

文章编号:1673-8926(2025)02-0127-12 DOI:10.12108/yxyqc.20250212

引用:梁鑫鑫,张银涛,陈石,等.塔里木盆地富满油田走滑断裂多核破碎带地震响应特征[J].岩性油气藏,2025,37(2):127-138.
Cite: LIANG Xinxin, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Seismic response characteristics of strike-slip fault multi-core damage zones in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(2): 127-138.

塔里木盆地富满油田走滑断裂多核破碎带 地震响应特征

梁鑫鑫¹,张银涛²,陈石¹,谢舟²,周建勋¹,康鹏飞²,陈九洲²,彭梓俊²

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田公司,
新疆 库尔勒 841000)

摘要:综合运用野外露头、地震属性、测井以及生产数据等资料,对塔里木盆地富满油田走滑断裂破碎带内部结构进行了研究,并探讨了破碎带的控储作用。研究结果表明:①塔里木盆地皮羌断裂是一条左旋撕裂走滑断层,根据露头变形程度可将破碎带结构分为断层泥、大节理发育区、角砾岩、碎裂岩和裂隙发育带5类。皮羌断裂是由多条次级断层组成的复杂走滑断裂带,发育多核断层破碎带,断层核由碎裂岩和断层泥构成。②富满油田走滑断裂与野外露头断裂发育模式相同,为多核断层破碎带模式。不同应力机制下的走滑断裂破碎带结构差异明显:平移段破碎带宽度最小,平均宽度为368.50 m,破碎带主要发育裂缝;张扭段破碎带宽度大,平均宽度为1 174.00 m,破碎作用主要发生在边界断裂带内部,裂缝和溶洞为主要结构;压扭段破碎带宽度较大,平均宽度为951.25 m,破碎作用不仅在断裂带内部发生,而且对断裂带外围有一定影响,裂缝发育,溶蚀孔洞欠发育。③研究区走滑断裂活动强度与破碎带规模呈正相关关系,断裂活动性越强则破碎带规模越大,储集体越发育;单井产能不仅受储集体规模控制,还受断裂应力环境影响,张扭段、平移段的产能和储集体规模带呈正相关关系,压扭段产能与储集体规模没有明显的相关性。

关键词:储集体;地震属性;破碎带结构;单核破碎带;多核破碎带;走滑断裂;皮羌断裂;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2;P618.13 文献标志码:A

Seismic response characteristics of strike-slip fault multi-core damage zones in Fuman Oilfield, Tarim Basin

LIANG Xinxin¹, ZHANG Yintao², CHEN Shi¹, XIE Zhou², ZHOU Jianxun¹, KANG Pengfei²,
CHEN Jiuzhou², PENG Zijun²

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Comprehensively using of outcrop, seismic attributes, logging and production data, the internal structure

收稿日期:2024-04-23;修回日期:2024-06-12;网络发表日期:2024-12-13

基金项目:国家自然科学基金“塔里木盆地中部走滑断裂分区差异发育规律与机制研究”(编号:42472186)与国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“塔里木盆地超深层走滑断裂对碳酸盐岩缝洞储层的控制机理研究”(编号:U21-B2062)联合资助。

第一作者:梁鑫鑫(1995—),男,中国石油大学(北京)在读博士研究生,研究方向为油区构造解析。地址:(102249)北京市昌平区府学路18号。Email:liangxx_0423@163.com。

通信作者:陈石(1986—),男,博士,副教授,主要从事含油气盆地构造分析的研究与教学工作。Email:chenshi4714@163.com。

of the strike-slip fault damage zone in the Fuman Oilfield of Tarim Basin was studied, and the reservoir control function of the damage zone was discussed. The results show that: (1) The Piqiang fault in Tarim Basin is a left-lateral tear strike-slip fault, and the damage zone structure can be divided into five types based on the degree of outcrop deformation: fault gouge, large joint development area, breccia, cataclasite, and fracture development zone. The Piqiang fault is a complex strike-slip fault zone composed of multiple secondary faults, with a multi-core fault damage zone, and the fault core is composed of cataclasite and fault gouge. (2) The strike-slip fault of Fuman Oilfield follows the same outcrop development model, which is a multi-core fault damage zone model. The structure of the strike-slip fault damage zone under different stress mechanisms is significantly different: the width of the strike-slip segment damage zone is the smallest, with an average width of 368.50 m, and the damage zone mainly develops fractures; the width of the pull-apart segment damage zone is large, with an average width of 1 174.00 m, and fracturing mainly occurs within the boundary fault zone, characterized by fractures and karst caves; the width of the push-up segment damage zone is relatively large, with an average width of 951.25 m, and fracturing not only occurs within the fault zone but also has a certain impact on the surrounding area of the fault zone, with developed fractures and underdeveloped karst caves. (3) The activity intensity of strike-slip faults is positively correlated with the scale of the damage zone in the study area; the stronger the fault activity, the larger the scale of the damage zone, and the more developed the reservoir. The single well production capacity is not only controlled by the scale of the reservoir but also influenced by the stress environment of the fault. The production capacity and the scale of the reservoir in the pull-apart and strike-slip segments generally show a positive correlation, while there is no obvious correlation between the production capacity and the scale of the reservoir bodies in the push-up segment.

Key words: reservoir; seismic attribute; fault damage zone architecture; single-core fault damage zone; multi-core fault damage zone; strike-slip fault; Piqiang fault; Fuman Oilfield; Tarim Basin

0 引言

塔里木盆地是中国最大的海相碳酸盐岩含油气盆地,其勘探过程历经 50 多年^[1-2],早期石油勘探主要集中在盆地边缘和内部的逆冲推覆带,如库车前陆盆地和塔中隆起^[3-5]。自 2010 年以来,依托高精度三维地震资料,在塔北隆起和阿满过渡带发现了一系列大型走滑断裂带^[6-8],随后中石油塔里木油田和中石化西北局在塔河、富满以及顺北油田围绕着走滑断裂带的油气勘探取得了重大突破^[9-11],揭示了走滑断层对超深层碳酸盐岩油气藏具有明显的控制作用,目前走滑断裂带是塔里木盆地勘探的主要领域^[1]。富满油田位于阿满过渡带,相较于研究成熟的塔北和塔中隆起,研究区储层受岩溶作用的影响小^[12],走滑断层通过其独特的力学作用和流体性质对研究区储层的发育起主导作用^[10,13]。众多学者对阿满过渡带走滑断裂的构造样式、演化期次以及形成机制进行了大量研究,总结出走滑断裂纵向分层、平面分段、多期活动的发育特征^[14-16],总体认为走滑断裂形成于中晚奥陶世^[17-18]。走滑断裂控储作用的研究表明走滑断层破碎带发育的裂缝和空腔等是致密碳酸盐岩的储集空间^[19-21],通过断层运移的流体对储层进行改造^[22-23]。走滑断裂破碎带结构复杂,不同应力分段的破碎带结构存在明显差

异,破碎带的结构决定了储层类型,复杂的破碎带结构导致碳酸盐岩断控储层具有强烈的非均质性^[24-26]。大量的研究成果揭示走滑断裂破碎带对油气富集具有明显的控制作用,但是对破碎带结构的研究较少,且现有研究主要是基于野外或者井震资料的独立研究,缺乏野外和井震资料的综合研究。

通过野外露头考察,运用地震及测井等资料,对塔里木盆地富满油田走滑断裂破碎带结构和发育模式进行研究,深化走滑断裂破碎带内部结构的认识,以期为富满油田走滑断裂型油气藏的勘探提供一定指导。

1 地质概况

富满油田位于塔里木盆地阿满过渡带内,阿满过渡带在塔里木盆地北部塔北隆起和南部塔中隆起之间,向东过渡到满加尔凹陷,西部与阿瓦提凹陷相接,呈鞍状展布(图 1)。受多期构造变形影响,阿满过渡带形成了一系列 NE 和 NNW 向走滑断裂^[27](图 1)。走滑断裂的平面展布具有明显的分区性,以 F_{15} 断裂为界, F_{15} 以西主要发育 NNW 向平行走滑断裂,其南端与 F_{15} 相交,北端延伸至塔北隆起区。 F_{15} 以东发育 NE 向走滑断裂,这些断裂向南延伸至塔中隆起,向北可延伸至阿满过渡带和满加尔凹陷,在富满地区走向变为 NNE 向,与北部

