

基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝 “分级-分期-分组”建模方法 ——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例

赵向原¹, 游瑜春¹, 胡向阳¹, 黎静容², 李 毓²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要:油气藏中普遍发育多类、多尺度天然裂缝,其成因具有多期次性,规模具有多级次性,发育受多种地质因素综合控制,这些特点为裂缝的精细三维地质建模带来了很大挑战。以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例,提出了一种基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”三维地质建模方法,认为多尺度裂缝建模应遵循等时约束、层次约束及成因控制等原则,建模过程中应充分开展裂缝地质研究,根据研究区实际建立合理的裂缝级次、期次划分方案,分级、分期开展裂缝三维建模。①大尺度裂缝主要采用确定性方法进行建模,中-小尺度裂缝则采用其成因机制和发育主控因素进行约束建模;②在裂缝分期、分组描述和参数统计获得关键地质规律认识的基础上,通过地质力学方法分期开展中-小尺度裂缝分布预测,进而采用“分期-分组”的思路进行建模;③最终将大尺度裂缝模型和中-小尺度裂缝模型进行融合,得到多尺度裂缝网络模型。元坝地区长兴组储层多尺度裂缝建模实践表明,上述建模方法可有效弥补传统方法在建立中-小尺度裂缝模型精度方面的不足。

关键词:成因机理;多尺度裂缝;裂缝建模;长兴组;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors: A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area, Sichuan Basin

ZHAO Xiangyuan¹, YOU Yuchun¹, HU Xiangyang¹, LI Jingrong², LI Yu²

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil and Gas Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Fractures of diverse types and multiple scales are widely distributed in oil/gas reservoirs. They feature multiple stages in terms of origin and different classes in terms of scale under the comprehensive control of various geological factors, posing great challenge for fine 3D geological modeling. The biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area, Sichuan Basin is taken as a case to establish a classified-staged-grouped 3D geological modeling method for multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors. It is proposed that the multi-scale fracture modeling should follow the principles of equivalent time constraint, hierarchical constraint and genetic control. According to the actual situation of the study area, geological factors for fracture generation should be fully considered in the modeling process, and a reasonable division scheme for fracture classes and developmental stages should be set for 3D fracture modeling. The large-scale fractures are mainly modeled by the deterministic method, while the medium-to-small-scale fractures are modelled according to their genetic mechanisms and main factors controlling fracture development. Following the understanding of critical geological patterns acquired from the staged and grouped description of fractures with relevant parameters collected, we carry out

收稿日期:2022-06-05;修订日期:2022-11-15。

第一作者简介:赵向原(1983—),男,博士、副研究员,油气田开发地质。E-mail: auxus@sina.com。

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010204);国家“万人计划”科学家工作室、中石化科技部项目(P20077kxjgz)。

staged prediction of the medium-to-small-scale fracture distribution by geomechanical method, and then modeling in line with different stages and groups of fractures. Finally, the large-scale fracture model and the medium-to-small-scale fracture model are integrated to obtain the multi-scale fracture network model. Its application to the multi-scale fracture modeling of Changxing Fm. reservoir in Yuanba area shows that the method can effectively make up for the shortcomings of traditional methods in the accuracy of establishing medium-to-small-scale fracture models.

Key words: genetic mechanism, multi-scale fracture, fracture modeling, Changxing Fm., Yuanba area, Sichuan Basin

引用格式:赵向原,游瑜春,胡向阳,等. 基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 213-225. DOI: 10. 11743/ogg20230118.

ZHAO Xiangyuan, YOU Yuchun, HU Xiangyang, et al. Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors: A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 213-225. DOI: 10. 11743/ogg20230118.

储层天然裂缝一般具有多成因、多发育阶段及多因素综合控制等特点,研究难度较大,至今尚未有一套完整且公认的全面解决裂缝定量预测及表征的方法。在裂缝建模方面,离散裂缝网络模型(DFN)自20世纪70年代以来就被国内外学者们广泛研究并应用,至今已积累了大量的研究成果^[1-4]。总结目前主流的DFN建模方法,针对构造裂缝(为了统一,将传统意义上的断裂、断层、裂缝或节理等统称为裂缝),主要采用分尺度方法对不同规模裂缝分别进行建模,其中对于规模较大的延伸长度达百米级以上的断层,可通过地震资料精确解释并结合钻井资料认识,采用人机交互的方式利用确定性建模方法建立大尺度断裂离散分布模型;对于中-小尺度(延伸长度介于米级-百米级)裂缝,主要采用随机建模方法,即以井点岩心裂缝观察或成像测井裂缝参数解释得到的裂缝密度为“硬数据”,以各类地震裂缝预测属性体、断层距离约束体、构造主曲率法预测裂缝分布、生产动态及监测资料裂缝验证等结果作为井间裂缝分布趋势约束,首先得到裂缝分布强度(大多为裂缝密度)模型,并结合地质认识,采用随机模拟方法得到中-小尺度裂缝离散网络模型^[5-12]。上述方法中,大尺度裂缝建模技术较为成熟且模型精度较高,而对于中-小尺度裂缝,由于目前已有的各类裂缝预测方法很难有效、精确地表征井间中-小尺度裂缝参数分布,导致模型精度较低。例如传统地震方法因自身分辨率限制难于识别储层中各组中-小尺度裂缝的参数分布^[13-14];基于断层距离约束所建立的裂缝分布模型相较于通过断层扰动应力场^[15]控制下的裂缝分布预测结果,其可靠性更差;通过构造主曲率法主要实现与岩层形变有关的张裂缝分布预测^[16-17],且上述方法均是以定性或半定量的方式对中-小尺度裂缝的分布进行预测,难以精确定量识别裂缝各类参数。为提高

中-小尺度裂缝模型精度,本文以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组礁滩相碳酸盐岩储层为例,提出了采用成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝三维建模方法,以期建立能够更加准确反映地质规律的裂缝及其参数分布模型。

1 区域地质特征

元坝气田位于四川盆地东北部(图1),研究区西北与盆地三级构造单元九龙山背斜构造带相接,东北与通南巴背斜构造带相邻,南部与川中低缓构造带相连,为龙门山、米仓山和大巴山造山带所影响的低缓构造区^[18-20]。晚二叠世长兴期,元坝地区处于梁平-开江陆棚西侧台地边缘,形成了一套以开阔台地、台缘礁滩和台缘斜坡为主的碳酸盐岩沉积体系,其中台缘生物礁滩构成了该区最有利的储集相带^[21-26]。长兴组礁滩相储层可分为上(长二段)、下(长一段)两段,上段以沉积生物礁相为主(可进一步划分为礁盖、礁核、礁基3类单元),下段以沉积生屑滩相为主,储层岩石类型主要为溶孔白云岩、生屑(含生屑)粉-细晶白云岩、残余生屑(粒屑)白云岩和生物礁白云岩。对1 000余个岩心样品的物性参数进行实测可知,储层孔隙度介于0.53%~24.65%,平均孔隙度为4.37%,渗透率介于 $(0.002\ 6\sim 2\ 385.482\ 6)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.380\ 1\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔-渗关系表现出双重介质特征。

