

# 川北通南巴地区须家河组储层裂缝测井评价

李阳兵, 吴晓光, 任杰, 吴家安, 赵翔, 朱国庆

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

## 摘要

由于钻井重泥浆及复杂断裂构造等因素的影响, 川北通南巴地区须家河组储层天然裂缝和诱导裂缝在成像测井图上常相互叠加, 难以区分, 是研究区储层评价和裂缝解释中的难题。从成因机理、产状特征、缝面边缘特征、相互切割特征等方面, 对成像图上天然缝和诱导缝的特征差异进行了梳理, 开展了研究区裂缝的测井评价方法的系统研究, 进行了天然缝和诱导缝在成像图上的识别和有效区分。并基于测井、地质、岩心、测试等多种资料, 开展了储层物性参数及裂缝参数对产能的贡献分析, 相比储层物性参数, 储层裂缝参数与气井无阻流量的相关性更好, 证明了天然裂缝的有效性对通南巴地区须家河组储层产能具有重要贡献。研究成果对后续钻井储层测井综合评价和产能分析具有重要意义。

## 关键词

天然裂缝, 诱导缝, 须家河组, 产能, 通南巴地区, 川北

# Determination of the Porosity Cutoff in the Xujiahe Formation Dense Clastic Reservoir in Northern Sichuan

Yangbing Li, Xiaoguang Wu, Jie Ren, Jia'an Wu, Xiang Zhao, Guoqing Zhu

Xinan MWD/LWD Logging Corporation, Sinopec Matrix Coporation, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 15<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Due to factors such as heavy drilling mud density and complex fault structures, natural and induced fractures in the Xujiahe Formation reservoir in the Tongnanba area of northern Sichuan often overlap on FMI imaging logging maps, making it difficult to distinguish between them. This is a challenge in reservoir evaluation and fracture interpretation in the study area. A systematic

study was conducted on the logging evaluation methods of fractures in the study area, including the differences in the characteristics of natural fractures and induced fractures on the imaging map from the aspects of genesis mechanism, occurrence characteristics, fracture edge characteristics, and mutual cutting characteristics. The identification and effective differentiation of natural fractures and induced fractures on the imaging map were also carried out. Based on various data such as logging, geology, rock cores, and testing, an analysis was conducted on the contribution of reservoir physical and fracture parameters to production capacity. Compared with reservoir physical parameters, the correlation between reservoir fracture parameters and unobstructed flow rate of gas wells is better, proving that the effectiveness of natural fractures has an important contribution to the production capacity of the Xujiahe Formation reservoir in the Tongnanba area. The research results are of great significance for the reservoir logging comprehensive evaluation and productivity analysis in subsequent drilling.

## Keywords

Natural Fracture, Induced Fracture, Xujiahe Formation, Production Capacity, Tongnanba Area, Northern Sichuan

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

天然裂缝作为地下油气储集空间和油气运移的通道,其准确识别和有效性评价是储层评价的重要内容,尤其对于致密碎屑岩储层而言,天然裂缝的发育能够明显提升储层渗流能力,往往是储层获得高产的关键[1] [2] [3]。对于天然裂缝的描述,一般是通过地面露头、钻井取心观察、测井(常规测井、声、电成像测井)等技术方法开展。钻井取心观察成本高、取心井段有限、资料不连续、收获率低和岩心不定向等缺点[4],电成像测井资料分辨率高,纵向连续性好,可视化程度高,有效克服了上述劣势,其不仅能够提供类似岩心的高分辨率照片,而且还能够提供在实际温度、压力和流体环境下较准确的裂缝参数信息,能够满足更精细地描述岩性、裂缝、构造地应力方向等特性,是储层裂缝评价的重要研究内容[5] [6] [7] [8]。

在川北通南巴地区须家河组致密碎屑岩低孔渗储层天然裂缝发育,裂缝解释与评价是储层测井评价研究的重点内容,然而由于研究区处于构造强变形区,且须家河组气藏超压,钻井常使用重泥浆(泥浆密度  $2.02\sim 2.36\text{ g/cm}^3$ )钻进,多种因素影响下,导致储层气测录井显示微弱,同时电成像测井图上天然裂缝与诱导裂缝相互叠加,二者且经常交织在一起,给天然裂缝识别和评价和储层评价带来了很大困难。

前期学者分析了川东北巴中一通南巴地区致密砂岩储层裂缝的类型及成因,并结合裂缝充填矿物包裹体分析,厘定了裂缝形成期次,并探讨了岩性组合、岩层厚度、断层、褶皱变形强度对裂缝发育的控制作用[9],但总体上偏于宏观,对于储层裂缝精细评价方面存在一定程度的不足。因此有必要开展研究区须家河组致密碎屑岩储层裂缝测井的系统化和精细化研究。本文以电成像资料为基础,从成因机理、产状特征差异等方面,进行了天然缝和诱导缝在成像图上的差异识别和有效区分。并基于常规测井、录井、地质、测试等多种资料,开展了储层物性参数及裂缝参数对产能影响的贡献分析,相比储层物性参数,储层裂缝参数与无阻流量的相关性更好,其中无阻流量与高导裂缝条数、总长度、宽度、倾角等呈正相关,并与总长度的相关性最好,双重因素(厚度\*视孔隙度谱分析裂缝孔隙度、条数\*宽、缝长\*宽、

