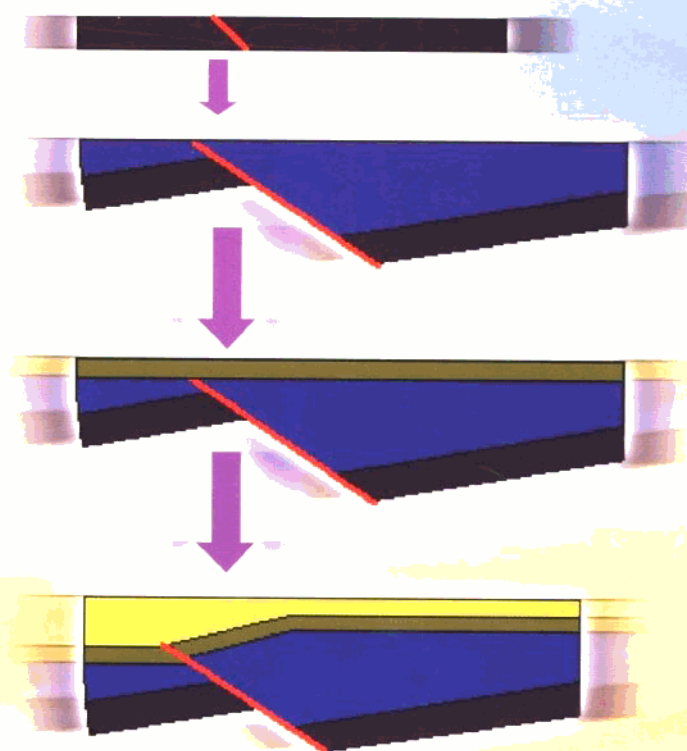


# 正反转构造综合分析原理和方法

胡望水 周延军 刘学锋 编著



石油工业出版社

# 正反转构造综合分析原理和方法

胡望水 周延军 刘学锋 编著

石油工业出版社

## 内 容 简 介

本书是一部系统介绍正反转构造研究原理和方法的著作。介绍了正反转构造的基本概念,论述了正反转构造的几何学和运动学特点;从流体活动、动力机制的角度探讨了正反转构造的形成机制及构造演化特点;系统阐述了正反转构造的物理、几何及数学研究方法;论述了正反转盆地油气资源特点及油气分布规律;分析了中国东部一些典型正反转盆地的正反转构造特征及油气聚集的特点。

本书系统性强,全面反映了正反转构造研究的新思路和新方法,适合于石油地质科研人员、生产人员及高等院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

正反转构造综合分析原理和方法/胡望水等编著.  
北京:石油工业出版社,2001.10

ISBN 7-5021-3556-1

I. 正…

II. 胡…

III. 构造盆地-油气藏-分布规律-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070491 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)  
北京乘设伟业科技排版中心排版  
北京市密云华都印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 8.25 印张 210 千字 印 1—1000

2001 年 10 月北京第 1 版 2001 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3556-1/TE·2625

定价:28.00 元

## 前 言

反转构造为叠加构造的一种类型,是油气聚集的重要场所。在 20 世纪的 20~30 年代,Lamplyugh(1920)、Stille(1924)、Prouvost(1930)等构造地质学家在研究西北欧含油气区(北海地区)时就注意到反转构造现象,相应地提出了“反转构造作用”(inversion structuring)的概念。随着构造地质学研究的进步及油气勘探地震技术的改进和认识的提高,以及反转构造中油气勘探成功率提高,石油地质学家逐步认识到反转构造为一重要的叠加构造形式,并与油气生成、运移、聚集有着密切的关系,反转构造日益引起地质界和石油工业界的广泛兴趣和高度重视。其独特的构造发育历史及特有的油气聚集条件,形成了很多大型油气田。因此,分析反转构造发育的机制、几何学和运动学的特征、构造演化及其对油气的控制作用在整个油气勘探过程中显得尤其重要。

特别是 20 世纪 80 年代末期以来,构造地质学研究的进展、高分辨率地震资料的广泛应用及计算机模拟技术的不断进步,推动了反转构造分析的迅速发展。在 1987 年 3 月由英国皇家学会主持召开的“反转构造”研讨会上,与会专家通过热烈的讨论,进一步明确了“反转构造”的概念,把“构造反转”定义为“早期由张性—扭性断层控制,常发育同裂陷期(或同伸展期)层序(即被动充填层序)的上盘盆地(地堑或半地堑),后来在挤压作用下发生隆起和局部挤出”,由此作用诱发的构造称为“反转构造”。由此可见,这次会议为反转构造研究的重要里程碑,标志着反转构造的研究进入了一个崭新的发展阶段。在 1993 年 9 月,英国皇家学会又主持召开了“盆地反转”研讨会,这次会议对反转构造的分类、几何学和运动学的特征、形成机制、构造演化、热史分析方法、与油气聚集的关系以及全球典型反转盆地的构造特征、油气富集规模进行了系统全面的分析和报道。从对反转构造的几何形态描述来看,早期侧重于定性描述,将其描述为上隆下凹的“镜像”构造,而如今侧重于用定量的几何数学方法解剖其形态特征。反转构造模拟进入崭新的发展阶段。随着计算机技术的迅速发展,在比例物理模拟的基础上,逐步实现了数学模拟。三维构造的模拟能够提供有关复杂断层体系的三维几何形态的发育演变的有用的信息。反转构造的沉降史、热史的定量恢复模拟,在理论上,建立了重要的模式,在方法上,建立了多参数相互验证的定量恢复技术。由此可见,在这短短的十几年时间内,反转构造研究真可谓突飞猛进,取得了前所未有的成绩。从勘探的意义上说,反转构造的准确分析,为油气资源的勘探和准确评价提供了必要的地质信息。

在裂陷型含油气盆地中,反转构造作用所引起的构造—地层演化可以为油气聚集造就有利的空间。最近研究表明,世界许多典型的含油气盆地不仅发生了反转,部分油气聚集在反转构造之中,而且不同类型的反转构造因其反转变形程度不同对油气分布及规模和勘探成功率有一定程度的影响。局部反转裂谷较区域反转裂谷具有相对较高的大储量几率,即具有较高的勘探成功率。北海盆地、阿根廷的中西部地区、波罗的海南部盆地、印尼苏门答腊盆地、新西兰南岛西海岸盆地,我国东部陆地及海上许多中、新生代盆地如松辽盆地、辽河盆地、潮水盆地、东海陆架盆地、珠江口盆地等也广泛发育局部反转构造。这些盆地经历前裂陷期、裂陷伸

