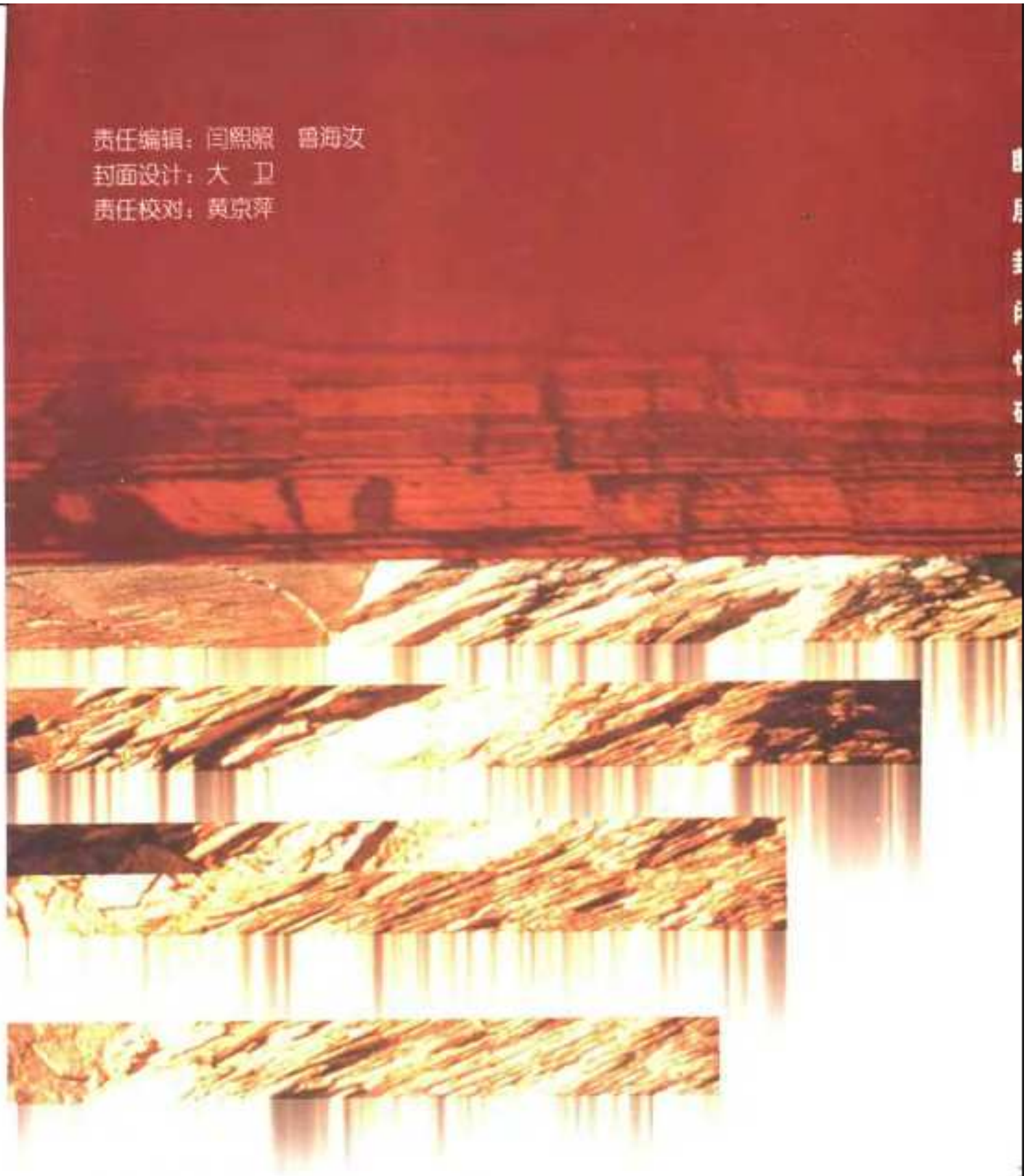
吕延防　付　广　等编著

断层封闭性研究

石油工业出版社

断层封闭性研究

责任编辑：闫熙照　雷海汝
封面设计：大　卫
责任校对：黄京萍



ISBN 7-5021-3806-4

9 787502 138066 >

ISBN 7-5021-3806-4/TE · 2775
定价：30.00 元

断层封闭性研究

吕延防　付　广　张云峰
王朋岩　付晓飞　杨　勉　编著

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

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没再有更新的认识，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（$CSP = \Sigma thickness^2/distance$，$SF = \Sigma thickness^n/distance^m$）。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 = （ΣShale bed thickness）×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上的研究结果汇编而成，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于断裂达 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和采油特点），其中又发育着更多的小断层。又如在一个面积仅 5400km^2 的济阳坳陷中，发现的断层多达 1580 条。

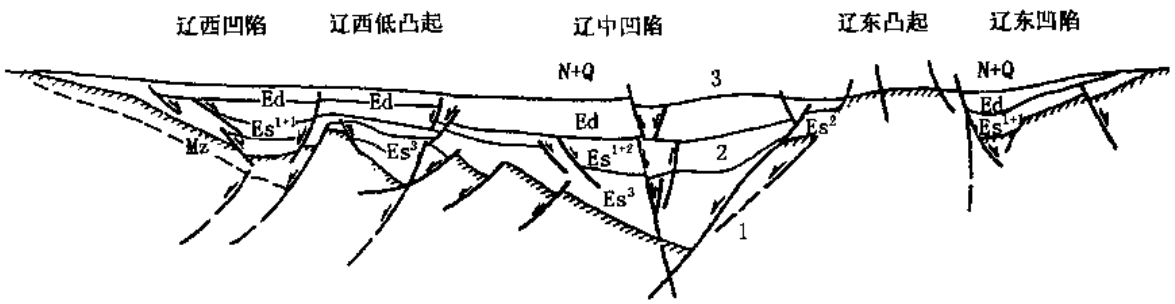


图 1－1　地震解释剖面图（渤海湾）

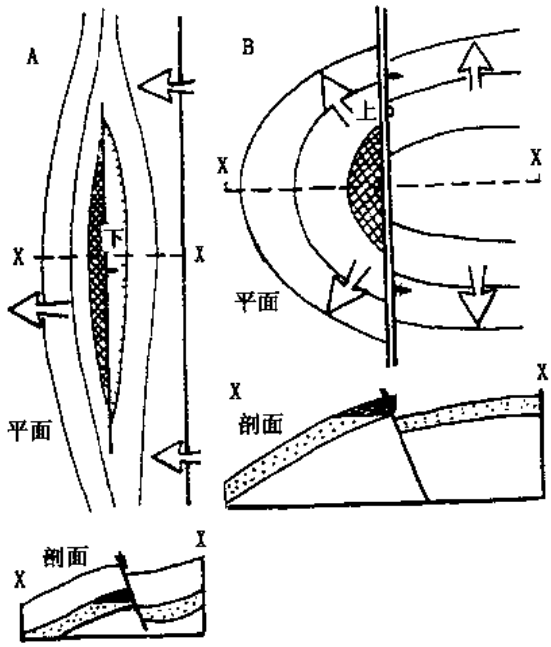


图 1－2　正断层与褶皱所形成的圈闭
A—由平缓褶皱与正断层交切而形成的圈闭；
B—由正断层与较陡褶皱交切而形成的圈闭
（大箭头表示区域倾斜方向）

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在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、甚至可达数千公里。

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。

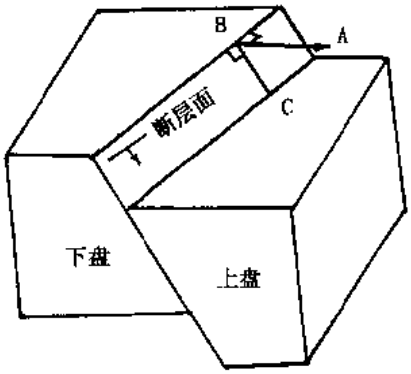


图 1－3　上下盘、断层面和断层线示意图

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。

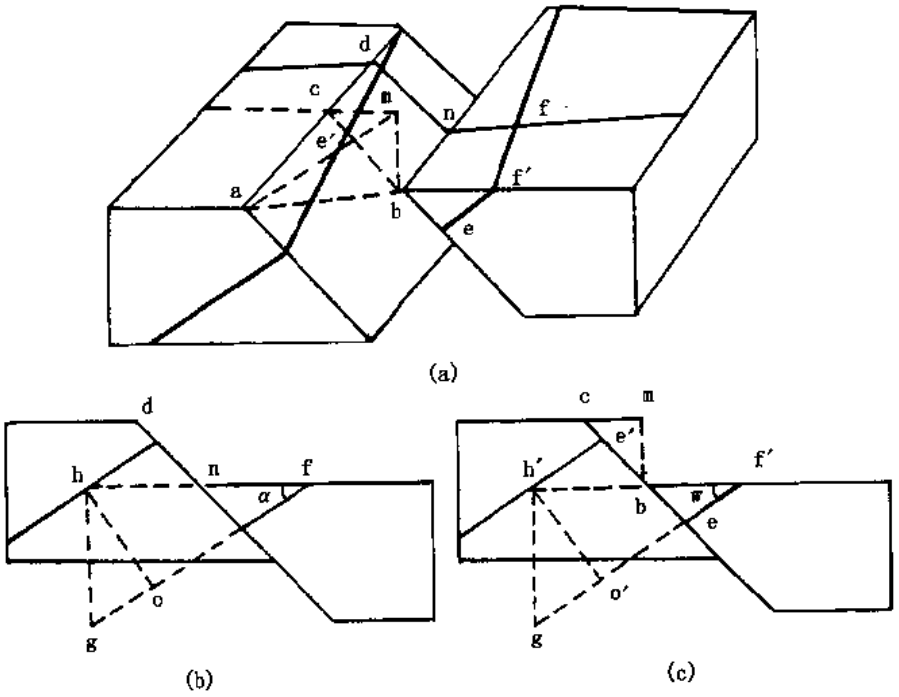


图 1－4　断层滑距和断距

(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 ho）。

铅直地层断距：断层两侧相当层之间的铅直距离（图 1－4b 中 hg）。

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 hf），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。

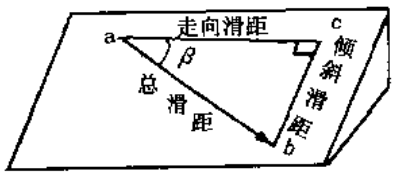


图 1－5　侧伏角与滑距之间的三角关系图

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△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。

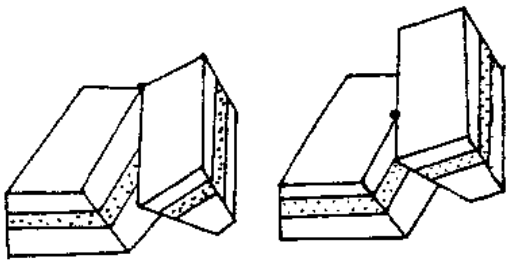


图 1－7　两种旋转的枢纽断层

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 $\beta>80°$ 时为正（逆）断层；$\beta=45°\sim80°$ 时为平移－正（逆）断层；若 $\beta=10°\sim45°$ 时为正（逆）－平移断层；若 $\beta<10°$ 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。

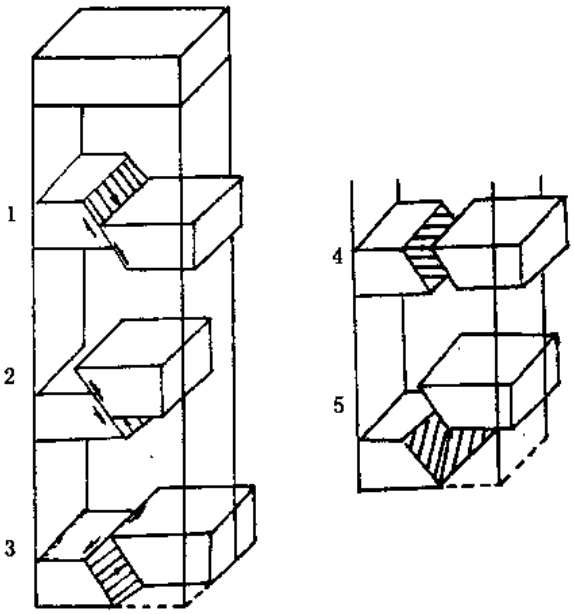


图 1－8　按断层两盘相对运动划分的断层和组合命名（据 M.Matuauer，1980）

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

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。

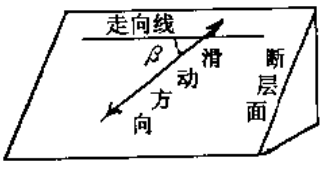


图 1－9　断层面上滑动线的侧伏角示意图

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

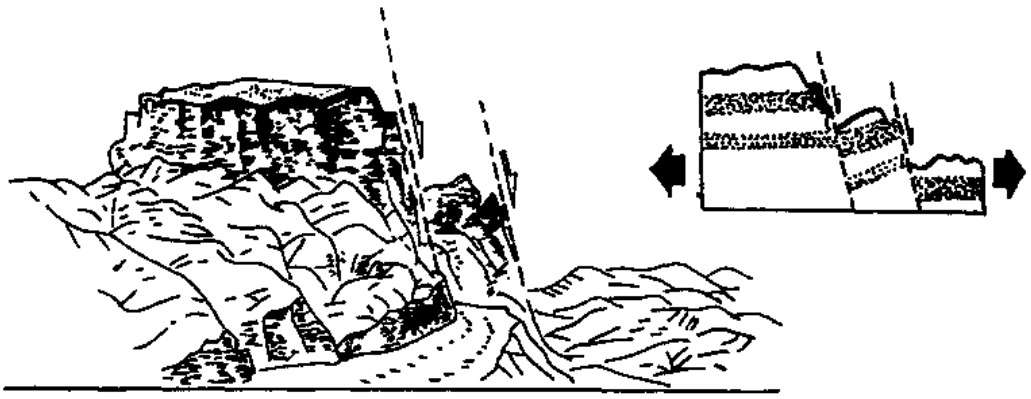


图 1－10　阶梯状正断层（广东仁化）（据蓝淇锋等，1974）

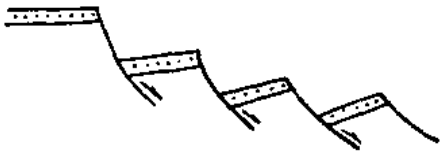


图 1－11　阶梯状掐斜断块

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

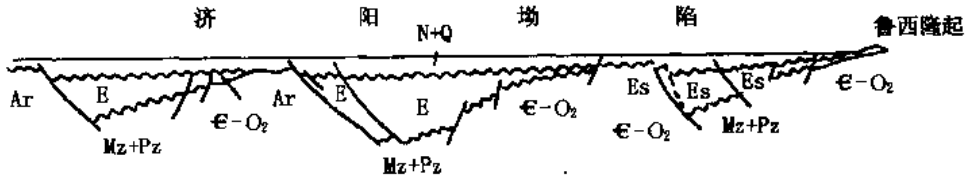


图 1－12　济阳断坳中的箕状构造（渤海湾盆地）

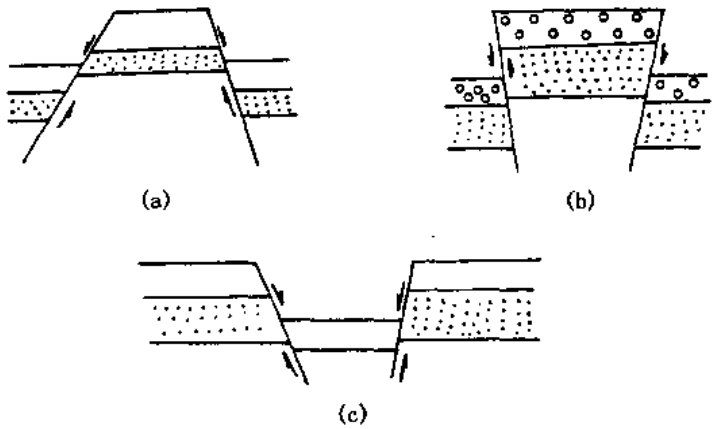


图 1－13　地垒（左）和地堑（右）

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）。

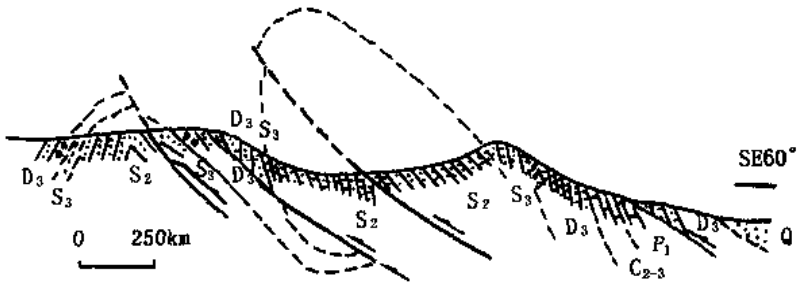


图1－14 茅山地区地质剖面图（江苏）（据原长春地质学院，1979）

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辐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，常见于穹隆构造、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。

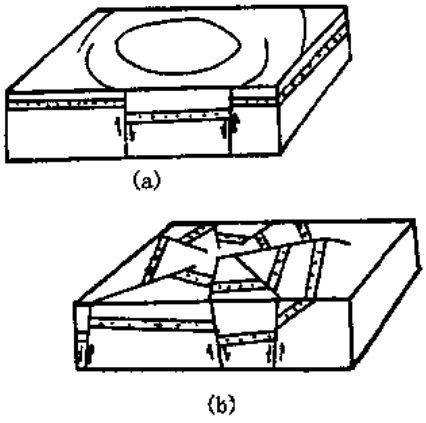


图 1－15　环状断层和放射状断层

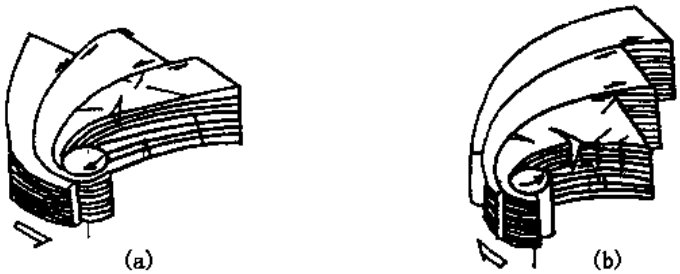


图 1－16　张扭性旋扭构造（a）和压扭性旋扭构造（b）立体示意图（据北京大学，1978）

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

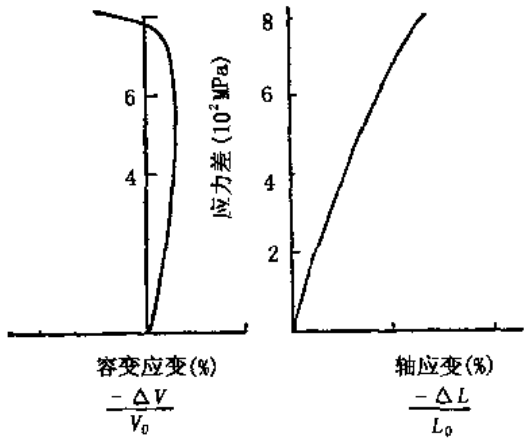


图 1－17　花岗岩的容积应变和轴向应变实验曲线

（花岗岩圆柱试件在 100MPa 围压和室温条件下，轴向受压缩短，岩石的扩容在体积应变曲线中以黑粗线表示。正 ΔV 为体积缩小，正 ΔL 为长度缩短）

石破裂强度时，岩石体积迅速扩大，微裂隙大量形成并集中形成断层面。微裂隙的迅速扩展导致宏观上岩石破裂。

当断层面一旦形成并且应力差超过磨擦阻力时，两盘就开始相对滑动，形成断层。实测证明，断层两盘的滑移是以十分不均匀的速率进行运动的，并且不同的断层或同一断层的不同部位滑移的瞬时速度都不相同，有的表现为缓慢的非地震式滑动，其瞬时滑动速度每年只有 1～2cm；有的则以非常大的速度滑动，表现为快速的地震式滑动，其瞬时滑动速度与岩石中弹性波的波速相当。因此，同一条大断层，地震可以在断层的某一部分发生，而其他部分可以没有滑动或仅显示缓慢的蠕滑。无论以哪种方式滑动，断层的活动均表现脉冲式运动的特点。

图 1－18 是斯柯尔兹（1968）在围压 10MPa 和室温条件下对花岗岩进行的粘滑试验。在破裂面的滑动过程中，应力的线状上升与突发的应力降（应力的快速衰减）相间出现。应力降与微裂隙的活动有关，当时滑动速度非常高，相当于发震时的断层滑动；在应力降之间，滑动速度非常慢，从而表现了断层剪切滑动的粘滑表象。而在另一些实验条件下，有的破裂面滑动没有应力降发生，岩石表现为稳定滑动。

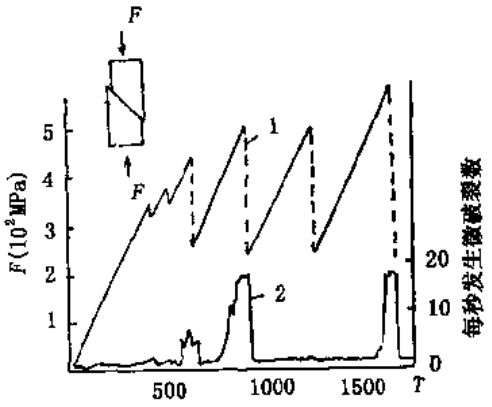


图 1－18　花岗岩摩擦滑动实验曲线

（花岗岩在围压 100MPa 和室温条件下，实验显示的力与时间及微裂隙形成频率的关系）

1—力与时间之关系曲线；2—微裂隙形成与时间关系之频率曲线；T—时间

最后，随着应力的释放或应力差（$\sigma_1 - \sigma_3$）趋向于零，则一次断层作用即告终止。

二、断层形成机制

在地质历史时期断层的形成机制是十分复杂的，有关成因的很多力学和地质因素有待于进一步定量了解。安德森（E.M.Anderson，1951）从最简单的情况出发，在假定被断岩石的力学性质为均匀、各向同性的前提下，采用库伦－纳维叶破坏准则，分析了形成断层的应力状态。他认为地面与空气间无剪切应力作用，因此形成断层的三应力状态中的一个主应力轴垂直于水平面。据此提出了 3 种三轴应力状态与 3 种主要断层类型间的对应关系，即形成正断层、逆断层和平移断层的三种应力状态（图 1－19）。

1．*正断层形成机制*

（1）断层的一般特征

① 正断层是上盘沿断层面相对向下滑动的断层。形成正断层的应力状态是：最大主应

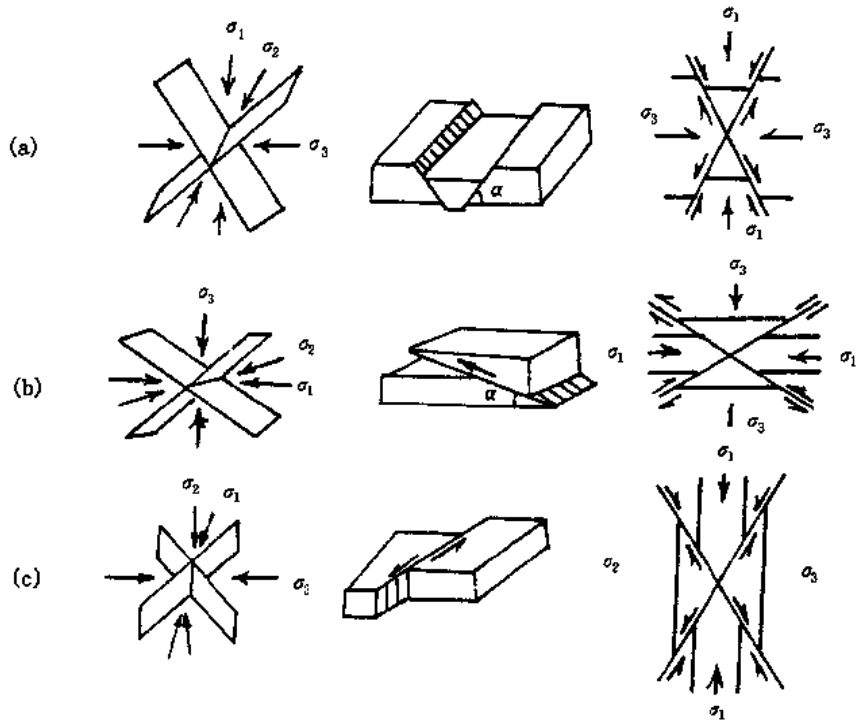


图 1－19　形成断层的三种应力状态（据 E.M.Anderson，1951）

（a）正断层；（b）逆断层；（c）平移断层

力轴（σ_1）直立，中间主应力轴（σ_2）水平，并与断层走向平行；最小主应力轴（σ_3）水平，并与断层走向垂直，可能形成的断层为走向平行于 σ_2 轴线、上盘顺断层倾斜线向下滑动的正断层（图 1－19a）。

② 正断层产状一般较陡，倾角多在 45°以上，而以 60°～70°最为常见。

③ 断层带内岩石破碎程度相对不太强烈，断层角砾岩多带棱角，断层附近地层很少有强烈挤压、揉皱现象。

④ 由于断层上盘相对向下滑动的断层作用，在垂直断层走向的水平方向上两盘岩石所占空间有拉长现象（图 1－20）。因此，正断层是一种使水平基准面扩大的伸展断层，是一法范围内地壳水平拉伸的结果。

（2）正断层形成机制

正断层广泛发育于各种不同的地质构造环境，一般主要产于构造变动轻微地区或褶皱带的盖层。在构造变动强烈的褶皱带，正断层一般不占主导地位，常成为伴生构造出现。

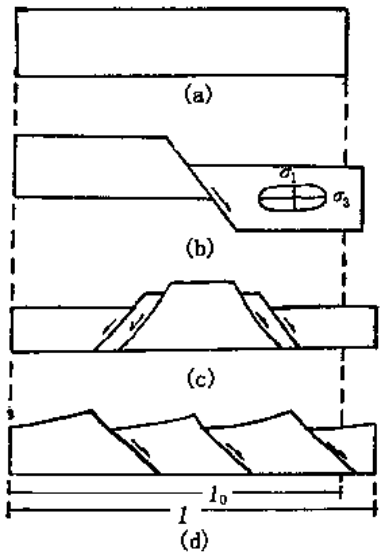


图 1－20　正断层的形成与地壳水平伸张的关系

（图示一岩块发生正断层后，在垂直断层走向的剖面上看到的伸张现象）

l_0—断层位移前的水平距离；l—断层位移后的水平距离（a）未发生正断层之岩块；（b）受张应力作用发生正断层之岩块；（c）在张应力作用下发生地垒之岩块；（d）在张应力作用下形成阶梯式正断层之岩块

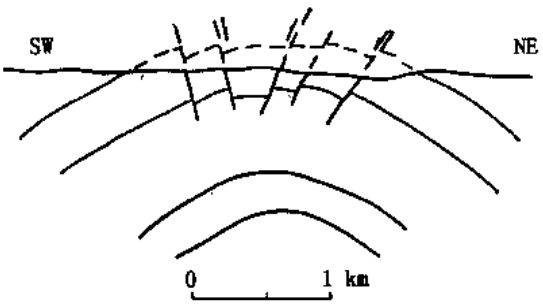


图 1－21　背斜顶部的正断层和小型地堑
（图示从一褶皱之横剖面上看到的正断层发育情况）

正断层主要是在水平拉伸应力条件下形成的，拉伸应力主要有两种：

① 局部性拉伸作用。在岩层形成背斜时，由于岩层的上拱，在外弯层处诱导出与背斜枢纽垂直的张应力和近于垂直方向的压应力。在这两种力的作用下，可以在背斜顶部附近产生两组相向倾斜的平行于背斜枢纽方向的纵向正断层，并常常组合成地堑构造（图 1－21）。

当背斜发生倾伏时，沿枢纽方向也可引起局部拉伸，形成垂直枢纽方向的横向正断层（图 1－22），并常常组合成阶梯状断层。

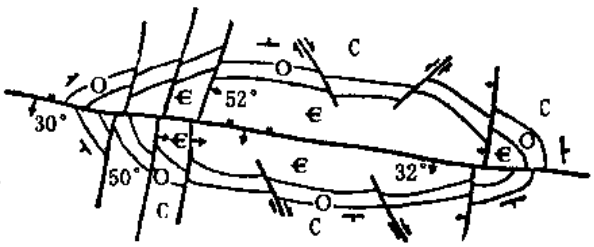


图 1－22　背斜倾伏形成的横向正断层地质图（粗线为断层线）

此外，由于底辟作用、岩浆侵入作用，在上覆地层中也可造成垂向挤压和侧向的拉伸，产生正断层的应力状态，在平面上形成环状、放射状正断层。

② 区域性拉伸作用。侧向水平拉伸的沉降盆地，其边缘具有形成正断层的应力条件，可以形成正断层（图 1－23），它的发育与盆地的沉积同时进行时，称为生长断层或同沉积断层。这种正断层主要发育在大中型断陷盆地的边部，规模以大中型为主，主要发生于中生代和新生代。生长断层的特点一般为走向断层，断层面产状往往是上陡下缓。由于侧向拉伸，断层下降盘边下降边接受沉积，所以下降盘地层明显增厚。地层时代愈老，断距愈大，并在断层上盘常发育逆牵引构造。

由于区域性的差异升降运动，可在升与降过渡的挠曲地段产生正断层，其产状向下降一侧陡倾。这种断层的产生可能同地壳向上隆起形成的垂向挤压和相应的侧向拉伸所形成的应力状态有关。

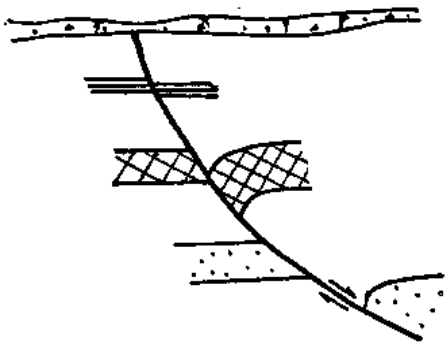


图 1－23　盆地边缘生长断层示意图
（图示盆地边缘为一断层，在垂直断层走向的剖面上看到的逆牵引构造现象）

2．*逆断层的形成机制*

（1）逆断层的一般特征

① 逆断层是断层上盘沿断层面相对向上滑动的断层。形成逆断层的应力状态是：最大主应力轴（σ_1）和中间主应力轴（σ_2）水平，最小主应力轴（σ_3）直立，中间主应力轴（σ_2）平行断层走向（图 1－19b）。

② 逆断层可根据断层倾角分为高角度逆断层和低角度逆断层。高角度逆断层倾角大于 45°，常在正断层发育地区产出。低角度逆断层倾角小于 45°，在逆断层发育区一般多数是低角度逆断层。

③ 断层带内的岩石多显示强烈的挤压破碎，形成断层角砾岩、碎裂岩和片理化岩石。

断层角砾一般棱角不明显，常被圆化或压扁。断层附近地层常有强烈挤压揉皱现象。在垂直断层走向的剖面上，断层的伴生与派生构造如羽状张节理、曳引现象。强褶现象等出露最清楚。

④ 由于断层上盘相对向上滑动的断层作用，在垂直断层走向的水平方向上两盘岩石所占空间有缩短现象（图 1－24）。因此，逆断层是产生水平基准面侧向缩短的收缩断层，是一定范围内地壳水平挤压作用的结果。

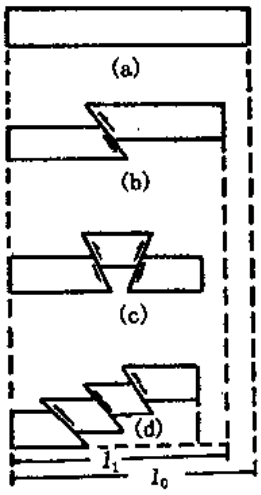


图 1－24　逆断层形成与地壳缩短的关系
（图示岩块受力作用产生逆断层，在垂直断层走向的剖面上所见的空间缩短现象）
l_0—断层位移前的水平距离；l_1—断层位移后的水平距离（a）未变动之岩块；（b）发生逆断层之岩块；（c）发生地垒之岩块；（d）发生阶梯式逆断层之岩块

（2）逆断层形成机制

逆断层、逆掩断层和辗掩构造分布较为广泛，在形成机制上，高角度逆断层与低角度逆断层形成的构造条件有明显的不同。

① 形成高角度逆断层的构造条件：

A. 侧向挤压作用。由侧向挤压作用所形成的轴面陡倾的强烈褶皱中，常发育有大致平行褶皱轴面的高角度逆断层（图 1－25），其断层面的倾向和倾角与褶皱轴面基本一致，与主压应力基本垂直。这种断层的形成是与岩层的塑性剪切流动有关。由于岩层强烈褶皱时塑性变形加剧，在强烈的侧向挤压作用下，岩层发生差异性塑性剪切流动而产生逆断层。

B. 差异升降运动。在褶皱带与沉降盆地之间，发育一种向上升区一侧陡倾的逆断层。克罗斯（H.Closs）曾用泥饼模拟试验来解释其成因。图 1－26 表明，差异升降运动造成挠曲时，由于上下剪切作用可导生出两组次级剪裂面。这种高角度的逆断层是沿着垂直的剪切作用所产生的倾向上升区的一组剪裂面发育而成的，而垂直的剪切作用是由差异升降运动所引起的。

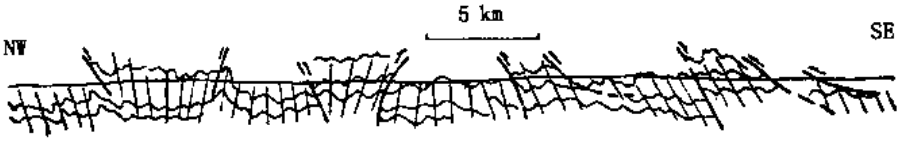


图 1－25　德国哈尔茨古生代地层的强烈褶皱与高角度逆断层（剖面示意图）

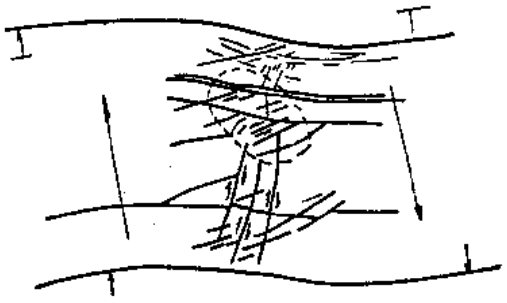


图 1－26　垂直的剪切作用造成高角度逆断层素描图（据李启昆，1991）
（图示材料性质不同的数层物质在试验仪中受剖面上的剪切力作用后，在断面上所见裂隙之素描图）

② 形成低角度逆断层的构造条件：低角度的逆断层是在水平挤压作用下沿倾角小于 45°的剪切面进一步发展而形成的，可有以下 3 种不同的情况。

A. 由褶皱进一步发展而成的延伸逆断层。由水平挤压作用产生的褶皱在其进一步发展中，一翼发生倒转，在持续的变形过程中逐渐被拉薄，最后沿剪裂面被剪断形成延伸逆断层

(图 1－27)。

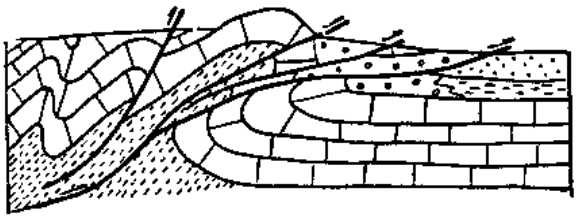


图 1－27　褶皱的倒转翼被剪断形成逆断层素描图
(据李启昆，1991)(比利牛斯山)

B. 与褶皱同时发育的破裂逆断层。脆性岩层在水平挤压作用下，可以形成开阔褶皱。在褶皱开始的同时也很快出现破裂，于是在平行挤压的剖面上，形成一系列 X 型剪裂面，进一步发展成为破裂逆断层（图 1－28)。而随着断层的发展，褶皱也进一步加强。与延伸逆断层比较破裂逆断层的主要区别是没有倒转翼、没有地层被拉薄的现象。

C. 早于褶皱形成的剪开逆断层。剪开逆

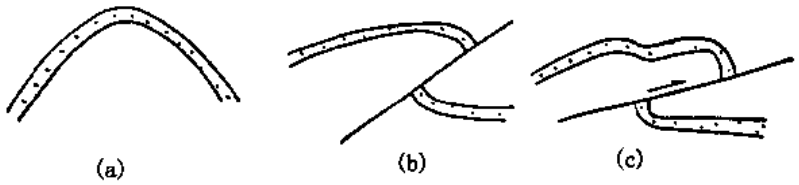


图 1－28　破裂逆断层形成过程示意图
(a) 未发生断层前之褶皱图；(b) 破裂逆断层正在形成之示意图；(c) 破裂逆断层已形成之示意图

断层仍是强烈水平挤压所形成。在它发生之前，地层并无明显的褶皱现象，因此剪开逆断层发育地区，除断层附近的牵引构造外，地层并无大规模的褶皱，地层倾角非常平缓，在剪开逆断层出现以后，地层连同断层面都可以再一次褶皱。如法国某煤盆地的逆断层就是属于此种成因（图 1－29)。

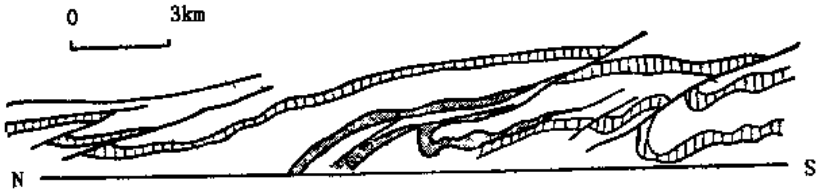


图 1－29　法国某煤盆地中的剪开逆断层素描示意图

3. 推覆构造的形成机制

推覆构造即辗掩构造，是 19 世纪后期由研究阿尔卑斯山脉地质构造的海穆（A.Heim，1878)、贝特朗（M.Bertrand，1884）等人提出的。推覆构造亦属低角度逆断层，但由于规模巨大，具有较为复杂的形成机制。

(1) 推覆构造的主要特征

① 巨大的上覆岩块（推覆体)，沿着底部一个十分平缓的滑动面向前滑动（图 1－30)，滑动距离可达数十公里，甚至更远。

② 推覆体内部的变形程度不一，在冲断推覆体中岩层没有或基本上没有发生褶皱，而在褶皱推覆体中岩层发生倒转，并有平卧褶皱发育。

③ 推覆构造常发育于造山带的前缘。在世界大的造山带中如阿尔卑斯、喜马拉雅、加

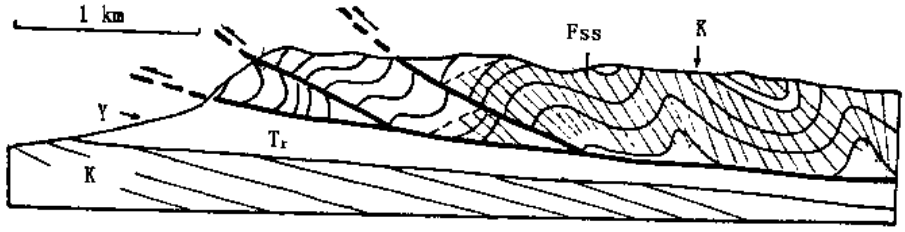


图 1－30　构造推覆体前峰剖面图

Y—原始岩系；T_r—中新统；K—白垩系；Fss—推覆体

拿大科迪耶拉及其他许多地方都已发现推覆构造。

（2）推覆构造形成机制

推覆构造是大型低角度逆掩断层与大型重力滑动构造的统称。对推覆构造的成因长期以来存在着两种观点，即侧向挤压说与重力滑动说。

① 侧向挤压成因。海穆、贝特朗等人认为，推覆构造是水平挤压形成的褶皱进一步发展的结果（图 1－31）。位于造山带的推覆体是由一系列高角度逆断层组成的逆冲带，它将推覆体向外推向造山带前缘的坳陷区。推覆体之所以能沿低角度的断层面推移相当远的距离，主要侧向挤压造成的。因为侧向挤压伴随均衡的上升，导致造山带的升起，故可提高推覆体的位置，有利于推覆体的重力滑动。

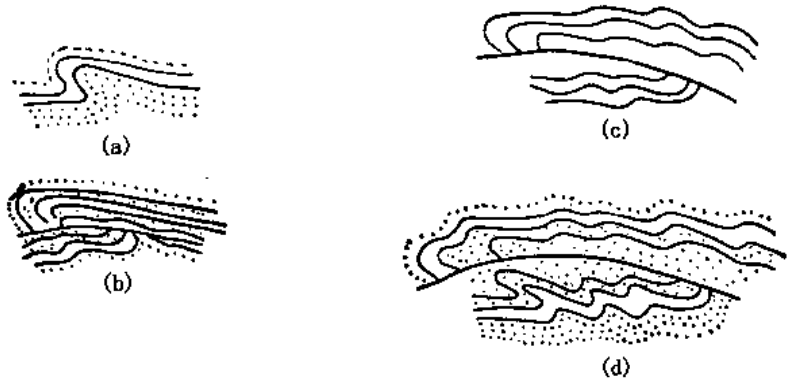


图 1－31　推覆体发展示图

（自（a）向（d）示意推覆发展的过程）

② 重力滑动成因。推覆构造的研究发现，一些推覆体与强烈的褶皱没有直接联系，有些现象与重力滑动构造的特点十分相似。于是有些学者如杜隆佩（R.Tpump）等人提出了推覆构造的重力滑动成因学说。

重力滑动作用的机制与地表滑坡相类似，是岩块因自重由高处向低处滑动，靠自重而下滑的岩块，其体积愈大，则所要求的斜坡角度愈小。因此，大规模的推覆构造底部的滑动面往往十分平缓。

图 1－32 是重力滑动作用形成的推覆构造。从图中可以看出，推覆体的大部分地段是沿着斜坡向下滑动的，其底部的滑动面并非逆掩断层面而是低角度正断层面。正是因为重力滑动，推覆体内部出现紊乱、翻卷及叠置等复杂现象。在推覆构造中，推覆体前峰出现若干倾

向与重力滑动方向相反的逆掩断层（图 1－33）；推覆体的后端常有拉开的正断层，其形成与推覆体重力下滑有关；在推覆体下滑到低凹地带，常形成上下叠置的平卧褶皱（图 1－33），但其中见不到由侧向强烈挤压造成的褶皱中必然伴随的一翼岩层的拉薄甚至尖灭消失的现象。



图 1－32 河南嵩山朝天凹重力滑动构造地质剖面图

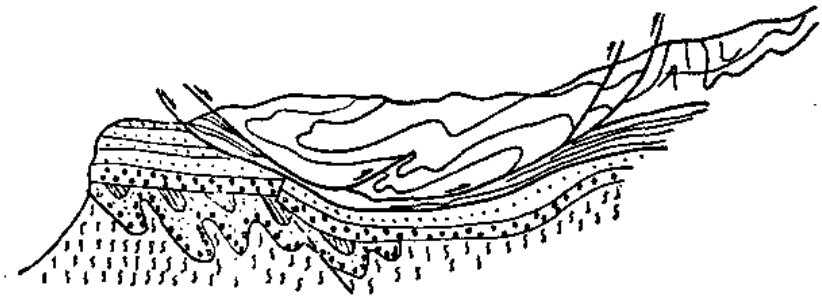


图 1－33 推覆体重力滑动造成的平卧褶皱示意素描图（河南嵩山）

当前普遍认为重力作用是引起多数造山带中侧向运动的重要因素。造山带一旦隆起，重力滑动和重力扩张就会在侧向逆冲作用中发挥重要作用。重力作用和侧压作用是推覆体形成的两种基本作用，这两种因素在不同情况下作用各不相同，或以其一者为主，或共同活动。

4．*平移断层的形成机制*

（1）平移断层的主要特征

① 平移断层是断层两盘沿断层走向相对滑动的断层。形成平移断层的应力状态是：最大主应力轴（σ_1）和最小主应力轴（σ_3）水平，中间主应力轴（σ_2）在直立，断层面和断层滑动方向垂直于 σ_2（图 1－19c）。

② 断层面产状常为直立或近于直立，倾角多大于 70°。断层面平直，而且延伸较远。由于断层陡峻，有时还有一定程度的倾斜滑动，所以一些大型平移断层常被误认为正断层。

③ 大型平移断层常表现为强烈破碎带、密集剪裂带、角砾岩化带和糜砾岩化带。与其他类型的断层比较，剪裂破碎现象更为强烈。

（2）平移断层形成机制

平移断层一般常与褶皱或逆掩断层相伴生，常与褶皱或逆掩断层斜交或直交。大型平移断层往往是一条重要的构造带。水平挤压作用是平移断层形成的构造背景，它主要有以下两种方式。

① 不均匀侧向挤压。不均匀的侧向挤压作用，使不同的岩块在垂直于纵向逆断层或褶皱枢纽的方向上，作不同程度的向前推移（图 1－34），从而在各岩块之间形成走向垂直于逆断层或褶皱枢纽的平移断层。这类断层的规模一般不大，平移断层运动的旋向也无一定的规律，可右行也可左行，视各部分侧向力的相对大小而定。

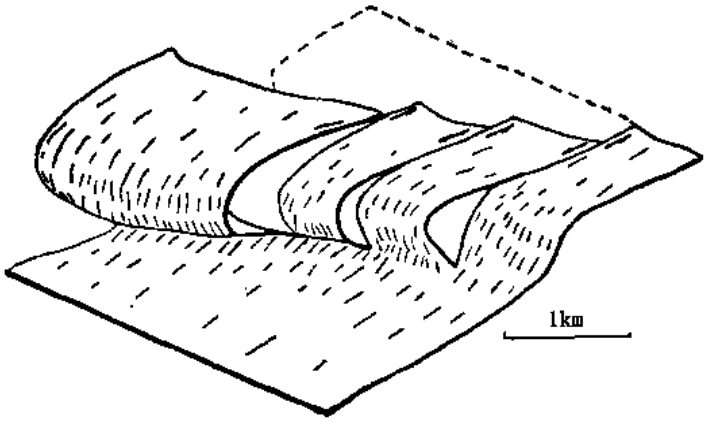


图 1－34　平移断层形成的一种方式（示意图）

② 侧向挤压作用。在水平侧向挤压作用下沿平面 X 型剪裂面发展而形成平移断层（图 1－35）。这类平移断层的规模有大有小，旋向具有一定规律，常有共轭的两组，一组左行，一组右行，符合两组共轭剪裂面的统一运动方向。这种平移断层较前一种更普遍。

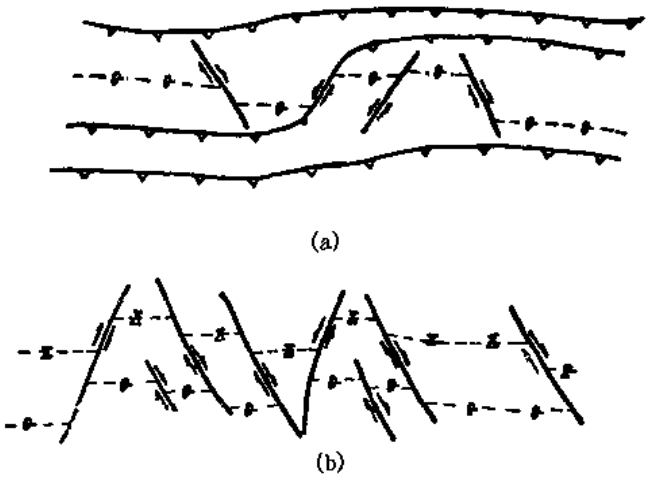


图 1－35　平移断层与逆断层带
(a) 褶皱带 (b) 相伴生（示意图）

区域性大型平移断层常称为走向滑动断层。世界上著名的走向滑动断层有美国西海岸的圣安德烈斯断层、新西兰阿尔卑斯断层、苏格兰大格陵断层等，这些巨大走向滑动断层，延伸均在百公里以上。如圣安德烈斯断层（图 1－36），走向 NNW，右行滑动，全长约 1000km，平移距离约 500km，自侏罗纪末就开始活动，新生代达到高潮，直至现在仍在活动。

5．韧性剪切

上面所讨论的几种模式是在均匀、各向同性的弹性岩石中主应力作用方向与断层面及断层性质的关系。实际断层的形成远不是如此简单，现代研究理论认为：对断层面产状来说，即使是同一地区的同一条断层也随深度的加大（岩石力学性质的变化）倾角由陡逐渐变缓；从断层的形成机制来说，随着深度的增大由脆性断裂逐渐变为韧性剪切（或韧性断裂）。

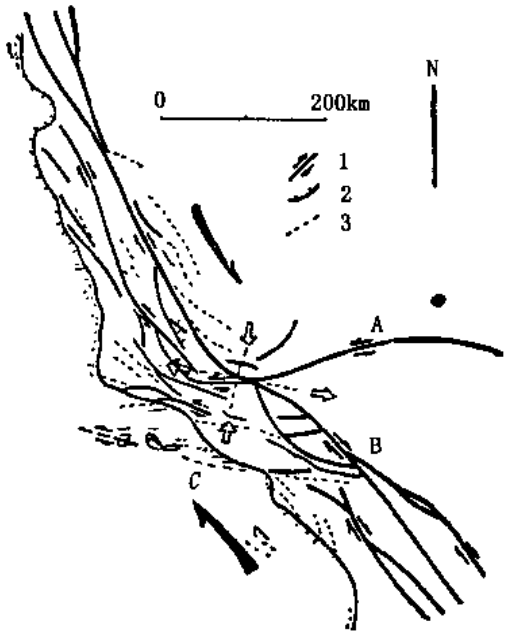


图 1－36　圣安德列斯断层及其相伴生的褶皱和断层（平面图）

1—平移断层；2—逆断层；3—褶皱；A—加尔劳克断层；B—圣安德烈斯断层；C—洛杉矶

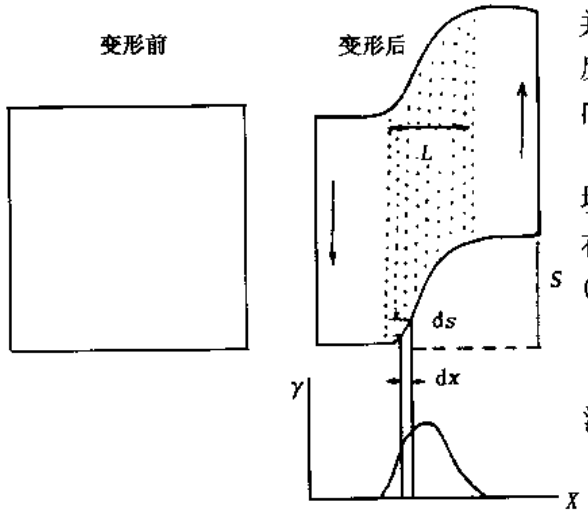


图 1－37　韧性剪切及其位移量计算示意图（据 J.G.Ramsay，1970）

在侵入岩体中。在我国冀东地区华北地块的古老基底太古界片麻岩中发现有相当规模的韧性断层（曹成润，1998）。

所谓韧性剪切是指岩石在塑性状态下，由剪切作用所形成的一系列微小错动造成一定规模（宏观上）位移的现象（图 1－37）。

韧性剪切是一种特殊的断层成因机制。脆性断裂的错动面非常醒目，其位移（错动）集中在断层面上发生，而韧性断裂却无宏观的错动面，是一条一系列连续位移的韧性剪切带，它是微小错动的总体效应。这种由韧性剪切所形成的断层，在野外能够观测到其两侧标志层的明显错开，但找不到一般断层的那种断层面或断层线，在露头上只有一定宽度的变形带（韧性剪切带）。

如图 1－37，在韧性剪切带（L）内，剪应变（γ）是变化的，其总位移量（S）等于各微量位移（dS）的总和。若以剪应变 γ 为纵坐标，以观测点到剪切带一边的距离 x 为横坐标，作 γ 与 x 的曲线（图 1－37 右下图），则该曲线与横坐标包围的面积就是该剪切带的总差异位移，可用积分的方法求得。

韧性剪切带中的新生面理与韧性剪切带的边界线呈 45°角（交角指示对盘运动方向），并且自边缘向中心一般呈 S 型（图 1－38）或反 S 型。带内岩石的位移和变形量一般由边缘向中心逐渐增大。

一条向下深切的大断裂，无论是在收缩环境下的逆冲断层，还是拉伸环境下的正断层，在盖层中均表现为脆性断层，但在进入基底（或更深层）时，一般渐变为韧性断层（图 1－39）。

韧性剪切主要发生在被置换、变质改造或混合岩化成为相对均一的变质岩系中，也发生

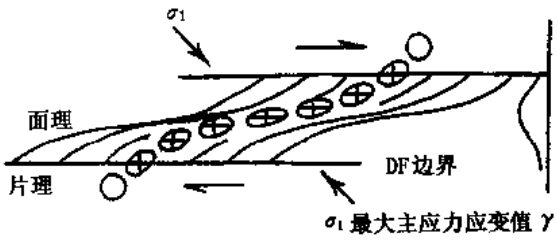


图 1－38　韧性剪切带内部面理展布及应变特征

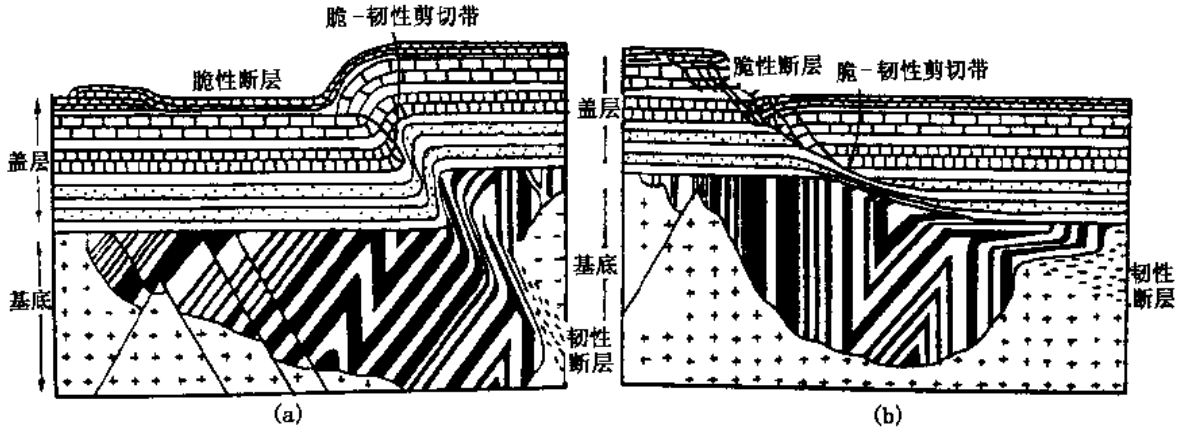


图 1－39　脆性断层与韧性断层的关系（据 J.G.Ramsay，1980）

（a）收缩环境；（b）拉伸环境

第四节　断层识别标志

分析和研究断层，首先应确定断层的存在，即要认识断层。由于断层的两盘沿断层面相对错动，在断层面（带）内及其附近产生一系列的构造现象，这些构造现象便是我们认识断层存在的重要标志。

断层在野外的表现情况差别很大，有的直接露出地表可供直接观测，有的由于后来的长期风化剥蚀不易直接观测到，需要用间接方法来鉴定。至于那些现今还在活动的断层在地形、地貌方面反映比较明显。

一、露头区断层的识别标志

断层既然是具有明显位移的断裂构造，那么岩层、岩体的错动一方面破坏了岩层、岩体或矿体、矿脉和岩脉的原有产状，或者是破坏它们的正常展布规律；另一方面在断层面及其附近便产生一些伴生或派生的构造现象，还可在一定条件下，在地貌上、水文地质以及其他方面造成一系列特征标志。这些直接和间接标志正是发现和确定断层的依据。

1．构造线的不连续

这是识别断层的最直接、最基本的标志。任一地区的岩层、岩体、岩墙或岩脉以及褶皱、断裂构造等一定范围内均呈一定方向延伸。若在这一地区发生断层，定会把这些构造线切割，无论在平面上还是在剖面上均造成各种地质界线或构造线的中断和错开现象。若断层规模较小时，这些现象在野外露头上可直接观测到，而且有助于分析断层的错动方向和大小；若规模较大时，在地质图上表现明显，故可通过分析地质图来研究断层。

图 1－40 是由断层造成的构造线不连续现象的图示。走向断层 F_1、倾向断层 F_2 和斜向断层 F_3 分别切割和错开了地层和早期断层。这种错断有可能只反映在平面上或剖面上，也可能在平面、剖面上同时反映出来。

构造线的不连续虽为重要的标志且野外易于鉴定或观测，但必须把这种现象与角度不整合、岩相相变和因岩浆侵入而造成的接触关系加以区别（图 1－41）。

2．地层的重复和缺失

断层的发生不仅使地层变得不连续，而且使地层发生重复和缺失现象。这种地层重复与

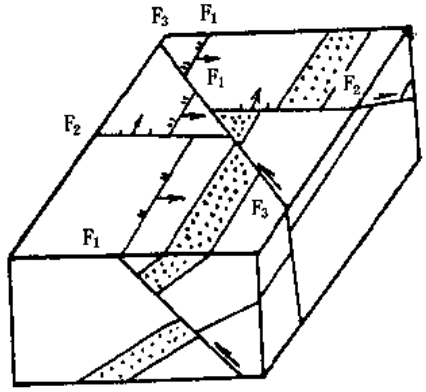


图 1－40　断层引起的构造不连续现象

F_1—走向断层；F_2—倾向断层；F_3—斜向断层

缺失现象对走向断层和斜向断层来讲，在平面上和钻井剖面上都会出现（图 1－42）。至于什么情况下重复或断失，就要视具体断层的性质、断层面的产状及被断地层的产状而定。

地层重复与缺失除断层之外还可有其他原因，如褶皱和不整合。由于断层引起的地层顺序的重复和褶皱的地层重复主要区别在于前者为非对称性单向重复，后者为对称性重复，即以褶皱核部为中心向两翼对称重复（图 1－43）。断层造成的地层缺失和沉积间断所造成的地层缺失也不同，前者有破碎带、断层面，而后者有广泛的古剥蚀面且缺失是区域性的。此外，不整合往往是某一时代较新的地层与一系列不同的时代较老地层接触，断层则将不同

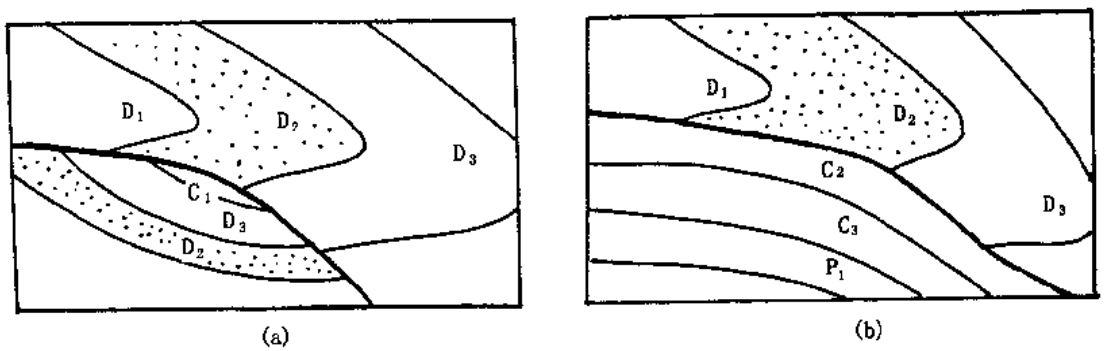


图 1－41　两种接触关系

(a) 断层接触；(b) 角度不整合接触

时代地层之间相互错开接触（图 1－44）。

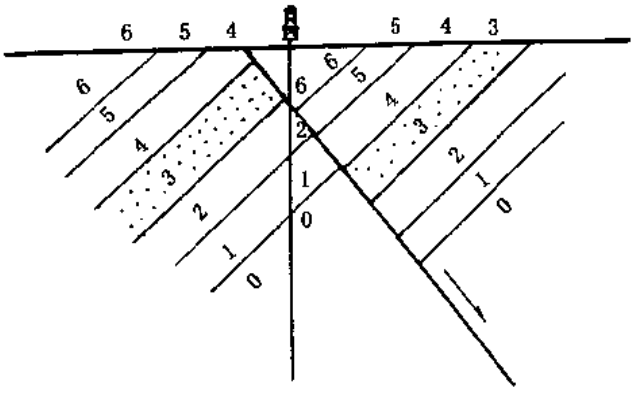


图 1－42　地层重复或断失示意剖面图

3. 断层面（带）的构造和岩性特征

断层面是岩层或岩体直接运动的面，因此在断层面上留下相对错动的各种痕迹。在野外观察时，直接看到断层面以及断层错动所产生的一些痕迹和构造岩，这是认识断层的直接标志。

(1) 断层擦痕、摩擦镜面和阶步

在断层面上，两断盘的相对滑动和摩擦留下的痕迹叫做断层擦痕。擦痕通常表现为一系列彼此平行的细而密集的线条（图 1－45），在较大规模的断层面上表现为一系列相间排列的擦脊与擦沟。在较坚硬的岩石中，有的断层面上出现一层 C 质、Si 质、Fe 质或 Ca 质薄膜，形成光滑的摩擦镜面。它们是断层两盘相互压紧、反复碾磨使断层面两侧近旁岩石中原来含有的物质重熔并被挤出

敷抹所致。

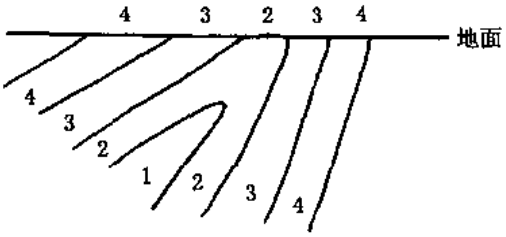


图 1－43　褶皱构造引起的平面、剖面上的地层重复现象

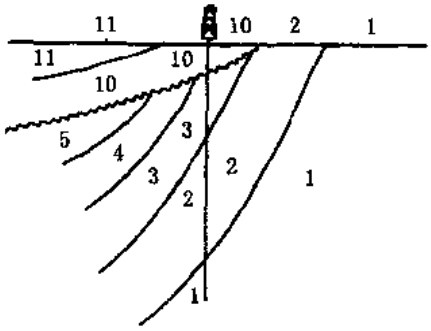
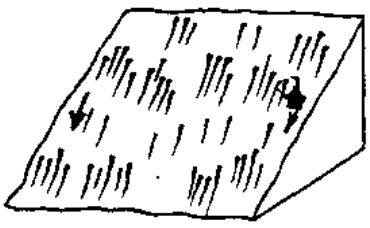


图 1－44　不整合造成的地层缺失在平面和钻井中的表现



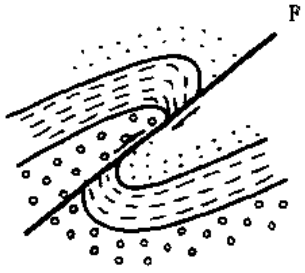


图 1－45　断层面上出现的擦痕（a）及两侧的伴生牵引构造（b）

与擦痕相类似的还有断层面上生长的纤维矿物，如砂岩断层面上生长的石英、石灰岩断层面上的纤维状方解石等等。这些矿物的结晶习性并非为纤维状，但断层的相对错动使得它们的生长服从于一定的应力状态呈平行于错动方向的纤维状（图 1－46）。这些擦痕和纤维状矿物的排列，均为指示断层两盘相对错动方向的标志。

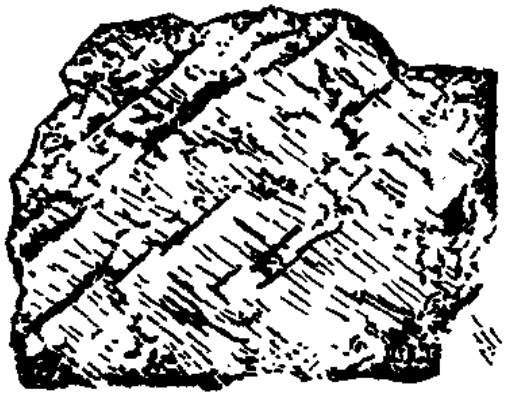


图 1－46　断面上生长的纤维石英晶体素描图（据原武汉地质学院，1979）

通常与擦痕相伴生出现的还有断层面上的阶步，它是与擦痕垂直的断面上的微小陡坎，是由于顺擦痕方向的局部阻力差异或因断层间歇性运动的顿挫而形成（图 1－47）。

阶步的形态特征是在剖面上呈不对称的缓波状曲线（图 1－47a），反阶步的形态与阶步大致相仿，但有一显著区别是反阶步的陡坡与缓坡并不是以圆滑曲线连续过渡，而是以开口的折线相连接。图 1－47b 是由剪切羽列面形成的反阶步；图 1－47c 为由断层派生的楔形张节理形成的台阶状陡坎。

（2）断层构造岩

断层构造岩是断层带中或是断层两盘岩石

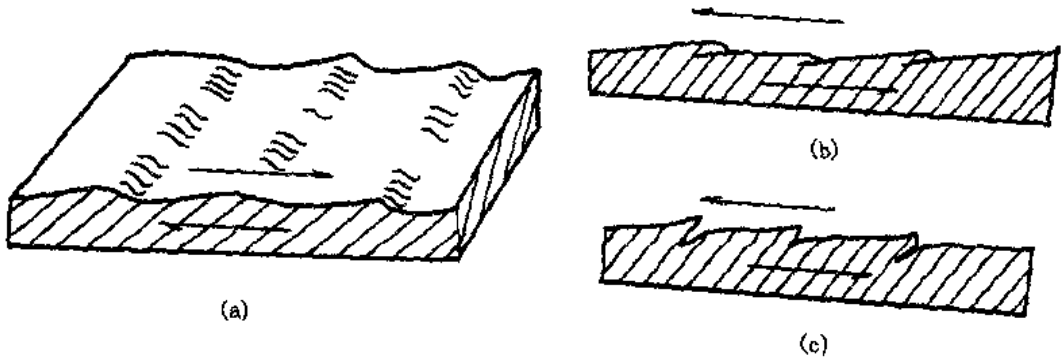


图 1－47　阶步（a）与反阶步（b）（c）

在断层作用下被改造形成的具有特征性结构、构造和矿物成分的岩石。由于断层两盘相对错动，导致断层面两侧岩石发生变形、机械破碎并在局部摩擦引起的高温下发生重结晶，甚至有新的变质矿物生成。但由于断层形成的力学机制不同，断裂带内部的岩性特征也存在较大差异。

① 压性断层构造岩。压性断层是在挤压或压缩作用下形成的断层，主要包括逆断层、逆冲断层和逆冲推覆构造，此外，还有挤压破碎带、直立地层带、片理带、页理、大部分劈理、部分压溶缝合线以及部分正断层等（刘泽容，1998）。

压性断层带常常发育有压性断层岩，它是断层两盘岩石在断层作用中被改造形成具有特征性结构、构造和矿物成分的岩石，包括脆性断层伴生的碎裂岩系列和韧性剪切带伴生的糜棱岩系列。前者主要发育在浅层次盖层中，而后者是发生在较深层次结晶基岩中的一种普遍的构造现象。碎裂岩系以碎裂作用为主，根据基质含量的碎块粒径可进一步细分为破裂岩、断层角砾岩、碎粒岩或碎斑岩、碎粉岩、断层泥等（图 1－48a）。

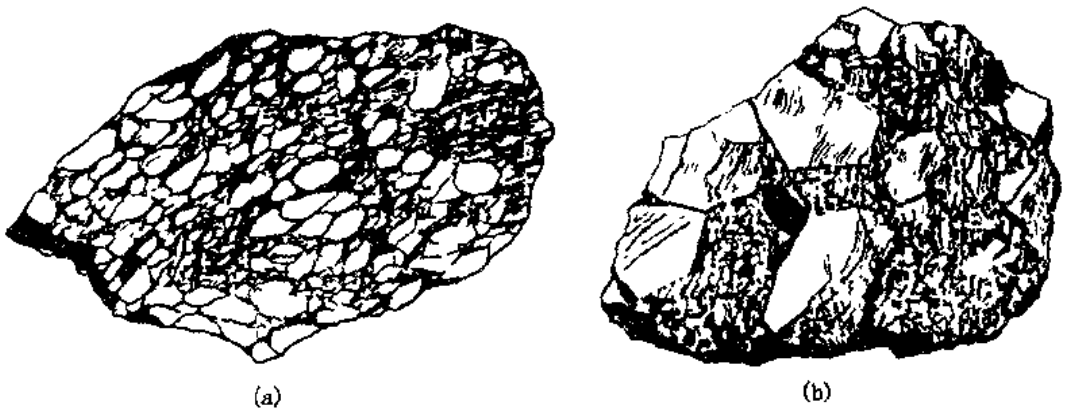


图 1－48　断层角砾岩（江苏苏州）（据孙岩等）

（a）逆掩断层中的压碎角砾岩；（b）砂岩中的张裂角砾岩

破裂岩，是指初始破碎尚未显著位移的岩石，多分布在由断裂带至完好岩石之间的过渡地带。压性破裂岩发育两组扭裂即张裂和压裂，将岩石分割成扁菱形、三角形等块体，表明所受的挤压作用和挤压作用的主要方向。

