

引用格式:曹立迎,林会喜,曹飞,等.基于数值试井的断溶体油藏储集体动态表征[J].油气地质与采收率,2023,30(6):150-159.

CAO Liying, LIN Huixi, CAO Fei, et al. Dynamic characterization of reservoir spaces in fault-karst reservoir based on numerical well testing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 150-159.

基于数值试井的断溶体油藏储集体动态表征

曹立迎¹, 林会喜¹, 曹飞², 鲍典²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔里木盆地顺北断溶体油藏是碳酸盐岩油藏的一种特殊类型,其储集空间主要是受断裂作用改造形成的洞穴或裂缝。因储集空间结构复杂、形态不规则且分布随机性强,传统上依据静态地震资料的缝洞体雕刻技术存在诸多不确定性。依据缝洞体雕刻结果,采用数值试井正演模拟方法分析不同试井曲线代表的地质意义,明确试井分析可动态表征断溶体油藏储集体,提出了基于数值试井动态约束缝洞体雕刻阈值的储集体定量表征方法。该方法结合试井解释、生产特征分析等研究手段,用动态修正的储集体认识约束地震属性阈值,确定缝洞体形态和储量规模,进而优选更为准确的缝洞体雕刻模型。

关键词:断溶体;数值试井;储集体动态表征;油藏描述;缝洞体雕刻

文章编号:1009-9603(2023)06-0150-10

DOI:10.13673/j.pgre.202302009

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Dynamic characterization of reservoir spaces in fault-karst reservoir based on numerical well testing

CAO Liying¹, LIN Huixi¹, CAO Fei², BAO Dian²

(1. SINOPEC Exploration and Development Research Institute, Beijing City, 100083, China; 2. SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: Shunbei fault-karst reservoir in Tarim Basin is a special type of carbonate reservoirs. The reservoir spaces are mainly formed by caves and fractures transformed by faulting. Due to reservoir spaces with complex structures, irregular shapes, and strong randomness of distribution, there are many uncertainties in the traditional delineation technology of fracture-cavity spaces based on static seismic data. The forward simulation method of numerical well testing is adopted to analyze the geological significance of different well test curves according to fracture-cavity space delineation results, and it is clear that the fault-karst reservoirs can be dynamically characterized based on well test analysis. A quantitative characterization method of reservoir spaces is proposed by correcting the threshold values of fracture-cavity delineation with dynamical numerical well test data. This method determines the shapes and reserve sizes of the reservoir spaces, and then selects a more accurate delineation models by combining well test interpretation, production characteristics analysis, and other research means and using the reservoir space knowledge with the dynamic correction to constrain the threshold values of the seismic attributes.

Key words: fault-karst reservoirs; numerical well testing; dynamic characterization of reservoir space; reservoir description; fracture-cavity space delineation

中国海相碳酸盐岩油气资源丰富。近年来,随着工程工艺水平不断提高,超深层碳酸盐岩断溶体

油藏已成为油气战略的接替领域。2015年西北油田在塔里木盆地顺托果勒低隆起超深层碳酸盐岩

收稿日期:2023-02-10。

作者简介:曹立迎(1986—),男,山东聊城人,副研究员,硕士,从事油气藏开发工作。E-mail:caoly.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目“顺北深层断溶体油藏描述及可采储量定量表征”(P21064-1)和“顺北凝析气藏高产井稳产能力及技术对策研究”(P23184)。

中发现了 $10 \times 10^8 \text{t}$ 级的顺北油气田^[1-3]。2020年以来,塔里木油田部署的满深1、满深2重点探井也获得高产工业油流^[4]。受大型克拉通内走滑断裂控制的断溶体油藏引起了广泛关注。断溶体油藏是指碳酸盐岩受多期次构造挤压作用后,沿深大断裂发育一定规模的破碎带,经多期岩溶水沿断裂下渗或局部热液上涌致使破碎带内断裂和裂缝被溶蚀改造形成溶蚀孔、洞储集体,在上覆泥灰岩、泥岩等盖层封堵以及侧向致密灰岩遮挡下,后期油气沿深大断裂垂向运移、充注成藏后形成的一类特殊的油气藏^[5]。作为一种特殊的缝洞型碳酸盐岩油藏类型,不同于碎屑岩油藏、碳酸盐岩潜山油藏等,断溶体油藏呈典型的巨厚块状板状体特征,主要的储集空间类型是受断裂作用改造形成的洞穴或断面空腔、裂缝^[6-9]。但由于储集空间类型更加多样化,流体运动规律愈加复杂,严重影响该类油气藏的评价、井位部署及开发方式确定^[10-11]。

缝洞体雕刻技术作为目前常用的缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间描述技术,能够实现对缝洞储集空间分布形态的立体描述,并确定储集体的形态、规模和组合关系^[12-14]。但由于钻井时缝洞发育段常发生放空或漏失等工程异常现象,导致岩心和测井资料无法有效获取,影响了地震属性阈值值的确定,降低了储集体定量表征的精度^[15-21]。为此,笔者以塔里木盆地顺北断溶体油藏Y区块为例,提出了一种基于数值试井的断溶体油藏储集体动态表征方法,该方法大大降低了缝洞体静态雕刻过程中的不确定性,提高了断溶体油藏量化描述精度,对断溶体油藏储量计算、开发方案编制具有重要的指导意义。

1 断溶体油藏特征

1.1 静态储集体发育特征

断溶体油藏储集体的发育和形成受控于断裂的破碎和溶蚀,在断溶体核部发育规模较大的洞穴型储集体,且向两侧逐步演变为裂缝-洞穴型、裂缝型储集体,总体表现为沿断裂带分段成藏、纵向穿层、空间断续分布的特点。针对塔里木盆地顺北油气田Y区块长度为24 km的断裂带,首先将钻时曲线与结构张量属性体结合,确定结构张量阈值为16以明确油藏的分布边界;其次井-震结合确定表征洞穴的波阻抗阈值为-27,断裂周围孔洞的杂乱属性阈值为0.19,裂缝的AFE相干体阈值为0.13,进而多方融合得到断裂带的三维展布体。

