

天然气勘探

横向变速小尺度体反射系数变化规律研究

李胜军, 高建虎, 赵应成, 刘卫华, 刘军迎

(中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: AVO 技术的研究已有 30 多年的发展历程, 其中有起有落。近年来 AVO 技术的应用日趋广泛, 发展较快。在寻找非均质油气藏方面, AVO 技术具有其他方法不可替代的作用。通过对横向小尺度体的模型设计, 正演模拟的计算及与 Zoeppritz 方程计算理论值的对比, 讨论了横向小尺度体大小变化、速度变化对反射系数的影响, 得出了横向尺度大小及速度变化对反射系数的影响规律, 总结了横向变速时反射系数随偏移距的变化规律。

关键词: 横向变速; 小尺度体; 反射系数; Zoeppritz 方程

中图分类号: TE132.1⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2011)05-0878-06

引用格式: 李胜军, 高建虎, 赵应成, 等. 横向变速小尺度体反射系数变化规律研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 878-883.

0 引言

AVO (Amplitude Versus Offset) 技术是根据振幅随炮检距的变化规律所反映出的地下岩性及其孔隙流体的性质来直接预测油气和估计地壳岩性参数的一项技术^[1]。孙鹏远等^[2]对基于 Zoeppritz 近似的各种反射系数近似方法进行了归类 and 对比, 目前大多数的 AVO 研究是在均匀介质或各向异性介质^[3-7]前提下对 Zoeppritz 方程的近似。但我国大部分油气藏的储层非均质性很强, 如何有效地预测非均质性储层是油气勘探开发的一个关键环节。现有的储层预测方法大多是基于水平层状介质和均匀介质模型, 不能满足非均质储层预测的需求。因而, 必须对非均质储层反射系数随介质弹性参数的变化情况进行深入地研究。

在横向均质或大尺度横向变速的情况下, Zoeppritz 方程及其简化式可以很好地描述地层的反射系数。在小尺度横向变速的情况下, 现有的反射系数表达式是否适用, 怎样才能有效地描述地下介质的真实情况? 当前国际上对小尺度横向变速情况下反射系数近似式的研究很少, 且主要从各向异性角度出发, 根据各向异性的各个参数对 Zoeppritz 方程近似式进行修正, 不能应用到实际的 AVO 分析和

叠前反演之中。横向小尺度如何定义、变速范围如何界定, 横向小尺度变速体对反射系数影响程度是多大, 横向小尺度变速情况下近似公式如何入手, 这一系列问题都急需解决。

针对上述问题, 利用弹性波有限差分模拟算法做模型分析, 建立不同尺度的小尺度体, 变化小尺度体内的速度, 对横向小尺度变速体的反射系数进行分析, 探索反射系数随尺度体大小的变化规律及其与岩性变化的关系, 促进非均质储层预测技术的发展。

1 方法原理

由最基本的应力、应变关系和牛顿第二定律可以导出各向同性、完全弹性、非均匀介质中波动方程^[8-11]。

$$\frac{\partial g^x}{\partial t} = Q \frac{\partial f^x}{\partial x} + L \frac{\partial f^y}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial g^y}{\partial t} = Q \frac{\partial f^y}{\partial y} + L \frac{\partial f^x}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial g^s}{\partial t} = Q^* \left(\frac{\partial f^x}{\partial y} + \frac{\partial f^y}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f^x}{\partial t} = P \left(\frac{\partial g^x}{\partial x} + \frac{\partial g^s}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial f^y}{\partial t} = P \left(\frac{\partial g^s}{\partial x} + \frac{\partial g^y}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式(2)—式(5)中: f^x 、 f^y 为质点速度; g^x 、 g^y 为法线

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2011-04-01.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2007CB209604); 国家科技重大专项(编号: 2011ZX05007-06)联合资助。

作者简介: 李胜军(1979-), 男, 山东成武人, 工程师, 硕士, 主要从事地震波传播及正演模拟研究. E-mail: li_sj@petrochina.com.cn.