断层角砾岩，由保持原岩特点的岩石碎块组成，基质含量小于 50%，角砾一般大于 2mm。它是在断层形成过程中遭受相对挤压、引张或错动形成的角砾、扁砾或圆砾等胶结而成的岩石。压性角砾岩具定向性，其长轴平行断面分布，角砾有时被压扁或磨圆，表面常有擦痕，内部有压性劈理、张裂和扭裂。胶结致密，胶结物主要为原岩的岩粉。

碎粒岩，是断裂错动将角砾进一步破碎以后胶结而成的岩石，基质含量为 50%～90%，碎块粒径介于 0.1～2mm 之间。它是以脆性变形为主、塑性变形为辅的构造岩。压性碎粒岩的碎粒多圆粒化或透镜状，呈微显定向性，其扁平面与断面大致平行，具挤压结构，胶结物仍是原岩的岩粉为主。

碎粉岩，是岩石研磨极细，粒度比较均匀的岩石。基质含量大于 90%，一般碎块粒径在 0.1mm 以下，也可称为超碎裂岩。

断层泥，是未固结的泥状断层岩。细粒化的颗粒不易分辨，其中夹少量较大碎块，含量小于 30%。一般是在围压较小的浅层地质环境下形成的，常发育在地面至 2.5km 深处。与原岩相比，它的细粒化，不仅有研磨作用，也有压溶作用。

糜棱岩系根据细粒化基质含量和岩石重结晶作用程度可分为糜棱岩类和构造片岩类。糜棱岩类由细粒化基质和碎斑组成。根据基质含量和碎斑粒径可将糜棱岩进一步细分为糜棱岩化岩（基质大于 10%）、初糜棱岩（基质为 10%～50%）、糜棱岩（基质 50%～90%、碎斑粒径小于 0.05mm）和超糜棱岩（基质大于 90%、碎斑粒径小于 0.05mm）。糜棱岩是韧性剪切带的产物，它是原岩在高温、高压条件下，发生晶体塑性变形而形成的一种断层岩。糜棱岩致密坚硬，肉眼无法辨认颗粒，具有较强的面理和线理。有明显的流纹状面理，是由某些矿物（如石英）被强烈拉长并围绕一些脆性变形的残斑（如长石）而显示出塑性流动性状，形成流动构造。

② 张性断层构造岩。张性断层，是在引张作用或局部引张作用下形成的一套断裂系统。张性断层充填的岩脉或矿脉，一般延伸较短，埋深较浅，连续性差，形态复杂，厚薄变化大，常呈反复曲折追踪现象，膨胀收缩，参差不齐，脉壁粗糙，脉中的砾石棱角好，胶结疏松，矿物晶体常垂直脉壁生长。

张性断裂中的断层岩主要发育碎裂岩系，且常见破裂岩和断层角砾岩。张性破裂岩中常见张裂，将岩石分割成参差不齐的条带状或不规则状块体，表明其垂直方向的引张作用。张性角砾岩的角砾形态不规则，棱角明显，内无劈面，大小混杂，无定向性，胶结疏松，胶结物以外来物质为主。张性碎裂岩的碎粒，多呈棱角状或次棱角状，杂乱分布（图 1－48b）。

③ 扭性断层构造岩。扭性断层，一般包括走滑断层和平移断层，是在区域性剪切作用或局部剪切作用下形成的一套断裂系统。

扭性破裂带常充填有岩脉或矿脉，这种脉体呈似板状，常常相互平行或呈雁行排列，脉壁平整，若两组脉体同时出现，构成交叉网状，交叉部位脉体多膨大或呈柱状。呈雁行排列的张性或张扭性裂隙常常取代扭裂面，在主脉一侧或两侧常有直立的旋扭构造或分支脉。若脉体是同构造结晶组成，矿物的排列方向与脉壁斜交，表明它是扭动作用生成的（图 1－49）。

扭性断裂带中的断层岩兼有碎裂岩和糜棱角砾岩两个系列岩石。扭性破裂岩，常发育有两组扭裂和张裂，它们将岩石切割成平行四边形或不等腰三角形碎块，表明所受扭力作用及方向。

扭性角砾岩，角砾常成菱形或三角形，表面多擦痕，微具定向性，长轴与断面斜交，边

部整齐，有时成透镜状或圆砾化的棒状或蛋状。胶结物很少，且为外来物质，而常常是原岩的岩粉组成。

扭性碎裂岩，呈定向排列，扁平面常与断面斜交，碎粒多呈次棱角状或圆粒化。

扭性糜棱岩，矿物定向排列，并与断面或主要面斜交，常见有白云母等应力矿物，重结晶颗粒具多边化、雪球构造及不对称压力影等。

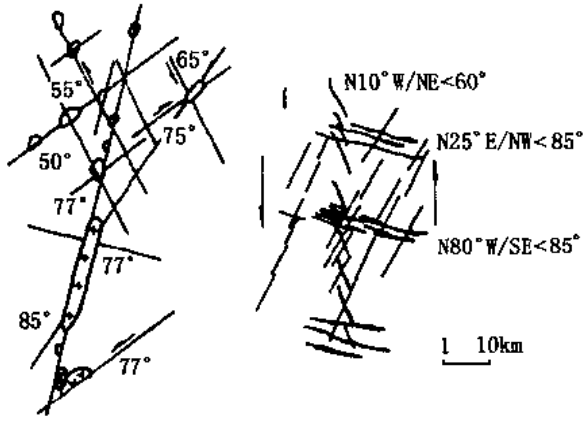


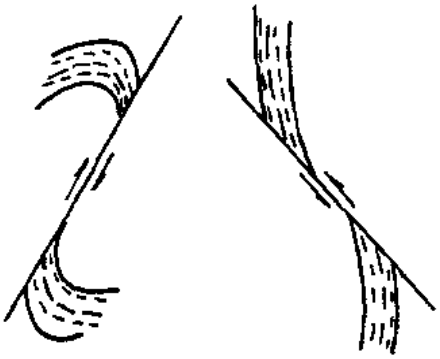
图 1－49 沿扭裂面分布的串珠状花岗岩图

4．断面附近的构造现象

在断层发生、发展过程中，在断层的两侧出现一系列伴生和派生构造，它们可作为断层存在的依据，还可用来鉴定断层的错动性质和力学性质。断层两侧的构造现象既有塑性变形，也有脆性破裂。

（1）断层旁侧的塑性变形

断层旁侧的塑性变形有伴生与派生之分。断层两侧相邻岩层因断层错动、摩擦牵引所产生的明显的弧形弯曲，称伴生牵引构造。它是断层附近常见的构造现象，越靠近断层面越弯曲，地层的厚度也越薄（图 1－50）。


图 1－50 断层面附近的伴生牵引构造

强烈错动的断层（特别是强烈挤压的逆断层）可形成牵引所致的半向斜或半背斜。这种伴生褶皱与主干断层力学性质相同，属于同一应力场的产物，其轴面大体平行于断层面。牵引构造也叫拖拉构造，它仍在平面或剖面上均可出现，但与油气藏关系较密切的是剖面上的牵引构造。

关于牵引构造的成因，一般认为是两盘相对错动、摩擦对岩层拖曳的结果。近年来有些人认为，如果牵引构造是两盘相对运动引起的，则意味着断层的脆性变形在先，塑性弯曲在后，这与一般变形过程相矛盾。从而提出了可能是先挠曲、后发生断层的观点，认为牵引构造是早期的塑性弯曲在断层错动时发育而成。

其实，上述两种观点都是可取的，即无论早期塑性弯曲的岩层，还是没有早期弯曲的岩层均可形成牵引构造。至于塑性弯曲在后出现的问题，应考虑到断层的错动不是简单的机械运动，而是伴随光能、声能、弹性振动、热能等各种形式释放出所积累的能量的过程。所以在断层错动前和错动过程中，其错动面附近物理、化学条件是大不同的，完全可以形成不同的变形产物。

派生褶皱也叫牵引褶皱或拖拽褶皱，是在断层两盘相对错动所诱导的局部应力场作用下形成的一系列小型不对称褶皱（图 1－51）。从地质力学的观点来看，属于低序次构造。

派生褶皱的特点：一是分布于断层面的一侧或两侧，离断层面不远即可消失；二是其形态多样，但以斜歪褶皱为常见；三是其轴面与主干断层面斜交，其锐角指示对盘运动方向。

(2) 断层旁侧的脆性破裂

在断层附近既能形成塑性变形，也可形成各种脆性破裂。断层旁侧的脆性破裂主要是羽状的剪节理和张节理。虽然它仍都具有一般剪节理与张节理的特点，但均不能穿过主干断层。这些派生节理与主断层斜交，交角的大小因派生节理的力学性质不同而有差异。断层旁侧的羽状剪节理和张节理是在断层的剪切错动诱导的次一级应力场作用下形成的派生构造。

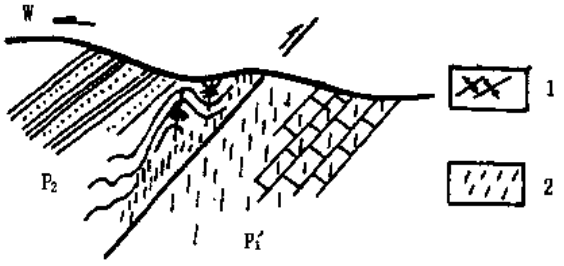


图 1－51　断层旁侧的牵引褶皱（湖南）
（据原长春地质学院，1979）
1—小褶皱轴面；2—页岩中的页理及灰岩中的劈理

5. 其他标志

这里主要是指地形、地貌、水文地质方面和一些岩浆活动及地震活动方面的标志。

(1) 断层崖和断层三角面

由于断层两盘的相对错动，上升盘常形成陡崖，即断层崖。大型断层崖在卫片、航片上可有明显的显示，形成线性构造的地貌景观（图 1－52）。



图 1－52　断层三角面素描图

盆地与山脉、山区与平原的线状分界也往往是断层作用的结果。但是地貌上的陡崖不一定都是断层崖，具体问题要具体分析。

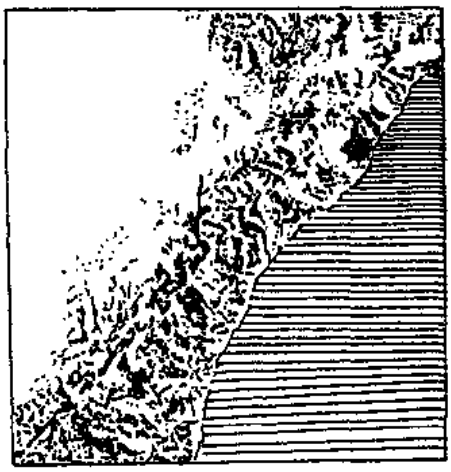


图 1－53　阿尔卑斯断层在卫片上的线性影像（新西兰）

断层崖受到与崖面垂直方向的水流的侵蚀切割，可形成沿断层走向（线状）分布的一系列三角形陡崖，即断层三角面（图 1－53）。

(2) 山脊错断和水系改向

错断的山脊往往是断层两盘相对平移运动的结果。断层（尤其是现今活动断层）常控制和影响水系的发育，引起河流突然改向（图 1－54），甚至发生河谷错断现象。

(3) 线状分布的泉水及串状湖泊、洼地温泉和冷泉常通过断层涌出地表，所以它们的线状分布往往也是断层存在的标志

如西藏念青唐古拉山南麓的断层带上，从黑河到当雄一带就分布有一连串的高温温泉（图 1－55）。

湖泊、洼地呈串珠状分布，通常意味着大断层存在。如沿我国云南东部南北向的小江断裂带分布着一连串湖泊，自北向南有杨林海、阳宋海、滇池、抚仙湖、杞麓湖以及昆明盆地、宣良盆地、嵩明盆地和玉溪盆地等。

(4) 岩体和震中的线状分布

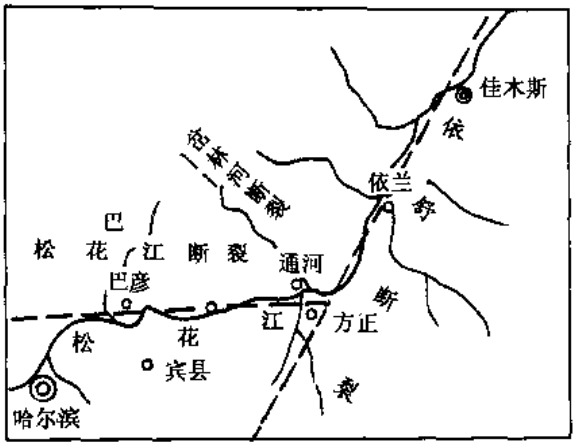


图 1－54　松花江流向的改变与区域断裂之关系（黑龙江）

断层（带）可成为岩浆作用和矿液活动的通道和停积场所，因此呈线性分布的小型侵入体、喷发岩体或硅化带、矿化带等常反映断层的存在（图 1－56）。硅化带因其岩性较坚硬、抗风化能力强，易呈高地，矿化带则有其特殊的颜色标志，因而野外易于发现。另外，天然地震震中的条带状分布也有助于认识断层（特别是深大断层）的存在。

以上概述了判断断层存在的 4 个方面标志，它们是观测和研究断层的基础和前提。对于一条断层来说，并非上述 4 种标志均有出现，有的可能只观测到其中的某一、二个标志。所以在地质调查中，应结合其他地质条件和背景，加以综合分析。

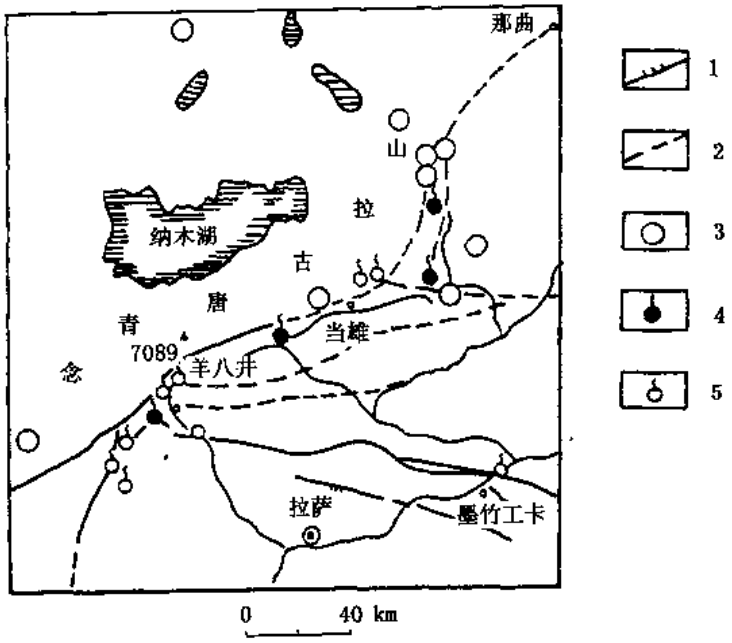


图 1－55　念青唐古拉山温泉与地震震中分布（西藏）（据原武汉地质学院等，1979）

1—逆断层；2—推测断层；3—六级以下的地震震中；4—沸泉；5—热泉

二、地下断层的识别

因为油气藏均位于地下一定深度，所以为了有效地勘探和开发油气资源，正确认识地下断层是极为重要的。地下断层的研究仍以地面断层的分析理论为基础，但要用其他间接的技术手段取得第一手资料。

1．地下断层的识别

（1）重、磁、电法勘探中的断层标志

由于断层两盘岩性往往有较明显的差异，其各种物理性质（如密度、磁化率、电阻率

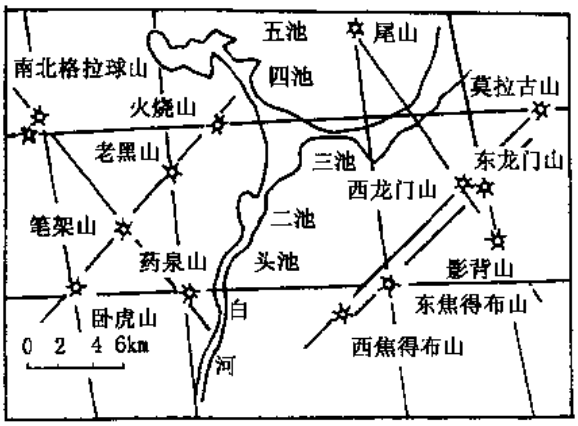


图 1－56　五大连池火山群沿断裂线及其交点分布图（黑龙江）

等）都会发生相应的变化。因此，利用重力、航磁、地电等各种区域物探方法获得的异常变化曲线图，可以推断地下断层的存在。如磁性有较明显差异的岩层沿断层两侧分布时，常形成磁力异常带，例如，郯庐断裂带航空磁测平面、剖面图上磁异常变化点的连线正反映郯庐断裂带的存在；又如依一舒断裂带的航磁图上表现为在区域正异常的背景上呈长条状的北东向航磁负异常带。

在重力勘探资料上，地下断层往往反映为重力梯度大的地带，即重力线密集的地带常有断层（图 1－57）。一般区域性的大断裂在区域物探资料上反映较明显。

（2）钻井地质中的断层标志

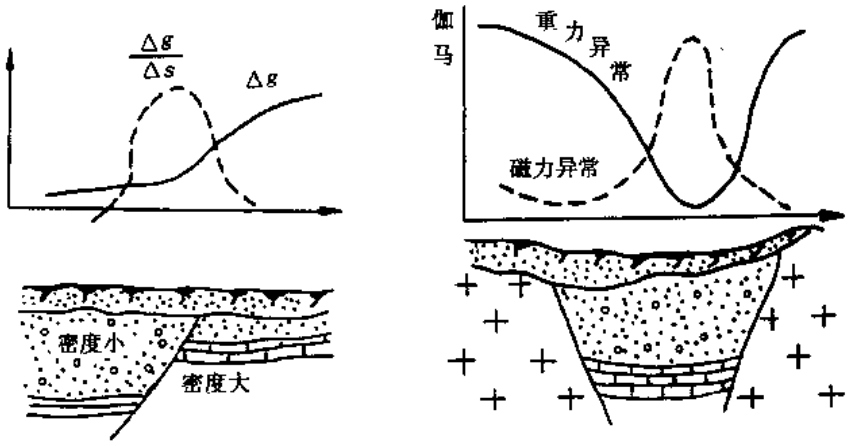


图 1－57　重力异常曲线

① 井下地层的重复与缺失。将单井综合解释的地层剖面与该区的地层综合柱状剖面对比，可以确定钻井剖面上地层的重复和缺失及同一地层厚度的急剧增厚或变薄。这种情况必须与褶皱的地层重复和不整合的地层缺失加以区别。研究地层产状、断层面产状及地层重复与缺失情况（图 1－58），不仅可以认识断层存在，而且有助于进一步判断断层的错动性质。

② 短距离内标准层的标高突变。如果相邻两口井都没有钻到断层，两口井中同一标准层的标高差较大，则可能在相邻井间存在着断层（图 1－59）。不过，这种情况也可由挠曲等其他原因造成。这就应参考地震资料等其他资料综合分析，加以区别。

③ 意外的泥浆漏失和油气显示。如果在钻井过程中钻遇断层，则可能在致密岩层中突然发生泥浆漏失，或在不应有油气逸散的地层中可能会有油气显示，甚至出现井喷现象。

（3）地震反射剖面上的断层标志

连续的地层在地震反射时间剖面上表现为连续的反射波组（或同相轴），断层的存在使反射波组（或同相轴）突然被错开或出现线状突变带。因此，可根据反射同相轴的延伸及其突变情况确定断层并分析两盘的错动性质。

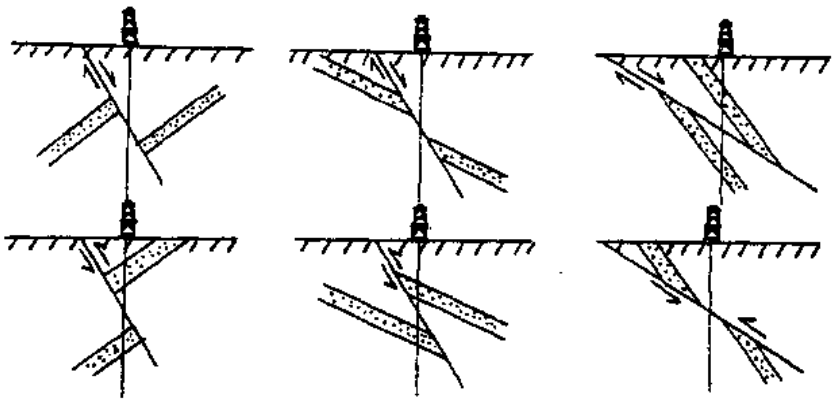


图 1－58　井下断层造成的地层重复和断失示意图

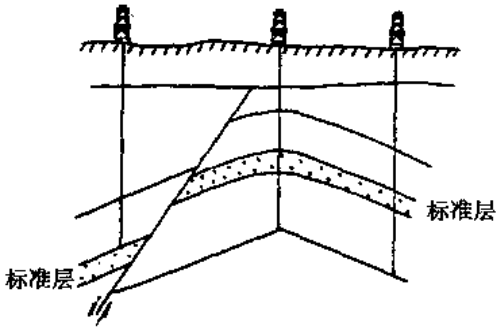


图 1－59　断层引起同一层面标高的突变

图 1－60 为松辽盆地北部林甸地区的地震反射剖面图。从图上可以看到一条上陡下缓的断层，从反射界面的错动来看，下部（深部）表现为正断层，上部（浅部）却表现为上盘上升的逆断层。厚度分析证明，林甸断层经历了先正、后逆的两种不同性质的错动。

（4）地层倾斜矢量图上的断层标志

若在断层附近形成断裂破碎带，则在地层倾斜矢量图上呈杂乱模式或空白带；若断层附近地层因两盘错动而变陡或变缓，则在地层倾斜矢量图上表现为方位大体一致、倾角随深度增大或减小的一组矢量。根据倾斜矢量图的变化特征，可以比较准确地确定断点位置、断层走向及断面产状。

利用地层倾斜矢量图确定断层的优点是直观且只需一口井资料，所以对新探区的第一口探井来说，地层倾角测井是很重要的手段。但是用这种资料判断断层也有其多解性，应结合其他资料进行综合分析。

（5）声波测井曲线上为断层标志

同井、同岩性、同深度声波曲线的异常一般也可作为断层存在的标志之一，不同性质的异常曲线反映不同力学性质的断层。

压扭性断层在断层面附近因孔隙度减小、密度增大而提高波速。因此，在压扭性断层附近的声波时差值比相邻地段同岩性地层相对减小。张性断层在断层面附近因孔隙度增大、密度减小而降低波速。因此，在张性断层附近的声波时差值比相邻地段同岩性地层相对增大。

2．断点的组合问题

在单井剖面上确定了断点，只能说明该井钻遇断层，还不能确切了解整条断层的特征。在多口井各自有若干断点时，需要对各断点进行研究，把属于同一断层的各个断点联系起来，才能了解和认识地下断层产状及各断层间的相互联系。这项工作称为断点组合。

（1）断点组合的一般原则在组合井间断点时，应遵循的基本原则

① 各井钻遇的同一条断层的断点，其断层性质应该一致，断层面产状和铅直断距应大

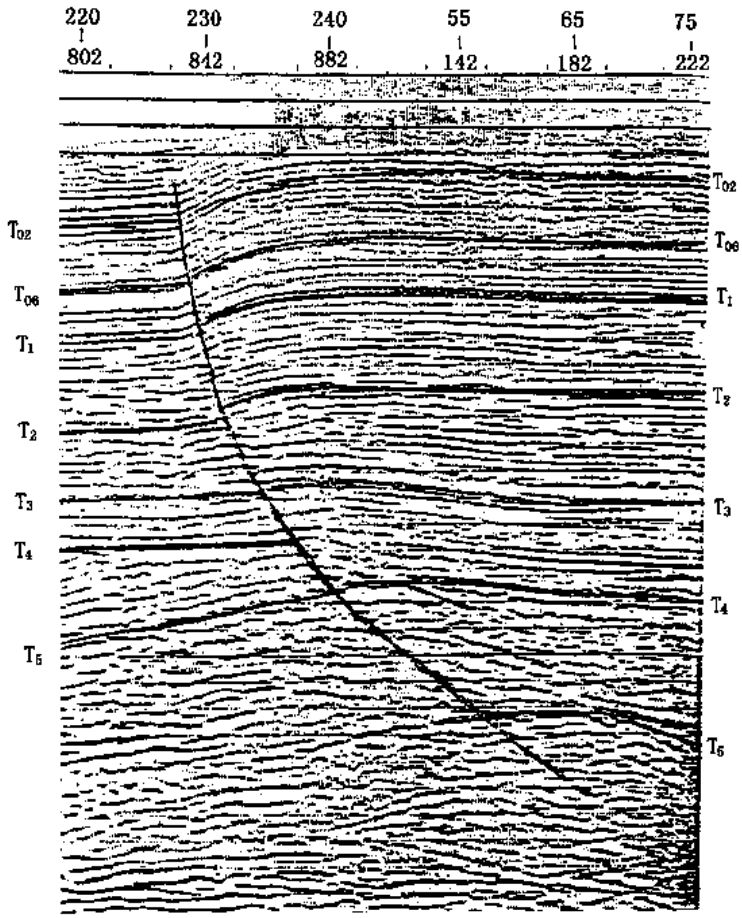


图 1－60　林甸断层的地震反射剖面图（松辽盆地北部）

体一致或有规律地变化；

② 经组合后的断层，同一盘的地层厚度不能出现突变；

③ 断点附近地质界线的升降幅度与铅直断距要基本符合，各井钻遇的缺失层位应大体一致或有规律地变化；

④ 断层两盘的地层产状要符合构造变化的总趋势。

（2）断点组合方法

组合断点，首先是将同一性质的断点组合起来，把不同性质的断点区分开。但是，同一性质的断点未必就属于同一条断层，也可能属于同性质的另一条断层，因此，还需要进一步研究、区分和组合。

① 作剖面图组合断点 多条断层切割造成的断块之间的各地层界面的标高呈突变关系，地层厚度也可能突变（或因部分缺失，或因上下盘的差异沉积造成）。因此，利用各井的分层数据、断点资料作剖面图，分析各层面的高低关系和厚度变化情况，一般能找出同一条断层的断点。

② 作断面等值线图组合断点 断层面等值线图能够反映断层面的产状及分布范围。不同

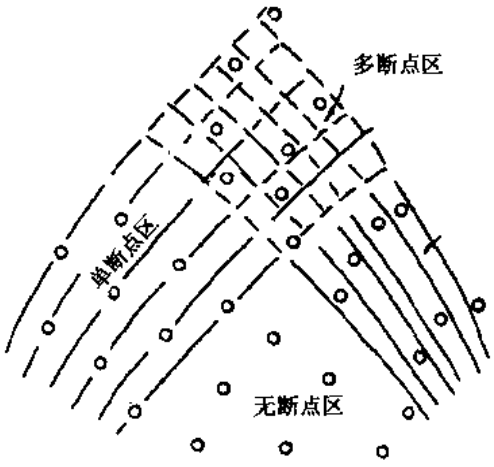


图 1－61　利用断面等高线组合断点示意图（据曹成润，1998）

的断层，其断面等值线的变化趋势不同。因此，为了区分复杂区同井钻遇的多个断点，可以在远离复杂区的单断点区先编制断面等值线图，再把已知的产状和落差及其变化规律逐渐向复杂区延伸，把多断点区分开（图 1－61）。

③ 综合分析 在地下构造复杂的地区，井下断点多，断点组合往往具多解性，需要综合分析各种资料，从而选择较合理的断点组合。如断点组合方案与断面等值线图、剖面图和构造草图相互验证，同时参考地震资料所提供的区域构造特征和分布模式，若有矛盾，查明原因，调整断点组合方案，直到与前述各项原则和各种图件相互吻合为止。若有条件，还可利用地层流体性质、油气水分布关系和压力恢复曲线特征来验证所组合成的断层。

第二章　断层封闭机理及其影响因素

所谓断层封闭性系指断层对油气的封闭能力。它在地质空间上表现为两个方面，即断层的垂向封闭性和侧向封闭性。

第一节　断层封闭机理

一、断层侧向封闭机理

所谓断层侧向封闭性是指断层在侧向上对断层两盘对置层中沿断层面法线方向穿过断层面运移油气的封闭能力。根据断层两盘岩层对接关系以及两盘与断裂填充物之间排替压力的相对大小和是否有泥岩涂抹层的形成，可将断层侧向封闭机理分为以下3种形式：

1. 砂泥对接封闭机理

当断层两盘岩层以“面”接触时，断层能否形成侧向封闭主要取决于断层两侧对接岩层排替压力的相对大小。如果位于油气运移方向上近油源一盘（A）（图2－1a）的岩层排替压力 P_A 小于远油源一盘（B）的岩层排替压力 P_B，则B盘可以阻止A盘油气的侧向运移，断层具有侧向封闭性。否则，油气将由A盘穿过断层面向B盘运移，断层不能形成侧向封闭（图2－1b）。通常情况下，由于泥岩与砂岩相比，孔渗性差，排替压力高，当砂岩与泥岩对置时，泥岩便可对砂岩中的油气起到封闭作用，即所谓砂泥对接封闭机理。例如黄骅凹陷北大港主断层就是一个典型例子。在明化镇上段沉积时期，沙三段排油进入末期，沙二段开始排油，此时下降盘的沙一中段超压泥岩埋深达到2300m左右，还未与上升盘的沙二段、沙三段欠压实泥岩相接触，因此沙二段生成的油气有一小部分向上运移进入浅部地层。稍后，沙一中段超压泥岩与沙二、三段超压泥岩相接触，形成顶部封闭层，对北大港断层下降盘沙二段、沙一段生成的油气运移则起到了侧向遮挡作用（图2－2）。

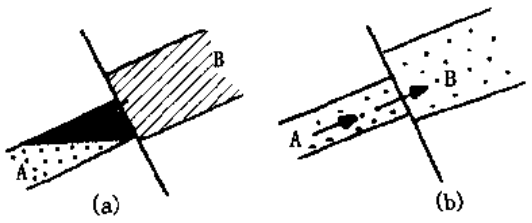


图2－1　断层两盘以“面”接触的侧向封闭机制
(a) 砂泥对接；(b) 砂砂对接

2. 断裂带高排替压力封闭机理

当断层两盘为“带”接触时，尽管断层两盘为砂砂接触，尽管对置盘砂岩的排替压力低于油气运移盘岩层的排替压力，如果断裂带的排替压力大于油气运移盘岩层的排替压力，断裂带就能阻止油气的侧向运移，断层具侧向封闭性。否则，油气将向断裂带中运移，或沿断裂带发生垂向运移，或穿断裂带进入对置盘砂岩层发生侧向运移，断层不能形成侧向封闭。依据断裂带物质形成高排替压力的原因此种封闭作用又可分为以下两种形式。

(1) 泥质填充封闭机理

如果断裂带的填充物以泥质成分为主，由于泥质成分孔渗性差，排替压力高，与断层两侧的目的层形成排替压力差，阻止油气运移，使得断层在侧向上形成封闭，如图2－3a所

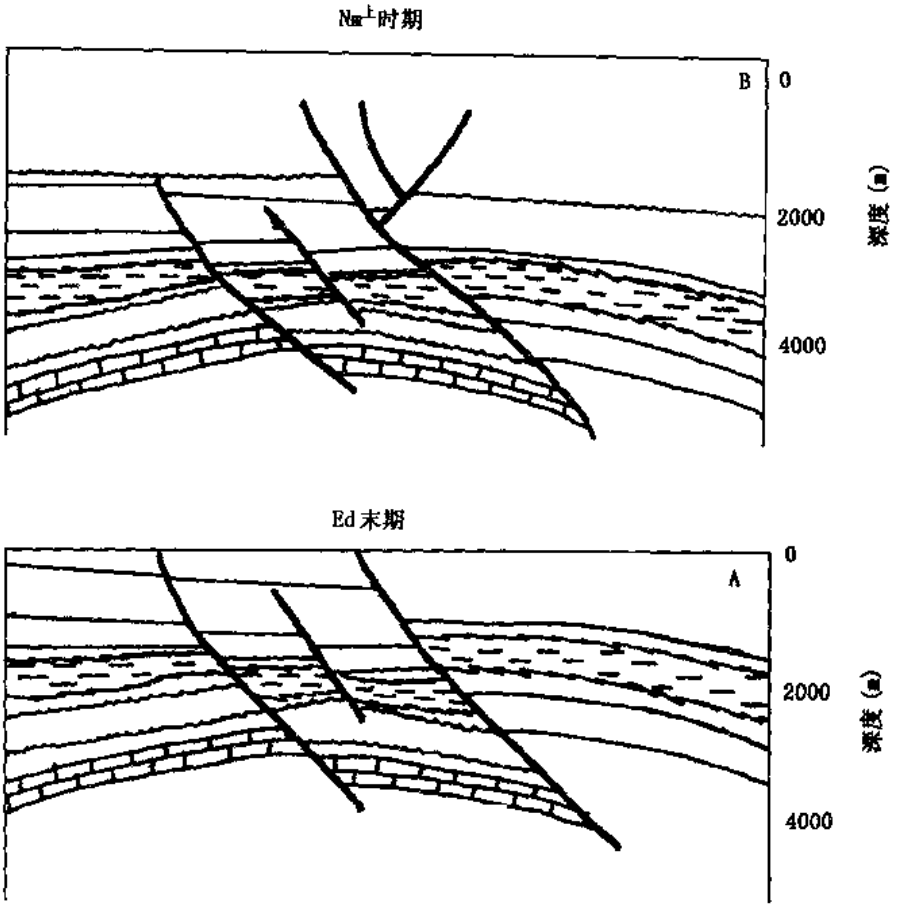


图 2－2　北大港主断层发育史与油气运移关系图（据陈发景等，1989）

示。相反，如果断裂带的填充物以砂质成分为主，由于砂质成分孔渗性好，排替压力低，不能与断层两侧的目的层形成排替压力差而阻止油气侧向运移。例如，黄骅凹陷北大港港中开发区沙一段油藏中油气为断层面所遮挡，因下降盘东一段砂岩层与其上升盘的沙一段油层邻接，东一段为物性好的大段含水层，油层与水层对置，推测断裂为泥岩充填，断裂带具有大的排替压力（图 2－4）。

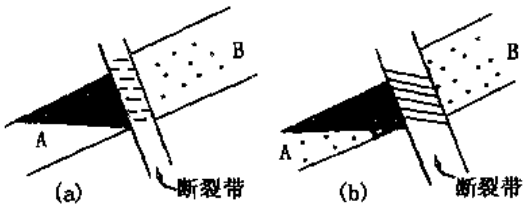


图 2－3　断裂带高排替压力侧向封闭机制
（a）泥质填充；（b）后期成岩

（2）后期成岩封闭机理

由上可知，尽管断裂填充物以砂质成分为主，但由于后期地下水流动造成的胶结、矿化和油气遭受氧化形成的沥青化作用，使其孔渗性变差、排替压力升高，也可使其与断层两侧的储层原来无排替压力差现在变成有排替压力差，从而使断层形成了侧向封闭性，如图 2－3（b）所示。例如松辽盆地北部深层大量断裂带岩心中发育的裂缝很大一部分皆已被方解石脉填充，少量还有被黄铁矿填充，使其排替压力明显升高，从而阻止油气穿过断层进行侧向运移，形成侧向封闭。

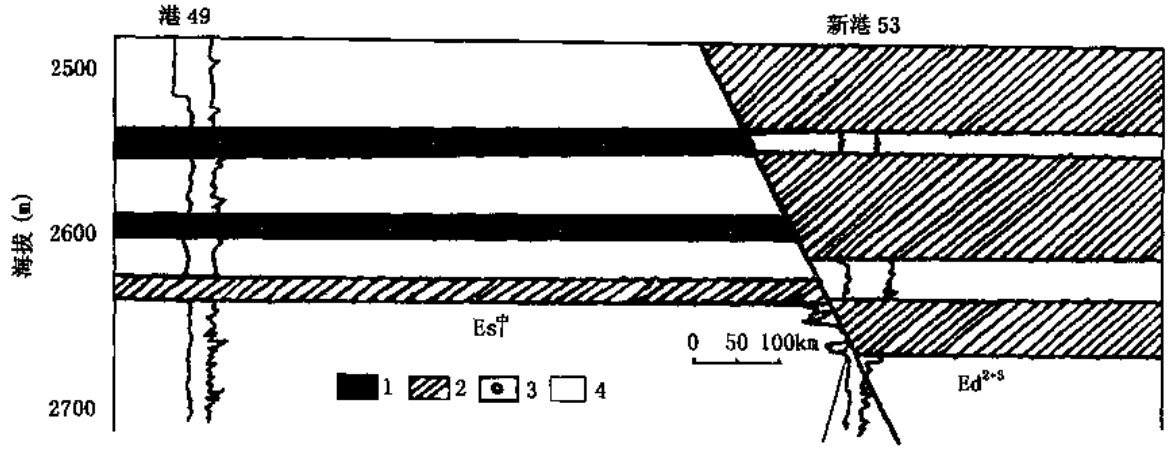


图 2－4　北大港油田港中开发区油藏剖面图（据陈发景等，1989）

1—油层；2—水层；3—气层；4—泥岩

3．泥岩涂抹形成的侧向封闭机理

这种侧向封闭是由于同生断层在活动过程中，由于构造应力和上覆岩层重量的作用，断层两盘的未固结或半固结的泥岩层被削截、挤压进入断裂空隙，在断层两盘削截砂岩层上形成的一薄泥质岩层。由于泥岩涂抹层在形成过程中受到较大的剪应力与地层重力的共同作用，使其孔渗性明显低于相应深度的泥岩层的孔渗性，故具有较高的排替压力，可形成对目的层的侧向封闭，如图 2－5 所示。且只要存在泥岩涂抹，这种侧向封闭油气不存在任何问题，故这种侧向封闭作用主要取决于其空间分布的连续性，其空间分布的连续性越好，泥岩涂抹的侧向封闭性越好，反之则越差。

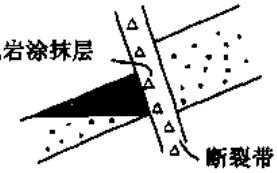


图 2－5　泥岩涂抹层侧向封闭机理

二、断层垂向封闭机理

所谓断层垂向封闭性是指断层对沿断层面切线方向顺断层运移油气的封闭能力。根据断层两盘之间有无填充物、填充物成分及后期是否经受过成岩改造等特征，可将断层垂向封闭性形成机制划分为以下两种形式。

1．断层面紧闭封闭机理

这种封闭机制的形成所需要的地质条件是断层两盘之间无断裂填充物，断层两盘之间以“面”接触。在这种情况下，断层面主要是依靠上覆岩层重力或区域主压应力使其发生紧闭。然而，由于断层面的凸凹起伏，仍会遗留渗漏空间，通常在断层缓角处紧闭，陡角处开启造成油气渗滤散失。因此，仅仅依靠断层面所受到的压力，还不能使断层对油气在垂向上形成完全封闭，还必须借助于泥岩的塑性流动，来堵塞断层紧闭后遗留下来的渗漏空间。

大量实验结果（鲁兵等，1996）表明，断层面紧闭处地层多为岩性较软的泥质岩层，硬度低，塑性强，尤其是当其所受压力超过泥岩塑性变形所需要的最小压力（据李德发等 1991 年对川西坳陷上三叠统泥岩的高压实验研究证明，其所抗最大压力不超过 5MPa）时，泥岩便发生塑性变形向渗漏空间流动，堵塞断层面紧闭后所遗留的渗漏空间，使其愈合起来在垂向上形成对油气的封闭作用。否则，断层在垂向上难以形成封闭。

2．断裂带排替压力差封闭机理

这种封闭机制要求的条件是断层两盘之间存在断裂填充物，断层两盘呈“带”接触。在这种条件下，断层在垂向上的封闭性主要是依靠断裂带上下物质所形成的排替压力差来体现。按照断裂带上下物质形成排替压力差的原因又可分为以下两种形式。

（1）泥质填充物封闭机理

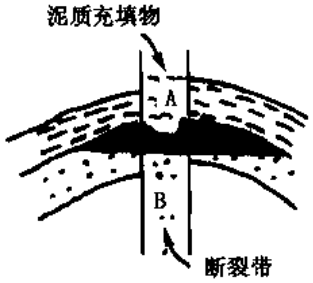


图 2－6　断裂带泥质充填封闭机理

如果断层在剖面某处（A）的填充物以泥质成分为主，如图 2－6 所示，而其下部（B）处以砂质成分为主时，由于泥质成分颗粒较砂质成分颗粒细小，孔隙度和渗透率低、排替压力高，所以，断裂带在 A 处较 B 处有更大的排替压力，即二者之间存在着向下的排替压力差，A 处可对 B 处的油气形成封闭，即断层在 A 处起到了垂向封闭作用。反之断层在垂向上不能形成封闭作用。例如松辽盆地大庆长垣以东的升 61 井，在 1295.5m 处发现一长期发育断层（并在该断层断点取心），其层位为嫩一段，断层在该段具同生特征。岩心观察发现，断点取心处为垂直宽度 0.4mm 的碎裂带，带内为与围岩同性质的泥岩碎块，碎块表面具明显的多次擦痕，无次生矿物胶结。该井在下部扶余－杨二组产气，且在断点以上地层中不见油气显示，表明该断层在垂向上具封闭能力。

（2）后期成岩封闭机理

如果断层的填充物皆为砂质成分，其较高孔隙度和渗透率必然使其成为地下流体向地表运移和地表水向地层中渗漏的通道。地下流体在沿其由下至上的运移过程中，由于温压环境条件的改变，地下水所携带的大量矿物质由于压力和温度的降低，造成过饱和而沉淀下来，例如 $CaCO_3$ 沉淀形成方解石，SiO_2 沉淀形成石英，FeS_2 沉淀形成黄铁矿等，油气也可因地表游离氧和细菌的作用而发生氧化作用，轻质成分减小，重质成分增加，使其粘度加大变成固体沥青。而地表水在沿断层向上渗滤过程中，同样也会带来大量的矿物质，因过饱和而在其内形成次生方解石、黄铁矿和石英等。正是这些后期的矿物沉淀和固化沥青，胶结了疏松的沉积物，并填塞了原来断裂带中砂质成分的孔隙，使其在局部（A）的渗透性变差，排替压力增大，与其下部未胶结和堵塞程度相对较差的 B 处之间形成排替压力差，如图 2－7 所示，从而使断层在 A 处形成了垂向封闭。例如松辽盆地北部深层大量断裂带岩心中发育的裂缝，大部分已被方解石脉和黄铁矿所填充，形成了垂向封闭，阻止了油气穿过断层作垂向运移。

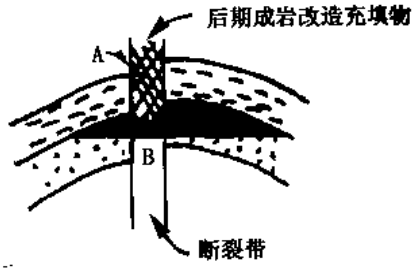


图 2－7　断裂带后期成岩封闭机理

第二节　断层封闭性的主要影响因素

一、断层侧向封闭性的主要影响因素

1．断移地层的砂泥比值

地层的砂泥比值系指某一层段内砂岩层总厚度与泥岩层总厚度的比值。如果被断层所错断的地层中砂泥比值较高，断层错断地层后断层两盘的砂泥岩层对置的可能性就一定很小，

断裂充填物的性质也应以砂质为主，断层的侧向封闭能力必然较低。相反，如果断层所错断的地层中砂泥比值较低，断层两盘砂泥岩层对置的可能性就很大，断裂充填物的性质也应以泥质成分为主，断层侧向封闭性相对较好。因此砂泥比值大小是影响断层侧向封闭性的重要因素。当砂泥比值高到一定程度时，无论其他条件如何，断层都不具封闭能力。

据吕延防等（1994）对辽河油田34条已知封闭性断层的统计结果表明，不同性质断层侧向封闭时对断移地层的砂泥比值要求也是不同的。同生断层所错断的地层砂泥比值大于1.0，非同生断层大于0.8，断层不具封闭性；封气断层断移地层的砂泥比值一般小于0.6。

通过计算塔里木盆地塔中地区断移地层的砂泥比值（表2－1）可以看出，在石炭系地层内断层附近井的砂泥比值均小于0.8，表明本区该主要断裂在石炭系和中上奥陶统地层内所断移的地层应以泥岩为主，断层的封闭性较好，这或许是塔中地区断层附近油气较富集的原因之一。

表2－1　塔中低隆石炭系与中上奥陶统砂泥比值数据表

井号 / 地层	TZ11	TZ12	TZ16	TZ2	TZ20	TZ201	TZ22	TZ25	TZ37	TZ4	TZ31	TZ32	TZ33	TZ17
C	0.629	1.66	1.353	0.821	1.146	0.764	1.114	1.049	0.894	2.096	0.435	0.567	0.779	1.639
$O_{2\ 3}$	0.458	0.845		0.302										

井号 / 地层	TZ11	TZ12	TZ16	TZ2	TZ20	TZ201	TZ122	TZ11	TZ12	TZ16	TZ2	TZ20	TZ201	TZ22
C	0.420	0.658	0.571	2.236	2.049	8.009	2.125	0.604	1.985	0.675	0.661	0.535	4.421	1.278
$O_{2\ 3}$	0.905	0.374	0.427	2.727										

2．泥岩涂抹层分布的连续性

由上可知，只要断裂泥岩涂抹层发育，其侧向封闭性较好，因此，泥岩涂抹对断层侧向封闭性的影响关键取决于其分布的连续性，而泥岩涂抹层空间分布的连续性又要受其断层本身断距、断移地层泥岩层厚度和层数的影响。泥岩层厚度越大，层数越多，泥岩涂抹层越发育，空间分布的连续性越好，反之则越差。例如，松辽盆地汪家屯气田的W_1、W_2、W_3、W_4断层（图2－8）是位于气藏顶部的4条主要断层，将背斜构造切割成众多的小断块，其在扶、杨油层内的侧向封闭性好坏对该气藏天然气的聚集与保存以及气、水分布具有重要的控制作用。

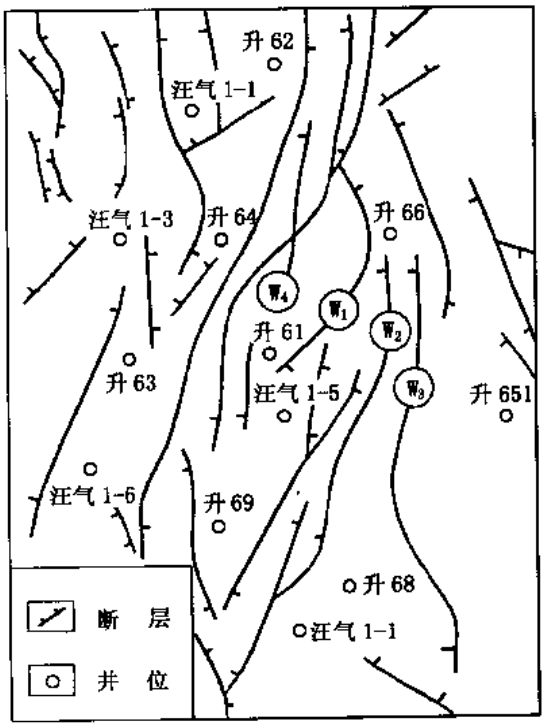


图2－8　汪家屯气田断层平面分布图

该气藏W_1、W_2、W_3、W_4断层在扶余油层中的泥岩涂抹系数（f_m）如表2－2所示，其值均小于2.0，远远小于泥岩涂抹层在空间上连续所要求的泥岩涂抹系数（$f_m \leqslant 4$，详见第五章第一节内容），这表明W_1、W_2、W_3、

W_4 断层在扶余油层内的泥岩涂抹层在空间上分布是连续的，即其侧向封闭性较好，可以有效地阻止油、气侧向运移，该气藏没有统一的油、气、水界面和压力系统也证实了这一点。

表 2－2　W_1、W_2、W_3、W_4 断层特征及 T_2 层泥岩涂抹系数

断层号	断层位置	断层活动类型	断层要素				断穿层位	青一段泥岩厚度（m）	泥岩涂抹系数
			走向	倾向	倾角（°）	断距（m）			
W_1	升 61、汪气 1－4 井间	晚期	NNE	SE	56	90	$T_{06}-T_2$	58.5	1.54
W_2	汪气 1－4、升 65 井间	长期	SN	W	55	35	T_2-T_5	68.0	0.51
W_3	汪气 1－4、升 65 井间	中期	SN	W	55	40	T_2	68.0	0.59
W_4	升 63、升 61 井间	长期	NNE	NW	60	44	T_1-T_2	58.5	0.75

3．断裂填充物的性质

如果断裂充填物以泥质成分为主，其孔渗性差，排替压力高，侧向封闭性好。相反，如果断裂带充填物以砂质成分为主，其孔渗性好，排替压力低，侧向封闭性差。通过断裂带岩心观测结果表明，破碎断层泥的孔喉半径可能小于 0.001mm，可支持高达 300mm 的油柱。若断裂充填物以砂质成分为主，是否具备侧向封闭性则取决于断层带的碎裂程度和后期的成岩改造作用，若后期成岩作用形成方解石、石英和沥青的强烈胶结，断层也可形成良好的侧向封闭性，例如，羊三木油田 F_2 断层（图 2－9）。该断层下盘储集了油气，与含气层对置的地层在上倾方向上的断层上盘为含水储层，通过两盘储集层排替压力实测数据可知，相对置的储集层物性相当，充填物的排替压力高于目的储集层的排替压力，说明断裂填充物应以泥质为主或被后期胶结物充填形成了侧向封闭。

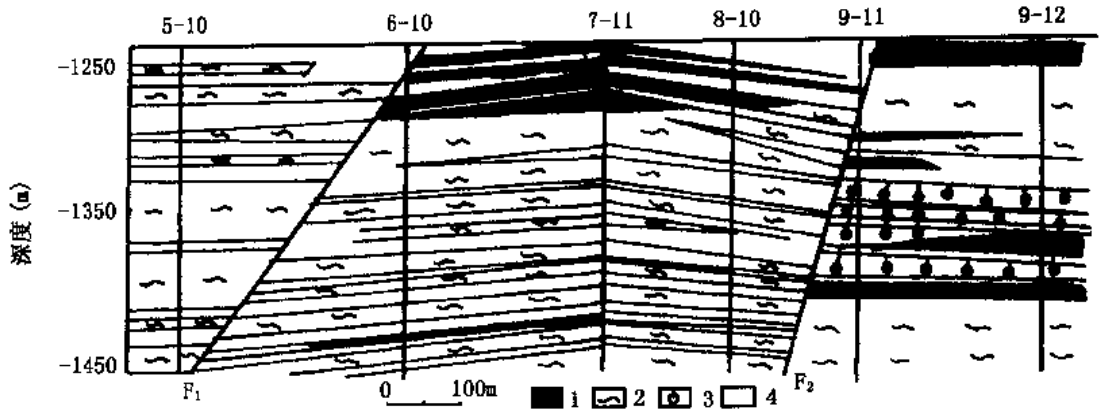


图 2－9　羊三木油田馆陶组的油藏剖面图（据陈发景等，1989）

1—油层；2—水层；3—气层；4—泥岩

二、断层垂向封闭性的主要影响因素

1．断面压力

断面压力是造成断层在垂向上紧闭的最重要因素，断层面压力越大，断层紧闭程度越高，垂向封闭性越好，反之则越差。而断层面的压力大小又受断面埋深和倾角等因素的影响，断层面埋深越大，倾角越缓，断层面所受到的压力越大，断层紧闭程度越高，垂向封闭性越好，反之越差。此外，区域主压应力对其也有影响，区域主压应力越大，与断层交角越接近 90°，对断层面的压力越大，断层紧闭程度越高，垂向封闭性越好，反之则越差。例

如，松辽盆地北部三站气田的 S_1、S_2、S_3、S_4 断层（图 2－10），它们是分布在气田高部位的 4 条主要断层，将背斜分割成众多小断块，其上部盖层青一段内的垂向封闭性好坏对该气田的天然气的聚集与保存至关重要。

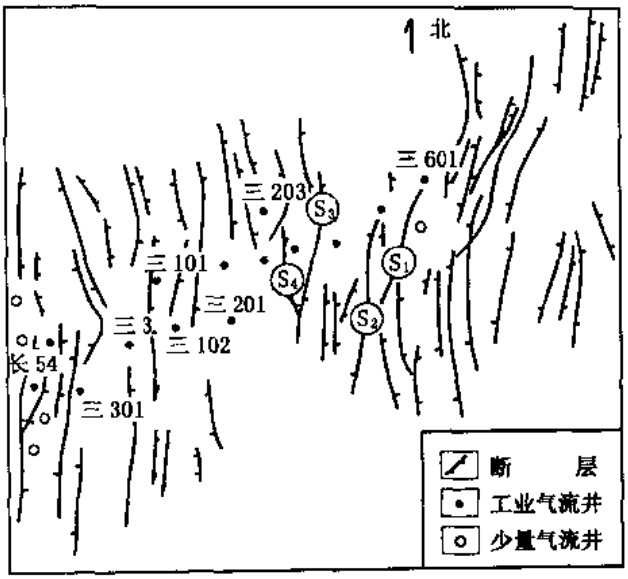


图 2－10　三站气田断层平面分布图

该气藏 S_1、S_2、S_3、S_4 断层在盖层青一段泥岩底部处的断层面压力，如表 2－3 所示，由表 2－3 可以看出，S_1、S_2、S_3、S_4 断层在青一段泥岩盖层底部处的断层面压力均大于 5MPa（详细评价标准请参见第五章第三节内容），这一压力可使断层两盘的泥岩发生塑性流动，堵塞断层面在压力作用下紧闭后所遗留下来的空间，使其孔渗性变差，排替压力增大，形成油、气垂向运移的遮挡物，这是三站气田中天然气能保存至今的重要原因之一。

表 2－3　三站气田 S_1、S_2、S_3、S_4 断层在青一段底面断面压力计算表

断层号	断开青一段泥岩的顶底埋深 (m)	断面所受静岩压力 (MPa)	区域主压应力 (MPa)	区域主压应力与断层走向交角 (°)	区域主压应力对断面产生的压力 (MPa)	断面所受总压力 (MPa)
S_1	571.5～669.0	3.26～3.82	3.5～3.8	66	2.94～3.19	6.20～7.01
S_2	559.5～651.0	3.06～3.56	3.4～3.7	63	2.81～3.06	5.87～6.60
S_3	523.0～651.0	3.57～4.45	3.3～3.7	60	2.52～2.82	6.09～7.27
S_4	480.5～607.5	3.61～4.57	3.0～3.6	80	2.53～3.03	5.53～7.60

2．断面产状

由上述断层垂向封闭机理可知，断面压力的大小主要取决于断面倾角和断面埋深，倾角越大，埋深越浅，断面正压力越小，越不利于断层垂向封闭。因此，在其他条件相同的情况下，深埋的缓角断层封闭性好。

如图 2－11 所示，断面形态不同断层封闭能力差异很大，对铲形断层下部断面缓，垂向

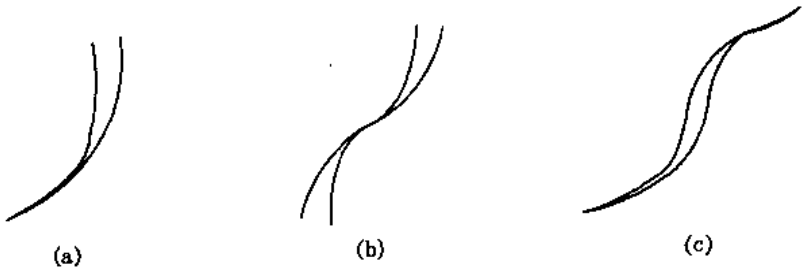


图 2－11　不同断面形态的断层封闭性示意图

(a) 铲形断层；(b) 上凹下凸形断层；(c) 上凸下凹形断层

封闭性好，上部断面陡，紧闭程度差，垂向封闭性差。同理，上凹下凸断层中间垂向封闭性好，上下垂向封闭性差，上凸下凹断层上下垂向封闭性好，中间垂向封闭性差。

3. 断裂填充物质的性质

断层的垂向封闭性除与断面正压力和断层面倾角有关外，还受断移地层泥岩含量的影响。断层断移地层的泥地比值越高，断裂带中的泥质成分越多，孔渗性越差，垂向封闭性越好。相反尽管断面所受正应力较大，但断移地层剖面上泥岩所占地层比例很小，断裂充填必然以砂质成分为主，以砂质成分为主的断裂充填恰似一斜置于断层面上的储集层（图 2－12a），若使该储集层具有封闭能力，单纯靠断层压力使其渗透率降低到泥质岩的程度是极其困难的，还必须依靠后期成岩改造，即使无断裂充填，但因断层两盘泥岩少，砂岩多，两盘泥岩层相互不接触，油气仍可沿断面迂回向上运移（图 2－12b）。因此，断移地层的泥砂比值很低时，不利于断层的垂向封闭。例如，松辽盆地大庆长垣以东的升 196 井，在井深 1536.6m 处的 72cm 的岩心中，见棕红色细粒砂与灰白色钙质粉砂岩之间有一断裂带存在，断裂带的垂直宽度达 10cm，断裂带内有棕色油砂碎块及灰色泥岩碎块充填，该断裂带内以砂质充填为主，在灰白色钙质粉砂岩的破裂面上见有油迹，表明了破碎带对油气运移起了通道作用（图 2－13）。

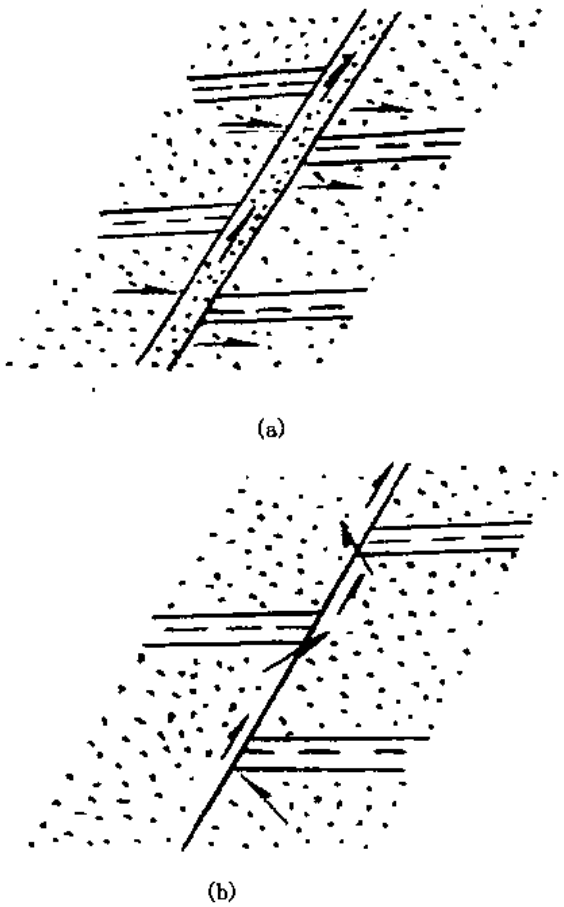


图 2－12　高砂泥比值区油气沿断层垂向运移图（据吕延防等，1994）

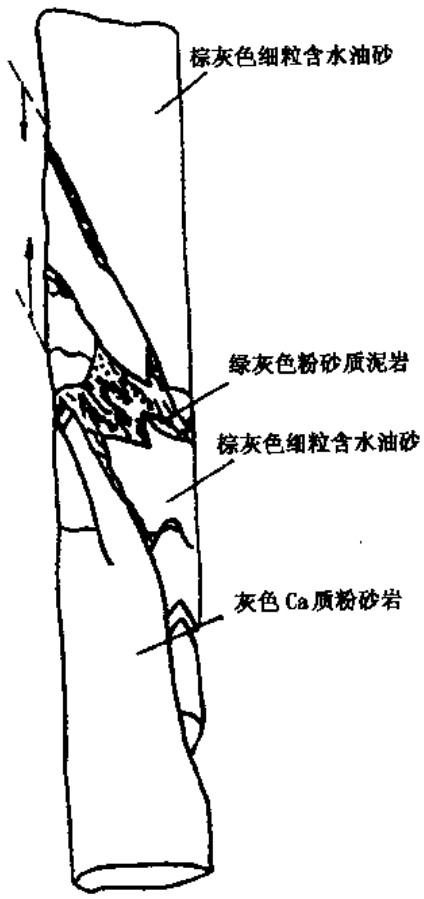


图 2－13　升 169 井断层破碎带素描图（据大庆石油管理局研究院，1991）

第三章　断层封闭性的物理模拟实验

第一节　断层涂抹层分布规律的物理模拟实验

为研究断层带中断层涂抹层的展布规律及其与断移地层岩性、厚度、成岩程度的关系，为断层封闭性的评价奠定基础，本节着重介绍了泥岩涂抹形成的物理模拟实验。

主要控制断层封闭能力的是断裂带毛细管性质与非断裂带储层毛细管性质的差异，如果二者差异很大，则断裂本身可以起封闭作用。有3种形成机理可以引起断裂毛细管性质不同于非断裂岩石（Watts，1987；Knipe，1992）。

泥岩涂抹是通过泥页岩岩层的泥化并进入发展中的断层带而形成，导致沿原页岩层上下盘断壁间的削截砂岩层上形成的一较薄泥质层（如图3－1所示）。它的发育程度直接影响着断层对油气藏的侧向封堵能力，是断层带中广泛发育着的一种断层构造碎裂岩之一，是地壳岩石受力破坏以至位移的产物。泥岩涂抹于断面之上，使得断层面具有了很高的排替压力。作为一种充填物质进入断裂带内部，它是盖层封闭能力在断层内部的改造和再现。从某种程度上说，可以把它看成是泥岩厚度在断层带内的变形和延伸。

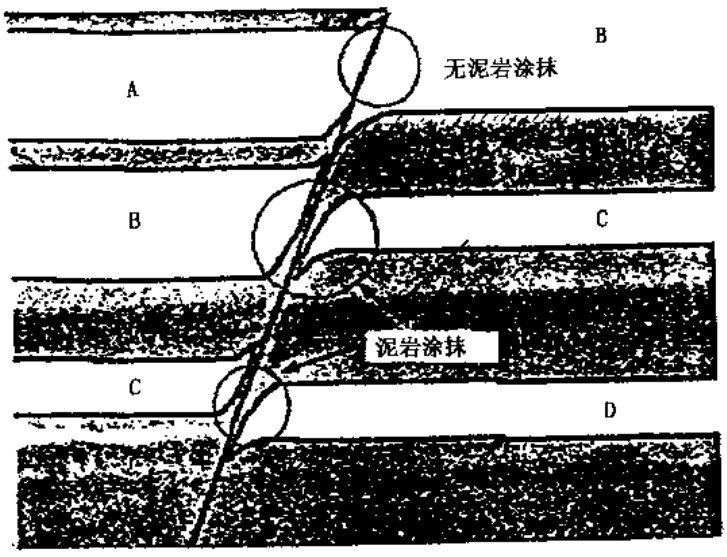


图3－1　泥岩涂抹概念的由来（据James.C.Benneke，1995）

对于高圈闭来说，Robert R .Rerg认为在与沉积作用同时进行的倾向滑动中沿断层面处的储层界面注入了泥岩涂抹填塞物。这种物质可视为钻探过程中沉积于渗透砂岩上的泥饼的类似产物，它成为石油运移的广布的封堵层，尤其是对油气的侧向封闭有重要的作用。

涂抹层不仅起侧向封闭作用，而且在垂向上遮挡油气也有重要的作用。如图3－2a所示，在砂砂接触，油气呈“之”字型向上运移时，可以把断层看成是垂向开启的。而当断层

带中发育有泥岩涂抹时，它不但遮挡了油气的侧向运移，而且阻止了油气作垂向的运移，使得油气被封存起来，如图 3－2b 所示。

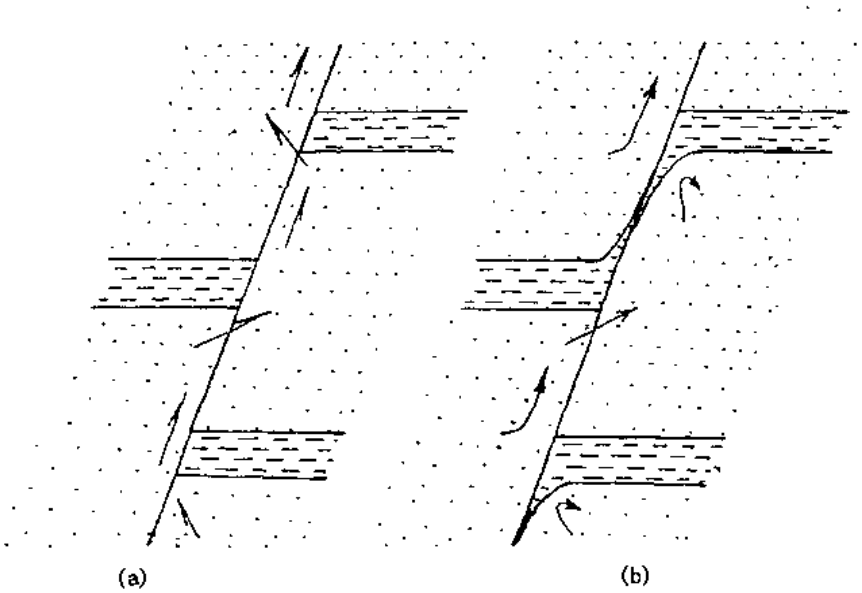


图 3－2　涂抹层的分布与油气运移关系示意图

为了判别和预测因泥岩涂抹形成的封闭性，需将其机理与地下可测定的性质相联系（如岩性和断距），任何预测方法离不开常规的、容易得到的数据。目前，对于预测泥岩涂抹封闭能力的算法国内外许多学者在此方面作了很多工作。

Weber 等（1978）描述了德国境内沿出露生长断层的页岩涂抹之后，Lindsay 等（1993）描述了已石化的砂页岩层露头中的页岩涂抹。在单一页岩错断过程中，页岩是逐渐泥化且形成的页岩涂抹厚度随断层位移的加大而变薄，因此，认为页岩涂抹的空间连续性与页岩厚度比例及断层位移有关（Bowier 等，1989；Lindsay 等，1993），如果这样的断层带形成了油气聚集的断层封闭，那么封闭与断层位移及断裂地层段砂页岩比率间可能存在的相关关系，这种关系由以前的研究者们在几个不同的地区得以证实（Weher，1987；Bowier 等，1989；Knott，1993）。

Bouvier 等（1989）在尼罗河三角洲 Nun River 油田，用泥岩涂抹势（CSP）作为在断层的砂－砂对置区的一种估计方法。Lehrer 和 Pilaar（1996）从水动力的角度，认为由泥或页岩层中流出的流体应与其厚度的平方成正比，提出了涂抹系数的概念。Lindsay 等（1993）提出了页岩涂抹系数（SSF）概念。G. Yielding 等（1997）定义了一个称为页岩断层泥比率（SGR）的描述概念。

本节从多次的物理模拟实验着手，根据对滑动方式、涂抹过程的大量观测，在总体上为断层泥的分布规律提出了拟合数学表达式，并利用已知的资料对提出的经验拟合公式做了详细检验。与力学分析和数值模拟这两种方法相比，物理模拟方法的明显不同之处在于这种方法是按照近似原理选择实验材料，确定载荷条件和变形条件，在自制物理模型装置上进行断层泥形成机制模拟。

一、实验原理及装置

1. 实验原理

(1) 材料塑性变形开始时的应力状态

设在应力作用下的物体内有一点 P，在通过该点 P 的每个平面单元上，有效应力矢量均有明确规定的正应力分量 σ_n 和切向应力分量 τ。那么物体在 P 点就可能发生塑性变形：

$$|\tau| = \tau_0 + \sigma_n^1 \tan\varphi, \text{或} |\tau| = \tau_0 + \mu\sigma_n^1 \qquad (3-1)$$

式中 τ——临界剪应力；

μ——内摩擦系数（$\mu = \tan\varphi$）；

φ——内摩擦角。

临界值 τ_0 是抗剪强度，同时又是 $|\tau| - \sigma_n^1 \tan\varphi$ 所能达到的最大值（图 3－3，图 3－4）。

（2）滑移和双滑移模式

库伦判据中有关塑性变形本身的模式称为滑移和双滑移模式。按照库伦－莫尔理论，粘性或非粘性摩擦材料塑性变形和破坏是由沿方向明显的不连续滑移而引起的。在材料处于极限状态的任何点上，存在着一对可能的滑移单元，在这两个单元上，库伦屈服条件得到满足。这一对共轭单元的交线平行于中间主应力（σ_n^1）方向（图 3－5）。

