

页岩气水平井地质建模中几个关键问题处理技术

周 昕^{1,2}, 陈克勇¹, 李宜真², 李彦超², 李俊翔², 乔玲茜²,
郝越翔², 李洁辛², 刘礼军¹, 聂焕然¹, 唐 迅¹

(1. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059;

2. 川庆钻探工程有限公司 页岩气勘探开发项目经理部, 成都 610051)

[摘要] 页岩储层三维地质建模存在若干技术难题, 例如基于顺层水平井构造还原及精细建模技术问题、基于水平井的页岩多属性参数一体化建模技术问题及不同尺度天然裂缝综合表征及建模技术问题等, 本文就以上几个问题的处理技术进行了探讨。针对基于顺层水平井构造还原及精细建模问题, 提出使用水平井段密集分层节点数据全点约束的层面循环构建技术进行处理; 针对基于水平井的页岩多属性参数一体化建模技术问题, 提出使用相控及多属性约束的逐级关联建模技术, 其中由于水平井数据采样产生的统计偏误问题, 采用对水平井所在的小层进行高精度分层细化水平段定位及平面网格倍数抽稀的办法进行处理; 针对页岩中多尺度天然裂缝综合表征及建模技术问题, 推荐采用裂缝分形模拟技术; 针对水平井导向模型在钻井中实时更新问题, 推荐采用虚拟井分层控制技术方法。以上技术方法均通过威远气田验证, 大幅度提高了模型的精度和可靠性, 在页岩气储层地质建模中可推广使用。

[关键词] 页岩; 顺层水平井; 构造建模; 相控建模; 逐级关联约束建模

[分类号] TE319

[文献标志码] A

Discussion on several key problems in shale gas reservoir modeling based on horizontal wells

ZHOU Xin^{1,2}, CHEN Keyong¹, LI Yizhen², LI Yanchao², LI Junxiang², QIAO Lingqian²,
HAO Yuexiang², LI Jiexin², LIU Lijun¹, NIE Huanran¹, TANG Xun¹

1. College of Energy Resources of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Shale Gas Exploration and Development Project Management Department of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company, Chengdu 610051, China

Abstract: The 3D geological modeling of shale reservoirs is different from geological modeling of conventional reservoirs. There are some related technical problems, such as issues pertaining to (1)

[收稿日期] 2023-04-02。

[基金项目] 川庆钻探公司—成都理工大学 2021 年校企联合攻关项目(CQCDLG-2021-04)。

[第一作者] 周昕(1994—), 女, 工程师, 研究方向: 石油天然气勘探, E-mail: 361189726@qq.com。

[通信作者] 陈克勇(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 油气藏精细描述及地质建模, E-mail: Aik.Chen@qq.com。

[引用格式] 周昕, 陈克勇, 李宜真, 等, 2024. 页岩气水平井地质建模中几个关键问题处理技术[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 76-90.

Zhou X, Chen K Y, Li Y Z, et al., 2024. Discussion on several key problems in shale gas reservoir modeling based on horizontal wells[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 76-90.

structure reconstruction and fine modeling based on bedded horizontal wells, (2) integrated modeling of multiple shale parameters based on horizontal well data, and (3) comprehensively characterizing and modeling natural fractures at different scales. This paper proposes some solutions to these key problems. Aimed at the problem of fine structure modeling based on bedding horizontal wells, a method consisting of cyclically constructing layers constrained by horizontal well layering data is proposed. For shale property modeling based on horizontal wells, a facies-controlled and multi-property-constrained modeling strategy is proposed. Due to the statistical errors caused by horizontal well data sampling, two ways those use high-precision layering the horizontal section of horizontal wells and enlarge modeling grid to decluster the density of the data scaled up from the horizontal wells were adopted. Fractal simulation technology was recommended for the characterization of natural fractures at different scales in shale, and we suggested using virtual wells and virtual stratifications to solve the problem of updating steering models in drilling. The above methods were verified using data from the Weiyuan gas field, and we showed that the model accuracy and reliability were greatly improved relative to other methods. The technical methods presented in this work can be popularized in the geological modeling of shale gas reservoirs.

Key words: shale; bedding horizontal well; structure modeling; facies-controlled modeling; progressive associative constraint modeling

四川盆地威远地区于 2012 年被确定为国家级页岩气示范区(谢军,2018)。“十三五”期间,川庆威远页岩气初步实现高效开发,核心区建产 165 km²,井均产气量达 27×10^4 m³/d(王治平等,2021)。页岩储层具有横向连片性好,纵向非均质性强的特点,龙马溪组优质页岩主要分布在龙一₁¹小层中下部。大量开发实践表明,水平井产气量不仅与龙一₁¹小层中下部钻遇率和水平段所处龙一₁¹小层厚度呈正相关,还受 TOC、含气量、脆性矿物含量、孔隙度等储层属性参数以及天然裂缝分布较大的影响(程辉等,2021;何畅等,2019;陈雪等,2020)。随着威远页岩气田进入水平井平台化精细开发阶段,准确预测龙一₁¹小层优质储层的位置以及储层关键属性参数和天然裂缝的分布,是实现页岩气田高效开发的基本保证。因此,对基于地质工程一体化的页岩储层三维精细地质建模的需求也日益凸显。由于页岩储层三维地质建模起步较晚(龙胜祥等,2019;马成龙等,2017),目前还存在一些技术难题困扰着相关技术和科研人员。本文通过实践研究,提出了能有效解决构造建模、属性参数建模、裂缝建模以及构造模型适时更新相关问题的技术方法,供业内同行参考。

1 基于顺层水平井构造还原及精细建模技术

1.1 存在的问题

四川盆地页岩气藏具有厚度薄、物性差的特

点,其开采主要采用水平井顺层长水平段方式,水平段长度通常 2~3 km。水平井段分层不同于直井和斜井分层,在每一个分层节点上,无法实现纵向连续分层,只能体现目标层或水平井段钻遇的特征层准确位置,不能体现上下层位界限及厚度变化关系。另外,水平井段以最大限度在优质层段中穿行,如果不对优质层段进行高精度细分层的话,很难实现水平井段分层点精细定位。

目前普遍采用的方法是沿水平段分层节点增加虚拟直井和虚拟分层(乔辉等,2018;欧成华等,2019),通过虚拟分层数据点来约束层面的构建。该方法的优点在于:虚拟井上各层分层数据点完整,能对各个层面的构建做精细的约束;其缺点在于:页岩气藏水平井水平段长度大,分层节点多(每口井大于 20 个),要充分利用每一个分层节点数据,需要设置大量的虚拟井和虚拟分层,工作量巨大且难以管理。如果将分层节点抽稀,又会造成大量分层节点无法参与控制,降低了模型的准确度和精度。如图 1 所示某 10 口水平井的平台,沿水平段分层节点抽稀后,共增加了 87 口虚拟井。

为了解决以上问题,本文提出了水平井高精度分层、逐级控制的方法进行水平段密集层位数据拾取,运用层面循环约束构建技术实现构造还原及精细建模。

1.2 地质逐级分层

页岩气藏可获取用于地质分层的基础数据主

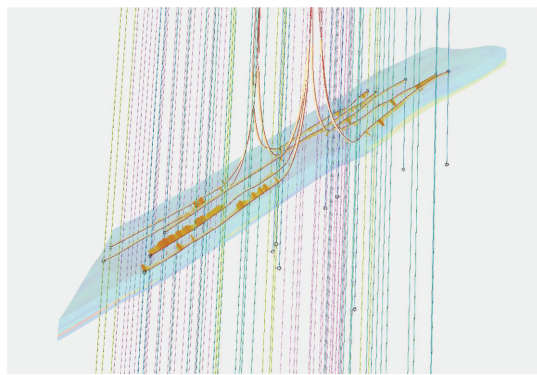


图 1 某平台沿水平段增加虚拟直井和虚拟分层
Fig. 1 Adding virtual vertical wells and their layers along the horizontal wells' sections of a horizontal well platform

要包括:直井段的常规测井信息和水平段的随钻伽马测井信息、元素录井信息。需要充分结合野外露头观察和岩心分析,确定主要层位界限在常规测井、随钻伽马测井和元素录井上的特征,分析常规测井、随钻伽马测井和元素录井的关系,建立可识别、易追踪、适合三维精细构造建模需要的小层划分方案。

1.2.1 水平井斜井段小层划分

四川盆地威远地区龙马溪组海相页岩优质层在龙一₁亚段内,可识别和追踪的小层有 4 个,各自特征明显,易于区分,其中位于下部的龙一₁¹小层为水平井段目标层:

龙一₁¹小层在主勘探区以硅质页岩为主,局部为钙质和混合质页岩,测井上主要表现为高 GR、低 DEN、中高电阻率特征,其底与五峰组主要以 GR、电阻率由高值向低值转换、DEN 向高值转换的特征。其顶界为龙一₁²小层 GR 低值光滑箱形的底部,TOC 低值向高值变化。

