

中国碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率研究进展

戴彩丽^{1,2}, 方吉超^{1,2}, 焦保雷³, 何 龙³, 何晓庆³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580; 3. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:围绕中国碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率难题, 阐述缝洞型油藏储集体描述、物理模拟方法、剩余油分布及提高采收率方法 4 个方面的研究进展, 探讨并展望未来缝洞型油藏提高采收率技术的关键与发展方向。缝洞储集体精细描述是提高采收率技术的研究基础, 也是实现相似性物理模拟的依据; 缝洞型油藏剩余油主要分布在构造高部位和连通屏蔽区, 目前提高采收率的方法主要为注气顶替高部位原油, 措施较为单一; 未来中国碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率研究的发展在于储集体勘探与三维模拟相结合的精细地质描述和实现缝洞型油藏均衡驱替两个方面, 等密度流体和流道调整技术是两个潜力研究方向。

关键词:缝洞型油藏; 提高采收率方法; 储集体描述; 物理模拟; 剩余油分布; 流道调整

中图分类号:TE 344 **文献标志码:**A

引用格式:戴彩丽, 方吉超, 焦保雷, 等. 中国碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率研究进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 67-78.

DAI Caili, FANG Jichao, JIAO Baolei, et al. Development of the research on EOR for carbonate fractured-vuggy reservoirs in China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(2): 67-78.

Development of the research on EOR for carbonate fractured-vuggy reservoirs in China

DAI Caili^{1,2}, FANG Jichao^{1,2}, JIAO Baolei³, HE Long³, HE Xiaoqing³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

3. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC Northwest Branch Company Technology, Urumqi 830011, China)

Abstract: Around the key problems of enhanced oil recovery (EOR) for carbonate fractured-vuggy reservoirs in China, this paper summarizes the research progress of four aspects of reservoir description, physical simulation, distribution of residual oil and EOR method, discusses and prospects the development of EOR technology for carbonate fractured-vuggy reservoirs in the future. The fine description of fractured-vuggy reservoir is the research basis of the EOR method, which is also the fundamental of the similarity physical simulation. The residual oil of fractured-vuggy reservoir is mainly distributed in the high part of the reservoir structure and the shielding area of the poor connectivity among fractured-vuggy reservoir structure. Currently the method of EOR is relatively simple, which mainly relies on gas injection to replace the crude oil at high position of reservoir structure. In the future, the development of EOR method for carbonate fractured-vuggy reservoir in China lies in the 2 aspects of the fine geological description, which is combined with reservoir exploration and 3D simulation, and the realization of equilibrium displacement in fractured-vuggy reservoir. The equidensity liquid and channel flow control technology are the two potential research directions.

收稿日期: 2018-04-01

基金项目: 十三五国家油气重大专项(2016ZX05014005-008); 国家杰出青年科学基金项目(51425406); 长江学者奖励计划(T2014152); 中国石油大学研究生创新基金项目(YCX2017025)

作者简介: 戴彩丽(1971-), 女, 教授, 博士, 长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 新世纪百千万人才工程国家级人选, 研究方向为油气田提高采收率。E-mail: daicl@upc.edu.cn。

Keywords: fractured-vuggy reservoir; EOR method; reservoir body description; physical simulation method; residual oil distribution; channel flow control

碳酸盐岩油藏约占世界石油储量的52%、全球油气总产量的60%,油藏物性较好,以裂缝型油藏为主,油田产量高,是世界重要的石油增储上产领域之一^[1-2]。中国西部碳酸盐岩油藏储量丰富,约占探明储量的2/3,但油藏条件极为苛刻,具有世界唯一性,大型溶洞-裂缝错综复杂发育,水驱采收率极低^[3-4]。以中国典型碳酸盐岩缝洞型油藏塔河油田奥陶系缝洞油藏为例^[5-6],其水驱采收率仅为14.9%,剩余油丰富,亟待提高缝洞型油藏原油采收率。碳酸盐岩缝洞型油藏储集体异于砂岩油藏,多为溶洞-裂缝复杂组合体,尺度复杂多变,以溶洞和大型裂缝为主,溶洞规模较大且连通形式多样,空间展布复杂,非均质性极强^[7-8]。另外中国碳酸盐岩缝洞型油藏埋藏较深,地层条件极为苛刻,如塔河缝洞型油藏埋藏超深(井深大于5 000 m),超高温高压(温度高于125 ℃,压力大于60 MPa),给缝洞型油藏提高采收率带来巨大的困难。笔者围中国绕缝洞型油藏提高采收率技术相关难题,结合油田实际,阐述缝洞型油藏储集体描述、物理模拟手段、剩余油分布及提高采收率方法等4个方面在缝洞型油藏提高采收率技术中的研究进展,探讨未来中国缝洞型油藏提高采收率技术研究的关键和发展方向。

1 缝洞型油藏储集体描述

缝洞型油藏储集体精细描述是实现提高采收率研究的关键。缝洞型油藏储集体异于常规砂岩油藏,由不同尺度的溶洞和裂缝组合而成,它的缝洞尺寸级别从几微米/几十微米到几米/几十米不同,尺寸跨度巨大,难以精确描述各部分的形态。另外缝洞型油藏没有层的概念,缝洞连通错综复杂,无法借鉴砂岩油藏分层描述方法,给缝洞型油藏储集体的精确描述带来困难。目前地震反演和钻井勘探是描述缝洞型油藏储集体形态的主要方法,已实现对直径超过5 m洞穴的识别^[9-12],对于0.5~5 m的洞穴也可通过对数据的精细化处理进行识别,对于更小尺寸的缝洞极难识别^[13-14],而小型缝洞的发育远远多于大型洞穴^[15-16],且往往存在多层、网状缝洞系统^[17],无法精确刻画储集体的内部结构、连通性及连通关系^[18-19],直接影响缝洞型油藏储层勘探与开发。

