

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

RFT资料在多井储层评价中的应用

杨少春 刘泽容

吴佩芳

(石油大学油藏地质研究所, 山东东营)

(中原石油勘探局勘探处, 河南濮阳)



本文以东濮凹陷马厂地区为研究工区着重论述重复式地层测试(RFT)资料在多井储层评价中的应用。利用压力资料可定性、定量判断储层的渗透性,估算渗透率值可用于油层有效厚度标准研究,压力随深度梯度变化转换为密度变化来了解流体性质、确定油水界面,从而验证测井多井解释结论。研究表明,应用效果明显,解释结论得到试油试采证实,解释符合率提高,研究成果有助于研究工区油藏综合评价,部分成果已用于油田生产。

关键词 重复式地层测试 多井储层评价 渗透率估算 油水界面判断

RFT测试即重复式电缆地层测试,是一种新型测井方法,具有测量地层压力、采集地层中流体、估算储层渗透率、预计产能及预测油、气、水界面等多方面的功能。实践已证明,应用RFT测试资料评价储层的生产能力已成为测井地层分析与油气评价的重要方法,尤其适用于低孔低渗储层、多油水系统的断块油气藏描述。

马厂地区位于东濮凹陷的南部,为一断块多、油水系统多、储层低孔、低渗的复杂断块油田,笔者近两年在该区成功地进行了油藏描述研究工作,其中,在多井储层评价研究过程中,充分利用了RFT资料,取得较好的效果。选择12口井具代表性的RFT资料(测试质量高、资料反映地层特征),作了各井的压力剖面并判断了流体性质、确定了油水界面、估算了储层的渗透率,结合测井多井解释及试油资料建立了油层有效厚度标准,并对油、水、干层进行了综合解释,提高了解释符合率。研究成果有助于该区油藏评价,部分成果已用于油田开发。

1 多井储层评价技术概述

在马厂地区首次应用多井储层评价技术对储层进行评价,其方法概述如下:

多井储层评价是油藏描述中的重要工作,是一种综合性解释方法。不仅能有效地使用测井信息,而且结合地质、岩芯分析和地层测试等资料,分析各种岩电关系,准确地计算出储层的各种参数并综合解释出油、水、干层。研究过程中,主要进行测井资料预处理与标准化,关键井-四性关系研究,测井解释模型的建立以及对标准化后的描述井进行测井资料的数字处理,从而获得各单井的储层厚度、物性及含油性参数,便于油、水、干层综合解释。这一方法只适用于油田开发期井多、测井资料全的情况下,在钻井少,取芯井少、测井资料不全的地区,开展多井储层评价有一定难度,但如果有关RFT测试资料可以弥补其不足。在马厂开发区井多、测井资料全,RFT资料用于多井储层评价主要验证多井解释结论,提高解释符合率;在马厂北勘探区井少,RFT

资料结合其它测井使得多井评价研究工作得以开展,求取了各种储层参数,对油、水、干层进行综合解释,取得了较好的效果。

2 RFT资料的应用

RFT资料应用较广,在马厂地区多井储层评价中主要用于判断储层渗透性、油层有效厚度标准研究以及确定油水界面。

2.1 RFT测试特点及作用

RFT测试及流体采集部分的原理参看文献[1]。测试部分主要由探头、压力计、平衡阀、预测试室及取样筒组成,各个部分的功能不相同。RFT仪器可以在任何深度取样,具有测量地层压力和收集储集层流体样品的功能。仪器一次下井可进行多点测压和最多对两点的地层流体取样。每个测点可记录3种不同的压力数据:泥浆柱压力、地层压力、收集到 20 cm^3 的地层流体所产生的瞬时压力。

