

低渗透砂岩油藏开发技术

——以胜利油田为例

孙焕泉 杨勇 编著

石油工业出版社

低渗透砂岩油藏开发技术

——以胜利油田为例

孙焕泉 杨 勇 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以胜利油田低渗透砂岩油藏为研究对象,在分析了储量状况、地质特征、开发特征及渗流特征的基础上,重点对储层建模技术、数值模拟技术、开发部署、技术政策界限及主要的工艺技术等内容进行了阐述,并介绍了三种不同类型典型油藏的开发实例。

本书可供从事油田开发的各级管理人员、技术人员及大专院校师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗透砂岩油藏开发技术:以胜利油田为例 / 孙焕泉, 杨勇编著.
北京:石油工业出版社, 2008. 12
ISBN 978 - 7 - 5021 - 6844 - 5

I. 低…

II. ①孙…②杨…

III. 低渗透油层 - 砂岩油气田 - 油田开发 - 研究 - 东营市

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 174812 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) 64523544 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 328 千字 印数: 1—1000 册

定价: 48.00 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

前 言

胜利油田低渗透砂岩油藏主要分布在渤南、纯化、牛庄、桩西、五号桩、滨南、大芦湖、正理庄、东风港等 48 个油田，截至 2007 年底探明石油地质储量 7.3 亿吨，占全油区的 15.4%，随着勘探程度不断提高以及勘探技术不断进步，每年新增探明储量及动用储量所占比例越来越高。“八五”以来，每年新增探明储量都在 2000 万吨左右，占当年探明储量的 1/4。尤其是 2007 年低渗透砂岩油藏探明石油地质储量 6811 万吨，占当年探明储量的 64.6%，低渗透砂岩油藏已成为胜利油田重要的增储上产阵地之一。

胜利油田低渗透砂岩油藏埋藏深，大多在 3000 米以上，经济有效动用难度大。经过多年攻关研究，已初步形成配套的低渗透油藏开发技术，包括室内实验、井网井距优化、细分层系、油层保护、储层改造等配套技术，为胜利油区低渗透油藏的有效开发奠定了基础。因此，系统总结低渗透砂岩油藏开发技术，对今后更好地指导此类油藏的开发具有重要的现实意义。

本书依据胜利油区低渗透油藏的特点开展了油藏分类，阐述了低渗透油藏储量分布、动用状况、开发历程及现状；描述了低渗透砂岩油藏成岩作用和沉积特征、孔喉结构、裂缝特征、敏感性、润湿性等储层特征；介绍了室内实验渗流机理研究成果及低渗透砂岩油藏储层建模方法，建立了三维地质模型；针对低渗透数值模拟中的几个关键问题提出了处理方法，论述了低渗透油藏数值模型的建立和求解方法，并介绍了数值模拟技术在低渗透油藏中的应用。

本书总结分析了低渗透油藏科学的开发部署方法，包括能量补充方式、注水（注气）时机、合理层系井网部署方式、合理技术经济井距及相应的开发技术经济政策；介绍了油层保护、储层改造、注水开发、水平井、大孔径射孔、裸眼完井、深抽等低渗透油藏主要的开发工艺技术，并重点介绍了异常高压岩性油藏史深 100、裂缝性特低渗油藏大芦湖油田、薄互层油藏纯化油田的开发实践。

此书在编写过程中，得到了周涌沂、王建等同志的大力支持，在此表示衷心地感谢。

由于笔者水平所限，书中疏漏及不妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

目 录

第一章 概况	(1)
第一节 低渗透油藏的概念及分类	(1)
第二节 储量分布及动用状况	(2)
第三节 开发历程及现状	(3)
第二章 低渗透油藏地质特征	(5)
第一节 沉积及成岩特征	(5)
第二节 储层特征	(7)
第三节 流体性质及压力系统特征	(14)
第三章 低渗透油藏渗流及开发特征	(16)
第一节 渗流特征	(16)
第二节 开发特征	(39)
第四章 低渗透砂岩油藏储层建模	(43)
第一节 储层地质模型的分类及建模方法	(43)
第二节 低渗透砂岩油藏裂缝模型研究	(48)
第三节 低渗透砂岩油藏三维地质建模	(56)
第五章 低渗透油藏数值模拟技术	(64)
第一节 低渗透油藏数值模拟中的几个关键问题及处理方法	(64)
第二节 低渗透油藏数值模拟模型的建立及求解	(70)
第三节 数值模拟技术在低渗透油藏中的应用	(79)
第六章 低渗透油藏开发部署及技术政策	(89)
第一节 低渗透油藏开发方式及注水时机	(89)
第二节 低渗透油藏开发层系的组合与划分	(100)
第三节 低渗透油藏井网部署	(106)
第四节 低渗透油藏合理井网密度	(115)
第五节 经济政策界限	(124)
第七章 低渗透油藏主要开发技术	(128)
第一节 油层保护技术	(128)
第二节 储层改造技术	(140)