为实现对缝洞型油藏储集体的精确描述,国内

地质专家和油藏工程专家做了大量的工作,从地质构造和油藏工程两方面对储集体发育规律及缝洞分布特征进行详细描述,划分了多种储集体类型,指导缝洞型油藏开发。

1.1 以洞、缝、孔为基础的构造关系

碳酸盐岩缝洞型油藏储集体区别于砂岩油藏最主要特征在于没有可循环重复的特征单元向三维方向复制扩展,而是以洞、缝、孔为基本单元构成的不规则组合体,这也造成了缝洞型油藏局部构造的唯一性,无法通过室内小范围岩心实验向地层大范围构造变化进行推测,给地质认识和室内实验带来了巨大困难。从地质学角度,缝洞型油藏储集体最基本的构成是洞、缝、孔,溶洞按尺寸可分为小洞和大洞,尺寸从毫米级至米级分布广泛;裂缝尺寸介于几微米至几十微米,主要包括压溶缝、收缩缝及构造缝等;孔尺寸介于几微米至几百微米,主要包括基质溶孔、晶间孔、粒内孔、砾间孔及砾内孔等^[20-21]。在成藏过程中,洞、缝、孔是缝洞型油藏主要的油气储集空间^[22]。裂缝既是油气储集空间也是连接孔洞的主要沟通通道^[23-25],以高角度垂向发育为主,形成了大量复杂裂缝和断裂系统,连通性较好。碳酸盐岩基质基本不存在储渗能力,对油藏流体流动具有渗流屏障作用,也是油气理想的圈闭保护屏障^[26]。储集空间存在相对的位置关系,难以形成连续规则的储集体,一般按相对位置关系可分为6类,分别为广义基质、孤立裂缝网络、孤立溶洞、裂缝网络系统、裂缝-溶洞系统和溶洞系统^[27]。多种复杂的缝洞储集体类型组合形成了碳酸盐岩缝洞型油藏。在油藏尺度上,特别是在岩溶作用比较完整的缝洞型油藏一般可以按一定规律进行分区。许多专家学者对塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构进行了精细研究,认为径流带地下河系统是重要油气聚集场所,提出了表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带^[28-30],如图1所示。表层岩溶带以沉积物或角砾岩充填地表河和落水洞发育为主,砾间孔隙和裂缝为主要储存空间。渗流岩溶带高角度裂缝和充填驻水洞大量发育,也是沟通表层岩溶带和径流岩溶带重要通道。径流岩溶带发育大型溶洞和缝洞组合体,储集空间大,高产井一般与缝洞型油藏径流岩溶带直接相通。

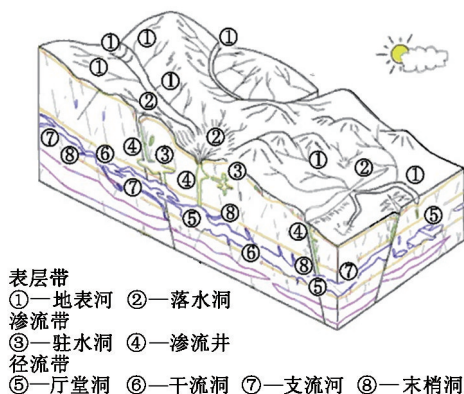


图1 塔河油田岩溶带及其缝洞发育结构模式^[28]

Fig.1 Karst zone and fracture-cavity construction model in Tahe Oilfield

1.2 缝洞型油藏储集体的储运特征

以洞、缝、孔为基础的地质构造使得缝洞型油藏的储集体形态与油藏流体流动不同于砂岩油藏多孔介质储运特征。油藏成藏的不连续性和运移空间尺度效应是碳酸盐岩缝洞型油藏最主要特征,原油主要富集在大型溶洞及与之相连的裂缝带,基质具有极强的屏蔽作用,而作为连通通道的裂缝尺寸远大于多孔介质孔隙尺寸。这造成了缝洞型油藏储运特征的复杂性,同时存在管流特征和渗流特征,大型缝洞体内流态为典型的管流,微小孔缝内流态则表现出渗流特征。以塔河典型油藏奥陶系缝洞型油藏为例,从储集体的发育特征角度,李阳等^[19]认为地下河系统和岩溶洞穴系统原油储量最为丰富,贡献了塔河油田95%以上的产能。不同尺寸的裂缝沟通溶洞储存空间,形成了复杂缝洞网络,使得流体流动既存在多孔渗流也存在宏观尺寸流动特点。李宗宇等^[31-33]研究发现缝洞型油藏中发育大量的微裂缝和微小孔洞,其综合尺度按油层物理和油藏工程理论属于渗流范围,但是实际生产中也存在一定的宏观水动力学特点,如漩涡、回流、虹吸等现象。王殿生等^[34]将复杂的缝洞储运关系概括为两种最基本的类型,分别为裂缝-孔隙型(裂缝型)和裂缝-溶洞型(缝洞型)。结合生产实践发现,缝洞型油藏的开采特征有着明显的区域化,不同区域内的温压系统有所不同,同一区域的温压系统一致,表明缝洞型油藏不同区域的连通性较差,而同一区域的连通性较好。陈志海等^[35]从油藏成藏及油藏连通性角度提出了“缝洞单元”的基本概念,并阐述了缝洞单元的划分方法及原则,每个缝洞单元内具有统一的压力系统及相似的流体性质,是一个相对独立的油气开采基本单位。结合储集体类型与含油气状态,康志

江等^[36]将缝洞型油藏划分5种类型,分别为溶洞为主的低饱和缝洞型油藏、缝洞为主的低饱和缝洞型油藏、缝孔为主的低饱和缝洞型油藏、具气顶的过饱和缝洞型油藏和稠油缝洞型油藏。

基于地质构造与油藏工程研究,缝洞型油藏的储集体描述从最基本的洞、缝、孔构成到多种复杂缝洞组合体,再到油藏尺度的储层岩溶带划分,多角度多层次对缝洞型油藏的基本特征进行综述,指出了缝洞型油藏以大型溶洞和裂缝为主要储集空间,裂缝作为主要的连通通道,存在复杂流体运移行为,包括微观渗透和宏观水动力学特点。结合缝洞型油藏连通性提出了“缝洞单元”概念,这为后期缝洞型油藏研究提供了基础。但缝洞型油藏储体描述多以定性描述为主,精细化程度较差,这给室内提高采收率模拟实验带来巨大困难,难以揭示缝洞油藏条件下的措施作用机制。

