

塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统 划分与形成机制

黄 诚, 云 露, 曹自成, 吕海涛, 李海英, 刘永立, 韩 俊

(中国石化 西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:碳酸盐岩地层普遍发育各类成因机制的非均质性缝洞储层,其孔隙系统的形成演化受岩石的地质演化控制。一般情况下,这类非均质性缝洞储层的形成与地层流体系统中各种不饱和性流体的热化学作用方式和所能带走的物质体积总和有关。但是,塔里木盆地顺北地区发现的“断控”缝洞储层未经历不饱和性流体的溶蚀改造作用,其空间展布明显受到断裂带边界约束,勘探证实可以形成商业价值储层。因此,断裂活动能否发生大规模的物质体积调整,形成完整的缝洞储集系统,需要引起重视。通过应用三维地震、钻井异常工况、测井、元素录井、压恢试井、干扰试井和生产动态资料等,综合表征“断控”储层特征,反演“断控”缝洞单元和储集系统。针对走滑断裂活动过程中的岩石物理特性、构造增容机理和流体改造机制,开展了脆性岩层应变方式、断层封闭性控制因素、水-岩作用方式等研究,提出断裂带内部受岩体错动、破碎及力学-热化学作用而发生的物质体积调整是顺北地区“断控”缝洞储层形成的主导因素,其孔隙系统的形成、演化与断裂活动关系密切。当“断控”缝洞系统形成、演化过程中无法忽视流体影响时,可依据流体性质和作用方式等,细分出“岩溶型”和“热溶型”亚类,作为“断控”储层概念的理论衍生。

关键词:断控储层;走滑断裂;缝洞系统;碳酸盐岩;中-下奥陶统;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin

Huang Cheng, Yun Lu, Cao Zicheng, Lyu Haitao, Li Haiying, Liu Yongli, Han Jun

(Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Heterogeneous fractured-vuggy reservoirs of diverse genetic mechanisms are widely developed in carbonate strata, and the pore generation and evolution of diverse types within is related to the geological evolution of rocks. Generally, the formation of heterogeneous fractured-vuggy reservoirs is associated with thermochemical action mode of various unsaturated fluids in the formation and the total volume of materials that can be carried away. However, the fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin, are not subjected to dissolution modification of unsaturated fluid, and feature a space distribution mainly constrained by fault zone boundaries. Exploration experiences have suggested that those reservoir spaces can be of hydrocarbon reservoirs with commercial value. What we have to pay attention to lies in whether a reservoir system of fracture-vug type can be formed under large-scale volume adjustment of materials by fault activities. An integration of 3D seismic interpretation, analysis of abnormal drilling conditions, well logs, element logging, pressure buildup test, interference test, and production performance data, is applied to comprehensively characterize the fault-controlled reservoirs, with their fractured-vuggy units and reservoir system inverted. The strain mode of brittle strata, factors controlling fault sealing, and water-rock interaction mode are studied according to the rock physical characteristics, structural compatibilization mechanism, and fluid modification mechanism during the strike-slip fault activity. It is proposed that the material volume variation resulted from rock dislocation, damage, and mechanical-thermochemical action in the fault zone, is a factor determining the formation of

收稿日期:2020-12-31;修订日期:2021-12-18。

第一作者简介:黄诚(1985—),男,硕士、副研究员,石油地质。E-mail: 61783856@qq.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部项目(P21033-3);国家自然科学基金项目(U19B6003-02)。

fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei area, whose pore system formation and evolution is closely related to fault activities. As theoretical derivation, the fault-controlled reservoirs can be subdivided into two types given the property and action mode of fluids, that is, the reservoir of karst type and of hydrothermal dissolution type, if being ignorable effects in the process of formation and evolution of their fracture-vug system.

Key words: fault-controlled reservoir, strike-slip fault, fracture-vug system, carbonate rock, Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:黄诚,云露,曹自成,等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68. DOI: 10. 11743/ogg20220105.

Huang Cheng, Yun Lu, Cao Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68. DOI: 10. 11743/ogg20220105.

断裂是具有宽度、长度和几何形态的破碎带,是具有时空概念的构造地质体。B. И. Белкин(贝尔金, 1989)首次提出“脉型油气圈闭”的概念^[1],强调脉型圈闭形成于地震应力带上,通过膨胀预破裂和热液改造,极大地提高原先基本不渗透岩石的储集性能,形成具备油气储集能力的圈闭。Tveranger(2005)提出了断裂相的新概念^[2],指出断裂带是具有特定断裂相组合序列和内部结构的三维地质体,为建立断裂带的储层地质模型奠定了理论基础。罗群(2004)从圈闭捕获、聚集油气的基本石油地质条件出发,通过对柴达木盆地北缘冷湖构造带稠油封堵型油藏分析,发现油藏大致沿呼通诺尔断层带展布,大胆提出“断层体”圈闭的假设^[3],并对断层体圈闭的储集、封闭和保存条件做出了理论上的预测。由于中国主流观点仍强调从流体动力学角度阐述断裂构造内烃类的运移模式,因此断裂与不整合面、储集层共同构成的油气复合输导系统成为研究热点,然而,断裂的储集性能及成储机制研究未能引起广泛重视。顺北油气田的发现证实走滑断裂可以形成商业价值储层^[4-7],但有学者对“断控”储层的真实储层类型和成储机制存有质疑:断裂构造的破碎规模有限,在地质演化过程中,力学-热化学作用会造成断裂构造的物性降低或直接闭合。因此,推测顺北地区的“断控”储层仍是沿断裂展布的溶蚀缝洞型储层,或者断裂沟通了深部非断控的规模储集系统。

本文认为顺北地区发现的“断控”储层主要由构造破裂形成的“空腔”型洞穴、孔洞和缝网系统组成,其孔隙系统的形成、演化与断裂带内部受岩体错动、破碎及力学-热化学作用而发生的物质体积调整关系密切,是一种复合的兼具缝洞且与构造呈良好匹配关系的储集体。顺北地区“断控”储层的发现是对断裂构造在石油地质研究中扮演角色的重新认知,实现了在地质思维中由二维结构向三维地质体的华丽蜕变。

1 区域地质概况

顺北地区位于塔里木盆地腹地,处于塔中、塔北两大古隆起和阿瓦提、满加尔两大古拗陷之间,是塔里木盆地台盆区最重要的构造纽带,长期稳定沉降。顺北地区沉积演化受控于盆地区域构造与沉积演化背景,尤其以塔中-塔北古隆起的形成演化影响为主。整体而言,沉积环境经历了早古生代海相—晚古生代海—陆过渡相—中、新生代陆相演化历程。本区在盆地多期构造运动阶段,存在一定程度的抬升剥蚀,但地层序列和构造格局基本未受到影响^[8-9]。在东西横亘、南北相间的隆—坳格局之下,受塔中-塔北古隆起多期活动产生的斜向和旋转应力场控制,顺北地区形成了一系列与区域构造事件呈良好匹配关系的克拉通内小尺度高陡走滑断裂。走滑断裂集中发育于顺托果勒低隆起之上,普遍贯穿古生界的地层序列,表现为呈一定间距、密集分布的大规模断裂系统(图1)。走滑断裂系统以小尺度水平位移为主,最大滑移距不超过2 km,延伸长度最大可超过250 km,普遍形成聚敛或拉伸型直立走滑构造,并在斜压和斜拉应力背景下,分别呈现正花状、负花状构造,沿断裂走向呈现明显的横向分段性^[10-15]。

顺北地区“断控”储层的发现具有特定的勘探背景,其发现始于对古老海相碳酸盐岩领域缝洞型岩性圈闭和油气富集规律的深入研究和实践。中国石化西北油田分公司经过数十年的勘探、开发实践,发现走滑断裂带与上覆古喀斯特生态系统共同控制油气的富集。随着塔河油田向南部古斜坡区滚动勘探,进入上奥陶统泥岩覆盖区后,古地表喀斯特地质条件消失,加大了对断裂带控储机制的探索,提出古岩溶沿断裂体系下渗、溶蚀改造,形成柱状岩溶缝洞型储层的假设,并取得不错的勘探成效^[16-18]。至此,走滑断裂带是具

