

基于混合方程的裂隙介质地震波场数值模拟

杜正聪 (攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

贺振华, 黄德济 (成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059)

[摘要] 在 Hudson 理论的基础上推导出基于弹性-声学近似的裂隙模型反射系数计算公式; 用变参考慢度 Rytov 近似波场延拓算子对给定裂隙模型进行正演和偏移, 并分析其波场特征。结果表明: ①在当前地震分辨率下, 不能识别单个裂隙, 但可以探测裂隙发育带; ②裂隙带达到一定的宽度和密度时, 可以用地震方法检测裂隙的分布, 潜山内幕反射波的范围与强弱, 有利于研究裂隙发育带的宽度和密度; ③裂隙带的低频复波反射, 表明在裂隙发育带, 地震波频率减低, 这意味着用地震波的频率特征是可以检测裂隙的。

[关键词] 裂隙 (岩石); 地震模型; 裂隙带; 裂隙宽度; 地震勘探; 慢度; 正演; 地震偏移

[中图分类号] P631.44

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-9752 (2005) 02-0197-04

致密油气储层中裂隙系统的存在对扩大油气的存储空间、增加流体渗透性、建立运移通道起建设性作用, 有利于油气藏的形成。但若缺少良好的储盖组合, 亦有破坏性^[1]。无论出现哪种情况, 查明裂隙系统的空间分布和缝隙中流体 (油、气、水) 的赋存情况, 对油气的勘探、开发都有十分重要的意义。因此, 通过裂隙模型的正演与偏移来研究裂隙介质的波场特征就显得尤为重要。

目前要以分辨率为 10m 左右的地震勘探来直接探明地下毫米级裂隙的空间分布显然是不可能的。笔者首先在裂隙介质中基于弹性波动方程的地震波传播的 Hudson 理论上推导出与裂隙密度、充填物性质、波的人射参数、围岩性质等因素密切相关的反射系数计算公式。然后算出将裂隙集中考虑的理论地质模型的反射系数。最后用基于声学方程的变参考慢度扩展局部 Rytov 近似傅氏偏移法 (VRSELBF) 对给定模型进行正演和偏移并分析其波场特征。

1 方法原理

1.1 含裂隙反射界面的反射系数计算公式

根据裂隙介质中的弹性波动方程可推导出裂隙型固-流混合介质中地震纵波相速度 V_p 的计算公式^[2]:

$$V_p^2 = \frac{1}{2} [a \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + b (\sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \theta)] + \frac{1}{2} \{ [c \sin^2 \theta \cos^2 \varphi - d (\sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \theta)]^2 + 4e^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi (\sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \theta) \}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, φ, θ 分别为平面纵波传播时与裂隙走向及与垂轴的夹角; a, b, c, d, e 是与裂隙密度 ϵ 密切相关的 5 个表达式的值, 具体表达式见参考文献 [2]。对于一维情况, 定义裂隙密度 ϵ 为裂隙的有效宽度 l_b 与裂隙带宽度 l_a 之比。裂隙带的等效速度 V_m 即为由式 (1) 求得的 V_p 。等效密度 ρ_m 由下式给出:

$$\rho_m = \frac{\rho_2 (l_a - l_b) + \rho_3 l_b}{l_a} \quad (2)$$

式中, ρ_2 为围岩的密度; ρ_3 为裂隙中充填物的密度。设裂隙带上覆层的密度为 ρ_1 ; 裂隙带纵波速度为 V_1 ; 裂隙围岩的纵波速度为 V_2 。则可得到含裂隙反射界面的反射系数 R_t 计算公式:

$$R_t = \frac{\rho_m V_m - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_m V_m} \quad (3)$$

[收稿日期] 2004-09-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (40174039); 国家“973”项目 (G1999043311)。

[作者简介] 杜正聪 (1975-), 男, 2000 年大学毕业, 讲师, 博士生, 现主要从事通信及地震信号处理方面的研究。

和不含裂缝的反射界面的反射系数 R_n 计算公式:

$$R_n = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \tag{4}$$

由于式(1)适用于非均匀各向异性弹性介质,且波的传播方向是任意的。而式(3)和式(4)是在均匀各向同性介质或声学介质中推导出来的,且波的传播方向是垂直入射的。因此式(3)和式(4)有一定的近似,但当目的层埋藏深(大于 5000m)时,反射波入射接近法线方向,且在裂缝带内的混合介质可视为具有等效速度 V_m 和等效介质密度 ρ_m 的均匀介质,因此简化的式(3)和式(4)具有一定的合理性和实用性,不妨称之为弹性-声学近似。

