

超低渗透油藏勘探开发技术新进展

超低渗透油藏 勘探理论与技术

EXPLORATION THEORY AND TECHNOLOGY FOR ULTRA-LOW
PERMEABILITY RESERVOIRS

杨 华 付金华◆著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一部有关超低渗透油藏勘探理论与技术的专著,以鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透油藏为典型代表,全面论述了超低渗透油藏地质特征、富集条件、油藏成藏动力学和资源评价等勘探理论,并进一步系统地介绍了超低渗透油藏勘探目标评价技术、油气地表地球化学勘探技术、地震勘探技术和测井技术等勘探技术方法,探讨超低渗透油藏勘探开发一体化管理模式。对同类油藏勘探具有重要指导意义和实用参考价值。

本书可供从事石油地质勘探与开发的生产、教学和科研人员参考。同时,也可作为石油地质专业研究生油气勘探方面的教材。

图书在版编目(CIP)数据

超低渗透油藏勘探理论与技术/杨华,付金华著.
北京:石油工业出版社,2012.2
(超低渗透油藏勘探开发技术新进展)
ISBN 978-7-5021-8928-0
I. 超…
II. ①杨…②付…
III. 鄂尔多斯盆地-低渗透油气藏-油气勘探-研究
IV. P618.130.8
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 012361 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)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.75

字数:505 千字

定价:120.00 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 一

超低渗透油藏属于非常规油藏,受技术条件和开采成本制约,长期以来没有得到规模有效开发。近年来随着石油勘探和资源供需形势的巨大变化,超低渗透油藏越来越受到国际石油界的重视,国外致密油气(tight oil)的划分范围比较宽泛,国内与之对应的划分标准则涵盖了特低渗透、超低渗透和非储层三种类型。我国超低渗透油气资源分布广、储量大,在油气资源勘探和开发中占据着十分重要的地位。鄂尔多斯盆地是我国规模最大的低渗透油气资源富集区,经过几十年的潜心研究,超低渗透油藏勘探开发理论与技术取得了重大进展,并实现了工业规模开发,为国内外超低渗透油藏勘探、开发和现代油田管理提供了成功范例。鄂尔多斯盆地超低渗透油藏勘探与开发经验证明,油藏勘探开发理论研究和勘探开发新技术的应用,是指导油田勘探和开发方案部署的基础,是超低渗透油藏勘探开发成功的关键所在;观念创新、方法创新和标准化、数字化管理实践,是超低渗透油田实现低成本发展与生产方式转变的基石。由冉新权教授主持撰写的《超低渗透油藏勘探开发技术新进展》丛书,就是在大量理论研究和实践基础上,对超低渗透油藏勘探开发理论与技术的全面论述和系统总结,不但丰富和发展了传统的油藏形成机理,开拓了油藏勘探开发新领域,创新了现代油藏管理模式,而且对我国乃至世界其他地区超低渗透油藏勘探开发具有重要的指导意义。

本套丛书共四册,包括《超低渗透油藏勘探理论与技术》《超低渗透油藏开发理论与技术》《超低渗透油藏压裂改造技术》《超低渗透油藏地面工程技术》。系统介绍了超低渗透油藏勘探、开发、数字化管理技术和方法,包括地震勘探技术、测井技术、井网优化技术、多级加砂和多缝压裂技术、数字化关键技术、地面集输关键设备研发等,结合长庆油田超低渗透油藏具有的“三低”特点,对上述技术的内容和应用效果进行了详细论述。其中黄土塬复杂地形和地表条件下地震勘探和地球化学勘探技术、低阻油层测井识别技术的应用达到国际先进水平;根据启动压力梯度、最小可流动喉道半径确定生产压差,进行高效合理注水,结合储层物性关系、确定临界注采静压差,建立有效驱替压力系统的评价方法,精细调控注采压力系统,是地层压力保持合理水平的有益尝试;数字化增压橇、智能注水橇和远程控制电磁阀等数字化关键设备的成功研发,使集油站无人值守成为现实,使油田组织管理方式和发展方式发生根本转变。

我赞同本丛书的观点,即超低渗透油藏成功的勘探开发得益于科学管理和技术创新,思维方式的转变、管理理念的创新,催生了以标准化体系为核心的超低渗透油藏全新管理模式。如勘探开发一体化就是适合于鄂尔多斯盆地自然条件和地质条件的油藏评价创新举措,一体化的管理模式改变了以往传统的做法,加快了地质认识的步伐,缩短了建设周期,提高了勘探开发的整体效益;具有自主知识产权的多级压裂工艺和先进适用技术的集成与应用,助推了低成本发展的步伐,其产生的技术经济效益是显而易见的。

总之,本套丛书是生产和科研相结合的成果,集中反映了我国近年来在超低渗透油藏勘探开发方面的最新进展,代表了超低渗透油藏勘探开发、地面集输系统标准化设计与油田数字化建设的先进水平,也是一套国际上少有的针对性和实用性非常强的系列专著,值得我们学习和研究。我相信,这套书的出版,不仅对发展超低渗透油藏勘探、开发理论研究和技術具有重要的启发作用,更重要的是对我国目前和今后油气勘探开发具有重要的指导意义。为此,在本套书出版之际,我谨向作者和致力于超低渗透油藏勘探开发的有识之士致以衷心的祝贺。希望你们继续努力,为鄂尔多斯盆地能源化工基地建设和我国经济社会发展做出更大的贡献。

沈忠厚

(中国工程院院士)

