

致密砂岩裂缝测井识别特色技术及其应用效果 ——以四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段为例

刘志远,李浩,武清钊,南泽宇,苏俊磊,金武军

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:裂缝是致密砂岩储层高产、稳产的一个关键因素,由于受常规测井分辨率低、致密砂岩岩性和物性变化快以及裂缝发育规模小且产状多变等因素影响,常规测井裂缝识别符合率偏低。以川西坳陷新场气田须家河组二段致密砂岩为例,在总结区域裂缝类型和裂缝测井响应特征的基础上,创新性地提取电阻率降低因子和时差增大因子等多种裂缝敏感因子,以及电阻率维度与声波速度约束指标,在放大裂缝信号的同时压制干扰影响,并首次采用灰色关联确定敏感因子权重系数,加权计算裂缝指示曲线,利用阈值约束实现裂缝识别,进一步通过与裂缝响应模式库对比,聚类识别裂缝类型。与X5和X101等5口井电成像对比,裂缝识别符合率达到90%以上,为研究致密砂岩裂缝展布规律、储层类型评价以及产能预测等提供了可靠依据。

关键词:裂缝敏感因子;灰色关联;常规测井;裂缝识别;致密砂岩;新场气田;川西坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and application effect of logging-based fracture identification in tight sandstones: A case study of the Upper Triassic Xu 2 Member in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Liu Zhiyuan, Li Hao, Wu Qingzhao, Nan Zeyu, Su Junlei, Jin Wujun

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Fractures are a key factor for high and stable production of tight sandstone reservoirs. The coincidence rate of fracture identification based on conventional logging is, however, low, due to the low resolution of conventional logging, rapid change of lithology and physical properties of tight sandstone, small-scale fractures with variable occurrences. Based on the concluded regional fracture types and fracture logging response characteristics, we innovatively extract multiple factors sensitive to fracture such as resistivity reduction and moveout augmentation in the tight sandstone of the second member of Xujiahe Formation (hereinafter referred to as Xu 2 Member) in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression. Furthermore, resistivity dimension and acoustic dimension constraint index are selected to suppress the interference effect with the amplification of fracture signals; and the gray correlation is applied for the first time to determine the weight coefficient of sensitive factors, the fracture indication curve is calculated by weighting, and the threshold constraint is used to identify fractures. In comparison with the fracture response pattern library, the fracture type is identified by clustering. In comparing with electric imaging data of the 5 wells including Wells X5 and X101, the coincidence rate of fracture identification reaches up to more than 90%, providing a favorable basis for the study of fracture distribution pattern, reservoir type evaluation and productivity prediction of tight sandstones.

Key words: fracture sensitivity factor, grey correlation, conventional logging, fracture identification, tight sandstone, Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

致密砂岩是指孔隙度小于10%、覆压基质渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩^[1-2],在中国分布广泛,特别是在四川盆地、鄂尔多斯盆地陆相地层。其中,致密

油可采资源量达到 $(10 \sim 20) \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$,天然气可采资源量达到 $(8.8 \sim 12.1) \times 10^{12} \text{ m}^{[4]}$,是中国最具潜力的油气资源。致密砂岩中常发育裂缝,而裂缝不但是致

收稿日期:2020-10-12;修订日期:2021-01-13。

第一作者简介:刘志远(1974—),男,高级工程师,测井评价。E-mail:liuzy.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化重大科技攻关项目(P18089-2, P21040-4)。

密砂岩油气储集与运移的重要通道,更是这类储层能否获得高产及稳产的重要因素^[5-9]。准确识别井点上的裂缝,可以为搞清致密砂岩中裂缝分布、寻找致密砂岩甜点与有效开发提供有利的依据。

电成像是识别裂缝的有效方法^[10-14],但由于电成像价格高、测速慢,在实际生产中应用并不广泛。利用常规测井识别裂缝很早就被提出并被持续研究,J. 苏等人采用孔隙度与微球形聚焦电阻率交会识别裂缝^[15],孙建孟采用曲线变化率法和孔隙结构指数法等方法识别裂缝^[16],谭海芳提出通过孔隙度差值、电阻率下降、声波时差增大和变密度异常等指示裂缝^[17],赵永刚提出基于井径、电阻率、密度和声波等常规测井曲线计算出8个裂缝指示参数,构建裂缝综合识别参数进行裂缝识别^[18]。由于受常规测井分辨率低、致密砂岩段岩性和物性变化快以及裂缝发育规模小且产状多变等因素影响,裂缝识别难度较大^[19-20],严重影响了致密砂岩气藏评价与有效开发。因此,有必要进一步探索利用常规测井识别致密砂岩裂缝的方法。

本文以川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段

致密砂岩为例,依据岩心、电成像和生产测试等一手资料明确裂缝层段,搞清裂缝常规测井响应特征,通过提取多个裂缝敏感参数,采用灰色关联识别裂缝,模式聚类识别裂缝类型,取得了较好的应用效果,研究成果对致密砂岩新井投产方案设计、老井挖潜、储层类型评价和产能预测等具有积极意义。

1 研究区概况

川西坳陷位于龙门山冲断带与龙泉山隆起带所限定的四川盆地西部,是晚三叠世以来形成的叠覆型盆地,坳陷呈现“三隆两凹一坡”的构造格局^[21],即龙门山前构造带、新场构造带、知新场构造带、成都凹陷、梓潼凹陷和中江斜坡。新场气田处于川西坳陷中段NEE向新场构造带上,是从晚三叠世以来经历了多期构造运动的复合大型隆起带^[22-23](图1),气田位于该构造带西部,整体上表现为NWW向构造,南陡北缓。

