



温柔, 刘平, 陈绪龙, 等. 2026. 波阻抗差异性下井中微地震初至波信号特征分析. 地球物理学进展, 41 (1): 0182-0193, doi: 10. 6038/pg2026H0392.

WEN Rou, LIU Ping, CHEN XuLong, et al. 2026. Analysis of the characteristics of the first-arrival wave signal of downhole microseismic under the wave impedance difference. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0182-0193, doi: 10. 6038/pg2026H0392.

波阻抗差异性下井中微地震初至波信号特征分析

Analysis of the characteristics of the first-arrival wave signal of downhole microseismic under the wave impedance difference

温柔^{1,2}, 刘平³, 陈绪龙⁴, 刘文强^{1,2}, 李栋^{1,2}, 姜龙³

WEN Rou^{1,2}, LIU Ping³, CHEN XuLong⁴, LIU WenQiang^{1,2}, LI Dong^{1,2}, JIANG Long³

1. 中国石油集团测井有限公司地质研究院, 西安 710077

2. 中国石油天然气集团有限公司测井重点实验室, 西安 710077

3. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 西安 710201

4. 中国石油集团测井有限公司培训中心, 西安 710054

1. Geological Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an 710077, China

2. Well Logging Key Laboratory, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710077, China

3. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an 710201, China

4. Training Center, China National Logging Corporation, Xi'an 710054, China

摘要 地层波阻抗差异是影响井中微地震监测资料品质的重要因素之一。基于 Snell 定律和 Zoeppritz 方程, 通过研究波阻抗差异性和入射角大小对微地震初至波信号特征的影响, 揭示了井中微地震资料初至波能量与地层波阻抗差异性大小、入射临界角之间的关系, 并加以正演论证, 得出波阻抗差异性大的地层对初至波的能量和传播路径影响较大。以煤层气 XX 井为例, 在射孔段 1 处部分检波器未能接收到初至信号影响, 导致无法进行检波器三分量旋转定位与监测解释, 通过声波测井资料获取目的层段地层速度信息, 结合地层波阻抗变化, 分析了微地震射孔记录中部分检波器初至波缺失的原因, 及时调整检波器布设深度, 解决了因波阻抗差异大, 且入射角大于临界角时, 部分检波器监测不到初至波的问题。通过检波器深度向上调整

Abstract The difference in formation wave impedance is one of the important factors affecting the quality of wellbore microseismic monitoring data. Based on Snell's law and the Zoeppritz equation, by studying the influence of wave impedance difference and incident angle on the characteristics of the first arrival wave signals of microseisms, the relationship between the energy of the first arrival waves in wellbore microseismic data, the magnitude of the formation wave impedance difference, and the incident critical angle was revealed and verified through forward modeling. It was concluded that formations with large wave impedance differences have a significant impact on the energy and propagation path of the first arrival waves. Taking Well XX in a coalbed methane field as an example, at Perforation Section 1, some geophones failed to receive the first arrival signals, which affected the three-component rotation positioning of the geophones and the monitoring interpretation. By obtaining the formation velocity information of the target interval from acoustic logging data and combining it with the changes in formation wave impedance, the reasons for the absence of the first arrival waves in the microseismic perforation records of

收稿日期 2025-02-25; 修回日期 2025-10-12.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 中国石油天然气集团有限公司科技项目“可控冲击波-射孔联作增效关键技术研究”(2024ZG42)、中国石油集团油田技术服务局有限公司科学研究与技术开发项目“EISC 平台完善与数据治理技术研究与应用”(2023T-003-001)、中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性项目课题“超深及多层管柱套后测井评价关键技术研究”(F-D60024K3.01)和中国石油集团测井有限公司科研项目“压裂监测与评估方法应用研究”(FD60123K001)联合资助。

第一作者简介 温柔, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事非常规油气微地震监测技术研究、生产测井资料解释及油藏综合评价等工作。

E-mail: 407746256@qq.com.

30 m 后,在射孔段 2 处获取了较好的初至波信号,并用该信号的定位结果进行井中微地震压裂裂缝监测,解释结果与常规测井、偶极声波测井综合分析,发现微地震事件点在高度上与储层特性、偶极声波显示裂缝高度基本吻合。

关键词 波阻抗;初至波;井中微地震;临界角;声波测井;三分量检波器

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026H0392

CSTR:32085.14.pg2026H0392

some geophones were analyzed. The deployment depth of the geophones was adjusted in a timely manner to solve the problem that some geophones could not detect the first arrival waves when the wave impedance difference was large and the incident angle was greater than the critical angle. After the depth of the geophones was adjusted upward by 30 meters, good first arrival wave signals were obtained at Perforation Section 2. The positioning results of these signals were used for wellbore microseismic fracturing fracture monitoring. The interpretation results, when comprehensively analyzed with conventional logging and dipole acoustic logging, showed that the microseismic event points were basically consistent in height with the reservoir characteristics and the fracture height indicated by dipole acoustic logging.

Keywords Wave impedance; First-arrival wave; Downhole microseismic; Critical angle; Acoustic logging; Three-component geophone

0 引言

近年来,非常规储层的勘探开发正在世界范围内蔓延,非常规油气勘探开发的重点是压裂,压裂效果的好坏直接关系到最终开发效果,为了解决压裂效果评价问题,微地震监测技术逐步得到应用与推广(杨瑞召等,2016;赵超峰等,2018;蒋星达,2021;李亦佳,2022)。井中微地震监测是通过在压裂井周围的监测井中布置多级三分量检波器、分析压裂过程中岩石破裂产生的微地震事件来监测压裂裂缝长度、宽度、高度、方位及地应力方向等信息的地球物理技术(董文波等,2023)。在井中微地震实际资料运用过程中,监测距离、压裂规模、井筒环境、现场噪声等因素均会影响微地震资料品质,使得监测结果往往无法真实有效的评价压裂效果。前人针对微地震裂缝监测波场特征研究较少,刘军(2009)基于射线追踪对微地震 P 波、S 波进行正演模拟,发现入射角不同引起的反射系数变化会导致的透射波能量损失不同,对波的振幅影响比较大,对折射波和反射波振幅的影响尤为明显。梁北援和王建立(2018)提到当前在微地震监测中存在若干重大问题,首要的是数据采集,否则无从谈起后续任务。Wang 等(2017)指出在微地震监测中,从数据采集、处理到解释等,必须遵循微地震学和工程应用的基本规律和要求。

本文从初至波的传播特性入手,在波阻抗差异性基础上,分析了波阻抗差异性、临界角和折射波之间的关系,并以最大入射角为界限,阐述了当波从低波阻抗入射到高波阻抗时,压裂井与监测井的井距、波阻抗界面与压裂段的垂直距离、波阻抗界面与检波器的垂直距离对检波器深度范围的影响,并通过初至波波场正演模拟进行验证。最后以煤层气 XX 井

为例,通过调整检波器深度,使其避开波阻抗差异大的界面,提高了井中微地震资料的品质,并通过测井资料进行了压裂效果综合分析。因此,在进行井中微地震监测时,应考虑地层波阻抗差异的影响,采取适当的措施来降低波阻抗对微地震波的影响。

1 不同储层下井中微地震初至波事件分析

目前,井中微地震主要采用纵横波初至联合定位算法(Luo *et al.*,2023;李德周等,2024),该算法在速度模型基础上,利用纵波和横波的能量特性、回归算法或偏振分析准确拾取纵横波初至信息(乔汉青等,2022;杨文等,2023;赵超峰等,2020),再通过检波器定向原理,联合求取发震点位置。因此,井中微地震监测成功与否很大程度取决于检波器接收微地震事件的品质。

