

塔里木盆地富满断控破碎体油藏储集类型特征 与注水替油效果

江同文¹, 邓兴梁², 曹鹏³, 常少英³

(1. 中国石油天然气股份有限公司, 北京 10007; 2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000;

3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:塔里木盆地走滑断裂控制的超深油气藏是近年来中国油气勘探开发最重要领域之一,但目前该类型油藏的储集空间类型并不清楚,不同储集空间类型与注水效果关系不明确,严重制约了富满油田的高效开发。在充分分析野外露头、岩心、成像测井以及动态监测资料的基础上,系统剖析了断控破碎体的3种主要储集空间类型及其与注水效果的关系。提出了断控破碎体的概念,指出富满油田主要为断控破碎体油藏,研究结果表明:①断裂空腔型储集体主要分布在断裂带的核部,由断层滑动面产状变化引发内部体积调整形成了“空腔”型洞穴。埋藏条件下的储集空间相对较为封闭,内部孔隙空间较大,注水后原油置换率较高,部分油井动用储量的注水采收率可高达93%。②角砾间孔隙型储集体主要分布在断裂带的核部,由相邻的角砾相互支撑而形成角砾间不规则储集空间类型。该类储集体分布较为均匀,孔隙度中等,单位压降下的产液量较高,但是由于储集空间内部连接并不通畅,注水后置换率较低,需要研究探索构建立体结构井网来提高开发效果。③构造裂缝型储集体主要分布在断裂带的损伤带和过程带,在断层带的两侧和端部发育形成一定宽度的裂缝带。裂缝带周边也会发育少量孔隙,部分区域会形成一定的渗流优势通道,因此注入水的流失量较大,注水效果相对于断裂空腔型储集体较差。研究成果支撑了富满油田上产原油 350×10^4 t,可助推注水开发方案和提高采收率方案的优化,对同类型油藏高效开发具有重要的借鉴意义。

关键词:储集空间类型;注水开发;碳酸盐岩;断控破碎体;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Storage space types and water-flooding efficiency for fault-controlled fractured oil reservoirs in Fuman oilfield, Tarim Basin

JIANG Tongwen¹, DENG Xingliang², CAO Peng³, CHANG Shaoying³

(1. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China; 2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China;

3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Ultra-deep hydrocarbon reservoirs in the Tarim Basin, governed by strike-slip faults, have become a pivotal target in China's hydrocarbon exploration and exploitation efforts in recent years. However, the storage space types of these reservoirs, as well as their relationships with water-flooding efficiency, are yet to be clarified, presenting a significant challenge to the efficient development of the Fuman oilfield. Based on thorough analyses of outcrops, core samples, formation micro-imaging (FMI) logs, and dynamic monitoring data, we introduce the concept of fault-controlled fractured reservoir to refer to the those in the Fuman oilfield, and systematically explore the three major storage space types and their relationships with the water-flooding efficiency. Key findings are as follows: (1) Fault cavity-type reservoirs, predominantly found in the core of the fault zones, feature hollow cavities created by adjustments of internal special volume after multi-stage structural activities on the faults' sliding surfaces. The storage spaces of these reservoirs, relatively enclosed under burial conditions, are characterized by large pore volumes. This structural configuration enhances oil-water displacement efficiency, with some oil wells yielding a waterflooding recovery factor up to 93 % of the petroleum reserves in development; (2) Inter-breccia pore-type reservoirs, also primarily distributed in

收稿日期:2023-12-29;修回日期:2024-03-06。

第一作者简介:江同文(1968—),男,博士、教授级高级工程师,石油天然气评价与开发及科研管理。E-mail: jiangtw-tlm@petrochina.com.cn。

通信作者简介:曹鹏(1985—),高级工程师,碳酸盐岩油藏精细描述。E-mail: caop_hz@petrochina.com.cn。

the fault zones' core, feature inter-breccia irregular storage spaces formed by the mutual support of adjacent breccias. These reservoirs exhibit a relatively uniform distribution, moderate porosity, and high liquid yield per unit pressure drop. However, the poor internal connectivity for the storage spaces leads to a low oil replacement rate by water injection. Therefore, it is necessary to explore the construction of a three-dimensional well pattern to improve development efficiency. (3) Structural fracture-type reservoirs are primarily distributed in the damage and process zones of the fault zones, with fracture zones with certain widths developing along the fault zones' both sides and ends. In addition, a small number of pores are present around these fracture zones, with dominant seepage channels formed locally. This leads to a significant loss of injected water and, accordingly, lower oil displacement efficiency compared to the fault cavity-type. The study results can serve to support the production of 350×10^4 tonnes in the Fuman oilfield. Furthermore, they prompt the optimization of schemes for waterflooding and enhanced oil recovery (EOR), having a significant referential value for the efficient exploitation of similar oil reservoirs.

Key words: reservoir space type, waterflooding, carbonate rock, fault-controlled fractured reservoir, Fuman oilfield, Tarim Basin

引用格式:江同文,邓兴梁,曹鹏,等. 塔里木盆地富满断控破碎体油藏储集类型特征与注水替油效果[J]. 石油与天然气地质,2024,45(2):542-552. DOI:10.11743/ogg20240217.

JIANG Tongwen, DENG Xingliang, CAO Peng, et al. Storage space types and water-flooding efficiency for fault-controlled fractured oil reservoirs in Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 542-552. DOI: 10.11743/ogg20240217.

塔里木盆地寒武系-奥陶系碳酸盐岩分布面积超过 $40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 厚度超过 3 km, 油气资源非常丰富^[1]。经历了多年的勘探开发实践, 储层地质理论认识不断深化, 相继发现了轮古油田、塔河油田、塔中 I 号气田、哈拉哈塘油田、富满油田和顺北油田等亿吨级油气田。其中, 富满油田属于典型的断控型油藏, 2014 年 5 月跃满 3 井成功突破, 获得高产工业油气流, 拉开了碳酸盐岩断控型油气藏大规模勘探开发的序幕; 随后的 10 年间, 中国石油在富满油田不断向坳陷深处拓展, 截至 2023 年 5 月, 在富满油田已成功钻探深度大于 8 000 m 的超深井共计 104 口, 主体均是围绕克拉通内走滑断裂展开精细勘探和滚动评价开发。

伴随断控型油气藏的持续勘探开发, 目前富满油田已发现的三级储量超 10 亿吨规模, 是中国石油今后原油增储上产的主战场。前人经过多年的研究, 提出了断溶体油藏的概念, 指出了断控型储层受到了走滑断裂和溶蚀作用的双重控制^[2], 且主要储集空间仍为洞穴; 同时, 围绕走滑断裂的广泛发育, 不同学者从走滑断裂的形成机制和演化过程等方面开展了多种技术思路的探索研究, 也指出了走滑断裂的几何分段性特征控制了储层的整体发育规模的差异性^[3-10]; 还有学者对富满油田的走滑断裂开展了构造成因机制分析, 进一步明确了各种次级剪切断裂组合方式差异是走滑断裂分段性的成因机制, 控制了破碎带的发育范围^[11-13]。