四川盆地自元古宙—新生代沉积有巨厚的海—陆两相岩层,须家河组为晚三叠世海—陆过渡相与早期

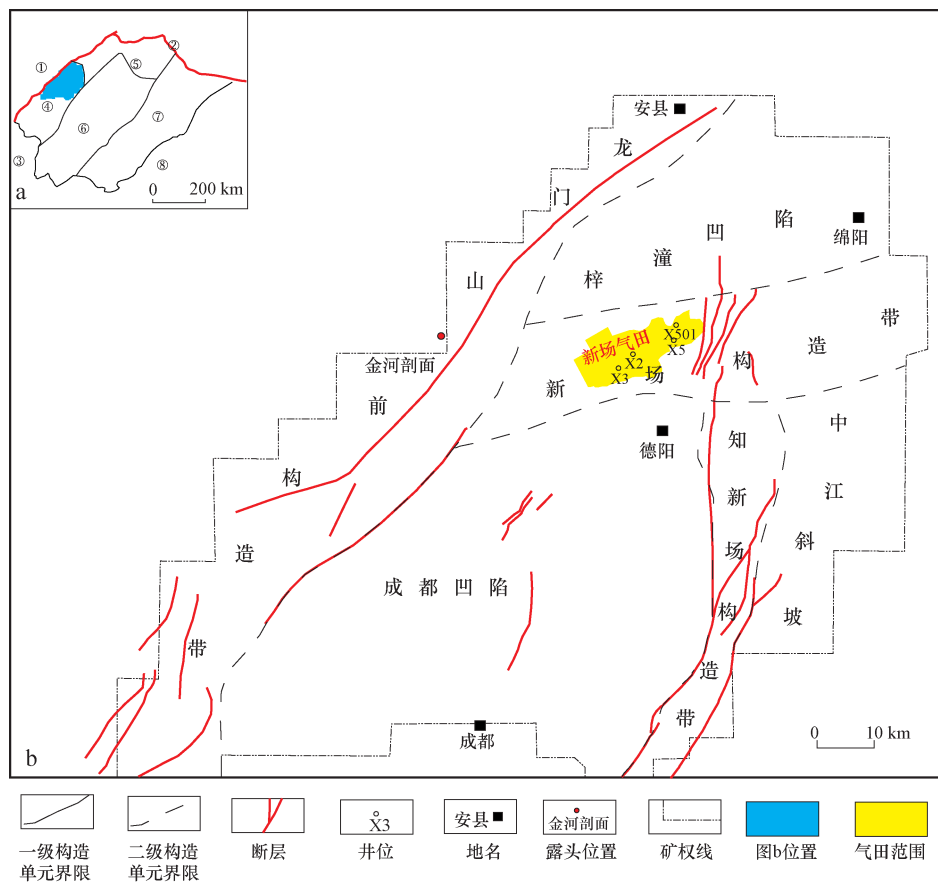


图1 川西坳陷北部构造位置

Fig. 1 Structural location of the north part of the Western Sichuan Depression

a. 四川盆地构造简图; b. 川西坳陷北部构造简图与新场气田所在位置

①龙门山断裂; ②米仓-大巴山冲断带; ③康滇古陆; ④川西坳陷; ⑤川北坳陷; ⑥川中低缓构造带; ⑦川东断褶带; ⑧古隆起

陆相沉积,该时期川西拗陷处于龙门山类前陆盆地的前缘拗陷带沉降和沉积中心^[24-25],存在西部龙门山、东部川中古隆起以及北部米仓山-大巴山造山带等多个物源。纵向上须家河组可分为5段,其中须二段早中期主要为三角洲-湖泊沉积体系,后期河道发育,发育数个规模较大的辫状河三角洲沉积体系,这使得新场地区须二段沉积厚度较大(钻厚560~660 m),中、上部地层岩性以厚层细粒岩屑砂岩为主,砂体单层厚度平均可达70 m,下部主要为砂岩和泥页岩互层,砂体中常夹有泥质条带和煤层(线)。

须二段砂体物性致密,孔隙度主要分布在2.5%~4.5%,基质渗透率差,普遍低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但局部也存在孔隙较发育层段,如新203井部分岩心孔隙度达到9%,渗透率达 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

受多期构造运动的影响,砂体中裂缝发育^[26-27],岩心多见低角度裂缝(图2a),局部见高角度裂缝。低角度裂缝密度较大,部分岩心呈薄饼状,但开度小,常有次生方解石、次生石英等填充。高角度裂缝密度相对较低,裂缝开度相对较大,呈填充-半填充状(图2b)。

邻近的什邡金河剖面露头显示(图2c),须家河组厚层岩屑砂岩中发育大型低角度裂缝组合,其中2条大开度低角度裂缝稳定发育,裂缝开度大、延伸长,但裂缝密度低,其周围发育大量的伴生裂缝,这些伴生裂缝虽裂缝密度大,但开度小,产状复杂多变。

2 裂缝测井响应特征

裂缝为连续或不连续的面状非均质储集空间,其中充注有油气和地层水等原始流体。由于钻井过程中采用井筒压力大于地层压力钻井,钻井液会沿着张开裂缝侵入地层,驱替其中的原始流体。测井时,缝间流体、裂缝产状、裂缝密度、开度和填充程度等因素都会

对测井仪器响应造成不同程度的影响,部分测井系列响应较为明显。

2.1 电阻率测井响应

裂缝对侧向系列电阻率测井影响较大。由于工区内钻井液主要采用水基泥浆,导电性较好,侵入裂缝的泥浆与地层形成并联导电^[28],造成裂缝段电阻率较之邻近相似无缝地层突变降低,特别是在高阻背景条件下(图3,深度4 955~4 960 m)。裂缝数值模拟^[29]显示,裂缝段电阻率降低程度与裂缝张开度、裂缝内泥浆矿化度、背景电阻率等因素呈正比,而与裂缝填充程度呈反比。

双侧向幅度差异也受裂缝影响,主要是由于深、浅侧向探测深度不同,裂缝-地层并联导电系统中裂缝影响存在差异^[30],网状缝与高角缝的双侧向表现为明显的正差异特征,而低角缝双侧向基本重合。

造成电阻率降低的并非只有裂缝,孔隙发育、泥质条带甚至岩石粒度变细也会造成电阻率降低(图4,深度5 006~5 011 m)。引起双侧向正差异的也不仅仅只有天然裂缝,钻井过程中形成的钻井诱导缝、泥浆压裂缝和应力释放缝等人工诱导裂缝,甚至井眼严重扩径也会造成双侧向正差异。图5中应力释放造成局部井壁崩落引起大段双侧向正差异现象。

2.2 补偿声波测井响应

声波时差对裂缝的响应随裂缝倾角的不同而存在较大差异,这是由于在补偿声波测量过程中,滑行波沿井壁表层传播^[31]。对于低角缝、斜交缝以及裂缝破碎带,滑行波在裂缝面发生反射、折射,波形幅值衰减明显^[32],幅值衰减可导致首波波至触发后延,甚至周波跳跃,引起声波时差明显增大。而对于高角缝与垂直缝,由于大部分滑行波不受裂缝影响^[28],声波时差整体变化不大。



