

doi: 10.11720/wtyht.2020.1289

马修刚,周军,蔡文渊,等.反射波成像与纵波径向速度成像在华北油田裂缝型碳酸盐岩储层勘探开发中的联合应用[J].物探与化探,2020,44(2):271-277.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1289

Ma X G,Zhou J,Cai W Y,et al.The combined application of reflective wave imaging and P-wave velocity variation to the exploration and development of fractured carbonate reservoirs of North China Oilfield[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(2):271-277.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1289

# 反射波成像与纵波径向速度成像在华北油田 裂缝型碳酸盐岩储层勘探开发中的联合应用

马修刚<sup>1</sup>,周军<sup>1</sup>,蔡文渊<sup>2</sup>,王伟<sup>1</sup>,于伟高<sup>3</sup>,曹先军<sup>1</sup>,孙佩<sup>1</sup>

(1.中国石油集团测井有限公司技术中心,陕西 西安 710077;2.中国石油集团测井有限公司 华北分公司,河北 任丘 062550;3.中国石油天然气股份有限公司 华北油田分公司,河北 任丘 062550)

**摘要:**碳酸盐岩地层因成藏复杂,缝洞储层非均质性强、常规测井响应特征不明显,给勘探和有效开发带来较大难度。缝洞型储层有效性评价是深层油气勘探开发中面临的主要难题。对于储层中尺度较小的裂缝,由于地震的分辨率较低,常规测井方法探测深度较浅,难以对数十米地质构造进行准确评价。近年来发展起来的单井偶极横波反射成像技术能够有效利用低频横波的传播特点,对井旁 20~30 m 范围内的声反射体进行成像。纵波径向速度成像技术利用多接收阵列反演井壁 1 m 以内的纵波速度变化,能较好地指示储层的可改造性。偶极横波反射成像较好地发现井壁裂缝延伸以及井旁裂缝,纵波径向速度成像可反映井壁附近储层纵波速度变化,综合认为裂缝较发育,延伸较远或存在井旁隐蔽裂缝储层且井壁纵波径向速度变化较大的层段,具有较好的储层改造潜力。应用该方法对华北油田河西务潜山几口井进行处理分析,分析结果与储层改造后产液有较好的对应性,值得进一步推广应用。

**关键词:**裂缝型碳酸盐岩;缝洞型储层偶极横波反射;纵波径向速度;储层改造

**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)02-0271-07

## 0 引言

陆相碎屑岩沉积盆地对我国石油天然气行业作出了巨大贡献,随着国家对国内油气依存度提高,石油缺口近几年连续攀升,对一些埋藏深、断层裂缝发育、非均质性强、横向变化大等复杂的油气勘探力度进一步加大。冀中拗陷是我国潜山油气勘探的发祥地,区内潜山型油气藏为主要油气藏,占已发现油气藏储量的 55% 以上<sup>[1]</sup>。河西务潜山位于冀中廊固凹陷东部,是由河西务主断层控制的呈北东向展布的一个大型垒块山。岩性主要为白云岩、灰岩和岩溶角砾岩。灰岩和白云岩都是低孔、超低渗储层,不

经过酸化、压裂等储层改造,难以获得工业产能<sup>[2-3]</sup>。

随着碳酸盐岩油气藏的陆续发现,碳酸盐岩储层识别变得越来越重要。地震勘探横向上能探测较大尺度的地质构造,对数十米裂缝等小型地质构造以及裂缝延展特征等无法给出定量参数描述<sup>[4-6]</sup>。虽然测井技术在不断进步,由于碳酸盐岩缝洞型储层孔隙结构复杂,非均质性强,横向变化大,常规测井方法对裂缝的井外延伸情况以及井旁是否存在隐蔽型储层难以给出答案。反射波成像技术<sup>[1]</sup>通过对阵列声波或远探测声波测井中反射波信息提取处理,得到井旁缝、洞等构造反射特征,探测尺度介于地震与常规测井方法之间,该方法能评价裂缝延伸

收稿日期:2019-05-22;修回日期:2020-01-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0603600-005);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项项目(2017E-15);中国石油集团公司工程专项(2018E-2107)