基于地震解释成果、放空漏失情况和生产动态特征,将顺北油气田Y区块初步划分为4类缝洞组合:①孤立洞穴型,典型特征是油井直接钻遇大型洞穴,且洞穴周边裂缝不发育,与其他规模洞穴不能有效连通(图1a)。②裂缝-洞穴型,典型特征是油井直接钻遇裂缝,通过裂缝沟通规模洞穴(图1b)。③缝洞集合体型,与孤立洞穴型的差异在于发育多个规模洞穴,洞穴间裂缝发育,通过裂缝可沟通多个洞穴型储集体(图1c)。④缝洞密集群型,典型特征是在剖面上存在多个小规模洞穴型储集体,储集体间有裂缝沟通,形成一个缝洞密集群,分析认为该缝洞结构形成的主要原因是构造破碎形成的,储集体内部非均质性极强,存在多个物性边界(图1d)。

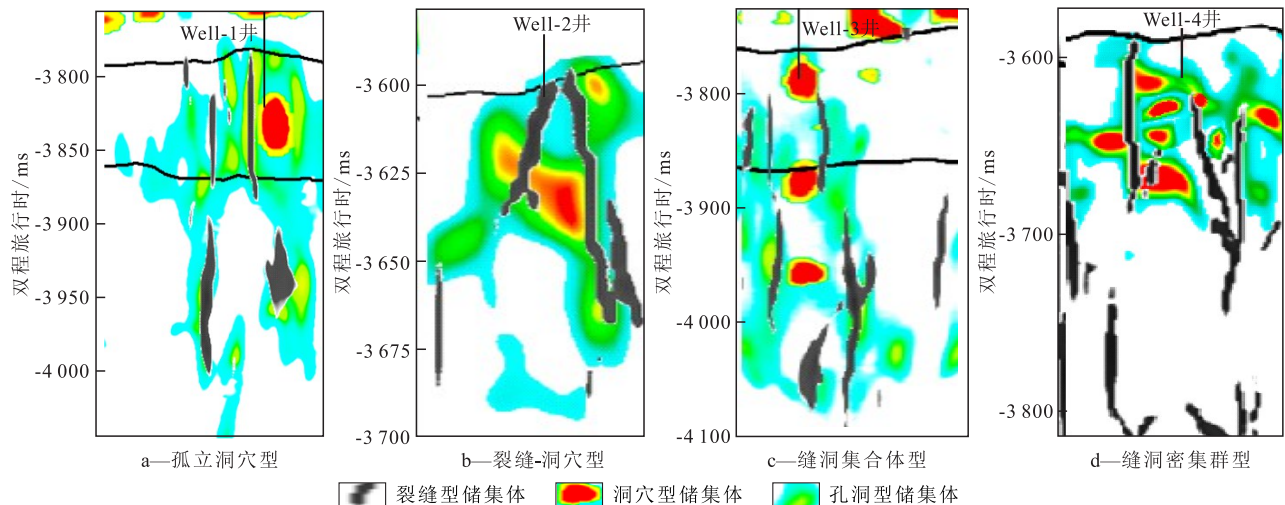


图1 塔里木盆地顺北油气田Y区块不同缝洞组合

Fig.1 Combination of different fracture-cavity in Y block of Shunbei oil and gas field in Tarim Basin

1.2 动态开发特征

统计分析顺北油气田Y区块同一断裂带的28口井实际试井资料,发现试井曲线形态呈明显规律性差异的特点,且不同形态的试井曲线对应的油井生产特征差异也较明显。依据压力与压力导数曲线形态可分为5类(图2)。

深V型 11口油井试井曲线呈此类特征,占比40%。具体表现为在经过井储影响阶段后,压力曲线近乎平行,压力导数曲线急剧下降后又上翘,呈下凹深V型特征。试井解释结果显示此类油井井控储量高(平均值为 241×10^4 t)、储层物性好(平均渗透率为108 mD)。生产特征表现为初期日产油量高(平均值为104.7 t/d)、累积产油量高(平均值为 8.5×10^4 t)、供液能力充足等特点,但控制不好易发生暴性水淹。

深V+尖峰状波动型 6口油井试井曲线呈此类特征,占比21%。该类曲线与深V型曲线形态相近,区别在于压力导数曲线下凹处不光滑,存在明显的尖峰状波动。试井解释结果显示此类油井井控储量高(平均值为 142×10^4 t)、储层物性好(平均渗透率为102 mD)。生产特征表现为初期日产油量较高(平均值为82.3 t/d)、累积产油量较高(平均值为 6.2×10^4 t)、供液能力较充足等特点。

倒S型 2口油井试井曲线呈此类特征,占比7%。该类压力导数曲线中间段呈双下凹的特征,且双下凹段之间压力与压力导数曲线明显平行。试井解释结果显示井控储量较高(平均值为 103×10^4 t)、储层物性较好(平均渗透率为52 mD)。生产特征表现为初期日产油量较高(平均值为78.3 t/d)、累积产油量较高(平均值为 5.5×10^4 t)、供液能力较充

