石油与天然气地质
OIL & GAS GEOLOGY

文章编号:0253－9985(XXXX)XX－0001－14

超深层碳酸盐岩断裂破碎体油藏内部结构、渗流特征及连通模式

——以塔里木盆地富满油田为例

常少英[1],陈方方[2],陈楩俊[1],鲁慧丽[1],王　彭[2],王孟修[1],姚倩颖[1],庞　旭[1]

(1. 中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023;2. 中国石油 塔里木油田公司 勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地富满油田的断裂破碎体油藏属于一种新型油藏类型,同时也是塔里木油田在超深层碳酸盐岩油气勘探开发中的关键增产领域。对该类油藏内部结构和渗流特征的认识不清,制约了注-采关系的优化。基于野外露头、岩心、钻-测井、地震和生产动态等资料,聚焦于塔里木盆地富满油田的断裂破碎体油藏这一典型案例,系统梳理了碳酸盐岩断裂带内部结构组成要素与特征,并结合断裂带渗透率数据分析了其渗透性变化规律。研究表明:①富满油田超深断裂破碎体油藏内部具有"二元-三级多簇"结构体系。②断裂带具有"核部连通、带部输导、隔-夹层封堵"的渗透特征。③构建了3类渗流连通模式:强连通型,即钻穿断层核部储层,整体连通;弱连通型,即钻穿断层损伤带,初期不连通,后期连通;不连通型,即钻穿断层破碎带,相对孤立。对断裂破碎体内部结构、渗流特征及连通模式的认识为优化注-采关系和构建立体井网提供了技术支持,在塔里木盆地富满油田提高采收率重大开发先导试验中发挥了重要作用。研究成果可为地质条件相似的油藏开发建立可推广的技术模式,制定相应开发策略,为实现高效开发与产能突破提供支撑。

关键词:内部结构;渗流特征;连通模式;断裂破碎体;碳酸盐岩油气藏;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3　　**文献标识码**:A

Internal architecture, seepage characteristics, and connectivity modes of ultra-deep carbonate fault-fractured oil reservoirs: A case study of the Fuman Oilfield, Tarim Basin

CHANG Shaoying[1], CHEN Fangfang[2], CHEN Jiajun[1], LU Huili[1], WANG Peng[2], WANG Mengxiu[1], YAO Qianying[1], Pang Xu[1]

(1. *Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang* 310023, *China*; 2. *Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang* 841000, *China*)

Abstract: Fault-fractured oil reservoirs in the Fuman Oilfield, Tarim Basin, represent a new reservoir type and a key domain for increasing oil production from ultra-deep carbonate rocks in the Tarim oilfield. Insufficient understanding of the internal architecture and seepage characteristics of such reservoirs has constrained the optimization of injection-production relationships. Based on an integrated analysis of data including field outcrops, cores, drilling and well logging, seismic surveys, and production performance, this study systematically clarifies the constituent elements and structural characteristics of carbonate fault zones, and elucidates their permeability variation patterns using fault-zone permeability data. The fault-fractured oil reservoirs in the Fuman oilfield, Tarim Basin, is taken as a typical case for the study. As indicated by the research results, (1) the internal architecture of ultra-deep fault-fractured oil reservoirs in the Fuman oilfield has a "dual-element, three-level, multi-cluster" structural system. (2) The fault zones are characterized by seepage characteristics of fault-core connectivity, fault-zone conduction, and sealing by barriers and interlayers. (3) Three types of seepage connectivity modes were constructed: strongly-connected mode, in which the

收稿日期:2026-02-02;**修回日期**:2026-07-20。

第一作者简介:常少英(1983—),男,高级工程师,油藏地球物理和油气藏评价综合研究。**E-mail**: changsy_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:鲁慧丽(1982—),女,高级工程师,碳酸盐岩储层预测。**E-mail**: luhl_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2025ZD1402304);中国石油天然气股份有限公司科技项目(2023ZZ16YJ01,2023ZZ16YJ02,2026DJ140101);新疆维吾尔自治区重大科技专项(2024A01010)。

well penetrates the reservoir in the fault core and achieve overall connectivity; weakly-connected mode, in which the well penetrates the fault damage zone with no initial connectivity but subsequent connectivity over time; and disconnected mode, in which the well penetrates the fault-fracture zone and remains relatively isolated. Understanding the internal architecture, seepage characteristics, and connectivity modes of fault-controlled fractured reservoirs serves to provide technical support for optimizing injection-production relationships and constructing three-dimensional well patterns. This understanding plays an important role in the major development pilot test for enhanced oil recovery in the Fuman oilfield, Tarim Basin. The research findings can also provide a transferable technical model and development strategy for reservoirs with similar geological conditions, thereby supporting their efficient development and breakthroughs in production capacity.

Key words: internal architecture, seepage characteristics, connectivity mode, fault-fractured reservoir, carbonate reservoir, Fuman Oilfield, Tarim Basin

引用格式:常少英,陈方方,陈楩俊等. 超深层碳酸盐岩断裂破碎体油藏内部结构、渗流特征及连通模式——以塔里木盆地富满油田为例[J]. 石油与天然气地质,DOI:10. 11743/oggXXXXXX01.

CHANG Shaoying, CHEN Fangfang, CHEN Jiajun, et al. Internal architecture, seepage characteristics, and connectivity modes of ultra-deep carbonate fault-fractured oil reservoirs: A case study of the Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI:10. 11743/oggXXXXXX01.

在超深层(尤其指埋深超过7 000 m)碳酸盐岩油气藏的勘探开发中,断裂带及其控制的缝洞型储集体已成为维持高产、稳产的关键目标,具有至关重要的战略地位。随着勘探开发实践的深入,在塔里木盆地富满油田的南部坳陷区(满深、富源、果勒和哈德等)发现了一种有别于富满油田北部(跃满北和新垦等)断溶体的储集体类型。岩心和薄片资料表明,该区域断裂缝洞型储集体中鲜见大气淡水溶蚀作用的迹象,其储集空间主要由断裂破碎作用形成,类型包括角砾间孔隙、断裂空腔、构造缝以及深成岩热液溶蚀孔洞。由于主控因素的差异性,富满油田北部断溶体与南部断裂破碎体之间存在显著差异,主要体现在储集体的发育位置、空间形态、内部结构、充填物性质和实际生产特征等方面。这种不受大气淡水溶蚀改造、储层孔-渗条件主要依靠断裂机械破裂作用大幅改善、油气沿断裂及其相关裂缝系统聚集成藏的超深层致密灰岩油气藏,称之为断裂破碎体油气藏[1]。塔里木盆地富满油田南部坳陷区和顺北油田作为中国重要的超深层断裂破碎体油气产区,将成为目前及今后一个时期重要的上产、稳产领域[2]。

近年来,富满油田在勘探开发领域实现重大突破,成为其原油产量连续5年保持强劲增长势头的主引擎。富满油田断裂破碎体油藏具有埋藏深、构造复杂和非均质性强等特点[3],传统油气地质理论与开发技术在此面临严峻挑战。断裂破碎体是走滑断裂作用形成的复杂储渗单元[4],其内部结构非均质性强、流体流动机制复杂、连通规律预测困难,具体表现为对断控油藏内部结构的刻画精度不够[5-6]、对地质模式的认识还存在争议[7-8]以及对流体运移规律的揭示还不够深入[9-10]等,这些问题制约了该类油藏采收率的提高,亟需深化其内部结构、渗流特征及连通规律的系统认知。因此,本文聚焦于塔里木盆地富满油田断裂破碎体内部结构、渗流特征及其连通模式等方面研究内容,对于丰富断控油藏地质理论、指导油田高效勘探开发具有重要的理论和现实意义。

1 地质背景

塔里木盆地富满油田主体为一个近南北向展布的“鞍状古隆起”,构造上隶属阿瓦提凹陷与满加尔凹陷之间的过渡带(即“低梁部位”)。其西、东两侧分别与阿瓦提和满加尔凹陷相接,北倚塔北隆起,向南逐渐过渡为中央凸起(图1)。主要目的层位于中奥陶统鹰山组二段—一间房组。现今的构造比较平缓,一般埋深为6 500 ~ 8 500 m,平均埋深约为7 500 m,属于超深层勘探范围,有利勘探面积达1. 13 × 10^4 km^2。塔里木盆地台内发育走滑断裂系统(如$F_1$17断裂带),控制破碎体空间展布,断裂带延伸长度为20 ~ 50 km,垂向断距为100 ~ 300 m,在富满油田的南部区带(满深、富源、果勒和哈德等)发育断裂破碎体油藏,其储集体类型以断裂破碎角砾间孔、张扭空腔和高角度裂缝为主,孔隙度通常为3% ~ 12%。断裂储层亦作为油气垂向运移通道,直接沟通埋深9 ~ 18 km的烃源岩(如玉尔吐斯组),并控制上覆缝洞圈闭油气富集[11],油柱高度可达上千米,为典型的立式板状油气藏。研究区桑塔木组巨厚泥岩为奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层提供了优质区域盖层;而下寒武统玉尔吐斯组作为主要烃源岩层系,广泛分布于塔里木盆地北部坳陷,为该区奥陶系碳酸盐岩油气藏供烃,二者共同构成了该区关键的生-储-盖组合[12]。