2 缝洞型油藏提高采收率物理模拟方法

室内物理模拟技术是油藏开采特征描述的重要方法之一,也是最为重要的提高采收率研究手段之一。提高缝洞型油藏采收率方法研究的物理模拟技术旨在再现缝洞型油藏地下开采特征,明确剩余油分布规律,指导提高采收率研究方向,揭示措施方法的作用机制。随着缝洞型油藏地质认识及多相流体流动规律研究的不断深入,缝洞型油藏储集体从地质构造和油藏工程多角度多层次进行了深度刻画,然而室内物理模拟仅能根据研究需要从某一方面简单描述缝洞型油藏的流体流动规律,始终无法利用室内小岩心充分模拟缝洞型油藏的储运特征。缝洞型油藏室内物理模拟技术经历了从简单的二维特征模拟到复杂三维模拟、从单井缝洞模拟到缝洞单元模拟的发展^[37-38],模拟手段与数据处理方法也从简单的图像识别、直观观察分析剩余油分布状态,到目前实验分析与流体力学模拟相结合的方法进行尝试,实现了从模拟形状相似、流体流动状态相似及地层条件相似等多重吻合模拟,使得室内物理模拟与地层实际相似程度越来越高。

为了得到缝洞型油藏某平面的开采特征,许多学者早期根据地质条件建立了能在一定程度上反映储层平面的简单二维模型,旨在为作者的观点进行验证,多以理想可视化模型为主,难以扩大到油藏尺度进行指导性应用。李江龙和王雷等^[39-40]采用有机玻璃板二维光刻模型进行了模拟实验,观测二维

平面水流通道形成及剩余油分布情况,但模型模拟维度较少,溶洞与裂缝尺寸比例制定与实际储层差别较大,模型壁面与实际碳酸盐岩地层相似性较差。为了改善理想模型的模拟效果,碳酸盐岩壁面特征及缝洞结构被引入室内物理模拟^[41-45],利用碳酸盐岩石块钻孔或切割等形式制作裂缝型或缝洞型拟三维岩心,结合岩心夹持器中的不同摆放形态,模拟真实地层的岩石壁面条件和缝洞型油藏结构,研究了缝洞结构对水驱特征曲线的影响和缝洞型油藏的堵水效果,实验结果规律性较好。缝洞型油藏储集体空间的强非均质性造成其在三维各个方向的差异性均较大,现有的二维模型或拟三维模型无法与地层实际相对应,一般用于验证缝洞型油藏某些流动规律及其他相关研究成果。

在二维模型的基础上,增加缝洞型油藏的模拟维度,使模拟效果更加接近实际油藏,三维缝洞型油藏室内物理模拟技术研究也经过了一系列的发展过程。从简单的三维有机玻璃模型到现在相似度极高的碳酸盐岩刻蚀模型,不但能够模拟缝洞型油藏的局部连通结构,也能够实现缝洞单元整个井组开发模拟,模拟技术科学性日益提高,模拟效果对现场的指导性越来越强。有机玻璃可视化三维模型首先被引入模拟三维缝洞型油藏,这种模型较为简单,一般为一个或几个溶洞通过一定宽度的透明长方体缝相连,形成缝

洞型油藏简单模型,模拟缝洞型油藏典型缝洞结构的开发规律。张东等^[46]利用三维双洞可视化物理模型研究了洞-缝-洞介质中水驱油注采规律研究,发现毛细管力能够阻碍水流入裂缝,但模型概念化程度较高,是一个拟三维模型,模型仅在两个维度上进行了模拟,也未考虑碳酸盐岩壁面与有机玻璃壁面差异,模拟手段相对简单。为了得到有效的三维模拟方法,吕爱民等^[47]将规则的缝洞体向三维方向复制延伸,形成了多层三维网络缝洞模型,但没有充分考虑裂缝形态及缝洞尺寸差异,模拟效果与现场实际差异性较大。侯吉瑞等^[48-49]从另一个角度出发,以实际井组地质解释模型为基础按比例缩小,制作了三维缝洞单元物理模型,并且考虑了不同层位的填充率,其模型流动方面尽量满足雷诺数相等,模拟效果较好(图2),然而此模型过分依赖缝洞型油藏地质解释,对于分辨较差的地方模糊处理,仅能在生产动态上尽量模拟实际生产状况,难以揭示局部提高采收率措施机制。另外3D地质模型重现技术也被引入缝洞型油藏物理模拟,利用已有的缝洞型油藏地质解释模型进行轮廓重构,导入3D打印设备,进行地层缝洞轮廓构筑,此方法与侯吉瑞等研究方法类似^[50-51],过分依赖对缝洞型油藏的地质解释,而目前地质解释方法难以分辨小于0.5 m的缝洞结构,这给3D重现地质模型带来了难以克服的困难。

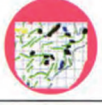
层位	结构示意图	实物图	层位	结构示意图	实物图
第一层			第四层		
第二层			第五层		
第三层			第六层		

图2 油藏原型各层缝洞结构示意图与实物图^[48-49]

Fig.2 Comparison of fractured vuggy structures between physical model and real core for each layer

缝洞型油藏室内物理模拟研究不但需要外形相似,更多地要求动力和流体运动相似,才能充分模拟油藏尺度下局部流体流动特征,指导缝洞型油藏提高采收率实验研究,揭示提高采收率方法作用机制。王敬和刘中春等^[50-51]根据油藏特点及缝洞中流体流动规律,引入相似理论及特征参数,从形状、动力及流体运动三方面相似设计了以溶洞为基础的缝洞系统(表1),特征参数一般包括配位数(即溶蚀孔洞

所连通的裂缝条数)与填充程度(溶蚀孔洞的充满程度),模拟主体以单一溶洞为基础,进行局部流动和剩余油分布研究。这种方法其实是为了达到精确模拟地下缝洞储集体的一种妥协,将大致相似的缝洞结构与流体流动形态进一步匹配,达到相似性模拟,是一种较为理想的模拟方法。相似理论方法主要包括形状相似、流动相似、动力相似及特征参数相似。油藏尺度的形状相似较为容易实现,借助油藏

地质解释数据复刻地层整体形貌,但小于 0.5 m 的区域仍是未来需要重点攻关区域。运动相似方面是室内模拟的重点和难点,碳酸盐岩缝洞型油藏实际储层空间特征尺寸不均一,缝洞发育复杂,内部充填程度及充填物不同,导致在实际注采比和注水速度条件下局部雷诺数差异较大,缝洞结构中内部流动复杂多样,微观渗流和宏观管流并存,给物理模拟与实际流动相似性带来巨大的困难^[52-53]。动力相似方面,主要通过控制生产压差、局部缝洞结构及模型材质进行相似性模拟,可实现手段相对较多。特征参数相似方面,配位数及填充程度表征缝洞型油藏的局部特点。配位数主要表征缝洞连通的复杂程度,充填程度则是溶洞内部状态的表征。塔河缝洞型油藏的充填程度一般自上而下逐渐增加,这与其自上而下岩溶作用增强具有一致性^[54-55]。目前物理模拟方法已能够满足从二维到三维物理模拟提高采收率实验的需要,并且逐步有规律地进行了模型填充,模拟条件与实际油藏条件越来越接近,未来缝洞型油藏室内物理模拟技术的关键仍然是缝洞地质结构的精确描述。