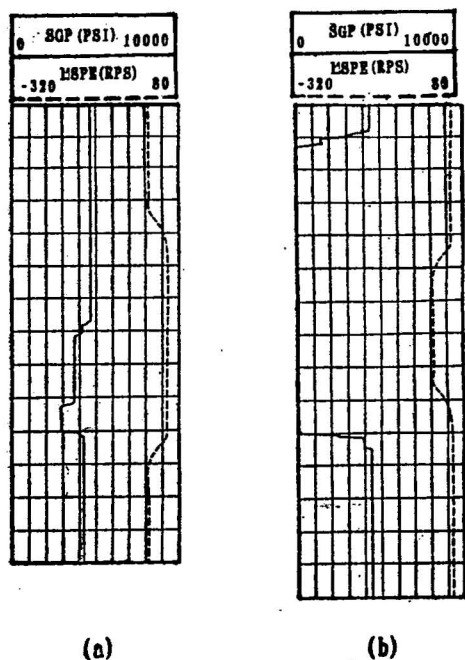


图 1 马 11-7 井压降曲线图

Fig. 1 Curve map of pressure slope in Ma 11-7 well

a—较低渗透率 ($5 \times 10^{-3} - 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$); b—非渗透性 ($< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

a—Lower permeability ($5 \times 10^{-3} - 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$); b—non-permeability ($< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

SGP—应变式压力计压力 (psi ○); MSPE—电动速度 (RPS ⊙)

○ 1psi = 0.3325 Pa.

⊙ RPS 为每秒钟转数。

2.2 定性定压判断储层渗透性

测井资料可用于判断储层渗透性,其途径通过计算渗透率来实现,RFT资料应用也不例外,只不过计算方法不同而已。然而,两者结合综合判断储层的渗透性会取得良好的效果。

2.2.1 定性判断储层的渗透性

RFT仪器在进行预测试时,压力计记录到流体流动所产生的压降,由于预测试室容积小,因此,储层的渗透性好坏直接影响到记录的压力降大小。实践证明,渗透率高、压降小、压力恢复快;渗透率低、压降大、压力恢复慢。根据这一特点可利用压降曲线判断储层渗透性[1]。

在马厂地区,利用12口井的压降曲线所表现的压力降变化定性地判断了储层的渗透性。研究发现,该区储层多表现为低孔低渗,即渗透率大都在 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下,压力降较大,压力恢复慢,在压降曲线上表现十分明显。图 1 为马 11-7 井两个测点的压力变化曲线。由曲线压力降变化可以看出,图 1 a 2736.89m 测点所在井段压降较大,储层表现为低渗,渗透率大约在 $5 \times 10^{-3} - 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;图 1 b 2729.8m 测点所在井段压力降更大,反映出储层渗透性更差, $< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为非渗透层。为检验判断准确性,利用岩芯物性分析资料加以验证,结

果表明, 2736.89m测点所在井段岩芯分析渗透率值为 $1.4 \times 10^{-3} - 11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 2729.8m测点所在井段分析值 $< 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由此可见, 判断较为准确, 说明利用 RFT 资料定性判断储层渗透性可以在取芯井少地区进行。

2.2.2 定量判断储层的渗透性

定量判断储层的渗透性主要通过利用压力曲线估算出渗透率值来实现^[1,2], 判断的准确性取决于估算值的精度。

测试经验表明, 压力恢复的速度主要取决于储层的渗透率大小, 因此, 利用压力曲线可以估算出渗透率值。方法有压降法和压力恢复法, 前者反映近井眼的储层特征, 后者则反映远离井眼的储层特征。由于马厂地区测试井井眼较好, 泥浆侵入影响较小, 因此, 压降法计算出的渗透率也可用来定量反映储层渗透性。

根据测试过程中地层压力下降幅度求解储层渗透率的方法称为压降法, 其计算方法采用达西渗滤定律并进行单位转换, 计算公式为:

$$K_R = 5660 \frac{q \cdot \mu}{\Delta P}$$

式中: K_R —估算渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); q —流量 (cm^3/s); μ —流体的粘度 ($\text{mpa} \cdot \text{s}$), 常取 ($0.5 \text{ mpa} \cdot \text{s}$); ΔP —预测试室压力降 (psi)。

