

## 水力压裂缝动态非对称延伸过程数值模拟

杜书恒<sup>1,2,3</sup>, 庞 姗<sup>2,3</sup>, 师永民<sup>3\*</sup>

(1.中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室,北京 100190; 2.北京大学 地球与空间科学学院,北京 100871; 3.北京大学 石油与天然气研究中心,北京 100871)

**摘要:**从“人工油气藏开发”的角度,采用全缝长压裂缝模拟技术,结合储层精细地质建模技术对低渗透储层水力压裂过程中形成的原位储层-支撑剂复合体的动态延伸过程及其变化特征进行探索,提出以水力压裂缝动态非对称指数来表征水力压裂缝动态非对称延伸特征,构建原位储层-支撑剂复合体的评价参数,探索水力压裂缝动态非对称指数在常规测井曲线中的响应特征,并据此建立基于常规测井曲线的水力压裂缝动态非对称延伸特征的方法。研究表明,全缝长压裂缝模拟技术优于仅基于常规测井数据的半缝长非对称压裂缝模拟技术,便于开展储层非均质性研究。水力压裂缝动态非对称指数可以反映水力压裂缝在某一压裂时长的非对称延伸规模水平,结合储层物性与目前开发动态可为实现储层的充分动用提供指导。水力压裂缝动态非对称延伸特征剖析是提高采收率的重要研究方向。

**关键词:**压裂 全缝长 非对称 动态 提高采收率

**中图分类号:**TE357.1

**文献标识码:**A

## Numerical simulation of dynamic asymmetric extension process in hydraulic fracturing

DU Shuheng<sup>1,2,3</sup>, PANG Shan<sup>2,3</sup>, SHI Yongmin<sup>3</sup>

(1. *The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing City, 100190, China*; 2. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing City, 100871, China*; 3. *Oil and Gas Institute, Peking University, Beijing City, 100871, China*)

**Abstract:** From the aspect of “artificial reservoir development”, the whole-fracture simulation method and fine geologic modeling were applied to the study of the dynamic extension process and the characteristics of the combination of proppant and in-situ low-permeability reservoir formed in hydraulic fracturing process. A new index named “dynamic asymmetric index of hydraulic fracture” could be used to characterize the characteristics of hydraulic fracturing dynamics, which is the evaluation parameter of the combination of in-situ reservoir and proppant. The dynamic response characteristics of this index in conventional logging curve was explored, and the evaluation system of dynamic asymmetric extension characteristics based on conventional logging data was established. The research results show that the whole-fracture simulation method is better than the semi-fracture asymmetric simulation method based on the conventional logging data, which is helpful to reservoir heterogeneity research. The dynamic asymmetric index of hydraulic fracture can reflect the asymmetric extension scale of hydraulic fracturing in a certain fracturing time. Combined with reservoir physical properties and current development state, it can provide guidance for the full utilization of reservoirs. The analysis of dynamic asymmetric extension characteristics of hydraulic fracture is an important research direction for EOR.

**Key words:** fracturing; whole-fracture; asymmetry; dynamic; EOR

收稿日期:2018-03-12。

作者简介:杜书恒(1994—),男,安徽定远人,博士,从事储层地质力学方面的研究。联系电话:18813134652, E-mail: dushuheng@pku.edu.cn。

\*通讯作者:师永民(1966—),男,陕西泾阳人,研究员,博士。联系电话:13466608831, E-mail: sym@pku.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“低渗-超低渗油藏套损井失控储量潜力研究”(2017ZX05013005-009)。

对于低渗透储层,由于其天然渗透率较低,无法形成高效泄油通道,因此自然产能较小。需开展水力压裂等储层改造措施,形成有效驱油体系,构建“人工油气藏”,以提高注入井效率和生产井产能<sup>[1-3]</sup>。

值得注意的是,在水力压裂过程中,随着压裂液的不间断泵入,大量支撑剂也随之泵入地层并充填于人工裂缝中。随着时间的推移,原位储层与后期充填进入的支撑剂形成一个复合体,且由于复合体的形成对原位储层的性质以及原始地应力场产生了极为明显的扰动,压裂过程中及压裂后储层已不再完全凸显原位储层的特点,而以原位储层-支撑剂复合体的形式出现。中外学者针对水力压裂缝的研究大多侧重于压裂缝展布规模的角度<sup>[4-9]</sup>,研究尺度多局限于半缝长,较少考虑泵入的支撑剂与原位储层形成的复合体,且储层压裂后该复合体呈现严重的非对称性,因此前人研究成果中对储层压裂后产能评估与实际产能存在较大差异的解释存在较大的出入<sup>[10-12]</sup>。

对于注水开发油藏而言,进入开发中后期,全油藏储层水淹程度将趋于动态分布,其变化规律不仅与地质因素相关,还与生产动态、工程参数等因素密切相关,因此仅凭有限的检查井的取心观察和测定无法准确判定油藏整体的动用程度。在水力压裂过程中,随着原位储层-支撑剂复合体的形成,储层孔隙度、渗透率等物性参数及泊松比、杨氏模量等岩石力学参数都将发生动态变化;因此,仅凭未改造前的储层初始渗透率来评价低渗透储层的非均质性特征,不符合地质特征与生产实际,只有建立针对原位储层-支撑剂复合体性质的量化评价方法,才能在开发中后期的井网加密及老井重复压裂开发政策实施过程中有的放矢。