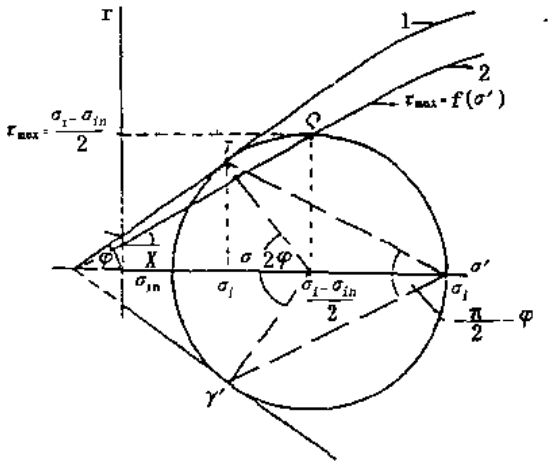


图 3－3 二维莫尔应力圆（表示临界应力状态）

1—库伦－莫尔临界线；2—抗剪强度线

图中的箭头用来指示沿这一对单元可能的运动方向，这种方向与作用在这些单元上的剪应力方向一致，因此，依据机械功的定义，剪应力由于引起滑移而作功，滑移单元迹线与最大主应力方向之间的简单角度关系已为大量的实验和天然存在的滑移现象的观测所证实。沿滑移线滑移可引起两种变形：沿单个（一个或几个）滑移线（或面 S_1、S_2）滑移的不连续变形（破裂作用）和沿间距密集的两组滑移线（面）的连续变形。

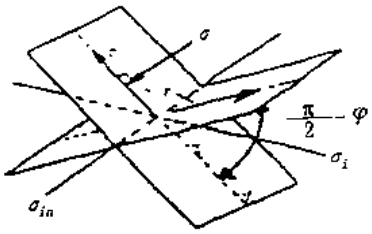


图 3－4 自然空间里的平面单元

（与图 3－2 应力平面内切线点（T，T'）相关）

图 3－6 中说明了这种沿两组共轭滑移面的滑移，滑移沿两组方向的面发生，意味着主应力方向不变，而且整个材料具有不变的内摩擦角。然而，更一般的情况是，主应力方向或摩擦抗剪强度在载荷达到极限状态的岩体中可能有所变化，这种情况下，变形和破裂将由沿着曲面的滑移作用来实现。

（3）断层摩擦定律

在较低围压下，在岩石中发育剪破裂之后，由于岩石沿破裂面失去内聚力，该面成为软弱面，随后沿该破裂面发生摩擦滑动。断层摩擦滑动同样涉及到某些物理及力学过程的微观机制。

Amonton 定律说明：在低围压下，为使滑移开始所需的平行于断层面的切向力与正交于断层的法向力成正比，$\bar{\mu}$ 为滑动摩擦系数：

$$|\tau| = \bar{\mu}\sigma_n \qquad (3-2)$$

滑动摩擦系数通常大于内摩擦系数（μ），因此，在低围压力下，为产生滑动所要求的差应力（$\sigma_1 - \sigma_3$）比为形成另一个破裂所要求的差应力要小，使得断裂作用往往沿先断裂面

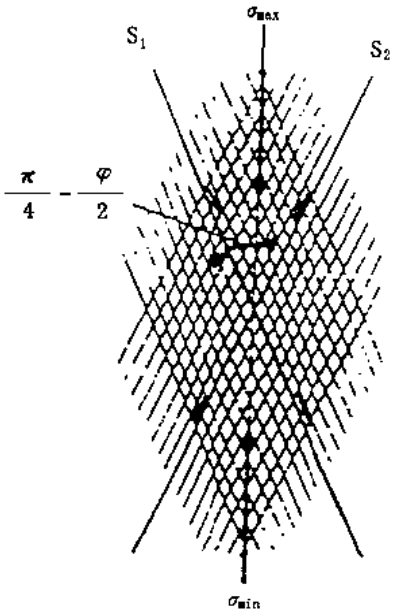


图 3－5　塑性变形和破坏（由沿滑移线滑移引起）

不连续变形（破裂作用）沿单个滑移线（S_1，S_2）滑移，连续变形；沿两组密集的滑移线连续滑移

滑移。

根据上述原理可以看出，断层倾角与泥岩涂抹程度没有直接关系，而是在考虑砂泥岩层的厚度时，要利用倾角（α）将砂泥岩的实际厚度（H）换算成断层带内的有效厚度（$L=H/\sin\alpha$）。因此，本实验中，一般采用垂直断层的形式进行涂抹实验（图 3－7）。

2．实验装置

本装置是由底座、剪切施力杆、正应力施力杆、及滑动箱（下半部固定，上半部可滑动）组成（图 3－8）。

材料为砂岩层（石英砂、粘土、膨润土）和泥岩层（粘土、膨润土、水泥）组成，经过按比例搅拌，烘干以后制作而成。

二、实验结果

泥岩涂抹已在实验室被证实，在露头、岩心中观察到，在测井解释中也已被推断。泥岩涂抹作用程度主要随页岩厚度、页岩与所研究点的距离而变化，单层页岩涂抹作用随页岩厚度增加和页岩与研究点距离的减少而增加，任意一点的泥岩涂抹作用是所有经过该点的页岩的共同作用。

在理论上，泥岩涂抹程度随页岩的可塑性、断层角度、有效应力等而变化，还与页岩厚度和页岩与所研究

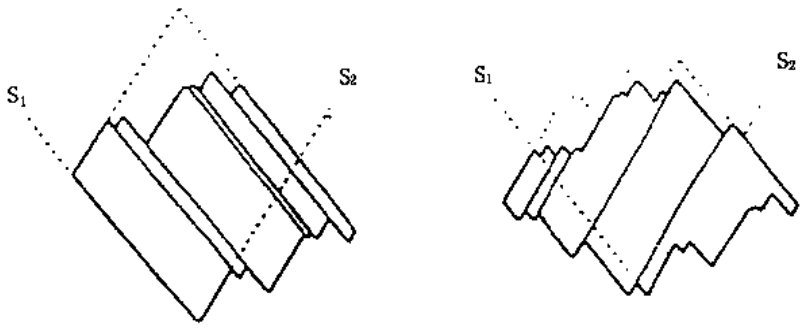


图 3－6　平面变形（由“双滑移”引起）（据 de Joselin，1959）

点之间的距离有关。由于受资料的限制，确定这些次要因素就非常困难，本节从实验室的角度，提取其中的显著性因素，寻找涂抹层在地下的分布规律。

1．涂抹层的形成

伴随断层发育的多条泥岩涂抹带，形成了一个剪切带。由于靠近断层两侧的剪切应力，使得泥岩塑性流动主要靠剪切应力逐渐拉开，沿断层面的拉张作用提供了塑性页岩流入断层带的空间，在随后的错动过程中，粘土进一步塑性流动。

图 3－9 当 b 点被拉断时，a、c 点就变得相对稳定，此时泥岩涂抹的发育是要靠摩擦力和挤压力来维持，直至断层停止错动为止。

由于塑性变形作用减少了沿断层的摩擦阻力，邻近剪切带的砂岩没有明显的涂抹现象，

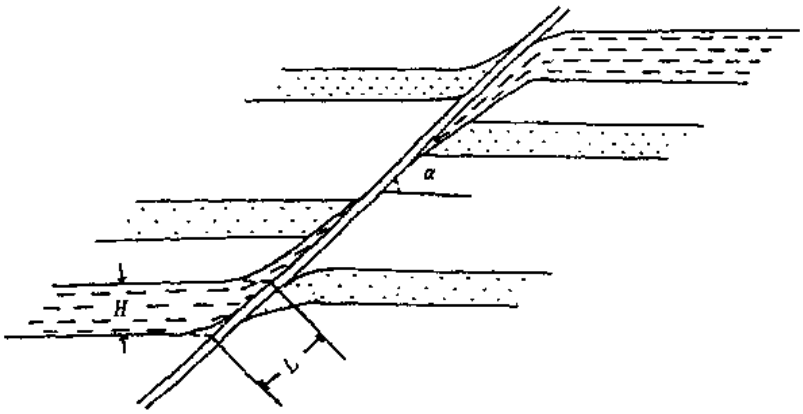


图 3－7　有效涂抹厚度转换关系图

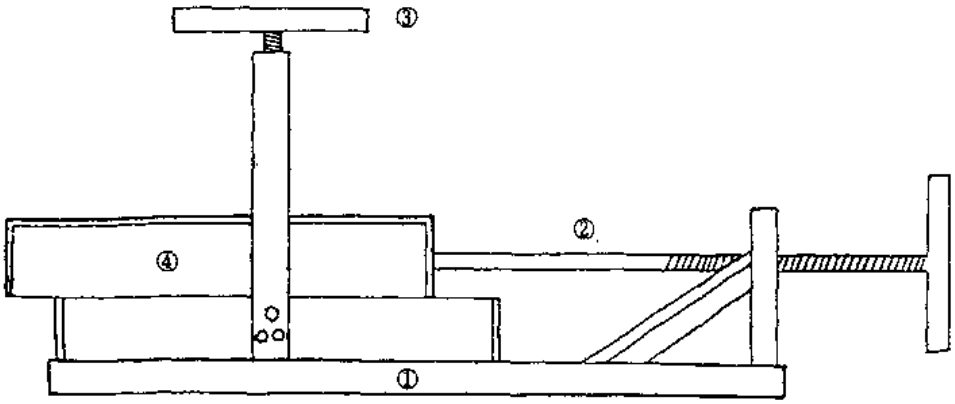


图 3－8　实验装置简图

①—底座；②—剪切施力杆；③—正应力施力杆；④—滑动箱

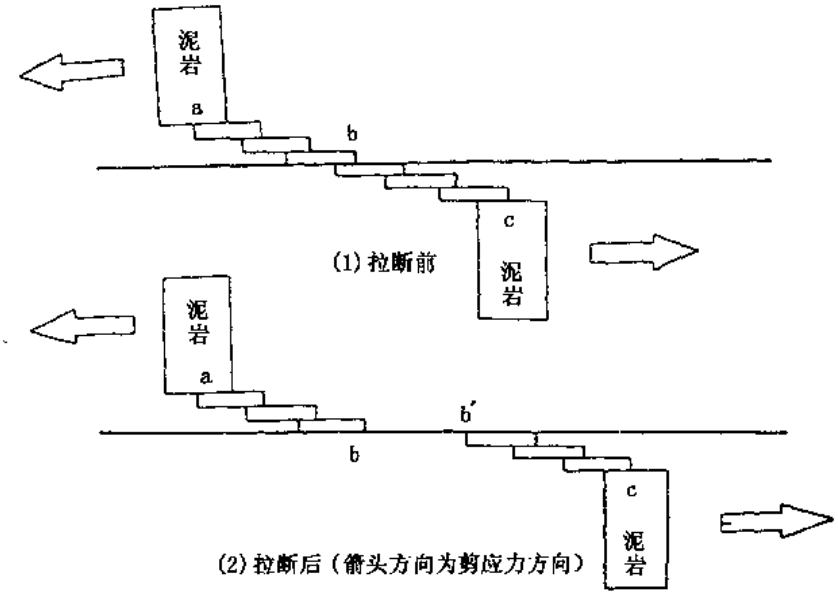


图 3－9　泥岩涂抹层成因示意图

但是，由于砂岩较硬，沿断层的摩擦剪切作用使之产生有规律的裂缝和微小弯曲（图 3－10、图 3－11）。有的脆性较大的砂岩，破碎后形成楔状体塞入剪切带，同时给邻近的泥岩涂抹留出空间。泥岩层被错开以后，涂抹层沿断层错动方向上在被动盘一侧由厚变薄，在主动盘一侧由薄变厚，直至涂抹厚度达到最大。

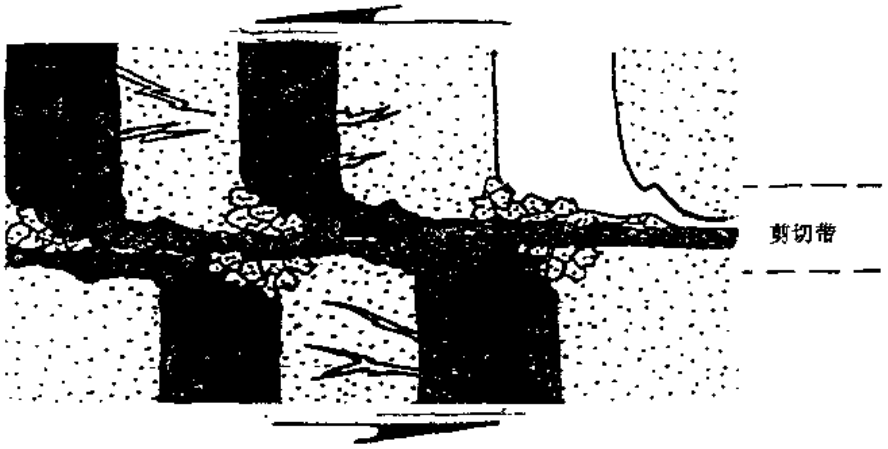


图 3－10　泥岩涂抹与砂岩楔体关系图

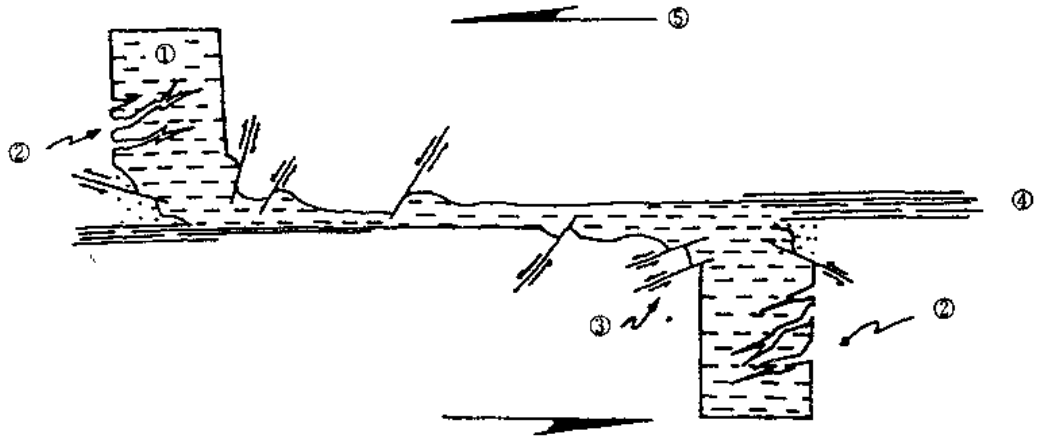


图 3－11　泥岩涂抹伴生裂缝分布图

①—泥岩；②—张性裂缝；③—剪性裂缝；④—剪切带；⑤—错动方向

2. 涂抹层的分布

（1）涂抹层分类

从实验室和野外地质分析，结合国内外已知资料，认为涂抹层在剖面上分为 3 种类型，这几种类型与其形成机理有关。

①剪切型：此种类型的涂抹类似于（Weber 等，1978）图 3－12 描述的那样，涂抹层的厚度通常随着与原泥岩层距离的增加而减小，在上下盘对应层的中间位置达到最薄。它主要发生在断距相对较大，断层倾角较缓，断面较光滑的断层处。剖面上可以明显地看出，泥岩涂抹层分布广泛，厚度展布均匀，是遮挡油气的良好隔层。在尼日尔河三角洲地区，此种类型的泥岩涂抹比较发育，对该区的油气藏保存有着重要的作用。

②削截型：削截型也是碎屑岩中一种较为常见的涂抹类型，它是砂岩层滑过泥页岩时，磨蚀、削截作用所形成的泥页岩薄层。当原泥岩层较厚，断距较小时，削截型涂抹层比较发育，断距逐渐增大，涂抹层本身也逐渐被削蚀掉，如图 3－13 所示。

③填塞型：填塞型涂抹是断层在错断过程中的一种局部反应，是涂抹层对砂岩层所产生裂缝的局部充填。这种类型往往不易预测，也有些学者称其为侵入型涂抹，如图 3－14 所示。

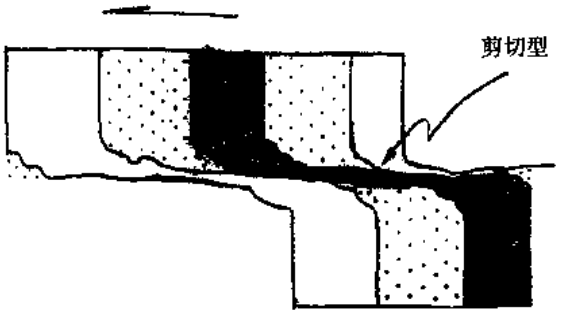


图 3－12　剪切型泥岩涂抹示意图

(2) 涂抹层的分布

涂抹层在空间上的分布并不是理想的那样规则，主要受泥岩厚度、断距、主应力方向及断面粗糙程度的影响（图 3－15），剖面上，在地层被错动的方向上，涂抹层由厚变薄，并

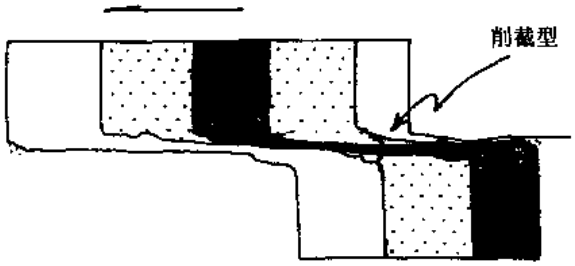


图 3－13　削截型泥岩涂抹示意图

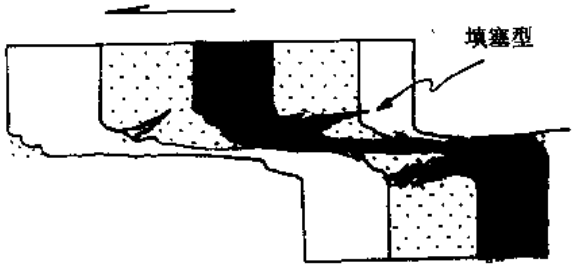


图 3－14　填塞型泥岩涂抹示意图

且在断层带中涂抹层拖拽越远，其厚度越薄。在涂抹层末端分布有拖拽残留的透镜状碎块。在平面上，当砂岩因脆性大而在断面上形成凹坑，或断层带空间较大时，涂抹层便有机会填充进去，发育成较厚涂抹层，相反则较薄，甚至不发育（图 3－15）。

3. 涂抹层的连续性与断层断距的关系

当断层断距较大时，涂抹层的连续性变差，并且在涂抹层末端分布有拖拽残留的透镜状碎块，这只是针对某一个泥岩层所产生的涂抹层而言的。当存在几组涂抹层时，泥岩涂抹的连续性还要受泥地比的控制，如果泥地比值较大，涂抹层的连续性受断距的影响则较小，反之较大。当断层距较小时，涂抹层的连续性较好（图 3－16）。

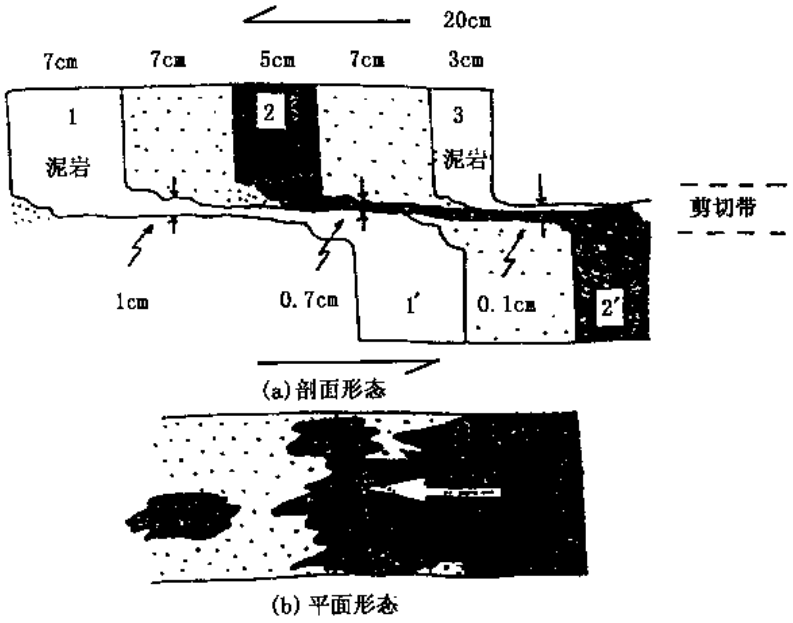
4. 涂抹现象与断层活动时间的关系

实验结果表明，断层的活动性控制着涂抹层的建设与破坏，往往断层初期的活动对涂抹层的建设起积极的作用，继续加载，使断距增大，随着断层两盘同一泥岩层错动距离的增加，涂抹层逐渐减薄或被拉断或被削截。这说明沿原断裂构造迹线再次活动的断层，一般不再产生较发育的涂抹层，而是对先期产生的涂抹层起着破坏作用（图 3－17）。

当泥岩处于塑性状态时的断层活动泥岩涂抹非常发育，这说明，同生断层在泥质沉积物未成岩之前，易形成涂抹层。

泥岩处于脆性状态时，断层涂抹层不发育，说明非同生断层不易形成泥岩涂抹现象。

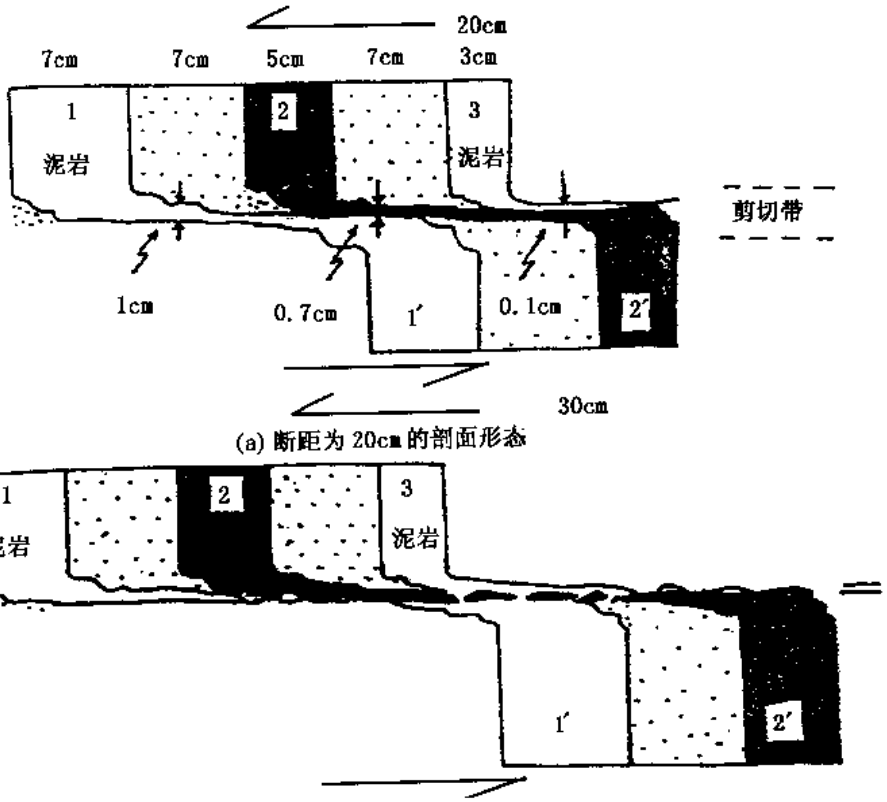
同期实验的材料，泥岩厚度不同，涂抹层的发育情况不同。薄层泥岩由于失水量大而变脆，实验时一般不形成或极少形成涂抹现象，而厚层泥岩当烘干后，外部显脆性，但内部失



(a)剖面形态

(b) 平面形态

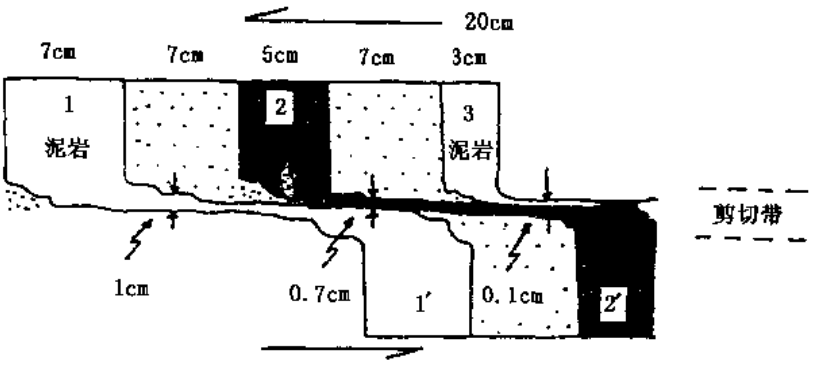
图 3－15　泥岩涂抹层分布图



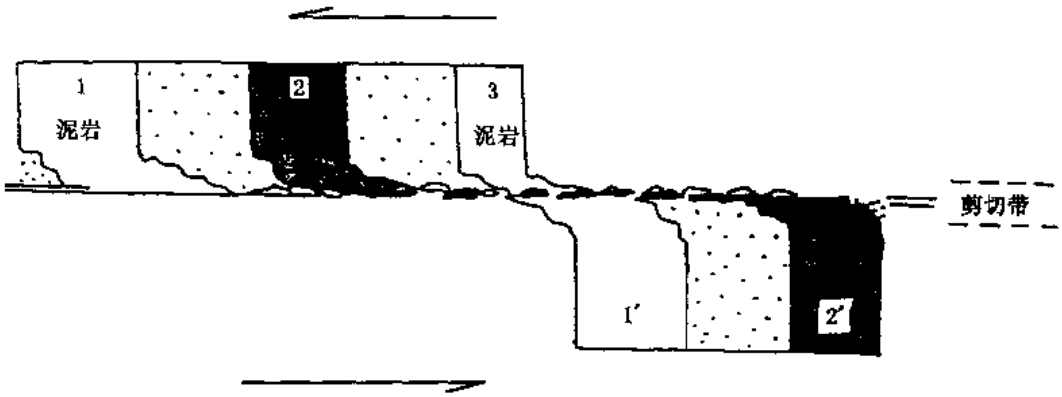
(a) 断距为 20cm 的剖面形态

(b) 断距为 30cm 的剖面形态

图 3－16　泥岩涂抹的连续性与断层断距关系图



(a) 先期发育的泥岩涂抹现象



(b) 后期错动对涂抹层的破坏

图 3－17　间歇活动断层的泥岩涂抹剖面示意图

水量小仍显塑性，实验时涂抹层发育，这一现象说明，当泥岩层处于欠压实状态时，断层活动易形成涂抹层。

如果事先在所有的砂岩层段中部垂直于层面锯半个口，如图 3－18 所示，以此作为先期断裂构型，观察在此基础上，涂抹层的发育程度，结果如图 3－18 所示。

从图中可以看出，断层再次错动时，砂岩层没有先期的那种强烈拉张和摩擦作用，没有形成明显的剪切带，这时由于砂岩挤占了空间，使得粘土涂抹失去填充机会。这说明断层的再次活动不形成或很少形成断裂充填，所以，多期活动的断层，其断层泥主要是前期的再改造。

5. 伴生裂缝的分布

泥岩涂抹只存在于泥岩层位移经过的断层部分，它在生长延伸过程中，受正应力、切应力等力的交互作用，使得涂抹层本身发育有许多伴生微裂缝（图 3－11），主要微裂缝有两组，一组是平行于断面的裂缝，它向着相对错动的方向张开（图 3－13），另一组是沿断面法线方向的裂缝，这组裂缝不太发育，主要出现在泥涂抹层与泥岩层相接的内弯曲处（图 3－14）。除此之外，砂岩楔状体部分，也发育有类似的裂缝（图 3－11）。

三、数据处理与分析

尽管上述诸多因素影响着涂抹层的发育，但经实验统计和处理后发现，影响涂抹层发育

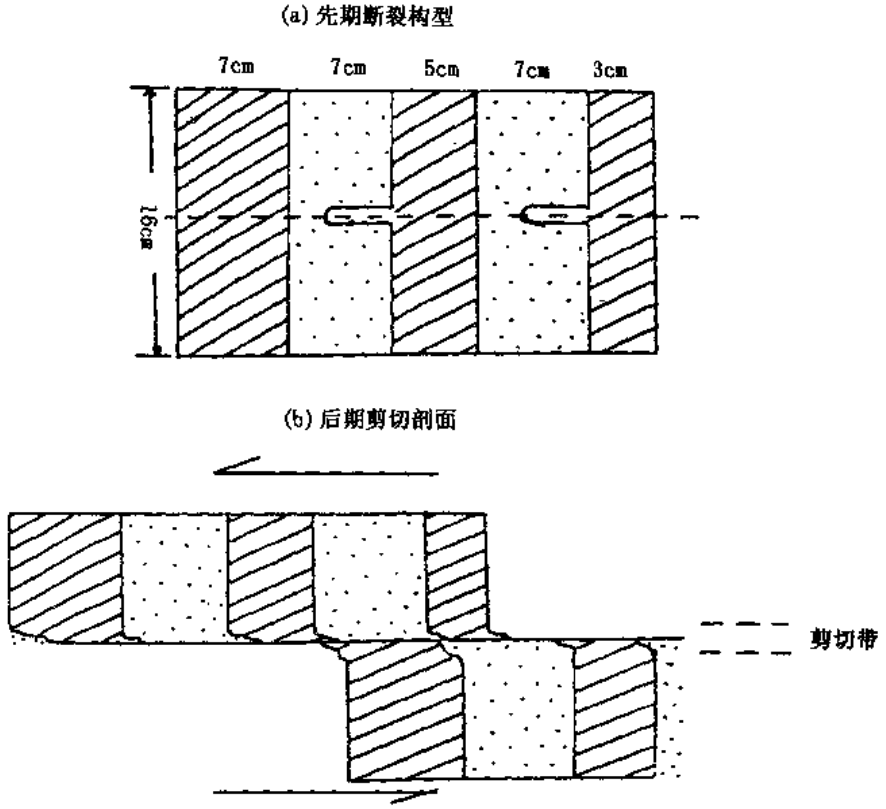


图 3－18　先期断裂后期剪切泥岩涂抹示意图

的关键因素是泥岩本身的厚度、岩层的塑性强度和断距。在泥岩处于塑性状态时，泥岩厚度和断距对泥岩涂抹长度影响的方差分析见表 3－1、表 3－2。

表 3－1　泥岩涂抹长度与泥岩厚度及断距关系实验数据统计表

泥岩厚度（cm） 涂抹层长度 断距（cm）	B_1（3.5）	B_2（5）	B_3（5.5）	B_4（7）	合计
A_1（20）	3.7	4.7	5	5.7	19.1
A_2（17）	3.6	4.3	4.5	5.5	17.9
A_3（14）	3.3	4.5	4	5	16.8
合计	10.6	13.5	13.5	16.2	53.8

表 3－2　断距和泥岩厚度因素显著性方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 比
因素 A（断距）	0.67	2	0.34	8.5（F_A）
因素 B（泥岩厚度）	5.23	3	1.74	43.5（F_B）
误　差	0.26	6	0.04	
总　和	6.16	11		

取显著水平为 α，可得假设 $H_{01}:\alpha_1=\alpha_2+\alpha_T=0$ 的拒绝域为：$F_A=\frac{\overline{S}_A}{\overline{S}_B}\geqslant F_\alpha(r-1,(r-1)(s-1))=F_\alpha(2,6)$。假设 $H_{02}:\beta_1=\beta_2=\cdots\beta_s=0$ 的拒绝域为：$F_B=\frac{\overline{S}_B}{\overline{S}_E}\geqslant F_\alpha(s-1,(r-1)(s-1))=F_\alpha(3,6)$ 由于 $F_{0.05}(2.6)=5.14<F_A, F_{0.05}(3.6)=4.76<F_B$，所以在水平 $\alpha=0.05$ 下，拒绝假设 H_{01}，H_{02}，即断距、泥岩厚度对涂抹长度的影响都是显著的，又由于 F_B 远大于 F_A，因此泥岩厚度对涂抹长度的影响较断距更显著。

实验中，本节还提取了泥岩含水量和砂岩的粘土含量的数据信息，用以表征砂泥岩的塑性强度，并且对两种因素进行了无交互作用双因素方差分析（表 3－3、表 3－4），结果是 $F_A>F_\alpha(3.9)=5.14, F_B<F_\beta(3.9)=5.14$，从而可以看出，泥岩含水量对涂抹厚度的影响是显著的，而砂岩中粘土含量对涂抹长度的影响则不显著。

表 3－3　泥岩涂抹长度与泥岩含量及砂岩粘土含量关系数据统计表

泥岩厚度（cm） 涂抹层长度 断距（cm）	B_1（16.73）	B_2（17.97）	B_3（18.60）	B_4（19.91）	合计
A_1（32.32）	2.6	4.5	4.5	2.5	14.1
A_2（34.27）	4.7	4.7	3.7	4.3	17.4
A_3（36.72）	5.0	4.2	5.6	6.5	21.3
A_4（38.54）	7.0	6.5	9.8	9.0	32.3
合计	19.3	19.9	23.6	22.3	85.1

表 3－4　泥岩含量与砂岩粘土含量因素显著性方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 比
因素 A（泥岩含水量）	47.01	3	15.67	12.05
因素 B（砂岩粘土含量）	3.06	3	1.02	0.78
误　差	11.7	9	1.30	
总　和	61.78	15		

从图 3－19a 中可以看出，泥岩涂抹的厚度随着断距减小和泥岩厚度的增加而增大；泥岩涂抹的长度随着断距和泥岩厚度的增加而变长，而且从总体趋势看，泥岩厚度起主要作用。

泥岩厚度、断距、涂抹长度 3 者关系及泥岩厚度、断距、涂抹厚度 3 者关系的理想模型如图 3－19b 所示，与图 3－19a 相比较，说明涂抹长度、涂抹厚度随前两者因素（泥岩厚度、断距）的变化而规律性变化，并且因其他因素的影响而使“网格”出现不一致的上隆和下洼。

将泥岩厚度、泥岩涂抹长度及泥岩厚度、泥岩涂抹厚度分别点到平面图上（图 3－20，图 3－21），图上散点的分布规律体现了二者的对应关系变化，相关系数分别为 0.61 和 0.55。由于涂抹长度、涂抹厚度不仅受着泥岩厚度的影响，同时还受断距、砂泥岩的塑性程度差、断面压力等其他因素的影响，因此相关系数不是很大，但却反映了一个总体趋势，并表现出较好的函数关系，经计算机拟合以后，所得涂抹长度与泥岩厚度拟合关系式为：

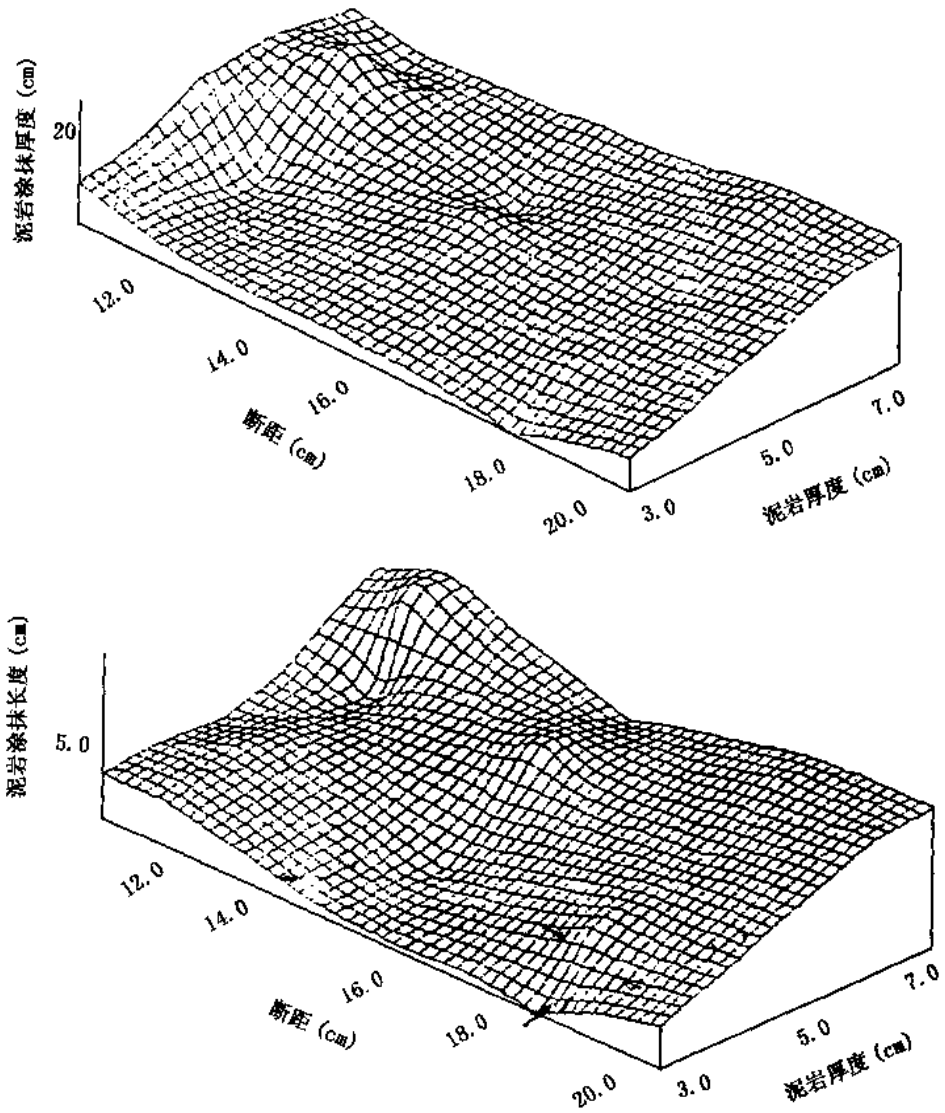


图 3－19a　泥岩涂抹长度、泥岩涂抹厚度与泥岩厚度及断距关系网状图

$$L_s = 1.37H_m^{0.79} \tag{3-3}$$

式中　L_s——泥岩涂抹长度（m）；

H_m——产生泥岩涂抹的泥岩层厚度（m）。

涂抹厚度与泥岩厚度的拟合关系式为：

$$H_s = 0.31H_m^{0.87} \tag{3-4}$$

式中　H_s——单一泥岩涂抹层厚度（同一涂抹层的平均厚度值）（m）；

H_m——产生泥岩涂抹的泥岩地层厚度（m）。

上述公式是某一层泥岩所产生的泥岩涂抹情况，但实际地质条件下是一系列泥岩层的叠置，并都会产生泥岩涂抹，经实验研究认为，在研究某一点的泥岩涂抹厚度时，其厚度为经过该点的所有泥岩层所产生的涂抹层的厚度之和，即

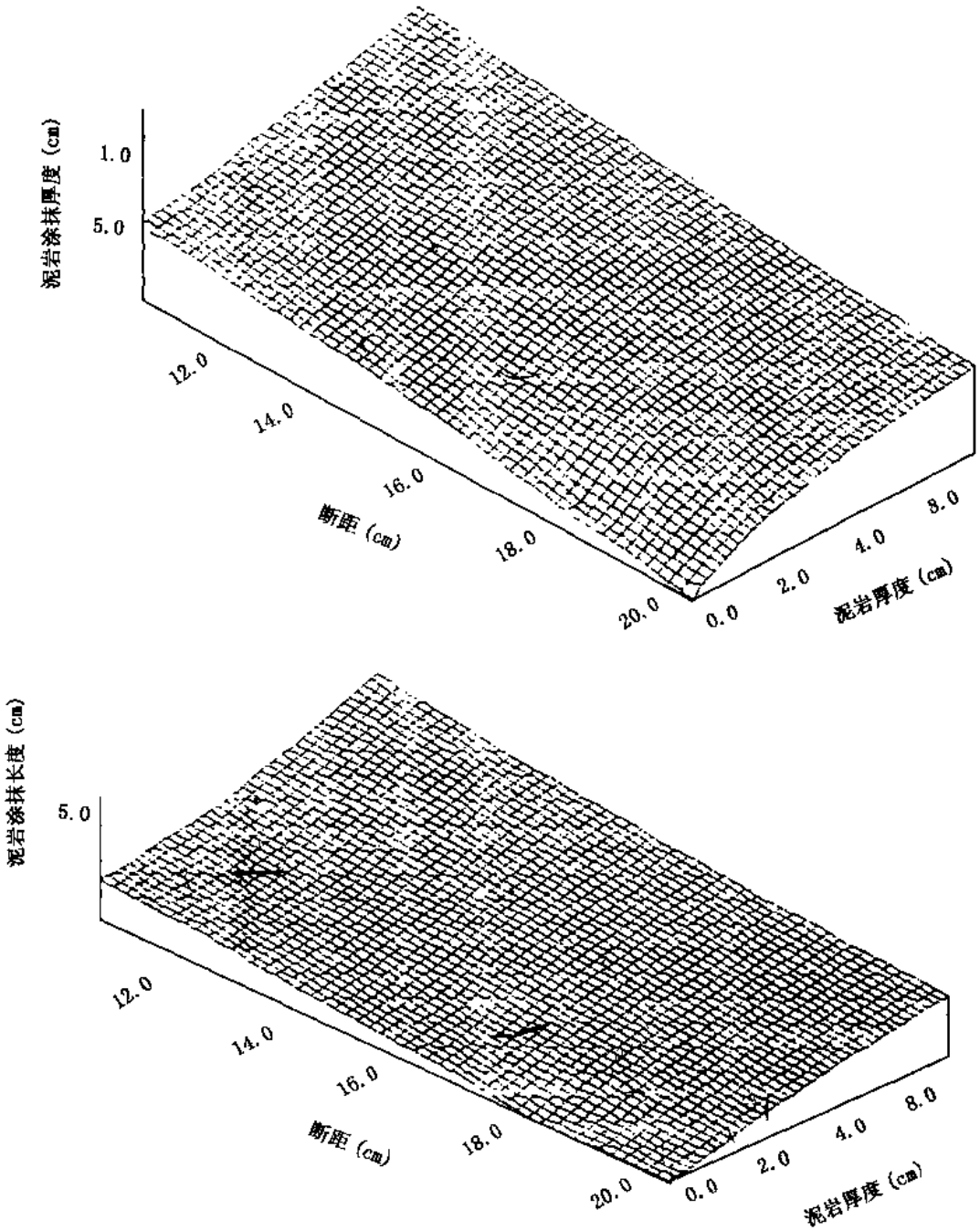


图 3－19b　泥岩涂抹长度、泥岩涂抹厚度与泥岩厚度及断距理想模式图

$$H_{ns} = \sum_{i=1}^{n} 0.023 H_{mi}^{0.95} \tag{3-5}$$

式中　H_{ns}——涂抹层的总厚度（m）；

H_{mi}——某一层产生泥岩涂抹的泥岩层厚度（m）；

n——断移的地层数。

从泥岩涂抹长度、厚度与断距的关系图上可以看出，泥岩涂抹长度随着断距的增加有增

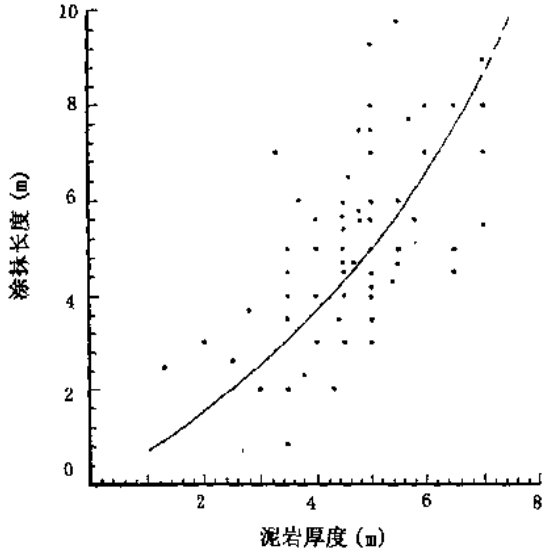


图 3－20　涂抹长度与泥岩层厚度关系图

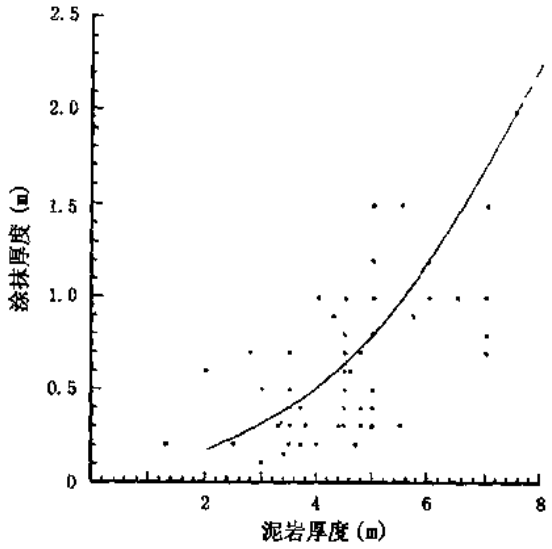


图 3－21　涂抹厚度与泥岩层厚度关系图

加的趋势，而泥岩涂抹厚度随着断距的增加而减薄，如图 3－22、图 3－23 所示，由于受着泥岩厚度及其塑性显著性的影响，所测得的数据点相关系数并不是很大，泥岩涂抹长度与断

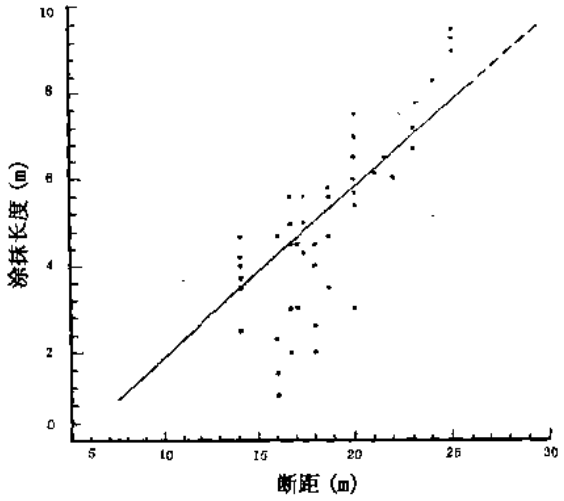


图 3－22　涂抹长度与断距关系图

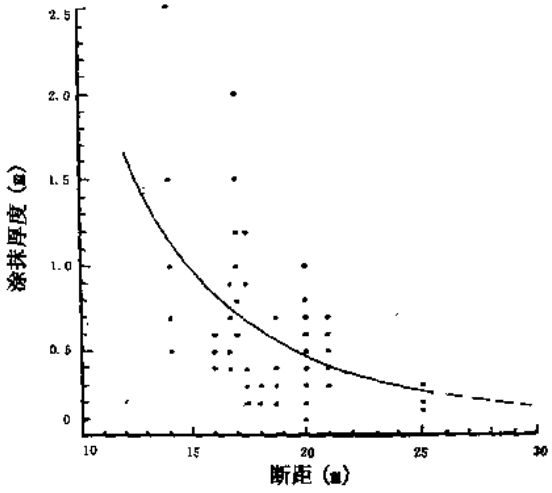


图 3－23　涂抹厚度与断距关系图

距的相关系数为 0.63，泥岩涂抹厚度与断距的相关系数为 0.71，对应的拟合经验公式分别为：

$$L_s = 1.61 + 0.31T_{hr} \tag{3-6}$$

$$H_s = 1/(0.297T_{hr} - 2.70) \tag{3-7}$$

式中　L_s——泥岩涂抹长度；

H_s——泥岩涂抹厚度；

T_{hr}——断距。

通过分析泥岩中含水量（塑性参数）与泥岩涂抹形态的关系，建立了如图 3－24、图 3

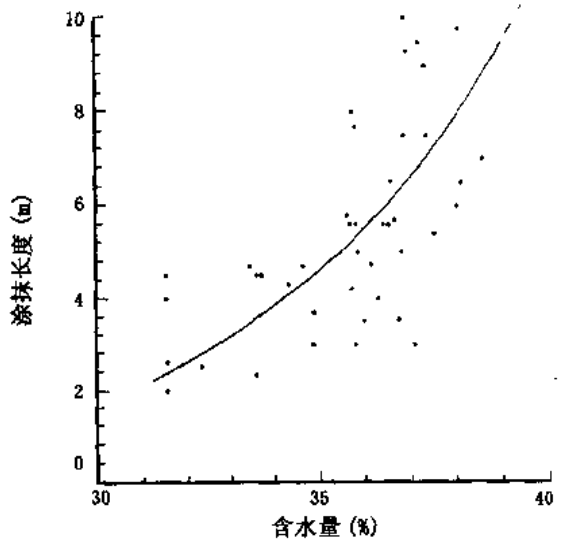


图 3－24　涂抹长度与含水量关系图

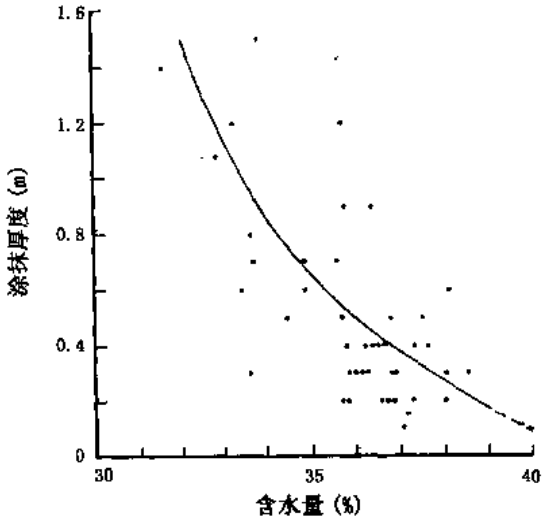


图 3－25　涂抹厚度与含水量关系图

－25 所示的拟合曲线关系。泥岩涂抹长度因泥岩本身含水量的增加，塑性流动能力增强，因此泥岩涂抹长度随着泥岩含水量的增加而增加。正因为塑性流动能力的增强，泥岩涂抹层的厚度则随之而变薄，对应的拟合经验公式分别为：

$$L_s = 0.0087 \times 1.19 S_w \tag{3-8}$$

$$H_s = 0.022 S_w^2 - 1.72 S_w + 34.4 \tag{3-9}$$

式中　L_s——泥岩涂抹层长度（m）；

H_s——泥岩涂抹层厚度（m）；

S_w——泥岩含水量（%）。

对以上数据进行多元回归分析，得到涂抹层厚度、长度与各参数间的关系统计规律表达式为：

$$H_s = H_m^{1.2248} S_w^{0.1504} T_{hr}^{-1.245} \tag{3-10}$$

$$L_s = H_m^{0.9405} S_w^{0.4644} T_{hr}^{0.05128} \tag{3-11}$$

值得注意的是，这些公式的前提条件是：①所研究的泥岩层本身是完全错开的；②所研究的涂抹层是断层早期活动时形成的。此外，当断距较大，使得涂抹层不连续时，涂抹层的长度为断裂带内所有泥岩层产生的所有涂抹层之和。公式中的涂抹厚度为同一涂抹层的平均厚度值。

实际地质资料表明，在断裂带中，泥岩涂抹不但分布广泛，而且厚度较大，以东营凹陷王家岗油田通 61 断裂为例，钻遇该断面中部的井在断层附近均存在一定厚度的泥质涂抹层，作为良好的隔层，涂抹层平均厚约 7.6m（表 3－5），这是该地区封闭油气的主要隔层。

表 3－5　通 61 断层的断层泥厚度统计表

井　号	11	90	70	45	121	83	84	64
厚度（m）	15	6	8	7	7	3	5	10

第二节　断层封闭时充填物泥质含量下限的物理模拟实验

断裂带填充物是断层断移地层发生破碎而挤入断裂带中形成的，因此断裂带填充物是来自不同断移地层的砂、泥混杂物。在这种情况下，填充物中泥质含量越大，断层封闭的可能性就越大。因为泥质含量越大，断裂带孔、渗透性越差，断裂带排替压力越高，断层封闭性越好。究竟断裂带填充物中泥质含量达到多大时，断裂带才是封闭的，通过实际地质资料难以知晓，只有开展物理模拟实验获取理论值，才有可能回答这一问题。因此利用不同泥质含量砂泥混合物模拟断裂带填充物质，以此寻找断裂带封闭与断裂带中泥质含量之间的定量关系。

一、实验装置

模拟实验装置主要由实验箱、千斤顶、双柱塞泵、ZL5 智能测量仪等组成，如图 3－26 所示。

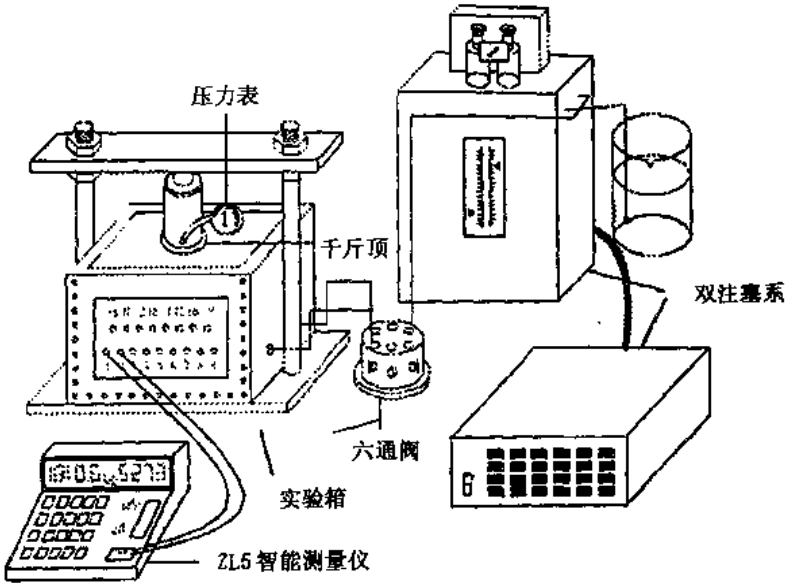


图 3－26　实验装置简图

1．实验箱

实验箱是本次模拟实验的主体，是断层垂向封闭性地质模型建立的地方。它是由 5cm 厚的钢板构成的长 80cm、宽 50cm、高 50cm 的一个长方箱体。其上盖是活的，可以打开，其内的地质模型均由此装入，还可以通过此盖对箱内施加压力。箱体的正面在钢板内镶有一块透明的玻璃板，通过它可以观察实验箱内所发生的实验变化，观察原油是否沿断裂带发生了运移。在其右下角留有注油口，在实验过程中，原油就是由此注入箱体内的，详细特征见图 3－26 所示。

2．立式液压千斤顶

实验过程中置于实验箱盖之上，施加的压力作用于实验模型上，相当于地层中的负荷压力，最高压力为 60MPa，自重 28kg。

3.SZB－1 型双柱塞泵

注油装置。

4.ZL5 智能测量仪

用来测量模型内电极对间的阻抗值，从而间接监测电极对间的含油饱和度变化情况，仪器精度达 5 位有效数字。

二、实验过程

1. 实验材料

以砂泥混杂物模拟断裂带填充物满足断层断裂带充填规律，不同泥质含量断裂带相并置，可寻找封闭性与断裂带中泥质含量之间的定量关系。前期实验研究表明不同粒度级别的石英砂与泥混合，其达到封闭油气的泥质含量界限是不同的。为此，选择与部颁粒度标准（十进制）相对应的 5 种石英砂来开展实验，如表 3－6 所示。

表 3－6　实验材料选用的石英砂与粒度对应关系

石英砂目数	270	100～200	50～100	20～40	10～20
对应粒度级别	粉砂岩	细砂岩	中砂岩	粗砂岩	砾　岩

①泥岩采用建筑用石膏粉和黄土按 1∶5 比例混合，以便增加其硬度，每 10kg 干料加 6.5L1％矿化水混合而成的塑性材料。

②断裂带充填物用不同目石英砂（270 目、100～200 目、50～100 目、20～40 目和 10～20 目）和 1∶5 膏泥混合物加饱含 1％NaCl 矿化水混合而成。

③底部储油层和顶部砂层用饱含水量 1％矿化水的石英砂充填。

④煤油中加入少量原油（5∶1），加深颜色以便观察。

2. 安装实验

①按上述要求加工和备好足量原料。

②将加工好的原料按模型设计要求装入实验箱内，使断裂带横剖面能透过有机玻璃进行观察。同时在断裂带上不同位置埋填电极，用来测量油水交替变化情况。

③实验箱加盖，再放上加压装置－带有压力计的千斤顶（加压 5MPa）。

3. 观察实验现象，测量并记录数据

①用测量仪测加压前，调节并记录各电极对的阻抗值。

②加压至 5MPa 并保持该力基本不变至实验结束，记录阻抗值并观察实验现象。

③选择几组有代表性的数据用软件绘出时间－阻抗关系曲线。

④打开装置，取样分析。

三、实验模型及实验结果

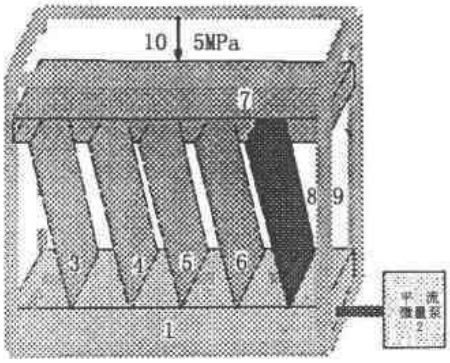
1. 实验一

用 270 目石英砂与膏泥不同比例混合模拟断裂带填充物，共设计实验模型五个，实验模型及时间－阻抗曲线如图 3－27 所示。实验结果：注油 28h5 条断裂带均无油运移现象发生，说明粉砂岩在实验室条件不需要混合粘土依靠自身的毛细管力就能封闭住油。

2. 实验二

用 100～200 目石英砂与膏泥不同比例混合模拟断裂带填充物，共设计实验模型四个，实验模型及时间－阻抗曲线如图 3－28、图 3－29、图 3－30、图 3－31 所示。

模型一实验结果：只有 90％石英砂与 10％粘土混合的断裂带有油运移现象。

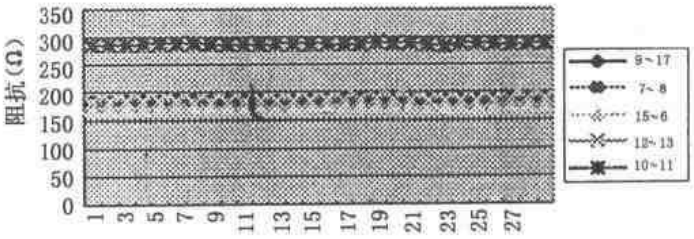


1—烃源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为5:1）；
3—断裂带（充填物为90%石英砂与10%泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为75%石英砂与25%泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为60%石英砂与40%泥的混合物）；
6—断裂带（充填物为25%石英砂与55%泥的混合物）；
7—断裂带（充填物为100%石英砂）；
8—围岩（泥岩与膏岩的混合物）；
9—应力箱；
10—顶部砂岩层；
11—千斤顶（上覆岩层压力5MPa）

实验模型图



电极埋放位置图



时间-阻抗曲线

图 3-27　270 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型图

模型二实验结果：注油 24h 两条断裂带均有油运移现象发生，说明填充物为 75%石砂和 25%粘土混合、60%石英砂和 40%粘土混合模拟的断裂带实验室条件下垂向开启。

模型三实验结果：注油 30h 两条断裂带均无油运移现象发生，说明填充物为 45%石英砂和 55%粘土混合模拟的断裂带实验室条件下垂向封闭，从而说明 100～200 目石英砂模拟断裂带封闭油所需粘土含水量介于 40%和 55%之间。

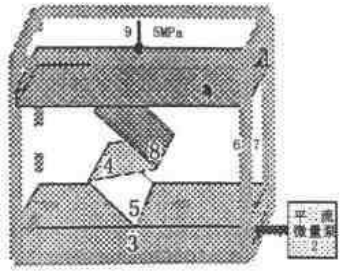
为此又设计了实验模型四，该模型三条断裂带粘土含量分别为 45%、47.5%和 50%，实验结果表明，注油 29h，3、4 号断裂带有油运移现象发生（断裂带分别为 55%石英砂和 45%粘土混合、52.5%石英砂和 47.5%粘土混合而成），5 号断裂带（断裂带为 50%石英砂和 50%粘土混合）无油运移现象。因此，可以认为 100～200 目石英砂模拟断裂带充填物封闭油所需粘土含量为 50%。

3．实验三

用 50～100 目石英砂与膏泥不同比例混合模拟断裂带填充物，实验模型共设计 3 个，实验模型及时间－阻抗曲线如图 3－32、图 3－33、图 3－34 所示。

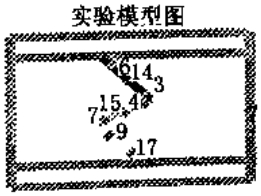
模型－实验结果：注油 24h，3、4、5 号三条断裂带均有油运移现象发生，说明填充物为 90%石英砂和 10%粘土混合、75%石英砂和 25%粘土混合、60%石英砂和 40%粘土混合模拟的断裂带实验室条件下垂向开启。

模型二实验结果：注油 30h 两条断裂带均无油运移现象发生，说明填充物为 45%石英砂和 55%粘土混合模拟的断裂带实验室条件下垂向封闭，从而说明 100～200 目石英砂模拟

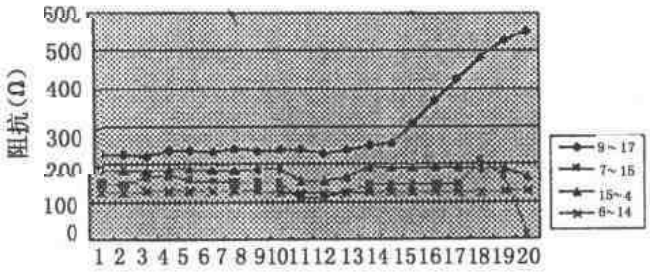


1—烃源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 6:1）；
3—断裂带（充填物为 98% 石英砂与7.0%泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为 76% 石英砂与 26% 泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为 80% 石英砂与 40% 泥的混合物）；
6—应力箱，
7—围岩（泥岩与膏岩的混合物）；
8—顶部砂岩层；
9—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）

实验模型图

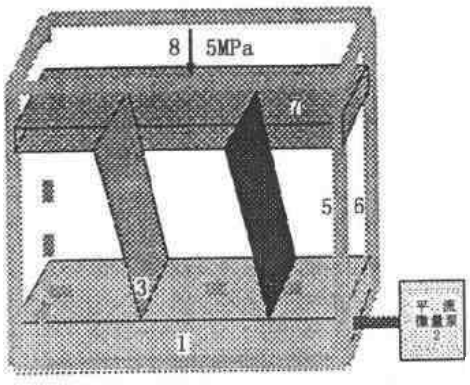


电极埋放位置图



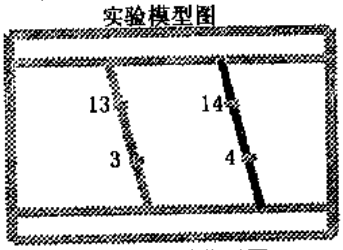
时间-阻抗曲线

图 3-28　100～200 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型一

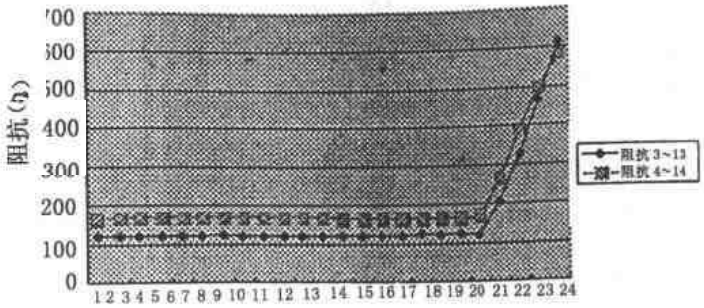


1—烃源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 5:1）；
3—断裂带（充填物为 75% 石英砂与 25% 泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为 60% 石英砂与 40% 泥的混合物）；
5—围岩（泥岩与膏岩的混合物）；
6—应力箱；
7—顶部砂岩层；
8—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）

实验模型图

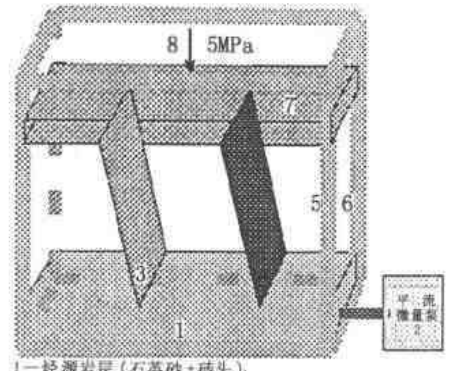


电极埋放位置图



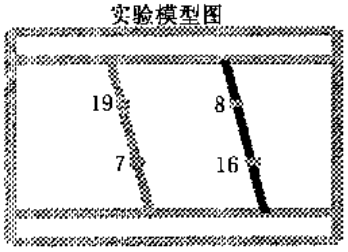
时间-阻抗曲线

图 3-29　100～200 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型二

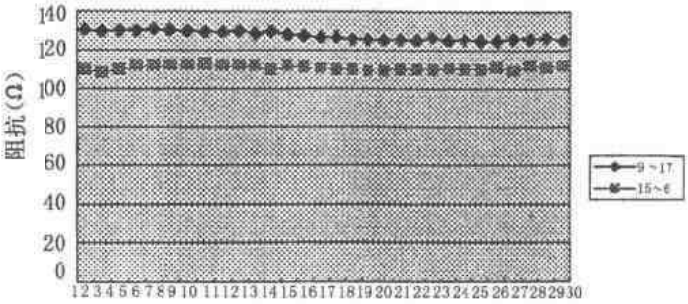


1—轻源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为5:1）；
3—断裂带（充填物为45%石英砂与66%泥的混合物）；
4- 断裂带（充填物为30%石英砂与70%泥的混合物）；
5—圈岩（泥岩与膏岩的混合物）；
6 应力箱；
7—顶部砂岩层；
8—千斤顶（上覆岩层压力5MPa）

实验模型图

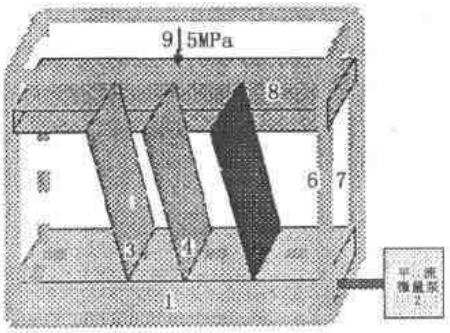


电极埋放位置图



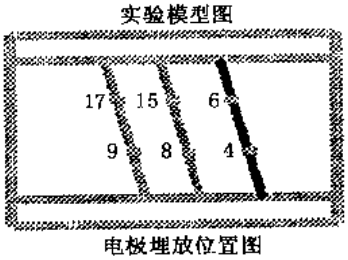
时间-阻抗曲线

图 3-30　100~200 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型三

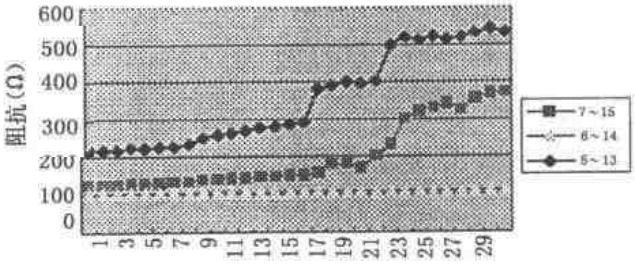


1—轻源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为5:1）；
3—断裂带（充填物为55%石英砂与45%泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为52.5%石英砂与47.5%泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为55%石英砂与50%泥的混合物）；
6 顶部砂岩层；
7—圈岩（泥岩与膏岩的混合物）；
8—应力箱；
9—千斤顶（上覆岩层压力5MPa）

实验模型图

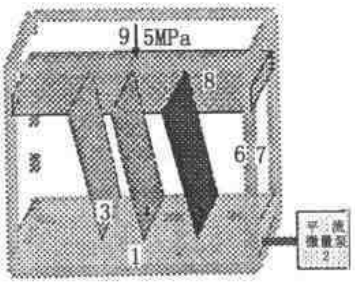


电极埋放位置图

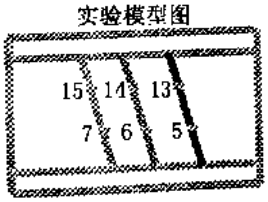


时间-阻抗曲线

图 3-31　100~200 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型四

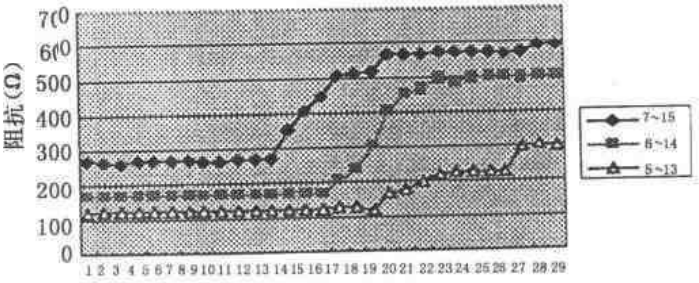


1—烃源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 5:1）；
3—断裂带（充填物为 90% 石英砂与 10% 泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为 75% 石英砂与 25% 泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为 60% 石英砂与 40% 泥的混合物）；
6—顶部砂岩层；
7—围岩（泥岩与膏岩的混合物）；
8—应力箱；
9—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）



