

吕延防 付 广 等编著

断层封闭性研究

石油工业出版社

断层封闭性研究

吕延防 付 广 张云峰 编 著
王朋岩 付晓飞 杨 勉

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者长期科研实践的总结。全书共分八章,其内容主要包括:断层形成机制及其基本特征,断层封闭机理及其影响因素,断层封闭性的物理模拟实验,断层封闭性的定性评价方法研究,断层封闭性的定量评价方法研究,断层封闭演化史研究,断层封闭的差异性研究,断层在油气藏形成与保存中的作用研究。内容以物理模拟实验为基础,以统计分析为手段,以实例分析为依据,以评价方法为核心,总结了国内外有关断层封闭性研究的实践,系统阐述了断层封闭性的研究思路、方法、步骤、应用实践及其效果。是一部实用性很强的断层封闭性研究的专门著作。

此书可作为从事石油天然气地质勘探与开发的科研、技术人员以及有关大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

断层封闭性研究/吕延防等编著.

北京:石油工业出版社,2002.7

ISBN 7-5021-3806-4

I. 断…

II. 吕…

III. 石油天然气地质-地质断层-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 042115 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 262 千字 印 1—1000

2002 年 7 月北京第 1 版 2002 年 7 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3806-4/TE·2775

定价:30.00 元

前 言

油气在运移过程中常常会遇到断层面，这种断层面有时可以作为油气运移的通道，有时又起遮挡作用（1989，陈发景）。当起通道作用时，油气可沿断层面做垂向运移，断层错断地层的层位不同，油气运移到的层位也不同，其活动时期控制着天然气二次运移的时期；当起封闭作用时，断层在侧向上可阻止油气穿断层面运移，垂向上防止油气沿断面向上部储层运移。因此搞清断层的封闭程度，可认清油气的分布规律，确定油气的勘探目的层，同时研究与断层有关的圈闭，对于有效寻找油气藏具有重要的指导意义。

早在1966年，Derret Smith就从分析断层封闭性的本质入手，建立了断层封闭性理论模型，其基本含义为：目的盘岩层中的排替压力小于与之对置的断层另一盘地层排替压力时，断层封闭，所以，目的砂层与对盘泥岩层对置，断层是封闭的。若断层两盘为砂层与砂层对置，断裂带内的断层泥可起封烃作用。Smith在1980年发表的文章中，利用油田实例证实了断层两侧砂泥对置断层封闭理论的正确性，并通过对野外的实际观察，证实了断层泥的存在。后来人们所做的工作，基本都是从不同角度证实Smith模型的正确性，并以断层两盘砂泥对置作为断层封闭的主要标准应用于实际断层封闭性的判断。

1978年，K.J.Weber等人利用一种环形剪切实验装置来模拟断层泥的形成，证实了在剪应力作用下的塑性地层可以形成断层泥，他同时也对所产生的断层泥进行了封闭性能测试，确认断层泥可对流体起遮挡作用。

N.L.Watts于1978年在所发表的文章中以Smith理论模型为基础，从理论上进一步论述了两盘不同渗透能力砂岩相互对置时，无充填情况下断层封闭单相烃柱和两相烃柱能力的差别。他指出，在浅处，断层遮挡的油柱也许大于气柱，而在临界深度（区间）之下，气比油易于封闭。在断层封闭能力确定的情况下，如果断层封闭的是油气藏，随着气顶高度的增大，断层封闭油气柱总高度减小。

1984年，M.W.Dewney通过对断层的封闭机理研究指出，断层封闭具备双向性，即顶部封闭（后人称之为垂向封闭）和侧向封闭，且由于两个方向上封闭性质的差异，导致对油气保存与破坏的控制作用大不相同；断层的垂向封闭，将油气限制在了某一储层内而不致于上逸散失，断层的垂向开启会导致油气向更新地层中串层运移、聚集（或再聚集）或散失。断层的侧向封闭将油气限制在了断层的一侧，使油气只能在断层一侧沿断层走向发生运移或聚集；断层侧向开启会导致油气穿断层面运移，使油气在地层上倾方向上的更远处聚集或散失。

1989年，Urbans Allan提出了利用断面剖面分析判断断层侧向封闭性的方法，该方法的前提是断层内无充填，断层侧向封闭与否取决于断层两盘砂泥岩层的对置状况，该方法是以断层面为剖面，将断层两盘目的层段各岩层按实际地层产状投影到断面剖面上，根据两盘渗透性地层和非渗透性地层的分布状态从油气运移角度分析各点断层的侧向封闭性。

陈发景（1989）在前人研究的基础上又进一步研究了断层封闭机理，建立了断层差异排替压力封闭能力判断模型。指出断层侧、垂向封闭能力的大小取决于目的盘储层与对置盘地层、断裂充填物质及盖层内断层裂缝排替压力差的大小，如果目的盘储层排替压力小于对置盘地层排替压力（无断裂充填或断裂充填物排替压力小于目的储层排替压力）或小于断裂充填物（有断裂充填时）排替压力时，断层侧向封闭，否则断层侧向开启；当目的盘储层排替

1023/105

压力小于盖层内断层裂缝排替压力时,断层垂向封闭,否则垂向开启。陈发景利用北大港油田开发区油藏实例证实了所建模型的正确性。在陈发景以后,关于断层封闭机理问题不再有更新的认识,多数工作都致力于断层封闭影响因素研究和断层封闭性判别方法研究上。

1989年,J.Q.Bouvier在尼日利亚农河油田利用三维地震资料作过断层切片,研究断层两盘地层接触情况,并以此分析断层封闭性。研究后指出,断层泥的存在确实可以阻挡油气穿过断层的侧向运移。

1992年,曹瑞成、陈章明提出了利用逻辑信息技术判断断层封闭性的方法。该方法是在总结所有影响断层封闭性因素的基础上,利用逻辑信息法对各因素进行分析、筛选,找出最主要的10个因素,并计算其各自在断层封闭性中作用权值,建立由各因素及其权重构成的断层封闭性判别模型。

1993年,Lindsay等人根据实际资料的统计分析,提出了泥岩涂抹因素SSF(Shale Smear Factor)分析断层侧向封闭性判别方法,其SSF的计算公式为:SSF=断距/泥岩层厚度,SSF主要用以表征断层涂抹层的连续程度,Lindsay给出了断层封闭性作用的SSF范围值。受Lindsay的启发,1996年,Fulljames和Lehner改进了Lindsay的SSF计算方法,分别提出了CSP(Clay Smear Potential)和SF(Smear Factor)断层涂抹层连续性的描述方法及公式($CSP = \sum \text{thickness}^2 / \text{distance}$, $SF = \sum \text{thickness}^n / \text{distance}^m$)。1997年,G.Yielding在前人研究的基础上,提出了断层泥分布率SGR(Shale Gouge Ratio)及计算公式:SGR=($\sum \text{Shale bed thickness}$) $\times 100\%$ /Fault throw。并用以分析断层泥的分布及断层的侧向封闭性能。

