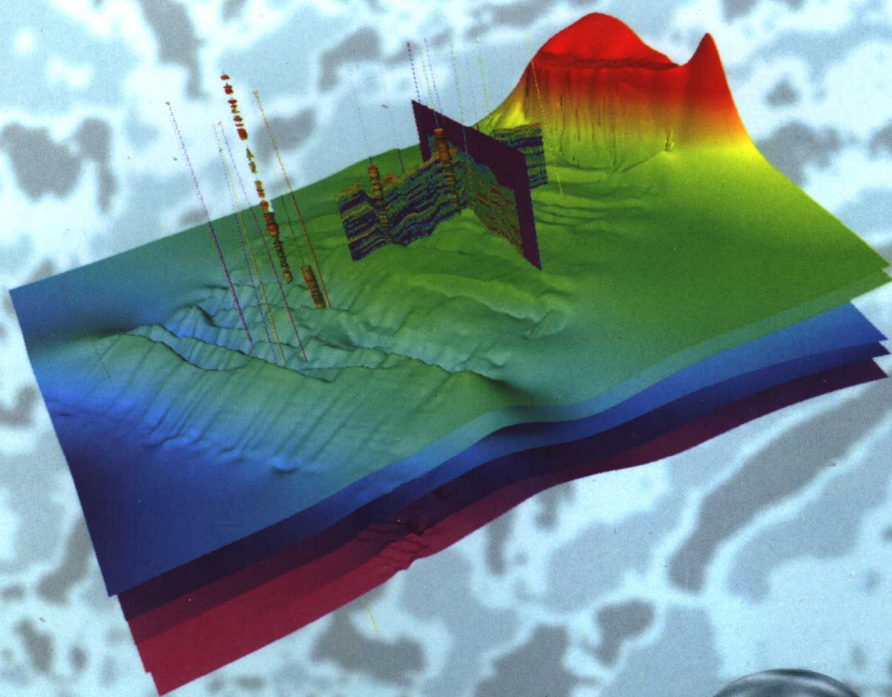


复杂油气田勘探开发丛书·第16卷

复杂油气田

COMPLEX OIL & GAS RESERVOIRS



1

石油工业出版社

Vol.16 No.1 2007

南堡凹陷北部沙三段岩性圈闭识别与评价

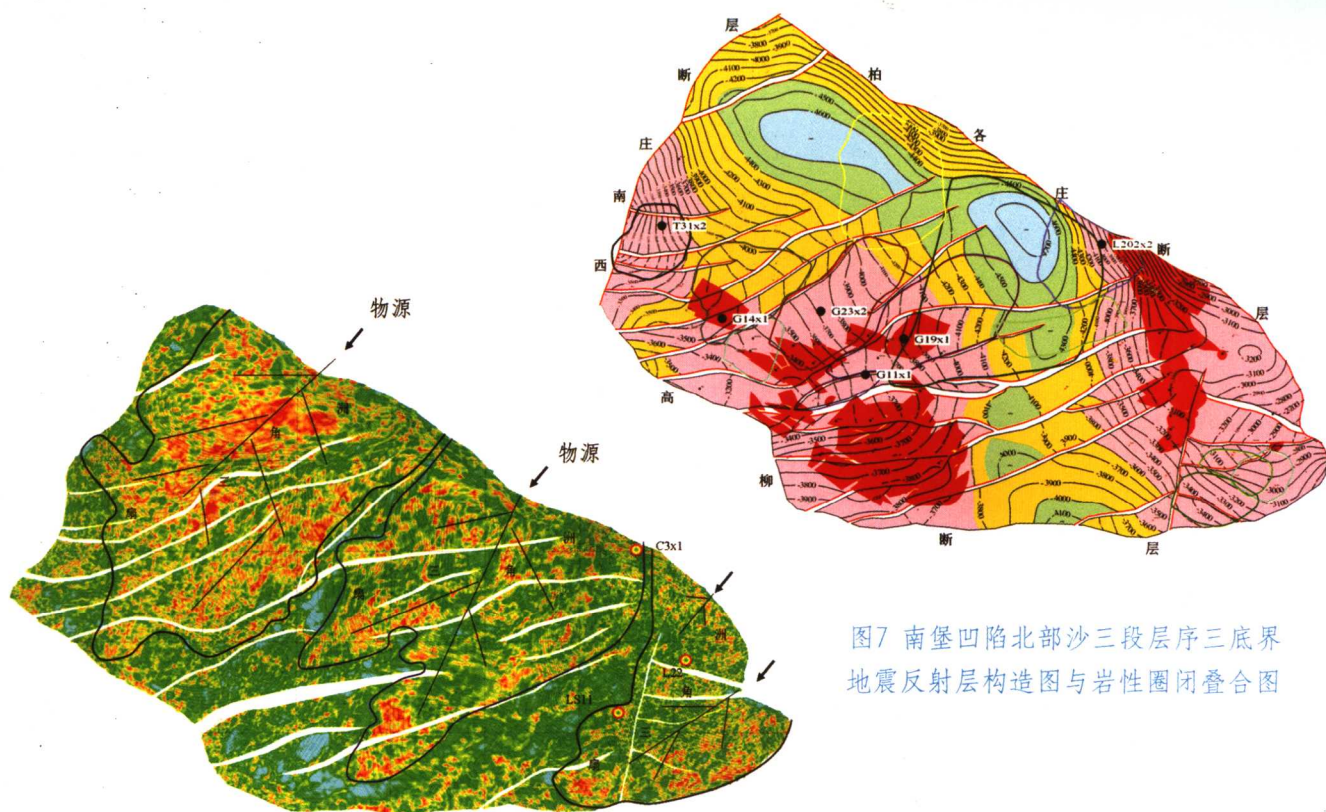


图4 有利砂体发育区预测

图7 南堡凹陷北部沙三段层序三底界地震反射层构造图与岩性圈闭叠合图

《复杂油气田》编辑委员会

主任：常学军 主编：常学军

副主任：王晓文 副主编：董月霞

委员：（以姓氏笔画为序）

王晓文	冯俊山	冯京海	刘泉海	刘树义	刘蕴华
毕宏勋	汤景会	李斌	李良川	陈元千	陈月明
陈仁保	张博郁	何新年	陆德喜	周海民	周凤鸣
金明权	苑吉林	武若霞	姚军	郝建明	赵福麟
贺廷昭	高卫国	常学军	崔永芳	董月霞	谢占安
裘恽南	路宝仲	靳明三	廖保方	谯汉生	穆立华

