

碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术

康志江¹,李 阳²,计秉玉¹,张 允¹

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司,北京 100728)

摘要:中国碳酸盐岩缝洞型油资源量丰富,探明石油地质储量达 29.3×10^8 t,已经成为中国油气勘探开发和油气增储上产的重要领域。由于深埋 5 500 m 碳酸盐岩缝洞体的描述精度低、流动模式多样、模拟预测难度大,注水窜流易造成油井暴性水淹,导致采收率仅为 15.9%,此类油藏开发是世界级难题。经过多年的研究与实践,形成地球物理描述、地质建模、注水注气和酸压改造等提高采收率系列技术,单元应用后储量动用率提高了 42%,同时已提高采收率 2.3%,对同类深层、超深层强非均质性油藏开发具有借鉴作用。

关键词:改善注水;气项驱;缝洞型油藏;碳酸盐岩油气藏;提高采收率

中图分类号:TE327 **文献标识码:**A

Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs

Kang Zhijiang¹, Li Yang², Ji Bingyu¹, Zhang Yun¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. SINOPEC, Beijing 100728, China)

Abstract: China is rich in fractured-vuggy carbonate oil reserves, with proved reserves in place of 29.3×10^8 t, which has become an important target for China's hydrocarbon exploration and development, and important contributor for the increase of reserves and production. Due to the low reservoir and fluid description accuracy, the variation in flow patterns, and the difficulty to predict flow pattern by simulation of carbonate fractured-vuggy reservoirs in a burial depth of 6500 m, the transverse flow in water injection is prone to cause abrupt watered-out wells, resulting in a low recovery rate of only 14.9%. Development and production in such reservoirs are a world-class problem. After many years of research and practice, we developed a series of technologies to enhance oil recovery, including geophysical description, geological modeling, water and gas injection, and acid fracturing. The developed STOOIP has increased 42% with an EOR (enhanced oil recovery) of 2.3 percent in the structural units tested with the new technologies, which are applicable to the development of similar deep or ultra-deep reservoirs with strong heterogeneity.

Key words: improved water injection, gas flooding, fractured-vuggy oil reservoir, carbonate reservoir, EOR

中国海相碳酸盐岩油资源量丰富,碳酸盐岩沉积分布面积达 450×10^4 m²,油气资源量 358×10^8 t 油当量,石油资源量约 150×10^8 t,截至 2015 年底,塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地累计探明碳酸盐岩石油地质储量 29.3×10^8 t。1984 年塔里木盆地沙参 2 井获得高产油气流,实现了中国古生代海相碳酸盐岩油藏重大突破,成为中国油气勘探史上的重要里程碑^[1];1990 年沙 23 井发现了中国第一个古生代超深层海相特大型油田——塔河油田^[2];1997 年塔河油田投入开发,目前已建成世界上最大的缝洞型油藏原油

生产基地,年产油气能力已达 900×10^4 t 油当量,标志着中国海相碳酸盐岩油藏开发理论和技术的形成,碳酸盐岩油气藏已经成为中国油气勘探开发和油气增储上产的重要领域^[3]。

与国外同类油藏相比,中国碳酸盐岩油气藏储层时代老、埋藏深、类型多、地质条件复杂^[4],开发难度更大。油藏开发主要面临 4 大挑战:①缝洞储集体离散性强,空间描述难度大;②油井含水快速上升、产量递减大,自然递减率达 19.5%;③注水单向受效,注采井网、高效驱替难;④采收率低,标定采收率仅为 15.9%。

收稿日期:2019-01-28;修订日期:2020-02-11。

第一作者简介:康志江(1969—),男,博士、教授级高级工程师,复杂碳酸盐岩油气田开发。E-mail: kangzj. syky@ sinopec. com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05014);国家自然科学基金面上项目(51574277)。

经过多年的研究与实践,形成地球物理缝洞体描述、岩溶地质建模、自由流与渗流耦合油藏数值模拟、注水注气、大型酸压改造等提高采收率系列技术,单元应用后储量动用率提高42%,已提高采收率2.3%,期望对进一步深化碳酸盐岩油藏开发研究提供借鉴。

1 地球物理描述技术

对于碳酸盐岩储层的描述,不仅要描述其分布范围,更要描述其形态规模、缝-孔-洞配置关系、充填特征及含油气性。针对中国海相碳酸盐岩油藏埋藏超深、地震成像精度低等问题^[5],形成了高精度采集、绕射波分离和逆时深度偏移高精度成像、多尺度分类检测识别等技术^[6]。

1.1 创建散射波与最小二乘偏移成像高精度成像方法

针对小尺度异常体(缝洞体)的弱散射信号,创新性地研发了基于散射角域地震响应的散射波分离成像方法(图1),在散射偏移过程中提高了弱散射体成像能量,能发现掩盖在反射同相轴中的隐蔽散射体。

