

中国石油天然气总公司重点建设学科
应用地球物理论文专辑

测井新方法

及其应用

江汉石油学院
测井教研室
编

中国建材工业出版社

中国石油天然气总公司重点建设学科
应用地球物理论文专辑

测井新方法及其应用

江汉石油学院 测井教研室 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

【内容提要】

本书系统介绍了生产测井、核磁共振测井、成像测井等方面的测井新方法和新成果。本书共收集了应用地球物理方面的应用论文 35 篇,这些文章集中体现了近几年来江汉石油学院“九·五”重点学科建设期间,测井领域的技术状况和最新进展。

本书可供广大测井科技工作者学习、借鉴,也可作为地质、油藏工程及相关学科科技人员和大专院校有关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

测井新方法及其应用/江汉石油学院 测井教研室 编. —北京:中国建材工业出版社,1998. 8
ISBN 7—80090—782—1

I. 测…

II. ①江

III. ①地下物探—测井②采油井—测井

IV. TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 22328 号

测井新方法及其应用
江汉石油学院 测井教研室 编
责任编辑 宋 彬

*

中国建材工业出版社出版发行(北京海淀区三里河路 11 号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
核工业中南二零九印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.375 字数:240 千字
1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷
印数:1~650 册 定价:25.00 元
ISBN 7—80090—782—1/TU·170

前 言

随着石油工业的迅速发展,对测井技术的要求也越来越高。进入 90 年代以来,成像测井、核磁共振测井等新一代测井技术投入应用,以及井间电磁波成像测井的发展,把测井技术描述与解释的能力,提高到了一个新的高度。

近年来,江汉石油学院应用地球物理学科作为中国石油天然气总公司重点建设学科,在测井技术发展的过程中做了大量的工作,取得了显著的成绩,部分科研成果达到了国际领先水平或国内领先水平。

测井资料的地质综合解释研究在国内有一定影响。如油藏描述技术、测井资料优化解释、水淹层解释技术、地层倾角测井资料处理、非均质渗透率解释模型、利用测井资料进行地层对比、测井资料高分辨率处理、水平井测井解释方法、环形声波测井解释等。

生产测井方法与解释技术的研究受到了国内外测井同行的关注。多相流生产测井解释方法与软件已在十余个油田和地区推广应用。

电磁勘探方法研究具有较大的优势。高分辨率电磁勘探方法、井间电磁波层析成像技术、电磁法直接找油等方面的研究已取得可喜成果。

在石油储层地球物理方向已开展了多项研究工作,神经网络在油气预测中的应用、地震资料高分辨率处理等方面的研究已取得较大进展。

我们将本学科教师及油田有关技术人员近年来的部分研究论文编辑成册,意在通过广泛的学术交流、业务上的沟通,以期更好地推动我国测井技术及应用研究的深入开展,以促进科研成果的转化,为我国石油工业的发展,做出应有的贡献。

在本书编写过程中得到了江汉石油学院物探系领导及全体同仁的大力支持和帮助;有关油田测井公司的领导和技术工作者也给予了多方面的帮助,特别是武汉工业大学曹文聪教授在本书编写的整个过程中,给予了无私的帮助和指导。在此谨向他们以及给予帮助的其他同志表示衷心的感谢。

由于水平有限,编写时间仓促,本书疏漏之处在所难免,敬请各位同仁批评指正。

编著者

1998 年 8 月于荆州

开拓进取中的江汉石油学院物探系

地球物理勘探系(简称物探系)是江汉石油学院石油主干专业系部之一。主要开办了应用地球物理专业。1952年开办石油高级物探班,1953年正名为北京石油地质学校后,物探和测井一直是学校的主干专业;1978年经国务院批准,成立江汉石油学院,同年开设勘查地球物理和矿场地球物理两个本科专业;1986年经国务院批准应用地球物理学科获硕士学位授予权;1994年按照国家教委公布的专业目录进行了专业调整,勘查地球物理和矿场地球物理两个专业合并改建为应用地球物理专业;1995年,应用地球物理学科被确定为中国石油天然气总公司(部级)重点建设学科。1997年,测井资料综合解释与数据处理被评为省级优质课程。

目前,系下设物探教研室(研究室)、测井教研室(研究室)、地球物理实验与研究中心、电磁模拟实验室及系办公室。拥有人机联作物探工作站、SUN测井工作站、瞬态仪、核磁共振岩心分析仪等各种设备329台套,固定资产1266万元,基本满足了教学和科研要求。全系现有教职工57人,在编教师41人,其中教授5人、副教授9人、讲师27人,教师中具有硕士及以上学历的人员35人,占教师总人数的85.4%。

本系现设有应用地球物理本科专业1个;地球探测与信息技术硕士点一个。在校本科生227人;硕士研究生17人。在人才培养方面,按照培养创新能力强、创业精神强的目标,坚持精雕细刻,实行导师制,不断提高人才培养质量,以适应国内外两个人才市场的需要。

本系广泛开展科学研究与学术交流。“八五”以来全系共承担科研项目171项,其中国家攻关和国家自然科学基金等纵向课题62项;横向协作课题109项,取得了一批高水平的研究成果。获得省部级以上奖励14项,其中国家科技进步二等奖1项;省部级一等奖1项;省部级二等奖5项;省部级三等奖7项。公开出版专著、教材16部;公开发表学术论文400余篇。已在生产测井方法与应用;电磁勘探、声波测井、测井资料综合解释与地质应用;地震资料处理与解释等几个方面形成了自己的特色与优势。“八五”以来,先后有7名外国知名专家、教授到本系讲学,有刘光鼎、许厚泽、马在田等5名中科院院士及其他国内知名专家、教授来系讲学或作学术报告,同时有8名教师到国外讲学、学术交流或技术培训。

