

引用格式:徐静,叶小明,刘小鸿,等.不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术[J].油气地质与采收率,2023,30(5):41-48.
XU Jing, YE Xiaoming, LIU Xiaohong, et al. Key techniques for quantitative characterization of fractured reservoirs with different lithology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5): 41-48.

不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术

徐 静,叶小明,刘小鸿,李俊飞,王鹏飞

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:由于海上不同岩性裂缝油气藏的裂缝成因不同、发育规律比较复杂,难以定量预测裂缝。根据油气藏裂缝发育特征,应用多种研究方法,提出不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术:①砂砾岩裂缝油气藏定量表征技术,把沉积演化模拟和目标模拟相结合,预测砾内缝展布范围,实现砂砾岩微裂缝定量表征。②变质岩裂缝油气藏定量表征技术,在建模中引入非结构化网格剖分,实现大、中、小尺度裂缝及其与基质间耦合关系的精细表征。③碳酸盐岩油气藏定量表征技术,在开展多信息多手段融合储层评价基础上,应用双模迭代技术定量表征微裂缝分布。渤海3个油气田的应用结果表明,这一系列表征技术在开发方案研究中提供了坚实的定量依据,数值模拟拟合精度提高20%左右,在油田调整中成功指导10余口开发井高效实施,为类似裂缝油气藏的高效开发提供借鉴。

关键词:多尺度裂缝表征;非结构化网格;目标模拟;双模迭代;沉积演化模拟

文章编号:1009-9603(2023)05-0041-08

DOI:10.13673/j.pgre.202210005

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Key techniques for quantitative characterization of fractured reservoirs with different lithology

XU Jing, YE Xiaoming, LIU Xiaohong, LI Junfei, WANG Pengfei

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin City, 300459, China)

Abstract: It is difficult to predict fractures quantitatively due to the different fracture genesis and complex development laws of fractures in offshore fractured oil and gas reservoirs with different lithologies. Techniques for quantitative characterization of fractured reservoirs with different lithology were proposed by many research methods based on fracture development characteristics of reservoirs: ① Quantitative characterization technique of fractured glutenite reservoirs: the sedimentary evolution simulation and target simulation are combined to predict the distribution range of intra-gravel fractures and quantitatively characterize the micro-fractures of glutenite fractured reservoirs. ② Quantitative characterization technique of fractured metamorphic rock reservoirs: an unstructured mesh subdivision was introduced in modeling to quantitatively characterize the large, medium and small fractures and their coupling relationships with matrix. ③ Quantitative characterization technique of carbonate reservoirs: the dual-mode iteration technique was used to quantitatively characterize the distribution of microfractures on the base of the multi-information and multi-means reservoir evaluation. The application of these techniques in three oil and gas fields in Bohai Sea shows that these characterization techniques provide a solid quantitative basis in the study on development schemes, with numerically simulated fitting accuracy improved by about 20%. These techniques have successfully guided the efficient implementation of more than 10 development wells during oilfield adjustment, providing a reference for efficient development of similar fractured reservoirs.

Key words: multi-scale fracture characterization; unstructured mesh; target simulation; dual-mode iteration; sedimentary evolution simulation

随着勘探开发的不断深入,在渤海已相继发现多个裂缝油气藏,探明石油地质储量不断攀升^[1],约

占渤海油田总探明石油地质储量的10%。裂缝油气藏的高效开发成为渤海油田上产、稳产的重要支撑。

收稿日期:2022-10-08。

作者简介:徐静(1987—),女,云南曲靖人,工程师,硕士,从事复杂储层表征为主的油气地质综合研究及油藏数值模拟研究工作。E-mail:xjyinghan@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058-001)。

实践表明,裂缝储层本身的复杂性决定了油气田开发的复杂性,主要表现在储层岩性复杂多样(包括似层状变质岩、层状砂砾岩、块状碳酸盐岩、混积岩等^[1-2]),裂缝成因不同、发育规律复杂等多方面。因此,裂缝分布预测及其精细表征是裂缝油气藏方案编制和高效开发的关键^[3-5]。目前普遍存在对各尺度裂缝的发育规律认识不清、非典型裂缝储层预测困难、缺乏有效的多尺度裂缝定量表征方法等问题,特别是对于微、小尺度裂缝建模鲜有研究,直接影响裂缝储层表征质量。

裂缝建模是一种常用的研究裂缝空间展布的手段,可分为确定性建模和随机建模。确定性建模是根据已知信息建立确定的裂缝模型,受资料和模型网格的制约,该方法仅适用于相对易于解释的规模较大的裂缝。随机建模大致可分为5类:①基于空间剖分的裂缝建模。②离散裂缝网络建模。③基于变差函数的裂缝建模。④基于多点地质统计学的裂缝建模。⑤基于分形特征迭代的裂缝建模^[6]。这5类有各自的优缺点和适应性,近年来应用最广泛的是离散裂缝网络(Discrete Fracture Networks, DFN)建模,最早由BAECHER等^[7]引入,并进行了不同形式的改进。然而,该方法无法满足多尺度裂缝的精细表征需要。随着Delaunay三角网格剖分算法的改进^[8],非结构网格确定性表征与离散裂缝网络建模相结合的多尺度裂缝表征方法,实现了裂缝精细表征精度和效率的双提高,将成为未来的研究趋势。

