

多分量裂缝预测技术研究及其在川南页岩气工区的应用

杨海涛¹, 黄平辉², 曹中林¹, 王 栋¹, 周 强¹, 闫媛媛², 王鸿燕¹

(1. 中国石油集团东方地球物理勘探公司, 成都 610213;

2. 中国石油西南油气田公司, 成都 610051)

摘要: 与常规油气相比, 页岩中普遍含气, 但是单井的产量变化大, 通过改造形成裂缝网络的页岩气井才具有工业开发价值。目前, 页岩裂缝预测的方法较多, 大多数是基于纵波地震资料的, 而利用多分量地震资料预测裂缝发育区仍是研究人员探索和努力的方向。这里首次运用转换横波地震资料对页岩气的裂缝发育情况进行预测研究。首先, 利用转换波模型正演, 结合多波地震资料对比识别页岩的小断裂、小断层。其次, 通过基于横波分裂特性的裂缝预测技术对高角度的裂缝走向和密度进行预测。通过四川盆地实际资料应用表明, 多分量裂缝预测技术能够有效识别页岩气的裂缝发育情况, 多分量裂缝预测效果明显优于纵波叠前裂缝预测, 成果更加合理。

关键词: 转换波模型正演; 横波分裂技术; 页岩气多波裂缝预测

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.06

0 引言

我国的页岩气资源量丰富, 而国内的主要页岩气资源分布在四川盆地^[1]。与常规油气相比, 页岩中普遍含气, 但还没有达到广泛的勘探开发地步, 其根本原因在于致密的页岩渗透率通常很低(小于1 mD), 目前已投入开发的页岩气产区通常天然裂缝系统比较发育, 但是单井的产量变化较大, 只有通过压裂改造形成裂缝网络的页岩气井才具有较大的工业开发价值^[2-3]。

实践证明, 裂缝不仅是页岩气的储集空间, 也是页岩气的渗流通道, 是页岩气从基质孔隙流入井底的必要途径。目前, 裂缝的检测方法较多, 大多数是基于纵波地震资料的; 而随着地震勘探技术的进步, 在四川盆地内多个工区开展了三分量地震勘探即纵波震源激发, 三分量检波器接收, 可以获得包括纵波和转换横波的地下信息。转换横波通过裂缝性地层时,

将分裂为快横波(S_1)和慢横波(S_2), 利用横波分裂信息, 可以研究介质的方位各向异性, 探测裂缝方位和裂缝发育密度。因此, 利用分裂的快慢横波成为研究裂缝方向及其发育程度的最直接最可靠的方法^[4-9]。

笔者首次运用转换横波地震资料对页岩气的裂缝发育情况进行探索性研究。首先, 利用多波模型正演的方法, 结合多波地震资料的对比对小断层、小断裂进行预测, 搞清不同裂缝发育带的走向以及相互切割关系; 其次, 利用基于转换横波偏振特性的裂缝预测技术对高角度的裂缝走向和密度进行预测。通过四川盆地实际多波地震资料的应用表明, 多波裂缝预测技术能够有效的识别页岩的裂缝发育情况, 获得的预测成果优于纵波叠前裂缝预测成果, 与成像测井预测的结果吻合。