龙一₁²小层在主勘探区以硅质页岩为主,局部为钙质页岩和混合质页岩,测井上主要表现为 GR 低值光滑箱形,其顶部以 GR 低值向高值转换为界与龙一₁³小层分界,其底与龙一₁¹小层以 GR 低值光滑箱形的底部分界。

龙一₁³小层以硅质页岩为主,其次为混合质页岩,测井上主要表现为 GR 中高值,其底与龙一₁²小层以 GR 高值向低值光滑箱形转换为分界,其顶界与龙一₁⁴小层以 GR 高值向低值光滑箱形转换为分界。

龙一₁⁴小层以钙质页岩为主,局部为混合质页岩,测井上主要表现为 GR 低值平箱形,元素录

井上钙元素含量高,硅元素含量低,其顶部以 GR 低值向高值转换为界与龙一₁²亚段分界,其底与龙一₁³小层以 GR 低值光滑箱形的顶部分界(图 2)。

1.2.2 目标层水平井段精细分层

龙马溪组优质页岩主要位于龙一₁¹小层中下部,因此,水平井水平段均沿龙一₁¹小层顺层分布,需要对龙一₁¹小层进行精细的特征层划分,才能准确定位水平段的位置,为构造建模提供必要的支撑。

利用随钻伽马、铀、钾(GR、U、K)测井曲线,结合钙、硅、铝(Ca、Si、Al)元素录井曲线进行特征层划分,将龙一₁¹小层划分为 7 个特征层。

7 号特征层:随钻 GR、U、K 曲线呈中高值,元素录井为中低 Ca、Al,中高 Si;6 号特征层:低随钻 GR、U、K,低 Ca、Al,中高 Si;5 号特征层:高随钻 GR、U、K,低 Ca、Al,中高 Si;4 号特征层:低随钻 GR、U、K,低 Ca,中高 Al、Si;3 号特征层:高随钻 GR、U,中高 K,中低 Ca、Al、Si;2 号特征层:低随钻 GR、U、K,低 Ca、Al,高 Si;1 号特征层:高随钻 GR,中高 U、K,低 Ca、Al,高 Si(图 3、图 4)。

1.3 构造还原及精细建模策略

为了克服增加虚拟井和虚拟分层的缺陷,本次尝试采用水平井段分层节点数据约束的层面循环约束构建方法,具体实现如下:①基于地震和全区构造层面趋势,利用平台井分层校正,确定龙一₁¹顶面;②以龙一₁¹顶面为基准,利用 7 号层厚度分布,确定 7 号层底面参考面,并在 7 号层底水平井分层约束校正下,确定 7 号层底面;③以 7 号层底面为基准,利用 6 号层厚度分布,确定 6 号层底面参考面,并在 6 号层底水平井分层约束校正下,确定 6 号层底面;④依次进行下去,确定 1 号层底面;(所有分层点等效参与了对 1 号层底面的约束);⑤以 1 号层底为基准,按以上步骤逆向再走一遍,以达到所有水平井段分层对所有层面约束的目的(图 5)。

该方法的优点在于:通过层间厚度关联,循环构建层面,在不需要增加虚拟井和虚拟分层的情况下,充分利用水平层段分层节点数据约束,达到虚拟井和虚拟分层同样的效果;缺点在于:需要循环构建层面,手工操作相对比较耗时,但由于该方法逻辑性强,可利用 Petrel 软件中 Workflows 模块进行简单编程设置,即可自动循环运行。

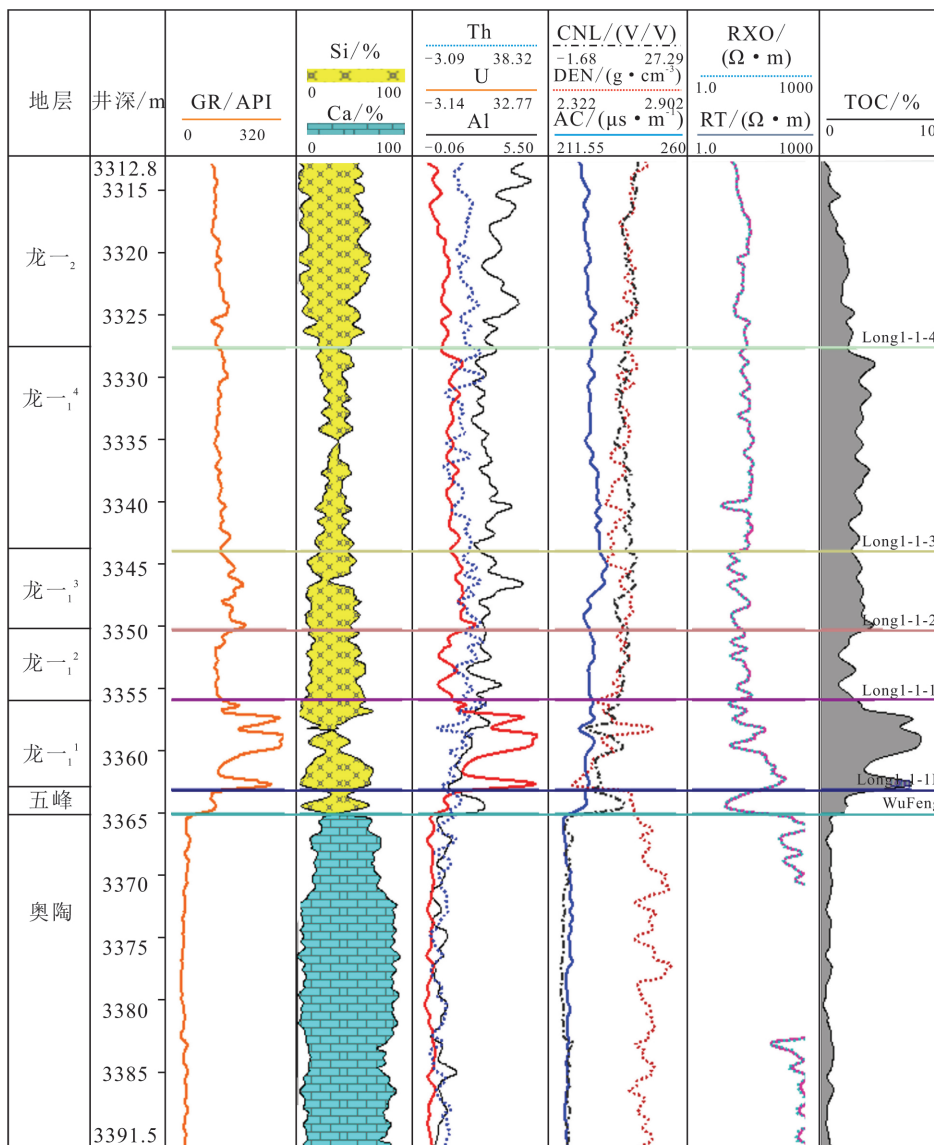


图 2 标准井小层划分及测井响应

Fig. 2 Standard well sub-layer division and the well logging characteristics

2 基于水平井的页岩多属性参数一体化建模技术

2.1 存在的问题

页岩的属性参数较常规砂岩储层更多,各属性参数的大小普遍受岩相特征的影响,且属性参数之间也具有一定的相关性。目前的建模研究中,大多数建模工作者都采用了随机建模策略,少数人采用了相控建模方法,并未涉及到属性参数相互之间的关联问题。本文为了将以上两个因素同时研究并应用到模型中,采用相控及多属性约束逐级关联的建模技术,以获得页岩多属性参数

一体化建模结果。

2.2 页岩相建模技术

2.2.1 页岩岩相划分

根据前人研究可知,威远地区龙一₁亚段整体为深水陆棚亚相(蒋裕强等,2016;梁峰等,2022;管全中,2020;史洪亮等,2019;欧成华等,2021)。为充分利用直井和水平井相关资料信息以满足建模需求,在单井上利用泥质、钙质、硅质含量解释结果,精细划分为钙质页岩陆棚、硅质页岩陆棚、泥质页岩陆棚和混合质页岩陆棚微相,对应钙质页岩、硅质页岩、泥质页岩和混合质页岩4种岩相。

