

doi: 10.11720/wtyht.2021.1181

刘伟男,张超谟,朱林奇,等.页岩气水平井 TOC 测井评价新方法[J].物探与化探,2021,45(2):423-431.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1181

Liu W N,Zhang C M,Zhu L Q,et al.A new method for TOC logging evaluation in shale gas for horizontal well[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,45(2):423-431.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1181

页岩气水平井 TOC 测井评价新方法

刘伟男^{1,2},张超谟¹,朱林奇³,胡松⁴,孔政⁵,邓瑞¹

(1.油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学),湖北 武汉 430100;2.中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518054;3.中国科学院 深海科学与工程研究所,海南 三亚 572000;4.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;5.中石化胜利油田勘探开发研究院,山东 东营 257099)

摘要: 由于存在地层缺失、井眼穿层不断变化、重点层段测井曲线较少、井眼环境复杂、测井响应值与储层参数关系较为复杂等特点,页岩气储层水平井测井解释难度较大。针对该问题,本文采用“水平井钻遇地层模型—水平井间及水平井与直井响应差异分析—水平井曲线校正—基于直井的参数评价模型”的评价技术流程,进行页岩气水平井 TOC 测井评价。在测井评价中,针对响应规律复杂的特点,采用直方图法进行测井响应规律分析,同时考虑到水平井测井曲线较少,为了综合利用测井曲线信息,结合曲线重叠方法提出双重信息融合评价模型。结果表明,本方法在充分分析测井响应差异的基础上对水平井测井曲线进行校正,且提出的双重信息融合模型具有能充分利用测井信息、评价精度高以及操作简单等优点。

关键词: 页岩气;测井响应差异;水平井测井曲线校正;TOC;双重信息融合

中图分类号: TE19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)02-0423-09

0 引言

随着页岩气勘探开发技术的不断发展,传统的直井勘探模式受到了挑战。水平井是最大井斜角达到或接近 90°,并在目的层中维持一定长度的水平井段的特殊井^[1-2],水平井对于提升油气藏采收率具有明显的效果^[3-6]。页岩气储层是典型的自生自储油气藏,但是其优质层段往往较薄且较为致密,虽然储层内部发育有微裂缝,但是由于微裂缝沟通能力有限,因此在开采时需利用水平井模式进行开发,以提高单井产能和采收率等^[7-10]。

在水平井测井评价中,目前采用方法是先进行井眼与地层关系的解释,之后将水平井测量曲线校正到直井状态,然后利用垂直井模型进行评价。其中,汪中浩等提出“水平井测井解释系统”用于解释

井眼轨迹与油藏的位置关系,同时考虑地层各向异性进行交互解释^[11];吕萍等利用胜利油田“水平井咨询系统”进行井眼轨迹与地层接触关系的确定,进而进行储层流体识别工作^[12];赵军等在井眼轨迹与地层关系研究的基础上进行储层岩性和物性的判断,为后续解释提供参考依据^[13];针对泥页岩,胡松等以直井和水平井测井曲线为基础,通过交互式正反演方法确定井眼与地层关系,之后进行曲线校正和储层参数计算^[14]。目前,页岩的水平井测井评价方法主要参考常规砂岩和碳酸盐岩储层评价方法,但是页岩水平井中往往未有密度、中子等能够反映储层特征的测井曲线,且页岩储层中评价参数与常规储层存在差异,即页岩储层中必须评价的有机碳含量、含气量等参数在常规储层中往往为非必须评价参数^[15-16],同时,由于页岩层系一般在深暗色泥页岩中夹薄层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、砂岩等,

收稿日期:2020-04-16;修回日期:2020-11-13

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060-002,2017ZX05032003-005);长江大学优秀硕士学位论文培育计划资助项目

作者简介:刘伟男(1995-),男,硕士,主要研究方向为测井综合评价及解释。Email:lwn1995@126.com

通讯作者:张超谟(1962-),男,教授,从事测井地层评价与油藏描述的科研与教学工作。Email:zhang7801@263.net

储层薄互层特别发育,导致实际水平井井眼轨迹难以完全与目的层段相贴合,给水平井的测井解释带来了较大的难度。首先,对于某些曲线,特别是对于声波时差和电阻率曲线,由于各向异性等因素导致水平井与垂直井测井响应特征存在较大差异;其次,对于页岩储层,由于其非均质性较强,因此即使是同一层组的各个小层,其测井响应特征也存在较大差异,且水平井井间测井响应特征的差异较大。

针对上述问题,本文以 Y 试验区为例,考虑到研究区井眼穿层不断变化、测井响应特征复杂和测井曲线有限等问题,采用“水平井钻遇地层模型—水平井测井响应分析及曲线校正—基于直井的多信息融合参数评价模型—水平井评价”评价技术路线:首先,进行井眼轨迹与地层关系的解释;之后结合井眼与地层关系,利用直方图法进行水平井测井响应特征对比分析,厘清水平井井间和水平井与直井测井响应特征差异,同时进行曲线校正工作;在此基础上考虑水平井测井资料有限性、曲线抖动问题及模型适用性问题,构建了以水平井测井系列为约束的双重信息融合 TOC 评价模型,以期对该地区后续水平井的测井评价提供指导。

1 研究区概况

四川盆地具有丰富的页岩气地质储量,在龙马溪组、五峰组及筇竹寺组发育着大量的灰黑色泥岩、黑色碳质泥岩、灰黑色碳质泥岩、灰黑色粉砂质泥岩和黑色炭质泥页岩储层,储量十分丰富^[17-20]。Y 试验区位于四川盆地的东南部,其主力勘探层系为五

