

双相各向异性随机介质伪谱法地震波场特征分析*

李红星^{1)2)†} 陶春辉²⁾³⁾

1) 东华理工大学核工程技术学院, 抚州 344000)

2) 国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012)

3) 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

(2008 年 8 月 4 日收到, 2008 年 9 月 4 日收到修改稿)

各向异性、双相孔隙以及非均匀性是描述油气储层时应综合考虑的。结合随机介质理论和双相介质模型建立了双相各向异性随机介质模型, 采用伪谱法模拟了双相各向异性随机介质地震波场。结果表明: 双相各向异性随机介质地震波场存在散射波、旅行时扰动等复杂的波场特征, 这些特征强烈依赖于随机介质模型参数。在大非均匀空间尺度下, 非均匀幅度主要影响波的旅行时扰动; 在小非均匀空间尺度下, 非均匀幅度主要影响波的散射。该研究使人们有可能在统计意义下反演油气储层的非均匀特征, 有益于加深对地震波在油气储层中传播规律的认识。

关键词: 双相各向异性, 随机介质, 伪谱法, 地震波

PACC: 9130F, 7530G, 0240

1. 引 言

实际地球介质, 特别油气储集层是一个复杂的介质系统。随着对地层岩石性质认识的深入和地震波理论的发展, 人们研究的介质模型与实际情况日益接近。Biot^[1-5] 早期发表的一系列文章建立了孔隙各向异性介质理论。Dvorkin 和 Nur^[6] 建立了 Biot 喷射流 (BISQ) 模型, Parra^[7,8] 将这一理论推广到横向各向同性双相介质情况。杨顶辉等^[9,10] 基于固-流耦合思想, 建立了一般含流体多孔隙各向异性介质中的弹性波波动方程。在 1978 年以后, Crampin^[11-13] 证实了裂隙诱导各向异性和横波分裂的存在, 并提出了扩张各向异性模型。此后, 地震各向异性的研究逐渐成为地震学的前沿和热点, 每年都有大量的研究成果公开和论文发表, 尤其在各向异性弹性波的正演方面^[14-17]。国内研究者在弹性各向异性介质及双相、黏弹各向异性介质中的波场特征分析、振幅与炮检距关系分析、弹性参数反演等方面做了大量的研究工作^[18-26]。但是这些介质模型仅考虑

了介质的各向异性和孔隙特征, 却忽略了实际介质所具有的非均匀随机性。近年来, 已经认识到大地模型的非均匀特性是影响地震波整体特征的关键因素, 一些文献已对随机介质中的声波或弹性波场特征进行了讨论^[27-31]。在前人研究的基础上, 利用随机介质和 BISQ 模型建立了双相各向异性随机介质模型。采用伪谱法正演模拟了双相各向异性随机介质地震波, 发现双相各向异性随机介质模型对应的地震记录中有散射波、旅行时扰动、地震波尾等复杂的波场特征。当非均匀的空间尺度以及非均匀幅度变化时, 研究波场特征的变化特点, 发现波的散射形式强烈依赖于介质的统计特性。在大非均匀空间尺度下, 非均匀幅度主要影响波场的旅行时扰动; 在小非均匀空间尺度下, 非均匀幅度主要影响波场的散射。该研究使人们有可能在统计的意义下反演出介质在小尺度上的非均匀特征, 有益于加深对地震波在实际地球介质中传播规律和油气储层描述的认识。

* 海洋公益性行业科研专项经费(批准号: 200805005)、国家自然科学基金(批准号: 40776038, A9906004)、地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学, 北京)开放课题(批准号: GDL0802)、国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费(批准号: JT0802)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2005AA615040)和国家海洋局青年海洋科学基金(批准号: 2007311)资助的课题。