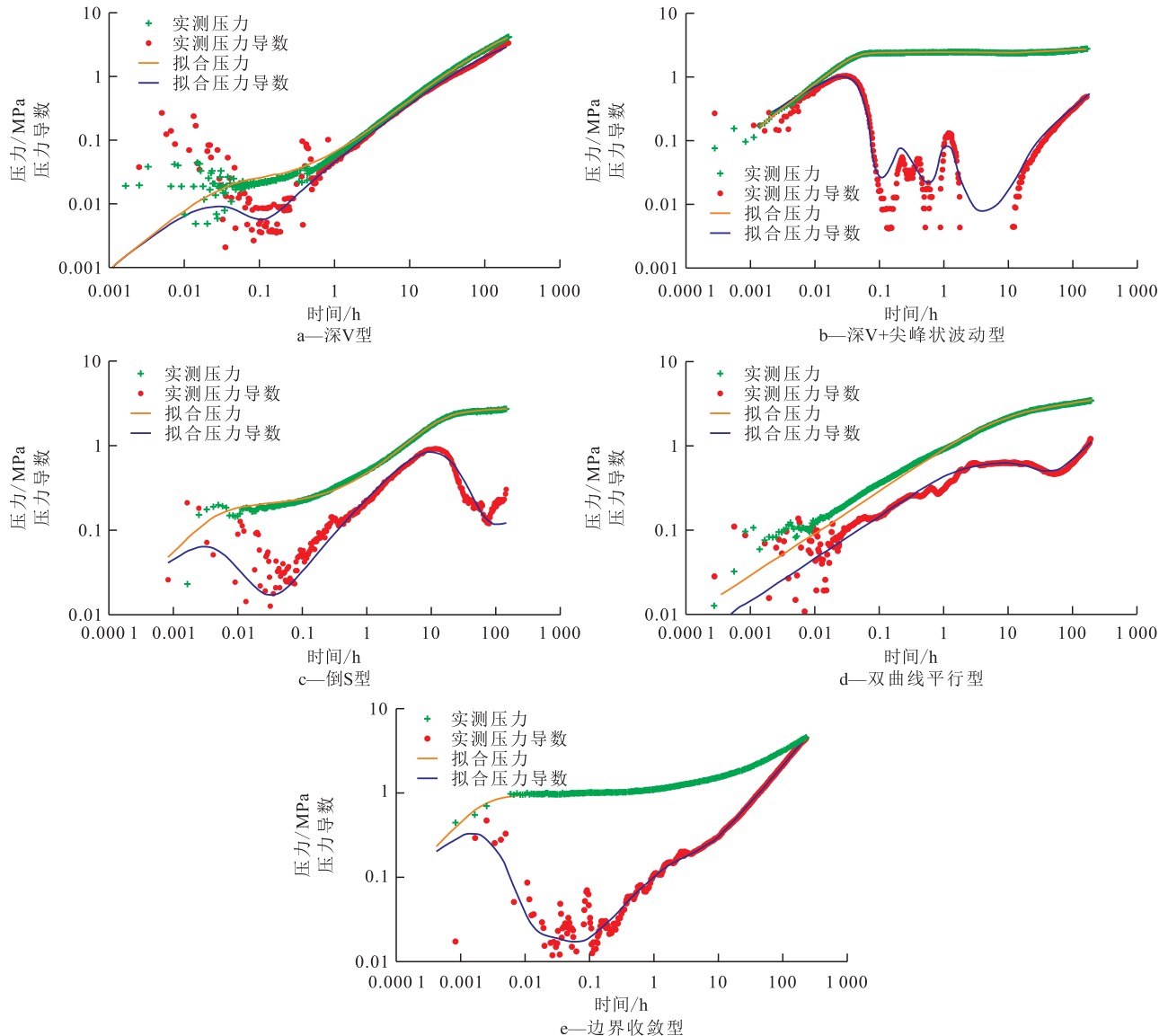


图2 塔里木盆地顺北油气田Y区块典型试井曲线

Fig.2 Typical well testing curves of Y block of Shunbei oil and gas field in Tarim Basin

足等特点。

双曲线平行型 6口油井试井曲线呈此类特征,占比21%。该类曲线典型特征表现为压力与压力导数曲线平行上升呈1/2斜率。试井解释结果显示井控储量低(平均值为 26×10^4 t)、储层物性较差(平均渗透率为30 mD)。生产特征表现为初期日产量低(平均值为22.3 t/d)、累积产油量低(平均值为 2.5×10^4 t)、供液能力不足等特点,油井生产多表现为注水替油或间开生产。

边界收敛型 3口油井试井曲线呈此类特征,占比11%。该类曲线与致密油藏的相近,中间段为下凹浅V特征,后期压力与压力导数曲线近似重叠呈上升状态,反映储层物性变差或封闭性储层边界特征。试井解释结果显示井控储量低(平均值为 8×10^4 t)、储层物性差(平均渗透率为2 mD)。生产特征表现为初期日产量低(平均值为15.1 t/d)、累积产油量低(平均值为 1.5×10^4 t)、供液能力差等特点,大部分油井注水替油或者间开生产。

2 不同类型储集体动态表征

2.1 数值试井正演模拟

由于常规试井方法得到是整个试井工程内地层相关参数的平均值,解释获得的参数较为宏观,不能精准揭示断溶体油藏内复杂的流体流动及压力传播过程,对储集体表征的指导意义较小。数值

试井解释方法能弥补以上缺点,可以精细刻画典型井的压力及产量变化规律,分析不同形态试井曲线特征代表的地质意义。

2.1.1 模型建立

由于真实断溶体油藏缝洞结构极其复杂,基于真实地质模型建立的数值试井模型因网格过多且尺寸相差大,导致极易不收敛。因此,在准确表征断溶体油藏缝洞结构的基础上,对上述4种不同缝洞组合进行简化设计(图3a1—3a4),并基于简化设计结果建立不同缝洞组合数值试井模型(图3b1—3b4)。模型采用非结构化网格控制网格大小和节点密度,实现基质、裂缝、洞穴等多重介质边界的拟合,提高流体流动集中部位的计算速度和精度。

设定模型基本参数如下:初始油藏压力为80 MPa,储层厚度为200 m,含油饱和度为0.85,综合压缩系数为 $1.2 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$;洞穴的半径为20 m,孔隙度为20%,渗透率为200 mD;基质渗透率为0 mD,对产量无贡献;裂缝的长度为60 m,宽度为10 mm,孔隙度为2%,渗透率为5 000 mD;小规模缝洞群中单个洞穴半径为8 m,其他物性参数与洞穴一致;原油密度为 0.85 g/m^3 ,黏度为 $2.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,井径为0.108 m。油井定油生产,日产量为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.1.2 模拟结果分析