断控型油藏初期的开发效果较好, 但是油井投产 2~3 年便面临着天然能量不足的开发现状, 为了进一

步提高该类型油藏的开发效果, 亟需深化对储集体类型及其与注水开发效果关系的认识。因此有必要从钻井的开发特征入手, 充分结合野外地质露头、钻井特征、试井双对数诊断曲线特征以及开发动态特征, 开展多学科、多数据和多维度的研究, 深化研究断控型油藏的储集空间类型以及不同储集空间类型与注水开发效果的关系, 对于后续该类型油藏优化注水方案和提高采收率方案的编制, 现场先导试验的优化实施以及持续开展提高采收率技术的攻关研究意义重大。

1 区域地质概况

塔里木盆地中部下古生界碳酸盐岩地层厚度超过 3 000 m, 历经多年勘探实践, 发现了多套储-盖组合与含油气层段, 目前已发现的油气藏主要分布在塔北隆起南斜坡与塔中凸起北斜坡地区。富满油田位于塔里木盆地北部坳陷中部的阿满过渡带, 主力产层为奥陶系的一间房组-鹰山组, 阿满过渡带南、北分别连接了中央隆起和塔北隆起, 东、西倾没于满加尔凹陷和阿瓦提凹陷。该地区经历了多期构造活动, 但长期处于南、北两大隆起区之间的构造低部位, 已勘探发现的奥陶系主力产层构造平缓, 表现为北高南低、东西倾没的大型鼻状构造, 埋深超过了 7 000 m^[14-15]。

塔里木盆地发育多条大型走滑断裂, 从发育形态上分析, 北部整体发育“X”型共轭断裂, 向南部逐渐发育“Y”型交错断裂和 NE 向走滑断裂。富满油田主体

位于北部坳陷阿满过渡带中北部,多年的精细勘探和滚动评价开发证实了克拉通内走滑断裂在该地区的“控储、成藏、控藏、控富”的主体作用。该类型油气藏的发现开启了全新的勘探开发思路,是塔里木盆地油气增储上产的主力军。

与塔里木盆地北部已发现的轮古、哈拉哈塘以及塔中地区油气藏的多重控制作用和成藏模式不同,富满油田是主体受走滑断裂控制的油气藏,平面上沿走滑断裂呈“线状”分布,纵向上呈“板状”发育,与常规的碎屑岩油藏有明显的不同,该类型油藏呈现“竖立”“板状”展布,为一种特殊类型的油气藏(图1)。

2 断控破碎体储集空间类型

2.1 断控破碎体的概念

富满油田的勘探开发实践表明,目前已发现的奥陶系油气藏主要沿通源的深大断裂带附近或与之相关的次级断裂分布。鲁新便等以塔河油田为研究对象,提出了“断溶体圈闭”的概念^[2],指出该类型圈闭聚集形成的油气藏,称为“断溶体油气藏”,认为该地区发现的储集体在受到深大断裂控制的基础上,后期还明显受到了多种流体的溶蚀作用,使得“断溶体圈闭”内部优质储集体展现出了洞穴型储集体特征,储集空间类型与塔北“断控+潜山”岩溶区、“断控+层间”岩溶区的储集空间类型较为一致,整体上储集体内部发育大量的洞穴,也是该类型油气藏的主要聚集空间^[17-24]。然而,岩石矿物学和地球化学等资料表明,阿满过渡带奥陶系储集体仅存在少量流体改造现象,溶蚀的贡献极小,远不足以形成现今具有工业生产价值的规模性储集体^[25]。因此,富满油田奥陶系储集体主要是由走滑断裂活动导致的以机械破碎及其伴生的少量溶蚀作用形成的储集空间构成。为强调这类储集体的成因,本文将之定义为“断控破碎体”,其含义是:在断裂形成的过程中,断裂带内部的断层岩因断裂滑动而不断被揉合、捣碎形成的一种破碎严重、角砾发育、具备良好孔隙空间和渗流通道的储集空间组合体(图2),断控破碎体内部形成的储集空间为油气的主要聚集区。

2.1.1 断控破碎体储集空间分布

断控破碎体的储集空间主要分布于断裂带内,因此与断裂带内部结构密切相关。在基于实际观测的断裂带研究中,构造地质学家发现:断裂带作为一个三维地质体,由不同构造要素组成,包括断层核(fault core)

和损伤带(damage zone)(图3)^[26],两者即可作为流体的运移通道,也具备一定的储集性能。其中断层核位于断裂带中心,是吸收绝大部分断层滑移量的高应变带,发育角砾岩、碎裂岩^[27-28]以及断层泥^[29];损伤带位于断层核两侧,包含所有与断层相关的脆性变形区域^[24],主要为裂缝带^[31-32]或变形带^[33];此外,一些学者将断裂带端部进一步细分为过程带(process zone),主要发育微裂缝,该区域尚未形成断层核,随着断裂带的生长成核,过程带将逐渐演化为断层核和损伤带的成熟结构^[30];将损伤带外部与断裂活动相关的褶皱变形区域细分为牵引带(drag zone),牵引带的宽度可大可小,当岩层的变形完全表现为脆性时甚至可以完全不存在^[26]。