† E-mail: redstar_li@sina.com

2. 双相各向异性随机介质模型

基于 BISQ 模型的双相各向异性介质中波传播方程^[10]为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha} \nabla P = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_1 \mathbf{u} + \rho_2 \mathbf{U}), \quad (1)$$

$$-\nabla(\phi P) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (-\rho_a \mathbf{u} + \rho_{22} \mathbf{U}) + \eta \phi^2 \gamma \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{U} - \mathbf{u}), \quad (2)$$

$$P = -\nabla \cdot (\mathbf{F} \mathbf{S} \mathbf{U}) - (\mathbf{F} \mathbf{S} \frac{\boldsymbol{\alpha} - \phi \mathbf{I}}{\phi}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$ 为应力张量, \mathbf{A} 排空情况下孔隙介质弹性常数矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为固体应变张量, $\boldsymbol{\alpha}$ 为有效应力之孔隙弹性系数张量, P 为流体压力, \mathbf{F} 为 Biot 流系数张量, \mathbf{S} 为喷射流系数张量, \mathbf{u} 和 \mathbf{U} 分别表示固体和流体的位移, ϕ 为孔隙度, η 为流体黏滞系数, γ 为流体阻抗系数张量(渗透率 κ 的倒数), $\rho_1 = (1 - \phi)\rho_s$, ρ_s 为固体密度, $\rho_2 = \phi\rho_f$, ρ_f 为流体密度, ρ_a 为固-流耦合密度张量, $\rho_{22} = \phi\rho_s \mathbf{I} + \rho_a$.

为了便于讨论,在此仅考虑排空情况下孔隙介质弹性系数引起的各向异性,并假设弹性系数矩阵各量的相对扰动是相同的,从而可以只用一个相对扰动量来描述随机介质在小尺度上的非均匀性.考虑空间随机介质扰动的孔隙介质弹性系数可以表示为

$$A = A_0(1 + \delta), \quad (4)$$

其中, A_0 为背景弹性系数, δ 表示空间随机介质扰动.高斯型及指数型椭圆自相关函数^[29-31]被广泛地用于随机介质模型及散射现象的研究,本文使用如下形式的高斯型椭圆自相关函数:

$$\varphi(x, z) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2}\right)\right]. \quad (5)$$

由自相关函数生成随机介质模型的计算公式为

$$\delta'(x, z) = \text{FT}^{-1}\{\sqrt{\text{FT}}[\varphi(x, z)] \times \exp[i\theta(k_x, k_z)]\}, \quad (6)$$

其中, a, b 为 x, z 方向的自相关长度,表征随机介质模型变化的尺度, a, b 越大,随机模型变化尺度越大. $\text{FT}, \text{FT}^{-1}$ 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换; $\theta(k_x, k_z)$ 为随机相位谱,通常为在二维空间上取值在 $[-\pi, \pi]$ 范围,具有均匀分布的伪随机数.

通过规范化^[29-31]产生均值为零,方差为 e ,并以 $\varphi(x, z)$ 为自相关函数的随机扰动,即

$$\delta(x, z) = \frac{e}{d} [\delta'(x, z) - \bar{\mu}], \quad (7)$$

其中, d^2 为 δ' 的方差, $\bar{\mu}$ 为 δ' 的平均值.

3. 伪谱法波场数值模拟

伪谱法^[27]又称为傅里叶变换法,主要特点是空间微分利用傅里叶变换,时间微分采用差分格式.傅里叶变换法的主要优点是空间网格可以较大,计算精度非常高.其对时间的二阶微分的差分格式如下:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{u(t + \Delta t) - 2u(t) + u(t - \Delta t)}{(\Delta t)^2}; \quad (8)$$

对空间的二阶微分为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(x) \exp(i2\pi k_x x) dk_x \\ &= -4\pi^2 \sum_j \left(\frac{j}{ND}\right)^2 \tilde{p}\left(\frac{j}{ND}\right) \\ &\quad \times \exp\left(i2\pi \frac{j}{ND} x\right) \frac{1}{ND}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\tilde{p}(k_x)$ 是 $p(x)$ 的傅里叶变换.

