

塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带地震预测

万效国¹, 邬光辉², 谢恩¹, 张银涛¹, 高莲花¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库车 841000; 2. 中山大学海洋学院, 广州 广东 510006)

摘要:碳酸盐岩断裂带往往具有较宽阔的破碎带,是缝洞体储层发育的有利部位,断层破碎带的识别与预测对油气井位的优选具有重要意义。在塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩井-震响应分析的基础上,通过地震方法与技术的对比分析,利用相干加强(AFE)与裂缝地震相分析技术,结合地震均方根振幅、地震曲率、缝洞体雕刻等多技术手段,可以进行碳酸盐岩断层破碎带的预测与刻画。结果表明,哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带沿断裂带条带状、扇状展布,一般具有200~2500 m的较宽范围,与钻探结果吻合程度高。哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩大型缝洞体储层的分布受控于断层破碎带,破碎带规模越大,缝洞体越发育。

关键词:破碎带宽度;走滑断裂;碳酸盐岩;塔里木盆地

中图分类号:P631 **文献标识码:**A

Seismic prediction of fault damage zones in carbonates in Halahatang area, Tarim Basin

Wan Xiaoguo¹, Wu Guanghui², Xie En¹, Zhang Yintao¹, Gao Lianhua¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;

2. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Carbonate fault zone often has relatively wide damage zone, which is favorable for the development of fracture-cave system, and its identification and prediction is of great significance for oil/gas target optimization. On the basis of well-seismic responses analysis of the Ordovician carbonates in Halahatang area of the Tarim basin, comparative analysis of various seismic techniques reveals that the carbonate fault fractured zone can be identified and described by using coherent enhancement technique (AFE) and fracture seismic facies analysis technique, combining with the seismic root-mean-square amplitude, seismic curvature and fracture-cave system description. The results show that the carbonate fault damage zones are in stripped, fan-shaped distribution along the fault zone, generally with a width of 200–2500 m, which have good agreement with the well data. The fault fractured zone controlled the distribution of large scale fracture-cave system, and the wider the damage zone is, the larger the fracture-cave system is.

Key words: damage zone width, strike-slip fault, carbonate rock, Tarim Basin

断裂带通常具有由断层核和破碎带组成的复杂三维空间结构,不仅是自然科学研究与工程应用研究的热点和难点^[1-3],而且与油气运聚成藏关系密切^[4-5]。断层破碎带是裂缝发育的变形带,可能宽达数千米^[3,6],具有复杂的内部构造变形、流体-岩石作用和渗流作用^[3-8],是断裂带储层发育与流体作用的主体部位,其结构特征与变形作用引起广泛关注^[3,5-6],变形机制及其对渗流作用研究取得重要进展。由于断层破碎带非均质性强烈,与围岩一般渐变过渡,而且含油气盆地内部资料有限,井下识别与预测困难,一般进行地质模型研究与地震预测^[2,5,7]。

塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩是石油勘探与开发的重点领域,油气主要沿断层破碎带分布,其识别与预测对油气井位优选与评价具有重要意义。本文在断裂带精细解释的基础上,通过地震信息的筛选,优选断层破碎带识别与描述的有效方法与技术,为碳酸盐岩油气高效勘探开发提供技术基础。

1 地质背景

哈拉哈塘地区位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起奥陶系潜山西部^[9],整体为向西南倾伏的鼻状构造,

收稿日期:2015-07-22;修订日期:2016-07-10。

第一作者简介:万效国(1984—),男,工程师,地震解释与储层预测。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05004-004)。

面积达 8 000 km²。本区显生宙地层齐全,主要目的层为上奥陶统良里塔格组、中奥陶统一间房组和中-下奥陶统鹰山组灰岩,厚度逾 500 m,碳酸盐岩顶面埋深在 6 000 ~ 7 500 m。

