

崔刚, 李秀容, 王津津, 等. 叠前方位各向异性技术在潜山储层裂缝预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 59-68.

CUI Gang, LI Xiurong, WANG Jinjin, et al. Quantitative prediction to fractured reservoir in buried hill based on pre-stack azimuthal anisotropy[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 59-68.

叠前方位各向异性技术在潜山储层裂缝预测中的应用

崔刚¹, 李秀容¹, 王津津², 杨莹莹¹, 郭玉廷², 肖笑¹

(1 中石油华北油田公司第一采油厂, 河北任丘 062552; 2 中石油华北油田公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552)

摘要: 裂缝型碳酸盐岩储层非均质性极强, 储层类别以高角度缝为主。在油田开发中如何精准刻画储层空间展布特征, 寻找构造高部位剩余油是亟需解决的难题。通过叠前方位各向异性技术对潜山中小型裂缝进行预测, 结合地层微电阻率扫描成像(FMI)裂缝解释结果进行标定和分级刻画, 进一步应用三维可视化及自动追踪技术实现对储集裂缝体的空间定量雕刻, 精准落实裂缝体空间分布及连通性。该技术在某油田的实际应用结果表明, 使用该方法预测的裂缝体结果与后续实际验证井的钻遇情况相符。此研究对开发后期高含水潜山裂缝型油藏有效挖潜剩余油具有很好的指导作用。

关键词: 碳酸盐岩; 缝洞储层; 叠前各向方位异性; 裂缝预测; 定量刻画; 潜山

中图分类号: P744.4; TE155

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.331

0 引言

裂缝型碳酸盐岩储层具有复杂性和特殊性, 储集空间发育极其不规则, 储层非均质性极强, 国内外学者曾经做过大量的研究^[1-8], 对裂缝在露头、测井、地震等资料上识别、裂缝的分类分级、裂缝的预测方法等研究也趋于成熟^[9-15], 但是对于裂缝体的定量刻画及横向分布连通性问题^[16-18], 尤其是裂缝型油藏开发后期裂缝体空间分布及连通性研究以及对剩余油的挖潜研究较少。目前对裂缝检测的技术手段日趋多样化, 可通过岩芯、地表露头、测井成像等手段直接分析, 但由于裂缝在地表由于压力释放会改变裂缝形态, 因此分析结果受到干扰; 此外测井成像分析法也会受钻井液、井壁坍塌等因素干扰, 且识别范围受限^[19-21]。利用地震资料预测裂缝的相应技术可分为叠前及叠后预测法, 常用的叠后地震预测方法包括相干体、构造不连续属性、边缘检测、衰减梯度属性、蚂蚁追踪、应力场数值

模拟和曲率分析等; 叠前预测主要使用方位各向异性属性分析技术, 相比于叠后方法, 叠前方位各向异性裂缝检测空间上覆盖程度高, 同时包含方位角信息, 可判定裂缝走向及密度等信息^[22-24]。本文尝试应用叠前方位各向异性技术对潜山裂缝进行预测, 并结合 FMI 成像裂缝解释结果进行标定和分级刻画, 通过三维可视化及自动追踪技术实现对储集裂缝体的空间定量刻画。运用该方法可以有效解决裂缝体横向连通性问题, 对于油藏后期剩余油挖潜具有重要指导意义, 特别是在寻找无井钻遇的孤立裂缝体油藏方面具有优势, 为后期井位部署提供有力依据。

1 原理及思路

1.1 叠前方位各向异性裂缝预测原理

AVAZ(或 AVOZ)即三维地震资料的振幅随偏移距(入射角)和方位角变化关系。地震频率的衰减和裂缝发育的空间变化程度有关, 沿裂缝走向方向振幅能量衰减小, 垂直裂缝走向方向衰减大, 导致不同方位地震振幅有差异, 这种振幅差异越大, 代表裂缝各项异性强度越强^[25-28]。岩石物理模型实验结果表明, 地震纵波沿垂直于裂缝方向的传播

收稿日期: 2021-12-29

资助项目: 中国石油股份有限公司重大科技专项“华北油田上产 800 万吨关键技术研究与运用”(2014E-35)

作者简介: 崔刚(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油田勘探与开发方面的研究工作。E-mail: cy1_cg@petrochina.com.cn

速度小于沿平行于裂缝方向的传播速度^[29-31]；并且地震波的动力学特征(如振幅、主频、衰减等)比运动学特征(如速度)对裂缝特征的变化更为敏感^[32]。以上研究表明,利用叠前地震资料提取方位地震属性(如振幅、速度、主频、衰减等)检测裂缝型储层是完全可行的。

本文研究方法基于 HTI(transversely isotropy with a horizontal axis of symmetry)介质展开,一般认为,HTI 是由平行排列的垂直裂隙、裂缝组成^[33],与潜山高角度缝实际发育情况相符(图 1)。

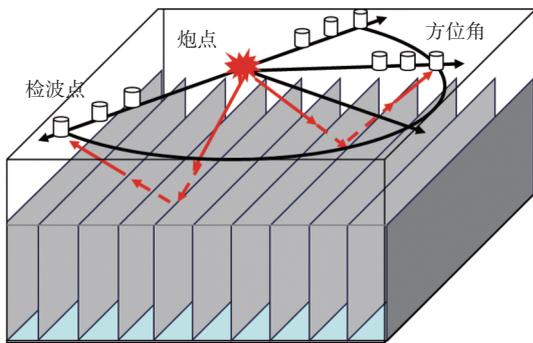


图 1 HTI 介质模型
Fig.1 HTI media model

叠前方位各向异性检测是基于纵波的一种地震检测方法,P 波反射振幅在裂缝的不同方位上具有不同的变化特征,因此,利用振幅随方位角变化(RVA)可识别裂缝的方位和强度。反射 P 波通过裂缝介质时,在固定炮检距的情况下,反射振幅(R)

