

致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模方法

——以红河油田 92 井区长 8 储层为例

孙爽¹, 赵淑霞^{2,3}, 侯加根^{1*}, 周银邦², 宋随宏¹, 何应付²

1 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249

2 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 100083

3 中国石油化工集团公司海相油气藏开发重点实验室 北京 100083

* 通信作者, houjg63@cup.edu.cn

收稿日期: 2018-11-14

国家科技重大专项(2016ZX05048-003)资助

摘要 天然裂缝是致密砂岩储层的重要储集空间和渗流通道, 具有明显的多尺度特征, 建立多尺度裂缝三维地质模型对提高该类油藏开发效率具有重要的实际意义。但是, 目前多尺度裂缝建模方法缺少系统深入的研究, 尤其是小尺度裂缝建模约束条件单一, 随机性强, 可靠性低。因此, 本文以红河油田 92 井区长 8 储层为例, 首先利用野外露头、岩心、测井、地震等资料, 将天然裂缝主要分为 3 种规模类型: 大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝。在此基础上, 提出了多尺度裂缝分级建模思路: (1)用人工地震解释的确定性方法建立大尺度裂缝模型; (2)用蚂蚁体追踪的确定性方法建立中尺度裂缝模型; (3)在建立三维脆性指数模型和地震属性融合体的基础上, 利用多元线性回归方法融合岩石脆性指数模型、到断层距离属性体、地震属性融合体建立井间裂缝发育概率体, 并以此为软数据约束建立裂缝密度模型, 然后在裂缝几何形态和裂缝密度模型的约束下, 用基于目标的示性点过程模拟方法建立小尺度裂缝模型。最后, 将大尺度裂缝、中尺度裂缝和小尺度裂缝离散网络模型融合成综合离散裂缝网络模型, 并通过粗化得到裂缝属性模型。经验证, 建立的裂缝模型与地质认识和生产动态数据均吻合较好, 为油藏数值模拟提供了地质依据。

关键词 致密砂岩; 多尺度裂缝; 分级建模; 红河油田; 长 8 储层

Hierarchical modeling of multi-scale fractures in tight sandstones: A case study of the eighth member of the Yanchang formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield

SUN Shuang¹, ZHAO Shuxia^{2,3}, HOU Jiagen¹, ZHOU Yinbang², SONG Suihong¹, HE Yingfu²

1 College of Geosciences, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China

2 Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of Marine Oil & Gas Reservoir Production, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract Natural fractures are an important storage space and major flow channels in tight sandstones, and have obvious

引用格式: 孙爽, 赵淑霞, 侯加根, 周银邦, 宋随宏, 何应付. 致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模方法——以红河油田 92 井区长 8 储层为例. 石油科学通报, 2019, 01: 11-26

SUN Shuang, ZHAO Shuxia, HOU Jiagen, ZHOU Yinbang, SONG Suihong, HE Yingfu. Hierarchical modeling of multi-scale fractures in tight sandstones: A case study of the eighth member of the Yanchang formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield. Petroleum Science Bulletin, 2019, 01: 11-26. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.01.002

multi-scale features. Thus the establishment of three-dimensional multi-scale fracture geological models has important practical significance for improving the development efficiency of this kind of reservoir. However, multi-scale fracture modeling methods lack systematic and detailed research. Especially the small scale fracture model generally has strong randomness and low reliability due to a single constraint condition. Therefore, taking the eighth member of the Yanchang Formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield as an example, based on outcrop, core, logging and seismic data, this paper divides natural fractures into three types, namely large scale fractures, mesoscale fractures and small scale fractures. On this basis, a hierarchical modeling approach to multi-scale fractures is proposed: (1) The large scale fracture model is built by using the deterministic method of manual seismic interpretation; (2) the mesoscale fracture model is set up by using the deterministic method of ant tracking; (3) on the basis of establishing a 3D brittle index model and a seismic attribute fusion body, the multiple linear regression method is used to combine the rock brittleness index model, the fault distance property body and the seismic attribute fusion body to obtain the inter-well fracture development probability body, which is used as secondary data to establish the fracture density model. Next, under the constraint of fracture geometry and the fracture density model, the small fracture model is constructed by an object-based marked point processes simulation. Finally, a comprehensive discrete fracture network model is built by integrating the large scale, mesoscale and small scale fracture models and fracture properties models are established by upscaling. It is proved that fracture models established are in good agreement with the geological understanding and production data, which provide the geological foundation for the numerical reservoir simulation.

Keywords tight sandstone; multi-scale fracture; hierarchical modeling; Honghe oilfield; the eighth member of the Yanchang formation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.01.002

随着常规油气资源的不断消耗,致密砂岩油气逐渐成为人们关注的勘探和开发新领域。在致密砂岩储层中,由于岩石致密,岩石脆性程度大,在构造应力作用下天然裂缝发育^[1]。天然裂缝是该类储层重要的储集空间和渗流通道,具有明显的多尺度特征,对致密砂岩油藏的油气聚集、勘探与开发具有重要影响^[2-6]。因此,定量表征不同尺度的裂缝并建立裂缝三维地质模型既可以反映裂缝空间分布规律和裂缝参数特征,又可以满足油藏工程定量研究的需要,对提高该类油藏开发效率具有重要的现实意义。

目前的裂缝建模方法主要包括等效连续模型和离散裂缝网络模型(DFN)^[7]。等效连续模型将储层划分为有限的网格,并直接对每个网格赋予一定的平均裂缝属性值^[8]。DFN模型使用许多具有特定方向、长度和面积的离散面元来表征裂缝的分布,并且可以根据裂缝的几何形态特征和传导率进行流体流动特性的预测^[9]。与等效连续模型相比,DFN更能反映裂缝的非均质性和多尺度性,并且具有多学科、多资料协同的优势,是目前裂缝建模中应用最多、发展最快的模型^[10-11]。针对多尺度裂缝建模,大中尺度裂缝一般根据地震资料进行确定性建模,描述较准确^[7,10-12];小尺度裂缝主要以井点数据为硬数据,以地震属性为井间约束数据,用随机模拟方法建立其DFN模型^[13-15]。但是,小尺度裂缝模型具有较强的随机性,且地震属性常具有多解性,仅考虑地震属性对井间裂缝分布的约束作用难以建立较可靠的小尺度裂缝离散网络模型。

本文以鄂尔多斯盆地红河油田92井区长8致密砂岩储层为例,基于野外露头、岩心、测井、地震等资料,根据裂缝规模、裂缝识别方法的尺度界限性以及裂缝发育的主控因素将裂缝主要划分为大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝3个规模尺度裂缝类型,并在此基础上采用分级建模的思路建立多尺度裂缝离散网络模型和裂缝属性模型。

1 研究区概况

红河油田位于鄂尔多斯盆地天环坳陷南部,东部为伊陕斜坡,南部为渭北隆起,西部为西缘逆冲带(图1)。红河油田92井区位于红河油田西北部,面积约100 km²,其构造特征相对简单,整体为一北东高、南西低的平缓单斜,地层倾角不足1°,主要受北东东向断层控制,局部发育低幅度的小型鼻状隆起。研究区主要沉积中生代和新生代碎屑岩,其中上三叠统延长组长8油层组、长9油层组为主要含油层系。

本次研究对象为长8油层组,厚度约为90~110 m,从上到下细分为长8₁和长8₂两个小层,其中长8₁小层包括长8₁¹、长8₁²和长8₁³三个单层,而长8₂小层包括长8₂¹和长8₂²两个单层。研究区长8储层沉积环境为辫状河三角洲前缘,主要发育水下分流河道和分流间湾沉积微相,岩性主要为浅灰色细砂岩、粉砂岩与深灰色泥岩、粉砂质泥岩的互层。根据岩心物性分析资料统计,长8储层孔隙度主要分布在

8%~12%，平均值为 10.7%，空气渗透率主要分布在 $0.10 \times 10^{-3} \sim 0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均值为 $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，表现为低孔超低渗储层。研究区长 8 储层主要经历了印支期、燕山期和喜山期三期构造运动，由于岩石强度及脆性程度大，天然裂缝普遍发育，但是该区储层裂缝主要受燕山期 NE-SW 方向挤压应力控制。

2 致密砂岩储层多尺度裂缝特征

裂缝是致密砂岩储层有效的储集空间和重要的渗流通道，具有明显的多尺度特征，对该类油藏的勘探与开发具有重要影响。不同尺度的裂缝具有不同参数特征和分布特征，其识别方法和发育程度的主控因素也存在差异。因此，本文基于野外露头、岩心、测井、地震等资料，根据裂缝规模、裂缝识别方法的尺度界

限性和裂缝发育的主控因素将致密砂岩储层的天然裂缝主要分为 3 个尺度裂缝，即大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝(表 1)。

大尺度裂缝是指可以根据三维原始地震数据进行人工解释的断层，平面延伸长度一般为千米级，裂缝开度大于 $100 \mu\text{m}$ ，其发育的主控因素为构造应力，构造应力的大小和方向控制大尺度裂缝的发育程度和走向。红河油田 92 井区发育 9 条断层，主要分布在研究区北部，均为北东东向，延伸长度最小为 1252.81 m，最大为 4369.57 m，主要受燕山期构造应力控制(图 2)。

中尺度裂缝是指常规地震解释无法准确识别，需要利用蚂蚁体追踪等技术识别和预测的断层，平面延伸长度一般为数十米级至百米级，裂缝开度大于 $100 \mu\text{m}$ ，其发育程度主要受构造应力和断层的控制。对于红河油田 92 井区长 8 储层，长 8 顶部标志层的屏蔽作用使得储集层内幕反射较弱，而蚂蚁追踪技术可以突出地震数据中的不连续信息，较好地克服储集层内幕反射弱的问题，并自动拾取不同方位的中尺度裂缝，具有速度快、精度高等特点^[16-18]。研究区中尺度裂缝主要分布在研究区北部，走向主要为北东东向，其次为近南北向，延伸长度最小为 64 m，最大为 1170 m，主要分布在 64~300 m(图 3)。

小尺度裂缝是指地震蚂蚁体无法识别，但可以根据岩心、成像测井、常规测井等资料识别的裂缝，平面延伸长度为米级至十米级，裂缝开度一般为 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ ^[19]，其发育程度在构造应力背景下主要受岩性、脆性指数控制。根据红河油田 92 井区岩心观察描述以及邻区成像测井解释，小尺度裂缝主要有北东东向及近南北向两个组系^[20]，与大尺度裂缝和中尺度裂缝延伸方向一致，大部分为高角度构造剪切缝，裂缝倾角主要为 $80^\circ \sim 90^\circ$ (图 4、5)，延伸长度主要分布在 $0.5 \sim 50 \text{m}$ ^[19]。

