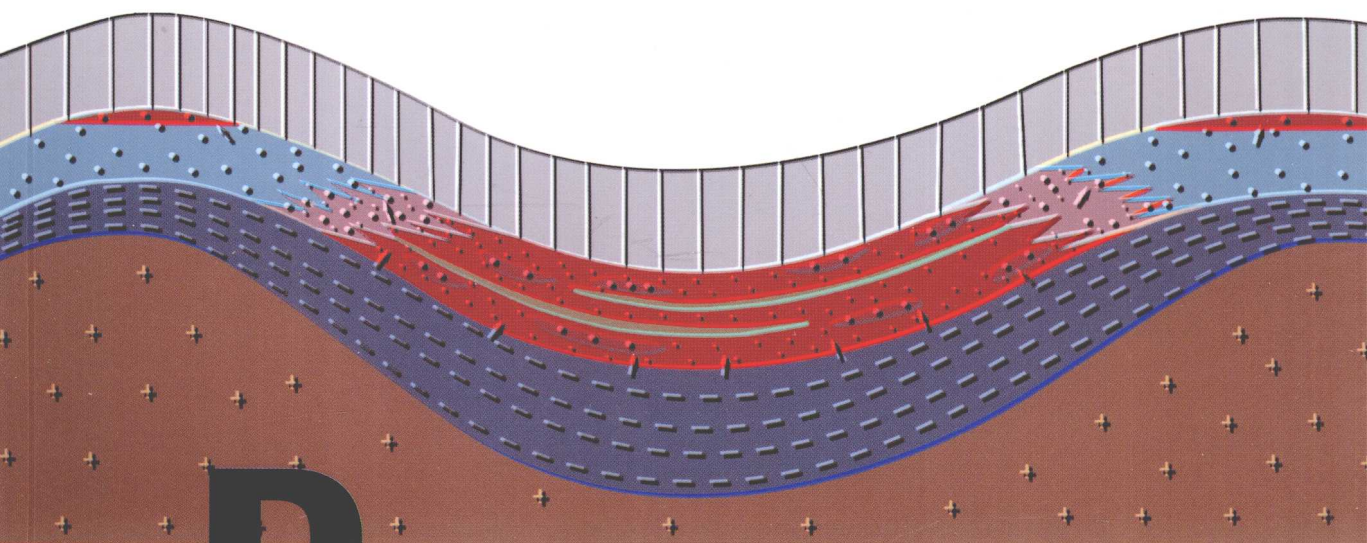


深盆油藏

——松辽盆地扶杨油层油藏形成与分布

侯启军 著



Distribution of
deep basin oil

石油工业出版社

深盆油藏

——松辽盆地扶杨油层油藏形成与分布

侯启军 著

石油工业出版社

内 容 提 要

深盆油藏的形成机制和分布规律以及勘探思路与常规的岩性油藏是完全不同的,这就需要从成藏机理、动力学特征、形成条件与分布规律等方面去认识深盆油这种特殊类型的油藏。本书通过物理模拟实验和机理的研究,探索了深盆油的形成理论和形成条件,并介绍了松辽盆地扶杨油层深盆油藏的形成与分布规律以及深盆油理论指导下的勘探成效,为向斜区油气藏的研究和勘探提供一些理论依据和实践范例。

本书可作为从事石油地质研究和油气勘探工作者的参考材料,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

深盆油藏:松辽盆地扶杨油层油藏形成与分布/侯启军著.

北京:石油工业出版社,2010.6

ISBN 978-7-5021-7495-8

I. 深…

II. 侯…

III. ①含油气盆地-油气藏-形成-研究-东北地区

②含油气盆地-油气藏-地理分布-研究-东北地区

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206005 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523739 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9.75

字数:243 千字

定价:58.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

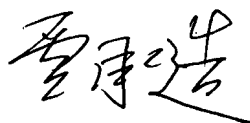
序

我国油气勘探取得一系列重大突破,油气地质理论和勘探技术取得重大进展,其中重大成果之一就是在盆地坳陷部位发现了大面积分布的特殊类型油气藏,例如鄂尔多斯盆地石炭—二叠系苏里格“深盆气”藏。松辽盆地作为油气勘探和生产的主战场之一,已经走过了50多年的发展历程,取得了辉煌成就。特别是近些年来,中浅层岩性油藏勘探和深层火山岩气藏勘探取得了重大突破和发现,这得益于勘探思路的创新、地质理论的创新和勘探技术的进步。面向未来,松辽盆地仍然是主要的勘探领域,老区勘探需要勘探思路和地质理论不断创新。侯启军所著的这本深盆油藏专著,就是对松辽盆地石油地质理论不断创新探索的结果。

近些年勘探实践表明,松辽盆地扶杨油层在中央坳陷区发育着大面积低渗透油藏,过去普遍认为是岩性油藏,但是其与上覆的萨、葡、高油层三角洲前缘岩性油藏的形成与分布特征存在明显差异,而与盆地坳陷内部“深盆气”的形成机制和动力学特征很相似。2005年10月,作者在中国石油学会石油地质专业委员会主办、三大石油公司协办的“中国油气勘探六大领域进展、经验及技术研讨会”上宣读的“松辽盆地的深盆油藏”大会论文,首次提出了深盆油藏的概念,会后发表于《石油勘探与开发》2006年第4期。在此基础上,近几年来通过物理模拟实验和理论模型研究,丰富和完善了深盆油藏的形成机制和分布规律,构建起了深盆油理论,并以此为指导对松辽盆地扶杨油层资源潜力、勘探方向、勘探部署策略、勘探目标评价和配套勘探技术开展了系统研究,有力地推动了向斜区扶杨油层油藏的勘探,实现了新的发展和突破。