1.2 波场延拓公式

用于裂缝模型正演与偏移的波场延拓算子应具有保振幅、精度高、稳定性好的特征,能适应横向速度剧烈变化等特殊要求。为了使局部 Rytov 近似能适用于横向速度剧烈变化的裂缝模型的正演与偏移,笔者将多参考慢度 (MRS)^[3]引入到扩展局部 Rytov 近似傅氏 (ELRF) 偏移方法^[4,5]中,即在每一延拓步长内的不同区域选用不同的参考慢度以保证 Rytov 近似波场延拓算子中慢度的变化足够小。于是得到不同区域散射波场的计算式:

$$\begin{aligned} &\varphi_j^i(x, y, z_i + \Delta z; \omega) \\ &\approx F_{k_x, k_y}^{-1} \left\{ \alpha^j e^{i k_z^j(z_i) \Delta z} F_{x, y} \left[\left(\exp \left(i \omega \frac{v_0^j(z_i)}{2} \delta(M(x, y, z_i) - S_0^j(z_i)) \right) e^i(x, y, z_i) \Delta z \right) - 1 \right] P_0^i(x, y, z_i; \omega) \right\} \end{aligned} \tag{5}$$

式中, $M(x, y, z_i)$ 是空间位置和参考慢度之间的映射函数;上标 j 是在每个延拓步长内不同区域的参考慢度的标号; $v_0^j(z_i)$ 为延拓层内第 j 区域的参考速度,通常取为 $v^j(x, y, z)$ 的平均值; ω 为地震信号的频率; Δz 为延拓步长; $S_0^j(z_i)$ 为参考速度 $v_0^j(z_i)$ 的倒数; $\delta(\cdot)$ 函数的作用是当 $M(x, y, z_i) = S_0^j(z_i)$ 时其值为 1, 否则为 0;其他符号意义参见文献[3 ~ 5]。入射波场 P_0 与总波场 P 的计算公式如下:

$$P_0^i(x, y, z_i + \Delta z; \omega) \approx F_{k_x, k_y}^{-1} \{ e^{i k_z^j(z_i) \Delta z} \times F_{x, y} [\delta(M(x, y, z_i) - S_0^j(z_i)) P(x, y, z_i; \omega)] \} \tag{6}$$

$$P(x, y, z_i + \Delta z; \omega) = \sum_j P_0^i(x, y, z_i + \Delta z; \omega) \exp \left[\frac{\varphi_j^i(x, y, z_i + \Delta z; \omega)}{P_0^i(x, y, z_i + \Delta z; \omega)} \right] \tag{7}$$

在式(5),(6)中,内部的傅氏变换只在每一深度步长内进行。为减少偏移过程中的假频,可在频率域中使用巴特沃斯滤波器,并在边界上使用 Hanning 窗衰减^[6,7]。根据公式 $e^\zeta \approx 1 + \zeta$ 近似成立的条件,可得出式(5)稳定有效成立的条件是:

$$\left| \omega \frac{v_0^j(z_i)}{2} \delta(M(x, y, z_i) - S_0^j(z_i)) \max \{ e^i(x, y, z_i) \} \Delta z \right| < \beta \tag{8}$$

式中, $\max \{ e^i(x, y, z_i) \}$ 为延拓层内第 j 区间的最大慢度扰动。为了把用 $(e^\zeta - 1)$ 近似 ζ 所带来的相对误差限制在 0.5% ~ 1.0% 的范围内,根据一阶马克劳林展式的误差计算式 $\epsilon = \zeta^2 / 2!$ 可计算出式(8)中 β 的取值范围为 0.1 ~ 0.15。因为对于确定的地震信号, ω 的取值范围是确定的,不能随意减小;延拓步长 Δz 过小会引起计算量的激剧增大, Δz 不宜过大或过小;因此对于横向变速激烈的裂隙介质要使式(8)成立势必要选很多个参考慢度,其运算效率是相当低的。为此引入了随频率 ω 而变化的参考慢度选择法即变参考慢度。在具体正演、偏移实现时将频率作为最外层循环,在对不同的频率成分进行波场延拓时选用不同的参考慢度数,对于低频率成分的波场进行延拓时可以少选几个参考慢度适当增大 $e^i(x, y, z_i)$ 仍能保证成像精度并可提高运算效率。详细实现流程见文献 [7]。

