

缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术的认识与思考

——以塔河油田和顺北油气田为例

计秉玉,郑松青,顾浩

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206)

摘要:塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩油藏是油田开发面临的新的油藏类型,存在产量递减快、采收率低和储量动用率低等问题。剖析了中国石化塔河油田和顺北油气田缝洞型碳酸盐岩油藏地质特征及开发面临的挑战,系统总结了中国石化在缝洞型油藏描述、开发建产和提高采收率等方面的技术进展,针对塔河油田和顺北油气田的不同开发阶段,提出了下一步技术攻关建议。缝洞型碳酸盐岩油藏经过多期构造运动、岩溶作用和油气充注,储集体非均质性极强,油、气、水分布复杂,给油藏描述、地质建模、储量评价、效益建产、注水-注气、钻井工程、酸压改造、井筒举升等带来一系列挑战。经过20年的开发实践,中国石化西北油田形成了基于地球物理的体积雕刻、断裂精细解析和岩溶系统表征技术,以及基于岩溶相控的地质建模、靶向酸压和注水-注气提高采收率等技术。为实现顺北油气田高效开发,需进一步开展基于断裂解析的成藏特征研究以及基于地球物理雕刻的储集体相控地质建模、流体相态特征及高压物性、油藏组分数值模拟、油藏地质力学与数值模拟耦合、油气藏与举升一体化模拟、井位优选和钻井轨迹优化等工作。为实现塔河油田大幅提高采收率目标,需进一步开展缝洞结构描述、岩溶成因系统研究、储量动用评价、注水-注气机理及规律研究、缝洞井节点网络模拟和动态监测系统研究等工作。

关键词:油藏描述;地质建模;提高采收率;缝洞型油藏;塔河油田;顺北油气田;塔里木盆地

中图分类号:TE344

文献标识码:A

On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe oilfield and Shunbei oil and gas field

Ji Bingyu, Zheng Songqing, Gu Hao

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: The new-type fractured-vuggy carbonate reservoirs in the Tarim Basin feature rapid decline in production, low oil recovery and low producing/proved reserve ratio in oilfield development. The study discusses in-depth the geological characteristics and challenges faced in oilfield development in the fractured-vuggy carbonate reservoirs of Tahe and Shunbei oilfields, Sinopec, and systematically summarizes the technical progress Sinopec has made in reservoir characterization, oilfield development, production capacity construction and EOR. Meanwhile, suggestions on the future technology researches are put forward targeting different stages of oilfield development. The fractured-vuggy carbonate reservoirs having undergone multiple stages of tectonic movement, karstification and hydrocarbon charging are characterized by strong heterogeneity and complex oil, gas and water distribution, which bring multiple challenges to reservoir characterization, geological modeling, reserve evaluation, economic production capacity construction, water and gas injection, drilling engineering, acid fracturing, gas lifting and so on. After 20-year development practice, Sinopec Northwest oilfield has developed technologies for volume characterization, fine fault interpretation, karst system characterization based on geophysics, for geological modeling under karst facies constraint, and for targeted acid fracturing and enhancing oil recovery via water/gas injection. To achieve efficient development of Shunbei oilfield, it is necessary to study hydrocarbon accumulation characteristics based on fault analysis, facies-constrained geological modeling based on geophysical analysis, fluid phase behaviors and oil properties at high pressure, composition numerical simulation of reservoirs, coupling of reservoir geomechanics and numerical reservoir simulation, integrated

收稿日期:2022-04-01;修订日期:2022-09-16。

第一作者简介:计秉玉(1963—),男,博士,教授级高级工程师,油气田开发。E-mail: jiby.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05014)。

simulation of reservoir and gas lifting, optimization of well location and drilling trajectory, and so on. To achieve the goal of greatly improving oil recovery in Tahe oilfield, it is necessary to further carry out researches on fracture-vug architecture description, karst genetic system, producing reserve estimation, mechanism and law of water/gas injection, network simulation with fracture, vug and well as nodes, and dynamic monitoring system.

Key words: reservoir characterization, geological modeling, enhanced oil recovery (EOR), fractured-vuggy reservoir, Tahe oilfield, Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

引用格式: 计秉玉, 郑松青, 顾浩. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术的认识与思考[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1459-1465. DOI: 10. 11743/ogg20220614.