魏中文 鞠晓东 薛云松

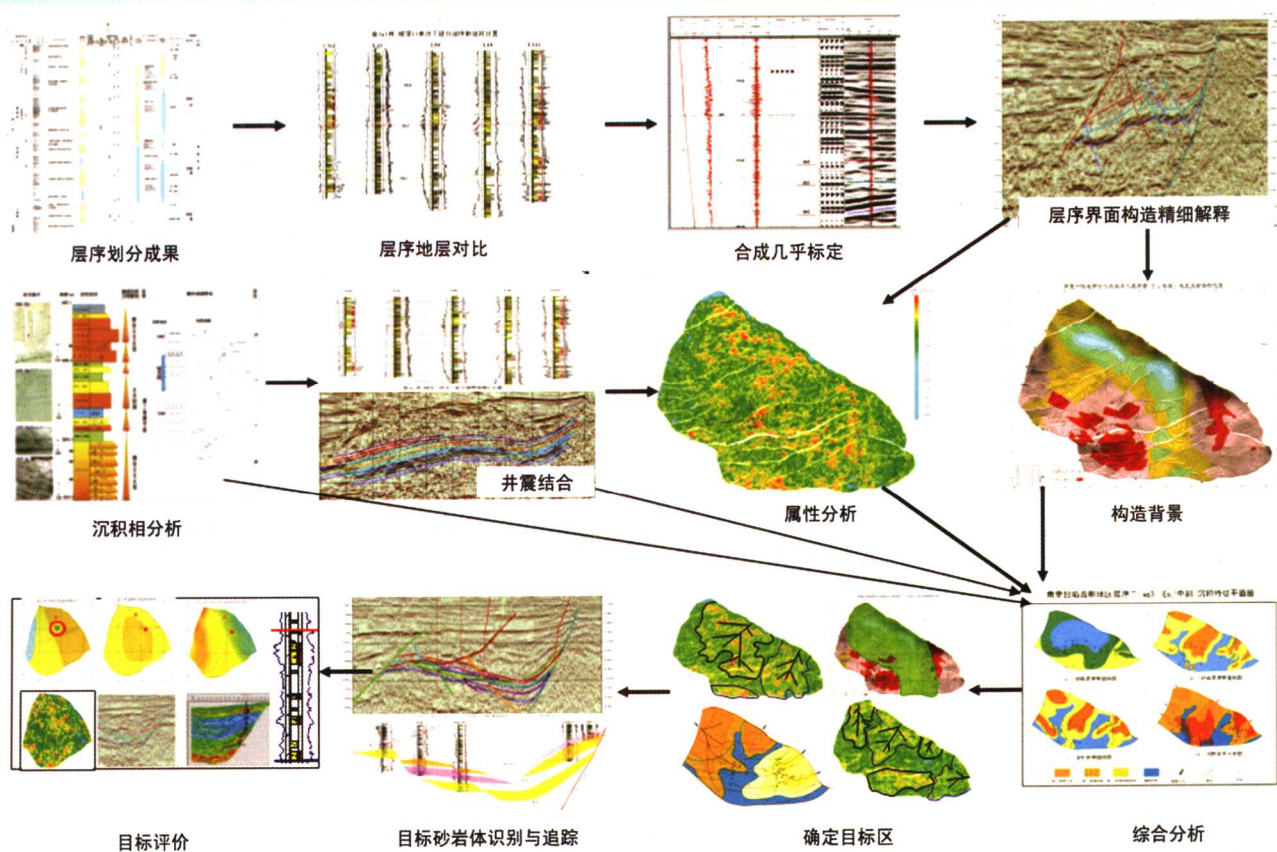


图1 岩性圈闭识别与评价技术流程图

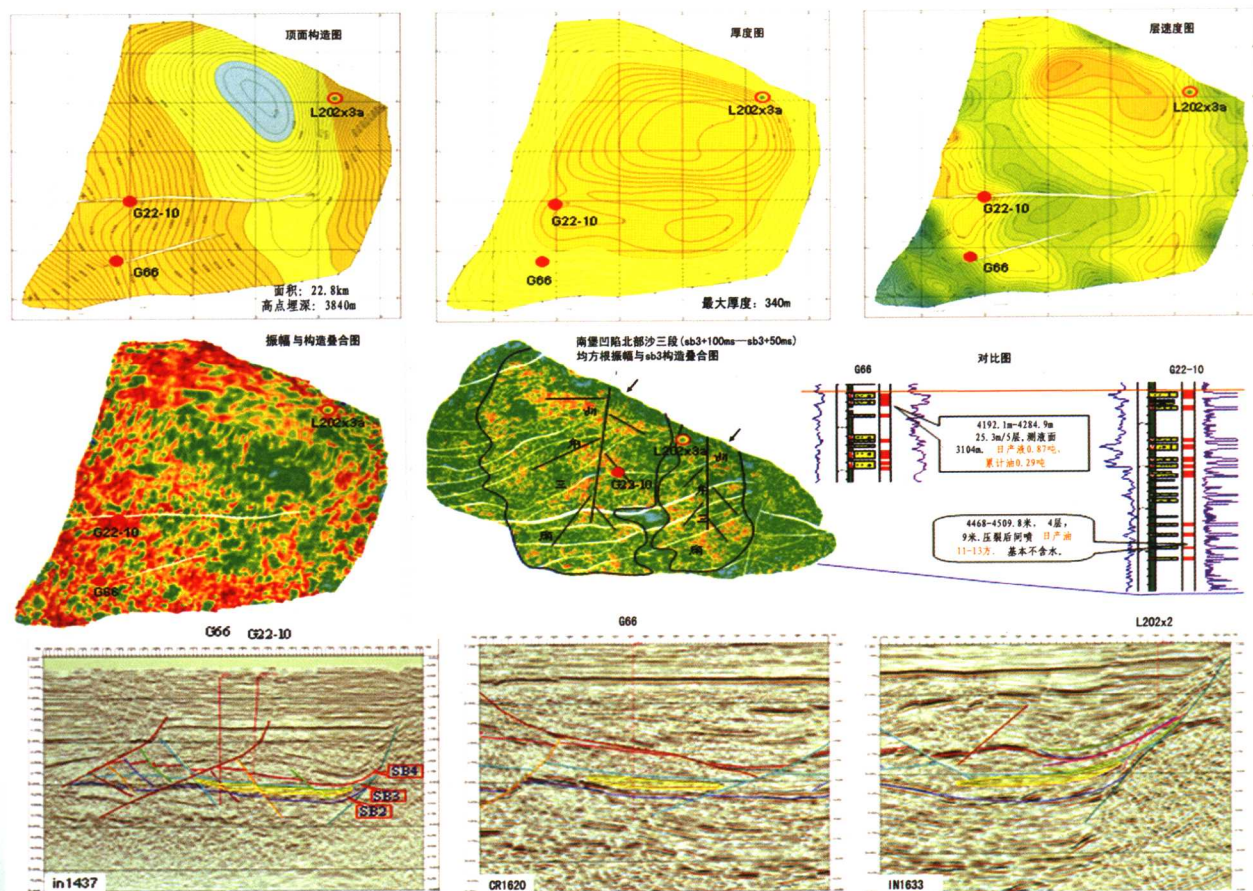


图8 高22-10井区沙三段层序二高位域扇三角洲砂体综合评价图

复杂油气田

第 16 卷
第 1 册

图书在版编目(CIP)数据

复杂油气田·第 1 册

常学军主编.

北京:石油工业出版社,2007.5

(复杂油气田勘探开发丛书)

ISBN 978-7-5021-6036-4

I. 复… II. 常… III. ①复杂

地层油气田-油气勘探

②复杂地层-油气田-油田

开发③复杂地层-油气田

-气田开发 IV. TE3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字

(2007)第 050965 号

主 编 常学军

副主编 董月霞

地 址 河北省唐山市 51*甲区
冀东油田勘探开发研究院

邮 编 063004

电 话 (0315)8766573

E-mail fzyqt@petrochina.com.cn

目 次

地质勘探

- 南堡凹陷北部沙三段岩性圈闭识别与评价 曹中宏, 谢占安, 杨晓利, 等 (1)
- 地震波形反演方法研究 邢文军, 翟瑞国 (5)
- 水平井测井响应特征分析 陈云峰, 魏忠文, 张文昌, 等 (10)
- 水平井测井解释评价方法研究及应用 司兆伟, 庄东志, 徐 风 (13)
- 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层测井评价研究 杨国涛, 于炳松, 刘忠宝, 等 (17)
- 火山岩储层岩性识别方法研究 王郑库, 欧成华, 李凤霞, 等 (23)
- 鄂尔多斯盆地西缘前陆盆地构造-沉积响应 李 斌, 李相博, 卢红选, 等 (27)

油田开发

- 高浅北区常规稠油油藏开发调整研究 高 晖, 马桂芝, 韩 军 (33)
- 柳 102 断块剩余油分布特征与开采策略 熊廷江, 张 杰, 刘 磊, 等 (37)
- 新立油田注水井转抽油井的机理研究 吴 琼, 韩 玲, 张会玲, 等 (41)
- 辽河油区注水低效区块提高采收率潜力评价 阴艳芳 (45)
- 对极限含水条件下三元复合驱的认识 张俊霞 赵长久 (49)

钻采工程

- 小间隙大斜度水平井固井技术在冀东油田的应用 赵永光, 白亮清, 赵树国, 等 (51)
- 油井捞砂工艺技术及其应用 宋其仓, 于 燕 (55)

综 合

- 陕北地区侏罗系古地貌研究 孙燕妮, 焦积田, 付伟, 等 (57)
- 高尚堡 25 万立方米天然气处理装置主要工艺技术研究 张春刚, 谭 云, 张立群, 等 (61)
- JDT 水基清防蜡剂的研究与应用 倪 银, 赵 娜, 胡彬彬, 等 (66)

其 他

- 启用电子邮件新信箱的通知 (70)

责任编辑:樊会兰 排版:王宏艳

Complex Oil & Gas Reservoirs

Vol. 16 No. 1 Mar. 2007

CONTENTS

• PETROLEUM EXPLORATION •

- Identification and Evaluation of Es₃ Lithologic Trap in North Nanpu Sag Cao Zhonghong, *et al.* (1)
- Research of Methods for Seismic Waveform Inversion Xing Wenjun (5)
- Application of Logging Data to Geological Guiding and Evaluation of Horizontal Wells
..... Chen Yunfeng, *et al.* (10)
- Research and Application of Evaluation Method for Well Logging Interpretation for Horizontal Wells
..... Si Zhaowei, *et al.* (13)
- Logging Evaluation of Ordovician Carbonate Reservoirs in Tazhong Area of Tarim Basin
..... Yang Guotao, *et al.* (17)
- Methods of Lithologic Recognition in Volcanic Reservoirs Wang Zhengku, *et al.* (23)
- Tectonic – Sedimentary Response of Foreland Basin in Western Margin of Ordos Basin Li Bin, *et al.* (27)

• OILFIELD DEVELOPMENT •

- Development and Adjustment of Conventional Heavy – Oil Reservoir for Gaoqianbeiqu of Gaoshangpu Oilfield ...
..... Gao Hui, *et al.* (33)
- Research and Production Countermeasures of Distribution of Remaining Oil in Liu 102 Fault Block
..... Xiong Tingjiang, *et al.* (37)
- Research on Mechanism of Transformation of Water Injection Wells into Oil Production Wells in Xinli Oilfield ...
..... Wu Qiong (41)
- Evaluation of Potential for EOR in Flooding – Low – Efficiency Block of Liaohe Oil Region Yin Yanfang (45)
- Understanding of ASP Flooding at Limit Water Cut Zhang Junxia, *et al.* (49)

• DRILLING AND PRODUCTION ENGINEERING •

- Application of Cementing Technique of Horizontal Well with Close Clearance and Great Angle to Jidong Oilfield
..... Zhao Yongguang, *et al.* (51)
- Bailing Technology of Oil Well and Its Application Song Qicang, *et al.* (55)

