

文章编号: 0253-2697(2017)05-0570-08 DOI:10.7623/syxb201705010

裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度建模 ——以四川盆地平落坝构造须家河组二段储层为例

黄小娟^{1,2} 李治平^{1,2} 周光亮³ 刘倩⁴ 李洪^{1,2} 王红坤⁵

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 中国地质大学非常规天然气地质评价与开发工程北京市重点实验室 北京 100083;
3. 中国石油西南油气田公司川西北气矿 四川江油 621700; 4. 北京恺标技术发展有限公司 北京 100083;
5. 中国石油化工股份有限公司河南油田分公司勘探开发研究院 河南濮阳 450000)

摘要:裂缝性致密砂岩储层的非均质性突出,相对于沉积相变对储层所造成的影响,后期成岩与构造运动对储层的改造更重要,裂缝的发育特征常是影响这类储层有效性的关键因素。常规描述储层性质的孔隙度、渗透率参数难以确切描述该类储层的性质。在评价裂缝性致密砂岩储层时,将裂缝破碎带作为优质储层研究对象,以裂缝孔隙度作为储层评价关键参数,是研究裂缝性致密砂岩有效储层分布规律的重要途径。在裂缝孔隙度建模过程中,构造裂缝孔隙度的空间结构信息是建模的关键,在建立地震属性与裂缝的相关性基础之上,使用地震属性构造了裂缝孔隙度的空间结构参数。生产数据表明,地震低频属性能够在整体上指示裂缝孔隙度的平面分布特征,可以用来构造裂缝孔隙度的变差函数,但该属性不能定量给出裂缝孔隙度的空间分布特征,因此不能用于辅助参数进行协同计算。将地震蚂蚁体数据和通过成像测井校正的单井裂缝孔隙度解释数据共同作为模拟裂缝孔隙度模型的输入参数,使用协同建模的方法建立裂缝孔隙度的空间分布,从而定量评价了裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度的空间展布规律,为数值模拟提供数据支持。

关键词:致密砂岩;蚂蚁体数据;成像测井;裂缝孔隙度;建模

中图分类号:TE34

文献标识码:A

Fracture porosity modeling of fractured tight sandstone reservoir: a case study of the reservoir in Member 2 of Xujiache Formation, Pingluoba structure, Sichuan Basin

Huang Xiaojuan^{1,2} Li Zhiping^{1,2} Zhou Guangliang³ Liu Qian⁴ Li Hong^{1,2} Wang Hongkun⁵

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Northwest of Sichuan Gas Field, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Jiangyou 621700, China; 4. Beijing KaiBiao Technology Development Company Limited, Beijing 100083, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Henan Oilfield Company, Henan Puyang 450000, China)

Abstract: Fractured tight sandstone reservoirs are highly heterogeneous. In contrast to the effect of sedimentary facies change, diagenesis and tectonic movements play more important role. The properties and distribution of fractures are always the key factors to evaluate such type of reservoir. The porosity and permeability parameters, which are normally used to describe reservoir properties, could not describe fractured tight sandstone reservoir sufficiently. It is an important method to evaluate the distribution of the effective reservoir of the fractured tight sandstone by treating fracture porosity as a random variable and using it as a key evaluating parameter. Constructing the spatial structure of the fracture porosity is the key step for modeling, and therefore the spatial structure parameters created by using seismic properties after the correlation was established. Production data indicated that frequency spectral decomposition properties of seismic could show the similar plane distribution of the fracture porosity, and could be used to calculate the varigram of the fracture porosity. However, the properties were 2D and could not be used as secondary data in modeling. Ant tracking data of seismic and log interpreted fracture porosity being as input data and using collaborative modeling method to create the spatial distribution of the fracture porosity were established and then evaluated the reservoir quantitatively.

Key words: tight sandstone; ant tracking data; imaging logging; fracture porosity; modeling

引用:黄小娟,李治平,周光亮,刘倩,李洪,王洪坤. 裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度建模——以四川盆地平落坝构造须家河组二段储层为例[J]. 石油学报, 2017, 37(5): 570-577.

Cite: HUANG Xiaojuan, LI Zhiping, ZHOU Guangliang, LIU Qian, LI Hong, WANG Hongkun. Fracture porosity modeling of fractured tight sandstone reservoir: a case study of the reservoir in Member 2 of Xujiache Formation, Pingluoba structure, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 37(5): 570-577.

基金项目:国家重大科技专项(2017ZX05009-005)和北京市自然科学基金项目(No. 3162026)资助。

第一作者:黄小娟,女,1973年3月生,1995年获江汉石油学院学士学位,现为中国地质大学(北京)博士研究生,主要从事储层建模与气藏模拟研究。
Email: huangxj@cugb.edu.cn

通信作者:李治平,男,1963年10月生,1985年获西南石油学院学士学位,1998年获西南石油学院博士学位,现为中国地质大学(北京)教授、博士生导师,主要从事油气田开发理论与开采方法、非线性油气层渗流力学理论与应用、油藏数值模拟方法及软件开发等方面的研究工作。
Email: 20022011671@cugb.edu.cn