地球物理勘探系,师资力量较雄厚,教学、科研实力较强,成果突出,已成为我国应用地球物理领域一支较有影响的力量。目前全系上下团结一心,正在为把物探系建设成为国内外有影响的、高水平的地球物理勘探系而努力奋斗。

系主任:郭海敏 博士 教授

电话:(0716)8430420(办)

8431265(宅)

目 录

用生产测井资料改进试井分析的方法研究	郭海敏	方战杰(1)
用 NMR 测井资料评价毛管束缚水饱和度的方法	查传钰	(6)
用反射斯通利波确定地层裂缝性渗透带	章成广 汪中浩 何宗斌 肖承文	程 明(12)
神经网络在区分油层中的应用	王向公 黄文新 汪鲁江	祗淑华(17)
神经网络方法在生产测井确定剩余油饱和度中的应用	汪中浩 吴锡令	谢孟义(21)
用双感应资料估计水平井段油水界面位置	李鹏翔	(25)
用生产测井资料确定剩余油饱和度方法研究	戴家才	张庆红(29)
电缆地层测试资料分形解释方法研究	赵 亮 汪中浩	吴锡令(32)
塔中北坡下古生界不整合面测井资料分析	李 军 王洪艳 曾少军	张永忠(37)
濮城油田沙二下储层物性解释模型	付 洁	秦菲莉(40)
测井曲线的绝对深度校正	李先鹏 陈新林	顾宏伟(44)
一种基于层序分析的相对深度校正方法	李先鹏	(47)
疏松砂岩饱和气及饱和水时纵横波速度及其变化	周继宏	章成广(50)
用 8259 扩充智能仪表中断系统	邬春学 李宏魁	吴志刚(54)
仪器偏心对固井声幅测井曲线的影响	李维彦	(57)
注入剖面测井井温曲线实例剖析	李俊舫	杨多顺(60)
用纵横波时差等测井资料识别油气层	章成广 高楚桥 周继宏 肖承文	程 明(66)
一种基于井周电阻率成像上的图像处理方法	程世旭	胡官阳(71)
套管井电场的近似传输线模拟及管外地层电阻率测量	刘迪仁	徐建华(74)
西文 Motif 环境下实现中文帮助信息的关键技术	汪中浩 章成广	王显辉(79)
利用储层和原始水层 4M 电阻率相对比值法定量解释水淹层	杨 林 诸葛月英	耿宗辉(82)
示踪流量测井资料解释方法及应用	杨 林	(87)
MAXIS500 成像测井井场信息及分析	何宗斌	(93)
XTF 文件编辑程序设计 with 实现	何宗斌	(97)
MAXIS500 成像测井 DLIS 文件编辑程序设计	何宗斌	(101)
苏丹阿布加布拉油田解释方法研究	秦菲莉 孙灵芬 付 洁	(105)
智能仪表中监控程序的加密技术	邬春学	杨红明(108)
濮城油田储层水淹机理研究	杨多顺 段新海 刘兆密	吴红军(111)
智能频率计的设计与实现	胡官阳	程世旭(114)
管套井长源距声波全波波形特征分析	李维彦	(119)
用 AD7884 实现快速高精度智能式数据采集	邬春学 李宏魁	吴志刚(124)
最小二乘曲面拟合在测井资料环境校正中的应用	王向公 祗淑华 汪鲁江	(127)
塔里木盆地不整合面、构造作用和沉积相对奥陶系储层改造作用	李 军	(130)
一种有效的提高智能仪表系统可靠性和抗干扰能力的设计方法	邬春学 吴志刚 李宏魁	(136)
深层测井评价方法研究及应用	尹庆文 韩成	(139)

用生产测井资料改进试井分析的方法研究

郭海敏 方战杰

(江汉石油学院)

常规试井只测压力,而生产测井一次下井可同时测量流量、压力、密度等资料,能够弥补试井技术的不足。本文研究了对流量与压力同时测试,并采用褶积和反褶积方法对测试资料进行处理的方法,开发了相应的处理软件,所给出的实例表明,该方法具有良好的应用前景,同时也适用于多层测试。

一、改进的 Horner 图

关井压力降可表示为三个无量纲时间函数之和,它们是:

典型压力恢复时间函数: $P_D(t_P + \Delta t)_P - P_D(\Delta t)_D$

流量褶积时间函数: $\int_0^{\Delta t_D} q_D(T) P'_D(\Delta t - T) dT$

表皮压力降函数: $S q_D(\Delta t)_D$ 。

当续流变得足够小时,关井压力降方程可以简化为:

$$P_i - P_{ws_{q_D \rightarrow 0}} = m \left[\lg(t + \Delta t) + \sum (\Delta t) \right] \quad (1)$$

在续流消失后,关井压力 P_{ws} 与流量褶积压力恢复时间函数的关系应呈一直线,该直线的斜率与典型半对数图的斜率相等,并且把它外推到无限关井时间就得到了 P_i 。

只要恢复压力不等于油层压力,续流就将一直存在,所以,实际上续流永远不会等于 0,因此,就应把 $[\lg(t + \Delta t) + \sum (\Delta t) \bar{S} q_D]$ 绘入图中,而不只是 $[\lg(t + \Delta t) + \sum (\Delta t)]$,以使所有点都落在一条直线上。