实际上，除了上述 3 种主要裂缝规模类型外，在致密砂岩储层中还发育有较为广泛的微裂缝。微裂缝是指只有在岩心薄片上才能识别的微观尺度的裂缝，延伸长度一般为厘米级及以下，裂缝开度小于 $30 \mu\text{m}$ ，其发育程度主要受成岩作用、岩石组分控制。然而，

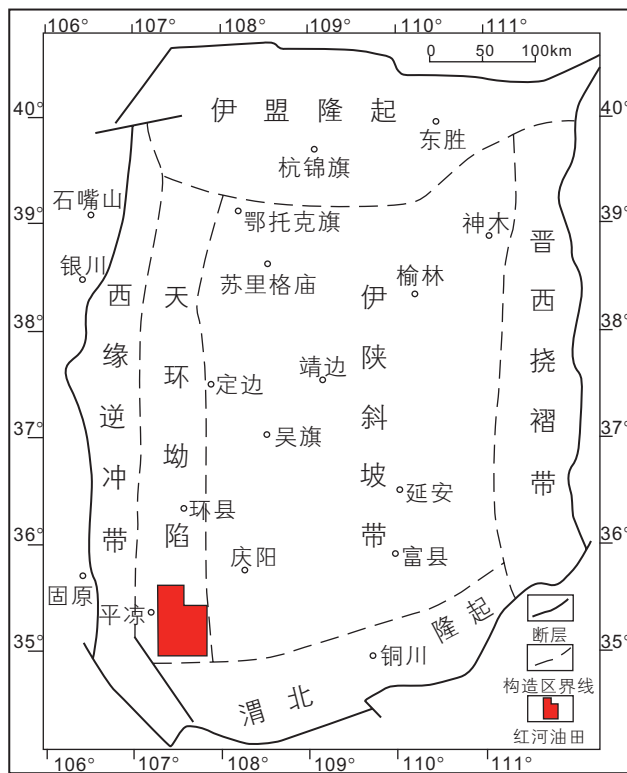


图 1 红河油田构造位置图

Fig. 1 Structural location map of the Honghe oilfield

表 1 多尺度裂缝分级标准

Table 1 Multi-scale fracture classification standard

裂缝类型	裂缝延伸长度	裂缝开度/ μm	识别方法	裂缝发育主控因素
大尺度裂缝	千米级	>100	常规地震	构造应力
中尺度裂缝	数十米级至百米级	>100	蚂蚁体追踪	构造应力、断层
小尺度裂缝	米级至十米级	30~100	岩心、成像测井、常规测井为主，地震属性为辅	在构造应力背景下主要受岩性、脆性指数控制

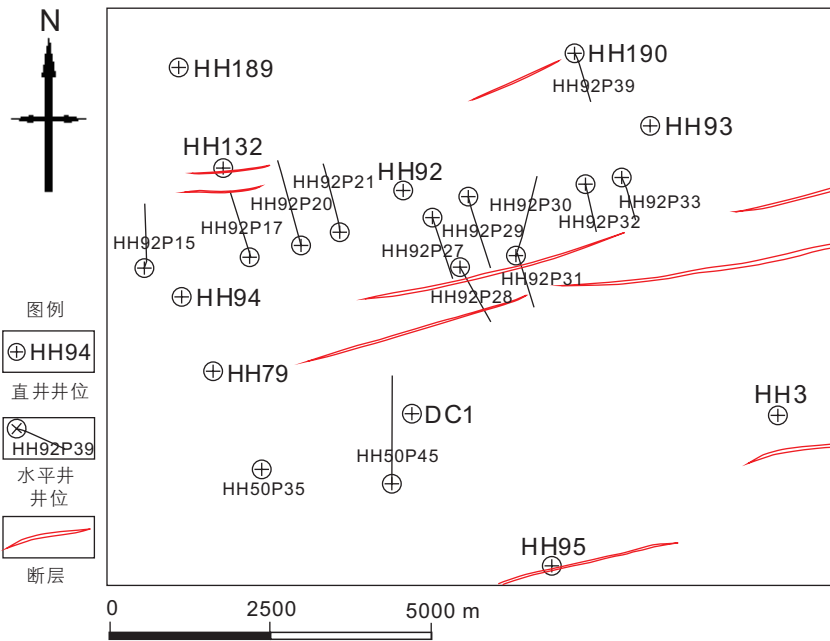
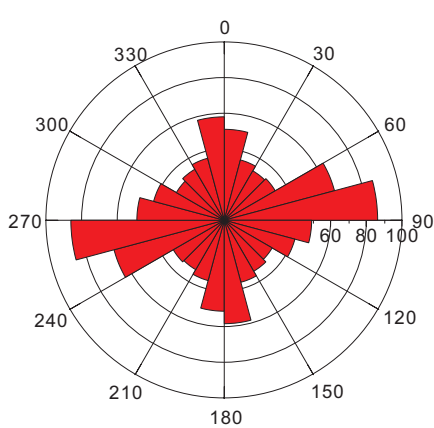
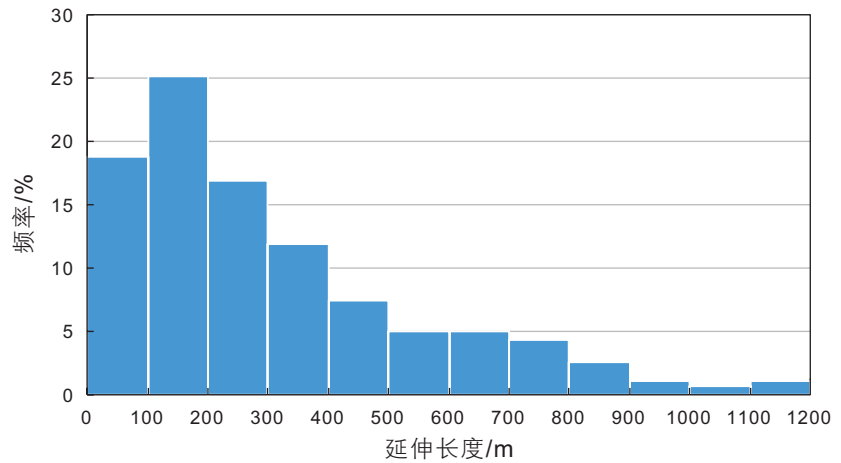


图2 红河油田92井区大尺度裂缝分布图

Fig. 2 Large scale fracture distribution map of wellblock 92 of the Honghe oilfield



(a) 走向玫瑰花图



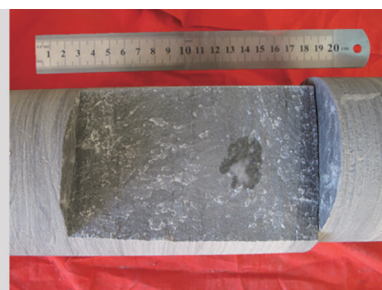
(b) 延伸长度分布直方图

图3 蚂蚁体拾取的中尺度裂缝走向玫瑰花图和延伸长度分布直方图 (N=549)

Fig. 3 Rose diagram of strike and histogram of extension length of mesoscale fractures obtained from the ant body (N=549)



(a) 高角度构造剪切缝
(HH79, 2356.91~2357.34 m)



(b) 方解石半充填的高角度构造剪切缝
(HH190, 2258.64~2258.90 m)

图4 岩心上小尺度裂缝

Fig. 4 Small scale fractures in cores

由于微裂缝规模较小且局部发育，对油藏孔渗贡献不大，暂不用于微裂缝建模和油藏数值模拟^[12]。

3 致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模方法

针对具有多尺度特征的裂缝，采用分级建模的方法，即分大尺度裂缝、中尺度裂缝和小尺度裂缝 3 个级别分别建立离散裂缝网络模型，然后将单一尺度裂缝离散网络模型融合成综合离散裂缝网络模型，并通过粗化建立裂缝属性模型(图 6)。在红河油田 92 井区长 8 油层组中，长 8₁² 单层裂缝最发育并且是研究区重点开发的层位，因此，本文以红河油田 92 井区长 8₁² 单层为例，针对致密砂岩储层进行多尺度裂缝分级建模。

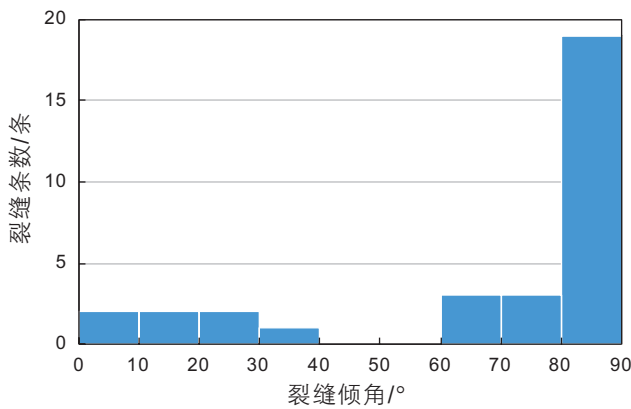


图 5 岩心识别的小尺度裂缝倾角统计直方图(N=37)
Fig. 5 Histogram of small scale fracture dip identified from core (N=37)

以长 8₁² 单层顶底面分别作为地层构造模型的顶面和底面，考虑裂缝尺度和建模精度要求，地层构造模型 X、Y、Z 方向网格设计精度分别为 20 m、20 m、0.5 m。

3.1 大尺度裂缝模型

大尺度裂缝是由常规三维地震资料直接解释的断层，其建模采用确定性方法，即先依据断层在地震剖面上的标志以及断层组合规律对三维地震资料进行断层解释，确定断层位置、产状等参数，然后用确定性建模的方法直接建立与之相匹配的大尺度裂缝网络模型(图 7)。

3.2 中尺度裂缝模型

蚂蚁追踪技术可以自动拾取常规地震解释不能识别出的中尺度裂缝，并且具有速度快、精度高等特点。在对原始地震数据体进行构造平滑处理的基础上，使用方差分析技术获得方差体，然后利用蚂蚁追踪技术对方差体中满足预设断裂条件的不连续痕迹进行追踪，提取蚂蚁体。由于研究区长 8 油层组顶部标志层的屏蔽作用，储集层内幕反射较弱，单次利用蚂蚁追踪技术提取得到的蚂蚁体中裂缝信息不明显(图 8a)。经实验发现，在前述蚂蚁体的基础上再次利用蚂蚁追踪技术可使裂缝信息更加突出，更容易被识别(图 8b)。最后，利用最终获得的蚂蚁体自动拾取不同方位的中尺度裂缝。然而，受地震数据品质和分辨率的影响，自动拾取的中尺度裂缝具有一定的不确定性，因此需用