第三节	注水技术	(153)
第四节	不稳定注水技术	(159)
第五节	水平井技术	(161)
第六节	重点工艺技术	(165)
第八章	典型低渗透油藏开发实例	(171)
第一节	高压异常岩性油藏开发实践——以史深 100 为例	(171)
第二节	裂缝性特低渗油藏开发实践——以大芦湖油田为例	(183)
第三节	薄互层油藏开发实践——以纯化油田为例	(190)
参考文献		(197)

第一章 概 况

第一节 低渗透油藏的概念及分类

一、低渗透油藏的概念

低渗透油藏是一个相对的概念，世界各国的划分标准和界限因不同国家、不同时期的资源状况和技术经济条件不同而各异，变化范围也较大。例如，原苏联将渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油田作为低渗透油藏，我国低渗透油藏开发专家李道品先生^[1]根据低渗透油藏的渗流特征和开采特征，将储层渗透率 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的油田作为低渗透油藏，这个标准已形成了共识，并被普遍采用。

二、低渗透油藏的分类

1. 按储层物性（渗透率）分类

根据储层平均渗透率的差异，将低渗透油藏进一步分为3种类型：一般低渗透油藏、特低渗透油藏、超低渗透油藏。

一般低渗透油藏是指油层平均渗透率介于 $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的油田。这类油藏一般能达到工业油流标准，但产能偏低，需要采取压裂等油层改造措施提高生产能力，才能获得较好的开发效果和经济效益。胜利油田大部分低渗透油藏属于此类，主要分布在渤南、商河、牛庄、纯化、大王北、平方王、邵家等油田。

特低渗透油藏是指油层平均渗透率介于 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的油田。这类油藏一般束缚水饱和度较高，正常测试达不到工业油流标准，必须采取大型压裂改造和其他相应措施，才能有效地投入工业开发，主要分布在大芦湖、五号桩、正理庄等油田。

超低渗透油藏是指油层平均渗透率介于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的油田。这类油藏储层非常致密，束缚水饱和度很高，基本没有自然产能，一般不具备工业开发价值。只有当油藏埋深、油层厚度、原油性质等条件较好时，通过采取适当措施，才具备一定的经济开采价值，胜利油田上报探明储量没有该类油藏。

2. 按沉积类型和储层分布状况分类

按沉积类型和储层分布状况分类，胜利油田的低渗透油藏主要包括层状构造低渗透油藏、透镜体岩性低渗透油藏、薄互层低渗透油藏三大类。

层状构造低渗透油藏主要指以渤南油田为代表的三角洲或扇三角洲沉积的受岩性、构造双重控制的低渗透油藏，主要分布在渤南、桩西、商河等油田。

透镜体岩性低渗透油藏主要指以牛庄油田为代表的滑塌浊流沉积形成的透镜体状岩性低渗透油藏，主要分布在牛庄、史南等油田。

薄互层低渗透油藏主要指以纯化油田为代表的滨浅湖相砂泥交互的薄互层低渗透油藏，主要分布在纯化、大王北、平方王、邵家等油田。

3. 按储集渗流特征分类

储集渗流特征主要是指孔隙性渗流、裂缝孔洞型渗流及具有双重介质的渗流三大类。胜利油田低渗透油藏按储集渗流特征进行分类，可分为具有孔隙性渗流特征的单重介质和具有双重介质的渗流两大类。

单重介质主要是指砂岩孔隙介质，尽管渗透率低，但地层无天然裂缝或天然裂缝不发育（对流体渗流无影响），胜利油田的主要低渗透油藏都属于这种类型，比如渤南、纯化、牛庄等油田。

双重介质是指在低渗透油藏中天然裂缝较为发育，砂岩孔隙和天然裂缝对流体储集与渗流均有一定的贡献，这种类型的油藏在胜利油田较少，仅在大芦湖油田存在。

第二节 储量分布及动用状况

一、储量分布状况

胜利油田低渗透油藏分布在渤南、纯化、牛庄、桩西、五号桩、滨南、大芦湖、正理庄、东风港等42个油田。截至2007年底，探明储量 $7.31 \times 10^8 \text{t}$ ，占全油区的15.4%。“八五”以来，每年新增探明储量都在 $2000 \times 10^4 \text{t}$ 左右（图1-1），2007年探明 $6811 \times 10^4 \text{t}$ ，占当年探明储量的64.6%。