展期、热沉降期、反转期等几个演化阶段。对反转过程的研究不仅是石油地质学研究的重要内容,而且是大陆构造学及大陆动力学的重要组成部分。

本书的基本内容为作者等负责完成的中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目“正反转构造平衡剖面方法研究”、参加中国石油天然气集团公司“九五”攻关项目“东部地区天然气富集规律及有利区带评价”的构造研究成果、参加大庆石油管理局项目“松辽盆地构造格架”及辽河石油勘探局项目“辽河盆地构造特征”的部分成果。本书的目的在于介绍反转构造的概念及研究现状,阐述正反转构造的类型;论述正反转构造的几何学和动力学特征,探讨正反转构造的成因机制;正演反转构造的形成过程及与油气的关系;建立正反转构造分析的理论体系,开发一套正反转构造平衡剖面正演技术方法;用该理论和方法对我国中、新生代典型反转盆地如松辽盆地、辽河盆地进行了系统分析,并讨论了反转构造对油气的控制作用。

本书共分六章。前言、第一章、第二章、第三章由胡望水撰写,第四章由刘学锋撰写,第五章由胡望水、雷中英撰写,第六章由周延军撰写。全书由胡望水统一审阅定稿。

感谢中国石油天然气集团公司中青年创新基金的资助。中国地质大学王燮培教授、中国石油勘探开发研究院李伟高级工程师给予了大量的帮助,谨表示衷心的感谢。在研究过程中,大庆石油管理局、辽河石油勘探局勘探开发研究、中国石油天然气集团公司“中国北方侏罗系石油地质综合研究与勘探目标选择”科技工程项目组、江汉石油学院科研处和地质系及柳保军、客伟利、曲良超等给予了支持和帮助,特表谢意。

鉴于时间仓促,水平有限,加之反转构造学正处于发展阶段,文中不当之处敬请各位同仁批评指正。

作 者

# 目 录

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第一章 正反转构造概念.....             | (1)   |
| 第一节 正反转构造基本概念.....           | (1)   |
| 第二节 正反转构造研究概述.....           | (3)   |
| 第三节 正反转构造的样式.....            | (8)   |
| 第四节 正反转构造的基本鉴别标志 .....       | (13)  |
| 第二章 正反转构造的几何学和运动学 .....      | (15)  |
| 第一节 概述 .....                 | (15)  |
| 第二节 两种常见正反转构造的几何学、运动学研究..... | (16)  |
| 第三章 正反转构造的形成机制 .....         | (29)  |
| 第一节 热力作用机制 .....             | (29)  |
| 第二节 流体流动、断层复活与构造反转.....      | (35)  |
| 第三节 构造反转机制与反转构造演化 .....      | (41)  |
| 第四章 正反转构造研究方法 .....          | (45)  |
| 第一节 正反转构造定量研究方法 .....        | (45)  |
| 第二节 正反转构造物理模拟 .....          | (48)  |
| 第三节 正反转构造的平衡模拟 .....         | (61)  |
| 第五章 正反转构造与油气聚集 .....         | (85)  |
| 第一节 正反转构造与油气 .....           | (85)  |
| 第二节 反转盆地的油气资源 .....          | (91)  |
| 第三节 正反转盆地的沉降史和热史 .....       | (95)  |
| 第六章 中国典型反转盆地.....            | (107) |
| 第一节 松辽反转盆地.....              | (107) |
| 第二节 塔里木反转盆地.....             | (112) |
| 第三节 辽河反转盆地.....              | (117) |

# 第一章 正反转构造概念

反转构造学或反转构造分析是盆地构造学的一个分支学科,是一门最近发展起来的新兴学科。它研究沉积盆地反转期的构造几何特征、运动学特征及动力学特征。本章阐述了正反转构造的概念,回顾了正反转构造的研究发展历史,总结了正反转构造的研究内容;论述了正反转构造的基本类型和划分方案;根据正反转构造的构造、沉积特征提出了各类正反转构造的识别标志。

## 第一节 正反转构造基本概念

### 一、正反转构造概念

反转构造(inverted structure)为叠加构造的一种类型,是构造地质学特别是石油构造地质学在 20 世纪兴起的一个具有重要意义的研究领域。尽管许多年前在 Lamplyugh(1920 年)和 Stille(1924 年)的讨论中就已识别出反转构造,但是明确用“反转”一词来描述反转构造或盆地,还是由 Glennie 和 Boegner(1981 年)首先提出来的。Glennie 等(1981)认为构造反转就是指在某一地区发生过构造沉降和隆升的转化,这种转化相对瞬时进行,可被看做既有正向运动(上升)又有负向运动(下降)两种类型。Bally(1983)的主要观点为,盆地或半地堑,或者地堑系统受压,不同程度地从里向外反转,且沿着先存正断层发生反转变形。Harding(1985)构造反转指构造地形极性变化,即在一个特定构造上,从以前的低地到高地。从大规模来看,这种变形是指盆地反转。Murphy(1991)等将反转构造定义为大陆裂谷环境内早期正断层上盘的反倾向滑动所形成的构造;Graciansky(1989)反转作用可以发生在如阿尔卑斯那样的造山带,对认识造山带的构造演化及探索造山演化模式有重要价值。在 1987 年召开的“反转构造”研讨会上,与会的专家对反转构造的研究成果作了比较系统的分析总结,对反转构造的认识基本达成一致,定义为:原先由张性—张扭性断层控制、通常发育有同断陷期(或同拉张期)层序(即被动充填层序)的上盘盆地(地堑或半地堑),后来在挤压作用下发生了隆起和局部挤出,由此构造作用产生的构造即为“反转构造”(图 1-1)。盆地反转定义为:受后续挤压—压扭作用导致盆地充填抬升和部分挤出断层系控制的盆地。如果盆地的发育没有涉及一定程度的与断层有关的地壳拉张,那么即使它后来发生了隆起,也不应视为反转盆地。总之,反转作用的发生有两个前提:(1)盆地的发育明显受断层控制,因而可以识别出同拉张期或被动充填的地层层序;(2)区域应力体制的改变使原有的断层(系)得到广泛的再利用,因而隆起作用影响的是上盘而不是下盘。由此可以看出,这次会议强调了正反转构造作用和正反转构造的概念。我们则认为同一构造若由两期力学性质和作用方向相反的构造作用叠加所形

