

引用格式:邱小雪,石学文,廖茂杰,等. 深层页岩储层裂缝识别及有效性评价方法研究及应用:以四川盆地南部为例[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 40-48.

QIU Xiaoxue, SHI Xuewen, LIAO Maojie, et al. Research and application of fracture identification and effectiveness evaluation methods for deep shale reservoirs: A case study in southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 40-48.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.005

# 深层页岩储层裂缝识别及有效性评价方法研究及应用

## ——以四川盆地南部为例

邱小雪<sup>1</sup>,石学文<sup>1</sup>,廖茂杰<sup>1</sup>,张洞君<sup>1</sup>,高翔<sup>1</sup>,杨杨<sup>1</sup>,钟光海<sup>1</sup>,刘鹏<sup>2</sup>

(1. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院,四川成都 610051;2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**四川盆地南部地区(以下简称川南)深层页岩储层断裂发育,直接影响页岩气水平井的工程施工和有效建产。基于川南五峰组—龙马溪组页岩岩心,开展岩石物理实验和数值模拟实验,得到了不同尺度、不同产状、不同充填物质的裂缝声学响应特征,分析了裂缝对声波衰减能力的影响因素,建立了1套页岩气水平井裂缝识别和有效性评价方法。结果表明:纵波、横波和斯通利波的振幅衰减受裂缝倾角和裂缝宽度的共同影响,其衰减能力随裂缝宽度增加呈指数增加,随裂缝倾角的增加而降低。斯通利波对充填流体裂缝敏感,可识别和评价含气、含水的有效裂缝;纵波和偶极横波对充填方解石裂缝敏感,可识别和评价充填方解石的无效裂缝。基于反射波成像识别的裂缝结果与成像测井、岩心识别裂缝类型一致,验证了有效性评价方法的可靠性。将研究成果应用于页岩气水平井实测资料,精细评价了页岩气水平井断裂风险位置,有效保障了“一段一策”压裂分段的优化设计。

**关键词:**裂缝;深层页岩;阵列声波;振幅衰减;有效性评价

中图分类号:TE319

文献标识码:A

## Research and application of fracture identification and effectiveness evaluation methods for deep shale reservoirs: A case study in southern Sichuan Basin

QIU Xiaoxue<sup>1</sup>, SHI Xuewen<sup>1</sup>, LIAO Maojie<sup>1</sup>, ZHANG Dongjun<sup>1</sup>, GAO Xiang<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, ZHONG Guanghai<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>2</sup>

(1. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the deep shale reservoirs of the southern Sichuan Basin, the development of fractures directly impacts the engineering construction and effective production of horizontal shale gas wells. Taking the shale cores in the Wufeng-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin as a case study, rock physics experiments and numerical simulations were conducted to obtain the acoustic response characteristics of fractures at different scales, orientations, and fillings. The study analyzed the factors affecting the attenuation capability of acoustic waves on fractures and established a set of fracture identification and effectiveness evaluation methods for horizontal shale gas wells. The results showed that the amplitude attenuation of P-waves, S-waves, and Stoneley waves was influenced by both the fracture dip angle and fracture width, with attenuation capacity exponentially increasing with fracture width and decreasing with the dip angle. Stoneley waves were sensitive to fluid-filled fractures and could be used to identify and evaluate gas-bearing and water-bearing effective fractures. P-waves and dipole S-waves were sensitive to calcite-filled fractures, able to identify and evaluate ineffective calcite-filled fractures. The fracture identification results based on reflected wave imaging were consistent with the results obtained from imaging logging and core identification, verifying the reliability of the effectiveness evaluation method. The research findings were applied to the actual data from horizontal shale gas wells, thoroughly evaluating the fracture risk positions in horizontal shale gas wells and effectively ensuring the optimized and tailored design for fracturing segments.

**Keywords:** fractures; deep shale; array acoustics; amplitude attenuation; effectiveness evaluation

收稿日期:2024-04-23。

第一作者简介:邱小雪(1995—),女,硕士,工程师,主要从事页岩气测井解释评价研究工作。地址:四川省成都市成华区建设北路一段83号,邮政编码:610051。E-mail:1195568422@qq.com

基金项目:中国石油科技项目“新区新层系有利区优选与勘探评价关键技术研究”(2023ZZ21-04)。

四川盆地南部地区(以下简称川南)深层页岩气资源量丰富、勘探潜力大。目前,奥陶系五峰组—志留系龙马溪组地层是页岩气产能建设的主力<sup>[1]</sup>。受多期构造运动影响,五峰组—龙马溪组页岩储层发育复杂断裂<sup>[2-6]</sup>,给页岩气开发带来了巨大挑战。研究表明:水平井井周裂缝或断层虽能增加储层的渗透性而提高产气率<sup>[7-9]</sup>,但当井周钻遇较大尺度的条状缝时,容易引起井筒套变和邻井压窜等工程复杂事件的发生<sup>[10]</sup>,因此裂缝的准确识别和评价对深层页岩气开发具有重要意义。针对裂缝识别方面,国内外研究学者已形成多种方法,比如基于成像测井可识别毫米级微裂缝<sup>[11]</sup>,但水平井油基泥浆成像的成本昂贵,资料处理复杂,在水平井裂缝识别中应用较少;斯通利波能量衰减法可识别近井筒裂缝或断层(探测范围介于0~3 m)<sup>[12-13]</sup>,资料容易受岩性和井眼的影响;地震裂缝预测技术有相干、边缘检测、蚂蚁体及曲率属性<sup>[14-16]</sup>,但受归位、分辨率、多解性等问题的影响,对于断距20 m以内的地震断裂成像预测的综合识别符合率较低。远探测声波测井技术是识别水平井周、井旁储层裂缝的重要方法<sup>[17]</sup>,可实现探测范围介于3~20 m的断裂识别,在碳酸盐岩及致密砂岩油气藏应用中有一定成效。相较于常规储层,页岩储层具有裂缝尺度小、声阻抗差异弱的特征<sup>[18]</sup>,基于远探测声波测井识别页岩气水平井裂缝存在多解性强,裂缝充填物质识别难等问题,亟待建立1套适用于页岩储层裂缝识别和有效性评价方法。

基于川南五峰组—龙马溪组野外露头页岩地层和井

下岩心资料,总结页岩裂缝在区域上的纵横向展布特征,开展含裂缝页岩纵横波振幅特征岩石物理实验和三维有限元数值模拟,分析不同产状、不同充填物质的过井裂缝声学特征,建立了1套适用于页岩气水平井的裂缝识别方法,为地震裂缝预测、区域地质认识、现场施工和生产需求提供有效指导。

