

渤海油田中深层低阻油层 测井特征及识别

汪瑞宏,崔云江,陆云龙,时新磊,齐 奕

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

摘 要:渤海油田近些年来在中深层储层的勘探开发中发现了一定数量的低阻油层,不少此类油层经试油证实有较高的产能,一些油田低阻油层所占储量比重达到了 60% 以上,为提高低阻层的识别效果,迫切需要对低阻油层的成因和识别方法进行总结。在总结其他油田类似储层评价经验的基础上,以测井、录井、岩心实验分析及 DST 测试等资料为依据,分析了渤海地区常见低阻油层的测井响应特征及对应的识别方法。研究表明:孔隙结构复杂、高矿化度泥浆侵入、地层水矿化度变化等是形成渤海地区中深层低阻油层的主要原因,采用常规测井技术、录井技术和核磁共振、阵列声波等技术组合可以较好地地进行低阻油层的识别。

关键词:渤海油田;中深层;低阻油层;成因;识别

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.11004

渤海油田自 2001 年以来在新近系陆续开展了一系列低阻油层识别和评价方法的研究^[1-3],研究表明,孔隙结构复杂、泥浆侵入、黏土矿物附加导电等是造成油层电阻率低的主要原因。近些年来,随着勘探开发逐渐向中深层深入,在古近系的东营组和沙河街组陆续发现了一定数量的低阻油层,渤海油田的古近系沉积体系以三角洲为主^[4],沉积能量低、水体平稳容易形成粉砂岩和泥质粉砂岩,同时由于埋藏深,低阻往往与低孔渗共存,岩性和孔隙结构比浅层更为复杂,这些都给测井评价带来了较大困难。

国内多位学者对低阻油层的识别和评价方法

进行了系统的研究,从沉积、成藏等角度分析了低阻油层的形成机理,并对不同类型的低阻油层提出了有针对性的识别评价方法,通常将低阻成因归纳为:高地层水矿化度、高束缚水饱和度、圈闭幅度低、油水密度差小和孔隙结构复杂等几个方面^[5-10];在识别方面,主要是结合试油等资料,根据油、水层在常规测井曲线特征上的不同指示,选取对应的敏感参数通过交会图法、重叠法和临近水层法等进行识别,这些方法通过放大测井参数在低阻油层和水层间的响应差异来达到区分油、水层的目的。近年来核磁共振、阵列声波等新技术也逐渐开始应用于低阻油层的识别,但由于受到应用效果及操作成本等多方面的限制,目前在渤海油田尚未得到广泛应用。低阻油层的形成受到多种因素的影响,对具体的油田和储层难以找到普遍性适用的方法进行识别和评价,笔者结合渤海区域低阻油层的测井特征,简要分析了造成中深层油层低阻的主要因素,利用测井、录井及测井新技术的组合来达到识别的目的,取得了较好

收稿日期:2016-05-24

基金项目:中海油总公司“十二五”重大科技项目“渤海典型低孔低渗油藏勘探开发关键技术与实践”(CNOOC-KJ 125 ZDXM 07 LTD-TJ-02)

作者简介:汪瑞宏(1982—),男,硕士,工程师,主要从事测井资料处理、解释和岩石物理研究工作。E-mail: wangrh@cnooc.com.cn

的应用效果,可以为其他区域的低阻油层评价提供借鉴。

1 中深层低阻油层的成因分析

对渤海区域十余个油田低阻油层的钻井取心、井壁取心、地层水等资料进行系统分析后认为,主要由于以下几种因素造成了油层电阻率降低:

(1)岩石颗粒细、分选不好,形成大小孔隙并存的复杂孔隙结构,导致微孔隙发育,吸附大量的束缚水,使束缚水含量增加,多数油田束缚水饱和度可达 30%~50%,对降低油层电阻率的作用明显,同时中深层黏土矿物中伊利石和伊/蒙混层所占比例较高,使地层出现附加导电性,进一步增加了孔隙的比表面积,降低了地层电阻率;

(2)海上油田钻井液用海水配制,为保证钻井安全往往加入大量的氯化钾以提高泥浆比重,泥浆矿化度可达 30 g/L 或者更高,而渤海海域的地层水矿化度一般在 3 000~7 000 mg/L 范围内,