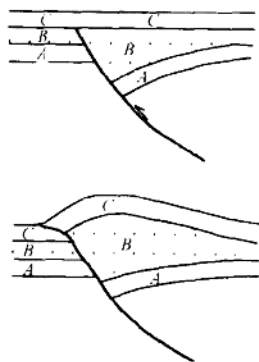


图 1-1 经典正反转构造的示意图解

A、B 和 C 为地层层序。A:前裂谷期层序;B:同裂谷期层序

成,这种叠加构造称为反转构造,如早期沉降晚期上隆者称为正反转(positive inversion),其地质过程为伸展后的挤压;相反的情形称为负反转(negative inversion),这种叠加既有断层滑动方向正好相反的情形,又有断层滑动方向为斜向滑动叠加的情形,甚至还有断层滑动方向相差90°的情形。

二、正反转构造的规模、程度和发育特征

从反转构造研究的结果来看,反转构造的规模存在很大的变化。如单个断裂反转引起的小规模反转构造,由一个早期断层反向滑动形成,这类构造在中新生代含油气盆地中相当发育,不仅有利于油气聚集,而且有利于油气保存,如中国东部的中新代含油气盆地(图 1-2),大庆林甸反转构造;中等规模的如整个盆地的反转,由整个相连接的断层系统的反向作用形成,较有利于油气的聚集和保存,如北海南部的布罗德 Fourteens 盆地和东异他大陆架区的中新生代含油气盆地(图 1-3),由于一条断距较大、一直向右延伸的伸展断层的存在,形成了前第三纪的半地堑,在第三纪期间该断层产生了反向滑移,使半地堑升降,在断层上盘形成了褶皱,同时其中一些缩短作用发生在反向断层上,形成一系列反冲断层;在区域性的如盆地群或裂谷系的反转,同一构造背景下相互关联的盆地群或裂谷系受反向挤压作用隆起、强烈褶皱改造,不利于油气的聚集和保存,如华北地台南缘形成的中、晚元古代三叉裂谷系(马杏垣等, 1985;王鸿祯,1982)其中一支发展成贺兰拗拉槽,寒武纪—奥陶纪贺兰拗拉槽得到进一步发展,志留纪—泥盆纪拗拉槽轻度反转,早、中石炭世拗拉槽再度裂开,中、新生代拗拉槽强烈反转,早期正断层反转为逆断层(张功成,1997),被动边缘志留纪以后反转成冲断—褶皱带(刘和铺,1990)。与此相应,反转构造的变形程度也有明显的变化,从微弱的变形直到前期构造已被改变得难以辨认,通常以微弱、轻度、中等、强烈、全部、改变等来描述反转构造的变形程度,这

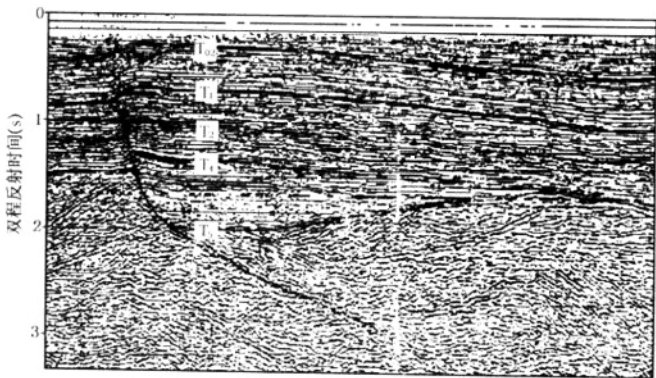


图 1-2 松辽盆地林甸挤压倾滑伸展型正反转构造

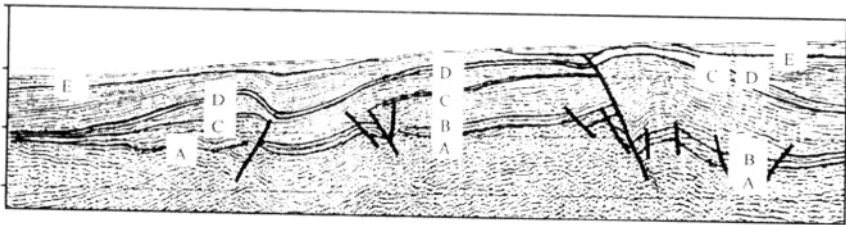


图 1-3 印尼东异他大陆架区的反转盆地,中等程度的反转



种划分取决于零点和变形改造。从油气聚集和保存而言,变形程度低,有益于油气的聚集和保存,如我国的松辽盆地晚期的反转属于微弱到中等的变形,为大庆油田成为世界大型油气田奠定了基础,油气勘探的结果显示近一半的油气聚集在反转构造内。由于变形程度越强烈,构造的破裂和改造就越强烈,油气的破坏就越厉害,如布罗德 Fourteens 盆地就是如此。

世界许多著名的含油气盆地都发现了有油气聚集的反转构造,如北海南部的盆地、新西兰塔拉纳基盆地、美国中部蒙大拿、印尼爪哇海、马来西亚的马来盆地、澳大利亚的巴斯盆地、西班牙比利牛斯中南部盆地、英国布里斯托尔河床盆地、阿根廷西部的中新世盆地。我国东部的许多盆地普遍发育有反转构造,在西部塔里木等盆地也发育有反转构造。从目前世界反转构造的分布特征来看,绝大多数反转构造发育在中新生代含油气盆地,这说明在中新生代全球构造体制存在快速转换。在我国东部反转构造发育存在如下规律:(1)自西向东反转构造发育的时间由早到晚;(2)就同一盆地而言,自西向东反转构造发育的程度由弱到强,构造幅度由低到高。这种规律与中国周围板块特别是太平洋板块的运动规律有着明显的一致性,说明反转构造的发育主要是由东部太平洋板块运动体制的变化所引起的。因此研究反转构造不仅对我国的油气勘探具有十分现实的意义,而且对东部板块运动历史的恢复提供非常重要的信息。

## 第二节 正反转构造研究概述

### 一、正反转构造研究现状

尽管许多年前在 Lamplugh(1920 年)和 Stille(1924 年)的讨论中就已识别出反转盆地,但是明确用“反转”一词来描述反转盆地,还是由 Glennie 和 Boegner(1981 年)首先提出来的。最近十几年来,反转构造研究在石油地质学、石油地球物理学的新理论与方法的指导下获得了迅猛发展。1987 年,由英国皇家学会主持召开的“反转构造”会议,将“反转”这一概念进行了扩充,因为原有石油工业中对反转的理解已不适合时代要求了。最有意义的可能还是 Glennie 和 Boegner 的“负反转”一词的提出。反转构造的物理模拟和计算机几何定量模拟也正蒸蒸日上。