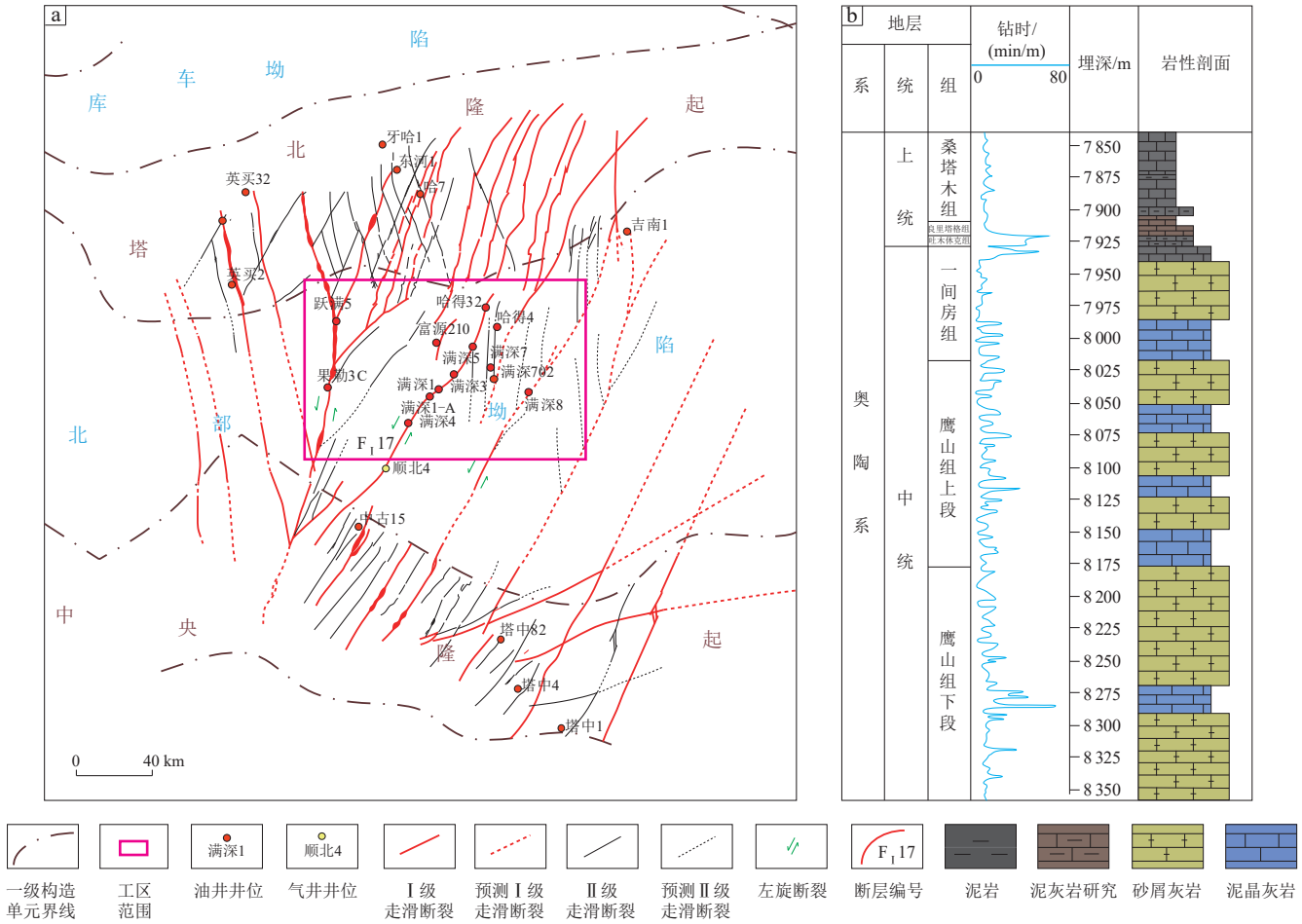


图1　塔里木盆地富满油田研究工区位置(a)和满深1井地层综合柱状图(b)

Fig. 1　Location of the study area in the Fuman oilfield (a) and composite stratigraphic column of well Manshen 1 (b), Tarim Basin

2　断裂破碎带结构特征及地质模式

断裂破碎体通常呈现为高应变核部与低应变破碎带共同构成的三维地质结构。近年研究进一步揭示，其内部构造具有更高复杂性：成熟断裂破碎体的核部可细分为内核与外核；压扭性走滑断裂带内则能够识别出2个次级裂缝带。综合来看，该类构造可概括为“二元-三级多簇”结构体系，即核部与破碎带构成断裂带一级变形单元，各类断层岩、裂缝带及其伴生构造则组成二级变形单元，进一步细分为三级亚类变形单元，大规模断裂带核部和破碎带往往重复出现，呈现“多簇状”发育的特征。

2.1　走滑断裂破碎带内部结构要素

目前关于断裂内部结构的研究主要集中在碎屑岩，碳酸盐岩走滑断裂内部结构研究常借用碎屑岩走滑断裂内部结构模式，这往往与实际钻井情况不符。碳酸盐岩断裂带内部结构解剖是断控储层机制研究的基础。因此，亟需加快碳酸盐岩走滑断裂内部结构模式的研究。

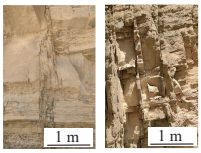
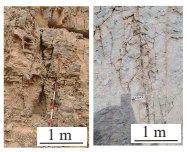
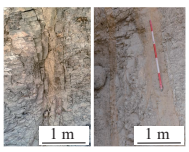
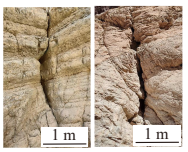
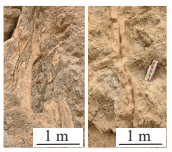
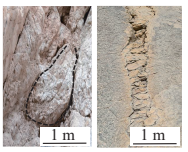
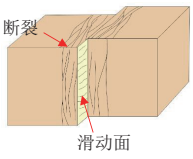
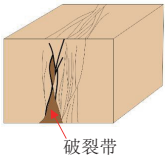
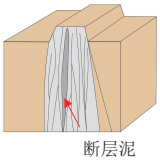
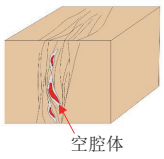
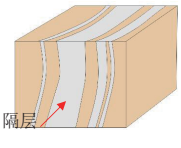
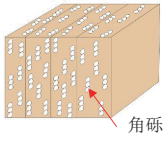
野外露头与井下断裂的应力特征、岩性及几何样式特征相似时，二者即可开展类比。富满油田断控缝洞型储集体的野外可类比对象，位于塔里木盆地新疆维吾尔自治区柯坪—巴楚地区的“皮羌断裂”“硫磺沟”“大湾沟”“一间房”和“肖尔布拉克”等露头区，广泛分布于柯坪县、巴楚县和伽师县一带，其出露地层以奥陶系碳酸盐岩为主。其中，巴楚地区露头层位主要为一间房组，岩性以砂屑灰岩和泥晶灰岩为主。

柯坪地区奥陶系碳酸盐岩走滑断裂带出露良好，上述露头展现了断裂带内部结构的宏观和微观特征，为研究走滑断裂带构造提供了系统可靠的野外资料。断裂带内部结构可划分出滑动面、裂缝带、断层泥、隔-夹层(透镜体)、空腔体和断层角砾等断裂内部构型要素(表1)，断裂带是一个或几个结构要素的集合[13]。

滑动面为断裂上、下盘滑动形成的接触面，广泛发育于走滑断裂各段，附近岩石受剪应力揉搓形成破碎带，分直线切割型、波动起伏型和渐变条带型3类。其

表1 富满油田奥陶系断裂内部构型要素

Table 1 Internal configuration of the Ordovician faults in the Fuman oilfield

构型要素	滑动面	裂缝破碎带	断层泥	空腔体	隔层	断层角砾
典型野外露头照片						
地质模式示意图						
特征	断裂上、下盘或断层两侧沿滑动面滑动，往往在滑动面附近形成破碎带	多组断裂交叉，网状缝、岩石破裂带发育	位于主断层的中心部位，由于断层挤压研磨作用，断层核渗透性较差	受张扭性应力影响，在断层的核部出现脱腔效应，形成空腔体	断裂内部常由于流体所携带硅质、方解石和泥质等矿物沉淀后，充填裂缝或岩性致密化形成隔-夹层	在应力作用下，原岩破碎成角砾状，角砾之间的基质为破碎细屑，或有部分外来物质胶结

纵窄致密，部分填充细碎屑岩，横向变化大但延伸距离短，不利于流体大规模运移，局部因缝隙存在而具一定渗透性。

裂缝带由断层面滑动引发岩石挤压破碎形成，无黏结力，呈网状缝发育特征，具高孔-渗性。在碳酸盐岩中裂缝带更复杂，以高角度裂缝为主，分大尺寸和微尺寸2类。富满油田以机械破碎为主，见方解石充填，多数裂缝因挤压胶结渗透率低，仅局部裂缝带为油气运移优势通道，可形成非构造圈闭。