峰—龙马溪组,区域内已经完钻、有明显经济效益的井有 5 口,其中 Y3 井单井日产气达 6.33 万 m³,考虑到纵向上岩性差异较大,在实际勘探和开发时将其从下到上分为 1~9 号层。对研究区块优质重点层段(2~3 层)岩心分析结果进行统计,镜质体反射率介于 2.42%~2.77%之间,平均为 2.57%;TOC 含量介于 0.45%~7.83%之间,平均为 3.04%;孔隙度范围为 2.66%~6.62%,平均为 4.59%;吸附气含量介于 0.57~2.58 m³/t 之间,平均为 2.01 m³/t;同时,储层的黏土含量平均值为 35.42%,硅质含量平均值为 50.48%,碳酸盐岩含量为 9.49%,黄铁矿含量为 4.37%。综合岩心分析结果,Y 试验区五峰—龙马溪组页岩具有高孔隙度、高有机碳含量、高含气量和高脆性矿物含量(硅质与碳酸盐岩矿物)的特点,同时区块水平井钻井层位主要位于从地质角度(有机碳含量、孔隙度、含气量)和工程角度(脆性矿物含量)都最优质的 2 号层和 3 号层下部。综合分析,Y 试验区作为川南地区最重要的页岩气产区之一,具有有利于页岩气形成和开发的条件。

2 水平井评价思路

本文提出的水平井的解释流程见图 1。在进行水平井的解释之前,首先,需结合水平井钻井资料和测井资料明确水平井井眼轨迹与地层关系,之后结合井眼与地层关系采用直方图法对全靶点段和同层段水平井井间测井响应差异性进行分析,以厘清研究区块测井响应特征,若差异性是由于测井仪器存在系统误差导致的,需对其进行校正,若差异由地层

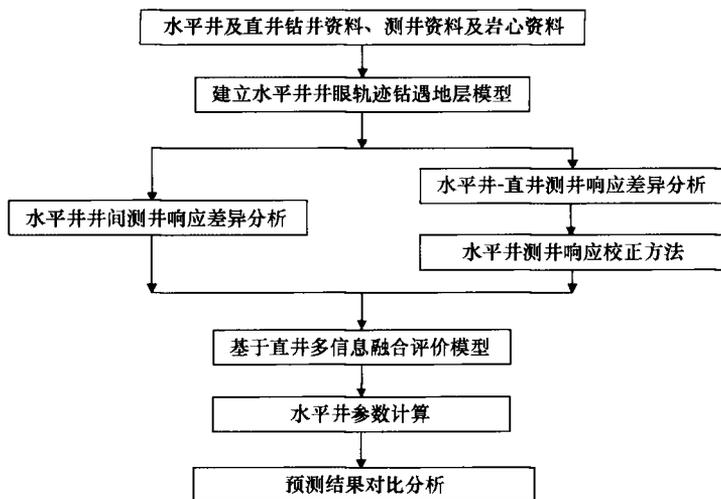


图 1 Y 试验区水平井参数评价新方法流程

Fig.1 The flow chart of new method for evaluating horizontal well parameters in Y area

原因和轨迹原因造成,则不需要校正。其次,采用直方图法对直井与水平井测井响应差异性分析,在此基础上进行水平井校正,其作用在于尽量消除直井与水平井测井时各向异性和仪器状态等因素造成的差异,使直井中建立的评价模型在水平井的储层参数评价中仍然适用。只要水平井中测量的曲线在建模时都应尽量考虑,这是因为由于仪器状态、井眼环境等问题,水平井测量曲线难免会发生抖动,而多信息模型可最大化地避免该问题,同时多信息模型可以尽可能地利用已知信息,提高模型的预测精度。最后,进行水平井参数计算和预测结果对比分析。

3 测井响应特征分析及水平井测井响应校正方法

3.1 水平井井眼轨迹钻遇地层模型

在进行水平井测井响应分析及水平井响应校正前,需结合水平井实际钻井资料和测井资料确定井眼钻遇地层情况,以便于后续测井响应特征分析和水平井测井响应校正。

图 2 为 Y 试验区 Y3 井根据钻井资料和测井资料井眼轨迹与地层接触关系。可以看出在 Y 试验

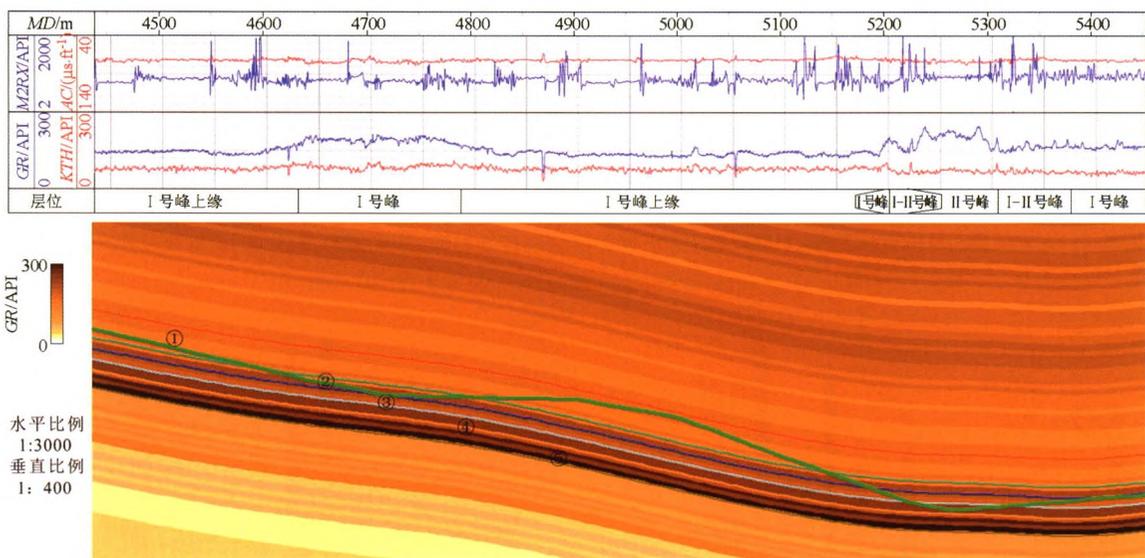


图 2 Y3 水平井井眼轨迹与地层接触关系

Fig. 2 The contact relationship between borehole trajectory and formation of horizontal well Y3