图2 川西拗陷新场气田须二段致密砂岩岩心与露头裂缝照片

Fig.2 Photos showing the tight sandstone core and outcrop fractures of the Upper Triassic Xu 2 Member in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

a. X5井,层理缝密集发育段,埋深4 962.11~4 962.35 m; b. L150井,致密砂岩高角缝发育段,埋深4 731.12~4 731.52 m; c. 金河剖面,厚层岩屑砂岩,砂体中发育大型低角缝组合

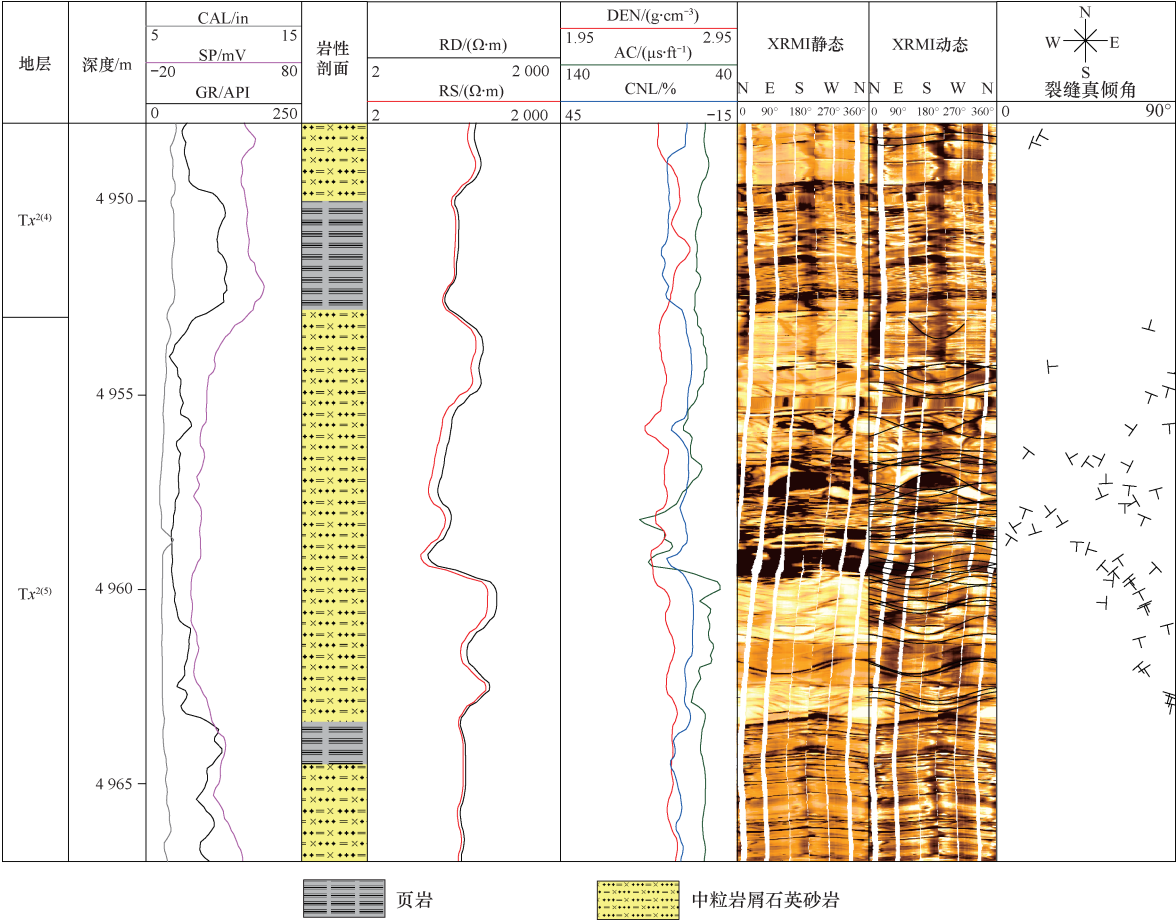


图 3 川西坳陷新场气田 X3 井须二段裂缝破碎带双侧向电阻率测井响应特征
Fig. 3 Resistivity response characteristics of Dual Lateral Logging (DLL) in Well X3 in the fractured zone of the Upper Triassic Xu 2 Member in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

裂缝声波模拟表明^[33],低角缝开度越大,声波幅值衰减越明显,引起的声波时差增大特征也越明显。图 3 中 X3 井 4 957.5 ~ 4959.5 m 深度裂缝破碎带的声波时差较相邻未发育裂缝段明显增大,而在裂缝发育相对稀疏的 4 955.0 ~ 4 956.5 m 深度,声波时差增大程度不及下部裂缝破碎带。

2.3 自然电位测井响应

对于自然电位,裂缝段也常表现出负异常特征^[34],图 3 中的 X3 井裂缝破碎带自然电位负异常特征明显,认为主要是裂缝的高渗透性造成的过滤电动势所引起^[35]。

对于自然伽马、补偿中子等仪器居中测量的放射性测井,裂缝对曲线影响较少。

3 裂缝敏感参数与约束指标提取

3.1 测井敏感参数提取

可以看出,测井响应是裂缝发育程度、裂缝产状以

及噪音干扰信号的综合响应,这些响应一方面是识别、区分裂缝的重要依据,另一方面也增大了裂缝识别的难度,测井裂缝响应的提取与去噪技术是裂缝识别的关键。本文通过提取多个相互独立的裂缝敏感参数与约束指标(表 1),用以放大裂缝测井响应同时压制其他因素干扰影响,为后续裂缝识别提供可靠参数。

电阻率降低因子。通过求取深侧向电阻率与其最大包络差值,在放大裂缝造成电阻率降低响应的同时减弱基质导电背景影响,公式中通过其与自然伽马比值以减小泥质的影响,该因子对各类有效裂缝均敏感。

电阻率最大包络算法流程大致包括 3 个方面。
①标记种子点:循环对比对数电阻率相邻点大小,当对比点大于等于相邻点对数电阻率记为包络线种子点;
②剔除泥质夹层:判断电阻率曲线对应泥质含量是否超出预设泥质含量门槛值,大于门槛值即将该点作为包络线种子点;
③插值计算:种子点间线性插值计算包络线。

