

基于裂缝形成机理分析的潜山裂缝地震预测技术

明 君 黄江波 王建立 王 林

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:太古界深层变质岩潜山气藏由于埋深大、地震成像难度高、资料分辨率低等因素导致利用宽方位地震数据进行精细高角度小尺度裂缝预测难度极大;裂缝发育期次多、走向倾角复杂多变进一步加剧了利用地震振幅反演裂缝信息的难度。针对以上难题,从变质岩基质裂缝形成机理分析入手,评估利用地震资料预测变质岩裂缝形成能力的可行性,在裂缝形成能力评估基础上利用方位各向异性信息进行裂缝密度预测。提出一种地球物理适用的变质岩基质潜山裂缝形成能力评估模型,创新地联合利用临界应变能释放率和脆性指数评估变质岩基质潜山裂缝形成能力,通过岩相定义、地震反演和统计分类实现裂缝形成能力定量地震解释。同时基于 Chapman 模型的横向各向同性(Horizontal Transverse Isotropy, HTI)岩石物理模拟技术构建不同裂缝形成能力岩相的裂缝密度与方位各向异性强度拟合关系,据此在裂缝形成能力解释基础上进行裂缝密度分岩相精确预测。以上基于裂缝形成机理分析的潜山裂缝地震预测技术成功应用于潜山 B 构造,研究成果可为相似变质岩基质潜山裂缝地震预测提供参考。

关键词:变质岩潜山;裂缝密度预测;裂缝形成机理;统计分类;Chapman 模型;HTI

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.002

Seismic prediction technology for buried hill fracture reservoirs based on fracture formation mechanism analysis

MING Jun, HUANG Jiangbo, WANG Jianli, WANG Lin

CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: Due to factors such as large burial depth, high difficulty in seismic imaging, and low data resolution, it is extremely challenging to predict fine, high-angle, and small-scale fractures using wide-azimuth seismic data in the deep metamorphic rock buried hill gas reservoirs of the Archean period. The multiple stages of fracture development and complex and variable strike and dip angles further exacerbate the difficulty of using seismic amplitude to invert fracture information. In response to the above difficulties, this paper starts with an analysis of the formation mechanism of fractures in metamorphic rock matrix, evaluates the feasibility of using seismic data to predict the formation ability of fractures in metamorphic rock, and based on this, utilizes azimuthal anisotropy information for fracture density prediction. Firstly, a geophysical applicable evaluation model for the formation ability of fractures in buried metamorphic rocks is proposed. The model innovatively combines the critical strain energy release rate and

收稿日期:2024-02-26

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技项目“渤海复杂潜山油气藏精细油藏描述及高效开发技术研究”(CNOOCKJ135ZDXM36TJ03TJGD2020-01)

作者简介:明 君(1970-),男,四川南充人,教授级高级工程师,学士,主要从事地震资料处理、解释以及储层预测工作。
E-mail:mingjun@cnooc.com.cn

brittleness index to evaluate the formation ability of fractures in buried hill of metamorphic rocks. Through petrographic definition, seismic inversion, and statistical classification, quantitative seismic interpretation of fracture formation capability is achieved. Concurrently the HTI (Horizontal Transverse Isotropy) rock physics simulation technology based on the Chapman model is used to develop a fitting relationship between fracture density and azimuthal anisotropy strength of different fracture formation capability of rock facies. Based on this, accurate prediction of fracture density by rock facies is carried out based on the interpretation of fracture formation capability. The above technology has been successfully applied to the structure B of buried hill in Bohai. The research results can provide reference for seismic prediction of fractures in similar metamorphic rock buried hill.

Keywords: Metamorphic rock buried hill; Fracture density prediction; Formation mechanism of fractures; Statistical classification; Chapman model; HTI

0 前言

近年来潜山构造逐渐成为热门油气勘探目标,渤海盆地已相继发现渤中19-6凝析气田、渤中13-2油田和渤中26-6油田等亿吨级油气田。目标潜山B构造发育于盆地太古界地层中,受多期构造运动和长期风化作用等影响,潜山内部高角度裂缝发育,是油气有利储集区域和运移通道。方位各向异性裂缝表征是潜山B构造主要的储层识别手段之一。随着宽方位地震采集和处理的发展,利用地震信息预测地下裂缝成为研究热点。

为了研究各向异性对地震波传播特征的影响, Thomsen L^[1]提出了弱各向异性的理论,以及用来表征各向异性影响的参数。Rüger A^[2]对横向各向同性(Horizontal Transverse Isotropy, HTI)介质反射特征进行了研究,推导出HTI介质反射系数近似方程。Mallick S等人^[3]率先利用振幅随方位变化数据进行裂缝介质弹性参数反演。詹仕凡等人^[4]利用多尺度方位各向异性分析、研究了宽方位矢量偏移距域地震道集的裂缝预测方法。王建花等人^[5]利用杨氏模量方位变化特征,推导了一种基于地震杨氏模量表征的方位弹性阻抗方程,并建立了概率化地震反演方法。

储层裂缝定向度高、地震资料方位各向异性特征强且稳定是上述技术成功应用的必要前提。对于潜山B构造而言,由于裂缝尺度、发育期次、填充度和倾向走向等复杂性及地震资料品质差异等问题,利用宽方位地震资料预测裂缝难以保证效果。一方面,深埋多期次多尺度裂缝引起的方位各向异性强度相对复杂且微弱,难以被有效地提取和反演;另一方面,表征岩石基质特征的稳定强振幅响应通常被作为与裂缝无关的各向同性项,实际上岩石基质的稳定强振幅响应可用于岩石基质的脆性或可压裂性评估^[6-7],这是裂缝形成和发育的岩石力学基础。岩石脆性是控制岩石裂缝形成的重要内因,目前详尽准确的脆性评价方法一般以实验室测量为

主^[8-10],适用于地球物理研究的岩石脆性评价方法主要包括考虑矿物组成的评价方法^[11-12]和基于峰前弹性特征的评价方法^[13]。考虑矿物组成的评价方法优势在于能够直接建立脆性和岩性之间的联系,基于峰前弹性特征的评价方法则涵盖了矿物含量、微观结构和孔隙流体等对岩石脆性的综合影响。高脆性地层通常被认为是裂缝易发育区,然而脆性无法表征岩石强度,高脆性岩石可能由于破裂需要积累的应变能(即应变能释放率)高而极难破裂,导致裂缝发育能力低^[14],评估岩石本身裂缝形成能力需要兼顾岩石强度和脆性评价。

潜山B构造变质岩基质非均质性强,控制裂缝形成的岩石内部因素差异较大,在同等外部应力风化等因素控制下的裂缝发育程度便不同。根据以上认识,在评估变质岩基质固有裂缝形成能力的基础上进一步预测裂缝发育程度,成为提升裂缝预测精度可行、有效的方法。