哈拉哈塘地区断裂发育,以走滑断裂为主,主要分布在下古生界碳酸盐岩地层,发育北西向与北东向两组方向断裂系统。发育于志留系一二叠系的断裂主要为直立型、半花状为主,多为继承性发育,但发生性质转换。中生界走滑断裂集中在北部,沿早期北东向大型走滑带发育一系列雁列构造,形成一系列微型地堑。走滑断裂主要发育在加里东晚期、晚海西期和燕山期 3 个阶段。

哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩储层以灰岩为主,主要发育大型缝洞体储层^[9-11],沿断裂带 2 km 范围内分布,向南部主要集中在断层破碎带内。本区油气资源丰富^[10],已发现含油面积达 3 000 km²,主要沿大型缝洞体分布。不同于碳酸盐岩原生孔隙型储层,碳酸盐岩油水产出变化大,同一部位或同一口井都可能出现不同的生产特征,70% 以上油气产量来自于不到 30% 的高效井,且均位于大型断层破碎带上。

2 断层破碎带刻画方法

断层破碎带是围绕断层核周围受断裂发育及其相互作用形成的变形地质体^[4,6],并以裂缝发育为特征,具有与围岩不同的地质结构与岩石物理特征^[5,12-13]。由于裂缝带的发育通常在地震资料上存在不同于围岩的地球物理特征^[13-15],因此,通过不同地震储层预测与描述方法技术的对比分析,可以优选有效的技术手段,从不同角度刻画断层破碎带的特征。

2.1 断层破碎带地震响应特征

塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩往往具有较宽断裂带,通过井-震标定,可以识别出与围岩不同的地震响应特征(图 1)。

断层核多发生在相对较窄的高应变带,包含断层泥、构造角砾、碎裂岩、超碎裂岩及局部滑动带^[4-7]。地震资料上,断层核通常表现为杂乱无连续波组,弱振幅或局部异常强振幅,高频异常,波形错断、分叉或无反射。

破碎带可以分为内带与外带。内带邻近断层核,与断层核突变接触或渐变接触。破碎带内带发育多组方向的裂缝^[4-7],形成裂缝密集分布区域,局部构造变形强烈,形成角砾岩、碎裂岩发育区,地层不连续,碳酸盐岩内部没有明显的地层界面与波阻抗界面。断层破

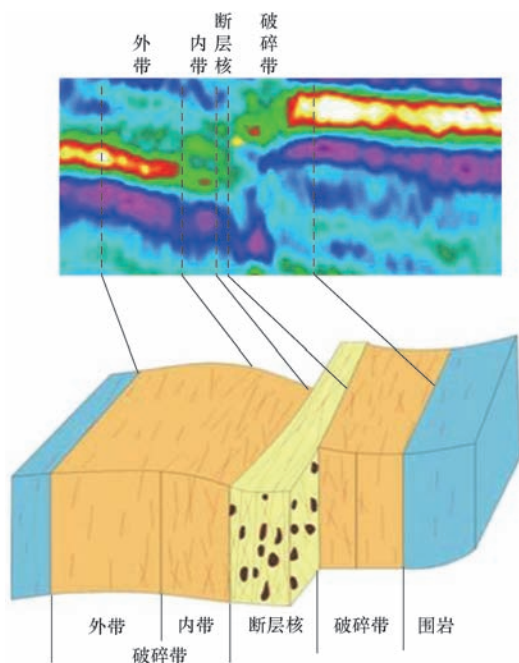


图 1 碳酸盐岩断层破碎带地震剖面与地质模式

Fig. 1 Seismic profile and geological model of fault fractured zones in carbonates

碎带内带在地震资料上通常呈弱振幅,波组不稳定、波形变化大,同相轴突变,发生扭曲、分叉。破碎带内带与断层核通常连为一体,表现为杂乱弱振幅,区分困难。

断层破碎带外带以裂缝发育为特征^[4-7],通常以单一的 1 ~ 2 组裂缝为主。裂缝发育程度较内带明显降低,地层连续性好,缺少角砾岩与碎裂岩,在地震剖面上通常呈现同相轴连续,振幅减弱,频率降低的特征。破碎带外带与内带、围岩呈渐变关系,常规地震剖面通常较难识别外带的分布,需要精细的裂缝与储层预测方法判识。