笔者用上式对马厂地区沙三下亚段12口井、54个测点进行了渗透率估算, 获得了较准确的渗透率计算值 (表1)。

表 1 马 12-12井RFT资料估算渗透率

Table 1 Permeability estimated by RFT data in Ma 12-12 well

序号	深度 (m)	压力(MPa)		压力系数		渗透率估值($10^{-3} \mu\text{m}^2$)						
		地层	泥浆	地层	泥浆	q_1	ΔP_1	K_{R_1}	q_2	ΔP_2	K_{R_2}	K_R
1	2331	23.21	26.21	8.99	1.15	0.66	29	64.3	1.76	81	61.38	62.84
2	2435	23.99	27.43	1.00	1.15	0	0	0	0	0	0	0
3	2455	24.05	27.63	0	1.15	0.57	1624	0.99	1.51	3393	1.26	1.12
4	2489	24.59	28.01	1.01	1.15	0.54	169	9.05	1.69	361	13.22	11.14
5	2508.5	24.75	28.21	1.01	1.15	0.55	292	5.38	1.62	705	6.51	5.94
6	2518	24.83	28.32	1.01	1.15	0.55	134	11.72	1.62	276	16.63	14.17
7	2573	25.48	28.98	1.01	1.15	0.54	124	12.34	1.62	305	15.05	13.69

注: 表中渗透率估算值为双测试室条件下, 所求得的 2 个渗透率值的平均值。

估算渗透率值可用于储层定量研究, 其精度如何, 需用岩芯分析数据验证, 从而推广至无取芯井区的储层研究。

在马厂地区, 由于 RFT 测试井段大都没有取芯资料, 因此, 只能将估算渗透率值与测井解释渗透率值比较。因为测井多井解释渗透率计算模型是在关键井-四性关系研究的基础上建立的, 是经过关键井处理检验的。表 2 为马厂开发区沙三下亚段测井解释渗透率误差分析表, 表中数字反映误差大小, 绝对误差为 $10.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 相对误差只有 32.03%, 说明误差较小, 可以证实解释出的渗透率值精度较高。检验过程中, 着重进行了估算渗透率值与解释渗透率值的相关分析。如马 12-12 井深度 2508.5m 处, 估算渗透率值为 $5.94 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而测井解释值为 $6.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 又如马 11-86 井深度 2801.3m 处, 估算渗透率值为 $142.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而测井解释值为 $147.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 2947.2m 处, 估算值为 $49.95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 解释值为 $40.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 可见误差较小。为全面检验, 作估算渗透率值与测井解释渗透率值关系图, 如图 2 所示, 相关

表 2 关键井渗透率误差分析
Table 2 The error analysis of permeability in key wells

井号	井段 (m)	K ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	K 处理 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	绝对误差 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	相对误差
马11-7	2876.3—2877.5	1.05	1.06	0.55	0.524
	2878.6—2881.4	21.75	25.70	3.95	0.182
	2920.2—2924.4	58.02	60.90	2.88	0.050
马11-16	2771.0—2777.5	26.63	16.60	10.03	0.377
	2836.3—2837.1	30.83	5.80	25.03	0.212
	2838.2—2838.6	9.16	11.10	1.84	0.200
	2847.0—2849.6	16.10	8.80	7.3	0.453
	2851.3—2853.1	11.70	11.40	0.30	0.026
马 12	2699.2—2702.1	84.50	103.10	18.60	0.215
	2703.8—2708.1	47.16	25.20	21.96	0.466
马12-24	2592.5—2595.6	64.00	35.36	28.37	0.443
	2607.7—2610.0	14.59	18.10	3.51	0.241
	2660.1—2661.6	49.00	40.47	8.53	0.174
平均				10.22	0.320