2011年9月

序 二

鄂尔多斯盆地是我国规模最大的低渗透油气资源勘探与开发基地,经过几十年的艰苦努力,超低渗透油藏成藏理论与勘探技术取得了重大进展,油气产量创历史新高,成为世界上超低渗透油藏勘探和开发成功的范例。超低渗透油藏是指油层渗透率平均为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mD}$ 的油藏。进入 21 世纪,长庆油田将石油勘探的触角不断向特低渗透—超低渗透油藏延伸,相继发现了西峰、姬塬油田,特别是近年来超低渗透油藏的勘探开发取得了新的突破,发现并开发了 $5 \times 10^8 \text{ t}$ 储量规模的华庆超低渗透油田,实现了超低渗透油藏的有效开发,使低渗透油藏开发极限降至 $0.3 \sim 0.5 \text{ mD}$ 。为了深化对超低渗透油藏成藏机理的认识,全面阐述超低渗透油藏勘探理论和技术,系统总结超低渗透油藏勘探成功经验,特编写本书,以进一步指导油气勘探向新区、新领域不断发展,这必将对同类油藏的勘探起到重要的借鉴作用。

全书共分十章,第一章为绪论,主要介绍了超低渗透油藏基本概念、国内外超低渗透油藏勘探历史、勘探现状、勘探开发前景、未来发展方向与趋势,以鄂尔多斯盆地延长组超低渗透油藏为典型实例,分别从理论和勘探实践两方面探讨低渗透油藏勘探的认识和启示。第二章至第六章为超低渗透油藏勘探理论,其中第二章是对超低渗透油藏地质特征的全面总结,以鄂尔多斯盆地三叠系延长组油藏为例,系统论述了油藏区域地质、沉积体系、沉积相、油藏类型等特征;第三章总结了超低渗透油藏富集条件,论述了烃源岩与生烃热演化特征、储集条件和盖层条件以及成藏特征与成藏模式等;第四章探讨了超低渗透油藏成藏动力学,应用石油运移动力学原理,分析石油运移动力和成藏动力学及其平衡条件,探讨成藏动力学系统与油气聚集特征;第五章超低渗透油藏油气资源评价,在大量实验分析测试资料的基础上,通过生油岩和原油及伴生气有机地球化学特征分析,确定有效烃源岩特征及其生排烃能力,在模拟实验的基础上,选定资源量计算参数,分别计算了生、排烃量;第六章介绍了超低渗透油藏勘探目标评价技术,突出超低渗透勘探目标评价的方法、技术和程序,其中在区域勘探评价中强调了宏观评价程序,在区块勘探评价中注重目标区带优选,在圈闭评价中突出有利条件评价和勘探部署。

第七章至第九章为超低渗透油藏勘探技术,其中第七章是超低渗透油藏地表油气地球化学勘探技术,本章在介绍油气化探理论、方法及质量评估的基础上,重点介绍了黄土塬区超低渗透岩性油藏化探异常信息提取与处理技术和化探异常解释与评价技术。第八章是超低渗透油藏地震勘探技术,系统介绍了黄土塬复杂地表条件下的地震资料采集和处理关键技术,地震层位标定、地震构造、沉积相和岩性分析技术,以及储层含油气性地震预测技术。通过鄂尔多斯盆地延长组超低渗透性油藏勘探实例,分析了地震勘探技术及其应用效果。第九章超低渗透油藏测井技术,主要介绍了以阵列式感应和密度为代表的高精度仪器在超低渗透油藏勘探中的应用,重点介绍精细岩心刻度测井及精细储层分类建模技术以及超低渗透储层四性关系

对比和应用交会图方法、阵列感应式判别等新方法对油气水层的综合判识。同时,还简要介绍了核磁共振、声电成像、偶极子声波等测井新技术应用。第十章总结了超低渗透油藏勘探组织和管理经验,是在勘探实践中形成的超低渗透油藏勘探开发一体化模式,核心内容是整体性评价,一体化管理,规模性建产。勘探开发一体化管理模式极大地加快了低渗透油藏地质认识的步伐,缩短了勘探开发周期、提高了整体效益。

本书在编写方式上力求反映现代油气成藏研究和勘探的新理论、新进展、新技术和新方法,在指导思想上突出低渗透油藏的“三低”(低渗、低压、低丰度)特点,特别是对复杂地表地形条件下超低渗透隐伏岩性油藏的勘探技术研究和应用,不但丰富和发展了传统的油藏形成机理,开拓了油藏勘探新领域,而且在为超低渗透油藏勘探提供新思路和新观点的同时,注重介绍勘探技术和方法,具有很强的实用性,为从事低渗透油藏研究的有识之士提供重要参考。

依照我们对特低渗透—超低渗透油藏地质和勘探工作的感性认知,在写作过程中深感超低渗透油藏的地质条件之复杂,研究工作难度之大,勘探工作之辛苦。在此,谨向奋斗在鄂尔多斯盆地油气勘探战线的人们表示敬意,借此向关心和支持长庆油田上产 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 油气当量的各位读者表示谢意。

本书的完成得到长期从事该领域研究的合作专家的帮助,为本书编写提供了大量翔实的基础资料。长安大学地球科学与资源学院李荣西教授对本书编写提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

谨以此书纪念长庆油田会战 40 周年,并献给长庆油田年产油气当量实现 $4000 \times 10^4 \text{t}$!