## 1 区域裂缝发育特征

川南页岩储层主要目的层为奥陶系五峰组和志留系龙马溪组,经过多期沉降和抬升剥蚀演化过程发育了复杂天然裂缝带<sup>[19]</sup>。为明确川南深层页岩裂缝在区域上的展布特征,结合页岩野外露头和井下岩心资料,对页岩裂缝进行观察、描述和统计,为裂缝模拟实验提供建模参考。

### 1.1 露头裂缝特征

根据五峰组—龙马溪组野外露头地层发现,地表裂缝主要以构造成因的剪切缝为主,主要包括平面剪切缝和剖面剪切缝2种类型。受断裂影响,剪切缝附近区域产生断裂伴生缝,在部分露头地层可见直立缝和张性缝。根据野外露头资料统计结果表明:川南五峰组—龙马溪组地表天然裂缝具有延伸距离短、间距小的特点。天然裂缝的延伸长度主要以1~2 m为主,少有大于6 m的长距离延伸裂缝发育;各裂缝之间的距离小,间距主要以小于1 m为主,间距大于6 m的裂缝基本不发育(图1)。

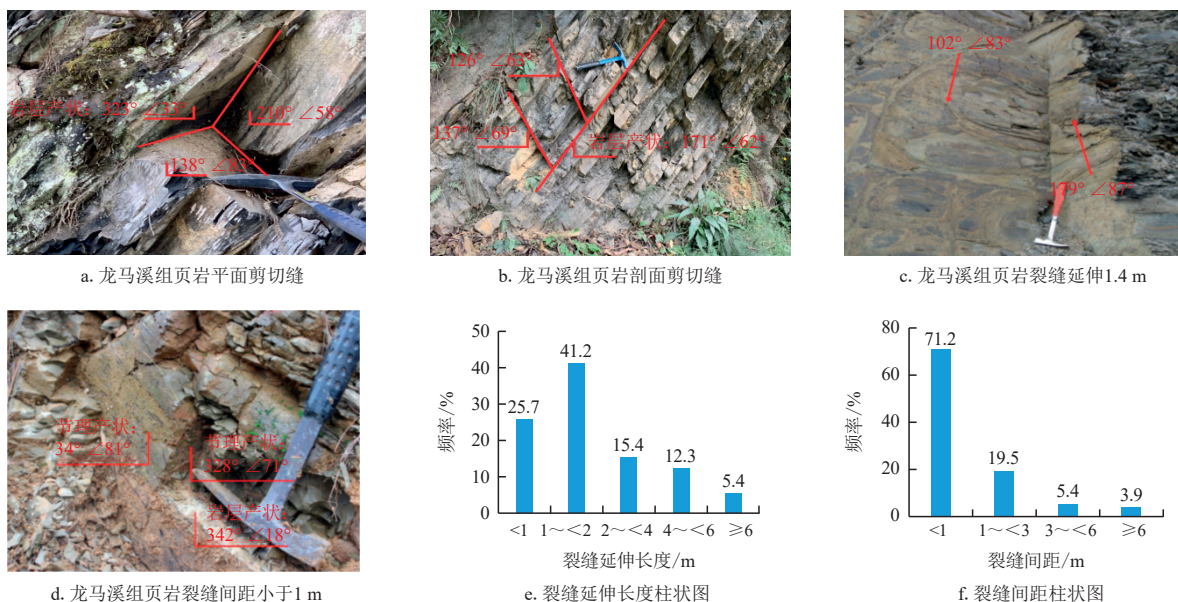


图1 川南五峰组—龙马溪组地表裂缝发育特征

Fig. 1 Surface fracture development characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin

## 1.2 岩心裂缝特征

对L203井区等6口典型深层页岩气井进行岩心描述,统计得到五峰组—龙马溪组一段天然裂缝发育产状、位置以及充填类型(图2)。结果表明:L203井区五峰组—龙马溪组页岩岩心中裂缝较为发育,主要以剪切缝为主,其次为层理缝、顺层滑脱缝及张性缝,同时含有少量的溶蚀缝(图2a)。裂缝类型主要以直立缝和高角度缝为主,其次为低角度缝和水平缝(层理)。不同单井及单井裂缝密度纵向变化具有显著差异,整体上五峰组裂缝密度最高,龙马溪组一段—亚段的1小层次之,储层段由底到顶(五峰组—龙马溪组一段—亚段)的裂缝密度逐渐降低,裂缝类型也由直立缝向水平缝过渡(图2b、图2c)。天然裂缝主要以微裂缝为主,小于1 mm的微裂缝占80%以上,裂缝充填程度较高,半充填缝和全充填缝占90%以上,直立缝及高角度缝以方解石充填为主(图2d、图2e、图2f)。总体而言,川南五峰组—龙马溪组页岩岩心裂缝具有角度高、宽度小以及充填程度高的特征。

## 2 页岩裂缝声学实验与模拟研究

为明确不同裂缝类型对声波响应特征的影响机理,基于区域裂缝充填类型和产状特征,分别开展含裂缝页岩纵横波振幅特征岩石物理实验和三维有限元数值模

拟,为页岩储层裂缝识别和有效性评价方法建立奠定理论基础。

### 2.1 页岩声学岩石物理实验与分析

#### 2.1.1 物理模型与实验设置

实验设置不同产状、不同充填物质的过井裂缝模型,包括2种充填类型(水、气),3种裂缝倾角( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ )以及7种裂缝宽度(0、50、100、300、600、1 000、2 000  $\mu\text{m}$ )的页岩样品。通过声学岩石实验测得原始页岩样品的纵波和横波速度、含不同特征裂缝岩心纵波和横波速度和振幅,进而开展不同裂缝对纵波和横波的影响分析(图3)。

#### 2.1.2 物理实验结果

实验得到不同类型岩心裂缝的纵、横波波波形,通过提取经过不同裂缝宽度、不同倾角以及不同充填物质的纵横波到达时间和振幅等参数。为表征声波在传播过程中能量损失程度,将无裂缝条件下的声波振幅值除以裂缝充填后的声波振幅值后取对数,可得到声波相对衰减系数,从而分析声学响应特征随裂缝属性参数的变化。如图4a、图4b所示,纵波和横波在经过充填空气的裂缝时,声波振幅明显衰减,并随着裂缝宽度的增加衰减增强。通过对比不同裂缝宽度、不同充填物质的纵、横波振幅衰

