

电缆地层测试器 资料解释理论 与地质应用

林 梁 著

$$\Delta P_1 = 2340 \frac{q_1 \mu}{K_r r_2} (0.5 R_{mv} + 0.5) \left[\text{erfc} \left(R_{mv} \sqrt{\frac{t}{24.46}} \right) + S \left(2 - R_{mv} \right) \right] \quad (0 < q_1 < 1)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 + 2340 \frac{(q_2 - q_1) \mu}{K_r r_2} (0.5 R_{mv} + 0.5) \left[\text{erfc} \left(R_{mv} \sqrt{\frac{t}{24.46}} \right) + S \left(2 - R_{mv} \right) \right] \quad (q_1 < q_2 < 1)$$

$$\Delta P_3 = 2340 \frac{q_3 \mu}{K_r r_2} (0.5 R_{mv} + 0.5) \left[\text{erfc} \left(R_{mv} \sqrt{\frac{t}{24.46}} \right) + S \left(2 - R_{mv} \right) \right] \quad (q_2 < q_3 < 1)$$



石油工业出版社

电缆地层测试器 资料解释理论与地质应用

林 梁 著

石 油 工 业 出 版 社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书介绍了电缆地层测试器的原理、特点和应用。在多孔介质渗流力学的基础上,讨论了电缆地层测试器的稳定和非稳定、均质和非均质压力场球形与圆柱形的解析解。根据这些数学结论和相应的计算方法的应用结果,说明新方法具有明显的优越性和效果。本书还讨论了电缆地层测试器的数值方法和油气藏压力评价的方法。书中提出的公式与地质应用都给出实例来说明使用的过程。

本书可供电缆地层测试器资料解释人员、油田测井和油田地质人员参考,也可作为石油地质高等院校大学生或研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电缆地层测试器资料解释理论与地质应用 / 林梁 著

-北京:石油工业出版社, 1994.

ISBN 7-5021-1319-3/

I. 电…

II. 林…

III. 电缆地层测试器—应用—油气勘探

IV. TE15

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

黑龙江大庆科技彩印厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开 13 印张 332 千字 印 1—1500

1994 年 9 月北京第 1 版 1994 年 9 月大庆第 1 次印刷

定价: 12.00 元

序

电缆地层测试器是目前国内各油田勘探开发中使用的一种新技术。到目前为止, 电缆地层测试器在国内累计测井一千余口。现使用的仪器绝大部分从国外引进, 其中主要从斯伦贝谢公司和阿特拉斯公司引进, 国内中原油田已经生产出电缆地层测试器。这些仪器的功能是类似的, 但是仪器的细节不一样。斯伦贝谢公司在最新推出的 90 年代测井仪器车 MAXIS-500 上装备了组合式地层测试器, 它将电缆地层测试器发展到一个新水平。

电缆地层测试器可以在储集层上测量地层压力与一条压力曲线, 每次下井可以在有限多个深度上测量压力, 且取到两个储层中的流体样品。组合式地层测试器改进为人为控制抽取地层流体。当前的主要地质应用是做压力与深度坐标平面图, 根据油气藏中的压力分布原理, 可以确定油气藏中油、气和水两相流体接触界面的位置, 显示出高压和低压的异常层位等。随着勘探技术的不断发展, 它在油气勘探与开发的作用越来越重要。

目前电缆地层测试器在国内石油工业中处于一个新的发展阶段。电缆地层测试器在 50 年代由斯伦贝谢公司发明并投入使用。由于当时的技术水平的限制, 它的实用性和可靠性存在一定的问题。计算机等现代工业的发展促进了地层测试器性能的改进, 它们为地层测试器创造了新的发展机会。本书的第一个目的在于推动电缆地层测试技术在国内的发展。

按世界流行的性能价格比评价, 电缆地层测试技术是一种很有经济价值的实用技术。它在国内的中原油田的应用充分地说明了这一事实。随着改革开放的深入与市场经济的逐渐形成, 在优化资源配置的前提下, 电缆地层测试器将成为石油技术市场中的一个具有强大竞争力的技术商品。

在作者的多年研究成果与国外有关资料的消化和吸收的基础上, 提出了新的解释方法。新的解释方法借鉴试井理论, 修正了球形压力恢复模型中的缺陷。按照当今试井解释方法框架, 建立了新的流动函数与解释流程。该方法使用图形分析与计算相结合, 它能够全面地定量地分析实际资料。经过对实际资料的处理, 说明新的方法效果比以往球形与圆柱形压力恢复模型两种计算的效果好。

本书兼顾实际应用与理论研究两个方面。它是研究电缆地层测试器资料地质应用的成果总结。书中以多孔介质渗流力学为基础, 推导出电缆地层测试器的数学模型, 它包括均质模型与非均质模型。由于非均质模型的需要, 引入微分方程的数值解法, 建立正演模型的工具。用最优化拟合压力曲线解决参数估计的问题是另一种数值方法。

全书分为五章。第一章介绍了三种裸眼井和一种套管井电缆地层测试器仪器。首先介绍了电缆地层测试器的特点和作用, 然后分别介绍了阿特拉斯公司的地层多次测试器、斯伦贝谢公司的重复地层测试器和组件式地层动态测试器, 最后介绍了哈里伯顿公司的套管井地层测试器。介绍的内容以资料解释为目的。

第二章讨论了多孔介质中渗流力学基础, 这为后面的数学叙述做准备。本章对储集层建立了连续介质场的概念, 叙述了多孔介质中渗流的基本定律—达西定律, 以及非线性渗流的

