

探边测试试井分析的发展综述

薛敬利*

刘曰武

纪友亮

(石油大学·华东) (中国科学院力学研究所) (石油大学·华东)

摘要 对近50年来探边测试试井分析的发展过程进行了综合分析研究,说明了探边测试试井分析是一个从简单油藏类型到复杂油藏类型的一个发展过程。指出了探边测试与常规测试的重要区别在于边界的性质、形状和大小的区别。给出了一个新的任意形状油藏,在不同边界条件下的数值试井模型。分析了不同边界性质对试井理论曲线的影响,以及边界距离的影响。明确指出探边测试的发展趋势必然是数值化求解的新思路。

主题词 探边测试 试井 边界 方法 研究

前 言

探边测试是在1956年由Jones^[1]首先提出的,一般是指“Limited Well Test”或“Extended Well Test”。Jones为探边测试提供了完整的理论基础,其后有许多研究者^[3-27]在这一领域作了大量的工作。由于计算机技术的发展,国际上70年代后期探边测试发展较快,在油田开发试井技术的基础上有了进一步的发展。通过探边测试油藏工程师对动态资料的解释更加深刻,主要表现在对油藏边界类型和边界大小的认识更清楚,这为油田勘探开发的决策提供了可靠的信息。

探边测试技术作为油藏勘探及开发初期地层状况的分析方法意义深远,尤其是对于埋藏深度大于2500 m的井,是其它物理方法所不能代替的。探边测试在勘探开发与一般试井分析存在一定的区别,主要在于测试设备、测试工艺设计以及测试目的。勘探初期井的测试主要关注流体液性、产能,通常采用钻杆测试(DST: DRILL STEM TEST)来完成。探边测试的主要目的是确定油藏边界的性质和大小,这是确定开发方案和开发方式的重要依据。地质和地球物理资料在确定地层边界性质和相变界限是非常困难的,这一研究的主要突破是不仅仅依靠圈闭溢出点判断油藏边界。开发阶段主要探边试井设备是直读绞车、高精度电子压力计和井口控制设

备或由钢丝、油管携带存储式电子压力计进行。

发展历史概述

探边测试与一般试井分析有着密切的关系。一般试井分析方法作为确定地层动态状况的主要手段从20世纪30年代提出,发展到现在已经近70年的历史^[11],主要理论依据是达西渗流理论和1935年Theis^[4]提出的点源函数理论,以及1949年Van Everdingen^[5]提出的Laplace变换理论。主要分析方法是1951年Horner^[6]提出的半对数直线分析理论和1974年Ramey^[7]提出的双对数压力曲线拟合理论,到1983年由Gringarten和Bourdet^[9]发展为双对数压力和压力导数曲线拟合理论。一般试井分析方法只能给出规则形状油藏在特定井位条件下的解释,即使已知油藏的形状,也难以给出合理的计算。因此,必须寻找新的思想和方法解决地层边界的问题,对油藏进行更为细致合理的地质描述。

最初的探边测试主要用于确定泄流区域的大小判断,即确定探测范围内有没有边界影响,并且评价单井控制范围和地质储量^[1,2]。随后应用的对象由油井扩展到了气井^[2]。随着油田开发技术的发展,人们不仅要求探测范围的大小,而且也对边界的形状提出了要求。这样,从60年代以后,人们对探边测试的研究主要集中在油藏边界的形状上^[3-22]。为了对油藏边界形状有一个较好的认识,就提出了

* 薛敬利,男,高级工程师,1990年毕业于石油大学矿场地球物理专业,从事试油测试技术研究与管理工。现为石油大学(华东)在读研究生。地址:河北省廊坊市华北石油管理局油气井测试公司,邮政编码:065007。

形状因子的概念。形状因子是由 Ditzs^[10] 在 1965 年首先提出的, 1993 年曾萍、郭冀义^[15] 提出了楔型储层探边试井分析的交点法。同年, 曾萍、赵凤兴^[16] 用边界元方法进行探边试井分析的理论研究。1995 年刘曰武等人^[13] 利用改进的试井分析方法研究了压裂井到断层的距离问题。刘泉海、刘曰武等人^[14] 用边界元方法研究了复杂断块油藏边界的确定方法。1998 年 Helmy, M. W. 和 Wattenbarger^[17] 给出了新的油藏形状系数。同年 Stephen 等人研究了实际断层的地质因素对压力测试资料的影响。2000 年 Guo, Boyun 和 Westaway 等人^[18] 对复杂形状油藏的不稳定试井分析进行了研究。2001 年周蓉、刘曰武等人^[20,21] 开始了数值试井方法研究, 主要解决了圆形地层试井理论模型问题。2003 年刘曰武、薛敬利等人^[22] 研究了三角形油藏的探边测试资料分析的数值试井问题。