影响微地震事件品质的因素除监测距离、现场噪声外还受岩石特性和地层构造等地质因素的影响。岩石杨氏模量和泊松比等弹性参数影响微地震波的传播速度和衰减,坚硬、脆性大的岩石有利于信号传播,可提高事件品质;而塑性强的岩石会使信号衰减快、波形畸变,降低事件品质。图 1 为不同储层中实际接收到的井中微地震事件,从微地震纵横波起跳、能量强弱及波至延续性可以看到,煤层气储层塑性较强、噪声比低,纵波初至受地层吸收的影响大,能量损失严重,横波初至起跳复杂、波至延续性长,初至波拾取的难度较大;而页岩气储层和致密砂岩储层脆性相对较强、信噪比高,纵波初至受地层吸收的影响较小,能量损失较小,横波初至起跳干脆、波至延续性短,初至波更容易拾取。层状介质引起的高波阻抗差异性、各向异性、断层、裂缝等地质构造会导致微地震波发生折射、反射和散射,复杂的地层

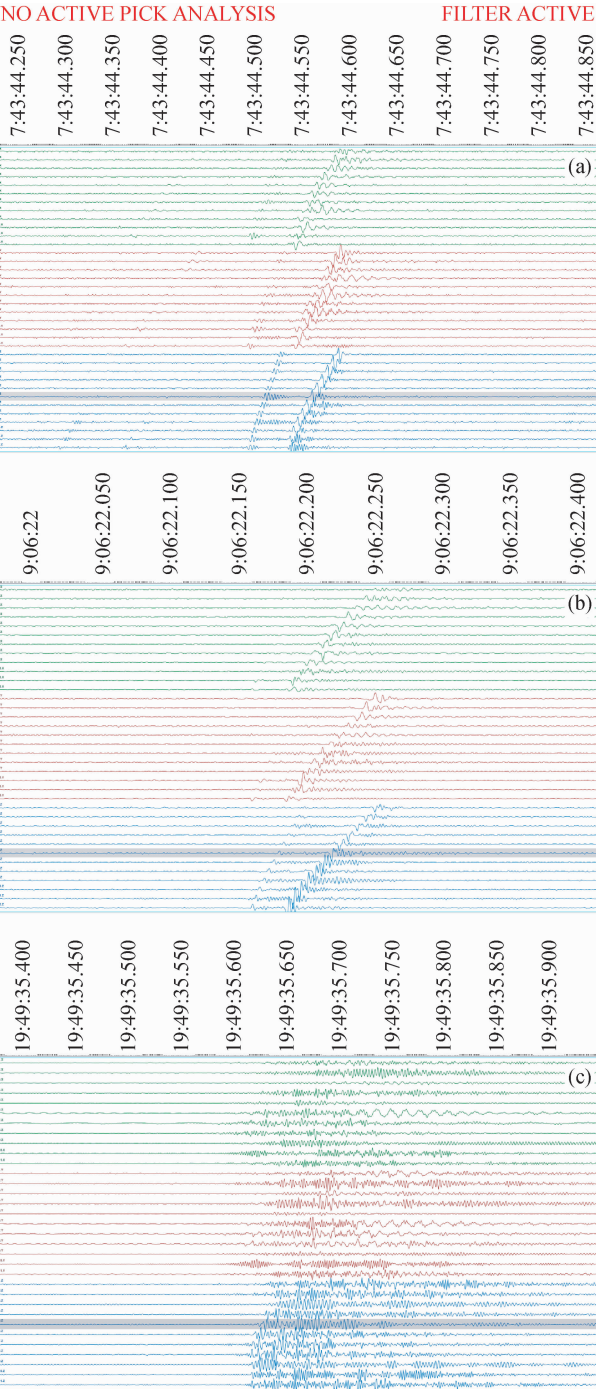


图1 不同储层微地震事件

(a)某页岩气储层井中微地震事件;(b)某致密砂岩储层井中微地震事件;(c)某煤岩气储层井中微地震事件. 图中纵坐标为三分量检波器代号,绿色为X分量记录,红色为Y分量记录,蓝色为Z分量记录,横坐标为时间.

Fig.1 Microseismic events in different reservoirs
(a) Microseismic events in a shale gas reservoir well;(b) Microseismic events in a tight sandstone reservoir well;(c) Microseismic events in a coalbed methane reservoir wel. In the figure, the ordinate represents the codes of the three-component geophone, with green indicating X-component records, red indicating Y-component records, and blue indicating Z-component records. The abscissa represents time.

结构使信号传播路径复杂,降低事件品质.

2 波阻抗对微地震信号影响分析

2.1 斯涅耳(Snell)定律

波阻抗是指地震波在介质中传播的能力,其数值等于介质密度 ρ 与波速 v 的乘积, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (王升荣等,2023).其中入射角 α 与折射角 β 的关系符合 Snell 定律(楚琦琦等,2021;鲍蕊和林玮,2019;刘瑞强等,2016):

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1\rho_1}{v_2\rho_2} \tag{1}$$

当一个平面纵波不以为零的任意角度射入到两种不同介质的分界面时,会产生纵波折射、横波折射、纵波反射和横波反射四种波. Zoeppritz 方程首次描述了纵、横波反射系数、纵、横波折射系数与密度、速度、入射角之间的关系,并发现了其方程为(马昭军等,2007;刘洋和魏修成,2008;刘文伍和张钊,2017):

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\phi_1 & \sin\theta_2 & -\cos\phi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\phi_1 & \cos\theta_2 & \sin\phi_2 \\ \sin2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}}\cos2\phi_1 & \frac{V_{P1}V_{S2}^2\rho_2}{V_{P2}V_{S1}\rho_1}\sin2\theta_2 & -\frac{\rho_2V_{P1}}{\rho_1V_{S2}}\cos2\phi_2 \\ -\cos2\phi_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}}\sin2\phi_1 & \frac{\rho_2V_{P2}}{\rho_1V_{P1}}\cos2\phi_2 & \frac{\rho_2V_{S2}}{\rho_1V_{P1}}\sin2\phi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{RP} \\ Q_{RS} \\ Q_{TP} \\ Q_{TS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin2\theta_1 \\ \cos2\phi_1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

式(2)中 θ_1 、 θ_2 、 ϕ_1 、 ϕ_2 分别为纵波入射角、纵波折射角、横波反射角、横波折射角,单位为 $^\circ$; Q_{RP} 、 Q_{RS} 、 Q_{TP} 、 Q_{TS} 分别为纵波反射、横波反射、纵波折射、横波折射的振幅,单位为 dB; V_{P1} 、 V_{S1} 分别为上层介质的纵波速度、横波速度,单位为 m/s; V_{P2} 、 V_{S2} 分别下层介质的纵波速度、横波速度,单位为 m/s; ρ_1 为上层介质的密度,单位为 g/cm^3 ; ρ_2 分别为下层介质的密度,单位为 g/cm^3 .

图 2a 是纵波从波阻抗小的介质射入波阻抗大的介质时,反射系数和折射系数与入射角的关系曲线,从图中可以看到,随着入射角的增大,当入射角小于临界角时,反射波系数逐渐增大、折射波系数逐渐减小;当入射角与临界角相等时,此时折射波系数为零;当入射角大于临界角时,反射系数突然增大,称之为“广角反射”,并出现转换横波.

