

文章编号:1009-9603(2019)03-0063-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.03.008

# 阵列声波测井在储层裂缝识别中的应用

——以鄂尔多斯盆地K区为例

韩刚<sup>1</sup>,何峰<sup>1</sup>,张孝珍<sup>2</sup>,王立华<sup>2</sup>,祝彦贺<sup>1</sup>,雷克辉<sup>2</sup>

(1.中海石油(中国)有限公司北京研究中心,北京 100027; 2.北京博达瑞恒科技有限公司,北京 100094)

**摘要:**充满流体的裂缝其声阻抗与岩石声阻抗具有显著区别,当声波通过裂缝时,必然引起声波的能量衰减。为有效识别致密砂岩气藏单井裂缝发育段,首先利用鄂尔多斯盆地K区EXDT全波列数据经过一系列处理得到阵列声波幅度衰减曲线,然后应用岩心分析、薄片鉴定、微电阻率成像资料标定阵列声波幅度衰减曲线,明确了裂缝发育段的声波幅度衰减明显增大的响应特征,确定了裂缝发育段阵列声波幅度衰减曲线的界限值:纵波幅度衰减曲线值大于12.5 db/m、横波幅度衰减曲线值大于13 db/m、斯通利波幅度衰减曲线值大于5.6 db/m,较好地实现了单井裂缝段的识别。鄂尔多斯盆地K区实例井分析表明,千5、盒2、盒4和盒6段对应的阵列声波幅度衰减大,裂缝较为发育,是研究区的主力产层。裂缝较大地改善了致密砂岩储层的渗透率,对产能起到了积极贡献,因此单井裂缝发育段的准确划分对于射孔开发具有指导意义。

**关键词:**致密储层;裂缝识别;阵列声波;声波幅度衰减曲线;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Application of array acoustic logging to fracture identification: A case study of Area K in Ordos Basin

HAN Gang<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xiaozhen<sup>2</sup>, WANG Lihua<sup>2</sup>, ZHU Yanhe<sup>1</sup>, LEI Kehui<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Center of CNOOC(China) Co., Ltd., Beijing City, 100027, China;

2. PST Service Corp., Beijing City, 100094, China)

**Abstract:** The acoustic impedance of fluid-filled fractures has a significant difference with that of rocks. The energy of the sound wave decays when the acoustic wave passes the fractures. In order to effectively identify the single-well fracture sections in tight sandstone gas reservoirs, based on the EXDT full wave processing data in Area K of Ordos Basin, the array acoustic wave amplitude attenuation features were analyzed and calibrated by the core analysis, thin slice observation and micro-resistivity imaging data. The response characteristics of the increment of the acoustic amplitude attenuation values were clarified, and the cutoff values were determined as: the compressional amplitude attenuation value is more than 12.5 db/m, the shear amplitude attenuation value is more than 13 db/m, and the Stoneley wave amplitude attenuation value is more than 5.6 db/m. As a result, the identification of single-well fracture sections was well achieved. The case analysis of Area K in Ordos Basin shows that the fractures in Layer Qian5, He2, He4 and He6 relatively develop corresponding to a significant amplitude attenuation of array acoustic wave, and have a good correspondence with the main producing interval. The fractures improve the permeability of tight sandstone reservoirs obviously and contribute positively to reservoirs productivity. Therefore the accurate identification of the single-well fracture section has a guiding significance for the perforation.

**Key words:** tight reservoir; fracture identification; array acoustic waves; amplitude attenuation curve; Ordos Basin

单井裂缝发育段的识别是实现后续裂缝研究的数据基础,也是决定裂缝预测精度的支撑资料。

裂缝识别的方法较多,包括岩心分析、薄片鉴定、常规测井(声波、中子、密度及电阻率测井),以及特殊

收稿日期:2019-03-12。

作者简介:韩刚(1983—),男,山西太原人,工程师,硕士,从事油气勘探开发研究工作。联系电话:(010)84526455, E-mail:hangang@cnooc.com.cn。

测井(微电阻率成像测井及阵列声波测井)等<sup>[1-5]</sup>。其中岩心分析和薄片鉴定最直观可靠,但取心资料往往少且不连续,不利于认识全区整个目的层段的裂缝发育规律;常规测井经济实用且系列齐全,但其探测深度浅,纵向分辨率低,特别是当储层以孔隙为主,且孔隙对测井曲线的响应远大于裂缝对测井曲线的贡献时,裂缝的响应信息易被掩盖,用常规测井曲线很难达到精准识别裂缝的目的。微电阻率成像测井具有高分辨率且连续测量的特征,能够直观地反映裂缝信息,但由于测量成本高昂,资料往往有限<sup>[6-8]</sup>。