• GENERALITY •

- Research of Jurassic Palaeogeomorphology in North Shanxi Area Sun Yanni, *et al.* (57)
- Application of Processing Unit for Natural Gas to Jidong Oilfield Zhang Chungang, *et al.* (61)
- Research and Application of Water – Base Paraffin Remover and Inhibitor Ni Yin, *et al.* (66)

南堡凹陷北部沙三段岩性圈闭识别与评价

曹中宏, 谢占安, 杨晓利, 张国栋

(中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北 唐山 063000)

摘 要 本文是在南堡凹陷层序地层学研究成果的基础上, 利用三维地震数据体进行三级层序界面解释、沿层序解释界面分时窗进行地震属性提取、结合钻井资料进行地震属性特征分析等技术手段确定南堡凹陷北部有利岩性圈闭发育区; 在三级层序解释界面的控制下, 根据不同体系域砂体发育类型寻找、识别有利岩性圈闭, 编制单个岩性圈闭综合图件, 优选勘探目标; 对高 22-10 井沙三段层序二高位域上倾尖灭岩性圈闭等 20 个岩性圈闭进行了识别与评价, 提出建议井位 7 口, 为南堡陆地岩性油气藏勘探提供了具体钻探目标。

关键词 高柳地区; 岩性圈闭; 体系域; 构造解释

南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷北部, 面积 1 932 km²。它是在华北地台基底上, 经中、新生代的块断运动而发育起来的一个中新生界北断南超的箕状凹陷。受凹陷内主要分隔性断裂高柳断裂控制, 受其分隔, 该凹陷可分为北部凹槽、南部凹槽两大构造分区。北部分区是指高柳断裂以北的凹陷区, 主要发育高尚堡潜山披覆背斜构造带、柳赞同沉积背斜构造带两个二级正向构造带, 该区是沙河街组 (Es) 的沉积中心; 南部分区是指高柳断裂以南和以西的凹陷区, 主要发育老爷庙、南堡 1 号、南堡 2 号、南堡 4 号、南堡 5 号等构造, 该区是东营组 (Ed) 的沉积中心。

前人研究认为: ① 南堡凹陷古近系可识别出 1 个超层序组、4 个超层序、11 个三级层序; ② 南堡凹陷古近系存在同沉积断裂坡折带和同沉积背斜挠曲坡折带两种类型, 发育了同生断裂坡折型层序和同沉积背斜挠曲坡折型层序两种层序类型; ③ 同生断裂坡折型层序和同沉积背斜挠曲坡折型层序的低位域砂体及高位域砂体成藏条件优越, 在地震剖面上易于识别, 是隐蔽油气藏勘探的主要目标^[1]。

本文是在前人研究成果的基础上, 以南堡凹陷北部二次三维连片叠前时间偏移处理地震资料为基础, 充分利用钻井、测井、岩心分析等资料, 以先进的地震解释、储层反演、综合评价等地震技术为手段, 开展南堡凹陷北部沙三段岩性圈闭识别与评价研究, 为南堡陆地岩性油气藏勘探提供具体钻探目标。

1 研究思路

利用南堡凹陷层序地层学研究成果进行沙三段层序地层对比, 利用三维地震数据体进行三级层序界面解释, 沿层序解释界面分时窗进行地震属性提取, 结合钻井资料进行地震属性特征分析, 确定有利岩性圈闭发育区; 在三级层序解释界面的控制下, 根据不同体系域砂体发育类型寻找、识别有利岩性圈闭, 编制单个岩性圈闭顶面构造形态图、地层等厚图、砂岩厚度图等; 对单个岩性圈闭的物性特征、含油性利用反演、速度场变化等相关手段进行评价, 确定有利岩性圈闭, 提出井位建议 (图 1, 见封三)。

2 岩性圈闭识别与评价

2.1 层序地层对比

沙三段地层是南堡凹陷古近系沙河街组最下部的沉积单元, 在凹陷内埋藏较深, 具有地层展布范围广、沉积厚度大的特点。沉积厚度多在 1 000 ~ 1 200 m 以上, 并发育多套自生自储的生储盖组合。

根据南堡凹陷层序地层学研究成果, 南堡凹陷北部沙三段可划分为两个超层序, 5 个三级层序。超层序 1 (SSQ1) 相当于沙三⁵ 亚段 (Es₃⁵), 超层序 2 (SSQ2) 相当于沙三⁴ 亚段到沙二段 (Es₃⁴—Es₂)。其中超层序 1 (SSQ1) 由 Sq1 组成, 超层序 2 (SSQ2) 由 Sq2, Sq3, Sq4 组成。

Sq1 层序的底界面为古近系与中生界之间的不整合面, 顶界面是侵蚀不整合面 (Sb2)。该层序相当

于 E_{s3}^5 的中下部。底部为一套细砾岩夹紫红色泥岩,属于冲积扇沉积,构成了层序的低位域(LST)。上部为紫红色泥岩夹粉砂岩,为扇前平原及浅湖沉积,属于层序的湖扩展体系域和高位体系域。

Sq2 层序的顶界面是扇三角洲与下切河道之间的界面(Sb3)。其低位域为细砾岩和含砾砂岩夹灰绿色泥岩构成的正旋回,属于水下扇沉积体系。水下扇之上覆盖的深灰色泥岩、油页岩为湖扩展体系

域(EST)。而上部由含砾砂岩与灰色泥岩构成的反旋回属于扇三角洲沉积体系构成了层序的高位体系域(HST)。

Sq3 层序的顶界面是辫状河道的底界面(Sb4)。其低位域属于下切水道及水下分流河道砂砾岩构成的正旋回;湖扩展体系域为深灰色、灰色泥岩;高位域属于砂岩夹灰色泥岩构成的反旋回,是扇三角洲沉积(图2)。