压力; g^s 为剪切力。

$$Q = \lambda + 2\mu = \rho \alpha^2 \quad Q^s = \mu = \rho \beta^2$$

$$L = \lambda = Q - 2Q^s$$

式中: ρ 为密度; $P = \frac{1}{\rho}$; α 为纵波速度; β 为横波速度。采用交错网格算法对式(1)—式(5) 进行离散,该方法计算效率高,且适用于非均匀介质、复杂构造和复杂地质体的地震波场数值模拟。

2 模型应用与分析

对于横向均质或大尺度横向变速模型,前人已做过较多研究,设计比较简单,反射系数可通过近似方程求取。而横向变速小尺度体的反射系数研究较少,尚未有横向小尺度变速情况下反射系数近似公式,因此也未见成熟模型。由于波动方程模拟算法适用于各种复杂构造与非均质体的数值模拟,为此在模型设计时做了一些简化,在均匀介质中加入一个尺度体($\lambda, \lambda/2, \lambda/4, \lambda/8$) (图 1a),通过全波动方程数值模拟来研究小尺度体对反射系数的影响及响应特征。

为总结横向变速小尺度体反射系数的变化规律,通过弹性波有限差分数值解的手段,对横向小尺度变速体的反射系数进行分析,在模拟过程中为减少地震波的传播影响,检波器放在距离目的层上方 50~100 m 附近。子波主频采用 30 Hz,对模型生成单炮记录(图 1b),在炮记录上分别拾取直达纵波和反射纵波的振幅极大值,进一步求取反射系数。通过改变小尺度体内的弹性参数,研究弹性参数对小尺度体反射系数的影响,通过改变尺度体的大小研究尺度体本身对反射系数变化规律的影响。对模型 1 下界面为均匀介质的情况用波动方程求取的反射系数与 Zoeppritz 方程求取的反射系数理论值进行比较,误差不到 1%。王建花^[12] 也做过类似的验证,证实了该方法对反射系数的求取是精确的。

图 1 模型中上层介质参数纵波速度为 2 192 m/s,横波速度为 818 m/s,密度为 2.160 g/cm³;下层介质参数纵波速度为 1 543 m/s,横波速度为 951.5 m/s,密度为 1.973 g/cm³。小尺度体宽度为一个 λ ,尺度体内纵波速度值依次从 1 543 m/s 变为 1 550 m/s、1 570 m/s、1 580 m/s、1 590 m/s。

图 2 为尺度体内速度变化时反射系数随入射角的关系曲线。从图中可以看出随着尺度体内速度的增加反射系数在小尺度体附近发生跳动,反射系数的绝对值在减小。

为进一步对比小尺度体内速度变化对反射系数的影响,做变化前与变化后的残差,如图 3 所示,图中黑、红、蓝、紫依次为尺度体为 1 550 m/s、1 570 m/s、1 580 m/s、1 590 m/s 时与 1 543 m/s 时反射系数的残差。从图 3 可以看出,随着速度的增加,反射系数曲线的变化率在明显增大。

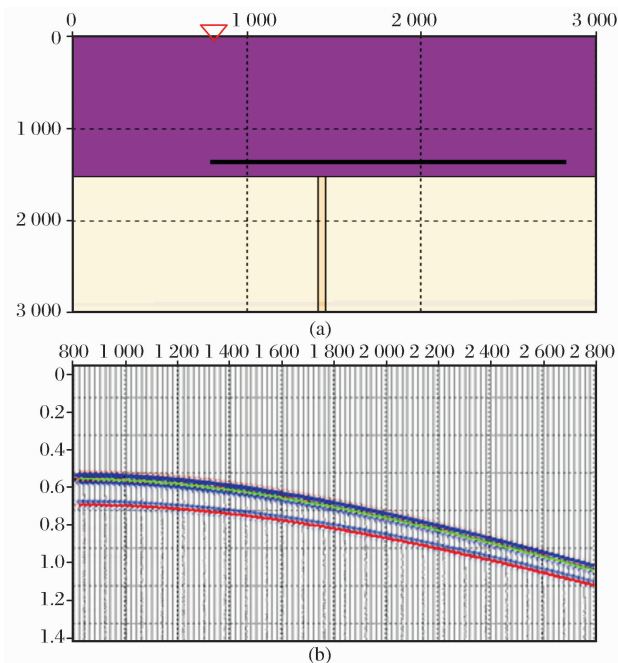


图 1 小尺度体宽度为 λ 时的模型(a)和单炮记录(b)

