

# 低渗透油气田测井技术论文集

Proceedings of Well Logging Technology for Low-permeability Oil & Gas Reservoirs

主 编 姚绪刚

Oil  
AND  
Gas



西北工业大学出版社  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

# 低渗透油气田测井技术论文集

主编 姚绪刚

西北工业大学出版社

**【内容简介】**本书汇集了近两年长庆测井针对长庆油田低渗透储层在生产、科研、应用等方面取得的研究成果。内容包括测井资料采集、处理、解释以及仪器、设备维护方面具有突出经济效益的最新成果；测井方法研究、测井资料综合应用以及相关软件开发等方面具有长庆特色的创新成果；跟踪国外测井技术发展趋势以及对未来发展具有前瞻性的讨论等。

### 图书在版编目(CIP)数据

低渗透油气田测井技术论文集/姚绪刚主编. —西安:西北工业大学出版社,2008. 11  
ISBN 978-7-5612-2437-3

I. 低… II. 姚… III. 低渗透油层—油气测井—文集 IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181723 号

出版发行:西北工业大学出版社  
通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072  
电 话:(029) 88493844 88491757  
网 址:www.nwpup.com  
印 刷 者:西安创维印务有限公司  
开 本:880 mm×1230 mm 1/16  
印 张:17.5  
字 数:600 千字  
版 次:2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷  
定 价:80.00 元

## 《低渗透油气田测井技术论文集》编辑委员会

主 任：姚绪刚

副主任：杨 林 牟金东

编 委：罗力纯 王 峰 贺小路 路利军 赵建武 秦民君  
鲁东明 王熙荣 田 方 张新江 李金刚 周 扬  
孙志忠 唐文江 郭 峰 杨新宏

主 编：姚绪刚

副 主 编：杨 林 牟金东 秦民君 王 环

责任编辑：秦民君 张 蕊 等

编 辑：王 环 余 迎 李总南 李 隼 王小宁

## 序 言

从1970年长庆油田开发以来,长庆测井就面对着世界油田开发史上少有的油气藏。低孔、低渗、低产出的特性让长庆测井人在油藏测井研究上走出了一条既曲折又辉煌之路,取得了许多重大的发现。例如西17井的成功解释发现了西峰大油田,陕参1井的成功解释开启了陕西中部大气田的开发。

近年来,在低渗透油气田测井技术研究上,无论是研究经费的投入,还是研究机制的探索等方面都进行了许多尝试,因此,总结近年来的成果非常必要。

从2006年长庆测井第七次科技大会以来,长庆事业部针对油田大发展的形势,开展了大量的技术研究工作,通过长庆事业部科学技术委员会研究立项40余项,投入研究经费1000多万元。所有科研项目均围绕生产需求立项,围绕长庆油田重点产能建设安排,例如《苏里格西部地区测井解释方法研究》、《姬塬地区长8、长9储层特征分析及测井解释方法研究》、《彭阳地区侏罗系地层测井解释方法研究》等多个解释方法研究项目。此外,根据长庆油田超低渗透产能建设的需要,进行了《EILog挂接小井眼测井仪( $\Phi 70$  mm)》、《小井眼射孔工艺配套》等研究,适应小井眼钻井的测井需要和工艺配套,同时完成了多项集团公司及中国石油集团测井有限公司的科研攻关项目,取得了3项中国石油集团测井有限公司科研成果一等奖和12项科研成果。在设备投入方面,随着中国石油集团测井有限公司自主研发的EILog成套装备大面积投入生产应用,测井时效从过去的20小时缩短到了10小时左右。在设备进步的同时,加大了测井技术人才的引进和培养。两年来,引进大学生97人,在超大工作量的情况下涌现出许多优秀的科技人才,事业部为人才的成长搭建了很好的发展平台。因此,把近年来的优秀科技成果汇集成书,就是对技术进步的肯定和总结,对技术人才成长的鼓励。

长庆油田继2007年油气当量突破2000万吨之后,预计2009年油气当量达到3000万吨,2015年前达5000万吨。5000万吨就是原来大庆油田达到的水平,长庆油田将要成为中国最大的油气田。按这个规划,从2008年开始到2015年,测井的工作量十分饱满。要完成这一艰巨的任务,特别是在超低渗透油气藏方面的测井技术研究还有大量的工作要做。希望长庆测井人共同努力,迎接新的挑战。

姚绪刚

2008年11月

# 目 录

## · 处理解释 ·

|                                              |                                       |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 白豹地区长 6 <sub>3</sub> 超低渗透储层测井解释方法研究及应用 ..... | 龙 斌 张旭波 (1)                           |
| EILog 成套装备测井资料测量精度评价 .....                   | 冯春珍 陈木银 孙春勇 杜彦明 宋 琛 (8)               |
| MIT 阵列感应测井仪在长庆油田的推广应用 .....                  | 成军军 杨双定 王熙荣 秦民君 龙 斌 高山荣 张寒秋 李国强等 (16) |
| 姬塬—白豹地区测井系列的优化评价 .....                       | 冯春珍 孙春勇 柳晓燕 黄小昆 姜微微 (23)              |
| 水平井注/产剖面测井解释方法初步研究 .....                     | 刘东明 刘红升 安秀荣 赵 慧 赵 雨 李爱荣 (31)          |
| 水平井声波时差测井响应特征研究 .....                        | 刘复屏 陈木银 马德录 罗红梅 (36)                  |
| 正交偶极子声波测井在压裂诊断中的应用 .....                     | 刘有霞 文晓峰 钟立军 (41)                      |
| 低渗透储层中裂缝发育程度与储层产能关系研究 .....                  | 罗菊兰 陈翠雀 胡晓丽 (47)                      |
| 苏里格东部气田测井解释方法研究 .....                        | 马德录 冯春珍 宋 琛 尤世梅 康国珍 (53)              |
| WU 区块煤层气开发测井解释方法 .....                       | 杨双定 赵建武 刘复屏 刘拥军 龙 斌 (58)              |
| 低孔隙度、低渗透率、低电阻率气层产能预测 .....                   | 马德录 宋 琛 孙浩贤 任海军 徐秋贞 (62)              |
| 苏里格中西部地区 H8 段储层粒度中值的计算及应用 .....              | 刘行军 康国珍 李新岐 刘颖卓 (66)                  |
| 姬塬地区长 8 储层特征分析及测井解释图版的建立 .....               | 麻平社 刘新田 蒋玉玲 尤世梅 柳晓燕 (71)              |
| 白豹地区地应力评价及岩石机械特性分析 .....                     | 赵 静 孙春勇 陈翠雀 李香玲 (77)                  |
| 声-电成像测井在长庆油田的应用 .....                        | 陈翠雀 (83)                              |
| 子洲—清涧地区测井资料标准化方法研究 .....                     | 井素娟 杨双定 (88)                          |
| 榆林—神木气田上古生界不同产能的砂岩气层特征分析 .....               | 钟立军 杨学国 路云峰 (92)                      |
| 马岭油田储层水淹后的电阻率特征研究 .....                      | 路云峰 秦民君 杜彦明 罗雄民 (95)                  |
| 中子寿命测井技术在乌兹别克斯坦康德姆油田的应用 .....                | 李玉宁 韩 焘 唐学荣 刘文军 (100)                 |
| 在 LEAD 平台下提高完井处理速度 .....                     | 陈木银 尤世梅 李英亮 (106)                     |
| 低孔隙度、低渗透率、低电阻率储层孔隙结构探讨 .....                 | 马德录 陈木银 宋 琛 柳晓燕 刘文军 (111)             |
| 影响自然电位测井曲线的因素分析与对策 .....                     | 刘新田 韩 焘 (115)                         |

