

蔺学旻,肖红琳. 缝洞型储层声波远探测测井响应模拟及应用:以塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层为例. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):312-327. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230195.

Lin Xuemin, Xiao Honglin. Simulation and Application of Acoustic Remote Detection Logging Response in Fracture - Cavity Reservoirs: Taking Fracture - Cavity Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55 (1): 312 - 327. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230195.

缝洞型储层声波远探测测井响应模拟及应用 ——以塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层为例

蔺学旻,肖红琳

中石化西北油田分公司勘探开发研究院,乌鲁木齐 830011

摘要:塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层缝洞类型多样、结构复杂。声波远探测技术能够探测到井外数十米范围内的地质异常体,在这种缝洞型油藏评价中具有广阔的应用前景。本文首先采用完全匹配层(perfectly matched layer, PML)吸收边界条件的交错网格有限差分方法模拟塔河油田缝洞型储层的声波远探测测井响应;然后根据缝洞空间分布建立过井及井旁裂缝不同长度、开度、角度的裂缝分布模型以及井旁洞穴、孔洞尺寸、数量、远近变化的缝洞型储层模型;再用有限差分方法模拟波场,分析裂缝、洞穴、溶蚀孔洞的波场特征,用偏移成像处理方法得到远探测声波波场裂缝、洞穴、溶蚀孔洞的成像结果,建立相应的声波远探测成像解释模型;最后将实钻井声波远探测测井资料与常规测井、电成像测井和地震剖面特征及试油成果进行对比。结果表明,应用此方法建立的声波远探测解释模型对碳酸盐岩缝洞型储层的识别效果良好,适用于塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层的识别与评价。

关键词:塔河油田;缝洞型储层;声波远探测;数值模拟;解释模型;实例应用

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230195

中图分类号:P631.8

文献标志码:A

Simulation and Application of Acoustic Remote Detection Logging Response in Fracture - Cavity Reservoirs:

Taking Fracture - Cavity Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield as an Example

Lin Xuemin, Xiao Honglin

Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi 830011, China

Abstract: Fracture - cavity reservoirs of Ordovician carbonate rock in Tahe oilfield have various types and complex structures. Acoustic remote detection technology can detect geological anomalies in the range of tens of meters outside the well, and has broad application prospects in the evaluation of fracture - cavity reservoirs. Firstly, the staggered grid finite difference method with perfectly matched layer (PML) absorption boundary conditions is used to simulate the acoustic remote detection logging

收稿日期:2023-08-09

作者简介:蔺学旻(1968—),男,高级工程师,从事测井综合研究,E-mail:lin3d@189.cn

基金项目:中国石化科技攻关项目(P20039)

Supported by Science and Technology Tackle Project of SINOPEC (P20039)

response of fracture - cavity reservoirs in Tahe oilfield. Then, through the simplified modeling of fracture - cavity spatial distribution, the fracture distribution model with different lengths, openings and angles of fractures passing through and beside the well and the fracture - cavity reservoir model with the changes of cave, hole size, number and distance beside the well are established. Then the wave field is simulated by finite difference, the wave field characteristics of cracks, caves and dissolution holes are analyzed, and the imaging results of cracks, caves and dissolution holes of acoustic remote detection wave field are obtained by offset imaging processing method, and the corresponding imaging interpretation model of acoustic remote detection is established. At last, the acoustic remote detection logging data of real drilling are compared with conventional logging, electric imaging logging, seismic profile characteristics, and oil test results. The results show that the acoustic remote detection interpretation model established by this method is effective for the identification and evaluation of carbonate fracture - cavity reservoirs.

Key words: Tahe oil field; fracture - cavity reservoirs; acoustic remote detection; numerical simulation; interpretation model; example application

0 前言

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起南部,是我国投入开发的储量最大、产量最高的海相碳酸盐岩油藏^[1-4],已累计产原油突破 $1 \times 10^8 \text{ t}$ ^[5],其奥陶系碳酸盐岩先后经历多期构造抬升和海平面变化,在加里东晚期—海西期经历了长期风化岩溶作用^[6],形成了复杂多样的岩溶缝-洞体系,包括大型溶洞、溶蚀孔洞、溶蚀孔隙、构造溶蚀裂缝等,其中大型洞、孔是最主要的储集空间;不同尺度的断裂和裂缝是主要的连通道^[7]。近年来塔河油田碳酸盐岩油藏的精细开发需要对缝洞型储层进行高精度刻画,常规测井由于受径向探测深度的限制,无法描述远离井筒缝洞型储层的结构,因此需要获得对井周数十米范围内响应信息的描述,搭建测井与地震识别缝洞的桥梁。

近年发展起来的利用充液井中偶极子声源进行的远探测测井^[8-14],从不定向发展到定向,探测距离也发展到可以对井外近百米内的地质异常体进行探测^[15],填补了常规测井与地震之间的空白,在塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏评价中具有广阔的应用前景。但缝洞型储层复杂多变,声波远探测成像特征与储层发育类型及发育程度的对应关系尚不明确,制约了常规成像测井近井筒储层评价与声波远探测远井筒缝洞识别及地震资料区域性缝洞型储层刻画的结合。

本文利用有限差分模拟方法^[16],通过开展缝洞型储层远探测特征的正演模拟,建立了过井及井旁

裂缝不同长度、开度、倾角的成像特征和井旁洞穴、孔洞尺寸、数量、远近变化的成像特征,形成了塔河油田缝洞型储层的声波远探测成像解释模型,通过在塔河油田奥陶系实钻井声波远探测测井的实例,将声波远探测成像结果与电成像测井、常规测井及地震资料缝洞识别结果进行对比,为建立塔河油田成像测井、常规测井、声波远探测井到地震的全尺度缝洞型储层评价体系提供依据。

1 孔隙弹性介质阵列声波测井响应有限差分模拟方法

1.1 Biot 孔隙弹性介质理论及基本方程

利用 Biot 孔隙弹性介质模型近似缝洞型储层。孔隙弹性介质的弹性波传播理论由 Biot^[17-18]提出,是一种描述多孔介质在受到机械作用时孔隙流体流动行为的数学模型,考虑了孔隙流体和固体基质之间相对运动引起的能量耗散。它将多孔介质的变形描述为固体基质的弹性变形和饱和孔隙流体流动引起的变形两个分量的总和,并考虑了固相和液相之间的耦合及流体压缩性和流体饱和度变化的影响。图 1 给出了 Biot 孔隙弹性介质模型示意图。

为了处理问题方便, Biot 提出了五个基本假设:1) Biot 理论中的“孔隙”为有效孔隙,即液相是连续的,而密闭孔隙被认为是固相的一部分;2) 孔隙在空间中随机分布,并且是各向同性的,即孔隙占据面积与固相占据面积的比率与横截面的方向无关;3) 孔隙的尺度为宏观尺度;4) 固体骨架被认为具有压缩性和剪切刚性,即为弹性固体基质;5) 介质单位体

积的形变是完全可逆的。基于这些假设, Biot^[17-18]根据固相与液相的质量和动量守恒方程, 通过流体流动和力学边界条件以及描述多孔介质流体流动特性的本构关系的耦合, 导出了 Biot 孔隙弹性介质波动方程, 用以近似模拟孔隙弹性介质中弹性波的传播特征与传播规律。

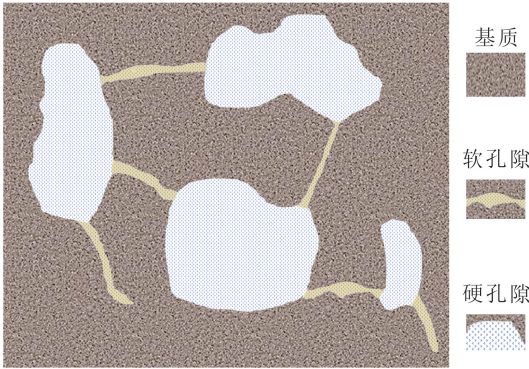


图 1 Biot 孔隙弹性介质模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of Biot poroelastic medium model

图 2a 给出了轴向柱对称的井筒流体与地层模型^[19-20]。设极坐标下 Biot 固-液双相模型中固相质点位移矢量为 $\mathbf{u} = (u_r, u_\theta, u_z)^\top$ (u_r 、 u_θ 、 u_z 分别为位移矢量 \mathbf{u} 的径向、轴向和垂向分量), 液相质点位移矢量为 $\mathbf{U} = (U_r, U_\theta, U_z)^\top$ (U_r 、 U_θ 、 U_z 分别为位移矢量 \mathbf{U} 的径向、轴向和垂向分量)。根据广义胡克定律, 考虑平行于波传播方向流体的流动, Biot 理论固-液双相横向各向异性孔隙弹性介质中的应力应变和孔隙压力关系可以表示为如下本构方程^[21-22]:

$$\begin{cases} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{A} \tilde{\boldsymbol{\epsilon}} + (\mathbf{Q} \boldsymbol{\epsilon}, 0, 0, 0)^\top; \\ p = -\mathbf{Q} \boldsymbol{\epsilon} - R \boldsymbol{\epsilon}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{11} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{13} & A_{13} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \mathbf{R};$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= a_{11} + q_1^2 R; \\ A_{12} &= a_{12} + q_1 q_2 R; \\ A_{13} &= a_{13} + q_1 q_3 R; \\ A_{33} &= a_{33} + q_3^2 R; \\ A_{44} &= a_{44}; \\ A_{66} &= a_{66}; \\ q_1 = q_2 &= 1 - \frac{a_{11} + a_{12} + a_{13}}{3 K_s}; \\ q_3 &= 1 - \frac{2 a_{13} + a_{33}}{3 K_s}; \\ R &= \frac{K_s^2}{D - \frac{2 a_{11} + a_{33} + 2 a_{12} + 4 a_{13}}{9}}; \\ D &= \left[1 + \varphi \left(\frac{K_s}{K_f} - 1 \right) \right] K_s. \end{aligned}$$

