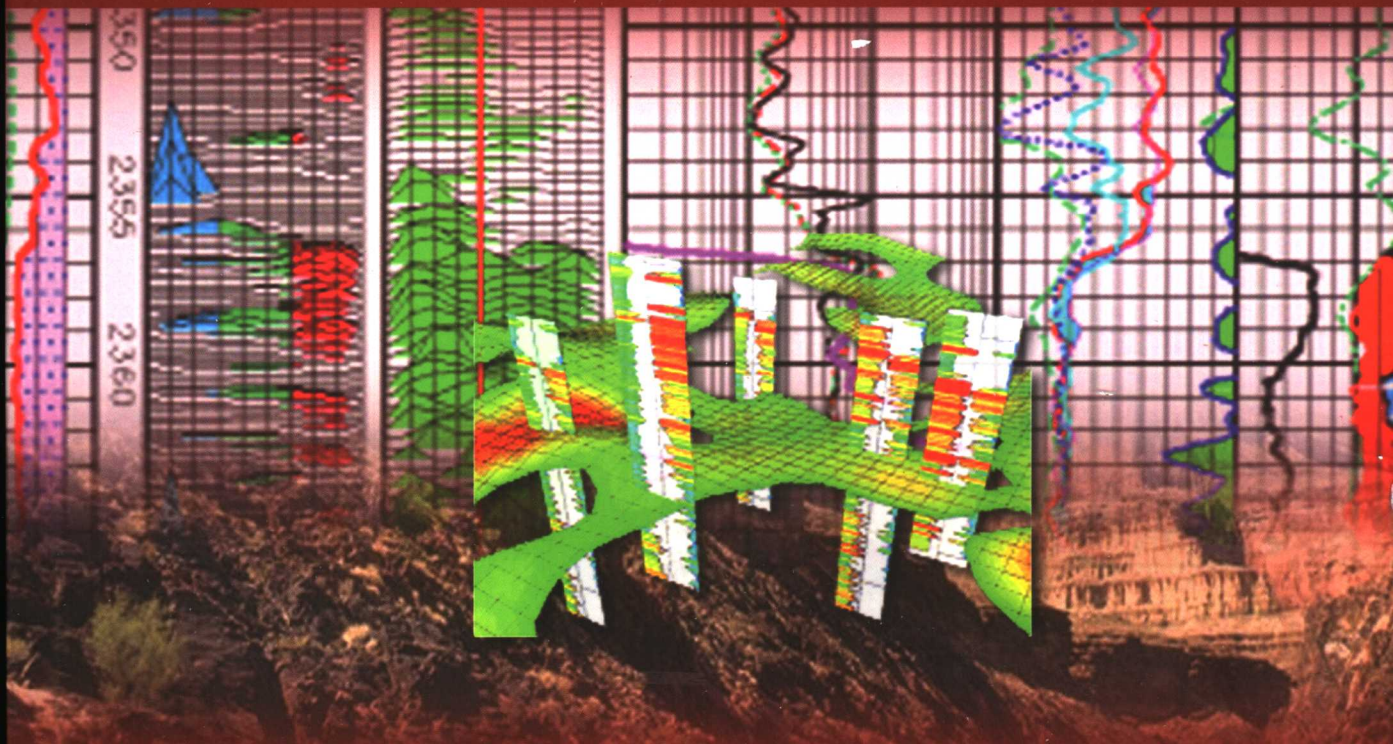


# 复杂储层测井 评价原理和方法

王树寅 李晓光 石 强 李潮流 等著



石油工业出版社

# 复杂储层测井评价原理和方法

王树寅 李晓光 等著  
石 强 李潮流

石油工业出版社

## 内 容 提 要

该书以复杂储集体岩性、物性、含油性非均质识别评价为核心,介绍了复杂储层测井综合评价的理论模型、孔隙结构体积模型和导电机理模型,论述了火山岩、碳酸盐岩、泥灰岩三类储层岩性识别技术、物性计算方法及含油性评价技术,并对低孔低渗储层测井方法进行了分析。

本书可供石油测井科技工作者使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

复杂储层测井评价原理和方法/王树寅等著.

北京:石油工业出版社,2006.12

ISBN 7-5021-5851-0

I. 复…

II. 王…

III. 复杂地层:储集层-油气测井-评价

IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 145562 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

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

---

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5

字数:266 千字 印数:1—1000 册

---

定价:50.00 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

21 世纪是油气资源的世纪，国民经济的快速发展，要求石油勘探开发事业必将快速发展。我国油气田已经历了数十至百余年的勘探开发历史，今后主要勘探开发的油气田多是复杂储层油藏。复杂油气藏勘探开发难度大，提高复杂油气藏勘探开发效果，首先要建立一套有效的复杂储层测井评价的理论和 method 技术，才能有效识别和预测复杂油气藏三维空间分布，故该书出版有重要的理论意义和实用价值。

《复杂储层测井评价原理和方法》是王树寅博士长期从事测井储层评价科研和生产实践的结晶。该书以复杂储集体岩性、物性、含油性非均质识别评价研究为核心，将国内外近年来测井储层评价的最新理论和 method 技术加以系统化、理论化，深入论述了复杂储层测井评价的原理和 method 技术，还对该理论在火山岩、碳酸盐岩、泥灰岩和低孔低渗储层等四类储层中的应用效果进行了剖析。

该书系统介绍了复杂储层测井评价的内涵，国内外研究现状，主要研究内容和特色，复杂储层测井综合评价的理论模型、孔隙结构体积模型和电导机理模型，复杂储层和低孔低渗储层的岩性、物性、含油性评价原理和 method 技术，分析了复杂储层和低孔低渗储层评价在生产实践中的应用效果。

《复杂储层测井评价原理和方法》一书，基础资料扎实，内容丰富，理论和 method 技术先进，深化和发展了测井储层评价原理和 method 技术，相信该书的出版将有助于石油科技工作者掌握复杂储层测井评价的新理论、新方法、新技术，科学地认识、评价和管理复杂储层和低孔低渗储层，必将加速复杂储层和低孔低渗储层测井评价理论和 method 技术的深化发展，推动我国复杂油气藏和低孔低渗油气藏勘探开发水平的不断提高和油气工业的健康高速发展。