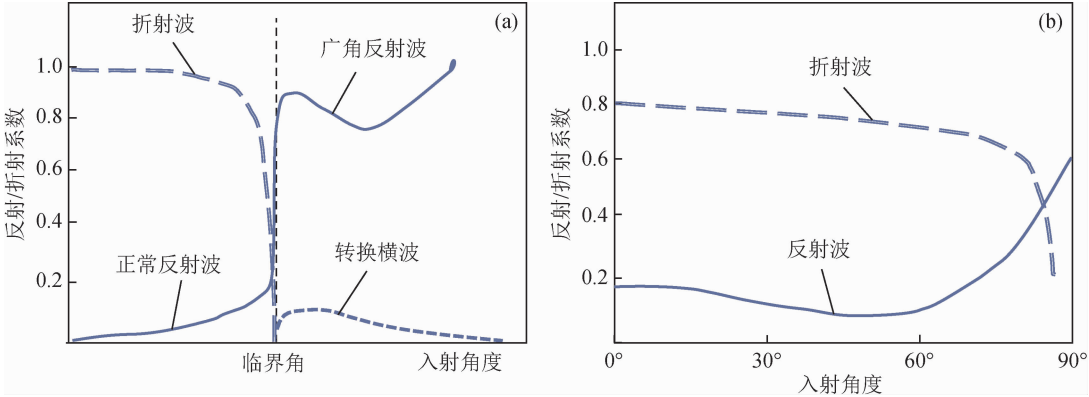


图 2 反射与折射能量系数示意图
(a) $v_1\rho_1 < v_2\rho_2$; (b) $v_1\rho_1 > v_2\rho_2$.

Fig. 2 Schematic diagram of reflection and refraction energy coefficients

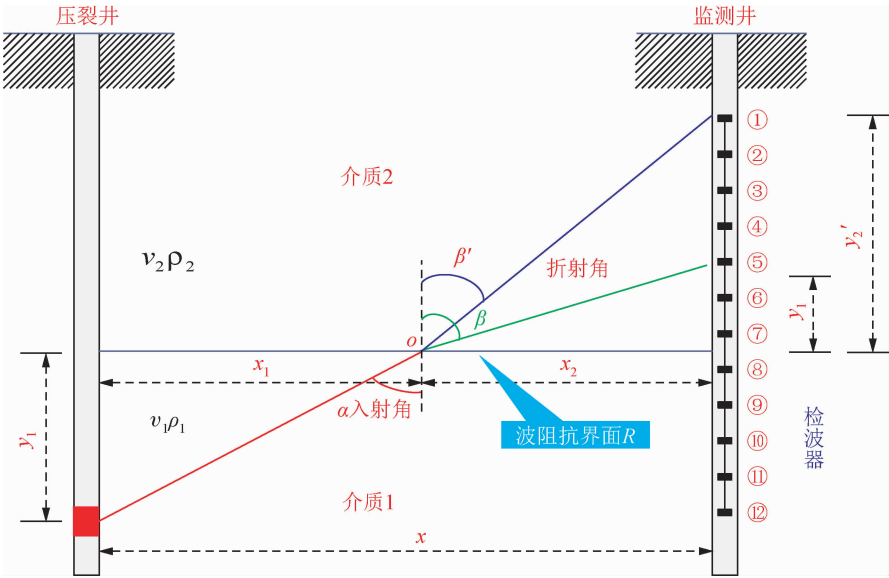


图 3 波阻抗差异性下井中微地震初至波传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the propagation of the first arrival waves of microseismic events in the well under the condition of impedance difference

图 2b 是纵波从波阻抗大的介质射入波阻抗小的介质时,纵波反射系数和纵波折射系数与入射角的关系曲线,从图中可以看到,此时不存在临界角,随着入射角的增大,反射波系数整体呈现由大变小的趋势,折射纵波系数从垂直入射到一定角度内几乎保持一个定值,当达到一定角度时,反射波系数突然增大、折射波系数突然减小。

Zoeppritz 方程明确了反射波和折射波能量与入射角的关系,反射波能量随入射角增大而增强,接近临界角时急剧增大,超过临界角发生全反射,能量等于入射波能量。折射波能量随入射角增大逐渐减小,

接近临界角时趋近于零,超过临界角时能量为零。因此,界面两侧的波阻抗变化和波入射到波阻抗面的夹角对波的能量传播有很大影响。

2.2 波阻抗差异对微地震波场能量的影响

波阻抗的变化可能会导致初至波振幅和相位的改变,下面以两口直井为例,如图 3 所示,两口井水平间距为 x ,压裂段与波阻抗界面的垂直距离为 y_1 ,根据式(3)可计算出 $\alpha_{\text{最大入射角}}$,通过不同波阻抗差异下 $\alpha_{\text{最大入射角}}$ 与 $\alpha_{\text{临界角}}$ 的关系,分析波阻抗对初至波能量的影响:

$$\alpha_{\text{最大入射角}} = \arctan\left(\frac{x}{y_1}\right).$$

(3)

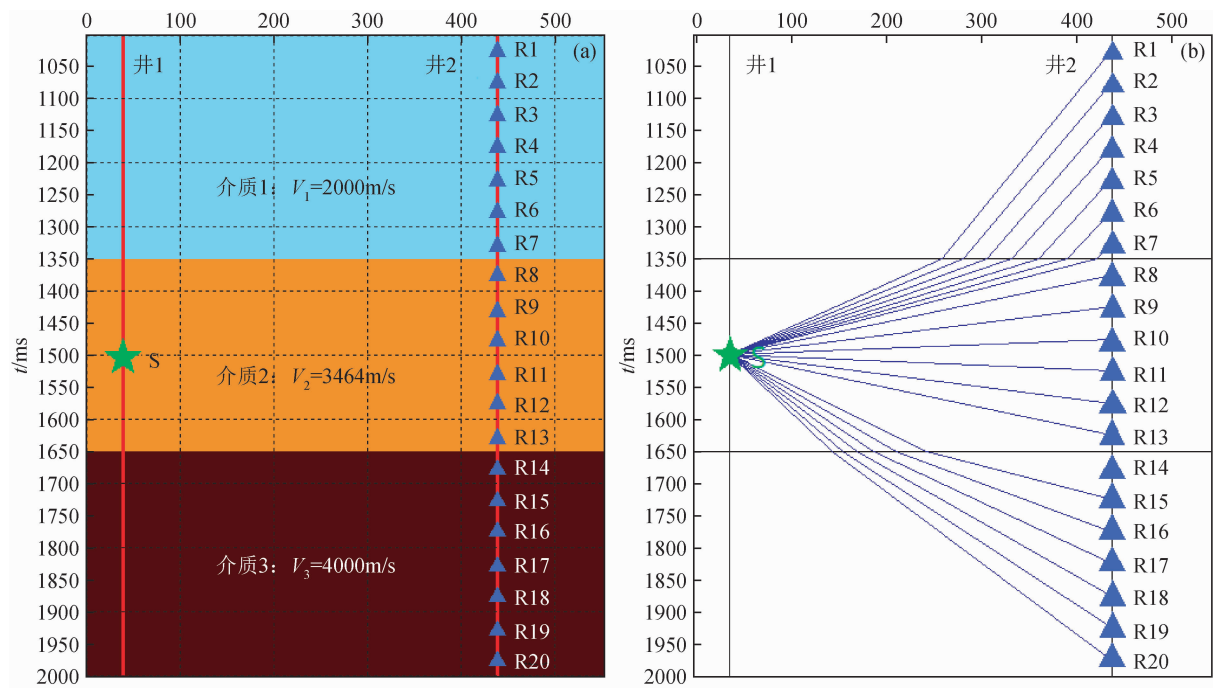


图 4 初至波射线追踪正演模拟

(a) 水平层状介质速度模型; (b) 初至波传播路径.