分别对单个洞穴模型、单缝-单洞模型、三洞-两缝模型及缝洞群模型等4种不同缝洞组合数值试井模型展开研究,分析不同压力传播阶段和试井曲线

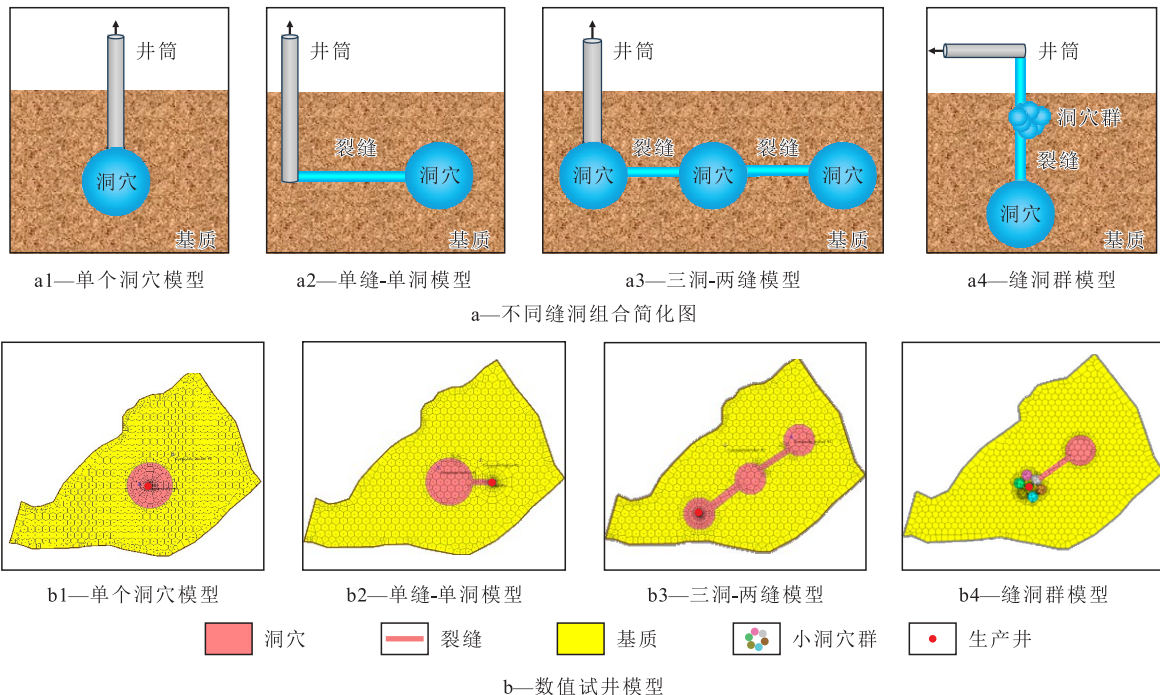


图3 断溶体油藏不同缝洞组合简化图及数值试井模型

Fig.3 Simplified diagram and numerical well testing models of different fracture-cavity combinations in fault-karst reservoirs

形态特征。

单个洞穴模型 数值试井模型如图3b1所示,基质部分不流动,生产井部署在洞穴顶部。生产井工作制度变化时,从压力传播图(图4a)可以看出,基质与洞穴间不存在流体流动,洞穴边界为封闭边界,压力波仅在洞穴内传播,随着时间的增加,洞穴内压力逐渐降低。从正演模拟试井曲线(图4b)可以看出,该模型开发阶段可划分为3个:井储影响阶段、洞穴响应阶段和封闭边界响应阶段。试井曲线与压力传播分析结果表明:压力导数曲线下凹段对应洞穴内的压力传播,而后期压力与压力导数曲线闭合呈上翘趋势可准确对应压力传播到洞穴边界后的时间段。

单缝-单洞模型 数值试井模型如图3b2所示,断溶体油藏内部存在1个圆形缝洞单元,基质部分

不流动,洞穴与裂缝相连通,生产井部署在裂缝上。从压力传播图(图5a)可以看出,压力首先在裂缝内传播,然后逐渐传播至与裂缝沟通的洞穴,洞穴边界为封闭边界,压力波仅在洞穴内传播,随着时间的增加,洞穴内压力逐渐降低。从正演模拟试井曲线(图5b)可以看出,该模型开发阶段可划分为4个:井储影响阶段、裂缝线性流动阶段、洞穴流动阶段及封闭边界响应阶段。与单个洞穴模型相比,单缝-单洞模型经过井储影响阶段后,流体首先在裂缝内流动,此时压力与压力导数曲线平行呈1/2斜率的形态,后期流体在与裂缝沟通的洞穴内开始流动,压力导数曲线同样呈下凹的典型特征,最后进入封闭边界响应阶段。由此可见,单缝-单洞模型试井曲线中不同阶段的响应与数值试井模拟的压力传播过程具有较好的对应关系。

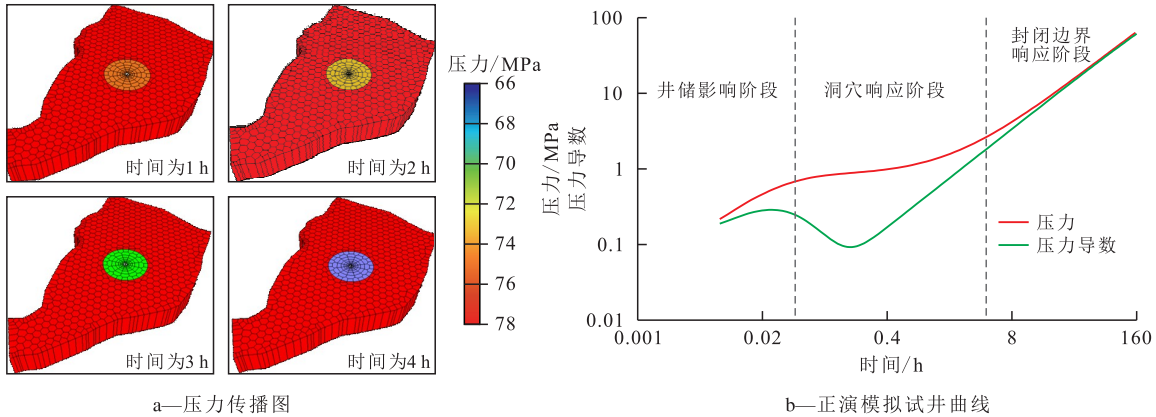


图4 单个洞穴模型压力传播图及正演模拟试井曲线

Fig.4 Pressure propagation diagram and forward simulation well testing curve of single cave model