2011 年 10 月



目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 超低渗透油藏概述	(1)
第二节 超低渗透油藏勘探开发前景	(10)
第三节 超低渗透油藏勘探主要做法与启示	(14)
第二章 超低渗透油藏地质特征	(18)
第一节 区域地质特征	(18)
第二节 沉积相特征	(38)
第三节 超低渗透油藏特征	(66)
第三章 超低渗透油藏形成条件	(75)
第一节 优质油源岩条件	(75)
第二节 储层和盖层特征	(80)
第三节 圈闭(油藏)类型	(98)
第四章 超低渗透油藏成藏特征	(100)
第一节 成藏期次与成藏过程	(100)
第二节 输导体系	(103)
第三节 成藏动力学	(110)
第四节 石油运移方向	(117)
第五章 超低渗透油藏油气资源评价	(121)
第一节 生烃岩有机地球化学特征	(121)
第二节 中生界原油地球化学特征及油源对比	(137)
第三节 有效烃源岩的厘定及其分布特征	(150)
第四节 有效烃源岩资源量评价	(157)
第六章 超低渗透油藏勘探目标评价技术	(163)
第一节 勘探区带综合评价	(163)

第二节 预探目标(圈闭)优选	(176)
第三节 油藏评价勘探	(182)
第七章 超低渗透油藏油气地球化学勘探技术	(190)
第一节 油气化探理论与方法	(190)
第二节 油气化探异常信息提取与处理技术	(199)
第三节 化探异常解释与评价	(208)
第八章 超低渗透油藏地震勘探技术	(228)
第一节 地震资料采集技术	(228)
第二节 地震资料处理关键技术	(229)
第三节 地震预测技术	(240)
第四节 地震技术应用实例	(251)
第九章 超低渗透油藏测井技术	(255)
第一节 高精度测井系列的推广	(255)
第二节 超低渗储层测井精细建模	(263)
第三节 储层“四性”关系研究	(272)
第四节 油气水层的综合识别方法	(277)
第五节 测井新技术应用	(287)
第十章 超低渗透油藏勘探开发一体化模式探讨	(299)
第一节 勘探开发联手,深化油藏认识	(299)
第二节 整体勘探、整体评价、整体开发	(301)
参考文献	(305)

第一章 绪 论

随着世界油气工业的发展,那些规模大、储量大、资源丰度高、易勘探、好开采的常规油气资源在剩余油气资源总量中所占的比重越来越小,而勘探开发难度大、技术要求高、以前不被世人所重视的超低渗透油气资源已经成为全球油气勘探和开发的一个重要领域,越来越受到人们普遍重视。经过长期努力,我国以鄂尔多斯盆地为代表的超低渗透油气资源勘探和开发取得了世界公认的成果,在超低渗透油气藏勘探理论和技术方面积累了丰富的经验,回顾和总结超低渗透油气资源勘探和开发的宝贵经验,对有效指导超低渗透油气藏勘探实践活动具有十分重要的意义。

第一节 超低渗透油藏概述

一、超低渗透油藏概念及分类

超低渗透性油藏是一个相对的概念,是依据储层物性划分出的一种油藏类型,指油层孔隙度低、喉道小、流体渗透能力差、产能低,通常需要进行油层改造才能获得工业油流的油藏。目前,超低渗透储层的岩石类型包括砂岩、粉砂岩、砂质碳酸盐岩、石灰岩、白云岩等,但主要以致密砂岩储层为主。

根据低渗透储层的孔隙度和渗透率特征,可分为两类:一类为高孔低渗储层,该类储层主要由沉积粒度比较细的粉砂岩构成,孔隙度相对较高(原始孔隙度可达到 10% ~ 40%),但是由于颗粒粒度细、粒内和粒间孔隙小且束缚水饱和度一般在 90% 左右,所以空气渗透率很低;另一类为低孔低渗储层,孔隙度(3% ~ 12%)和空气渗透率都很低,毛细管压力相对较高,束缚水饱和度一般在 45% ~ 70%,由于孔隙主要是由分散的微孔洞构成的,且孔洞之间的连通性差造成渗透率低。低渗透储层的形成主要与沉积作用、成岩作用和构造作用有关。按照成因不同可以将低渗透储层分为原生低渗透储层、次生低渗透储层和裂缝性低渗透储层(曾联波,2008)。原生低渗透储层主要受沉积作用的影响,沉积物粒度细,泥质含量高,分选差,以原生孔为主,储层大多埋深较浅,未经历强烈的成岩作用改造,岩石脆性低,裂缝不发育,孔隙度较高,而渗透率较低,多数为中高孔低渗型。次生低渗透储层主要是各种成岩作用改造的结果,这类储层原是常规储层,但由于压实作用、胶结作用等,大大降低了孔隙度和渗透率,原生孔隙残留较少,形成致密层。我国已发现的低渗透储层主要是这类储层。裂缝性低渗透储层主要受构造作用的影响。一些比较致密的岩石脆性较大,成岩后期构造作用产生的外力可以使一些比较致密的脆性较大的岩石发生破裂,形成一定的构造裂缝,从而提高了储层渗透率,形成裂缝性低渗透储层。裂缝既是这类储层的有效储集空间,也是主要的渗流通道(秦同洛,1994)。

然而,由于目前全球对于低渗透储层概念的认识还不完全一致,因此还未形成统一的低渗

透储层的分类和评价标准,不同的国家根据不同时期的石油资源状况和经济技术条件来制定其标准和界限,变化范围较大。而在同一国家、同一地区,随着认识程度的提高,低渗透油气藏的标准和概念也在不断地发展和完善。

前苏联学者将渗透率小于 50 ~ 100mD 的油田算作低渗透油田(苏尔古伊耶夫 MJ, 1993)。美国联邦能源管理委员会(FERC)把渗透率小于 100mD 的油田称为低渗透油田,把渗透率小于 0.1mD 的储层称为致密储层。

我国专家在长期的研究过程中,不同的学者根据不同的研究对象,提出了多种分类方案。1986 年罗蛰潭、王允诚提出将渗透率小于 100mD 的储层作为低渗透储层,并根据储层孔隙结构及毛细管压力参数将砂岩储层分为四大类。

严衡文等 1992 年在西安国际低渗透油气藏会议上,将渗透率大于 100mD 的储层作为好储层,将渗透率为 10 ~ 100mD 的储层作为低渗透储层,将渗透率为 0.1 ~ 10mD 的储层作为特低渗透储层(严衡文等,1993)。