两者差异较大,油层在钻开后易受到高矿化度泥浆侵入的影响造成电阻率降低,如果井况复杂需要多次通井使油层受浸泡时间达到一周以上,电阻率将可能随之降低一半以上;

(3)油藏运移成藏过程中,构造作用导致外来淡水侵入,对原生地层水进行驱替,造成地层水矿化度降低,水层电阻率增高,形成相对低阻油层,或叫天然水淹类低阻油层;

(4)其他如砂泥岩薄互层发育、油柱高度低、地层中含有导电矿物等因素也将造成油层电阻率降低。

2 中深层低阻油层的识别方法

低阻油层的成因复杂,而且往往是多种因素综合作用的结果,在对渤海多个油田的低阻油层成因和对应的测井曲线特征进行分析的基础上,将低阻层形成原因及对应的测井曲线特征归纳为表 1,并据此开展了低阻层的识别方法研究。

表 1 各类低阻层测井曲线特征

Table 1 Well logging characteristic of various types of low-resistivity oil reservoirs

低阻成因	形成过程	作用原理	曲线特征
复杂孔隙结构	沉积	改善导电网络	高自然伽马、高中子、高密度、自然电位低
油柱高度低	成藏	含油饱和度低	自然电位异常幅度较低,中子—密度显示物性相对较差
油层矿化度差异	成藏、成藏后	地层水电阻率不同	自然电位异常幅度低
盐水泥浆侵入	裸眼钻探	泥浆与地层水矿化度差异大	微侧向电阻率较高、自然电位异常幅度比纯水层小
砂泥岩互层	沉积	低阻泥岩并联导电	高自然伽马并呈锯齿状、自然电位幅度小、密度小、双侧向电阻率差异小

2.1 基于常规测井曲线的定性识别

渤海油田地层水矿化度远低于泥浆滤液的矿化度。岩层厚度、岩性和地层水矿化度等条件均相同的水层与油层相比,油层的自然电位异常幅度往往要比典型水层的自然电位异常幅度低,根据这一特性可以用自然电位幅度的差异定性划分油、水层。微侧向电阻率测量的是冲洗带的电阻率,在水层测量的是地层水和泥浆滤液的电阻率,油层段由于存在部分泥浆滤液未驱替的残余油,测量值包含了部分油的信息,数值一般明显比水

层高。由于深浅侧向电阻率探测深度的差异,侵入对浅电阻率的影响明显大于对深电阻率的影响,通常在油层段显示为深、浅电阻率间的分开程度较为明显,而在水层或者物性较差的油层段,深、浅电阻率基本重合,这在一定程度上可以作为区分油、水层的一个标准。

由于自然电位曲线分辨率较低,易受层厚的影响,一般 4 m 以下的储层,自然电位数值随厚度的减小而减小,单从自然电位曲线来识别砂泥岩互层和物性差造成的薄层存在多解性;微侧向电阻率具有较高的分辨率,但受井眼垮塌的影响

较大。因此,在渤海油田通常综合考虑自然电位、微侧向电阻率和深、浅侧向电阻率曲线的特征,引入自然电位相对值与深、浅侧向电阻率差值的比值 $[\Delta SP/(R_d-R_s)]^{[11]}$,或者自然电位相对值与微侧向电阻率相对值比值 $\Delta SP/\Delta R_{xo}$,来进行低阻油层的识别。图 1 左图是 J 油田 5 井沙二段测井曲线特征图,取样证实的油层和水层间电阻率值差异不大,在微侧向电阻率和自然电位曲线特征上有明显差异,右图压力资料分析油水界面在 2 365 m 左右,由于距离油水界面较近,油柱高度低造成了低阻,通过 SP 与 R_{xo} 组合可以进行识别。