2 裂缝建模方法的提出

2.1 裂缝建模原则

储层相建模一般遵循等时约束、层次约束及成因控制等3种建模原则^[27]。天然裂缝本身作为离散变

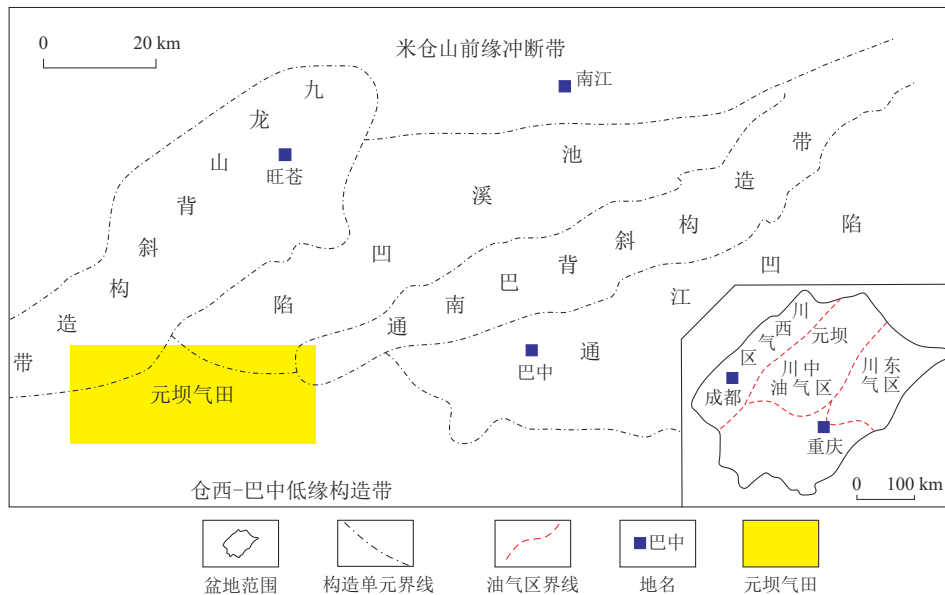


图1 川东北地区构造单元划分(据文献[20]修改)

Fig. 1 Structural unit division of the northeastern Sichuan Basin (modified from reference [20])

量,与沉积相或构型单元等离散地质体类似,可视为广义上的储层相,采用何种建模原则对其进行表征是首先要明确的问题。笔者认为,若要建立较为可靠的多尺度裂缝三维地质模型,仍须遵循以下原则。

2.1.1 等时约束建模原则

天然裂缝的形成具有期次性。多期构造裂缝是在地质体沉积后的多期构造应力背景下形成的,由于不同期次的构造应力性质可能不同,导致对应的各期裂缝参数具有相对独立的分布特征,各期裂缝的分布规律也会有所差别;而对于成岩裂缝如溶蚀裂缝,由于不同成岩阶段的成岩流体及溶蚀机制可能不同,在各期溶蚀作用下会产生不同类型及分布特征的成岩裂缝。在目前的资料条件下,若将不同期次和不同类型的裂缝一次性进行统一建模,则很难建立能够客观反映各期、各类裂缝实际地质规律的裂缝地质模型。因此,为了提高模型精度,在建模过程中应按照裂缝形成期次分别对各期裂缝进行建模,再将各期裂缝模型进行组合,最终形成现今储层状态下的总体裂缝分布模型。在建立各期裂缝模型过程中,要分别采用能够反映各期裂缝参数分布的特征进行约束,可有效提高模型精度。

2.1.2 层次约束建模原则

天然裂缝虽然具有多期次形成的特点,但各期裂缝又具有一定的级次性(可视为层次性),如大级别构

造裂缝与其周围同期形成的小级别裂缝具有一定的成因关系,小级别裂缝与更小尺度裂缝同样具有这种关系,成因上的相关性使得同期形成的各级裂缝在产状等参数分布上也具有一定的相关性,但由于裂缝的发育受控于多种地质及岩石力学因素,各级裂缝的规模参数分布则可能存在较大差异。因此,在建模过程中要根据研究区地质实际,在弄清裂缝级次特征及各级裂缝参数分布特征的基础上,通过分级控制,建立能够反映各级裂缝空间分布特征的地质模型。

2.1.3 成因控制建模原则

天然裂缝的分布并不是完全随机且杂乱无序的,其发育受控于多种地质因素,分布符合地质、岩石物理及岩石力学等规律,裂缝的各类参数分布与各类地质因素之间存在着一定的成因关系。如构造裂缝的发育和分布普遍受岩层(或岩石力学层)明显控制,层厚越大,裂缝规模越大,但裂缝线密度越小,因此裂缝规模或密度参数可与岩层(或岩石力学层)厚度参数之间建立起一定的定量关系^[28-31]。在建立中-小尺度裂缝模型时,为使模型更加符合实际地质规律,应充分结合裂缝形成的岩石力学或岩石物理学机制,充分挖掘并建立裂缝参数与裂缝主控因素之间的定量关系,而不仅仅是依靠统计学关系或各类间接验证性资料,以此来建立更为可靠的裂缝参数模型。

综上所述,储层天然裂缝的形成和分布具有成因多期性、规模多级次性、分布受多因素综合控制等特

点,其建模原则也应遵循等时约束、层次约束及成因控制等原则,以保证模型精度。

2.2 裂缝建模方法

为了有效刻画多尺度裂缝的空间分布及其参数特征,在确定裂缝建模原则的基础上,提出了基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法,该方法可有效弥补地震等资料因其精度缺陷而在规模较小尺度裂缝分布预测方面存在的不足,以满足油气藏开发过程中裂缝表征的精度要求。该方法包括多尺度裂缝级次划分及多尺度裂缝综合地质研究、大尺度裂缝三维建模、中-小尺度裂缝三维建模(包括单井裂缝密度计算、三维裂缝密度建模、三维裂缝网络建模)、多尺度裂缝模型融合及三维裂缝属性建模等环节,下面对各环节进行介绍。

2.2.1 多尺度裂缝级次划分

学者们根据研究需要,从不同角度开展过裂缝分级研究:①地质研究方面,按照断裂和裂隙的延伸规模、断裂深度以及所处构造单元部位,同时考虑对构造、沉积的控制作用等方面,将断裂等级划分为Ⅰ级断裂(区域构造单元边界断裂,控制盆地沉积)、Ⅱ级断裂(主干断裂,控制构造带的展布)、Ⅲ级断裂(次级断裂,控制局部构造)、Ⅳ级断裂(主要为伴生断层、小断层等);②在地球物理领域,根据裂缝长度与地震波长之间的关系可将裂缝划分为大尺度裂缝(裂缝长度大于 $1/4$ 波长)、中尺度裂缝(裂缝长度小于 $1/4$ 波长,大于 1% 波长)以及小尺度裂缝(裂缝长度小于 1% 波长)^[32-35];③在油气藏工程领域,有学者根据裂缝在渗流过程中所起的作用及表现将其分为油藏宏观裂缝、油藏细观裂缝和油藏微观裂缝^[36]。

在目前阶段的地质建模过程中,为了保证模型精度,会根据建模对象描述或识别精度的不同来采取不同的建模策略。对于能够精确识别且定量表征的地质对象,主要采用确定性方法进行建模,而对于无法精确识别且只能通过统计特征进行特征描述的地质对象,则主要采用随机方法进行建模。对于多尺度天然裂缝而言,目前仍处于规模较大尺度断裂易于精确识别而规模越小尺度裂缝越难于精确表征的技术阶段,因此从地质建模角度来说,开展裂缝分级研究,既要考虑不同尺度资料对不同规模裂缝的识别能力,同时也要考虑所划分的裂缝级次具有地质意义及油藏工程意义,以保证裂缝的描述结果符合客观规律。

因此,本文尝试提出以下多尺度裂缝级次划分思

路,即根据实际研究区地质特征和多尺度裂缝发育特征,结合不同尺度资料对各尺度裂缝的识别精度,并同时考虑到不同尺度裂缝发育特征以及在油气藏中所起的作用,来开展裂缝分级研究。

首先,可以将多尺度裂缝划分为大尺度裂缝、中-小尺度裂缝和微尺度裂缝。其中大尺度裂缝通过叠后地震资料人工解释或高精度检测属性可精确识别,平面上一般规模在百米-千米级别及以上,纵向上可切穿段、组、系及以上的地层范围(十米-百米-千米级别),在油气藏范围内呈离散分布,起控藏、主要输导或隔挡作用。根据不同油藏的裂缝影响范围等实际情况,还可将大尺度裂缝进一步划分为多个级别。中-小尺度裂缝平面上的延伸距离一般在米级-十米-百米级别及以下,纵向上切穿单层、多层、段以内的地层范围(分米-米级-十米级别),可通过钻井岩心资料、测井资料进行精细描述,并通过品质较高的叠前地震资料的某些属性进行定性或半定量识别。这一尺度裂缝是储层内最主要的非均质性类型之一,对改变储层渗流性质和储层连通状况等具有重要作用。根据工区实际储层发育特征及地质和岩石力学因素对裂缝的控制作用,也可将中-小尺度裂缝进一步划分为多个级次。