本文数值模拟空间网格间距选择 20 m,网格大小为 128×128 ,时间步长为 0.001 s.震源采用雷克子波,位于空间网格中心.为了便于分析双相各向异性随机介质中的波场特征,分别在均匀双相各向异性介质和不同参数的随机介质模型进行波场数值模拟.均匀介质模型参数选取如下: $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{ax} = 450 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{az} = 420 \text{ kg/m}^3$,固相体积模量 $K_s = 38 \text{ GPa}$,流相体积模量 $K_f = 2.25 \text{ GPa}$, $\phi = 0.25$,渗透率 $k_{11} = 0.4 \text{ mD}$, $k_{33} = 1.5 \text{ mD}$,固体弹性常数为 $A_{11} = 15.6 \text{ GPa}$, $A_{13} = 6.11 \text{ GPa}$, $A_{33} = 26.4 \text{ GPa}$, $A_{44} = 4.38 \text{ GPa}$, $A_{66} = 6.84 \text{ GPa}$,喷射流长度 $R_1 = 2 \text{ mm}$, $R_3 = 1 \text{ mm}$, $\eta = 0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,主频率 $f_c = 20 \text{ Hz}$.双相各向异性随机介质的随机扰动模型参数选取不同参数组合,见图 1.上述不同介质中在 320 ms 时刻的波场快照模拟结果如图 2 所示.为了更好地研究介质的非均匀性对波场传播的影响,对比了不同位置质点在不同介质模型中的震动(图 3).此外,研究了双层双相各向异性随机介质的反射与透射,分别模拟了双层均匀介质波场快照与双层双相各向异性随机介质波场快照.双层均匀介质参数如下:第一层 $A_{11} = 15.6 \text{ GPa}$, $A_{13} = 6.11 \text{ GPa}$, $A_{33} = 26.4 \text{ GPa}$, $A_{44} = 4.38 \text{ GPa}$, $A_{66} = 6.84 \text{ GPa}$;第二层 $A_{11} = 30.9 \text{ GPa}$, $A_{13} = 12.3 \text{ GPa}$, $A_{33} = 52.2$

GPa , $A_{44} = 9.83 \text{ GPa}$, $A_{66} = 12.1 \text{ GPa}$. 双层随机介质参数如下: 第一层介质为均匀双相各向异性介质, 第二层为随机介质模型, 第一层均匀介质和第二层背景弹性参数与双层均匀介质模型第一层和第二层相同. 第二层随机扰动介质模型参数选取为 $e = 0.2$, $a = b = 200 \text{ m}$. 模拟结果见图 4.

