

引用格式:钟文俊,熊亮,黎鸿,等.测井评价技术在威荣深层页岩气田中的应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):38-46.

Zhong Wenjun, Xiong Liang, Li Hong, et al. Application of log evaluation technology in Weirong Deep Shale Gas Field[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 38-46.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.01.006

测井评价技术在威荣深层页岩气田中的应用

钟文俊,熊亮,黎鸿,董晓霞,周静

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:页岩气储层的岩性、物性、含气性等特征与常规油气藏相比有明显的不同,因此,传统的常规测井技术和解释评价方法不能完全适用。针对威荣深层页岩气田储层地质特征和测井技术系列,在分析龙马溪组页岩储层测井响应特征及“六性”关系研究的基础上,运用“岩心刻度测井”技术以及岩石物理最优化体积模型和回归分析等技术方法,开展了页岩储层地质和工程参数的测井计算方法研究,形成了威荣深层页岩气储层关键参数的计算方法并建立页岩储层测井识别标准,在威荣深层页岩储层评价中取得了较好效果。

关键词:测井解释评价;页岩储层参数;测井响应特征;测井系列;威荣深层页岩气田

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Application of log evaluation technology in Weirong Deep Shale Gas Field

Zhong Wenjun, Xiong Liang, Li Hong, Dong Xiaoxia, Zhou Jing

(Exploration and Development Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The lithology, physical property, gas bearing property and other characteristics of shale gas reservoir are obviously different from those of conventional oil and gas reservoir, so the traditional conventional logging technology and the method of log interpretation can not be fully applicable. According to the geological characteristics and logging technology series of Weirong Deep Shale Gas Field, and based on the research on the logging response characteristics and “six-property” relation of the Longmaxi Formation shale reservoir, using core calibration log technique and petrophysical optimization volume model and regression analysis to carry out the research on the logging calculation method of shale reservoir geological and engineering parameters, form the calculation method of shale gas reservoir key parameters and establish the logging identification standard of shale reservoirs. The application shows that the proposed logging evaluation method has achieved good results in the evaluation of Weirong Deep Shale Reservoir.

Key words: log interpretation evaluation, shale reservoir parameters, logging response characteristics, logging series, Weirong Deep Shale Gas Field

页岩气已成为油气勘探开发的重要领域,测井技术的应用对于解决页岩气地质问题和提高页岩气勘探开发整体效益都有着重要的作用。由于页岩气储层的岩性、物性、含气性等特征与常规油气藏相比

有明显的不同,传统的常规油气测井方法和技术难以适应和满足要求。斯伦贝谢、哈里伯顿等测井公司以及国内一些页岩气田大多采用的页岩气特殊测井系列包括:常规测井加元素俘获测井、岩性扫描测

收稿日期:2020-10-16。

第一作者简介:钟文俊(1982—),女,硕士,工程师,主要从事非常规油气测井解释评价工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail:zhongwenjun.xnyq@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部重大专项“西南探区天然气富集规律与目标评价”(P20059-3);“十三五”国家科技重大专项“南海相页岩气勘探潜力与目标评价”(2017ZX05036-003)。

井、电成像测井、阵列声波测井等。研究、配套相应的测井解释技术和方法,计算页岩储层的岩石学、地球化学、岩石力学等方面的参数,为页岩气地质综合评价和勘探开发部署提供了丰富的基础资料和重要依据^[1-6]。

川南威荣深层页岩细粒沉积、富有机质的特点,决定其测井解释评价属于超致密储层的解释评价范畴,由于实验技术条件的限制,含气饱和度、游离气含量测量不够准确,导致测井精确标定存在难度,矿物组分含量的计算也存在局限性。

针对目前存在的难题,以钻井岩心描述和实验分析数据资料为依据,建立取心井各项分析数据与测井曲线的对应关系,分析优质页岩储层的测井响应特征,应用交会图技术统计分析页岩储层的“六性”之间的关系。在此基础上,运用回归分析、优化的页岩储层岩石物理体积模型等方法,建立了一套适用于威荣深层页岩储层识别和矿物组分、孔隙度、有机碳含量(*TOC*)、含气量以及岩石力学参数等定量计算的测井解释模型。现已应用于页岩气井的测井解释评价,并取得较好效果。

1 页岩储层特征

1.1 页岩储层地质特征

威荣深层页岩气田地理位置位于内江市和自贡市境内,构造主体处于威远背斜构造的斜坡带,以丘陵地貌为主。主要目的层龙马溪组整体处于深水陆棚沉积相带,岩性以黑色含钙硅质页岩(钙质硅质页岩)、黑色含碳页岩(碳质页岩)、灰黑色或灰色粉砂质泥岩为主^[7-8],富有机质页岩^[9](*TOC*≥2.0%)分布范围广,厚度在25~39 m。干酪根类型以I型为主,*TOC*介于0.02%~5.52%,平均约1.89%。有机质成熟度介于1.93%~2.43%,平均约2.26%,演化程度适中,以生成干气为主。储层物性相对较好,孔隙度介于2.02%~10.05%,平均约5.75%;水平渗透率为(0.01~1)×10⁻³ μm²,以特低渗页岩层为主;孔隙类型以基质孔和裂缝为主,发育纳米—微米孔隙,孔隙结构较为复杂,以50~200 nm孔径为主;泥页岩含气性较好,岩心实测总含气量在0.55 m³/t~12.61 m³/t,平均约5.57 m³/t;脆性矿物含量自上而下逐渐增高,脆

性矿物含量介于33%~81%,平均约53.58%,以硅质(石英+长石)为主,钙质(方解石+白云石)次之。整体具有“低泊松比、高杨氏模量”的特征,以X1井优质页岩(*TOC*≥4.0%)为例,其泊松比为0.24,杨氏模量为19.65 GPa,最小水平主应力为92.21 MPa,最大水平主应力为101.32 MPa,水平主应力差异系数较小(8%),压裂较易形成网状裂缝。