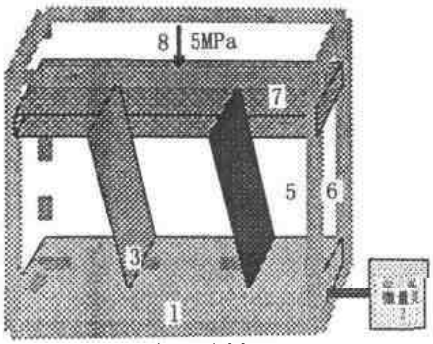
实验模型图

电极埋放位置图

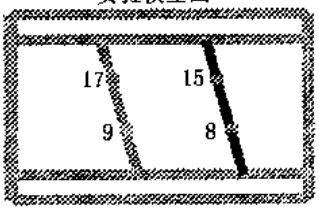


时间-阻抗曲线

图 3－32　50～100 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型一

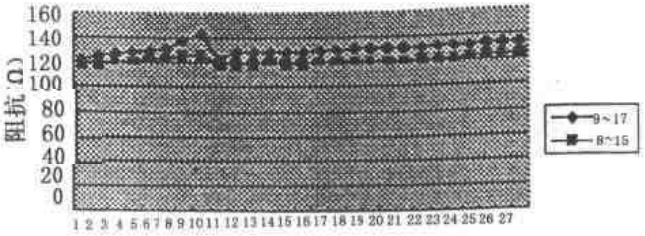


1—烃源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 5:1）；
3—断裂带（充填物为 45% 石英砂与 55% 泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为 30% 石英砂与 70% 泥的混合物）；
5—围岩（泥岩与膏岩的混合物）；
6—应力箱；
7—顶部砂岩层；
8—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）



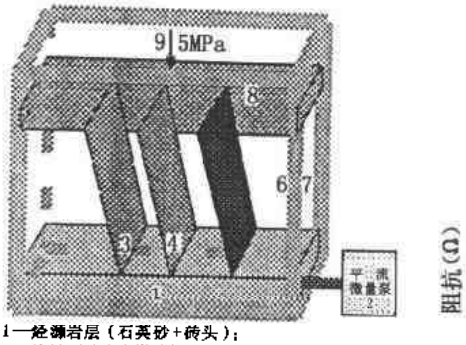
实验模型图

电极埋放位置图



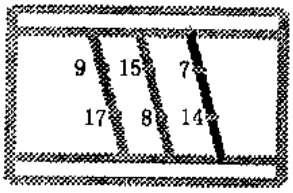
时间－阻抗曲线

图 3－33　50～100 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型二

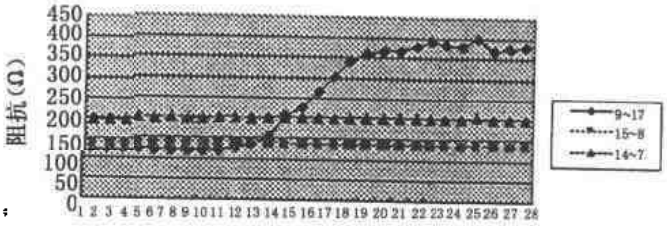


1—轻源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 5:1）；
3—断裂带（充填物为57.5%石英砂与42.5%泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为55%石英砂与45%泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为62.5%石英砂与47.5%泥的混合物）；
6—顶部砂岩层；
7—圈岩（泥岩与膏岩的混合物）；
8—应力箱；
9—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）

实验模型图



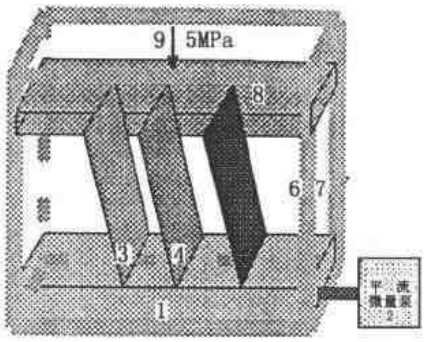
电极埋放位置图



时间（h）

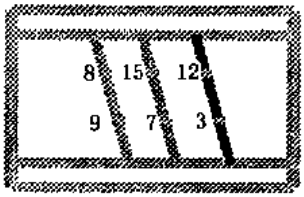
时间-阻抗曲线

图 3－34　50～100 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型三

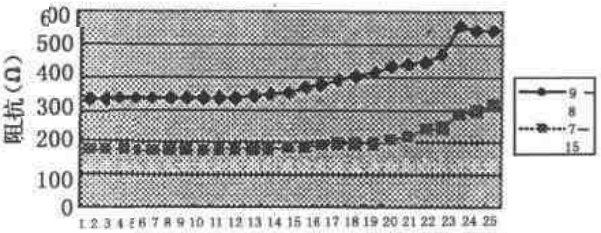


1—轻源岩层（石英砂+砖头）；
2—注油泵（油为煤油与原油混合物，比例为 5:1）；
3—断裂带（充填物为90%石英砂与10%泥的混合物）；
4—断裂带（充填物为75%石英砂与25%泥的混合物）；
5—断裂带（充填物为60%石英砂与40%泥的混合物）；
6—顶部砂岩层；
7—圈岩（泥岩与膏岩的混合物）；
8—应力箱；
9—千斤顶（上覆岩层压力 5MPa）

实验模型图



电极埋放位置图



时间（h）

时间-阻抗曲线

图 3－35　20～40 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型一

断裂带封闭油所需粘土含量介于40%和55%之间。

为此又设计了实验模型三，该模型三条断裂带粘土含量分别为45%、47.5%和50%，实验结果表明，注油29h，3号断裂带有油运移现象发生（断裂带分别为57.5%石英砂和42.5%粘土混合而成断裂带），4、5号断裂带（55%石英砂和45%粘土混合、52.5%石英砂和47.5%粘土混合而成断裂带）无油运移现象。因此，可以认为100～200目石英砂模拟断裂带充填物封闭油所需粘土含量为45%。

4．实验四

用20～40目石英砂与膏泥不同比例混合模拟断裂带填充物，共设计2个模型，实验模型及时间－阻抗曲线如图3－35、图3－36所示。实验结果表明，20～40目石英砂模拟断裂带填充物封闭油所需粘土含量为35%。

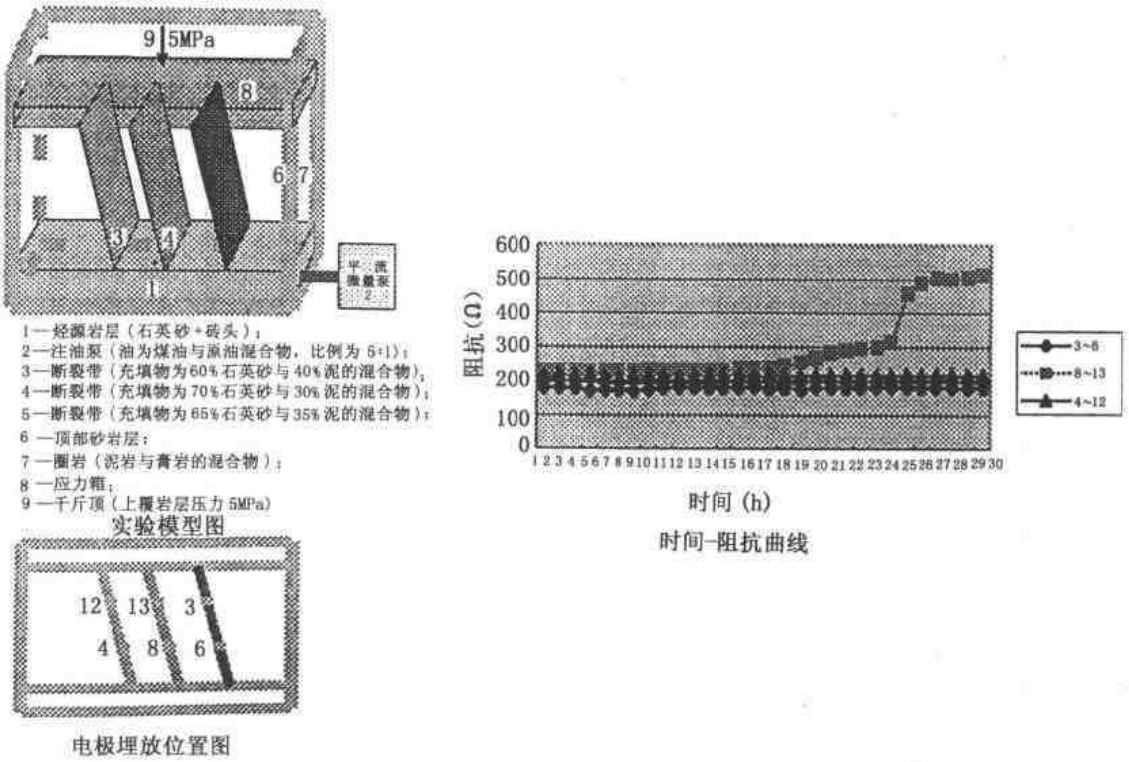


图3－36　20～40目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型二

5．实验五

用10～20目石英砂与膏泥不同比例混合模拟断裂带填充物，共设计模型2个，实验模型及时间－阻抗曲线如图3－37、图3－38所示，实验结果表明，20～40目石英砂模拟断裂带填充物封闭油所需粘土含量为30%。

根据上述实验得到了不同粒度石英砂模拟断裂带填充物封闭油所需粘土含量理论下限值．结果如表3－7所示。

四、实验结果分析及转化

1．实验结果分析

由表3－7中可以看出，断裂带中不同粒度的石英颗粒其对原油进行封闭所需要的粘土

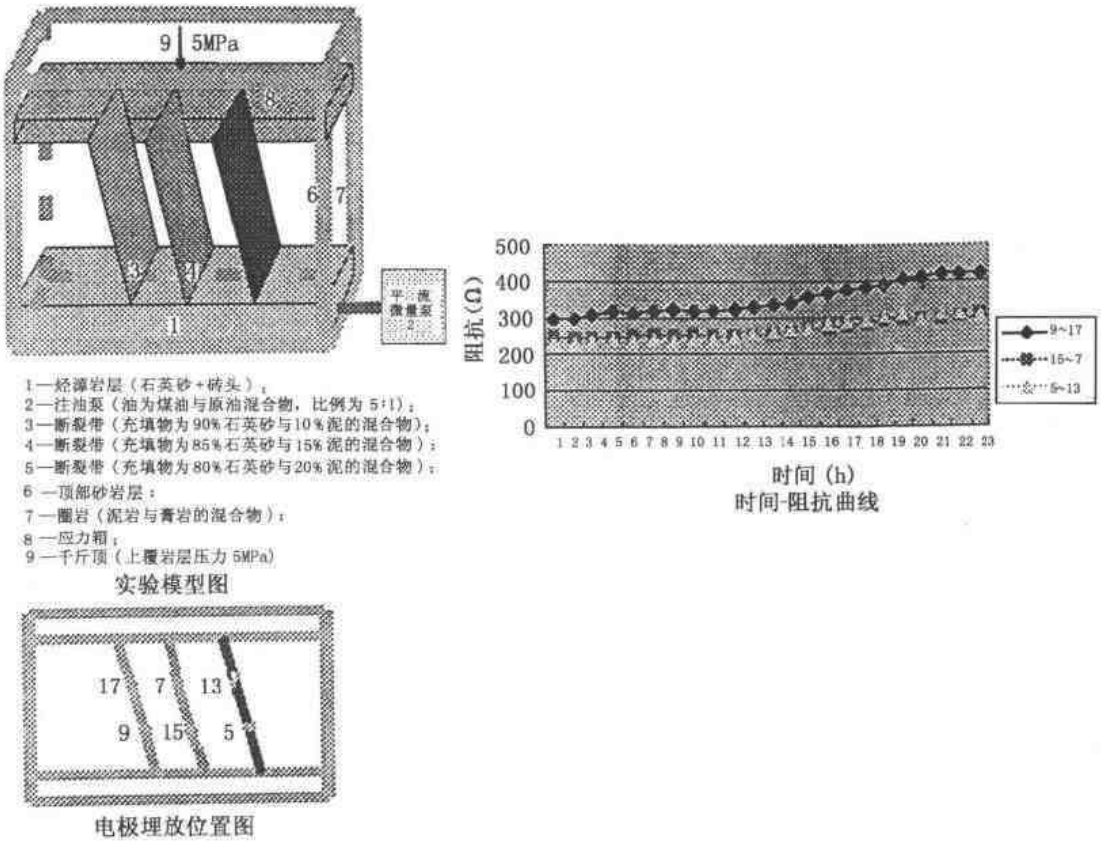


图 3－37　10～20 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型一

含量是不同的。除粉砂在实验室条件下，几乎不需要含有粘土即可凭借自身形成的毛细管阻力便可对原油进行封闭外，其余各粒度的石英颗粒要对原油形成封闭均需混合粘土，才能使其孔喉减小，毛细管阻力增大，阻止原油沿其运移。它们凭借自身形成的毛细管阻力封闭原油时所要求的粘土含量是随着粒度增大而减少的。为什么会出现这一现象？通过分析认为不管石英颗粒为哪一粒级，只要能对原油形成封闭，即原油不能通过其渗滤运移，就说明其毛细管阻力大于或等于原油运移的动力（浮力）。且在封闭的临界点上，所有粒度的石英颗粒形成的毛细管阻力应是相同的。根据毛细管力的定义，可以得到其毛细管半径是相同的。然而，由于石英颗粒的粒度大小不同，其以菱面体形式堆积所形成的孔喉大小也就不同（表 3－8）。

表 3－7　不同粒度石英砂模拟断裂带填充物封闭油所需泥质含量下限值

石英砂目数	270	100～200	50～100	20～40	10～20
对应粒度	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾石
断裂带封闭对应的泥质含量（%）	0	50	45	35	30

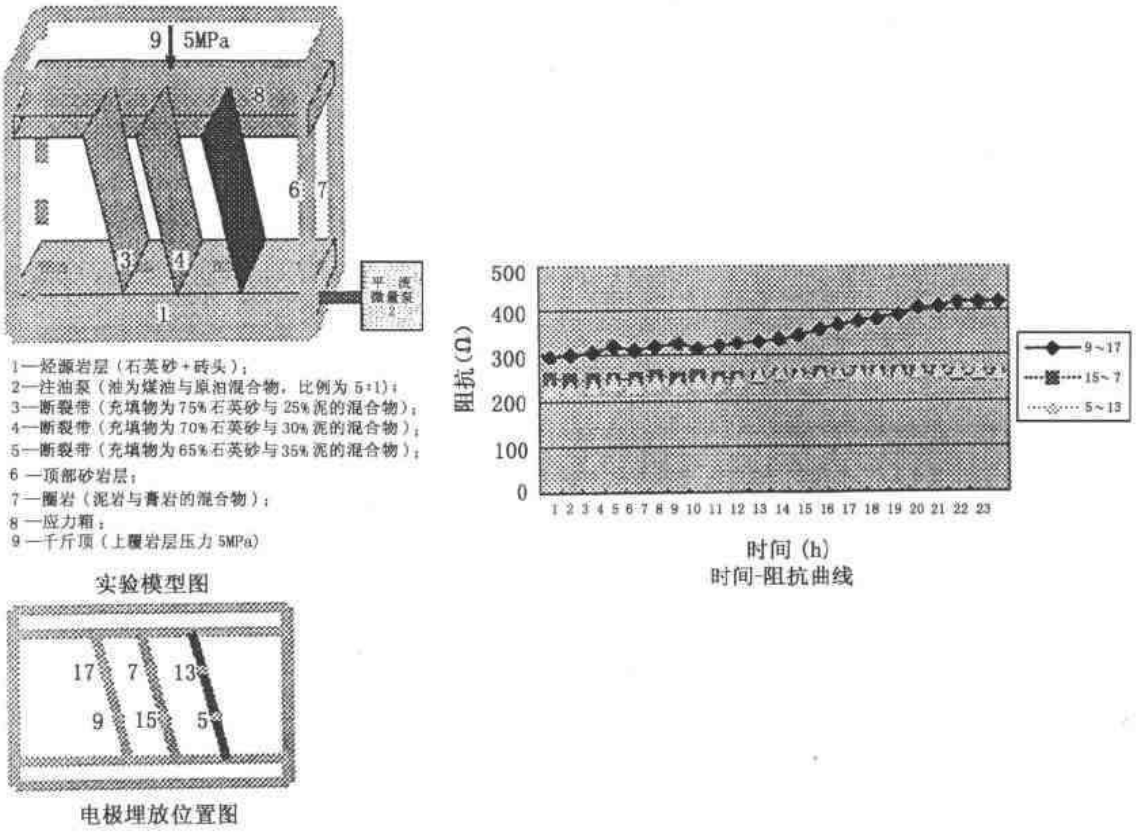


图 3－38　10～20 目石英砂和粘土混合模拟断裂带填充物实验模型二

由表 3－8 中可以看出，随着石英颗粒粒度的增大，其内的孔喉大小也在增大；反之则减小。但不管是哪一个石英颗粒粒级堆积形成的孔喉大小均大于粘土粒径（＜0.01mm），粘土颗粒均可以填充在其中，这就表明粘土在上述石英颗粒之中是以填充孔隙形式存在的。在实验过程中，每次实验时，所用石英颗粒及粘土的体积是相同的。在这种条件下，实验所用的石英颗粒粒度越大，其石英颗粒个数相对越少（表 3－9），进行堆积所形成的孔隙个数也就越少，但它们的总孔隙度大小却近于相同。因此，在这种条件下，要形成相同大小的孔喉，石英颗粒越大，其所需要填充孔隙的粘土量也就越少，这可能也就是造成上述现象的主要原因。

表 3－8　不同粒度石英颗粒堆积时的理论孔喉直径

粒　度	粒径（mm）	大孔喉直径（mm）	小孔喉直径（mm）
粗粉砂	0.094	0.0389	0.0145
细　砂	0.127～0.254	0.0526～0.1052	0.0196～0.0391
中　砂	0.254～0.508	0.1052～0.2103	0.031～0.0780
粗　砂	0.635～1.27	0.2629～0.5258	0.0978～0.1956
砾	1.27～2.54	0.5258～1.0516	0.1956～0.3912

表 3-9 相同体积堆积各粒度石英颗粒个数比

颗粒个数比	与细砂	与中砂	与粗砂	与 砾
粗粉砂	8.32	66.59	1040.43	8323.41
细 砂		8	125	1000
中 砂			15.63	125
粗 砂				8

2. 实验结果转化

以上实验结果是在 5MPa 上覆岩层压力，围岩为膏泥岩，常温常压下注油得到的不同粒度石英颗粒模拟断裂带填充物封闭油所需要的泥质含量界限。由于天然气对实验的密封性和检测性要求太高，目前实验条件下难以达到，因此必须通过油气的理论转化，以获得封闭天然气对应的泥质含量界限。

从实验条件可知，无论实验过程中是注油还是注气，其在实验箱底部砂层中所能形成的最大油柱高度和气柱高度是相同的，即 $h_g = h_o$。由浮力定义可得，油和气在实验箱底部产生的浮力大小分别为：

$$P_{fg} = (\rho_w - \rho_g) \cdot g h_g \tag{3-12}$$

$$P_{fo} = (\rho_w - \rho_o) \cdot g h_o \tag{3-13}$$

式中 P_{fg}、P_{fo}——气油浮力（Pa）；

ρ_w——地层水密度（g/cm^3）；

ρ_o、ρ_g——油气密度（g/cm^3）；

g——重力加速度（m/s^2）；

h_o、h_g——油气柱高度（m）。

由式 3-11 和式 3-12 可得：

$$P_{fg} = \frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_w - \rho_o} \cdot P_{fo} \tag{3-14}$$

地层水密度可取1.05g/cm³，油密度取0.7g/cm³，气密度取0.01g/cm³，将其代入式 3-14 中可得：

$$P_{fg} \approx 4.37 P_{fo} \tag{3-15}$$

断裂带中物质要阻止油或气通过其渗滤运移，则必须满足：

$$P_{dg} \geqslant P_{fg} \tag{3-16}$$

$$P_{do} \geqslant P_{fo} \tag{3-17}$$

式中 P_{dg}、P_{do}——断裂带中物质的排替压力（Pa）。

由式 3-15、式 3-16、式 3-17 可得：

$$P_{dg} \approx 4.37 P_{do} \tag{3-18}$$

由排替压力定义（等于岩石中最大连通孔喉所对应的毛细管力），及式 3-18 可得断裂带中物质对气、油形成封闭时所要求其内最大孔喉半径之间的关系为：

$$\frac{2\sigma_g}{\gamma_g} \approx 4.37 \cdot \frac{2\sigma_o}{\gamma_o} \tag{3-19}$$

式中 σ_g、σ_o——气-水、油-水界面张力（N/m）；

γ_g、γ_o——断裂带中物质封闭气、油时所要求的最大孔喉半径（m）。

由文献资料（包茨，1988）可得，在地表条件下，气－水与油－水界面张力的比值为2.8，则由式3－19可以得到断裂带中物质封闭油和气时其内所要求的最大孔喉半径之间的关系为：

$$\gamma_g \approx 0.64\gamma_o \tag{3-20}$$

由文献（陈荣书，1989）资料可知，如果将均匀颗粒按着菱面体进行堆积，其内的最大孔喉半径与其颗粒的粒径有如下关系：

$$\gamma = \frac{1}{2} \times 0.414D \tag{3-21}$$

式中 γ——颗粒呈菱面体堆积时形成的最大孔喉半径（m）；

D——颗粒直径（m）。

由式3－20和式3－21可得到断裂带物质封气和封油所需要的颗粒直径之间的关系为：

$$D_g = 0.64D_o \tag{3-22}$$

$$D_o = \frac{V}{\dfrac{V(1-X_o)}{D_i} + \dfrac{X_o V}{0.01}} \tag{3-23}$$

$$D_g = \frac{V}{\dfrac{V(1-Y_g)}{D_i} + \dfrac{Y_g V}{0.01}} \tag{3-24}$$

式中 D_o——封油断裂带内填充物平均粒径（mm）；

D_g——封气断裂带内填充物平均粒径（mm）；

V——断裂带体积（mm^3）；

D_i——某一粒度石英颗粒直径（mm）；

X_o——不同粒度石英颗粒模拟断裂带填充物封油需的粘土含量（小数）；

Y_g——不同粒度石英颗粒模拟断裂带填充物封气需的粘土含量（小数）。

将式3－22、式3－23、式3－24联立得到不同粒度石英颗粒模拟断裂带填充物封闭气和封闭油所需粘土含量之间的关系，如式3－25所示。

$$Y_g = \frac{\dfrac{1}{0.64}\left(\dfrac{1-X_o}{D_i} + \dfrac{X_o}{0.01}\right) - \dfrac{1}{D_i}}{100 - \dfrac{1}{D_i}} \tag{3-25}$$

式中各项的意义同前式。

利用此结果计算得到断裂充填物中不同粒度石英颗粒封闭气所需要的最低粘土含量，如表3－10所示。

表3－10 不同粒度石英砂模拟断裂带填充物封闭气所需泥质含量下限值

石英砂目数	270	100～200	50～100	20～40	10～20
对应粒度	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾石
断裂带封闭对应的泥质含量（%）	7	81	68	55	48

由表3－10中可以看出，断裂带充填物中不同粒度的石英颗粒封闭气所需要的粘土含量明显高于封闭原油所需要的粘土含量，这主要是因为气的浮力大，分子小，易散失所造成的。

第四章　断层封闭性定性评价

第一节　综合地质分析法判断断层封闭性

一、基本原理

由第二章断层封闭机理可知，断层封闭的本质因素取决于差异排替压力（Smith 1996，1998；陈发景等，1989），即当目的层排替压力小于与之对置的断层另一侧岩层排替压力（无断裂充填时）或断裂带的排替压力（有断裂充填时）时，断层在侧向上是封闭的，当目的储集层排替压力小于上覆盖层中的断裂带的排替压力时，断层在垂向上是封闭的，封闭能力用烃柱高度表示（图 4－1、式（4－1）、式（4－2））。

$$H_F = \frac{P_F - P_A}{(\rho_W - \rho_H)g} \times 10^3 \quad (4-1)$$

$$H_B = \frac{P_B - P_A}{(\rho_W - \rho_H)g} \times 10^3 \quad (4-2)$$

式中　ρ_W、ρ_H——水和油（气）的密度（g/cm^3）；

g——重力加速度；

P_F——盖层内断裂带排替压力（Pa）；

P_A——目的储集层 A 的排替压力（Pa）；

P_B——对置盘岩层的排替压力（Pa）；

H_B——断层侧向封闭能力（m）；

H_F——断层垂向封闭能力（m）。

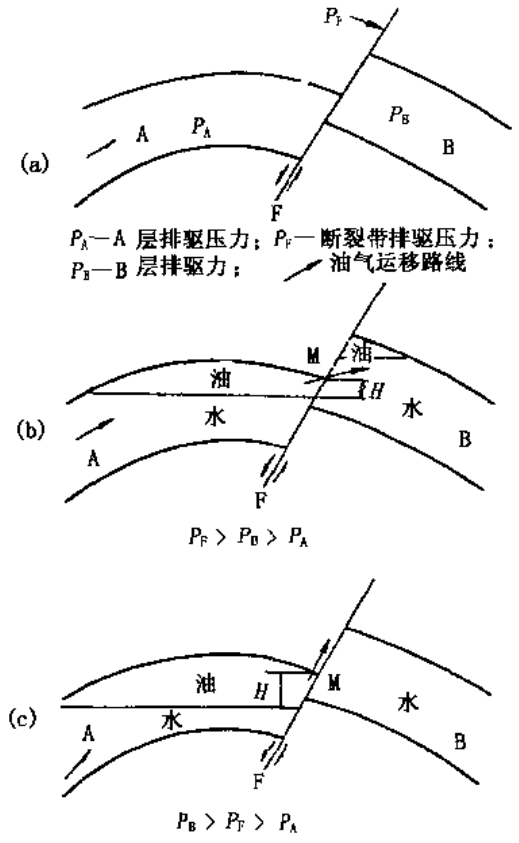


图 4－1　差异排替压力与断层封闭性（据陈发景，1989）

然而，大量测取断层两盘岩层的排替压力是不现实的，储集层之上盖层内断裂带的排替压力实际上无法测得，这样势必造成断层封闭性评价的困难。为解决这一难题，人们试图从研究影响断层封闭性的地质因素入手，首先确定断层封闭性的影响因素，再确认各因素在断层封闭性中的作用，根据各地质因素存在环境及特征，间接定性反映断层两盘对置岩层及其上覆岩层之间的排替压力差的大小，从而达到对断层封闭性的间接判断。

前人关于这方面的研究成果可概括为（图 4－2）：

①如果具高毛细管压力的页岩或其他不渗透岩层与断层另一侧目的储集层对置（图 4－

2a，图 4－2b），则穿过断层面发生侧向渗漏的可能性小（Smith 1966，1980，陈发景 1989）。

②当储集层之上的盖层很厚，且断层没将其完全断开，油气沿断层面向上渗漏的可能性最小（Weber，1978；陈发景 1989）。

③断层两边渗透性地层相并置时，断层泥可提供很好的侧向封闭（图 4－2c）（Weber，1978）。

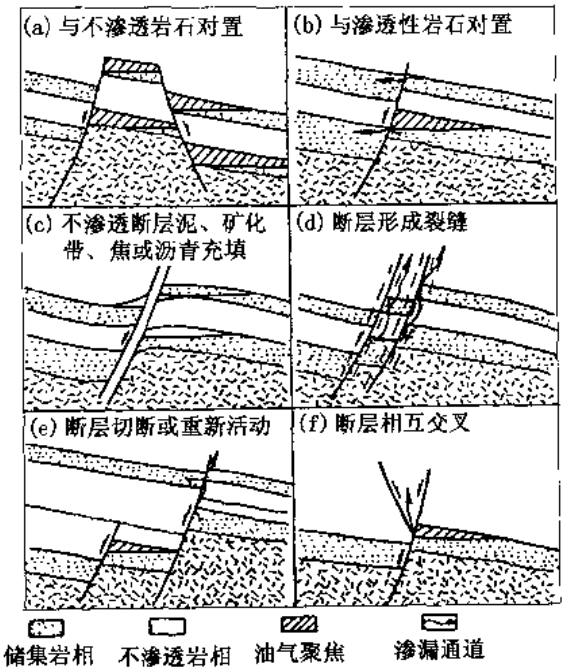


图 4－2　正断层封闭性的重要地质因素
（据 Harding，1989）

④断层带的矿化作用、岩石的成岩作用或石油的降解作用都可能减少断层带的渗透性，（图 4－2c）（Smith，1980）。

⑤如果岩石固结良好或脆性岩石被断开移动时，常沿正断层形成裂缝（图 4－2d）（Braingtein，1953），油气沿较老的断层带向上渗漏。如果开启的裂隙被胶结物充填，则不再成为运移的通道（Harding，1989）。

⑥如果断层重新活动，继续延伸穿过不整合面或向上延伸进入更浅的、缺乏上倾封闭的储集岩层时，油气沿断层面垂向渗漏的机会就会增大（图 4－2e）。深埋断层的这种风险最小（图 4－2e）（Harding，1989）。

⑦如果断层及与断层有关的裂缝相穿插，垂向渗漏的可能性会增大（图 4－2f）（Gatenby，1980）。

⑧如果断块位移造成不同流体压力的岩石相接触，低压断块的封闭性就会得到提高（Harding，1989，陈发景，1989）。

⑨大断距的断层增大了形成裂缝的可能性，因此也增大了垂向断层渗漏的风险（Harding，1989）。

在此基础上，作者研究了部分大庆、辽河和黄骅坳陷有关断层的封闭性，经分析归纳后可得到以下定性判断断层封闭性的方法。

1．根据断裂填充物性质判断断层封闭性

如果断裂充填物以泥质为主，其泥质充填物本身就具备侧向封闭性，并且该泥质充填物一定同时也具有垂向封闭性，由此形成断层的侧向与垂向封闭（图 4－3a），但若断裂充填物以砂质为主，则不具侧向封闭性。如果被断移的地层为较薄的砂泥互层，断裂充填物的性质在互层段内可能没有大的变化，此种情况下，不具侧向封闭性的断裂充填物往往在垂向上也不具封闭性，尽管目的储集层之上断层两盘可能为泥岩层相对置，油气仍可沿断裂带作垂向运移（图 4－3b）。可见，如果充填物具封闭性，与目的砂层对置的断层另一盘为泥岩层可增强充填物的封闭能力，减少油气侧向穿过断层运移的风险。若充填物不具封闭性，尽管与目的砂层对置的泥岩层可阻止烃的侧向运移，但却无法阻止油气沿断裂带的垂向运移，除非向上的断裂充填物变为非渗透性且两盘为泥岩层相对置，油气才可能免遭逸失。因此，不能单纯强调断层两盘岩层对置情况对其封闭性的影响，应对断裂充填物予以足够的重视。

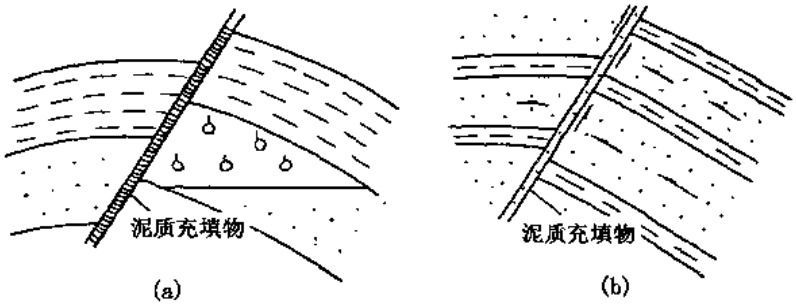


图 4－3　断裂充填物在油气运聚过程中的作用

总之，断裂充填物是一种普遍现象，同生断层往往充填与围岩具相同压实程度的填塞物，而非同生断层往往充填的是断层碎裂物质，前者裂缝可能较少，后者裂缝发育。然而，只要充填物较细，具有比储集层更高的排替压力，便具有一定的封闭能力。在较薄的砂泥互层段内，断裂充填物的性质是决定断层封闭与否的重要因素。

2．根据断移地层的砂泥比值判断断层封闭性

同生断层断移地层的砂泥比值大于 1.0，非同生断层大于 0.8，断层不具封闭性；封气断层断移地层的砂泥比值一般小于 0.6。

不难想象，如果为断层所错动的地层中泥岩层所占比值相当低，砂层含量相对很高，砂层与泥层对置的可能性就一定很小，断裂充填物的性质也以砂质为主。在较高的砂泥比条件下，断层的封闭能力必然较低，因此当砂泥比值高到一定程度时，无论其他条件如何，断层都不具封闭能力。

图 4－4 是辽河油田 34 条已知封闭性断层的统计结果，其纵坐标的封闭程度是指被断层

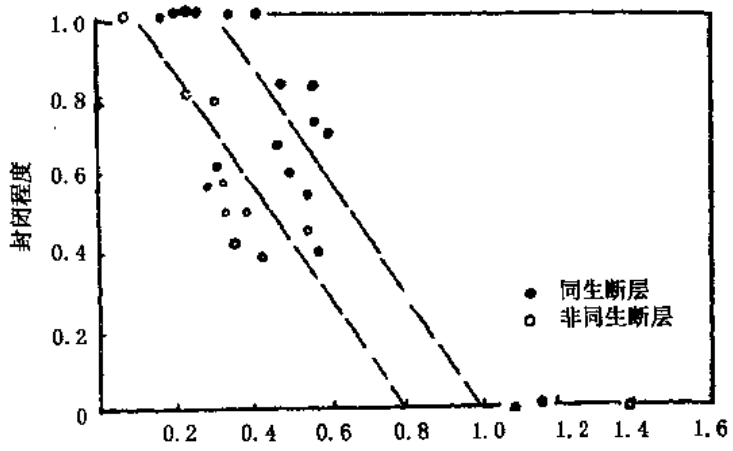


图 4－4　断层封闭程度与砂泥比值关系散点图

遮挡的一盘中含油（气）砂层的累加厚度与该含油（气）层段内砂岩层总厚度的比值；在目的盘一侧的地层剖面上，在均具油气来源的情况下，若储集层在上倾方向上与断层接触部位断层具封闭性，油气被断层封挡，该储集层内便富集油气；若上倾储集层与断层接触部位断层不具封闭性，油气则穿过断层继续向上倾方向运移，此种情况下该储集层不含油气，而为

水层。由于断层空间上各个部位的封闭性都不同，表现在断层剖面上某处是封闭的，在另一处则可能是开启的，由此造成地层剖面上油（气）层与水层交互存在的现象。被断层遮挡的一盘水夹层越多，说明断层封闭程度越差，反之越好。如辽河牛居油田，牛 41 井和牛 29－17 井所揭示的沙一段中上部渗透砂岩总厚度为 207m，其中由于牛 29－15 与牛 29－17 井间断层遮挡而形成的含油气层厚度 114.8m，水夹层厚度 92.2m，该断层的封闭程度为 0.55。

分析造成同生断层与非同生断层封闭性不同的原因，可能主要是二者形成的时间不同及其导致的断裂充填物性质不同所致。

由于非同生断裂充填物是岩石固结成岩后形成，碎裂物间的孔隙与裂缝需重新压实与胶结后方能封闭流体，而这种压实与胶结无疑比处于塑性状态下同生断层产生的断层涂抹层差。因此，相同砂泥比值下同生断层的封闭能力比非同生断层好。然而，只要充填物以泥质为主，两类断层就均具封闭性，封闭能力主要取决于地层的砂泥比值。

因为天然气分子小，活动能力强，对封挡条件要求比油苛刻，因此，相同地质条件下可封挡油的断层不一定能封挡天然气。由已知封气断层的统计结果发现，封气断层断移地层砂泥比值最高者为 0.59，推测当砂泥比值大于 0.6 以后，断层的封闭气能力就变得很差或不能封气了（表 4－1）。

表 4－1　封气断层断移地层砂泥比值统计表

地区	油气田名称	断层名称	断距 (m)	倾角 (°)	断层性质	断移地层砂泥比值		
						对盘	本盘	平均
辽河	法哈牛油田	法 39－37～法 41－41	120	72	同生	0.41	0.55	0.48
	法哈牛油田	法 43－41～法 45－43	15	75	非同生	0.70	0.45	0.58
	兴隆台油田	兴 109～兴 34	80	50	同生	0.21	0.29	0.25
	兴隆台油田	兴 82～兴 209	79	40	非同生	0.22	0.49	0.36
	黄于热油田	黄 5～黄 15－21	60	78	同生	0.24	0.22	0.23
	黄于热油田	黄 8－8～黄 32	45	69	非同生	0.13	0.02	0.07
	牛居油田	牛 23－22～牛 22－23	35	85	同生	0.45	0.25	0.35
	青龙台油田	龙 26～龙 26－16	30	70	同生	0.30	0.32	0.31
	大洼油田	洼 10－14～洼 12－18	44	65	同生	0.45	0.49	0.47
	大洼油田	洼 14－20～洼 16－22	36	60	同生	0.38	0.72	0.55
	大洼油田	洼 9－12～洼 9－14	52	75	同生	0.70	0.49	0.59
大港	港东油田	中 9－15～中 259	50	75	同生	0.47	0.39	0.43
	港东油田	中 7－67～中 6－68	30	65	同生	0.50	0.36	0.43
	港东油田	港 10－27～港 234	56	60	同生	0.69	0.46	0.58
	港东油田	港 223～港 10－27	75	75	同生	0.23	0.46	0.34
大庆	长春岭气田	长 3～长气 2－4	56	70	非同生	0.35	0.50	0.42
	三站气田	三 2～三 4	20	63	非同生	0.25	0.25	0.25
	汪家屯气田	宋 18～宋 181	18	69	非同生	0.15	0.27	0.21

3．根据断层面倾角陡缓判断断层封闭性

断层倾角在塑性地层段缓，脆性地层段陡，缓角断层的封闭性能好于陡角断层（图 4－

5)。这种断层的倾角变化及封闭特点在大庆长垣的萨尔图油田表现得相当明显。该油田嫩二段（K_1n_2）为大套泥岩，下伏嫩一段、姚家组及青二、三段为砂泥不等厚互层段，上覆嫩三段及其以上地层也为砂泥互层段。断层倾角在嫩二段均较缓，而在其上下层段较陡。在嫩二段断层具明显的垂向封闭性，所有油气均分布于嫩二段以下的萨、葡、高油层中，嫩二段以上则很少见油气显示。

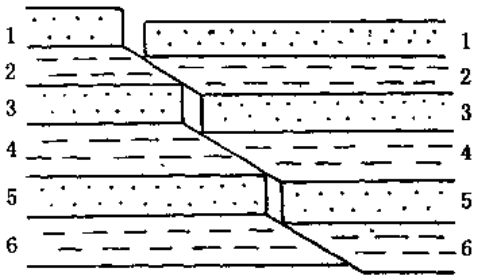


图 4－5　软硬互层拉张与滑动条件下断面滑动作用不一致现象示意图

4. *根据是否存在孔隙流体超压判断断层封闭性*

当断层两盘或断层一侧地层中存在孔隙流体超压时，证明断层面不作为流体泄压的通道，断层封闭性好。大庆长垣以东地区的 61 井在井深 1295.5m 处钻遇断移嫩一、二段的断层（图 4－6），断点位置在嫩一段中部，该断层断穿了嫩一、二段，断点处断距 34.5m，由图 4－6 可见，尽管本段地层被断层断穿，但断层两盘地层中仍然存在着较大的声波时差异常，表明孔隙流体超压的存在，流体没沿断层做垂向运移，断层具封闭性。事实上，该井在嫩一、二段之下的姚家组储集层中发现了油气，而在嫩一、二段之上地层中却不见任何油气显示，证明断层封闭性好。

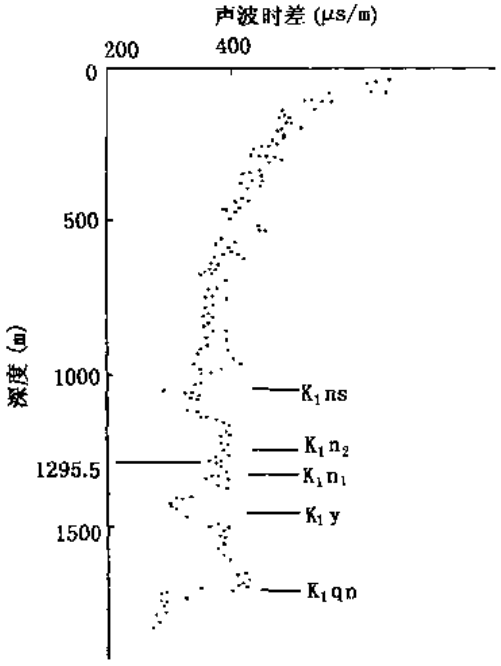


图 4－6　升 61 井声波时差与深度关系

5. *根据烃藏内剩余压力的大小或压力系数的垂向变化判断断层封闭性*

在地层水流动畅通的情况下，烃藏压力等于测压点处的静水压力与该点到烃水界面烃柱浮力之和，该浮力也是烃藏在该点的剩余压力。显然，剩余压力的大小与油藏高度、油（或气）水密度差成正比，用公式表示之

$$\Delta P = H \cdot \Delta\rho \cdot g \qquad (4-3)$$

式中　ΔP——烃藏剩余压力（MPa）；

H——烃水界面至测压点的高度（m）；

g——重力加速度。

由上式可知，如果烃藏高度很小，烃藏剩余压力很低，烃藏压力接近于地层静水压力。假设已知单一储集层的含烃高度（H），可计算出该烃藏内任何一点的剩余压力。与实测烃藏剩余压力（实测压力与静水压力之差）相比较（图 4－7），如果实测烃藏剩余压力不高于单一储集层内的烃柱浮力，证明该单一储集层具有独立的压力系统，断层不作为油气运移的通道沟通其下部的含烃层（下部含烃层烃水界面至该储集层的垂直距离大于该储集层的含烃高度），断层是封闭的。

若实测剩余压力高于该单一含烃层的烃柱浮力，说明下部含烃层对此层有贡献，二储集层是连通的，其连通的原因是盖层有裂缝或断层开启，在断层附近盖层中裂缝的产生与断层活动有关，故两种原因实质是一致的，均说明断层具开启性。

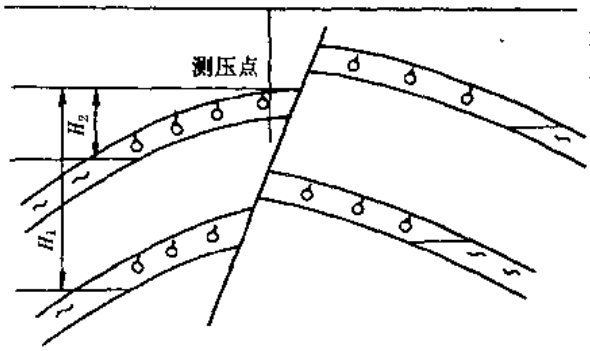


图 4－7　根据烃藏剩余压力判断断层封闭性模型

此方法也可用压力系数表示。所谓压力系数指实测地层压力与同深度静水压力之比值。一个具有统一压力系数的烃藏其顶点的系数最大，随着测压点的降低，压力系数减小，至烃水界面压力系数为 1.0。处于同一构造上多层叠置的含烃层，如果被断层或裂缝沟通，应属于同一烃藏，其各层压力系数应自最顶层至最底层有规律地递减。否则说明各含烃层并不互相连通，各自为独立的压力系统，断层不作为各烃层的沟通通道。这一方法不但可以用来判断断层的封闭性，也可以判断两储集层间盖层的真假。

如果断层附近烃藏内压力系数小于 1.0，或井身剖面上多层叠置的烃储集层内压力系数无规律性变化，本身就说明断层不作为沟通上下储集层的油气运移通道，各储集层间的隔层封闭能力也强。

6. 根据断移地层内垂向地温梯度变化判断断层垂向封闭性

如果断层作为流体垂向运移的通道，被断层沟通的上下储集层中流体应相互串通，上下储集层的地温应处于同一个地温梯度。若断层不作为流体运移通道，上下储集层不连通，由于盖层的隔热作用或某些地层中放射性元素相对较多，在其蜕变时放出热量而使地温增高，造成上下相邻储集层内地温梯度的差异。因此，在断层附近，如果被断移的地层各层内的地温梯度不同，且差异较大，在地层剖面上各层地温梯度的变化无规律性，说明断层是封闭的。

7. 根据断移地层的输导比判断断层侧向封闭性

断裂侧向封闭性的主要影响因素是断裂两盘的砂泥对置状态。目的盘砂岩层与对置盘泥岩层对置，断裂侧向封闭，否则侧向开启。根据松辽盆地齐家－泰康地区 63 条断裂统计结果（雷茂盛，1996），总结出了断裂侧向封堵率与地层输导比的关系式

$$\beta = (1-\alpha)^2 \qquad (4-4)$$

式中　β——断裂侧向封堵率，即目的盘砂岩层被对置盘泥岩层封堵的百分数，封堵率越高，断裂封闭性越好；

α——地层输导比，即输导层厚度与地层总厚度的比值。

利用上式计算了本区内敖古拉断裂各层侧向封堵率（表 4－2）。

由表 4－2 可见，除泉三段和姚一段断裂侧向封堵率为中等，其他各层段封堵率均在较好以上，泉四段和嫩一、二段封闭性最好，封堵率高达 77% 以上；研究层段平均封堵率为 73%，总体上断裂侧向封闭性较好，根据断层两盘所揭示的地层及油气水分布状况观测分析结果基本吻合。

二、应用实例

以琼东南盆 1 号断层为例。

琼东南盆地下构造层下第三系顶面以下断层较发育，全区共 206 条，均为正断层，大致分 3 个方向延展，即 NE 向、NW 向、近 EW 向，以 NE 向为主，EW 向次之，NW 向最少。在上构造层（下第三系顶面以上），断层数量显著减少，且延伸长度小，一般仅 10km 左右，

绝大多数为下构造断层上延部分（表4－3）。盆地内多数断层延伸长度小，落差小，仅少数延伸长度较大，断距亦大，断穿层位多，控制了盆地沉积及构造发展（表4－4，图4－8）。

表4－2　敖古拉断裂各层侧向封堵率

东盘地层	西盘地层	输导比	封堵率（%）	侧向封闭性评价		
				评价结果	评价标准	
K_2n_{1+2}	K_2n_2	0.08	84.6	好	封堵率（%）	评价
K_2y_{2+3}	K_2n_1	0.08	84.6	好	>75	好
K_2y_1	K_2y_{2+3}	0.04	36.0	中	74～50	较好
K_2qn_{2+3}	K_2y_1，K_2qn_{2+3}	0.22	60.8	较好	49～25	中
K_2q_4	K_2qn_1，K_2q_4	0.12	77.4	好	24～10	较差
$K_2q_3^{上部}$	K_2q_3，K_2q_4	0.48	27.0	中	<10	差

表4－3　琼东南盆地断层统计表

走　向	T_g（基底）	T_8（崖城组底）	T_7（陵水组底）	T_6（三亚组底）	T_4（莺－黄组底）	T_2（第四系底）
NE	135	54	121	47	37	17
NW	15		9	9		
EW	56	80	43	30	16	9
总　数	206	74	173	86	54	26

以下对1号断层封闭性做简略分析，其他断层封闭性分析见逻辑信息法应用举例。

表4－4　琼东南盆地主要断层特征表

断层号	级别	发育位置	发育时期	剖面形态	断开层位	活动旋回	延伸长度（km）	倾向	倾角	断距（m）
①	Ⅰ	莺琼盆地边界	前古生代	犁式	北部 T_4 南部 T_6	两个	120	南西	50°左右	>5000
②	Ⅰ	中央凹陷北边界	前第三纪	犁式	T_2	三个	81	东南	60°～70°	>5000
2－1	Ⅲ	崖南、崖北边界	前第三纪	平直	T_{5-2}	三个	35	东南	30°左右	1800
2－2	Ⅲ	崖南断陷内	前第三纪	犁式	T_4	三个	69	南	上部40° 下部30°	3200
2－3	Ⅲ	崖南断陷内	前第三纪	犁式	T_6	三个	48	南	大于50°	2060
③	Ⅱ	崖南、崖北边界	前第三纪	犁式	T_4	三个	85	东南	上部40° 下部30°	>5000
⑤	Ⅰ	盆地北边界	前第三纪	犁式	西部 T_2 东部 T_4	三个	160	南	上部50° 下部40°	>5500
(17)	Ⅰ	盆地北边界	前第三纪	平直	T_4	两个	46	东南	小于40°	2360

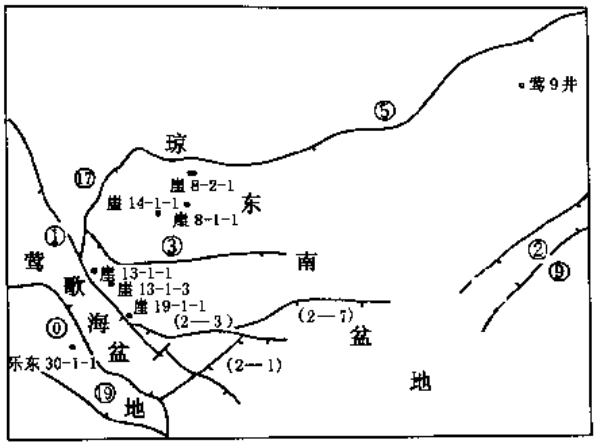


图 4－8　琼东南盆地主要断层分布图

琼东南盆地 1 号断层位于琼东南盆地西南缘，以该断层为界，西部下降盘一侧为莺歌海盆地，东部上升盘一侧为琼东南盆地。沿 1 号断层形成了一系列背斜构造圈闭，如崖 13－1（图 4－9）、崖 19－1，崖 20－1，崖 26－2 等。

目前已在断层上升盘一侧的崖 13－1 构造上发现了储量近千亿立方米的大气田，崖 13－1 构造为一半背斜，长轴走向与 1 号断层相同，该背斜构造西侧以 1 号断层为界，东翼呈斜坡向崖南凹陷过渡，圈闭面积在陵三段顶大于 60km^2，闭合幅度为 410m，由下至上圈闭面积减小。该构造内仅有几条小型 NE 向正断层，延伸长度小于 5km，最大断距小于 100m，已证实该气田含气井长度为 410m，构造充满度达 100%

本区最有利断层封闭的因素是区域盖层巨厚，1 号断层终止于莺黄组下部，天然气不可能沿断层垂向散失。

由图 4－9 可见，崖 13－1 构造主要产气层崖城组和陵水组与断层另一盘的梅山组地层对置，梅山组地层的封闭性如何，直接影响着 1 号断层在该段的封闭能力，也决定着崖 13－1 构造天然气的充满程度。

由图 4－10 可见，在崖 13－1－1 等 4 口井莺歌海组及其以上的泥质岩层中，孔隙流体压力均为正常静水柱压力，而黄流组及梅山组泥质岩层则为异常高压，其最大超压值可达 30MPa（崖 13－1－1 井梅一段）。由 1 号断层下降盘一侧的乐东 30－1－1 井梅山组高超压现象的存在可以断定，在 1 号断层下降盘梅山组的超压现象会比上升盘更普遍，且超压值更高（图 4－11）。实际地层压力测试表明，下降盘地层压力确实高于上升盘，乐东 30－1－1 井

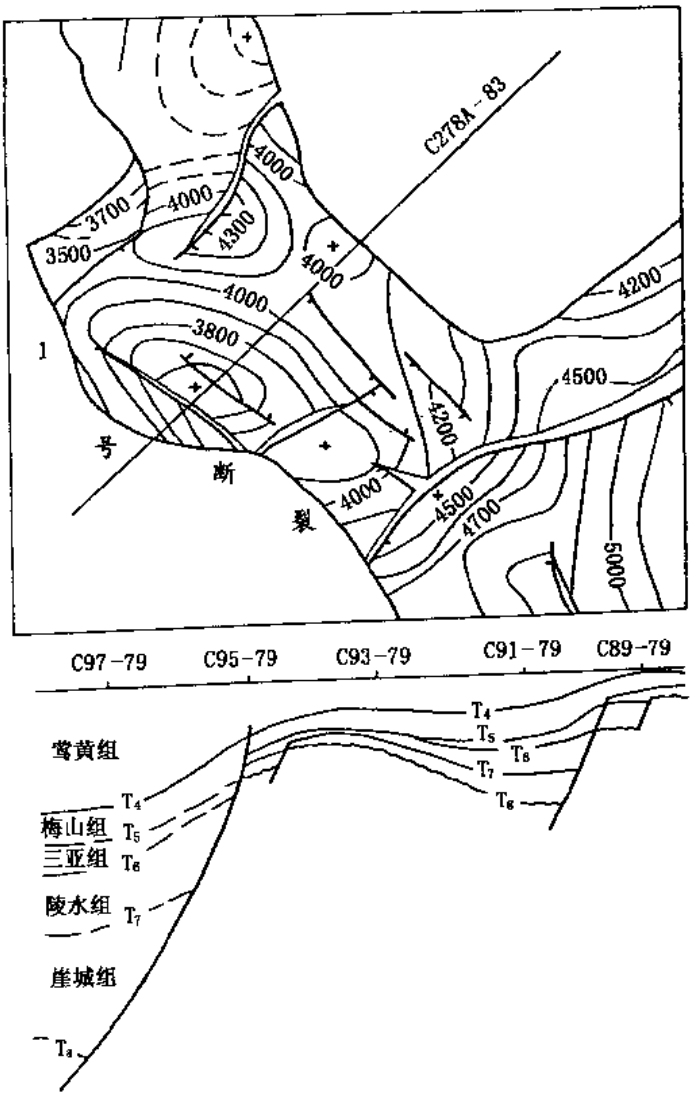


图 4－9　崖 13－1 构造平面及剖面图

平均地层压力梯度为 18.5MPa，而崖 13－1－1 井平均地层压力梯度为 10.5MPa，前者远高于后者。崖 13－1－1 构造目的储集层与断层另一盘超压层相对置，这种断块位移造成的不同流体压力岩层相接触，低压断块的封闭性会得到提高（陈发景、Harding，1989）。

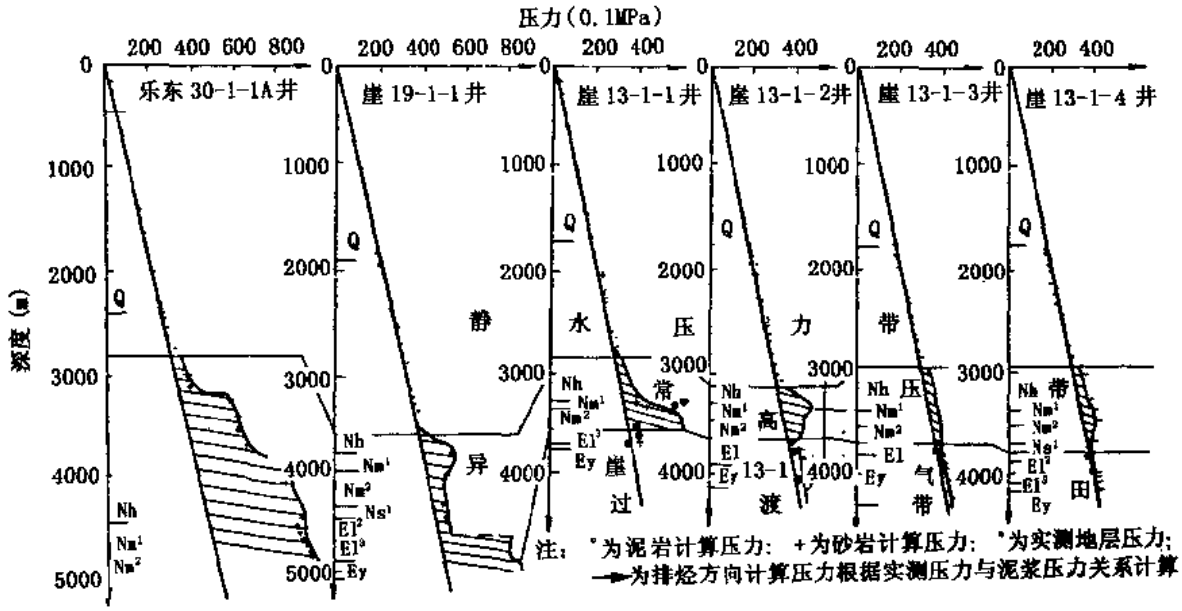


图 4－10　莺琼盆地孔隙流体压力剖面展布图

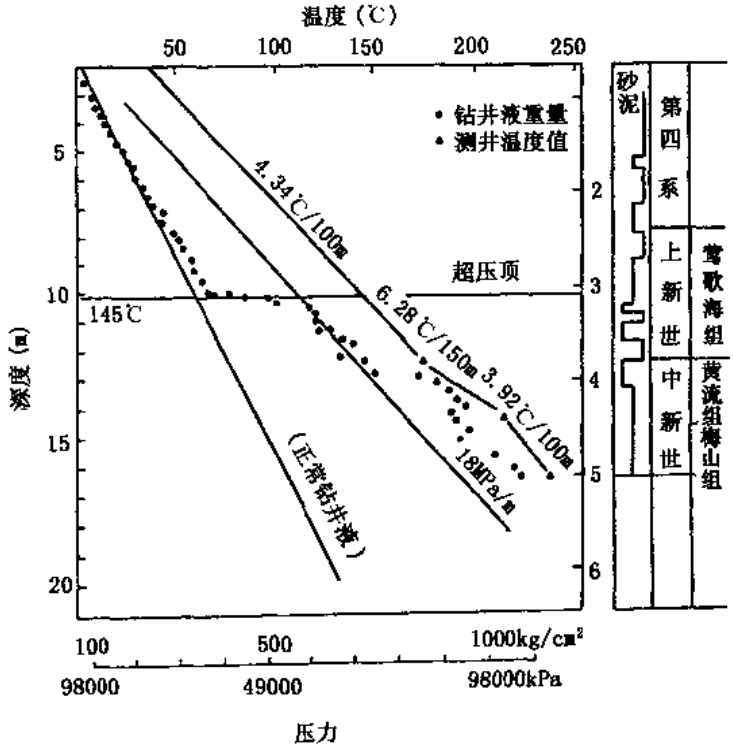


图 4－11　乐东 30－1－1A 井压力温度剖面图

从断层附近钻井地温梯度的差异上可断定1号断层垂向封闭性好，如表4－5中1号断层上升盘断层附近的崖13－1构造和崖19－1构造，下降盘断层附近的乐东30－1构造上各井地温梯度在剖面上无规律性变化，同一口井内埋藏浅地层地温梯度高，埋藏深地层地温梯度低，个别地层地温梯度甚至高于其下部地层温度梯度的几倍，如崖13－1－2井，2393.29～3457.35m井段，地温梯度为4.16℃/100m，在3457.35～3790.19m井的地温梯度高达8.32℃/100m，而在3790.19～4295.85m井段，地温梯度仅为2.89℃/100m，3457.35～3790.18m井段的地温梯度是3790.19～4295.85 m的2.8倍，这种上部地层地温梯度高，下部地层地温梯度低的现象在各井中均存在，这一方面说明盖层封隔能力强，另一方面说明断层垂向封闭性好，流体不沿断层发生垂向对流，上下层间的地温不能通过断层面对流而达到平衡。

表4－5　琼东南盆地1号断层附近各井地温梯度表

构造名称	井号	井深 (m)	地温梯度 (℃/100m)
崖13－1	崖13－1－1	<1825.751 1825.751～3069.34 3069.34～3617.98 3617.98～3822.19	4.34 3.93 4.76 5.71
	崖13－1－2	<2393.29 2393.29～3457.35 3457.35～3790.19 3790.19～4295.85	3.74 4.16 8.32 2.89
	崖13－1－3	<3618.28 3618.28～4069.08 4069.08～4301.64	3.98 6.50 2.01
乐东30－1	乐东30－1－1A	<3776.78 3776.78～4395.83 4395.83～5026.46	4.43 6.29 3.92
崖19－1	崖19－1－1	<2747.77 2747.77～4759.45 4759.45～5121.25	3.92 4.58 3.07

事实上，陵三段储集层横向连通性好，砂体平面分布广，钻井揭示崖13－1构造气水界面为3958m，而陵三段顶面与断层面交线最浅埋深约为3600m（图4－12）。如果断层不封闭，其圈闭溢出点埋深应为3600m，而事实上气水界面远大于“溢出点”埋深，表明断层侧向封闭性是良好的。

综上分析，1号断层南段具有良好的垂向、侧向封闭性，推测其封闭机理是同生断层形成的断层泥及侧向泥岩层封闭共同作用的结果。

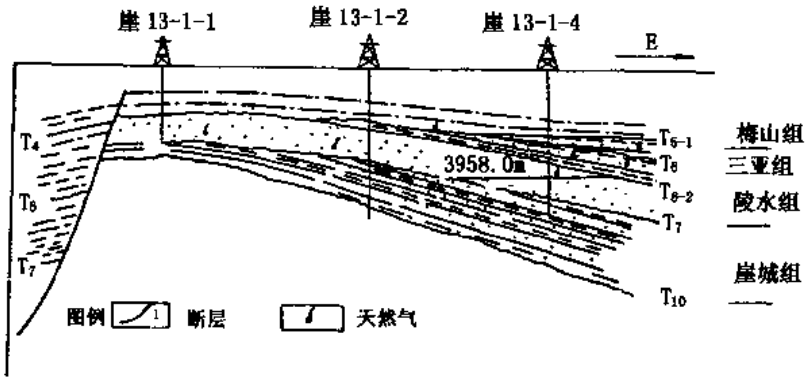


图 4－12　崖 13－1 气田剖面示意图

第二节　非线性映射分析法判断断层封闭性

断层封闭性是多种地质因素共同作用的结果，选择适当的数学地质方法将诸多的地质因素通过数学变换与计算进行综合分析，可确切地反映断层实际的封闭情况。通过大量分析证明，非线性映射分析是一种非常可信的判断断层封闭性的数学地质方法。

一、基本原理

非线性映射分析是一种“几何图像降维”的数学方法，由 J.W.Sammon 于 1969 年提出。该方法是通过某种非线性变换后，把高维空间几何图像转换为低维空间中的图像，要求变换后仍能近似地保持原像的几何关系，由此在低维空间中直观地看到一些高维样品相互关系的近似图像。

非线性映射分析分 Q 型和 R 型两类，Q 型是用距离系数矩阵表示样品点之间的关系，R 型通常是用相关系数矩阵或协方差矩阵表示变量间的关系，前者主要用于地质体的分类，后者主要用于地质变量的分类。断层封闭性的判别是将被判别的断层与已知封闭性断层一道进行数学变换和归类，以断定被判别断层封闭性的归属，属于地质体的分类研究，故选择 Q 型非线性映射分析。

以下简介 Q 型分析的基本原理：

设有 N 个样品，每个样品 P 个变量，则每一个样品点就相当于 R 空间中的一点 $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \cdots, X_{ip}]$ 现在要把 R^P 中的 N 点 $X_1, X_2, \cdots, X_N$ 映射到 N 维空间 R^l $(l<P)$ 中去，即通过非线性映射后，把 R^P 中的 N 点映射到 R^l 空间中，得到相应的 N 点：

$$Y_i = [Y_{i1}, Y_{i2}, \cdots, Y_{il}] \qquad i = 1,2,\cdots,N \tag{4-5}$$

一般 l 取 2，这样便于绘图。条件是：经过映射后，在 R^l 空间中点间的关系基本保持在 R^P 空间中点间的关系，即 R^l 中 N 点间距离仍近似于 R^P 空间中 N 点间的距离。

为此，引入量 E 作为高维变换到低维的约束条件。E 称之为映射误差，它是用 P 维空间中所有点的距离 d_{ij} 和一维空间中所有点的距离 d_{ij} 来定义的，表示一维空间中 N 点的构形对 P 维空间中 N 点构形的拟合程度。

$$E = \frac{1}{NF}\sum_{i<j} W_{ij}(d_{ij}^{*} - d_{ij})^2 \tag{4-6}$$

其中

$$NF = \sum_{i<j} d_{ij}^{*} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} d_{ij}^{*}$$

为标准化因子；

$$W_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^{*}}$$

为权因子；

式中 d_{ij}^{*}——R^{P} 空间样品点 i 和 j 之间的距离；

d_{ij}——R^{l} 空间中样品点 i 和 j 之间的距离。

$$d_{ij}^{*} = \sum_{k=1}^{p} [X_{ki} - X_{kj}]^2 \tag{4-7}$$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{p} [Y_{ki} - Y_{kj}]^2} \tag{4-8}$$

所以，映射误差 E 是 d_{ij}（$i=i$，$j=1$，2，…，N；$i<j$）的函数，其作用是用来作为由高维变换到低维的约束条件，使原空间 R^{P} 中各样品点之间的距离和新空间 R^{l} 中相应各样品点间距离之差的平方和达到小于 E 时，来求得新空间 R^{l} 中样品的几何构形。

计算步骤如下：

（1）列出原始观测数据的 $N \times P$ 矩阵

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1P} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2P} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{N1} & X_{N2} & \cdots & X_{NP} \end{bmatrix}$$

（2）计算两样品点 X_i 和 X_j 的距离

$$d_{ij}^{*} = \sqrt{\sum_{k=1}^{P} [X_{ik} - X_k]^2} \qquad i,j = 1,2,\cdots,N; i < j$$

得距离矩阵

$$D^{*} = \begin{bmatrix} d_{12}^{*} & d_{13}^{*} & d_{14}^{*} & \cdots & d_{1N}^{*} \\ & d_{23}^{*} & d_{24}^{*} & \cdots & d_{2N}^{*} \\ & & d_{34}^{*} & \cdots & d_{3N}^{*} \\ & & & & d_{N-1N}^{*} \end{bmatrix}$$

（3）任取 R^{l} 空间中 N 点的初始值

$$Y_1 = [y_{11} \quad y_{12} \quad y_{11}]$$
$$Y_2 = [y_{21} \quad y_{22} \quad y_{21}]$$
$$\cdots \qquad\qquad \cdots$$
$$Y_N = [y_{N1} \quad y_{N2} \quad y_{N1}]$$

为便于画图与观测，取 $l=2$，即平面。为减少计算时间，先取原始数据 X 进行 R 型因子分析，找出前两个主成分 F_1、F_2；构成一个因子面，然后把 N 个样品点在此因子面上的得分作为初始构形，进行迭代。

（4）计算两样品点的距离

$$d_{ij}^{(m)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{l}(y_{ik}^{(m)} - y_{jk}^{(m)})^2}$$

得矩阵

$$D_{ij}^{(m)} = \begin{bmatrix} d_{12}^{(m)} & d_{13}^{(m)} & d_{14}^{(m)} & d_{1N}^{(m)} \\ & d_{23}^{(m)} & d_{24}^{(m)} & d_{2N}^{(m)} \\ & & d_{34}^{(m)} & d_{3N}^{(m)} \\ & & & d_{N-1N}^{(m)} \end{bmatrix}$$

式中 $i, j=1, 2, \cdots, N$; $i<j$; m 为迭代次数。

(5) 将 $d_{ij}^{(m)}$代入 E 中，计算 $E(m)$

$$E(m) = \frac{1}{NF}\sum_{i<j} W_j(d_{ij} - d_{ij}^{(m)})^2$$

式中 $E(m)$ 为第 m 次迭代后的映射误差。

$d_{ij}^{(m)}$为第 m 次迭代后，在 R^l 中点 y_i 和 y_j 的距离。$E^{(m)}$为 $y_{p_q}^{(m)}$ ($p=1, 2, \cdots, N$; $q=1, 2, \cdots, l$) 的函数，故共有 $l \times N$ 变量。以后的计算步骤是调整变换 y_{p_q}，即变换 N 个样品点在 R^l 空间中的构形以减少映射误差。

用最快下降法搜索映射误差的极小值，即利用 $E(m)$ 对 $y_{p_q}^{(m)}$的一阶、二阶偏导数，求得$E(m)$达到极小值时在R^l中N个样品点的第$m+1$次的构形，进行迭代，最后使$E>E(m)$，此时所得的在 R^l 空间中的第 $m+1$ 次的 N 个样品点的构形即为非线性映射分析的结果。