为此,笔者以松辽盆地中央坳陷区朝阳沟地区白垩系为例,着重阐述低渗透储层全缝长压裂模拟的具体技术流程,首次提出原位储层-支撑剂复合体概念,构建原位储层-支撑剂复合体评价参数的计算式,探索该参数在常规测井资料中的响应特征,并由此建立基于常规测井数据的量化评价方法,以期为特低渗透储层提高采收率研究提供依据。

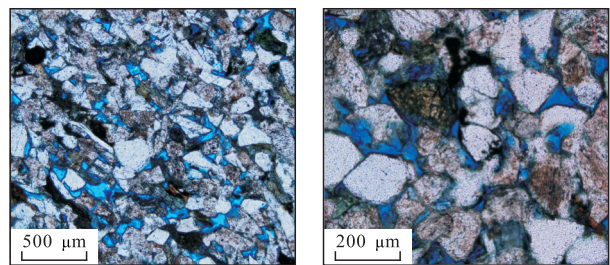
## 1 地质概况

研究区位于松辽盆地中央坳陷区朝阳沟地区,主要目的层为白垩系松花江群泉头组泉三段中上部和泉四段<sup>[13]</sup>,为一套不等粒混杂型碎屑硬砂质长

石砂岩。其储层岩石矿物组成中的石英含量为30%,长石含量为34%,岩屑含量为25%;胶结物以泥质为主,平均含量为14.08%;粘土矿物中的绿/蒙混层含量为40.7%,有的区域高达60%~70%;储层的粒度中值平均为0.107 mm,井点平均空气渗透率仅为3.6 mD,平均有效孔隙度为14.77%~17.77%,属于中-低孔低渗透储层。

## 2 技术依据及流程

水力裂缝的起裂、延伸、分布规律与岩石矿物的排布及孔喉的形状、大小和连通性密切相关。岩石铸体薄片观察发现,研究区储层的孔喉呈现明显的群落式发育特征(图1),致使其物性和岩石力学性质均表现为较明显的非均质性,对后期裂缝的展布产生较重要的影响。水力裂缝开启后,导致储层的导流能力发生严重的非均质性变化,因此需进一步厘清并定量化分析储层微观结构对于水力压裂缝的影响程度。



a—泉三段中上部 b—泉四段  
图1 朝阳沟地区泉三段中上部和泉四段储层  
岩石铸体薄片观察结果

Fig.1 Casting thin sections observation of the middle-upper section of Quan3 member and Quan4 member in Chaoyanggou area

铸体薄片观察结果(图1)表明,研究区泉三段中上部和泉四段储层发育较多的微观裂缝,且粘土矿物含量较高,自生石英较为发育,对储层的岩石力学性质产生重要影响,因此也将影响水力压裂缝延伸的非均质性变化。

中外对水力压裂缝的数值模拟技术总体以半缝长预测为主<sup>[14-20]</sup>,其结果适用于海相均质地层,但无法表征中国陆相低渗透砂岩储层的非均质性及其形成的非对称压裂缝的展布情况<sup>[21-33]</sup>。笔者首次采用全缝长压裂数值模拟技术,结合储层精细地质建模技术,分别将测井数据、三维地质模型数据与压裂模拟技术相结合,对朝阳沟地区翻109-69-2井巨厚压裂层段(埋深为1 243.0~1 267.4 m)形成的压裂缝的展布特征进行预测。

在水力压裂缝数值模拟过程中,需准备网格化的储层孔隙度、渗透率、泊松比和杨氏模量等基础数据。首先针对研究区特殊井的测井资料进行处理、解释,得出孔隙度、渗透率曲线;然后通过统计回归得出泊松比等岩石力学参数与声波时差等常规测井数据的关系式;最终计算得到研究区所有井的岩石力学参数。

采取有限元压裂数值模拟技术定量预测裂缝的展布。在压裂缝预测过程中,分别设置纵、横向网格步长为0.5和5 m。根据工程实际要求,设计水力压裂施工参数(表1)。

表1 朝阳沟地区翻109-69-2井压裂层段水力压裂施工参数

Table1 Hydraulic fracturing parameters of fractured layer in Well F109-69-2,Chaoyanggou area

各阶段压裂时长/min	累积压裂时长/min	各阶段加液量/m <sup>3</sup>	支撑剂类型	支撑剂质量浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )	排量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
10.00	10.00	28.0		0	2.8
5.45	15.45	12.5	石英砂	240	2.5
5.68	21.13	12.5	石英砂	360	2.5
7.09	28.22	15.0	石英砂	480	2.5
9.81	38.04	20.0	石英砂	600	2.5
8.90	46.94	17.5	石英砂	720	2.5
3.00	49.94	7.5		0	2.5

全缝长压裂数值模拟技术的流程为:①以常规测井及特殊测井处理解释得到的物性、岩石力学参

数曲线为基础,辅以沉积微相、波阻抗反演数据控制,建立孔隙度、渗透率、泊松比和杨氏模量等参数的空间模型。②截取穿过翻109-69-2井轨迹平行水平最大主应力方向的剖面网格数据,导入全缝长压裂数值模拟技术的预测系统模拟水力压裂缝展布。

由于建立的地质模型较好地综合了测井、沉积微相及井间地震反演等数据,因此目的层段的有效孔隙度、渗透率、泊松比及杨氏模量等参数的模型显示出较好的平面(横向)、层间、层内储层非均质性,符合中国陆相低渗透砂岩储层相带变化快,岩性、物性隔夹层发育广泛的沉积特征。