1.2 页岩储层测井特征

1.2.1 龙马溪组页岩测井响应特征

纵向上,川南威荣地区五峰—龙马溪组一段页岩测井电性特征可明显划分为3段(图1)。从下往上,第一段(3 813.7~3 849 m)呈4高3低特征,即高自然伽马、高铀、高声波、高电阻率、相对低中子、低密度,低钍铀比,中子曲线挖掘效应明显,具有较高的游离气丰度;第二段(3 795.8~3 813.7 m)的测井响应特征与第一段类似,但中子、密度挖掘效应差,有一定的含气特征;第三段(3 766.7~3 795.8 m)与上述两段差异明显,中子、密度关系颠倒,无明显含气特征。横向上,该地区五峰—龙马溪组特征相似。

1.2.2 优质页岩测井响应特征

1) 高自然伽马和高铀

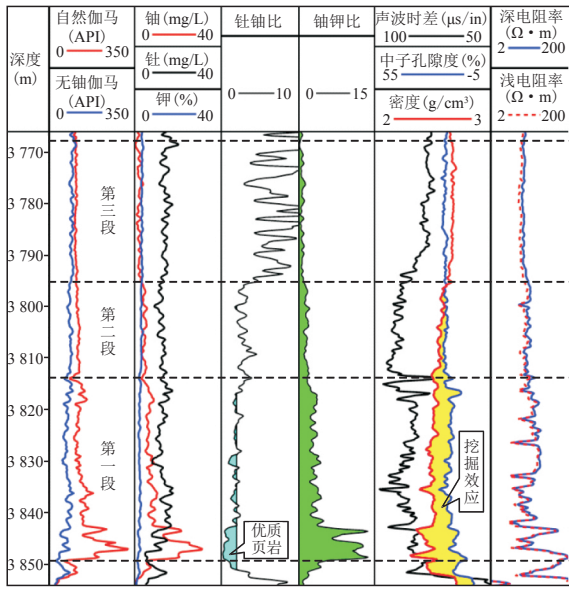
优质页岩气层段富含有机质且易于吸附高放射性铀元素,导致总伽马明显增加、高铀异常,采用总伽马—无铀伽马、铀—钾曲线重叠法能定性指示页岩储层(图1)。

2) 钍/铀比值小于2指示最有利页岩气相带

强还原沉积环境有利于有机质保存,是页岩气储层发育的有利相带。测井钍/铀(*TH/U*)比值反映沉积环境。*TH/U*小于2指示地层沉积环境为强还原环境,对应图1中3 842.8~3 849 m区间,包络面积最大,为优质页岩气层段;*TH/U*介于2~4指示为强还原环境到半还原环境,对应图1中3 795.8~3 842.8 m区间,测井*TH/U*比值包络面积小,为富有机质页岩。

3) 中子曲线呈现强烈“挖掘效应”特征

呈现“挖掘效应”特征是页岩中存在游离气的反映,且电阻率增高,深电阻率相对高阻,密度、中子测井值均减小。高游离气含量是有效开发页岩气的基础,也是优质页岩储层普遍特征(图1)。



注: 1 in=25.4 mm。

图1 威荣深层页岩气田X1井龙马溪组页岩测井响应曲线

Fig. 1 Well logging response curves of Longmaxi Formation in Well-X1 of Weirong Deep Shale Gas Field

4) 层理缝发育,高角度构造缝较少发育

岩心观察、井壁成像测井解释表明,优质页岩气段层理缝发育,而高角度构造缝较少发育。在成像测井图像上,层理缝呈暗色波纹状条带,在电阻率曲线上表现为锯齿状特征。

2 优质页岩储层“六性”关系

页岩气赋存方式和储集空间具有多样性和复杂性,导致页岩储层与常规油气储层测井评价差异较大,传统储层评价的“四性”关系(岩性、物性、电性、含油气性)不能满足页岩储层的评价,由此拓展为“岩石组分特征、物性、地化特性、电性、含气性、可压性”的“六性”关系^[10-11]。

图2所示,TOC与硅质含量、孔隙度、含气量呈正相关关系;含水饱和度与孔隙度呈负相关关系;孔隙度与黏土含量呈负相关关系,与含气量呈正相关关系。测井电性曲线与储层参数的相关性有好有差,其中密度曲线是龙马溪组优质页岩的指示曲线,与TOC、孔隙度、含气量、脆性矿物呈负相关关系,与TOC相关性最好,其次是孔隙度;自然伽马曲线与TOC、孔隙度、黏土矿物含量呈正相关关系;U曲线与

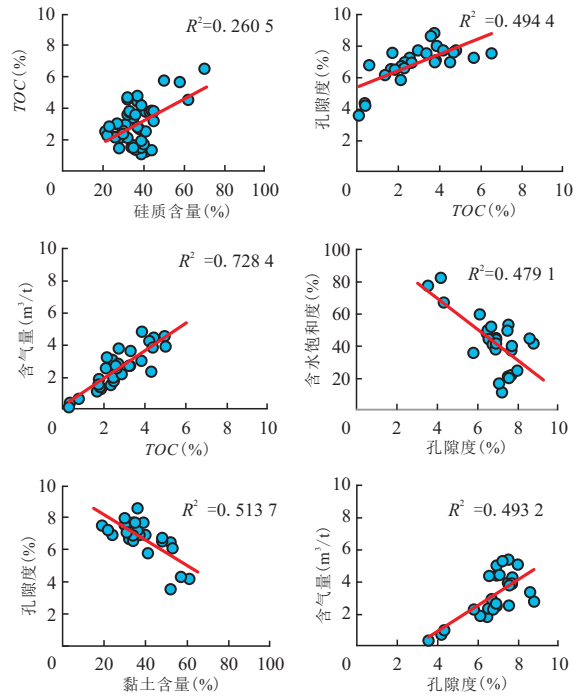


图2 页岩岩心实验分析储层参数相关关系

Fig. 2 Correlation of reservoir parameters by shale core experiment analysis

TOC、孔隙度呈正相关关系,且与TOC相关性最好;声波时差曲线与黏土矿物、孔隙度有一定正相关性;电阻率曲线与脆性矿物含量、黏土含量有一定的负相关性。“六性”关系研究表明,威荣深层页岩气储层岩性、有机地化特性、物性和含气性关系明显。