式为:

$$K_R = 0.9549825 K_C - 0.3539467, \text{ 相关系数 } R = 0.969.$$

显然, 相关性很好。因此, 可以推断, 利用RFT资料采用压降法估算的渗透率, 能基本上定量反映储层的渗透性。

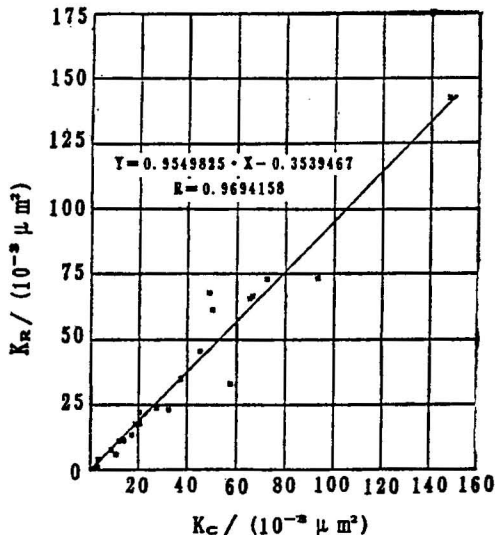


图 2 马厂地区估算渗透率 (K_R) 与测井解释渗透率 (K_C) 关系图

Fig. 2 The relationship of permeability estimated and log explanation in Ma chang area

依据估算渗透率与测井解释的渗透率, 对该区储层进行了判断, 并且利用渗透率进行了储层参数空间分布规律研究和储层综合评价, 其中渗透率在评价中作为一种重要的储层参数。如在该区将储层由好至差分为 A、B、C 三类, A 类储层, 渗透率值 $> 60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; B 类储层, 渗透率在 $60 \times 10^{-3} - 40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间; C 类储层, 渗透率值介于 $40 \times 10^{-3} - 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。两种方法计算的渗透率同时应用, 大大提高了定量判断的可信度, 尤其在北部勘探区, 效果更佳。此外, 估算渗透率值还用于了解储层非均质性研究、油层有效厚度标准研究等。

值得注意的是, 并非所有点估算值都可采用。如该区储层的层内、层间非均质性比较严重, 测试过程中仪器遇卡, 个别井段泥浆浸泡严重, 污染储层, 致使有些估算值不准。实际计算时, 应剔除这些点。

2.3 了解储层流体性质、确定油水界面、验证多井解释结论

正确判断储层含油气状况是多井储层评价的重要内容之一。然而,单纯用常规测井资料来解释、判断存在着片面性,尤其是在断块多、油水关系复杂的油气藏,往往会出现解释或判断错误,而 RFT 资料应用可以获得较好的效果。

利用 RFT 资料判断储层含油气状况的途径是利用地层压力数据与深度可建立压力剖面,把压力梯度(每米的压力降)通过单位换算转换为流体密度,从而了解流体性质、判断出油水界面^[2-4]。其换算公式为:

$$\text{流体密度 } \rho = \frac{\text{压力梯度}}{A} \quad (\text{g/cm}^3)$$

A 为由压力梯度与流体密度采用的单位所决定的转换系数,一般取 $A = 1.422$ 。

笔者在马厂地区做了 12 口井的压力剖面,分别计算了流体密度,确定了流体性质,成功地对各井的油水界面作了判断,并且有些井判断还得到试油试采所证实。

图 3 为马 12-12 井流体性质、油水界面判断成果图,由压力剖面、估算渗透率和该井测井数字处理解释成果图组成。

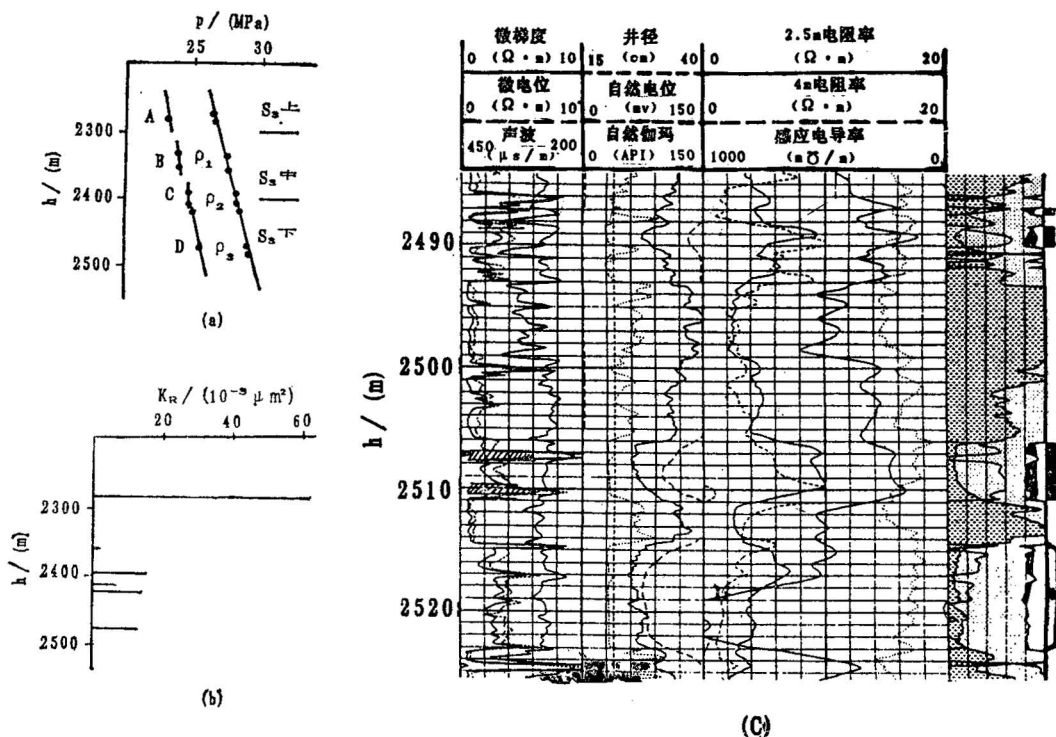


图 3 马 12-12 井流体性质、油水界面判断成果图

Fig. 3 Judgement map of fluid nature and the surface of oil and water in Ma 12-12 well
 a—地层压力剖面 (A、B、C、D 均为压力段; $\rho_1 = 1.158 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 0.785 \text{ g/cm}^3$, $\rho_3 = 1.113 \text{ g/cm}^3$; S_3^{\pm} , $S_3^{\#}$, S_3^{F} 分别代表沙三段上、中、下亚段); b—估算渗透率; c—测井过程解释图

a—Stratigraphic pressure section (A、B、C、D is all pressure section, $\rho_1 = 1.158 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 0.785 \text{ g/cm}^3$, $\rho_3 = 1.113 \text{ g/cm}^3$, S_3^{\pm} , $S_3^{\#}$, S_3^{F} expresses upper-subsection, middle-subsection and down subsection of-Shasan section);
 b—estimated permeability;
 c—explaining map by well logging processing

该井共进行了7个深度点的地层压力测量,由压力剖面可计算出泥浆柱的压力梯度约为0.014 MPa/m,在整个测试井段没有变化,说明本井泥浆性能是稳定的。分析地层压力剖面可以看出,该井压力剖面分布有4个压力段,每个压力段有各自压力系统。

层段A呈现较低压力,与B层段间有泥岩隔层相隔。层段B,压力增大,计算出的流体密度为1.158 g/cm³,这与水的密度相同,说明此段为一套水压力系统。层段C,显示较高压力,与层段B也有泥岩作为隔层,计算出的流体密度为0.785 g/cm³,与地下原油密度(据高压物性分析资料)接近,解释为油层段,该段估算渗透率值均<20×10⁻³ μm²,说明储层为低渗透性砂岩。D段为该剖面上最高压力段,计算出的流体密度为1.113 g/cm³,解释为水层。说明在B段与C段之间有一油水界面,从压力剖面上可以确定出油水界面在2515m处。这一判断结果得到试油所证实,试油资料表明,在2515m以上为油层,试油井段为2488.4—2510.0m,日产油11.10 t。此外,分析测井多井数字处理解释成果图(图3c)也表明,在2515m以上为油层,以下为水层,从而证实RFT资料和多井解释判断油水界面准确可靠。

