

特低-超低渗透油气藏 特色实验技术

杨正明 郭和坤 刘学伟 张亚蒲 熊生春 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对特低-超低渗透油气藏的储层特征、开发特征及有关特色室内实验技术,进行了全面系统的论述。书中介绍了储层微观孔隙结构、微观渗流机理及开发效果等几大方面的实验技术,详细阐述了实验方法、实验步骤及实验结果的分析,重点介绍了每项实验技术的应用。

本书可供石油工程技术人员、科学技术工作者及石油院校有关专业师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

特低-超低渗透油气藏特色实验技术/杨正明, 郭和坤,
刘学伟等著. 北京: 石油工业出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5021-9377-5

I. 特…

II. ①杨…②郭…③刘…

III. 低渗透油气藏-实验

IV. TE34-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 280285 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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64523612 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.5

字数: 200 千字

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

随着常规油气资源量的日益减少,特低-超低渗透油藏的开发工作越来越受到关注。由于特低-超低渗透油藏地质条件差、开发难度大,迫切需要有针对特低渗透油田开发的储层特征及渗流机理等方面的实验研究方法,以便指导现场开发。

本书基于特低-超低渗透油藏在开发中面临的实际问题,在跟踪国内外对特低-超低渗透实验方法的基础上,通过多年来大量的室内实验尝试,形成了七大油气藏特色实验技术,分别为恒速压汞实验技术、核磁共振岩心实验技术、X-CT扫描实验技术、非线性渗流测试技术、微观驱油实验技术、注CO₂开发实验技术、特低渗透大型露头模型物理模拟实验技术。

全书共分七章。第一章由杨正明、郭和坤、熊生春、王学武、周洪涛、骆雨田、李海波、黄雪皎和孙军昌撰写,第二章由杨正明、郭和坤、熊生春、王学武、骆雨田、李海波、何英、张英芝和孙军昌撰写,第三章由杨正明、郭和坤、张亚蒲、熊生春、王学武、骆雨田和何英撰写,第四章由张亚蒲、杨正明、刘学伟、王学武、齐亚东、骆雨田、刘志远、何英和于荣泽撰写,第五章由刘学伟、张亚蒲、杨正明、骆雨田、唐立根、张硕撰写,第六章由王学武、刘学伟、张亚蒲、杨正明、唐立根和张硕撰写,第七章由徐轩、魏国齐、杨正明、张亚蒲、刘学伟、滕起、薛成国、肖前华、田文博和冯骋撰写。

目前,已出版的、针对特低-超低渗透油气藏室内实验技术类的图书较少。因此,希望此书的出版对特低-超低渗透油田的开发起到推动作用,并能为石油科研人员、大专院校师生在油气藏开发的应用和学习中起到指导作用。

本书在编写过程中得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所同仁的大力支持和帮助,并得到了国家科技重大专项(2011ZX05013)、中石油科技重大专项(2011B-1203、2011E-0307)的资助。本书对所用的资料数据尽量作了注明,但难免有不详之处,请予以谅解。

著者

2012年9月

目 录

第一章 恒速压汞实验技术	1
第一节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试和参数计算方法	2
第二节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试结果分析	6
参考文献	14
第二章 核磁共振岩心实验技术	17
第一节 核磁共振岩石分析技术发展历程及应用现状	17
第二节 核磁共振测试可动流体原理及实验步骤	18
第三节 核磁共振实验技术应用	24
参考文献	39
第三章 X-CT 扫描实验技术	43
第一节 X-CT 扫描测试原理	43
第二节 常用 X-CT 扫描仪简介及系统校准、监测方法	44
第三节 X-CT 扫描结果与分析	47
第四节 结论和建议	54
参考文献	54
第四章 非线性渗流测试技术	57
第一节 低渗透油藏非线性渗流理论及实验方法	57
第二节 气藏非线性渗流实验测试	69
参考文献	75
第五章 微观驱油实验技术	77
第一节 实验设备及实验步骤	77
第二节 高温高压微观实验技术应用	79
第三节 核磁共振成像技术应用	86
参考文献	92
第六章 注 CO₂ 开发实验技术	94
第一节 最小混相压力实验	95
第二节 长岩心实验	102

第三节 组分分析实验	107
第四节 核磁共振微观气驱机理实验	114
第五节 微观可视实验	121
第六节 CO ₂ 吞吐实验	128
参考文献	133
第七章 特低渗透大型露头模型物理模拟实验技术	135
第一节 概述	135
第二节 实验原理	138
第三节 实验方法及流程	148
第四节 实验结果分析	150
第五节 实验技术应用	155
参考文献	170

第一章 恒速压汞实验技术

储层孔隙结构是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系^[1]。由于油、气、水是在储层岩石连通的孔隙中流动的,孔隙结构特征对孔隙中流体的流动具有重要的影响,因此研究岩石微观孔隙结构特征是研究流体渗流规律的基础。

目前,对岩石微观孔隙结构特征的研究方法可分为两大类:第一类是直接的实验方法,主要包括铸体技术、压汞法、离心法、半渗透隔板法、吸附法和光学方法等^[1-3]。第二类方法是数字岩心技术,其利用微观模拟模型可以模拟岩心中的孔隙大小分布、孔隙的网络拓扑结构等^[4-5],主要方法包括毛细管模型^[6-7]、球形颗粒堆积模型^[8]、格子模型^[9]和网络模型^[10-13]。两种方法中,前者是目前主要的研究孔隙结构特征的方法,并且是后者的研究基础。