### 3 模拟结果分析与讨论

#### 3.1 模拟结果分析

利用表1中的水力压裂施工参数开展裂缝参数耦合计算,得到基于地质建模成果的不同压裂阶段压裂缝的预测结果(图2)。随着压裂的实施,裂缝向远离井筒方向扩展延伸,水平方向为缝长,垂直方向为缝高,颜色代表裂缝开度。横、纵向网格步长分别为5和0.5 m。初始时长为5 min,以5 min为时间步长依次类推。在时长近50 min的水力压裂过程中,左翼裂缝优先起裂伸展,缝长增加速度较快且裂缝开度从5 min开始基本保持不变;至约20

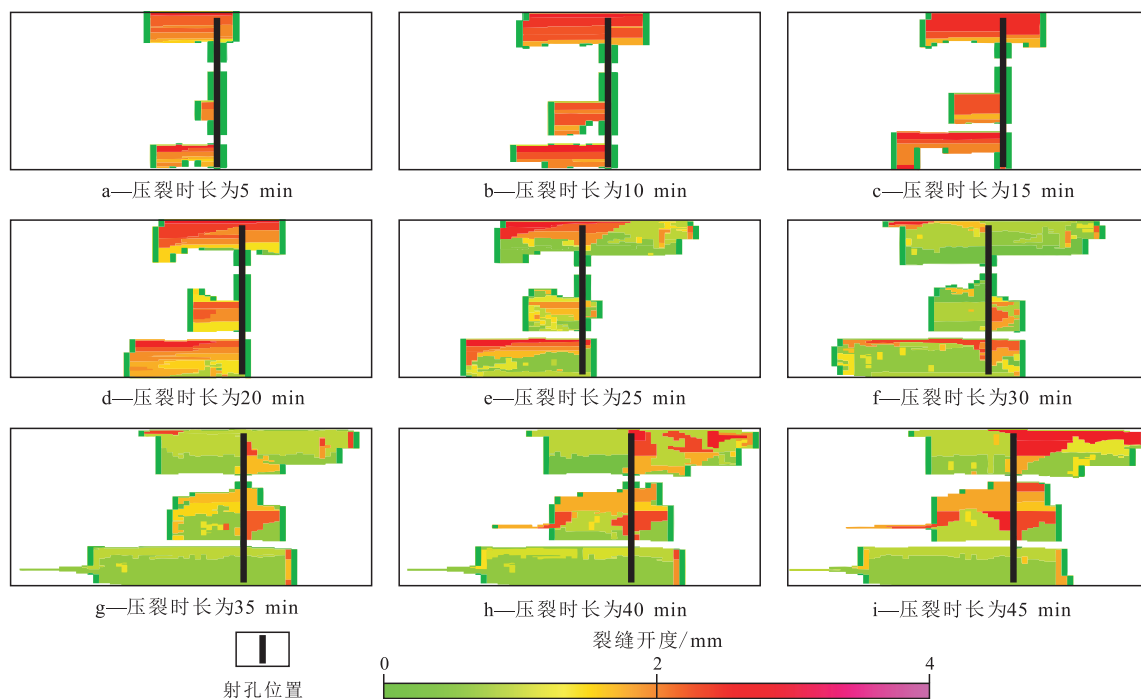


图2 基于地质建模的翻109-69-2井压裂层段不同压裂阶段水力压裂缝展布的模拟结果

Fig.2 Simulation results of fracture distribution in different hydraulic fracturing stages of fractured layer based on geological modeling in Well F109-69-2

min,左翼裂缝的缝长增长趋于停滞,且裂缝开度呈逐渐降低的趋势,这是由于受原始地应力的作用,裂缝趋于闭合,但由于压裂液中输送的石英砂支撑剂,导致裂缝开启的同时又可以留在张开的裂缝中起支撑作用,使得裂缝不至于完全闭合,形成填砂裂缝;20 min后,右翼裂缝开始伸展,且裂缝开度不断增加,表明研究区左、右两翼储层在物性及岩石力学性质方面存在严重的非均质性。

### 3.2 水力压裂缝动态非对称指数构建

随着水力压裂实施时间的推移,在压裂过程中及压裂后的储层已不再具有原位储层的特征,而是以原位储层-支撑剂复合体的形式存在。从本质上剖析,这种复合体的特征不仅源于井筒两端储层微观性质的差异,而且与原始地应力场分布和储层改造对于原始地应力场扰动产生的新的动态应力场的耦合作用密切相关,且随着储层改造过程的进行而不断发生变化。在低渗透砂岩储层压裂开发过程中,随着支撑剂的泵入,储层物性和岩石力学性质均处于连续的动态变化过程,亟需建立一种全面考虑工程与地质因素的参数作为量化评价水力压裂缝动态非对称延伸特征的标准。

对处于固定构造背景的油藏而言,其地应力方向通常分布单一且最大与最小水平主应力的差值较大;由此易导致压裂缝展布方向单一,呈现出1条主裂缝、多条微型支裂缝的分布格局,且地层导流能力的增大很大程度上来源于主裂缝的贡献。因此主裂缝的展布特征预测对于水力压裂开发效果的判定具有重大意义。由于主裂缝开度很大程度上可以表征裂缝内被支撑剂填充进而形成填砂裂缝的可能性,因此不同压裂时长井筒两端裂缝(即裂缝左、右两翼)纵向上随深度变化时各行网格的裂缝开度之和的差异可以较好地表征井筒两端裂缝形成水平的差异,不同压裂时长裂缝左、右两翼的裂缝开度及其变化曲线的对比可以较好地反映出纵向上原位储层-支撑剂复合体的特征,故将储层左、右两翼各小层的纵向水力压裂缝开度之和的差值与对应井筒处的水力压裂缝开度之比取绝对值后再进行归一化处理,将其作为原位储层-支撑剂复合体评价的度量,即水力压裂缝动态非对称指数。其表达式为

$$D_0 = \left| \frac{d_2 - d_1}{d_w} \right| \quad (1)$$

$$D_h = \frac{D_0 - D_{0\min}}{D_{0\max} - D_{0\min}} \quad (2)$$

式中:  $D_0$  为未归一化处理的原位储层-支撑剂

复合体的水力压裂缝动态非对称指数;  $d_2$  为裂缝左翼各小层水力压裂缝开度之和;  $d_1$  为裂缝右翼各小层水力压裂缝开度之和;  $d_w$  为井筒处储层的裂缝开度;  $D_h$  为归一化处理的原位储层-支撑剂复合体的水力压裂缝动态非对称指数。