威荣深层页岩气田X2井页岩储层“六性”关系图中,3 668.3~3 722.5 m井段为优质页岩段(图3),该段从上到下黏土含量降低,脆性矿物升高,脆性指数变大,TOC含量增大,孔隙度与含气量也逐次增大,该井水平井测试获得高产。

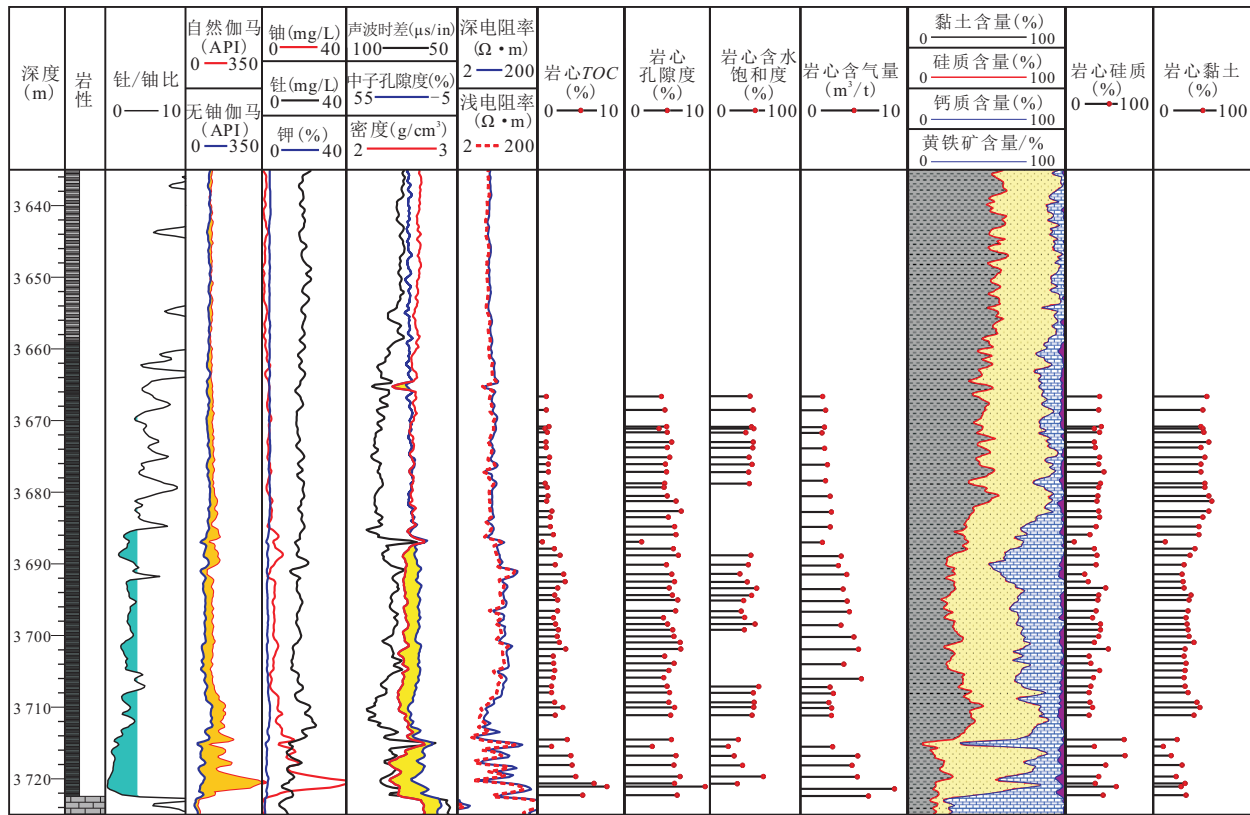
3 页岩储层测井评价技术

3.1 储层地质参数定量评价

3.1.1 有机碳含量

目前,有机碳含量是评价页岩储层烃源岩最为直接的指标,利用测井曲线计算有机碳含量的方法有:ΔlgR法、自然伽马(或自然伽马能谱)法、岩性密度法、多元回归法、岩性扫描测井法等^[12-14]。

为了计算威荣深层地区有机碳含量,选取与



注: 1 in=25.4 mm。

图3 威荣深层页岩气田X2井龙马溪组页岩储层“六性关系”

Fig. 3 Six-property relation of Longmaxi Formation shale reservoir in Well-X2 of Weirong Deep Shale Gas Field