我们可以将反转构造研究划分为四个阶段:一是反转构造初始发展阶段;二是反转构造概念完善阶段;三是反转构造物理模拟阶段;四是反转构造的系统综合发展阶段。

#### 1. 启蒙期的反转构造研究

自 20 世纪二三十年代认识到反转构造以来,反转构造这个概念引入石油工业中已很多年了,我们可看到不断增多的实例,就是那些位于或靠近盆地中心的沉积层为后期挤压抬升而形成的反转构造。Malay 盆地是一个较早的很好的实例(Bubb 和 Hayash, 1980, 图 1-4)。Malay 盆地的剖面图是由 Jack Armitage 在马来西亚的《地质学会石油论文专集》上第一次公开发表的。盆地中心位于 SP600—700 之上,位于 SP1000 处的半地堑被一个基底隆起所

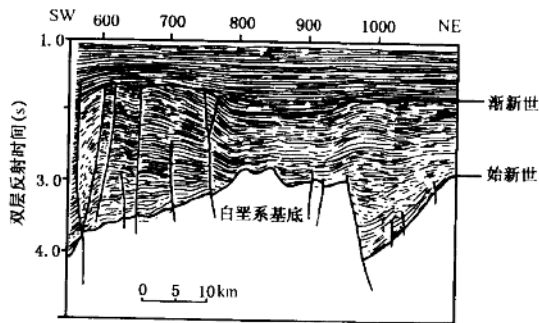


图 1-4 MALAY 盆地的一个反转构造实例的地震剖面图示  
垂向比例尺约为水平方向的 8 倍

分隔,这个隆起形成于沉积之中且一直发育到中新世末期,在下上新统沉积之前盆地主体大约有 1200m 厚的地层被剥蚀掉,压应力的持续导致上新世地层上拱呈弧形,由于最年轻的地层平伏于盆地之上,说明这种运动到很近的时期才停止。同样,半地堑经历了反转,虽然仅为很轻度的。盆地主体由于主断层的逆向错动,明显发生了反转。而在地震剖面上表现的是半地堑内的压应力效应,为褶皱而无明显断裂作用。

由此设想一个包括三期的演化模型:(1)白垩纪基底的正断层活动导致盆地形成;(2)随着断层活动减为零,快速沉积也逐渐减慢;(3)一个短时但迅速的挤压阶段以静止告终。

在石油公司的生产实践中,反转构造仅限于那些与 Malay 盆地相似的情形,他们发育于陆壳之上,最初,盆地沿正断层形成,以及一个三阶段的发展过程:伸展—静止—挤压。反转盆地不是碰撞构造的结果(除那些很不直接的外),它们不位于大陆边缘。在构造领域内它们是一个不可忽略的要素,也是一个独立的构造样式。

在这个阶段,反转构造并没有明确的定义,科学界仅仅大致了解这个概念在石油工业中的含义。

## 2. 概念完善期的反转构造研究

Zielger 博士认为,将盆地反转这一概念应用于克拉通背景之外进行实例构造分析,具有重要的价值,其观点得到很多人的支持。Hower, Zielger 和 Murphy 指出,断层的再活动并非是必需的,虽然多数情况下,扭张—拉伸盆地发展过程中涉及到断层系统。研究发现,反转构造或反转盆地不仅常出现在克拉通内的地区(如欧洲西北部)和弧后区(如 SUNDA 弧),而且还可以在巨大缝合带内出现(如玻利维亚的 ALTIPLANO 南部,叠于北极—北大西洋加里东造山带之上的志留纪盆地),还可以在被动陆缘局部构造单元之上(如挪威盆地, Bukowicz 和 Zielger, 1985)。反转盆地这种构造样式表明其变形是受挤压和压扭应力状态控制的。经验表明,压—压扭应力状态下的地堑和裂隙槽是以在水平应力下易于反转的薄的地壳为特征的。

盆地反转的程度变化可以很大,可以以局部轻度反转(原始盆地的深部结构仍保持,但其浅层部分变形为复背斜)到全部反转。因此,沿控制原始盆地结构的伸展断层的反转运动使地层回到零点(纯拉张到纯收缩的变化点或在该处上盘标志层面与区域标志层一致),甚至超过零点(Bally, 1984)。

Cooper 等(1989)认为反转盆地或反转构造是板内挤压变形的经典形式,这种变形的另一种解释就是基底断块沿陡立逆断层、逆冲断层和扭断层上冲(如美国 WIND 河山和德国 HARZ 山)。这些基底上冲是由先存的断裂系统在压—扭压作用下再活动发展的,它可能包括也可能不含有盆地和裂隙槽的反转。他们建议将“反转盆地”和“反转构造”这些术语仅限于那些在大规模拉张—扭张背景下发育的板内盆地的挤压—扭压变形,该定义保留了由石油工业中常规基础上使用的反转盆地发展而来的概念,因此,他们建议如果有人希望使用反转这一术语,无论在何种意义上他都应花少量文字说明他使用这一术语的真正含义。

De. Graumsky 教授列出了他更愿意在应用反转时少一些限制的原因,在西阿尔卑斯山中使用反转这一概念时改进了造山演化模式,并且为相似的造山带的解释提供了有力的工具,在 TETHYAN 区域造山带内应用的效果是很显著的。在造山带构造解释中,由于忽略构造反转作用的影响,由此引起了剖面建造、构造和区域构造解释中的严重错误(Coward, 1996)。

阿尔卑斯的经验表明:有些最可证实的反转可以从经历了相对轻度构造运动的亚阿尔卑斯式地区内找到。此外,反转概念可以帮助解释变形更强烈地区的几何形态,这被以下事实证

实:(1)从区块外部到内部变形强度的递变梯度;(2)内外带间的构造样式的比较;(3)每一区带内早期挤压阶段的几何形态的重建恢复。

例如,BELLEDONNE—PELVOUX 的“巨窗棂”构造和 PENNINIC 地区的“巨香肠”构造,它们开始继承了倾斜的拉伸断块,如果不将特提斯期的伸展断层作早阿尔卑斯反转加以考虑,要理解这些构造是不可能的,同样,对起源于特提斯半地堑的 HELVETIC 和 DIGNE 推覆体也是如此。