四川盆地平落坝构造须家河组二段(须二段)气藏经过 20 多年的开发,已经进入开发中后期,气藏在构造不同部位的取心资料及其样品的实测孔隙度、渗透率、饱和度数据结果显示,须二段储层沉积相与物性均表现稳定,但气井产能相差悬殊。对储层基质物性参数的研究表明,储层基质的相对高孔、高渗区域出现了低产能井,而相对低孔、低渗区域出现了高产能井,基质物性参数不能描述有效储层的分布规律,无法表征气藏的产能差异。

研究裂缝孔隙度的分布特征是评价平落坝气藏储层的关键^[1-3]。定量评价裂缝性储层的裂缝孔隙度是分析致密砂岩气藏以及其他裂缝性油气藏的关键^[4-7]。Petrel 软件将裂缝作为片元来处理,但裂缝在不同空间位置的产状数据的获取较为困难,而且该软件给出的片元过于理想,使用其 workflow 建立起来的模型可信度低,在研究区所建立的模型无法用于气藏模拟。

将裂缝破碎带作为研究对象来建模,提供了一种新的建模思路。Qu 和 Tveranger^[8]提出了在断层破碎带内进行裂缝孔隙度建模的方法,通过断层的落差与露头资料建立断层破碎带的空间范围并使用变差函数建模。该方法高度简化了断层面形态特征,但在实际情况下,这种明确指定断层破碎带的方法不能提供有效的空间限制,尤其在多条断层共同控制的情况下,断层破碎带不可能呈规则饼状。Fachri 等^[9]提出了另一种在角点网格下,采用局部加密的方法完成裂缝破碎带的空间描述,然后在这个裂缝破碎带内使用高斯模拟的方法建模。这种方法的问题是在确定加密角点网格时,需要人工输入边界,同时在破碎带内建立相模型与渗透率模型时,明显缺少建立变差函数的数据支持。

笔者从平落坝的具体情况出发,将裂缝破碎带作为研究对象,与 Qu 和 Tveranger 以及 Fachri 等方法不同,没有明确划分断层破碎带,而是将裂缝孔隙度看作一个随机变量,通过地震数据约束该变量,从而达到类似建模效果,在空间上模拟出裂缝孔隙度的变化规律,为裂缝性致密砂岩储层分类与开发方案的调整提供定量化支持。

1 地质背景

四川盆地平落坝构造须二段沉积环境为辫状河三角洲水下平原与辫状河三角洲前缘,在须二段沉积期,来自 NW 向的物源供给充足,沉积速度快,整个须二段沉积期,平落坝均位于水下,在相对水平面抬升期与高水位期,沉积连续无间断,沉积环境稳定。须二段沉积厚度约为 220 m,发育有水下分支河道、河口坝以及

河道间微相类型,堤岸相不发育。砂岩以中—粗粒石英砂岩为主,杂基与胶结物含量普遍很低,砂岩占地层的比例超过 80%,砂岩体多为水下分支河道与河口坝交互叠置而成的厚层砂岩复合体,砂岩总体分布稳定。须二段与其上覆须家河组三段(须三段)构成一个完整的三级层序,须二段自下而上划分为低水位体系域和水进体系域,须三段为高水位体系域^[10]。

平落坝构造形成于喜马拉雅构造运动早期,由 NWW—SEE 向压扭作用形成了目前的构造格局,在喜马拉雅构造运动晚期受 SWW—NEE 向压扭作用影响再次活跃,但构造形态没有改变,平落坝整体构造呈 NE 走向,沿着构造走向,形成了一系列延伸方向与构造走向一致的逆断层(图 1)。

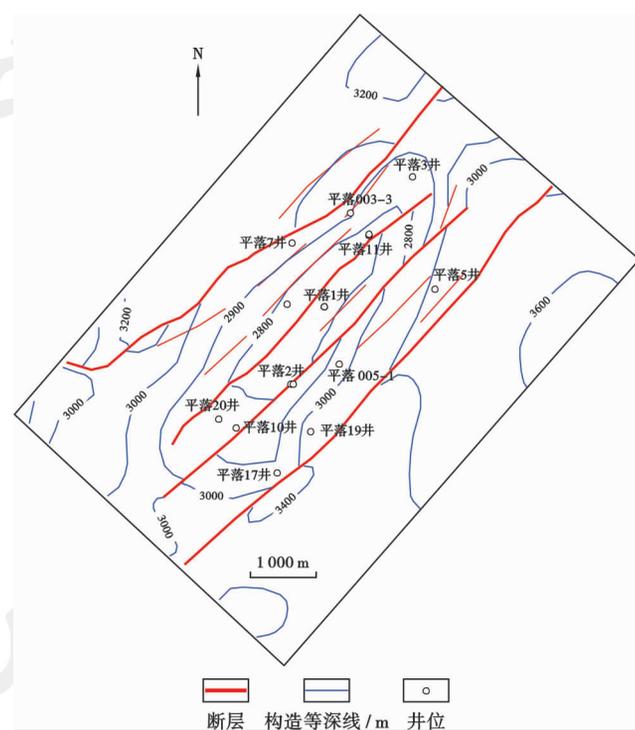


图 1 平落坝构造须二段顶面构造

Fig. 1 The top surface structural of Member 2 of Xujiahe Formation in Pingluoba structure

