

超深断控碳酸盐岩油藏空间结构表征技术与工程实践

韩剑发^{1,2,3*}, 孙冲^{1,2,3}, 朱光有^{4,5}, 张银涛^{1,2,3}, 李国会^{1,2,3}, 侯佳凯⁵, 李浩⁶, 丁志文^{1,2,3}

(1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000; 2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000; 3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000; 4. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 6. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083)

摘要: 在积极推进深地工程的背景下, 超深断控缝洞型碳酸盐岩成为油气勘探开发的重点领域, 而超深走滑断裂精准解译、缝洞体内部构型建模、断控油气藏储量雕刻评估、高效井位部署及提高采收率等是制约超深领域“增储上产”的重要科学问题与技术挑战。本文基于区域应力场研究、露头剖析、三维地震解译、物模数模, 全面构建了涵盖动力学、运动学、几何学, 分期、分级、分性质、分带、分层的“三学五分”断裂构造解析技术, 据此阐明了走滑断裂纵向分层、横向差异分段特征, 揭示了走滑断裂控储、控藏、控油气富集等地质规律, 发现了超深断控缝洞型 10 亿吨级大油田。依据动/静态资料, 精细刻画了断控缝洞体内部构型, 通过“井震”结合实现了断控缝洞型油气藏量化表征, 形成了相应的高效井位部署、油气储量雕刻评估等技术系列, 支撑了富满油田 10 亿吨级油气储量的发现与落实。依据断控油气藏的定量刻画结果, 针对性提出了提高采收率技术对策, 推动了富满 5×10^6 t 大油田的高效建设, 形成了超深断控碳酸盐岩“增储上产”范例, 可为我国类似油气藏的开发“上产”提供借鉴。

关键词: 超深领域; 缝洞体内部构型; 断控油气藏刻画; 高效井位部署; 增储上产; 塔里木盆地

中图分类号: TE1 **文献标识码:** A

Spatial Structure Characterization Technology and Engineering Practice of Ultra-deep Fault-Controlled Carbonate Reservoir

Han Jianfa^{1,2,3*}, Sun Chong^{1,2,3}, Zhu Guangyou^{4,5}, Zhang Yintao^{1,2,3}, Li Guohui^{1,2,3},
Hou Jiakai⁵, Li Hao⁶, Ding Zhiwen^{1,2,3}

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang, China; 2. R&D Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, China National Petroleum Corporation, Korla 841000, Xinjiang, China; 3. Engineering Research Center of Ultra-deep Complex Oil and Gas Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, Xinjiang, China; 4. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 6. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the context of actively promoting deep geological engineering, ultra-deep fault-controlled fractured carbonate reservoirs

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-02-21

通讯作者: *韩剑发, 中国石油塔里木油田公司教授级高级工程师, 研究方向为油气地质科研与碳酸盐岩勘探开发实践;

E-mai: lhanjf-tlm@petrochina.com.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(42230812, 42230816); 中国国石科技项目(2018E-1806, 2021DJ05)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

have become a focal point in oil and gas exploration and development. Precise interpretation of ultra-deep strike-slip faults, internal configuration modeling of fractured reservoirs, assessment of reserves sculpted by fault control, efficient well deployment, and enhanced recovery have emerged as crucial scientific challenges and technological barriers in increasing reserves and production in the ultra-deep domain. This study comprehensively constructs fracture structural analysis techniques utilizing regional stress field research, outcrop analysis, three-dimensional seismic interpretation, and physical modeling; this is based on dynamics, kinematics, and geometry, as well as different stages, grades, properties, zones, and layers. It elucidates the vertical layering and lateral segmentation characteristics of strike-slip faults, revealing geological laws governing reservoir control, storage, and hydrocarbon accumulation, ultimately leading to the discovery of billion-ton-level mega oilfields in ultra-deep fault-controlled fractured reservoirs. Based on dynamic/static data, the internal configuration of fault-controlled fractured reservoirs is finely delineated, and a quantitative characterization of reservoirs is achieved through the integration of well-seismic data, facilitating efficient well deployment and reservoir reserve assessment. This approach has supported the discovery and realization of billion-ton-level oil and gas reserves in the rich oilfields. Leveraging the quantitative characterization of fault-controlled reservoirs, targeted strategies to improve recovery rates are proposed, driving the efficient development of 5×10^6 -ton mega oilfields, thereby establishing a paradigm for increasing reserves and production in ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs. This study could serve as a reference for similar oil and gas reservoir development in China.

Keywords: ultra-deep domain; internal configuration of fractured reservoirs; characterization of fault-controlled reservoirs; efficient well deployment; increased reserves and production; Tarim Basin

一、前言

深层和超深层油气资源丰富, 已发现深层油气田数量多且储量大, 是油气勘探的重要领域^[1]。美国信息处理服务公司的数据表明, 全球已发现深层油气田 9423 个, 油气储量约为 1.865×10^{11} t。我国已发现深层油气田 902 个, 油气储量约为 1×10^{10} t^[2,3]。我国塔里木盆地超深层碳酸盐岩资源量丰富, 约有石油 4.65×10^9 t、天然气 1.13×10^{13} m³, 在寒武—奥陶系发现了塔北隆起轮古油田、哈拉哈塘油田、塔中隆起塔中 I 号凝析气田、北部坳陷富满大油田等。

早期研究表明, 超深层高温高压易致古油藏发生裂解, 往往以赋存天然气为主: 碳酸盐岩油藏中的原油与硫酸盐在高温下发生硫酸盐热化学还原反应^[4-6], 成为富含硫化氢的气田; 深层液态石油保存难度增大、遭受破坏因素增多^[7], 使超深层古老碳酸盐岩油藏较少, 而气藏或凝析气藏较多。我国古生界海相碳酸盐岩埋深大, 储集体成岩演化复杂、非均质性强^[1,8], 加之油气充注比较早^[9,10]、后期受构造破坏和改造严重, 加大了预测评价难度, 制约了下古生界海相碳酸盐岩油气勘探。塔里木盆地台盆区奥陶系碳酸盐岩成岩作用强烈, 基质孔隙消失殆尽, 经历多期构造断裂演化, 发育多期区域不整合, 形成了与暴露风化密切相关的岩溶缝洞型储集体^[11,12]。因此, 塔里木盆地古生界主力烃源岩的具体位置、海相碳酸盐岩规模有效储集体的地质模型和主控因素、超深领域中油田的存在概率及其形成与分布规律等, 是长期制约碳酸盐岩高效勘探

开发的瓶颈与难点^[13,14]。

“十三五”时期以来, 本研究团队针对塔里木盆地开展了走滑断裂解译主线、油气藏刻画核心等专项攻关, 揭示了断裂控储控藏控富机理, 深化了对超深断控碳酸盐岩油气地质的理论认识^[15,16], 攻克了超深缝洞型碳酸盐岩油藏精细描述与提高采收率关键技术^[9,17], 推动勘探领域由隆起区向斜坡区、坳陷区挺进并取得系列突破; 特别是发现了迄今为止世界上埋藏最深的富满缝洞型碳酸盐岩大油田(油藏埋深为 6000~8500 m), 新增三级油气储量约 1×10^9 t^[18,19], 初步建成 500 万吨级大油田, 对塔里木 3300 万吨级油田建设构成坚实支撑。可见, 强化超深断控缝洞型碳酸盐岩油气地质理论技术创新, 必将推动相关学科进步, 为深层海相碳酸盐岩油气“增储上产”提供重要参考。

二、超深断控大油气田的地质特征

塔里木盆地台盆区发育的大型潜山岩溶、内幕层间岩溶、深部断控岩溶等碳酸盐岩储集体, 是油气勘探的主攻领域^[20-24], 而当前对碳酸盐岩油气地质理论认识的不断深化, 促进油气勘探由隆起区逐步转向斜坡区、坳陷区^[10,25-27]。阿满过渡带是位于塔北—塔中两大古隆起之间的构造低梁, 尽管内幕碳酸盐岩缺乏区域不整合暴露风化与淋滤溶蚀^[28,29], 但大型走滑断裂破碎带经历了多源流体、多期溶蚀, 发育了大面积的断控岩溶储集体。其中, 富满油田是塔里木盆地阿满过渡带超深断控岩溶缝洞体油气勘探的范例。

（一）走滑断裂特征

塔里木盆地走滑断裂控制了北部坳陷区碳酸盐岩油气成藏富集。基于高精度三维地震资料、“三学五分”断裂构造解析技术，注重区域应力场分析，剖析了断裂发育动力学、运动学、几何学基础；依托断裂生长连接与空间组合基础，开展了断裂分期、分级、分性质、分带、分层解译。