时差增大因子考虑到裂缝造成声波时差增大的特征,通过求取声波时差与其最小包络线差值(算法与

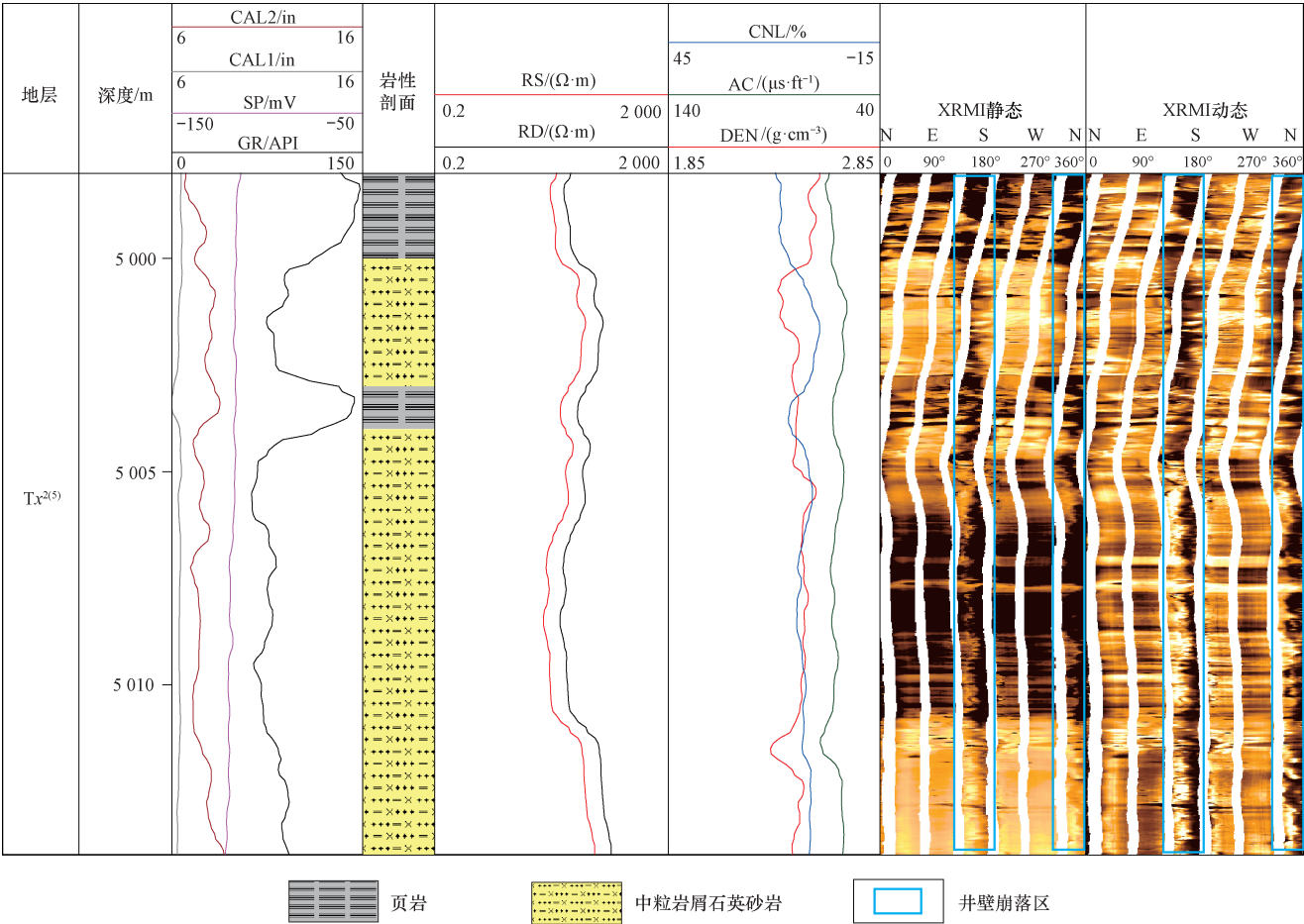


图 4 川西坳陷新场气田 X5 井须二段局部井壁崩落引起双侧向电阻率大段正差异特征

Fig. 4 Positive difference of DLL caused by local borehole caving in Well X5 in the Upper Triassic Xu2 Member in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

表 1 裂缝敏感因子与约束指标参数代码

Table 1 Code description of factors sensitive to fracture and constraint index parameters

敏感因子	公式	优势
电阻率降低因子 RT_GR_FF	$\frac{\ln RD_{evp} - \ln RD}{GR}$	各类缝
时差增大因子 AC_FF	$(AC - AC_{evp})(1 - V_{sh})$	低角缝、裂缝破碎带
电阻率幅度差因子 RDS_FF	$\lg RS_{evp}/RS - \lg RD_{evp}/RD$	斜交缝、高角缝
自然电位因子 SP_FF	$\frac{SP_{evp} - SP}{GR}$	层间缝、低角缝、破碎带
电阻率维度(约束指标) RT_{fet}	$\sum_{i=1}^m \lg RD_{i+1} - \lg RD_i /m$	裂缝与孔隙储层区分
声波维度(约束指标) AC_{fet}	$\sum_{i=1}^m AC_{i+1} - AC_i /m$	裂缝与孔隙储层区分

注: RD 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; RD_{evp} 为深侧向电阻率最大包络线, $\Omega \cdot m$; GR 为自然伽马, API; AC 为声波时差, $\mu s/ft$; AC_{evp} 为声波时差最小包络线, $\mu s/ft$; RDS 仅表示标记, 即该因子与 RD 和 RS 有关; V_{sh} 为泥质含量, %; RS 为浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; RS_{evp} 为浅侧向电阻率最大包络线, $\Omega \cdot m$; SP 为自然电位, mV; SP_{evp} 为自然电位最大包络线, mV; RD_i, RD_{i+1} 为段内相邻样点深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; m 为段内样点数量。

电阻率最大包络类似), 放大裂缝声波时差增大响应, 压制背景声波时差影响, 并通过进一步与非泥质体积乘积, 减除泥质的干扰影响。时差增大因子对于低角缝与裂缝破碎带敏感。

高角缝和垂直缝发育常造成双侧向电阻率正差异增大, 但在新场气田须二段致密砂岩内, 受人工诱导缝等影响, 双侧向也常表现为大段正差异, 严重干扰利用双侧向电阻率差异特征对裂缝的识别。研究中在分别