选择 Δt , 使 $\sum (\Delta t) = 0$, 未知系数 $\bar{S}$ 可用关井前的流动方程求得:

$$\bar{S} = \frac{(P_{\sum=0} - P_{wf})}{m(1 - q_{D\sum=0})} \quad (2)$$

这个分析结果与 Horner 分析相同,只有用 $-\sum (\Delta t)$ 代换了 $\lg(\Delta t)$, 把 P_i 换成了 $P_{\sum=0}$, 在关井时间足够长时:

$$\sum (\Delta t)_{\Delta t \rightarrow \infty} = -\lg \Delta t + 0.217 \frac{\Delta t_d}{\Delta t} \quad (3)$$

式中 Δt_a 是续流持续时间,在 Δt 约大于续流持续时间 Δt_a 的 20 倍时:

$$\lg(t + \Delta t) + \sum (\Delta t) = \lg(t + \Delta t) - \lg(\Delta t) = \lg \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \quad (4)$$

实际上等于 Horner 时间函数,并且如果 Δt_a 远小于 1 小时,在 1 小时后, $\sum$ 时刻为 0, 我们把这个图叫改进的 Honer 图。

二、SFRC 图

生产测井同时测量压力和续流数据,所以,记录数据的同时,还能对这些数据进行分析,

$$\text{式} \quad \frac{\Delta P}{1-q_D} = m \left[-\frac{\sum (\Delta t)}{1-q_D} + \bar{S} \right] \quad (5)$$

是这个分析方法的基础,它建立了压力函数与时间函数的关系。这些函数的图形是一条直线。因为可用压力和流量测量值计算它们,所以,在测试期间的任何时刻,都能绘出这样的图形,并进行分析。当分析结果可靠时,测试工作结束,把这个图叫“井底油层表面流量褶积 SFRC 图”。

三、时间函数修正法

把层面流量写为下式:

$$q_{aft} = q_0 e^{-\alpha \Delta t} \quad (6)$$

式中 q_{aft} 就是用生产测井的转子流量计测量的续流量,可用指数拟合法回归 α 值。

用下式对时间函数进行修正:

$$P_i - P_{ws}(\Delta t) = m \left[\lg \left(\frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} \right) + \frac{1}{2.303 \alpha \Delta t} \right] \quad (7)$$

式中 $\frac{1}{2.303 \alpha \Delta t}$ 这一项对 Horner 法中的时间比值 $\left[\lg \frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} \right]$ 进行修正,把 $P_{ws}(\Delta t)$ 值对应着 $\left[\lg \frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} + \frac{1}{2.303 \alpha \Delta t} \right]$ 的值绘成曲线,将得到具有正确斜率的直线。此直线段比 Horner 法直线段出现的时间要早得多,几乎要早一个对数周期。节约的时间取决于地层和流体的参数,一般总能节省若干小时的测试时间。事实上,在用 Horner 法所绘制的直线要经过非常长的时间才会出现。当 Δt 增大时, $\frac{1}{2.303 \alpha \Delta t}$ 则会变小,而 $\left[\lg \frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} \right]$ 也会减小,因而,Horner 法的曲线,渐近地和正确的直线段接近一致。

可应用很简单的 q_D 和 P_D 函数来定性地探索 Horner 分析法中续流的影响,必须认识到的是,如果要从修正 Horner 法求得准确而可靠的结果,则必须应用生产测井的分层流量。

四、反褶积法

不管是井筒储存还是续流现象,都会对井和油藏的早期曲线起到控制作用,从井底压力和层面流量算出没有储存影响的层面压差[即地层压降 $P_{SD}(t_D)$],作出各种 $P_{SD}(t_D)$ 随 t_D 的变化曲线图,可显示出一种给定的井和油藏的信息,这就是反褶积法。

1. 褶积积分式的线性化处理

连续变化产量情况下的无量纲压力为:

$$P_{WD}(t_D) = \int_0^{t_D} q'_D P_{SD}(t_D - T) dT = \int_0^{t_D} q'_D(t_D - T) P_{SD}(T) dT \quad (8)$$

利用积分中值定理,采用梯形积分法可得:

$$P_{SD}\left(t_{D_{n+\frac{1}{2}}}\right) = \frac{[P_{WD}(t_{D_{n+1}}) - SUM]}{q_D(t_{D_{n+1}} - t_{D_n})} \quad (9)$$

$$\text{式中} \quad SUM = \sum_{i=0}^{n-1} P_{SD}\left(t_{D_{i+\frac{1}{2}}}\right) [q_D(t_{D_{n+1}} - t_{D_i}) - q_D(t_{D_{n+1}} - t_{D_n})]$$

$$P_{SD}\left(t_{D_{\frac{1}{2}}}\right) = \frac{P_{WD}(t_{D_1})}{q_D(t_{D_1})}$$

$q_D(t_{D_{\frac{1}{2}}})$ 的取值很重要,它直接影响着每一个 P_{SD} 值,并会引起 $P_{SD} - \lg \Delta t$ 曲线的波动。

2. Laplace 变换反褶积法

对(9)式进行 Laplace 变换,并经褶积处理,得:

$$P_{SD}(t_D) = \frac{\alpha P_{WD}(t_D)}{\beta d_{D1} + P_{WD}(t_D)}$$

通过对井底压力和层面流量采用反褶积法,以求没有井筒储存(续流)影响的地层压力,从计算出的地层压力可判定井筒和油藏的几何形态,并用常规方法对计算出的地层压力进行分析以确定渗透率 K 及 S 等地层参数。

五、时间延长法

对常规 Horner 法进行续流校正,使出现径间流时间提前。由 Horner 法得:

$$P_i - P_{ws}(\Delta t) = m \lg \frac{t_P + \Delta t}{\Delta t} \quad (10)$$

式中 t_P ——生产时间;