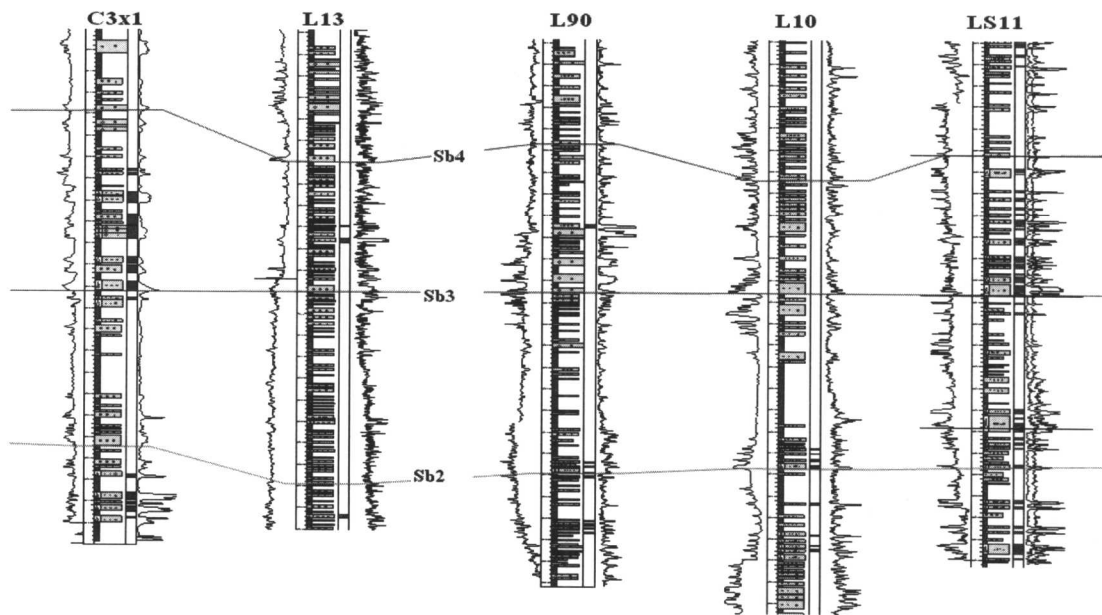


图2 南堡凹陷沙三段层序地层连井对比剖面

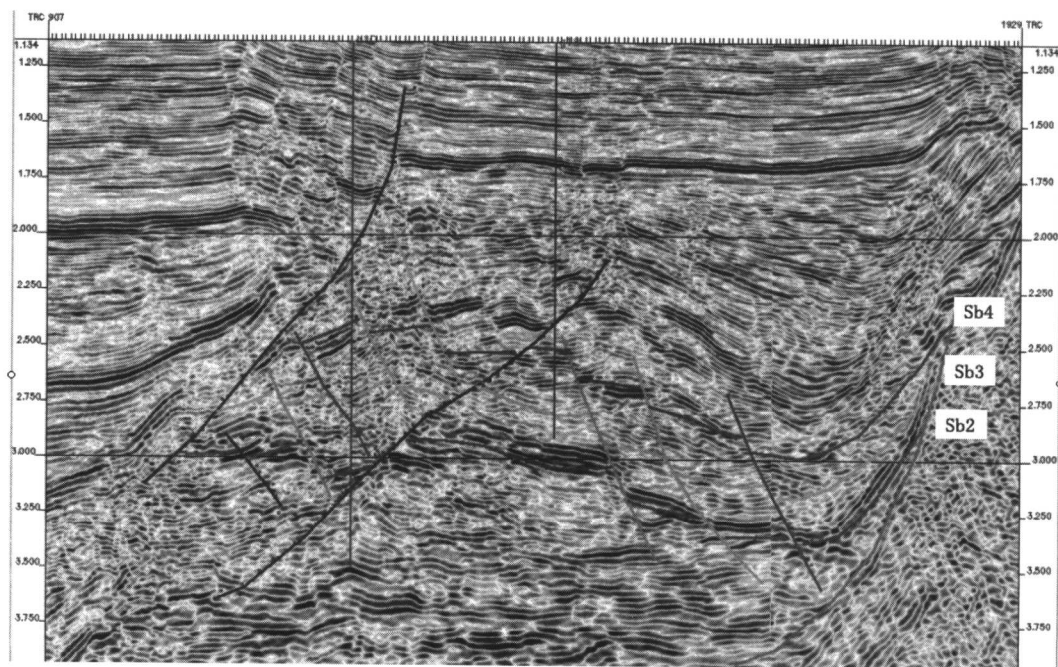


图3 南堡凹陷北部 IN1357 地震测线

Sq4 层序的顶界面是 Sq5 层序扇三角洲平原辫状河道的底界面。其低位域属于辫状河道砂砾岩构成的正旋回,湖扩展体系域和高位体系域为灰绿色泥岩夹砂岩,属于滨浅湖沉积。

2.2 层序界面地震解释层位标定

根据层序地层对比成果,制作合成记录进行了层位标定,结合地震反射波组及内部反射结构特征,确定了 Sq2 层序的底界面(Sb2)、Sq3 层序的底界面(Sb3)、Sq4 层序的底界面(Sb4)解释层位,具体的反射特征表现为:Sq2 层序的底界面(Sb2)在地震剖面上表现为反射能量强,特征明显,在两个强相位的同相轴之下,连续性好。Sq3 层序的底界面(Sb3)其特征是 1~2 个强相位,反射能量较强,连续性较好,全区均可连续追踪对比,内部为空白和弱反射带。Sq4 层序的底界面(Sb4)其特征为 2~3 个强相位组成,内部为席状反射,连续性好(图 3)。

2.3 层序界面构造解释

在层序界面解释中重点是确定主要三级、四级断层的特征和组合关系,充分利用水平切片与纵、横测线交互解释来控制解释质量,地震解释深度与层序地层分层吻合较好。解释认为:南堡凹陷北部沙

三段构造为一个整体的大型含油构造,具有统一的断裂系统,具有相似的油气成藏条件,具备形成岩性油气藏的构造背景。

2.4 有利目标区优选

在南堡凹陷北部沙三段进行岩性油气藏勘探有利目标区优选时,主要考虑构造背景、沉积相与沉积体系发育特征、已钻井含油气特征等因素。构造背景通过层序界面构造解释可以确定。利用层序界面构造解释成果,以层序解释界面为中心上下沿层提取地震属性,在全盆地沉积研究成果的约束下,利用钻井资料解译地震属性特征,确定有利砂体发育区(图 4,见封二),综合分析确定岩性油气藏勘探有利目标区。

2.5 单个岩性圈闭识别与评价

在岩性油气藏勘探有利目标区中,根据已钻井含油气特征,进行砂体标定(图 5),利用三维地震数据体进行识别与追踪(图 6),编制砂体顶面形态图、厚度图,对目标岩性圈闭利用属性分析、层速度分析来刻画单个岩性圈闭储层发育特征,并对其成藏条件进行综合评价,提出井位建议。

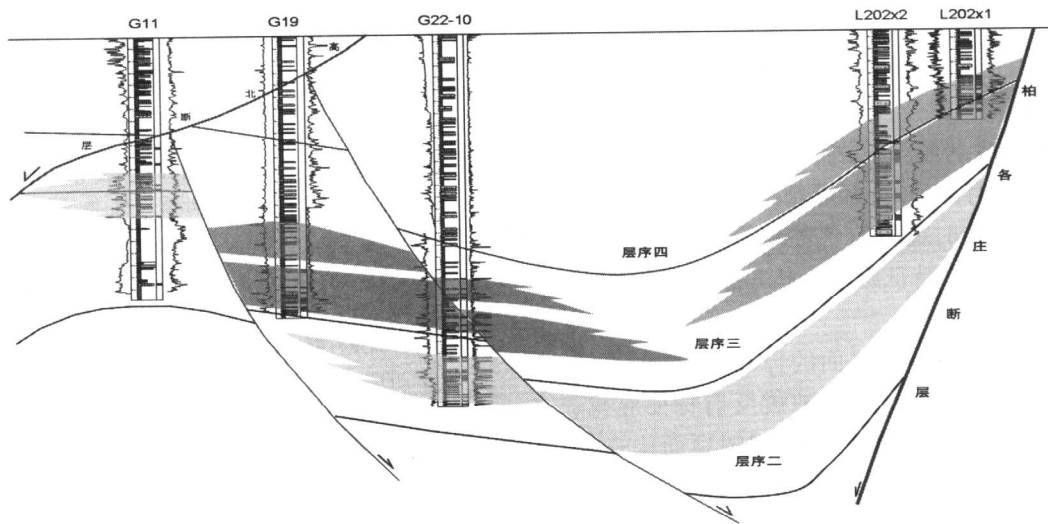


图 5 南堡凹陷北部高 11 井 - 柳 202x1 井沙三段沉积断面图

本次在南堡凹陷北部沙三段高尚堡构造与柳赞构造的接合部识别出高 22-10 井沙三段层序二高位域扇三角洲砂体岩性圈闭、高 19 井沙三段层序三低位域扇三角洲砂体岩性圈闭、柳 202x1 井沙三段层序四低位域扇三角洲砂体岩性圈闭等 20 个岩性

圈闭(图 7,见封二),圈闭面积 112.6 km²。

下面以高 22-10 井沙三段层序二高位域扇三角洲砂体岩性圈闭为例进行综合评价。该圈闭位于高尚堡构造与柳赞构造的接合部,高尚堡背斜构造的北翼,处于南堡凹陷主力生油次洼之一的拾场次

洼内。在高22-10井的南部有一个古构造高地,高位域扇三角洲砂体中的前积体在此上倾尖灭,形成了高22-10井沙三段层序二高位域扇三角洲砂体上倾尖灭岩性圈闭,该岩性圈闭的规模较大,埋深3 840 m,面积22.8 km²,最大厚度达340 m。高22-10井、高66井钻遇该岩性圈闭,分别解释油层70 m、

43 m。高22-10井在沙三段4 468~4 509.8 m井段试油,4层9 m,压裂后间喷日产油11~13 m³,基本不含水,高66井试油见油流。综合评价提出建议井柳202x3a井(图8,见封三)。

通过对所识别的20个岩性圈闭进行综合评价,提出建议井井位7口(图7,见封二)。

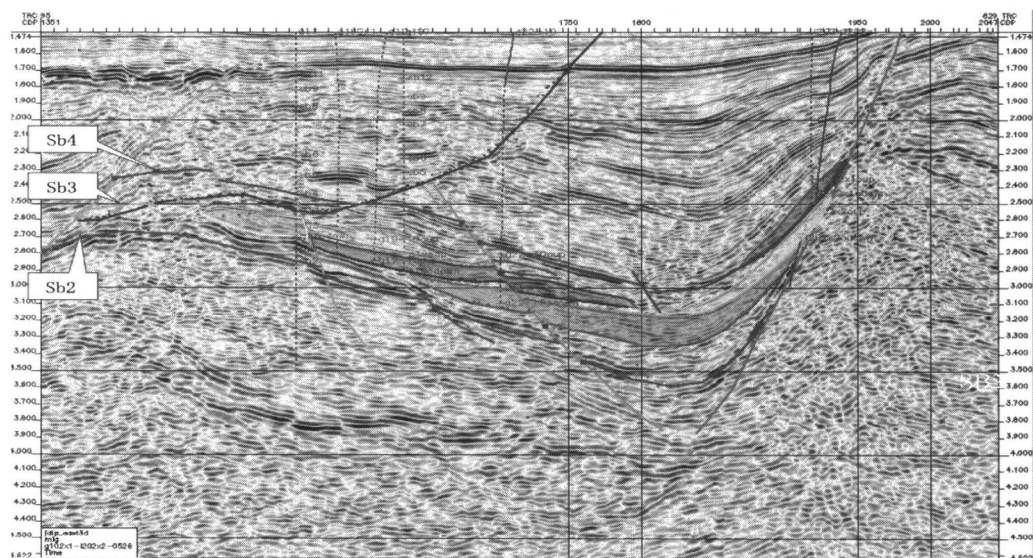


图6 南堡凹陷北部高11井-柳202x1井岩性圈闭解释地震剖面

3 结 论

(1) 在层序地层学研究成果框架控制下,对单井进行精确地层划分,划分出不同类型的沉积单元,建立连井层序剖面。根据层序界面地震的反射特征进行精细地时深标定,开展精细层序界面解释、沿层序解释界面分时窗提取各种地震属性、结合钻井资料进行地震属性特征综合分析可以确定有利岩性圈闭目标区。