1994年,M.Antoneuini和A.Aydia通过露头区断裂带的精细地质填图和测量,发现在多孔砂岩中变形条带、变形带和滑移面是同断裂带形成演化有关的次级构造,变形条带的孔隙度比围岩低1个数量级,渗透率低3个数量级,滑移面附近两盘岩石的渗透率比原岩低7个数量级;变形条带中毛管压力比围岩的大10100倍。因此说,即使是断层两盘砂岩层与砂岩层相接触,由于断裂带的低孔渗性也可能造成断层的侧向封闭。

1995年,吕延防通过对辽河油田开发区断层所断移地层的砂泥比值统计发现,同生断层断移地层砂泥比值大于1.0、非同生断层大于0.8,断层不具封闭性;封闭断层断移地层的砂泥比值一般小于0.6。他在总结了前人断层封闭性研究成果的基础上,提出了非线性映射分析法判断断层封闭性的数学地质方法。此后,又相继提出了压力系数法、综合地质分析法等断层封闭性分析方法。

1996年,吕延防在充分分析断层封闭机理及封闭性影响因素的基础上,指出影响断层侧向封闭性的主要因素是断层两盘砂泥岩层的对置状况,影响断层垂向封闭的主要因素是断层层面所承受的正压力。鉴于我国陆相沉积盆地砂泥岩层单层厚度不大、横向相变快、断层两盘砂泥岩层的对置状况直到油田开发初期都很难用作图的方式准确知晓的特点,提出了利用砂泥对接概率模拟的方法定量研究断层侧向封闭性的新方法。至此,将过去的断层封闭性的定性研究发展到了半定量—定量研究阶段。

1997年,付广等人在Lindsay等(1993)提出了泥岩涂抹系数的基础上,结合我国断层发育特点,提出了一套适合我国断层泥岩涂抹系数的求取方法,并将其应用于松辽和塔里木盆地断层封闭性研究中,并取得了较好的效果。1997年,付广等人又对断层垂侧向封闭机理进行了深入研究,对其研究方法进行了探讨。

近十几年来,除上述一些学者在断层封闭性研究方面颇有建树以外,R.E.Wallaces

(1986), T.P.Harding (1989), D.C.Peacock (1991), R.J.Knipe (1992, 1993), S.D.Knott (1994), R.G.Gibson (1994), R.R.Berg (1995), B.R.Crawford (1995), T.A.Fristad (1996), J.R.Fulljames (1996), F.K.Lchner (1996), G.M.Skerlec (1996), G.Yielding (1997) 等也都做了很多非常有价值的工作, 也取得了丰富的研究成果, 为后人继续研究奠定了理论基础, 提供了较丰富的研究资料。然而, 由于断层封闭性研究是目前油气地质理论中一大难题, 尽管都知道断层封闭性在油气运移、聚集、散失过程中起着举足轻重的作用, 只是因为其难度太大, 研究进展与其他成熟的石油天然气地质理论相比还存在着较大差距。

本书是笔者在参考国内外有关断层封闭性研究的最新成果的基础上, 将自“八五”、“九五”以来多年在断层封闭性方面的研究成果汇编而成, 是一部关于系统研究断层封闭性的专著, 主要包括断层形成机制及其基本特征、断层封闭机理及其影响因素、断层封闭性物理模拟实验、断层封闭性定性评价、断层封闭性定量研究、断层封闭性演化史、断层封闭的差异性、断层在油气藏形成与保存中的作用等内容。该书与国内外同类研究相比, 具以下特色:

(1) 基于油气封闭理论, 详细阐述了断层垂、侧向封油气机理及模式, 并对其各自的影响因素进行了深入分析。

(2) 详细介绍了断层泥涂抹实验和过程, 阐述了断层泥的形成机制、分布特征及影响因素, 为断层泥涂抹作用的定量研究奠定了基础。详细介绍了断层封闭时所需填充物泥质含量下限的物理模拟实验和过程, 提出了不同粒度条件下断层封闭时所需填充物泥质含量的下限标准, 这为断层封闭性的定量评价提供了重要参考依据。

(3) 在系统介绍断层封闭性定性评价方法的基础上, 着重介绍了利用泥岩涂抹系数法、砂泥岩对接概率法定量研究断层侧向封闭性的方法, 同时介绍了利用断面压力法和综合评价方法定量研究断层垂向封闭性的方法。

(4) 在断层活动历史研究的基础上, 建立了一套断层封闭性演化史的研究思路及方法。

(5) 理论与实例相结合, 详细阐述了断层在油气藏形成与保存中的作用。

(6) 从空间和时间上封闭能力 3 个方面论述了断层封闭的差异性。

总之, 该书注意吸收国内外有关方面的最新研究成果和先进技术, 以实验为基础, 以我国含油气盆地实际地质资料为依托, 深入探讨了断层封闭性理论及其研究方法, 这不仅有助于完善石油地质理论, 而且具重要的实用性。

本书是国内惟一系统阐述断层封闭性研究的专门著作, 可作为高校本科生、研究生教学、科研的参考教材, 也可作为该方面研究者的参考资料。

由于笔者理论水平有限, 以及国内外该方面研究的深度和广度的局限, 书中尚有许多不尽如人意之处在所难免, 希望专家们能就本书提出宝贵的批评和修正意见。

本书前言由付广、吕延防编写, 第一章由张云峰、付晓飞编写; 第二章由付广、付晓飞编写; 第三章由付广、吕延防、付晓飞编写; 第四章由吕延防、王朋岩、杨勉编写; 第五章由吕延防、付广、杨勉编写; 第六章由王朋岩编写; 第七章由付广、吕延防编写; 第八章由付广、张云峰编写。全书由吕延防、付广统稿。