2.1.2 岩心及成像测井证据

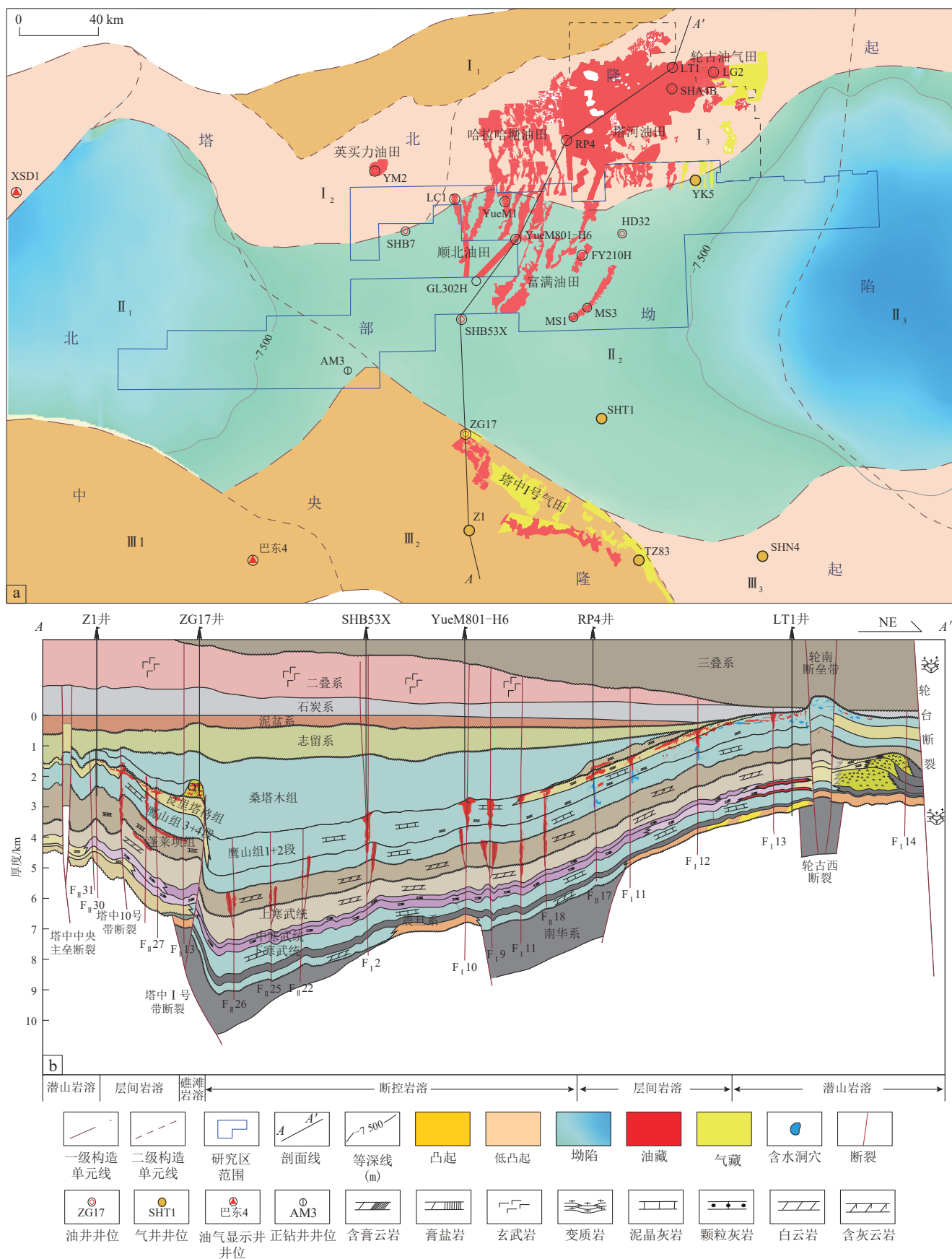
富满油田断控破碎体油藏目的层岩心收获率较低,以P1井为例(图4),该井钻遇目的层第一筒取心进尺8 m,岩心收获率31.5%,上部岩心较为完整,下部岩心破碎严重,成像测井显示7 325.5~7 326.5 m和7 345.0~7 346.0 m深度段发育大量破碎的角砾岩,内部孔隙发育,属于明显的断控破碎体储集类型(图5)。

2.1.3 与岩溶区差异特征

断控区与潜山岩溶区、层间岩溶区的储层地震响应特征类似,优质储层发育区均为“串珠”或“片状反射”的响应特征,但是油井生产特征差异明显。潜山岩溶区由于储层长时期暴露,储集体内部垮塌,充填严重,储集体相对孤立,油井初期产量高、产量递减快;断控+层间岩溶区由于岩溶作用明显,水体较活跃,油井生产初期不见水,后期含水快速上升后处于高含水低产状态;断控区由于断控破碎体的整体发育,储集体内部岩体破碎,孔隙度中等且分布相对较为均匀,储层纵向发育,油井表现为高产稳产的生产动态特征。

2.2 储集空间的构造成因分类

富满油田主力产层为奥陶系一间房组+鹰山组,目的层储集体受走滑断裂控制明显,为典型的断控破碎体油藏。众所周知,储集空间的基本类型包括孔隙、洞穴和裂缝。由于断裂带内部结构的分带性,断层核和损伤带内部往往发育分布规律不同的储集空间组合(储集体),与内部结构的成因有关。本次研究根据野外露头观测、钻井资料,发现走滑断裂带的断层核内主

图1 富满油田区域构造位置(a)及SN向构造剖面(b)^[16]Fig. 1 Regional tectonic location (a) and SN-trending structural section (b) of the Fuman oilfield^[16]

I₁, 轮台凸起; I₂, 英买力低凸起; I₃, 轮南低凸起; II₁, 阿瓦提凹陷; II₂, 阿满过渡带; II₃, 满加尔凹陷; III₁, 巴楚凸起; III₂, 塔中凸起; III₃, 古城低凸起

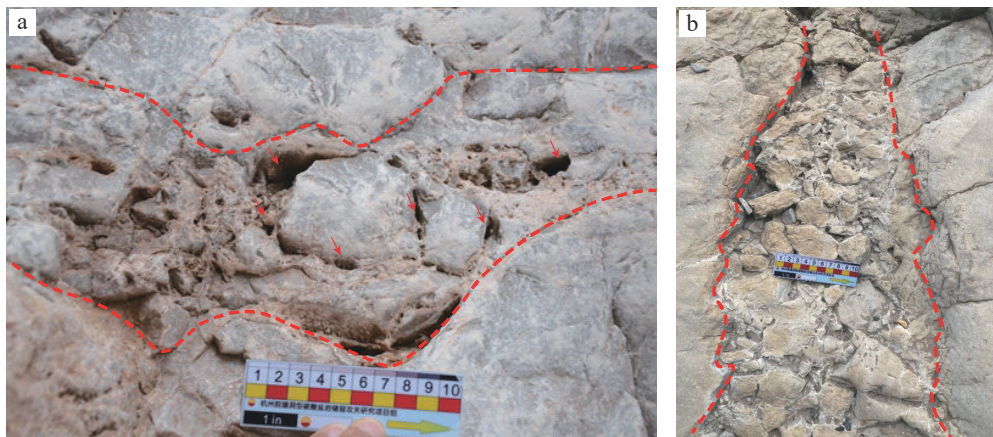


图2 富满油田断控破碎体野外露头特征照片

Fig. 2 Outcrops of fault-controlled fractured reservoirs in the Fuman oilfield

a. 皮羌断裂露头; b. 大湾沟露头

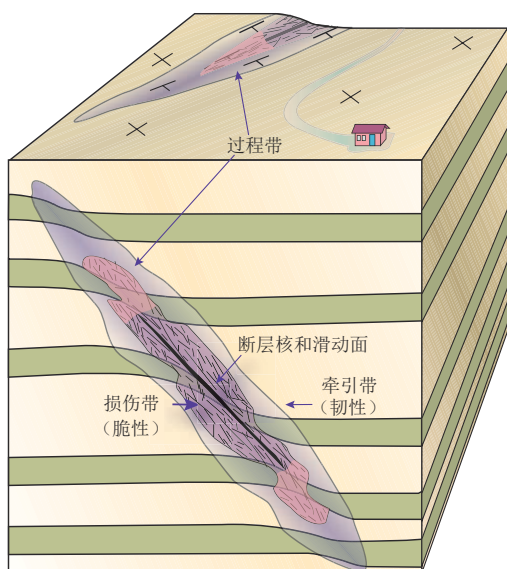


图3 断裂带组成分布示意图^[26]