# 前 言

石油是国民经济发展的重要支柱，也是工业的“血液”，我国油气田勘探开发已经历了数十至百余年，目前已进入了高成熟期。今后主要勘探开发研究的对象是复杂储层和低渗透储层。提高复杂储层和低渗透储层油气藏勘探开发的成功率，建立一套有效的复杂储层和低渗透储层评价原理和方法技术，必会提高复杂储层、低渗透储层勘探开发成功率和降低成本，推动石油工业快速发展。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院在 2002 至 2006 年间承担了中国石油重大科技攻关课题“油气藏描述与动态监测配套技术研究”项目的一个子课题，是中国石油为解决制约勘探生产进展的火成岩、变质岩、泥灰岩低孔低渗等复杂岩性油气藏测井评价国际学科前沿难题而设立的科技攻关课题，《复杂储层测井评价原理和方法》一书就是在此研究成果的基础上深化发展的高新成果。

该书共分七章，第一章绪论，论述了复杂储层、低孔低渗储层测井评价研究现状，研究原理和方法技术，研究内容和特色。第二章复杂储层测井综合解释评价理论模型，阐述了复杂储层孔隙结构体积模型和电导机理模型。第三章复杂储层岩性识别原理和方法，分别阐述了火山岩、碳酸盐岩和泥灰岩三类储层岩性识别的原理和方法技术。第四章复杂储层物性计算原理和方法，论述了火成岩、碳酸盐岩、泥灰岩等三类储层物性计算原理和方法技术。第五章复杂储层含油性评价原理和方法，阐述了火山岩、碳酸盐岩和泥灰岩三类储层含油性评价、识别的原理和方法技术。第六章低孔低渗储层测井评价原理和方法，阐述了低孔低渗储层测井响应，孔隙结构测井研究，孔隙度、渗透率和含油饱和度等参数计算原理和方法技术。第七章复杂储层评价应用效果研究，分别论述了火山岩、碳酸盐岩、泥灰岩和低孔低渗等四类储层测井评价在生产实践中的应用效果。

该书是中国石油勘探开发研究院廊坊分院广大科技人员集体智慧的结晶，先后参加编写工作的人员有刘凤新、李涛、王青、胡英杰、孔令福、康志勇等，尤其是辽河油田分公司勘探开发研究院在项目的进行过程中提供了大量基础资料；在工作和编写过程中得到了信荃麟、刘泽蓉、李国平、张占文等教授的悉心指导和帮助；分院测井人员付出了辛勤的劳动，在此表示衷心感谢。由于笔者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价国内外研究现状.....	1
第二节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价主要研究内容和特色.....	9
第三节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价原理和方法技术.....	11
<b>第二章 复杂储层测井综合解释评价理论模型</b> .....	14
第一节 复杂储层双孔隙结构体积模型.....	14
第二节 复杂储层导电机理模型.....	15
<b>第三章 复杂储层岩性识别原理和方法</b> .....	19
第一节 火成岩岩性识别原理和方法.....	19
第二节 碳酸盐岩岩性识别原理和方法.....	34
第三节 泥灰岩岩性识别原理和方法.....	35
<b>第四章 复杂储层物性计算原理和方法</b> .....	39
第一节 火成岩储层物性计算原理和方法.....	39
第二节 碳酸盐岩储层物性计算原理和方法.....	73
第三节 泥灰岩储层物性计算原理和方法.....	84
<b>第五章 复杂储层含油性评价原理和方法</b> .....	87
第一节 火成岩储层含油性评价原理和方法.....	87
第二节 碳酸盐岩储层含油饱和度计算原理和方法.....	104
第三节 泥灰岩储层含油饱和度计算原理和方法.....	104
<b>第六章 低孔低渗储层测井评价原理和方法</b> .....	108
第一节 低孔低渗储层砂体测井响应研究.....	108
第二节 低孔低渗储层孔隙结构测井研究理论和方法.....	117
第三节 低孔低渗储层孔隙度计算理论和方法.....	123
第四节 低孔低渗储层渗透率计算理论和方法.....	129
第五节 低孔低渗储层含油气饱和度参数研究.....	131
<b>第七章 复杂储层和低孔低渗储层测井评价应用效果分析</b> .....	136
第一节 火成岩储层测井评价应用效果研究.....	136
第二节 碳酸盐岩储层评价应用效果研究.....	147
第三节 泥灰岩储层测井评价应用效果研究.....	150
第四节 低孔低渗储层应用效果研究.....	152
结论和认识.....	156
<b>参考文献</b> .....	158

# 第一章 绪 论

复杂储层油气藏的主要特征是该油藏在三维空间剖面上,组成储层的主要矿物类型多大于4种,储层储集空间类型复杂、非均质性强,常有基质孔隙、溶蚀孔洞和各类成因裂缝,有时以溶蚀孔洞或裂缝为主。复杂的矿物组成、多种类型储集空间的混杂存在形成极其复杂的岩石物理响应,导致储层导电机理不清,故很难建立准确的测井响应理论模型,储层油藏的非线性、非均质的响应机制导致岩石物理反演多解性严重,是这类油气藏储层研究的共同难点,给岩石物理学家和油气勘探带来严重的挑战。

在油气勘探开发生产中,为了降低勘探开发成本,取心常较少,且火成岩、碳酸盐岩和泥灰岩等特殊岩性裂缝型储层取心收获率常很低,多不具有代表性;同时因复杂储层的非均质性强,裂缝或孔洞发育的岩心,在钻井取心过程中,缝洞发育的取心段至地面常压下因压力释放极易破碎,这些岩心在实验室进行岩石物理实验时也常出现岩心沿裂缝方向断裂,这时用少量的岩心资料来对复杂油藏的复杂储层进行完整系统地评价难度很大,这与均质孔隙型砂岩储层评价中常用岩心实验室资料来刻度测井的模式存在很大区别。因而用实验手段很难客观地模拟复杂储层溶洞的发育情况,从而也限制了对复杂储层开展大规模岩石物理实验研究。

近年来,随着国际石油科技发展和石油勘探开发广度与深度的拓展,非砂岩和非常规的碳酸盐岩等复杂岩性、低孔低渗、低阻油气藏等特殊类型复杂油气藏在中国石油油气勘探中的地位日渐重要,在此类油气藏中发现的油气储量占近年油气整体储量的比例也逐渐增大,正成为发现和开采油气田的主力勘探开发对象。如2002年,中国石油新增探明储量中变质岩和碳酸盐岩为储层、以裂缝和溶洞为储集空间的复杂油气藏贡献率高达16.7%,显示了复杂油气藏在石油工业中的地位与日俱增。用测井信息来认识评价和发现复杂油气藏的难度越来越大,需要应用多学科理论和方法技术,要求研究开发与之相匹配的岩石物理实验技术和复杂储层复杂油藏精细研究描述评价理论和方法技术,才能满足21世纪石油勘探开发事业高速发展的需求。

