

湖北省创新团队基金项目资助

低渗砂岩储层测井评价方法

● 汪中浩 章成广 编著

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

湖北省创新团队基金项目资助

低渗透砂岩储层测井评价方法

汪中浩 章成广 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从两个大的方面阐述了低渗砂岩储层的研究成果：一是从低渗砂岩储层测井解释的孔隙结构理论基础出发，以塔里木油田低渗砂岩储层为例，介绍了储层岩石孔隙结构特征的研究方法和产能评价的新方法，以及在 Geoframe 平台上所实现的方法软件及其应用效果；二是以合理开采低渗砂岩储层的水平井技术为主线，介绍了水平井测井技术和全新的测井评价方法，以及以确定井眼轨迹和油藏关系为主的水平井测井评价软件。

本书可作为从事低渗储层油气勘探开发的高级管理人员和技术人员的参考读物，也可供高等院校测井、地质、油藏工程专业高年级本科生和研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗砂岩储层测井评价方法/汪中浩，章成广编著.

北京：石油工业出版社，2004.8

ISBN 7-5021-4748-9

I. 低…

II. ①汪… ②章…

III. 低渗透油层-砂岩油气藏-油气测井

IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 079224 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.cn

总 机：(010) 64262233 发行部：(010) 64210392

经 销：全国新华书店

印 刷：河北天普润印刷厂印刷

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：12

字数：300 千字 印数：1—1000 册

定价：28.00 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

低渗砂岩油气藏的勘探与开发已成为全球石油工业的重要组成部分，水平井开采技术是石油工业的又一次技术革命，这两个方面给测井技术提出了挑战，同时也提供了发展机遇。

在低渗砂岩油气藏测井解释方法研究中，将测井问题归结为多孔介质孔隙结构特征参数研究是本书的核心思想。本书充分考虑了储层纵向非均质性对测井响应特征的影响；采用储层测井分类思想建立测井解释模型和引入油气动态特征评价方法计算储层产能；在储层有效厚度划分方法上综合储层测井分类结果、产能评价结果和可动水分析三方面结论；在 GeoFrame 平台上开发了低孔低渗储层测井解释软件。本书还就水平井测井评价方法的新成果进行了较为全面的阐述。

本书的出版得到了湖北省创新团对基金项目、中国石油天然气集团公司和塔里木油田公司的“九五”攻关项目、克拉玛依油田分公司和哈萨克斯坦阿克纠宾油气股份公司国际合作项目的资助。在完成本书的过程中，长江大学郭海敏教授、张超谟教授、刘瑞林教授、高楚桥教授、董超研究员给予了大力支持和帮助；石油大学博士生导师吴锡令教授，中国地质大学博士生导师管志宁教授、尉中良教授长期给予悉心指导和培养；塔里木油田分公司肖承文高级工程师、陈新林高级工程师、宋帆工程师、赵乾富工程师、刘兴礼工程师、李进福工程师等同志给予了精诚合作，克拉玛依油田分公司刘明高高级工程师、钱根宝高级工程师、刘顺生高级工程师、王延杰高级工程师、喻克全高级工程师等给予了大力支持；柴春艳、陈冬、罗少成、丁志辉、张艳红、刘飞等同学在书稿的方法演算和图形整理中作了大量工作。本书凝聚着他们的辛勤劳动，在此向他们致以最崇高的敬意和最真诚的谢意！另外，感谢李先鹏教授、易觉非教授参与了部分章节的撰写工作。最后，书中还引用了其他作者的研究成果，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平和阅历有限，书中不妥之处敬请读者批评指正。