迭代公式为

$$y_{p_q}^{(m+1)} = y_{p_q}^{(m)} - NF\Delta_{p_q}^{(m)} \tag{4-9}$$

式中

$$\Delta_{p_q}^{(m)} = \frac{\dfrac{\partial E(m)}{\partial y_{p_q}^{(m)}}}{\left|\dfrac{\partial^2 E(m)}{\partial^2 y_{p_q}^{(m)}}\right|} \tag{4-10}$$

$$\frac{\partial E(m)}{\partial y_{p_q}^{(m)}} = \frac{-2}{NF}\sum_{\substack{a=1 \\ a\neq p}}^{N}\left[\frac{d_{p_a}^{*} - d_{p_a}^{m}}{d_{p_q}^{(m)} d_{p_a}^{*}}\right](y_{p_q}^{(m)} - y_{p_a}^{(m)}) \tag{4-11}$$

$$\frac{\partial^2 E(m)}{\partial^2 y_{p_q}^{(m)}} = \frac{-2}{NF}\sum_{\substack{a=1 \\ a\neq p}}^{N}\frac{1}{d_{p_a}^{*} - d_{p_a}^{m}}\left[(d_{p_a}^{*} - d_{p_a}^{m}) - \frac{(y_{p_q}^{(m)} - y_{p_a}^{(m)^2})}{d_{p_a}^{(m)}}\left[1 + \frac{d_{p_a}^{*} - d_{p_a}^{(m)}}{d_{p_a}^{(m)}}\right]\right] \tag{4-12}$$

NF 是一个常数，控制收敛速度，通常取 $NF \approx 0.3, 0.4$。

把多个影响断层封闭性的因素看成是多维坐标，则每条断层即是这多维空间中的一个点，断层的封闭能力不同，其所在空间的位置就不同，封闭能力相似的断层，控制其封闭能力地质因素相似，所在坐标中空间位置就相近。在近似保持各断层间几何关系的前提下，通过数学变换使多维坐标降至二维平面，并在二维平面上研究不同封闭性能与断层所在的位置关系。可见，应用该方法研究断层封闭性时，必须首先正确找出影响断层封闭性的主要因素，并有一定数量经研究已确认是具有某种封闭能力和不具封闭能力的断层作为分析其他未

知封性断层的“参照物”，在非线性映射分析的二维平面上，与“参照物”相近的断层具有与“参照物”相似的封闭性。

二、应用实例

为对比研究，选取尽可能多的已知封闭性断层作基础，本节选择了大庆、辽河、大港的部分断层，取影响非活动性断层封闭性的最主要因素（断距、倾角、埋深、断层两盘平均砂泥比值、对盘与目的盘地层砂泥比值、两盘泥岩和砂岩层的一般厚度等地质变量）进行了非线性映射分析，得到非线性映射分析二维平面图（图 4－13）。

图 4－13 中，（1）～（39）号和（49）～（59）号断层为已知封闭能力的断层，其中（49）～（59）号为已知不封闭或封闭能力极差的断层，其他为已知具封闭能力的断层；（40）～（48）号和（60）号断层为被判断是应具有封闭性能的断层。

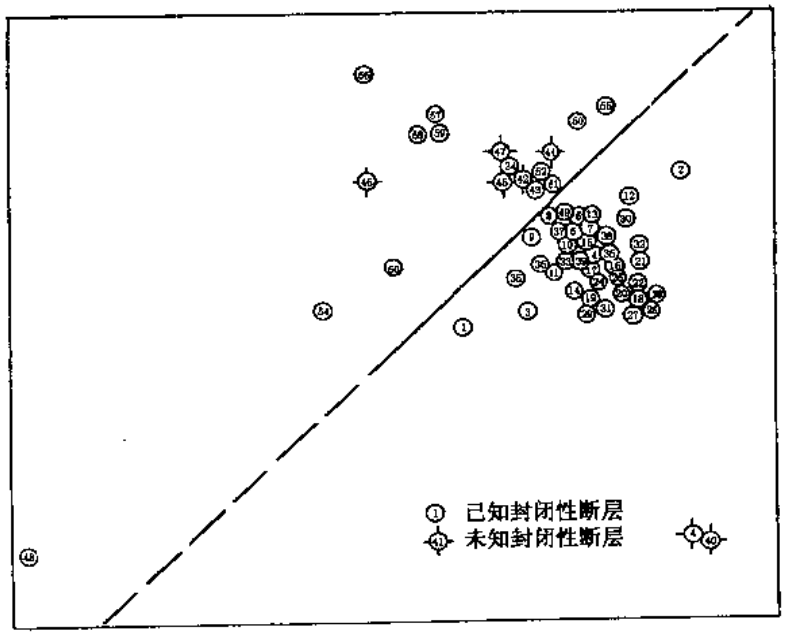


图 4－13　非线性映射分析判断断层封闭性平面图

从图 4－13 中可见，如果仅将断层封闭性分为封闭与不封闭两类，则两类断层明显分为两个点群，可用分界线将两类断层分开，分界线左侧为不封闭断层，分界线右侧为封闭断层，且由分界线向左，断层封闭性越来越差，向右则越来越好。这与断层的实际封闭情况完全吻合，如在分界线右侧的（26）、（27）、（28）号断层，位于大庆长垣以东地区的三站气田内，据气藏剖面分析，目的盘的含气井段不含水夹层，该含气层段与断层另一盘含水层段对置，表明断层具有强的封闭能力；（35）号断层（辽河兴隆台油田兴 82～兴 209 井间断层）目的盘含水层与含油层相互叠置，只有 38% 的储集层含油气，其他储集层含水。而在分界线左侧的（54）号（辽河曙光油田曙 1－40－34 井－杜 88 井间断层）和（56）号（辽河双南油田双 92－双 91 井间断层）断层，断层两盘均含稠油，且具有同一油水界面，表明断层不具任何封闭性。

通过各种地质资料综合分析认为，对被判断层得出的认识是正确的，如落入封闭断层点群一侧的（40）、（41）号断层，均位于大庆长垣以东的朝阳沟油田，被分析的断层层段是青山口组，该区青山口组为大套泥岩，是大庆长垣以东地区的主要区域性盖层，其厚度为

400m 以上，而该两条断层的断距分别为 25m 和 15m，远小于泥岩层厚度，即青山口组泥岩层没被错开，断层两盘泥岩相对置，此种情况下断层是封闭的。实际上，被断层错动的两盘附近，青山口组内仍保存着 5～6MPa 的孔隙流体超压，说明断层并不作为流体泄压的通道。而位于大庆长垣以东地区的断移上侏罗统的（47）、（48）和（60）号断层均落入了不封闭断层点群一侧这与综合地质分析得出的结论是一致的，该三条断层断移上侏罗统的砂泥比值分别为 2.3、20.5 和 50.0，据前述分析，断层在如此高的砂泥比值层段内不具封闭性。事实上，上侏罗统为本区主要气源岩层，但所发现的天然气多集中在其上覆的白垩系泉三、四段中，而在上侏罗统内却只见少量的天然气聚集，表明断层在油气运聚过程中以通道作用为主。

非线性映射分析能很好地反映多种地质因素综合作用的结果，所选择的变量及原始数据的读取不受任何人为因素的影响，且所用样品具重复使用性，是一种可信的断层封闭性判别的数学地质方法。

第三节　逻辑信息法判断断层封闭性

在盆地勘探的早期阶段，往往难以取得较齐全的定量化数据，而常常面临着大量的定性资料，为了能充分利用地质上的有用定性资料对断层封闭性进行定量研究，利用二态变化的逻辑信息数学地质方法研究断层封闭性。

逻辑信息法是数量化理论的一种，由前苏联学者近年来提出，该方法是以数理逻辑、组合分析及数理统计为基础的一种综合数学分析方法。通过转换器的研究，比较观测对象结构关系上的相似性，并评价这种结构个别元素的作用。

在国外，逻辑信息法已成功地应用于预测矿床产出的可能规模，如对前苏联滨海区锡矿床及汞矿床的预测，据称其可靠性可达 95% 以上。利用该方法对断层封闭性的研究，是我国学者曹瑞成、陈章明（1992）首次提出来的。利用此方法对汤源断陷、大庆长垣以西地区和松辽滨北地区断层封闭性的研究，所获结论是正确的。该方法的特点是能最大限度地利用地质工作者的学识和经验，适用于盆地勘探的早期阶段。

一、方法的基本步骤

①选择变量建立标志总体，即列出影响断层封闭性的各种地质因素。

②建立原始数据矩阵。所有标志（参数或称影响断层封闭性的因素）其值均取 0 或 1，该标志不存在取值为 0，该标志存在取值为 1。若样品数为 N，地质标志数（变量数）为 P，则有 0、1 的 $N \times P$ 矩阵。

③建立地质对象的变异序列。对勘探早期阶段断层封闭性的预测，须选择若干研究程度较高，已知具某种封闭程度的断层作为标准对象，用这部分标准对象建立变异序列。其目的在于筛选重要的影响断层封闭性因素（地质变量），这些标准对象（典型断层）的封闭性被认为是受相同地质因素所控制的。

④进行各种数学运算。A. 借助组合分析通过建立变异序列筛选变量，这样筛选出的变量称为信息标志，并按变量值 1 及 0 分别计算地质标志权。B. 借助逻辑运算对选出的信息标志计算信息权，其大小表示该标志的重要程度。C. 计算标志分权，区分哪些标志起正作用，哪些标志起负作用，以评价各标志对研究对象所起作用的性质与大小。

⑤检验所得结果。通过计算各标准对象的标志分权总量（也称“对象权”）评价所得结

果的正确性。若“对象权”大小变化的顺序与标准对象的变异序列（变化序列）一致，则说明结果正确。这时所选用的标志和所求得的标志权可用于对未知单元的预测和评价。

⑥未知对象（未知封闭性断层）的评价。

⑦对标志分权的意义进行地质解释。

根据已有的地质理论、根据计算结果对各地质标志的意义重新估价。

二、参数的选择

根据前面阐述的断层封闭性影响因素，取表 4－6 中各参数作为断层封闭性评价统计模式的计算标志。

表 4－6　统计模型标志（参数）一览表

编　号	断层封闭程度评价标志	标志类别
1	目的砂层上面有较厚的泥岩在两盘对置（同一盖层）	岩　性
2	目的砂层侧向上与另盘砂岩相接	
3	断层带为不渗透物质（断层泥）所充填	
4	为压性、压扭性断层（或显示压性特征）	力　学
5	为纯张性断层（剪切作用小）	
6	σ_1 方向与断层走向近于平行	
7	σ_1 方向与断层走向近 45°交角	
8	σ_1 方向与断层走向近垂直	
9	在某烃源岩烃类生成运移后形成或活动	时　间
10	断层两侧岩层相向而倾	基本特征
11	断层两侧岩层相背而倾	
12	断层平直或曲率较小	
13	断层在目的层段埋深较大（>2000m）	
14	断层在目的砂层段附近倾角较大（>60°）	
15	附近与其他大断裂斜交，或与走向平行、延伸相交的几条断层共生	
16	在此段断层沿走向弯曲	
17	断距较大（大于目的砂层厚度）	活　动　性
18	为同生断层性质	
19	目的砂层生长指数大于 1（在该层沉积时活动）	
20	目的砂层附近（横或纵向上）有超压层存在	其　他

注：σ_1 指评价时期区域构造应力场主压力应力方向。

三、封闭程度判别标准的建立

断层封闭程度即断层封闭能力。断层封闭性并非是一个绝对的概念，与盖层封闭性一样，在全封闭断层与不封闭断层之间存在着各种不同封闭能力的过渡类型，为叙述方便，将断层封闭性分为好（强）、较好（较强）、中等、差四种类型，以此作为对被判断层封闭性能的判别标准（表 4－7）。

四、标准对象的选取

根据上述断层封闭程度的分级标准，选择辽河、岔路河地区 8 条已知封闭能力的典型断层作为标准对象，在此基础上建立断层封闭能力统计预测模型（表 4－8）。

五、模型的建立与计算

根据上面断层封闭程度标准对象特征及标志类型，将每个标志取值0或1，建立了反映断层封闭程度由差至好的两个（Ⅰ、Ⅱ）相同等级的断层封闭程度变异序列（表4－9）。

表4－7　断层对烃类封闭程度判别标准表

封闭程度	标　准	图　示
好（Ⅳ）	圈闭被烃类充满至溢出点，断层两盘相接储集层中无统一的油水、气油界面，与泥质岩相接的单斜储集层中有较大的气顶	
较好（Ⅲ）	在圈闭闭合度范围内，断层两盘相接储集层中气顶较小或无，但有统一气油界面，但无统一油水界面，或与泥岩相接储集层中油水界面在溢出点之上，但大于闭合度1/2	
中等（Ⅱ）	圈闭内有少量油流，无气顶存在，断层两盘相接储集层中有统一油水界面，或与泥质岩相接储集层中有统一油水界面，或与泥质岩相接储集层中油柱高度小于闭合度的1/2	
差（Ⅰ）	在有油源运聚条件的情况下，圈闭内无烃类聚集	
前　提	在断层封闭的情况下，研究区的烃类运移量足以使圈闭充满烃类	

表4－8　标准对象特征简表

封闭程度	单元号	资料位置	基本特征简述
好	A_4	岔路河	走向近东西，倾向北，倾角50°～60°，断距1800～2500m，同生断层，晚期挤压，走向弯曲
	B_4	辽　河	走向北东东，倾向北西西，倾角50°～60°，断距700～1000m，同生断层，走向弯曲
较好	A_3	岔路河	走向近东西，倾向北，倾角50°，断距150～200m，同生性质，走向弯曲，与其他断裂相交
	B_3	岔路河	走向北东东，倾向南南东，倾角±55°，断距100～150m，走向平直，与另一条断层相交
中等	A_2	岔路河	走向北东东，倾向南南东，倾角60°～70°，断距50～100m，小同生断层，断面平直，走向弯曲
	B_2	辽　河	走向北西西，倾向北北东，倾角60°～70°，断距150～200m，小同生断层，断面平直，走向弯曲
差	A_1	辽　河	走向北西西，倾向北北东，倾角60°，断距50m，非同生断层，断面平直
	B_1	岔路河	走向北东，倾向北西，倾角60°～50°，断距±150m，非同生断层，与其他断裂相交

1. 筛选标志

首先去掉没有区分意义的标志，再利用编码理论中普通位移帕斯基三角形计算两序列（Ⅰ、Ⅱ）调整前后的每个标志权和相对标志权，并以此筛选出两类起正作用 $\overline{P}_k^*(1) > \overline{P}_k^*(0)$ 和起负作用 $\overline{P}_k^*(1) < \overline{P}_k^*(0)$ 的10个信息标志。

表 4－9　断层封闭程度变异序列及标志筛选表

断层封闭程度序列			典型实例（标准对象）		地质特征标志及标志构型																		
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	17	19	20
封闭程度变异序列	Ⅰ	差	A_1		0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
		中等	A_2		1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
		较好	A_3		1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
		好	A_4		0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0
	Ⅱ	差	B_1		0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
		中等	B_2		0	0	?	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
		较好	B_3		1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
		好	B_4		1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
标志权的计算及相对标志权的对比	调整前	$P_k^*(1)$		Ⅰ	2	0	∃	5	∃	0	1	5	0	1	2	0	4	0	3	5	3	3	3	∃
				Ⅱ	5	1	∃	∃	∃	1	1	3	0	1	2	0	2	1	5	4	1	4	1	∃
		$P_k^*(0)$		Ⅰ	3	3	∃	0	∃	3	2	0	3	2	1	5	1	5	0	0	0	0	0	∃
				Ⅱ	0	4	∃	∃	∃	4	2	0	5	2	1	5	1	2	0	1	2	1	2	∃
		$\overline{P}_k^*(1)\ \overline{P}_k^*(0)$		Ⅰ	<	<	∃	>	∃	<	<	>	<	<	>	<	>	<	>	>	>	>	>	∃
				Ⅱ	>	<	∃	∃	∃	<	<	>	<	<	>	<	>	<	>	>	<	>	<	∃
	调整后			Ⅰ	2	1	∃	∃	∃	1	1	3	0	0	1	0	3	0	5	3	1	4	1	∃
				Ⅱ	5	0	∃	5	∃	0	1	5	0	4	5	0	∃	1	3	3	3	3	3	∃
		$P_k^*(0)$		Ⅰ	3	4	∃	∃	∃	4	2	0	5	5	4	5	0	5	0	0	2	1	2	∃
				Ⅱ	0	3	∃	0	∃	3	2	0	3	1	0	5	∃	2	0	0	0	0	0	∃
		$\overline{P}_k^*(1)\ \overline{P}_k^*(0)$		Ⅰ	<	<	∃	∃	∃	<	<	>	<	<	<	<	>	<	>	>	<	>	<	∃
				Ⅱ	>	<	∃	>	∃	<	<	>	<	>	>	<	∃	<	>	>	>	>	>	∃
指标筛选结果					×	√	×	×	×	√	√	√	√	×	×	√	×	√	√	√	×	√	×	×

注：(1) 本表所用公式：$\overline{P}_k^*(1) = [\overline{P}_k^*(1)/L_k] \cdot 100\%$；$\overline{P}_k^*(0) = [\overline{P}_k^*(0)/L_k] \cdot 100\%$；

$\max P_k^*(1) = \max P_k^*(0) = L_k$。

(2) 标志权、相对标志的计算借助编码理论中普通的“位移帕斯基三角形”。

$P_k^*(1)$ 和 $\overline{P}_k^*(0)$ 为每个标志的相对标志权，可由下式求得

$$\overline{P}_k^*(1) = P_k^*(1)/L_k \tag{4-13}$$

$$\overline{P}_k^*(0) = P_k^*(0)/L_k \tag{4-14}$$

其中

$$L_k = P_k^*(1) + P_k^*(0) \qquad (k \text{ 为标志号}, k = 1,2,\cdots,P)$$

$P_k^*(1)$ 和 $P_k^*(0)$ 为通过位移帕斯基三角形分别计算出来的每个标志的标志权，L_k 为变量 k 在组成变异序列样品及标志 k 取值为1的样品数固定条件下的最大权。

2. 求各重要标志的标志信息权 P_k

根据筛选后的信息标志，列出简化前标准对象数据表（表 4－10），并在此基础上建立区分标志一览表（表 4－11）；做出断层封闭程度区分标志枝状图（图 4－14），从枝状图中查得最小区分标志组合（表 4－12），用每个标志所在最小区分标志组合数计算出评价断层封闭程度指标的信息标志权 P_k（表 4－13），再根据以下公式计算出各标志分权 P_k、各标志分权绝对差 R_k 及每个单元（标准对象）的对象权 I_i（表 4－14），最后得断层封闭性判别模型（表 4－15）。

表 4－10　简化前标准对象数据表

封闭程度组号	单元号	序号	信息标志号									
			2	6	7	8	9	12	14	15	16	18
Ⅰ差	A_1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	
	B_1	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
Ⅱ中等	A_2	3	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
	B_2	4	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
Ⅲ较好	A_3	5	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
	B_3	6	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
Ⅳ好	A_4	7	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
	B_4	8	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1

注：表中标志 8，9 互逆，将其加以合并，并以标志 8 表示。

表 4－11　区分标志一览表

对比行号	区分标志号									阶　号
	2	6	7	8	12	14	15	16	18	
1～3		6	7				15		18	
4	2	6	7					16	18	
5	6		8	12	14	15	16	18		
6				12	14	15		18		
7	2	6		8	12	14	15	16	18	
8	2	6		8	12	14	15	16	18	
2～3		6	7			14	15		18	
4	2	6	7			14		16	18	
5		6		8	12		15	16	18	
6					12		15		18	
7	2	6		8	12		15	16	18	
8	2	6	8	12		15	16	18		
3～5			7	8	12	14		16		
6		6	7		12	14				
7	2		7	8	12	14		16		
8	2		7	8	12	14		16		
4～5	2	7	8	12	14	15				
6	2	6	7		12	14	15	16		
7			7	8	12	14	15			
8			7	8	12	14	15			
5～7	2									Ⅰ
8	2									
6～7	2	6						16		
8	2	6						16		

表 4－12　最小区分标志组合表

最小区分标志组合	原始信息表中 标志组合个数
2－14－15－6－16	1
2－14－15－6－18	1
2－14－15－7－8①	2
2－14－16－12－6	1
2－14－16－12－15	1
2－14－16－18－6	1
2－14－16－18－7	1
Σ	8

表 4－13　标志信息权计算表

标志号	包含该标志的 最小区分标志组合数	标志信息权 P_k
2	1＋1＋1×2＋1＋1＋1＋1＝8	8/8＝1.0
6	1＋1＋1＋1＝4	4/8＝0.5
7	1×2＋1＝3	3/8＝0.375
8 (9)	1×2＝2	2/8＝0.25
12	1＋1＝2	2/8＝0.25
14	1＋1＋1×2＋1＋1＋1＋1＝8	8/8＝1.0
15	1＋1＋1×2＋1＝5	5/8＝0.625
16	1＋1＋1＋1＋1＝5	5/8＝0.625
18	1＋1＋1＝3	3/8＝0.375

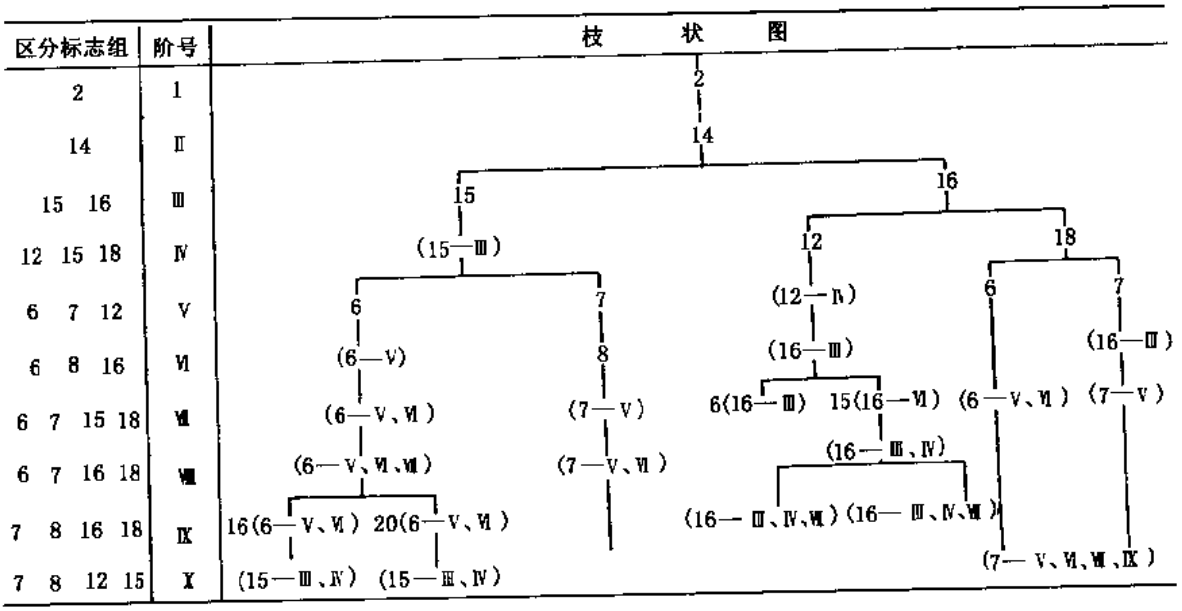


图 4－14　断层封闭程度预测区分标志枝状图

表 4－14　计算结果表

类目	变异序列（封闭程度）	单元号	序号	标志号										
				2	6	7	8	9	12	14	15	16	18	
原始数据	Ⅰ差	A_1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	
		B_1	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	
	Ⅱ中等	A_2	3	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	
		B_2	4	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	
	Ⅲ较好	A_3	5	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	
		B_3	6	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	
	Ⅳ好	A_4	7	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	
		B_4	8	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	
计算结果	标志权	P_k^*（1）		1	1	2	8	0	0	1	8	9	6	
		P_k^*（0）		7	7	4	0	8	10	7	0	1	0	
	相对标志权	$\overline{P}_k^*$（1）		0.125	0.125	0.333	1.0	0	0	0.125	1.0	0.9	1.0	
		$\overline{P}_k^*$（0）		0.875	0.875	0.6667	0	1.0	1.0	0.875	0	0.1	0	
	标志信息权	P_k		1.0	0.5	0.375	0.25	0.25	0.25	1.0	0.626	0.625	0.375	单元对象权
	标志分权	P_k^*（1）		0.125	0.0625	0.125	0.25	0	0	0.125	0.625	0.5625	0.375	
		P_k^*（0）		0.875	0.4375	0.25	0	0.25	0.25	0.875	0	0.0625	0	（I_i）
	分权绝对差	P_k（1）		0	0	0	0.25	0	0	0	0.625	0.5	0.375	
		P_k（0）		0.75	0.375	0.125	0	0.25	0.25	0.75	0	0	0	Σ
检验变化序列	A_1单元各标志分权（绝对差）			0	0	0.125	0	0	0	0	0	0	0	0.125
	B_1单元各标志分权（绝对差）			0	0	0.125	0	0	0	0.75	0	0	0	0.875
	A_2单元各标志分权（绝对差）			0	0.375	0	0	0	0	0	0.625	0	0.375	1.375
	B_2单元各标志分权（绝对差）			0.75	0.375	0	0	0	0	0	0	0.5	0.375	2.0
	A_3单元各标志分权（绝对差）			0	0.375	0.125	0.25	0.25	0.25	0.75	0.625	0.5	0.375	2.565
	B_3单元各标志分权（绝对差）			0	0	0.125	0	0	0.25	0.75	0.625	0	0.375	2.125
	A_4单元各标志分权（绝对差）			0.75	0.375	0.125	0.25	0.25	0.25	0.75	0.625	0.5	0.375	4.25
	B_4单元各标志分权（绝对差）			0.75	0.375	0.125	0.25	0.25	0.5	0.75	0.625	0.5	0.375	4.25

表 4－15　断层封闭性判别模型表

标　号	标志内容	标志分权绝对差	
		P_k（1）	P_k（0）
2	断层两盘的砂岩层相对接	0	16.69
6	σ_1方向与断层走向近于平行	0	7.63
7	σ_1方向与断层走向近于45°交角	0	2.79
8	σ_1方向与断层走向近于垂直	11.45	0
9	在某烃源岩烃类生成运移后形成或活动	0	11.45
12	断面平直或曲率很小	0	6.36
14	断面在目的层段附近倾角较大（大于60°）	0	4.77
15	所研究断层与其他断层斜交	0	15.27
16	所研究断层沿走向呈弯曲状	8.14	0
18	为同生断层性质	15.27	0

$$P_k = A/B \tag{4-15}$$

式中 P_k 为每个标志的标志信息权；A 为包含有标志 k 的最小区分标志组合数；B 为全部最小区分标志组合数。

由此可求得标志分权 $\dot{P}_k$（1）和 $\dot{P}_k$（0）：

$$\dot{P}_k(1) = P_k{}^*(1) \cdot P_k \tag{4-16}$$

$$\dot{P}_k(0) = P_k{}^*(0) \cdot P_k \tag{4-17}$$

再计算标志分权 P_k（1，0）

$$P_k(1,0) = |P_k(1) - \dot{P}_k(0)| \tag{4-18}$$

对于被研究断层，根据模型中的标志内容，赋于 0、1 数值，如标志 2。若目的砂层在侧向上与另一盘砂岩相对置，取值为 1，否则取值为 0。根据各标志的赋值（0 或 1），按照表 4－15 中各标志分权绝对差 R_k（1）或 R_k（0）（由各标志取值 0 或 1 所定）。用下式计算对象权 I_i；由 I_i 的分级标准（表 4－16）对被评价断层的封闭能力归类。

$$I_i = \sum_{k=1}^{P} R_k(0,1) \tag{4-19}$$

表 4－16　断层封闭能力对象权分级标准表

断层封闭级别	对象权	断层封闭能力
Ⅰ	75～100	极好
Ⅱ	50～75	好
Ⅲ	25～50	中
Ⅳ	10～25	差
Ⅴ	0～10	极差

六、模型的检验

根据表 4－15 断层封闭性判别模型，对辽河欢喜岭油田 3 个油层组中 10 条已知封闭性能的断层进行了计算，结果见表 4－17。

表 4－17　模型检验计算表

实　例	标　志　号										对象权	评价结果	符合情况
	2	6	7	8	9	12	14	15	16	18			
沙二油组齐 14 断块北界断层	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	66.28	好	√
沙二油组齐 13 断块南界断层	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	81.19	极好	√
沙二油组 7～9 断块北界断层	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	65.54	好	√
沙二油组 18～11 断层	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	49.79	中	√
大凌河油层二组欢 27 断块北界断层	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	68.04	好	√
沙二组锦 16 断块北界断层	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	53.62	好	√
杜家台油层一组欢 11 断块北界断层	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	45.75	中	√
杜家台油层一组 3～5 断块北界断层	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	59.73	中	×
沙二油组 18～11 东侧 NNE 向断层	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	10.6	差	√
沙二油组锦 16 断块西界断层	1	0	0	1	1	1	1	1	1		51.81	好	√

由表中可见，10 个中有 9 个完全符合，符合率高达 90%，其中一条不符合者也属于邻

级不符，而不是跨级不符，因此，模型是令人满意的。

七、应用实例

本章第一节中已经利用综合地质分析法对琼东南盆地1号断层南段的封闭性作了研究，研究结果确认1号断层南段封闭性好。因为1号断层南段作为崖13－1构造的边界，崖13－1构造上已经钻多口探井，各种地质资料相对较全。利用综合地质分析法基本可确定断层的封闭性质。然而，琼东南盆地断裂发育（图4－8），其他大断层附近因缺少钻井，一些数量化资料难以取全，利用综合地质分析法判断断层封闭性较困难，逻辑信息法则可较好地解决这一难题。

根据地震资料获得目的层段岩性对接情况（通过地震相）、断层性质（正断层或逆断层）、断层倾角大小、断面曲率大小、断层组合情况等，通过前人对本区大地构造背景分析，获得了断层走向与应力场主应力之间的关系，通过对断层发育史及生烃史的分析获得了断层形成时间、发育历史、烃源岩最早排烃期、排烃高峰期等资料。应用逻辑信息法对该区几条主要断层封闭性进行了判别（表4－18）。

表4－18　应用逻辑信息法对琼东南盆地主要断层封闭性的判断

断层号	标志号										对象权 I_t	封闭能力评价
	2	6	7	8	9	12	14	15	16	18		
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	59.3	好
2－1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	70.23	好
2－3	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0.31	好
2	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	79.96	极好
3	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	63.95	好
5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	59.29	好
17	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	59.29	好

研究结果表明，利用逻辑信息法对1号断层封闭性的判断结果与综合地质分析法所得结论是一致的，由此也证明逻辑信息法判断断层封闭性是可信的。由表4－18可见，琼东南盆地所有主要断层的现今封闭性均是好的，其中2号断层封闭性极好，在该条件下，若有相应的构造配合，对油气的聚集是非常有利的。

第四节　断面剖面分析法判断断层的封闭性

这是Allan，U.S.1989年提出的判断断层封闭性方法，也称为Allan图解法。

一、基本原理

假设断层面是紧闭的断层面不作为油气垂向运移通道，断裂带中无其他物质充填，或者即使透层与对置盘非渗透层相对接，断层侧向封闭。

有充填，其充填物不影响断层的侧向和垂向封闭性；断层两盘储层的物性基本一致，不存在物性差异；储层和非储层可用渗透层和非渗透层描述；断层的侧向封闭与否取决于断层两盘地层的对置状况，如果目的盘渗透层与对置盘渗透层相对接，断层侧向开启，如果目的盘渗以断层面为镜面，分别将断层两盘与断面相接触的地层投影到断层面上，便得到了断面剖面图（图 4－15）。图中具有封闭末端的地层描述的是渗透性地层的分布情况，渗透层之间的空白部分为非渗透层。无遮挡部分的渗透层组为目的盘储层，部分被目的盘储层遮挡的渗透层组为对置盘储层。断面剖面图可清楚地反映断层两盘岩层的对置情况，同一条储层在沿断层走向的不同位置侧向封闭情况是不一样的，当其与对置盘泥岩层相对接时，断层在对接部分侧向上是封闭的，否则侧向开启。

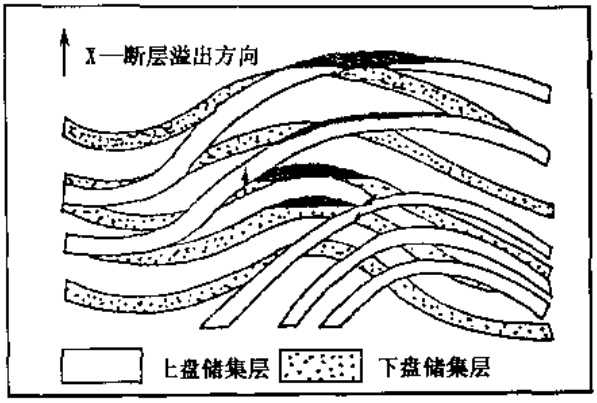


图 4－15　断面剖面图

二、做图的基本步骤

①针对研究断层，垂直断层走向选。择若干条断层剖面（过每条断层至少有 3 条剖面），如果需要研究区内若干条相邻断层，则剖面线尽可能照顾其他断层，使剖面线与所有断层走向线尽可能垂直（图 4－16），并使剖面线尽可能过已在区内完成的钻井。

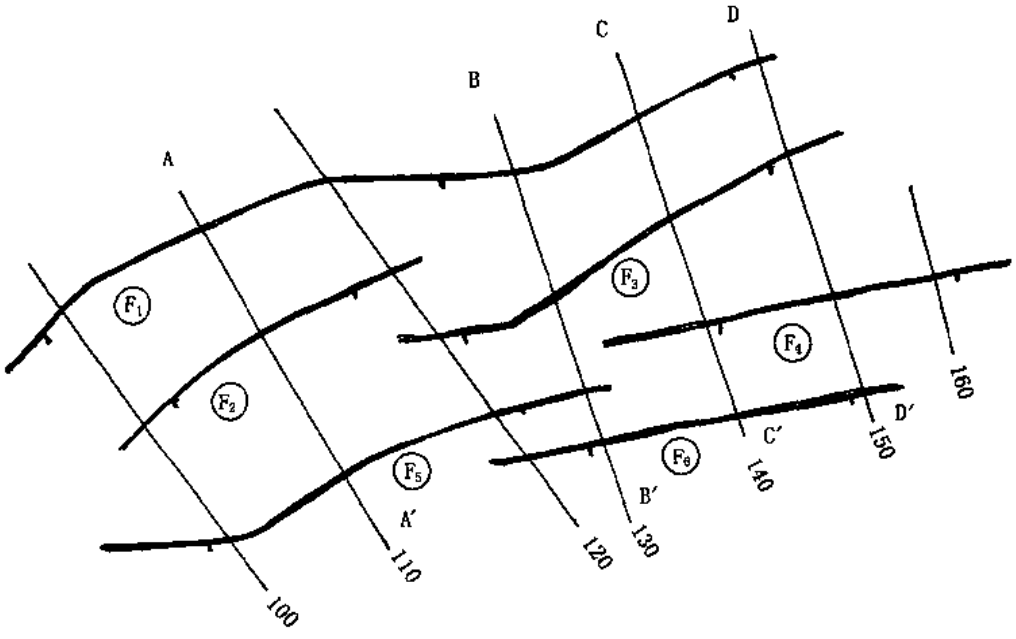


图 4－16　断层剖面线选位图

图中 ABCD 为零间距断层面；A′B′C′D′为断层切片走向投影图

②根据钻井资料进行地层划分与对比，这项工作越细越好，最好能划分对比到单砂层，完成所有设计好的断层剖面图。往往在勘探的初期阶段，研究区内钻井很少，欲做此图则必

须借用人工地震资料，通过地震资料确定层位和岩性，并在此基础上进行地层划分与对比，但地震资料确定的岩层只能是笼统的，不可能像钻井提示的地层那样实际、细致，因此，作出的图件也只能是概括性质的，与实际地层情况还存在着一定的距离。因此，建议只要有钻井资料，就尽可能利用之，除非井太少，不得不用地震资料。

③将每条剖面所揭示的断层两盘地层分别投影到断层面上，连接同一盘上相同地层的顶底界面点，便可形成我们想要的断面剖面图（图 4－17）。

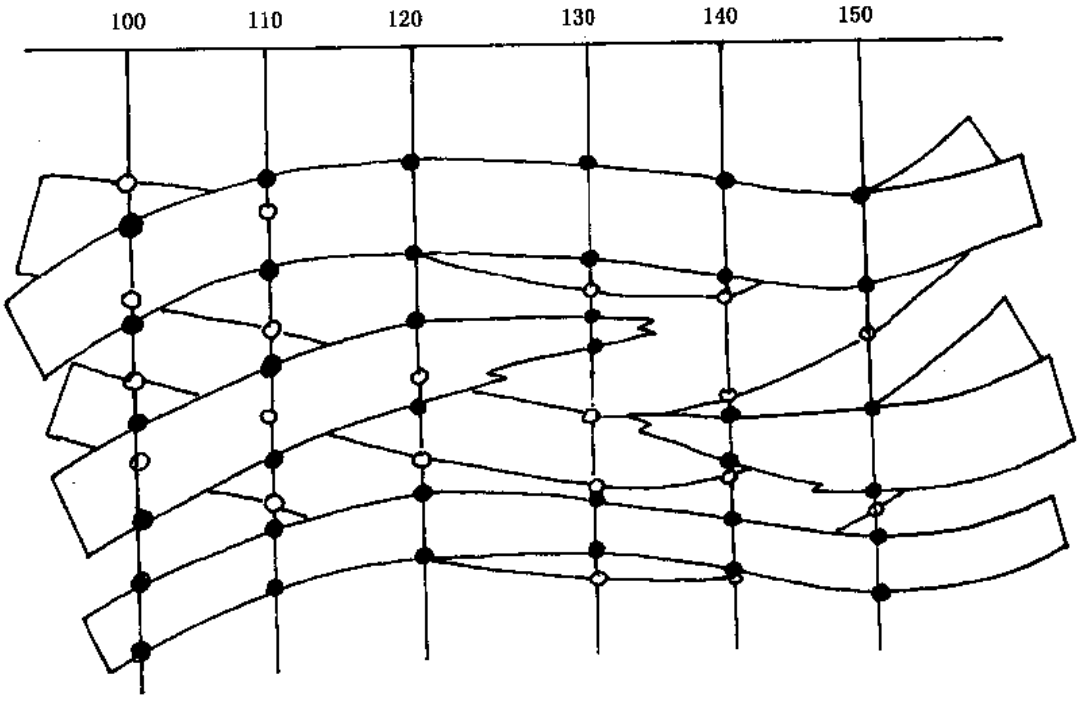


图 4－17　F_1 断层断面剖面图

三、实例分析

张永华等（2001）依据上述原理对焉耆盆地博湖坳陷本布图油田 Y2 井区的断层进行了封闭性分析。

本布图油田 Y2 井区位于焉耆盆地博湖坳陷北部的本布图构造带上，含油层段的三工河组上段为辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积，为一向上变细的正旋回，储层岩性主要为细砾岩、砾状砂岩和含砾砂岩，油层单层厚 5～25m，油层泥岩隔层厚 5～15m，油层分布受构造圈闭控制。

首先利用合成记录对三工河层段的主要目的层（Y2 井对应井段 2545.5～2556.5m）进行层位标定，作出油层顶面构造图（图 4－18）。从构造图上看出 Y2 井区是由构造控制的背斜型油气藏，其上被 F_3 和 F_4 两条相交断层切割，背斜圈闭复杂化，形成背斜油气藏。F_3 断距为 20～100m，F_4 断距为 30～200m。图 4－19、图 4－20 分别是 F_3、F_4 断层的断面剖面图。从图中可以看出 F_3、F_4 断层在 Y2 井处对 2、3 号小层具有封堵作用（其溢出点分别为图上 b、c 点处），对 1 号层不具有封堵作用，因为在 Y2 井钻遇的断层上盘一号储层与下盘储层在 a 点相交，使油气散失。

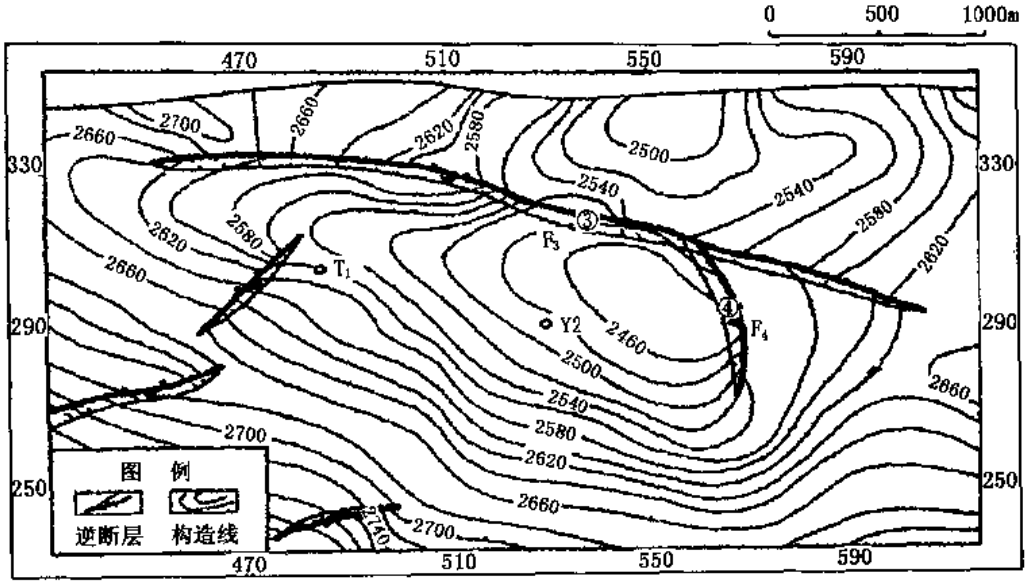


图 4－18　本布图油田 Y2 井区主力油层顶面构造图（据张永华等，2001）

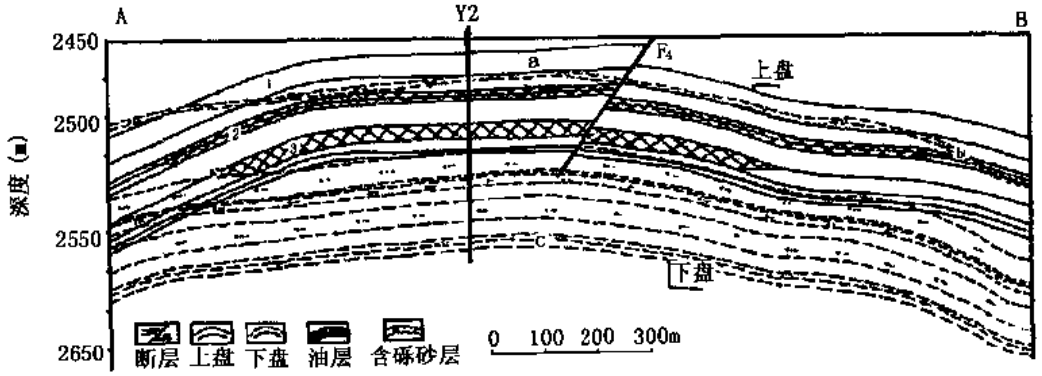


图 4－19　Y2 井区 F_3 号断层封堵性分析截面图（据张永华等，2001）

图中 a、b、c 分别代表 1、2、3 层油气溢出点

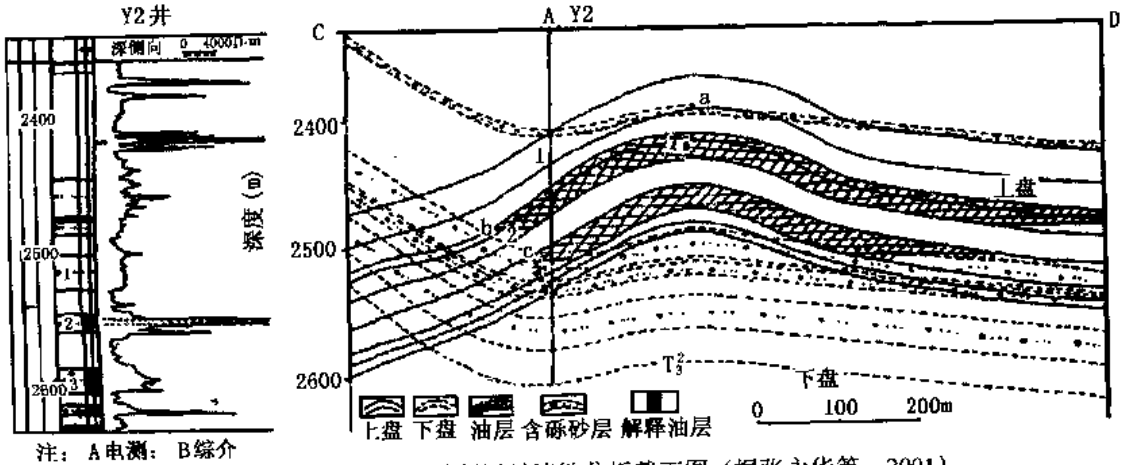


图 4－20　Y2 井区 F_4 号断层封堵性分析截面图（据张永华等，2001）

图中 a、b、c 分别代表 1、2、3 层油气溢出点

第五节　利用断层切片技术研究断层封闭性

一、基本原理

断层切片技术是A.R.Brown等于1987年开发的一项研究与断层有关构造的人机交互技术，下面是张永华等（2001）据之所做的具体工作，它是利用人机交互解释工作站从三维地震数据体中平行某一条已解释好的断层面等间距提取一系列地震信息剖面。它们是与断层面形态相同的倾斜曲面。倾斜曲面上的地震信息保留了原三维数据中的地震反射特征，它们可以按水平切片方式投影显示。

零间距的断层切片就是断层面本身的倾斜地震剖面，而正向间距或负向间距的断层切片分别反映断层上盘和下盘不同部位，且平行于断层面的倾斜地震剖面。利用断层切片可以研究断层上升盘或下降盘的目的层构造形态，发现和研究与主断层斜交的次级断层的分布和发育特征，研究断面上相应的断距在横向上或纵向上的变化规律。

把断层切片技术应用于圈闭分析研究，通过岩性标定的断层切片资料可以研究断面上的地层分布和岩性分布。在零间距的断层切片上可以展示出断层两盘的岩性接触关系，明确断面储层的封堵作用，从而可对圈闭的有效性作出评价。为了具体说明这一功能，引入如下概念。

1. 断层走向投影面

图4－21中的曲面部分为断层面，AB为断层的走向方向，与断层走向方向一致的铅垂平面称为断层走向投影面。

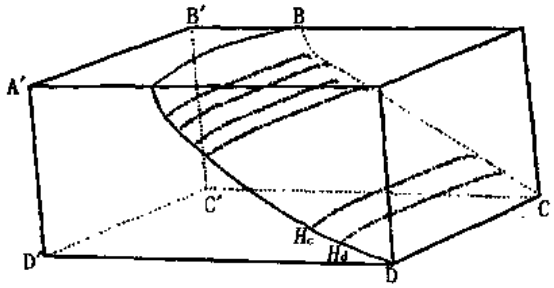


图4－21　断层走向投影示意图
（据张永华等，2001）

2. 断层走向投影

一条断层会切割一个或几个地震反射波，把该断层上盘和下盘的各个地震反射层终断点的T_0值，投影到断层走向投影面上，这样对每一套砂泥岩层顶底反射波，在走向投影面上都用两套反射波来显示，一套是上盘的反射波，另一套是下盘的反射波。在图4－21中断层面切割了H_1，H_2，…，H_n个反射波，这一系列反射波沿走向在上盘的终断点位置为H_{u_1}，H_{u_2}，…，H_{u_n}，在下盘的终断点位置为H_{d_1}，H_{d_2}，…，H_{d_n}，把这$2n$个反射波同向轴投影到断层走向投影面上，它们分别代表沿断层上下盘各储层、泥岩层顶底与断层的交点。通过对走向投影面上反射波同向轴进行层位标定，利用过井或邻井的VSP或地震测井资料对其时深转换，人们可形象地观察到圈闭的几何形态、地层形态以及断层两盘岩性的并置情况，以及因并置出现的封堵情况。

二、应用实例

张永华等（2001）应用此技术对焉耆盆地博湖坳陷本布图油田Y2井区控制圈闭的断层封闭性进行了分析，构造平面图是图4－18，其具体做法：

①对每条垂直剖面的F_3、F_4断层上、下盘的层位进行精细的对比和拾取；

②对 F_3、F_4 断层做切片处理，按水平切片方式投影显示；

③结合剖面上层位解释方案，在断层上升盘、下降盘和零间距的断层切片上分别对比和拾取 T_0 反射层位；

④对断层切片上的反射信息做岩性标定。

根据钻井资料、测井资料、合成记录与三维地震过井垂直剖面的层位标定结果表明，T_8^2 是砂岩集中段的顶界反射，具有连续、强振幅反射特征。在层位标定和精细解释下，分别拾取断面上下盘的振幅信息，生成在其走向投影方向上的断层面上盘与下盘反射波所对应的剖面（图 4－22）。图中黑色同相轴代表断层面处砂砾岩相对集中发育的层段，在图中箭头所指的同相轴代表 1、2、3 号储层所对应的砂层组。从该图中看出 Y2 井主要目的层（1、2、3 号储层）所对应的反射波具有明显的幅度，反映断背斜油藏的特点。从断面剖面图（图 4－19）分析，该储层所对应的反射波绝大多数不重叠，因此该断层对 Y2 井区块主力油层具有封堵作用。于是在该构造的低部位部署了 1 口井，经钻探 2 号储层获 45.4m^3/d 的工业油流。

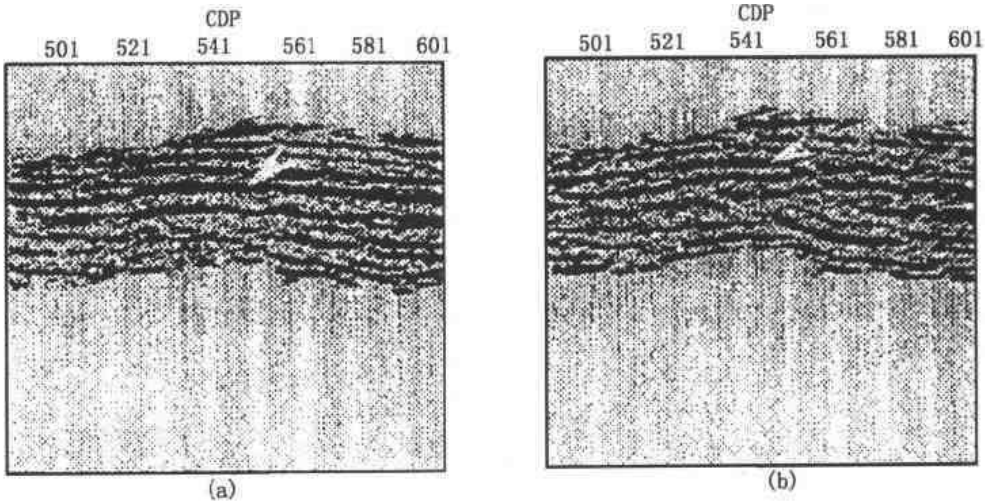


图 4－22　F_3 号断层走向投影图（据张永华等，2001）

(a) 下盘地震反射剖面；(b) 上盘地震反射剖面图中箭头所指的同相轴为断层面处主力油层反射波

第六节　模糊综合评判判断断层封闭性

该方法是由邓俊国和蔡忠（1998）提出的，是应用模糊变换和最大隶属度原则，考虑影响断层封闭性的各种因素对其所做的综合研究。

一、断层封闭性单因素评价矩阵的构成

正确建立断层封闭性单因素评价矩阵是进行断层封闭性模糊综合评价的关键环节。在研究中采用离散隶属函数和连续隶属函数确定各单因素评判隶属度。根据各断层每一种因素的隶属度值建立单因素评价矩阵。

1．封闭性标志的选择

在断层封闭性影响因素及断层封闭机理研究基础上，确定影响断层封闭性的重要因素有断面承受应力及断层力学性质、断层及两侧储层排驱压力、断层泥分布情况、断层两侧岩性

配置关系，断层封闭系数等岩层产状配置关系以及断层活动期与油气运移期配置关系等。

2. 封闭性的标志隶属度的确定

(1) 断层承受应力及断层力学性质

断层承受应力及力学性质是使断层具封闭性的必要条件。当断层承受压应力，而剪切应力为零时，断层为纯压性，断层封闭性强；当断层承受纯剪应力时，断层封闭性较强；当断层承受张应力兼剪应力时，断层为张扭性，断层封闭性较差；当断层承受张应力，而剪应力为零时，断层为纯张性，断层不具封闭性。其隶属函数为：

$$\mu(x)=\begin{cases}1 & \sigma_F>0 \quad \sigma_F>\sigma_C \quad \tau_F=0\\ ax & \sigma_F>0 \quad \sigma_F>\sigma_C \quad \tau_F\neq 0 \quad \sigma_F=0 \quad \sigma_F\neq 0\\ b\dfrac{1}{x} & \sigma_F<0 \quad \sigma_F>\sigma_T \quad \tau_F\neq 0\\ 0 & \sigma_F<0 \quad \sigma_F=0\end{cases} \tag{4-20}$$

式中 a，b——研究区经验常数；

x——断面承受应力。

(2) 断面及两侧储层排驱压力

当断面排驱压力（P_F）大于两侧储层排驱压力 P_{d1} 和 P_{d2} 时，断层封闭性强，其隶属度为 1；当断面排驱压力小于两侧储层排驱压力时，断层封闭性差，其隶属度为 0；当断面排驱压力大于两侧储层排驱压力，且两侧储层排驱压力不等，有明显差别时，其隶属度为 0.5。

(3) 泥岩涂抹层分布情况

当泥岩涂抹带在空间上呈连续分布时，断层封闭性强。用泥岩涂抹系数 f_m 表述泥岩涂抹层带的空间连续性，当 f_m 值在临界值范围内时，f_m 值越小，断层封闭性越好。其隶属函数为：

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & x>c\\ \dfrac{1}{1+\alpha(c-x)^{-\beta}} & x<c\end{cases} \tag{4-21}$$

(4) 断层两侧岩性配置关系

当断层两侧砂岩与泥岩或膏盐对置时，断层封闭性好，其隶属度为 1；断层两盘砂岩与砂岩对置时，可能封闭也可能不封闭，其隶属度取 0.5，而当断裂带为不渗透物质充填时，断层封闭性强，其隶属度为 1。

(5) 断层横向封闭系数

断层横向封闭系数是衡量断层侧向封闭程度的一个标志，其值越大断层封闭性越好，其隶属函数为：

$$\mu(x)=dx \tag{4-22}$$

式中 d——经验常数；

x——横向封闭系数。

其他封闭性标志的隶属度见表 4-19。

通过对我国东部几个断陷盆地（包括山东东营凹陷、江苏金湖凹陷、冀东南堡凹陷）主要控油断层封闭性影响因素进行综合研究后，建立断层封闭性单因素评价标准如表 4-19 所示。

表 4－19　断层封闭性单因素评价标准

影响因素	评价标志	隶属度
断层承受应力及断层力学性质	$\sigma_F>0$ 且 $\sigma_F>\sigma_C$，$\tau_F=0$，压性断层	计算求取
	$\sigma_F>0$ 且 $\sigma_F>\sigma_C$，$\tau_F\neq0$，压扭性断层	
	$\sigma_F=0$ 且，$\tau_F\neq0$，扭性断层	
	$\sigma_C<0$ 且 $\sigma_F>\sigma_T$，$\tau_F\neq0$，张扭性断层	
	$\sigma_F<0$，$\tau_F=0$，张性断层	
排驱压力	$P_F>P_{d1}$ 且 $P_F>P_{d2}$	1
	$P_f<P_{d1}$ 且 $P_F<P_{d2}$	0
	$P_F>P_{d1}>P_{d2}$ 或 $P_F>P_{d2}>P_{d1}$	0.5
涂抹层分布情况	在 f_m 临界值范围内，f_m 越小断层封闭性越好	计算
断层剪切带	存在剪切带封闭性强	1
	不存在剪切带	0.5
岩性配置关系	断层两盘砂岩与泥岩对置	1
	断层两盘砂岩与砂岩对置	0.5
	砂、砂对置时，断裂带为不渗透物质充填	1
断层封堵系数	$R_t<R_T$，封闭性好	1
	$R_t>R_T$，封闭性差	0.5
横向封闭系数	该数值越大，封闭性越好	计算
岩层产状配置关系	顺向正断层	0.5
	反向正断层	0.8
断层活动期与油气运移期配置关系	断层在油气运移期活动	0.3
	断层在油气运移期停止活动	0.8
	断层在油气运移期后仍活动	0

在断层封闭性评价标准确定之后，以崔庄—西园地区（图 4－23）为例进行断层封闭性模糊综合评价。其工作步骤为，首先建立单因素评价矩阵，之后选择最佳（加权平均型）模型的计算结果，并以最大隶属度原则对研究区主要断层作出综合评价。

3．单因素评价矩阵的构成

在对研究区的地震、地质、测井信息和断层封闭性各影响因素进行综合分析后，根据单因素评价标准建立断层封闭性单因素评价标准 R。崔庄地区断层封闭性单因素矩阵标准如表 4－20 所示。

二、计算方法及评价结果

在具体进行评价时，采用主因素决定型 M（$\wedge$，$\vee$）、主因素突出型 M（$\cdot$，$\vee$）及加权平均型 M（$\cdot$，$+$）3 种模糊综合评判的计算模型分别计算 $B=A\cdot R=(b_1,b_2,\cdots,b_n)$，并采用最大隶属度原则对各断层的封闭程度进行综合评价。应用上述方法对崔庄地区主要断层的封闭性进行了综合评价，评价结果见表 4－21 所示。

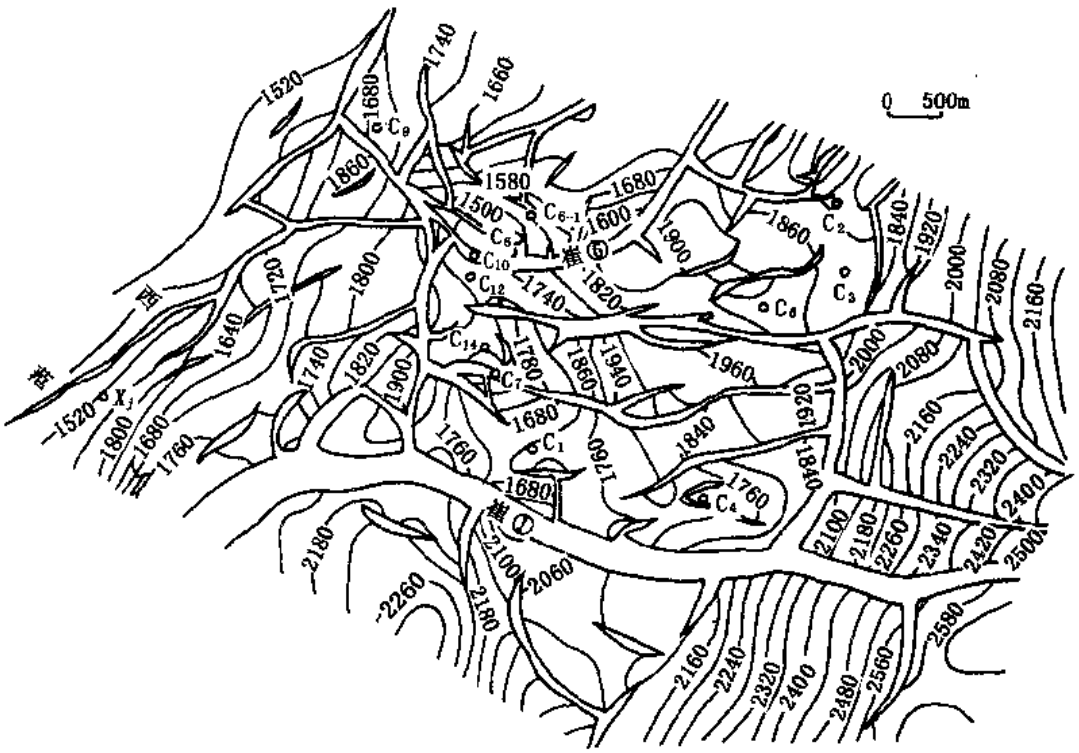


图 4－23　崔庄－西园地区 T_3^3 构造图（据刘泽容等，1998）

表 4－20　崔庄地区断层封闭性单因素评价标准矩阵

因素 \ R值 \ 断层	崔 1	崔 4	崔 6	崔 7	崔 8	范庄	程 1
承受压力	0.25	0.80	1.00	0.25	0.80	1.00	0.00
排驱压力	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00
岩性配置	0.80	1.00	1.00	1.00	0.80	1.00	0.80
f_m	0.80	1.00	1.00	1.00	0.80	1.00	0.80
横向封闭系数	0.06	0.20	0.50	0.38	1.00	0.85	0.00
产状配置	0.80	0.80	1.00	1.00	0.80	0.80	0.80

由表 4－21 可知，采用 M（·，+）模型计算结果最佳，所以，采用 M（·，+）模型的计算结果对崔庄地区各主要断裂进行综合评价。根据上述计算结果，确定评价标准，进而得出评价结果（见表 4－21）。评价结果表明，崔庄地区范庄北东向断层和崔 6 弧形断层封闭性最好，其综合评价值分别为 0.96 和 0.91，它们是区内主干断裂，控制了油气的形成和分布。低级序的崔 8、崔 4 北东向断裂和崔 7 东西向断裂封闭性较好，如崔 8 断裂综合评价值为 0.77，崔 7 断裂综合评价值为 0.72。崔 1 近东西向弧形断裂及程 1 北西向断裂封闭性

最差，其综合评价值为0.59和0.52。

表4－21　崔庄地区断层封闭性综合评价结果

计算方法 / B值 / 断层	$M(\wedge, \vee)$	$M(\cdot, \vee)$	$M(\cdot, +)$	评价标准	评价结果
范庄断层	0.21	0.21	0.96	$B>0.9$	封闭性最好
崔6断层	0.21	0.21	0.91		
崔4断层	0.21	0.21	0.70	$0.7<B<0.9$	封闭性较好
崔7断层	0.21	0.21	0.72		
崔8断层	0.21	0.18	0.77		
崔1断层	0.21	0.18	0.59	$B<0.7$	一般
程1断层	0.21	0.144	0.52		

第七节　根据断面力学性质判断断层垂向封闭性

该方法是王志欣、信荃麟（1997）结合东营凹陷油气分布的规律，从理论上对断层封闭性的评价方法进行的探讨。

一、断层面上任一点的直应力

断层封闭性的根本衡量标志是断面的力学性质，而断面力学性质又取决于地质历史时期中断面上的直应力和剪应力的大小。如果剪应力为零，则断面为简单的张性（$\sigma_N<0$，σ_N为断面某研究点的直应力，MPa）和压性（$\sigma_N>0$）；如果剪应力不为零，则断面为张剪性（$\sigma_N<0$）或压剪性（$\sigma_N>0$）；压性和压剪性断面具有封闭性，而张性和张剪性断面则是开启的。对不同时期不同应力场条件下断面的力学性质进行评价就可以得到该断层力学性质在地质历史时期中的动态演化过程。

但是，在确定断面的直应力时不能直接把三维地应力的数值代入到公式中，因为地应力分析与材料力学中的三维应力分析有所不同，地下环境为饱和流体并存在流体压力，所以这里强调断层面上的直应力必须是有效直应力，用于求取有效直应力的地应力值必须扣除所在点的流体压力值。

由于地下岩层中饱含着流体，岩石骨架中受到的导致变形和断裂的有效应力实际上小于地应力值。根据有效应力定律：

$$\begin{aligned} \sigma_H &= S_H \cdot P \\ \sigma_h &= S_h \cdot P \\ \sigma_v &= S_v \cdot P \end{aligned} \tag{4-23}$$

式中　σ_H、σ_h、σ_v分别为地应力场中的最大水平有效应力、最小水平有效应力和垂向有效应力，MPa；S_H、S_h、S_v分别为研究点的最大水平地应力、最小水平地应力和垂向应力，MPa；P表示研究点的地层压力，MPa。

对于地下任一断层面已知其产状特征和地应力场的特征，可以求出该断面上任一点的直应力（图4－24）。根据三维应力分析得知：

$$\sigma_N = l^2\sigma_H + m^2\sigma_h + n^2\sigma_v$$

$$l = \sin\alpha \cdot \sin\theta, m = \cos\alpha \cdot \mathrm{tg}\theta, n = \cos\theta \qquad (4-24)$$

上式中，l、m、n 分别为断面外法线与 3 个主应力方向的夹角的余弦；θ 为断面的倾角；α 表示断面的走向与最大水平主应力之间的夹角。

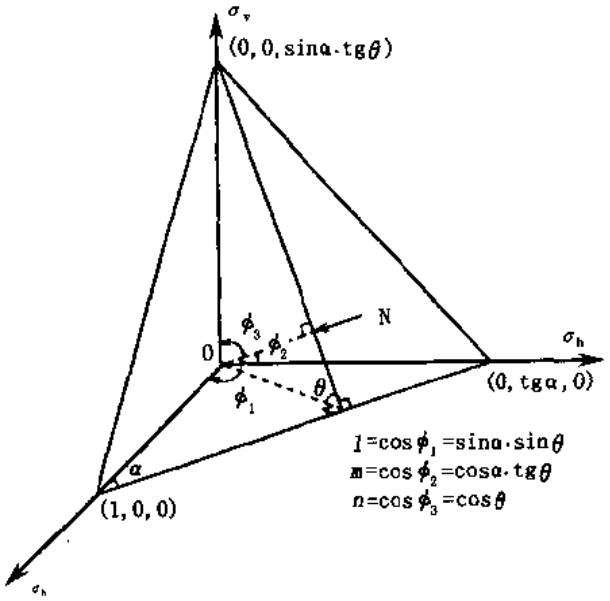


图 4－24　三维应力状态下任意截面上的主应力

断面上直应力的大小和性质决定了断层面的力学性质：$\sigma_N > 0$，则断面为压（剪）性；$\sigma_N < 0$，则断面为张（剪）性。

根据式 4－23、4－24 可以看出，σ_N 的大小与研究点断层面的产状及有效地应力的大小和方向有关，而有效地应力又决定于地应力与地层压力。如果地应力越大，地层压力越小，则有效应力值越大，σ_N 则为正值；如果地应力较小，而地层压力很高，特别是在异常高压发育带，那么有效应力很小，在特殊情况下甚至出现负值，σ_N 也有可能出现负值，即断裂面呈现有张性或张剪性。由此可以看出，流体压力是影响深部断层封闭性的重要因素。

二、地应力场的分析

王平（1994）认为：地壳中的地应力实际上包含两个因素，一个是地壳重力作用和均衡作用产生的静地应力（或称重力应力）$\overline{G}$，另一个是地壳水平运动产生的构造应力 $\overline{\sigma}$。两者叠加在一起构成了地应力场：

$$\overline{S} = \overline{G} + \overline{\sigma} \qquad (4-25)$$

式中 $\overline{S}$ 表示地应力场。

静地应力随深度增大而增大，垂向分量的梯度取决于上覆岩层的密度，而水平分量则受岩石的泊松比及均衡时间长短两因素的影响：

$$G_v = d \cdot D/10^6 \qquad (4-26)$$

$$G_H = (\upsilon/(1-\upsilon)^{1/n}G_v) \qquad (4-27)$$

上两式中，G_v、G_H 分别为静地应力的水平、垂直分量（MPa）；D 为研究点埋深（m）；d 为研究点上覆地层的平均密度（kg/m^3）；υ 为岩石的泊松比；n 为与时间有关的参数，经历的地质时间越长，G_H 与 G_v 的大小就越接近。

由于静地应力随深度增加而增大，所以在沉积盆地的浅层，静地应力较小，地应力以构造应力占主导地位；而在深部地层中，重力应力相对于构造应力占主导地位。如果忽略岩层孔隙性特征而把岩层看成均质体，则作用于任意截面上的直应力可以直接用 S_H、S_h、S_v 来计算。那么，在沉积盆地中即使叠加了拉张构造应力，在地下深部的地应力状态也仍然是压性的。若考虑到岩层孔隙性特征和流体压力的影响，作用于岩层骨架之上的有效应力就小得多。因此深部的张性断面实际上是流体高压的产物，而根本不存在拉张的地应力。即地应力

为压性，但有效应力可以为张性。

丁健民（1994）研究了胜利油田区深部的现今地应力场特征：在1300～3300m深度范围内，区域地应力的最大主应力为近东西向，中间主应力为垂向，最小水平主应力为近南北向，而且它们与深度之间存在如下关系：

$$\begin{aligned} S_H &= -22.58 + 3.410 \times^{-2} \cdot D \\ S_h &= -11.66 + 2.2 \times 10^{-2} \cdot D \\ S_v &= 2.2 \times 10^{-2} \cdot D \end{aligned} \qquad (4-28)$$

