

复杂碎屑岩测井 岩石物理与处理评价

周灿灿 李潮流 王昌学 胡法龙 等著



FUZA SUIXIEYAN CEJING YANSHI WULI YU CHULI PINGJIA

石油工业出版社

复杂碎屑岩测井岩石物理 与处理评价

周灿灿 李潮流 王昌学 胡法龙 刘忠华 著
李长喜 程相志 李霞 宋连腾 徐红军

石油工业出版社

内 容 提 要

本书重点论述了以低孔低渗、致密砂岩为代表的复杂碎屑岩储层岩石物理研究新思路、新装备、新认识以及针对复杂碎屑岩储层的成像测井处理评价新方法,并结合相关典型区块介绍了这些方法的应用实例分析。

本书可供石油勘探测井专业技术人员、实验工程师、大专院校测井相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂碎屑岩测井岩石物理与处理评价/周灿灿等著.
北京:石油工业出版社,2013.10

ISBN 978-7-5021-9756-8

I. 复…

II. 周…

III. 碎屑岩-测井-岩石物理性质-研究

IV. P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 211885 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.pip.cnpc.com.cn

编辑部:(010) 64523736

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

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:22

字数:560 千字

定价:140.00 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

今年是中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所（以下简称测井遥感所）成立十周年。十年前，在我兼任勘探开发研究院院长时，考虑到油气勘探中测井专业不可替代的重要作用，再加上众多老专家的多年呼吁，终于在中国石油天然气集团公司的大力支持下成立了以测井专业为主的测井遥感所，专门从事油公司储层岩石物理和测井处理解释评价技术研发及软件研制。以此为基础，决心在勘探开发研究院打造中国石油的测井基础理论和方法研发中心，重点探井快速处理与精细解释评价中心，以及中国石油天然气股份有限公司测井管理的技术支持中心。

十年过去了，我非常欣喜地看到，测井遥感所的测井人才建设快速发展，研究能力显著提升，一支研究方向稳定、技术水平较高、思维活跃且具有一定影响力的复杂储层测井岩石物理研究与解释评价力量在我国石油界已经形成。完全可以说，当年组建这个研究所时期期望达到的目标已基本上实现了。十年来，测井遥感所依托国家油气重大专项、中国石油勘探工程技术攻关测井项目、勘探与生产分公司科技项目、科技管理部测井基础研究项目、勘探开发研究院院级项目，以及大量的油田现场解释评价研究项目，依托适时成立的中国石油测井重点实验室及其顶层自主设计委托加工制造的国际领先的岩石物理实验装备，在复杂碎屑岩、缝洞型碳酸盐岩、火山岩等领域潜心研究，并与有关油田、高校合作攻关，深层次的岩石物理实验与解释评价方法研究相继取得了一系列原创性的丰硕成果。

复杂碎屑岩是中国石油近些年增储上产的主体，测井遥感所的测井技术人员在这个领域紧跟勘探进程，投入了大量的研究力量。结合勘探需求，在以岩石物理为基础的测井理论、以测井新方法为重点的处理新技术、以油藏评价为核心的解释新方法、以成果有形化为目标的软件开发等方面都做了大量的卓有成效的工作，科研成果在很多油田的勘探实践中发挥了重要作用。这些好成果以前都散居于各个单项成果报告之中。今年正值测井遥感所成立十周年，技术人员将复杂碎屑岩的成果经过细心的梳理、提炼和升华，形成一本体系较为完整、基础较为扎实、同时又实用性很强的著作。作为向建所十周年的生日礼物，我认为是一件有利于测井专业，有利于石油工业，也有利于辛苦劳作的技术人员自己的好事情。

翻阅全书，真切地感受到研究人员针对低孔低渗碎屑岩、致密砂岩等复杂碎屑岩储层，在微观岩石物理特征、高精度实验测试与数值模拟、勘探开发过程中常用的阵列感应测井与成像测井、核磁共振测井、MDT测井资料处理解释新方法、储层品质与油气层识别评价等几个方面所做的艰苦努力和实实在在的进步。全书具有以下特点：

（1）充分考虑复杂碎屑岩特殊的孔隙类型、孔隙结构特征及其对测井岩石物理性质的显著影响，强调基础理论和机理认识，从高精度配套实验与数值模拟相结合的角度开展测井岩石物理基础研究，大力发展测井数字岩石物理技术，认清储层内在的影响机理，研发适用可操作的解释评价新方法。

（2）充分考虑到阵列感应、核磁共振、微电阻率扫描成像等测井新技术虽在国内应用了很多年，但多采用国外常规处理方法和流程，对复杂碎屑岩的适用性较差的现状，通过交

互式反演及新的处理解释方法研发与应用，努力全方位认识评价复杂碎屑岩储层，争取对测井信息做到吃干榨净。

(3) 充分考虑到低品位油气藏普遍需要压裂改造技术以提高产能的需求，在岩心资料刻度的基础上，努力研究适合于具体区块构造地质和油藏特征的储层机械弹性和地应力测井评价方法，对于指导压裂施工方案设计、评估储层改造效果、提高单井试油成功率具有重要意义。

(4) 还可以看到作者们努力将基础研究成果与重点探区应用相结合。针对近些年测井评价技术在渤海湾、鄂尔多斯等重点探区特低孔渗碎屑岩油气藏勘探中的不适应性，在储层微观特征和主控因素分析的基础上，提出并实践了分区块分层位图版研制、测井影响因素逐步剥离、电法测井与非电法测井信息联合应用、测井与录井信息互补应用、烃源岩与储层品质配套应用的全新思路，有效解决了测井评价难题，为提高相关区块解释符合率发挥了关键作用。