(2) 在三级层序解释界面的控制下,根据不同体系域砂体发育类型和对应地震反射特征寻找、识别有利岩性圈闭,编制单个岩性圈闭顶面构造形态图、地层等厚图、砂岩厚度图等。利用地震属性、反演、速度场变化等相关手段对单个岩性圈闭的物性特征、含油性进行精细刻画。

(3) 对高22-10井沙三段层序二高位域上倾尖灭岩性圈闭等20个岩性圈闭进行了识别与评价,提出建议井井位7口,为南堡凹陷岩性油气藏勘探提供了具体钻探目标。在实际工作中总结出一套切

实可行的岩性油气藏识别方法,并取得了较好的应用效果,具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 冯有良,周海民,李思田等. 陆相断陷盆地层序类型与隐蔽油气藏勘探——以南堡凹陷古近系为例. 地球科学,2004,29(5): 603~608
- [2] 冯有良,周海民,李思田等. 陆相断陷盆地层序类型与构造特征. 地质论评,2004,(1):43~49
- [3] 周海民,董月霞. 南堡凹陷沉积体系研究与油气成藏. 复杂油气田,2002,11(1):1~5
- [4] 周海民,董月霞,刘蕴华. 冀东南堡凹陷精细勘探实践与效果. 中国石油勘探,2003,8(1):11~15
- [5] 董月霞,夏文臣,常学军等. 南堡凹陷层序地层学、沉积体系研究与油气成藏. 复杂断块油田精细勘探开发技术,2002,71~78

第一作者简介 曹中宏(1968—),男,1991年毕业于中国地质大学(北京)地质学专业,获学士学位,现在冀东油田公司勘探部主要从事勘探生产管理工作。

收稿日期:2006-11-12

地震波形反演方法研究

邢文军, 翟瑞国

(中国石油冀东油田勘探开发研究院, 河北 唐山 063004)

摘 要 地震波形反演由于其反演依据充分、可以有效地排除偶然因素的影响, 受到了广大地球物理工作者的关注。非线性地震波形反演可以恢复速度场的所有波长分量, 所以该方法得到了长足的发展。本文首先讲述了经典的非线性地震波形反演方法, 然后针对波形反演提出了共轭梯度和模拟退火混合优化反演方法, 并对模型进行了反演, 结果表明这是一种有效的波形反演方法。

关键词 波形反演; 共轭梯度; 模拟退火; 混合优化

波形反演^[1]是众多反演方法中的一种反演方法, 其优点是反演依据充分(计算值与实测值的对比参照是波形整体), 不仅可以利用同相轴的振幅及旅行时信息提取物性参数, 继而进行储层预测, 而且可以有效地排除偶然因素的影响, 所以波形反演是寻找隐蔽油气藏的有效途径之一。国内外学者对这种反演方法作了一些初步的研究, 已初步显示出了它的先进性、实用性和有效性。

地震波形反演的起初阶段是以线性波形反演为主, Berkhout^[2] (1984)、Devaney^[3] (1984)、Tarantola^[4] (1984) 等人都对线性地震波形反演作了一些初步的研究, 得出了一些有意义的结果, 然而都不能解决速度模型的长波长分量问题, Devaney (1984) 指出线性化地震波形反演是不能恢复速度场的长波长分量的, 并且 Mora^[5] (1989) 也证明了在正常的勘探条件下, 只有采用完全非线性地震波形反演方法, 才能观测到地震速度波场的所有波长分量。Mora^[6] (1987)、Pica *et al.*^[7] (1990)、Tarantola^[8] (1986) 等人对完全非线性波形反演进行了详细研究, 力求通过迭代下降方法寻求使得目标函数最小的速度模型。但是, 由于存在大量的局部极小值, 反演结果并不尽人意。后来为了克服局部极值问题, 提出了许多解决方法。Mrinal K. Sen and Paul L. Stoffa^[9] (1991) 针对非线性地震波形反演提出了模拟退火方法, 模拟退火方法不需要一个准确的初始模型, 并且不会陷入局部极值。Bunks^[10] 等人 (1995) 提出了尺度分解的多重网格方法, 他们采用多重网格法将地

震数据分解在不同的尺度上, 按尺度分解的思想进行迭代反演, 对于复杂的地质模型做了实验, 取得了很好的效果。周辉等人^[11] (1997) 研究了能求得目标函数全局最优解的遗传算法训练人工神经网络的方法, 并提出了加速网络收敛的方法。孟鸿鹰等人^[12] (1999) 提出了小波变换的多尺度方法, 对一维模型进行了试算, 并和已有的简单迭代法和多重网格法作了比较, 计算结果表明效果较好。他们共同的不足之处就是计算量都是比较大的。

针对地震波形反演的特点, 提出了模拟退火法和共轭梯度法的混合优化反演^[13]方法。为了说明反演方法的有效性, 利用上述方法对楔形体模型进行了试算。

1 经典的地震波形反演

波形反演是需要先给定一个初始模型作正演, 用观测数据和模型数据的差值进行逆时传播, 计算搜索方向和步长, 修改速度值再进行正演, 这样反复的进行迭代, 直到满足要求为止。下面详细介绍一下具体的算法。

地震波传播遵循常密度声波波动方程:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + s \right) \quad (1)$$

波场的初始条件是:

$$\begin{cases} p(x, z, 0) = 0 \\ \frac{d}{dt} p(x, z, 0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

优化问题的目标函数为:

$$J(v) = \frac{1}{2} \int_{(x,z) \in H} dx dz \times \int_0^T dt \{p(x,z,t) - \tilde{p}(x,z,t)\}^2 \quad (3)$$

式中, $\tilde{p}(x,z,t)$ 和 $p(x,z,t)$ 分别是观测数据和模型数据, $J(v)$ 为总偏差, H 为空间的接收区域, T 为总的接收时间。给定一个速度 v , 通过方程(1)计算模型数据。当方程(3)最小时的速度值就是反演问题的解。

梯度方法通常用于求解反演问题。这些方法是先给定一个初始速度模型, 再构造一个迭代公式, 然后进行反复的迭代。迭代公式为:

$$v_{n+1} = v_n + a_n d_n \quad (4)$$

式中 a_n 是一个通过线性搜索得到的正标量, d_n 是下降方向, 例如负梯度 $-dJ/dv$ 。地震反演的目标就是在方程(1)的约束下, 求目标函数方程(3)的最小值。为此, 我们把方程(1)写成 $G(p,v) = 0$ 的形式, 即:

$$G(p,v) = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + s \right) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

利用 Lagrange 乘数法, 可以化为无约束优化问题。

$$S = J + \int_{(x,z) \in H} \int_0^T \lambda G(p,v) dt dx dz \quad (6)$$

这里 S 为新的目标函数, $\lambda(x,z,t)$ 为 Lagrange 算子, 为了求得 S 关于 P 的平衡点, 对积分方程(6)分步积分两次,

$$S = J + \int_{(x,z) \in H} \int_0^T p \times \left[\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} + s - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial t^2} \right] dt dx dz \quad (7)$$

然后再令 $\partial S / \partial p = 0$, 得到关于 λ 的共轭波动方程:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} \right) + (p - \tilde{p}) \quad (8)$$

相应的终值条件为:

$$\begin{cases} \lambda(x,z,T) = 0 \\ \frac{d}{dt} \lambda(x,z,T) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

最后, 通过计算 $\partial S / \partial v$ 可以得到梯度:

$$\frac{\partial S}{\partial v} = \frac{2}{v^3} \int_0^T \lambda \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} dt \quad (10)$$

式中, p 可以通过方程(1)获得, λ 由方程(8)解得。

经典的完全非线性地震波形反演就是先给出初速度, 然后利用(10)式的梯度函数迭代修正速度函数, 直到目标函数取极小为止。

2 模拟退火和共轭梯度法的混合优化反演

地球物理联合反演^[14~20]由于使反演问题的非唯一性得到有效限制而越来越受到人们的重视。联合反演意义广泛, 联合反演的形式有很多种:

(1) 基于相同物性地球物理观测数据之间的联合反演。

(2) 基于不同岩石物性的地球物理观测数据之间的联合反演。

(3) 基于相同的物性岩性, 采用相同的资料, 只是使用不同的反演方法。这样可以充分利用不同方法的优点, 弥补不足, 提高反演精度和计算效率。

共轭梯度法^[21,22]是一种经典算法, 它有两个优点, 一是可以求得非线性问题的精确解, 二是具有二次截止的性质, 共轭梯度法进行 n 次搜索就可求出最小解, 因此它是一种快速、高精度的解法。然而, 共轭梯度法同其他非启发式反演或最优化方法一样, 目标函数在有多个极值点的情况下使用共轭梯度法就有可能陷入局部极值, 显然, 解决这一问题的思路是尽可能地使初始搜索点位于全局极值点的附近, 所以对初始模型依赖性很强。

模拟退火法^[23~25]进行反演时, 不需要给定初始模型, 它是在一定的范围内随机产生的初始模型, 并且迭代的每一次也都同样随机产生新的模型, 这样就可以摆脱初始模型的限制。由于是随机产生模型, 所以它还可以跳出局部极值, 突破反演过程中局部最优的限制, 获得全局最优解。因此, 模拟退火方法适用于解决地震反演中的非凸性目标函数的最优化问题。

