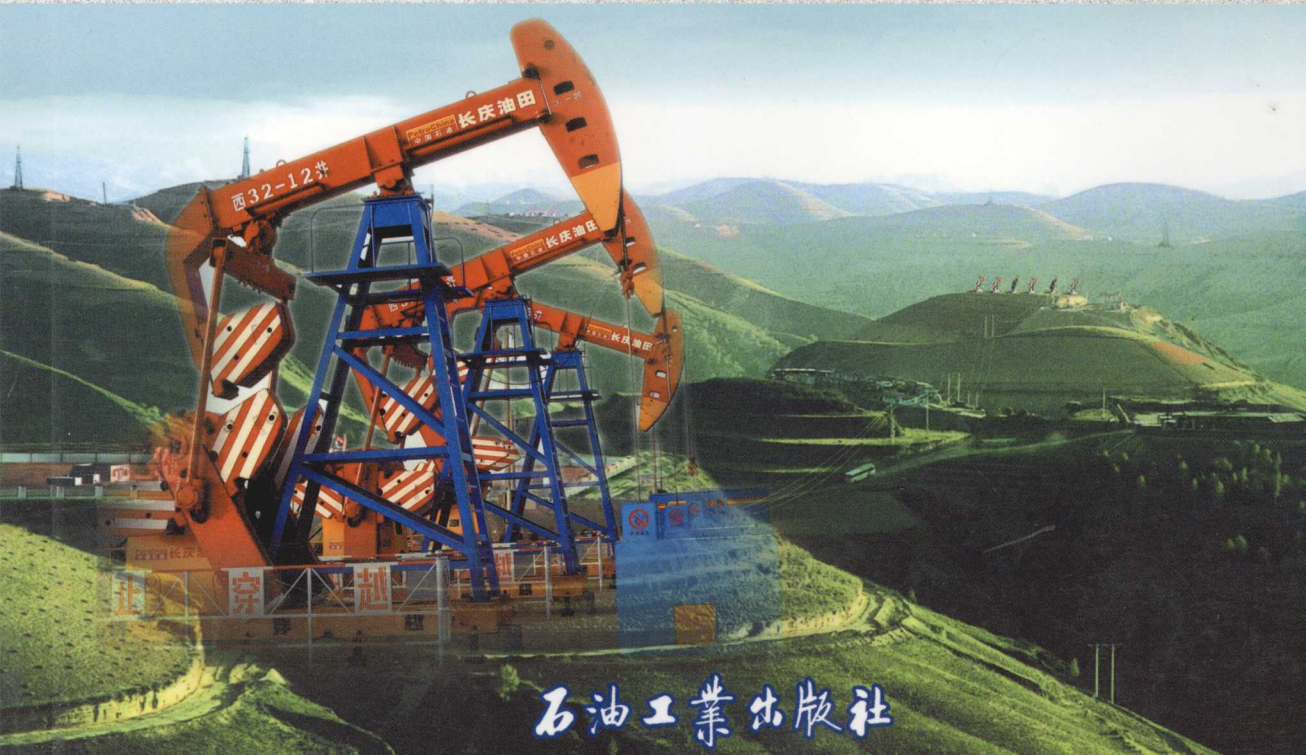


ORDOS BASIN

王道富◎著

EXTRA-LOW PERMEABILITY  
OILFIELD DEVELOPMENT

鄂尔多斯盆地  
特低渗透油田开发



石油工业出版社

# 鄂尔多斯盆地 特低渗透油田开发

王道富 著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书结合鄂尔多斯盆地三叠系延长组特低渗透油藏的客观实际,系统讲述了低渗透油藏开发的理论和方法。通过对大量实例的分析,简明扼要地说明了特低渗透油田的地质特征、开发特征及注水开发中可能遇到的问题和处理,是鄂尔多斯盆地特低渗透油田注水开发实践的总结。本书理论联系实际、系统全面,既有油田开发理论和技术,又有具体详实的实例资料,这对于其他类似油田开发的研究具有较大的指导意义。

本书可供油田开发工作者、石油院校有关专业师生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

鄂尔多斯盆地特低渗透油田开发/王道富著.  
北京:石油工业出版社,2007.3  
ISBN 978-7-5021-5961-0

I. 鄂…

II. 王…

III. 鄂尔多斯盆地-低渗透油层-油田开发

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027477 号

鄂尔多斯盆地特低渗透油田开发  
王道富著

---

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.cn  
发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店  
印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷  
787×1092毫米 开本:1/16 印张:22.5  
字数:568千字 印数:1—3000册

---

定价:98.00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

在遥远的晚古生代和中生代，鄂尔多斯盆地主要发育了巨大的河流和三角洲体系，水体升降频繁，生物生长茂盛，一派生机勃勃的景象。经过漫长的地质变迁，这种景象转变成一种典型的低孔隙度、低渗透率砂岩岩性油藏。砂岩就像“磨刀石”，油藏普遍为低压异常，单井一般无自然产能，储层易受伤害干扰。