表 1 相似准数及物理意义

Table 1 Similarity criterion and physical meaning		
相似性	相似准数	物理意义
几何相似	$\pi_1 = \frac{L_1}{L_2}$	模型尺寸与油藏控制尺寸之比
	$\pi_2 = \frac{D_1}{D_2}$	孔隙直径与油藏控制直径之比
	$\pi_3 = \frac{L}{D}$	裂缝与孔洞特征尺寸之比
运动相似	$\pi_4 = \frac{v_w t}{\varphi S_w L}$	注入流体体积与油藏孔隙体积比相同
	$\pi_5 = \frac{I}{P}$	注采比
	$\pi_6 = \frac{\mu_0}{\rho_0 v_0 L}$	雷诺数
动力相似	$\pi_7 = \frac{\Delta P}{\rho_0 g L}$	生产压力梯度与油重度之比
	$\pi_8 = \frac{v^2}{gL}$	黏性力和惯性力之比
特征参	ξ	配位数
数相似	η	填充程度

注: L_1 为模型特征尺寸,m; L_2 为油藏特征尺寸,m; D_1 为孔隙直径,m; D_2 为油藏控制直径,m; L 为特征尺寸,m; D 为孔洞特征尺寸,m; v_w 为水相流速,m/d; t 为时间,d; L 为长度,m; φ 为孔隙度; S_w 为水相饱和度; I 为注入体积,m³/d; P 为产量,m³/d; v_0 为油相流速,m/s; μ_0 为黏度,mPa·s; p 为压差,Pa; ρ_0 为油相密度,kg/m³; g 为比例系数,9.8 N/kg; σ 为界面张力,mN/m; ξ 为配位数; η 为充填程度。

3 缝洞型油藏剩余油分布

缝洞型油藏水窜规律及剩余油分布一直都是碳

酸盐岩油藏提高采收率研究的重点之一^[56-58]。以洞、缝、孔为基本构成的缝洞结构直接导致了缝洞型油藏油水赋存复杂,油水界面分布受连通性和重力双重影响,油藏内部并不是简单的上层油下层水,这造成缝洞型油藏无法像砂岩油藏一样分层系开发。另外这种复杂的油水分布和连通性导致了注入水易沿优势流道突破,见水后波及体积难以增加,水驱采出效果差。以中国典型碳酸盐岩缝洞型油藏——塔河油田缝洞型油藏开采现状(图 3)为例,自 2005 年碳酸盐岩缝洞型油藏注水开发开始,水驱可采储量和水驱单元逐年增加,截至 2015 年底,塔河油田缝洞型油藏水驱可采储量为 4 011×10⁴ t,而水驱采收率基本保持稳定,且仅为 14.9%。碳酸盐岩缝洞型油藏累积注水单元为 88 个,单向受效单元 69 个,水窜导致注水效果变差和失效的单元 30 个,单向受效和水窜成为主要开发矛盾,大量的剩余油存在地下储层,摸清剩余油精确分布已是进一步提高缝洞型油藏采收率的前提。

溶洞是缝洞型油藏基本构成之一,以溶洞为基础的缝洞储层也是高产井主要分布区,当注入水或底水驱替时,原油较易从溶洞顶部流入采出井,开采速度和原油黏度是影响剩余油分布的主要因素。刘中春等^[51]利用单一圆筒状容器模拟溶洞,证实了底水驱时流动通道尺度差、油水黏度比及开采速度增大导致水锥高度增加,而水锥高度越高采出程度越低,表明实际钻遇溶洞的油井中,当含水率达 90% 时,油水界面已接近井底。实际钻探过程中溶洞钻遇率较高,且大部分溶洞有一定的填充物,这也是影响剩余油分布的主要因素之一。王敬等^[50,59]利用可视化金属腔体模拟溶洞,在金属模型侧面有规律地打通孔模拟裂缝,得到不同组合形式的碳酸盐岩缝洞模型,研究发现重力分异是决定缝洞型油藏采收率的主要因素,油水置换是溶洞中剩余油开采的主要机制,这导致溶洞出口的最低点决定以溶洞为基础的缝洞局部无水采收率,而最高点控制水驱最终采收率,两点间的裂缝连通形式决定了含水上升规律。在单一溶洞的基础上向三维方向扩展,形成了三维复杂缝洞结构,结合碳酸盐岩的壁面特征,王敬等^[60]将碳酸盐岩柱状岩心进行切割钻孔,制作了具有一定规律的缝洞组合体。通过研究发现水驱后缝洞型油藏剩余油主要分为阁楼油、封存油、油膜、角隅油、盲洞油等,其剩余油储量取决于缝洞型油藏最上部连接点位置高低,这与前期研究一致^[50]。重力分异对缝洞型油藏影响远大于砂岩油藏,这直接

导致了缝洞型油藏局部高部位存在大量的阁楼油。复杂的缝洞连通关系造成了注入水绕流产生封存油和盲洞油,缝洞连通程度越低,封存油和盲洞油越多。另外,由于岩石表面的润湿性和原油黏度影响,岩石表面的油膜也是剩余油的重要组成部分,油湿表面油膜量较大,水湿表面油膜量小。阁楼油、封存油和盲洞油是缝洞型油藏主要的剩余油分布形式。在缝洞单元层面,侯吉瑞等^[48-49]基于实际缝洞单元多井注采模式,设计加工了缝洞单元物理模型,研究了缝洞单元内油井含水率变化,发现油井含水率上

升类型分为缓慢上升型、阶梯式上升型和暴性水淹型3种类型,井网注水能够在一定程度上抑制底水上升,减少点状出水,控制底水锥进。现阶段剩余油开采存在两个主要矛盾:一是重力分异产生的阁楼油与驱替介质的高密度矛盾;二是平面上优势水流通道的形成与流道调整技术的缺乏矛盾,次要矛盾是水驱过程中油藏岩石表面剩余油与注入水无效循环之间的矛盾。如何解决现阶段主要矛盾是实现碳酸盐岩缝洞型油藏大幅提高采收率的基础。