断层泥位于主断层中心及滑动面周围，由碎裂岩系构成，粒度均一。经挤压研磨及矿物沉淀，渗透性极差，孔、渗远低于断裂其他部位，压扭型断裂中较为常见。

隔-夹层（透镜体）由具黏结力的薄层条带构成，以碳酸盐岩为核心成分，起渗流障壁作用，分布于断层核与破碎带。形态分连续和不规则等类型，断层核部压扭型隔层可使区域整体致密。

空腔体受张扭性应力作用，在断层核部因脱腔效应形成。

断层角砾由多组构造应力导致岩石揉搓破碎形成，碎片经充填胶结后多呈透镜体状，相互支撑可形成规模角砾间孔储集体，是重要储集空间类型。

2.2 断裂破碎体内部“二元-三级多簇”结构模型

断裂破碎体的内部结构的形成受多尺度因素协同控制，宏观层面包括岩性差异、断层位移量、应变速率、活动历史、流体性质和温-压环境等；微观层面则涉及孔隙塌陷、碎裂细粒化、硅质-泥质涂抹、压溶作用和重结晶等变形机制。

受上述宏观与微观因素的耦合控制，断裂破碎体在空间上呈现出明显的“二元”结构特征，即“断层核”与“破碎带”，二者在成因、岩性组成、空间形态和渗流功能上存在显著差异。断层核作为断裂破碎体的核心高应变带，围绕主滑动面发育，由一系列经历强烈构造变形的断层岩构成。其宽度具有较大的变化范围，可从厘米级、米级至数十米级。规模较大的断层核内部常发育多个次级滑动面，这一特征记录了断层活动的多期次性与复杂性。在构造变形过程中，断层核因吸收绝大部分应变量和断距，导致内部岩石发生强烈改造，主要组成包括断层泥、碎裂岩、断层角砾岩和构造透镜体等断层岩，同时伴生有滑移面、裂缝系统、变形带以及缝合线等次级构造。从渗流功能来看，碳酸盐岩断层核内部分布的颗粒支撑角砾岩和张裂缝角砾岩等岩石类型，因具有较高的孔隙度与渗透率，可作为垂向流体运移的主要通道；而成熟期的断层泥和硅质涂抹层等低渗透岩石则会形成局部的封堵屏障，影响流体的运移。

破碎带分布于断层核的两侧，是断层活动引发的应力向围岩传递过程中形成的低应变区域。与断层核相比，破碎带的岩石变形程度相对较弱，以发育裂缝为特征，岩石的原始结构在一定程度上得以保留。根据其与断层活动的关联性及应力衰减特征，可将破碎带进一步分为主动盘破碎带与被动盘破碎带2个二级结构单元。主动盘是断层活动过程中相对运动的主导盘，受应力作用更为强烈，因此主动盘破碎带的裂缝密度与裂缝宽度通常大于被动盘破碎带，导致两盘破碎带在空间上呈现出不对称的分布特征。从渗流功能来看，破碎带内发育的北东向裂缝簇可作为流体侧向渗

流的通道，将断层核与周边围岩连通，形成“核-带”协同的流体运移系统。

在“二元”结构的基础上，根据岩石变形程度、岩性组合和渗流特征的差异，进一步将“断裂破碎体”划分为3个三级结构单元（图2，图3），实现对其内部结构的精细化表征。断层核部的三级分带，断层核作为一级结构单元，可划分为两个二级结构带：内核和外核。依据内部岩性与渗流特征的不同，内核和外核又可分为三级结构带，其中内核分为“断层泥带”和“颗粒支撑角砾岩带”，外核为“碎裂岩带”。断层泥带主要由细粒的断层泥组成，岩石致密，孔隙度通常小于5%，渗透率小于0.1×10^{-3} μm²，属于低孔-低渗的封堵带。其形成与泥岩的塑性流变和细粒物质的迁移沉积密切相关，能够有效阻挡流体的运移，在断裂破碎体内部形成封堵屏障。颗粒支撑角砾岩带是断层核内的高渗透区域，主要由颗粒支撑的断层角砾岩组成，角砾间孔隙发育，孔隙度可达15%～25%，渗透率为$(1\sim100)\times10^{-3}$ μm²（部分高渗区域可达$1\ 000\times10^{-3}$ μm²以上），属于高孔非均质渗流带。该带的渗流能力受角砾磨圆度与胶结程度的影响显著，角砾磨圆度越好、胶结程度越弱，孔隙连通性越好，渗透率就越高；反之则渗透率降低。该带是断层核内流体垂向运移的主要通道，对断裂破碎体的整体连通性起关键控制作用。外核的碎裂岩带位于断层内核与破碎带之间，属于过渡性结构带。岩石以碎裂岩为主，孔隙度介于5%～15%，渗透率为$(0.1\sim10.0)\times10^{-3}$ μm²，表现为中孔-中渗的特征。该带内部裂缝较为发育，但裂缝多被细粒物质部分充填，渗流能力介于断层泥带与颗粒支撑角砾岩带之间，可作为流体运移的辅助通道。

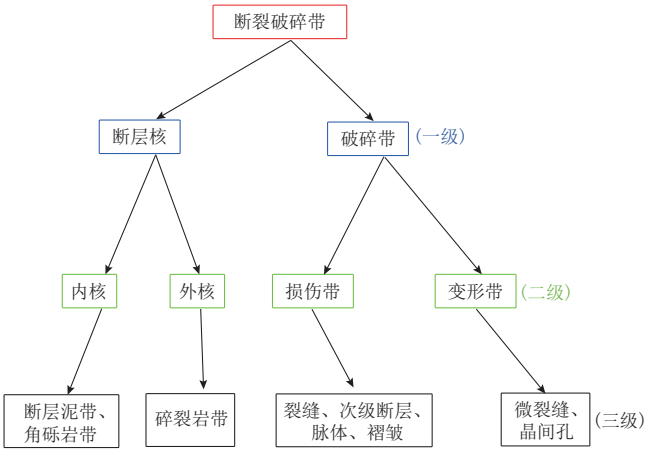


图2　富满油田断裂破碎体内部“二元-三级多簇”结构划分示意图

Fig. 2　Schematic diagram showing the division of the “dual-element, three-level, multi-cluster” internal architecture of fault-fractured reservoirs in the Fuman oilfield

破碎带也具有三级分带特征，破碎带整体作为一级结构单元，可分为2个二级结构带（损伤带和变形带），进而依据内部岩石变形特征与裂缝发育程度的差异，同样可划分两个三级结构带。损伤带又称诱导裂

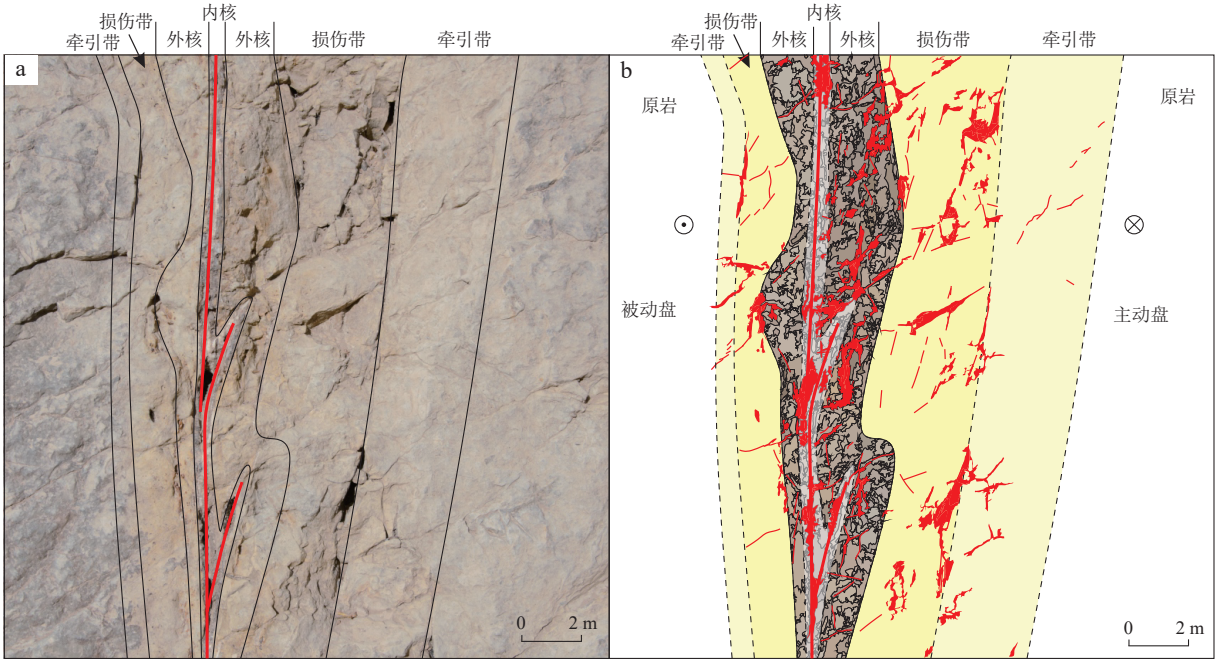


图3　富满油田野外露头照片（a）及其断裂破碎体“二元-三级”内部结构模式示意图（b）

Fig. 3　Field outcrop in the Fuman oilfield (a) and the “dual-element and three-level” internal architectural model of fault-fractured reservoirs therein (b)