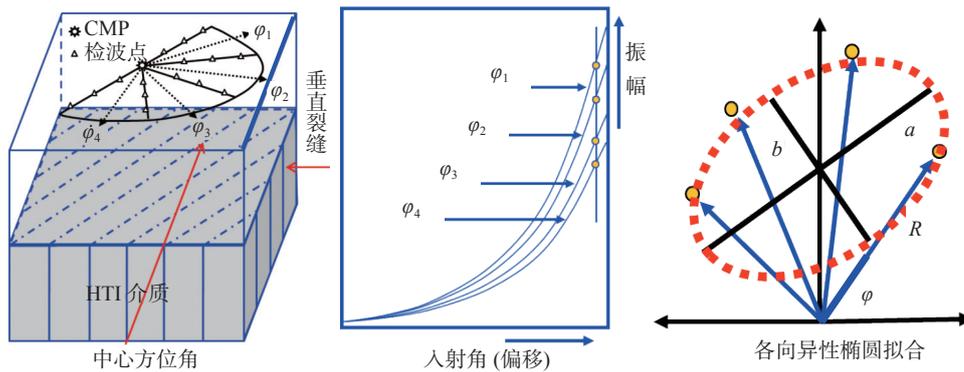


图 3 利用宽方位地震资料进行方位各向异性分析
Fig.3 Analysis azimuthal anisotropy by wide azimuth seismic data

1.2 裂缝型储层地震响应特征的数值模拟

为了研究任丘潜山雾迷山组碳酸盐岩储层裂缝地震响应,利用 R387 井的资料,制作了 7 个不同裂缝密度的正演模拟地震叠前道集记录(图 4),其

随方位角的变化是炮检方向与裂缝走向的夹角 θ 的余弦函数,反射振幅随方位角的变化可用解析式^[34]表示为:

$$R = A + B \cdot \cos 2\theta \tag{1}$$

式中: A 为与炮检距有关的偏置因子,可理解为均匀介质下的振幅;

B 为与炮检距和裂缝特征相关的调制因子,可理解为定偏移距下的振幅随方位角的变化量。

式(1)可近似用一椭圆来表示(图 2),当炮检方向平行裂缝走向时, $\theta=0^\circ$, 振幅 $R=A+B$ 最大;当炮检方向垂直裂缝走向时, $\theta=90^\circ$, 振幅 $R=A-B$ 最小。

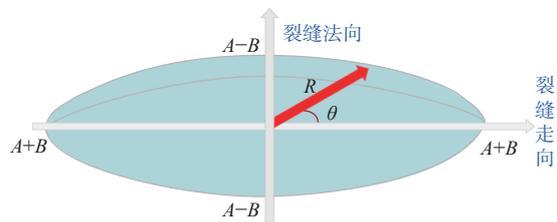


图 2 地震反射振幅随方位的变化
Fig.2 Seismic reflection amplitude variation with azimuth

利用三维地震资料宽方位角的特点,提取 3 个或 3 个以上不同方位角的地震反射振幅数据,通过椭圆拟合的手段,同时揭示其裂缝强度与方向(图 3)。图 3 中 $\varphi_i (i=1, 2, 3, 4, \dots)$ 是中心方位角, R 是由式(1)计算得到的反射振幅值,拟合得到的椭圆长轴与短轴之比 a/b , 即椭圆的扁率指示各向异性裂缝强度,该方法对开启的高角度裂缝效果尤其明显。

裂缝的体密度依次是 0、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%, 利用不同裂缝密度的不同方位角角道集正演结果,分析不同裂缝密度情况下不同方位角的地震记录随入射角的变化规律。

对 R387 井灰岩储层段,利用正演得到的叠前

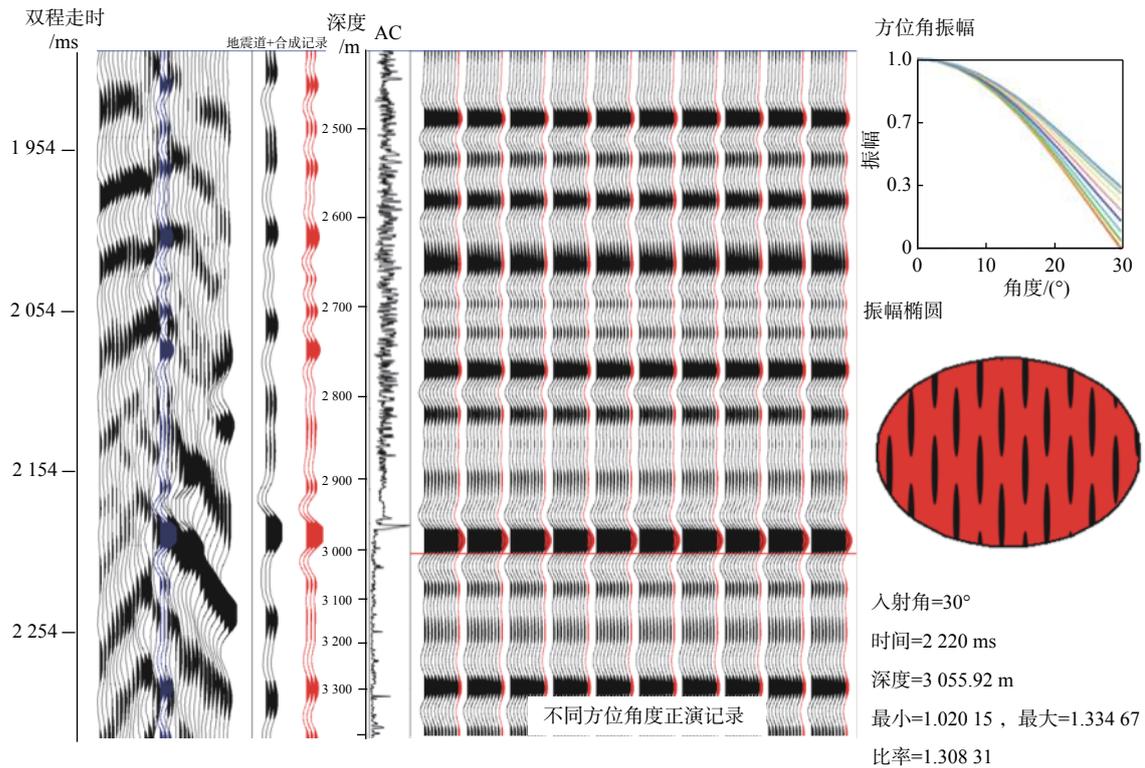


图 4 R387 井单井裂缝正演分析地震各向异性特征

Fig.4 Analysis of seismic anisotropy characteristics by single-well fracture forward modeling on Well R387