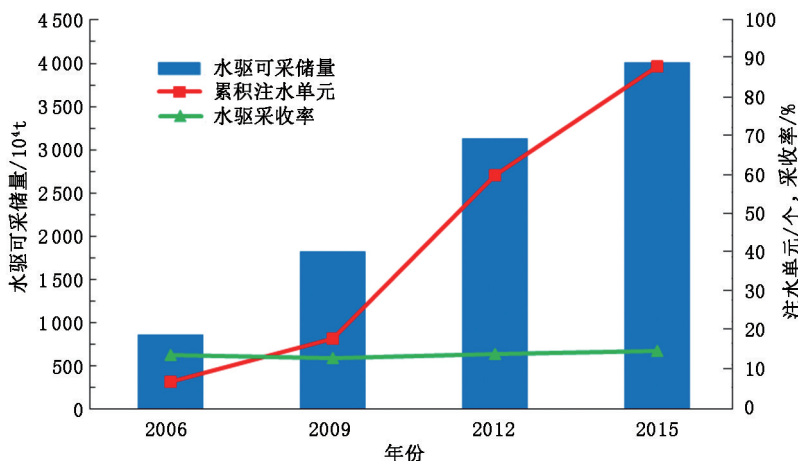


图3 塔河油田缝洞型油藏注水开采现状

Fig.3 Development situation of water injection in fracture-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield

4 缝洞型油藏提高采收率方法

针对碳酸盐岩缝洞型油藏重力分异产生的阁楼油与驱替介质的高密度矛盾,注气和泡沫提高采收率是目前常用的方法^[61-62]。注气法主要依靠注入地层中的气体与原油混合,利用重力分异作用,置换高部位剩余油,形成人工气顶、补充地层能量、扩大波及体积,从而提高缝洞型油藏采收率。该技术于2012年在塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏中开始试验,累积试验123口井,累积产油 16.13×10^4 t,解决了缝洞型油藏高部位“阁楼油”开采难题,创造了巨大经济效益^[63]。另外根据选用注入气体的不同性质,有针对性地对原油降黏或酸蚀地层,达到油藏高效开采的目的。王建海等^[64]利用氮气+二氧化碳吞吐的方法对TH12263井进行了提高采收率先导性试验,初期日产油量由10 t上升到18.6 t,掺稀比从3.4:1下降到1.9:1,证明注气提高碳酸盐岩缝洞型油藏采收率技术的可行性。注气虽然能够有效解决“阁楼油”难题,但也存在强烈的重力分异效果,造成明显的气窜优势流道。借用砂岩油藏

的水动力学方法,采用水气交替注入减弱气窜影响。苑登御等^[65-66]利用岩心刻蚀方法,建立了缝洞型油藏复杂地质结构模型,模拟缝洞型油藏水驱开发后,注氮气和水气交替注入两种措施提高采收率效果研究,发现水气交替注入比注氮气采收率增值高1%~2%。水气交替注入在一定程度上能够扩大气体在缝洞型油藏中的作用范围,但作用效果较砂岩油藏弱。为了进一步解决缝洞型油藏相对较高部位剩余油问题,注泡沫提高采收率显示出一定的优势。由于不同的气液比可形成不同表观密度的泡沫,从而有针对性地提高油层中上部采收率。李海波等^[67]利用二维可视化物理模型模拟碳酸盐岩缝洞型油藏底水驱开发和注氮气泡沫启动剩余油研究,证实了泡沫体系能够在重力分异的作用下持续顶替较高部位原油,提高油藏原油采出程度。王建海等^[68]进一步利用可视化缝洞模型模拟油藏开发和增产措施效果,优化出碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率的最佳方法为泡沫驱,其次为水气交替注入,最后为气驱,实验结果与苑登御等^[65-66]研究相似。泡沫流体的密度可控性使得其室内提高油藏采收率效

果比单独水驱和单独气驱好,但其工艺措施复杂且泡沫体系本身的稳定性较差,造成注泡沫未在矿场进行大规模推广,仍处于前期矿场试验阶段。

针对平面上优势水流通道的形成与流道调整技术的缺乏矛盾,缝洞型油藏流道调整技术被列为国家科技重大专项子课题之一,旨在控制水(气)驱优势流道,解决注入水(气)沿优势流道无效循环问题,扩大水(气)驱波及体积。前期的流道调整试验主要借用砂岩油藏堵水调剖的思路,许多专家学者^[69-71]有针对性地进行室内实验和矿场试验,证实了流道调整的有效性。鉴于中国西部缝洞型油藏高温高盐的苛刻地层条件和大尺度缝洞地质环境,传统冻胶类调流剂难以应用,而颗粒类调流剂的物化性质相对稳定,具有一定的优势。戴彩丽课题组联合中石化西北油田分工司研制了粒径可控、密度可调、油水选择性较好的调流剂颗粒体系已初步进行了矿场试验,初期对6个注采井组进行流道调整试验,4个注采井组取得了良好效果,措施成功率达67%,为后续完善流道调整技术坚定了信心。

5 认识与展望

中国碳酸盐岩缝洞型油藏地质构造十分复杂,油藏条件苛刻,油藏高效开发国内外可借鉴技术较少,提高采收率研究依然处于初级阶段。结合碳酸盐岩缝洞型油藏开发现状及提高采收率相关技术研究进展形成了以下4方面认识。

(1)缝洞型油藏储集体精细描述与储运特征分析依然是提高采收率研究的核心基础,着重攻关小于0.5 m的缝洞精细结构描述,明确不同尺度下缝洞型油藏的储运特征,是实现缝洞型油藏提高采收率的关键。

(2)现有的缝洞型油藏物理模拟方法相对较为完善,模型的设计加工技术成熟,但缺乏与之相匹配的理论方法。目前缝洞型油藏物理模拟方法的理论依据和所得结论多以相似性描述为主,理论通用性较差,无法达到指导矿场开采的目的。

(3)碳酸盐岩缝洞型油藏非均质性极强,剩余油主要分布在构造上部及连通屏蔽区域。缝洞型油藏高效开发主要存在两个系统矛盾,一是重力分异产生的阁楼油与驱替介质的高密度矛盾;二是平面上优势水流通道的形成与流道调整技术的缺乏矛盾。