我认为，本书系统地介绍了在该领域近年来的最新研究成果，论述过程深入细致，并结合具体实例阐明了技术应用的范围和效果。希望测井遥感所的碎屑岩测井研究团队今后能够以本书的成果为基础继续深化和扩展，把研究领域更加集中于以致密油气为代表的非常规资源，更加强调适应复杂碎屑岩储层的实验、采集精度和非常规的测井综合评价思路，切实持续发挥好测井技术作为地质家“眼睛”的重要作用。也希望从事测井处理解释和油气层评价的技术干部、岩石物理实验工程师以及油气勘探领域的地质与油藏研究技术干部能够仔细阅读了解本书，真正把相关成熟经验运用到日常工作中。

中国科学院院士： 

2013年9月

前言

“十一五”以来，中国石油的油气勘探主体对象逐渐转向以特低孔渗、致密砂岩、泥页岩等复杂碎屑岩储层。此类储层因孔隙结构极为复杂、孔隙空间体积小而导致其岩石物理特征与常规中高孔渗碎屑岩储层差异显著，测井响应信噪比降低，主要针对常规砂岩储层而设计的岩石物理实验与储层解释评价方法的适应性和精度正面临巨大挑战。与此同时，为满足复杂碎屑岩油气藏地质研究和评价需求，以高精度成像测井为代表的测井新技术被不断引入勘探生产中，深化复杂碎屑岩储层成像测井处理解释评价方法研究也成为测井科技工作者的当务之急。

基于上述原因，从“十一五”中期开始，国家专门设立油气重大专项，中国石油也通过测井攻关、基础研究等配套项目，在全国范围内组织优势力量围绕复杂碎屑岩储层岩石物理与测井处理评价方法等内容开展攻关。作为中国石油的一支重要研究力量，中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所一直全过程组织或参与此项工作，碎屑岩测井研究室、中国石油测井重点实验室在相关领域持续多年开展配套技术攻关研究，相继取得了一批具有重要理论价值和生产实效的成果。为庆祝测井遥感所建所十周年，笔者将这些成果进行提炼、整理出版。

本书重点总结了近年来测井遥感所在复杂碎屑岩领域的研究成果，从基础实验方法与工艺、测井响应机理、地质与储层信息提取、典型油气藏综合评价案例分析等几个角度，全面介绍了研究团队在复杂碎屑岩测井岩石物理特征与分析方法、核磁共振与阵列感应等成像测井资料处理解释新方法、复杂碎屑岩储层品质与流体识别新方法等方面的研究思路、研究成果与经验体会。虽然笔者对这些内容的广度和深度方面还感到有些不足，但值得欣慰的是，本书介绍的相关成果已在渤海湾、鄂尔多斯、吐哈、塔里木、四川及海南福山凹陷等盆地和区块得到了不同层次的试验与规模应用，取得了一系列发明专利和软件著作权，并在核心期刊发表了一批具有重要学术价值的论文，为提高重点勘探区块的油水层识别符合率及储量参数研究精度、加快复杂油气藏勘探进程发挥了重要作用，得到了相关油田的肯定和表扬。为满足需要，将这些成果进行了总结提炼，整理成书正式出版，以供同行共享经验与体会。

特别要强调指出的是，多年来中国石油勘探与生产分公司刘国强教授给予课题组大量的技术指导，李国欣处长、陆大卫教授、金鼎高级主管等领导和专家给予持之以恒的关心和无私帮助，这是碎屑岩研究团队取得成绩的基石和保障。

本书在测井遥感所周灿灿所长的组织和指导下，首先确定框架与提纲，然后分工编写，最后统稿定稿。具体章节编写分工如下：前言由李潮流完成，第一章由周灿灿、李潮流、李长喜、胡法龙、王克文、李霞、徐红军和俞军共同完成，第二章由王昌学完成，第三章由胡法龙、李潮流、刘忠华、李长喜完成，第四章由李潮流完成，第五章由王昌学完成，第六章由李潮流完成，第七章由程相志、宋连腾、刘忠华、李长喜、李霞和李潮流完成。全书由李潮流负责统稿，最终由周灿灿定稿。曾富强、张莉、孔强夫等参加了研究和整理出版工作。长庆油田勘探开发研究院石玉江总工程师及张海涛、周金昱、李高仁、杨小明、郭浩鹏，华

北油田勘探部沈华副经理及李拥军、成捷，华北油田勘探开发研究院测井室周明顺主任，渤海钻探测井公司柴细元副经理及邵维志、丁娱娇，冀东油田勘探开发研究院周凤鸣副院长及司兆伟、徐凤、张建林、田超国，塔里木油田肖承文高级专家，吐哈油田勘探公司刘东付副经理及杜向荣、韩成，南方勘探开发公司研究中心刘菊主任、张梅珠副主任等领导和专家、同行给本书的出版提供了大量宝贵的资料和建议，在此一并表示感谢。