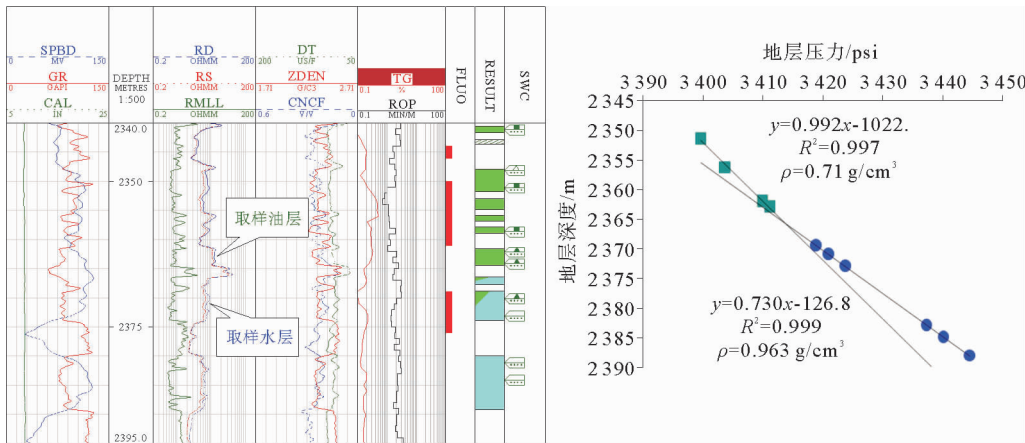


图 1 J5 井测井曲线特征及压力分析

Fig. 1 Logging curves and pressure analysis for Well J5

表 2 渤海部分油田中深层低阻油层判别标准

Table 2 Criteria for identification of mid-deep low-resistivity oil reservoir in Bohai Oilfield

油田	层位	孔隙度 %	含油饱和度 %	深电阻率/ $\Omega \cdot m$	$\Delta SP/\Delta R_{xo}$	$\Delta SP/(R_d-R_s)$	ΔR_{xo}
J25	沙河街组	≥ 18	≥ 40	4~7	≤ 0.4	—	—
J25 南区	沙河街组	≥ 15	≥ 40	6~9	—	—	≥ 1.8
L6	东营组	≥ 18	≥ 40	12~20	≤ 0.5	—	—
K20	沙河街组	≥ 17	≥ 40	3.5~6	≤ 0.25	—	—
C12 南	东营组	≥ 20	≥ 45	4~6	≤ 0.45	—	—
K10	沙河街组	≥ 15	≥ 40	3~5	≤ 0.4	—	—
B2	东营组	≥ 16	—	4~6	—	≤ 0.4	—

2.2 基于录井技术的油层识别

气测录井资料是在钻井过程中实时获取的资料,具有实时录取、不受储层岩性、电性和物性影响及应用方便的特点,能够直接反映地层的含油

表 2 为渤海部分油田中深层低阻油层的定量判别标准,其中自然电位相对值 ΔSP 与微侧向电阻率相对值 ΔR_{xo} 的定义如下:

$$\Delta SP = \frac{SP_{\text{测量}} - SP_{\text{泥岩}}}{SP_{\text{水层}} - SP_{\text{泥岩}}} \quad \Delta R_{xo} = \frac{R_{xo\text{测量}}}{R_{xo\text{水层}}}$$

式中:

- $SP_{\text{测量}}$ 为目的层的自然电位测井值;
- $SP_{\text{泥岩}}$ 为纯泥岩的自然电位测井值;
- $SP_{\text{水层}}$ 为纯水层的自然电位测井值;
- $R_{xo\text{测量}}$ 为目的层的微侧向电阻率测井值;
- $R_{xo\text{水层}}$ 为纯水层的微侧向电阻率测井值。

气饱和度。通过气测全烃曲线形态及各烃组分相对含量的高低可以作为油、水层识别的重要参考。由“烃组分三角形图解法”得到的内三角形的形状、大小及对应的油气分类可以进一步对油、水层进行识别^[12]。

热解气相色谱技术通过岩石地化热解分析及气相色谱分析技术对岩屑和璧心进行分析,油层、油水同层和水层在热解气相色谱的图谱上有不同的组合特征,根据谱图的形态特征、碳数范围、未分辨化合物含量等可以定性评价储层的烃类性质,其显示结果仅与储层的含油性和物性有关,与电阻率高低无关,受储层的岩性、地层水性质等影响较小,在渤海湾地区轻质油气藏识别中具有较好的应用效果,是目前评价井中低阻等疑难层实时评价和下步录取资料的重要参考。