平落坝构造须二段为特低孔致密砂岩储层,构造运动对储层物性产生了至关重要的影响,在构造运动的改造下,伴随着主要的逆断层,形成了延伸范围不一的断裂破碎带,在这些破碎带内,储层的物性得到了极大的改善,并形成了局部高渗流带。

2 储层基质物性特征

致密砂岩基质物性特征大多表现为低孔、低渗以及高含水。平落坝构造 2913 个岩心样本实测数据显示,平均孔隙度、渗透率与含水饱和度分别为 3.6%、 1.5×10^{-2} mD 和 54.58%。基质物性样本分布规律性明显,

孔隙度与含水饱和度接近正态分布,渗透率接近对数正态分布。

特低孔裂缝性致密砂岩储层基质物性特征与有效储层没有必然关系。在平落坝构造,对于基质物性相对较好的平落7井,由于没有钻遇裂缝发育带,虽然地层压力超过40 MPa,但并未产出天然气或地层水。按照物性基质孔隙度大于4%,渗透率大于0.01 mD的标准划分出来的有效储层单层厚度明显优于平落2井(图2、表1),而物性较平落7井差的平落2井是平落坝构造生产状况最好的采气井。因此,基质孔隙度不适合作为评价裂缝孔隙型致密砂岩有效储层的主要参数。

据。饱和度与孔隙度类似,与钻探试采结果没有明显的相关性,同样不能很好地表征储层性质(表1)。

表1 主要产气层岩心物性对比

Table 1 Core petrophysics correlation of main gas production layers

井号	样本数	孔隙度平均值/%	孔隙度标准差	渗透率平均值/ 10^{-3} mD	渗透率标准差	含水饱和度平均值/%	含水饱和度标准差
平落1	163	4.179	0.875	24.30	30.46	60.80	9.50
平落2	244	3.281	1.242	40.15	82.57	62.10	10.14
平落3	238	3.050	1.225	31.94	38.58	60.16	11.20
平落5	329	3.617	1.091	24.62	25.52	48.30	11.80
平落6	162	3.038	0.758	35.21	36.11	51.80	7.60
平落7	192	4.465	0.982	50.22	76.74	45.50	11.13

3 储层裂缝分布

目前对裂缝性油气藏裂缝孔隙度的空间分布进行定量研究没有成熟的方法。针对裂缝的研究大多是从描述裂缝的密度、长度、开度等参数入手,这些数据可以在取心井段对储层裂缝进行准确描述,但参数的获取较困难。成像测井提供了评价裂缝的可选途径,但与获取岩心资料类似,难以得到足够多且具有统计意义的成像数据来支持裂缝空间分布规律的研究。对于已开发的老油气田,许多现有的成像测井资料都是零散的,不能直接对裂缝发育情况进行全面评价。笔者借助地震与测井数据,在综合分析气藏生产数据与地震属性相关性的基础上,总结出建立裂缝孔隙度空间结构参数,使用储层参数建模的方法,提出了一种量化研究裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度的方法。

3.1 裂缝发育特征

平落坝构造形成于喜马拉雅运动早期,在压扭应力作用下,形成了一系列近NE向逆断层,伴随这些断层,发育了一系列的NE向断层破碎带。在地震成果数据体上,可以定性分辨出这些破碎带的空间分布特征,而裂缝破碎带内的储层是有效储层,与生产开发数据吻合。图3中测线为NW向,垂直构造走向,黄色箭头指向为与断层Ⅲ走向一致的裂缝破碎带。平落2井的目的层位于裂缝破碎带内。

岩心观察可见2组近正交的高角度裂缝,在微观薄片上也明确体现出2组近正交的构造裂缝(图4)。这些裂缝的存在是有效储层的必要条件,其不仅具有储集性能,也是沟通孔隙的桥梁,微裂缝的存在提高了储层的渗透性能。岩心与薄片观察表明,在岩心上宏观裂缝发育的井段,微观裂缝也发育,反之,在岩心上宏观裂缝不发育的井段,微观裂缝也一样不发育。在裂缝发育带,岩心呈破碎状态,区分不同级别的裂缝较困难,同时,在物性上不同级别的裂缝对物性参数的贡