Fig. 4 Forward modeling of first break ray tracing

(a) Velocity model of horizontal layered medium; (b) Propagation path of first break.

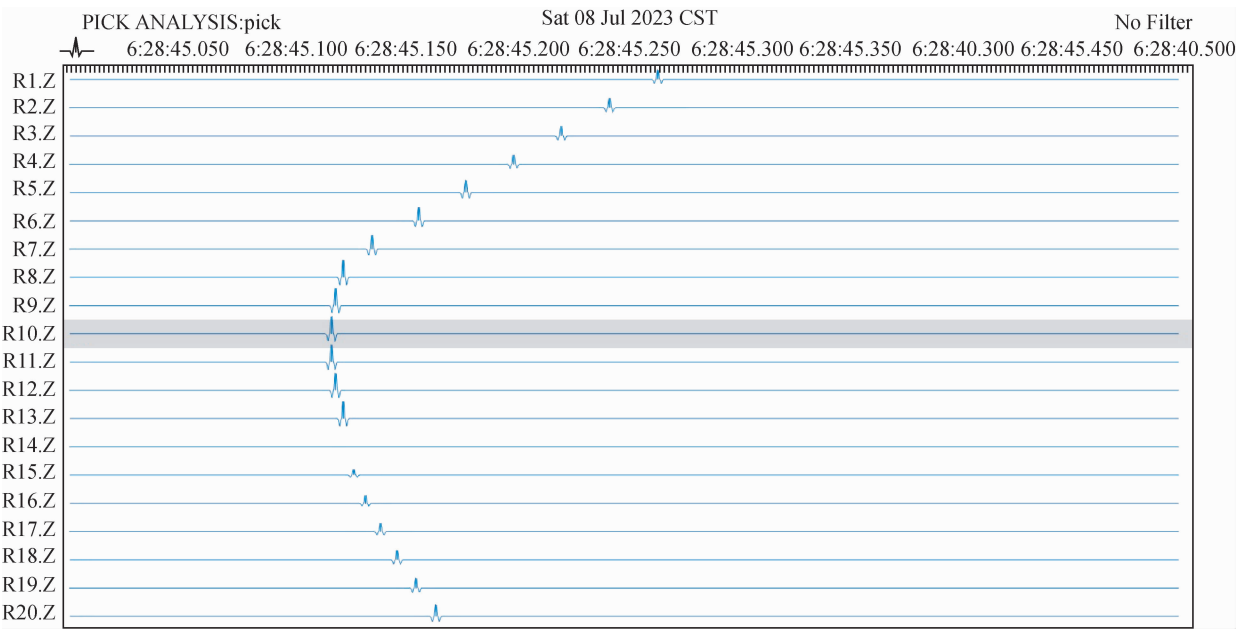


图 5 初至波正演 Z 分量记录

Fig. 5 Forward Z-component record of first break

(1) 当 $v_1\rho_1 = v_2\rho_2$ 时,入射角 α 等于折射角 β , 介质 1 中入射波的能量全部传至介质 1 和介质 2 中.

(2) 当 $v_1\rho_1 < v_2\rho_2$ 时,此时入射角 α 小于折射角

β . 此时又分为以下三种情况: ① 当 $\alpha_{\text{临界角}} \leq \alpha_{\text{最大入射角}}$, 且实际入射角 $<$ 临界角时,位于介质 1 中的 ⑧ ~ ⑫ 号检波器会接收到直达波,位于介质 2 中的 ① ~ ⑦ 号检波器会接收到折射波(透射波); ② 当

$\alpha_{\text{临界角}} \leq \alpha_{\text{最大入射角}}$,且实际入射角 $\geq$ 临界角时,位于介质1中的⑧~⑫号检波器会接收到直达波,介质2中靠近波阻抗界面 R 附近的检波器理论上可以监测到折射波,但由反射与折射能量系数可知,折射系数迅速降低为零,而检波器串又是连续的,因此介质2中不适合放置检波器;③当 $\alpha_{\text{临界角}} > \alpha_{\text{最大入射角}}$,此时实际入射角总是小于临界角,折射系数始终保持在较强的水平,在遵循最大监测距离的条件下,通过给定不同入射角,利用式(4)求取介质2中检波器与波阻抗界面 R 的距离 y_2 ,确保检波器三和分量能够接收到初至波信号:

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}=\frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2} \\ \tan \alpha=\frac{x_1}{y_1} \\ \tan \beta=\frac{x_2}{y_2} \\ x=x_1+x_2 \end{array}\right., \quad(4)$$

$S=\sqrt{x^2+\left(y_1+y_2\right)^2}$, (5)
式中, α 、 β 分别为入射角和折射角; x_1 、 x_2 分别为入射波在波阻抗界面的交点与压裂井和监测井的水平距离; y_1 、 y_2 分别为波阻抗界面与压裂段和检波器的垂直距离; S 为压裂段与检波器的距离.

(3)当 $v_1 \rho_1 > v_2 \rho_2$ 时,入射角 α 大于折射角 β' .此时不存在临界角,由反射与折射能量系数可知,随着入射角 α 的增大,折射波系数始终保持在较高水平,因此介质2中的检波器均可以接收到折射波.

2.3 初至波正演模拟

通过上述分析,建立层状介质速度模型,假设各层介质的密度均为 1 g/cm^3 ,根据波阻抗计算公式,得到介质1的波阻抗为 $2000\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$,介质2的波阻抗为 $3464\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$,介质3的波阻抗为 $4000\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$,各检波器偏振方向朝向震源点 S ,并根据射线追踪理论对初至波传播路径和 Z 分量波场进行正演模拟,发现两侧介质速度差异越大,初至波斜率变化越大,入射角越大,初至波斜率变化也越大,如图4、图5所示.

当震源 S 发出地震波后,初至波传播路径明显不同.(1)震源 S 与 $R8\sim R13$ 号检波器在同一介质内,初至波沿直线传播至检波器,波场能量最强;(2)震源 S 在介质2内,检波器 $R1\sim R7$ 在介质1内,初至波从高波阻抗介质2射入低波阻抗介质1时,折射率约0.577,对应的折射临界角约 35.27° ,初

至波沿走时最小的路径由震源传播至 $R1\sim R7$ 号检波器,折射角随着入射角增大而增大,折射角变化较小,初至波能量无明显变化,如表1所示;(3)震源 S 在介质2内,检波器 $R14\sim R20$ 在介质3内,初至波从低波阻抗介质2射入高波阻抗介质3时,折射率约0.866,对应的入射临界角约 60.00° ,初至波沿走时最小的路径由震源传播至 $R14\sim R20$ 号检波器,如表2所示, $R14$ 号检波器因入射角大于临界角,没有接收到初至波信息, $R15\sim R20$ 号检波器入射角均小于临界角,能够接收到初至波信号,折射角随着入射角减小而减小,且随着折射角的增大,初至波能量明显变弱(实际压裂监测中往往伴随着噪声,初至波的明显变弱会导致初至波信噪比降低甚至无法发现初至波).