鄂尔多斯盆地特低渗透储层岩性主要为细—粉砂岩，孔喉结构以小孔、细喉为主，渗流阻力大，启动压差大。陆相和海陆交互相沉积决定了沉积微相变化大，经过成岩作用的强烈改造，储层在纵、横向上均表现出强烈的非均质性。油层普遍与烃源岩相邻，受构造控制作用小，储层以三角洲前缘亚相为主，油层分布相对稳定，以大型岩性油藏为主。但油层厚度薄、物性差、含油丰度低、储量丰度低，一般每平方千米为40~50万吨。同时，天然能量匮乏，地层压力低，压力系数普遍小于1（一般为0.6~0.8），渗透率随压力下降而降低，渗透率越低，压力敏感性越强，油田开发难度大，单井产量低。

这种“低渗、低压、低产”的油藏，开发难度极大，主要表现在以下几个方面：

(1) 勘探阶段油藏识别难。低渗透油藏主要与沉积岩性有关，一般不受构造控制，属隐蔽性油藏，常规勘探方法不易识别。

(2) 油气层判识难。储层普遍具有低孔、低渗、低含油饱和度的特性，油层与水层、有效储层与非储层的岩性与电性响应差异小，有效油层识别难度大。

(3) 有效驱替压力系统难以建立。岩石孔喉细微，比表面积和原油边界层厚度大，流体在储层中呈现非达西渗流的特征，启动压差大，难以建立起有效的驱替压力系统。

(4) 油井稳产难度大。地层压力低，弹性能量匮乏，油井投产后，产量下降幅度大。

(5) 油层保护难度大。储层对液相伤害、固相伤害都较为敏感，并且伤害后不易解除。

20世纪50年代，鄂尔多斯盆地就已经发现了低渗透油层，但当时由于缺乏实践经验和技术手段，这类油气层就成了油气勘探开发过程中的“拦路虎”。从1950年起在盆地东部进行油气勘探，首先在陕北四郎庙枣园发现了三叠系延长组浅油层，渗透率低，经试油未能获得工业性油流。因而逐步把勘探重点转向盆地西部，在灵武、盐池地区经过几年勘探，1960年在李庄子、马家滩构造上发现了三叠系和侏罗系油层，渗透率仍然很低，经试油只获得两个低产油井，因而暂时中断了该区的勘探工作。直到1965年重返回该地区，1966年采用压裂技术，对低渗透油层进行压裂改造才分别在三叠系和侏罗系获工业性油流，首次突破了低渗透油层勘探开发技术难关，并陆续发现了大水坑、马坊油田和刘家庄气田。

1970年开始在盆地南部进行大规模石油会战，开展低渗透油藏研究，通过研究认为，侏罗系延安组油层属于河流相沉积，砂岩油藏形成于鼻状构造叠合处，同时油层又与三叠系延长组烃源岩沟通，从而发现了一系列低渗透砂岩油藏。为了经济有效地投入开发，在深化油藏研究的同时，开辟了一个开发试验区，进行天然能量和注水开发试验，油井压裂投产、注水、采油工艺攻关试验和单管常温密闭油气集输流程试验，逐步使马岭油田等侏罗系低渗透油藏投入了开发。同时，重新认识低渗透油藏，从储层沉积微相研究入手，深化对油藏形成规律和分布特征的认识，实施滚动勘探开发，实现增储建产一体化技术，使侏罗系低渗透油藏

开发持续发展，产量稳中有升。

三叠系延长组特低渗透油层于1966年在盆地西缘马家滩油田经压裂获得工业油流，并于1970年投入开发。而盆地内部大面积分布的延长组特低渗透油层，由于其渗透率太低，难以经济有效地投入开发。如，从1969年盆地南部完钻的庆参井来看，延长组长6—8油层渗透率均小于1mD，1970年经多次压裂后，才获得日产 $3.1\text{m}^3$ 低产油流。在这期间先后经历了20多年，不断加强对延长组特低渗透油层的地质综合研究、压裂攻关，重点井区注水开发试验和区域勘探。特别是1973年，是长庆油田的“压裂年”，以攻克延长组油层增产关为目标，在盆地中南部甩开钻探，钻探两条几百千米长的十字剖面24口压裂井，研究评价延长组油层，并进行压裂改造和井下爆炸试验。同时开辟了两个注水开发试验区，进行长期注水开发试验，但都因为油层渗透率低，平均单井日产量低，未获得突破。

20世纪80年代中期，安塞油田被发现，探明储量达亿吨，是我国当时最大的低渗透油田，平均有效渗透率只有0.49mD，成了一个“烫手的山芋”。90年代初，国际某著名的油田开发公司试图参与该油田早期研究，但试验研究后得出的结论为：安塞油田没有开发价值。然而，长庆人没有退缩。通过长期科技攻关，包括井网优化、开发压裂、超前注水等开发技术的应用，成功开发了安塞油田，并创造了著名的“安塞模式”。2005年，安塞油田的原油产量突破200万吨，通过滚动勘探开发，探明储量进一步增加，目前已达3.4亿吨。