条件,最后推导了质量守恒方程等建立定解问题的有关方程。

第三章讨论了单相液体渗流模型和解释方法。用解析法导出了几种边界条件下稳态与非稳态半球形流动条件下的压力场的解析解。用解析法推导出圆柱形流动的压力分布。根据场的叠加原理,得到电缆地层测试器半球形和半圆柱形流动的公式,同时也导出存在管线存储效应公式,它是电缆地层测试器资料解释中的重要问题。根据这些数学结论,讨论了新的方法和原方法解释实际资料的过程和实际应用效果。

第四章讨论了电缆地层测试器微分方程数值解法与最优化方法的曲线拟合。椭圆型与抛物型方程是偏微分方程的基本方程,我们给出它们的差分格式。用差分法得到的数值解考察了管线存储效应、表皮系数、各向异性等问题。用最优化方法进行压力曲线拟合是另一种数值分析方法。我们说明了泰勒级数展开法与麦夸尔特法以及它们计算结果,并附了C语言的程序。根据实例显示,它们都是有效的分析工具。

第五章总结了电缆地层测试器在油气藏压力评价中的应用。它是该仪器使用最成熟的方面,也是它获得大量经济效益的方面。从说明使用方法的角度,我们讨论使用地层压力分析的原理,叙述了国内外的单井地层压力的十种应用和多井地层压力的八种地质应用。每一个方法都给出应用实例。

作者认为,在整个电缆地层测试器的发展历史过程中,定量的数学描述是不够的。电缆地层测试器是一种以数学与物理为基础的高技术产品。在任何一个以数学与物理为基础的领域中,总是有定性与定量两个方面。研究工作不能轻视事物的定性的方面,也不能忽视定量的方面。定性方面往往就是质的方面,忽略了定性的方面,你对事物就没有一个明确的概念。你的研究也就无从下手。但是定性方面绝不是万能的。只考虑定性方面而不认真研究事物的定量方面,我们很可能无法深入地掌握其中的规律而成为那种一知半解、道听途说的工作者。因此电缆地层测试器的发展需要定量的数学描述来支持,这是本书写作第二个目的。

对于想把电缆地层测试器资料解释的好一些的读者来说,必须擅长随着数学推导过程来进行物理思维,必须善于在使用中研究与学习,不断地提高技术水平。深刻地理解物理概念需要经过反复钻研和反复应用,在钻研和应用的过程中,我们会对电缆地层测试器的物理机制认识越来越清楚,越来越深入。除此之外,并不存在任何别的神秘莫测或者使人顿悟的方法。

因此要想高水平地使用好电缆地层测试器资料,就不能厌弃和畏惧数学。只有把数学与实际应用结合起来,反复探讨,反复运用,才能很好地使用电缆地层测试器资料。在科学技术史中,数学与物理之间的相互强大的推动作用与紧密的联系也说明了它们的相依为命的关系。为了研究质点的变速运动,牛顿不得不亲自发明了微积分。为了表述相对论,爱因斯坦采用了非欧几何学,而且反过来使这门数学得到了很大地发展。

在技术积累达到一定程度后,电缆地层测试器的解释技术会有一个飞跃的。根据国外资料的反映,国外的电缆地层测试器解释理论方面的研究现在正趋于活跃,越来越多的研究成果刊登在杂志上,本书吸取了其中部分合理的内容。

电缆地层测试器有关的实际问题,有其自身共同的规律性,也有其特有的特殊性。因此,在每一实际问题中必须分析其具体的特定条件,并顺应那些条件来应用理论,否则再好的理论也是“文不对题”。通常说只要能够付诸实用,一种技术必然会非常简单,非常方便。比如计算机的原理和电路都非常复杂,但是学会操作并不困难。但是一个科技工作者的任务,并不仅仅在

于学会操作某种仪器,而更重要的还在于能够维修、改进已有的设备和建立新的数学模型。所谓“现场上用不着”往往只是借口。机械式的操作比较简单,而创造性的劳动则绝不会是简单和轻松的。要当一名名符其实的技术人员,就必须掌握一定的数学物理知识。希望本书能促进现场电缆地层测试器资料解释水平的提高。

对于只想了解电缆地层测试器的油气藏压力评价的读者,可以只阅读第一章和第五章内容。如果想全面了解,请按顺序阅读。

在尽量使用法定单位的前提下,书中使用了一些非法定计量单位,其原因是一些译文的图上的单位无法更改。附录中给出了标准单位与油田单位的转换表。

鉴于生产的需要,作者希望本书的内容既能为油田技术人员使用又能够作为油田开发测井课程的教材,同时也能成为石油与地质院校大学生和研究生的选修课程。有感于我国迄今尚未有一本电缆地层测试器资料解释方面的书,作者不揣浅陋,谨以此奉献给读者。我希望此书能够产生抛砖引玉结果。本书如果能对学习与研究电缆地层测试器的人员有帮助,本书的目的就达到了,同时我也感到很欣慰。

在本书的写作中得到众多测井前辈谭廷栋、张守谦、牛超群等的热情支持与关心。大庆石油勘探开发研究院的萧德铭与江汉石油学院的肖立志同志审阅了全书,并提出许多中肯与宝贵意见。戴荻、陈宾和出版社的有关同志也给予了大力支持。吴河勇、张宝玺、徐广田、杨利和赵秀英同志做了大量工作。宋石林同志绘制了本书的大部分图件。我在此谨向他们和关心本书出版的同志致以衷心的感谢。