我为作者这种创新意识和大胆实践欢欣鼓舞。相信本书的出版,对我国油气成藏理论探索和负向构造石油勘探具有积极的指导和推动作用。

中国科学院院士



前 言

长期的勘探实践表明,松辽盆地下部组合扶杨油层在中央坳陷的向斜区发育大面积低渗透油藏,尽管预探井找不到局部岩性圈闭,却井井有油,但又找不到油藏边界,提交储量多为人划定的“计算线”,不同年度提交的储量基本连片。过去一直认为向斜区发育的大面积低渗透油藏为岩性油藏,近几年来,通过对松辽盆地岩性油藏形成与分布规律的深入研究和勘探实践,发现向斜区的扶杨油层大面积低渗透油藏与中部组合萨、葡、高油层三角洲前缘岩性油藏的形成与分布特征有明显差异,却与深盆气的形成机制和动力学特征很相似。因此,经不断对比和思考,提出松辽盆地中央坳陷向斜区扶杨油层为深盆油藏。

本书通过系列的物理模拟实验,包括单一毛细管实验、砂体封油模拟实验、上生下储排运模拟实验、运移动力学模拟(甜点聚集)实验等,对深盆油的水封油机制有了比较系统的认识。实验室条件下,可以形成稳定的深盆油现象,水封油的主要控制因素是喉道大小;上生下排情况下,两层砂体粒径(孔隙度)相差较大时,上层细砂体内不容易注入油量,石油更易排入下层粗砂体内;两层砂体粒径(孔隙度)相近时,石油优先排入上层砂体内,这表明物性和距烃源岩的距离控制储层的含油性;致密储层广泛分布情况下,只要低孔低渗储层中排入石油,随排入量的增加,石油更容易进入低孔低渗储层中的相对高孔高渗砂体,并将其中的水排替,形成“甜点”。说明凹陷内,只要石油能够进入致密砂岩,“甜点”处即可形成良好的石油聚集。

松辽盆地中央坳陷区扶杨油层深盆油区石油的运移属于非达西流。由于低渗透性储层渗流孔道复杂、非均质性严重,低渗透性储层流体流动明显区别于中高渗透性储层中的流体流动。前者必须在压力梯度大于启动压力梯度后才会有流体流动,而后者只要存在压力梯度就会有流动。青山口组一段生成的石油在超压作用下,通过断裂进入扶杨油层,流体压力迅速下降,基本降为正常地层压力。因此,进入扶杨油层的石油向前推移的距离是有限的,接下来石油的运移即受到扶杨油层低孔低渗储层的控制,石油在这种多孔介质中的团块状运移导致石油在低一特低渗透层中的滞留,在深盆油成藏门限内形成较为稳定的深盆油藏。

本书提出了深盆油划分的方法和预测模型。深盆油圈闭形成的临界条件或地质门限,主要取决于储油砂层的孔喉半径以及该条件下的油水界面张力和地层倾角的大小。对于中央坳陷区埋深 2000m 左右,地层倾角为 10° 的情况下,浮力与界面张力相等时的临界孔喉半径值是 $6.2\mu\text{m}$,如果地下岩石的最大孔喉半径小于这个临界值,则界面张力大于石油所受浮力,石油不能继续向上倾方向运移,聚集于水体之下形成深盆油藏。分析表明,中央坳陷区深盆油圈闭形成的门限对应的储层孔隙度为 11%,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,埋深 1750m 左右。

松辽盆地扶杨油层具有良好的深盆油藏形成条件:油源充足是深盆油藏形成的前提条件,超压和持续排烃是深盆油藏形成的保证,大量排烃前致密性储层的形成是深盆油形成的必要条件,稳定的构造环境和保存条件使得深盆油藏趋于稳定的分布。青一段普遍存在超压,具有高的剩余压力,扶杨油层基本为正常地层压力,青一段与扶杨油层之间具有高的剩余压力差。正是在这一剩余压力差的作用下,压力才实现了传递,流体发生垂向排运作用。发生排运的时

间是嫩江组沉积期末和明水组沉积期末,主要成藏期为明水组沉积期末,此时,凹陷区扶杨油层已形成大面积低孔低渗的储层,为深盆油的形成奠定了良好的基础。因此,深盆油藏形成期主要为明水组沉积期末—古近纪末。

松辽盆地中央拗陷区扶杨油层油水关系复杂,体现在原油物性与含油饱和度以及油气层关系上。在平面上,从凹陷的边缘到中心再到边缘形成了正常油藏—深盆油藏(含水)—正常油藏的分布特点;在剖面上,深盆油具有明显的油水倒置关系。与此同时,油水分异特征在深盆油区和正常油区不同。深盆油区油水分异条件主要受砂体物性和下排深度控制,重力分异作用不明显;而正常油区主要受重力分异作用控制。因此,正常油区断层上升盘的垒块和构造高部位油水分异条件较好;但深盆油区扶余油层 I 砂组主要以油水分异差的油水层为主,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ砂组物性好的砂体可以形成油水分异较好的油层(含水)。

本书提出了松辽盆地深盆油藏形成模式:位于青一段烃源层之下的低渗透河道砂体由于相变和成岩演化形成纵横向叠置的复合岩性(成岩)圈闭体。拗陷中心青山口组优质烃源岩自嫩江期末持续至今生烃强度一直较大,使得拗陷内烃源层普遍存在超压,上覆青一段暗色泥岩厚度、下伏扶杨油层的显示高度及超压三者有明显的正相关关系。油气在烃源岩超压作用下,穿过底面、侧界面或以断层(微裂隙)为通道幕式向下排运到扶杨油层后,由于储层较致密,孔隙及喉道狭小,油的浮力远小于界面张力,浮力无法驱动油的运移,随埋深和生烃作用的增加,进入储层的油在压差驱动下,以活塞推动方式将可动水和弱束缚水向下和凹陷周边排挤。烃源岩厚度、超压、青一二段的岩性组合和油气运移通道—断层的纵向终止程度共同控制油气分布范围,形成拗陷中部包络线以上油层连片分布,两边高部位为纯水层的“油水倒置”分布特征。浅部高渗透区,浮力能够克服界面张力驱动油向高部位运移,油水按正常重力分异形成常规的构造和岩性油藏。

