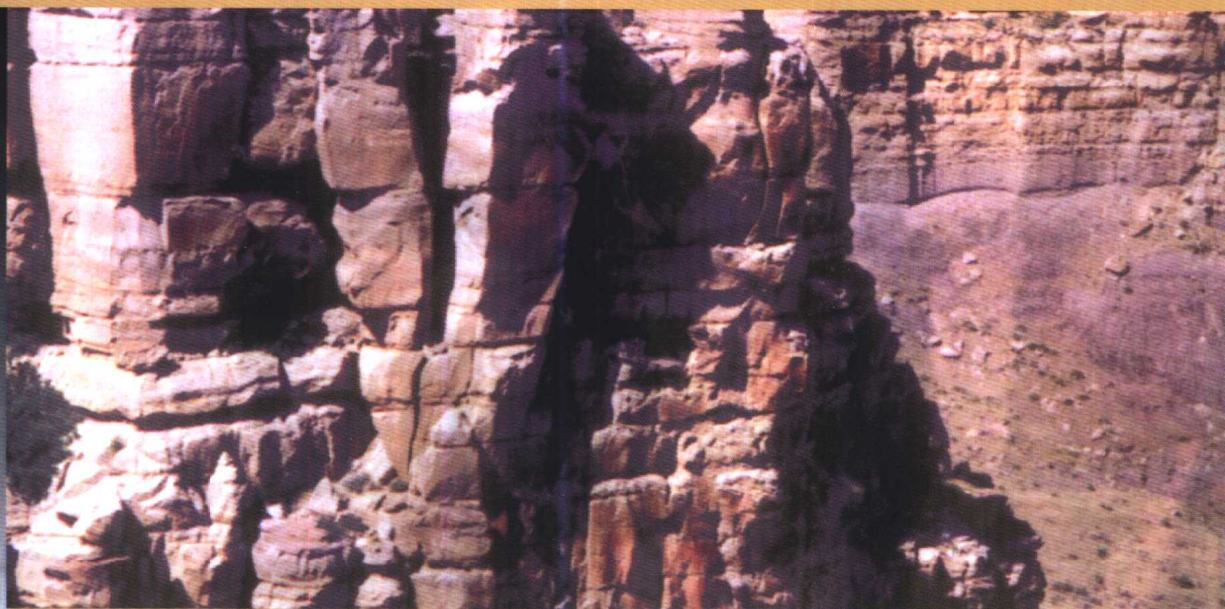




复杂断块油藏构造表征

李 阳 著



石油工业出版社

复杂断块油藏构造表征

李 阳 著

2012.12

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以东营凹陷中央隆起带的东辛油田和现河庄油田为研究对象,应用现代油藏构造表征技术,提出建立油区规模、油田规模和油藏规模等构造模式及控油断层封闭开启模式,揭示了油藏构造对剩余油形成机理和分布规律的控制作用。

本书可作为石油构造、油田开发地质学研究和工程技术人员的重要参考书,也可供有关高等院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

复杂断块油藏构造表征/李阳著.

北京:石油工业出版社,2001.12

ISBN 7-5021-3667-3

I. 复…

II. 李…

III. 断层油气藏-地质构造-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 097978 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 12 印张 304 千字 印 1—1000

2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3667-3/TE·2695

定价:25.00 元

序

《复杂断块油藏构造表征》一书是李阳从事油田开发地质学研究和生产实践近 20 年的科研成果。作者在油田开发地质方面有较强的造诣,为我国石油工业发展做出了突出的贡献,现任胜利石油管理局总地质师兼胜利石油集团公司副总裁。复杂断块油藏占我国东部油田总储量的三分之一以上,各油田已进入高含水期,揭示这类断块油藏剩余油形成机理,阐明剩余油分布规律,是当前国内和国际科技攻关的学科前沿课题和难题。作者抓住上述这一主要矛盾,以最具代表性的东营凹陷中央隆起带的东辛油田和现河庄油田为解剖对象,针对这两个油田断层极多,断块面积很小,构造面貌极为破碎,控油断层封闭开启性变化大,剩余油分布复杂,以多学科理论为指导,应用国内外现代油藏构造表征的新技术,将数学模拟和物理模拟相结合,提出建立油区规模、油田规模和油藏规模等的构造模式及控油断层封闭开启模式,揭示油藏构造对剩余油形成机理和分布规律的控制作用,从而在指导油田开发方面取得显著成效。

该书的主要特色是首次系统地阐明了复杂断块油藏五类构造模式的概念、特征、研究内容、表征方法及其对剩余油形成分布的控制作用,同时还预测了研究区的剩余油分布,从而为复杂断块油藏挖潜,提高原油采收率提供了科学依据。《复杂断块油藏构造表征》一书发展和提高了油田开发地质学研究的理论和学术水平,是该学科领域的主要参考书。

李阳
2001年12月

前言

我国东部和西部含油气盆地中广泛发育了复杂断块油气藏,这类油气田和油气藏在我国不仅数量很多,总储量也很大,是世界同类油田中储量最多的国家。这类油气藏形成的地质环境很复杂,表现为伸展、走滑和反转构造模式共存,断层数量很多,构造面貌极为破碎,断裂带普遍存在着不同数量和类型的构造岩,主控断层带具有同生性和复杂的演化历史,主断层赋存在复合、联合和反转应力场中,控油断层具有不同的封闭开启模式,主控断层控制了油气的运聚和散失。每个断块均有各自的油水系统,导致在一个油田内油水分布错综复杂。通过长期的勘探开发实践,现已形成了一套行之有效的勘探开发的理论和方法,在指导油田勘探和开发过程中,取得了很好的成果和显著的经济效益。但由于这类油气藏形成的地质环境复杂,故至今尚有很多问题未能解决,譬如,断层封闭开启诸参数如何定量表征?断层封闭开启程度与油气富集的关系?勘探初期怎样预测断块油藏的含油范围和油藏高度等等一系列地质难题。笔者认为以多学科理论为指导,综合应用多学科技术和方法,将数学模拟和物理模拟相结合,分别建好油区、油田、油藏三级规模的构造模型,同时还要建好控油断层纵向、侧向封闭开启模式,才能更好解决上述疑难问题,揭示断块油藏形成机制和油气富集规律,指导油田勘探和开发实践。该书是笔者长期科研和生产实践的总结,书中以众所周知的东营凹陷中央隆起带的东辛和现河庄两个复杂断块油田为例,研究和解剖了上述两个油田的复杂断块油藏主要特征、形成机制、分布规律,建立了油区、油田和油藏三级构造模式;将数学模拟和物理模拟相结合,定性、定量研究了控油断层封闭开启性、封闭开启史、封闭开启机理,建立了封闭开启模式和封闭界限值,同时还进行了油藏预测。