一代又一代的长庆人为了攻克低渗透油气藏开发的难题，不断解放思想，勇于探索，开拓进取，重新认识，针对不同低渗透油层的特点，研发出与之相适应的8套开发配套技术。20世纪90年代以来，先后成功开发了靖安和西峰等大油田，使鄂尔多斯盆地低渗透油气藏的开发生产进入快速发展的轨道。通过开发利用0.5mD的油层，极大地拓宽了低渗透油气藏的开发范围，为我国乃至世界低渗透油气储量的开发利用提供了宝贵的技术参考。截至2003年底，我国探明未动用的石油地质储量有55亿吨，其中大部分为低渗透储量，约35亿吨。随着勘探程度不断提高，今后发现低渗透油气储量的机会将越来越多。同样，世界油气资源中低渗透油气资源所占比重很大，而且目前探明和动用程度均较低。随着勘探开发技术的不断进步，低渗透油藏勘探开发前景十分广阔。

本书的著作者们长年工作在鄂尔多斯盆地，参与了技术创新的主要进程，经历了油田发展的喜怒哀乐。通过多年的攻关研究和试验，对低渗透油藏整体评价技术，渗流机理研究，开发方法和井网优化技术，钻采工艺，地面工艺等都有了较大的发展和提高。他们回顾大量的实践并总结分析，将特低渗透油田开发技术、方法和经验编写成《鄂尔多斯盆地特低渗透油田开发》一书。相信该书的问世将对广大的开发科技工作者和专业读者提供有益的参考和借鉴。

邱中建  
2006.12.14.

# 前 言

随着全球石油需求的快速增长，油气勘探开发对象日趋复杂，储量品位越来越差，特低渗透油藏将成为今后我国油田开发的主要对象。鄂尔多斯盆地特低渗透油藏开发，立足自主创新，坚持科学试验，从高分辨率地震勘探技术、隐蔽性油藏综合评价技术、井网优化技术、整体压裂、超前注水技术等方面着手，形成了低渗透油田勘探开发配套技术系列，成功开发了0.5mD以上的特低渗透油田，走在了世界前列。为了推广鄂尔多斯特低渗透油田开发经验，加快特低渗透油田的开发进程，作者在系统总结鄂尔多斯盆地特低渗透油田注水开发经验的基础上，通过大量的理论研究与分析，从特低渗透油藏的地质特征及开发特征出发，重点论述了特低渗透油藏的渗流理论、特低渗透油藏开发对策及特色技术，介绍了黄土塬区隐蔽性岩性油藏早期评价技术、特低渗透油藏井网优化技术、特低渗透油藏早期评价技术、精细注采调控技术、丛式井钻井工艺技术、套管防腐技术、油井压裂及重复改造技术、定向井小水量分层注水技术、井丛集油技术和油田注水技术。同时，结合实际油田的开发进行实例分析，剖析了特低渗透油田开发特色技术的形成和应用效果。

本书系统地讲述了低渗透油藏注水开发的理论和方法，结合鄂尔多斯盆地三叠系延长组特低渗透油藏的客观实际，简明扼要地说明了特低渗透油田的地质特征、开发特征及注水开发中可能遇到的问题和处理方法。这一著作融入了作者大量的实践经验，是鄂尔多斯盆地特低渗透油田注水开发实践的总结，本书通过对大量的实例的分析，总结了特低渗透油田开发理论、技术和方法。该书的特点是理论联系实际、系统全面、通俗易懂、实用性强。这本专著内容注重理论性、创新性和实用性，既有油田开发理论和技术，又有具体详实的实例资料，对于以后类似油田的研究具有较强的指导意义，可供油田开发工作者及有关专业人员阅读参考。

本书编写过程中油田广大科技工作者及专家做了大量工作，石油大学何顺利、程林松、程时清，成都理工大学冯文光，西安石油大学李璽、胥元刚等教授对相关章节给予了指导和帮助。在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，且特低渗透油田开发技术涉及多个学科领域，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2007年2月于西安

# 目 录

第一章 特低渗透油藏地质与开发特征 .....	(1)
第一节 低渗透油田勘探开发研究现状 .....	(1)
一、国内外低渗透油田分布 .....	(1)
二、国内外低渗透油田地质特征 .....	(3)
三、国内外低渗透油田开发现状 .....	(4)
第二节 区域地质概况 .....	(6)
一、构造背景 .....	(7)
二、地层简介 .....	(7)
第三节 沉积体系与特征 .....	(8)
一、古陆及沉积物源分析 .....	(9)
二、沉积体系确立 .....	(13)
三、沉积相特征 .....	(15)
四、沉积相带展布及演化特征 .....	(21)
第四节 特低渗透油藏储层特征 .....	(25)
一、储层岩矿特征 .....	(25)
二、储层孔隙类型和孔隙结构特征 .....	(32)
三、储层微裂缝发育特征 .....	(41)
四、储层宏观非均质性 .....	(45)
五、储层岩石的敏感性及岩石表面润湿性 .....	(53)
六、特低渗透油藏成因 .....	(54)
第五节 特低渗透油藏特征 .....	(62)
一、地层压力与温度 .....	(62)
二、流体性质 .....	(63)
三、可动流体饱和度 .....	(64)
四、油藏类型 .....	(69)
第六节 特低渗透油藏的开发特征 .....	(73)
一、油井无自然产能, 投产初期递减快 .....	(73)
二、非达西渗流特征明显, 驱替压力梯度大 .....	(74)
三、注水井吸水性能 .....	(77)
四、裂缝对开发的影响 .....	(79)
五、水驱效率特征 .....	(83)
六、采液、采油指数变化规律 .....	(86)
参考文献 .....	(87)