本书是一部理论性和实践性强、信息量丰富的专著，适合于测井专业技术人员和岩石物理实验工程师、地质勘探综合研究人员及地质、石油类院校的师生阅读参考。由于复杂碎屑岩，特别是致密砂岩等复杂储层的勘探评价仍处于攻关研究过程中，认识还有待进一步深化完善，加之笔者水平有限，书中肯定存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 复杂碎屑岩岩石物理特征与分析方法	(1)
第一节 复杂碎屑岩储层岩石物理与测井响应特征	(1)
一、复杂碎屑岩储层岩石物理特征分析	(1)
二、复杂碎屑岩储层测井响应特征分析	(7)
第二节 复杂碎屑岩储层岩石物理实验新装备	(10)
一、高温高压岩石电学和毛细管压力联测系统	(11)
二、高温高压驱替状态核磁共振测量系统	(14)
三、储层条件下岩石弹性参数测量系统	(16)
第三节 复杂碎屑岩储层孔隙结构与物性分析	(18)
一、利用 CT 扫描图像分析孔隙结构	(18)
二、复杂碎屑岩储层物性影响因素分析	(23)
第四节 复杂碎屑岩电性响应特征模拟与饱和度计算	(26)
一、毛细管压力与电阻率联测实验及数据分析	(26)
二、基于孔隙格架的电阻率响应模拟	(29)
三、复杂碎屑岩油气层饱和度计算模型	(31)
第五节 复杂碎屑岩核磁共振实验与模拟分析	(37)
一、多孔介质中核磁共振响应原理	(37)
二、多孔介质中流体的核磁共振响应数值模拟	(38)
三、复杂碎屑岩样品核磁共振岩石物理实验	(39)
四、基于孔隙格架的核磁共振响应模拟方法	(42)
第六节 复杂碎屑岩储层润湿性分析	(47)
一、储层岩石的润湿性	(47)
二、润湿性对岩石物理性质的影响	(47)
三、润湿性实验分析方法	(48)
第二章 阵列感应测井反演处理新方法	(53)
第一节 阵列感应测井及常规反演方法	(53)
一、阵列感应测井 HDIL 特性	(53)
二、阵列感应测井数据处理	(54)
三、阵列感应测井常规反演方法	(60)
第二节 井眼环境对阵列感应测井响应的影响分析	(62)
一、阵列感应测井二维数值模拟方法	(62)
二、阵列感应测井三维数值模拟方法	(65)
三、井眼环境对 HDIL 测井响应的影响分析	(68)

第三节 阵列感应测井适用性分析	(82)
一、砂泥岩剖面 HDIL 适应性分析	(83)
二、钻井液侵入条件下 HDIL 测井响应特征	(93)
第四节 阵列感应测井交互式反演方法	(104)
一、电阻率测井一般反演方法的局限性	(104)
二、阵列感应测井交互式反演	(107)
第五节 阵列感应—双侧向测井联合约束反演	(113)
一、阵列感应测井单独交互式反演的局限性	(113)
二、交互式联合约束反演的实现	(114)
三、联合反演实例	(114)
第三章 核磁共振测井处理与碎屑岩孔隙结构评价方法	(119)
第一节 核磁共振测井与常规反演方法	(119)
一、核磁共振测量原理	(119)
二、核磁共振测井数据常规处理方法	(125)
第二节 核磁共振孔隙结构评价新方法	(128)
一、孔隙结构实验表征方法	(128)
二、利用测井资料表征孔隙结构的方法	(130)
三、Delta 模型评价储层孔隙结构	(133)
四、核磁共振多分量谱系数计算渗透率	(136)
第三节 核磁共振测井—一维流体识别方法及适用性分析	(139)
一、双 T_w 法	(140)
二、双 T_E 法	(142)
三、双 T_w 和双 T_E 方法适用性分析	(144)
第四节 MRIL - Prime 型核磁共振测井仪器二维核磁共振测井采集与处理解释	(148)
一、二维核磁共振测井原理	(148)
二、二维核磁共振测井数据反演方法	(150)
三、不同流体二维核磁共振响应模拟	(150)
四、二维核磁共振流体分布特征	(152)
五、MRIL - Prime 型核磁共振测井仪器二维核磁共振测井实例	(152)
第四章 微电阻率扫描成像测井处理与深化应用	(155)
第一节 微电阻率扫描成像测井资料处理方法	(155)
一、微电阻率扫描成像测井常规处理方法	(155)
二、微电阻率扫描成像测井坏极板的校正处理	(158)
三、图像的进一步增强处理	(160)
第二节 碎屑岩岩性信息提取与沉积微相分析	(161)
一、根据图像提取碎屑岩岩性剖面的方法	(161)
二、方法应用与实例分析	(165)
第三节 利用微电阻率扫描成像测井定量评价碎屑岩储层非均质性	(171)
一、储层非均质性的研究内容与规模	(172)

