

电缆地层测试器测井应用综述

王向荣^{1,2}, 周灿灿², 王昌学², 曹文莉³

(1. 中国矿业大学(北京)资源与地球科学系, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所, 北京 100083;

3. 华北油田分公司勘探开发研究院, 任丘 062551)

摘要 电缆地层测试器能提供地层动态的压力、温度、流体性质等信息, 因而在油气勘探开发中得到广泛应用. 本文从流体取样、压力测量、温度测量等多个方面系统介绍了电缆地层测试器的功能和测井应用并进行了现场实例剖析, 这对于全面了解电缆地层测试器的功能, 认识其应用上的局限性, 从而合理应用其测井资料具有指导意义.

关键词 电缆地层测试器, 流体, 取样, 压力, 温度, 应用

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)05-1579-07

Review on application of the wireline formation tester

WANG Xiang-rong^{1,2}, ZHOU Can-can², WANG Chang-xue², CAO Wen-li³

(1. *China University of mining and technology(Beijing), School of Resource and geoscience, Beijing 100083, China;*

2. *Department of Well Logging and Remote Sensing Technology, Research Institute of Petroleum Exploration and Development of China, Beijing 100083, China;*

3. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Huabei oilfield, Renqu 062552, China)*

Abstract The wireline formation tester is widely used in oil exploration and development which can provide the formation information including dynamic pressure, temperature and fluid propriety. Its functions and applications in fluid sampling, pressure measuring, and temperature measuring are systematically introduced, and some field cases are analyzed. These are of guidance to know fully the functions of the wireline formation tester, realize the limits in application and make use of the data reasonably.

Keywords the wireline formation tester, fluid, sampling, pressure, temperature, application

0 引言

自 20 世纪 50 年代发展起来的电缆地层测试技术已日益成为石油勘探开发中地质家和工程师们所重视的一种测井手段. 目前国内所应用的电缆地层测试器如斯伦贝谢公司(Schlumberger)的第三代仪器-模块式电缆地层动态测试器(MDT)^[1]、阿特拉斯公司(Atlas)的地层多次测试器(FMT)^[2,3]以及哈里伯顿公司(Halliburton)的油藏描述仪(RDT)^[4]等仪器已具有连续测压、进行实时光学流体性质分析以及常规取样和 PVT 取样等功能, 并可根据测试资料计算地层渗透率和目的层流体密度等物理参数^[5,6], 从而能直接、快速、准确判别地层流体性质和帮助进行油藏综合评价^[7,8].

虽然电缆地层测试技术已大量应用于石油的勘探开发, 但无论是从深度和广度上有很多因素限制了这种技术的广泛应用^[9], 主要体现在: ①只肤浅地停留在其对地层流体性质的直接识别上, 没有深入分析它在地质成因、油藏评价以及工程技术等方面广泛和深入的应用^[10]; ②只认识到它的测压和油水判别功能, 而忽视了其温度测量、流体组分分析等功能^[11~13]; ③在油藏勘探开发不同阶段上广泛而合理的应用; ④电缆地层测试器测井的性价比, 可能现场工程师认为其单井测量成本很高而不愿大量应用; ⑤电缆地层测试器测井的适用性^[14]. 因此, 全面认识电缆地层测试器的功能, 分析其应用上的局限性, 正确而合理地应用其测井资料对于广大工程技术人员显得非常迫切.

收稿日期 2007-10-25; 修回日期 2007-12-20.

作者简介 王向荣, 女, 1969 年生, 黑龙江大庆人, 博士, 高级工程师, 在中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所从事测井和油藏研究. (E-mail: wangxr-1@163.com)

1 流体取样的应用

1.1 确定可疑层流体性质

应用电缆地层测试器流体取样技术,可以比较准确地确定可疑层流体性质,识别常规测井所无法识别的油气层,提高复杂油气层解释符合率,扩大勘探领域.

图1为冀东油田XX1井常规测井曲线图.图中B层(2383.2 m)电阻率曲线呈高阻特征,在钻井过程中也有较好的油气显示,可能是一油气层;C层电阻率值较低,钻井过程中无油气显示,表现为水层特征;A层(2349.8 m)与C层(2435.0 m)电阻率相当,但相关资料表明A层与B层物性相当,且在钻井过程中有一定油气显示.可见,A层是水层还是油气层,仅凭录井资料和常规测井曲线难以确定.为了确定A层的地层流体性质,采用了电缆地层测试器流体取样技术.经对这三个层的流体实时分析结果表明:A层和B层具有明显的油气特征,是油气层;而C层仅有一定溶解气特征,综合解释为含水层.这说明A层为一套低阻油气层.