通过理论分析,利用散射波和反射波在传播方向上的不同,提出了散射角域概念,并推导获得了散射角域反射波与散射波的不同地震响应特征。通过建立传播过程中散射角计算方法和共散射角成像条件,实现了共散射角偏移,同时解决了共散射角成像中的计算效率和存储效率问题。利用散射角域反射波和散射波的不同,研发了反射波拟合法散射波分离技术,通过拟合反射同相轴对反射波进行消除,实现散射波能量无畸变分离。对比可以看出(图1),散射波分离方法有效的压制了 T_4^1 层的反射能量,消除了风化壳“强反射”的影响,保留了散射能量,凸显了小尺度散射体形态(图1中箭头指处),如缝洞、小断层和异常体。

散射波分离前后缝洞储层的分布趋势一致,散射数据体比反射数据体反映更多细节情况,缝洞体的分辨率也要优于全波场数据。通过对串珠计数对比,散射波数据比全波场数据可以发现更多的隐蔽串珠,特别是在反射波掩盖效果比较显著的地方,散射波数据能提供高分辨率的串珠数据,通过计算,整体数据串珠的识别率,散射波数据比散射波数据提高了约20%。

研发形成了3D-GPU最小二乘偏移技术,基于散射波线性化反演成像理论和3D逆时偏移成像基础,采用共轭梯度反演最优化方法和GPU加速技术,创新性研发了3D最小二乘逆时偏移技术,通过多次迭代偏移过程可以减少照明、吸收等广义散射因素的影响,进一步提升小尺度异常体的分辨率。

最小二乘偏移比常规的RTM深部照明更均匀,同相轴连续性更好,对于串珠反射的收敛性更高,通过频谱对比分析可以看出,最小二乘偏移成像拓宽了频谱,频带展宽5 Hz。展现了最小二乘偏移成像提高成像分辨率和振幅均衡性及提高成像精度方面的效果和潜力。

1.2 建立缝洞体内部结构刻画技术

针对大尺度溶洞内部结构,自主研发基于叠前炮域分频时间偏移的缝洞结构描述技术,通过不同频率的能量叠合,实现了缝洞体内部结构的描述。

以保幅叠前道集为基础,通过储层特征及井资料的标定开展针对叠前道集的时频分解方法测试,利用Butterworth滤波器将经过预处理后的叠前CMP道集分解成不同频段叠前道集数据,形成不同优势频带的叠前道集数据,最终通过叠前时间偏移获得不同优势频带叠前时间偏移数据体。由图2可见,叠前分频剖面串珠形态保持较好,有效克服叠后分频产生的“信号震荡”现象。叠前分频更有利于不同尺度溶洞的刻画:低频成分描述了溶洞形态,高频成分揭示了溶洞内部细节及非均质特征。

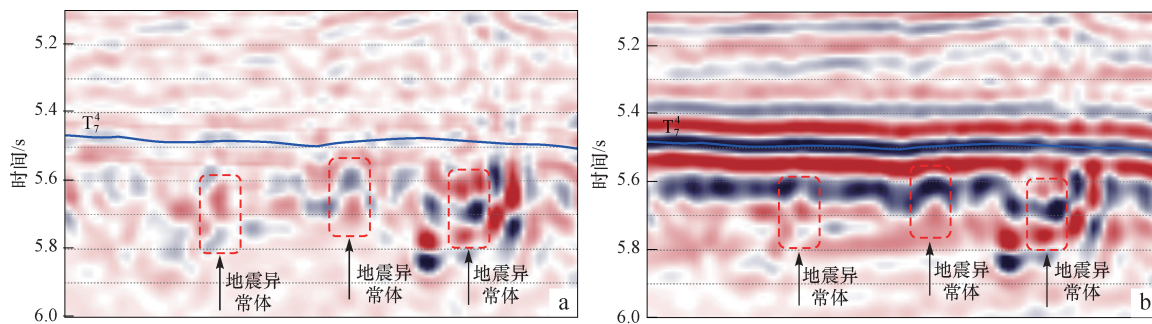


图1 RTM全波场成像(a)与散射波成像(b)效果对比

Fig. 1 The imaging profiles of the Reverse Time Migration(RTM) with full wave field information(a) and with scattered wave information(b)