本书是用计算机写成的。我感谢 WPS 字处理系统的创造者和自然码的发明者周志农先生,这些软件使得艰苦的写作成为一种愉快的工作。

由于时间、能力,特别是作者水平有限,书中难免有许多不妥之处,恳切希望每一位读者提出修正意见,以便本书有机会再版时能有所补正。欢迎来信指教,来信地址请寄:黑龙江大庆石油勘探开发研究院勘探一室林梁,邮政编码 163712。

作者

1994. 5

目 录

第一章 电缆地层测试器仪器	(1)
第一节 电缆地层测试器的作用和特点	(1)
一、电缆地层测试器在油气勘探和开发中的作用	(1)
二、电缆地层测试器的特点	(2)
第二节 地层多次测试器	(4)
一、概述	(4)
二、操作	(5)
三、刻度	(11)
四、压力曲线的定性说明	(12)
五、地层流体取样	(16)
第三节 重复地层测试器	(17)
一、操作	(17)
二、压力计	(21)
三、压力曲线的定性分析	(25)
第四节 组件式地层动态测试器	(31)
第五节 套管井电缆地层测试器仪器	(34)
第二章 渗流力学基础及流体渗流的数学模型	(38)
第一节 储集层渗流的基本概念	(38)
一、油气储集层	(38)
二、多孔介质	(43)
三、连续介质场	(46)
第二节 储集层渗流力学基础	(49)
一、场论简介	(49)
二、流体与多孔介质的力学性质	(53)
三、基本渗流定律——达西定律	(57)
四、非线性渗流规律	(60)
五、低速下的渗流规律	(63)
第三节 储集层渗流数学模型	(64)
一、电缆地层测试器模型的条件	(64)
二、状态方程	(65)
三、质量守恒方程	(67)
四、典型电缆地层测试器泛定方程的建立	(70)
五、边界条件和初始条件	(72)

第三章 单相液体渗流模型与解释方法	(75)
第一节 电缆地层测试器的流动方式	(75)
第二节 扩散方程半球形流动的解	(78)
一、半球形稳态渗流	(78)
二、半球形弹性均质非稳态渗流	(80)
三、半球形弹性非稳态渗流的测试半径	(86)
四、表皮系数	(89)
五、叠加原理	(91)
六、管线存储效应	(97)
第三节 圆柱形渗流	(101)
一、单相稳态渗流	(101)
二、单相非稳态渗流	(104)
三、储集层特征参数	(112)
四、增压模型	(115)
五、椭球形流动模型	(117)
第四节 压力曲线解释	(119)
一、实际的电缆地层测试器压力恢复曲线	(119)
二、实际压力恢复曲线与理想压力恢复曲线之间的差别	(120)
三、实际压力恢复曲线的定性分类	(122)
第五节 新的解释方法	(123)
一、四种渗透率测量方法之间的关系	(123)
二、新解释方法的步骤	(124)
三、管线存储效应的估算	(126)
四、计算渗透率	(128)
五、固相阻塞带参数的计算	(130)
六、三种模型计算渗透率的对比	(132)
七、与岩芯渗透率对比	(142)
第六节 在多孔介质中半球形流动液体界面的运动	(142)
一、液体流动的质点运动方程	(143)
二、半球形流动油水界面活塞式运动公式	(144)
第四章 解释模型的数值方法	(148)
第一节 电缆地层测试器微分方程离散化	(148)
一、电缆地层测试器的定解问题	(148)
二、差分逼近的基本概念	(152)
三、椭圆型方程的差分格式	(153)
四、抛物型方程的差分格式	(154)
五、电缆地层测试器方程的离散化	(157)
第二节、数值模拟结果	(160)

一、用球形流动模型验证三维差分模型	(160)
二、 <u>管线存储效应</u>	(163)
三、固相阻塞带	(164)
四、储集层各向异性	(165)
五、增压效应	(166)
第三节 用最优化方法做压力曲线拟合和参数估计	(166)
一、概述	(167)
二、曲线拟合的数学模型	(169)
三、泰勒级数展开法	(170)
四、麦夸尔特法	(172)
五、C 语言计算程序	(173)
第五章 电缆地层测试器的油气藏压力评价	(177)
第一节 压力评价原理	(177)
一、地下压力的分类	(177)
二、油气藏压力分析原理	(179)
三、电缆地层测试器测试地层压力的精度	(181)
第二节 单井地层压力的地质应用	(183)
一、泥浆柱压力的油气显示	(183)
二、泥浆柱压力曲线分析	(184)
三、油气藏油气水分布与它们的密度	(185)
四、储集层压力衰竭	(186)
五、确定断层与泥岩隔层的封闭性	(186)
六、套管井电缆地层测试器的应用	(187)
七、确定油气产量剖面	(188)
八、预测井底深度以下的油水界面	(189)
九、在钻井工程中的应用	(190)
十、识别裂缝	(191)
第三节 多井油气藏压力评价	(192)
一、研究油气藏的特征	(192)
二、在开发中确定动用层位和井间连通关系	(193)
三、进一步认识构造	(194)
四、地层对比	(195)
五、电缆地层测试器的经济评价	(196)
六、脉冲测试	(196)
七、监视开发井的压力变化	(197)
八、用于沉积相的研究	(198)

附录 I 矢量微分公式	(198)
附录 II RFT 单位与国际单位制单位换算表	(198)
参考文献	(199)

