

美国石油工程师学会专论丛书

生产测井—理论与评价

[美] A. D. 海尔 著



石油工业出版社

美国石油工程师学会专论丛书

生产测井——理论与评价

[美]A. D. 海尔 著

张 宁 编译 徐松南 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国石油工程师学会专论丛书之一。

本书是一本系统、全面介绍生产测井方法和解释方法的专著。书中对各种生产测井方法的选择、作业程序和资料解释均作了详细介绍,并附有大量实例和典型曲线、图版,理论分析也非常详实、丰富。

本书不仅可作为生产测井从业人员的工作指南,而且对从事油田勘探、开发的管理干部、科研人员、现场工程技术人员和石油院校师生来说也是一本有用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生产测井:理论与评价/(美)海尔(Hill, A. D.)著;张宁编译

北京:石油工业出版社,1995.7 (美国石油工程师学会专论丛书)

书名原文:Production Logging: Theoretical and Interpretive Elements

ISBN 7-5021-1508-0

I. 生…

II. ①海…②张…

III. 生产测井-理论-评价

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)

北京士得福科技开发中心排版

北京大学附属小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 9.375印张 1插页 237千字 印1—1500

1995年8月北京第1版 1995年8月北京第1次印刷

定价:15.00元

序 言

在油田的整个生产期间,可供采用的生产测井方法有许多种。应用于大多数油井中的一些生产测井作业都能顺利完成。但是,相对于其他的试井方法,如:裸眼测井、不稳定试井来说有关生产测井的文献却惊人地缺乏。五十年来,大多数有关生产测井的文献出现在一些期刊和服务公司的手册上,而且为数不多。当然,各服务公司手册中所涉及的范围和所提及的专用工具以及使用方法的细节是很有限的。本书的目的就是把有关生产测井的测量方法与解释方法的现有的知识集中起来,从而为想学习和解释生产测井的石油工程师们提供一个知识的来源。

本书在范围上是有限的,因而只可被视为希望在生产测井解释方面有所成就的从业者的一个起点。读者将会发现本书在生产测井方面比其他此类内容的书更具优越性。这本书提出了发展生产测井专门技能所必需的基本原理。

通篇的指导方针就是帮助工程师们选择能够获得理想数据的合适的测井技术。对每一种测井方法、测量理论的细节都有充分的描述,以便使工程师们鉴别所获得的数据的准确性和局限性,并且明白解释方法。在回顾了通常的操作方法之后,主要指出了为获得高质量的测井所必须遵循的步骤。另外,还详述了解释方法,并举例说明。同时也努力说明了正确进行生产测井作业和生产测井解释的效用,还指出了许多测量方法内在的局限性。

本书并未打算写成培训手册,用来传授生产测井操作方法。比如:几乎没有提及用以为获得并显示生产测井数据的地面电子装置。但是所详述的有关这套装置的知识却是生产测井作业者所必需的。由于各经销商的工具有所不同,因此,本文是对销售商所提供的信息的最好的补充。

通过对本书所包含内容的充分理解,可以使一位工程师:(1)

为完成给定的生产测井任务选择某种测井方式或某种组合测井方式；(2)知道哪种测井方式不能使用；(3)掌握使每次测井可获得最多的信息所必须遵循的测井作业程序；(4)对所有通常使用的生产测井进行初步的解释和(5)对在各种不同的井眼条件下进行的各种测井方法辨别其相对精度。

对采油工程师和油藏工程师来说，搜集有关生产测井方面的资料是十分有价值的。但是，在许多情况下，目前所拥有的技术还不足以回答所提出的种种问题，我希望将来新的生产测井技术的发展能够对最复杂的井眼条件进行作业并作出诊断。

A. 丹尼尔·海尔
于美国得克萨斯州奥斯汀市
一九九〇年五月

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 生产测井的定义和用途	(1)
1.2 生产测井的发展历程	(2)
1.3 技术现状	(3)
1.4 将来的需要	(4)
1.5 视野和目标	(4)
1.6 章节编排	(5)
参考文献	(6)
第二章 用生产测井对油井和油藏进行识别	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 钻井和定井过程中生产测井的应用	(8)
2.3 在投产和投注期间生产测井的用途	(18)
2.4 用于修井作业的生产测井	(25)
2.5 生产测井作业的计划 and 报告	(26)
2.6 井的诊断小结	(31)
参考文献	(39)
第三章 管线中的单相流动	(43)
3.1 引言	(43)
3.2 层流和紊流	(43)
3.3 速度剖面	(45)
3.4 在环形空间的流动	(48)
参考文献	(52)
第四章 温度测井	(53)
4.1 引言	(53)
4.2 工具和操作	(54)
4.3 井筒内温度特性的理论	(56)
4.4 温度测井解释	(70)

