

裂缝储层地震物理模拟研究

王玲玲¹, 魏建新^{1*}, 黄平², 狄帮让¹, 秦菽苑¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, CNPC物探重点实验室, 北京 102249

2 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041

* 通信作者, weijx@cup.edu.cn

收稿日期: 2017-5-28

中国国家自然科学基金(41474112); 国家重点基础研究发展规划(973)计划项目(2013CB228601); 中石油重大科技专项(XNS14JS2013-042)资助

摘要 根据中国西南部四川盆地中部龙岗地区的地质构造, 制作出一个小裂缝尺度、多种裂缝参数、成比例的裂缝储层地震物理模型。采用薄片模拟裂缝的方法制作可变参数的小尺寸裂缝带, 模拟一定区域内所有裂缝的等效特征。该模型是对裂缝物理模型技术的一个新尝试。通过进行数据采集和处理, 得到分方位数据。然后分析4个裂缝密度变化的裂缝带其中心位置处振幅随入射角的变化情况, 最后采用振幅和频率衰减梯度两种属性的方位各向异性预测裂缝发育区。结果显示, 裂缝带中心位置处振幅具有方位各向异性的特征, 方位振幅的拟合结果表明预测的裂缝方位是 90° , 预测的4个裂缝密度值是增加的趋势, 都与模型设计相符。和振幅属性相比, 频率衰减梯度属性的方位各向异性对小尺度裂缝更为敏感。

关键词 裂缝; 物理模型; 各向异性; 裂缝预测

0 引言

中国油气资源丰富, 但地质条件十分复杂, 资源开发难度大且成本高, 长期处于油气资源短缺的状态, 石油和天然气消费量对外依存度逐年增加, 因此, 在引进国外油气资源的同时要加强国内油气资源研究^[1]。国内油气资源中非常规油气资源占的比率高且种类多, 其中, 致密油储层是一种主要类型, 具有特低渗透率、特低孔隙度、储层物性差、非均质性强等特征。裂缝是这类油气储层的主要存储空间和渗流通道。研究裂缝发育程度和裂缝参数特征对非常规油气的甜点预测起着十分重要的作用。

地震物理模拟作为一种地震勘探的正演手段, 在裂缝储层识别和定量预测中起到重要作用。很多学者利用地震物理模拟技术进行裂缝研究。模型从单一层

的HTI(Transverse Isotropy with Horizontal axis)介质模型^[2-3]和包含一个HTI介质层的多层模型^[4-8]、逐步发展到包含HTI裂缝块的模型^[9], 可以预见模拟的裂缝区将会越来越小。由于裂缝形态和尺度差异较大、裂缝填充物属性多变、裂缝空间结构和所处地质构造复杂多样等因素, 随着勘探要求的提高, 传统的包含裂缝块的地震物理模型和层状垂直裂缝模型(HTI介质)已不能满足要求, 探索和提高地震物理模型制作和模拟技术势在必行。

现今, 各种裂缝预测方法层出不穷, 方法之间存在着差异和优劣。喻岳钰等利用瞬时频域衰减属性的方位各向异性特征, 较为成功的预测了碳酸盐岩裂缝^[10]。姜传金等利用纵波阻抗、频率衰减的方位各向异性特征, 准确预测了火山岩的裂缝发育情况^[11]。王洪求等利用振幅属性、旅行时、旅行时差、AVO梯度

引用格式: 王玲玲, 魏建新, 黄平, 狄帮让, 秦菽苑. 裂缝储层地震物理模拟研究. 石油科学通报, 2017, 02: 210-227

WANG Lingling, WEI Jianxin, HUANG Ping, DI Bangrang, QIN Shuyuan. Study of seismic physical modelling of fractured reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2017, 02: 210-227. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.020

等属性的方位各向异性预测裂缝^[12]。刘依谋等介绍了旅行时、速度、振幅、衰减、频率和相位等属性的方位各向异性原理和进展,给出了未来发展趋势,即综合利用地震波能量衰减、频率、相位方位各向异性提高裂缝预测精度^[13]。由于裂缝块和裂缝层的尺度都较大,各种方法预测结果的差异并不明显,使得采用简单的物理模型优选预测方法存在很大的局限性。

在三维地震物理模型制作技术^[14]的基础上,本文探讨裂缝储层模型制作技术,根据实际储层特征,构建了一个小裂缝带尺度的裂缝储层地震物理模型,并对振幅随偏移距和入射角变化进行了分析,然后采用振幅和频率衰减梯度两个属性的方位各向异性进行裂缝预测。

1 裂缝储层地震物理模型构建

1.1 模型制作难题探讨

裂缝储层地震物理模型是地震物理模型技术中一个新的发展方向,将储层构造特征与裂缝参数特征相结合,在制作过程中遇到了一些问题,此处探讨解决方法。

① 空间几何相似比问题。一方面,单条裂缝尺度非常小,裂缝延伸长度和张开度最小可达到毫米级别,按照几何相似比原理^[15],实验室中无法制作出如此小的裂缝,使得模型制作过程中空间尺度的相似性受到挑战。此外,裂缝性油气储层预测中,研究单条裂缝的意义并不大,并且储层裂缝常常是成群、成带分布,因此常采用等效的方式制作裂缝带,模拟某一区域所有裂缝的总体特征。另一方面,本文中裂缝目的层的埋深一般在三千米左右,而目的层的裂缝大小分布范围从几毫米到几百米,构建模型时,较难找到合适的尺度比例因子兼顾这两种尺寸,对模型的尺度比例有很大的限制性。综上所述,根据现有物理模型实验技术和条件,经分析本模型选用1:10 000,实验室1 mm的裂缝和地层尺度相当野外实际10 m,这样能模拟米级以上的小尺度裂缝带和单条裂缝。

② 多参数裂缝带的制作和边界影响问题。将环氧树脂和硅橡胶混合得到的基质材料层和渗透型纸片相互叠合,制作出不同裂缝参数的裂缝带,也称之为片状叠合等效裂缝岩石物理模块。这种裂缝带的边界能量过强,裂缝识别和预测过程中容易掩盖裂缝带的内部信息。为了减弱裂缝带边界的影响,一种理论上可行的方法是混合基质材料的速度尽量与地层速度一致,减小混合基质材料层和地层的波阻抗之间的差异。

1.2 地质背景

四川盆地是中国重要油气资源盆地之一,中部地区构造平缓、东高西低,自东向西逐渐倾伏。龙岗地区大安寨段含油气构造是本文主要研究区域。大安寨段厚80~110 m,埋深2 300 m以上,为一套黑色页岩(生油岩)与介壳灰岩(储集岩)互层。介壳灰岩层薄、致密、非均质性强,属于特低孔、特低渗孔隙-裂缝性储层^[16-19]。特低孔渗储层很不均匀,“低中有高”^[20]。储集空间类型主要为次生溶蚀孔、洞、裂缝及微孔隙和微裂缝。高角度(60°~90°)构造裂缝是该区储层裂缝的主要类型,裂缝分布比较规则,产状稳定,常成组出现。

1.3 裂缝地震模型设计

模型设计思路有3个:

① 依照龙岗9井区和高浅1井区大安寨段储层的地质模式、地震特征以及裂缝发育特征设计裂缝储层地震物理模型(图1)。共有6个地层,分别为第一层、沙一层、过渡层1、大安寨层、过渡层2以及第六层。表1给出各地层参数。

② 实际地质模型和简化裂缝模型组合。两个模型除了大安寨目的层有所不同,其余地质构造相同。如图2所示,实际地质模型在整个大模型的南半段,目的层模拟野外断层、薄互层以及尖灭等,有9组裂缝带,7个交叉裂缝,7组群缝,还有一些随机分布的裂缝带;简化裂缝模型在整个大模型的北半段,目的层是一个厚度约为190 m的厚层。

③ 简化裂缝模型。以模拟裂缝系统为主,放置单一裂缝参数变化的多组裂缝带。将8组不同参数的裂缝带规则分布在简化裂缝区。裂缝带参数包括裂缝带长度、裂缝带宽度、裂缝密度、两个裂缝带之间的水平距离、裂缝方位角、裂缝面倾角、阶梯状裂缝的宽度以及一些裂缝群的规模。

图3给出图2中4条线的垂向剖面的示意图,此处只有地层结构,没有裂缝。设计的垂向示意图经过三维坐标采集的坐标数据修正。每幅图的下半部分是目的层的垂向4倍放大图,以便于清楚地看到薄互层,并且能够看到导致薄互层层数变化的尖灭点(图3(c))。

空间上模型以1:10 000的比例尺度进行设计制作,速度相似比为1:2,采样间隔相似比为1:5 000,频率相似比与采样间隔相反(5 000:1)。表1显示模型地层的密度和速度参数,是相似比后的数据。裂缝物理模型尺寸为100 cm长,100 cm宽,20 cm高。模拟

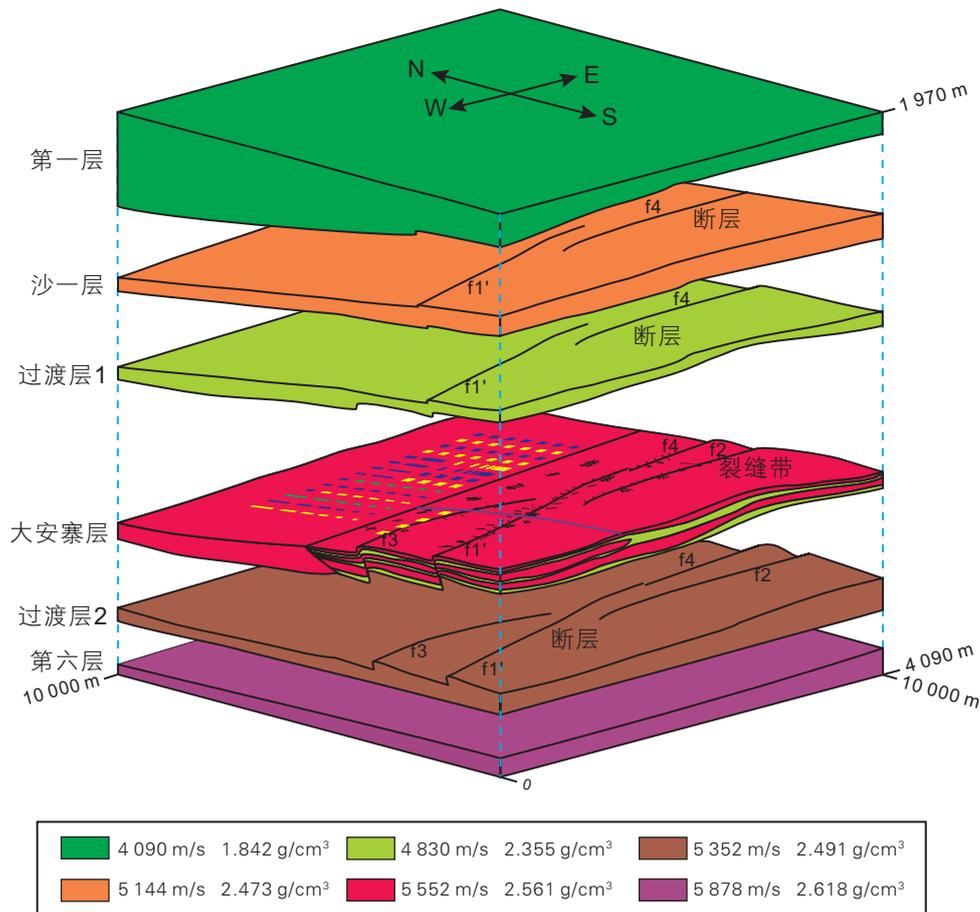


图1 三维裂缝储层地震物理模型

Fig. 1 3D fractured reservoir seismic physical model

表1 模型各地层速度和密度参数

Table 1 Parameters of velocity and density in strata

	模拟的实际参数	
	速度/(m/s)	密度/(g/cm ³)
第一层	4 090	1.842
沙一层	5 144	2.473
过渡层1	4 830	2.355
大安寨层	5 552	2.561
过渡层2	5 352	2.491
第六层	5 878	2.618