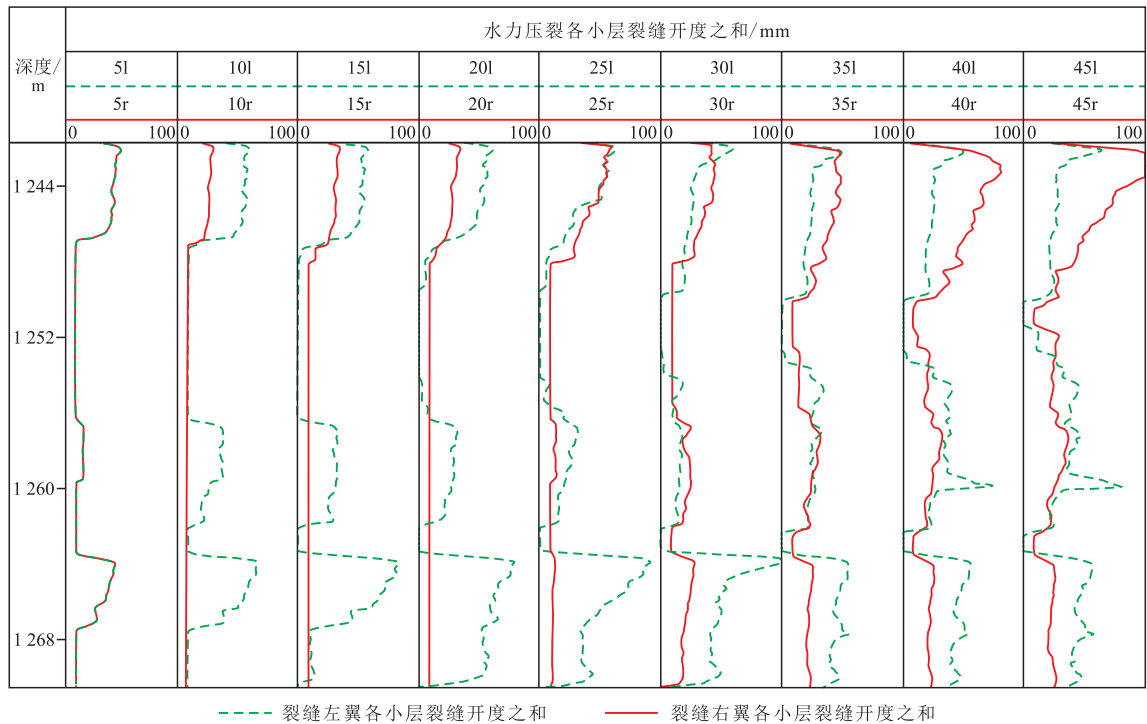
### 3.3 基于常规测井数据的裂缝开度定量评价

在储层改造方式的决策过程中,通常会因考虑工程难度因素而采取对厚度较大的低渗透砂岩储层发育层段进行整体压裂,以期实现大规模、大段造缝的目的。但从实际来看,由于中国陆相低渗透砂岩储层中常分布有较稳定的泥岩或云岩隔夹层,数值模拟结果及压裂各小层裂缝开度之和随时间变化曲线与常规测井曲线对比结果显示(图2,图3),隔夹层等非储层发育层段的裂缝规模较小或极少开启,因此对产能的贡献较小。此外,储层段产生的裂缝两翼的规模扩展亦呈动态分布,且差异较大,前期张开裂缝的位置可能在下一压裂阶段由于应力等因素再次闭合,若对不同压裂时长储层水力压裂缝的对称性不进行科学评价,则易导致对产能的错误预测和评价。

因此,为全面评价储层水力压裂缝的动态非对称延伸特征,分别以某一固定水力压裂时间段为节点,以裂缝开启及开度变化层段为研究对象,首先研究水力压裂各小层左、右翼裂缝开度之和与相应小层井筒所在位置裂缝开度之间的关系,得出定量关系式,剖析远离井筒储层与井筒附近储层的裂缝规模的耦合关系;其次,研究各小层井筒所在位置裂缝开度与相同位置网格常规测井数据之间的关系,确定不同压裂阶段井筒处裂缝开度的常规测井响应定量计算公式;最后,推导出水力压裂各小层左、右翼裂缝开度之和与常规测井数据之间的耦合关系式,以达到定量计算水力压裂缝动态非对称指数的目的。

对于水力压裂过程中的每个时间节点,各小层左、右翼裂缝的张开位置和时间次序不一致。因此,只有选取整个压裂过程中左、右翼裂缝开度发生连续变化的层段作为研究对象,才能确保水力压裂缝动态非对称指数的计算精度。

对于水力压裂各小层的左翼裂缝(图3),水力压裂时长为0~5 min属于前置液造缝阶段,该时间段内各小层的左翼裂缝开度之和与相应小层井筒所在位置裂缝开度之间具有极为密切的相关关系,表明这一阶段的左翼裂缝延伸规模受起裂处井筒附近储层的控制,且储层地应力及缝内净压力的大