研究表明，台盆区走滑断裂形成于中奥陶世，经历了晚加里东期、早海西期、晚海西期、印支-燕山期、喜马拉雅早期等多期继承性活动^[27,30,31]，形成了宽阔的断裂破碎带。解译三维地震连片数据发现，塔里木盆地台盆区存在走滑断裂 70 条。

（二）断控储集特征

在早期，碳酸盐岩勘探以沉积岩相、不整合面为重点，建立了潜山与层间岩溶模式，推动了轮南-塔河潜山岩溶储集体，哈拉哈塘、塔中层间岩溶、礁滩复合岩溶的勘探开发。近期则以走滑断裂为主线、断裂破碎带为主体，构建了断控岩溶缝洞体发育模式，丰富并发展了断控岩溶地质理论的内涵，拓展了超深碳酸盐岩“增储上产”领域。

钻探实践结果表明，走滑断裂破碎带是岩溶缝洞体发育最为有利的部位。从露头、岩心、薄片，测井，测试资料，氧碳同位素等常微量元素与包裹体的分析可见，断裂破碎带往往经历大规模的机械破碎、抬升暴露、风化淋滤，大气淡水、深部热液等多源流体的多期溶蚀，多种成因的洞穴、孔洞、裂缝在三维空间上叠加复合，进而形成断控岩溶缝洞体（分布于断裂破碎带周缘，具有横向分带、纵向分层、规模巨大的特征）^[32]。

富满油田奥陶系碳酸盐岩埋深主体位于 7000 m 以下，储集体位于奥陶系一间房组-鹰山组二段，断裂破碎带脆性碳酸盐岩经流体溶蚀改造作用形成大型洞穴、孔洞等储集体单元，具有明显的断裂控储特征；完钻 169 口井，其中放空 55 口（占 32.5%），漏失 104 口（占 61.5%）。断裂破碎带宽度为 100~2000 m，延伸达数百千米，纵向长度>1000 m，整体呈三维“树冠形、林带状”。

（三）断控油藏特征

富满断控缝洞型油田是受走滑断裂控制的缝洞型碳酸盐岩油藏，埋深为 6500~8500 m，高压物性

实验分析的原油密度为 0.77~0.89 g/cm³，气油比为 300~2000 m³/m³，整体上属于超深、高温、常压、轻质-挥发性的油藏及凝析气藏。

富满断控缝洞型油田的油气富集与油水分布受构造控制不明显，走滑断裂具有明显的控储控藏控富特点。走滑断裂既是油气输导路径，又是油气富集场所^[33,34]；深大断裂沟通油源、垂向运聚，形成大断裂-大油藏、小断裂-小油藏组合类型（见图 1）。

油气沿断裂破碎带呈纵向树状、平面林带状分布，自北向南逼近生烃中心，油柱高度北小南大^[35,36]。平面上的油气主要沿通源的深大断裂或相关的次级断裂呈条带状展布。

（四）油气成藏期次

油气成藏研究结果表明，塔里木盆地地下古生界海相碳酸盐岩经历了加里东晚期、晚海西期成油期，喜马拉雅期成气期，加里东末期、早海西期等多期油气调整与破坏，具有复杂的油气运聚与成藏过程。在多期油气成藏与调整过程中，沿断裂带纵向多层段聚集成藏，形成断控复式成藏体系。

（五）资源储量规模

富满断控缝洞型油田沿主干走滑断裂带储集体发育，储量丰度高、油气富集^[37]。自 2014 年以来，跃满、富源、玉科、满深等 9 块三维区连获发现，新增探明石油储量 1.02×10⁸ t。2020 年，富满区块向东、西、南方向甩开 7 口探井全部获得高产工业油气流，满深 1、哈得 32 井相继获得日产油 300 t 以上的高产；新发现 1 条资源量为 2.28×10⁸ t 的富油气大断裂，新增石油储量探明 3.099×10⁷ t；矿权内面积为 1.7×10⁴ km² 的整体油气富集特征已经明朗，发育大型走滑断裂 34 条，总长度为 1494 km，石油资源量为 1.1×10⁹ t。

三、走滑断裂刻画分级和分段评价

走滑断裂是断控油藏控储控藏的关键因素。依据野外露头解剖、物理模拟、数值模拟、板缘应力场研究，剖析了走滑断裂的几何学、运动学、动力学特征，构建了走滑断裂构造样式，创建了“三学三分”断裂刻画技术体系，形成了利用高精度三

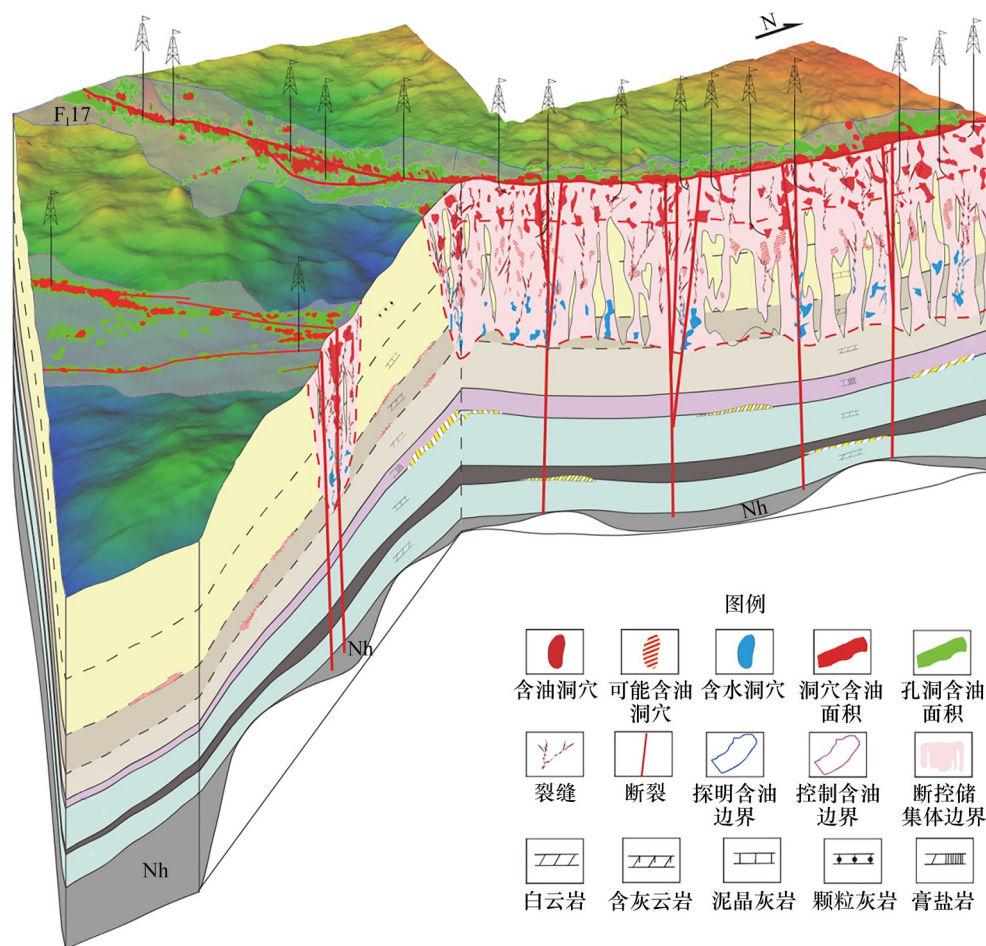


图1 富满油藏走滑断裂断控油气藏模式图

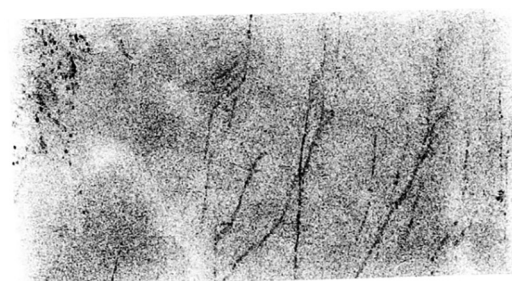
维地震资料进行走滑断裂的精细解译与地质特征研究的技术思路和完整流程。

(一) 走滑断裂高清成像与解释

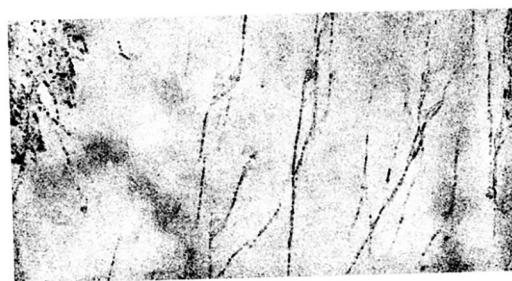
基于原始资料进行叠后解释性处理，对反映断裂的信息进行相对加强，从而提高相应信息的信噪比；智能追踪并增强同相轴连续性，凸显间断特征，精准解释断层结构并使其更真实地反映地质结构^[37,38]。