10 000 m × 10 000 m × 2 000 m 的区域和深度范围, 模拟的实际深度从 2 000 m 到 4 000 m。分析时均采用转换成野外参数的数据。

1.4 裂缝带制作和测试

在物理模型制作前需要制作裂缝带。图4是在几何相似原理和动力学相似原理的基础上, 基于等效介

质理论^[21-23], 制作具有不同裂缝参数的裂缝带。采用a、b、c三种不同配比的环氧树脂和硅橡胶混合基质材料制作不同参数的裂缝带, 其中a的基质速度更接近围岩速度。除了裂缝密度变化的裂缝带, 其余几组的裂缝密度均为0.95条/m。采用超声波透射测试法^[24]多次测量得到纵横波速度数据, 参见表2(经过相似比转换为野外实际参数)。除了简化裂缝区第6组缝面倾角变化的裂缝带, 其余都是具有水平对称轴的横向各向同性介质。

图4为简化裂缝区前七组裂缝带。第三组是裂缝密度变化的裂缝带(图4(c)), 裂缝带的尺度为180 × 180 × 50 m³, 裂缝密度、纵波速度及纵波各向异性显示在表3中, 随着裂缝密度增加, 速度各向异性增大。第五组裂缝方位角变化的裂缝带(图4(e))和第六组缝面倾角变化的裂缝带(图4(f))尺度都是130 × 130 × 60 m³。定义裂缝走向与图2中X方向的夹角为裂缝方位, Z方向是裂缝高度方向。第五组方位角从0°增加到90°, 间隔为15°。第六组缝面倾角分别为5°、15°、

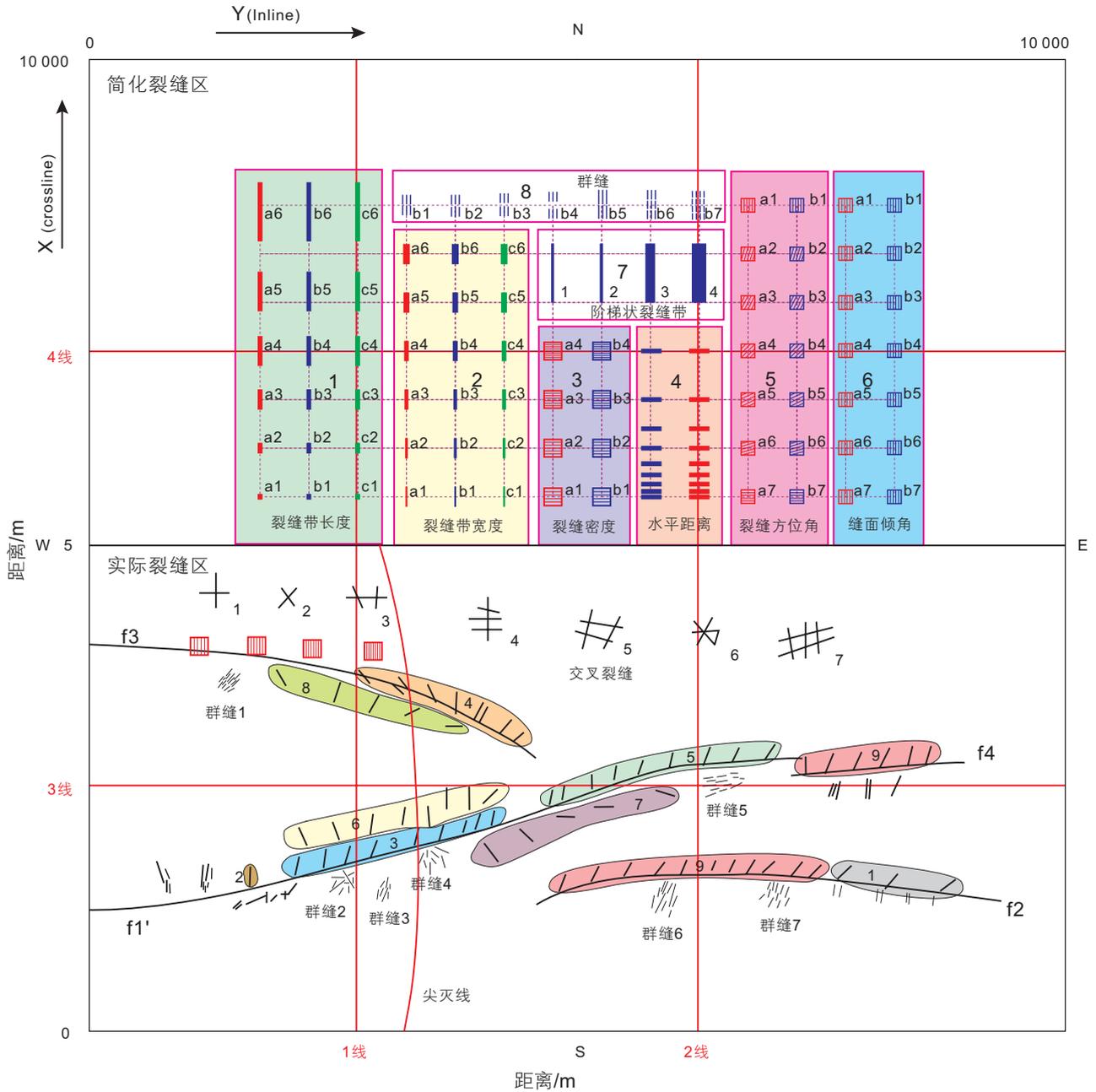


图 2 大安寨层顶界面水平裂缝分布图
 Fig. 2 Fracture distribution on the top of Da'anzhai layer

30°、45°、60°、75°和 90°。

图 5 给出复杂裂缝区的裂缝带的分布情况。大多数裂缝是高角度裂缝，少部分是中角度裂缝，几乎没有低角度裂缝。9 组裂缝带中最边上靠近模型边缘处的裂缝是缝面倾角最小的裂缝带，约 43°。9 组裂缝带中裂缝带的宽度从 6 m 到 14 m 不等，裂缝带长度都是 200 m，高度都是 50 m。大多数裂缝带与断层之间存在斜交的关系；交叉裂缝的形态很多，如十字结构、井字结构等，裂缝的宽度约为 1.5 m，长度从 200 m 到 400 m 不等；群缝的最大宽度是 378.2 m，最小是 178.8 m。

1.4 裂缝物理模型的制作

地震物理模型采用逐层浇筑的方式进行的。为了便于放置裂缝，浇筑流程与地层沉积次序相反。由第一层开始浇筑，然后逐渐向下，顺序是第一层、沙一层、过渡层 1、大安寨层（简化裂缝区和复杂裂缝区）、过渡层 2 以及第六层。图 6 显示物理模型的浇筑流程和 6 个地层相对应，总共有 6 大步骤，照片中是每一层的底界面。以步骤一中图 6a 为例，它不仅是第一层的底界面还是沙一层的顶界面。当浇筑到目的层时，

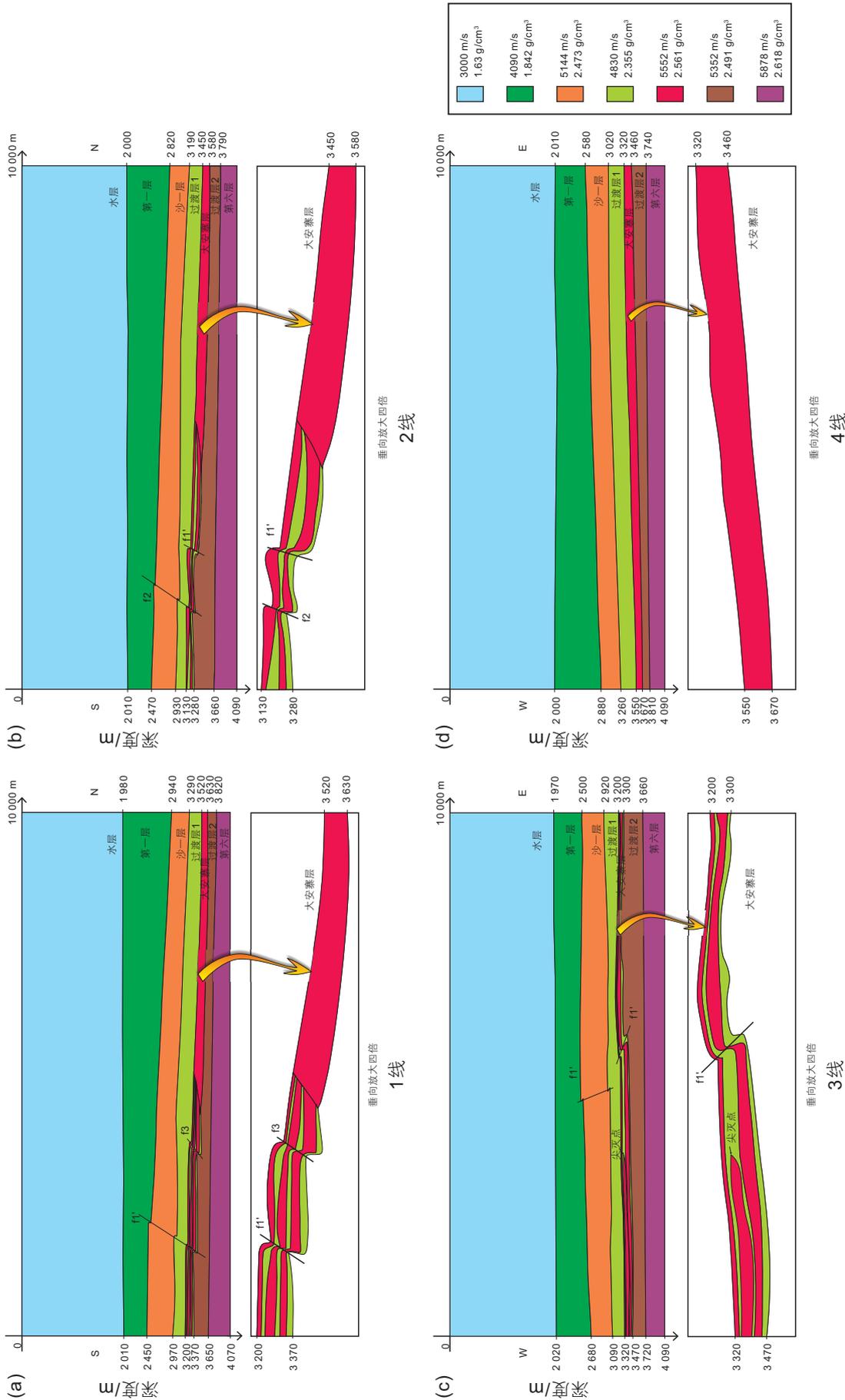


图3 图2中四条线的垂向剖面图
Fig. 3 Vertical profiles of four lines in figure 2

表 2 裂缝密度为 0.95 条 /m 时，纵横波速度和各向异性

Table 2 Velocities and anisotropy of the fractured zones when the fracture density is 0.95 cracks per meter