式中: $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = (\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{rz})^\top$, 为固体介质应力张量; A_{ij} ($i = 1, 3, 4, 6; j = 1, 2, 3, 4, 6$), 为排水状态下的弹性常数; a_{ij} ($i = 1, 3, 4, 6; j = 1, 2, 3, 4, 6$) 为含流体状态下的弹性常数; q_i ($i = 1, 2, 3$) 为 Biot 有效系数^[19]; K_s 为固相体积模量; R 为孔隙流体弹性参数; φ 为孔隙度; $\tilde{\boldsymbol{\epsilon}} = (e_{rr}, e_{\theta\theta}, e_{zz}, e_{r\theta}, e_{\theta z}, e_{rz})^\top$, 为固体介质应变张量; $\boldsymbol{\epsilon} = (\epsilon_{rr}, \epsilon_{\theta\theta}, \epsilon_{zz})^\top$, 为井孔流体的应变张量; p 为流体相对岩石固体骨架产生的压力; $\boldsymbol{\epsilon} = (e_{rr}, e_{\theta\theta}, e_{zz})^\top$, 为固体介质的轴向应变张量; K_f 为流体体积模量。

固相质点应变和液相质点应变与位移的关系为:

$$\begin{cases} e_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, e_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, e_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ e_{r\theta} = \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{r \partial \theta} - \frac{u_\theta}{r}, e_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}, \\ e_{\theta z} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}; \\ \epsilon_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \epsilon_{\theta\theta} = \frac{U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}, \epsilon_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}. \end{cases} \quad (2)$$

通过代数运算简化得到 Biot 方程在流体饱和孔隙弹性介质中波传播的运动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{11} \mathbf{u} + \rho_{12} \mathbf{U}) + \mathbf{B} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} - \mathbf{U}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{12} \mathbf{u} + \rho_{22} \mathbf{U}) - \mathbf{B} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} - \mathbf{U}) = \nabla p. \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= (1 - \varphi) \rho_s - \rho_{12}; \\ \rho_{12} &= -\rho_a; \\ \rho_{22} &= \varphi \rho_f - \rho_{12}. \end{aligned}$$

式中: σ 、 t 分别为介质的应力与运动时间; ρ_s 为介质骨架密度; ρ_a 为固相与液相之间的耦合密度; ρ_f 为孔隙流体密度; \mathbf{B} 为阻尼系数矩阵,在各个方向上的阻尼系数为 $b_i = \frac{\varphi^2 \eta}{\kappa_i} (i=r, z)$ (η 为流体黏度; κ_r 、 κ_z 分别为径向与垂向渗透率,若不考虑各向异性,则 $\kappa_r = \kappa_z$)。

1.2 孔隙弹性介质波动方程有限差分解

采用交错网格有限差分方法求解 Biot 孔隙弹性方程,图 2b 示意了图 2a 模型的三维离散网格波场分量分布^[23]。

离散波动方程(3)时,需要考虑柱坐标中井轴上不同性质源的波场性质。根据井轴处的边界条件,假设剖分网格的左边界总与井轴重合,那么在此边界处可用剖分网格的对称条件,并且井孔流体中应力与应变的剪切分量为 0^[24]。即位移和主应力服从以下条件^[25]:

$$\begin{cases} u_r^+ = (-1)^{n+1} u_r^-; \\ u_\theta^+ = (-1)^{n+1} u_\theta^-; \\ u_z^+ = (-1)^n u_z^-; \\ \sigma_{ii}^+ = (-1)^n \sigma_{ii}^-, i=r, \theta, z. \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为激发源的极数,单极子源时 $n=0$,偶极子源时 $n=1$,四极子源时 $n=2$;角标“+”和“-”分别表示井轴左侧和右侧的网格节点。

相应地,在井孔与地层中,考虑地层的轴向对称性,在同一时刻分别将速度与应力项在 r, θ, z 方向上展开,可以将流体饱和孔隙弹性介质波动方程(式(3))离散成如下格式^[26]:

$$\begin{aligned} (v_r)^t_{i,j} &= (v_r^r)^t_{i,j} + (v_r^\theta)^t_{i,j} + (v_r^z)^t_{i,j}; \quad (5) \\ \frac{(v_r^r)^{t+1}_{i,j+\frac{1}{2}} - (v_r^r)^t_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \\ \rho_{1,i,j+\frac{1}{2}} (w_{r,i,j+\frac{1}{2}}^t - v_{r,i,j+\frac{1}{2}}^t) b_r - \\ \rho_{3,i,j+\frac{1}{2}} D_r (\sigma_{rr,i,j+\frac{1}{2}})^{t+\frac{1}{2}} + \rho_{2,i,j+\frac{1}{2}} D_r (P_{r,i,j+\frac{1}{2}})^{t+\frac{1}{2}}; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(v_r^\theta)^{t+1}_{i,j+\frac{1}{2}} - (v_r^\theta)^t_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \\ - \frac{\rho_{3,i,j+\frac{1}{2}} [\sigma_{xx,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - \sigma_{\theta\theta,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} + \sin(n\theta) \sigma_{r\theta,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}]}{r_{i,j+\frac{1}{2}}}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(v_r^z)^{t+1}_{i,j+\frac{1}{2}} - (v_r^z)^t_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \\ - \rho_{3,i,j+\frac{1}{2}} D_z (\sigma_{\theta z,i,j+\frac{1}{2}})^{t+\frac{1}{2}}; \quad (8) \end{aligned}$$

$$(w_r)^t_{i,j} = (w_r^r)^t_{i,j} + (w_r^\theta)^t_{i,j} + (w_r^z)^t_{i,j}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{(w_r^r)^{t+1}_{i,j+\frac{1}{2}} - (w_r^r)^t_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \\ \rho_{4,i,j+\frac{1}{2}} (v_{r,i,j+\frac{1}{2}}^t - w_{r,i,j+\frac{1}{2}}^t) b_r - \\ \rho_{6,i,j+\frac{1}{2}} D_r (\sigma_{rr,i,j+\frac{1}{2}})^{t+\frac{1}{2}} + \\ \rho_{5,i,j+\frac{1}{2}} D_r (P_{r,i,j+\frac{1}{2}})^{t+\frac{1}{2}}; \quad (10) \end{aligned}$$

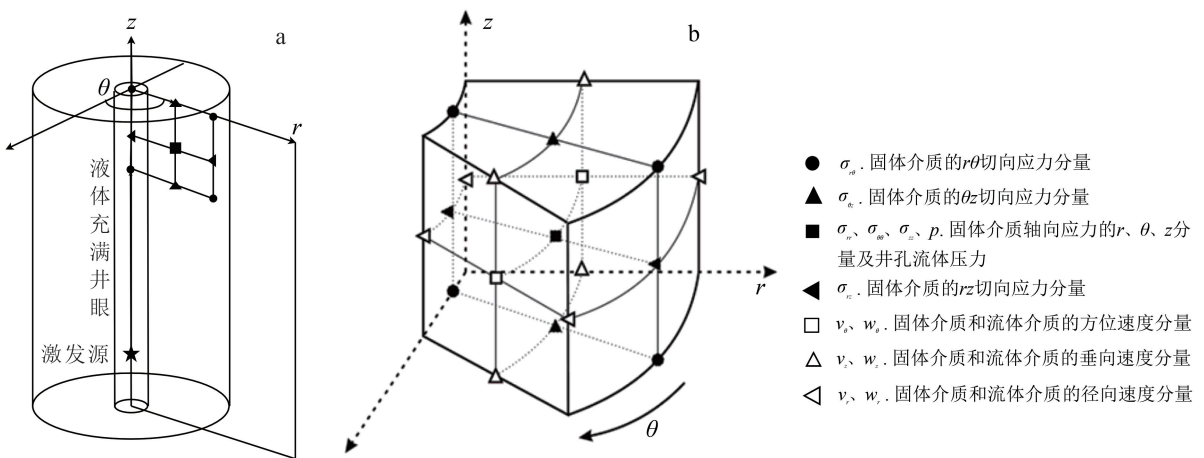


图 2 轴向柱对称井筒流体与地层模型(a)以及柱坐标中应力分量与速度分量三维交错网格离散化分布(b)

Fig.2 Axial column symmetric wellbore fluid and formation model (a) and three-dimensional staggered grid discrete distribution of stress and velocity components in cylindrical coordinates (b)

$$\frac{(\omega_r^\theta)_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (\omega_r^\theta)_{i,j+\frac{1}{2}}^t}{\Delta t} = \frac{\rho_{6,i,j+\frac{1}{2}} [\sigma_{rr,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - \sigma_{\theta\theta,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} + \sin(n\theta) \sigma_{r\theta,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}]}{r_{i,j+\frac{1}{2}}}; \quad (11)$$

$$\frac{(\omega_r^z)_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (\omega_r^z)_{i,j+\frac{1}{2}}^t}{\Delta t} = -\rho_{6,i,j+\frac{1}{2}} D_z (\sigma_{\theta z,i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}); \quad (12)$$

$$(\sigma_{rr})_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t = (\sigma_{rr}^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + (\sigma_{rr}^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + (\sigma_{rr}^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t; \quad (13)$$

$$\frac{(\sigma_{rr}^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (\sigma_{rr}^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = A_{11} D_r (v_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t) + q_1 D_r (\omega_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t); \quad (14)$$

$$\frac{(\sigma_{rr}^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (\sigma_{rr}^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \{A_{12} [v_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + \sin(n\theta) v_{\theta,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t] + q_1 [\omega_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + \sin(n\theta) \omega_{\theta,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t]\} / r_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}; \quad (15)$$

$$\frac{(\sigma_{rr}^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (\sigma_{rr}^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = A_{13} D_z (v_{z,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t) + q_1 D_z (\omega_{z,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t); \quad (16)$$

$$(p)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t = (p^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + (p^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + (p^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t; \quad (17)$$

$$\frac{(p)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (p)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -q_1 D_r (v_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t) - R D_r (\omega_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t); \quad (18)$$

$$\frac{(p^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (p^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \{-q_1 [v_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + \sin(n\theta) v_{\theta,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t] - R [\omega_{r,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t + \sin(n\theta) \omega_{\theta,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t]\} / r_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}; \quad (19)$$

$$\frac{(p^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - (p^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{t-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -q_3 D_z (v_{z,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t) - R D_z (\omega_{z,i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t). \quad (20)$$