## · 采集及工艺 ·

|                                            |                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| 苏里格气田快速测井配套技术 .....                        | 王熙荣 杨双定 成军军 樊立新 钟立军 (118)         |
| MIT 多臂井径成像仪、MTT 磁壁厚测井仪组合套损检查测井常见问题分析 ..... | 李玉宁 赵保华 马国忠 罗雄民 (121)             |
| MIT5530 阵列感应测井仪及其在苏里格气田的试验结果分析 .....       | 许思勇 金小惠 张亚洲 (126)                 |
| 套损检测新技术的应用效果分析 .....                       | 赵 慧 张 彧 崔红珠 刘东明 何小菊 钟立军 赵 雨 (133) |
| EILog 地面系统的检测与故障排除 .....                   | 张小刚 (140)                         |
| 泥浆性能对测井原始资料的影响 .....                       | 刘 勇 龚爱华 田英杰 孟庆生 张生生 (144)         |
| 射孔器材质量与现场施工安全控制分析 .....                    | 刘旭东 李爱荣 杜石头 唐卫中 李 鹏 (147)         |



|                               |     |     |     |     |               |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|---------------|
| 带压测井的危险因素分析及对策 .....          | 李圣涛 | 杨永杰 | 王明宽 | 李国玮 | (150)         |
| 石英晶体压力测井仪在生产测井中的应用 .....      | 傅 强 | 郭 锋 | 段银鹿 | 冯宇涵 | 李 鹏 (154)     |
| 全井眼涡轮流量计的特性浅析 .....           | 牛步能 | 李 鹏 | 李圣涛 | 李晓亮 | 李拥军 (159)     |
| 岩性密度测井的影响因素分析 .....           | 邱海滨 | 邢鸣翠 | 霍 亮 | 陈鸿傲 | (163)         |
| 裸眼测井遇卡处理 .....                | 胥 召 | 王瑾鹏 | 杨大千 |     | (166)         |
| EILog-05 声波变密度测井影响因素分析 .....  | 张寒秋 | 马国忠 | 赵宝华 | 刘文军 | (170)         |
| 中子寿命测井仪与防硫电缆的配接应用 .....       | 杨大千 | 王瑾鹏 |     |     | (175)         |
| EILog-05 微电极测井仪在长庆油田的应用 ..... | 张玉勇 | 文 松 |     |     | (179)         |
| 苏里格地区井眼环境对测井的影响 .....         |     |     |     |     | (184)         |
| 遇水失效安全磁电雷管在安塞油田的初步应用 .....    | 张全恒 | 代国兴 | 田中杰 | 陈建波 | 苟峻逸 曹孟鑫 (188) |
| 电缆传输过油管射孔工艺在苏里格气田的应用 .....    | 李拥军 | 王兆东 | 周 剑 |     | (192)         |

#### • 仪器维修及应用 •

|                                     |     |     |     |     |               |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|---------------|
| 长庆测井现用套损检测仪器应用探讨 .....              | 姚韦萍 | 方佰涛 | 赵连芳 | 贾启卫 | 马国忠 (195)     |
| 水平井射孔枪的技术改进 .....                   | 杨 平 | 潘 勇 |     |     | (200)         |
| DIL5520 双感应-八侧向测井仪技术特点及故障检修 .....   | 尹 鹏 | 曹 彬 | 彭宏文 | 陈 洁 | 刘宏明 雍建新 (204) |
| 仪器组合方式提高 LOGIQ 系统自然电位曲线质量 .....     | 成军军 | 王熙荣 | 孙环宇 | 冯相君 | 霍 亮 包春晖 (208) |
| 测井仪器中 O 形密封圈和密封槽的选配与应用 .....        | 秦小军 | 梁争斌 | 马 喆 |     | (214)         |
| EILog-05 声波测井仪故障现象分析 .....          | 黄晓昆 | 吴少威 | 陈浩军 |     | (218)         |
| EILog-05 测井系统的遥传伽马短节典型故障分析与解决 ..... | 韩金玉 | 吴黎辉 | 李兴文 | 雍建兴 | (222)         |
| 辅串电子线路常见故障分析及解决方法 .....             | 冯伊涵 | 钟吉彬 | 邢鸣翠 |     | (226)         |
| EILog-05 井下仪器特殊故障分析 .....           | 黄冬和 | 马 喆 |     |     | (230)         |
| EILog-05 岩性密度测井仪重复性问题探讨 .....       | 史国发 | 解 琪 | 李江博 | 黄超超 | 王建荣 (233)     |
| 绝缘对岩性密度仪器测井曲线的影响 .....              | 彭宏文 | 雍建兴 | 尹 鹏 | 刘宏明 | 邝学农 (238)     |
| EILog-05 声波测井仪出现波列齐头问题的分析解决 .....   | 梁争斌 | 刘永民 | 郭忠孝 | 季彩玲 | (241)         |
| 连续测斜仪测量精度的影响因素分析 .....              |     |     |     | 许永涛 | (243)         |
| 脉冲幅度对 LDLT5450 岩性密度测井仪刻度参数的影响 ..... | 韩金玉 | 吴黎辉 | 袁吉祥 | 赵保华 | (248)         |
| 浅析如何保障网络内信息的安全 .....                | 闫明英 | 孙彦荣 | 张彦琴 |     | (253)         |
| 单井承包政策在长庆事业部应用效果评价及建议 .....         |     |     | 刘慕生 |     | (257)         |
| ERP 系统 EAM 模块应用问题探讨 .....           | 张寒秋 | 马国忠 | 朱志英 | 成军军 | (262)         |
| 长庆事业部网络现状及改造计划 .....                | 孙彦荣 | 闫明英 |     |     | (266)         |

· 处理解释 ·

# 白豹地区长 $6_3$ 超低渗透储层测井解释方法研究及应用

龙 斌 张旭波

**摘要:**阐述了白豹长 $6_3$ 特低孔隙度或超低渗透率储层特征及成藏机理,较好地解决了现有常规测井生产条件下未加测密度时利用单声波时差计算储层物性参数误差大的难题。总结了白豹地区主要测井曲线校正参考标准。建立了孔隙度、渗透率、饱和度储层参数模型及解释交会图版。利用岩心刻度测井的方法,采用43口评价井、探井物性分析资料,回归了孔隙度、渗透率的计算公式,孔隙度的精度控制在 $\pm 1.5$ 个p.u.范围内;计算渗透率的绝对误差控制在半个数量级单位范围内。利用长4+5至长6上部段水下扇浊积体非渗透层全区分布稳定的特点总结出白豹地区主要测井曲线校正参考标准,储层测井曲线进行校正时,对参考曲线校正参考标准数据进行相应的加减,做统一标准化处理,消除系统误差。为进一步提高白豹地区长 $6_3$ 储层综合判识水平,求准这类储层参数起到一定的积极意义。