本书共分8章,由4部分内容组成。其中第一部分即第一章主要论述复杂断块油藏构造、油藏及保存等七个方面的特征,同时还论述了油藏构造表征原理和方法以及油藏构造表征的研究现状和展望。第二部分内容包括第二章至第五章,其主要内容是将油区、油田和油藏三级构造的综合研究与数学模拟和物理模拟相结合,深入地论述了油区、油田和油藏三级构造几何学、运动学和动力学,同时还论述了研究区构造应力场和流体势场的数学模拟和控油构造的物理模拟,剖析了复杂断块油藏构造模式形成机理和分布规律。第三部分包括第六章和第七章,主要阐述控油断层纵向和侧向封闭和开启性的定性、定量研究和表征,还论述了控油断层封闭开启史、封闭开启机理、封闭开启性综合评价,最后建立了控油断层的封闭开启模式。第四部分内容即第八章简述了断块油藏预测的原理,对研究区的有利断块区进行了预测。

该书主要特色是以多学科理论为指导,应用国内外现代油藏构造表征的新技术,将数学模拟和物理模拟相结合,建立了油区规模,油田规模和油藏规模的三级构造模式以及对油气藏形成、分布的控制作用,进而指导了油田勘探和开发。

该书在编写过程中得到了叶连俊院士的悉心指导并为该书作序,刘泽容教授、李任伟研究员等给予本人指导和许多启迪,在此表示衷心感谢,还要感谢胜利石油管理局地质研究院、东辛采油厂、现河采油厂等单位有关同志的大力帮助以及赵密福博士等提供的帮助。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 油藏构造特征	(1)
一、伸展、走滑和反转构造样式共存	(1)
二、断层数量很多,构造极为破碎	(2)
三、断裂带普遍成生了不同数量和类型的构造岩	(2)
四、主控断层常具有同生性和复杂的构造演化历史	(3)
五、主断层在复合、联合及反转应力场中成生	(4)
六、控油断层具有不同的封闭开启模式	(5)
七、主控断层控制油气的运移和聚散	(5)
第二节 油藏构造表征的原理和方法	(7)
一、油藏构造研究	(8)
二、油藏构造与油气关系	(9)
三、油藏构造物理模拟	(9)
四、油藏构造表征与油气预测	(10)
第三节 油藏构造表征研究现状和展望	(10)
一、断层封闭开启性研究	(10)
二、构造应力场研究	(11)
三、构造物理模拟研究	(11)
第二章 东营凹陷中央隆起带油区构造研究	(13)
第一节 油区构造几何学研究	(13)
一、油区构造背景及形成机制	(13)
二、中央隆起带构造单元划分	(18)
第二节 中央隆起带油藏构造运动学研究	(21)
一、基底水平伸展运动及盆地伸展量分析	(21)
二、中央隆起带沉降史、埋藏史分析	(24)
三、中央隆起带垂直差异升降运动	(26)
第三节 中央隆起带油藏构造动力学研究	(30)
一、东营凹陷构造形成机制研究	(30)
二、中央隆起带构造发育史研究	(34)
第四节 不同级序构造相关性研究	(40)
一、序次的概念	(40)
二、构造序次的划分	(41)
三、构造形迹力学性质的转化	(43)
四、构造形迹等级和序次的关系	(44)
第五节 断层调节带研究	(45)

一、断层调节带的概念·····	(45)
二、断层调节带分类·····	(45)
三、中央隆起带的断层调节带·····	(47)
四、断层调节带在油气勘探中的意义·····	(47)
第三章 东营凹陷构造应力场研究 ·····	(49)
第一节 构造应力场驱油的动力学分析 ·····	(49)
一、地应力导致岩体变形·····	(49)
二、有效应力原理·····	(50)
三、流体势·····	(51)
四、岩层内流体运动的微分方程·····	(52)
五、流体势微分方程的有限元公式·····	(53)
第二节 构造应力场数值模拟的原理及方法 ·····	(54)
一、构造应力场有限元数值模拟基本原理·····	(54)
二、有限元数值模拟的方法和步骤·····	(56)
第三节 中央隆起带构造应力场数值模拟 ·····	(56)
一、地质模型的建立·····	(56)
二、数学模型的建立·····	(57)
第四节 东营凹陷构造应力场数值模拟 ·····	(59)
一、沙一期构造应力场研究·····	(59)
二、东营—馆陶期构造应力场研究·····	(60)
三、明化镇—现今构造应力场研究·····	(61)
第五节 成藏期应力场与油气运聚的联系 ·····	(63)
第四章 油藏构造模式及对油气的控制作用 ·····	(66)
第一节 油藏构造模式研究 ·····	(66)
一、构造模式的概念·····	(66)
二、断面形态类型及构造模式分类·····	(66)
第二节 中央隆起带含油气圈闭 ·····	(67)
一、背斜圈闭·····	(67)
二、鼻状构造圈闭·····	(69)
三、断层圈闭·····	(70)
第三节 油藏构造形成机制研究 ·····	(70)
一、伸展构造形成机制·····	(70)
二、走滑构造形成机制·····	(76)
第四节 油藏断块模式与油气聚集的关系 ·····	(79)
一、平行断块模式·····	(80)
二、环状—放射状断块模式·····	(82)
三、墙角式断块模式·····	(84)
四、树枝状弧形断块模式·····	(88)
五、“入”字形断块模式·····	(91)
第五章 石油构造物理模拟研究 ·····	(94)