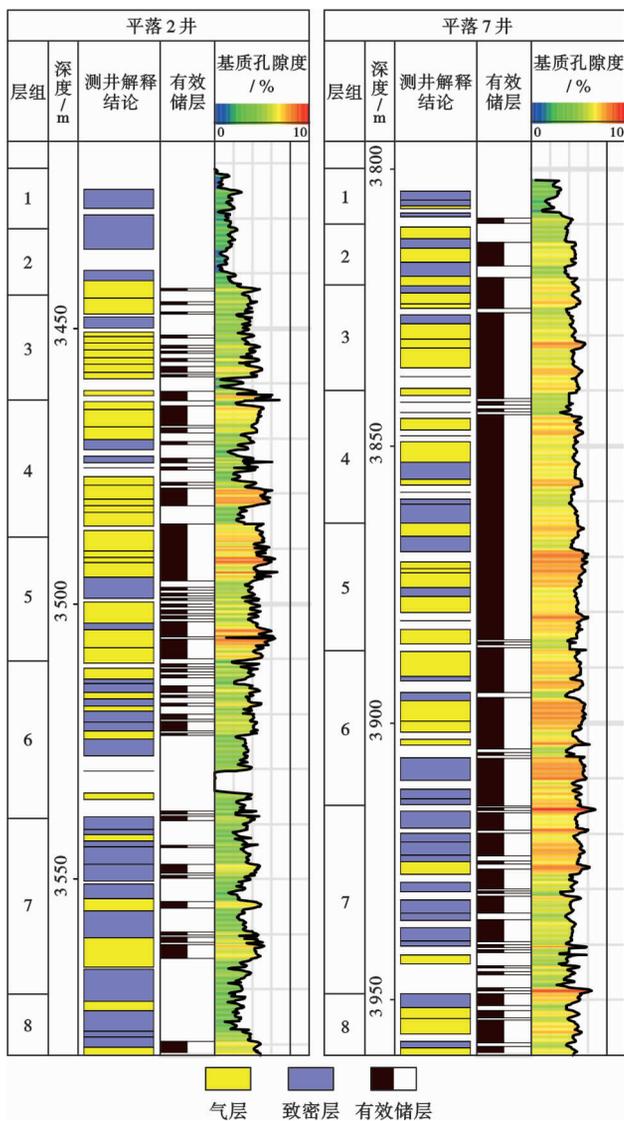


图2 平落2井与平落7井测井解释与常规有效储层划分

Fig. 2 Log interpretation and normal effective reservoir classification of Well PL2 and Well PL7

平落坝构造基质孔隙度与渗透率对数的相关系数约为0.7,具有明显的正相关,因此基质的渗透率参数也不能作为评价裂缝孔隙性致密砂岩储层优劣的主要依

献也无法区分。笔者将裂缝孔隙度作为一个随机变量, 视为所有级别裂缝对改善储集性能的综合贡献。

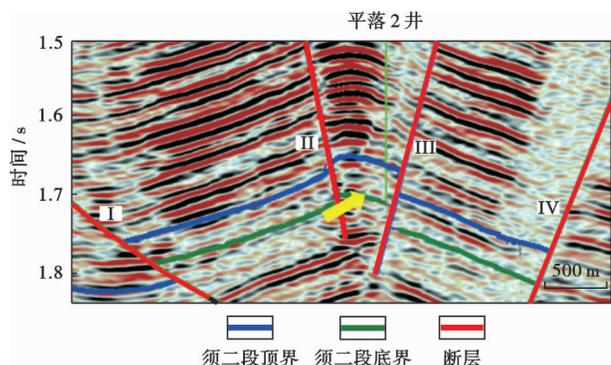
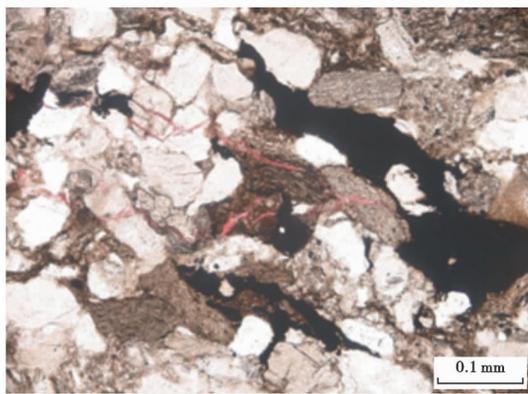


图 3 伴随断层发育的裂缝破碎带

Fig. 3 Fault damage zones occur with faults



(a) 裂缝岩心



(b) 微观薄片

图 4 构造裂缝的岩心与薄片微观特征

Fig. 4 The core with structural fracture and its microscopic features of the thin section

3.2 裂缝孔隙度解释

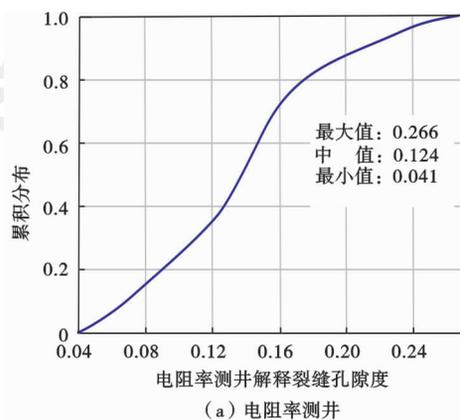
3.2.1 测井裂缝孔隙度

常规测井裂缝解释采用的是电阻率校正迭代法^[11-12]。该方法的原理为, 在裂缝发育段泥浆滤液的侵入程度要高于裂缝不发育段, 在这样的井段测得的深、浅双侧向电阻率值较围岩会表现出更大的差异, 这种差异越大, 表明裂缝孔隙度越大, 裂缝计算公式为:

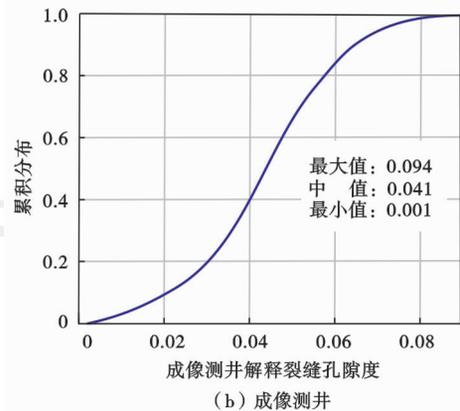
$$\phi_f = \left[R_{mf} \left(\frac{1}{R_{LLS}} - \frac{1}{R_{LLD}} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

$$m = 1.5 - 1.0\phi_f \quad (2)$$

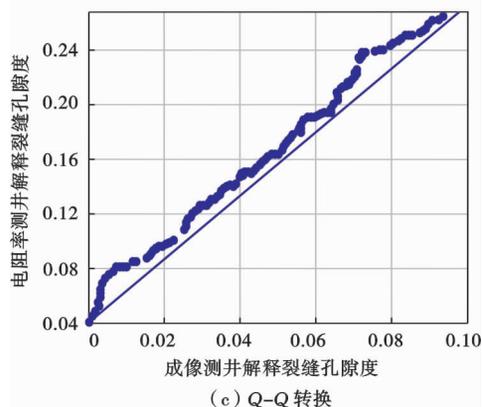
电阻率测井解释裂缝孔隙度结果的均值为 0.124%, 作为相对硬数据的全区成像测井解释裂缝孔隙度均值为 0.041%, 二者具有较大的差异。造成这种现象的原因是由于二者解释孔隙度时所用的数据与方法不同, 需要进行转换。使用数据分布转换(Q-Q 转换)将常规测井裂缝孔隙度解释结果转换到成像测井裂缝孔隙度解释范围。转换后原来的电阻率测井解释的裂缝孔隙度与成像测井解释的裂缝孔隙度一致(图 5)。



(a) 电阻率测井



(b) 成像测井



(c) Q-Q 转换

图 5 裂缝孔隙度数据解释

Fig. 5 Interpreted fracture porosity data

3.2.2 与裂缝相关的地震属性

分频属性一般被用于识别薄层储层沉积特征^[13],对于裂缝特征的特征通常选择小时窗结合相干分析来确定薄层内裂缝的分布^[14],厚层且穿层裂缝破碎带的识别与这2种情况不同,裂缝破碎带内没有明确的断面方位特征,与高角度断层相关的破碎带通常厚度较大,整体延展方向与断层走向一致。基于这些特征,对平落坝须二段储层选择100 ms时窗(平落坝构造须二段储层时间域跨度约100 ms)进行分频处理,对主频范围内(20~40 Hz)所有的分频切片均进行了分析,将分频切片与断裂解释以及生产数据对照发现,频率为36 Hz的切片上所有生产情况较好的井都分布在振幅属性值小于50的低幅区域(如图6中平落2井),而基本没有天然气产出的井均位于属性值大于50的高幅区域(如图6中平落7井)。分频属性数据与井平均月产气量具有明显的负相关。在研究区内,有5口井具有完整的须二段地层取心资料。岩心观察与生产数据表明,没有渗透性的地层不产气,产气量高的层段都是地层破碎较为严重的部分,也就是裂缝孔隙度较高的部位。因此,产气量多少与储层裂缝发育程度紧密相关(产气量在整体上与裂缝孔隙度存在正相关),裂缝孔隙度越高,产气量也越大。因此,可使用分频属性建立裂缝孔隙度模型的平面空间结构参数,即拟合变差函数。

平落坝构造须二段层速度为4380~4700 m/s,地层厚度分布较为稳定,地层致密砂岩超过80%。在研

究构造裂缝时,选择整个须二段作为目标层段。根据调谐厚度计算公式:

$$\Delta Z = v / (4.0f) \quad (3)$$

可计算出频率为36 Hz的调谐厚度为30.4~32.6 m。将裂缝破碎带作为有效储层分析,地震资料中体现出来的裂缝破碎带厚度大部分均在可识别范围之内。钻井取心能识别的断裂破碎带厚度比计算出的调谐厚度小。这是由于在垂向上裂缝破碎带发育产状与断层接近,同时虽然位于裂缝破碎带内的岩心完整,但其中分布大量微小的裂缝,其足以对地震波造成影响。

蚂蚁追踪数据体的算法是在建立地震方差数据体的基础上使用蚁群算法,加强方差体信号的连续性,最初该技术用于识别并生成解释断层^[15-20]。通过设置蚂蚁追踪的进攻性,可以识别更宽泛的断裂带,蚂蚁追踪数据体的算法是识别断裂破碎带的有效算法。图7为蚂蚁体识别出的断裂破碎带,其中红色箭头指示断裂破碎带。使用该地震属性而不是直接使用地震成果数据作为辅助数据建模是由于蚂蚁追踪数据体具有连续的值域空间和良好地反映断裂破碎带的能力,更适用于辅助储层参数建模。

4 裂缝孔隙度建模

使用建模方法对致密砂岩储层进行资源量评价较为直接^[21-22],但对于裂缝发育的致密砂岩储层,研究裂缝孔隙度的分布特征则需要更多的数据支持。

将蚂蚁追踪数据体用于裂缝孔隙度建模时,有学者将蚂蚁数据体按属性值的大小人为分段,将每一段分别视为一种不同的裂缝相,然后进行相控建模^[23-24]。这种做法的难点在于构造蚂蚁追踪数据体时参数选取不同,得到的结果差异较大,无法明确指出不同“裂缝相”的属性边界。笔者将地震属性数据体作为辅助数据,将经过校正的测井解释裂缝孔隙度作为硬数据,使用协同克里金算法进行裂缝孔隙度建模。