Ji Bingyu, Zheng Songqing, Gu Hao. On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe oilfield and Shunbei oil and gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1459-1465. DOI: 10. 11743/ogg20220614.

中国缝洞型碳酸盐岩油藏(缝洞型油藏)主要分布在塔里木盆地,其中塔河油田、轮古油田、哈拉哈塘油田、富满油田、顺北油气田等探明石油地质总储量已超过 20.0×10^8 t,是油气勘探开发最现实的接替领域^[1-2]。缝洞型油藏地质和开发特征与孔隙型碳酸盐岩油藏、碎屑岩油藏明显不同,国内外没有成熟的开发理论可供借鉴^[3-5]。中国石化西北油田通过不断探索实践,形成了缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术系列^[6-11],支撑了塔河油田和顺北油气田的上产与稳产,建成了年产 700×10^4 t 规模的大油田,但仍存在油藏地质认识深度不够、产量递减快(年递减率 $>15\%$)、采收率低(约 15%)、已探明未动用储量大($>4.3 \times 10^8$ t)等问题,开发模式有待于进一步总结提升。本文以塔河油田和顺北油气田为研究背景,分析了缝洞型油藏地质特征以及开发面临的挑战,梳理了成功的经验与做法,并对未来发展方向进行了讨论。

1 缝洞型油藏地质特征与开发挑战

中国石化西北油田已开发的碳酸盐岩油藏主要分布在塔河油田东部的裸露剥蚀区、塔河油田西部的浅埋区以及顺北油气田深埋区,由北向南埋深从 5 300 m

至 8 700 m 逐渐增加,地层压力从 54 MPa 至 88 MPa 逐渐增大、温度从 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐升高,属于典型的超深、高温、高压的缝洞型油气藏^[12-13]。经过多期的构造运动、岩溶作用和油气充注,地质条件异常复杂,给油藏描述、产建与开发、钻采工程工艺等带来诸多挑战。

1.1 油藏描述面临的挑战

1.1.1 缝洞储集体发育规律不明

塔河油田与顺北油气田分别以岩溶洞穴和走滑断裂伴生缝、洞作为主要储集空间,以断裂-裂缝作为主要输导通道,优质储集体的发育具有极强的非均质性,并非传统的“层状”储层。在岩溶系统或断裂带内部,孤立洞与连通洞并存,大洞与小洞并存,缝生洞、缝连洞,形成了极其复杂的缝-洞网络系统,呈现出不规则“层状”或“立体式”复杂储集体(图1)。有效缝洞储集体的空间分布规律尚未明确,地球物理描述技术精度受限,溶洞、断裂带以及裂缝的精细描述和表征难度较大。

1.1.2 油、气、水分布复杂

油气藏经过多期油气充注、多次破坏与改造,决定了其油气水分布异常复杂,原油性质差异大。塔河油

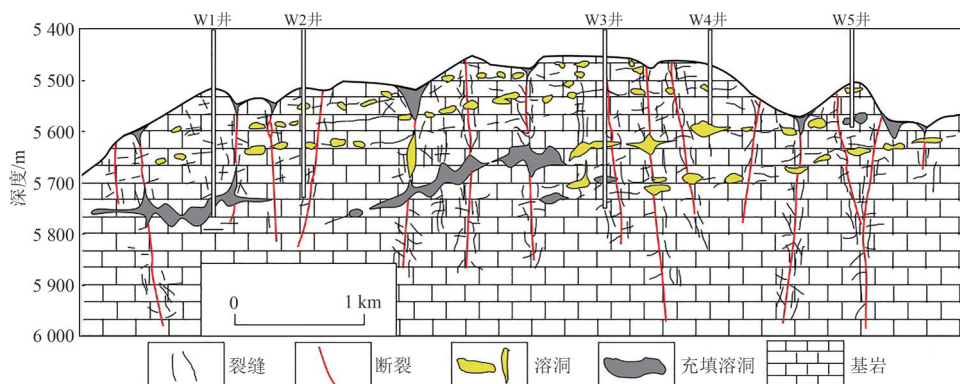


图1 塔河油田6区连井剖面

Fig. 1 Cross-well section in zone 6 of Tahe Oilfield

田奥陶系原油自北向南具有重质油—中质油—轻质油的分布特点,地面原油密度在 $0.81 \sim 0.98 \text{ g/cm}^3$;跃进油田与顺北一区为轻质油和弱挥发油,地面原油密度在 $0.78 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$;顺北二、三区为凝析气藏。含油气缝洞与含水缝洞并存,地球物理方法与地质方法识别流体难度大,天然水体分布特征与水体能量不清楚。