其中:

$$\rho_1 = \frac{\rho_{12} + \rho_{22}}{\rho_{12}^2 - \rho_{11}\rho_{22}};$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_{12}}{\rho_{12}^2 - \rho_{11}\rho_{22}};$$

$$\rho_3 = \frac{\rho_{22}}{\rho_{12}^2 - \rho_{11}\rho_{22}};$$

$$\rho_4 = \frac{\rho_{11} + \rho_{12}}{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2};$$

$$\rho_5 = \frac{\rho_{11}}{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2};$$

$$\rho_6 = \frac{\rho_{12}}{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}.$$

式中: $(v_r)_{i,j}^t$ 为轴对称二维剖分网格 (i, j) 上 t 时刻 r 方向上固体的速度分量; $(v_r^r)_{i,j}^t$ 、 $(v_r^\theta)_{i,j}^t$ 、 $(v_r^z)_{i,j}^t$ 分别为 $(v_r)_{i,j}^t$ 在考虑分裂式完全匹配层 (perfectly matched layer, PML) 吸收边界条件时 r 、 θ 、 z 方向上的分裂量; $(\omega_r)_{i,j}^t$ 为轴对称二维剖分网格 (i, j) 上 t 时刻 r 方向上流体的速度分量; $(\omega_r^r)_{i,j}^t$ 、 $(\omega_r^\theta)_{i,j}^t$ 、 $(\omega_r^z)_{i,j}^t$ 分别为 $(\omega_r)_{i,j}^t$ 在考虑分裂式 PML 吸收边界条件时 r 、 θ 、 z 方向上的分裂量; Δt 为均匀离散时间步长; $(p)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 为轴对称二维剖分网格 $(i+1/2, j+1/2)$ 上 t 时刻的流体压力; $(p^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 、 $(p^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 、 $(p^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 分别为 $(p)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 在考虑分裂式 PML 吸收边界条件时 r 、 θ 、 z 方向上的分裂量; $(\sigma_{rr})_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 为轴对称二维剖分网格 $(i+1/2, j+1/2)$ 上 t 时刻 r 方向上的流体压力; $(\sigma_{rr}^r)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 、 $(\sigma_{rr}^\theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 、 $(\sigma_{rr}^z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 分别为 $(\sigma_{rr})_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^t$ 在考虑分裂式 PML 吸收边界条件时 r 、 θ 、 z 方向上的分裂量; D_i ($i=r, z$) 为对 r 方向与 z 方向上的差分近似; $r_{i,j+\frac{1}{2}}$ 为二维剖分 $(i, j+1/2)$ 点上的径向距离; $\rho_{k,i,j+\frac{1}{2}}$ ($k=1, 2, \dots, 6$) 分别为 ρ_k 在二维剖分网格 $(i, j+1/2)$ 上的离散值。

速度和应力其他分量的离散关系可以用角标轮换的方式得到^[26-27]。

对于离散化方程,为了压制数值频散现象并确保空间分辨率和时间稳定性,必须在时间和空间上进行补偿,从而满足如下频散条件^[28]:

$$(\Delta r, \Delta z) < \frac{1}{8} \frac{(v_s)}{f_c}; \quad (21)$$

$$\Delta t < \frac{(\Delta r, \Delta z)}{v_{\text{Pmax}} \sqrt{2}}. \quad (22)$$

式中: Δr 、 Δz 分别为离散 r 方向和 z 方向的步长; $v_{p\max}$ 为介质中的最大纵波速度; v_s 为横波速度; f_c 为激发源主频。

为提高计算效率和精度,在差分方程求解时,还选用了非分裂 PML(NPML)吸收边界条件。图 3 给出了不同吸收边界条件计算精度的对比,可以看出,与无吸收边界条件相比,NPML 吸收边界条件和阻尼吸收边界条件均使边界波场得到了较大的衰减,证实了 NPML 和阻尼吸收边界条件的有效性。图 3b 给出了图 3a 中红色椭圆内 NPML 和阻尼吸收边界条件波场放大的对比,可以看出,阻尼吸收边界条件的波场幅度更大,表明 NPML 吸收边界条件对波场的吸收效果好于阻尼吸收边界条件。

2 缝洞型储层偶极声场响应

根据塔河油田实钻井资料井眼及泥浆数据,本次数值模拟采用井筒直径为 0.2 m,井孔泥浆密度为 1.1 g/cm³,泥浆纵波速度为 1 500 m/s。从取心实验数据和常规测井资料得到碳酸盐岩基质地层的纵波速度为 5 800 m/s,横波速度为 3 600 m/s,密度为 2.69 g/cm³。依据塔河油田数百口测井常规测井中的密度数据、偶极子声波中的纵横波资料,在数值模拟中对塔河油田缝洞型储层的纵波速度取值为 4 500 m/s,横波速度为 2 750 m/s,密度为 2.55 g/cm³。

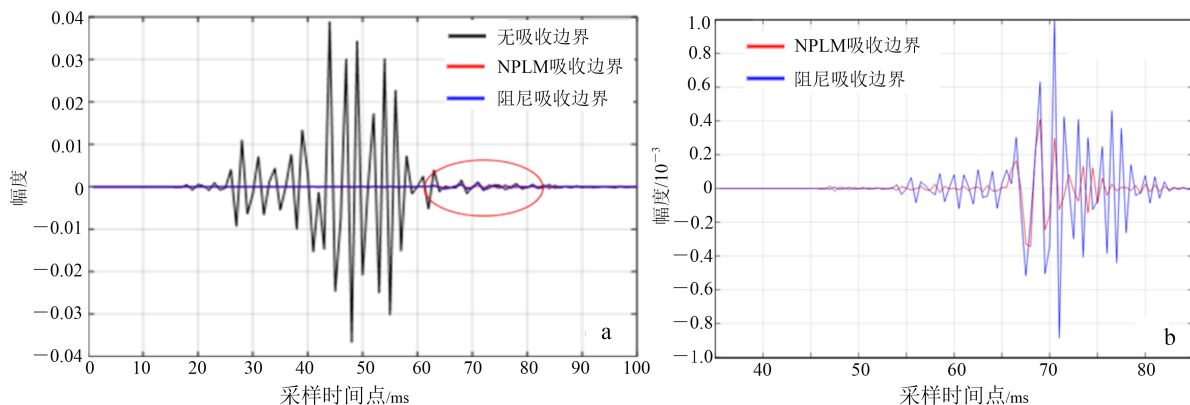
2.1 单个过井裂缝延伸长度、开度和倾角变化时的波场响应

塔河油田不同尺度的断裂和沿裂缝溶蚀扩大的大型裂缝是重要的油气储集空间和通道。根据塔河

油田数百口井的常规测井、电阻率扫描成像测井资料可知,这些断裂和溶蚀扩大裂缝开度为数厘米到数十厘米,本次模拟开度选定为 20 cm,设定倾角为 60°,走向为 0°,背景介质为灰岩,模拟分析穿井筒的裂缝长度对偶极反射声场的影响。全裂缝长度为 1、5、10、15 m。图 4 中每一个裂缝长度左侧为模拟反射波的变密度图,右侧为由模拟反射波数据处理得到的成像结果的变密度图(下同,不再赘述)。从图 4 中可以看出,对于过井倾斜裂缝而言,随着裂缝长度的增加,成像结果越来越清晰。由此可知,裂缝的长度越长,在偶极远探测测井中越容易被探测到。

假定裂缝长度为 10 m,倾角为 60°,走向为 0°,背景介质为灰岩,模拟分析裂缝开度对偶极反射声场的影响。根据塔河油田常规及电成像测井反映的沿裂缝溶蚀形成的大裂缝和不同尺度断裂的开度,本次模拟开度选为 5、10、20、30 cm。图 5 是每一个裂缝开度变化的模拟成像图。从图 5 中可以看出,裂缝的开度越大,成像结果越清晰,但没有本质差别。