另外, 我国在单井规则边界条件下的探边测试应用方面做了较多的工作^[23-27], 而对在单井不规则边界条件下的探边测试应用方面做的工作较少, 在多井条件下的探边测试应用方面做的工作更少。主要问题在于, 对于不同油藏、不同地质条件下的模型研究较少, 另一方面在于对存在邻井影响下的试井模型很难进行求解。

目前, 探边测试的试井理论所用的模型, 无论是 Theis 的点源解模型、Agarwal 的井储模型、Ramey 的井储表皮模型还是 Gringarten 和 Bourdet 的有效井径模型都利用了以下的基本假设: 地层均质、等厚、水平板状、各向同性、流体单一且性质不变, 而这些条件只有在勘探开发初期能有部分满足, 而在油田很多条件下已经不能满足油田勘探和开发的要求。因此, 必须对单井在不规则边界条件下的探边测试地质应用和在多井条件下的探边测试地质应用做深入的研究工作。

理论模型研究的发展

作为探边测试理论模型的发展主要包括两个方面, 一方面是不同的油藏边界条件下试井数学模型, 另一方面是对于不同油藏边界条件下试井理论曲线的认识。

1. 油藏模型的综述

(1) 目前用解析解或半解析解可以求解的油藏模型

模型主要是能够通过解析解或半解析解, 以及镜像叠加原理进行求解的数学模型。最基本的模型是均质无限大油藏的理论模型。

$$\text{控制方程: } \frac{\partial^2 p_D}{\partial R_D^2} + \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } p_D(T_D = 0) = 0 \quad (2)$$

$$\text{外边界条件: } p_D(R_D \rightarrow \infty) = 0 \quad (3)$$

$$\text{内边界条件: } \left. \frac{1}{R_D} \frac{\partial p_D}{\partial R_D} \right|_{R_D=1} = -1 + \frac{\partial p_{wD}}{\partial T_D} \quad (4)$$

$$\text{其中 } R_D = r_D e^{-S}, \quad T_D = t_D / C_D$$

$$C_D = \frac{1.592C}{\phi h C_r r_w^2}, \quad t_D = \frac{3.6kt}{\phi \mu C_r r_w^2}$$

$$p_D = \frac{kh(p_i - p)}{1.1842 \times 10^{-3} q \mu B}, \quad r_{we} = r_w e^{-S}$$

式中: B ——体积系数;

C ——井筒存储系数, m^3/MPa ;

C_i ——总压缩系数, MPa^{-1} ;

h ——地层有效厚度, m ;

k ——油藏渗透率, μm^2 ;

p ——地层压力, MPa ;

p_i ——地层原始压力, MPa ;

q ——生产率, m^3/d ;

r_w ——油井半径, m ;

S ——表皮系数;

ϕ ——油藏孔隙度;

μ ——地层中流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

r_{we} ——有效井径, m ;

下标 D ——无量纲。

除了均质无限大油藏外, 还有其它规则边界的均质有界油藏。这些油藏包括: 均质有界圆形定压/封闭边界油藏, 均质线性定压/封闭边界油藏(包括单一线性边界、两条夹角边界、三条线性边界组成的河道“U”边界、四条线性边界组成的矩形边界等)。与之相对应的双重介质油藏, 也有对应的类型。它们包括: 双重介质无限大油藏, 双重介质有界圆形定压/封闭边界油藏, 双重介质线性定压/封闭边界油藏(包括单一线性边界、两条夹角边界、三条线性边界组成的河道“U”边界、四条线性边界组成的矩形边界等)。

这些是目前常用模型, 在探边测试中可以解决规则几何边界问题。但是, 实际油藏的边界是多种多样的, 是以上模型所不能完全描述或近似的。因

此,必须发展新的模型和解决问题的手段。

(2)探边测试研究的新模型介绍

要解决边界的复杂性,需要新的理论和新的分析手段。在此给出一种由现行边界组成的任意形状油藏的试井分析模型。它可以用来解决三角形油藏、任意四边形油藏以及任意多边形油藏的探边测试资料解释问题。基本假设:油藏为水平板状的、均质各向同性、由任意多条线性边界的多边形油藏;井在多边形油藏中的任意位置,贯穿地层并以一定产量生产;地层中流体为弱可压缩、定常粘度的牛顿流体;流体在地层中的流动为层流状态,遵从达西定律;整个测试过程是一个等温过程,忽略重力作用,不考虑其它物理化学变化的影响。在此描述下的试井数学模型可以表示为以下形式,即