恒速压汞实验技术是近年来出现的一种高精度微观孔隙结构研究技术,整个进汞过程中保持汞的注入速度恒定来监测汞毛细管压力。恒速压汞实验技术的提出经历了长期的积累和发展过程。在国外,1959年,J. I. Gates在实验室使用汞孔隙度仪测定含有较大孔洞的碳酸盐岩岩心孔隙度时,就观察到在汞进入岩心过程中毛细管压力出现波动的现象。1966年,Crawford和Hoover等人使用图表记录下了在水驱油过程中注入压力的波动情况,更加清晰地反映了非混相驱替过程中由于岩石微观孔隙结构的变化所引起的毛细管压力波动。1970年,Morrow^[14]对非润湿相以极低的注入速度驱替润湿相实验过程进行了详细研究,同样观察到驱替过程中注入压力的波动现象,并引入了一些术语来描述压力波动的特征。1971年,C. Gaulier^[15]在SPE会刊上发表了一篇关于恒速压汞技术设计思想、合理性分析及数据处理方法的研究论文,C. Gaulie还给出了几种数据处理的实例。但他设计的实验仪器测试精度较低,很多关键概念只是初步定义,但该仪器能够测试的实验样品体积较大。1984年,H. H. Yuan和B. F. Swanson两位学者^[16]在C. Gaulier研究的基础上提出了更加完整的恒速压汞技术思想,并将该项技术称为孔隙特征检测仪。他们设计了更加精密的实验仪器,使得该项技术具有了规模化应用的商业基础。通过对恒速压汞思想和储层

岩石孔隙结构本身的研究,提出对于储层岩石由于喉道和孔道大小的差别必然导致毛细管压力的明显波动,因此通过这种波动就可以将 C. Gaulier 所认为的基质部分孔道、喉道进一步区分出来,同时他们也给出了数据处理的实例,其侧重点不仅在于反映多孔介质喉道、孔道各自的发育规律,而且将岩石的静态性质与其渗流动态特征联系起来,给出了使用孔道进汞饱和度预测水湿储层残余油饱和度的方法,大大拓宽了恒速压汞技术的应用范围。1990 年, H. H. Yuan 在 SCA 会刊上发表了题为“Advances in APEX technology”的论文。在前期研究的基础上,该文首先提出了使用恒速压汞数据表征岩石微观孔隙结构非均质性的方法,即喉道、孔道分布的多峰态特征,绘制了对应的三维分布图。1994 年, P. G. Toledo^[17]等人对恒速压汞的运动过程作了详细描述,建立了相应的数学模型,并利用 Monte Carlo 方法对其进行了数值模拟。1999 年, J. M. Potter 利用恒速压汞的实验结果和孔隙网络模型对实际岩样计算了渗透率、采收率等参数。在国内,1999 年,中国科学院渗流流体力学研究所引进国内第一台恒速压汞仪。2003 年,王金勋^[18]在恒速压汞实验数据基础上,利用 Bethe 网络模型对储层相对渗透率进行模拟计算。2006 年,杨鹏^[19]等人利用恒速压汞技术对储层中微生物的运移能力进行了评价分析。2006 年,于俊波^[20]等人将恒速压汞技术应用于低渗透储层的研究,结果表明喉道是控制渗流能力的关键因素,杨正明等人^[21-23]应用恒速压汞对低渗油藏、低渗气藏和火山岩气藏的微观孔隙结构特征进行了研究,分析了喉道半径分布对储层渗流能力的影响,认为平均喉道半径是储层评价的重要参数。2009 年,时宇^[24]对利用恒速压汞得到的孔喉分布进行分形研究,发现储层喉道分布具有分形特征,而孔隙分布不具分形特征。

本章叙述了恒速压汞技术测试岩心微观孔隙结构特征的原理、实验步骤及其在复杂油气藏中的应用情况。

第一节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试和参数计算方法

一、恒速压汞技术测试原理

孔隙在结构上可以划分为孔道和喉道。油层物理中压汞法是专门用于探测孔隙结构的实验技术。常规压汞是在某一恒定进汞压力下,通过压力计算喉道半径,通过计量进汞量来计算对应于该进汞压力的喉道控制体积,通过一系列

进汞压力实验来给出岩样中喉道的大小分布。从常规压汞的实验过程来看,它只是给出了某一级别的喉道所控制的孔隙体积,并没有直接测量喉道的数量,因此只能给出喉道半径及对应的喉道控制体积分布。而这个分布由于掺杂了孔道体积的因素,所以并非准确的喉道分布。因此采用恒速压汞技术对大庆油田徐深火山岩气藏的岩心进行微观孔隙结构特征测试分析,恒速压汞技术在实验进程上实现了对喉道数量的测量,从而克服了常规压汞的不足。由于恒速压汞技术能同时得到孔道和喉道的信息,对于孔道、喉道性质差别很大的储层尤其适用。