深盆油为满拗含油创造了条件,在深盆油藏理论指导下,勘探思路、勘探技术方面由寻找规模储量转变为寻找“甜点”,勘探技术的选择,从复杂的多种圈闭识别描述技术综合应用调整为以优质储层地震预测技术和单井增产技术应用为主。

理论上深盆油藏比深盆气藏更容易保存,深盆油的发现远少于深盆气发现的根本原因,不是深盆油能否形成的问题,主要是如何认识的问题。希望本书能为向斜区油气藏的研究和勘探提供一些理论依据和实践范例。

目 录

第一章 深盆油及其物理模拟实验	(1)
第一节 深盆气和深盆油	(1)
一、深盆气藏	(1)
二、向斜油藏	(2)
三、深盆油藏	(3)
四、深盆油成藏门限	(4)
第二节 毛细管水封油物理模拟实验	(4)
一、单一毛细管模拟实验	(4)
二、砂体封油及保存模拟实验	(7)
第三节 石油排运物理模拟实验	(12)
一、上生下储原油排运物理模拟实验	(12)
二、致密储层内甜点运移模拟实验	(21)
第四节 深盆油形成分布的数学模型	(24)
一、物理模拟实验结果分析	(24)
二、理论模型及影响因素	(25)
三、深盆油藏形成条件	(30)
第二章 深盆油藏形成的地质背景	(31)
第一节 盆地区域构造背景	(31)
一、盆地性质	(31)
二、地层分布	(31)
三、盆地构造演化特征	(33)
第二节 泉四段沉积体系和沉积相	(36)
一、沉积体系展布	(36)
二、泉四段沉积模式	(38)
三、砂体展布特征	(39)
第三节 致密储层的形成与分布	(40)
一、岩石矿物特征	(40)
二、主要成岩作用	(43)
三、致密储层的分布	(48)
第四节 深盆油藏形成的油源条件	(50)
一、优质烃源岩的分布	(50)
二、原油的地球化学特征	(51)
三、烃源岩的非均质性	(57)

四、扶杨油层石油的主要来源	(58)
第三章 深盆油藏形成的动力学特征	(63)
第一节 扶杨油层的排运通道特征	(63)
一、松辽盆地断裂发育特点	(63)
二、青一段底部断裂发育特征	(65)
三、断裂与排运通道	(66)
第二节 排烃动力学特征	(67)
一、地层超压形成机理	(67)
二、青一段泥岩超压特征与排烃动力	(71)
三、下排烃深度与垂向排烃油水分离条件	(75)
四、青一段向下排运模式和油藏控制因素的差异性	(79)
第三节 深盆油的运移和聚集	(82)
一、深盆油区石油运移机理和成藏动力学特征	(83)
二、断层和含油性的关系	(84)
三、生排烃史和扶杨油层石油成藏期	(86)
第四章 深盆油藏形成条件与分布规律	(93)
第一节 扶杨油层深盆油藏范围的确定和分布特征	(93)
一、深盆油藏边界的预测模型	(93)
二、深盆油藏分布特征	(95)
三、扶杨油层油藏分布模式	(99)
第二节 扶杨油层深盆油藏形成条件	(101)
一、油源充足是深盆油藏形成的前提条件	(101)
二、超压和持续排烃是深盆油藏形成的保证	(102)
三、大量排烃前致密性储层的形成是深盆油藏形成的必要条件	(103)
四、稳定的构造环境和保存条件	(104)
第三节 深盆油藏含油性及其组合模式	(106)
一、深盆油藏区各砂组含油性特点	(106)
二、含油性较好的“甜点”区分布及其控制因素	(109)
三、深盆油藏区含油组合模式	(111)
第五章 深盆油藏资源和勘探潜力	(115)
第一节 扶杨油层成藏体系与评价	(115)
一、成藏体系划分	(115)
二、松辽盆地南部扶杨油层成藏体系特征	(117)
第二节 深盆油藏石油资源量计算	(120)
一、深盆油资源概念	(120)
二、物质平衡法计算资源量	(120)
第三节 勘探潜力和勘探目标区评价	(124)

一、成藏带及其主要地质特征	(124)
二、松辽盆地南部成藏带地质综合评价和优选	(128)
三、深盆油“甜点”区有利条件分析	(132)
四、深盆油藏有利区勘探潜力分析	(135)
五、孤店地区勘探潜力分析	(136)
第四节 松辽盆地南部深盆油藏的勘探实践	(139)
一、古隆起翼部岩性油藏勘探效果	(140)
二、阶地区下坡勘探成效	(141)
三、凹陷区深盆油藏的勘探成效	(142)
参考文献	(143)

第一章 深盆油及其物理模拟实验

随着国内外天然气勘探和研究工作的深入,深盆气的形成机制已得到地质家的广泛认可。然而,深盆气藏从发现到被认识长达 15 年之久,深盆油藏的识别和认识会更加困难(袁政文等,1996)。为此,本书首先通过深盆油形成的物理模拟实验,从中得到的一些现象可帮助理解深盆油的形成机理。