缝长\*倾角)条件与无阻流量的相关性进一步增强。研究成果对后续储层裂缝解释、综合测井评价和产能分析及预测等工作具有重要指导意义。

## 2. 地质背景与储层四性特征

通南巴强变形构造区位于四川盆地川北坳陷,北部与米仓山构造带相邻,西南部与巴中低缓构造带相接[10] [11]。根据实钻情况,研究区须家河组储层主要发育在通南巴地区的须家河组四段、二段储层岩石类型主要为中-细粒岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、砾岩、砂砾岩为主,以及少量石英砂岩等。须四段121个岩心孔隙度主要分布在0.11%~8.17%之间,平均值为1.67%,岩心渗透率分布在 $0.003\sim 0.0872 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;须二段619个岩样实测孔隙度分布在0.2~11.2%之间,平均为2.01%,渗透率分布在 $0.0001\sim 2.833 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均 $0.103 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,整体具低孔隙度、低渗透率-特低孔隙度、特低渗透率的特征。

相对泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩等围岩,通南巴地区须家河组砂岩储层段一般具有低~中值自然伽马,自然电位略显负异常,井径曲线相对规则平直,局部因裂缝发育井径可表现扩径现象,深、浅侧向电阻率具一定的正幅度差,在裂缝不发育段补偿声波、补偿中子、密度测井孔隙度曲线测井值中低值,相对平稳,在裂缝发育段,孔隙度曲线会呈现相应的凸起或者尖峰状变化,电阻率曲线会出现尖峰状或指状的下降。

裂缝普遍发育是川北须家河组储层的重要特征,也是获得产能的重要影响因素。当储层发育低角度裂缝型时,补偿声波测井曲线及电阻率曲线一般会呈现“尖峰状”指示特征,深、浅侧向电阻率几乎重合或略显负差异。网状裂缝、斜交缝网发育段深、浅侧向电阻率几乎重合或呈正差异;高角度裂缝型储层深、浅侧向电阻率正差异幅度较大,具明显“双轨”曲线响应特征。但是,因井壁失稳造成的井眼崩落和扩径和流体性质的变化也常出现类似于裂缝的测井响应特征,同时常规测井曲线由于资料精度限制,一般只能做到裂缝发育特征的定性判别,难以达到裂缝精细描述与分类的目标[12],因此利用常规测井进行裂缝识别具有一定局限性。研究区须家河组岩心孔隙度与岩心含水饱和度的关系显示,随着孔隙度的增加,储层含水饱和度整体呈下降趋势,随着孔隙度的增大,含气饱和度呈升高趋势;在孔隙度低于2%时,含水饱和度急剧升高,分析应该主要是束缚水含量的增加。经统计,通南巴地区须家河组天然裂缝发育、孔隙度发育的细、中、粗粒砂岩(石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩、长石岩屑砂岩等)储层含气性好,中粒粒径以上的砂岩更易获得高产(图1)。

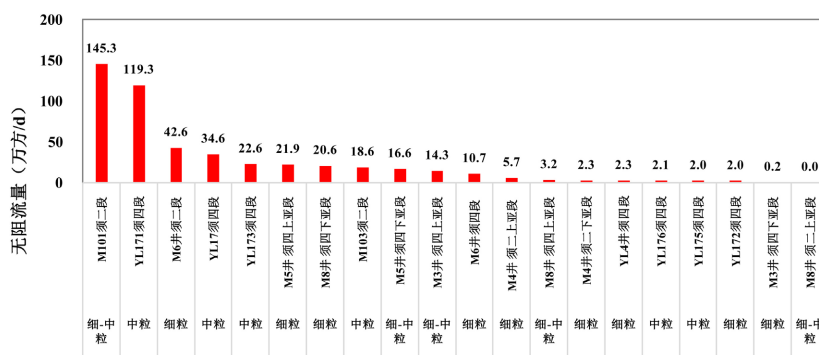


Figure 1. Relationship between sandstone Lithology, grain Size, and open flow capacity in the Xujiaye Formation in Tongnanba Area

图1. 通南巴地区须家河组测试层段砂岩岩性、粒度与无阻流量关系图

## 3. 天然裂缝与诱导裂缝

根据裂缝的形成方式和成因将裂缝分为天然裂缝与诱导裂缝;天然裂缝是指在钻井揭开以前地层中

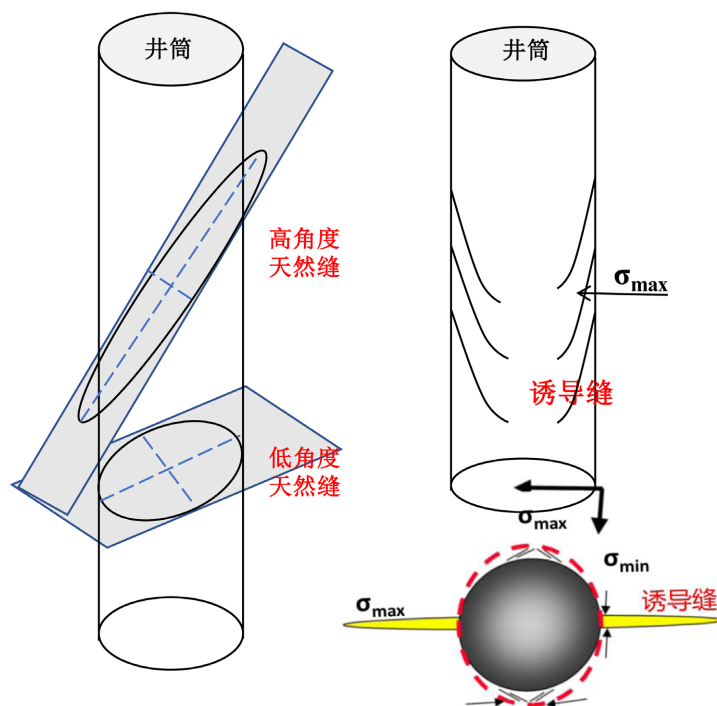
就已经存在的裂缝,在川北通南巴地区须家河组储层段内非常发育,是须家河储层评价研究的重点内容。由于重泥浆和断裂构造的影响,天然裂缝与诱导裂缝在川北须家河组中均有出现,且经常交织在一起,给天然裂缝识别和评价带来了一定困难。