为充分挖掘利用宽方位资料的稳定有效信息,提升变质岩潜山储层裂缝预测精度,本文从变质岩裂缝形成机理分析入手,提出一种地球物理适用的变质岩基质裂缝形成能力评估模型,分别利用临界应变能释放率和脆性指数表征岩石破裂前所需的应力积累以及岩石破裂后的破碎程度,联合2个参数对变质岩裂缝形成能力进行综合评估,并通过岩相定义和统计分类方法实现变质岩裂缝形成能力定量地震解释。进一步针对不同裂缝形成能力的岩相,分别利用反演的方位各向异性特征进行裂缝密度预测,提升裂缝解释精度。上述技术成功应用于潜山B构造,验证了技术有效性。

1 方法原理

1.1 变质岩潜山裂缝形成能力评估模型

变质岩潜山裂缝形成和发育主要受矿物组分、微观结构等内部因素以及构造应力、风化等外部因素共同控制。由于变质岩复杂的非均质性和外在条件的变化,其

裂缝形成机理的评价标准难以统一。本文从变质岩裂缝形成的内部因素分析入手,提出一种地球物理适用的裂缝形成能力评估模型,变质岩基质内裂缝形成的应力应变过程见图 1。

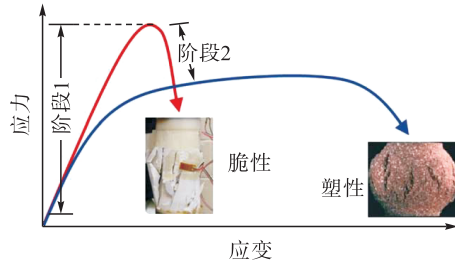


图 1 变质岩基质内裂缝形成的应力应变过程图

Fig. 1 Stress-strain process formed by metamorphic rock matrix fracture

由图 1 可知,阶段 1 为变质岩受力达到裂缝形成所需的临界应力状态,阶段 2 为变质岩突破临界应力状态开始破裂的状态,综合这两个阶段可以较完整地评价变质岩裂缝形成过程。阶段 1 通常可用断裂韧性或临界应变能释放率来表示,断裂韧性代表变质岩对先前存在的裂缝断裂扩展的抵抗力。实验证明,断裂韧性越高,变质岩形成裂缝需要的应力越高^[14]。Jarvie D M 等人^[11]根据不同类型岩石实验数据对断裂韧性和杨氏模量的关系进行统计分析,两参数的相关系数达到 0.79,表明利用杨氏模量预测断裂韧性的可靠性,拟合关系见式(1)。

$$K_{ic} = 0.313 + 0.027E \quad (1)$$

式中: K_{ic} 为断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$; E 为杨氏模量,GPa。

应变能释放率可表示新裂缝形成过程中每单位表面积的能量耗散^[15]。根据失效准则,当应变能释放率达到临界值时,裂缝开始扩展。一般来说岩石杨氏模量越高,临界应变能释放率越高,形成裂缝时需要消耗更多能量。临界应变能释放率计算见式(2)。

$$G_c = \frac{K_{ic}^2}{E / (1 - \nu^2)} \quad (2)$$

式中: G_c 为临界应变能释放率, J/m^2 ; ν 为泊松比。

阶段 2 用脆性指数^[12]表征裂缝发育程度,脆性指数越强,说明破裂形成的裂缝密度越大。可通过脆性矿物含量计算,脆性指数计算见式(3)。

$$BI_1 = (f_q + f_b) / (f_q + f_b + f_o) \quad (3)$$

式中: BI_1 为脆性矿物含量表征的脆性指数; f_q 为石英质量分数; f_b 为黑云母质量分数; f_o 为正长石质量分数。

RICKMAN R 等人^[13]提出利用杨氏模量泊松比定义脆性指数的计算,见式(4)。

$$BI_2 = (\bar{E} + \bar{\nu}) / 2 \quad (4)$$

式中: BI_2 为力学参数表征的脆性指数; $\bar{E}$ 为归一化处理

的杨氏模量; $\bar{\nu}$ 为经过反归一化处理的泊松比。

常见矿物和流体的 BI_2 见图 2。

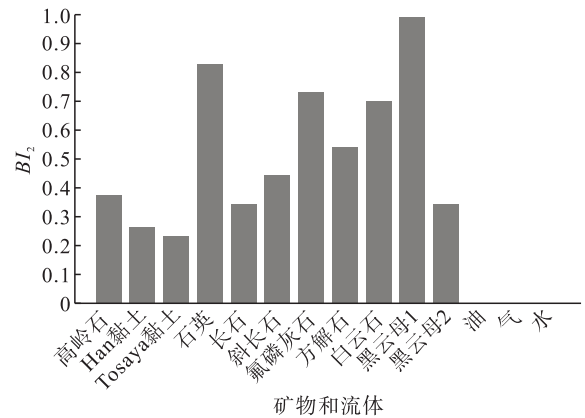


图 2 常见矿物和流体的 BI_2 图

Fig. 2 BI_2 of common minerals and fluids

由图 2 可知,石英、灰石等脆性矿物相对黏土、长石等塑性矿物,具有更高的脆性指数。包含的脆性矿物越多,岩石表现出的脆性越大,说明利用脆性矿物含量和弹性指数来表征脆性的原理一致性。潜山 B 构造变质岩以石英、长石和黑云母为主要成岩矿物,石英和黑云母表现出较高的脆性指数,这是变质岩内裂缝广泛发育的岩石矿物基础。本文使用 BI_1 ,联合 G_c 完整评价裂缝形成机理。以潜山 B 构造 7 井为例,变质岩主要矿物组成为石英、正长石和黑云母,其中石英与黑云母为脆性矿物,利用测井数据计算 BI_1 与 G_c 的交会,见图 3。

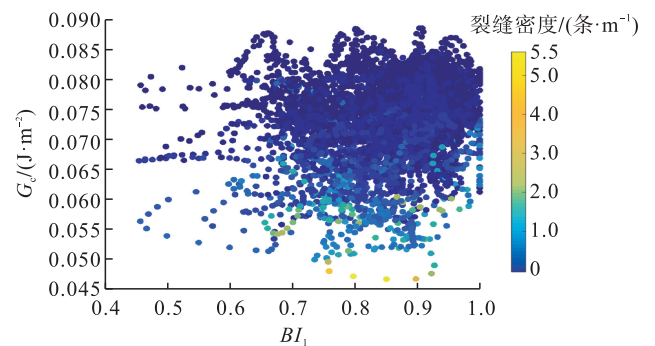


图 3 BI_1 与 G_c 交会图

Fig. 3 Crossplot of BI_1 and G_c

由图 3 可知,井内裂缝发育区对应更低的 G_c 和更高的脆性指数,符合机理认识。

1.2 变质岩潜山裂缝形成能力定量地震解释流程

根据以上分析, G_c 和 BI_1 可以实现变质岩关于裂缝形成能力的岩相划分,进一步需要合理构建岩相与地震响应的映射关系,从而实现适用于变质岩潜山裂缝储层的裂缝形成能力定量解释以及进一步的裂缝密度预测流程。裂缝形成能力定量解释和裂缝密度预测流程见图 4。