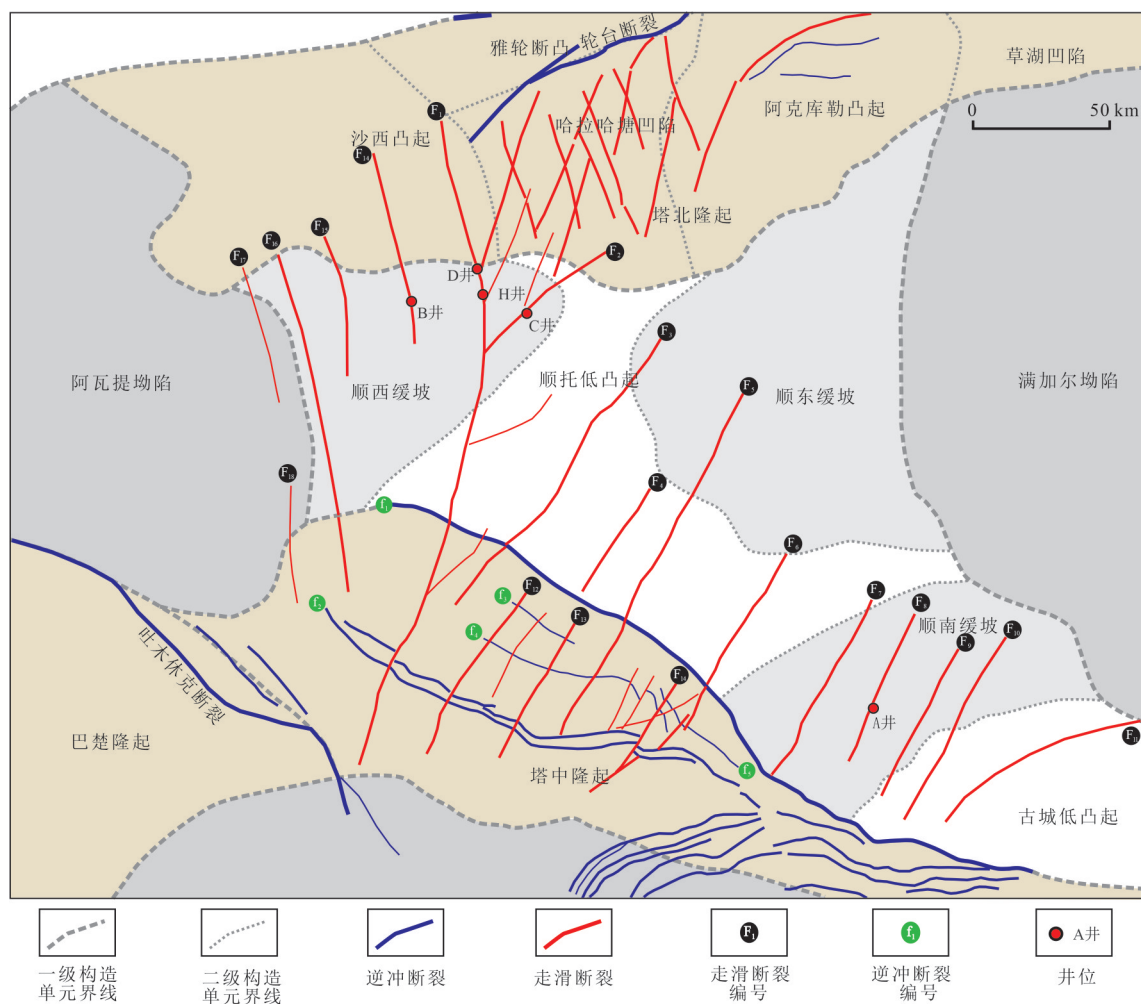


图1 塔里木盆地北部断裂分布

Fig. 1 Distribution map of faults in the northern Tarim Basin

有储集性能的地质体的观点逐渐被勘探工作者接受,但仍强调成储机制为大气淡水沿断缝系统溶蚀改造,其本质上仍是喀斯特生态系统的理论补充和实践延伸。也许事物总是偶然性和必然性的孪生体,在向南探索大气淡水沿断裂系统溶蚀改造的动力波及边界时,发现走滑断裂可以仅通过岩体错动、破碎及力学-热化学作用发生物质体积的调整,进而形成具有勘探开发经济价值的储集体,顺北地区的“断控”储层概念逐渐走进学者视野。

2 断控储层定义及其特征

2.1 断控储层定义

顺北地区在侧钻走滑断层时普遍发生不同程度的放空、漏失现象,断层之间的围岩致密,鲜有放空、漏失现象,表明断裂带内部物性快速变化。从岩心、成像测井和试井资料等来看,断层内部结构复杂,发育缝洞型

储层,由不同尺度的洞穴、孔洞和裂缝等储集空间组成^[4-7]。从岩矿和地化资料来看,“断控”储层存在流体改造的痕迹,但并非普遍存在。因此,本文将沿断裂带展布、以构造破碎为主、具备物理-热化学机制下增容作用的缝洞储层统称为“断控”储层。

“断控”储层的分布规律和孔隙系统的形成演化以断裂带空间结构和力学机制为主导,不受水-岩作用方式和流体动力波及范围影响。理论上,“断控”储层可发育于贯穿脆性地层的断裂带内部任何部位,储层发育程度与脆性岩层的应力应变方式、强度有关,这与溶蚀缝洞型储层存在本质区别。

2.2 断控储层特征

理论上,走滑断层在内部结构上通常被分成两部分:低渗透性的断层核和高渗透性的破碎带。与断层核相比,破碎带位于断层核两侧且形变程度较低,向外逐渐过渡为致密围岩。因此,断层不是一个单独的面,

而是一个有一定宽度且包含不同特征断层岩的“体”。走滑断层在构造应力作用下,以两侧岩体发生明显水平位移为特征,以周围岩体发生变形和破裂为产物,经历多期构造运动和流体叠加改造,形成内部结构复杂的、且具有储集性能的地质体。走滑断层内部缝洞结构的复杂性与不同部位的岩石强度、力学性质和现今应力状态差异有关。走滑断层作为具有储集性能的地质体,准确表征断层内部的储层特征和缝洞系统是开展“断控”储层研究的先决条件。

2.2.1 孔隙类型

碳酸盐岩在断裂过程中发生脆性破裂和弹性变形。脆性破裂机制以相互剪切、滑动形成的断层滑动面和断裂破碎带为主,其次为断层两侧有限区域应力释放形成的诱导裂缝带^[19]。断裂破碎带由断层岩和断层活动派生的裂缝构成^[20],诱导裂缝带由断层两侧脆性岩层弹性变形过程中派生的裂缝系统构成。断层滑动面在“弹性-摩擦”变形过程中,发生强烈的力学-热化学作用,颗粒尺寸快速减少、矿物沉淀作用加剧,断层应变硬化形成具有内聚力的断层核,储集物性显著降低,成为流体流动屏障^[21-24]。断层应变硬化作用由断层滑动面向两侧呈递减趋势,断层岩的内聚力逐渐降低,过渡为低-无内聚力的松散结构,即物性更好的破碎角砾岩带。破碎颗粒在相对滑动和旋转过程中会形成“点-面”支撑的孔洞空间,乃至尺度更大的洞穴空间。理论上,碳酸盐岩地层经历构造破碎或喀斯特化均可以形成不同尺度的洞穴、孔洞和裂缝等孔隙类型,两者在物理属性上无明显差别,但孔隙成因机制存在明显差异。

1) 断控洞穴

断控洞穴是指直径大于200 mm的断层空腔或破碎带,钻井以放空、漏失、钻时骤快或取心收获率低为特征。顺北地区钻遇断层的放空长度一般在0.25~1.50 m,最大可达4.33 m。由于放空后一般直接测试投产,鲜有洞底取心和成像测井资料,目前仅有2口井获取了放空段的成像测井信息。以A井为例(图2),放空段呈现角砾支撑结构,洞穴顶底和内部角砾无溶蚀迹象;双井径曲线显示洞穴长轴方位与围岩有效裂缝走向基本一致,表明洞穴展布与应力崩落方位有关。放空段在钻具冲划过程中存在频繁“憋泵”情况,表明洞穴内部结构不规则,与岩溶洞穴明显不同。放空段顶、底的元素录井复查表明,元素组成与围岩基本一致,仅硅、铝、铁元素含量略有上升,表明断层未经历规模的溶蚀改造和化学沉淀。

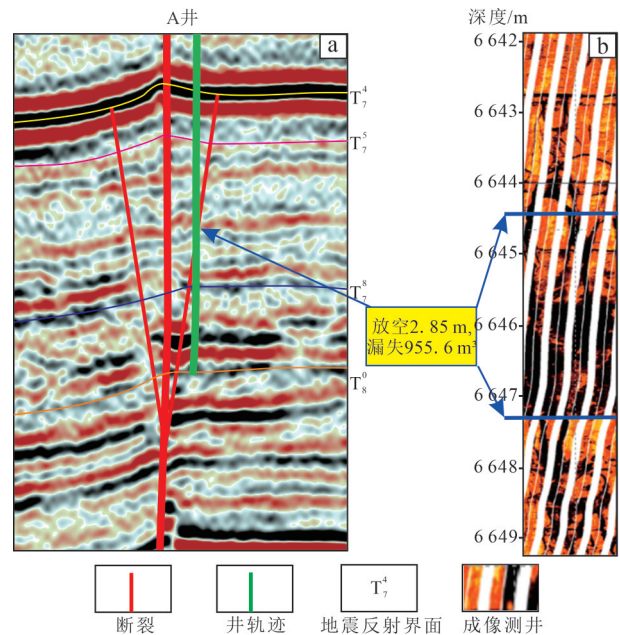


图2 塔里木盆地A井放空段成像测井响应特征

Fig. 2 Image logging responses of the interval with no resistance to drill string in Well A, Tarim Basin

a. 过A井地震剖面;b. A井断层放空段成像测井特征

顺北地区钻遇断层发生了更多的漏失现象,泥浆漏失量普遍在474~873 m³,漏失速率最大可达15 m³/s。以B井为例(图3),钻遇断层发生漏失,双井径曲线可见扩径现象,扩径长轴方位与围岩有效裂缝走向基本一致,双侧向电阻率曲线呈箱形特征。测井解释断层内部孔隙度快速变化,介于6%~50%;成像测井增益处理后,断层内部可见不规则结构的“砾状亮斑”,未见溶蚀迹象,元素组成也与围岩一致。成像测井显示围岩致密,仅发育少量裂缝,井径曲线平直,电阻率呈高阻特征,测井解释孔隙度介于0.5%~2.5%。

断控洞穴与岩溶洞穴的内部堆积物组成明显不同,与两者的成因机制有关。断控洞穴是岩体剪切、破碎形成的有效空间,其内部堆积物以垮塌的断层角砾为主,呈现基于力学的不规则支撑结构。岩溶洞穴是流体溶蚀、扩大孔隙系统形成的有效空间,其内部堆积物呈现较好的沉积韵律结构。两者在“三孔隙度”(AC, DEN, CNL)测井响应特征上的差异尤为明显。岩溶洞穴内部堆积物呈现韵律结构,“三孔隙度”曲线在洞穴段呈现同步响应特征;断控洞穴内部角砾不规则堆积,缺乏韵律结构,“三孔隙度”曲线呈现非同步性响应,推测因断控洞穴内部结构复杂而在测井过程中发生“周波跳跃”现象,导致“三孔隙度”曲线的非同步响应(图3)。