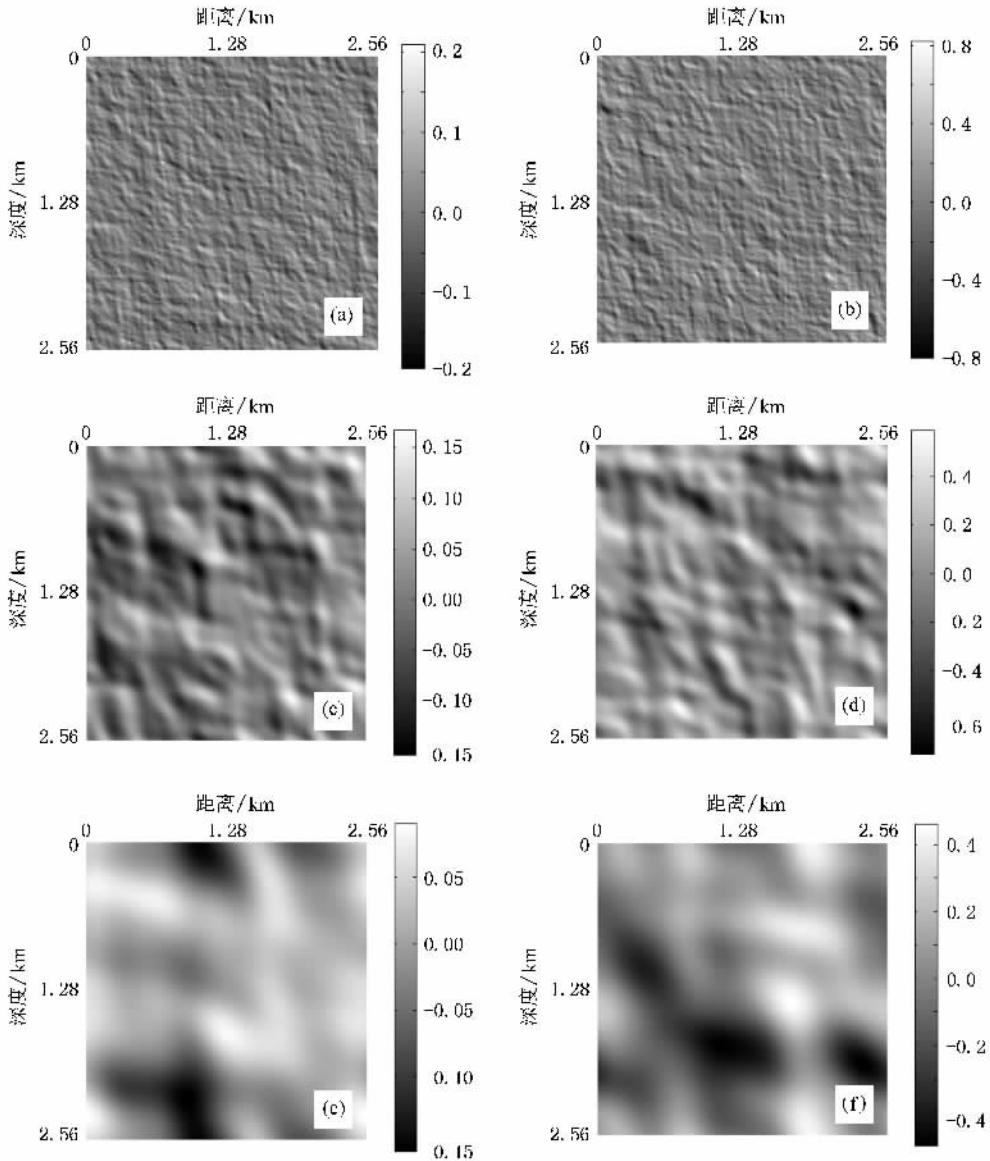


图 1 随机介质模型 (a) $e = 0.05$, $a = b = 40 \text{ m}$ (b) $e = 0.2$, $a = b = 40 \text{ m}$ (c) $e = 0.05$, $a = b = 200 \text{ m}$ (d) $e = 0.2$, $a = b = 200 \text{ m}$ (e) $e = 0.05$, $a = b = 600 \text{ m}$ (f) $e = 0.2$, $a = b = 600 \text{ m}$

4. 波场特征分析

在波场模拟结果中, 观测到快纵波与横波, 没有慢纵波, 这是由于在低频条件下 BISQ 模型产生的高衰减所引起的, 这与实际地震勘探资料中通常观测

不到慢纵波是一致的. 在各向异性双相介质中纵波波前面呈椭圆状, 横波出现横波分裂现象(图 2), 这充分体现了各向异性引起的波场特征.

在小尺度非均匀情况下 ($a = b = 40 \text{ m}$), 波场散射特征比较明显, 并且随着随机介质模型方差增大, 即非均匀幅度的增加, 波场的散射特征明显增加, 但

波场在方向上的旅行时并没有出现明显扰动. 这主要是随机介质模型的均值为零, 在小尺度非均匀的情况下, 波的各传播方向上的速度统计效果和均匀介质相差不大, 而小尺度的非均匀体更容易引起复杂的波场散射特征.