其次,在不同期次构造应力场作用下,各级次裂缝还可以进一步划分为不同的组系,裂缝分组反映了不同成因机制下所形成的裂缝的优势方位特征。微尺度裂缝无论平面还是纵向上延伸范围均有限(一般为厘米级及以下),主要在单岩层内发育,地震资料几乎无法有效识别,需要借助镜下微观分析等手段对其参数进行详细描述。这类裂缝对油气藏宏观渗流影响相对较小,对改善储层局部物性具有积极意义。

需要说明的是,在不同地区,裂缝的级次划分要综合研究区实际地质特征、裂缝发育特征以及不同尺度类型资料的裂缝识别能力,并结合研究目的来综合进行确定,统一的划分标准可能并不适用于不同地区的各类研究,甚至会带来严重的错误认识。

2.2.2 多尺度裂缝综合地质研究

裂缝建模之前的所有相关地质研究,是获取多尺度裂缝信息、建立多尺度裂缝地质认识的关键环节,是建立可靠的裂缝模型的前提和基础。根据裂缝建模的要求,裂缝综合地质研究需要明确裂缝的基本发育特征,如大尺度裂缝的性质、产状、力学机制、空间展布及组合关系特征等;对于中-小尺度和微尺度裂缝,要明确其成因类型,通过各类地质、地球物理、分析测试、生

产动态等资料,获取中-小尺度及微尺度裂缝参数分布特征及各参数的分类统计特征,分析裂缝的成因机制,划分裂缝形成期次,弄清裂缝发育的主控因素,并利用测井或地震资料开展裂缝井筒识别及空间分布预测,明确裂缝分布规律,建立裂缝分布及演化模式,阐明不同尺度裂缝对油气藏开发的影响。

对于构造裂缝来说,在某一地区可以发育多组构造裂缝,各组裂缝的性质及产状也可能不同,表明裂缝可能在不同的构造运动背景下形成,拥有不同的形成机理。在对构造裂缝进行分期和配套的基础上,划分裂缝期次和组系,明确各组裂缝形成时期的古应力场背景,可为采用地质力学方法开展裂缝分布预测提供地质依据。构造裂缝形成期次和各期裂缝形成时古应力场大小主要依据地质方法和试验方法综合确定,如通过裂缝形态特征可以判定裂缝的性质,通过裂缝之间的切割、限制关系及充填特征的差异性等可判断裂缝形成的先后,通过包裹体和碳-氧同位素分析、古地磁定向及岩石声发射试验等实验手段并结合沉积-构造演化史,可以综合确定裂缝形成时期及各期古构造应力大小和方向等信息^[37-38]。

地质因素往往与裂缝参数信息之间有着密切的成因联系,明确裂缝的成因机制以后,还要进一步阐明主要地质因素对裂缝发育规律及其参数特征的控制作用。如建立裂缝发育程度与岩性的关系、裂缝规模参数与岩层厚度(或岩石力学层厚度)的关系、裂缝发育程度与构造曲率之间的关系、裂缝发育程度与沉积相(微相)之间的关系、裂缝发育程度与岩层岩石力学参数之间的关系、裂缝开度与地应力及裂缝规模之间的关系、裂缝充填性与成岩作用强度的关系等等,依此获得先验地质认识,指导建模过程中裂缝相关参数的生成。

2.2.3 大尺度裂缝三维建模

离散裂缝网络模型采用大量具有一定方向、长度和面积的离散面元来表征裂缝的分布,每个面元上均附加着裂缝参数信息,包括裂缝平面延伸长度、裂缝纵向高度、裂缝开度、裂缝产状等,建立离散裂缝网络模型的主要任务就是要准确表征裂缝的空间分布及裂缝参数信息。按照层次约束的建模原则,对于可通过地球物理等资料和手段精确识别的大尺度裂缝来说,首先要对其进行精细建模。目前针对大尺度裂缝建模普遍采用确定性方法,通过人机交互方式严格按照大尺度裂缝参数精细描述结果建立模型。大尺度裂缝建模技术较为成熟,在此不再赘述。

2.2.4 中-小尺度裂缝三维建模

目前技术手段下,无法像识别大尺度裂缝一样对储层中每一条中-小尺度裂缝的空间位置和参数信息进行精细识别,因此无法通过确定性方法对其进行建模,需要在获取中-小尺度裂缝地质规律认识的基础上,以单井裂缝确定性信息为硬数据,以中-小尺度裂缝空间分布预测等信息为约束条件,依据等时约束及成因控制的建模原则和思路,采用基于目标的随机建模方法建立中-小尺度裂缝三维分布模型。

1) 单井裂缝密度计算

单井裂缝密度是指沿着井轨迹计算得到的用于表征井点处目的层段剖面上不同深度部位的裂缝发育密度(包括线密度、面密度、体密度等),主要通过岩心裂缝描述及成像测井裂缝解释结果,计算井筒延伸方向上单位窗长内裂缝的数量,进而得到单井裂缝密度曲线。单井裂缝密度作为控制裂缝空间分布的硬数据,对模型精度起决定性作用,如果单井裂缝模型不准确,在此基础上建立的裂缝三维模型一定是错误的。由于裂缝分布具有多尺度、多组系的特征,加之井筒钻遇各类裂缝又存在一定的概率,因此想要获取可靠的单井裂缝密度是难度较大的,需要根据获取的裂缝信息并结合裂缝地质认识,再依据合适的建模策略以计算得到合理、可靠的单井裂缝密度参数。

2) 三维裂缝密度建模

裂缝密度是反映裂缝发育程度的连续型变量,建模过程中三维裂缝密度模型控制着天然裂缝在不同空间位置上的生成数量,它是裂缝三维地质建模的核心环节。三维裂缝密度模型的建立主要是以单井裂缝密度作为硬数据,以裂缝预测得到的空间分布趋势作为约束条件,采用随机方法进行建立。裂缝分布趋势是用于描述裂缝发育程度的二维或三维数据,要想建立可靠的三维裂缝密度模型,除了具备可靠的单井裂缝密度信息外,还需要具有可靠的空间约束信息。通过叠前或叠后地震属性开展裂缝分布预测可以获取较为可靠的反映裂缝空间发育程度的信息,因此常被作为建立裂缝三维密度模型的约束条件。此外,通过裂缝综合地质研究获取各期裂缝形成时的古应力场大小和方向后,采用地质力学方法对各期构造裂缝的发育程度进行分别预测,并将其结果作为各期裂缝空间分布的约束条件来建立能够反映各期裂缝的三维密度模型,可作为有效提高裂缝模型精度的一种尝试。

采用地质力学方法开展裂缝预测的过程为:①在明确裂缝形成机理及主控因素的基础上建立合理的各

期裂缝形成时期对应的地质模型(二维或三维),该模型要充分考虑岩性、地层厚度、构造(如断层和褶皱等)、沉积相带分布等地质因素对裂缝的控制作用,其中多期次裂缝可能分别对应着不同的地质模型;②根据获得的各期次裂缝形成时期的古构造应力大小和方向,确定不同期次裂缝所对应的地质模型中各地质体的岩石力学参数及模型的边界受力条件;③应用有限元数值模拟方法对各期次古构造应力场进行数值模拟,得到古应力场最大主应力、最小主应力、垂向应力(若为三维模型)的大小和方向分布;④将计算结果与已有的反演约束条件进行对比分析,若不符合,则需要调整模型或边界受力条件,直至两者相符合,此时模拟结果较为可靠;⑤基于应力计算结果,通过岩石力学实验确定的不同地质体的岩石破裂准则,对各期次古应力条件下地质体的破裂情况进行判断,并结合先验地质认识综合计算裂缝发育强度,进而实现井间各期次、各组裂缝分布的定量预测。