<b>第二章 特低渗透油藏储层渗流理论</b> .....	(90)
<b>第一节 特低渗透储集层的表面物理性质和水驱油效率</b> .....	(90)
一、特低渗透油层的润湿性 .....	(90)
二、润湿性对水驱油效率的影响 .....	(93)
三、比表面 .....	(94)
四、岩石表面原油边界层厚度 .....	(94)
<b>第二节 特低渗透储层多孔介质特征及对渗流的影响</b> .....	(95)
一、特低渗透油层多孔介质的主要特性 .....	(95)
二、多孔介质中毛细管力分析 .....	(102)
三、孔隙介质与流体之间的相互作用 .....	(105)
<b>第三节 特低渗透储层流体单相渗流特征</b> .....	(110)
一、渗流的复杂性 .....	(110)
二、渗流过程的物理意义和基本特征 .....	(112)
三、单相流体渗流规律 .....	(117)
四、低渗低速渗流的流态与准数 .....	(118)
五、单相渗流数学方程 .....	(121)
六、启动压力梯度与渗透率的关系 .....	(125)
七、径向渗流时压力分布特征 .....	(128)
八、启动压力对单井产量的影响 .....	(129)
<b>第四节 特低渗透储层流体油水两相渗流特征</b> .....	(131)
一、油水两相渗流的微观实验研究 .....	(131)
二、特低渗透储层油水两相渗流的连续性方程和运动方程 .....	(133)
三、特低渗透油层中油水相对渗透率特征 .....	(136)
四、启动压力梯度对油水两相渗流的影响 .....	(143)
<b>第五节 变形介质对油水两相渗流的影响</b> .....	(143)
一、变形介质的渗流规律 .....	(144)
二、变形介质达西稳定渗流及其典型解 .....	(145)
三、变形介质不稳定渗流及其典型解 .....	(148)
四、变形介质储层油井合理产能 .....	(150)
五、变形介质的流固耦合问题 .....	(152)
<b>参考文献</b> .....	(154)
<b>第三章 特低渗透油藏开发主要对策</b> .....	(158)
<b>第一节 优化开发目标</b> .....	(158)
一、整体研究与重点解剖 .....	(158)
二、整体部署与分步实施 .....	(159)
三、早期现场试验与优化开发方案 .....	(161)
四、滚动评价与落实产建目标 .....	(161)
<b>第二节 优化井网形式</b> .....	(163)



一、长庆低渗透油田井网形式演化历程 .....	(163)
二、裂缝不发育油藏的井网形式 .....	(164)
三、裂缝发育油藏的井网形式 .....	(164)
四、井网部署原则 .....	(165)
第三节 优化注水时机 .....	(166)
一、优化注水时机问题的提出 .....	(166)
二、超前注水技术的作用和意义 .....	(166)
三、超前注水适应条件 .....	(168)
四、超前注水实施要求 .....	(168)
五、超前注水应用前景 .....	(168)
第四节 优化压裂方案 .....	(168)
一、整体开发压裂技术的发展历程 .....	(169)
二、整体开发压裂技术的主要做法 .....	(169)
三、整体开发压裂技术应用 .....	(170)
第五节 优化地面工艺 .....	(170)
一、面临的形势 .....	(170)
二、优化的思路 .....	(171)
三、优化的措施 .....	(171)
四、优化的特点 .....	(172)
参考文献 .....	(174)
<b>第四章 特低渗透油藏开发特色技术 .....</b>	<b>(176)</b>
第一节 黄土塬区油藏早期评价技术 .....	(176)
一、沉积环境恢复技术 .....	(176)
二、优质储层预测技术 .....	(177)
三、三维地质建模技术 .....	(177)
四、低幅构造分析技术 .....	(178)
五、综合录井技术 .....	(179)
六、测井油层识别技术 .....	(184)
第二节 井网优化技术 .....	(191)
一、井网形式的研究 .....	(191)
二、井网密度的确定及优化 .....	(195)
三、井排距的确定及优化 .....	(197)
第三节 超前注水技术 .....	(205)
一、超前注水机理 .....	(205)
二、超前注水参数的优选 .....	(210)
三、超前注水效果 .....	(216)
第四节 精细注采调控技术 .....	(219)
一、早期强化注水 .....	(219)