表1 波从介质2射入介质1中入射角与折射角关系

Table 1 Relationship between incidence angle and refraction angle of waves entering medium 1 from medium 2

检波器	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
入射角/(°)	55.78	58.37	60.75	62.95	65.29	66.85	68.59
折射角/(°)	28.9	29.52	29.93	30.93	31.20	32.11	33.59

表2 波从介质2射入介质3中入射角与折射角关系

Table 2 Relationship between incidence angle and refraction angle of waves entering medium 3 from medium 2

检波器	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20
入射角/(°)	—	54.65	50.52	45.73	42.06	39.1	36.37
折射角/(°)	—	69.6	62.02	55.85	50.77	46.47	42.87

3 现场资料应用

3.1 压裂段及监测段空间关系

以XX井为例,进一步阐述波阻抗对微地震波场及定位的影响,该井是某区块内一口煤层气井,主力层位为赛汉组Ⅲ+Ⅳ号煤,在测井资料上表现出“三高二低”特征,即电阻率中高值,声波时差高值,补偿中子高值,低体积密度,低自然伽马,测井响应特征明显.为研究该井压裂裂缝缝网扩展规律,提高单井产气量,采用井中微地震监测技术进行压裂裂缝有效性评价.

本次监测采用了8级Maxwave三分量检波器,按照首道最浅的排列原则进行射孔及微地震信号接

收, Z 分量沿着井筒向下, X 、 Y 水平分量垂直与井筒, 图 6 按比例缩放了压裂井与监测井的空间关系。

其中射孔 1 深度为 480.00 ~ 184.00 m, 射孔 2 深度为 434.00 ~ 438.00 m, 井间距 200.00 m。

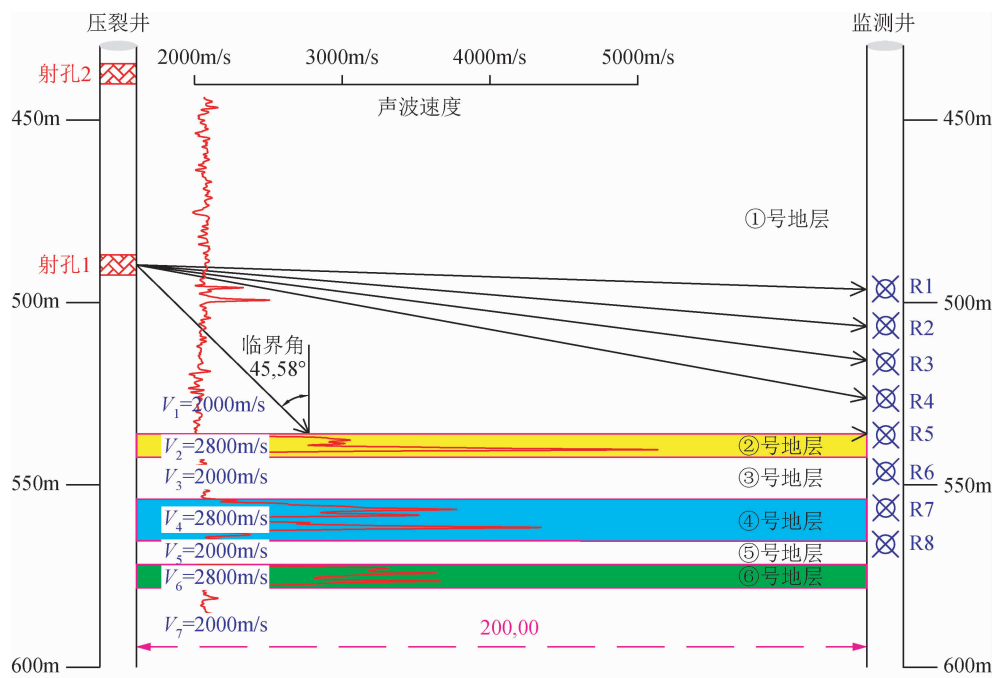


图 6 裂缝监测施工示意图

Fig.6 Schematic diagram of fracture monitoring operations

表 3 波阻抗界面划分

Table 3 Relationship between incidence angle and refraction angle of waves entering medium 1 from medium 2

序号	深度/m	岩性	声波时差 /(us/m)	体积密度 /(g/cm ³)	纵波速度 /(m/s)	与射孔段 1 距离/m	与射孔段 2 距离/m	波阻抗 /(kg/(m ² ·s))
1	500.0 ~ 533.0	煤	500	1.22	2000	92.28	46.28	2440
2	533.0 ~ 539.0	泥岩	357	2.3	2800	98.72	52.72	6440
3	539.0 ~ 552.0	煤	496	1.19	2016	110.21	64.21	2399
4	552.0 ~ 564.0	泥岩	362	2.36	2762	121.62	75.62	6518
5	564.0 ~ 568.0	煤	511	1.14	1957	128.11	82.11	2231
6	568.0 ~ 578.0	泥岩	337	2.12	2967	134.55	88.55	6290

3.2 射孔信号波形分析

压裂前先进行射孔信号监测,射孔 1 采用调整

前检波器深度进行接收,见表 4. 射孔时,射孔信号以地震波的方式传播,纵波初至分析如下。

表 4 调整前后各检波器深度

Table 4 Depths of geophones before and after adjustment

射孔	检波器代号	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
射孔 1	调整前 检波器深度/m	500.00	510.00	520.00	530.00	540.00	550.00	560.00	570.00
射孔 2	调整后 检波器深度/m	470.00	480.00	490.00	500.00	510.00	520.00	530.00	540.00