**关键词:**测井解释;超低渗透率;浊积体;储层划分;校正;交会图

## 1 区域地质背景及储层特征分析

白豹地质构造位置位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡带的西部,其沉积体系是属于北边靖边—吴起主河湖三角洲体系和安边三角洲体系向南延伸部分。该区长 $6$ 以半深湖—深湖—三角洲沉积环境为主,油层组厚120~150 m,可细分为长 $6_1$ 、长 $6_2$ 、长 $6_3$ 等3个油层,岩性主要由深灰色细砂岩、粉—细砂岩、钙质砂岩与灰黑色泥岩、粉砂质泥岩互层组成。该油层组是研究区砂体最发育、含油性最好的一个油层组,其中尤为长 $6_3$ 油层相对更发育,横向分布较为稳定,是该区目前重点勘探、评价目标层之一。储层岩石以极细—细粒长石砂岩为主,其次为含泥极细粒、细粒长石砂岩,其中有少量的中—细砂岩、粉砂岩。砂岩碎屑中以各类长石为主,相对含量为35%~60%,平均为45.7%;其次是石英,其相对含量为20%~45%,平均含量26.0%;砂岩碎屑中含有5%~15%的岩屑和少量的重矿物。长 $6$ 填隙物含量较低,平均为15.0%。杂基含量平均4%;胶结物含量一般在5%~20%之间,平均为10.0%,成分主要有水云母、绿泥石。

长 $6$ 砂岩平均粒度一般为0.06~0.20 mm,最大粒径为0.4 mm,粒度最小,碎屑颗粒分选中等—好,磨圆度以棱—次棱角状为主,结构成熟度较高。

长 $6$ 各种孔隙类型中以原生粒间孔隙为主,含量一般为0.5%~5%,占面孔率的65.6%,其次为各种次生溶孔,含量一般为0.5%~2.0%,占面孔率的33.8%,晶间孔隙及微裂隙平均含量不足0.1%,仅占面孔率的0.5%左右。平均孔隙直径变化范围在20~40  $\mu\text{m}$ 之间,属于微小孔隙。

根据长 $6_3$ 物性分析结果,研究区长 $6_3$ 砂岩孔隙度整体分布在4.0%~16.0%之间,主要集中分布在8.0%~12.0%,占总样品的52.1%;渗透率分布在 $(0.05\sim 1.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,主要集中分布在 $(0.1\sim 0.3)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,占总样品的38.4%,大于 $1.0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 样品仅占4.9%。总体上为低孔隙度、特低—超低渗透率特征。

长 $6_3$ 平均孔隙直径变化范围在20~40  $\mu\text{m}$ 之间,属于微小孔隙;压汞曲线显示曲线斜度一般,部分砂岩有明显的曲线平台,但排驱压力较大,物性好的压汞曲线表现好;孔隙结构参数排驱压力较高,分布区间为0.457 4~2.924 4 MPa;喉道中值半径为0.038 1~0.419 4  $\mu\text{m}$ ,属细喉—微喉;分选系数为1.226 2~



4.416 3, 孔喉分选较差; 变异系数分布在 0.092 8~0.439 6 之间, 最大进汞饱和度较高, 为 78.6%~92.53%, 但退汞饱和度较低, 在 17.60%~40.73% 之间。通过以上分析该储层微小孔隙发育, 孔隙结构一般, 但好于长3和长4+5。

该油层物性较差, 属于超低渗油层, 岩心分析孔隙度一般为 8.0%~12.0%, 渗透率一般为  $(0.1\sim0.3)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 岩石颗粒磨圆度以次棱角状为主, 分选好-中等, 具有低孔隙度、特低渗透率特征, 含油性好, 为中高电阻率油层, 是本文的重点研究对象。

## 2 白豹地区主要测井曲线校正参考标准

依据工区内所涉及的 43 口评价井、探井, 通过地层对比分析初步确定出长6油层组取心井有 16 口井。经仔细对比分析认为白×6×井、白×5×井长6取心层段应归属长7油层组。对其余 14 口井严格进行岩心归位。

对工区内储层声波时差、密度、双感应、中子、自然伽马等曲线采用 20 口探井、评价井的长4+5至长6上部段水下扇浊流积体非渗透层的声波时差、密度、双感应、中子、自然伽马等测井曲线的加权平均值进行统计分析, 得出长4+5、长6泥岩段的测井数据深感应电阻率为  $17.0\Omega\cdot\text{m}$ , 中感应电阻率为  $18.0\Omega\cdot\text{m}$ ; 声波时差为  $218.0\mu\text{m/s}$ ; 密度为  $2.62\text{g/cm}^3$ ; 补偿中子为 18 p.u.; 自然伽马为 100 API。对储层进行校正时参考上述数据进行相应的加减, 做统一标准化处理, 消除系统误差。

## 3 储层参数计算

### 3.1 密度校正与储层孔隙度的求取

测井密度在采集过程中受测值受井眼、仪器种类、刻度、仪器稳定性、仪器井下所处状态等因素影响, 造成实测值与实际数值或多或少存在偏差。实际解释过程中对于白豹地区长6地层储层划分、岩性识别、流体性质识别, 仅依靠声波、伽马、自然电位、电阻率曲线有时很难确定有效储层厚度。造成分层偏厚, 孔隙度计算误差大, 综合解释结论难以判定。

综观该区长6储层裸眼井井眼变化规则, 井径曲线变化平稳, 无垮塌现象。密度、声波测井受井眼影响很弱。受该区成藏、岩相与后生作用影响, 储层声波时差与围岩时差无差异或者差异很小, 且储层声波时差幅度区间很小  $15\sim20\mu\text{m/s}$ 。在建立与分析孔隙度相关性时, 其相关性差, 相关系数  $R=0.415\ 03$ 。通过取值分析认为, 测井密度与分析孔隙度相关性较好,  $R=0.83$ 。测井密度与分析密度也存在着较好关系,  $R=0.790\ 07$ 。因此, 孔隙度计算时对测井密度与分析密度的校正就显得尤为重要。

理论研究结果表明, 井下岩石实际密度值与岩心分析密度、分析孔隙度存在关系为

$$\rho_{\text{bFJ}} = \rho_{\text{bF}} + 0.010\ 8\phi_{\text{F}} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{\text{bF}}$  为岩心分析密度;  $\rho_{\text{bFJ}}$  为岩心分析密度校正值;  $\phi_{\text{F}}$  为分析孔隙度。

依照式(1)对分析密度校正后, 分别与测井密度、分析孔隙度建立关系。

测井时的密度曲线可参考浊积体非渗透层段密度平均值 2.62 进行校正; 也可作为现场密度、感应、自然伽马等曲线质量评价时的参考。分析密度经验校正后与分析孔隙度交会相关性很好,  $R=0.910\ 27$ 。

经统计该地区长6储层层顶海拔  $B=I$  地面海拔-深度  $I$  小于 600 m, 对分析孔隙度可以不作孔隙度压实校正, 因此建立分析孔隙度与分析校正密度、声波时差的复相关拟合,  $R_2=0.818\ 39$ 。

#### 3.1.1 有密度曲线时

(1)直接利用分析密度与分析孔隙度有较好关系(见图 1), 式(1)、式(2)联立进行孔隙度计算, 得

$$\phi_F = 91.43373 - 32.5394 \rho_{bF}, R = 0.96201, N = 60 \quad (2)$$

$$\rho_{bF} = 0.00681 + 0.9576 \rho_{bC}, R = 0.79007, N = 60 \quad (3)$$

$$\phi = 91.43373 - 32.5394 (0.00681 + 0.9576 \rho_{bC}) \quad (\text{说明: 此式计算孔隙度偏大})$$