不同岩性裂缝油气藏地质条件差异较大、发育裂缝尺度不同,制约其储层表征的核心难题不同。针对渤海油田面临的不同岩性裂缝油气藏研究与定量表征目标及难题,以3类裂缝油气藏为研究目标,聚焦旅大(LD)、锦州(JZ)和B等典型油田地质概况及生产特征,开展探索攻关,研究不同岩性裂缝油气藏的成因机理、储层差异性,通过多专业融合,从裂缝表征困难的不同根源着手深入分析,系统研究复杂裂缝储层发育规律及相应的裂缝建模思路与方法。通过变差函数随机模拟、DFN建模以及非结构网格表征等多种方法的融合和改进,解决非典型裂缝储层微、小尺度裂缝等效表征难题,并实现变质岩储层多尺度裂缝表征,提出了不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术。

1 地质概况及表征难题

1.1 旅大油田

旅大油田位于渤海辽东凹陷南洼东斜坡带(图1),受断层控制形成多个断块。目的层为沙河街组,

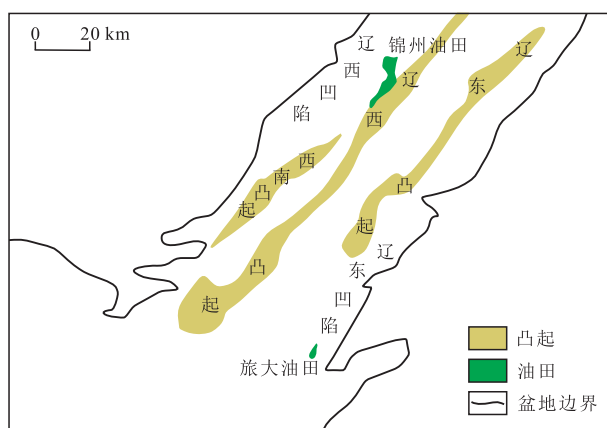


图1 渤海湾盆地旅大油田和锦州油田区域构造位置

Fig.1 Regional location of LD and JZ oilfields in Bohai Bay Basin

发育辫状河三角洲前缘沉积,岩性以砂砾岩为主,储集空间以砾内孔、砾内缝和粒间孔为主,属于低孔隙度、中-低渗透率储层,是渤海发现的首个发育裂缝的砂砾岩油藏。储量规模小,微裂缝的有效预测和表征直接决定了油田能否投入开发。

海上油田受开发成本高及平台条件的制约,井网密度低、资料少,尤其是开发方案设计阶段资料更少,加之裂缝储层的强非均质性,旅大油田微、小裂缝分布预测存在以下难题:①储层埋藏深,横向变化快,地震资料分辨率低,沉积微相展布及岩性预测困难。②不同于常规构造缝,其裂缝尺度小,成因复杂,难以预测。③砂砾岩储层微裂缝表征尚没有方法可借鉴。

1.2 锦州油田

锦州油田位于辽东湾辽西凸起中北段(图1),受断层控制形成东、西2个高点。目的层为太古宇潜山,油藏类型为块状油藏,发育变质岩裂缝储层,岩性以片麻岩和碎裂岩为主。储集空间主要是裂缝、溶孔和微裂缝,以构造裂缝为主,多尺度裂缝同时发育,非均质性强。

对于这类油气田方案编制和高效开发,明确裂缝分布并实现定量表征是关键,也是裂缝油气藏研究及表征面临的普遍性问题。受地震资料分辨率以及常规角点网格的多重限制,普遍存在储层中不同尺度裂缝占比不清楚、关键裂缝引起的窜流通道难以精细表征等问题,制约着剩余油分布研究及挖潜。因此,迫切需要从根源上研究裂缝分布规律,寻求能解决方糖模型无法体现裂缝单向窜流、中小尺度裂缝定量预测难等方法,实现不同尺度裂缝特征的精细表征。

1.3 B油田

B油田位于扎格罗斯造山带和阿拉伯台地东部边缘的过渡带上,构造特征为NW—SE向的背斜,分

为南、北2个高点,不发育断层。含油层系为白垩系 Mishrif 组,岩性为生物碎屑灰岩,储层平均厚度为 83.4 m,横向分布稳定,以中、低孔隙渗透率为主,局部为中、高孔隙渗透率。进入开发中后期,天然能量亏空加剧,注采动态表现出强非均质性,驱替模式及见水规律日益复杂。

B 油田渗流场复杂,部分生产井含水剧增、产能骤降,表现为裂缝储层生产特征,但成像测井无法识别裂缝,静态资料仅局部可见少量微裂缝,动静态认识存在矛盾,储层类型认识不清。如何实现这类非典型裂缝储层分布预测及有效表征面临巨大挑战。

2 三维定量表征技术

2.1 基于目标模拟的砂砾岩砾内缝油气藏定量表征技术

旅大油田储层发育砾内缝、砾缘缝和基质缝,由铸体薄片裂缝描述可见,主要发育砾内缝,占 90%,其尺度非常小,大部分未贯穿砾岩颗粒(图 2a),且不同砾石中发育的砾内缝方向不一致(图 2b)。由于裂缝尺度较小,测井、地震资料分辨率有限,传统的构造裂缝建模方法无法表征砂砾岩砾内缝。结合

LD-1Sa 井的 DST 测试及钻井液漏失分析表明,裂缝主要发育在优势储层段,其岩性主要为砾岩,漏失井段与优势储层段具有较好的相关性,表明裂缝与砾岩存在良好的相关性。从地质成因上分析,扇三角洲相砾岩分布受河道控制,因此,水下分流河道为砾内缝发育的有利相带,但地震资料无法直接刻画。

针对砂砾岩砾内缝储层特征及表征难题,提出储层沉积演化模拟与基于目标模拟相结合的方法,间接预测裂缝分布。主要通过 4 个步骤逐级实现:①采用储层沉积演化模拟方法预测不同岩性的空间分布趋势。②采用序贯指示模拟方法建立三维岩相模型。③基于岩相模型,采用基于目标模拟的方法建立单期水下分流河道相模型。④以水下分流河道相模型为约束,采用 DFN 建模方法建立裂缝网络模型。