图4为马11-4井流体性质、油水界面判断成果图。该井也测了7个深度点的地层压力,泥

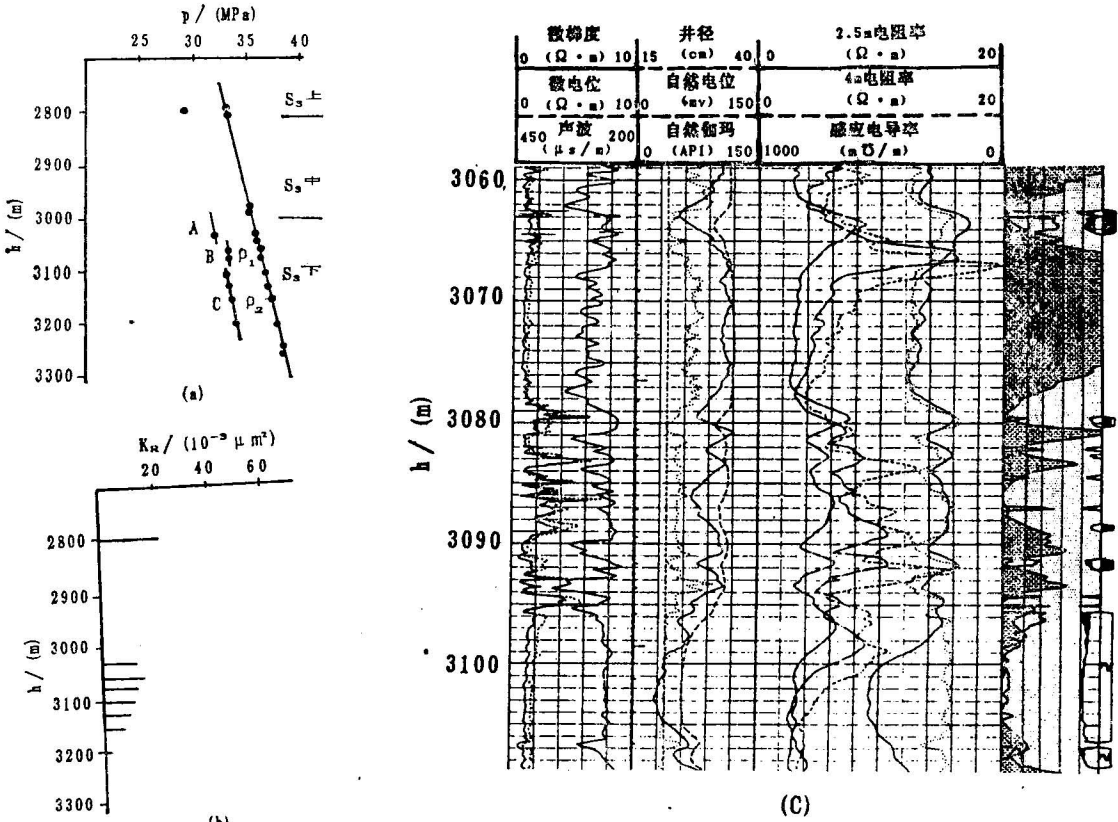


图4 马11-4井流体性质、油水界面判断成果图

Fig. 4 Judgement map of fluid nature and the surface of oil and water in Ma 11-4 well
a、b、c同图3; ρ₁=0.765 g/cm³; ρ₂=1.34 g/cm³

浆压力随深度变化趋势表明泥浆性能也是稳定的。分析图可知,有3个压力段。层段A在3000—3033.5m井段,表现为较低压力。层段B为3065—3075m井段,显示较高压力,与层段A之间有泥岩隔层,计算得到的流体密度为0.765 g/cm³,与地下原油密度接近,地层测点压力随深度变化是以地下原油密度为斜率的一条直线,估算渗透率值在10×10⁻³—20×10⁻³ μm²,为低渗透