2) 裂缝

裂缝是碳酸盐岩地层中常见的微构造类型,起到

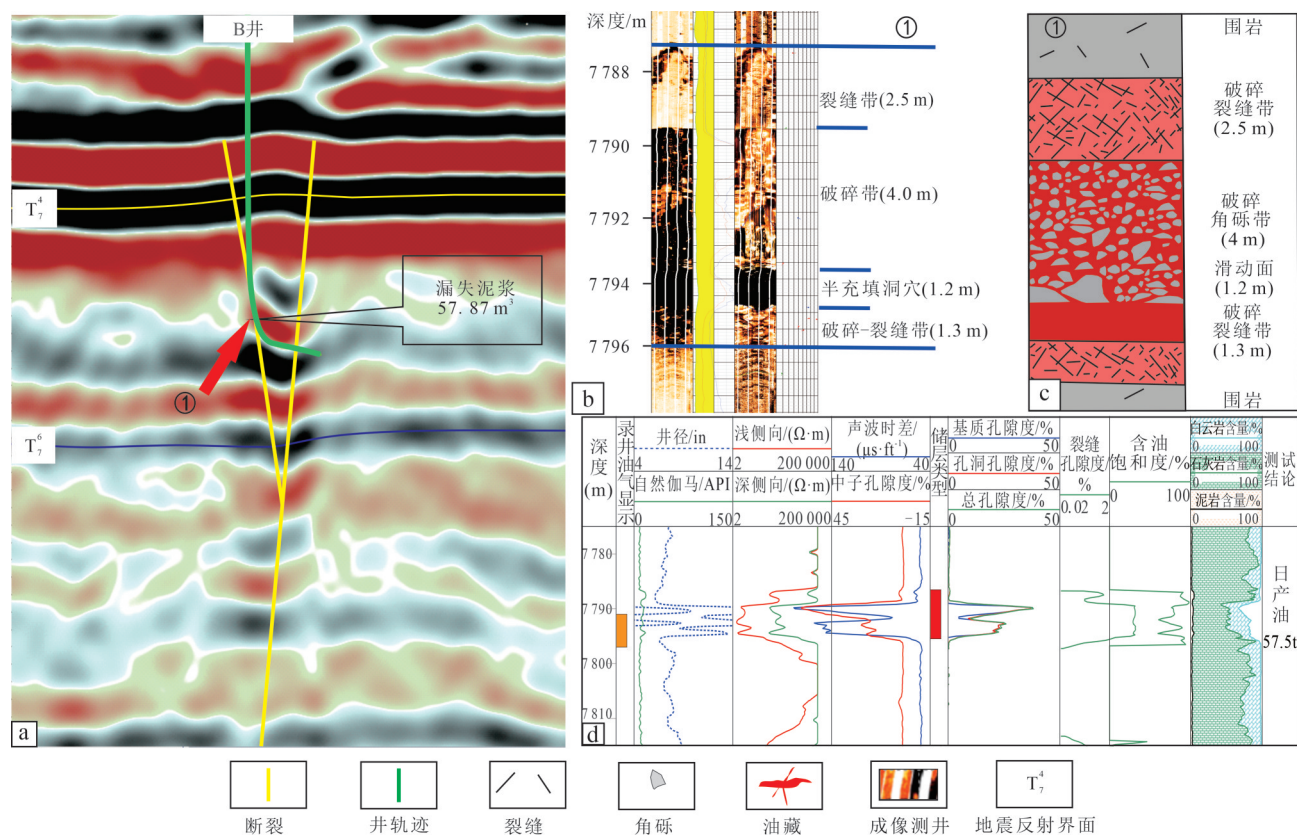


图3 塔里木盆地B井断层内部“核-带”结构及测井响应特征

Fig. 3 Fault core-damage zone structure and logging responses in a fault in Well B, Tarim Basin

a. 过B井地震剖面; b. 漏失井段成像测井特征; c. 漏失井段断层核-带结构示意图; d. B井储层综合柱状图

连通各种孔隙空间的作用,其自身也具备一定的储集性能。岩心观察和成像测井是描述井下裂缝发育情况最直接的方法。顺北地区发育构造缝和成岩缝两种类型。成岩缝主要为层理缝和缝合线,基本全被方解石和沥青质等充填,属于无效裂缝;具备储集性能的裂缝以构造缝为主,与断裂构造关系密切。

构造缝以中-高角度剪切裂缝为主,裂缝面平直,呈雁列式排列,裂缝开度主要介于0.2~2.0 mm,取心见裂缝渗油。测井解释裂缝发育密度与断层变形强度呈正相关性,裂缝以“齿化低阻”为测井响应特征,成栅状分布于限幅(>20 000 $\Omega \cdot m$)高阻围岩内。

构造缝充填方解石的U-Pb同位素测年、充填沥青的黄铁矿硫同位素测年、流体包裹体分析以及裂缝切割关系证实存在3期构造缝^[25],其形成时间与断裂主要活动期匹配^[26]。因此,断裂活动期次和强度会直接影响断层附近裂缝系统的发育规模。

3) 孔洞

孔洞直径一般介于2~200 mm,一般为破碎带颗粒在旋转、位移过程中形成“点-面”支撑结构的小微孔隙空间,孔隙成因机制与断控洞穴无异,仅表现为孔隙

直径趋小变化的过渡特征。孔洞一般与断控洞穴相伴而生,无法从断层岩中完全剥离研究,取心偶有揭示,呈不规则几何结构,内部充填富有机质成分。

2.2.2 储层类型

基于断裂内部结构的分带模式^[22]和递进演化过程,存在3种主要的储层类型:断控洞穴型、裂缝型和缝洞型,这3种类型形成于断裂带的不同部位或者不同演化阶段。

1) 断控洞穴型

断控洞穴型储层由无(或低)内聚力的破碎角砾岩带组成,形成相对均质的双重介质模型(沃伦-茹特模型)。压恢试井呈现典型的径向流动特征^[27],持续时间长(C井径向流动持续时间长达3a),说明洞穴型储层规模大,短时间难以波及储集体边界。压力导数曲线存在小幅的尖峰状抖动现象,说明洞穴型储层存在轻微的压力传导屏障,表明洞穴内部结构不规则(图4),与成像测井特征和放空段探底“憋泵”情况反映的信息一致。

2) 裂缝型

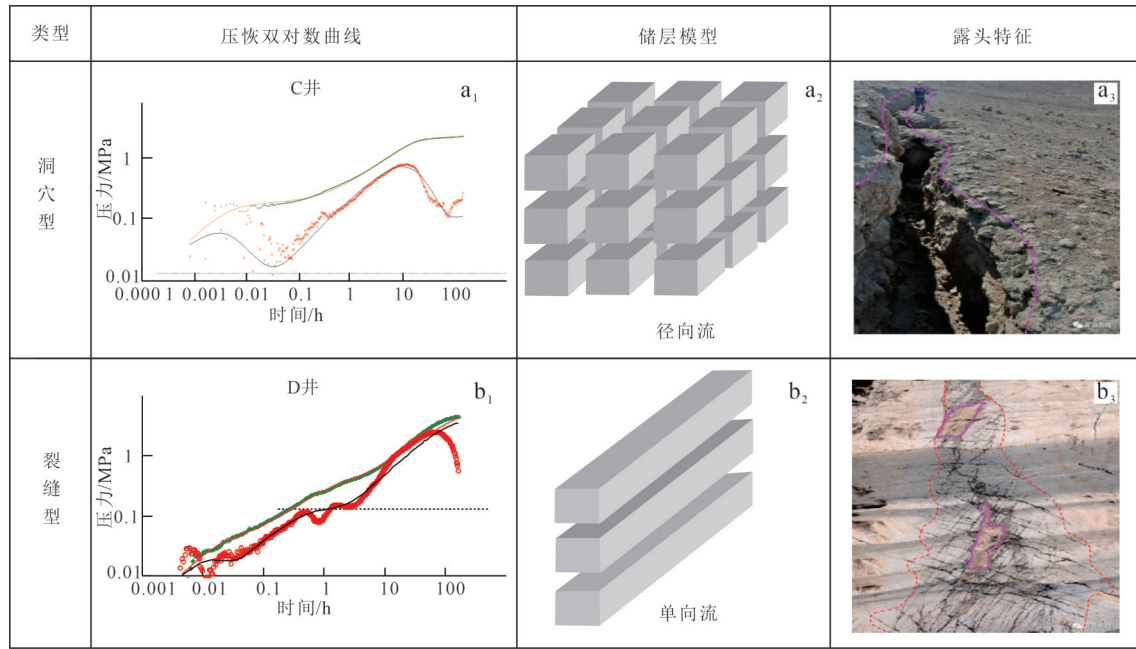


图4 顺北地区断控洞穴型、裂缝型储层压恢试井响应特征

Fig. 4 Logging responses in pressure buildup test of reservoirs of fault-controlled cavern and fracture types in Shunbei area

裂缝型储层广泛分布于断层两侧围岩有限弹性变形区域。钻井以轻微漏失或不漏失为主,双侧向电阻率曲线呈指状尖峰低阻特征,成像测井呈中-高角度裂缝密集分布特点。裂缝一般呈组系分布,形成具有明显各项异性的介质模型(凯泽米模型)。压恢试井呈现典型的裂缝导流特征^[27],压力导数曲线平滑,内区地层渗透率一般在 $(100\sim 530)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,说明近井区域属于中-高渗透地层;外区地层渗透率普遍小于 $50\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,表明远端地层渗透性变差,能量补给需要克服较大的生产压差(图4)。裂缝型储层在试采时表现出生产压差大、压降迅速、地层能量供给缓慢等特点。