作者简介:马修刚(1984-),男,高级工程师,主要从事测井数据处理方法、软件与应用研究工作。

及发现井旁隐蔽型缝洞储层<sup>[7-9,1]</sup>。反射波成像技术是基于纵、横波反射信息提取和偏移成像的处理技术,其中偶极横波反射成像利用正交偶极声波测井资料处理实现井旁缝洞成像,提供井眼外数十米范围内的裂缝走向、倾角和延伸信息,较地震成像精度更高。该技术能对早期采集的阵列声波资料进行处理应用,提高资料应用附加值,实现降本增效。纵波径向速度成像利用声波走时反演得到近井纵波速度变化剖面,提供储层及岩石脆性变化信息,结合反射波成像提供了一项能更有效指示储层可改造性的评价方法。该项技术适用于砂泥岩、碳酸盐、页岩等多种类型地层,在华北潜山碳酸盐岩油气勘探及储层改造应用,取得明显应用效果<sup>[10]</sup>。

### 1 纵波径向速度成像

Brian E 于 1992 年提出了一种利用声波折射原理,通过层析成像方法处理多接收声波测井数据,可以构建出连续深度上声波慢度二维图谱<sup>[11]</sup>。Zeroug S 等人<sup>[12]</sup> 2006 年详细阐述了要获取较好的纵波径向速度剖面,需要相对长的源距及更多的接收阵列。该方法能指示钻井后,井筒径向地层是否发生蚀变。同年,Valero H P 等人<sup>[13]</sup> 应用该技术评价地层,并结合常规、电阻率以及 MDT 等测井资料,评价径向地层变化以及引起变化的原因,为完井提供指导。

基于纵波折射的径向速度反演方法流程如图 1。当地层脆性较高时,钻井会导致井壁附近地层破碎,声波径向速度在破碎地层,会出现速度变化。由此,可通过声波径向速度变化指示储层可压裂性。

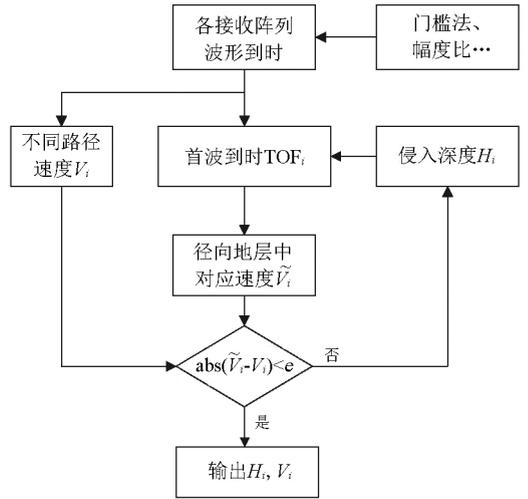


图 1 纵波径向速度反演流程

Fig.1 Inversion process of P-wave velocity variation

### 2 偶极源反射波成像技术

一方面,单极声源纵波反射波的一般主频为 10 kHz 左右,由于频率相对较高,在地层中传播时,衰减的更快,对于井旁较远处的构造,经过构造反射回来的反射波幅度几乎没有或者湮没在噪声里。另一方面,由于井筒尺寸和仪器尺寸的限制,频率很难降到更低。单极声源条件下若想获得井旁反射构造的方位信息,需要多个方位接收站独立接收,单方位声波测井数据通常包含多个接收站数据,在加上方位接收测量,数据量会成倍增加,在相同传输速率条件下,会大幅降低测井作业速度,从而提高作业风险。为此,唐晓明等<sup>[14]</sup> 提出利用正交偶极横波的新型反