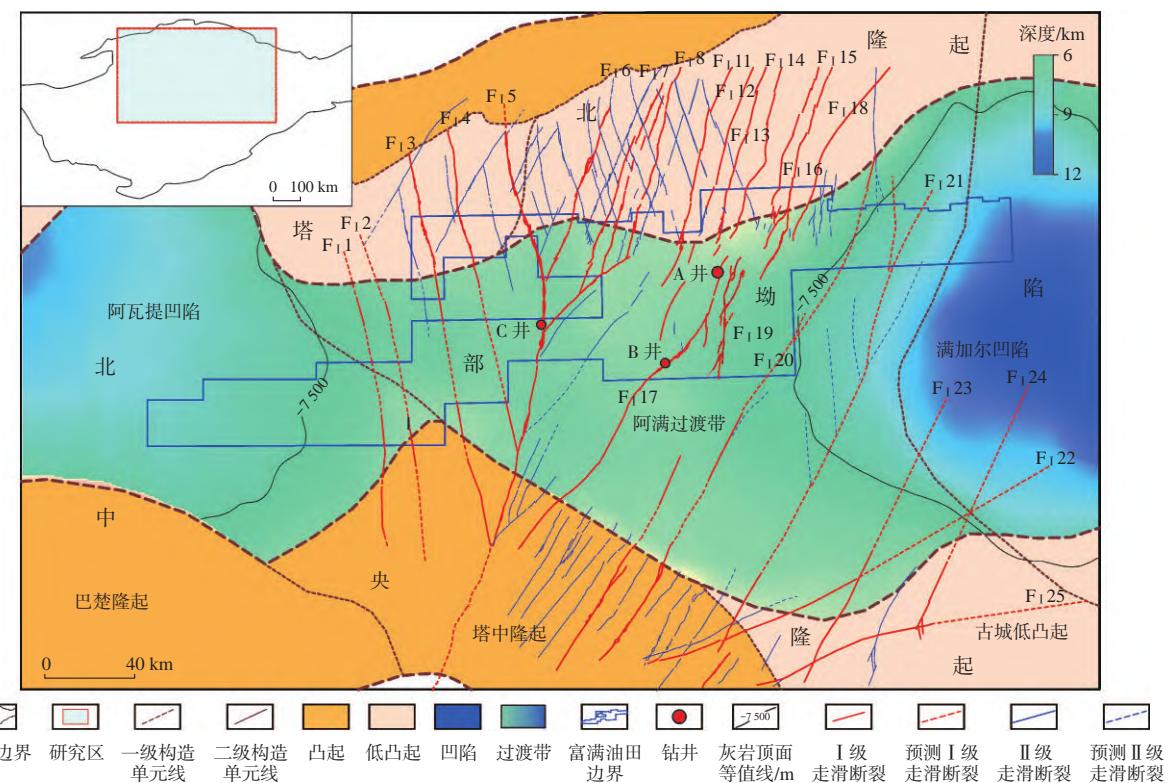


图1 塔里木盆地富满油田构造位置及邻区下古生界主要断裂分布(据文献[10]修改)

Fig. 1 Regional structural location of Fuman Oilfield and distribution of main faults of Lower Paleozoic in adjacent areas, Tarim Basin

的塔北隆起 NNE, NNW 小角度共轭走滑断裂相接。从走滑断裂的平面分布可知, 塔北隆起走滑断裂体系和塔中隆起走滑断裂体系在阿满过渡带交汇, 因此走滑断裂在阿满过渡带走向大多发生改变。

富满地区古生界自下而上发育下寒武统碳酸盐岩, 中寒武统膏盐岩, 上寒武统—中奥陶统大厚度碳酸盐岩层^[28]和上奥陶统—二叠系碎屑岩地层。寒武世早期, 富满地区继承震旦纪坳陷结构, 沉积了下寒武统玉尔吐斯组优质烃源岩, 为富满油田的主要烃源岩层。目前富满油田的主力开发目的层是中奥陶统的一间房组和鹰山组上部厚度约为 600 m 的厚层灰岩^[29], 受走滑断裂破碎改造, 储层类型为孔洞—裂缝型, 上奥陶统混积陆棚相巨厚泥岩与之构成良好的储盖组合(图 2)。

2 走滑断裂破碎带野外特征

断裂是一个具备复杂内部结构的三维地质体^[30-32], Chester 等^[33]基于断裂带内部不同位置的结构特点, 横向上将断裂分为断层破碎带和断层核 2 个部分。断层破碎带不仅是断裂的主体, 还是流体作用与储层发育的重要区域^[34]。在断裂带中, 断层核可能单独出现(单核断层), 也可能多个同时出现

(多核断层), 即断层核发生分支现象^[35](图 3)。

断层破碎带的宽度与位移关系复杂, 具有不同程度的分散性。目前, 针对这种关系的研究主要集中在野外露头, 特别是在碎屑岩中, 而盆地内部中一大尺度的研究则较少。碳酸盐岩断层破碎带的结构更加复杂, 其时空演变差异大且非均质性强。通常情况下, 断层破碎带裂缝的发育程度会随着与断层核距离的增加而减少^[36-37]。综上所述, 通过露头获得的裂缝密度可用来划分断层破碎带的宽度分布。

皮羌断裂位于塔里木盆地西北缘柯坪冲断带上(图 4a), 总长约为 80 km, 切穿古生界碳酸盐岩^[38]。从卫星图中可以看出皮羌断裂整体为一条线性展布的 NNW 向左旋走滑断层, 与柯坪冲断构造呈近垂直的交切关系, 由此推断皮羌断裂是受由北至南的挤压环境形成的撕裂断层。西盘挤压变形量大于东盘, 走滑断层 2 盘发育挤压推覆构造, 西盘由北至南发育 4 排推覆构造, 东盘由北至南发育 5 排推覆构造。皮羌断裂与富满油田内走滑断裂有诸多相似性, 二者都为多期活动的左旋走滑断层, 富满油田内发育的 F₁₇ 等断裂是塔中隆起发育的撕裂断层延伸至阿满过渡带, 与皮羌断裂属性

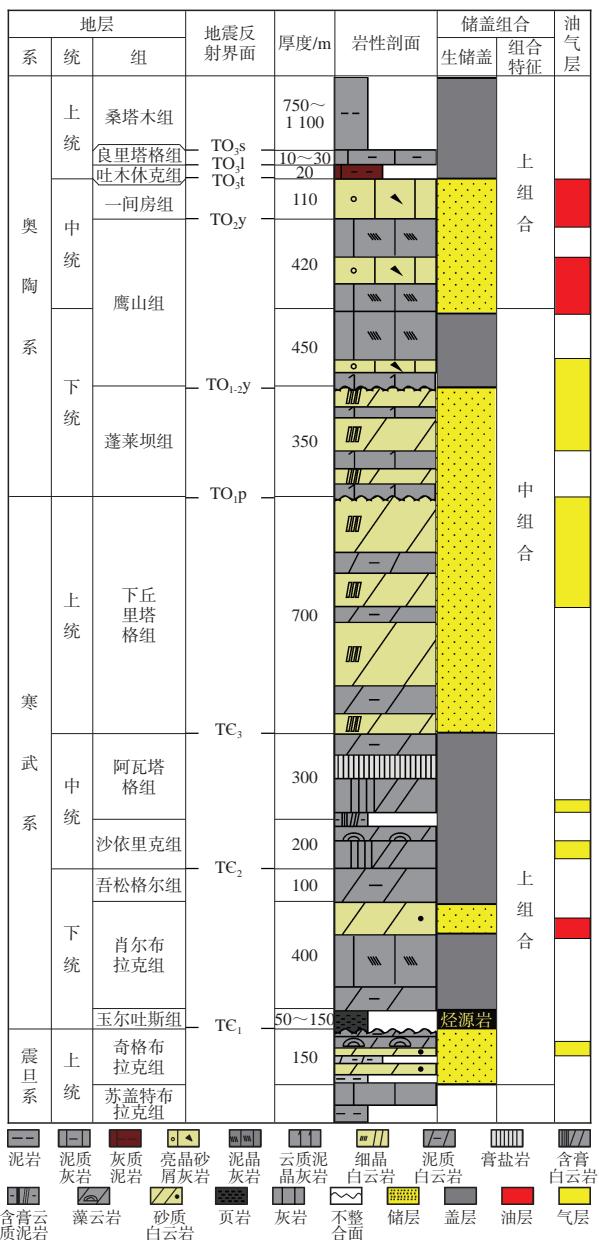


图 2 塔里木盆地富满油田下古生界地层综合地层特征
(据文献[10]修改)