缝带，是破碎带内主要发育裂缝的地质体，其形成距断层活动引发的围岩牵引变形密切相关，损伤带内部裂缝的分布具有明显的空间分异规律，其密度随与主滑移面距离的增大而呈幂律形式衰减（表2），表现为近滑移面区域裂缝密集、连通性强，而远场区域则裂缝稀疏、连通性显著降低。除裂缝系统外，损伤带内常发育次级断层、矿物脉体和层间褶皱等三级构造带。这些伴生构造不仅进一步优化了岩石的孔隙网络结构，也显著增强了损伤带的整体渗透性与流体输导能力。从空间分布来看，主动盘损伤带的裂缝密度显著高于被动盘损伤带，导致主动盘损伤带的渗流能力优于被动盘损伤带。变形带是破碎带内的构造变形区，岩石仅发生塑性变形或轻微的脆性变形，未发生明显的破裂，主要发育微裂缝与晶间孔，为三级结构带。变形带的孔隙度与渗透率均较低，渗透率通常小于1×10^{-3} μm²，渗流能力差，可作为局部的渗流屏障，限制流体在破碎带内的横向运移[14]。

2.3 断裂破碎体内幕结构井-震特征解析

基于富满油田38口钻-录井资料和露头解剖资料，结合典型井（满深4井）精细剖析，可明确断裂破碎体具备典型的二元-三级多簇结构特征，二元结构为断层核-损伤带组合，三级结构包含断层核、损伤带和原岩变形带，多簇结构表现为多段叠置的断裂组合特征，且在露头、成像测井和地震刻画上呈现差异化识别标志。

露头尺度上，该结构受控于伸展-走滑双重构造样式，由边界主滑移带与内部连接断层组构成多断板状构造。主滑移带阶列式侧向生长、相互叠接，在叠接区域形成菱形拉分盆地，造就多簇断裂错落分布的格局；据此可直观识别出分段式的断裂核部与两侧破碎损伤带，整体呈现多段、簇状叠置的宏观结构形态，是二元-三级结构形成的基础地质表象。

表2 富满油田柯坪地区碳酸盐岩走滑断裂带大湾沟剖面裂缝密度随距主滑移面距离关系数据

Table 2 Statistical data of fracture density variation with distance to the principal slip surface in the Dawangou carbonate strike-slip fault section, Keping area, Fuman oilfield

距主滑移面距离(x)/m	裂缝密度(ρ)/(条/m)	拟合公式	幂指数(b)	拟合系数(R^2)
0.5	18.2	$\rho=12.48x^{-0.89}$	0.89	0.987
1.0	12.5			
2.0	8.7			
5.0	4.3			
10.0	2.1			
20.0	1.0			

成像测井可实现结构精细定量刻画，清晰区分三级结构物性差异。断层核水平宽度介于9.1～16.4 m，整体占比偏低，但孔隙度显著偏高，平均孔隙度2.2%～9.5%，以断裂空腔为核心储集空间。损伤带宽度具有明显不对称性，整体宽度更大、占比更高，孔隙度远低于断层核，以裂缝-孔隙型储集空间为主。残余原岩变形带占比最高、孔隙度极低，为致密隔挡层。单井可钻遇多套完整核-带结构，形成多簇叠置的纵向结构特征。

地震刻画依托井-震标定可实现宏观结构识别。结合钻井放空、漏失、气测异常和孔隙度测井响应特征，可精准锚定断裂破碎体地震响应特征，有效划分核-带空间边界。地震剖面可清晰识别断裂破碎体整体展布范围，刻画多段结构叠置的多簇分布特征，区分高响应的断层核发育区、弱响应的损伤带及均匀致密的原岩变形带，实现断裂破碎体二元-三级多簇结构的井-震联合识别与空间表征（图4）。

3 断裂破碎体内部结构孔-渗特征及模式

3.1 断裂破碎体渗流特征

基于新疆柯坪地区大湾沟碳酸盐岩露头孔-渗测试数据（图5；表3），结合岩石薄片观察和CT扫描数字岩心分析等手段，根据孔-渗特征可将超深层断裂破碎体核-带结构划分为3类。①低孔-低渗型，主要分布于断层核的断层泥带与破碎带的变形带，以断层泥和致密变形岩为主，孔隙度小于5%，渗透率小于0.1×10^{-3} μm²，受压实作用与细粒化作用影响，孔隙连通性极差，属封堵性岩石；②中孔-中渗型，集中在断层外核的碎裂岩带与破碎带的被动盘损伤带，岩石类型为碎裂岩、弱胶结基质支撑角砾岩，孔隙度介于5%～15%，渗透率为$(0.1\sim10.0)\times10^{-3}$ μm²，碎裂化与弱胶结作用保留了部分孔隙连通性，是流体运移的过渡通道；③高孔非均质型，位于断层内核的颗粒支撑角砾岩带与破碎带的主动盘损伤带，以颗粒支撑角砾岩和张裂缝角砾岩为主，孔隙度达15%～25%，渗透率差异显著，部分高渗区域可达$1\,000\times10^{-3}$ μm²以上，其特征受角砾磨圆度与胶结程度控制，是流体运移的主要通道，决定整体渗流能力[17]。

超深层断裂破碎体内部不同结构单元的渗流特征存在显著差异，这一差异由结构单元的成因、岩性组成和构造演化历史共同决定。断层核作为核心区域，呈“高渗连通区与低渗封堵区交替分布”的非均质特征，

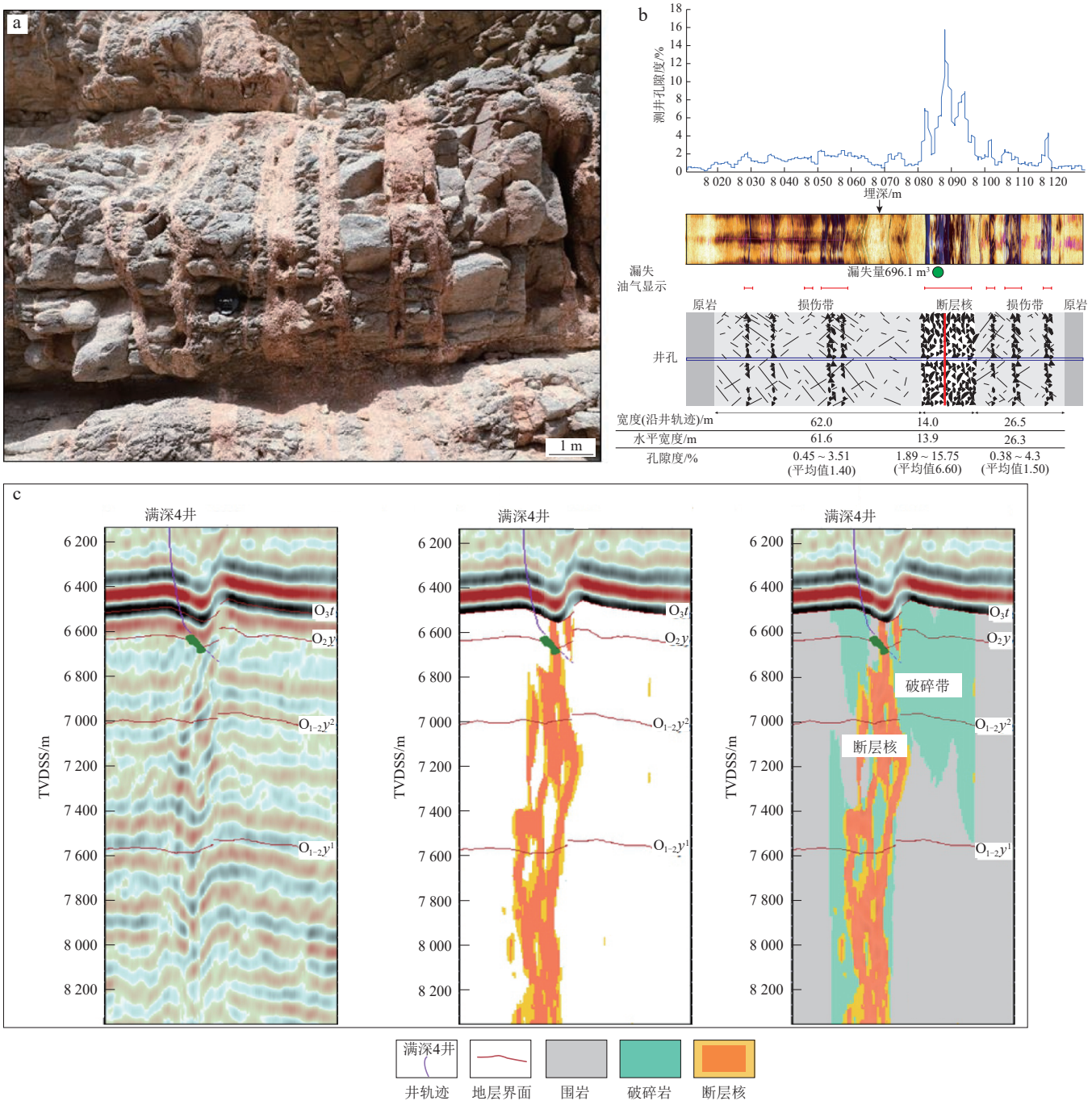


图4　富满油田野外露头–井–震资料核–带结构特征对比

Fig. 4　Comparison of fault-core structural characteristics based on field outcrop, well, and seismic data from the Fuman oilfield