目 录

第一篇 低渗砂岩储层孔隙结构评价方法

第1章 低渗砂岩储层孔隙结构测井解释理论基础	(3)
1.1 砂岩储层孔隙结构	(3)
1.2 低渗砂岩储层孔隙结构研究现状	(4)
1.3 砂岩储层孔隙结构测井解释理论基础	(7)
第2章 储层岩石孔隙结构特征	(12)
2.1 储层孔隙结构的微观特征	(12)
2.1.1 孔隙结构的直观研究	(12)
2.1.2 孔隙结构的拓扑学特征	(12)
2.1.3 孔隙结构的微观参数	(13)
2.2 储层孔隙结构的宏观特征	(14)
2.2.1 储层孔隙结构宏观参数的影响因素	(14)
2.2.2 储层孔隙结构宏观参数的分布规律	(16)
2.3 储层孔隙结构特征参数解释模型	(17)
2.3.1 孔隙度解释模型	(17)
2.3.2 渗透率解释模型	(24)
2.3.3 平均孔喉半径解释模型	(26)
2.3.4 分选系数解释模型	(28)
2.3.5 排驱压力解释模型	(29)
2.3.6 孔隙结构系数解释模型	(29)
第3章 储层岩电特征	(32)
3.1 碎屑岩储层岩电参数的变化规律	(32)
3.2 岩电参数的控制因素	(36)
3.2.1 岩石的电阻	(36)
3.2.2 m 值的控制因素	(39)
3.2.3 n 值的控制因素	(41)
3.3 岩电参数的特征	(42)
3.3.1 不同类型储层的 m 值变化规律	(42)
3.3.2 不同类型储层的 n 值变化规律	(49)
3.4 岩电参数的确定方法	(50)
3.4.1 多因素拟合法	(51)
3.4.2 储层分类统计法	(55)
3.4.3 饱和度指数校正	(56)

第二篇 低渗砂岩储层产能评价方法

第4章 储层产能评价方法	(59)
4.1 储层类型识别	(59)
4.1.1 储层分类	(59)
4.1.2 储层类型识别	(60)
4.2 有效厚度的划分标准和方法	(67)
4.2.1 油水层标准	(67)
4.2.2 可动水分析	(69)
4.3 储层产能定量解释的理论基础	(72)
4.3.1 多孔介质中流体的基本渗流理论	(72)
4.3.2 射孔不完善井流量、压力校正	(73)
4.3.3 油水产能指数及其换算	(76)
4.4 预测储层产能的实用模型	(77)
4.4.1 相对渗透率模型	(77)
4.4.2 油相渗透率、水相渗透率模型	(78)
4.4.3 储层产能预测模型	(78)
第5章 低渗储层解释软件及其应用	(80)
5.1 低渗储层孔隙结构解释评价软件	(80)
5.1.1 储层类型识别模块	(81)
5.1.2 储层参数计算和油水识别模块	(82)
5.1.3 计算储层结构参数与预测储层产能模块	(86)
5.1.4 成果图显示与输出模块	(89)
5.2 TZ47 井处理解释	(93)
5.3 TZ11 井解释实例	(97)
5.4 TZ111 井解释实例	(102)

第三篇 低渗砂岩储层水平井测井技术

第6章 水平井技术和水平井测井技术概述	(111)
6.1 水平井技术	(111)
6.2 水平井技术的特点	(112)
6.3 国内外水平井钻井技术现状	(112)
6.3.1 大位移井钻井技术	(113)
6.3.2 分支井技术	(114)
6.3.3 设计师型井眼和阶梯式水平井	(115)
6.3.4 井眼的几何导向和地质导向	(116)
6.3.5 工具仪器的升档和升级	(119)
6.4 水平井测井技术	(119)
6.4.1 水平井测井解释研究的现状	(120)
6.4.2 水平井测井解释研究中存在的问题与困难	(122)

6.4.3 水平井测井解释研究的趋势	(123)
第7章 地层各向异性与测井响应特征	(124)
7.1 地层电阻率各向异性及其应用	(124)
7.1.1 地层电阻率各向异性的概念	(124)
7.1.2 水平电阻率与垂直电阻率的计算	(126)
7.1.3 常规电阻率测井在层状各向异性地层中的响应特征	(127)
7.1.4 地层岩石各向异性在水平井中的应用	(129)
7.2 水平井中电阻率测井响应特征	(130)
7.2.1 仪器的测量类型	(130)
7.2.2 大斜度井和水平井中电阻率测井响应原理	(132)
7.2.3 水平井泥浆滤液侵入特征及侵入的模拟	(133)
7.2.4 电阻率测井响应特征	(135)
7.3 水平井非电法测井仪器响应特征	(141)
7.3.1 自然伽马测井响应特征	(141)
7.3.2 补偿中子测井响应特征	(142)
7.3.3 补偿密度测井响应特征	(142)
7.3.4 补偿声波测井响应特征	(142)
7.3.5 井径测井响应特征	(142)
7.3.6 测井响应的延滞	(142)
7.4 水平井随钻测井仪器响应特征	(143)
第8章 水平井测井评价方法	(145)
8.1 水平井井眼轨迹的三维空间描述方法	(145)
8.1.1 水平井井眼轨迹的图示法	(145)
8.1.2 点测井斜数据的处理方法	(147)
8.1.3 水平井井眼轨迹三维空间描述	(148)
8.2 地层层界面的描述方法	(150)
8.2.1 地层关键界面点的解释	(150)
8.2.2 地层区域界面位置的确定	(151)
8.2.3 井眼轨迹范围内地层层界面空间展布的描述	(152)
8.2.4 地层层界面描述实例	(153)
8.3 小型薄层膏泥岩透镜体的识别	(154)
8.4 水平井产能评价方法	(155)
8.4.1 水平井产能计算的物理模型	(155)
8.4.2 水平井产能的计算	(156)
8.4.3 水平井产能的影响因素	(160)
8.4.4 分支水平井产能的计算方法	(167)
第9章 水平井测井解释软件系统	(170)
9.1 水平井测井解释软件系统的设计	(170)
9.2 水平井测井解释软件系统核心技术的实现	(171)
9.2.1 井眼管理的实现	(171)