式中 S_H、S_h、S_v——最大水平主应力、最小水平主应力和垂向地应力（MPa）；

D——埋深（m）。

用类似于式4－28的线性关系式来表示地应力随深度的变化是很不确切的，因为不同地点构造应力的大小和方向还受岩石力学性质和构造部位的影响。但这一公式告知，地下深处并不存在张性地应力，断层的张开并非构造拉张的结果，而是瞬间高流体压力作用的结果。

构造应力的方向和大小随时间会有较大的变化，特别是在地震活跃期。在地质历史上能识别出的地应力变化都表现为大规模的抬升和沉降，它们往往持续很长的时间，从数百年到上千万年。实际上，在人类历史上能够观测到无数次剧烈的构造变动，其变动过程仅持续数天到数小时。在地质历史时期这样的变动不可胜数，但它们却很难留下记录，更不必说确切地加以描述了。

三、地层压力的确定

J.M.Hunt（1990）对世界上许多盆地进行了研究后发现，盆地浅部一般为常压系统，而年轻盆地深部则多存在异常高压系统。

常压系统中地层孔隙压力的大小可以用静水柱压力来近似表示，而异常压力系统的压力数值通常难以用公式确切表示出来。目前常用地震速度谱资料粗略地估算盆地范围的异常高压，或利用声波测井以等效深度法求井点范围的泥岩段地层压力，直接的地层压力资料主要来自中途测试和试井。

实际上，地层压力在地质历史时期也是变化的，地层压力的变化与很多因素有关，构造运动和沉积负荷的变化、地温场的变化、粘土矿物的成岩脱水等都对地层压力有影响，但除了快速构造变化外，其他因素引起的压力变化只是一种长周期渐进变化，不足以引起断层封闭性的根本变化。

对地震期间油井动态的观测资料及大量的其他地震地质现象如喷沙、冒水、喷气等的分析表明，地震活跃期地层压力存在明显的变化，说明地震期间不仅是深部异常高压带的压力会发生强烈变化，而原来为常压的浅层也会产生强烈的异常变化，这是因为地震作用速度快、流体压力上升过程中因渗透损失而造成的压力下降很小。可见地震作用是导致地质历史时期地层压力变化的重要因素之一。

总之，断面的力学性质取决于该断面上有效直应力和剪应力大小和方向，有效直应力为压性，则断面为封闭的。通常情况下，地下深部断层均是压（剪）性的，即是封闭的。有效直应力的性质受控于有效地应力，有效地应力的大小又与流体压力密切相关，因此，研究断层封闭性时，必须考虑流体压力对其的影响。断层封闭性不但是变化的，而且是一种瞬时的、多次重复的过程，断层垂向开启过程（裂缝开启过程）是非常短暂的过程。地震期间由于构造应力场骤然变化导致流体高压进而引起地下深部压性断裂结构而发生开启是深部断层开启的主要机制。

第五章　断层封闭性定量评价

第一节　对接概率计算法判断断层侧向封闭性

由第二章内容可知，如果目的盘储集层与其对置盘渗透层相接触，断层在侧向上是不封闭的，如果与非渗透层相对置，断层在侧向上是封闭的。该理论的正确性是无可置疑的，但真正在实际中应用则是相当困难的，尤其在陆相盆地岩性横向变化快、早期勘探阶段钻井较少的情况下，断层两盘岩性分布情况实际上难以知晓。因此，断层两盘岩性对置与否也就无法判定，即使在开发阶段钻井较多情况下，陆相砂泥薄互层段内，绘制剖面图过程中因比例尺所限，断距读取的微小误差，便会造成断层两盘面目全非的砂泥对置结果。为了解决这一难题，这里提出了断层两盘砂泥对接概率模拟的方法，以其来判断断层的侧向封闭性。

一、基本原理与步骤

1. 砂泥对接概率的概念

在砂泥岩地层剖面中，将砂岩视为渗透性地层，泥岩层视为非渗透性地层。所谓砂泥对接概率是指占断层目的盘砂岩层总厚度的某一百分数的砂岩层被对置盘泥岩层封堵的可能性大小。在断层的目的盘一侧，通过模拟计算，相对目的盘砂岩层总厚度而言，如果仅有少部分砂岩层被对置盘泥岩层封堵的概率高，而大部分砂岩层被封堵的概率小，则说明该断层侧向封闭性差，相反，如果大多数砂岩层与对置盘泥岩层对置概率大，则说明该断层的侧向封闭性好。由于断层两盘垂向地层剖面是根据钻井所揭示地层通过计算机模拟出来的，而地层剖面的模拟受多种复杂因素影响，同一剖面不同层次模拟结果之间存在着一定的差异，因此，通过模拟建立的断层两盘地层剖面及砂泥对接情况具一定的随机性，故而用砂泥对接概率来描述断层侧向封堵可能性的大小。

2. 断层两盘垂向沉积序列的模拟

(1) 厚度分布的确定

沉积序列的模拟实际上是确定垂向岩性状态和厚度的分布问题，在砂泥两种岩性剖面中，厚度的分布是取得模拟的关键。由于勘探早期钻井资料少，直接统计断层附近的砂泥分布几乎是不可能的。于是，提出根据各种沉积相和砂地比值建立地层厚度分布模型的思路。

在同一沉积盆地内盆地发育的同一阶段，不同沉积相砂泥岩层的厚度及其分布规律有显著差异，相同沉积相内的砂泥岩层厚度及其分布规律有较好的相似性，因此，可采用沉积相类比的方法解决断层附近砂泥厚度分布问题。具体做法是：对研究区的钻井所揭示地层进行沉积相划分，统计每一种相中砂泥小层厚度，做出砂泥厚度分布直方图，然后再做砂泥岩小层厚度的马尔可夫概型分布，确定其厚度分布规律。

最常见的小层厚度分布有 3 种，即正态分布、对数正态分布和指数分布。它们的数学表达式分别为：

① 正态分布：

$$Y_z(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-1/2\left(\frac{X_i-\mu}{\delta}\right)^2} \tag{5-1}$$

其中

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i = \overline{X}$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2$$

式中 X_i——某一小层的厚度；

N——地层中小层个数。

② 对数正态分布：

$$Y_z(X_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta X_i} e^{\frac{(\ln X_i-\mu)^2}{2\delta^2}} & (X_i > 0) \quad (5-2) \\ 0 & (X_i < 0) \quad (5-3) \end{cases}$$

其中

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ln X_i$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\ln X_i - \mu)^2$$

式中符号同前。

③ 指数分布：

$$Y_z(X_i) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda}(X_i - \mu) & (X_i > \mu) \quad (5-4) \\ 0 & (X_i < \mu) \quad (5-5) \end{cases}$$

式中 $\mu = E_x - \lambda$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{D_x}}$$

$$E_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i = \overline{X}$$

$$D_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2$$

式中符号同前。

在进行每一相内小层厚度分布模型分析的同时，计算出小层厚度均值、小层厚度标准差及砂地比值（即统计层段内砂岩层累积厚度与该层段地层总厚度的比值）。

对同一口井中的相同相和不同井中相同相进行对比分析，找出各种沉积相的砂泥岩层小层厚度分布规律，建立同一沉积相的砂泥小层厚度分布模型。

（2）砂泥小层厚度的求取

在地层垂向序列模拟中，一旦岩性状态选定后，就要选择相应的厚度分布模型进行抽样，获得服从随机分布的厚度变量，可应用伪随机数技术来实现。

① 如果小层厚度为正态或近于正态分布，那么厚度计算公式为：

$$H = \mu + \delta\left[\sum_{i=1}^{N} \text{rand}(\quad)/32768 - 6\right] \tag{5-6}$$

其中

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i$$

$$\delta = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \mu)^2$$

式中 X_i——实际地层的砂泥层厚度；

N——此地层的小层数。

② 如果小层厚度为对数正态分布，则小层厚度为：

$$H = \exp\{\mu + \delta[\sum_{i=1}^{N} r\text{and}()/32768 - 6)]\} \tag{5-7}$$

其中 $\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln X_i$

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\ln X_i - \mu)^2$$

式中符号与①中相同。

③ 如果小层厚度为指数分布，则小层厚度为：

$$H = -\frac{1}{\lambda}\ln[r\text{and}(\quad)/32168] \tag{5-8}$$

其中 $\lambda = 1/\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X_i\right)$ 式中符号与①中相同。

3．断层两盘砂泥对接概率的计算

准备研究区各层段的沉积相平面分布图，在断层线上选定某一点，确定该点处目的盘目的层段的沉积相，再根据该点断层的断距，确定与其对置的断层另一盘地层的沉积相。人工输入对置盘沉积相的小层厚度分布状态、小层厚度均值、小层厚度标准差以及要模拟的层段厚度，计算机产生伪随机数模拟计算该段各小层厚度及岩性。用同样方法模拟计算出目的盘目的层段的各小层厚度及岩性。

断层两盘各小层厚度及岩性模拟计算出来之后，按图 5－1 归纳出的两盘砂泥对置关系

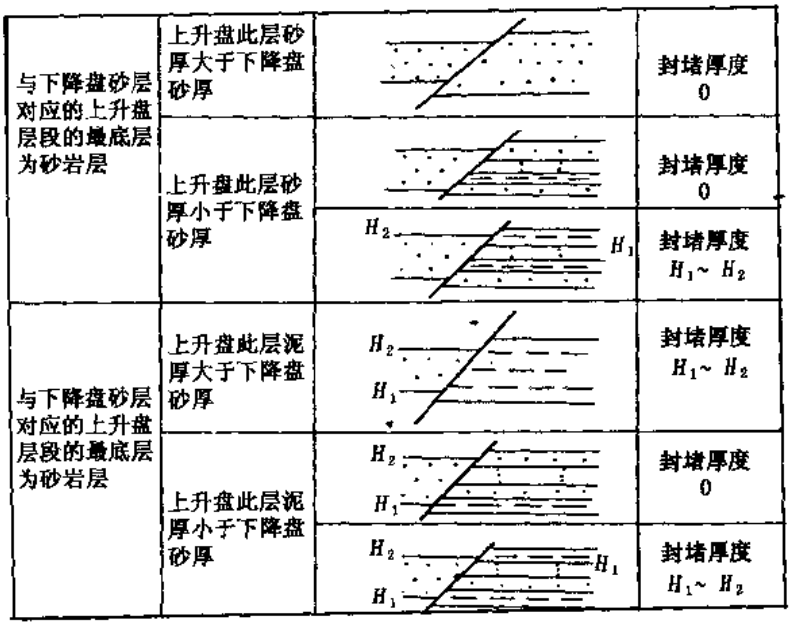


图 5－1 砂泥对接的六种情况

H_1，H_2—地层界面埋深

的 6 种情况，以下降盘为目的盘，判断单砂层被封堵的厚度，并计算出该目的层段内被对置盘封堵的砂层累加厚度占模拟层段中砂层总厚度的百分数。由于随机数具随机性，多次模拟才具统计规律性，故采用 1000 次模拟，将模拟结果利用直方图的形式表示出来（图 5－2）。

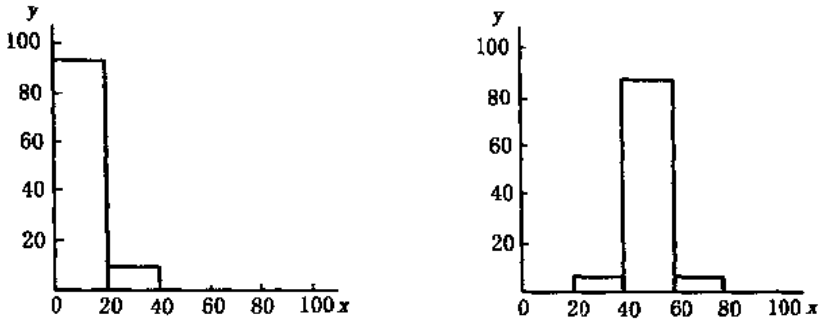


图 5－2　延吉盆地东部坳陷断层封闭概率直方图

图 5－2 中横坐标封闭程度表示目的盘的层段内被封堵砂岩厚度占该段砂岩总厚度百分数，分 5 个区间，分别表示 5 个级别的断层封闭程度（表 5－1）。纵坐标封闭概率表示多次模拟过程中落入横坐标某个区间内的次数占累积总模拟次数的百分比。根据概率理论，某一封闭程度的封闭概率越高，说明多次模拟过程中得到该计算结果的次数越多，该事件发生的可能性越大；相反，某一封闭程度的封闭概率越小，说明具此封闭能力的可能性越小；当某一事件发生的概率大到一定程度时，该事件就变成了必然事件。据此，视对接概率最大者为断层在该点的侧向封闭能力。

表 5－1　断层侧向封闭程度分级表

被封堵砂岩百分数（%）	0～20	20～40	40～60	60～80	80～100
断层封闭度	差	较差	中	较好	好

将沿断层走向上不同位置处侧向封闭性模拟结果用不同线段标注在断层平面分布图上，便可获得断层侧向封闭性评价图。

选择大庆和辽河油田已知封闭能力的断层采用上述方法进行砂泥对接概率模拟，发现模拟结果与实际断层的封闭能力基本一致（表 5－2），模拟误差均值为 0.08，说明该方法用于断层的侧向封闭性研究是可行的。

二、应用实例

无论综合地质分析法还是逻辑信息法或非线性映射分析法，都将断层分为封闭与不封闭两类，尽管逻辑信息法中将断层封闭性细分了几种过渡类型，但对变量的取值仍采用“是”与“非”的形式。而实际上，由于断层沿走向上各处断层断距的差异，或地层产状的变化，或断移地层沉积岩相的变化，使同一段内断层的各处砂泥对置情况不同，致使其封闭性也不一样。在断层的剖面上，由于所断移的地层在不同层段内砂泥分布规律的差异，而使其在不同深度内（或不同层段内）封闭性不同。因此，上述诸方法只能是粗略地、概括地描述断层封闭性的总体特征，而沿断层走向线上的不同位置、断层剖面上的不同层位，其侧向封闭性如何，这些方法就难以作出精确地回答，而对接概率的模拟计算，则可较好地解决这一问题。下面以延吉盆地为例，阐述该方法的实际应用效果。

延吉盆地为吉林省东部长白山东麓的一个中生代山间断陷盆地，分东西两个坳陷（图 5

-3)，盆地内主要地层自下而上为下白垩统的锏佛寺组一、二、三段，大拉子组的一、二、三段，上白垩统的龙井组一、二、三段，再上为第三系、第四系地层。龙井组三段及其以上地层在德新凹陷部分被剥蚀。由所钻的探井提示，区内主要储集层是锏佛寺和大拉子组内的砂岩层，盖层为该组内的泥岩层。地震解释表明，该区断层发育，基本均为盆地初期形成、后期多次活动的同生正断层，断层一般上延至龙井组一段，断层倾角变化大（40°～70°）。断层延伸长度不等，绝大多数切割凹陷，其中盆地的东西边界即受两条大断层限制，区内断层封闭性控制了油气分布规律。

表 5-2　断层侧向封闭性模拟结果与实际封闭能力的比较

油田名称	断层位置	层位	沉积相		砂地比		模拟封闭程度		实际封闭程度		相对误差
			目的盘	对置盘	目的盘	对置盘	被封堵砂岩占砂岩总厚度的百分数（%）	归类	储油砂岩占砂岩总厚度的百分数（%）	归类	
大庆	三3～三102	泉三、四段	河流	河流	0.18	0.23	52.3	中	48.1	中	+0.09
	三201～三2	泉三、四段	河流	河流	0.22	0.15	70.6	较好	73.2	较好	-0.04
	三2～三4	泉三、四段	河流	河流	0.11	0.10	89.1	好	91.5	好	-0.03
	升61～升64	泉三、四段	河流	河流	0.20	0.13	81.8	好	85.4	好	-0.04
辽河	龙12～龙15-21	沙河街组	三角洲平原	三角洲平原	0.51	0.47	20.5	较差	26.6	较差	-0.22
	法39-37～法41-41	东营组	浅湖	浅湖	0.29	0.27	46.6	中	49.3	中	-0.06
	黄5～黄5-12	沙河街组	河流	河流	0.40	0.26	64.3	较好	72.0	较好	0.11
	海16-22～海14-22	东营组	三角洲前缘	三角洲前缘	0.45	0.32	40.7	中	38.8	较好	+0.05

根据前面阐述的断层侧向封闭性研究原理，在延吉盆地的实际应用步骤如下：

①根据已知钻井剖面，在细分沉积相的前提下，分别统计各相的砂泥岩小层厚度分布。然后对已知井已知相的小层厚度分布作沉积序列模拟，通过马尔柯夫概率模型分析，确定不同相不同砂地比值条件下的小层厚度分布规律（表5-3）。

②准备各项预研究层段的沉积相平面变化图。

③根据地震剖面做每条断层的断面剖面图，将各组地层在断层两盘的沉积相标定在断面剖面图上（图5-4）。

④选择目的层段，确定断层的目的盘。由于研究目的不同，在沿同一条断层的走向上不同位置上目的盘可能有变化，如在断层上升盘一侧的某个位置上有一断层圈闭，预研究该圈闭边界断层的侧向封闭性，则此处的目的盘为上升盘；若断层圈闭在下降盘，或沿断层线无

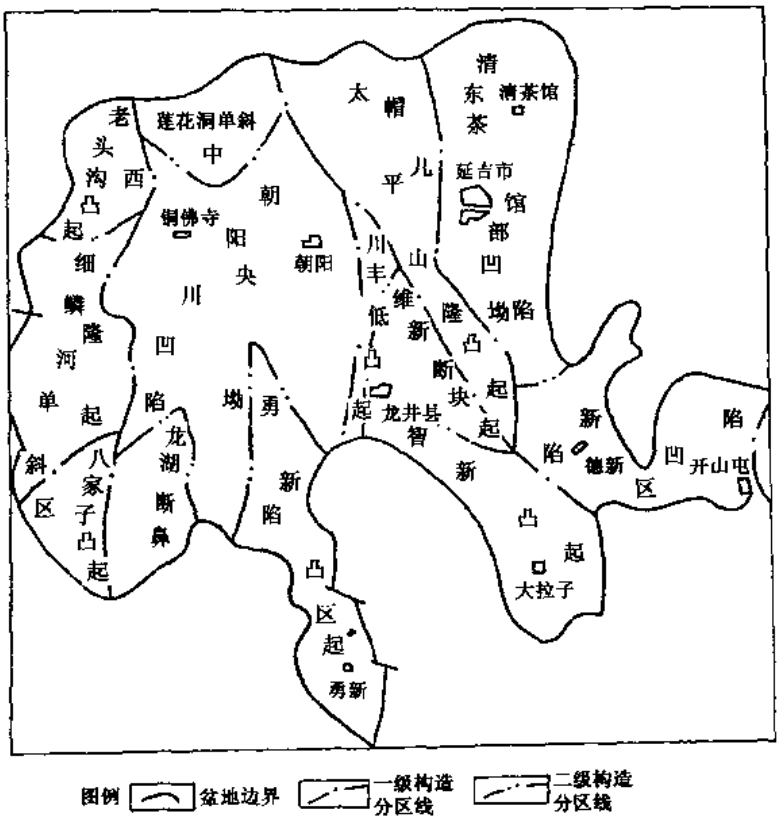


图 5－3　延吉盆地地质构造分区图

断层圈闭，只想了解该断层是否可阻止油气的侧向运移，则目的盘便为下降盘。

表 5－3　不同沉积相砂泥厚度分布模拟结果

井　号	沉　积　相	分布规律 1－正态 2－对数正态 3－指数	小　层　厚 度　均　值	标　准　差	砂地比值
延 D_3	三角洲平原	2	1.31	1.09	0.84
延 D_5	浅　湖	2	1.16	0.94	0.72
延 D_4	滨　湖	3	2.08	0.47	0.54
延 D_5	半深湖	2	1.51	1.02	0.44
延参 1 井	浅　湖	2	0.53	1.88	0.63
延 D_3 井	半深湖	2	1.03	0.99	0.29
延 D_1 井	近岸扇	2	0.65	1.13	0.85
延 D_3 井	浅　湖	2	1.11	0.88	0.28
延参 2 井	近岸湖	2	0.32	0.77	0.64
延参 2 井	浅　湖	2	0.19	1.31	0.11
延参 2 井	深　湖	3	2.96	0.19	0.06
延参 2 井	远岸扇	2	0.11	0.79	0.29
延 1 井	水下扇	2	0.48	1.02	0.75

⑤根据断层各处两盘相互对置地层的沉积相类型和砂地比值，正确选择图 5－2 所示的

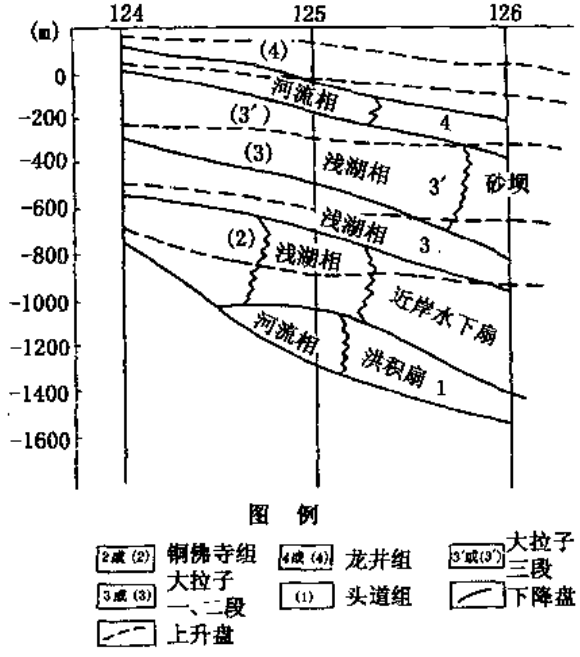


图 5-4 延吉盆地东部坳陷 II_5 断层断面剖面图

模拟对接概率模型，确定在该层段内断层的侧向封闭性。需要说明的是：图 5-2 列出的只是部分对接概率模拟结果，实际上，在同一沉积相的不同位置上，砂泥厚度的分布是有差异的，模拟出的砂泥分布规律、小层厚度均值、标准差、砂地比值等也不尽相同，为尽可能使断层封闭性分析结果更切合实际，充分利用钻井资料，对所有井中不同井段的同一沉积相都做了沉积序列模拟，在实际断层封闭性判断中，是根据断层所在平面沉积相位置，选择具有与之位置大致相当的钻井中所模拟的沉积序列模型，井进行对接概率模拟，获得最大可能与实际相符的断层封闭性模拟结果。

⑥将沿走向上不同位置的侧向封闭性模拟结果用不同线段标注在平面图上，便获得了断层侧向封闭性评价的平面图（图 5-5）。

由延吉盆地各层段内断层侧向封闭性评价图中可以看出，该盆地断层的侧向封闭性具有如下特征：

A. 同一条断层在同一层段内的不同位置处侧向封闭性不同。如盆地东区的 III_2^2 号断层，在大拉子组一、二段内，其中段侧向封闭性好，向南北两方向逐渐变差，至走向上的两个末端，其封闭性逐渐达到最差，造成同一条断层沿走向上不同位置的侧向封闭性差异的主要原因，是断移地层中段位于半深水湖相带，断移地层的泥地比值高达 70% 以上，断层两盘相互对置的岩层泥多砂少，砂岩层被断层另一盘泥岩层封堵的量高，侧向封闭性自然好。在该断层的南北两端，断移地层为滨湖相，其地层的泥地比值低于 40%，断层两盘砂多泥少，目的盘砂岩层被对置盘泥岩层封堵的量亦少，断层侧向封闭性就差。由于上述沿断层走向上断层两盘泥质含量的差异，造成了同一条断层在不同位置处的侧向封闭性的不同。

B. 同一条断层在不同层段内的侧向封闭特征不同。仍以盆地东区的 III_2^2 号断层为例，总体上看，该断层在铜佛寺组内、大拉子组一、二段内及大拉子组三段内均具备中段侧向封闭性好，向两端封闭性差的特点，但由于该断层在垂向上不同层位内对置岩层泥地比值差异，表现其封闭性在不同层段内各不相同，以大拉子组一、二段内封闭性为最好，且具中-好封闭性的延伸区间也较长；以铜佛寺组内侧向封闭性为最差，该组内 III_2^2 号断层最好的侧向封闭性为中等，在该段内，该断层以差封闭性为主，且其封闭特征与大拉子一、二段内区别较大，在铜佛寺组内 III_2^2 断层封闭性不是中段好、两边差，而是由北向南断层封闭性由中等逐渐变为差，大拉子组一、二段内 III_2^2 断层北端差封闭性位置在铜佛寺组内为中等，中段好封闭性位置在铜佛寺组内为中等-差，可见，尽管是同一条断层，在三维空间上的不同位置，其侧向封闭性的差异是相当大的，由此也可见采取新的断层封闭性判别方法详实研究断层三维空间上封闭性变化特征的必要性。

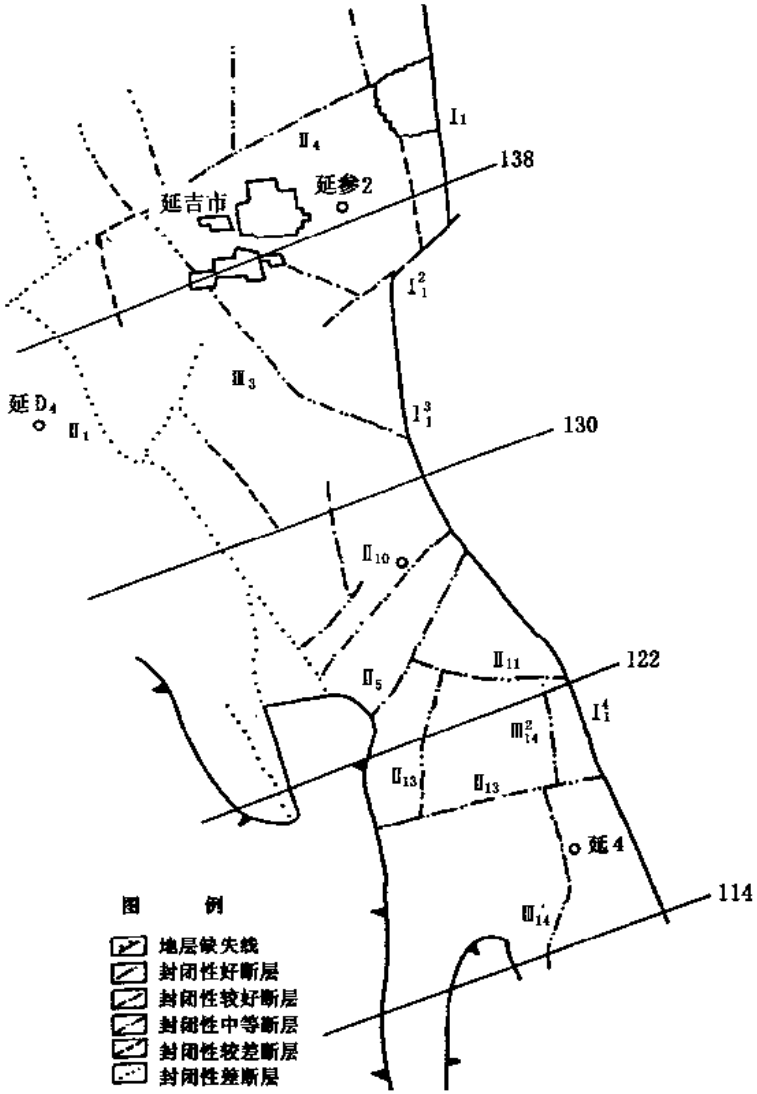


图 5－5a　延吉盆地东区大拉子组一、二段内断层侧向封闭性评价图

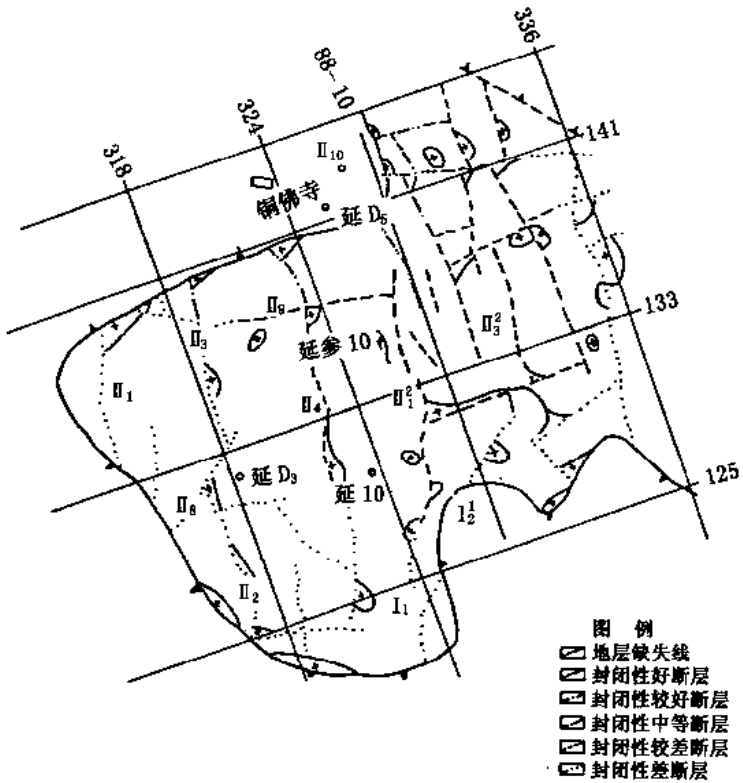


图 5－5b　延吉盆地朝阳川坳陷大拉子组内断层侧向封闭性评价图

C. 延吉盆地内侧向封闭性非常好的断层较少，只有盆地的边界断层，由于沉积岩直接与对置盘非渗透基底岩性对置，流体不再穿断层面进入侧向基岩，显示出边界断层的完全侧向封闭特征，此类断层只发现一条，即盆地东部的Ⅰ号边界断层。在盆地内部，侧向封闭性最好的级别为封闭性较好断层。分析其主要原因是盆地较小，目的层沉积期又恰为盆地发展的断陷阶段，沉积区距物源近，物源充足，沉积粒度粗，总体上砂质含量较高，缺少像松辽盆地青山口组和嫩江组一、二段那样的大套巨厚纯泥岩层，因此，当断层将地层断开时，不存在目的盘储集层被对置盘大套纯泥岩完全封堵的现象，故而，盆地内部没有像东区Ⅰ号断层那样侧向封闭性极好的断层。

D. 整体上，东区断层的侧向封闭性明显好于西区。从西区的大拉子组内部和铜佛寺组内断层侧向封闭性评价中可见，西区的断层侧向封闭性以差和较差为主，仅有少量断层达到中等级别，无或少有侧向封闭性较好以上级别的断层。而从东区的几张断层侧向封闭性评价图中可见，东区断层侧向封闭性以中等－较好为主，较差或差等封闭性断层相对较少。

E. 从层位上看，东西两区断层侧向封闭性的差异也较大。西区在铜佛寺组内断层侧向封闭性好于大拉子组内断层，铜佛寺组内封闭性中等断层相对多于大拉子组内断层，而大拉子组内断层封闭性最好者以较差级别居多。东区在大拉子组内断层侧向封闭性好于铜佛寺组内断层，尤其以大拉子组一、二段内断层侧向封闭性为最好，大拉子组一、二段内较好侧封闭性的断层多，较差或差封闭性断层少，而铜佛寺组内中－较差封闭性断层多，而封闭性较好者少。

F. 在东西两个大区域内，断层侧向封闭性也具较明显的分带性。

在盆地的西区，相对较好的侧向封闭性断层主要发育在该区的东北部延D_6、延参1、延D_5、延2井一带，而盆地西区的西部、西南部及南部断层侧向封闭性均差。

在盆地的东区，断层的侧向封闭性总体上东部好于西部，南部好于北部。在YJ－93－342测线以西，断层基本上均为差封闭性，在该测线以东，大拉子一、二段内断层以较好封闭性为主，个别封闭性较差（如Ⅲ号断层），大拉子组三段内和铜佛寺组内断层以中等封闭性为主。

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

依据Smith（1966）的断层两盘砂砂对接断层侧面向开启、砂泥对接断层侧向封闭的概念模型，王东辉和韩光宇（1989）通过研究与断层有关的构造圈闭中油气分布特征后提出了这两种方法。尽管这两种方法都是针对与断层有关的构造圈闭提出的，但对于一般断层封闭性的研究而言也是适用的。

一、封堵量计算法判断断层侧向封闭性

1. 基本原理

断层对构造圈闭可起到封堵与漏失两种控制作用。当断层封堵盘一侧的泥岩层与断层另一侧的砂岩层相接触时起封堵作用，断层封堵盘一侧的砂岩层与断层另一侧的砂岩层相接触时，则起导通与漏失作用。可用封堵量Q_{SA}的大小表示储集砂层被封堵后保存油气的数量概念，则有

$$Q_{SA} = Q_R \cdot Q_S \tag{5-9}$$

式中 Q_R——储集系数；

Q_S——封堵系数。

Q_R、Q_S 值均根据地区实际情况而定。

2. 参数选择

根据研究区储集层的岩性情况，设泥岩的储集系数 $Q_R=0$，封堵系数 $Q_S=1.5$（最大值）；砂岩的储集系数则是根据自然电位曲线的负向幅值大小确定的。在安徽天长地区储层中因没有粗砂岩，所以只取了细砂岩和粉砂岩的储集系数（即 Q_R 值分别为1和0.7）。处于断层封堵盘的砂层储集性能愈好，则漏失愈大，即封堵性愈差。所以，其封堵系数与储集系数互为补偿，其模数值可以人为选取（该区定为1.5）。

在确定上述参数时，要尽量使封堵量曲线反映灵敏、利于解释，既不使解释工作复杂化又不漏掉实际油层。表5-4是经过多次试算和与实际资料对比确定的该区最佳参数值。

表5-4 参数选择数值表

Q_{SA} / Q_R / Q_S		泥 岩	细砂岩	粉砂岩
		0	1	0.7
泥 岩	1.5	0	1.5	1.05
细砂岩	0.5	0	0.5	0.35
粉砂岩	0.8	0	0.8	0.56

此表是研究区解释封堵量曲线时的重要依据，即 $Q_{SA}=1.5$ 时是封堵最好的油层，$Q_{SA}=1.05$ 时为封堵较好的油层，$Q_{SA}=0.8$ 时为差油层或可疑油层，$Q_{SA}=0.56\sim0.35$ 时则为漏失层。

3. 方法步骤

①用测区内已知井的地质录井资料及测井曲线（以自然电位曲线为主）在目的层段每2m取一样点，作出储集系数曲线（即砂、泥岩分层图）。如该井因遇断层造成地层缺失，需通过区域地层对比或借助同一构造内已知井资料将缺失地层补齐，再绘出该井完整的储集系数曲线。然后，根据需要沿地层倾向将储集系数曲线移到构造的相应位置（如图5-6中A点）。

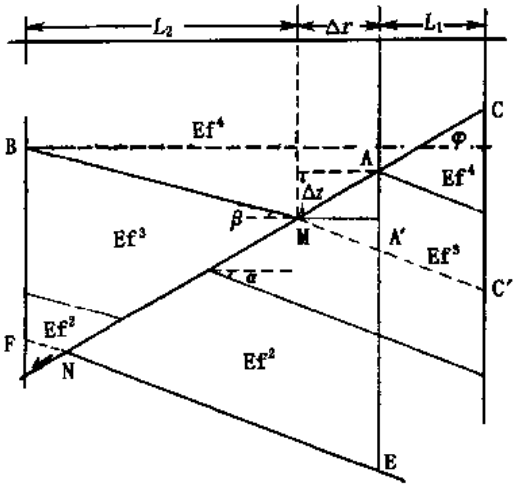


图5-6 构造岩性剖面示意图

②根据地震构造图及钻井资料，做出通过构造高点、横穿断层走向的构造综合剖面图（最好利用联井测线）（图5-6）。

③在构造综合横剖面图上，正确选取断层两侧地层倾角 α、β 及断面倾角 φ（一般求统计值，如上、下地层倾角差别太大，也可分段选取、使用）。

④根据选取的 α、β、φ 值及构造综合横剖面图，计算断棱点A处地层柱（图5-6）。

因地层错断产生的铅垂方向下移量 S_h。设图中 A 点位于盖层 Ef^4 的底界面上，那么断层下降盘 Ef^4 的底界面下降了一段距离 Δz 后，断层上升盘 A′点处以上地层则被下降盘 Ef^4 底界以上的地层封堵。此时，封堵系数曲线相对储集系数曲线垂直下移了$\overline{AA'}$距离，即

$$S_h = \overline{AA'} = \Delta z + \Delta x \operatorname{tg}\alpha \tag{5-10}$$

式中 Δz——断层的垂直断距；

Δx——断层的水平断距。

另外，设 E 点为 A 处井柱（或储集系数曲线）的终点，根据 A 处井的储集系数曲线，可求出断层上盘 B 点处封堵系数曲线的终点 F。但由于断层两侧地层倾角和压实程度不同，$\overline{BF} \neq \overline{A'E}$，所以须求地层视厚度校正系数 k 值，即

$$k = \frac{\overline{AE'}}{BF} = \frac{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} \tag{5-11}$$

式中 α——断层上升盘地层倾角；

β——下降盘地层倾角。

由式 5－10、式 5－11 分别求出 S_h 和 k 值后，便可对封堵系数曲线作垂向偏移和伸缩校正。然后，再与储集系数曲线逐点对应相乘，求出封堵量曲线。

如果已知井在图 5－6 中的断层上升盘 C 位置处，则由 B 点延伸到断层面，封堵的是 C′点处以上地层。其下移量为

$$S_h = (L_1 + \Delta x)\operatorname{tg}\alpha + L_2 \operatorname{tg}\beta \tag{5-12}$$

此时 C′点相对比 B 点下降的距离为 S_h。而地层视厚度校正系数 k 值则与式（5－10）相同。对于断层两侧地层倾角相反的屋脊型构造，则

$$S_h = (L_1 + \Delta x)\operatorname{tg}\alpha - L_2 \operatorname{tg}\beta \tag{5-13}$$

$$k = \frac{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta} \tag{5-14}$$

在图 5－6 中 B 点处，可以是真实井位置，也可以是为说明问题而虚设的封堵系数曲线的位置。在实际计算封堵量过程中只要求出 A 点处的封堵量曲线即可。反之，如 B 点处有已知井，也可求出 A 点处的封堵量曲线。

⑤用各点的封堵系数乘以相应的储集系数求取各点的封堵量值，计算流程如图 5－7 所示。取得各点的封堵量数值后，再绘制封堵量曲线。

封堵量曲线的数量要视测区内控制断层及断层两侧地层的横向变化情况而定。在断层两侧地层横向变化小的区段，用少量的封堵量曲线可对构造的封堵情况作出定性解释，则曲线数量可少些；反之，曲线的数量要多些。因此，要因地制宜的确定封堵量曲线的数量。

⑥曲线的对比解释。将封堵量曲线与岩性、分层图逐层进行对比，在相邻几条封堵量曲线上幅值大（即高值部位）、连续性好的层位应是含油层。对在封堵量曲线上反映较好、依据不足的含油层，可在构造综合剖面图上暂划为预测油层，以待进一步试油或钻探证实。

⑦根据解释结果，圈定各储层的含油面积及计算石油地质储量。

4．*应用实例*

（1）王龙庄构造

该构造是近年来发现的小油田，面积约 1.5km^2，西Ⅲ和Ⅲ$_0$ 断层对该构造起控制作用（图 5－8）。

经钻探证实，Ef^3～Ef^1 为多层叠加、且连片的油藏，其特点是在横剖面上油层沿断层成

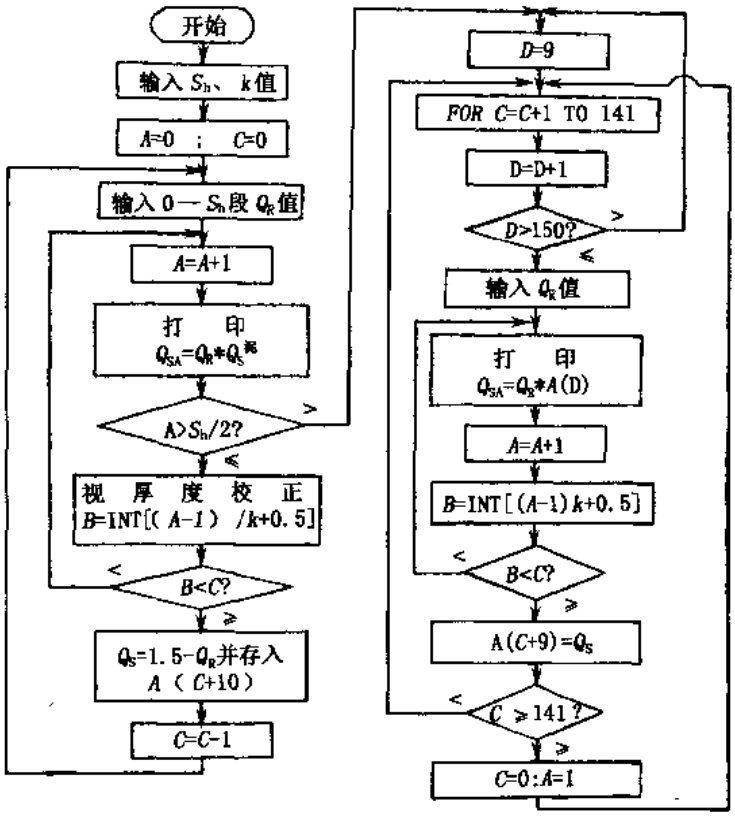


图 5－7　计算封堵量程序框图

A、C、D 均为数值变量，作循环指针用；A（ ）为数值变量存储单元

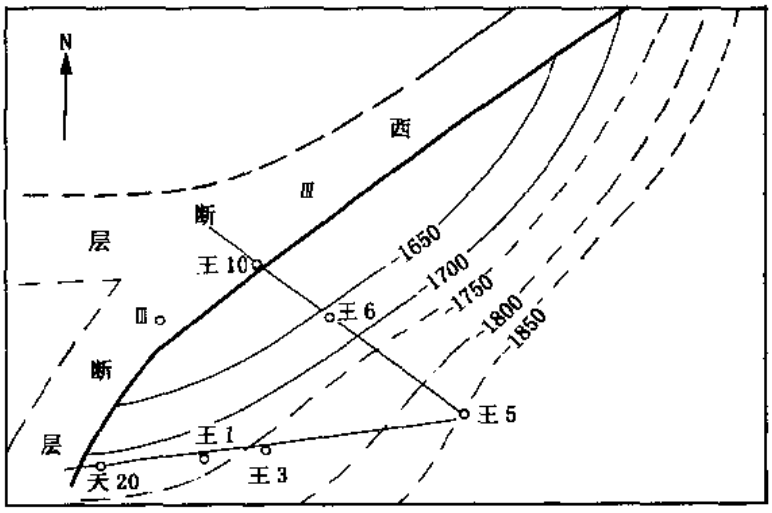


图 5－8　王龙庄构造 T_3'反射层构造图

刷状分布。图 5－9a、5－9b 分别是王 10－王 6－王 5 井和天 20－王 1－王 3－王 5 井的联井剖面封堵量分析图。在图 4－9a 中，$\overline{PQ}$段为 Ef^2 段Ⅲ、Ⅳ亚段及 Ef^3 段底（即 Ef^{2-3}、

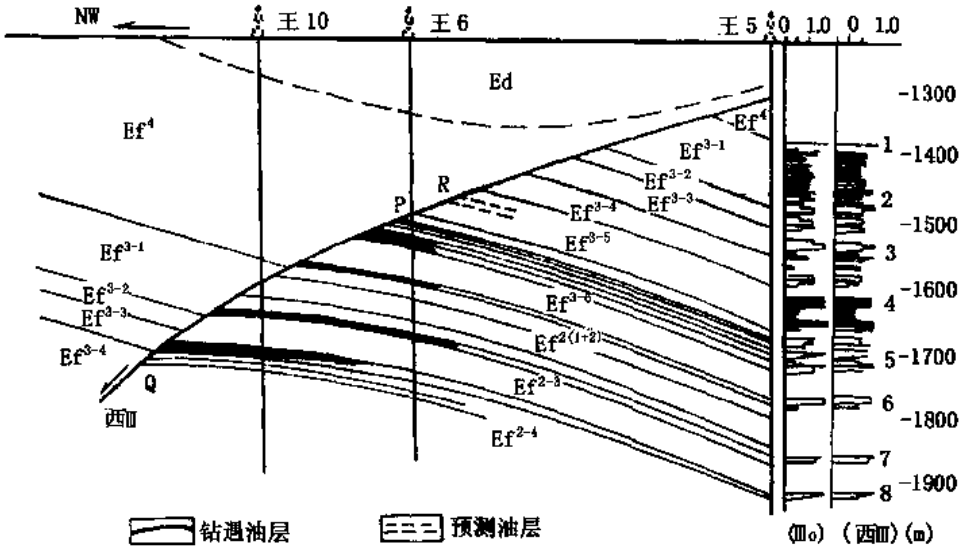


图 5－9a　王龙庄构造王 10－王 6－王 5 井联井剖面封堵量分析图

（图中右端为封堵量曲线）

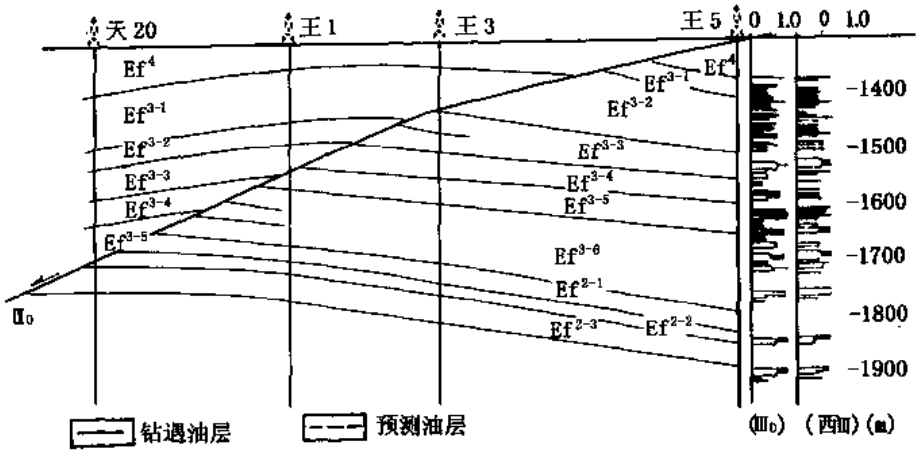


图 5－9b　王龙庄构造天 20－王 1－王 3－王 5 井联井剖面封堵量分析图

（图中右端为封堵量曲线）

Ef^{2-5}、Ef^{3-6}）油组。在相应的封堵量曲线上（5、6、7、8 段）均显示为高值，吻合较好。$\overline{RP}$段，在区域上为 Ef^3 段下部油组（即 Ef^{3-5}），从区域推断有两层薄油层，与封堵量曲线上的高峰值 4 段对应，这说明其推断是正确的。

另外，从 $Ⅲ_0$ 断层控制的封堵量曲线看，4 段下部（即 Ef^{3-5}下部）薄砂层为漏失层，这说明由西Ⅲ断层封堵的储层中的油气，由 $Ⅲ_0$ 断层漏失了，这样，此储层便成为空储层。同样，西Ⅲ断层封堵的 2 段有多层高封堵值，但 $Ⅲ_0$ 断层在该段有不同程度的漏失，这样，Ef_3 段下部也成为空储层。在 $Ⅲ_0$、西Ⅲ断层都有高封堵量值的 1、3 两段（即 Ef^{3-1}顶部和 Ef^{3-3}），预测为含油层段，经王 3、王 8 和王 20 井钻探证实为含油层。

在图 5－9b 中，天 20 井（与王 10 井部位相当）钻遇了 Ef^2 段中部 Ef^{2-3}、Ef^{2-4}两个油组；王 1 井处于构造的低部位，钻在 Ef^2 段含油层的油水边界之外，未见出油；王 3 井在

Ef^3段顶部钻遇油层，在封堵量曲线上反映为两个高峰值，但在Ef^2段钻在两油组的油水边界之外未能出油。

（2）欧庄构造

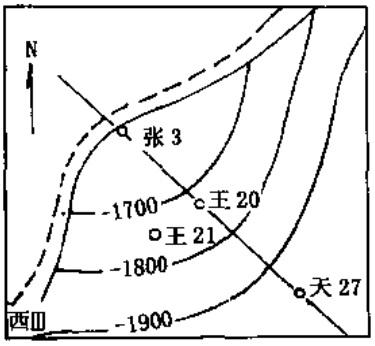


图5－10　欧庄构造T_3地震反射层构造图

该构造在王龙庄构造西南2km处，面积小于1km^2，圈闭幅度约100m。图5－11是沿图5－10中张3－王20－天27井作的构造剖面及封堵量分析图。

该构造的Ef^2段储集层较薄，张3井钻遇Ef^{2-3}段油组的最下一层，与封堵量曲线4段峰值对应，在井深1618.4～1636.8m见到3层共11m厚的油层。王20井钻遇Ef^3段四亚段油层，在井深1409.2～1431.4m见到4层共7m厚的油层，与封堵量曲线1段峰值对应。另外，根据封堵量曲线预测1′、3两组峰值所对应的砂层为储油层，其结果在Ef^{3-3}～Ef^{3-4}段、深度1437.4～1476.8m钻遇到2.6m厚的油层（王21井），与用1′段峰值预测的深度和层位完全吻合，在该区发现了这一组新的含油层位。3段峰值所对应的砂层也被王6井证实为该构造的漏钻油层。2段峰值与出油层对应（图5－11）。

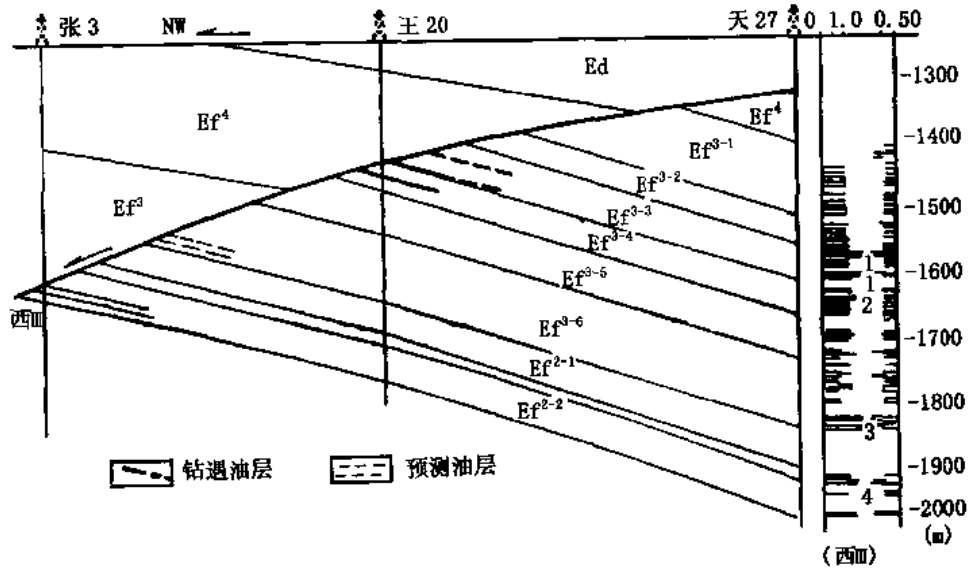


图5－11　欧庄构造张3－王20－天27井的构造剖面封堵量分析图

（图中右端左为封堵量曲线；右为岩性分层图）

西Ⅲ断层对王龙庄构造和欧庄构造起控制作用，断层垂直落差为200～300m。在封堵量计算时，王龙庄构造下移量S_h为406m；欧庄构造下移量S_h为340m。这样，Ef^4段泥岩封堵的范围约占整套储层的二分之一左右，总封堵量大。因此，沿西Ⅲ断层展布的构造，应是含油的有利地带。

$Ⅲ_0$断层靠近王龙庄构造的区段，断距最小、倾角平缓。在封堵量计算时，下移量S_h仅14m。储集盘大部分由Ef^3段、Ef^2段的砂、泥岩互层封堵，在某些特定层位有漏失。但

王龙庄构造的该侧为平缓的屋脊型，所以影响不太严重。

对王龙庄和欧庄构造断层封堵量计算结果与实际地层对比分析发现，现计算结果与实际封堵量的吻合率高达93.7%，证明这是一种非常可行的断层侧向封闭性研究方法。

二、封堵特性的相关分析法判断断层封闭性

前文的封堵量计算法可以比较直观、准确地判断目的盘储层的封堵特征，指明漏钻、漏试的油层，有效地指导布钻，但人工分析的工作量较大。

在上述工作中，韩光宇、王东辉（1989）发现，同一个次级构造带内，依附于某条断层形成的构造圈闭，其沉积的地层都是相似的，横向变化不大，即使变化，也是有规律的。这一类构造圈闭的储集层的封堵总量除与储层总厚度有关外，还与断层的落差，断层面的倾角和两盘的地层倾角有关。如果选定一套具有代表性的地层，事先作出各种可能出现的断层要素和地层倾角变化，计算各种参数配置时的封堵总量，就可以定性地判断出每个构造圈闭的封堵特性，尤其对一个新发现构造的综合评价是有价值的。基于上述思想，提出了此种方法。

1. 基本原理

①构造圈闭中，地层的分布确定以后，断层两侧地层的封堵关系，主要取决于断层要素及上、下盘地层倾角。

②一条测井曲线如自然电位曲线、电阻率曲线等，都可以看做划分砂、泥岩性质的代表纵向地层柱的函数曲线。

③断层两侧的地层柱在没有发生断层时，是完全相同的，当发生断层时，两侧的地层柱发生了错动，其两侧的地层曲线相似程度也发生了变化，相似程度越差，说明上、下盘岩性差异越大，便是砂岩储层与泥岩接触，封堵条件最好，可求取相关函数 $\Phi(\tau)$，来反映封堵特性。

④相关函数 $\Phi(\tau)$ 的大小，代表两个函数的相似程度，可以反映封堵条件的优劣。

$$\Phi(\tau)=\frac{1}{H}\int_0^H y(h)\cdot x(h+\tau)\mathrm{d}h \tag{5-15}$$

式中 $\Phi(\tau)$——相关函数，无量纲；

$y(h)$、$x(h)$——代表断层两侧地层曲线；

τ——由于断层引起的地层位移。

设：$y(h)=1-x(h)$

式（5-15）可变为：

$$\Phi(\tau)=\frac{1}{H}\int_0^H[1-(h)]\cdot x(h+\tau)\mathrm{d}h=\frac{1}{H}\int_0^H x(h+\tau)\mathrm{d}h-\frac{1}{H}\int_0^H x(h)\cdot x(h+\tau)\mathrm{d}h \tag{5-16}$$

令：$$\Phi_0(\tau)=\frac{1}{H}\int_0^H x(h+\tau)\mathrm{d}h \tag{5-17}$$

$$\Phi_{xx}(\tau)=\frac{1}{H}\int_0^H x(h)\cdot x(h+\tau)\mathrm{d}h \tag{5-18}$$

将式（5-17）、式（5-18）代入式（5-16）得：

$$\Phi(\tau)=\Phi_0(\tau)-\Phi_{xx}(\tau) \tag{5-19}$$

式（5-19）就是本节使用的相关函数式。其理论曲线如图5-12所示。

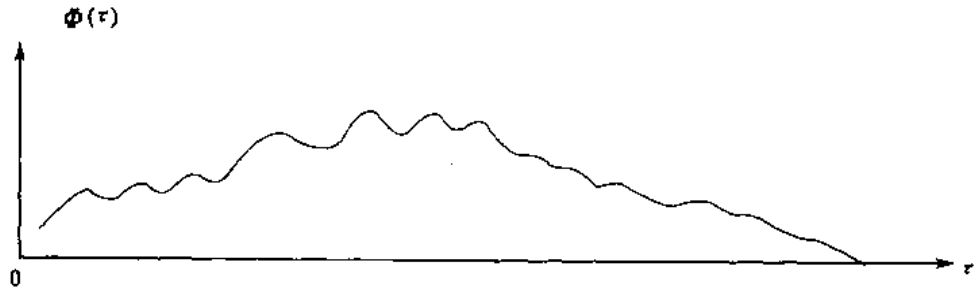


图 5－12　断块构造圈闭封堵特性的相关分析理论曲线

2. 试算步骤及效果分析

(1) 步骤

① 将地层曲线 y（h）按 1m 或 2m 取点输进微机。

② 选取 K =…0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、……。y（h）中的 h 经 K 值校正后，得到 x（h）曲线。

③ 选取 τ 值从 0～500m，$\Delta\tau$ = 5m 连续变化。

试算的部分数据由表 5－5 所示：

表 5－5　断块构造圈闭封堵特征相关分析数据表

Φ(τ) \ K / τ	1.2	1.1	τ	1.0	0.9……
1	0.4247	0.4428	5	0.4212	
6	0.4120	0.4002	10	0.4200	
11	0.4253	0.4166	15	0.4160	
16	0.4344	0.3919	20	0.4365	
21	0.4318	0.4006	25	0.4432	
26	0.4302	0.4372	30	0.4082	
31	0.4167	0.4421	35	0.4284	
36	0.4127	0.4374	40	0.4456	
			⋮	⋮	
41	0.4380	0.4195	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	……

试算的 Φ（τ）曲线如图 5－13。

(2) 试算结果表明

① 随断层垂直落差的增大，封堵总量明显增大，当增大到某个高值后，便逐步衰减至零。

②Φ（τ）高值区中的低值说明在某个垂直断距时，断层两侧的砂层接触多，为漏失层，使总封堵量出现低值。

③Φ（τ）函数值在 0.5 以上的构造圈闭，可以认为是相对有利的储油构造。

④ 对于一个新发现的构造，取准了该构造的参数后，即可从对应曲线上，查出封堵量

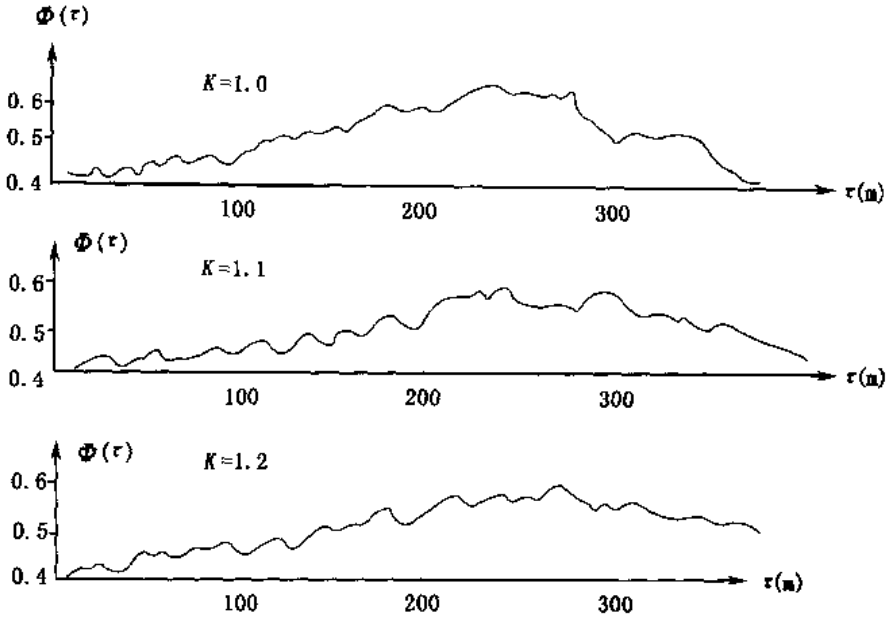


图 5－13　断块构造封堵特性相关分析曲线

值，帮助判断该构造的含油特性。

3．实际应用

王龙庄构造：$k=1.2$ $\tau=210\text{m}$ $\Phi(\tau)=0.58$。

欧庄构造：$k=1.1$ $\tau=252\text{m}$ $\Phi(\tau)=0.56$。

这两个构造的总封堵量都落在高值区，都是封堵较好的储油构造，事实上，这两个构造正是王龙庄油田的两个主要出油构造。

相关分析是对薄储层封堵量特性研究的继续，它从宏观上揭示了一个断块构造圈闭的含油特性。尤其对一个未钻井的新构造，它可以利用相关曲线量板，快速而较准确地判断出储集层封堵的优劣，有助于对构造的综合评价。

当一个构造有一口探井后，可利用薄层砂、泥岩封堵量分析方法，计算各储层的封堵量值，选择钻探的有利部位，和试油的最佳层段。

总之，断块构造圈闭封堵特性的相关分析和封堵量计算结合起来，对打准井、找准油层有一定的参考价值。

第三节　泥岩涂抹系数法研究断层侧向封闭性

泥岩涂抹系数，又称泥岩涂抹因子或粘土涂抹势，有人还将其称为泥岩沾污因子，是近年来刚刚兴起用来确定断层侧向封闭性的一种有效方法，也是定量判断在断层面附近形成的泥岩涂抹层是否连续的一个重要参数。它是用倾斜断距与被断泥页岩厚度之比值来表示，这个比值过大或过小都可能表明泥岩涂抹层在断面附近不连续分布，即这一断层不具封闭性。这个数值大小既取决于断层的倾向断距又取决于被断地层中的泥岩厚度。有关泥岩涂抹层形成机制、分布特征、影响因素及其与各影响因素之间的函数关系，详见第三章第一节中的内容，本节中主要介绍地层条件下泥岩涂抹层发育的影响因素、泥岩涂抹系数的计算方法以及

应用其定量判断层侧向封闭性方法及实例。

一、泥岩涂抹层发育的影响因素

本书第三章第一节关于泥岩涂抹层的物理模拟实验中已总结出了一些前人未提及到的影响因素，在此对前人关于此项内容的研究给予简述。

根据 Lindsay 等（1993）研究，泥岩涂抹系指在断层活动过程中，由于泥岩岩性软塑性大，在挤压应力或重力的作用下，泥岩被粉碎成粘土，在其上下盘断壁间被削截的砂岩层上形成的一个糜棱岩化的泥岩隔层，如图 5－14 所示。

这种泥岩涂抹作用，在挤压应力或重力的作用下，不仅可以使泥岩中粘土颗粒侵入到砂岩层中，堵塞其孔隙，而且还使泥岩涂抹层中成分发生均质化，导致其内小孔隙均匀分布。因此，泥岩涂抹层具较强的封闭性，它好似钻井中沉淀于渗透砂岩层上的泥饼，阻止了油气的侧向运移。



图 5－14　野外观测的泥岩涂抹作用
（据 FLchnev 等，1974）

大量的野外观察结果表明，断裂带中的泥岩涂抹现象是十分普遍的，它既可以存在于逆断层中，又可以存在于正断层中，如图 5－14 所示。然而，在不同的断层中以及同一条断层的不同部位，由于断层性质、断移地层的泥地比和断面产状及形态的差异，其内的泥岩涂抹程度以及空间分布大小是明显不同的。断层性质不同，断层面上所受的作用力也就不同。挤压成因的逆断层，由于断层面上不仅要受到一个来自上覆岩层重量产生的压力作用，而且还要受到一个来自区域构造挤压应力对断层面的挤压作用，因此，其泥岩涂抹的作用相对较强，有利于泥岩涂抹层的发育。而拉张成因的正断层，其断层面上只受到一个来自上覆岩层重量产生的压力作用，因此，其泥岩涂抹作用相对较弱。断移地层的泥地比大小也是影响泥岩涂抹层发育的重要因素。断移地层的泥地比越高，断裂带中泥质成分越多，越有利于泥岩涂抹层的发育。反之，则断裂带中泥质成分越少，越不利于泥岩涂抹层的发育。此外，断层产状及其光滑程度也影响泥岩涂抹层的发育，断层面越缓，其所受到的压力越大，涂抹作用越强，越有利于泥岩涂抹层的发育；相反，断层越陡，其所受到的压力越小，涂抹作用越弱，越不利于泥岩涂抹层的发育。断层面越光滑，泥岩涂抹的范围越大，越有利于泥岩涂抹层的发育；断层面越不光滑，泥岩涂抹的范围越小，越不利于泥岩涂抹层的发育。

综上所述，泥岩涂抹层的发育是诸多地质因素综合作用的结果。

二、断层侧向封闭性的泥岩涂抹系数研究方法

由于泥岩涂抹层成分已被均质化，小孔隙分布均匀，孔渗性较差，因而具有较强的毛细管封闭能力，油气欲通过断层进行侧向运移，必须穿过泥岩涂抹层，否则油气被泥岩涂抹层所封闭。例如，汤原断陷汤参 1 井 2950m 断层面处的一块岩心，岩性为黑灰色含钙泥岩，局部粉砂富集，具光滑的错动面，可见轻微的动力变质现象，微裂缝发育，方解石充填。实测饱合水排替压力大于 39MPa，远远大于正常压实泥岩的排替压力。由此可以看出，泥岩涂抹层依靠其自身较高的排替压力足以封闭住侧向运移的油气。

1. 泥岩涂抹系数

由上述分析可知，泥岩涂抹层由于受断层性质、断移地层泥地比和断层产状及光滑程度的影响，其在空间上发育部位及发育程度差异较大。Richard G.Gidson（1995）对特立尼达海区哥伦布盆地第三系沉积物中的断层研究发现，泥岩涂抹只能存在于泥岩位移经过的断层部分。其在空间上连续性的好坏集中反映在断层位移大小和断开泥岩层数及厚度上，即断层位移越小，断开泥岩层数越多、厚度越大，则泥岩涂抹层在空间上的连续性越好。反之泥岩涂抹层的空间上的连续性越差。据此，在第三章模拟实验结果的基础上，根据图 5－15 的模型采用泥岩涂抹系数（Bouvier 等，1989；Jev 等，1993）大小来定量描述泥岩涂抹层的发育程度。

$$f_m = \frac{L}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \qquad L \geqslant H \tag{5-20}$$

$$f_m = \frac{1}{R_m} \qquad L < H \tag{5-21}$$

式中 f_m——泥岩涂抹系数；

L——断层断距（m）；

h_i——被断层错开的第 i 层泥岩岩层厚度，$i=1, 2, \cdots, n, m$；

n——被断层错开的泥岩层数；

H——被断层断开地层厚度（m）；

R_m——被断层断开地层的泥岩厚度与地层厚度的比值。

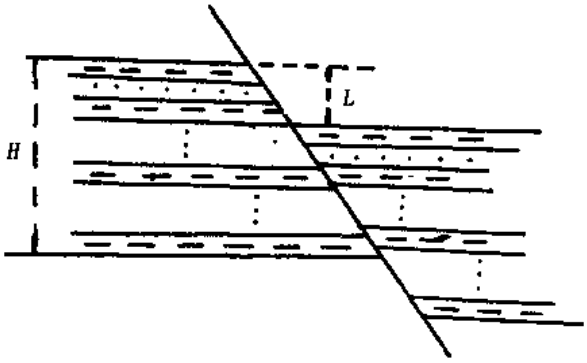


图 5－15 泥岩涂抹系数的概念模型

由式 5－20 和式 5－21 可以看出，泥岩涂抹系数 f_m 越大，泥岩涂抹层越发育，空间上的连续性越好，断层侧向封闭性越好；反之，泥岩涂抹层则越不发育，空间上的连续性越差，断层侧向封闭性越差。

2. 研究方法

由上可知，泥岩涂抹系数 f_m 大小反映了泥岩涂抹层空间发育程度及其断层侧向封闭性的好坏。那么泥岩涂抹系数多大才能确保其在空间上的连续性，使断层在侧向上形成封闭呢？根据 Richard G.Gibson（1995）通过测试 Teak 及 Poui 油田泥岩涂抹层连续性与其所封闭住的烃柱高度之间的对应关系（见图 5－18）以及统计 Poui 油田泥岩涂抹系数与页岩涂抹层空间连续性关系得知，只要泥岩涂抹系数大于 0.25（即断层错开泥岩的比例大于 25%），其泥岩涂抹层就能保持空间上的连续性，所形成的断层侧向封闭性越好；相反，若泥岩涂抹系数小于 0.25（即错开泥岩层厚的比例小于 25%），其泥岩涂抹层就无法保持空间上的连续性，所形成的断层侧向封闭性差。因此，可以将泥岩涂抹系数 $f_m=0.25$ 作为泥岩涂抹层的空间上是否连续的判别标准。

研究断层侧向封闭性的方法步骤如下：

①通过钻井数据统计被断层错开某一段地层内的泥岩层数以及厚度，计算其累积泥岩厚度 Σh_i 值；

②在构造剖面上量取断层的断距 L 值；

③根据公式 5－20 或公式 5－21 计算泥岩涂抹系数 f_m 值；

④根据计算得到的泥岩涂抹系数 f_m 判断断层侧向封闭性的好坏，$f_m \geqslant 0.25$，表明泥岩涂抹层在空间上连续，断层侧向封闭性好；如果 $f_m < 0.25$，表明泥岩涂抹层在空间上不连续，断层侧向封闭性能就差。