砂砾岩储层的展布受控于古地貌、物源供给等多种沉积因素,采用储层沉积演化模拟方法反演预测砾岩的空间分布(图 3)。基于井点岩性硬数据,以沉积演化模拟岩性趋势体为约束建立全区的三维岩相模型。该模型能较好地应用于扇三角洲相储层的沉积模式,整体预测岩性体的分布趋势,并反映井点处钻遇储层的岩性分布。

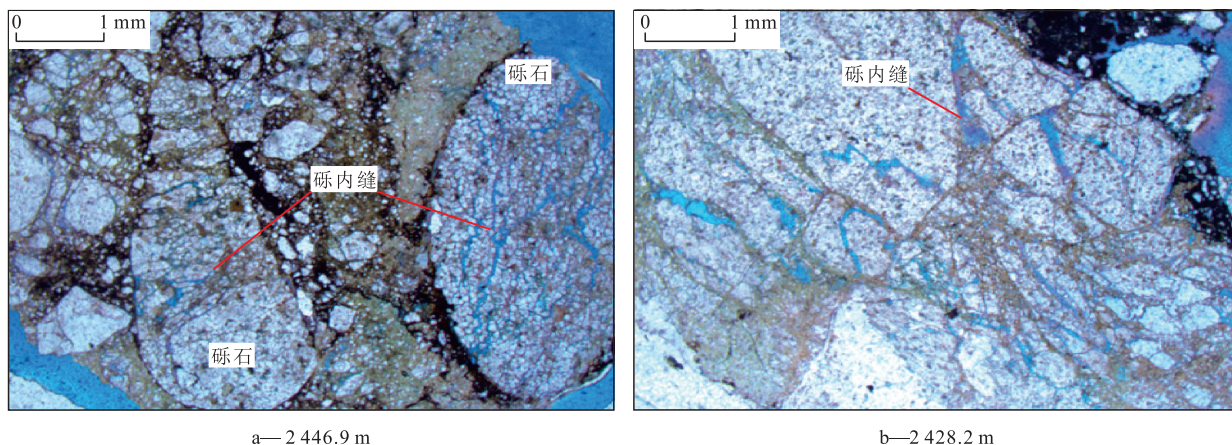


图 2 旅大油田 LD-1Sa 井铸体薄片
Fig.2 Casting thin sections of Well LD-1Sa in LD Oilfield

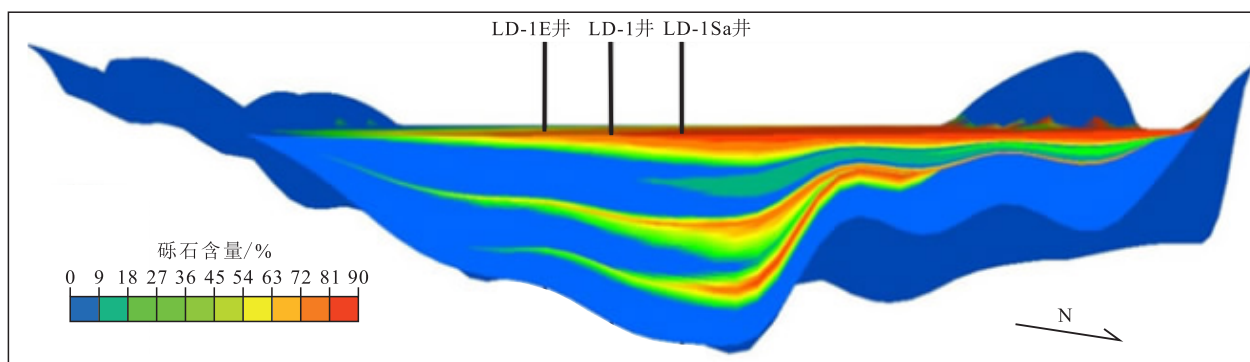


图 3 旅大油田沙河街组砾岩的空间分布三维模型
Fig.3 Three-dimensional model of conglomerate distribution of E_3s in LD Oilfield

由于扇三角洲沉积内部水下分流河道变化剧烈、分期频繁,储层内部砾岩含量变化剧烈,直接影响裂缝分布密度,需要进一步预测多期次水下分流河道展布。根据扇三角洲沉积模式研究,通过测井响应特征划分单期沉积微相,结合滦平扇三角洲野外露头及相似油田类比研究,扇三角洲前缘水下分流河道的宽厚比为20~100,平均约为60。相对常规基于像元的相建模方法,基于目标模拟的方法能更好地刻画河道砂体的形态、规模及期次^[9]。因此,采用基于目标模拟的方法,以井点河道沉积微相硬

数据、河道参数和岩相模型为约束,建立单期水下分流河道模型(图4a)。从模型中提取出水下分流河道沉积微相进行归一化处理,进而约束建立裂缝密度趋势体,最后采用DFN建模的方法,多条件共同约束建立裂缝网络模型,将该模型粗化为等效裂缝属性模型,图4b为裂缝水平方向渗透率模型,与基质模型结合,实现裂缝孔隙型储层定量表征。