假定裂缝长度为 10 m,开度为 20 cm,走向为 0°,背景介质为灰岩,模拟分析裂缝倾角对偶极反射声场的影响。令裂缝倾角为 20°~80°,每隔 20°模拟一次。裂缝离井距离(裂缝中点到井轴之间的距离)为 10 m。图 6 为过井筒裂缝倾角变化模拟成像图。从图 6 中可以看出,随着裂缝倾角的增大,裂缝的成像长度越来越大,也越来越清晰。这是因为:裂缝与井平行时辐射到地层中的横波能量最多,井外反射体最容易成像;随着裂缝倾角变小,声源辐射到地层中的横波的能量逐渐减小,裂缝的成像长度和清晰度也逐渐变差。



a. 无吸收边界、NPML 和阻尼吸收边界的波场对比;b. NPML 和阻尼吸收边界波场放大的对比。

图 3 不同边界条件的反射波对比图

Fig.3 Comparison of reflected waves with different types of boundary formation

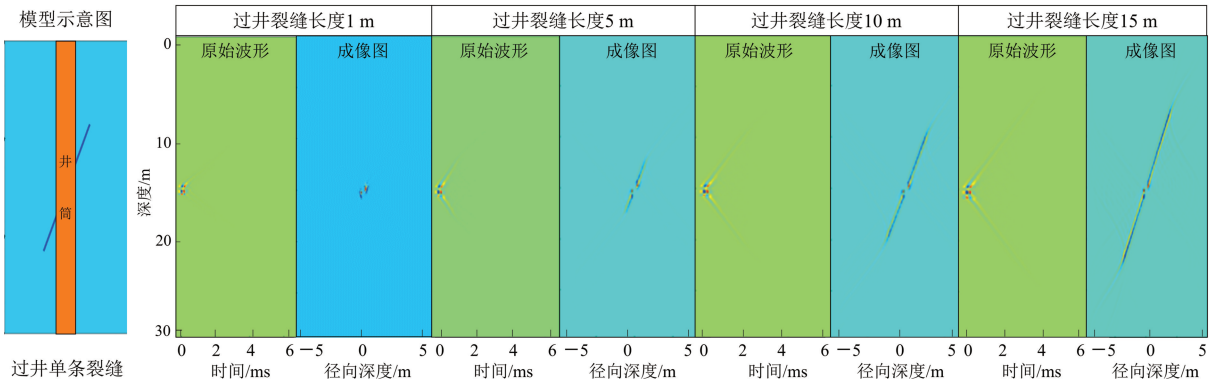


图 4 过井筒裂缝长度变化模拟成像图

Fig.4 Simulated imaging of fracture length change through wellbore

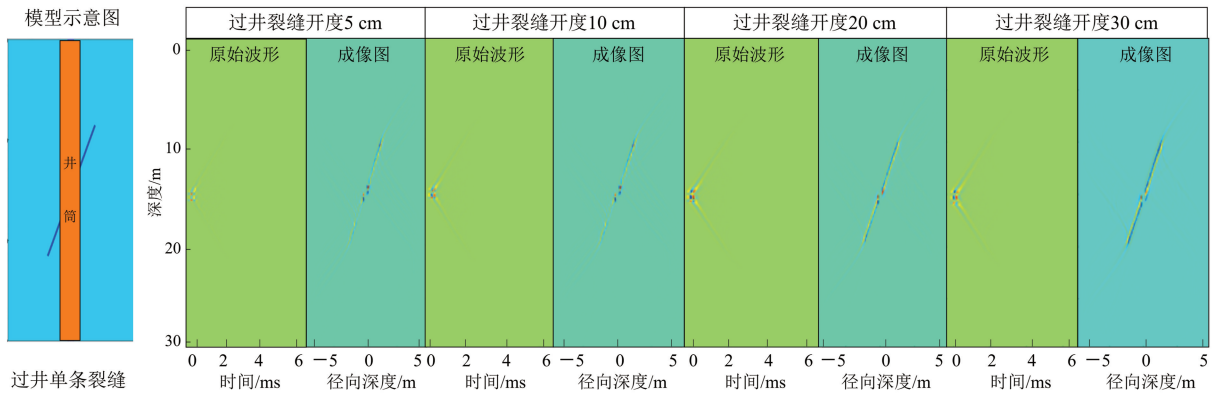


图 5 过井筒裂缝开度变化模拟成像图

Fig.5 Simulated imaging of fracture opening change through wellbore

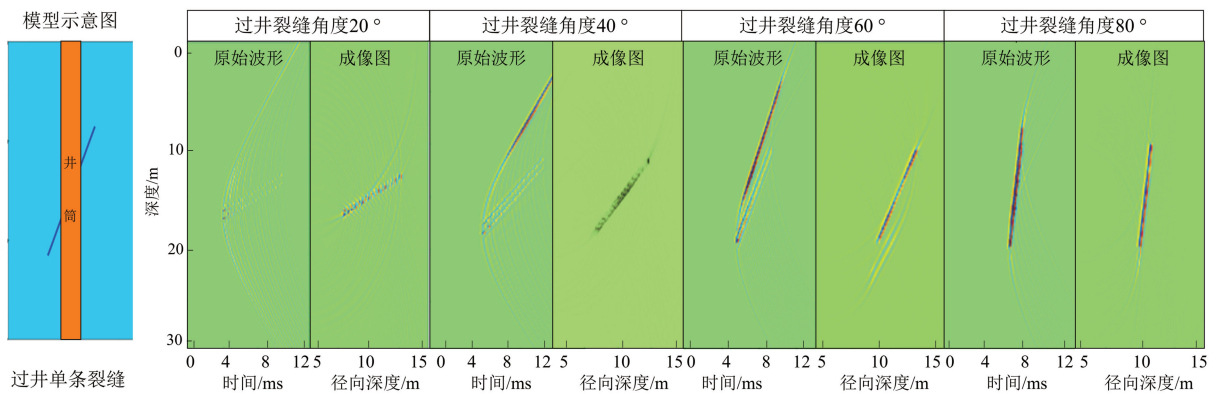


图 6 过井筒裂缝倾角变化模拟成像图

Fig.6 Simulated imaging of fracture angle change through wellbore

2.2 多个井旁裂缝延伸长度、开度和倾角变化时的波场响应

塔河油田碳酸盐岩油藏的储层中除了不同尺度断裂和沿裂缝溶蚀形成的大裂缝之外,发育更多的

是尺寸较小的裂缝带,研究裂缝带的远探测声场特征至关重要。

根据塔河油田裂缝开度分布及声波远探测的分辨率,假定裂缝开度为 5 cm,倾角为 60°,走向为 0°,

裂缝长度分别为 0.5、1.5、5.0、10.0 m,背景介质为灰岩,模拟分析井旁裂缝组裂缝长度对偶极反射声场的影响,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,由于生成裂缝组的位置有随机性,裂缝组之间的相互干涉不同,成像有一定的变化;但总体来看,裂缝长度越长越易成像,对于小尺寸的裂缝组,最终成像时呈现一种团簇状。

根据塔河油田电成像显示的裂缝开度范围并考虑到阵列声波仪器分辨率,设定裂缝开度为 1、2、5、10 cm,倾角为 60°,走向为 0°,裂缝长度为 0.8 m,背景介质为灰岩,模拟分析井旁裂缝组裂缝开度对偶极反射声场的影响,结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,由于生成的裂缝组的位置有随机性,裂缝组之间的相互干涉成像反映不同,总体来看,裂缝开度越大反射波能量越强,成像越明显,成像结果反映的是裂缝组的整体形态。

假定裂缝长度为 0.8 m,开度为 5 cm,走向为

0°,倾角为 0°、30°、60°、90°,背景介质为灰岩,模拟分析井旁裂缝组裂缝倾角对偶极反射声场的影响,结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随着平行裂缝组倾角的增加,裂缝组的整体形态更为清晰,由于裂缝组的尺度较小,最终成像时呈现一种团簇状。这是由于裂缝组的反射波之间相互叠加干涉,不能够完全还原模型图,但能够看出裂缝组的整体区域轮廓;且由于被前面的裂缝组遮挡,后面的裂缝组的反射能量较弱。

2.3 井旁单个洞穴直径、中心距井轴径向距离变化时的波场响应

在塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏中,洞穴是极为重要的一种储层类型,它储存油气的贡献度超过了 50%。为了进一步了解洞穴产生的远探测声场特征,需要从洞穴尺寸、离井距离方面出发,模拟分析洞穴远探测声场随上述因素的变化规律。

根据塔河油田常规及成像测井对 264 个井层洞

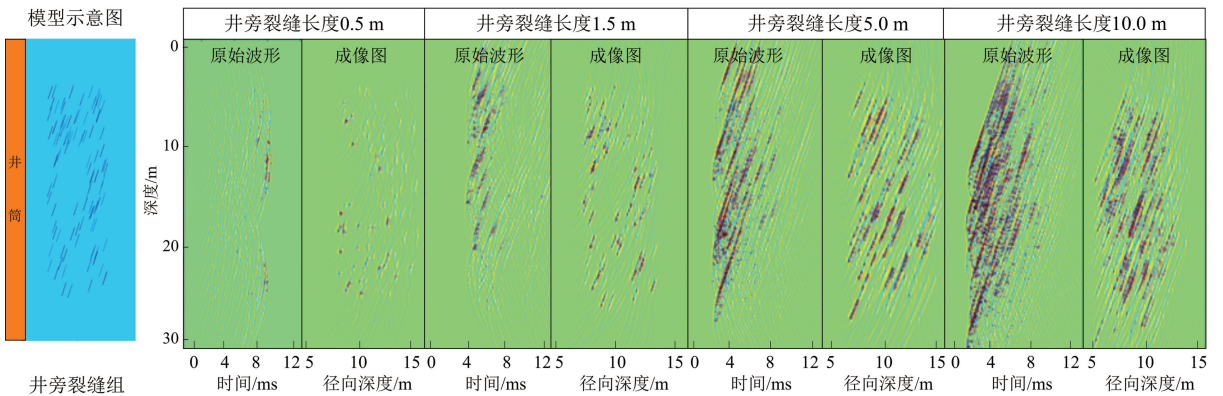


图 7 井旁裂缝组裂缝长度变化模拟成像图

Fig.7 Simulated imaging of fracture length change in fracture group beside wellbore