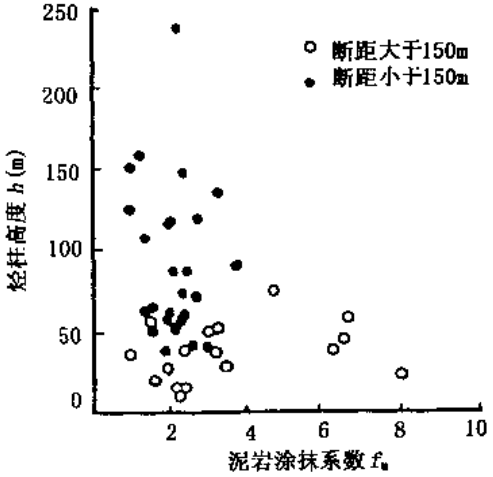


图 5－16　泥岩涂抹系数与烃柱高度的关系

三、应用举例

1．轮南地区的断层

轮南地区位于塔北隆起中段，是塔里木盆地油气勘探的重点地区，已在奥陶系、石炭系、三叠系和侏罗系发现了油气。石炭系油气最为丰富，自上而下分为 3 个含油组合，其中 C_I 油组的盖层为泥岩夹砂岩段，泥岩的厚度大于 20m，泥岩含钙质较重；C_{II} 油组的盖层为上高伽马泥岩段，在断垒带上比较发育，泥岩较纯，含钙质重，厚度为 47．5～86m；C_{III} 油组的盖层为下高伽马泥岩段，岩性为泥岩、钙质泥岩和粉砂质泥岩，受古地形影响，沉积厚度变化较大，为 41～112m，总的趋势是向西盖层变差。

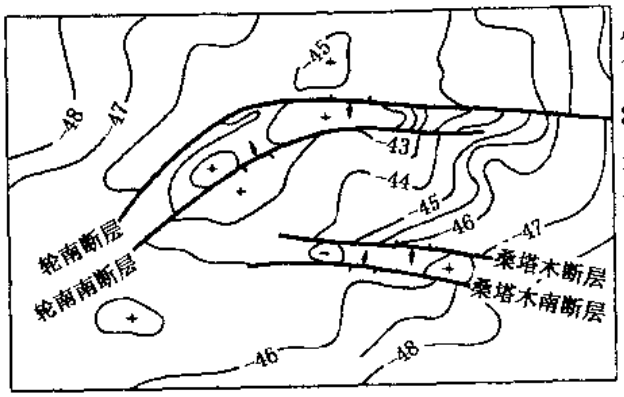


图 5－17　轮南地区奥陶系顶面构造图

该区从北至南发育了轮台断层、轮南断层、轮南南断层、桑塔木断层和桑塔木南断层（见图 5－17），将该区从南到北分割成轮南和桑塔木两个断垒。其中以轮南断层及其派生的轮南南断层最为发育，它们均形成于海西晚期，印支后期终止活动，错开了该区石炭系 3 套泥岩层。在断层错动过程中，这 3 套泥岩层能否对石炭系 3 个油组形成连续涂抹，决定了断层能否形成较好的侧向封闭性，对该区石炭系油气的聚集与保存起到重要作用。

根据轮南断层和轮南南断层的断距及错开石炭系泥岩厚度资料，根据式（5－20）或式（5－21）可计算出石炭系 3 套泥岩层的涂抹系数（见表 5－6）。按照前述判别标准，轮南断层对石炭系 3 个油组的侧向封闭性都不好，有利于寒武－奥陶系源岩生成的油气向石炭系运移。轮南南断层对 C_{II} 和 C_{III} 油组的侧向封闭性相对较好，有利于沿轮南断层运移上来的寒武－奥陶系油气聚集成藏；但对 C_I 油组的侧向封闭性不好，不利于油气的聚集与保存。这一结论与该区目前勘探结果是吻合的。

2．塔中地区的断层

塔中地区主要是指塔中低凸起构造，是塔里木油气勘探的重点地区。油气主要产在石炭系。由图 5－18 中可以看出，该区油气的聚集、分布与断层关系十分密切，所获得的工业油气流井皆分布在断层附近，断层对该区油气的聚集成藏起着重要控制作用。大量的研究表

明：断裂对油气藏的形成具有双重作用，既可以起油气运移的通道作用，又可以起遮挡作用，断层究竟起何种作用关键取决于其封闭性。因此，断层封闭性研究对油气藏形成研究具有重要意义，笔者将利用泥岩涂抹系数研究塔中地区石炭系中主要断层（F_2-F_5）的侧向封闭性。

表 5-6　轮南、轮南南断层特征及泥岩涂抹系数表

断　层	倾　向	长　度 (m)	石炭系断距 (m)	f_m		
				C_I	C_{II}	C_{III}
轮　南	S	54	360～510	8～25.5	4.31～10.74	3.21～12.44
轮南南	N	45	80～230	4～11.5	0.94～4.86	0.71～2.06

注：断层均为逆断层，走向均为 NE 向转 EW 向。

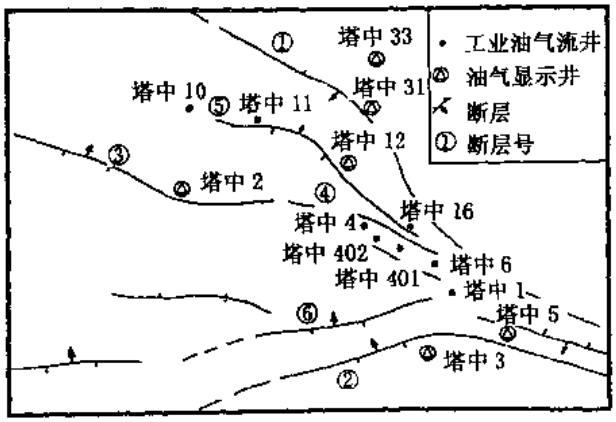


图 5～18　塔中地区油气与断裂关系示意图

塔中低隆起发育有 15 条大小不同的逆断层（图 5－18）。根据它们的形成机理及在平面上的展布，可以总结出以下 5 个共同特征：

①形成时间早，断距大。多数断裂为加里东期形成，早海西期终止的基底断裂，断裂基底落差大，多数在 400m 以上，最大可达到 1980m（表 5－7）。

②断层多呈“Y”或“花式”背冲逆断裂，构成塔中低隆起的高垒断块构造。

③成因基本相同，都是挤压形成的逆断层。

④东部断开层位低（$T_{g8}-T_{g5}$），西部断开层位高（$T_{g8}-T_{g2}$）。断裂活动结束时间具有东早西晚的特点。

⑤多数断层走向与区域构造走向基本一致，而且由西向东逐渐收敛，呈 EW－WN 走向（表 5－7）。

由钻井资料可知，塔中地区石炭系泥岩发育，如表 5－8 所示，累积厚度为 68.5～481.5m，平均为 256.6m，泥地比为 11.1%～70.4%，平均为 47.2%。根据表 5－7 中该区已知几个主要断层的断距资料和表 5－8 中泥岩累积厚度和泥地比资料，由式（5－20）或式（5－21）计算得到几条主要断层在石炭系中的泥岩涂抹系数如表 5－9 所示。

由表 5－9 中可以看出，该区几条主要断层在石炭系除 F_2 泥岩涂抹系数大于 4，所形成的泥岩涂抹层空间分布连续性相对较差，侧向封闭性不好，不利于油气聚集成藏外，其余几条断层（F_2、F_4、F_5）在石炭系的泥岩涂抹系数均小于 4，所形成的泥岩涂抹层空间分布连续性相对较好，侧向封闭性强，有利于油气的聚集成藏。

表 5－7　塔中 1 号构造断裂要素（据敬光汉等，1995）

断裂名称	性质	走向	倾向	断开层位	最大垂直断距（m）			延伸长度（km）
					T_{g8}	T_{g5}'	T_{g7}	
F_1（F_{1-I}，F_{1-II}）	先正后逆	NW	北东	$T_{g8}-T_{g5}'$		4100	4000	52（F_{1-I}32，F_{1-II}20）
F_2	逆、走滑	NWW	北东东	$T_{g8}-T_{g2}'$或T_{g2}	1200	1900	2000	77
F_3	逆	NWW	北东东	$T_{g8}-T_{g2}'$或T_g	670	490	430	32
F_4	逆	NW	南西	$T_{g8}-T_{g2}'$	180	300	340	27
F_5	逆	NW	北东	$T_{g8}-T_{g2}'$	100	100	270	15
F_6	逆	EW	南	$T_{g8}-T_{g3}$		330	900	30
F_7	逆	NWW	北东东	$T_{g8}-T_{g2}'$或T_{g2}	300	630	520	28
F_8	逆	EW	南	$T_{g8}-T_{g3}$		3800	350	18
F_9	逆	NW	北东东	$T_{g8}-T_{g5}'$				20
F_{10}	逆	NE	南东	$T_{g8}-T_{g3}$		840	1240	18
F_{11}	逆	NE	南东	$T_{g8}-T_{g5}'$				15
F_{12}	逆	NE	南东	$T_{g8}-T_{g5}'$				15
F_{13}	逆	NE	北西	$T_{g8}-T_{g5}'$		610	570	12
F_{14}	逆	NWW	北东	$T_{g8}-T_{g5}'$		490	1000	15
F_{15}	逆	NW	南西	$T_{g8}-T_{g3}$		480	480	25

表 5－8　塔中地区石炭系泥岩厚度统计表

井号	泥岩累积厚度（m）	泥地比（%）
塔中 101 井	357.3	58.5
塔中 102 井	334.0	60.6
塔中 11 井	320.5	61.4
塔中 12 井	218.5	37.6
塔中 14 井	287.0	49.6
塔中 16 井	278.0	42.5
塔中 17 井	194.5	37.9
塔中 2 井	229.5	54.9
塔中 20 井	260.0	46.6
塔中 201 井	315.0	56.7
塔中 22 井	142.0	47.3
塔中 25 井	293.0	48.8
塔中 37 井	282.0	52.8
塔中 4 井	165.5	32.3
塔中 31 井	393.5	69.7
塔中 32 井	374.5	63.8
塔中 33 井	325.0	56.2
塔中 28 井	353.5	50.0
塔中 29 井	481.5	70.4
塔中 30 井	322.0	60.3
塔中 402 井	201.5	38.9
塔中 403 井	158.5	30.9
塔中 411 井	201.5	32.8
塔中 421 井	68.5	11.1
塔中 422 井	182.5	32.0
塔中 6 井	242.0	38.4
塔中 9 井	166.5	33.5

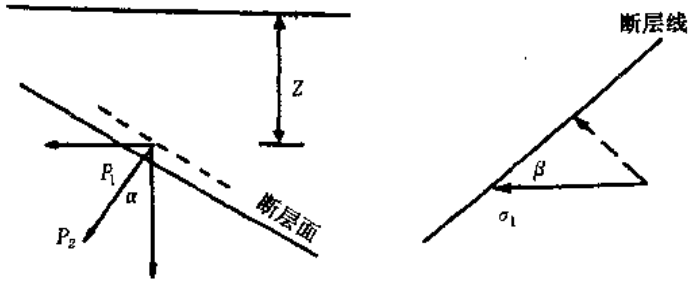
表 5－9　塔中地区几条主要断裂石炭系泥岩涂抹系数

断层	性质	断穿层位	断层落差 (m)	断穿石炭系泥岩平均累积厚度及钻揭井号 (m)	泥岩涂抹系数
F_2	逆，走滑	$T_{g6}-T_{g2}'$，T_{g2}	1200	270.1（塔中1、2、4、6、10、11、12、14、16、17、18、19、20、22、25、28、29、30、31、32、33、34、37、42、402、403、411、421、101、103、201井）	4.44
F_3	逆，走滑	$T_{g6}-T_{g2}$，T_g	670		2.48
F_4	逆，走滑	$T_{g6}-T_g$	180		2.91
F_5	逆，走滑	$T_{g6}-T_{g2}'$	100		1.98

第四节　断层垂向封闭性研究

一、基本原理

影响断层垂向封闭性好坏的最关键因素是断面的紧闭程度。若断面紧闭，断层垂向封闭性好，油气不能沿断面作垂向运移，否则，断层开启，断层作为油气运移的通道。断面的紧



(a) 剖面图　　(b) 平面图

图 5－19　断层面受力分析示意图

闭程度可用断面所受正压力大小（图 5－19）来衡量，其计算公式为

$$P = Z(\rho_r - \rho_w)\cos\theta + \sigma_1\sin\theta \cdot \sin\beta \qquad (5-22)$$

式中　P——断面所受的正压力（MPa）；

Z——断面埋深（m）；

ρ_r——上覆地层的平均密度（g/cm^3）；

ρ_w——地层水密度（g/cm^3）；

σ_1——区域主压应力（MPa）；

ρ——σ_1 与断层线交角；

θ——断面倾角，(°)。

当断面所受正压力大于泥岩的变形强度时，因泥岩变形而导致断层裂缝愈合，由此造成断层垂向封闭，否则断层垂向开启。

根据延吉盆地泥质岩泊松比计算，该盆地内泥质岩的变形强度在 2.0～8.0MPa 之间，据此，按断面所受正压力的大小，将断层垂向封闭性细分为 5 个级别（表 5－10）。

表 5－10　断层垂向封闭性评价标准

断面压力 (MPa) / 封闭性 / 泥地比（%）	<1.5	1.5~3.5	3.5~5.5	5.5~7.5	>7.5
>50	差	较差	中	较好	好
50~40	差	差	较差	中	较好
40~30	差	差	差	较差	中
30~20	差	差	差	差	较差
<20	差	差	差	差	差

断层的垂向封闭性除与断面压力有关外，还受断移地层泥岩含量的影响，尽管断面所受正压力较大，但断移地层剖面上泥岩所占地层比例很小，断裂充填必然以砂质为主，以砂质为主的断裂充填恰似一斜置于断层面上的储集层（图 2－12），若使该储集层具有封闭能力，单纯靠断层压力使其渗透率降低到泥质岩的程度是极其困难的。即使无断裂充填，因断层两盘泥岩少、砂岩多，两盘泥岩层相互不接触，油气仍可沿断面迂回向上运移（图 2－12）。因此，当断移地层的泥地比值很低时，不利于断层的垂向封闭。此外，泥岩中的砂质含量也与地层剖面上泥地比值有关，尤其在陆相沉积地层中砂岩地层相对发育的区域，往往泥岩中砂质含量也高，而砂质含量高的泥岩，变形强度大。所以，在根据断面压力评价断层垂向封闭性时，兼顾了断移地层的泥地比值（表 5－10）。

由式 5－22 可见，断面正压力的大小主要取决于断面倾角、断面埋深和区域主压应力，倾角越大、埋藏越深，区域主压应力越大，断面正压力越大，越有利于断层垂向封闭；反之断层垂向封闭性差。因此，在其他条件相同的情况下，深埋的缓角断层垂向封闭性好。

二、应用实例

以延吉盆地为例，研究断层垂向封闭性。其基本步骤与图件如下：

①做断面构造图（图 5－20）。

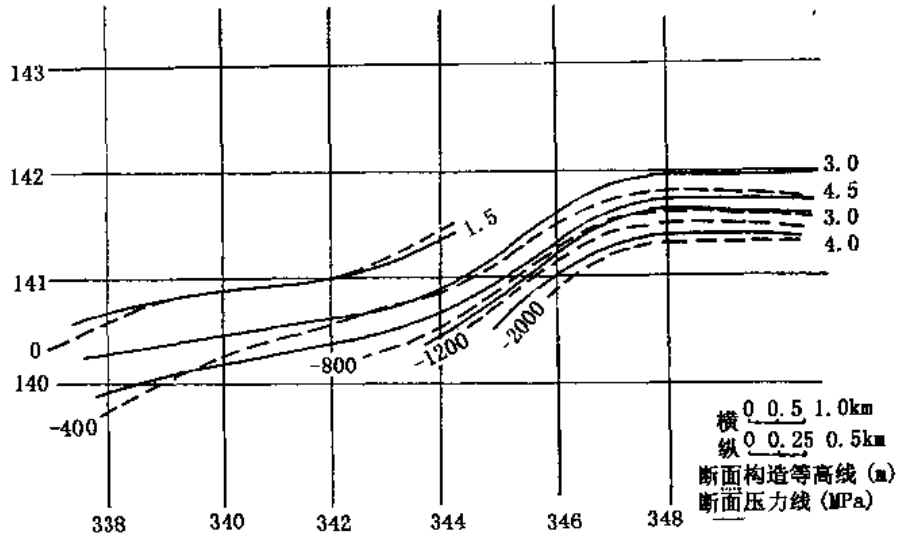


图 5－20　延吉盆地 II_4 断层断面构造及断面压力图

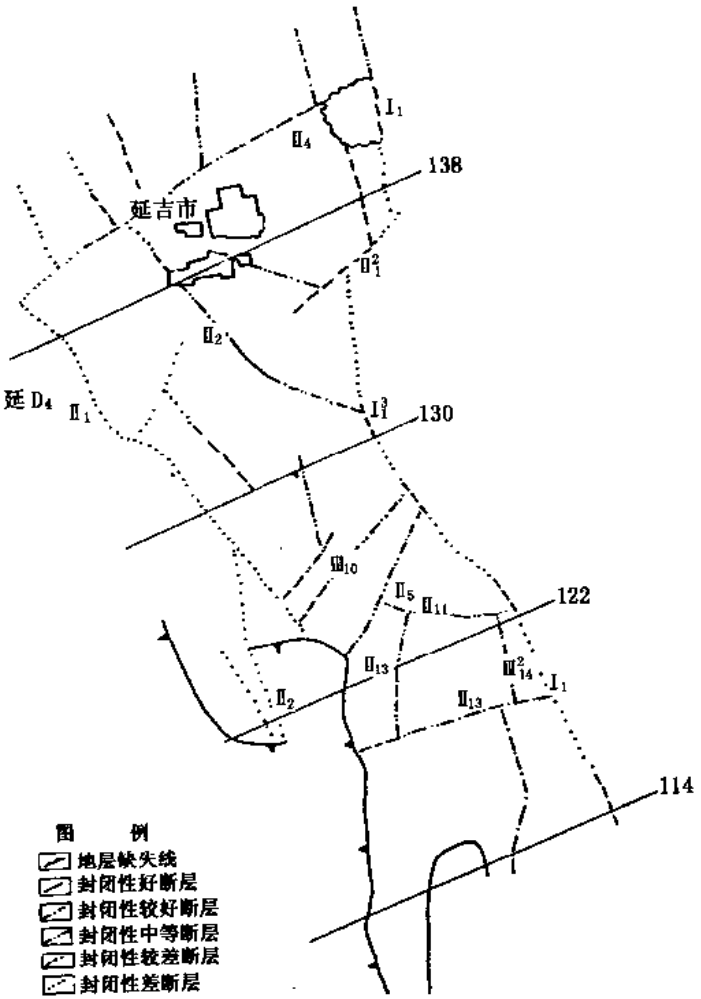


图 5－21a　延吉盆地东区大拉子组一、二段内断层垂向封闭性评价图

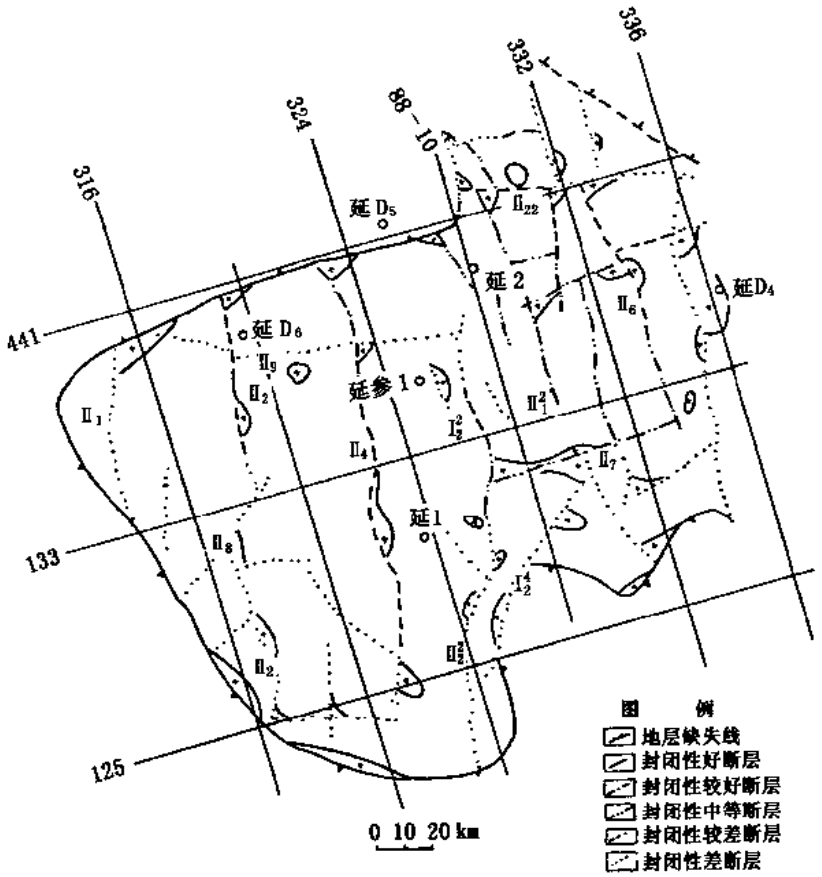


图 5－21b　延吉盆地朝阳川坳陷大拉子组内断层垂向封闭性评价图

②根据断面埋深、倾角，通过式（5－22）计算各点正压力，并在断面构造图上做断面压力图（图5－20）。

③根据断移地层的沉积相分析两盘地层的泥地比值，根据目的层段断面埋深从相应断面构造图与断面压力图上查得断面正压力，按表5－10标准确定目的层段内断层的垂向封闭性能，并将其以平面图的形式表示之（图5－21）。

上述断层面上的正压力也可直接通过断层剖面图上计算求得。

由所编制的断层垂向封闭性评价图中可见延吉盆地断层具有以下封闭特征：

① 同一条断层在同一层段内，在其走向方向上因断面倾角的变化、断面埋深的不同而引起断面压力的差异，由此导致断层垂向封闭性沿其走向上的变化。如盆地东区的$Ⅲ_2^2$断层，在大拉子组一、二段内，其中段垂向封闭性好，向南北两个方向逐渐变差，在该断层的最北端，断层垂向封闭性变为最差，最南端断层封闭性变为较差。分析其断层沿走向不同位置封闭性变化的原因主要有3个：一是断面埋深的变化，二是断层倾角的变化，三是断移地层砂质含量的变化。在断层的南端，由于断移地层为滨湖相，泥质含量低，断裂充填为中砂质含量相对较高，岩石的变形程度相对也较大，因此，尽管埋藏较深、断面压力也较大，但断面愈合能力却相对较差。故该段垂向封闭性为较差级别。在该断层中段，断层面埋深增加，断移地层为浅湖相，泥质含量增加，断裂充填也以泥岩为主，断面愈合能力强，故其封闭性能变好。自中段向北，断层倾角逐渐变陡，断面埋深逐渐变浅，断面压力逐渐变小，加之断移地层逐渐变为滨湖相，断裂充填砂多泥少，不利于断面的愈合，因此，断层垂向封闭性又逐渐变差。盆地内同一层段内同一条断层沿走向上垂向封闭性变化较大的现象相当普遍。

② 同一条断层在不同层段内的垂向封闭性不同。仍以盆地东区的$Ⅲ_2^2$断层为例。总体上，该断层在铜佛寺组内、大拉子一、二段及大拉子三段内均为中段封闭性相对好，向两端封闭性变差的特点，但由于断层在不同层位上埋深不同，断移地层的岩性差异，造成其垂向封闭性在不同层段内不同。铜佛寺组内地层岩性较粗，尽管断面埋深较大，断面压力较高，但断移地层中砂多泥少，泥质岩变形强度大，断层垂向封闭性在中段及其以南以中等封闭能力为主，在中段以北为较差和差。在大拉子组一、二段内，因断移地层泥岩增多，砂质含量变低，尽管断层埋藏深度变浅，断面压力相对下部地层变小，但因泥质岩变形强度相对变低，而使断面愈合能力增强，因此，在该段内断层总体垂向封闭能力明显好于下部铜佛寺组。在上部的大拉子组三段内，由于断面埋深变浅，断移地层的泥质含量减少，其垂向封闭性相对下部的大拉子组一、二段内变差。可见，尽管是同一条断层，在三维空间的不同位置，其垂向封闭性差异是较大的。

③ 总体上，东区断层垂向封闭性明显好于西区，在铜佛寺组内、大拉子一、二段内和大三段内，绝大多数断层垂向封闭性为中等以上级别，而西区此类断层数较少，大多数断层垂向封闭性较差。

④ 从层位上看，东西区断层垂向封闭性也存在差异。西区断层在铜佛寺组内封闭性相对较好，大拉子内断层垂向封闭性相对较差。而东区以大拉子组一、二段内断层垂向封闭性相对最好，铜佛寺组内断层封闭性居中，大拉子组三段内断层垂向封闭性相对较差。

⑤ 东西两大区域内，断层垂向封闭性具较明显的分带性。

在西区，垂向封闭性较好的断层主要集中在东北部，其他部位的断层垂向封闭性均很差，铜佛寺组内垂向封闭性相对较好的断层分布范围比大拉子组内有所扩大。

在东区，凹陷内部断层垂向封闭性相对较好，而其边部断层垂向封闭性差。

⑥ 从所有断层垂向封闭性评价图上看，断层垂向封闭性的好坏基本与断层的延伸方向无关。

第五节　渗滤速度模拟计算法判断断层垂向封闭性

由前文可知，许多学者从不同角度对断层垂向封闭性研究进行了探讨，并对断层的垂向封闭机理、封闭特征、封闭模式、封闭史演化及影响因素的研究已取得了较为深入的认识，但不同的研究者由于出发点和解决问题的目的不同，其对断层垂向封闭性的评价仅仅是某一个侧面入手的，缺乏综合性，且评价标准也就不同，致使不同学者对同一条断层的评价结果也就不同，这无疑不利于断层封闭性研究的深化。为此，本节试图通过油气在外力作用下通过断层的渗滤速度的相对大小来探讨断层垂向封闭性的综合评价指标及方法。

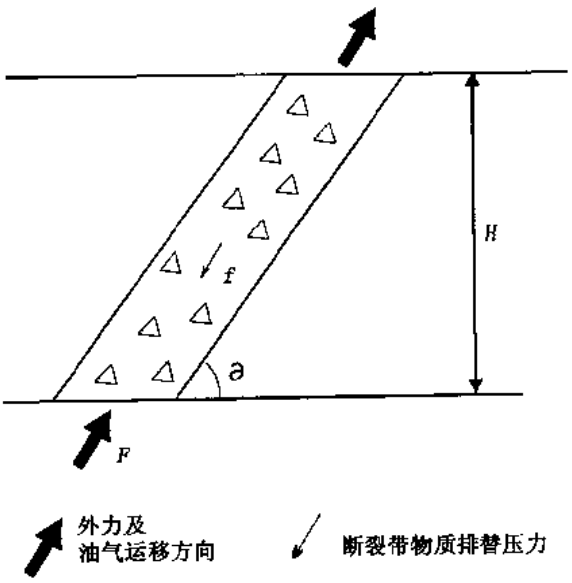


图 5－22　油气在外力作用通过断层渗滤的地质模型

一、断层垂向封闭性综合评价的地质模型和数学模型

断层垂向封闭性的好坏既受断裂带中物质封闭性的影响，又受油气本身性质的影响，因此，断层垂向封闭性的评价指标应是一个既要反映断裂带物质封闭性，又要反映油气本身性质的综合性评价指标。

本节假定对一个盆地或一个坳陷所有断层在目的层段给其施加一个外力（条件是大于断裂带物质排替压力），让油气通过其进行渗滤运移（图 5－22），其渗滤量大小可用达西定律（式 5－23）描述。

$$Q = K(F - f)St\sin\alpha / \mu H \tag{5-23}$$

式中　Q——油气沿断裂渗滤散失量（m^3）；

K——断裂带渗透率（μm^2）；

F——外力（Pa）；

f——断裂带排替压力（Pa）；

S——断裂带面积（m^2）；

t——油气发生渗滤时间（s）；

μ——油气粘度（Pa·s）；

H——目的层段厚度（m）；

α——断裂倾角。

由于式（5－23）中 S、t 两个参数在实际计算中是难以确定的，且又与断层垂向封闭性无直接关系，故二者可以不予直接考虑，由式（5－21）两边同除以 S、t，便可得到油气

在外力作用下，通过断层发生渗滤的速度大小为：

$$V = Q/St = K(F - f)St\sin\alpha/\mu H \tag{5-24}$$

由式 5－24 中可以看出，在驱使油气通过断层发生渗滤作用的外力（F）不变的情况下，油气通过断层目的层的渗滤速度 V 的大小与断裂带的排替压力（f）、渗透率（K）、断层倾角的正弦成正比，与目的层厚度（H）和油气粘度（μ）成反比。因此，油气在外力作用下通过断层渗滤速度的相对大小在一定程度上反映断层在目的层垂向封闭性的好坏，即油气通过断层在目的层的渗滤速度越慢，断层在目的层的垂向封闭性越强；反之则越差。而且 V 值大小既反映了断层本身封闭性的影响，又反映了油气性质的影响，应是断层垂向封闭性评价的综合指标。

在实际地质条件下，不同断层的目的层段厚度、断裂带物质的排替压力、渗透率、断层倾角均不同，因此由式 5－24 计算得到不同断层的 V 值差异也就较大，难以限定其值大小范围和确定等级划分标准。为此，为了限定 V 值大小范围和确定等级划分标准，本节采用式 5－25 对其进行均一化处理。

$$FSI = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\% \tag{5-25}$$

其中：

$$V_{max} = \frac{K_s(F - f_s)\sin\alpha}{\mu H} \qquad V_{min} = \frac{K_m(F - f_m)\sin\alpha}{\mu H}$$

式中 FSI——断层垂向封闭性评价指标（%）；

V_{min}——油气在外力作用下通过断层在目的层段为纯泥质填充物时的渗滤速度（m/s）；

V_{max}——油气在外力作用下通过断层在目的层段为纯砂质填充物时的渗滤速度（m/s）；

K_s——断层在目的层段两盘砂岩地层的渗透率（μm^2）；

K_m——断层在目的层段两盘泥岩地层的渗透率（μm^2）；

f_s——断层在目的层段两盘砂岩地层的排替压力（Pa）；

f_m——断层在目的层段两盘泥岩地层的排替压力（Pa）。

由式 5－25 可以看出，FSI 值大小表示油气通过断层在目的层段的渗滤速度相对于相同条件下油气通过断层在目的层段内泥质填充渗滤速度的增长率，FSI 值越小，V 值越小，断层垂向封闭性越好；反之，断层垂向封闭性越差。

二、主要参数的确定方法

1．断裂带排替压力 f

由前面研究知，油气沿断裂带渗滤运移时遇到的阻力主要是排替压力。然而，由于受到钻穿断层井数及钻井难以取心等因素的限制，通过直接测试获取断裂带物质的排替压力是十分困难的，因此，只能借助于计算方法来求取目的层段断裂带物质的排替压力。本节这里假设来自断层两盘的物质均匀地分布在断裂带中，故可用断层在目的层段两盘地层排替压力及岩性比例，根据串联原理来估算目的层段断裂带物质的排替压力。

$$f = \frac{f_s \cdot f_m}{R_m f_s + R_s f_m} \tag{5-26}$$

式中 f——目的层段断裂带物质排替压力（Pa）；

f_m——断层在目的层段两盘泥岩排替压力（Pa）；

f_s——断层在目的层段两盘砂岩排替压力（Pa）；

R_m——目的层段断裂带中泥质含量；

R_s——目的层段断裂带中砂质含量。

断裂填充物的岩性主要受到其断移地层岩性的影响，断层断移地层的泥岩厚度越大，其断裂带中填充物的泥质含量就越高。相反，如果断层断移地层的泥岩厚度越小，其断裂带中填充物的泥质含量就越低，因此，可以近似地用断层两盘目的层段中的泥质含量和砂质含量分别代替断层在目的层的断裂带中填充物的泥质含量和砂质含量，即

$$R_m = H_m/H \tag{5-27}$$

$$R_s = H_s/H \tag{5-28}$$

其中：$H = H_m + H_s$

式中 H_s，H_m——目的层段砂岩，泥岩的厚度（m）；

R_m，R_s——H 符号意义同上。

2．外力 F

式 5-24 中的假设施加外力，在计算时，应满足确保油气通过断层渗滤即可，即 $F > f$，通常可用一个盆地或一个坳陷最大深度处泥岩的排替压力代替便可满足要求。

3．断裂带渗透率 K

断裂带渗透率是与其排替压力一样难以确定的参数，本节这里也可参照其排替压力的求取方法利用断层两盘目的层段砂泥岩的渗透率及岩性比例来求取，如式（5-29）所示。

$$K = \frac{K_s \cdot K_m}{R_m K_s + R_s K_m} \tag{5-29}$$

式中 K——目的层段断裂带物质渗透率（μm^2）；

K_s——断层在目的层段两盘砂岩地层的渗透率（μm^2）；

K_m——断层在目的层段两盘泥岩地层的渗透率（μm^2）；

R_m，R_s——符号意义同上。

4．油气粘度 μ

油气粘度主要受其所处的温压条件影响，可由文献（陈荣书，1989）得到的油气粘度与温压

$$\lg\mu_o = \frac{\lg c + \lg\mu_{os}}{1 + \alpha(T - T_s)(\lg c + \lg\mu_{os})} - \lg c \tag{5-30}$$

式中 T_s——地表温度（℃）；

μ_{os}——地表原油粘度（mPa·s）；

c，α 为与油气粘度有关的常数，c 的单位为（mPa·s），α 的单位为（$℃^{-1}$）；

$\mu_{os} \geqslant 10^3$mPa·s 时，$c = 10$，$\alpha = 2.52 \times 10^{-3}$

$10 < \mu_{os} < 10^3$mPa·s 时，$c = 100$，$\alpha = 1.44 \times 10^{-3}$

$\mu_{os} \leqslant 10$mPa·s 时，$c = 1000$，$\alpha = 0.76 \times 10^{-3}$

$$\mu_g = -2.60341 \times 10^{-5} \cdot T + 4.46911 \times 10^{-4} P + 1.672 \times 10^{-2} \tag{5-31}$$

式中 μ_g——气粘度（Pa·s）；

T——温度（℃）；

P——压力（Pa）。

由式（5-30）、（5-31）可见，随埋深增加，温压增加，原油粘度逐渐减小。

三、断层垂向封闭性评价标准

本节在全面考虑断层目的层厚度、断裂带渗透率、排替压力和断层倾角等因素对油气通过断层渗透率大小影响的基础上，根据 *FSI* 值的相对大小，提出了断层垂向封闭性的评价标准，如表 5－11 所示。

表 5－11　断层垂向封闭性的评价标值

评价等级	好	较好	中等	差
FSI	<25	50～25	75～50	>75

四、应用举例

选取松辽盆地北部三肇凹陷汪家屯气田的 W_1 和 W_5 两条断层为例，利用上述研究方法，研究其在青山口组盖层中的垂向封闭性。

汪家屯气田位于三肇凹陷北部汪家屯－升平构造上，是松辽盆地北部目前发现的较大气田之一，天然气主要产于下白垩统泉头组三、四段的扶余、杨大城子油层中，天然气主要来自下伏下白垩统的沙河子组－营城组的煤系源岩，盖层为上覆下白垩统的青山口组发育的大套暗色泥岩。

由于汪家屯气田处于汪家屯－升平深大断裂带上，构造内断裂十分发育，主要为正断层，延伸方向以 NNE 向为主，延伸长度 4～5km，最长 11km，断距一般为 40～60m，最大 120m，均断穿青山口组盖层。W_1 和 W_5 是该气田内的两条主要断裂，其特征如表 5－12 所示。它们均分布在气藏内，如图 5－23 和图 5－24 所示，其在青山口组内垂向封闭性的好坏，对于气藏中天然气的聚集、保存将起到重要的控制作用。

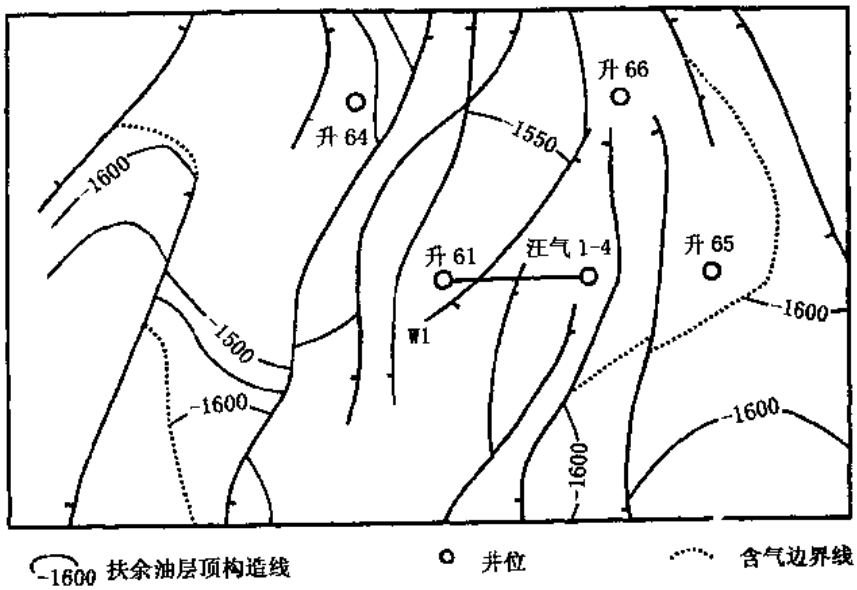


图 5－23　汪家屯气田 W_1 断层位置图

由图 5－23 和图 5－24 中可以看出，升 61 井和汪气 1－4 井分别位于 W_1 断层两侧，而升 54 井和卫深 3 井则分别位于 W_5 断层两侧。由钻井资料可知，W_1 和 W_5 断层处青山口组

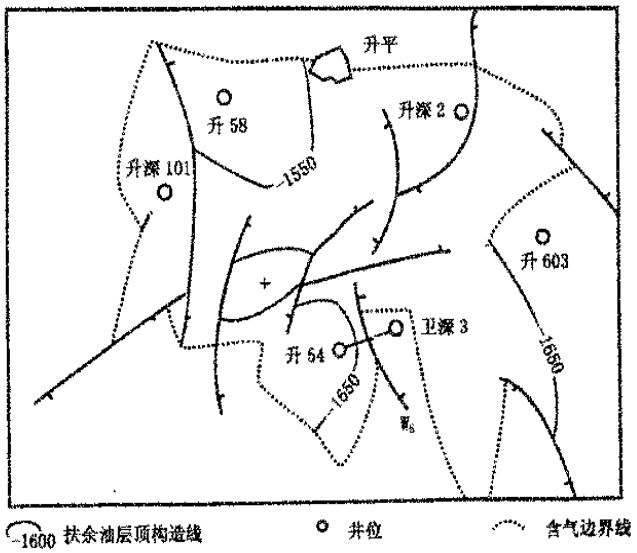


图 5－24　汪家屯气田 W_2 断层位置图

地层厚度（H）分别为 248m 和 244.5m，泥地比（R_m）分别为 0.81 和 0.77。由该区泥岩和砂岩孔隙度随深度的变化关系式（式（5－32）和式（5－33））和渗透率和孔隙度之间的关系式（式（5－34）和式（5－35））计算 W_1 和 W_5 断层处青山口组泥岩和砂岩的渗透率分别为 $1.73\times10^{-6}\mu m^2$、$5.58\times10^{-3}\mu m^2$ 和 $1.75\times10^{-6}\mu m^2$、$5.55\times10^{-3}\mu m^2$。

表 5－12　汪家屯气田 W_1、W_5 断层特征

断层号	断层位置	断层类型	走向	倾向	倾角（°）	断距（m）	断层性质
W_1	升 61－汪气 1－4 井之间	晚期	NNE	SE	56	90	正断层
W_5	升 54～卫深 3 井之间	晚期	NNW	NE	62	20	正断层

$$K_s = e^{(8\phi-7)} \tag{5-32}$$

$$K_m = e^{(15\phi-8)}\cdot10^{-3} \tag{5-33}$$

$$\phi_m = 54.74\cdot e^{-0.0009354Z} \tag{5-34}$$

$$\phi_s = 43.57\cdot e^{-0.0003835Z} \tag{5-35}$$

式中　K_s，K_m——砂、泥岩渗透率（μm^2）；

ϕ_s，ϕ_m——砂、泥岩孔隙度；

Z——埋深（m）。

由式（5－29）计算可得，W_1 和 W_5 断层在青山口组处断裂带的渗透率（K）分别为 $2.14\times10^{-6}\mu m^2$ 和 $2.27\times10^{-6}\mu m^2$。由该区泥岩实测排替压力与深度关系（式（5－37））算得 W_1 和 W_5 断层处青山口组泥岩和砂岩的排替压力分别为 4.54MPa、3.65MPa、4.56MPa、3.67MPa。由式（5－26）计算得到 W_1 和 W_5 断层在青山口组处断裂带的排

力（f）分别为 4.34MPa 和 4.32MPa。由式（5－36）取 5km 处泥岩排替压力值（14.09MPa）作为 F。

$$f_m = -0.41 + 0.0029Z \tag{5-36}$$

$$f_s = \sqrt{\frac{\phi_s \overline{K_m}}{\phi_m K_s}} f_m \tag{5-37}$$

在此基础上，由式（5－24）和式（5－25）分别计算得到 W_1 和 W_5 断层在青山口组处的垂向封闭性的评价指标 *FSI* 分别为 7.0%和 8.6%。按照表 5－11 中评价指标准 W_1 和 W_5 断层在青山口组处的垂向封闭性均为好等级，这一结论与实际的地质情况非常吻合。由于青山口组是大套的泥岩层段，且其中具有较高的地层超压，泥岩层本为欠压实，岩石孔隙度高、塑性强，地层被断层错动后，在上述的地层条件下其实很快便形成断裂面的愈合，否则其中的超压也不会保存至今，应该早已沿断裂面泄失殆尽了；下部的油气也不会得以保存，也该沿断裂面上逸散掉了。青山口组内部地层超压的存在及其上部构造中油气藏能够得以保存，均说明青山口组内断层的垂向封闭性是非常好的。

第六章　断层封闭史演化研究

断层封闭史，指的是断层封闭性的发生、发展和演化的全过程。从已解剖的油气藏来看，发育在同一地区不同体系的断层，不仅它们的封闭性常常各不相同，就是同一体系的断层，因各自发育的局部地质环境不同，局部应力方式、应力场特点的不同，也将导致他们各自的封闭史的不同，进而导致有利的断层圈闭发育分布的位置不同。

无论断层的现今封闭性如何好，地质时期均有过开启的过程，断层主要开启的时间发生在断层活动时期，由于断层活动过程中形成断面裂缝，流体在地层条件下必然沿断面裂缝作垂向运移，同时断层成为超压释放的通道，直到断面裂缝愈合为止。在断层发育的相对静止期，由于地质时期断层埋深不同，断面所受正压力的变化和断裂带填充物质的差异，断层垂向上不同程度的存在着开启性。如果正确恢复了断层封闭性演化史，配以盖层封闭史、油气生排运史、构造发育史及流体势演化史的恢复，就可重塑油气运移与聚集的全过程，对目前油气的分布规律自然会有一个正确的认识。

断层的形成与发展并非是平稳进行的，而是间歇性活动的。根据断层发育历史，可将断层的发育过程划分为相对静止期与活动期两个阶段。一条长期发育的断层往往多次交替发育这两个过程。在断层发育的这两种阶段中，其封闭性及对油气的控制作用是截然不同的。

第一节　断层封闭史演化研究的基础工作

应用埋藏史、构造演化史、构造应力场演化史和断层面承受主应力相结合，研究断层封闭史的方法（刘泽容等，1998），不仅能定性和定量揭示各个地质时期控油断层的封闭性、开启性及封闭开启程度，同时还能预测油气分布的位置和富集程度。

一、埋藏史分析

沉积埋藏史，是指盆地的某一沉积或一系列单元自沉积开始至现今或某一地质时期的厚度和埋藏深度的变化情况，常用埋藏史曲线来表示。从石油地质学来看，埋藏史可以阐明区域热历史、油气生成、运移、聚集和散失的机理和历史；同时，埋藏史是进行断层封闭史研究不可缺少的一个重要前提，通过埋藏史研究不仅可以阐明盆地的沉积充填史，揭示各种沉积体系在时间和空间上的分布和演化规律；还可以阐明圈闭的形成机制和发育过程，定量建立盆地的沉降模型；并且能够确定盆地演化的力学机制，为古地层格架的建立奠定基础。通过埋藏史研究还能恢复复杂断块群的埋藏历史，确定构造形成时期，定性研究断层封闭史，划分断层封闭史的期次。埋藏史研究能够确定压力封盖时间，进而研究圈闭形成与断层封闭史和油气生成与运移聚集之间的匹配关系，实现预测油气藏分布的目的。埋藏史研究主要采用回剥法，通过建立工区砂泥岩孔隙度与深度的关系，分别计算各层在不同地史阶段的原始沉积厚度，然后编绘埋藏史曲线，进行埋藏史恢复。

二、构造演化史研究

构造演化史研究，也是进行断层封闭史研究的一个重要部分，通过构造演化史研究，不仅可以确定研究区在地质历史时期经历构造运动的期次，还可以确定各期次构造运动的发育

特征和演化过程，同时可以揭示各期构造运动所导致的断层和断块圈闭的形成及演化，另外还能恢复各个地质历史时期断层在平面上的展布特征和组合形式。在纵向上能够确定断层的倾角和古落差的大小及倾角与古落差的变化情况。若将上述研究成果与埋藏史研究相结合，可以基本确定每一条断层两盘岩性的对置情况，从而能够实现对各个地史时期中每一断层的封闭性和封闭史进行定性分析研究。平衡剖面方法是近几年来在国内外兴起并得到广泛应用的一种新方法，这种方法是为了建立合理的地质剖面而提出的一种几何学方法。平衡剖面，是指可以把剖面上变形构造通过几何学原理全部复原成未变形状态的剖面。采用平衡剖面来研究构造演化史，是当今研究构造演化史中使用方便、应用效果最佳的一种新技术。通过平衡剖面的研究，不仅可以揭示盆地的扩张史、沉降史和埋藏史，同时，还可以揭示盆地中断层的发育史，恢复复杂断块群的构造演化史，进而揭示断层的封闭史。

三、应力场演化史研究

应力场演化史研究，是开展断层封闭史研究的一个重要基础。构造应力场是研究构造运动的成因及应力场的时空分布规律和力源的一门学科，从构造应力的角度来研究构造运动，可使运动的规律和形式得到直接完整和统一的表达。只有对构造应力场有了正确地、深入地了解，才能从根本上揭示区域内各种构造现象的成因联系，构造整体的形成过程、形成条件、力学性质和分布规律等各个复杂的地质问题。长期以来，石油地质学家们认为，浮力、动力和毛细管阻力是决定油气二次运移方向和聚集场所的流体势（梯度）的主要动力。近年来，特别是油气封存箱理论问世以来，人们认为异常压力是一种影响油气垂向和侧向运移的原动力。通过学者们长期有益的探索，目前，地学界许多人都认识到构造应力是油气运移的重要动力。油气由最大主应力高值区向最大主应力低值区运移，由高势区向低势区运移。成藏期油气同时发生垂向和侧向运移，此时运移规模大，油气运移到高应力包围的低应力区聚集起来形成油气藏。构造应力场演化史研究，不仅可以再现不同地质历史时期构造和构造应力场的特征，阐明古今应力方式、展布规律、各时期应力场的差异，还可以阐明各个地质时期控油断层的力学性质、断面承受主应力的大小，揭示控油断层的封闭性和开启性及封闭史，预测油气藏的分布。

四、应用断面承受主应力研究断层封闭史

通过大量油田的解剖来看，断面承受主应力不是一成不变的，而常常是伴随地质历史时期、区域应力场或局部应力场、断面倾角、埋深等诸因素的变化而发生变化，从而导致断层的封闭性、开启性和封闭史也发生变化，若能揭示每一条断层在各个地质历史时期，在不同层系和不同地段所承受主应力的性质和大小，就能正确评价断层的封闭史。

第二节　静止期断层封闭史演化研究

一、断层封闭史的定性恢复

这里利用逻辑信息法定性恢复断层封闭性演化史。该方法的基本思想也是把地质历史的某些时期作为时间界面，根据当时断层两盘的对接情况、应力状态、断层的几何特征、断层性质等，按逻辑信息法判断断层封闭性标准，对断层封闭性进行评价。具体步骤为：

①恢复断层古落差。

②计算各研究层段的砂地比值，判断两盘砂泥岩层的对置状况。

③确定各时期主应力方向，研究断层展布与主应力方向的关系。

④研究与目的断层相交或其附近断层的发育历史，确定其交切关系和交切时间．分析其他断层对所研究断层封闭性的影响。

⑤确定研究层段内断层的同生或非同生性质。

⑥根据上述内容按表 4－15 标准正确选取该地史时期的标志分权绝对差值。

⑦将所确定的该时期标志分权绝对差值累加计算，便获得该时期该断层的封闭程度。

表 6－1 是按上述方法对琼东南盆地各主要断层封闭性演化史恢复的计算结果。

表 6－1　应用逻辑信息法对琼东南盆地主要断层封闭史的恢复

断层号	时　期	标　志　号										得　分	封闭程度
		2	6	7	8	9	12	14	15	16	18		25　50　75
1	陵水组沉积期	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	50.23	
	三亚组沉积期	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	35.81	
	梅山组沉积期	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	31.15	
	现　在	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	59.29	
2－1	陵水组沉积期	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	39.7	
	三亚组沉积期	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	44.36	
	梅山组沉积期	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	58.78	
	现　在	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	70.23	
2－3	陵水组沉积期	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	35.81	
	三亚组沉积期	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	56.59	
	梅山组沉积期	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	53.62	
	现　在	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	70.31	
2	陵水组沉积期	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	43.07	
	三亚组沉积期	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	54.09	
	梅山组沉积期	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	68.51	
	现　在	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	79.96	
3	陵水组沉积期	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	52.5	
	三亚组沉积期	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	47.84	
	梅山组沉积期	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	52.50	
	现　在	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	63.93	
5	陵水组沉积期	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	66.92	
	三亚组沉积期	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	52.50	
	梅山组沉积期	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	44.57	
	现　在	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	59.29	
17	陵水组沉积期	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	66.92	
	三亚组沉积期	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	52.50	
	梅山组沉积期	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	44.57	
	现　在	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	59.29	

由表 6－1 可见，琼东南盆地 1 号断层在陵水组沉积时期封闭性较好，三亚组沉积时期封闭性变为中等，梅山组沉积时期接近较差级别，梅山组沉积以后断层封闭性又逐渐好转，到目前已达到好封闭性级别。盆地内像 1 号断层这样由好变差、又由差变好演化史的断层还有 5 号和 17 号断层。其他断层的封闭性基本随地质历史的发展而逐渐变好，目前，所有断层封闭性均处于好或极好级别，这对盆地内天然气的聚集是十分有利的。

二、断层封闭史的定量恢复

该方法的基本思想是把地质历史的某些时期作为时间界面，根据当时断层两盘岩性对置状态、断层倾角、埋深、断移地层的成岩程度等，利用前述的对接概率法计算不同时期的目的层段的侧向封闭性，利用断面压力计算法恢复不同时期目的层段断层的垂向封闭性。

以延吉盆地东部坳陷为例叙述断层封闭史的恢复方法及步骤：

①恢复断层古落差（图 6－1）。

②绘制古断面剖面图（图 6－2）。

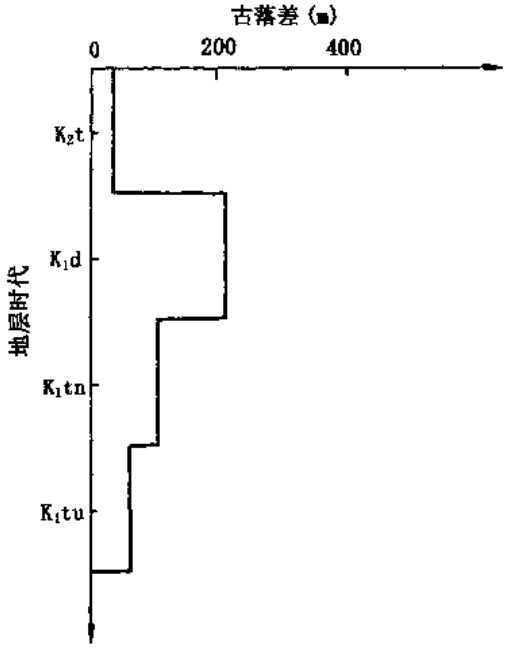


图 6－1　延吉盆地东部坳陷Ⅲ$_{14}$断层古落差图

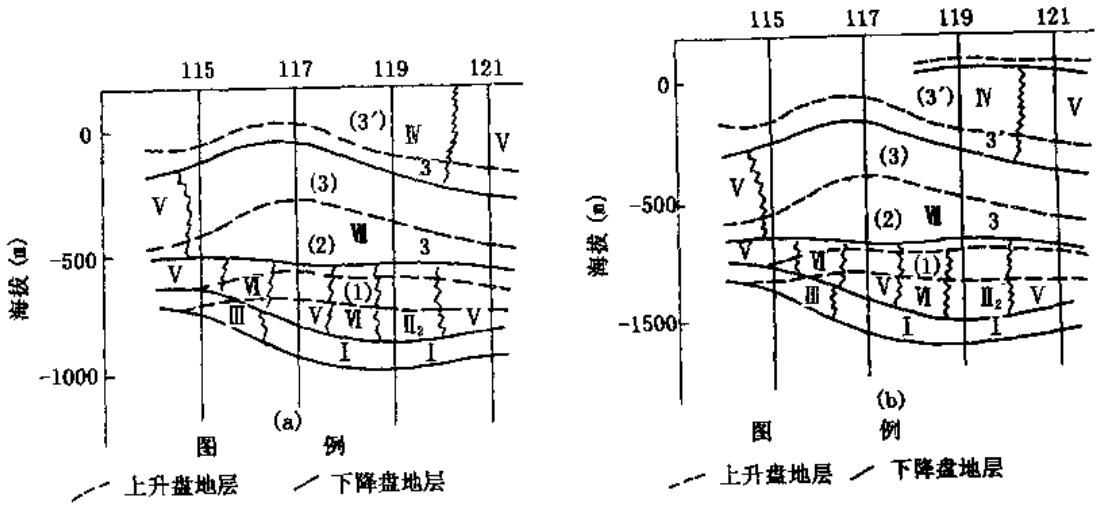


图 6－2　延吉盆地东部坳陷Ⅲ$_{14}$断层古断面剖面图

1，(1) —头道组；2. (2) —铜佛寺组；3，(3) —大拉子组一、二段；3′，(3′) —大拉子三段；Ⅰ—河流相；Ⅱ—断崖扇；Ⅲ—洪积扇；Ⅳ—滨湖相；Ⅴ—浅湖相；Ⅵ—扇三角洲；Ⅶ—半深湖泊；

(a) 东部坳陷$Ⅲ_{14}^{1}$、$Ⅲ_{14}^{2}$断层大拉子组沉积末期断面剖面图；

(b) 东部坳陷$Ⅲ_{14}^{1}$、$Ⅲ_{14}^{2}$断层龙井组沉积末期断面剖面图

③根据断层两盘对置岩层沉积相，利用前文所述方法进行砂泥对接概率模拟，便可得到

地质历史时期断层侧向封闭性评价图（图6－3）。

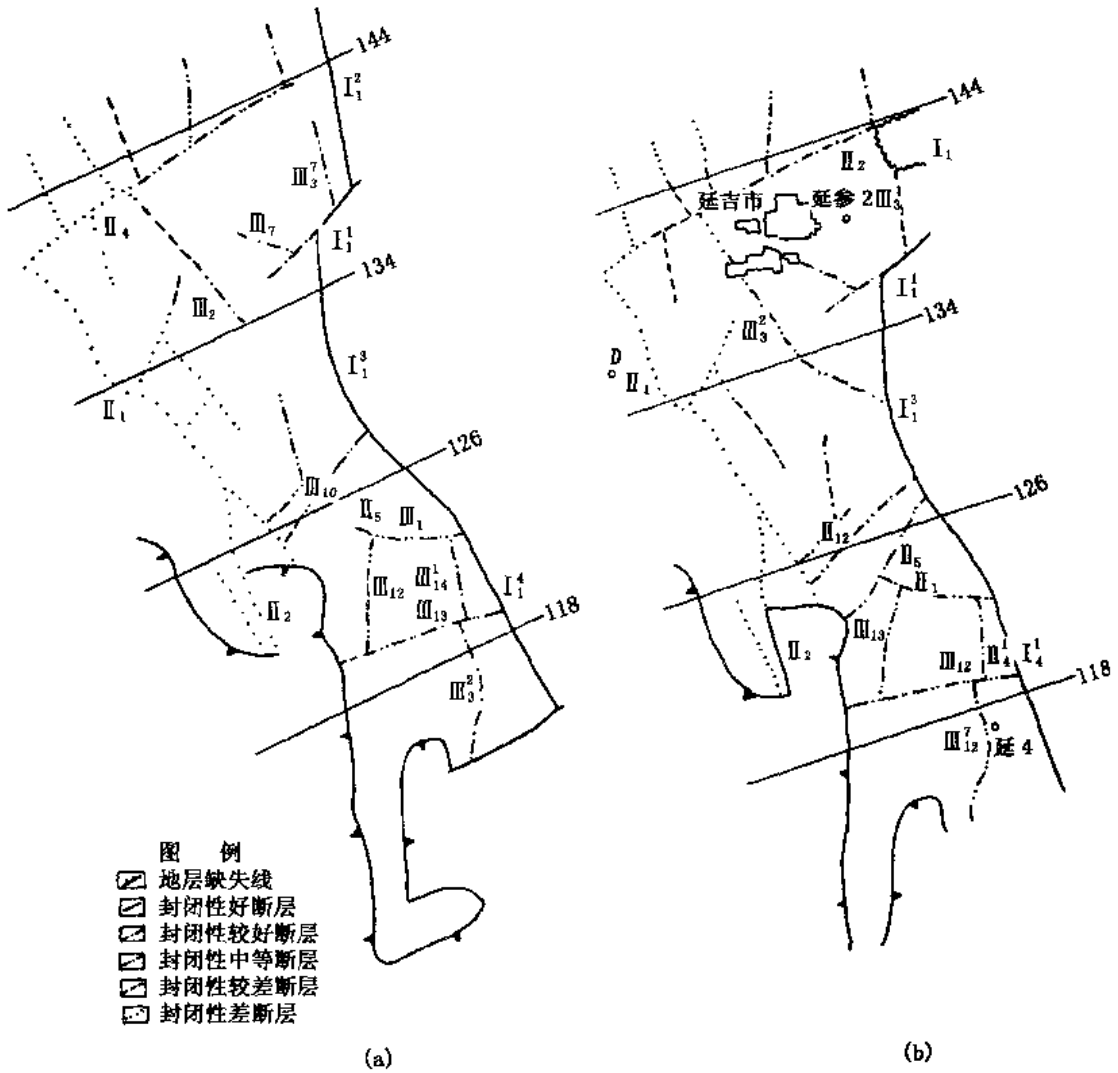


图6－3 延吉盆地东部坳陷断层侧向的封闭性演化史图

(a) 延吉盆地东部坳陷大一、二段内断层在大拉子组沉积末期侧向封闭性评价图；

(b) 延吉盆地东部坳陷大一、二段内断层在龙一段沉积末期侧向封闭性评价图

④恢复地层沉积史。

⑤根据研究区不同埋深泥质岩的成岩程度，确定其变形强度，并确定不同成岩程度下断层垂向封闭性评价标准（表6－2，表6－3）。

⑥根据断层面古埋深及倾角，计算古断面压力，根据古断层垂向封闭性评价标准确定断层古垂向封闭性，由此绘制不同地史时期目的层段内断层垂向封闭性演化史恢复图件（图6－4）。

由图6－3、图6－4可见，延吉盆地东部凹陷大一、二段内断层封闭性的演化具有如下规律：

①由于断层的主要活动时期为大拉子组一、二段沉积期和大拉子组三段沉积期。大拉子

组沉积以后，尽管断层还有活动，但古落差明显减小，断层两盘相对置的地层自大拉子组沉积以后没再有大的变化，因此，大拉子组一、二段内断层侧向封闭性在大拉子组沉积末期及龙井中组一段沉积末期与现今的情况无大的区别（图 6－3）。总体上，东区在大拉子组沉积末期及以后大拉子组一、二段内断层侧向封闭性逐渐变好，I 号断层一开始就具备好的侧向封闭能力，Ⅲ$_{14}$、Ⅲ$_{13}$、Ⅲ$_{10}$、I_2^1 断层在大拉子组沉积末期及以后，就具有较好的侧向封闭性，该时期Ⅱ$_5$、Ⅲ$_{25}$、Ⅲ$_{11}$断层封闭性较好，但目前封闭能力比历史时期相对较差。Ⅲ$_9$ 断层和$Ⅲ_2^2$ 断层中段地史时期侧向封闭性为中等或较好，目前侧向封闭能力比过去有所提高。

表 6－2　早成岩阶段 A 亚期断层垂向封闭性评价标准表

断面压力 / 封闭性 (MPa) / 泥地比 (%)	<0.5	0.5～2.0	2.0～3.5	3.5～5.0	>5.0
>50	差	较差	中	较好	好
50～40	差	差	较差	中	较好
40～30	差	差	差	较差	中
30～20	差	差	差	差	较差
<20	差	差	差	差	差

表 6－3　早成岩阶段 B 亚期断层垂向封闭性评价标准表

断面压力 / 封闭性 (MPa) / 泥地比 (%)	<1.0	1.0～2.5	2.5～4.0	4.0～5.5	>5.5
>50	差	较差	中	较好	好
50－40	差	差	较差	中	较好
40～30	差	差	差	较差	中
30～20	差	差	差	差	较差
<20	差	差	差	差	差

②由于断面埋深、断移地层的成岩程度在地史时期变化大，因此断层的垂向封闭性在不同时期差别较大（图 6－4）。

A. 有的断层从古至今垂向封闭性逐渐变差。如 I_1^4 断层在大拉子组沉积末期，大拉子组一、二段内因其断面倾角较小，断面压力较大，断移地层中的泥质岩成岩程度较低，断面愈合能力相对较强，表现为中等垂向封闭能力。龙井组一段沉积以后，I_1^4 断层南段埋藏深度逐渐增加，仍保持着中等垂向封闭性能，但其北段因埋藏深度变化不大，断面压力没有明显增加，可断移地层的成岩程度却有所提高，泥质岩的变形强度加大，致使断层活动后的断面愈合能力变差，显示其较差的垂向封闭能力。目前情况下，由于断面压力与龙井组一段沉积末期区别不大，但断移地层的成岩程度远比那时高，龙井组沉积以后的断层活动，产生的断面裂缝再度愈合则相对困难，因此，目前该断层的垂向封闭性差。

B. 有的断层从古至今垂向封闭性逐渐变好。如$Ⅲ_1^3$ 断层大拉子组沉积末期大一、二段内东段垂向封闭性相对较好，为中等封闭能力，西段相对较差，为差－较差封闭能力。龙井

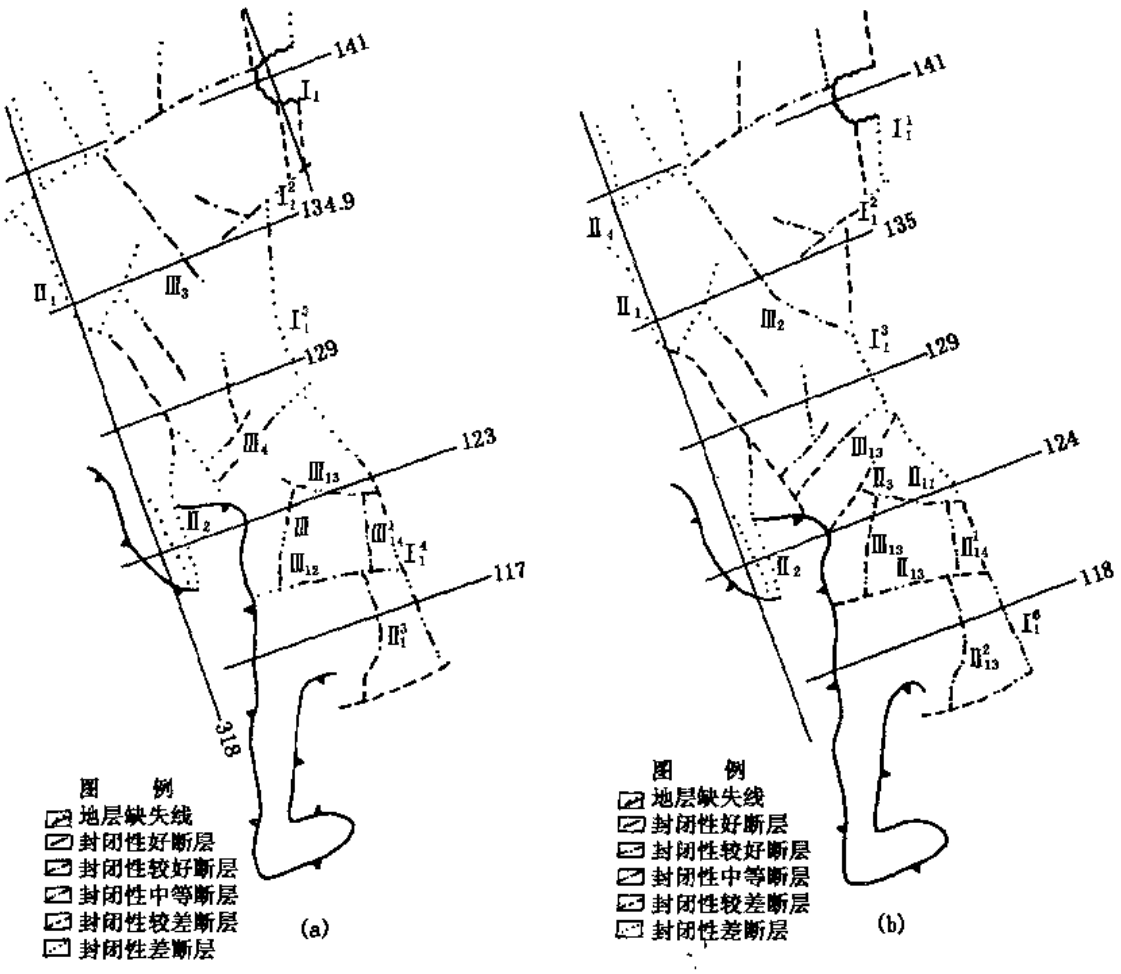


图 6-4 延吉盆地东部坳陷断层垂向封闭性演化史图

(a) 延吉盆地东部坳陷大一、二段内断层在大拉子组沉积末期垂向封闭性评价图；

(b) 延吉盆地东部坳陷大一、二段内断层在龙一段沉积末期垂向封闭性评价图

组一段沉积后期，东段封闭能力无明显变化，但其西段封闭性向好的方向转化，变为较差封闭能力。到现今，该断层东段为较好封闭性，西端为中等封闭性。

C. 有的断层地史时期封闭性就较好，目前仍保持着较好的封闭状态。如 $Ⅲ_{14}^{1}$、$Ⅲ_{14}^{2}$、$Ⅲ_{10}$、$Ⅲ_{11}$等断层。

D. 有的断层自始至终封闭性差，如$Ⅲ_{6}$、$Ⅱ_{1}$、$Ⅲ_{1}$、$Ⅲ_{2}$、$Ⅲ_{3}$等断层。

第三节 活动期断层封闭史演化研究

一般情况下，在断层发育的整个地史过程中，相对静止期往往长，活动期则短。然而，无论活动期有多短，即使是瞬间结束，都会造成断层裂隙，而裂隙一旦形成，则必然成为油气运移的垂向通道。因此，多数专家认为，断层在活动过程中主要是开启状态，开启形式主要为垂向开启。所以可得出这样的结论：相对静止期垂向开启的断层，地史发展过程中始终是开启的；目前处于封闭状态的断层，地史时期一定曾经开启过，由于断层活动往往与区域

构造事件相伴生，故断层开启时间主要是断层形成期及其以后所经历的区域构造运动期。

关于断裂开启的机理，王志欣等（1997）认为，只要流体压力上升到一定的程度，断裂就可以开启。沉积物加载和构造挤压都是对地下相对封闭的含水层的一种压缩过程，从理论上讲都会引起孔隙压力上升。由于隔水层本身存在着一定的渗透性，地层中形成的异常高压随着时间的推移会不断地消耗，除非盆地的沉积速率非常高。经过对比研究认为较高的沉积速率是流体高压形成并得以维持的主要原因。但是靠沉积加载、长周期的构造挤压、水热增压等因素都不能使异常压力上升到压裂地层的程度。因此必然存在着一种使压力快速上升而不致被缓慢渗透消耗掉的机制，正是这种机制导致了断裂的开启。王志欣等（1997）提出如下两种断裂开启的机理。