区中,由于地层各向异性、仪器在井眼中穿行状态以及层界面的影响,导致水平井测井曲线(电阻率曲线、声波时差曲线等)存在毛刺和曲线抖动等现象,同时对于 Y3 井,其水平井主要穿行轨迹在 I 号峰、II 号峰之间,水平井穿层较为明显,在测井解释中需要进行测井响应特征分析及校正工作。

3.2 水平井井间测井响应差异性分析

确定了水平井与地层接触关系后,考虑到水平井测井响应受井眼环境、仪器状态等因素影响较大,需进行水平井井间测井响应差异性分析的研究,本文在井眼与地层关系基础上,采用直方图法对多井之间进行水平段和相同层段测井响应特征分析,以确定水平井井间测井响应的一致性情况。

首先进行水平井水平段测井曲线响应分析。本文用于研究的水平井为 Y1 井、Y2 井、Y3 井,其中水平井目的层位为 I 号峰至 III 号峰,主要进行自然伽马(GR)、声波时差(AC)、深电阻率(RD)及去轴伽

马(KTH)曲线直方图的绘制(图 3)以进行测井响应分析。从图 3 中可以看出不同井之间测井响应特征存在较大差异,同类型曲线中不同井的响应值主峰并不相同,整体上看存在多个主峰,特别是对于声波时差曲线,可以明显看到 3 口井峰值均不重叠。分析认为,产生这种情况的原因可能有两种,第一种为钻遇的地层具有一定的差异,即在钻进过程中发生了多次穿层,而不同的小层测井响应值具有一定差异,造成测井响应特征不一致;第二种可能是测井仪器系统误差以及井眼环境的影响,导致了不同井之间的差异。

考虑到上述问题,本文提出了根据井眼与地层关系进行水平井同一层位测井曲线响应分析的思路。对于 Y 试验区,选择水平井实钻层段 I 号峰上缘进行测井响应特征分析,图 4 为测井响应直方图,表 1 为对应的水平井深度。