1.1.3 传统地质建模技术适应性差

基于现有地质统计规律的传统地质建模技术难以适应缝洞型油藏的强非均质性。缝洞边界与内幕结构,孔隙度、渗透率等关键物性参数严重依赖地球物理手段确定,地质储量准确计算难度大,不能为油藏数值模拟提供可靠的地质模型。

1.2 产建与开发面临的挑战

1.2.1 塔河油田未动用储量评价难度大

塔河油田已探明未动用储量超过 $4.3 \times 10^8 \text{ t}$,主要分布在小缝洞发育区、次级断裂区、特稠油区和盐下油水分布复杂区,储集体发育地质模式尚未建立,油藏描述与评价技术不过关,井位部署与经济有效动用技术不明朗。

1.2.2 顺北油气田规模建产、稳产难度大

顺北油气田尤其是顺北二、三区建产步伐快,挥发性油藏和凝析气藏并存,流体相态、油气水分布、储量及产能等需进一步研究落实,与流体组成、相态变化相关的油气藏开发方法尚未明确,开发方案不确定性很大。此外,顺北一区因天然能量不足,产量递减快(年自然递减率高达30%),补充能量开发技术政策尚不完善,规模建产稳产难度大。

1.2.3 塔河油田进一步大幅提高采收率难度大

塔河油田注水、注气虽见到一定效果,但储集空间复杂,流体流态复杂,油气水运动规律不清,剩余油分布难以准确表征,提高采收率机理与相关的技术政策需要深入研究。目前,塔河油田注水开发平均提高采收率3.10%,注气开发平均提高采收率2.67%,注水、注气后进一步提高采收率技术储备不足,距大幅度提高采收率的要求仍有较大差距。

1.3 钻采工程工艺面临的挑战

1.3.1 井位优选和轨迹优化面临的挑战

高成本要求更高的单井最终累积产量(EUR)和更

高的稀井高产目标。在油价40 \$/bbl的条件下,塔河油田西部地区单井累产需达到 $6 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4 \text{ t}$,单井控制地质储量需达到 $50 \times 10^4 \text{ t}$;顺北气油田单井累产需达到 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 以上(侧钻井累产为 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ t}$),给井位优选和轨迹优化提出了极高要求。

1.3.2 顺北钻井工艺面临的挑战

窄泥浆密度窗口与长裸眼钻井对工艺要求极高。二叠系易井漏,存在垮塌、卡钻风险;志留系存在断裂,井漏、出盐水同存,堵漏难度极大;中—下奥陶统硬脆性地层垮塌,影响安全成井;小井眼定向钻井效率低,频繁起下钻;古生界软—硬交错,钻速慢,储集体埋藏深,平均完钻深度超过8 000 m,导致顺北油气田钻井周期长(平均为240 d)、成本高。

1.3.3 井筒举升面临的挑战

塔北原油在井筒举升过程中随着温度和压力降低,粘度加大,流动性变差,目前主要通过掺入稀油举升到地面,严重影响经济效益。同时流体中富含 H_2S 和 CO_2 等腐蚀性气体,流动性保障存在严重问题。

1.3.4 酸压建产面临的挑战

由于缝洞预测与钻井施工难度大,塔河油田近3年溶洞钻遇率(直接放空)只有49%,顺北一区虽已达80%,但漏失量差异巨大,放空厚度小于5 m的井数约占38%,必须通过酸压技术沟通形成有效通道才能实现储量动用,对地应力描述、酸液性能和泵压能力等方面提出了更高的要求。

上述油藏地质特点与开发挑战制约了塔河油田与顺北油气田的高效开发,需要发展针对性的油气藏开发技术。

2 主要开发技术进展

塔河与顺北缝洞型油气藏独特的地质条件,国内外少有经验可供借鉴。20多年来,中国石化西北油田不断探索和攻关,形成了一系列特色技术,支撑了 $700 \times 10^4 \text{ t}$ 原油产量的长期稳定。