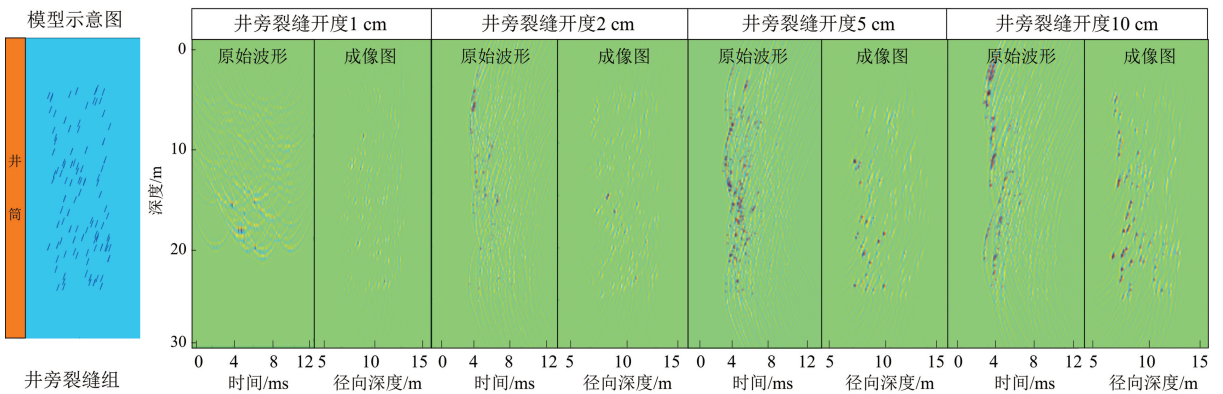


图 8 井旁裂缝组裂缝开度变化模拟成像图

Fig.8 Simulated imaging of fracture opening change in fracture group beside wellbore

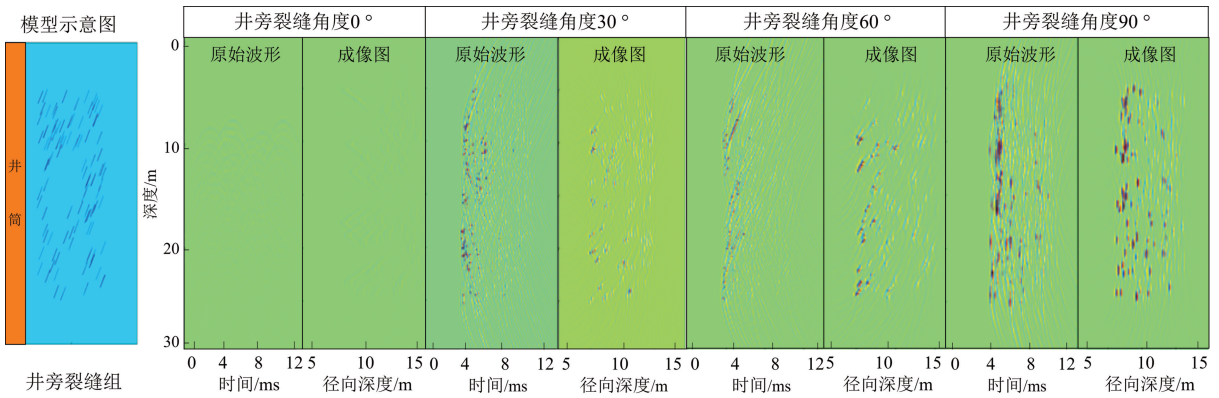


图 9 井旁裂缝组裂缝倾角变化模拟成像图

Fig.9 Simulated imaging of fracture angle change in fracture group beside wellbore

穴进行统计而确定的洞穴尺寸范围,本次模拟假定洞穴离井距离为 10 m,洞穴直径为 10、50、100、300 cm,背景介质为灰岩,模拟分析洞穴尺寸对偶极反射声场的影响,结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出:当单个洞穴的直径较小时,成像结果呈斑点状;当单个洞穴的直径较大时,可呈现洞穴的轮廓。

假定洞穴直径为 3 m,离井距离为 10、20、40、60 m,背景介质为灰岩,模拟分析洞穴离井筒距离变化对偶极反射声场的影响,结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,洞穴离井距离越远,洞穴的轮廓成像越模糊。这是由于随着距离的增加,反射波的能量越来越弱。长距离的反射体成像与仪器辐射出去的能量有直接关系。

2.4 井旁多个孔洞直径、中心距井轴径向距离变化时的场响应

塔河油田碳酸盐岩储层中的溶蚀孔洞往往不是

单个存在,而是多个孔洞发育成群;所以需要从孔洞的尺度、数目方面出发,详细模拟分析它们对孔洞群远探测声场的影响。

根据塔河油田岩心和电成像资料反映的孔洞尺寸,设定孔洞直径为 1、2、5、8 cm,孔洞数目为 50 个,背景介质为灰岩,模拟分析孔洞尺寸对偶极反射声场的影响,结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出,孔洞的声波远探测成像为“小串珠”的形态,随着孔洞尺度的增加,反射波的能量变大,“小串珠”现象越来越明显。

假定孔洞直径为 5 cm,孔洞数目为 50、100、200、300 个,背景介质为灰岩,模拟分析孔洞数目变化对偶极反射声场的影响,结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出,随着孔洞数目的增加,反射波的能量增大,成像结果呈现团簇状,可分辨孔洞组的区域,但孔洞组内孔洞的形态无法识别。

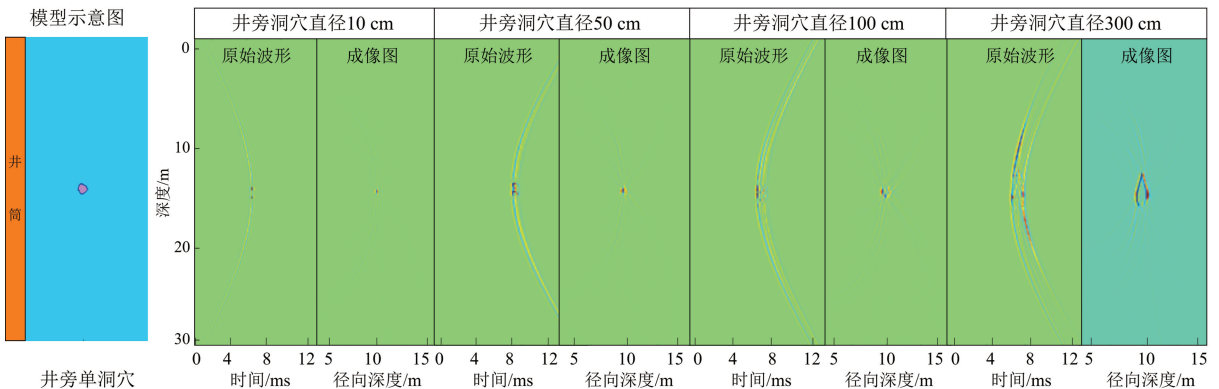


图 10 井旁单洞穴尺寸变化模拟成像图

Fig.10 Simulated imaging of size change of single hole beside wellbore

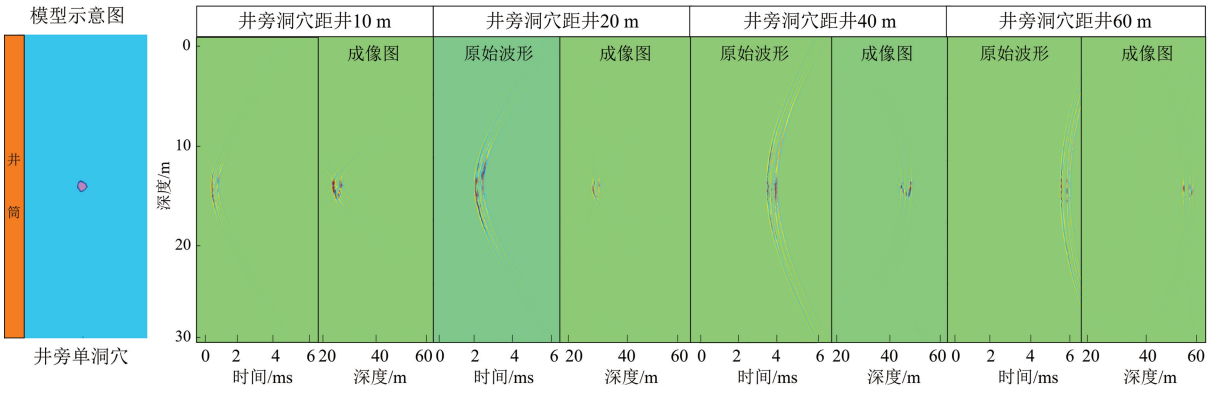


图 11 井旁单洞穴离井筒距离变化模拟成像图

Fig.11 Simulated imaging of distance change between single hole near well and wellbore