Fig. 3 Schematic diagram showing the composition of a fault zone^[26]

要发育断裂空腔型和角砾间孔隙型储集体, 损伤带内主要发育构造裂缝型储集体。

2.2.1 断裂空腔型储集体

断裂空腔型储集体是由于断层滑动面产状变化的区域发生内部体积调整而形成的“空腔”型洞穴, 因此主要分布在断裂的核部。这种类型的储集体孔隙度较大, 钻井过程中会发生放空或大量漏失, 因此无法取得真实储集空间的岩心, 但是在成像测井上可以观测到明显的暗褐色块状图像且实钻井发生放空; 另外, 在柯坪地区的野外露头可以观察到部分地区断层核部呈现明显的断裂空腔型储集体类型, 该类型储集体是断控破碎体油藏中最好的储集空间类型, 由于该类型储集体形成的条件较为苛刻, 因此该类型储集体的整体占比较低, 储层地质模式可简化为图6。

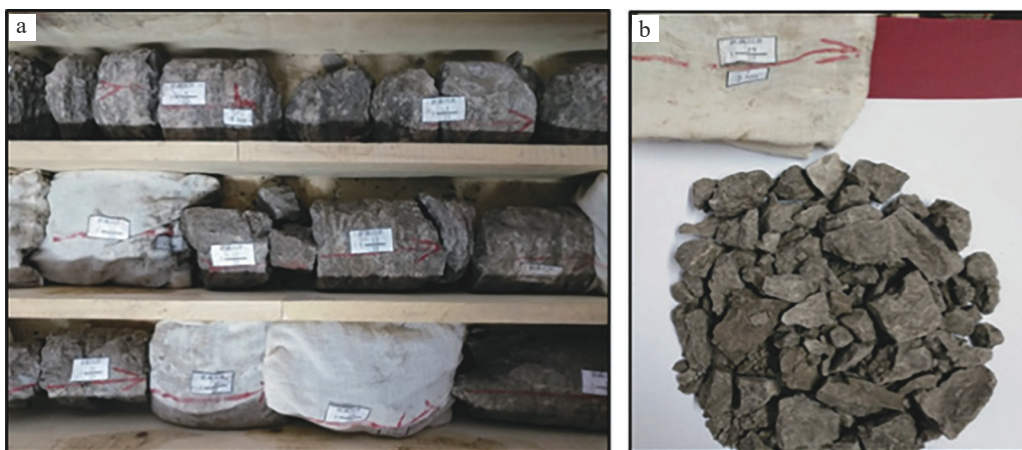


图4 富满油田P1井取心照片

Fig. 4 Photos of cores from well P1 in the Fuman oilfield

a. 取心照片, 埋深7 343.0 ~ 7 344.0 m; b. 岩屑照片, 埋深7 343.6 m

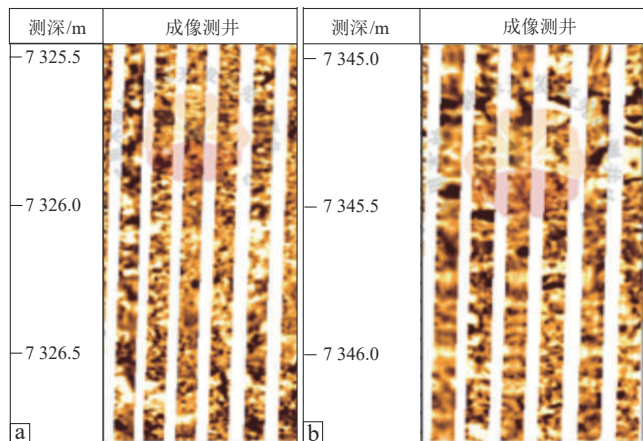


图5 富满油田P1井典型破碎体成像特征

Fig. 5 Logging curves and formation micro-imaging (FMI) signatures of typical fractured reservoirs in well P1 in the Fuman oilfield

a. 测深7 325.5 ~ 7 326.5 m; b. 测深7 345.0 ~ 7 346.0 m

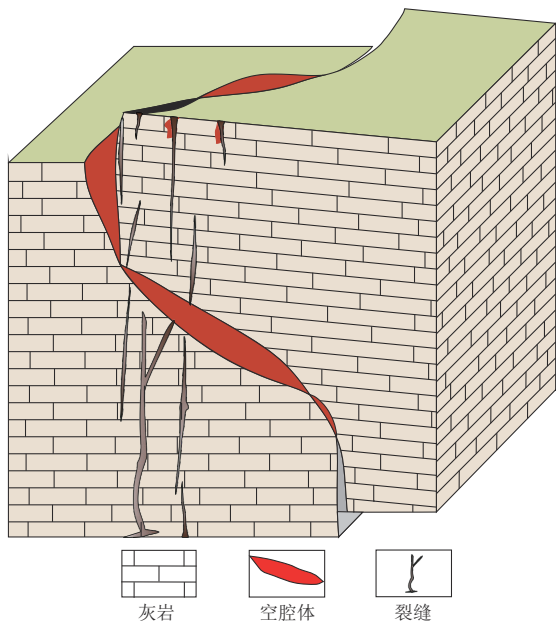


图6 断裂空腔型储集体地质模式

Fig. 6 Geological model of fault cavity-type reservoirs

2.2.2 角砾间孔隙型储集体

角砾间孔隙型储集体是由于相邻的角砾相互支撑而形成的一种角砾间不规则储集空间类型,包括洞穴和孔隙。不同粒径的角砾一般发育在断层核外部,与损伤带相邻,当相邻角砾的粒径较大时也可形成大洞穴。该类型储集体孔隙度中等,分布较为均匀,在实际钻井过程中会发生少量漏失,取心破碎严重且收获率较低,成像测井上显示明显的角砾孔洞发育的暗褐色点状特征,如P1井在7 325.5 ~ 7 326.5 m和7 345.0 ~ 7 346.0 m深度段成像测井显示明显的角砾孔洞发育