而由于试油工艺及费用等方面的原因,不可能对每个可能的油气层进行试油,只能从中选择可能

较好的几个层进行试油求产.由于常规测井解释的多解性,常常漏掉真正的油气层而对非油气层进行试油,从而增加了勘探成本、延长油气勘探的周期.电缆地层测试器测井技术具有直接识别地层流体性质的特性,其施工工艺相对简单、快捷,可以在较短的时间内对多个层位进行测试,并能够给出比较准确可靠的结果^[15].

因此,电缆地层测试器测井技术的应用,对于快速发现油气层、优选试油层位、提高试油效率、加快油气勘探周期具有重要意义.

1.2 证实流体性质,替代试油,节省成本

在常规测井解释不是明显油层的层段,经电缆地层测试器测试证实为水层的,可以肯定不需下套管或减少下套管的深度^[16],从而提高施工效率,大大节约施工成本.

1.3 进行地层流体组分分析,减少套管损害

对气区取样进行气组分化验分析,可以掌握各类烃组分的含量以及是否存在异常的重金属元素,对设计开采方式和预防管线腐蚀具有意义.

1.4 分析流体各种参数,为后续数据处理提供真实依据

通过对地层流体进行取样,分析地层水矿化度,

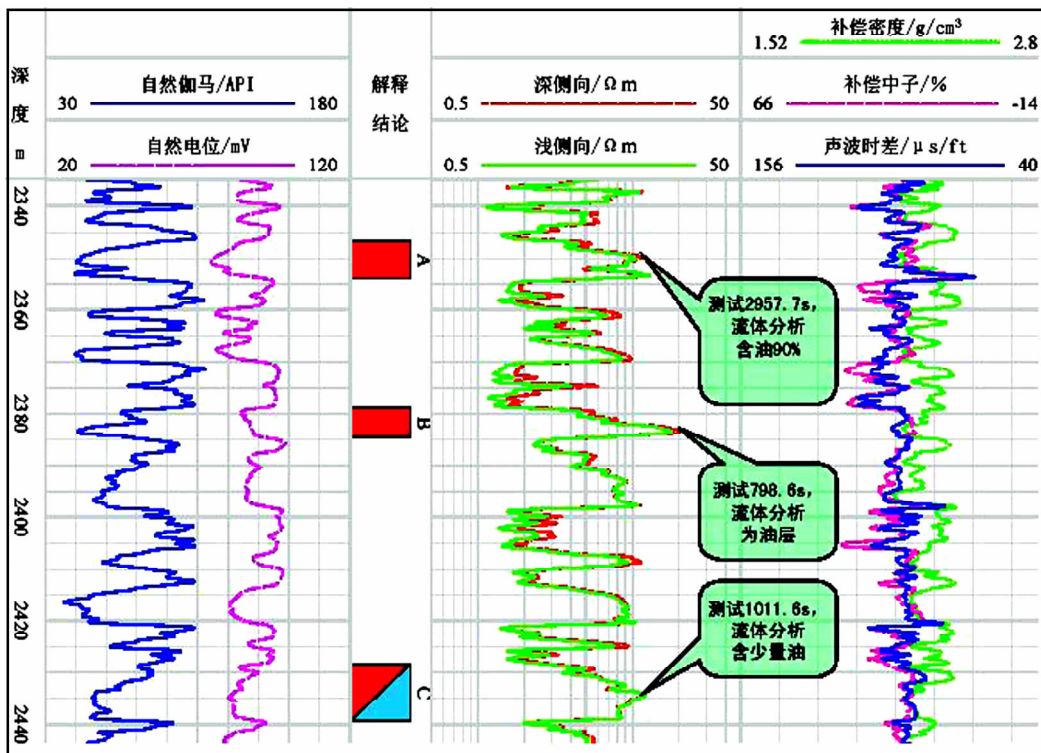


图1 冀东油田XX1井MDT流体分析和常规测井曲线图

Fig. 1 MDT fluid analysis and conventional logging curve at XX1 well of Jidong oil field

对常规测井解释模型和水淹解释模型进行改进,可提高解释符合率^[17,18].

对污染程度(如油基泥浆)的准确识别和提供给油藏评价非常重要的参数:气油比(GOR)^[19,20].