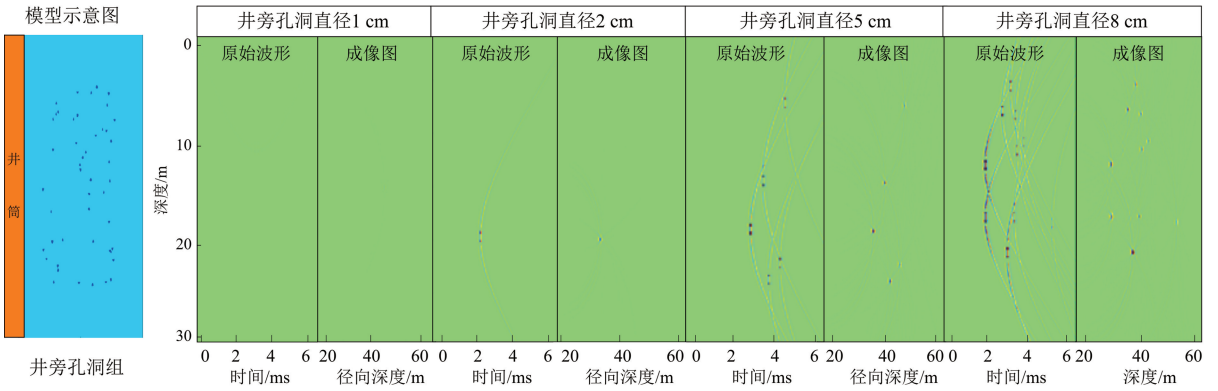


图 12 井旁孔洞群孔洞尺寸变化模拟成像图

Fig.12 Simulated imaging of size change of hole group near well

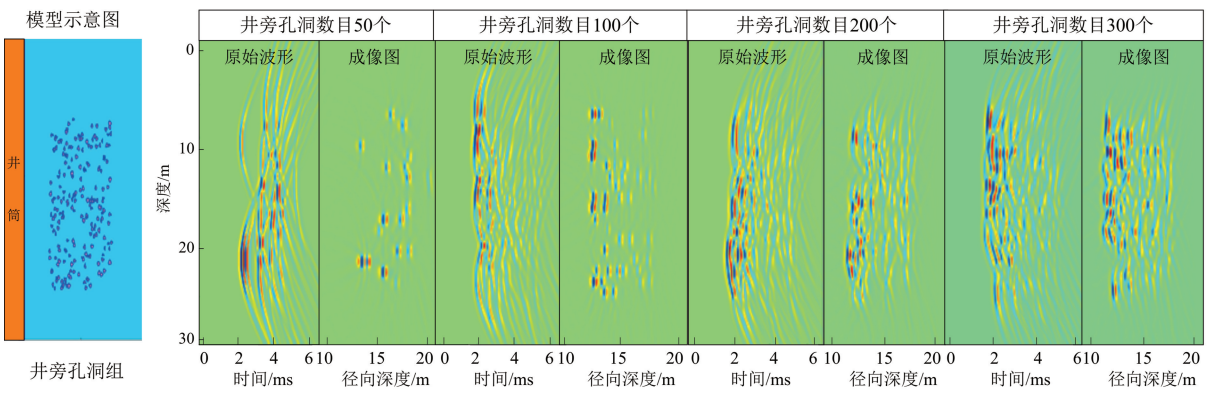


图 13 井旁孔洞群孔洞数量变化模拟成像图

Fig.13 Simulated imaging of number change of hole group near well

3 储层声场数值模拟结果特征分析及实测资料解释应用

3.1 远探测声场数值模拟特征模式

从前文裂缝、洞穴、孔洞模型的模拟结果分析可

以得到如下规律性认识。

1) 对于裂缝型储层,基本呈现为连续线性反射。不同的裂缝长度、开度、倾角、离井距离等具有不同的成像结果,裂缝长度大、开度大、倾角高、离井距离近,成像结果清晰。

2)对于洞穴型储层:当单个洞穴的直径较小时,成像结果呈斑点状;当单个洞穴的直径较大时,可呈现洞穴的轮廓。洞穴直径、洞穴离井距离对成像结果均有影响。

3)孔洞型储层分别成像为小串珠、团簇状杂乱斑点。孔洞尺寸、数目对成像结果均有影响。

据此,可以总结出储层远探测声场的解释模式及对应的识别图版,以便于解释塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层的声波远探测反射声场显示特征,推测储层裂缝与溶蚀孔洞的发育特征。表 1 给出了由裂

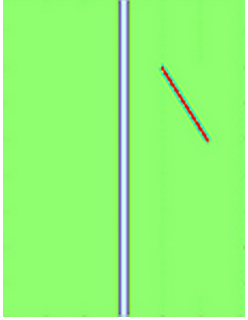
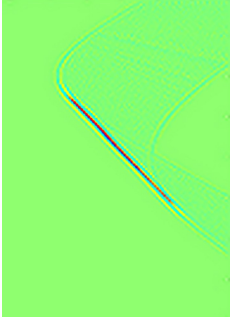
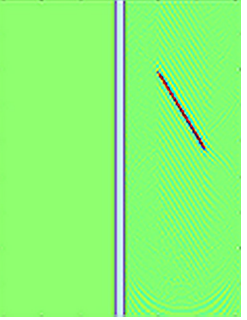
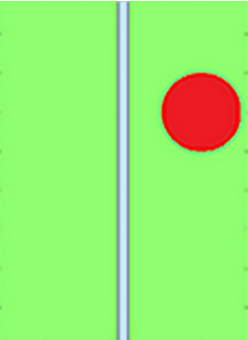

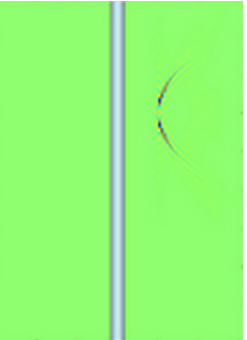
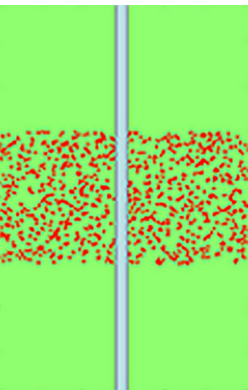
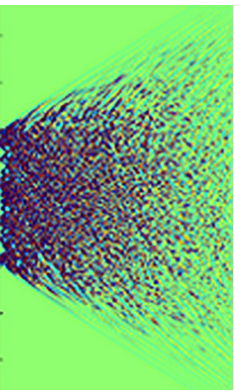
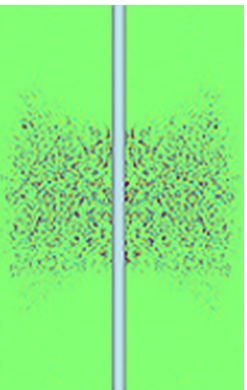
缝、洞穴及孔洞模型的声场模拟响应总结得到的碳酸盐岩缝洞型储层远探测特征解释模式。表 1 中图版类似于传统的地球物理解释图版,可直接据以推断对应的缝洞分布特征。

3.2 声场数值模拟图版在塔河油田的应用

在上述声波远探测响应特征数值模拟结果及解释模式的基础上,结合塔河油田实际测井资料进行了声波远探测处理解释,并结合常规综合测井、电成像测井及地震资料进行对比。

表 1 碳酸盐岩缝洞型储层远探测特征解释模式

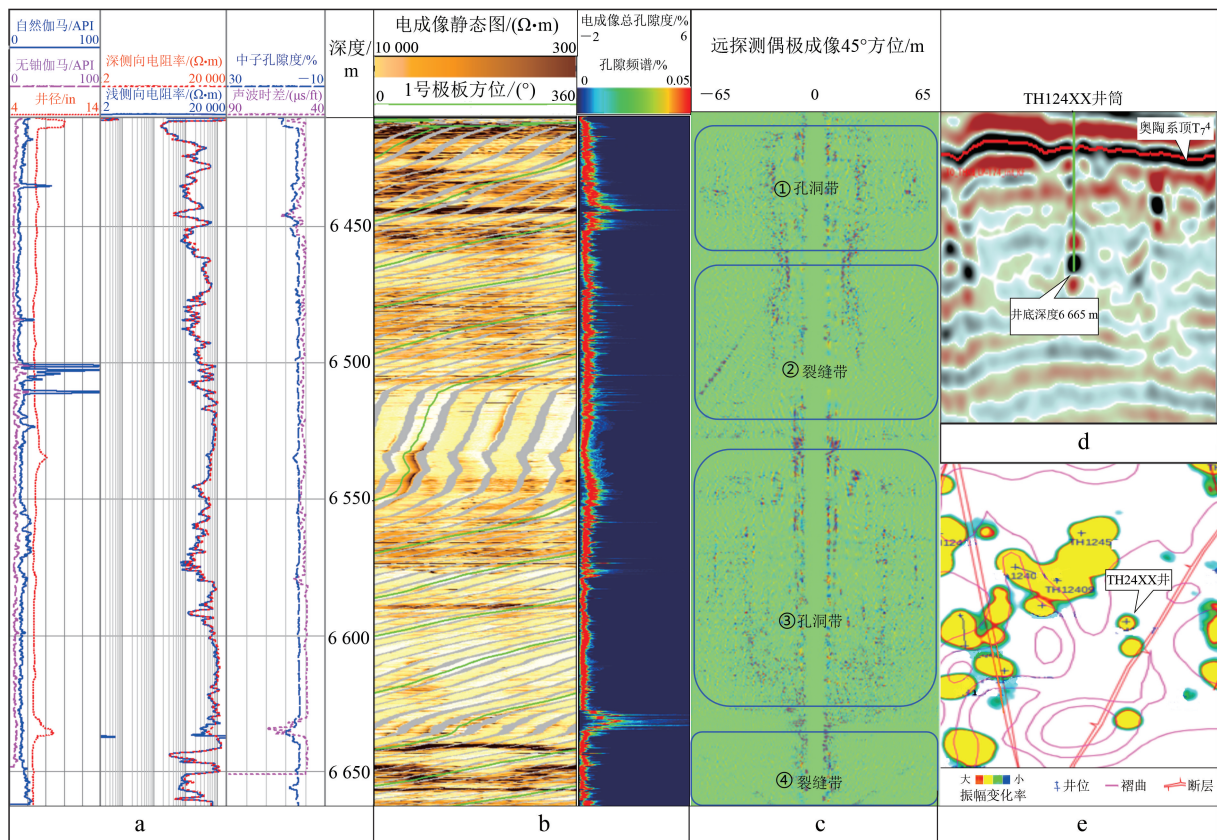
Table 1 Interpretation model of carbonate fracture - cavity reservoir remote detection characteristics

模型	波形特征	解释模式	图像特征		
			储层模型	模拟波形	偏移成像
裂缝	连续线性倾斜反射	连续条带状			
溶洞	修长弧形、双曲线或大圆弧状的反射特征	略小弧形			
孔洞	团簇状杂乱分布反射	圆弧状叠合特征或杂乱斑块状			