在本书的写作过程中, 很多前辈和同事以及在校的研究生都给予了大力帮助, 笔者在此表示衷心的感谢。

目 录

第一章 断层形成机制及其基本特征	(1)
第一节 断层的几何要素.....	(2)
第二节 断层分类及其组合类型.....	(4)
第三节 断层形成过程及机制.....	(9)
第四节 断层识别标志.....	(19)
第二章 断层封闭机理及其影响因素	(31)
第一节 断层封闭机理.....	(31)
第二节 断层封闭性的主要影响因素.....	(34)
第三章 断层封闭性的物理模拟实验	(39)
第一节 断层涂抹层分布规律的物理模拟实验.....	(39)
第二节 断层封闭时充填物泥质含量下限的物理模拟实验.....	(54)
第四章 断层封闭性定性评价	(66)
第一节 综合地质分析法判断断层封闭性.....	(66)
第二节 非线性映射分析法判断断层封闭性.....	(76)
第三节 逻辑信息法判断断层封闭性.....	(80)
第四节 断面剖面分析法判断断层的封闭性.....	(88)
第五节 利用断层切片技术研究断层封闭性.....	(92)
第六节 模糊综合评判判断断层封闭性.....	(93)
第七节 根据断面力学性质判断断层垂向封闭性.....	(97)
第五章 断层封闭性定量评价	(100)
第一节 对接概率计算法判断断层侧向封闭性.....	(100)
第二节 封堵量计算及封堵特性的相关分析判断断层侧向封闭性.....	(108)
第三节 泥岩涂抹系数法研究断层侧向封闭性.....	(116)
第四节 断层垂向封闭性研究.....	(122)
第五节 渗滤速度模拟计算法判断断层垂向封闭性.....	(126)
第六章 断层封闭史演化研究	(132)
第一节 断层封闭史演化研究的基础工作.....	(132)
第二节 静止期断层封闭史演化研究.....	(133)
第三节 活动期断层封闭史演化研究.....	(138)
第七章 断层封闭的差异性	(142)
第一节 断层封闭能力的差异性.....	(142)
第二节 空间上断层封闭的差异性.....	(143)
第三节 时间上断层封闭的差异性.....	(146)
第八章 断层在油气藏形成与保存中的作用	(148)
第一节 断层活动形成的构造裂缝改善了油气储集空间及性能.....	(148)

第二节	断层活动开启控制着油气运聚时期及层位·····	(149)
第三节	断层活动与封闭控制着不同类型油气圈闭的形成·····	(151)
第四节	断层封闭与开启控制油气的保存与散失·····	(153)
参考文献	·····	(155)

第一章 断层形成机制及其基本特征

断层是断裂构造的一种，是岩层或岩体沿破裂面发生明显位移的断裂构造；它和褶皱、节理一样，是在地壳中普遍发育的地质构造现象之一。

断层的规模大小、切割的深浅差别甚大。有些断层时断时续活动到现今，对人类也有很大的影响。一些规模巨大的断层，不仅直接控制区域的沉积作用、岩浆活动和构造变动，而且还控制和影响了区域的成矿作用，还常常分隔着两个不同的大地构造单元。一些规模中、小型的断层，对于矿产的形成和改造、地下流体（油、气、水）的运移和储聚以及地震的发生和活动等等都起着直接的控制作用或产生重要的影响。因此，在含油气盆地构造的研究或局部圈闭构造的研究中往往离不开断层的分析。

断层往往是由节理进一步发展而成的，所以两者之力学性质相近。但与节理相比有如下几方面的特点：一是断层规模较大，切割较深，而且可单一存在；二是断层具有明显的错动，且在平面、剖面上断层面产状变化较大；三是长期发育的深大断裂往往作为区域或大地构造单元的分界控制着断层两侧的沉积岩性、岩相特征及构造发育特征；四是由于断层两盘的相对错动所出现的一系列构造现象，如地层的重复、断失和破碎带、断层构造岩等现象是节理所没有的。

在地壳表层，岩石一般表现为脆性，向地下深处随着温度和压力的增高，岩石也由脆性转变为韧性。因此，地壳中的断层还表现出一定的层次性，浅层次为脆性断裂，形成脆性断层，在较深和深层次则形成韧性断层或韧性剪切带，两者之间还存在一个过渡层次。

研究断层构造，需要具体分析其形态特征、分类和组合关系、时间上的发展规律和空间上的分布规律、断层的形成机制及断层与矿产的关系等。

大型断层或深大断裂往往影响和控制着含油盆地的形成与发展演化过程。我国大部分含油气区的形成均与区域性深大断裂有着密切关系，基底断层是控制含油气盆地内一、二级构造形成和发育的最主要因素（图 1-1）。如统计资料表明，整个渤海湾盆地的基底主干断裂达 50 余条，将盆地分割为 81 个大小不等的断块，每一个断块便是一个独立活动单元（使同一个油田具有不同的水动力系统 and 采油特点），其中又发育着更多的小断层。又如在一个面积仅 5400km² 的济阳拗陷中，发现的断层多达 1580 条。