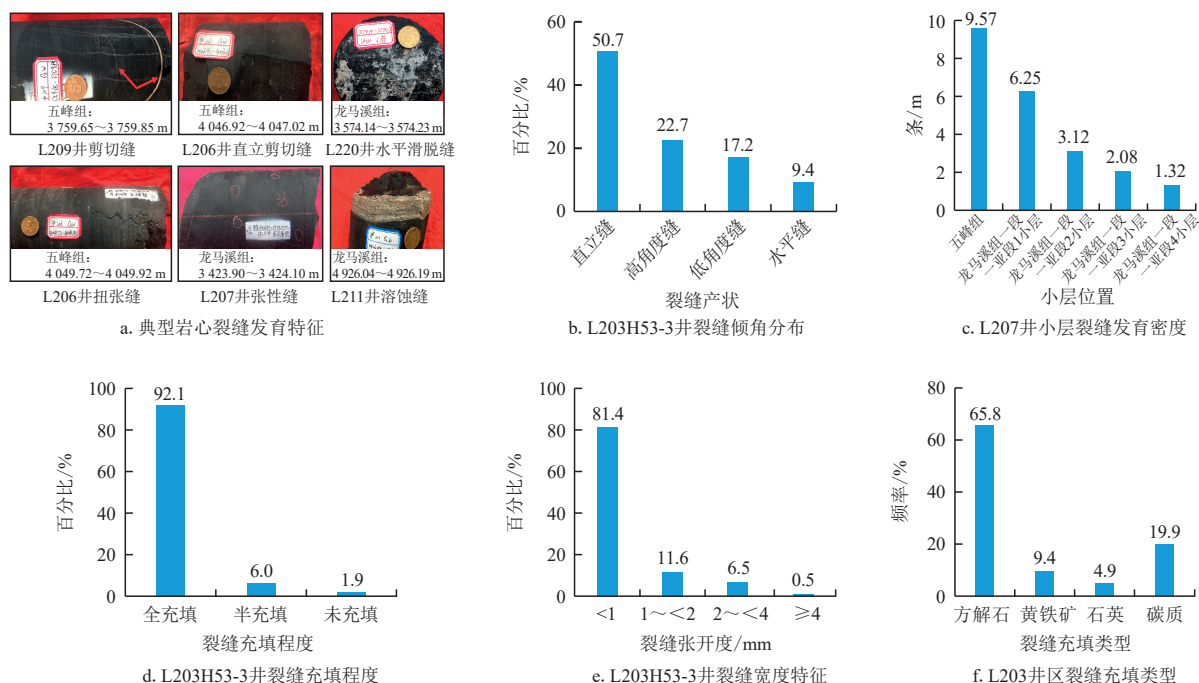


图2 L203井区五峰组—龙马溪组岩心裂缝特征统计

Fig. 2 Statistical characteristics of core fractures in Wufeng–Longmaxi Formation of well L203