2.2 地震均方根振幅属性

振幅是地震波的主要属性之一,与地震反射系数密切相关。地震均方根振幅则是将振幅平方的平均值再开平方,对振幅异常敏感,与碳酸盐岩缝洞系统密切相关^[14-16],在塔里木盆地海相碳酸盐岩地震储层预测中得到广泛的应用。碳酸盐岩断层核与断层破碎带的内带由于裂缝系统和大型缝洞体发育,往往容易形成地震振幅异常响应。通过典型实例对地震数据体的振幅等地震属性与断层破碎带的相关性分析,发现均方根振幅属性对断层破碎带具有较好的响应(图 2)。异常的均方根振幅多沿断层破碎带分布,呈条带状展布,或是团块状分布。由于断层破碎带外带广大范围内的裂缝不足以形成明显的振幅异常响应,振幅属性往往难以反映破碎带外带。

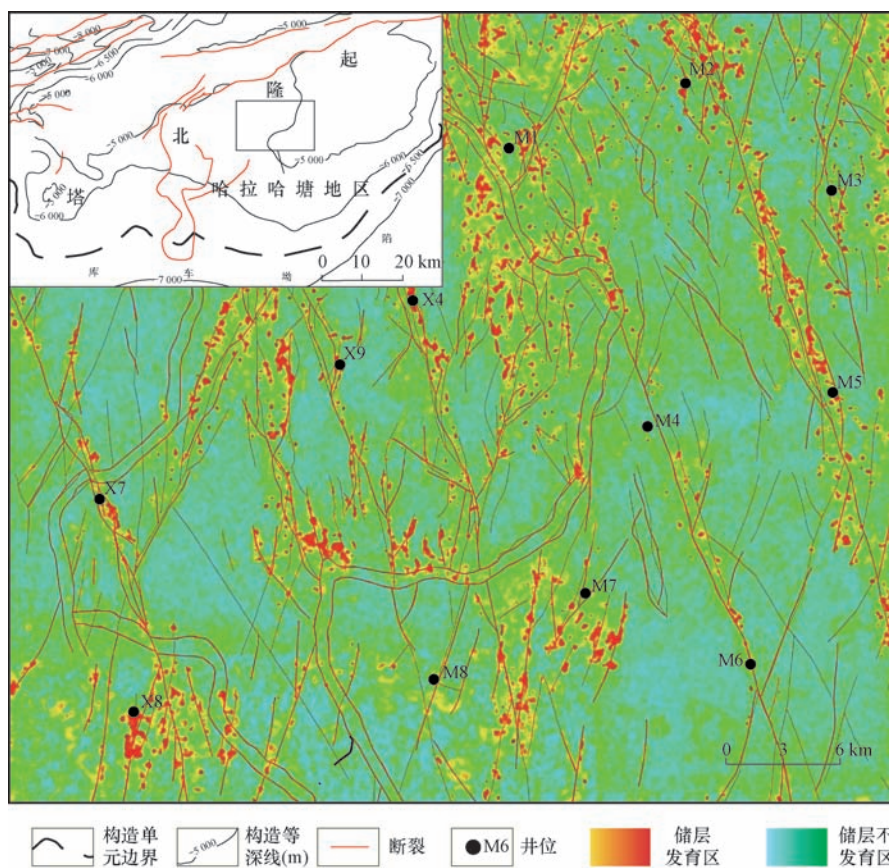


图 2 哈拉哈塘地区奥陶系一间房组顶面均方根振幅属性平面图

Fig. 2 Root-mean-square amplitude attribute map on the top of the Ordovician Yijianfang Formation in Halahatang area

(图中红色 - 黄色代表均方根振幅异常区域)