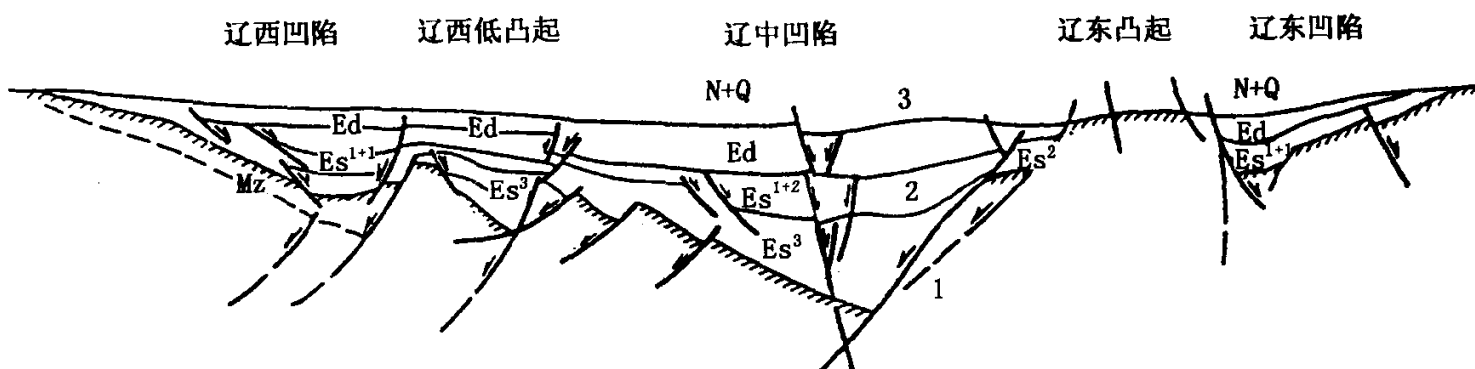


图 1-1 地震解释剖面图（渤海湾）

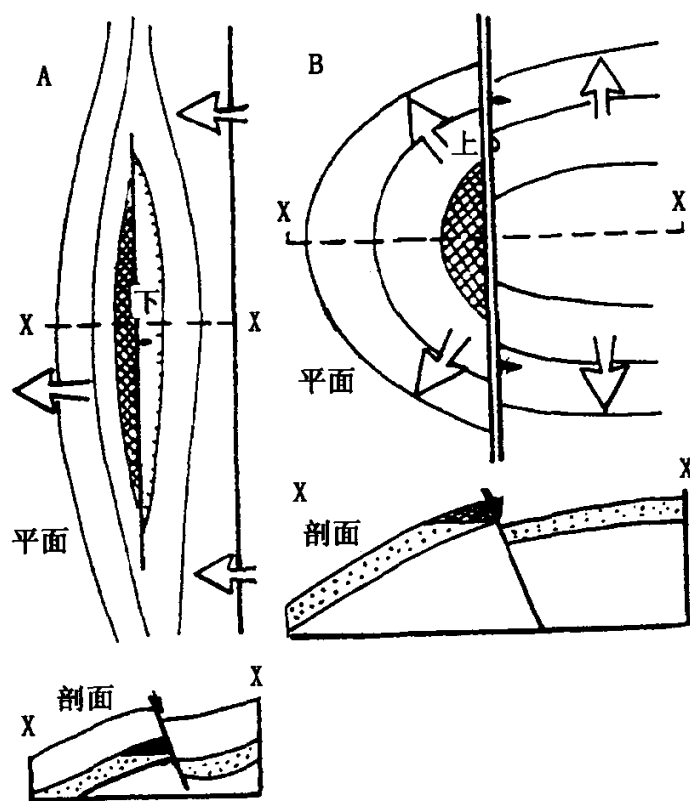


图 1-2 正断层与褶皱所形成的圈闭
A—由平缓褶皱与正断层交切而形成的圈闭；
B—由正断层与较陡褶皱交切而形成的圈闭
(大箭头表示区域倾斜方向)

含油气盆地中的断层对油气藏的形成和破坏两方面都有着直接的影响。开启断层可以成为油气垂向运移的良好通道，在许多地区断层由于沟通了生油层系和储油层系，在较新的地层中形成了次生油藏。如柴达木冷湖油田的形成就是因为轴向产生了一条大断层，为油气的垂向运移提供了良好条件，紧靠着断层形成了宝塔状的多油层油藏。我国很多油藏的形成与断层起垂向通道作用有关。另一方面，断层可阻挡油气运移，断层还可形成保存油气藏的圈闭，许多油气圈闭的全部或局部乃由断层所形成（图 1-2）。

油气藏形成后的后期断层作用，既可促进油气的再分配，也可破坏已形成的油气藏。地表油苗的出现大多与断裂破坏有关。

总之，从含油气盆地的形成到油气的运移聚集以及后期改造或破坏的整个过程中，始终贯穿着断层构造的活动及其影响。

第一节 断层的几何要素

断层的规模、形态和产状千差万别，但每一条断层都由几个基本的要素组成，简称为断层要素。断层的几何要素包括断层的基本组成部分以及与描述断层空间位置和运动性质有关的具有几何意义的要素。

一、断层面（带）和断层线

断层相对位移的错动面称为断层面，断层面也就是构成断层的破裂面，它可被视为面状构造以确定其产状。断层面有的平直、有的弯曲（波状）。断层面与地面的交线称为断层线，亦即断层在地表的出露线。它的出露形态取决于断层面的产状和地形（坡向、坡角）。

规模较大的断层面，无论沿其走向或倾向产状都会有些变化，而且大断层的错动往往不是沿一个平面而是沿着具有一定宽度的破裂地带发生的，这种破裂带叫断裂带或断层带。断裂带可由一些近于平行的或互相交织的断层组合而成，其宽度自几米至数百米、甚至可达数十公里。

二、断盘

断盘是指断层面两侧的岩层或岩体，也即断层两侧相对移动的岩块。当断层面倾斜时（多数情况），断盘分为位于断层面上侧的上盘和位于断层面下侧的下盘（图 1-3）。当断层面直立时，则相对于断层面的方位两盘可以分为东盘、西盘或东北盘、西南盘等。根据两盘相对错动的关系，可把相对上升的一盘称为上升盘，相对下降的一盘称为下降盘。

三、位移

位移也叫断层位移，是断层两盘相对移动的总称，是任意方向上量度的断层两盘的相对运动方向及运动大小。关于位移的不同类型，各家所用名称比较混乱，尚无统一的用法。根据目前多数国内院校所用的术语，把位移可分为滑距和断距两种。