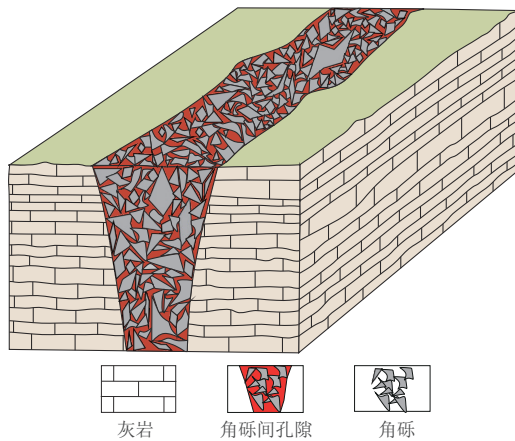


图7 角砾间孔隙型储集体地质模式

Fig. 7 Geological model of inter-breccia pore-type reservoirs

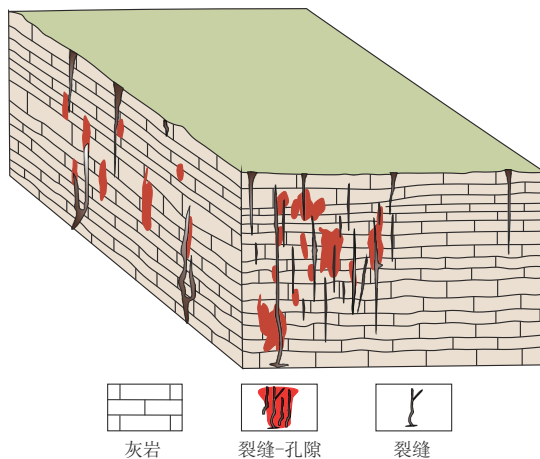


图8 构造裂缝-孔隙型储集体地质模式

Fig. 8 Geological model of tectonic fracture-type reservoirs

特征(图5)。该类型储集体在野外和地下广泛发育,是断控破碎体油藏的主要储集空间,其储集体地质模式可简化为图7。

2.2.3 构造裂缝型储集体

构造裂缝型储集体以发育大量裂缝为特征,因此主要位于损伤带或过程带,在裂缝带形成的同时也会发育少量的孔隙,但仍以裂缝和微裂缝为主。该类型储集体主要分布在走滑断裂形成的断层核侧翼部,地质模式可简化为图8。

3 注水效果与储集类型关系

对于断控破碎体油藏,开发初期依靠弹性能量开发,具有较高的产量,参照哈拉哈塘油田的开发经验,衰竭式开发后期主要采用注水吞吐替油的方式进行二次开发,进一步提高采收率。单井注水替油机理主要

是通过注入盐水到油藏单元内,补充地层能量,恢复地层压力,在焖井过程中利用重力分异的原理,使油、水不断置换,抬升油-水界面,提高油藏上部含油饱和度,然后开井对油藏进行开采,直到能量耗尽。油井以“注水—焖井—采油”为一个周期进行注采循环,经过多轮次的注水替油,逐步提高油藏的采收率^[28]。

实施注水吞吐替油的核心是需要注入水后进行焖井,以便进行充分的油水重力分异,提高注水吞吐替油的开发效果,但是油水重力分异的速度主要取决于储集体本身的内部空间结构特征,因此注水替油效果与储集体类型的关系十分密切。

单井钻遇断控破碎体油藏不同储集空间类型,虽然在地震响应基本上都是“串珠状”或者“片状反射”的特征,但是在油井开发阶段会表现出不同的动态变化特征,整体上可以通过单位压降的产液量进行判别(图9):①断裂空腔型储集体,由于形成条件较为苛刻,一般在地下条件下的储集空间相对较为封闭,因此单位压降的产液量中等;②角砾间孔隙型储集体,是断控破碎体油藏的主要储集空间类型,由于该类型储集体孔隙度中等,且规模较大,因此单位压降下的产液量较高;③构造裂缝型储集体,主要储集空间为微裂缝以及周边的少量孔隙,因此供液能力有限,单位压降下的产液量最低。图9中显示的单井钻遇的3种储集空间类型条件下的动态响应特征对比,代表的是一种宏观规律,具体的油井生产动态由于还受到诸如工程管理、油井井间干扰等其他多种因素的影响,会表现出不同的动态响应特征。另外,断控破碎体油藏实际的储集空间类型,还可以通过压恢试井曲线进行有效辨别,下面借助实际单井的响应特征进行说明。

3.1 断裂空腔型储集体的注水开发效果

断裂空腔型储集体为“串珠状”地震响应特征,地震反射呈现明显的“洞穴型”储集体特征,在钻井过程中会发生放空和漏失,油井生产初期高产稳产,油井自喷开发阶段的单位压降产液量呈现明显的线性关系,压恢试井曲线呈现长时期的井筒储集效应,代表单井钻遇空腔型储层。以P4井为例,钻井过程中放空3.69 m,漏失泥浆506.1 m³,单位压降的产液量为438 t/MPa,投产初期开展了压恢试井测试,试井解释结果显示井筒储集系数较高,可达133 m³/MPa,地层系数可高达 $23\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 。该井钻遇的储集体表现出了明显的断裂空腔型储集体的特征(图10)。

该井经历了11个轮次的注水吞吐替油措施,累计注水 $12.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,注水期间累计产油 $6.33 \times 10^4 \text{ t}$ 。该

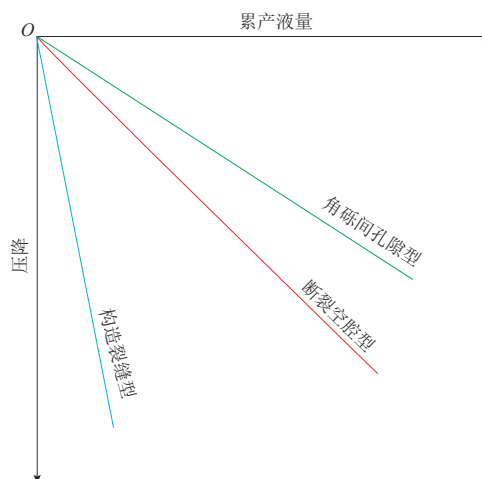


图9 断控破碎体油藏不同储集空间类型的累产液量与压降关系曲线对比示意图

Fig. 9 Schematic diagram showing the comparison of the cumulative fluid production vs. pressure drop of fault-controlled fractured oil reservoirs with different types of storage spaces

类型储集体经过注水二次开发后,按照单井动用的储量进行计算,注水吞吐替油开发的采收率达到了93%,是断控破碎体油藏开展注水吞吐替油效果最好的储集体类型。该类型储集体内部相对封闭且连通性较好,具备油水重力分异置换的优势空间,因此在油井开发过程中天然能量供应不足时,通过注水吞吐替油开发可有效置换储集体内部的原油,多轮次的注水开发后,油井高含水开采,表明储集体内部的大部分原油已被采出,注水开发效果良好。