Fig. 2 Stratigraphic column of Lower Paleozoic in Fuman Oilfield, Tarim Basin



图 5 塔里木盆地皮带断裂带寒武—奥陶系碳酸盐岩露头考察路线及野外照片

Fig. 5 Field investigation route and photos of the Cambrian-Ordovician carbonate outcrops in the middle segment of Piqiang fault, Tarim Basin

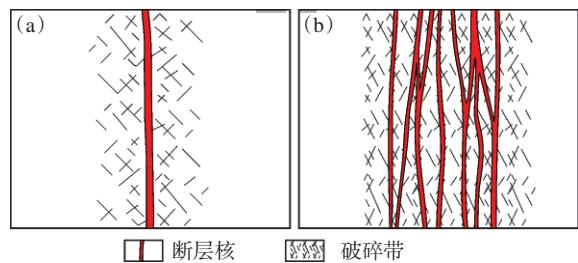


图3 单核断层(a)和多核断层(b)破碎带示意图
 Fig. 3 Schematic diagrams of single-core fault (a) and multi-core fault (b) damage zones

相同^[39]。虽然两者的活动时期存在差异,但是均切穿了奥陶系碳酸盐岩,因此皮羌断裂破碎带结构可以指导富满油田走滑断裂破碎带结构的研究。研究选取皮羌断裂3个考察点进行实地测量(图4b),总结了走滑断裂野外露头结构特征。

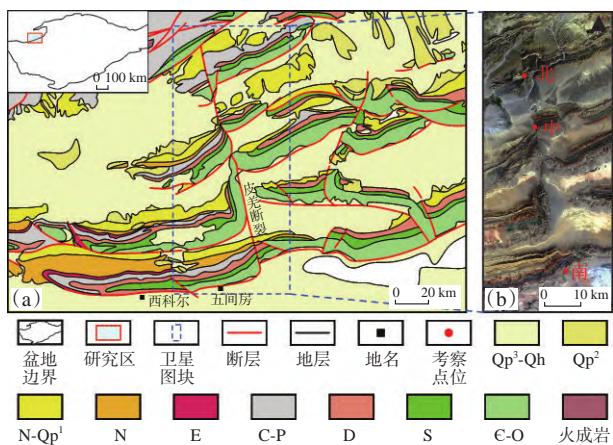


图 4 塔里木盆地柯坪冲断带地质简图(a)及皮羌断裂带卫星图(b)(据文献[40]修改)

Fig. 4 Geological sketch of the Kalpin thrust belt in Tarim Basin (a) and satellite image of Piqiang fault (b)

以皮羌断裂中段考察点(坐标 N 40.3°, E 77.7°)为例:观测路线如图 5a 所示,破碎带宽度约为 122 m。卫星图和野外露头均能观察到走滑断裂典型的线性构造识别特征,露头为狭长的线性脊状构造(图 5a,5b),破碎程度高。断层破碎带与围岩可

见明显的边界,破碎带为浅色的裂缝发育带,围岩为红色或绿色岩层。考察点北部东盘围岩中发育走滑断裂相关的牵引褶皱,地层变形严重,褶皱方向指示了其所在活动盘的运动方向(图 5c),表明皮羌断裂为左旋走滑断裂。

沿破碎带露头对裂缝发育情况进行实地测量,依据破碎带变形程度将断裂破碎带的结构分为断层泥、大节理发育区、角砾岩、碎裂岩和裂缝带等 5 类。断层泥破碎严重,裂缝不发育;大节理发育区变形程度低,发育大型裂缝;角砾岩带裂缝发育,角砾大小不一;碎裂岩带发育网状裂缝,裂缝无明显错动;裂缝带发育剪切裂缝,裂缝无明显错动,切割岩石,裂缝发育程度有差异(图 6)。

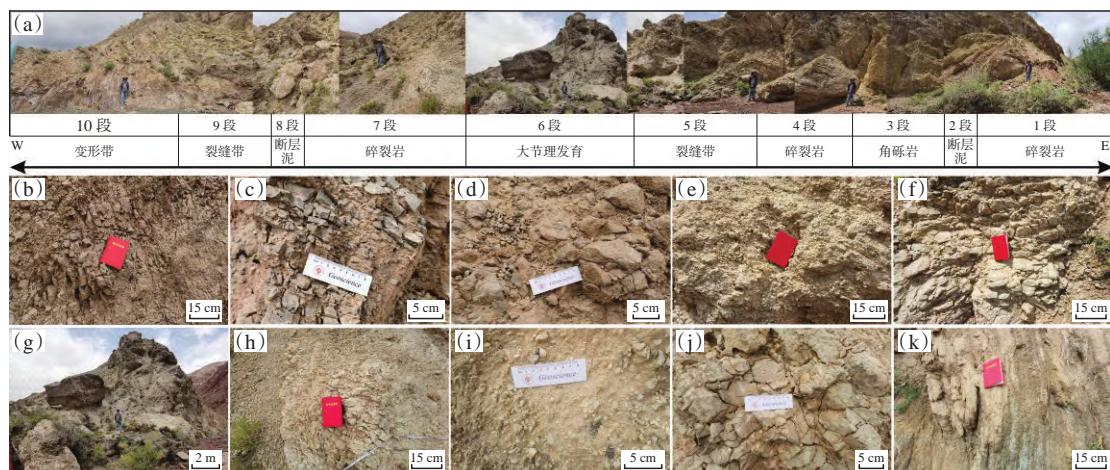
皮羌断裂中段考察点断裂破碎带由东向西划分为 10 段,各段之间无明显的变化边界(图 7a)。1 段破碎程度高,以碎裂岩为主,宽为 4.7 m,裂缝总数为 170 条,裂缝密度约为 36.17 条/m。2 段由断层泥和角砾岩构成,宽为 4.3 m,裂缝总数为 100 条,裂缝密度约为 23.26 条/m。3 段为角砾岩,宽为 6.0 m,裂缝总数为 83 条,裂缝密度约为 13.83 条/m。4 段

类型	断层泥	大节理发育区	角砾岩	碎裂岩	裂缝带
典型图片					
模式					
特征	破碎严重,以断层泥为主,裂缝不发育	发育大型裂缝	裂缝发育,发育角砾岩,角砾大小不一	发育网状裂缝,裂缝无明显错动,形成大小不一的碎裂岩	发育剪切裂缝,裂缝无明显错动,切割岩石,裂缝发育程度有差异

图 6 塔里木盆地皮羌断裂破碎带横向结构分类

Fig. 6 Lateral structural classification of the damage zones in Piqiang fault, Tarim Basin

为碎裂岩,宽为 10.0 m,裂缝总数为 620 条,裂缝密度为 62.00 条/m。5 段为裂缝发育带,破碎强度较高,宽为 6.0 m,裂缝总数为 200 条,裂缝密度约为 33.33 条/m。6 段为大节理发育区,破碎程度低,宽为 26.0 m,裂缝总数为 200 条,裂缝密度约为 7.69 条/m。7 段为碎裂岩,宽为 7.0 m,裂缝总数为 400 条,裂缝密度约为 57.14 条/m。8 段为断层泥,宽为 4.0 m,破碎严重,裂缝不发育。9 段为裂缝发育带,宽为 18.0 m,裂缝总数为 800 条,裂缝密度约为 44.44 条/m。10 段为围岩变形带,宽为 36.0 m,裂缝总数为 30 条,裂缝密度约为 0.83 条/m。