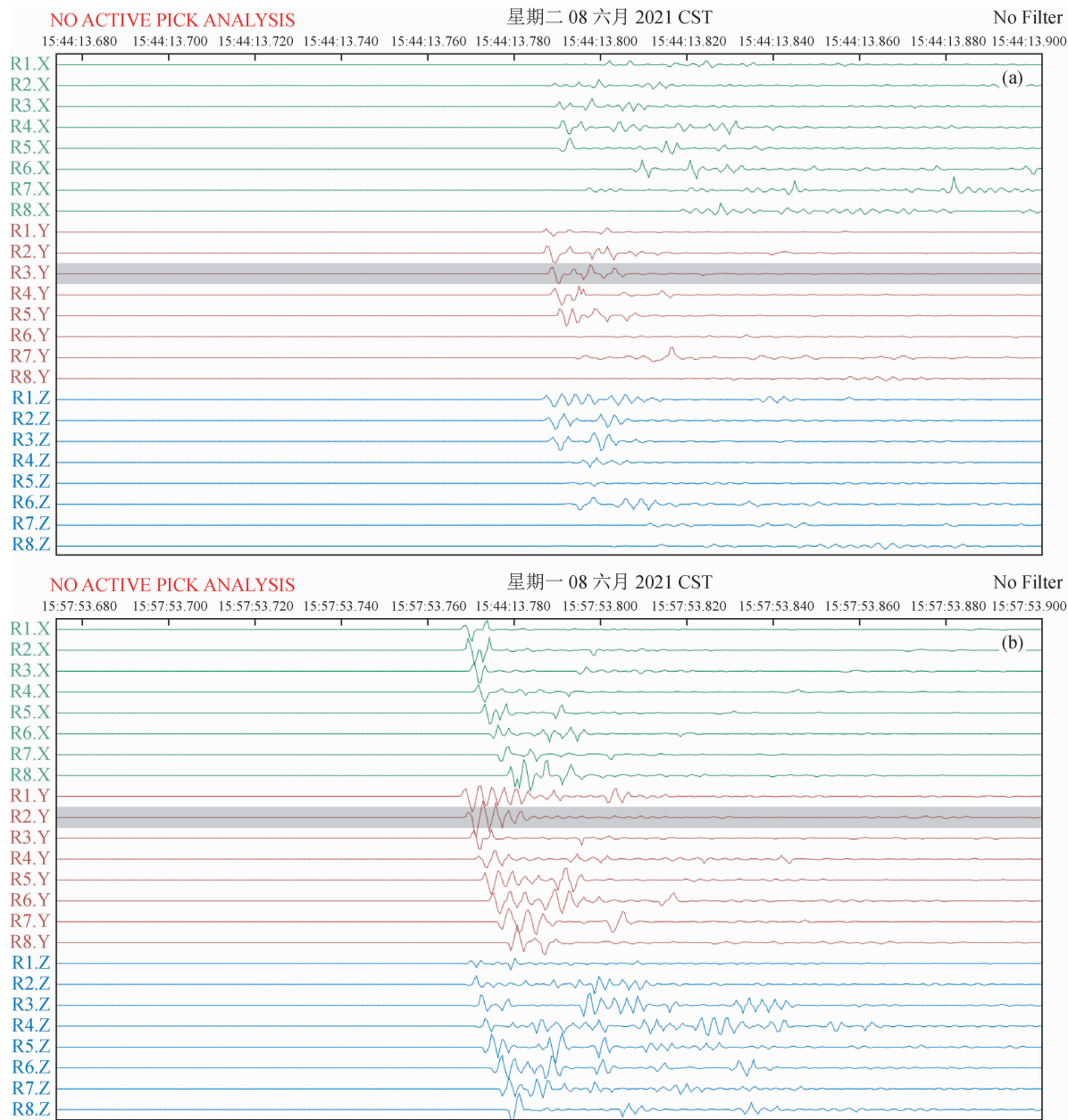


图 7 射孔记录对比图

(a) 射孔 1 微地震波形记录;(b)射孔 2 微地震波形记录. 图中绿色为 X 分量记录,红色为 Y 分量记录,蓝色为 Z 分量记录.

Fig. 7 Comparison chart of perforation records

(a) Microseismic waveform record of perforation 1; (b) Microseismic waveform record of perforation 2. In the figure, green represents the X-component record, red represents the Y-component record, and blue represents the Z-component record.

图 7a 是射孔 1 射孔时,接收到的三分量波场记录.从图中可以看到,R1 ~ R5 号检波器,纵波初至信号强,起跳明显.但由于 R6 号检波器处于③号地层内,与射孔 1 所在的①号地层之间存在②号高速地层,该地层波阻抗大,①号地层与②号地层界面折射率约为 0.7143,临界角约 45.58°.当地震波传播至 R6 号检波器时,由于入射角远远大于临界角,形

成全反射波,直达波无法传至 R6 号检波器,导致直达波能量衰减严重,R7 ~ R8 号检波器受②号、④号高速地层影响,直达波能量衰减更严重,因此无法进行正常定位.

现场通过声波测井资料分析发现,该井整体的地层速度大约为 2000 m/s,但在 540.00 ~ 580.00 m 存在三个高速地层,高速地层最高可达近 4000 m/s,

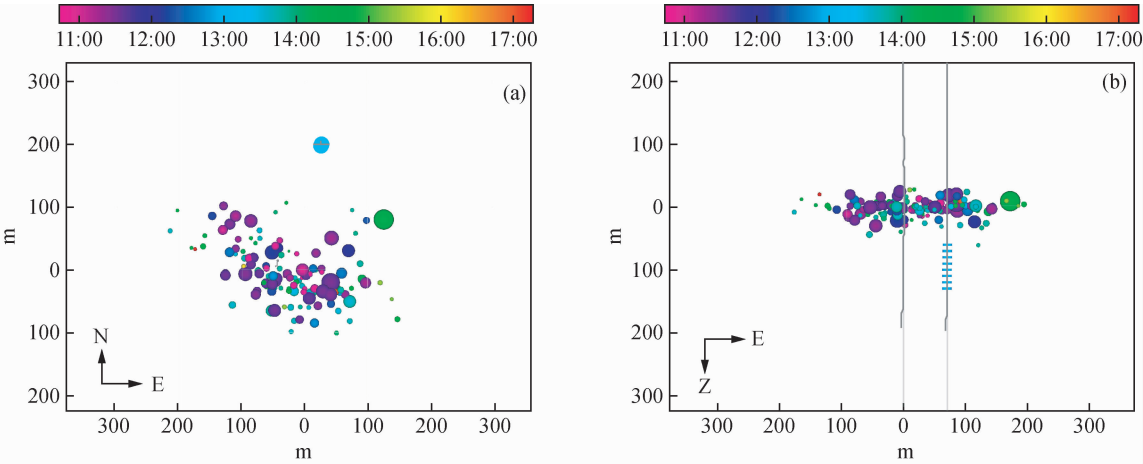


图 8 微地震事件展布图
(a)俯视图;(b)侧视图. 图中不同颜色微地震事件点代表不同时间,微地震点大小代表震级.

Fig. 8 Distribution map of microseismic events

(a) Top view; (b) Side view. The microseismic event points of different colors in the figure represent different times, and the size of the microseismic points represents the magnitude.

高速地层与低速地层波阻抗差异大,容易形成强反射波. 现场及时进行调整,为有效避开波阻抗大的地层,将检波器深度整体上提 30.00 m,射孔 2 采用了调整后检波器深度进行接收,见表 4. 纵波初至分析如下.

图 7b 是射孔 2 射孔时,接收到的三分量波场记录. 从图中可以看到, R1 ~ R8 号检波器,纵波初至信号强,起跳明显. R1 ~ R8 号检波器接收到的纵波初至能量表现出“浅弱深强”的趋势,符合压裂点与检波器 Z 分量偏振方向关系(温柔等,2023).

通过以上分析发现,检波器深度调整后,在第 R6 ~ R8 号检波器明显监测到射孔 2 的微地震纵波波形,且微地震振幅随检波器 Z 分量与射孔段之间夹角的增大而减小,符合纵波波场偏振特性.

3.3 微地震事件定位反演

检波器调整后,对射孔 2 进行压裂,共监测到 137 个微地震事件,图 8 是微地震事件经定位反演后裂缝展布图,图中微地震事件颜色代表不同时间地层破裂时微地震响应时间,微地震点的大小代表微地震震源能量. 结合压裂施工规模、微地震事件响应时间及震源能量分析可得:(1)压裂时,微地震事件点分布于整个压裂过程中,且破压及前置液阶段微地震震源能量强,为地层破裂主要造缝阶段,压后地层闭合阶段产生的微地震点较少;(2)本次压裂分为主裂缝和次裂缝,主裂缝沿着 NW56°方向,次裂缝延伸方向与主裂缝基本垂直,裂缝规模较小.