### 3.1. 天然裂缝

天然裂缝按其产状的大小可以分为高角度缝、斜交缝、低角度缝、平缝。天然裂缝一般在成像图上主要表现为电导率异常的正弦波。天然裂缝常与溶蚀孔串在一起,电导率异常的宽窄变化较大,当裂缝中有流体充填,在常规电阻率测井曲线上表现为低阻,在成像图像上表现为深色的条纹或条带,当有方解石或钙质充填时表现为高阻异常。根据裂缝的电阻率与背景电阻率差异,可将电成像图上的裂缝分为高阻裂缝与高导裂缝。天然高导缝是指裂缝电阻率相对于围岩为低阻,图像为深色的正弦条纹,高导缝一般为张开裂缝,有效性较好,高角度天然缝贯穿井筒长度优于低角度天然缝,能显著提升储层渗流能力,裂缝有效性更好(图 2)。天然高阻缝是指裂缝电阻率高于背景围岩,在图像上呈浅色调,一般为方解石充填,裂缝呈闭合状态,有效性差。

前期岩心观察分析、以及实验分析表明,研究区须家河组裂缝中高阻充填物一般为石英颗粒和方解石,在成像图上呈现亮白色的正弦曲线条纹,低阻充填一般为流体或者泥质充填,在成像图上呈现为暗色条纹。另外根据天然裂缝形成时期分为原生缝与次生缝;根据与沉积构造关系分为交错层理缝、层界面缝、冲刷面缝、非沉积构造缝等。

### 3.2. 诱导裂缝



**Figure 2.** Schematic diagram of natural fractures and stress release induced fractures passing through the wellbore  
**图 2.** 天然裂缝与应力释放诱导缝过井筒示意图

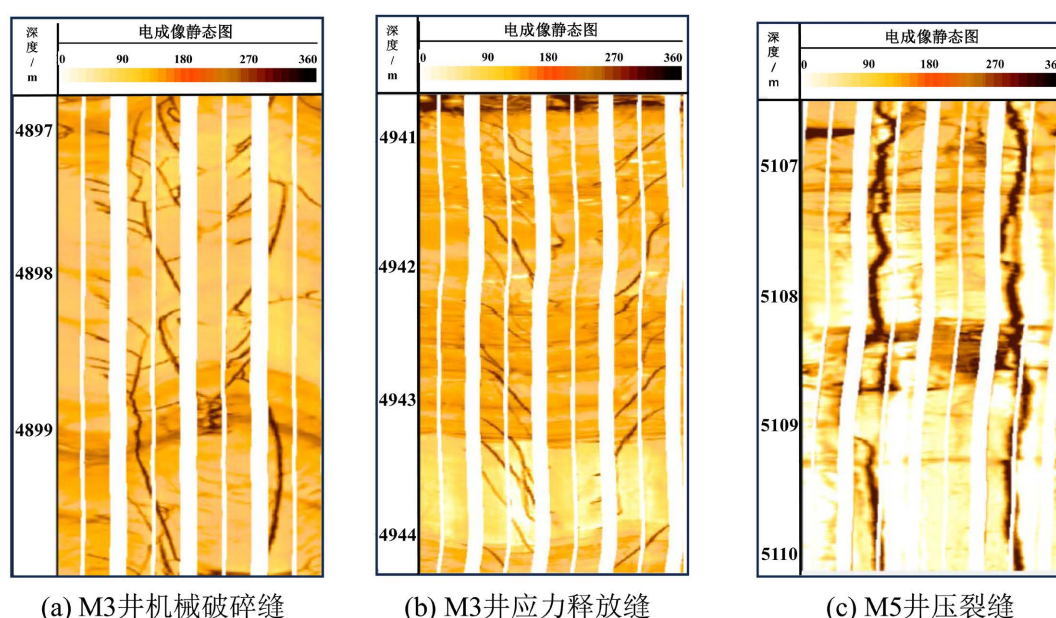
诱导裂缝的形成多与现今地应力场有关,在井下地层中常遇到三种诱导裂缝,分别为机械破碎缝、应力释放缝、压裂缝,它们的形成机理与特征各不相同。



**机械破碎裂缝：**是由钻井过程中由于钻具振动形成的，它们十分微小且径向延伸很浅，很容易鉴别(图 3(a))。

**应力释放裂缝：**当钻开高压地层，地层应力得以快速释放而形成的裂缝。典型裂缝特征，裂缝呈雁行状密集排列，应力释放缝的走向代表了现今最大主应力方向，与井眼崩落方向垂直(图 3(b))。

**压裂缝：**是重泥浆与地应力不平衡造成的裂缝，它们虽然径向延伸不远，但张开度和纵向延伸都可能较大，并总是以 180 度或近于 180 度之差对称地出现在井壁上；以一条高角度张性裂缝为主，在两侧有较小的剪切裂缝；在双侧向测井曲线上出现特有的“双轨”现象，即深、浅双侧向曲线表现为大段近平行、较规则的正差异异常，其电阻率值较高。压裂裂缝常出现在重泥浆钻井井段。但有时在泥浆密度不大时也可见到，尤其地层致密性脆时，这是由于此时水平应力得到较好的保存，一旦当该水平应力非平衡性很强时，将同时发生井壁的压裂和崩落(图 3(c))。



**Figure 3.** Different types of induced fractures in the Xujiahe Formation of Tongnanba area  
**图 3.** 通南巴地区须家河组不同类型诱导缝