4.5	用温度测井鉴定水力裂缝	(93)
4.6	温度测井施工和解释指南	(96)
	参考文献	(99)
第五章	放射性示踪测井	(103)
5.1	引言	(103)
5.2	工具和操作	(104)
5.3	示踪剂损耗法测井	(105)
5.4	速度推测测井	(122)
5.5	示踪剂释放	(140)
5.6	层流中的放射性示踪测井	(143)
5.7	双脉冲示踪测井	(153)
5.8	放射性示踪测井操作和解释指南	(154)
	参考文献	(159)
第六章	转子流量计测井	(162)
6.1	引言	(162)
6.2	工具和操作	(163)
6.3	转子流量计的操作	(164)
6.4	转子响应理论	(167)
6.5	转子流量计测井解释	(170)
6.6	特别工具及其应用	(193)
6.7	转子流量计的作业和解释	(196)
	参考文献	(199)
第七章	单相流动生产剖面概述	(201)
7.1	引言	(201)
7.2	温度测井、放射性示踪剂测井及转子流量计测井的比较	(201)
7.3	测井实例	(207)
第八章	套管中的多相流动	(213)
8.1	引言	(213)
8.2	滞留现象	(213)
8.3	两相流动状态	(218)
8.4	两相压降特性	(226)
8.5	管道倾斜对两相流的影响	(228)

8.6 两相油井孔眼中流出的流体	(231)
8.7 三相流	(232)
参考文献	(235)
第九章 多相流中的生产测井	(237)
9.1 引言	(237)
9.2 多相流的生产测井解释	(239)
9.3 生产井中的操作方法(施工程序)	(241)
9.4 液流速度的测量	(242)
9.5 流体识别测井	(257)
9.6 多相流测井的定量分析	(267)
9.7 三相流中的定量分析	(275)
9.8 多相流定性生产测井解释	(275)
9.9 在多相流中进行生产测井解释和施工准则	(284)
参考文献	(289)
后记	(292)

第一章 引言

1.1 生产测井的定义和用途

所谓生产测井,通常包括许多用于完井后的注入井和生产井的测井技术,其目的是评价该井本身和油藏的生产动态。然而,近些年来,生产测井的任务则扩展了从钻井初期各个阶段,一直到该井的整个开采历程的最终。生产测井的目的就是评价油管内流体的流动,或者说,在某种情况下,就是直接评价井的完成情况。生产测井的最普遍的用途就是计量井眼内流体流动剖面,测量井眼内从地层进入井眼或由井眼进入地层的流体的情况。Wade^[1]等人在谈到生产井时,认为生产测井就是回答:“哪种流体,各有多少、来自何方”的问题的。套管完井的地层评价测井,比如说脉冲中子测井,有时也被认为是生产测井;然而,对该项工作的目的来说,不会考虑地层评价测井,除非它们被用于测定流动剖面。可以认为早期的测井方法是指对单相流进行温度放射性示踪和旋转流量计等测试,对多相流的温度测井,流动密度测井,流体的内容和流量计测井,以及用于完井评价的噪声测井,水泥胶结测井,和非聚焦伽玛射线密度测井。

生产测井通常用于有问题的井的判断或油藏监测^[2]。随着更多的美国油田逐渐步入二次和三次采油期,生产测井的需求量不断上升。生产发展到这个阶段,油藏的驱扫效率常需进行动态评析,而生产测井则是用于确定注入或产出流体纵向分布的最有效的少数几种方法之一。同样,适当的完井方法对油藏产能效率是非常重要的而生产测井则是评价井眼的一种主要方法。正象 McKinly 所说,在某种情况下,生产测井技术甚至可被应用于钻井过程

中。

生产测井,象大多数试井一样,依赖于间接计量来获取所要求的结果。例如:在温度测井中测得的井眼温度是所测井深的函数。工程师们能应用评价图来确定注入层段或生产层段。因此,在生产测井中,测井解释是相当重要的。几乎所有的测井解释都依赖于对井眼内和井眼周围流体的运移的了解以及对这些流体的运移是如何影响测井计量的了解。因此,测井解释是本书的重点。