(2)也可以直接用孔隙度与密度、声波时差的复相关式进行计算。

$$\phi_F = 97.89211 - 35.59822 \rho_{bF} - 0.01022 \Delta t, R^2 = 0.92732, N = 60 \quad (4)$$

$$\rho_{bF} = 0.00681 + 0.9576 \rho_{bC}, R = 0.79007, N = 60$$

则有  $\phi = 97.89211 - 35.59822 (0.00681 + 0.9576 \rho_{bC}) - 0.01022 \Delta t$  (计算数值与分析孔隙度一致性差, 分析原因是密度未校正)。

(3)由于分析校正密度与测井密度相关性较好(见图 2),基本上在 45°线附近,且具有以下关系:  $\rho_{bC} = -0.07854 + 1.02869 \rho_{bFJ}, R = 0.78996, N = 60$ , 因此认为  $\rho_{bFJ} \approx \rho_{bC}$ ,说明通过式(1)对分析密度校正是可行的。

由式(4)对测井密度校正后,由单相关式计算孔隙度。

$$\phi_F = 136.6345 - 50.436 \rho_{bFJ}, R = -0.90406, N = 60 \quad (5)$$

$$\rho_{bFJ} = 0.9943 + 0.60618 \rho_{bC}, R = 0.78996, N = 60 \quad (6)$$

由于分析校正密度与测井密度相关性较好,基本上在 45°线附近。若进一步用式(6)对测井密度进行校正将导致如图 3 所示测井密度校正过量。分析认为分析孔隙度与测井密度校正值单相关  $R = -0.74242$ ,进一步造成分析孔隙度与测井密度校正值、声波的复相关关系降低,仅为  $R_2 = 0.55593$ 。因此,用式(6)对测井密度进行校正不适合。用式(5)直接计算孔隙度,则有

$$\phi = 136.6345 - 50.436 \rho_{bC} \quad (\text{单用密度计算与分析孔隙度一致性好})$$

$$\phi = 143.86371 - 52.60256 \rho_{bC} - 0.00785 \Delta t \quad (\text{用密度、时差同时参与计算时与分析孔隙度一致性好})$$

### 3.1.2 无密度曲线时

先用声波反推出密度曲线,再由孔隙度与分析校正密度、声波时差的复相关式(8)计算。

$$\rho_{bC} = 3.22897 - 0.00314 \Delta t \quad R = -0.75192, N = 87 \quad (7)$$

$$\rho_{bFJ} = 0.9943 + 0.60618 \rho_{bC} \quad R = 0.78996, N = 60$$

$$\rho_{bFJ} \approx \rho_{bC}$$

$$\phi_F = 143.86371 - 52.60256 \rho_{bFJ} - 0.00785 \Delta t, R^2 = 0.81839, N = 60 \quad (8)$$

则在无密度曲线时孔隙度计算公式为

$$\phi = 143.86371 - 52.60256 (3.22897 - 0.00314 \Delta t) - 0.00785 \Delta t \quad (9)$$

式中,  $\Delta t$  为声波时差。

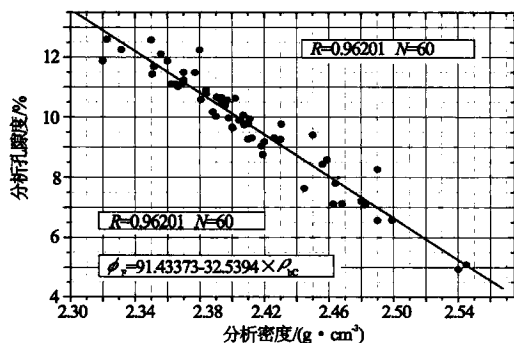


图 1 分析孔隙度与分析密度关系图

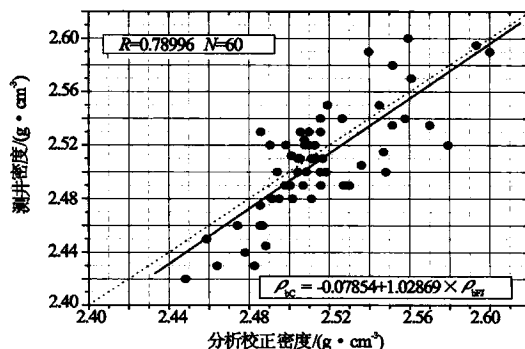


图 2 分析校正密度与测井密度关系图

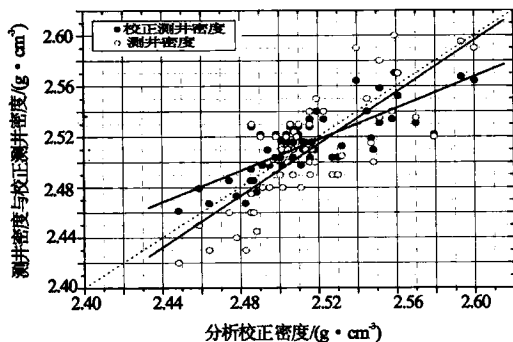


图3 分析校正密度与测井密度、测井校正密度关系图

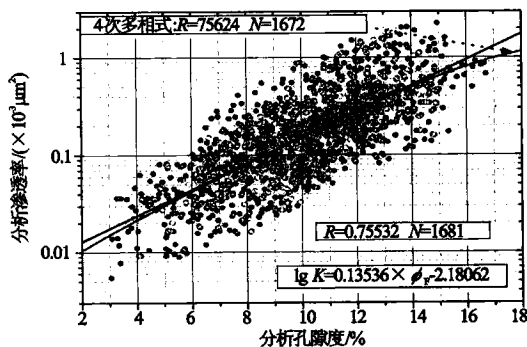


图4 分析孔隙度与分析渗透率关系图

### 3.2 渗透率的计算

渗透率受岩石比面、粒度、泥质成分、孔喉大小、曲折度等多种因素影响。通常是以分析渗透率和测井参数进行多元拟合进行求取。由于长6<sub>3</sub>储层取值点较少,人工取点误差较大,因此,渗透率与 $\rho$ 、 $\alpha$ 、 $\Delta GR$ 、 $AC$ 、 $R_i$ 等进行单相关分析认为,渗透率除与 $\rho$ 有关外,其余单相关很差,多元拟合时复相关性系数仅0.405。所以,在确定渗透率图版时主要是利用分析孔隙度与渗透率建立关系,每口井采用岩心归位确定出取值段后,直接利用分析点数据建立关系(见图4),关系式为

$$\lg K = 0.13536\phi - 2.18062, R = 0.75532, N = 1681 \quad (10)$$

## 4 含水饱和度的计算

含水饱和度计算通常采用经典的阿尔奇公式,含水饱和度模型中孔隙度指数 $m$ 、饱和度指数 $n$ 和胶结系数 $a$ 、 $b$ 值由岩电实验气驱法确定。研究区内4个地层的物性和含油性的不同导致 $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$ 系数也有所不同,故此分层位进行确定。经典的阿尔奇公式是在孔隙度大于10,并且不富含黏土,对低孔隙度岩石直接采用经典的阿尔奇公式并不合适。依据岩石测定的方法,采用变形的阿尔奇公式求取含水饱和度。由阿尔奇公式 $S_w = (abR_w/\phi^m R_i)^{1/n}$ ,得含水饱和度公式 $S_w = (FbR_w/R_i)^{1/n}$ 。