目前中外针对阵列声波测井在裂缝测井识别中的应用已进行了大量的研究,朱留方研究了交叉偶极子阵列声波测井在裂缝性碳酸盐岩储层评价中的应用<sup>[9]</sup>,陈英阐述了利用多极子阵列声波测井识别裂缝的方法<sup>[10]</sup>,唐军等进行了阵列声波测井技术在识别碳酸盐岩储层类型中的应用研究<sup>[11]</sup>,尹帅等利用阵列声波测井资料对海陆过渡相碎屑岩地层单井裂缝发育段进行定量识别<sup>[12]</sup>,前人的应用研究多集中在裂缝相对发育的碳酸盐岩地层和特低孔碎屑岩储层。鄂尔多斯盆地K区为致密砂岩储层,孔隙度为4%~12%,裂缝仅少量发育,一般成像测井见1~3条裂缝,常规测井对裂缝发育段无明显响应特征,且目的层段受煤层、泥岩垮塌的影响,裂缝识别多解性强。

通常充满流体的裂缝其声阻抗显著区别于岩石声阻抗,当声波通过裂缝时,必然引起声波能量的衰减。为此,利用阵列声波处理后的能量幅度衰减信息,与岩心、薄片、常规测井资料及微电阻率成像测井资料相互对比标定,去伪存真,实现了致密砂岩储层裂缝发育段的识别,以期为类似地区裂缝识别提供借鉴。

## 1 区域地质概况

K区位于鄂尔多斯盆地东缘,构造上处于晋西挤压构造褶皱变形带,是发育在上古生界煤系烃源岩层上的大型致密砂岩气藏<sup>[13]</sup>。研究区上古生界自下而上发育本溪组、太原组(包含太1—太2段)、山西组(包含山1—山2段)、石盒子组(包含盒1—盒8段)和石千峰组(包含千1—千4段)。石盒子组储层孔隙度主要为4%~12%,其储集空间类型多样,主要包括粒间溶孔和溶蚀颗粒孔,发育少量裂缝。部分岩心及成像测井资料裂缝特征分析表明,研究区存在压溶缝、溶蚀缝、构造缝等多种成因缝,以构

造缝为主(图1)。研究区低幅度褶皱和断裂主要受燕山期、喜马拉雅期构造运动和早白垩世紫金山地区火山侵入抬升的影响<sup>[14-15]</sup>。

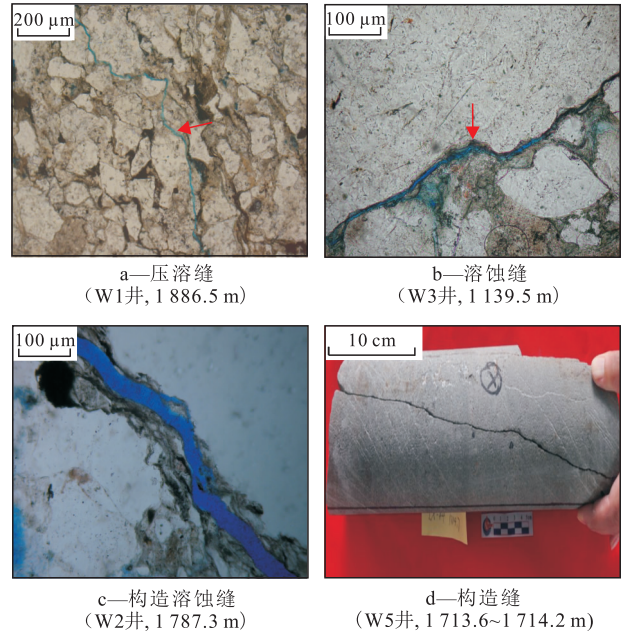


图1 鄂尔多斯盆地K区岩心及薄片裂缝特征

Fig.1 Fracture characteristics of core and thin section in Area K of Ordos Basin

## 2 基于阵列声波的裂缝发育段识别方法

中海油田服务股份有限公司自行研制的交叉偶极阵列声波测井仪EXDT具有8个阵列宽带接收器、1个近单极发射器、2个正交偶极发射器和1个远单极发射器,接收器阵列对传播波场可进行广泛的空间采样,发射器和接收器阵列的排列可测得较深地层处声波传播的信息。利用每个深度点记录的单极源波形和偶极源波形,可分别提取纵波、横波和斯通利波相关信息<sup>[16-19]</sup>。随后利用岩心薄片及微电阻率成像刻度对比阵列声波处理成果曲线,分析阵列声波测井的裂缝响应特征,用于单井裂缝发育段的识别。

### 2.1 阵列声波测井处理

EXDT测井仪接收的信号包括纵波、横波和斯通利波等。纵波以液体压缩波形式从发射器传播到地层,在井壁产生折射后以地层的纵波速度沿井壁传播,并以液体压缩波的形式传到接收器。横波速度低于纵波,所以到达接收器的时间晚于纵波,但横波不能在软地层中传播,仪器接收到的是偶极子发射器产生的沿井壁传播的挠曲波,挠曲波是一种频散界面波,在低频时以横波速度传播。继横波