控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial X_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial Y_D^2} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (X_D, Y_D) \in \Omega \quad (11)$$

初始条件: $p_D(T_D = 0) = 0$ (12)

外边界条件:

定压边界条件: $p_D|_{\Gamma_d} = 0$ (13)

封闭边界条件: $\left. \frac{\partial p_D}{\partial n} \right|_{\Gamma_f} = 0$ (14)

内边界条件: $\left. \frac{\partial p_D}{\partial n} \right|_{\Gamma_w} = -1 + \frac{\partial p_w}{\partial T_D}$ (15)

式中: Ω ——所研究油藏;

Γ_d ——线性定压边界;

Γ_f ——线性封闭边界;

Γ_w ——内边界。

由此模型可以解决任意多边形油藏的探边测试资料的分析问题。

2. 边界反映的特征分析

探边测试资料分析的主要工作是在测试资料的压力和压力导数曲线的反映特征上。从总的特征看,油藏的边界形状对早期的试井理论曲线并没有多大影响。对于压力理论曲线,压力和压力导数曲线的早期段仍然是由井筒储存效应和表皮效应控制的阶段。在最早的井筒控制阶段,压力和压力导数曲线都是斜率为 1 的直线段;在曲线的中期,压力导数曲线都是接近于水平的曲线,压力导数的数值接近于 0.5;但对于晚期阶段,由于边界性质不同,曲线的形态发生了巨大的变化。

探边测试的资料解释是基于对模型的反演而得

出的最佳结论,结合静态资料求出理想的边界类型。对于单一线性封闭边界、单一线性定压边界、圆形定压油藏、圆形封闭油藏,在半对数图和双对数图上,压力曲线和压力导数曲线存在的关系可以得出较为明确的结论(见图 1、图 2)。

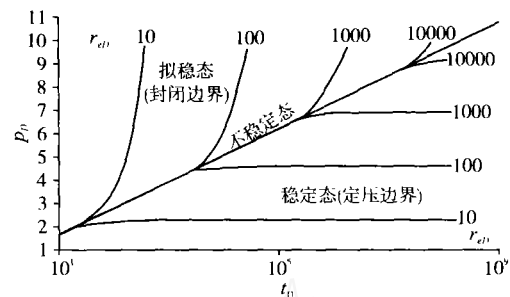


图1 封闭/定压圆形油藏半对数典型曲线(后期段)

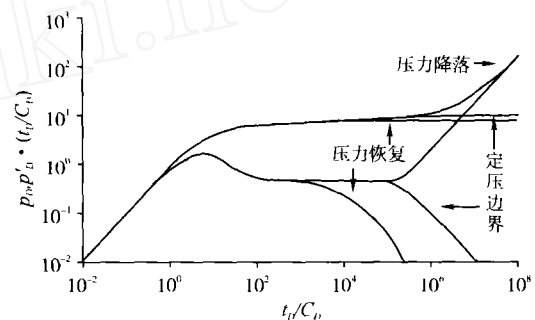


图2 封闭/定压圆形油藏双对数典型曲线

对于平行边界封闭油藏,两条边界都是封闭边界或定压边界,在双对数曲线图中压力曲线与压力导数曲线表现不同(见图 3)。如果两条边界有一条边界是定压边界,那么在直角坐标图、半对数图以及双对数曲线图中,压力曲线最终表现为水平直线段。但由于有封闭边界存在,压力导数曲线在双对数曲线图中表现为下掉之前可能存在一个明显凸起。