a. 断裂破碎体核–带结构野外露头照片；b. 满深4井断裂破碎体核–带结构解析；c. 地震数据断裂体核–带结构信息提取

（TVDSS为海平面以下的真实垂深；O_3t为吐木休克组；O_2y为一间房组；$O_{1-2}y^1$为鹰一段；$O_{1-2}y^2$为鹰二段。）

高渗区为垂向运移主通道，低渗区形成封堵屏障，流体运移呈“绕流–突进”特征。主动盘破碎带可承受构造应力更强，裂缝发育充分，孔隙度10% ~ 20%，渗透率(10 ~100) × 10^{-3} μm² 以上，是侧向运移主通道；而被动盘破碎带裂缝稀疏，孔隙度5% ~ 10%，渗透率小于5 × 10^{-3} μm²，仅为辅助通道。损伤带渗透率呈环带状分布，靠近主滑移面处高、远离则降低，渗流能力受裂缝连通性控制，变形带仅发育微裂缝与晶间孔，孔隙度小于5%，渗透率小于1 × 10^{-3} μm²，为渗流屏障。

断裂破碎体的渗流特征随构造演化阶段动态调整，可分为雏形期、发展期与成熟期3个阶段。雏形期为断裂发育初始阶段，断层活动弱、构造应力未充分释放，破碎体核–带结构无分化、边界模糊。仅局部发育微破裂区，无成型的断层岩和连通裂缝网络，基质渗流

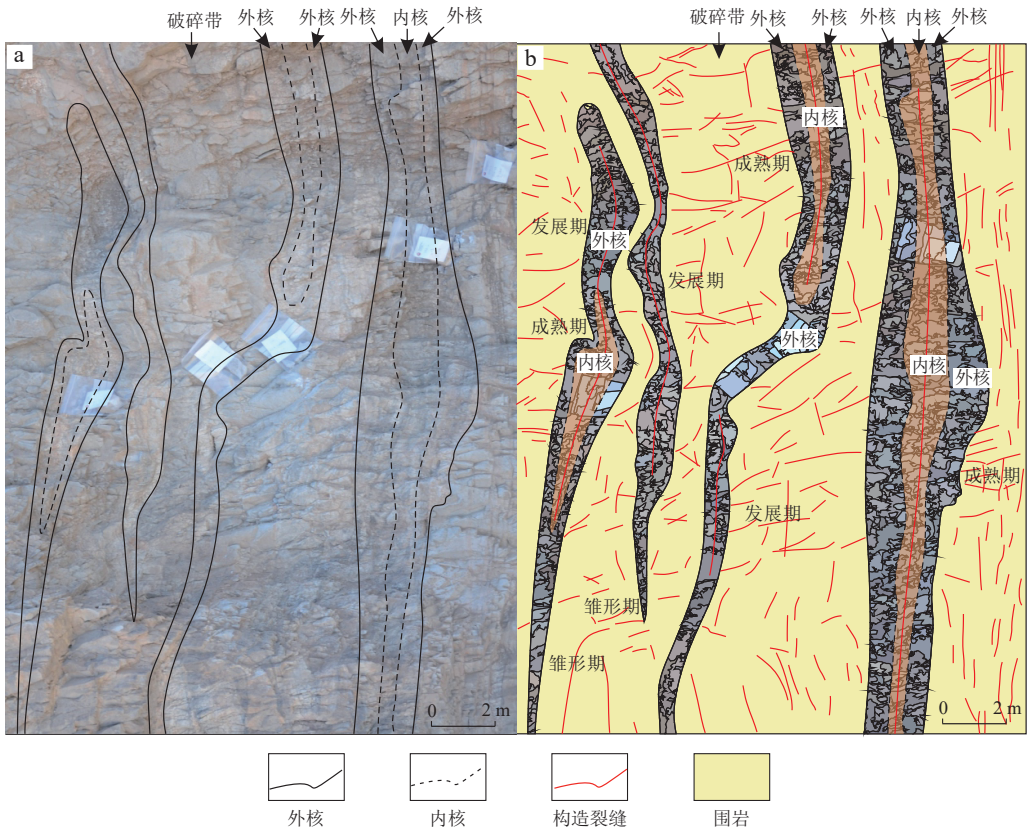


图5 富满油田大湾沟剖面断裂带内部结构孔-渗测试取样点分布与结构剖面示意图

Fig. 5 Distribution profile of sampling points for porosity and permeability testing of the internal architecture of the fault zone in the Dawangou section, Fuman Oilfield

a. 野外剖面照片(白色样品袋为取样点);b. 结构剖面示意图

占主导,孔隙度低于5%、渗透率小于1×10^{-3} μm^2。该阶段整体渗流连通性和稳定性极差,流体运移能力弱,对油气富集与开发的贡献有限,且渗流物性对应力变化高度敏感。发展期为断裂发育关键阶段,断层活动显著增强、应力大量释放,破碎体“二元-三级”结构完全分化。核部大幅扩张,形成密集连通裂缝网络,孔隙度和渗透率大幅提升,以高效非达西垂向渗流为主;破碎带大幅扩展,主动盘和被动盘渗流差异显著,形成“核-带”协同渗流系统。该阶段整体连通性、渗流能力最优,是油气运移富集的有利阶段,同时结构定型使得渗流特征稳定性大幅提升。成熟期为断裂稳定阶段,断层活动趋于停滞,整体结构受成岩改造主导、复杂度提升。核部受胶结作用影响呈现高渗通道或低渗封堵的二元物性特征;破碎带宽度最大但裂缝多被压实胶结,渗流物性变差,非均质性显著增强。流体由单一核部主导渗流转变为多路径复合渗流模式,渗流特征最稳定,受外部应力影响极小,流体呈“多路径复合流”,渗流特征复杂化,岩石应力敏感性进一步降低[18-19]。

3.2 断裂破碎体渗流模式

尽管碳酸盐岩断裂带结构复杂,但其渗透性具有较为明显的规律。断层核经历了更为强烈的剪切应变和颗粒重排作用,形成高度定向排列的破裂面网络,构成连通的渗透通道;而破碎带受应力场梯度影响,裂隙发育呈现多尺度无序分布,导致有效连通路径不连续。

钻井数据统计显示,断裂带内只有油气显示的储层厚度仅占其总厚度的约9%。研究表明,宽缝对窄缝具有显著的流动屏蔽效应,约90%的流体输导仅发生于断裂带内10%的裂缝空间中,表明断裂带内部结构的渗透性差异对油气运移具有关键控制作用[20]。其中,高渗透性与高连通性的裂缝带构成流体的优势运移路径。该优势路径的形成与“压力-应变-应力”耦合机制密切相关:在裂缝带油气充注过程中,高渗透裂缝带内部压力增幅最大、增速最快,压力升高导致裂缝面正应力降低、缝宽增大。宽裂缝的扩张进一步对相邻窄缝带产生挤压作用,使其渗透性下降,即正应力由宽缝向窄缝传递。这一机制导致绝大部分流体沿高渗透优势路径发生运移。

表3 富满油田大湾沟剖面断裂带核-带结构采样和渗透率测试数据

Table 3 Sampling and permeability test data sheet for the fault-core structure in the Dawangou section, Fuman oilfield

位置编号	渗透率/(10^{-3} μm^2)	地质分区	位置编号	渗透率/(10^{-3} μm^2)	地质分区
1	1 250.2	核部(高渗连通区)	26	0.1	隔-夹层(封堵区)
2	980.5	核部(高渗连通区)	27	0.1	隔-夹层(封堵区)
3	0.1	隔-夹层(封堵区)	28	110.3	带部(疏导区)
4	85.7	带部(疏导区)	29	1 320.8	核部(高渗连通区)
5	0	隔-夹层(封堵区)	30	0.1	隔-夹层(封堵区)
6	920.1	核部(高渗连通区)	31	78.4	带部(疏导区)
7	65.2	带部(疏导区)	32	1 050.6	核部(高渗连通区)
8	0.1	隔-夹层(封堵区)	33	0	隔-夹层(封堵区)
9	1 420.3	核部(高渗连通区)	34	92.8	带部(疏导区)
10	0.1	隔-夹层(封堵区)	35	880.9	核部(高渗连通区)
11	74.6	带部(疏导区)	36	0.1	隔-夹层(封堵区)
12	1 150.4	核部(高渗连通区)	37	68.3	带部(疏导区)
13	0	隔-夹层(封堵区)	38	0.1	隔-夹层(封堵区)
14	55.9	带部(疏导区)	39	1 280.5	核部(高渗连通区)
15	1 020.7	核部(高渗连通区)	40	83.1	带部(疏导区)
16	0.1	隔-夹层(封堵区)	41	0	隔-夹层(封堵区)
17	49.8	带部(疏导区)	42	950.2	核部(高渗连通区)
18	1 350.6	核部(高渗连通区)	43	72.5	带部(疏导区)
19	0.2	隔-夹层(封堵区)	44	0.1	隔-夹层(封堵区)
20	62.3	带部(疏导区)	45	1 120.4	核部(高渗连通区)
21	0	隔-夹层(封堵区)	46	59.7	带部(疏导区)
22	1 080.9	核部(高渗连通区)	47	0.1	隔-夹层(封堵区)
23	77.1	带部(疏导区)	48	1 400.8	核部(高渗连通区)
24	0.1	隔-夹层(封堵区)	49	88.2	带部(疏导区)
25	890.4	核部(高渗连通区)	50	0.1	隔-夹层(封堵区)