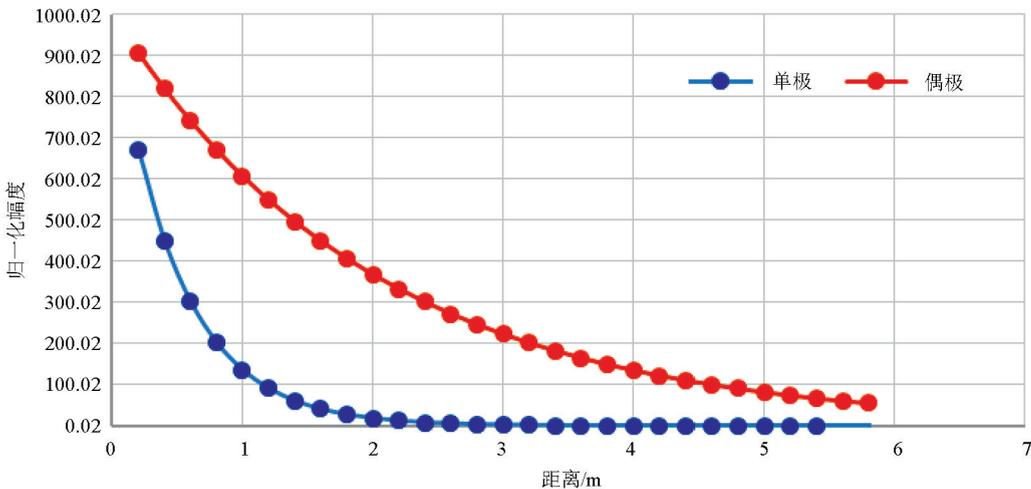


图 2 单偶极声源激发波形随传播距离衰减关系

Fig.2 Attenuation change with propagation distance of Monopole and Dipole source  
万方数据

射波成像技术。相对于单极源反射成像技术,正交偶极横波反射具有如下优势:

1) 偶极发射源由两组位于仪器轴向相同高度,互相垂直的片状陶瓷片组成,陶瓷片整体组成呈“口”字型,辐射中心频率为 2.5 kHz 的弯曲波,相对单极声源,偶极声源激发频率更低,衰减更小。故而偶极声源辐射声场具有更远的径向传播距离,能对井旁更远处的构造进行探测。

2) 分析井孔中的单、偶极声源远场辐射特征,与单极声源相比,偶极声源在垂直平面内具有更宽的角度覆盖范围,意味着有更多可能接收到来自不同方位上构造反射回来的信号。

3) 仪器测量,由于电缆的扭力,仪器会在井中旋转,结合连斜仪器记录的阵列声波仪器的 X 分量方位角,利用正交偶极四分量正交方位接收的特性,通过对比不同角度的成像构造反射能量,即可确定构造反射来自哪个方位。

### 2.1 偶极横波反射成像处理

偶极横波反射成像方法为利用正交偶极横波测井仪研究井旁地质构造建立了理论基础。本文基于该理论基础,利用 LEAD 偶极横波反射成像处理软件中多方位成像处理与构造解释等特色处理解释模块进行了应用。

### 2.2 多方位成像处理

多方位成像包括方位合成、直达波压振、反射波

提取、上下行波合成等步骤。多方位合成基于水平偏振的横波(SH波)计算方程:结合仪器记录的正北方位即可计算特定方位的反射波能量:

$$SH = xx \cdot \cos^2\varphi - (xy + yx) \cdot \sin\varphi \cos\varphi + yy \cdot \sin^2\varphi$$

其中:xx、yy 表示同向分量波形,xy、yx 表示交叉分离波形,φ 表示成像方位与 xx 同向分量夹角。

反射波提取采用中值滤波、偏移叠加等多种信号处理方法将反射波从包含直达波的全波波列中分离出来,根据不同的同向轴,分离得到上行、下行反射波,同时基于给出的标定井段实现直达波头波抑制,减少直达波的震荡周期提高反射波信噪比<sup>[15]</sup>。上下行波合成后,偏移成像在频率—波数域对数据进行偏移处理,再通过二维傅里叶反变换将偏移后的反射体位置映射到空间域上,将时间域成像结果转换到深度域,反映构造的径向位置。

### 2.3 构造解释

构造解释工具提供深度成像过井轴切片和井周成像垂直井周切片联合分析功能,过井轴切片提供特定方位成像图,通过该视图能确定构造所在的深度范围;结合垂直于井轴切片,提供轴向不同径向深度能量分布,通过该视图能确定反射波能量最强方位,从而确定构造倾向。结合交互分析功能,对构造成像轨迹进行勾画,提取构造的延伸长度、倾角、倾向等产状参数(图 3)。结合井眼轨迹数据,能在三维空间展示构造在井周的分布。