第一节 石油构造物理模拟的目的和意义	(94)
第二节 构造物理模拟发展的现状和展望	(95)
一、构造模拟发展现状	(95)
二、构造物理模拟的展望	(98)
第三节 构造模拟的原理和方法	(98)
一、构造数学模拟	(98)
二、构造物理模拟	(98)
第四节 泥料模拟实验	(99)
一、油区构造物理模拟原型的建立	(99)
二、油田、油藏构造物理模拟原型的建立	(100)
三、泥料模拟的原则	(101)
四、泥料模拟装置	(104)
五、泥料模型材料选择	(107)
六、模拟实验步骤	(109)
第五节 油区、油田构造物理模拟实验	(110)
第六章 断层纵向封闭开启性定性定量研究	(113)
第一节 断层具纵向封闭和开启的两重性	(113)
第二节 断层纵向封闭和开启的力学机制	(120)
一、断裂带脉的形成模式	(120)
二、断层开启中的地震泵作用	(122)
三、东营凹陷流体包裹体分析	(124)
四、沸腾包裹体的发现为油气脉动式成藏提供依据	(126)
五、东营凹陷油气纵向运移控制因素研究	(128)
第三节 东营凹陷中央隆起带油气纵向成藏模式	(132)
一、概述	(132)
二、喷水冒沙现象	(133)
三、东营凹陷中央隆起带油气纵向成藏模式	(134)
第七章 断层侧向封闭开启性研究和评价	(140)
第一节 断层侧向封闭开启性的影响参数研究	(141)
一、断层的力学机制研究	(141)
二、断层两侧岩性配置关系	(146)
三、泥岩沾污带的定量表征	(150)
四、断层活动时期与油气运移时期的配置	(153)
第二节 断层侧向封闭开启史研究	(154)
一、断层侧向封闭开启史的基础研究	(154)
二、成藏期断层侧向封闭开启性影响因素的定性分析和定量参数的求取	(156)
第三节 断层封闭机理研究	(159)
第四节 断层封闭开启性模糊综合评判	(161)
一、模糊综合评判的数学模型	(161)
二、单因素评判矩阵的建立	(162)

第五节 断层封闭模式..... (165)

 一、主应力封堵模式 (166)

 二、岩性配置封堵模式 (166)

 三、时间配置封堵模式 (167)

 四、泥岩沾污带封堵模式 (167)

第八章 断块油藏油气预测..... (168)

 第一节 断块油藏油气预测原理..... (168)

 一、断层侧向封闭开启性与油藏的分布 (168)

 二、断层的纵向封闭开启性与油藏预测的关系 (170)

 第二节 中央隆起带断块油藏油气预测..... (170)

 一、地震层速度在断块油藏中的油气预测 (170)

 二、从断层封闭机理上预测 (171)

 三、油气富层层位的预测 (171)

 四、复杂断块区的进一步勘探问题 (173)

 五、复杂断块油藏剩余油分布规律研究 (174)

参考文献..... (177)

第一章 绪 论

断裂作为构造运动留下的构造形迹,是地壳构造演化过程中的突出表现。在陆相盆地中,与其它构造类型相比,断裂的控油作用显得尤为重要。断裂活动的普遍性、幕式性、层次性、差异性、封闭开启性等特点和规律决定了它与地壳中油气的形成与分布存在着必然的联系。

第一节 油藏构造特征

我国东部含油气断陷盆地中广泛发育有复杂断块油气田,这类油田不仅数量多,而且它的总储量也很大,是世界上同类油田在总储量中占有比例最多的。该类油藏的断裂系统十分复杂,且构造破碎、断层多、断块小。由于断层的相互切割,各断块及断块内各含油层系均具有独立的油水系统,导致在一个油田内油水分布错综复杂,故这类油气藏的主要特征都与断层有关,或者说主要是受断层的控制。从我们研究解剖或揭示的东部复杂断块油气田来看,它们的构造特征主要有六个方面:①伸展、走滑和反转构造样式共存;②断层数量很多、构造极为破碎;③断裂带普遍生成了不同数量和类型的构造岩;④主控断层常具有同生性和复杂的构造演化历史;⑤主要断裂在联合或复合应力场环境中生成;⑥控油断层具有不同的封闭开启模式;⑦主控断层控制油气聚集和散失。

一、伸展、走滑和反转构造样式共存

断块构造样式是地壳上岩石受力后发育的变形场的产物,不同的断块构造样式,反映了不同的地质变形环境和不同的应力方式和应力场。长期以来,绝大部分地质学家们认为我国东部的断陷湖盆在新生代时期属于伸展作用形成的盆地。通过我们长期的科研实践,揭示了东部断陷湖盆内的构造特征、形成机制及其对油气的控制作用,认为东部新生代断陷湖盆内,除广泛发育在区域性引张作用下形成的、并具有一套以正断层为主的地堑、地垒、阶梯状断层、箕状构造、剥离断层和大型断陷盆地(华北盆地)等具有特色的典型伸展构造系统外,同时还发育了与走向滑动断层相伴生的构造,具有一套以雁列式褶皱、断裂、断块隆起和断陷盆地、棋盘格式断裂、帚状断裂、“入”字型、弧形断裂和花状构造等多种具有特色的直扭和旋扭构造系统。特别是其中的雁列式和帚状构造,规模很大,级序也高,这在郯庐断裂带两侧的冀鲁帚状构造和苏北构造都有充分体现。如郯庐断裂两侧的冀鲁帚状构造内的拗陷和隆起,凹陷和凸起,褶皱和断裂多为雁行排列,同时控制了华北盆地内济阳拗陷、埕宁隆起、黄骅拗陷、沧县隆起、冀中拗陷和临清拗陷及其中低序凹陷、凸起直至二级构造带以及它们派生的低级序构造或断裂的形成和演化,从而也控制凹陷内油气的形成和分布。上述与伸展构造和走滑构造有关的两种类型断块样式,不仅它们的特征、形成机制不同,其控油规律也各不相同,它们常常是成生在同一个地区,形成复杂的构造面貌和油气分布,故研究和区分伸展构造和走滑构造有关的断块样式,揭示它们的形成机制和控油规律,对指导东部油气勘探有重要的理论和实际意义。

