

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.017

碳酸盐岩生物礁地震响应特征的数值模拟

但志伟¹, 肖 为¹, 方中于¹, 曾 驿², 汪瑞良², 张宏兵³, 尚作萍³

(1. 中国海洋石油总公司能源发展股份有限公司钻采工程研究院地球物理研究所, 广东 湛江 524000;

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广东 广州 510240; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对碳酸盐岩生物礁储层具有较强非均质性的特点, 利用叠前黏弹性波动方程正演数值模拟方法, 模拟了碳酸盐岩生物礁、滩的地震响应特征, 为地震资料识别生物礁储层提供依据. 模拟结果显示, 在生物礁两侧出现上超反射, 礁顶明显见披覆现象, 在礁体内部产生 S 形前积反射、弱反射或杂乱反射, 在礁前缘斜坡相外形呈楔状且礁底为下超反射终止. 此外, 礁体顶底界反射产生极性反转, 底部反射同相轴可能出现上凸或下凹现象, 而深度域成像剖面可以消除上凸或下凹现象.

关键词: 碳酸盐岩 生物礁 叠前地震 黏弹性波动方程 地震响应

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)03-0345-05

Numerical simulation of seismic response characteristics of carbonate reef

DAN Zhi-wei¹, XIAO Wei¹, FANG Zhong-yu¹, ZENG Yi², WANG Rui-liang²,
ZHANG Hong-bing³, SHANG Zuo-ping³

(1. Geosciences Institute of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524000, China;

2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Guangzhou 510240, China;

3. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the nonhomogeneous characteristics of carbonate reef reservoirs, seismic forward modeling was conducted to simulate the seismic responses of carbonate reefs and beaches using the pre-stack viscoelastic wave equation, in order to provide a basis for identification of carbonate reef reservoirs according to seismic data. The simulation results show that the superposed overtaking reflection occurred on two sides of the reef and the drape covering phenomenon appeared over the reef. S-shaped forward sedimentary, weak, and mussy reflections took place inside the reef. The outer shape of the ramp facies in the reef front-edge appeared wedgy and the overtaking reflection stopped at the bottom. Moreover, reverse polarity occurred between the top and bottom reflections inside the reef. The bottom reflection presented upward-convex or downward-concave characteristics. These could be eliminated in the depth image profile.

Key words: carbonate rock; organic reef; pre-stack seismic; viscoelastic wave equation; seismic response

波场数值模拟技术是研究各种地震地质条件下构造、物性和岩性等各种地质因素与地震波响应特征之间关系的一门技术, 可以提高对复杂介质中地震波传播规律的认知, 检验地震资料处理及解释技术的应用效果及适用范围^[1-3]. 所以波场数值模拟技术一直是地震勘探领域的重要研究内容.

正演数值模拟技术分为 2 个重要分支, 一是求解偏微分方程的波动方程数值模拟, 二是由积分方程以求解波场传播旅行时为主的射线追踪数值模拟^[4-9]. 射线追踪数值模拟方法出现较早, 在模拟相对简单的构造模型时快速高效, 且提供的射线路径非常直观. 射线追踪数值模拟方法又分为程函方程法、射线法和弯曲射线法等, 国内外大部分地球物理软件公司早期推出的数值模拟软件大多采用射线追踪数值模拟技术. 此外, 出现了一些改进的射线追踪数值模拟方法, 如由传统的射线追踪数值模拟方法改进的 Gauss 束法、射线法与 Kirchhoff 近似法相结合的快速算法、采用有限差分技术求解格林函数方法等.