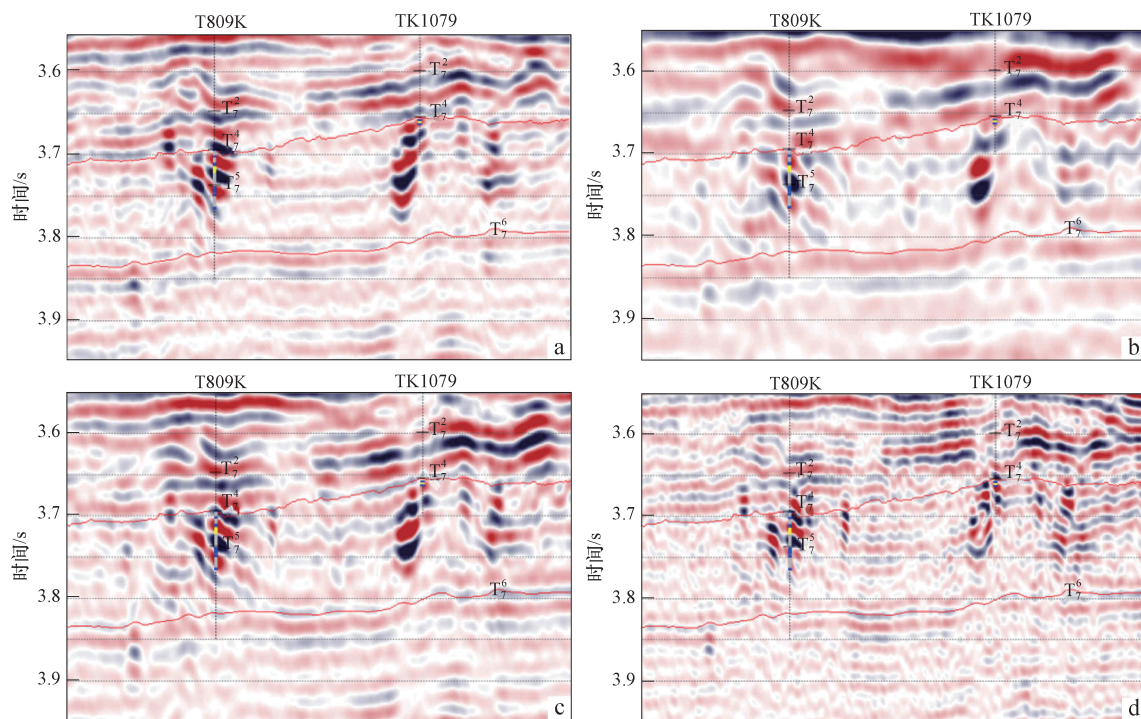


图2 不同频段大尺度缝洞偏移成像对比

Fig. 2 Large-scale fractured-vuggy migration imaging in different frequency bands

a. 全频段; b. 5-10-15-20 Hz; c. 20-30-35-40 Hz; d. 50-55-60-65 Hz

基于分频炮域叠前时间偏移成像,通过不同频率的能量叠合,描述大尺度缝洞结构。当高、中低频能量一致性较好时,表明一般为单室溶洞,充填较均质;而当高、中低频能量不一致时,往往为大型溶洞系统,不均质性较强。

针对表层内部小尺度缝洞体,建立了小尺度储集体的地震信号增强目标处理技术,建立了基于反射系数反演的振幅谱梯度预测方法,解决弱反射储集体预测难题,预测符合率达82%。

基于叠后反射系数反演技术提高地震资料分辨率,通过反射系数“奇偶分解”获得能提高薄层分辨率能力的“偶分量”,利用反射系数反演出高频成分(薄层)的偶分量反射系数序列,与地震子波褶积可获得比原始地震数据分辨率更高的“新地震数据”。通过基于反射系数反演技术提高地震资料纵向分辨率,地震数据主频从25 Hz提高到40 Hz,被 T_7^4 强反射压制的小尺度储集信号增强, T_7^4 界面下小尺度储集体反射特征明显,响应异常与测井解释的裂缝孔洞储层存在明显对应关系。

地震资料振幅谱梯度是指在地震资料有效频带内地震反射波振幅随频率的变化率,其突出了地震资料不同频率振幅的变化特征,更加直观地揭示了储层横向渗透性能变化特征。采用振幅谱梯度属性预测了的

表层风化壳型小尺度储集体,预测结果与测井解释符合率达82.5%。

2 缝洞型油藏岩溶建模技术

20世纪80年代建立的确定性建模及随机建模方法,解决了孔隙连续型储层的地质统计学建模问题,21世纪初建立的多点地质统计学及离散裂缝建模方法,解决了河道与裂缝储层地质建模问题,而针对缝洞型油藏建立的离散缝洞建模方法,解决了岩溶型复合介质油藏地质建模问题^[7-9]。

受多期构造运动等因素的控制和影响,古岩溶型储集体是隆起上最为重要的储集体^[10-11],离散缝洞建模技术把岩溶型储集体划分为溶洞、溶蚀孔洞、裂缝(大尺度、中尺度、小尺度)和基岩,在古地貌、岩溶发育模式和断裂发育规律约束下,分类、分级建立离散分布模型,之后融合形成了离散溶洞裂缝网络三维地质模型。不同性质储集体采用不同方式建立模型:大型溶洞采用地震截断模式修正的方法,小型溶洞采用多点地质统计学随机模拟方法,溶蚀孔洞采用序贯高斯随机模拟方法,大尺度裂缝采用人工解释的确定性方法,中尺度裂缝采用蚂蚁体追踪的方法,小尺度裂缝采用基于目标的随机模拟方法。基于裂缝、孔洞、溶洞的

级次演化模式,建立大尺度溶洞、大尺度裂缝、小尺度孔洞、小尺度裂缝的同位赋值融合方法,构建多尺度缝洞体分布模型(图3)。实现了缝洞体形态规模、配置关系、充填特征及储集物性的精细描述,明确了不同类型储集体的地质储量及其空间分布,地质模型钻井符合率由71.1%提高至92.7%,大幅度提高了储量动用率。