复杂储层测井理论和方法技术的建立正是在上述背景基础上提出来的,以地质、测井、地震、地质统计、石油工程多学科的理论为指导,应用多种资料充分挖掘测井提供的连续而丰富的信息,以岩石物理实验为依据,建立好岩石物理模型,直观、定量研究描述复杂储层缝洞发育参数的成像测井为标志,建立配套的常规测井储层评价的配套理论方法技术。指导复杂油田勘探开发,深化发展复杂油田测井地质学的理论和方法技术。

## 第一节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价国内外研究现状

国外对复杂岩性裂缝储层的测井评价,主要是成像测井技术及可视化处理。用成像测井信息研究储层纵向分布、产状,类型等,特点是配对储层直观描述,同地质评价紧密结合;缺点是价格昂贵,缺少高精度的储层参数量化和可靠的含油性评价。国外含油性解释仍采用均质解释模型,王牌程序仍为ELAN最优化测井储层参数分析软件。

我国测井软件的基础是德莱赛测井公司的 3700 测井分析软件，常用的程序是：单孔隙度分析程序，泥质砂岩分析程序，复杂岩性分析程序，近年来又从斯伦贝谢公司引进了 ELAN 程序。各油田据自身地质特征，对 3700 软件进行了修改，形成了适应本油田地质特点的分析程序。如四川油田将德莱赛公司的复杂岩性分析程序 CRA，改为 CRAC 和 CRAK 程序，适用川东石炭系雷口坡地层特征；长庆油田根据低孔低渗的地质特征，将德莱赛公司的 CRA 程序改为 CQCRA 处理系统。这些解释软件，无论是引进的，还是改形的，都是以均质解释模型为基础的，很难适应裂缝性储层测井解释评价的广泛需要。

鉴于国内外研究现状及目前油气勘探自常规油气藏向非常规复杂油气藏发展的大趋势，国内外学者们将注意力转移到低孔、低渗、复杂岩性等非常规油气藏的研究上。对测井解释来讲，探索非均质模型为主的多模型综合应用的解释方法，寻求经济、有效、直观为特点的测井解释技术，已成为复杂岩性储层测井解释研究的发展方向。

复杂岩性油气藏测井评价研究内容含复杂储层矿物岩性识别、储层物性参数计算、含油性识别等内容。本书以辽河盆地东部凹陷火成岩、塔里木碳酸盐岩和盐城泥灰岩为对象展开研究，论述复杂储层测井评价的原理和方法技术，指导油田勘探和开发。

### 一、复杂储层岩性识别研究

#### 1. 火成岩岩性识别和储层研究

火成岩是指地壳深部或上地幔中形成的高温高压熔融岩浆体，在不均衡应力场作用下运移至地下或喷出地表冷凝而形成的岩石。火成岩储层现已成为一种特殊的油气储层受到国内外石油公司的广泛重视。早在 19 世纪末 20 世纪初，日本、印度尼西亚、古巴、墨西哥、阿根廷、美国、前苏联等国先后发现了火成岩油气藏（表 1-1），因而吸引了地质学家的重视，他们对火成岩有较细致的研究，但由于火成岩储层的结构十分复杂，影响储层物性和含油性的因素与普通的沉积岩既有相同点，又存在着本质的区别，不同学者对火成岩储层有不同的认识，概括起来有下述 5 种观点。

表 1-1 世界部分国家火成岩油气藏特征简表

国家	层位	油田数	岩性	孔隙度 (%)	渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	油藏面积 $\text{km}^2$
日本	N	5	英安熔岩、流纹角砾岩、安山集块岩、流纹熔岩	9~25	1~150	2~28
印度尼西亚	E	1	安山岩、凝灰角砾岩	6~10	裂缝控制	30
古巴	K	3	凝灰岩、火山角砾岩			0.25~0.4
阿根廷	T、K、E	3	安山岩、流纹岩、凝灰岩	20		
美国	K、E	5	橄榄玄武岩、粗面岩、凝灰岩	5~17	0.01~25	0.35~8
前苏联	K、E	3	流纹英安凝灰岩、安山岩	0.1~20	0.01~3	
加纳	Q	1	集块岩	15~21		15

(1) 岩性岩相论：岩性岩相论认为，任何类型的火成岩均可构成储层，储油物性主要取决于岩石结构、岩相及次生变化，矿物（沸石、粘土）影响储层物性，我国及前苏联在基性和中性火山熔岩中发现油气藏较多，而日本则在酸性火成岩中发现的油气藏较多等。

(2) 构造论：构造论认为，储层主要受基底褶皱强度及基底断裂的控制，常沿大断裂两



侧分布，火成岩处于继承性发育的构造高点时，有利于形成油藏。火成岩储层不决定于何种岩石类型，而决定于这种岩石所处的构造部位，大多数火成岩储层均与断层、裂缝有关。

(3) 油源论：油源论认为，火成岩油气藏的形成，必须与油、气源岩相伴生，广泛发育的火成岩油气藏的本质是次生的，火成岩油气藏多在生油岩中。

(4) 风化论：风化论认为，火成岩出露地表后表层的物理化学风化作用形成了火成岩储层，是陆上喷发火成岩储层的主要成因。

(5) 岩体论：岩体论认为，油气藏主要受岩体形态控制。我国火成岩储层在不同地质时期、不同地区也有广泛分布，岩性多种多样，有玄武岩、安山岩、流纹岩、凝灰岩及未喷出地表的次火成岩等（表 1-2）。

表 1-2 中国部分火成岩油气藏基本特征简表

盆地、坳陷	地区、油气藏	层位	岩性	孔隙度 (%)		渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	
				范围	平均	范围	平均
冀中	曹家务	E	辉绿岩	2.9~10.5	6	0.1~1.3	0.52
济阳	东营凹陷等 13个凹陷	E、J	玄武岩、安山岩、辉绿岩、 凝灰岩、细碧岩、煌斑岩	0.03~21		0.01~216	0.05~10
辽河	欧利坨子、热 河台、大洼	E、J	角砾熔岩、凝灰熔岩、粗面岩、 杏仁玄武岩	1.3~28.9	5-22	0.02~36	0.1~10
准噶尔			玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩	1.1~26.3	5~12	0.01~702	0.6~20.3
黄骅	风化店	E	次火成岩、次黑云母安山岩	2.2~15.4		0.01~250	
二连	阿北	K	安山岩	12~23.4		1.2~62.2	
大庆	徐家围子	J	玄武岩、流纹岩				
江苏	闵桥	E	玄武岩	2~24.1		<1~164	