第一节 深盆气和深盆油

一、深盆气藏

近年来,世界上已发现储量可观的向斜气水倒置型气田。如北美的圣胡安、瓦腾堡格、波多音、默尔克勒维、纳德埃尔佛斯五个大型向斜气田,可采储量可达 $8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上。这些气田的主要特点是,气聚集在向斜底部,水在上气在下,气水关系倒置,产层常为低孔低渗的砂岩(图 1-1)。其形成机理是,由于向斜部位地层中有机质源源不断生成的天然气把水排出,在向斜轴部及其附近因缺少浮力而形成天然气聚集。也有人认为这种水封气藏,可以应用相对渗透率原理或水动力条件来解释。这种低压气藏,虽然单井产量不会很高,但含气面积可以很大,具有很大的潜在储量和工业开采价值。

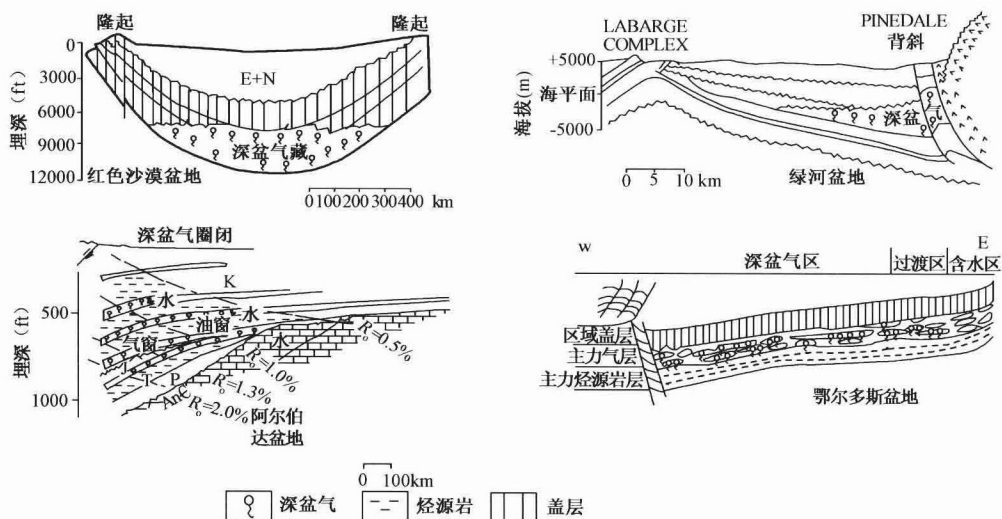


图 1-1 国内外已知几个主要深盆气藏分布特征与地质模式
(据袁政文等编译修改,1996)

深盆气是指盆地中央或坳陷深部致密砂岩地层中气水关系倒置的非常规气藏(图 1-2),它是在特殊地质条件下形成的,具有特殊的圈闭形成机理和分布规律。

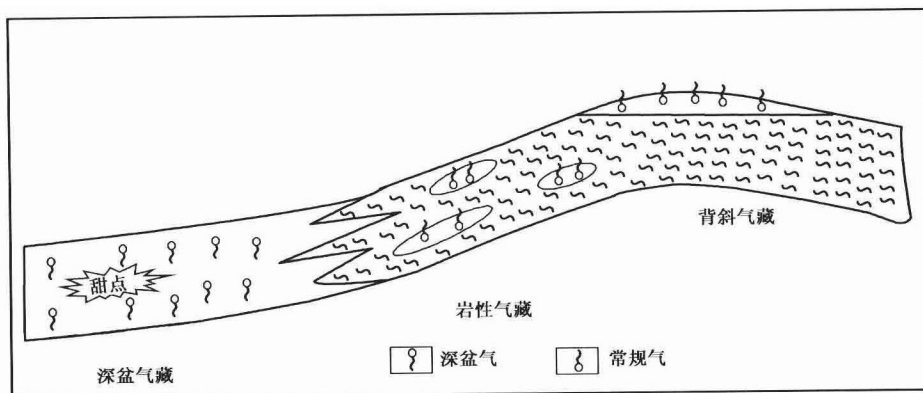


图 1-2 深盆气藏和常规气藏剖面分布特征

一般深盆气藏具有以下特征:① 烃源岩排烃经初次运移就可成藏;② 天然气广泛分布于向斜或盆地内,储量大,分布广;③ 储层致密,单井产量低;④ 气水倒置或无明显气水界面,气水边界起伏,不受构造控制;⑤ 气藏具有异常地层压力,往往是异常低压。

深盆气藏成藏机理包括两个重要的方面:其一,在盆地深凹陷部位,下伏烃源岩排出的天然气直接进入储层,在毛细管力与静水压力下,浮力作用不足以使气向上倾方向运移。随着初次运移而聚集的天然气不断增多,深盆气藏上部的气水边界向上推进,最终达到力学平衡的最小埋藏深度。姜振学等(2000)所做的实验表明,气水边界一般以“指进”形式向上推进,“指进”部分受毛细管作用可出现“卡断”现象,“卡断”呈游离相态的天然气或者随着深盆气藏气水边界的向上推进而被深盆气藏“捕获”,或者经二次运移形成常规气藏。其二,天然气扩散与二次运移造成的天然气逸散不断被下伏烃源岩排出的天然气补充,逸散与补充的动态平衡状态决定了深盆气藏分布范围。一般深盆气藏分布范围小于或等于深盆气藏力学平衡所确定的范围。

深盆气藏的形成需要包括构造、储层、生储配置、封盖及保存条件等方面的地质条件:

- ① 一般深盆气在具有区域深拗陷或单斜构造格局的盆地内发育;
- ② 要求烃源岩分布广、生烃强度较高,通常煤系可成为深盆气良好的烃源岩;
- ③ 具备致密、发育面积大、直接上覆于烃源岩的储层,储层沿上倾方向物性变好;
- ④ 储层顶、底发育封盖层;
- ⑤ 区域构造稳定、断裂发育少。