恒速压汞维持非常低的进汞速度,保证了准静态进汞过程的发生。在此过程中,界面张力与接触角保持不变;进汞端经历的每一个孔隙形状的变化,都会引起弯月面形状的改变,从而引起系统毛细管压力的改变,其过程如图 1-1 所示。图 1-1 (a) 为孔隙群落以及汞前缘突破每个结构的示意图,图 1-1 (b) 为相应的压力变化。当进汞前缘进入到主喉道 1 时,压力逐渐上升,突破后,压力突然下降,如图 1-1 (b) 第一个压力降落 O (1); 然后汞将逐渐将第一个孔室填满并进入下一个次级喉道,产生第二个次级压力降落 O (2); 以下渐次将主喉道所控制的所有次级孔室填满;直至压力上升到主喉道处的压力值,即为一个完整的孔隙单元。主喉道半径由突破点的压力确定,孔隙的大小由进汞体积确定。这样喉道的大小以及数量就能在进汞压力曲线上得到明确的反映。图 1-2 所示为恒速压汞压力波动典型曲线。

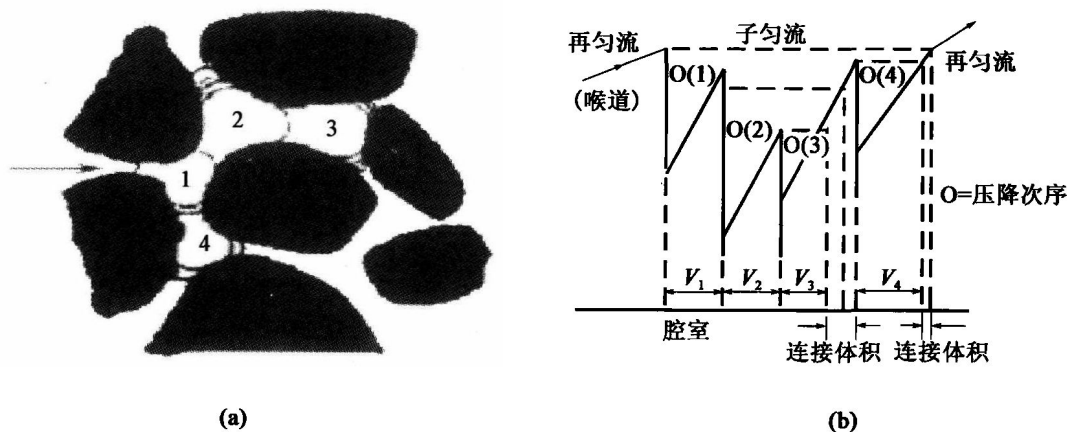


图 1-1 恒速压汞技术测试储层孔隙结构原理示意图

(a) 孔隙群落以及汞前缘突破每个结构的示意图; (b) 相应的压力变化

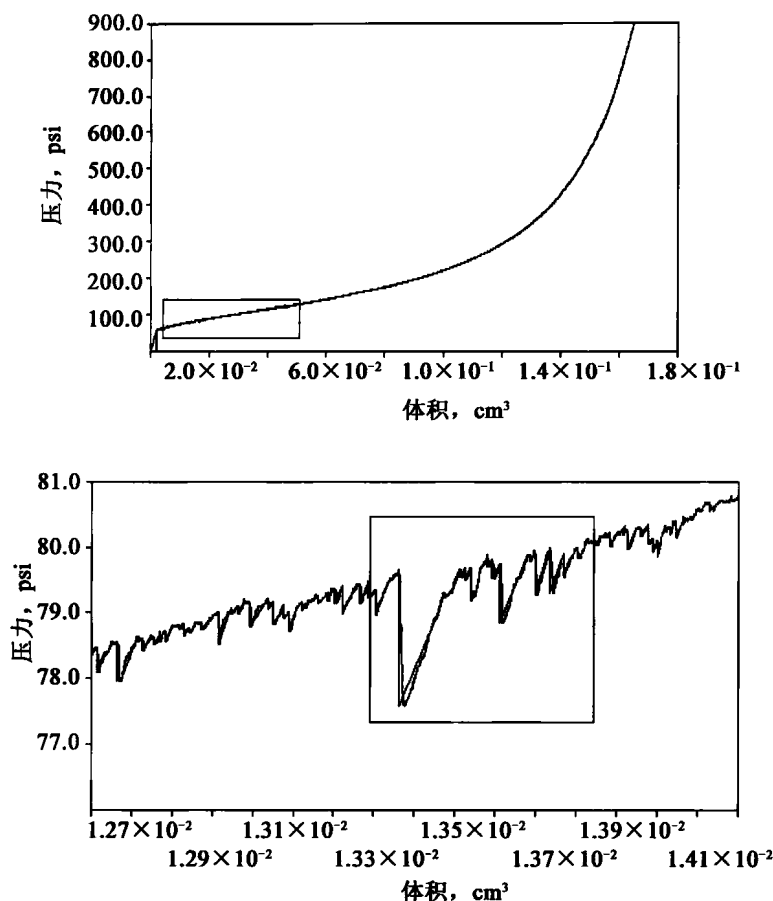


图 1-2 恒速压汞压力波动典型曲线

实验采用美国 Coretest 公司制造的 ASPE 730 恒速压汞仪，恒速压汞实验仪结构如图 1-3 所示。进汞压力为 0~1000psi (约 7MPa)，进汞速度为 0.00005mL/min，接触角为 140° ，界面张力为 485dyn/cm，样品外观体积约 1.5cm^3 。