2.1 油藏描述技术

缝洞型油藏的特殊性决定了开发地质研究的新内涵,储集空间由各级次断层、裂缝与岩溶作用后生改造形成,“层状”储层概念拓展到“不规则层状”或“不规则立体”储集体,缝洞单元成为开发基本对象,储层构造

地质学、油藏地质力学和岩溶地质学成为油藏描述的主流学科,与钻井放空漏失信息、酸压施工信息、测试信息相结合的地球物理技术及生产动态分析技术成为油藏描述的主要手段。

2.1.1 基于地球物理的体积雕刻

基于缝洞型油藏地质特征,运用物理模拟实验和数值模拟相结合的手段深入认识不同类型缝洞储集体的“串珠”“杂乱”等反射特征,广泛应用逆时偏移(RTM)成像技术,探索绕射波成像技术,实现储集体的辨识与定位^[14-16],在此基础上形成了缝洞储集体地球物理雕刻技术:一是以波阻抗、振幅能量等属性(尤其是结构张量)描述溶洞形态、规模和空间展布;二是以相干+AFE(自动断层提取)+likelihood(裂缝发育概率)等属性描述断裂及裂缝发育特征;三是实现缝洞关联与配置关系、地质模型的立体表征;四是测井结合地球物理正演,建立孔隙度与波阻抗的关系,进而由地球物理信息确定孔隙度。同时运用试井分析等动态方法校正雕刻体,与传统容积法计算储量相比取得了实质性进步,精度大幅度提高。

2.1.2 走滑断裂解析与控储控藏能力评价

顺北油气田和塔河油田托甫台区块岩溶作用较弱,走滑断裂体控储控藏成为评价与开发主要研究对象,目前基于断裂几何学、运动学和动力学形成了走滑断裂三维解析方法。走滑断裂控储控藏能力评价可以简单归纳为3个步骤:①沿断裂带走向分段;②断裂横向分带(核带结构);③纵向上依据断裂连接与沟通方式,以及通源情况分类。上述开发-地质一体化研究为富油气目标评价、井位优选和井轨迹优化提供了依据。

2.1.3 裸露区岩溶地质描述

提出缝洞单元的概念,将缝洞单元作为油田开发管理的基本单元,形成了古地貌、古水文、古构造分析方法,以及与岩溶分析相结合的风化壳岩溶模式和描述方法。近年来,进一步提出岩溶系统概念,探索了从

表层型岩溶成因到暗河型岩溶成因的整体性认识。

2.1.4 三维地质建模

以野外露头、密井网解剖为基础,建立了包括表层、古暗河、断控3类岩溶储集体的地质知识库,初步形成了基于不同成因储集体地质模式和发育规律的岩溶相控统计分类建模方法(图2)。

针对表层岩溶储集体中的小尺度溶洞和孔洞,采用岩溶相控和地震属性约束的协同序贯指示模拟方法进行模拟,而小尺度裂缝网络的模拟则采用井-震结合的随机模拟方法;针对古暗河岩溶储集体,基于知识库确定古河道几何形态参数,制作三维训练图像,采用多点地质统计学方法模拟古暗河发育形态及结构模式;针对断控岩溶储集体,利用分区带目标模拟方法构建训练图像,在地震预测信息和储集体到断层距离的约束下,采用多点地质统计学方法建模^[17-20]。

2.1.5 缝洞型油藏试井分析

试井技术在缝洞型油藏动态描述中的应用主要有两个方面:一是利用传统试井分析软件分析压力恢复曲线。由于软件中试井模型与缝洞型储集体在几何形态与渗流条件等方面差别较大,只能做一些定性分析,如溶洞之间的沟通情况等;二是建立离散缝洞试井模型,对缝与洞的连通与展布方式作出假设,求解压力恢复曲线并与实测曲线拟合,分析油藏特征。由于模型存在多解性,目前研究仍停留在沟通溶洞存在性的判别上。此外,在脉冲试井、示踪剂试井和生产数据分析(PDA)技术等方面也取得了较大进展,对深化缝洞型油藏的认识起到了一定作用。