然而,在拉伸和挤压有同样强度的地区,无论在何种地球动力环境下,反转概念对于构造恢复具有极大的作用。这些地球动力环境可以包括克拉通内盆地和大洋盆地、陆内盆地和陆缘环境,以及低起伏区和造山带。

在造山带,将反转概念限制性地应用于轻度构造作用区域之外似乎合乎情理,但是必须注意的是,甚至在内带早期的挤压可能产生了后来叠加的反转构造。

1987 年,专家认为如果在褶皱带内外区内各级构造上可观测到挤压作用,如在变质区,这样的情况就不应该认为是反转。识别反转时必须寻找区域应力场的变化。反转描述了一种基于几何观察而确定的构造特征,并不局限于特定构造背景。

### 3. 反转构造的物理模拟研究

自 80 年代末,以 McClay 为代表的构造模拟研究组对反转构造比例物理模型的建立和类比模拟作了大量的研究工作,取得了大量的有重要价值的成果,这对反转构造的全面系统研究起着重要的促进作用。他们在敦伦大学皇家好来威模拟实验室对正反转构造进行了全面系统类比模拟研究 (McClay, 1989; Buchanan 和 McClay, 1991, 1992; Buchanan, 1991; Simmons, 1991),主要集中在二维倾滑反转类比模拟上,对铲形断层、面状断层、断坡—断坪铲形断层及多米诺断层组合进行了系列研究。实验模拟结果和引用的实例说明了当伸展盆地系遭受倾滑反转时所发育的构造的复杂性。类比模拟显示出与反转盆地断裂系实例有许多明显的相似。“标枪”状或“箭头”状同伸展期沉积楔几何形态是反转构造的典型特征。以断层为边界的构造发育于复活的主拆离断层系或盆地边界断层之上。下盘取直断层和后冲断层是实验模拟,也是自然界所见的普遍特征。边界断层的较陡部分的支撑效应产生压实特征和褶皱作用。这些特征既见于类比模拟,也可在反转的伸展断裂系的实例中见到。对质点位移路径的详细分析表明按比例类比模拟是了解盆地反转的几何形态和运动学特征的一种强有力的技术。

Koopman 等(1987)、McClay(1989)、Buchanan 和 McClay(1991)、Krantz(1991)、Roure 等(1992)和 Mitra(1993)对反转作用的物理模型研究作了阐述。然而,所有这些研究都集中于反转构造的二维几何形态研究。Keller 和 McClay(1995)展示了一系列三维正反转构造砂箱实验结果。这些实验也是在伦敦大学的皇家好来威断裂动力学模拟实验室做的。三维模拟能更好地了解反转的伸展断裂系沿走向的几何形态以及它们的逐步演化,尤其是了解断层的扩展作用。三维类比模拟取得了一些重要成果,给反转构造三维定量模拟提供了重要的地质信息。

(1)实验显示出反转期控制变形的四种明显的变形机制,它们是低摩擦基底拆离面的再活动、褶皱作用、断裂作用和与局部顺层缩短有关的断层向后旋转。

(2)这些三维模型的主要特征是断层位移沿走向的变化。这些变化产生了沿走向断层的分段性,这些断层要么在侧向上逐渐消亡,要么以侧列断坡构造形式横过位移转换带相互叠置。实验中产生的断层与自然界的伸展断层和逆断层有相似的行为和样式。

(3)先存伸展断层的结构对反转构造几何特征有明显的控制作用。这种控制作用是通过产生位于断层端部的断层集中带和定位不连续的位移带实现的,这些带一直活动,并影响了反

转期断裂的演化。无论在伸展期还是在反转期,都未观察到走滑调节带发育。

(4)逆断层较之伸展断层常形成较长的断片并调节较少的位移。无论在铲形断层模拟实验还是在断坡—断坪式断层模拟实验中,逆断层的  $r$  值比伸展断层普遍低些。

#### 4. 反转构造的系统综合研究

90年代中后期,反转构造的研究进入新的发展历史时期,即综合研究时期。在此阶段,反转构造的研究主要集中在反转构造动力机制、反转构造地质概念模型及反转构造平衡剖面模拟领域。

Letouzey(1990)利用构造地质学应力应变分析原理,结合实例对倾滑型、斜滑型、走滑型反转构造的发育机制进行了分析论证,他认为在构造反转过程中断裂最重要的参数是断裂相对于应力场的方位,此参数和缩短量控制先存断层是否重新活动或要么以逆冲要么以斜向滑动方式复活。Richard等(1995)通过分析断层复活的摩擦机制以研究在挤压作用下先存正断层可能复活的特殊应力和流体压力条件。通过对反转构造系列分析,发现:(1)在许多情况下,反转中断层复活具高度选择性,在一系列先存正断层中仅一些构造复活,或仅仅正断层系统内个别构造在挤压反转作用下以逆断层方式活动(Badley等,1989;Hayward and Graham,1989;Williams等,1989),很明显,定向的断层并不总是更优先地选择性复活。(2)在低到中等程度反转地区,反转断层中等到陡倾( $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ),且下盘相对少见低角度取直逆断层(Hayward and Graham,1989;Simpon等,1989)。在忽略应力场明显多相性的条件下,摩擦机理表明选择性复活存在如下三种可能解释:(1)在断块经历了最大的“多米诺”式伸展运动的地层,倾角最小的正断层最先复活;(2)沿特殊断层带具有异常低摩擦力物质的存在;(3)流体超压( $P_f > \text{静水压力}$ )的非均一性分布,在最大超压作用区反转复活,优先产生。最后一种可能性深受关注,也就是在反转过程中流体超压的产生是由于随着伸展应力状态向挤压应力状态的转换引起平均应力剧增,在伸展背景下岩石具有高的流体存储空间,而在挤压背景下岩石则有相对低的流体存储空间。陡倾断层的挤压复活可能需要超高压。在断层倾角超过摩擦破裂角(典型  $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ )情形下,超静岩压力的流体压力( $P_f > \sigma_3 = \sigma_v$ )是破裂定位的必须的前提条件。Lowell(1995)则从板块构造的角度论证了反转构造的发育机制,依据对实例的分析,认为盆地反转需要的作用力为外加水平力,而不是垂向作用力。在会聚构造背景下,盆地可能主要由于走滑作用而反转,如巴西东北滨岸的构造,或者由于纯挤压作用而反转,如摩洛哥亚特拉斯山脉的构造。其本质差别是,会聚走滑作用使相对高角度正断层以逆断层方式复活,而当这些断层经受导致低角度收缩断层产生的更加定向挤压作用的作用时,它们就难以复活。通常,反转是由走滑和挤压(压扭)联合作用引起的,因为最大压应力的方向与先存盆地构造走向之间存在一定的夹角。