TOC含量最敏感的测井参数(图4),优选出精度最高的多元回归模型:

$$TOC=0.009GR-9.167DEN-0.161CNL+27.134 \quad (R=0.877) \quad (1)$$

式中:TOC为有机碳含量,%;GR为自然伽马,API;DEN为补偿密度,g/cm³;CNL为中子孔隙度,%。

3.1.2 储层物性参数

页岩孔隙包括有机孔隙与无机孔隙,而无机孔

隙又包括黏土孔隙与脆性矿物颗粒孔隙度^[15]。页岩孔隙度的测井常规计算方法主要有以下2种。

1) 通过对不同孔隙度测井曲线的测量原理及与地层敏感程度分析,综合考虑页岩孔隙度组成以及响应参数,以多元回归技术为手段,建立孔隙度测井评价模型:

$$POR=0.061AC+0.12CNL-14.97DEN+37.189 \quad (R=0.8183) \quad (2)$$

式中:POR为孔隙度,%;AC为声波时差,μs/m。

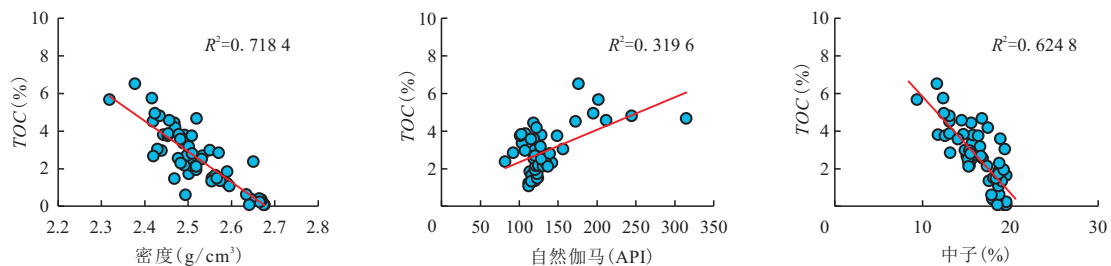


图4 岩心实测有机碳含量与测井曲线关系

Fig. 4 Relation between measured TOC of core and logging curves

2) 基于干黏土骨架参数比较稳定的特点,针对威荣地区不同实验方法测量页岩孔隙度的不确定性,分析主要影响因素,采用基于干黏土、有机质、非黏土骨架和孔隙流体体积模型,利用密度、中子、声波等测井信息,建立测井响应方程组,确定总孔隙度^[16]。

3.1.3 矿物组分含量

页岩中脆性矿物类型与含量、以及黏土类型与含量,对页岩储层改造和开采尤其重要。本文研究区页岩矿物组分含量(w)的测井评价有3种方法。

1) 利用对岩性敏感的测井资料建立基于多测井因素的地区经验多元回归模型:

$$w = aGR + bAC + cCNL + dDEN + e \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 分别是 GR 、 AC 、 CNL 、 DEN 的待定系数; e 是常数项。

2) 基于体积模型,确定敏感测井信息和特定矿物或有机质之间的定量关系,建立地质约束最优化模型测井响应方程式,求最优化解^[17]。

3) 采用斯伦贝谢岩性扫描测井(Lithoscanner),可同时采集俘获谱和非弹谱,每个谱的结果被转换成元素干重含量,由此解释确定矿物成分含量^[18]。

3.1.4 含气量评价

页岩孔隙中的天然气是自生自储,有吸附气和游离气2种相态。游离气以游离状态赋存于页岩孔隙和裂缝之中,吸附气则吸附于页岩干酪根(或黏土矿物)表面,页岩总含气量是二者之和^[19-22]。

吸附气含量由以下2种方法求得。

1) 采用兰格缪尔(Langmuir)等温吸附方程式。利用等温吸附实验得到的Langmuir参数,将实验数值校正到地层压力下,再利用校正之后的数据点同 TOC 实验分析数据建立吸附气含量计算模型:

$$G_x = V_L P / (P_L + P) \quad (4)$$

式中: G_x 为吸附气含量, m^3/t ; V_L 为朗氏体积, m^3 ; P 为地层压力,MPa; P_L 为朗氏压力,MPa。

2) 考虑到有机质含量是吸附气含量的主要控制因素,依据等温吸附实验结果,结合储层实测的有机质含量,建立吸附气含量与有机质之间的定量关系(图5):

$$G_x = 0.7592 \times TOC + 1.258 \quad (R = 0.9658) \quad (5)$$

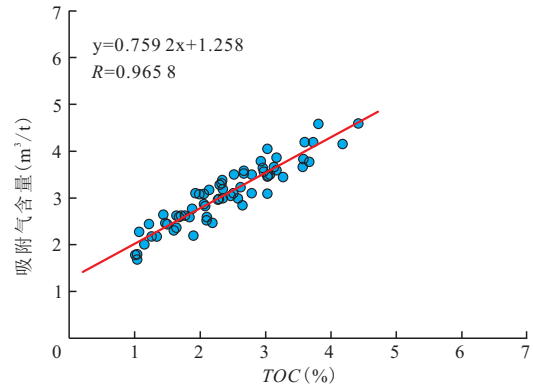


图5 威荣深层页岩气田龙马溪组页岩吸附气含量与 TOC 含量关系

Fig. 5 Relation between adsorbed gas content and TOC of Longmaxi shale in Weirong Deep Shale Gas Field

3.2 储层工程参数评价

3.2.1 岩石力学参数计算

页岩储层岩石力学参数评价主要涉及泊松比、杨氏弹性模量,利用地层的纵横波时差和密度等测井资料可计算得到动态弹性参数^[23-24]。

杨氏模量:

$$E_d = \rho_b v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2) / (v_p^2 - v_s^2) \quad (6)$$

泊松比:

$$\mu_d = (v_p^2 - 2v_s^2) / (2v_p^2 - 2v_s^2) \quad (7)$$

在应力幅值、加载速度和所引起的岩石变形等方面,地下岩层应力更接近岩石静态测试的条件,在地应力计算和实际工程中应采用岩石的静态弹性参数。动/静态杨氏模量转换方法:

$$\lg(E_s \times 10^{-3}) = a \times \lg(\rho_b E_d \times 10^{-3}) + b \quad (8)$$

