· 正演模拟 ·

利用错格虚谱法模拟礁、滩相储层地震波场

巴　晶*①　曹　宏①　姚逢昌①　孔丽云②
首　皓①　刘　炯②　杨慧珠②

（①中国石油勘探开发研究院物探技术研究所，北京 100084；②清华大学工程力学系，北京 100084）

巴晶，曹宏，姚逢昌，孔丽云，首皓，刘炯，杨慧珠. 利用错格虚谱法模拟礁、滩相储层地震波场. 石油地球物理勘探，2010，45(2)：177～184

摘要　文中基于中国西部 F 地区的声波测井资料设计了四层礁、滩相地质模型，并用气、水分别替换礁、滩内部的流体，利用错格虚谱法模拟礁、滩相储层地震波场，避免了常规虚谱法在选用粗网格模拟小尺寸礁、滩时出现的不收敛现象，提高了计算效率。结果表明：①无论是含气还是含水，礁、滩相的边界与尺寸都能清晰分辨，但与礁、滩同时含气的模型相比，在滩含水、礁含气的模型中，礁边界成像较为清晰，滩边界较模糊；②若仅从完全弹性波动传播理论出发，从地表观测记录可以准确检测到深度大于 3000m 的小尺寸礁、滩结构，并且在已知围岩速度与孔隙度分布的前提下，可从地震剖面中直接识别礁、滩中的气、水分布。然而，在实际工作中，礁、滩的识别受到多种因素制约，尤其是地震波的衰减和频散，所以对于含流体的地层，其在地震频段的速度建模将是目前必须解决的一个难题。

关键词　错格虚谱法　礁、滩相储层　波场正演　偏移成像

1　引言

礁、滩相储层预测是近年来中国中西部油气勘探的重点与难点，其最大挑战在于礁与滩的地球物理异常特征不明显[1～3]。在常规地表地震勘探中，礁、滩结构的尺寸与构造形态往往小于用四分之一波长设定的地震波长的最高分辨率极限，因此在叠后剖面中信息微弱，为实际资料处理与后期解释带来困难。为模拟地震波在礁、滩中的传播，往往需要采用很小的空间采样与时间采样，但给正演研究带来很大计算量，同时也增加了处理压力。地球物理领域常用的波场正演方法有虚谱法、有限元法[4]、边界元法[5]及有限差分法[6，7]。其中有限差分法精度最高，并且应用最为广泛。虚谱法具有较高的频率域分辨率，并且与其他方法相比，虚谱法达到相同的计算精度需要相对较少的计算网格，因此具有较高的计算效率。此外，虚谱法还有原理简明、易于实现的优点，因此被广泛引用。笔者曾将虚谱法应用于黏弹双相介质[8]、双孔双相介质[9]与 BISQ[10]介质的波场模拟，结果显示虚谱法具有计算效率高、程序易调试、波场精度高的优势，十分适合于模拟宏观均匀近似条件下的复杂介质模型。与有限差分法相比，虚谱法的一个最大劣势在于，虚谱法受限于介质速度的空间突变性。对于构造起伏剧烈、速度变化剧烈的区域，应用虚谱法几乎无法适用[11]，但是应用错格虚谱法能很好地改进这一问题。刘炯等曾采用错格虚谱法模拟了缝洞型储层中的地震波场[12]，结果显示错格虚谱法能够很好地适用于具有非均匀缝洞结构介质中的速度奇异性。

基于前述研究成果，本文采用错格虚谱法模拟具有更强局部非均匀性的礁、滩相储层中的地震波场，采用分频模拟方法讨论小尺度礁、滩构造在地震波场中的响应特征，并利用中国西部 F 地区的声波测井资料设计礁、滩相地质模型，基于 Gassmann 理论计算生物礁速度，进行气、水流体替换，然后采用

* 北京市海淀区学院路中国石油勘探开发研究院物探技术研究所，100084
本文于 2009 年 4 月 23 日收到，修改稿于同年 6 月 16 日收到。
本项研究由国家 973 项目（2007CB209505），科技部国际合作项目（2006DFB62030），国家自然科学基金重点项目（40830423），国家科技重大专项（2008ZX05004-006）联合资助。

返回目录

叠前偏移成像技术进行含气与含水礁、滩的偏移成像。

2 方法原理

在礁、滩相储层的波场正演中，常遇到迭代计算过程不收敛现象，产生这种发散现象的原因来自于地层界面的剧烈起伏以及薄层、夹互层等引起的地震速度突变。在对波动方程进行离散微分计算过程中，地层速度的剧烈变化极易引起计算结果的频散，甚至会导致计算结果的不收敛。在对礁、滩相储层进行速度建模的过程中，由于滩的厚度较小，且滩表面随地层起伏变化显著，因此礁、滩相储层速度建模在薄层地震模拟研究中成为难题。