2 压力测量的应用

MDT 可以测量地层压力传播数据,估算地层压力的分布,鉴别油藏中的可动流体,评价油气水的接触界面;研究纵向上油层压力分布,确定高压异常层,指导套损预防措施;确定油层连通状况,结合多井地层对比,进行油藏评价等多方面压力测量的应用^[21,23].

2.1 研究可疑层流体性质,确定油水界面^[24~26]

图 2 是冀东油田南堡凹陷 NPXX1 井一井段 MDT 测压和常规测井解释成果图,图中第一道和第二道分别叠加上 MDT 地层压力测量值和流度数据.有效测压点分别分布于 2546.0、2582.0、2600.

0、2600.5、2601.0、2638.0、2650.0 和 2675.0 m 处.以 2546.0 m 和 2582.0 m 二点作拟合得到地层流体密度值为 0.38 g/cm^3 ,结合常规测井曲线解释这里为油气层,所拟合的密度值是偏低的原因是进行拟合的有效测压点较少和第一点可能存在超压现象(压降流度较低显示这里地层物性较差).后面的点地层压力系数很接近且明显处于第一、二点连线之外,显示其与上部不属同一个压力系统或流体性质发生了改变,参考测井评价成果,这里应是流体性质发生了改变.后面的点作拟合得到地层流体密度值为 0.98 g/cm^3 ,综合解释下面的层为水层.以水层压力连线和上部油气层压力连线交会得到油水界面约在 2592.7 m 处.

2.2 对单井研究储层间封隔特征,为油田开发提供依据^[27]

图 3 是冀东油田 NPXX3 井某一井段 MDT 测压和常规测井解释成果图.图中4个测压点均为有

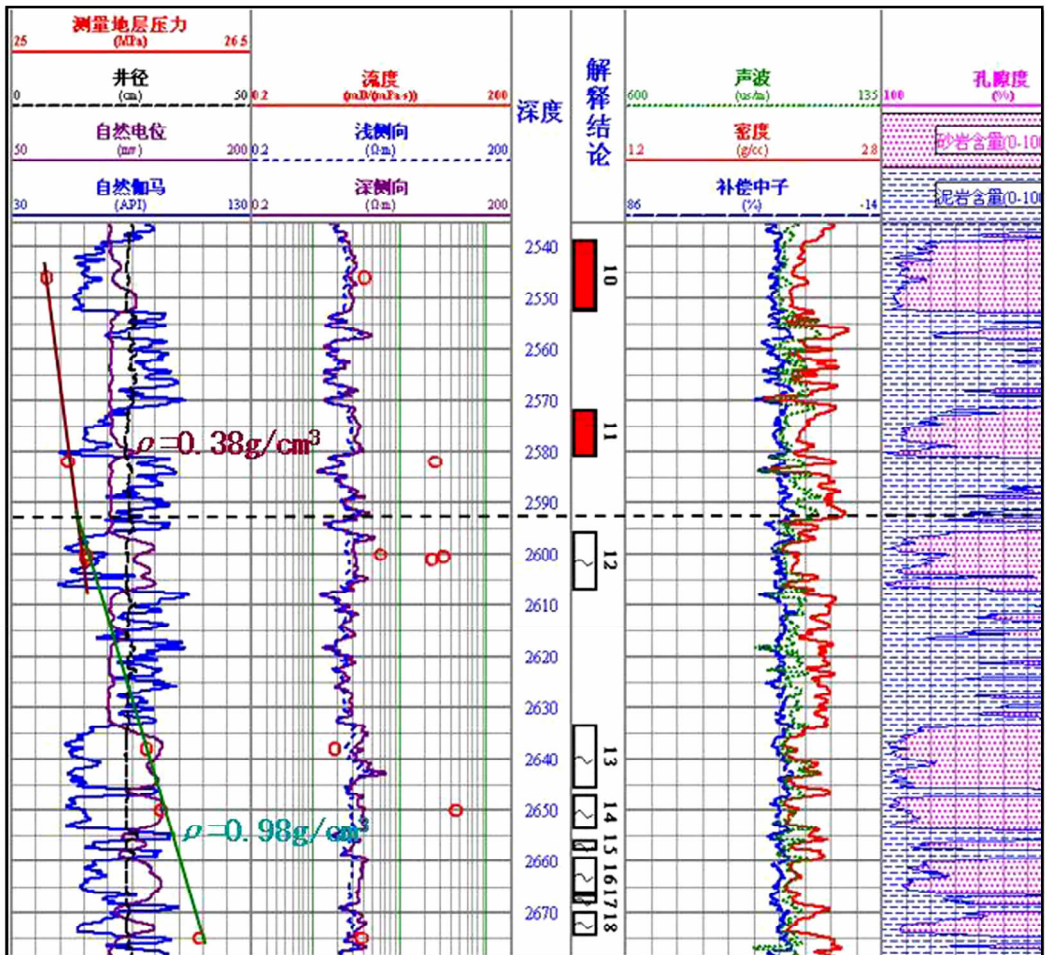


图 2 NPXX1 井一井段 MDT 测压和常规测井解释成果图

Fig. 2 MDT measurement press and conventional logging explanation at NPXX1 well some well length