二、不稳定注水 .....	(220)
三、沿裂缝强化注水 .....	(222)
四、注采剖面调整 .....	(223)
第五节 复杂地貌丛式井钻采工艺技术 .....	(225)
一、丛式井钻井技术 .....	(225)
二、定向井有杆泵采油技术 .....	(235)
第六节 套管腐蚀与防护技术 .....	(243)
一、套管腐蚀与防护技术的发展历程 .....	(243)
二、腐蚀机理研究 .....	(245)
三、套管防腐主体技术 .....	(252)
第七节 油井压裂及重复压裂改造技术 .....	(256)
一、压裂改造的必要性 .....	(256)
二、整体开发压裂技术 .....	(257)
三、重复压裂技术 .....	(263)
四、裂缝监测及诊断技术 .....	(267)
第八节 定向井小水量分层注水技术 .....	(273)
一、注水井投注技术 .....	(274)
二、定向井小水量分层注水技术 .....	(278)
第九节 丛式井集油技术 .....	(286)
一、丛式井集油工艺流程 .....	(286)
二、丛式井组集输管网及布站优化 .....	(288)
第十节 油田注水地面工艺技术 .....	(289)
一、油田及注水的主要特点 .....	(289)
二、单干管小支线活动洗井注水工艺 .....	(289)
三、树枝状干管稳流配注活动洗井注水工艺 .....	(290)
参考文献 .....	(291)
第五章 特低渗透油藏开发实例 .....	(293)
第一节 安塞油田 .....	(293)
一、油田地质概况 .....	(293)
二、开发背景 .....	(295)
三、勘探开发历程 .....	(295)
四、开发技术思路 .....	(296)
五、技术发展 .....	(304)
六、开发特征与效果 .....	(307)
第二节 靖安油田 .....	(310)
一、油田地质概况 .....	(310)
二、开发背景 .....	(310)
三、勘探开发历程 .....	(311)

四、开发思路 .....	(312)
五、技术的完善推广 .....	(313)
六、开发效果主要技术指标 .....	(325)
第三节 西峰油田 .....	(327)
一、储层地质特征 .....	(327)
二、开发背景 .....	(328)
三、勘探开发历程 .....	(328)
四、技术思路 .....	(329)
五、技术发展 .....	(338)
六、开发效果 .....	(344)
参考文献 .....	(345)

# 第一章 特低渗透油藏地质与开发特征

## 第一节 低渗透油田勘探开发研究现状

### 一、国内外低渗透油田分布

#### 1. 低渗透油田分类

不同国家和地区对低渗透油田的划分标准并不统一。通常根据储层性质和油田开发技术经济指标进行划分,美国将渗透率不大于 100mD 的油田称为低渗透油田,前苏联采用的标准是 50 ~ 100mD,而我国一般将渗透率在 10 ~ 50mD 的油田称为低渗透油田。渗透率为 1 ~ 10mD 的称为特低渗透油田,例如长庆安塞油田、大庆榆树林油田等。一般把小于 1mD 称为超低渗透油田<sup>[1,2]</sup>。

本书根据低渗透油田实际生产特征,结合前人的研究成果,并依据基质岩块渗透率,把低渗透油田分为三类<sup>[3]</sup>:

(1) 低渗透油田,油层平均渗透率为 10 ~ 50mD。这类油层油井初产一般能够达到工业油流标准,但产量太低,需采取压裂措施,提高生产能力,才能取得较好的开发效果和经济效益。

(2) 特低渗透油田,油层平均渗透率为 1 ~ 10mD。这类油层一般束缚水饱和度较高,测井电阻率低,油井一般没有自然产量,必须采取较大型的压裂改造和其他相应措施,才能有效地投入工业开发,如长庆安塞油田、大庆榆树林油田等。

(3) 超低渗透油田,其油层平均渗透率为 0.1 ~ 1.0mD。这类油层非常致密,束缚水饱和度高,油井基本没有自然产能,在现有技术经济条件下一般不具备工业开发价值。如长庆目前攻关的 0.3mD 储层。

#### 2. 国外低渗透油田分布状况

世界大面积分布着低渗透油田,其资源量约占盆地资源的 20%~60%。随着勘探程度的增高,各大含油气盆地的低渗透石油资源在剩余资源中占有越来越大的比例。全球主要产油国都有低渗透油田存在。据 17 个国家统计(表 1-1),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%,基本未开发。

表 1-1 主要产油国低渗透油田分布统计表

序号	国家	油田个数(个)	储量( $10^4 \text{t}$ )	储量比例(%)
1	巴西	2	138950.0	4.0
2	哥伦比亚	1	4172.0	0.1
7	委内瑞拉	4	123844.0	3.5
4	特立尼达和多巴哥	1	8225.0	0.2
5	墨西哥	1	1023526.0	29.3

续表

序号	国家	油田个数(个)	储量( $10^4$ t)	储量比例(%)
6	美国	29	275288.0	7.9
7	加拿大	3	105735.0	3.0
8	澳大利亚	4	19278.8	0.6
9	泰国	1	11200.0	0.3
10	中国	6	764000.0	21.9
11	土库曼斯坦	2	100243.0	2.9
12	哈萨克斯坦	1	7392.0	0.2
13	阿塞拜疆	1	3220.0	0.1
14	埃及	4	311161.2	8.9
15	阿尔及利亚	1	574000.0	16.4
16	希腊	1	3780.0	0.1
17	英国	3	21574.0	0.6
合计		68	3495588.2	