3) 缝洞型

缝洞型储层属于断控洞穴型和裂缝型储层的过渡类型,地层渗透性快速变化,储层非均质性增强。钻井普遍发生漏失,双侧向电阻率曲线呈箱形低阻特征。压恢试井呈现径向流动和裂缝导流的过渡类型^[27],部分井发生裂缝导流和径向流动交替出现的情况,呈现多缝洞连通结构。压力导数曲线存在尖峰状抖动现象,说明缝洞型储层存在压力传导屏障,其内部结构不规则,储层非均质性强。

2.2.3 缝洞单元

断控缝洞单元一般指具有连续、统一滑动面的断层内,由连通的裂缝、孔洞和洞穴组成的缝洞集合体,缝洞单元具有相同的油气藏性质和统一的油气藏压力

系统。断控缝洞单元判别难度大,需要基于断层的地质静态描述与投产井油藏动态特征对其进行判别。

1) 地质静态描述

断控缝洞单元的空间分布十分复杂,但储层形成机制相同。因此,断裂构造样式、阶列组合方式以及主滑移断层判别是缝洞单元地质静态描述的基础。

一般情况下,大型走滑断裂带是由一系列初始形成的线列或错列的小型走滑断层递进拼接而成。初始的线列或错列走滑断层具有连续、统一的断层滑动面和断裂破碎带,控制了断控缝洞单元的形成和规模,断层叠覆区为缝洞单元边界。通过解析断层的阶列组合和剖面构造样式,可以初步划分缝洞单元。在此基础上,运用井-震标定和正演模拟,确定洞穴型、缝洞型和裂缝型储层的地震相,利用瞬时能量、不连续性和增强相干等地震属性,在空间上雕刻出有利地震相的形态和范围,判别缝洞单元主体及其空间分隔性^[28-29]。

2) 投产井油藏动态响应

缝洞单元内部渗透性高,井组连通性好,其本质是一个多井系统。通过对具有连续、统一滑动面的断裂上投产井进行干扰试井,获取了准确的多井干扰数据。结果表明,具有连续、统一滑动面的断裂内部干扰试井信号明显,监测到明显压力降幅转折点,定量井间干扰试井响应速度最大达到380 m/h。断层叠覆区干扰试井未监测到压力降幅转折点,储层连通性差,为缝洞单元边界。

连通井组在同一工作制度下,试采累产曲线呈现斜直线型特征,生产过程中流压变化曲线未出现明显波及范围扩大现象,表明井组内部连通性好,具有统一的缝洞单元边界。井组内投产井的油气藏特征相同,不同生产时间的油气藏压力系数呈现斜直线型分布特征,表明缝洞单元内具有相同的油气藏性质和统一的油气藏压力系统。

2.2.4 缝洞系统

断控缝洞系统是指同一断裂带在断裂构造样式和动态演化过程约束下,由彼此分隔的缝洞单元形成的具有成因关联性的缝洞系统。顺北地区走滑断裂普遍发育幕式叠加变形,存在挤压、伸展和平移3种主要变形样式。

挤压变形会导致断裂带内部围岩发生强烈弹性变形,其与断层共同释放应力,限制了断裂破碎带的发育规模。此外,由于断层为挤压性质,断裂破碎带的内聚力增强,从而导致缝洞储层的“减孔效应”增强,缝洞单元规模减小。但强烈的弹性变形会形成规模更大的裂缝系统,导致缝洞单元之间分隔性降低,形成类似“蜂窝煤状”的缝洞系统,试采中后期生产压差增大,将逐渐动用远端缝洞单元(图5a,c)。

伸展变形会导致应力集中释放于断层附近,有利于形成低-无内聚力破碎角砾岩带,缝洞单元物性更好、规模更大。缝洞单元之间的围岩鲜有参与弹性变形,裂缝系统不太发育,缝洞单元之间分隔性强,形成相对独立的缝洞系统,在长期试采过程中未发现动用远端缝洞单元的现象(图5b,d)。

此外,由于连续的、完整的断裂活动涵盖局部应力场演化的全过程,会影响储集系统的形成和演变。局部应力场的旋转和走滑运动方向反转,会造成断层发生挤压与伸展性质的转换,储集结构发生叠加改造,导致复式拉分变形和复式挤压变形的储集结构发生反向演化,即复式拉分变形样式的缝洞单元规模减小、缝洞单元之间的分隔性降低,反之亦然。

3 成储机制

3.1 地层材料性质

不同岩性的应力-应变关系曲线存在明显差别。断裂活动在软弱岩层中以塑性变形为主,断层面粘滑,应力大部分消耗在断层位移上,在围岩中集中很少,且以塑性变形为主,而不是构造破裂^[22]。在脆性岩层中,断裂活动会发生大规模脆性变形,断裂破碎带和诱导裂缝带共同诱发断裂带内物质体积的调整,形成兼具缝洞结构特征,且与断裂活动呈良好成因关联性的断控缝洞系统。

顺北地区中下奥陶统-寒武系发育巨厚、连续沉积的碳酸盐岩地层(>2 km),地层深埋在7 300 m以深。巨厚、致密的碳酸盐岩地层有利于走滑断裂带发生大规模脆性变形,鲜有泥质等软弱层塑性变形而堵塞破碎带的情况。走滑断层产状高陡直立,有利于形成垂向贯穿的断裂破碎带,分段构造样式则有利于储层横向分隔。因此,顺北地区特有的地层材料性质促使本区具备仅通过断裂活动发生的大规模构造破裂,形成与断裂活动呈良好成因关联性的缝洞型商业储层。

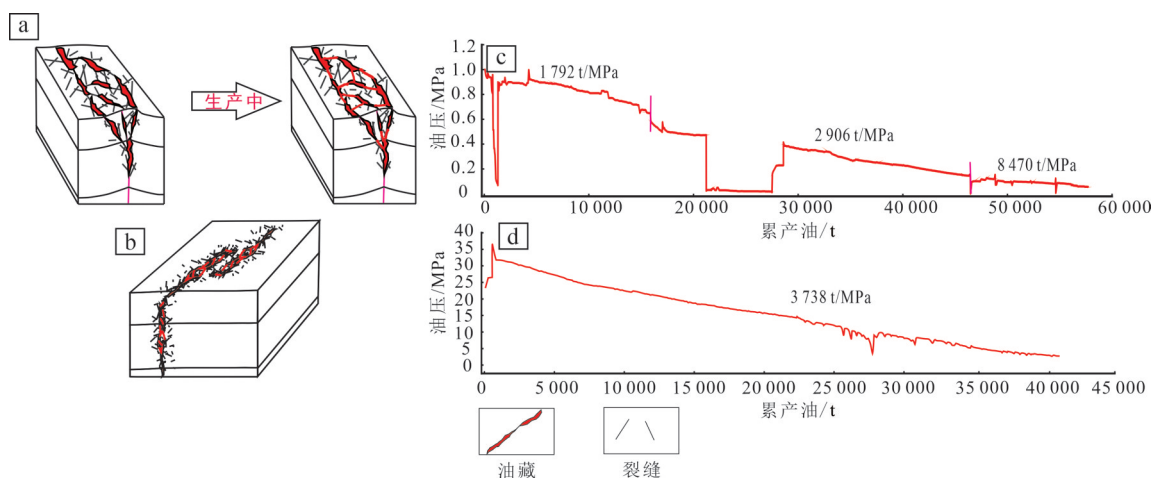


图5 挤压变形和伸展变形机制下的断控储层生产动态特征及油藏示意图

Fig. 5 Schematic diagrams showing fault-controlled reservoirs under compressive and extensional deformation regimes and their production performance

a. 挤压性断裂带油气藏特征示意图; b. 伸展性断裂带油气藏特征示意图; c. 挤压性断裂投产井生产特征, E井; d. 伸展性断裂投产井生产特征, F井

3.2 构造增容机制

断裂带一般具有二元结构,即走滑断层和围岩诱导裂缝带。由于断裂带是多次地震滑动的累积,其每次滑动都不遵循同一个滑动面,自然也就存在叠覆的走滑断层和诱导裂缝带,导致“断控”储层呈现空间非均质性。这种在走滑断裂带内部因构造破裂增容形成的缝洞型储层称为“断容型”断控储层。总体而言,断裂活动期次越多、变形强度越大,位移量越大,越有利于形成规模断控储层。

3.2.1 “核-带”模式

对于深埋固结成岩的非-低孔隙碳酸盐岩而言,伴随断层的形成、传播和相互作用,断层发生持续的、复杂的剪切破碎和应变硬化。断层滑动面、断层破碎带及诱导裂缝带形成的“核-带”结构,集中释放了大量应力,形成的碎裂岩和断层角砾岩具有一定的内聚力,其渗透率相比围岩而言“时高时低”,储层非均质性强,断层破碎带向两侧过渡为围岩诱导裂缝带,由相互交织的裂缝网络组成,形成高渗透性区域(图3,图6)。

断裂活动时可形成具备规模储集效应的构造破碎区域,关键是断裂停止活动后,能否仍维持高开启状态。从断层封闭性与储集性的辩证关系来看,要使断

裂维持高开启状态,关键影响因素是:断层承受的正应力状态、软弱岩性的含量及脆-塑性应变状态、诱导裂缝带的闭合程度。

1)顺北地区走滑断层高陡直立,上覆地层在断层上产生的正压应力有限。侧向挤压应力在幕式构造活动时达到峰值,但不可持续。侧向伸展应力在幕式构造活动峰值期,可以形成大规模的松散-低内聚力的破碎带,断层滑动面开启程度高,有利于沿滑动面形成尺度不一的断层“空腔”,在构造活动平静期得以保存。因此,断裂带内部可以形成并保留具有一定规模的断控缝洞单元。断层承受的正应力状态与断层产状关系密切,断层倾角越陡,在断层上产生的正压应力越小,越有利于断控储层的保存。