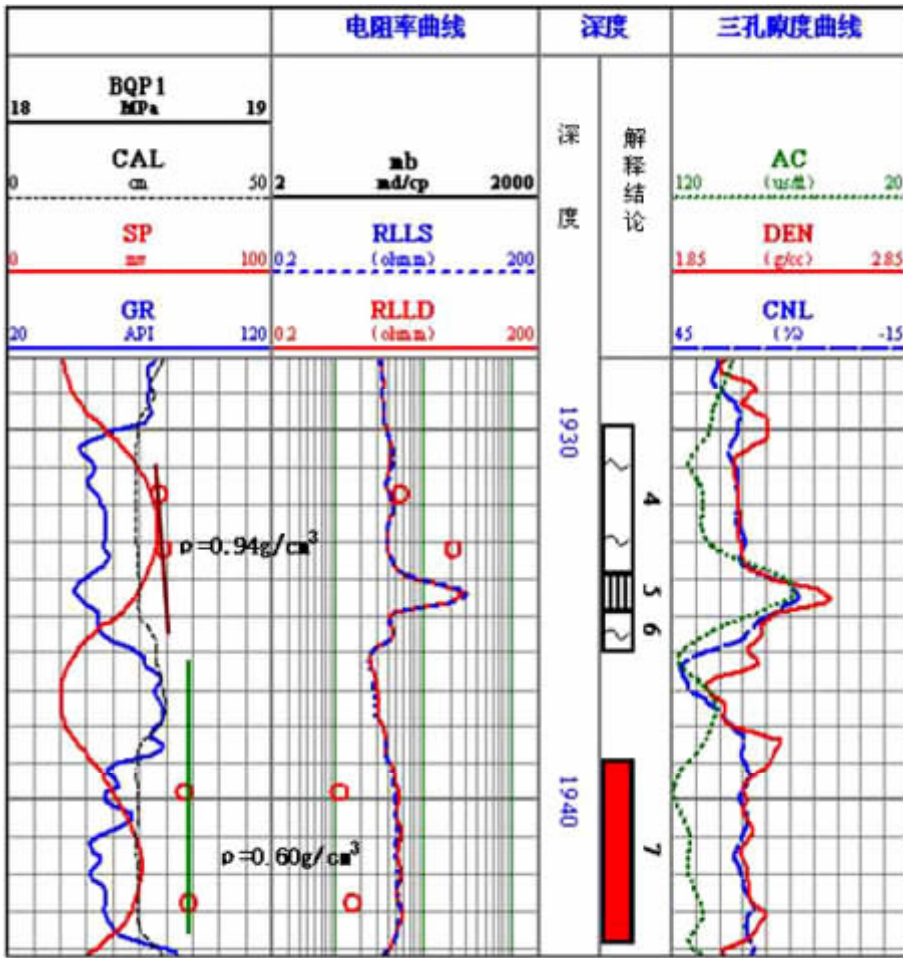


图 3 NPXX3 井一井段 MDT 测压和常规测井解释成果图

Fig. 3 MDT measure press and conventional logging explanation at NPXX3 well

效测压点. 从测压连线趋势来看, 上部两个点与下部两个点明显不在一条线上. 用上部两个点进行拟合得到流体密度值为 0.94 g/cm^3 , 为含油水层或水层; 用下部两个点进行拟合得到流体密度值为 0.60 g/cm^3 , 为油气层. 很明显, 上部与下部储层不属于同一个压力系统, 中间存在封隔层. 从常规测井曲线上看, 上部与下部储层之间存在一高致密层和一较厚的泥岩层.

2.3 研究储层性质 (压力异常预防套损)^[28]

图 4 是大庆油田 GAOXXX 井 MDT 测压成果与泥浆柱压力的对比图, 在研究纵向上油层压力分布可以发现, 分别在 852 m 层段、1063 m 层段、1085 m 层段确定出高压异常层, 来指导套损预防措施.