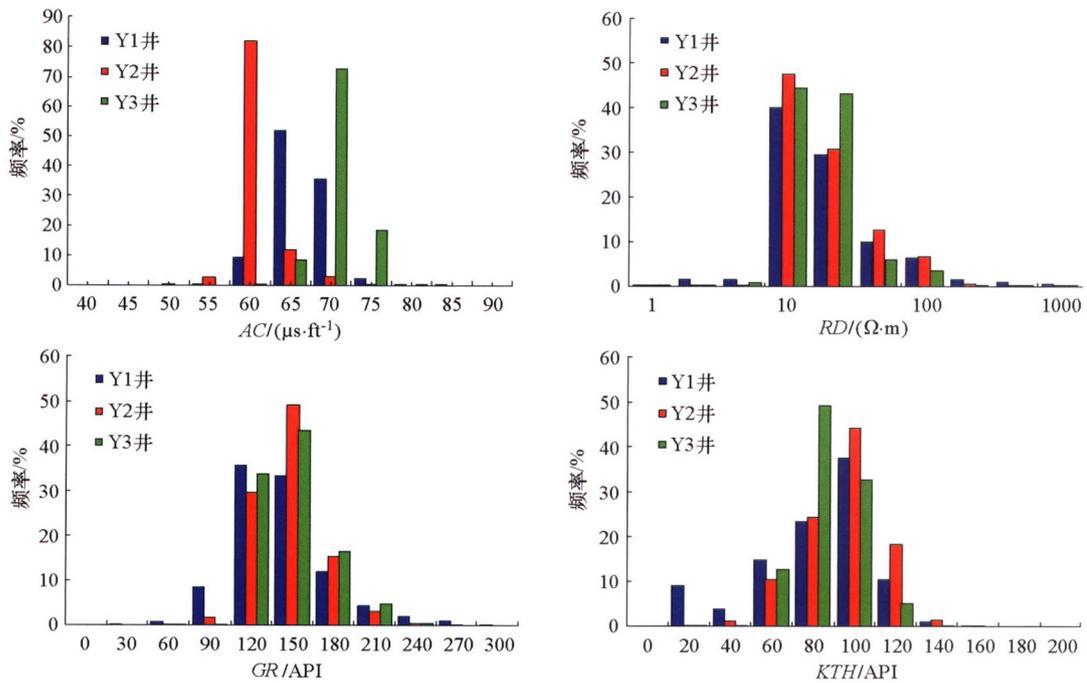


图 3 Y 试验区水平井目的层段测井响应直方图

Fig.3 The logging response histogram of whole horizontal wells in Y area

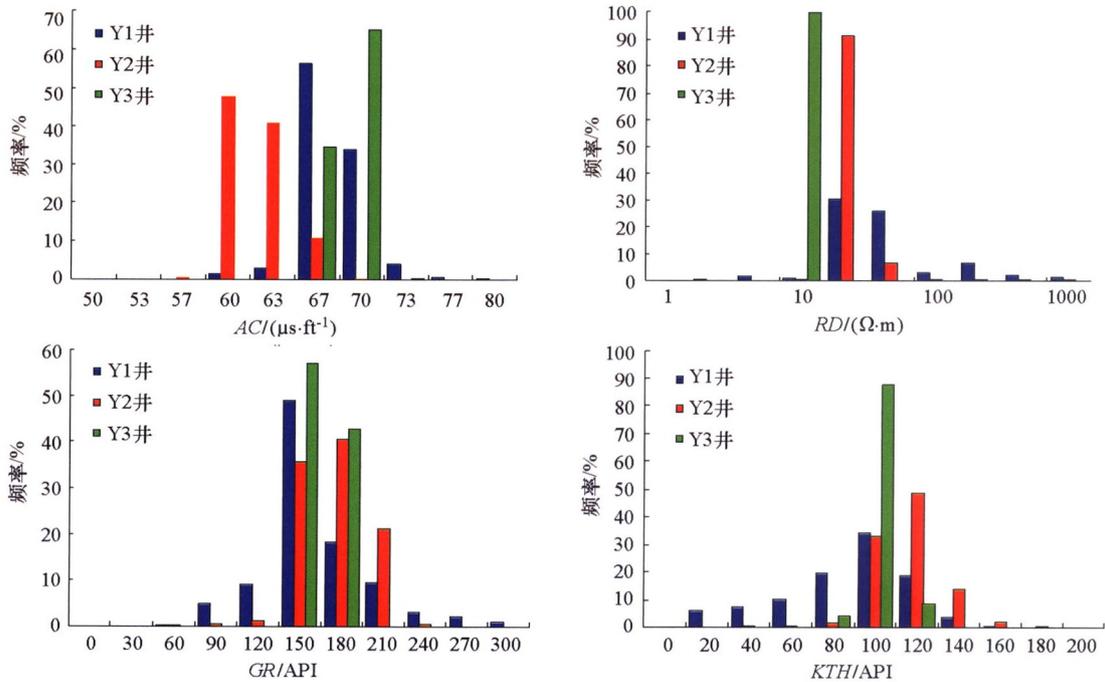


图 4 Y 试验区水平井 I 号峰上缘测井响应直方图

Fig.4 The logging response histogram of upper edge of peak I for horizontal wells in Y area

从图中可以明显看出,同一层位不同井的各个测井曲线的响应值主峰具有非常好的对应性,说明即使在复杂井眼条件下,研究区水平井测井曲线仍然较为稳定、没有受到较大影响。因此,在研究区块进行页岩气储层测井解释时,无需考虑水平井之间差异,这是水平井使用统一模型的基础。

表 1 Y 试验区水平井段 I 号峰上缘深度统计

Table 1 The depth of upper edge of peak I in horizontal well section of Y area

井名	深度范围斜深/m
Y1 井	4 075.0~5 577.7
Y2 井	5 195.0~5 488.7
Y3 井	5 656~5 873

3.3 直井与水平井响应关系差异性分析及水平井校正方法

在厘清水平井间测井响应差异原因后,由于各向异性、地层界面以及水平井井眼不规则(井眼形状呈钥匙型)等多重因素作用,在测井评价之前,首先需进行直井与水平井测井响应分析,以确定直井与水平井测井响应之间的差异并对水平井测井响应进行校正。

以 Y3 井为例进行直井与水平井同一层位直方图绘制(图 5)。选择 I 号峰上缘层位进行了自然伽马(*GR*)、声波时差(*AC*)、深电阻率(*RD*)和去铀伽马(*KTH*)曲线直井和水平井测井响应特征分析,同

时对 Y3 井垂直井和水平井重点层段响应值进行统计(表 2)。结合图、表可以看出, Y3 井重点层段中直井与水平井声波时差测井差异性明显,分析认为,仪器状态和地层各向异性是导致差异性的主要原因。对于电阻率响应,由于测井仪器在水平井段和垂直井中仪器响应机理存在差异,因此需要进行校正。对于放射性测井,考虑到在直井中使用常规自然伽马仪器,水平井中使用随钻伽马仪器,同时在放射性测井中存在放射性涨落,且基于伽马能谱获得去铀伽马曲线时能谱存在漂移现象,因此在放射性曲线中,二者在分布范围和峰值上存在差异,同时两者直井和水平井峰值差异规律存在差异。