二、基于图像的储层非均质程度评价方法	(172)
三、利用微电阻率扫描成像测井定量评价碎屑岩储层各向异性	(177)
第四节 基于沉积模式的古水流分析方法	(181)
一、利用测井信息判识古水流的方法原理	(181)
二、古流向判识方法的应用实例	(186)
第五章 模块式地层动态测试器测井解释评价方法	(194)
第一节 模块式地层测试器基本工作原理	(194)
一、电缆地层测试技术发展历程	(194)
二、MDT 的主要模块构成	(195)
第二节 MDT 测试质量分析与测前设计	(198)
一、MDT 测井适用性分析	(198)
二、MDT 测井测前设计	(202)
第三节 MDT 测井资料处理与评价方法	(207)
一、压力梯度计算方法	(207)
二、单探针测试储层渗透率计算方法	(208)
第四节 根据 MDT 测井预测产能的方法原理与应用	(219)
一、储层产能的概念	(220)
二、确定井底流入曲线 (IPR)	(220)
三、确定产能预测模型的参数	(222)
四、确定油井举升曲线 (VLP)	(227)
五、产能预测的参数敏感性分析	(233)
六、计算实例分析	(237)
第六章 测井岩石力学评价方法	(240)
第一节 岩石弹性力学基础与测井评价方法	(240)
一、应力与应变	(240)
二、弹性模量的定义	(242)
三、动态弹性模量测井计算模型	(244)
四、横波拟合	(245)
第二节 地应力测井计算方法	(246)
一、地应力的概念	(246)
二、垂向地应力计算	(246)
三、水平应力计算	(248)
第三节 岩石的破裂理论与破裂压力计算	(250)
一、井壁附近岩石的破裂理论	(250)
二、岩石破裂压力计算方法	(252)
三、钻井液密度窗口	(256)
四、破裂压裂参数的转换	(257)
第四节 碎屑岩储层压裂高度测井预测方法	(259)
一、水力压裂造缝机理	(259)

二、裂缝的应力强度因子理论	(260)
三、岩石的断裂韧性 K_{IC}	(260)
四、裂缝延伸准则	(261)
五、压裂缝高监测方法	(261)
六、应用效果分析	(262)
第七章 复杂碎屑岩油气藏测井评价实例	(269)
第一节 歧口凹陷中深层复杂碎屑岩储层下限与流体识别评价	(269)
一、歧口凹陷地质概况	(269)
二、歧口凹陷储层特征概述	(270)
三、歧口凹陷中深层油气层岩石物理与测井响应特征	(274)
四、歧口凹陷复杂碎屑岩储层下限标准	(277)
五、歧口凹陷复杂油气层识别方法	(281)
六、DPM 饱和度模型的应用	(289)
第二节 福山凹陷复杂碎屑岩油气层识别与评价	(294)
一、福山凹陷地质概况与测井评价难点	(294)
二、福山凹陷储层岩石物理特征	(296)
三、福山凹陷储层下限与测井分类方法	(299)
四、福山凹陷油气层识别与饱和度计算	(305)
第三节 姬塬—白豹地区复杂碎屑岩油藏含油富集区测井评价	(315)
一、区域地质概况	(315)
二、多井测井资料标准化	(318)
三、储层参数精细解释与多井评价	(323)
四、利用测井资料计算烃源岩有机碳含量	(326)
五、源储配置关系测井评价及有利富集区优选	(329)
参考文献	(334)

第一章 复杂碎屑岩岩石物理特征与分析方法

随着国内油气勘探的不断深入,在常规的中—高孔隙度、渗透率砂岩中发现大型油气藏的可能性变得越来越小,对当前油气储量和产量增长贡献最主要的是以特低孔隙度、渗透率为典型特征的复杂碎屑岩储层。以鄂尔多斯盆地为例,根据常温常压下实验测量的空气渗透率对储层进行分类,复杂碎屑岩储层包括特低渗储层(1.0~10.0mD)、超低渗储层(0.30~1.0mD)和致密砂岩储层($<0.3\text{mD}$)。

在中国石油天然气集团公司(以下简称中国石油)矿权区内,复杂碎屑岩储层主要分布在鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地大川中地区侏罗系、塔里木盆地大北—克深地区白垩系、松辽盆地南部深层、渤海湾盆地歧口凹陷中深层沙河街组、吐哈盆地三塘湖地区芦草沟组。本章主要分析此类复杂碎屑岩储层的岩石物理特征,针对其实验分析难题讨论相应的解决方案及岩石物理新方法、新装备,详细介绍近期针对复杂碎屑岩储层测井岩石物理研究的最新进展。

第一节 复杂碎屑岩储层岩石物理与测井响应特征

一、复杂碎屑岩储层岩石物理特征分析

(一) 孔隙结构特征

储层孔隙结构与储层的储集性能和物理特性密切相关。在复杂碎屑岩储层中,孔隙类型、孔隙尺寸大小及匹配关系等孔隙结构特征分析和评价尤为重要,其典型特点是储集空间以次生溶蚀孔隙为主,孔隙类型多样,原生粒间孔分布少。因此,致密砂岩储层与以原生粒间孔为主的常规中高孔渗储层在岩石物理特征和渗流特征等方面有明显差异。

以吐哈盆地巴喀油田下侏罗统致密砂岩气藏为例,储层的主要孔隙类型为溶蚀作用形成的长石溶孔和岩屑(花岗岩岩屑)溶孔,孔隙结构复杂(图1-1-1),在致密砂岩储层中溶蚀作用对物性改善起着十分重要的作用。

对于山前带受强挤压作用的致密砂岩储层来说,高岩屑含量砂岩受到挤压导致储层物性变差、孔隙结构复杂,普遍致密。在挤压过程中的机械破碎作用产生的微裂缝对储层的改善起着极其重要的作用,一方面提供了储集空间,另一方面沟通了不连通的孔隙(图1-1-2),控制着有利储层的发育。

岩心恒速压汞实验反映复杂碎屑岩储层普遍具有喉道细微、孔喉比大、孔隙结构差的特点。如图1-1-3所示,在孔隙度 ϕ 为5.49%、渗透率 K 为0.05mD时,其喉道半径峰值为0.6 μm ,而孔喉比为200~300,反映储层孔隙连通性较差。

