

第九章 断层成因分析

断层是岩石破裂的表现。影响岩石破裂因素很多，如应力大小、应力性质、岩石的力学性质及变形的物理条件(围压、温度、孔隙液压及时间因素等)。断层的形成和分布是有规律性的，不管人们从哪个角度来分析研究它，最终还是集中在岩石破裂的机制方面。本章重点介绍断层与应力的关系以及逆冲推覆构造、伸展构造和走滑构造的形成模式。

第一节 断层与应力关系

安德森断层应力模型

安德森(E. M. Anderson, 1951)从最简单的情况考虑，假设：

- (1) 沿地球表面剪应力为零，断层三个主应力其中之一趋向于直立，另外两个主应力趋向水平。
- (2) 断层面都是剪切面，并经常以共轭型式出现。

在以上假设条件基础上，提出了正、逆和平移断层三种应力状态。

安德森模式被地质学家所接受，作为分析揭示地表或近地表脆性断层的依据。现在一般认为：

断面是一个剪切面，一对共轭断层交线规定了 σ_2 方位， σ_1 与两剪切面的锐角平分线一致， σ_3 与两剪切面的钝角平分线一致，断层面与 $\sigma_1\sigma_3$ 应力主平面的交线规定断层滑向，其指向是锐角区楔形岩块沿 σ_1 向角顶运动，即断层两盘垂直于 σ_2 方向滑动。

一、正断层应力状态

1. 正断层的应力状态是：

σ_1 直立， σ_2 和 σ_3 水平；形成一对反向陡倾斜(倾角约 60°)的正断层；两断层面的交线方向平行于 σ_2 ，平行断层走向；断层面上剪切运动方向是岩块垂直压缩平行于 σ_1 ，岩块水平拉伸平行于 σ_3 ，上盘岩块下滑。

2. 根据形成正断层的应力状态和莫尔圆表明，引起正断层作用的有利条件是：

最大主应力(σ_1) 在铅直方向上逐渐增大，或者是最小主应力(σ_3) 在水平方向上逐渐减小。因此水平拉伸和铅直上隆是最适合于发生正断层作用的应力状态。

二、逆断层的应力状态

1. 低角度逆断层(冲断层)的应力状态是：

σ_3 直立， σ_1 和 σ_2 是水平的；形成一对反向缓倾斜的逆断层(断层面倾角约 30° 左右)；两断层面交线仍然平行于 σ_2 ，平行于断层走向；断层面上剪切运动方向是水平方向压缩且平行 σ_1 ，直立方向拉伸平行于 σ_3 ，断层上盘岩块向上滑动。

2. 根据形成正断层的应力状态和莫尔圆表明，引起逆断层作用的有利条件是：

最大主应力(σ_1) 在水平方向上逐渐增大，或者是最小主应力(σ_3) 在铅直方向上逐渐减小。因此水平挤压有利于逆断层的发育。

三、平移断层的应力状态

形成平移断层的应力状态是：

σ_2 直立， σ_1 和 σ_3 是水平的；形成一对直立的共轭平移断层，两共轭断层夹锐角对着 σ_1 方向，其交线平行 σ_2 。断层面上剪切运动方向是水平压缩平行 σ_1 ，水平拉伸平行 σ_3 ，锐角区向角顶运动。

尽管安德森的断层应力模型不完全符合于自然界断层发育的实际情况，这一模型在研究断层系统时还是有用的，因此地质学家们以此作为分析断层的依据。

第二节 逆冲推覆构造的形成模式

关于推覆构造的形成机制，目前有以下三种认识：

一、侧向水平挤压说

在逆冲推覆构造研究早期，人们根据褶皱造山带逆冲推覆构造中发育的大规模褶皱，认为逆冲

推覆构造发育区显示了在水平方向的强烈缩短，其缩短量达到几十公里乃至上百公里。

有些学者认为：**推覆构造的形成是在侧向水平挤压作用下，在推覆构造根部发育的高角度逆断层把推覆体抬升到一定高度位置，在推覆体具有定位能的情况下，再沿着低缓滑动面，在后方推动力作用下被送到造山带前缘，从而形成推覆构造。**

推覆体从造山带的根部被送到造山带前缘没有侧向水平挤压的后方推动是难以实现的，这是最早研究阿尔卑斯推覆构造时就已经提出来的观点。但是在褶皱造山带的边缘存在着这种水平挤压的原因，长期以来并不了解。自从板块构造理论产生以后，**板块聚合型边界之一的碰撞带提供了巨大的水平挤压的动力源。**