3.4 裂缝综合分析

从常规曲线分析,该井主力煤层的顶底板岩性主要为砂质泥岩、泥岩,含水性弱,渗透性差,对煤层封隔性较好,其中 357.0 ~ 362.8 m、378.4 ~ 379.2 m、403.6 ~ 404.4 m 为砂泥岩夹层,封堵性较好;362.8 ~ 363.6 m、373.2 ~ 274.0 m、395.2 ~ 396.0 m、421.0 ~ 423.0 m 为夹矸,封堵性较差. 将压前、压后偶极声波测井和井中微地震成果导入测井常规图中,如图 9 所示,图中微地震事件横坐标为事件点与井筒的距离,左侧表示井筒附近微地震事件点深度,右侧表示远离井筒附近微地震事件点深度,微地震事件点与储层特性、偶极声波分析如下:

(1)通过井中微地震事件点深度分析发现,当射孔 2 压裂时,裂缝向上延伸至 421.0 ~ 423.0 m 夹矸层时,由于该处距离压裂段近,压裂能量强,裂缝穿透该夹矸层继续向上延伸,当裂缝延伸至 403.6 ~ 404.4 m 砂泥岩夹层时,裂缝穿透该砂泥岩薄层,且在界面附近出现大量微地震事件点,并继续向上延伸,且穿透 395.2 ~ 396.0 m 处较薄的夹矸层,并产生较多的微地震事件,最终由于距离压裂段较远,压裂能量损耗严重,停止在 378.4 ~ 379.2 m 砂泥岩夹层附近.

(2)偶极声波测井利用横波分裂原理,通过压裂前后射孔附近储层各向异性对比,可准确评价近井筒附近压裂效果. 通过压前、压后快慢横波时差大小及各向异性对比发现,压裂后在 398.0 ~ 450 m 井

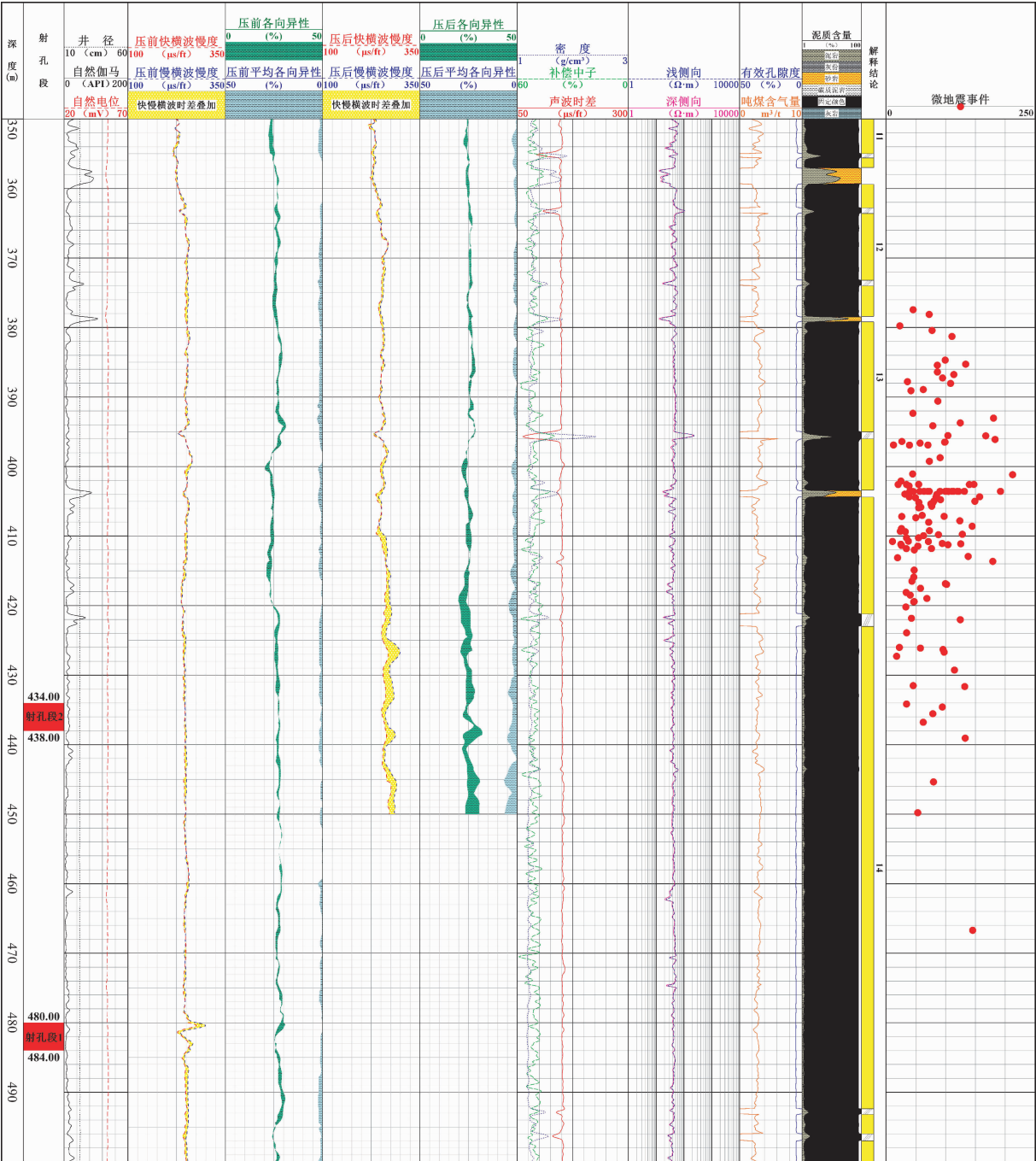


图9 吉煤XX井测井曲线与微地震事件对比图

1 ft = 30.48 cm.

Fig.9 Comparison chart of logging curve and microseismic events of Jimei XX well

段快慢横波时差变大,各向异性能量出现不同程度增强,因此判断近井筒地带压裂裂缝高度为398.0~450 m,450 m以下井段由于压后测井遇阻,导致无法采用偶极声波分析压裂效果.由于微地震事件点深度评价的是整个裂缝的深度,而偶极声波测井仅能评价近井筒附近裂缝深度,因此微地震事件点深度大于阵列声波裂缝显示深度.

(3)射孔1压裂早于射孔2压裂,当射孔2压裂进行微地震监测时,由于射孔1附近裂缝已形成,产生的微地震波形能量衰减很快,导致监测到的事件数量会大大减少,即使有少量微地震事件产生,但由于破裂点与检波器深度Z分量夹角近似90°,传播至检波器Z分量的微地震事件P波能量几乎为零,无法进行定位,因此,微地震事件点在440 m以下井段

非常少甚至消失.

4 结论与建议

(1)本文基于 Snell 定律和 Zoeppritz 方程,通过波阻抗差异性和入射角大小对井中微地震初至波信号特征研究发现,在不考虑波场吸收衰减的情况下,当压裂段所处层位与检波器所处层位波阻抗相等时,入射角等于折射角,入射波的能量全部透过界面传到检波器,初至波无能量损失. 当压裂段所处层位与检波器所处层位波阻抗差异较大时,随着入射角的增大,折射波能量系数不断下降,当入射角等于临界角时,可能导致部分检波器无法接收到直达波和折射波,存在一定的监测盲区.

(2)波阻抗差异性严重井中微地震资料品质,在井中微地震监测之前,要先利用声波测井资料、VSP 地震资料进行地层速度分析,若存在地层声波速度变化较大的储层,应根据压裂井和监测井的水平距离、压裂段与波阻抗界面的垂直距离,合理安排检波器监测深度,避免出现微地震信号减弱、丢失和模糊不清的现象.

(3)通过微地震监测成果与常规测井、偶极声波测井成果对比,能够更加准确的评价压裂效果.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bao R, Lin W. 2019. The acoustics abnormal reflection based on the generalized Snell's law. *Nondestructive Testing* (in Chinese), 41 (2): 21-25.