运用多地震属性检测断层,拾取井轨迹闭合方位的断层产状数据,统计同一条断层不同投产井区的断层倾角与单位压降产能和气油比系数相关性。结果表明,断层倾角与两类指标成正相关性。断层倾角越陡,单位压降指数越高,表明井控缝洞单元规模越大;断层倾角越陡,气油比系数越高,表明晚期充注强度越大^[7,25],断层开启性越好(图7)。

2)巨厚碳酸盐岩地层中塑性岩性含量极少,元素录井和返出岩屑亦证实断层内部为碳酸盐岩,元素组成与围岩无异,塑性岩性含量极少。断层滑动面反复运动时,两侧岩层以脆性应变为主,形成的断层破碎带

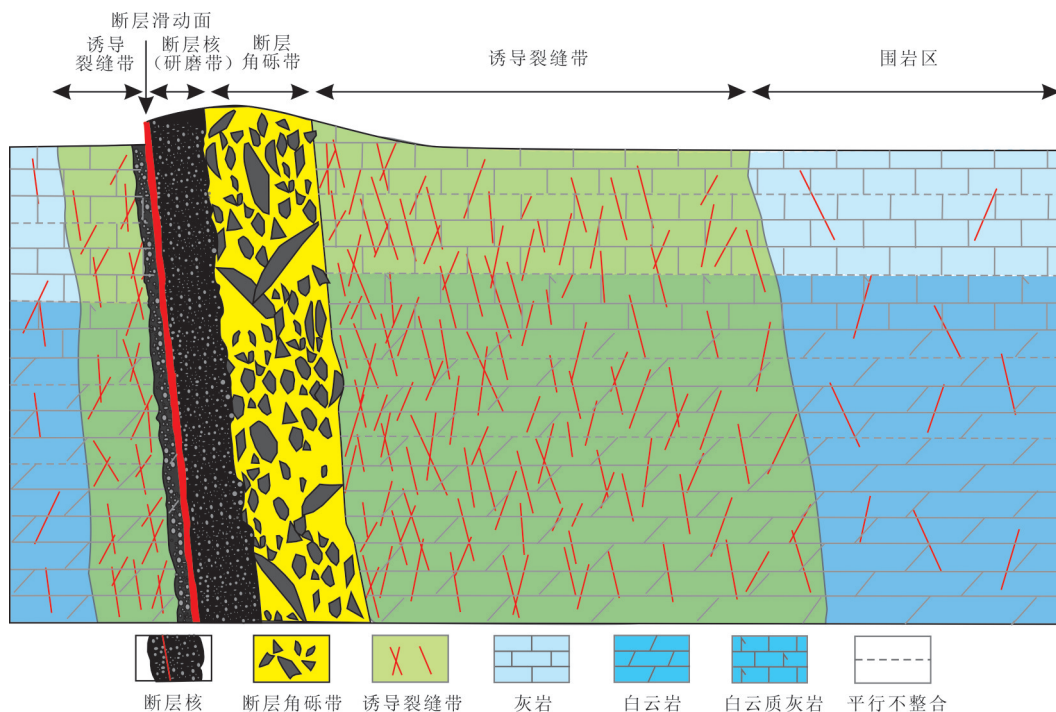


图6 顺北地区走滑断层的“核-带”成储模式

Fig. 6 A reservoir model of “fault core-damage zone” type in the strike-slip fault in Shunbei area

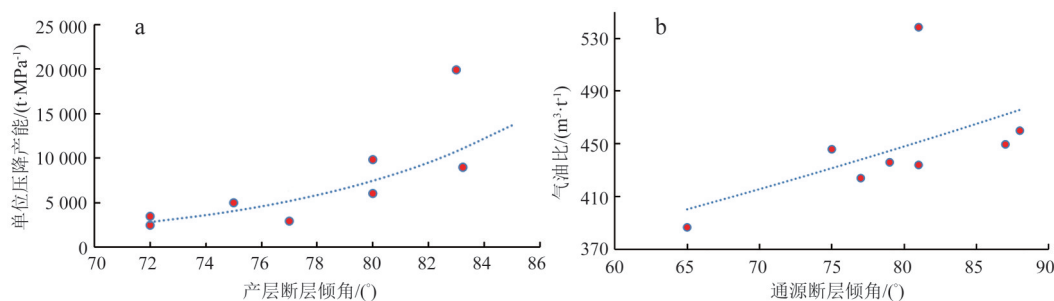


图7 顺北1号断裂带投产井断层倾角与单位压降产能(a)、气油比(b)交汇图

Fig. 7 Cross plots of fault dip angle vs. productivity per unit pressure drop (a), and fault dip angle vs. gas-oil ratio coefficient (b) in a production well in Shunbei No. 1 fault zone

虽具有较强的内聚力,但无法完全封闭。加之断裂幕式活动,已经应变硬化的断层岩仍会发生二次剪切破碎,不利于封闭断层。

3)在喜马拉雅期,受印度板块和欧亚板块碰撞影响,塔里木盆地整体受北东-南西方向水平挤压应力场控制^[30-34],顺北油气田现今地应力场的最大主应力方向为NE向45°,NE和NEE走向裂缝带处于激活状态,具备较好的开启性能,成像测井解释的开启裂缝多为NE和NEE走向。以D井为例,本井在叠接隆起部位调整了4次斜井轨迹方案,前3次井轨迹闭合方位与现今地应力场的最大主应力方向近平行,第4次井轨迹闭合方位与最大主应力方向近垂直。第4次井轨迹的全井段油气显示活跃程度明显高于前3次,表明第4次井轨迹钻遇开启性裂缝更多,开启裂缝具有明显各向异性,裂缝走向与井轨迹闭合方位近垂直,与现今最大主应力方向近平行。

3.2.2 “叠接”模式

在断裂带递进走滑过程中,两条走滑断层之间的叠覆区域,称为叠接部位。叠接部位在两侧断层滑动面的相向运动过程中,会发生旋转-变形,极易发生剪切破碎。伴随着断裂带的持续走滑运动,叠接部位的多个滑动面最终会逐渐“贯穿”形成统一的新滑动面,新断层滑动面一般呈现弯曲形态,弯曲部位的两盘岩体会发生旋转-撕裂,诱发局部张应力场或挤压应力场,拓展形成复杂的断控缝洞型储层。

1) 横向“叠接”部位

走滑断层的叠接部位和弯曲部位常形成正花状构造和负花状构造。

正花状构造形成于局部压扭应力场,叠接区域的围岩破碎程度高,分割性强,围限叠接部位的边界断层是主滑移断层,以挤压性质为主,断层内部纵向非均质性强,缝洞型储层呈现纵向分层发育特点。以H井为

例(图8a,b),直井轨迹进入挤压性断层内部长达367 m,测井资料显示断裂内部缝洞型储层和致密隔层间互分布,呈现垂向分层特点。

负花状构造形成于局部张扭应力场,叠接区整体下掉形成地堑,地堑内部因未发生明显变形,仅分散分布诱导裂缝,地层渗透性差,不发育规模断控储层。边界断层为主滑移断层,以弱伸展性质的断裂活动为主,断层的弱伸展性质有利于形成和保持低-无内聚力的断裂破碎带,沿断裂形成贯通的大型缝洞单元。以G井和G-CH1井为例(图8c,d),2口井实为一井多靶,侧钻负花状构造的边界断层。G井浅层侧钻边界断层放空后测试获高产油气流,随后因沥青堵塞地层通道而停止排液。G-CH1井利用G井原井眼,沿相同的井轨迹闭合方位加深侧钻同一边界断层,断层附近发生放空后测试获高产油气流,油气性质与G井产层一致,开井初始油藏压力与G井沥青堵塞前的残余油藏压力一致,表明伸展性断层内部储层垂向连通性好,为贯通的大型缝洞单元。

2) 垂向“侧接”部位

“侧接”结构是指断层在垂向剪切-滑动过程中,由于断穿地层的材料性质差异,剪切-破裂过程发生垂向终止,应力沿地层材料薄弱带发生侧向扩展,随后在新的薄弱位置继续发生垂向剪切-滑动,形成纵向上多个滑动面“叠接”的排列结构(图9)。

断层纵向侧接部位的阶列组合与断层两盘倾移分量的运动方向共同决定了侧接部位的局部应力状态。张应力状态下,侧接部位的断层滑动面开启程度高,有利于沿滑动面形成尺度不一的断层“空腔”,断层破碎带则形成规模大、连通好的无-低内聚力角砾岩带。挤压应力状态下,侧接部位的断层滑动面和破碎带承受的挤压正应力明显强于上覆和下伏走滑断层,地层渗透性显著降低,形成流体流动屏障,造成“断控”储层的垂向非均质性。