道集绘制不同方位角的 AVO 曲线, 分析不同方位角的地震反射差异, 判断裂缝对地震反射的影响。表 1 是不同入射角的地震各向异性强度统计, 不同裂缝体密度地震各向异性强度直方图上可以看出, 当裂缝体密度 < 0.5% 的情况下, 裂缝的地震各向异性强度较小; 当裂缝体密度 > 1% 后, 裂缝的地震各向异性强度迅速增大。同时, 从不同方位角的 AVO 曲线上看, 裂缝的地震各向异性强度随着入射角的增大而迅速增大, 零入射角没有地震各向异性响应, 说明裂缝对垂直入射的地震反射没有影响, 只有在存在一定入射角的情况下, 才有各向异性响应。

上述正演结果表明: ①零入射角没有地震各向异性响应, 只有大入射角、大偏移距才存在各向异

性响应, 因此, 利用地震资料做裂缝预测, 要尽量应用大偏移距资料; ②裂缝对地震反射的影响是较大的, 裂缝体密度 > 1%, 地震就存在明显的各向异性, 因此, 利用三维叠前地震 P 波资料, 可以很好地检测裂缝, 而且精度很高, 可以检测出细微的裂缝存在。

1.3 裂缝体定量刻画研究思路

本次研究主要采用叠前方位各向异性裂缝地震预测方法, 以叠前 CMP 道集为基础, 利用方位道集各向异性振幅能量差异, 实现裂缝强度预测与裂缝体三维刻画, 同时以 FMI 裂缝解释结果为标准, 对方位各向异性预测的裂缝强度体进行标定及裂缝级别确定, 并通过三维可视化自动追踪技术刻画裂缝体空间分布以及横向连通性(图 5)。

(1) 对 FMI 成像测井等资料进行分析, 分析单井纵向裂缝发育特征, 获取裂缝储层段解释参数, 如裂缝级别分类、有效孔隙度等解释数据。

(2) 分析叠前 CMP 道集的方位角和偏移距, 确定方位角划分方案, 保证各方位角道集能量均衡, 划分依据是保证每个方位角度内的平均覆盖次数级别一致。

(3) 求取不同方位角振幅、频率等对裂缝敏感

表 1 裂缝密度地震各向异性强度统计

Table 1 Seismic anisotropy intensity statistics of fracture density

裂缝密度/%	地震各向异性强度
3.0	1.017
2.5	1.013
2.0	1.009
1.5	1.006
1.0	1.003
0.5	1.001
0	1

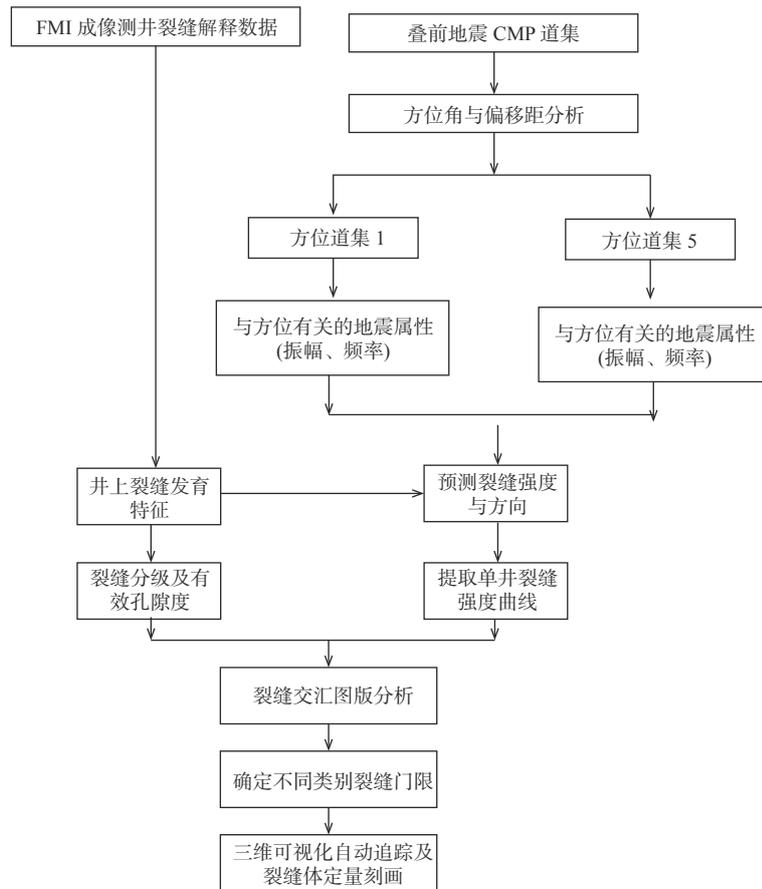


图5 裂缝体定量刻画研究思路

Fig.5 Quantitative delineation of fracture cube

的属性,进行椭圆拟合,得到预测裂缝强度体。

(4)通过单井标定,提取过单井位置的裂缝预测强度体曲线。

(5)将(4)中提取的单井裂缝属性体强度值与(1)中得到的裂缝储层解释的有效孔隙度进行交会分析,建立不同级别裂缝储层参数与裂缝强度的关系图版,获取预测裂缝不同级别裂缝的门限值范围。

(6)以裂缝强度体为基础,开展三维裂缝体自动追踪,设定(5)中获取的门限值,运用自动追踪技术开展不同级别裂缝体的自动追踪与定量刻画(定量刻画裂缝储层厚度、面积、体积参数)。

(7)通过裂缝体自动追踪可以清晰刻画裂缝体空间分布及连通性,其中,未钻遇井的孤立裂缝体是剩余油挖潜方向之一。

2 实例应用

2.1 地质概况

某碳酸盐岩潜山研究区整体形态为受 NNE

向大断层控制的单面山,地形为“北高南低、西陡东缓”,为裂缝性碳酸盐岩底水油藏。储层岩性以白云岩、泥质白云岩为主,储层裂缝发育,且从 FMI 成像测井解释结果发现,裂缝以高角度缝为主(图 6),其中,1 类裂缝储层有效孔隙度 $>4\%$,2 类裂缝储层有效孔隙度介于 $2\% \sim 4\%$,3 类裂缝储层有效孔隙度 $<2\%$ 。1 类裂缝为优质储层,这种裂缝储层物性好,产能高,是寻找油气的主要目标。早期油田按照统一油水界面,统一温度压力系统开发,但由于裂缝原因导致底水快速推进,主体开发区水淹严重,目前,整个油田平均含水率约为 96% ,主要存在问题表现在裂缝储层空间分布及连通性情况不清,严重影响了后期剩余油的挖潜,井位部署难度大。