3.2 角砾间孔隙型储集体的注水开发效果

角砾间型储集体也是“串珠状”地震响应特征,地震反射呈现明显的缝洞储集体特征,在钻井过程中会发生漏失,油井生产初期高产稳产,压恢试井曲线呈现复合型储集特征,代表单井钻遇缝洞储集体类的储层。以P5井为例,钻井过程中漏失598 m³,单位压降的产液量为505 t/MPa,投产初期开展了压恢试井测试,试井解释结果显示井筒储集系数较低,仅为0.18 m³/MPa,地层系数为 $365 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 。该井钻遇的储集体表现出了明显的角砾间孔隙型储集体的特征(图11)。

该井经历了4个轮次的注水吞吐替油措施,累计注水 $5.04 \times 10^4 \text{ m}^3$,注水期间累计产油 $2.20 \times 10^4 \text{ t}$,该类型储集体经过注水二次开发后,按照单井动用的储量进行计算,采收率仅为30.4%,相对于断裂空腔型储集体,注水吞吐替油效果较差。该类型储集体类似于砂岩油藏的储渗特征,但是由于展布形态为

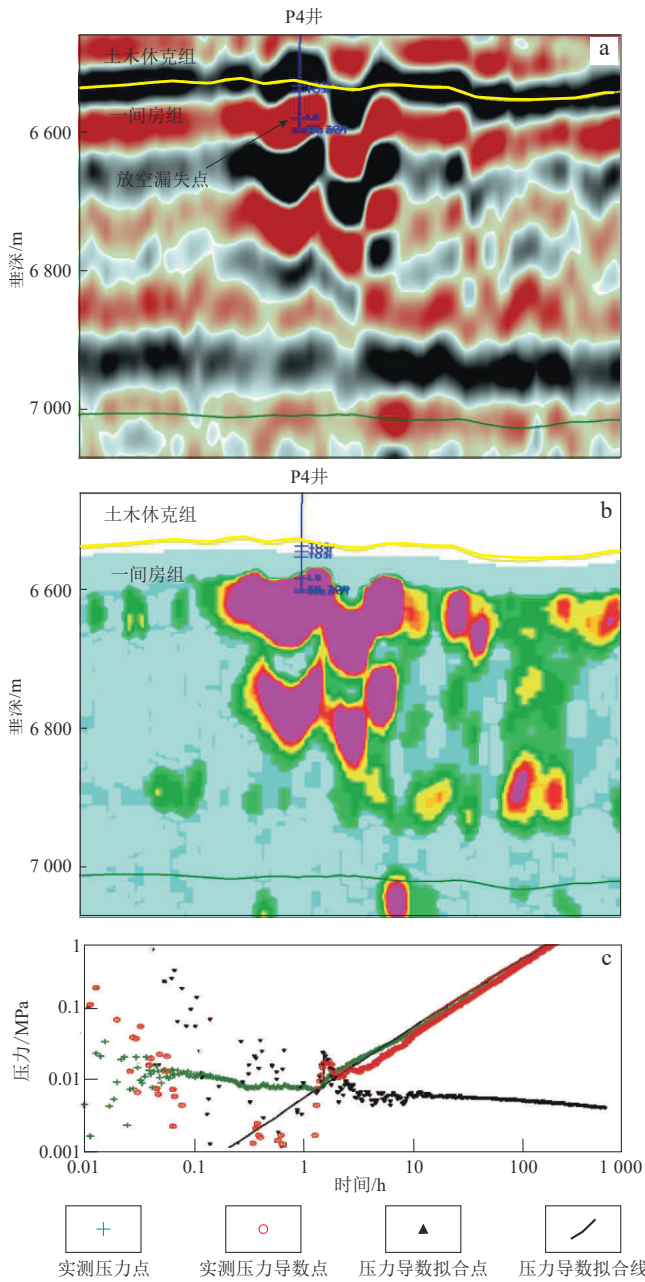


图10 典型断裂空腔型储集体动、静态响应特征(P4井)

Fig. 10 Dynamic and static response characteristics of typical fault cavity-type reservoirs (well P4)

a. 地震剖面; b. 反演剖面; c. 试井双对数曲线特征

“竖立”“板状”,储集体内部不存在较好的油水重力分异的空间,因此与钻遇断裂空腔型储集体的油井相比,钻遇该类型储集体的油井在天然能量不足之后开展注水吞吐替油过程中,由于油水重力置换能力有限,导致油井注水后,开井初期高含水,因此有必要根据储层精细表征的研究成果,进一步积极探索构建立体结构井网开展注水开发,以便进一步提高注水开发效果。

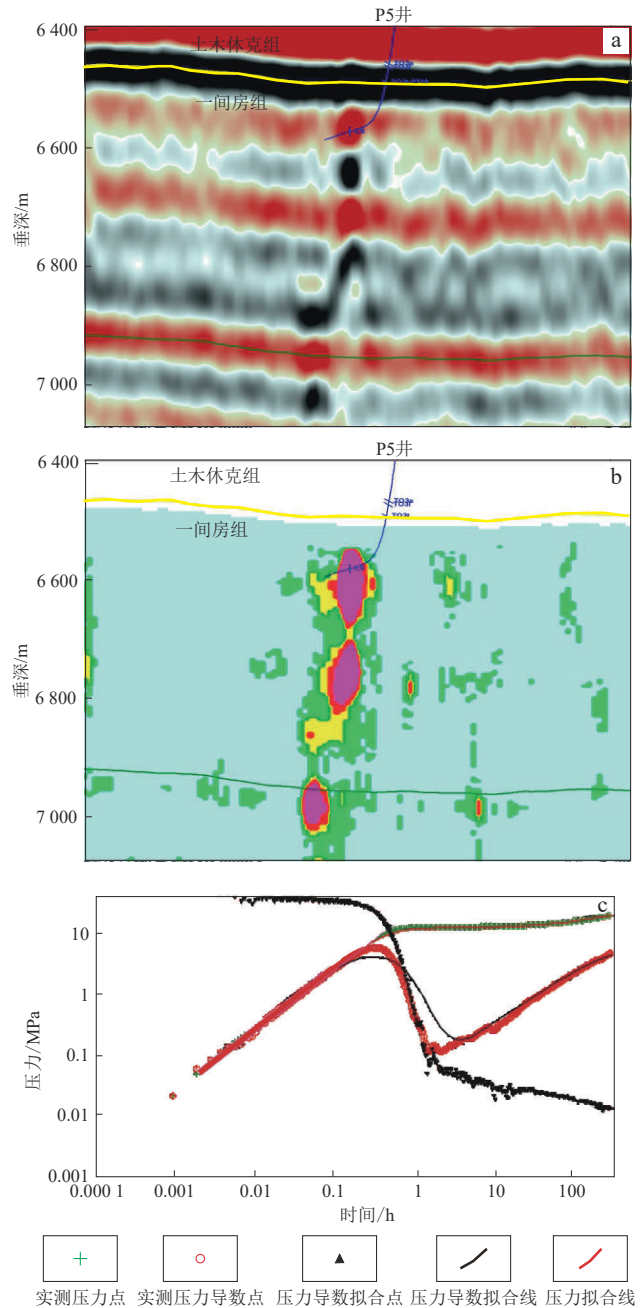


图11 典型角砾间孔隙型储集体动、静态响应特征(P5井)