常规的虚谱法通过傅里叶变换，把物理空间中对空间的微分计算转化为在波数域中的乘积计算，然后再通过傅里叶逆变换把结果转换回物理空间，从而求出物理量的空间微分近似值。采用传统虚谱法对连续函数进行一阶求导的离散表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial x}=\sum_{k_x}^{k_n}\mathrm{i}k_xU(k_x)\exp(\mathrm{i}k_xx) \tag{1}$$

其中：i 为虚数单位；k_x 表示 x 方向的波数；$U(k_x)$ 表示位移 u 在波数域中的傅里叶变换值。传统虚谱法在傅里叶变换后，采用全局化的格式求解局部的微分算子，在全局范围内任意一个点的速度改变都可能影响其他位置的微分算子，因此传统虚谱法特别适合于速度渐变或是结构形态相对简单的地层模型。在礁、滩相这种结构复杂的介质环境中，局部区域的速度突变极易在傅里叶正变换后产生较大的虚部，该虚部通过傅里叶逆变换则产生较大的实部，进而使得迭代计算发散。而错格虚谱法能够改进这一问题，其在微分算子中多乘了一个 $\exp(\mathrm{i}k_x\Delta x/2)$ 项，使得傅里叶变换后的波场在波数域保持了实部与虚部均衡，即使对于速度突变区域，也不会出现虚部远大于实部的情况。错格虚谱法求解一阶微分的离散表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial x}=\sum_{k_x}^{k_n}\mathrm{i}k_xU(k_x)\exp(\mathrm{i}k_x\Delta x/2)\exp(\mathrm{i}k_xx) \tag{2}$$

由式(2)可以看出，错格虚谱法实际上是对传统虚谱法的进一步近似，并非是严格精确。由这种近似得到的波场的振幅与相位的保真问题，在文献[12]中有详细论述。通过一维与二维算例证明了错格虚谱法的波场精度可完全满足工程应用的需求。图1为礁、滩相速度模型及其传统虚谱法与错格虚谱法的正演波阵面，由图1可见：在同样的空间与时间采样密度下，传统虚谱法的模拟结果(图1b)出现了明显的发散现象，其位移波阵面上已经观察不到正常的波场同相轴，而且发散现象比缝洞波场正演中所遭遇的状况[12]更为严重；采用错格虚谱法的模拟结果没有出现发散现象(图1c)。图1表明，即使对于厚度小于四分之一地震波长的薄滩，错格虚谱法仍能很好地保持波场振幅的精度与相位完整性，因此在保证相同计算精度的前提下，错格虚谱法对时间采样与空间采样的要求都较低，因而具有较高的计算效率。

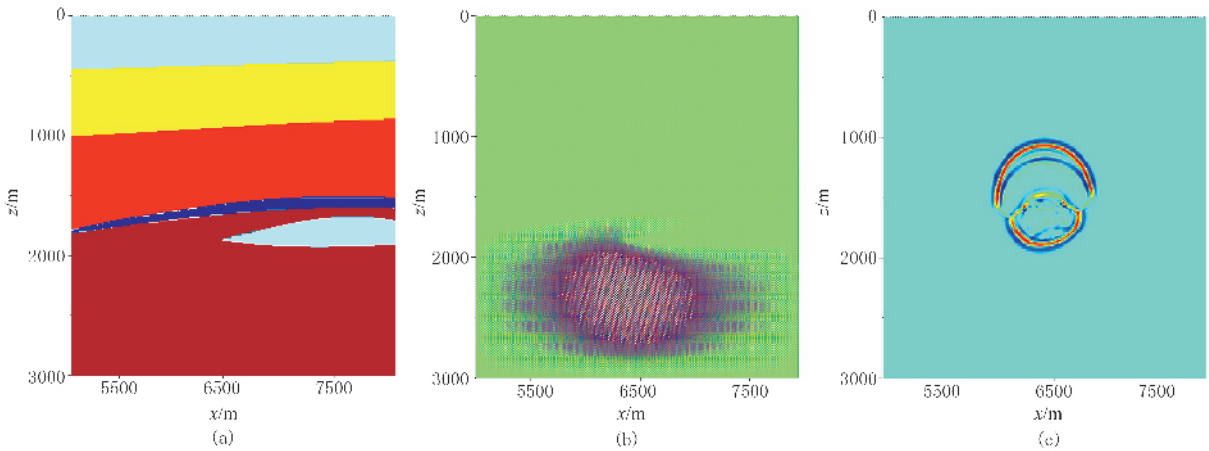

图1 礁、滩相速度模型(a)及其传统虚谱法(b)与错格虚谱法(c)的正演波阵面

滩的平均厚度为25m(图a中深蓝色区域)，在模型正中心进行30Hz的声波震源的激发，分别采用式(1)与式(2)进行迭代模拟计算，在震源激发后80ms分别记录了两种方法得到的波阵面