在较大非均匀尺度下 ($a = b = 200 \text{ m}$), 与小尺

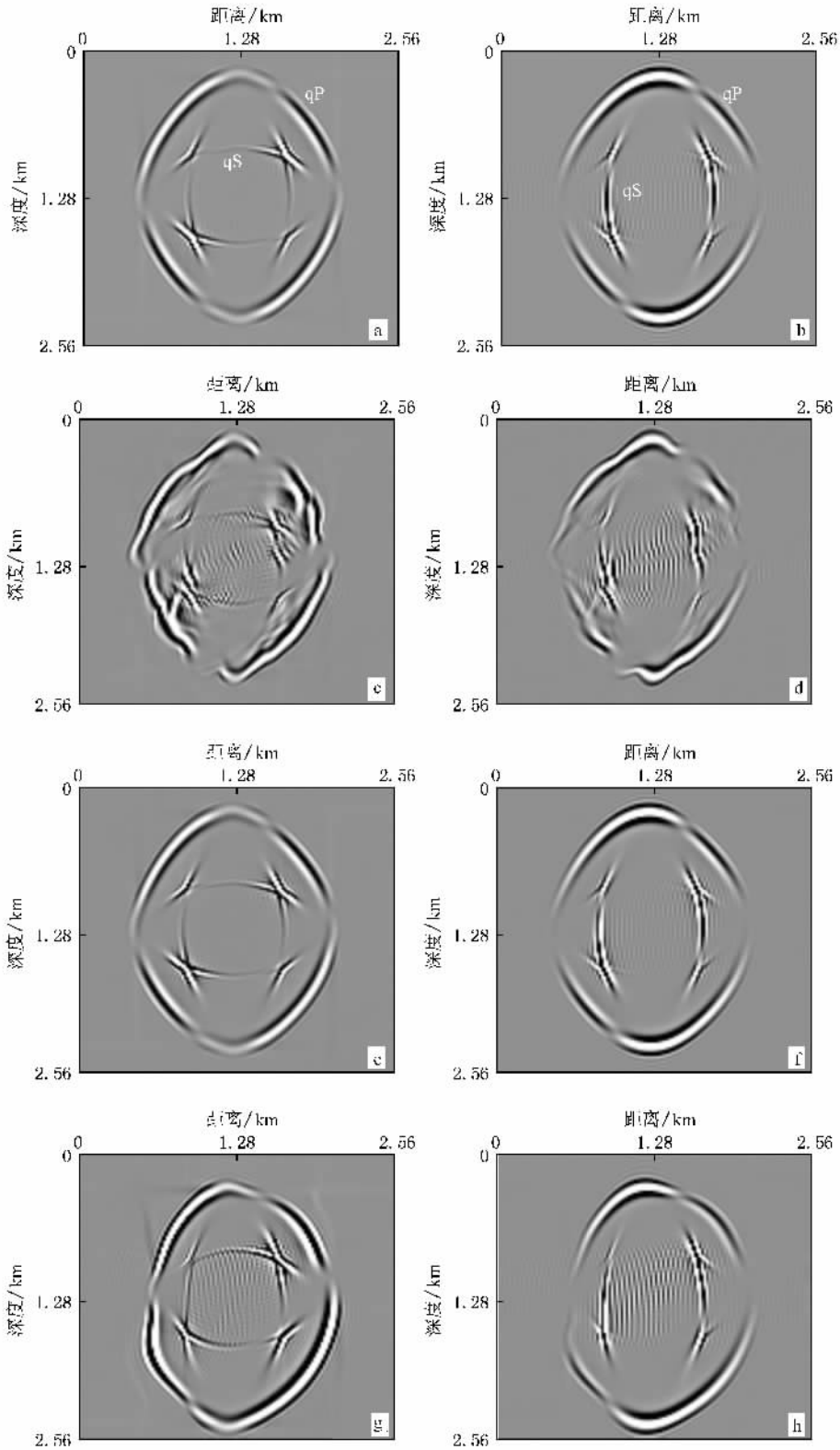


图2 双相各向异性均匀及随机介质波场快照 图中标记 qP 表示快纵波, qS 表示横波。(a) 均匀介质, x 分量; (b) 均匀介质, z 分量 (c) $e = 0.05$, $a = b = 40$ m, x 分量 (d) $e = 0.2$, $a = b = 40$ m, x 分量 (e) $e = 0.05$, $a = b = 200$ m, x 分量 (f) $e = 0.2$, $a = b = 200$ m, x 分量 (g) $e = 0.05$, $a = b = 600$ m, x 分量 (h) $e = 0.2$, $a = b = 600$ m, x 分量