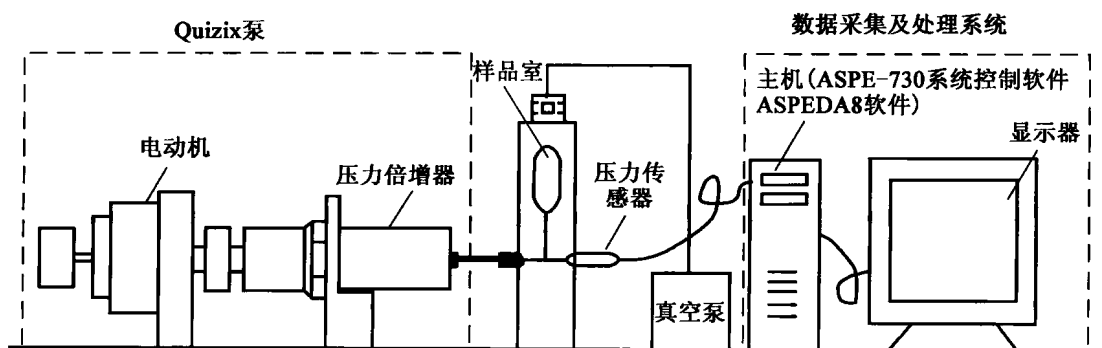


图 1-3 恒速压汞实验仪结构

二、恒速压汞技术实验步骤

恒速压汞实验所采用的是国际上最先进的由美国 Coretest Systems 公司生产的 ASPE-730 型恒速压汞装置, 其具体的实验步骤和方法如下:

- (1) 钻取直径为 2.5cm 的柱塞岩样, 洗油后烘干。
- (2) 用气测方法测量洗油烘干后的标准岩心的孔隙度和渗透率。
- (3) 从柱塞岩样上截取小块岩样抽真空, 然后浸泡在汞液中。
- (4) 以恒定的速度 (0.00005mL/min) 向岩心注汞, 进汞过程中压力周期性地降落一回升, 当压力达到 900psi 时实验结束。
- (5) 进汞同时, 通过计算机系统来进行实时监控及自动化数据的采集和输出, 以备后续处理。

三、孔隙结构参数的计算方法

(1) 微观均质系数: 储层中的各级喉道半径相对于该储层中最大喉道半径的总体偏离程度。该系数值越大, 表明该测试岩心的喉道半径与最大喉道半径差异越小, 不同级别喉道大小分布相对比较均匀, 则:

$$a = (\sum r_i \alpha_i) / r_{\max} \quad (1-1)$$

式中 α_i ——每一喉道半径归一化的分布频率密度;

r_i ——某一喉道半径, μm ;

$r_{\max}$ ——最大喉道半径, μm 。

(2) 平均喉道半径: 取喉道半径分布的方均根。公式为:

$$\overline{R_c} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n r_i^2 \alpha_i \right)} \quad (1-2)$$

(3) 主流喉道半径: 渗透率累加贡献 80% 所对应的喉道半径。

(4) 单个喉道对渗透率的贡献率:

$$\Delta K_i = \frac{r_i^2 \alpha_i}{\sum r_i^2 \alpha_i} \times 100\% \quad (1-3)$$

(5) 相对分选系数: 样品喉道半径方差与该样品平均半径的比值。该系数越小, 表明样品中喉道大小越趋近平均值, 储层微观孔隙结构分布越一致, 则:

$$CCR = \delta / \overline{R_c} \quad (1-4)$$

$$\delta = \sqrt{\sum (r_i - \bar{R}_c)^2 \alpha_i} \quad (1-5)$$

式中 δ ——方差, μm ;

r_i ——某一喉道半径, μm ;

$\bar{R}_c$ ——平均喉道半径, μm ;

α_i ——每一喉道半径归一化的分布频率密度。

第二节 恒速压汞微观孔隙结构特征测试结果分析

恒速压汞检测结果用于对岩样内部的孔隙发育程度、喉道发育程度以及孔隙与喉道之间的配套发育程度等进行分析,不仅能够获得岩样的总毛细管压力曲线,还能够将喉道和孔隙分开,分别获得喉道的毛细管压力曲线和孔隙的毛细管压力曲线。通过恒速压汞检测,不仅能够得到常规压汞的一些检测结果,如阈压喉道半径、中值喉道半径等,还能够分别获得喉道半径分布、孔隙半径分布、孔隙—喉道半径比分布等重要的微观孔隙结构特征参数。下面以两种不同类型的储层岩心来说明恒速压汞测试技术的应用。

一、特低渗透油藏典型岩心恒速压汞测试与分析

以代表大庆外围东 16 区块和树 322 区块的 2 块典型岩样为例,说明恒速压汞测试技术的应用。图 1-4 至图 1-11 和表 1-1 给出了榆树林 2 个特低渗透岩样的恒速压汞测试数据结果。