勘探实践表明,储层孔隙空间大小和裂缝发育程度及其配置关系对储层品质与储层有效性具有明显的控制作用。图1-1-4为吐哈盆地巴喀油田下侏罗统致密砂岩气藏试气结果与储层品质关系。由图可见,对应 $\phi>6\%$ 的区域为I类有效储层(铸体薄片显示孔隙较发育、

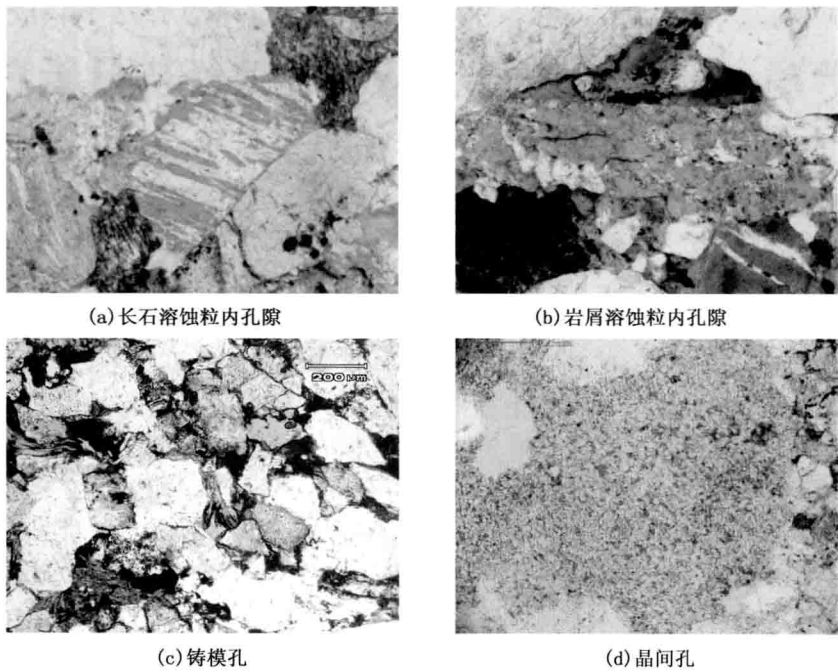


图 1-1-1 复杂碎屑岩储层典型的储集空间类型

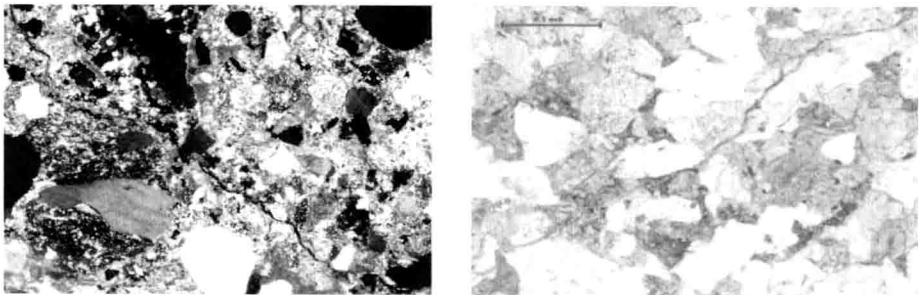


图 1-1-2 吐哈盆地巴喀油田下侏罗统含微裂隙储层薄片

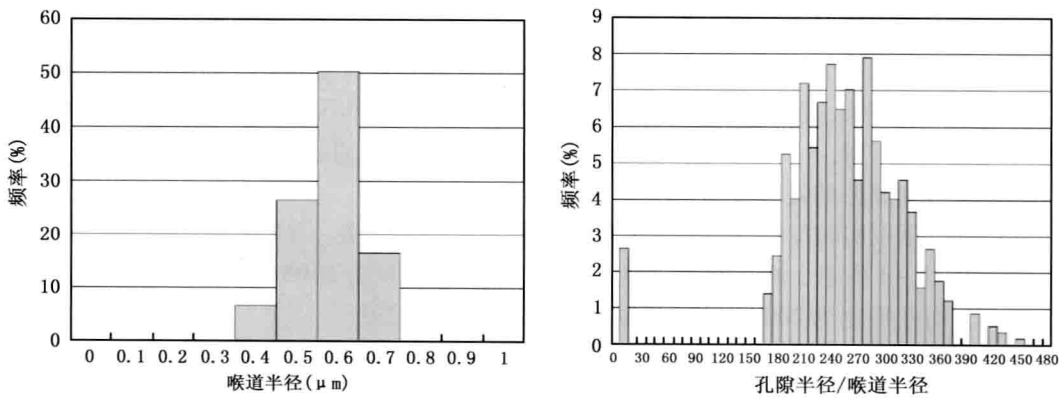


图 1-1-3 岩心恒速压汞实验确定的喉道半径和孔喉比 ($\phi=5.49\%$, $K=0.05\text{mD}$)

连通性较好)，均可获得工业产能； $\phi = 3\% \sim 6\%$ 的区域试气结果差别很大，裂缝是否发育是决定储层产能的必要因素，若裂缝（微裂隙）发育，则储层具有产能，为有效储层（铸体薄片显示微裂隙和穿粒缝改善了孔隙之间的连通性），若裂缝（微裂隙）不发育，储层基本不具有产液能力，为低产层或干层（铸体薄片显示孔隙连通性较差）； $\phi < 3\%$ 的区域为干层（铸体薄片显示孔隙孤立、不连通）。Ⅱ类储层中裂缝（微裂隙）的发育程度是决定产能的关键。实验分析和试气结果均表明孔隙空间和裂缝发育程度及其匹配关系是致密砂岩气储层品质的主要控制因素。