东营凹陷在 E_k 和 E_{s_4} 沉积时,整个凹陷的应力场表现为 NNE—SSW 方向的拉伸作用,但从 E_{s_3} 至 E_d 沉积来看,表明控盆构造应力场发生盆地的活动主要受控于 NW—SE 向的拉

伸力作用。而进入晚第三纪以来,东营凹陷的构造活动主要受 NEE 向挤压应力场控制(万天丰,1994),在这种区域应力场的作用下,东营凹陷绝大多数 NE 向断裂表现出右旋剪切特点。但一些 NW 向断裂则表现出左旋剪切特点。我们知道,这种构造应力场的转化,是反转构造形成的关键。而这种反转构造又对油气资源的聚集和分布起着重要的作用。

二、断层数量很多、构造极为破碎

油藏构造面貌极为复杂,其复杂性主要来源于众多而又密集的断层。这些断层将构造切割破碎,形成规模不等的断块,组成形态和成因各异的断块群,从而控制断块油气藏的形成和分布。勘探开发实践证明,在一个复杂断块群分布区发育的断层可达数百条,这些断层将油田切割成数百个断块区,各断块面积大于 1km^2 的为数不多,且大多断块面积不足 0.5km^2 。在复杂断块区内,90%以上的钻井都钻遇断层,平均每口井钻遇断点一般为 3~4 个。如统计东辛油田 1400 口完钻井中,钻遇断层的井有 1330 口,占 95%,平均每口井钻遇 3.4 个断点。而文昌寨油田断层则更密集。1986 年统计全油田 180 口井,只有少数浅井没有钻遇断点。钻遇 5 个以上断点的井有 78 口,占 43.3%,全油田平均每口井钻遇断点 4.4 个,这就意味着平均每口井穿过了 5 个以上的断块。该油田含油井段及断层发育井段都从 1400m 开始,油井平均深度约 2400m。也就是说平均 4 个以上断点是在大约 1000m 的井段中遇到的,可见其复杂性。由此导致了其断块油气藏数目多,规模小。油田勘探开发实践也证实,在每一个含油断块中,在一定深度范围内,都发育了少则十几个多则几十个油气藏,若将某一复杂断块群油气藏作为一个整体来看,它们所包含的油气藏数量会更多,可能有数百个规模不大的油气藏,每个油气藏都自成油水系统,使全油田油水关系呈现错综复杂的局面。

复杂断块油田由于其断层多,构造面貌破碎较严重,但每个断块的内部构造一般都非常简单,整个断块内地层产状变化不大。大多数断块地层倾角小,只有少数经历强烈掀斜的断块,倾角较大,可达 $20^\circ\sim 30^\circ$ 以上。断块内构造等高线一般较平直或者微微弯曲,很少有地层受到强烈褶曲的现象。除了很大的断块内部可能有局部隆起外,一般断块都是单向倾斜的。

油藏构造的总体构造形态一般都是某种程度的正向构造。由于被大量断层切割,复杂断块油田总体构造形态不完整,而且形态呈多种多样。有四翼周全的穹窿和穹窿背斜,如文明寨油田。也有三面明显下倾一面上或极微弱下倾的鼻状构造,如东辛油田的东营构造。也有两端倾没不明显的狭长背斜,如东辛油田的辛镇构造和文留油田等。也有基本上向一个方向倾斜的单斜,如现河庄油田等。

三、断裂带普遍生成了不同数量和类型的构造岩

断层岩是在特定地质环境下形成的,其结构特征直接反映其所处环境的地质构造运动特性。地质学者对于断层岩的研究可追溯到数世纪前,但据文献最早记载的是英国的 Lapworth (1885),他把苏格兰西北部 Mine 的逆冲断层中所观察到的断层岩称为糜棱岩(Mylonite)。Lapworth 所记载的糜棱岩现已被公认是在韧性剪切变形过程中产生的。从 19 世纪末至 20 世纪后期,有关断层岩成因的记载用语比较混乱,比如:碎裂岩(Cataclastic rocks, Water & Campbell, 1935; Higgins, 1971)、碎裂变质岩(王嘉荫, 1978)、构造岩(孙岩等, 1979)、压碎岩(吉田胜, 1978; 高术秀雄, 1982)等。直到 70 年代后期, Sibson (1977) 首先明确地把与断层运动有关的断层带中产生的岩石称为断层岩。

控油断层广泛发育了不同类型、不同规模、不同组构和成分的断层岩,是油藏构造的又一

特征。这里的断层岩,包括浅层次脆性岩石伴生的碎裂岩系和深层次韧性岩石伴生的糜棱岩系两大类。依据断层岩的特征,可以确定断层的存在,识别断层的属性,为分析确定断层两盘运动方向提供依据;同时还能测定或分析断层形成时的温度和压力,为判断断层形成深度和形成环境的温压状态提供信息。除一般的断层岩外,考虑到控油断层的封闭机理还可分出剪切带、泥岩沾污带、碎裂岩三种特殊类型的断层岩。剪切带可以看作是一种特殊类型的断层岩。这种断层岩是在同生正断层两盘沉积物尚未固结成岩的特定地质条件下,断层的下盘相对向上滑动,在下盘的上部,多形成正牵引不对称背斜;断层的上盘相对向下滑动,在上盘的下部,多形成正牵引不对称向斜。牵引背斜和向斜的陡翼都靠近断层,因而在陡翼附近派生低级序局部压扭性应力。在断层两盘滑动和陡翼派生的局部压扭性应力联合作用下,牵引构造陡翼尚未固结成岩的高含水泥岩层沿着断裂带发生塑性流动,被拉长减薄,甚至有些为线形条带,连续分布,形成剪切带。这种剪切带结构致密,孔喉半径很小,孔渗性能很差,对油气可以形成一定的封堵能力。泥岩沾污带也是一种特殊类型的断层岩,在被断地层的砂泥岩层序中是普遍存在的现象。实践表明,当泥岩累计厚度不小于被断地层总厚度的 25% 时,这种断层在位移和滑动过程中,易形成以变形泥岩为主并夹少量砂岩碎块细粒化、泥化的断层岩,即所谓的泥岩沾污带。这种泥岩沾污带断层岩结构致密,颗粒均一化,孔隙度比原岩减少,孔渗性能差,具有良好封堵流体的能力。碎裂岩指断层位移期间的颗粒挤压和破碎作用,形成的断层泥明显降低了断层带的渗透性。在断层变形带内,由于碎裂作用使得孔隙度值比围岩的小一个数量级,渗透率比围岩中的小 3 个数量级(Gibson,1994)。对断层岩岩心微观结构的研究表明,碎裂产生的断层泥可以封堵住 300m 高的油柱或更多的烃柱。控制碎裂物发育的主要因素是断层移动时作用在断面上的有效法向应力的。上述三种类型的断层岩其形成的地质环境有所不同,但都是油气的良好遮挡面,可以构成断块油藏重要的圈闭机制,在它们发育的地区,常常也是油气富集的地区。