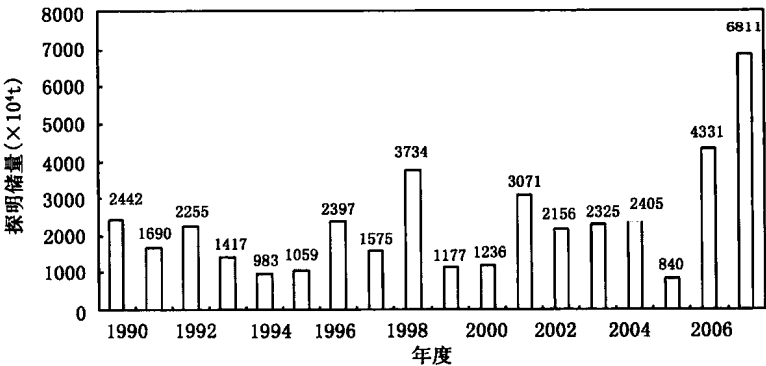


图1-1 胜利油田“八五”以来低渗透油藏新增探明储量图

二、储量动用状况

截止到2007年，胜利油田共探明低渗透油藏的储量达到 $7.31 \times 10^8 \text{t}$ ，目前动用 $5.45 \times 10^8 \text{t}$ ，80%以上的动用储量集中在普通低渗透油藏（即一、二类低渗透油藏）（表1-1）。

表1-1 2007年底储量状况表

类型	主要参数	动用储量		主要储层类型
	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	($\times 10^4 \text{t}$)	所占比例 (%)	
I类油藏	$30 \leq K < 50$	13660	25.1	厚层 透镜体 薄互层

续表

类型	主要参数	动用储量		主要储层类型
	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	($\times 10^4 \text{t}$)	所占比例 (%)	
Ⅱ类油藏	$10 \leq K < 30$	24570	45.1	
Ⅲ类油藏	$1 \leq K < 10$	16287	29.8	滩坝砂
Ⅳ类油藏	$K < 1$	探明储量无该类油藏		

未动用储量 $1.86 \times 10^8 \text{t}$ ，待核销、试采及待评价的占 60% 左右。该类储量未动用主要原因为渗透率低，埋藏深，砂体分布零散，经济有效动用困难。

第三节 开发历程及现状

一、开发历程

胜利油田低渗透油藏的开发大体上经历了四个阶段：低产阶段、产量上升阶段、产量平稳阶段和产量回升阶段（图 1-2）。

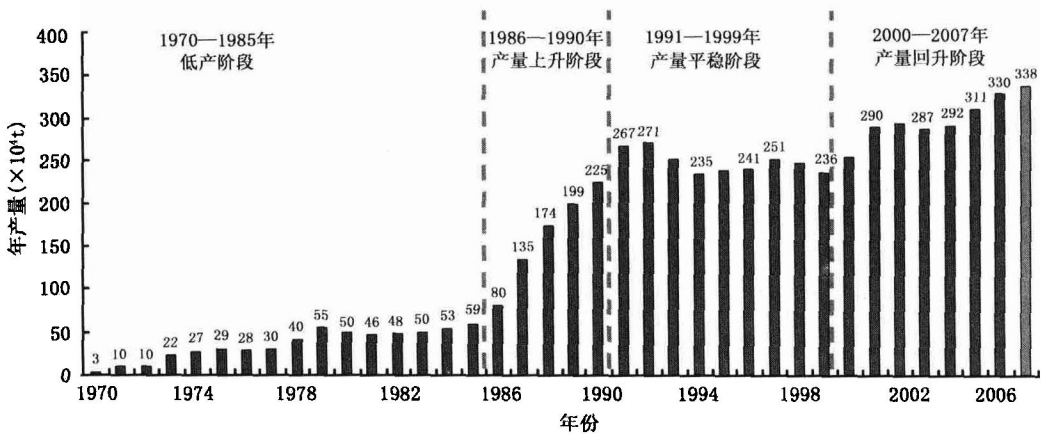


图 1-2 胜利油田低渗透油藏历年产油量

1970—1985 年为低产阶段。该阶段为胜利油田低渗透油藏开发探索时期，主要投入开发了渤南三区、五区、平方王东区等区块。由于储层改造等配套技术尚未完善，一直为低速开发。

1986—1990 年为产量上升阶段。该阶段重点发展了压裂改造等配套工艺技术，并采用四点法面积井网注水补充能量，实现了渤南三区、五区等低渗透区块的高速上产。同时，纯化、桩西、邵家等新区块相继投入开发，年产油量从阶段初的 $59 \times 10^4 \text{t}$ 上升到阶段末的 $225 \times 10^4 \text{t}$ 。

1991—1999 年为产量平稳阶段。该阶段重点攻关研究并配套形成了低渗透油藏开发技术，主要包括地应力场与裂缝分布规律、井网井距优化、整体压裂改造、油层保护等配套技术。

术，主要投入开发了牛庄、大芦湖等油田，樊 29、牛 20 及史深 100 等单元取得较好的开发效果，弥补了渤南等老油田的产量递减。

“九五”末以来为产量回升阶段。该阶段重点开展了低渗透油藏精细地质建模、渗流机理、小井距现场试验等技术攻关，进一步配套完善了低渗透油藏开发技术。在此基础上，随着新区块投入开发和老区调整，低渗透油藏产量呈回升趋势，年产油量稳定在 $240 \times 10^4 \text{t}$ 以上。