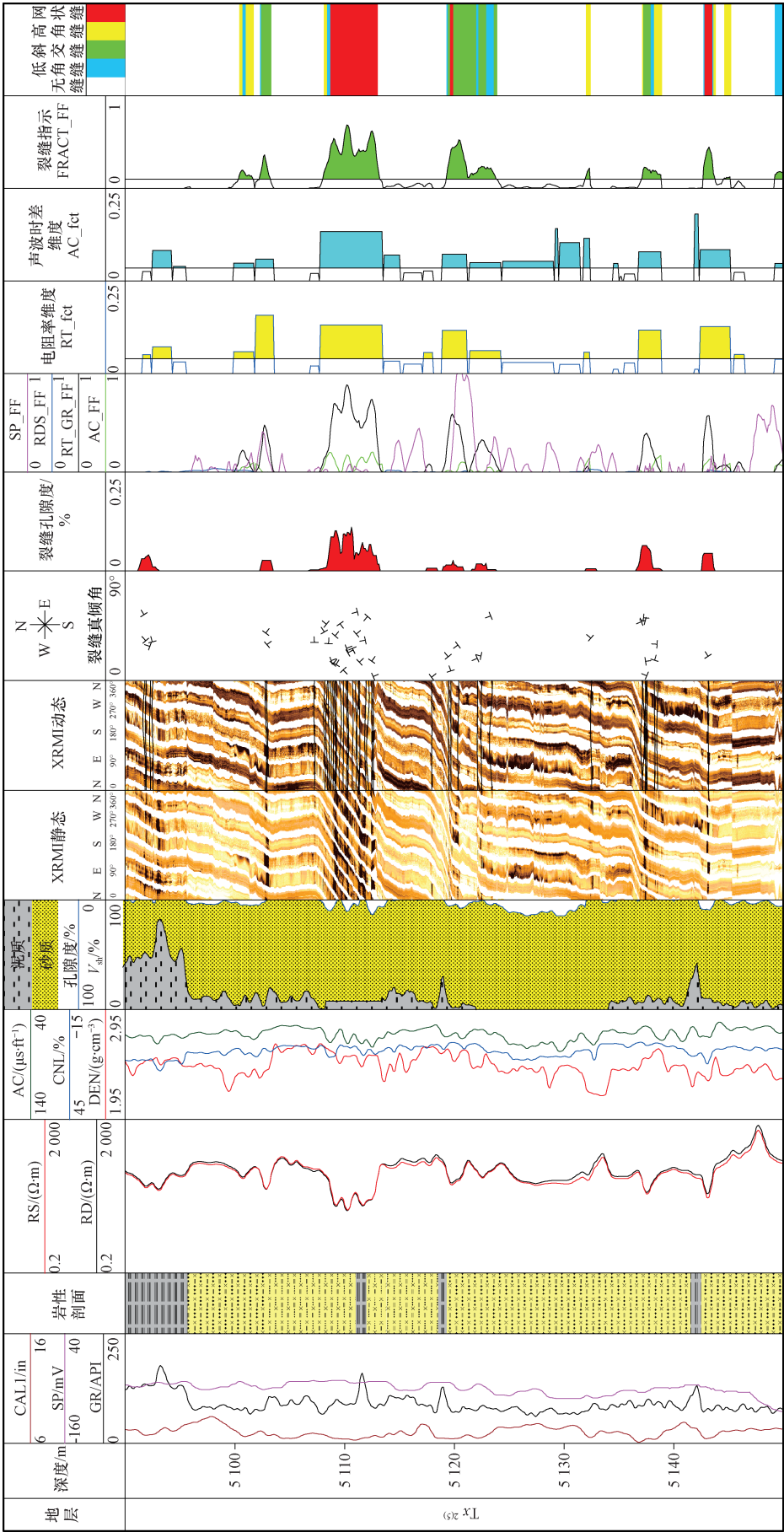


图5 川西坳陷新场气田X501井须二段常规测井裂缝识别

Fig. 5

Diagram showing fracture identification by conventional logging in Well X501 in the Upper Triassic Xu 2 Member, Western Sichuan Depression

求取深、浅双侧向电阻率最大包络趋势线基础上,通过比较双侧向电阻率与对应包络线幅度差的差异大小,计算电阻率幅度差因子,尽量压制由于人工裂缝等背景因素引起的双侧向电阻率幅度差影响,突出裂缝因素引起的双侧向电阻率幅度差。

3.2 干扰因素消除技术

如前所述,裂缝发育段常具有突变性,从而导致电阻率与声波曲线形态复杂化,这与孔隙发育引起的平缓变化特征存在一定差异。考虑到常规测井曲线纵向分辨率相对较低,研究中通过分段计算单位厚度内曲线长度反映曲线维度(表1)。图5和图6分别显示了X501与X5井裂缝与非裂缝段曲线维度对比,可以看出裂缝发育段电阻率与声波维度较大^[36],而非裂缝段两个维度均明显偏低。研究中可以据此设置门槛值作为约束指标,对孔隙储层进行筛选。

4 灰色关联识别裂缝

利用电成像等资料明确裂缝层段作为样本,通过提取上述敏感因子作为已知信息,应用灰色关联分析确定敏感因子的权重系数,加权计算裂缝指示曲线,进而采用阈值约束识别裂缝,并在建立裂缝敏感因子响应模式库的基础上,采用模式识别来判断裂缝类型。

采用灰色关联确定敏感因子权重系数,首先对敏感因子进行标准化处理,然后计算子因素(裂缝敏感因子)与母因素(电成像裂缝发育程度)之间的关联度,最后用关联度与其总和之比确定各敏感因子权重系数,计算过程主要包括母序列与子序列的选定、关联系数、关联度、关联序和关联矩阵的计算^[37-39],具体算法如下。

1) 母、子序列选定

将电成像裂缝发育程度作为关联分析的母序列记为 $\{X_t^{(0)}(0)\}$,其中: $X_t^{(0)}(0)$ 表示电成像裂缝发育程度,%; t 为裂缝层段样本标记,取值为 $1, 2, \dots, n$ 。确定对应样本的敏感因子作为子序列记为 $\{X_t^{(0)}(i)\}$,其中: $X_t^{(0)}(i)$ 表示裂缝层段敏感因子; i 为子因素(敏感因子)标记,取值为 $1, 2, \dots, m$ 。

2) 原始数据变换

由于母、子序列中因素的物理意义不同,数据的量纲也不一定相同,因此需要对原始数据做变换以消除量纲间的差异。对母、子序列数据进行归一化:

$$X_t^{(1)}(i) = \frac{X_t^{(0)}(i) - \{X_t^{(0)}(i)\}_{\min}}{\{X_t^{(0)}(i)\}_{\max} - \{X_t^{(0)}(i)\}_{\min}} \quad (1)$$