四、主控断层常具有同生性和复杂的构造演化历史

王平(1981)就指出复杂断块油田形成的决定因素是长期继承性断裂活动覆盖了油气运移期。这是具体分析了东辛、永安、临盘等断块油田的断层、构造发育历史与油气运移历史后得出的结论。这一论断经历了二十多年来大量实践的检验,可以说凡是新发现的复杂断块油田都普遍符合这一条件。

我国东部油区的断陷盆地可分为坳陷、凹陷和洼陷等三级,它们的构造剖面形态都为一翼陡另一翼缓的箕状盆地。在凹陷内中央隆起带的二级断层或凹陷内其它二级构造带的主断层以及大部分三级断层,都常具有同生性,它们在第三纪早期已形成,并且控制了中央隆起带油气藏的形成与分布。在上述各级盆地的陡翼,也普遍发育了同生铲形断层。由于它们活动期长,强度大,落差也大,可为一、两条或三条近于平行的断层组成断裂带。该断裂带上升盘为物源区,下降盘为沉积区,沉积了第三系不同成因类型的砂体。在湖盆的缓翼,有时也发育一条活动强度小、落差也小的同生断层构成湖盆缓坡边界。其中控制坳陷和凹陷的主断层形成更早,在燕山末期已形成,后至喜马拉雅期再次活动,即活动期较长,从而控制孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组的生、储、盖层和圈闭的发育与分布。这类同生断层下部形成早,落差大(可达 500~1000m),断面倾角较缓(约为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$),承受压应力很大,可达 50MPa 以上,大于一般岩石抗压强度,呈挤压状态。而断层上部形成时期晚,落差较小(一般 $< 500\text{m}$),断面倾角较陡(通常 $> 50^{\circ}$),断面承受压应力较小,约为 20MPa 左右,小于一般岩石抗压强度,呈引

张状态。这类断层发育在高含水的砂泥岩塑性地层中,当断层两盘相对运动时,下盘向上滑动,易形成正牵引背斜、反向屋脊断块、断阶带,断面附近泥岩层发生塑性流动形成剪切带和泥岩沾污带,使断层具有封闭性,为大量的油气创造了良好的聚集场所。研究中,我们解剖了胜利、江苏、中原、冀东、大港和辽河等各油田内为数众多的断块油气藏。发现分布在各个油田或同一油田内的各个断块油气藏,尽管它们的含油层位、油层数量和特征各自有所不同,但油层分布具有共同的规律,即油层垂向分布深度范围大,在一个断块内通常都发育了多套含油层系,有些油田沙河街组的沙四段、沙三段、沙二段和沙一段都是重要的含油层系,同时位于浅层的东营组、馆陶组甚至明化镇组内部都发育了油层,累计含油井段长度很大,可达 2000m,其原因与油区中断层多次活动,发育期较长,断层切割层系较多和断层在活动期和静止期性质转化有关。相反,在一个断块内,侧向上单一油层分布范围较小,仅限于一个断块展布的范围,明显受断层局限。从解剖的众多油气藏来看,在各个断块群油气藏内的每一个油层,在平面上的分布面积一般都较小,很少超过断块展布的范围,绝大多数单层含油面积均小于 1km^2 ,且介于 $0.1\sim 1\text{km}^2$ 之间,而含油面积小于 0.1km^2 的也不少,它们只是由于在平面上可以叠合连片,从而导致油气分布范围广。

从解剖金湖凹陷的崔庄—范庄地区(吴堡至三垛期),在同一区域应力方式和应力场作用下范庄(N55°E)、崔 6(N35°E)、崔 12(SN)和崔 9(NW)等不同方向断层,自 1000~4000m 不同深度断面承受正应力和剪应力的数值分析看,范庄断层浅层为张剪左行,深层为张剪右行;崔 6 断层为压性;崔 7 断层浅层为左行剪张,深层为左行剪压;崔 12 断层浅层为右行剪张,深层为右行剪压;崔 9 断层为压性。研究表明,各断层不仅应力变化大,同时也很复杂,不仅不同方向的断层断面承受应力不同,就是同一条断层在不同地段、深度和不同时期,断面承受的应力性质也不相同。一般来说,在浅层多为张应力发育地区,而深层多为压应力发育区。若区域应力场发生变化,断面承受应力将更加复杂。由此可见,这是导致主要控油断层封闭性变化大,断块油气藏形成和分布复杂的最主要原因之一。

五、主断层在复合、联合及反转应力场中成生

这里所指的主干构造,包括东部断陷湖盆内的隆起和拗陷、凸起和凹陷,凹陷内的主干断裂、二级构造及其派生、伴生的三级断裂和部分四级断裂等构造成分,可以肯定地说,它们都不是在单一应力场中成生,而是在复合或联合应力场中形成的。