3) 中-小尺度裂缝网络建模

在建立裂缝三维密度模型以后,要结合裂缝地质认识建立符合地质规律的三维裂缝网络模型。由于不同成因(或期次)和性质的裂缝具有各自相对独立的裂缝参数统计学分布特征,理论上应该对每一类成因裂缝分别进行建模,最终得到符合研究区地质实际的包含所有期次的中-小尺度裂缝三维网络模型。建模过程中,利用三维裂缝密度模型对空间上所生成裂缝片的多少进行约束,同时要结合裂缝发育的主控因素(如控制裂缝发育的地质因素与裂缝几何参数之间的定量关系),对所生成的每一条裂缝片产状、形态、规模等参数进行控制,使得所生成的每一类成因裂缝的各类参数总体上与先验统计规律保持一致,同时又保证各裂缝片参数与所在位置的地质因素有关。在生成离散裂缝片的过程中,裂缝倾角和走向等信息主要通过相似露头、岩心或成像测井裂缝描述统计得到的裂缝产状分布等认识进行控制,其中走向分布也可以依据地质力学方法得到的裂缝模拟结果进行空间约束;裂缝形态可以选择四边形或其他多边形;裂缝纵向高度一般可通过相似露头进行统计确定,也可通过测井资料在划分岩石力学层的基础上,结合裂缝发育的主控因素综合确定;裂缝平面延伸长度一般难于确定,可以通过地表相似露头统计的裂缝平面长度与纵向高度之间建立的经验公式进行确定,再进一步通过油藏工程方法计算得到的裂缝参数对其进行调整;裂缝开度可通过成像测井解释取得,同时要结合试井

等油藏工程方法确定的裂缝参数不断进行优化调整确定。

2.2.5 多尺度裂缝模型融合

在同一网格体系下建立了大尺度裂缝及中-小尺度裂缝模型以后,需要将不同尺度裂缝模型进行融合形成多尺度裂缝三维网络模型。融合过程中,当某一网格同时出现不同尺度裂缝以致出现交叉、重复或矛盾时,按照裂缝级次大小顺序保留其中规模最大的裂缝信息。胡向阳^[39]在针对塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开展多尺度缝洞三维建模过程中,提出了以地质概念模式为指导,忠实于井点数据条件及缝洞储集体发育模式和组合规律的同位条件赋值算法,将各单一缝、洞离散模型融合成缝洞储集体模型,采用该方法也可有效地对不同级次离散裂缝模型进行融合,能够使多尺度裂缝模型更加符合地质规律。

2.2.6 裂缝属性参数建模

裂缝属性参数模型是指能够反映裂缝孔隙度和渗透率参数空间分布的三维模型,旨在表征多尺度裂缝的空间非均质性特征及其影响。在天然裂缝主要起渗流通道作用的大多数油气藏中,多尺度裂缝渗透率表征相比裂缝孔隙度而言更具有油气地质意义。由于在地层状态下无充填裂缝的渗透率主要与裂缝的开度有关,而裂缝开度同时受多种因素控制且难于预测,因此要建立可靠的裂缝渗透率模型是一项难度较大的工作。如前所述,裂缝开度参数可以通过成像测井裂缝解释来获取,同时根据岩心裂缝观察也可以得到部分裂缝的开度信息,但需要将其恢复至地层围压条件下求取真实的裂缝开度。在得到裂缝开度参数以后,可以采用平板流动理论模型计算每组裂缝的渗透率^[40],即:

$$K_f = e^3 \cos \xi / (12S) \quad (1)$$

式中: K_f 为岩石裂缝的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; e 为裂缝开度, μm ; ξ 为裂缝与流体流动方向间的夹角, $(^\circ)$; S 为该组裂缝间距, m 。

3 研究实例

依据上述方法和思路,以四川盆地东北部元坝地区长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例,进一步论述基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法的应用。

3.1 长兴组储层裂缝发育特征

元坝地区长兴组大尺度断裂发育相对较少,但通过蚂蚁追踪方法可以在储层中提取一些平面长度在2 000 m以内的小断裂。综合露头、岩心、薄片及成像测井资料可知,储层中主要发育规模相对较小的中-小尺度裂缝,这些裂缝具有多期形成、多组系分布且有效性存在差异的特点,笔者曾系统论述了长兴组储层裂缝的成因类型及识别特征、评价了裂缝有效性并分析了有效裂缝的地质意义^[23],这些成果将会为开展精细裂缝三维地质建模奠定基础。

研究表明,元坝地区长兴组储层构造裂缝类型既有张性裂缝也有剪切裂缝,以剪切裂缝为主(图2)。总体上,裂缝走向主要为NW-SE向,其次为近EW向和NE-SW向;裂缝倾向主要为NE向和SW向,少量NW倾向;按照裂缝倾角分布可分为低角度缝($< 20^\circ$)、斜交缝($20^\circ \sim 60^\circ$)和高角度缝($> 60^\circ$)3类,主要以高角度缝和斜交缝为主,不同倾角裂缝具有不同的优势走向,其有效性差异较大,反映了裂缝为多期构造应力场作用下形成(图3)。裂缝规模方面,实测露头裂缝纵向高度一般分布在20 m以内(其中小于12 m的裂缝占近

90%);单条裂缝平面延伸长度一般不超过70 m,部分裂缝规模较大,推算可达150 m以上;裂缝开度与现今地应力场及裂缝规模等因素有关,将地表岩心统计裂缝开度折算到地下并结合成像测井裂缝开度解释,确定裂缝地下开度主要分布在60 μm 以内,少数裂缝开度可超过200 μm ,总体上表现出NW-SE向及近EW向裂缝的开度略大于NE-SW向裂缝开度的特征^[23]。

综合构造演化史(及构造形迹)、埋藏史、油气充注史、裂缝交切关系及充填差异性、不同倾角裂缝走向及倾向分布特征及不同成因类型裂缝形成的力学机制^[41],可将构造裂缝的形成划分为4期,分别为印支晚期、燕山中晚期(主要为晚期)(NW-SE向挤压应力场)、喜马拉雅早期(NWW-SEE向应力场强烈挤压)和喜马拉雅晚期(NE-SW向挤压应力场),其中后3期为主要的裂缝形成时期。裂缝的发育受岩性、岩石力学层厚度、沉积微相、岩石结构组分、岩石力学性质等因素综合控制,其中白云岩类相比灰岩类中裂缝发育程度更高(白云岩类中裂缝视密度平均为2.9条/m,灰岩类中裂缝视密度平均为1.9条/m),且高角度缝与斜交缝视密度随着岩石力学层厚度的增大呈幂函数减小。总体上看,礁盖微相内裂缝最为发育(平均视密度达3.9条/m),礁核