	平行裂缝面的 纵波速度/(m/s)	垂直裂缝面的 纵波速度/(m/s)	快横波的速度/ (m/s)	慢横波的速度/ (m/s)	纵波各向异性 ε	横波各向异性 γ
a	5 042	4 720	2 326	2 102	0.068	0.107
b	4 704	4 187	2 216	1 960	0.123	0.131
c	4 106	3 226	2 010	1 264	0.273	0.589

先浇筑复杂裂缝区，再浇筑简化裂缝区。在复杂裂缝区，裂缝垂直粘到大安寨顶界面上，然后一层层的浇筑薄互层。第三个薄互层(图 6f)是一个尖灭层，严格按照设计要求确定尖灭线的位置。为了获得更为准确的地层参数，每一层的浇筑过程中预留下一个地层样品，对各地层样品进行测试得到地层速度信息，然后对设计参数进行修正。

2 地震数据数据采集和处理

采用超声脉冲反射波法进行宽方位地震数据采集。为了减弱面波、提高采集速度，模型数据的采集是在水箱中进行。根据目的层的深度设计水层的厚度为 200 mm，用来模拟一个 2 000 m 的低速层环境。采集时使用的柱塞状压电换能器的发射端直径和接收端直径分别为 9 mm 和 14 mm(转换成野外参数为 90 m 和 140 m)，频率为 0.23 MHz，相似比后为 46 Hz。目的层波长为 120.7 m，换能器辐射的近场范围大致由换能器辐射半径的平方除以波长来计算^[25]，远场区域波场稳定，振幅变化规律明显(逐渐减小)，利于检测裂缝。本实验在纵波情况下，按照目的层波长计算激发换能器的近场距离为 $45\text{ m} \times 45\text{ m} / 120.7\text{ m} = 16.78\text{ m}$ ，远远小于目的层的深度，故本实验测试到的是远场数据。

设计的宽方位(近全方位)采集观测系统参数如表 4，观测系统纵横比是 0.84，采样间隔为 1 ms，满覆盖次数为 224 次(图 7a)，记录长度为 4 s。图 7b 给出采集数据的偏移距和方位角的交汇图。偏移距大于 1 500 m 并小于 3 000 m 时，数据的方位角信息比较全。数据偏移距小于 1 500 m 时，方位角 $80^\circ \sim 100^\circ$ 的数据缺失，偏移距大于 3 000 m 数据方位角缺失更严重。

模型的地震数据有比较丰富的地震波场，从浅层到深层都有较高的信噪比，各层反射界面明显，但是波场记录中也伴随着不同种类的干扰波。对原始数据加载观测系统和道编辑后进行一系列的叠前处理。处理过程包括观测系统加载、真振幅恢复、高通滤波、衰减谐振、预测反褶积、速度分析、拉东滤波、道集

分选、分方位角度叠加、叠后和叠前时间偏移。振幅补偿处理在利用振幅信息研究裂缝储层时非常重要，真振幅恢复的目的是尽量对地震波能量的衰减和畸变进行补偿和校正。图 8 是某一单炮记录真振幅恢复前后的对比。单炮记录的信噪比较高，各地层反射清晰可见。通过对比发现，深层(如第六层顶界面)和远偏移距(椭圆框中所示)的振幅得到补偿和恢复。在模型内部固-固界面上存在着多次转换方式的干扰波，通过 Radon 滤波将这种干扰波从波场中去除。

3 振幅随入射角和方位角变化

3.1 换能器指向性能量补偿

每一个换能器都有特定的指向性特征，物理模型数据分析会涉及到振幅变化，尤其是在振幅随着角度的变化(AVO)分析时需要进行换能器指向性能量补偿。换能器在应用于地震物理模型数据采集之前，都需要根据实验确定其指向性特征，并根据实验得到的结果在数据处理前进行能量补偿。图 9a 为换能器指向性示意图。换能器的振幅随入射角增大急剧减小，在入射角度大于 60° 外几乎没有能量。这种不同角度上振幅的差异，是指向性能量补偿的基础。根据换能器指向性得到的与入射角有关的校正系数：

$$cc = 8.40 \times 10^{-7} \theta^4 + 8.17 \times 10^{-7} \theta^3 + 8.58 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.10 \times 10^{-3} \theta + 1.02 \quad (1)$$

cc 为校正系数， θ 是入射角，相关系数 $R^2 = 0.995$ 。

图 9b 和图 9c 显示的裂缝密度变化裂缝带 a1(CDP 位置 Inline448, Crossline964)的振幅随着入射角的变化情况，b 图为换能器指向性能量补偿前后道集，可见不同角度上的振幅得到了明显的补偿，尤其是大入射角的位置能量补偿更为明显。抽取裂缝带第一个波形(图 9b 中 2 线)负振幅的绝对值(图 9c)，并将数据进行四次多项式最小二乘拟合，可以看到开角补偿后振幅总体能量增强，随入射角的增大补偿越多。

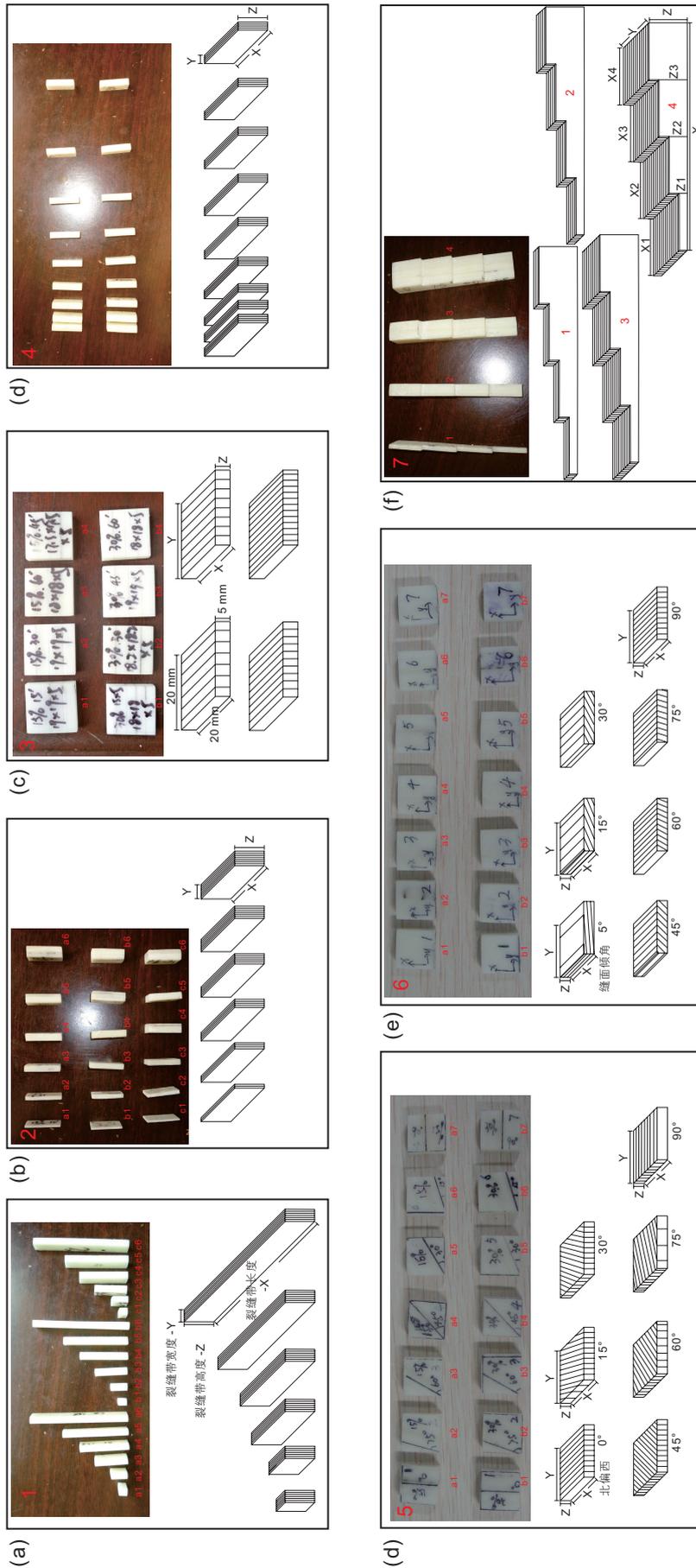


图 4 不同裂缝参数照片和示意图, 裂缝参数分别是裂缝带长度 (a)、裂缝带宽度 (b)、裂缝密度 (c)、裂缝带间距 (d)、裂缝方位角 (e) 和阶梯状裂缝带 (f) 不同裂缝参数照片和示意图, 裂缝参数分别是裂缝带长度 (a)、裂缝带宽度 (b)、裂缝密度 (c)、裂缝带间距 (d)、裂缝方位角 (e) 和阶梯状裂缝带 (f), fracture parameters are lengths of fractured zones (a), widths of fractured zones (b), fracture densities (c), spacings between two fractured zones (d), azimuth angles (e), fracture surface dip angles (f) and widths of terraced fractured zones (g)

表 3 不同裂缝密度裂缝带的参数

Table 3 Parameters of fractured zones with varied fracture densities

编号	3-a1	3-a2	3-a3	3-a4	3-b1	3-b2	3-b3	3-b4
裂缝密度/(条/m)	0.319	0.631	1.027	1.331	0.418	0.656	0.945	1.336
平行裂缝面的纵波速度/(m/s)	4 856	4 916	5 090	5 168	4 454	4 648	4 666	4 676
垂直裂缝面的纵波速度/(m/s)	4 748	4 722	4 712	4 600	4 286	4 276	4 250	3 970
纵波速度各向异性	0.023	0.041	0.080	0.123	0.039	0.087	0.098	0.178