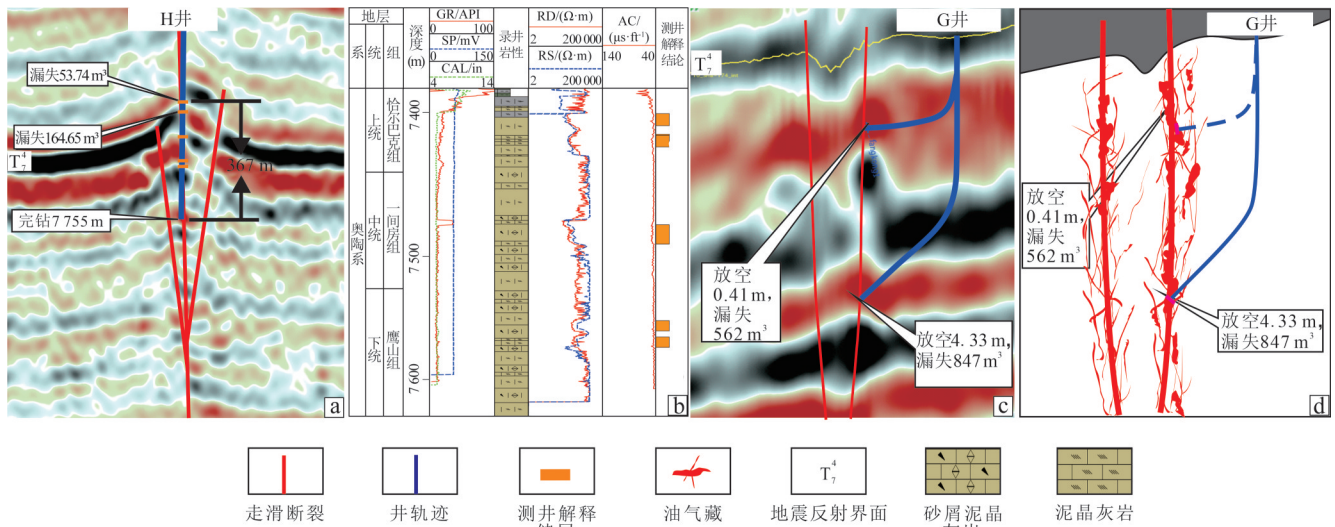


图 8 顺北地区钻遇断层的典型井地震-测井-试采响应特征

Fig. 8 Seismic-logging-production responses of typical wells encountering faults in Shunbei area

a. 过 H 井单井地震剖面; b. H 井单井地层综合柱状图; c. 过 G 井井地震剖面; d. G 井井油藏剖面示意图

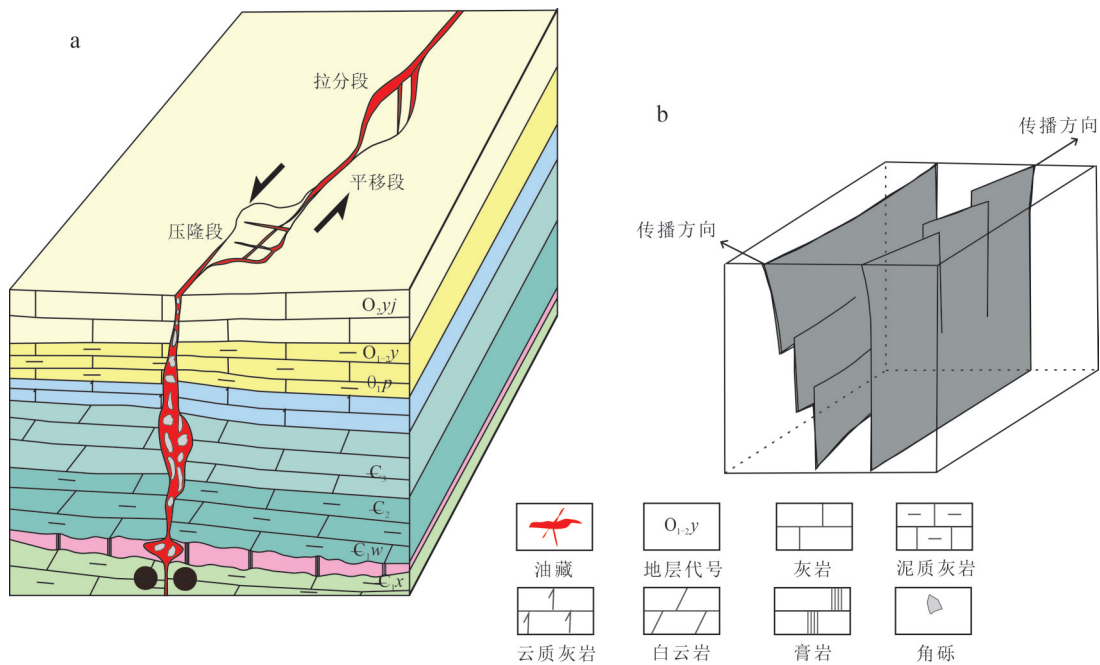


图 9 顺北地区走滑断层的储层地质模型(a)与叠接机制(b)

Fig. 9 Schematic diagrams showing reservoir geological model of strike-slip faults (a) and the overlapping mechanism(b) in Shunbei area

3.3 流体改造机制

顺北地区及邻区发育的大型走滑断裂带,向北、向南贯穿塔北、塔中喀斯特生态系统和覆盖区深循环热液流体系统^[35]。喀斯特生态系统内的“断控”储层以淡水改造为主,上奥陶统覆盖区的“断控”储层以深循环热液流体改造为主。流体活动参与到断裂形成、演化过程中,沿断裂系统提供的流路网络发生溶蚀-沉淀,对构造增容空间进行叠加改造,造成断裂带的成储

机制复杂化。

3.3.1 淡水改造机制

托普台地区位于塔北古隆起南斜坡,处于古地表喀斯特的碎屑岩覆盖区(深度>300 m),紧邻顺北油气田北部地区。工区内发育大型共轭走滑断裂,古地形有利于大气淡水在地下水头压力驱动下,沿走滑断裂向覆盖区下渗,属于塔北古喀斯特生态系统^[36-38]。承压流体沿断裂和裂缝系统向深部发生缓慢移动,破碎

带由于水流的汇集,增大了水-岩接触面积,在温度、压力驱动下沿断裂带发生溶蚀改造,形成具有一定规模并呈线形分布的溶蚀缝洞型储层(图10)。不断补充的 CO_2 和淡水使得岩溶作用持续进行,下降流不饱和和溶蚀带不断沿断裂带向深部侵蚀,扩溶构造增容空间。承压流体在向深部缓慢流动过程中,逐渐由不饱和和溶蚀向过饱和沉淀转变,溶蚀-沉淀过程既可顺序进行,也可交替发生,构造增容空间遭受破坏性改造。

托普台地区沿走滑断裂常钻遇放空、漏失,多口井揭示洞穴层和泥质充填物。岩心见明显溶蚀现象,洞穴充填的巨晶方解石Ce无异常,Eu未出现正异常; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.7096~0.7097,平均值为0.7096,普遍高于中-下奥陶统锶同位素范围在0.7086~0.709;氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)数据明显偏负(-14‰~-16‰)。由此表明,覆盖区(深度>300 m)洞穴充填巨晶方解石的成岩流体以大气淡水来源为主,同时存在古老硅铝质岩层的剥蚀和壳源锶的混入。

由此可见,贯穿喀斯特生态系统的走滑断裂即使延伸至覆盖区,仍可以遭受沿断裂带下渗大气水的溶蚀改造。重力是该类型流体的主要驱动力,地形是控制水头梯度的重要因素,走滑断裂的构造增容空间则是影响承压水体流路变化和溶蚀-沉淀过程的主导因素。因此,淡水改造机制下沿走滑断裂溶蚀形成的缝洞型储层可称为“岩溶型”断控储层。

3.3.2 热液流体改造机制

热液流体一般定义为具有较高温度(50~500℃)的水溶液,溶液性质随时间、空间变化而改变,并导致

所含溶质的沉淀。本文将热液流体的定义外延至一切高于地层温度(>5℃)的地层流体,存在流体性质和溶蚀速率的变化,并导致所含溶质的沉淀。

塔里木盆地发育多期火山活动事件,岩浆或岩浆期后封存的地层热卤水(热液)在顺北地区较常见。地层深部热液沿断裂向上运移过程中,对断裂破碎带进行溶蚀扩大、交代增容、结晶增孔等,形成一定规模的溶蚀缝洞型储层。基于热液矿物组合、流体包裹体和地球化学特征,可以大致描述热液流体来源,并分为地层热卤水和岩浆期后混合热液两类。

地层热卤水在顺北地区较常见,已有众多学者^[39-43]针对顺北地区热液活动提出了大量的证据,指出地层热流体可能来源于深部前寒武系一下奥陶统多个层系。以M井为例^[39-40](图11),取心硅化岩见(微晶)石英-方解石组合,石英包裹体最高温度为202.8℃,明显高于正常地温演化最高温度(现今为191.8℃)。石英的硅、氧同位素与热液成因相似,稀土总量低,具较明显Eu正异常,Fe和Mn等常量元素相对富集。方解石脉的碳、氧、锶同位素显示流体受到了高温和深部碎屑岩的影响,表明其可能来源于前寒武系碎屑岩低温地层热卤水。鞍型白云石的碳、氧、锶同位素地化习性具有明显“亲源性”特征,但不重叠,指示流体来源于寒武系和下奥陶统碳酸盐岩封存的热卤水。

此外,存在与岩浆作用有关的混合热液。例如,塔里木盆地在二叠纪发生了广泛而强烈的岩浆活动,释放出了大量的富氟热流体。富氟热液沿断裂和裂缝上移,强烈改造奥陶系灰岩,形成了特有的萤石化储层^[44-52]。