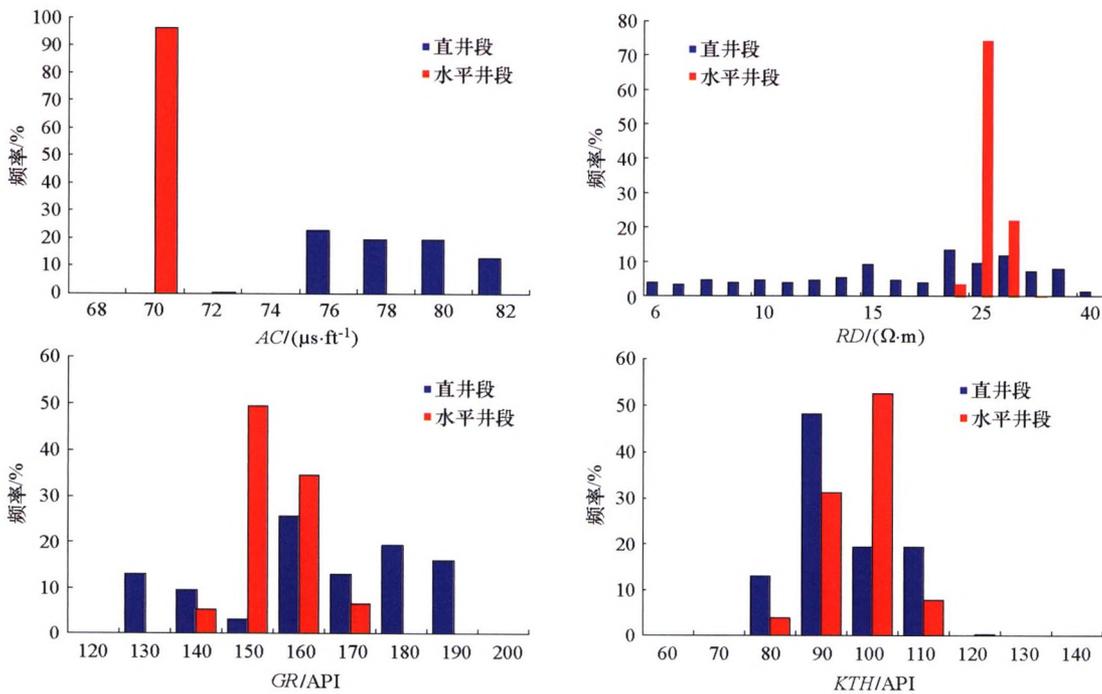


图 5 Y3 井 I 号峰上缘层位直井与水平井测井响应直方图

Fig.5 The logging response histogram of vertical well and horizontal well in upper edge of peak I of Y3

表 2 Y3 井水平井和直井 I 号峰上缘响应值统计

Table 2 Response values for upper edge of peak I of horizontal and vertical wells in Y3

参数	直井峰值	水平井峰值
$AC/(\mu s \cdot ft^{-1})$	76	71
$RD/(\Omega \cdot m)$	22.4	25.1
GR/API	160	150
KTH/API	90	100

表 3 Y3 井水平井测井响应值校正量统计

Table 3 Statistical for correction of logging response of horizontal well Y3

参数	$AC/(\mu s \cdot ft^{-1})$	$RD/(\Omega \cdot m)$	GR/API	KTH/API
校正量	5	-2.7	10	-10

在进行水平井校正时主要采用直方图法,对比表 2 中水平井与直井分布范围和峰值,进行水平井校正量的确定,结果见表 3。

4 双重信息融合 TOC 评价模型

目前主要根据有机质的物理特征差异,基于测井曲线,对 TOC 进行评价。相关文献^[21-26]认为,对于四川盆地页岩气区块,密度曲线与 TOC 具有非常好的相关性,但是由于水平井中往往难以采集到密度等曲线,导致相比于直井,水平井中测井信息有限,同时在水平井中,由于仪器状态和地层等因素的影响,导致曲线存在抖动现象,这给水平井 TOC

等参数的评价带来难度。为此,提出了双重信息融合 TOC 评价方法,该方法主要以水平井测井系列为约束,针对水平井测井信息少的问题,为了充分利用测井信息,首先采用两条曲线重叠进行测井响应特征的提取,之后以重叠后的曲线为基础,基于直井岩心数据建立多元融合信息评价模型。

有机质具有高声波时差、高电阻率、高放射性的特点,针对这些特点,相关文献提出了很多评价 TOC 的方法,其中较为常用的是 $\Delta\log R$ 重叠方法^[27]:其将孔隙度曲线(声波、中子和密度曲线)与电阻率曲线在贫有机质层段进行完全重合或平行的处理,而在富含有机质的层段中曲线会分离,分离间隔的大小代表了有机质含量的高低,因此可以直接利用 $\Delta\log R$ 法对 TOC 进行评价。Y 试验区水平井利用声波时差曲线与电阻率曲线进行叠合。由于传统的 $\Delta\log R$ 方法并不适合于高成熟度的储层,本文选用改进的 $\Delta\log R$ 方法,其公式为:

$$\Delta\log R = \log \frac{R}{R_{\text{基线}}} + \frac{\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}}{100}, \quad (1)$$

$$DD = a\Delta\log R + b. \quad (2)$$

式中: a 、 b 为地区拟合常数,本地区 $a = 1.66$, $b = 4.26$; DD 为反映 TOC 的 $\Delta\log R$ 曲线; $R_{\text{基线}}$ 和 $\Delta t_{\text{基线}}$ 为贫有机质层段的电阻率和声波时差测井值,其中 $R_{\text{基线}} = 23.18 \Omega \cdot \text{m}$, $\Delta t_{\text{基线}} = 73.88 \mu\text{s}/\text{ft}$ 。

由于 Y 试验区龙马溪组—五峰组储层段的优质储层段为高伽马层段,因此应在模型中对有机质放射性特征进行考虑。页岩储层中,放射性较强的矿物有黏土、有机质、钾长石,研究区块的长石含量非常少,所以放射性较强的矿物主要有黏土和有机质^[28-29]。有机质的放射性主要来源于铀含量,而自然伽马曲线测得的是综合放射性,而去铀伽马曲线测得的是除铀的综合放射性,所以将自然伽马曲线与去铀伽马曲线进行重叠,即可反映有机质的含量。其对应的公式为:

$$DC = \frac{GR - GR_{\text{min}}}{GR_{\text{max}} - GR_{\text{min}}} - \frac{KTH - KTH_{\text{min}}}{KTH_{\text{max}} - KTH_{\text{min}}} \quad (3)$$