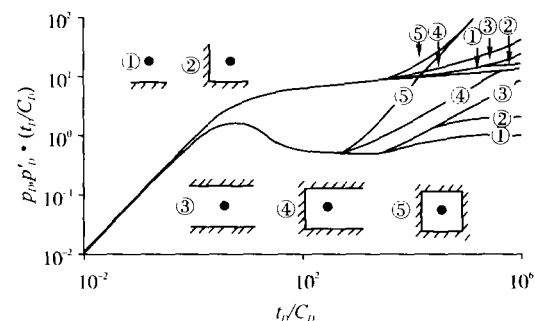


图3 几种不渗透边界油藏的双对数典型曲线

对于夹角形边界油藏,如果两条边界都是封闭边界,那么在半对数曲线中将会出现两个不同斜率

的直线段。两直线段的斜率与封闭边界的夹角存在密切关系,夹角越小第二直线段与第一直线段的斜率比值越大。在双对数曲线图中,压力曲线一直上翘,而压力导数曲线会出现两个水平直线段,夹角越小压力导数曲线第二水平直线段的对数值越大。如果夹角为 90° ,那么压力导数曲线第二水平直线段的对数值等于2(见图3)。如果两条边界都是定压边界,那么在直角坐标图、半对数图以及双对数曲线图中压力曲线最终表现为水平直线段,在双对数曲线图中压力导数曲线最终表现下掉;如果两条边界有一条边界是定压边界,那么在直角坐标图、半对数图以及双对数曲线图中压力曲线最终表现为水平直线段,而压力导数曲线在双对数曲线图中表现为下掉。

对于“U”形边界油藏,如果三条相互垂直的边界都是封闭边界,那么在双对数曲线图中压力和压力导数曲线最终表现为平行轨道式,即压力曲线与压力导数曲线相互平行而不相交(见图3)。在此之前,由于井距三个边界的距离不同可能出现两个波弯。如果三条边界都是定压边界,那么在直角坐标图、半对数图以及双对数曲线图中压力曲线最终表现为水平直线段,而压力导数曲线在双对数曲线图中表现为下掉;如果三条边界有一条边界或两条是定压边界,那么在直角坐标图、半对数图以及双对数曲线图中压力曲线最终表现为水平直线段。但由于有封闭边界存在,压力导数曲线在双对数曲线图中表现与夹角边界油藏类似。

对于其它规则边界形状,不再做仔细分析,但给出总的原则,即封闭边界的影响是使双对数图中的压力导数曲线上翘,定压边界的影响是使双对数图中的压力导数曲线下掉,发生作用的时间是由井到边界的距离所确定的,井到边界的距离越大,边界作用的影响越晚。图4给出了另外一种三角形边界的试井理论曲线的计算情况。

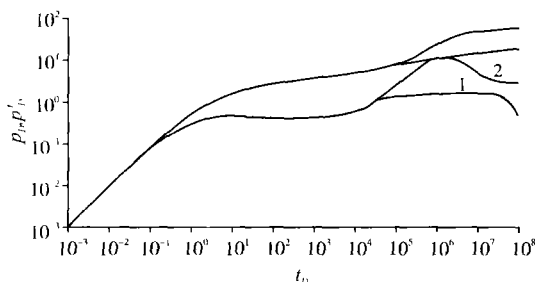


图4 钝角三角形油藏中的理论曲线

在储层评价中的应用

我国在探边测试试井理论和实际应用方面都作了大量的工作^{[13~16],[20~27]},现以一典型事例说明这些工作的进展状况。

X井是一口滚动开发井,本井射开东二2井段2525.6~2541.0m,两层厚度为8.8m。通过对该井钻井、录井、取心和电测资料分析,该井储层物性较好,电测解释平均孔隙度为21%,渗透率在 $6.2 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,电测解释为油层。经试油没有自喷能力,随后进行抽油机投产,并安装偏心井口准备录取资料,以 $26\text{m}^3/\text{d}$ 的产量稳定生产12d,动液面下降很快,由最初的井口下降到1200m,为进一步弄清该井所在区块的油层特性、断块形状、控制面积和油层压力等参数,决定在该井进行电子压力计探边测试。

对该井双对数及导数图进行拟合分析得到(见图5),井筒储集系数 $0.629\text{m}^3/\text{MPa}$;表皮系数0.6;渗透率 $93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;地层压力15.68 MPa;第一不渗透边界距离72m;第二不渗透边界距离95m;两不渗透边界的夹角 105° ;定压边界距离190m(见图6)。