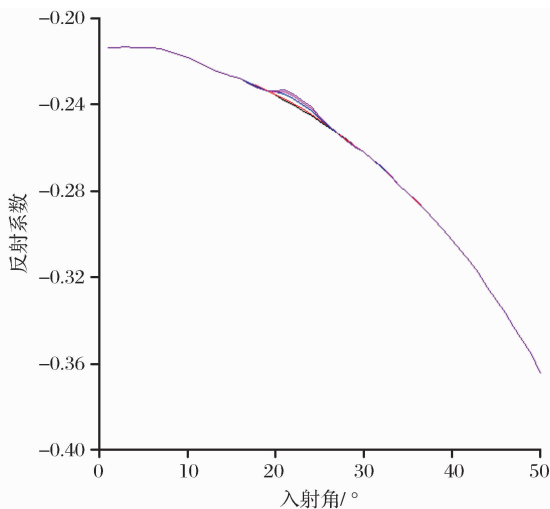


图 2 反射系数随入射角的变化特征

减小尺度体的宽度到 $\lambda/2$,模型中介质参数与图 1 相同。图 4 是尺度体内不同速度情况下反射系数随入射角变化的关系曲线,从图中可以看出,随着小尺度体内速度的增加,小尺度体位置附近的反射系数的绝对值在减小,但相对尺度体宽度为 λ 时的情况,反射系数变化幅度有所减小。从弹性参数变化前后反射系数残差曲线(图 5)与图 3 的曲线相比,