李道品长期从事低渗透研究,将低渗透层的渗透率上限定为 50mD,并提出了“超低渗透”的概念(李道品等,1997,1998)。结合油田的生产实际,按照油层的平均渗透率将低渗透油田分为三类:(1)一般低渗透油田,油层平均渗透率为 50 ~ 10mD;(2)特低渗透油田,油层平均渗透率为 10.0 ~ 1.0mD;(3)超低渗透油田,油层平均渗透率为 1.0 ~ 0.1mD。

综上所述可以看出,目前我国专家在低渗透储层的上限方面已基本达成共识,即普遍将渗透率 50mD 作为低渗透碎屑岩储层的物性上限,并基本形成大的分类框架。1998 年制定了中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》(SY/T 6285—1997)(赵澄林等,1998),确定了含油储层的孔隙度、渗透率评价分类标准(表 1-1)。该标准将低渗透含油砂岩储层分为低渗透(渗透率 50 ~ 10mD)、特低渗透(渗透率 10 ~ 1mD)、超低渗透(渗透率 1 ~ 0.1mD)、非渗透(渗透率小于 0.1mD)储层(表 1-1)。但此分类仍然存在一些不足,突出表现在两方面:一是现行的石油天然气行业标准对于低渗透储层的分类仍然偏粗,不能满足像鄂尔多斯盆地这种典型低渗透油气田勘探评价的需要;二是对于各级低渗透储层的孔隙度划分界限还有待探讨。

表 1-1 含油碎屑岩储层孔隙度和渗透率评价分类标准

级别	特高	高	中	低	特低	超低
孔隙度, %	> 30	30 ~ 25	25 ~ 15	15 ~ 10	10 ~ 5	< 5
渗透率, mD	> 2000	2000 ~ 500	500 ~ 50	50 ~ 10	10 ~ 1	1 ~ 0.1

大量生产实践经验证明,超低渗透性油藏储层致密,成藏控制因素多样,油气聚集成藏机理复杂,勘探难度大。同时,超低渗透性油藏束缚水高而含油饱和度低、孔隙度低、喉道小、流体渗透能力差,一般情况下没有自然产能,在常规技术条件下不具备商业开发价值。只有采取特殊技术措施,超低渗透性油藏油井产量才能够获得一定产能,达到工业油流标准。由于超低渗透性油藏油井产量低下,高产稳产难度大,要求不断革新开发技术,应用各种技术手段提高单井产量,才能取得较好的开发效果和良好的经济效益。

近年来,长庆油田加强鄂尔多斯盆地延长组超低渗储层的研究,通过系统研究储层特征、微观结构、渗流特征等参数,结合可动流体饱和度测试技术、恒速压汞的微观孔隙结构测试技

术、低渗透储层启动压力测试技术、低渗透储层水驱油特征研究方法等成熟技术的应用,筛选出4个超低渗储层分类参数(启动压力梯度、有用孔喉体积分数、主流喉道半径、可动流体饱和度)进行分类评价(表1-2)。综合研究表明:有效孔隙度、可动流体饱和度、主流喉道半径与渗透率呈正相关性,与启动压力梯度呈负相关性。通过对4个参数归纳分析,构建了一个综合性超低渗储层分类参数——四元分类系数(F_{eci})。即:

$$F_{eci} = \ln \frac{(\phi_e / \phi_{e\max})(S_o / S_{o\max})(r_m / r_{m\max})}{\lambda / \lambda_{\max}}$$

式中 F_{eci} ——超低渗储层分类系数;

ϕ_e ——有效孔隙度;

S_o ——可动流体饱和度;

r_m ——主流喉道半径;

λ ——启动压力梯度。

表 1-2 四元分类系数法评价的超低渗储层综合分类

分类	有用孔喉体积分数	可动流体饱和度	主流喉道半径, μm	启动压力梯度, MPa/m	四元分类系数	相应渗透率 mD
特低渗	>0.7	>0.5	>2.5	<0.05	>4.0	>1.0
超低渗 I	0.56 ~ 0.8	0.42 ~ 0.62	1.3 ~ 2.5	0.05 ~ 0.2	1.5 ~ 4.0	0.5 ~ 1.0
超低渗 II	0.56 ~ 0.8	0.42 ~ 0.62	0.8 ~ 1.3	0.2 ~ 0.5	0 ~ 1.5	0.3 ~ 0.5
超低渗 III	0.42 ~ 0.7	0.35 ~ 0.52	0.35 ~ 0.8	0.5 ~ 1.1	-2.0 ~ 0	0.1 ~ 0.3
非有效层	<0.42	<0.4	<0.35	>1.1	<-2.0	<0.1

在分类系数与渗透率关系图上,超低渗储层划分为超低渗 I、II、III 三大类(图 1-1)。

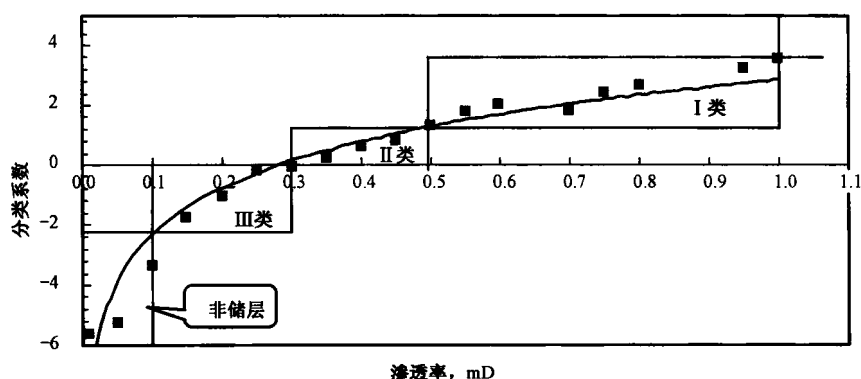


图 1-1 四元分类系数与渗透率关系图

二、超低渗透油藏勘探现状

全球经济的快速增长,对石油的需求不断增加,促使原油价格持续攀升,也带动了低品位、低渗透油气藏勘探开发的快速发展,并已成为全球油气勘探开发的热点。在我国陆上,以鄂尔