Fig. 11 Dynamic and static response characteristics of typical inter-breccia pore-type reservoirs (well P5)

a. 地震剖面; b. 反演剖面; c. 试井双对数曲线特征

3.3 构造裂缝型储集体的注水开发效果

构造裂缝型储集体在钻井过程中会发生漏失,油井生产初期高产,但产量递减快,压恢试井曲线呈现裂缝型储集特征,代表单井钻遇裂缝型储层。以P6井为例,钻井过程中漏失 633.87 m^3 ,单位压降的产液量为 101 t/MPa ,投产初期开展了压恢试井测试,试井解释结果显示井筒储集系数较低,为 $1.13\text{ m}^3/\text{MPa}$,地层系

数为 $1\,940 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 。该井钻遇的储集体表现出了明显的构造裂缝型储集体的特征(图12)。

该井经历了7个轮次的注水吞吐替油措施,累计注水 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$,注水期间累计产油 $0.79 \times 10^4 \text{ t}$,由于具有裂缝优势通道,因此注入水流失量较大,导致了原油置换率较低。该井经过注水二次开发后,按照动用储量进行计算,采收率仅为37%,相对于断裂空腔型储集体,注水吞吐替油效果较差。

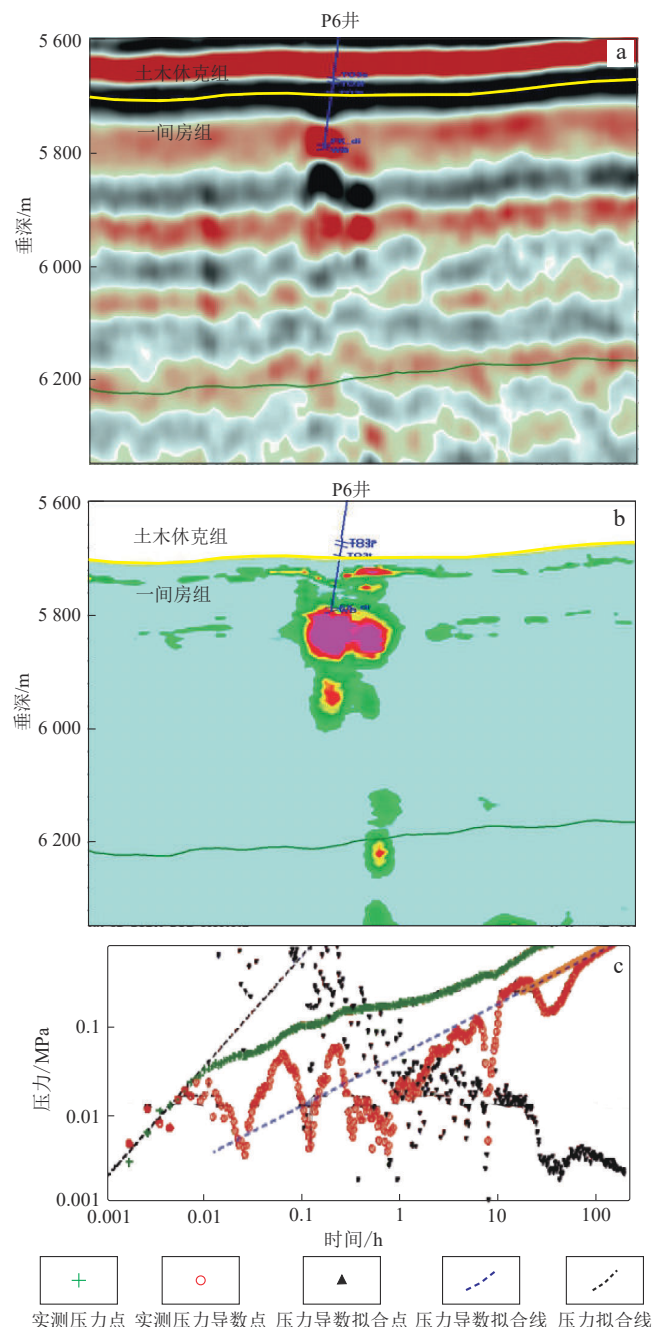


图12 典型构造裂缝型储集体动、静态响应特征(P6井)
Fig. 12 Dynamic and static response characteristics of typical tectonic fracture-type reservoirs (well P6)
a. 地震剖面;b. 反演剖面;c. 试井双对数曲线特征

4 结 论

1) 将“断控破碎体”定义为在断裂的形成过程中,断裂带内部的断层岩因断裂滑动而不断被揉合、捣碎形成的一种破碎严重、角砾发育、具备良好的孔隙空间和渗流通道的储集空间组合体,断控破碎体内部形成的储集空间为油气的主要聚集区。

2) 断控破碎体油藏依据储集空间组合类型,主要分为断裂空腔型、角砾间孔隙型和构造裂缝型储集体。其中断裂空腔型储集体是由于断层滑动面产状变化的区域发生内部体积调整而形成的“空腔”型洞穴,孔隙度较大;角砾间孔隙型储集体主要分布在断裂核部,是断控破碎体油藏的主要储集体类型;构造裂缝型储集体主要分布在走滑断裂的损伤带和过程带,分布范围较大,但是储集空间有限。

3) 依据断控破碎体油藏的3种主要储集体类型的构造成因、储集空间内部的非均质性的整体特征以及各类动态监测资料显示的注水效果开展总结,指出断裂空腔型储集体注水吞吐替油开发效果最好,角砾间孔隙型储集体亟需通过构建立体结构井网提高采收率,构造裂缝型储集体注水吞吐开发效果较差。