9.2.2 测井曲线管理的实现 (172)

9.2.3 水平井井眼轨迹描述的实现 (174)

9.2.4 分段垂深校正技术的实现 (176)

9.2.5 地层解释技术的实现 (177)

参考文献..... (180)

第一篇 低渗砂岩储层孔隙 结构评价方法

第 1 章 低渗砂岩储层孔隙结构 测井解释理论基础

在石油勘探开发中,储层评价、描述是最关键、最核心的技术问题之一,其中测井技术是提高油层识别能力和准确评价储量大小的科学依据。如何将测井问题归结为多孔介质孔隙结构特征参数研究问题?这是测井分析家在解决低孔、低渗砂岩油气藏、低电阻砂岩油气藏、裂缝-孔隙型复杂岩性油气藏等目前主要勘探开发目标时必须回答的,它贯穿于整个油田勘探开发的全过程。

本章从介绍砂岩储层孔隙结构概念入手,剖析了低渗砂岩储层孔隙结构测井研究现状,最后以油气聚集理论和毛细管理论为基础,论述了将测井问题归结为多孔介质孔隙结构特征参数研究问题这一新的研究理念,并用分形几何理论加以阐述。

1.1 砂岩储层孔隙结构

储集岩是由固体骨架和储集空间组成的,如图 1-1 (a) 所示。砂岩储层的储集空间是由大小不等的孔隙、喉道所组成,如图 1-1 (b) 所示。一般认为储集岩的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。将储集岩的孔隙空间用大的孔隙和小的喉道两个几何形体来概括是研究储集岩孔隙结构的基本前提。其中喉道大小、分布以及它们的几何形状是影响储集岩的储集能力和渗透特征的主要因素,因为它决定了岩石毛管压力的大小,以及含油饱和度和油藏剖面高度。

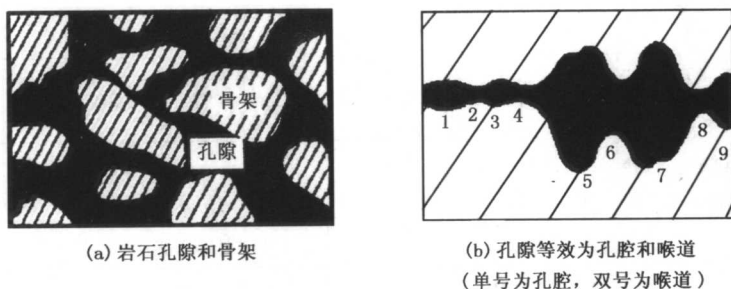


图 1-1 岩石孔隙组成和孔隙结构示意图

孔隙和喉道的孔隙结构特征是砂岩储层结构的重要组成部分,也是影响油气储集与油田开发效果的内在因素,而储层的宏观物性是其外在表现和平均效应,也是最常用的描述参数。具体描述岩石孔隙结构特征的参数分宏观参数(孔隙度 ϕ 、渗透率 K 、地层因素 F 等)和微观参数两类。其中描述岩石孔隙结构特征的微观参数可细分为反映孔喉大小、孔喉分选程度、孔喉连通性和控制流体运动特征三类。反映孔喉大小的参数有:最大连通喉道半径 R_d 、喉道半径中值 R_{50} 、平均喉道半径 R_m 、喉道半径均值 J_z 和主要喉道半径平均值 R_z ;反映孔喉分选程度的参数有:喉道分选系数 S_p 、相对分选系数 D 、均质系数 a 、峰态 K_g 和