2.3 地震曲率属性体与裂缝地震相

地震曲率属性通过描述地下曲面的弯曲程度,来预测与识别微小断层、缝洞体和裂缝带^[17]。与地震倾角属性不同,地震曲率属性能更好地描述储层的断裂特征和垂向上的非连续性。通过曲率属性的提取分析,发现最大曲率属性较好地反映了与断裂和岩溶作用相关的裂缝带。在最大曲率属性剖面上(图 3a),微断裂和裂缝带往往表现为黑色的线状构造特征(较大的曲率值),在横向上可切割储层。曲率属性提供了成像断裂系统、描述裂缝带空间分布的有效工具。

利用地震反射倾角、最大曲率和非连续性属性进行地震相分析,可以有效地从这些地震几何属性中提取出与微断裂 - 裂缝相关的共同特征,并对微断裂 - 裂缝进行识别和几何尺度意义上的分级^[18]。微断裂 - 裂缝通道会表现为大的地震倾角值、大的最大曲率值和小的地震相似性,地震相空间的分布可以作为断层破碎带划分与分级的依据。地震相分析结果与断层破碎带分布对应较好(图 3b),微断裂与大型裂缝带沿断裂带密集分布,具有较强的地震相,与断层核和断层破碎带内带位置相当。周边分布是更为广泛的次级

规模的地震相(黄色、绿色),为破碎带的主体部位。远离断裂带的蓝色地震相代表围岩分布区。

2.4 相干加强(AFE)裂缝预测

相干体是对地震数据道之间相似性的数学描述,能清晰指示地层的非连续性,直接从 3D 地震数据体中定量地得到断层和地层特征^[14-15]。

常规相干属性可以定性判断断层的展布(图 4a),对断层破碎带的宽度及大型缝洞体的团块状、点状为地震“串珠”也有一定的响应。但由于哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩埋深大、地震分辨率较低,常规相干属性对断层破碎带的边界、裂缝带的发育与分布响应模糊。

高精度相干加强裂缝扫描技术(AFE)可以将一定范围内的相干信息按照一定的参数进行线性组合,通过线性加强,最终得到裂缝扫描结果^[19]。然后利用测井解释结果来标定与检查验证,从而预测裂缝发育区,确定断层破碎带的分布范围(图 4b)。结果表明,新垦 - 热瓦普区块裂缝密集程度受控于断裂带,总体上分为北东 - 南西走向和北西 - 南东走向两组断层破碎带,与区内发育的 X 型大断裂的延伸方向一致。另