存在的问题：水平挤压作为逆冲推覆构造的成因机制的经典观点，虽然被许多地质学家所接受，但是在揭示某些逆冲推覆构造中也遇到一定的困难。如某些逆冲构造带的变形没有褶皱伴生，尤其是**挤压作用力与推覆体所能承受的应力之间存在巨大矛盾**，对于一个长、宽、厚以公里以至数十、数百公里计的大推覆体，如使其长距离运移，作用力是十分巨大的。这样大的作用力已大大超过岩石强度，岩石早在运移前就已碎裂了。而且一些强烈变形的推覆体在变动中处于一种弹塑性状态，很难将应力远距离传递（朱志澄，1999）。

二、重力滑动说

由于侧向水平挤压解释推覆构造形成时遇到的难题，因此某些学者提出重力是引起推覆构造的驱动力源，这种观点早在研究阿尔卑斯构造时就已经提出了。

重力滑动解释推覆构造形成，如同地面滑坡一样，**滑动体(推覆体)由于本身重量，沿着低缓的滑动面自上而下滑动。当滑动体滑动时，首先必须具有一定的位能，而且滑动必须在软弱层内。由于滑动体在重力作用下滑动，则在滑动体内产生平卧翻卷褶皱。显然，滑动面的主体必须是向滑动方向倾斜的低角度正断层。重力滑动形成的推覆体，其前缘出现与重力滑动方向相反倾斜的逆冲断层组合，后缘出现倾斜与重力滑动方向相同的伸展断层组合。**

三、重力扩展说

重力扩展说是 W. H. Bucher (1956) 在研究加拿大落基山推覆构造时提出的。**他认为岩石在重力作用下，垂向压扁降低高度，并在水平方向上向静岩压力小的方向流动扩展，从而产生水平方向的推动力形成逆掩断层及推覆构造。**

四、推覆构造形成中孔隙液压作用

大规模推覆构造上盘岩块被推移数十公里，一直令地质学家们所费解。如阿尔卑斯的格拉鲁斯推覆体长为 30 公里，位移距离竟达 40 公里。这么大的岩块，能够推移这么远的距离，其所需要的动力是巨大的。这样大的动力，恐怕在岩块发生位移之前，已经能使岩块破碎。但事实是岩块基本完整，并位移了几十公里，这究竟是什么原因呢？Hubbert 和 Rubey (1959) 提出用孔隙液压理论来解释这种现象。

Hubbert 和 Rubey (1959) 认为，岩石和岩层中总是具有一定的流体压力，超出正常的流体压力为异常或高孔隙液压，这种高孔隙液压可在任何深度出现，一般多在 1.5—3km。**高孔隙液压，可以对岩石起着浮力作用，从而降低上覆推覆岩块的重力并起着减小推覆体与下伏岩块之间的摩擦力。因此较小的动力也能推动上覆推覆体沿着低缓断层面位移很大距离。**

逆冲作用引起地层重叠和构造加载，肯定会在适当部位引起异常高压。这些部位常常是软弱岩层尤其是蒸发岩产出部位。巨大逆冲岩席的掩覆也为封闭状态的形成提供了有利条件。同时逆冲断层面上摩擦生热，又促进了水热增压作用。

孔隙液压不仅与逆冲推覆作用有密切关系，而且与正断层、滑脱和大型拆离断层的关系也不容忽视。

第三节 伸展构造的形成模式

随着 70 年代后期美国盆岭区第三纪伸展构造研究的开展，近些年来许多学者作了大量深入的研究工作，相继提出了各种大陆伸展构造模式，用以探索伸展构造的形成、解释大陆内部及被动大陆边缘裂陷伸展区的各种地质及地球物理特征。概括起来，大陆伸展构造模式可以分为三类：纯剪切

伸展模式、简单剪切模式和分层拆离组合伸展模式（陆克政等，1997）。

一、纯剪切伸展模式

纯剪切伸展的思想由来已久，地质学家在野外地质调查中常能发现岩层断裂呈共轭出现，并且岩石力学实验可以重现这一现象。岩石中的共轭断裂面代表岩石在应力作用下发生非旋转应变产生的脆性剪切破裂面，这种非旋转剪切变形称为“纯剪切”。在纯剪切变形条件下形成的正断层一般是高角度的（倾角 60° 左右）。共轭出现的正断层相向或相背倾斜，并在运动过程中导致断块体以直移方式相对上升和下降，从而形成地堑和地垒，并使地壳产生水平伸展。这种机制形成的地堑和地垒通常都是近似对称的，并且没有块体的掀斜旋转运动（非旋转伸展系列）。