一、地震短期临震应力变化触发高压致裂

地壳区域构造应力场的变化存在着不同的周期。其中大的周期可延续几百万年至几千万年甚至更长的时间，可以引起整个地区的构造应力场性质的变化。但是，这种长期变化的应力改变相当缓慢，一般为 2MPa/Ma，大约相当于沉积速率为 100m/Ma 所增加的负荷应力，因此这种长周期的应力场变化对流体压力的影响是很小的。

除了这种长期变化外，地质历史上各地的构造应力场肯定还存在着许多不同级别周期的变化，地震的孕震－发震周期就是一种短时间内的应力变化周期。在一个孕震－发震周期中，局部地区的地应力场受构造应力场的影响会发生明显的变化，通过地震观察可以清楚地记录这些应力场变化的时间、幅度、方向等。根据对 1980～1983 年四川道孚、甘孜地震期间的地应力变化的观察（表 6－4），发现在短短的 7～12 个月内应力值改变了 0 .13～14MPa，相

表 6－4　不同级别周期的构造应力场变化

观测点	应力增加值（MPa）	持续时间	应力改变速率（Pa/Ma）	相当的沉积载荷速率（m/Ma）	备注
四川冕宁	1.3	3d	1.58×10^{14}	7.68×10^{9}	1977 年 1 月 13 日冕宁 5.3 级地震震前突变
四川芦山	4.8	1d	1.75×10^{15}	8.50×10^{10}	1977 年 5 月 7 日芦山 4.0 级地震震前突变
四川泸定	0.13	9 个月	1.70×10^{11}	8.26×10^{6}	1980～1982 年间的道孚 6.9 级、甘孜 6.0 级地震从孕震到发震的应力场变化
四川泸定	0.14	12 个月	1.40×10^{11}	6.80×10^{6}	
四川大邑	0.4	9 个月	5.3×10^{12}	2.58×10^{7}	
四川大邑	0.7	8 个月	1.05×10^{12}	5.10×10^{7}	
四川马边	0.4	9 个月	6.8×10^{11}	3.30×10^{7}	
四川马边	1.4	7 个月	1.8×10^{12}	8.75×10^{7}	

注：1. 加载沉积物的平均密度按 2100kg/m³ 计。

2. 渤海湾盆地早第三纪东西向拉张，晚第三纪到现在为东西向挤压，取应力变化总量为 50MPa。

当于（6.8×10^{6}m/Ma）～（8.75×10^{7}m/Ma）的沉积速率所引起的地应力变化。这种变化常引起油层压力或油层生产动态的变化。还有一种变化速率更快的应力场变化，即地震发震的一刹那发生的瞬间应力场变化（表 6－4）。这种极短暂、范围小、但幅度很大的应力场变化往往引起流体压力的迅速变化，可造成浅层的隔水层破裂并引起喷沙、冒水、井涌等现象；在深部则可能引起断裂力学性质改变，发生断裂开启，引起流体垂向运移。这种由于临

震应力骤变造成流体高压进而引起张性断裂或使原来的压性断裂转为张性断裂的过程，为地震触发高压致裂。

二、深部流体注入引起的连锁压裂

地震期间由于应力快速变化导致异常压力快速上升并引起断裂开启后，深部的流体就会沿开启断面向上运移注入到上覆地层中。如果上覆层仍是封闭的，而且岩层中总孔隙体积有限，由深部注入的流体会造成该上覆层流体压力迅速上升，而有可能导致断裂开启。这一过程与采油增产工艺中的人工压裂是非常相似的。向上运移的流体逐层向上覆层注入会引起上覆各层的断裂发生连锁开启。

由于上述两种断裂开启的机制的存在，地下深部高压带中的油气就会在地震作用期间沿断面向上运移，直到上覆不开启的断面处，然后再向两侧储层中聚集，形成次生油气藏。由于每次地震造成的地应力分布不同，流体压力不同，断裂开启点也不同，涌出的流体量也不同，所以油气向上运移并形成次生油气藏的层位也不同，油水界面也就不可能统一。

大庆长垣以东的三站气田（图 6－5），天然气储存在泉四段的扶余、杨大城子油层中，

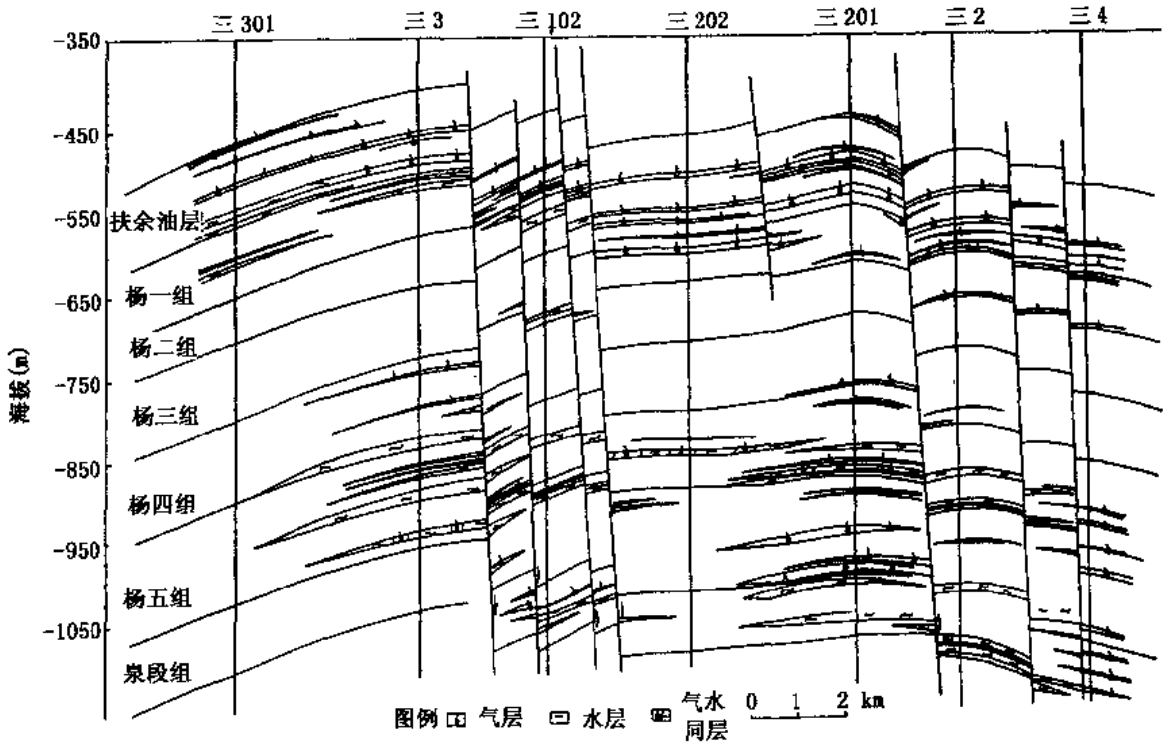


图 6－5　三站气田气藏剖面图

天然气来自深部沙河子组－营城组，气藏盖层为青山口组大套岩层，气田内发育众多断层。断层一般向上终止于青山口组盖层下部，多数向下断至登娄库组，部分断穿泉头组、登娄库组进入沙河子组－营城组。目前这些断层在泉头组内均是封闭的，在登娄库组和沙河子组－营城组则主要是开启的。断层发育史研究表明，这些断层在登娄库组沉积末期活动，泉头组沉积时均处于休眠状态，泉头组沉积末期均复活并产生大量新断层，因此，使该区沙河子组－营城组排运的天然气在此期间遭到严重散失。随着青山口组及其以上地层的沉积，断层逐渐由开启转入封闭，沙河子组－营城组生排的天然气暂时聚集在泉头组盖层之下的登娄库组

地层中（登娄库组和沙河子组－营城组盖层发育差），嫩江组沉积末期，区内经历了一次大型构造运动，这次构造运动造成了断层的大量复活并开启，聚集于登娄库组内的天然气沿开启断层向上运移至泉头组上部的扶余油层中，并通过断层沟通达到运聚平衡，使全气田气底海拔高度基本处于同一水平上。随着构造运动的停止，断层由开启转入封闭，各气层间由此被分开，各自构成独立系统。后来的几次构造运动，由于强度较小，没能造成多数断层的复活，仅个别深大断裂复活并开启，使下部天然气再次向上运移至泉四段中，由于此时多数断层处于封闭状态，沿断层上来的天然气只聚集在邻近的封闭断层一侧杨大城子储集层中（三201井、三4井），而附近无再次开启性断层的断块内，因无天然气上运通道，杨大城子储集层只含水而不含气，各气层仍保持相互独立且气水界面海拔大致相等的原始状态（三301、三3、三102、三2井）。

断层在活动期的开启性已被很多学者所接受，但活动期的断层也并非处处开启，仍然存在着差异性。从理论上讲，受张应力作用形成的断层在断面的陡角段开启，在缓角段封闭（图6－6a）；受挤压应力作用形成的断层，则在断面缓角段开启，在陡角段封闭（图6－6b）；受剪应力作用的平移断层，在断层弯曲部位易形成完全开启或封闭（图6－6c）。

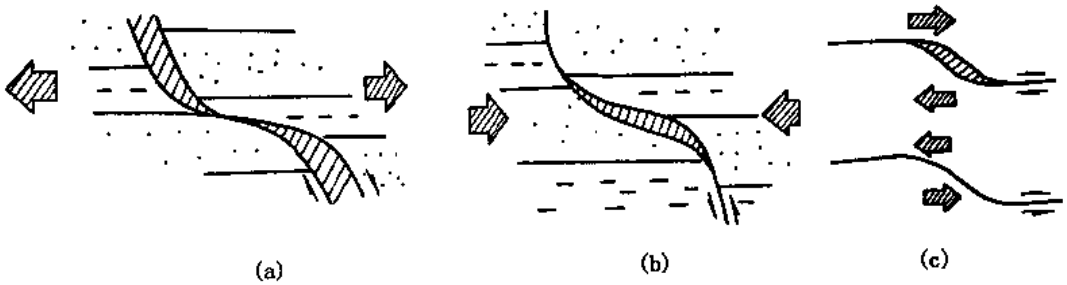


图6－6　不同应力状态下断层的封闭性

然而，在断层活动期无论受哪种应力状态所形成的断层均垂向开启，当断层停止活动并处于相对静止时，这种垂向开启都将被减弱，在高泥地比值层段内且泥岩成岩程度不是过高的条件下，这种开启则可能很快转入封闭。

第七章　断层封闭的差异性

以往关于断层封闭性的研究，是根据所能取到的断层某个位置处的有关资料，经分析后确定其“封闭”或“不封闭”的性质。通过上述章节的研究可见，这种以点代面的分析方法无疑是不全面的。事实上，断层封闭性在空间上、时间上以及封闭能力上均存在着不同程度的差异性，只有正确认识断层封闭性的差异，才可能对所确定断层的封闭特征作出正确评价。

第一节　断层封闭能力的差异性

当目的盘储层与对置盘非渗透层对接时，断层在侧向上是绝对封闭的，当断裂明显出现开口裂缝时，油气沿裂缝的渗流远比在储层中容易，断层在垂向上是绝对开启的。实际地层中除了存在着上述两种极端状态外，多数情况下是两者之间的状态，如与目的盘储层相对接的不是非渗透层，而是渗透能力比目的盘储层相对差的另一时代储层，断裂带的裂缝不是开启的，而是呈在一定压力下油气可沿其运移的微裂状态等等，这种情况下，不能说断层是开启的，也不能说断层是封闭的。因此，所谓的断层封闭性实际涵义是指断层的封闭程度，它包括断层的完全封闭和完全开启，以及二者之间的过渡状态。

由式 4－1 可见，在烃水密度差一定时，断层的封闭程度取决于储层与遮挡体的排替压力差，这里的遮挡体系指对置盘岩层或断裂充填物或储层之上盖层内的断裂充填。当 $p_A > p_F$ 时，断层处于完全开启状态，对油气 p_F 的运移起通道作用；当 $p_A < p_F$ 时，断层对油气起遮挡作用，p_F 与 p_A 差值越大，断层的遮挡能力越强，所能封闭的烃柱高度越大。当圈闭内聚集的烃柱高度达到断层所能封闭的最大烃柱高度以后，由于烃柱产生的浮力大于遮挡体的排替压力，油气突破遮挡体发生运移，直到烃柱高度降至遮挡体所能封闭的高度为止。黄骅坳陷小集油田官 39 断块即为一典型实例，该断块储油构造是一个被断层切割的差异压实背斜，断层的断距仅几十米，两盘为油－油接触。断层两盘接触的不同小层同为含油或含水，但油水界面上升盘较下降盘高 15m 左右，这表明断层顶部封闭性好，侧向封闭能力为 15m 高油柱。当油气聚集达 15m 高油柱后，油气穿过断面进入上升盘储集层；由于断层两盘均有油气来源，两盘油水界面始终保持 15m 高的差距，在油层开发过程中，当上升盘开发至两盘油水界面高差大于 15m 时，下降盘的油穿过断面进入上升盘，以达到其动态平衡。造成这一现象的主要原因是断层两盘储层物性差所致。由于断层两盘均为储层，二者的排替压力差约为 1.0MPa，上升盘可封闭下降盘 15m 高的油柱。两盘油水界面差距拉大 15m 以后，下降盘油柱靠浮力穿过断层进入上升盘储层。

断层的封闭能力除与断层本身的物性有关以外，还与所封闭的流体性质有关，从式（4－1）中可见，在地层水密度一定的情况下，烃的密度越小，断层所封闭的烃柱高度就越小，说明断层的封闭能力就越差，反之亦然。因此，能封闭油的断层，不一定能封闭天然气，能封闭稠油的断层，不一定能封闭稀油。辽河高升油田莲花油层砂岩储层极其发育，尽管区内断层也发育，但断层断距不大，一般为 50m，最大断距 120m（G_4），断层没将莲花油层错

开，断层两盘均为砂－砂接触（图 7－1）。

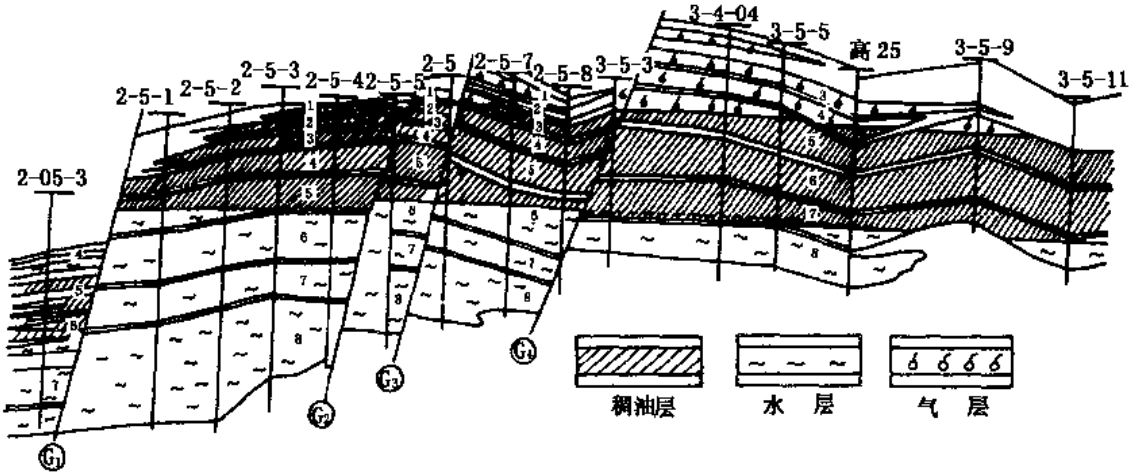


图 7－1 辽河高升油田莲花油藏剖面图

由于断移地层主要为砂岩，推测断裂带内也主要以砂质充填为主，故整段断层的封闭性较差。从油藏剖面图上可清楚见到，该油藏为含气顶的稠油藏，在 G_2、G_3、G_4 断层两侧，尽管不同时代小层相互对置，但全区具有同一气油界面，证明断层对气不具封闭性。然而，在 G_2 断层下降盘，油水界面为－1700m，而在上升盘一侧则为－1690m，二者相差 10m，说明 G_2 断层对稠油具一定封闭能力，所能封闭的稠油柱高度为 10m，G_4 断层两盘油水界面也存在近 10m 高的差距，说明这两条断层尽管对气不封闭，但对稠油是封闭的。根据断层两盘储层物性研究，上升盘下降盘储层的渗透能力相等，G_2、G_4 断层之所以具一定的封稠油能力，是因为断层活动过程中形成断裂充填，且充填物的物性较之两侧储层差，由此阻止了稠油穿过断层侧向运移，故对气不起封闭作用。研究表明，该断层对稀油也起不到封闭作用。可见，断层的封闭能力也与所封流体性质有关，流体的密度越小，断层的封闭性越差，反之越强。

第二节 空间上断层封闭的差异性

一、同一条断层在空间不同位置处的封闭性能不同

①断层两盘地层不协调弯曲或走向断距的变化会造成沿走向上两盘对置岩性的变化，从而导致断层侧向封闭性的差异（图 7－2）。

②断裂充填是一个普遍的地质现象，对同一条断层的不同部位，由于断移地层的岩性不同，会造成断裂的性质不同、断裂充填的分布不均一。在以泥质为主的断裂充填部位，断层泥可起到良好的侧向封闭作用；在以砂质为主的断裂充填部位，断裂充填不但起不到侧向封闭作用，还为油气沿断层的垂向运移创造了通道条件。

③断层面本身不是一个理想的平面，而是一个凸凹不平的曲面，在相同深度下，断面倾角越缓，断面所受正压力越大，断层封闭性越好；相同倾角的断层，埋藏深者封闭性好，埋藏浅者封闭性差。

④同一条断层在沿其走向上可能切过不同的沉积相区，在剖面上切穿不同沉积相层位，

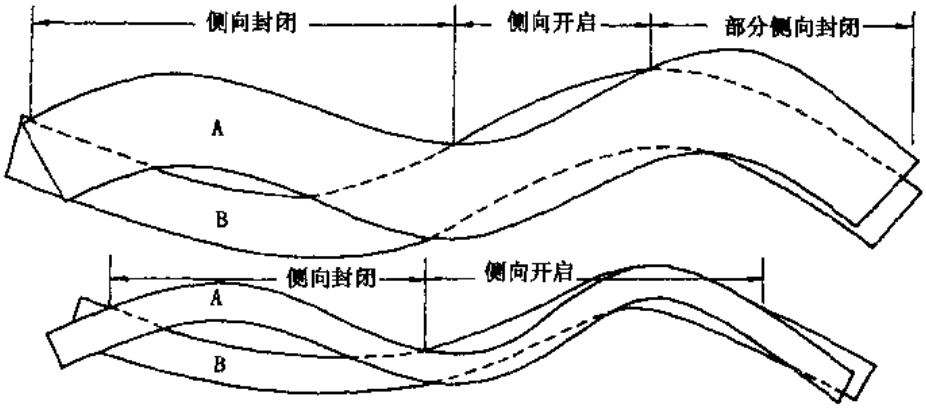


图 7－2　弯曲地层的断面剖面图

A—目的盘储层；B—对置盘储层

由于不同沉积相有其不同的砂泥比值，在砂泥比值低的部位，断层封闭性好，在砂泥比值高处，断层封闭性差。

例如，根据王平（1994）研究，东辛油田营 8 断块沙二下 8～10 砂组油藏，文中油田文 15 断块区的沙三上油藏，文 25 断块区的沙二下油藏等等，含油高度达到 150～250m。它们都是受下降盘大段泥岩控制的。而不存在这种条件的地方，也就是砂岩发育层段封挡的地方，则绝大多数油藏规模都很小。表 7－1 所列举的各断块中，沙二下 8 砂组以下几乎没有一个油藏高度达到 50m 的。它们都是与砂岩发育段相接触的。油藏高度小宽度窄的情况在图 7－3 和图 7－4 上也能看得很清楚。有趣的是图 7－4 所表示的辛 23 断块，沙二段顶部 1

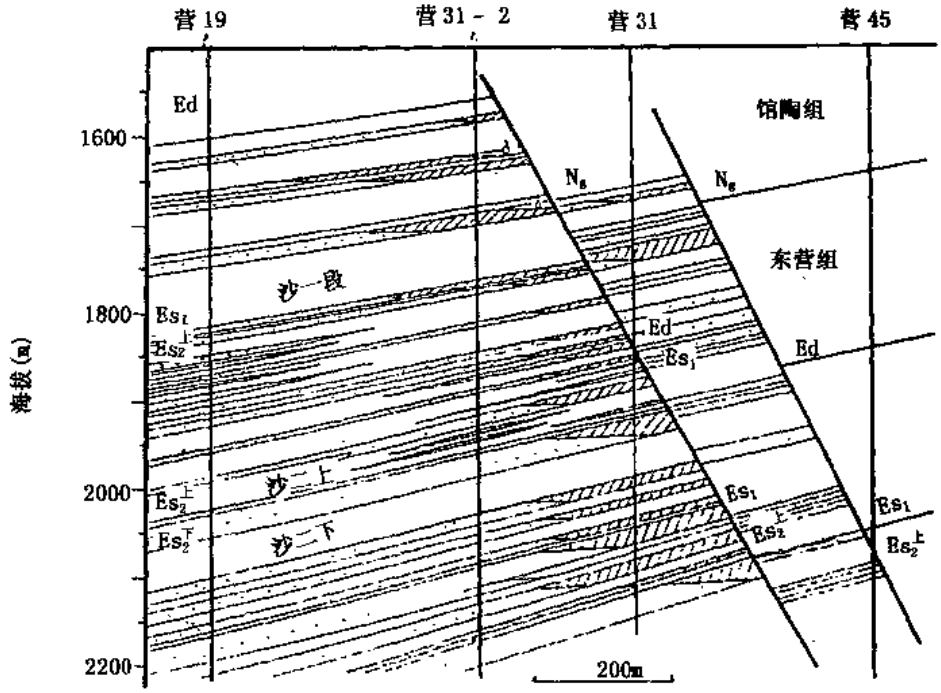


图 7－3　营 31 断块油藏剖面图（东辛采油厂资料）

~3砂组受下降盘沙一段大段泥岩控制含油高度和宽度都较大，4砂组以下油藏受下降盘沙二段所控制，油藏高度和宽度明显变小。

表 7－1　东辛油田几个断块油水界面数据表（据王平，1994）

营8断块			营31断块		辛23断块						辛50－5断块					
砂组	小层	油水界面(m)	砂组	油水界面(m)	砂组	小层	油水界面(m)	砂组	小层	油水界面(m)	砂组	小层	油水界面(m)	砂组	小层	油水界面(m)
Ed_1		－1360	Es_1^1	－1562	Es_2^1	1	－2128.5	Es_2^7	4～5	水层	Es_1^{2-3}		满块	Es_2^{11}	1	岩性控制
Ed_2		－1440	Es_1^2	－1658		2	水层		6	－2294	Es_1^{5-8}		满块		2	－2307
Ed_3		－1660	Es_1^3	－1705		3	－2124		7～8	水层	Es_2^1	1	满块		3	－2318
Es_1^1		－1760	Es_2^1	－1707		4	－2160		9	－2305		2～3	－1985		4	满块
Es_1^3		－1840	Es_2^2	－1790		5	水层	Es_2^8	1～6	－2315	Es_2^2	1	满块		5	－2334
Es_2^1		－1980	Es_2^3	－1815		6	－2147		7～10	－2288		2	－1994		6～7	－2325
Es_2^{2-8}		水层	Es_2^4	水层	Es_2^2	1	水层	Es_2^9	1～3	水层	Es_2^3		－2015		8～9	－2335
Es_2^7	1	－2080	Es_2^5	－1910		2	－2225		4～5	－2288	Es_2^4		水层	Es_2^{12}	1	－2344
	2	岩性控制	Es_2^6	－1890		3	水层	Es_2^{10}	1	水层	Es_2^5		－2043		2	－2391
	3	－2090制	Es_2^7	岩性控制		4	－2184		2～3	－2346	Es_2^6		－2106		4	－2409
	4	岩性控制	Es_2^8	－1925		5－6	－2253		4～6	水层	Es_2^7	1～2	岩性控制	Es_2^{13}	1	－2400
Es_2^3		－2210	Es_2^9	水层	Es_2^3	1	－2239		7	－2373		3～4	岩性控制		2	－2412
Es_2^9		－2230	Es_2^{10}	－2015		2－3	－2203	Es_2^{11}		－2324	Es_2^8	1	满块		3～4	－2406
Es_2^{10}	1－3	－2210	Es_2^{11}	－2050		4－5	－2257	Es_2^{12}		－2385		2	满块		5	－2415
	4－5	－2240	Es_2^{12}	－2090	Es_2^4	1	水层	Es_2^{13}		－2400	Es_2^9	1	岩性控制	Es_2^{14}	1	－2441
Es_2^{11}	1	－2250	Es_2^{13}	－2105		2－6	－2195	Es_2^{14}		－2468		2	－2240		2	－2460
	2	－2270	Es_2^{14}	－2140		7	－2206	Es_2^{15}		－2467		3	－2234		3	－2470
	3－5	－2260	Es_2^{15}	水层	Es_2^5	1	－2201	Es_2^{16}		－2500	Es_2^{10}	1	－2244	Es_2^{15}	1	－2477

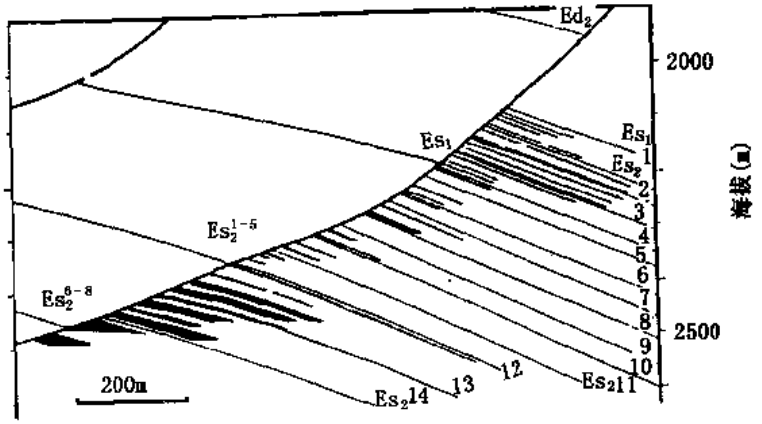


图 7－4　辛 23 断块油藏剖面图（东辛采油厂资料）

二、同一条断层在空间不同位置处的封闭类型不同

相对于目的盘被断层断移的储层而言，油气可否被保存取决于 3 方面因素：

①储层之上的盖层内断层裂缝是否闭合，若有断裂充填，盖层内断裂充填物是否具有阻止烃类穿过盖层运移的能力。

②对置盘岩层是否有比目的盘储层更高的排替压力。

③若两对置岩层均为渗透层，目的储层内油气能否穿过断面作侧向运移主要取决于是否有断裂充填。若断裂充填物的渗透能力好于两盘对置岩层，断裂充填物不起遮挡作用，油气可穿过断层运移；否则，油气被断裂充填物封闭。如果对置岩层和断裂充填物均具有封闭能力，则二者可联合，起侧向封闭油气的作用。

基于上述3个方面，断层封闭机理相应地可划分为3种类型，第1种类型为垂向封闭，也可称顶部封闭；第2种类型为对接封闭；第3种类型为断裂充填封闭。

由于在断层空间不同位置处两盘对置岩性不同、断裂充填物分布不均一、断面裂缝的紧闭程度不同，造成断层各处封闭类型不同。如图2－9所示，羊三木油田F_2断层，断层下盘储集了油气，与含气层对置的地层上倾方向上的断层上盘为含水储层，通过两盘储层排替压力实测数据可知，相对置的储层物性相当，显然，下盘储层中天然气被保存的另一关键因素是该段内存在断裂充填物，且充填物的排替压力高于目的储层排替压力，同时，目的储层之上的盖层内断层具垂向封闭性。因此该段断层封闭类型为断裂充填封闭。当然，无论是对接封闭还断裂充填封闭，能使油气得以保存的前提是应具有顶部封闭。同是F_2断层，在其顶部与对盘泥岩层相对接的储层中富集了油，而与对盘砂岩层相对接的储层中只含水，不含油，表现出对接型封闭特征。

第三节　时间上断层封闭的差异性

断层的封闭性是相对某一时间而言的，同一条断层可以在某一段时间里表现为以开启为主，而在另一段时间里表现为以封闭为主，断层的这种封闭与开启随着断裂发育的演化过程而变化。

对于对接封闭型断层而言，由于断层的每次活动都会改变两盘岩性的对置状态，每次对置状态的改变必然导致断层侧向封闭性的变化。

对于断裂充填封闭型断层而言，在断层埋藏较浅时，断裂充填物的塑性使其具备一定的封闭能力。当断层埋藏较深时，由于成岩程度增强，断裂充填物的脆性增大、塑性减小，断层的轻微活动都会导致断裂充填物的破碎而产生裂缝，并由此而失去封闭能力。

对于顶部封闭型断层而言，断层在活动过程中必然产生裂缝，此时断层对油气起通道作用。在断层相对静止时期，随着断层被埋深，断面压力增大，在一定条件下断面裂缝会逐渐愈合而形成封闭，或者由于地层水进入断层后发生碳酸钙沉淀，形成钙质充填使断层形成封闭。研究表明，目前封闭的断层，地史时期曾开启过，其开启时间主要发生在断层活动阶段。如大庆长垣以东的汪家屯气田，天然气储存于泉四段的扶余、扬大城子油层中，属于来自下部上侏罗统的高一过成熟煤型气。研究表明，天然气从上侏罗系排运出来以后，主要沿断层穿过登娄库组、泉头组下部巨厚砂泥岩地层垂向运移至该储层中发生聚集。天然气运聚期，断层无疑是以开启为主，而目前的开发动态表明，区内断层均表现为封闭特征。可见，断层的封闭性在不同地质时期是不一样的。

再如，根据王平（1994）研究，东辛油田北翼营8断块内的营18井，在主要产油层段以下的12～13砂层组取到了多层低饱和油砂。它们是整层含油的，测井解释和试油证明为

水层。岩心干燥后出现条带结构。凡粒度粗物性好处呈白色，而粒度细物性差处呈褐色，含油较好。与正常油砂正好相反。这些油砂显然是水淹的油层，在断块高层位，这些层是产油的。产油带宽度不到500m，而天然水洗带宽度超过500m。这些现象说明它们原来有很好的封闭条件，形成了很宽的油藏。后来某个时候发生了严重的串通或窜流，但目前它仍是封闭的。也许这种封闭－开启－封闭的转换经历了许多反复。这类低饱和油砂在东辛油田的营19、辛15－1井及广利油田的菜59井都取到过。

第八章　断层在油气藏形成与保存中的作用

油气勘探的实践表明，我国绝大多数含油盆地中油气藏的形成和分布与断层有着密切的关系，它们的形成与分布均受断层分布的控制。断层在油气藏的形成与保存中具有双重作用，既可以作为遮挡物阻止油气运移，使之聚集成藏。又可以作为油气运移的通道，使油气发生至地表的散失或引起油气在地下的再分配作用。那么断层在地下究竟起何作用，关键取决于其封闭与开启性，而断层的封闭与开启除了要受到其活动历史、受力性质以及断裂带充填物质成分等影响外，还要受到其埋深和后期矿化及成岩作用等因素的影响。由此看出，断层在不同地区和不同时期应具有不同的封闭与开启性，使得它们在油气藏形成与保存中所起作用也就不同。综合前人研究，断层在油气藏形成中应具有改善油气储集空间及性能、控制油气运移方向和时期、控制不同类型圈闭形成和控制油气藏的保存与破坏4种作用，下面本章将从以上4个方面阐述断层在油气藏形成与破坏中所起到的重要作用。

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

根据地质力学研究，断层活动是构造应力聚集到一定程度时的突然释放，断层这种活动可以使其附近的脆性岩石（砂岩与灰岩）当所受到的构造应力超过岩石抗张、抗剪、抗压强度后产生构造裂缝。这些构造裂缝的发育与分布受断层发育和分布的控制：距离断层越近，裂缝越发育；反之则越少，如图8－1所示。此外先存断层往往成为后期构造运动作用于地层的边界条件，断层的边界效应和阻止地层运动，使地层在后期构造应力作用下发生褶皱而产生局部应力场。当这些局部应力场的地应力状态达到岩石破裂条件时，使岩层发生破裂形成了构造裂缝。这种构造裂缝主要分布在局部构造枢纽或轴的延伸方向、构造高点及其附近、构造枢纽的弯曲部位和地层产状急剧变化的地带。

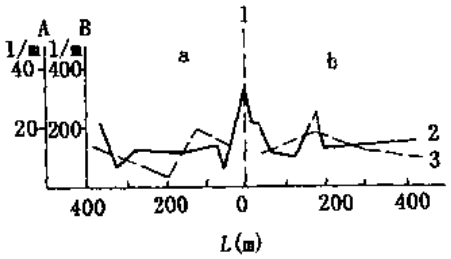


图8－1　在与断层线距离不同的条件下砂岩中大裂缝和微裂缝的密度

（据 CMeXOB，1974）

东喀尔巴阡山叠瓦构造带晚白垩世－早第三纪陆源碎屑岩夹少许碳酸盐岩；A—大裂缝密度；B—微裂缝密度；a—断层上盘；b—断层下盘；1—断层线；2—微裂缝密度平均曲线；3—大裂缝密度平均曲线；L—距断层线的距离

正是由于这些构造裂缝的形成，改善了油气储集空间及性能，构造裂缝不仅可以直接作为油气的储集空间，而且还可以起到沟通孔隙或孔洞，使孔隙渗透性增强的作用。这种作用尤其是在碳酸盐岩、泥岩或页岩、火山岩等致密岩层中更为明显。根据世界上已开发油气田统计数据，裂缝型储集层油气资源占世界总量的近一半。例如我国西南地区古生界、中生界油气田基本上是以裂缝型储集层为主，胜利油田在Es层中也找到了裂缝型油气藏。盛产石油的中东地区，裂缝型碳酸盐储集层也占很大比例。目前世界上已有不少盆地在泥岩裂缝圈

闭中发现了工业油气流，如美国东部的阿巴拉契盆地、落基山区的尤因塔盆地、丹佛盆地、加利福尼亚的圣玛利盆地、前苏联的西伯利亚盆地、厄瓜多尔的圣埃利纳油田、加拿大的魁北克盆地等。我国也开始发现一些泥岩裂缝油气藏，如柴达木盆地西部发现了油泉子泥岩裂缝油藏，渤海湾盆地东营凹陷有两口井在沙三段、沙四段生油岩中见到了工业油流，松辽盆地的下白垩统青山口组在古龙凹陷有5口井获工业油流，江汉盆地中也发现了泥岩裂缝工业油藏。

第二节　断层活动开启控制着油气运聚时期及层位

大量的研究结果表明，断层在活动中无论其性质如何，均在垂向上具开启性，静止后的断层如果其断面压力小或断裂带以砂质成分为主，那么它仍可在垂向上具开启性。在垂向上呈开启状态的断层，它们是油气穿层运移的良好通道。断层作为油气运移的通道，对油气藏的形成主要起到以下3个作用。

一、断层作为油气运移通道，连接烃源岩与圈闭

断层作为油气运移的通道，主要是通过其内及其附近的裂缝网络系统进行的。它可使纵向上相距较远的烃源岩与圈闭连接起来，尤其是穿层系烃源岩与圈闭连接的桥梁，是油气在纵向上穿层系长距离运移的重要途径。断层作为油气垂向运移的通道，可以直接连接烃源岩和圈闭使油气成藏，如图8－2a所示，例如松辽盆地北部昌德构造登娄库组背斜气藏、汪家

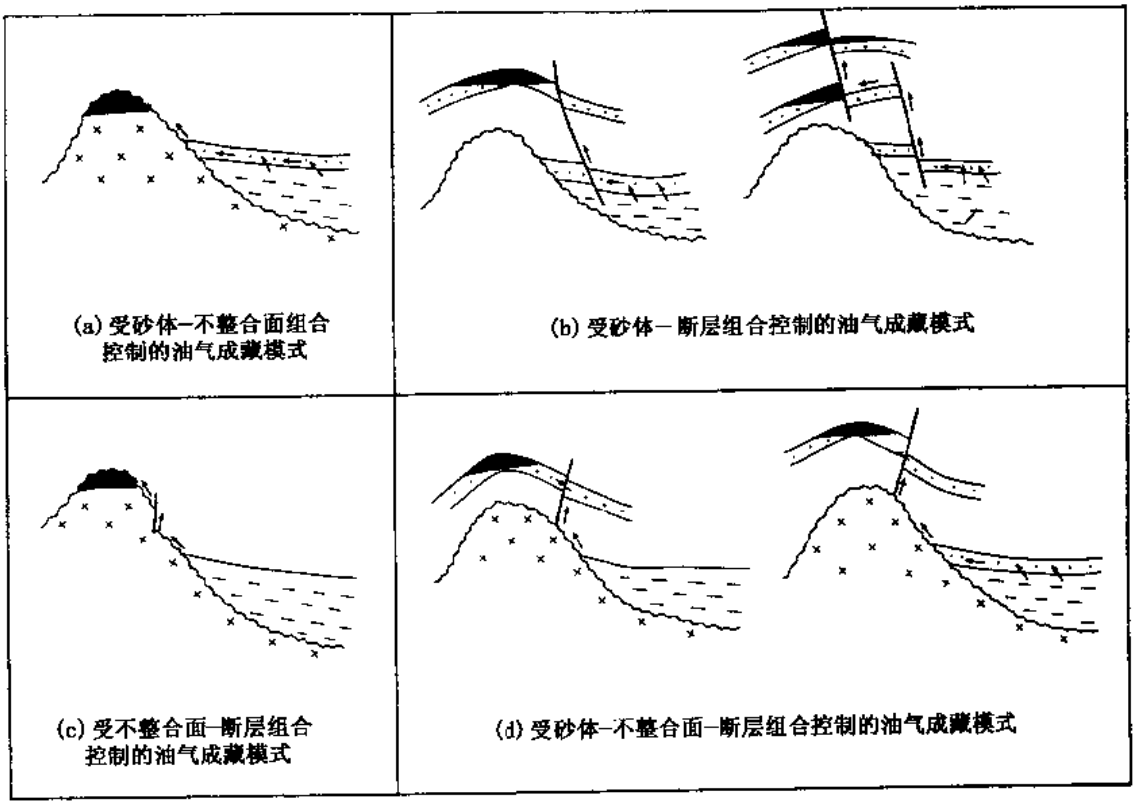


图8－2　受组合输导层控制形成的油气成藏模式

屯构造登娄库组断块气藏、薄荷台构造登娄库组断鼻气藏、四站构造登娄库组一段岩性－构造气藏、昌五构造登库娄库组岩性－断层气藏。断层还可以与砂体配合连接烃源岩与圈闭使油气成藏，如图 8－2b 所示。例如松辽盆地汪家屯构造泉头组断块气藏、三站构造泉头组二段断鼻气藏、薄荷台构造登娄库组断鼻气藏、四站构造登娄库组一段岩性－构造气藏、昌五构造登娄库组岩性－断层气藏。断层还可以与不整合面配合连接烃源岩与圈闭使油气成藏，如图 8－2c 所示，例子同上。断层还可以与不整合面和砂体共同配合连接烃源岩与圈闭使油气成藏，如图 8－2d 所示，例子也同上。

二、断层空间延伸层位控制油气在垂向上运聚层位

由上述分析可知，断层是油气运移的通道，它的空间延伸层位控制着油气在垂向上运移的最大距离。在一定程度上也就决定了油气在空间上运聚成藏的范围。例如松辽盆地北部长垣以东地区深层 T_5 层断至 T_3 层的断裂在平面上的分布存在着明显的差异性，其主要分布于升平－汪家屯地区和朝长地区，而昌德地区仅发育断穿 T_4 层的断层，如图 8－3 所示。断层作为该区侏罗系生成的天然气向上运移的通道，使沙河子组－营城组烃源岩生成的天然气由下向上运移至不同的层位中。昌德地区由于仅仅发育断穿 T_4 层断层，沙河子组－营城组烃源岩生成的天然气沿断层只能向上运移至登娄库组内，在其内运聚成藏，形成了昌德及昌德东登娄库组气藏，而升平－汪家屯和朝长地区由于发育 T_5 和 T_4 断至 T_3 层乃至 T_2 层的断层，沙河子组－营城组源岩生成的天然气沿断层向上除可以运移至登娄库组外，还可以向上运移至泉一、二段储集层中，故在该区除在登娄库组形成了升平、汪家屯、薄荷台、四站气藏外，还在泉一、二段和泉三、四段中形成了汪家屯和三站气藏，如图 8－4 所示。这充分说明了断层在空间上的延伸层位控制着油气在垂向上运聚层位。

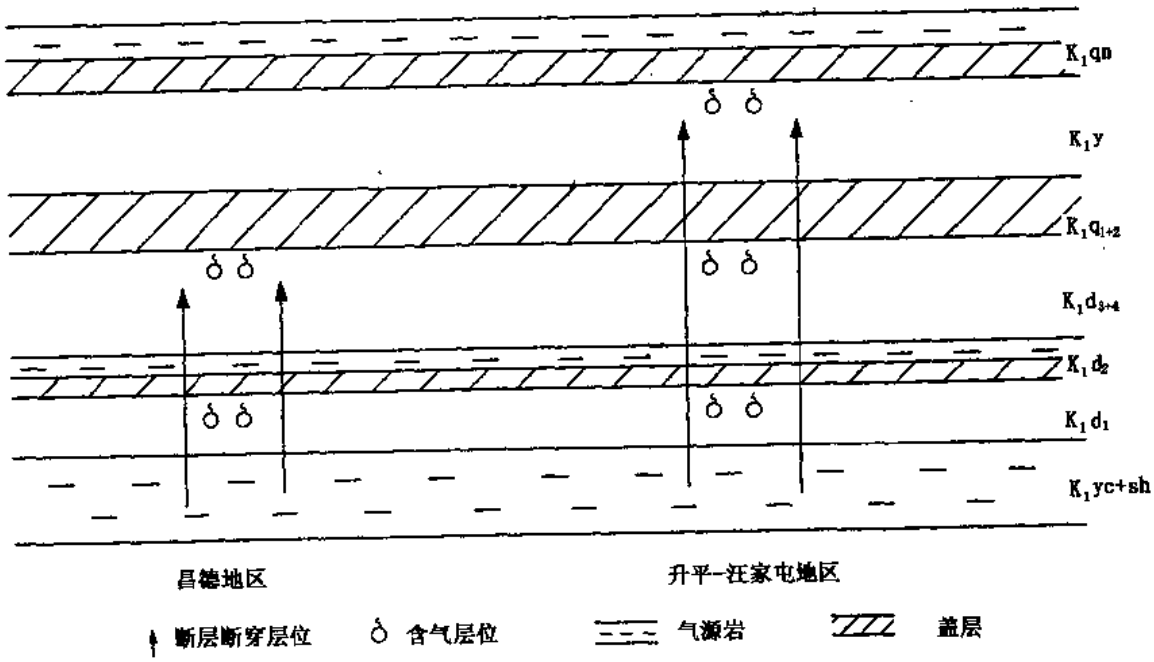


图 8－3　松辽盆地北部断层延伸层位与天然气运聚关系示意图

三、断层活动时期控制着油气的垂向运聚时期

由上述分析可知，断层只有处在活动时期时，方可成为油气大量运移的通道，因此，从

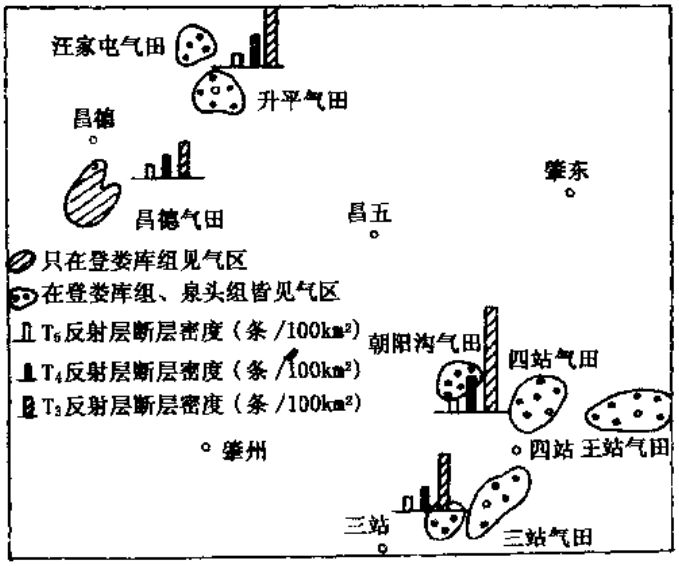


图 8-4　大庆长垣以东地区断裂与气藏分布层位关系

这个意义上讲，烃源岩大量生烃期后的断裂活动时期就应是油气垂向运聚时期。例如，松辽盆地北部大庆长垣以东地区，断层活动史研究表明，该区在侏罗纪沉积时期和登娄库组沉积时期、泉头组沉积末期－青二、三段沉积中期、嫩江组沉积末期和明水组沉积末期断层活动开启，成为油气垂向运移通道。由卢双舫等（2000）研究成果可知，该区沙河子组－营城组气源岩在其沉积末期开始生烃，在泉二段沉积末期达到生气高峰。综上分析，该区天然气垂向运移时期应为登娄库组沉积时期、泉头组沉积末期－青二、三段沉积中期、嫩江组沉积末期和明水组沉积末期四个时期。

由该区泥岩排替压力随埋深变化资料，根据盖层封油气门限的确定（付广等，1996）可知，该区登二段、泉一、二段、青山口组和嫩一、二段四套泥岩盖层封闭能力分别于登三段沉积末期、泉一、二段沉积末期、青山口组沉积末期和嫩二段沉积末期开始形成。由此结合上述天然气垂向运移期可以得到，该区天然气的主要聚集期应为泉头组沉积末期－青山口组沉积中期，因为此时期该区泉头组一、二段区域性盖层开始具封闭能力，且烃源岩开始进入大量生排气期，所以有利于侏罗系天然气在其下运聚成藏。而登娄库组沉积时期，虽然登二段泥岩盖层在登三段沉积末期已开始形成封闭能力，但其分布范围明显小于泉一、二段，且此时烃源岩尚未进入大量生排气期，故其不应是该区天然气的主要聚集期。嫩江组沉积末期和明水组沉积末期，虽然几套盖层均已形成封闭能力，但此时侏罗系烃源岩的大量生排气期已过，不能形成大规模的天然气聚集，也不是该区的主要天然气聚集期。

第三节　断层活动与封闭控制着不同类型油气圈闭的形成

一、与断层活动相伴生的圈闭构造

当断层活动时，它们不仅仅可以作为油气垂向运移通道，而且在它们活动的过程中还可伴生出以下两种类型圈闭的形成。

1. 滚动背斜的形成

在断陷盆地的斜坡地带或断裂带的主断层下盘，由于同生断层逆牵引作用或重力滑动作

用形成背斜构造即为滚动背斜，它多为小型的短轴背斜沿断层上盘分布，两翼不对称，高点自浅至深向断层下倾方向偏移，如图 8－5a 所示。例如济阳坳陷的坨庄－胜利村油田的背斜构造就是受胜北大同生断层所控制的滚动背斜，其主要含油层沙河街组的油藏属于滚动背斜油气藏，背斜走向近 E－WS，与胜北大断层大致平行，虽然该背斜油气藏被若干断层所切割，但仍明显是受背斜控制，而含油气十分丰富。

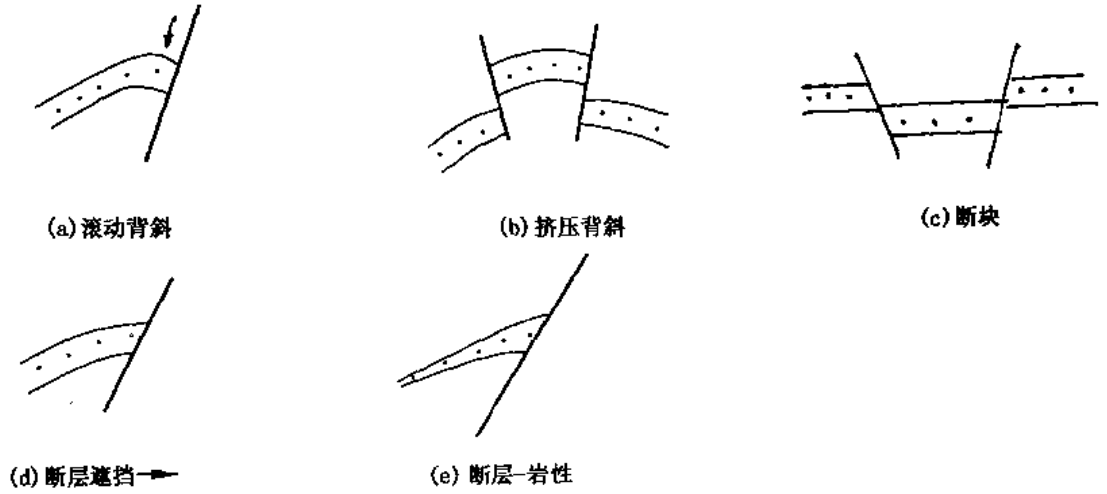


图 8－5　受断层活动和遮挡形成的圈闭构造

2．挤压型背斜的形成

在断陷盆地的中央地带，由拉张应力而产生的地堑型的断陷，使地层陷落挤压而形成背斜，并在后期挤压中定型，两侧受断层夹持，在背斜上常伴随产生正断层，如图 8－5b 所示。例如辽河断陷盆地中的黄金带油气田、热河台油气田的主体油气藏，都是由于断层活动挤压而形成的背斜圈闭构造。

二、断层作为遮挡物形成的圈闭构造

当断层活动停止后，由于受断移地层砂泥比值、断层活动泥岩涂抹作用和后期成岩改造作用等影响，断层在侧向上开始具封闭性，成为油气侧向运移的遮挡物，按照断层与储集层的组合方式不同可形成以下 3 种类型。

1．断块圈闭

这种圈闭是由储集层在上倾方向由两条叉断层所包围形成的，按照断层与砂层组合的形状又可细分为屋脊状、阶梯状、交叉状、高垒状等类型，如图 8－5c 所示。例如辽河坳陷的双喜岭油田、高垒带中的油气藏，文留油田地堑带和地垒带的断块油气藏卧龙河、克拉玛依油田北缘断块的有些油气田均属于此例子。

2．断层遮挡圈闭

这种类型圈闭是在储集层的上倾方向，为一向上倾凸出的弯曲断层面所包围形成的，如图 8－5d 所示。例如我国青海柴达木盆地冷湖油田某断层油藏可以作为这种类型油气典型实例。

3．断层－岩性圈闭

在倾斜储集层的上倾方向岩性变为不渗透层，在两侧为两条断层所封闭形成的圈闭，如图 8－5e 所示。例如我国青海柴达木盆地冷湖油田中的某一个油气藏，可以作为这种类型油

气藏的典型实例。

第四节　断层封闭与开启控制油气的保存与散失

油气藏自形成以后，要经历漫长的地质历史演化过程。由于地史过程中构造运动与变动频繁发生，油气藏作为多种复杂地质因素综合作用的产物，无疑要受到构造运动的影响，随着地质条件的变化而变化。断层活动作为构造运动的重要方式，不仅对油气的生成、运聚成藏有重要的控制作用，而且在油气藏形成以后对油气藏的保存有至关重要的影响。

如果油气藏形成后断层不再活动仍具封闭性或不被新的断层所破坏，则有利于油气藏的保存。相反，如果油气藏形成以后，由于后期构造运动在油气藏部位产生新的断裂切割油气藏，或者是早期静止封闭断层重新活动开启，打破了原生油气藏的物理－化学平衡，油气将沿断层这个相对低势区迅速逸散，油气藏遭到破坏，破坏的程度与断层切割圈闭形成的溢出点高低、断层是否断至地表、断层重新封闭的时间等因素有关，可细分为以下两种情况：

一、断层活动开启引起起油气藏的破坏

这种情况是断层断至地表，如图 8－6a 所示，由于断层的通道、连通作用，使地下深度的高压条件下的油气藏与地表常压环境相连通，巨大的压力差将使油气沿断层迅速逸散至地表，造成油气藏遭到破坏，如果这种作用一直持续下去，就可以完全破坏掉油气藏。例如四川盆地卧龙河－黄草峡气藏，如图 8－7 所示。勘探目的层 Tc^3、Tc^5 在卧龙河背斜和双龙平缓背斜断裂不发育，油气保存完好，而黄草峡背斜，一方面遭到了强烈褶皱，顶部遭到剥蚀，油气封盖条件变差，另一重要原因是产生了断至地表并断开目的层的断裂。另外，地表水的渗入、冲刷以及氧化菌解作用，使油气藏破坏殆尽，Tc^1 地层断层没有切割到圈闭，油气藏得以保存下来。

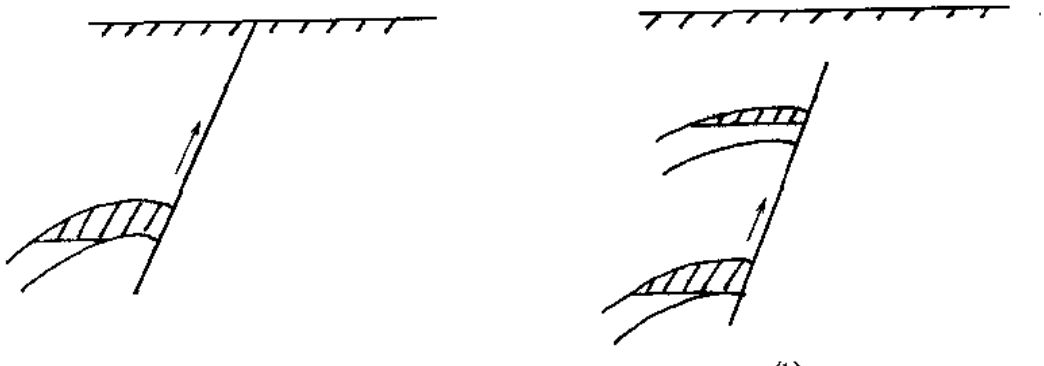


图 8－6　断层活动开启对油气藏破坏与再分布作用示意图

(a) 断层断至地表；(b) 断层未断至地表

二、断层活动开启引起的油气再分配作用

这种情况是断层未断至地表，如图 8－6b 所示，使油气藏与上方储集层圈闭相连通，油气沿断层向上运移聚集，如果断层活动开启并未完全破坏掉原生油气藏，仅仅使原有油气藏圈闭的容积变小，这样就会造成溢出点以下的油气沿断裂向上方储集层中运移，在新的圈闭内聚集成新的油气藏。其结果是使原来单一的油气藏，分解成若干个油气藏，以致使油气藏

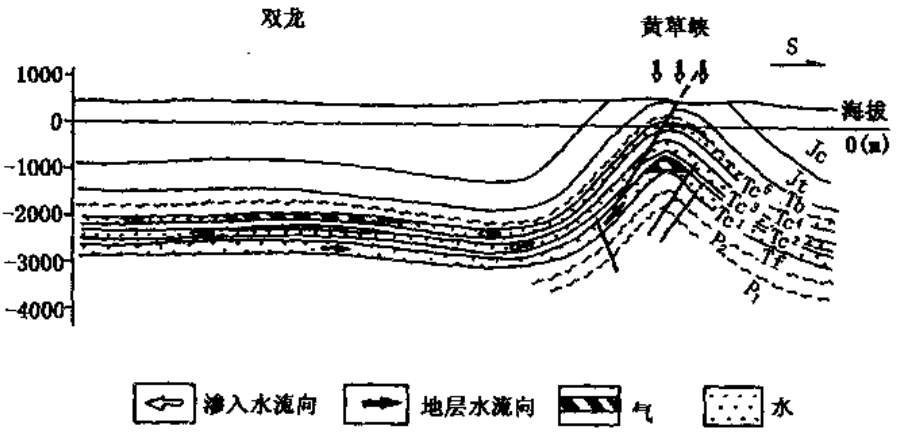


图 8-7 卧龙河至黄草峡一带气藏横剖面图

(引自《四川石油地质志》, 1989)

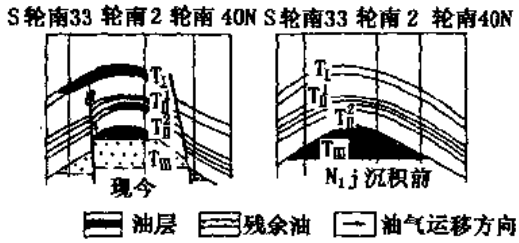


图 8-8 塔里木盆地轮南 2 号油藏剖面图

的规模和价值都相应减小，这种作用称之为“油气的部分再分配”。如果断层活动开启完全破坏掉了原生油气藏，油气就会全部向上运移至上方储集层中，在新圈闭中聚集成新的油气藏，而原生油气藏消失，这种作用称之为“油气的完全再分配”。例如塔里木盆地库车坳陷轮南 2 号油藏，就是由于后期断裂破坏，发生部分油气再分配作用形成的，如图 8-8 所示。再如波斯湾盆地扎格罗斯山前带的许多巨大油气田，存在 3 个主要含油层即上侏罗统灰岩、白云岩和第三系石灰岩，后期断裂的作用沟通了下面两个主要含油气层与第三系石灰岩储层，使 J、K 地层中的油气藏遭到破坏，油气沿断裂在第三系石灰岩中聚集，使第三系石灰岩成为储集油气的主力油层，形成巨大的油气储量。

参 考 文 献

1 包茨．天然气地质学（M）．北京：科学出版社，1998，217，237
2 白新华，付广．盖层封闭天然气的综合指数CSGI及应用．石油勘探与开发，1997，24（6）：103～105
3 曹瑞成，陈章明．早期勘探区断层封闭性评价方法．石油学报，1992，13（1）：13～22
4 程军林，宁吉泽．定量评价断层封闭性．断块油气田，1999，6（4）：14～17
5 程军林．断层封堵类型及并置封堵模式概述．海相油气地质，1999，4（1）：52～56
6 邓俊国，王贤，王伟锋．模糊综合评判技术在柳堡断块圈闭评价中的应用．断块油气田，1999，6（6）：5～9
7 付广，杨勉．断层垂向封闭性预测方法．复式油气田，2000（3）：38～40
8 付广，王朋岩，孙洪斌．断层垂向封闭模式及研究方法．新疆石油地质，1998，19（1）：7～10
9 付广，李玉喜，张云峰等．断层垂向封闭油气性研究方法及其应用．天然气工业，1997，17（6）：22～25
10 付广，张靖，李庆章．断层侧向封闭模式及研究方法．中国海上油气（地质），1998，12（1）：42～46
11 付广，王朋岩，付晓飞．塔中地区石炭系主要断层的侧向封闭性．新疆石油地质，1998，19（5）：362～365
12 付广，薛永超，杨勉．利用断裂填充物泥质含量研究断层封闭性的方法．断块油气田，1999，6（1）：9～12
13 付广，王朋岩，陈章明．断层侧向封闭性的粘土涂抹势研究方法及应用．断块油气田，1997，4（1）：17～20
14 付广，李凤君，白明轩．断层侧向封闭性与垂向封闭性关系分析．大庆石油地质与开发，1998，17（2）：6～9
15 付广，杨勉．利用断裂填充物中泥质含量研究断层封闭性的改进方法．江汉石油学院学报，2002，24（1）：1～4
16 付广，任述民，赵荣．利用声波时差资料研究断层垂向封闭性．石油地球物理勘探，1997，32（5）：724～739
17 付广，曹成润，陈章明．泥岩涂抹系数及其在断层侧向封闭性研究中的应用．石油勘探与开发，1996，29（6）：38～41
18 付广，陈章明，吕延防等．断层封闭性综合评价方法探讨及应用．河南石油十年硕果优秀论文选集．北京：石油工业出版社，1997，73～78
19 付晓飞，付广，赵平伟．断层封闭机理及主要影响因素研究，天然气地球科学，1999，10（3，4）：54～62
20 洪世铎．油层物理基础（M）．北京：石油工业出版社，1985，21～126
21 郝石生，陈章明，高耀斌等．天然气藏的形成与保存．北京：石油工业出版社，1995，142～170
22 谯汉生，牛嘉玉，王明明．中国东部深层反向断层遮挡聚油机理与勘探实践．石油勘探与开发，1999，26（6）：10～13
23 吕延防．油气保存条件．黑龙江省科技出版社．1997，68～134
24 吕延防．断层封闭的差异性分析．大庆石油学院学报，1996，20（4）：7～11
25 吕延防，付广，高大岭等．油气藏封盖研究．北京：石油工业出版社，1996，64～123
26 吕延防，李国会，王跃文等．断层封闭性定量研究方法．石油学报，1996，17：39～43
27 吕延防，姜贵周．延吉盆地断裂特征及对油气分布的控制．断块油气田，1997，4（2）：1～4
28 吕延防，付广，姜振学等．延吉盆地东部凹陷油气运聚模式．天然气工业，1997，17（2）：1～5
29 吕延防，陈章明，陈发景．非线性映射分析断层封闭性评价方法．石油学报，1996，10（2）：7～12
30 吕延防，张发强，吴春霞．断层涂抹层分布规律的物理模拟实验研究．石油勘探与开发．2001，28

(1)：30～32
31 鲁兵，刘忠，孔宪政等．断层折射与断层封闭性关系．石油勘探与开发，1999，26（3）：28～30
32 鲁兵，孔宪政，黎冰等．断块结构与断块封闭性间的关系．石油勘探与开发，1999，26（6）：14～17
33 鲁兵，陈章明，关德范等．断面活动特征及其对油气的封闭作用．石油学报，1996，17（3）：33～37
34 鲁兵，黎冰，刘忠等．松辽盆地滨北地区基底断裂及对油气的控制作用．大庆石油学院学报，2000，24（4）：8～11
35 刘泽容，张晋仁，金强．油藏评价与预测．北京：石油工业出版社，1993，1～24
36 刘泽容，信荃麟，邓俊国等．断块群油气藏形成机制和构造模式．北京：石油工业出版社，1995，108～115
37 罗群，孙宏智．断裂活动与油气保存关系研究．石油实验地质，2000，22（3）：225～231
38 陆友明，牛瑞卿．断层封闭形成机理及研究方法．天然气地球科学，1999，10（5）：12～16
39 李亚辉，刘泽容，陈利．断裂封闭演化史研究及其应用。石油大学学报，1998、22（3）：15～18
40 李德荣，杨书安．试论不同力学性质的断裂构造的富水部位和富水性．地质科学，1975，（3）：200～229
41 孙宝珊．油田断裂封闭与通道研究．地质力学学报，1995，2（2）：1～7
42 童亨茂．断层开启与封闭的定量分析．石油与天然气地质，1998，19（3）：215～220
43 童亨茂．应力对流体及其油气二次运移作用的几种模式．石油大学学报，1998，23（2）：14～17
44 王平．试论断层面正应力的变化及影响因素．江苏油气，1991，2（4）：8～12
45 王平．论断层封闭的广泛性、相对性和易变性．断块油气田，1994，1（1）：3～10
46 王洪辉，陆正元．川南二叠系阳新统大断裂封闭性研究．南方油气地质，1995，2（1）：12～16
47 王荣华．大庆油田断裂特征、成因及其与油气聚集的关系．石油勘探与开发，1981，9（6）：55～59
48 王志欣，信荃麟．关于地下断层封闭性的讨论（以东营坳陷为例）．高校地质学报，1997，3（3）：294～300
49 王朋岩，付广，王艳君等．碎屑岩地层中形成断层垂向封闭的有利深度及确定方法．大庆石油学院学报，2000，24（4）：12～14
50 熊永旭，先容有，董秀芳等．破裂面的性质与油气渗滤关系探讨．石油地质文集（构造3）．北京：地质出版社，1978，164～168
51 杨世明，王海生．数模评价断裂在油气运移中的作用．特种油气藏，2000，7（1）：7～9
52 张永华，贾曙光，杨春峰等．断层封堵性的应用研究．石油物探，2001，40（4）：83～87
53 赵永祺，王华崇，贾玉梅．复杂断块扶杨油藏断层封闭性研究．断块油气田，1996，3：21～25
54 周新桂．利用排替压力研究断层封闭性及其在塔里木盆地的应用．地质力学学报，1997，3（2）：47～53
55 钟宏平，傅康荣，黄仙英．珠江口盆地断层封闭因素探讨．中国海上油气（地质），1991，5（6）：1～6
56 Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within fault. AAPG Bulletin, 1989, 73: 803～811
57 Antonellini. M. and A. Aydin. Effect of faulting flow on porous sandstones: petrophysical properties. AAPG Bulletin, 1994, 78: 355～377
58 Berg, Robert R. and Avery, Alana Haveman. Sealing properties of Tertiary growth faults. Texas Gulf Coast. AAPG Bulletin. 1995, 79 (3): 375～393
59 Bouvier, J.D., C.H, Kaars－Sijpestijn, D.F. Kluesneret al. Three－dimensional seismic interpretation sealing investigations, Nun River Field, Nigeria. AAPG Bulletin, 1989, 73: 1379～1414
60 Chapman T J, Meneilly A W. Fault displacement awalysis. Pure and Applied Geophysics, 1990, 124: 77～106

61 Downey, M.W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations. AAPG Bulletin, 1984, 68: 1752～1763
62 Engelder J T. Cataclasis and the generation of fault goupe. AAPG Bulletin, 1974, 58: 1515～1522
63 Harding T.P, and Tuminas A C. Interpretation of footwall (lowsid) traps sealed hy reverse faults and convergent wrench faults. AAPG Bulletin, 1988, 72: 738～757
64 Gibson R G. Fault－zone Seals in Siliciclastic Strata of the Columbus Basin, Offshore Trinidad, AAPG Bulletin, 1994, 78 (9): 1372～1385
65 Gauthier B D M, Lake D. Probabilistio modelling of faults below the limit of seismic resolution in Pelican field, North sea, offshore united Kingdom. AAPG Bulletin, 1993, 77: 761～777
66 G. Jones, Q.J. fisher and R.J. Rnipe. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs. Geological society special publication, No. 147, part Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, 1998
67 Hooper ECD. Fluid migration along growht faults in compacting Sediments. Jour. of Petrol. Geol, 1991, 4 (2): 161～180
68 Hughes D J. Faulting associated with deep－seated salt domes in northeast portion of the Mississippi salt basin. Gulf Coast Association of Geologial Societies Transactions, 1960, 10: 155～173
69 Harding T P and Tuminas A C. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal blocks and at stable flank of foredeep basin and at rift basin. AAPG Bulletin, 1989, 73: 812～840
70 Jev B I et al. Akaso field, Nigeria: use of integrated 3－D Seismic, fault slicing, clay smearing and RT pressure data on fault trapping and dynamic leakage. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1389～1404
71 Knipe R J. Faulting process and fault seal. NPF special pubication, 1992, 1: 325～342
72 Knott S D. Fault Seal analysis in the Northsea, AAPG Bulletin, 1993, 77: 778～792
73 Pitmann E D. Effect of fault－related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones, simpson Group (Ordovician), oklahorma. AAPG Bulletin, 1981, 65 (11): 2381～2387
74 Robert D and Hatcher Jr. Structural geology, principles, concepts and problems, Second edition. New Jersy: Prdntice－Hall Inc, 1995
75 Smith D A.. Theoretical consideration of sealing and nonsealiug faults. AAPG Bulletin, 1966, 50: 363～374
76 Steven D. Knoot. Fault Seal analysis in the North Sea. AAPG Bulletin, 1993, 72 (5): 778～792
77 Secor, D.T. Jr., Role of fluid pressure in jointing. Am. Jour. of science, 263 (october 1965), 99: 663～646
78 Smith, D.A. Sealing and non－sealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin. AAPG Bulletin, 1980, 64: 145～172
79 Stepphan K. Maathai and Stephen G. Robert. the influence of fault permeability on sin－gle－phase fluid near fault－sand intersections: Results from steady－state high－resolu－tion models of pressure－driven fluid flow. AAPG Bulletin, 1996, 8 (11): 1763～1779
80 Watls N L. The oretical aspects of caprock and fault seals for single and two phase hydrocarbon columns. Marine and petroleum Geolgy. 1987, 4 (4): 247～307
81 Weaber K J. et al. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structrues. Tenth Annual Offshore Technology conference proceedings. 1978, 62 (4): 2643～2653
82 Yielding G, Freeman B and T Needham D. Quantitative Fault seal prediction. AAPG Bulletin, 1997, 81: 897～917