二、开发现状

截止到 2007 年 12 月，胜利油田动用低渗透单元 208 个，动用地质储量 $5.12 \times 10^8 \text{t}$ ，平均标定采收率 18.62%，可采储量 $0.95 \times 10^8 \text{t}$ 。油井总井数 2924 口，油井开井数 2415 口，单井日产油 3.4t，综合含水 66.4%，水井总井数 1121 口，水井开井数 869 口，单井日注 33.9m^3 ，年产油 $338 \times 10^4 \text{t}$ ，累计产油 $6006 \times 10^4 \text{t}$ ，采出程度 11.7%，采油速度 0.65%，可采储量采出程度 63.0%，剩余速度 8.7%。

第二章 低渗透油藏地质特征

第一节 沉积及成岩特征

一、沉积特征

1. 滨浅湖相储层

胜利油田东营凹陷和沾化凹陷均有滨浅湖相沉积的低渗透储集层。在凹陷斜坡带的局部隆起部位,由于水体较浅,由湖流和湖浪将河流入湖碎屑物搬运至此沉积。储层主要为砂岩储层和碳酸盐岩储层。纯化、桩西浅层、大王北等低渗透油藏以该类储层为主。

砂岩为主的储层沉积微相划分为滩脊和滩凸微相、内岸滩砂微相和外岸滩砂微相;碳酸盐岩为主的储层沉积微相划分为鲕粒滩和灰泥坪。

砂岩储层以细砂岩和粉砂岩为主,灰质和白云质胶结,岩性致密,碳酸盐岩含量一般高于15%。粒度普遍较细,分选较好。碳酸盐岩储层主要为生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、礁灰岩和白云岩。

砂岩储层的储集空间以孔隙型为主。碳酸盐岩的储集空间以原生孔隙和次生溶蚀孔隙为主,并有微裂缝发育,有利于增加储层的渗透性。

2. 深水浊积相储层

一种为远岸浊积扇,由水下峡谷构成补给水道的水下重力流携带大量碎屑物向湖内流动,出谷口后开始分支呈辐射状展开,形成扇形沉积;另一种为三角洲前缘滑塌浊积砂体。大芦湖、牛庄和渤南等低渗透油藏以该类储层为主。

岩性以细砂岩和粉砂岩为主,主要为泥质、灰质和白云质胶结。泥质含量5%~15%,碳酸盐岩含量约10%左右。储集空间为粒间孔、溶蚀孔,微裂缝发育。

3. 近源浊积相储层

近源浊流或碎屑流经短距离搬运,直接快速堆积而成。滨南和五号桩等低渗透油藏以该类储层为主。

岩性由砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩、细砂岩和粉砂岩组成。成分成熟度低,沉积物分选差。储集空间为微孔隙、残余粒间孔和微裂缝。

埋藏较深的河流相和三角洲相储层经成岩作用可以成为低渗透储层。

二、成岩作用

1. 压实作用

胜利油田低渗透储层主要为近源碎屑物沉积,成分成熟度低,碎屑颗粒分选差,在上覆压力和水体静压力的作用下,使碎屑颗粒排列紧密,塑性组分变形,大大降低了孔隙空间,进而影响储层的渗流能力。在胜利油田,随着埋藏深度的增加和埋藏时间的增长,碎屑岩的储集性能有逐渐变差的趋势。例如沾化凹陷内的渤南油田沙三段储层,二区油

层埋深 3478m, 渗透率为 $8.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 五区油层埋深 3100m, 渗透率为 $45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 一区油层埋深在 2879 ~ 2957m 之间, 渗透率为 $220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。埋藏深度与渗透率有明显的对应关系。

2. 胶结作用

在胜利油田, 胶结作用对低渗透储层的孔渗性影响也很大, 主要包括石英次生加大和碳酸盐胶结作用。

1) 石英次生加大

在深层的低渗透储层中, 常见石英次生加大现象。石英次生加大除使孔隙度降低外, 还堵塞石英碎屑之间的孔隙喉道, 形成镶嵌状结构, 降低储层渗透性。例如渤南油田随着埋深及地温的增加, 泥岩中有机质在转化过程中形成的有机酸降低了孔隙溶液的 pH 值, 减少了 SiO_2 溶解度, 有利于石英再生加大, 在薄片中可以见到明显的石英颗粒次生加大边。在沙三段 9 砂层组次生加大占 0.5% ~ 1% 面积。扫描电镜中可见到由于石英次生加大使晶形发生变化, 造成颗粒间相挤相嵌, 使孔隙度变小, 喉道变窄, 甚至消失。

2) 碳酸盐胶结作用

碳酸盐胶结物对碎屑岩的储集性能影响很大, 可以使渗透层变为非渗透层甚至变为致密层。低渗透储层的碳酸盐含量受沉积相控制。滨浅湖相的薄层砂岩碳酸盐含量高, 主要为碳酸盐胶结。例如纯化油田沙四段上亚段油层碳酸盐含量高达 17.8%, 属于典型的碳酸盐胶结储层。