1 模型正演

页岩层断裂、断层是影响页岩气开发的重要地

质条件。由于地震分辨率的影响,对断层的识别能力有限。根据近年的研究成果,纵波地震剖面仅能识别断距大于 10 m 的小断层。为了验证转换波识别小断层的优势,本次分别进行了不同断距的纵波和转换波的模型正演分析,根据实钻井分析,非页岩储层段 377 m,纵波速度为 4 100 m/s,横波速度为 2 200 m/s,密度为 2.7 g/cm³;页岩储层 59 m,纵波速度为 3 900 m/s,横波速度为 2 150 m/s,密度为 2.6 g/cm³;下伏岩层纵波速度为 6 300 m/s,横波速度为 3 100 m/s,密度为 2.7 g/cm³。在页岩储层段顶底界设计了不同断距的断层,分别为 10 m、15 m、20 m 和 25 m。由前述地震资料频谱分析可知,研究区纵波主要目的层主频为 30 Hz,与纵波对应的转换波主频为 20 Hz。对于正演模拟来说,与纯纵波或横波模拟相比,转换波模拟比较复杂。本文通过对炮点和检波点分别下延的思想采用雷克子波作为震源利用单程波方程实现转换波共炮记录的正演模拟,模拟得到的转换波单炮记录具有无直达波,多次波干扰的特点,然后通过常规的处理获得剖面(图 1)。而单程波方程共炮集记录波场模拟采用几何扩散原理,即将炮点和检波点同时向下延拓,波场延拓采用纵横向可变速的傅里叶有限差分(FFD)方法^[10]。一维声波方程在频率—空间域表示为:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = i \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \bar{P} \quad (1)$$

其中: $v=v(x,z)$, $\bar{P}=\bar{P}(x,z,\omega)$;延拓公式可以表示为:

$$\bar{P}(x,z_{i\pm 1},\omega) = \bar{P}(x,z,\omega) e^{\pm iA\Delta z} \quad (2)$$

式(2)中 $A = \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - \frac{k^2 v^2}{\omega^2}}$ 。k 为波数; ω 为时间角频率;利用公式(2)对炮点和检波点分别进行波场延拓,对炮点和检波点的波场进行互相关,再与该处反射系数相乘,得到该反射点处波场值。对同一时间点处的波场值进行叠加即可形成该时间点处的合成记录。

图 1 中的小断层就是我们重点关注的研究对象。从图中可以看到,在 15 m~25 m 的断裂位置,纵波和转换波的同相轴都存在明显扭动,而 10 m 的断裂位置处,纵波同相轴存在十分微小的抖动,转换波同相轴的变化略大于纵波。分析其原因,由于纵波和横波的传播速度不一样,横波速度较纵波速度低,由旅行时差公式(3)可知,在穿过同样落差的垂向距离时,转换波地震剖面相应的走时较大,因此在相同的视分辨率条件下,PS 波的断距时间落差大于 PP 波,其对断层的分辨能力稍强。具备更好地识别小断裂、小断层的能力。