2.2 开发建产关键技术

2.2.1 井位优选与轨迹优化

塔河油田主体区以缝洞单元作为开发的基本单元,而顺北油气田以断裂单元(几何分段)作为开发的基本单元。由于单井投资大,必须实现稀井高产,钻井

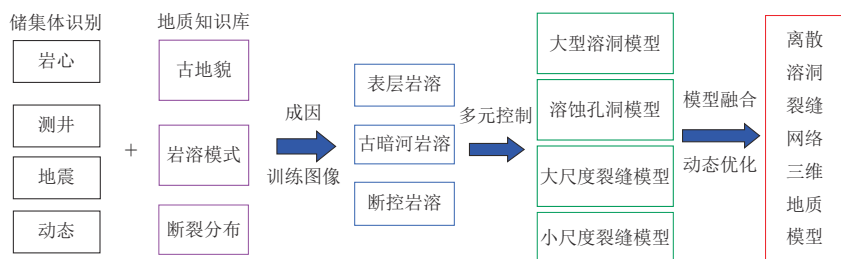


图2 缝洞型油藏三维地质建模技术流程

Fig. 2 Work flow showing the three-dimensional geological modeling technology for fractured-vuggy reservoirs

目标必须优选为大溶洞或多个溶洞群,并通过一井多洞、一井多靶、轨迹优化实现单井控制储量目标。

2.2.2 酸压改造沟通

酸压改造沟通是缝洞型油藏开发的关键技术:①引进了高压井口与高压压裂机组;②研制了不同速率缓蚀酸;③水平井分段压裂多靶点沟通技术取得了进展;④探索了转向压裂技术。酸压技术已经成为增加单井控制储量的有效手段。

2.3 提高采收率技术

塔河老区提高采收率技术可以概括为以下几个方面:①针对未井控的溶洞打新井或侧钻^[21],增加井控储量;②通过生产工作参数优化,控制底水上升速度;③单井注水替油和多井注水驱油,补充储集体能量^[22-25];④注水井分级注入颗粒调控流道和生产井人工隔板堵底水技术^[26];⑤针对洞顶剩余油的注 N_2 重力驱技术^[27-28]。

3 关于开发技术发展的几点思考

顺北油气田和塔河油田开发阶段不同,面临的主要矛盾不同,下一步的开发技术发展重点也不同。

3.1 顺北油气田开发技术

顺北油气田2016年发现并投入开发,处于开发初期阶段,主要采取滚动勘探开发模式建产。目前,顺北一区处于补充能量开发阶段,二区处于建产阶段,三区处于评价阶段。为实现储量的不断动用和高效开发,保证产量不断上升,下一步需在以下方面开展技术攻关。

1) 基于断裂解析的成藏特征研究。顺北断控岩溶油藏的地质开发特点与难点决定了油藏评价与开发设计工作应持续深化成藏特征研究,重点突出断裂输导体系、储集体与生油源配置关系、储集体内部结构模式、油气富集影响因素以及油气水分布特征研究。

2) 基于地球物理雕刻的储集体相控地质建模技术。依据地质模式建立定性模型,以此模型为基础进行地球物理正演、试井正演和生产动态正演,通过拟合实现反演,建立更加符合油藏实际的地质模型。

3) 不同缝洞类型油藏岩石物理与孔隙度、渗透率、含油饱和度等物性参数研究。根据油藏地质特点和开发需要,突出岩石力学研究,优化测井系列。此外,压缩系数在动态地质储量计算和生产工作制度制定方面起着关键作用,应该通过动态分析方法加深认识。

4) 流体相态特征、高压物性与油藏组分数值模拟

研究。顺北一区为易挥发油藏,4号带是凝析气藏,高压物性和相态特征复杂,需要在相态特征及组分数值模拟研究基础上,认识开发指标变化规律,明确补充能量机理与方法,为合理制定挥发油藏和凝析气藏的开发技术政策奠定基础。

5) 油藏地质力学与数值模拟耦合技术。顺北断控油气藏裂缝发育,导流能力受应力影响较大,流体流动受到流场、应力场等多种因素控制,下一步可考虑以Petrel(Visage模块)与Eclipse为基础搭建流程和方法,深入认识生产过程中的裂缝导流能力变化特征。