式(6)~(8)中: E_d 为动态杨氏模量,MPa; ρ_b 为岩性密度, g/cm^3 ; v_s 为横波时差, $\mu s/m$; v_p 为纵波时差, $\mu s/m$; μ_d 为动态泊松比; E_s 为静态杨氏模量,MPa; a 、 b 为动/静态杨氏模量转换地区经验系数。

3.2.2 脆性指数评价

脆性指数是评价页岩可压裂性的重要参数,目前,计算脆性指数的方法有以下2种。

1) 岩石矿物组份法

先算出各矿物组分含量,再用式(9)计算脆性指数:

$$Brit1 = 100\% \times [w(S) + w(Ca)] / [w(S) + w(Ca) + w(Clay)] \quad (9)$$

式中: $Bri1$ 为脆性指数,%; $w(S)$ 为硅质矿物百分含量,%; $w(Ca)$ 为钙质矿物百分含量,%; $w(Clay)$ 为黏土矿物百分含量,%。

2) 偶极声波计算法

将计算出的动态泊松比和动态杨氏模量单位进行均一化处理,然后平均产生百分数表示脆性系数。根据改进的Rickman公式计算出脆性指数,该方法得到的脆性指数也叫可压裂指数^[25]:

$$Brit2=(BI_v+BI_p)/2 \quad (10)$$

式中: $Brit2$ 为脆性指数(可压裂指数); BI_v 为均一化后的静态杨氏模量均值; BI_p 为均一化后的静态泊松比均值。

3.2.3 裂缝评价

页岩储层裂缝的识别和有效性评价一直是个难题。常规测井方法识别页岩裂缝,不同类型的裂缝,测井曲线响应敏感程度也不同,声电成像、核磁共振等特殊测井在储层裂缝识别和有效性评价中发挥了重大作用^[26-27]。威荣区块电成像测量井段解释的裂缝类型主要有高阻缝、高导缝、微断层、钻井诱导缝。X1井高导缝和高阻缝是以构造作用为主的天然裂缝,主要发育在龙马溪组非储层段。高导缝的裂缝间隙未被方解石等高阻矿物充填,为有效缝,对储层的改造有重要作用,在FMI图像(地层微电阻率扫描成像)上呈现出暗黑色正弦曲线。高阻缝裂缝间隙被方解石等高阻矿物部分或半充填,有效性差,FMI图像上呈现亮黄色。统计结果显示,X1井高导缝倾角集中在 $8^\circ \sim 48^\circ$,为低—中角度裂缝,倾向为

NNE方向;微断层走向与高导缝走向较为一致,近NEE—SWW方向(图6)。

3.2.4 地应力评价

地应力在空间上可用3个主应力表示:垂向主应力(S_v)、水平最大主应力(S_H)和水平最小主应力(S_h)。垂向主应力是由上覆岩层压力(P_o)确定的,由密度测井资料求得。水平方向的主应力由2部分构成:一是上覆岩层压力引起,是岩石泊松比的函数;二是由地质构造应力引起,与岩石泊松比无关^[25,28]。

利用电成像测井资料研究地应力方向的方法有2种:一是根据诱导缝走向进行分析,二是根据井眼崩落特征进行分析。基于横波各向异性的地应力方向分析,是在横波提取基础上,对横波进行分离,得到快、慢横波速度及方位,快、慢横波的差异程度代表了地层各向异性程度,各向异性的方位通常指快横波方位,快横波的方位常常代表裂缝发育方位,当裂缝由地应力不均诱导产生时,各向异性方位代表了最大主应力方位。如图7所示,X1井最大主应力方位为近东西向。

4 测井综合评价实例分析

4.1 优质页岩储层测井识别标准

由于威荣地区页岩气测井响应特征具有明显的“四高三低”特征,电阻率高阻共存,呈锯齿状特征,中子测井出现明显的气层“挖掘效应”特征,参照中国石化龙马溪组页岩气储层评价标准,将威荣深

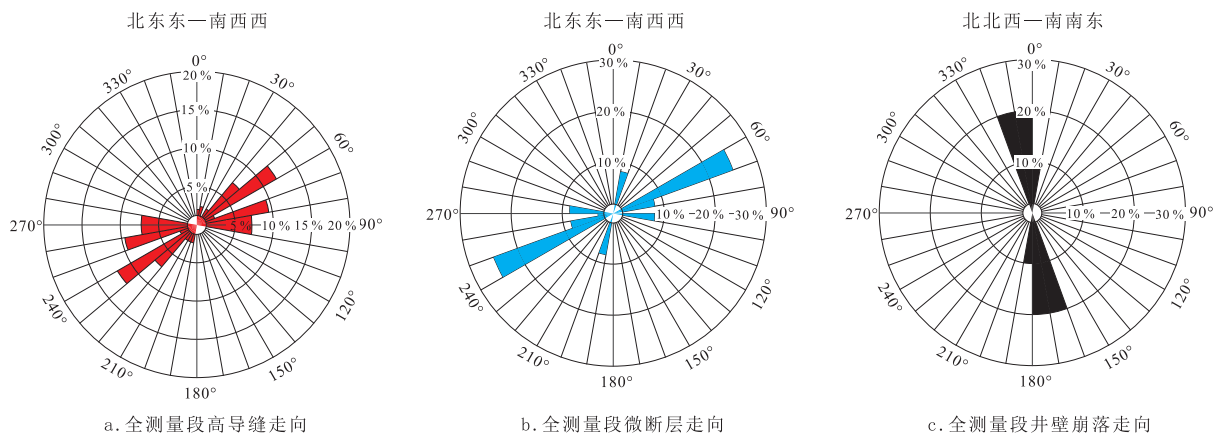
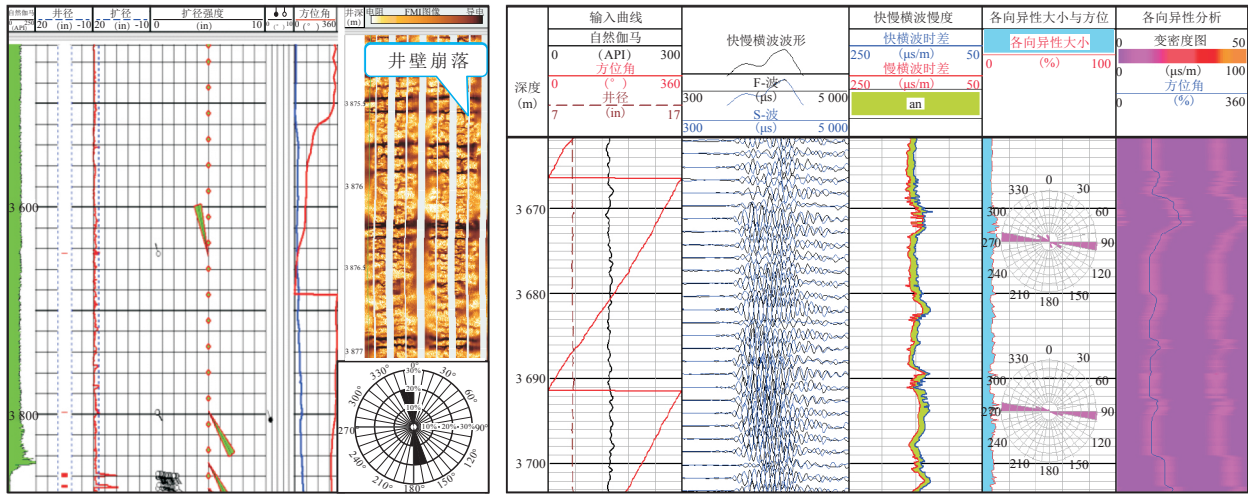