对火成岩的研究，早期主要是野外的岩石描述，从火成岩岩相入手，研究其孔隙类型及分布规律，进而揭示火成岩油气藏的控制因素。到 19 世纪后半叶，随着偏光显微镜在薄片鉴定中的应用，使岩石的矿物组成、结构和构造的观察更加准确，出现了岩石描述的热潮（林景仟，1995）；之后随着地球化学的引入，火成岩地球化学研究飞速发展，物质成分、矿物成分的研究迅速深入。到 20 世纪 60 年代，火山地质学逐渐把火山碎屑岩当作沉积物，描述了新的火山结构、火山喷发的物理作用过程。

20 世纪 80 年代以来，因不同学科间的交叉、测试技术和计算机技术的飞速发展、实验模拟手段的逐渐完善，使现代火成岩的研究完全脱离了纯岩石学的范畴，研究范围含火成岩矿物成分、化学组分、岩石结构构造、岩石系列类型与演化趋势、火山作用、火山结构及火山构造等诸方面。

近年来，我国大庆油田、胜利油田、辽河油田、克拉玛依油田在玄武岩、粗面岩、辉绿岩等火成岩钻探中相继获得重要发现，其中辽河盆地自 1996 年以来在火成岩油气藏中的勘探进展较快，特别是辽河盆地东部凹陷欧利坨子油田欧 26 并在火成岩地层中获得高产工业油气流后，又相继发现了千万吨级整装、以火成岩为单一目的层的粗面岩油气藏，在国内掀起了火成岩储层学研究的又一次热潮。研究思路一方面是从野外和岩心入手，另一方面更多地重视测井和地震等地球物理资料的应用和评价，并出现了具有较大生命力的边缘学科

——火成岩储层地质学，其核心就是解决火成岩的岩性、相带、储层识别和评价等问题。火成岩储层地质学不仅可以为火成岩油气藏的勘探提供依据，同时还是含火成岩盆地环境分析的基础，成为碎屑岩或其他油气藏勘探的借鉴和重要依据。

从表 1-2 可知，组成火成岩地层的矿物种类非常多，岩性复杂，但以硅酸盐为主要成分，化学元素以氧最多，以氧化物表示则以  $\text{SiO}_2$  含量最高。 $\text{SiO}_2$  与其他氧化物之间具有消长关系，因此通常用它来划分火成岩的酸碱度，标准是：酸性岩 ( $\text{SiO}_2 > 66\%$ )、中性岩 ( $53.66\% < \text{SiO}_2 < 66\%$ )，基性岩 ( $43.53\% < \text{SiO}_2 < 53.66\%$ ) 和超基性岩 ( $\text{SiO}_2 < 43.53\%$ )。

储层发育程度与岩性有密切的关系，因此岩性识别是储层识别和油气藏评价的基础。由于火成岩岩石矿物的复杂多样性，通常的做法有两种：其一是对有取心的井段，观察不同岩心对应的测井响应值大小，据此建立基于测井曲线的岩性识别图版，区分不同岩性反应较灵敏的曲线含自然伽马 (GR)、体积密度 (DEN)、补偿声波 (AC) 和自然伽马能谱曲线 (NGS)；其二是在具备全岩心分析实验的基础上，利用 QAPF 双三角图进行分类 (Q = 石英、磷石英和石英，A = 碱性长石，P = 斜长石和方柱石，F = 副长石类)，也可以用 TAS 图 (硅碱图) 进行分类。显然，方法二需要昂贵的全岩心分析，不利于新区探井的储层快速评价。

Henkel 指出，比值  $(m\text{Ca} + 1.2m\text{Mg}) / (m\text{K} + 1.43m\text{Na})$  的对数与岩石的密度有良好的线性关系。因而利用密度测井值或上述比值与密度的交会图可识别火成岩的岩性。岩性密度测井给出的岩性指数  $PE$  对岩石的化学成分敏感， $PE$  值与密度  $\rho_b$  交会可更有效地区分岩性。和密度测井一样，声波时差从酸性岩向超基性岩增加。用声波测井资料或声波时差与密度的交会图都能识别火成岩的种类。如果通过已知几口井岩心观察，确定出区块上主要岩性对应的测井响应特征，就可以给出利用测井资料识别不同岩性的图版，据此可以对其他没有取心资料的井段或新井展开快速准确的岩性识别评价，因此第一种方法是一种经济有效、快速可靠的方法。但应用这种方法应注意以下几点：①要应用火成岩发育井段内逐点的测井资料，以避免人为主观因素的影响；②岩性岩相识别前必须进行火山结构分析，因为同一岩性和岩相在不同的火山机构内其测井响应有差异；③在无法实现大范围或全井段取心的情况下应加强成像测井的工作量，以此对储层进行评价。

利用概率统计技术或者神经网络技术识别复杂岩性地层也是一种在国内比较流行的研究方法。这种方法的主要步骤通常是在资料齐全的重点井中以地质资料为基础，综合测井、钻井、岩心分析、铸体薄片及图像分析鉴定等资料，将储层分成若干个类型并筛选出若干个样本和若干个反映岩性较灵敏的曲线，通过概率分析的方法建立起基于测井资料的不同类型储层的判别模式。这种模式在重点样本井中如果能够准确描述岩性，就可以推广到同一区域其他井中，但前提条件是岩性、岩相在区域平面上变化不大，具有类比性。

## 2. 碳酸盐岩岩性识别和储层研究

碳酸盐岩的测井评价国外起步较早 (1951 年)，已有 50 多年的历史。其发展历史可分为四个阶段：

(1) 第一阶段自 20 世纪 50 年代初到 60 年代中期，这时只用少数常规测井信息来对储层中裂缝响应进行定性识别和评价。

(2) 第二阶段自 20 世纪 60 年代中期至 70 年代末，这时主要用多种常规测井信息对储层中裂缝响应进行综合研究评价。

(3) 第三阶段自 20 世纪 70 年代末至 90 年代初, 这一阶段在测井技术上已有了很大的发展, 已形成了多种信息(倾角、阵列声波、三孔隙度等)配套技术综合判识复杂储层中的裂缝。