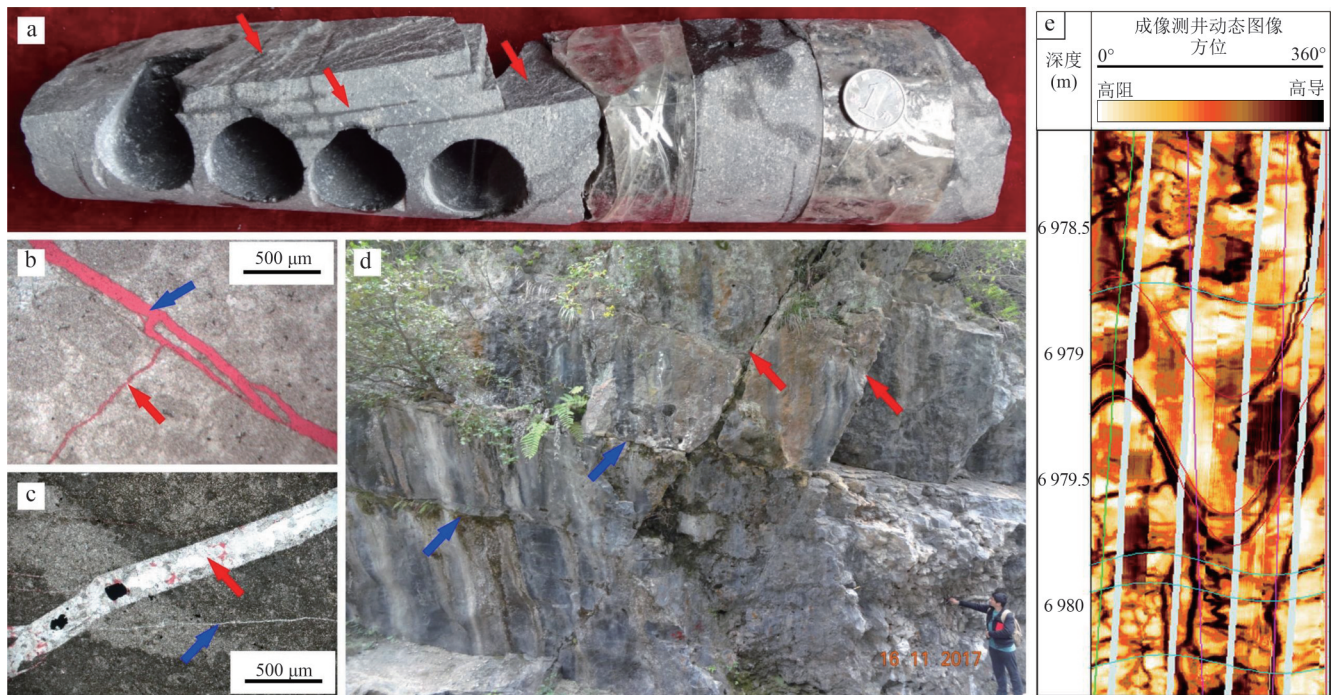


图2 不同资料识别元坝地区长兴组储层天然裂缝特征照片

Fig. 2 Characteristics of natural fractures in the Changxin Fm. of Yuanba area identified by different data

a. Y104井,岩心,可见一组相互平行的高角度构造裂缝,缝面平直光滑,埋深不详;b. Y2井,亮晶含鲕砂屑灰岩,可见两组无矿物充填的构造裂缝,其中一组裂缝(蓝色箭头)限制了另一组裂缝(红色箭头)的延伸,埋深不详;c. Y12井,显微薄片,可观察被矿物充填了的构造裂缝,埋深不详;d. 川东北宣汉地区盘龙洞剖面,可观察到长兴组内两组分布规则的构造裂缝相互切割;e. Y101井,埋深6 978.5~6 980.3 m,成像测井,可识别出高角度构造裂缝呈正弦曲线特征

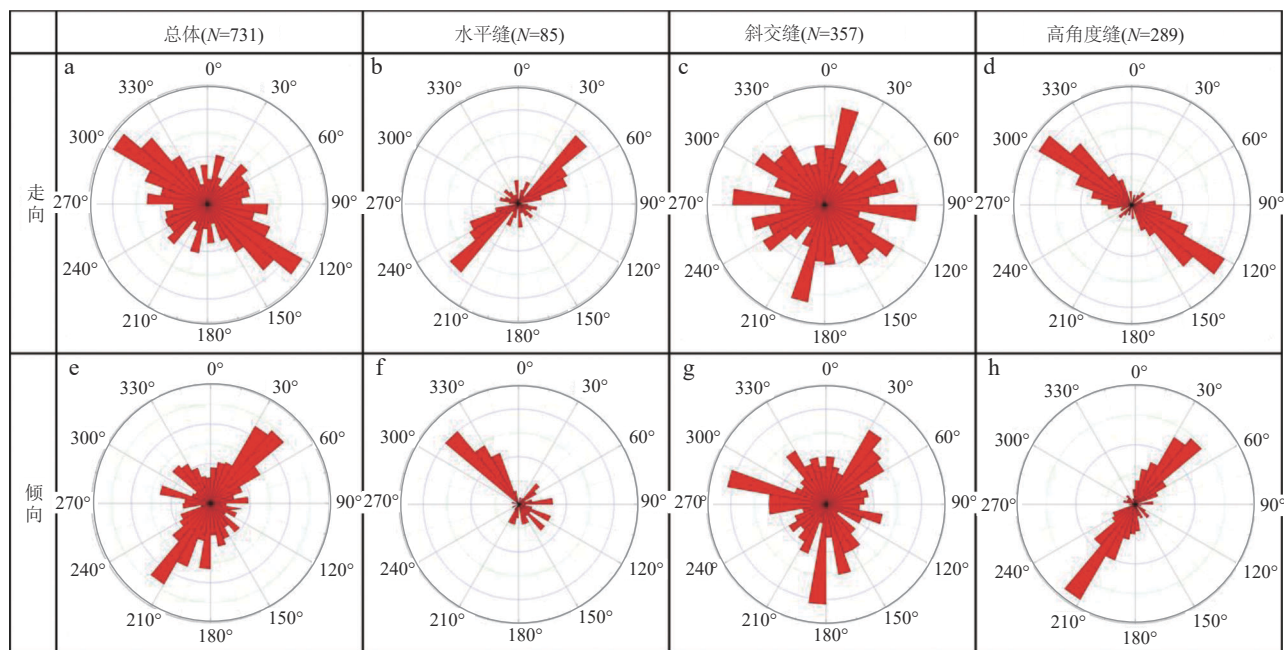


图3 元坝地区长兴组储层中不同倾角类型裂缝的走向和倾向分布玫瑰花图

Fig. 3 Strike and dip rose diagrams of fractures with different dip angles in the Changxing Fm. of Yuanba area

微相次之,礁基和礁间裂缝发育程度最差(平均视密度小于1条/m)^[42]。

对元坝地区长兴组多尺度裂缝进行级次划分。首先,将地震资料能够精确识别的所有裂缝定义为大尺度裂缝,统计该区大尺度裂缝长度主要分布在2 000 m以内,集中分布在200~1 200 m,纵向高度分布在20 m以上;其次,定义该区仅能够通过钻井、测井和岩心等资料识别的裂缝为中-小尺度裂缝,由于裂缝的发育受岩石力学层厚度控制,无法通过地震资料进行精确有效识别,通过该区12口井长兴组岩石力学层的识别划分结果,确定该区受岩石力学层控制的裂缝纵向规模分布在1~20 m,可将中-小尺度裂缝按照纵向高度进一步划分为4个级别(表1),通过相似露头统计裂缝平面长度/裂缝纵向高度比值分布在3.5~13.4。

3.2 大尺度裂缝建模

受开江-梁平陆棚古地貌控制,元坝地区长兴期

表1 元坝地区长兴组碳酸盐岩储层裂缝分级

Table 1 Fracture classes of carbonate reservoir in the Changxing Fm. in Yuanba area

裂缝尺度	裂缝级次	裂缝纵向高度/m	有效识别手段
大尺度	1级	>20	地震资料
	2级	12~20	
中-小尺度	3级	6~12	钻井、露头、岩心、测井
	4级	1~6	
	5级	<1	

从东向西发育有4条礁带,分别为①号礁带、②号礁带、③号礁带和④号礁带,每个礁带均由多个礁群组成,各礁带之间并不完全相连。下面以②号礁带为例,介绍不同尺度裂缝建模实例研究。

通过叠后地震方差体、蚂蚁体以及其他边缘检测等属性综合对元坝地区长兴组储层大尺度裂缝进行检测(以②号礁带为例),通过生产动态资料验证其结果具有较高的可靠性。在此基础上,采用确定性方法人机交互建立了大尺度裂缝三维分布模型。模型显示,大尺度裂缝主要在气藏内部发育,裂缝长度主要分布在1200m以内,纵向高度在19.7~34.5 m,裂缝走向主要以NE-SW和NW-SE向为主(图4)。