2.1 基于地质知识库的古暗河多点地质统计建模方法

针对古暗河形态多样、结构复杂、规律性差的特点,优选知识库中现代岩溶暗河形态结合古河道几何参数,制作三维训练图像,采用多点地质统计学方法模拟古暗河的发育形态及组构模式,形成了基于地质知识库的古暗河多点地质统计建模方法。

2.2 分区带多元约束断控岩溶储集体建模方法

断孔岩溶储集体的发育受断裂控制,根据断控岩溶储集体发育特征,基于地质知识库建立断控储集体形态、高度和展布的规律,利用分区带目标模拟的方法构建训练图像。采用PR(更新比率恒定)信息融合方法,整合断层和地震等多元信息,构建综合发育概率体,模拟断控储集体分布。

2.3 表层岩溶储集体多元约束建模方法

表层岩溶储集体以小尺度溶蚀孔洞和裂缝为主,整体呈片状和网状分布,分布较广泛。溶蚀孔洞采用岩溶相控和地震属性约束的协同序贯指示模拟算法,小尺度裂缝网络采用井震结合随机模拟方法。

2.4 基于示踪剂约束的地质模型局部连通性优化方法

针对缝洞型油藏连通关系复杂的情况,在示踪剂的约束下定义目标函数,应用退火模拟方法,局部优化部分裂缝位置,确保模型连通性与示踪剂数据定量一

致,降低模型不确定性。

3 缝洞型油藏数值模拟与试井解释技术

3.1 复合介质变重耦合油藏数值模拟

20世纪50年代布鲁斯、皮斯曼建立了单重介质数学模型,解决了孔隙连续介质型油藏数值模拟问题;1960年前苏联的Barenblatt, Zheltov 和 Koehina 提出双重介质概念;20世纪70年代Warren-Root建立了双重介质数学模型,解决了裂缝孔隙型连续介质油藏数值模拟问题;20世纪90年代建立了离散裂缝网络模型,解决了具有离散裂缝的连续介质数值模拟问题。针对塔河缝洞型油藏数值模拟问题,研究建立了离散大型缝洞与连续介质耦合数学模型^[12-13],形成复合介质变重耦合技术。

离散大型缝洞与连续介质耦合数学模型为洞穴流与渗流耦合为核心的数值模拟奠定了理论基础^[14]。数学模型分为两类,第一类是基于洞穴奈维-斯托克斯动量方程建立的控制方程组,溶孔的渗流通过源汇项处理;第二类是渗流达西定律建立的控制方程组,洞穴或裂缝的奈维-斯托克斯流是通过嵌入式处理。软件程序实践表明,第一类方法计算精度高、计算量大,可用于缝洞组合的精细机理研究,第二类方法计算精度较低、计算速度快,一般用于油藏尺度的模拟预测^[15]。

在此基础上,编制了缝洞型油藏数值模拟软件^[16](KARSTSIM),在模拟算法方面采用有限体积方法,对各偏微分控制方程进行数值离散,使用改进约束压力残差CPR(Constrained Pressure Residual)预处理与代数多重网格AMG(Algebraic Multigrid)线性方程解法相结合的算法求解。基于非结构化网格,对大尺度裂缝和溶洞进行嵌入显式处理与计算,小尺度裂缝和孔洞发育区根据其分布特征,采用变重耦合的分区模拟,

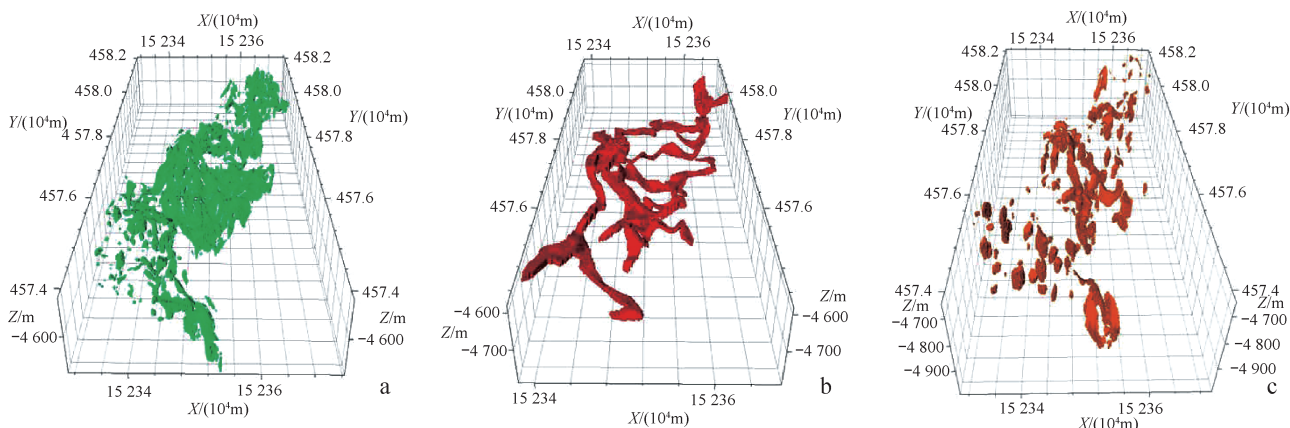


图3 表层岩溶(a)、暗河(b)和断控储集体(c)地质模型

Fig. 3 Geological models of surface karst(a), underground river(b), and fault-controlled reservoir(c)