2.4 计算储层渗透率

在进行预测时通过记录的压力曲线可用于分析和计算地层渗透率. 在流体抽吸和停止抽吸的过程中记录不同时间的降压大小和恢复压力是地层渗

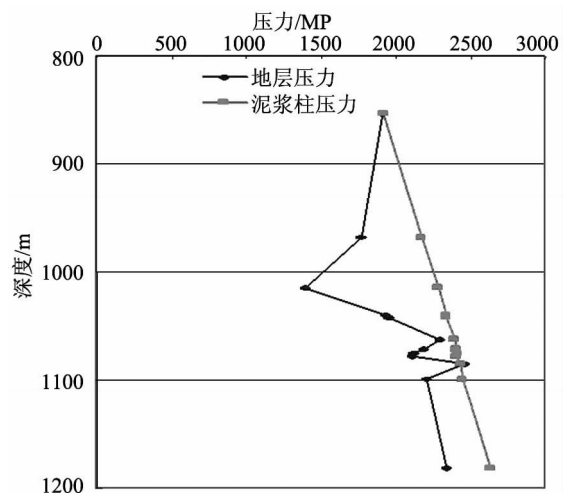


图 4 大庆油田 GAOXXX 井 MDT 测压纵向分布图

Fig. 4 MDT press vertical distribution at GAOXXX well of Daqing oil field

透率的函数, 因此根据压力测试曲线采用压力下降

法、球形压力恢复法和柱形压力恢复或现场快速直观解释法可估算地层渗透率^[29]。

渗透率是地球物理评价中的一个非常重要的参数,它能指示地层流体的渗透能力,从而直接判断地层流体的产出能力。常规地层评价得出的是地层静态渗透率,这种参数不能反映地层的真实情况,而通过电缆地层测试器测井抽吸过程得出的渗透率是动态的,它反映了地层流体的流动能力,因而更可靠。

2.5 进行产能预测^[30~34]

通过电缆地层测试器测井资料对油气产能进行正确评价可以检验油气勘探成果,为油气田开发提供基本依据;还可以部分替代试油,为油气勘探开发节省资金;在低渗透储层中,准确的产能预测有利于评价产能改造潜力,指导酸化压裂层位的选取和施工,提高油藏开发效益。

进行储层产能预测需要综合常规测井、地质、采油、工程等各种资料,通过计算地层流体进入井底的动态流入曲线和流体从井底到井口的动态举升曲线来得到流体井底自然产能和井口协调产能。通过这些曲线可以优化油管生产管径,建立合理的生产制度,从而油气提高采收率。

产能预测中的关键参数如地层压力、地层温度、地层渗透率、地下流体密度、流体原始溶解气油比等等均可直接由电缆地层测试器测井而来,因此由电缆地层测试器测井资料进行储层产能评价更方便、更经济。

图 5 是塔里木油田 XX4 井 YY 层产能预测成果图,图的横坐标为产量(单位: m^3/d),纵坐标为井底流动压力(单位: MPa)。图中实线是表皮系数 S 为 1.5 时的井底动态流入曲线,四条虚线分别表示井口压力为 12.0、15.0、17.0、19.0 MPa 的井底到井口动态举升曲线,它们与井底动态流入曲线的交点对应的横坐标值即为井口协调产能,纵坐标值即为井底流动压力。当井口压力 15.0 MPa 时,对应的井口动态举升曲线与井底动态流入曲线的交点对应的横坐标值约为 $480 \text{ m}^3/\text{d}$,该井的试油产量为 $471 \text{ m}^3/\text{d}$,计算值与实际值一致。

2.6 结合多井地层对比,进行油藏评价^[35]

利用电缆地层测试器测井资料进行多井油藏评价需要同构造、地质、分层等资料和测井评价资料以及油田评价经验等结合评价地层纵横向上砂体的连通情况、分析油水配置情况、确定油藏油水界面、划分压力系统、观察流体性质的横向和纵向变化以及进行储层和流体对比等。

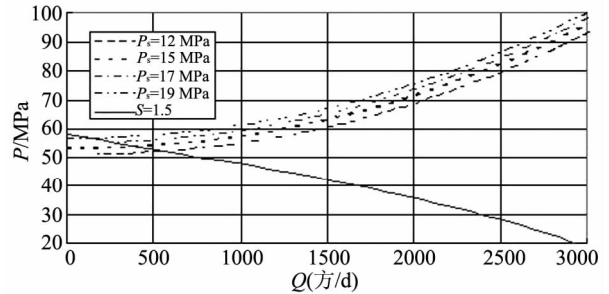


图 5 塔里木油田 XX4 井 YY 层产能预测成果图

Fig. 5 Productivity forecasting production of XX4 well YY layer of Talimu oil field