歪度 S_k ；反映孔喉连通性和控制流体运动特征的参数有：排驱压力 p_d 、特征参数 T 、饱和度中值压力 p_{50} 、结构系数 F_y 、视孔喉比 V_{pf} 、退汞效率 W_e 和结构均匀度 $a \cdot W_e$ 。

上述参数一般通过岩石岩样铸体薄片、扫描电镜、压汞、核磁共振等实验研究手段获得。利用实验资料，地质学家在我国低渗透油田总结出储层分类标准（见表 1-1）。而测井分析家主要测量岩石的孔喉分布（毛管压力曲线）和孔径大小分布（NMR 图像分析），以及研究因孔隙结构的差异引起的岩电特征的差异。两者的结合是低渗油田孔隙结构研究的重点。

表 1-1 低渗砂岩油层孔隙结构特征分类表（据李道品，1997）

油田、油层	分类	K $10^{-3}\mu\text{m}^2$	样品 块数	压汞毛管压力曲线基本数据						
				ϕ %	K $10^{-3}\mu\text{m}^2$	p_d MPa	p_{CS0} MPa	R_{50} μm	S_{Hlg} %	$>1\mu\text{m}$ %
彩南油田 J_{1s} ， 尕斯库勒油田 E_3^1 ， 扶余油田扶余油层， 马岭油田 Y10 油层	1	100~50	1151	19.83	66.2762	0.1072	0.5847	1.5557	83.12	55.48
枣园油田 K_2^2 ， 丘陵油田 J_{2s} ， 文留油田盐间层， 朝阳沟油田扶余油层， 老君庙油田 M 层， 牛庄油田沙三下， 留西油田沙三下 1 油层， 新立油田葡萄花油层， 吗西深层板、板油组	2	50~10	1727	16.31	20.5843	0.2399	1.1707	1.3352	78.55	44.12
火烧山平三段， 彩南西山窑组， 鄯善油田 J_{2s} 、 J_{2x} ， 丘陵油田 J_{2x} ， 克拉玛依下乌禾组， 牛庄油田沙三中， 新民油田、榆树油田、新立油田扶余油层， 安塞长 6 ₁ 油层	3	10~1	674	13.89	4.4042	0.3713	3.4974	0.4621	76.87	42.22
火烧山平二段， 鄯善油田 J_{2x} 部分油田样品	3	1.0~0.1	202	8.45	0.3285	1.9757	9.6679	0.1203	50.32	18.12
火烧山油田平二段细砂、粉砂岩， 克拉玛依下乌禾组（冲积扇缘部分）	4	0.1 ~0.01	37	6.27	0.0644	5.616	10.649	0.061	36.31	
高尚堡高参 1 井沙三 5	5	0.01 ~0.001	7	3.11	0.00417		28.074		30.55	15.45

1.2 低渗砂岩储层孔隙结构研究现状

随着科学技术的发展，石油勘探开发程度更加深入，各种工艺技术也不断提高和完善，低孔低渗砂岩油气藏的勘探与开发已成为全球石油工业的重要组成部分。其中，美国西部、南部的 20 个沉积盆地拥有大量的低孔低渗油气田，其可采储量占该国总储量的 10%~15%；原苏联地区低渗油气层储量已占其总储量的 42.5%，年产量已达到 1 亿 t；我国在长

庆油田、吉林油田、大庆油田、新疆油田及塔里木油田等地区都存在相当量的低孔低渗油气藏,据有关资料预测低渗油气藏已占我国石油总储量的 29.7%,占天然气总储量的 56%。因此,勘探开发低孔低渗油气藏对我国油气发展有着重要的战略意义。