减能力发现(图4c),在相同裂缝倾角和宽度条件下,空气充填裂缝比水充填裂缝引起的纵、横波衰减相对更大,但均随裂缝宽度的增大,纵、横波衰减系数呈对数规律增

大。对比不同裂缝倾角的声波衰减能力发现(图4d),裂缝宽度一定时,低角度比高角度裂缝对声波的衰减更明显。

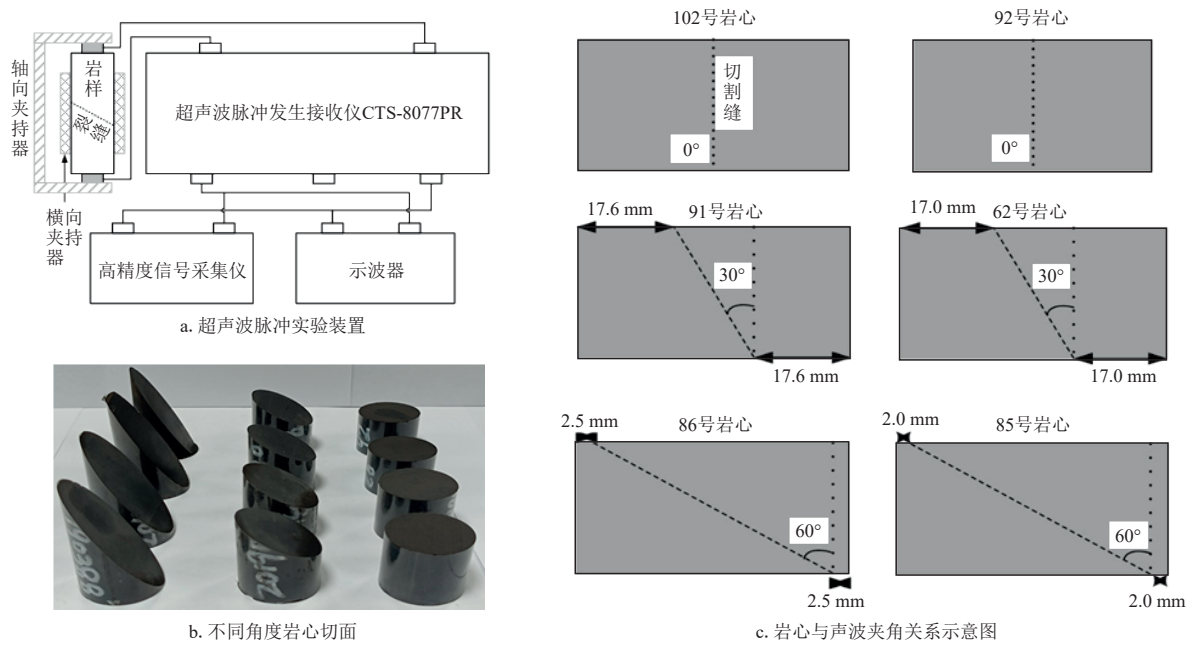


图3 岩石物理实验示意图  
Fig. 3 Schematic diagrams of rock physics experiments

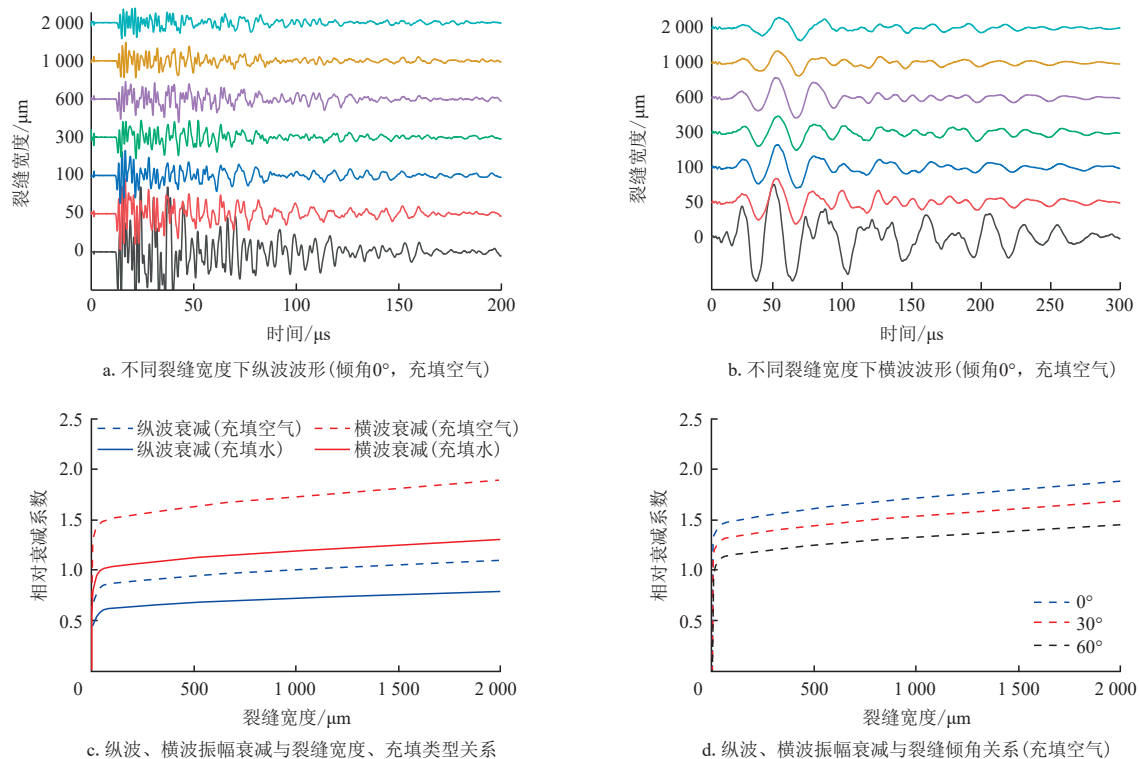


图4 不同倾角、不同填充类型、不同裂缝宽度下纵波和横波的振幅衰减变化  
Fig. 4 Amplitude attenuation changes of P-waves and S-waves under different dip angles, filling types, and fracture widths

## 2.2 有限差分数值模拟与分析

### 2.2.1 建模和参数设置

为进一步补充研究不同充填类型、不同倾角、不同裂缝宽度对声波衰减的影响,基于三维有限差分理论的声学正演模拟方法<sup>[20]</sup>,对页岩气水平井过井裂缝在不同井孔模式下的声波进行模拟研究。速度和应力作为描述声场的基本函数,可描述声波在各向同性介质中的传播特征,通过牛顿第二定律和胡克定律基本理论可综合推导得到有限差分方程组,见式(1),进而模拟声波响应特征。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + g_{xx} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + g_{yy} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + g_{zz} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + g_{xy} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + g_{xz} \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + g_{yz} \end{array} \right. \quad (1)$$

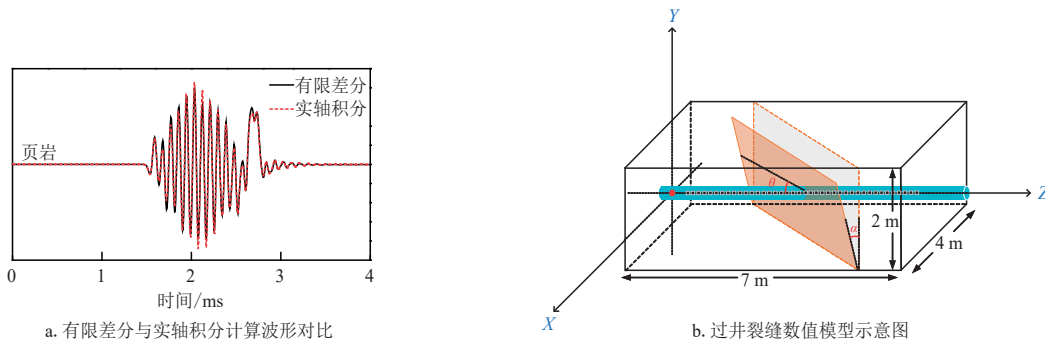
式中: $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 为应力源; $g_{xx}$ 、 $g_{yy}$ 、 $g_{zz}$ 、 $g_{xy}$ 、 $g_{xz}$ 、 $g_{yz}$ 为速度源; $\rho$ 为介质密度,单位 $\text{g/cm}^3$ ; $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 为介质中质点的振动速度,单位 $\text{m/s}$ ; $\sigma$ 为应力,单位 $\text{MPa}$ ; $\lambda$ 成为拉梅系数; $\mu$ 为剪切模量。

基于有限差分算法模拟得到的波形图与实轴积分解析计算的结果进行对比,两者波形基本一致(图5a),验证了模拟算法的合理性。几何建模包括空间模型和网格单元,模型大小为 $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 7\text{ m}$ ,网格尺寸为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (图5b)。模型主要包含井孔和裂缝2种要素。其中,井孔半径为 $0.1\text{ m}$ 且充填流体,其井轴与 $z$ 轴重合;过井裂缝作为研究的主体对象,与井轴斜交,在 $z$ 轴的交点坐标为 $4.5\text{ m}$ ,其宽度、倾角及充填物类型可变。数值模拟实验设置了3种充填类型(方解石、水、气),4种裂缝角度( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ),以及5种裂缝宽度的模型( $0$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $30$ 、 $40\text{ mm}$ )。

### 2.2.2 数值模拟结果

将数值模拟得到的声波与原始波(无裂缝条件下的声波)的振幅进行对比,得到不同倾角、不同充填类型、不同裂缝宽度下斯通利波、横波、纵波振幅衰减变化结果(图6)。振幅衰减是以无裂缝条件下的声波振幅为标准,与裂缝模型接收到的声波振幅进行差值后除以原始声波振幅得到的比值。在充填水的有效缝中,斯通利波、偶极横波和纵波明显发生衰减,其振幅衰减与裂缝宽度和裂缝倾角的变化关系基本都为单调变化关系,即振幅衰减能力随裂缝宽度增加呈指数增加,随裂缝倾角增加而降低,可用于识别有效裂缝;在充填空气的有效缝中,斯通利波、偶极横波和纵波的衰减更加明显,其振幅衰减与裂缝宽度和裂缝倾角的变化关系与充填水的有效缝衰减一致,均为单调变化关系;在充填方解石的无效缝中,偶极横波和纵波有一定的衰减,且纵波的衰减强于偶极横波,可识别和定量评价充填方解石裂缝,而斯通利波几乎没有衰减,且与裂缝倾角和裂缝宽度没有响应,即不能识别充填方解石裂缝。