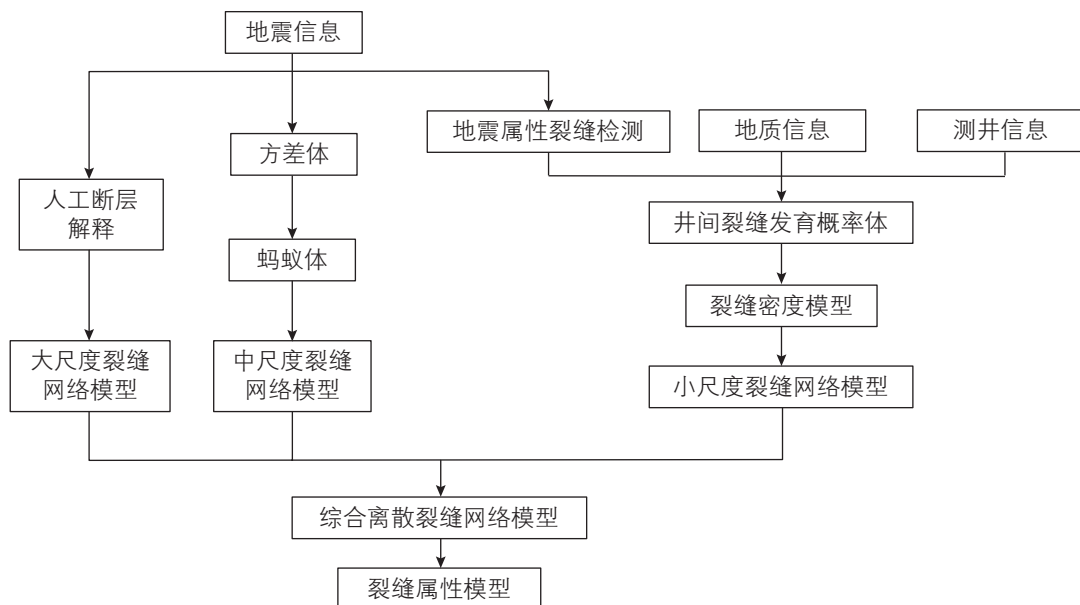


图 6 致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模技术路线图
Fig. 6 Technology roadmap of hierarchical modeling of multi-scale fractures in tight sandstones

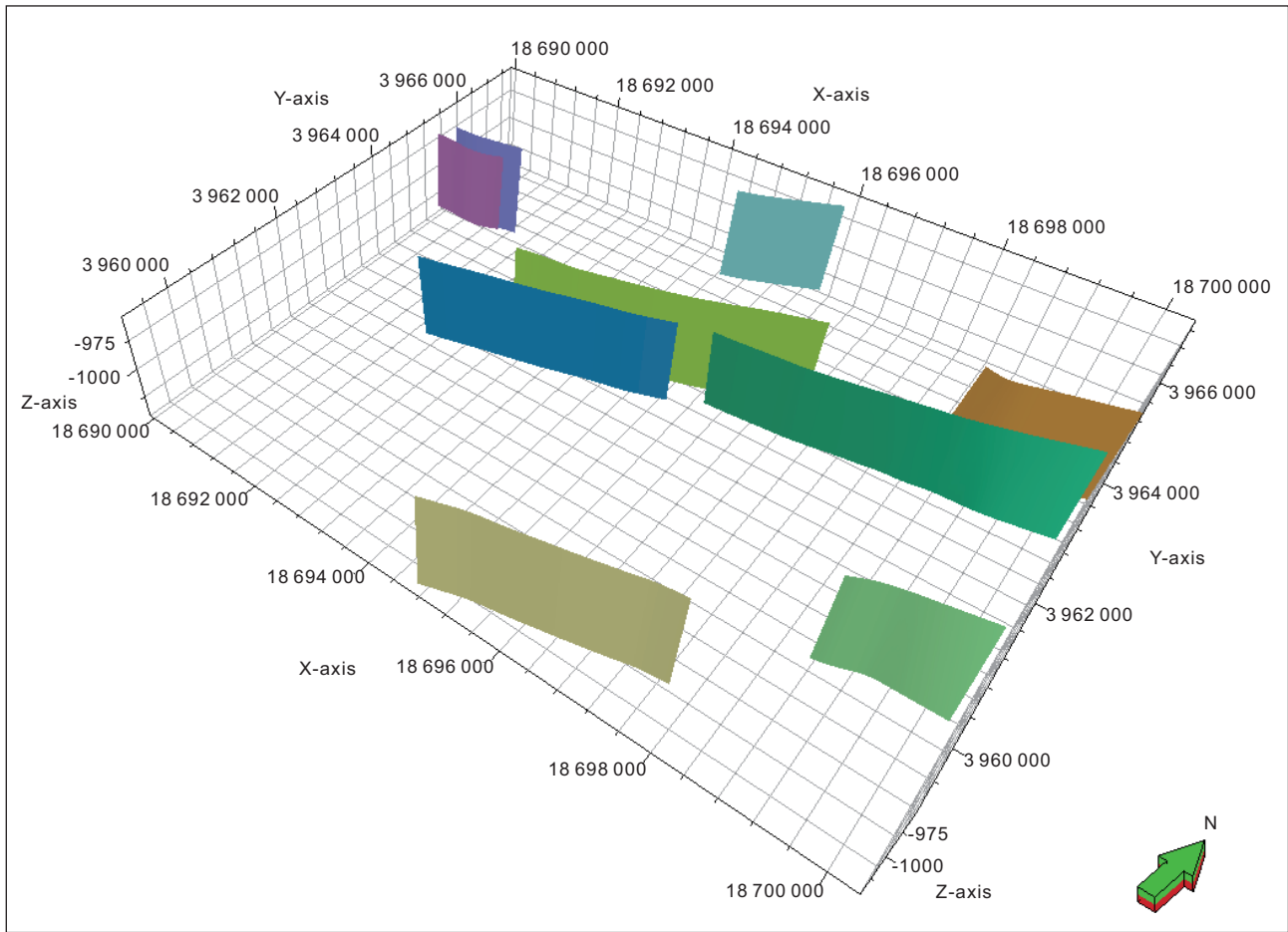
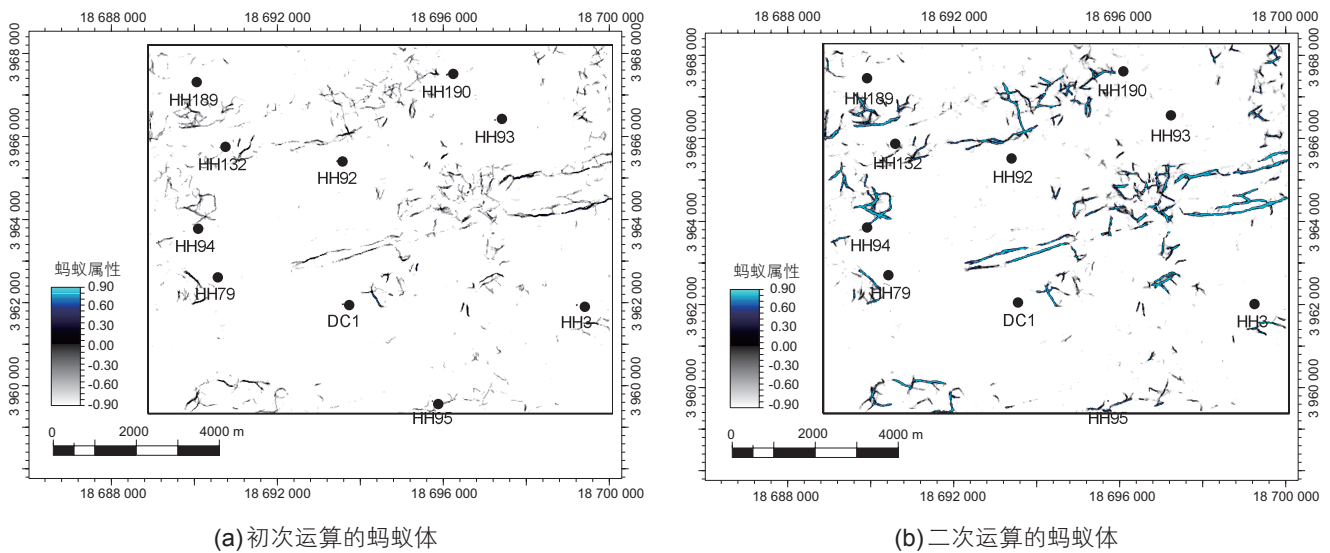


图 7 红河油田 92 井区长 8_1^2 单层大尺度裂缝网络模型 ($N=9$)

Fig. 7 The large scale fracture network model of Chang 8_1^2 single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield ($N=9$)



(a) 初次运算的蚂蚁体

(b) 二次运算的蚂蚁体

图 8 红河油田 92 井区蚂蚁体长 8 油层组顶层沿层切片

Fig. 8 The ant slice along the top of the eighth oil layer group of the Yanchang Formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield

人机交互方式，主要是以地质认识和地质规律为基础，对拾取的裂缝碎片进行补充和修正，再用确定性建模

方法建立中尺度裂缝网络模型(图 9)。

研究区中尺度裂缝模型共由 549 片裂缝碎片组成，

其中，距离断层越近，中尺度裂缝数目越多，随着到断层距离的增加，裂缝数目明显减少(图 10)，这与裂缝发育的一般认识吻合，可在一定程度上证明中尺度裂缝模型的准确性。