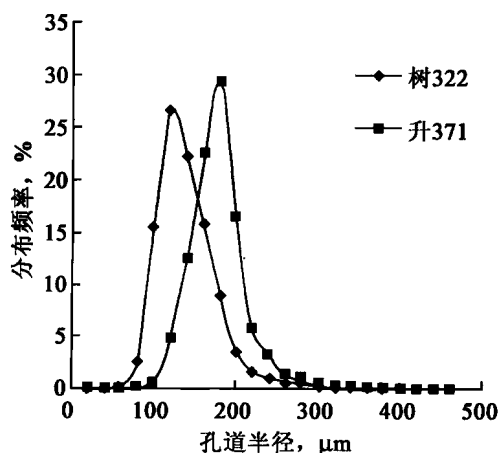


图 1-4 样品孔道半径分布

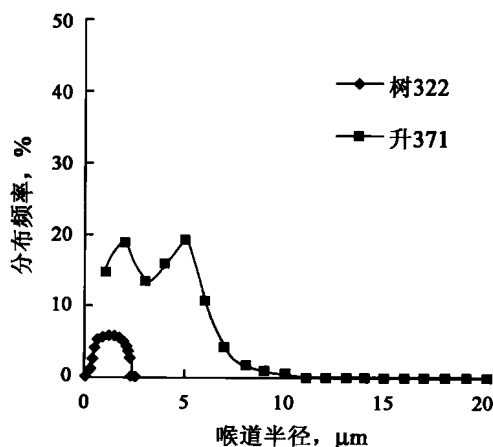


图 1-5 样品喉道半径分布

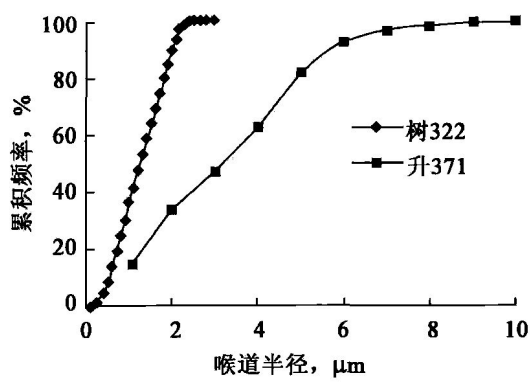


图 1-6 样品喉道半径累积分布

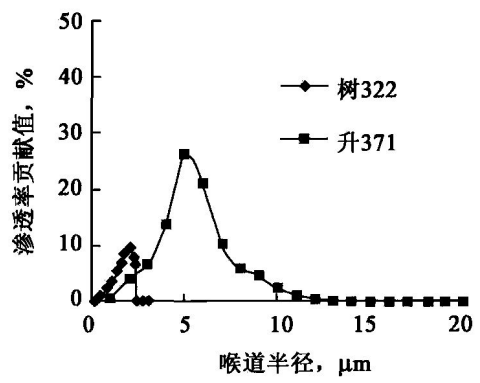


图 1-7 样品单一喉道对渗透率的贡献率

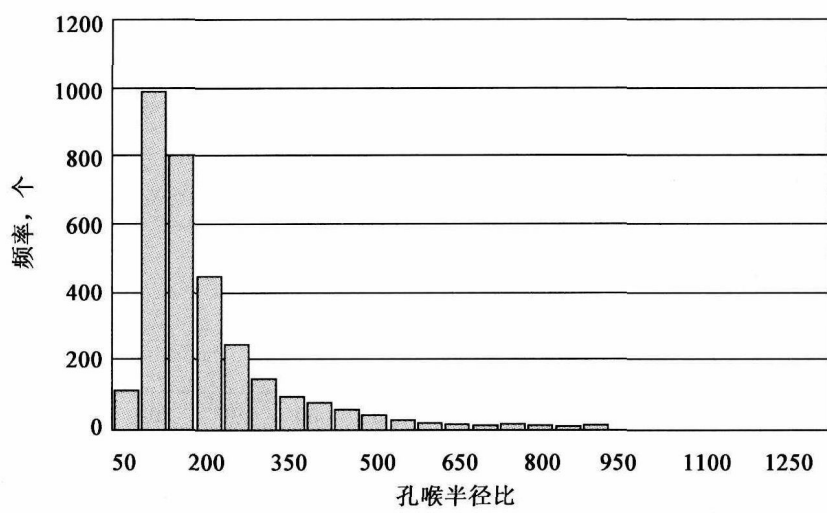


图 1-8 树 322 区块一样品孔喉半径比分布

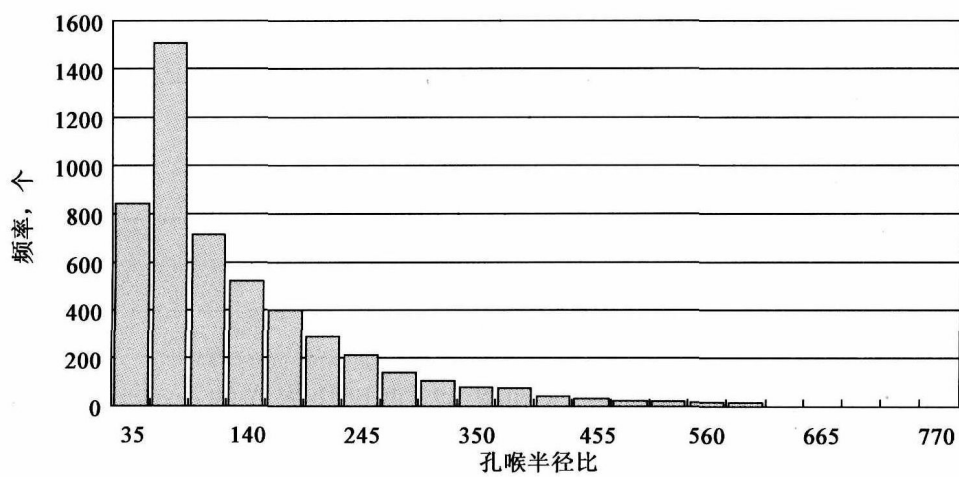


图 1-9 东 16 区块一样品孔喉半径比分布

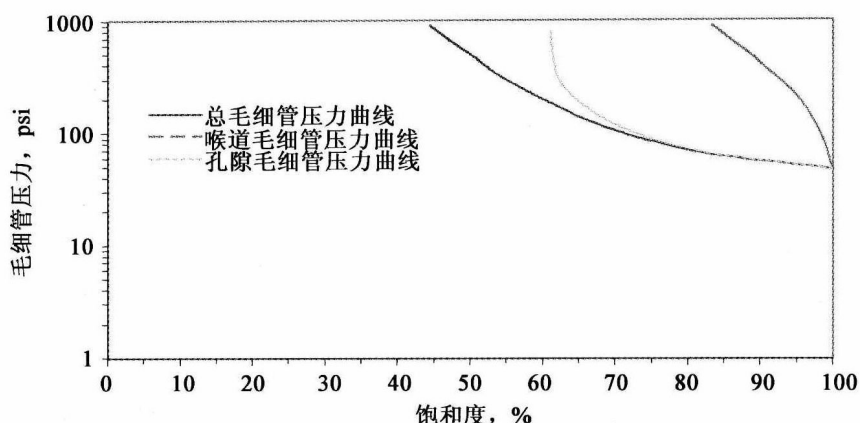


图 1-10 树 322 区块一样品毛细管压力曲线

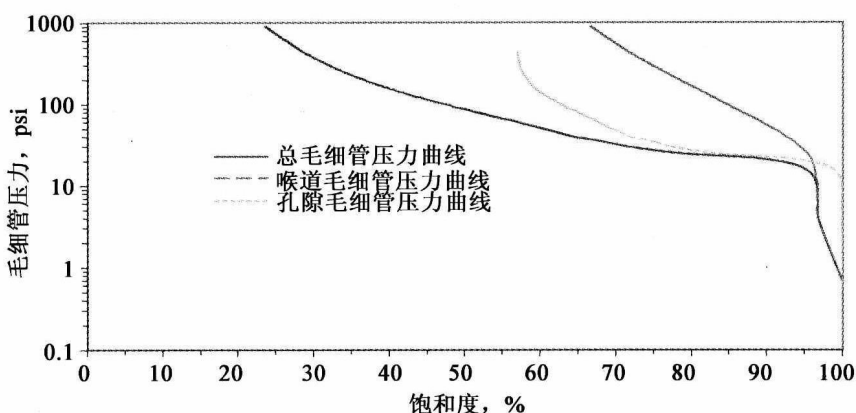


图 1-11 东 16 区块一样品毛细管压力曲线

表 1-1 特低渗透岩样数据

参数名称	东 16 区块岩心	树 322 区块岩心
渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$	3.6721	1.0149
孔隙度, %	19.65	13.24
最大喉道半径, μm	29.0	2.4
平均喉道半径 (方均根), μm	4.283	1.416