### 3.3. 诱导缝与天然裂缝在成因机制以及在成像图上的产状和特征主要有以下几点差别

第一：诱导缝主要是在现今地应力作用下产生的裂缝，与现今地应力有密切关系，排列整齐，规律性强；而天然裂缝常为多期构造运动形成，又经地下水溶蚀与沉淀、充填作用的改造，因而分布不规则。

第二：天然裂缝因常遭溶蚀，裂缝面总不太规则，且缝宽有较大变化，而诱导缝的缝面形态规则且缝宽变化很小。

第三：诱导缝的径向延伸不大，故深侧向电阻率下降不很明显。

第四：诱导缝的走向与现今最大主应力方向一致，天然裂缝的走向与现今最大主应力方向无关。

第五：天然裂缝可出现明显的切割地层特征，诱导缝往往终止于软地层和天然裂缝等地质体，延伸不连续或被错段，在泥岩层无延伸，且诱导缝两侧一般无岩性错位，不穿过整个井眼，形不成正弦曲线，产状异于天然裂缝。

根据以上特征，可以对天然裂缝和诱导缝进行有效分辨和区分，而当天然高角度高导缝与诱导缝交织在一起，且产状接近一致，难于区分时，综合上述多种信息和特征进行识别(图 4)。

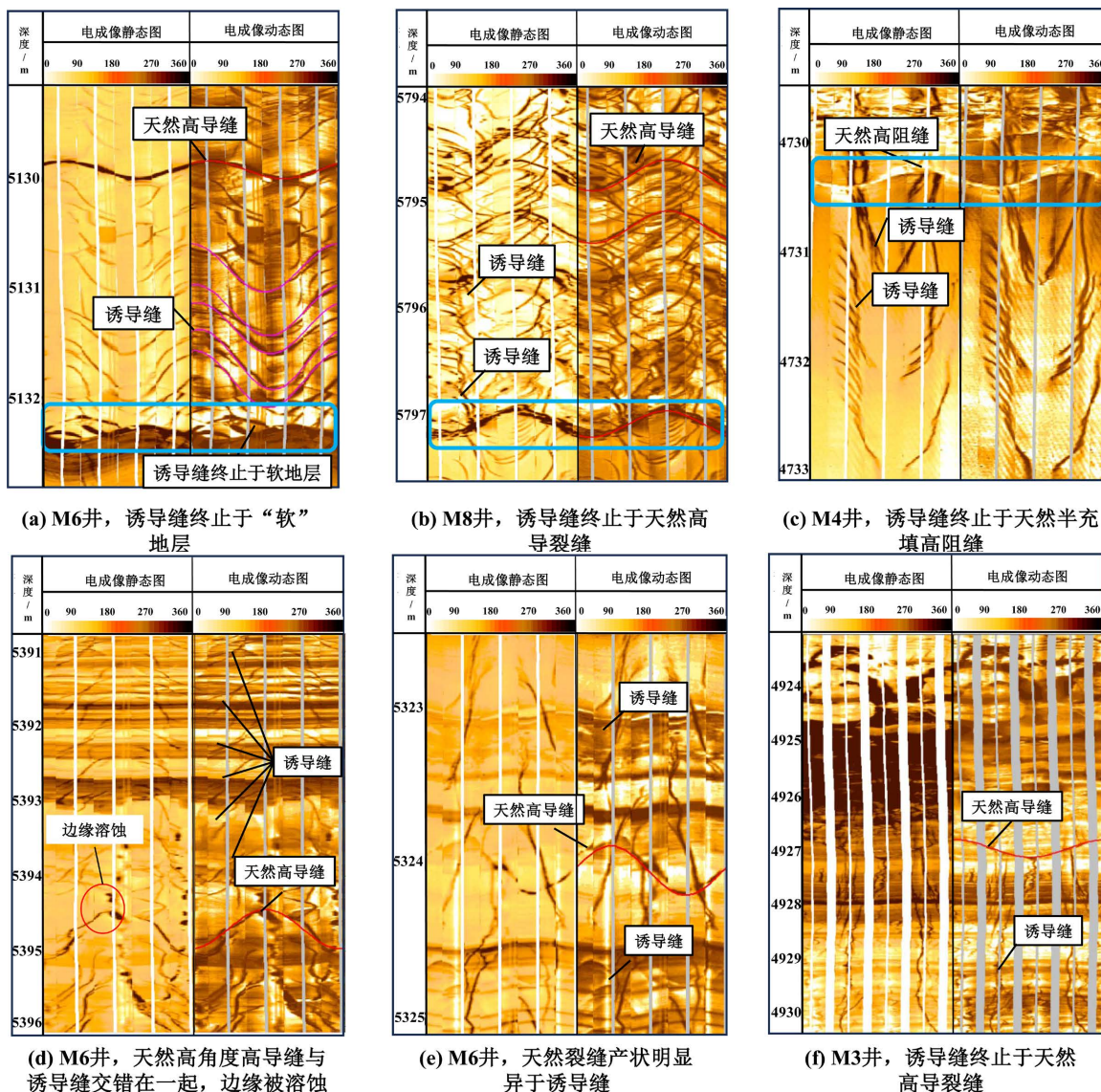


Figure 4. Identification and differentiation of induced fractures and natural fractures in the Xujiahe Formation of Tongnanba area

图 4. 通南巴地区须家河组诱导缝与天然裂缝区分别

#### 4. 裂缝参数定量计算

电成像测井裂缝定量评价主要包括对裂缝产状、密度、裂缝孔隙度等参数的计算。裂缝的产状是通过提取的裂缝轨迹方程直接计算得到。裂缝宽度和裂缝孔隙度等参数对储层产能具有重要的意义，一般情况下测井资料难以精确计算裂缝孔隙度。电成像计算裂缝孔隙度一种是面积意义上的孔隙度即裂缝视面积孔隙度，即统计窗长内各裂缝的视开口面积与电成像图像的面积之比；另外一种为电成像谱分析法计算的裂缝孔隙度[13] [14]。