多斯盆地为代表的低渗透油气藏勘探开发取得了重大突破,为低渗透油气藏勘探开发积累了宝贵的经验。低渗透油气藏已成为我国当前乃至今后中国石油工业发展的主流和必然趋势。

(一)世界超低渗透油藏勘探现状

随着世界油气工业的发展,那些规模大、储量大、资源丰度高、易勘探、好开采的油气资源在整个剩余油气资源总量中所占的比重越来越小,而一些以前不被重视的、未列入主要勘探目标的、开发效益相对较差、勘探开发技术要求高的油气资源将逐步成为全球油气勘探开发的热点。有关方面在对全球各类油气资源分布及其所需勘探开发技术研究的基础上指出,可用一个三角形图对全球油气资源进行描述(图 1-2)。

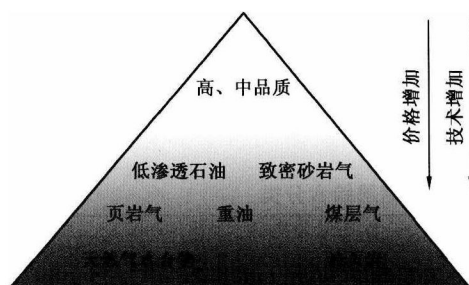


图 1-2 油气资源状况三角图解

从图 1-2 可以看出,高、中品质容易开发的常规油气资源占据三角形上部面积较小区域,对应的资源量也较小;而低渗透石油、致密砂岩气、页岩气、重油、煤层气、天然气水合物、油页岩等低品质不容易开发的非常规油气资源占据三角形的中下部,对应的资源量也较大。而且从三角形顶端到底部,油气资源开发所需技术和成本逐步增高。随着高、中品质常规油气资源的减少和勘探开发技术的进步,低渗透油气资源将成为常规油气资源的接替者和保障世界油气资源供应的主角。

在我国陆上更是如此,随着我国油气勘探开发程度的不断提高,优质油气田的储量和产量逐年减少,低渗透等低品位油气田的储量和产量所占比例逐年增大,已成为当前以及今后我国油气增储上产的主要资源。

低渗透油田是世界上最重要的油气田类型之一。世界上低渗透石油资源十分丰富,其资源量占总资源的 20% ~ 60%。分布范围非常广泛,在北美、中亚、东亚和东南亚、北非、北欧等地区都有广泛的分布,主要分布于墨西哥、中国、阿尔及利亚等 17 个国家(图 1-3),剩余探明储量中低渗透石油储量达 $349.5 \times 10^8 \text{ t}$,占全球剩余石油储量的 20%。

随着油气勘探开发时间的延长,低渗透油田所占的比例越来越大。例如,俄罗斯近几年来在西西伯利亚地区新发现的低渗透、薄层等低效储量已占其当年油气探明储量的 50% 以上,低渗透油气藏已成为俄罗斯老油气开发区最主要的后备资源。目前总体来看,由于开发难度大、技术水平要求高,国外对低渗透石油资源开发的规模还不是很大,多数产油国的油气勘探开发的主要目标仍是中高渗产层。美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等是除中国以外世界上为数不多的几个开发低渗透油藏的国家,目前这些国家开发的低渗透储层的渗透率下限基本在 1.0mD 以上。如美国就在二叠盆地(Permian Basin)开采渗透率 1.0mD 左右的油藏,单井平均

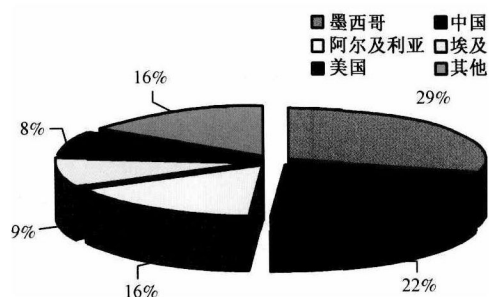


图 1-3 世界主要产油国低渗透油田储量分布图

产油量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ t/d}$ 。俄罗斯则在西伯利亚地区的贝斯特林油田、西苏尔古特油田、东苏尔古特油田、罗斯金油田和费德罗夫油田等的低渗透油气资源开发中积累了丰富的经验。

(二) 中国超低渗透油藏分布与勘探现状

在中国特有的以陆相沉积为主的含油气盆地,普遍具有储层物性较差的特点,相应发育了丰富的低渗透油气资源。经过长期不懈的探索,中国低渗透资源的勘探取得了很大的发现,特别是近 20 年来,在低渗透砂岩、海相碳酸盐岩、火山岩等的石油勘探中发现了大规模石油储量,低渗透油藏目前已经成为石油储量增长的主体。通过持续不断的开发技术攻关和创新,中国低渗透油藏资源实现了规模有效开发,形成了国际一流的低渗透油藏开发配套技术系列。在中国石油产量构成中低渗透油藏产量的比例逐步上升,地位越来越重要。随着勘探程度的提高和对石油资源需求的不断增长,无论从剩余石油资源还是未来开发趋势分析,低渗透油藏将是中国未来石油勘探开发的主要对象,也是中国未来石油工业发展的主流和必然趋势(胡文瑞,2009)。