2.2 道集校正处理

在本次研究中,三维地震资料来自华北物探公司,面积为 120 km^2 。地震数据的特点是主频约为 31 Hz ,有效频率范围约为 $6 \sim 65 \text{ Hz}$,信噪比相对较高。地震采集使用 2592 个地震道。为确保地震资

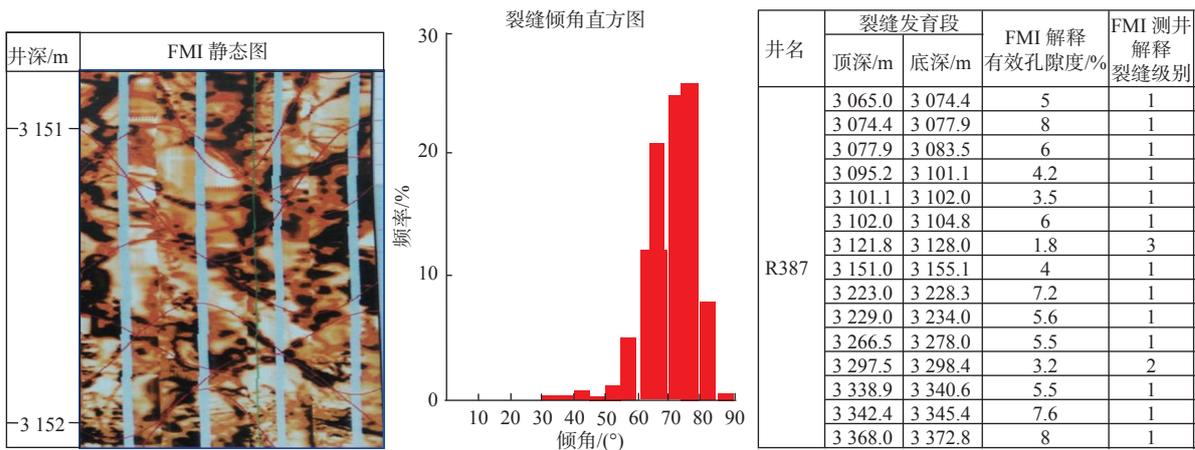


图 6 R387 井 FMI 解释成果

Fig.6 The result of Well R387 FMI interpretation

料能够不同方位角的道集抽取及各项异性识别的需要,运用多方法组合静校正、叠前综合去噪技术、地表一致性反褶积和子波整形技术、保护低频和低频成像技术、地质模型约束速度分析技术以及基于 GPU 各项异性叠前时间偏移技术对地震资料进行预处理。

2.3 叠前各项异性裂缝预测效果分析

通过观测系统分析,确定了方位角划分方案,把叠前 CMP 数据划分成 4 个方位角(表 2),各方位角内平均覆盖次数基本一致,由方位角地震剖面及频谱分析可见(图 7),不同方位角地震剖面的能量较均衡,频谱宽度和主频基本一致,满足裂缝预测条件。

表 2 方位角度划分结果统计表

Table 2 Azimuth classified statistical results

中心方位角/(°)	方位角度范围/(°)	平均覆盖次数
38	0~76	18.87
87	67~106	18.88
122	107~137	18.89
159	138~180	18.88

利用不同方位地震数据体,通过方位振幅属性计算及拟合,得到叠前各向异性裂缝预测强度剖面(图 8),受地表风化淋滤及构造运动影响,潜山顶面及断层附近裂缝非常发育,随着向下垂向渗透及淋滤作用降低,裂缝发育程度也随之减弱,预测结果符合地质规律,且从过井剖面 and FMI 成像测井解释裂缝发育程度(图 9)对比分析可知,预测裂缝强度