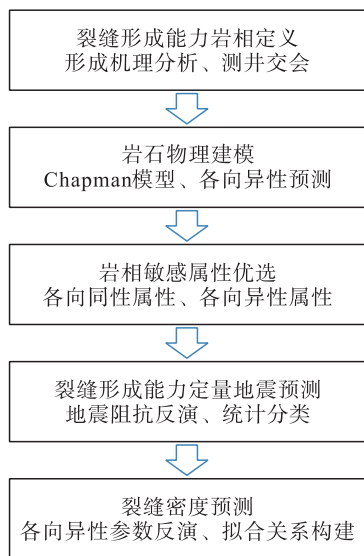


图4 裂缝形成能力定量解释和裂缝密度预测流程图

Fig. 4 Workflow of quantitative interpretation of fracture formation ability and fracture density

1.2.1 裂缝形成能力岩相定义

根据图3 可将潜山B 构造变质岩按照裂缝形成能力划分为三类岩相,测井矿物组分、成像测井解释的裂缝密度、纵横波速度和密度等信息用于交会分析,岩相分

类阈值选取参考岩心分析和测井含气储层解释。裂缝形成能力相关岩相定义见图5。

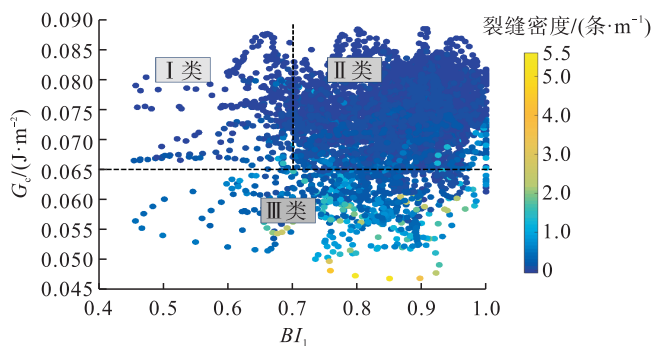


图5 裂缝形成能力相关岩相定义图

Fig. 5 Definition of lithofacies related to fracture formation ability

由图5 可知, I类对应高 G_c 和低脆性指数,代表难破裂塑性变质岩相; II类对应高 G_c 和高脆性指数,代表难破裂脆性变质岩相; III类对应低 G_c 和高脆性指数,代表易破裂脆性变质岩相。其中 III类岩相裂缝形成能力最强, I类岩相裂缝形成能力最弱。岩相分类结果与储层解释对比见图6。

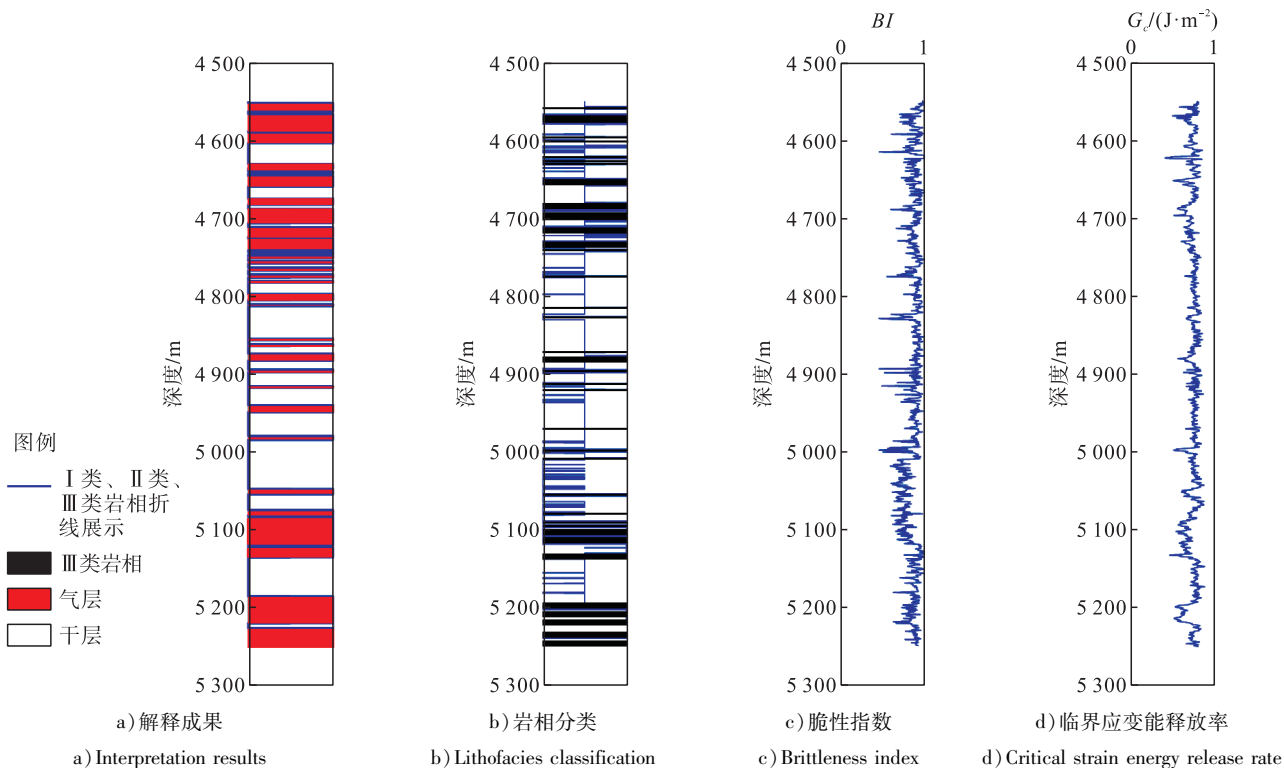


图6 岩相分类结果与储层解释对比图

Fig. 6 The comparison between the classification results of lithofacies and reservoir interpretation

由图6 可知,岩相分类结果与测井解释吻合度高, III类岩相基本对应根据岩心和测井录井资料解释的气层,证实了分类标准的合理性。

1.2.2 岩石物理建模

各向异性岩石物理模拟是实现裂缝储层精细分析和精准预测的基础,潜山B 构造裂缝发育复杂,风化带裂缝倾角分布及岩心切片内孔隙裂缝特征见图7。

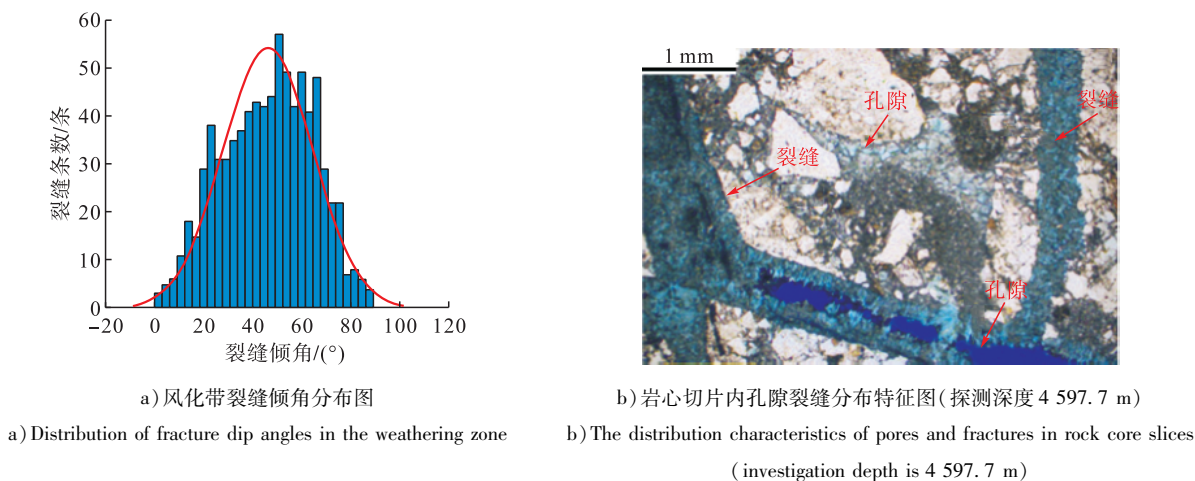


图 7 风化带裂缝倾角分布及岩心切片内孔隙裂缝特征图

Fig. 7 Distribution of fracture dip angles in the weathering zone and pore-fracture characteristics in rock core slices