3. 溶解作用

溶解和溶蚀作用使碎屑组分、胶结物及杂基经过孔隙水或裂缝水的溶解形成次生孔隙。胜利油田多数低渗透储层都有次生孔隙发育。例如牛庄油田、滨南油田、纯化油田、渤南油田和五号桩油田等。

研究表明, 低渗透储层次生孔隙发育与沉积相带、埋深和构造断裂密切相关。如五号桩油田古近系近源浊积扇砂体埋深 3200 ~ 4000m, 包围于巨厚的生油岩中。生油岩在成熟演化过程中形成的有机酸对砂岩体内的无机物反应形成大量次生孔隙。由于有机酸在砂体内的流动受沉积相带的控制, 不同微相中的砂岩在成分、结构及厚度方面存在差异, 影响次生孔隙的发育和分布。中扇亚相辫状水道砂体厚度大, 原始渗透性好, 最有利于形成储集性能较好的次生孔隙。

同时, 次生孔隙的分布也与断裂密切相关。开启性断层是酸性溶液活动的良好通道, 有利于在靠近断层附近形成次生孔隙。在微裂缝发育的低渗透储集岩中, 沿裂缝溶蚀作用强, 可以形成次生孔隙, 而远离微裂缝处次生孔隙不发育。

4. 粘土矿物

胜利油田低渗透油藏粘土含量大于 8%, 粘土矿物中以伊利石和蒙皂石为主。渤南油田粘土矿物主要为伊利石 (52.16%)、伊/蒙混层 (37.79%) 和高岭石 (10.05%); 大芦湖油田粘土矿物主要为伊利石 (50.9%)、伊/蒙混层 (48%) 和少量高岭石。牛庄油田粘土矿物主要为高岭石和绿泥石 (8% ~ 21%)。由于粘土矿物呈蜂窝状、丝状或絮状充填于孔隙和喉道中, 不仅降低孔渗性, 使油层物性变差, 同时由于粘土矿物在储层中的运移堵塞喉道及其敏感性, 对开发造成不利影响。

第二节 储层特征

一、岩性特征

1. 岩石的粒度组成

胜利油田低渗透碎屑岩储层受陆相沉积环境控制和成岩作用的影响；岩性主要为细砂岩和粉砂岩，其次为粗粒级砂岩和砾岩以及碳酸盐岩。岩石粒度分布范围较广。永安镇油田永551砂砾岩体沉积分选差，除砾岩外，砂岩多为砾状不等粒砂岩，一块样品往往含有从砾石（个别直径大于64mm）到粉砂和泥不同粒级；渤南油田五区砂岩储层粒度中值分布范围0.05~0.4mm，平均值为0.19mm，主要属细砂岩粒级，其次是中砂岩、粗粉砂岩粒级；纯化油田沙四段上亚段砂岩储层粒度普遍较细，一般粒径为0.05~0.1mm，平均为0.067mm，属粗粉砂级。

2. 岩石的矿物成分

胜利油田低渗透油藏的岩石矿物成分中，石英、长石和岩屑平均各占1/3，为长石砂岩和岩屑砂岩类（表2-1）。

表2-1 胜利油田低渗透油藏储层矿物成分及胶结物含量表

油 田	层位	矿物成分含量（%）			胶结物含量（%）	
		石英	长石	岩屑	泥质	碳酸盐
渤南五区	Es ₃	35.0	30.0	20.0	9.0	6.0
大芦湖	Es ₃	32.8	29.3	22.5	6.0	9.4
牛庄油田牛27-B	Es ₃	35.0	32.1	21.4	5.1	6.4
纯化油田纯东	Es ₄ ^上	41.1	30.3	13.8	5.1	9.7

3. 胶结物类型

胶结物含量较高，对低渗透储层的形成起着重要作用。胜利油田低渗透油藏胶结物主要为泥质胶结和碳酸盐胶结为主。例如牛庄油田王68井区泥质含量平均为10.2%，碳酸盐含量为7.9%；大芦湖油田沙三段中亚段油层碳酸盐含量10.8%，泥质含量为6.9%；渤南油田五区沙三段泥质含量5%~25%，平均值为9.2%，碳酸盐含量平均为6.4%；纯化油田沙四段上亚段油层碳酸盐含量高达17.8%，泥质含量13.9%。