其中: DC 为反映 TOC 大小的放射性曲线, GR 为自然伽马曲线, KTH 为去铀伽马曲线, GR_{max} 和 GR_{min} 为伽马曲线归一化最大、最小值, KTH_{max} 和 KTH_{min} 为去铀伽马曲线归一化最大、最小值。

最后,利用 2 条反映 TOC 的不同物理性质的曲线进行融合,综合利用测井曲线信息,得到利用不同曲线信息得到的单 TOC 计算模型,同时采用最小二乘法利用岩心资料优化二者的权系数,得到双重融合 TOC 预测模型(表 4)。

表 4 Y 试验区 TOC 计算模型

Table 4 TOC computing model of Y area

名称	模型表达式
单 $\Delta\log R$ 模型	$\text{TOC}_{\Delta\log R} = 1.66\Delta\log R + 4.26$
单 DC 模型	$\text{TOC}_{\text{DC}} = 11.92\text{DC} + 1.095$
双重融合模型	$\text{TOC} = 0.32\text{TOC}_{\Delta\log R} + 0.68\text{TOC}_{\text{DC}}$

利用 Y 试验区 I 号峰上缘至 III 号峰的岩心数据进行建模。直井 TOC 预测结果见图 6。图中可以明显看出,单 $\Delta\log R$ 方法在上部计算 TOC 偏大,在中部计算效果较好,在下部 TOC 计算偏低;利用放射性信息计算的 TOC 曲线在上部的计算结果偏低,下部计算结果偏高;最后的双重融合 TOC 预测模型的预测精度明显提高,提高了 TOC 的预测精度。所以,多信息融合评价页岩气储层参数十分重要。

对 3 种方法进行误差统计(表 5)。分析结果表明,双重融合 TOC 预测模型由于既考虑了有机质常规声学、电学特性,同时考虑到了有机质放射性特性,因此在模型误差上具有较好的改善。

表 5 Y 试验区导眼段 TOC 误差统计

Table 5 Error statistics of TOC of vertical well in Y area

模型	绝对误差/%	相对误差/%
单 $\Delta\log R$ TOC 预测模型	1.07	35.91
单 DC TOC 预测模型	0.41	13.76
双重融合 TOC 预测模型	0.16	5.36

运用该模型进行页岩气储层水平井 TOC 测井评价,分析 I 号峰和 I 号峰上缘直井 TOC 预测结果与水平井预测结果见图 7。在页岩储层中相同层位横向储层参数分布稳定,同时通过图 7 可以看出水平井与直井在对应层段 TOC 预测范围相一致,峰值相当,说明水平井计算得到的 TOC 与直井 TOC 一致,水平井评价结果分布稳定,能较好地反映储层实际变化规律,评价结果具有较强的实用性。

该方法主要针对能够采用重叠法进行测井响应特征提取的情况,当直井与水平井测井曲线不匹配时,多解性增加,评价难度增大。

5 结论

1) 根据井眼实际钻进轨迹,确定重点层段所对应的水平井段,并通过水平井段测井响应值进行水平井间测井曲线响应差异分析,证明对于四川盆地 Y 试验区五峰—马溪组页岩气储层,其水平井井间测井响应特征差异主要来自于地层原因和轨迹原因。