二、向斜油藏

根据油气差异聚集原理,天然气分布于靠近源区一侧的圈闭中,向上倾方向依次为油气藏、纯油藏和空圈闭。但在系列圈闭中,一旦上倾方向最高的圈闭被油气充满后,该系列圈闭的油气聚集基本上已完成。如果这时油气源区继续生成油气,而又不能向上倾方向溢出,天然气将排挤油和水,并使之向储层下倾方向回流。在这种情况下,天然气将占据最高背斜的顶部,甚至充满整个背斜圈闭,而油则占据向斜部分,形成向斜油藏(图 1-3)。Gussow 认为:美国弗吉尼亚州西部林肯县的格列飞斯维尔(Griffithsville)向斜油藏就是这样形成的,该油藏上倾方向的达姆萨特背斜和上倾方向的岩性圈闭中完全被天然气所充满,而向斜的较高部位则聚集石油,水分布于向斜更低部位。

显然,这种向斜油藏实际上属于常规油藏。向斜油气藏的油气从向斜低部位到高部位是按照油气藏、纯油藏、空圈闭的顺序排列的,并且低部位的油气是由于上部的圈闭被气充满以后,油气发生回流作用造成的,其中油水还是服从差异聚集原理的,只不过后期多了一次回流作用,这与深盆油藏的石油聚集原理是有区别的。

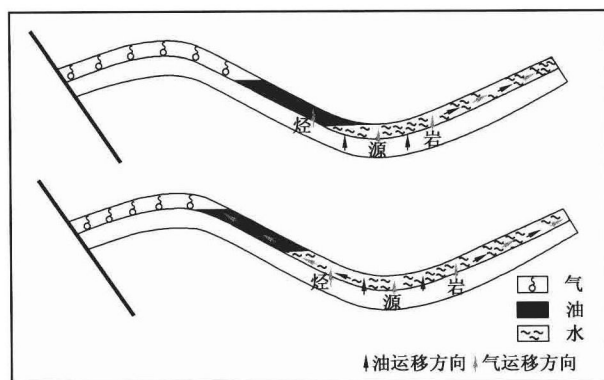


图 1-3 向斜油藏形成示意图

三、深盆油藏

与向斜油藏不同,深盆油藏是指盆地中央或坳陷深部致密砂岩地层中油水关系倒置的非常规油藏(图 1-4)。

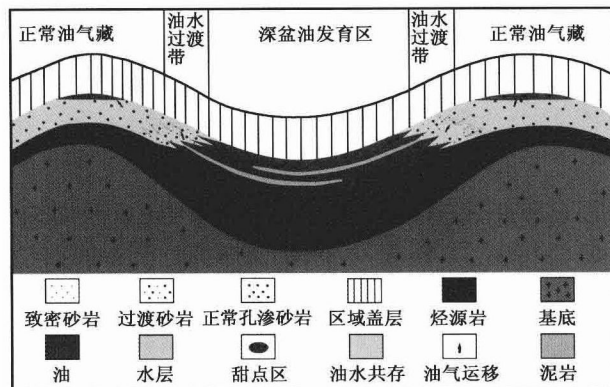


图 1-4 深盆油藏与常规油藏分布关系示意图

深盆油藏往往主要形成于活跃的烃源岩区内。在成岩作用、水化学等作用下,储层孔喉半径减小到一定程度,在高压排水、排烃范围内逐渐形成了一个石油滞流一半滞留区带。由于油水两相非达西流动差异,形变阻力成为主要因素,在超压的条件下水被优先向上倾方向排出,剩下的油被逐渐聚集,形成了反重力成藏现象。这种油藏属区域聚集成藏,油藏面积大,但产量相对较低。

深盆油藏的形成不服从差异聚集原理,由向斜的低部位到高部位(指相对的高部位,斜坡一带)按照纯油藏、油水同层、纯水层的分布,其形成原因是石油的滞留作用,也就是油、水两相之间非达西流动的差异所引起的。而到了构造的高部位则油水是按照正常油藏形式分布的,即水在低部位,油在高部位。

深盆油成藏的动力是多方面的,超压可能是其成藏过程中的主要动力。烃源岩在经历了一定程度的压实以后,特别是烃源岩顶底的边缘部分逐渐封闭,使孔隙流体排不出或排出困难。因而流体承受了部分上覆沉积物的有效压应力,使孔隙流体具有异常高压,而岩石则承受较低的有效压应力形成欠压实。这种由欠压实烃源岩产生的异常高压,可以在后期压实和排液过程中逐渐消失。实际上欠压实烃源岩中的孔隙流体也正是借助于其本身所产生的异常高压,使相对封闭的烃源岩及不连通的孔隙产生裂隙而得以排出。流体排出后异常压力消

失或减弱,烃源岩遭到后期压实,微裂隙和连通的孔隙重新封闭,此后流体压力再次积蓄升高使岩石再次破裂而排液,这样周而复始的异常压力,在强度上比正常压实中产生的剩余压力要大得多,正是这种动力驱使石油在地壳内发生运移。

深盆油藏具有与深盆气藏相似的地质条件。由于地下原油的物理性质(密度、粘度等)与天然气存在较大差别,故两者虽然在成藏条件和成藏机理上具有相似性,但深盆气藏与深盆油藏的分布规律并不完全相同。

四、深盆油成藏门限

深盆油也存在一个地质门限,进入这一门限,深盆油能够富集成藏;不能进入这一地质门限,深盆油就不能富集成藏。探究这一门限及其变化规律,对于预测深盆油藏形成具有理论意义。为讨论问题方便,将深盆油成藏门限定义为深盆油成藏的临界地质条件,可用储集岩体的孔喉半径或直径来表示。

