轭的区域动力学问题进行讨论与协作,在本文撰写中又承《地学前缘》编辑部给予多方协助,一并致以深切谢意。但伸展构造研究内容广泛,许多新进展难免挂一漏万,谬误之处,尚请批评指正。

参 考 文 献

- 1 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报. 1983. (1). 22~32
- 2 马杏垣. 论伸展构造. 地球科学. 1982. (30). 15~22
- 3 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析. 地球科学. 1993. 18 (5): 699~724
- 4 朱志澄. 变质核杂岩和伸展构造研究述评. 地质科技情报. 1994. 13 (3): 1~9
- 5 Burke k. Development and distribution of rift systems. *Distinguished lecture of AAPG*. New York: Science-Thru-Medi Inc. 1983
- 6 Vail P R. Sea level changes and global unconformities from seismic sequence interpretation. *A report of the JOIDES*. 1977. 7~2
- 7 Watts A B. The U. S. Atlantic Continental Margin: Subsidence history, crustal structure and thermal evolution. *Geology of passive continental margins. AAPG Education Course Note Series* 19. 1981. 1~75
- 8 Bally A B. Folded belts and their associated basins. as seen on reflection seismic profiles. *A short course (AAPG Notebook)*. 1992. 1~55
- 9 王鸿祯等. 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. 3~34
- 10 孙枢等. 继续重视拗拉槽(裂陷槽)及其成矿作用的研究. 中国油气盆地分析——朱夏学术思想研讨文集. 北京: 石油工业出版社. 1993. 55~59
- 11 Lowell J D. *Structural styles in petroleum Exploration*. Tulsa: OGCL Publications. 1987. 191~250
- 12 刘和甫, 陆伟文, 王玉新. 鄂尔多斯西缘冲断-褶皱带形成与形变. 鄂尔多斯盆地西缘掩冲带构造与油气. 兰州: 甘肃科学技术出版社. 1990. 54~76
- 13 Hamilton W. Crustal extension in the Basin and Range Province, southwestern United States. *Continental extensional tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1987. 155~176
- 14 Gibbs A. Development of extension and mixed-mode sedimentary basins. *Continental extensional tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1987. 19~34
- 15 Gibbs A. Strutural evolution of extensional basin margins. *J Geol Soc London*. 141. 609~620
- 16 McClay K R. Ellis P G. Analogue models of extensional fault geometries. *Continental extensional tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1987. 109~126
- 17 邓晋福, 赵海玲, 罗昭华. 新生代中国东部大陆岩石圈的伸展与减薄. 中国大陆构造论文集. 武汉: 中国地质大学出版社. 1992. 165~172
- 18 Davis G A. Qian Xianglin, Zheng Yadong, et al.. Mesozoic Deformation and Plutonism in the Yunmeng Shan: *A Chinese metamorphic core complex North of Beijing*. 1994 (in press)
- 19 Howard K A. John B E. Crustal extension along a rooted system of imbricate low-angle fault: Colorado River

- extensional corridor. California and Arizona. *Continental extensional tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1987. 299~312
- 20 牛树银, 陈路, 许传诗. 太行山区地壳演化及成矿规律. 北京: 地震出版社. 1994. 1~203
- 21 Keen C E. Some important consequences of lithospheric extension. *Continental extensional tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1987. 67~74
- 22 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 夏义平, 刘立群. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地球科学. 1994. 19(6): 727~741
- 23 Hayward A B, Graham R H. Some geometrical characteristics of inversion. *Inversion tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1989. 17~40
- 24 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 沈飞. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地质学报. 1994. 68(2): 101~118
- 25 MaClay K R. Analogue models of inversion tectonics. *Inversion tectonics*. London: Blackwell Scientific Publications. 1989. 41~62

EXTENSIONAL TECTONICS AND ITS INVERSION

Liu Hefu

(China University of geosciences, Beijing, 100083)

Abstract The evolution of extensional tectonics occurs in three main phases: (1) the continental rifting phase, (2) the onset of drifting, and (3) the main drifting. Extensional structures formed at different tectonic levels: (1) the upper-crust brittle blocks above the decollement faults are bounded by listric faults, ramp-flat faults and domino fault systems, (2) the middle-crust is extended by discontinuous ductile shear zones separating metamorphic lenses, and (3) the lower-crust is extended by more pervasive ductile flattening and by dykes. Extensional fault systems which have undergone inversion commonly show thrust faults, short-cut faults, fault-bend folds, fault-propagation folds, pop-up structures in the region of the crestal collapse graben, and harpoon structures in the region of the half graben.

Key words extensional tectonics, inversion, tectonic level, decollement fault