图 2 是 B2 井测井曲线特征,2 号层气测全烃含量高,录井为 C 级荧光粉砂岩。由于临近无典

型水层可供对比,与典型油层 1 号层进行对比,2 号层电阻率明显较低,自然电位高,中子密度显示物性较差,有含水的可能性。用该层的烃组分数据制作了烃组分三角形,均为边长 $< 25\%$ 的小三角形,对应为油层;对该层录取的璧心进行气相色谱分析,碳数分布范围宽,正构烷烃组分齐全,色谱曲线呈规则的梳状,基线平直,不可辨别烃含量少,为典型的油层特征。随后 DST 测试证实该层日产油 46.5 m^3 ,不含水,通过该层申报了 160 余万 m^3 的探明储量。录取的璧心分析结果显示岩性细、束缚水含量高是造成该层电阻率低的主要原因。

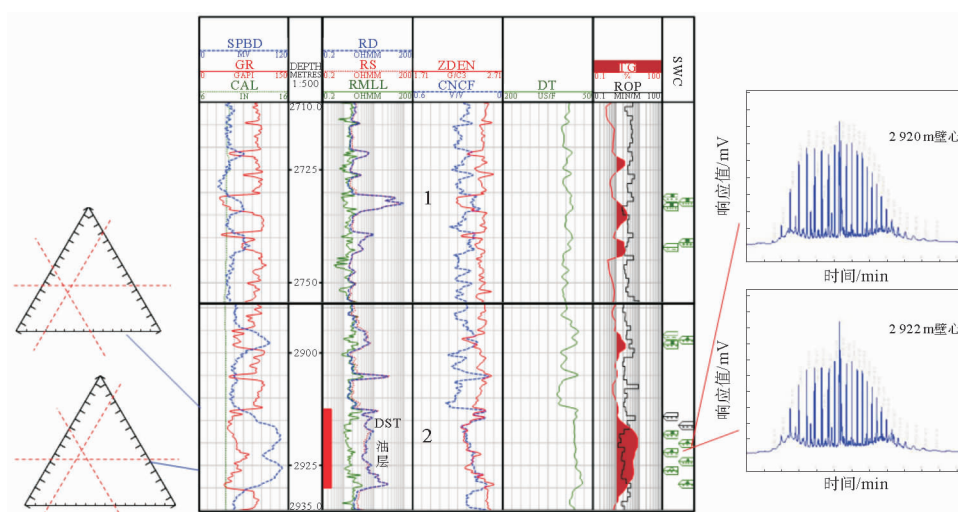


图 2 B2 井测井曲线特征

Fig. 2 Well logging characteristics of well B2

2.3 电缆与随钻测井联合识别低阻油层

李长喜等^[13]、冯尚坤等^[14]开展了泥浆侵入对电阻率影响的定量研究,电阻率较高的油层,钻井液浸泡时间达到 10 天或侵入深度达到 0.3 m 左右时,电阻率将降低到原来的一半左右。

随钻测井是在进行钻井施工的同时实时录取各种录井和测井资料的测井方法。与常规的电测井相比,随钻测井在刚打开地层时就进行测井,可以得到未受钻井液和井眼影响的真实的地层参数,获得的电阻率更能代表地层的真实电阻率。但同时由于随钻随测,无法形成侵入剖面,在避免泥浆侵入的同时,无法获得在渤海应用效果较好

的自然电位和经侵入后的微侧向电阻率曲线,如果再随后进行电缆测井,则相当于进行了时间推移测井,既可以有效评价泥浆侵入特征,又可以获得更为丰富的信息以对储层的流体性质做出更准确的判断。