1.2 生产测井的发展历程

生产测井是随着利用温度监测和确定井眼内流体进入地层的层段而开始^[3]。油田的早期工作者们认识到,冷却了的气体随着其膨胀而引起低温异常,从而可确定气层的位置。也常用冷却液注入井内,关井后测定井内残余的温度异常来确定可渗层^[4]。

本世纪 40 年代,在温度监测中增加了流量和压力测量以获取有关井眼条件的更多的信息^[5,6]。井内的流体类型可通过测量压力梯度来确定。流量测量则可获得有关注入和产出量的资料。

更进一步的发展则是地面记录的生产测井仪。这给操作者们提供了在测井过程中更为灵活和可控的明显优越性。随着可靠的润滑油挤注装置的发展,地面记录仪则成了工业标准。

到本世纪 60 年代中期,发展了其他的生产测井仪,以获取有关井眼条件的更进一步的信息,特别是用于多相流动条件下的仪器。密度计和产能(含水井)计可用来解决复杂的多相流动特性问题。同时,固井质量测井作为一种完井评价方法取得了广泛的应用^[7~9]。

随着有效的新仪器的发明,所遇到的更为复杂的情况使得测井解释方法更进一步发展,如今,新的测井技术和解释方法仍在不断进行试验,毫不怀疑,今后的几年内,人们对井眼流动特性的了解将会更加深入。

1.3 技术现状

目前大量的生产测井仪器是非常适用的。对单相流体流动、温度测井、放射性示踪测井和旋转流量计测井已广泛地应用于生产中。在大多数情况下,合理地应用这些方法和进行解释都可得到精确的流动剖面。而在多相流体流动的情况下,除应用单相流体流动的测井方法外,还要加上流体密度测井、流量测井和偏心流量计测井。为了完善评价,工程师还可选择噪音测井,固井评价测井,有时也用非聚焦伽玛射线密度测井。

用同一管柱下入所有生产测井工具通常是可行的^[10]。最近已经开发了可同时进行计量的工具^[11]。并可清除由于井眼不稳定而产生的某些误差。因为常常需要进行全套的测井,特别是在多相流动的情况下。所以用一趟管柱同时下入许多工具并同时进行多通道的测量,显然是非常先进的。

在过去的40年中,测井装置已取得了重大的改进,但是,测井技术尚有一些局限性,特别是在多相流体流动的情况下。在单相流体流动的情况下,如应用得当,大多数流动剖面技术都可提供相当精确的结果,值得注意的例外是在小流量井或是非正规的裸眼井中,则不一定可靠。在多相流体流动的井眼中,其条件往往是如此地复杂和非常不同于所设计的工具应用范围,以致于生产测井计量常常是不准确的,在错误的情况下,产生错误的决策或是对井眼情况产生全盘错误的认识。这不值得惊讶,因为我们所试图要做的困难的工作是在一个两相或是三相的流体中进行测量,而所测得的仅是远离流动主体的一小部分样品。还有,在目前的条件下,尽管可以使用许多经过改良的仪器,但仍没有办法精确测量未经一次相分离的多相流体的流动。

1.4 将来的需要

今后生产测井结果要进一步完善,将需要开发新的计量工具,因为从现有测试仪器及解释方法只可能是逐步改进。可能需要一种全新的方法来显著提高我们测量流动剖面的能力,特别是在多相流动的情况下。

目前,在生产实践中,通过对井内流体的流动的测量而导出流体进入井筒内的位置和流量,例如:我们可以在井眼内几个井段测定平均流速和平均流度。根据这些测量结果,通过对多相流动的推导可计算出每一相的体积流量。并可求得流入井眼内不同深度井段之间的流量差别。这种方法十分困难—基本的计量器具常常不准确,而评价则依赖于对流动条件的估计,这些导致更进一步的失误。

要明显提高多相流条件下测定流动剖面的能力,需要对流体量的变化采取更直接的测量方法。直接测量单相或多相流体的平均流速的技术,将大大改进多相流动生产测井结果。取而代之的是:直接测量流经孔眼的流体流速,而不是根据从地层流入井眼内流体流量的变化来推导出流动状况。这可能是将来的一个重大变革。

生产测井工具和解释方法将需要进行改进,以使之更加适应于生产测井的应用。在勘探井的钻井过程中,这些测井将是有用的判定工具^[2]。随着生产的持续发展、生产测井将会被越来越多地用于提高采收率的生产作业中去。在这些新领域中的流体的不同特性,将需要新的方法来进行生产测井。