式中: $\min$ 为取最小值; $\max$ 为取最大值; $X_t^{(1)}(i)$ 为归

一化变换后的序列,无量纲。

将变换后的母序列记为 $\{X_t^{(1)}(0)\}$,将子序列记为 $\{X_t^{(1)}(i)\}$,进一步计算出同一样品点子因素与母因素观测值之间的绝对值及其级值分别为:

$$\Delta_t(i, 0) = \{X_t^{(1)}(i) - X_t^{(1)}(0)\} \quad (2)$$

$$\Delta_{\max} = \{X_t^{(1)}(i) - X_t^{(1)}(0)\}_{\max t, \max i} \quad (3)$$

$$\Delta_{\min} = \{X_t^{(1)}(i) - X_t^{(1)}(0)\}_{\min t, \min i} \quad (4)$$

式中: $\Delta_t(i, 0)$ 为某一样品点相比较序列的绝对差,无量纲; $\max i$ 为取同一子因素的子因素与母因素观测值之间的绝对值的最大值; $\max t$ 为取同一样品点子因素与母因素观测值之间的绝对值的最大值; $\min i$ 为取同一子因素的子因素与母因素观测值之间的绝对值的最小值; $\min t$ 为取同一样品点子因素与母因素观测值之间的绝对值的最小值; $\Delta_{\max}$ 与 $\Delta_{\min}$ 为所有比较序列各个样品点中的绝对差中的最大值和最小值,无量纲; $\Delta_{\min}$ 一般为0。

母序列与子序列的关联系数 $L_t(i, 0)$ 计算结果,计算公式为:

$$L_t(i, 0) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_t(i, 0) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨系数,其目的是为削弱最大绝对差数值太大而失真的影响,提高关联系数之间的差异显著性,一般情况下取 $0.1 \sim 0.5$,本次取 0.25 ,无量纲。

各子因素对母因素之间的关联度 $r_{i,0}$ 可以由下式得出

$$r_{i,0} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n L_t(i, 0) \quad (6)$$

式中: $r_{i,0}$ 为各子因素(裂缝敏感因子)关联度,无量纲。

各子因素(裂缝敏感因子)权重系数为各子因素关联度与总和比,归一化确定缝敏感因子权重系数,公式为:

$$\alpha_i = \frac{r_{i,0}}{\sum_{i=0}^m r_{i,0}} \quad (7)$$

式中: α_i 为各子因素权重系数,无量纲。

通过上述算法确定川西凹陷新场须二中亚段裂缝敏感因子权重系数,电阻率降低因子权重 0.407 ,时差增大因子权重 0.279 ,电阻率幅度差因子权重 0.178 ,自然电位因子权重 0.136 ,其中电阻率降低因子权重最大,对于裂缝最为敏感,同时依据表1中算法,依据刻度范围归一化后,结合样品约束指标范围,确定了裂缝约束指标阈值,电阻率与声波维度阈值均取 0.05 ,无量纲。

据此,采用各裂缝敏感因子加权计算得到裂缝指示。

$$FRACT_FF = \sum \alpha_i V_i \quad (8)$$

式中: $FRACT_FF$ 为裂缝指示,无量纲; V_i 为归一化后的裂缝敏感因子,无量纲。

表 2 川西坳陷新场气田须二段裂缝敏感因子模式库

Table 2 Pattern library of factors sensitive to fracture in the Upper Triassic Xu 2 Member in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

裂缝类型	电阻率降低因子	时差增大因子	电阻率幅度差因子	自然电位因子
低角缝	0.27	0.060	0.004	0.070
斜交缝	0.29	0.004	0	0.080
高角缝	0.14	0.040	0.080	0.001
网状缝	0.44	0.190	0.020	0.030

注:各敏感因子均按公式(1)进行归一化,无量纲。

进一步采用裂缝指示曲线与电成像裂缝发育程度相关对比,确定裂缝指示阈值取 0.1 较为合适,据此进行裂缝识别。

由于各敏感因子对不同类型裂缝响应存在差异,可依据敏感因子差异采用模式识别方式进行裂缝类型判断。研究中在归纳各类裂缝典型响应基础上,建立了须二段裂缝敏感因子模式库(表 2),通过对比待评价样本与各裂缝间模式欧式距离远近进行裂缝类型判别。

裂缝模式识别表达式为:

$$TYPE = \min_k \left(\sum_{i=1}^4 \| X_i - V_i \|^2 \right) \tag{9}$$

式中:TYPE 为裂缝类型;*i* 为裂缝敏感因子标号;*k* 为裂缝类型标号;min 为裂缝类型中的欧式距离最小值;*X_i* 为待识别样本裂缝敏感因子,无量纲;*V_i* 为模式库裂缝敏感因子,无量纲。

5 应用效果

为了验证上述识别方法的有效性,选取研究区有成像测井资料的井,利用成像资料标记出裂缝发育段,并根据常规测井资料计算裂缝指示曲线,两者对比后即可开展应用效果分析。

图 5 显示了 X501 井常规测井裂缝识别效果。电成像显示该井多段斜交缝与网状缝发育,常规测井表现为电阻率降低、声波时差增大特征,对应的裂缝敏感因子中的电阻率降低因子与声波时差因子响应明显,由此计算裂缝指示曲线与电成像裂缝基本一致。模式识别以网状缝与斜交缝为主,也与电成像吻合较好,仅有电成像上个别孤立裂缝未能有效识别。图中还可看出,在孔隙相对发育的 5 125 ~ 5 131 m 深度段,虽然电阻率降低同时声波时差增大,但电阻率维度低于其阈值下限,在裂缝识别中可以有效剔除。

图 6 显示了 X5 井常规测井裂缝识别效果,该井双侧向大段正差异,为井眼局部垮塌引起,电成像显示多段裂缝发育,对应双侧向电阻率有所减低,声波时差增大,特别在电成像裂缝发育的 5 033 ~ 5 041 m 深度段,电阻率降低、自然电位等裂缝响应因子响应明显,由此计算的裂缝指示曲线与电成像裂缝对应关系较好,整体上双侧向差异因子对双侧向大段正差异与泥岩层段都有很好的抑制。从电成像裂缝特征来看,5 075 ~ 5 092 m 深度段见高角缝与低角缝间互发育,常规测井裂缝识别情况与之对应。