收稿日期: 2011-01-12

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05025)

作者简介: 但志伟(1980—), 男, 湖北赤壁人, 工程师, 主要从事石油物探研究. E-mail: danzhiwei@cnooc.com.cn

射线追踪数值模拟方法很难满足高精度模拟复杂地质模型地震波场动力学特征的要求,而波动方程数值模拟提供的波场快照图有助于细致分析地震波场在各种复杂介质内部的运动学和动力学特征.根据不同的模拟方程,波动方程数值模拟主要分为声波模拟、弹性波模拟、黏弹性波模拟以及裂隙和孔隙弹性的 Biot 模拟等^[10-14].波动方程模拟有很多数值实现方法,如有限元、有限差分、Fourier 变换、边界元、谱元、广义屏等,其中有限差分法是目前研究最多的波动方程数值模拟方法.为了克服频散和运算速度较慢等问题,有限差分已从早期的低阶发展到高阶,网格划分也从早期的规则网格发展到交错网格,直至可变网格.为此,本文基于交错网格有限差分技术的黏弹性波动方程,对几种典型的生物礁、滩地质模型进行模拟,分析不同生物礁、滩地质模型的地震反射波组特征,为根据地震资料有效识别生物礁、滩提供理论依据.

1 地震正演数值模拟方法

1.1 黏弹性波动方程

由地震波在介质中传播的本构方程和动量守恒方程可得三维黏弹性介质中的一阶速度-应力关系^[11-13]为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = \begin{cases} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} [M(1 + \tau_p) - 2\mu(1 + \tau_s)] + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \mu(1 + \tau_s) + r_{ij} & i = j \\ \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \mu(1 + \tau_s) + r_{ij} & i \neq j \end{cases} \tag{1}$$

式中： x_i, x_j ——笛卡儿坐标； t ——时间； σ_{ij} ——第 ij 个应力张量； v_i —— i 方向的速度； M, μ ——限定参数（限定在参考频率 ω_0 处纵、横波的相速度）； τ ——优化参数；下角标 p 和 s 分别代表纵波和横波。 r_{ij} 是一个记忆变量,可以表示为

$$\frac{\partial r_{ij}}{\partial t} = \begin{cases} -\frac{1}{\tau_\sigma} \left[(M\tau_p - 2\mu\tau_s) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + 2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \mu\tau_s + r_{ij} \right] & i = j \\ -\frac{1}{\tau_\sigma} \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \mu\tau_s + r_{ij} \right] & i \neq j \end{cases} \tag{2}$$

式中 τ_σ 为优化参数.此外,动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \tag{3}$$

式中： ρ ——密度； f_i —— i 方向的外力.

1.2 数值模拟步骤

针对黏弹性波动方程式(1),采用高阶交错网格差分技术进行离散处理,本文使用四阶中心差分来近似空间微分,二阶中心差分来近似时间微分.

此外,常规处理和速度分析基于 Focus 处理系统,采用 GeoDepth 叠前深度偏移等模块进行叠前偏移处理.正演模拟步骤如下：

- a. 采用人机交互的方法建立地震地质模型.
- b. 进行地震地质模型网格离散化,离散网格的大小考虑背景速度、异常体最小尺度和收敛条件.
- c. 进行常规地震资料处理,获取水平叠加时间剖面、时间/深度偏移剖面 and 保幅 CRP 道集.

本文正演数值模拟采用与野外采集接近的观测系统和采集参数,其中道间距 25 m,炮间距 25 m,最小偏移距 0 m,最大偏移距 3 000 m,接收道数 128 道,采样间隔 1 ms,记录时间 2.5 s,雷克子波的主频分别为 30 Hz 和 60 Hz.

2 生物礁地质模型的地震反射响应特征

从测井资料可以看出,即使在沉积环境不同,或成岩作用也不尽相同的情况下,碳酸盐岩都具有共同的特点:传播速度比较快,密度比较大,明显高于其上覆和下伏以砂泥岩为主的碎屑岩.碳酸盐岩的地震反射响应表现为强反射特征,碳酸盐岩顶界反射以强振幅波峰出现,而底界则往往以强振幅的波谷形式出现,这为在地震反射波记录上识别碳酸盐岩奠定了基础.碳酸盐岩因沉积环境的不同,分为生物礁相碳酸盐岩、生物滩相碳酸盐岩和泻湖相碳酸盐岩,尤以生物礁最为有利.典型生物礁的地震反射特征主要表现为:具有强反