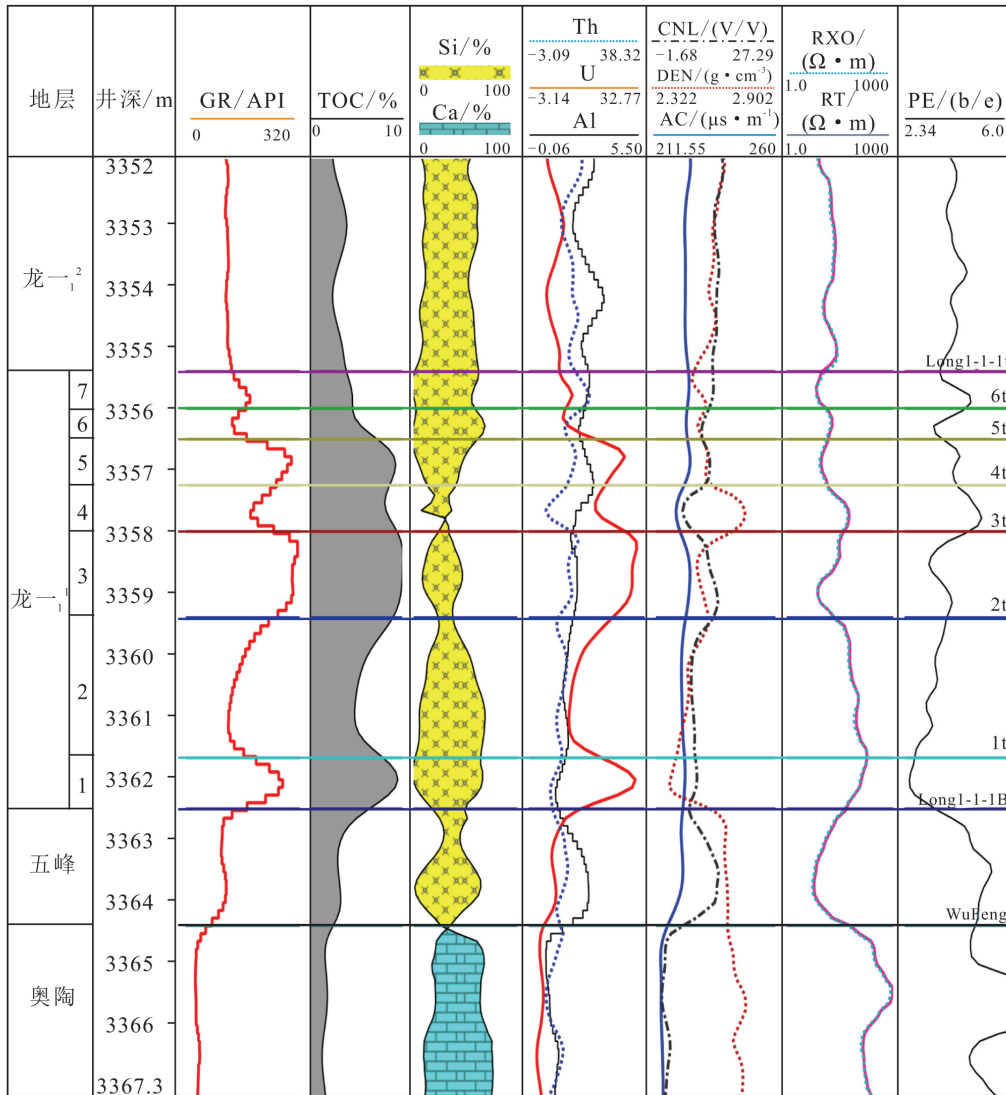


图 3 标准井特征层划分
Fig. 3 Standard well characteristic subtle layer division

直井:根据测井解释的石英含量(ZQUAZ)和碳酸钙含量(ZCALC)进行划分。ZQUAZ>50%为硅质页岩,ZCALC>50%为钙质页岩,ZQUAZ+ZCALC<20%为泥质页岩,其余为混合质页岩。

水平井:利用元素录井硅元素(Si)和钙元素(Ca)进行划分。将Si和Ca做归一化处理,Si>0.75为硅质页岩,Ca>0.7为钙质页岩,Si+Ca<0.2为泥质页岩,其余为混合质页岩。将以上划分的结果在每一口单井上进行钙硅曲线交会核实(图6)。

2.2.2 优势相分布

根据前面建立的精细构造模型,经网格划分,通过按比例提取每口井岩相在各小层中的优势

相,绘制各小层岩相平面分布图。该方法充分利用了直井和水平井资料信息,除龙一₁¹小层外,其余各小层均能达到较好的效果。龙一₁¹小层内因为存在大量的水平段数据信息,造成优势相统计结果容易产生偏误(舒红林等,2020;董越等,2022)。对该偏误的解决办法有两种:方法一是首先采用直井数据确定优势相总体分布趋势,再利用直井数据对优势相边界进行修正;方法二是将该小层精细到7个特征层中进行分析,纵向上绘制出7个特征层的优势相分布。方法一精度略低,但操作简单,能快速实现;方法二由于特征层平均厚度小于1m,精度高,数据偏误小,但操作复杂,工作量大。鉴于本次优势相分析是用于岩相建模的约束条件,故选用方法一实现(图7)。

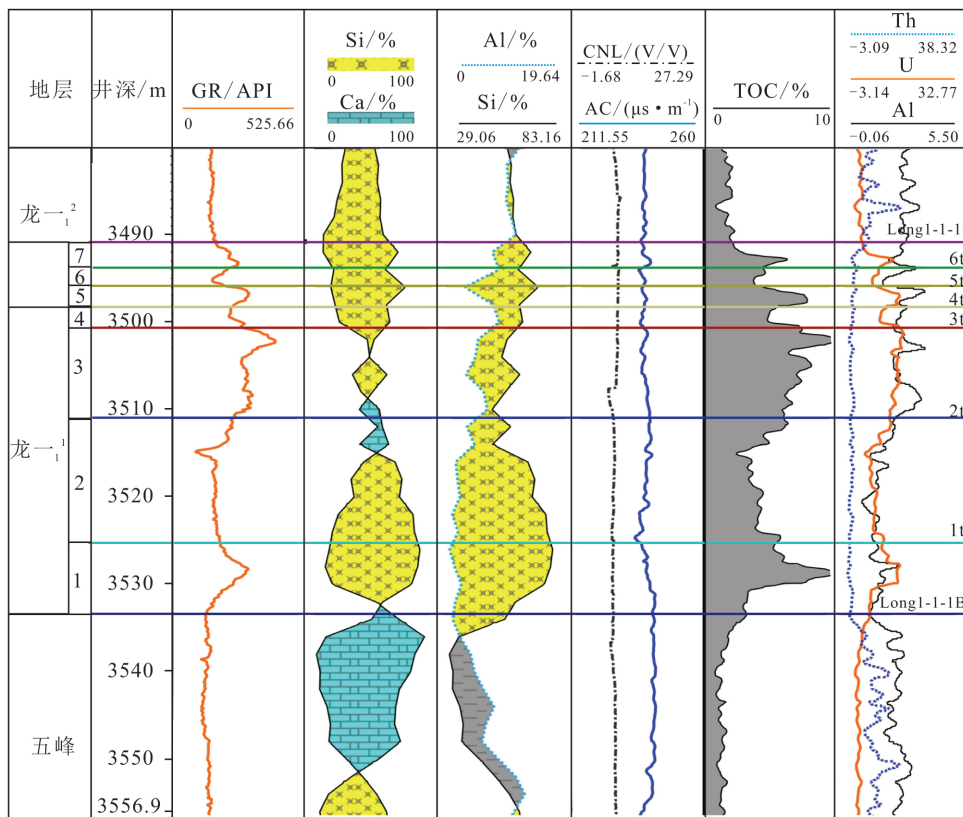


图 4 水平井水平段特征层划分

Fig. 4 Characteristic subtle layer division in the horizontal section of a horizontal well