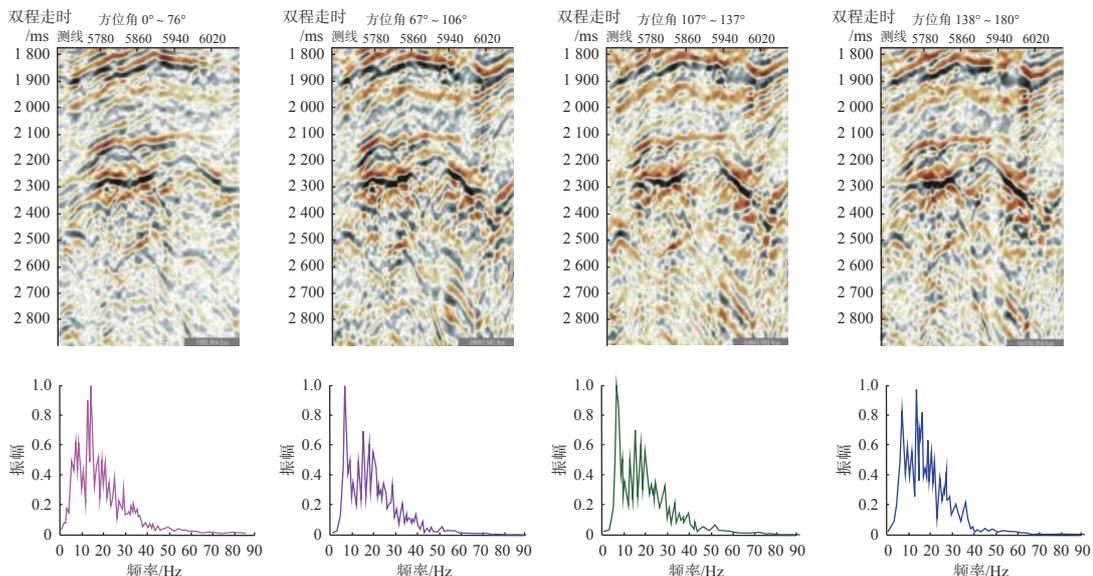


图 7 方位角道集处理成果剖面及频谱分析

Fig.7 Azimuth gather processing and frequency analysis

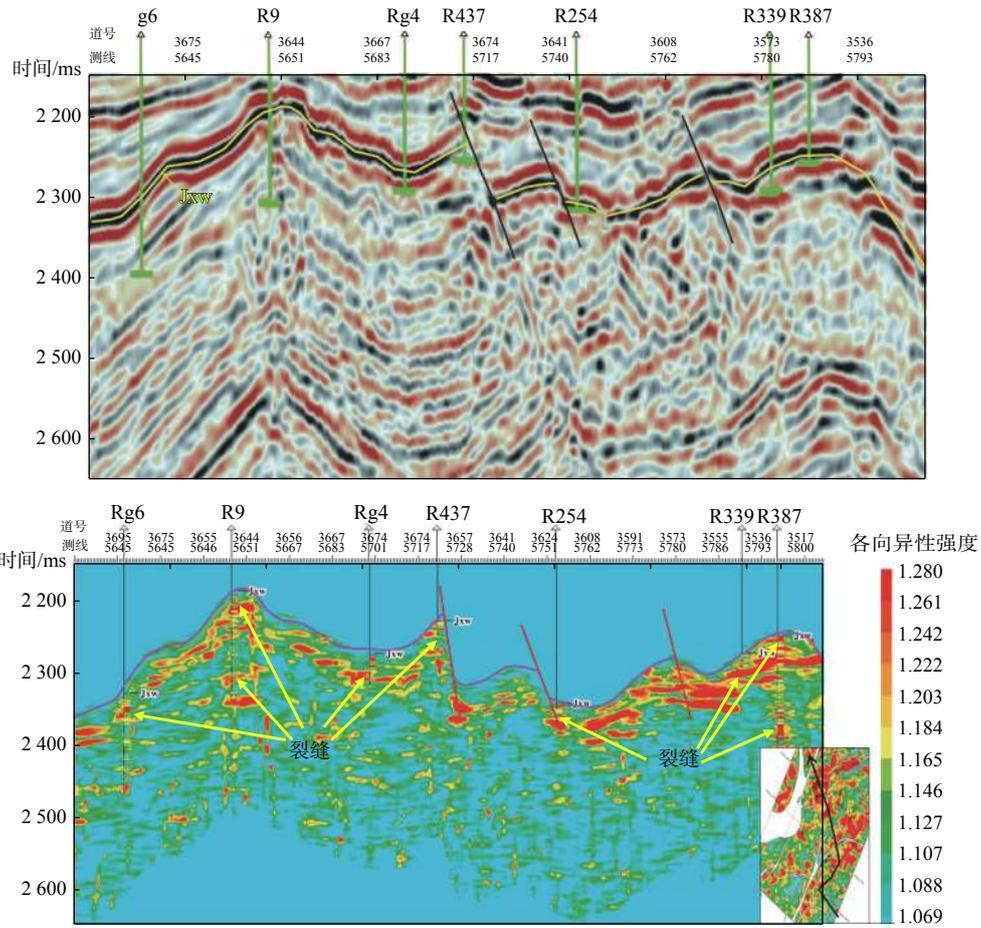


图 8 叠前各向异性裂缝检测剖面

Fig.8 Fracture profile obtained with prestack azimuthal anisotropy

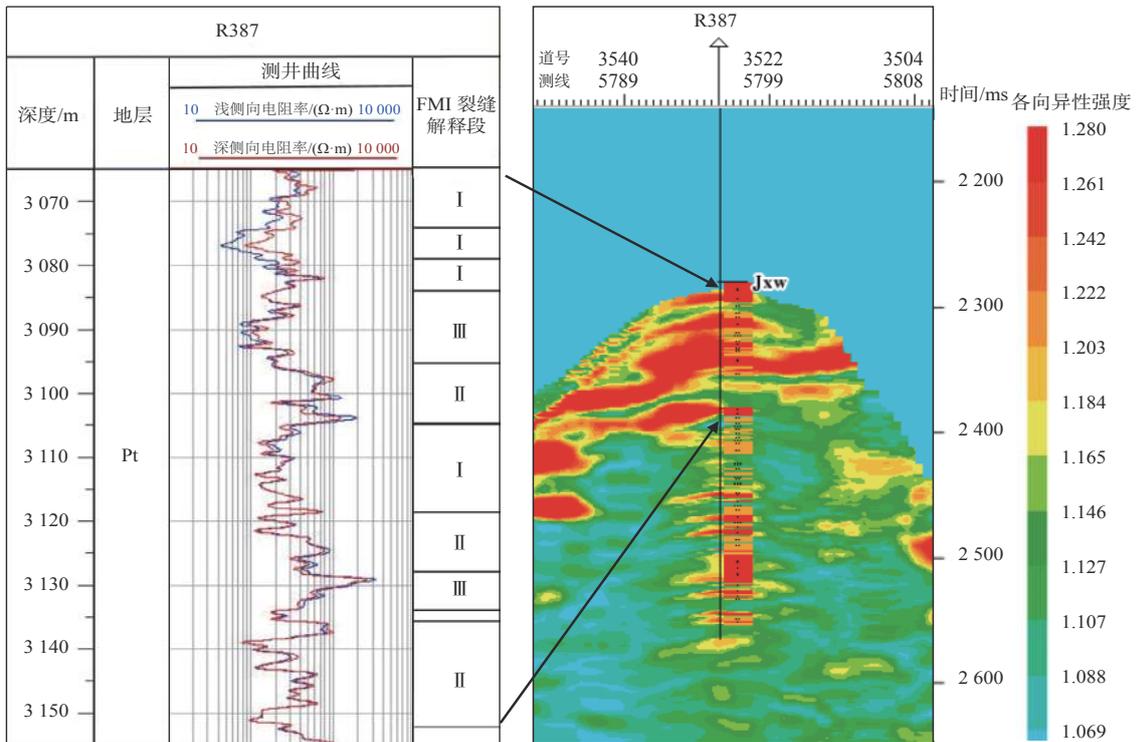


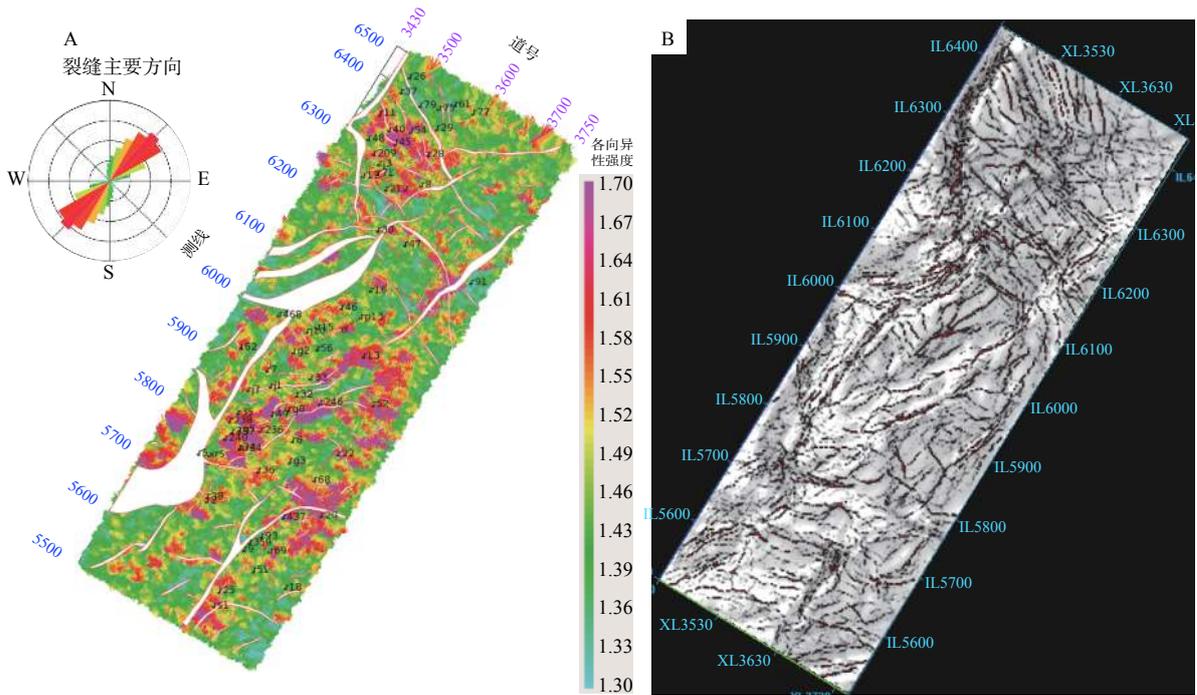
图 9 R387 井预测结果 (局部放大) 与 FMI 裂缝解释吻合

Fig.9 The result of Well R387 forecast is anastomose with the interpretation of FMI

剖面与井上裂缝解释段较吻合(剖面上井上裂缝段为 FMI 解释段)。其中,从裂缝强度剖面可看出,在潜山内幕存在一些孤立裂缝体与顶部裂缝不连通,这些孤立的裂缝体将是油藏开发中后期剩余油挖潜的重点研究对象之一。

如图 10 所示,任丘潜山缝洞储层受构造、断层

及地层控制作用较强,潜山顶部缝洞储层整体比较发育。受印支期挤压应力影响,本区发育 NW、NNE、EW 向断层。任丘潜山叠前各向异性预测结果显示裂缝方向以 NNE 及近 EW 向为主,北部有 NW 向断层发育,预测结果与地质情况更吻合。



(A)叠前各向异性预测裂缝密度与方向叠合平面图;(B)叠后属性预测裂缝平面分布

图 10 任丘潜山叠前各向异性预测裂缝密度与方向叠合平面图

Fig. 10 Prediction of fracture density and direction by prestack anisotropy in Renqiu Buried Hill

2.4 FMI 解释标定与裂缝交汇图版分析

用 R387 井 FMI 解释成果对预测裂缝强度进行标定,并提取相应过井处的裂缝强度曲线,将 FMI 测井解释成果有效孔隙度与提取的预测裂缝强度曲线值进行交会分析,建立不同级别储层参数与各向异性裂缝密度的关系图版,获取裂缝强度门限值范围。

依据 FMI 成像测井裂缝解释段的顶底深度,求取相应段的各向异性裂缝密度平均值(表 3)。按照裂缝储层级别将有效孔隙度和各向异性裂缝密度进行交会分析,交会结果显示,Ⅰ级裂缝储层的各向异性裂缝密度普遍 > 1.19 ,有效孔隙度 $> 4\%$;Ⅱ级裂缝储层各向异性裂缝密度介于 1.15 和 1.4,有效孔隙度介于 2% 和 4%(图 11)。依据交会结果,可划分出不同级别裂缝储层对应的各向异性裂缝

密度的门限值范围(表 4)。

2.5 裂缝型储集体定量刻画