返回目录

3　波场正演

本文设计了一个二维四层的地质模型,模型参数见图 2。该模型的原型取自四川 F 地区,且实际目标区的礁体埋深在 6000m 以上。为简化正演模拟起见,将礁、滩相储层设定在地表以下小于 3000m 的深度范围以内,着重分析礁与滩的地震波响应特征。如图 2b 所示,选取全区模型的 5000～8000m 段,于水平方向 6500m、深度方向 1500m 处设置虚拟震源,计算时间步长为 1ms,空间采样间隔为 10m,采用中心频率为 10,30,50Hz 的雷克子波作为震源子波进行声波波场的正演测试,得到 10,30,50Hz 震源子波激发下的不同时刻的垂直地震波阵面(图 3～图 5),数值模拟结果显示:①在 10Hz 的激发条件下(图 3),对于较薄地层中的滩、礁组合体而言,礁顶、礁底的反射很弱(滩顶反射被混叠在初至波之中,滩底反射相对较清晰),按垂向分辨率为四分之一波长(98.025m)的分辨能力计算,无法识别滩的顶、底界(滩厚度为 35m),此时礁、滩相惟一的显著波场特征来自于滩底反射;②在 30Hz 的激发条件下(图 4),滩顶、滩底、礁顶的反射波都较为清晰,礁底反射波较弱,且随着时间的传播,礁顶的反射与多次波混叠,减弱明显;③在 50Hz 的激发条件下(图 5),滩顶、滩底、礁顶、礁底的反射波都十分清晰,但由于波长较短(78.42m),波阵面中的多次波与散射波非常发育,因此经过 300ms 的传播以后,滩顶、滩底与礁顶的波前面仍然十分清晰,但此时礁底的反射受到多次波的影响,已经不易分辨了。分频波场模拟表明,礁、滩相储层的地震波响应特征与地震波的中心频率关系密切,仅从弹性波的传播理论上讲,若忽略多次波的影响,地震波的中心频率越高,其对礁、滩形态与尺寸的分辨率就越高。然而在实际地层中,频率越高的地震波所面临的由局域流、黏弹性弛豫机制与随机散射所造成的衰减也越强,因此要从地表炮集观测埋深较大的礁、滩体,仍需依靠低频地震分量。

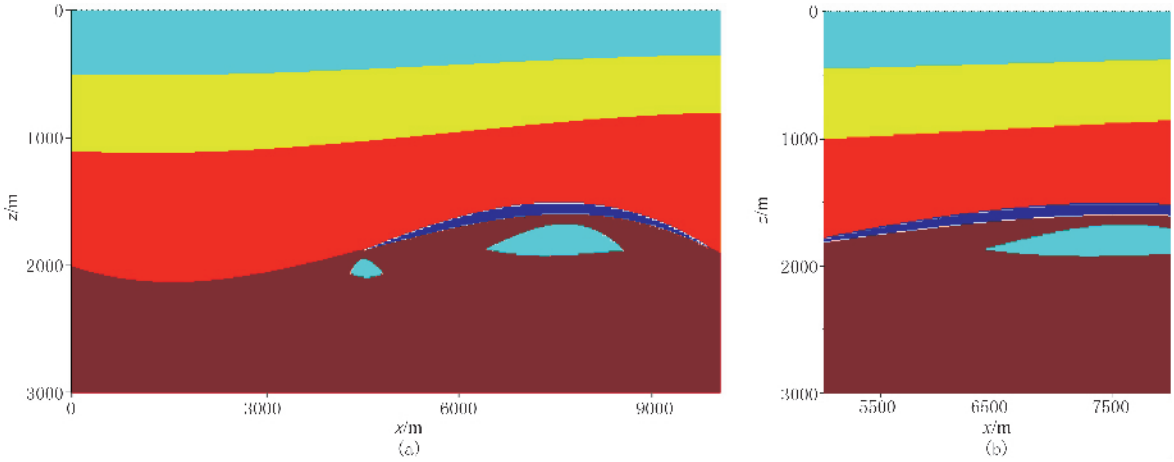

图 2　礁、滩相速度模型示意图

(a)全区域速度模型;(b)水平方向 5000～8000m 段速度模型

模型的水平宽度为 10000m,垂直深度为 3000m。从地表往下,三个层界面均起伏不平,最下层的层界面弯曲度最大,且层上局部区域覆盖了一层薄薄的滩(深蓝色薄层区域),滩的水平长度为 5300m,滩的平均厚度为 35m,滩下分布有大、小两个礁体(滩下的浅蓝色区域),大礁体宽 2100m,平均厚度为 85m,小礁体宽 500m,平均厚度为 45m。模型上三套地层的纵波速度分别为 3523,3970,4401m/s,礁、滩相的围岩速度为 4791m/s,礁速度为 3553m/s,滩速度为 3921m/s,所有地层速度值均取自声波测井在相应深度段观测速度的平均值。礁、滩速度与围岩速度都比实际埋深 6000m 的岩层速度低(根据声波测井资料,实际围岩的纵波速度在 6200m/s 以上,礁、滩速度为 5500～5900m/s)