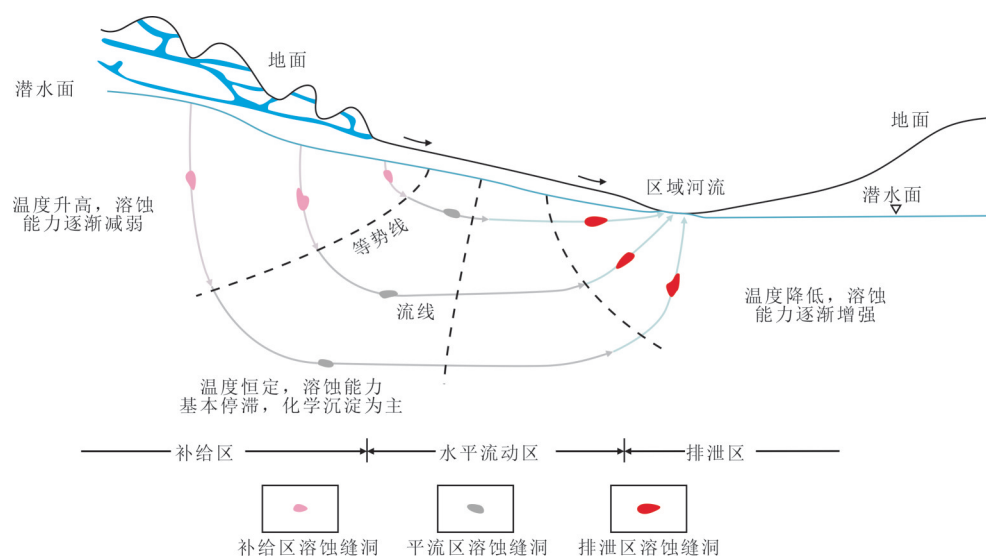


图10 托普台地区上奥陶统覆盖区深部大气淡水岩溶模式

Fig. 10 Meteoric water dissolution model of the deep parts as overlain by the Upper Ordovician in Tuoputai area

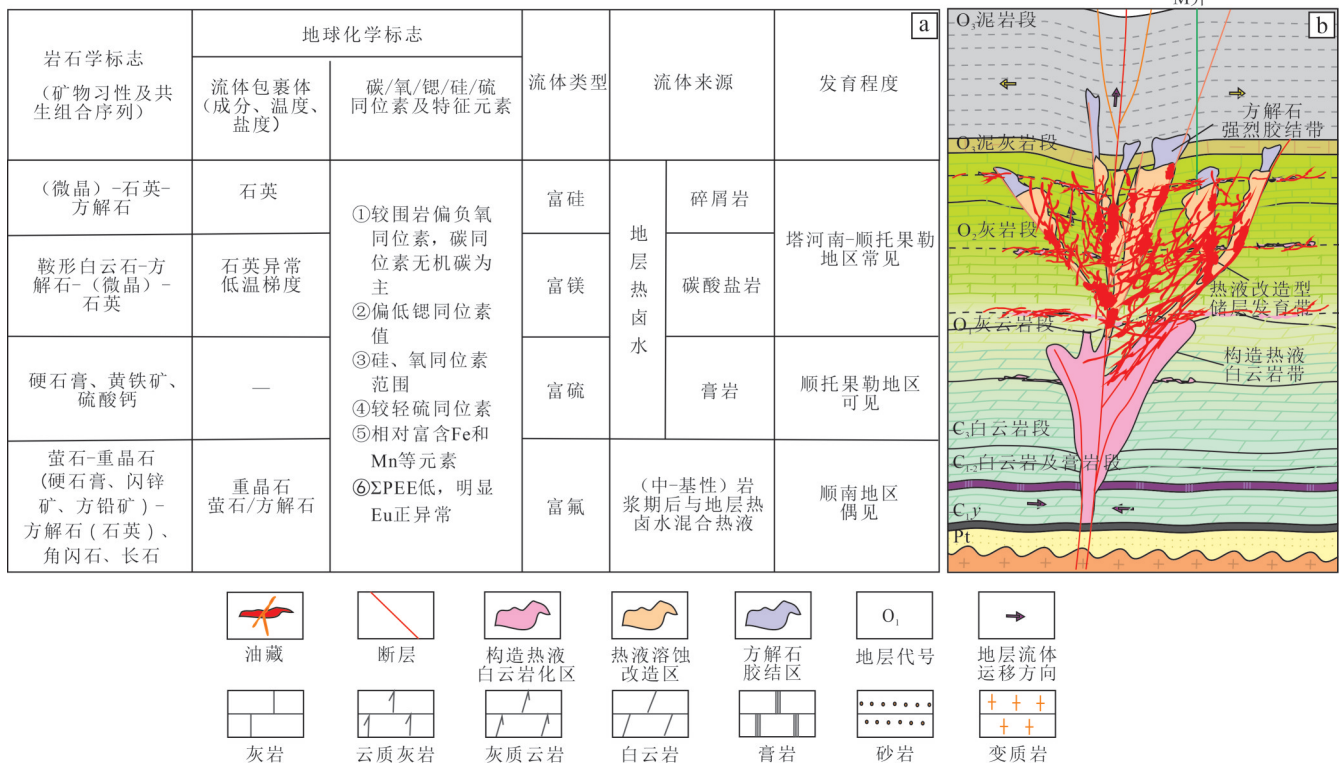


图11 顺北地区断控热液溶蚀特征(a)及岩溶模式(b)

Fig. 11 Characteristics of fault-controlled hydrothermal dissolution(a) and karst model(b) in Shunbei area

走滑断裂在活动过程中,热液流体在浮力(热密度)驱动下,沿断裂、裂缝上侵,并对原岩交代、溶蚀改造。由于热液流体性质频繁变化,多具有混合流体特征,通常会发生pH值叠加效应、离子强度(盐度差异)叠加效应和钙离子浓度叠加效应,从而导致混合流体对碳酸盐岩不饱和。一方面,大量不饱和流体沿断层和缝网系统自下而上对构造增容空间发生溶蚀改造,随着温度和pH值等在流体上侵过程中交替变化与围岩达到平衡,陆续有序析出热液矿物组合,导致储层非均质性增强。另一方面,在热液流体交代原岩过程中,自形度较高的热液矿物晶体在新生变形过程中,以搭建结构堆积成晶间孔隙,可形成沿断裂展布的、规模有限的基质孔隙型储层。

由此可见,热液流体的主要驱动力为浮力,只能沿断控缝网系统扩溶和交代,形成溶蚀缝洞型储层和局部的基质孔隙型储层,其溶蚀-沉淀、交代原岩的范围明显受限于走滑断层。因此,热液流体改造机制下沿走滑断裂形成的缝洞型储层称为“热溶型”断控储层。

4 结论

1)走滑断裂作为一个空间地质体,具备物理-化学机制下的增容作用,可以在断裂带内部形成伴生的

孔隙空间和缝洞系统,形成具有勘探开发经济价值的“断控”储层。通过开展走滑断裂的构造增容机制研究,认识到断裂带内部受岩体错动、破碎及力学-热化学作用而发生的物质体积调整是“断控”储层形成的主导因素。断裂过程中发生的脆性破裂和弹性变形可以形成断控洞穴、孔洞和裂缝等储集空间,基于断裂内部结构的分带模式和递进演化过程,可以形成3种储层类型,并在断裂构造样式和动态演化过程约束下,共同形成具有成因关联性的缝洞系统。

2)在巨厚的脆性岩层中,断裂活动会发生大规模脆性变形,断层位移和构造破碎共同消耗应力,诱发断裂带内大规模的物质体积调整,形成与断裂活动相关的断控缝洞系统。走滑断裂带的构造增容机制可细分为:“核-带”模式和“叠接”模式。前者能否形成规模储集效应,取决于走滑断层承受的正应力状态、软弱岩性的含量及脆-塑性应变状态、诱导裂缝带的闭合程度。后者则取决于叠接部位的演化阶段和局部应力场状态。

3)在无法忽视断裂带形成、演化过程中的流体活动因素时,依据流体性质、作用方式和强度等,可将“断控”储层的成因机制细分为“断容型”、“岩溶型”和“热溶型”3种亚类。“断容型”是指一切发育于断裂带内部,由裂缝、孔洞和断控洞穴所构成的储集体,不受地

层岩性约束和流体活动影响。“岩溶型”和“热溶型”是“断控”储层的理论衍生,可外延至喀斯特生态系统和覆盖区深循环热液流体系统中所有的不饱和性流体,流体以重力或浮力为主要驱动力,沿断裂系统提供的流路网络发生溶蚀-沉淀改造,形成溶蚀缝洞型“断控”储层。