第一章 电缆地层测试器仪器

本章说明了电缆地层测试器在油田勘探开发中的作用与特点，介绍了斯仑贝谢公司的重复地层测试器和组件式动态测试器，阿特拉斯公司的地层多次测试器以及哈里伯顿公司的套管井地层测试器。对于这四种仪器，介绍了仪器的结构、功能、测试的资料。所介绍的内容是为了使读者能够在解释资料时，正确地使用所有测试的信息，以利于与其他资料综合使用。

第一节 电缆地层测试器的作用与特点

一、电缆地层测试器在油气勘探和开发中的作用

电缆地层测试器属于测井仪器。测井在油气勘探与开发中是不可缺少的一门实用技术。为了讨论清楚电缆地层测试器在油气勘探与开发中的作用，我们简述油气勘探与开发的全过程。

为了找油找气，一般要根据地质科学的研究，首先在有利于石油生成和聚集的地区，进行地质调查和以地震勘探为主的地球物理勘探，找出可能储藏石油和天然气的各种地质构造。至于这些地质构造中是不是有油气呢？最终要靠钻井来证实。在钻井的过程中，可以从钻速变化、泥浆性能变化、油气显示以及岩屑、岩芯分析、气测井等资料，进一步认识地层，粗略地判断含油气情况。

气测井不属于测井而属于钻井部门管理。它又称为泥浆测井，主要是分析研究泥浆中气体含量和成分的变化。当钻头钻开含油气储集层时，在井中循环的泥浆可以把一些油气带到地面，通过泥浆测井仪器的分析就可以测定出来。在探井中，一般都要进行气测井，它是直接找油找气的重要方法之一。根据气测井的异常显示，还可以准确地预报高压油气层，以便钻井队采取措施，防止发生井喷事故。

在钻井见到油气显示后，还有许多技术问题需要解决。例如油层有多厚？油田面积有多大？油气储量是多少？预测这口井的油气量是否有必要下价值几十万元的钢铁套管？要回答这些问题，又需要做大量的工作。只有把地下的情况弄得清清楚楚，才可能科学地勘探和开发油田。测井可以提供许多极为重要的资料。

目前的测井可以分为常规测井、地层倾角测井、声波波列测井、电缆地层测试器。常规测井曲线可以划分岩性和层厚，计算储集层的孔隙度、含油饱和度、泥质含量等参数。对多口井的以测井资料为主的各种资料进行对比，可以绘制地质构造图。地层倾角测井资料经过计算机处理可以确定地层各个层面构造倾角和倾向，进一步可以确定沉积的倾角和倾向。这些数据可以大大提高地质构造图的精度和为沉积相研究提供数据。声波波列测井可以确定井筒附近地层的横波与纵波速度，以及杨氏模量等机械力学参数，为工程地质和油层改造服务。

目前国内外的地层测试器分为两种：钻杆地层测试器和电缆地层测试器。钻杆地层测试

是一种试井或者试油的方法，试井是核实油气储集层是否有产能的唯一方法，是检查油气田开发效果的重要手段。试井过程是首先定位并且分隔住要测试的井段，用射孔等方法打开油气层，然后采用各种抽取方式得到这些地层的产油量、产气量、产水量、渗透率以及这些流体的性质参数。这些参数都是检验油气储量的重要依据。

与钻杆地层测试相比，电缆地层测试器是一种微型试井设备，它在井眼中工作，是一种应用于石油勘探与开发的高技术产品。按照井眼的情况，没下套管的井眼被称为裸眼井，下了钢套管的井眼被称为套管井。电缆地层测试器可以测量地层压力和地层的压力性质，每次下井可以采集两筒地层中的流体样品。它的特点是能够快速与经济地采集到地层流体，评价地层产能。目前的电缆地层测试器具有测量地层压力，采集地层流体，估算地层渗透率，预测产能，预测油气、气水、油水界面，判断储集层之间的连通性等能力，它是设计完井方案和开发方案的重要资料。

由斯伦贝谢公司最新推出的组件式地层动态测试器使地层测试器上升到一个新水平。它能够将地层中的泥浆滤液排入井眼中，直到井下仪器中的电阻率测量确认抽吸流体是油气为止，它还可以测量储集层的水平与垂向渗透率。它的这些独有的性能使它有可能代替钻杆地层测试器。

对于一些可疑的储集层，可以用测井电缆把井壁取心器放入井筒中，对准可疑地层进行井壁取心，把岩心取到地面上，再做细致地观察和分析。

以上讨论的是测井在油气勘探中所具有的重要作用。测井不仅在油气勘探中具有重要作用，而且在油田的开发过程中，也可以发挥积极的作用。在地质工程上，用声幅、井径和声波变密度测井资料可以估算出固井需要的水泥量，检查固井质量。在对地层射孔时，必须用测井资料作为校准射孔深度的依据，以致在进行射孔时，形成穿过套管、水泥环进入地层的通道。为了提高油井的生产能力和改造致密储集层的储集特性，需要对储集层进行酸化压裂处理。在进行酸化压裂的前后，都要用测井资料评价对储集层处理的效果。

在油田投产以后的采油阶段，监视井下流体动态十分重要。这关系到油田的采收率和稳产高产。生产测井是在这个阶段中最主要的提供井下流体参数的方法。它可以判断油井故障，找出井下出水层位，井壁串槽部位，检测套管腐蚀程度，监视井下的油水动态等等。