— — — 裂缝左翼各小层裂缝开度之和      ——— 裂缝右翼各小层裂缝开度之和  
 注：5l—45l和5r—45r分别表示压裂时长为5—45 min的裂缝左、右翼各小层裂缝开度之和

图3 水力压裂各小层裂缝开度之和随压裂时长变化曲线

Fig.3 Variation of the sum of hydraulic fracture openness with time in each layer

小和方向较为稳定,非均质性较弱。至10 min后开始进入加砂支撑缝阶段,各小层的左翼裂缝开度之和与相应小层井筒所在位置裂缝开度之间的相关关系依然较好,但相比初始相关系数已大幅下降,表明由于距井筒的距离增大,该时间段内裂缝已波及到的左翼储层的物性和岩石力学性质等已发生动态变化,其裂缝的延伸规模不再受起裂处井筒附近储层的主导,且由于储层中强水敏造成压裂液的大量滤失,导致储层地应力及缝内净压力的大小和方向亦发生动态变化,左翼储层的非均质性发生了动态的连续性变化。

对于水力压裂各小层的右翼裂缝(图3),水力压裂时长为0~20 min属于包含前置液造缝阶段和加砂形成支撑缝的前2次加砂阶段(共分5次加砂),在该段时间内各小层右翼裂缝开度之和与相应小层井筒所在位置裂缝开度之间具有极为密切的相关关系,且具有与左翼裂缝相似的发育特征。至25 min后进入加砂支撑缝的后3次加砂阶段,各小层的右翼裂缝开度之和与相应小层井筒所在位置裂缝开度之间已呈现出较为复杂的多次项关系,且相比初始相关系数也大幅下降,表明由于距井筒的距离增大,该时间段内裂缝已波及到的右翼储层的物性和岩石力学性质等已发生相比左翼储层更加剧烈的动态变化,其裂缝的延伸规模已基本不受

起裂处井筒附近储层的控制,而完全受控于裂缝前端连续变化的原始地应力及缝内净压力,右翼储层的非均质性亦发生了动态的连续性剧烈变化。

此外,由于各小层井筒所在位置的裂缝开度由全缝长非对称压裂缝模拟技术确定,而无法直接计算,不利于对原位储层-支撑剂复合体的评价。因此,若能通过研究各小层井筒所在位置裂缝开度与相同位置网格常规测井数据之间的关系,确定不同水力压裂时长井筒处裂缝开度的常规测井响应定量计算公式,即可得到各小层井筒所在位置的裂缝开度。

以水力压裂时长为5 min为例,绘制各小层井筒所在位置裂缝开度与相同位置网格处的深侧向电阻率(LLD)、浅侧向电阻率(LLS)、自然电位(SP)的交会图(图4),发现各小层井筒所在位置的裂缝开度与LLD和LLS呈良好的负相关关系,与SP呈良好的正相关关系。通过计算 $SP/(LLS \times LLD)$ ,并将其与各小层井筒所在位置的裂缝开度再次交会分析,发现该值与各小层井筒所在位置的裂缝开度具有对数相关关系,由此得到水力压裂时长为5 min井筒处裂缝开度的常规测井响应定量计算公式(图4)。

同理可以得到水力压裂时长分别为5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40和45 min,各小层井筒处裂缝开度

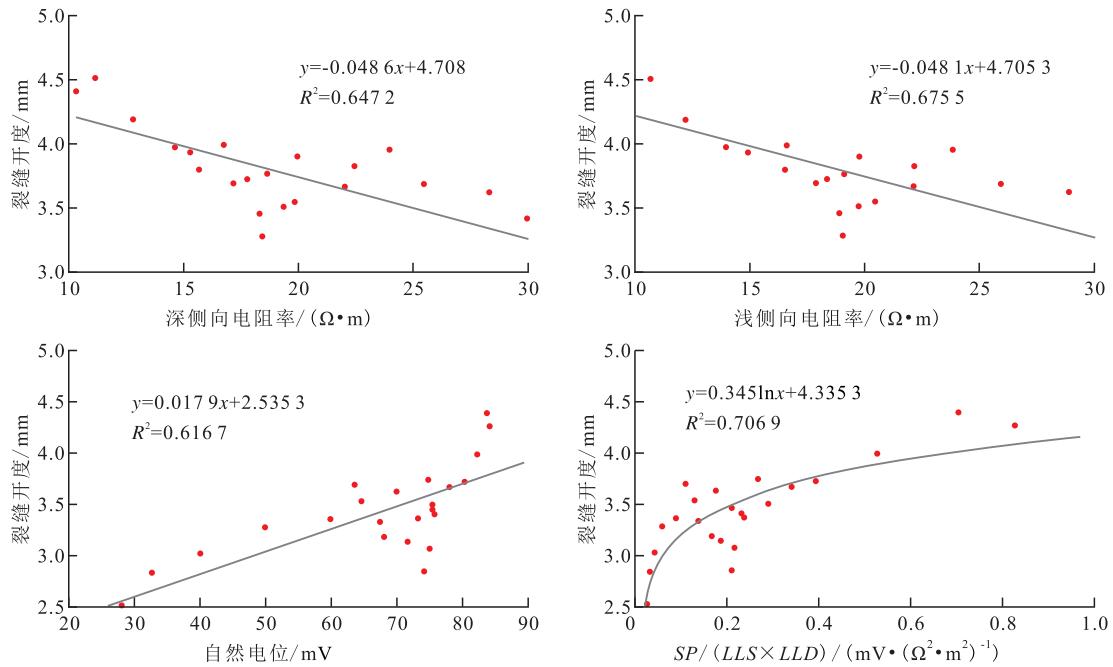


图4 水力压裂时长为5 min各小层井筒所在位置裂缝开度与相同位置网格处常规测井数据交会图

Fig.4 Cross plot of the fracture width located in the wellbore in 5 min and the conventional log data