之后到达的斯通利波以井内液体压缩波的形式从发射器直接传到接收器<sup>[20-21]</sup>。井中传播的这些波的总和构成了井下声波的全波列(图2)。

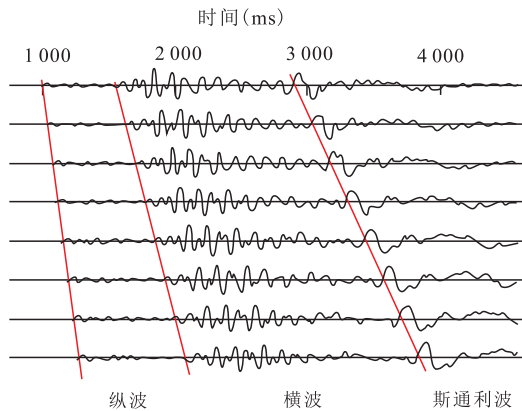


图2 声波全波列波形图

Fig.2 Diagram of acoustic full waveform

针对 EXDT 测井得到的全波列数据,利用 EGPS 软件的阵列声波模块完成阵列声波的处理,主要包括地层纵波、横波和斯通利波的提取及时差计算、到时计算、幅度曲线计算、衰减曲线计算等,处理流程见图3所示。

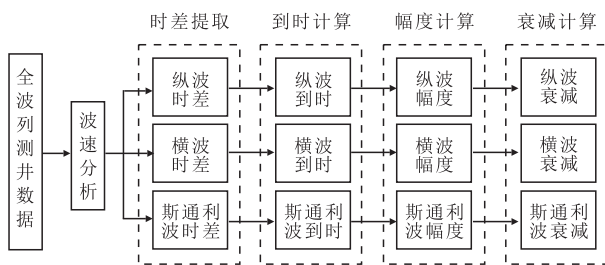
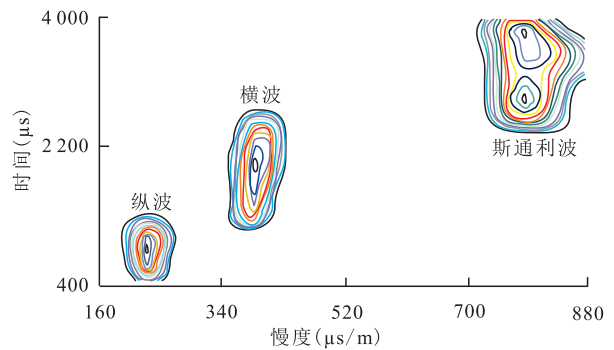


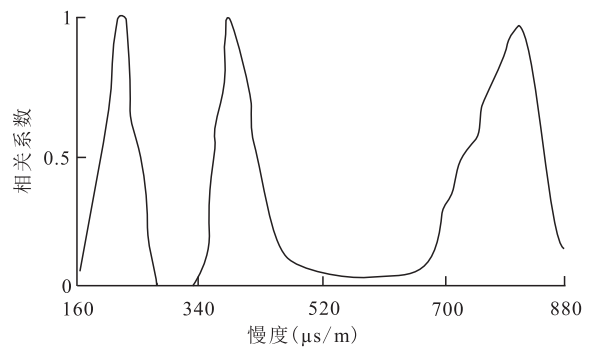
图3 阵列声波测井处理流程

Fig.3 Array acoustic logging processing flow chart

在全波列图像上正确区分和提取纵波、横波及斯通利波是幅度衰减曲线精确计算的基本保证。区分纵波和横波,主要根据幅度、相位及到达时间,其区别在于:①横波幅度大于纵波幅度;②在声波全波列图上,纵波和横波首波相位是相反的,即相位相差180°;③一般横波首波比纵波首波滞后5—8个周期。斯通利波是用低频脉冲激励单极发射器发射时产生的,到达时间更晚,频率较低。基于这3种波的特性,对每个深度点的全波列数据设置合理的起始时间、处理窗长和频率范围,采用时间慢度相关法得到每个深度下的时间慢度相关图(图4a),然后将其投影在时间慢度轴坐标,3个峰值对应的慢度值即分别为该深度点的纵波、横波及斯通利波时差(图4b)。随后计算每个接收器接收到的每种波的到达时间,然后对其进行精确开窗,完成每种波的幅度和衰减曲线计算。



a—时间和慢度关系



b—慢度投影曲线

图4 纵波、横波和斯通利波时差提取方法

Fig.4 Extraction method for P-wave, S-wave and Stoneley-wave

### 2.2 裂缝发育段阵列声波响应特征

纵波、横波、斯通利波幅度衰减曲线及斯通利波在变密度图上的干涉条纹是指示裂缝的良好标志。但幅度衰减曲线及干涉条纹对扩径及煤层极为敏感,为有效识别裂缝发育段,需与常规测井及电阻率成像相互对比,区分不同地质信息的测井响应特征差异,提取反映裂缝发育段的有用信息。