通过对正演模拟计算得到的数据进行分析,进一步明确了页岩不同充填类型裂缝声学响应特征,且变化规



注: $\theta$ 为裂缝与地层夹角,单位( $^\circ$ ); $\alpha$ 为裂缝倾角,单位( $^\circ$ )。

图5 过井裂缝声学数值模拟

Fig. 5 Acoustic numerical simulation of wellbore fractures

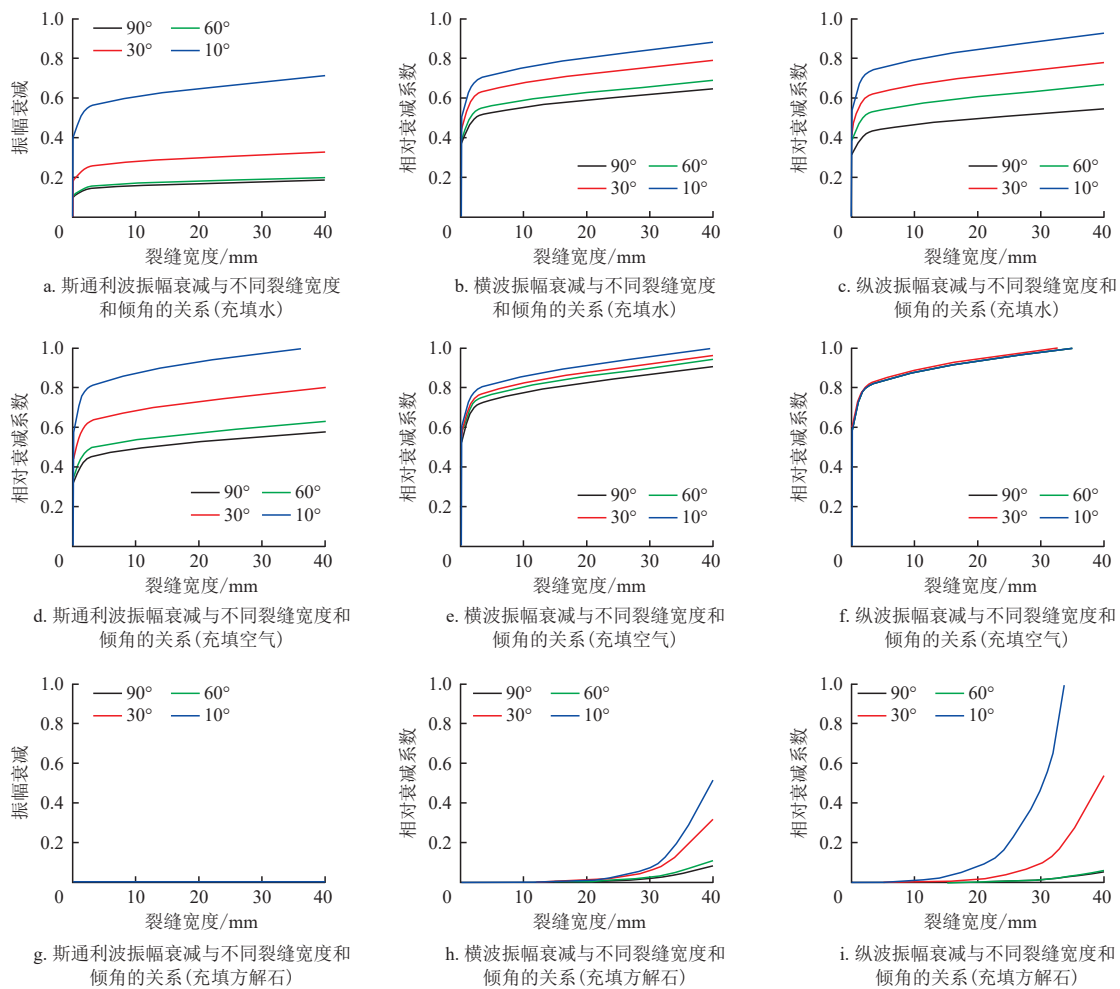


图6 不同倾角、不同充填类型、不同裂缝宽度下斯通利波、横波、纵波衰减变化

Fig. 6 Attenuation changes of Stoneley waves, S-waves, and P-waves under different dip angles, filling types, and fracture widths

律与岩石物理实验结果基本吻合,从而验证了数值模拟实验的可靠性。通过对比偶极横波和斯通利波的衰减能力,得到裂缝的有效性评价方法,即当均有衰减时可判断为有效缝,当斯通利波无衰减而偶极横波有衰减时,可判断为无效缝;从图6可以看出,基于声波衰减能力识别有效缝的识别下限为5 mm,无效缝的识别下限为10 mm。

### 3 实例应用效果

根据声波传播理论,当声波经过裂缝时,其大部分能量衰减转换为反射波,利用反射波成像可实现裂缝的识别,结合前文裂缝的声波模拟研究形成的充填类型有效性评价方法,综合形成了1套页岩气水平井过井裂缝识别和有效性评价方法,并对实际页岩气生产井进行实例应用。

#### 3.1 反射波处理和成像

Kirchhoff积分偏移<sup>[21]</sup>根据波动方程的Kirchhoff积分解可描述井下绕射点的特征,将相同绕射点的能量进行汇聚,再归位到对应的绕射点上,精确对反射波进行定位。基于阵列声波测井资料进行反射波处理和成像,包括声波资料预处理、高精度反射波分步提取、全方位快速精细偏移成像3大步骤,形成1套页岩气水平井井筒反射波成像技术,其反射体代表过井裂缝或断层等有效信息。