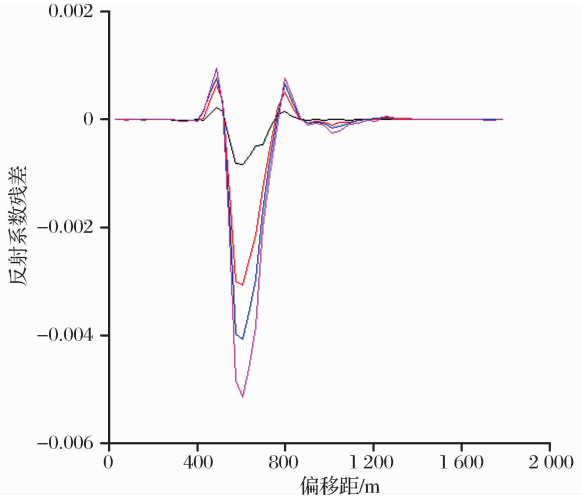


图 3 反射系数变化与偏移距的关系

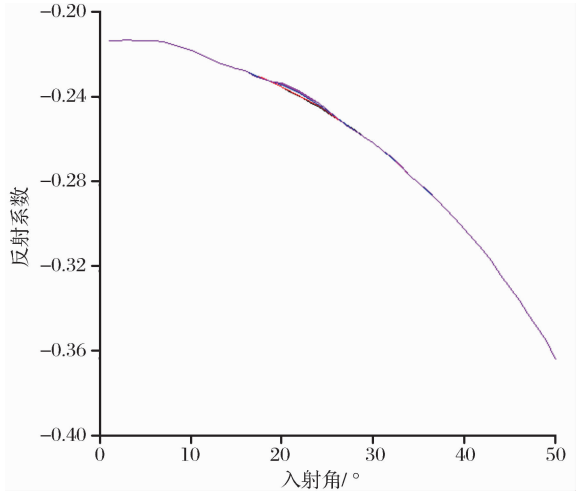


图 4 反射系数随入射角的变化

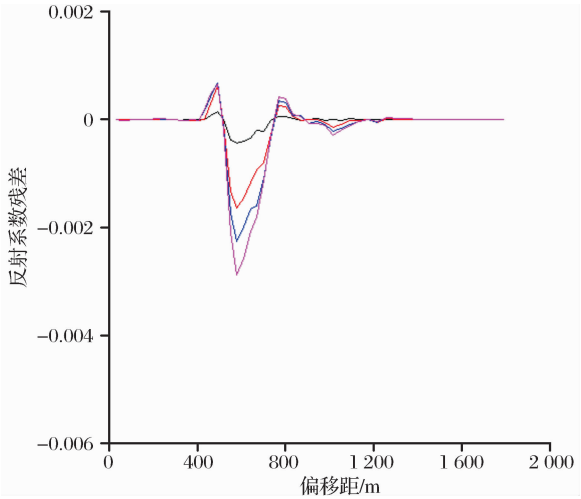


图 5 反射系数变化与偏移距的关系

反射系数的变化影响是较明显的。

进一步减小小尺度体的宽度到 $\lambda/4$, 模型参数与图 1 中的参数相同。从图 6 可看出, 在 20° 附近反射系数随尺度体内速度的增加跳动幅度不是很明显。图 7 反射系数变化与偏移距关系曲线与图 3 尺度体为 λ 的情况相对比, 更能明显的发现, 反射系数的变化率明显减小。

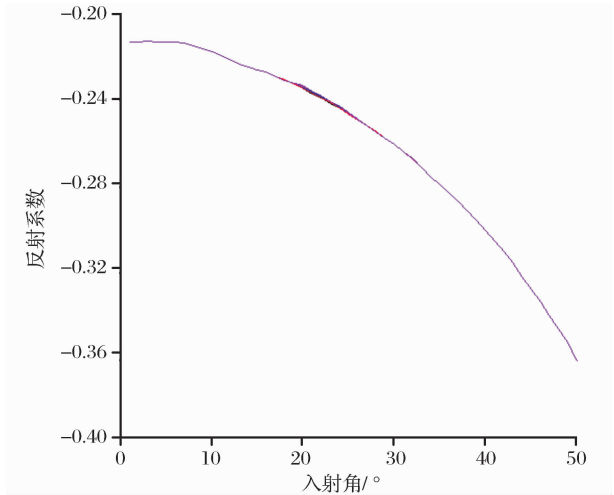


图 6 反射系数随入射角的变化

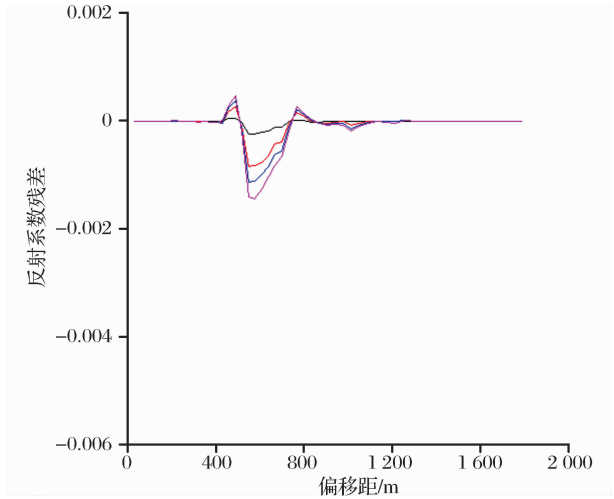


图 7 反射系数变化与偏移距的关系

进一步减小小尺度体的宽度到 $\lambda/8$, 模型参数与图 1 中的参数相同。图 8 中反射系数变化曲线由小尺度体引起的震动已非常微弱, 从图 9 中的定量变化可以看出, 在速度为 1590 m/s 时跳动最大值为 0.0007 , 相对尺度体为 $\lambda/4$ 时的情况, 减小了 50% , 可见在尺度进一步减小时, 相对速度变化而言, 尺度体的大小对反射系数的影响起着主要作用。

图 10 中上层介质参数: 纵波速度为 2192 m/s , 横波速度为 818 m/s , 密度为 2.160 g/cm^3 ; 下层介质参数: 纵波速度为 1543 m/s , 横波速度为 951.5 m/s ,