**扩径段特征** 自然伽马(*GR*)高值为研究区典型的泥岩标志,其对应的波形曲线(*WV01*)有明显的干涉条纹,纵波幅度衰减曲线(*ATTNC*)、横波幅度衰减曲线(*ATTNS*)及斯通利波幅度衰减曲线(*ATTNST*)明显高值异常。但其对应井径曲线(*CAL*)明显增大(图5)。1 701~1 712 m为扩径的泥岩段,并非裂缝发育段。

**煤层特征** *GR*相对低值,中子孔隙度(*CNCF*)和声波时差(*DTC*)急剧增大,对应的密度(*ZDEN*)急剧减小,为目标区典型的煤层测井特征,*WV01*干涉条纹明显,*ATTNC*,*ATTNS*及*ATTNST*明显高值异常,微电阻率成像测井无明显的裂缝正弦特征(图6)。1 941~1 946 m为煤层,阵列声波的一系列响应特征均为煤层影响导致,并非裂缝发育段。

**裂缝发育段特征** *GR*相对低值,*CNCF*均值为0.09 v/v,*DTC*均值为223  $\mu\text{s}/\text{m}$ ,*ZDEN*均值为2.52  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,为目标区典型的砂岩测井特征,*WV01*有干涉条

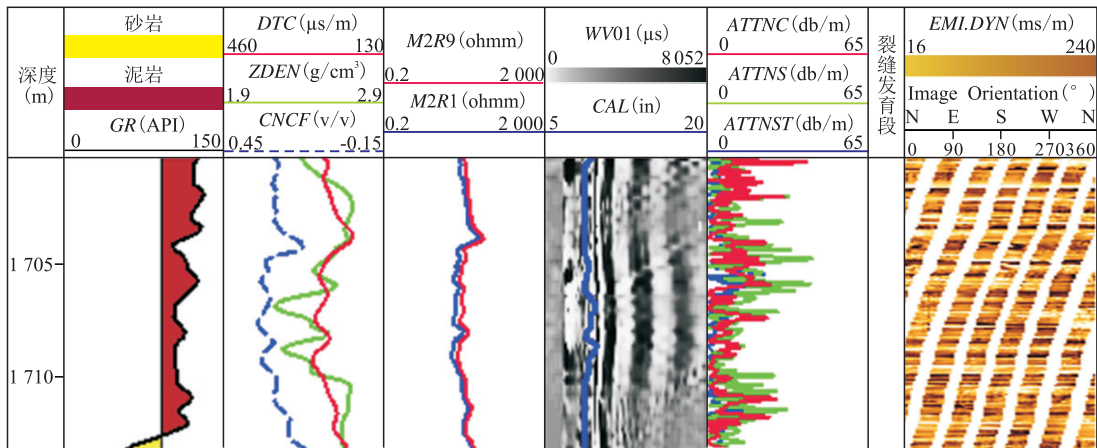


图5 鄂尔多斯盆地K区泥岩扩径段阵列声波特征

Fig.5 Array acoustic logging plots in enlarged borehole section in Area K of Ordos Basin

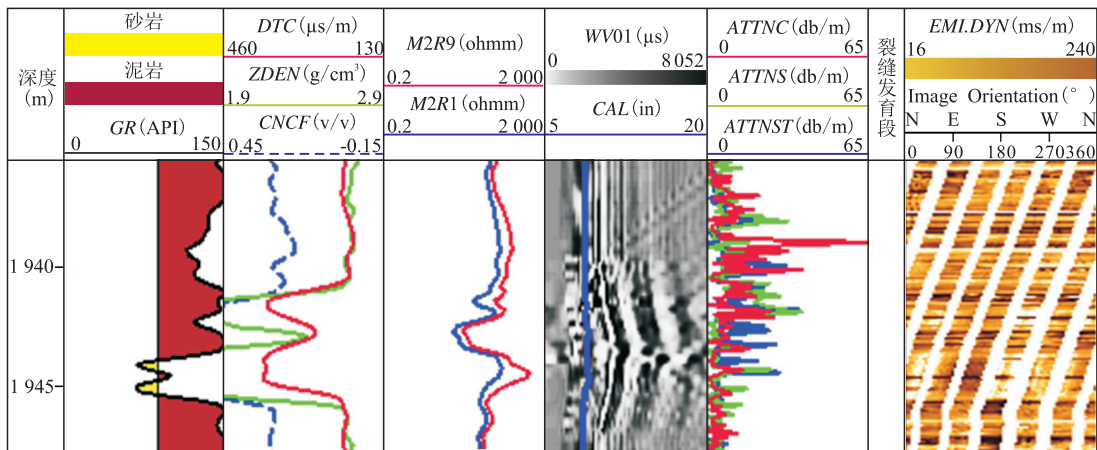


图6 鄂尔多斯盆地K区煤层段阵列声波特征

Fig.6 Array acoustic logging plot in coal section in Area K of Ordos Basin

纹,但较扩径及煤层段变弱,ATTNC,ATTNS及ATTNST明显高值异常,微电阻率成像测井存在多条开启裂缝(图7)。阵列声波的一系列响应受到裂缝影响,所以1794~1803m为裂缝发育段。