哈里伯顿公司的产品套管电缆地层测试器 CWFT 在采油阶段有很好的应用效果。它是带有射孔枪的电缆地层测试器。在套管井中，只要射孔成功，它就具有裸眼井中的电缆地层测试器的所有功能。

二、电缆地层测试器的特点

由于电缆地层测试器的工作方式与其他测井方法类似，因此它属于一种测井方法，但是它的测井过程与其他测井方法的过程相比有很大的不同。其他测井测量的是井内随深度连续变化的物理量。其测井过程如图 1—1 所示。在测井过程中，用测井电缆把井下仪器放入井筒内，测井绞车提升或者下放电缆，使井下仪器沿井筒移动，同时由电缆带动深度传感器工作。井下仪器在井中连续工作，对每一个深度点进行测量，并通过电缆向地面传输信号，这时深

度传感器也送出深度信号，两者同时送入地面测井车的测井记录仪与计算机中，计算机将信号和深度信息记录在磁带、胶片和纸上，我们就得到了一张从井底到井口的有各种物理量随深度连续变化的测井曲线图。

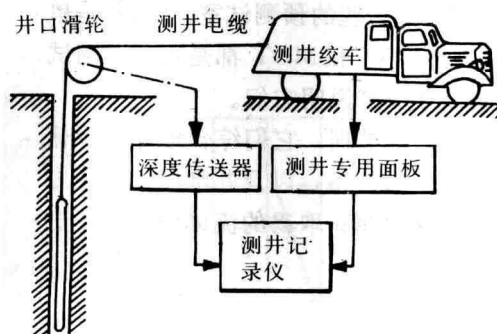


图 1-1 测井工作示意图

电缆地层测试器的测量与以上不同。它一般是在测量自然电位或自然伽马测井曲线以后再进行测量。在测试以前，设计人员根据自然伽马或自然电位测井曲线确定井筒内储集层所在深度，结合地质设计和施工情况，确定电缆地层测试器要进行流体取样的两个深度和预测试若干个深度的位置，一般要设计出几十个预测试深度点。以这个设计为基础，将井下仪器下放到井中的一个设计深度，定位并开始推靠仪器，探头被挤进储集层，然后井下仪器开始抽取地层流体和测量探头处的压力变化，取样等，测量完后收回推靠器，井下仪器上升或下降至第二点、第三点，…，重复测量，直到所有的设计深度测量完为止，到此一次下井的电缆地层测试器的测量完毕。

取推靠器

与其他测井方法相比，电缆地层测试器有四点不同。首先它测量的资料是压力随时间变化的坐标图，而不是深度与某种测井的物理量的坐标图；第二它是在深度上对人们感兴趣的个别深度点进行测量，而不是连续记录深度上的某一物理量；第三它是测量某一储集层经过抽吸后压力场的变化。压力是地层的直接地质参数，它不是像其他测井方法一样，测量的是间接的物理量，它们间接地反映储集层的情况；第四它测量时井下仪器定位在井中某一深度位置上静止不动，而其他测井在测井时井下仪器是沿着井筒匀速运动。

随着现代工业的蓬勃发展，计算机和材料工业都有长足的进步，它们都促进了测井仪器和解释技术的发展。近几年来，石油工业对测井行业提出了更高的要求，例如对于致密储集层，电缆地层测试器不能测量到地层压力和采集到流体样品。人们希望有性能更好的电缆地层测试器解决这种问题。目前电缆地层测试器的一个发展趋势是代替钻杆地层测试，电缆地层测试器有快速和测试费用便宜的优势，但是现在还有一些技术问题与经济问题需要解决。

斯仑贝谢测井公司的电缆地层测试器称为重复式电缆地层测试器，英文代码是 RFT。阿特拉斯公司的这种仪器称为地层多次测试器，英文代码是 FMT。哈里伯顿公司的这种仪器称为选择式电缆地层测试器，英文代码为 SFT。九十年代初，斯仑贝谢公司推出了一种新型的电缆地层测试器，组件式地层动态测试器，它的英文代码是 MDT，它是井眼成像测井车 MAXIS-500 上的一支重要井下仪器，它代表了当代电缆地层测试技术的最高水平。与同类仪器相比，它具有许多独特的功能。以上这四种产品都是在裸眼井中使用的电缆地层测试器，它们是世界上占有绝大多数电缆地层测试服务工作量的仪器。哈里伯顿公司有套管井地层测试器，英文代码是 CWFT，它是在八十年代推出的一种新仪器。国内中原油田制造出电缆地层测试器。本书讨论的内容均适用于这些仪器。为了方便，我们将它们通称为电缆地层测试器，英文简写用 WFT 表示。以下我们用这些简写代表相应的仪器。

RFT 在四种裸眼井中最具有代表性，它是目前国内油田测量井数最多的仪器。由于 FMT 的性能价格比有一定的竞争性，在国内测量的总井数越来越多。SFT 在国内使用的很

少。MDT 目前在国内没有见到测试资料。CWFT 只是在国外应用，它正处于发展时期。

按照预测试室的类型分类，有单预测试室、双预测试室和可控预测试室三种类型的 WFT。单预测试室和双预测试室的 WFT 分别是有一个和两个 5 mL 或者 10 mL 的预测试室。可控预测试室的 WFT 有一个可以用手动或程序控制流量，容积大一些的预测试室。FMT 是单预测试室 WFT 的代表。RFT 是双预测试室 WFT 的代表。CWFT 和 MDT 都是可控预测试室的 WFT。它们的理论公式和压力记录是不一样的。我们逐个来说明它们。