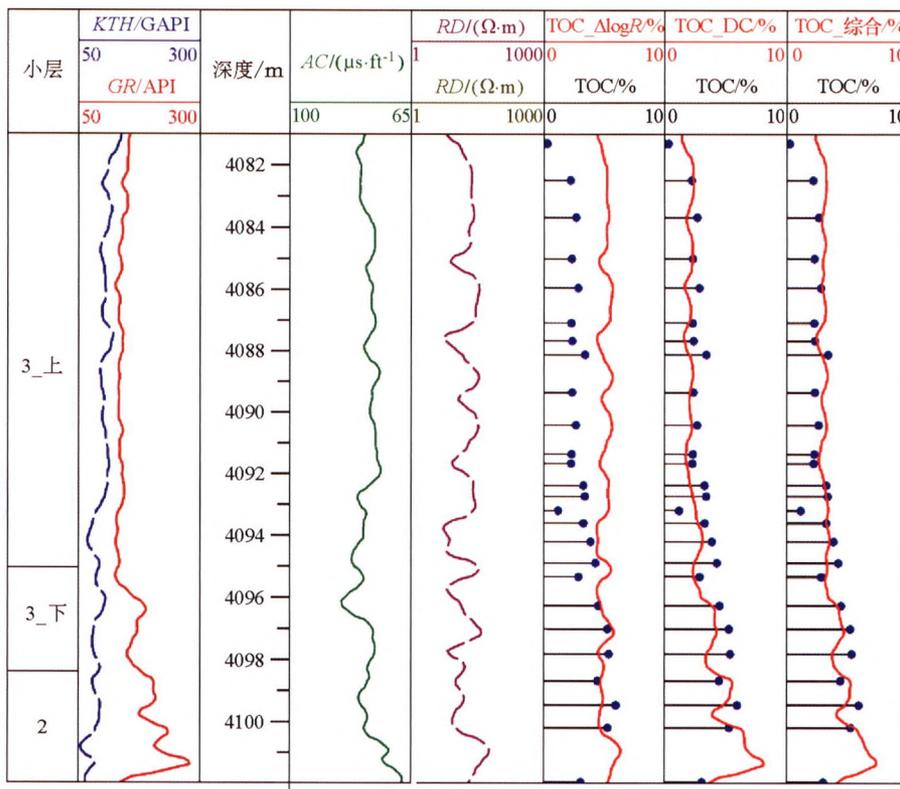


图 6 Y3 井直井 TOC 预测结果
Fig.6 TOC prediction results of vertical well Y3

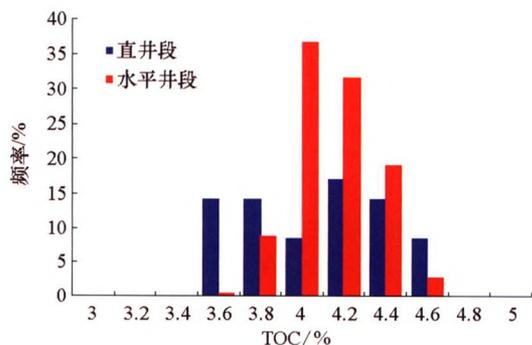


图 7 Y 试验区直井—水平井 TOC 预测结果
Fig.7 Histogram of TOC calculation results for vertical and horizontal wells in Y area

2) 直井与水平井的测井响应存在差异, 需要进行水平井与直井的匹配校正工作。本文在测井响应特征分析基础上利用直方图法进行了水平井测井曲线校正。

3) 本文提出的双重叠融合 TOC 预测模型采用曲线重叠法进行了有机碳特征曲线的提取, 之后得到多元信息融合评价模型, 在测井信息有限的情况下, 仍能准确计算 TOC。但是, 当直井与水平井测井系列不匹配时, 多解性增强, 评价难度较大。

参考文献 (References):

[1] 林永学, 王显光, 李荣府. 页岩气水平井低油水比油基钻井液研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 28-33.
Lin Y S, Wang X G, Li R F. Development of oil-based drilling fluid with low oil-water ratio and its application to drilling horizontal shale gas wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 28-33.

[2] 高德利. 大型丛式水平井工程与山区页岩气高效开发模式[J]. 天然气工业, 2018, 8(8): 1-7.
Gao D L. A high-efficiency development mode of shale gas reservoirs in mountainous areas based on large cluster horizontal well engineering [J]. Natural Gas Industry, 2018, 8(8): 1-7.

[3] 肖文, 文凯民, 谢川, 等. 页岩气水平井钻完井技术研究[J]. 科技展望, 2015(27): 116-120.
Xiao W, Wen K M, Xie C, et al. Techniques of shale gas horizontal well drilling and completion [J]. Science and Technology, 2015(27): 116-120.

[4] 任岚, 林然, 赵金洲, 等. 页岩气水平井增产改造体积评价模型及其应用[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 47-56.
Ren L, Lin R, Zhao J Z, et al. A stimulated reservoir volume (SRV) evaluation model and its application to shale gas well productivity enhancement [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 47-56.

[5] 周灿灿, 王昌学. 水平井测井解释技术综述[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 152-160.
Zhou C C, Wang C X. Technology review on the log interpretation of horizontal well [J]. Process in Geophysics, 2006, 21(1): 152