6) 井位优选与钻井轨迹优化技术。以油藏描述为依据、储量评价为基础、效益评价(不同平衡油价下的可采储量)为目标优选目标体,形成方法、流程以及信息平台,探索地质力学特征在井轨迹优化方面的作用。

7) 不同缝洞类型油藏地质储量与采收率评价。目前,顺北1号带探明石油地质储量与生产动态反映出的地质储量差异较大,需要进一步完善断控油藏储量计算方法,评估动用储量大小和采收率,为下一步开发技术对策的制定提供依据。

8) 油气藏与举升一体化数学模型研究。顺北油气田埋藏深,垂直管流段相态变化大,要统一产能方程、物质平衡方程与产量递减方程,加强油藏-井筒-地面一体化数值模拟研究(可以考虑IPM数值模拟软件),实现生产工作制度优化。

3.2 塔河老区提高采收率技术

塔河油田1997年发现并投入开发,经历了天然能量开发、注水开发、注气开发阶段,目前处于提高采收率阶段。下一步工作重点是开展精细油藏描述,深化开发调整和提高采收率、控制递减率。据此,需开展以下几个方面的研究工作。

1) 缝洞结构研究。多井静态、动态结合的缝洞地质特征再认识,绘制缝洞型油藏地质表征图件,体现洞间连通性和缝洞内幕结构,以及与小尺度缝洞的关系。

2) 岩溶成因系统认识。古地貌、古水系、古构造等学科相结合,对岩溶系统建造与改造过程开展研究,对整个岩溶系统取得系统认识,建立基于岩溶系统的储集体发育模式。

3) 基于地震雕刻体的建模-数模一体化技术。静、动结合,深入识别钻遇洞、缝连洞、二线洞、孤立洞,以及裂缝之间的连通情况。以地震雕刻体模型为基础,开展建模-数模一体化研究。通过快速建模、快速数模、迭代修正,深化油藏和剩余油认识,同时提升缝洞雕刻精度。

4) 储量动用状况评价技术。评价动用程度差或

未动用洞以及大洞内部动用差的部位,预测新井EUR,优化加密、扩边井位。

5) 深化注水、注气机理与油水运动规律研究。在认识缝洞结构的基础上,以数值模拟为主要技术手段,分析渗流速度场、压力场和饱和度场,以及油藏特征、井位及注入介质、工作制度对其影响,从宏观层面深入认识注水、注气提高采收率机理。

6) 缝-洞-井空间网络模型研究。不同于以网格为基础的传统数值模拟,以地震雕刻成果为基础,直接建立缝-洞-井空间网络模型,表征缝-洞-井连通关系,通过常微分方程组联立求解预测油藏生产动态和开展压力恢复曲线分析,能较好地反映缝洞型油藏流动特征,是油藏数值模拟的重要补充和油藏工程研究的一种新途径。

7) 开发效果评价及指标变化规律研究。不同于传统的孔隙型油藏,缝洞型油藏中很多井会因出现注水后暴性水淹(占比50%左右)而关井,导致含水结构与油藏废弃含水界限发生重大变化,因而其开发指标变化规律和采收率评价方法需深入研究。

8) 数据(大数据)分析技术。塔河油田缝洞型油藏地质条件复杂,以地质建模和数模为核心的模型驱动研究存在较大困难,但塔河油田经20多年开发生产,积累了大量的动、静态及生产措施资料,可以运用大数据分析手段,洞察一些新的规律,对加深油藏认识和做好下一步开发调整提供依据。

9) 监测系统优化研究。油田开发是一个闭环系统,缝洞型油藏复杂性高,地质表征难度大,不确定性强,更需要生产过程中的针对性测试。针对性部署监测系统,发展监测技术,及时加深油藏认识和实施有效调整,对塔河油田进一步提高采收率和顺北油气田的科学、高效开发具有重要意义。

4 结论和建议

塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩油藏经历多期构造运动、岩溶改造和油气充注,储集体地质特征和流体分布十分复杂,给高效开发带来了很大挑战。为实现缝洞型油藏高效开发,在油藏描述方面,需针对缝洞型油藏地质特点,发展以地质模式为指导,地球物理与动态模型相结合的一体化表征技术,先定性后定量、先模式后模型,同时加强针对性的油藏动态监测;在注水、注气开发方面,需加强油水、油气运动规律研究,加强挥发性、凝析气藏相态和多组分油藏数值模拟研究,为制定开发技术政策和提高采收率提供科学依据;同时,探索基于地震雕刻体的缝-洞-井空间网络模型的油藏工