可以更加明显地看到受小尺度体减小的影响, 反射系数的变化率也有所减小, 在尺度为 $\lambda/2$ 时变化量最大值在 0.003 之内, 而尺度体为 λ 时变化最大值在 0.005 左右, 减小了 60% , 可见尺度体的大小对

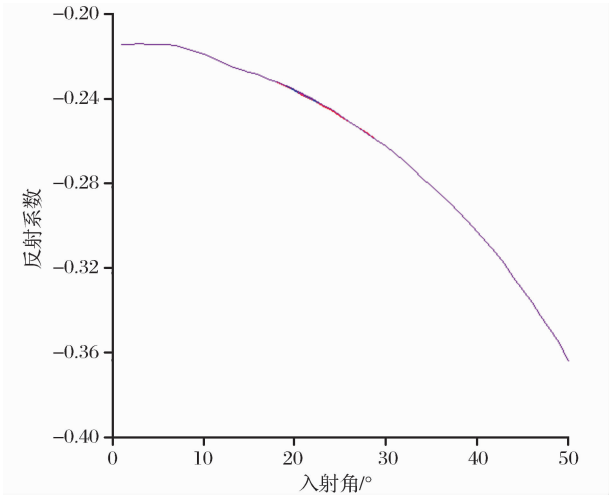


图 8 反射系数随入射角的变化

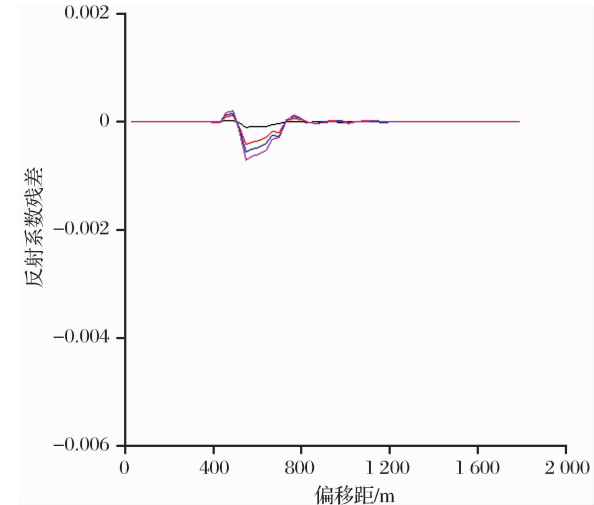


图 9 反射系数变化与偏移距的关系

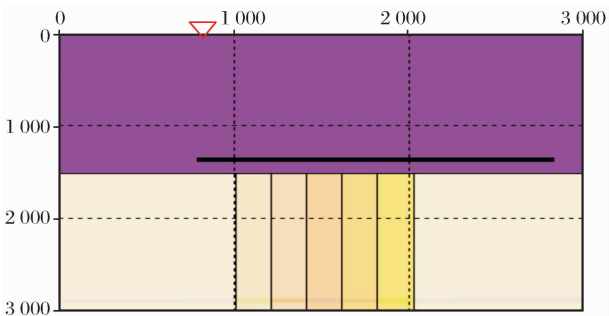


图 10 单个小尺度体为 4λ 的模型

密度为 1.973 g/cm^3 。单个小尺度体宽度为 4λ ，尺度体速度以 25 m/s 为梯度递增。由于尺度较大，且速度变化剧烈，可以看出，图 11 中曲线在偏移距小于 400 m 处出现明显的抖动，这是由于断点绕射引起的。

图 12 中的介质参数与图 10 相同，单个小尺度体宽度为 2λ ，尺度体速度以 10 m/s 为梯度先增后减。可以看出，图 13 中曲线在偏移距小于 400 m 处