### 2.3 裂缝发育段阵列声波界限值

为进一步提高单井裂缝发育段判别的精准性,以岩心照片及成像测井验证过的井段作为样本点,制作密度与纵波、横波及斯通利波衰减曲线的交会

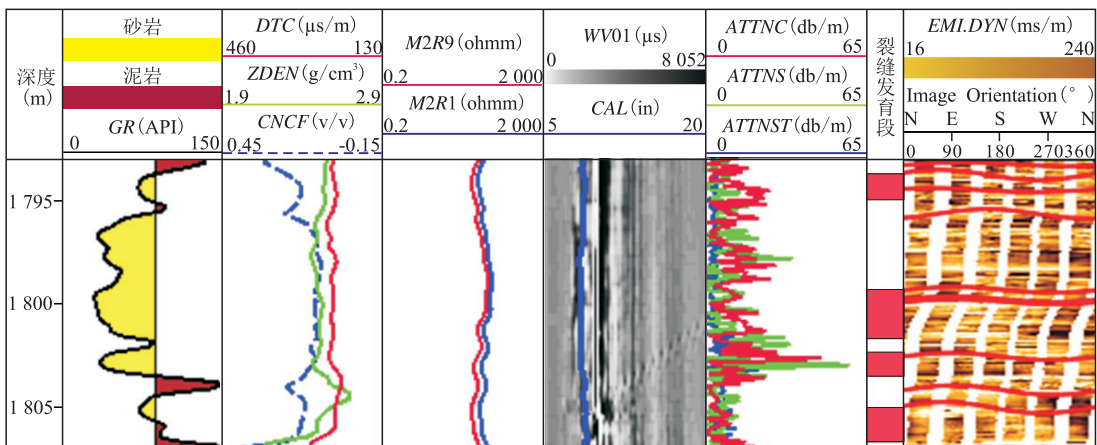


图7 鄂尔多斯盆地K区裂缝发育段阵列声波特征

Fig.7 Array acoustic logging plot in fracture development section in Area K of Ordos Basin

图版(图8—图10),以确定声波幅度衰减曲线的界限值。裂缝发育段的纵波、横波和斯通利波幅度衰减曲线界限值分别为12.5,13和5.6 db/m,考虑到全波列波形的幅度衰减强弱与裂缝倾角息息相关,所以若某井段内仅其中的1条或2条幅度衰减曲线异常,也应考虑到其裂缝发育的可能性。