针对复杂构造进行保持断点的非连续特征增强滤波，以有效减少噪声。通过多次迭代改进相干、曲率、最大似然属性等特定地震属性算法，不断提高抗噪能力和分辨率，实现复杂地表、微小断距、弱走滑断裂的精准识别（见图2）。

处理解释方法显著提高了低信噪比与走滑断裂的刻画精度，达到了走滑断裂精细识别的目标，为超深断控复杂碳酸盐岩油藏精细描述确立了数据基础。



(a) 玉科区块奥陶系一间房组顶面相干属性图（滤波前）



(b) 玉科区块奥陶系一间房组顶面相干属性图（滤波后）

图2 多次滤波处理前后弱走滑断裂相干属性对比

(二) 走滑断裂精细刻画与评价

通过要素集成创新,形成了针对全层系走滑断裂的立体解释技术系列,兼顾了断层解释的三维空间闭合、断层解释的正确性,提升了走滑断裂解释精度。利用三维立体解释技术,在等时切片上沿着断层走向完成平面解释,结合断裂质控功能快速解释垂直于该断层走向的任意线剖面;在三维空间上监控该断层的闭合和解释方案的统一性,再通过断层提取和相应加工处理,根据需要快速提取任意解释密度的断层。

应用相干、方差、曲率、最大似然等地震属性切片分析技术,自下向上作沿层切片,即可清晰识别工区内主干断裂及其分支断裂的空间展布特征,

支持对走滑断裂的精细刻画。对比发现,台盆区的走滑断裂系统具有分区分带性(见图3),发育塔中凸起NE向调节走滑断裂体系、塔北隆起X型共轭走滑断裂体系、阿满过渡带东部NE向单剪走滑断裂体系、阿满过渡带西部NW向单剪走滑断裂体系。

四、缝洞型碳酸盐岩储集体的定量刻画

岩溶缝洞型储集体是受走滑断裂、机械破碎叠加溶蚀等作用形成的大量溶蚀孔洞^[39,40],在地震剖面上显示为多峰多谷的“串珠”状反射个体或者簇群;基于三维地震数据,人工能够容易地识别大规

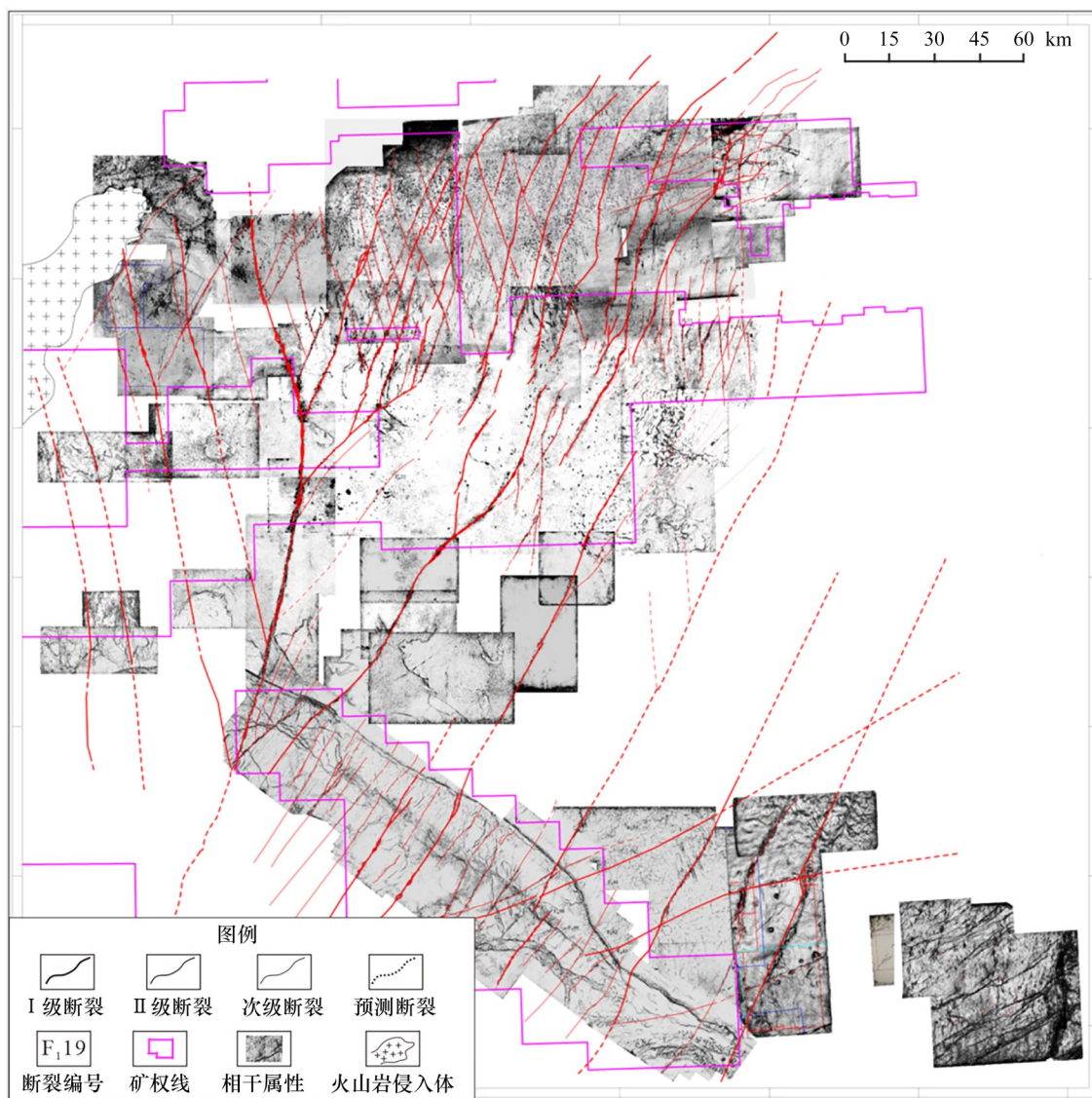


图3 台盆区奥陶系灰岩顶面(一间房组顶)相干属性及断裂纲要

模的缝洞体储集体。常规波阻抗反演、地震属性分析等方法不能有效提升储集空间的描述精度，这是因为反演结果无法解释与动态数据之间的矛盾（如受地层沉积特征的影响）^[41]，反演过程难以解决一间房组上覆地层伴生相位所致低阻抗干扰。为此，创建了以相控地质统计反演为核心的缝洞体精细划分与定量刻画技术。

（一）相控反演储集体划分

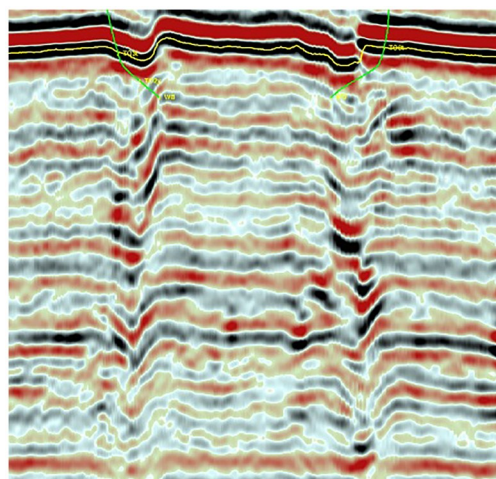
在相控反演中，最重要的步骤是建立断裂破碎带阻抗低频模型，利用地震数据体进行属性体计算，优选可精准反映断裂破碎带的属性体作为构建低频模型的优势属性。断裂破碎带主要沿断裂呈条带状分布，基于振幅、频率、相干、相位等属性的计算结果相关性分析可以发现，高亮体属性最能反映断裂破碎带特征。为此，选择高亮体属性作为刻画断裂破碎带的优势属性，融合稀疏脉冲反演并插值得到的低频阻抗模型，得到含断裂破碎带信息的低频阻抗模型（见图4）。

对比单井提取波阻抗反演数据、测井计算波阻抗数据可见，波阻抗值的分布频次及数值均有较好的吻合度。波阻抗反演值与测井计算的波阻抗值、非储集体地层背景值与有效储集体值的一致性均较好，说明反演结果是可信的。相关技术在富满油田及其他区块的进一步应用成效明显，地震剖面显示断裂破碎带（“长串珠”反射+杂乱反射）特征清楚。