#### 3.2 页岩裂缝识别与有效性评价

为验证基于反射波成像识别裂缝结果的可靠性,分别将裂缝成像结果与电成像和岩心识别的裂缝结果进行对比。成像测井可以识别井壁毫米级细微裂缝及充填类

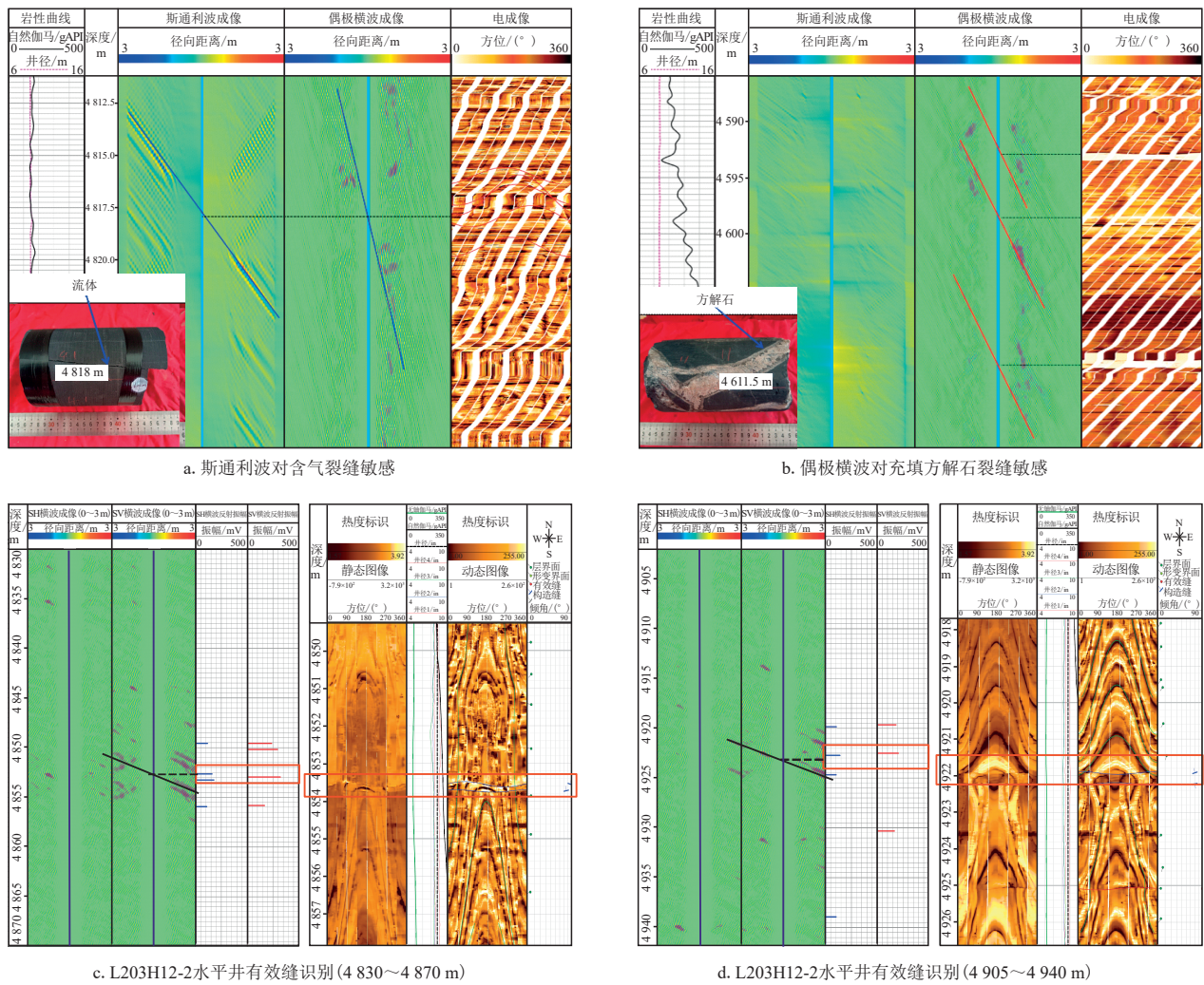
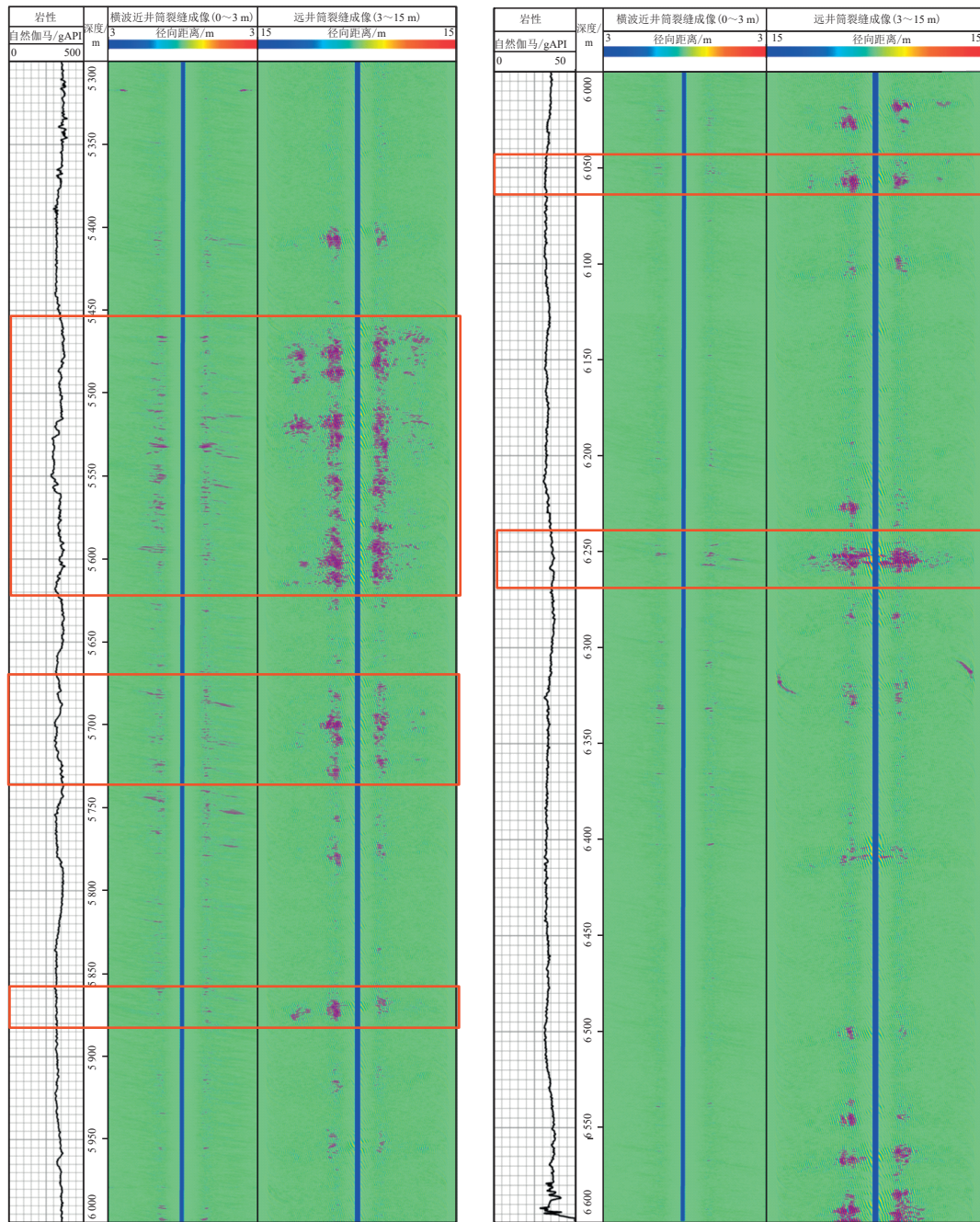


图7 直井/水平井有效性评价结果验证  
Fig. 7 Verification of effectiveness evaluation results for vertical/horizontal wells