2 数值模拟试验

根据新疆塔河 3 号地区奥陶系储层溶蚀缝洞的地质特征设计了 3 个地质模型 (图 1~3)。模型的顶层是深度为 5000 多米的石炭系巴楚组底部泥岩,紧接着是 20m 左右深的双峰灰岩,接下来是一层 10 多米深的风化剥蚀层,最后是碳酸盐岩的古潜山。在古潜山的顶界面给出了一组深 80m 左右、被油和水充填的垂直裂缝,这是对古潜山顶界面溶蚀裂缝的集中化、理想化、极端化模拟。用式(3)和式(4)可算出模型中各点的反射系数,再用变参考慢度 Rytov 近似傅氏偏移算子对反射系数模型作正演

和偏移。

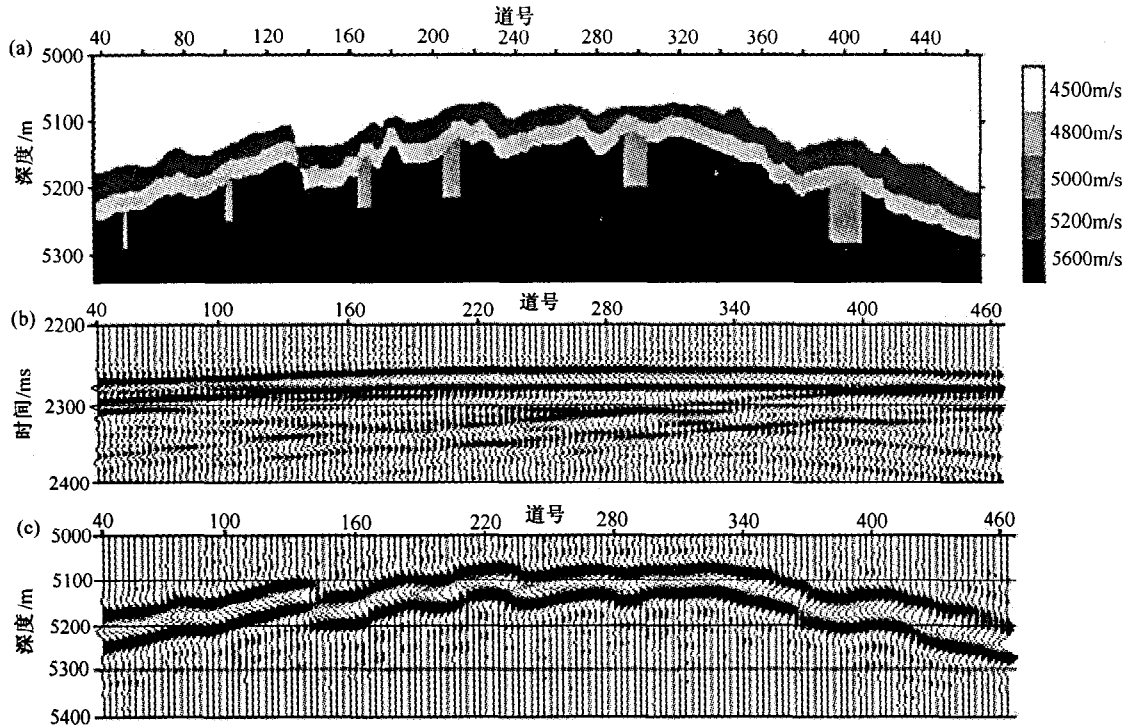


图 1 不同缝宽的裂缝模型 (a) 及其正演记录 (b)、偏移剖面 (c)