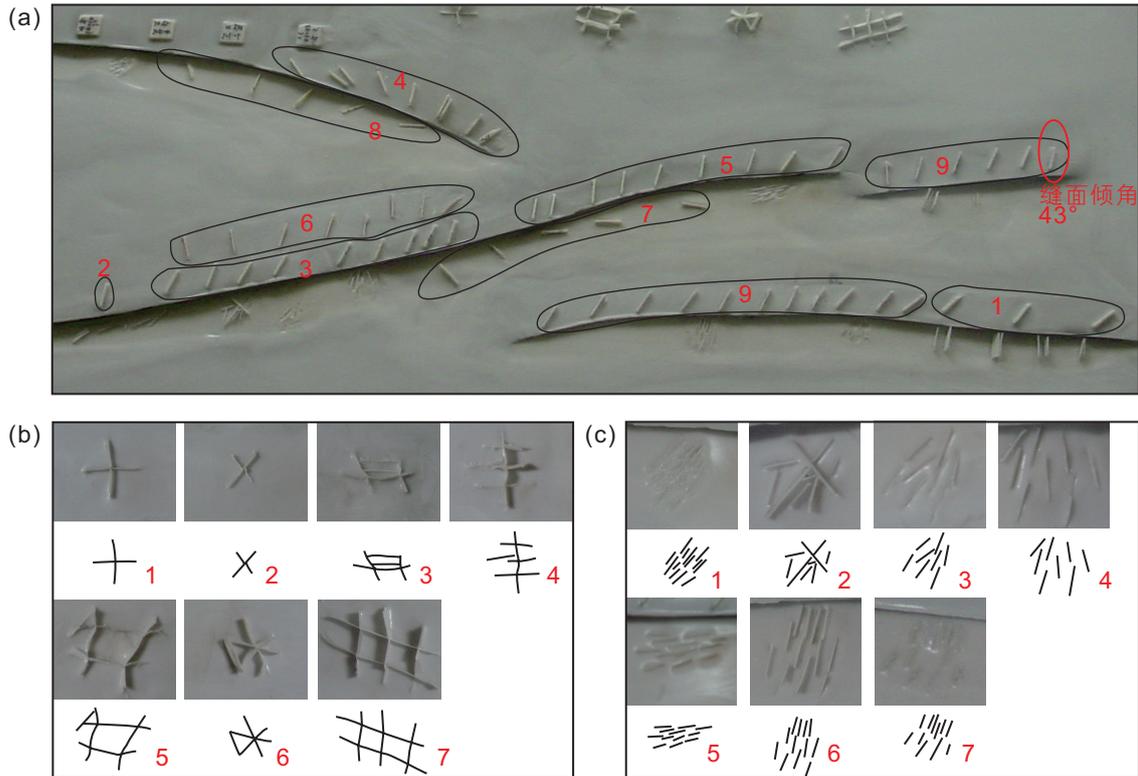


图 5 复杂裂缝区裂缝带 (a)、交叉裂缝 (b) 和群缝 (c)

Fig. 5 Fracture zones (a), intersected fractures (b) and fracture swarms (c) in the complex area

3.2 六个方位上振幅随入射角和方位变化

方位P波裂缝检测方法是对某一给定位置点的一系列不同炮检方位角的道集进行分析, 查找不同方位角上的振幅变化。以第三组裂缝密度变化的裂缝带为例, 裂缝带编号增加, 裂缝密度是增大的, 分别是0.319、0.631、1.027和1.331。图10a和10b给出4个裂缝带中心位置处CDPs(Common Depth Points)面元的偏移距和方位角分布, 是分析中必不可少的环节, 为接下来的整体数据的裂缝预测提供参数设定参考, 如提供数据选择范围、最佳面元设置。4个CDP位置处有相同的偏移距分布和相似的方位角分布, 保证相同的分方位条件下、4个裂缝带在同一方位的能量均衡。

正北方向(X)为方位角0°方向, 地震资料按方位

角不同进行分方位处理, 0°~30°和180°~210°归为一个方位, 依次类推30°为一个方位角范围, 共得到6个方位。中心角度分别为15°、45°、75°、105°、135°和165°。图11是裂缝带中心位置CDPs处的15°方位的振幅随入射角变化道集, 入射角从0°增加到42°, 间隔为3°。道集上裂缝带显示出多个“波峰-波谷”的特征(叠后剖面上显示为“串珠”状特征), 裂缝带a1位于1950~2000ms处。

提取红色椭圆位置的波谷的最大振幅随入射角变化曲线(图12), 由于不同方位上数据的不均匀性, 有效的入射角道集范围不同。总的来说, 各个方位数据的振幅随着入射角的增大而减小。同一入射角, 不同方位上振幅也存在差异, 中心角度15°和165°振幅值相对其他几个方位角更小, 中心角度75°和105°

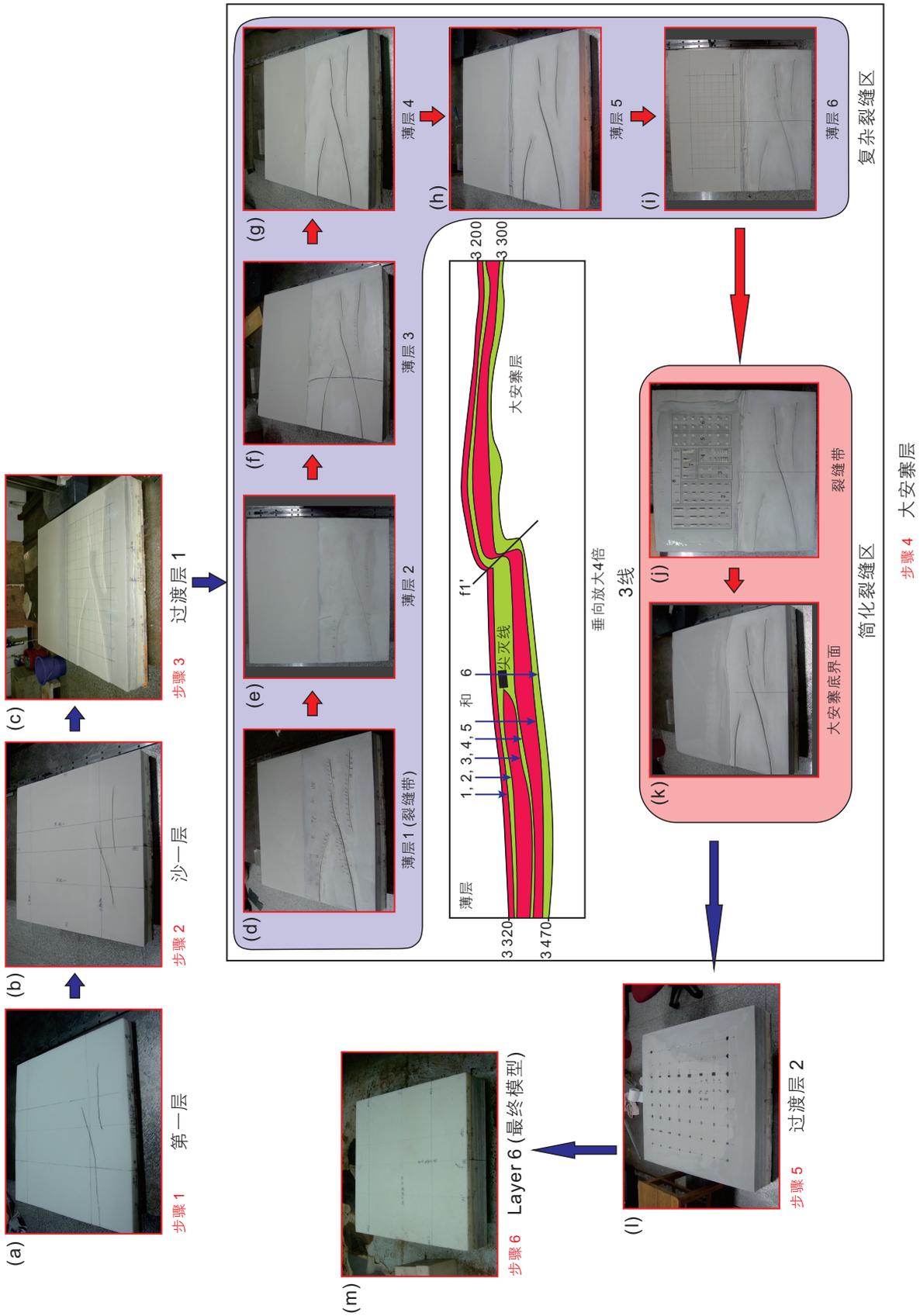


图6 裂缝物理模型浇筑过程
Fig. 6 Construction procedure of the fractured physical model

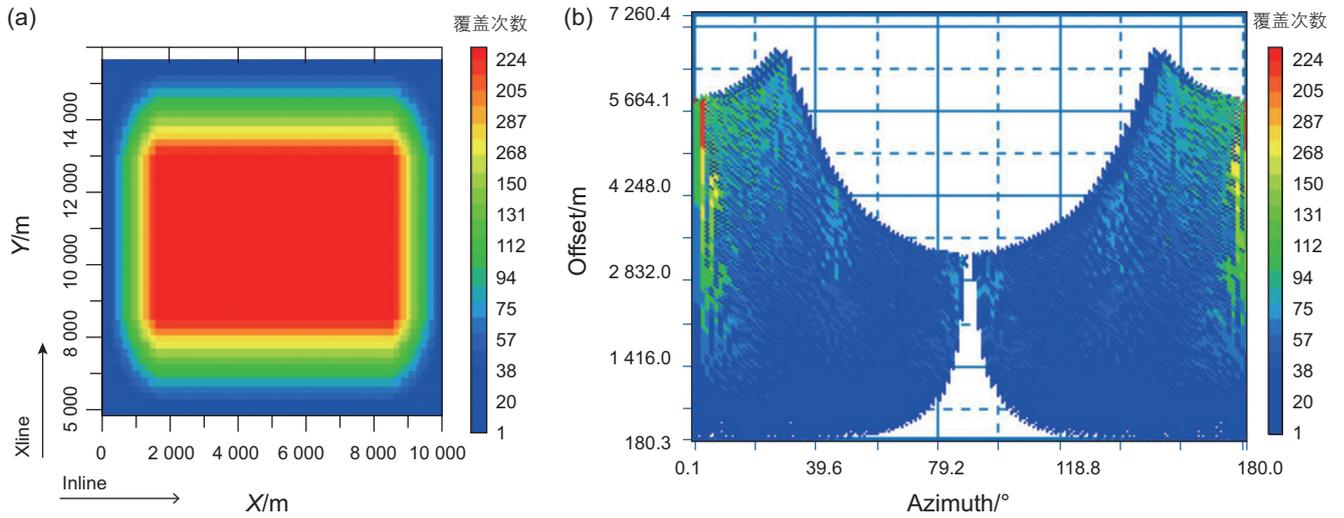


图 7 (a) 工区覆盖次数和 (b) 偏移距 - 方位角交汇图

Fig. 7 Fold (a) and Offset-azimuth cross plot (b)