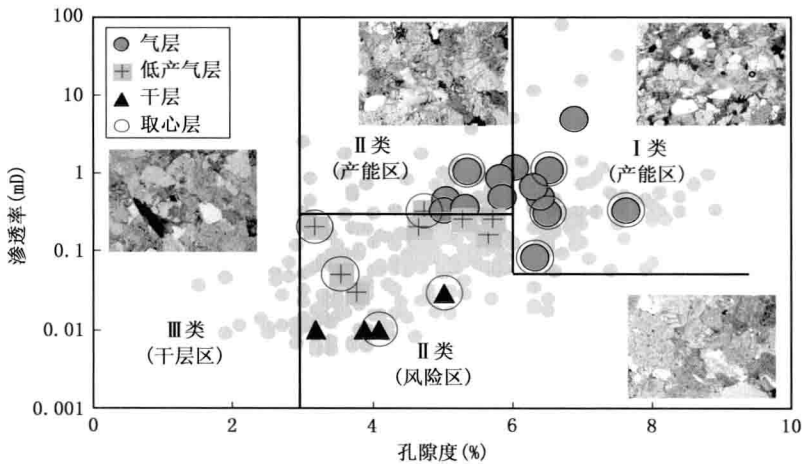


图 1-1-4 吐哈盆地巴喀油田下侏罗统致密砂岩储层分类图版

(二) 电性特征

大量研究表明，在复杂砂岩储层中，孔隙结构不仅影响储层的渗透性，而且对电性也具有重要影响，表现为具有相近孔隙度、相同流体性质饱和条件下的储层电阻率可能差别很大，这给以电阻率为核心的流体识别技术带来很大挑战。因此分析孔隙结构的影响规律对于油气层测井识别评价具有重要意义。

图 1-1-5 是鄂尔多斯盆地白豹地区长 6 段 14 块样品、渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组沙二至沙三段 26 块样品的饱和盐水的电阻率 R_0 与根据岩心核磁共振和压汞实验分析确定的平均孔喉半径比 τ 的关系图版，其中 τ 的定义式为：

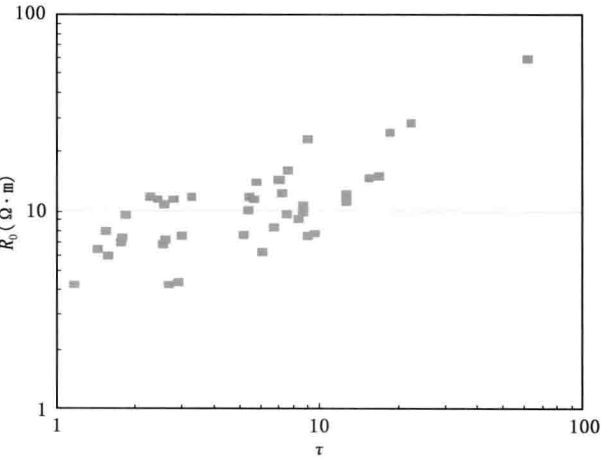


图 1-1-5 R_0 与 τ 的实验关系分析

$$\tau = \frac{R_{50\text{核磁}}}{R} \tag{1-1-1}$$

式中 $R_{50核磁}$ ——根据横向弛豫时间 (T_2) 谱转换的累积频率曲线上 50% 对应的孔喉半径;
 $\bar{R}$ ——压汞实验提供的平均喉道半径。

随着 τ 值增大, 储层喉道成相对变细的趋势, 导电路径趋于复杂化, 因此 R_0 呈增大的趋势, 但数据点存在明显的发散, 主要原因是 40 块样品的孔隙度不同, 不同区块样品的孔隙结构也存在差异。

为进一步深入分析 τ 对低孔低渗储层电阻率的影响, 从上述 40 块样品中选取同一区块、孔隙度相近的样品进行对比分析, 结果如图 1-1-6 所示。

图 1-1-6 (a) 是来自歧口凹陷深层沙河街组样品的实验数据, 饱和 12000mg/L 盐水在室温条件下测量其 R_0 值; 图 1-1-6 (b) 是来自白豹地区的样品实验数据, 饱和 50000mg/L 盐水在相同条件下测量 R_0 值。可以看出, 储层电阻率受 τ 影响明显。一方面, 随着 τ 值增大, 大孔细喉电阻率较高, 粗喉道则具有较好的导电能力、较低的电阻率。另一方面, 在相近孔隙度下, 随着 τ 值减小, 喉道相对变粗, 渗透性和导电能力均增强, 岩石电阻率降低, 并且低孔隙度岩样的变化规律更为明显。