Δt ——关井时间。

若在压力恢复期间,油井的总续流量为 Q_{aft} ,并假定它以关井前的稳定产量 q_0 生产,则生产时间为:

$$\Delta t_P = \frac{Q_{aft}}{q_0}$$

则认为井在生产 $t_P + \Delta t_P$ 时间后,层面和地面严格地关井,此时无续流影响。为此,引入有效生产时间 t_{pe} 和有效关井时间 Δt_e ,则有:

$$\Delta t_P = \frac{Q_{aft}}{Q_0} = \int_0^{\infty} q_0 e^{-\alpha t} dt / q_0 = \frac{1}{\alpha} \quad (11)$$

六、实用效果分析

下面的一口井,历经 8h 的压力恢复测试,经过计算和分析并做出其比较图版。

图 1 是常规 Horner 图与改进 Horner 对比图,图中横坐标 $R = \lg(t + \Delta t) + \Sigma(\Delta t) + \bar{S}q_D$,为时间函数,单位为小时(h);纵坐标 P_{ws} 为井底关井压力,单位为磅/英寸²。从中看出:常规 Horner,由于受续流影响,出现早期测试的 $P_{ws}(\Delta t)$ 与时间函数呈非线性关系,只在 $\Delta t = 0.956$ h 起开始出现直线段。

图 2 是 SFRC 与 MDH 法对比图。图中横坐标 $X = -\Sigma/(1-q_D)$,为井底油层流量褶积时间函数,单位为小时;纵坐标 $Y = \Delta p/(1-q_D)$,为压力函数,单位为磅/英寸²,其中 $\Delta p = p_{ws} - p_{wf}$ 。MDH 曲线的早期点受井筒储集影响而呈非线性,在 $\Delta t = 0.12$ 时开始出现直线段斜率 $m = 62, k = 370 \text{md}, S = 0.7$,SFRC 曲线在关井后 $\Delta t = 0.42 \text{h}$ 就得到一条明确直线,比 MDH 法提前,而且 SFRC 分析也很可靠,同时能揭示压力恢复初期油层的不均匀性。这种不均匀性可能被其他方法漏掉,直线段斜率 $m = 57.09, k = 403 \text{md}, S = 1.57$ 。

SFRC 对层面流量的测量要求精度高,而生产测井的转子流量计,线性测量范围很大,对 SFRC 非常适用,测出的层面流量与井底压力可在井面实时作出 SFRC 曲线,进行分析一直到认为可靠时,测试就可停止。

图 3 是反褶积图与 MDH 对比图,图中横坐标 P_{SD} 为无量纲地层压力;纵坐标 T 为无量纲时间。由于 α 和 $q_D(t_{D\frac{1}{2}})$ 值难于精确求得,产生波动结果,但仍将出现直线段的时间从 1.2h 提

前到 0.52h。如何准确计算 α 和 $q_D(t_{D\frac{1}{2}})$ ，正是人们一直所研究的问题。

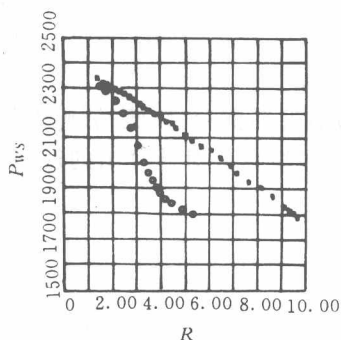


图 1 改进 Horner 与常规 Horner 对比图

○ 常规 Horner □ 改进 Horner

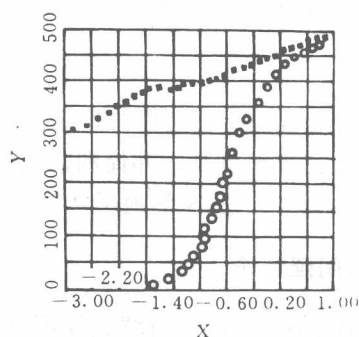


图 2 SFRC 法与 MDH 法对比图

○ MDH □ SFRC

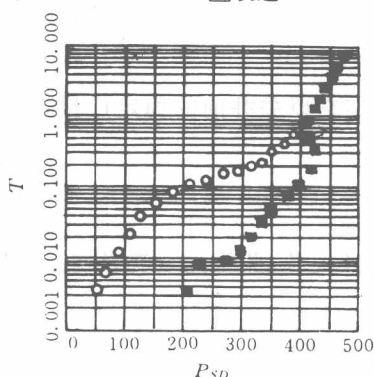


图 3 反褶积图与 MDH 对比图

○ 线性化处理的反褶积 □ MDH 图

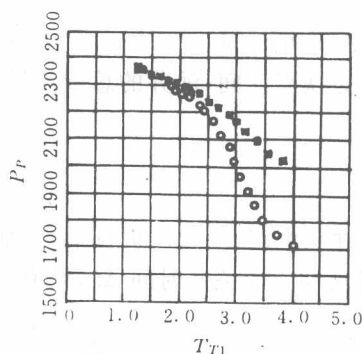


图 4 时间延长法与 Horner 对比图

○ 时间延长法 □ Horner 法

图 4 是时间延长法与常规 Horner 对比图，图中横坐标 $T_{r1} = \log[(t_p + \Delta t)/(\Delta t - \Delta t_p)]$ 为时间函数，单位为小时；纵坐标 P_r 为井底关井压力，单位为磅/英寸²。从图中可以看出，时间延长法出现直线段的时间为 0.5h。从上面可知：改进 Horner、SFRC、反褶积和时间延长法求得的渗透率 K 和表皮因子 S 同 Horner 法求得的 K 、 S 值接近一致，即得到了相同的解释结果，但它们均比 Horner 出现的直线段提前了 0.5h。由于这口井是高渗透率地层 ($K=400\text{md}$)，出现径向流时间早，若对于一口低渗透率地层，导压系数 $\eta = \frac{K}{\phi \mu G}$ 小，压力恢复期间，压力恢复慢，出现径向流时间晚，若用上述方法进行处理，出现直线段时间提前至 0.5~3h，使原来废弃的资料得以应用，在现场可节省大量的人力物力，在实际中大有用处。