##### 4.1. 裂缝参数定量计算

通过前文中的区分方法开展了天然裂缝的有效识别工作，天然高导裂缝拾取之后，进行裂缝视参数的定量计算。利用成像测井资料人工进行裂缝视参数的定量计算，通常是在统计窗长内基于实验及数学



模拟得出的经验公式，主要进行开口裂缝视参数的连续计算。

$$\textcircled{1} \text{ 裂缝宽度 } W: W = a * A * R_{xo}^b * R_m^{1-b}$$

$W$  是裂缝宽度,  $A$  是由裂缝造成的电导异常面积,  $R_{xo}$  是裂缝岩石骨架电阻率(一般情况下是侵入带电阻率),  $R_m$  是裂缝中流体电阻率, 为井底温度下的泥浆电阻率。  $a$ ,  $b$  均为与仪器有关的常数, 其中  $b$  接近为零, 取值完全取决于成像测井仪器的具体结构;  $a$  的单位是微米<sup>-1</sup>,  $b$  无量纲。

$\textcircled{2}$  裂缝孔隙度 VPA: 为每米井段上裂缝在井壁上所占面积与成像测井覆盖井壁的面积之比。

$$\text{计算公式为: } VPA = \sum Wi * Li / L * \pi * D$$

$Wi$  = 第  $i$  条裂缝的平均宽度;

$Li$  = 第  $i$  条裂缝在统计窗长  $L$  内(一般  $L$  选为 1 m 或者 0.6096 m)的长度;

$D$  = 井径;

实际上, 该裂缝孔隙度为面积意义上的孔隙度, 即视面孔率。

$\textcircled{3}$  裂缝密度: 为统计窗长内的裂缝条数, 通常为为每米井段所见到的裂缝总条数。

$\textcircled{4}$  裂缝长度: 为统计窗长内所拾取的裂缝长度总和(见图 5 第 7 列)。

视面孔率、裂缝密度、裂缝长度三个参数是在裂缝准确拾取和裂缝宽度准确计算的基础上获得, 但通常难以获得很准确的裂缝宽度, 因此裂缝参数的定量计算存在一定误差。

## 4.2. 电成像视孔隙度谱分析

电成像测井在同一深度点可以得到井周 360 范围内的  $N$  条电导率(电阻率的倒数)曲线(XRMI 测井仪为 150 条, FMI 测井仪为 192 条), 即可以获得同深度孔隙度曲线, 按照孔隙度的大小划分区间, 可形成孔隙度频率直方图; 以各深度点孔隙度大小区间为横坐标, 频率为纵坐标, 使用一定窗长和步长对孔隙度图像进行频率直方图统计, 形成纵向上连续深度点的频率图, 类似核磁共振测井 T2 谱的孔隙度频谱(图 5 第 8 列)。孔隙度频谱的横向分布代表了地层孔隙范围, 而幅度则代表相应大小孔隙在当前深度点地层中所占的比例, 通过该方式可直观地观察各深度段不同大小孔隙度的频率分布[15] [16]。通过岩心与成像资料相互标定, 利用阿尔奇公式可以将电成像电阻率图像转变成孔隙度图像并进行自动分析, 确定基质孔隙与裂缝孔隙的分界点, 从而计算裂缝储层的裂缝孔隙度(图 5 第 9 列)。由于研究区缺少全直径岩心的裂缝孔隙度实验数据进行标定, 由谱分析计算的裂缝孔隙度值只反映相对变化。

电成像测井具有很高的分辨率和井周覆盖率, 采用成像测井电导率转化为视地层电阻率, 再计算储层孔隙度, 对于非均质性强的复杂储层具有较高精度和良好的判别效果。

以 M3 井须四上亚段为例, 储层段岩性以灰色、浅灰色中砂岩、细砂岩为主, 局部夹深灰色泥岩、粉砂质泥岩, 钻井泥浆比重 2.15 g/cm<sup>3</sup>, 钻井过程中 4900.90~4902.19 m 漏失泥浆 59.8 方, 4926.80~4926.96 m 漏失泥浆 89.4 方, 储层解释段为 4895.5~4924.0 m, 顶、底砂岩岩性较纯, 中部砂岩泥质含量相对高, 电阻率曲线高-中-高值变化趋势, 声波中高值, 补偿中子曲线具有明显挖掘效应, 显示储层具有较好的含气性。电成像上诱导缝与中、高角度天然缝共存, 局部井段天然缝边缘见高阻亮白色特征, 对比岩心为石英颗粒半充填以及高阻碳质成分充填所致(图 6)。电成像共解释天然高导缝 16 条, 平均倾角 46.2°, 长度累计 15283.6 mm, 平均宽度 0.09457 mm, 视面孔率 0.0521%, 谱分析裂缝孔隙度平均 1.0442%, 裂缝发育且有效性较好。测井综合解释 2 层含气层和 2 层气层, 累计厚度为 28.5 m, 其中有效储层(孔隙度 ≥ 3.0%)厚度 24.4 m。测试井段为 4900.0~4914.0 m, 射孔厚度 14.00 m/3 层, 采用射孔试挤测试联作工艺。试挤入地液量 15.2 m<sup>3</sup>, 试挤后采用一级 3 mm 油嘴 + 二级 4 mm 油嘴, 30 mm 孔板临界速度流量计求产, 油压 45 MPa, 流压 57.38 MPa, 气产量 10.1156 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d; 测试为工业气层。