由图 7-a)可知,裂缝整体表现出高角度特征,与周边断层走向基本一致。由图 7-b)可知,孔隙和裂缝较发育且存在一定连通性,在高埋深(海拔 -4 000 m 以下)时海上新采集地震资料主频在 15 Hz 左右,岩石物理模拟时需考虑低频下波诱导的流体在孔隙、裂缝间的流动作用,实现方位各向异性强度的精准预测。综合考虑,本文选用 Chapman 模型^[16]进行 HTI 介质各向异性模拟。

1.2.2.1 Chapman 模型

Chapman 模型考虑了发生于微裂隙与球形孔隙间或者不同方向的微裂隙间颗粒尺度流体流动,以及发生于微裂隙、球形孔隙与裂缝间的中观尺度流体流动。这 2 种尺度的波诱导流体流动能达到新的流体压力平衡状态。Chapman 模型的有效刚度常数可以利用相互作用能量法得到。Chapman 模型的有效刚度张量表达式见式(5)。

$$C = C^0 - \Phi_p C^1 - \varepsilon_e C^2 - \varepsilon_f C^3 \quad (5)$$

式中: C 为岩石有效刚度张量, GPa; C^0 为岩石基质的各向同性弹性张量, GPa; C^1 、 C^2 、 C^3 分别为孔隙、微裂隙、裂缝的附加作用, GPa; Φ_p 为孔隙度; ε_e 为微裂隙密度, 条/m; ε_f 为裂缝密度, 条/m。

1.2.2.2 井内方位各向异性强度预测

基于 Chapman 模型可构建适用于变质岩潜山裂缝储层的岩石物理建模流程。具体建模流程为:采用 Voigt-Reuss-Hill 边界模型^[17]和等效自相容近似模型^[18]组合基质矿物和孔隙,建立岩石背景介质,再根据研究地区裂缝的产状和发育规律,基于多尺度裂缝 Chapman 模型引入裂缝信息完成建模。进一步即可据此流程预测井内方位各向异性强度。具体方法为:给定已有测井数据(矿物含量/孔隙度/裂缝密度)和对各向异性强度影响较小的模型参数(颗粒尺度/裂缝半径/弛豫时间

等),通过遍历裂缝长度和裂缝纵横比参数,搜索能够保证估计纵横波速度和实测纵横波速度误差最小的参数值,对应方位各向异性强度即为输出,计算见式(6)。

$$\sqrt{[C_{33}^{\text{real}} - C_{33}^{\text{pre}}(asp, L_f)]^2 + [C_{55}^{\text{real}} - C_{55}^{\text{pre}}(asp, L_f)]^2} \rightarrow \min \quad (6)$$

式中: C_{33}^{real} 、 C_{55}^{real} 分别为实测刚度矩阵内第 3 行第 3 列弹性模量和第 5 行第 5 列弹性模量, GPa; C_{33}^{pre} 和 C_{55}^{pre} 分别为岩石物理预测刚度矩阵内第 3 行第 3 列弹性模量和第 5 行第 5 列弹性模量, GPa; asp 为裂缝纵横比; L_f 为裂缝长度, m。

1.2.3 岩相敏感属性优选

判别分类、贝叶斯分类、神经网络分类、支持向量机分类 K-邻域分类等是常用的统计分类优选方法,其中贝叶斯分类的应用最成熟。贝叶斯分类首先需要建立地震弹性属性的概率密度函数。具体做法为利用校正后对应不同岩相的测井数据,通过基于核函数的非参概率密度估计,计算对应不同属性组合的二维概率密度函数,即给定岩相时弹性参数相关的属性的概率分布。二维概率密度函数可通过对 2 种地震属性交会内的数据点进行平滑得到^[19]。高斯核函数可用作滤波模板,在元素点位置 (i, j) 计算见式(7)。

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中: $G(i, j)$ 为位置 (i, j) 处高斯核函数; σ 为标准差; k 为中心点构建的位置,模板尺寸为 $(2k+1)(2k+1)$ 。

基于二维概率密度函数,地震属性可通过贝叶斯分类,解释为不同的岩相类别。地震属性可以为各向同性地震属性或各向异性地震属性。贝叶斯分类见式(8)。

$$\psi = \operatorname{argmax}[p(r|\omega)p(\omega)] \quad (8)$$

式中: ψ 为待估计岩相; r 为地震属性; ω 为对应岩相类别; $p(r|\omega)$ 为对应不同岩相的二维概率密度函数; $p(\omega)$ 为不同岩相的先验概率。

利用贝叶斯分类可进行统计分类,但不同地震属性组合的分类能力不同。为了量化不同属性组合的分类能力,可以利用式(8)对测井训练数据进行自分类,计算贝叶斯分类混淆矩阵,见式(9)。

$$C_m = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: C_m 为贝叶斯分类混淆矩阵;元素 P_{ij} 为真实岩相为 j 类时预测为 i 类岩相的条件概率。

矩阵第 i 行表示实际岩相为 j 类岩相时被预测为各类岩相的概率值。明显地 $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ 。对角线元素对应成功分类每种岩相的成功率。

1.2.4 裂缝形成能力定量地震预测

裂缝形成能力定量地震预测用于对 1.2.3 节中通过贝叶斯分类优选出的敏感地震属性组合进行反演,进一步利用贝叶斯分类实现地震岩相解释。岩相敏感地震属性可以是常规各向同性属性,也可以是各向异性属性,根据工区实际情况利用 1.2.3 节优选得到。各向同性属性反演方法在此不再赘述。方位各向异性反演方法较多,考虑到方位弹性阻抗作为一种体属性具有更高的稳定性,在属性优选和反演中优先考虑方位弹性阻抗作为目标属性,针对各向异性介质实现各向异性弹性阻抗方程及其反演方法的研究。

Downton J 等人^[20]提出的方位弹性阻抗计算见式(10)~(11)。

$$EI(\theta, \varphi) = EI(\theta) e^{2\sin\theta^2 \cos\varphi^2 \tau} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\delta^{(v)} + 8 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \gamma^{(v)} \right] \quad (11)$$