根据已钻井资料整理,Ⅰ类裂缝储层物性好,产能高,为主要优质储层目标。为了搞清这种裂缝储集体分布,以叠前各向异性预测的裂缝强度数据体为介质,根据 FMI 标定与裂缝强度的门限,设定Ⅰ级裂缝储层对应的裂缝密度门限值 > 1.19 ,有效孔隙度 $> 4\%$,运用三维可视化技术开展裂缝储集体的搜索,对Ⅰ类裂缝型储集体进行立体刻画,共搜索 852 个裂缝储集体,累积总体积约为 $52.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。再利用已钻井信息中的原始油水界面(OWC)对 852 个裂缝储集体进行筛选,过滤出尚未钻探井裂缝储集体。这种裂缝储集体往往受周围致密岩性遮挡作用或随着开发程度增加,油藏压力下降、亏空,导致上覆压力增加造成一些开启裂缝闭合,形

表 3 R387 井 FMI 裂缝解释成果

Table 3 The result of FMI fracture interpret in Well R387

井名	裂缝发育段		FMI解释有效 孔隙度/%	各向异性预 测裂缝强度	FMI测井解释 裂缝级别
	顶深/m	底深/m			
	3 065.0	3 074.4	5.0	1.195	I
	3 074.4	3 077.9	8.0	1.321	I
	3 077.9	3 083.5	6.0	1.347	I
	3 095.2	3 101.1	4.2	1.280	I
	3 101.1	3 102.0	3.5	1.314	I
	3 102.0	3 104.8	6.0	1.372	III
	3 121.8	3 128.0	1.8	1.252	I
	3 151.0	3 155.1	4.0	1.396	I
	3 223.0	3 228.3	7.2	1.358	I
	3 229.0	3 234.0	5.6	1.262	I
	3 266.5	3 278.0	5.5	1.209	I
	3 297.5	3 298.4	3.2	1.195	II
	3 338.9	3 340.6	5.5	1.311	I
	3 342.4	3 345.4	7.6	1.216	I
	3 368.0	3 372.8	8.0	1.265	I
	3 414.3	3 417.4	5.5	1.156	I
R387	3 436.9	3 438.3	5.0	1.198	I
	3 438.3	3 455.4	9.0	1.215	I
	3 457.7	3 459.0	8.0	1.194	I
	3 466.3	3 468.0	4.0	1.347	I
	3 468.0	3 471.6	8.0	1.265	I
	3 473.1	3 475.0	7.0	1.210	I
	3 496.2	3 499.5	5.6	1.268	I
	3 507.3	3 509.1	2.3	1.248	II
	3 251.0	3 255.8	1.7	1.133	I
	3 256.7	3 259.7	3.8	1.142	II
	3 262.0	3 264.9	4.0	1.187	II
	3 296.2	3 297.5	2.8	1.207	II
	3 298.4	3 300.0	3.2	1.177	II
	3 316.6	3 318.3	2.0	1.180	II
	3 320.0	3 323.0	2.4	1.164	II
	3 326.5	3 328.4	2.0	1.209	III
	3 337.1	3 338.9	3.0	1.265	II
	3 294.2	3 295.2	1.6	1.199	III