$$\Delta T_{pp} = 2H/V_p$$

$$\Delta T_{ps} = H/V_p + H/V_s \quad (3)$$

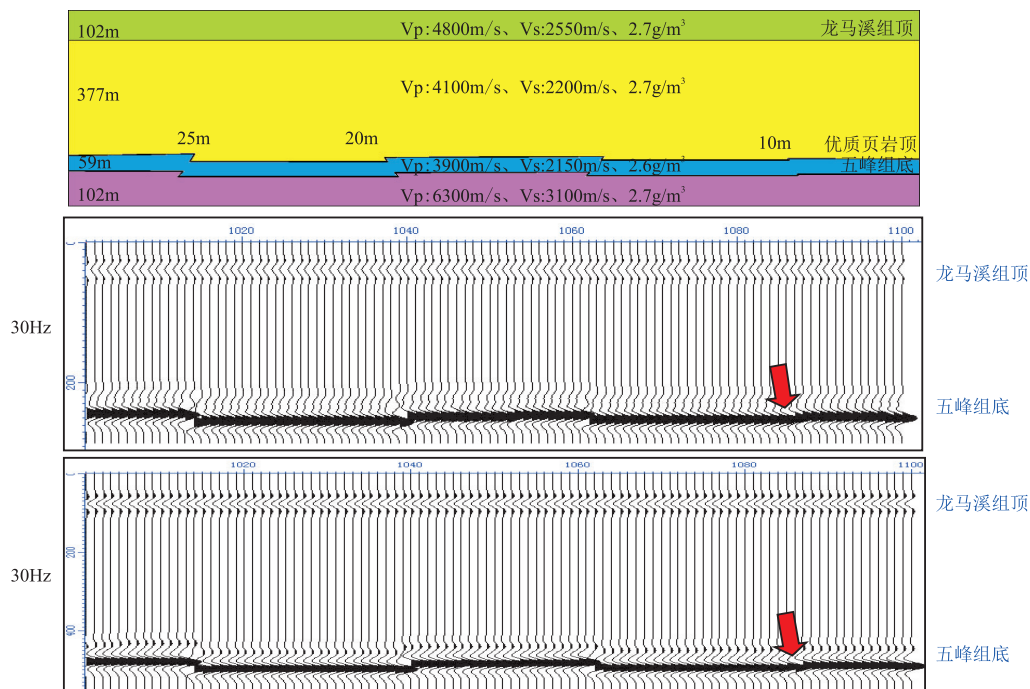


图 1 多分量不同断距的模型正演

Fig. 1 Forward modeling of multicomponent models with different fault distances

2 基于横波分裂特性的裂缝预测技术

横波分裂是指当横波穿过 HTI 介质时,若横波的偏振方向与裂缝走向不一致,那么入射的横波在 HTI 介质中的质点振动就会分裂成两个相互垂直的分量,以快、慢不同的速度传播,该现象被称为横波分裂^[10](图 2)。将横波偏振方向平行于裂缝走向的分量称为快横波,以 S_1 表示,快横波传播的速度较快,以基质速度(岩石骨架的速度)传播;将横波偏振方向垂直于裂缝发育方向的分量称为慢横波,以 S_2 表示,慢横波传播的速度相对较慢,是以岩石骨架和裂缝中填充流体的总速度传播。裂缝走向、裂缝发育密度和裂缝中填充流体类型影响着 S_1 和 S_2 的偏振方向、传播速度(或者叫做时间延迟)、频谱与振幅属性。横波分裂后快横波和慢横波传播到地表,按照地表观测系统坐标系分解、重新合成,被水平检波器 X 分量和 Y 分量接收到。因此,当地面布置的测线方向与裂缝方向不平行时,接收到的 X 分量和 Y 分量记录中都含有快、慢横波的信息。

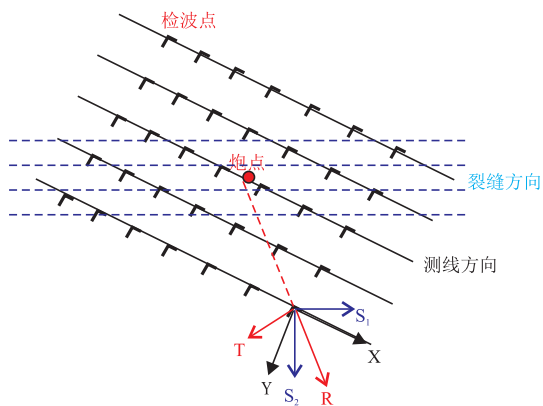


图 2 波分裂原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear wave splitting

研究成果表明,利用 X 和 Y 分量记录计算分析各种横波分裂特征参数可以检测地下储层中裂缝发育的走向、发育密度、辨别裂缝中填充的流体类型等,这对各种类型裂缝型油气藏的勘探和开发具有极其重要的意义。

根据 HTI 介质的横波分裂理论,裂缝型储层中裂缝的走向和发育密度的求取可以转化为快横波(S_1)的偏振方位角度 β 和快、慢横波穿透地层的传播时间延迟量 τ 的求取。横波分裂后,快、慢横波穿

过地层的时间延迟指示了 HTI 介质中裂缝的发育程度。时间延迟量即快、慢横波的时差可以表示为 $\tau = t_2 - t_1$ 。 t_1 和 t_2 分别为快横波(S_1)和慢横波(S_2)穿过目的层 HTI 介质所需的传播时间。 τ 值的大小反映了 HTI 介质中裂缝的发育情况,裂缝发育程度越高, τ 值越大,反之越小。

三维转换波资料中,每个方位角记录的信息都是快、慢横波的矢量合成。因此,本文创新提出基于横波分裂特性的裂缝预测技术,替代传统的能量比值法,工作效率大大提高。该方法采用三维地震资料的某一个方位角的地震资料通过角度扫描,去寻找裂缝方向。通过旋转公式(2)进行矢量合成与分解,可以得到一系列的所谓伪快慢横波波场:

$$\begin{pmatrix} S1_i \\ S2_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ T \end{pmatrix} \quad (4)$$