3 温度测量的应用

长期注水开发的油田,可使产层温度降低,这在注水井附近表现的更为明显,地层温度的变化直接影响原油粘度的数值,从而影响采收率的变化。利用注水井及生产井的井温测井曲线,可区分单井纵向各层的吸水、生产、流体流动(如管外窜槽)等情况,利用多井可确定平面上的剩余油的分布状况^[36]。

4 在勘探开发不同阶段中的应用

对于勘探初期的预探井,进行电缆地层测试的主要目的是发现油气层,应在有利储层内布点进行测试,建立区块的压力剖面,计算储层流体密度,确定气、油、水界面。在重点层位及疑难层位进行流体性质分析或取样,为勘探地质研究提供基础信息。

对于勘探中期的评价井,进行电缆地层测试的主要目的是弄清油藏性质及油气水分布,应在重点层及疑难层测压以识别流体性质,建立油藏压力资料,并最好进行流体分析取样,为储量计算提供宝贵参数,为油藏开发方案编制及地质研究提供依据^[37]。

对于开发初期的开发准备井,进行电缆地层测试的主要目的是以获取油藏压力资料,为油藏开发方案编制提供依据,故在每个层系的砂层组布点,面上控制压力变化趋势。

对于开发中后期的调整井,进行电缆地层测试的主要目的是重点在注采层系布点,通过油藏压力变化,监测储层连通及动用情况,实现油层动态跟踪,因此,应采取测量点加密方式测井,为新井投产及区块注采完善提供基础资料。

5 存在的问题

尽管电缆地层测试器在油气的勘探开发中取得了很大成功,但它在实际应用中还存在一些问题,首先,泥浆性能、泥饼质量、井眼稳定性以及地层物性等对仪器的测压质量有较大影响,测压过程中经常出现的超压、座封失效、干测试等现象不仅延误测井时间,而且影响后续的测井解释准确度^[38];其次,由于仪器抽吸流体的压差与生产压差的不一致(可能还有别的因素),在油水同层段导致仪器取样解释结果与试油结果不一致;最后,仪器尚不能适应复杂的井眼环境,如大狗腿度的井眼、大斜度井等。

致 谢 在资料的收集、数据处理过程中,得冀东油田研究院和大庆油田勘探公司 MDT 相关研究人员的大力帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献 (References):