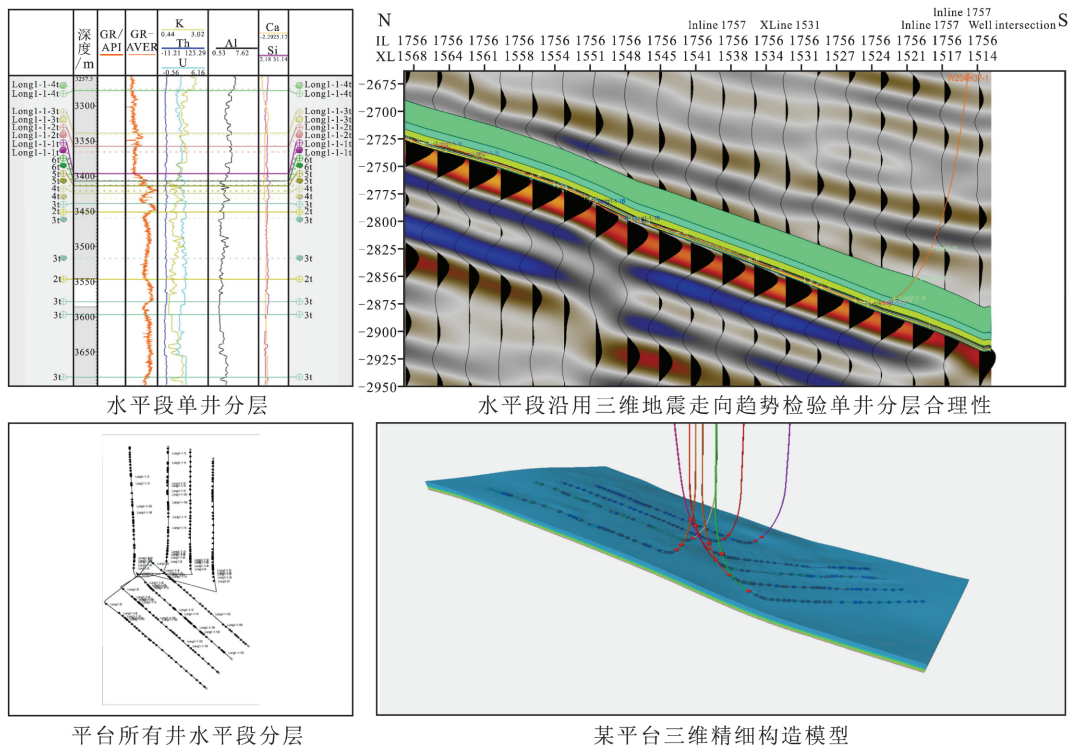
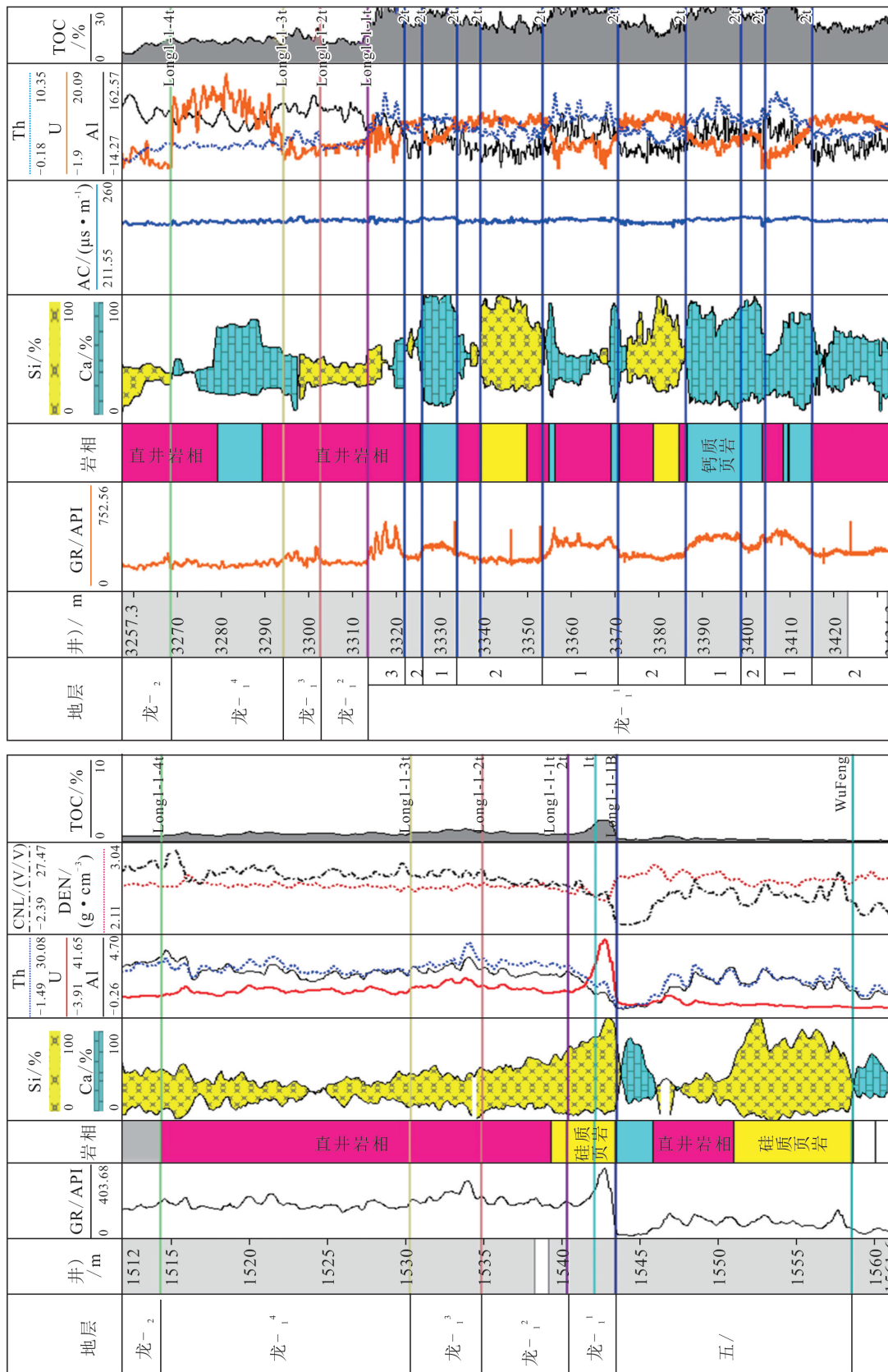


图 5 水平井段分层节点循环约束构造建模实现

Fig. 5 Structural model established using the method of cyclically constructing horizontal well section layers



(B)水(井)岩相划分

(A)直井岩相划分

图6 单井岩相划分综合柱状图

Fig.6 Composite columnar section of single well lithofacies division

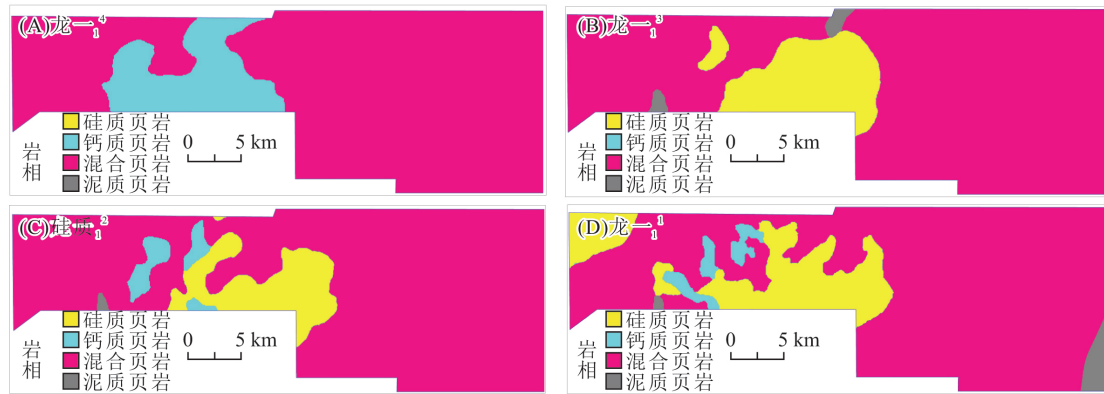


图 7 各小层优势岩相平面分布
Fig. 7 Distribution of majority lithofacies in each sub-layer

2.2.3 优势相约束下的岩相建模

根据对工区内评价井和水平井岩相划分,经数据粗化后进行集束处理,对岩相纵向分布比例和变差函数进行分析,采用序贯指示模拟随机建

模方法,在优势相分布模型的约束下,建立全区岩相分布模型(图 8)。基于页岩岩相平面分布相对稳定,纵向分布非均质性强的特点,岩相建模网格划分应遵循纵向步长小,平面步长大的原则。