通过与 X5 和 X101 等多口井电成像对比,裂缝段识别符合率达到 90% 以上(表 3)。

6 结论

- 1) 受构造运动作用影响,川西坳陷新场气田须二段厚层致密砂岩裂缝发育,主要为低角缝与高角缝,并见有大型低角度裂缝组合,其中发育大开度低角度主缝与大量产状复杂的伴生缝。
- 2) 常规测井中双侧向电阻率与补偿声波对裂缝响应敏感,裂缝段双侧向电阻率见明显降低,其中高角缝与网状缝段见明显正差异,低角缝、斜交缝与网状缝

表 3 川西坳陷新场气田须二段裂缝识别符合率统计

Table 3 Statistics on coincidence rate of fracture identification in the Upper Triassic Xu 2 Member in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

地层	井号	井类型	总取样数/个	非裂缝样品符合数/个	裂缝样品符合数/个	符合率/%
须二上亚段	X5	建模井	1 239	1 023	143	94.1
	L150		982	875	76	96.8
	X501		2 056	1 853	96	94.8
	X601	盲井	1 702	1 190	370	91.8
	X11		988	898	43	95.2
须二中亚段	X3	建模井	1 694	1 357	122	87.3
	X5		1 158	881	164	90.2
	X11		1 873	1 743	30	94.7
	X501	盲井	1 063	783	168	89.5

段声波时差具增大特征,泥质条带、溶孔发育与人工诱导缝具有相似响应,对裂缝识别造成干扰。

3) 裂缝发育段电阻率与声波时差曲线常具有突变特征,曲线形态复杂,维度增大,通过分段计算单位厚度内曲线长度,反映维度变化,设置阈值可有效筛除孔隙发育段等干扰影响。

4) 通过提取电阻率降低因子等独立裂缝敏感因子,放大裂缝响应同时压制干扰,采用灰色关联确定敏感因子权重系数,加权计算裂缝指示曲线,阈值标定识别裂缝,聚类模式识别裂缝类型,裂缝识别符合率达到90%以上。

参 考 文 献

- [1] 赵靖舟,李军,曹青,等.论致密大油气田成藏模式[J].石油与天然气地质,2013,34(5):573-583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5):573-583.
- [2] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,32(4):607-614.
Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 32(4):607-614.
- [3] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等.中国陆相致密油形成机理与富集规律[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184.
Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6):1168-1184.
- [4] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等.致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J].石油与天然气地质,2013,34(6):717-723.
Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, et al. Progress of research on hydrocarbon accumulation of tight sand gas and several issues for concerns[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6):717-723.
- [5] 王威,卢祥国,吕金龙,等.裂缝对致密砂岩储层物性及产气能力影响实验[J].大庆石油地质与开发,2019,38(4):160-166.
Wang Wei, Lu Xiangguo, Lv Jinlong. Experiments of the effects of the fracture on the physical property and gas production capacity for the tight sandstone[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(4):160-166.
- [6] 曾联波,吕鹏,屈雪峰,等.致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J].石油与天然气地质,2020,41(3):449-454.
Zeng Lianbo, Lu Peng, Qu Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3):449-454.
- [7] 毛哲,曾联波,刘国平,等.准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性[J].石油与天然气地质,2020,41(6):1212-1221.
Mao Zhe, Zeng Lianbo, Liu Guoping, et al. Characterization and effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the south margin of the Junggar Basin, Northwestern China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6):1212-1221.
- [8] 梅丹,胡勇,王倩.裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献[J].石油实验地质,2019,41(5):769-772.
Mei Dan, Hu Yong, Wang Qian. Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5):769-772.
- [9] 曹耐,雷刚,董平川,等.裂缝型储层渗透率应力敏感评价及对生产影响[J].断块油气田,2019,26(2):195-199.
Cao Nai, Lei Gang, Dong Pingchuan, et al. Stress sensitivity evaluation of permeability of fractured reservoir and its effect on production[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(2):195-199.
- [10] 钱玉萍.基于孔、裂隙理论评价致密气层[J].石油地质与工程,2019,33(4):21-25.
Qian Yuping. Evaluation of tight gas formation based on pore and fracture theory[J]. Petroleum Geology & Engineer, 2019, 33(4):21-25.
- [11] 谭廷栋.成像测井技术[J].中国石油勘探,1997,2(1):33-38.
Tan Tingdong. Imaging logging[J]. China Petroleum Exploration, 1997, 2(1):33-38.
- [12] Hiroaki Okada, Yasuo Yamada. Fracture distribution in and around intrusive rocks in the Fushime Geothermal Field, Japan evidence from the FMI logging [C]//Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, SPWLA 43th Annual Logging Symposium. Oiso, Japan; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2002:paper DD.
- [13] 刘冬冬,杨东旭,张子亚,等.基于常规测井和成像测井的致密储层裂缝识别方法——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组为例[J].岩性油气藏,2019,31(3):76-85.
Liu Dongdong, Yang Dongxu, Zhang Ziya, et al. Fracture identification for tight reservoirs by conventional and imaging logging: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3):76-85.
- [14] 王晓,周文,王洋,等.新场深层致密碎屑岩储层裂缝常规测井识别[J].石油物探,2011,50(6):634-638.
Wang Xiao, Zhou Wen, Wang Yang, et al. Conventional log identification of fractures in the deep tight clastic reservoir in Xinchang Area[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2011, 50(6):634-638.
- [15] J 苏, J 加特纳, 尚作源.根据测井曲线探测裂缝[J].石油物探译丛,1982,22(1):86-96.
J Su, J Gartner, Shang Zuoyuan. Detecting fractures according to logging curve[J]. Reservoir Evaluation and Development, 1982, 22(1):86-96.
- [16] 孙建孟,刘荣,梅基席,等.青海柴西地区常规测井裂缝识别方法[J].测井技术,1999,23(4):268-272.
Sun Jianmeng, Liu Rong, Mei Jixi, et al. Fracture identification technique by conventional logs from Western Chaidamu Basin, Qinghai Oilfield[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(4):268-272.
- [17] 谭海芳,师桂祥,申梅英,等.利用常规测井资料识别砂泥岩中裂缝的方法研究[J].断块油气田,2004,11(6):81-82.
Tan Haifang, Shi Guixiang, Shen Meiyang, et al. Method research to distinguish fracture by using conventional logging data[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2004, 11(6):81-82.
- [18] 赵永刚,潘和平,李功强,等.鄂尔多斯盆地西南部镇泾油田延长组致密砂岩储层裂缝测井识别[J].现代地质,2013,27(4):934-940.
Zhao Yonggang, Pan Heping, Li Gongqiang, et al. Logging identification for the tight sandstone reservoir fractures of Yanchang Formation in Zhenjing Oilfield of Southwestern Ordos Basin[J]. Geoscience,