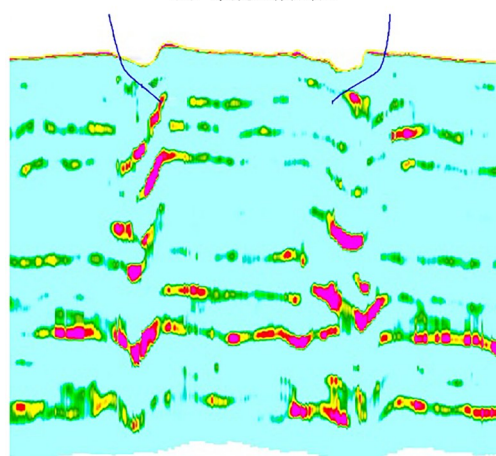
波阻抗反演剖面显示，储集体规模很小且断裂破碎带特征基本无法分辨，受一间房组上覆地层的低阻抗特征干扰，表层显示为低阻抗特征，与钻井实际不相符。通过断裂破碎带地质相控反演进一步提升了断裂破碎带特征的分辨能力，但表层干扰依然存在。为此，在断裂破碎带地质相控反演的基础上，再次开展沉积相控迭代反演，成功消除了一间房组上覆地层的低阻抗特征干扰，结果与钻井实际相符。跃满区块的应用反映了相似的规律，但断裂破碎带储集体地质特征的分辨效果更加突出。

（二）缝洞体空间量化雕刻

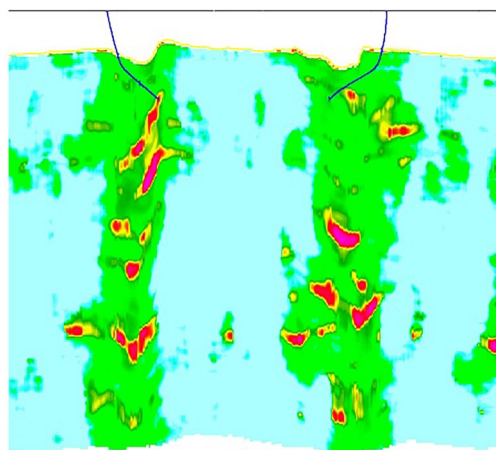
波阻抗反演虽能准确刻画缝洞体的空间形态，但不能确定单个缝洞体的有效储集空间^[42]。碳酸盐



(a) 常规地震剖面



(b) 常规反演波阻抗剖面



(c) 相控反演波阻抗剖面

图4 过满深4、满深1连井的对比剖面图

岩储集类型多样，裂缝型、孔洞型、裂缝孔洞型、洞穴型储集体内的充填物各异，因而刻画出的每个缝洞体都是不同类型缝洞体的组合体；只有计算出每个缝洞体的孔隙度，才能准确计算缝洞体的有效

储集空间^[43]。可见, 计算碳酸盐岩储集体孔隙度属性体是定量刻画碳酸盐岩缝洞储集体的关键, 通过测井解释孔隙度、测井波阻抗等曲线的交汇, 得到孔隙度与波阻抗相互转换的关系, 再将波阻抗反演体转换为孔隙度体。

针对孔隙度属性体, 在三维缝洞几何模型与有效孔隙度下限的约束下可得缝洞连通体的有效孔隙度模型(见图5)。缝洞型储集体以缝洞连通体内的有效网格为单位, 故可采用积分法求取有效体积; 单个有效网格的有效储集空间即为单个网格体积与相对应的有效孔隙度的乘积, 缝洞连通体的有效储集空间等于缝洞连通体内有效网格的有效储集空间之和, 区块内有效储集空间等于区块内有效储集空间之和。

(三) 缝洞体准确归位技术

超深缝洞型储集体几何尺寸小、埋藏深, 对缝洞体空间成像精度要求较高^[44,45]。地下地质条件复杂, 对部分区域常规叠前深度偏移缝洞体的成像不准, 加之洞穴空间归位精度不高、无法准确钻遇储集体, 可能导致侧钻或钻井失利而增加勘探成本^[46]。

以原有的道集、速度场为基础, 利用垂直地震剖面(VSP)速度及周边井的VSP、测井、钻井分层等资料, 对速度模型及各向异性参数进行迭代优化, 提高叠前深度偏移速度及参数场的精度, 保障缝洞体空间成像归位精度。①加强地震基础资料的质量控制与评价, 发现问题及时优化校正, 为VSP驱

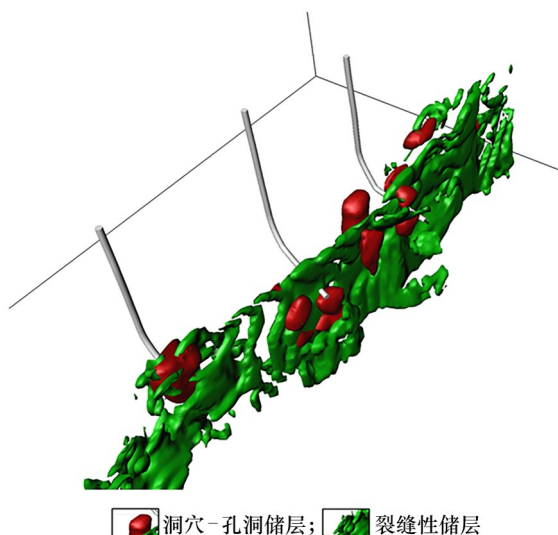


图5 某地区储集体三维空间雕刻图

动处理做好数据准备; ②检查VSP速度、测井速度, 研发VSP、测井、钻井分层的一致性处理技术, 进行井速度与地震速度的匹配校正; ③研发高效的VSP驱动地震速度建模技术, 利用新钻井信息、VSP速度, 快速校正地震速度误差; ④研发各向异性参数场的高效求取方法, 快速进行目标“串珠”的准确成像, 减少网格层析、层控网格层析的迭代次数; ⑤研发保真、保幅的叠后资料提频修饰技术, 尽量提高目标层的信噪比与分辨率。

VSP驱动处理研究显著提高了井周成像精度, 利用VSP驱动资料优化钻井轨迹则有效提高了正钻井目的层放空漏失率、储集体钻遇率。据此完钻47口井, 其中日产百吨以上的高产井有29口。

五、动/静态结合缝洞体连通性分析与高效布井

(一) 动/静态一体化的缝洞储集体连通性分析

准确判断岩溶缝洞型储集体的连通关系, 对钻井及生产都具有重要的指导意义^[47,48]。连通性分析考虑了储层连通、裂缝连通两种模式, 将“井震”数据与生产动态数据相结合, 适用于单井和井组^[49]。依据断裂研究认识、与断裂相关缝洞体的格架模型, 精细刻画主干断裂面及储集体物性, 明确井间连通关系以及剩余油的分布范围。刻画缝洞体轮廓及物性是建模要点, 以结构张量为依据设置合理门限值, 结合数值模拟、油藏动态分析结果不断修正和完善三维地质模型。

在储集体建模方面, 碳酸盐岩有别于碎屑岩, 其纵向储集体发育穿层性强^[50]; 鉴于纵向储集体的分辨率要求不高, 网格步长设为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}\times 2\text{ m}$, 在平面上采用油藏单元划分边界作为建模工区范围。采用“四步法”建立破碎带模型, 充分刻画破碎带的外轮廓与内部结构。①在地震叠前深度偏移资料的逆时偏移(RTM)体中, 考虑到碳酸盐岩储集体响应特征为“串珠”状反射, 对各单元取合理门限值, 勾勒缝洞体的粗略轮廓; ②利用单井气测和钻时标定储集体发育区的振幅梯度结构张量属性值, 计算与结构张量相关且有利的储集体模型, 再将储集体模型与RTM体提取的轮廓模型进行交集计算, 由此细化储集体轮廓, 得到缝洞体轮廓模型; ③对缝洞体轮廓模型进行连通体计算, 去除与连通单元

无关的储集体，按照基本的连通性认识并利用波阻抗属性对外轮廓进行进一步修正，得到富源210断裂带缝洞体连通模型；④根据测井孔隙度反演并研究确定孔隙度值（>5.2%的为洞穴型储集体、1.8%~5.2%的为裂缝孔洞型储集体），再利用反演孔隙度体与缝洞体连通模型进行交集计算，刻画缝洞体轮廓内部洞穴型储集体、裂缝孔洞型储集体的展布特征。