### 3. 国内低渗透油田分布状况

我国石油可采资源量约  $150 \times 10^8$ t, 其中低渗透可采资源量  $56 \times 10^8$ t。低渗透资源主要分布于全国主要沉积盆地。

我国石油地质条件具有多样性和复杂性, 与北美地区近似, 低渗透石油资源占有重要位置, 已发现储量中低渗透储量占 30.9%。随着勘探的深入, 新增探明储量中低渗透资源所占比重不断增大。中国石油<sup>[4]</sup>从“九五”前的 26.7% 上升到“十五”的近 70% (表 1-2)。低渗透地质储量主要分布在新疆、大庆、胜利、吉林、辽河、大港、中原、延长、长庆等油区。随着勘探的不断深入, 我国每年新增的探明储量中, 低渗透石油资源的比例将越来越大。

表 1-2 中石油探明石油地质储量阶段分类表

阶段	中高渗透 ( $10^8$ t)		低渗透 ( $10^8$ t)				合计 ( $10^8$ t)
	储量	比例 (%)	低渗透	特低渗透	超低渗透	比例 (%)	
“十五”前	88.76	73.3	13.00	15.71	3.66	26.7	121.13
“九五”	7.67	34.3	3.90	6.68	4.11	65.7	22.36
“十五”	4.03	30.5	1.47	5.74	1.95	69.5	13.18

我国东部老油区, 石油产量逐年递减, 发现的常规油气藏规模越来越小, 低渗透油气储量不断增加, 主要分布在中深层; 中西部地区, 储层物性差, 非均质性强, 有大面积的低渗透油气资源 (表 1-3)。

表 1-3 国内低渗透油田储量状况统计表

油田	探明地质储量 ( $10^4$ t)	探明低渗透储量 ( $10^4$ t)	低渗透比例 (%)	中高渗透比例 (%)
大庆	0.5777	10.4556	18.1	81.9
吉林	0.1082	7.9226	73.2	26.8

续表

油田	探明地质储量 ( $10^4$ t)	探明低渗透储量 ( $10^4$ t)	低渗透比例 (%)	中高渗透比例 (%)
辽河	0.2248	5.2374	23.3	76.7
华北	0.1169	3.0504	26.1	73.9
大港	0.0922	3.1987	34.7	65.3
冀东	0.0147	0.0440	3.0	97.0
长庆	0.1320	11.2855	85.5	14.5
塔里木	0.0373	0.8686	23.3	76.7
吐哈	0.0292	1.5319	52.5	47.5
玉门	0.0153	1.1754	76.6	23.4
青海	0.0318	1.4300	45.0	55.0
新疆	17.7000	6.3000	36.0	64.0

由此可见，低渗、特低渗油田储量的开发已成为我国陆上石油工业（特别是鄂尔多斯盆地）稳定发展的重要潜力；搞好此类油田高效开发的宏观决策，尽快提高其开发水平和经济效益，已成为我国未来石油工业，特别是长庆油田持续发展的关键。低渗透油田储量分布有如下特点：

(1) 由各油区的低渗透储层埋藏深度统计表明，目前发现的低渗透油藏以中深层为主，主埋藏深度小于1000m约占5.2%，1000~2000m约占43.1%，2000~3000m约占36.2%，大于3000m约占15.5%。

(2) 低渗透储层中特低渗透及超低渗透储量约占一半。根据渗透率大小，低渗透油藏可以分为三类：一类渗透率为10~50mD，其储量占53%；二类渗透率为1~10mD，其储量占38.6%；三类渗透率为0.1~1.0mD，其储量占8.4%。二、三类低渗透储层的储量占到了47%。

(3) 国内低渗透油藏岩性以砂岩为主。从目前探明的低渗透油藏统计，砂岩油藏占70%左右，砾岩油藏占10%左右，其余的存在于变质岩及灰岩等特殊岩性油藏中。

## 二、国内外低渗透油田地质特征

### 1. 国外低渗透油田地质特征

根据文献调研，对低渗透油田大体上可以归纳出以下几个特点<sup>[5]</sup>：

(1) 储层物性差，渗透率低：由于颗粒细、分选差、胶结物含量高，经压实和后生成岩作用使储层变得致密，渗透率一般小于100mD，甚至低于1mD。

(2) 储层孔隙度一般偏低，大部分为7%~20%，个别高达28%。

(3) 原始含水饱和度较高，原油物性较好。一般含水饱和度30%~40%，个别高达60%，原油相对密度多数小于0.85，地层原油黏度多数小于3mPa·s。

(4) 储层非均质性强，由于沉积环境不稳定，砂层的厚薄变化大，层间渗透率变化大，有的砂岩泥质含量高，地层水电阻率低。

(5) 天然裂缝相对发育。由于岩性坚硬致密，多存在不同程度的天然裂缝系统，一般受区域性地应力的控制，具有一定的方向性，对油田开发的效果影响较大。裂缝是油气渗透



的通道，也是注水窜流的条件，且人工裂缝又多与天然裂缝的方向一致，因此，天然裂缝是低渗透砂岩油田开发必须认真对待的因素。

### 2. 国内低渗透油田地质特征

(1) 油藏类型单一。我国低渗透油田以岩性油藏和构造岩性油藏为主，有 60% 以上的储量存在于上述两种类型的油藏中，主要为弹性驱动油藏。

(2) 储层物性差，孔隙度和渗透率低。总体上看，岩屑含量高、黏土或碳酸盐胶结物较多是低渗透砂岩储层的普遍现象。据统计，低渗透油田储层平均孔隙度为 18.55%，渗透率一般为 1~50mD，但各个油田的情况不一。从 18 个油田 28 套油层统计，平均渗透率小于 10mD 的油层占 61%，平均渗透率 10~20mD 的油层占 21%。我国的低渗透油田一半以上的储量存在于渗透率小于 1~10mD 的油藏中。