- 2013,27(4):934-940.
- [19] 王瑞雪.常规测井识别裂缝研究综述[J].山东工业技术,2013,(7):128-129.
Wang Ruixue. The Summarize of the convention logging indentify the fracture[J]. ShanDong Industrial Technology, 2013, (7): 128-129.
- [20] 王柯,张荣虎,戴俊生,等.低渗透储层裂缝研究进展[J].地球科学与环境学报,2015,37(2):44-57.
Wang Ke, Zhang Ronghu, Dai Jun-sheng, et al. Review on low-permeability reservoir fracture[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(2): 44-57.
- [21] 杨长清,李旻,冷济高.川西孝泉-丰谷构造带特征、演化历史及其天然气分布关系研究[M].成都:中国石化西南油气分公司,2010.
Yang Changqing, Li Yu, Leng Jigao. Characteristics, evolution history and natural gas distribution of Xiaoquan & Fenggu structural belt in Western Sichuan Depression[M]. Chengdu: Sinopec Southwest Oil & Gas Company, 2010.
- [22] 殷积峰,谷志东,李秋芬.四川盆地大川中地区深层断裂发育特征及其地质意义[J].石油与天然气地质,2013,34(3):376-382.
Yin Jifeng, Gu Zhidong, Li Qiufen. Characteristics of deep-rooted faults and their geological significances in Dachuanzhong area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 376-382.
- [23] 吕正祥,张世华,叶泰然,等.新场气田须二气藏描述[M].成都:中国石化西南油气分公司,2010.
Lv Zhengxiang, Zhang Shihua, Ye Tairan, et al. Description of Xu2 gas reservoir in Xinchang Gas Field[M]. Chengdu: Sinopec Southwest Oil & Gas Company, 2010.
- [24] 郑荣才,李国晖,戴朝成,等.四川类前陆盆地盆-山耦合系统和沉积学响应[J].地质学报,2012,96(1):170-179.
Zheng Rongcai, Li Guohui, Dai Chaocheng, et al. Basin-mountain coupling system and its sedimentary response in Sichuan Analogous Foreland Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 96(1): 170-179.
- [25] 杜宗飞,高红灿,郑荣才.渝南关坝地区上三叠统须家河组沉积特征[J].石油地质与工程,2019,33(3):1-4.
Du Zongfei, Gao Hongcan, Zheng Rongcai, et al. Sedimentary characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Guanba Area of Southern Chongqing[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(3): 1-4.
- [26] 唐大海,谭秀成,王小娟,等.四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价[J].特种油气藏,2020,27(3):40-46.
Tang Dahai, Tan Xiucheng, Wang Xiaojuan, et al. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Specail Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 40-46.
- [27] 何志国,熊亮,杨凯歌.川西坳陷中段新场构造须二气藏主控因素分析[J].天然气勘探与开发,2006,29(4):18-22.
He Zhiguo, Xiong Liang, Yang Kaige. Mainly controlling factors of Xujiahe 2 member gas reservoir in Xinchang structure, middle west-Sichuan sag[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(4): 18-22.
- [28] 雍世和,张超谟,高楚桥,等.测井数据处理与综合解释[M].东营:中国石油大学出版社,2007:290-297.
Yong Shihe, Zhang Chaomo, Gao Chuqiao, et al. Logging data processing and comprehensive interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007: 290-297.
- [29] Sibbit A M, Faivre O. The dual laterolog response in fractured rocks [C] // SPWLA 26th Annual Logging Symposium. Dallas, Texas; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1985: paper T.
- [30] 南泽宇,李军,贾丽华,等.低阻碳酸盐岩储层双侧向裂缝响应模拟及定量评价[J].地球物理学进展,2014,29(5):2224-2230.
Nan Zeyu, Li Jun, Jia Lihua, et al. Simulation and quantitative evaluation of dual-laterolog response of fracture in low-resistivity carbonate reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2224-2230.
- [31] 楚泽涵.声波测井原理[M].北京:石油工业出版社,1987:75-79.
Chu Zehan. Principle of sonic logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 75-79.
- [32] 龚丹,章成广.裂缝性致密砂岩储层声波测井数值模拟响应特性研究[J].石油天然气学报,2013,35(7):82-86.
Gong Dan, Zhang Chengguang. Research on numerical simulation response characteristics of acoustic logging for fractured tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(7): 82-86.
- [33] 沈建中,应崇福.掠入射脉冲纵波在带形裂缝上的散射—光弹方法实验验证[J].声学学报,1989,14(3):216-219.
Shen Jianzhong, Ying Chongfu. A second-order approximate solution for scattering of a grazing longitudinal wave pulse by a ribbon-type crack-experimental verification by the photo elastic method [J]. Acta Acustica, 1989, 14(3): 216-219.
- [34] 邓惠,致密碎屑岩裂缝气层的自然电位[J].石油物探,1991,31(1):57-62.
Dang Hui. Spontaneous potential of fractured gas-bearing formation of compact clastic rock [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 1991, 31(1): 57-62.
- [35] 姜达贵.自然电位测井评价海拉尔油田变质岩潜山油藏裂缝性储层[J].测井技术,2017,41(5):550-554.
Jiang Dagui. Effectiveness evaluation of metamorphic buried hill fractured reservoir with spontaneous potential logging in Hailar Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 550-554.
- [36] 董双波,柯式镇,张红静,等.利用常规测井资料识别裂缝方法研究[J].测井技术,2013,37(4):380-388.
Dong Shuangbo, Ke Shizhen, Zhang Hongjing, et al. On fracture identification with conventional well logging data[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 380-388.
- [37] 龙章亮,温真桃,李辉,等.一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):37-42.
Long Zhangliang, Wen Zhentao, Li Hui, et al. An evaluation method of shale reservoir crushability based on grey correlation analysis[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 37-42.
- [38] Dong Shaoqun, Zeng Lianbo, Lyu Wenya, et al. Fracture identification and evaluation using conventional logs in tight sandstones: A case study in the Ordos Basin, China [J]. Energy Geoscience, 2020, 1(3-4): 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.003>.
- [39] 夏宏泉,杨华斌,刘红歧,等.川东飞仙关组鲕滩储层测井识别[J].天然气工业,2001,21(1):57-61.
Xia Hongquan, Yang Huabin, Liu Hongqi, et al. Analysis of some problems in casing calculation by finite element method[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 57-61.