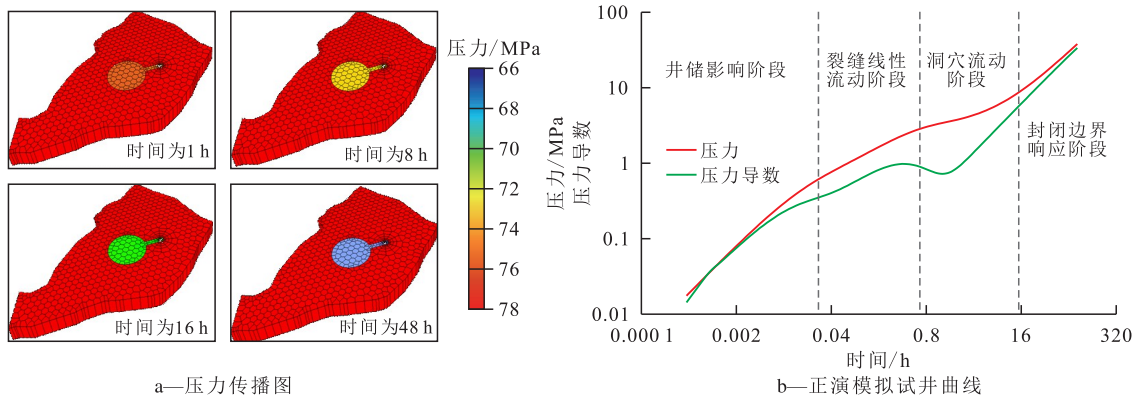


图5 单缝-单洞模型压力传播图及正演模拟试井曲线

Fig.5 Pressure propagation diagram and forward simulation well testing curve of single fracture and single cave models

三洞-两缝模型 数值试井模型如图3b3所示,断溶体油藏内部存在3个圆形洞穴单元,3个洞穴通过2条裂缝相连通,基质部分不流动,生产井部署在洞穴上部。从图6可以看出,该模型压力传播过程十分复杂,开发阶段可划分为7个:井储影响阶段和洞穴1、裂缝1、洞穴2、裂缝2、洞穴3的流动阶段以

及封闭边界响应阶段。三洞-两缝模型数值试井模型进一步证实压力导数曲线下凹是洞穴型储层的动态响应,压力与压力导数曲线平行呈1/2斜率是裂缝型储层的动态表征。

缝洞群模型 数值试井模型如图3b4所示,该模型主要反映断溶体油藏由于构造破碎成藏导致

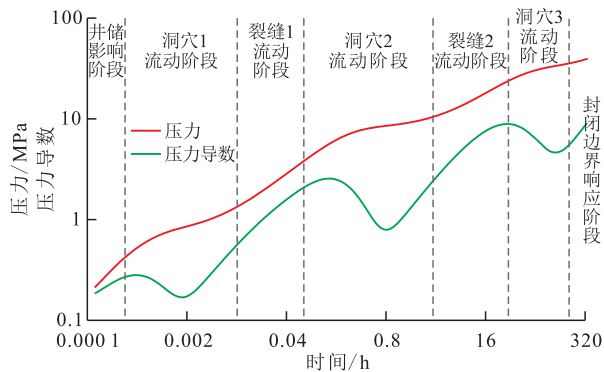


图6 三洞-两缝模型正演模拟试井曲线

Fig.6 Forward simulation of well testing curve of model with three caves and two fractures

储集体由多个小规模洞穴构成。模型中多个小规模洞穴构成1个洞穴单元,生产井部署在该洞穴单元上,且该洞穴单元通过裂缝沟通另外1个规模洞穴。该模型试井曲线正演模拟结果(图7)显示,开发阶段可划分为5个:井储影响阶段、小规模洞穴群流动阶段、裂缝线性流动阶段、洞穴2流动阶段及封闭边界响应阶段。小规模洞穴群构成的洞穴单元压力导数曲线呈深V+尖峰状波动的特征。

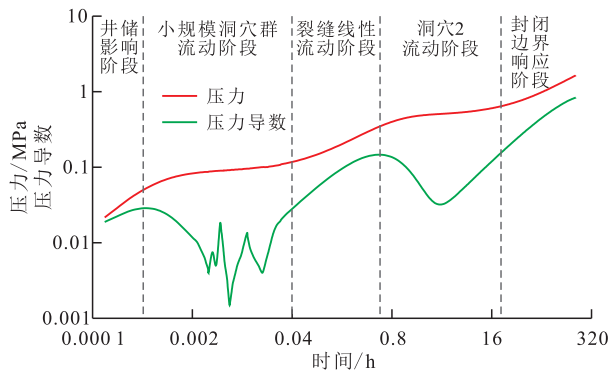


图7 缝洞群模型正演模拟试井曲线

Fig.7 Forward simulation of well testing curve of fracture-cavity group model

将数值试井正演模拟中压力传播过程匹配试井曲线可以明确缝洞结构与试井曲线的对应关系:压力导数曲线下凹的深V特征是生产井钻遇洞穴储集体的反映;压力与压力导数曲线平行呈1/2斜率是流体在裂缝内流动的典型特征;压力导数曲线呈深V+尖峰状波动的形态反映的是规模洞穴集体类型的储集体。利用试井曲线形态可以开展断溶体油藏储集体类型及连通关系的定性表征。

2.2 试井曲线形态影响因素

采用2.1.1模型建立基本参数,分别改变洞穴规模、渗透率、裂缝宽度等主要参数,固定其他参数,计算得到不同参数下的试井曲线,分析各参数对试井曲线的影响。

2.2.1 洞穴型储集体规模

基于单个洞穴模型,选取洞穴型储集体体积分别为 100×10^4 、 150×10^4 和 200×10^4 m³开展敏感性分析。从图8可以看出,洞穴型储集体规模主要影响中期阶段,随着洞穴型储集体规模不断增大,压力传播速度越慢,压力导数曲线下凹程度越大,曲线上显示“凹子”越深。

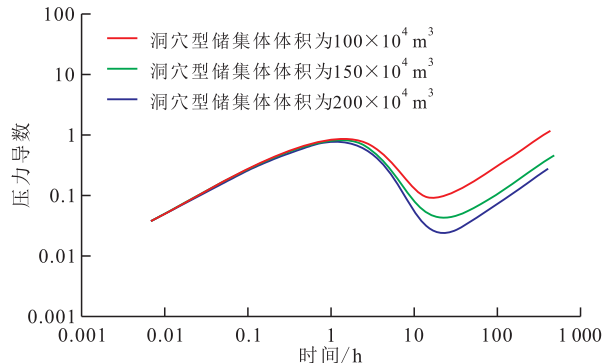


图8 不同洞穴型储集体规模的单个洞穴模型正演模拟试井曲线

Fig.8 Forward simulation of well testing curves of single cave models with different reservoir space sizes

2.2.2 裂缝开度

基于单缝-单洞模型,选取裂缝开度分别为5、10和100 mm开展敏感性分析。从图9可以看出,裂缝开度主要影响中期裂缝流动阶段,裂缝开度越大,裂缝导流能力越强,裂缝响应时间越短,压力导数曲线驼峰位置向左移动现象明显。针对同一口井不同时间段试井资料分析认为,由于应力敏感,断溶体油藏随着开采时间增加,地层能量下降,存在裂缝变形问题,因此开发过程中需重点关注裂缝闭合对此类油藏开发造成的不可逆影响。