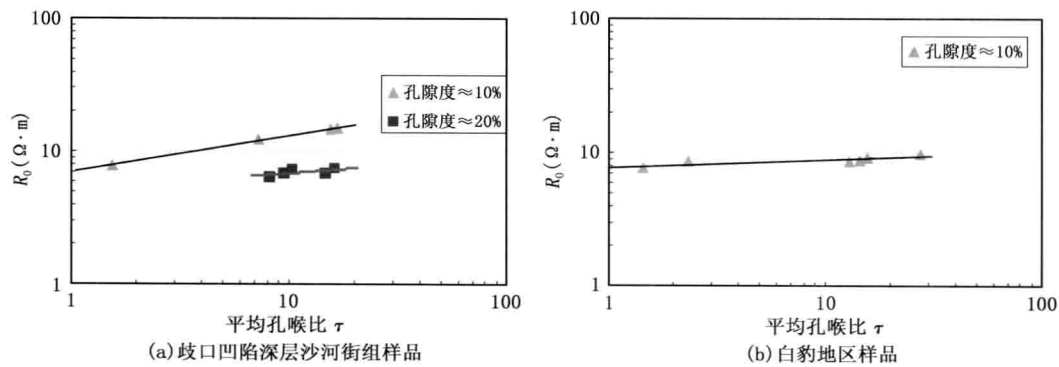


图 1-1-6 不同地区相近孔隙度的样品 τ 值影响 R_0 的关系图版

图 1-1-7 是考察 τ 对电阻增大率 I 的影响规律, S_w 为含水饱和度。可以看出, 在储层饱和度相近的情况下, 由于其孔喉比的差异, 细喉道 (τ 值高) 的储层电阻增大率呈降低的

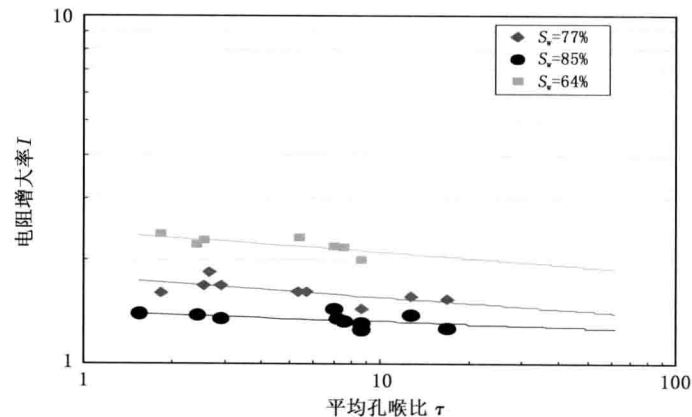


图 1-1-7 τ 对 I 的影响规律分析

趋势，这可能主要是由于微细喉道中饱含的束缚水导电而引起的。

通过对多个盆地不同区块、不同层位的复杂碎屑岩储层岩电实验结果统计表明，其地层因数 F 与孔隙度关系在双对数坐标系中呈非线性关系，为非阿尔奇（Archie）曲线特征。图 1-1-8（a）为长庆油田上古生界储层地层因数 F 与孔隙度 ϕ 关系图。由图可见，在孔隙度为 13% 附近 F 与 ϕ 变化关系有一明显拐点。 $\phi > 13\%$ 时数据分布较集中，曲线斜率较大； $\phi < 13\%$ 时数据点较分散，斜率变小。图 1-1-8（b）为塔里木油田志留系储层 $F-\phi$ 关系图版，变化趋势更复杂，且在孔隙度为 10% 附近 F 与 ϕ 变化关系出现拐点。