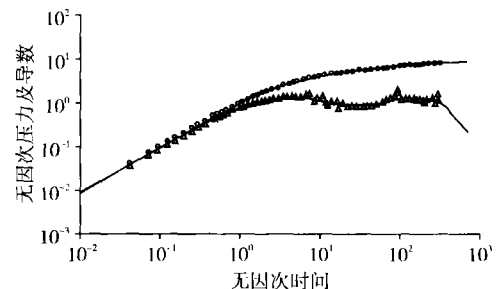


图5 为双对数及导数拟合图

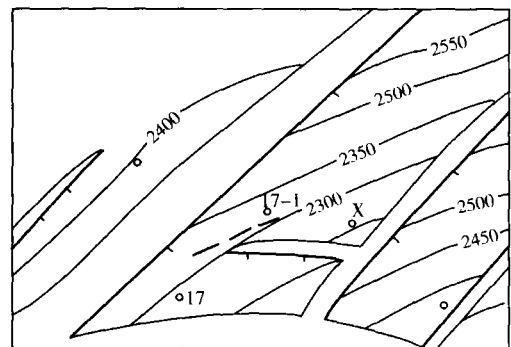


图6 X井地质构造图

结 论

通过对探边测试试井分析的发展过程进行综合分析研究,说明了探边测试试井分析是一个从简单油藏类型到复杂油藏类型的一个发展过程。指出了探边测试与常规测试的重要区别在于边界的性质、形状和大小的区别。给出了新的任意形状油藏在不同边界条件下的数值试井模型,分析了不同边界性质对试井理论曲线的影响以及边界距离的影响。明确指出了探边测试的发展趋势必然是数值化求解的新思路。

参 考 文 献

1. Jones, Park: Reservoir Limited Test, Oil and Gas, June 1956: 184 - 196.
2. Jones, Park.: Reservoir Limited Test on Gas Wells, J. Pet. Tech., June 1962: 613 - 619.
3. Jones, L. G.: Reservoir Reserve Tests, J. Pet. Tech., March 1963: 333 - 337.
4. Theis C. V.: The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage, Trans. AGU, 1935: 519 - 564.
5. Van Everdingen A. F. and Hurst W.: The Application of the Laplace Transformation to Flow Problem in Reservoirs, Trans. AIME, 1949, 186: 305 - 324.
6. Horner D. R.: Pressure Build-up in Wells, Proc. Third World Pet. Cong, The Hague sec. II, 1951: 503 - 563.
7. Ramey, H. J. Jr.: Short-Time Well Test Data Interpretation in the Presence of Skin Effect and Well Bore Storage. JPT, Jan. 1970.
8. Gringarten, A. C., H. J. Ramey, Jr. and R. Raghavan: Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Infinite-Conductivity Vertical Fracture, Soc. Per. Eng. J. (August) 1974: 347 - 360.
9. Bourdet, D. and Gringarten, A. C.: Determination of Fissure and Block Size in Fractured Reservoirs by Type-Curve Analysis, SPE 9293, 1980.
10. Ditzs, D. N.: Determination of Average Reservoir Pressure from Build Up Surveys, J. Pet. Tech. Aug, 1965: 955 - 959.
11. Earlougher, R. C.: Estimating Drainage Shapes from Reservoir Limit Test, SPE 3357. Paper Presented at SPE 46th Annual Fall Meeting, New Orleans, Oct. 1971.
12. Home, R. N.: Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach, 1995.
13. 刘曰武,肖陆锦,赵明跃:利用改进的试井分析方法确定压裂井到断层的距离,油气井测试,1995(3)4。
14. 刘泉海,刘曰武等:复杂断块油藏边界的确定方法,油气井测试,1996(2)5。
15. 曾萍,郭冀义:楔型储层探边试井分析的交点法,石油勘探与开发(增刊),1993。
16. 曾萍,赵凤兴:用边界元方法进行探边试井分析,江汉石油学院学报,1993。
17. Helmy, M. W., Wattenbarger, R. A.: New Shape Factors for Well Produced at Constant Pressure, SPE 39970, presented at the 1998 SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, Mach, 1998.
18. Guo, Boyun, Westaway, Peter and Jacquemont, Jerome: Field Case Studies of Pressure Transient Data from Complex Reservoirs, SPE 63308, presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2000.
19. Zhao, Gang and Thompson, Leslie G.: Transient Pressure Analysis of Bounded Communicating Reservoirs, SPE 71032, presented at the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, May 2001.
20. Zhou Rong, Liu Yuewu, Zhou Fuxin: Numerical Solutions for the Transient Flow in the Homogeneous Closed Circle Reservoirs, Acta Mechanica Sinica, 2003, 19: 40 - 45.
21. 刘曰武,周蓉:均质圆形定压油藏不稳定渗流的数值解,油气井测试,2001(6)10。
22. 刘曰武,薛敬利,纪友亮:三角形油藏中探边测试问题的研究及其应用,油气井测试,2003(2)12。
23. 唐云凤:探边测试技术在储层评价中的应用,试采技术,1992。
24. 董家东等:L13-23井探边测试成果分析,油气井测试,1997(2)6。
25. 王承毅:应用探边测试方法对断块油气藏进行早期评价,断块油气田,1999。
26. 戴凤春,许金凤:曙103井探边测试及试采资料分析,油气井测试,2000(1)9。
27. 朱静,张崇刚:欧36井系统试井及探边测试资料分析,油气井测试,2002(2)11。