由图4b清晰可见,沿河道主流线往边缘方向,裂缝渗透率逐渐变差,有效体现了储层的非均质性,较符合地质认识。该模型为油田开发方案研究提供了

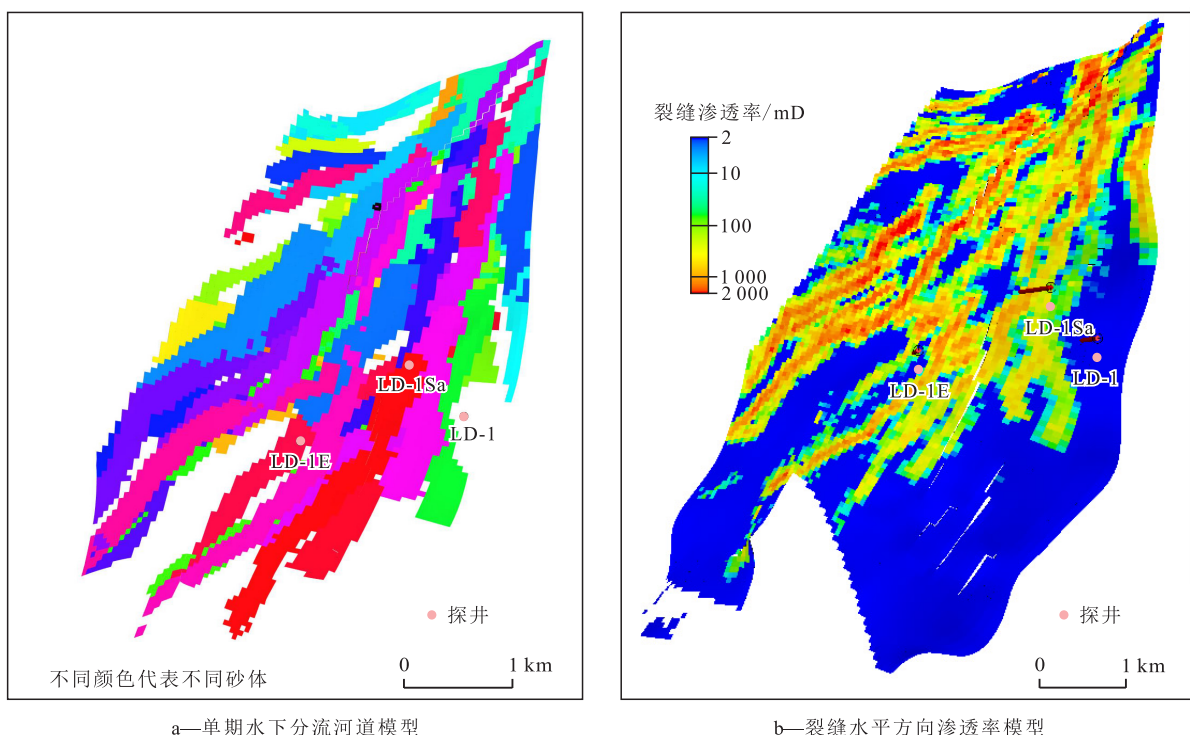


图4 旅大油田沙二段II-1油组水下分流河道及裂缝渗透率模型

Fig.4 Underwater distributary channel and fracture permeability models of Es₂ oil group II-1 in LD Oilfield

可靠基础,在部署注采井网时,充分考虑了裂缝展布方向,在改善渗流的前提下,避免优势裂缝带直接连通注采井,部署了2注2采的不规则井网,预测生产20 a的采收率为23.3%(图5),与油藏工程类比法确定的采收率26%较一致。而在方案研究初期,用传统构造裂缝建模方法建立的模型,在相同井网方案部署下,由于模型平面非均质性较弱,注采井间连通性较好,油田预测采收率达到41.2%,结合油藏工程类比法研究认为,这对于该类低孔隙度、中-低渗透率储层而言过于乐观。这也说明了本次基于目标模拟的砂砾岩砾内缝储层预测的可靠性有大幅提高。

2.2 基于多信息约束的变质岩多尺度裂缝储层表征技术

2.2.1 多尺度裂缝分布规律

天然裂缝的发育极大地影响着地下流体的运

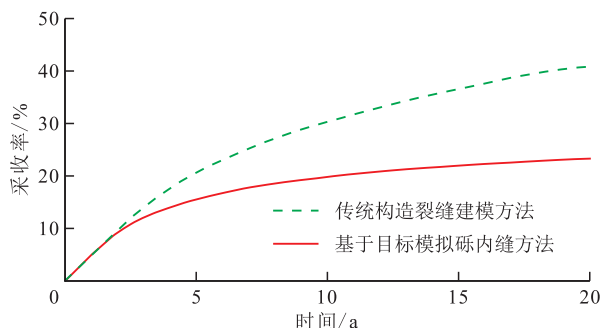


图5 旅大油田不同方法建立裂缝模型预测采收率

Fig.5 LD Oilfield recoveries predicted with fracture models by different methods

移,因此,精细描述油藏中的天然裂缝对油田剩余油研究至关重要。变质岩天然裂缝具有多尺度性,不同尺度裂缝渗流差异大。依据观测资料的规模和识别精度、裂缝长度及其对渗流的影响,将裂缝尺度划

分为3级:①通过地震解释、蚂蚁追踪识别的断层级别裂缝为大尺度裂缝,尺度为百米至千米级。②通过露头观测描述可识别的中间尺度裂缝为中尺度裂缝,约为米级至百米级,油田中该类裂缝无法直接描述。③岩心描述、测井解释的裂缝划分为小尺度裂缝,约为毫米至分米级。

大尺度裂缝 基于地震属性数据,优化分析不同边界探测属性,利用能较好反映断裂信息的方差体和混沌体数据进行蚂蚁追踪识别,结合井点解释数据对比验证,提取大尺度裂缝的空间形态。