的常规测井响应定量计算公式,依次为

$$D_{w5} = 0.345 \ln\left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 4.3353 \quad (3)$$

$$D_{w10} = 0.360 \ln\left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 4.6536 \quad (4)$$

$$D_{w15} = 0.365 \ln\left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 4.7673 \quad (5)$$

$$D_{w20} = 0.516 \ln\left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 4.5283 \quad (6)$$

$$D_{w25} = 0.340 \ln\left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 4.2433 \quad (7)$$

$$D_{w30} = -0.7049 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^2 + 1.2832 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 1.5579 \quad (8)$$

$$D_{w35} = 167.35 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^4 - 283.98 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^3 + 142.94 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^2 - 18.588 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 2.1403 \quad (9)$$

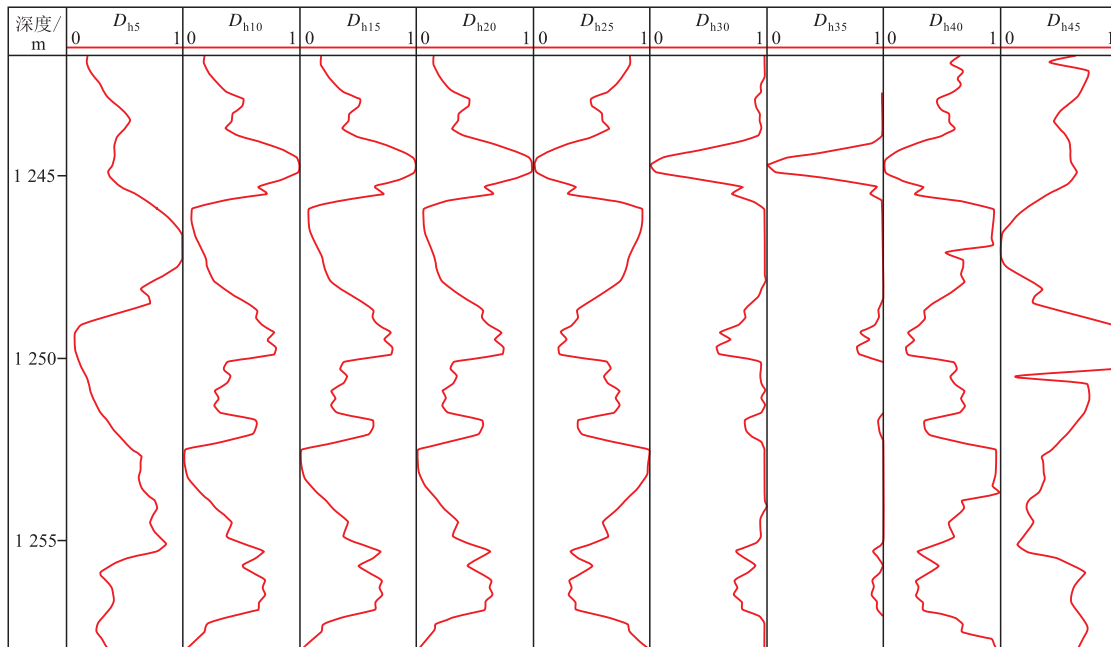
$$D_{w40} = -4.1062 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^2 + 8.4629 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 1.0895 \quad (10)$$

$$D_{w45} = -0.8217 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right)^2 + 7.3496 \left(\frac{SP}{LLD \times LLS}\right) + 1.1642 \quad (11)$$

式中:  $D_w$  为井筒处裂缝开度,mm;  $LLD$  为深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $LLS$  为浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $SP$  为

自然电位,mV。

根据水力压裂缝动态非对称指数计算公式,基于埋深为1241.7~1259.3 m储层段常规测井数据,计算得到不同压裂时长的水力压裂缝动态非对称指数曲线(图5)。由图5可以看出,水力压裂缝动态非对称指数可以反映出水力压裂缝在某一压裂时长的非对称规模水平。其值越大,反映水力压裂缝的对称性越差,若该层段储层的物性较差,则进一步水力压裂改造的潜能较小;若该层段储层的物性较好,则表明仅沿井筒某一方向实现有效改造,而其他方向地层并未有效压裂,可以采用转向压裂等改造手段实现储层的充分动用。相似地,其值越小,反映水力压裂缝的对称性越好,若该层段储层的物性较差,则形成裂缝的规模较小,进一步水力压裂改造的潜能亦较小;若该层段储层的物性较好且产液量较低,则表明虽然实现了水力压裂缝对称,但压开程度较低,可进一步采用转向压裂等改造手段实现储层的充分动用;若该层段储层的物性较好且产液量较高,则表明水力压裂缝对称,但压开程度较低,基本实现了储层的充分动用。随着时间的推移,水力压裂缝动态非对称指数的变化存在一定的规律,在水力压裂时长为0~20 min,水力压裂缝动态非对称指数基本保持不变;20~25 min,水力压裂缝动态非对称指数曲线整体转向,进一步印证水力压裂过程中储层应力和物性等因素的复杂变化将导致发生部分已开启裂缝重新闭合等动态