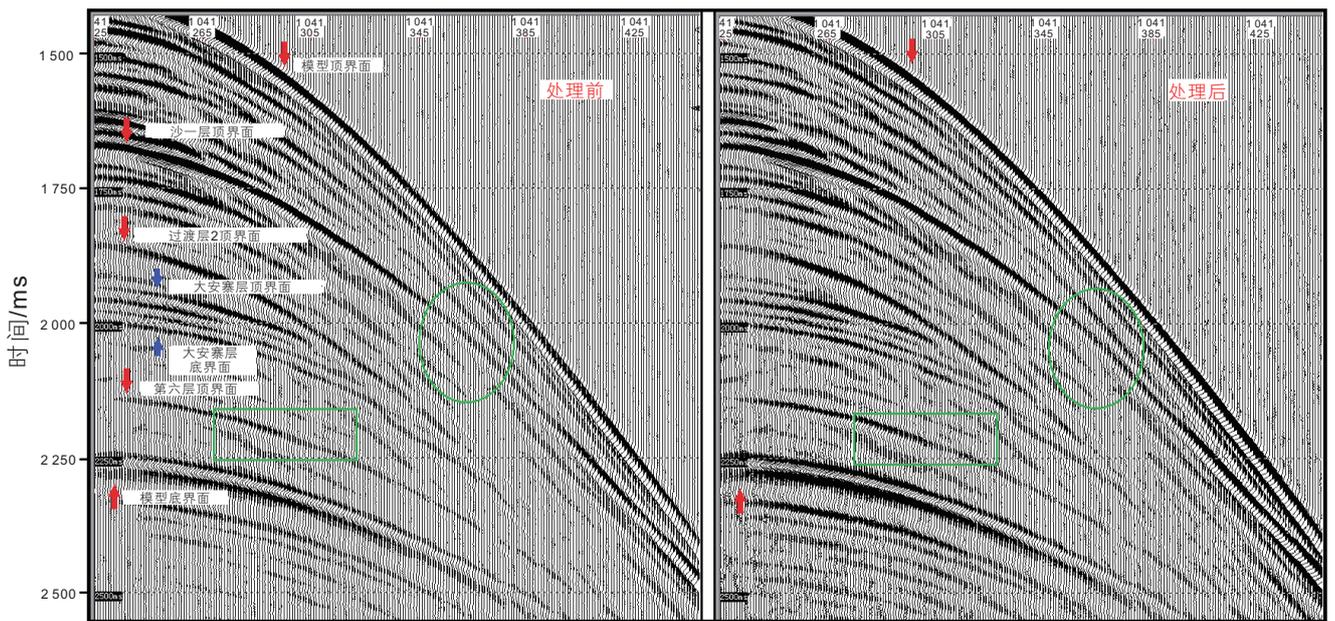


图 8 某一单炮记录真振幅恢复前后对比

Fig. 8 A single shot records before and after true amplitude recovery

表 4 三维宽方位采集观测系统参数

Table 4 3D wide-azimuth geometry parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
观测系统	32 线 8 炮 448 道正交	纵向偏移距	200 m
面元	12.5 m × 12.5 m	纵向最大炮检距	5 775 m
覆盖次数	14 × 16 次	最小非纵距	12.5 m
道距	25 m	最大非纵距	3 187.5 m
炮点距	25 m	最大最小炮检距	430.5 m
接收线距	200 m	炮线数	26
炮线距	400 m	接收线数	51
横向滚动距离	200 m	排列总道数	14 336 道

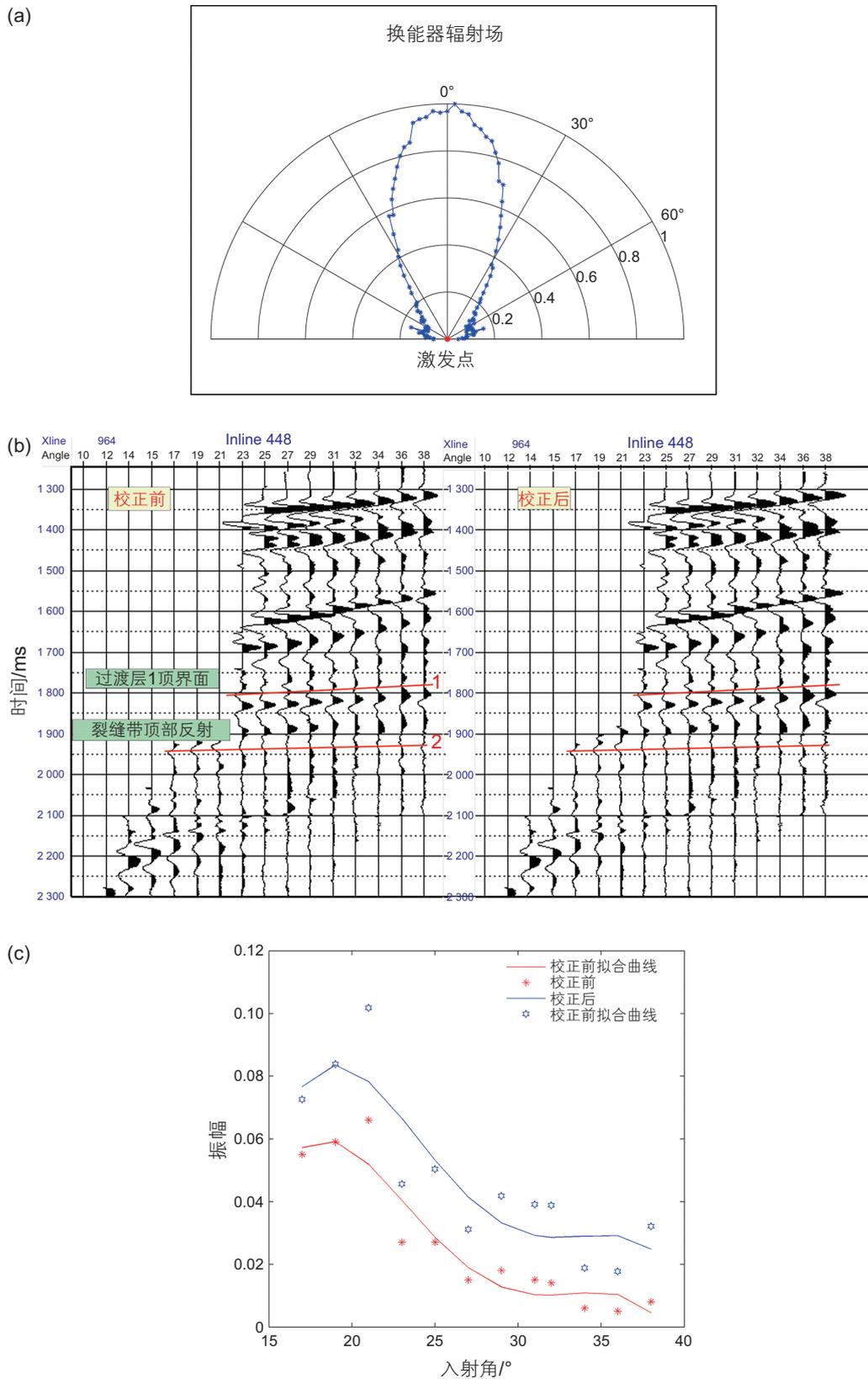


图 9 换能器指向性示意图 (a)、换能器开角校正前后入射角道集 (b) 和换能器开角校正前后裂缝带顶界面 (图 b 中 2 线) 振幅随入射角变化曲线 (c)

Fig. 9 The schematic diagram of the transducer directionality (a), the gathers of different incident angles before and after the opening angle correction of transducers (b), the top boundary of fractured zone (line 2 in Figure b) before and after the opening angle correction of transducers (c)

的振幅值最大，中心角度 45° 和 135° 振幅处于中间。说明振幅具有方位各向异性特征。进一步将入射角 18° 的振幅以极坐标的方式显示出来并按照对称性将 180°~360° 数据补全，然后对数据进行拟合。如图 13 所示。拟合曲线类似“花生”形状，a1~a4 四个裂缝

带拟合曲线的长轴长度(同一方位两个振幅之和)分别为 0.161 8、0.164 0、0.129 8、0.111 9，其方向对应的方位分别为 94°、88°、86° 和 82° 方位，总的来说在 90° 方位附近，与模型设计的裂缝走向一致。

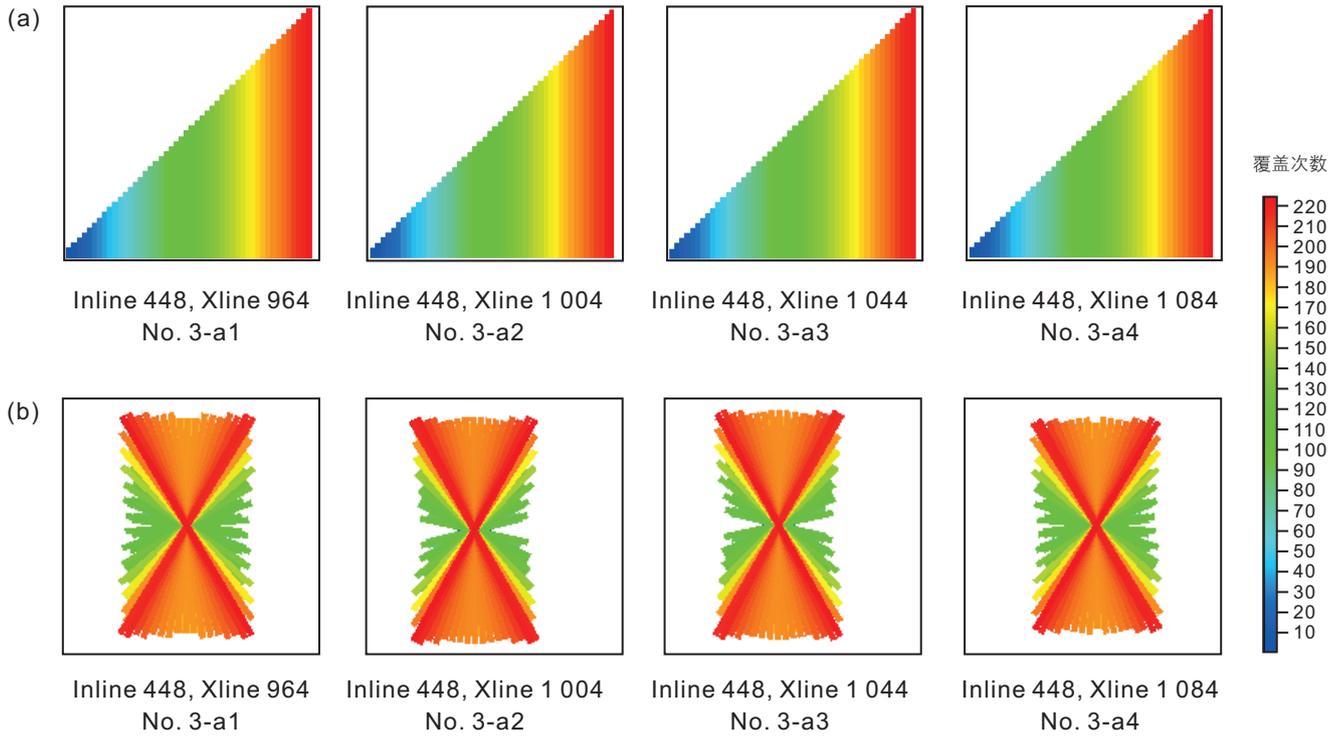


图 10 裂缝密度变化的裂缝带中心 CDP 位置处偏移距 (a) 和方位角 (b) 分布
 Fig. 10 Offset (a) and azimuth (b) of bins at CDPs in the central positions of fractured zones with varied fracture densities