低孔低渗油气藏已成为我国油气勘探开发活动的重要领域之一。随着近 10 年构造-岩性油藏的广泛勘探,每年低孔低渗油层约占我国石油储量的一半以上,可见其丰富的潜力。例如吉林油田低渗透油田的探明储量占油田总的 63.5%、动用储量占油田总的 41%和产量占油田总的 49.66%,还有 39184 万 t 已探明未动用的低渗透储量,占全部未动用储量的 89%,近几年要探明的储量也几乎全部为低渗透储量,今后的开发对象以低渗透油田为主。同样辽河油田有低渗透油藏断块 20 个,总计含油面积 130.01km²,原油地质储量 15471 万 t,分别占已探明含油面积和原油地质储量的 13%和 7.5%。总之,目前的开发对象日趋复杂,科技依赖程度越来越高。但是目前油层评价与试油效益并不令人满意,据大庆、新疆、吉林和塔里木等 4 个油田的不完全统计,获工业油流的试油获得率仅为 20%~30%,而有的地区测试的水层与干层竟占 36.5%。说明现有的测井解释油层评价能力和由有效厚度提供的试油层位等有待提高。虽然目前低孔低渗油气藏的勘探开发不成熟,但经过鄂尔多斯盆地和松辽盆地的理论和实践,在勘探、开发低孔、低渗油气藏的理论 and 实践方面都总结了許多有益的经验,主要成果集中在地质规律研究和开发方案研究上,测井解释沿用中高孔渗油气藏的解释方法和思路的居多。目前随着核磁共振测井技术的发展与应用,为定量计算低孔、低渗孔隙结构提供了信息资料。按把测井问题归结为多孔介质孔隙结构特征参数研究问题的研究思路,地质规律研究成果和计算机技术的飞速发展也为测井解释模型的建立提供了精细地质模型和计算机模型的坚实基础。

低渗油气藏是指孔隙度低、渗透率差、束缚水高、喉道小而需要进行人工改造的油气层。但渗透率往往是一相对概念,数值界限随油气开采工艺技术的进步而改变。20 世纪 80 年代以前,一般以渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为界限;目前,储层渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 判定为低渗透率砂岩油藏,渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 定为特低渗透率砂岩油藏。为了解决低渗油气藏勘探开发程度不高的问题,地质学家根据孔隙类型和毛管压力特征对低孔低渗储层进行分类评价,结合渗流特征确定渗透率的界限,实际解释应用以定性分析为主,定量解释研究文献基本没有。其中有代表性的分类评价方法有:1) 罗宾逊(1966 年)按岩石表面结构和毛管压力特征把储层分为轻度交代的砂岩(孔隙度一般在 15%~25%的范围内,渗透率则从 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到几百毫平方微米)、受压实交代的砂岩(孔隙度一般为 10%~20%,渗透率从 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或更小到大约 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、受孔隙充填所交代的砂岩(岩性细,孔隙度可降低到 15%,渗透率降低到大约 $10 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和高度交代的砂岩(受到较大程度的颗粒压实或孔隙充填所交代,岩石表面非常致密,其孔隙度一般低于 5%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)四类;2) 王允诚等(1981 年)根据我国四个大区十二个油田一千多块砂岩岩心压汞毛管压力曲线资料及铸体薄片有关孔隙类型资料,提出了根据孔隙类型和毛管压力特征进行分类评价的方法,罗蛰潭把它归为好至非常好的储集岩(砂岩粒度范围主要是细粒和中粒,个别为粗粒,分选好,粗歪度,孔隙较大,孔喉半径粗或中等,孔隙度都大于 20%,渗透率大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、中等储集岩(砂岩粒度范围从粉砂级到细砂级,许多是泥质胶结,孔喉的分选性变化大,歪度略粗,孔隙度在 12%~20%范围内,渗透率从 $1 \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、差的储集岩(细砂—粉砂,孔隙和喉道都很小,孔隙度大都带 7%~11%的范围内,渗透率也都很小,只有 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到几个 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和非储

层(颗粒为粉—极细粒,微孔十分细小,孔隙度一般都小于6%(油层)或4%(气层))四种类型。刘顺生等(1991年)根据罗蛰潭教授关于储层的分类方法对准噶尔盆地砾岩储层孔隙结构分类,也得到了类似的结果。这种孔隙类型和毛管压力特征分类法是目前地质上较通用的方法;3)杨俊杰(1993年)认为从地质成因渗流观点上揭示低孔渗油气层的特征则更重要,把低孔渗油气层分为五方面特征:①成因后生作用强烈、次生孔隙占重要地位;②伴有裂缝(特别是微裂缝),层控作用明显;③非均质程度、酸敏、水封明显,驱油效果差;④发育特殊的油气圈闭—成岩相对圈闭;⑤渗流特性与达西定律不符,其低渗层的上限约为 $(20\sim 40)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。综合上述观点可得出:用孔隙度、渗透率作为表达致密油气层的属性是简明而必要的,从地质成因渗流观点上揭示低孔渗油气层的特征也很重要,但都只能宏观上认识储层性质,不能精细描述低孔低渗储层内非均质和定量区分储层好坏。为了更好地研究岩石孔隙结构特征,Katz、Thompson(1985年),Krohn(1988年)等外国学者利用分形几何理论分析岩心扫描电镜实验资料来研究岩石孔隙结构。同样,国内学者也利用分形几何理论研究了岩石孔隙结构,其中李克文等(1993年)利用分形几何理论分析岩心扫描电镜实验资料和水驱油实验研究岩石孔隙结构与提高采收率的关系;陈程等(1996年)利用分形几何理论分析压汞毛管压力实验数据,提供了一种测量孔隙结构分维的方法,并对砂岩孔隙结构进行分类和评价。这种孔隙结构分维的研究方法对低渗透储层产能评价研究和岩电实验分类模型研究有很好的启示作用。