二、物性特征

胜利油田低渗透油藏分布范围广，油藏类型多，储层物性参数变化范围大。

1. 孔隙度

统计胜利油田具有代表性的9个低渗透油藏，其孔隙度变化范围在6.6%~26%之间，平均为16.9%（表2-2）。

表 2-2 胜利油田低渗透油藏储层物性和含油饱和度统计表

油 田	层位	孔隙度 (%)		渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)		含油饱和度 (%)	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
牛庄	Es ₃	17 ~ 21	18	4.4 ~ 31.6	15	53 ~ 68	62
平方王东区	Es ₄ z1	20 ~ 21	21	—	45	58 ~ 68	62
商河	Es ₁ —Es ₃	16 ~ 26	19	1 ~ 36.2	17.2	47 ~ 61	48.2
渤南	Es ₂ —Es ₃	14 ~ 23	18.3	1.3 ~ 50	21.2	47 ~ 67	57.4
纯化	Es ₄	—	20	29.7 ~ 36.7	34.2	53 ~ 65	58.6
大芦湖	Es ₃	14 ~ 20	15.7	1.7 ~ 30.7	6.7	45 ~ 64	56
大王北	Es ₂	15 ~ 18	16.6	—	31	—	57
小营	Es ₄	—	13	6.4 ~ 7.3	6.9	57 ~ 62	60
孤南	Es ₁ —Es ₃	6.6 ~ 14	10.2	0.5 ~ 8	4.7	52 ~ 57	54

2. 渗透率

从表 2-2 看出, 渗透率变化范围在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 对于同一个低渗透油层, 局部物性好的部位渗透率高于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3. 含油饱和度

从表 2-2 看出, 原始含油饱和度在 45% ~ 68% 之间, 均低于 70%, 低渗透油藏原始含水饱和度较高。这主要是低渗透油藏渗透率低, 孔隙结构差, 驱动力小, 油气运移的阻力大, 油气进入孔隙少, 因而含油饱和度低。

三、孔喉结构特征

1. 次生孔隙发育

胜利油田低渗透砂岩储层的孔隙以粒间孔为主, 原生粒间孔 ($< 25\%$) 和次生粒间溶蚀孔 (40% ~ 70%) 都有发育 (图 2-1)。东营凹陷的牛庄油田、滨南油田、纯化油田及沾化凹陷的渤南油田、五号桩油田都有良好的次生孔隙砂体分布。五号桩油田 3500m 以下的次生孔隙砂体的孔隙度为 15% ~ 20%, 渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 也是储集性能较好的油层。另外还有微孔隙 ($< 35\%$)、晶间孔和裂隙孔。油层中的裂隙可以沟通孤立的溶蚀孔和微孔隙, 对改善低渗透的渗流状况十分有利。



粒间孔, 单偏光 10×20
牛35井, 2957m



铁白云石溶蚀成孔隙, 单偏光 10×20
河125-1井, 3018.5m

图 2-1 典型取心井的孔隙特征图

2. 孔喉小，非有效孔喉占的比例较大

反映孔喉大小的几个主要参数为平均孔喉半径 (R_a)、孔喉半径中值 (R_{50})、最大孔喉半径 (R_{max})，胜利油田孔喉半径中值较小。比如，渤海油田沙三段9砂层组的平均孔喉半径为 $1.02 \sim 2.78 \mu\text{m}$ ，平均为 $1.73 \mu\text{m}$ ；孔喉半径中值为 $0.965 \mu\text{m}$ ；最大孔喉半径为 $1.45 \sim 8.41 \mu\text{m}$ ，平均为 $4.11 \mu\text{m}$ 。大芦湖油田樊12井区沙三段平均孔喉半径为 $1.32 \sim 2.95 \mu\text{m}$ ，平均为 $1.90 \mu\text{m}$ 。

非有效孔喉体积指孔喉半径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的孔喉体积，胜利油田低渗透砂岩油藏这部分孔喉在孔喉总体积中占较大比例。例如渤海油田沙三段储层在物性相对较好的样品中为20%，最差的样品可高达35%，大部分样品非有效孔喉体积达30%，直接影响了储层的质量。

3. 毛细管压力曲线特征

高渗透储层和低渗透储层的孔隙对渗透率的贡献有明显不同（图2-2），通过对比表明，低渗透储层喉道细，排驱压力高，增加了注水驱油的难度。比如桩106块桩106-69井毛细管压力曲线：层位为馆陶组，井深为1378.7m，孔隙度为37.6%，渗透率为 $2176 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，渗透率贡献累计为96%对应的孔喉半径为 $6.3 \mu\text{m}$ 。大芦湖樊10井毛细管压力曲