中尺度裂缝 变质岩裂缝发育的主控因素是构造应力,相似构造应力下的裂缝发育规律相似。锦州油田潜山与秦皇岛区域露头具有相似的构造背景。因此,采用类比和地质统计学方法,对秦皇岛区域露头进行勘察观测,系统描述相似露头。对10个观测点的裂缝参数进行精细测量、数字化和参数统计,分析露头裂缝长度的分布规律^[10-11],其是否与锦州油田中尺度裂缝一致需进一步验证。首先,将锦州油田大尺度裂缝和岩心观察的小尺度裂缝进行精细描述和统计,归一化后投到一个对数图版中,大、小尺度裂缝样本斜率一致,即具有相同幂指数;其次,将露头裂缝长度统计信息同样归一化并投到该图版中(图6),可以看出露头中尺度与锦州油田大、小尺度裂缝样本的曲线斜率基本一致,说明这3种不同尺度的裂缝长度遵循相同的幂函数分布^[8],指数约为2,表明露头统计裂缝发育规律可用于预测锦州油田中尺度裂缝,并明确了锦州油田不同尺度裂缝的发育规律,为中、小尺度裂缝离散建模提供可靠的参数。

小尺度裂缝 主要基于成像测井,结合地震、岩心等资料,分别对裂缝走向、密度、长度、开度等信息进行描述研究。

2.2.2 基于非结构化网格表征多尺度离散裂缝系统

锦州油田潜山发育离散的大、中、小尺度裂缝综合称为多尺度离散裂缝系统。针对多尺度裂缝的非均质性特征,提出基于非结构化网格表征多尺度离散裂缝系统的建模方法。

大尺度裂缝 由于尺度大、对油气渗流影响大,且是容易引起对开发不利的窜流通道的主要因素,准确刻画非常必要。常规储层表征方法均基于角点网格,受网格正交性、方向单一等限制,无法实现裂缝准确刻画^[6]。从限制裂缝储层表征精度的根源(网格)入手,转变思路,引入非结构化网格剖分技术^[8,12]。非结构化网格^[13]是没有规则拓扑关系的网格,网格区域内的点不具有相同的毗邻单元。该方法剖分的网格在形状、大小方面能灵活变化和组合,大尺度裂缝虽然长度较大但宽度较小,且走向互有

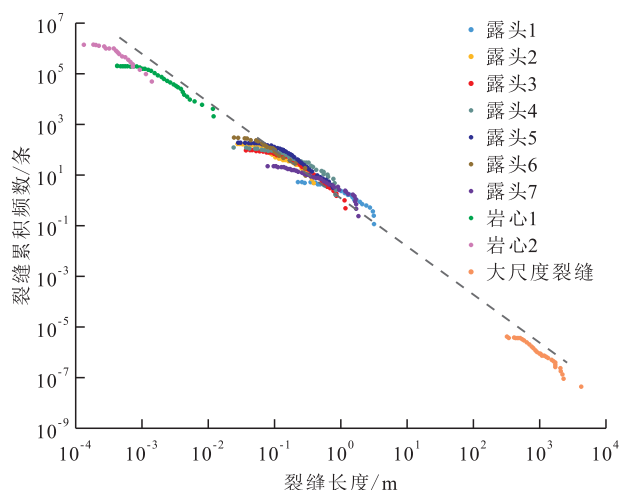


图6 锦州油田裂缝长度发育规律

Fig.6 Fracture length development law of JZ Oilfield

不同,非结构网格在刻画这类地质体方面有明显优势。将蚂蚁体追踪确定的大尺度裂缝(如图7所示的红色和蓝色裂缝片)作为硬数据,在网格剖分时直接约束,用相邻网格交切面(三棱柱网格面)精细表征裂缝片,通过确定性建模建立大尺度裂缝模型^[14],并对裂缝周围网格适当加密,实现不同产状的大尺度裂缝的“真实”表征,直接、准确地刻画大尺度裂缝(图7)。

中、小尺度裂缝 规模较小,形态难以确定,地震资料只能预测其密度变化趋势,无法用确定性方法准确表征,因此,采用DFN建模方法。通过上述对数图版预测,中、小尺度裂缝在锦州油田裂缝中的比例大,且数量非常巨大,因此对油田开发的影响较大,需要综合多项资料定量预测。综合地震属性变化趋势,成像测井解释走向、长度、开度等信息,以及全油田裂缝幂函数规律约束,精细设置DFN建模中的各项参数,模拟建立中、小尺度离散裂缝模型。与通用的DFN建模方法不同的是:本次用到的长度参数是综合蚂蚁体大尺度裂缝、岩心小尺度裂缝和相似露头中尺度裂缝精细描述总结的分布函数,是基于本油田构造背景研究的规律,不再是简单的估算范围。