4　礁、滩成像

为分析地表观测记录中的礁、滩相地震响应特征,制作了地表合成记录。在地表设置了虚拟测线,该测线共 100 炮,单炮时间长度为 2.5s,时间采样间隔为 1ms,边界条件采用 PML 边界条件。在制作炮集的过程中同时考虑了两种情况:①礁与滩同时含气,此时礁、滩反射都强;②滩含水、礁含气,此时礁反射强、滩反射弱。在礁、滩含流体后,其体积

返回目录

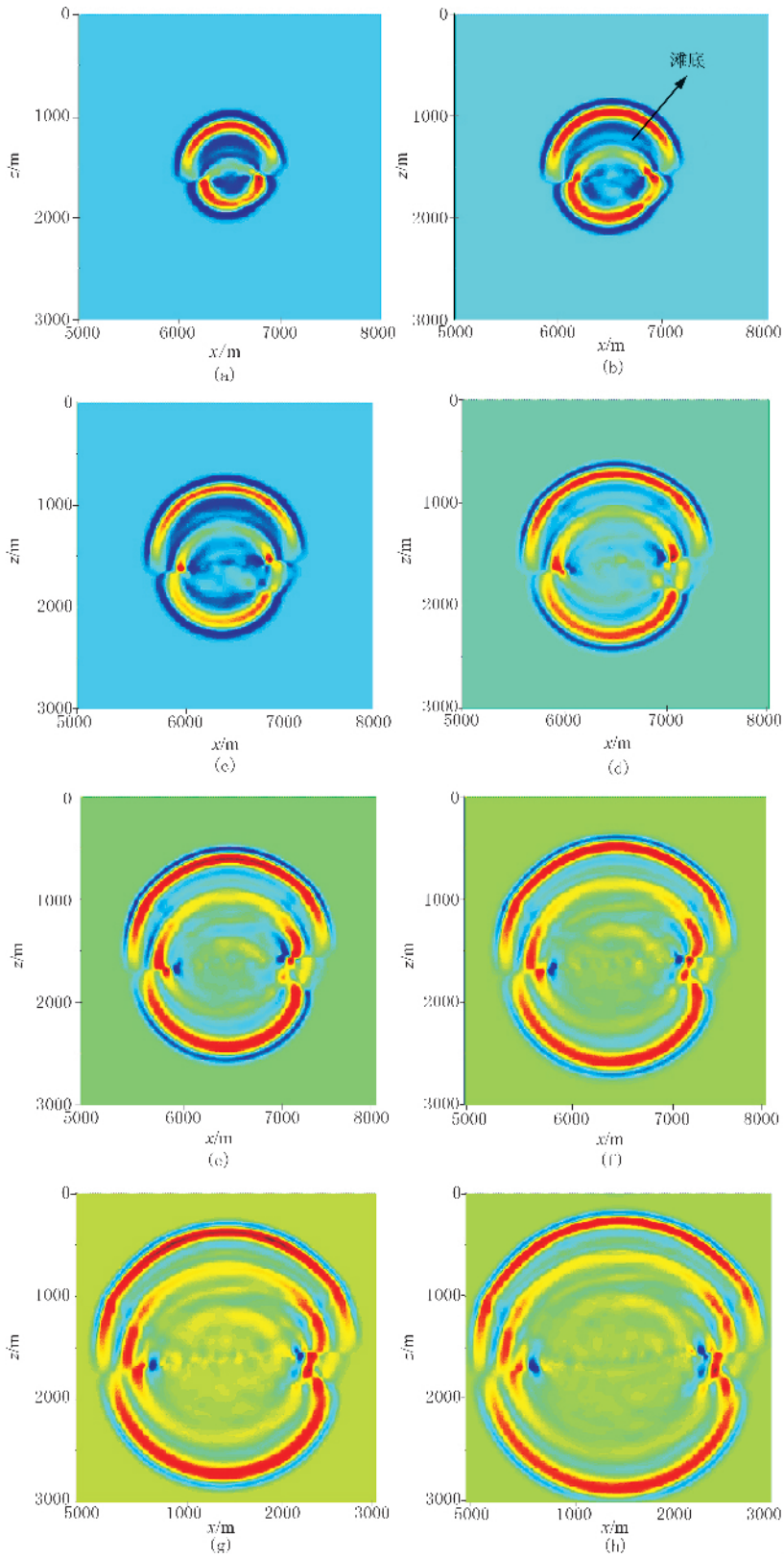

图 3 10Hz 震源子波激发下的不同时刻的垂直地震波阵面

(a)120ms;(b)150ms;(c)180ms;(d)210ms;(e)240ms;(f)270ms;(g)300ms;(h)330ms

返回目录

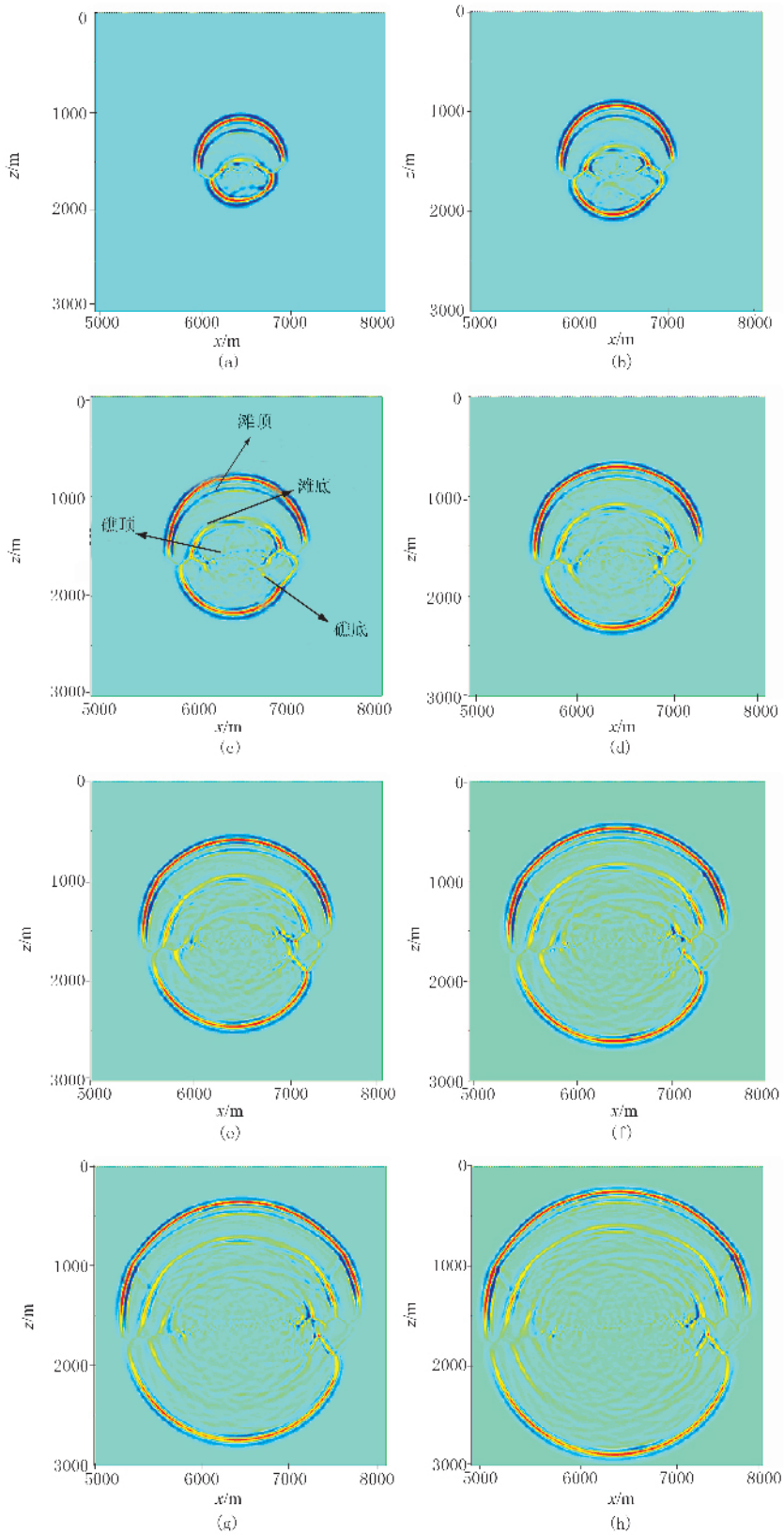