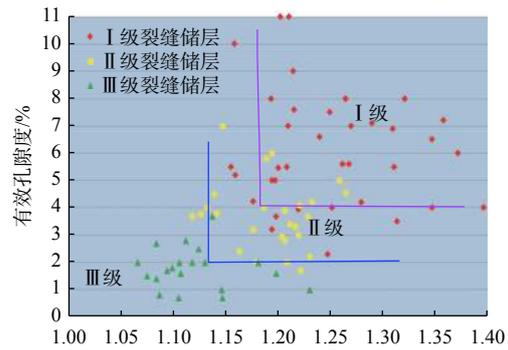


图 11 任丘潜山叠前各向异性预测裂缝密度与有效孔隙度交会图

Fig.11 Intersection figure about fracture density of prestack azimuthal anisotropy and effective porosity

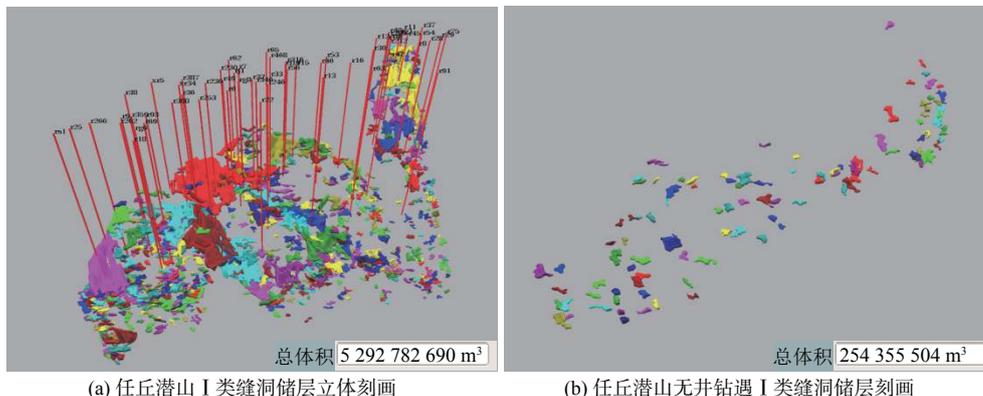
表 4 叠前各向异性裂缝密度解释成果

Table 4 Prestack anisotropic fracture density

储层分类	各项异性裂缝强度(R)	有效孔隙度(ϕ)/%
I级裂缝储层	$R > 1.19$	$\phi > 4$
II级裂缝储层	$1.15 < R \leq 1.19$	$2 < \phi \leq 4$
III级裂缝储层	$1.07 < R \leq 1.15$	$\phi \leq 2$

成孤立裂缝体,此类裂缝体与已钻井高含水区的裂缝储集体不连通。通过过滤及优选共有 75 个孤立裂缝储集体,累积总体积约为 $2.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 12)。孤立的裂缝储集体在平面上多处于断层相对少的潜山斜坡,且主要发育在距潜山面 50 m 以下。

裂缝储集体空间分布预测结果与后续 2 口检验井的验证结果吻合。W6 井为验证井之一,斜井井底刚好钻遇一个孤立裂缝体(面积 0.11 km^2 ,厚度 43 m),该井投产初期日产油 5 t,酸化后初期日产纯油 18 t,证明利用该方法在裂缝型油藏开发中后期寻找优质裂缝储层及裂缝横向连通性分析比较有效。



(a) 任丘潜山 I 类缝洞储层立体刻画

(b) 任丘潜山无井钻遇 I 类缝洞储层刻画

图 12 任丘潜山原始油水界面之上的裂缝型储集体定量刻画

Fig.12 Quantitative characterization of fractured reservoirs above the original oil-water interface in Renqiu Buried Hill

3 结论

(1)基于地震波的振幅、主频、衰减等动力学特性优于速度特性以及潜山裂缝储层多以高角度裂缝为主的基本地质情况,利用叠前地震资料提取叠前方位地震属性较叠后地震属性预测具有更大的优越性。