因此,通过实验室物理模拟实验来观察和分析深盆油藏的形成和运移过程,确定形成油水倒置的理论孔径门限,从机理上认识深盆油的运聚机理是十分重要的。

第二节 毛细管水封油物理模拟实验

一、单一毛细管模拟实验

1. 实验方法

选择孔喉直径不等、材料相同的系列玻璃管(共14种)进行实验(内径分别为0.8mm、1.1mm、1.5mm、2.2mm、3.6mm、3.7mm、4.0mm、4.9mm、5.8mm、6.9mm、8.0mm、8.5mm、9.0mm、11mm)。将水注满玻璃管后,自下而上注入原油观察油水移动情况,确定毛细管封油临界孔喉直径(图1-5)。实验装置见图1-6,实验时,选择染色的凝析油进行油水倒置实

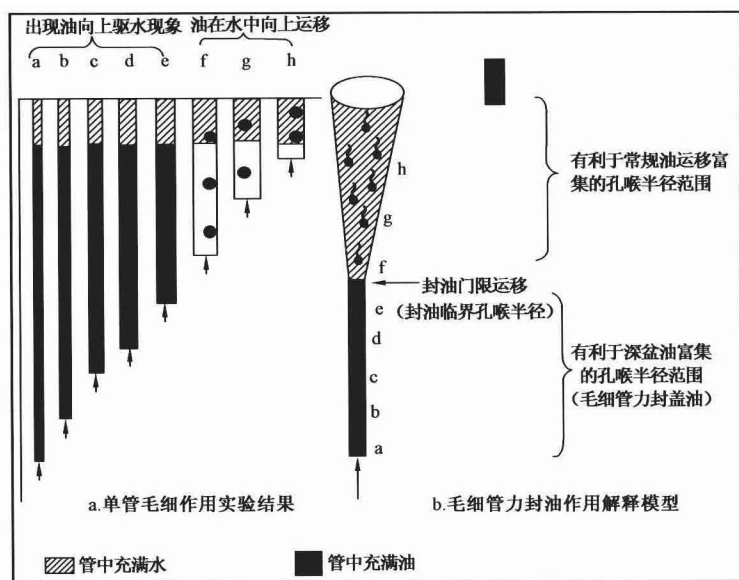


图 1-5 单一毛细玻璃管封油实验示意图

验,首先将均匀等径的玻璃管垂直夹在托架上,向玻璃管中注满水,静置观察并记录原始水柱高度,用注射器针头刺穿玻璃管底端胶塞,向管内缓慢注入一定体积的染色油(凝析油),观察油柱上浮现象并记录时间。

实验过程的观测,主要采用肉眼观察,秒表记录时间,并按一定的时间间隔利用数码相机拍摄照片。

2. 实验现象

上述实验表明,不同内径的玻璃管出现不同的水封油现象。

① 内径大于等于 11mm 的玻璃管:注油后原油呈悬浮状油滴快速上浮,不能形成油柱,无法形成油水倒置状态(图 1-7 右)。

② 内径为 9.0mm 的玻璃管:注油后原油多为悬浮状小油滴,可形成 1~2 段 0.5~1cm 小油柱,上浮也很快(图 1-7 左、中)。

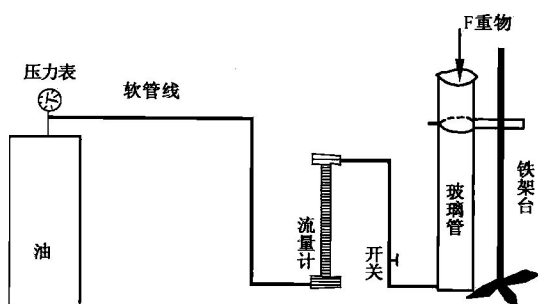


图 1-6 毛细玻璃管水封油模拟实验装置结构示意图

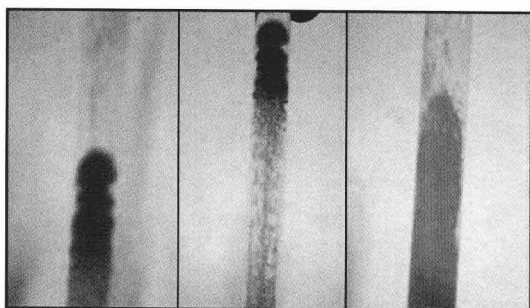


图 1-7 直径 9mm(左、中)、11mm(右)的玻璃管注油后油的上浮现象

③ 内径为 8.5mm 的玻璃管:注油后原油多为分散状上浮,偶尔可形成高度约 1cm 小油柱,可形成短暂的油水倒置现象,但持续时间很短。

④ 内径为 8.0mm 的玻璃管:注油后原油可形成分段小油柱,但上浮很快,偶尔可以形成短暂的油水倒置现象。

⑤ 内径介于 5.8~6.9mm 的玻璃管:当玻璃管内径小于 6.9mm 时,采用常规的直接注油方式即可形成油水倒置关系。当注油速度很小,注入的油珠很细小时,油柱将呈分散状上浮。加快注油速度,小油珠形成抱壁油珠或油柱时,可形成并保持高度较小的油水倒置,但仍不稳定,油柱上浮较快。

⑥ 内径介于 4.0~4.9mm 的玻璃管:注油后原油容易形成较高的油柱和短暂的油水倒置现象,油水倒置稳定时间稍长,上浮缓慢。

图 1-8 显示,直径 4mm、4.9mm、5.8mm 的玻璃管注油后油柱均上浮,没有出现稳定的油水倒置现象。

⑦ 内径介于 1.5~3.7mm 的玻璃管:易于形成稳定的油水倒置,3.6mm 以下的玻璃管注油后出现稳定的油水倒置现象,直径 3.7mm 的玻璃管内油柱九天后上浮。