根据中国 2004—2007 年开展的第三次油气资源评价结果,全国石油远景资源量为 $1086 \times 10^8 \text{ t}$ (不含台湾和南海),其中低渗透资源量为 $537 \times 10^8 \text{ t}$,占总资源量的 49%。截至 2008 年底,中国剩余石油远景资源量为 $799 \times 10^8 \text{ t}$,其中低渗透石油资源 $431 \times 10^8 \text{ t}$,占剩余石油资源总量的 60%,全国低渗透石油资源的 80% 以上分布在中、新生代陆相沉积盆地中。

低渗透砂岩油藏是我国低渗透油藏的主要类型,以岩性油藏和构造—岩性油藏为主,主要分布于中国的鄂尔多斯盆地、松辽盆地、四川盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地以及渤海湾盆地、海拉尔盆地、二连盆地、苏北盆地和江汉盆地的中深层,探明储量大于 $2 \times 10^8 \text{ t}$ 的油区有大庆、吉林、辽河、大港、新疆、长庆、吐哈、胜利、中原等 9 个油区。其地质特征主要表现为“低渗、低压、低丰度”,渗透率 1.0 mD 左右,压力系数低于 1,储量丰度为 $(40 \sim 60) \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。通过近 20 多年的不懈探索,低渗透砂岩油藏在鄂尔多斯、松辽等盆地实现了大规模有效开发,为近几年中国原油产量的稳定增长发挥了重要作用。据统计,低渗透油藏产量比例逐年上升,近 3 年分别为 34.8%、36%、37.6%,其中 2008 年中国低渗透原油产量 $0.71 \times 10^8 \text{ t}$,占全国总产量的 37.6%。由此可见,低渗透资源在油田开发中的地位越来越重要,正在成为我国油田开发的主力军之一。

总结我国低渗透油田资源分布状况,可以发现其呈现以下特点。

(1) 油藏类型以岩性油藏为主:包括砂岩、碳酸盐岩和火山岩等岩性油藏。

(2) 分布区域广:我国东部、中部和西部都有分布。东部分布在松辽盆地、渤海湾盆地、二连盆地、海拉尔盆地、苏北盆地、江汉盆地等砂岩油藏和松辽盆地、渤海湾盆地火山岩油藏;中部分布在鄂尔多斯盆地砂岩油藏;西部分布在准噶尔盆地、柴达木盆地、塔里木盆地、三塘湖盆地砂岩油藏和火山岩油藏。

(3) 含油层系多:古生界、中生界和新生界都有分布,其中以中生界地层为主。

我国鄂尔多斯盆地、松辽盆地、四川盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地等大型叠合盆地普遍发育了中生界大型河流—三角洲沉积体系,砂体大面积广泛分布,为形成大面积低渗透砂岩油藏奠定了基础。在 20 世纪 80 年代以前,由于受技术条件和地质认识程度的限制,勘探效果不明显,进展不大。20 世纪 80 年代以来,随着油气勘探理论的丰富发展和技术的巨大进步,低渗透油藏勘探取得了重大发现,在大面积低渗透砂岩油藏和火山岩油藏勘探方面取得一系列重

大突破,发现了一大批地质储量超过亿吨级和多个地质储量达 $(5 \sim 10) \times 10^8 \text{t}$ 规模的油田群,形成了石油储量新的增长高峰期。

截至2008年底,我国在几个主要大型沉积盆地中已发现184个低渗透油田,累计探明低渗透石油地质储量 $141 \times 10^8 \text{t}$,可采储量 $18.9 \times 10^8 \text{t}$ 。其中,鄂尔多斯盆地自20世纪80年代以来,随着储层预测技术、压裂改造技术和地质认识的提高,先后发现了一批低渗透整装大油田。1983年发现了地质储量超亿吨的安塞油田,1996年在其西侧发现了靖安油田,2001年在盆地西南部发现西峰油田,共探明石油地质储量 $2.4 \times 10^8 \text{t}$ 。2003年在盆地西北部发现姬塬油田,探明石油地质储量 $4.06 \times 10^8 \text{t}$;2005年在盆地中部发现华庆油田,探明石油地质储量 $5.2 \times 10^8 \text{t}$ 。通过进一步勘探与评价,预计在陕北、陇东、姬塬和华庆地区有望形成4个 $10 \times 10^8 \text{t}$ 级规模储量区。松辽盆地从20世纪80年代开始,以高分辨率二维和三维地震资料为基础,针对大面积低渗透岩性油藏勘探,加强河流—三角洲砂体分布研究和有效储层的预测,不断探索提高单井产量的油层压裂改造技术,陆续发现了徐家围子、大情字井、英台—四方坨子等油田,低渗透岩性油藏勘探实现了大面积突破,新增石油探明地质储量 $24.5 \times 10^8 \text{t}$,可采储量 $4.9 \times 10^8 \text{t}$ 。准噶尔盆地自2005年开始在盆地西北缘沿逆掩断裂带开展低渗透油气勘探,按照多层系复式聚集成藏理论,突出岩性勘探、深化富油区带精细勘探,通过重新认识和重新评价,取得新的突破和发现,储量规模不断增长,2005—2008年在石炭系、二叠系和三叠系新增石油探明地质储量 $2.94 \times 10^8 \text{t}$,可采储量 $0.53 \times 10^8 \text{t}$,新发现地质储量规模超过 $5 \times 10^8 \text{t}$ 。

截至2008年底,我国主要大型沉积盆地石油资源量为 $569 \times 10^8 \text{t}$,其中低渗透资源量为 $370 \times 10^8 \text{t}$,占总资源量的65%(表1-3);剩余石油资源量 $413 \times 10^8 \text{t}$,其中剩余低渗透石油资源量 $316 \times 10^8 \text{t}$,占76.5%。松辽盆地、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地等四大盆地低渗透储量比例均在85%以上(表1-4)。全国累积探明石油地质储量 $287 \times 10^8 \text{t}$,其中低渗透石油地质储量 $141 \times 10^8 \text{t}$,占49.2%。我国主要大型沉积盆地近几年探明储量中低渗透石油地质储量所占比例平均达到70%以上(表1-5)。可以看出,低渗透石油资源已经成为目前勘探的主要对象和储量增长的主体,同时可以肯定低渗透资源也是我们未来最为主要的勘探对象和储量增长的主体。