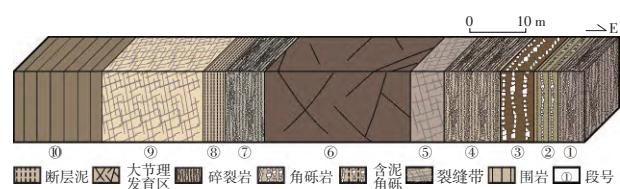


(a) 皮羌断裂中段露头分段照片;(b) 碎裂岩,1 段细节照片;(c) 断层泥和角砾岩,2 段细节照片;(d) 角砾岩,3 段细节照片;(e) 碎裂岩,4 段细节照片;(f) 裂缝带,5 段细节照片;(g) 大节理发育区,6 段细节照片;(h) 碎裂岩,7 段细节照片;(i) 断层泥,8 段细节照片;(j) 裂缝带,9 段细节照片;(k) 围岩变形带,10 段细节照片。

图 7 塔里木盆地皮羌断裂中段寒武—奥陶系碳酸盐岩露头分段及各段细节照片

Fig. 7 Segmentation and detailed photos of the Cambrian-Ordovician carbonate outcrops in the middle segment of Piqiang fault, Tarim Basin

皮羌断裂中段的露头特征与裂缝统计数据揭示了其复杂的破碎带结构。如图 8 所示,破碎程度各异,不同类型的破碎带结构相互交织、反复出现。即便是同类型的破碎带,由于强度差异,裂缝的发育程度也显著不同。露头统计结果得到的裂缝密度曲线呈现多峰的特征(图 9a),与单核破碎带常见的由断层核向两侧递减的趋势截然不同。皮羌断



注:不同颜色仅为区分分段,无实际含义。

图 8 塔里木盆地皮羌断裂中段露头分段模式

Fig. 8 Outcrop segmentation pattern of the middle section of Piqiang fault, Tarim Basin

裂的断面并不明显,使得断层的精确位置难以辨识。为了更深入地研究,借鉴以往学者的研究方法^[36]对裂缝的累积密度进行了统计。结果显示,裂缝累计密度曲线中存在多个斜率变化的区域。通常情况下,单核破碎带裂缝密度累积曲线的斜率变化处,往往是破碎带与围岩的边界。皮羌断裂带结构复杂,多条断层同时影响,使得各断层之间的围岩界定异常困难。因此,将多核破碎带中的斜率变化点视为断层核的位置,而2核之间的区域则是由2条断裂共同控制的断层裂缝带(图9)。皮羌断裂中段实际上是由多条断裂组合而成的复合断层破碎带,其结构复杂,碎裂岩段和泥岩段构成了断层核的主要部位,分别是1段、4段和8段,这3条断裂的断层核的宽度相对较小,但破碎程度极高。此外,除了中段的断裂破碎带外,皮羌断裂的北段和南段的破碎带结构也体现出不同类型的破碎带结构,他们相互交织,呈现多核断裂破碎带的特征(图9b,9c)。综上可知,皮羌断裂整体上是由多条次级断裂共同组成的复杂走滑断裂带。

3 走滑断裂破碎带地震响应特征

在多井资料分析的基础上,结合钻井资料与地震资料,总结了富满油田走滑断层破碎带的3类结构

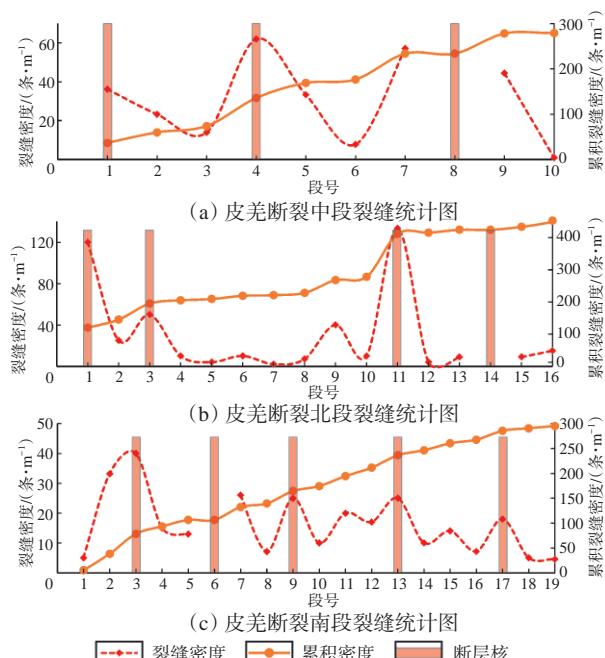
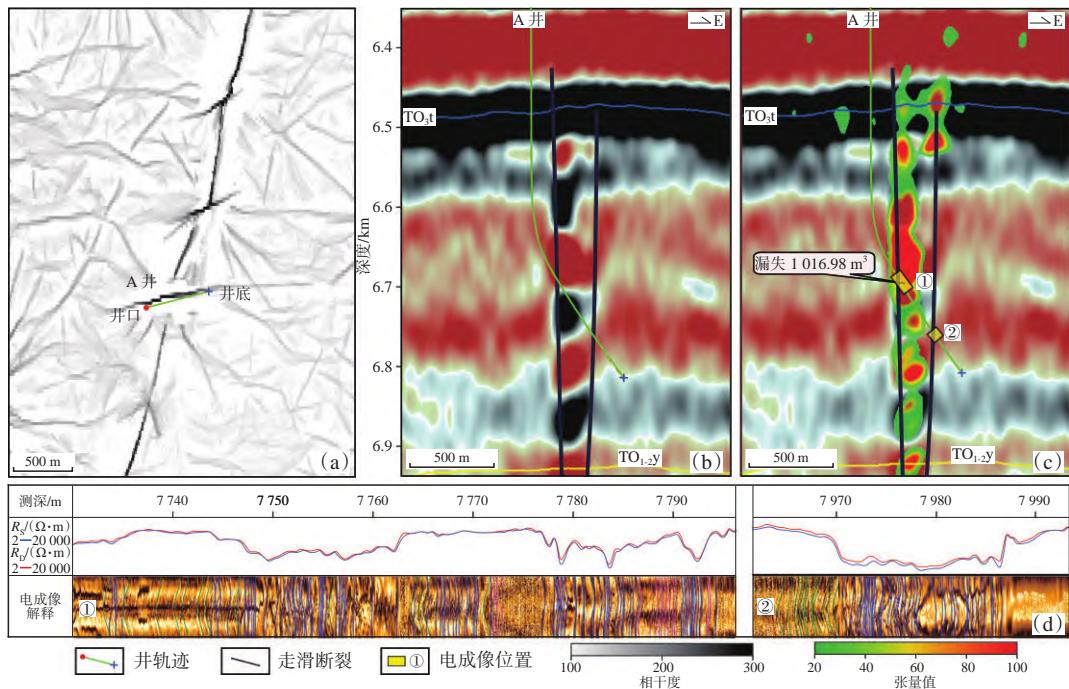


图9 塔里木盆地皮羌断裂露头裂缝统计
(统计点位参见图4b)