(4)目前缝洞型油藏提高采收率方法相对较少,纵向上利用气体密度优势驱替高部位剩余油,矿

场推广效果较好;平面上利用流道调整技术进行了扩大波及试验,效果较好,具有广阔的推广价值。

随着碳酸盐岩缝洞型油藏勘探开发技术的进步,预计未来继续在储集体类型、物理模拟和剩余油精细描述方向加大投入。由于缝洞型油藏的非均质性极强,地震技术难以对局部结构进行精细推测和描述,多井联合测井和井底成像技术将得到推广,对地下缝洞发育形态进行精确测绘,然后借助3D打印技术进行油藏构造再现,最后通过室内物理模拟技术优化最佳提高剩余油采收率方法。注气主要解决了“阁楼油”难题,但在水平方向提高采收率存在一定的不足,气体与原油的密度差较地层注入水与原油密度差更大,气体流度较水流度大,这将导致注气平面优势通道发育比注水优势通道发育更严重,且气体的携带能力极差,后续气窜优势通道的调整技术更为苛刻。流道调整配合注水是未来缝洞型油藏提高采收率技术的发展方向。

流道调整配合等密度流体驱替技术将是未来缝洞型油藏提高采收率研究的潜力所在。流道调整技术解决了因流度差异造成的平面窜流通道发育难题,使驱替介质能够在平面上均匀推进。等密度流体克服了因重力分异导致的底部水窜通道和顶部气窜通道发育难题,解决了缝洞型油藏纵向波及问题,能够充分启用中部油层。结合等密度流体和流道调整技术优势,研发等密度流体与调流剂是实现大幅度提高缝洞型油藏采收率的关键。中国西部碳酸盐岩缝洞型油藏大多地层条件苛刻,温度高于125℃,矿化度大于 20×10^4 mg/L,严重制约等密度流体和调流剂研发。等密度流体将以水基稀泡沫、水基低密度复合流体为潜力研究方向。调流剂将以密度可调、粒径可控、选择性好、能够实现聚结膨胀的复合有机颗粒为潜力研究方向。

参考文献:

- [1] 江怀友,宋新民,王元基,等.世界海相碳酸盐岩油气勘探开发现状与展望[J].海洋石油,2008,28(4):6-13.
JIANG Huaiyou, SONG Xinmin, WANG Yuanji, et al. Current situation and forecast of the world's carbonate oil and gas exploration and development [J]. Offshore Oil, 2008, 28(4): 6-13.
- [2] SUN Qian, ZHANG Na, MOHAMED Fadlelmula, et al. Structural regeneration of fracture-vug network in naturally fractured vuggy reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 28-41.

- [3] 撒利明,姚逢昌,狄帮让,等. 缝洞型储层地震响应特征与识别方法[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 23-28.
SA Liming, YAO Fengchang, DI Bangrang, et al. Seismic response characteristics and identification method of fracture-cavity reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(1): 23-28.
- [4] 李阳. 塔河油田岩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.
- [5] 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): 1-12.
KANG Yuzhu. Characteristics and distribution laws of paleokarst hydrocarbon reservoirs in palaeozoic carbonate formations in China [J]. Natural Gas Ind, 2008, 28(6): 1-12.
- [6] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [7] XIAO Yang, ZHANG Ziwei, JIANG Tongwen, et al. Dynamic and static combination method for fracture-vug unit division of fractured-vuggy reservoirs [J]. Arab J Sci Eng, 2018(43): 2633-2640.
- [8] QU Ming, HOU Jirui, QI Pengpeng, et al. Experimental study of fluid behaviors from water and nitrogen floods on a 3-D visual fractured-vuggy model [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 871-879.
- [9] ZENG Hongliu, ROBERT Loucks, JANSON Xavier, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin western China [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.
- [10] 王超, 张强勇, 刘中春, 等. 缝洞型油藏裂缝宽度变化预测模型及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 86-91.
WANG Chao, ZHANG Qiangyong, LIU Zhongchun, et al. Prediction model for fracture width changes in vug-fracture oil reservoirs and its application [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 86-91.
- [11] 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 & Experiment, 2012, 34(2): 193-198.
- [12] WANG Daigang, LI Yong, HU Yongle, et al. Integrated dynamic evaluation of depletion-drive performance in naturally fractured-vuggy carbonate reservoirs using DP-SO-FCM clustering [J]. Fuel, 2016, 181: 996-1010.
- [13] 赵军, 肖承文, 虞兵, 等. 轮古地区碳酸盐岩洞穴型储层充填和度的测井评价[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 605-610.
ZHAO Jun, XIAO Chengwen, YU Bing, et al. Logging evaluation on filling degree of cavernous carbonate reservoirs in the Lungu region [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 605-610.
- [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.
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.
- [15] SHEN Feng, QI Lixin, HAN Gehua. Characterization and preservation of karst networks in the carbonate reservoir modeling [R]. SPE110072-MS, 2007.
- [16] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素和复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
HE Zhiliang, PENG Shoutao, ZHANG Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [17] JOSEPH W D. The role of small caves as bat hibernacula in Iowa [J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2011, 73(1): 21-27.
- [18] 刘中春. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏提高采收率技术途径[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 66-69.
LIU Zhongchun. Enhanced oil recovery in Tahe karstic/fractured carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 66-69.
- [19] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞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 Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.