在建模过程中，结合已有的断裂研究认识，选取两种断裂属性优势相叠加；去除可能性断裂体中与储集体无关的小断裂，再结合人工智能蚂蚁体断裂进行主干断裂面形态的分段修饰，从而建立断裂面模型；在保证线性段、叠覆段断面空间形态符合地质学认识的基础上，最终得到断裂带三维地质模型（见图6）。

（二）超深碳酸盐岩油气藏高效布井技术系列

立足对富满油田油藏地质特征的认识，明确了高产高效井具有“近主干油源断裂+正地貌+长串珠”的典型特征^[20]，进而建立靶点优选及井轨迹设计技术^[33,51]。结合断裂活动强度、储集体发育程度、构造位置等因素，沿断裂带进行油藏解剖，总结出油气差异富集模式，明确了富满油田油气沿主干断裂带富集、距主干油源断裂距离明显影响油气充注强度、分支断裂与主干断裂油水界面存在显著差异^[52-54]。富满油田部分高产井表现出长期试采不产水、油压下降慢，计算的动态储量 $>1 \times 10^6$ t。通过动/静态储量匹配、流温/静温测试变化规律等方面的研究，认识到部分断裂带局部油柱高度为300~400 m。为此，井位优选遵循部署在主干油源断裂上、储层特征为多峰多谷“长串珠”、储集体规模大、微地貌避开局部低洼的原则，再利用短半径水平井/斜度井针对优化后的靶点开展轨迹设计。

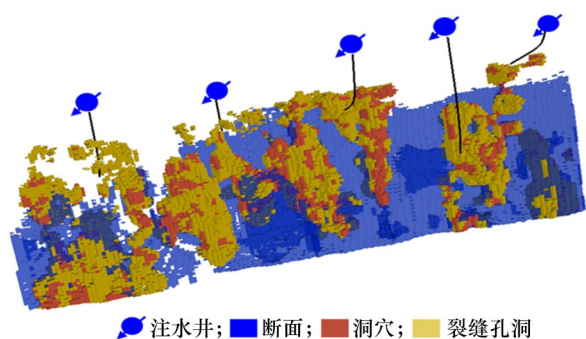


图6 富满地区富源210断裂带断裂模型图

1. 依据叠前深度偏移位置
叠前深度偏移对碳酸盐岩特殊的缝洞型储集体“串珠”，表现的能量更聚焦，收敛效果更好，个别地方出现从无到有的变化。叠前深度偏移是解决碳酸盐岩复杂构造成像难题的有效手段。

2. 振幅变化率属性选靶点
振幅梯度结构张量分析是将图像处理特性引入地震解释中的一种属性分析方法^[55,56]，注重对边界的识别，而对内部响应作模糊化处理；对碳酸盐岩储集体反映的是包括洞穴型、孔洞型、缝洞型、裂缝型储集体的总体地震响应，能够较好刻画缝洞储集体的边界。碳酸盐岩井位设计多采用大斜度井方式，应用振幅变化率属性，在平面上根据相关能量变化而选取不同的设计轨迹；在剖面上为井位设计提供准确的造斜点、井底坐标，提高储集体钻遇率（见图7）。

3. 依据波阻抗反演选靶层
富满油田储集体的地震反射特征为片状强反射、强长“串珠”型、孤立“串珠”型、杂乱反射型。高产高效井钻遇的储集体类型均涉及这4种反射类型，但以前2种为主。强长“串珠”型、孤立“串珠”型地震反射特征反演储集体类型以洞穴为主，片状强反射地震反射特征代表的储集体类型以洞穴、孔洞、裂缝为主，杂乱反射型地震反射特征反演储集体类型以小型孔洞、裂缝为主。

4. 依据地应力选靶向
超深断控缝洞型碳酸盐岩储集体非均质性强，钻井一次中靶率低，而复杂地层压力和地应力系统导致钻井工程事故频发、完井提产措施难以实施^[57,58]。碳酸盐岩基质致密，基本不具备油气渗流条件，若未直接钻遇有效储集体，通常需要酸化压

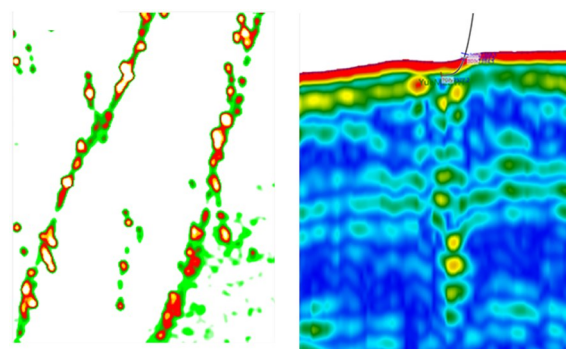


图7 富满地区跃满区块振幅分布特性
(a) 振幅变化率平面图 (b) 振幅变化率剖面图

裂创造渗流通道。如果设计井轨迹与地应力方向一致或相近,则很难通过人工造缝沟通有利储集体;设计井轨迹平面与区域最大主应力方向垂直或大角度相交,有利于钻井钻遇更多高角度裂缝以提高直投率,也有利于酸压沟通有效缝洞体的范围以及保证钻井过程中的井壁稳定性。

通过技术攻关,优选和培植了一批高效井位。2018年以来,完钻开发井138口(含千吨井10口、百吨井84口),成功率由75%提高至96%;新井的首年日均产油从35 t提高至74 t,平均产能到位率达106%。

六、超深缝洞型碳酸盐岩油气藏提高采收率配套技术

超深缝洞型碳酸盐岩油气藏开发机理的系列研究,揭示了缝-洞系统内水驱油过程的油水变化规律^[59],明确了洞穴系统中重力是影响流动及油水分布的主要因素、孔洞主要起供液作用、裂缝起连通作用。完善了超深缝洞型碳酸盐岩油气藏改善注水及注气开发技术,有力支撑了塔里木油田原油“上产稳产”。

(一) 超深缝洞型碳酸盐岩油气藏开发机理

1. 裂缝系统流动机理

原油在不同尺度上流动的压力梯度与速度驱替实验以及相应的流动规律研究^[59-61]表明,原油在缝宽 $>100\ \mu\text{m}$ 的裂缝中流动时呈非达西流特征,缝越宽则越趋近于自由流,压力梯度和流动速度表现为明显的非线性关系;裂缝开度 $<50\ \mu\text{m}$ 尤其是达到 $10\ \mu\text{m}$ 时,压力梯度和流动速度呈明显的线性关系,此时的流动状态为渗流,流动能力较差。

相渗研究表明,在流动中宽缝起决定性作用,而窄缝的贡献较小。不同宽度裂缝的油水两相流动规律差异明显:裂缝宽度 $>50\ \mu\text{m}$ 时,油水相对渗透率曲线为近X型,说明裂缝对油水流动的影响较小,油水流动呈现自由流特征;裂缝宽度 $<50\ \mu\text{m}$ 时,水相的相对渗透率曲线为上凸型,油相的相对渗透率曲线为下凹型,说明油相呈现不连续并在一定程度上阻碍水相运动。不同缝宽下油水相对渗透率曲线进一步验证了中缝以上裂缝为主流通道、窄缝流动能力差的结论。

2. 缝-洞系统流动机理

由缝-洞系统实验发现^[62,63],在单洞穴系统内重力是影响油水流动及分布的主要因素。受油水密度差异引起的重力分异影响,水相始终分布在油相界面以下,随着水相界面的抬升油相不断被驱出溶洞;水相进入溶洞后在重力作用下聚集于洞穴底部,油水界面随着注入水的增加而不断抬升,下部孔洞中剩余油在开采后期被缓慢驱出。在洞穴+孔洞系统中,洞穴是最主要的流动空间,重力在相应流动过程中发挥了关键作用。在裂缝沟通双洞穴模型中,底水从底部洞穴通过裂缝进入上部洞穴,逐渐将上部洞穴内的油相驱出,其油水流动过程与单洞穴系统类似。这种油水流动过程表明,裂缝在缝-洞系统内主要起到流动通道的作用^[64,65]。

在洞穴系统中,重力是影响油水流动及分布的主要因素,孔洞主要起供液作用,裂缝起连通通道作用。果勒302H等典型井开发过程也证实了这个规律。该井投产后油压、产量均处于下降趋势,前期油压、产量下降斜率基本一致且相对较大;后期地层压力下降至8~10 MPa后,油压保持前期的下降速率,而产量下降速率明显变缓,原因是后期孔洞储集体因生产压差加大后供液量增加,导致产量斜率变缓。

(二) 注水及注气开发技术

1. “三线四定”油气藏单元研究技术

“三线四定”研究法指利用碳酸盐岩油藏的注水指示曲线、能量指示曲线、试井曲线等理论曲线,确定油气藏单元规模、连通方式、剩余储量、能量大小,从而定量指导油藏开发,实现超深缝洞型碳酸盐岩油藏效益开发^[66,67]。