图6 威荣深层页岩气田X1井龙马溪组页岩裂缝评价

Fig. 6 Evaluation of shale fracture of Longmaxi formation in Well-X1 of Weirong Deep Shale Gas Field



注:1 in=25.4 mm。

图7 威荣深层页岩气田X1井FMI结合偶极声波测井评价龙马溪组地应力方位

Fig. 7 Evaluation of stress orientation of Longmaxi formation by FMI combined with cross-dipole acoustic logging in Well-X1 of Weirong Deep Shale Gas Field

层页岩气田页岩储层划分为I、II、III类,排除井眼、钻井液侵入等因素对测井响应的影响,确定这3类页岩气层定性识别标准(表1)。

4.2 应用实例分析

X1井是威荣深层页岩气田的一口开发评价井,利用常规测井、电成像、偶极、岩性扫描测井资料,结合岩心实验分析,对该井志留系龙马溪组下部—奥陶系五峰组页岩层段进行了测井综合评价(图8)。

综合X1井各参数指标来看,该井龙马溪组共解释53.2 m页岩气储层,其中脆性矿物含量48%~77%,平均为56.9%;黏土含量19%~48%,平均为38%;孔隙度4.5%~7.5%,平均为5.4%;TOC含量1.5%~6.1%,平均为2.8%;游离气含量2.3 m³/t~10.2 m³/t,平均为4.5 m³/t;总含气量4.8 m³/t~14.5 m³/t,平均为7.4 m³/t。其中,底部(3 813.7~3 849 m)总含气量最高,储层厚度达35.3 m,是最有潜力的页岩气藏发育层段,电成像测井显示该段微裂缝较发育;偶

极横波各向异性分析最大主应力方向为北东东—南西西。选取I类优质页岩气层段3 842.8~3 849 m作为该井1 500 m水平段靶窗,实钻优质储层钻速率为100%,对水平段分20段进行射孔和大型压裂,在井口套压稳定在35.4 MPa下,获产26×10⁴ m³/d,钻探的多口页岩气井均获高产工业气流。目前,威荣深层页岩气田已提交1 246.78×10⁸ m³探明储量,显示出良好的勘探开发前景。

5 结论

- 1) 威荣深层页岩气田探井采用常规综合测井加测元素俘获测井及岩性扫描测井、电成像测井、阵列声波测井等特殊测井的页岩气测井系列基本满足页岩储层参数测井解释评价需要。
- 2) TOC含量、孔隙度、含气量、脆性指数等是页岩储层评价的关键参数,富含有机质是形成优质页岩储层的基础,TOC含量与孔隙度、含气量和脆性指

表1 威荣深层页岩储层测井识别标准

Table 1 Logging identification standard of Weirong deep shale reservoir

储层类别	自然伽马 (API)	铀 (mg/L)	铀/钾	电阻率 (Ω·m)	钍/铀	密度 (g/cm ³)	中子 (%)	备注
I	≥130	≥10	≥4	≥20	≤2	≤2.50	≤17	中子有明显挖掘效应,中子、密度有较大的包络面积,电阻率呈高低阻相间的锯齿状
II	110~130	2~10	1~4	13~20	2~4	2.50~2.65	17~20	中子有挖掘效应,中子、密度有一定的包络面积,但小于I类页岩储层段,电阻率变化较小
III	<110	<2	<1	<13	>4	>2.65	>20	与I、II类页岩相比,中子、密度包络关系反转,电阻率值较低且相对稳定