有效划分溶洞区、裂缝区与溶孔区,区与区之间任意组合、精细计算之间流动量,在保证精度的条件下,减少运算工作量。应用软件产油量预测符合率达到85.1%,与常规商业软件相比,符合率提高了近一倍。

3.2 缝洞型油藏试井技术

试井是通过工作制度 and 井底压力变化测试储层参数,Warren-Root 模型很好地解决了天然裂缝型碳酸盐岩储层中的非线性渗流问题,但缝洞型油藏普遍发育着洞穴、溶蚀孔洞与裂缝,双重介质模型已经不能适应于此类油藏的试井解释。

针对缝洞型油藏,提出了两种试井模型。一是当储集介质表征单元体存在且尺度较小时,利用等效连续介质数值模型建立试井解释方法(三重介质模型);二是在大尺度溶洞介质和多孔介质中的耦合流动采用复合介质理论模型。

等效连续介质模型考虑了3种情形:①溶洞-井筒连通模型:假设地层由基岩、裂缝、溶洞三种连续介质而成,考虑溶洞发育,向井筒供液,同时基岩和裂缝向溶洞发生拟稳态窜流。②裂缝溶洞-井筒连通模型:考虑裂缝和溶洞同时向井筒供液,基岩和裂缝之间、基岩和溶洞之间以及裂缝和溶洞之间发生拟稳态窜流。③裂缝溶洞基岩-井筒连通模型:考虑基岩、裂缝和溶洞均向井筒供液,同时基岩和裂缝之间、基岩和溶洞之间以及裂缝和溶洞之间发生拟稳态窜流。大尺度溶洞介质和多孔介质中的耦合流动试井模型对大尺度溶洞区考虑自由流的力学性质,溶洞外区域考虑渗流的力学性质,两种流动模型进行数值和解析联合求解。

通过三重介质模型和复合偶和介质模型,除传统试井解释参数外,如钻遇洞穴体积、裂缝或溶洞渗透率、基岩向溶洞窜流系数、裂缝向溶洞窜流系数、基岩弹性储容比、溶洞弹性储容比等之外,还可解释溶洞体积、溶洞与井相对位置及裂缝宽度、密度等参数的解

释,更有效评价地下缝洞储集体的物性与流动参数,图4为不同尺度溶洞测试时模拟计算的压力变化与压力倒数曲线。

针对试井测试时间短、无法预测更远处缝洞体储量问题,提出了产量数据分析(PDA)综合解释方法,基于拟稳态阶段物质平衡时间与流量重整压力关系曲线,按溶洞、孔洞、裂缝三类储集体分别预测单井控制储量,避免试井解释控制储量过小,提高了井控储量计算精度。

4 改善水驱优化技术

4.1 空间结构井网构建技术

在能量补充开发阶段,井网部署是提高储量动用率、采收率和产能的关键,井网的设计应适应储集体的发育和分布特征^[17-21]。对于强非均质碳酸盐岩油藏而言,无论哪种储集类型,其分布变化大,采用面积井网部署,会出现大量无产能井和低产能井,且储量控制程度低,因此,应改变井网设计的思路和方法。

建立了空间结构注采井网设计方法,适应了离散性与强非均质性缝洞型储集体的高效驱替,具体方法是“溶洞定油井、连通定水井、储量定井数”:处在大型溶洞上的井初步设计为采油井,裂缝、孔洞储集体上的井初步设计为注水井,结合井含水率程度次序性部署,整体上实现缝注洞采、低注高采、同层注采,最优配制注水井和采油井的注采关系(图5),提高了对剩余储量水驱控制程度,在溶洞与溶洞之间设计为换向驱油井组。实际设计中,岩溶残丘溶洞、主干断裂控制的缝洞体、主暗河段储集体优先部署采油井;根据连通情况确定注水井,构建注采关系;在设计井网、确定井位的过程中,考虑经济因素,根据单元储量规模确定注采井数。塔河油田实施空间结构井网设计技术储量控制程度提高25%,理论计算采收率可达32%。