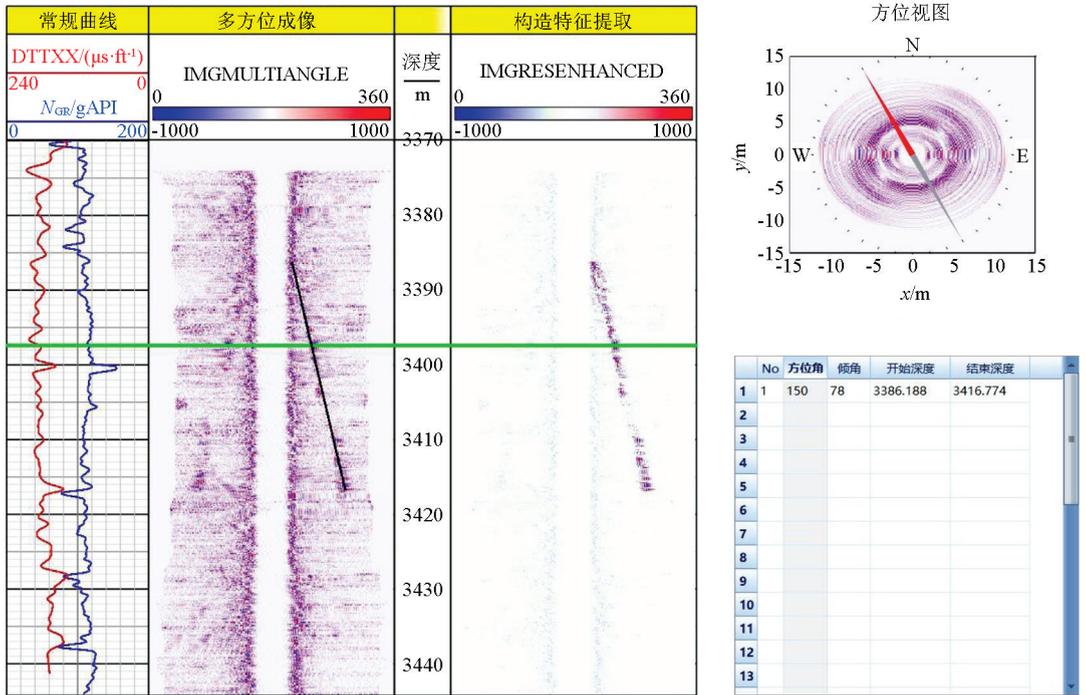


图 3 反射构造特征提取

### 3 应用实例

华北油田河西务潜山成藏条件复杂,储层非均质性强、横向变化较大,区域裂缝分布及走向不清晰,勘探开发难度大。其中 AT1X 井,第 1 次完钻测井底深度 5 100 m,利用偶极横波反射成像技术发现 5 100 m 附近裂缝向下仍有延伸,综合斯通利波反射及微电成像裂缝显示,5 100 m 深度附近储层裂缝均比较发育。综合其他录井气层等信息后加深 300 m 后二次完井,再次应用偶极横波反射成像处理,5

100 m 处两组不同倾角的裂缝组向下延伸 40 多米,发现井旁存在大量裂缝组。

针对完井阵列声波测井数据,进行纵波径向速度成像处理,显示井壁附近均存在纵波速度变化,说明钻井过程导致井壁岩层破碎,指示储层脆性较好<sup>[16]</sup>,有利于储层改造。5 065.2~5 203 m,酸化压裂后日产气 40.9 万 m<sup>3</sup>,日产油 71 m<sup>3</sup>(图 4),截至 2017 年 6 月,累计产气 1 993 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,产油 6 807.47 m<sup>3</sup>。