地质学家们研究和分析地质历史时期的应力方式和应力场,常用的方法是依据各时期的构造变形场来反推追溯应力场,现时也常用模拟实验来检验,两者结合就能较准确的判断和确定各个时期的应力场。中国东部断陷盆地内展布的变形场,除有典型的区域引张作用下形成的一套正断层为主的地堑、地垒、阶梯状断层、箕状构造、剥离断层等伸展构造系统外,还发育了一套典型的走滑断裂作用下形成的雁列褶皱和断裂、断块隆起、断陷盆地、帚状构造、棋盘格式断裂、“入”字型断裂、弧形断裂、花状构造等各具特色的走滑断裂构造系统。两套构造系统,各自形成的地质环境、应力方式、应力场都不相同。两套构造系统并存,表明新生代东部断陷盆地是伸展作用和走滑作用两种应力方式和应力场并存。如剥离断层,在东部断陷盆地内广泛发育,它不仅控制东部箕状断陷盆地陡坡的边界,也控制陡坡构造岩相带的形成、演化和油气藏形成分布,同时还控制断陷盆地内二级构造带发生发展和油气藏形成与分布。平面上常呈锯齿状弧形展布,剖面上为上陡(倾角为 50°)下缓(倾角为 $20^\circ\sim 30^\circ$)的铲形。中央隆起带的弧形断裂,有的弧顶指向东北,有的弧顶指向西北,它们是由北东向和近北西向两组断裂不同

部位联合而成。经大量露头区调查和模拟实验证实,锯齿状弧形断层是在地应力长期作用下岩石受力后变形,对早期形成的两组扭裂面经应力场复合和联合改造而形成的。如兰聊断裂是典型的剥离断层,平面上为锯齿状弧形,在弧顶指向隆起区的部位,常为两组相向倾斜的扭裂面组成,形成沟谷,在其下游方向常发育大量的各时期近岸水下扇储集砂体;而在弧顶指向凹陷区的部位,常为两组相背倾斜的扭裂面组成,多形成山脊,构成分水岭,砂体一般不发育。兰聊断裂是上陡下缓的铲形正断层,在上部 $E_{s2}^{\text{上}}$ 中,断层倾角较陡,为 65° ,经计算断面承受的压应力分量较小,为 21MPa 左右,比一般岩石抗压强度小,此段无油气分布。而下部 $E_{s2}^{\text{下}}$ 中,断面倾角变缓,为 29° ,断面承受的压应力分量较大,为 54.7MPa,大于一般岩石抗压强度,此段油气富集,表明同一断层上部受拉张,下部受挤压,两种应力方式同时出现在一条断层上,导致油气富集的差异。类似上述的联合和复合构造,在东部断陷盆地内普遍存在,也可以说断陷盆地的绝大多数断裂,特别是主干断裂都不是在一次构造运动一种应力方式下形成,从而导致联合或复合构造发育,使油区中的构造面貌极为复杂。由于中国东部断陷盆地在早期伸展以及晚期挤压两种构造应力场环境中成生,而这种构造应力场的反转对油气的聚集必将有深远的意义。

六、控油断层具有不同的封闭开启模式

断层在某一段时间内开启,导致油气的纵向运移;而在其封闭时,则会导致油气的聚集成藏。正是由于断层具开启和封闭的幕式过程,才会导致大的油田乃至油区的形成,可见断层对油气成藏之重要。正确的理解断层的开启性和封闭性的关系将有助于理解油气成藏的动态过程,因此也倍受关注(Philippi, 1965; Hooper, 1991; Scholz, 1973; 王志欣等, 1997; 阎福礼等, 1999)。在研究中,发现东营凹陷中央隆起带控油断层的封闭性与主应力、岩性配置、泥岩沾污带以及断层活动时期与油气运移时期配置关系等因素密切相关,为此我们建立了相应的断层封堵模式。而在中央隆起带的不同构造位置,其封闭性的主要控制因素也有很大的不同。如辛镇构造的断层封闭性主要受断面正应力、断层活动时期与油气运移时期配置关系控制,而东营构造的断层封闭性主要受泥岩沾污带、断裂带的性质等因素影响,对于现河庄断阶带,封闭性则与岩性配置、断面正应力等因素密切相关。可见在不同的地区,断层封闭性的主要控制因素不同,因此具有不同的封闭模式,反映出断层封闭性控制因素的复杂性。

中央隆起带断裂的开启性与断层在油气运移时期的活动规律、活动强度、断层的力学机制、断层的组合关系、断层两侧界岩关系、地层的流变性、区域盖层等众多因素相关,这些控制因素的差异导致了油气的纵向运移也非常复杂。通过对中央隆起带断层开启性控制因素及对油藏特征的解剖,认为东营凹陷中央隆起带油气沿断裂运移方式有 3 种:直线涌流、直线渗流、折曲渗流。这种现象在惠民凹陷临南地区也同样存在,并且控制了油气的富集层位和平面上的分布(图 1-1)。

七、主控断层控制油气的运移和聚散

油气藏的保存与破坏是油气成藏以后演化过程中矛盾的两个对立统一面。由于地史过程中构造运动与变动频繁发生,油气藏无疑要受到构造运动的影响,其演化向两个方向发展,一是向有利于油气藏保存并使油气更富集的方向发展,一是向破坏油气藏的方向发展。下面着重讨论断裂对油气藏的破坏和聚集作用。