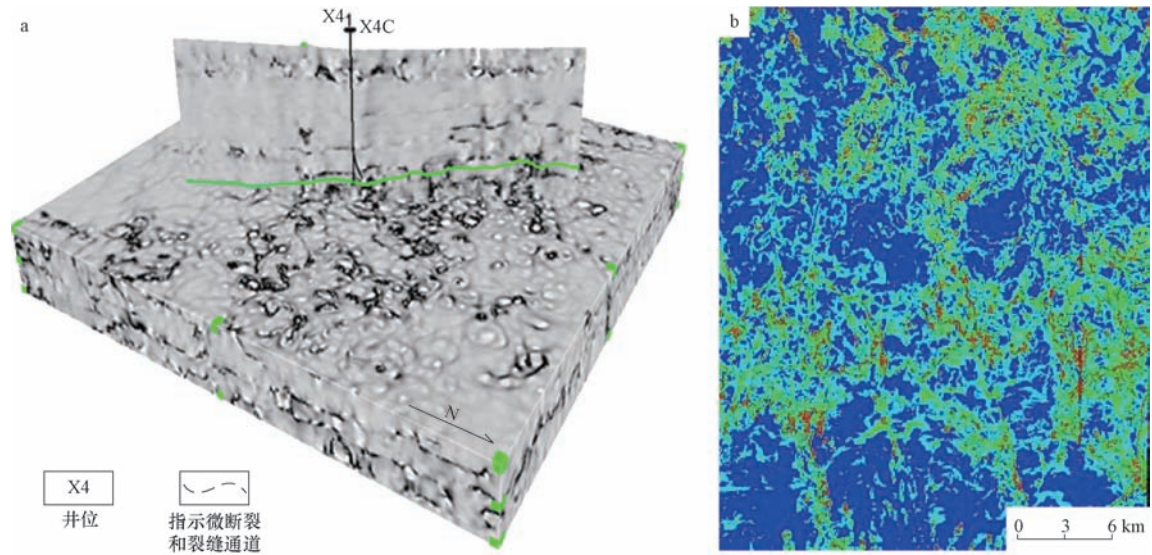


图 3 哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩顶面曲率属性体(a)和裂缝地震相沿层切片(b)

Fig. 3 Curvature attribute (a) and horizon slice of fracture seismic facies (b) on the top of the Ordovician carbonate in Halahatang area

(a. 黑色代表较大曲率。b. 红色、橘黄色代表微断裂与大型裂缝带,黄色、绿色代表裂缝发育区,蓝色代表基质分布区。)

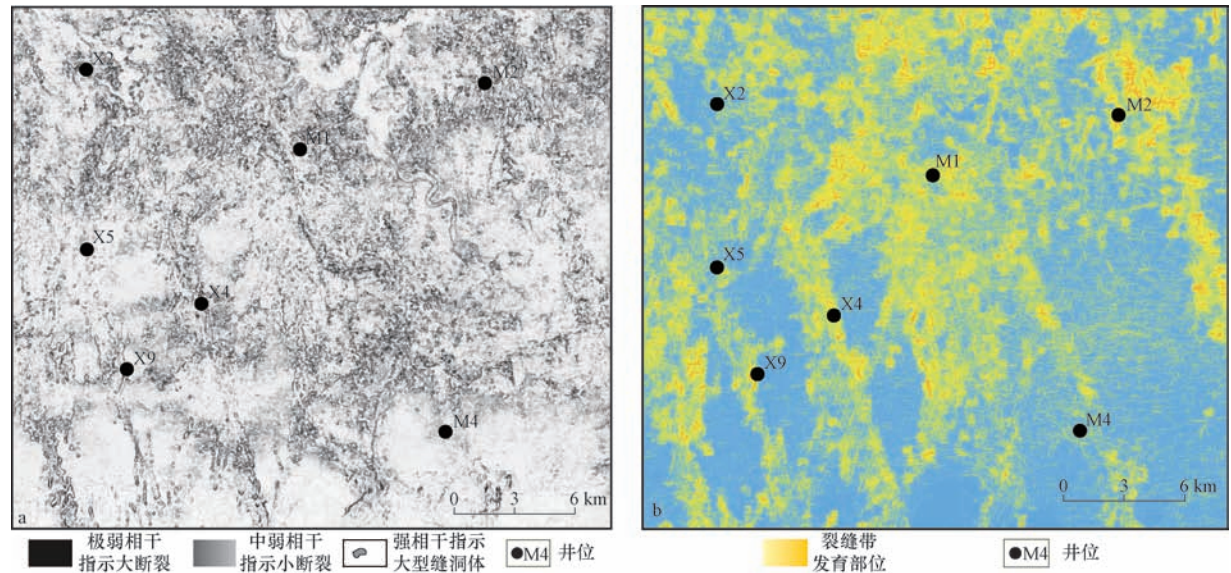


图 4 哈拉哈塘地区奥陶系一间房组顶相干平面图(a)与 AFE 裂缝预测平面图(b)

Fig. 4 Coherence graph (a) and AFE fracture map (b) on the top of the OrdovicianYijianfang Formation in Halahatang area

(a. 黑色为极弱相干,条带状弱相干主要为断裂响应;浅黑色-深灰色为中弱相干,指示小断裂、裂缝;团块状、点状为强相干,为大型缝洞体的响应。b. 黄色为裂缝带发育部位,线条方向代表裂缝带走向,颜色加深代表裂缝带密度加强。)