碳酸盐岩油藏注水指示曲线表示累计注入水量与压力变化的关系,能很好地反映注水过程中油井压力随累计注水量增加的动态变化,为储集体类型及规模判断提供可靠依据,支持动态储量计算。能量指示曲线表示油压与累产液的关系,其中的线段斜率变化能够很好地反映生产中油压随累产液的变化趋势,用于储集体类型、油井动态储量计算、油藏能量及水体大小评价等的初步判断。试井曲线来自试井监测数据,即压力及压力导数曲线能够反映地层的真实动态。因此,依据碳酸盐岩储集类型、发育情况、储渗性能,结合试井曲线特征,可建立

缝洞型油藏动/静态一体化的“试井曲线-缝洞单元-动态特征”开发模式。

不同的试井曲线反映不同的阶段特征,各阶段的不同形态以及曲线位置的高低,均体现(该井的)近井区域储集体类型、储集体性质及边界反应。依据缝洞试井曲线方程(即波动-管渗耦合方程)计算相应的地层参数,据此判断该井的动态储量,实现对油藏开发过程的综合分析和定量指导。

2. “四类差异注水”开发技术

不同的注水方式作用不同,根据油气藏特征、气油比差异等进行注水技术差异化研究,探索形成了注水替油、注水保压、高压注水、单元注水等差异注水技术。

缝洞型碳酸盐岩油藏可划分为单井缝洞单元、多井缝洞单元:前者在初期可依靠天然能量进行自然开采,随着生产天然能量的减弱而无法自喷生产,需要在补充能量注水完毕后重新开井;后者的注水开发,多采用单元注水方式横向或纵向驱替井间剩余油。在注水开发过程中,注水井为储集体发育程度较差的井,生产井为储集体发育程度较好的井,目前较多采用“低注高采、缝注洞采”方式。

对于气油比 $<300 \text{ m}^3/\text{t}$ 的油藏,在具钻井漏失或溢流的情况下,选取地震剖面有明显“串珠”结构的井进行注水替油开采,实施重点是对注水时机、焖井时间的把握。常规注水及酸压无法实现远井区高效扩容,导致单井初产高、递减快、采出程度低。尝试采用高压($>50 \text{ MPa}$)注水技术,以高压注入水为能量载体,突破孤立缝洞体屏障,实现有效扩容。

对于气油比 $>300 \text{ m}^3/\text{t}$ 的油藏,存在产量递减快、稳产难度大的问题,在开采过程中应保持油藏压力高于油藏饱和压力,避免地层脱气造成采收率低。结合测压资料、油井各类指示曲线,判断油藏进入溶解气驱的时间,及时进行注水保压。

3. “四类改善注水”开发技术

探索了缝洞型碳酸盐岩油气藏多井单元改善注水提高采收率技术。依据缝洞连通、潜力分布、机理研究认识,创建了单元注水失效后的“四类改善注水”技术,包括注采参数调整技术、注采方向调整技术、注入介质调控技术、注入流道调控技术。

调整注采参数及方向,更大程度地提高储量动用程度,进一步驱替非优势通道处的剩余油,实现

对(单元注水失效后)连通井组的进一步挖潜。注入介质调整能够利用注入气、凝胶等动用注入水无法到达的顶部缝洞位置剩余油,同时封堵前期形成的水窜通道。注入流道调整亦可起到类似作用,基于密度差异性发挥不同介质的自身特点,完成油与注入介质的置换,实现动态调驱并提高采收率。

4. 注气开发技术

根据缝洞型碳酸盐岩油藏的特征,注气开发技术主要分为单井注气开发、井组注气开发。基于油藏精细描述的研究成果,提出了不同岩溶地质背景缝洞型油藏注气的差异化技术政策,完成影响缝洞型油藏注气效果的主控因素、注气时机,量化注气参数优化等研究。结合缝洞型油藏地质特征,完成油藏潜力分类评价,制定了与不同岩溶地质背景对应的选井标准,完善了适合研究工区的注气开发技术。

单井注气开发主要针对相对定容型的单井注气。基于注入气体非混相、人工气顶驱、膨胀降粘、降低界面张力、溶解抽提等机理,通过重力分异置换出注水未波及的顶部剩余油。井组注气开发主要针对两口及以上的连通井组,涉及注气井注气驱替井间剩余油、改变油藏流场并抑制底水锥进作用、补充地层能量、抽提作用等机理,一般为不连续注入。

基于单井注氮气作用机理、现场试验结果及经验,完成注气时机、注气方式、注气量、焖井时间、开井工作制度等注采参数优化研究,形成了缝洞型油藏单井注氮气技术政策。依据5种参数优化及矿场统计结果,初步形成了针对替油失效井、含水上升井,具有差异化特点的单井注氮气开发技术政策(见表1)。

表1 单井注气提采关键技术政策

参数	参考标准
注气时机	替油失效井,置换率大于0.2时注气效果好 含水上升井,含水率大于80%后注气效果好
注气方式	替油失效井,持续注气 含水上升井,气水交替
注气量	替油失效井,初期在0.3~0.4 PV,后期在0.1 PV 含水上升井,1倍水侵体积
焖井时间	洞穴型7~10 d,裂缝型15~20 d
开井制度	前期正常生产时工作制度

注:PV表示孔隙体积倍数。

依据油藏特征和开发实践,主要考虑地质、开发、工程3项要素以及具体的7项特征,制定了适合缝洞型油藏注气选井原则(见表2)。注入介质主要是纯度为99%的氮气。为提高对管柱的保护程度,初步形成了一套添加除氧剂防止管柱腐蚀的工艺措施。探索形成了机采井注气井口及管柱工艺,改变以往只能在自喷井实施注气开发的局面。

5. 注水及注气开发技术应用效果

新区扩大注水规模、老区改善注水等效果显著,油气产量创历史新高。2018—2021年,共实施单井注水144口,井组注水58口,累计注水 $8.796 \times 10^6 \text{ m}^3$,累计产油 $1.523 \times 10^6 \text{ t}$,年均增油 $3.8 \times 10^5 \text{ t}$ 。

随着注气配套技术及工艺的成熟,尽管受注气成本的影响而使注气规模、增油量等呈现波动,但整体保持了上升趋势。2018—2021年,共实施注气36口,累计注气 $8.953 \times 10^7 \text{ m}^3$,累计增油 $1.324 \times 10^5 \text{ t}$ 。

七、结语

本研究团队创新发展了走滑断裂控储控藏控富地质理论,开辟了油气规模“增储上产”新发展方向。精细刻画断控碳酸盐岩油气藏,提出了“沿走滑断裂整体勘探部署、分段滚动评价、逐段精细开

发”断控缝洞型碳酸盐岩勘探开发思路,形成了超深断控缝洞型碳酸盐岩10亿吨级大油田高效建设的范例。

创新配套了“四定+四选”高效井部署技术,促成布井方式由“大面积分散部署”向“沿油源断裂集中部署”转变。高效井优选原则由“高、大、强串珠”向“主干断裂+正地貌+长串珠”转变,井型设计由“直井钻探单串珠”向“水平井横穿断裂带”转变,将单井日均产油从35 t提升至61 t。

通过覆盖多学科的动/静态一体化研究,深化了对缝洞型碳酸盐岩油气藏的认识,揭示了缝洞型碳酸盐岩油气藏的开发机理。配套完善了“三线四定”断控缝洞型碳酸盐岩油气藏单元精细刻画、“四类差异注水”“四类改善注水”、注气提高采收率等开发技术,显著改善了老区的注水效果,使注水量、增油量均呈上升趋势。

面向进军超深领域的发展趋势,传统的“成盆、成烃、成储、成藏”等油气理论亟需创新,超深目标的精准测量工程、钻探工程、提高采收率等关键技术有待突破。诸如断控缝洞型油气成藏理论、缝洞型油气藏精准量化评估、超越“重磁地震”的目标透视技术研发、高效开发技术政策优化等,成为极富潜力的领域研究方向。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 21, 2023; **Revised date:** February 21, 2024

Corresponding author: Han Jianfa is a professor-level senior engineer of PetroChina Tarim Oilfield Company. His major research fields include hydrocarbon exploration and development in carbonate reservoirs. E-mail: lhanjf-tlm@petrochina.com.cn

Funding project: National Natural Science Found Project (42230812, 42230816); Scientific Research and Technology Development Project from China National Petroleum Corporation (2018E-1806, 2021DJ05).