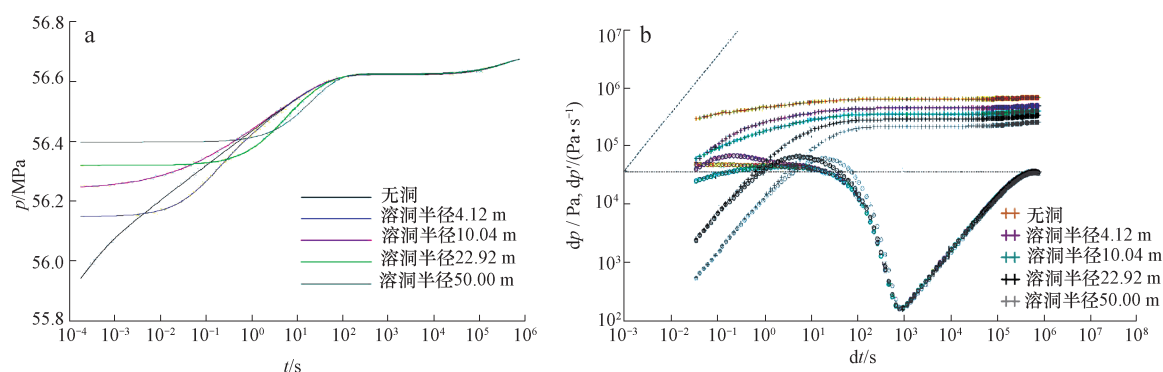


图4 渗流-自由流动耦合模型压降(a)、恢复压差(b)曲线对比

Fig. 4 The comparison of pressure drop(a) and pressure difference recovery(b) curves in seepage-free flow coupling model

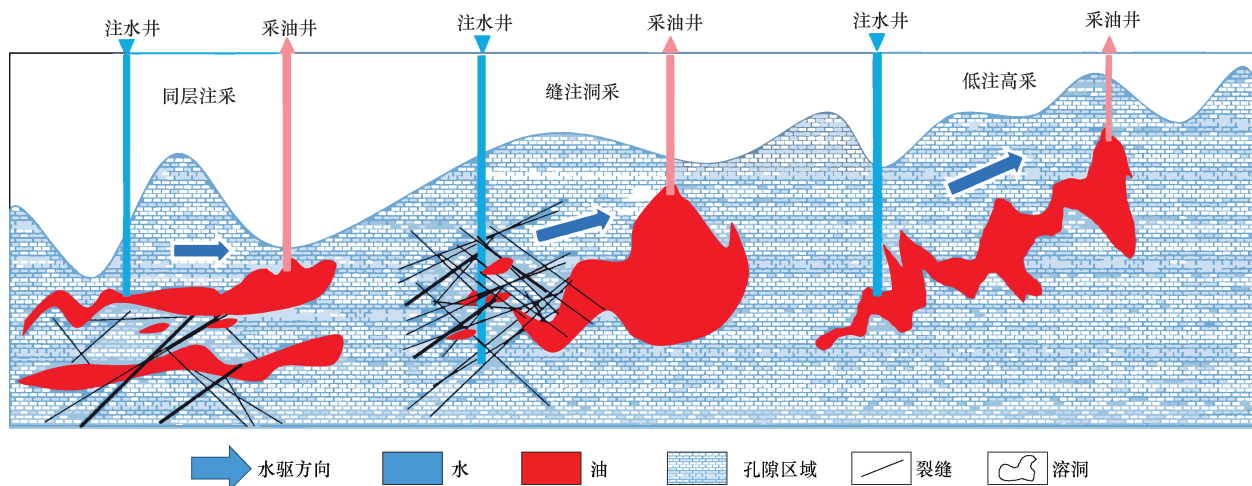


图5 空间注采结构井网示意图

Fig. 5 The schematic diagram of spatial pattern of injection-production wells

4.2 注采参数优化技术

油藏开发生产优化控制是一个最优化问题,以实现经济效益最大化为目标,通过计算机自动优化求解油水井注采参数,获取各阶段的注采调整方案,调控油水井的生产,改善开发效果。它是一种以单井为对象的矢量方案设计方法,相比于粗放的人工设计方法具有更精细高效、快速灵活的优点,面对非均质性强、井间连通关系复杂的缝洞型油藏也具有更好的适用性。

建立优化数学模型是进行优化计算和优化设计的基础,为此需要按照优化计算的要求,建立缝洞油藏优化数学模型,优化注采参数,实现效益最大化。提出了3种优化方法:一是基于确定性模型的注采参数优化方法,其是利用对数变换法,将控制变量变换到相同数量级的对数域上进行随机扰动梯度求解;二是基于不确定性模型的注采参数优化方法,其是在地质建模不确定性分析基础上,建立多个可能的地质模型,利用生产动态,剔除不符合的地质模型,最后将油水井工作制度带入所有模型,所有模型的NPV期望值最优的作为最优方案;三是基于井间连通性模型的注采参数优化方法,其是以井间连通单元为模拟对象,根据物质平衡原理、油水两相前缘推进方程等建立一种新的水驱油藏井间动态连通性模型。

3种生产优化方法中鲁棒优化方法抗风险能力最强,计算的累产油最高,且相应的累产水和累注水都是都最低,从而实现了少注水,多产油的优化控制目标。S80单元应用降水增油效果明显(图6)。优化5年注采量,优化后累增油 19.5×10^4 t,降低含水率6.6%,累产水减少 5×10^4 m³,耗水率降低40.5%。