- [1] 匡立春. 电缆地层测试资料应用导论[M]. 北京:石油工业出版社, 2005.
Kuang L C. An introduction to applied of the wireline formation Data[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2005.
- [2] Dresser Atlas. 重复式地层测试器原理、理论及解释[M]. 1985.
Dresser A. Formation Multi-Tester(FMT) Principle, Theory and Interpretation[M]. 1985.
- [3] Hashem M, Elshahawi H, Ugueto G. A decade of formation testing-do's and don'ts and tricks of the trade[A]. SPWLA 45th Annual Logging Symposium, paper L. Hashem, M., Elshahawi, H., Ugueto, G., 地层测试器十年的发展. 第45届测井分析家年会,2004.
- [4] 哈里伯顿测井能源服务公司. 哈里伯顿测井新技术简介[M]. 2001.
Halliburton Energy Services. Halliburton Logging New technology synopsis[M]. 2001.
- [5] 王寿奎. 重复式地层测试器[M]. 北京:石油工业出版社,1985.
Wang S K. Repeat formation tester[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1985.
- [6] 谷宁,陶果,刘书民. 电缆地层测试器测量的油水两相有限元模型[J]. 地球物理学进展,2005,20(2): 337~341.
Gu N, Tao G, Liu S M. The finite element simulation of formation wireline testing for oil-water two-phase flow[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005,20(2):337~341.
- [7] 原宏壮,陆大卫,张辛耘,等. 测井技术新进展综述[J]. 地球物理学进展. 2005,20(3):1221~1226.
Yuan H Z, Lu D W, Zhang X Y, *et al.* An overview of recent advances in well logging technology[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005,20(3):1221~1226.
- [8] 张元中,肖立志. 新世纪第一个五年测井技术的若干进展. 地球物理学进展. 2004,19(4): 828~836.
Zhang Y Z, Xiao L Z. Some progress of well logging techniques during the first five years of the new millennium[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2004,19(4): 828~836.
- [9] 马建国. 油气井地层测试[M]. 石油工业出版社, 2006.
Ma J G. Oil Gas Well Formation Tester[M]. Petroleum Industry Press, 2006.
- [10] 林梁. 电缆地层测试器资料解释理论与地质应用[M]. 石油工业出版社,1994.
Lin L. The Wireline formation tester data Interpretation and application [M]. Petroleum Industry Press,1994.
- [11] Hashem M, Elshahawi H, Parasram R, *et al.* Successful low level detection of H2S using wireline formation testers [A]. Spwla 48th Annual Logging Symposium, Paper GG,2007.
Hashem M, Elshahawi H, Parasram R, *et al.* 应用电缆地层测试器的成功探测[A]. 第48届测井分析家年会.
- [12] Baary R, Head E, Morris C, *et al.* New wireline formation tester techniques and applications [J]. Spwla 34th Annual Logging Symposium,1993. ZZ1~ZZ15.
Baary R, Head E, Morris C, *et al.* 新型电缆地层测试器技术及应用,第34届测井分析家年会.
- [13] 陆大卫,宁从前. MDT 测井技术在我国陆上油气勘探中的应用[J]. 中国石油勘探,2003, 8(1):58~66.
Lu D W, Ning C Q. Application of MDT logging technology for China's onshore oil and gas exploration[J]. China Petroleum Exploration,2003, 8(1):58~66.
- [14] 杨勇,王贺林,岳造福,等. 运用 MDT 测井技术准确识别疑难油气层实例[J]. 中国石油勘探,2006, 11(5):52~57.
Yang Y, Wang H, Yue Y F, *et al.* Application of MDT logging technology in accurate identification of knotty oil and gas layers[J]. China Petroleum Exploration,2006, 11(5):52~57.
- [15] 范晓敏. 双侧向测井曲线形状与地层侵入关系研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):142~146.
Fan X M. Investigation on the relation between form of laterologs and invasion state of reservoir[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(1):142~146.
- [16] 胡法龙,肖立志,张元中,等. 电缆地层测试最小测试时间的确定[J]. 地球物理学进展,2006,21(4):1221~1226.
Hu F L, Xiao L Z, Zhang Y Z. The minimum testing time determination for wireline formation tester [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(4):1221~1226.
- [17] 蒋建平,高广运,康继武. 镜质组反射率测试及其所反映的构造应力场[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 138~145.
Jiang J P, Gao G Y, Kang J W. Tests on vitrinite reflectance of coal and analysis of tectonic stress field[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(1): 138~145.
- [18] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 石油工业出版社, 2005.
Liu N Q. Practicality modern well testing interpretation[M]. Petroleum Industry Press, 2005.
- [19] 李阳. 油藏综合地球物理技术在垦71井区的应用[J]. 石油物探,2008,47(2):107~115.
Li Y. Application of integrated geophysics technique in reservoirs [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008,47(2):107~115.
- [20] 时新芹,高秋涛,叶运清,等. 电缆地层测试器(MDT)井下流