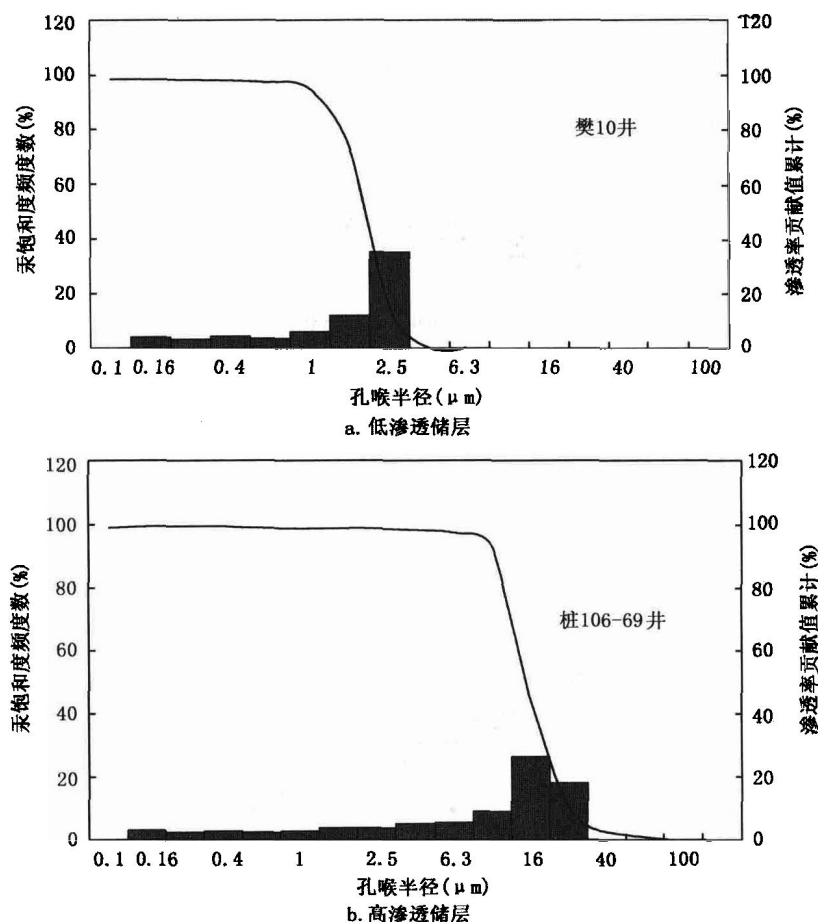


图2-2 高渗透储层与低渗透储层毛细管压力曲线对比图

线：层位为沙三段中亚段，井深为 2902.7m，孔隙度为 15%，渗透率为 $3.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，渗透率贡献累计为 95% 对应的孔喉半径为 $0.83 \mu\text{m}$ 。

4. 孔隙结构特征参数与渗透率的关系

对胜利油田几十年来的压汞资料近 290 口井的 650 块次的 5256 个各项参数按 7 个渗透率级别 ($<1 \times 10^{-3}$, $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$, $5 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$, $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3}$, $50 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3}$, $100 \times 10^{-3} \sim 1000 \times 10^{-3}$, $1000 \times 10^{-3} \sim 5000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)，5 个层位 (Ng 、 Es_1 、 Es_2 、 Es_3 、 Es_4) 进行了统计，建立了砂岩油藏孔隙度、排驱压力、孔喉半径平均值、变异系数、均质系数、岩性系数、退汞效率与空气渗透率的关系。

图 2-3 反映了不同渗透率的砂岩油藏孔隙度的变化情况。从关系曲线可以看出，渗透率以 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右为界，存在两种变化规律，即低渗透砂岩油藏孔隙度随渗透率的增加而增加的快，中高渗透砂岩油藏孔隙度随渗透率的增加而增加的慢。也就是说，增加相同的孔隙度，低渗透储层所能提高的渗透性要低，从而反映出低渗透储层孔喉配位数低。

图 2-4 和图 2-5 都反映了砂岩油藏孔喉大小与空气渗透率的关系。图 2-4 中的排驱压力（即最大孔喉半径）和图 2-5 中的平均孔喉半径与空气渗透率具有较好的相关性，因此，通过渗透率划分出的低渗透砂岩油藏具有孔喉半径细小的特点。

通过变异系数、均质系数、岩性系数、退汞效率与空气渗透率的关系可以反映砂岩储层均质性与空气渗透率的关系。结果表明，这四项参数与空气渗透率的相关性较差，因此可以得出非均质性强并不是低渗透储层的特点，同时均质性好也不是中高渗透储层的特点。