3.3 小尺度裂缝模型

小尺度裂缝是致密砂岩储层裂缝的主要组成部分，但是受地震资料分辨率的影响，无法直接对井间的小

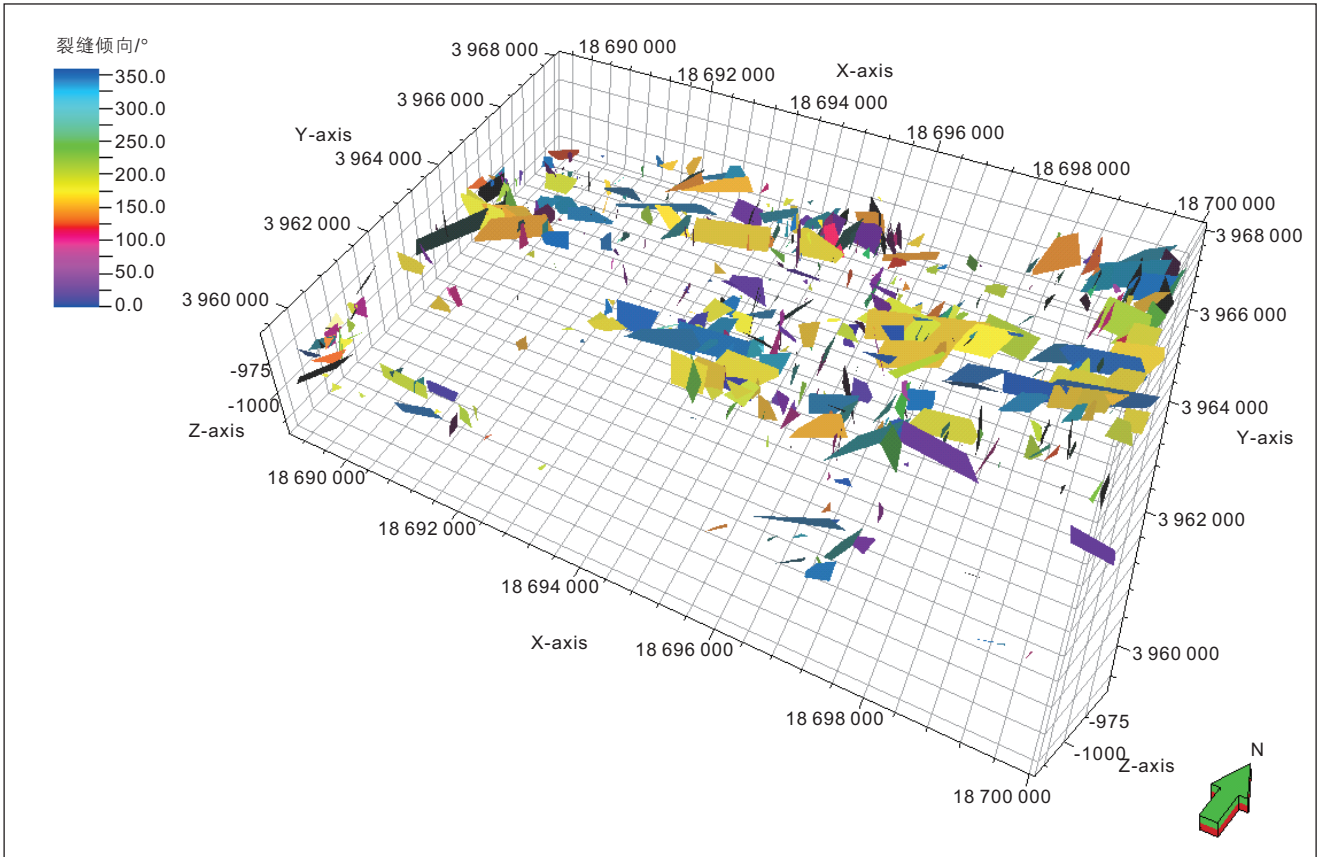


图 9 红河油田 92 井区长 8₁² 单层中尺度裂缝网络模型(N=549)

Fig. 9 The mesoscale fracture network model of Chang 8₁² single layer in the Yanchang Formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield (N=549)

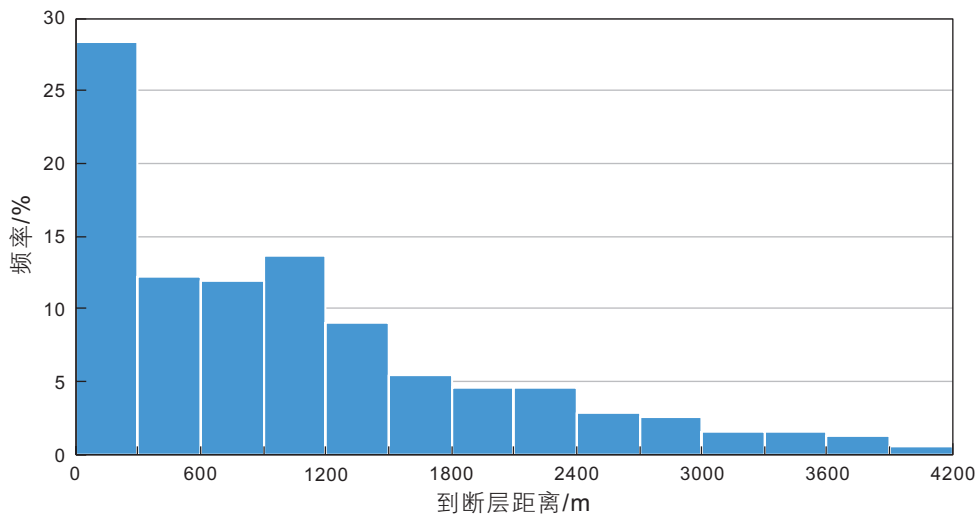


图 10 中尺度裂缝到断层距离分布直方图(N=549)

Fig. 10 Histogram of distance from mesoscale fractures to faults (N=549)

尺度裂缝进行识别,因此,采用随机模拟的建模方法,即先建立裂缝密度模型,然后以裂缝几何形态和裂缝密度模型为约束数据,应用基于目标的示性点过程模拟方法建立小尺度裂缝模型^[11-12,21-22]。已有的油气勘探开发实践表明,小尺度裂缝在纵向上和横向上存在强烈的非均质性,其发育程度主要受岩性、脆性指数、断层和构造应力的控制^[23]。本文在小尺度裂缝建模过程中,综合考虑了岩性、脆性指数、断层对小尺度裂缝发育的控制作用以及地震属性的井间约束,以裂缝发育地质规律为指导,遵循成因建模原则,先根据单井岩石脆性指数解释模拟建立三维脆性指数模型,并且根据裂缝发育概率与地震属性的相关分析建立地震属性融合体,再利用多元线性回归方法融合岩石脆性指数模型、到断层距离属性体、地震属性融合体建立井间裂缝发育概率体,然后以此约束建立裂缝密度模型,最后将裂缝几何形态参数和裂缝密度模型作为输入参数,使用基于目标的示性点过程模拟算法,生成小尺度裂缝模型(图 11)。

3.3.1 脆性指数模型

从岩石矿物组成和含量出发,脆性指数是指储层中脆性矿物的相对含量^[24-26]。研究表明,岩石脆性指数是致密砂岩储层小尺度裂缝发育程度的主控因素,脆性指数越大,裂缝发育程度越高^[27]。一般来说,脆性矿物主要包括石英、长石和碳酸盐矿物,但是在

研究区长 8 致密砂岩储层中,石英和碳酸盐矿物相对含量较高,而与石英和碳酸盐矿物相比,长石脆性程度相对较小,因此,本文采用的脆性指数计算公式如下^[28]:

$$BI = \frac{V_{qz} + V_{car}}{V_{qz} + V_{car} + V_{fels} + V_{clay}} \quad (1)$$

式中, V_{qz} 为石英含量,%; V_{car} 为碳酸盐矿物含量,%; V_{fels} 为长石含量,%; V_{clay} 为黏土含量,%。

脆性指数模型的建立一般是采用随机模拟方法^[29],首先根据常规测井采用多矿物模型计算矿物成分,再利用矿物成分比值法计算单井脆性指数^[30-31],然后以单井解释脆性指数为建模硬数据,在岩相的控制下用序贯高斯模拟建立脆性指数模型。

根据研究区 X 衍射全岩矿物资料分析,将长 8₁² 单层看成是由石英、碳酸盐矿物、长石、黏土和孔隙流体这几部分组成,首先利用伽马、声波、密度、中子等常规测井曲线建立相关的非限定方程(式 2),并采用数值优化方法进行矿物组分的求解^[31],然后根据公式 1 计算各井脆性指数。结果表明,应用多矿物模型计算的脆性指数与用 X 衍射全岩矿物分析结果计算的脆性指数具有较好的一致性(图 12)。图 12 中,最后一道的红点为根据全岩矿物分析资料计算的脆性指数实测值,黑色曲线为应用多矿物模型计算的脆性指数预测值。

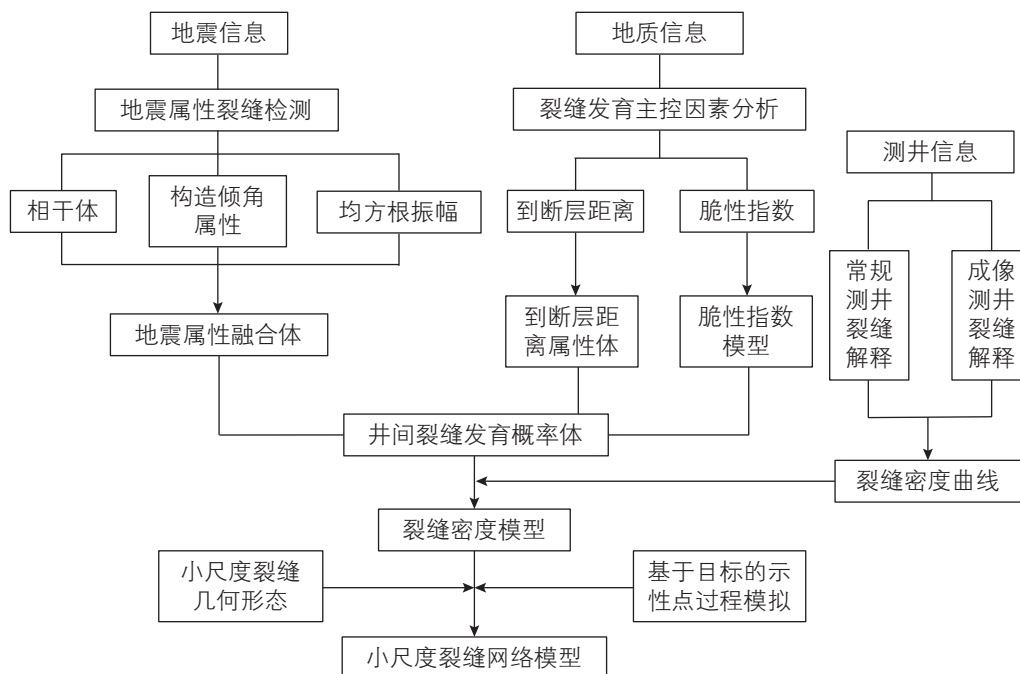


图 11 致密砂岩储层小尺度裂缝建模技术路线图

Fig. 11 Technology roadmap of small scale fracture modeling in tight sandstones

$$\begin{aligned}
 GR &= GR_1V_1 + GR_2V_2 + GR_3V_3 + GR_4V_4 + GR_5V_5 \\
 \Delta t &= \Delta t_1V_1 + \Delta t_2V_2 + \Delta t_3V_3 + \Delta t_4V_4 + \Delta t_5V_5 \\
 \rho &= \rho_1V_1 + \rho_2V_2 + \rho_3V_3 + \rho_4V_4 + \rho_5V_5 \\
 \Phi_N &= \Phi_{N1}V_1 + \Phi_{N2}V_2 + \Phi_{N3}V_3 + \Phi_{N4}V_4 + \Phi_{N5}V_5 \\
 1 &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中， GR 、 Δt 、 ρ 、 Φ_N 分别是自然伽马(API)、声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$)、密度(g/cm^3)、中子孔隙度(%)的测井曲线值。 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 分别是石英、碳酸盐矿物、长石、黏土、孔隙流体的体积，小数。 GR_1 、 GR_2 、 GR_3 、 GR_4 、 GR_5 分别是石英、碳酸盐矿物、长石、黏土、孔隙流体的自然伽马测井响应值，其他的与之类似。