式中: $EI(\theta, \varphi)$ 为方位弹性阻抗, $\text{km/s} \cdot \text{g/cm}^3$; $EI(\theta)$ 为常规弹性阻抗, $\text{km/s} \cdot \text{g/cm}^3$; θ 为入射角, ($^\circ$); φ 为方位角, ($^\circ$); $\delta^{(v)}$ 、 $\gamma^{(v)}$ 为 Thomsen 各向异性参数; τ 为综合各向异性强度; V_s 、 V_p 分别为横波速度和纵波速度, m/s 。

基于贝叶斯理论,根据储层待反演方位弹性阻抗的先验分布信息和地震信息,可求解方位弹性阻抗的后验概率分布,最终求解最优解。对各方位和入射角的地震数据分别进行方位弹性阻抗反演,便可得到工区目标层段各方位、各角度的方位弹性阻抗数据体。后续根据选取垂直裂缝走向和平行裂缝走向的方位阻抗反演结果,

可根据式(7)推导 τ ,计算见式(12)。

$$\tau = \frac{\ln \frac{EI(\theta, \varphi) / EI(\theta)}{2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}}{2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \quad (12)$$

1.2.5 裂缝密度预测

常规裂缝密度预测方法中一般利用各向异性梯度反演属性表征裂缝发育程度。变质岩基质裂缝形成能力不同,发育裂缝的密度、长度、形态和纵横比等均不同。Ⅲ类岩相裂缝形成能力更强,一般更易发高密度裂缝,对应各向异性强度更高。Ⅰ类岩相裂缝形成能力最差,裂缝密度及相应各向异性强度较低。根据岩石物理模拟得到的不同岩相对应的各向异性与裂缝密度的拟合关系,即可利用 1.2.4 节中反演的 τ 预测不同岩相内的裂缝密度分布,最终实现全区裂缝密度预测。

2 应用效果

潜山 B 构造属于暴露型潜山,埋藏深度在海拔 -4 000 m 以下,钻井揭示潜山顶部风化带内孔隙和裂缝较发育,裂缝倾角范围主要集中在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 间,横向非均质性强,风化带之下为致密花岗岩潜山。地震资料 HTI 特征明显,由于潜山内幕地震反射信息较少,裂缝识别难度较大。需要转变思路从裂缝形成机理分析入手,评估利用地震资料预测变质岩基质裂缝形成能力的可行性,在此基础上进行变质岩基质裂缝形成能力评估,进一步利用方位各向异性信息进行裂缝密度预测。

2.1 裂缝形成能力岩相定义

裂缝形成能力岩相定义已在 1.2 节中详细介绍,根据测井分析将变质岩潜山依据裂缝形成能力划分为三类岩相,此处不再赘述。

2.2 井内方位各向异性参数预测

根据 1.2 节所述 Chapman 岩石物理模拟技术进行潜山 B 构造井内方位各向异性预测,测井解释的裂缝密度、孔隙度和矿物组分见图 8。

估计纵横波速度与实测纵横波速度见图 9。由图 9 可知,估计纵横波速度与实测纵横波速度基本一致,保证了各向异性参数预测的准确性,预测各向异性参数 $\gamma^{(v)}$ 、 $\varepsilon^{(v)}$ 、 $\delta^{(v)}$ 和测井裂缝密度解释结果见图 10。由图 10 可知,各向异性强度与裂缝密度对应关系较好,为后续潜山 B 构造裂缝分析和预测奠定理论和数据基础。