表1-3 我国主要沉积盆地低渗透石油资源分布状况(胡文瑞,2009)

盆地	低渗透资源		常规资源		总资源量	
	资源量, 10^8t	比例,%	资源量, 10^8t	比例,%	资源量, 10^8t	比例,%
松辽	77	54	65	46	142	100
渤海湾	56	54	47	46	103	100
鄂尔多斯	68	92	6	8	74	100
柴达木	13	52	12	48	25	100
准噶尔	41	69	18	31	59	100
塔里木	37	51	36	49	73	100
其他	78	84	15	16	93	100
合计	370	65	199	35	569	100

表 1-4 我国主要沉积盆地低渗透剩余石油资源分布状况(胡文瑞,2009)

盆地	剩余石油资源量,10 ⁸ t	剩余低渗透石油资源量,10 ⁸ t	占剩余资源量比例,%
松辽	75	69	92
渤海湾	62	36	58.1
鄂尔多斯	59	55	93.2
柴达木	22	19	86.4
准噶尔	42	37	88.1
塔里木	70	28	40
其他	83	72	86.7
合计	413	316	76.5

表 1-5 我国主要沉积盆地近几年新增石油探明储量(胡文瑞,2009)

时间	原油	高一中渗透		低—特低渗透	
	地质储量,10 ⁴ t	地质储量,10 ⁴ t	比例,%	地质储量,10 ⁴ t	比例,%
2003	43903	13582	30.9	30321	69.1
2004	52107	10807	20.7	41300	79.3
2005	56152	16590	29.5	39562	70.5
2006	61511	22090	35.9	39421	64.1
2007	38440	11028	28.7	27413	71.3
2008	73710	9689	13	64021	87

低渗透油气资源的经济有效开发是一个世界性的难题,针对已探明难动用储量和新增低渗透储量的有效开发,我国进行了长期不懈的探索,开展了一系列针对性的开发技术攻关和试验,形成了一批世界水平的原创性和集成性开发技术,实现了低渗透砂岩、火山岩油气藏的规模有效开发,如鄂尔多斯盆地、松辽盆地、准噶尔盆地低渗透砂岩油藏的开发,三塘湖盆地牛东低渗透火山岩油藏的开发等。特别是鄂尔多斯盆地油层渗透率 0.5mD 油藏实现了规模有效开发,目前正在进行 0.3mD 油藏的开发攻关试验,为其他地区类似油藏的有效开发提供了经验和技术储备。总之,随着开发技术水平的不断提高,越来越多的低渗透、超低渗透资源将不断被有效开发。

(三)鄂尔多斯盆地超低渗透油藏勘探现状

鄂尔多斯盆地超低渗透油藏勘探和开发在我国具有突出的代表性。自 1907 年在陕北地区成功钻探中国陆上第一口油井延 1 井以来,低渗透油藏勘探开发的漫长探索历程,先后经历了探索、起步、突破和大发展四个阶段。20 世纪 70 年代,以延长组为主攻目标,在庆城一带实施了两条压裂大剖面井,改造效果不理想,低渗透的勘探开发工作进展比较缓慢,“压开延长组、拿下大油田”的目标未能实现,但为进一步认识和评价“磨刀石”式延长组油层,积累了宝贵的经验。80 年代在总结经验教训的基础上,明确认识到:要突破延长组的工业化局面,不仅需要抓压裂改造油层,更主要的还得靠地质勘探找出富集地区。1983 年在“陕甘宁盆地三叠系延长统特低渗透油层油气资源评价”基础上提出了“东抓三角洲、西找湖底扇”的找油思路,

并且将安塞地区作为勘探延长组的突破口。随着塞1井、塞5井、塞6井等一批高产井成功实施,在延长组发现了第一个内陆湖泊三角洲大油田,探明地质储量超亿吨。90年代末,在靖边气田勘探过程中,坚持立体勘探,又发现了靖安油田。伴随着安塞—靖安油田的成功开发,极大地坚定了挑战低渗透油藏的信心。随着勘探理论和技术的不断提高,进入21世纪以来,在盆地西南部西峰、西北部姬塬和湖盆中部华庆等地区连续发现了多个地质储量超亿吨的油田,在鄂尔多斯盆地形成了以陕北、陇东为中心的亿吨级超低渗透油田群。

1. 西峰地区石油勘探状况

西峰地区成藏地质条件复杂,勘探历尽艰辛。20世纪70年代、90年代进行了一系列探索,但未取得勘探上的实质性突破;进入21世纪,随着研究的不断深入和工艺技术的提高,在认真分析过去勘探成果的基础上,系统开展了盆地西南延长组沉积体系的研究,首次提出了“盆地西南部长8发育辫状河三角洲沉积,三角洲前缘分流河道砂体发育”的新认识;深化了延长组油气运移特征研究,指出了长7生烃过程中所产生的异常流体势有利于向长8大范围运移,形成“上生下储”成藏组合。在此认识的指导下,2001年开展了老井复查,优选西峰的白马区作为首钻目标,部署探井7口,6口井获5.8~34.7t/d的工业油流。其中西17井长8₁油层试油获34.7t/d的高产油流,长8油层勘探取得重大突破,从而拉开西峰亿吨级油田勘探的序幕。2002年在评价白马区长8₁油层储量规模的同时,积极向南北甩开预探,并在董志区西33井获得高产油流。据此开展了在白马、董志长约64km、宽20km的长8储层含油带上,整体连片评价,取得突破性进展。2003—2005年加强西峰油田主体带两侧的预探及在东侧的合水地区发现新的含油富集区,进一步扩大了西峰油田的含油范围。截至2010年,西峰油田累计探明储量 2.4×10^8 t,储量规模近 6×10^8 t。