断裂核-破碎带耦合连通模式垂向上发育的“核-带”结构构成垂向渗流通道,断层核内角砾间孔与破碎带裂缝共同构成垂向连通网络;侧向上断层泥(压扭型核-带结构)或胶结角砾岩分割高渗角砾岩体,形成“甜点”储层。破碎带具有分带性屏障特征,变形带微裂缝发育区与变形带高渗区之间形成渗流界面,从而限制流体横向运移[21-23]。

依据断裂破碎体内部结构渗流特征,本文提出“核部连通、带部输导、隔-夹层封堵”的渗透模型(图6)。该模型明确了走滑断裂的张性、压性属性,并对走滑断裂核-带结构不同发育阶段的渗流特征进行划分。断层核通常构成流体的优势运移路径,其连通性受裂缝密度、走向和延伸长度等多因素控制,因此高渗透带往往局限于裂缝带内有限的空间范围。整体上,裂缝带的渗透性与断层核和裂缝带的相对比例呈正相关关系。随着裂缝介质渗透性测试技术的进步和断裂带渗透率数据的持续积累,相关研究正逐步向定量化、精细化方向发展。

对比断裂破碎体与传统断溶体的本质差异,断溶体以断裂为导流通道,岩溶溶蚀为核心成因,储集空间由溶孔和溶洞主导;断裂破碎体则以构造机械破碎为主控,流体溶蚀仅为辅力。成因差异直接形成截然不同的控储特征,机械破碎造就杂乱裂隙网络,孔喉细小、连通性不均,孔隙结构受破碎程度控制;而断溶体大尺度溶蚀孔隙发育,孔喉粗大、连通性优越。应力敏感性方面,断裂破碎体裂隙受应力作用易闭合,渗透率降幅显著,应力敏感特征突出;断溶体溶蚀孔洞骨架稳定性更强,应力影响较弱。二者成因、孔喉结构、储层物性及应力响应具有系统性差异(表4)。

4 超深层断裂破碎体油藏连通类型

以$F_1$17断裂带为例,开展单井内部结构解剖,并结合单井钻遇断层的位置关系,把不同连通井组单元的连通方式划分为3大类:强连通型,即钻穿断层核部储层,整体连通;弱连通型,即钻穿断层损伤带,初期不连通,后期连通;不连通型,即钻穿断层破碎带,相对孤

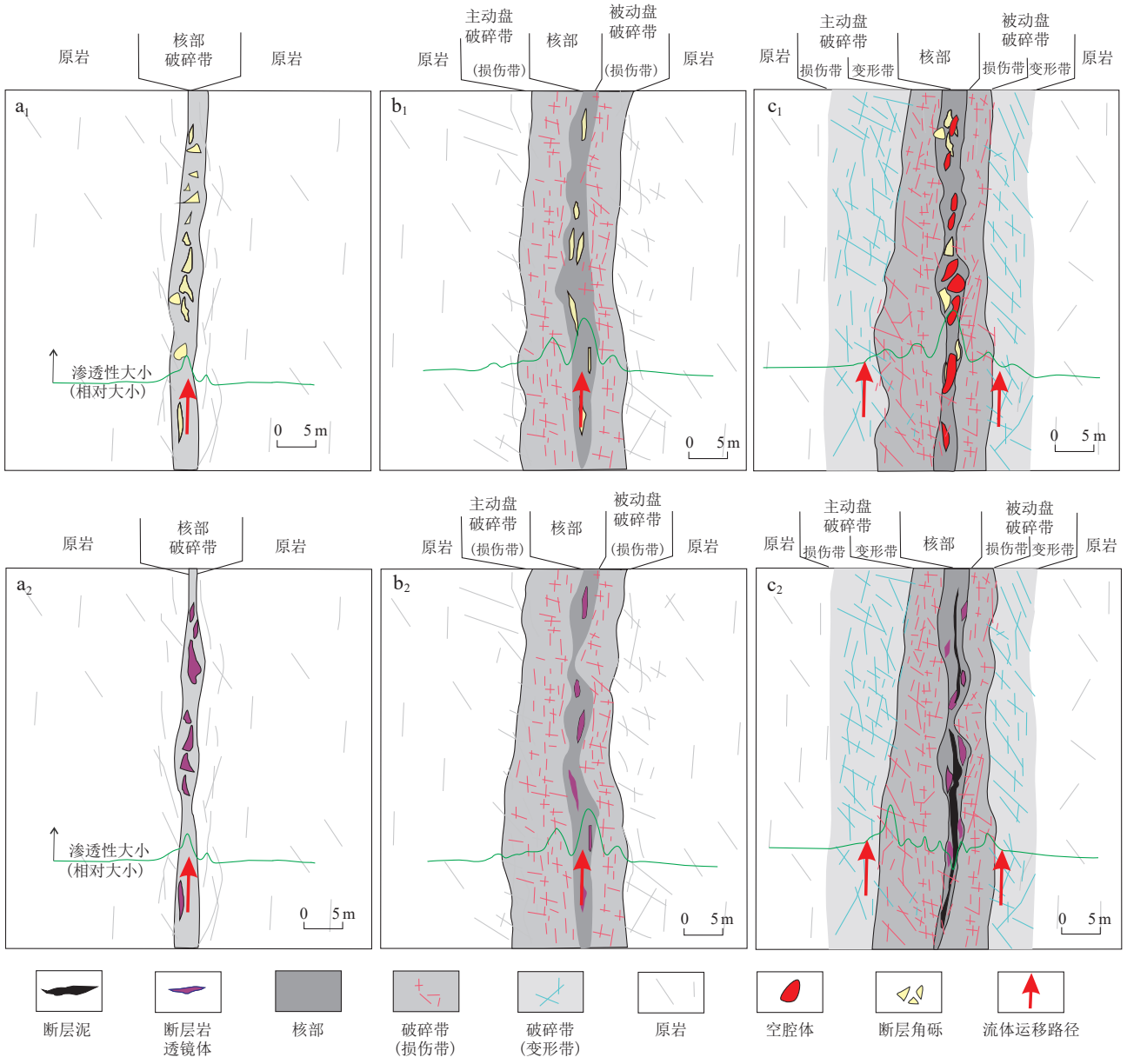


图6 富满油田不同性质断裂破碎体内部渗流规律演化模式示意图

Fig. 6 Evolution models of internal seepage patterns for fault-fractured reservoirs with different properties in the Fuman Oilfield

a_1—c_1. 分别为张扭性断裂雏形期、发展期和成熟期渗流模式示意图；a_2—c_2. 分别为压扭性断裂雏形期、发展期和成熟期渗流模式示意图

立。连通类型的识别是油藏单元内部连通路径的研究及井控储量的可动潜力评价的基础[24-25]。

4.1 强连通型模式定义与井组实例

强连通型模式指钻井穿透断层核部储层且整体连通的开发单元，典型代表为满深4-H3井组。该单元包含满深4、满深4-H3、满深4-H2、满深2-H4、满深401H和满深4-H1井，井-震标定与取心数据证实所有井均穿透走滑双重构造带的断层核部储层（图7a）。核部储层物性较好，如满深4井核部孔隙度达18.0%，满深401H井为15.6%，形成贯穿性高渗通道。此类模式中，断层核部作为主连通介质，其规模与物性直接控制井间连通强度。

井组连通性可由静态、动态响应特征进行证据约束。静态数据：满深4井与满深401H井通过井-震标定证实直接钻遇核部高孔带，满深4-H2井和满深2-H4井通过“核-核”实现强连通。动态响应特征表现在3个方面：①压力具有同步变形特征，满深4井和满深4-H1井等4口井油压变化趋势高度一致，反映统一压力系统；②井间干扰效应明显，满深4井关井后压力持续下降，相邻满深4-H1井和满深4-H2井压力上升0.5 ~ 1.2 MPa，指示流体发生了再分配过程；③动态

表4　断裂破碎体与断溶体渗流关键特征参数对比

Table 4　Comparison of key parameters of seepage characteristics between fault-fractured reservoirs and fault-karst reservoirs