图 5 中第五道为纵波径向速度成像,颜色接近红色的标示纵波速度变化大,接近蓝色标示纵波速

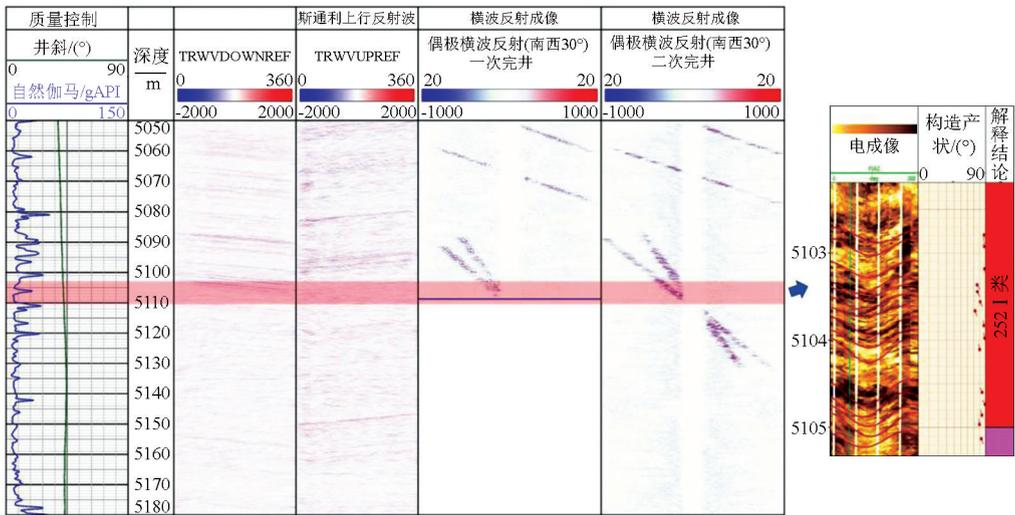


图 4 AT1X 一次完井与二次完井井偶极横波反射成像对比

Fig.4 Contrast of dipole shear wave reflection imaging between first run and the second of well AT1X

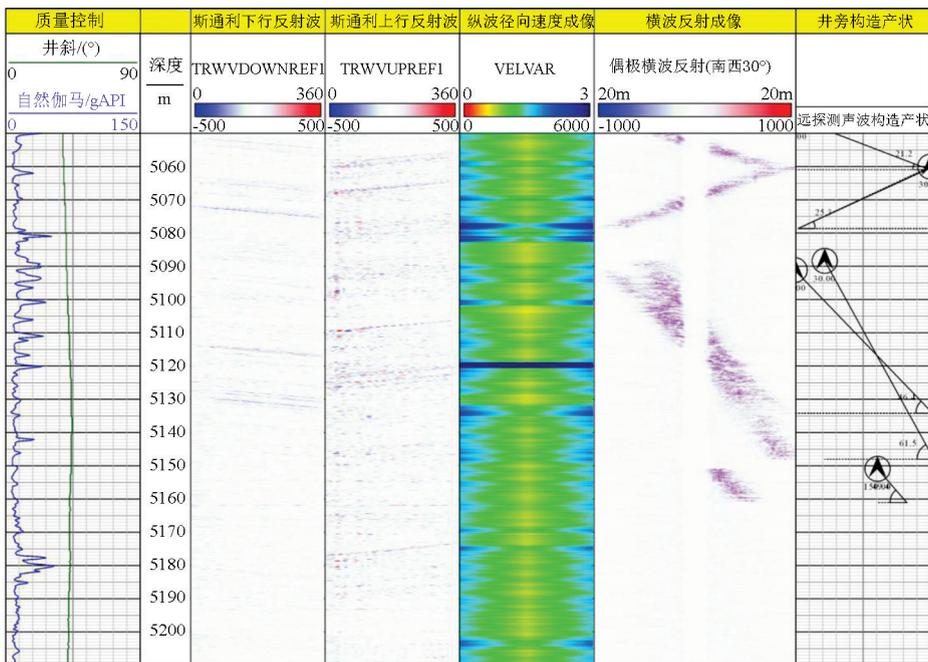


图 5 AT1X 井 2 次完井偶极横波反射与纵波径向速度成像综合图

万方数据 Fig.5 Reflective wave imaging and P-wave velocity variation result of well AT1X