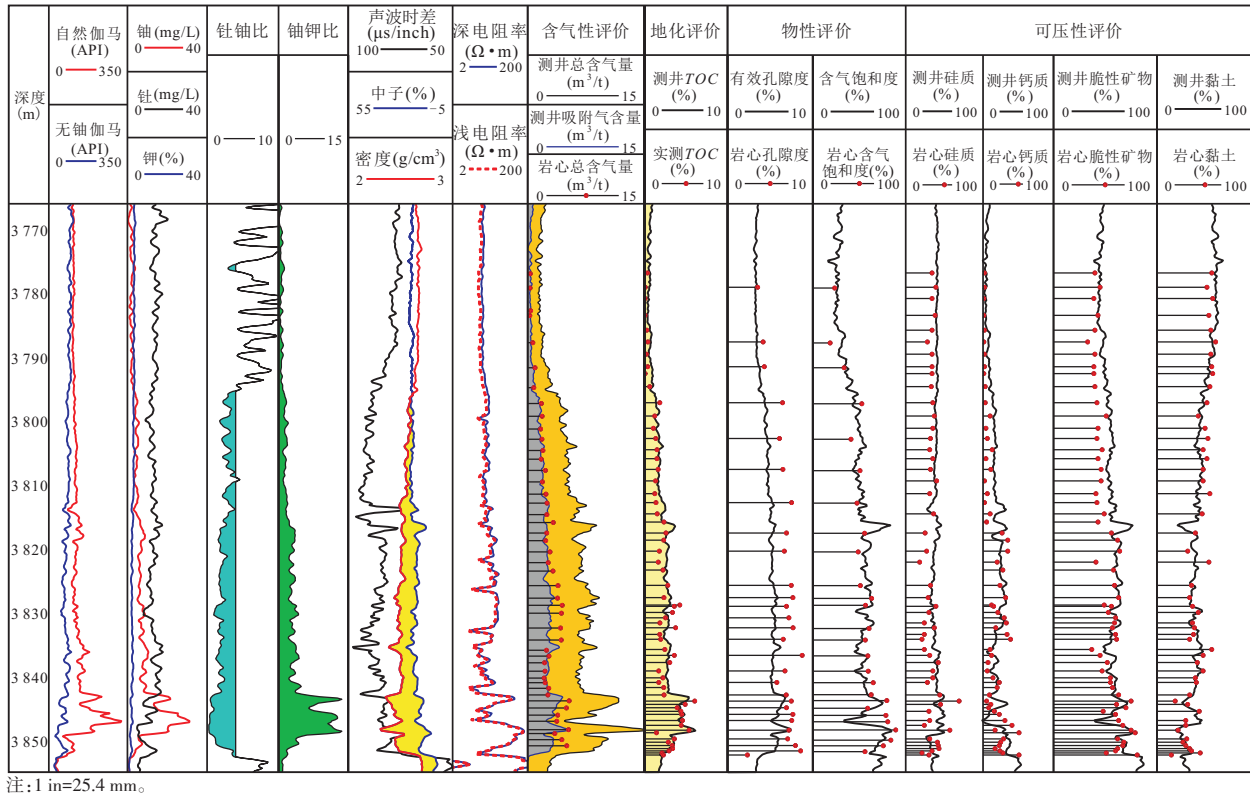


图8 威荣深层页岩气田X1井龙马溪组页岩气综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of Longmaxi formation shale gas in Well-X1 of Weirong Deep Shale Gas Field

数均呈正相关关系。

3) 运用交会图、回归分析、优化的页岩储层岩石物理体积模型等方法可以有效识别页岩储层并建立储层评价参数的测井解释模型。建立的威荣深层页岩气储层测井解释模型在该区实际生产应用中取得了较好的效果。

参考文献

[1] GB/T 31483—2015. 页岩气地质评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 31483—2015. Geological evaluating methods for shale gas[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.

[2] 樊晓伊, 姚光庆, 赵乾辰, 等. 页岩储层有机碳含量测井定量评价方法对比研究——以X地区研究为例[J]. 石油地质与工程[J], 2017, 31(2): 48-52.
Fan Xiaoyi, Yao Guangqing, Zhao Qianchen, et al. Comparative study on logging quantitative evaluation methods of organic carbon content in shale reservoir: A case from area X[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(2): 48-52.

[3] 路菁, 李军, 武清钊, 等. 页岩油气储层有机碳含量测井评价方法研究及应用[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(6): 143-147.
Lu Jing, Li Jun, Wu Qingzhao, et al. A study and an application on logging evaluation method of TOC in shale oil and gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(6): 143-147.

[4] 李军, 武清钊, 路菁, 等. 页岩气储层总孔隙度与有效孔隙度

测量及测井评价——以四川盆地龙马溪组页岩气储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 602-609.

Li Jun, Wu Qingzhao, Lu Jing, et al. Measurement and logging evaluation of total porosity and effective porosity of shale gas reservoirs: A case from the Silurian Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 602-609.

[5] 王燕, 冯明刚, 严伟, 等. 计算页岩气储层矿物成分含量的新方法: 黏土视骨架密度法——以涪陵页岩气田为例[J]. 海相油气地质[J], 2016, 21(4): 67-72.
Wang Yan, Feng Minggang, Yan Wei, et al. A method of calculating percent of mineral composition in gas reservoir by apparent skeleton density of clays: A case of Lower Silurian Longmaxi Gas-bearing Shale Reservoir in Fuling Gas Field, Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2016, 21(4): 67-72.

[6] Wang H Y, Shi Z S, Zhao Q, et al. Stratigraphic framework of the Wufeng-Longmaxi shale in and around the Sichuan Basin, China: Implications for targeting shale gas[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(3-4): 124-133.

[7] 同学洪, 曹春锋, 王慧. 岩性扫描测井资料处理解释方法研究与应用[J]. 测井技术, 2018, 42(5): 503-508.
Yan Xuehong, Cao Chunfeng, Wang Hui. Research and application on processing and interpretation of litho scanner logging data[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 503-508.