4.1 变差函数

通常建模都是使用硬数据直接建立实验变差函数,但此研究对象并不是与沉积物源方向关系密切的沉积体,而是与断裂系统紧密相关的断裂破碎带,其延展方向与构造走向一致,与沉积方向差异较大。同时,由于裂缝的穿层性,沿层提取统计数据的作法不适合建立裂缝孔隙度空间的结构关系。

36 Hz分频地震属性数据展示了裂缝破碎带在平面上分布趋势,可以用来确定水平方向上2个相互垂直的变差函数,经过正态数据转换后,屏蔽少量过大的方差贡献点,拟合得到方位角为47.5°。主方向上的

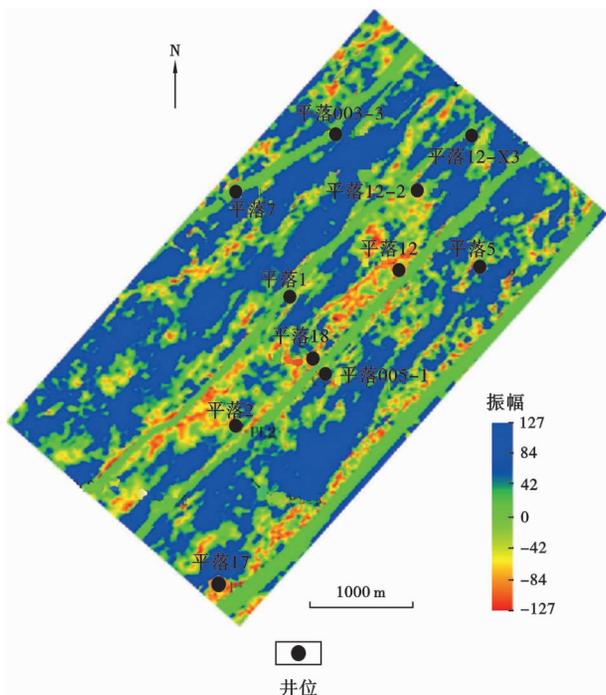


图6 三维地震36 Hz分频属性切片

Fig. 6 Frequency spectral decomposition properties slice of seismic with frequency 36 Hz

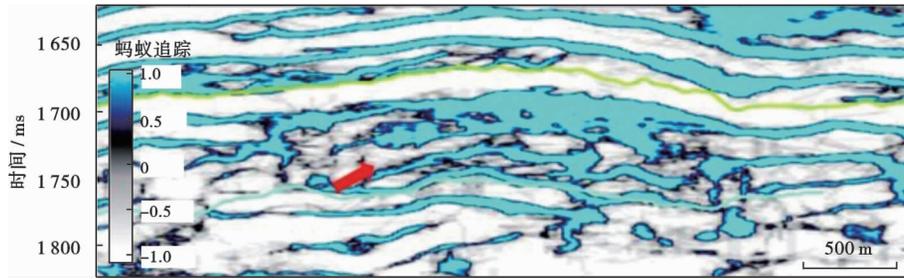


图7 蚂蚁追踪数据体

Fig. 7 Ant tracking data of study region

变差函数与方位角 137.5° 次方向上变差函数的变程分别是 3188 m 和 1035 m (表 2)。二者均为球状模型,垂向上的变差函数取 36 Hz 分频属性的调谐厚度 32.6 m 作为变程,仍然使用球状模型。在拟合变差函数时,水平方向和垂直方向的块金效应为 0.005。

表 2 变差函数参数

Table 2 Variogram parameters used in modeling

变差函数	类型	基台值	块金效应	变程
方位角 47.5°	球状	1	0.005	3188
方位角 137.5°	球状	1	0.005	1035
垂向	球状	1	0.005	32

使用的变差函数参数形式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0.005 + C \left(\frac{1.5h}{a} - \frac{0.5h^3}{a^3} \right), & (0 \leq h \leq a) \\ 1, & (h > a) \end{cases} \quad (4)$$

4.2 协同克里金

地震分频属性分析是基于频谱分析的地震成像方法,揭示了地层在不同的频率下纵向上整体的变化规律,每个频率下的属性数据都是二维的,因此不能在三维空间上作为协同克里金估值的辅助数据。

蚂蚁数据体能够在三维空间上反映断层破碎带的展布特征,用其作为建模的辅助数据对裂缝孔隙度的空间分布进行约束。该数据体约束裂缝孔隙度的空间展布,约束程度通过相关系数参数确定。该参数为 0.45 时,地震数据体对裂缝孔隙度的约束可以达到最佳效果,在模型中,既能体现出裂缝破碎带的规律性,同时也能保证井数据的一致性。用测井解释数据作为硬数据,蚂蚁追踪数据体作为辅助数据,使用同位协同克里金算法进行序贯高斯建模。