射外形、礁体内部杂乱反射、礁滩翼部周围有上超反射及前积现象、礁滩上覆地层存在披覆构造、礁体底部出现上凸或下凹现象等。生物礁在时间域成像地震剖面上的这些反射特征,可以帮助发现生物礁礁体。

因此,建立不同形态、不同沉积相碳酸盐岩生物礁的地质框架模型,通过模型正演,分析不同类型碳酸盐岩生物礁沉积模型的地震响应特征,如振幅、频率、相位等方面的特征。本文涉及的几种类型生物礁都是从实际地震剖面中提取的结果。

2.1 塔礁概念模型及地震响应特征

图 1 为一个塔礁地质概念模型,由 2 个礁体上下叠置组合而成(孔隙均不发育)。塔礁是在局部轻度隆起的碎屑岩上生长发育而成,最终被海平面快速上升而淹死,其围岩均为碎屑岩。该生物礁具有高速(2 850 ~ 5 200 m/s)、高密度(2.5 ~ 2.57 g/cm³)的特征,围岩为低速(2 300 ~ 2 860 m/s)、低密度(2.18 ~ 2.33 g/cm³)。模型横向长度为 12 km,纵向深度为 2 500 m,中间 2 层为 2 个不同期次重叠的礁体,设计有隆起构造。数值模拟采用的观测方式为基于射线的零偏移距正演。

图 2(a)为模型正演模拟时间域成像地震剖面。使用 Ricker 子波,其主频为 60 Hz。从图 2 可以见到明显的地震反射波组特征。礁体与围岩之间为强反射,礁体内部反射非常弱。礁体顶界为正反射,礁体底界为负反射,这种极性反转有助于识别礁体。此外,礁体中央部位呈现低频,向边缘频率逐渐升高。在生物礁的外围上超现象明显,生物礁顶上披覆现象明显,礁体下部及下伏界面反射呈现明显上凸特征。利用这些振幅反射特征可以区分碳酸盐岩和碎屑岩。图 2(b)为使用相同子波模拟深度域成像剖面。对比深度域与时间域成像剖面可以发现,在深度域成像剖面中,礁体下伏反射层上凸现象得到消除,与设计模型一致。说明深度域成像效果优于时间域成像,为此对于碳酸盐岩生物礁储集层要求使用深度域成像结果。