以上是生产测井资料在试井中的具体应用，使用层面流量和井底压力进行分析，和只使用压力数据相比，不仅真实可靠而且时间缩短，使测试效率和解释结果都提高。

七、结论

1. 生产测井测量的层面流量信息，在现代试井解释中起着重要作用。
2. 同时分析层面流量和压力数据的改进 Horner、SFRC、反褶积法和时间延长法都比常规 Horner、MDH 法出现直线段时间提前，而且解释结果精确可靠。
3. 上述解释所得的 K 、 S 值可直接应用于分析油藏构造类型中。

符号说明:

- c ——井筒续流常数(桶/磅/英寸²); C_D ——无因次井筒储存常数;
 h ——地层厚度(英尺); $P_D(t_D)$ ——无量纲地层压力;
 P_{WD} ——无量纲压力降; P_{wf} ——井底流动压力(磅/英寸²);
 P_{ws} ——井底关井压力; $P_{SD}=P_0+S$ ——无量纲地层压力加井壁阻力系数;
 P_i ——原始压力; q_{sf} ——层面流量;
 q_D ——无量纲层面流量; t_D ——无量纲时间;
 t_P ——生产时间(小时); μ ——粘度(厘泊);
 r_w ——井径(英尺); ϕ ——孔隙度;
 β ——原油的地层体积系数; S ——表皮系数;
 K ——渗透率(毫达西)。

用 NMR 测井资料评价毛管束缚水饱和度的方法

查传钰

(江汉石油学院)

一、前言

NMR 资料在地层评价中有着广泛的用途,如估算有效孔隙度、毛管束缚水孔隙度和可动流体孔隙度,评价束缚水饱和度、含油饱和度、渗透率、孔径分布,区分油、气、水,研究岩石结构特征等。其中利用 NMR 测井资料来准确评价地层渗透率是最吸引人的问题。用 NMR 测井资料来改进渗透率的评价有很多方法,其中先利用 NMR 资料准确估算地层束缚水饱和度,再通过常规采用束缚水饱和度评价渗透率的经验方法去评价渗透率也是一种改进渗透率评价的有效方法之一。准确估算地层束缚水饱和度除可改进渗透率评价外,在地层评价中还有其他很多用途,本文专门讨论利用 NMR 资料评价毛管束缚水及其饱和度的方法、评价中的问题以及改进评价的思考。

二、基本原理

岩石骨架中不含可自由取向的氢,骨架不能产生核磁共振信号,NMR 信号完全是由孔隙中的流体(如水、石油、天然气)产生的。NMR 信号的幅度与被测灵敏体积内氢的含量成正比,因此,利用 NMR 信号幅度可以评价地层有效孔隙度、毛管束缚水体积及可动流体体积。

处于地层孔隙中的流体的弛豫时间特性,除与流体本身的弛豫特性有关外,还要受到流体与岩石骨架表面相互作用的影响,使弛豫加快,弛豫时间变短。一般岩石孔隙中水的弛豫时间要比集聚态时快 1~4 个数量级。

孔隙中的流体按所处的区域可分成两部分,一部分处于孔壁附近的一薄表层内,厚度约 1nm。此范围内的流体部分地丧失迁移能力,成为束缚水。它们的扩散受到孔壁的限制,并不断与孔壁发生相互作用,由于孔壁顺磁中心的存在等诸多因素,使该区域内氢的弛豫时间变短,该区域称快弛豫区;另一部分是孔隙腔体,它称为慢弛豫区。这两个区域内的氢由于流体分子的扩散运动而发生强烈的交换,并不断地混合,实际测得的是岩石孔隙内各种弛豫的总效应。当岩石孔径单一,孔隙内只有一种类型的流体,且在观察流体弛豫的时间内流体分子的扩散长度大于孔径,孔隙内快慢弛豫的粒子能很快完全混合,此时观察到的弛豫衰减呈单指数衰减:

$$M(t) = M_0 e^{-t/T_2^*} \quad (1)$$

式中 T_2^* —— 观察到的弛豫时间,它是孔隙内各区域弛豫时间的某种平均值。

T_2^* 可表示为:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_{2b}} + \frac{1}{T_{2s}} \quad (2)$$

式中 T_{2b} —— 孔隙流体处于集聚态时的弛豫时间,简称体弛豫;

T_{2s} —— 表示由于表面相互作用面对孔隙内流体弛豫时间的影响。

具有以上特性的孔隙归属为快扩散范畴。当孔隙大到一定程度,流体的扩散长度小于孔径,在观察弛豫的时间内各区域的流体分子不能完全混合,而只能局部地发生部分混合,此时就可以观察到孔内各部分流体的不同弛豫时间,此时孔隙内的流体弛豫衰减不是呈单指数衰

减,(1)、(2)式不成立,这类孔隙归属为慢扩散范畴。

表面相互作用影响的大小,即 $\frac{1}{T_{2s}}$,实验和理论分析表明它可以表示为:

$$\frac{1}{T_{2s}} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (3)$$

式中 S ——单位孔隙的表面积;

V ——单位岩石中孔隙体积;

$\frac{S}{V}$ ——岩石的孔隙比表面积;