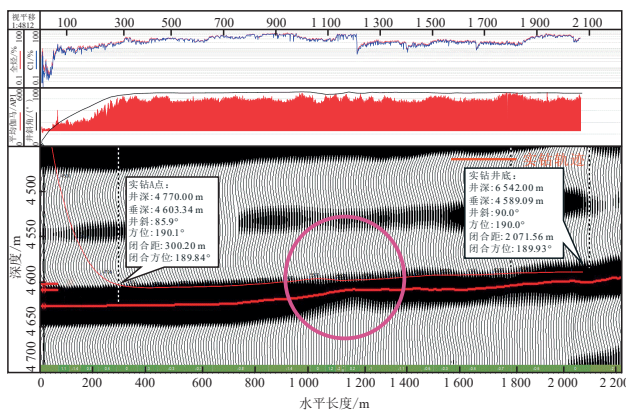
型<sup>[22]</sup>,当页岩裂缝充填方解石时,具有高电阻特征,在电成像图上呈现明显的亮色条纹;当页岩裂缝为张开状态时充填泥浆或地层水,具有低阻特征,在成像图上呈现暗色条纹<sup>[23]</sup>。如图7a所示,在直井中过井裂缝充填流体时,斯通利波和偶极横波的反射波均有响应,且电成像上表现为暗色的正弦曲线(反映有效缝);如图7b所示,当过井裂缝充填方解石的无效缝时,仅存在偶极横波滑行反射波而斯通利波无响应,在电成像上表现为亮色的正弦曲线(反映无效缝)。在水平井中,油基电成像在高角度裂缝中有暗色条纹显示(反映有效缝),同时在SH横波成像与SV横波成像均有响应,综合可判断为有效裂缝。结合电成像和岩心以及远探测声波技术,可综合判断井筒裂缝的有效性评价结果,同时验证了裂缝识别和有效性评价方法的可靠性。

### 3.3 页岩气水平井实测资料应用

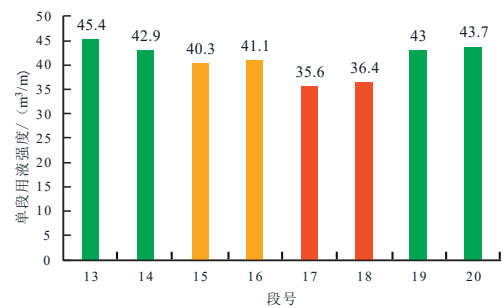
将裂缝识别和有效性评价方法应用于实际生产井Z201井的阵列声波资料处理,明确了各井段的裂缝发育特征。Z201井的远探测声波识别成果图中深度介于5400~5900m的井段有多组反射体出现(图8a),表现为复杂裂缝发育;而深度大于5900m的井段裂缝发育一般,仅有3处规模较小的有效缝发育。在地震剖面上,显示深度介于5500~5700m的井段疑似有小断层发育(图8b),而靠近B点附近地层(深度大于6000m)较缓,无明显风险段发育。综合地震和远探测处理结果,降低了15~18压裂段(深度介于5600~5900m)施工规模,适当增加了5900m以深井段的压裂排量,保证了井筒完整性,最终Z201井获得高产工业气流。



a. Z201井远探测声波识别裂缝结果



b. Z201井地震剖面成像



c. Z201井压裂分段用液强度

图8 远探测声波识别有效缝应用

Fig. 8 Application of far-field acoustic wave detection in identifying effective fractures

## 4 结论

1) 斯通利波对充填流体裂缝敏感,可识别和评价充填气或水的有效裂缝,纵波和偶极横波对充填方解石裂缝敏感,可识别和评价充填方解石的无效裂缝。

2) 纵波衰减能力最强,斯通利波衰减能力最弱,有效缝识别下限裂缝宽度为5 mm,无效缝识别裂缝宽度为下限10 mm。

3) 基于Kirchhoff偏移成像法的反射波识别裂缝技术与岩心及电成像结果对比,验证了裂缝有效性评价方法的可靠性,可用于页岩气水平井断裂风险位置精细评估。

### 参考文献

- [1] 吴建发,张成林,赵圣贤,等. 川南地区典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(8): 1385-1400.  
WU Jianfa, ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, et al. Typical types of shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin and enlightenment of exploration and development[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(8): 1385-1400.
- [2] 聂海宽,李沛,党伟,等. 四川盆地及周缘奥陶系-志留系深层页岩气富集特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 648-659.  
NIE Haikuan, LI Pei, DANG Wei, et al. Enrichment characteristics and exploration directions of deep shale gas of Ordovician-Silurian in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 648-659.
- [3] 崔悦,李熙喆,郭伟,等. 川南深层奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩裂缝方解石脉对页岩气运移富集的启示[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1199-1208.  
CUI Yue, LI Xizhe, GUO Wei, et al. Enlightenment of calcite veins in deep Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shales fractures to migration and enrichment of shale gas in southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1199-1208.
- [4] 胡浩浩,鞠玮,郭伟,等. 川南海坝区块页岩气储层裂缝发育特征与预测[J]. 非常规油气, 2023, 10(1): 61-68.  
HU Haohao, JU Wei, GUO Wei, et al. Development characteristics and prediction of natural fractures within shale gas reservoirs, Haiba Block of southern Sichuan Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 61-68.
- [5] 刘明,李彦婧,潘兰,等. 南川地区页岩储层构造裂缝特征及其定量预测[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 8-14.  
LIU Ming, LI Yanjing, PAN Lan, et al. Structural fracture characteristics and quantitative prediction of shale reservoir in Nanchuan Area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 8-14.
- [6] 何建华,李勇,邓虎成,等. 川东南永川地区龙马溪组页岩储层构造裂缝特征及期次演化研究[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 298-311.  
HE Jianhua, LI Yong, DENG Hucheng, et al. Study on tectonic fracture characteristics and stage evolution of Longmaxi shale reservoir in Yongchuan, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(3): 298-311.
- [7] 吴建发,赵圣贤,范存辉,等. 川南长宁地区龙马溪组富有机质页岩裂缝发育特征及其与含气性的关系[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 428-446.  
WU Jianfa, ZHAO Shengxian, FAN Cunhui, et al. Fracture characteristics of the Longmaxi Formation shale and its relationship with gas-bearing properties in Changning area, southern Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 428-446.
- [8] 胡之华,李树新,王建君,等. 复杂人工裂缝产状页岩气藏多段压裂水平井产能评价[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 459-466.  
HU Zhijian, LI Shuxin, WANG Jianjun, et al. Productivity evaluation of multi-stage fracturing horizontal wells in shale gas reservoir with complex artificial fracture occurrence[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 459-466.
- [9] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响: 以渝东南地区阳春沟构造带五峰—龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 126-134.  
MA Jun. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchongou structural belt in southeast Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 126-134.
- [10] 韩玲玲,李熙喆,刘照义,等. 川南泸州深层页岩气井套变主控因素与防控对策[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 853-861.  
HAN Lingling, LI Xizhe, LIU Zhaoyi, et al. Influencing factors and prevention measures of casing deformation in deep shale gas wells in Luzhou block, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 853-861.
- [11] 黄振华,程礼军,刘俊峰,等. 微电阻率成像测井在识别页岩岩相与裂缝中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 121-123.  
HUANG Zhenhua, CHENG Lijun, LIU Junfeng, et al. Application of micro-resistivity image logging in identifying shale facies and fractures[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 121-123.
- [12] 李宁,王克文,刘鹏,等. 不同裂缝条件下斯通利波幅度衰减实验[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 258-265.  
LI Ning, WANG Kewen, LIU Peng, et al. Experimental study on attenuation of Stoneley wave under different fracture factors[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 258-265.
- [13] 夏飞月,苏远大,唐晓明. 斯通利波在渗透地层和裂缝带的反射及透射: 解析和数值方法模拟对比[J]. 地球物理学报, 2022, 65(4): 1508-1518.  
XIA Feiyue, SU Yuanda, TANG Xiaoming. Stoneley wave reflection and transmission across permeable formations sand fracture zones: Comparison of analytical and numerical modeling results[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(4): 1508-1518.
- [14] 王飞,程礼军,刘俊峰,等. 叠后地震属性识别页岩气储层裂缝研究及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 113-116.  
WANG Fei, CHENG Lijun, LIU Junfeng, et al. Research and application of post stack seismic attribute identification of shale gas reservoir fractures[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(5): 113-116.
- [15] 李丛,张栋,朱德胜,等. 基于宽方位三维地震数据的裂缝检测技术研究及应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1041-1046.  
LI Cong, ZHANG Dong, ZHU DeSheng, et al. Research and application of crack detection technology based on wide-azimuth 3D seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 37(3): 1041-1046.
- [16] 孙小琴. 基于井震结合的南川地区页岩气储层叠后裂缝预测技术[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 462-467.  
SUN Xiaoqin. Poststack fracture prediction technology of shale gas reservoir based on combination of well and seismic in Nanchuan[J].