(4) 第四阶段自 20 世纪 90 年代初到目前, 该阶段对复杂裂缝性储层测井评价技术有了飞跃的发展, 声电成像测井、核磁测井等新技术对复杂裂缝性储层的评价已趋成熟, 基本能满足复杂油藏勘探开发的需求。

大量生产和科研实践表明, 碳酸盐岩的矿物成分主要是方解石、白云石, 因此, 在利用测井信息识别岩性相对可靠, 但岩石结构常因颗粒、晶粒、生物骨架、灰泥和胶结物等结构组分的存在而变得十分复杂, 相应的储集类型也较多。它的脆性和可溶性使构造和溶蚀孔隙相当发育, 但因成因不同也导致非均质性很强, 增加了测井评价的难度。据孔隙形成时间可分为原生孔隙和次生孔隙两大类, 碳酸盐岩沉积物的原始结构、构造孔隙属原生孔隙, 成岩作用以后岩石的各种结构、构造孔隙常因成岩期各种作用的影响, 各种原始孔隙结构受到不同程度的改造。因此, 碳酸盐岩成岩期形成的各种孔隙常常不再属于原生孔隙, 成岩后期所形成的各种孔隙则全部属次生孔隙。碳酸盐岩孔隙类型在地质历程中具有不断演化的特点, 后期形成的孔隙往往是在前期原有孔隙的基础上演化而成的, 如重结晶、白云岩化等次生岩石结构孔隙常保留有变余结构, 各种溶蚀孔隙有时不同程度地保留有原来孔隙的形状等。据目前研究表明, 储层的储集类型为三类: 即裂缝型、孔洞型及孔隙孔洞型。

碳酸盐岩的岩性不同, 构造条件以及溶蚀条件的差异会导致不同层段和不同区域孔隙发育程度不同。

目前除用常规测井信息的交会技术对岩性进行判识外, 其新技术 ECS、成像测井的应用使判识精度大大提高。

### 3. 泥灰岩岩性识别和储层研究

泥灰岩是纯泥岩与纯灰岩的过渡岩性, 地质特征和测井响应特征都与纯泥岩或纯灰岩差别很大, 具有独特的地质特征和电性特征。

泥灰岩沉积属半深湖—深湖相沉积, 气候温暖、微生物活跃, 并具有较弱的水动力沉积条件。这类沉积主要是泥质和钙质淤泥, 沉积物具有明显的分带性。由于气候、河流、湖水水面升降、水动力、地球化学、生物作用等诸多因素, 常会使沉积物的岩性、物性发生较大的变异性。

在岩性方面, 泥灰岩一般为暗色泥质与灰色、深灰色、黑色灰泥混合沉积物。在纵向剖面常呈深色泥岩与高含云灰质的灰色、黑色泥岩、白云岩互层, 泥岩及含云灰质泥岩占大多数, 泥质含量普遍较高, 为强钙质胶结及混合岩性。岩性识别采用两种孔隙度测井的交会技术进行。

在物性方面, 这种较细、微细粒的沉积, 可使泥灰岩的物性呈低孔、低渗状态, 在压实作用中由于排液不畅可能出现剖面上的局部高压, 形成异常高压带。从另一方面看, 由于泥灰岩具有高含钙的混合复杂岩性特点, 改变了泥岩的可塑性, 增加了岩石的脆性, 在局部压力变化或构造应力的作用下极易产生微细裂缝或较大型裂缝, 使原有孔隙连通, 改造了原低孔、低渗的物性条件, 有利于油气的运聚。

另外, 温暖气候、半深湖—深湖的沉积环境, 加之河流、水动力、地球化学、生物活动等诸多因素的影响, 沉积过程中可形成微层理、斜层理、砂质或灰质小透镜体, 生物活动形成的洞穴或胶体形成的原生孔, 局部水进或水退影响沉积底床, 产生水动力搅动界面, 造成

砂泥质的不均匀分布。在成岩过程中，泥岩脱水、体积收缩可形成干缩裂缝；泥岩高压封闭流体释放，可形成垂直泥岩界面的微裂隙；和泥质同期沉积的易溶物质溶解可形成次生孔洞。

从上述分析可知，泥岩、泥灰岩沉积经常不是单一的地质特征，随沉积环境和成岩作用的差异，地质特征可有多种情况，在一定情况下可形成低孔、低渗的泥岩、泥灰岩致密岩体，在另外一些情况下则可形成各种孔隙发育的孔渗兼备的泥岩、泥灰岩储集体。

因岩性、储集条件的特殊性和发现油气藏较少，在目前的石油天然气勘探开发中泥灰岩储层占的储量比例相对较小，相关的研究成果文献也相对较少。国外在此方面的研究评价均使用 ECS 和成像新技术手段，效果也不十分理想。而在国内发现有气并已形成产能规模的只有柴达木盆地和盐城地区，因受测井采集信息手段的限制，主要研究依据为常规测井信息，在效果和深度上更逊一筹。总之，受各种条件的制约，此类岩性储层的研究评价尚不过关，是石油天然气勘探中急需攻关的重要问题。

## 二、复杂储层物性参数计算

### 1. 火成岩储层物性参数计算

火成岩储层的储集空间除基质粒间孔隙以外，还有孔洞和裂缝。孔洞含气孔、杏仁体内孔、斑晶晶间孔、收缩孔、微晶间孔、晶内孔、熔蚀孔、胀裂孔、塑流孔等。这些孔洞空间多呈封闭状态，若有裂缝连通即可储油。裂缝有构造裂缝、隐爆裂缝、成岩裂缝、风化裂缝、竖直节理、柱状节理等。火成岩中的各种储集空间多呈组合形式，如原生孔隙中的气孔常和溶缝、洞相连，而次生的构造缝常形成溶蚀—构造复合缝。在任一地区可存在几种组合类型，但其中常有一种是最主要的。

上述火成岩的储集空间成岩过程中，多为一个演化过程。研究表明，火成岩储集空间有下述 5 个演化阶段。

(1) 岩浆作用阶段：形成各种原生孔隙和裂缝。

(2) 喷发期后的热液阶段：填充原生孔。

(3) 次生裂缝与蚀变交代阶段：构造作用的影响，岩石破碎或形成裂隙；次生裂缝本身既是储集空间，又将不连通的孔（气孔）缝（原生裂隙）连通并加以改造。热液沿裂缝通道改造两侧的外貌，对岩石交代形成熔孔。交代熔蚀与充填同时发生，形成各种熔孔、充填残留孔、充填残留缝等。