文献反映测井学家在孔隙结构特征的定量解释上作了探讨,有代表性的方法有:一是用岩石简化导电模型获得了孔隙结构系数,反映储层孔隙的大小及其曲折程度;二是建立孔喉中值半径与渗透率/孔隙度之间的双对数关系式,把孔隙结构的宏观参数与微观参数联系起来;三是利用核磁共振测井 T_2 分布结合岩石物理实验计算平均孔隙半径,但测井学家的研究很少应用到低渗透油气藏的研究中。匡立春(1992年)用岩石简化导电模型获得了孔隙结构系数,能很好地反映储层孔隙的大小及其曲折程度,但在低渗透储层条件下计算的孔隙结构系数无法分辨储层好坏。张宇晓(1992年)建立了孔喉中值半径与渗透率/孔隙度之间的双对数关系式,把宏观参数与微观参数联系起来,在南阳油田应用中获得较好的效果,其研究思路有很好的借鉴作用,但未探讨在低渗透储层条件下的应用。肖立志(1998年)和岳文正等(2002年)给出了利用核磁共振测井 T_2 分布计算平均孔隙半径的方法,但也未详细探讨在低渗透储层条件下的应用。运华云等(2001年)研究建立了岩心核磁共振 T_2 分布与压汞毛管压力曲线之间的关系,为利用 T_2 分布进行岩石孔隙结构研究提供了方法基础。毛志强等(2000年)选择Wang等人(1988年)提出的网络模型进行了孔隙结构与含油岩石电阻率性质理论模拟研究,使储层孔隙结构研究成果能为建立测井解释模型服务。

目前反映储层孔隙结构岩电特征的研究,即确定储层含油性常用的测井解释方法和思路,一是研究特定储层 m 、 n 的变化规律,二是研究考虑各种影响因素的变形阿尔奇公式。储层 m 、 n 的变化规律是研究储层孔隙结构岩电特征的核心,现阶段的研究成果主要表现在以下几个方面:王曰才教授(1979年)通过对国外岩电结果分析,指出孔隙度指数 m 与系数 a 是半对数关系,与孔隙度有很好线性关系。原海涵(1990年)通过毛管理论推得孔隙度指数 m 与系数 a 与平均孔喉半径平方的对数存在线性关系,即与渗透率有关,并指出孔隙度指数 m 是平均孔喉半径平方的增函数,而系数 a 是减函数。Herrick等(1989年)由电曲折度的概念解释了 m 值的变化规律,即在相同孔隙度的情况下,孔隙结构越复杂,电曲折度越大, m 值越大。曾文冲等(1994年)总结我国6个油田的岩电实验,得出 m 是储

层孔隙结构的函数，其变化规律为：一般不是常数，而是随着 K 和 ϕ 增加而减小，所用实例孔隙度均大于 15%。张金钟（1993 年）由分形几何理论导出了孔隙度指数 m 与系数 a 的半对数关系。Michael 等（1989 年）研究了润湿性和压力对饱和度指数及胶结指数（孔隙度指数）的影响，指出岩石亲油与亲水情况下饱和度指数有很大差异，因而在选取 n 值时要考虑岩石润湿性。

针对现有低渗砂岩孔隙结构测井定量解释的缺陷，我们的研究思路是从地质和油藏工程的角度解决测井解释问题。也就是结合已开发的低孔低渗油田基本特征，通过分析实验结果，深入研究 TZ47、11 井区志留系的储层地质学、岩石物理学和油藏工程等方面的规律，寻找解决问题的突破口。