(2)利用三维地震资料宽方位角的特点,通过椭圆拟合结果可有效指示各项异性裂缝(高角度缝)在不同方位角上能量衰减的强度。

(3)利用FMI成像测井成果与预测裂缝强度曲线值的交汇分析,反推解释结论的有效性,建立不同级别裂缝储层对应的各向异性裂缝密度的门限值。

相较于相干体、蚂蚁算法等其他叠后方法,利用三维可视化种子点追踪技术开展裂缝体追踪,更适用于中小型裂缝,且可以寻找无井钻遇的孤立裂缝体,更有FMI成像测井成果做约束,极大程度地为有效挖潜剩余油提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 龚伟,刘军,林新,等.基于叠前频变AVO反演的碳酸盐岩缝洞储层含气性预测技术研究与应用[C]//中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集,2019:955-958.
- [2] 王震,邓光校,文欢,等.塔河油田碳酸盐岩叠前裂缝预测技术应用分析[J].*工程地球物理学报*,2018,15(1):65-72.
- [3] 刘军,任丽丹,龚伟.叠前各向异性裂缝预测技术在顺南地区碳酸盐岩领域中的应用研究[J].*工程地球物理学报*,2017,14(4):463-467.
- [4] 张志军,肖广锐,李尧.渤中19-6油田变质岩潜山内幕裂缝地震响应特征及预测技术[J].*石油地球物理勘探*,2021,56(4):845-852.
- [5] 孙夕平,张昕,李璇,等.基于叠前深度偏移的基岩潜山风化淋滤带储层预测[J].*岩性油气藏*,2021,33(1):220-228.
- [6] 孙致学,姜宝胜,肖康,等.基于新型集成学习算法的基岩潜山油藏储层裂缝开度预测算法[J].*油气地质与采收率*,2020,27(3):32-38.
- [7] 徐振旺.地震资料叠前裂缝预测技术在静北潜山的应用[J].*长江大学学报(自然科学版)*,2019,16(3):16-22.
- [8] 邓攀,陈孟晋,杨泳.分形方法对裂缝性储集层的定量预测研究和评价[J].*大庆石油地质与开发*,2006,25(2):18-20.
- [9] 周新桂,张林炎,屈雪峰,等.沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J].*石油学报*,2009,30(2):195-200.
- [10] 鞠玮,侯贵廷,冯胜斌,等.鄂尔多斯盆地庆城-合水地区延长组长63储层构造裂缝定量预测[J].*地学前缘*,2014,21(6):310-320.
- [11] 詹彦,侯贵廷,孙雄伟,等.库车坳陷东部侏罗系砂岩构造裂缝定量预测[J].*高校地质学报*,2014,20(2):294-302.
- [12] 王珂,戴俊生,王俊鹏,等.塔里木盆地克深2气田储层构造裂缝定量预测[J].*大地构造与成矿学*,2016,40(6):1123-1135.
- [13] 张继标,刘士林,戴俊生,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系储层构造裂缝定量预测[J].*地质力学学报*,2019,25(2):31-40.
- [14] 王蓓,刘向君,司马立强,等.磨溪龙王庙组碳酸盐岩储层多尺度离散裂缝建模技术及其应用[J].*岩性油气藏*,2019,31(2):124-133.
- [15] 周新桂,邓宏文,操成杰,等.储层构造裂缝定量预测研究及评价方法[J].*地球学报*,2003,24(2):79-84.
- [16] 徐会永,冯建伟,葛玉荣.致密砂岩储层构造裂缝形成机制及定量预测研究进展[J].*地质力学学报*,2013,19(4):377-384.
- [17] 周文,尹太举,张亚春,等.蚂蚁追踪技术在裂缝预测中的应用:以青西油田下沟组为例[J].*岩性油气藏*,2015,27(6):111-118.
- [18] 王建君,李井亮,李林,等.基于叠后地震数据的裂缝预测与建模:以太阳-大寨地区浅层页岩气储层为例[J].*岩性油气藏*,2020,32(5):122-132.
- [19] 周江辉,周路.地震属性裂缝预测方法及应用[J].*石化技术*,2021,28(11):130-131.
- [20] 印兴耀,马正乾,向伟,等.地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(I):裂缝储层岩石物理理论[J].*石油物探*,2022,61(2):183-204.
- [21] 石雪峰,张昊,赵才顺.基于叠前地震数据的AVAZ裂缝预测技术及应用[J].*石化技术*,2022,29(1):129-130.
- [22] 饶溯,孙福亭,汪洪强,等.基于方位各向异性理论的地震预测裂缝方法及应用综述[J].*能源与环境*,2021,43(5):152-156.
- [23] 任涛,秦军,周阳,等.利用叠前方位各向异性预测准噶尔盆地西北缘车476井区火山岩裂缝[J].*石油地质与工程*,2021,35(1):1-7.
- [24] 熊晓军,张鑫,张本健,等.裂缝融合分析的窄方位叠前裂缝预测技术[J].*石油地球物理勘探*,2021,56(5):1150-1156.
- [25] 张璐,何峰,陈晓智,等.基于倾角导向滤波控制的似然属性方法在断裂识别中的定量表征[J].*岩性油气藏*,2020,32(2):108-114.
- [26] 赵才顺,万欢,张昊,等.纵波方位各向异性正演模拟及叠前裂缝检测应用研究:以鄂尔多斯盆地致密砂岩气区为例[J].*地球物理学进展*,2019,34(1):257-265.
- [27] 姜晓宇,张研,甘利灯,等.花岗岩潜山裂缝地震预测技术[J].*石油地球物理勘探*,2020,55(3):694-704.
- [28] 丁燕,杜启振,YASIN Q,等.基于深度学习的裂缝预测在S区潜山碳酸盐岩储层中的应用[J].*石油物探*,2020,59(2):267-275.
- [29] 章惠,关达,向雪梅,等.川东北元坝东部须四段裂缝型致密砂岩储层预测[J].*岩性油气藏*,2018,30(1):133-139.
- [30] 陈彦虎,蒋龙聪,胡俊,等.页岩储层裂缝型孔隙定量预测的新方法[J].*地质科技情报*,2018,37(1):115-121.
- [31] 李娟,孙松领,陈广坡,等.海拉尔盆地浅变质岩潜山岩性控

- 储特征及储层岩性序列识别[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 26-36.
- [32] 肖小玲, 靳秀菊, 张翔, 等. 基于常规测井与电成像测井多信息融合的裂缝识别[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3): 542-547.
- [33] 陈义国, 赵谦平, 杨文博, 等. 双侧向测井裂缝孔隙模型考察与改进[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(4): 171-174.
- [34] 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.

Quantitative prediction to fractured reservoir in buried hill based on pre-stack amplitude azimuthal anisotropy

CUI Gang¹, LI Xiurong¹, WANG Jinjin², YANG Yingying¹, GUO Yuting², XIAO Xiao¹

(1 The First Oil Extraction Factory of Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China;

2 Exploration and Development Research Institute of PetroChina Huabei Oilfield, Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: Fractured carbonate reservoirs are highly heterogeneous, and the reservoir types are dominated by high-angle fractures. How to accurately characterize the spatial distribution characteristics of reservoirs in oilfield development and find remaining oil in structural highs is an urgent problem to be solved. Regarding carbonate buried hill fracture reservoir as research object, technology of quantitative prediction to delineate fracture reservoir in buried hill was applied using pre-stack azimuthal anisotropy. Different azimuth seismic amplitude attributes were used to predict fracture intensity by ellipse fitting, and then cross-plot analysis of predicted fracture intensity and interpreted single well Formation Microscanner Image(FMI) fracture were conducted to obtain fracture intensity cutoff values of fracture reservoir of different scales. Eventually, the purpose of quantitative carbonate fracture reservoir delineation can be achieved in combination with 3D visualization seed point tracking technology. Practical application shows that the method could enhance fracture reservoir exploration reliability, and the prediction was proved by drilling results.

Key words: carbonate rock; fracture-pore reservoir; pre-stack azimuthal anisotropy; fracture prediction; quantitative delineation; buried hill