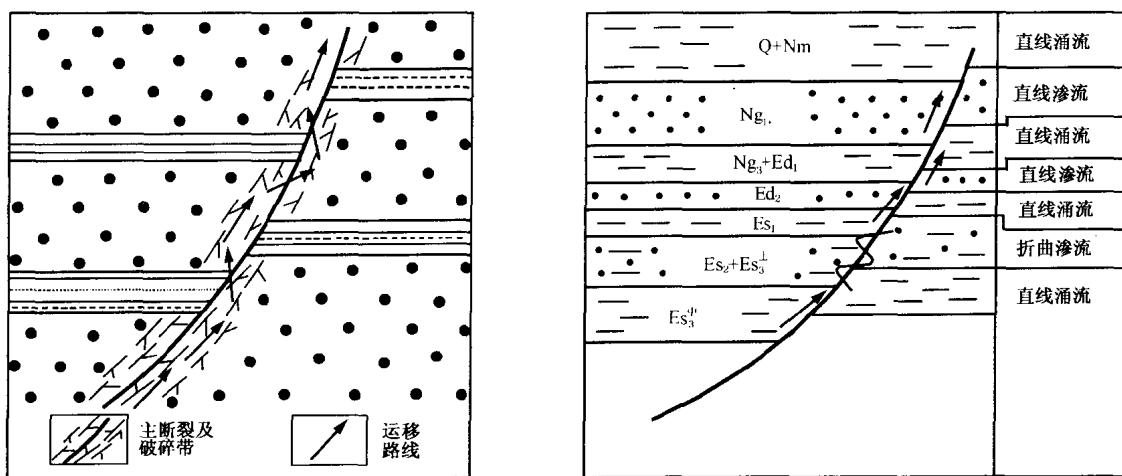


图 1-1 惠民凹陷油气沿断裂纵向运移模式示意图

1. 后生断裂对原生气藏破坏

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,打破了原生气藏的物理—化学平衡,油气将沿断裂面(带)这个相对低势区迅速逸散,油气藏遭破坏。破坏的程度与断层切割圈闭形成的溢出点的高低、断层是否断至地表、断层重新封闭的时间等因素有关。显然,溢出点越高,断层重新封闭的时间越长,断裂带越宽,油气藏遭破坏的程度就越大。据断层是否断至地表,可进一步分为下面两类。

(1) 断至地表的断裂对油气藏的破坏

这种类型的断裂对原生气藏的破坏程度很大。由于地下深处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纵向开启的断层通道迅速逸散到地表。许多情况下油气沿断裂逸散到地表,油气藏遭破坏的过程并非永远持续下去。随着断裂活动的减弱以及逸散到地表的油气被氧化形成沥青塞而将断裂重新封闭,下倾方向未逸出的油气得到保护,从而形成沥青封闭型油气藏。这种现象在中央隆起带未见典型的实例,而柴达木盆地则有典型的实例存在。冷湖四号、冷湖五号油田被主断裂所切割,沿主断裂带分布着沥青、地蜡,它们使这两个油田被保存下来。

(2) 断裂未断至地表的情况

当断裂作用使油层的一部分与上方储层连通时,可使原有油气藏圈闭容积变小,并使溢出点以下的油气沿断裂向上方储层中运移,在新的圈闭内聚集成新的油气藏。其结果是,使原先单一的油气藏分解成若干个油气藏,以致油气藏的规模和价值都相应减小。东营背斜营 31 断层在明化镇期活动强烈,使受营 31 断层控制的营 31 断块区油气大部分散失。营 31 断块区腰部的营 19 井,沙二段上部取心发现油浸砂岩 29.92m,试油均为水层。据此认为,岩心中所含原油为古油藏破坏后的残余油。如古油藏不被破坏,该区沙二段上部含油面积至少应有 2km²,而现今这一层段的油藏只保留下很小的面积。根据油藏形成演化史及断层活动速率分析,在明化镇组沉积前,沙二段上部油藏与断层下降盘的沙一段接触,封堵条件较好,并且馆陶组沉积期断层活动规模大,沙二段上部原始油藏不致被破坏。至明化镇组沉积时期,营 31 断层再次强烈活动,造成沙二段上部油藏与断层下降盘以砂岩为主的东营组接触,遮挡条件遭到破坏,从而造成油气散失,古油藏被破坏。

东营凹陷中央断裂背斜带西部的河 51 井,1972 年 9 月钻到沙三段高压油层时发生强烈

井喷。井喷前中途测井,在东营组和馆陶组未见任何油气显示,但在 70 天以后处理井喷事故时,在距原井眼 65m 又钻一新井眼,完钻电测时,于东营组、馆陶组发现油层 10 层 54.4m。这套油层真电阻率平均为 $7.4\Omega\cdot\text{m}$,感应电阻率为 $145\Omega\cdot\text{m}$,这些参数均超出了本区段油层真电阻率的界限($5.0\Omega\cdot\text{m}$)。在该井段 3 块不同深度井壁取心的岩样中均见到微含油砂岩,说明是典型油层。这些新油层是在 70 天内沿原井眼将被钻遇的沙三段高压油气运移至浅层砂岩储层中形成的次生油气藏。如果把老井眼视为活动期断层,则可见沙三段原生油气藏被破坏(沙三段高压油藏破坏前的压力系数为 1.64,破坏后降为 1.47),上部次生油气藏快速形成的现实。这样一种现象还说明东营—馆陶组的 10 层新油层有 3 套油水系统,表明其形成至少经过了 3 次油气运移,而时间只有 70 天。这一事实表明:断至生油岩的断层,一旦产生,就会在短时间内破坏原生油气藏,并同时在浅层形成次生油气藏。

另外一个典型的实例是梁家楼油气藏,梁家楼浊积扇砂岩体位于中央隆起带的西部,面积 450km^2 ,砂岩厚度 20~40m。经地球化学分析证明,砂岩储层的原油来自其周围的生油岩(张敦祥等,1990),经运移、聚集后,先形成原生油气藏,然后被后期活动断裂把原油藏切割成阶梯状断块,使部分油气在原储层的新断块圈闭中进行再运移和再聚集而成为多断块含油的残留油气藏。

这种实例不仅在东部油田存在,而且在西部也有发现。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而重新分布的油气藏。海拉尔盆地的乌西断裂也是典型例子。波斯湾盆地扎格罗斯山前带的许多巨大油气田都具这种特点,那里的油田大多存在于 3 个主要含油层即上侏罗统灰岩、白垩系灰岩和第三系主灰岩中,后期断裂的作用沟通了下面两个主要含油层与第三系主灰岩,使前两者地层中的油气藏遭破坏,油气沿断裂在第三系主灰岩中聚集,从而使第三系主灰岩成为油气的主力富集油层,形成巨大的油气储量。