共轭梯度法和模拟退火法各有利弊, 结合了它们的优点, 实现了模拟退火法和共轭梯度法的混合优化反演方法。首先随机产生初始模型用模拟退火法反演速度场的长波长分量, 再用共轭梯度法进行反演, 这样就可以得到速度场的全部波长分量, 并且模拟退火法反演的结果作为共轭梯度法反演的初始模型, 这样既解决了初始模型问题、陷入局部极值问题, 同时又提高了运算效率。

3 模型试算

我们采用高速楔形体模型对速度进行了反演。子波选用雷克子波,主频为 30 Hz,采样间隔均为 6 m,时间采样间隔为 1 ms,时间长度为 600 ms。模拟退火法的参数:初始温度 $T_0 = 100$,马可夫链长度 $\text{MarkovLength} = 100$ 、衰减参数 $\partial = 0.9$ 。

地质模型是在地层中夹有一个高速的楔形体(见图 1),总共 20 道,每道有 100 个采样点,即模型为 120×600 m。共轭梯度是以 2 400 m/s 的均匀速度场作为初始模型,而模拟退火反演是在一定范围内随机产生的初始模型,混合优化反演方法是以模拟退火法反演的结果作为初始模型,用共轭梯度法进行反演。图 2 是共轭梯度法的反演结果,楔形体

非常清楚,但是反演层有部分抖动,这是陷入局部极值所引起的。图 3 是模拟退火法的反演结果,图 4 是混合优化反演方法的反演结果,从图中可以看出,反演结果几乎和原来模型一样,说明了使用混合反演方法进行波形反演的有效性和稳定性。我们使用拟合误差:

$$W = \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{\sum_{i=1}^M (v_{ji} - v_{oji})^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^M v_{oji}^2} \right) \quad (11)$$

式中 M 为点数, v_{ji} 为速度反演结果, v_{oji} 为理论速度值, i, j 则分别为采样点号和道号。根据式(11)来比较一下反演结果。共轭梯度拟合误差为 0.012417,混合优化反演拟合误差为 0.004280,显然混合优化反演方法的效果优于共轭梯度法。

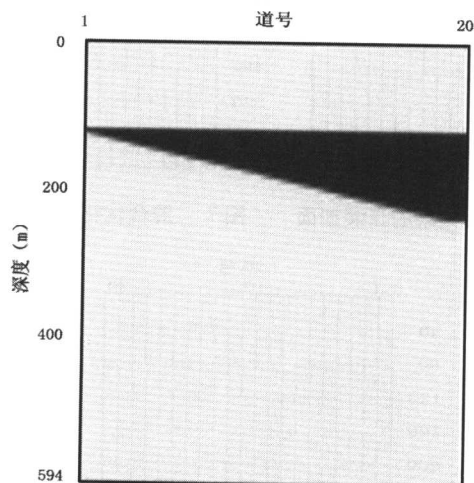


图 1 高速体模型

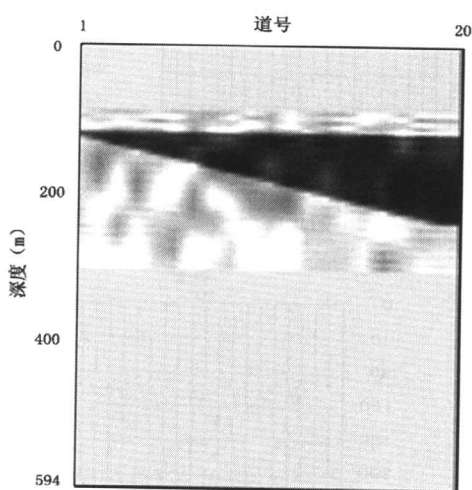


图 2 共轭梯度法反演结果

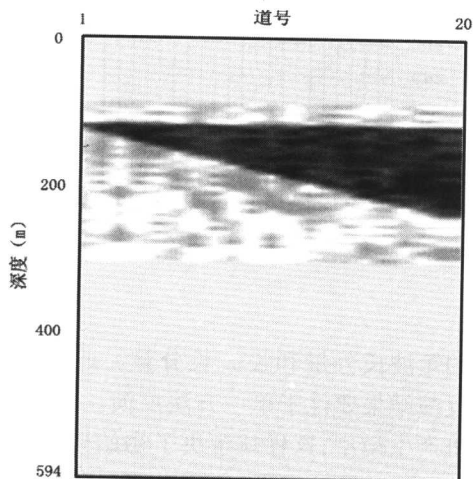


图 3 模拟退火法反演结果

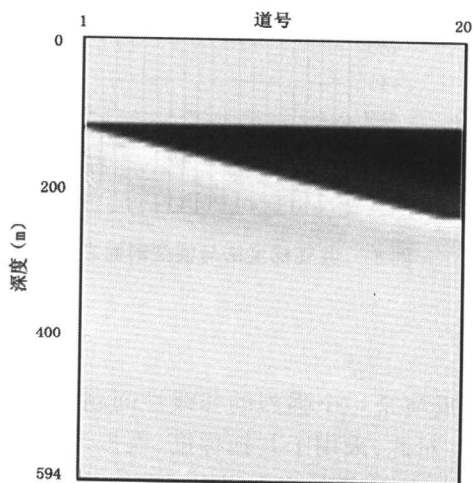


图 4 混合优化反演结果

4 分析

为了说明方法的有效性,对高速楔形体用反演结果的正演剖面进行了比较。图5至图7分别是理论模型、共轭梯度法反演结果、混合优化反演结果的

正演剖面,图8、图9分别是共轭梯度法、混合优化反演法反演结果的正演剖面与理论模型正演剖面的波场差。可以看出,混合优化反演法的剩余波场几乎为零,对比发现混合优化反演的地震波形反演结果是最好的,剩余波场能量也是最弱的。

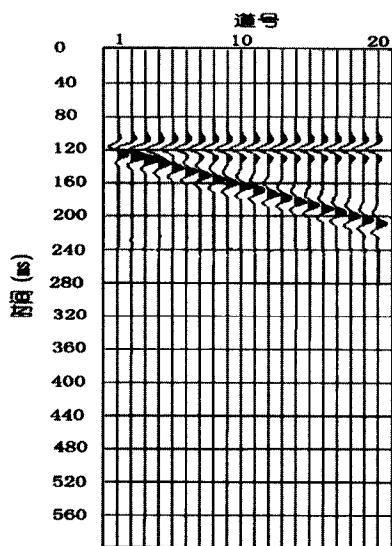


图5 图1的正演剖面

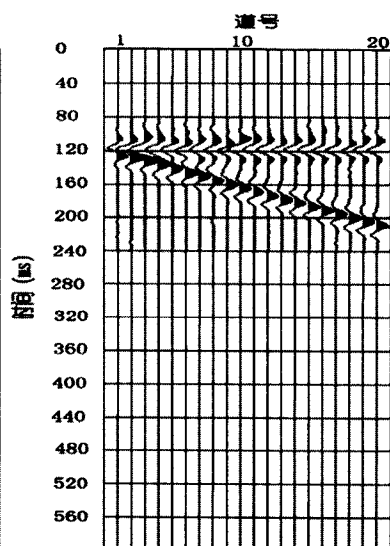


图6 共轭梯度法反演结果的正演剖面

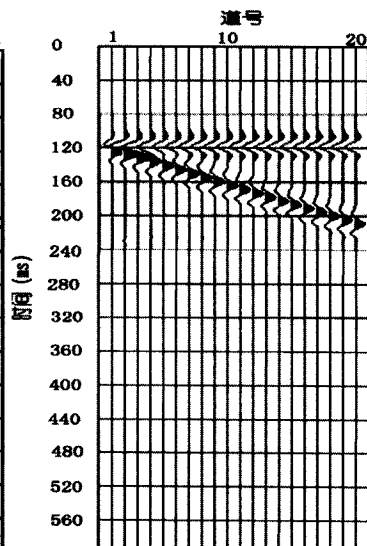


图7 混合优化反演的正演结果

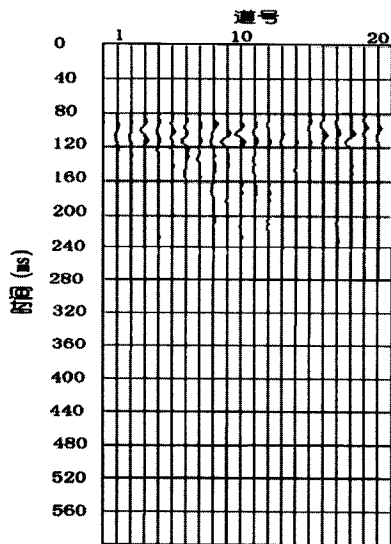


图8 共轭梯度法与模型剖面之差

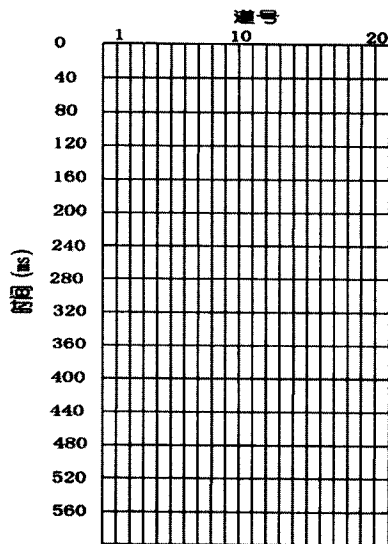


图9 混合反演与模型剖面之差

5 结论

地震波形反演是一个强烈的非线性问题,容易陷入局部极值,对此,采用了共轭梯度、模拟退火的混合优化反演方法,这样就完全利用了它们的快速、高效、能够跳出局部极值的优点,而且可以反演波场