参 考 文 献

- [1] 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 Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, 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.
- [2] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: Taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(4): 461-469.
- [3] 侯少勇, 段霏泽, 赫庆庆, 等. 富满油田超深碳酸盐岩油气藏走滑断裂带有利储层发育区研究[J]. 海洋石油, 2023, 43(1): 10-15.
HOU Shaoyong, DUAN Peize, HE Qingqing, et al. Study on the favorable reservoir area of strike-slip fault zone of ultra-deep carbonate reservoir in Fuman Oilfield[J]. Offshore Oil, 2023, 43(1): 10-15.
- [4] 张银涛, 孙冲, 王轩, 等. 哈拉哈塘油田走滑断裂带控储成藏规律初探[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(1):

- 10-18.
- ZHANG Yintao, SUN Chong, WANG Xuan, et al. Reservoir formation patterns in the strike-slip fault zone of the Halahatang Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(1): 10-18.
- [5] 王清华. 塔里木盆地17号走滑断裂带北段差异变形与演化特征[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1136-1145.
- WANG Qinghua. Differential deformation and evolution characteristics of the No. 17 strike-slip fault zone in the Tarim Basin [J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1136-1145.
- [6] 孙永革, 孔丽姝, 路清华, 等. 塔里木盆地古城墟隆起顺南1井古油藏热裂解过程的分子碳同位素地球化学记录[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 904-911.
- SUN Yongge, KONG Lishu, LU Qinghua, et al. Molecular carbon isotopic geochemistry records of thermal cracking in the palaeo-reservoir of Well Shunnan 1 in Guchengxu Uplift, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(5): 904-911.
- [7] 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 Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, 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.
- [8] 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F₁17断裂为例[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1123-1135.
- LIU Qiang, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its geological significance: A case study of F₁17 fault in Fuman Oilfield [J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1123-1135.
- [9] 张红波, 周雨双, 沙旭光, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂隆起段发育特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 321-334.
- ZHANG Hongbo, ZHOU Yushuang, SHA Xuguang, et al. Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No. 5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 321-334.
- [10] 邓兴梁, 闫婷, 张银涛, 等. 走滑断裂断控碳酸盐岩油气藏的特征与井位部署思路——以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 21-29.
- DENG Xingliang, YAN Ting, ZHANG Yintao, et al. Characteristics and well location deployment ideas of strike-slip fault controlled carbonate oil and gas reservoirs: A case study of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 21-29.
- [11] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203-212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 203-212.
- [12] 韩俊, 董少峰, 尤东华, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩热液溶蚀及其油气勘探意义——以顺南蓬1井为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 770-779.
- HAN Jun, DONG Shaofeng, YOU Donghua, et al. Hydrothermal dissolution of deep-buried carbonate rocks and its significance for hydrocarbon exploration in Shunnan area, the Tarim Basin: Taking Well Peng-1 in Shunnan area as a case [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(4): 770-779.
- [13] DENG Xingliang, CHEN Jiajun, CAO Peng, et al. Segmentation and lateral growth of intracratonic strike-slip faults in the northern Tarim Basin, NW China: Influences on Ordovician fault-controlled carbonate reservoirs [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1255162.
- [14] 邓兴梁, 闫婷, 张银涛, 等. 走滑断裂断控碳酸盐岩油气藏的特征与井位部署思路——以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 21-29.
- DENG Xingliang, YAN Ting, ZHANG Yintao, et al. Characteristics and well location deployment ideas of strike-slip fault controlled carbonate oil and gas reservoirs: A case study of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 21-29.
- [15] HU Xiangyang, ZHENG Wenbo, ZHAO Xiangyuan, et al. Quantitative characterization of deep fault-karst carbonate reservoirs: A case study of the Yuejin Block in the Tahe Oilfield [J]. Energy Geoscience, 2023, 4(3): 100153.
- [16] 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 Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, 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.
- [17] 张文彪, 段太忠, 赵华伟, 等. 断控岩溶体系空间结构差异性与三维建模——以顺北1号断裂带为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12094-12108.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, ZHAO Huawei, et al. Hierarchical characteristics and 3D modeling of fault-controlled paleokarst systems: A case study of Shunbei 1 strike-slip fault zone [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 12094-12108.
- [18] 胡文革, 邹宁, 李丹丹, 等. 断溶体油藏油源深度对井温分布影响的数值模拟[J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 748-755.
- HU Wenge, ZOU Ning, LI Dandan, et al. The numerical simulation for the influence of reservoir depth on well temperature in karstic-fault reservoir [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 748-755.
- [19] 丁志文, 汪如军, 陈方方, 等. 断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 286-296.

- DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47 (2): 286–296.
- [20] 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, 40(4): 449–455.
- ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. Characteristics of strike-slip faults and fault-karst carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 449–455.
- [21] 张银涛, 孙冲, 王轩, 等. 哈拉哈塘油田走滑断裂带控储成藏规律初探[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 10–18.
- ZHANG Yintao, SUN Chong, WANG Xuan, et al. Reservoir formation patterns in the strike-slip fault zone of the Halahatang Oilfield [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2020, 42(1): 10–18.
- [22] 张文彪, 段太忠, 李蒙, 等. 塔河油田托甫台区奥陶系断溶体层级类型及表征方法[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 314–325.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LI Meng, et al. Architecture characterization of Ordovician fault-controlled paleokarst carbonate reservoirs in Tuoputai, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 314–325.
- [23] 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.
- [24] 韩永科, 张志遥, 陈玮岩, 等. 塔里木盆地跃满地区超深油藏成藏地质条件与演化过程[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(11): 1634–1645.
- HAN Yongke, ZHANG Zhiyao, CHEN Weiyan, et al. Geological conditions and evolution for the accumulation of the ultra-deep oil pools in the Yueman area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(11): 1634–1645.
- [25] 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.
- 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.
- [26] FOSSEN H. Structural geology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [27] CHESTER F M, LOGAN J M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1986, 124 (1): 79–106.
- [28] FAULKNER D R, MITCHELL T M, JENSEN E, et al. Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B5): B05403.
- [29] CLAUSEN J A, GABRIELSEN R H, JOHNSEN E, et al. Fault architecture and clay smear distribution. Examples from field studies and drained ring-shear experiments [J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 2003, 83(2): 131–146.
- [30] VERMILYE J M, SCHOLZ C H. The process zone: A microstructural view of fault growth [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B6): 12223–12237.
- [31] CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31(2): 117–127.
- [32] FAULKNER D R, LEWIS A C, RUTTER E H. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain [J]. *Tectonophysics*, 2003, 367(3/4): 235–251.
- [33] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstone: A review [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(4): 755–769.
- [34] 曹鹏, 常少英, 戴传瑞, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏注水替油适应性浅析——以轮古西潜山油藏为例[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(3): 121–125.
- CAO Peng, CHANG Shaoying, DAI Chuanrui, et al. Brief analysis on water-flooding development of fractured-cavity type of carbonate reservoirs——By taking Lunguxi buried hill reservoir for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(3): 121–125.

(编辑 张玉银)