在反转构造地质模型研究上,根据几何学原理和平衡剖面原理,仅对倾滑反转构造的地质模型作了比较详细的工作。Mitra(1993)根据实验和运动学模拟以及对实际构造的观察建立了面状和铲形断层的复活形成的反转构造的平衡模型。这些模型和相关的关键性参数提供了各类反转构造的一些典型特征,这些特征可用于资料品质不好的地区这类构造几何形态和运动学特征的分析。与Mitra不同的是,Coward(1996)分析了面状和铲形断层旋转复活对反转构造的控制作用,在盆地反转过程中旋转对断层重新活动起着制约作用,旋转既有水平旋转,又有垂直旋转。围绕水平轴的旋转能导致半地堑的缩短,引起半地堑内地层的挤出。围绕垂直轴的旋转导致非平面应变的发生,反转作用通常伴随走向滑动或斜向滑动。因此反转构造地质模型的发展趋势是研究开发模拟构造发展演化的三维空间地质模型,为其接近实际的恢

复研究提供坚实的理论基础。

反转构造计算机平衡剖面技术研制开发刚刚起步,在中国石油天然气集团公司的资助下,研制开发的正反转构造分析的平衡剖面技术,包括正演模拟技术和反演恢复技术,后面将详细阐述。

## 二、反转盆地或构造研究内容

从目前反转构造研究取得的成果来看,反转构造和构造反转是一项不可忽视的重要研究工作,这些成果无论对矿产资源的勘察,还是对全球板块构造的研究,都已发挥着重要的指导作用,并取得了一定的经济效益。结合前人的研究,我们认为反转构造分析侧重在几个方面。

### 1. 反转盆地的沉积学

- (1) 反转盆地的沉积背景;
- (2) 反转盆地的物源、古水流等;
- (3) 反转盆地的沉积相、沉积体系及沉积演化;
- (4) 反转构造对沉积的控制;
- (5) 反转盆地的层序地层。

### 2. 反转盆地或反转构造的几何学与运动学

(1) 构造样式研究:反转盆地的构造样式、倾滑反转构造、走滑诱导反转构造、压扭反转构造等;反转前盆地发育的构造样式、地堑或半地堑、冲断构造及其相关褶皱等

(2) 构造变形的几何学与运动学分析:确定断裂作用序列及断裂重新活动的时间;计算断层的生长指数和活动速率;计算地层的伸展量和缩短量;计算伸展率、缩短率及反转率;计算伸展构造幅度、挤压构造幅度及反转构造幅度;伸展构造、冲断构造、反转构造的几何演化;平衡地质剖面或三维地质模型建立;确定伸展作用、冲断作用及反转作用的性质、时间、期次、叠加改造的程度、运动方向等。

(3) 构造迁移分析:沉降中心、沉积中心、运动方向等迁移;

(4) 构造沉降分析;

(5) 构造变形的物理模拟和数学模拟。

### 3. 反转盆地或反转构造的动力学

(1) 反转盆地或反转构造的构造背景和构造应力场;

(2) 反转盆地或反转构造的构造演化;

(3) 反转盆地的岩石圈物理性质;

(4) 反转构造的应力状态;

(5) 反转盆地的流体变化特征;

(6) 反转盆地或反转构造的类型和成因机制。

### 4. 反转盆地或反转构造的油气聚集特点

(1) 反转盆地或反转构造的圈闭类型、圈闭发育特征;

(2) 反转盆地烃源岩分布、热演化、成熟度、初次运移、二次运移;

(3) 反转盆地的储盖组合;

(4) 反转盆地油气运移与聚集、运移时间、运移通道、成藏时期与成藏模式、流体势、成藏演化及油气系统。

### 第三节 正反转构造的样式

尽管不同的构造地质学家根据自己的构造分类准则对反转构造有不同的认识与划分,但是其分类必须既有理论价值,又有使用价值,对生产有很好的指导作用。

反转构造是指构造变形作用发生反向变化所产生的与前期构造性质相反的一种叠加构造,分为正反转构造和负反转构造。对正反转构造进行全面系统划分,有利于推动对正反转构造特征、形成机制、数学模拟、盆地形成演化及油气勘探分析研究的深化。

#### 一、前人的分类

Hayward 等(1989)从变形规模上对其进行了分类,将其划分为局部反转和区域反转,局部反转指只涉及一个早期断层反向滑移形成的单一构造的反转;区域反转指涉及整个盆地的反转,是由整个相连接的断层系统的反向作用而形成的。在此基础上,依据反转程度进一步将每类细分为三类:微弱反转,只有少量的反转滑移量,并在反转断层的上盘形成轻度褶皱;中等反转,具有较大的反转滑移量,上盘发育有较紧闭褶皱,断层的性质发生较明显的转化;强烈反转,有大量的反转滑移量,反转断层的上盘发育有倒转褶皱和逆断层。

Mitra(1993)根据反转构造伸展和挤压期褶皱和断裂的运动学关系来分类。最简单的反转构造表现为面状断层上的滑移量的逆转而无任何褶皱作用相伴产生。如果断裂作用同时伴有褶皱作用,将形成更复杂的构造。已识别出两种主要类型:(1)与面状或铲形断层相关的断展褶皱;(2)与铲形断层相关的断弯褶皱。

Letouzey(1990)从反转构造形成的力学角度,把正反转构造划分为两大类:(1)挤压倾滑型反转;(2)走滑控制型反转。在此基础上,Lowell(1995)将正反转构造划分为三大类:(1)挤压主导型反转;(2)走滑主导型反转;(3)压扭型反转。

#### 二、本书的分类

不同成因的正反转构造对油气运移、聚集和保存具有不同的控制作用。因而,对正反转构造进行形成机制分类,将对拉张盆地油气形成演化的研究,进一步扩大找油领域均有重要意义。在近几年工作的基础上,本文提出了一个正反转构造较为系统的分类方案。

构造作用方式的多样性,复杂性以及这些多样性,复杂性构造作用方式的相互叠加,导致盆地发育演化的复杂性和正反转构造类型的多样性。首先依据控制正反转构造发育断层的组合类型,将正反转构造分为单一型和复合型两大类;其次,基于正反转构造发育的力学机理,将单一型细分为挤压倾滑型,压扭型及走滑诱导型3亚类,将复合型细分为挤压倾滑复合型和压扭复合型2亚类;再次,依据正反转构造的发育机制及应力叠加方式,对每亚类正反转构造进一步细划,共14小类(表1-1,图1-5)。