(下转第55页)

- in southeastern Chongqing[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(6): 1078-1088.
- [12] 薛冈,熊炜,张培先. 常压页岩气藏成因分析与有效开发:以四川盆地东南缘地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(5): 668-675.  
XUE Gang, XIONG Wei, ZHANG Peixian. Genesis analysis and effective development of normal pressure shale gas reservoir: A case of Wufeng-Longmaxi shale gas reservoir in southeast margin of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(5): 668-675.
- [13] 何希鹏,卢比,房大志,等. 渝东南彭水—武隆地区常压页岩气生产特征[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(5): 72-79.  
HE Xipeng, LU Bi, FANG Dazhi, et al. Production characteristics of normal pressure shale gas in Pengshui-Wulong area, southeast Chongqing[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(5): 72-79.
- [14] 何希鹏,卢比,何贵松,等. 渝东南构造复杂区常压页岩气生产特征及开发技术政策[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 224-240.  
HE Xipeng, LU Bi, HE Guisong, et al. Production characteristics and optimized development technologies for normal-pressure shale gas in the structurally complex areas of southeastern Chongqing[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 224-240.
- [15] 姚红生,房启龙,袁明进,等. 渝东南常压页岩气工程工艺技术进展及下一步攻关方向[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(6): 1132-1142.  
YAO Hongsheng, FANG Qilong, YUAN Mingjin, et al. Progress of normal-pressure shale gas engineering technology in southeast Chongqing and the research direction of next steps[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(6): 1132-1142.
- [16] 周博成,熊炜,赖建林,等. 武隆区块常压页岩气藏低成本压裂技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(3): 80-85.  
ZHOU Bocheng, XIONG Wei, LAI Jianlin, et al. Low-cost fracturing technology in normal-pressure shale gas reservoirs in Wulong Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(3): 80-85.
- [17] 蒋恕,李园平,杜凤双,等. 提高页岩气藏压裂井射孔簇产气率的技术进展[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 9-22.  
JIANG Shu, LI Yuanping, DU Fengshuang, et al. Recent advancement for improving gas production rate from perforated clusters in fractured shale gas reservoir[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(1): 9-22.
- [18] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等. 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(6): 1-14.  
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 1-14.
- [19] 史毅,郑斌,张宇,等. 页岩油经济可采储量起算标准计算方法:以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. *中国矿业*, 2021, 30(9): 181-187.  
SHI Yi, ZHENG Bin, ZHANG Yu, et al. Methods of determining commercial oil flow standard in shale reserves estimation: A case study of Permian Lucaogou formation in Jimusar depression[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(9): 181-187.
- [20] 李晔. 致密砂岩气藏储量起算标准的确定及应用[J]. *石化技术*, 2020, 27(7): 117-118.  
LI Ye. Determination and application of reserve calculation standards for tight sandstone gas reservoirs[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 27(7): 117-118.

(编辑 尹淑容)

(上接第48页)

- Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(3): 462-467.
- [17] CAI M, WU H L, LIU P, et al. Intelligent calculation method of relative sonic attenuation and its application to fracture evaluation in tight sandstone reservoir[J]. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2022, 218: 110968.
- [18] 苟其勇,丁拼搏,凌玮桐,等. 川南页岩地层裂缝地震物理模拟及敏感属性分析[J]. *石油物探*, 2023, 62(2): 314-326.  
GOU Qiyong, DING Pinbo, LING Weitong, et al. Seismic physical modeling and sensitive attribute analysis of fractures in the shale layer in the southern Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(2): 314-326.
- [19] FAN H, LIU P, ZHAO H, et al. Forward modeling of P- and S-waves response of fractures intersected with horizontal wells in tight reservoirs[J]. *Front. Earth Sci.*, 2023, 11: 1149171.
- [20] 施振生,赵圣贤,赵群,等. 川南地区下古生界五峰组—龙马溪组含气页岩岩心裂缝特征及其页岩气意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1087-1101.  
SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHAO Qun, et al. Fractures in cores from the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin and their implications for shale gas exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1087-1101.
- [21] 曹国滨,宁鹏鹏,刘斌,等. 三维克希霍夫积分法叠前时间偏移快速成像方法: CN202110883510.8[P]. 2024-02-10[2024-02-16].  
CAO Guobin, NING Pengpeng, LIU Bin, et al. Three dimensional Kirchhoff integration method for fast imaging of pre stack time migration: CN202110883510.8[P]. 2024-02-10[2024-02-16].
- [22] 张庄,章顺利,何秀彬,等. 川西坳陷须家河组二段裂缝发育特征及形成主控因素:以合兴场气田为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(5): 581-590.  
ZHANG Zhuang, ZHANG Shunli, HE Xiubin, et al. Development characteristics of fractures in the second member of Xujiahe Formation in Hexingchang Gas Field, western Sichuan Depression and their main control factors of formation: A case study of Hexingchang Gas Field[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(5): 581-590.
- [23] 邹榕,徐中祥,张晓明,等. 顺北和托甫台区块奥陶系断裂结构单元测井响应特征初探[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 18-23.  
ZOU Rong, XU Zhongxiang, ZHANG Xiaoming, et al. Log response characteristics of Ordovician fracture unit in Shunbei and Tuofutai block[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 18-23.

(编辑 常燕)