图 1-9 显示,3.7mm(右)玻璃管注油九天后油柱上浮,直径 3.6mm(左)玻璃管注油后形成稳定的油水倒置现象。

⑧ 内径小于等于 1.5mm 的玻璃管:实验过程中,直径 0.8mm、1.1mm、1.5mm、2.2mm 的玻璃管注油后出现稳定的油水倒置现象,而且非常稳定(图 1-10)。

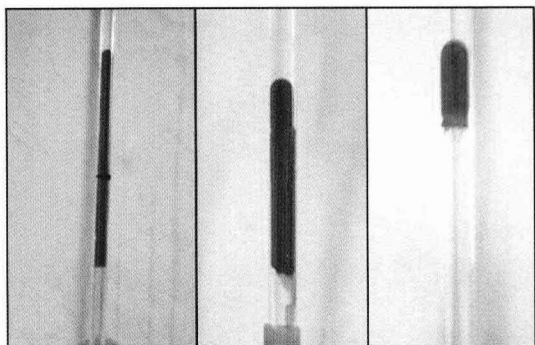


图 1-8 直径 4mm(左)、4.9mm(中)、5.8mm(右) 玻璃管内油柱上浮现象

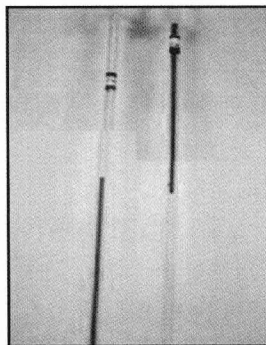


图 1-9 直径 3.6mm(左)玻璃管和直径 3.7mm 玻璃管(右)注油后油柱上浮情况

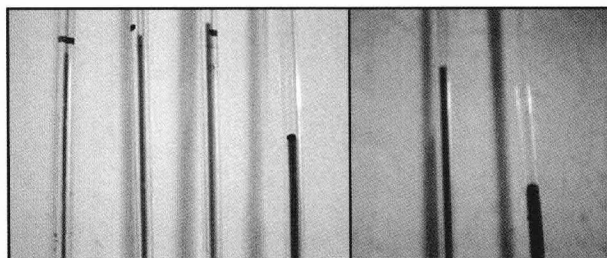


图 1-10 直径 0.8mm、1.1mm、1.5mm、2.2mm 玻璃管油水倒置现象

上述实验过程和结果表明:内径 5.8 ~ 8mm 的单一毛细玻璃管均可形成短暂的油水倒置现象但不稳定,油柱上浮很快;内径 3.7 ~ 4.9mm 的单一毛细玻璃管均可形成暂时的油水倒置现象,油柱缓慢上浮;形成稳定油水倒置的临界直径大约为 3.6mm(表 1-1)。

表 1-1 单一毛细玻璃管注油实验

序号	内径(mm)	油滴上浮时间	现象描述
1	0.8		油水倒置,非常稳定
2	1.1		油水倒置,非常稳定
3	1.5		油水倒置,非常稳定
4	2.2		油水倒置,稳定
5	3.6		油水倒置,较稳定
6	3.7	220h	油水倒置,较稳定,9d 后缓慢上浮
7	4.0	45'30"	形成油水倒置,油柱上浮缓慢
8	4.9	32'10"	短时间油水倒置,油柱上浮慢
9	5.8	2'20"50	较短时间油水倒置,油柱上浮较快
10	6.9	1'33"25	单一油柱,上浮较快
11	8.0	45"32	形成分段小油柱,上浮很快
12	8.5	24"47	多为散状上浮,可形成约 1cm 小油柱

续表

序号	内径(mm)	油滴上浮时间	现象描述
13	9.0	4"53	多为悬浮状小油滴,可形成1~2段0.5~1cm小油柱
14	11	3"70	悬浮状小油滴,不能形成连续油柱
备注	实验条件相同下对比,注油量2ml,注油速率约20ml/min		

3. 实验结果讨论

上述单一毛细管的水封油实验表明,毛细管越细越容易形成水封油和油水倒置现象,由此可以得到以下认识:

① 表面张力越大,所产生的毛细管压力就越大,流体倒置关系就越容易形成。由于油—水表面张力大约是气—水表面张力的一半,照此分析气水倒置关系应该比油水倒置关系更容易形成和保存,上述实验已证明结论正好是相反的。因此,与表面张力相比,油气密度可能在流体倒置关系的形成过程中起更为重要的作用。

② 与气水倒置实验的临界直径为0.3cm相比(庞雄奇,2003),形成油水倒置时的临界玻璃管直径增大(0.36cm),主要原因归结于原油的密度较大,浮力减小。由前所述,油水倒置的动力学条件是没有浮力存在,但在达到浮力作用消失之前的临界条件下,玻璃管壁上的束缚水膜仍然能够流动并传递水压。由于原油的密度较大,相同条件下油柱对玻璃管壁所施加的压力比气柱大,导致能够传递水头压力的束缚水膜厚度提前减薄至临界值,即浮力作用消失的临界状态提前结束,从而更易于形成油水倒置关系:

a. 在相同的玻璃管(毛细管)半径条件下,密度较大的原油更容易形成流体倒置(油水倒置)关系,即深盆油藏比深盆气藏更加“稳定”。

b. 在特殊的毛细管半径条件下,当气水倒置关系(深盆气藏)无法形成时,油水倒置关系(深盆油藏)仍然可以在一定范围内形成,即深盆油藏的形成和保存对毛细管半径的要求并不苛刻,深盆油藏也更容易“形成”。