1. 滑距

滑距是断层两盘实际位移距离的总称。两盘的位移包括移动方向和移动距离，而滑距只是一个距离的概念。滑距又可分解为几个方向的分量。

总滑距：指原来的一点被断层错开后的两个对应点之间的实际距离（图 1-4a 中的 ab ），它是三维的概念，是在三维空间上错开的真正距离。

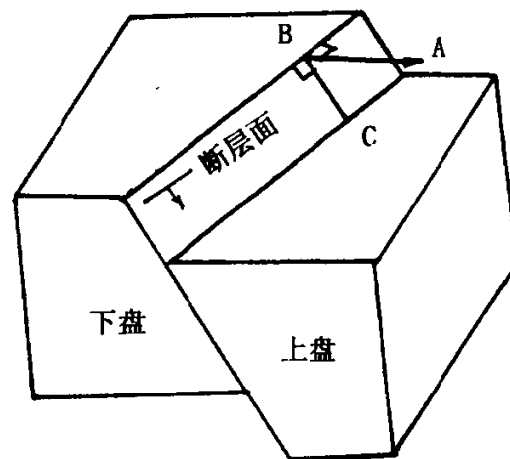


图 1-3 上下盘、断层面和断层线示意图

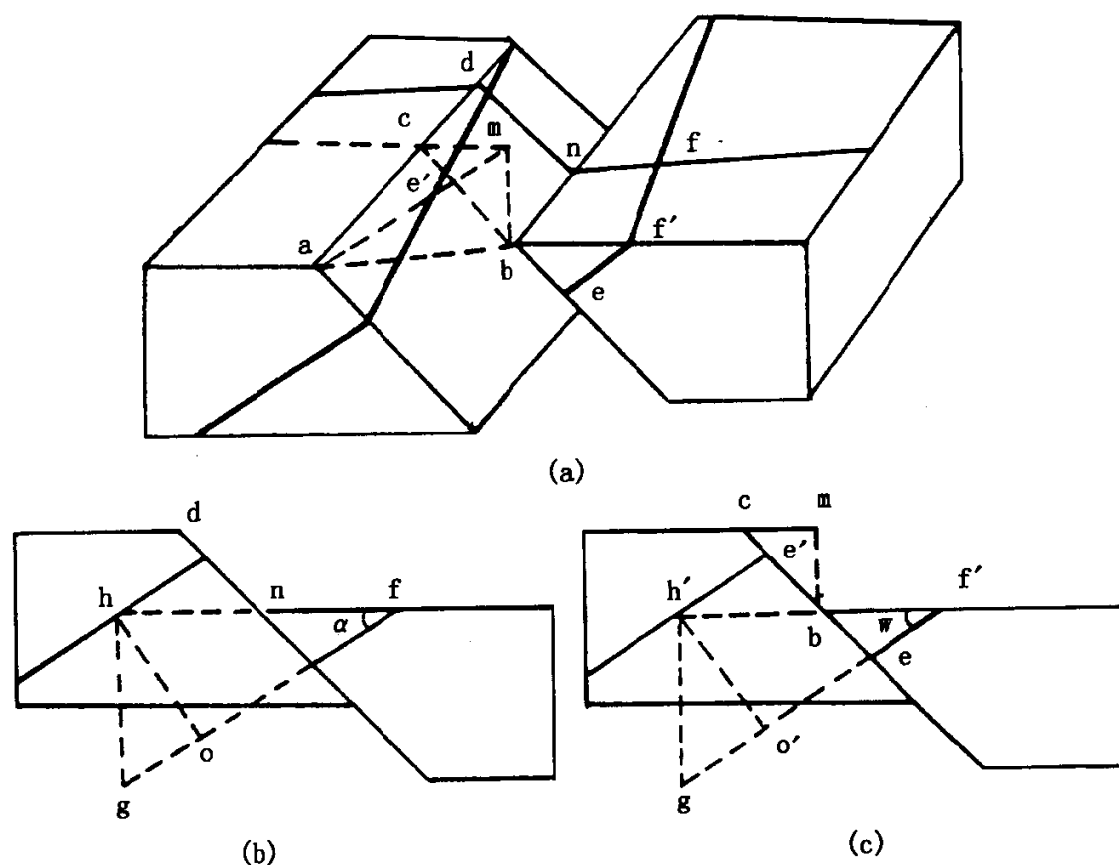


图 1-4 断层滑距和断距

(a) 立体图；(b) 垂直岩层走向的剖面；(c) 垂直断层走向的剖面

走向滑距：总滑距在断层面走向线上的分量（图 1-4a 中 ac ）。走向滑距与总滑距之间的锐夹角（ cab ）为总滑距或擦痕的侧伏角，反映上盘上推或下滑的角度。

倾斜滑距：总滑距在断层面倾斜线上的分量（图 1-4a 中 cb ）。

水平滑距：总滑距在水平面上的投影长度（图 1-4a 中 am ）。

2. 断距

断距是指被错断岩层在两盘上的对应层之间的相对距离。同一条断层在不同方位的剖面

上,其断距值不同。真断距是在垂直于被错断岩层走向的剖面上测得的断距包括地层断距、铅直地层断距和水平地层断距。

地层断距:断层两侧相当层面之间垂直距离(图1-4b中 h_o)。

铅直地层断距:断层两侧相当层之间的铅直距离(图1-4b中 h_g)。

水平地层断距:指断层两盘上的同一岩层层面在水平方向上的最短距离。即断层两盘上对应层之间的水平距离(图1-4b中 h_f),也称为水平错开。

在垂直于断层走向的剖面上,也可测量与垂直于岩层走向剖面上相当的各种断距,如图1-4c剖面中的 $h'o'$, $h'g'$, $h'f'$ 分别为视地层断距、视铅直地层断距和视水平地层断距。当岩层走向与断层走向不一致(不是走向断层)时,除铅直地层断距外,其他视地层断距均小于真地层断距。

在以上滑距和断距的各种类型中,总滑距、走向滑距、倾斜滑距在断层面上构成直角三角形关系(图1-5)。其中,若已知总滑距的侧伏角和某一滑距,便可求得另外两种滑距的大小。

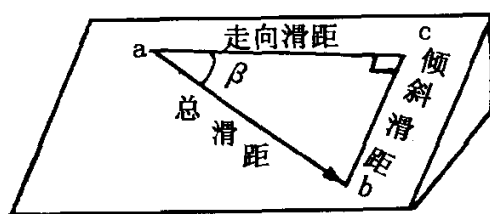


图1-5 侧伏角与滑距之间的三角关系图

在垂直于地层走向的剖面上,三种地层断距又构成直角三角形关系(图1-4b中 $\triangle hof$)。因此,若已知岩层倾角(α)和任一断距,即可求出其他两种断距。

尽管位移的术语较多,但实际工作中常用的名称不多,那就要看哪种位移易测量。在一般情况下,断距用得较多,因为无论是在垂直地层的剖面、垂直断层的剖面还是在其他剖面上均可量测断距,况且地层之间的错动,无论在野外露头上还是在钻井资料或地质图上都较容易观测分析。

第二节 断层分类及其组合类型

有关断层的分类与描述往往涉及到地质背景、运动方式、力学机制和各种几何关系等因素,因而断层分类方法也不一致,相对而言,断层的几何学分类和运动学分类方法更为科学和实用。

一、断层分类

1. 断层的几何学分类

(1) 根据断层走向与区域构造线的几何关系分类

纵断层:断层走向与褶皱轴线(或区域构造线)基本平行的断层。

横断层:断层走向与褶皱轴线(或区域构造线)基本垂直的断层。

斜断层:断层走向与褶皱轴线(或区域构造线)斜交的断层。

(2) 根据断层面产状与岩层产状的几何关系分类

走向断层:断层走向与地层走向基本平行一致的断层。

倾向断层:断层走向与地层倾向基本平行一致的断层。

斜向断层:断层走向与地层走向既不平行也不垂直的断层。

顺层断层:断层面与岩层面大致平行,即二者产状基本一致的断层。

2. 断层的运动学分类

(1) 正断层

正断层的上盘为下降盘、下盘为上升盘，也即正断层是上盘沿断层面相对向下错动的断层。正断层断层面产状一般较陡，大多在 45° 以上，但向地下深处常变缓。

(2) 逆断层

逆断层的上盘为上升盘，下盘为下降盘，即逆断层是上盘相对上升的断层。逆断层一般规模较大，断层面常呈舒缓波状。

逆断层又根据断层面倾角的大小细分为如下几种类型：

① 冲断层：过去国内一般指倾角大于 45° 的高角度逆断层。现在不少人用作低角度的逆断层。在英国指低角度的逆断层，但在美国却指高角度的逆断层。

② 逆掩断层：一般指倾角小于 45° 的低角度逆断层。

③ 辗掩断层：现亦称为逆冲断层，是指位移距离很大的低角度逆断层。事实上，断层面的倾角随深度均有较大变化，地表浅层的高角度断层在地下一定深处变为低角度断层。

(3) 平移断层

平移断层是指断层两盘沿断层面的走向相对错动的断层。规模巨大的平移断层通常称为走向滑动断层，简称走滑断层。平移断层一般断层面较陡近直立。大型平移断层常表现为强烈破碎带、密集剪裂带等。在描述平移断层时，通常根据两盘之平移错动性质可分为左行（左旋）和右行（右旋）平移断层（图 1-6）。