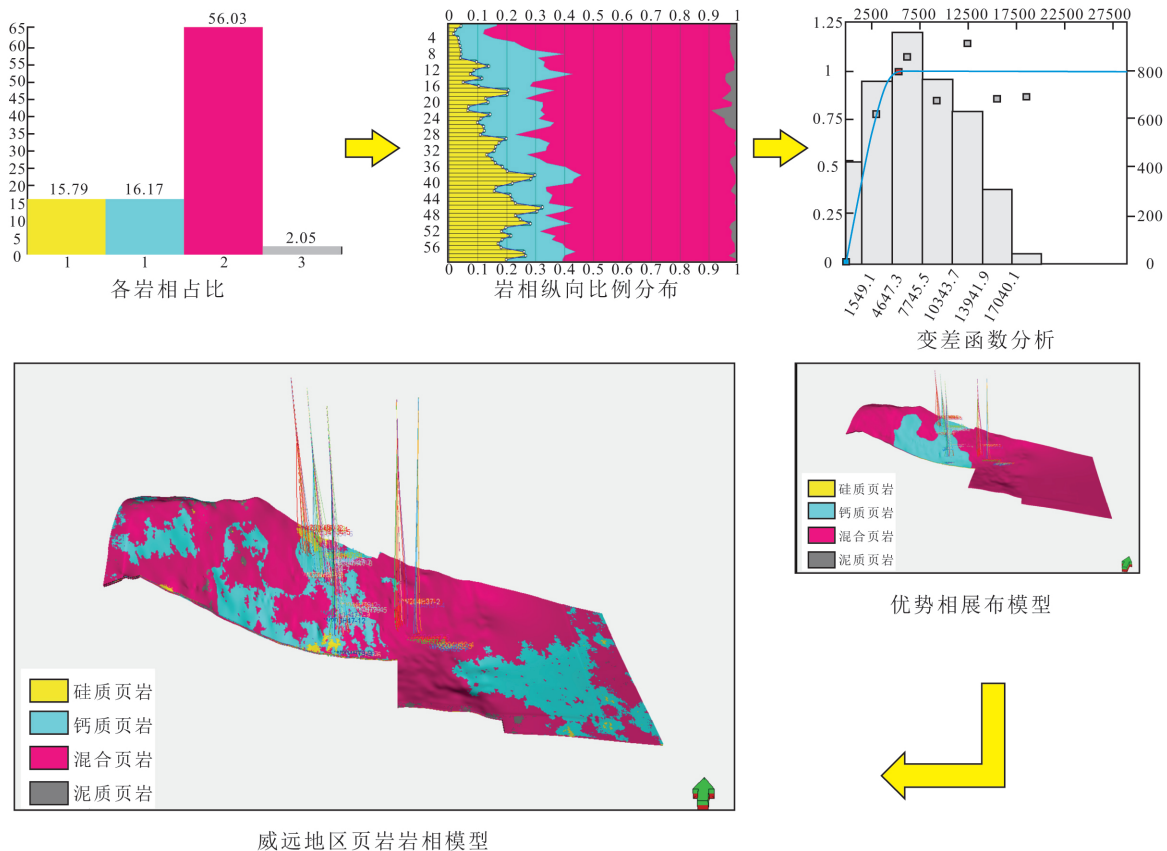


图 8 基于优势相约束的水平井岩相三维建模

Fig. 8 The 3D lithofacies modeling based on horizontal well data and constrained by majority lithofacies distribution

2.3 相控及多属性约束逐级关联建模技术

2.3.1 属性参数与岩相关系分析

按照硅质页岩、混合质页岩、钙质页岩和泥质

页岩 4 种岩相分别对页岩孔隙度、渗透率、含水饱和度和、TOC、含气量和脆性矿物含量(体积分数)等属性参数进行统计(表 1)。结果显示,页岩属

表 1 页岩属性参数分岩相统计表
Table 1 Statistics of shale parameters classified by the lithofacies

属性参数	硅质页岩			混合质页岩			钙质页岩			泥质页岩		
	低质	高值	中值	低质	高值	中值	低质	高值	中值	低质	高值	中值
孔隙度/%	3.04	10.58	6.26	1.13	8.96	5.99	0.17	8.71	5.17	0.49	7.22	4.67
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	100.690	496.750	300.390	50.020	598.280	337.100	0.104	0.658	0.229	0.151	0.325	0.233
含水饱和度/%	12.01	77.15	38.08	5.30	79.60	30.90	47.50	88.70	60.70	37.10	80.40	60.80
TOC/%	2.22	9.95	4.93	1.82	9.74	4.63	0.68	6.99	4.19	1.39	3.88	1.88
含气量/%	2.01	11.28	4.95	1.01	7.95	4.92	0	7.50	4.61	0.24	6.86	3.91
脆性矿物体积分数/%	60.09	79.98	71.39	26.01	80.05	71.16	56.22	79.89	70.79	40.57	78.81	58.53

性参数受页岩岩相影响较大,总体表现为硅质页岩和混合质页岩岩相储层相对较好,钙质页岩岩相储层相对较差。

2.3.2 属性参数相互关系分析

根据页岩属性参数测井解释数据,分别分析各属性参数之间的相关性,将相关性较强的属性

参数用于建模时的相互约束。经分析,威远地区页岩孔隙度分别与渗透率、含气量参数呈现较强的正相关关系,与含水饱和度呈现较强的负相关关系,含水饱和度与孔隙度、TOC、含气量均呈现出较强的负相关关系,含气量与 TOC 之间呈现较强的正相关关系(图 9)。

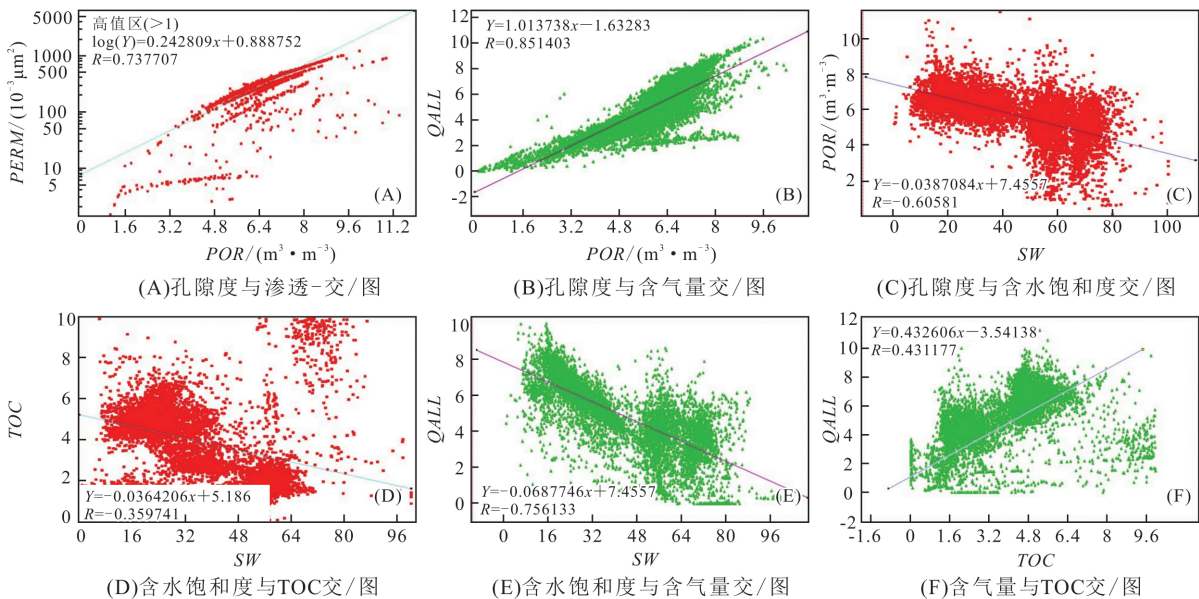


图 9 主要属性参数之间相关交会图
Fig. 9 Correlations between the different parameters of shale

2.3.3 属性参数建模技术

页岩属性参数建模必须面临的两个基本问题:一是数据统计偏误,由于水平井水平段主要沿着优质储层顺层钻井,其解释的储层参数通常具有“偏好”的统计偏误;二是作为页岩气开发的水平井多数缺少测井资料,无法对相关属性参数进行解释,造成部分属性参数建模基础数据匮乏,难以保证空间分布预测的可靠性。

为解决水平井造成的数据统计偏误问题,传统的方法为忽略水平井数据,只统计直井数据规律。本次仍然推荐使用精细构造分层的办法,将

水平段分散到不同的物理层中,而不是笼统地在一个小层内,同时结合扩大水平网格倍数(De-clustering),从而抽稀水平井段的数据量。该方法的优点在于,极大地使用了水平井资料,弥补直井资料匮乏的问题。

针对部分属性参数数据匮乏问题,经反复试验,本文推荐使用相控建模及属性约束逐级关联的方法来解决。具体思路为:首先优选基础数据相对丰富且受岩相影响较为明显的 TOC 属性参数进行相控建模(图 10),然后选择与 TOC 属性参数相关性较好的且受岩相影响明显的含水饱和