参 考 文 献

- [1] В. И. Белкин, Р. И. Медведский, 朱起煌. 脉型油气圈闭[J]. 地质科技情报, 1989, 8(2): 83-88.
В. И. Белкин, Р. И. Медведский, Zhu Qihuang. Vein-type oil and gas trap[J]. Geological Science and Technology Information, 1989, 8(2): 83-88.
- [2] Tveranger J, Braathen A, Skar T, Skauge A. Center for integrated petroleum research - research activities with emphasis on fluid flow in fault zones[J]. Norwegian Journal of Geology, 2005, 85: 63-72.
- [3] 罗群, 黄捍东, 庞雄奇, 等. 自然界可能存在的断层体圈闭[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 148-150.
Luo Qun, Huang Handong, Pang Xiongqi, et al. A kind of possible natural fault petroleum trap[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 148-150.
- [4] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [5] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1-10.
Ma Yongsheng, He Zhiliang, Zhao Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1-10.
- [6] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进步与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [7] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
Qi Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [8] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 379-389.
Huang Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in Superimposed basin and its identification method: Tarim basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 379-389.
- [9] 漆立新. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 36(6): 771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 36(6): 771-779.
- [10] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 38-48.
Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 38-48.
- [11] Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137.
- [12] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
Deng Shang, Li Huili, Han Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
- [13] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J/OL]. 大地构造与成矿学: 1-16[2022-01-02]. DOI: 10.16539/j.dggzyckx.2020.05.015.
Deng Shang, Liu Yuqing, Liu Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: A case study of the Shunbei Area, Tarim basin[J/OL]. Geotectonica et Metallogenia, 1-16[2022-01-02]. DOI: 10.16539/j.dggzyckx.2020.05.015.
- [14] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
Jiao Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [15] 吕海涛, 张峭楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 444-452.
Lü Haitao, Zhang Shaonan, Ma Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 444-452.
- [16] 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等. 哈拉哈塘地区走滑断裂与断溶体油藏特征[J]. 新疆石油地质, 2019(4): 449-455.
Zheng Xiaoli, An Haiting, Wang Zujun, et al. Characteristics of Strike-Slip Faults and Fault-Karst Carbonate Reservoirs in Hala-hatang Area, Tarim basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019(4): 449-455.
- [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): 347-356.
- [18] Lu Xinbian, Wang Yan, Tian Fei, et al. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the southern Tahe area of the Tarim basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 587-605.
- [19] 周新桂,陈永峤,孙宝珊,等. 塔里木盆地北部地层岩石力学特征及地质学意义[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 8-12.
- Zhou Xingui, Chen Yongqiao, Sun Baoshan, et al. Rock mechanics characteristics in northern Tarim basin and its geologic significance[J]. *Petroleum Exploration And Development*, 2002, 29(5): 8-12.
- [20] Sibson R H. Fault Rocks and Fault Mechanisms[J]. *Journal of Geology*, 1977, 133(3): 191-214.
- [21] 付晓飞,尚小钰,孟令东. 低孔隙岩石中断裂带内部结构及与油气成藏[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(6): 2428-2438.
- Fu Xiaofei, Shang Xiaoyu, Meng Lingdong. Internal structure of fault zone and oil/gas reservoir in low-porosity rock[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(6): 2428-2438.
- [22] 付晓飞,方德庆,吕延防,等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. *地球科学*, 2005(3): 328-336.
- Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lü Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. *Earth Science*, 2005, 30(3): 328-336.
- [23] 付晓飞,郭雪,朱丽旭,等. 泥岩涂抹形成演化与油气运移及封闭[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(1): 52-63.
- Fu Xiaofei, Guo Xue, Zhu Lixu, et al. Formation and evolution of clay smear and hydrocarbon migration and sealing[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(1): 52-63.
- [24] 付晓飞,肖建华,孟令东. 断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(1): 25-37.
- Fu Xiaofei, Xiao Jianhua, Meng Lingdong. Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 25-37.
- [25] 王斌,赵永强,何生,等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 965-974.
- Wang Bin, Zhao Yongqiang, He Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 965-974.
- [26] 曹自成,路清华,顾忆,等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 975-984.
- Cao Zicheng, Lu Qinghua, Gu Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 975-984.
- [27] 赵锐,赵腾,李慧莉,等. 塔里木盆地顺北油气田断控缝洞型储层特征与主控因素[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(5): 8-13.
- Zhao Rui, Zhao Teng, Li Huili, et al. Fault controlled fracture cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 8-13.
- [28] 李海英,刘军,龚伟,等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 107-120.
- Li Haiying, Liu Jun, Gong Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 107-120.
- [29] 刘宝增,漆立新,李宗杰,等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 412-420.
- Liu Baozeng, Qi Lixin, Li Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 412-420.
- [30] 马德波,何登发,陶小晚,等. 塔北哈拉哈塘地区剪切断裂系统构造特征及其对油气分布的控制[J]. *地质科学*, 2016, 51(2): 470-483.
- Ma Debo, He Dengfa, Tao Xiaowan, et al. Structural features of shear fault system and its control on hydrocarbon distribution in Halahatang area, North Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2016, 51(2): 470-483.
- [31] Sobel E R, Dumitru T A. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(102): 5043-5063.
- [32] Gan Weijun, Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, B08416. Doi: 10.1029/2005 SB004-120.
- [33] Yin Shuai, Ding Wenlong, Zhou Wen, et al. In situ stress field evaluation of deep marine tight sandstone oil reservoir: A case study of Silurian strata in northern Tazhong area, Tarim Basin, NW China[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017, 80: 49-69.
- [34] 孙东,杨丽莎,王宏斌,等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(S1): 80-87.
- Sun Dong, Yang Lisha, Wang Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(S1): 80-87.
- [35] 朱东亚,孟庆强,胡文瑄,等. 塔里木盆地塔北和塔中地区流体作用环境差异性分析[J]. *地球化学*, 2013, 42(1): 82-94.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan, et al. Differences between fluid activities in the Central and North Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 2013, 42(1): 82-94.
- [36] 孟万斌,刘家铎,何建军,等. 塔河托甫台地区中奥陶统一间房组储层特征与地震预测[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(4): 104-110.
- Meng Wanbin, Liu Jiayi, He Jianjun, et al. Reservoir characteristics and seismic detection of the Yijianfang formation of middle ordovician in tuofutai area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*,

- 2009, 29(4): 104-110.
- [37] 严威, 王兴志, 张廷山, 等. 塔河油田加里东中期第Ⅲ幕岩溶作用[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 411-416.
Yan Wei, Wang Xingzhi, Zang Yanshan, et al. Investigations of the karst during the Episode Ⅲ of the mid-Caledonian in the Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 411-416.
- [38] 田鹏, 马庆佑, 吕海涛. 塔里木盆地北部跃参区块走滑断裂对油气成藏的控制[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 156-161.
Tian Peng, Ma Qingyou, Lü Haitao. Strike-slip faults and their controls on hydrocarbon reservoirs in the Yuecan block of the Northern Tarim Uplift, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2): 156-161.
- [39] 陈红汉, 鲁子野, 曹自成, 等. 塔里木盆地塔中地区北坡奥陶系热液蚀变作用[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 43-63.
Chen Honghan, Lu Ziyue, Cao Zicheng, et al. Hydrothermal alteration of Ordovician reservoir in northeastern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 37(1): 43-63.
- [40] 李映涛, 叶宁, 袁晓宇, 等. 塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 934-944.
Li Yingtao, Ye Ning, Yuan Xiaoyu, et al. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 934-944.
- [41] 朱秀, 朱红涛, 陈红汉, 等. 塔里木盆地顺南地区中-下奥陶统深成岩溶特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 653-662.
Zhu Xiu, Zhu Hongtao, Chen Honghan, et al. Characterization of hypogenic karst systems in the Middle-Lower Ordovician of Shunnan area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 653-662.
- [42] 鲁子野, 陈红汉, 云露, 等. 塔中顺南缓坡奥陶系热流体活动与天然气成藏的耦合关系[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 487-498.
Lu Ziyue, Chen Honghan, Yun Lu, et al. The coupling relationship between hydrothermal fluids and the hydrocarbon accumulation in Ordovician of Shunnan Gentle Slope, Northern Slope of Tazhong Uplift[J]. Earth Science, 2016, 41(3): 487-498.
- [43] 李培军, 陈红汉, 唐大卿, 等. 苏奥, 魏华动. 塔里木盆地顺南地区中-下奥陶统NE向走滑断裂及其与深成岩溶作用的耦合关系[J]. 地球科学, 2017, 42(1): 93-104.
Li Peijun, Cen Honghan, Tang Daqing, et al. Coupling relationship between NE strike-slip faults and hypogenic karstification in Middle-Lower Ordovician of Shunnan Area, Tarim Basin, Northwest China[J]. Earth Science, 2017, 42(1): 93-104.
- [44] 王嗣敏, 金之钧, 解启来. 塔里木盆地塔中45井区碳酸盐岩储层的深部流体改造作用[J]. 地质论评, 2004(5): 543-547.
Wang Simin, Jin Zhijun, Xie Qilai. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the Well TZ45 region[J]. Geological Review, 2004, 50(5): 543-547.
- [45] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. 地质论评, 2008(3): 348-354.
Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Effects of Deep Fluid on Carbonates Reservoir in Tarim Basin[J]. Geological Review, 2008, 54(3): 348-354.
- [46] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245-253, 314.
Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of Hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253, 314.
- [47] 范蕾, 王国芝, 石学法, 等. 南大西洋中脊26°S热液区成矿物质来源探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1648-1659.
Fan Lei, Wang Guozhi, Shi Xuefa, et al. Discussion on sources of metallogenic materials in the 26°S hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(6): 1648-1659.
- [48] 刘超, 马骄, 萨如力草克提·沙拉克, 等. 沙垒田地区奥陶系古岩溶储层热液流体改造的地球化学证据[J]. 断块油气田, 2021, (5): 620-624.
Liu Chao, Ma Jiao, Sarulicapketi Shalake, et al. Geochemical evidences of hydrothermal fluid alterations of Ordovician paleo-karst reservoirs in Shaleitian area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, (5): 620-624.
- [49] 王健, 庞宇晗, 操应长, 等. 塔里木盆地石灰窑露头区寒武系碳酸盐岩断控岩溶储层的形成机制及指示意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 1-12.
Wang Jian, Pang Yuhua, Cao Yingchang, et al. Formation mechanism and significance of Cambrian carbonate fault-controlled karst reservoir in Shihuiyao outcrop area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 1-12.
- [50] 肖重阳, 杨林, 林波, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠纪火山活动期次与分布[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 177-185.
Xiao Chongyang, Yang Lin, Lin Bo, et al. Volcanic activity stages and distribution during the Permian in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 177-185.
- [51] 瞿长, 赵锐, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北5断裂带储集体地震反射与产能特征分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 68-74.
Qu Chang, Zhao Rui, Li Huili, et al. Seismic reflection and productivity of reservoirs in the fault-zone 5 of Shunbei, Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 68-74.
- [52] 张三, 金强, 赵深圳, 等. 塔河油田海西运动早期奥陶系岩溶地貌[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(5): 527-534.
Zhang San, Jin Qiang, Zhao Shenzhen, et al. Ordovician karst paleogeomorphology during Early Hercynian movement in Tahe oil-field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 527-534.

(编辑 张玉银)