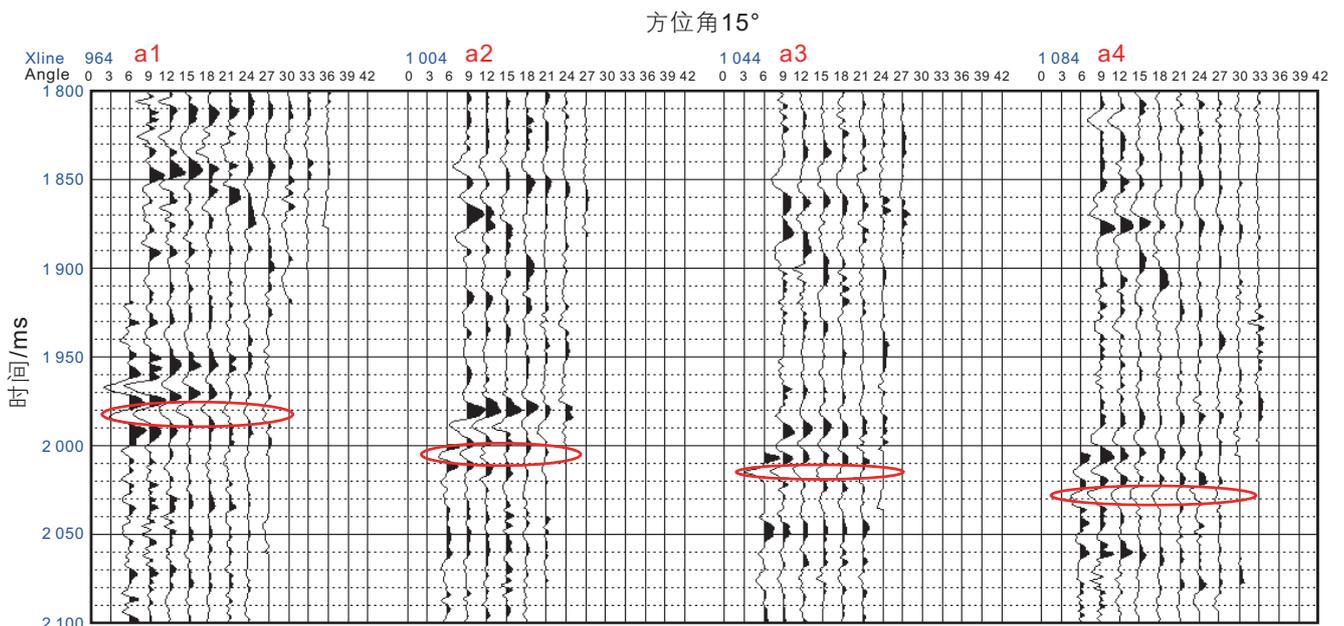


图 11 方位 15°，裂缝带位置叠前 AVA 道集
 Fig. 11 The pre-stack AVA gathers of four fractured zones at the central CDPs with azimuth 15°

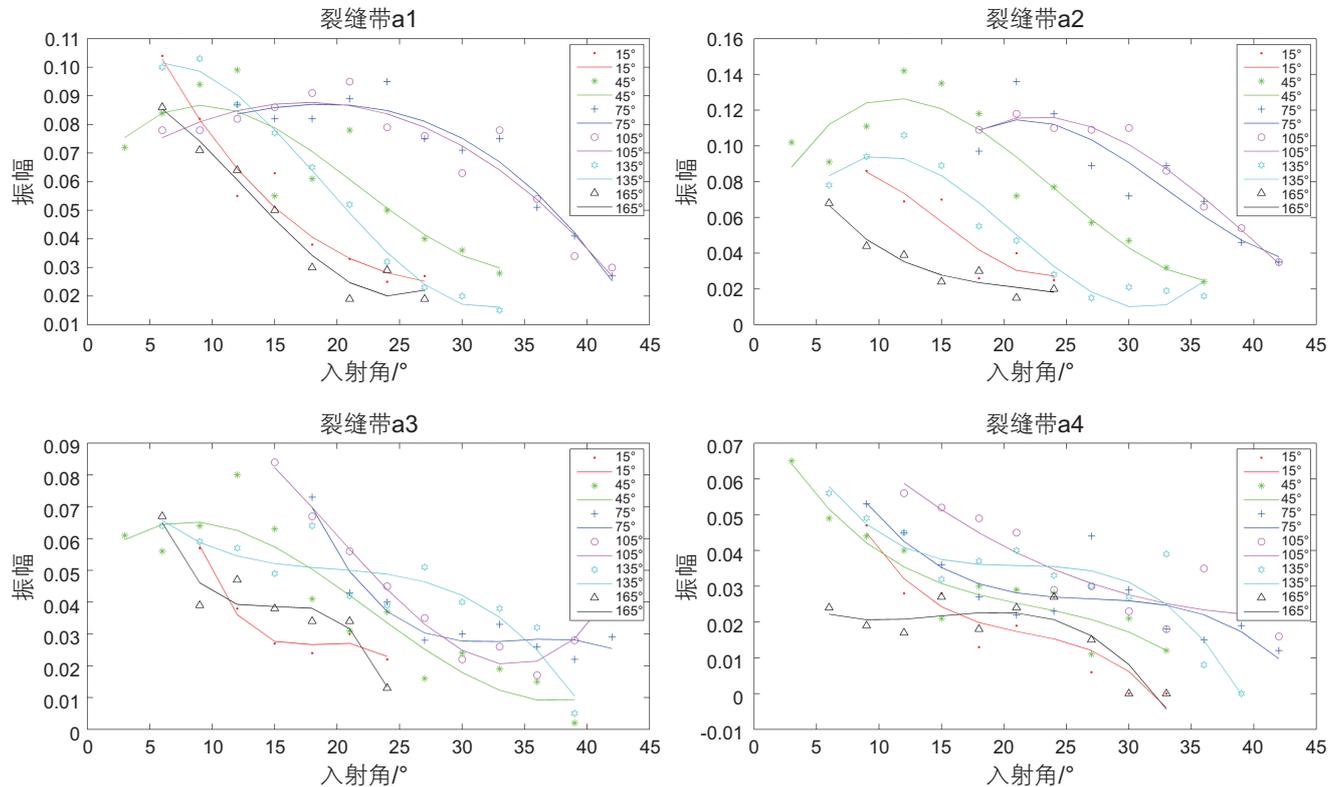


图 12 四个裂缝密度不同的裂缝带在不同方位上振幅绝对值随入射角变化曲线 (线条为拟合值)

Fig. 12 The variation curve of the absolute values of amplitude with the incident angles in different azimuths (Lines of different colors are the fitting curve of the amplitude)

3.3 所有方位上振幅随入射角和方位变化

在 6 个方位道集分析的基础上对所有方位的数据进行统计分析, 用余弦拟合方法^[26]预测裂缝密度和方位, 余弦拟计算量小, 适用于拟合多种地震属性。本实验中, 提取裂缝带顶界面的振幅并将其进行余弦拟合以获得裂缝参数。裂缝主方位是超面元内所有 CDP 的拟合结果, 超面元大小是 3×3 ($37.5 \text{ m} \times 37.5 \text{ m}$), 目标 CDP 在 9 个面元的中心位置。图 14 显示裂缝带中心位置 CDP 处裂缝预测方位的玫瑰图。反射振幅余弦拟合出的长轴和正北方位角 0° 的方向之间的夹角定义为裂缝方位(与设计方位一致)。裂缝带 3-a1 预测得到的裂缝方位是 $75^\circ \sim 90^\circ$; 裂缝带 3-a2 预测得到的裂缝主方位是 $90^\circ \sim 105^\circ$, 此外还有少量的 $75^\circ \sim 90^\circ$ 方位角的裂缝; 裂缝带 3-a3 和 3-a4 的裂缝主方位是 $75^\circ \sim 90^\circ$, 此外还有少量的 $90^\circ \sim 105^\circ$ 方位角的裂缝。因此, 玫瑰图显示的裂缝带的预测方位角在 90° 附近, 与设计的裂缝走向相符合。裂缝密度是另一个需要关注的参数, 此处裂缝密度是无量纲的, 由于玫

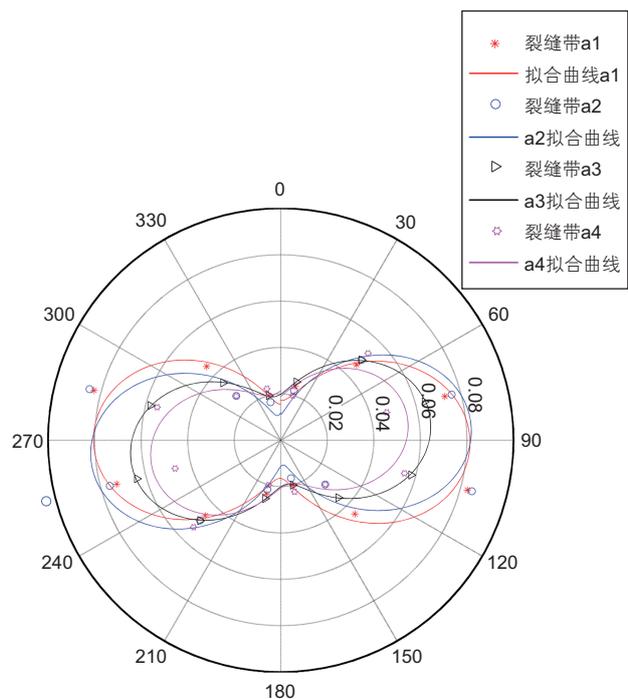


图 13 入射角为 18° 时, 振幅随方位角变化。拟合函数格式为 $amp = a_1 \sin(b_1 \theta + c_1) + a_2 \sin(b_2 \theta + c_2)$ 。 θ 为入射角, amp 为振幅值。
Fig. 13 The variation of amplitude with the azimuth when the incident angle is 18° . Curves of different colors are the fitting curve of the amplitude

玫瑰图中的色标只能粗略地表示裂缝密度，并不详细，所以需要详细分析密度值。4个裂缝带预测得到的裂缝密度分别为0.621 247、0.729 767、0.742 916和0.813 922，可以看出4个值的增加趋势与设计值的趋势相吻合。值得注意的是，设计的裂缝密度是基于等效介质理论，垂直裂缝面方向上的线密度，而预测值是面密度。

4 地震属性方位各向异性裂缝预测

振幅属性和衰减属性的方位变化可以检测裂缝方向和预测裂缝密度^[27-29]。将采集的数据以等方位覆盖次数的方式划分方位角，选取的方位角范围分别为

0°~23°，22°~46°，45°~90°，90°~135°，134°~158°，157°~180°，得到中心方位角分别为11.5°，34°，67.5°，112.5°，146°，168.5°。图15和16是由振幅属性和频率衰减梯度属性的方位各向异性预测的裂缝密度分布结果。对于简化裂缝区的裂缝带，振幅属性的方位各向异性追踪的是裂缝带的边界，内部信息不明显，预测到的裂缝位置与设计(图2)相吻合，a基质制作的裂缝带的边界响应更弱，说明保证基质速度和围岩速度一致来降低边界影响是可行的。第一组小尺寸1-a1、1-b1和1-c1(50 × 42 × 100 m³)也有所指示，1-c1由于受到了干扰，指示不明显。第二组2-a1、2-b1和2-c1(200 × 10 × 100 m³)因裂缝带宽度10 m过小，所以基本上看不到密度指示。针对