③ 单一毛细管水封油试验是十分理想的实验,获得的水封油临界孔喉直径“很大”,这是由于实验室难以模拟复杂地质条件造成的,但实验获得的“水封油”现象具有很好的启示意义。玻璃管与岩石孔隙具有相似的表面物理性质,玻璃管观察结果可以推广至地下理想条件下单根均匀毛细管的油水排驱作用,烃类的密度变化在流体倒置关系(深盆油气藏)的形成中具有更大作用,类似实验室条件下的“水封油”作用也应该是存在的。

二、砂体封油及保存模拟实验

1. 实验方法

对填满不同粒径的细砂和水的玻璃管进行油驱水系列实验,观测玻璃管中原油运移情况,确定水封油的最大砂粒粒径、对应砂粒粒径的孔喉直径(图1-11)。

为排除玻璃管大小对油水倒置关系形成的影响,选择长度为400mm,内径分别为20mm和50mm的玻璃管进行实验。首先在玻璃管内注水(无色)填砂,然后从底部注入染色的凝析油。本实验重点对8种砂粒进行实验观察,砂粒粒径分别为:0.7~0.8mm,0.5~0.55mm,0.4~0.45mm,0.35~0.4mm,0.3~0.35mm,0.25~0.3mm,0.2~0.25mm和0.1~0.15mm。

1) 实验材料

将粒度相同等轴近浑圆颗粒状石英砂填充到管状玻璃容器中。实验中使用的水为蒸馏水,

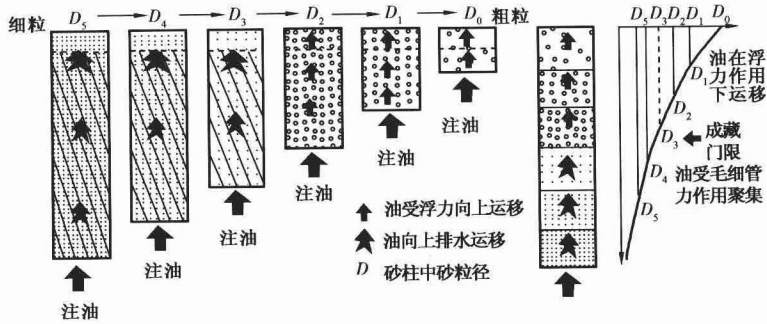


图 1-11 玻璃管砂柱封油物理模拟实验示意图

其粘度为 1.002cp (20°C), 密度为 $1.007\text{g}/\text{cm}^3$ (20°C); 用于排替水的凝析油的粘度为 1.698cp (16°C), 密度为 $0.792\text{g}/\text{cm}^3$ (19°C); 凝析油用油红染色, 以便与水区别, 便于观察实验现象。

实验前先用清水反复漂洗石英砂表面的粉尘, 并浸泡 24 小时。

2) 填装砂体模型

管状模型由石英砂填入玻璃管而成。玻璃管直径分别为 20mm 和 50mm ; 长度为 400mm , 可以采用干填和湿填两种方法填装整个玻璃管而制成砂柱模型。

3) 实验流程

将填装好的玻璃管直立, 固定在托架上, 用恒流泵注入或注射器针头刺穿玻璃管底端胶塞, 向管内注入一定体积的染色油 (凝析油), 静置 10min 后记录原始油柱高度。观察实验过程, 每隔一定时间记录油运移前缘的高度并拍照, 直至油运移至砂体的顶部。

4) 观测技术

对于实验结果的观测, 主要采用肉眼观察, 随时记录油在孔隙介质中驱替孔隙水的过程; 按一定的时间间隔利用数码相机或摄像机拍摄运移路径及路径前缘的形态。由于这些方法只能观察到玻璃装置表面的路径, 内部路径图像模糊难辨。

2. 实验现象

直径为 50mm 的玻璃管中填充砂进行实验获得如下现象。

① $3.0 \sim 4.0\text{mm}$ 粒径砂: 无法形成油水倒置现象, 注入的凝析油虽然可以以活塞方式对水进行整体推进, 但无法稳定存在, 注入的油在浮力作用下很快向上运移。

② $0.7 \sim 0.8\text{mm}$ 粒径砂: 由于凝析油的粘滞性运移过程, 短时间内形成视觉上的“油水倒置”。底部注入凝析油在大约 16min 后产生第一滴浮出水面的油珠, 其直径约为 $3 \sim 4\text{mm}$, 运移距离约为 16cm 。所形成的油水倒置现象在数小时内完全破坏并形成浮于水面上方的油柱, 最后在原始油柱位置和油的运移路径上形成较为均匀分布的油斑。

③ $0.5 \sim 0.55\text{mm}$ 粒径砂: 注油后的现象大致与 $0.7 \sim 0.8\text{mm}$ 粒径砂相同, 但油柱变化时间更长, 大约 3h 后产生第一滴浮出水面的油珠, 上浮的油珠直径大约为 $2 \sim 3\text{mm}$ 。

④ $0.4 \sim 0.45\text{mm}$ 粒径砂: 注入油可以保持一定时间的稳定, 大约 20h 后产生第一滴浮出水面的油珠, 上浮的油珠直径为 2mm 左右, 油水界面略微上移。

⑤ $0.35 \sim 0.4\text{mm}$ 粒径砂: 注入油可以保持一定时间的稳定, 大约 25h 后产生第一滴浮出水面的油珠, 排出油珠直径为 2mm 左右。

⑥ 当砂粒粒径小于等于 $0.3 \sim 0.35\text{mm}$ 时, 注入油柱稳定存在, 且砂粒越细油柱越稳定。至少在 560d 后, 实验中的 4 种砂粒油柱均没有发生上浮移动。

上述实验表明, 当砂粒粒径为 0.35mm 或更小时, 可以产生油水倒置现象, 此时的孔隙平