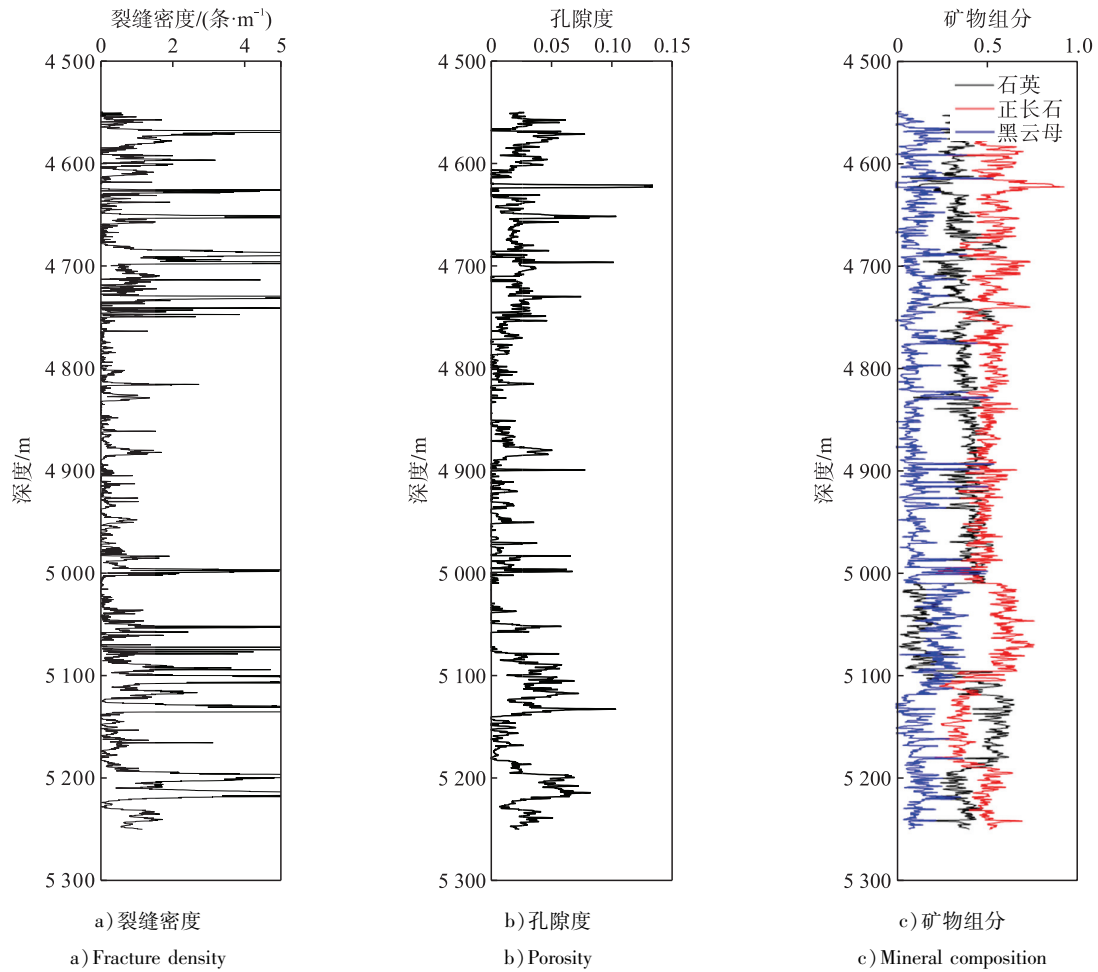


图 8 测井解释成果图

Fig. 8 Logging interpretation results

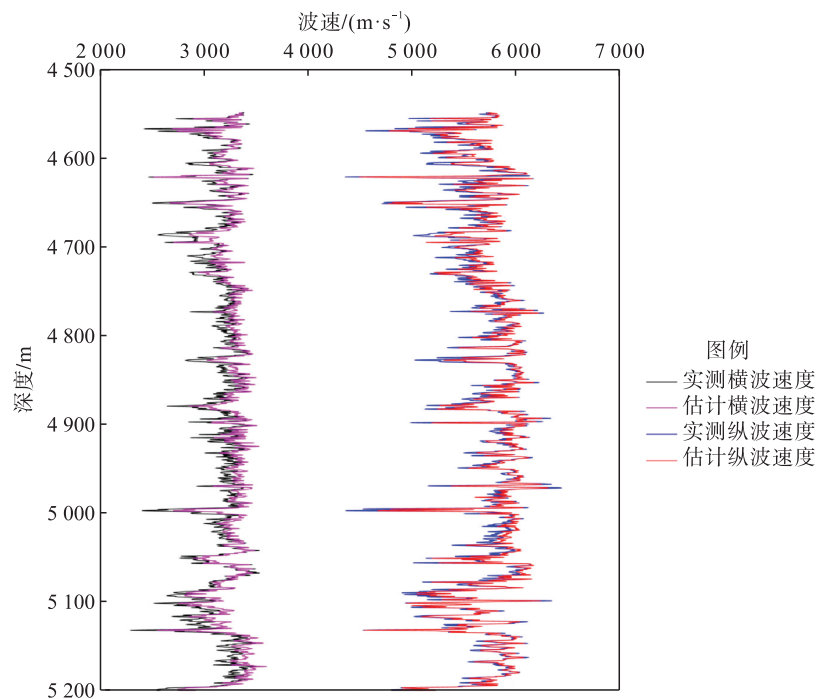
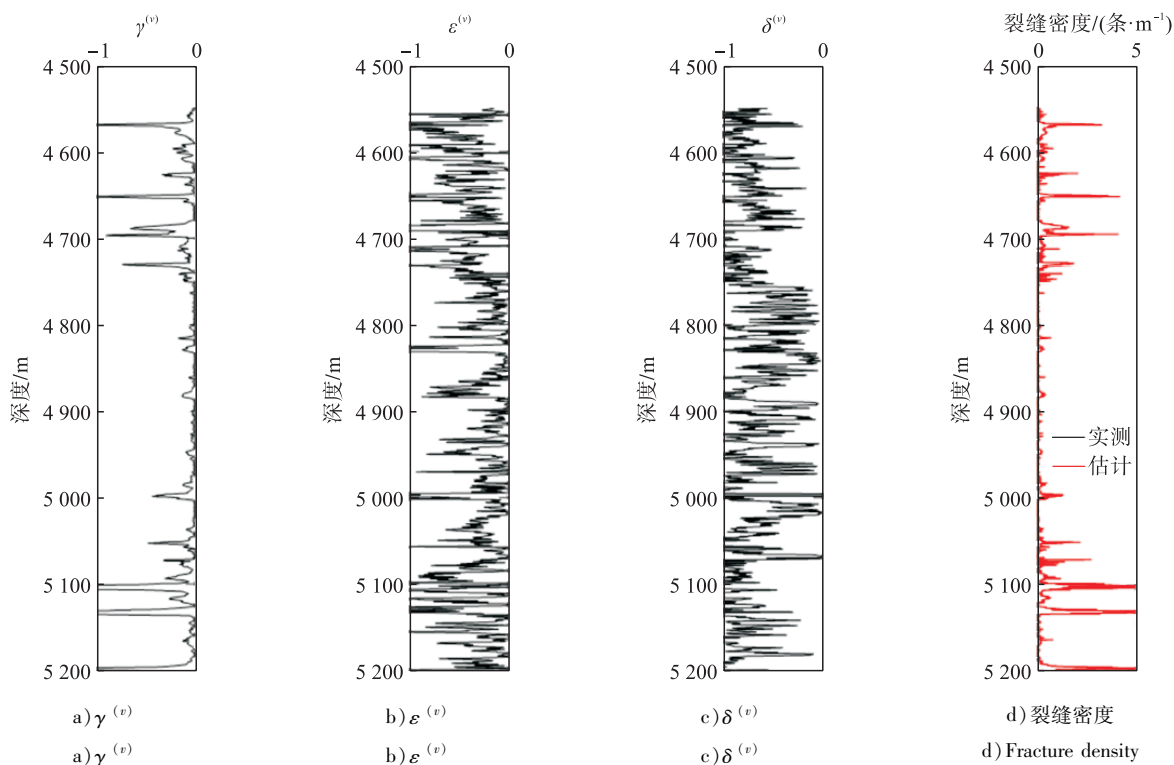


图 9 估计纵横波速度与实测纵横波速度比较图

Fig. 9 Comparison between estimated P- and S-wave velocities and measured wave velocities

图 10 预测各向异性参数 $\gamma^{(v)}$ 、 $\epsilon^{(v)}$ 、 $\delta^{(v)}$ 和测井裂缝密度解释结果图Fig. 10 Predicted anisotropic parameters $\gamma^{(v)}$ 、 $\epsilon^{(v)}$ 、 $\delta^{(v)}$ and the interpretation results of logging fracture density

2.3 岩相敏感地震属性优选

完成井内方位各向异性参数预测后,利用贝叶斯分类混淆矩阵进行不同属性组合的概率密度函数分类能力比较,以选取对脆性相关岩相敏感最优的地震属性。分别建立各向同性属性组合和各向异性属性组合的概率密度函数,并通过贝叶斯分类和混淆矩阵

统计比较两类属性组合对三类岩相的分类能力。各向同性属性组合为声波阻抗 (acoustic impedance, AI)—弹性阻抗 $EI(30^\circ)$,各向异性属性组合为方位弹性阻抗 $EI(30^\circ, 90^\circ)$ —方位弹性阻抗 $EI(30^\circ, 30^\circ)$ 。对应不同属性组合的二维概率密度函数见图 11。

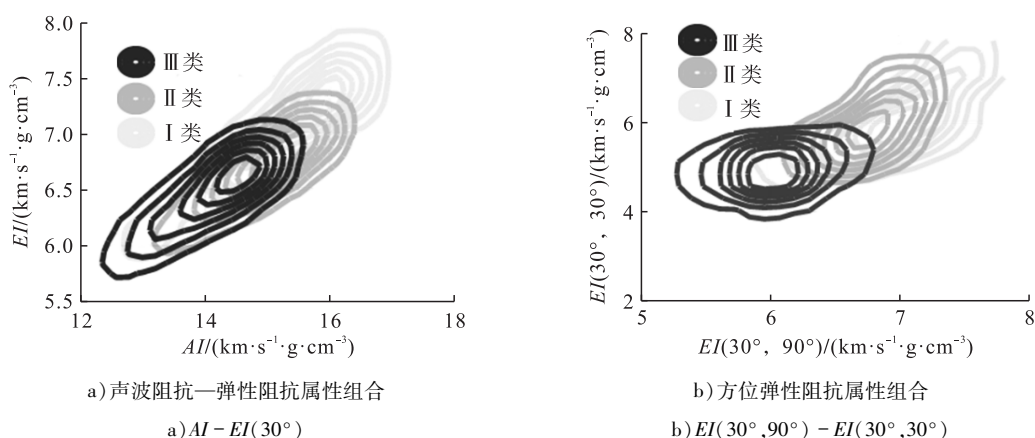


图 11 对应不同属性组合的二维概率密度函数图

Fig. 11 2-D probability density functions corresponding to different pairs of attributes