度变化小。第六道为偶极横波提取井旁构造产状信息,黑线标示裂缝轨迹,与水平线夹角标示构造倾角,圆圈中主箭头指示构造的方位。

应用该方法对河西务潜山后续3口井处理分析(图6,图7):相对AT1X井,井外裂缝发育程度相对较弱,且纵波径向速度成像指示井壁可改造性也相

对差。

处理分析4口井分别试油产液及综合偶极横波反射成像与纵波径向速度成像处理分析结论情况如表1。根据试油统计,产液数据与处理结论有较好的对应性,井旁裂缝发育且可改造性较强的储层,获得了较好的产液。

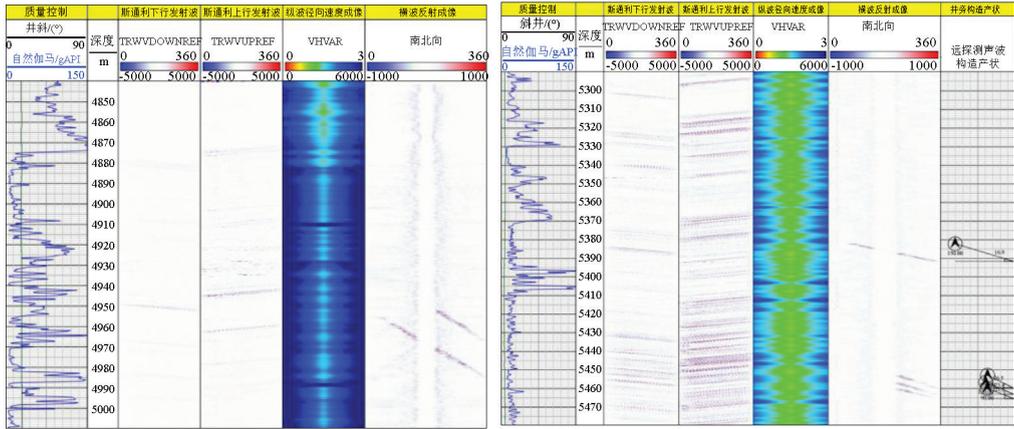


图6 AT2X(左)、AT3井(右)偶极横波反射与纵波径向速度成像综合图

Fig.6 Reflective wave imaging and P-wave velocity variation result of well AT2X and AT3