图 4　30Hz 震源子波激发下的不同时刻的垂直地震波阵面

(a)120ms;(b)150ms;(c)180ms;(d)210ms;(e)240ms;(f)270ms;(g)300ms;(h)330ms

返回目录

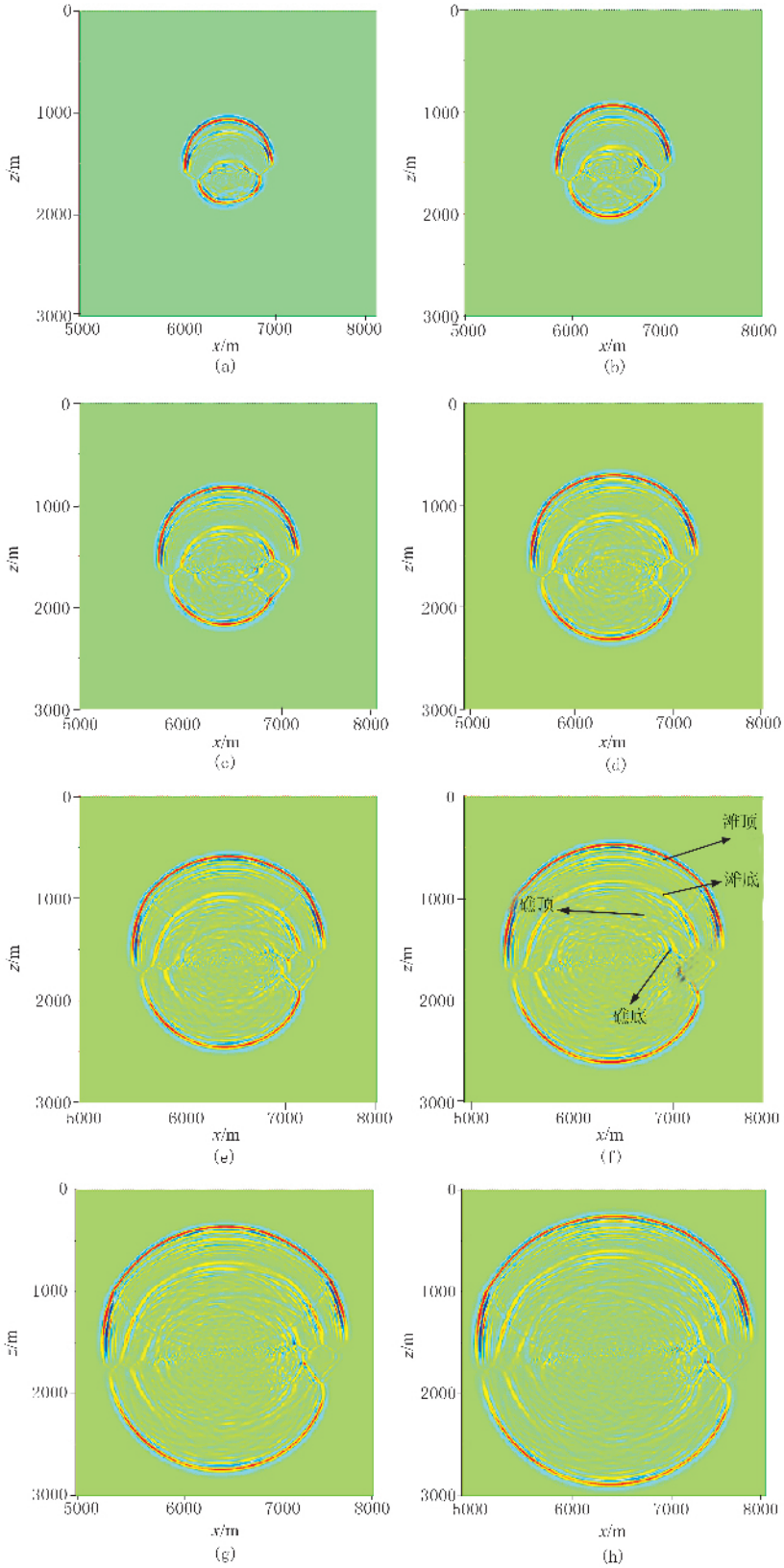

图 5 50Hz 震源子波激发下的不同时刻的垂直地震波阵面

(a)120ms;(b)150ms;(c)180ms;(d)210ms;(e)240ms;(f)270ms;(g)300ms;(h)330ms

返回目录

模量、剪切模量与密度等参数符合 Gassmann 理论的孔隙弹性规律，即

$$K_e = K_d + \frac{(1-K_d/K_s)^2}{\phi/K_f + (1-\phi)/K_s - K_d/K_s^2} \quad (4)$$

$$\mu_e = \mu_d \quad (5)$$

$$\rho_e = \rho_d + \phi\rho_f \quad (6)$$

其中：K_f、K_s、K_d、K_e 分别为孔隙流体、固体颗粒、干骨架与介质的体积模量；μ_e 与 μ_d 分别为饱和介质与干骨架的剪切模量；ρ_e、ρ_d、ρ_f 分别为饱和介质、干骨架与流体的密度；ϕ 为孔隙度。

在正演计算中可根据先验知识给定的礁、滩相的孔隙度、骨架弹性参数与组分密度参数（表 1），根据给定的孔隙介质参数，采用 Gassmann 理论计算礁、滩含气与含水状况下的纵波速度，采用图 2a 中速度模型，通过波动方程正演，计算两种状况下的炮集合成记录。

图 6 为在水平位置 5000m 的地表设置虚拟震源得到的全区波阵面，图 7 为地表观测的炮集记录。采用基于谐波分解的叠前偏移成像方法[13]，分别对礁、滩含气与含水的地表虚拟记录进行了叠加