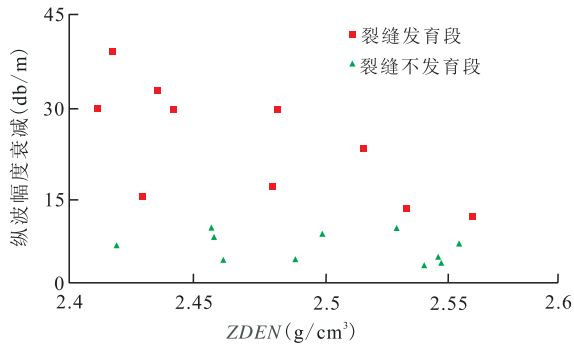


图8 密度与纵波幅度衰减曲线交会图

Fig.8 Cross plot of density with P-wave amplitude attenuation

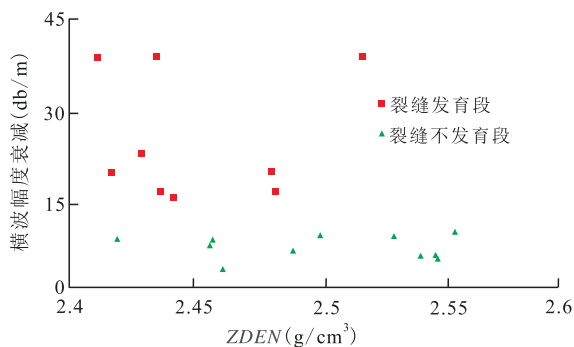


图9 密度与横波幅度衰减曲线交会图

Fig.9 Cross plot of density with S-wave amplitude attenuation

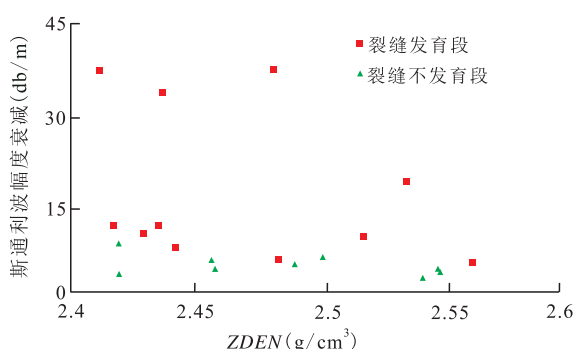


图10 密度与斯通利波幅度衰减曲线交会图

Fig.10 Cross plot of density with Stoneley-wave amplitude attenuation

### 2.4 裂缝发育特征

基于前述裂缝段阵列声波的测井特征,对研究区内23口井进行裂缝发育段识别与分析,将裂缝发育段频次按小层进行统计发现,纵向上千5、盒2、盒4和盒6段储层裂缝较其他小层发育,且部分井受紫金山隆起区、褶皱及断层影响,裂缝相对发育(图11)。

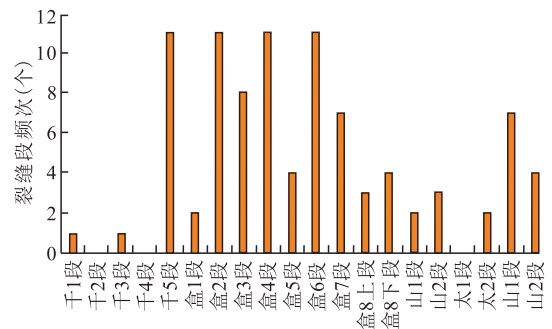


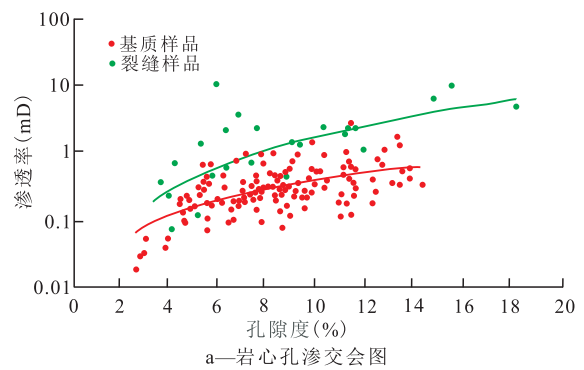
图11 裂缝纵向发育特征

Fig.11 Vertical fracture characteristics in different layers

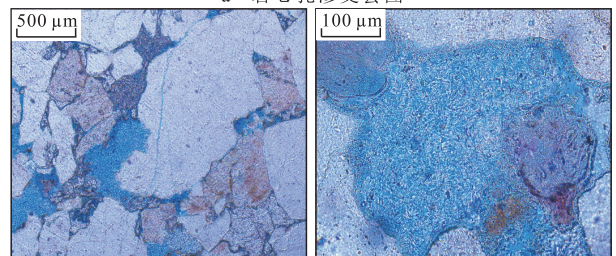
## 3 裂缝对储层改造作用及实例分析

### 3.1 裂缝对储层物性的改造作用

基于柱塞岩样物性分析数据,将岩心孔隙度与渗透率进行交会分析,发现裂缝样品孔渗拟合趋势线高于纯基质样品拟合线,表明在基质孔隙相同的情况下,裂缝对储层渗透率有明显提高作用(图12a)。W5井发育上、下2套砂岩,均为中粗长石岩屑砂岩,溶蚀孔-裂缝发育(图12b),基质孔隙度为15%,气测渗透率为10.5 mD,砂岩溶蚀孔发育,无裂缝(图12c),基质孔隙度为16.2%,渗透率为4.9 mD,两者孔隙相近,但上套砂岩的渗透率高于下套,所以裂缝对储层渗透性具有积极改造作用。



a—岩心孔渗交会图



b—溶蚀孔,可见裂缝 (W5井,1564.7 m) c—溶蚀孔,无裂缝 (W5井,1609.5 m)