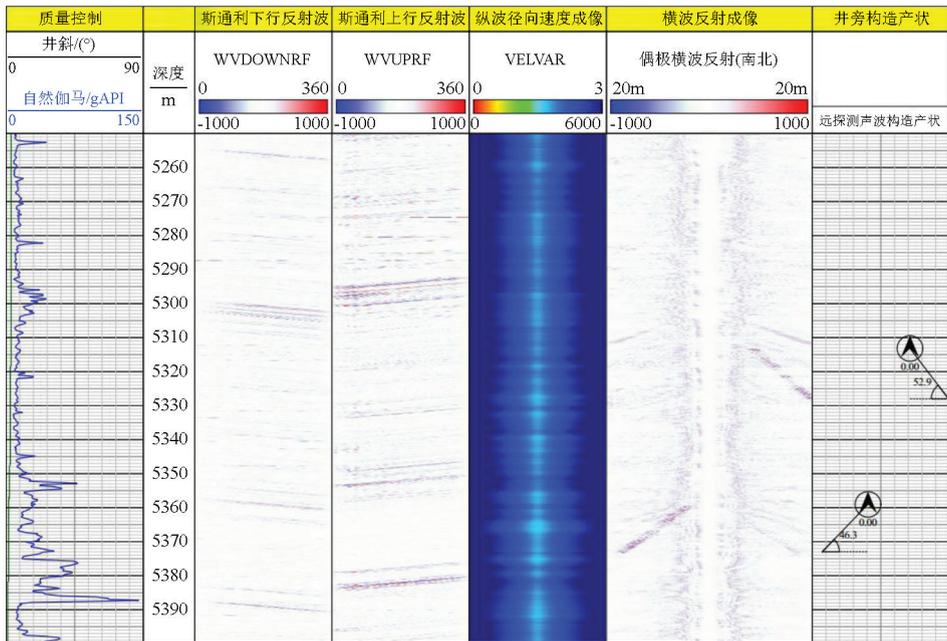


图7 AT4X井偶极横波反射与纵波径向速度成像综合图

Fig.7 Reflective wave imaging and P-wave velocity variation result of well AT4X

表1 处理结论及试油数据

Table 1 Logging interpretation conclusion and oil test data

井号	井段/m	试油方式	日产油/t	日产气/m <sup>3</sup>	井旁裂缝/组	储层可改造性
AT1X	5065.2~5203	酸压	71.16	408900	5	强
AT2X	5287.4~5440.4	常规试油	11.01	31180	2	中等
AT3	5298.6~5458.4	压裂	35.04	502660	4	强
AT4X	5277.8~5392	酸压		98360	2	弱

## 4 结论

1) 偶极横波反射成像具有井旁 10 m 以外裂缝、断层等构造探测能力,通过产状解释能获取裂缝的井外延展定量参数。结合微电阻率成像测井结果,可在井壁裂缝准确定量描述的基础上,扩展裂缝在三维空间的延展信息,更全面地评价非均质性储层有效性。

2) 径向速度成像能指示井筒近井储层改造潜力,再结合横波反射成像反映的井旁储层信息,能有效提高储层勘探开发效果。

3) 偶极横波反射成像技术能利用已经采集的老的阵列声波测井数据,发现传统测井方法不能发现的井旁隐蔽储层,结合声波径向速度成像提供的储层可改造性,提高单井利用率,为已经关停或没有产量井提供再度产生工业开发价值的可能。

## 参考文献 (References):

- [1] 劳海港.冀中坳陷潜山类型及其演化特征研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.  
Lao H G.Research on the type and evolution feature of buried Hill in Jizhong depression[D].Qingdao:China University of Petroleum (East China),2010.
- [2] 朱姜炜.冀中坳陷典型潜山裂缝发育规律研究[D].北京:中国石油大学(北京),2013.  
Zhu J W.The study on fracture development rule of the typical buried-hills in the Jizhong depression[D].Beijing:China University of Petroleum(East China),2013.
- [3] 杜金虎,何海清,赵贤正,等.渤海湾盆地廊固凹陷杨税务超深超高温奥陶系潜山油气勘探重大突破实践与启示[J].中国石油勘探,2017,22(2):4-8.  
Du J H,He H Q,Zhao X Z,et al.Significant exploration breakthrough in Yangshuiwu ultra-deep and ultra-high temperature Ordovician buried-hill in Langgu sag,Bohai Bay Basin[J].China Petroleum Exploration,2017,22(2):4-8.
- [4] 马修刚,周军,余春昊,等.利用偶极横波反射成像评价缝洞储层有效性[J].测井技术,2018,42(1):85.  
Ma X G,Zhou J,Yu C H,et al.Effectiveness evaluation of cave-fractured reservoir based on dipole shear wave imaging[J].Well Logging Technology,2018,42(1):85.
- [5] 田瀚,杨敏.碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J].物探与化探,2015,39(3):545-546.  
Tian H,Yang M.The logging evaluation methods for fractured-vuggy carbonate reservoirs[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(3):545-546.