表 1　孔隙介质参数

K_s(N/m^2)	K_d(N/m^2)	ϕ	μ_d(N/m^2)	K_{f1}(N/m^2)	ρ_{f1}(kg/m^3)	K_{f2}(N/m^2)	ρ_{f2}(kg/m^3)	ρ_s(kg/m^3)
38×10^9	16×10^9	0.15	14.6×10^9	2.5×10^9	1040	1.4×10^6	100	2650

注：K_{f1} 与 ρ_{f1} 表示水的体积模量与密度，K_{f2} 与 ρ_{f2} 表示气的体积模量与密度，部分参数取自文献[10]

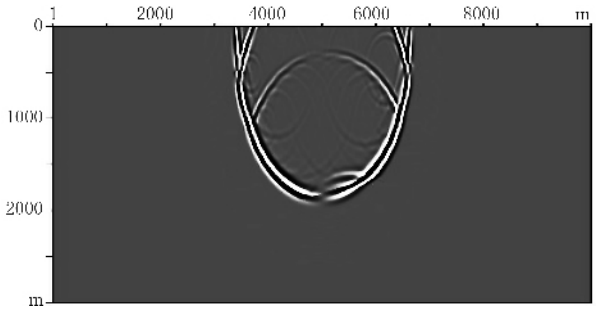

图 6　在水平位置 5000m 的地表设置虚拟震源得到的全区波阵面

（图 8），偏移成像结果如图 9 所示，结果表明：无论是含气还是含水，礁、滩相的边界与尺寸都能清晰分辨，但与礁、滩同时含气的模型（图 9a）相比，在滩含水、礁含气的模型（图9b）中，礁边界成像较为清晰，滩边界较模糊。根据 Gassmann 理论可以解释上述现象，即由于多孔岩石在含水后纵波速度下降程度比含气时小，因此滩含水的波阻抗差较低。上述算例表明，如果仅考虑完全弹性波动传播理论，在理想状况下，从偏移后的成像结果中直接识别礁、滩中的气、水分布是可能的。但在实际工程中，礁、滩相的识别受到深度、衰减与散射等因素的限制，且实际地层模型要复杂得多，因此仅采用完全弹性波动传播理论是不足的。最新的研究显示，在中国西部的饱含水岩石中，中、低频带的地震波频散现象超出了人们早先的认知难度，从地震频段到测井频段的速度频散比率能达到 30%以上。因此对于含流体的地层，其在地震频段的速度建模将是必须解决的一个难题。