图 1-6 错开近直立砂、页岩层的右行平移断层（广东）（据蓝淇锋，1977）

以上 3 种断层的一个共同特点是两盘为直线状相对错动。然而，由于自然界各种构造运动之复杂性，有些断层并非直线位移而是具有旋转的特点，这就是下面要介绍的第四种类型。

(4) 枢纽断层

枢纽断层是指断层两盘以某一点为轴心作相对旋转运动的断层。枢纽断层断盘的旋转有两种：一种是旋转轴位于断层的一端，表现为横穿断层走向的各个剖面上的位移量不等；一种是旋转轴不位于断层的端点，表现为旋转轴两侧的相对位移的方向不同（图 1-7）。

枢纽断层具有如下两个特点：①同一断层不同地段的位移不同。一方面是断距沿断层面的走向不断变化；另一方面对轴心不在断层端点的枢纽断层而言，断层的性质也发生变化，如一端可显示为正断层，另一端可表现为逆断层。②该断层两盘上原来产状一致的同一岩层或岩脉经旋转而不平行，即两盘地层产状不同。

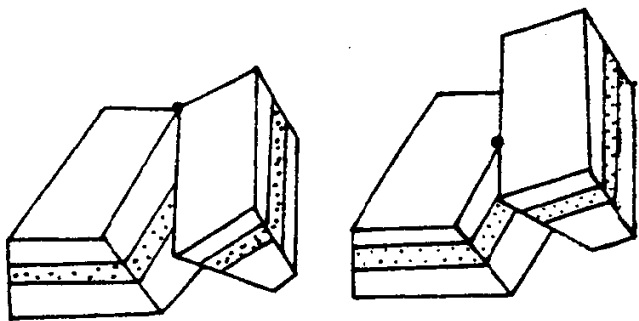


图 1-7 两种旋转的枢纽断层

这种组合名称中，后者为主要运动分量，即主要错动性质（图 1-8）。

通常，人们根据两盘滑动线的侧伏角 β 值的大小来确定主要运动分量与次要运动分量。如图 1-9 中，若 $\beta > 80^\circ$ 时为正（逆）断层； $\beta = 45^\circ \sim 80^\circ$ 时为平移 - 正（逆）断层；若 $\beta = 10^\circ \sim 45^\circ$ 时为正（逆）- 平移断层；若 $\beta < 10^\circ$ 时为平移断层。

此外，还可以依据上述几何关系分类与断层性质分类名称作复合命名，如纵向逆断层、横向正断层等。

二、断层组合类型

当一次构造应力场作用于某一地区时，不仅仅形成一条孤立的断层，而且形成很多构造变动的有规律组合，当然也会产生多条断层。我们把凡是在同一时期、同一构造应力作用下形成的一系列断层，无论其产状是否相同，称为一个断层系。这里介绍的断层组合类型实质上就是断层系的类型。

1. 在剖面上常见的几种断层组合形式

(1) 阶梯状（式）断层

由平行或大致平行的正断层沿同一方向依次向下滑动所形成的断层系称为阶梯状断层（图 1-10）。我国的太行山、内蒙古的乌拉山等很多地区都可找到阶梯状断层的实例，国内外许多断陷型盆地也多发育阶梯状断层。

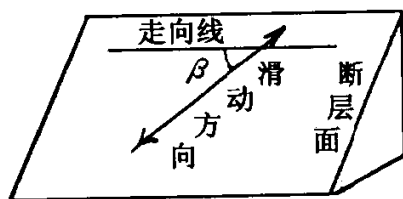


图 1-9 断层面上滑动线的侧伏角示意图

以上特点在较大规模的枢纽断层中尤为突出。因此在野外量测断层的各种位移时，尤其对大规模的断层位移，需要进行分段测量。

在野外实际观测中，常见的断层往往不是沿断层面的倾斜线或走向线相对滑动，而是斜向错动。因此，断层常兼有正（逆）和平移的两重性质。此类断层一般采用两种名称简单相加而成的组合命名法，如平移 - 正断层、右行 - 逆断层、正（逆） - 左行平移断层等等。在

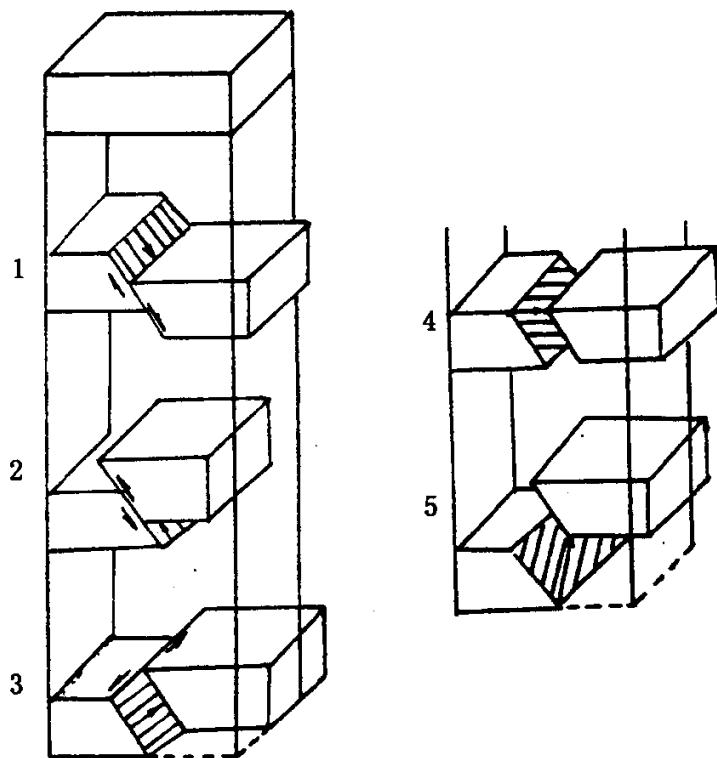


图 1-8 按断层两盘相对运动划分的断层和组合命名（据 M. Matuauer, 1980）

1—正断层；2—逆断层；3—平移断层；

4—正 - 平移断层；5—逆 - 平移断层

阶梯状断层在区域性抬斜过程中，常发生一定旋转而形成阶梯状抬斜断块（图 1-11）。这种阶梯状抬斜断块在地形上表现为单面山和山谷相间排列的景观。一些在地质历史时期中形成的阶梯式抬斜断块在地形上无明显反映，但是可以反映在断陷沉积上，为一系列平行的箕状构造（图 1-12）。这类箕状构造在我国中、新生代盆地中十分发育。