长6地层的地质因素测定采用白153、白269井49块岩样进行的,由于该层小于12.0%。在双对数坐标中得出地层因素的关系式 $F = 9.422/\phi^{0.8843}$ (见图5),相关系数 $R = 0.9417$ ,有 $m = 0.8843$ , $a = 9.422$ ,同样具有低 $m$ 、高 $a$ 的特征,比长3、长4+5地层 $a$ 值更大, $m$ 值更小,表明该区低孔储层地质因素模型的复杂性。在单对数坐标中地层因素与孔隙度具有一定关系,即地层因素( $F$ )由下式确定:

$$\lg F = 2.8004 - 21.0298\phi + 182.9148\phi^2 - 659.6155\phi^3, R = 0.9450 \quad (11)$$

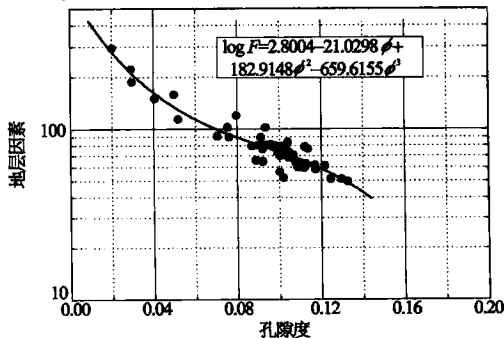
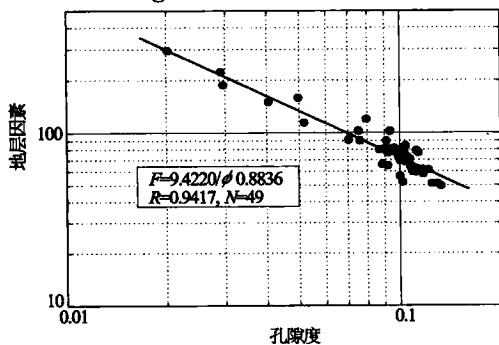


图5 长6地层孔隙度与地层因素关系图

长6采用白269、白153井287块岩样电阻增大率实验测定数据,在双对数坐标中,电阻增大率回归公式为 $I = 1.1580/S_w^{1.9526}$ ,相关系数 $R = 0.8253$ ,由式中得出 $n = 1.9526$ , $b = 1.1580$ (见图6),与阿尔奇公式中的 $n$ , $b$ 值非常接近,可以用于含水饱和度计算。

地层水电阻率采用水分析资料查图版确定其范围为0.10~0.12。

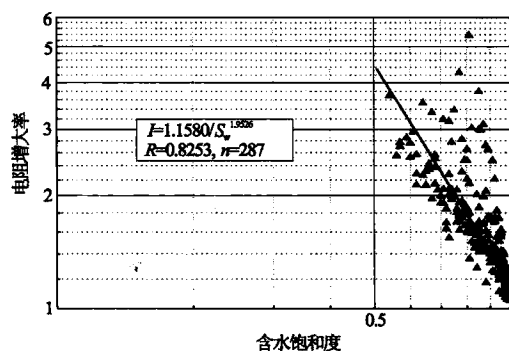


图6 长6地层含水饱和度与电阻增大率关系图

## 5 长6<sub>3</sub>测井解释交会判识图版

以试油资料为依据,仔细对比分析,确定相关点的最终结论。分析中发现一些交会参数如自然电位比值( $\alpha$ )、自然伽马相对值( $\Delta GR$ )作为交会判识参数。原因在于长6储层自然电位曲线幅度小、精度差,和其他参数交会效果不好。自然伽马曲线在油、干、差油、油水、含油层上幅值差异小,自然伽马相对值( $\Delta GR$ )计算结果与其他参数交会规律性不强。以下交会图中孔隙度采用复相关计算结果,渗透率、含水饱和度等为新经验公式计算所得。

该区长6<sub>3</sub>采用43口井88个层点测井和试油资料进行优选声波时差—电阻率( $\Delta t - R_t$ )、密度—电阻率( $\rho - R_t$ )、计算孔隙度与含水饱和度( $\phi - S_w$ )和计算渗透率与含水饱和度( $K - S_w$ )交会判识图版(见图7、图8),得出长6<sub>3</sub>地层油层、差油层、水层下限值。作图发现个别点分布无规律,查图分析认为,目的层结论不仅与

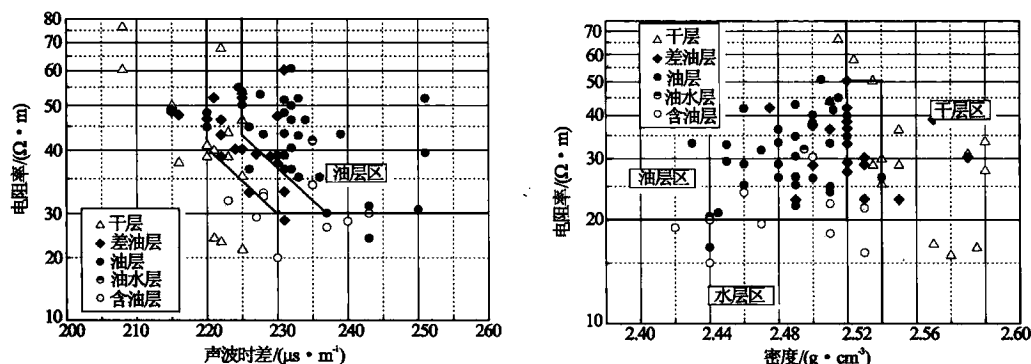


图7 长6<sub>3</sub>声波时差、密度与电阻率交会图

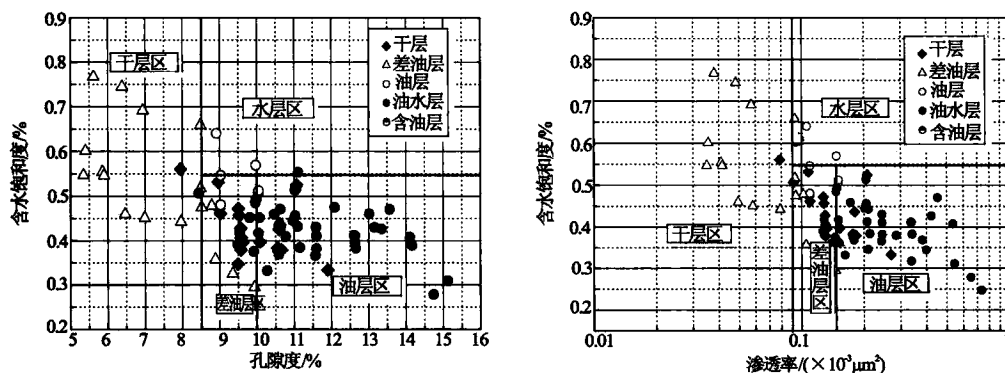


图8 长6<sub>3</sub>孔隙度、渗透率与含水饱和度交会图

测井参数有关,而且储层厚度、压裂改造效果对目的层结论影响很大。交会图确定结论也有它的局限性,综合解释综合加以考虑。

## 6 储层参数计算应用效果及图版检验

根据上述回归的孔隙度、渗透率、饱和度计算公式进行实际储层参数计算。

孔隙度公式的检验,采用 60 个层点对长 6<sub>3</sub> 进行孔隙度验证(见图 9)。由测井计算孔隙度与岩心分析孔隙度对比分析,可以看出有 96.67% 层点计算孔隙度的绝对误差控制在  $\pm 1.5$  个 p. u. 范围内,由此推断计算孔隙度完全可以满足解释的需要。