图12 岩心孔渗分析

Fig.12 Analysis of porosity and permeability of core

### 3.2 测井识别裂缝发育段实例分析

以A1井为例,1458.0~1467.0 m测井解释为气层,其阵列声波变密度图干涉条纹明显,纵波、横

波和斯通利波幅度衰减曲线分别为 23.4, 25.9 和 52.5 db/m。1 460.0~1 466.0 m 确定为裂缝发育段

(图 13), 其压裂前产量达 12 120 m<sup>3</sup>/d, 裂缝起高导流通道的作用。

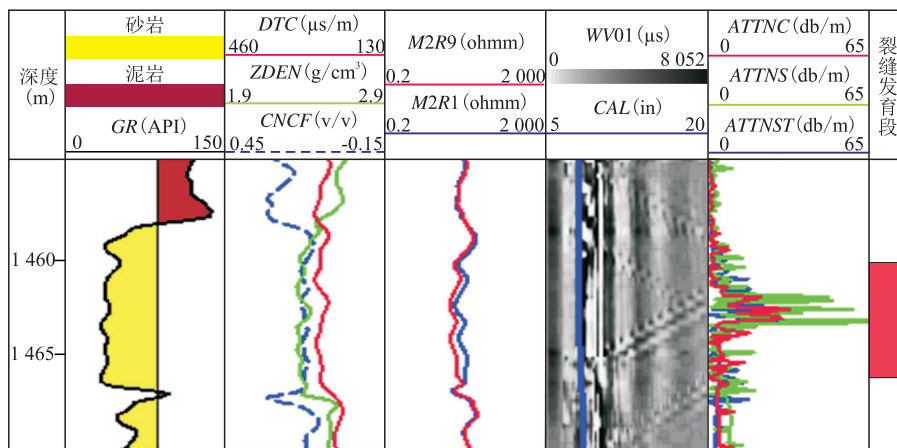


图 13 A1 井测井综合解释成果

Fig.13 Logging interpretation result of Well A1

以 A2 井为例, 1 905.0~1 907.0 m 测井解释为气层, 阵列声波变密度图清晰可辨无明显干涉条

纹, 幅度衰减曲线也无明显变化(图 14), 认为此井段裂缝不发育, 其压裂前、后均未获得工业气流。

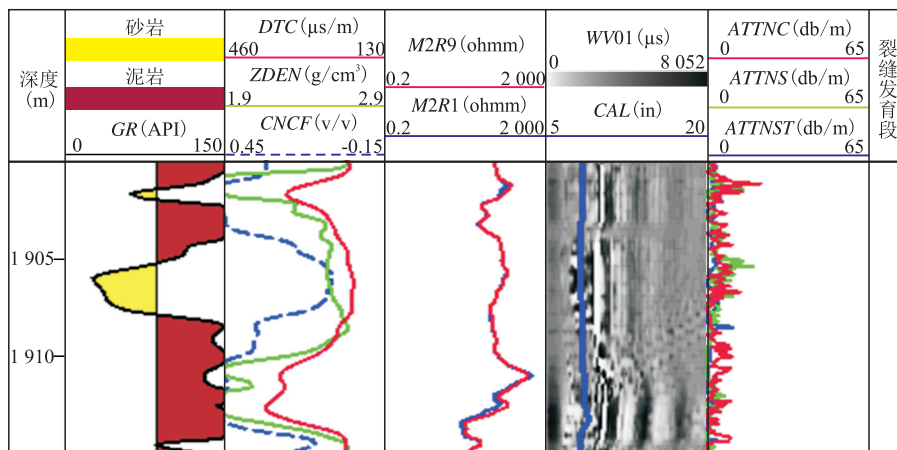


图 14 A2 井测井综合解释成果

Fig.14 Logging interpretation result of Well A2

### 4 结论

针对鄂尔多斯盆地 K 区以孔隙为主、裂缝少量发育的储层, 形成了一套利用岩心、微电阻率成像标定阵列声波幅度衰减曲线, 确定裂缝衰减曲线界限值, 准确识别有效裂缝的方法。该方法弥补了常规测井对裂缝响应特征不敏感的问题, 提高了裂缝发育段的识别精度, 拓展了阵列声波裂缝识别思路。明确了研究区裂缝纵向发育特征, 其中千 5、盒 2、盒 4 和盒 6 段裂缝较发育, 与主力产层段有较好对应性。裂缝对储层改造作用明显, 提高了储层渗透率, 对产能起到了积极贡献作用。单井裂缝发育段的准确划分对于射孔开发及压裂具有指导意义。

### 参考文献

[1] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 235-240.  
YONG Shihe, ZHANG Chaomo. Logging data processing and comprehensive interpretation[M]. Dongying: Press of University of Petroleum, China, 1996: 235-240.

[2] 段昕婷, 陈义国, 贺永红, 等. 电导率异常检查裂缝识别方法与应用——以鄂尔多斯盆地延长组深层低渗透砂岩为例[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 89-94.  
DUAN Xinting, CHEN Yiguo, HE Yonghong, et al. Application of conductivity anomaly detection technique for fracture identification: a case study on deep low-permeability sandstone in Yan-chang Formation, the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 89-94.