的抖动明显减弱，另外曲线的变化趋势也同样呈抛物线趋势变化，从而说明尺度体内速度的变化趋势影响着反射系数随偏移距的变化趋势。

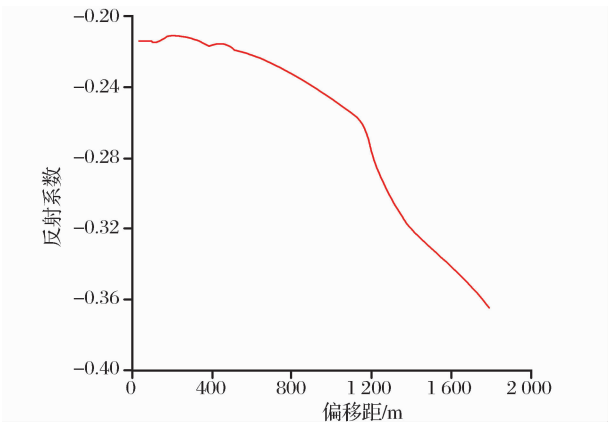


图 11 反射系数随偏移距的变化

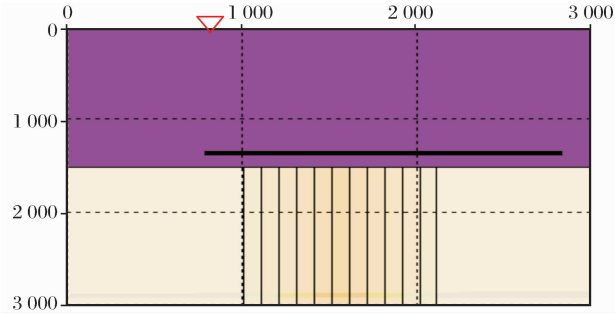


图 12 小尺度体为 2λ 的模型

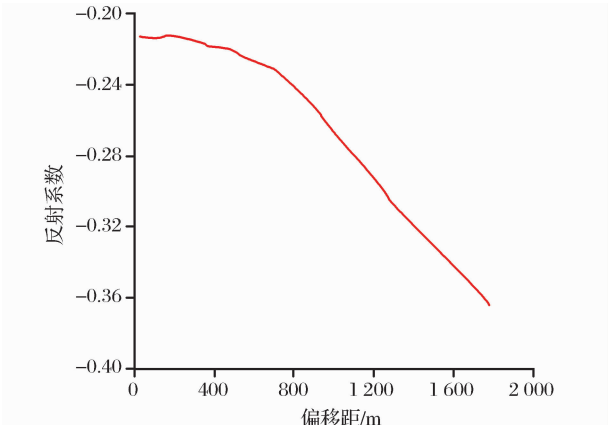


图 13 反射系数随偏移距的变化

图 14 中的介质参数与图 10 相同，单个小尺度体大小为 λ ，尺度体速度以 7 m/s 为梯度递增。图 15 中曲线在偏移距小于 400 处的抖动基本消除，另外曲线的变化趋势在小尺度体偏移距范围内变的向上凸起，在偏移距为 1200 m 处由于速度突然减小使得曲线在此处突然弯曲。

图 16、图 17 尺度体分别为 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ ，速度分别以 3 m/s 、 2 m/s 递增。从图 18、图 19 反射系数与

偏移距的关系曲线可以看出,小尺度体在 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 大小连续变化时对反射系数的变化趋势影响不是很明显,仅在小尺度体末端由于速度与邻侧速度差异太大,引起反射系数突然的跳动。