ρ_2 ——流体与岩石骨架相互作用的强度,称为“表面弛豫强度”。

对于快扩散范围的孔隙来说,由于孔隙较小,比表面 S/V 大,表面相互作用的影响很大,有 $\frac{1}{T_{2s}} \gg \frac{1}{T_{2b}}$,此时孔内流体的弛豫时间 T_2^* 可近似为:

$$\frac{1}{T_2^*} \approx \frac{1}{T_{2s}} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (4)$$

由(4)式可见,孔隙内流体的弛豫时间和孔隙空间大小及形状有关,孔隙越小,比表面越大,表面相互作用对孔内流体弛豫的影响越大, T_{2s} 的值也越小,观察到的 T_2^* 也越短。所以,利用对 T_2 弛豫时间的测量可以评价孔隙的大小。

当地层中的孔隙大小不均匀时,不同尺度的孔隙,其中流体呈现不同的弛豫时间,实际观察到的自旋回波串的衰减是各种不同弛豫时间的总效应。自旋回波衰减信号可表示为:

$$M(t) = \int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} M(T_{2i}) e^{-t/T_{2i}} dT_{2i} \quad (5)$$

式中 $T_{2\min}$ 、 $T_{2\max}$ ——地层中流体弛豫时间的分布范围。

将(5)式离散化为多指数衰减之和:

$$M(t) = \sum_i M(T_{2i}) e^{-t/T_{2i}} \quad (6)$$

或

$$M(t) = M_0 \sum_i P(T_{2i}) e^{-t/T_{2i}} \quad (7)$$

式中 $M_0 = \sum_i M(T_{2i})$, 或 $M(T_{2i}) = M_0 P(T_{2i})$, $\sum_i P(T_{2i}) = 1$ 。

利用(6)式或(7)式对实测的自旋回波衰减曲线进行最小二乘非线性拟合,就可求得地层中的 T_2 分布 $P(T_{2i})$ 。通过刻度可将 $M(T_{2i})$ 转换成孔隙体积,就可得到地层中各种弛豫时间所对应的体积了。NMR 孔隙度为:

$$\phi_{NMR} = \frac{M_0}{M_{w0}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 M_{w0} ——为 100% 水的样品在相同的测量条件下测得的信号在 $t=0$ 时的幅度。

利用 T_2 分布可以评价毛管束缚水孔隙度、可动流体孔隙度及毛管束缚水饱和度。孔隙中流体的横向弛豫时间和孔隙大小有关,随着孔隙的减小,流体的横向弛豫时间也减小。若地层压差一定,当孔喉或孔道尺寸达到非湿润相流体不能进入孔隙取代湿润相的关键尺寸 R_c 时,对应的孔隙内流体的弛豫时间为 T_{2c} 。 T_{2c} 称为横向弛豫时间截止值, T_{2c} 的大小和关键的孔喉尺寸、地层中的压差、岩石的结构特性和岩性等有关。当地层中的流体的弛豫时间有一定的分布时,则弛豫时间小于 T_{2c} 的成分对应的流体处于束缚状态,大于 T_{2c} 的成分对应的流体处于较大孔隙之中,为可动流体。这样,只要确定出 T_{2c} ,就可利用 T_2 分布来区分可动流体和毛管

束缚水。目前国际上的经验做法,是在解释中将 T_{2c} 作为一个地质常数来处理的,对砂岩采用 33ms,对碳酸盐岩约为 80~90ms 或更大。

三、毛管束缚水评价中的问题

这种评价毛管束缚水的方法还存在不少问题,下面对几个主要问题进行讨论。

(1) 该方法评价毛管束缚水的关键是正确地确定弛豫时间截止值 T_{2c} 。在评价毛管束缚水时, T_{2c} 是作为一个解释常数来处理的,实际对不同的岩性及岩石结构特性有不同的 T_{2c} 值,如从砂岩到石灰岩就存在着很大的差异,所以,当 T_{2c} 取值不准时会给解释结果引入误差。当孔隙空间结构复杂、孔喉尺寸分布不均匀,或表面弛豫强度 ρ_2 有明显的变化时,此时 T_{2c} 不可再视为常数,此时若仍将 T_{2c} 处理为常数,也必然会给解释结果引入误差。

T_{2c} 还和地层压力有关。毛管束缚水是在地层毛细管压力下仍然能保留在岩层中的水。随着地层的毛管压力的增大,相应的截止值 T_{2c} 会变小,与 T_{2c} 对应的关键孔喉尺寸变小,在孔隙中孔隙表面束缚水的厚度也会变薄。

(2) 重质原油或高粘度原油的影响。当地层中存在原油时,原油粘度对 T_1 和 T_2 均有较大的影响,特别是对 T_2 的影响更大。 T_1 和 T_2 随原油粘度的升高而下降,当原油粘度较高时,会使原油的 T_2 减小到截止值以下,从而影响束缚水体积及其饱和度的评价,造成束缚水饱和度偏大。

(3) 大孔隙含水地层的束缚水饱和度评价偏低。如在饱含水的纯地层且地层的孔隙度较大时,测得的 T_2 分布可能都处于 T_{2c} 以上。此时用上述方法评价的毛管束缚水体积为零,实际上,地层中还是存在毛管束缚水的,只不过该方法将大孔隙表面的束缚水也都认为是可动水了,从而使束缚水饱和度评价偏低。