研究区主要发育水下分流河道和分流间湾沉积微相，其中，根据储层岩性、微观孔隙结构特征和宏观储层物性，水下分流河道微相可划分为细砂岩相和粉砂岩相，分流间湾主要为泥岩相。细砂岩相石英和碳酸盐矿物含量较高，泥质含量低，脆性指数值较大，主要为 0.40~0.55，而泥岩相泥质含量高，石英和碳酸盐矿物含量低，脆性指数值较小，主要为 0.15~0.30，粉砂岩相则介于两者之间，脆性指数主要为 0.30~0.45(图 13)。因此，本文提出多级相控建立三维脆性指数模型方法，即先以单井沉积微相解释成果为硬数据，以砂地比等值线图作为平面约束数据，建立研究区沉积微相模型，然后以单井岩相解释成果为硬数据，以不同岩相发育概率体为软数据，在沉积微相模型控制下用序贯指示模拟方法建立岩相模型(图 14)。最后，在此基础上，以单井解释脆性指数为硬数据，在岩相约束下用序贯高斯模拟方法建立脆性指数模型(图 15)。

3.3.2 地震属性融合体

受地震数据采集技术和精度的影响，地震属性体无法直接识别出单一小尺度裂缝。然而，在小尺度裂缝发育区，裂缝之间的空隙和流体改变了储层的原始物性，会影响地震波的传播，从而引起地震属性的异

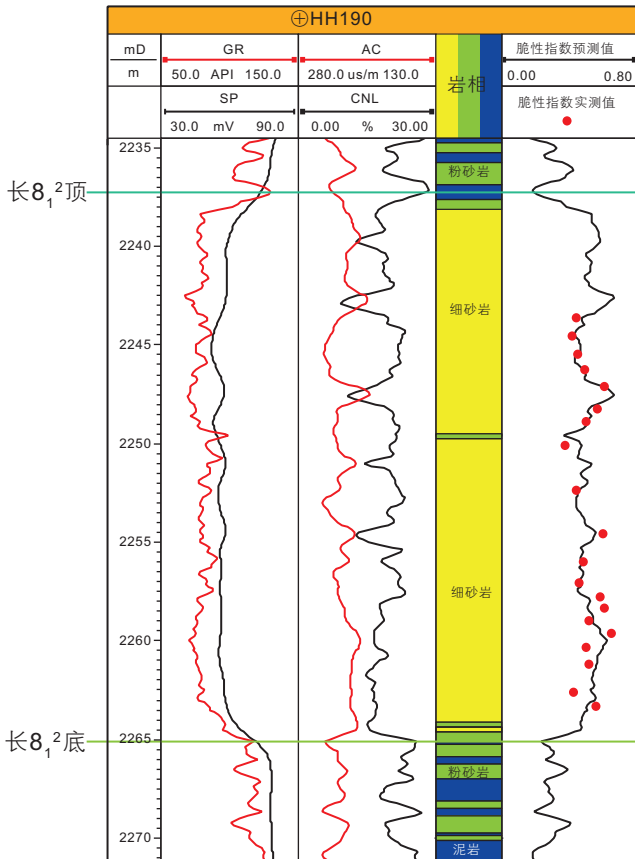


图 12 HH190 井脆性指数预测结果验证
Fig. 12 The verification of brittleness index prediction result of well HH190

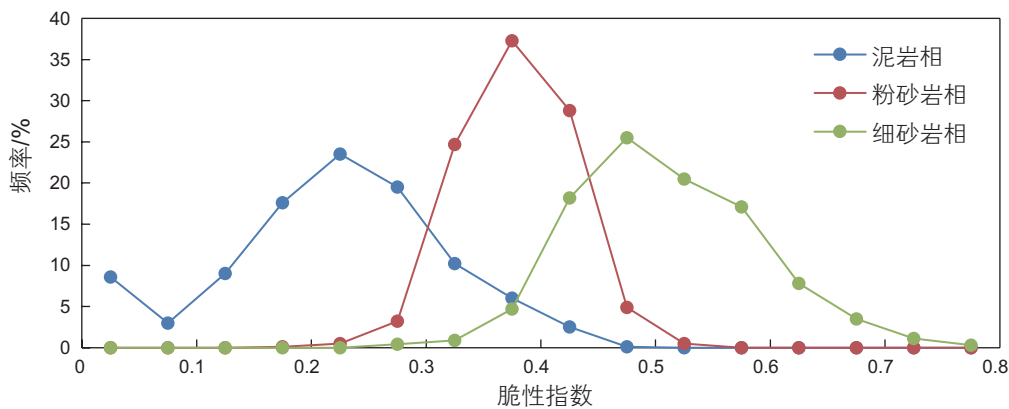


图 13 岩相与脆性指数关系图
Fig. 13 Relationship between lithofacies and brittleness index

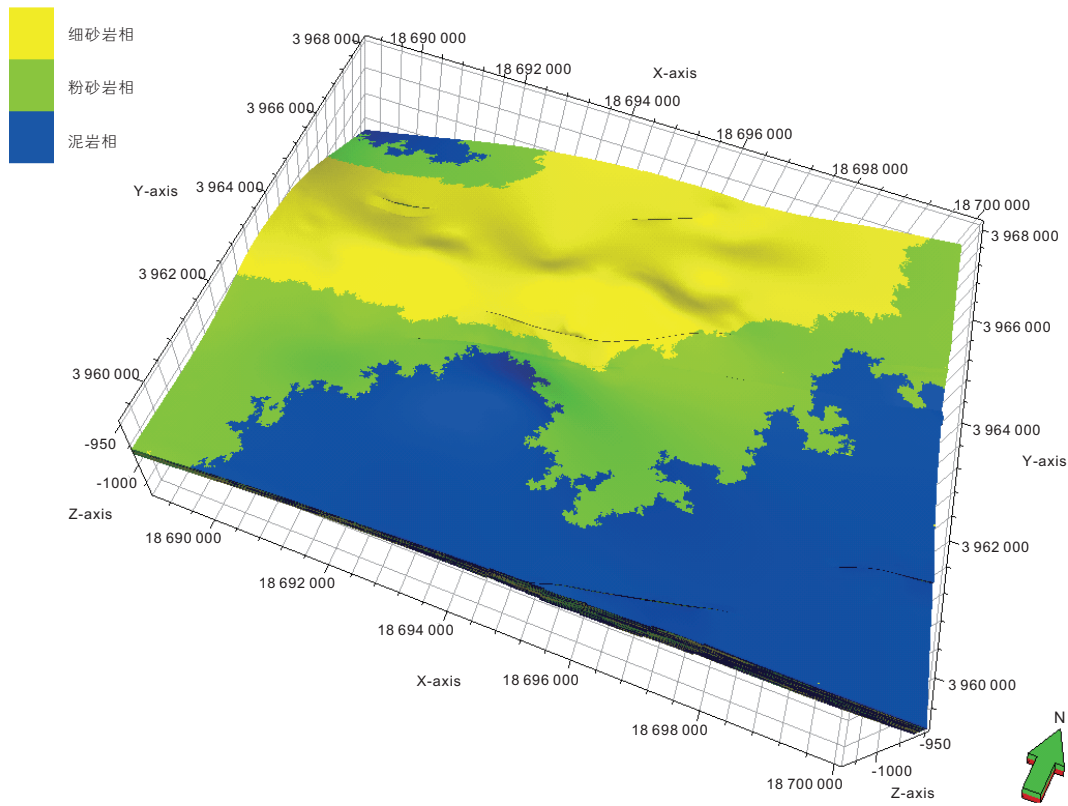


图 14 红河油田 92 井区长 8₁² 单层岩相模型

Fig. 14 The lithofacies model of Chang 8₁² single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield

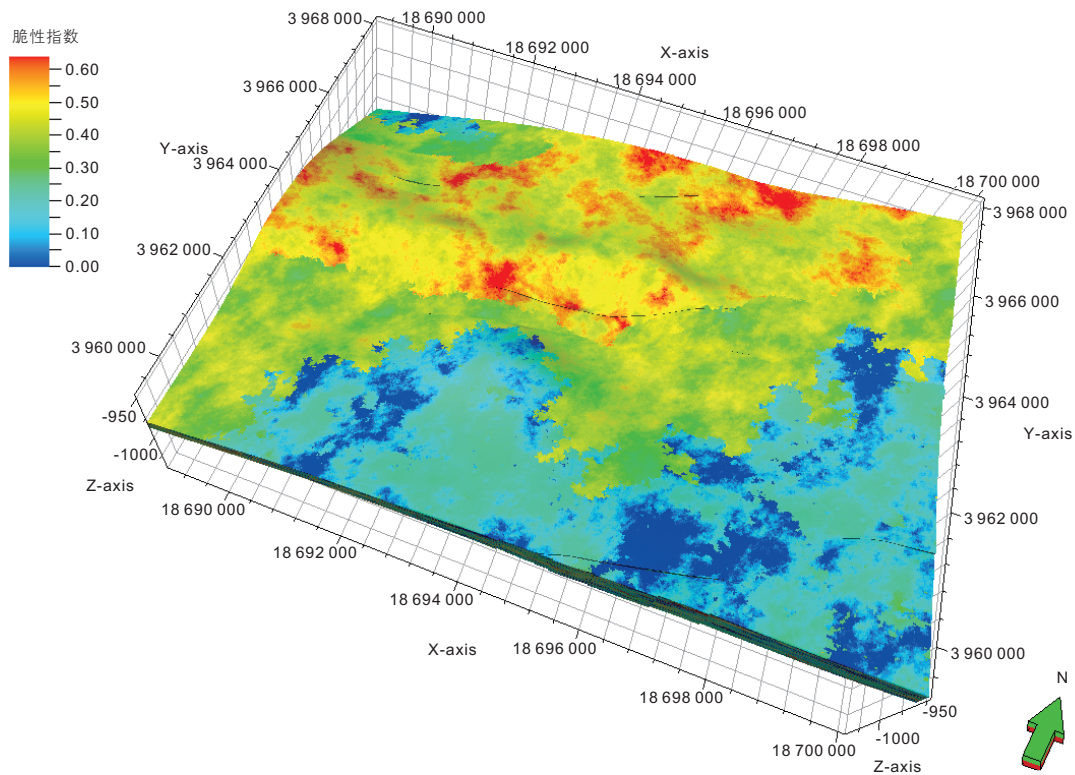


图 15 红河油田 92 井区长 8₁² 单层脆性指数模型

Fig. 15 The brittleness index model of Chang 8₁² single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield

常响应^[32]。因此,地震属性体可以反映小尺度裂缝的相对发育程度,从而进行井间裂缝预测。根据地震属性分析,相干体、构造倾角属性、均方根振幅属性均与裂缝发育有较好的响应关系(图 16)。图中,相干体中突出的不连续信息、构造倾角高值区和振幅低值区均可以较好地反映裂缝发育区的分布。但是,单一地震属性是储层岩性、物性和含流体性质的综合响应,具有多解性,因此本文在建模过程中,根据裂缝发育概率与各地震属性的相关分析,以裂缝发育概率与各地震属性的相关系数绝对值作为权系数对以上 3 种地震属性体进行加权平均,构建地震属性融合体,这样做可以突出多种地震属性的共性特征,削弱单一地震属性的多解性。

首先,对相干体、构造倾角属性、均方根振幅数

据进行归一化处理,再根据岩心、常规测井识别的裂缝发育段计算各井裂缝发育概率,其中裂缝发育概率是指目的层的裂缝发育段厚度占目的层总厚度的比例,然后根据各井裂缝发育概率与其各地震属性的相关分析(图 17),以各地震属性与裂缝发育概率的相关系数绝对值作为各地震属性的权系数,运用加权平均的方法得到地震属性融合体的计算公式如下:

$$S = \frac{0.72 \times Coherence + 0.66 \times Dip + 0.58 \times RmsAmpl}{0.72 + 0.66 + 0.58} \quad (3)$$

式中, S 为归一化地震属性融合体, $Coherence$ 为归一化相干体属性, Dip 为归一化构造倾角属性, $RmsAmpl$ 为归一化均方根振幅属性。

然后,根据公式 3 计算得到归一化地震属性融合体,如图 18 所示。由图可知,地震属性融合体突出了

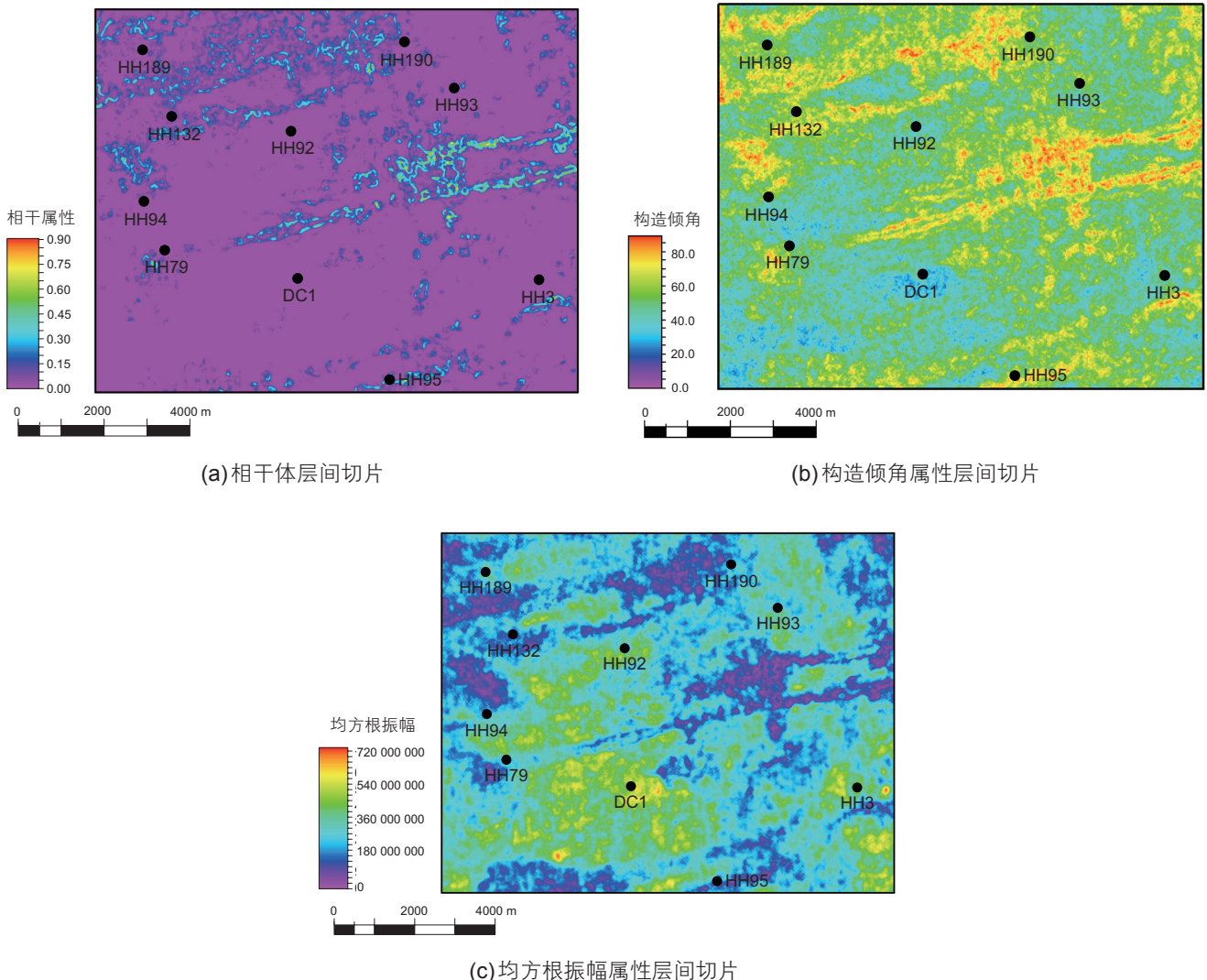


图 16 相干体、构造倾角属性和均方根振幅属性层间切片

Fig. 16 Interlayer slices of coherence cube, structural dip attribute and RMS amplitude attribute

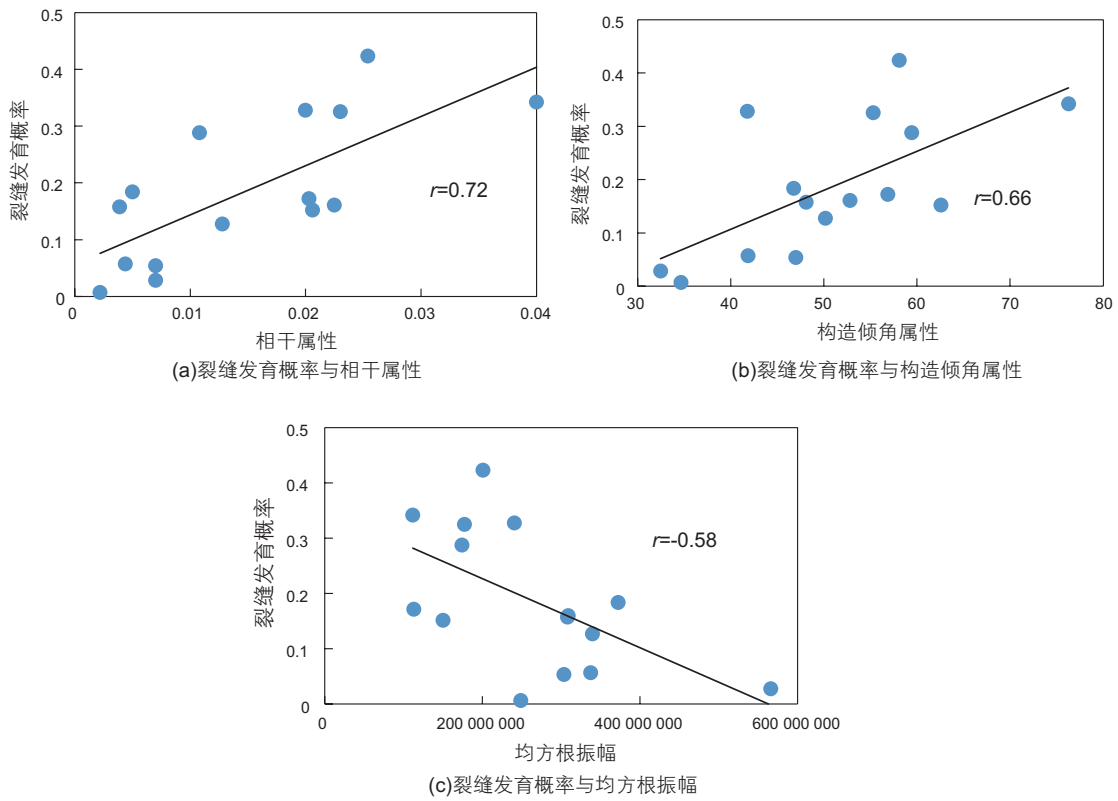


图 17 裂缝发育概率与各地震属性相关关系图(据 10 口探井和 5 口水平井导眼段)

Fig. 17 Correlation diagram of fracture development probability and various seismic attributes (according to 10 exploration wells and vertical sections of 5 horizontal wells)