外,工区内还发育其它方向延伸的微裂缝,其方向规律性不强,主要为岩溶裂缝和受各期构造运动影响形成的构造缝。测井约束的 AFE 研究成果可以直观反映裂缝的发育程度和发育特征,与钻探实际吻合较好,该技术是研究碳酸盐岩断层破碎带发育特征的有效手段。

2.5 缝洞体雕刻

近年来,缝洞体雕刻技术在碳酸盐岩储层预测与评价中发挥了重要作用^[14-16]。缝洞体雕刻在利用地震体几何属性信息进行地质建模的基础上,结合单井测井相建模、构造信息、反演波组抗信息,求取缝洞连

通体有效孔隙度地质模型,雕刻有效孔隙度体,计算出有效储集空间。

通过井区的实钻对比分析表明,大型缝洞体储层基本分布在断层破碎带,其形成和分布与断层破碎带密切相关(图 5)。大型缝洞体主要分布在断层破碎带的内带,在外带也有分布,其外边界与断层破碎带的边界大体一致,具有很好的对应关系,可以用来划分断层破碎带的分布。

综合各种方法、技术特点与适用条件,地震均方根振幅与曲率可以进行断层破碎带展布分析,刻画断层核-破碎带内带较发育的区块。相干加强(AFE)结合

裂缝地震相可以进行断层破碎带的平面分带分块划分对比。相干加强(AFE)、缝洞体雕刻与地震属性结合可以进行局部有利断层破碎带发育区的刻画与预测。

3 断层破碎带分布

通过地震方法与技术优选,可以综合进行断层破碎带的划分与描述。在断层与层位精细解释的基础上,大体确定断裂带的展布。通过地震均方根振幅属性、地震曲率分析,进行断层破碎带分布的初步划分。结合钻井资料的标定,重点进行相干加强裂缝带的预测,并辅以其他叠前与叠后裂缝预测资料,厘定断层破碎带的平面分布范围(图6)。继而在局部缝洞体雕刻与储层裂缝预测资料的基础上,进行断层破碎带的内部分段与分块,开展次一级的细分。

通过多种方法的刻画,哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩断层破碎带沿断裂带呈条带状分布,断裂两盘的破碎带多不对称,主要集中在其中一盘。沿走向上形态与发育程度变化大,具有分段性,单一断裂多呈条块状展布,断层叠覆区多呈条带状,有分支断裂或断裂相交则多呈撒开的扇形。断层破碎带轮廓宽度较大,宽度变化范围一般在200~2 500 m。部分发育部位宽达3 000 m,多条断裂带叠合部位逾5 000 m,远大于数百米范围的垂向断距。而世界其他地区断裂规模较大时,断距多大于破碎带的宽度^[3,6,20]。断层破碎带的成因受断裂的性质、规模、局部应力场和岩性等多因素控制^[2,4-6,20-22]。本区可能与奥陶系碳酸盐岩岩性、走滑断层及多期构造作用相关,受多种因素影响。

结合岩心物性统计与地震储层预测分析(图2,图5,图6),哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩缝洞体储层发育,并主要集中在断层破碎带上。哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩基质孔隙度一般小于3%,渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气基本来自大型缝洞体^[14-16]。而断层破碎带裂缝发育,不仅可以使渗透率增加1~3个数量级,而且有利于岩溶和埋藏溶蚀作用形成大型缝洞体储层^[16]。由此可见,断层规模越大,断层破碎带越发育,缝洞体储层分布也越多,缝洞体规模也越大。大型断裂带上,破碎带宽度往往大于1.5 km,大型缝洞体储层也可能延伸2 km范围。而小规模断裂带的断层破碎带往往较窄,多小于1 km,缝洞体分布多在800 m范围内。距断层核越近,缝洞体越发育,单个缝洞体规模也较大。统计分析,大型缝洞体多集中在距断层核1.2 km范围内。