通过以上非结构化网格确定性建模和DFN建模相结合,实现了大、中、小尺度裂缝的产状、形态和分布密度的差异性描述,为准确模拟流体窜流通道提供了基础。

2.2.3 基质与裂缝系统渗流特征耦合表征

裂缝储层的表征包含基质表征和裂缝系统表征2部分,且基质和裂缝系统是相互依存、不可或缺的重要组成。

基质属性模型 以井点孔隙度、渗透率为硬数据,采用相控随机建模的方法,模拟建立基质属性模

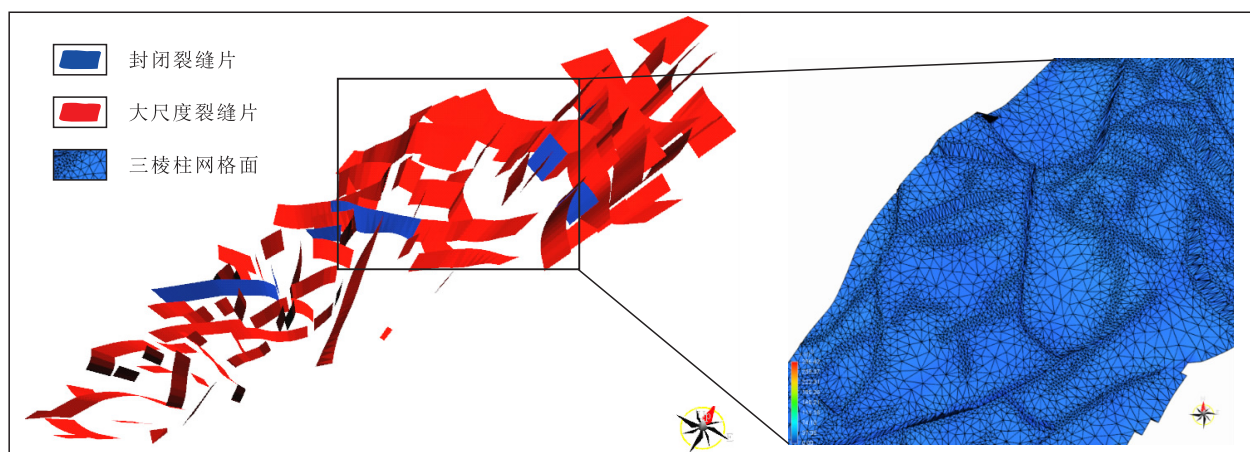


图7 锦州油田大尺度裂缝和基于大尺度裂缝剖分的非结构化网格模型

Fig.7 Large fractures and unstructured mesh model based on large fracture subdivision of JZ Oilfield

型。

裂缝属性模型 建立的多尺度裂缝模型实现了裂缝系统的离散表征,还需将其属性模型计算出来,主要步骤为:①基于多尺度离散裂缝模型,采用Oda方法粗化中、小尺度裂缝,计算得到双重介质裂缝属性模型。②依据大尺度裂缝的流动特征,采用平板流法计算离散裂缝属性。

基质属性模型与裂缝系统的耦合表征 引入基于连通表的离散裂缝油藏模拟方法^[15],由连通表控制每个网格与周围网格的关系。该方法采用有限体积法,用连通表的形式来刻画非结构化网格之间的传导率,其核心是确定网格间的连接关系以及计算相邻网格间的传导率。应用基于流动模拟的方法,根据实际储层中裂缝的分布,模拟计算每一对连接之间的传导率,也就是确定基质-基质(M-M)、基质-裂缝(M-F)、裂缝-裂缝(F-F)的流动情况(图8),表征介质间的传导,实现基质与裂缝系统渗流特征及耦合表征。

2.2.4 应用效果

基于基质属性与裂缝系统的耦合模型,结合动态数据,建立数值模拟模型,该模型包含常规的双重介质和单独刻画的大尺度裂缝。通过对油田全区及单井生产历史数据进行拟合,全区累积产油量、累积产液量、采出程度、含水率等指标符合率均在85%以上,符合率明显提升。此外,对关键裂缝的水窜现象也进行了很好的表征^[16]。从A4H井组动态响应可知,A4H井注水后,A8H井含水率很快上升,且停注后,A8H井含水率下降(图9),两井间发生了水窜现象,表明存在大尺度裂缝沟通。通过对两注采井间大尺度裂缝的精细刻画,新模型中A8H井的预测含水率与实际含水率符合率很高,很好地表征了裂缝引起的水窜现象,而常规方法建立的模型对该井组动态难以拟合。可见本次建立的新模型能更好地表

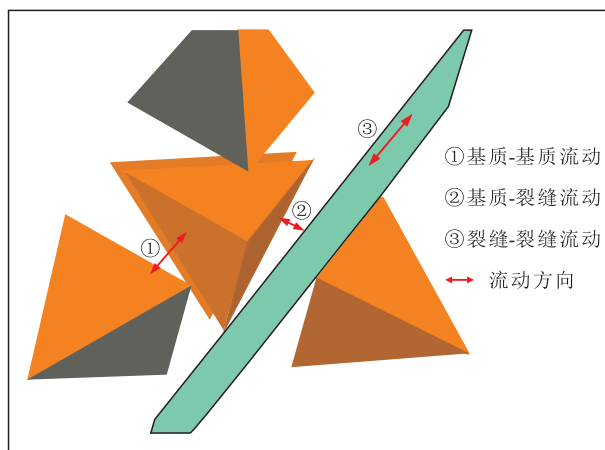
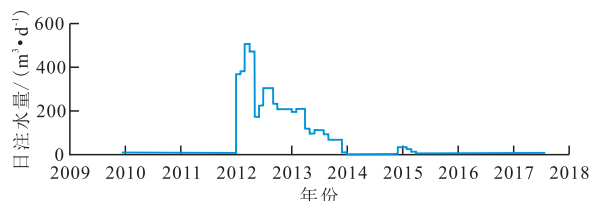
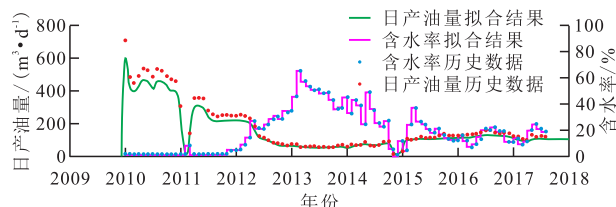


图8 三维离散裂缝模型3种传导率示意

Fig.8 Three kinds of conductivity of three-dimensional discrete fracture model



a—A4H注水井日注水量变化曲线



b—A8H井生产动态曲线拟合

图9 锦州油田A8H井生产动态曲线拟合

Fig.9 Dynamic fitting of water cut of Well A8H in JZ Oilfield
征复杂裂缝的分布及渗流特征,充分反映裂缝对油藏动态的关键影响,保障了剩余油研究的可靠性。