[3] 陈彦虎, 胡俊, 蒋龙聪, 等. 利用常规测井曲线定量预测裂缝型

- 孔隙度[J].特种油气藏,2017,24(6):7-11.
- CHEN Yanhu, HU Jun, JIANG Longcong, et al. Quantitative prediction of fractured porosity by using conventional logging curves [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(6): 7-11.
- [4] 车世琦. 四川盆地涪陵地区页岩裂缝测井定量识别[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 72-78.
- CHE Shiqi. Quantitative identification of shale fractures with logging in Fuling of Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(6): 72-78.
- [5] 舒志国, 关红梅, 喻璐, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层孔隙参数测井评价方法[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 38-43.
- SHU Zhiguo, GUAN Hongmei, YU Lu, et al. Well logging evaluation of pore parameters for shale gas reservoirs in Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(1): 38-43.
- [6] 苗清, 秦华明, 刘江, 等. 裂缝识别测井技术开发与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(6): 138-143.
- MIAO Qing, QIN Huaming, LIU Jiang, et al. Development of fracture identifying well-logging technique and its application [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(6): 138-143.
- [7] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1712-1724.
- LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [8] 李佳阳, 夏宁, 秦启荣. 成像测井评价致密碎屑岩储层的裂缝与含气性[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 17-20.
- LI Jiayang, XIA Ning, QIN Qirong. Fracture and gas-bearing evaluation of tight clastic reservoir with image logging [J]. *Well Logging Technology*, 2007, 31(1): 17-20.
- [9] 朱留方. 交叉偶极子阵列声波测井资料在裂缝性储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 225-227.
- ZHU Liufang. Application of cross-dipole acoustic logging data in fractured reservoir evaluation [J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(3): 225-227.
- [10] 陈英. 多极子阵列声波测井在滇涪油田长8储层中的裂缝识别[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(15): 169.
- CHEN Ying. Fracture identification in Chang8 reservoir of Dianjing Oilfield by multipole array acoustic logging [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2012, 33(15): 169.
- [11] 唐军, 章成广. 阵列声波测井技术在识别碳酸盐岩储层类型中的应用研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(3): 101-105, 109.
- TAN Jun, ZHANG Chengguang. Application of array acoustic logging in recognizing carbonate reservoir types [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(3): 101-105, 109.
- [12] 尹帅, 丁文龙, 赵威, 等. 基于阵列声波测井的海陆过渡相碎屑岩地层裂缝识别方法[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 75-82.
- YIN Shuai, DING Wenlong, ZHAO Wei, et al. Fracture identification method for marine-continental transitional clastic rocks based on the array acoustic logging [J]. *Petroleum Drilling Tech-*
- niques*, 2015, 43(5): 75-82.
- [13] 刘喜杰, 马遵敬, 韩冬, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块致密砂岩优质储层形成的主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(4): 481-490.
- LIU Xijie, MA Zunjing, HAN Dong, et al. Research on the main factors of high quality tight sandstone reservoir in Linxing block, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(4): 481-490.
- [14] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3731-3741.
- CHEN Gang, DING Chao, XU Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3731-3741.
- [15] 丁超, 陈刚, 张宏发, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体地球化学与构造环境分析[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 74-81.
- DING Chao, CHEN Gang, ZHANG Hongfa, et al. Geochemical characteristics and geological environment of Zijinshan complex in the eastern Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(3): 74-81.
- [16] 刘西恩, 孙志峰, 仇傲, 等. EXDT 正交偶极阵列声波测井仪在地层各向异性评价中的应用[J]. 测井技术, 2010, 34(6): 564-568.
- LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao, et al. Application of the EXDT cross-dipole array acoustic logging tool to anisotropic formations evaluation [J]. *Well Logging Technology*, 2010, 34(6): 564-568.
- [17] 刘西恩, 孙志峰, 仇傲. 正交偶极阵列声波测井仪器(EXDT)及应用[C]. 青岛: 中俄测井国际学术交流会, 2010: 20-25.
- LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao. Application of the EXDT cross-dipole array logging tool [C]. Qingdao: Sino-Russian International Symposium on Logging, 2010: 20-25.
- [18] 李玉霞, 李亚敏. MPAL 多极子阵列声波测井仪[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 439-442.
- LI Yuxia, LI Yamin. Multipole acoustic array logging tool [J]. *Well Logging Technology*, 2008, 32(5): 439-442.
- [19] 王贵清. 交叉式多极阵列声波(XMAC)测井资料的应用[J]. 国外测井技术, 2003, 18(2): 18-19.
- WANG Guiqing. Application of logging data for Cross-Multipole Array Acoustilog (XMAC) [J]. *World Well Logging Technology*, 2003, 18(2): 18-19.
- [20] 王瑞甲, 乔文孝, 鞠晓东, 等. 利用国产多极子声波测井仪评价软地层声学性质的实例分析[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 272-273.
- WANG Ruijia, QIAO Wenxiao, JU Xiaodong, et al. Case study of soft formation evaluation by homemade multipole acoustic logging tool [J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(5): 272-273.
- [21] 胡红, 罗宁, 李联新. 阵列声波资料在测井解释中的应用[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 97-101.
- HU Hong, LUO Ning, LI Lianxin. Application of array acoustic wave data in well logging interpretation [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2): 97-101.