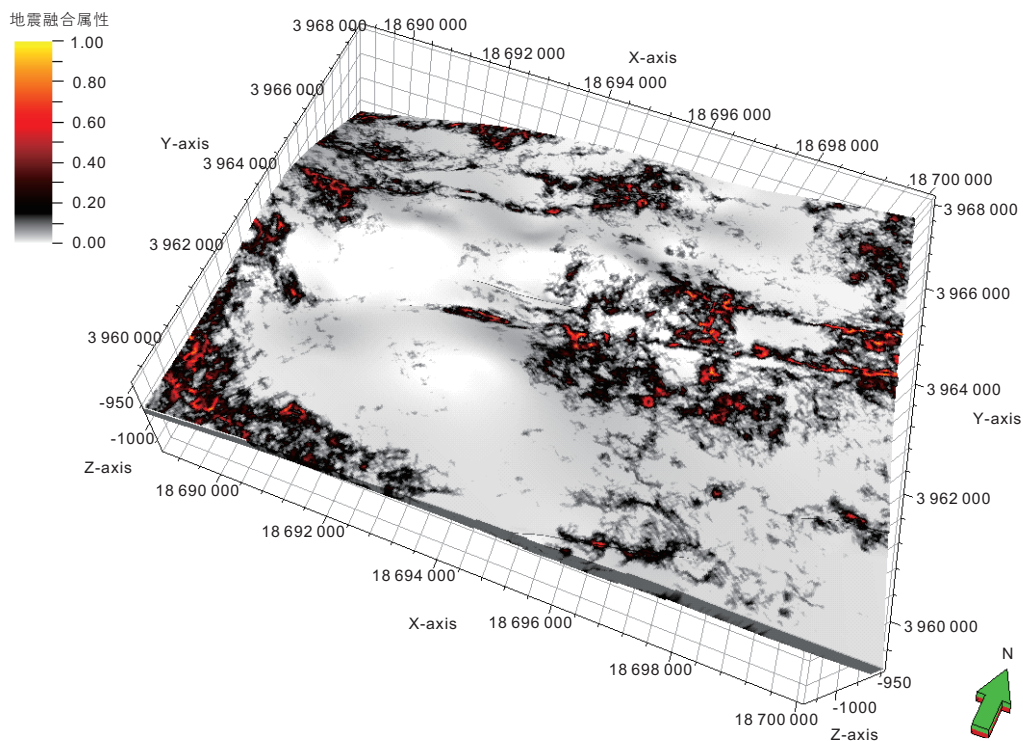


图 18 红河油田 92 井区长 8_1^2 单层地震属性融合体

Fig. 18 The seismic attribute fusion body of Chang 8_1^2 single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield

各地震属性体裂缝预测结果一致的区域，使裂缝发育区更加明显，这样可以提高预测精度，降低井间不确定性。

3.3.3 裂缝密度模型

裂缝密度模型的建立是小尺度裂缝建模的关键。裂缝密度曲线可通过成像测井裂缝解释和取心井岩心裂缝描述获得，但是研究区成像测井资料和取心资料有限，导致单井硬数据较少。在这种情况下，本文利用多元线性回归方法建立裂缝发育概率与脆性指数、到断层距离和地震属性融合体的关系式(式 4)。据此利用该公式，从脆性指数、到断层距离和地震属性融合体计算得到井间裂缝发育概率体，充分发挥地质信息和地震信息对井间裂缝模拟的约束作用，然后，以单井裂缝密度曲线为建模硬数据，以裂缝发育概率体为软数据，用序贯高斯模拟方法建立裂缝密度模型(图 19)。由模型可知，裂缝密度高值区主要分布在脆性指数高值区或断层附近，与地质认识符合较好。

$$P = 0.6555 \times BI + 0.3185 \times S - 0.2108 \times Fd - 0.0395, R^2 = 0.91 \quad (4)$$

式中， P 为裂缝发育概率， BI 为脆性指数， S 为归一化地震属性融合体， Fd 为归一化到断层距离。

3.3.4 小尺度裂缝网络模型

根据研究区小尺度裂缝的发育特征，设置小尺度裂缝几何形态和产状参数，用基于目标的示性点过程模拟方法随机生成裂缝片，同时结合退火模拟，以裂缝密度模型为目标函数，使生成的裂缝片满足模型中裂缝密度要求，最终建立研究区小尺度裂缝网络模型^[21](图 20)。通过统计分析小尺度裂缝模型中水平井裂缝密度和产能的关系，发现水平井最大日产油量随小尺度裂缝密度的增加而增加(图 21)，这可在一定程度上证实小尺度裂缝模型的可靠性。

最后，将大尺度裂缝、中尺度裂缝和小尺度裂缝 3 个级别的裂缝网络模型叠加在一起，即可得到该致密砂岩储层的综合离散裂缝网络模型。在此基础上，用 Oda 方法对综合离散裂缝网络模型进行粗化^[33]，生成最终的裂缝属性模型。

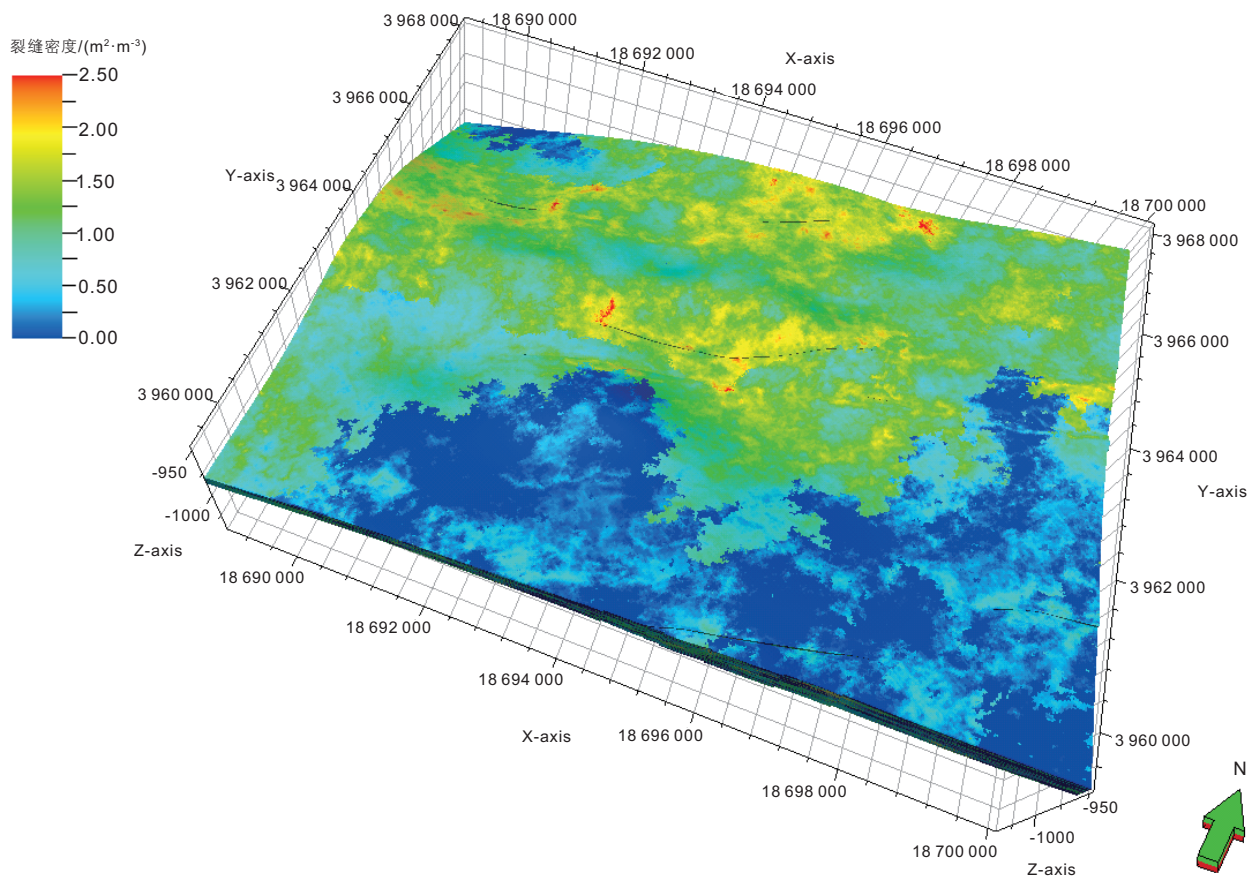


图 19 红河油田 92 井区长 8_1^2 单层小尺度裂缝密度模型

Fig. 19 The small scale fracture density model of Chang 8_1^2 single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield

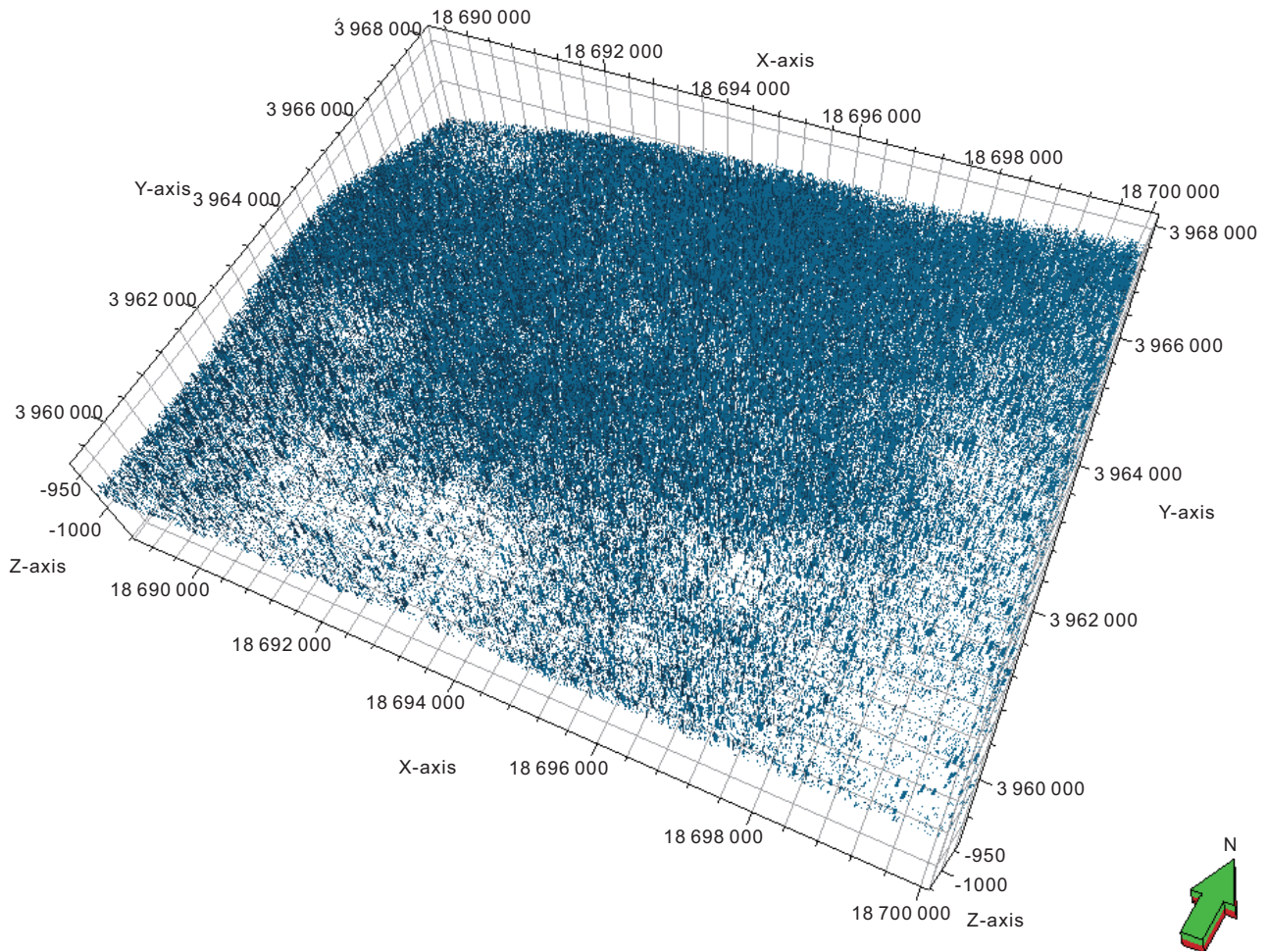


图 20 红河油田 92 井区长 8_1^2 单层小尺度裂缝网络模型

Fig. 20 The small scale fracture network model of Chang 8_1^2 single layer in wellblock 92 of the Honghe oilfield