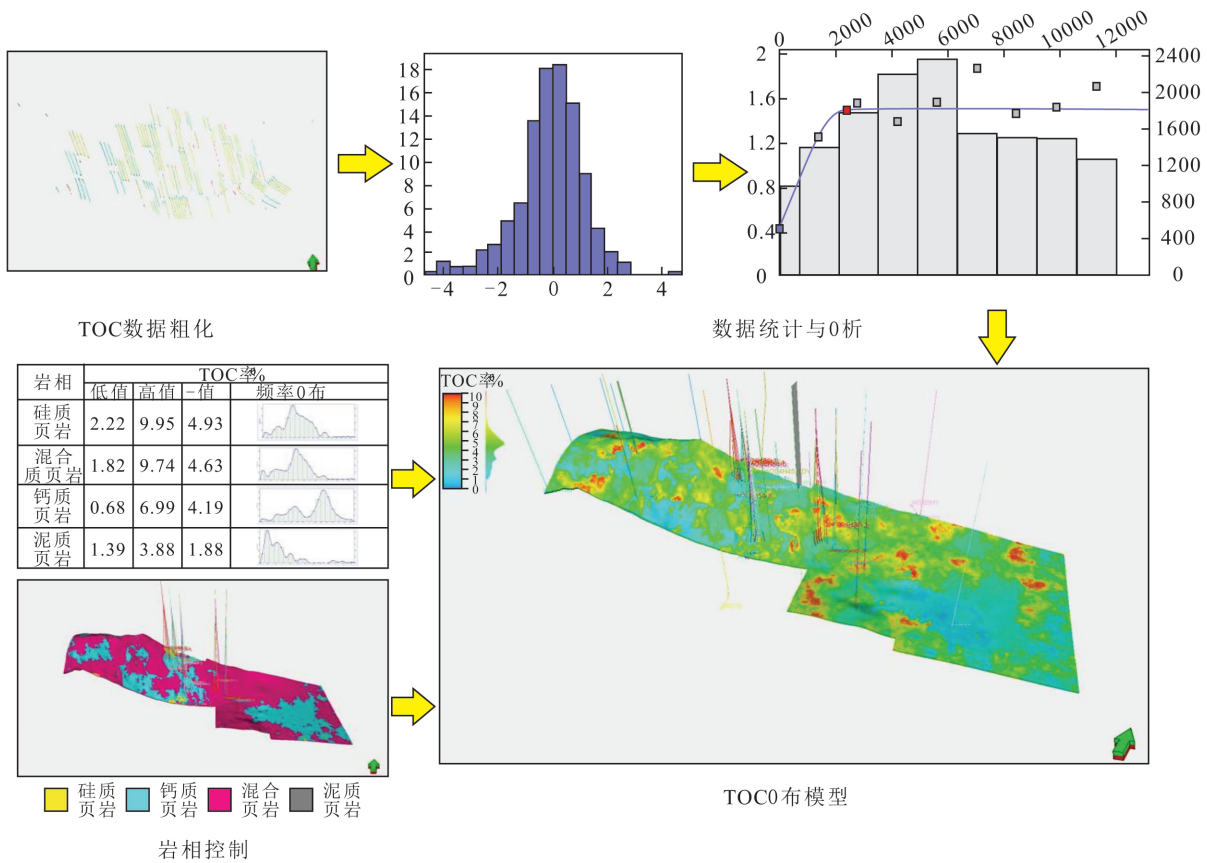


图 10 相控 TOC 建模
Fig. 10 Lithofacies-controlled TOC modeling

度属性参数,进行相控+TOC 模型约束关联建模。依次对孔隙度参数采用相控+含水饱和度模型约束关联建模,对渗透率参数采用相控+孔隙度模型约束关联建模,对含气量参数采用相控+TOC 模型+含水饱和度模型+孔隙度模型基于神经网络共同约束的多属性关联建模(图 11),实现属性参数模型相互关联,协调分布。

属性关联约束中,亦可运用地震属性约束,但前提是要保证地震数据体的准确归位。由于页岩水平井开发中,大量井缺乏相关测井资料,无法开展地震时深归位分析,造成水平井数据与地震属性数据匹配性较差,故本文不推荐该方法。

3 多尺度天然裂缝综合表征及建模技术

天然裂缝是影响页岩气藏产能的关键因素,页岩气开发中裂缝的准确刻画至关重要。目前常用的裂缝描述方法是在岩心和成像测井等基础资料裂缝参数刻画的基础上,利用基于三维地震数据体的蚂蚁追踪技术、极大似然分析技术等,对天

然裂缝分布进行刻画(赵春段等,2022;成友友等,2023)。此类方法由于受到三维地震分辨率的限制,对大、中型裂缝的刻画效果较好,但对小裂缝、甚至微裂缝的刻画困难较大,且方法受参数设置限制,一次只能刻画出某一尺度级别的裂缝。

页岩气储层中,天然微裂缝的大量分布,不仅对产能影响巨大,而且还影响页岩气水平井压裂施工。因此,需要一种方法能够同时刻画出页岩储层不同尺度的天然裂缝。基于分形理论的裂缝描述方法,利用分形的自相似性,能够达到同时刻画不同尺度天然裂缝的目的(张琴等,2020;骆正山等,2023;何浩祥等,2022;位云生等,2021;吴明录等,2020)。

在分形建模中,天然裂缝空间位置分布由分形理论决定,裂缝长度分布符合幂律分布,裂缝走向与倾向服从正态分布。采用分形理论对天然裂缝进行模拟分析,需要从岩心、成像测井和三维地震分析中获取关键参数,包括裂缝密度常数、分形维数、裂缝走向、倾向、倾角、裂缝最小长度等。具体的模拟过程如图 12 所示。

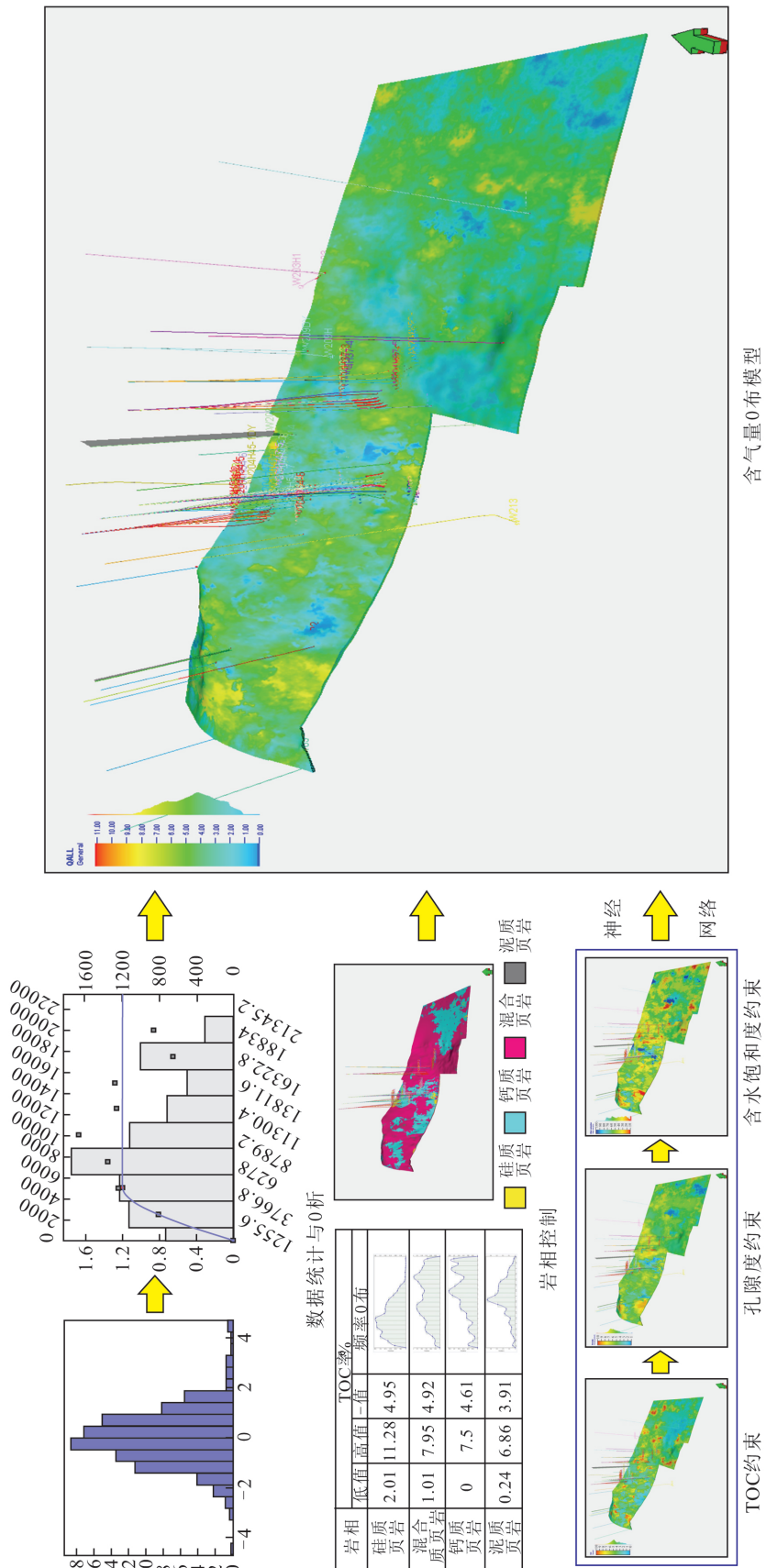


图11 岩相控制及多属性参数约束含气量建模

Fig.11 Lithofacies controlled and multi property parameters constrained gas content modeling