由图 11 可知,三类岩相对应的属性覆盖分布范围不同,三类岩相叠合面积越小,误分类概率越小,成功预测能力越强。

利用贝叶斯分类,假设三类岩相的先验概率均相

同,通过式(8)的贝叶斯分类对训练数据进行自分类,通过式(9)所示分类混淆矩阵统计数据点分类情况,两种属性组合的完整贝叶斯分类混淆矩阵直方图见图 12。

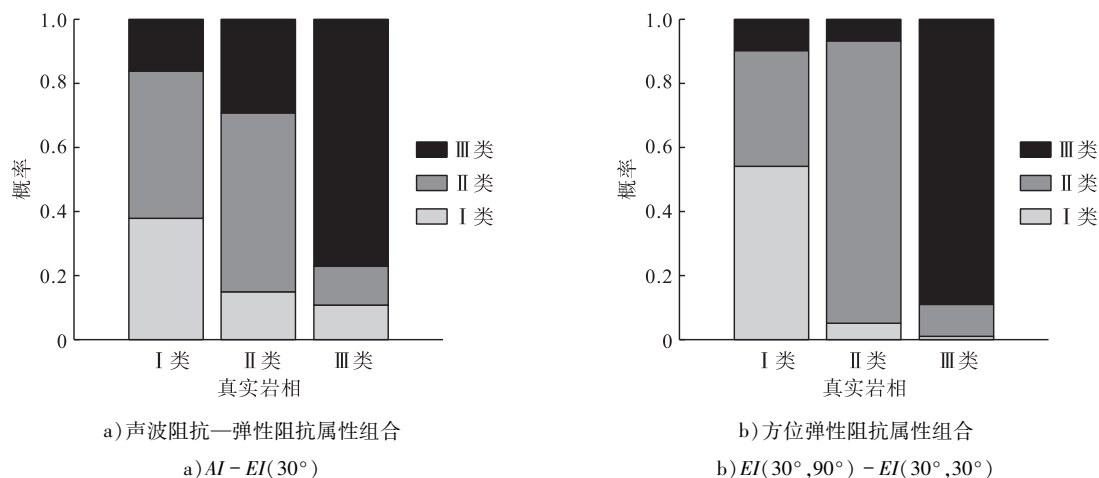


图 12 不同地震属性组合的贝叶斯分类混淆矩阵直方图

Fig. 12 Bayesian classified confusion matrix in vertical bars for different seismic attribute pairs

由图 12 可知,各向异性引入后能够明显增强地震属性对不同岩相的识别能力。I 类、II 类和 III 类岩相的分类成功率分别提升了 16%、32% 和 12%。III 类易破裂脆性变质岩相不易被误分类为 I 类、II 类,且预测 III 类结果对应 I 类、II 类真实岩相的概率也更小。因此选用该属性组合作为计算条件概率密度函数的属性和下一步反演的最终反演参数。

2.4 裂缝形成能力定量地震预测

优选裂缝相关岩相敏感的地震属性 $EI(30^\circ, 30^\circ)$ 和 $EI(30^\circ, 90^\circ)$, 进行方位弹性阻抗反演并利用贝叶斯分类模型进行岩相分类。本文以方位角 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 地震资料进行方位弹性阻抗反演。敏感属性反演结果利用图 11-b) 所示二维概率密度函数进行贝叶斯分类, 得到三类裂缝形成能力岩相, 实现裂缝形成能力定量地震解释图, 见图 13。

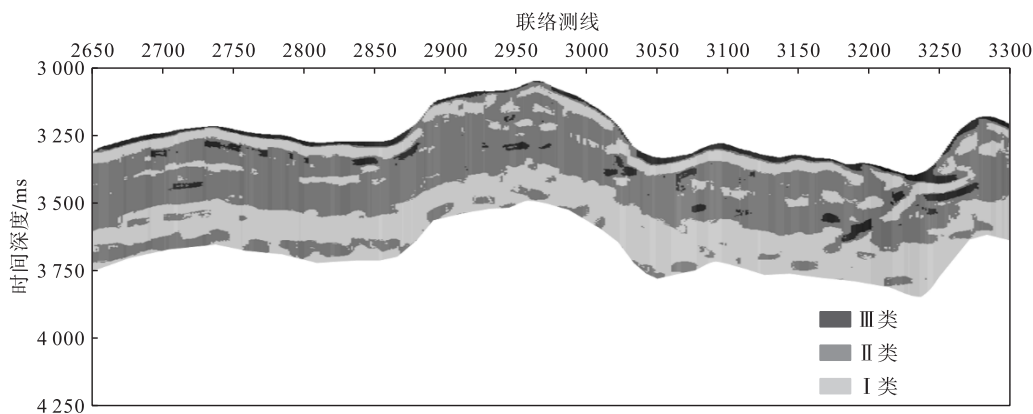


图 13 潜山 B 构造裂缝形成能力定量地震解释图(主测线 4762)

Fig. 13 Quantitative seismic interpretation of fracture formation ability in structure B of buried hill (inline 4762)

由图 13 可知三类岩相的纵向横向分布特征。III 类岩相主要分布在潜山顶面及高角度断层发育位置, I 类、II 类岩相在潜山风化带内主要呈层状发育特征。

2.5 裂缝密度预测

依据井内岩石物理模拟分析构建的三类岩相内各向异性强度与裂缝密度的岩石物理交会关系见图 14。

由图 14 可知,三类岩相表现出的各向异性强度与裂缝密度的关系不同;其中, I 类、II 类和 III 类岩相裂缝密度与各向异性强度拟合关系见式(13) ~ (15)。

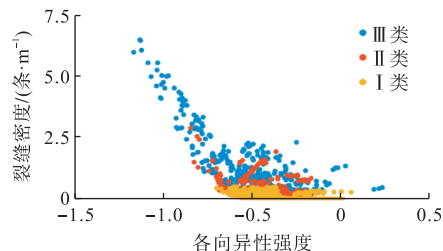


图 14 三类岩相内各向异性强度与裂缝密度的岩石物理关系图

Fig. 14 Rock physical relationship between anisotropy strength and fracture density within three types of lithofacies