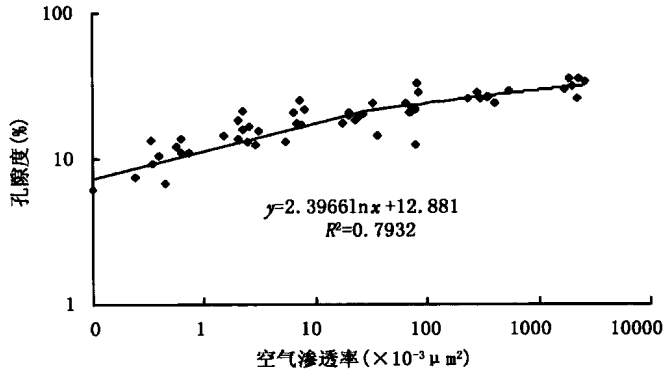


图 2-3 砂岩油藏储层孔隙度与空气渗透率的关系曲线

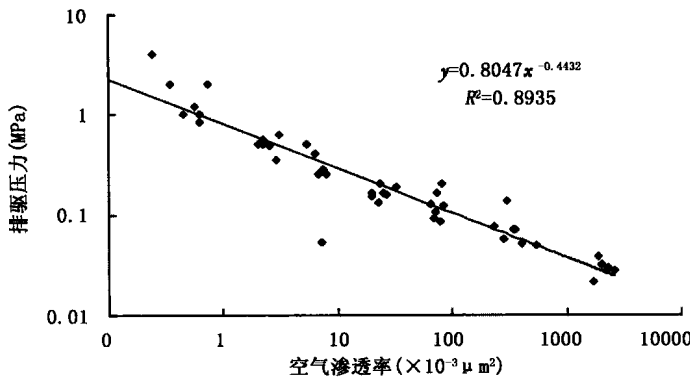


图 2-4 砂岩油藏储层排驱压力与空气渗透率的关系曲线

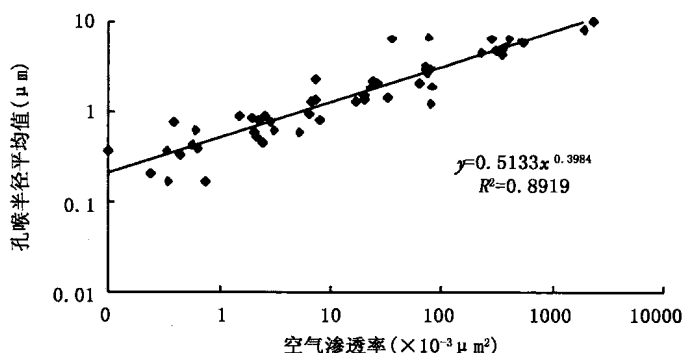


图 2-5 砂岩油藏储层孔喉半径平均值与空气渗透率的关系曲线

四、裂缝特征

储层裂缝在低渗透油藏地质研究中具有十分重要的意义，正确认识和研究裂缝是裂缝性砂岩油田开发成败的关键。

低渗透油藏储层裂缝成因，大多为构造裂缝，极少为非构造裂缝，胜利油田低渗透储层的裂缝成因也是如此。因此，低渗透油藏的构造裂缝与大地构造背景密切相关，即裂缝分布比较规则，产状稳定，常常成组出现；有潜在缝的特点，裂缝面上常见擦痕及阶步等；裂缝切穿深度大；常被矿物局部和全部充填；力学性质既有张裂缝，也有剪裂缝，一般以剪裂缝为主。

裂缝的产状以高角度缝为主，统计各低渗透油藏倾角大于 60° 的裂缝占总裂缝的 70% 以上。如胜利油田大芦湖油田沙三段中亚段低渗透油层构造裂缝倾角一般在 $65^\circ \sim 90^\circ$ ，占总裂缝的 81%。通过井温测井曲线表明压裂缝大部分造缝在储层内，裂缝向上延伸小，向下延伸长度较大，一般在 $8 \sim 10\text{m}$ 左右。通过岩心观察和裂缝测量，发现岩心中存在高角度裂缝，裂缝内有方解石充填，裂缝宽度 1mm 。裂缝分布测量表明，其走向大多在 $NE75^\circ - 95^\circ$ 之间。

裂缝发育方位与区域构造有关，如胜利油田大芦湖油田储层裂缝主要是由两个构造期所形成的区域性裂缝体系。一种是始新世—渐新世构造期裂缝体系：一组为走向 EW 向的剪切节理缝、一组为走向 NNW 向的剪节理缝和一组为走向 NW 向的张节理缝。另一种是新近纪构造裂缝体系：一组为 NE 向、一组为 NW 向的共轭剪切节理缝；另一组近 EW 的张节理缝。

裂缝密度主要受构造部位、砂岩厚度、岩性等控制。不同的构造部位其应力场大小和方位不同，造成裂缝发育的程度和方位不同，一般来说褶皱转折处、背斜的陡翼以及断层附近裂缝较发育。砂岩厚度越大，裂缝密度越小；岩性越致密坚硬，裂缝越发育。

在裂缝的规模特征方面，据研究，低渗透油藏裂缝宽度一般都很小，多数在十几到几十个微米之间。如大芦湖油田沙三段中亚段储层裂缝宽度主要在 $1 \sim 5\mu\text{m}$ 之间，裂缝长度 $2 \sim 8\text{m}$ 的占 83%。通过相近露头观察，多数裂缝的延伸长度小于 100m 。

在开启特征方面，低渗透油藏以闭合缝尤其是潜在缝为主（图 2-6）。裂缝孔隙度、渗透率是裂缝性油田开发的关键参数，虽然砂岩油田的裂缝孔隙度都非常小，一般小于 1%，但渗透率变化十分巨大，从几十至上千毫达西不等。裂缝性砂岩油田裂缝主要起增加储层导流能力的作用，而基本不是储集空间。而在滨浅湖相沉积的碳酸盐岩储层，如纯化油田低渗