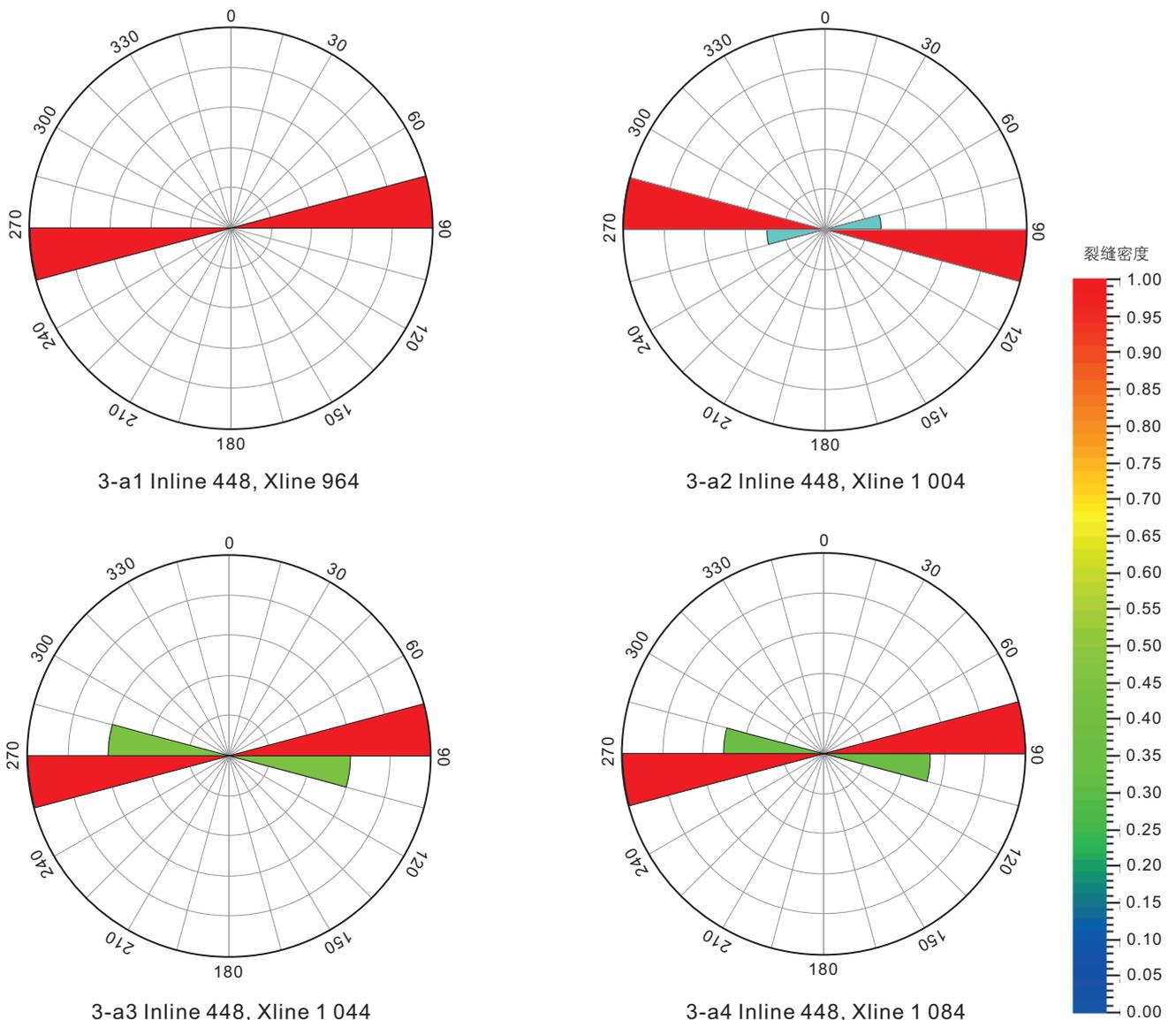


图 14 不同裂缝密度变化裂缝带玫瑰图

Fig. 14 Rose maps of fractured zones with varied fracture densities

实际裂缝区, 振幅属性预测的密度结果能量团尺寸较大, 对断层和多个裂缝的整体有指示作用。频率衰减梯度属性的方位各向异性对对简化裂缝区的裂缝带给出的响应比较杂乱。对实际裂缝区中裂缝带、群缝、交叉裂缝都有响应, 椭圆选区是群缝的响应, 矩形是交叉裂缝的指示, 与已知分布能够一一对应, 但也出现了个别无法对应的能量团, 这主要是由于薄互层和地层尖灭线等复杂的地质构造、这些地质构造与裂缝相互作用等因素产生的干扰能量引起的。总的来说, 频率衰减梯度属性对小尺度裂缝比较敏感, 效果优于振幅属性。

5 讨论

野外裂缝常常以组系形式出现, 微裂缝、中尺度裂缝的尺度是从毫米到米级。这在基于相似比的地震物理模拟中是很难模拟和制作的。本实验制作的裂缝带是地震尺度级别, 是某一区域内的等效模型。模型研究裂缝带尺度、裂缝密度、缝面倾角、裂缝方位角、多组裂缝带之间的距离等参数, 不能研究裂缝张开度参数和裂缝流体填充的情况。