[8] Nie H K, Li D H, Liu G X, et al. An overview of the geology and

- production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3-4): 147-164.
- [9] 熊亮,魏力民,史洪亮.川南龙马溪组储层分级综合评价技术及应用——以四川盆地威荣深层页岩气田为例[J].*天然气工业*, 2019, 39(S1): 60-65.
Xiong Liang, Wei Limin, Shi Hongliang. Reservoir classification comprehensive evaluation technology and application of Longmaxi formation in southern Sichuan: A case from in Weirong Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(S1): 60-65.
- [10] 魏斌,邹长春,李军,等.页岩气测井方法与评价[M].上海:华东理工大学出版社,2016.
Wei Bin, Zou Changchun, Li Jun, et al. Shale gas logging method and evaluation[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2016.
- [11] 孙建孟,刘坤,王艳,等.泥页岩储层裂缝识别与有效性评价研究[J].*测井技术*, 2015, 39(5): 611-616.
Sun Jianmeng, Liu Kun, Wang Yan, et al. Fracture identification and effectiveness evaluation research of shale reservoir[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 39(5): 611-616.
- [12] 李启翠,楼一珊,史文专,等.FMI成像测井在四川盆地页岩气地层中的应用[J].*石油地质与工程*, 2013, 27(6): 58-60.
Li Qicui, Lou Yishan, Shi Wenzhuan, et al. Application of FMI imaging logging in shale gas formation of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2013, 27(6): 58-60.
- [13] 陶小锋,潘仁芳.长宁地区龙马溪组页岩气储层测井解释评价[J].*重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2016, 18(2): 22-26.
Tao Xiaofeng, Pan Renfang. Logging interpretation of gas shale reservoir in Longmaxi Formation of Changning Area[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2016, 18(2): 22-26.
- [14] 陈四平,谭判,石文睿,等.涪陵页岩气优质储层测井综合评价方法[J].*石油钻探技术*, 2020, 48(4): 131-138.
Chen Siping, Tan Pan, Shi Wenrui, et al. A comprehensive logging evaluation method for high quality shale gas reservoirs in Fuling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 131-138.
- [15] 鞠玮,牛小兵,冯胜斌,等.页岩油储层现今地应力场与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J].*中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 931-940.
Ju Wei, Niu Xiaobing, Feng Shengbin, et al. The present-day in-situ stress state and fracture effectiveness evaluation in shale oil reservoir: A case study of the Yanchang formation Chang 7 oil-bearing layer in the Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(5): 931-940.
- [16] 钟光海,陈丽清,廖茂杰,等.页岩气储层品质测井综合评价[J].*天然气工业*, 2020, 40(2): 54-60.
Zhong Guanghai, Chen Liqing, Liao Maojie, et al. A comprehensive logging evaluation method of shale gas reservoir quality[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 54-60.
- [17] 冷玥,赵迪斐,郭英海,等.页岩气储层测井评价技术研究与应用现状[J].*非常规油气*, 2019, 6(6): 117-123.
Leng Yue, Zhao Difei, Guo Yinghai, et al. The application status of shale gas reservoir logging evaluation[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(6): 117-123.
- [18] 夏宏泉,刘畅,王瀚玮,等.页岩含气量测井评价方法研究[J].*特种油气藏*, 2019, 26(3): 1-6.
Xia Hongquan, Liu Chang, Wang Hanwei, et al. Logging evaluation of shale gas content[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2019, 26(3): 1-6.
- [19] 张梦吟.页岩气水平井含气性定量评价方法研究——以涪陵页岩气田为例[J].*海相油气地质*, 2019, 24(1): 78-84.
Zhang Mengyin. Quantitative evaluation method of gas content for shale gas horizontal well: A case study of Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(1): 78-84.
- [20] 廖东良,路保平,陈延军.页岩气地质甜点评价方法——以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J].*石油学报*, 2019, 40(2): 144-151.
Liao Dongliang, Lu Baoping, Chen Yanjun. An evaluation method of geological sweet spots of shale gas reservoir: A case study of the Jiaoshiba gas field, Sichuan Basin[J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2019, 40(2): 144-151.
- [21] 何羽飞,王金彬,于小龙,等.基于测井资料的页岩含气量定量评价[J].*测井技术*, 2018, 42(6): 667-671.
He Yufei, Wan Jinbin, Yu Xiaolong, et al. Quantitative evaluation of shale gas content based on logging data[J]. *Well Logging Technology*, 2018, 42(6): 667-671.
- [22] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shalegas resources[C]// paper SPE-131768-MS presented at the SPE Unconventional Gas conference, 23-25 February, 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [23] Li Y Z. Mechanics and fracturing techniques of deep shale from the Sichuan Basin, SW China[J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(1): 1-9.
- [24] Mohammad R K, Ahad A M. Total organic carbon content determined from well logs using $\Delta\log R$ and neuro fuzzy techniques[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 45(3): 141-148.
- [25] Lucier A M, Hofmann R, Bryndzia L T. Evaluation of variable gas saturation on acoustic log data from the Haynesville shale gas play, NW Louisiana, USA[J]. *The Leading Edge*, 2011, 30(3): 300-311.
- [26] Kethireddy N, Heidari Z, Chen H Y. Quantifying the effect of kerogen on electrical resistivity measurements on organic-rich source rocks[C]// paper SPWLA-2013-NN presented at the SPWLA 54th Annual Logging Symposium, 22-26 June, 2013, Orleans, Louisiana..
- [27] Panjaitan M L, Moriyama A, Mcmillan D, et al. Qualifying diversion in multi clusters horizontal well hydraulic fracturing in Haynesville Shale using water hammer analysis, step-down test and microseismic data[C]// paper SPE-189850-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 23-25 January, 2018, The Woodlands, Texas, USA.
- [28] Jiang YQ, Fu YH, Xie J, et al. Development trend of marine shale gas reservoir evaluation and a suitable comprehensive evaluation system[J]. *Natural Gas Industry B*, 2020, 7(3): 205-214.

(编辑 余聪)