1.5 视野和目标

本书将作为那些从事生产测井和生产测井解释的石油工程师们的信息源。我已努力将把普遍应用于套管内外流动的生产测井

或是完井评价测井全部包括进来。但是,除用于剖面测量外,套管井的地层评价测井不包括在内。

纵观本书,提出一种指导性意见以帮助选择适当的测井技术,从而得到理想的数据。对每一种测井方法,将尽量详细地提出测量理论。以使工程师们了解测井的精度和局限性,并明白测井解释的过程和方法。在温习了一般的操作过程以后,首先指出,为获得高质量的测井所必需遵循的步骤。随后详细介绍测井解释方法,并以实例来说明。在本文中,我已力图表明生产测井正确使用的效力和解释方法。并指出那些测量器具固有的暂时无法克服的局限性。

1.6 章节编排

本书分成4个主要部分。第一部是绪言,并象道路图册一样提出贯穿于井和油藏全部生命的生产测井的应用方法。对具体的问题,读者可在随后的章节中,寻求到详细的测井方法和解释方法。后面的三个部分则涉及到单相流体流动的测井。多相流体流动的测井和管外以及完井评价测井。特别的测井技术将在最早的部分中予以介绍。(如在单相流部分的温度测井),然后在其他部分里应用时再次予以讨论。

第一部分包括了第一章和第二章,第一章对本书进行了介绍,而第二章则描述了生产测井在井和油藏诊断方面的使用。对读者来说,若某口井或某个油藏遇到问题,第二章将提供帮助:诸如将使用哪种测井方法,预期的结果精度如何,以及使用何种其他的测井方法来完善生产测井。

第二部分从第三章到第七章。介绍用于单相流体的生产测试方法。在随后的章节中将分别讨论,同样的这些测量方法其中有些在多相流体流动条件下所受到的影响。第三章简要回顾了管内流动的基本原理。第四、五、六章则分别介绍温度测井,放射性示踪测井和旋转流量计测井。第七章则总结了应用于单相流的生产测井技术,并着重强调各种测井方法之间的关系。

第三部分(第八章、第九章)则探讨相当困难的在多相流体流动状态下的生产测井。第八章提出了管线内多相流体流动所需明白的生产测井计量方法和评价解释方法的背景知识。第九章则讨论多相流体流动状态的生产测井。原先提出的测量方法分温度测井、放射性示踪和旋转流量计测井并将作为多相流分流的测井方法进行讨论。并介绍多相流体流动条件进行生产测井的唯一计量方法。本章强调了在多相流条件下要进行多种测井的技术和指出进行测井生产实践的局限性。

最后一部分:第十章到第十二章,则讨论用于完井评价或井眼各部流动的测井技术。第十章,讨论噪声测井,第十一章则讨论用于固井评价的水泥固结情况和超声波脉冲回声测井。第十二章则讨论其他的应用不多的测井技术,如用于套管外流体的测井技术。这些包括非聚焦伽玛射线密度测井,辐射层温度测井,以及用于测量流体表面的脉冲中子测井。

贯穿全书,我是试图对各种生产测井方法赋予足够的理论根据,使工程师们能判断在不同场合下这些测试方法的优缺点。在这些理论之后随即用实例来说明生产测井的通常用途。

参 考 文 献

1. Wade, R. T. *et al.* : "Production Logging — The Key to Optimum Well Performance," *JPT* (Feb. 1965) 137—44.
2. McKinley, R. M. : "Production Logging," paper SPE 10035 presented at the 1982 SPE Intl. Petroleum Exhibition and Technical Symposium, Beijing, March 18—26
3. Schlumberger, M., Doll, H. G., and Perebinosoff, A. : "Temperature Measurements in Oil Wells," *J. Inst. Pet. Technologists* (Jan. 1937) 23, No. 159.
4. Millikan, C. V. : "Temperature Surveys in Oil Wells," *Trans., AIME* (1941) 142, 15—23.
5. Dale, C. R. : "Bottom Hole Flow Surveys for Determination of