4.3 裂缝孔隙度模拟

在建模过程中,将断裂破碎带作为整体加以考虑,由于破碎带内裂缝孔隙度高,裂缝发育,裂缝孔隙度与岩相耦合并不紧密,因此不适合进行相控。

使用序贯高斯模拟的过程是:①将硬数据与软数

据在模拟空间中按设定的网格进行粗化,使用的网格尺寸是 $20 \times 20 \times 0.5$,粗化后每一个模拟空间网格中都存在地震数据但不一定存在硬数据;②建立随机模拟路径,将第一步模拟网格中没有硬数据的空间网格随机地建立一个路径;③按网格在随机路径中的次序来进行协同克里金计算,每计算一个网格,先搜索该网格周围的硬数据与辅助数据,使用搜索到的数据求解克里金方程,得到该网格的计算结果,并将其作为计算下一个网格的硬数据,直到整个随机路径全部计算完毕,完成一个模拟实现;④重复步骤②和步骤③,建立多个模拟实现;⑤使用交叉验证法^[23]对模拟实现进行筛选,将筛选出来最具有代表性的结果进行均值化处理,得到的模拟结果如图 8 所示。

储层裂缝孔隙度参数建模的结果是对取心、测井、地震以及生产数据上表现出来的裂缝进行综合表征。在模型中,高裂缝孔隙度发育区与高产能井高度吻合。

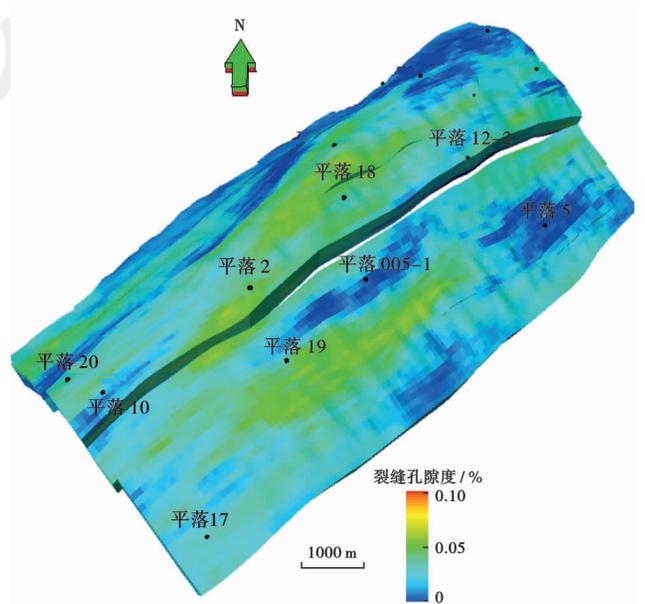


图8 平落坝构造须二段裂缝孔隙度模拟实现结果

Fig. 8 Realization results of the fracture porosity modeling for Member 2 of Xujiahe Formation in Pingluoba structure

5 结论

(1) 对于裂缝性致密砂岩储层, 定量化裂缝孔隙度不但可以为评价储层质量提供帮助, 也是进行数值模拟的重要输入参数。在空间上定量化描述裂缝孔隙度需要对钻井、测井、地震以及生产数据进行综合分析对比, 提取适合于裂缝建模的数据集模拟裂缝的空间分布规律。

(2) 测井解释裂缝孔隙度不能直接应用于储层建模, 该属性分布与成像测井解释数据分布的差异需要在建模之前进行处理, 通过数据分布转换, 将测井解释裂缝孔隙度数据映射到成像测井解释孔隙度分布空间。

(3) 对于裂缝性致密砂岩储层, 对比发现三维地震分频数据能够反映裂缝破碎带的平面分布特征, 可作为有效趋势性数据用于构造裂缝孔隙度空间结构参数模型。为识别断裂系统而生成的蚂蚁追踪数据体是三维的, 可以反映裂缝破碎带, 并作为有效的辅助数据用于建模算法。

(4) 综合使用测井、地震以及生产数据, 利用协同建模的方法, 建立了与生产数据相吻合的裂缝孔隙度空间分布模型, 该模型定量描述裂缝的空间分布, 同时也为进一步进行开发模拟以及开发方案调整提供了量化的数据支持。

符号注释: ϕ_f —裂缝孔隙度; R_{mf} —泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{LLS} —浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{LLD} —深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; m —迭代系数; ΔZ —调谐厚度, m ; v —速度, m/s ; f —频率, Hz ; $\gamma(h)$ —变差函数值, 无因次; C —常数; h —距离, m ; a —变程, m 。