(4) 含油饱和度的影响。当孔隙为多相流体时,若岩石亲水,烃和水不相溶,则烃以球状的形式存在于孔隙腔体内。显然,烃和水之间无扩散运动,此时,孔隙内的烃的弛豫时间就等于它的体弛豫时间,孔隙中的水除毛管束缚水外,还可能可动水。此时,水相的弛豫时间和不含烃时相比,变短了,即水相的 T_2 谱向短 T_2 方向偏移。这是因为水和孔壁接触的表面不变,但水的体积变小了,水都处于更接近于孔壁的位置,孔壁表面的相互作用影响更强,使弛豫时间变短。变短的程度与含油气饱和度有关。此时,就很容易造成毛管束缚水饱和度评价偏大的结果。

(5) 在标准的 T_2 测量中,一般回波间隔 T_E 的设置都较小,使其对水的扩散影响可以忽略。若地层中存在气时,由于气的扩散系数比水大两个数量级,气体仍会有明显的扩散影响。气的扩散影响使气体的 T_2 弛豫时间变短。这种扩散影响和内部场的不均匀度有很大关系,对于下列情况扩散影响尤其大:① 小孔隙,孔隙度越小,内部场的梯度越大;② 孔隙中含大量粘土,而粘土中常含有比较多的铁离子;③ 地层骨架中含有含铁矿物,特别是石英砂岩,铁是岩石具有高磁化率的主要原因,它增强了内部场的梯度。一旦气受到较大扩散影响以至使气的 T_2 值接近或小于 T_{2c} ,也会使毛管束缚水评价偏大。

(6) 粘土的影响。NMR 对粘土束缚水没有响应,但当孔隙内存在分散泥质时,分散泥质往往处于孔壁,使孔壁表面变得更粗糙,从而进一步加快了孔壁附近流体的弛豫速度。另外粘土通常带有大量的铁,铁的高磁化率使孔壁附近内部场的梯度明显增大,又加大了流体的扩散影响,这也使孔隙中流体的弛豫时间变短。因此,粘土的存在也会使毛管束缚水饱和度偏高。

(7) 毛管束缚水饱和度的评价还和 NMR 测井孔隙度的评价有关。由于粘土束缚水的弛豫时间比孔壁表面束缚水的弛豫时间还要短,约在 1ms 或更短。目前,商用的 NMR 仪器 T_2

的测量范围约为 3~3000ms,粘土束缚水的弛豫信号在 90°脉冲结束后到第一个 180°脉冲开始前已经衰减掉了,所以,仪器测不到粘土束缚水。NMR 孔隙度是不含粘土束缚水的孔隙度,NMR 测得的束缚水是不含粘土束缚水的毛管束缚水,因此,NMR 测井求得的是毛管束缚水饱和度,它和常规测井评价的束缚水饱和度是有差别的。

随着 NMR 测井技术的不断发展,NMR 测井仪在不同的测量方式下有不同的 T_2 测量范围,若仪器的 T_2 测量范围和地层中流体 T_2 分布范围不同,也会使解释引入歧途。为求得准确的毛管束缚水,要求特别注意仪器的 T_2 测量范围,特别是短 T_2 端的响应。当短 T_2 端的响应减小到 1ms 或更低,此时,在 NMR 孔隙度、毛管束缚水体积评价中就会有粘土束缚水的贡献。

四、改进毛管束缚水的评价方法

为改进较大孔隙中被忽略的束缚水和多相流体而引起的水相弛豫时间向短 T_2 方向偏移等问题,须对已有的评价方法进行改进。

1. 束缚水体积和横向弛豫时间的关系

设地层中的各种孔隙均为快扩散范畴,每个孔隙中水相的弛豫时间均为单指数衰减。在完全相同测量条件下确定的 T_2^* 截止值为 T_{2c} ,则地层中的 $T_2 \leq T_{2c}$ 相对应的孔隙中全为束缚水,不可能含油;与 $T_2 > T_{2c}$ 相对应的孔隙中可能有油,有束缚水,也可能有可动水。对可能含油的孔隙,设孔隙体积为 V_i ,表面各为 S_i ,束缚水厚度为 b ,油、可动水、束缚水的体积分别为 V_{oi} 、 V_{Mi} 、 V_{Bi} ,

则必有: $V_i = V_{oi} + V_{Mi} + V_{Bi}$, 且 $V_{Bi} = S_i b$

该孔隙的含油饱和度 S_{oi} 和束缚水饱和度 S_{BVi} 为:

$$S_{oi} = \frac{V_{oi}}{V_i} \quad S_{BVi} = \frac{V_{Bi}}{V_i} = \frac{S_i b}{V_i} \quad (9)$$

因孔隙是属于快扩散范畴,且含油,所以,水相的弛豫时间就近似等于表面相互作用弛豫时间,它和 ρ_{2w} 成反比,和水相比面积 $\frac{S_i}{V_i - V_{oi}}$ 成反比:

$$\frac{1}{T_{2Wi}} = \rho_{2w} \frac{S_i}{(V_i - V_{oi})} = \rho_{2w} \frac{1}{(1 - S_{oi})} \cdot \frac{S_i}{V_i} \quad (10)$$

该孔隙中束缚水体积 V_{Bi} 为:

$$V_{Bi} = S_i b = \frac{b}{\rho_2} (1 - S_{oi}) \frac{V_i}{T_{2Wi}} \quad (11)$$

(11)式表示,在 $T_{2w} > T_{2c}$ 的孔隙中,其束缚水的体积和含油饱和度及水相的弛豫时间的关系。

2. 束缚水厚度与地层毛管压力的关系

在实验室中采用离心力排液测量 T_{2c} 的实验中,岩样转速越高,孔隙表面液体受到的压力越大,排出的液体也越多,此时测得的 T_2 值就是在此压力下束缚水的 T_{2c} 值,有:

$$\frac{1}{T_{2c}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{束}} \quad (12)$$