为检验上述求取的渗透率公式的可靠性,采用 73 个层点对长 6<sub>3</sub> 求取的渗透率公式进行验证(见图 10),由目的层的测井计算渗透率与岩心分析渗透率对比分析可以看出,97.26% 层点计算渗透率的绝对误差控制在半个数量级单位范围内,由此推断计算渗透率完全可以满足解释的需要。

为检测实际应用效果,采用白 2××井长 6 地层测井参数计算,与岩心物性分析的资料进行了对比。从白 2××井长 6 地层 2 060.0~2 088.4 m 井段(见图 11)可以看出,计算孔隙度与岩心孔隙度基本一致,计

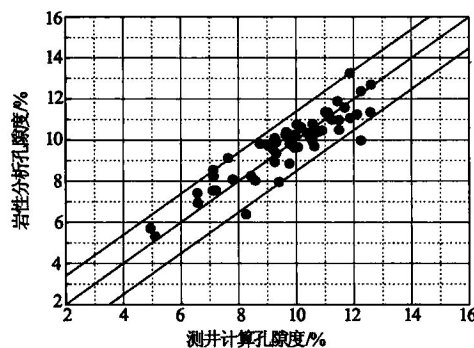


图 9 长 6 计算孔隙度检验图

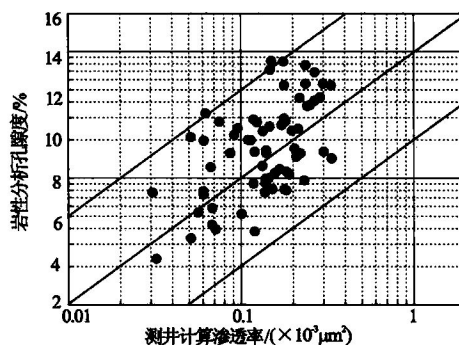


图 10 长 6 渗透率公式检验图

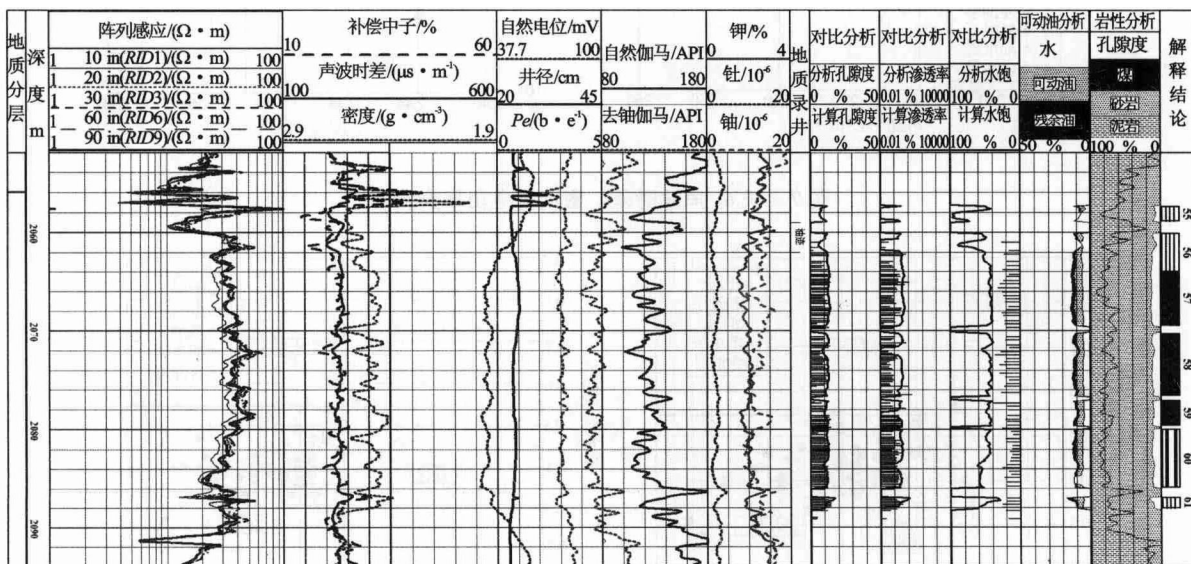


图 11 白 2××井长 6 储层有密度曲线时参数检验综合图

算渗透率比岩心分析渗透率偏高一些,但对于特低渗储层采用测井参数计算渗透率偏高是正常的,因为分析渗透率实验室测量与地层也存在一定误差,常规取心油水挥发造成数据显示岩心分析含水饱和度比实际的低。

采用检验的储层物性变化很大,同一储层既有物性好的,也有物性差的。从 4 个地层看,计算孔隙度与渗透率变化趋势与岩心分析数据变化一致,数值上孔隙度精度高,而渗透率数值基本一致,个别层点存在偏大现象,但控制在半个数量级内,完全满足测井解释需要。由于没有密闭取心资料,含水饱和度模型无法验证,但计算数值与试油是相符的,含水饱和度模型可以满足生产应用。

## 7 结论

长 6<sub>3</sub> 储层具特低孔隙度,超低渗透率,砂体厚度大,分布稳定,中高电阻率,含油性较好的特点,是该区内主要的勘探、开发层系。总体上储层的含油性主要受物性影响较大。

储层声波时差与围岩时差无差异或者差异很小,判断渗透层、反映物性时存在隐蔽性与难度。虽然利用现有密度与声波时差、物性相关条件,较好地解决了常规生产井未加测密度时利用单声波时差计算储层物性参数误差大的难题。但是密度曲线在区分薄层岩性方面有很明显的优势。因此建议该区内生产井,重点井组可加测密度曲线,更好地进行储层划分、岩性识别。

利用长 4+5 至长 6 上部段水下扇浊积体非渗透层全区分布稳定的特点总结出白豹地区主要测井曲线校正参考标准。感应电阻率为  $17.0 \Omega \cdot m$ , 中感应电阻率为  $18.0 \Omega \cdot m$ ; 声波时差为  $218.0 \mu m/s$ , 密度为  $2.62 g/cm^3$ , 补偿中子为 18 p. u. 自然伽马为 100 API。对储层测井曲线进行校正时参考上述数据进行相应的加减,做统一标准化处理,消除系统误差。

利用岩心刻度测井的方法,采用 43 口评价井、探井物性分析资料,回归了孔隙度、渗透率的计算公式,孔隙度的精度控制在  $\pm 1.5$  个孔隙度单位范围内;计算渗透率的绝对误差控制在半个数量级单位范围内。

采用了岩电实验气驱法建立的含水饱和度模型。测量结果  $b, n$  值接近理论值;  $a, m$  值受孔隙度影响较大,对低孔隙度低渗透率地层具有高  $a$ 、低  $m$  的特征,孔隙度越低,  $a$  值越大,  $m$  值越小,须采用变形的阿尔奇公式计算含水饱和度。建立的孔隙度、渗透率、饱和度储层参数模型完全满足测井解释的需要。为进一步提高白豹地区长 6<sub>3</sub> 储层综合判识水平,求准这类储层参数起到一定的积极作用。

## 参考文献

- [1] 杨永发, 冯春珍, 等. 延长组测井解释技术方法研究及应用评价 [Z]. 中国石油集团测井有限公司长庆事业部, 2007.
- [2] 长庆油田公司. 2006, 2007, 2008 年区域勘探生产动态分析资料 [Z]. 2008.