WFT 所测量的压力曲线上包括泥浆柱静压力和地层压力等数据，它们综合地反映了储集层的压力性质。根据所取得压力资料可以估算每个储集层的渗透率，以及井剖面上的压力分布，油气水界面等，它们是油气藏描述不可缺少的压力原始信息；取得的流体样品需要进行实验室分析。分析流体样品可以估算储集层的产能、含水率等。

第二节 地层多次测试器

一、概 述

FMT 是一种复杂的单预测试室电缆测试系统。在一次下井中，它可以在每个储集层上得到一个预测试压力记录。预测试压力记录显示了封隔器在井壁上的密封情况与压力性质。当密封情况良好时，可以决定是否进行地层流体取样。通过取样，可以知道储集层中是否含有油气。预测试压力记录还可以快速定性估算地层渗透率。

测量的顺序要求先测量自然电位或者自然伽马等常规测井曲线，根据这些曲线马上解释出储集层所在的深度位置。再用多芯测井电缆连接与悬挂着 FMT，按照设计深度准确地定位在储集层上进行测量。每进行一次测量就有一个压力测试记录，用它可以获得对所测地层的评价，这是综合解释油气层的一项重要资料。电缆地层测试器的最大特点是提供了鉴别目的层产能的快速与经济方法。

与钻杆地层测试相比，FMT 能提供大量的与可靠的垂向压力分布。它可以在 20m 井段内的 50 个深度上测试 50 个压力记录，这样可以详细显示出在这个井段内的压力和产能的详细情况，而钻杆地层测试不可能达到这样的精度，同时钻杆地层测试的施工费用要比 FMT 高得多。钻杆地层测试的压力计测试的是被封堵井段的平均地层压力。FMT 测量的是在指定深度上压力与流体的性质。因此用钻杆地层测试压力资料来确定地层流体性质是不准确的。

图 1—2 表示出钻杆地层测试和 FMT 资料在一个油气藏上的应用。这个油藏的连通性好，油藏所包含的储集层都处于一个压力系统中。图中的几个钻杆地层测试压力形成的压力分布不能准确地确定各相流体的梯度。数据点落在距离梯度线较远的位置。图中 FMT 的压力数据准确地计算出天然气和水的梯度以及它们的密度、气水界面的深度。盐水的压力梯度为 0.465 psi/ft（磅/平方英寸/英尺）。天然气的压力梯度是 0.11 psi/ft（磅/平方英寸/英尺）。图中的两条直线的斜率与这两个数值接近，可以解释出上部是气层，下部是水层，两条直线的交点是气水界面。

FMT 资料有多种用途。从一个压力记录可以得到对应深度上的地层压力和泥浆柱压力。

用多个压力记录可以得到各个地层压力和泥浆柱压力。用一个井段内的多个地层压力值可以表示出该井段的垂向地层压力分布情况；用该井段内的多个泥浆柱压力还能做出泥浆柱压力梯度曲线。在垂向地层压力分布图上，可以得到储集层中液体和气体的梯度，并且识别出渗透性隔层。

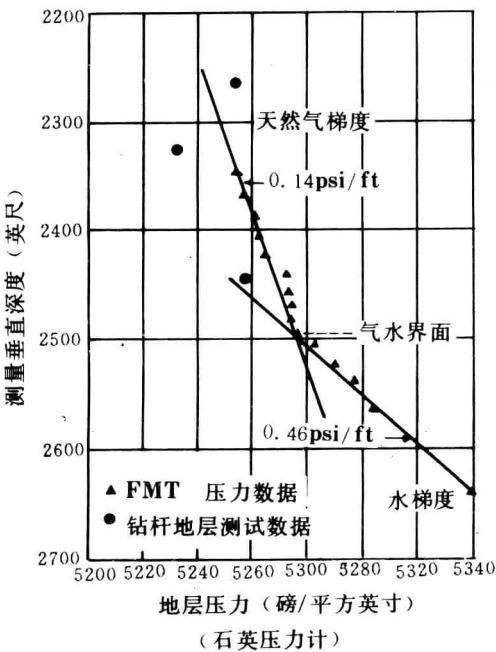


图 1—2 钻杆地层测试和 FMT 资料在一个油气藏上的应用对比

多井的 FMT 资料可以用于区域地质分析。用井与井之间的 FMT 的地层压力梯度做对比，可以发现井间横向连通存在与否。在固井时期，从压力测量得出的信息能说明泥浆失水的情况。使用 FMT 数据能设计射孔与确定酸化压裂的方案。用 FMT 中得到的信息能用于优化完井的方法和最大限度地发现储集层。

二、操作

FMT 在裸眼井中，当仪器下放到选择好的深度时，FMT 可以得到一条压力曲线。如果在地面仪器面板上的压力曲线显示井下仪器与井壁之间的密封良好，而且地层是一个渗透性好的地层，就可以打开一个井下仪器中两个取样筒中的一个，进行地层流体取样。图 1—3 是 FMT 的探头部分的像片。上面的像片是井下仪器的推靠器回缩时的状态，中间的像片是井下仪器推靠器推靠时的状态。

井下仪器系统包括控制电路、液压部分和采集流体样品的容器。图 1—4 是井下仪器结构示意图。控制电路和液压部分装在井下仪器的上部，探头部分安装在仪器的中间，取样筒安装在井下仪器的下部。有许多大小不同容积的取样筒可供选择。例如 3.875L、4L、10L 和 20L 等。根据具体的地质情况，可以选用各种尺寸的取样筒。如果井下仪器没有安装取样筒，探头部分距离仪器底部的距离为 1.676m。每一次可以选择其中两种取样筒，进行不同的组合。如果不进行地层流体取样，仅测量地层压力，可以不安装取样筒。