参考文献

- [1] 朱光有,姜华,黄士鹏,等.中国海相油气成藏理论新进展与超大型油气区预测[J/OL].石油学报,2023,[2024-02-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2128.TE.20230625.1736.002.html>.
Zhu G Y, Jiang H, Huang S P, et al. New progress in Marine hydrocarbon accumulation theory and prediction of super-large oil and gas areas in China [J/OL]. Acta Petrolei Sinica, 2023, [2024-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2128.TE.20230625.1736.002.html>.
- [2] 张光亚,马锋,梁英波,等.全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J].石油学报,2015,36(9):1156-1166.
Zhang G Y, Ma F, Liang Y B, et al. Domain and theory-

表2 缝洞型碳酸盐岩油藏注气采油选井原则

因素	项目	内容
地质因素	剩余油模式	适合注气开发的5种典型剩余油模式,即储集体高部位剩余油、底水锥进封闭剩余油、水平井上部剩余油、酸压沟通周缘缝洞体、井间注水封闭剩余油
	储集类型	洞穴型储集体优先(强烈放空漏失、酸压停泵压力<15 MPa、井储系数>5 m ³)
开发因素	累采油	累计产油量>5000 t
	出水规律	优先选择台阶状或快速上升型,间开生产有效或长期带水自喷试采井
工程因素	能量评价	优先选择能量中等-偏强试采井
	井筒状态	井筒与储集体沟通性好(存在产层垮塌、裂缝闭合、沥青质堵塞、出泥、落鱼等)
	生产管柱	井口、管柱、套管固井质量、抗挤强度满足注气施工要求

- technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1156–1166.
- [3] 朱光有, 杨海军, 苏劲, 等. 中国海相油气地质理论新进展 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 722–738.
Zhu G Y, Yang H J, Su J, et al. New progress of marine hydrocarbon geological theory in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 722–738.
- [4] Zhu G Y, Wang T S, Xie Z Y, et al. Giant gas discovery in the pre-cambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins [J]. *Precambrian Research*, 2015, 262: 45–66.
- [5] Worden R H, Smalley P C. H₂S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation, Abu Dhabi [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1/2/3/4): 157–171.
- [6] Zhu G Y, Wang H T, Weng N. TSR-altered oil with high-abundance thiadamantanes of a deep-buried cambrian gas condensate reservoir in Tarim Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 1–12.
- [7] Zhang Y, Muxworthy A R, Jia D, et al. Identifying and dating the destruction of hydrocarbon reservoirs using secondary chemical remanent magnetization [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11100–11108.
- [8] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现 [J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(4): 1–15.
Zhao W Z, Shen A J, Qiao Z F, et al. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(4): 1–15.
- [9] Zhu G Y, Wang H T, Weng N, et al. Use of comprehensive two-dimensional gas chromatography for the characterization of ultra-deep condensate from the Bohai Bay Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 63: 8–17.
- [10] Zhu G Y, Chen F R, Wang M, et al. Discovery of the lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(10): 2123–2151.
- [11] 顾忆, 黄继文, 贾存善, 等. 塔里木盆地海相油气成藏研究进展 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(1): 1–12.
Gu Y, Huang J W, Jia C S, et al. Research progress on marine oil and gas accumulation in Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(1): 1–12.
- [12] 漆立新, 云露. 塔里木盆地碳酸盐岩成藏模式与勘探实践 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 867–876.
Qi L X, Yun L. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 867–876.
- [13] 杨海军, 张辉, 尹国庆, 等. 基于地质力学的地质工程一体化助推缝洞型碳酸盐岩高效勘探——以塔里木盆地塔北隆起南缘跃满西区块为例 [J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(2): 27–36.
Yang H J, Zhang H, Yin G Q, et al. Geomechanics-based geology-engineering integration boosting high-efficiency exploration of fractured-vuggy carbonate reservoirs—A case study on West Yuman Block, Northern Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(2): 27–36.
- [14] 潘政屹, 徐凌, 张黎, 等. 全球深层碳酸盐岩气藏勘探现状与开发特征 [J]. *中国石油大学胜利学院学报*, 2022, 36(3): 1–12.
- Pan Z Y, Xu L, Zhang L, et al. Characteristics of exploration and development for global deep carbonate gas reservoirs [J]. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 2022, 36(3): 1–12.
- [15] 江同文, 韩剑发, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中隆起断控复式油气聚集的差异性及主控因素 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 213–224.
Jiang T W, Han J F, Wu G H, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 213–224.
- [16] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力 [J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1296–1310.
Han J F, Su Z, Chen L X, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- [17] 陈利新, 贾承造, 姜振学, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩富油模式与主控因素 [J]. *石油学报*, 2023, 44(6): 948–961.
Chen L X, Jia C Z, Jiang Z X, et al. Oil enrichment model and main controlling factors of carbonate reservoirs in Halahatang Area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(6): 948–961.
- [18] 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义 [J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 47–58.
Wang Q H, Yang H J, Zhang Y T, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 47–58.
- [19] Yang S, Wu G H, Zhu Y F, et al. Key oil accumulation periods of ultra-deep fault-controlled oil reservoir in northern Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 285–299.
- [20] 韩剑发, 王彭, 朱光有, 等. 塔里木盆地超深层千吨井油气地质与高效区分布规律 [J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(5): 735–748.
Han J F, Wang P, Zhu G Y, et al. Petroleum geology and distribution law of high efficiency areas in ultra-deep kiloton wells in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 735–748.
- [21] 韩剑发, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区北部斜坡带下奥陶统碳酸盐岩风化壳油气富集特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(2): 167–173, 188.
Han J F, Yu H F, Zhang H Z, et al. Characteristics of hydrocarbon enrichment in the Lower Ordovician carbonate rock weathering crust on the northern slope zone of Tazhong Area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 167–173, 188.
- [22] 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气来源与运聚成藏研究 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(3): 426–435.
Han J F, Mei L F, Yang H J, et al. The study of hydrocarbon origin, transport and accumulation in Tazhong Area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 426–435.
- [23] 杨海军, 郝芳, 韩剑发, 等. 塔里木盆地轮南低凸起断裂系统与复式油气聚集 [J]. *地质科学*, 2007, 42(4): 795–811.
Yang H J, Hao F, Han J F, et al. Fault systems and multiple oil-gas accumulation play of the Lunnan lower uplift, Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(4): 795–811.
- [24] 韩剑发, 王招明, 潘文庆, 等. 轮南古隆起控油理论及其潜山准