3.3 中-小尺度裂缝建模

通过对元坝地区11口井岩心裂缝描述及10口成像测井裂缝解释获取的裂缝信息,并根据不同成因期次裂缝划分结果,分别计算得到了各单井不同期次各组裂缝密度曲线,并以此作为硬数据,利用地质力学方法预测得到的各期裂缝分布预测结果作为趋势约束,应用序贯高斯方法分别建立了不同期次中-小尺度裂缝三维密度模型(②号礁带)(图5)。其中,采用地质力学方法分别预测了②号礁带燕山晚期、喜马拉雅早期和喜马拉雅晚期的裂缝发育强度(图6)。通过以上结果可知,长兴组上储层段在各期应力场作用下形成的裂缝在空间分布上均具有较强

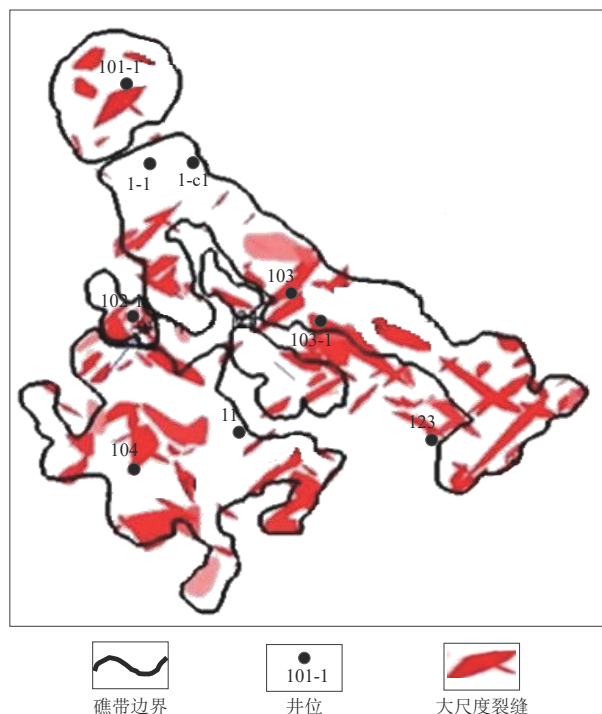


图4 元坝地区②号礁带长兴组储层大尺度裂缝模型

Fig. 4 Large-scale fracture model of the Changxing Fm. reservoir in No. 2 reef zone, Yuanba area

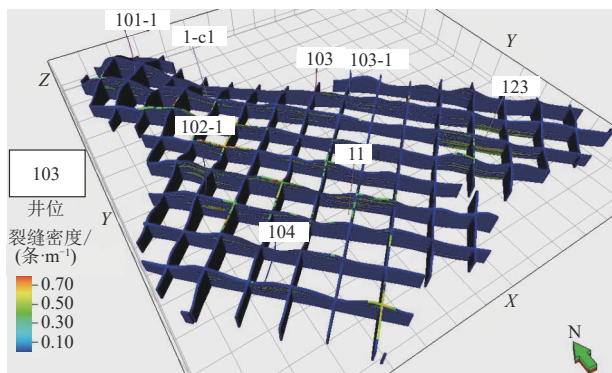


图5 元坝地区长兴组储层NW-SE向中-小尺度裂缝密度模型(②号礁带栅状图)

Fig. 5 3D density model of medium-to-small-scale fractures striking NW-SE in the Changxing Fm. in No. 2 reef zone, Yuanba area

的非均质性,其中生物礁主体部位裂缝发育程度较高,尤其是在礁盖微相内裂缝最为发育,在礁基和礁间微相内裂缝发育程度相对较差,模拟结果与地质认识基本符合。

以各期次裂缝三维密度模型为基础,结合中-小尺度裂缝先验地质认识,分别建立了各期次裂缝离散分布模型。在建立裂缝模型过程中,考虑到生物礁储层内裂缝形态的复杂性,裂缝的几何形态采用了十边形。依据裂缝产状分布地质研究成果,各期次裂缝走

向、倾向和倾角的生成采用Fisher Model方法;裂缝长度和开度分布均符合Power Law分布,建模过程中采用了幂律分布模型并结合了裂缝密度与裂缝规模之间的关系。如图7a所示,由于不同尺度的裂缝数量较多,仅显示了平面长度在55 m以上规模的天然裂缝展布特征,模型中裂缝的走向主要为NW-SE向,其次为近EW向和NE-SW向,裂缝纵向高度分布在1.7~18.8 m,与地质认识基本一致。

3.4 多尺度裂缝融合模型

采用同位条件赋值算法^[43]将大尺度裂缝模型与中-小尺度裂缝模型进行融合,得到了反映全区裂缝发育特征的多尺度裂缝三维地质模型,保证了不同尺度裂缝在交汇过程中属性参数分布的合理性(图7b)。采用平板流动理论模型对每组裂缝的渗透率进行计算,得到岩石裂缝渗透率分布在 $(20 \sim 200) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4 结论与讨论

储层中天然裂缝的形成和分布具有成因多期性、规模多级次性、分布受多因素综合控制等特点,在目前不完备的技术条件下,其建模应遵循等时约束、层次约束及成因控制等原则,以保证裂缝模型精度。为了精细刻画多尺度裂缝的空间参数分布,在遵循上述原则的基础上,以地质认识作为指导,提出了基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法,该方法包括多尺度裂缝级次划分及多尺度裂缝综合地质研究、大尺度裂缝三维建模、中-小尺度裂缝三维建模、多尺度裂缝模型融合及三维裂缝属性建模等环节,可有效弥补地震等其他资料因其精度缺陷而在预测和表征较小尺度规模裂缝参数分布方面的不足。该方法可以推广应用到发育多期次、多尺度天然裂缝的其他类型油气藏的裂缝表征研究中。在应用过程中,要充分结合研究区的研究目标和工区实际裂缝发育规律,制定合理的裂缝三维建模策略,这样才能建立既能满足一定的精度要求、又能够指导油气藏开发的合理的裂缝三维地质模型。

在现有技术条件下要建立可靠性较高的中-小尺度裂缝精细三维地质模型仍然面临较大挑战。学者们虽然普遍采用了地质、测井、地震等静态资料以及试井、油气藏工程等动态资料相结合的多信息融合手段,并综合了岩石力学或数学方法开展裂缝研究,但总体上讲,目前的技术水平对地下裂缝的真实发育规律认识仍然不够深入彻底,对裂缝信息的定量认识仍然不

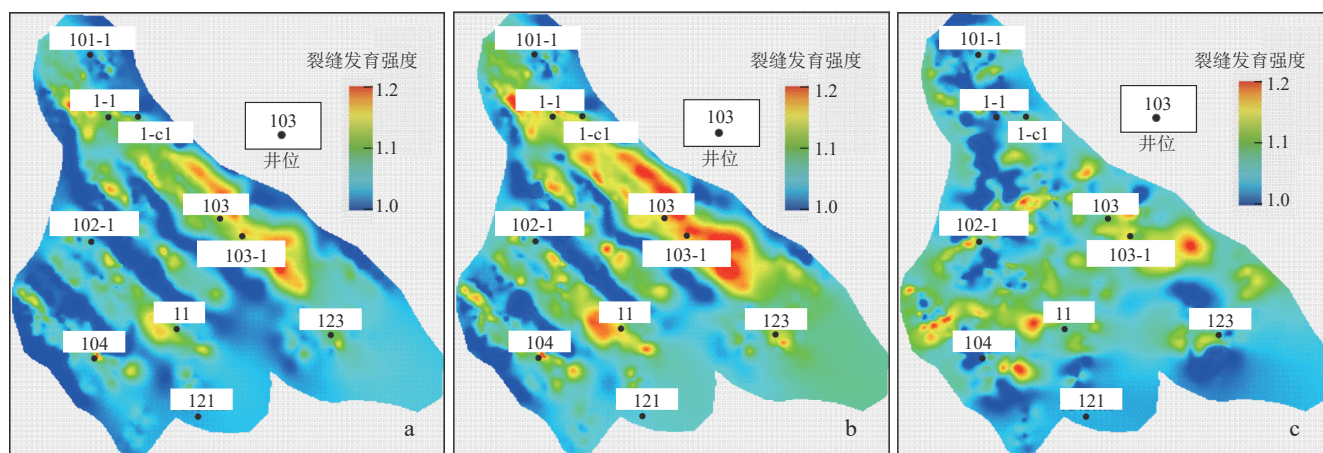


图6 地质力学方法预测元坝地区②号礁带长兴组上段不同期次裂缝强度等值线

Fig. 6 Contour map of fracture intensity at different stages predicted via geomechanical method in the upper interval of Changxing Fm. in the No. 2 reef zone, Yuanba area