程新方法,在此基础上开展压力恢复曲线、生产动态、洞间连通性、压缩系数分析以及相关技术政策研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
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, 33(4): 1007-1020.
- [2] 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.
- [3] 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 Petrologica Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [4] 李阳,康志江,薛兆杰,等. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 669-678.
Li Yang, Kang Zhijiang, Xue Zhaojie, et al. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669-678.
- [5] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43-53.
Hu Wenge. Paleokarst fracture-vug types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53.
- [6] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 1-10.
Hu Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 1-10.
- [7] 康志江,李阳,计秉玉,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 434-441.
Kang Zhijiang, Li Yang, Ji Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434-441.
- [8] Ning Fei, Yun Jinbiao, Zhang Zhongpei, et al. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of Central Uplift Belt in the Tarim Basin [J]. Energy Geoscience, 2022, 3(1): 63-72.
- [9] 张娟,杨敏,谢润成,等. 塔里木盆地塔河油田4区和6区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 219-228.
Zhang Juan, Yang Min, Xie Runcheng, et al. Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4-6, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 219-228.
- [10] 吕心瑞,孙建芳,郭兴威,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.

- Lyu 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.
- [11] 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, Zhagn 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.
- [12] Li Y. Development Theories and methods of fracture-vug carbonate reservoirs[M]. London: Academic Press, 2017.
- [13] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101-106.
- Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [14] 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.
- [15] 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.
- 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] 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, 44(5): 421-427.
- 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, 44(5): 421-427.
- [17] Wang S, Guan L, Zhu H. Prediction of fracture-cavity system in carbonate reservoir: A case study in the Tahe Oilfield [J]. Applied Geophysics, 2004, 1(1): 56-62, 66.
- [18] 鲁新便, 赵敏, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维建模方法技术研究——以塔河奥陶系缝洞型油藏为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 193-198.
- Lu Xinbian, Zhao Min, Hu Xiangyang, et al. Studies of 3D reservoir modeling: Taking Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield as an example [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2): 193-198.
- [19] 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.
- [20] 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]. 地质学前沿, 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.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 路飞飞, 李斐, 胡广强, 等. 塔河油田碳酸盐岩侧钻小井眼钻完井技术[J]. 石油机械, 2017, 45(9): 37-41.
- Lu Feifei, Li Fei, Hu Guangqiang, et al. Drilling and completion technology for sidetracked slim hole in carbonate reservoir in Tahe Oilfield [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(9): 37-41.
- [23] 鲁新便, 荣元帅, 李小波, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏注采井网构建及开发意义——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 658-664.
- Lu Xinbian, Rong Yuanshuai, Li Xiaobo, et al. Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe Oilfield in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 658-664.
- [24] 荣元帅, 黄咏梅, 刘学利, 等. 塔河油田缝洞型油藏单井注水替油技术研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4): 57-60.
- Rong Yuanshuai, Huang Yongmei, Liu Xueli, et al. Single well water injection production in Tahe fracture-vuggy reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4): 57-60.
- [25] 荣元帅, 李新华, 刘学利, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏多井缝洞单元注水开发模式[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 58-62.
- Rong Yuanshuai, Li Xinhua, Liu Xueli, et al. Discussion about pattern of water flooding development in multi-well fracture-cavity units of carbonate fracture-cavity reservoir in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 58-62.
- [26] 吴文明, 秦飞, 欧阳冬, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏堵水技术[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 104-107.
- Wu Wenming, Qin Fei, Ouyang Dong, et al. Study on water plugging technology in fractured-cavity carbonate reservoirs, Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2013, 20(6): 104-107.
- [27] 黄江涛, 周洪涛, 张莹, 等. 塔河油田单井注氮气采油技术现场应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 103-105.
- Huang Jiangtao, Zhou Hongtao, Zhang Ying, et al. Field application of oil recovery technique by nitrogen injection in single-well in Tahe Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 103-105.
- [28] 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.