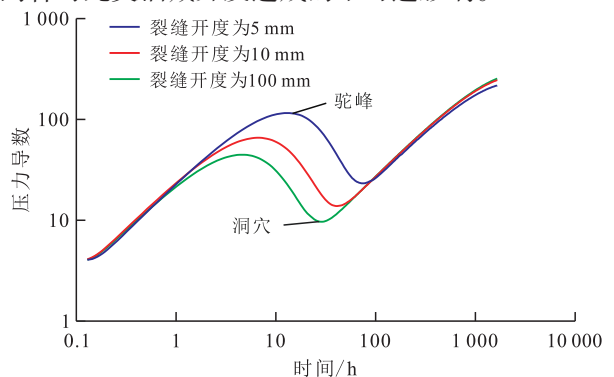


图9 不同裂缝开度的单缝-单洞模型正演模拟试井曲线

Fig.9 Forward simulation of well testing curves for single fracture and single cave models with different fracture openings

2.2.3 渗透率级差

为更好地反映渗透率级差的影响,将图3b3进行简化,去掉裂缝2、洞穴3形成双洞-单缝模型,分

别给2个洞穴型储集体赋值不同的渗透率,建立5, 50和200等3个渗透率级差数值试井模型。从图10可以看出,洞穴型储集体渗透率级差越小,生产并未钻遇的远端洞穴压力导数曲线下凹越浅,“凹子”形态越不明显。因此,从某种意义上说,压力导数曲线几个“凹子”并不能完全代表动用几个洞穴型储集体,而是“凹子”与动用的洞穴数量呈正相关关系。

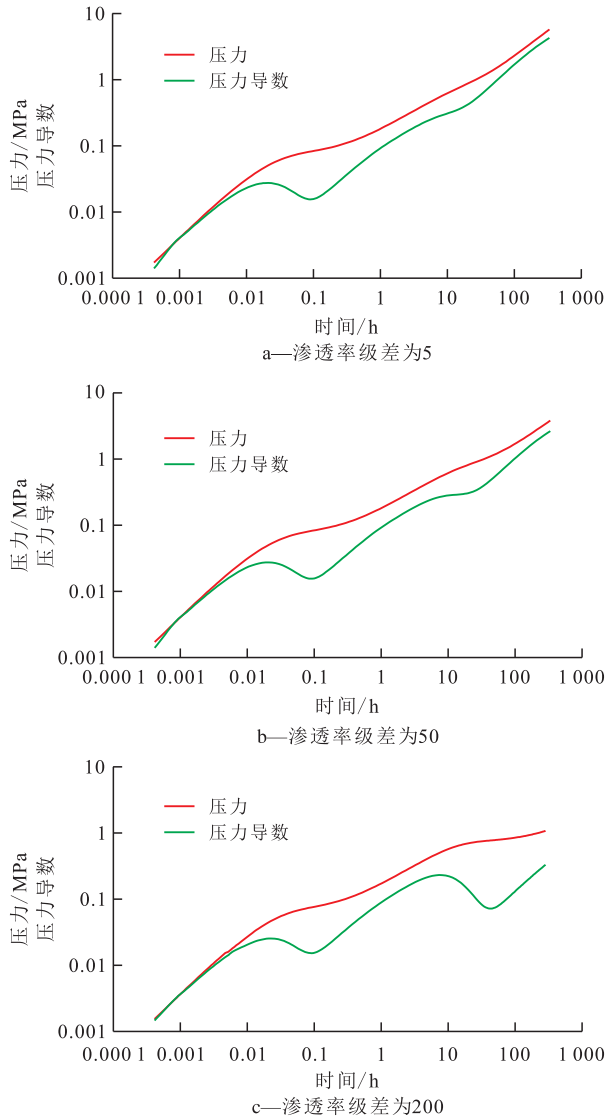


图10 不同渗透率级差的双洞-单缝模型正演模拟试井曲线对比

Fig.10 Forward simulation of well testing curves for two caves and one fracture models with permeability ratios

3 储集体动态表征方法应用

3.1 储集体发育特征动态表征

利用试井资料,结合地质静态雕刻成果和生产动态资料,以5种典型试井曲线(图2)为例,分析不

同试井曲线类型代表的地质意义及对应油井的生产能力。

深V型 该类型试井曲线反映断裂活动性强,地层破碎程度高。储集体类型以洞穴为主,规模较大(体积大于 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$),属大型缝洞集合体。油藏沿断裂面横向连通性好,纵向延伸较深,剖面上沿断裂面呈网状分布。钻遇该类型储集体的油井高产能、高能量,开发效果较好,提产潜力较大。

深V+尖峰状波动型 该类型试井曲线反映断裂活动性强,地层破碎程度一般。储集体类型以洞穴为主,规模中等(体积约为 $50 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4 \text{ m}^3$),属中型缝洞集合体。油藏沿断裂面横向连通性一般,储集体内部存在流动屏障,纵向延伸较深,剖面上沿断裂面呈网状分布。钻遇该类型储层油井中产能、高能量,可适当提产。

倒S型 该类型试井曲线反映断裂活动性一般,地层破碎程度一般。储集体以洞穴为主,规模中等(体积约为 $50 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4 \text{ m}^3$),属中型缝洞集合体。油藏沿断裂面横向连通性好,纵向延伸较深,剖面上沿断裂面呈网状分布。开发过程中通过裂缝沟通可动用2个中等规模洞穴,呈高产能、低能量的开采特征,建议控制产量,以避免能量下降快,产生裂缝闭合,造成可动用储量损失。

双曲线平行型 该类型试井曲线反映断裂活动性差,地层破碎程度低。储集体以裂缝为主,规模中等(体积小于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$),属小型缝洞群。油藏沿断裂面横向连通性一般,纵向延伸较浅。钻遇该类型储层油井低产能、低能量,鉴于压力下降、裂缝闭合等问题,开发初期应考虑能量补充问题。