##### 1. 单一型正反转构造

##### 1) 挤压倾滑型正反转构造

挤压倾滑型正反转构造是拉张盆地发育到晚期,区域先存拉张应力场变为挤压应力场,先存构造受到后期垂直走向挤压作用形成的。

张性盆地发育到反转期,应力场变为挤压应力场。在垂直构造走向的挤压应力场下,压应力优先在先存正断层处释放,正断层处因此产生倾向反转活动,即逆断运动,上盘地层褶皱形

表 1-1 正反转构造分类简表

|                       | 大类          | 亚 类             | 小 类         | 主要变形力 | 主要运动方式  |
|-----------------------|-------------|-----------------|-------------|-------|---------|
| 正<br>反<br>转<br>构<br>造 | 单<br>一<br>型 | 挤压倾滑型           | 断展型正反转构造    | 伸展→挤压 | 倾向→倾向滑动 |
|                       |             |                 | 断弯型正反转构造    |       |         |
|                       |             | 压扭型             | 张扭—压扭型正反转构造 | 张扭→压扭 | 斜向→斜向滑动 |
|                       |             |                 | 伸展—压扭型正反转构造 | 伸展→压扭 | 倾向→斜向滑动 |
|                       |             | 走滑诱导型           | 弯曲走滑型正反转构造  | 张剪→压剪 | 走向→走向滑动 |
|                       |             |                 | 叠复型正反转构造    |       |         |
|                       | 复<br>合<br>型 | 挤压<br>倾滑<br>复合型 | 取直断展型正反转构造  | 伸展→挤压 | 倾向→倾向滑动 |
|                       |             |                 | 取直断弯型正反转构造  |       |         |
|                       |             |                 | 背冲型正反转构造    |       |         |
|                       |             |                 | 对冲型正反转构造    |       |         |
|                       |             |                 | 多米诺型正反转构造   |       |         |
|                       |             | 压扭<br>复合型       | 斜向背冲型正反转构造  | 伸展→压扭 | 倾向→斜向滑动 |
|                       |             |                 | 斜向对冲型正反转构造  |       |         |
|                       |             |                 | 压扭多米诺型正反转构造 |       |         |

### 成正反转构造。

这类反转构造具有标志性的构造特征。在平面上:(1)其走向与先存构造走向或盆地轴向一致,即与挤压方向垂直;(2)发育部位及规模明显受控于先存构造部位及规模。在剖面上:(1)常表现下正上逆的特征;(2)反转构造产生于断裂上盘,一般正好位于凹陷上方,为近断裂翼窄、陡而远断裂翼宽、缓的不对称背斜;(3)断裂下盘几乎没有变形,地层基本保持原状;(4)断展型剖面形态为铲形,且常表现下正上逆的特征;(5)断弯型。断裂剖面形态常呈现“z”形,即上下缓中间陡,反转中断面向上产状变缓,以至发生顺层滑脱;(6)薄皮型。先存断裂没有或几乎没有反转活动,在该断裂处上覆层中发育滑脱逆断层。

松辽盆地的正反转构造大多为断展型反转构造,盆地东北断隆区表现得尤为明显。在平面上,这些反转构造发育于断裂上盘,完全受控于先存正断层,与先存正断层走向几乎一致(北东向),保持着平行或一致的排列组合关系,显示了挤压倾滑的特点。绥化反转构造位于绥化凹陷之上,具有如下特点:(1)背斜轴向为北东向,与其西侧的断层平行,位于凹陷之上;(2)两翼不对称,西翼陡窄,东翼缓倾;(3)深层褶皱弱,向浅层渐强;(4)剖面上断裂具上陡下缓,下正上逆的特征;(5)越过断层变形程度迅速降低,下盘地层几乎没有变形。这类构造在国外盆地中也常有,如苏门答腊 RAMBUTAN 油田的储油构造<sup>[6]</sup>,北海南部 DOWSING 断裂区及其它构造区<sup>[7]</sup>。松辽盆地长春岭正反转构造即为断弯型正反转构造,在国外也常见,如澳大利亚 BASS 盆地一个构造和英国 BRISTOL 海峡盆地北部的某构造均为断弯型正反转构造。这些构造明显具有前述的典型特征。