方差	2.135	0.553
相对分选系数	0.498	0.390
均质系数	0.129	0.545

从图表中数据分析可知, 东 16 和树 322 两区块岩样的孔道半径分布比较接近, 东 16 区块岩样略大, 而喉道分布相差很大。树 322 区块岩心喉道半径分布集中在 $0.2 \sim 2.4 \mu\text{m}$, 平均 $1.42 \mu\text{m}$, 没有大级别喉道 (大于 $3 \mu\text{m}$); 而东 16 区

块岩心喉道半径分布集中在 $1\sim 11\mu\text{m}$ ，平均 $4.28\mu\text{m}$ ，大级别喉道（大于 $3\mu\text{m}$ ）占 66.45%。

孔喉半径比是岩石孔喉特征分析中的一项重要参数，当孔隙半径与喉道半径的比值较小时，孔隙被较大喉道控制，此时有利于孔隙内的油气采出；反之，当孔隙半径与喉道半径的比值较大时，表明大孔隙被小喉道控制，此时不利于孔隙内的油气采出。东 16 区块岩样的孔喉半径比明显小于树 322 区块岩样的孔喉半径比。因此，东 16 区块岩样与树 322 区块岩样相比，有利于孔隙内的油气采出。

从毛细管压力曲线可以看出：树 322 区块岩样的喉道进汞饱和度为 17%，孔道进汞饱和度为 37%，总的进汞饱和度为 54%，进汞压力为 50psia；东 16 区块岩样喉道的进汞饱和度为 35%，孔道进汞饱和度为 43%，总的进汞饱和度为 80%，进汞压力为 0.8psia。因此，可知东 16 区块的孔道发育程度和喉道发育程度均高于树 322 区块。