在式 4 中, α_i 为矢量分解与合成的角度和径向方向的夹角, $S1_i$ 表示矢量分解与合成得到的一系列快横波, $S2_i$ 表示矢量分解与合成得到的一系列慢横波, i 表示方位角度扇区的序号,其为从 1 开始递增的正整数; R 表示径向分量; T 表示切向分量。

在 n 个角度中,总会找到一组快、慢横波波场与真正的快、慢横波波场一致或最大程度近似。评价角度扫描是否找到裂缝方向的标准就是各组波场的互相关值是否最大。当互相关值最大时,所对应的角度就是裂缝的走向,此时互相关最大值即快、慢波的时差就是裂缝发育程度。在 S_1 和 S_2 道集上目的层的时窗内做相关计算,得到的快、慢横波的时延:

$$f(k) = \sum_{j=L}^M \left(\sum_{i=1}^N S1(i, j) S2(i, j+k) \right) \quad (5)$$

上式取最大值时对应的 k 值乘以采样间隔即为快、慢横波之间的时延 τ 。式中, L, M 为分析时窗起始和终止采样点序号, N 为分方位角道集中的总道数。

3 实际地震资料应用

本次采用四川盆地页岩气示范区的三维三分量地震资料进行了应用。该资料采用“22L×10S×312R 正交”观测系统,面元为 15 m×15 m,覆盖次数 143 次,纵横比 0.7,满覆盖面积为 200 km²。前期纵波地震资料已在该区页岩气开发中发挥了重要作用。

但是随着勘探的深入,页岩气高效勘探开发存

在的问题也越来越突出。由于页岩各向异性强,利用常规纵波叠前、叠后裂缝预测技术难以识别微小裂缝且预测精度较低,无法满足页岩气水平井钻进及压裂改造和开发的需求。而多分量地震勘探技术在小断裂识别及裂缝预测方面能有效降低单一纵波的多解性,提高预测的精度。

笔者通过对原始资料的分析,总结了转换横波处理的难点,开展了针对性的转换横波处理技术研究与应用,形成了一套基于转换横波综合静校正、分步多域联合噪声压制、各向异性四参数速度分析、

OVT 域叠前时间偏移的关键处理技术及流程,获得了波组特征清晰、信噪比较高、同相轴连续性好、偏移归位合理的转换波地震资料,为该区河道砂岩多波储层精细预测及裂缝预测奠定了基础。

通过该区实际纵波和转换横波的地震剖面的对比发现,图 3 为转换横波与纵波处理成果剖面,通过对比两者的波组关系和波形特征相似,主要标志层、构造特征一致,但小断层在转换横波地震剖面更易于识别。综合转换横波地震资料在该区新增解释 III 级断层 20 条,IV 级断层 30 条。

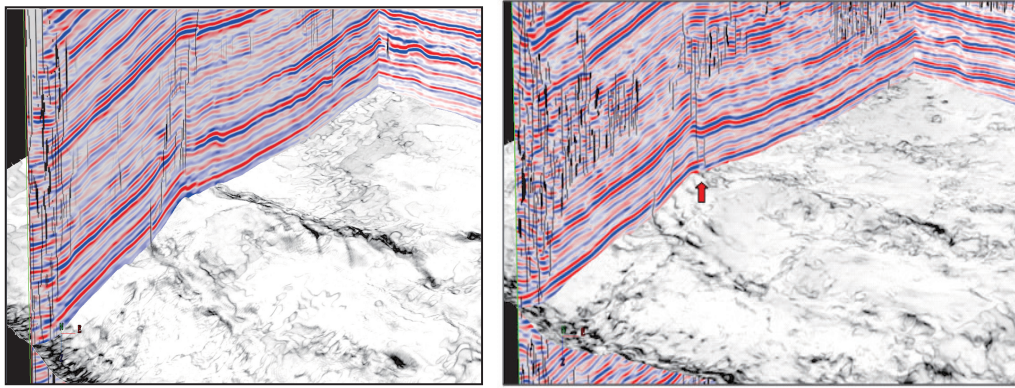


图 3 纵波(上)和转换波(下)储层底界沿层相干与地震剖面、断层的叠合图

Fig. 3 Superposition diagram of coherence along reservoir bottom boundary with seismic section and fault