边界收敛型 该类型试井曲线反映断裂活动性差,地层破碎程度低。储集体以洞穴为主,规模较小(体积小于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$),属小型孤立缝洞体。油藏沿断裂面横向连通性差,纵向延伸较浅,剖面上沿断裂面呈孤立状分布。钻遇该类型储层油井低产能、低能量,主要开发方式是注水替油或间歇生产。

3.2 储集体发育规模定量表征

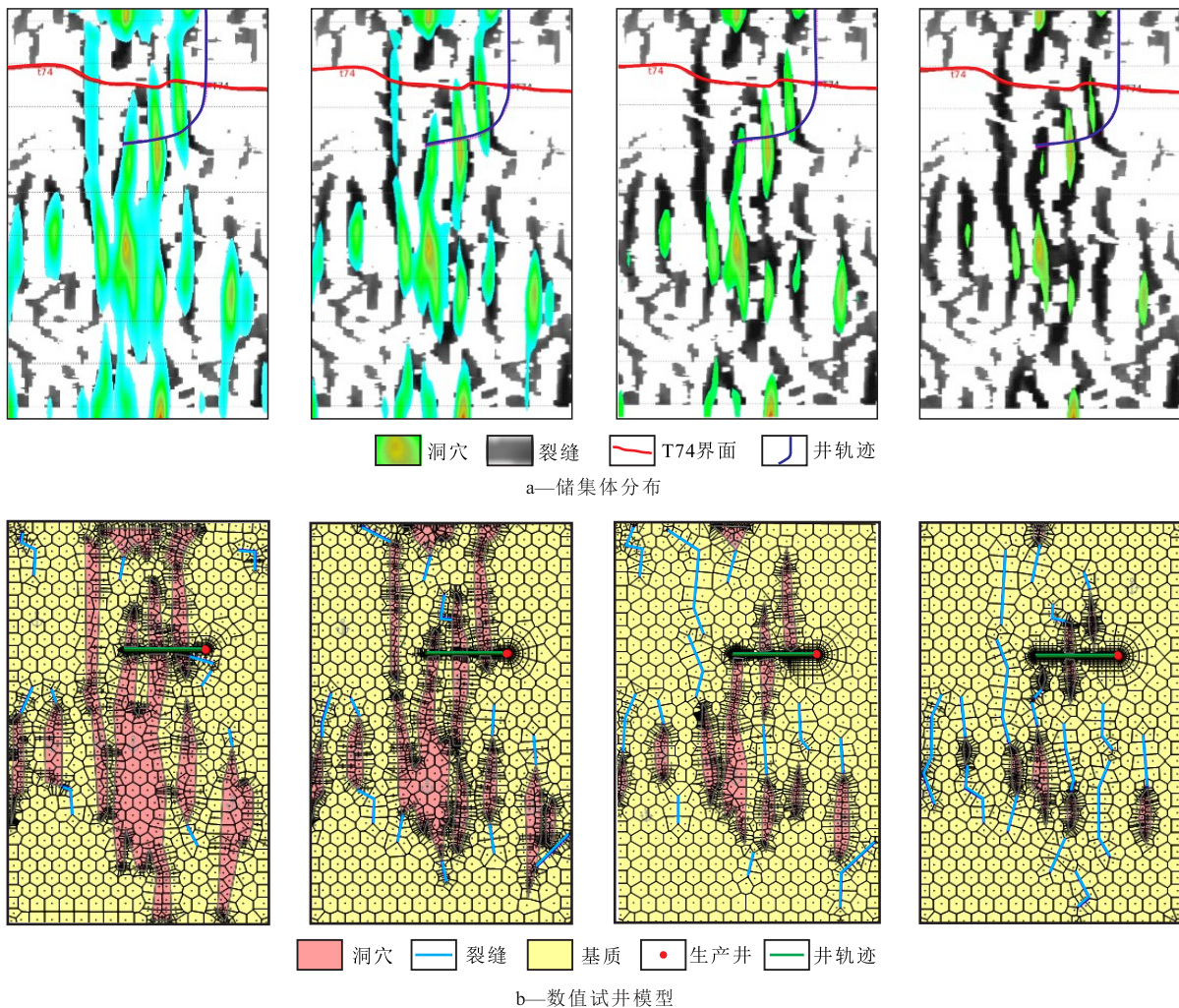
针对缝洞体雕刻技术中门槛值确定问题,本文结合数值试井正演模拟结果及试井曲线敏感性分析,提出一种利用数值试井等动态资料修正缝洞体雕刻门槛值的方法,动静结合不断提高断溶体量化描述的精度。

基于数值试井的缝洞体雕刻门槛值确定方法流程如下:①对试井监测数据进行处理,获取实际的试井解释双对数曲线。②通过地震雕刻,获取一

系列不同门槛值的储集体分布图。③将不同门槛值储集体进行数值化,开展数值试井分析,形成不同门槛值储集体的试井曲线理论图版。④将试井曲线理论图版与实际试井曲线进行对比分析,拟合效果较好的试井曲线对应的门槛值确定为缝洞体雕刻的最终门槛值。

以顺北油气田 S-15 井为例,首先结合井-震标定结果,确定应用不连续属性表征洞穴型储集体,门槛值为 0.05~0.2。在此基础上,优选 0.075,0.103,0.136 和 0.195 其 4 个门槛值进行缝洞体雕刻,明确不同门槛值条件下储集体分布(图 11a)。因裂缝、

孔洞型储集体储量占比极少,仅针对洞穴型储集体敏感属性门槛值进行优化,裂缝等仅作为流动通道。基于 4 个门槛值雕刻结果,利用非结构化网格建立相对应的数值试井模型(图 11b),再将不同门槛值储集体试井曲线理论值与测试值进行拟合对比(图 12),可以看出门槛值为 0.103 时拟合精度最高,该门槛值对应的缝洞体雕刻结果最能反映真实地质认识,最终计算该井控制地质储量为 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。利用该井控制地质储量进行数值模拟得出单井产量、压力等生产数据历史拟合吻合率均达到 90%,可在一定程度上验证结果的准确性。



图片从左至右门槛值依次为0.075, 0.103, 0.136, 0.195

图 11 不同门槛值储集体分布与数值试井模型

Fig.11 Reservoir space distribution and numerical well testing model under different threshold values