油层段。到层段 C, 压力变化则过渡到了以水密度为斜率的直线, 与 B 层段直线相交于 $3\ 095\text{m} \pm$, 交点处被指示为本井沙三下亚段—油水界面。这与图 4 C 该井数字处理解释成果显示油水界面 ($3\ 094.5\text{m}$) 深度相一致, 并经试油证实油水界面以上为油层 (试油深度 $3\ 062.5\text{—}3\ 080.6\text{m}$, 共试 2 层 4.4m , 日产油 13.5t), 又一次证明 RFT 资料判断油水界面比较可靠。

上述分析充分表明, 把压力梯度随深度变化的关系换算为储层内流体随深度关系来确定油水界面比较可靠, 并且可用来验证测井多井解释结果的准确性。对其它井也作了油水界面的判断, 有些井已得到试油证实, 有些井的油水界面判断改变了原来的看法, 经重新试油, 证实判断正确。这一方法成功应用表明, 在探区可利用少量井的 RFT 资料确定出油水界面, 可减少盲目的打井, 从而节省大量资金。

2.4 油层有效厚度标准研究

多井储层评价中油层有效厚度标准的研究, 主要是以岩芯分析为基础, 试油试采资料为依据, 应用测井多井解释出的各种储层参数, 采用数理统计方法, 寻找岩芯、试油试采及测井解释参数之间的关系, 从而确定出油层有效厚度的岩性、物性、电性及含油性下限值, 得到油层的取舍标准。利用这种方法, 在马厂开发区进行了研究, 如沙三下亚段油层物性、含油性标准为: 孔隙度 $> 12\%$, 渗透率 $> 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含油饱和度在 41% 以上, 图版符合率在 $85\% \pm$, 另外还有岩性、电性标准。

但在油田勘探初期, 钻井取芯、试油成本费用高、速度慢, 而且不可能大量取芯。因此, 利用 RFT 压力估算渗透率资料, 结合少量试油资料进行油层有效厚度标准的研究, 可以节省大量资金, 简便、直观可靠。

笔者在马厂北地区依据估算渗透率值与测井解释的孔隙度, 并结合试油资料作出两者的关系图 (图 5)。分析图发现, 油层基本上分布在渗透率 $> 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度 $> 12\%$ 的范围内, 图版符合率可达 92% 以上, 与开发区油层物性下限值完全吻合, 而且图版符合率提高了 $7\% \pm$ 。究其原因, 该区试油层大都为长井段多层合试, 某些干层可能被认为是油层, 使得利用测井多井解释参数与试油资料结合确定的标准符合率降低。而 RFT 压力资料是按点测试的, 相当于单层测试, 并且有些目的层都有好几个测点, 因此, 图版符合率提高。

应用所定标准, 对测井资料进行了油、水、干层综合解释, 符合率较高。在开发区, 符合率提高了 $10\% \pm$; 在北部勘探区提高了 $20\% \pm$ 。由此可见, RFT 资料也可用于油层有效厚度标准研究, 尤其适用于井少、取芯资料少的探区油藏早期评价, 可提供较理想的物性参数。

3 应用效果小结

RFT 资料用于马厂地区多井储层评价, 效果是显著的。解释出的储层参数精度高, 其中渗

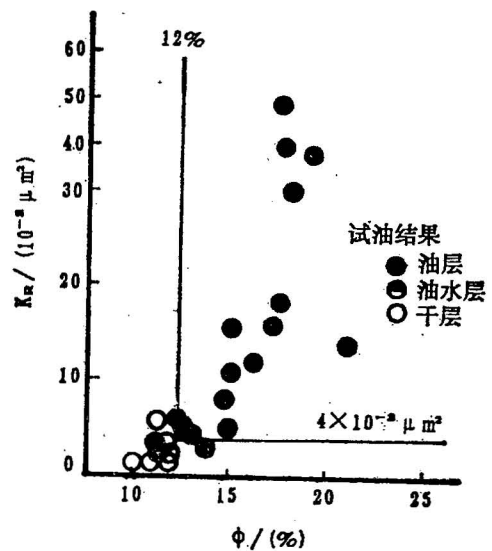


图 5 马厂地区测井解释孔隙度 (ϕ) 与估算渗透率 (K_R) 关系图

Fig. 5 The relationship of logging explanation porosity (ϕ) and permeability (K_R) estimated