- [20] 窦之林,等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
- [21] 郭平,袁恒璐,李新化,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏气驱机制微观可视化模型试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):89-93.
GUO Ping, YUAN Henglu, LI Xinhua, et al. Experiments on gas injection mechanisms in carbonate fracture-cavity reservoir using microvisual model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(1):89-93.
- [22] BONA N, RADAELLI F, ORTENZI A, et al. Integrated core analysis for fractured reservoirs: quantification of the storage and flow capacity of matrix, vugs, and fractures [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2003,6(4):226-233.
- [23] 陈志海,黄广涛,刘常红,等. 烃类流体分布与缝洞储层流动单元的划分[J]. 石油学报,2007,28(1):92-97.
CHEN Zhihai, HUANG Guangtao, LIU Changhong, et al. Distribution of hydrocarbon fluid and division of flow units in fracture-cave reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(1):92-97.
- [24] 荣元帅,赵金洲,鲁新便,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏剩余油分布模式及挖潜对策[J]. 石油学报,2014,35(6):1138-1146.
RONG Yuanshuai, ZHAO Jinzhou, LU Xinbian, et al. Remaining oil distribution patterns and potential-tapping countermeasures in carbonate fracture-cavity reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014,35(6):1138-1146.
- [25] ZHANG Kang, WANG Darui, BRYAN G Huff. Reservoir characterization of the Ordovician oil and gas pools in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31(1):123-126.
- [26] 杨辉廷,江同文,颜其彬,等. 缝洞型碳酸盐岩储层三维地质建模方法初探[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(4):11-16.
YANG Huiting, JIANG Tongwen, YAN Qibin, et al. Establishment of 3D geological models of fracture-cavern carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004,23(4):11-16.
- [27] 卢占国. 缝洞型介质流体流动规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.
LU Zhanguo. Fluid flow law in fractured vuggy media [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [28] 金强,田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):15-21.
- JIN Qiang, TIAN Fei. Investigation of fracture-cave constructions of karsted carbonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(5):15-21.
- [29] 姚军,胡蓉蓉,王晨晨,等. 缝洞型价质结构对非混相气驱油采收率的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(2):80-85.
YAO Jun, HU Rongrong, WANG Chenchen, et al. Influence of fractured vuggy structure on oil recovery efficiency during immiscible gas flooding [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(2):80-85.
- [30] 鲁新便,蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发:以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2010,31(1):22-27.
LU Xinbian, CAI Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development: taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2010,31(1):22-27.
- [31] 李宗宇. 塔河奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策探讨[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):856-862.
LI Zongyu. A discussion on development strategies for the Ordovician fractured-vuggy carbonate rock reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2007,28(6):856-862.
- [32] ZHANG Na, YAO Jun, XUE Shifeng, et al. Multiscale mixed finite element, discrete fracture-vut model for fluid flow in fractured vuggy porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016,96:396-405.
- [33] CAMACHO-VELAZQUEZ R, VASQUEZ-CRUZ M, CASTREJON-AIVAR R, et al. Pressure-transient and decline-cure behavior in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005,8(2):95-112.
- [34] 王殿生. 缝洞型介质流动机制实验与数值研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2009.
WANG Diansheng. Experimental and numerical study of fluid flow mechanism in fractured-vuggy porous media [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [35] 陈志海,马旭杰,黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):847-855.

- CHEN Zhihai, MA Xujie, HUANG Guangtao. Research on the fracture-vug unit division of fractured-vuggy carbonate rock oil pools [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6): 847-855.
- [36] 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.
- 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.
- [37] 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): 58-61.
- 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 Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 58-61.
- [38] 李俊键, 姜汉桥, 徐晖, 等. 碳酸盐岩油藏单井缝洞型储集体开采规律试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(2): 85-89.
- LI Junjian, JIANG Hanqiao, XU Hui, et al. Experiment on production laws for single well in vuggy carbonate reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(2): 85-89.
- [39] 李江龙, 陈志海, 高树生. 缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油微观实验模拟研究[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(6): 637-642.
- LI Jianglong, CHEN Zhihai, GAO Shusheng. Microcosmic experiment modeling on water-driven-oil mechanism in fractured-vuggy reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 637-642.
- [40] 王雷, 窦之林, 林涛, 等. 缝洞型油藏注水驱油可视化物理模拟研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(2): 121-124.
- WANG Lei, DOU Zhilin, LIN Tao, et al. Study on the visual modeling of water flooding in carbonate fracture-cavity reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2011, 33(2): 121-124.
- [41] 隋宏光, 王殿生, 刘金玉, 等. 缝洞型介质对水驱油采收率影响的物理模型实验研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(6): 52-56.
- SUI Hongguang, WANG Diansheng, LIU Jinyu, et al. Experimental study on the effect of the structure of fracture-vuggy media on recovery factor of water flooding [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2011, 26(6): 52-56.
- [42] 龙秋莲, 朱怀江, 谢红星, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏堵水技术室内研究[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(1): 108-112.
- LONG Qiulian, ZHU Huaijiang, XIE Hongxing, et al. Laboratory study of water shutoff in the fracture-cavity carbonate reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 108-112.
- [43] 李爱芬, 张东, 姚军, 等. 缝洞单元注水开发物理模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(2): 130-135.
- LI Aifen, ZHANG Dong, YAO Jun, et al. Physical simulation of water flooding in fractured-vuggy unit [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(2): 130-135.
- [44] 李文芳, 陈江, 谭希群, 等. 长期实验研究不同驱替模式对缝洞型碳酸盐岩油藏[J]. *Geosystem Engineering*, 2008, 21(2): 61-72.
- LI Wenfang, CHEN Jiang, TAN Xiqun, et al. Long-core experimental study of different displacement modes on fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Geosystem Engineering*, 2008, 21(2): 61-72.
- [45] 王周华, 王忠敦, 曾繁华, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油驱替方程[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 44: 96-108.
- WANG Zhouhua, WANG Zidun, ZENG Fanhua, et al. The material balance equation for fractured vuggy gas reservoirs with bottom water-drive combining stress and gravity effects [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 44: 96-108.
- [46] 张东, 李爱芬, 姚军, 等. 洞-缝-介质中水驱油注采规律研究[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 86-91.
- ZHANG Dong, LI Aifen, YAO Jun, et al. Law of water flooding in vug-fracture-vug medium [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 86-91.
- [47] 吕爱民, 李刚柱, 谢昊君, 等. 缝洞单元注水驱油可视化物理模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(4): 50-54.
- LÜ Aimin, LI Gangzhu, XIE Haojun, et al. Study on the visual modeling of water flooding in fractured-vuggy unit [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(4): 50-54.
- [48] 侯吉瑞, 李海波, 姜瑜, 等. 多井缝洞单元水驱见水模式宏观三维物理模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 717-722.
- HOU Jirui, LI Haibo, JIANG Yu, et al. Macroscopic three-dimensional physical simulation of water flooding in multi-well fracture-cavity unit [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 717-722.
- [49] 侯吉瑞, 郑泽宇, 宋昭杰, 等. 缝洞单元注水驱油物理模拟及优化[J]. *Pet Sci*, 2016, 13: 259-271.
- HOU Jirui, ZHENG Zeyu, SONG Zhaojie, et al. Three-dimensional physical simulation and optimization of water injection of a multi-well fractured-vuggy unit [J]. *Pet Sci*, 2016, 13: 259-271.
- [50] 王敬, 刘慧卿, 宁正福, 等. 缝洞型油藏溶洞-裂缝组合