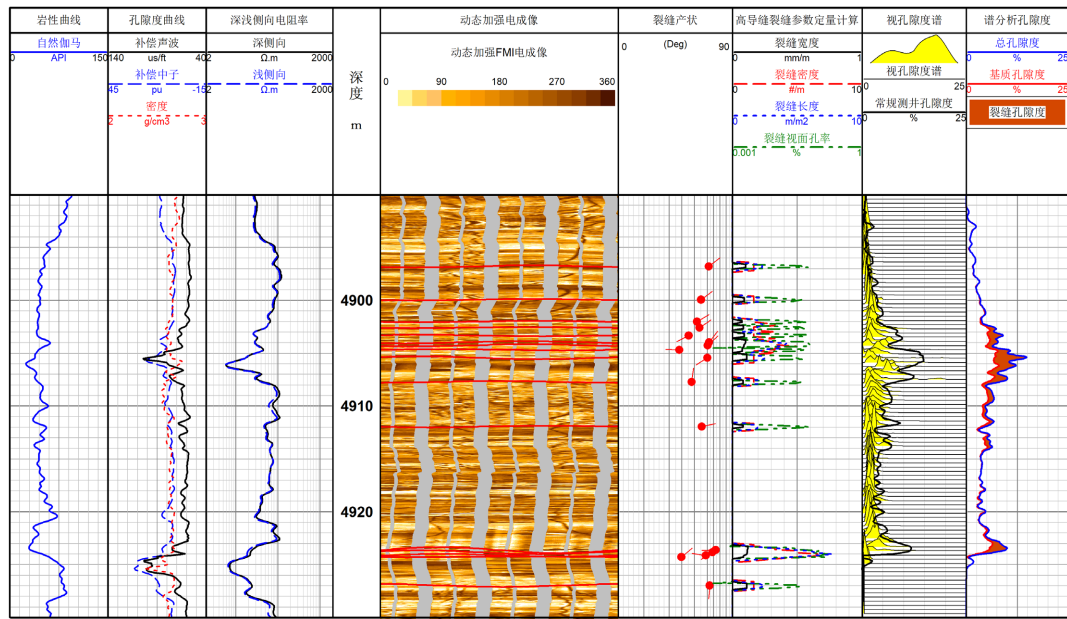


Figure 5. Quantitative calculation results of electrical imaging fracture parameters in upper sub-member of the fourth member of Xujiache Formation in Well Ma 3

图 5. M3 井须四上亚段储层电成像裂缝参数定量计算成果图

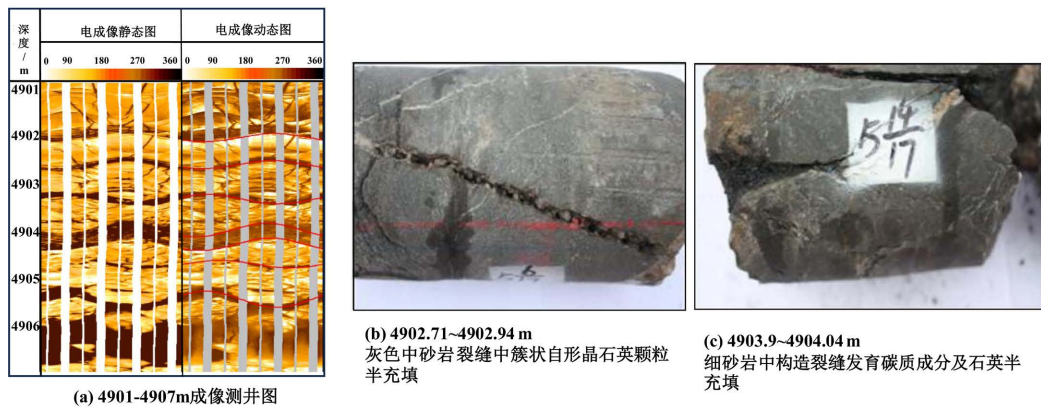


Figure 6. Electrical imaging logging results and core photos in upper sub-member of the fourth member of Xujiache Formation in Well Ma 3

图 6. M3 井须四上亚段电成像测井成果图与岩心照片

### 5. 储层物性参数与产能关系分析

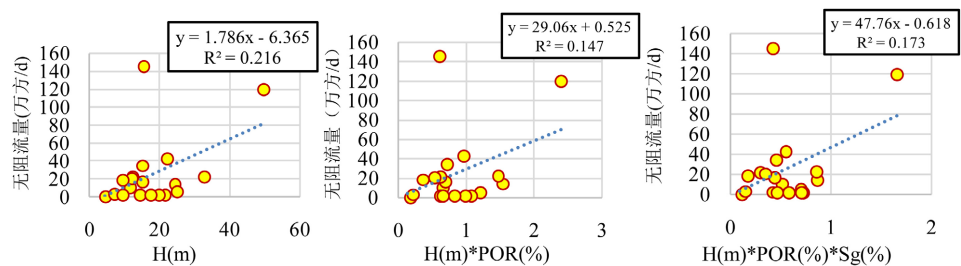


Figure 7. Cross plot of open flow capacity and reservoir physical parameters of gas wells