大陆岩石圈纯剪切伸展模式很好地解释了地堑或裂陷盆地（或裂谷、地堑）的形成机制，如一些裂谷作用（或地堑形成机制）模式基本上都属于纯剪切伸展模式范畴。

二、简单剪切伸展模式

早在 60 年代，美国地质学家就在北美西部科迪勒拉山脉“盆岭区”发现大型近水平断层（或滑脱面）。此后的研究证明这是一条大约以 12° 倾角向地下延伸的大型低角度正断层，正向滑动至少有 30km，甚至有 50-60km。这一发现给人们以重要的启示。Wernicke（1981，1982，1985）在研究美国西部盆岭区伸展构造的基础上提出了大陆岩石圈的简单剪切伸展模式。他认为地壳或岩石圈中存在的一些大型低角度正断层是大陆伸展变形的运动面。并且这个大型低角度正断层在大陆伸展中发生旋转剪切变形，位于该面之上的上盘系统进一步被大量旋转正断层肢解。整个岩石圈的伸展变形是一种旋转的简单剪切应变体制。在简单剪切伸展模式中，浅层地壳中脆性破裂构成的伸展构造系统，是由地壳中岩石圈尺度的大型低角度正断层上盘的剪切滑动引起的，其中的主要伸展断层不具有旋转平面式正断层或铲式正断层特征。由于低角度正断层切穿整个岩石圈，造成地壳的脆性伸展区域与上地幔的韧性伸展（在低角度正断层延伸部位发生韧性伸展，实际上也是低角度正断层的一部分）区域在垂向上并不叠加。因此，在任意给定的垂向参照线上，地壳的伸展减薄与上地幔的伸展减薄是不均匀的。

第四节 走滑断层的形成模式

走滑断层经常出现于两大地质背景中：

(1) 在地壳的上部层次中，延长一般不超过几十公里。最小规模的走滑断层可以在采石场、悬崖断面上，甚至在手标本上见到。

(2) 在现代或古板块边界上，由区域性走滑断层构成，这些大型走滑断层有许多穿透了地壳，并具有大规模的位移。例如，圣安德烈斯等四条走滑断层环太平洋周边分布，构成太平洋板块边界。圣安德烈斯断层平移 330 km (Crowell, 1989)，新西兰阿尔平断层平移 480 km (Wellman, 1954)，苏格兰大谷断层平移 600 km (Storelvedt, 1987)，日本中央构造线平移 1000 km (Taira, 1983)，红河断层平移 300 km (Zhong, 1986)，郯庐断裂带平移 740 km (徐嘉伟, 1980)。阿尔金断裂最大位移 300—400 km (Molnar *et al*, 1975; Tapponnier, 1986; 卢华复等, 1997)。

在区域上，大型走滑断层既可以作为独立活动体系，又可以作为区域构造的重要组成单元，对区域构造主要起构造转换和调整的作用。例如，在印度板块与欧亚板块碰撞俯冲过程中，印度板块东西两侧的走滑断层通过走滑调整了碰撞俯冲和构造缩短，并使区域构造发生了转换。

在走滑断层附近常出现雁列褶皱或断层，可以认为是一种剪切变形的结果。因此，从理论上讲，走滑断层形成机制有纯剪切模式或简单剪切模式，但实际上纯剪切所产生的共轭破裂仅在位移不大的情况下发育，因为在几何学上不可能是两组共轭断层同时起作用，由于彼此有阻碍，发生运动学上的堵车问题。因此对于大规模的走滑断层形成机制主要采用简单剪切模式（刘和甫，1999）。

简单剪切的模拟实验研究发现：(1) 早期发育两组共轭剪切，即 Riedel 剪切，与主位移带同向的称 R 破裂，反向的称为 R' 破裂，在 R 和 R' 破裂的锐角等分线平行的方向上形成张性破裂或地堑；(2) 中期可以发育一组新剪切称为 P 破裂，与 R 破裂成对称，但剪切方向相反；(3) 晚期 R 和 P 破裂旋转而趋近主位移带（Sylvester, 1994）。