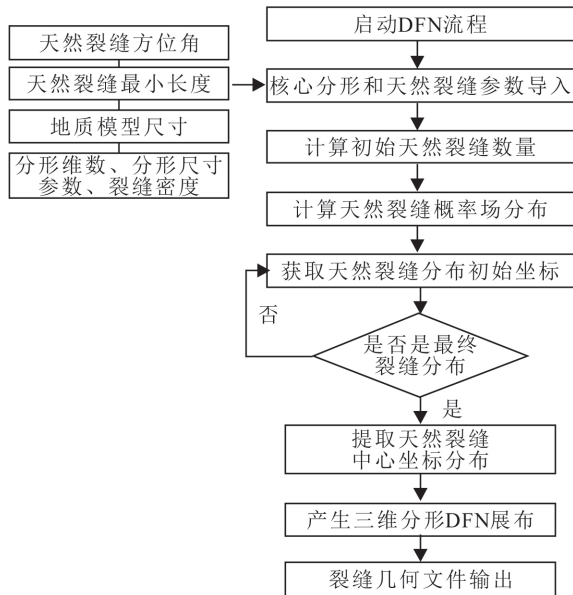


图 12 分形裂缝模拟流程图
Fig. 12 Fractal fractures simulation flowchart

基于蚂蚁体追踪提取的天然裂缝信息,以盒式分维测算技术对裂缝几何进行研究。具体方法:将不同边长 a 的正方形网格度量裂缝平面几何,裂缝充填方格数为 $N(a)$,裂缝分形维数为: $D = -\lim_{a \rightarrow 0} [\lg N(a)/\lg(a)]$ 。实际计算时,在以 a 为横坐标, $N(a)$ 为纵坐标的双对数坐标图上,用最小二乘法拟合直线段的斜率,即为所求的分数维 D 。

基于有限元分析技术,对古今应力场进行分析。根据弹塑理论,以单井天然裂缝分析数据为基础,建立构造应力作用下裂缝开度、裂缝密度等参数的定量表征关系式。

通过关键参数的提取,利用分形裂缝模拟方法,实现了不同尺度天然裂缝建模(图 13)。

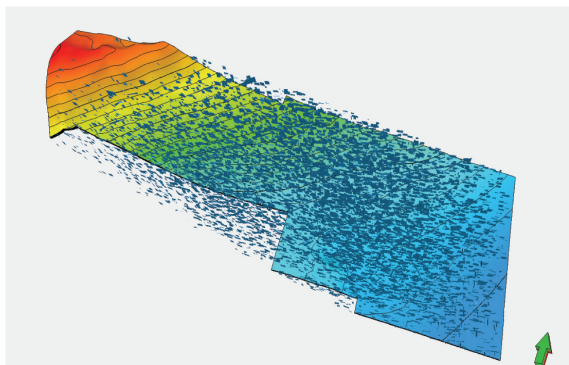


图 13 天然裂缝分布模型
Fig. 13 Natural fractures distribution model

4 基于水平井的导向模型实时更新技术

由于水平井水平段以顺层分布为主,直接用水平井分层对原始构造模型进行更新,无法做到各个层面协调联动。因此,采取在水平段关键分层节点上建立虚拟井,并在虚拟井上标定原始构造模型各层面的位置,初始化虚拟分层,通过调整虚拟井补心海拔,消除水平井分层节点与原始构造模型对应层面的偏差,最终实现虚拟分层。通过沿水平段多个关键分层节点,建立虚拟井和虚拟分层,以虚拟分层实现对原始构造模型的更新。

以 WA-3 井为例,在水平井钻井过程中,进行了两次模型适时更新。当水平井段钻至井深 2 972 m 处,在原始导向模型中显示钻头钻达龙一₁¹ 小层的低界,通过随钻 GR 信息判定,钻头仍在龙一₁¹ 小层中上部位置,在此建立虚拟井 V1 和虚拟实钻分层,通过对比原始导向模型分层比实钻分层下偏了 2.6 m,因此在此处对原始导向模型进行了第一次局部更新;当水平井段钻至井深 3 144 m 处,在原始导向模型中显示钻头钻达龙一₁¹ 小层的底界,通过随钻 GR 信息判定,钻头仍在龙一₁¹ 小层中下部位置,在此建立虚拟井 V2 和虚拟实钻分层,通过对比原始导向模型分层比实钻分层上偏了 2.3 m,因此在此处对原始导向模型进行了第二次局部更新(图 14)。

5 效果检验

(1)通过采用水平井段分层节点数据约束的层面循环构建方法,在威远页岩气田建立的构造模型,与原始水平井导向模型相比,41 口水平井的实钻 A 点平均垂深偏差从 7.9 m 降低到 2.1 m, 5 口高精度验证井实钻 A 点平均垂深偏差从 1.9 m 降低到 1.66 m,大大提高了构造模型的精度。

(2)通过采用相控及多属性约束的逐级关联建模技术,在威远页岩气田建立的属性参数模型,经检验,符合率高。TOC 模型与单井解释符合率为 96%,孔隙度模型与单井解释符合率为 90%,渗透率模型与单井解释符合率为 88%,含水饱和度模型与单井解释符合率为 91%,含气量模型与单井解释符合率为 93%。

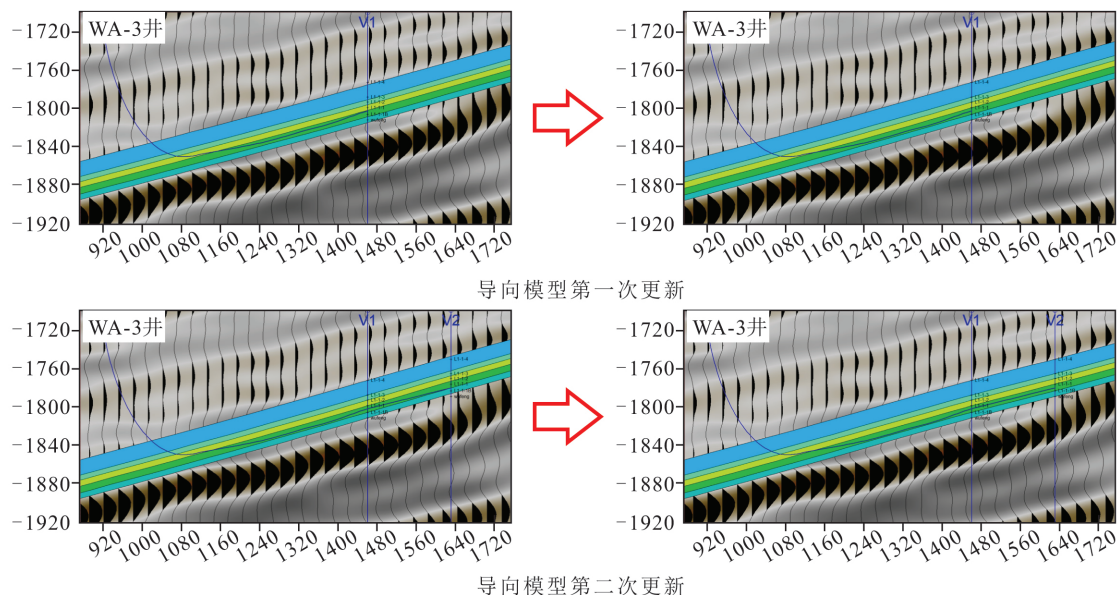


图 14 导向模型随钻实时更新
Fig. 14 Real-time updates of the guidance model while drilling

(3)采用裂缝分形模拟技术,在威远页岩气田建立的天然裂缝网络模型,经与单井测井解释对比,裂缝符合率高。裂缝破裂位置的吻合率达80%,裂缝倾角及倾向预测的平均符合率达82%。

6 结论

a. 采用基本水平井段分层密集节点数据层面循环约束构建方法,实现了基于水平井的构造还原,提高了构造模型的准确度和精度。该方法克服了运用添加虚拟井及分层产生的操作复杂和数据管理问题,大大提高了建模工作效率。

b. 采用相控及多属性约束的逐级关联建模技术,将岩相模型与属性模型以及属性模型相互之间有机地联系起来,各模型分布相互关联,实现多属性参数建模的一体化。

c. 采用裂缝分形模拟技术,实现了多尺度大小的裂缝综合表征,较为客观地反映出了页岩储层裂缝分布的非均质特点。

[参 考 文 献]

程辉,宋立新,2021. 地质工程一体化地质导向技术在威远页岩气开发中的应用[C]//2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(下册),716—722.
Cheng H, Song L X, 2021. Application of integrated geological and engineering geo-steering technology in the

development of Weiyuan shale gas reservoir[C]// Proceedings of the 2021 International Field Exploration and Development Conference (Volume II), 716—722. (in Chinese)

陈雪,徐剑良,黎菁,等,2020. 威远区块页岩气水平井产量主控因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),42(5):63—74.

Chen X, Xu J L, Li J, et al., 2020. An analysis of main controlling factors of production for horizontal shale gas well in Weiyuan block [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 42 (5):63—74. (in Chinese)

成友友,郭春秋,陈鹏羽,等,2023. 碳酸盐岩气藏应力敏感特征及微观机理[J]. 石油勘探与开发,50(1):152—159.