- Fluid and Gas Movements in Wells," *Trans.* , AIME (Aug. 1949) 186 205—10.
6. Riordan, M. B. : "Surface Indicating Pressure, Temperature and Flow Equipment," *Trans.* , AIME (1951) 192 257—62.
 7. Grosmanin, M. , Kokesh, F. P. , and Majani, P. : "A Sonic Method for Analyzing the Quality of Cementation of Borehole Casings," *JPT* (Feb. 1961) 165—71.
 8. Riddle, G. A. : "Acoustic Wave Propagation in Bonded and Unbonded Oil Well Casing," paper SPE 454 presented at the 1962 SPE Annual Meeting, Los Angeles, Oct. 7—10.
 9. Pickett, G. R. : "Acoustic Character Logs and Their Applications in Formation Evaluation," *JPT* (June 1963) 659—67.
 10. Meunier, D. , Tixier, M. P. , and Bonnet, J. L. : "The Production Combination Tool — A New System for Production Monitoring," *JPT* (May 1971) 603—13.
 11. Anderson, R. A. *et al.* : "A Production Logging Tool with Simultaneous Measurements," *JPT* (Feb. 1980) 191—98.

第二章 用生产测井对油井和油藏进行识别

2.1 引言

生产测井是评价油井和油藏生产情况的有力工具,但使用不当,或所处环境不宜时,也可成为一种浪费时间和人力及财力的举动。对所用的各种生产测试方法的能力和局限性的理解以及对生产测井所能解决的各种问题类型的认识程度是有效地进行生产测井的根本。这一章,通过讨论生产测井所能查出的井或油藏的问题以及在每种情况下所使用的测井方法来概述贯穿油井整个开采历程生产测井的应用。

油藏动态监测,完井评价和修井作业的计划及评价都是生产测井最普通的应用^[1-8]。有时生产测井是作为常规油藏监测工作的一部分;但是更普遍地被油田工程师们用来直接诊断从井的动态碰到的问题,地面的生产状况或将该井与邻井比较而发现的问题,均可通过生产测井加以证实。

对一口井来说:从开钻后到最终废弃,各种生产测井都是有用的井况诊断工具。这一章首先描述了在钻井和完井过程中生产测井的用法,之后描述更常用的油井生产或注入阶段的生产测井。然后叙述与修井作业有关的生产测井的用法,在提出生产测井作业的规划准则以后,用表格形式概述了在井或油藏动态评价中生产测井的应用。

2.2 钻井和完井过程中生产测井的应用

传统上人们认为生产测井是用于完井后的生产井或注入井,

但是,现在越来越多地被应用于钻井和完井阶段中。从开始钻井作业时起,生产测井就可被用来寻找泥浆漏失层,地下井涌层段或是倒灌井的水源。事实上,所有的完井作业,包括固井、砾石充填、射孔或是油井的酸化、压裂,都可用生产测井来进行评价。

2.2.1 泥浆漏失层的检测

泥浆漏失层系指一个层段由于井眼和地层之间的压力差而导致在钻井过程中泥浆进入该层段(见图 2.1)。在泥浆漏失层段,流体从井眼进入地层。因此,某些相同的技术在完井后也可用来测定注水剖面。与此相反,确定漏失层位置的各种复杂因素是,所关心的漏失液发生在钻杆与井壁的环形空间,再者钻井泥浆又往往是粘稠的。在这些条件下,需要一种能够检测钻杆外部液流的方法。

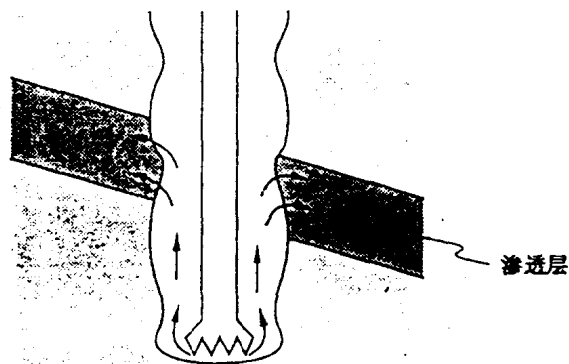


图 2.1 泥浆漏失层

可用温度测井和放射性示踪测井来确定泥浆漏失层。在这种情况下,与在注入井中的测温情况相同,关井温度录井,根据冷流体进入地层会导致地层冷却而出现低温异常,判定那些是流体的漏入层。一旦钻井泥浆进入地层,从温度往下逐渐升高的突然中断,即可断定漏失层位。这是因为钻井循环泥浆沿环空上返时,在较深部位与地层接触被升温,而在漏失层的上部环形空间中,已升温的泥浆量较少,导致漏失层上部的井筒受热较少。图2.2就说明了这个现象。第一次测井温曲线是钻井过程中,泥浆的循环排量很