注:  $D_{h5}$ — $D_{h45}$ 分别表示压裂时长为5—45 min的水力压裂缝动态非对称指数

图5 翻109-69-2井压裂层段水力压裂缝动态非对称指数曲线

Fig.5 Curves of asymmetric index of hydraulic fracture in Well F109-69-2

变化。在油田开发中后期的挖潜过程中,可在储层进一步细分的基础上,根据井组注水及生产动态,结合水力压裂缝动态非对称指数曲线开展重复压裂参数优化,以期实现储层的充分动用,进而提高最终采出程度。

## 4 结论

水力压裂缝的精细预测对于油田开发增产意义重大,水力压裂缝动态非对称延伸特征剖析是剩余油挖潜的重要方向。针对中国陆相低渗透砂岩储层,基于地质建模成果的全缝长非对称压裂缝模拟技术要优于仅基于常规测井数据的半缝长非对称压裂缝模拟技术,便于储层非均质性的研究。由于注水开发会造成油藏三维空间应力场等物理化学性质发生动态变化,因而水力压裂缝的展布也将呈现动态非对称特征。综合工程和地质因素,提出以水力压裂缝动态非对称指数来表征水力压裂缝动态非对称延伸特征,进而建立基于常规测井曲线的量化评价方法,并将水力压裂缝动态非对称指数作为一种新的开发地质属性加以应用。水力压裂缝动态非对称指数反映水力压裂缝在某一压裂时长的非对称延伸规模水平,其值越大,反映水力压裂缝的对称性越差,若该层段的储层物性较差,则进一步水力压裂改造的潜能较小;若该层段的储层物性较好,则表明仅沿井筒某一方向实现了有效改

造,而其他方向地层并未有效压开,可以开展转向压裂等改造手段实现储层的充分动用。相似地,其值越小,反映水力压裂缝对称性越好;若该层段的储层物性较差,则表明形成的水力压裂缝的规模较小,进一步水力压裂改造的潜能亦较小;若该层段的储层物性较好且产液量较低,则表明虽实现了均匀改造,但压开程度较低,可进一步开展转向压裂等改造手段实现储层的充分动用;若该层段的储层物性较好且产液量较高,则表明实现了均匀改造,基本实现了储层的充分动用。在油田开发中后期的挖潜过程中,可在储层进一步细分的基础上,计算单井水力压裂缝动态非对称指数,并结合矿场产液剖面 and 吸水剖面分析,开展转向压裂等改造手段,以实现储层的充分动用,提高最终采出程度。

### 参考文献:

- [1] 朱维耀, 仝倩, 马千, 等. 页岩气不稳定渗流压力传播规律和数学模型[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 1-7.  
ZHU Weiyao, QI Qian, MA Qian, et al. Unstable seepage modeling and pressure propagation of shale gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 1-7.
- [2] 卢晨刚, 张遂安, 毛潇潇, 等. 致密砂岩微观孔隙非均质性定量表征及储层意义——以鄂尔多斯盆地X地区山西组为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 556-561.  
LU Chengang, ZHANG Suian, MAO Xiaoxiao, et al. Quantitative characterization of microscopic pore heterogeneity in tight sandstones and its reservoir significance: A case study of the Shanxi Formation in X area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Exper-