- [6] 肖承文,王贵清,吴兴能,等.基于反射波的碳酸盐岩储集层测井评价技术[J].天然气工业,2013,33(6):29-30.  
Xiao C W,Wang G Q,Wu X N,et al.Logging evaluation of carbonate reservoir based on reflected waves[J].Natural Gas Industry,2013,33(6):29-30.
- [7] Hornby B E.Imaging near-borehole of formation structure using full-waveform sonic data [J].Geophysics,1989,54(6):747-757.
- [8] 张承森,肖承文,刘兴礼,等.远探测声波测井在缝洞型碳酸盐岩储集层评价中的应用[J].新疆石油地质,2011,32(3):325-326.  
Zhang C S,Xiao C W,Liu X L,et al.Application of remote detection acoustic reflection logging to fractured-vuggy carbonate reservoir evaluation[J].Xinjiang Petroleum Geology,2011,32(3):325-326.
- [9] 范文同,刘冬妮,程红伟,等.远探测声波技术在碳酸盐岩储层改造中的应用[J].工程地球物理学报,2016,13(6):701-702.  
Fan W T,Liu D N,Cheng H W,et al.The application of remote detection acoustic wave technique to carbonate reservoir reconstruction[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2016,13(6):701-702.
- [10] 钱玉萍,王文文,侯振学,等.纵波走时层析成像技术在非常规储层压裂评价中的应用[J].测井技术,2018,42(4):427-428.  
Qian Y P,Wang W W,Hou Z X,et al.Application of compressional wave velocity tomographic reconstruction on fracturing evaluation of unconventional reservoir [J].Well Logging Technology,2018,42(4):427-428.
- [11] Brian E,Hornby B.Tomographic reconstruction of near-borehole slowness using refracted borehole sonic arrival[J].Geophysics,1993,58(12):1726-1728.
- [12] Zeroug S,Valero H P,Bose S,et al.Monopole radial profiling of compressional slowness[C]//New Orleans:SEG,2006.
- [13] Valero H P,Sinha B,Vissapragada B.Radial profilings Integration for optimal well completion design[C]//New Orleans:SEG,2006.
- [14] Tang X M.Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement[J].Geophysics,2004,69(6):1378-1379.
- [15] 韩炜,周军,马修刚,等.一种井旁构造反射波与井壁直达波的分方法[P].中国专利,ZL201510680914.1,2018-06-01.  
Han W,Zhou J,Ma X G,et al.A method for separating reflected waves from direct waves of wellbore structure from slide wave.[P].Chinese Patent,ZL201510680914.1,2018-06-01.
- [16] 唐晓明,许松,庄春喜,等.基于弹性波速径向变化的岩石脆裂性定量评价[J].石油勘探与开发,2016,43(3):420-422.  
Tang X M,Xu S,Zhuang C X,et al.Quantitative evaluation of rock brittleness and fracability based on elastic-wave velocity variation around borehole [J].Petroleum Exploration and Development,2016,43(3):420-422.

## The combined application of reflective wave imaging and P-wave velocity variation to the exploration and development of fractured carbonate reservoirs of North China Oilfield

MA Xiu-Gang<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, CAI Wen-Yuan<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, YU Wei-Gao<sup>3</sup>, CAO Xian-Jun<sup>1</sup>, SUN Pei<sup>1</sup>

(1. Technology Center, China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an 710077, China; 2. North China Branch, China Petroleum Logging Co. Ltd., Renqiu 062550, China; 3. North China Oilfield Branch, China Petroleum and Natural Gas Co. Ltd., Renqiu 062550, China)

**Abstract:** Because of complex reservoir forming conditions, strong heterogeneity and indistinct regularity of conventional logging response, it's difficult to conduct exploration effectively in the carbonate reservoir. The effectiveness evaluation of fractured reservoir is the main problem in the exploration and development of deep oil and gas. Seismic survey is limited to identifying small scale fractures or faults because of low resolution, and it is difficult for conventional logging method to accurately evaluate the geological characteristics because of the shallow investigation depth. The dipole shear wave imaging technique has been developed in recent years, which can image borehole acoustic reflectors within the range of 20~30m based on low frequency of dipole shear wave. Monopole radial profiling of compressional slowness can be used to retrieve P-wave velocity variation in well bore within 1m, which can indicate the reversibility of the reservoir. The dipole shear wave imaging is a good way for finding the extension of the wellbore fractures and the concealed fractures near the well, and monopole radial profiling of compressional slowness can reflect the change of P-wave velocity near the wellbore. In a comprehensive way, the reservoir with such characteristics as well developed fractures, long extension of fractures or existence of concealed fractures near the well bore and remarkable variation of compressional slowness indicates great potential for reservoir reconstruction. This method was applied to processing several wells in Hexiwu Qianshan in Huabei Oilfield, and the results correspond well with the results of liquid production after the reservoir reconstruction, and hence the method is worthy of further popularization and application.

**Key words:** fractured carbonate; carbonate reservoir dipole shear wave reflection; P-wave velocity variation; reservoir reconstruction

(本文编辑:叶佩)