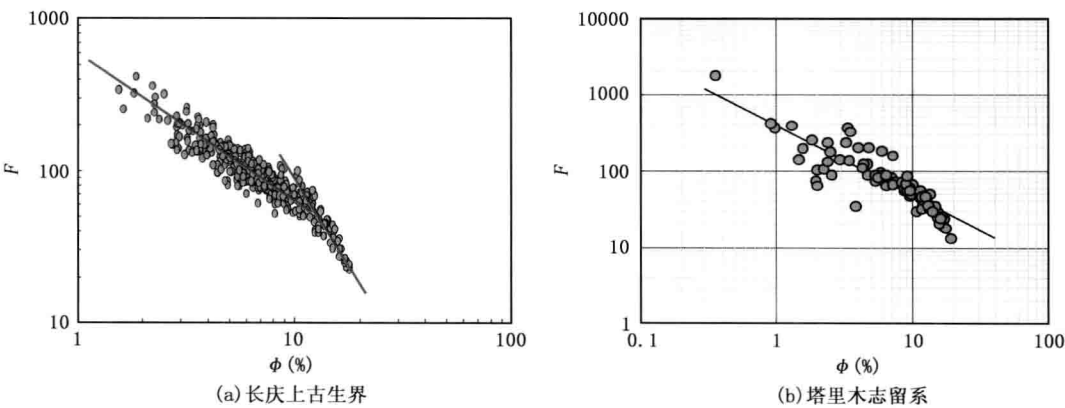


图 1-1-8 F 与 ϕ 的关系

根据不同孔隙类型岩石电学性质特征（图 1-1-9），地层因数和孔隙度关系可分为以下几类：

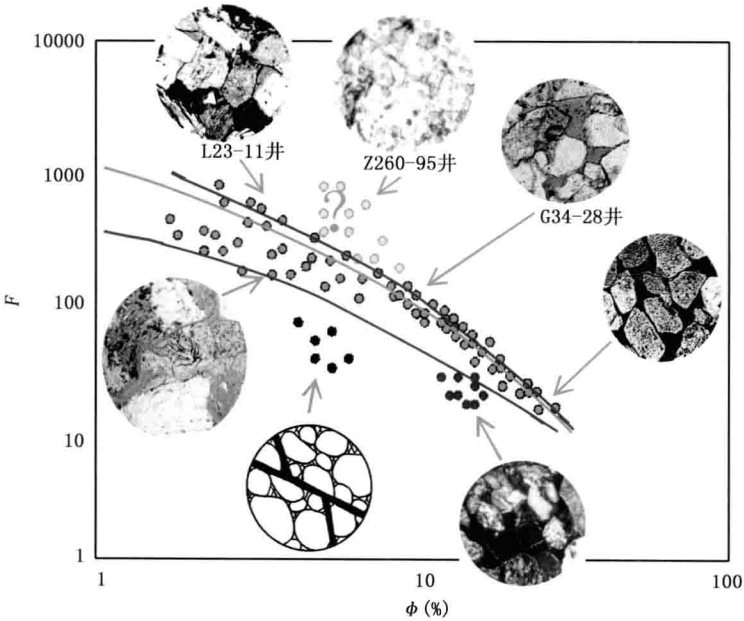


图 1-1-9 不同孔隙类型砂岩储层岩石电学性质示意图

- (1) 中高孔渗粒间孔隙储层：电学性质可应用阿尔奇模型及其改进形式等描述；
- (2) 中高孔渗泥质砂岩储层：电学性质可应用 W—S 模型、双水模型等描述；
- (3) 低孔低渗次生孔隙发育储层：电学性质复杂；
- (4) 裂缝—孔隙型砂岩储层：电学性质具有各向异性特征，无成熟模型描述。

(三) 含油气饱和度分布特征

根据储层地质研究结果，油气储层孔隙可分为毫米级孔、微米级孔和纳米级孔三种类型。以致密砂岩为例，我国非常规油气储层研究结果表明，纳米级孔是致密砂岩储层连通储集空间的主体。与中高孔渗砂岩储层相比，致密砂岩储层孔喉特征差异主要体现在喉道上，喉道更细微，分布范围窄，主要集中在小于 1 μm （纳米级）的范围内，毛细管阻力大，但是在近源成藏、源储共生的成藏背景下，烃源岩长期持续高压充注使其仍可以具有较高的含油气饱和度，因此，储层含油气的临界孔喉半径和最大含油气饱和度对资源潜力评价至关重要。根据邹才能等人的研究结论，致密砂岩气储层临界孔喉半径为 40nm，致密砂岩油储层临界孔喉半径为 54nm。根据这一孔喉半径下限结果结合吐哈盆地巴喀油田恒速压汞实验分析的孔喉半径分布，可计算出不同类型致密砂岩气层临界孔喉半径对应的储层最大理论含气饱和度分别为 56.3%、42.1%、21.5%。根据相渗实验确定的不同类型储层束缚水饱和度可获得致密砂岩气层的含气饱和度理论下限值分别为 43%、36%、22%，如图 1-1-10 所示。

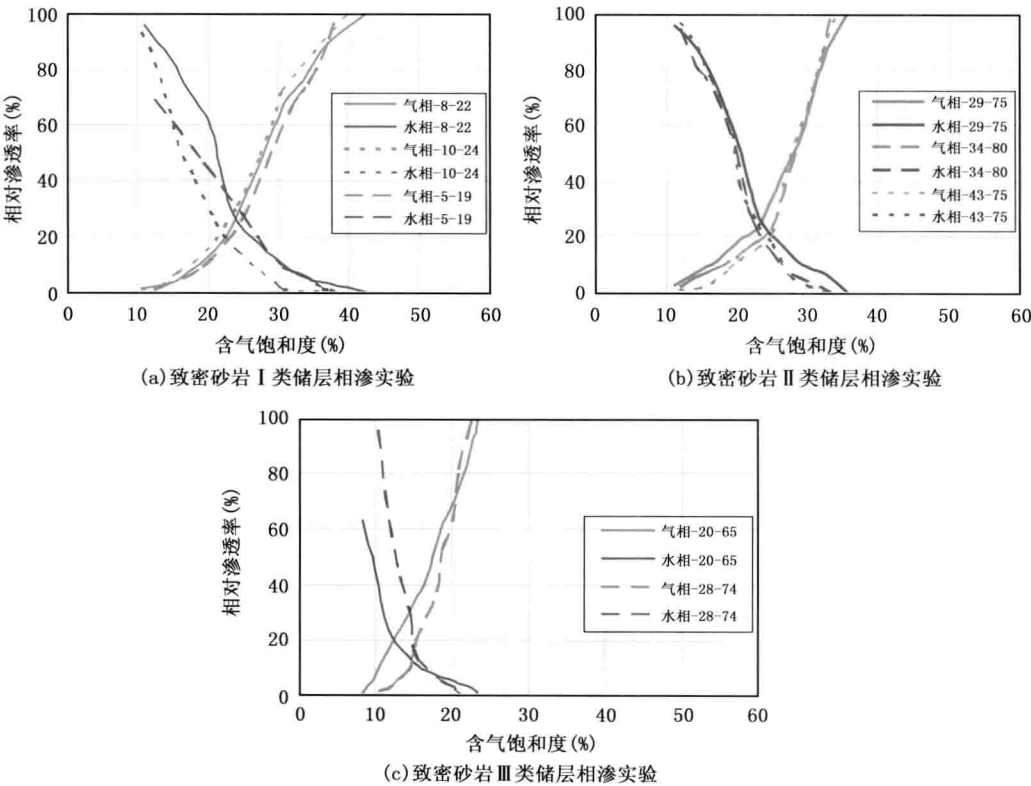


图 1-1-10 应用相渗实验确定吐哈盆地水西沟群致密砂岩气层含气饱和度下限