特征参数	断裂破碎体	断溶体
成因机制	构造机械破碎主控；超深层强构造应力、多期走滑剪切挤压导致岩体脆性错断、角砾化，原生构造造储，流体改造仅为次要微调	流体溶蚀改造主控；断裂仅作为流体运移通道，依靠大气淡水、深部热液水-岩反应溶蚀扩孔，构造破碎仅起辅助作用
储集空间类型	砾间孔隙、剪切裂隙和网状微裂缝发育，孔喉结构规整、连续性好；“缝多洞少”	溶孔、溶洞和溶蚀扩大缝发育，空间形态极不规则、孔径跨度大；“大洞大缝”
孔喉与结构特征	受二元-三级断裂结构约束，分带性强、发育规律稳定；裂缝-孔隙双重介质匹配优良，整体连通性均匀可控	无规则分带特征，空间发育随机性强、非均质性极强，局部富集、连通差异大
物性发育特征	渗透率优势明显，孔-渗匹配关系好，整体储层物性均匀稳定	普遍存在高孔-低渗特征，受充填和胶结作用影响大，物性规律性差
应力敏感性	刚性破碎裂隙体系结构稳定，高地应力下不易闭合，物性衰减弱，储层保存与产能稳定性优	溶洞和大孔体系抗压实能力弱，应力调整易出现孔喉闭合、垮塌充填，物性衰减明显
主控因素与发育规律	受控于断裂期次、应力强度、二元-三级多簇构造格局，构造因素主导储层空间分布	受控于不整合暴露时长、古地貌、流体性质与溶蚀强度，后期流体改造主导储层发育

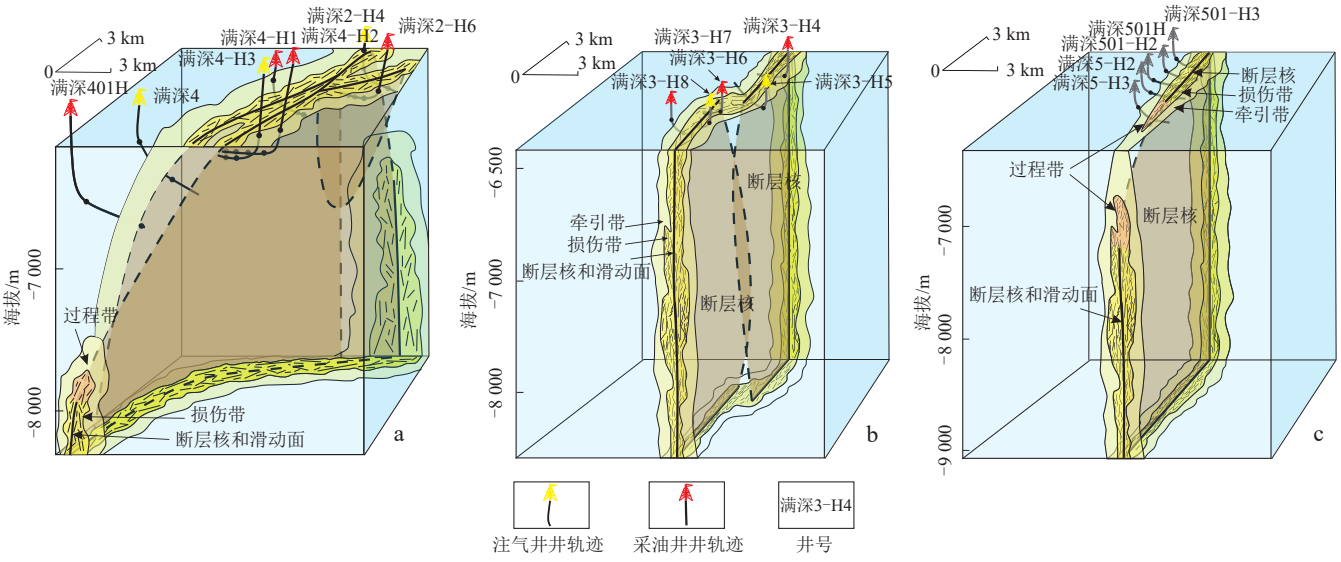


图7　富满油田断裂破碎体油藏内部连通模式示意图

Fig. 7　Schematic diagram showing internal connectivity patterns of fault-fractured oil reservoirs in the Fuman oilfield

a. 强连通型；b. 弱连通型；c. 孤立不连通型

异常响应关联性好，满深401H井因油嘴直径增大25%导致油压偏低，但压力变化趋势同步性证实深部核-带连通。

该模式的形成受走滑双重构造、核部高孔-高渗物性和“核-核”空间对接三重机制控制。走滑强剪切使核部高度破碎、裂缝贯通；核部孔隙度达15.6%～18.0%、渗透率高，构成贯穿性高渗通道；多井同钻连续核-带，平面上形成半径约800 m连通单元、垂向跨层沟通，构建“核-核连通立体网络”。其判别标准为：①钻遇同一核-带、孔隙度≥15%、平面连通半径600～1 000 m、压力同步偏差≤0.3 MPa及井间干扰≥0.5 MPa；②动态上表现为压力同步、干扰明显及异常关联一致，证实统一压力系统与强连通特征。该模式明确超深层断控油藏中断层核-带的高速通道作用，提出400～600 m最优井距与均衡驱替策略，为同类油藏井网优化提供理论依据与定量标准。

4.2　弱连通型模式定义与地质特征

弱连通型模式指井组钻井钻遇断层破碎带储层，但未全部钻穿断层核部、初期未形成有效连通但后期动态连通的开发单元，典型代表为满深3-H4井组。该单元包含满深3-H4、满深3-H6、满深3-H7、满深3-H8和满深3-H5井，并非所有井均钻穿走滑断裂断层核（图7b）。

井组连通性静态特征为主力井组（满深1-H1井和满深3-H6/7/8井）钻遇同一R剪切断裂破碎带，发育裂缝-孔洞复合储层，满深3-H5井钻遇次级断裂破碎体，与主井组储层物质基础差异显著，满深3-H4井穿

透断层核-破碎带过渡区，形成核带-破碎带弱连通通道。动态响应连通证据链包括以下3个方面：①压力系统同步性，6口井折算至7 950 m深度的静压、流压数据呈现同步波动，证实后期统一压力系统形成，满深3-H8井压力降至52 MPa这一阈值时触发远端储集体沟通，与满深1-H1井压降速率匹配度提升至89%。②生产响应特征具有阶段性，初期阶段为单井累产液量小于0.5×10^4 m³时，压降梯度大于0.15 MPa/kt，反映孤立储集体特征；后期阶段生产响应特征为累产液量大于1.2×10^4 m³后，压降梯度趋缓至0.06 MPa/kt，指示多储集体串接供液。③生产特征具有几个关键转折点，满深1-H1井生产18个月后日产液量突增35%，反映与远端大型缝洞体沟通。

该模式遵循破碎带定界、压降触发和缝网贯通三阶段立体阶梯式连通机制：①初始隔离期破碎带与核部物性差异大、储集体孤立；②压降触发期累计采出量达8×10^4 m³、缝内净压差大于8 MPa时，遮挡突破、局部连通启动；③网络成型期裂缝扩展形成半径大于1 200 m的“带-带复合连通体”。判别标准为：①主力井钻遇破碎带、部分井位于核-破碎带过渡区；②静压同步偏差≤0.5 MPa、触发压力≤52 MPa；③初期压降梯度＞0.15 MPa/kt、后期压降梯度≤0.06 MPa/kt、18个月左右日产液量突增≥35%。开发采用阶梯式提产，控压稳产后提产至80～100 m³/d，设定压降速率大于0.8 MPa/月预警，加密NW310°侧钻井，有效扩大弱连通范围。

4.3 孤立不连通型模式定义与地质分异特征

孤立不连通型模式指钻井穿透断层过程带（破碎带）、与主储集体缺乏有效连通的开发单元，典型代表为满深5-H3井组。该单元内存在2套独立连通系统：①核部连通体，满深5-H5和满深5-H6井组与满深5-H2和满深501-H3井组分别钻遇2条断裂核部，形成高渗通道；②过程带孤立体，满深5-H3井钻穿断裂间过程带，发育单断板状裂缝型储层，与核部储集体存在物性屏障。

模式的动态响应验证与压力系统独立性显示，油压动态分异特征，即核部井组满深5-H5/H6井组与满深5-H2和满深501-H3井组分别呈现同步压降趋势（年均降幅2.5～3.2 MPa），反映内部统一压力系统。孤立井特征为满深5-H3井投产后油压3个月内骤降8 MPa后趋于稳定，表明储集体能量补给受限。产能衰减规律，即孤立井累产液量达8 000 m³时，压降梯度达0.25 MPa/kt，为核部井组的3.6倍。无井间干扰现象，证实储集体孤立性。

该模式受构造分隔、岩性遮挡和物性差异三重控制：①两条断裂核部间距大于700 m、裂缝网络不贯通；②过程带泥质充填形成渗透率级差大于4倍的渗流屏障；③过程带低渗储层与核部高渗体物性差异悬殊，完全孤立。判别标准为：孤立井投产后3个月油压骤降≥8 MPa、累产液量8 000 m³时压降梯度≥0.25 MPa/kt（为核部井组3.5倍以上）、无井间干扰、核部井组年均压降2.5～3.2 MPa。开发需实施高强度多级酸压、加密NW310°水平井，建立压降速率大于1.2 MPa/月的预警机制，及时干预补能。