(4) 风化淋滤作用阶段：岩浆体暴露地表时，机械风化作用形成大量裂隙，化学风化作用的淋滤作用，多有利于储存空间的形成与改善，极细的风化物也能充填缝洞。

(5) 深埋改造作用阶段：若地壳下降，接受沉积，火成岩受上覆沉积的覆盖和地下水的改造作用，携带油气的有机酸对孔、缝也有强烈的改造作用，改造后孔洞常被油气或水充填。

火成岩储集空间的复杂演化过程受诸多因素的控制，其中地球物理方法能够研究的主要控制因素有岩相、构造作用和风化作用，岩相是储集空间演化的物质基础，而构造作用和风化过程是岩性岩相的再造。

岩相类型：喷发相熔岩气孔和裂隙常较发育，而火山爆发相的火山碎屑岩不发育气孔和裂隙，其中近火山口相的火山集块岩、角砾集块岩具有块间孔、砾间孔，而粒度细小的凝灰岩、角砾凝灰岩基本上无有效储存空间。不同相带岩石性质不同，原始孔、缝发育不同，对应力反应不同，抗风化改造的能力也有明显差别，因而岩相也决定了次生储集空间的发育

程度。

构造作用：熔岩为脆性岩石，构造应力易产生裂隙。而火山碎屑岩相韧性较强，次生裂隙不发育。原生和次生孔洞和裂隙影响后续孔缝的改造。

风化作用：风化侵蚀带和构造破碎带孔缝发育。火成岩风化程度与储层物性常是正相关，自上而下风化程度若减小，风化微裂缝则降低。

从测井评价的角度来说，岩石物理学家关心的是如何利用测井的手段来识别孔缝发育井段、定量计算孔缝参数，评价火成岩的含油性。国外对这种复杂岩性储层的测井研究，主要放在成像测井研究及可视化处理上，来评价储层产状、储层类型，主要用：声电成像和核磁共振测井、套管井测井、油藏动态监测、MDT 测试等技术，为测井市场的 30%。优点是对储层描述直观，并同地质评价结合紧密，尤其是核磁共振测井能提供与岩性无关的孔隙结构等信息；此外，阵列声波测井提供的斯通利波信息在致密无缝井段可看成“不衰减”面波，遇到与井眼相通的张开缝时就会发生能量衰减，衰减越大则裂缝张开性越好。将斯通利波衰减与裂缝密度对比，裂缝越发育则衰减越明显，即储层越好，因此利用阵列声波测井的斯通利波信息能很好地识别划分渗透层段，找出有效储层。

近年来，斯伦贝谢公司又将 ECS 元素俘获测井推向国内市场。ECS 元素俘获测井类似于常规的自然伽马能谱测井，但 ECS 可以提供包括铝、硅、钙、铁、硫、钛、钆 7 种元素连续的体积含量曲线，并依据铝、铁含量曲线计算地层泥质含量，对复杂岩性地层评价很有帮助。

新技术测井对复杂岩性储层的表征和描述能力强，技术先进，缺点是价格昂贵，在很多评价井中都无法规模化应用。以中国石油为例，每年采用斯伦贝谢公司的高分辨率成像测井 FMI 识别和评价裂缝的工作量在 30 井次左右，平均单井测井费用在 15 万美元以上，斯伦贝谢北京计算中心的平均单井处理费用在 8 万美元左右，昂贵的费用限制了该项技术只能用于重点区块、重点探井中。

依赖高分辨率成像测井评价复杂岩性储层还存在另外一个无法回避的问题，就是新技术测井资料的处理手段。以斯伦贝谢公司的 FMI 测井为例，FMI 高分辨率测井模式有 8 个极板、192 个电极，沿井壁每 0.1in 采一次样便得到了环井壁细微的电阻率变化，其纵向和横向（绕井壁方向）分辨率均为 0.2in（5mm），在 8in 井眼中空间覆盖率最高可达 80%。FMI 测井确实可以为复杂岩性储层描述提供非常直观丰富的岩石物理信息。为得到基质孔隙、次生孔隙（裂缝和溶蚀孔洞）的定量参数，斯伦贝谢公司采用一种孔隙度频谱分析技术从 FMI 资料中提取上述参数。但目前该项技术为斯伦贝谢公司垄断，并且不向油公司出售而只提供技术服务。

阵列声波测井的资料处理尤其是利用斯通利波计算储层渗透率的方法、ECS 元素俘获测井的资料处理目前在中国石油 13 家油田均无法完成。类似的其他几项评价复杂岩性油气藏的关键技术也都属于这种情况。

价格与技术壁垒这两个因素限制了在火成岩油气藏钻探过程中完全依靠成像测井解决储层识别和评价的难题，必须寻求其他的方法。国内各油气田在此类油气藏勘探中绝大多数井采集资料的依然是以常规测井为主，而测井解释所采用的多为均质模型，储层参数精度求取欠缺，目前尚无一套适用性较为广泛的、基于常规测井资料的和非均质模型的复杂储层物性参数评价方法。

## 2. 碳酸盐岩储层物性参数计算

碳酸盐岩储层是原生沉积或后生作用形成的具有储集空间和渗流能力的地层，这种储层有块状、层状，并有裂缝、溶洞、孔隙及其混合形式的多种孔隙结构。正确划分储层是研究碳酸盐岩油气层的基础。研究孔隙结构复杂的储层，应从岩性、物性、含油性、孔隙结构的相互关系入手，结合试油、试采资料，研究地球物理测井划分储层的方法。

碳酸盐岩储层岩性以石灰岩、白云岩为主，次为硅质岩。碳酸盐岩储层具有较广的孔隙度变化范围，国内外多数碳酸盐岩油气田的储层为低孔隙度，少数碳酸盐岩油气田的储层具有高孔隙度，如伊朗油田的阿斯玛里石灰岩储层孔隙度为 25%、利比亚油田的法鲁德白云岩储层孔隙度为 28.1% 等。我国的碳酸盐岩储层多具有低孔隙度和非均质强的特点。储层孔隙度低，对测井信息贡献小，使测井信息主要反应岩石骨架特征，若测井信息灵敏度低，将直接影响评价精度。因此，不能像纯岩性那样仅用一种孔隙度测井方法来解释，需要考虑组成岩性的矿物种类，选择两种或多种孔隙度测井方法相结合来进行岩性及孔隙度的定量解释。此外，孔隙类型多样，连通情况各异，应针对不同的要求分别求出不同的孔隙度，如总孔隙度、岩块孔隙度、裂缝孔隙度等。