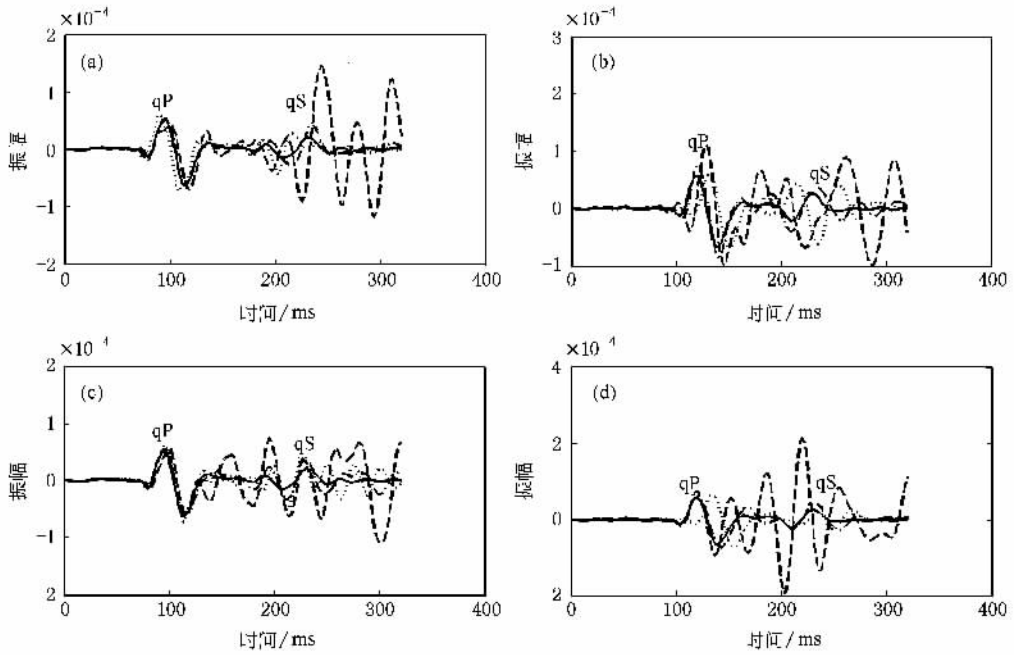


图 3 双相各向异性均匀及随机介质中某质点振动图 位置分别为(a) $(1.28 \text{ km}, 1 \text{ km})$ (b) $(1 \text{ km}, 1.28 \text{ km})$ (c) $(1.28 \text{ km}, 1.56 \text{ km})$ (d) $(1.56 \text{ km}, 1.28 \text{ km})$ 其中, — 均匀介质; - - $e = 0.05, a = b = 40 \text{ m}$; ··· $e = 0.2, a = b = 200 \text{ m}$