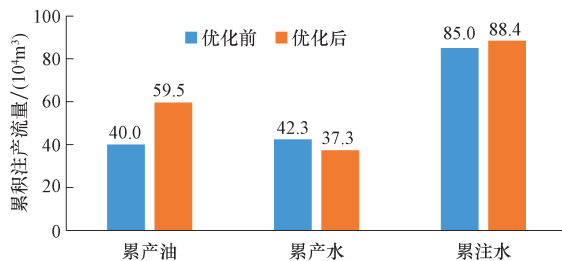


图6 S80单元注采参数优化效果对比

Fig. 6 Comparison of parameters before and after applying the flooding-production method to the structural unit S80

5 缝洞型油藏注气提高采收率技术

注气是注水后大幅度提高油藏采收率的方式,其作用机理是注入气重力分异、顶替洞顶阁楼油,补充地层能量,压制水锥,同时降低原油粘度提高流动性,一般选用注氮气,采用单井吞吐和气驱两种方式,已形成了注气井优选、注气量优化技术^[22-24]。

塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏注气始于2012年4月,TK404井开始注氮气吞吐试验,先后实施4轮次吞吐^[21],累计注氮气6 674 m³,累计采油6 344 t,提高采出程度1.23%,取得了明显的增油效果。截至2016年12月,塔河油田共实施注气井330口,覆盖储量 1.45×10^8 t,日注气量 29×10^4 m³,日产油1 534 t,年增油 43×10^4 t,累增油 137×10^4 t。其中单井注氮气累计注入量 3.5×10^8 m³,累计产油 111.3×10^4 t,提高采出程度1.6%,累计方气换油率0.96 t/m³。单元注氮气驱38个井组,累计注氮气 1.7×10^8 m³,累计增油 25.9×10^4 t,提高采出程度0.34%。

6 缝洞型油藏酸压工艺技术

塔河缝洞型油藏 70% 的井需要酸压改造投产,形成了缝洞型油藏大型酸压改造技术系列^[25-26]。针对酸压中酸岩反应速度快、酸液滤失严重、有效酸蚀缝短等难题,建立了耐温 150℃ 高粘缓蚀交联配方、生酸浓度 12.5% 的缓速自生酸配方、聚合物类就地变粘酸配方,形成了小跨度控缝高酸压和深穿透复合酸压技术^[22-23],实现缝高 40 m 可控,人工酸蚀裂缝半缝长度 145 m 以上(最高 169 m),示范区现场实施 42 井次,有效率为 97.6%,累计增油 69.4×10^4 t,有效期最长达到 1 622 d,增油效果显著。

80 m 范围内 360° 非主应力任意方向靶向酸压技术。针对径向距离 < 30 m 储集体,形成复杂缝酸压技术;距离 30 ~ 80 m、方位 0° ~ 75° 储集体,形成缝内暂堵转向酸压技术;距离 30 ~ 80 m,方位 75° ~ 90° 储集体,探索定向喷酸造缝技术。

7 认识与结论

经过不断的探索与实践,创新形成深层缝洞型碳酸盐岩油气藏提高采收率关键技术,主要包括:(1) 创建以高精度采集、绕射波分离等高精度成像为核心的地球物理描述技术,建立了基于地质知识库的岩溶缝洞体精细建模方法,提高了储集体识别和描述精度。(2) 进一步发展洞缝孔复合介质变重耦合的数值模拟方法及试井分析技术,丰富和发展了碳酸盐岩油气藏开发理论。(3) 形成空间结构井网设计、注采优化等改善注水开发技术,有效提高了储量控制程度、控制了水窜。形成了单井、多井氮气气顶驱选井与注采量优化技术,提高了采收率。(4) 进一步发展了 80 m 范围内 360° 非主应力任意方向靶向酸压技术。

但是,在碳酸盐岩油藏开发中仍然存在诸多挑战,已开发油气田采收率低、新增储量多为超深层、更加复杂的领域,如塔里木盆地顺北油田为奥陶系碳酸盐岩断裂-洞穴型油藏,平均埋藏深度超 7 300 m,受深大断裂控制作用明显,具有高压、高温与高应力的特点,储集体描述和有效开发难度更大。需要进一步加强研究,推动碳酸盐岩油气藏开发理论和技术的续发展。