- iment, 2017, 39(4):556-561.
- [3] 马世忠,张宇鹏.应用压汞实验方法研究致密储层孔隙结构——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J].油气地质与采收率, 2017, 24(1):26-33.  
MA Shizhong, ZHANG Yupeng. Study on the pore structure of tight reservoir by using method of mercury injection—A case study of the Lucaogou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1):26-33.
- [4] 罗晓容,张立宽,雷裕红,等.储层结构非均质性及其在深层油气成藏中的意义[J].中国石油勘探, 2016, 21(1):28-36.  
LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, LEI Yuhong, et al. Structural heterogeneity of reservoirs and its implication on hydrocarbon accumulation in deep zones [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1):28-36.
- [5] 尉鹏飞,张金川,隆帅,等.四川盆地及周缘地区龙马溪组页岩微观孔隙结构及其发育主控因素[J].中国石油勘探, 2016, 21(5):42-51.  
WEI Pengfei, ZHANG Jinchuan, LONG Shuai, et al. Characteristics and controlling factors of microscopic pore structure of Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5):42-51.
- [6] 胡罡.计算水驱油藏体积波及系数的新方法[J].石油勘探与开发, 2013, 40(1):103-106.  
HU Gang. A new method for calculating volumetric sweep efficiency in a water-flooding oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):103-106.
- [7] 纪淑红,田昌炳,石成方,等.高含水阶段重新认识水驱油效率[J].石油勘探与开发, 2012, 39(3):338-345.  
JI Shuhong, TIAN Changbing, SHI Chengfang, et al. New understanding on water-oil displacement efficiency in a high water-cut stage [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3):338-345.
- [8] 许长福,刘红现,钱根宝,等.克拉玛依砾岩储集层微观水驱油机理[J].石油勘探与开发, 2011, 38(6):725-732.  
XU Changfu, LIU Hongxian, QIAN Genbao, et al. Microcosmic mechanisms of water-oil displacement in conglomerate reservoirs in Karamay Oilfield, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6):725-732.
- [9] 李阳,王端平,刘建民.陆相水驱油藏剩余油富集区研究[J].石油勘探与开发, 2005, 32(3):91-96.  
LI Yang, WANG Duanping, LIU Jianmin. Remaining oil enrichment areas in continental waterflooding reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3):91-96.
- [10] 李兴训.水驱油田开发效果评价方法研究[D].成都:西南石油学院, 2005.  
LI Xingxun. Study on evaluation method for oilfield development effect of water flooding [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2005.
- [11] 苏海波,于金彪,张同伍,等.低渗透储层水驱油渗流阻力特征[J].油气地质与采收率, 2018, 25(1):117-121.  
SU Haiibo, YU Jinbiao, ZHANG Tongwu, et al. Features of seepage resistance during water flooding in low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1):117-121.
- [12] 侯荣.岔河集油田岔30断块水驱开发效果评价[D].成都:西南石油学院, 2002.  
HOU Rong. Effect evaluation on water flooding in Cha30 fault-block of Chaheji oilfield [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2002.
- [13] 李景伟.朝阳沟油田外围扶余油层高分辨率层序地层研究及开发潜力评价[D].大庆:大庆石油学院, 2008.  
LI Jingwei. High-resolution sequence stratigraphy research and development potential appraisal of Fuyu oil layer in the peripheral area of Chaoyangou Oil Field [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [14] 徐蕾,师永民,徐常胜,等.长石族矿物对致密油储渗条件的影响——以鄂尔多斯盆地长6油层组为例[J].石油勘探与开发, 2013, 40(4):448-454.  
XU Lei, SHI Yongmin, XU Changsheng, et al. Influences of feldspars on the storage and permeability conditions in tight oil reservoirs: A case study of Chang-6 oil layer group, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4):448-454.
- [15] 张文正,杨华,解丽琴,等.鄂尔多斯盆地上古生界煤成气低孔渗储集层次生孔隙形成机理——乙酸溶液对钙长石、铁镁暗色矿物溶蚀的模拟实验[J].石油勘探与开发, 2009, 36(3):383-391.  
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Secondary porosity formation of Upper Paleozoic low porosity-permeability coal-formed gas reservoirs, Ordos Basin: Simulation on dissolution of anorthite and dark-colored feldspar minerals in acetic acid solution [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3):383-391.
- [16] 赵国泉,李凯明,赵海玲,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成[J].石油勘探与开发, 2005, 32(1):53-55, 75.  
ZHAO Guoquan, LI Kaiming, ZHAO Hailing, et al. Feldspar corrosion and secondary pore formation in the Upper Paleozoic gas reservoir, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1):53-55, 75.
- [17] 杨正明,于荣泽,苏致新,等.特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J].石油勘探与开发, 2010, 37(1):94-98.  
YANG Zhengming, YU Rongze, SU Zhixin, et al. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1):94-98.
- [18] HUSSAIN Siti Aslina. Water local volume fraction on oil in water dispersion [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2008, 1(2):57-63.
- [19] MORGANA de Vasconcellos Araújo, SEVERINO Rodrigues de Farias Neto, ANTONIO Gilson Barbosa de Lima. Theoretical evaluation of two-phase flow in a horizontal duct with leaks [J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2013, 3(4):6-14.
- [20] LAN Wenjie, LI Shaowei, XU Jianhong, et al. Synthesis of titania-silica core-shell microspheres via a controlled interface reaction in a microfluidic device [J]. Langmuir, 2011, 27(21):13242-13247.



- [21] PIELA K, OOMS G, SENGERS J V. Phenomenological description of phase inversion [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2009, 792(1): 1-8.
- [22] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.  
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- [23] 白云来, 王新民, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地西部边界的确定及其地球动力学背景[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 792-813.  
BAI Yunlai, WANG Xinmin, LIU Huaqing, et al. Determination of the borderline of the western Ordos Basin and its geodynamics background [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 792-813.
- [24] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 798-807.  
LI Shixiang, DENG Xiuqin, PANG Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 798-807.
- [25] 陈全红, 李文厚, 胡孝林, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1150-1162.  
CHEN Quanhong, LI Wenhou, HU Xiaolin, et al. Tectonic setting and provenance analysis of late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7): 1150-1162.
- [26] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34-43.  
YUAN Xuanjun, LIN Senhu, LIU Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34-43.
- [27] 屈红军, 杨县超, 曹金舟, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深部油气聚集规律[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 243-248.  
QU Hongjun, YANG Xianchao, CAO Jinzhou, et al. Oil accumulation rules in deep zones of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 243-248.
- [28] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. *古地理学报*, 2011, 13(4): 443-455.  
DENG Xiuqin, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(4): 443-455.
- [29] 王峰, 田景春, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积充填演化及其对印支构造运动的响应[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(6): 882-889.  
WANG Feng, TIAN Jingchun, FAN Liyong, et al. Evolution of sedimentary fillings in Triassic Yanchang Formation and its response to Indosinian movement in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(6): 882-889.
- [30] 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透大型岩性油藏成藏机理研究[D]. 西安: 西北大学, 2011.  
DENG Xiuqin. Accumulation mechanism research on ultra-low-permeability and large scale lithologic reservoirs of Triassic Yanchang formation in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [31] 王香增, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地致密油的定义[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 1-7.  
WANG Xiangzeng, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Definition of tight oil in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(1): 1-7.
- [32] 王学军, 王志欣, 陈杰, 等. 鄂尔多斯盆地镇北油田延长组低渗透储层成因及油气运移特征[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(1): 15-18.  
WANG Xuejun, WANG Zhixin, CHEN Jie, et al. Low permeability reservoirs genesis and petroleum migration of the Yanchang formation, Zhenbei oilfield, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(1): 15-18.
- [33] 梁吉学, 常象春, 尹伟. 镇泾地区延长组流体过剩压力分布特征及其与油气成藏的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(4): 55-60.  
LIANG Jixue, CHANG Xiangchun, YIN Wei. Distribution characteristics of fluid overpressure and their relationship with hydrocarbon accumulation in the Yanchang Formation of Zhenjing area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(4): 55-60.

编辑 邹滋滢