从油层物理角度来说，如果渗透率主要是由较大的喉道所贡献的，那么流体的渗流通道大，渗流阻力小，渗流能力强，储层开发潜力大。反之，如果渗透率主要是由小的喉道所贡献的，那么流体的渗流阻力就大，渗流能力弱，储层开发难度大。对东 16 区块渗透率做主要贡献的喉道集中在 $5\mu\text{m}$ 附近，而对树 322 区块渗透率做主要贡献的喉道集中在 $2\mu\text{m}$ 附近。因此，东 16 区块的开发潜力和开发效果都明显好于树 322 区块。

二、火山岩气藏岩样恒速压汞测试与分析

1. 不同渗透率条件下的孔喉分布特征

选取 6 块来自大庆徐深火山岩气藏不同渗透率级别的岩样进行微观孔隙结构特征分析，岩样测得的孔道半径分布曲线，喉道半径的分布曲线、累积分布曲线，测试样品参数及结果见表 1-2 和图 1-12 至图 1-15。

表 1-2 6 块不同渗透率级别恒速压汞测试样品参数和测试结果

岩心编号	最大喉道半径 μm	平均喉道半径 μm	均质系数	孔隙度 %	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$
1	0.1	0.100	1.000	6.51	0.006
3	0.1	0.100	1.000	4.93	0.024

续表

岩心编号	最大喉道半径 μm	平均喉道半径 μm	均质系数	孔隙度 %	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$
6	0.2	0.164	0.781	9.48	0.102
9	3.5	0.523	0.088	10.40	1.340
11	4.9	1.084	0.158	18.50	2.060
14	9.8	2.285	0.141	20.00	8.260

从表 1-2 中可以看出, 火山岩气藏渗透率越大, 其岩心均质系数越小, 表明岩心越不均匀, 平均喉道半径越大; 渗透率越小, 其最大喉道半径也越小。

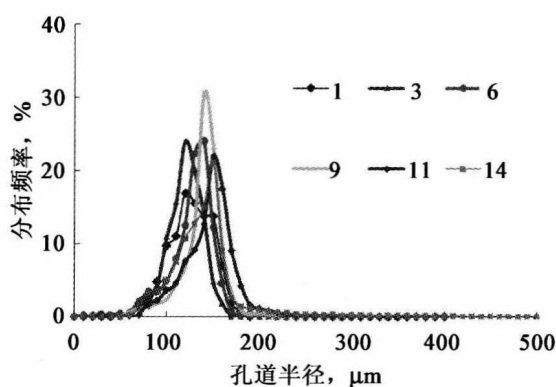


图 1-12 6 块样品孔道半径分布曲线

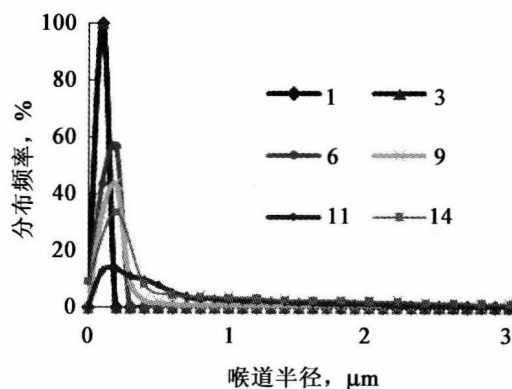


图 1-13 6 块岩样喉道半径分布曲线

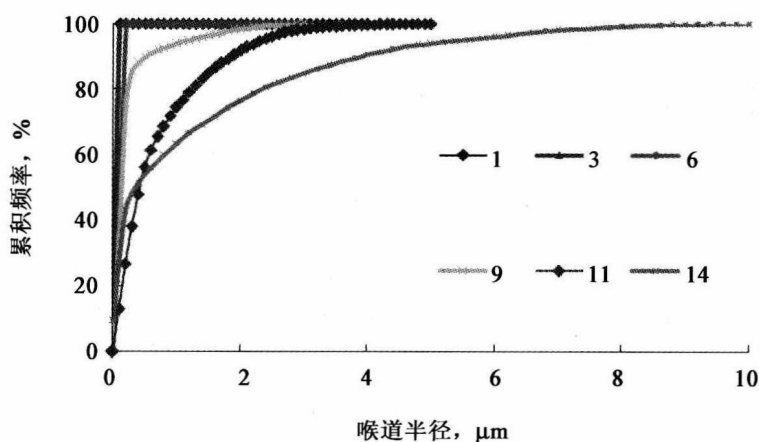


图 1-14 6 块岩心喉道半径累积分布曲线

从图 1-12 至图 1-13 中可以看出, 对于不同渗透率岩心来说, 其岩样孔道半径分布比较接近, 峰值分布大体在 $100\sim 200\mu\text{m}$ 之间。渗透率越大, 其峰值分