# EILog 成套装备测井资料测量精度评价

冯春珍 陈木银 孙春勇 杜彦明 宋 琛

**摘要:** 中国石油测井有限公司研制开发的 EILog 快速与成像测井系统, 其测井资料测量精度评价关系到它在测井行业中的重要地位和对测井仪器的更新换代。以前在仪器的稳定性和一致性上做过很多评价, 但在资料精度上定量评价较少。应用 EILog 与 ECLIPS-5700、MAX-500 油气井测井资料在同一个处理解释参数条件下测量对比分析各自计算的储层参数分别与岩心分析的孔隙度、渗透率对比之间误差大小; 评价 EILog 装备的常规测量精度; 对 EILog 测量的阵列感应与 ECLIPS-5700 高分辨率感应进行对比分析。通过评价, EILog 装备测量精度与 ECLIPS-5700、MAX-500 测井资料一致, 甚至有的曲线精度高于以上两种仪器。Eilog 装备非常适合低渗透地层的测量, 在长庆油田应用两年来(至 2007 年), 其解释符合率大幅提高, 由 2005 年总解释符合率 87.63% 上升至 2007 年总解释符合率 91.19%。

**关键词:** 测井装备; 测井资料; 储层参数; 阵列感应测井; 测量精度

## 0 引言

EILog 快速与成像测井系统<sup>[1]</sup>于 2005 年 3 月在长庆油田开始推广应用, 截至目前常规资料与 ECLIPS-5700 进行了 T21, B266, T5 井等 3 口井测量对比, 与 MAX-500 进行 S60 井测量对比。阵列感应测井在长庆油田与 ECLIPS-5700 和 MAX-500 已实验对比了 20 口井。通过 4 口油气井的资料在处理解释参数一致的条件下, 进行测井计算的储层参数与岩心分析数据分别对比评价测量精度。分析了 B270, A99 井阵列感应资料, 给出阵列感应评价流体性质的精度。装备投产初期在下井一次成功率、组合测量、稳定性、测量资料的重复性、一致性等方面做了大量工作, 但测量资料在计算储层参数的精度上定量评价很少, 它是否适合低渗透地层的测量没有明确的观点。由于岩心分析含水饱和度与实际相差较大, 不作含水饱和度的分析, 但作了电阻率分析。本文主要利用对比分析和两年来测井资料应用方面进行的评价, 给出 EILog 成套装备测井测量精度能否满足低渗透地层的储层参数计算的观点。

## 1 孔隙度曲线测井精度评价

孔隙度测井主要为声波时差、密度、补偿中子测井。在对比分析上选择大孔隙度和小孔隙度地层, 孔隙度是根据声波时差和密度交会计算的, 渗透率计算是依据声波时差、密度、补偿中子、电阻率、光电吸收界面指数等进行多元回归的, 含水饱和度是依据岩电实验分析结果采用变形的阿尔奇公式计算的。岩心分析密度采用地层特点折算到地下情况。

### 1.1 气井孔隙度曲线测井精度评价

T21 井是 2005 年 11 月 26 日测的一口气探井, 该井进行了 EILog 和 ECLIPS-5700 对比测量。根据该地区的地质特征, 选择主要层系石盒子组盒 8 段和山西组山 2 段进行对比分析, 盒 8 段 2 760.0~2 800.0 m 为低电阻率、高孔隙度(相对)、含水岩屑砂岩储层, 山 2 段 2 880.0~2 910.0 m 为中等电阻率、低孔隙度渗透率、含气岩屑砂岩储层。图 1、图 2 为 T21 井盒 8、山 2 地层测量参数与岩心分析对比解释