参考文献

- [1] 康玉柱. 中国古生代海相成油特征[M]. 新疆科技卫生出版社, 1995.
- [2] 康玉柱. 等. 中国古生代海相油气田形成条件与分布[M]. 新疆科技卫生出版社, 2002.
- [3] Kang Yuzhu. et al. Formation conditions and distribution of paleozoic marine oil and gas fields in China[M]. Xinjiang Science and Technology Press, 2002.
- [4] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007 - 1020.
- [5] Ma Yongsheng, He Dengfa, Cai Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 34(4): 1007 - 1020.
- [6] 康玉柱. 中国古生界油气勘探成果及勘探战略思考[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 1 - 7.
- [7] Kang Yuzhu. Palaeozoic hydrocarbon exploration achievements and strategies in China[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 1 - 7.
- [8] 胡华锋, 鲍典, 马灵伟, 等. 基于高频衰减梯度的碳酸盐岩溶洞储集体规模识别方法[J]. 石油物探, 2018, 53(57): 892 - 901.
- [9] Hu Huafeng, Bao Dian, Ma Lingwei, et al. Scale characterization of carbonate karst cave reservoirs based on high-frequency attenuation gradient: A case study from karst paleochannels reservoirs in Tahe oil-field, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 53(57): 892 - 901.
- [10] 王世星, 曹辉兰, 靳文芳, 等. 碳酸盐岩缝洞系统地震响应特征分析和塔中卡 1 区缝洞储层预测[J]. 石油物探, 2005, 40(5): 421 - 427, 415.
- [11] Wang Shixing, Cao Huilan, Jin Wenfang, et al. Seismic response and prediction of fracture-cavity system in carbonate reservoir: A case study in the Ka - 1 field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 40(5): 421 - 427, 415.
- [12] 李阳, 侯加根, 李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600 - 606.
- [13] Li Yang, Hou Jiagen, Li Yongqiang. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600 - 606.
- [14] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 1 - 7.
- [15] Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science, 2012, 36(1): 1 - 7.
- [16] 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.
- [17] Hou Jiagen, Ma Xiaoliang, 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.
- [18] 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. 石油实验地质, 2007(29): 217 - 223.
- [19] Kang Yuzhu. Reservoir rock characteristics of paleozoic marine facies

[1] 康玉柱. 中国古生代海相成油特征[M]. 新疆科技卫生出版社,

- carbonate rock in the tarim basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007(29): 217–223.
- [11] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布[J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 1–11.
- Kang Yuzhu. Characteristics and distribution laws of paleokarst hydrocarbon reservoirs in palaeozoic carbonate formations in china[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 1–11.
- [12] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 115–121.
- Li Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 115–121.
- [13] 康志江, 赵艳艳, 张允, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术与应用[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 944–949.
- Kang Zhijiang, Zhao Yanyan, Zhang Yun, et al. Numerical simulation technology and its application to fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 944–949.
- [14] 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 634–640, 673.
- Kang Zhijiang, Li Jianglong, Zhang Dongli, et al. Percolation characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 634–640, 673.
- [15] 康志江. 缝洞型碳酸盐岩油藏耦合数值模拟新方法[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(5): 514–516.
- Kang Zhijiang. New method of coupling numerical simulation and application to fracture-cavern carbonate reservoir[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(5): 514–516.
- [16] Kang Z, Wu Y S, Li J, et al. editors. Modeling multiphase flow in naturally fractured vuggy petroleum reservoirs. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2006; Society of Petroleum Engineers.
- [17] 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.
- [18] 王任一. 基于生产动态数据的井间储层连通性识别方法[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 443–450.
- Wang Renyi. An approach to recognize interwell reservoir connectivity based on production data[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 443–450.
- [19] 吴忠维, 崔传智, 杨勇, 等. 高含水期大孔道渗流特征及定量描述方法[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 839–844.
- Wu Zhongwei, Cui Chuanzhi, Yang Yong, et al. Seepage characteristics and quantitative description of large pore pathways at high water cut stage[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 839–844.
- [20] 荣元帅, 刘学利, 杨敏, 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏多井缝洞单元注水开发方式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(1): 28–32.
- Rong Yuanshuai, Liu Xueli, Yang Min. A discussion on water flooding in the multi-well fractured-vuggy units of carbonate reservoirs in Tahe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 28–32.
- [21] 李江龙, 黄孝特, 张丽萍, 塔河油田4区奥陶系缝洞型油藏特征及开发对策[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 630–633.
- Li Jianglong, Huang Xiaote, Zhang Liping. Reservoir characteristics and development strategy of ordovician fractured-vuggy reservoirs in block 4 of tahe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 630–633.
- [22] 朱桂良, 孙建芳, 刘中春. 塔河油田缝洞型油藏气驱动用储量计算方法[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 436–442, 450.
- Zhu Guiliang, Sun Jianfang, Liu Zhongchun. An approach to calculate developed reserves in gas drive fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 436–442, 450.
- [23] 惠健, 刘学利, 汪洋, 等. 塔河油田缝洞型油藏单井注氮气采油机理及实践[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(1): 75–77.
- Hui Jian, Liu Xueli, Wang Yang, et al. Mechanism and practice of nitrogen injection for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoir in tahe oilfield, tarim basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(1): 75–77.
- [24] 窦之林. 论碳酸盐岩缝洞型油藏的滚动开发[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(3): 300–302.
- Dou Zhilin. On rolling development of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(3): 300–302.
- [25] 赵海洋, 林涛, 陈朝刚, 等. 塔河油田碳酸盐岩油藏重复酸压可行性研究[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(1): 113–120.
- Zhao Haiyang, Lin Tao, Chen Chaogang, et al. Feasibility study on repeated acid fracturing in carbonate reservoirs of Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling & Production Technology*, 2009, 31(1): 113–120.
- [26] 刘建坤, 蒋廷学, 周林波, 等. 碳酸盐岩储层多级交替酸压技术研究[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 45(1): 104–111.
- Liu Jiankun, Jiang Tingxue, Zhou Linbo, et al. Study on acid-refracturing feasibility in carbonate reservoirs of Tahe oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 45(1): 104–111.

(编辑 张玉银)