- 体分析资料的解释与应用[J]. 国外测井技术, 2005, 20(3): 21~24.
- Shi X Q, Gao Q T, Ye Y Q, *et al.* The interpretation and application of downhole fluid analysis data measured by MDT [J]. *World Well Logging Technology*, 2005, 20(3): 21~24.
- [21] 李景伟. MDT 电缆地层测试资料在油田高含水开发期的应用[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 55~57.
- Li J W. Application of MDT in oilfield development in high water-out period[J]. *Petroleum Instruments*, 2007, 21(2): 55~57.
- [22] 刘胜建, 冷洪涛, 赵爱军. 模块式地层测试资料在 KD48 井的应用[J]. 油气井测试, 2007, 16(1): 67~69.
- Liu S J, Leng H T, Zhao A J. Application of MDT in KD48 well [J]. *Well Testing*, 2007, 16(1): 67~69.
- [23] 王杰堂. RFT 测井资料解释处理方法与软件应用[J]. 勘探地球物理进展, 2007, (4).
- Wang J T. Interpretation and processing software for RFT log data [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2007, (4).
- [24] 郭兴伟, 施小斌, 丘学林, 吴智平, 杨小秋. 渤海湾盆地济阳坳陷新生代裂后不整合、加速沉降事件及其成因浅析. 地球物理学报, 2007, 50(2): 455~464.
- Guo X W, Shi X B, Qiu X L, Wu Z P, Yang X Q. Cenozoic post-rift unconformity and the accelerated subsidence events of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin and preliminary analyses on their original mechanism [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(2): 455~464.
- [25] 郝天珧, 杨长春, 刘洪, 等. 环渤海地区前新生代油气资源的综合地质、地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1269~1279.
- Hao T Y, Yang C C, Liu H, *et al.* Integrated geological and geophysical study for pre-cenozoic hydrocarbon resources in the circum-bohai area [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(4): 1269~1279.
- [26] 汤井田, 张继锋, 冯兵, 等. 井地电阻率法歧离率确定高阻油气藏边界[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 926~931.
- Tang J T, Zhang J F, Feng B, *et al.* Determination of borders for resistive oil and gas reservoirs by deviation rate using the hole-to-surface resistivity method [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(3): 926~931.
- [27] 张向林, 刘新茹, 李健, 等. 我国油气开发监测技术进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1360~1363.
- Zhang X L, Liu X R, Li J, Lu T. Progress in oil productive monitoring technology in China [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(4): 1360~1363.
- [28] 陈育勤, 张树东. MDT 测井技术在川东北地区多井解释中的应用[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 52~53.
- Chen Y Q, Zhang S D. Application of MDT logging technology to multiwell interpretation in the northeastern Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(7): 52~53.
- [29] 谷宁, 陶果, 刘书民. 电缆地层测试器在渗透率各向异性地层中响应[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 229~234.
- Gu N, Tao G, Liu S M. Responses of the wireline formation tester in permeability anisotropic formations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 229~234.
- [30] 谭成仟, 吴向红, 宋子齐. 利用测井资料预测克拉玛依油田八区克上组油层产能[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 285~290.
- Tan C Q, Wu X H, Song Z Q. Using log data for predicting oil-gas production capacity of Keshang Formation reservoir in eighth block, Kelamayi oil-field [J]. *Oi Geophysical Prospecting*, 2001, 36(3): 285~290.
- [31] 汪中浩, 章成广, 肖承文, 等. 塔中油田低渗透储集层产能预测模型[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(4): 89~90.
- Wang Z H, Zhang C G, Xiao C W, *et al.* Productivity predicting model of low permeability reservoirs in Tazhong oil-field [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2003, 25(4): 89~90.
- [32] 顾国兴, 丁进. 利用测井资料预测油层产能的新方法[J]. 江汉石油学报, 1993, 15(1): 43~49.
- Gu G X, Din J. A method for forecasting the productivity of a oil-producing pay by using logging interpretation data [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2003, 25(4): 89~90.
- [33] 毛志强, 李进福. 油气层产能预测方法及模型[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 58~61.
- Mao Z Q, Li J F. Method And Models for Productivity Prediction of Hydrocarbon Reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(5): 58~61.
- [34] 何雨丹, 肖立志, 毛志强等. 测井评价“三低”油气藏面临的挑战和发展方向[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 282~288.
- He Y D, Xiao L Z, Mao Z Q, *et al.* The present challenges and research direction of well logging evaluation methods in low porosity, low permeability and low saturation reservoir [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2005, 20(2): 282~288.
- [35] 贺莉丽, 王培虎, 王昌学. MDT 资料解释影响因素分析与应用[J]. 油气井测试, 2007, 16(2): 17~21.
- He L L, Wang P H, Wang C X. Analysis of influencing factor on MDT data interpretation and its application [J]. *Well Testing*, 2007, 16(2): 17~21.
- [36] Collins C, Proett M, Storm B, *et al.* 压力梯度综合分析油藏连通和流体评价的方法[A]. 第 48 届测井分析家年会, 2007.
- Collins C, Proett M, Storm B, *et al.* An Integrated approach to reservoir connectivity and fluid contact estimates by applying statistical analysis methods to pressure gradients [A]. *Spwla 48th Annual Logging Symposium*, 2007.
- [37] 张福明, 查明, 邵才瑞, 等. 天然气的测井勘探与评价技术[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 179~185.
- Zhang F M, Zha M, Shao C R, Yin X Y. Technology of natural gas exploration and evaluation based on well-logging data [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(1): 179~185.
- [38] 原宏壮, 陆大卫, 张辛耘, 等. 测井技术新进展综述[J]. 地球物理学进展, 2007, 20(3): 786~795.
- Yuan H Z, Lu D W, Zhang X Y, *et al.* An overview of recent advances in well logging technology [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 20(3): 786~795.