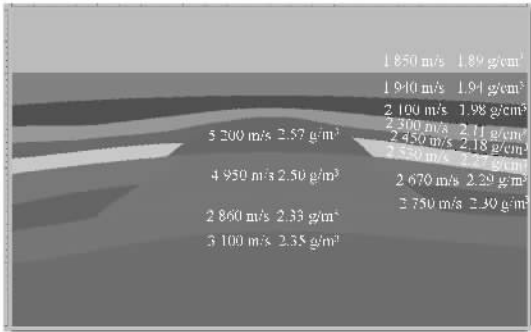


图 1 塔礁地质概念模型参数模型

Fig. 1 Parameter model of geological conceptual model for a tower reef

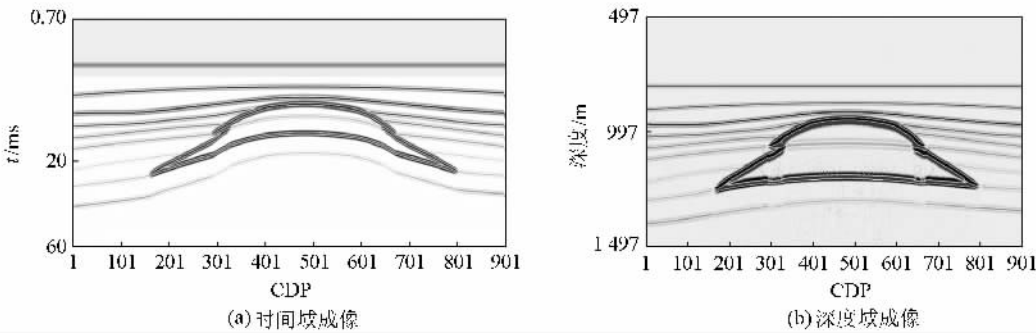


图 2 模拟主频为 60 Hz 的地震剖面

Fig. 2 Simulated seismic profile with peak frequency of 60 Hz

2.2 跨相带地质概念模型及地震响应特征

参照巴哈马海湾南部的水下观测和取样对现代碳酸盐前斜坡的研究成果来设计碳酸盐岩跨相带模型。该模型以台地边缘礁为主体(以加积 + 进积的成礁模型构建),从右到左分别为台坪、滩、礁、礁前斜坡相,台地边缘礁向台地内有礁翼相滩和泻湖过渡,台地边缘礁向台地海盆方向有陡斜坡带向缓坡斜坡带过渡,以斜坡楔的形式终结。跨不同相带的地质框架模型如图 3 所示。

跨不同相带地质框架模型数值模拟结果如图 4 所示。从图 4 反射波组特征可以发现,台地边缘礁相表现出礁顶为强振幅反射、碳酸盐岩厚度明显加大、底部反射上凸、内部出现 S 形前积现象和视频率变低等特征。滩相的顶部为强振幅反射,碳酸盐岩厚度无明显变化,内部反射连续,滩与礁相和泻湖相间有一渐变的能量减弱过渡现象。泻湖相的顶为强振幅反射,碳酸盐岩厚度逐渐变薄,其内部及底部有振幅减弱现象。礁前陡斜坡相范围很窄,反射特征呈台阶式陡倾反射,且强反射突然中断。缓坡斜坡相顶面反射为较强振幅特征,内部

杂乱至断续状,上下层总的形态像喇叭状向斜坡楔收拢,最后变成强的复合波反射.

2.3 复合生物礁地质框架模型及地震响应特征

某生物礁是一个礁滩复合体,钻遇生物碳酸盐岩厚度达573.5 m,其主体为台地边缘礁,发育多套高孔储层.在碳酸盐岩段的中下部也有多层孔隙发育层段,局部甚至孔隙、缝洞更为发育.经测井解释和测试,在该礁体上部获得高产油流,下部层段为水层.从孔隙发育程度来看,储层表现为孔隙发育、欠发育或致密层段相间出现且厚薄不均,该特征多次出现.岩性解释结果表明,曾有多次因海平面下降而暴露是引起上述现象的主要原因.为此,开展精细的模型正演研究,可以帮助对地震剖面中出现的反射特征做出合理的地质解释,预测储层发育的层位和具体位置.

图 5 为该生物礁物理框架模型,其传播速度、密度值由某井的声波和密度测井分层数据提供.模型横向长度为 10 000 m,纵向深度为 3 000 m.按不同分辨率需求,模拟了 2 套数据(网格大小 5 m×2 m,主频 60 Hz;网格大小 5 m×5 m,主频 30 Hz).采用的观测方式为:中间放炮,两边接收.道间距 25 m,炮间距 25 m,偏移距-3 175~3 200 m,接收道数 256 道,共 200 炮,64 次叠加,采样间隔 1 ms,记录时间 2.5 s,第 1 炮的坐标位置为(1 500,0).

模型设计时考虑了多次海平面升降的生物礁成岩环境,按退积型、加积型、进积型和加积进积型的基本模型进行组合.模型正演结果如图 6 所示,图中碳酸盐岩顶界面强反射特征明显,可以清楚地区分碎屑岩与碳酸盐岩.此外,由于横向变速造成时间成像“构造假象”(或速度陷阱),不能正确反映地下构造形态.在分辨率方面,60 Hz 主频数据明显优于 30 Hz,薄层分辨率更高.