Fig. 9 Statistics of outcrop fractures of Piqiang fault, Tarim Basin

特征,选取A井、B井和C井3口典型钻井进行描述。

A井位于F₁17断裂北部平移段(图10a),过井地震剖面可见该井钻穿2条走滑断层,断层控制了串珠状反射,断层活动性低,地层变形弱(图10b)。



(a) F₁17断裂A井区灰岩顶面(TO₃t);(b)过A井地震剖面解析;(c)过A井结构张量属性剖面、录井信息及破碎带标注;(d)A井测井曲线和成像测井。

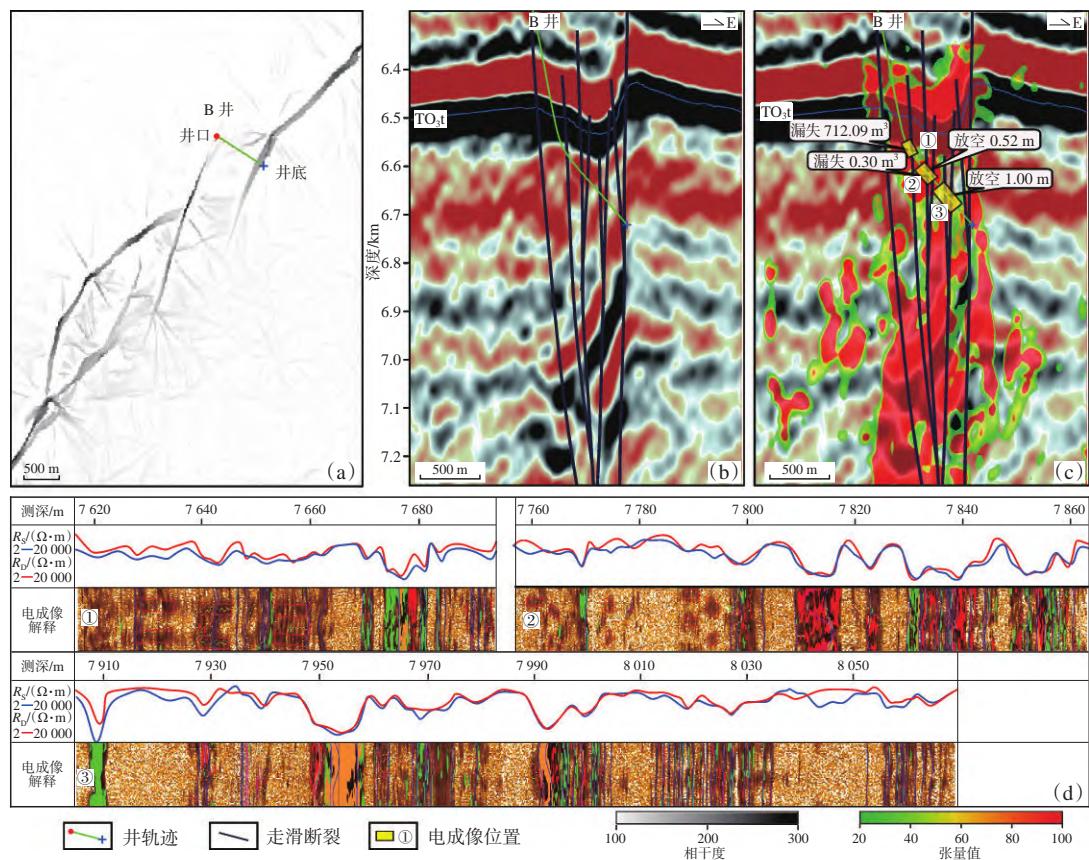
图10 塔里木盆地富满油田F₁17断裂典型井A井奥陶系碳酸盐岩断层破碎带结构特征(井位见图1)

Fig. 10 Structural characteristics of the Ordovician carbonate fault damage zone in well A of F₁17 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

结构张量属性叠合地震剖面显示裂缝主要分布在2条断裂周围,且西侧断裂破碎带分布范围更广(图10c),2条断层组成的破碎带总宽度为352 m,破碎带宽度较小,单条断层的破碎影响范围有限,裂缝仅在断裂两侧较窄范围发育。成像测井解释结果与地震资料结果一致,可见2组破碎带发育(图10d),深浅侧向测井曲线能够准确地反应裂缝发育位置,2组破碎带之间裂缝不发育。第1组破碎带斜宽为67 m,发育大量低角度裂缝,钻至该断层发生漏失,累计漏失钻井液1 016.98 m³。第2组破碎带斜宽为25 m,发育2组相交的高角度裂缝以及一系列的低角度裂缝,裂缝走向与断裂走向一致。

B井位于F₁17断裂南部张扭段,平面上为分段叠接特征(图11a)。断层活动性强,地层拉分下掉(图11b,11c)。成像测井解释中可见3组破碎带发育(图11d),与平移段不同的是该类型成像测井中每组破碎带发育1条或多条断裂,第1组破碎带

底部发育1条断裂,裂缝密集发育,孔洞发育,存在漏失现象,破碎带斜长78 m。第2组破碎带中发育2条断裂,均发育孔洞,钻至第1条断裂钻进放空,钻至第2条断裂漏失0.30 m³。2断裂之间裂缝发育,但密度较断层核部小,破碎带斜长为106 m。第3组破碎带斜长为163 m,钻遇2条断层,第1条断裂核部发育孔洞,钻井放空1 m。第2条断裂核部由裂缝和小型溶孔构成。2条断裂核部之间发育裂缝和少量溶孔,为2条断裂核部之间的破碎带。过井地震剖面可见断裂带由2条边界断层限制,2条断层中间夹持地层变形严重,断层外侧变形较弱,中间发育5条次级断裂,与成像测井解释结果相吻合(图11b,11d)。结构张量剖面可以看到裂缝孔洞的发育主要集中在2条大型断层夹持部位,断裂带两侧发育较少,破碎带结构张量宽度为1 005 m(图11c),远大于平移段破碎带,且单条断层破碎带宽度也大于断层平移段破碎带。



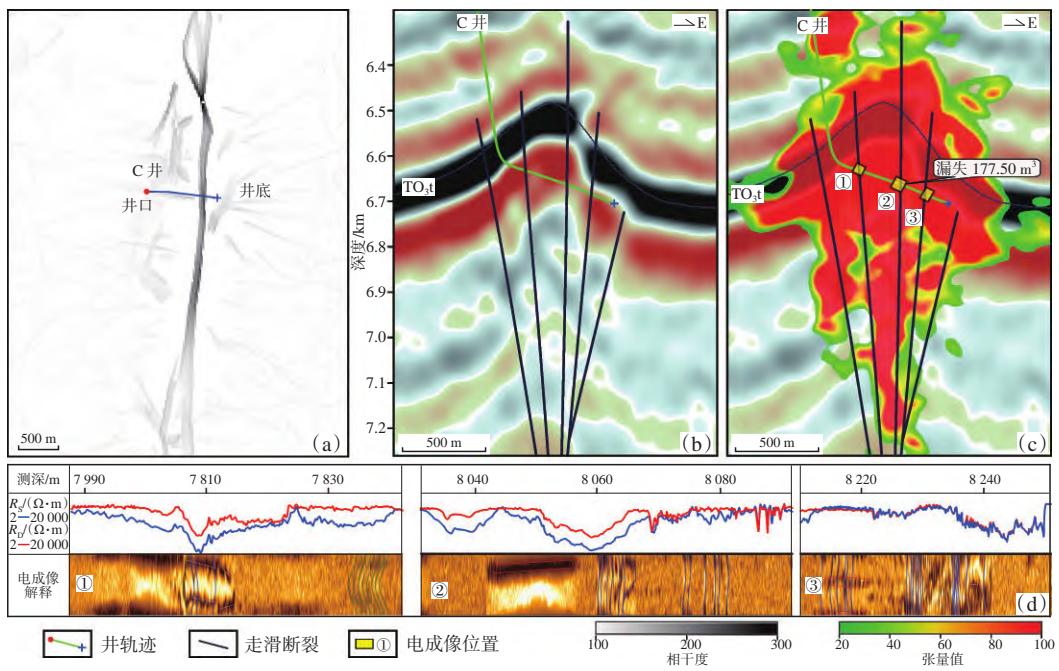
(a) F₁17断裂B井区灰岩顶面(TO₃t);(b)过B井地震剖面解析;(c)过B井结构张量属性剖面、录井信息及破碎带判定;(d)B井测井曲线和成像测井。

图11 塔里木盆地富满油田F₁17断裂典型井B井奥陶系碳酸盐岩断层破碎带结构特征(井位见图1)

Fig. 11 Structural characteristics of the Ordovician carbonate fault damage zone in well B of F₁17 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