由于地壳的大规模断块上升运动而形成断块山时，其边缘

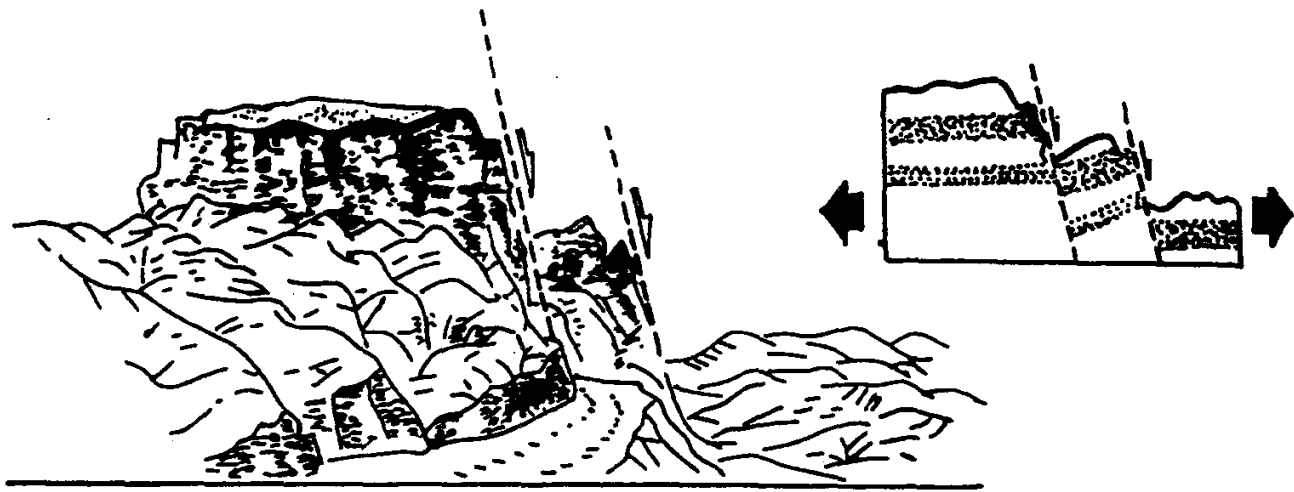


图 1-10 阶梯状正断层 (广东仁化) (据蓝淇锋等, 1974)

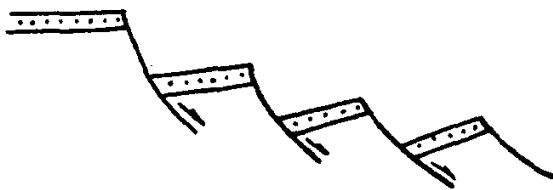


图 1-11 阶梯状抬斜断块

通常出现阶梯状断层, 或者出现在河流或某一盆地下降时的边缘。

(2) 地堑、地垒

地堑是指两条或几条大致平行的正断层及其间的共同下降盘。地垒是指两条或几条走向大体平行的断层及其间的共同上升盘 (图 1-13)。

形成地堑和地垒的断层并不都是正断层, 也

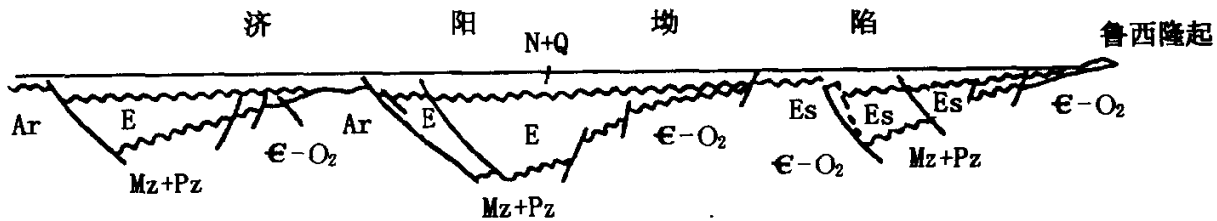


图 1-12 济阳断坳中的箕状构造 (渤海湾盆地)

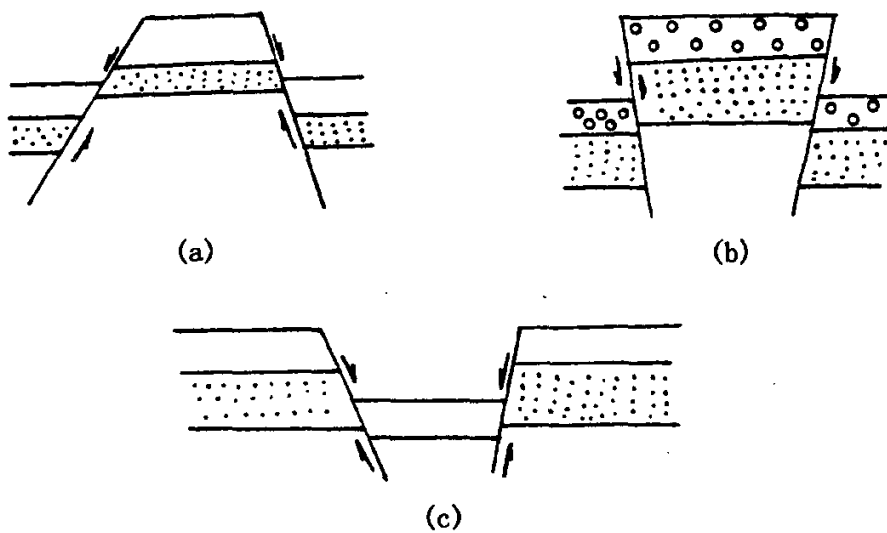


图 1-13 地垒 (左) 和地堑 (右)

可以是逆断层，但以正断层为较普遍。组成地堑、地垒两侧的正断层可以单条产出，也可由数条产状相近的正断层组成，形成两个依次向里或向两侧断落的阶梯状断层带。从地形反映来看，地堑一般成为河谷、湖泊洼地，而地垒成为台地、高原。

从区域地质构造看，地堑比地垒发育更广泛，具有更重要的地质意义。地堑可控制后来沉积盆地的发育，特别是在大型或巨型地堑中往往形成深水湖区，有巨厚的暗色泥岩，有机质丰富。另外，沉积速度较快，利于烃类的保存和转化，故常成为良好的储油区。

世界著名的地堑有东非地堑、莱茵地堑和贝加尔湖地堑等。这种巨型地堑也称为断陷谷或裂谷。大规模的地堑延伸长达数百公里甚至数千公里，具有长期发育的历史。如东非地堑，从东非莫桑比克的赞比西河口沿湖区向北直达亚丁湾（小亚细亚），全长近6000km，现在地形上表现为深而宽的谷地，有一系列湖泊和内海。