5 结论

1）断裂破碎体油藏内部可归纳为“二元-三级多簇”结构体系。一级由核部与裂缝带构成的二元结构单元组成；二级包括各类断层岩、裂缝带及其伴生构造单元；三级为更细分的亚类变形单元。在一级结构尺度上，断裂带呈现出统计意义上的“分段幂律”分布规律，该规律可作为分析断裂带生长演化过程的重要依据。断裂带内部渗透率变化幅度可达10个数量级。

2）“二元-三级多簇”模型通过系统划分断裂破碎体的结构层级和渗流单元，揭示了其非均质性和连通性规律，为超深断控油藏的储层预测、井网部署和开发调整提供了理论依据。其核心在于强调“结构控储、分带控渗、多簇控流”的地质-工程一体化思维。

3）提出“核部连通、带部输导、隔-夹层封堵”的渗透结构模型。断裂带流体运移遵循优势路径原则，其渗流规律受应力场、渗流场和化学场等多场耦合控制。

当前，断裂带流体运移研究仍存在诸多挑战。未来需重点关注以下4个方向：①构建断裂带结构的三维时-空演化模型，为分析断裂在输导、封堵和储集等方面的控藏（矿）作用提供基础；②发展适用于断裂带的非线性、多相态和多场耦合渗流理论，支撑油气成藏预测与评价；③融合多学科方法与多尺度观测技术，逐步形成系统化的“断裂带流体运移学”研究方法体系；④强化理论与地质-工程实践的结合，推动现有模型与技术的优化升级，提升工程地质应用的针对性与可靠性。

参 考 文 献

[1] 邓兴梁，常少英，刘志良，等. 超深层“断裂破碎体”概念和地

质模式及其地震表征方法[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(5): 1099-1110.
Deng Xingliang, Chang Shaoying, Liu Zhiliang, et al. Concept, geological model and seismic characterization of ultra-deep fault-fracture bodies[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(5): 1099-1110.

[2] 何治亮, 云露, 尤东华, 等. 塔里木盆地阿-满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 13-21.
He Zhiliang, Yun Lu, You Donghua, et al. Genesis and distribution prediction of the ultra-deep carbonate reservoirs in the transitional zone between the Awati and Manjiaer depressions, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 13-21.

[3] 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): 1415-1425.
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): 1415-1425.

[4] 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.
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.

[5] 张银涛, 林承焰, 罗枭, 等. 深层缝洞体地震特征提取与能量脊线追踪[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(5): 1132-1140.
Zhang Yintao, Lin Chengyan, Luo Xiao, et al. Method for extracting seismic features and tracing energy ridges in deep fractured-vuggy reservoirs [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(5): 1132-1140.

[6] 邢廷栋, 薛诗桂, 焦艳艳, 等. 走滑断裂体系核带结构物理模型实验研究[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(6): 1473-1481.
Xing Tingdong, Xue Shigui, Jiao Yanyan, et al. Experimental research on the core-zone structure physical model of strike-slip fault systems[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(6): 1473-1481.

[7] 刘建新, 孙勤华, 王锦喜, 等. 裂缝型储层预测技术优选-以塔北地区奥陶系为例[J]. 海相油气地质, 2010, 15(3): 65-69.
Liu Jianxin, Sun Qinhua, Wang Jinxi, et al. Technique optimum of prediction to fractured reservoirs: an example of ordovician fractured reservoir in tabei region, tarim basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(3): 65-69.

[8] 蔡露露, 孙赞东, 罗春树, 等. 频谱分解方法比较及其在轮古地区碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(4): 72-76.
Cai Lulu, Sun Zandong, Luo Chunshu, et al. Frequency-spectral Decomposition Method and Its Application in Carbonate Reservoir Prediction in Lungu Area of Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(4): 72-76.

[9] 刘敬寿, 田博涵, 张滨鑫. 塔里木盆地超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学孪生建模技术及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 270-286.
Liu Jingshou, Tian Bohan, Zhang Binxin. Geomechanical twin modeling for ultradeep fractured-vuggy carbonate reservoirs and its application in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 270-286.

[10] 徐红霞, 沈春光, 李斌, 等. 多属性分析技术在碳酸盐岩断溶体预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊2): 158-163.
Xu Hongxia, Shen Chunguang, Li Bin, et al. Application of multi attribute analysis technology in prediction of carbonate rock fault solution [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S2): 158-163.

[11] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 1-13.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Huili, et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 1-13.

[12] 李宗杰, 云露, 曹自成, 等. 超深走滑断控型凝析气藏特征与勘探关键技术——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂带为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 18-33.
Li Zongjie, Yun Lu, Cao Zicheng, et al. Characteristics and key exploration technologies for ultra-deep strike-slip fault-controlled condensate gas reservoirs: A case study of the No. 4 strike-slip fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 18-33.

[13] 屈泰来, 邬光辉, 刘加良, 等. 碳酸盐岩断裂相分类特征——以新疆塔里木盆地柯坪露头为例[J]. 地球学报, 2011, 32(5): 541-548.
Qu Tailai, Wu Guanghui, Liu Jialiang, et al. The classification and characteristics of carbonate fault facies: a case study of the outcrop of Kalpin area, Tarim Basin in Xinjiang [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(5): 541-548.

[14] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 深层碳酸盐岩断控岩溶储集体结构模式与表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 256-269.
Lyu Xinrui, Sun Jianfang, Li Hongkai, et al. Architectural patterns and characterization methods of fault-controlled karst reservoirs in deep carbonates[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 256-269.

[15] 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.

[16] 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 & Experiment，2018，40(4)：461-469.

[17] 邓尚，邱华标，刘大卫，等. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展——以塔里木盆地北部为例[J]. 石油与天然气地质，2024，45(5)：1211-1225.
Deng Shang，Qiu Huabiao，Liu Dawei，et al. Advances in research on the genetic mechanisms of intracratonic strike-slip fault system and their control on hydrocarbon accumulation：A case study of the northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology，2024，45(5)：1211-1225.

[18] 常少英，曾溅辉，徐旭辉，等. 碳酸盐岩断溶体内部结构识别技术及应用[J]. 石油地球物理勘探，2022，57(2)：414-422.
Chang Shaoying，Zeng Jianhui，Xu Xuhui，et al. Identification technology for internal structures of carbonate fault-karst and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting，2022，57(2)：414-422.

[19] 常少英，崔仕提，曹鹏，等. 碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术及应用[J]. 海相油气地质，2022，27(2)：192-200.
Chang Shaoying，Cui Shidi，Cao Peng，et al. Key techniques and applications of seismic characterization of carbonate fault-karst configuration[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2022，27(2)：192-200.

[20] 常少英，庄锡进，邓兴梁，等. 断溶体油藏高效井预测方法与应用效果——以HLHT油田奥陶系潜山区为例[J]. 石油地球物理勘探，2017，52(增刊1)：199-206，13-14.
Chang Shaoying，Zhuang Xijin，Deng Xingliang，et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction：a case study in Ordovician buried hills，HLHT Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting，2017，52(S1)：199-206，13-14.

[21] 李映涛，邓尚，张继标，等. 深层致密碳酸盐岩走滑断裂带核带结构与断控储集体簇状发育模式：以塔里木盆地顺北4号断裂带为例[J]. 地学前缘，2023，30(6)：80-94.
Li Yingtao，Deng Shang，Zhang Jibiao，et al. Fault zone architecture of strike-slip faults in deep，tight carbonates and development of reservoir clusters under fault control：A case study in Shunbei，Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers，2023，30(6)：80-94.

[22] 蔡振忠，赵海涛，王彭，等. 考虑流固耦合作用的超深缝洞型碳酸盐岩储层连通性表征：以塔里木盆地富满油田满深区块为例[J]. 地学前缘，2024，31(5)：301-312.
Cai Zhenzhong，Zhao Haitao，Wang Peng，et al. Characterization of connectivity in ultra-deep fractured-caveate reservoirs considering fluid-solid coupling：a case study of the Manfen block in the Fuman oil field of the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers，2024，31(5)：301-312.

[23] 薛一帆，文志刚，黄亚浩，等. 深层—超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究——以塔里木盆地富满油田为例[J]. 油气藏评价与开发，2024，14(4)：549-559.
Xue Yifan，Wen Zhigang，Huang Yahao，et al. Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone：A case study of Fuman Oilfield，Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2024，14(4)：549-559.

[24] 常少英，李昌，陈娅娜，等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. 海相油气地质，2020，25(1)：22-34.
Chang Shaoying，Li Chang，Chen Yana，et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2020，25(1)：22-34.

[25] 常少英，李世银，王孟修，等. 超深断控型油气藏差异富集程度分析方法及应用——以塔里木盆地富满油田为例[J]. 石油科学通报，2024，9(6)：899-910.
Chang Shaoying，Li Shiyin，Wang Mengxiu，et al. Analysis method and application of differential enrichment degree for ultra-deep fault-controlled hydrocarbon reservoirs：A case study of Fuman Oilfield，Tarim Basin[J]. Petroleum Science Bulletin，2024，9(6)：899-910.

（编辑 许 诺）