本文收稿日期:2002-12-18 编辑:穆立婷

Wang Yi, He Xianjun, Sun Siping, Luo Jing, Wang Yuqing (Wenmi Oil Production Factory, Tuha Oilfield)

By using the late achievement of computer technology, internet technology, communication and information technology, the paper developed successfully the system of the pumping well condition for automatism supervise long distance and having been used industrially in Wenmi oilfield of Tuha. Using the system, the investment cost can be reduced, the condition of pumping well on the beam can be continuously observed, abnormality condition can be reported on time, and parameter management will become a database system and a network system. The system can enhance time ratio of opening pumping well and normalization of working condition and come into being the communication and scientific mode of the production well's management.

Subject heading: pumping well, data automatic collection, wireless communication long distance, application, analysis

· Comprehensive Discussion ·

A Summary of the Reservoir Limit Test Analysis. 2003(3)12:65 ~ 69

Xue Jingli (Petroleum University · Huadong), Liu Yuewu (Institute of Mechanic, Chinese Academy Sciences), Ji Youliang (Petroleum University · Huadong)

By analyzing the developing history of reservoir limit test, it shows that the reservoir limit test analysis has a history life from single reservoir model to complex reservoir model. The significant difference between the normal well test and the reservoir limit test is that the reservoir limit test emphasize the geometrical characters of the outer boundaries. A new model for the reservoir limit test is developed for the reservoir with arbitrary shape boundaries in this paper. The effects of the outer boundary properties on the typical curves have been discussed in detail. It is pointed out that the future trend of reservoir limit test analysis is solving the problem in the numerical way.

Subject heading: reservoir limit test, well testing, boundary, method, research

The Method to Improve the Effect and Benefit of Downhole Operation in Tarimu Oilfield. 2003(3)12:70 ~ 73

Zhang Yanxing, Yin Zexin (Development Affair Department, Tarimu Petroleum Sub-Company)

Downhole operation holding the important proportion in field development in Tarimu oil field is determined by its characteristic. But the improving effect and benefit of downhole operation have not formed yet. By analyzing, there are four factors of affecting the effect of downhole operation such as design put forward, operation carried out, operation estimated, level and process of management. Through several typical examples, the reason of success and failure in work operation is analyzed.

Subject heading: Tarimu oilfield, borehole service, effect, benefit

油 气 井 测 试

(双月刊·1984年创刊·公开发行)

第12卷第3期(总第77期)

主 编:庄建山

副主编:张绍礼 王 军

WELL TESTING

(Bimonthly·Started in 1984)

Vol. 12, No. 3 June. 25, 2003

Chief Editor: Zhuang Jianshan

Vice-Editor in Chief: Zhang Shaoli Wang Jun

主 管: 中国石油天然气集团公司

主 办: 华北石油管理局

技术监督: 中油股份公司勘探与生产分公司

编辑出版: 《油气井测试》编辑部

(065007)河北省廊坊市万庄43号信箱

电话: (0317)2551432、2552634

E-mail: yqjcs@petro-hb.com.cn

印 刷: 河北地勘局测绘院印刷厂

发 行: 《油气井测试》编辑部

2003年6月25日出版

Competent Authorities: CNPC

Sponsor: Huabei Petroleum Administrative Bureau

Technical Control: Exploration & Production Company

PetroChina Company Limited

Editor & Publisher:

The Editorial Department of Well Testing

P. O. Box 43 Langfang City, Hebei Province, P. R. C.

Telephone: (0317)2551432、2552634

E-mail: yqjcs@petro-hb.com.cn

Postcode: 065007

刊号: ISSN 1004-4388
CN 13-1147/TE

广告许可证号: 1310004000046

定价: 10.00 元