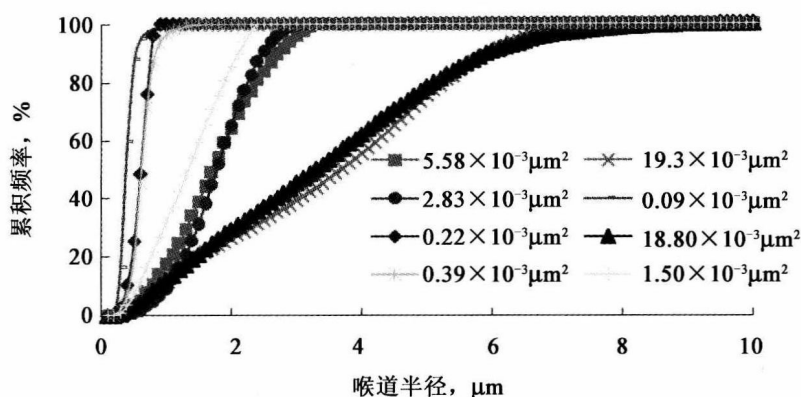


图 1-15 低渗透砂岩油藏 8 块不同渗透率岩样的喉道半径累积频率分布

布略偏向右侧。而岩样对应的喉道分布相差很大。当渗透率为 $0.024 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，其喉道半径只有小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的喉道，无更大的喉道；而当渗透率为 $8.260 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，其喉道半径有小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的喉道，也有很多较大的喉道，如 $9.8 \mu\text{m}$ 的喉道，其平均喉道半径为 $2.285 \mu\text{m}$ 。

从图 1-14 中可以看出，对于所测得的不同渗透率的火山岩气藏岩心来说，大约 60% 的喉道半径小于 $0.8 \mu\text{m}$ ，这与火山岩的岩性有关。

图 1-15 为低渗透砂岩油藏 8 块不同渗透率岩样的喉道半径累积频率分布。与火山岩气藏岩心喉道半径分布相比，其渗透率较大的岩心，小的喉道占了很少一部分，如渗透率为 $5.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的喉道半径仅占 20%。

因此，对于火山岩气藏来说，气孔、裂缝和溶洞的存在对气体的渗流起着重要的影响。

2. 不同喉道半径对岩心渗透率的贡献率

图 1-16 为岩心喉道半径对渗透率的贡献率曲线。从图中可以看出，渗透率小的岩心主要由小的喉道半径所控制；而随着渗透率的增大，逐渐有大级别的喉道参加，较大的喉道对渗透率的贡献增大。1 号和 3 号岩心的渗透率主要由喉道半径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的喉道所贡献，而 11 号岩心的渗透率主要由 $0.9 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 的喉道所贡献，14 号岩心的渗透率主要由 $2.2 \sim 9.8 \mu\text{m}$ 的喉道所贡献。

图 1-17 为岩心平均喉道半径与渗透率的关系曲线。从图中可以看出，平均喉道半径与渗透率有很好的相关关系。

因此，平均喉道半径是表征火山岩气藏岩心孔隙结构的重要参数，它影响

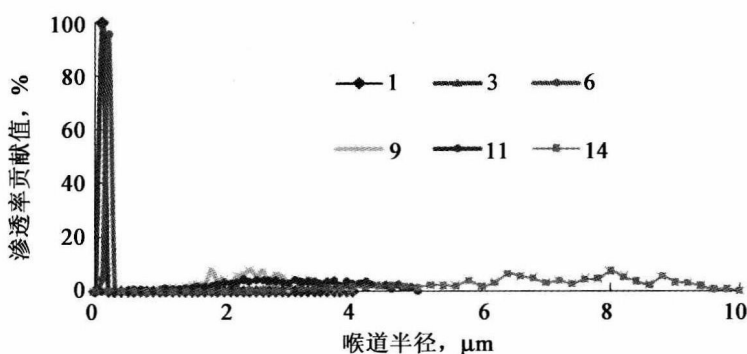


图 1-16 岩心喉道半径对渗透率的贡献曲线

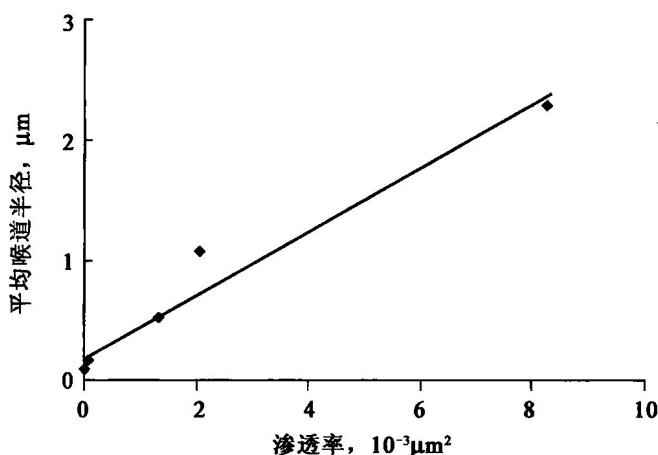


图 1-17 岩心平均喉道半径与渗透率的关系曲线

火山岩气藏气体的渗流能力。平均喉道半径越大，渗流阻力越小，气体的开发潜力越大。反之，如果平均喉道半径越小，那么气体的渗流阻力就越大，储层中气体的开发难度也越大。

3. 不同渗透率的孔喉半径对比分析

孔喉半径比是岩石孔喉特征分析中的一项重要参数，当孔隙半径与喉道半径的比值较小时，孔隙被较大喉道连通，此时有利于孔隙内的油气采出；反之，当孔隙半径与喉道半径的比值较大时，表明大孔隙被小喉道连通，此时不利于孔隙内的油气采出。以 6 号 ($0.102 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 和 14 号岩心 ($8.260 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 为例，测试结果见图 1-18 和图 1-19。

从图中可以看出，6 号岩样的孔喉半径比主要集中在 500~900 之间，而 14 号岩心的孔喉半径比主要集中在 30~800 之间，其中孔喉半径比在 30~60 之间