的短波长分量和长波长分量。通过模型算例看出,反演结果要优于单一方法反演。由于模拟退火是随机产生模型,这样就解决了初始模型问题,并且既增加了反演的稳定性,又提高了运算效率,说明了混合优化反演方法的优越性。

参 考 文 献

- [1] 邢文军,王永刚. 非线性地震波形反演综述. 储层地震技术新进展, 2004; 129 ~ 135
- [2] Berkhout, A. J. Multidimensional linearized inversion and seismic migration. *Geophysics*, 1984, 49: 1881 ~ 1895
- [3] Devancy, A. J. Geophysical diffraction tomography. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22: 3 ~ 13
- [4] Tarantola, A. Linearized inversion of seismic reflection data. *Geophysical Prosp*, 1984, 32: 998 ~ 1015
- [5] Mora P. Inversion = migration + tomography. *Geophysics*, 1989, 54: 1575 ~ 1586
- [6] Mora P. Nonlinear two - dimensional elastic inversion of multioffset seismic data. *Geophysics*, 1987, 52: 1211 ~ 1228
- [7] Pica, A and Tarantola A. Nonlinear inversion of seismic reflection data in a laterally invariant medium. *Geophysics*, 1990, 55: 284 ~ 292
- [8] Trantola, A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data. *Geophysics*, 1986, 51: 1983 ~ 1903
- [9] Sen M K and Stoffa P L. Nonlinear one - dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. *Geophysics*, 1991, 56: 1624 ~ 1638
- [10] Bunks C, Saleck F M, Zaleski S. Multiscale seismic waveform inversion. *Geophysics*, 1995, 60: 1457 ~ 1473
- [11] 周辉, 何樵登, 徐世浙. 人工神经网络非线性地震波形反演. 石油物探, 1997, 36(1): 61 ~ 70
- [12] 孟鸿鹰, 刘贵忠. 小波变换多尺度地震波形反演. 地球物理学报, 1999, 42(2): 241 ~ 248
- [13] 邢文军. 波形反演方法与应用研究: [学位论文], 中国石油大学(华东), 山东 东营; 2006, 1 ~ 43
- [14] 敬荣中. 地球物理非线性联合反演方法研究: [学位论文],

中南大学, 长沙; 2002, 1 ~ 5

- [15] 敬荣中, 鲍光淑, 陈绍裘. 地球物理联合反演研究综述. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 535 ~ 540
- [16] 杨辉, 戴世坤, 宋海斌等. 综合地球物理联合反演综述. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 261 ~ 271
- [17] 杨辉, 刘财, 渠广学. 地震 - 大地电磁数据非线性联合反演方法研究. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 261 ~ 271
- [18] 关小平, 黄嘉正, 罗孝宽. 重力、地震资料联合反演实例. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3): 379 ~ 385
- [19] 高少武, 蔡加铭, 赵波等. 地震和测井联合反演储层波阻抗技术. 石油物探, 2002, 41(3): 279 ~ 284
- [20] 范祯祥, 郑仙种, 范书蕊等. 利用地震、测井资料联合反演储层物性参数. 石油地球物理勘探, 1998, 33(1): 38 ~ 50
- [21] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法. 辽宁大连: 大连理工大学出版社, 2001, 92 ~ 135
- [22] 卢名高. 实用最优化方法. 北京: 石油大学(北京), 1996, 153 ~ 192
- [23] 王山山. 快速模拟退火地震反演. 地球物理学报, 1995, 38(1): 123 ~ 134
- [24] 王山山. 约束模拟退火. 石油地球物理勘探, 1995, 30(1): 27 ~ 35
- [25] 张霖斌. 快速模拟退火算法及应用. 石油地球物理勘探, 1997, 32(5): 654 ~ 660

第一作者简介 邢文军(1979—), 男, 2006年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术, 获硕士学位。现在冀东油田勘探开发研究院主要从事正演模拟、地震解释工作。

收稿日期: 2006-08-15

(上接第 54 页)

(3) 针对存在高压层、无法环空加压、水泥浆失重等问题, 拉大缓凝水泥和速凝水泥的稠化时间, 要求水泥浆呈直角稠化, 有利于对高压层实现平衡压稳, 防止油气上窜。

(4) 通过 G7-P1 井 $\phi 177.8$ 套管油层固井的顺利施工, 积累了对小间隙大斜度水平井固井技术的经验, 具有一定的推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 范先祥等. 楚 28 - 平固井技术. 钻井液与完井液, 2005, (2): 62 ~ 64
- [2] 于金成等. 大庆油田古平 1 井完井技术. 石油钻探技术, 2001,

(1): 47 ~ 48

- [3] 罗恒荣等. 大斜度长裸眼定向井钻井完井技术. 钻井液与完井液, 2003, (2): 22 ~ 23
- [4] 陈贡生等. 大斜度定向井固井技术研究与应用. 河南石油, 2001, 15: 28 ~ 30
- [5] 林强等. 非常规短尾管固井技术在大斜度井的应用. 天然气工业, 2005, 25(10)

第一作者简介 赵永光(1979—), 男, 2004年7月毕业于江汉石油学院石油工程专业, 现在冀东油田勘探开发工程监督中心, 从事钻井监督工作, 助理工程师。

收稿日期: 2007-01-07

水平井测井响应特征分析

陈云峰, 魏忠文, 张文昌, 毛文红, 王春祥

(中国石油冀东油田勘探开发工程监督中心, 河北 唐海 063200)

摘要 与在直井中相比, 测井仪器在水平井中的响应特征有了很大变化, 本文从测井仪器原理出发, 研究了感应测井、侧向测井及其他非电法测井的基本特征, 并结合现场实际, 举例说明测井曲线可能出现的特性, 并对这些特性做出了合理的解释。

关键词 水平井; 钻具输送; 随钻测井; 响应特性

目前的测井仪器均是以铅直穿过近似水平地层为前提设计的, 相应解释模型也是以“铅直井轴径向对称介质”为基础而建立的, 在水平井中, 地层界面与井轴接近平行, 径向介质非对称分布, 使测井响应特征有别于直井而表现出诸多的特殊性。

水平井测井主要由钻具输送常规测井及随钻测井完成, 与直井相比, 虽然测井原理相同, 但大部分仪器测量受井斜、地层产状的影响, 使所测量的测井曲线出现“异常”和“变形”。在此情况下, 把常规测井解释技术直接应用到水平井测井解释中来, 将会遇到许多困难, 得到甚至是错误的解释结论。因此, 开展水平井测井仪器响应特征研究, 弄清楚在大斜度井及水平井中, 仪器响应特征与直井中的差别, 对于现场水平井地质导向及后期测井解释具有非常重要的意义。

1 感应测井响应特征

水平井钻具输送常规测井时, 由于双感应—八侧向系列与双侧向—微球系列相比, 具有不带测臂、易于起下的优点, 常常被作为水平井常规测井项目。而随钻测井, 大多用电磁波传播电阻率测井, 如 RAC 或 CDR(斯伦贝谢)、MPR(贝克休斯)、EWR(哈里伯顿)等, 属于感应测井, 所以感应测井在水平井中应用最为广泛。

在水平井中, 影响感应测井的主要因素有井眼、侵入带、围岩、仪器偏心 and 井斜等。其中井眼、侵入带和仪器偏心的影响基本上可按传统的直井环境下的响应方法进行校正, 这里主要介绍井斜的影响。图 1 为正演计算深感应在高阻层(模拟砂岩层)随井

斜变化的测井响应图^[1], 试验地层乃地层厚度为 3 m 的 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 的砂岩地层, 围岩为电阻率 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的泥岩。

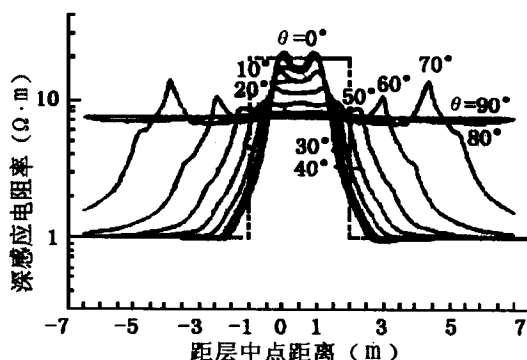


图 1 深感应电阻率与井斜的关系

由图 1 可见, 感应电阻率有如下特征:

- (1) 随着井斜角的增大, 感应测井受围岩的影响增大, 地层中点视电阻率随井斜增大而降低。
- (2) 井斜大于 50° 以后, 地层中视电阻率不再明显降低, 而在测井曲线上出现犄角状的尖峰, 其高峰在距界面约 0.5 m 的高阻层一侧, 尖峰随井斜角的增大而增大。
- (3) 浅探测曲线特征与深探测大致相同, 受井斜影响大比深探测小得多, 犄角状的尖峰幅度小。
- (4) 受围岩的影响, 在层界面仪器探测范围内, 在低阻层(如泥岩), 双感应电阻率为正差异, 在高阻层, 双感应电阻率为负差异。