a. 燕山晚期; b. 喜马拉雅早期; c. 喜马拉雅晚期

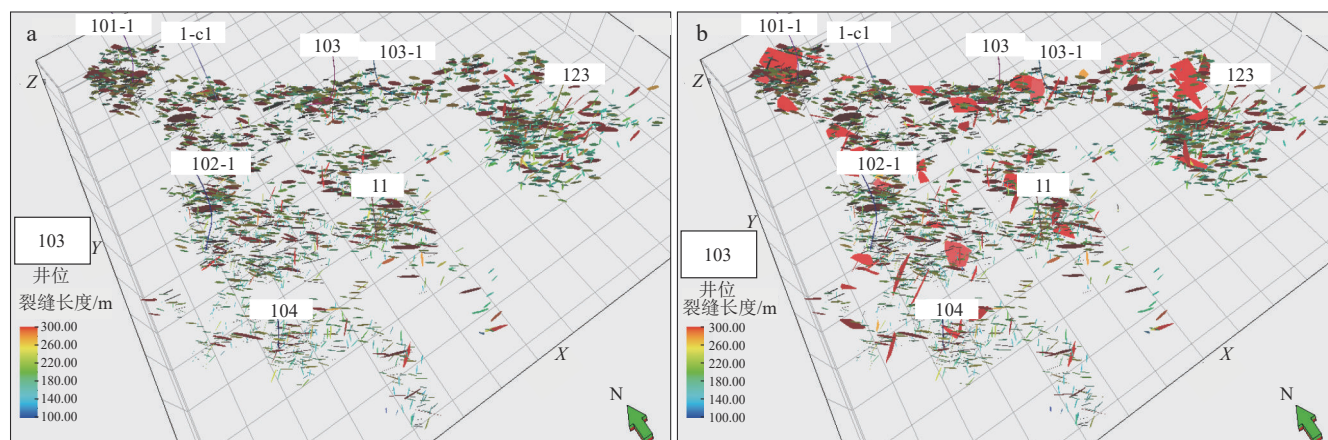


图7 元坝地区②号礁带长兴组储层裂缝三维地质模型

Fig. 7 3D geological model of fractures in the Changxing Fm. reservoir in the No. 2 reef zone, Yuanba area

a. 中-小尺度裂缝三维地质模型; b. 多尺度裂缝网络模型

(图中仅显示平面长度在55 m以上规模的天然裂缝。)

够精确,给裂缝精细建模带来较大困难。随着非常规油气资源的比重越来越大,对裂缝表征的精度要求也越来越高。从油气藏开发面临的主要矛盾出发,在充分的裂缝地质研究基础上,分析不同类型、级次、组系、规模的中-小尺度裂缝对油气藏开发的影响,着重对油气藏开发有主要影响的裂缝进行精细描述和表征,以达到提高裂缝模型精度和适用性的目的,是一种可行的建模策略。此外,裂缝的成因与地质力学因素密切相关,采用地质力学方法开展裂缝分布预测并作为空间约束建立裂缝三维模型,是提高中-小尺度裂缝模型精度的有益尝试。

在目前技术条件下,本文提出的裂缝建模方法可能并不适用于微尺度裂缝。储层中微尺度裂缝数量众

多、成因复杂、形态各异、分布难以预测,学者们普遍认为其在储层中所起的作用与大尺度度和中-小尺度裂缝不同,将微尺度裂缝一般归属于基质孔隙范畴,主要对基质物性起改善作用,在现有的资料和技术条件下难以用离散裂缝建模的方法对其开展表征研究。笔者认为,在充分研究微尺度裂缝成因类型和发育主控因素的基础上,通过建立合适的微尺度裂缝测井和地震评价方法,阐明微尺度裂缝空间分布规律,在此基础上,可采用等效建模方法定量表征微尺度裂缝的参数分布及其对储层的贡献。

参 考 文 献

- [1] 邓西里, 李佳鸿, 刘丽, 等. 裂缝性储集层表征及建模方法研

- 究进展[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 306-319.
- DENG Xili, LI Jiahong, LIU Li, et al. Advances in the study of fractured reservoir characterization and modeling [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 306-319.
- [2] 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 Xiaoling, GUO Zhaojie. Fractured reservoir modeling method based on discrete fracture network model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(6): 964-972.
- [3] 吴键, 孙圆辉, 王彬, 等. 准噶尔DX18区块裂缝性火山岩储集体三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 92-99.
- WU Jian, SUN Yuanhui, WANG Bin, et al. 3D geological modeling of fractured volcanic reservoir bodies in Block DX18 in Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 92-99.
- [4] 赵力彬, 石石, 肖香姣, 等. 库车坳陷克深2气藏裂缝—孔隙型砂岩储层地质建模方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 10-13, 108.
- ZHAO Libin, SHI Shi, XIAO Xiangjiao, et al. Geologic modeling of fractured and porous sandstone reservoirs in the Keshen-2 gas pool of the Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 10-13, 108.
- [5] WILL R, ARCHER R, DERSHOWITZ B, et al. A discrete fracture network approach to conditioning petroleum reservoir models using seismic anisotropy and production dynamic data[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 2004. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2004: SPE-90487-MS.
- [6] SAUSSE J, DEZAYES C, DORBATH L, et al. 3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(7/8): 531-545.
- [7] 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 Jiagen, MA Xiaoqiang, LIU Yuming, et al. Modelling 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.
- [8] 张连进, 王俊杰, 庄小菊, 等. 川西北超深层复杂构造气藏裂缝建模方法及开发潜力预测[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 98-103.
- ZHANG Lianjin, WANG Junjie, ZHUANG Xiaoju, et al. Fracture modeling method and development potential prediction of ultra-deep gas reservoirs with complex structure in Northwestern Sichuan [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3): 98-103.
- [9] 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 Yanmei, XIA Dongling, SU Zongfu, et al. Fracture modeling at different scales based on convergent multi-source information [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 57-63.
- [10] 孙爽, 赵淑霞, 侯加根, 等. 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[J]. 石油科学通报, 2019, 4(1): 11-26.
- SUN Shuang, ZHAO Shuxia, HOU Jiagen, et al. 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 [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(1): 11-26.
- [11] 战雕, 邵振鹏, 曾丽, 等. 柴达木盆地东坪气田基岩储层裂缝建模方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 71-79.
- ZHAN Diao, SHAO Zhenpeng, ZENG Li, et al. A study on fracture modelling of the bedrock reservoir in Dongping Gas Field, Qaidam Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(3): 71-79.
- [12] 张小平, 孙祥熙, 苏燕, 等. 裂缝孔隙性气藏储层地质建模研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(1): 60-64.
- ZHANG Xiaoping, SUN Xiangxi, SU Yan, et al. Geological modeling on the fractured low-permeability gas reservoirs [J]. Journal of Chongqing Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 16(1): 60-64.
- [13] 印兴耀, 马正乾, 向伟, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(I)——裂缝储层岩石物理理论[J]. 石油物探, 2022, 61(2): 183-204.
- YIN Xingyao, MA Zhengqian, XIANG Wei, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (I): Effective anisotropic seismic rock physics theory [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(2): 183-204.
- [14] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 703-710.
- LIU Jun, REN Lidan, LI Zongjie, et al. Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 703-710.
- [15] 冯建伟, 孙建芳, 张亚军, 等. 塔里木盆地库车坳陷断层相关褶皱对裂缝发育的控制[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 543-557.
- FENG Jianwei, SUN Jianfang, ZHANG Yajun, et al. Control of fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 543-557.
- [16] 李志勇, 曾佐勋, 罗文强. 褶皱构造的曲率分析及其裂缝估算——以江汉盆地王场褶皱为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 517-521.
- LI Zhiyong, ZENG Zuoxun, LUO Wenqiang. Curvature analysis