3.2.1 TH124XX 井

图 14 所示给出了 TH124XX 井碳酸盐岩井段常规测井、电成像测井、声波远探测测井及地震综合图。该井 6 415~6 457 m 常规测井显示双侧向电阻率有所降低,声波时差和中子孔隙度同步增大,表现为孔洞、裂缝型储层特征(图 14a),在电成像上显示发育数条高导缝,微裂缝为主,溶蚀较发育,孔隙频谱显示孔隙较发育,总孔隙度为 3.7%~4.2%(图 14b),声波远探测成像(图 14c)显示井外 65 m 范围内见斑点状反射异常,对照前述解释模型,此井段为溶蚀孔洞发育,常规测井、电成像的储层识别与声波远探测测井一致。6 440~6 495 m 电阻率中高(图 14a),储层不发育,在电成像上显示为个别细微裂缝(图 14b),但声波远探测成像显示井外 40~60 m 范围有两组明显带状反射异常(图 14c),对照前述解释模型为井外发育裂缝带,裂缝延伸较远、规模较

大,45°切片最清晰,裂缝走向沿北东南西向展布(图 14c)。6 537~6 630 m 在电成像显示裂缝不发育,仅发育斑点状溶蚀孔洞,孔隙频谱显示储层非均质性较强,总孔隙度为 3.0%~3.3%(图 14b),声波远探测成像显示井外 60 m 范围见多组近似垂直及斑点状反射异常(图 14c),根据前述解释模型,此段为发育的溶蚀孔洞带。6 643~6 657 m 电成像显示高导缝特征,裂缝为中角度,上段裂缝宽度小,主要为微裂缝,下段裂缝宽度大、缝面粗糙,被溶蚀作用改造明显(图 14b),声波远探测成像显示井外约 60 m 近似垂直的带状反射异常(图 14c),根据前述解释模型,此段为裂缝发育带,45°切片最清晰,推测裂缝走向沿北东向展布(图 14c)。地震资料(图 14d、e)显示“串珠”规模小,相干弱,与常规测井、电成像测井和声波远探测测井解释本井主要为裂缝、孔洞型储层一致。本井全井酸压后 12 mm 油嘴电潜泵生



a. 常规测井曲线图; b. 电成像测井成果图; c. 声波远探测处理成果图; d. 上地震时间偏移剖面图; e. 地震振幅变化率叠合图。英尺(ft)、英寸(in)为非法定计量单位,1 ft=12 in=0.304 8 m,下同。

图 14 TH124XX 井常规测井、电成像测井、声波远探测测井及地震综合图

Fig.14 Comprehensive map of conventional logging, electric imaging logging, acoustic remote detection logging and seismic of Well TH124XX

产,油压 1.59 MPa,日产油24 m³。

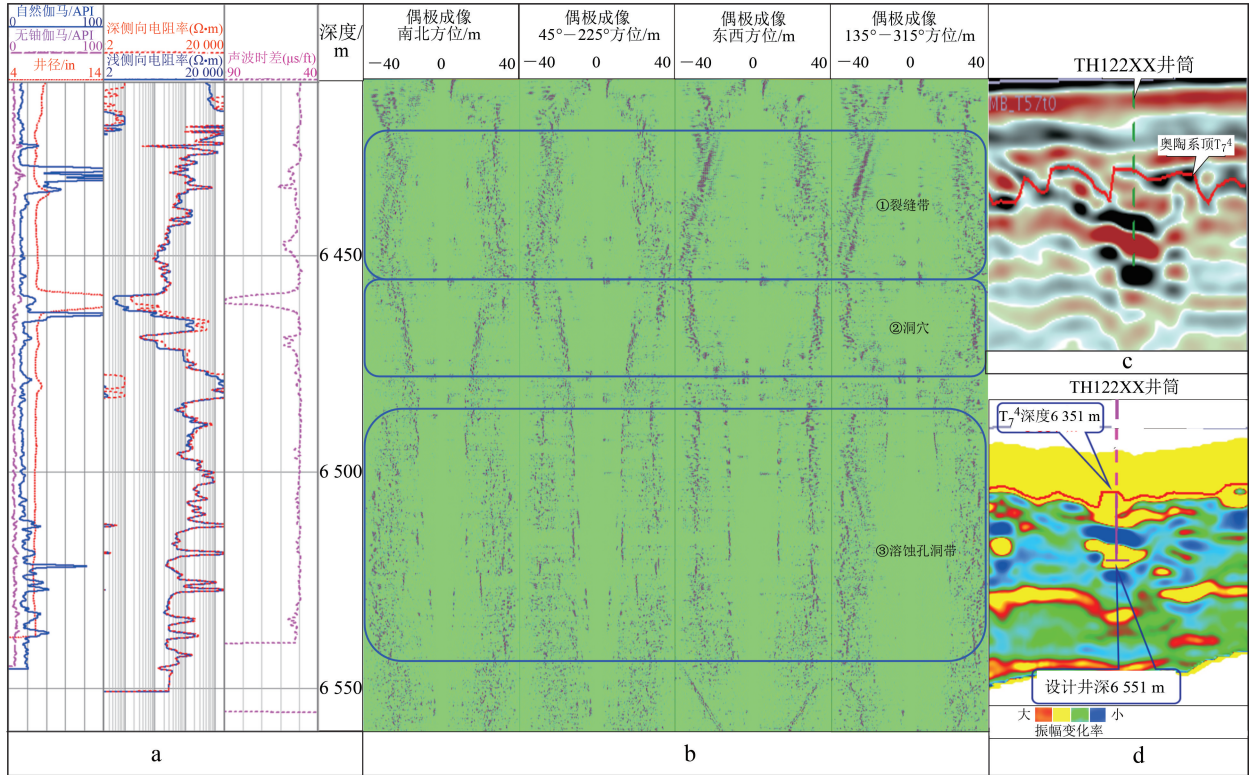
3.2.2 TH122XX 井

图 15 给出了 TH122XX 井常规测井、声波远探测测井及地震综合图。6 424.5~6 425.5 m 电阻率急剧降低,声波时差稍有增大,为单组系裂缝发育(图 15a)。6 425.5~6 454.5 m 电阻率逐渐降低,声波时差局部增大,为洞穴顶部连续的裂缝发育带(图 15a);此段声波远探测成像显示为与数值模拟一致的穿井壁的井旁裂缝带特征(图 15 b)。6 458.5~6 463.0 m 双侧向电阻率急剧降低,井径扩大超过 14 in,声波时差急剧增大,表现为放空洞穴的曲线特征(图 15a),声波远探测成像显示为径向深度为 20~40 m、高度为 20 余 m 的微弧状反射特征,为洞穴型储层的成像特征(图 15b),与常规测井反映一致。从 6 485 m 到井底电阻率略有降低,声波时差微幅增大,为孔洞型储层特征(图 15a);声波远探测成像显示为从井筒周围延伸到径向深度 40 m 范围内的团簇状杂乱斑,为溶蚀孔洞发育带(图 15b)。

图 15 c、d 地震资料显示“串珠状”明显,储层发育,与常规测井及声波远探测解释的洞穴相吻合。本井全井段酸压,5 mm 油嘴开井,油压 8.2 MPa,日产油 45 m³。

3.2.3 TH1021XX 井

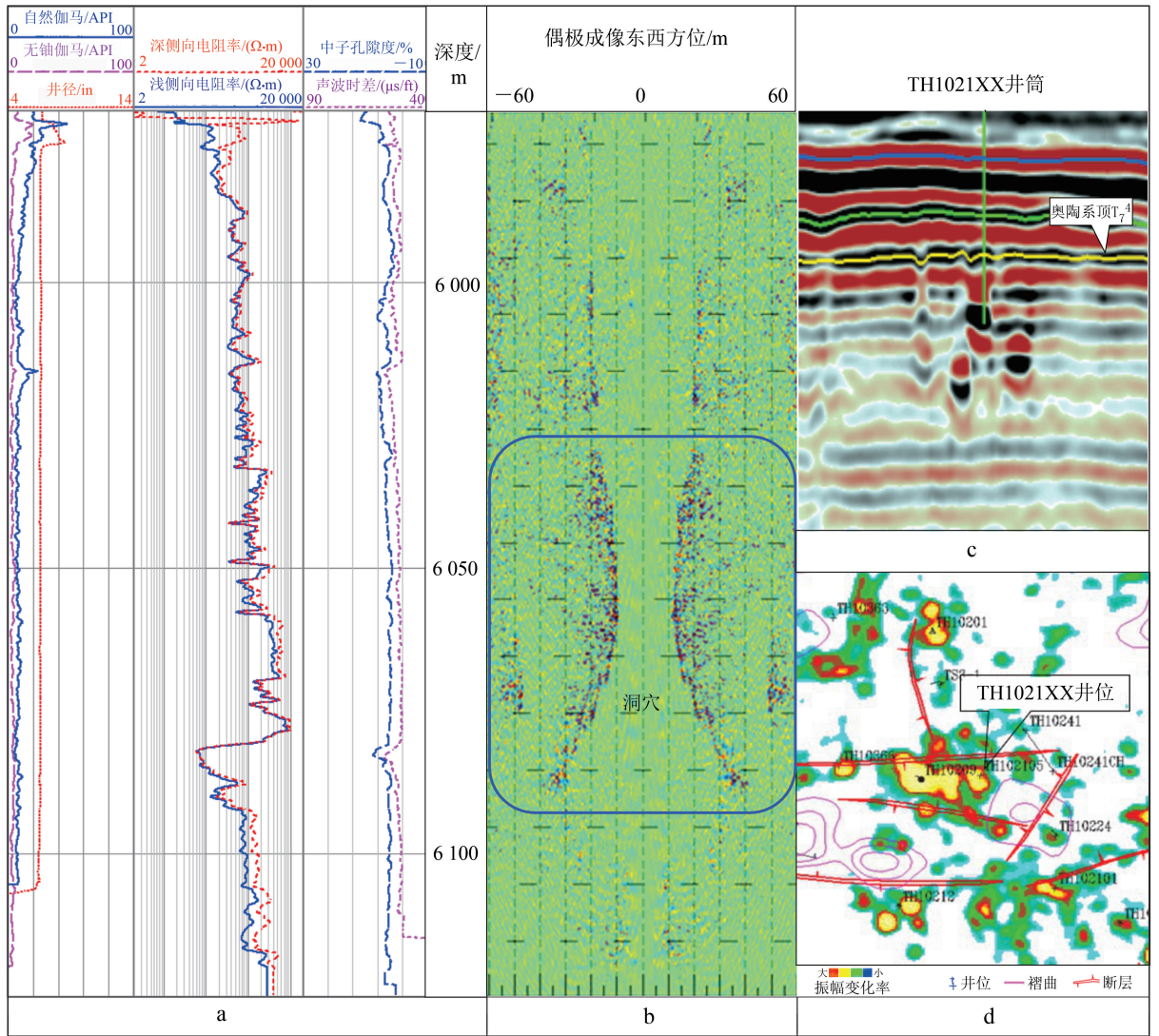
图 16 给出了 TH1021XX 井常规测井、声波远探测测井及地震综合图。常规测井 6 025~6 085 m 显示储层不发育,且以孔洞型储层为主(图 16 a);声波远探测成像显示距离井筒 20~40 m 见强反射近弧状成像特征信号(图 16 b)。由于常规测井探测深度有限,无法反映远离井筒的这个井旁储集体,根据模拟成像特征分析为井旁洞穴,近弧状成像为洞穴边界。偶极声波远探测成像在东西向反射最强烈,成像最清晰(图 16 b)。地震资料显示本井井旁有东西向断裂发育(图 16 c、d),声波远探测成像显示的是此断裂破碎并溶蚀形成的溶蚀洞穴边界。本井全井段酸压,4.5 mm 油嘴,油压 17 MPa,日产油 78 m³。