$$\varepsilon_f = 3 \tau \quad (13)$$

$$\varepsilon_f = 25 \tau^2 + 7.5 \tau \quad (14)$$

$$\varepsilon_f = -21 \tau^3 + 3.5 \tau^2 + 8.5 \tau + 2.7 \quad (15)$$

分析岩相间的拟合关系差异可能与裂缝发育的长度

和形态有关,可通过预测的裂缝长度和纵横比等特征进一步分析验证。

根据以上解释模型,在岩相解释基础上可利用反演的方位各向异性信息和构建的岩石物理关系实现裂缝密度拟合预测,裂缝密度预测结果见图 15。

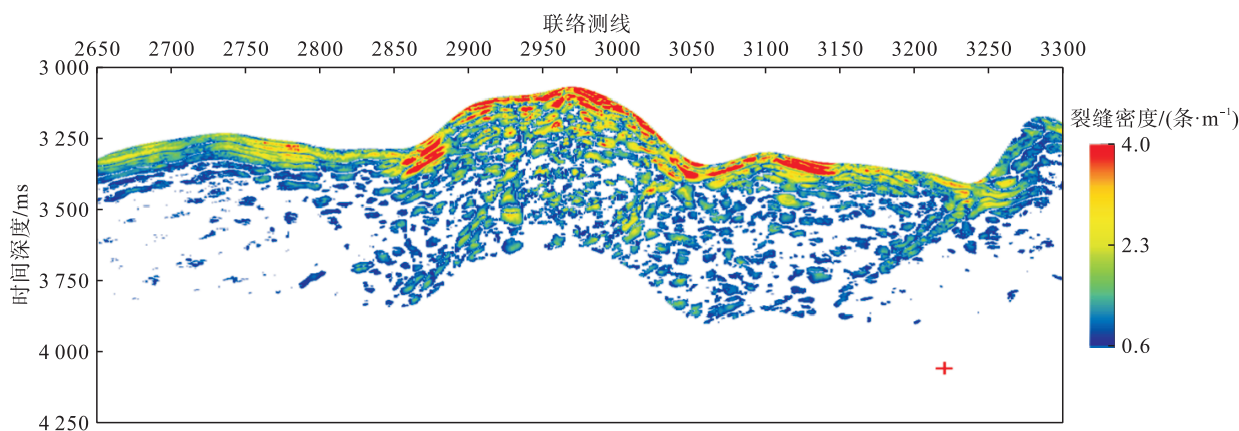


图 15 潜山 B 构造裂缝密度预测图(主测线 4762)

Fig. 15 Prediction of fracture density in structure B of buried hill (inline 4762)

3 结论

本文提出一种变质岩潜山裂缝形成机理分析方法,联合临界应变能释放率和岩石脆性指数综合分析变质岩裂缝形成机理和形成能力,在裂缝形成机理分析基础上实现裂缝密度精准预测,将变质岩潜山裂缝密度直接反演分解为裂缝形成能力评估和带内密度估计,精准岩石物理建模和井内各向异性强度估计进一步提升了预测准确度。同时裂缝形成能力分析和地震解释工作也可对后续井位压裂开发提供有益指导。基于裂缝形成机理分析的潜山裂缝地震预测技术可作为变质岩潜山裂缝预测技术体系内的新补充,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51 (10): 1954-1966.
- [2] RÜGER A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1996.
- [3] MALLICK S, CRAFT K L, MEISTER L J, et al. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data [J]. Geophysics, 1998, 63 (2): 692-706.
- [4] 詹仕凡,陈茂山,李磊,等. OVT 域宽方位叠前地震属性分析方法[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 956-966.
ZHAN Shifan, CHEN Maoshan, LI Lei, et al. OVT domain wide-azimuth prestack seismic attribute analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50 (5): 956-966.
- [5] 王建花,张金森,吴国忱. 宽方位杨氏模量反演和裂缝预测方法及应用——以渤中凹陷 H 构造潜山勘探为例[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 593-602.
WANG Jianhua, ZHANG Jinmiao, WU Guochen. Wide azimuth Young's modulus inversion and fracture prediction: An example of H structure in Bozhong sag [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56 (3): 593-602.
- [6] CHEN Jiaojiao, ZHANG Guangzhi, CHEN Huaizhen, et al. The construction of shale rock physics effective model and prediction of rock brittleness [C]//2014 SEG Annual Meeting, 26-31 October 2014, Denver, Colorado, USA. Houston: SEG, 2014.
- [7] ZHANG Feng, WANG Lin, LI Xiangyang. Characterization of a shale-gas reservoir based on a seismic amplitude variation with offset inversion for transverse isotropy with vertical axis of symmetry media and quantitative seismic interpretation [J]. Interpretation, 2020, 8 (1): 1-40.
- [8] HONDA H, SANADA Y. Hardness of coal [J]. Fuel, 1956, 35: 451-461.
- [9] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11 (10): 389-392.
- [10] ALTINDAG R, GUNAY A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks [J]. Scientific Research & Essays,

- 2010, 5 (16): 2107-2118.
- [11] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian barnett shale of North-Central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4): 475-499.
- [12] VERNIK L, NUR A. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks [J]. Geophysics, 1992, 57 (5): 727-735.
- [13] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the barnett shale [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24, September 2008, Denver, Colorado, USA. New York: SPE, 2008.
- [14] JIN X, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. An integrated Petrophysics and Geomechanics approach for fracability evaluation in Shale Reservoirs [J]. SPE Journal, 2000, 20 (3): 518-526.
- [15] WHITTAKER B N, SINGH R N, SUN G. Rock fracture mechanics. Principles design and applications [M]. New York: Elsevier, 1992.
- [16] CHAPMAN M, MAULTZSCH S, LIU E, et al. The effect of fluid saturation in an anisotropic multi-scale equant porosity model [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 54 (3/4): 191-202.
- [17] Hill R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate [J]. Physical Society, 1952, 65 (5): 349-354.
- [18] BERRYMAN J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media. I. Spherical inclusions [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68 (6): 1809-1819.
- [19] WANG Lin, ZHANG Feng, LI Xiangyang, et al. Quantitative seismic interpretation of rock brittleness based on statistical rock physics [J]. Geophysics, 2019, 84 (4): 1942-2156.
- [20] DOWNTON J, GRAY D. AVAZ parameter uncertainty estimation [C]//2006 SEG Annual Meeting, 06 October, 2006, New Orleans, Louisiana, USA. Houston: SEG, 2006.

中国石油首个咸水层 CCS 试注项目启动

2024 年 7 月 12 日上午,中国石油首个咸水层 CCS 试注项目在南方油田福山探区金凤 7x 井场正式启动。这代表着中国石油在南方地区低碳产业布局和转型发展驶向快车道。

咸水层 CCS 是实现二氧化碳规模埋存的有效途径。研究表明,咸水层封存潜力巨大,对实现碳减排具有重大意义。中国石油南方油田持续攻关咸水层 CCS 技术,在海南省“揭榜挂帅”重点研发专项和中国石油“基础前瞻”科技专项的支持下,取得了阶段性进展。该项目可为国内咸水层 CCS 方案编制标准和规范制定、咸水层 CCS 封存技术和商业模式探索提供第一手资料,同时也为中国石油和海南省参与国内及国际碳排放权交易拓展新的应用场景。

南方油田布局 CCUS 相关技术已 10 余年,不仅打通了 CCUS 全产业链流程,而且实现了较好的经济效益,内部收益率达到 13% 以上。未来,南方油田将深度融合“CCUS 降碳、CCS 固碳、新能源减碳”,推动油气产业与负碳产业融合发展,积极融入海南省西部工业走廊绿碳产业链建设,加快培育负碳技术向未来产业延伸,以实际行动为实现“双碳”目标贡献石油力量。

(杨 寒 摘编自中国石油新闻中心 <http://www.news.cnpc.com-cn/system/2024/07/15/030137084.shtml>)