目前，国内外测井储层物性的计算常采用两种方法：

(1) 利用三孔隙度（声波、中子、密度）测井进行交会计算，此方法是用常规资料对储层进行定量计算评价。问题是岩性储集空间复杂时，精度偏低，但方法成熟普及、投资少。

(2) 利用核磁和声电成像测井进行计算和描述，此方法的优点是描述直观、精度高，缺点是尚未普及、成本高。

## 3. 泥灰岩储层物性参数计算

泥灰岩储层物性求取研究文献相对较少，斯伦贝谢公司主要用测井新技术的 ECS、核磁和成像测井资料进行计算评价。国内因受技术手段限制，主要用三孔隙度测井资料的交会技术进行求取。问题是，当同一种矿物的单元厚度大于 1m 时，其评价精度基本能满足勘探需求；若同一种矿物单元厚度小于 1m 时，评价精度较差，不能满足勘探开发的需求。

### 三、复杂储层含油性评价研究

火成岩、碳酸盐岩及泥灰岩油气藏均是以裂缝和孔洞为主要储集空间的复杂岩性油气藏，岩石含油性与电阻率间的关系不能用简单的阿尔奇公式来描述。如前所述，此类储层因裂缝和孔洞的存在，不但取心资料难以获取，即使取得有限的岩心资料也很难进行岩电实验来模拟地层条件下的岩电关系。目前包括斯伦贝谢公司在内，针对复杂岩性油气藏的油水识别，主要采用的技术思路是在准确获取储层物性参数尤其是裂缝和孔洞的相对大小等信息的基础上，结合钻探过程中的录井显示、气测异常等信息综合判识油气水层，依靠电阻率曲线的相对高低寻找和评价油气层。斯伦贝谢公司通常采用考虑泥质和地层水并联导电的印度尼西亚方程，见式（1—1）：

$$\sqrt{C_t} = \left[ \sqrt{C_{ucl}} \times V_{cl}^{(evcl - m_{ucl} \times V_{cl})} + \frac{\sqrt{C_{uwa}}}{\sqrt{a}} \phi^{0.5(m + \frac{m^2}{\phi})} \right] \left[ \frac{V_{uwa}}{\phi} \right]^{n/2} \quad (1-1)$$

式中  $C_t$ ——测量电导率， $\Omega/m$ ；

$C_{ucl}$ ——泥岩电导率， $\Omega/m$ ；

$V_{cl}$ ——泥岩体积；

$evcl$ ——泥岩体积指数，隐含 1.0；

- $mvcl$ ——泥岩体积指数校正因子，隐含 0.5；
- $C_{uwa}$ ——地层水电导率， $\Omega/m$ ；
- $a$ ——阿尔奇公式系数，隐含 1.0；
- $m$ ——孔隙度胶结指数， $m = 1.89 + 0.019/\phi$ ；
- $n$ ——饱和度指数，隐含 2.0；
- $mc_2$ ——孔隙度胶结指数校正因子，隐含 0.0；
- $\phi$ ——孔隙度；
- $V_{uwa}$ ——地层水体积。

应指出的是，尽管斯伦贝谢公司的解释模型考虑了泥质和地层水双重贡献，但在实际应用中利用该模型计算的饱和度也只能作为参考。以中国石油为例，作为世界一流服务公司的斯伦贝谢公司每年在此类油气藏勘探尤其是重点探区重点探井的油气层发现和评价方面成功率都比较低。对于复杂储层这种岩性种类多、富含裂缝和孔洞尤其是网状缝发育的地层，储集空间变化类型大，岩石的导电机理十分复杂，含油性评价一直是尚未攻克的世界级难题。

综上所述，复杂岩性油气藏目前已逐渐成为油气勘探的主力对象之一，也越来越引起地质学家和岩石物理学家的重视。从测井评价的角度来看，以裂缝和孔洞为主要储集空间的复杂岩性油气藏勘探过程中，受取心和实验手段等客观条件的限制，对储层岩石物理实验研究的力度和手段明显欠缺，多数油田为解决生产所需，在重点探井中依赖昂贵的声电成像测井，在一般评价井中通常采用均质解释模型来识别和评价储层，精度和符合率均不能满足生产需求。因此研究基于常规测井资料的、适合此类非均值储层的双重孔隙解释模型具有重要的实际价值。以辽河盆地东部凹陷火成岩油气藏为主要靶区，从测井的角度和储盖组合的思路出发、以储层物性参数研究为重点，对火成岩油气藏进行测井评价正是为适应中国石油勘探生产疑难问题而设立的重点攻关项目，这也是本书的意义之所在。

## 第二节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价主要研究内容和特色

### 一、主要研究内容

#### 1. 火成岩岩石学研究

火成岩岩石学研究的领域很广，其主要研究目的是为了建立不同火成岩矿物测井响应模型，故首先要识别火成岩，进行火成岩岩石类型划分，开展火成岩岩石化学特征分析，研究工区大量岩心的全岩岩石分析，建立 TAS 图及硅碱图，研究火成岩主要岩石类型的氧化物含量特征，分析岩石化学特征。结合 X 衍射实验数据分析不同火成岩矿物测井响应模型。

#### 2. 火成岩测井储层敏感曲线筛选及火成岩测井岩性识别方法研究

基于不同岩石矿物测井响应的差别，研究利用测井曲线及交会图技术定量识别岩性的方法。

#### 3. 复杂储层特征研究

据大量的岩心观察和铸体薄片分析、扫描电镜分析、计算机成分分析等，揭示火成岩储层主要的储集空间类型，探讨储集空间的形成和演化模式；根据岩石力学实验分析工区裂缝的形成机理和发育特征；根据压汞实验和孔渗实验分析储层微观孔喉特征。在此基础上，研究各种岩石矿物骨架参数。

#### 4. 复杂储层物性参数计算方法研究

基于常规测井资料，以声电成像测井为标定，进行总孔隙度、基质孔隙度、裂缝孔隙度定量计算方法研究。

#### 5. 复杂储层含油饱和度计算方法研究

研究了在不同孔隙类型发育的情况下，地层因素与孔隙度之间的理论关系；在不同储层类型中电阻率指数与含水饱和度之间的理论关系；研究根据储层类型自动改变  $m$ 、 $n$  值的方法，建立适应多种储集类型的、全剖面处理计算含油饱和度的方法模型，并利用试油资料进行标定；探讨利用非电法测井及压汞实验计算饱和度的方法。