如果使用了 Hewlett Pacrd 石英压力计，在没有安装取样筒时，探头部分距离仪器底部的距离大约是 2.74m。当 FMT 装有两个 10L 的取样筒时，探头部分距离仪器底部的位置大约是 9.45m；如果使用石英压力计，这个距离达到 10.5m。当井底有储集层时，需要知道储集层距离井底有多深，如果小于探头到仪器底部的距离，FMT 就无法测量到这个储集层。

井下仪器的操作是由地面的测井仪器面板控制的。每一个胶片记录是由一个完整的控制操作过程产生的。当仪器正常工作时，记录的测量值是以时间秒的形式而不是以深度的形式记录的，如图 1—5 所示。当使用英制测量时，同常规的测井记录的深度格进行比较，一个时间格代表的是两秒而不是两英尺。第一道是以模拟方式记录压力值，它提供密封的有效性和

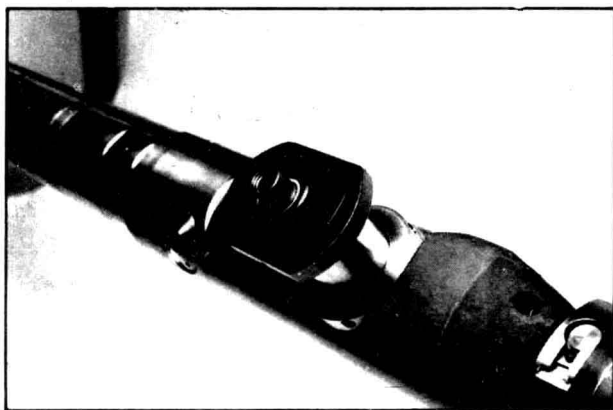
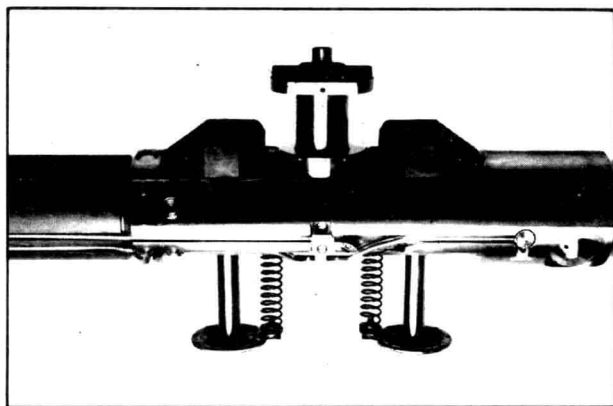
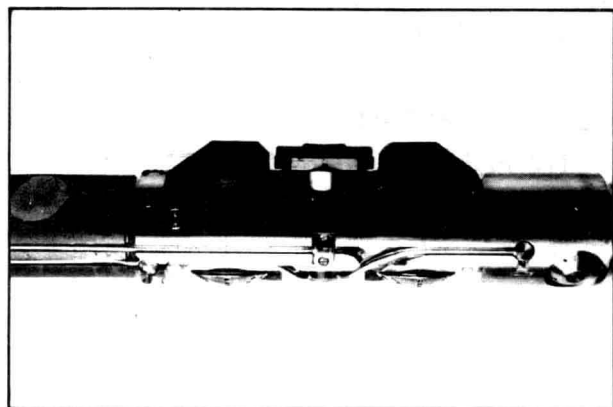


图 1—3 FMT 的探头部分的像片

渗透率的指示；第二道被分为四个记录压力的数字形式的小道，它们是个位、十位、百位和千位。它们提供了被记录压力的精确的数字型读数，液压泵的压力可以显示在第一道上，如图中的虚线，它能够帮助分辨井下仪器的预测试和抽取流体的各个工作阶段，并且显示出液压泵的工作状态。压力的列表数据也可以显示在图上。当温度显示模块工作时，温度曲线可以显示在第一道上。