式中 $\left(\frac{S}{V} \right)_{\text{束}}$ ——相当于孔隙表面束缚水的平均厚度 b 。

所以,在一定的压力下,当 T_{2c} 确定后,孔隙表面束缚水厚度 b 为:

$$b = \rho_2 T_{2c} \quad (13)$$

将(13)式代入(11)式得:

$$V_{Bi} = \frac{(1 - S_{oi})T_{2C}V_i}{T_{2Wi}} \quad (14)$$

利用(14)式可以计算地层中水相 $T_2 > T_{2C}$ 成分的束缚水体积。

3. 评价地层的 T_2 截止值

T_{2C} 值应根据地层岩性和毛管压力正确地评价。由 Young—LaPlace 方程确定的临界喉道的孔隙半径 r_{bc} 与地层毛管压力 P_c 的关系为：

$$r_{bc} = \frac{2\sigma\cos\theta}{P_c} \quad (15)$$

式中 σ ——界面张力；

θ ——接触角。

又根据岩石中流体的弛豫特性，在 T_2 为 T_{2C} 时，流体的表面相互作用大大地大于体弛豫，所以有：

$$\frac{1}{T_{2C}} = \rho_2 \frac{S}{V} = \rho_2 \frac{K}{r_{bc}} \quad (16)$$

式中 K ——孔隙形状因子(对球形孔隙 $K=3$ ，对管状孔道 $K=2$)。

将(15)式代入(16)式得：

$$\frac{1}{T_{2C}} = \frac{\rho_2 K P_c}{2\sigma\cos\theta} \quad (17)$$

(17)式表明当水和岩性均匀且已给定时， $\frac{1}{T_{2C}}$ 和毛管压力 P_c 成正比。首先根据岩心数据确定 T_{2C} ，再利用(20)式对已确定的 T_{2C} 值进行地层毛管压力、 ρ_2 、孔隙形状结构影响的修正。

4. 毛管束缚水体积及其饱和度计算

利用 T_2 分布，将 T_2 分布按 T_{2C} 值分成两段，分段计算毛管束缚水体积。

对 $T_2 \leq T_{2C}$ 部分，它的贡献全部来自束缚水，其体积为：

$$V_{B1} = \varnothing_{NMR} \sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i}) \quad (18)$$

式中 $\varnothing_{NMR}$ —— $t=0$ 时磁化强度经刻度而转换得到的孔隙度。

对 $T_2 > T_{2C}$ 部分，这部分的 T_{2C} 是由水和全部的油所贡献的。假定地层中不存在高粘度的重质原油，原油的 T_2 是以单峰形式分布在长 T_2 端。若地层中存在高粘度原油，且原油的 T_2 短到接近或等于 T_{2C} ，则必须采用其他的 NMR 测量，如采用不同的恢复时间，才能将束缚水和粘度油区分开。否则，这两种流体难以区分，使评价的束缚水体积产生严重的误差。

在 $T_2 > T_{2C}$ 的谱中，利用(14)式计算水相的毛管束缚水体积时不可能知道每个孔隙内的含油饱和度，但整个岩石的平均含油饱和度是可知的，为简化计算设每个孔隙都有相同的含油饱和度和 $\bar{S}_o$ 为：

$$\bar{S}_o = \left[1 + \frac{\sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i})}{\sum_{T_{2i} > T_{2C}} P(T_{2i})} \right] S_o \quad (19)$$

式中 S_o ——整个岩石的含油饱和度。

将此式代入(14)式，并对所有大于 T_{2C} 的成分求和，其中应扣除因含油而多估的束缚水部分，则束缚水体积为：

$$V_{B2} = \left[1 - S_o - \frac{\sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i})}{\sum_{T_{2i} > T_{2C}} P(T_{2i})} S_o \right] T_{2C} \phi_{NMR} \left[\sum_{T_{2i} > T_{2C}} \frac{P(T_{2i})}{T_{2i}} - \frac{S_o}{T_{2o}} \right] \quad (20)$$

岩石的毛管束缚水体积 V_{BV1} 为:

$$V_{BV1} = V_{B1} + V_{B2} \\ = \phi_{NMR} \left\{ \sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i}) + \left[1 - S_o - \frac{\sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i})}{\sum_{T_{2i} > T_{2C}} P(T_{2i})} S_o \right] T_{2C} \left[\sum_{T_{2i} > T_{2C}} \frac{P(T_{2i})}{T_{2i}} - \frac{S_o}{T_{2o}} \right] \right\} \quad (21)$$

当地层为纯水层时(21)式可简化为:

$$V_{BV1} = \phi_{NMR} \left[\sum_{T_{2i} \leq T_{2C}} P(T_{2i}) + T_{2C} \sum_{T_{2i} > T_{2C}} \frac{P(T_{2i})}{T_{2i}} \right] \quad (22)$$

毛管束缚水饱和度为:

$$S_{BV1} = \frac{V_{BV1}}{\phi_{NMR}} \times 100\% \quad (23)$$

为提高毛管束缚水饱和度的评价精度,要求在测量中流体所受的扩散影响可以忽略。当流体扩散影响较明显时,由于扩散使 T_2 谱向短 T_2 偏移,会导致毛管束缚水饱和度评价过高。

以上的评价方法不适合含气地层,也不适用于含低 T_2 的高粘度重质原油地层。对于含泥质的地层应根据地层分散性泥质含量来适当地调整 T_2 的截止值。

五、结束语

为改进毛管束缚水的评价,使它能适应水层和油层、油水同层的地层而提出了本评价方法。目前由于实验室条件不成熟,还没有用实验数据来验证,今后应开展实验研究和现场处理,以便不断地发现问题和解决问题,并不断地完善解释方法。