透率绝对误差 $<25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 相对误差 $<40\%$, 用于储层研究。在该区储层评价中, 利用了渗透率参数, 评价结果表明, 马19西断块、马11西断块、马11东断块和马10东断块为最有利的储层参数分布区, 并且得到油田开采所证实。油水层界面的确定, 得到试油所证实, 同时验证了测井多井解释结论。尤其在马厂北地区, 用少量井的RFT压力资料结合其它测井资料确定了马22块、马26块的油水边界, 对该区进一步勘探开发有实际指导意义。估算渗透率值用于油层有效厚度标准研究, 在开发区, 配合多井评价使油水层解释符合率提高 10% , 在勘探区符合率提高 20% 。所有这些充分证明RFT资料用于多井储层评价, 增加了储层评价的可靠程度, 适用于油藏综合评价。

4 结论

1. RFT测试可在裸眼井中进行, 具有速度快、精度高、耗资少、系统直观等特点。
2. 多井储层评价研究中RFT资料应用可定性、定量判断储层的渗透性、确定油层有效厚度标准, 了解流体性质、确定油水界面以及验证多井解释结论, 大大提高了油水层解释符合率, 适用于油藏综合评价。
3. RFT资料应用可以为油田勘探和开发提供一些重要参数, 解决一些其它测井所不能解决的问题, 尤其适用于油田早期油藏评价, 如能配合其它资料, 效果更佳, 其应用前景十分广阔。

参 考 文 献

- 1 钟兴水, 耿全喜. 油田开发测井技术. 石油工业出版社, 1992, 191—240页。
- 2 曾文冲, 欧阳健, 何登春. 测井地层分析与油气评价. 石油工业出版社, 1987, 192—217页。
- 3 谭廷栋等. 测井资料在油气田开发中的应用. 石油工业出版社, 1991, 1—25页。
- 4 Schlumberger. RFT Essentials of Pressure Test Interpretation. 1982.

THE APPLICATION OF RFT DATA IN MULTI-WELL RESERVOIR EVALUATION

Yang Shaqchun and Liu Zerong

(University of petroleum, Dongying, Shandong)

Wu Peifang

(Exploration Department, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan)

Abstract

With the Machang area of the Dongpu depression as the study area, this paper mainly discusses the application of the Repeat Formation Test (RFT) data in multi-well reservoir evaluation. Pressure data may be used to make a qualitative and quantitative estimation of the permeability of reservoirs. The permeability estimate may be used to study the effective thickness standard of oil reservoirs. The transformation of the variation of pressure with depth into the variation of density with depth can help to understand the properties of fluids and determine the oil-water interface, thus verifying the conclusion of multi-well logging inter-

pretation. Study indicates that the application yields marked good results. The conclusion of the interpretation has been verified by formation and production tests and the conformity rate of the interpretation increases. The research results are conducive to the comprehensive reservoir evaluation of the study area, and some of the achievements have been applied in oil production. Finally the paper points out that the application of RFT data has a vast prospect.

Key words: Repeat Formation Test (RFT), multi-well reservoir evaluation, permeability estimate, determination of oil and water interface

作者简介

杨少春, 1962年11月生。1992年毕业于石油大学北京研究生院, 获硕士学位。现在石油大学(华东)油藏地质研究所从事教学和油藏描述研究工作。通讯地址: 山东省东营市石油大学。邮政编码: 257062。