在塔中志留系低孔低渗油气层测井解释方法研究中，将测井问题归结为多孔介质孔隙结构特征参数研究，为此我们设计的研究流程如图 1-2 所示。研究方案中首先充分考虑了储层纵向非均质性对测井响应特征的影响；其次采用储层测井分类思想建立测井解释模型和引入油气动态特征评价方法计算储层产能；又在储层有效厚度划分方法上综合储层测井分类结果、产能评价结果和可动水分析三方面结论；最后在 GeoFrame 平台上开发低孔低渗储层测井解释软件。

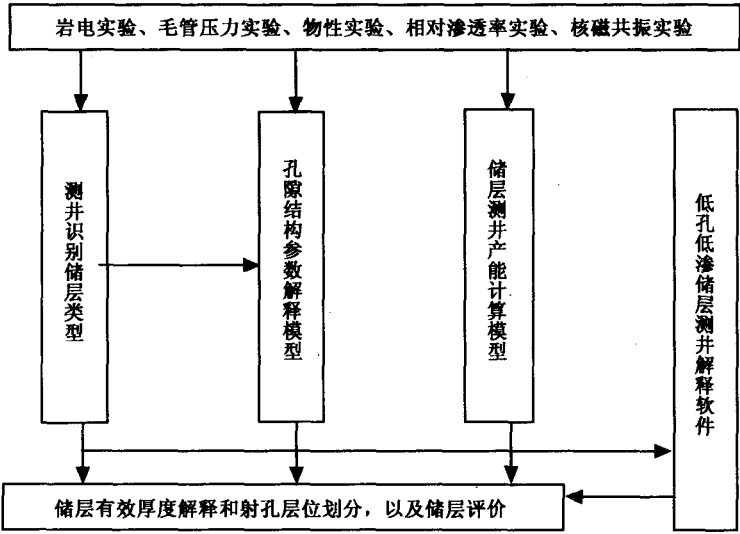


图 1-2 低渗砂岩孔隙结构测井定量解释研究流程

1.3 砂岩储层孔隙结构测井解释理论基础

油气藏内各种砂岩储层储集空间都是由大小不等的孔隙喉道所组成，在原始状态下所有孔隙喉道均被水所饱和，处于分散状态的油气在运移过程中始终受两种作用力的影响，一是油气在水中的浮力，即驱动力，二是砂岩毛细管孔隙水的阻力，油气在驱动力的作用下，只有克服毛细管的阻力才能进入毛细管孔道内，所以分散状态油气靠自身的浮力作用，首先在构造顶部较大的孔隙喉道相连接的大孔隙中聚集，随着油气柱高度的增加，即驱动力的增加，油气才能进一步进入较小的孔隙喉道中，油藏中距自由水界面越高，油气饱和度则越

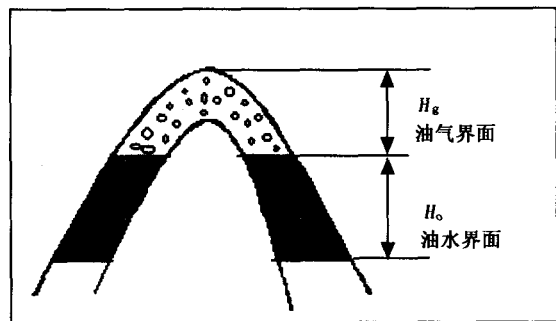


图 1-3 油气藏剖面示意图

为,

$$\begin{aligned}
 p &= p_w - p_g - p_o \\
 p_w &= (H_g + H_o) \rho_w g / 1000 \\
 p_g &= H_g \rho_g g / 1000 \\
 p_o &= H_o \rho_o g / 1000 \\
 p &= H_g (\rho_w - \rho_g) g / 1000 + H_o (\rho_w - \rho_o) g / 1000
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

纯气藏因无油柱高度即 $H_o = 0$, 其驱动力为,

$$p = H_g (\rho_w - \rho_g) g / 1000 \tag{1-2}$$

纯油藏因无气柱高度即 $H_g = 0$, 其驱动力为,

$$p = H_o (\rho_w - \rho_o) g / 1000 \tag{1-3}$$

式中 p ——油气聚集驱动力, MPa;

p_w ——静水柱压力, MPa;

p_g ——静气柱压力, MPa;

p_o ——静油柱压力, MPa;

ρ_o 、 ρ_g 、 ρ_w ——油、气、水的地下密度, g/cm^3 ;