参 考 文 献

- [1] 丁文龙, 王兴华, 胡秋嘉, 等. 致密砂岩储层裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 737-750.
DING Wenlong, WANG Xinghua, HU Qiuqia, et al. Progress in tight sandstone reservoir fractures research [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 737-750.
- [2] 李忠平. 深层致密砂岩气藏裂缝特征描述、识别及分布评价——以新场气田须二气藏为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
LI Zhongping. Fracture characteristics, identification and evaluation of the distribution for deep tight sandstone gas pool: an case from the second member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [3] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 183-189.
TIAN Jingchun, LIU Weiwei, WANG Feng, et al. Heterogeneity of the paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao area of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 183-189.
- [4] 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等. 致密气储层可压裂性测井评价方法[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 74-80.
SUN Jianmeng, HAN Zhilei, QIN Ruibao, et al. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 74-80.
- [5] 牛博, 高兴军, 赵应成, 等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模——以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 89-100.
NIU Bo, GAO Xingjun, ZHAO Yingcheng, et al. Architecture characterization and modeling of channel bar in paleo-braided river: a case study of dense well pattern area of Sazhong in Daqing oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 89-100.
- [6] 张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 127-137.
ZHANG Junfeng, BI Haibing, XU Hao, et al. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 127-137.
- [7] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素——以塔里木盆地克深2气田为例[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 715-727.
WANG Ke, ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture: a case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 715-727.
- [8] QU Dongfang, TVERANGER J. Incorporation of deformation band fault damage zones in reservoir models [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(3): 423-443.
- [9] FACHRI M, TVERANGER J, BRAATHEN A, et al. Volumetric faults in field-sized reservoir simulation models: a first case study [J]. AAPG Bulletin, 100(5): 795-817.
- [10] 李熙喆, 张满郎, 谢武仁. 鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 168-175.
LI Xizhe, ZHANG Manlang, XIE Wuren. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 168-175.
- [11] 王越之, 田红. 常规测井与 FMI 测井资料相结合研究储层裂缝[J]. 断块油气田, 2001, 8(5): 30-32.
WANG Yuezhi, TIAN Hong. Research of fracture reservoir characteristics using FMI logging and dual laterolog [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2001, 8(5): 30-32.
- [12] 崔勇, 栾瑞乐, 赵澄林. 辽河油田欧利坨子地区火山岩储集层特征及有利储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2001, 27(5): 47-49.
CUI Yong, LUAN Ruile, ZHAO Chenglin. Volcanic rock reservoir characteristics and prediction in Oulituozhi region, Liaohe Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 27(5): 47-49.
- [13] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 64-66.
ZHANG Yanzhang, YIN Shoupeng, ZHANG Qiaoling, et al. Geologic significance of the seismic spectral decomposition technology and its application analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 64-66.

- [14] 陈波,孙德胜,朱筱敏,等.利用地震数据分频相干技术检测火山岩裂缝[J].石油地球物理勘探,2011,46(4):610-613.
CHEN Bo,SUN Desheng,ZHU Xiaomin, et al. Fracture detection in volcanic rocks using discrete frequency coherency cubes on full-azimuth seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011,46(4):610-613.
- [15] 杨士明,潘晓慧,葛善良.利用地震分频属性预测薄砂岩储层——以塔里木盆地塔中隆起带顺9井区为例[J].石油天然气学报,2014,36(1):45-49.
YANG Shiming,PAN Xiaohui,GE Shanliang. Predicting thin sandstone reservoir by using seismic separate frequency attribute;by taking wellblock Shun 9 of Tazhong uplift in Tarim Basin for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2014,36(1):45-49.
- [16] HOSSAIN M S,UROSEVIC M,KEPIC A. Interpretation of 3D high-resolution seismic data collected over an IOCG deposit in South Australia[J]. SEG Extended Abstracts,2015(1):1-5.
- [17] SILVA C C,MARCOLINO C S,LIMA F D. Automatic fault extraction using ant tracking algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin;2005 SEG Annual Meeting, Houston, Texas, 6-11 November,2005[C]. Houston;Society of Exploration Geophysicists,2005.
- [18] LI Yandong,WANG Jun,YANG Hao, et al. Fracture characterization using azimuthal AVO, ant-tracking and curvature; 2013 SEG Annual Meeting, Houston, Texas, 22-27 September, 2013 [C]. Houston;Society of Exploration Geophysicists,2013.
- [19] 张欣.蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用——以平湖油田放鹤亭构造为例[J].石油地球物理勘探,2010,45(2):278-281.
ZHANG Xin. Application of ant tracing algorithm in fault automatic interpretation;a case study on Fangheting structure in Pinghu oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting,2010,45(2):278-281.
- [20] 史军.蚂蚁追踪技术在低级序断层解释中的应用[J].石油天然气学报,2009,31(2):257-258.
SHI Jun. Application of ant tracking technology in small fault interpretation[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2009,31(2):257-258.
- [21] 湛卓恒,OSADETZ K G. 西加拿大沉积盆地 Cardium 组致密油资源评价[J].石油勘探与开发,2013,40(3):320-328.
CHEN Zhuoheng,OSADETZ K G. An assessment of tight oil resource potential in the Upper Cretaceous Cardium Formation, Western Canada Sedimentary Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(3):320-328.
- [22] 郭智,孙龙德,贾爱林,等.辫状河相致密砂岩气藏三维地质建模[J].石油勘探与开发,2015,42(1):76-83.
GUO Zhi,SUN Longde,JIA Ailin, et al. 3D geological modeling for tight sand gas reservoir of braided river facies[J]. Petroleum Exploration and Development,2015,42(1):76-83.
- [23] 程超,吴东昊,桑琴,等.基于蚂蚁体的“相”控地质建模[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(3):21-25.
CHENG Chao,WU Donghao,SANG Qin, et al. Facies-controlled geological modeling based on ant body[J]. Journal of Xi'an Shiyou University; Natural Science Edition,2011,26(3):21-25.
- [24] 龙旭,武林芳.蚂蚁追踪属性体提取参数对比试验及其在塔河四区裂缝建模中的应用[J].石油天然气学报,2011,33(5):76-81.
LONG Xu,WU Linfang. Identification of thin-bed tuning and AVO anomaly based on seismic spectral decomposition[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2011,33(5):76-81.

(收稿日期 2016-12-04 改回日期 2017-03-22 编辑 王培玺)

版权所有