3 测井新技术用于中深层低阻油层的识别

3.1 核磁共振测井低阻油层识别技术

常规的测井方法不仅难以有效区分束缚水与自由水,而且受骨架和井眼的影响也较大。核磁

共振测井技术利用氢原子核自旋形成的磁矩与外加磁场共同作用的特性来测量岩石内部的含氢量,不受岩石骨架的影响,直接对岩石孔隙中的流体进行测量^[15],可以准确区分不同的孔隙成分,评价地层孔隙结构特征,对低阻成因进行辅助判断。由于油和水的纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 的差异较大,在核磁 T_2 谱上呈现出形态不同的特征,采用不同的等待时间进行测量,在短等待时间内,水信号能完全恢复,油气的信号不能完全恢复;长等待时间内,水和油气的信号都能全部恢复,将两次测量的 T_2 谱相减,可以消除水的信号,留下油气的信号,这就是差谱法。根据水的扩散系数比轻质油小得多的特点,采用长、短不同的回波间隔进行测井,使得油和水在 T_2 谱分布的位置上存在差异,由此识别出油和水,这就是移谱法的原理。在低孔渗的条件下,利用标准 T_2 谱结合差谱或移谱法可以较好地识别轻质油层和水层,而在大孔隙中或者储层非均质性较强时,利用核磁共振测井资料识别油、水层的效果受到影响^[16],同时因为核磁共振测井仪器的探测深度浅,容易受到泥浆深侵入的影响,在应用时需重点结合常规测井资料进行判断。

3.2 岩石力学参数在识别低阻油层的应用

用电阻率评价孔隙流体性质往往容易受到地层流体矿化度的影响,岩石声波传播速度是岩石总体特征的反映,包含了孔隙流体部分的贡献,受到地层水矿化度的影响很小。理论和实验研究表明^[17],地层含不同流体时其纵波速度存在差异,但横波主要沿岩石骨架传播,与孔隙流体性质关系很小。在其他地层条件相同的情况下,当地层中的油品较好时,由于油与水的密度存在一定的差异,与水层相比,油层将呈现纵横波速度比低、泊松比低、体积压缩系数高的特征,利用这些特征可以由阵列声波测井资料区分油、水层。

渤海南部 K 油田馆陶组为中孔中渗储层,地层原油黏度约为 0.7 g/cm^3 , 2 138 m 以上段和以下段的电阻率比较接近(图 3),且中子、密度测井反映两段物性差异不大,仅自然电位异常幅度和气测录井显示上有差别,单从常规测井曲线特征上无法判别流体性质。对阵列声波测井数据进

行处理发现,两套储层的岩石力学参数存在明显差异,2 138 m 以下层段体积压缩系数 CMPR 与泊松比 POIS 间有明显的“镜像特征”,纵横波速比 VPVS 较低,说明储层中有含油的可能性,而上部层段显示则相反。随后分别进行了 DST 测试,2 126~2 137 m 产出 9.3 m^3 水,无油产出,2 150~2 168 m 测试日产油 20.7 m^3 ,含水 7%,表明这套油层离油水界面较近,油柱高度低,油水趋替力差异小造成了油层的电阻率低。

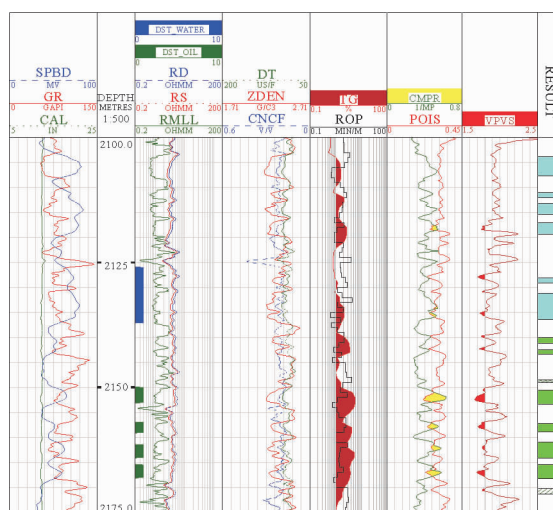


图 3 K5 井声波测井特征

Fig. 3 Acoustic log characteristic of well K5

4 结论

(1)物性差、孔隙结构复杂造成束缚水含量高,高矿化度钻井液侵入,油气运移过程中造成油水层矿化度差异等是形成渤海区域中深层低阻油层的主要因素;

(2)自然电位和微侧向电阻率是渤海区域低阻油层识别最有效的测井方法,同时加强气测录井、地层对比及适时应用核磁共振、阵列声波测井等新技术,可以提高低阻油层识别的准确率;