H_o 、 H_g ——油、气柱高度, m;

g ——重力加速度, $9.8m/s^2$ 。

由毛管理论知, 储层孔隙遵守 Laplace 公式

$$p_c = 2 \times 10^{-3} \sigma \cos \theta / r \tag{1-4}$$

式中 p_c ——毛细管力, MPa;

σ ——油水或气水表面张力, mN/m;

θ ——接触角, ($^\circ$);

r ——毛细管半径, μm 。

在油藏情况下, 浮力驱动力与毛细管力平衡, 由式 (1-3) 和式 (1-4) 可得

$$H_o = \frac{2 \sigma \cos \theta}{(\rho_w - \rho_o) g} \cdot \frac{1}{r} \tag{1-5}$$

大, 反之则小。因此, 油气藏原始的饱和程度受油气聚集驱动力和储集岩的孔隙结构两方面因素的控制。在油藏高度一定, 即油气聚集驱动力一定的情况下, 油气藏原始的饱和程度主要受储集岩的孔隙结构的控制。

如图 1-3 是油水藏剖面示意图。油气藏和气顶气藏的油气藏驱动压力的表达式如下:

气顶气藏的油气藏的油气聚集驱动力

针对某一油气藏,可假设油水密度差和润湿性是常数,由上式可知,储层岩石毛细管半径越小,要达到相同含油饱和度值所需要的油气藏闭合高度越大,而当油气藏闭合高度一定时,储层岩石毛细管半径越小油气藏的原始含油饱和度值相应也越小。即油气藏的油气饱和度的空间分布主要受储层孔隙结构的控制。因此,在评价低渗砂岩储层时,我们只需深入研究油气藏内砂岩储层孔隙结构的展布就能评价油气藏原始的饱和程度。

压汞毛细管压力曲线是研究砂岩储层孔隙结构的基本特征和油气藏原始饱和度的基本变化规律的桥梁。其驱替的基本原理是:在地面条件下,采用非润湿相的汞驱替砂岩孔道中的润湿相汞蒸气。整个驱替过程是当外部依次增加非润湿相汞的压力,使其克服砂岩各种孔道中汞蒸气的毛细管阻力,直到不再增加非润湿相汞的外界压力时为止,此时砂岩储层中非润湿相汞的体积占总孔隙体积的百分数,即为该非润湿相汞的饱和度。为了总结通用的压汞毛细管压力曲线实验规律, Leverett (1941 年) 消除孔隙度 ϕ 和渗透率 K 对毛管压力的影响,提出了无量纲毛管压力—— J 函数的概念。该函数的定义式为,

$$J = \frac{p_c}{\sigma \cos \theta} \left(\frac{K}{\phi} \right)^{1/2} \quad (1-6)$$

J 函数的意义是砂岩储层孔隙结构相近岩样的数据点将落在同一条 J 函数曲线周围,故可用 J 函数曲线求取不同砂岩储层孔隙结构的油气藏原始饱和度。其理论依据可由贺承祖 (1998 年) 推导的 J 函数曲线的分形几何公式来解释。其推导过程如下:

根据分形几何原理,若储层孔径分布符合分形结构,则储层中孔径大于 r 的孔隙数目 $N(>r)$ 与 r 有如下幂函数关系 (Mandelbrot, 1982 年)

$$N(>r) = \int_r^{r_{\max}} P(r) dr = ar^{-D} \quad (1-7)$$

式中 $r_{\max}$ ——储层中最大孔隙半径, μm ;

$P(r)$ ——孔径分布密度函数;

a ——比例常数;

D ——孔隙分维数。

将式 (1-7) 对 r 求导可得到孔径分布密度函数 $P(r)$ 的表示式

$$P(r) = \frac{dN(>r)}{dr} = a'r^{-D-1} \quad (1-8)$$

式中, $a' = -Da$ 为比例常数。

将式 (1-8) 代入下式积分,可得到储层中孔径小于 r 的孔隙累积体积 $V(<r)$ 的表示式

$$V(<r) = \int_{r_{\min}}^r P(r) ar^3 dr = a''(r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}) \quad (1-9)$$

式中,常数 $a'' = a'a / (3-D)$, a 为与孔隙形状有关的常数 (孔隙为立方体时 $a=1$, 孔隙为球体时 $a=4\pi/3$), $r_{\min}$ 为储层中最小孔隙半径。同理,储层的总孔隙体积 V 为

$$V = a''(r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}) \quad (1-10)$$

则孔径小于 r 的累积孔隙体积分数 S 为