### 2)压扭型正反转构造

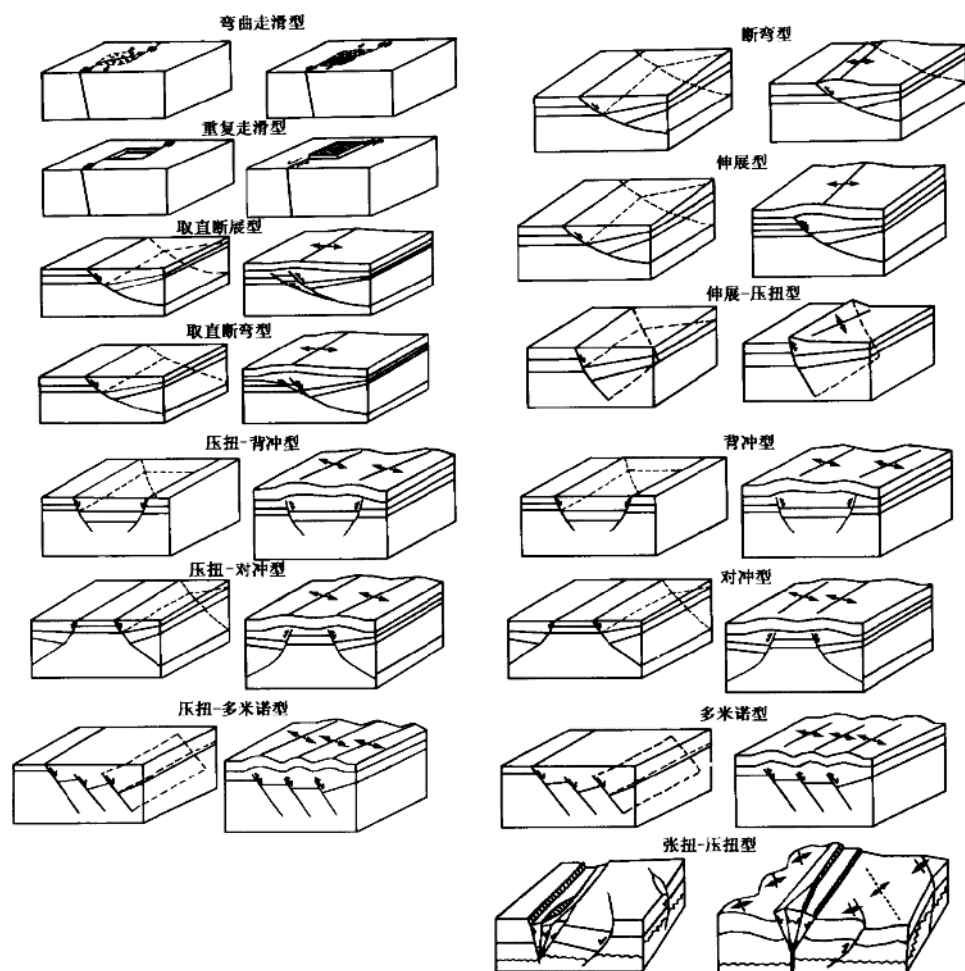


图 1-5 正反转构造分类示意

压扭型正反构造是指张扭断层因受力方式变为压扭所产生的与扭动断层小角度相交的反转构造,它沿盆地内扭动断层带展布。

压扭型正反转构造发生在裂谷盆地的反转期,即由前期的拉张或张扭应力场转变为压扭应力场的时期。大规模扭动断层的运动方向发生了反转,从左行或右行张扭变为右行或左行压扭或倾向拉张,断块的运动方式也相应地由扭动倾向伸展差异拉伸沉降变为扭动差异挤压上升。

压扭型正反转构造具有标志性特征。在平面上:(1)多发育于扭动断层变动带内;(2)沿扭动断层明显呈雁行排列;(3)与扭动断层呈小角度相交;(4)伸展—张扭型,拉张期构造走向与断层走向或盆地轴向一致,反转期构造与断层呈小角度相交。在剖面上:(1)断层常具有扭动标志性特征——花状构造;(2)宽度明显受断裂变动带宽度的控制,且叠加在早期凹陷部位上;(3)断裂附近变形带极窄;(4)张扭—压扭型,两期构造的叠加有相当好的继承性;(5)伸展—压扭型,后期构造对前期构造有较强的改造;表现为冲起构造(POP—UP),与张扭—压扭型的显著差别为其断面相对较缓。



珠江口盆地构造为典型的张扭—压扭型正反转构造。控制凹陷南部的主边界断层,断面陡立,并形成向上撒开的分支断裂,构成典型的负花状构造样式,凹陷内近断层处地层变形强烈;反转构造恰好迭加其上,两套地层产状不一致。断裂附近变形带极窄,且反转构造恰好发育在断裂变形带内,越过变形带拗陷期沉积层段未发生褶皱。南海北部陆缘的其他盆地(如北部弯盆地)也广泛发育类似的反转构造,其变形特征相似,发育的层位及时代相同,沿断裂呈雁形排列。它们是晚第三纪时期,印度板块与欧亚板块的碰撞及向北推进速度的变化导致红河等大型扭断层的反转所产生的。辽河盆地东部凹陷大部分构造也为典型张扭—压扭型正反转构造。松辽盆地东南隆起区德惠凹陷农安—万鑫塔构造。国外也常见,例如阿根廷 NEUQUEN 盆地 HUINCUL 构造亦为此类反转构造。辽河盆地西部凹陷东侧冷家—台安构造带的反转构造和东海西湖凹陷中部反转构造为伸展—压扭型正反转构造,从东海西湖凹陷反转构造发育史分析可知,张性构造走向与断层走向或盆地轴向一致,正反转构造与断层呈小角度相交,从剖面可见,主干断层并不象张扭—压扭型的主干断层那样笔直插入基底,而是相对较缓,正反转构造是在改造张性构造基础上发育起来的,继承性较差。DANISH 中央地堑反转构造,中晚侏罗世倾滑伸展构造在晚白垩世压扭应力场作用下重新活动而产生的。

### 3) 走滑诱导型正反转构造

走滑诱导型正反转构造是指因走滑断裂相对运动方向的反向,在走滑断裂带走向变化的区段或雁列式断层重复带内形成的与走滑断层近于直交的正反转构造。

走滑诱导型正反转构造发生在剪切应力场反转时期,大规模走滑断层的运动方向发生反转,从左行或右行走滑变为右行或左行走滑,从而走向变化区段或雁行断层重复带内拉张应力场变为挤压应力场,先期的局部拉升沉降变为局部挤压隆升。走滑诱导型正反转构造具有的特征,在平面上表现为:(1)发育在走滑断层走向变化的区段或雁列断层重叠带,一般为与区域构造不协调的局部构造现象;(2)与走滑断层走向或挤压力方向近于直交。在剖面上:(1)背斜限于走滑断层变形带内,褶皱强烈且不对称;(2)断裂下盘一般也可表现出较强的变形;(3)断裂面一般较陡。

印度尼西亚苏门答中央盆地的 TANDUN 油田的储油构造属于弯曲—走滑型正反转构造。在平面上,反转构造发育于 PUNGUT—TANDUN 走滑断层 TANDUN 走向变化段内,其规模完全受控于断层规模,褶皱轴向与走向变化段一致;剖面变形情况与前述变形特征完全相同。新西兰南岛西海岸的反转构造也为此类正反转构造。南 Baltic 海 RøNNE 地堑内发育的反转构造为叠复—走滑型正反转构造,RøNNE 地堑位于 SORGENFRIE TORNQUIST 走滑断裂带与 TEISSEYRE TORNQUIST 走滑断裂带的重叠段内,其反转构造的产生是由于右行走滑运动变为左行走滑运动而引起的,褶皱轴与走滑断裂以大角度相交。

## 2. 复合型正反转构造

### 1) 挤压倾滑复合型正反转构造

取直断展型,取直断弯型正反转构造是指区域先存拉张应力场变为挤压应力场,在挤压应力作用下,于先存断层下盘发生取平作用形成倾角低于主断层的新冲断层,先存正断层部分地发生反转,由它们共同作用产生的反转构造。

这两小类反转构造具有标志性的构造特征。在平面上:(1)其走向与先存构造走向或盆地轴向一致;(2)发育部位及规模明显受控于先存构造的部位和规模。在剖面上:(1)取直断展型,断裂剖面形态为铲形;(2)取直断弯型,新产生断裂剖面形态为“z”形,即上部和下部的倾角低,甚至顺层,中间倾角较高;(3)在先存断裂下盘新产生低角度逆断层;(4)断裂下盘一般没有