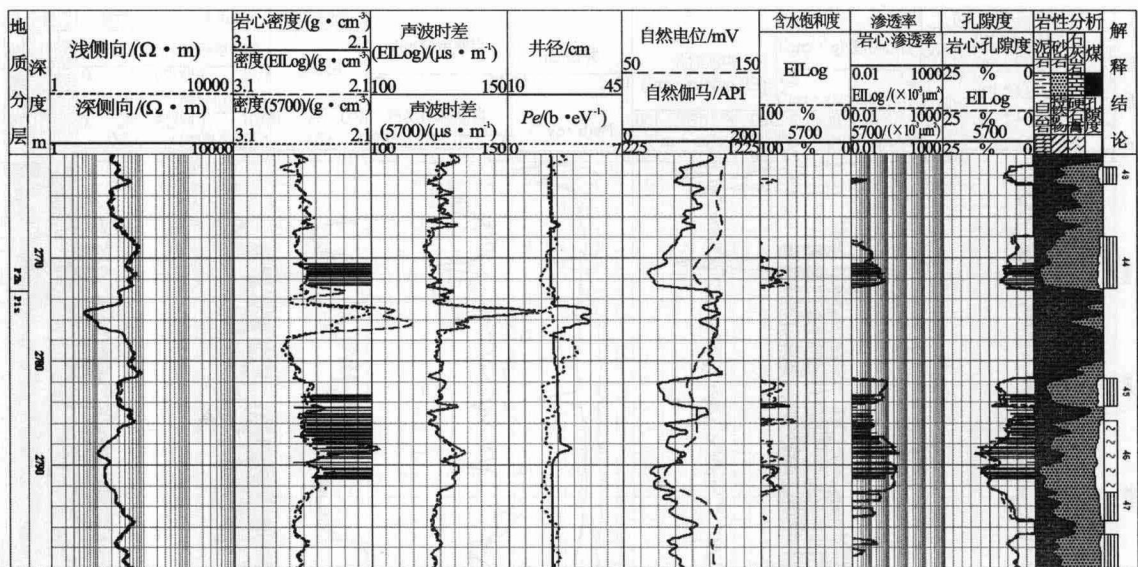


图1 T21井盒8段测量参数与岩心分析对比解释成果图

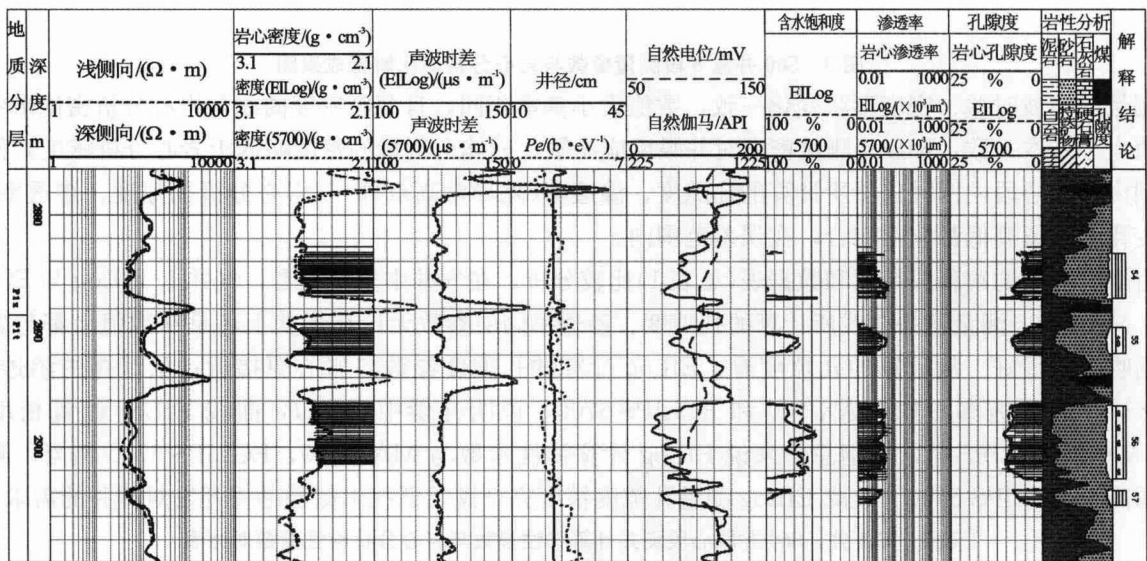


图2 T21井山2段测量参数与岩心分析对比解释成果图

成果图。由图1、图2可以看出,两种仪器测量的声波时差形状变化一致,数值大小基本相同,个别段EILog高于ECLIPS-5700测值,两者密度曲线与岩心分析密度形状变化和数值大小基本一致。EILog密度对井眼反应更加灵敏,数值略低于5700密度和与岩心分析密度,但在误差范围内。取心段所计算的孔隙度、渗透率与岩心分析孔隙度、渗透率相比,数值高低形状变化基本一致,在误差范围内(见表1)。两个井段数值大小却不一致,在低孔隙度范围内两者数值相等,高孔隙度范围两者数值有一定差异。46个层岩心分析孔隙度最大值为16.40%,EILog计算的最大孔隙度为15.20%,而5700计算的最大孔隙度为14.46%,可以看出在大孔隙内EILog计算的孔隙度与岩心孔隙度更接近。S60井为2007年7月7日测的一口气探井,该井进行了EILog和MAX-500对比测量。依据地质特点,选择石盒子组盒8段对比分析,盒8段3640.0~3680.0m为中等电阻率、低孔隙度高渗透率含水石英砂岩储层。由图3可以看出,两种

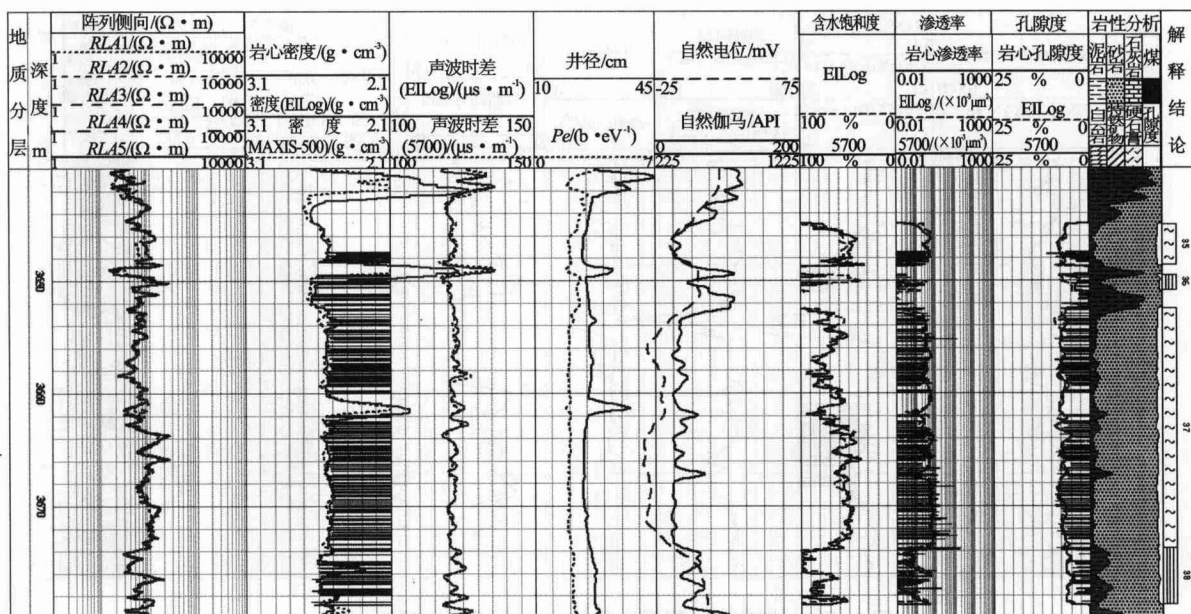


图3 S60井盒8段测量参数与岩心分析对比解释成果图

仪器测量的声波时差、密度形状变化一致，数值大小基本相同，且两者密度曲线与岩心分析密度形状变化和数值大小基本一致，EILog 测量密度对井眼反应灵敏，砂体上测量的密度略低于岩心分析密度，但在误差范围内。取心段内两种仪器所计算的孔隙度、渗透率(除异常高点外)与岩心分析孔隙度、渗透率相比，形状变化和数值高低都非常吻合，在误差范围内。

由取心井段的解释成果图和数据表(见表1)比较分析，在气井中整体上看，气井上 EILog 与 ECLIPS-5700，MAX-500 测量测井曲线所计算的孔隙度、渗透率储层参数无论在形状上还是在数值上都与岩心分析数据吻合得很好。从计算的孔隙度看，EILog 计算的孔隙度参数与岩心更接近；从计算的渗透率看，EILog 计算的渗透率不如 MAX-500 和 ECLIPS-5700，说明补偿中子和  $Pe$  曲线 EILog 测量精度低于 MAX-500 和 ECLIPS-5700，但总的来说 EILog 计算物性参数与 MAX-500，ECLIPS-5700 相当，测量动态范围高于 ECLIPS-5700。故此 EILog 测量孔隙度精度完全满足低孔渗储层勘探开发对测井的需求。

表1 T21井，S60井取心段测井计算物性参数与岩心分析物性参数对比表

| 井号  | 层号 | ECLIPS-5700,<br>MAX-500 计算参数 |                                      |                              | EILog 计算参数 |                                      |                              | 岩心分析数据    |                                       |                              | 试气<br>产量 |
|-----|----|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------|
|     |    | 孔隙度/<br>%                    | 渗透率/<br>( $\times 10^{-3} \mu m^2$ ) | 密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 孔隙度/<br>%  | 渗透率/<br>( $\times 10^{-3} \mu m^2$ ) | 密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 孔隙度/<br>% | 渗透率 /<br>( $\times 10^{-3} \mu m^2$ ) | 密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) |          |
| T21 | 46 | 10.59                        | 1.03                                 | 2.53                         | 11.2       | 0.88                                 | 2.52                         | 10.52     | 0.908                                 | 2.52                         | 12 987/0 |
|     | 54 | 5.45                         | 0.12                                 | 2.62                         | 5.98       | 0.09                                 | 2.59                         | 6.14      | 0.189                                 | 2.60                         |          |
|     | 55 | 6.50                         | 0.15                                 | 2.59                         | 6.41       | 0.11                                 | 2.57                         | 7.01      | 0.140                                 | 2.59                         |          |
|     | 56 | 8.54                         | 0.19                                 | 2.51                         | 9.06       | 0.16                                 | 2.50                         | 8.46      | 0.279                                 | 2.53                         |          |
| S60 | 37 | 6.83                         | 0.42                                 | 2.52                         | 7.23       | 0.40                                 | 2.49                         | 7.18      | 0.626                                 | 2.52                         | 0/25.8   |
|     | 38 | 5.58                         | 0.12                                 | 2.53                         | 5.63       | 0.09                                 | 2.52                         | 5.01      | 0.160                                 | 2.54                         |          |