充分利用转换横波的偏振特性,基于工区转换横波地震数据开展了裂缝预测,具体步骤如下:

1)根据本文提出的方法,结合裂缝发育带的走向,只需要选取 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 方位角扇区的 R 分量和 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 方位角扇区的 T 分量数据;

2)对选出的两组数据分别进行叠前时间偏移并叠加;

3)将 R、T 分量偏移叠加数据作为一组矢量体每间隔 15 度进行一次矢量分解与合成,得到一系列快(S_{1i})、慢(S_{2i})横波波场;

4)分别对分量波场(S_{1i} 或者 S_{2i})按照扫描角度进行排列,形成方位角度道集;

5)对方位角度道集中的每一道设定目的层时窗,对时窗内振幅值进行统计,寻找极值,即找到裂缝方向 α 。

6)对裂缝方向 α 所对应的 S_1 和 S_2 波场的目的层时窗的数据做互相关计算,即得到裂缝发育程度。

通过互相关计算提取工区目的层段的互相关值即快慢波的时差获得裂缝密度预测平面图,如图 4。

根据时差分布范围可以刻画出裂缝带的分布情况,时差越大裂缝越发育。从平面图上可以看出工区目的层裂缝发育,主要分布在工区西部及 Z201 井以北区域。与纵波叠前裂缝预测成果相比,利用转换横波地震资料预测的效果明显优于纵波叠前裂缝预测效果。

4 结论

笔者首次运用转换横波地震资料对四川盆地页岩气示范区小断层及裂缝发育情况进行了研究与应用。得出以下结论:

1)通过模型正演和实际地震资料对比表明,转换横波地震资料对小断层的识别能力更强,提高了小断层的识别精度。

2)文中提出的基于横波分裂特性的裂缝预测技术,采用转换横波单一方位角信息进行角度扫描与矢量合成能够获得裂缝发育方向和密度,预测效果明显优于纵波叠前裂缝预测,成果更加合理。

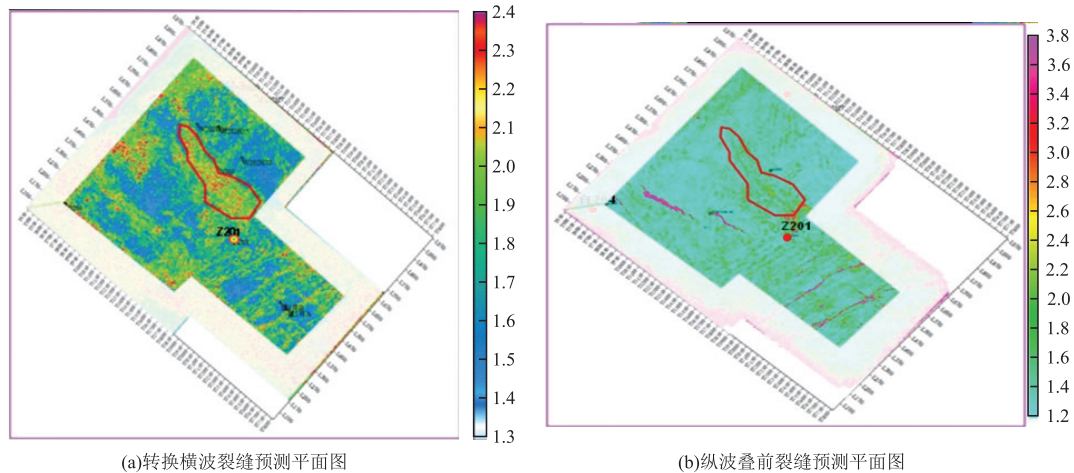


图4 多分量裂缝预测效果对比

Fig. 4 Comparison of multi-component fracture prediction effect

参考文献:

- [1] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979—1007.
ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979—1007. (In Chinese)
- [2] ZHANG H, HE Z H, LI Y L, et al. Research and application of spectral inversion technique in frequency domain to improve resolution of converted PS-wave [J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 247—257.
- [3] ZHANG H, HE Z H, LI Y L, et al. A constrained spectral inversion method based on compressive sensing in order to distinguish high-quality shale[J]. Exploration Geophysics, 2018, 49(5): 782—791.
- [4] 曾靖, 黄捍东, 苗雨新. 保靖地区龙马溪组优质页岩气储层地震反演预测[C]//中国地球科学联合学术年会, 2016: 83—86.
ZENG J, HUANG H D, MIAO Y X. Seismic inversion prediction of high quality shale gas reservoir in Longmaxi formation in Baojing area[C] // Annual meeting of China Geoscience Association, 2016, 83—86. (In Chinese)
- [5] 陈勇. 川东南焦石坝及丁山地区五峰—龙马溪组页岩气储层特征及“甜点”预测技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
CHEN Y. Research on reservoir characteristics and sweet spot prediction technology of shale gas of Wufeng—longmaxi Formation in Jiaoshiba and Dingshan area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (In Chinese)
- [6] 孙小琴. 地震属性分析技术在彭水区块页岩含气量预测中的应用[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(4): 39—41.
SUN X Q. Application of seismic attribute analysis technology in shale gas content prediction in Pengshui Block[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(4): 39—41. (In Chinese)
- [7] 李志荣, 邓小江, 杨晓, 等. 四川盆地南部页岩气地震勘探新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 40—43.
LI Z R, DENG X J, YANG X, et al. New progress in seismic exploration of shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 40—43. (In Chinese)
- [8] 尹俊, 严文芬, 林琳. 涪陵地区大安寨段优质泥页岩地震预测[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 334—337.
YIN J, YAN W F, LIN L. Seismic prediction of quality mud shale in Da'anzhai Formation of Fuling Area [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 334—337. (In Chinese)
- [9] 陈胜, 赵文智, 欧阳永林, 等. 利用地球物理综合预测方法识别页岩气储层甜点: 以四川盆地长宁区块下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(5): 20—30.
CHEN S, ZHAO W Z, OUYANG Y L, et al. Comprehensive prediction of shale gas sweet spots based on geophysical properties: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Changning Block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(5): 20—30. (In Chinese)

[10] OZAKTAS H M, ARIKAN O, KUTAY M A, et al.
Digital computation of the fractional Fourier transform

[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,
44(9): 2141—2150.

Research and application of multi-component fracture prediction technology in shale gas area

YANG Haitao¹, HUANG Pinghui², CAO Zhonglin¹,
WANG Dong¹, ZHOU Qiang¹, YAN Yuanyuan², WANG Hongyan¹

(1. Bgp inc, China National Petroleum Corporation, Chengdu 610213, China;

2. Petrochina Southwest oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China)

Abstract: Compared with conventional oil and gas, shale generally contains gas, but the output of a single well varies greatly. Generally, only shale gas wells that form a complex fracture network through transformation have more excellent industrial development value. At present, there are many methods to predict shale fractures based on P-wave seismic data, while predicting fracture development areas using multi-component seismic data is still the direction of researchers' exploration and efforts. This paper uses converted wave seismic data to predict the development of shale gas fractures for the first time. First, the converted wave model is used for forward modeling, combined with multi-wave seismic data to compare and identify minor fractures and faults in shale. Secondly, the shear wave splitting technology predicts the crack trend and density at high angles. The application of actual data in the Sichuan Basin shows that the fracture prediction technology of converted waves can effectively identify the fracture development of shale gas, and the prediction results are consistent with the results of imaging logging prediction with high accuracy.

Keywords: converted wave model forward modeling; shear wave splitting technology; shale gas multi-wave fracture prediction