(3) 叠瓦状断层

这是逆断层中最常见的组合形式。若干条产状大体相同、平行排列的逆断层其上盘在剖面上呈叠瓦状向同一方向依次上推而组合的构造，称为叠瓦状断层（图1-14）。

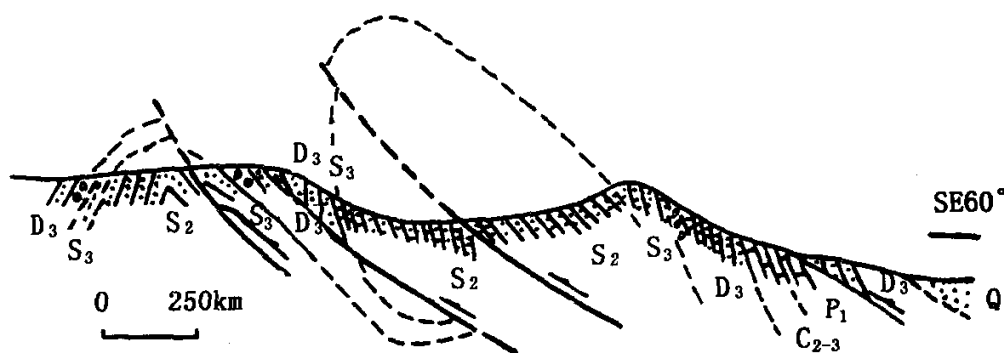


图1-14 茅山地区地质剖面图（江苏）（据原长春地质学院，1979）

叠瓦状构造常表现为前（上）陡后（下）缓，即成凹向上方的弧形。在剖面上呈屋顶瓦盖或鳞片状依次重叠，故得此名。这种构造主要和强烈挤压的构造运动有关，如我国青藏高原喜马拉雅山的西段强烈挤压形成相当规模的叠瓦构造、塔木里盆地和准噶尔盆地的边缘挤压逆冲带中发育的叠瓦构造。

2. 在平面上常见的几种断层组合形式

(1) 平行断层

断层面具有相同的走向，断层线在平面上相互平行的断层系称为平行断层。

剖面上的阶梯状断层、叠瓦状断层在平面上均表现为平行断层。如果若干条近平行的正断层呈斜向错列展布时，便构成雁列式断层。在我国南方，雁列式断层常控制了中、小型红色盆地的发育与展布。

(2) 环状断层和放射状断层

若干弧形或半环状断层围绕一个中心呈圆环状排列的断层系叫同心环状断层（Ring faults）。若干条断层自一个中心呈放射状排列时的断层系称放射状断层（Radial faults）。

它们形成的力学条件与环状节理和放射状节理相似，常见于穹窿构造、火山口周围、岩株侵入体地区及盐丘、短轴背斜的顶部等处。组成环状和放射状的断层主要是正断层（图1-15）。

(3) 旋扭断层

也称帚状断层，是由较大断层的剪切滑动所诱导的扭动力偶作用下形成的若干较小规模的弧形断层组合（图 1-16）。

这些弧形断层既可能为压扭性断层，也可能为张扭性断层。它们的几何特征为一端收敛一端撒开。由于旋扭断层的剪切滑动方向与主断层错动方向一致，所以在二者中知道其一，便可推知其二。实际上，旋扭断层在平面上和剖面上均可出现。

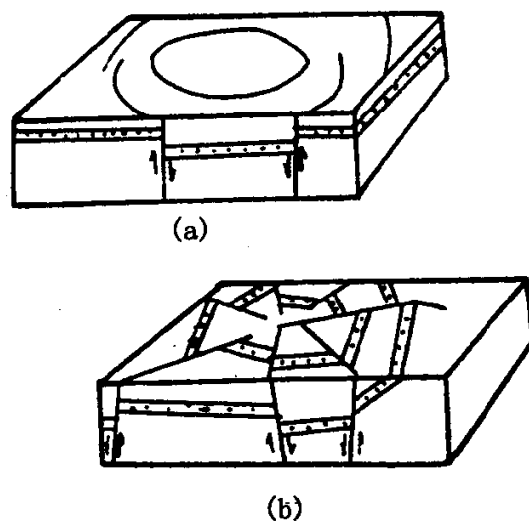


图 1-15 环状断层和放射状断层

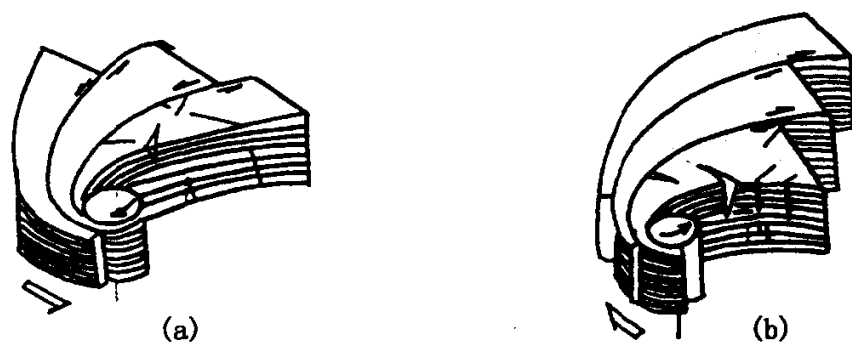


图 1-16 张扭性旋扭构造 (a) 和压扭性旋扭构造 (b) 立体示意图 (据北京大学, 1978)

第三节 断层形成过程及机制

断层的形成机制主要是指断层形成和发展的力学过程。有人认为沿断层面的剪切作用是形成断层的直接力学成因，或者说是断层活动的普遍力学模式。然而断层的形成机制是一个复杂的课题，它涉及到断层的发生和形成、断层所处的压力状态，以及各类断层的成因和形成条件等诸方面的问题。

一般认为，当某一地区的构造应力超过岩石的强度极限时，先出现裂隙并由裂隙进一步扩展或相互联合，形成一定规模的断层面。所谓断层作用是既要克服断层面上两盘间摩擦阻力，又要使集中在两端点的应力超过强度极限而继续扩展，从而发生位移的过程。通常在断层两盘发生错动时，断层面会延伸和加深。断层从发生、发展到终止不是简单的机械运动，而是一个复杂的物理过程。

一、断层的形成过程

断层的发生和形成是一个复杂的过程。20 世纪 60 年代后期，布雷斯 (Brace, 1966) 等许多人，曾先后进行了一系列岩石脆性破裂实验和对活动断层位移的观测，从而深入地揭示了断层形成中岩石碎裂和剪切位移的规律。

图 1-17 是布雷斯等人 (1996) 在 100MPa 围压和室温条件下对花岗岩进行实验的结果。当应力差从零增加到大约岩石破裂强度的一半时，岩石体积缩小，并表现为弹性变形。当应力差继续增大时，岩石中微裂隙形成，并伴有体积膨胀和非弹性变形。当应力差达到岩