Chu Q Q, Hu Y, Lin W. 2021. Sound metasurface refraction based on generalized Snell's law. *Chinese Journal of Electron Devices* (in Chinese), 44 (2): 498-501.

Dong W B, Gui Z X, Wang Y N, *et al.* 2023. Asymmetry analysis of microseismic monitoring results of horizontal well fracturing. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 58 (1): 161-169.

Jiang X D. 2021. Bayesian inversion for microseismic velocity optimization and high precision event location [Ph. D. thesis] (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, doi: 10. 27061/d. cnki. ghgdu. 2021. 005286.

Li D Z, Li C, Yuan Q S. 2024. Evaluation of fracturing effect of horizontal wells in coal shale gas based onborehole micro-seismic rapid location monitoring technology——take well J1HF in South North China as an example. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 39 (1): 207-215, doi: 10. 6038/pg2024HH0139.

Li Y J. 2022. Research on inversion imaging of microseismic signals propagation velocity models and source localization [Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University, doi: 10. 27272/d. cnki. gshdu. 2022. 006699.

Liang B Y, Wang J L. 2018. An enormous challenge: understanding the microseismic features. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 18 (13): 14-21.

Liu J. 2009. Research on multi-wave field forward simulation of micro-seismic model based on ray tracing [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China).

Liu R Q, Chen X Y, Wang L F. 2016. An innovative experiment for accurate measurement of refractive index of water and glass based on Snell's law. *China Science and Technology Information* (in Chinese), (17): 17-18, 15.

Liu W W, Zhang Z. 2017. Review of reflection coefficient calculation methods for Zoeppritz equation. *Energy and Energy Conservation* (in Chinese), (12): 2-4, 16, doi: 10. 16643/j. cnki. 14-1360/td. 2017. 12. 002.

Liu Y, Wei X C. 2008. Propagation characteristics of converted refracted wave and its application in static correction of converted wave. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51 (S2): 226-232.

Luo Z H, Shang X Y, Wang Y, *et al.* 2023. P-and S-wave arrival time combined Bayesian location method for a microseismic event. *Journal of Central South University*, 30 (11): 3808-3820.

Ma Z J, Tang J M. 2007. Review of computational methods for P-SV wave reflection coefficients. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 30 (6): 433-439.

Qiao H Q, Liu C, Ge Q X, *et al.* 2022. Research and application of microseismic first arrival picking method based on geophone spacing constraint. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37 (5): 2024-2035, doi: 10. 6038/pg2022FF0468.

Wang J L, Leng C B, Liang B Y. 2017. Principle of vector scanning for microseismic. //Proceedings of 2017 Workshop: Microseismic Technologies and Applications. Hefei: SEG, 68-71.

Wang S R, Sun C Y, Cai R Q, *et al.* 2023. P-P wave reflection coefficient approximate expression and P-& S-wave impedance inversion based on normal impedance component. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 58 (4): 933-941, doi: 10. 13810/j. cnki. issn. 1000-7210. 2023. 04. 018.

Wen R, Li D, Huang K, *et al.* 2023. Characteristics analysis of three-component wave field based on borehole microseismic data of shear wave splitting. *Well Logging Technology* (in Chinese), 47 (3): 350-356, doi: 10. 16489/j. issn. 1004-1338. 2023. 03. 014.

Yang R Z, Zhao Z G, Wang Z G, *et al.* 2016. *Microseismic Monitoring Technology for Shale Gas Development* (in Chinese). Shanghai: East China University of Science and Technology Press.

Yang W, Liu F, Liu F, *et al.* 2023. Real-time microseismic monitoring based on deep learning and wireless transmission. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38 (4): 1656-1672, doi: 10. 6038/pg2023GG0436.

Zhao C F, Zhang W, Tian J T, *et al.* 2018. Interpretation examples of microseismic events. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 53 (4): 770-777.

Zhao C F, Zhou Z Y, Tian J T, *et al.* 2020. Borehole microseismic monitoring technology for fracturing in unconsolidated sandstone gas reservoir: a case study from the Sebei gas field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 35 (5): 1919-1925, doi: 10. 6038/pg2020DD0390.

附中文参考文献

鲍蕊, 林玮. 2019. 基于广义斯涅尔定律的声超常反射. 无损检测, 41 (2): 21-25.

楚琦琦, 胡宇, 林玮. 2021. 基于广义 Snell 定律的声超表面折射. 电子器件, 44 (2): 498-501.

董文波, 桂志先, 王亚楠, 等. 2023. 水平井压裂微地震监测成果的不对称性分析. 石油地球物理勘探, 58 (1): 161-169.

蒋星达. 2021. 微地震速度模型和高精度定位贝叶斯反演方法[博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, doi: 10. 27061/d. cnki. ghgdu. 2021. 005286.

李德周, 李丛, 袁青松. 2024. 基于井中微地震快速定位监测技术的煤系

页岩气水平井压裂效果评价——以南华北地区 J1HF 井为例. 地球物理学进展, 39(1): 207-215, doi: 10.6038/pg2024HH0139.

李亦佳. 2022. 微震信号传播速度模型反演成像与震源定位方法研究[博士论文]. 济南: 山东大学, doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2022.006699.

梁北援, 王建立. 2018. 对微地震监测的最大挑战: 目标特性不明. 科学技术与工程, 18(13): 14-21.

刘军. 2009. 基于射线追踪的微地震模型多波场正演模拟[硕士论文]. 青岛: 中国石油大学.

刘瑞强, 陈秀艳, 王礼锋. 2016. 基于斯涅耳定律精确测量水和玻璃等折射率的创新实验. 中国科技信息, (17): 17-18, 15.

刘文伍, 张钊. 2017. Zoeppritz 方程反射系数计算方法综述. 能源与节能, (12): 2-4, 16, doi: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2017.12.002.

刘洋, 魏修成. 2008. 转换型折射波传播规律及其在转换波静校正中的应用研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(S1): 204-210.

马昭军, 唐建明. 2007. P-SV 波反射系数计算方法综述. 勘探地球物理进展, 30(6): 433-439.

乔汉青, 刘财, 葛奇鑫, 等. 2022. 基于检波器间距约束的微地震初至拾取方法研究及应用. 地球物理学进展, 37(5): 2024-2035, doi: 10.6038/pg2022FF0468.

王升荣, 孙成禹, 蔡瑞乾, 等. 2023. 基于法向阻抗分量的 P-P 波反射系数近似表达与纵横波阻抗反演. 石油地球物理勘探, 58(4): 933-941, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.04.018.

温柔, 李栋, 黄科, 等. 2023. 基于横波分裂的井中微地震资料三分量波场特征分析. 测井技术, 47(3): 350-356, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2023.03.014.

杨瑞召, 赵争光, 王占刚, 等. 2016. 页岩气开发微地震监测技术. 上海: 华东理工大学出版社, 12.

杨文, 刘飞, 刘烽, 等. 2023. 基于深度学习和无线传输的非常规页岩气压裂微地震实时自动监测. 地球物理学进展, 38(4): 1656-1672, doi: 10.6038/pg2023GG0436.

赵超峰, 张伟, 田建涛, 等. 2018. 微地震事件解释实例. 石油地球物理勘探, 53(4): 770-777.

赵超峰, 周治岳, 田建涛, 等. 2020. 疏松砂岩气藏压裂井中微地震监测应用研究——以涩北气田为例. 地球物理学进展, 35(5): 1919-1925, doi: 10.6038/pg2020DD0390.