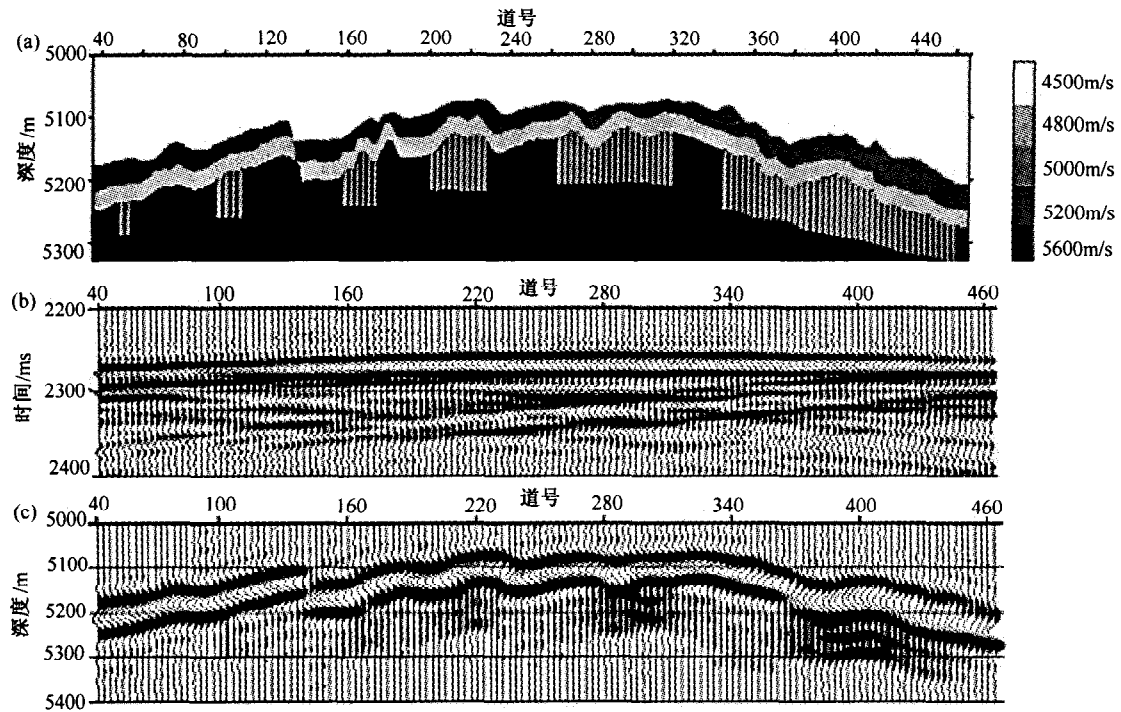


图 2 不同裂缝带宽度的裂缝模型 (a) 及其正演记录 (b)、偏移剖面 (c)

图 1 模拟的是一系列宽度不同的裂缝。在偏移剖面上, 几乎不能识别裂缝的存在; 对于大裂缝 (相当于嵌入一个非均质体), 在潜山内幕有小异常, 但不能分辨其分布范围。

图 2 模拟的是一系列缝宽相同、缝间距相同、裂缝带宽度不同的裂缝带。在偏移剖面上, 表明裂缝存在的异常非常明显。裂缝发育带反射特征表现为, 在潜山顶面反射下的低频复波, 其范围与裂缝带宽