- 层状油气藏勘探 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 448–453.
- Han J F, Wang Z M, Pan W Q, et al. Petroleum controlling theory of Lunnan paleohigh and its buried hill pool exploration technology, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 448–453.
- [25] Liu J Q, Li Z, Wang X, et al. Tectonic-fluid evolution of an ultra-deep carbonate reservoir in the southern Halahatang Oilfield Area, Tarim Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 145: 105870.
- [26] Zhu G Y, Li J F, Wang M, et al. Formation and distribution of ethanodiamondoids in deeply buried marine oil from the Tarim Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2021, 162: 104327.
- [27] Zhu G Y, Li J F, Zhang Z Y, et al. Stability and cracking threshold depth of crude oil in 8000m ultra-deep reservoir in the Tarim Basin [J]. Fuel, 2020, 282: 118777.
- [28] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335–349.
- Song X G, Chen S, Xie Z, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335–349.
- [29] Zhu G Y, Milkov A V, Zhang Z Y, et al. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China [J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 2019, 103(7): 1703–1743.
- [30] 天工. 塔里木盆地新发现 10 亿吨级超深油气区 [J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 133.
- Tian G. Newly discovered 1 billion-ton ultra-deep oil and gas area in Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(7): 133.
- [31] Yao Y T, Zeng L B, Mao Z, et al. Differential deformation of a strike-slip fault in the paleozoic carbonate reservoirs of the Tarim Basin, China [J]. Journal of Structural Geology, 2023, 173: 104908.
- [32] 韩剑发, 孙崇浩, 王振宇, 等. 塔中隆起碳酸盐岩叠合复合岩溶模式与油气勘探 [J]. 地球科学, 2017, 42(3): 410–420.
- Han J F, Sun C H, Wang Z Y, et al. Superimposed compound Karst model and oil and gas exploration of carbonate in Tazhong uplift [J]. Earth Science, 2017, 42(3): 410–420.
- [33] 杨海军, 蔡振忠, 李勇, 等. 塔里木盆地富满地区吐木休克组烃源岩有机地球化学特征及其油气勘探意义 [J/OL]. 地质科技通报, [2024-02-28]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20220705>.
- Yang H J, Cai Z Z, Li Y, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks in Tumuhe Formation, Fuman area, Tarim Basin and its significance for oil and gas exploration [J/OL]. Bulletin of Geological Science and Technology, [2024-02-28]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20220705>.
- [34] Jiang T W, Han J F, Wu G H, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2020, 47(2): 229–241.
- [35] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报, 2021, 42(8): 971–985.
- Tian J, Yang H J, Zhu Y F, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971–985.
- [36] Bai Z K, Lü X X, Song Z X, et al. Characteristics of boundary fault systems and its hydrocarbon controlling on hydrocarbon accumulation in Awati Sag, Tarim Basin, China [J]. China Geology, 2019, 2(1): 94–107.
- [37] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂控大油气田的勘探发现与技术创新 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58–71.
- Wang Q H, Yang H J, Wang R J, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58–71.
- [38] 张驰, 储呈林, 徐勤琪, 等. 塔里木盆地阿克库勒凸起东南斜坡走滑断裂构造特征及油气地质意义 [J]. 地质学报, 2024, 98(2): 481–493.
- Zhang C, Chu C L, Xu Q Q, et al. Tectonic structural characteristics of strike-slip fault in southeast slope of Akkule uplift in Tarim basin, and its petroleum geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(2): 481–493.
- [39] 高利君, 李宗杰, 李海英, 等. 塔里木盆地深层岩溶缝洞型储层三维雕刻“五步法”定量描述技术研究与应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 691–697.
- Gao L J, Li Z J, Li H Y, et al. The deep karst fissure and cavern reservoir in Tarim Basin carved in three dimensions: Research and application of “five-step method” quantitative description technology [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 691–697.
- [40] Tian F, Luo X R, Zhang W. Integrated geological-geophysical characterizations of deeply buried fractured-vuggy carbonate reservoirs in Ordovician strata, Tarim Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 292–309.
- [41] 孟伟. 碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏勘探开发关键技术——以塔河油田为例 [J]. 海相油气地质, 2006, 11(4): 48–53.
- Meng W. The key technologies for exploration and development of fractured/caverned karst reservoirs: A case of Tahe oil field, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(4): 48–53.
- [42] Liu L J, Fan W P, Sun X, et al. Gas condensate well productivity in fractured vuggy carbonate reservoirs: A numerical modeling study [J]. Geenergy Science and Engineering, 2023, 225: 211694.
- [43] He Z L, Sun J F, Guo P H, et al. Construction of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture-cavity reservoir geological modeling [J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2021, 48(4): 824–834.
- [44] Ni X F, Shen A J, Pan W Q, et al. Geological modeling of excellent fracture-vug carbonate reservoirs: A case study of the ordovician in the northern slope of Tazhong palaeouplift and the southern area of Tabei slope, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 444–453.
- [45] Ouyang S Q, Lyu X, Quan H, et al. Evolution process and factors influencing the tight carbonate caprock: Ordovician Yingshan Formation from the northern slope of the Tazhong uplift, Tarim Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 147: 105998.
- [46] Lan X D, Lyu X X, Zhu Y M, et al. The geometry and origin of strike-slip faults cutting the Tazhong low rise megaanticline (central uplift, Tarim Basin, China) and their control on hydrocarbon

- distribution in carbonate reservoirs [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 22: 633–645.
- [47] 黄绪宝, 顾汉明. 塔河油田南部缝洞储层的正演模拟及地震波场特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(6): 836–840.
Huang X B, Gu H M. Forward modelling and seismic wave field characteristics of fractured-vuggy reservoirs in the southern part of Tahe oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6): 836–840.
- [48] Zhu D C, Zou H Y, Yang M L, et al. The middle permian maokou reservoir (southern Sichuan Basin, China): Controls on karst development and distribution [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204: 108686.
- [49] 韩剑发, 程汉列, 施英, 等. 塔中缝洞型碳酸盐岩储层连通性分析及应用 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(5): 147–153.
Han J F, Cheng H L, Shi Y, et al. Connectivity analysis and application of fracture cave carbonate reservoir in Tazhong [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(5): 147–153.
- [50] Zhao X Q, Wu C D, Ma B S, et al. Characteristics and genetic mechanisms of fault-controlled ultra-deep carbonate reservoirs: A case study of ordovician reservoirs in the Tabei paleo-uplift, Tarim Basin, Western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 254: 105745.
- [51] 刘强, 张银涛, 陈石, 等. 塔里木盆地走滑断裂发育演化特征精细解析及其地质意义: 以富满油田F₁₇断裂为例 [J]. *现代地质*, 2023, 37(5): 1123–1135.
Liu Q, Zhang Y T, Chen S, et al. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its geological significance: A case study of F₁₇ fault in Fuman oilfield [J]. *Geoscience*, 2023, 37(5): 1123–1135.
- [52] Wang S, Liu H, Wu X, et al. Major period and process of hydrocarbon accumulation of deep reservoirs—A case study of Tuoputai Area in Tarim Basin, China [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 111305.
- [53] 宋周成, 翟元宝, 邓昌松, 等. 富满油田超深井井身结构优化技术与应用 [J]. *钻采工艺*, 2022, 45(6): 36–41.
Song Z C, Zhai W B, Deng C S, et al. Optimization technology and application of casing program of ultra-deep wells in fuman oilfield [J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(6): 36–41.
- [54] 蔡万春, 倪小威, 郇志鹏, 等. 直推存储式测井在富满油田超深地层中的应用优势及改进措施 [J]. *测井技术*, 2022, 46(5): 536–540.
Cai W C, Ni X W, Huan Z P, et al. Application advantages and improvement measures of direct push storage logging in ultra-deep formations in fuman oilfield [J]. *Well Logging Technology*, 2022, 46(5): 536–540.
- [55] 胡君毅, 周路. 裂缝检测分析方法在碳酸盐岩岩溶储层中的应用 [J]. *化工设计通讯*, 2021, 47(3): 187–188.
Hu J Y, Zhou L. Application of fracture detection and analysis method in carbonate karst reservoir [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2021, 47(3): 187–188.
- [56] 李一, 钟广法, 宋继胜, 等. 梯度结构张量分析法在三维地震资料河道砂体预测中的应用 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(3): 44–47, 110.
Li Y, Zhong G F, Song J S, et al. Application of the gradient structure tensor analysis method to the prediction of channel sand from 3D seismic data [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(3): 44–47, 110.
- [57] 靳大松, 霍如军, 张家振, 等. 塔里木油田富源区块钻井提速关键技术 [J]. *钻采工艺*, 2021, 44(1): 125–128.
Jin D S, Huo R J, Zhang J Z, et al. Key ROP improvement techniques for Fuyuan block in Tarim oilfield [J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(1): 125–128.
- [58] 韩忠艳, 耿宇迪, 赵文娜. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水平井酸压技术 [J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(6): 94–97.
Han Z Y, Geng Y D, Zhao W N. Fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(6): 94–97.
- [59] Zheng S Q, Yang M, Kang Z J, et al. Controlling factors of remaining oil distribution after water flooding and enhanced oil recovery methods for fracture-cavity carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 786–795.
- [60] Yuan D Y, Hou J R, Song Z J, et al. Residual oil distribution characteristic of fractured-cavity carbonate reservoir after water flooding and enhanced oil recovery by N₂ flooding of fractured-cavity carbonate reservoir [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 129: 15–22.
- [61] Wen Y C, Hou J R, Xiao X L, et al. Utilization mechanism of foam flooding and distribution situation of residual oil in fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Science*, 2023, 20(3): 1620–1639.
- [62] 郑小敏, 孙雷, 王雷, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油机理物理模拟研究 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(2): 89–92.
Zheng X M, Sun L, Wang L, et al. Physical simulation of water displacing oil mechanism for vuggy fractured carbonate rock reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2010, 32(2): 89–92.
- [63] Luo Z F, Zhang N L, Zhao L Q, et al. An extended finite element method for the prediction of acid-etched fracture propagation behavior in fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 191: 107170.
- [64] 杨前雄, 熊伟, 高树生. 单缝洞系统内部流态的初步模拟研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2007, 29(3): 95–96, 100, 127.
Yang Q X, Xiong W, Gao S S. Preliminary simulation of flow patterns in single fissure-cavern system [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007, 29(3): 95–96, 100, 127.
- [65] Abouelresh M O, Mahmoud M, Radwan A E, et al. Characterization and classification of the microporosity in the unconventional carbonate reservoirs: A case study from Hanifa Formation, Jafurah Basin, Saudi Arabia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 145: 105921.
- [66] 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——以塔河油田和顺北油气田为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1459–1465.
Ji B Y, Zheng S Q, Gu H. 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.
- [67] 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 W G. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1–10.