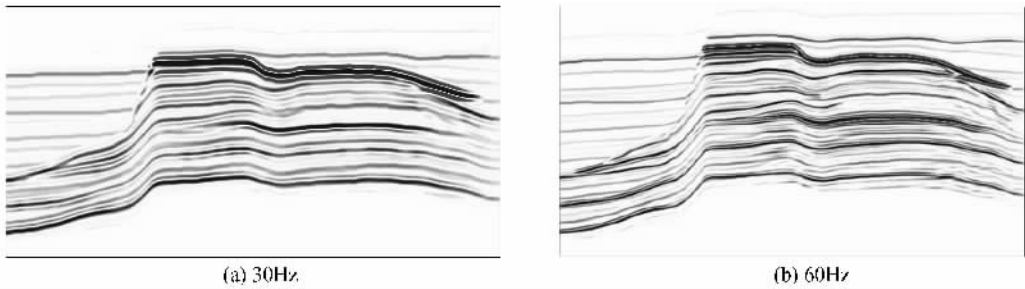


图 6 模拟时间域成像的地震剖面

Fig. 6 Simulated seismic profile imaging in time domain

图 7 为深度域成像模拟地震剖面,主频为 60 Hz.从图 7 可以见到,礁翼附近的 S 形前积现象比较清晰,礁的多期次上超特点明显,礁内中间靠右的强反射同相轴表明,早期形成的礁核部位比塔礁所在位置更远离海盆方向.对比模型正演结果与实际地震记录,两者比较接近,表明复合礁体设计合理、正演模拟方法可靠.此外,叠前深度偏移的深度剖面外形特征与地质模型一致,说明正确的速度模型是恢复地质构造形态的关键.

3 结 论

- 由于在生物礁、滩与上下围岩之间存在较大的波阻抗差异,其顶底分界面可以形成强地震反射以及产生极性反转,其内部产生 S 形前积反射、弱反射或杂乱反射,两侧出现上超反射及披覆现象.这些特征都有助于识别碳酸盐岩生物礁.
- 在横向上,生物礁顶部强反射会导致其底部反射比周围反射弱.在纵向上,生物礁内不存在明显的波

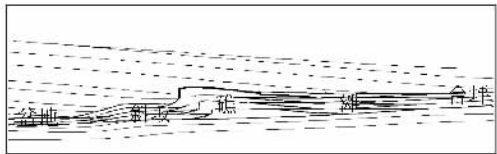


图 3 跨不同相带地质框架模型

Fig. 3 Geological frame model across various phases

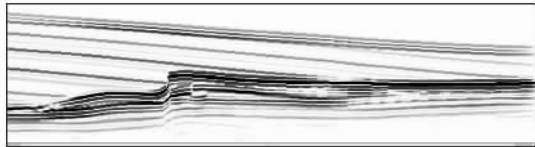


图 4 跨不同相带地质框架模型模拟地震剖面

Fig. 4 Simulated seismic profile across various phases

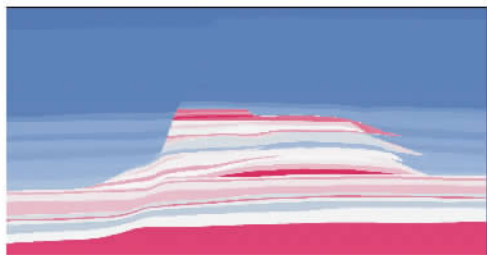


图 5 某生物礁物理框架模型

Fig. 5 Physical frame model for a reef

阻抗差异,其内部无法形成强反射,不利于分析生物礁内部纵向变化特征.此外,对于大孔隙度和致密碳酸盐岩(如礁相和台坪相),底部反射同相轴会分别出现下凹和上凸现象,并且随着孔隙度变化幅度加大下凹和上凸现象更加明显.

c. 碳酸盐岩从台坪相到滩相、台地边缘礁相及陆棚相,其底界地震反射能量逐渐增强,而顶界反射能量变化复杂.这种横向相带变化所引起的地震反射特征差异,有助于识别不同相带碳酸盐岩地层.

d. 对于碳酸盐岩生物礁储集层,高分辨率资料更能反映薄层的变化特征,深度域成像剖面优于时间域成像剖面,可以消除生物礁下伏地层地震反射上凸或下凹现象.为此,在地震资料处理阶段要提供高分辨率的深度域成像剖面,这也为后续的叠前或叠后波阻抗反演提供保障.