- 160.
- [6] 程庆昭,魏修平,宿伟. 水平井测井解释评价技术综述[J]. 非常规油气,2016,3(2):93-98.
Cheng Q Z, Wei X P, Su W. Summary of horizontal well logging interpretation and evaluation technology [J]. Unconventional Oil and Gas, 2016, 3(2): 93-98.
- [7] 凡刚. 水平井测井解释在江苏油田的应用[J]. 中外能源, 2008,13(6):55-58.
Fan G. Application of logging interpretation for horizontal well in Jiangsu Oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2008, 13(6): 55-58.
- [8] 陈元千,汤晨阳,陈奇. 等温吸附量计算方法的推导及应用[J]. 油气地质与采收率,2018,25(6):56-62.
Chen Y Q, Tang C Y, Chen Q. Derivation and application of isothermal adsorption rate calculation method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 56-62.
- [9] 李英杰,左建平,姚茂宏,等. 页岩气超临界等温吸附模型及储量计算优化[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(2):328-338.
Li Y J, Zuo J P, Yao M H, et al. Improved shale gas supercritical isothermal model and the calculation method of geologic reserve [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(2): 328-338.
- [10] 曲鸿雁,彭岩,刘继山,等. 气体吸附对页岩裂缝表观渗透率和页岩气采收率的影响[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(8):891-900.
Qu H Y, Peng Y, Liu J S, et al. Impact of gas adsorption on apparent permeability of shale fracture and shale gas recovery rate [J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(8): 891-900.
- [11] 汪中浩,易觉非,赵乾富,等. 水平井测井资料地质解释应用[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(3):70-72.
Wang Z H, Yi J F, Zhao Q F, et al. Application of geologic interpretation of horizontal well logging data [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26(3): 70-72.
- [12] 吕萍,张永敏. 水平井咨询系统的原理与应用[J]. 测井技术, 2004, 28(5): 455-457.
Lyu P, Zhang Y M. Theory and application of horizontal well advisement system [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(5): 455-457.
- [13] 赵军,海川. 水平井测井解释中井眼轨迹与油藏关系分析技术[J]. 测井技术, 2004, 28(2): 145-147.
Zhao J, Hai C. The analysis technique of relationship between well trajectory and reservoir in horizontal log interpretation [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(2): 145-147.
- [14] 胡松,周灿灿,王昌学,等. 泥页岩油气藏水平井评价对策与实践[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1877-1885.
Hu S, Zhou C C, Wang C X, et al. The strategies and practice of horizontal well evaluation in shale hydrocarbon reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 1877-1885.
- [15] 余义常,徐怀民,江同文,等. 海相碎屑岩水平井隔夹层识别与表征——以哈得逊油田东河砂岩为例[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(6):1400-1411.
Yu Y C, Xu H M, Jiang T W, et al. Identification and characterization of interlayers on horizontal well in marine clastic reservoirs: A case study of Donghe sandstone in Hadeson oilfield, Tarim basin [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(6): 1400-1411.
- [16] 时建超,屈雪峰,雷启鸿,等. 致密油水平井声波时差测井影响因素分析及测井响应特征研究——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7储层为例[J]. 西北大学学报:自然科学版,2017,47(4):585-592.
Shi J C, Qu X F, Lei Q H, et al. The influencing factors and response characteristics of acoustic time logging in tight oil horizontal well: A case study of Chang 7 reservoir in Longdong Area of Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2017, 47(4): 585-592.
- [17] 黄兵,万昕,王明华. 富顺永川区块页岩气水平井优快钻井技术研究[J]. 钻采工艺,2015,38(2):14-16.
Huang B, Wang X, Wang M H. Research on optimized shale gas horizontal well drilling technologies in Fushun-Yongchuan Block [J]. Drilling and Production Technology, 2015, 38(2): 14-16.
- [18] 董大忠,施振生,管全中,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 2018,38(4):67-76.
Dong D Z, Shi Z S, Guang Q Z, et al. Process, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 67-76.
- [19] 王开亮,李凯强,王励坤,等. 四川盆地东缘石柱地区五峰—龙马溪组页岩矿物组分及含气性特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2018,54(3):285-302.
Wang K L, Li K Q, Wang L K, et al. Mineral composition and gas-bearing characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in Shizhu area, eastern Sichuan Basin [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2018, 54(3): 285-302.
- [20] 郭洪志. WY地区页岩气藏测井精细评价[D]. 成都:西南石油大学,2014.
Guo H Z. Comprehensive logging evaluation for shale gas reservoirs in WY area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [21] 熊镠,张超谟,张冲,等. A地区页岩气储层总有机碳含量测井评价方法研究[J]. 岩性油气藏,2014,26(3):74-78+83.
Xiong L, Zhang C M, Zhang C, et al. Research on logging evaluation method of TOC content of shale gas reservoir in A area [J]. Lithology Reservoirs, 2014, 26(3): 74-78+83.
- [22] 袁超,周灿灿,胡松,等. 地层有机碳含量测井评价方法综述[J]. 地球物理学进展,2014,29(6):2831-2837.
Yuan C, Zhou C C, Hu S, et al. Summary on well logging evaluation method of total organic carbon content in formation [J]. Process in Geophysics, 2014, 29(6): 2831-2837.
- [23] 陈祖庆. 海相页岩 TOC 地震定量预测技术及其在应用——以四川盆地焦石坝地区为例[J]. 天然气工业,2014,34(6):24-29.
Chen Z Q. Quantitative seismic prediction technique of marine shale TOC and its application: A case from the Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 24-29.
- [24] 孟召平,郭彦省,刘尉. 页岩气储层有机碳含量与测井参数的

- 关系及预测模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 247-253.
- Meng Z P, Guo Y S, Liu W. Relationship between organic carbon content of shale gas reservoirs and logging parameters and its prediction model [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 247-253.
- [25] 王建国, 李忠刚, 朱智, 等. 基于测井方法的页岩有机碳含量计算[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(3): 170-174.
- Wang J G, Li Z G, Zhu Z, et al. Calculation of the shale TOC extents based on the well logging methods [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3): 170-174.
- [26] 别凡, 万宇, 聂昕, 等. 页岩气储层总有机碳含量测井评价新方法[J]. 测井技术, 2016, 40(6): 736-738.
- Bie F, Wan Y, Nie X, et al. A new method of TOC content evaluation in shale gas reservoirs with log data[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(6): 736-738.
- [27] Passey Q, Creaney S, Kulla J, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [28] Zhao P, Mao Z, Huang Z, et al. A new method for estimating total organic carbon content from well logs [J]. AAPG, 2017, 100(8): 1311-1327.
- [29] Xu J, Li Y, Zhang B, et al. A logging-curve separation scale overlay method for total-organic-carbon estimation in organic-rich shale reservoirs [J]. Interpretation, 2017, 5(3): T387-T398.

A new method for TOC logging evaluation in shale gas for horizontal well

LIU Wei-Nan^{1,2}, ZHANG Chao-Mo¹, ZHU Lin-Qi³, HU Song⁴, KONG Zheng⁵, DENG Rui¹

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Shenzhen Branch, CNOOC China Co., Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China; 4. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield company, SINOPEC, Dongying 257099, China)

Abstract: Due to the lack of layer, the constant change in borehole formation, the fewer logging curves in key intervals, the complex borehole environment, the complex relationship between logging response and reservoir parameters and some other factors, the logging interpretation of horizontal well in shale gas is difficult. Aimed at tackling this problem, the authors adopted the evaluation technique flow of "Formation method of horizontal well logging-Analysis of response differences between horizontal wells and between horizontal and vertical wells-Correction of horizontal well curves-Parameter evaluation method based on vertical wells" to evaluate TOC in shale gas for horizontal wells. In the logging evaluation, in view of the complex response law, the histogram method is used to analyze the logging response law and, in consideration of the fact that there are fewer logging curves for horizontal wells in the logging evaluation, a dual information fusion method is proposed based on combination with curve overlap method so as to comprehensively utilize the logging curve information. The results show that this method can correct horizontal well logging curves based on fully analyzing the logging response differences, and the dual information fusion method has the advantages of full use of logging information, high accuracy of evaluation method and simple operation.

Key words: shale gas; the logging response difference; the correction of logging curves in horizontal well; TOC; dual information fusion

(本文编辑:沈效群)