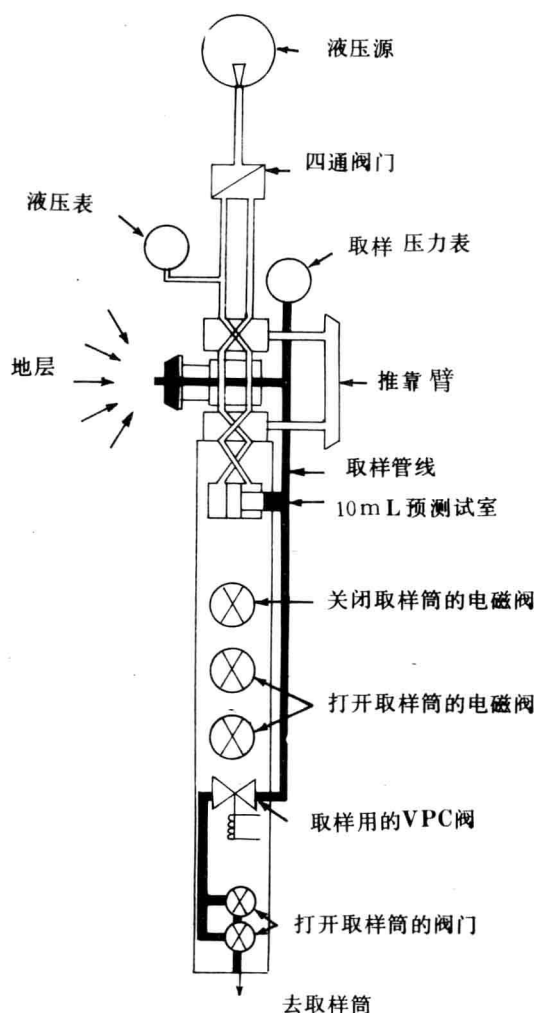


图 1—4 井下仪器结构示意图

在每个设计深度上，操作的过程包括在记录前后的泥浆静压力的两部分，即探头推靠前和探头回缩后对应的曲线，如图 1—5 所示。FMT 有一个内部马达泵、推靠和回缩探头的液压系统。液压驱动推靠臂，使带有环状橡胶垫的探头牢固地支撑在井壁上。这个环状的橡胶垫圈称为封隔器，它是一种特殊的经过硫化处理的过氧化腈橡胶，它适用于储集层中有硫化氢气体的环境。液压也显示在地面仪器面板上，用来指示液压系统工作正常与否。井下仪器的外壳始终保持远离井壁，这样可以减少井下仪器遇卡的可能性。

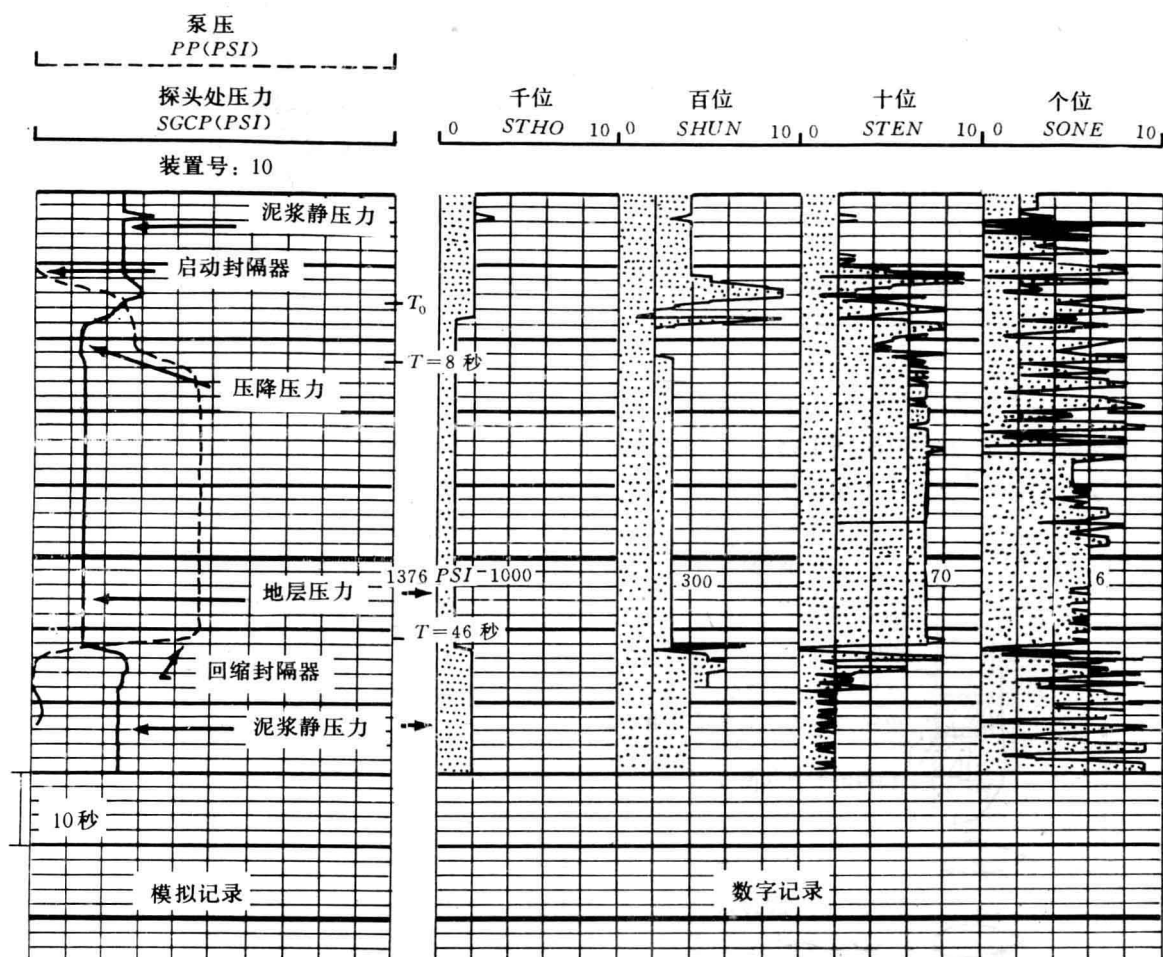


图 1—5 典型的预测试压力记录

推靠时，液压系统提供强大的推力推动推靠臂顶住井壁，由于反作用力，与之对应的探头被顶进地层。预测试室的活塞以一个常数流量抽取 10 mL 的流体，让它进入预测试室。地面仪器面板显示出液压泵压和测试压力曲线的变化，而且在地面仪器中记录了如图 1—5 形式的图。如果在一口井中有很多非常致密的储集层，为了能够达到好的测试效果可以选用 5 mL 的预测试室。