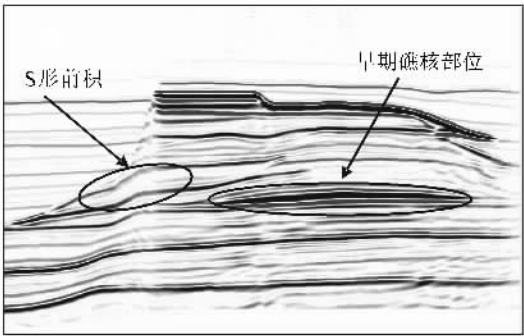


图 7 模拟深度域成像的地震剖面

Fig. 7 Simulated seismic profile imaging in depth domain

参考文献：

[1] 余德平. 波场数值模拟技术[J]. 勘探地球物理进展,2004,27(1):16-21. (SHE De-ping. On wave field numerical modeling techniques[J]. Progress in Exploration Geophysics,2004,27(1):16-21. (in Chinese))

[2] 张永刚. 复杂介质地震波场模拟分析与应用[M]. 北京 石油工业出版社,2007.

[3] 李三福,肖为,朱美娟,等. 深水礁滩相储层地震模型的正演模拟及其地震响应特征分析[J]. 工程地球物理学报,2011,8(1):91-96. (LI San-fu,XIAO Wei,ZHU Mei-juan,et al. Forward modeling and analysis of seismic response characteristic in the deep water reef-flat reservoirs model[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2011,8(1):91-96. (in Chinese))

[4] 何建军,刘家铎,鲁新便,等. 基于模型正演的地震属性分析技术识别和划分碳酸盐岩储层缝洞单元[J]. 石油地球物理勘探,2009,44(4):472-477. (HE Jian-jun,LIU Jia-duo,LU Xin-bian,et al. Recognition and delimitation of fracture and cave units of carbonate reservoir by using seismic attributes analytic technique based on forward model[J]. Oil Geophysical Prospecting,2009,44(4):472-477. (in Chinese))

[5] 贺振华,黄德济. 复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用[M]. 成都 四川科学技术出版社,1999.

[6] 董良国,马在田,曹景忠,等. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分法[J]. 地球物理学报,2000,43(3):856-864. (DONG Liang-guo,MA Zai-tian,CAO Jing-zhong,et al. A staggered-grid high-order difference method of one-order elastic wave equation[J]. Chinese Journal of Geophysics,2000,43(3):856-864. (in Chinese))

[7] 奚先,姚姚. 二维弹性随机介质中的波场特征[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(6):679-685. (XI Xian,YAO Yao. Wavefield characters of 2-D elastic random medium[J]. Oil Geophysical Prospecting,2004,39(6):679-685. (in Chinese))

[8] 白杰. 射线追踪正演模拟及应用[D]. 北京 中国地质大学,2007.

[9] BUBE K,WASHBOURNE J. Wavetrace ray tracing for the propagation of band-limited signals. Part 1:Theory[C]//Expanded Abstracts of 71st Annual Internat SEG Mtg. San Antonio,USA SEG,2001:1131-1134.

[10] HOUSE L,LARSEN,MARTIN G,et al. 2D and 3D elastic modeling with shared seismic models[C]//Expanded Abstracts of 72nd Annual Internat SEG Mtg. Obblahome City SEG,2002:1975-1978.

[11] 张文忠. Biot 介质的交错网格差分法波场模拟研究[D]. 北京 中国地质大学,2007.

[12] 雍运动. 三维黏弹性随机介质地震波场并行模拟研究[D]. 吉林 吉林大学,2007.

[13] ROBERTSSON J O A,BLANCH J O,SYMES W W. Viscoelastic finite-difference modeling[J]. Geophysics,1994,59(9):1444-1456.

[14] CARCIONE J M,KOSLOFF D,KOSLOFF R. Wave propagation simulation in a viscoelastic medium[J]. Geophys J,1988,95:597-611.