(3) 孔喉细小，溶蚀孔发育。低渗透砂岩储层的孔隙以粒间孔隙为主，原生粒间孔隙和次生粒间孔隙都发育，但溶蚀孔隙相对较发育，另外还有微孔隙、晶间孔和裂隙孔。低渗透储层以中孔、小孔为主；喉道以管状和片状的细喉道为主，根据大量低渗透油田砂岩储层的统计，喉道半径一般小于 1.5 $\mu\text{m}$ ，非有效孔隙体积在整个孔喉体积中所占比例较大，在 26%~65% 之间，平均 30%，直接影响储层的渗透性。

(4) 储层非均质性强，这主要是受水进、水退形成储层纵向上的沉积旋回规律而造成储层不同微相之间的储层物性差异。层内非均质性受沉积韵律的变化和成岩作用而表现明显的不同。

(5) 裂缝发育，我国低渗透油田储层的裂缝大多是构造裂缝，其分布比较规则，常常成组出现；裂缝切穿深度大，产状以高角度裂缝为主，倾角大于 60° 的裂缝占裂缝总数的 70% 以上，裂缝密度受构造部位、砂岩厚度、岩性控制十分明显。低渗透油田裂缝宽度一般都很小，多数在十几到几十微米之间，裂缝的延伸长度大多小于 100m。低渗透砂岩油田裂缝孔隙度都十分小，一般小于 1%，但渗透率变化很大，从几十至上千毫达西不等。

(6) 油层原始含水饱和度高，低渗透油藏原始含水饱和度较高，一般在 30%~50%，有的高达 60%。

(7) 储层敏感性高，低渗透砂岩油藏储层碎屑颗粒分选差，黏土和基质剪含量高，成岩作用强，油层孔喉细小，容易造成各种损害。

(8) 原油性质好，我国低渗透油田原油具有密度小、黏度小、含胶质和沥青少的特点，另外原油凝固点比较高、含蜡量比较高，原油密度一般为 0.84~0.86g/cm<sup>3</sup>，地层原油黏度一般为 0.7~8.7mPa·s。原油性质好是低渗透油田开发的一个重要的有利因素。

## 三、国内外低渗透油田开发现状

### 1. 开发现状

#### 1) 国外低渗透油田开发现状

国外低渗透油藏开发时间长，从美国 1871 年发现著名的勃莱德福油田起，已有 100 多年的历史了。国外认为，低渗透油田尤其是高压低渗透油田初期压力高、天然能量充足，最好首先采用自然能量开采，尽量延长无水和低含水开采期。他们一般都先利用弹性能量和溶解气驱能量开采，但是油层产能递减快，一次采收率低，只能达到 8%~15%。进入低产期时再转入注水开发，采用注水保持能量后，二次采收率可提高

到 25%~30%。

经过对美国、前苏联、加拿大及澳大利亚等 20 多个低渗透砂岩油田的调研发现,天然能量驱动以溶解气驱为主,其次为边水驱和弹性驱。含水饱和度最高为 55%,最低为 8%,平均为 22.7%。一次采收率最高为 30% (美国的快乐泉弗朗梯尔“A”油藏),最低为 6.5% (加拿大帕宾那油田),平均为 15.8%。二次采收率最高为 31% (前苏联的多林纳维果德油藏),最低为 1.5% (美国的斯普拉柏雷油田),平均为 25.39%。据对国外油田的统计,大部分是优先利用天然能量开采,只有极少数油田投产即注水。注气也成为许多低渗透油田二次和三次开采方法,如西西伯利亚低渗透油田,采用注轻烃馏分段塞、干气段塞和气水混合物达到混相驱,驱油效率比水驱提高 13%~26%,取得了令人鼓舞的效果。斯普拉柏雷油田从 1995 年起着手进行注二氧化碳开发可行性研究,1997 年底已完成室内研究,随即进行矿场试验,第一年采油速度达 6%。

根据国内外不同规模矿场实际,见到一定效果的二次采油方法有:混相烃驱油法、二氧化碳驱油法、水气交注、水气混注和周期注气等。据俄罗斯《石油业》2000 年报道,注气和水气混合驱油开采低渗透储层是比较有前景的。他们利用自动评价系统,对低渗透油藏的层系进行评价分析,建议对低渗透油藏进行注二氧化碳、注气态烃、周期注蒸汽驱油、热水等开发方法。