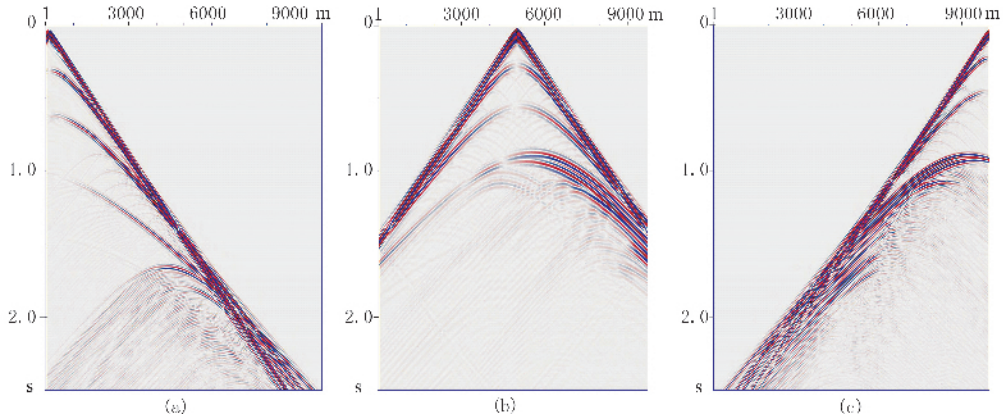

图 7　地表观测炮集记录

(a)震源位于水平位置 0m；(b)震源位于水平位置 5000m；(c)震源位于水平位置 10000m

返回目录

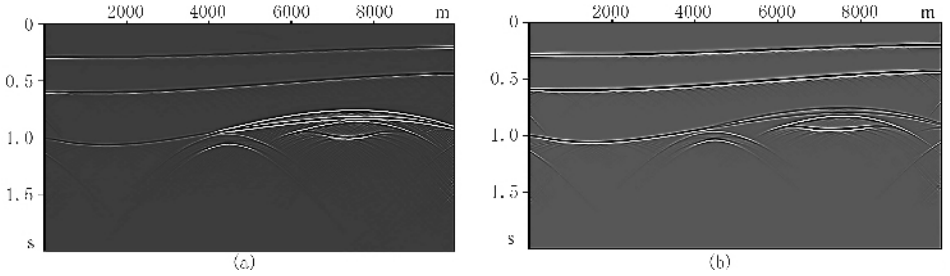

图8 礁、滩同时含气(a)与滩含水、礁含气(b)模型的叠加剖面

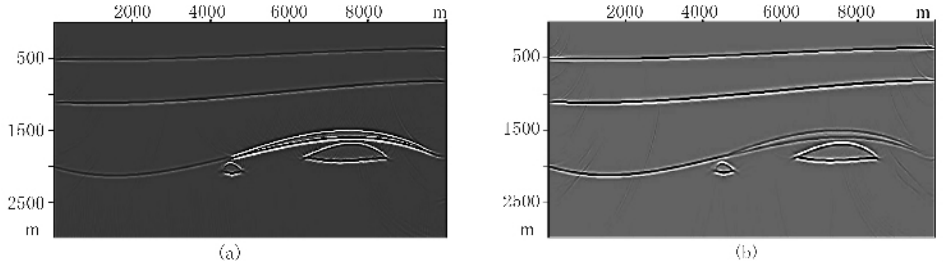

图9 礁、滩同时含气(a)与滩含水、礁含气(b)模型的深度偏移成像结果

5 结束语

本文采用错格虚谱法模拟了起伏地层结构中的礁、滩相储层的声波波场，结果显示错格虚谱法适用于模拟具有较大速度奇异性的复杂构造，能够在保持波场精度的情况下提高计算效率，十分适合礁、滩相储层的正演研究。基于中国西部F地区的声波测井资料设计了四层礁、滩相地质模型，利用Gassmann理论，用气、水分别替换礁、滩内部的流体，经过波场正演制作了合成记录，采用基于谐波分解的叠前偏移成像方法进行礁、滩结构的成像。结果表明，若仅从完全弹性波动传播理论出发，从地表观测记录可以准确检测到深度大于3000m的小尺寸礁、滩结构，并且在已知围岩速度与孔隙度分布的前提下，可从地震剖面中直接识别礁、滩中的气、水分布。然而，本文的结果仍是建立在完全弹性波动方程的前提下，且速度模型取自声波测井，而在实际的礁、滩相勘探工作中，碳酸盐岩中的复杂构造如裂缝、溶洞、流体的“补丁”状饱和以及伴随产生的地震波速度的宽频带频散与能量衰减，都会给礁、滩结构的地表地震识别带来困难，因此对于含流体的地层，其在地震频段的速度建模将是目前必须解决的一个难题。

参考文献

[1] 熊晓军，贺振华，黄德济. 生物礁地震响应特征的数值模拟. 石油学报，2009，30(1)：75～79

[2] 蔡涵鹏，贺振华，黄德济. 礁、滩相油气储层预测方法研究. 石油地球物理勘探，2008，43(6)：685～688

[3] 敬朋贵. 川东北地区礁、滩相储层预测技术与应用. 石油物探，2007，46(4)：363～369

[4] 田迎春，杨慧珠. 含两种流体的饱和孔隙介质的有限元数值模拟. 应用地球物理，2010，7(待刊)

[5] 符力耘，牟永光. 弹性波边界元法正演模拟. 地球物理学报，1994，37：521～529

[6] 裴正林. 双相各向异性介质弹性波传播交错网格高阶有限差分法模拟. 石油地球物理勘探，2006，41(2)：137～143

[7] 杜启振，孔丽云，韩世春. 裂缝诱导各向异性双孔隙介质波场传播特征. 地球物理学报，2009，52(4)：1049～1058

[8] 巴晶，卢明辉，胡彬，杨慧珠. 黏弹双相介质中的松弛骨架模型. 地球物理学报，2008，51(5)：1527～1537

[9] Ba J, Nie J X, Cao H, Yang H Z. Mesoscopic fluid flow simulation in double-porosity rocks. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L04303

[10] Ba J, Cao H, Yao F C, Nie J X, Yang H Z. Double-porosity rock model and squirt flow in laboratory frequency band. *Applied Geophysics*, 2008, 5(4): 261～276

[11] 赵志新，徐纪人，崛内茂木. 错格实数傅里叶变换微分算子及其在非均匀介质波动传播研究中的应用. 地球物理学报，2003，46(2)：234～240

[12] 刘炯，马坚伟，杨慧珠，巴晶. 缝洞型储层错格伪谱法模拟. 石油地球物理勘探，2008，43(6)：723～727

[13] 首皓，姚逢昌，曹宏，刘洪. 基于共炮偏移与谐波分解的AVO反演. 石油地球物理勘探. 2009，44(1)：38～42

[14] Ba J, Cao H, Yao F C, Yang Z F. Pore heterogeneity induces double-porosity in Guang'an sandstone. *CPS/SEG Beijing* 2009, Beijing, China, 2009

(本文编辑：刘勇)

返回目录