通过钻井与生产资料分析,在远离哈拉哈塘奥陶系风化壳以南的内幕区,绝大多数油流井与断层破碎带密切相关。统计表明90%以上的高产油流井位于断层破碎带范围内,仅有极少量破碎带之外的井获得

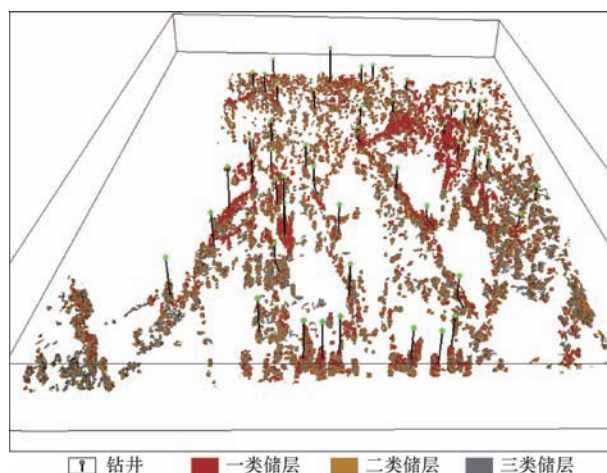


图5 哈拉哈塘地区奥陶系一间房组顶储层缝洞体雕刻图
Fig. 5 Reservoir fracture-cave description on the top of the Ordovician Yijianfang Formation in Halahatang area

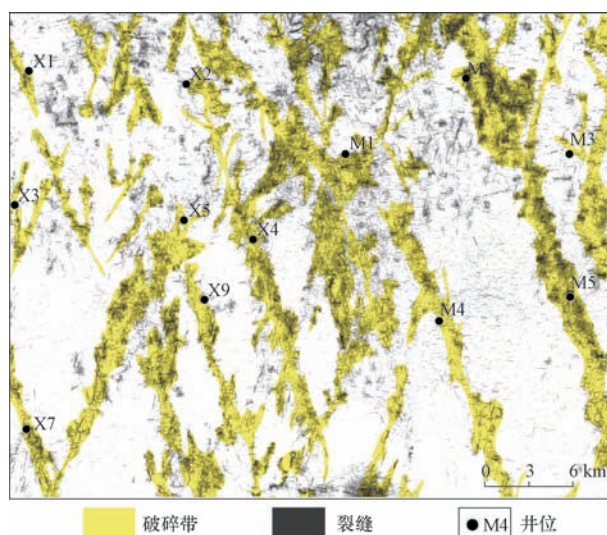


图6 哈拉哈塘地区奥陶系一间房组顶断层破碎带划分
Fig. 6 Fault damage zone division of the Ordovician Yijianfang Formation in Halahatang area

高产,揭示断层破碎带对低孔、低渗致密碳酸盐岩油气产出的重要性。更值得关注的是,累计产量大于 $2 \times 10^4 \text{ t}$ 的高效井都分布在距主断层核1.5 km的破碎带范围内,揭示高效井的分布受控于破碎带,与钻前预测一致。而大于2.5 km的钻井很难获得稳定的产能,分析多位于破碎带的外围区或不在破碎带范围内。然而,并非钻遇断层破碎带就一定获得高产。虽然少部分井钻前预测破碎带发育,实钻却未钻遇裂缝发育带,但通过侧钻获得成功,可见井点选择虽有一定误差,但破碎带预测基本可行。还有少部分井(小于10%)预测在破碎带内,但实钻为致密带,这类“破碎带”还需要进一步地震攻关与破碎带预测方法的提升。

4 结论

1) 哈拉哈塘地区奥陶系断层破碎带可以利用地

震均方根振幅与曲率判别断层核-破碎带内带,利用相干加强(AFE)结合裂缝地震相进行区带划分,相干加强、缝洞体雕刻与地震属性结合进行局部破碎带发育区的刻画与预测。

2) 哈拉哈塘地区一间房组断层破碎带沿断裂带条带状或扇状展布,一般具有200~2500 m的较宽范围。断层规模越大,断层破碎带越宽。

3) 哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩大型缝洞体储层主要分布在断层破碎带,受控断层破碎带的规模与部位,并为实际钻井所验证。