2. 姬塬地区石油勘探状况

石油勘探经过了30年曲折的勘探历程。近年来,以陆相层序地层理论为指导,构建了姬塬地区主力目的层的沉积模式,首次提出“长4+5期湖侵背景下发育退覆式三角洲沉积”和“长8期发育浅水三角洲沉积”的新认识,突破了“湖侵期缺乏有效储集体”的束缚,实现了勘探层系的重大转移,开辟了勘探新领域。在长4+5、长6、长8油层取得了重大发现。在长4+5油层发现了铁边城、吴仓堡、堡子湾、铁边城北四条整装储量规模区,在长6油层发现了吴420、耿27、黄32等含油富集区,在长8油层发现了黄3—罗1、池53、罗3、元191等4个整装含油砂带。经过连续6年的集中勘探和评价,已累计探明储量 4.06×10^8 t。通过进一步勘探和评价,姬塬地区有望形成 10×10^8 t的储量规模。

3. 华庆地区石油勘探状况

通过深化湖盆中部沉积微相研究,突破了“湖盆中部以泥质岩类沉积为主,缺乏有效储集体”的传统观念,提出“长6—8期湖盆中部发育三角洲前缘分流河道、砂质碎屑流、浊流沉积等多种成因砂岩储集体,具备形成大型岩性油藏”的新认识。在部署上坚持整体勘探、整体评价、勘探开发一体化,华庆地区长6油层取得重大突破,落实了元284、白209、白255、山139四个整装规模储量区,新增探明地质储量 5.2×10^8 t。长8油层落实了白306、白246、白465、白468共四个含油富集区,开创了盆地中部石油勘探的新局面。华庆地区最终可形成 $(8 \sim 10) \times 10^8$ t的储量规模。

三、超低渗透油藏勘探开发难点

长庆油田勘探与开发的是典型的低渗、低压、低丰度隐蔽性油藏。目前勘探主力目的层的渗透率为1mD左右,地表及地下地质条件极为复杂,圈闭识别困难,勘探难度大。

(1) 陆相沉积变化大,以岩性圈闭为主,隐蔽性强。

陆相河流—三角洲沉积环境变化大,沉积类型多样,层序研究及有利相带预测难度大;河流迁移摆动频繁,多期河道叠置,砂体展布形态难刻画;随着勘探的逐步深入,勘探目标由三角洲前缘向湖盆中央及沉积中心推进,岩性圈闭边界难以确定,优选有利勘探目标难度进一步加大。

(2) 储层岩性复杂,孔喉细小,非均质性强。

储层岩石类型多,孔喉微观结构复杂,非均质性强,储层物性越来越差。勘探目的层喉道细小,孔隙连通性较差。长6油层组排驱压力一般为0.1~1.0MPa,最大1.8MPa;喉道中值半径一般为0.2~1.7 μm ,最小0.1 μm 。长8油层组排驱压力一般为0.4~1.4MPa,最大2.1MPa;喉道中值半径一般为0.15~1.3 μm ,最小0.07 μm 。长4+5油层组排驱压力一般为0.6~2.0MPa,最大3.5MPa;喉道中值半径一般为0.14~0.75 μm ,最小0.04 μm 。陕北长6油层组平均渗透率1~3mD,陇东地区长8平均渗透率0.5~2mD,姬塬地区长4+5平均渗透率为0.3~1.5mD,华庆地区长6₃油层组平均渗透率0.3~0.6mD。储层非均质性增强,横向厚度变化大,纵向上隔夹层较多,相同砂岩段渗透率分布范围为0.05~15mD,孔隙度分布范围4%~12%,增加了勘探开发难度。

(3) 油藏油水关系复杂,勘探目标评价难度大。

鄂尔多斯盆地中生界延长组油藏主要受岩性控制,由于储层物性差等原因造成油水重力分异性较差,油水关系较为复杂,存在构造高部位出水、低部位产油的情况,从而导致勘探目标评价难度加大。

(4) 地表条件差,资料信噪比低,地震勘探难度大。

鄂尔多斯盆地石油探区地表是举世闻名的黄土高原,由于长期的风化、侵蚀,形成了树枝状水系与沟、塬、梁、峁、坡并存的独特地形、地貌。这种巨厚黄土层地貌特征对地震波激发及接收极为不利,造成地震波衰减严重、信噪比和分辨率低;在资料处理方面存在静校正难度大、原始记录横向能量差异大、多组浅层折射干扰严重等困难;在资料解释方面存在砂岩与泥岩波阻抗差异小、储层横向变化大、岩性识别及有效储层预测困难。

(5) 岩电关系复杂,测井响应差异小,油层识别难度大。

延长组储层具有低孔、低渗特征,孔隙结构复杂,溶孔、微孔比例大,岩电性质复杂;油水分异不明显,普遍发育低阻、低饱和度油层,油、水层电阻率对比度小,测井信息对孔隙和流体的分辨能力比较低,有效储层识别与评价难度大;储层非均质性强,测井解释图版的适应范围小。

(6) 油层致密,油水关系复杂,压裂改造难度大。

鄂尔多斯盆地储层特有的低压、低渗、薄层、非均质性,导致油层改造极其困难。主要表现在4个方面:一是储层孔喉小,普遍含敏感性黏土矿物,优化低伤害压裂液体系难度大;二是压力系数低,压后排液难度大;三是单层厚度薄,薄互层发育,深穿透长裂缝改造的压裂规模优化难度大;四是油水关系复杂,分异不明显,控水增油工艺技术难度大。

(7) 地层压力系数低,应力敏感性强,非达西渗流明显。