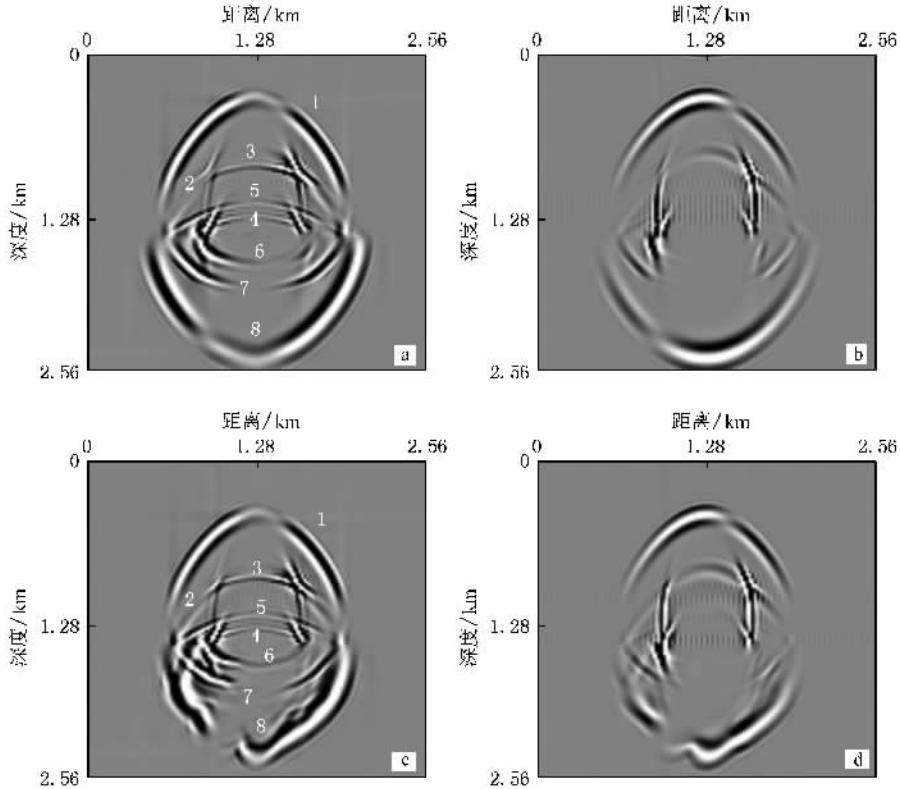


图 4 双层双相各向异性均匀及随机介质波场快照 (a) 均匀介质, x 分量 (b) 均匀介质, z 分量 (c) $e = 0.2, a = b = 200 \text{ m}$, x 分量 (d) $e = 0.2, a = b = 200 \text{ m}$, z 分量. 1 为纵波 2 为反射纵波 3 为横波 4 为反射横波 5 为反射转换波 6 为透射横波 7 为透射转换波 8 为透射纵波

度非均匀情况相对比可知,在相同随机介质模型方差情况下,波场的散射特征明显减少,而波场各方向的旅行时扰动明显增加。从图 2 可以发现,在较大非均匀尺度下,随着非均匀幅度的增加,波场的散射特征也有所增加,但波场的旅行时扰动更加明显。

在更大非均匀尺度下($a = b = 600 \text{ m}$),波场的散射特征更加微弱,在较小非均匀幅度情况下波场的旅行时扰动也较小,但在较大非均匀幅度情况下,波场的旅行时扰动呈现出大方向尺度上的剧烈扰动。

在不同介质模型中观察某质点的振动(图 3)也可以清楚地看出:在均匀介质中纵波和横波到达区分很好,基本没有散射干扰特征。在 $a = b = 40 \text{ m}$, $e = 0.05$ 时的非均匀介质模型中,波场的旅行时出现轻微的扰动现象,并且出现一定的散射能量。在 $a = b = 40 \text{ m}$, $e = 0.2$ 时的非均匀介质模型中,波场的旅行时出现轻微的扰动现象,散射能量很大,已经很难在其中区分出横波能量。在 $a = b = 200 \text{ m}$, $e = 0.2$ 时的非均匀介质模型中,波场的旅行时出现较大的扰动现象,但是散射能量明显减少。

在双层介质模型波场模拟中,观测到了纵波、反

射纵波、横波、反射横波、反射转换波、透射横波、透射转换波、透射纵波(图 4)。由于第二层介质为随机模型介质,透射波场产生散射特征和旅行时扰动特征。

5. 结 论

利用随机介质和 BISQ 模型建立了双相各向异性随机介质模型,体现了地层的各向异性、孔隙性以及非均匀性,更加接近现实地层和油气储层。采用伪谱法正演模拟了双相各向异性随机介质地震波,发现双相各向异性随机介质模型对应的地震记录中有散射波、旅行时扰动、地震波尾等复杂波场特征,这些特征强烈地依赖随机介质模型参数,反映出非均匀尺度和幅度信息。研究结果表明:在大非均匀空间尺度下,非均匀幅度主要影响波场的旅行时扰动;在小非均匀空间尺度下,非均匀幅度主要影响波场的散射。该研究使人们有可能在统计的意义下反演出介质在小尺度上的非均匀特征,有益于加深对地震波在实际地球介质中传播规律和油气储层描述的认识。