C井位于F₁5断裂中部压扭段(图12a),断层活动性强,灰岩顶面隆起幅度大。地震剖面可见断裂带由5条断层构成,地层强烈挤压变形,使得宽

度变大(图12b,图12c)。钻井钻遇其中3条断层,并未完全钻穿破碎带。成像测井解释中可见3组破碎带发育(图12d),一共钻遇3条断裂,第1组破



(a) F_1 5 断裂 C 井区灰岩顶面(TO_t);(b) 过 C 井地震剖面解析;(c) 过 C 井结构张量属性剖面、录井信息及破碎带标注;(d) C 井测井曲线和成像测井。

图 12 塔里木盆地富满油田 F_5 断裂典型井 C 井奥陶系碳酸盐岩断层破碎带结构特征(井位参见图 1)
Fig. 12 Structural characteristics of the Ordovician carbonate fault damage zone in well C of F_5 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

碎带中部发育 1 条断裂, 裂缝密集发育, 破碎带斜长为 42 m。第 2 组破碎带中发育 1 条断裂, 核部发生漏失, 共漏失 177.50 m³, 破碎带斜长为 60 m。第 3 组破碎带斜长为 41 m, 由 1 条断层控制发育, 断层核部溶蚀孔洞发育。结构张量剖面显示裂缝孔洞广泛发育, 断裂带两侧发育, 破碎带结构张量宽度为 1 148 m(图 12c), 远大于平移段破碎带, 略大于张扭段, 且单条断层破碎带宽度也大于断层平移段破碎带, 但小于张扭段破碎带。

以往学者利用地震属性对地震破碎带进行定量分析^[41-42], 本次选择刻画碳酸盐岩缝洞体常用的结构张量属性对富满油田走滑断裂进行定量分析。以过 C 井剖面为例, 提取剖面灰岩顶面结构张量值并归一化, 沿测线一端为 0 点绘制该剖面张量值和累积张量值(图 13), 得到的统计图特征与皮羌断裂的裂缝统计图相似, 具有多峰多斜率变化的多核破碎带特征。C 井剖面张量值分布图具有 5 个峰值, 代表该剖面的 5 条断层, 同时在复合破碎带内累积曲线的斜率不断变化, 破碎带两侧围岩内斜率降至 0, 以此可以确定破碎带的宽度为 1 148 m, 与地震剖面解释结果一致。根据以上方法对 F_1 7 断裂进行定量统计, 总结不同应变机制下破碎带的宽度和断层数量(图 14), 结果显示平移段破碎带平均宽度和断层数量皆为最小, 张扭段断层均为最大, 压扭段居中。

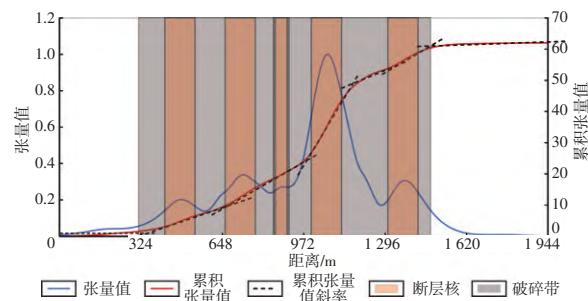


图 13 塔里木盆地富满油田 F_5 断裂过 C 井剖面灰岩顶面结构张量值分布图
Fig. 13 Distribution map of the structure tensor value of the top surface of limestone in well C section of F_5 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

Fig. 13 Distribution map of the structure tensor value of the top surface of limestone in well C section of F_5 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

走滑断裂的地震响应特征表明富满油田发育的走滑断裂与皮羌断裂发育模式相同, 是多条断裂组合而成的多核断裂破碎带模式, 即使位移量较小的平移段断裂也并非由单条断裂控制。并且不同应力机制下的走滑断裂的井震建模结构存在明显差异(图 14), 平移段破碎带宽度最小, 破碎带主要发育裂缝, 且裂缝走向与断裂走向一致。张扭段破碎带受断裂组合影响, 破碎带宽大, 但是破碎作用主要发生在断裂带内部, 对断裂两侧围岩影响较小; 张扭段破碎带裂缝和溶蚀孔洞均发育, 造成钻井过程中的漏失和放空, 发育多组走向裂缝, 优势走向与断裂走向高角度相交。压扭段破碎带因复

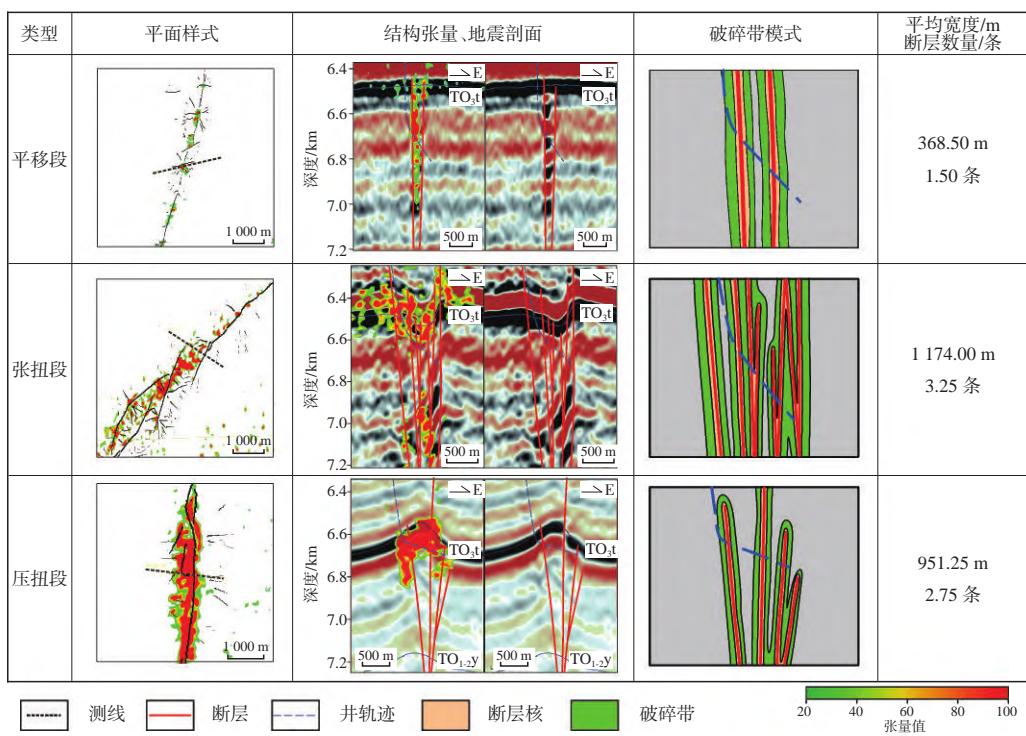


图 14 塔里木盆地富满油田不同应力段走滑断裂破碎带结构

Fig. 14 Structure of strike-slip damage zone in different stress segments of Fuman Oilfield, Tarim Basin

杂的断裂带导致破碎带宽度大,破碎作用不仅在破裂带内部发生,而且对断裂带外围也有一定的影响;压扭段破碎带以裂缝发育为主,溶蚀孔洞欠发育,裂缝走向并无明显优势。

4 油气地质意义

富满地区长期处于构造低部位,走滑断裂对储层控制作用显著。钻井资料揭示了4种主要的储集空间类型:洞穴型、孔洞型、裂缝型和裂缝—孔洞型^[43-44],其中最常见的是裂缝型储层,其次是裂缝—孔洞型。钻井统计数据显示,在目标地层钻探过程中,普遍发育洞穴和规模缝洞体,引发了大量的钻井液漏失或钻井放空现象,这些发生漏失的井段与测井解释所确定的裂缝—孔洞型储层具有良好的对应关系^[10]。