图 7. 气井无阻流量与储层物性参数交会图

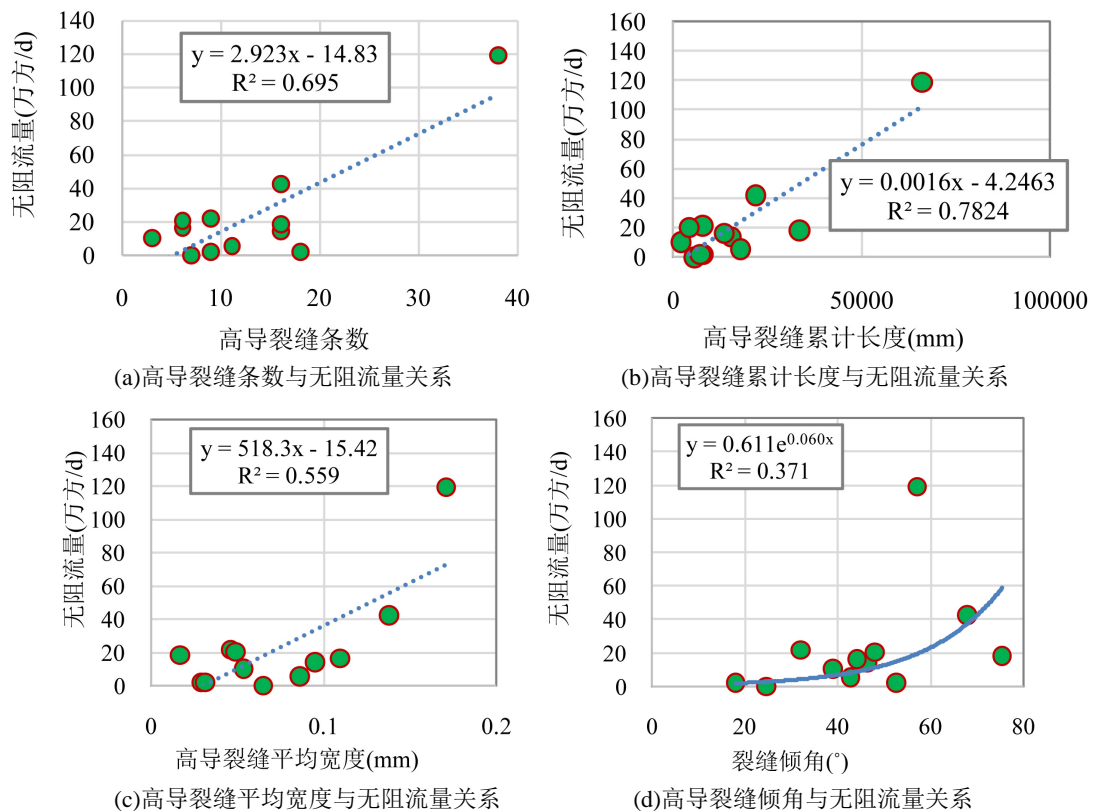


一般情况下, 储层产能会受到储层有效厚度(H)、孔隙度(POR)、渗透率、含气饱和度(Sg)等参数的影响。将通南巴地区已测试的须家河组气井无阻流量与储层 H、POR\*H、POR\*Sg\*H 值进行交会, 结果显示气井无阻流量与三者的相关性一般, 表明储层有效厚度、孔隙度、含气饱和度等参数因素对产能的贡献有限(图 7)。

## 6. 电成像高导裂缝对产能影响

通南巴地区须家河组天然裂缝的发育情况在产能的贡献起到重要作用。

### 6.1. 裂缝条数、长度、宽度、倾角



**Figure 8.** Cross plots of open flow capacity and high conductivity fracture number, total length, average width, and crack inclination angle in the test layers

**图 8.** 测试层段无阻流量与高导裂缝条数、总长度、平均宽度、裂缝倾角交会图

电成像测井识别的高导裂缝的条数、长度、宽度、倾角等参数差异对储层渗流能力的提升能力不同。储层裂缝条数越多、裂缝累计长度越长、裂缝的缝宽度越宽, 裂缝对储层的渗流能力的提升越明显, 越有利于储层产能的释放。研究区个别井须家河储层因为天然裂缝极其发育, 仅通过射孔即获得了理想的产能, 例如 M101 井、M103 井、YL17 井等。经过数据统计和交会图分析, 研究区须家河组测试层段无阻流量与电成像高导裂缝条数、总长度、宽度、倾角呈较好正相关关系(图 8), 其中与总长度的相关性最好(图 8(b))。

双重因素条件(条数\*宽、缝长\*宽、缝长\*倾角、厚度\*谱分析裂缝孔隙度)与无阻流量的相关性进一步增强(图 9), 其中高导裂缝总长度\*宽度乘积与无阻流量呈现较好的正相关, 相关系数  $R^2 = 0.9272$ , 展现出了最好的相关性(图 9(a))。