#### 6. 低孔低渗储层特征及测井响应

##### 1) 储层总特征

认真分析前人的研究成果，对地层、沉积相、岩石类型、成岩作用、孔隙类型、孔隙分布等基本情况进行总结，详细了解本区储层的基本特征。

##### 2) 不同类型储层测井响应特征

紧密结合岩心录井资料，仔细研究现有测井资料，利用多种方法建立反映储层非均质性 & 次生孔隙测井响应特征规律。

#### 7. 低孔低渗储层测井表征评价配套方法研究

苏里格气田属于低孔低渗气田，储层参数测井表征方法必须符合其特点，然而目前低孔低渗储层测井解释方法在很多方面沿袭了中高孔渗储层解释方法，为了更加精确表征本区储层特征，必须重点进行测井表征方法研究，建立一套适合苏里格气田储层测井表征方法。

#### 8. 低孔低渗储层分布规律预测研究

##### 1) 储层非均质性多参数计算

在储层测井表征方法研究基础上，精确计算苏里格气田储层砂体厚度、孔隙度、渗透率、次生孔隙厚度。确定单井、单层储层非均质性变化规律。

##### 2) 井间预测

根据苏里格地区现有 50 余口已钻探井，经过方法选择，选取最适合本区进行井间预测的方法，在本区进行井间预测，以确定本区储层非均质性在井间变化规律。

##### 3) 储层的空间分布特征

在单井储层参数计算、井点预测的基础上，完成本区储层空间分布特征的研究、储层分布范围研究以及分布规律研究。

## 二、主要特色

综合应用常规测井资料和高新技术测井资料相结合，对复杂储层的测井数字处理及解释理论和方法进行了深入的研究，成果已在火成岩、碳酸盐岩和泥灰岩中应用，取得了较好的经济效益和社会效益，主要特色是：

(1) 首次建立了复杂储层基于常规测井资料连续、定量计算总孔隙度、基质孔隙度和裂缝孔隙度的理论方法模型，突破了传统均质测井解释模型。解决了均质测井解释模型与复杂地质模型不相匹配的学科前沿难题。全面分析了高新科技测井和常规测井对复杂储层渗透性的表征能力。

(2) 应用理论模拟，半定量地研究了不同储集空间对导电性的影响，首次应用变  $m$ 、变  $n$  模型、自动根据储层类型选择饱和度模型的储层含油性评价理论和方法；建立了基于核磁共振测井计算含油饱和度的方法。



(3) 建立了利用岩心氧化物含量识别划分火成岩类型的图版, 采用 CIPW 方法定量计算火成岩中不同矿物的含量。

(4) 指出火成岩的蚀变程度影响储层物性, 提出利用电阻率与中子测井交会方法定性识别火成岩蚀变程度, 提出蚀变程度过高和过低均不易形成优质储层。

(5) 据岩石力学实验成果, 研究东部凹陷不同类型火成岩裂缝形成的难易程度, 论述了粗面岩为何在特定构造背景下最易形成裂缝、是东部凹陷油气富集高产的主要储层。

(6) 提出依据测井资料划分火山喷发期次的方法, 该方法指导储层评价取得了很好的经济社会效益。

(7) 应用核磁、成像测井信息分析, 提出了一系列低孔低渗储层定性和定量评价表征参数, 提出了判识不同类型复杂低孔低渗储层的识别标准及识别方法。首次建立了总孔隙度、有效孔隙度、次生孔隙度、微裂隙孔隙度等多种孔隙度定量计算方法, 以便进行不同孔隙类型储层的评价研究。

(8) 建立了强低孔低渗储层非均质性核磁测井孔隙结构性识别新方法, 提出核磁  $T_2$  谱中三个特征点是反映孔隙结构的重要参数: 不可动峰最小值反映最小喉道半径; 可动峰最大值反映最大孔隙半径; 可动峰与不可动峰之间鞍部曲率大小反映次生孔径的均匀度。

(9) 提出了低孔低渗储层含气饱和度计算参数  $m$  值随孔隙度减小而降低, 不同于正常砂岩  $m$  值随胶结程度增加 (孔隙度减小) 而增大的规律。给低孔低渗油气层测井解释评价提出了新的理论基础, 为阿尔奇公式在低孔低渗油气层解释评价中的应用提供了理论依据。

(10) 利用最新建立的石英砂岩测井识别标准, 识别了 40 口井石英砂岩储层厚度, 首次在苏里格气田做了石英砂岩厚度平面分布图, 界定了石英砂岩分布范围, 为寻找天然气富集区提供了科学依据。

### 第三节 复杂储层和低孔低渗储层测井评价原理和方法技术

复杂储层测井解释和评价的方法技术, 从岩心观察和描述入手, 建立不同岩性、不同储集空间储层的地质概念模型; 然后依据实验分析资料和测井资料, 研究能区分不同岩性灵敏的测井曲线, 建立利用测井资料解决岩性识别和矿物剖面的计算模型, 是测井解释的基础; 在获取准确的岩性剖面基础上, 建立适应非均质储层的岩石物理模型, 进行储层物性参数计算, 特别是裂缝发育程度的参数定量计算, 是测井解释的关键, 最后是含油性判别。复杂储层评价技术路线见图 1-1 所示。

#### 一、复杂储层岩性识别划分原理和方法技术

辽河盆地东部凹陷广泛发育了火成岩体, 它影响了碎屑岩的沉积及油气成藏, 还为火成岩油气藏的形成提供了物质基础。在东部凹陷进行了大范围的取样岩心观察、岩石薄片鉴定和岩石化学成分全分析。东部凹陷火成岩岩性非常复杂, 类型繁多, 主要岩性有粗面岩、玄武岩、凝灰岩、砂砾岩、泥岩及玄武质粗面岩和玄武质凝灰岩等, 还有安山岩、安山玄武岩、辉绿岩共计 11 种。对火山岩和火山碎屑岩, 应用全岩分析的元素数据, 以矿物学研究为基础, 建立划分各种岩性的图版; 首次提出用岩心氧化物含量定量划分火成岩岩性、用中子与深电阻率交会的方法识别了火成岩蚀变程度, 从而为储层识别和评价奠定了基础。进而研究该区块的不同测井曲线对岩性的灵敏度, 结合声电成像裂缝识别结果及试油试采等动态数据, 建立火成岩储层 3700 系列测井识别标准。