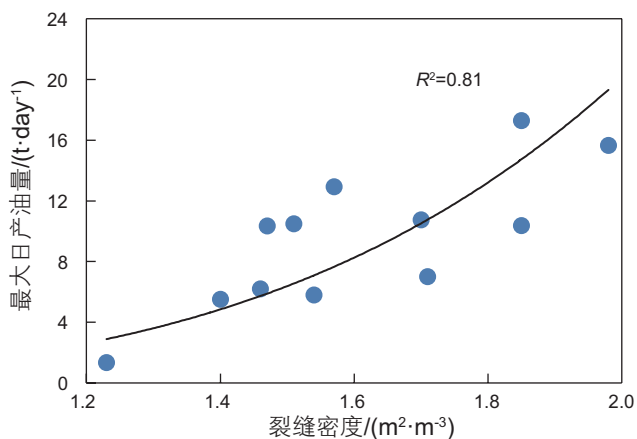


图 21 小尺度裂缝模型中水平井裂缝密度和产能的关系(据 12 口水平井)

Fig. 21 Relationship between fracture density and productivity of horizontal wells in the small scale fracture model (according to 12 horizontal wells)

4 结论

裂缝是致密砂岩储层有效的储集空间和重要的渗流通道, 具有明显的多尺度特征, 根据裂缝规模、裂缝识别方法的尺度界限性和裂缝发育的主控因素可将致密砂岩储层的天然裂缝主要分为大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝 3 种规模类型。

针对致密砂岩储层多尺度裂缝, 采用分级建模的思路。对于大尺度裂缝, 采用人工地震解释的确定性建模方法; 对于中尺度裂缝, 采用蚂蚁体追踪的确定性建模方法; 对于小尺度裂缝, 充分考虑了地质信息对裂缝发育的控制作用和地震数据的井间约束, 先利用多级相控建模方法建立三维脆性指数模型, 基于相关分析建立地震属性融合体, 再利用多元线性回归方法融合岩石脆性指数模型、到断层距离属性体、地震属性融合体建立井间裂缝发育概率体, 并以此为约束

数据建立裂缝密度模型, 然后以裂缝几何形态和裂缝密度模型为约束数据, 用基于目标的示性点过程模拟方法建立小尺度裂缝模型。最后, 将大尺度裂缝、中尺度裂缝和小尺度裂缝网络模型融合成综合离散裂缝

网络模型, 并通过粗化得到裂缝属性模型。该方法建立的裂缝模型与地质认识和生产动态数据吻合较好, 可用于油藏数值模拟。

参考文献

- [1] 曾联波. 雷家油田下第三系低渗透储层裂缝特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 167–169. [ZENG L B. Fracture characteristics of Eocene low permeable reservoirs in Leijia oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2):167–169.]
- [2] ORTEGA O J, MARRETT R A, LAUBACH S E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(2): 193–208.
- [3] STRIJKER G, BERTOTTI G, LUTHI S M. Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: A case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan[J]. Marine & Petroleum Geology, 2012, 38(1): 104–116.
- [4] OLSON J E, LAUBACH S E, LANDER R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis[J]. AAPG Bulletin MEMOIR 107, 2009, 93(11): 1535–1549.
- [5] LAW B E, SPENCER C W. The Pinedale gas field: A sweet spot in a regionally pervasive basin-centered gas accumulation, Green River and Hoback Basins, Wyoming[J]. AAPG Memoir 107, 2014: 37–59.
- [6] NELSON R A, MOLDOVANYI E P, MATCEK C C, et al. Production characteristics of the fractured reservoirs of the La Paz Field, Maracaibo Basin, Venezuela[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1791–1809.
- [7] 刘建军, 吴明洋, 宋睿, 等. 低渗透油藏储层多尺度裂缝的建模方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 90–103. [LIU J J, WU M Y, SONG R, et al. Study on simulation method of multi-scale fractures in low permeability reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2017, 39(4):90–103.]
- [8] 郎晓玲, 郭召杰. 基于 DFN 离散裂缝网络模型的裂缝性储层建模方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 964–972. [LANG X L, GUO Z J. Fractured reservoir modeling method based on discrete fracture network model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(6):964–972.]
- [9] 王建华. DFN 模型裂缝建模新技术[J]. 断块油气田, 2008, 15(6): 55–58. [WANG J H. DFN model: A new modelling technology for fracture[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(6):55–58.]
- [10] DERSHOWITZ B, LAPOINTE P, EIBEN T, et al. Integration of discrete feature network methods with conventional simulator approaches[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 3(2): 165–170.
- [11] SABATHIER J C, BOURBIAUX B J, CACAS M C, et al. A new approach of fractured reservoirs[C]//International petroleum conference and exhibition of Mexico. MEXICO: Society of Petroleum Engineers, 1998.
- [12] 李阳, 侯加根, 李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600–606. [LI Y, HOU J G, LI Y Q. Features and classified hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration & Development, 2016, 43(4):600–606.]
- [13] 侯加根, 马晓强, 刘钰铭, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究: 以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 59–66. [HOU J G, MA X Q, LIU Y M, et al. Modeling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2):59–66.]
- [14] 薛艳梅, 夏东领, 苏宗富, 等. 多信息融合分级裂缝建模[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 57–63. [XUE Y M, XIA D L, SU Z F, et al. Fracture modeling at different scales based on convergent multi-source information[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2014, 36(2):57–63.]
- [15] 王乐之, 刘红磊, 张纪喜, 等. 普光大湾地区断裂系统自动识别及裂缝建模研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5304–5307. [WANG L Z, LIU H L, ZHANG J X, et al. Study on the automatic recognition of fault-system and fracture modeling in Dawan area of Puguang gasfield[J]. Science Technology & Engineering, 2013, 13(18):5304–5307.]
- [16] KADLEC B J, DORN G A, TUFO H M, et al. Interactive 3-D computation of fault surfaces using level sets[J]. Visual Geosciences, 2008, 13(1): 133–138.
- [17] 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 X. 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.]
- [18] 孙乐, 王志章, 李汉林, 等. 基于蚂蚁算法的断裂追踪技术在乌夏地区的应用[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 716–721. [SUN L, WANG Z Z, LI H L, et al. Application of fault tracking technology based on ant colony algorithm in Wuxia Area[J]. Fault-Block Oil &

- Gas Field, 2014, 21(6):716–721.]
- [19] 吕文雅. 致密砂岩储层多尺度裂缝主控因素及对产能的贡献——以鄂南地区长8储层为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- [20] 刘岩. 低渗储层裂缝特征及其对油气富集的控制作用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [21] 赵彬, 侯加根, 刘钰铭, 等. 基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法[J]. 科技导报, 2011, 29(3): 39–43. [ZHAO B, HOU J G, LIU Y M, et al. Modeling of carbonate fractured reservoirs based on marked point process simulation[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(3):39–43.]
- [22] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法——以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383–387. [HU X Y, LI Y, QUAN L S, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3):383–387.]
- [23] 吕文雅, 曾联波, 刘静, 等. 致密低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地质科技情报, 2016(4): 74–83. [LV W Y, ZENG L B, LIU J, et al. Fracture research progress in low permeability tight reservoirs[J]. Geological Science & Technology Information, 2016(4):74–83.]
- [24] 张矿生, 刘顺, 蒋建方, 等. 长7致密油藏脆性指数计算方法及现场应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(5): 29–32. [ZHANG K S, LIU S, JIANG J F, et al. Calculation method about brittleness index in Chang 7 dense reservoir and its field application[J]. Well Testing, 2014, 23(5): 29–32.]
- [25] 石道涵, 张兵, 何举涛, 等. 鄂尔多斯长7致密砂岩储层体积压裂可行性评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 52–55. [SHI D H, ZHANG B, HE J T, et al. Feasibility evaluation of volume fracturing of Chang-7 tight sandstone reservoir in Ordos Basin[J]. Journal of Xian Shiyou University, 2014, 29(1):52–55.]
- [26] GRIESER W V, BRAY J M. Identification of production potential in unconventional reservoirs[C]//Production and Operations Symposium. Oklahoma: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [27] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62–71. [ZHAO X Y, ZENG L B, ZU K W, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1):62–71.]
- [28] WANG M, WILKINS R W T, SONG G, et al. Geochemical and geological characteristics of the Es3L, lacustrine shale in the Bonan sag, Bohai Bay Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 138: 16–29.
- [29] 何璇. 西加拿大盆地B区块致密砂岩储层三维地质模型研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015. [HE X. The 3-D geological models study of tight gas sands reservoir in west Canada sedimentary basin, block B[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.]
- [30] 李华阳, 周灿灿, 李长喜, 等. 致密砂岩脆性指数测井评价方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂岩储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 593–597. [LI H Y, ZHOU C C, LI C X, et al. Logging evaluation and application of brittleness index in tight sandstone reservoir—a case study of Chang-7 tight sandstone reservoir in Longdong area of Ordos basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5):593–597.]
- [31] 范卓颖, 林承焰, 王天祥, 等. 致密地层岩石脆性指数的测井优化建模[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1411–1420. [FAN Z Y, LIN C Y, WANG T X, et al. Logging optimization modeling on brittleness index of tight formation rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11):1411–1420.]
- [32] 彭仕宓, 索重辉, 王晓杰, 等. 整合多尺度信息的裂缝性储层建模方法探讨[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 1–7. [PENG S M, SUO C H, WANG X J, et al. A modeling method for fractured reservoirs using multi-scale information[J]. Journal of Xian Shiyou University, 2011, 26(4):1–7.]
- [33] ODA M. Permeability tensor for discontinuous rock masses[J]. Geotechnique, 1985, 35(4): 483–495.

(编辑 付娟娟)