- 体内水驱油模型及实验[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 67-63.
- WANG Jing, LIU Huiqing, NING Zhengfu, et al. Experiments on water flooding in fractured-vuggy cells in fractured-vuggy reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 67-63.
- [51] 刘中春, 李江龙, 吕成远, 等. 缝洞型油藏储集空间类型对洞井含水率影响的实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 271-274.
- LIU Zhongchun, LI Jianglong, LÜ Chengyuan, et al. Experimental study on effect of reservoir space type on water cut of wells in karstic-fractured carbonate reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 271-274.
- [52] MOCTEZUMA A B, VIZIKA O, THOVERT J F, et al. One-and twophase permeabilities of vugular porous media[J]. Transport in Porous Media, 2004, 56(3): 225-244.
- [53] KAVEH Dehghani, JAIRAM Kamath. High temperature blow-down experiments in a vuggy carbonate core[R]. SPE 56542, 1999.
- [54] 王太, 李会雄, 李雷, 等. 缝洞型油藏溶洞内底水锥进现象的可视化研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(6): 989-992.
- WANG Tai, LI Huixiong, LI Lei, et al. Visualization study on the bottom-water coning in large-scale cavity of fracture-cavernous reservoirs [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(6): 989-992.
- [55] 刘之的, 苗福全, 候庆宇, 等. 塔河油田五区奥陶系碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1483-1489.
- LIU Zhidi, MIAO Fuquan, HOU Qingyu, et al. Study on log response characteristics of Ordovician carbonate Karst formation in area 5 of Tahe Oilfield [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1483-1489.
- [56] 郑松青, 李阳, 张宏方. 碳酸盐岩缝洞型油藏网络模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 72-75.
- ZHENG Songqing, LI Yang, ZHANG Hongfang. Fracture-cavity network model for fracture-cavity carbonate reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(3): 72-75.
- [57] 杜金虎, 周新源, 李启明, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩大油气区特征与主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 652-661.
- DU Jinhu, ZHOU Xinyuan, LI Qiming, et al. Characteristics and controlling factors of the large carbonate petroleum province in the Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 652-661.
- [58] 林昌荣, 王尚旭, 张勇. 应用地震数据体结构特征法预测油层分布规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 39-43.
- LIN Changrong, WANG Shangxu, ZHANG Yong. Predicting reservoir distribution by applying method of seismic data structure characteristic [J]. Journal of China University of petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(2): 39-43.
- [59] 王璐, 杨胜来, 彭先, 等. 缝洞型碳酸盐岩气藏多类型储层内水的赋存特征可视化实验[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 686-696.
- WANG Lu, YANG Shenglai, PENG Xian, et al. Visual experiments on the occurrence characteristics of multi-type reservoir water in fracture-cavity carbonate gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 686-696.
- [60] 王敬, 刘慧卿, 徐杰, 等. 缝洞型油藏剩余油形成机制与分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 585-590.
- WANG Jing, LIU Huiqing, XU Jie, et al. Formation mechanism and distribution law of remaining oil in fracture-cavity reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 585-590.
- [61] KAVKAVEH Dehghani, JAIRAM Kamath. High temperature blow-down experiments in a vuggy carbonate core [J]. SPE Journal, 2001, 6(3): 283-287.
- [62] HOU Jirui, LUO Min, ZHU Daoyi. Foam-EOR method in fractured-vuggy carbonate reservoirs: mechanism analysis and injection parameter study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 546-558.
- [63] 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制及实践[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 fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 75-77.
- [64] 王建海, 李娣, 曾文广, 等. 塔河缝洞型油藏氮气+二氧化碳吞吐先导试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 110-113.
- WANG Jianhai, LI Di, ZENG Wenguang, et al. Pilot test of N₂& CO₂ huff and puff in tahe fractured-vuggy reservoirs [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(6): 110-113.
- [65] 苑登御, 侯吉瑞, 宋兆杰, 等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏注水方式优选及注气提高采收率实验[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(6): 102-110.

- YUAN Dengyu, HOU Jirui, SONG Zhaojie, et al. Optimization of water injection methods and N_2 flooding for EOR in Tahe fractured-vuggy carbonate reservoir [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(6):102-110.
- [66] 苑登御,侯吉瑞,王志兴,等.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气及注泡沫提高采收率研究[J].地质与勘探,2016,52(4):791-797.
- YUAN Dengyu, HOU Jirui, WANG Zhixing, et al. Research of N_2 flooding and N_2 foam flooding for EOR fractured-vuggy carbonate reservoirs of the Tahe Oilfield [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4):791-797.
- [67] 李海波,侯吉瑞,李巍,等.碳酸盐岩缝洞型油藏氮气泡沫驱提高采收率机制可视化研究[J].油气地质与采收率,2014,21(4):93-96.
- LI Haibo, HOU Jirui, LI Wei, et al. Laboratory research on nitrogen foam injection in fracture-vuggy reservoir for enhanced oil recovery [J]. Petroleum Geology Recovery Efficiency, 2014, 21(4):93-96.
- [68] 王建海,焦保雷,曾文广,等.塔河缝洞型油藏水驱后期开发方式研究[J].特种油气藏,2015,22(5):125-128.
- WANG Jianhai, JIAO Baolei, ZENG Wenguang, et al. Development mode of Tahe fracture-cave reservoirs in late water flooding stage [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2015, 22(5):125-128.
- [69] 朱怀江,王平美,刘强,等.一种适用于高温高盐油藏的柔性堵剂[J].石油勘探与开发,2007,34(2):230-233.
- ZHU Huaijiang, WANG Pingmei, LIU Qiang, et al. A kind of flexible water shutoff agent applicable to reservoirs with high temperature and salinity [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2):230-233.
- [70] ZHAO Guang, DAI Caili, ZHANG Yanhui, et al. Enhanced foam stability by adding comb polymer gel for in-depth profile control in high temperature reservoirs [J]. Colloids Surfaces A, 2015, 482: 115-124.
- [71] 朱怀江,程杰成,隋新光,等.柔性转向剂性能及作用机制研究[J].石油学报,2008,29(1):79-83.
- ZHU Huaijiang, CHENG Jiecheng, SUI Xinguang, et al. Characteristics and action mechanism of the flexible agent applied in fluid diversion of reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1):79-83.

(编辑 刘为清)