4 结论

断溶体油藏试井曲线形态差异较大且规律性明显,曲线形态大致可分为 5 类,不同类型试井曲线形态对应油井开发效果差异的规律性明显,其中深

V、深 V+尖峰状波动、倒 S 型井控储量规模大、产能高,开发效果较好。双曲线平行型及边界收敛型井控储量规模小、产能低,开发效果较差。

形成基于数值试井的断溶体油藏储集体动态表征方法:即通过数值试井正演模拟方法,明确不同试井曲线形态代表的地质意义,利用试井曲线可

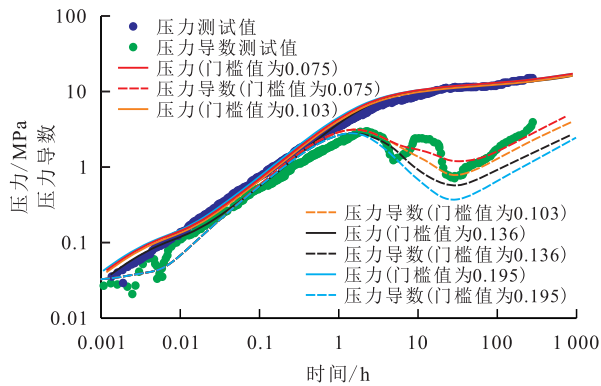


图12 不同门槛值储集体试井曲线理论与测试值的拟合关系

Fig.12 Fitting relationships between theoretical values and tested values of well testing curves for reservoir spaces with different threshold values

以描述井储关系,油井钻遇储集体类型、沟通数量、连通关系等,实现断溶体油藏储集体缝洞结构的动态表征。利用试井曲线中压力导数随储集体规模变大、下凹变深的特点,建立不同门槛值储集体的试井曲线理论图版,通过拟合实际试井曲线可实现储集体规模的定量表征。

参考文献

[1] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J].中国石油勘探,2020,25(1):101-111.
 QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 101-111.

[2] 云露,邓尚.塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J].石油学报,2022,42(6):770-787.
 YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: a case study of Shunbei oil and gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 42(6): 770-787.

[3] 云露.顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J].新疆石油地质,2021,42(2):136-142.
 YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei Area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.

[4] 杨学文,汪如军,邓兴梁,等.超深断控缝洞型碳酸盐岩油藏注水重力驱油理论探索[J].石油勘探与开发,2022,49(1):116-124.
 YANG Xuewen, WANG Rujun, DENG Xingliang, et al. Theoretical exploration of water injection gravity flooding oil in ultra-deep fault-controlled fractured-cavity carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 116-124.

[5] 胡文革.塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征

研究与实践[J].石油与天然气地质,2022,43(3):528-541.
 HU Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 528-541.

[6] 鲁新便,胡文革,汪彦,等.塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J].石油与天然气地质,2015,36(3):347-355.
 LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.

[7] 魏操,程时清,李宗泽,等.井洞相连的串珠状缝洞型油藏试井分析方法[J].油气地质与采收率,2022,29(6):85-94.
 WEI Cao, CHENG Shiqing, LI Zongze, et al. Well test analysis method for fracture-cavity reservoirs of beads-on-string structure with wellbore-cave connection [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(6): 85-94.

[8] 顾浩,康志江,尚根华,等.基于物质平衡的超深断溶体油藏弹性驱产能主控因素分析[J].油气地质与采收率,2021,28(4):86-92.
 GU Hao, KANG Zhijiang, SHANG Genhua, et al. Analysis of main controlling factors for elastic flooding productivity of ultra-deep fault-karst reservoirs based on material balance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 86-92.

[9] 胡文革.顺北油气田断溶体油藏油井产能评价新方法[J].新疆石油地质,2022,42(2):168-172.
 HU Wenge. A new method for evaluating the productivity of oil wells in fault-karst reservoirs in Shunbei Oil & Gas Field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 42(2): 168-172.

[10] 唐磊,王建峰,曹敬华,等.塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):329-339.
 TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 329-339.

[11] 吕海涛,韩俊,张继标,等.塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J].石油实验地质,2021,43(1):14-22.
 LÜ Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 14-22.

[12] 刘群,王世星,顾汉明,等.碳酸盐岩缝洞体体积定量计算及其影响因素分析探索——以塔河油田主体区为例[J].石油勘探,2013,52(2):217-222.
 LIU Qun, WANG Shixing, GU Hanming, et al. Carbonate fracture-cave volume quantitative calculation and its influencing factors analysis: case study of the main area in Tahe oil field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(2): 217-222.

[13] 王震,文欢,邓光校,等.塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用[J].石油物探,2019,58(1):149-154.
 WANG Zhen, WEN Huan, DENG Guangxiao, et al. Fault con-

- trolled karst reservoir characterization technology in the Tahe Oilfield, China [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(1): 149-154.
- [14] 赵建, 李冰, 罗云, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏地质储量计算方法[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(3): 38-44.
ZHAO Jian, LI Bing, LUO Yun, et al. Calculation method for geological reserve of Ordovician carbonate rock reservoir in Tahe oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(3): 38-44.
- [15] 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系层次建模方法[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 207-218.
ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 207-218.
- [16] 吕心瑞, 孙建芳, 邬兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河 S67 单元奥陶系油藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 728-737.
LÜ Xinrui, SUN Jianfang, WU Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 728-737.
- [17] 刘宝增, 漆立新, 李宗杰, 等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 412-420.
LIU Baozeng, QI Lixin, LI Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 412-420.
- [18] 李映涛, 漆立新, 张峭楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中一下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1470-1484.
LI Yingtao, QI Lixin, ZHANG Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [19] 鲍典, 张慧涛. 塔河油田碳酸盐岩断溶体油藏分隔性描述方法研究[J]. *新疆石油天然气*, 2017, 13(1): 25-30.
BAO Dian, ZHANG Huitao. Description of the separation in fault-karst carbonate reservoirs in Tahe oil field [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2017, 13(1): 25-30.
- [20] 窦之林. 碳酸盐岩缝洞型油藏描述与储量计算[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 9-15.
DOU Zhilin. Description and reserves calculation of fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 9-15.
- [21] 李勇, 邓晓娟, 宁超众, 等. 基于不确定性分析的缝洞型油藏“二次定量雕刻”技术[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 1-11.
LI Yong, DENG Xiaojuan, NING Chaozhong, et al. “Second quantitative characterization” of fracture-cavity reservoirs with combination of dynamic and static data considering uncertainties [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 1-11.

编辑 何青芳