- and fracture estimating of folds—A case study of Wangchang fold in Jiangnan Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(4): 517–521.
- [17] 曾锦光, 罗元华, 陈太源. 应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题[J]. *力学学报*, 1982, 18(2): 202–206.
- ZENG Jinguang, LUO Yuanhua, CHEN Taiyuan. A method for the study of reservoir fracturing based on structural principal curvatures[J]. *Journal of Mechanics*, 1982, 18(2): 202–206.
- [18] 彭光明, 刘言, 李国蓉, 等. 元坝气田长兴组气藏生物礁相储集层发育特征[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(5): 511–516.
- PENG Guangming, LIU Yan, LI Guorong, et al. Development characteristics of reef reservoir in Changxing gas pool, Yuanba Gas Field, northeastern Sichuan Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(5): 511–516.
- [19] 李宏涛, 龙胜祥, 游瑜春, 等. 元坝气田长兴组生物礁层序沉积及其对储层发育的控制[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 39–48.
- LI Hongtao, LONG Shengxiang, YOU Yuchun, et al. Sequence and sedimentary characteristics of Changxing Formation organic reefs in the Yuanba Gasfield and their controlling effects on reservoir development in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 39–48.
- [20] 邓剑, 段金宝, 王正和, 等. 川东北元坝地区长兴组生物礁沉积特征研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(4): 63–72.
- DENG Jian, DUAN Jinbao, WANG Zhenghe, et al. Research on the reef characteristic of Changxing Formation in Yuanba area of northeast Sichuan Province [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014, 36(4): 63–72.
- [21] 赵文光, 郭彤楼, 蔡忠贤, 等. 川东北地区二叠系长兴组生物礁类型及控制因素[J]. *现代地质*, 2010, 24(5): 951–956.
- ZHAO Wenguang, GUO Tonglou, CAI Zhongxian, et al. The controlling factors and types of carbonate reef of Permian Changxing Formation in northeast of Sichuan Basin [J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 951–956.
- [22] 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组沉积格局及成藏控制意义[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(4): 458–465.
- NI Xinfeng, CHEN Hongde, TIAN Jingchun, et al. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(4): 458–465.
- [23] 赵向原, 胡向阳, 曾联波, 等. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2): 52–61.
- ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, ZENG Lianbo, et al. Evaluation on the effectiveness of natural fractures in reef-flat facies reservoirs of Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 52–61.
- [24] 杨丽娟, 王勇飞, 张明迪, 等. 元坝气田复杂生物礁气藏气水分布精细表征方法[J]. *断块油气田*, 2022, 29(3): 373–377.
- YANG Lijuan, WANG Yongfei, ZHANG Mingdi, et al. Fine characterization method of gas-water distribution in complex organic reef gas reservoir in Yuanba Gas Field [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(3): 373–377.
- [25] 缪尉杰, 王兴文, 丁咚. 元坝气田深度酸压工艺技术探索及应用[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(6): 98–104.
- MIAO Weijie, WANG Xingwen, DING Dong. Exploration and application of deep acid fracturing technology in Yuanba Gas Field [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2021, 35(6): 98–104.
- [26] 荀威, 王本成, 杨丽娟, 等. 产量不稳定分析在元坝气田的应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(4): 652–658.
- XUN Wei, WANG Bencheng, YANG Lijuan, et al. Application of rate-transient analysis in Yuanba Gas Field [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(4): 652–658.
- [27] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 53–60.
- WU Shenghe, LI Yupeng. Reservoir modeling: Current situation and development prospect [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(3): 53–60.
- [28] 赵向原, 曾联波, 王晓东, 等. 鄂尔多斯盆地宁盐—合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及其开发意义[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 274–285.
- ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, WANG Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 274–285.
- [29] 李王鹏, 刘忠群, 胡宗全, 等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 884–897, 1010.
- LI Wangpeng, LIU Zhongqun, HU Zongquan, et al. Characteristics of and main factors controlling the tight sandstone reservoir fractures in the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 884–897, 1010.
- [30] 宿晓岑, 巩磊, 高帅, 等. 陇东地区长7段致密储集层裂缝特征及定量预测[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2): 161–167.
- SU Xiaocen, GONG Lei, GAO Shuai, et al. Characteristics and quantitative prediction of fractures of tight reservoir in Chang 7 member in Longdong area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 161–167.
- [31] 孙珂, 徐珂, 陈清华. 低渗透储层构造裂缝长度表征及应用——以四川盆地磨溪—高石梯地区寒武系龙王庙组为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 160–169.
- SUN Ke, XU Ke, CHEN Qinghua. Characterization of the length of structural fractures in low permeability reservoirs and its application: A case study of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and*

- Experiment, 2022, 44(1): 160-169.
- [32] CHEN Shuangquan, ZENG Lianbo, HUANG Ping, et al. The application study on the multi-scales integrated prediction method to fractured reservoir description[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 80-92.
- [33] 代瑞雪, 冉崎, 关旭, 等. 多尺度裂缝地震综合预测方法——以川中地区下寒武统龙王庙组气藏为例[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(2): 38-44.
- DAI Ruixue, RAN Qi, GUAN Xu, et al. A comprehensive seismic method for multi-scale fracture prediction: A case study on Lower Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir, Central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(2): 38-44.
- [34] WANG Lingling, WEI Jianxin, HUANG Ping, et al. Seismic prediction method of multiscale fractured reservoir [J]. Applied Geophysics, 2018, 15(2): 240-252.
- [35] 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法[J]. 地质论评, 2021, 67(2): 543-556.
- LYU Wenya, ZENG Lianbo, CHEN Shuangquan, et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Geological Review, 2021, 67(2): 543-556.
- [36] 苏皓, 雷征东, 李俊超, 等. 储集层多尺度裂缝高效数值模拟模型[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 587-593, 634.
- SU Hao, LEI Zhengdong, LI Junchao, et al. An effective numerical simulation model of multi-scale fractures in reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 587-593, 634.
- [37] 汪如军, 赵力彬, 张永灵. 基于最小耗能原理的库车坳陷超深致密砂岩裂缝定量预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 23-35.
- WANG Rujun, ZHAO Libin, ZHANG Yongling. Quantitative fracture prediction of ultra-deep tight sandstone in Kuqa Depression based on principle of minimum energy consumption [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 23-35.
- [38] 王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 338-353.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, et al. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study of Keshen Gas Field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 338-353.
- [39] 胡向阳, 袁向春, 侯加根, 等. 多尺度岩溶相控碳酸盐岩缝洞型油藏储集体建模方法[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 340-346.
- HU Xiangyang, YUAN Xiangchun, HOU Jiagen, et al. Modeling method of carbonate fractured-cavity reservoirs using multiscale karst facies-controlling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 340-346.
- [40] 曾联波, 赵向原. 鄂尔多斯盆地天然裂缝与注水诱导裂缝 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 130-140.
- ZENG Lianbo, ZHAO Xiangyuan. Natural fractures and water injection induced fractures in Ordos Basin [M]. Beijing: Science Press, 2019: 130-140.
- [41] 范小军, 彭俊, 李吉选, 等. 川东北元坝地区上二叠统长兴组超深层礁滩岩性气藏中裂缝特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 511-516.
- FAN Xiaojun, PENG Jun, LI Jixuan, et al. Fracture characteristics of ultra-deep reef-bank lithologic gas reservoirs in the Upper Permian Changxing Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 511-516.
- [42] 赵明, 樊太亮, 于炳松, 等. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 709-718.
- ZHAO Ming, FAN Tailiang, YU Bingsong, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics in Tazhong area of Tarim Basin [J]. Geoscience, 2009, 23(4): 709-718.
- [43] 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 Xiangyang, LI Yang, QUAN Lianshun, 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.

(编辑 张玉银)