Cheng Y Y, Guo C Q, Chen P Y, et al., 2023. Stress sensitivity of carbonate gas reservoirs and its microscopic mechanism [J]. Petroleum Exploration and Development, 50(1):152—159. (in Chinese)

董越,李永强,曹茜,等,2022. 基于水平井资料的砂砾岩储层岩相建模方法[J]. 科学技术与工程,22(22):9582—9591.

Dong Y, Li Y Q, Cao Q, et al., 2022. Geological modeling method for conglomerate reservoir exploited by horizontal wells [J]. Science Technology and Engineering, 22(22):9582—9591. (in Chinese)

管全中,2020. 四川盆地威远区块五峰—龙马溪组页岩储层精细刻画与甜点预测[D]. 北京:中国石油大学(北

- 京).
- Guan Q Z, 2020. Fine Characterization and Sweet Spot Prediction of the Wufeng-Longmaxi Formations in Weiyuan Area, Sichuan Basin [D]. Beijing: The Archive of China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese)
- 何畅, 万玉金, 苏云河, 等, 2019. 威远气田页岩气井产量影响因素综合分析[C]//2019 油气田勘探与开发国际会议论文集, 440—453.
- He C, Wan Y J, Su Y H, *et al.*, 2019. Comprehensive analysis of influencing factors for shale gas well production in Weiyuan Gas Field [C]//Proceedings of the 2019 International Field Exploration and Development Conference, 440—453. (in Chinese)
- 何浩祥, 郑家成, 廖李灿, 等, 2022. 基于裂缝分形特征的钢混梁疲劳损伤精细评估[J]. 振动、测试与诊断, 42(3): 503—510.
- He H X, Zheng J C, Liao L C, *et al.*, 2022. Refined fatigue damage assessment of reinforced concrete bridge based on fractal characteristics of cracks [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 42(3): 503—510. (in Chinese)
- 蒋裕强, 宋益滔, 漆麟, 等, 2016. 中国海相页岩岩相精细划分及测井预测: 以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例[J]. 地学前缘, 23(1): 107—118.
- Jiang Y Q, Song Y T, Qi L, *et al.*, 2016. Fine lithofacies of China's marine shale and its logging prediction: A case study of the lower Silurian Longmaxi marine shale in Weiyuan area, southern Sichuan Basin, China [J]. Earth Science Frontiers, 23(1): 107—118. (in Chinese)
- 梁峰, 张琴, 卢斌, 等, 2022. 威远五峰组—龙马溪组页岩岩相展布及对水平井产量的影响[J]. 沉积学报, 40(4): 1019—1029.
- Liang F, Zhang Q, Lu B, *et al.*, 2022. Lithofacies and distribution of Wufeng formation-Longmaxi formation organic-rich shale and its impact on shale gas production in Weiyuan shale gas play, southern Sichuan basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(4): 1019—1029. (in Chinese)
- 龙胜祥, 张永庆, 李菊红, 等, 2019. 页岩气藏综合地质建模技术[J]. 天然气工业, 39(3): 47—55.
- Long S X, Zhang Y Q, Li J H, *et al.*, 2019. Comprehensive geological modeling technology for shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 39(3): 47—55. (in Chinese)
- 骆正山, 张莎莎, 骆济豪, 等, 2023. 分形理论在裂隙储层气水渗流模型中的应用[J]. 中国科技论文, 18(1): 97—102.
- Luo Z S, Zhang S S, Luo J H, *et al.*, 2023. Application of fractal theory in gas-water seepage modeling of fractured reservoir [J]. China Sciencepaper, 18(1): 97—102. (in Chinese)
- 马成龙, 张新新, 李少龙, 2017. 页岩气有效储层三维地质建模——以威远地区威 202H2 平台区为例[J]. 断块油气田, 24(4): 495—499.
- Ma C L, Zhang X X, Li S L, 2017. 3D geological modeling of effective shale-gas reservoirs: Taking Wei 202H2 platform of Weiyuan Area as an example [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 24(4): 495—499. (in Chinese)
- 欧成华, 梁成钢, 罗利, 等, 2021. 页岩岩相分类表征及对建产区产能的影响[J]. 沉积学报, 39(2): 269—280.
- Ou C H, Liang C G, Luo L, *et al.*, 2021. The lithofacies classification and its influence on the gas production capacity in the shale gas production area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(2): 269—280. (in Chinese)
- 欧成华, 杨晓, 梁成钢, 等, 2019. 页岩小层水平井对比及其构造三维可视化表征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 41(6): 44—50.
- Ou C H, Yang X, Liang C G, *et al.*, 2019. Shale layer correlation of horizontal wells and their 3D visual characterization [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 41(6): 44—50. (in Chinese)
- 乔辉, 贾爱林, 位云生, 2018. 页岩气水平井地质信息解析与三维构造建模[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 40(1): 78—88.
- Qiao H, Jia A L, Wei Y S, 2018. Geological information analysis of horizontal wells and 3D modeling of shale gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 40(1): 78—88. (in Chinese)
- 史洪亮, 熊亮, 董晓霞, 等, 2019. 川南地区五峰组—龙马溪组下段页岩岩相特征及演化序列差异性成因[J]. 天然气工业, 39(S1): 71—77.
- Shi H L, Xiong L, Dong X X, *et al.*, 2019. Differences in shale facies characteristics and evolutionary sequences in the lower section of the Wufeng Formation Longmaxi Formation in the southern Sichuan region [J]. Natural Gas Industry, 39(S1): 71—77. (in Chinese)
- 舒红林, 王利芝, 尹开贵, 等, 2020. 地质工程一体化实施过程中的页岩气藏地质建模[J]. 中国石油勘探, 25

(2):84-95.

Shu H L, Wang L Z, Yin K G, *et al.*, 2020. Geological modeling of shale gas reservoir during the implementation process of geology-engineering integration [J]. *China Petroleum Exploration*, 25(2):84-95. (in Chinese)

王治平, 张庆, 刘子平, 等, 2021. 斜坡型强非均质页岩气藏高效开发技术——以川南威远地区龙马溪组页岩气藏为例[J]. *天然气工业*, 41(4):72-81.

Wang Z P, Zhang Q, Liu Z P, *et al.*, 2021. Efficient development technology slope-type strongly heterogeneous shale gas reservoirs: A case study on the Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Weiyuan area of the southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 41(4):72-81. (in Chinese)

位云生, 王军磊, 于伟, 等, 2021. 基于三维分形裂缝模型的页岩气井智能化产能评价方法[J]. *石油勘探与开发*, 48(4):787-796.

Wei Y S, Wang J L, Yu W, *et al.*, 2021. A smart productivity evaluation method for shale gas wells based on 3D fractal fracture network model [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4):787-796. (in Chinese)

吴明录, 丁明才, 2020. 分形离散裂缝页岩气藏多级压裂水平井数值试井模型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 44(3):98-104.

Wu M L, Ding M C, 2020. A numerical well testing interpretation model for multiple fractured horizontal well in fractured shale gas reservoir based on fractal discrete fracture network [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 44(3):98-104. (in Chinese)

谢军, 2018. 长宁—威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. *天然气工业*, 38(2):1-7.

Xie J, 2018. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction [J]. *Natural Gas Industry*, 38(2):1-7. (in Chinese)

张琴, 梁峰, 梁萍萍, 等, 2020. 页岩分形特征及主控因素研究——以威远页岩气田龙马溪组页岩为例[J]. *中国矿业大学学报*, 49(1):110-122.

Zhang Q, Liang F, Liang P P, *et al.*, 2020. Investigation of fractal characteristics and its main controlling factors of shale reservoir: A case study of the Longmaxi shale in Weiyuan shale gas field[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(1):110-122. (in Chinese)

赵春段, 张介辉, 蒋佩, 等, 2022. 页岩气地质工程一体化过程中的多尺度裂缝建模及其应用[J]. *石油物探*, 61(4):719-732.

Zhao C D, Zhang J H, Jiang P, *et al.*, 2022. Multi-scale fracture modeling and its application in shale gas geology and engineering integration [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 61(4):719-732. (in Chinese)

(责任编辑:黄维婷)



(上接第 45 页)

徐敏, 裴向军, 张晓超, 2014. 强震触发石碑塬滑坡黄土动力特性[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(4):492-498.

Xu M, Pei X J, Zhang X C, 2014. Dynamic characteristics of loess from dynamic characteristics of loess from Ningxia Shibei yuan landslide triggered by Haiyuan earthquake [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(4):492-498. (in Chinese)

张晓超, 2015. 地震诱发石碑塬低角度黄土滑坡形成机理的试验研究[D]. 成都:成都理工大学档案馆, 2015.

Zhang X C, 2015. Experimental Study on Mechanism of Shibei yuan Loess Landslide Triggered by Earthquake [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

Wu Q L, Zhao Z J, Liu L, *et al.*, 2016. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty[J]. *Science*, 353:579-582.

(责任编辑:魏 崑)