2.3 基于双模迭代的碳酸盐岩微裂缝油气藏定量表征技术

B油田碳酸盐岩储层受沉积、成岩和构造作用

共同影响,孔隙类型复杂,前人认为该储层为孔隙型储层,然而该认识与裂缝储层生产动态存在矛盾。针对这一矛盾,通过多专业一体化融合,精细研究储层类型,认为储层存在小型溶蚀孔洞、微观缝和少量宏观缝^[17],属于缝洞并存且裂缝尺度较小的非典型双重介质储层。常规裂缝表征方法对于微裂缝储层存在2方面难题:①由于裂缝尺度小,成像测井难以识别,难以获取准确的井点裂缝密度、走向、倾角等硬数据。②地震资料分辨率不够,无法准确预测微裂缝的空间分布。基于该类微裂缝储层的特征和表征难题,根据不同密度微裂缝对生产动态沟通情况的不同,创新提出双模迭代技术表征微裂缝,其技术流程如图10。该方法充分运用油藏生产动态对不同密度孔洞、裂缝响应的差异性,对微裂缝的空间分布进行校正。

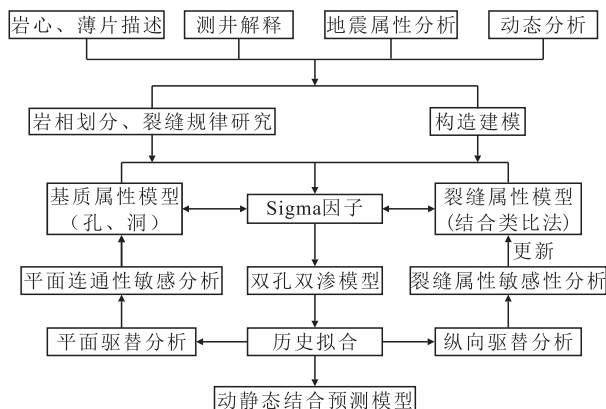


图10 微裂缝储层双模迭代定量表征技术流程

Fig.10 Technical process of quantitative characterization technique with dual-mode iteration of microfracture reservoirs

其关键步骤为:①结合地震、测井、地质、油藏多专业开展储层评价,研究缝、洞发育特征及规律;开展精细岩心描述,统计分析微裂缝密度、倾角等作为裂缝建模的参数。②采用DFN建模方法模拟离散裂缝网络模型,建立初始双孔双渗模型。以表征层状岩石弯曲程度的地震曲率属性体约束建立裂缝密度趋势。③开展双模迭代研究,不断优化完善模型。基于该地质模型建立油藏模型,结合生产动态资料,通过历史拟合进行储层平面及垂向三维驱替敏感性分析,根据动态响应模式研究主控因素,并以合理的动态认识为约束条件返回更新地质模型裂缝分布,通过双模迭代^[18],使模拟结果逼近油藏生产且符合地质认识,微裂缝发育情况逐渐被定量刻画,最终有效实现孔、洞、缝的物性三维定量表征(图11)。由图11可见,B油田南区的微裂缝垂向沟通能力大大强于北区,由此落实储层驱替模式为:南区以纵向驱替为主,北区以平面驱替为主。

双模迭代优化后的双孔双渗模型数值模拟的拟

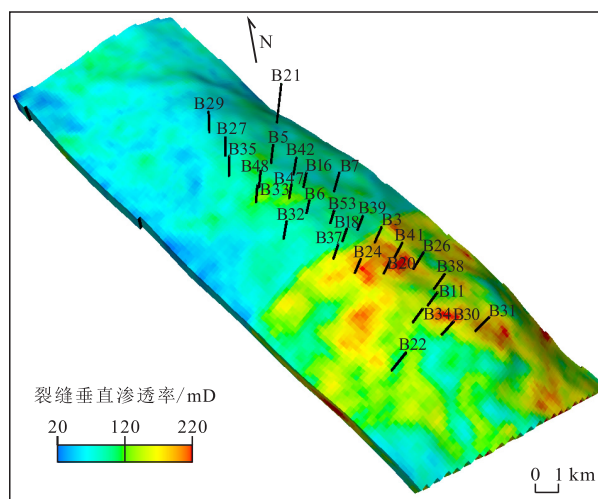


图11 B油田双模迭代优化后裂缝系统垂直渗透率场

Fig.11 Vertical permeability field of fracture system after dual-mode iteration optimization in B Oilfield

合程度明显提高,油田见水后,日产油量拟合符合率为100%,整体静压、单井压力、含水率拟合符合程度均提高20%,单井各项指标拟合精度均满足拟合要求。模型较好地反映了油田驱替模式,为底注顶采策略提供了技术支持。在应用该模型进行剩余油预测的基础上,开展了注水方案优化,提出分区配注策略:中北部高产区裂缝不发育,能量亏空大,重点注水;南部高含水区域裂缝发育,地层能量相对稳定,无需注水或少量注水。目前该油田已完成4口注水井的调整实施,结合裂缝发育的南北差异性特征进行不均匀注水,截至目前,油田整体日产油能力提高了18%,达到 $0.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3 结论

提出基于目标模拟、多信息约束以及双模迭代等3项不同岩性裂缝油气藏定量表征技术,弥补了常规序贯指示模拟不能很好再现模拟目标体的形态和规模的缺点,破除了角点网格在单一方向、网格尺寸方面的桎梏,降低了仅用静态资料约束复杂建模存在的不确定性,首次实现了不同岩性裂缝油气藏复杂裂缝展布预测以及微裂缝、多尺度裂缝的精细表征。

3项技术已应用到旅大、锦州及B油田,分别解决了砂砾岩储层砾内缝尺度小、预测难,变质岩多尺度裂缝精细表征难、大尺度裂缝引起的窜流通道刻画难,以及碳酸盐岩油藏微裂缝预测难、动静态认识矛盾突出等研究难题,为复杂裂缝油藏开发方案研究及调整方案优化奠定了坚实基础。