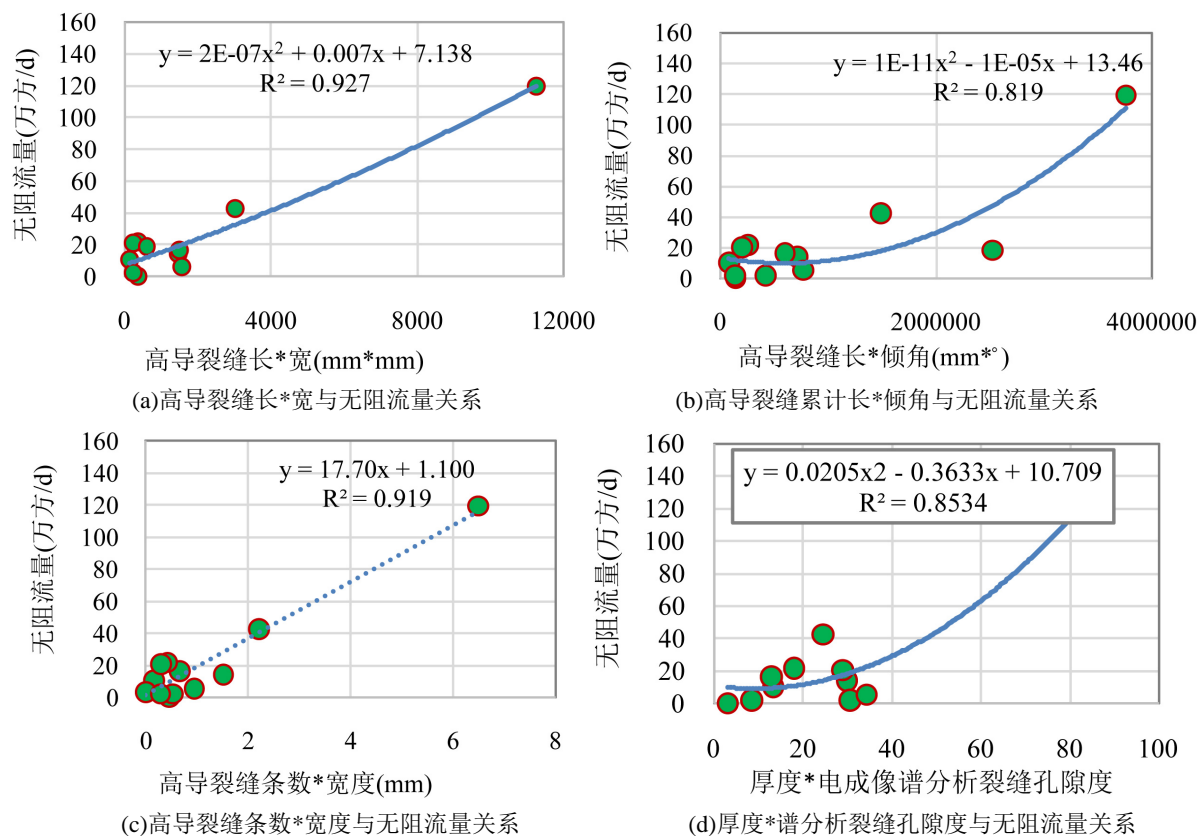


Figure 9. Cross plots of open flow capacity and high conductivity fractures' double factors

图 9. 测试层段无阻流量与高导裂缝双重因素交会图

## 6.2. 电成像谱分析裂缝孔隙度

研究区须家河组通过电成像测井计算的孔隙度谱分析裂缝孔隙度未进行全直径岩性分析标定, 但储层谱分析裂缝孔隙度、以及储层有效厚度与谱分析裂缝孔隙度乘积与无阻流量均呈现出具有很好的相关关系, 表明了谱分析裂缝孔隙度对储层产能的正向影响作用(图 9(d))。

## 7. 结论

1) 从成因机理、产状特征、缝面边缘特征、相互切割特征等方面分析, 进行了川北通南巴地区须家河组储层天然裂缝和诱导裂缝在成像图上的识别和有效区分。

2) 从储层物性(厚度、孔隙度、含气饱和度)、裂缝参数特征等多方面进行产能主控因素分析, 相比储层物性参数, 裂缝参数与气井无阻流量的相关性更好, 其中裂缝总长度\*宽度的乘积与无阻流量正相关最好, 表明了裂缝累计长度越长、裂缝的缝宽度越宽, 裂缝对储层的渗流能力的提升越明显, 越有利于储层产能的释放。

3) 本文研究成果证明了天然裂缝的有效性对研究区须家河组储层产能具有重要贡献, 对后续储层测井综合评价, 产能预测和分析等工作提供了技术依据。

## 基金项目

中国石油化工股份有限公司勘探分公司科技攻关项目“川北地区须家河组储层测井评价技术攻关”(35450003-22-ZC0607-0004)。

## 参考文献

- [1] 刘志远, 李浩, 武清钊, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 981-991.
- [2] 雷明, 陈涛, 韩乾凤, 等. 一种基于常规测井资料计算碳酸盐岩储层裂缝孔隙度新方法[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2678-2689.
- [3] 苏可嘉, 秦臻, 邓呈祥, 等. 致密砂岩裂缝填充识别及其测井响应特征——以鄂尔多斯盆地镇泾油田延长组为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9095-9104.
- [4] 李阳兵, 张筠, 徐炳高, 等. 川西地区须家河组裂缝成因类型及形成期次的成像测井分析[J]. 测井技术, 2010, 34(4): 348-351.
- [5] 李阳兵, 葛祥, 张筠, 等. 应用成像测井确定川西须家河组漏层及漏失性质[J]. 测井技术, 2008, 32(1): 57-60.
- [6] 李杰, 蒋有录, 孙均. 川东北通南巴地区须家河组断层和裂缝特征及发育模型[J]. 地质论评, 2019(S1): 67-68.
- [7] 张筠, 徐炳高. 成像测井在川西碎屑岩解释中的应用[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 129-132.
- [8] 张筠. 川西坳陷裂缝性储层的裂缝测井评价技术[J]. 天然气工业, 2003, 23(Z1): 43-45.
- [9] 蒋有录, 李明阳, 王良军, 等. 川东北巴中-通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1525-1537.
- [10] 盘昌林, 刘树根, 马永生, 等. 川东北须家河组储层特征及主控因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 27-34.
- [11] 王威, 凡睿, 黎承银, 等. 川东北地区须家河组“断缝体”气藏有利勘探目标和预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 992-1001.
- [12] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [13] 李晓辉, 周彦球, 缙艳红, 等. 电成像测井孔隙度分析技术及其在碳酸盐岩储层产能预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 928-934.
- [14] 左程吉, 王祝文, 向旻, 等. 基于电成像测井孔隙度分析技术的火山岩孔隙径向非均质性研究[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 449-454.
- [15] 侯振学, 于雪娴, 李东旭, 等. 电成像测井处理新技术在储层评价方面的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 573-578.
- [16] 何进, 汤玉, 温建平, 等. 电成像测井孔隙度频谱分析技术及其在火成岩储层中的应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2015(1): 14-17.