参 考 文 献

- [1] Wang K. Finding fault in fault zones[J]. Science, 2010, 329: 152-153.
- [2] 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: 1557-1575.
- [3] Aiming L, Kazuhiko Y. Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 57: 1-15.
- [4] Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault zone architecture and permeability structure[J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [5] Olierook H K H, Timms N E, Hamilton P J. Mechanisms for permeability modification in the damage zone of a normal fault, northern Perth Basin, Western Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 50: 130-147.
- [6] Kim Y S, Peacock D C P, Sanderson D J. Fault damage zones[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(3): 503-517.
- [7] Molli G, Cortecchi G, Vaselli L, et al. Fault zone structure and fluid-rock interaction of a high angle normal fault in Carrara marble (NW Tuscany, Italy) [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32: 1334-1348.
- [8] 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.
- [9] 崔海峰, 郑多明, 滕团余. 塔北隆起哈拉哈塘凹陷石油地质特征与油气勘探方向[J]. 岩性油藏, 2009, 21(2): 54-59.
Cui Haifeng, Zheng Duoming, Teng Tuanyu. Petroleum geologic characteristics and exploration orientation in Halahatang Depression of Tabei uplift [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 54-59.
- [10] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827-844.
Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [11] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933-940.
Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Anjiang, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim basin and their controlling effects on karst reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 31(6): 933-940.
- [12] Laubach S E, Olson J E, Gross M R, et al. Mechanical and fracture stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93: 1413-1426.
- [13] Jeanne P, Guglielmi Y, Cappa F. Multiscale seismic signature of a small fault zone in a carbonate reservoir: Relationships between VP imaging, fault zone architecture and cohesion[J]. Tectonophysics, 2012, 554-557(25): 185-201.
- [14] 彭更新, 但光箭, 郑多明, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区三维叠前深度偏移与储层定量雕刻[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 5: 49-56.
Peng Gengxin, Dan Guangjian, Zheng Duoming, et al. 3D prestack depth migration quantitative characterization of carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 5: 49-56.
- [15] 杨平, 孙赞东, 梁向豪, 等. 缝洞型碳酸盐岩储集层高效井预测地震技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 502-507.
Yang Ping, Sun Zandong, Lian Xianghao, et al. Seismic technology for predicting highly profitable wells in the fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 502-507.
- [16] 杜金虎. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩油气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Du Jinhu. Oil and gas exploration of Cambrian-Ordovician carbonate in Tarim basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [17] 李澈, 季天愚, 李雨澈. 曲率属性分析及其在地震资料解释中的应用[J]. 当代化工, 2014, 43(4): 558-560.
Li Che, Ji Tianyu, Li Yuche. Analysis of curvature attribute and its application in seismic interpretation[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(4): 558-560.
- [18] 汲生珍, 邹兴威, 夏东领, 等. 地震相裂缝分级技术在储层预测中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 71-77.
Ji Shengzhen, Wu Xingwei, Xia Dongling, et al. Application of seismic facies technique for fracture classification in reservoir prediction[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(3): 71-77.
- [19] 张军林, 田世澄, 郑多明, 等. 裂缝型储层地震属性预测方法研究与应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(3): 79-84.
Zhang Junlin, Tian Shicheng, Zheng Duoming, et al. The study and application of seismic attribute technique for fractured reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2013, 35(3): 79-84.
- [20] Torabi A, Berg S S. Scaling of fault attributes: A review[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 1444-1460.
- [21] Riley P R, Goodwin L B, Lewis C J. Controls on fault damage zone width, structure, and symmetry in the Bandelier Tuff, New Mexico [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(6): 766-780.
- [22] Michie E A H, Haines T J, Healy D, et al. Influence of carbonate facies on fault zone architecture[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 65: 82-99.

(编辑 张玉银)