- [1] Biot M A 1941 *J. Appl. Phys.* **12** 155
- [2] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 168
- [3] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 179
- [4] Biot M A 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1254
- [5] Biot M A 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **42** 1616
- [6] Dvorkin J, Nur A 1993 *Geophysics* **58** 524
- [7] Parra J O 1997 *Geophysics* **62** 309
- [8] Parra J O 2000 *Geophysics* **65** 201
- [9] Yang D H, Zhang Z J 2002 *Wave Motion* **35** 223
- [10] Yang D H 1998 *Postdoctoral Dissertation* (Beijing: University of Petroleum) p7 (in Chinese) [杨顶辉 1998 博士后出站报告(北京:石油大学)第 7 页]
- [11] Crampin S 1978 *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **53** 467
- [12] Crampin S 1981 *Wave Motion* **3** 343
- [13] Crampin S 1984 *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **76** 135
- [14] Byun B S 1984 *Geophysics* **49** 1908
- [15] Carcione J M, Kosloff D A 1992 *Geophysics* **57** 1593
- [16] Igel H, Mora P, Rioulet B 1995 *Geophysics* **60** 1203
- [17] Dai V, Vafielis A 1995 *Geophysics* **60** 327
- [18] Li H X, Liu C, Tao C H 2007 *Oil Geophys. Prospe.* **42** 686 (in Chinese) [李红星、刘 财、陶春辉 2007 石油地球物理勘探 **42** 686]
- [19] Zhang Z J, He J D 1989 *Oil Geophys. Prospe.* **24** 290 (in Chinese) [张中杰、何樵登 1989 石油地球物理勘探 **24** 290]
- [20] Zhang Z J, Teng J W, He Z H 2000 *Sci China E* **29** 569 (in Chinese) [张中杰、滕吉文、贺振华 1999 中国科学 E **29** 569]
- [21] Zhang Z J, Wang G J, Harris J M 1999 *Phys. Earth Planet. Int.* **114** 25
- [22] Du Q Z, Yang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2101 (in Chinese) [杜启振、杨慧珠 2002 物理学报 **51** 2101]
- [23] Du Q Z, Yang H Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2801 (in Chinese) [杜启振、杨慧珠 2004 物理学报 **53** 2801]
- [24] Du Q Z, Yang H Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2010 (in Chinese) [杜启振、杨慧珠 2003 物理学报 **52** 2010]
- [25] Du Q Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4428 (in Chinese) [杜启振 2004 物理学报 **53** 4428]
- [26] Du Q Z, Liu L L, Sun J B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6143 (in Chinese) [杜启振、刘莲莲、孙晶波 2007 物理学报 **56** 6143]
- [27] Korn M 1993 *J. Appl. Phys.* **29** 247
- [28] Ikelle L, Yung S, Daube F 1993 *Geophysics* **58** 1359
- [29] Xi X, Yao Y 2001 *OGP* **36** 546 (in Chinese) [奚 先、姚 姚 2001 石油地球物理勘探 **36** 546]
- [30] Xi X, Yao Y 2002 *Earth Sci. — J. China Univ. Geosci.* **27** 67 (in Chinese) [奚 先、姚 姚 2002 地球科学——中国地质大学学报 **27** 67]
- [31] Xi X, Yao Y 2004 *OGP* **39** 381 (in Chinese) [奚 先、姚 姚

2004 石油地球物理勘探 39 381]

Features analysis of seismic wave field in two-phase anisotropic random medium with the pseudo-spectral method^{*}

Li Hong-Xing^{1 2 3)†} Tao Chun-Hui^{2 3)}¹ *College of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China*² *Key Laboratory of Submarine Geoscience, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*³ *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*

(Received 4 August 2008 ; revised manuscript received 4 September 2008)

Abstract

The anisotropy, two-phase pore and nonuniformity must be considered comprehensively in order to describe the oil and gas reservoirs accurately. Consequently a two-phase anisotropic random medium model based on the two-phase model and random medium theory is presented in this paper. The seismic wavefield numerical modeling was simulated by using the pseudo-spectral method. The results show that there exist complex wave field features such as wave scattering and traveling time disturbance and these features strongly depend on parameters of the random medium model, the nonuniformity rate mainly impacts the wave traveling time disturbance when spatial scale of nonuniformity is large and mainly impacts wave scattering when spatial scale of nonuniformity is small. The studies make it possible to retrieve the nonuniformity on statistical basis and are useful to understanding more deeply the seismic wave propagation in oil and gas reservoirs.

Keywords: two-phase anisotropy, random medium, pseudo-spectral method, seismic wave

PACC: 9130F, 7530G, 0240

^{*} Project supported by the Ocean Public Welfare Scientific Research Special Appropriation Project (Grant No. 200805005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 49906004, 40776038), the Open Fund of Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education (Grant No. GDL0802), the Scientific Research Fund of the Second Institute of Oceanography, SOA (Grant No. JT0802), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2005AA615040) and the Youth Ocean Science Foundation of State Oceanic Administration, China (Grant No. 2007311).

[†] E-mail: redstar_li@sina.com