国外大量研究和实践证明,当前低渗透油田开发中,广泛应用并取得明显经济效益的主要技术仍然是注水保持油藏能量、压裂改造油层和注气等技术,储层地质研究和保护油层措施是油田开发过程中的关键技术。

## 2) 国内低渗透油田开发现状

通过“九五”以来的研究攻关和试验,我国对低渗透油田的特征认识、开发决策和工艺技术等各个方面,都有了新的较大发展和提高,主要体现在以下几个方面<sup>[6]</sup>。

### (1) 储层特征研究方面:

①储层和含油性预测技术。利用地震预测和测井资料,进行多参数逐级联合反映,预测储层分布状况和含油气程度。

②储层裂缝识别研究和预测技术。利用露头 and 岩心观测、常规测井和成像测井、地应力测定和地质建模等技术,研究空间三维应力分布,研究储层裂缝特征和预测储层空间三维裂缝分布。

③储层孔隙结构和可动流体研究新技术。利用核磁共振新技术,研究储层微观孔隙结构和可动流体饱和度的关系。

### (2) 渗流机理研究方面:

①非达西渗流特征。通过深入的实验研究,进一步认识了非达西渗流特征,并初步建立了非达西渗流方程和数值模拟软件。

②流—固耦合作用。通过实验,证实了低渗透储层应力敏感性强烈,流—固耦合作用对储层物性影响明显。

③渗吸作用。发现渗吸作用在低渗透储层中排油作用较大,初步确定了与渗吸作用相协调的最佳驱油速度。

### (3) 油田开发方法和井网方面研究:

①开发方式。从生产实践中观察看出,超前注水能够保持较高的生产能力,比滞后注水具有明显的优越性。初步开展了注气方式开采试验。

②油田动态特征。进一步观察研究和认识了低渗透油田注水开发后，地下压力场和流体场的分布特征和规律。

③开发井网。通过现场生产试验和深入观察分析，进一步总结出裂缝性低渗透油田科学合理部署开发井网的方针原则和界限。

(4) 钻采工艺技术方面：

①适应低渗透油田开发的钻井工艺技术。小井眼和水平井钻井技术都有新的发展，特别是欠平衡钻井技术对裂缝性低渗透油田开发效果十分明显。

②水力压裂技术。整体高效压裂技术有了新的发展。对裂缝性低渗透油田将压裂技术与开发井网科学地有机结合，同时可以获得较好的开发效果和经济效益。

③低成本的采油工艺技术。根据低渗透油田油井产量低的特点，试验和发展了无油管、螺杆泵、提捞以及活动采油油田注水技术。

## 2. 开发特征

我国低渗透油田油层受岩性控制，水动力联系差，边、底水驱动不明显，自然能量补给差，多数靠弹性和溶解气驱采油，油层产能递减快，一次采收率低，只能达到8%~12%，采用注水保持能量后，二次采收率可提高到25%~30%。由于渗透率低、孔隙度低，必须通过酸化压裂投产，才能获得经济价值或必须通过压裂增产，才能提高经济效益。由于孔隙结构复杂，喉道小，泥质含量高，以及各种水敏性矿物的存在，导致地层在开采过程中易受伤害，损失产量可达30%~50%。据对全国15个低渗透油田计算，平均弹性采收率为3.25%，溶解气驱采收率为13.9%，依靠天然能量开采总采收率为17.10%，而水驱开发最终采收率可达26.9%。注水保持压力开发，比依靠天然能量枯竭式开发采收率增加近10%。无论从石油资源的合理利用看，还是从经济效益看，对低渗透、特低渗透油田采取人工注水保持压力的开发方式十分必要。因此，低渗透油田为了提高开发效果，提高最终采收率，必须采取保持压力的开发方式实施注水开发，但注水时间的早晚对油田开发效果影响也比较大。

大量生产实践表明，低渗透、特低渗透油田投产后，如果能量补充不及时，地层压力会大幅度下降，油井产量迅速递减，年递减可达25%~45%，采出1%的地质储量地层压力下降3~4MPa，以后即使地层压力上升，油井产量和采油指数也难以恢复。通过室内实验研究认为这就是压敏效应即“流—固耦合”作用的结果。

低渗透、特低渗透储层弹塑性比较突出，当孔隙压力下降后，作用在岩石骨架上的有效应力增加，导致储层孔隙度、特别是渗透率急剧减小，而孔隙压力再上升时，其值不能完全恢复。这就是低渗透、特低渗透油田油井产量、采油指数下降难以恢复的原因。

长庆油田广大科技工作者根据特低渗储层启动压差较大、应力敏感性较强、油藏压力系数低、地饱压差小等特点，通过渗流规律研究及开发实践，创造性地提出了超前注水理论，并研究了超前注水的注采井距、注水时机、地层压力保持水平、注水压力、注水强度等技术政策，形成了特低渗油藏的超前注水开发配套技术。

## 第二节 区域地质概况

鄂尔多斯盆地北以阴山、大青山及狼山为界，南至秦岭，西起贺兰山、六盘山，东到吕梁山，总面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其大地构造位置属华北地台西部，为克拉通边缘拗陷盆地。盆