经分析认为进一步研究方向有两个, 一是天然裂

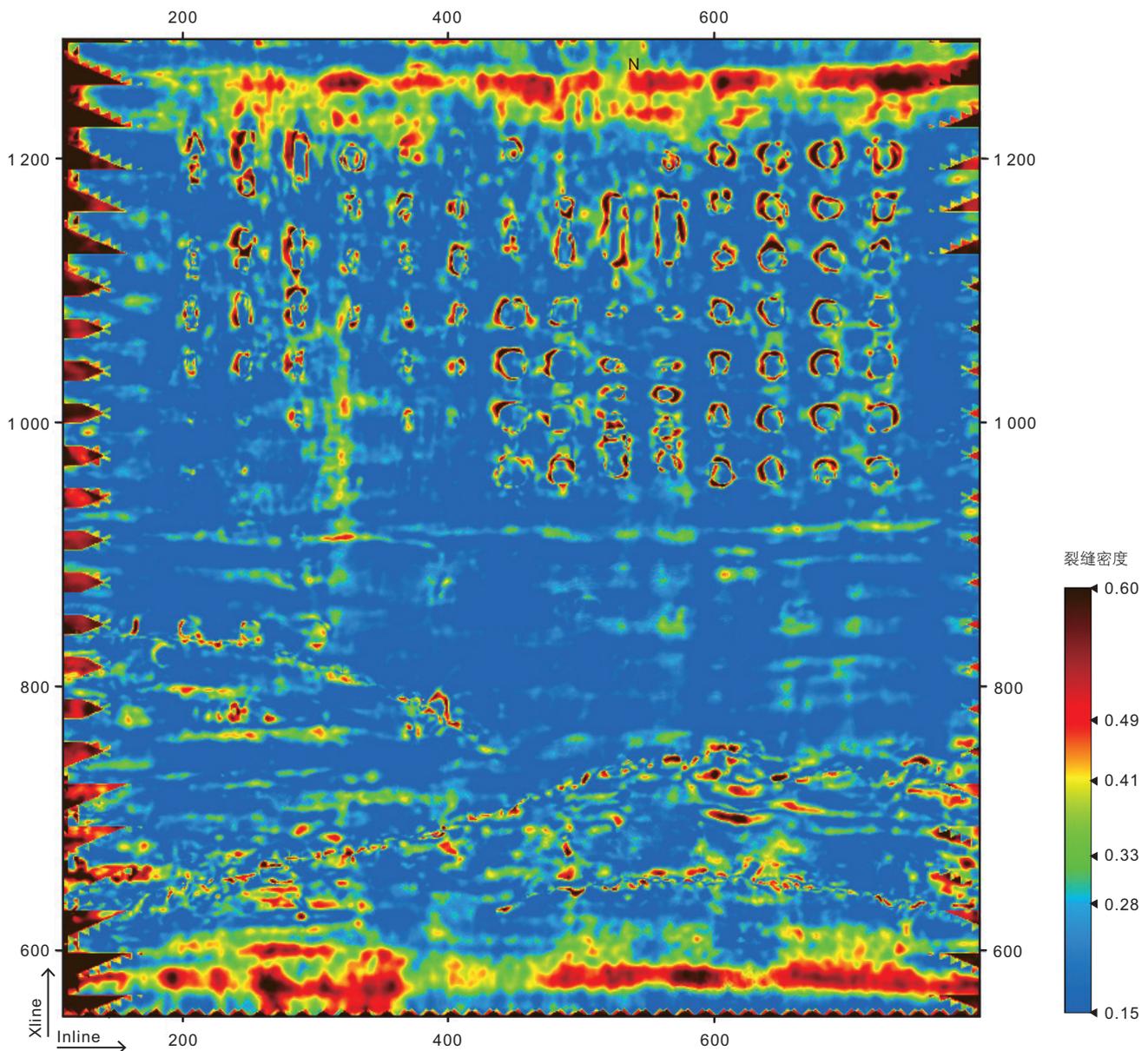


图 15 振幅属性的方位各向异性预测的裂缝密度

Fig. 15 Fracture density detected by azimuthal anisotropy of amplitude attribute

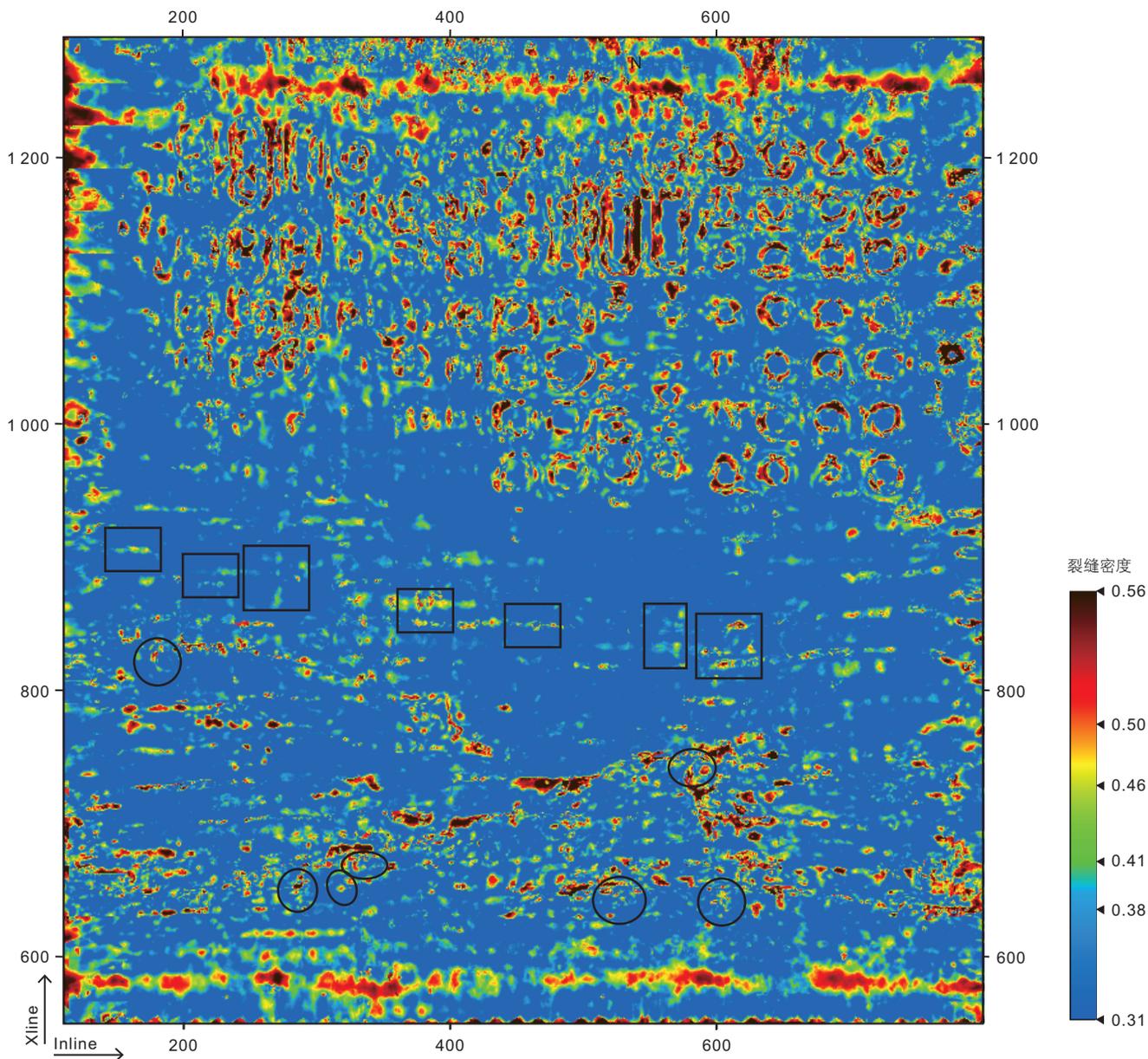


图 16 频率衰减梯度属性的方位各向异性预测的裂缝密度

Fig. 16 Fracture density detected by azimuthal anisotropy of frequency attention gradient attribute

缝的详尽描述和模型制作，包括张开度参数变化的裂缝和含流体的裂缝。另一个是不明显边界裂缝带的建模，野外不明显边界裂缝带居多，尽量减小边界效应对地震响应和裂缝预测结果的影响。一种可行的方法是保证裂缝带混合基质材料的速度与围岩一致。另一种可能的方法在不明显边界的裂缝带制作方面，尽管很难实现。

6 结论

这个模型是将裂缝带和模拟实际地层的地震物理

模型结合的一个初步试探。以四川中部龙岗地区大安寨段储层为地质背景，构建裂缝地震物理模型。此模型能够模拟多种裂缝参数的裂缝带。

对裂缝密度变化的 4 个裂缝带中心位置的叠前道集进行振幅随入射角和方位角分析，得到裂缝带处叠前道集数据具有振幅方位各向异性特征，满足了裂缝的各向异性特征。拟合得到的裂缝方位与设计相吻合，同时裂缝密度变化情况也与设计的相符。在此基础上，分析振幅属性和频率衰减梯度属性的方位各向异性得到的裂缝密度分布，认为频率衰减梯度属性在预测小尺度的裂缝方面优势明显。

致谢

感谢中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院

在模型构建过程中提供大量地质构造和地球物理方面珍贵资料和协助。感谢宋瑾芝、袁三一、张福宏等人的处理工作和有益的讨论。

参考文献

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 01: 2–23. [JIA C Z, PANG X Q, JIANG F J. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 2–23.]
- [2] DEWANGAN P, TSVANKIN I, BATZLE M, et al. PS-wave moveout inversion for tilted TI media: A physical-modeling study[J]. Geophysics, 2006, 71: D135–D143.
- [3] ZHU Y P, TSVANKIN I, DEWANGAN P, et al. Physical modeling and analysis of P-wave attenuation anisotropy in transversely isotropic media[J]. Geophysics, 2007, 72: D1–D7.
- [4] WANG S X, LI X Y, QIAN Z P, et al. Physical modelling studies of 3-D P-wave seismic for fracture detection[J]. Geophysical Journal International, 2007, 168: 745–756.
- [5] VARELA I, MAULTZSCH S, CHAPMAN M, et al. Fracture density inversion from a physical geological model using azimuthal AVO with optimal basis functions[C] // 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. Houston, 2009: 2075–2079.
- [6] YIN Z H, LI X Y, DI B R, et al. Effects of offset-depth ratio on fracture detection – a physical modeling study[C] // 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. San Antonio, 2011: 2014–2018.
- [7] MAHMOUDIAN F, MARGRAVE F, WONG J, et al. Fracture orientation and intensity from AVAz inversion: A physical modeling study[C] // 83rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. Houston, 2013: 483–487.
- [8] MAHMOUDIAN F, MARGRAVE G F, WONG J, et al. Azimuthal amplitude variation with offset analysis of physical modeling data acquired over an azimuthally anisotropic medium[J]. Geophysics, 2015, 80: C21–C35.
- [9] EKANEM A M, WEI J X, LI X Y, et al. P-wave attenuation anisotropy in fractured media: A seismic physical modelling study[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(Supp. 1): 420–433.
- [10] 喻岳钰, 杨长春, 王彦飞, 等. 瞬时频域衰减属性及其在碳酸盐岩裂缝检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1717–1722. [YU Y Y, YANG C C, WANG Y F, et al. P-wave azimuthal attenuation attributes in wavelet-scale domain and its application to fracture detection in carbonate[J]. Progress in geophysics (in Chinese), 2009, 24(5): 1717–1722.]
- [11] 姜传金, 鞠林波, 张广颖, 等. 利用地震叠前数据预测火山岩裂缝的方法和效果分析—以松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 515–523. [JIANG C J, JU L B, ZHANG G Y. The method and effect analysis of volcanic fracture prediction with prestack seismic data—An example from the volcanic rocks of Yingcheng formation in Xujiaweizi fault depression, north of Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2011, 54(2): 515–523.]
- [12] 王洪求, 杨午阳, 谢春辉, 等. 不同地震属性的方位各向异性分析及裂缝预测[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 925–931. [WANG H Q, YANG W Y, XIE C H, et al. Azimuthal anisotropy analysis of different seismic attributes and fracture prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 925–931.]
- [13] 刘依谋, 印兴耀, 张三元, 等. 宽方位地震勘探技术新进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 596–610. [LIU Y M, YIN X Y, ZHANG S Y, et al. Recent advances in wide-azimuth seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 596–610.]
- [14] 魏建新, 牟永光, 狄帮让. 三维地震物理模型的研究. 石油地球物理勘探, 2002, 37(6): 556–561. [WEI J X, MOU Y G, DI B R. Study of 3-D seismic physical model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(6): 556–561.]
- [15] 牟永光. 三维复杂介质地震物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 4–5. [MOU Y G. Seismic physical modeling for 3-D complex media[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 4–5.]
- [16] 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 22–26. [JIANG Y Q, QI L, DENG H B, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 22–26.]
- [17] 张福宏, 邹定永, 陈玲, 等. 川中地区大安寨致密油储层预测技术研究[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 44–48. [ZHANG H F, ZOU Y D, CHEN L, et al. Prediction technology of Daanzhai tight-oil reservoir, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(4): 44–48.]
- [18] 廖群山, 胡华, 林建平, 等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011, 12(6): 815–838. [LIAO Q S, HU H, LIN J P, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 12(6): 815–838.]
- [19] 杨跃明, 杨家静, 杨光, 等. 四川盆地中部地区侏罗系致密油研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 873–882. [YANG

- Y M, YANG J J, YANG G, et al. New research progress of Jurassic tight oil in central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 873–882.]
- [20] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 8–17. [LIANG D G, RAN L H, DAI T S, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 8–17.]
- [21] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64: 133–150.
- [22] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy[J]. *Geophysics*, 1986, 51: 1954–1966.
- [23] RUGER A. Reflection coefficient and azimuthal AVO analysis in anisotropic media [Ph. D. thesis]. Colorado: Colorado School of Mines, 1996.
- [24] 魏建新, 狄帮让. 地震物理模型超声测试技术中的几个问题[J]. *勘探地球物理进展*, 2003, 26(4): 294–300. [WEI J X, DI B R. Several problems of the ultrasonic measurement techniques of seismic physical model[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2003, 26(4): 294–300.]
- [25] NDT Resource Center. Radiated Fields of Ultrasonic Transducers [EB/OL]. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/Community-College/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm>.
- [26] XIE C H, YONG X S, YANG W Y, et al. The comparison between the Cosine fitting and AVAZ in fracture detection[C]// Beijing 2014 International Geophysical Conference & Exposition. Beijing, 2014: 614–616.
- [27] CARCIONE J M. A model for seismic velocity and attenuation in petroleum source rocks[J]. *Geophysics*, 2000, 65: 1080–1092.
- [28] CHICHININA T I, OBOLENTSEVA I R, RONQUILLO-JARILLO G, et al. Attenuation anisotropy of P- and S-waves: Theory and laboratory experiment[J]. *Journal of Seismic Exploration*, 2007, 16: 235–264.
- [29] LI F, LYU B, QI J, et al. Seismic attenuation anisotropy and corresponding frequency versus azimuth (FVAz) attribute[C]// 86th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. Dallas, 2016, 352–356.

Study of seismic physical modelling of fractured reservoirs

WANG Lingling¹, WEI Jianxin¹, HUANG Ping², DI Bangrang¹, QIN Shuyuan¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China

Abstract A small fracture-scale, multi-fractured parameter proportional model of a fractured reservoir has been constructed in the laboratory based on the geological background of Longgang in the central Szechwan Basin, southeast China. Small-scale fractured zones with variable fracture parameters are constructed to simulate the equivalent characteristics of all fractures in certain regions and paper sheets are used to simulate fractures. The model is a trial of the fractured physical model technique. Then the data acquisition and processing are carried out to obtain azimuthal data. Finally, we analyse amplitude at central CDPs of four fractured zones with different fracture densities versus incident angles and the azimuthal anisotropy of amplitude and frequency attenuation gradient attributes are used to detect the development of fractures. The results show that the amplitude of the fractured zones has characteristics of azimuthal anisotropy and the fitting results of the azimuthal amplitude show the predicted orientations are around 90° and four fracture densities have an increasing trend, in accordance with the model design. The azimuthal anisotropy of frequency attenuation gradient attributes is more sensitive to small fractures, comparing with amplitude.

Keywords fractures; physical model; anisotropy; fracture detection

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.020

(编辑 付娟娟)