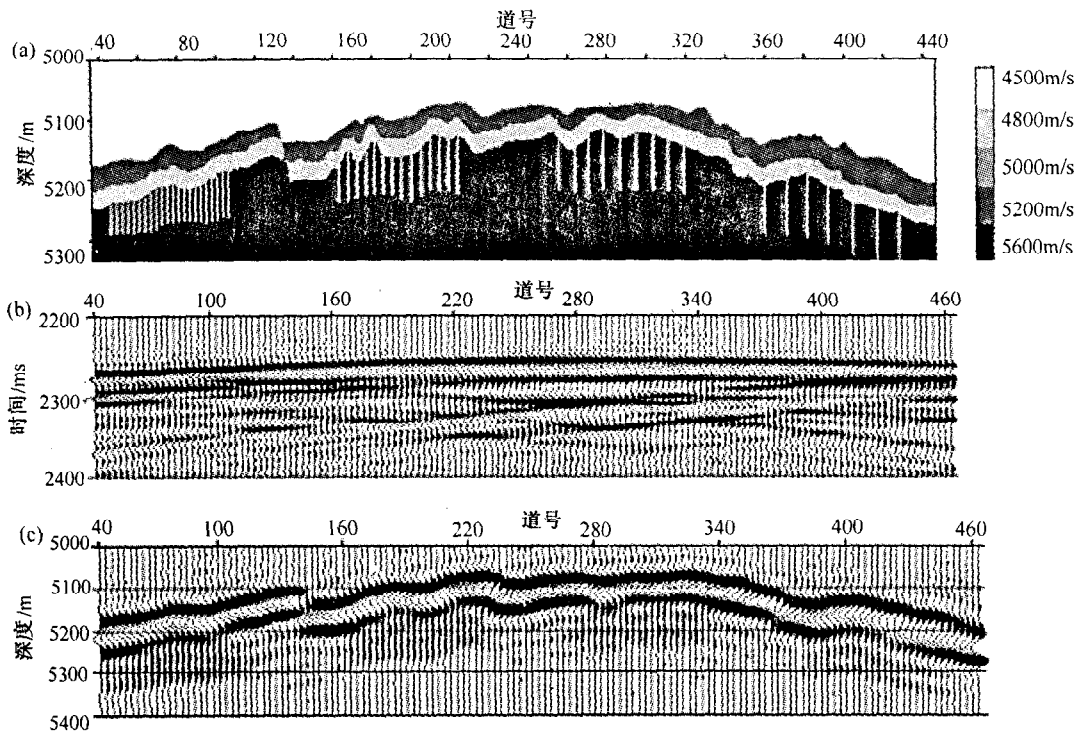


图 3 不同缝间距的裂缝模型 (a) 及其正演记录 (b)、偏移剖面 (c)

度接近, 而且, 裂缝带宽度越大, 能量越强; 在裂缝带中心, 复波能量最强。该记录对于进一步研究裂缝检测技术具有重要的指导意义。

图 3 模拟的是一系列缝宽相同、缝间距不同、裂缝带宽度保持不变的裂缝带。在偏移剖面上, 裂缝带也显示了明显的异常特征, 随着裂缝密度的增大, 低频复波的反射能量逐渐增强。与前两种情况不同的是, 潜山顶界的反射受到了影响, 局部能量明显变弱, 这可能与裂缝带的各向异性程度不同有关。

3 结论和认识

- 1) 在当前地震分辨率下, 不能识别单个裂缝, 但可以探测裂缝发育带。
- 2) 裂缝带达到一定的宽度和密度, 可以用地震方法检测裂缝的分布, 潜山内幕反射波的范围与强弱, 有利于研究裂缝发育带的宽度和密度。
- 3) 裂缝带的低频复波反射, 表明在裂缝发育带, 地震波频率减低, 则意味着用地震波的频率特征是可以检测裂缝的。上述记录中, 复波的相位数均为 2 个, 这是否与裂缝的垂向深度有关, 值得进一步研究。
- 4) 裂缝中的流体性质与地震波场特征响应也是一个研究的内容。

[参考文献]

[1] 贺振华, 桂志先, 何建军等. 裂缝型混合介质中地震波场特征数值模拟 [J]. 物探化探计算技术, 2002, 24 (增刊): 1~5.
 [2] 何樵登, 张中杰. 横向各向同性介质中地震波及其数值模拟 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1996.
 [3] Huang L J, Fehler M C, Wu R S. Extended local Rytov Fourier migration method [J]. Geophysics, 1999, 64): 1535~1545.
 [4] 陈生昌, 曹景忠, 马在田. 基于 Rytov 近似的叠前深度偏移方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36 (6): 690~697.
 [5] 贺振华, 王才经, 李建朝等. 反射地震资料偏移处理与反演方法 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
 [6] 贺振华, 黄德济, 胡光岷等. 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.
 [7] 杜正聪, 贺振华, 蒲利春等. 变参考慢度 Rytov 近似傅氏偏移算法 [J]. 石油大学学报, 2004, 28 (1): 31~34.

[编辑] 弘文