2 侧向测井响应特征

侧向测井比感应测井测量范围大, 高阻不失真,

垂直分辨率高,没有犄角假峰,所以有较大的优越性。目前随钻测井系列中,钻头电阻率、环形电阻率、方位钮扣电阻率(斯伦贝谢 RAB)属于侧向测井。随钻测井仪器与常规测井仪器一样,在水平井中主要受井眼状况、侵入带、围岩、仪器偏心、井斜的影响。这里仍主要讨论井斜的影响。图 2 为正演计算深侧向在高阻层(模拟砂岩层)随井斜变化的测井响应图^[1],试验地层为 1.5 m 厚的砂岩层,电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$,围岩为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的泥岩,钻井液电阻率 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$,泥饼厚度 3.8 cm,侵入半径 20.3 cm。

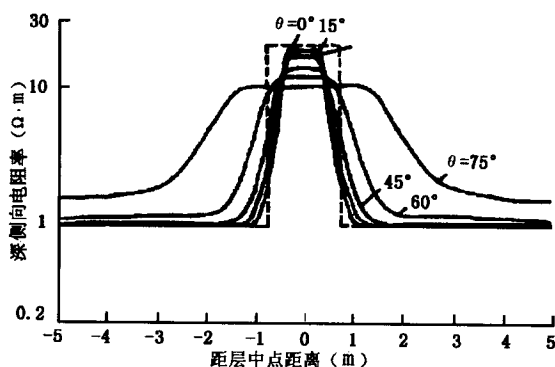


图 2 深侧向电阻率与井斜的关系

由图中可见,有如下特征:

(1) 在井斜小于 15° 时,井斜对电阻率的影响可以忽略不计,随着井斜角的增大,深侧向视电阻率明显降低,边界过渡带变缓。

(2) 受围岩的影响,在层界面仪器探测范围内,在低阻层(如泥岩),双侧向电阻率为正差异,在高阻层,双侧向电阻率为负差异。

3 其他仪器响应特征

补偿中子仪器由于其上方到井壁之间充满钻井液,它对中子探测起了屏蔽作用,使中子减速并大部分被吸收,所以中子测井实际上反映下方地层。密度具有方向性,探测下方地层。

自然伽马测井不具有方向性,水平井中仪器靠向井眼下方,对下方地层敏感些,但仍可忽略其偏心影响;声波测井可以认为没有方向性,在水平井中,地层界面的影响可能造成声波跳跃。

常规测井中的自然电位受到影响因素多,在水平井钻具输送测井时,下测时需要灌钻井液,上测时扰动较大,通常情况下,分层不明显,很难得到理想曲线。

4 水平井测井曲线可能出现的特性

4.1 油层电阻率负差异

在常规直井和大斜度定向井测井时,在油层中,钻井液的侵入排走了高阻的油,呈低阻侵入,深侧向、浅侧向、微球电阻率依次降低。按照直井的常规解释方法,电阻率负差异是淡水钻井液侵入典型的水层特征。但在水平井中,井身轨迹沿着油层顶面钻进,探测较深的仪器受到更多的邻层低阻地层(如泥岩)的影响,所以电阻率较探测浅的低,油层有可能为负差异(见图 3)。

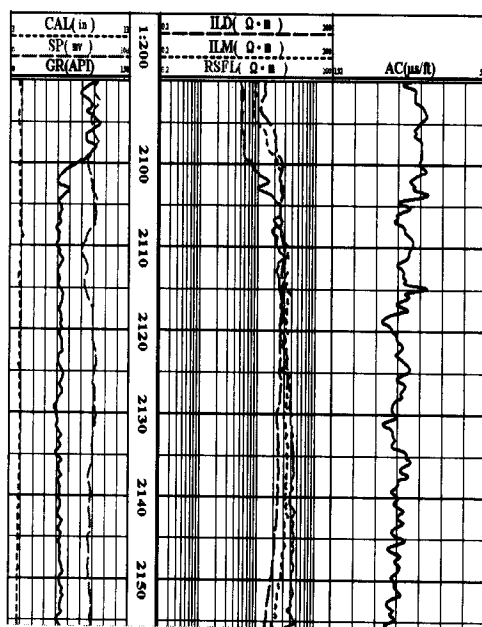


图 3 油层电阻率负差异

4.2 与直井相比电阻率的异常高

随钻电阻率与常规直井电阻率测井相比,除了井斜和围岩的影响外,还有一个重要因素,就是钻井液侵入的不同引起的,通常认为,随钻测井时,钻井液侵入很少,仪器测井所得到的电阻率更接近于地层真实电阻率,与邻井完井测井资料相比,可能电阻率值很高。

另外,如前文所述,感应测井在地层界面,进入高阻层的一侧,会出现一个或两个异常高的犄角峰,这是测井仪器的一个缺陷,是一个假象。在水平井测井中,经常遇到电阻率极高的现象,高于本地层的地质特征,就是由于这个假峰引起的。然而也正是这个假峰,也恰恰说明井眼沿着地层界面钻进。

4.3 测井曲线的对称出现

在直井钻井中,除非逆断层,很少有地层上下重复现象发生。但在水平井中,井眼轨迹从上部地层进入目的层一段距离后,由于是下倾地层钻进井斜太大或井眼上挑,井眼有可能又回到了上部地层,表现出来的就是地层的重复出现,测井曲线上下对称。

4.4 各曲线所测地层界面不统一,厚度不同

由于各种仪器探测深度不同,在地层界面处,各种仪器探测到地层的位置不同,这和直井不同,所以各曲线所测地层界面不统一,相应的地层厚度也不相同。以一口井的钻具输送常规仪器资料为例,如下图所示,短水平线标注为各条曲线所测到的地层界面,可见各曲线界面不一致,相应计算出的地层厚度有时差别很大(见图4)。

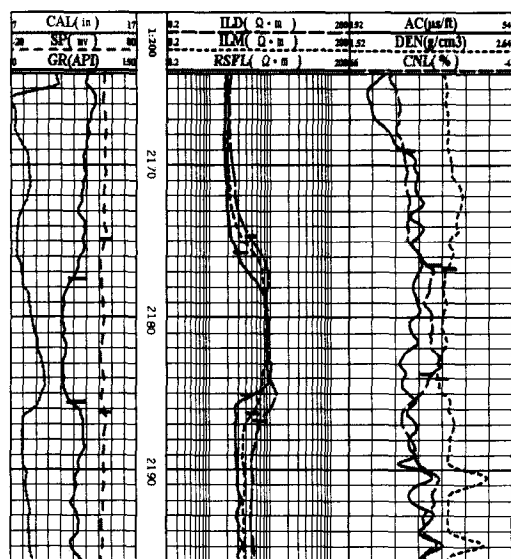


图4 各曲线所测地层界面不一致,厚度不同

5 水平井测井的不足及建议

目前,钻具输送常规测井仪器,工艺较成熟,但也存在着工艺复杂及容易发生脱枪、挤压电缆等事故,而且一旦井下仪器发生故障,更换仪器就得起下一趟钻,相当费时。钻具输送测井时,绞车和钻具不能完全同步,深度不太准确,钻井液面不稳,自然电位干扰大,测井资料品质较差。相对于测井工艺,测井解释方法还很滞后,对于不同介质中大斜度井测井仪器响应特征,仍然有许多理论性的工作要完成。

随钻测井发展很快,市场潜力大,有逐步代替常规电缆测井之势,但实时数据存在着采样率低,传输慢的缺点。这就限制了传输的信息量,采样数和分辨率较低,并且仪器受干扰影响严重,信号不稳定,更换及检修繁琐。由于安全的原因,很少进行放射性孔隙度测井。随钻测井还属于发展阶段,相信随着技术的进步,在不远的将来,能够克服瓶颈,更好地满足现场的要求。

参 考 文 献

- [1] 汪中浩,章成广. 低渗砂岩储层测井评价方法. 北京:石油工业出版社,2004:135~140
- [2] 李文斌等. 随钻测量系统在波浪水平井中的应用. 石油钻采工艺,2005,(5):26~28
- [3] 李曙光,邢光龙,杨善德. 感应测井仪器响应特性的考察分析. 测井技术,2002,(4)
- [4] 康俊佐,邢光龙,杨善德. 电磁传播电阻率测井阵列探测特性的对比分析. 测井技术,2004,(4)

第一作者简介 陈云峰(1972—),男,籍贯内蒙古四子王旗,1995年本科毕业于大庆石油学院测井专业,2001年毕业于石油大学(华东)油气田开发工程专业,获硕士学位,现在冀东油田监督中心从事测井监督工作,工程师。

收稿日期:2007-01-09

(上接第56页)

(3) 适用范围广,尤其适用于负压倒灌的油气层防砂。

(4) 井筒捞砂工艺操作简单,捞砂效率高,不需辅助设备,降低了施工成本。

第一作者简介 宋其仓(1968—),男,2005年7月毕业于中国石油大学石油工程专业,现从事油田开发管理工作,工程师。

收稿日期:2006-08-26