(3)由于不同地质条件下低阻油层的成因不同,通常是多种因素叠加作用的结果,在进行低阻油层识别时,需要首先分清成因,充分挖掘基础资料,选用对应的测井方法或者技术,形成适合区域实际情况的低阻油层识别评价方法。

参考文献:

- [1] 赵永生,崔云江,韦忠花.渤海海域低电阻率油气层特征及其识别方法[J].中国海上油气(地质),2001,15(6):429-432.
- [2] 吕洪志,李兴丽,顾保祥.渤海新近系低电阻率油层成因及测井响应特征[J].中国海上油气,2006,18(2):97-102.
- [3] 桑华.渤海油田低阻油气藏测井识别评价方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
- [4] 李建平,周心怀,吕丁友.渤海海域古近系三角洲沉积体系分布与演化规律[J].中国海上油气,2011,23(5):293-298.
- [5] 中国石油勘探与生产公司.低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M].北京:石油工业出版社,2011.
- [6] 欧阳健.油藏中饱和度—电阻率分布规律研究——深入分析低电阻油层基本成因[J].石油勘探与开发,2002,29(3):44-47.
- [7] 王博,赵军,王森,等.断块低阻油层测井识别与评价[J].岩性油气藏,2012,24(6):110-114.
- [8] 谢清,王建民.鄂尔多斯盆地志丹、安塞地区长6低阻油层成因机理及识别方法[J].岩性油气藏,2013,25(3):106-111.
- [9] 郑雷清.综合识别方法在低阻油气层勘探中的应用[J].岩性油气藏,2007,19(2):71-75.
- [10] 陈桂菊,高兴军,张为民,等.吉林大情字井油田低阻油层的识别方法研究[J].断块油气田,2006,13(4):86-88.
- [11] 李文湘,汪瑞宏,崔云江.渤中2油田东营组油层有效厚度下限确定方法[J].石油地质与工程,2013,27(4):58-60.
- [12] 汪瑞宏,李兴丽,崔云江.气测录井技术在渤海疑难层流体识别中的应用[J].石油地质与工程,2013,27(1):72-75.
- [13] 李长喜,许坤,史卜庆.盐水钻井液侵入条件下低幅度—低电阻油层的测井识别与评价[J].中国海上油气,2008,20(6):373-378.
- [14] 冯尚坤,许庆英,樊立新,等.泥浆侵入对储层电性的影响及实例分析[J].测井技术,2007,31(6):563-566.
- [15] Akkurt R, Vinegar H J, Tutuian P N, et al. NMR logging of natural gas reservoirs[J]. The Log Analyst, 1996, 37(5):33-42.
- [16] 邵维志,贵兴海,郝丽萍,等.浅析核磁共振测井在储层流体性质识别方面的局限性[J].测井技术,2014,38(6):684-689.
- [17] 黄导武,王继立,翟亦斌,等.不同气油比地层流体物性及岩石物理实验研究[J].测井技术,2010,34(5):411-414.

LOGGING CHARACTERISTICS AND IDENTIFICATION OF MEDIUM-DEEP LOW RESISTIVITY OIL RESERVOIRS IN BOHAI OILFIELD

WANG Ruihong, CUI Yunjiang, LU Yunlong, SHI Xinlei, QI Yi

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: Many low-resistivity oil reservoirs have been found in the medium-deep buried strata of the Bohai oil field recently. Most of them have high production after DST. In some of them, the reserve of low-resistivity reservoir may be above sixty percent. It is indeed an urgent need to find out the causes and evaluation method for this kind of reservoirs. Upon the evaluation experiences from other fields, we studied in this paper the origin of the low-resistivity oil reservoir in the medium-deep strata, and the methods to identify them from others. The results show that complex pore structure, high salinity water invasion, and change in water salinity are the main causes for the formation of low-resistivity oil reservoirs. The methods, which may effectively identify the low-resistivity oil reservoir, are also discussed, such as the combination of conventional well logging technique, mud logging technique and some new well logging techniques like NMR logging and array acoustic logging. The combination is proven effective.

Key words: Bohai Oilfield; medium-deep strata; low-resistivity oil zone; cause; identification