F_{17} 断裂是一条NE向走滑断裂(图15a),活动性分析揭示该断裂活动具有南强北弱的趋势,破碎带宽度统计结果与活动性趋势相同(图15b),断裂的活动性强大部位发育规模更大的断层破碎带。不同强度断裂的过井地震—结构张量叠合剖面中,灰岩顶面(TO_3t)变形幅度越大则破碎带范围越大,拉张段和挤压段的破碎带宽度普遍大于活动性较小的平移段(图15c)。断裂破裂作用使得致密碳酸盐岩地层形成规模缝洞型储层。综上分析可知,一

般情况下,断裂带规模越大,破碎带越发育,控制的缝洞型储层也更为发育。

然而实际生产中并非规模大的储集体就一定有较好的产能,前文分析发现不同应力段下破碎带结构存在差异,因此选择富满油田 F_{17} 断裂带上不同应力段钻井,对断层破碎带宽度与单井产能进行对比分析,结果显示张扭段单井产能高于压扭段与平移段,压扭段单井产能最低(图16)。而且张扭段和平移段的单位压降产油量与破碎带宽度存在较好的正相关关系,破碎带宽度越大单位压降产油量越高。压扭段的单井产能和破碎带宽度则没有明显的对应关系,单位压降产能普遍较低,同等规模破碎带的张扭段 $Z1$ 井与压扭段 $Y3$ 井的单位压降产油量相差9倍多。以上结果表明,单井产能不仅与破碎带发育规模相关,还与走滑断裂所处应力环境有极大关系,不同应力段的钻井产能揭示张扭段和平移段钻井的产能通常较压扭段钻井高。走滑断裂复杂的破碎带结构产生大量构造裂缝和破碎角砾岩缝网,形成了复合的断裂体缝洞储集空间,张扭段整体处于拉张应力下,裂缝开启度高,储集体连通性高。反观压扭段破碎带,在挤压应力下形成,裂缝开启度低,储集体连通性差,导致产能低。然而并非所有的张扭段都比压扭段单井产能高,例如 $Z3$ 井和 $Y4$ 井,可见应力分段也只能作为

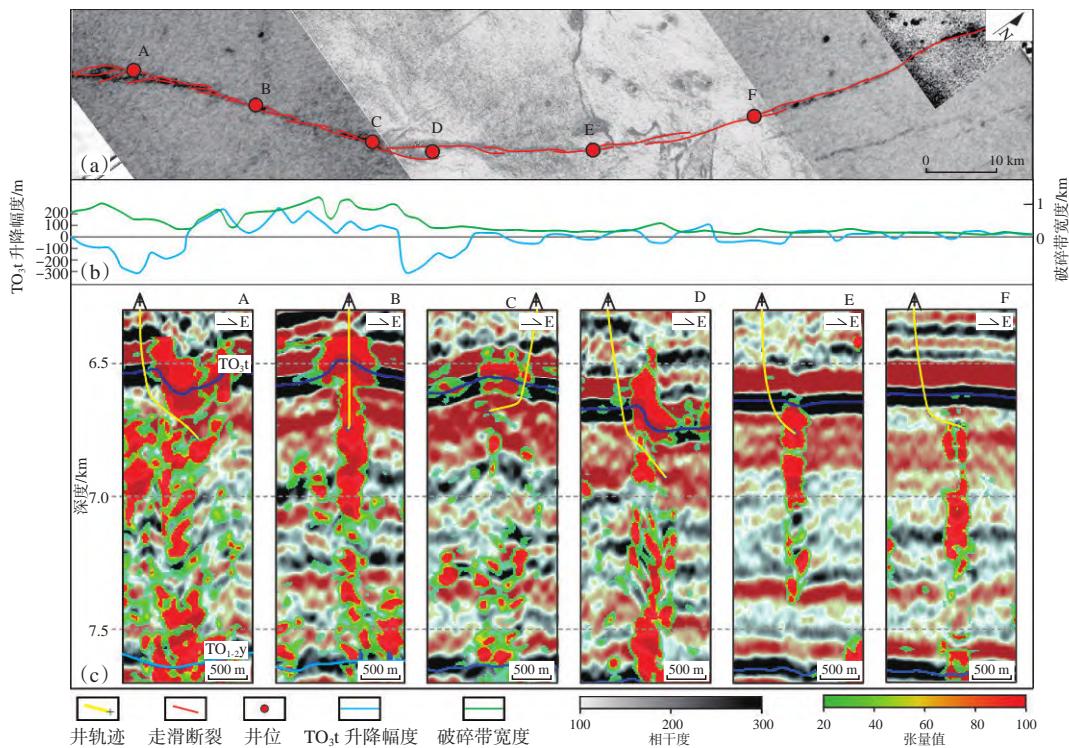


图 15 塔里木盆地富满油田 F₁₇ 断裂灰岩顶面(a)、活动性统计(b)及过井地震—结构张量属性叠合剖面(c)

Fig. 15 Coherence map of the limestone top surface (a), activity statistics chart (b) and seismic-structure tensor attribute overlay section obtained through well (c) of F₁₇ fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

储集体连通性的参考。综上可知,在以后的勘探中可以将断层破碎带宽度大的张扭段作为主要方向,同时加强储集空间连通性的研究。

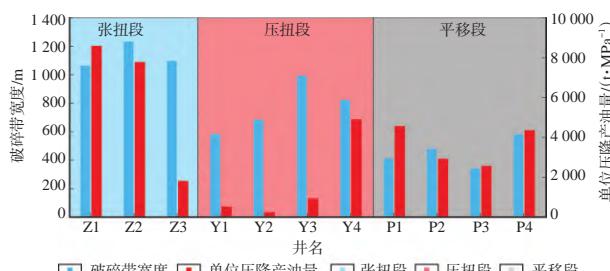


图 16 塔里木盆地富满油田 F₁₇ 断裂不同应力段破碎带宽度与单井产能柱状图

Fig. 16 Fault damage zone widths in different stress segments and individual well productivity histogram of F₁₇ fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin

5 结论

(1) 塔里木盆地皮羌断裂是由多条次级断层组成的复杂走滑断裂带,发育多核断层破碎带,沿露头的裂缝密度曲线表现为多峰的特征,裂缝密度累积曲线呈现多个斜率变化区域。破碎带露头结构可分为断层泥、大节理发育区、角砾岩、碎裂岩和裂缝发育带等 5 类,不同的类型结构重复出现,且同类型破碎带因变形强度不同裂缝发育程度差异明显。

(2) 富满油田走滑断裂带由多条断裂构成,发育多核断层破碎带,与野外观察结果一致。不同应力机制下的断裂破碎带结构存在明显差异,平移段破碎带宽度最小,裂缝为主要结构,裂缝走向与断裂走向一致;张扭段破碎带宽度大,破碎作用主要发生在断裂带内部,以裂缝和溶洞为主要结构,裂缝优势走向和断裂走向高角度相交;压扭段破碎带宽度大,破碎作用不仅在破碎带内部发生,对断裂带外围也有一定程度的影响,裂缝发育,溶蚀孔洞欠发育,裂缝无明显优势走向。不同应力机制下的单条断层破碎的宽度也有明显差异,其中平移段宽度最小,压扭段破碎带次之,张扭段单条断层的破碎带宽度最大。

(3) 研究区走滑断裂活动越强破碎带规模越大,储层规模越发育。产能不仅与破碎带规模相关,还与走滑断裂所处应力环境相关,应力环境可作为储集体连通性的参考,通常张扭段储集体连通性高、产能最好,压扭段储集体连通性差、产能低。因为在拉张应力下裂缝开启度高、储集体连通性好;挤压应力下裂缝开启度低、储集体连通性差。

参考文献:

- [1] 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 Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, 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.
- [2] 田军,王清华,杨海军,等.塔里木盆地油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):272-282.
- TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021,42(3):272-282.
- [3] 郑民,彭更新,雷刚林,等.库车坳陷乌什凹陷构造样式及对油气的控制[J].石油勘探与开发,2008,35(4):444-451.
- ZHENG Min, PENG Gengxin, LEI Ganglin, et al. Structural pattern and its control on hydrocarbon accumulations in Wushi Sag, Kuche Depression, Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008,35(4):444-451.
- [4] QI Jiafu, LEI Ganglin, LI Minggang, et al. Contractual structure model of the transition belt between Kuche Depression and South Tianshan Uplift [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (3):120-128.
- GUO Xiaowen, LIU Keyu, JIA Chengzao, et al. Fluid evolution in the Dabei Gas Field of the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China: Implications for fault-related fluid flow [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 78:1-16.
- [6] 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 Shuntuogoule area of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017,38(5):831-839.
- [7] 黄少英,张玮,罗彩明,等.塔里木盆地中部满深1断裂带的多期断裂活动[J].地质科学,2021,56(4):1015-1033.
- HUANG Shaoying, ZHANG Wei, LUO Caiming, et al. The faults and faulting phases of the Manshen-1 fault belt, central Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2021,56(4):1015-1033.
- [8] 赵锐,赵腾,李慧莉,等.塔里木盆地顺北油气田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 & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5):8-13.
- [9] 马庆佑,曹自成,蒋华山,等.塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系[J].海相油气地质,2020,25 (4):327-334.
- MA Qingyou, CAO Zicheng, JIANG Huashan, et al. Source-connectivity of strike slip fault zone and its relationship with oil and gas accumulation in Tahe-Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020,25(4):327-334.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 孟万斌,肖春晖,冯明石,等.碳酸盐岩成岩作用及其对储层的影响:以塔中顺南地区一间房组为例[J].岩性油气藏,2016,28(5):26-33.
- MENG Wanbin, XIAO Chunhui, FENG Mingshi, et al. Carbonate diagenesis and its influence on reservoir: A case study from Yijianfang Formation in Shunnan area, central Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016,28(5):26-33.
- [13] 倪新锋,沈安江,乔占峰,等.塔里木盆地奥陶系缝洞型碳酸盐岩岩溶储层成因及勘探启示[J].岩性油气藏,2023,35 (2):144-158.
- NI Xinfeng, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Genesis and exploration enlightenment of Ordovician fracture-vuggy carbonate karst reservoirs in Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2):144-158.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 朱秀香,赵锐,赵腾.塔里木盆地顺北1号断裂带走滑分段特征与控储控藏作用[J].岩性油气藏,2023,35(5):131-138.
- ZHU Xiuxiang, ZHAO Rui, ZHAO Teng. Characteristics and control effect on reservoir and accumulation of strike-slip segments in Shunbei No.1 fault zone, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023,35(5):131-138.
- [17] 张银涛,陈石,刘强,等.塔里木盆地富满油田F₁₉断裂发育特征及演化模式[J].现代地质,2023,37(2):283-295.
- ZHANG Yintao, CHEN Shi, LIU Qiang, et al. Development characteristics and evolution model of F₁₉ fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Geoscience*, 2023,37(2):283-295.
- [18] 邬光辉,马兵山,韩剑发,等.塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J].石油勘探与开发,2021,48(3):510-520.
- WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3):510-520.
- [19] GRAHAM B, ANTONELLINI M, AYDIN A. Formation and growth of normal faults in carbonates within a compressive environment [J]. *Geology*, 2003,31(1):11-14.
- [20] 韩剑发,苏州,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 Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, 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.
- [21] 卜旭强,王来源,朱莲花,等.塔里木盆地顺北油气田奥陶系控缝洞型储层特征及成藏模式[J].岩性油气藏,2023,35 (3):152-160.
- BU Xuqiang, WANG Laiyuan, ZHU Lianhua, et al. Characteristics and reservoir accumulation model of Ordovician fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023,35(3):152-160.
- [22] 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.
- JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influ-

- ence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 245-253.
- [23] 杨海军, 李开开, 潘文庆, 等. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用 [J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 783-792.
- YANG Haijun, LI Kaikai, PAN Wenqing, et al. Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in central Tarim [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 783-792.
- [24] 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.
- [25] 陈叔阳, 何云峰, 王立鑫, 等. 塔里木盆地顺北1号断裂带奥陶系碳酸盐岩储层结构表征及三维地质建模 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 124-135.
- CHEN Shuyang, HE Yunfeng, WANG Lixin, et al. Architecture characterization and 3D geological modeling of Ordovician carbonate reservoirs in Shunbei No.1 fault zone, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(2): 124-135.
- [26] 邬光辉, 张韬, 朱永峰, 等. 碳酸盐岩断裂破碎带结构、分布与发育机制 [J]. 地质科学, 2020, 55(1): 68-80.
- WU Guanghui, ZHANG Tao, ZHU Yongfeng, et al. The architecture, distribution and growth of carbonate fault damage zone [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2020, 55(1): 68-80.
- [27] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田F₁6断裂发育特征及其对油气分布的影响 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99-109.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, YANG Minghui, et al. Development characteristics of F₁6 fault in Fuman Oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 99-109.
- [28] 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.
- [29] 彭军, 夏梦, 曹飞, 等. 塔里木盆地顺北一区奥陶系鹰山组与一間房组沉积特征 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 17-30.
- PENG Jun, XIA Meng, CAO Fei, et al. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 area, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 17-30.
- [30] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. *Geology*, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [31] LABAUME P, SHEPPARD S M F, MORETTI I. Fluid flow in cataclastic thrust fault zones in sandstones, Sub-Andean Zone, southern Bolivia [J]. *Tectonophysics*, 2001, 340(3/4): 141-172.
- [32] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性 [J]. 地质学报, 2010, 84(4): 570-578.
- WU Zhiping, CHEN Wei, XUE Yan, et al. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 570-578.
- [33] 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.
- [34] 史今雄. 塔河油田断裂对奥陶系碳酸盐岩缝洞储集体控制作用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- SHI Jinxiong. Study on controlling effects of faults and fractures on Ordovician carbonate fracture-cavity bodies in Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [35] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [36] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 152: 70-87.
- [37] SAVAGE H M, BRODSKY E E. Collateral damage: Evolution with displacement of fracture distribution and secondary fault strands in fault damage zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: B03405.
- [38] 杨勇, 汤良杰, 郭颖, 等. 柯坪冲断带皮羌断裂的新生代构造演化特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1204-1210.
- YANG Yong, TANG Liangjie, GUO Ying, et al. Cenozoic structural evolution characteristics of Piqiang fault, Kalpin thrust belt [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(6): 1204-1210.
- [39] CHEN Shi, ZHANG Yintao, XIE Zhou, et al. Multi-stages of Paleozoic deformation of the fault system in the Tazhong Uplift, Tarim Basin, NW China: Implications for hydrocarbon accumulation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 265: 106086.
- [40] TURNER S A, LIU J G, COSGROVE J W. Structural evolution of the Piqiang Fault Zone, NW Tarim Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(1): 394-402.
- [41] 陈宇航, 张新涛, 余一欣, 等. 渤中凹陷北部中生界顶面断层破碎带量化研究 [J]. 现代地质, 2022, 36(4): 1035-1042.
- CHEN Yuhang, ZHANG Xintao, YU Yixin, et al. Quantitative study on the Uppermost Mesozoic fault damage zones in northern Bozhong Sag [J]. *Geoscience*, 2022, 36(4): 1035-1042.
- [42] 廖宗湖, 凡睿, 李薇, 等. 川东北须家河组致密砂岩断缝系统Ⅱ: 断层破碎带的结构特征 [J]. 石油科学通报, 2020, 5(4): 449-457.
- LIAO Zonghu, FAN Rui, LI Wei, et al. Fault-fracture systems of the Xujiahe tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part Ⅱ: Structure characteristics of fault damage zones [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(4): 449-457.
- [43] 程飞. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层类型动静态识别方法: 以塔里木盆地奥陶系为例 [J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 76-82.
- CHENG Fei. Integrated dynamic and static identification method of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case from the Ordovician in Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(3): 76-82.
- [44] 杨鹏飞, 张丽娟, 郑多明, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩大型缝洞集合体定量描述 [J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 89-94.
- YANG Pengfei, ZHANG Lijuan, ZHENG Duoming, et al. Quantitative characterization of Ordovician carbonate fracture-cavity aggregate in Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(6): 89-94.

(编辑: 卢春梅, 黄成刚)