2. 先存断裂封闭性变差而导致断层油气藏的破坏和再次聚集

(1) 由于构造运动造成断裂重新活动,油气藏被破坏

目前的勘探表明,陆相盆地中受断层遮挡而形成的油气藏是相当普遍的(单家增,1996)。显然,一旦作为遮挡条件的断层的封闭性变差,油气将沿断裂散逸。而作为构造薄弱带的断裂,总是后期构造运动应力集中和释放的地带。因此,先期封闭的断裂极易被后期构造运动重新激活,断层开启,从而破坏原来的油气藏,并在新的圈闭中重新聚集起来。

(2) 由于地质条件和环境的改变致使断层封闭性变差,油气藏遭破坏和再次聚集

任何事物的发展不可能是一成不变的,断层的封闭能力也是一样,随着地质条件的变化可能变好,也可能变差。造成断层封闭性变差的因素有:①地下水沿断裂带的溶解、淋滤作用造成断裂逐渐变得开启;②地应力的作用使断裂带产生裂缝,或由于地应力转向使断裂处于拉张环境(但并未造成断层的活动);③由于温度、压力的变化造成断层带物质的孔、渗性变化,如压溶作用使断裂带物质溶解等;④断层上、下盘地层由于压实、成岩、胶结等作用使物性改变而使断层横向封闭性变差,从而造成油气沿断裂发生侧向运移,并在合适的圈闭中重新聚集和成藏。

第二节 油藏构造表征的原理和方法

油藏构造研究是油藏描述的深化和发展,是精细储油构造研究与石油地质综合研究相结合的产物,是为揭示断块油藏成藏机制和油气的分布规律,以及进一步的油藏预测服务的。通过长期的科研实践及对中国东部典型断块油气藏的解剖,以构造地质学和石油地质学的研究

为基础,结合陆壳构造与洋壳构造、局部构造与全球构造的分析,通过定性分析和定量分析相结合,重点探讨局部油藏构造的应力方式、类型及其对油气的控制作用(图 1-2)。认为主要包括以下几方面的研究内容和方法。

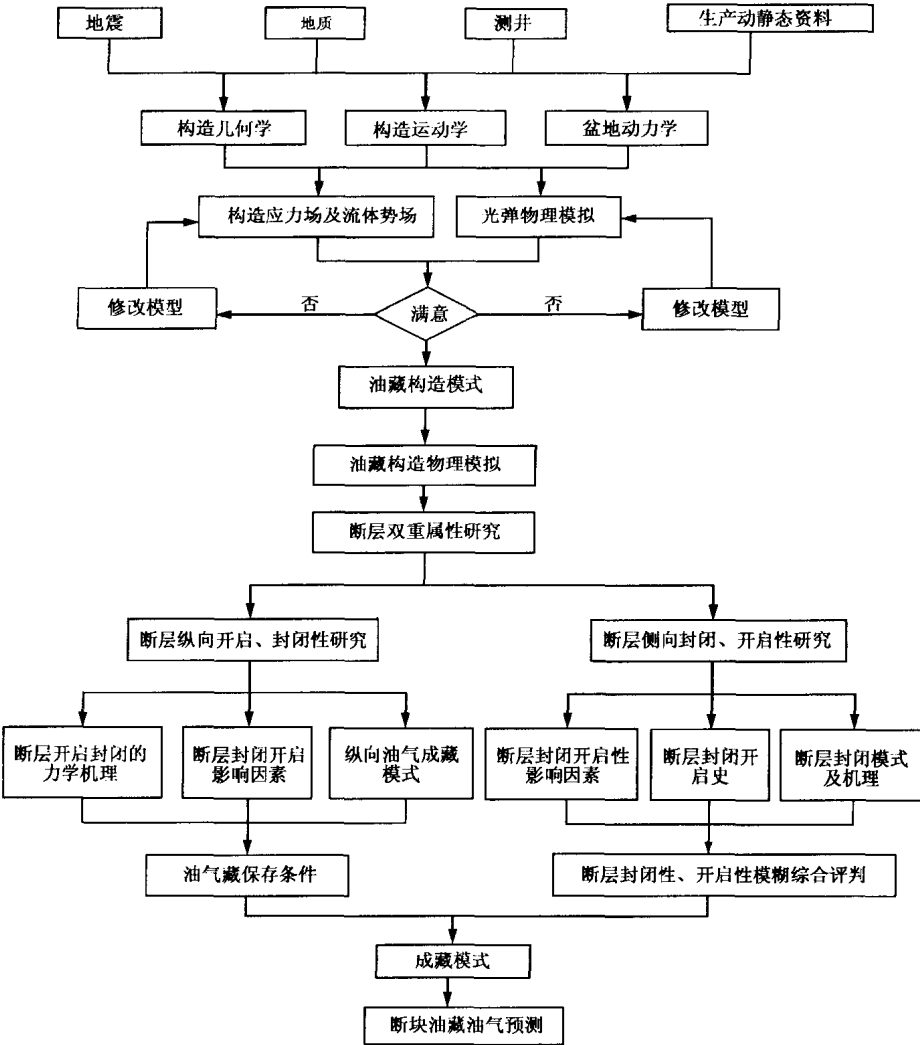


图 1-2 复杂断块油藏构造表征的方法和技术

一、油藏构造研究

研究工作以全球板块构造的活动论、地质历史发展的阶段性和事件性、多旋回成盆和多旋回构造反转等基本理论观点为指导,运用现代构造地质学和盆地分析的新概念、新方法和新技术手段,比较系统地分析了新生代构造的几何学、运动学和地球动力学特征。

1. 构造几何学研究

几何学研究是研究控油构造的几何形态、空间分布、产状、大小、控油构造各要素之间以及构造与相关构造之间的几何关系。主要包括构造单元划分、构造样式的划分及断裂的基本特征研究。

2. 构造运动学研究

运动学研究是研究控油构造的运动特征和运动规律,目的在于通过分析盆地构造变形样