a. 常规测井曲线图; b. 声波远探测处理成果图; c. 地震时间偏移剖面图; d. 地震振幅变化率剖面图。

图 15 TH122XX 井常规测井、声波远探测测井及地震综合图

Fig.15 Comprehensive map of conventional logging, remote detection logging and seismic of Well TH122XX



a. 常规测井曲线图; b. 声波远探测处理成果图; c. 地震时间偏移剖面图; d. 地震振幅变化率叠合图。

图 16 TH1021XX 井常规、声波远探测测井及地震综合图

Fig.16 Comprehensive map of conventional logging, remote detection logging and seismic of Well TH1021XX

4 结论

1) 本文根据阵列声波测井响应有限差分模拟的原理和方法,对塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层的声波远探测声场进行了数值模拟,得到了过井及井旁裂缝不同长度、开度、角度的成像特征和井旁洞穴、孔洞尺寸、数量、远近变化的成像特征,建立了塔河油田缝洞型储层声波远探测的基础解释模板。

2) 塔河油田三口井实测阵列声波资料的声波远探测测井与常规测井、电成像测井和地震剖面特征的对比证明,声波远探测测井对碳酸盐岩缝洞型储

层的判识具有较好效果,其结果与电成像测井、常规测井和地震属性剖面结果对应性较好。

3) 通过声波远探测数值模拟建立的塔河油田缝洞型储层声波反射声场特征、解释模式与相应特征图像,为识别与评价塔河油田缝洞型油藏远离井筒的储层发育类型与发育程度及延展范围奠定了基础。通过微尺度成像测井、小尺度常规测井和中尺度声波远探测测井与大尺度地震资料的有机结合,未来有望建立起塔河油田从成像测井、常规测井、声波远探测测井到地震资料的全尺度缝洞型储层评价体系。

参考文献 (References):

- [1] 康玉柱, 康志宏. 塔河大油田勘探实践与技术创新 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
Kang Yuzhu, Kang Zhihong. Exploration Practice in Tahe Huge Oilfield and Technical Innovation [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009.
- [2] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律 [J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101 - 106.
Li Yang, Fan Zhihui. Developmental Pattern and Distribution Rule of the Fracture-Cavity System of Ordovician Carbonate Reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101 - 106.
- [3] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 565 - 573.
Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geology of Giant Tahe Oilfield and a Review of Exploration Thinking in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 565 - 573.
- [4] 窦之林. 碳酸盐岩缝洞型油藏描述与储量计算 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 9 - 15.
Dou Zhilin. Description and Reserves Calculation of Fractured-Vuggy Carbonate Reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 9 - 15.
- [5] 郭春涛, 史江涛, 刘亮, 等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 68 - 82.
Guo Chuntao, Shi Jiangtao, Liu Liang, et al. Sedimentary Characteristics and Evolution Model of Middle and Lower Ordovician in Tahe Area, Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 68 - 82.
- [6] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743 - 752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling Factors of Ordovician Reservoir Formation in Tahe Area, Tarim Basin and Its Composite and Joint Genetic Mechanism [J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(6): 743 - 752.
- [7] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
Dou Zhilin. Development Technology of Carbonate Fracture Cave Type Reservoir in Tahe Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [8] Tang X M, Glassman H, Patterson D. Single-Well Acoustic Imaging in Anisotropic Formations [J]. Geophysics, 2008, 73(4): D11 - D16.
- [9] Tang X M, Patterson D. Single-Well S-Wave Imaging Using Multi-Component Dipole Acoustic Log Data [J]. Geophysics, 2009, 74(6): 211 - 223.
- [10] Wei Z T, Tang X M. Numerical Simulation of Radiation, Reflection, and Reception of Elastic Waves from a Borehole Dipole Source [J]. Geophysics, 2012, 77(6): D253 - D261.
- [11] Tang X M, Cao J J, Wei Z T. Shear-Wave Radiation, Reception, and Reciprocity of a Borehole Dipole Source: With Application to Modeling of Shear-Wave Reflection Survey [J]. Geophysics, 2014, 79(2): T43 - T50.
- [12] 唐晓明, 魏周拓. 利用井中偶极声源远场辐射特性的远探测测井 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2798 - 2807.
Tang Xiaoming, Wei Zhoutuo. Remote Detection Logging Using Far-Field Radiation Characteristics of Dipole Sound Source in Well [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(8): 2798 - 2807.
- [13] 魏周拓. 反射声波测井数值与物理模拟研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
Wei Zhoutuo. Numerical and Physical Simulation of Reflective Acoustic Logging [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [14] 李丹. 反射声波测井的成像研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
Li Dan. Study on Imaging for Acoustic Reflection Imaging Logging [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2021.
- [15] 董经利, 许孝凯, 张晋言, 等. 声波远探测技术概述及发展 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 566 - 572.
Dong Jingli, Xu Xiaokai, Zhang Jinyan, et al. Overview and Development of Acoustic Remote Detection Technology [J]. Advances in Geophysics, 2020, 35(2): 566 - 572.
- [16] 李航, 孙宇航, 李佳慧, 等. 基于波动方程的 seismic 波数值模拟研究综述 [J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), [2024 - 07 - 29]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230308>.
Li Hang, Sun Yuhang, Li Jiahui, et al. Comprehensive Review of Numerical Simulation of Seismic Waves Based on the Wave Equation [J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), [2024 - 07 - 29]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230308>.

- jjuese.20230308.
- [17] Biot M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: I: Low-Frequency Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168 - 178.
- [18] Biot M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: II: Higher Frequency Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179 - 191.
- [19] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
Tang Xiaoming, Zheng Chuanhan. Quantitative Log Acoustics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [20] 曹景记,唐晓明,魏周拓.偶极声源在裸眼井及套管井外的横波辐射特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1683 - 1692.
Cao Jingji, Tang Xiaoming, Wei Zhoutuo. S-Wave Radiation Characteristics of Dipole Sound Source Outside Open Hole and Cased-Hole [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1683 - 1692.
- [21] 杨顶辉,滕吉文. 各向异性介质中三分量地震记录的FCT有限差分模拟[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(2): 181 - 190.
Yang Dinghui, Teng Jiwen. FCT Finite-Difference Simulation of Three-Component Seismic Records in Anisotropic Media [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 1997, 32(2): 181 - 190.
- [22] Ursula Iturrarán-Viveros, Molero Miguel. Simulation of Sonic Waves Along a Borehole in a Heterogeneous Formation: Accelerating 2.5 - D Finite Differences Using [Py]OpenCL[J]. Computers & Geosciences, 2013, 56: 161 - 169.
- [23] Pan G A, Abubakar A, Habashy T M. An Effective Perfectly Matched Layer Design for Acoustic Fourth-Order Frequency-Domain Finite-Difference Scheme [J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(1): 211 - 222.
- [24] Hiroshi Takenaka, Tanaka Hiroki, Okamoto Taro, et al. Quasi-Cylindrical 2.5D Wave Modeling for Large-Scale Seismic Surveys [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 1.
- [25] 徐冰,李文博,王易安,等. 不规则井眼的斯通利波反射数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(9): 2029 - 2032.
Xu Bing, Li Wenbo, Wang Yian, et al. Numerical Simulation of Stoneleigh Wave Reflection in Irregular Borehole[J]. Science, Technology and Engineering, 2012, 12(9): 2029 - 2032.
- [26] Wang T, Tang X. Finite-Difference Modeling of Elastic Wave Propagation: A Nonsplitting Perfectly Matched Layer Approach[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1749 - 1755.
- [27] Wang X, Hornby B, Dodds K. Dipole Sonic Response in Deviated Borehole Penetrating an Anisotropic Formation [C]//72nd Annual Meeting. Salt Lake City: Society of Exploration Geophysicists, 2002: 360 - 363.
- [28] Kurkjian A L, Chang S K. Acoustic Multipole Sources in Fluid-Filled Boreholes [J]. Geophysics, 1986, 51(1): 148 - 163.