应用结果表明,该裂缝表征技术新颖有效、方法多样,已指导3个油田前期方案编制和10余口开发调整井的实施。目前,渤海主要的裂缝油气藏正逐步投入开发,正是该技术发挥作用的重要时期,通过

应用深化,可为更多类似裂缝油气藏的高效开发提供依据。

参考文献

- [1] 谢玉洪,张功成,沈朴,等.渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向[J].石油学报,2018,39(11):1 199-1 210.
XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, SHEN Pu, et al. Formation condition and exploration direction of large gas field in Bozhong Sag of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1 199-1 210.
- [2] 徐长贵,杜晓峰,刘晓健,等.渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2020,41(2):235-247.
XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247.
- [3] 叶小明,王鹏飞,霍春亮,等.海上复杂碎屑岩储层油气藏地质建模关键技术[J].中国海上油气,2018,30(3):110-115.
YE Xiaoming, WANG Pengfei, HUO Chunliang, et al. Key techniques for geological modeling of offshore complex clastic rock reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 110-115.
- [4] 孙致学,姜宝胜,肖康,等.基于新型集成学习算法的基岩潜山油藏储层裂缝开度预测算法[J].油气地质与采收率,2020,27(3):32-38.
SUN Zhixue, JIANG Baosheng, XIAO Kang, et al. Prediction of fracture aperture in bedrock buried hill oil reservoir based on novel ensemble learning algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 32-38.
- [5] 但玲玲,史长林,文佳涛,等.多信息融合裂缝建模技术在碳酸盐岩双重介质油藏开发中的应用[J].油气地质与采收率,2022,29(1):46-52.
DAN Lingling, SHI Changlin, WEN Jiatao, et al. Application of multi-information fusion modeling technology for fractures in dual-medium carbonate reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 46-52.
- [6] 董少群,曾联波, XU Chaoshui, 等.储层裂缝随机建模方法研究进展[J].石油地球物理勘探,2018,53(3):625-641.
DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, XU Chaoshui, et al. Some progress in reservoir fracture stochastic modeling Research[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(3): 625-641.
- [7] BAECHER G B, LANNEY N A, EINSTEIN H H. Statistical description of rock properties and sampling[R]. Paper Presented at the 18th US Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado, 1-8, June, 1977.
- [8] 徐静,霍春亮,叶小明,等.基于多尺度融合的巨厚复杂裂缝性储层精细表征[J].中国海上油气,2021,33(3):93-99.
XU Jing, HUO Chunliang, YE Xiaoming, et al. Fine characterization of thick and complex fractured reservoirs based on multi-scale fusion[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 93-99.
- [9] 叶小明,霍春亮,王鹏飞,等.基于目标的海上三角洲相油田地质建模[J].物探化探计算技术,2018,40(3):404-410.
YE Xiaoming, HUO Chunliang, WANG Pengfei, et al. Object-based stochastic modeling of delta reservoirs in offshore oilfield[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(3): 404-410.
- [10] KOLYUKHIN D, TVERANGER J. Statistical analysis of fracture-length distribution sampled under the truncation and censoring effects[J]. Math Geoscience, 2014, 46(6): 733-746.
- [11] CLARK R M, COX S J D, LASLETT G M. Generalizations of power-law distributions applicable to sampled fault-trace lengths: model choice, parameter estimation and caveats[J]. Geophysics Journal International, 1999, 136(2): 357-372.
- [12] LÜ Z B, HUO C L, GE L Z, et al. Application of an integrative new technique on modeling and numerical simulation for fractured reservoir based on unstructured grid: A case study of JZS buried hill reservoir[R]. Paper IPTC-19267 presented at the International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26-28, March, 2019.
- [13] 周德华,戴城,方思冬,等.基于嵌入式离散裂缝模型的页岩气水平井立体开发优化设计[J].油气地质与采收率,2022,29(3):113-120.
ZHOU Dehua, DAI Cheng, FANG Sidong, et al. Optimization of 3D development in shale gas horizontal wells based on embedded discrete fracture model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 113-120.
- [14] GONG B, LI J C, SHAN Y. An integrated approach of fractured reservoir modelling based on seismic interpretation and discrete fracture characterization[R]. Paper IPTC 16562 presented at the International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26-28, March, 2013: 1-8.
- [15] KARIMI-FARD M, DURLOFSKY L J, AZIZ K. An efficient discrete fracture model applicable for general-purpose reservoir simulators[J]. SPE J, 2003, 9(2): 227-236.
- [16] 祝晓林,刘宗宾,葛丽珍,等.渤海油田裂缝性潜山油藏储层分类及剩余油分布规律[J].断块油气田,2022,29(4):527-531.
ZHU Xiaolin, LIU Zongbin, GE Lizhen, et al. Reservoir classification and distribution law of remaining oil in fractured buried hill reservoirs of Bohai Oilfield[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(4): 527-531.
- [17] 张义楷,康安,闵小刚,等.伊拉克米桑油田群 Mishrif 组 MB21 段碳酸盐岩储层特征及成因[J].石油实验地质,2016,38(3):360-365.
ZHANG Yikai, KANG An, MIN Xiaogang, et al. Characteristics and genesis of carbonate reservoirs in the Mishrif MB21 member in the Missan Oil Fields, Iraq[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 360-365.
- [18] 徐静,霍春亮,李军,等.建模数模一体化方法表征 BN 油田剩余油分布[J].石油地质与工程,2017,31(5):61-65.
XU Jing, HUO Chunliang, LI Jun, et al. The residual oil distribution of BN oilfield is characterized by the integrated modeling method[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(5): 61-65.