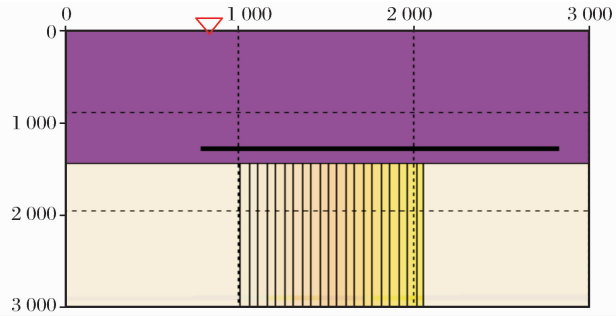


图 14 小尺度体为 λ 的模型

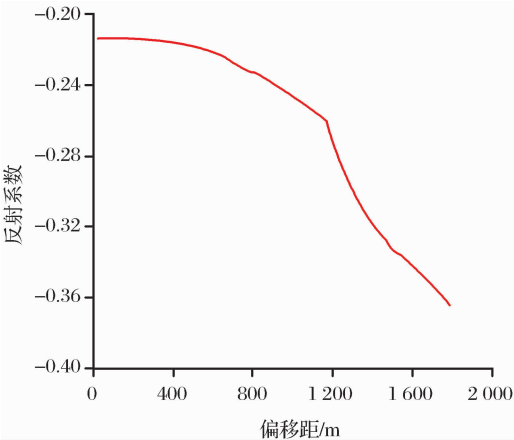


图 15 反射系数随偏移距的变化

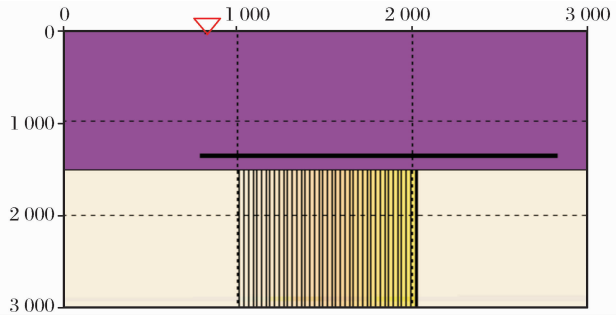


图 16 小尺度体为 $\lambda/2$ 的模型

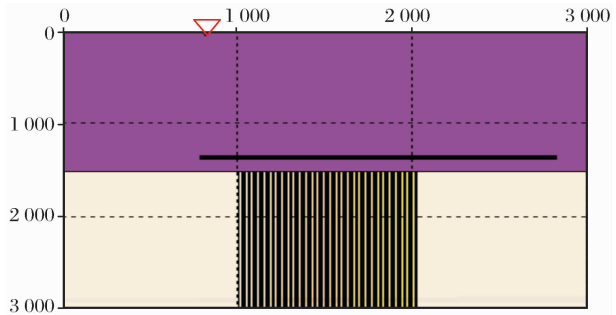


图 17 小尺度体为 $\lambda/4$ 的模型

图 10、图 12、图 13、图 16、图 17 所示模型反射系数随偏移距的变化对比如图 20 所示。可以看出,图中蓝线有先上升后下降的趋势,这正好与模型中参数先增加后减小相一致,且变化趋势较平缓。红色、紫色曲线在 1 200 m 处出现相对突变,这是由于

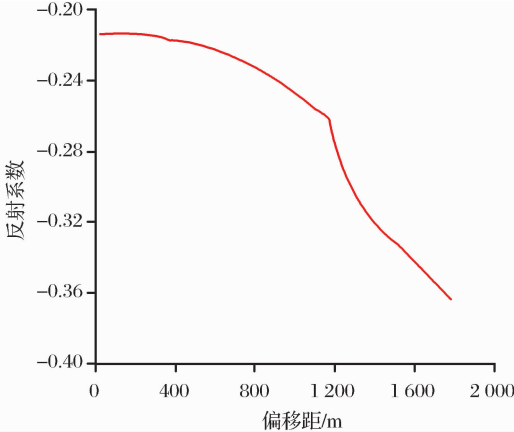


图 18 反射系数随偏移距的变化

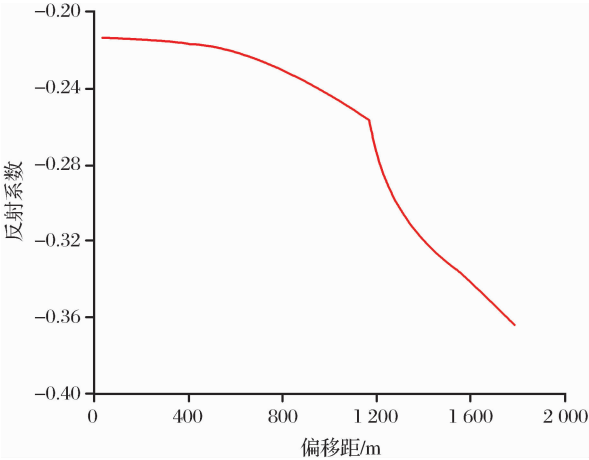


图 19 反射系数随偏移距的变化

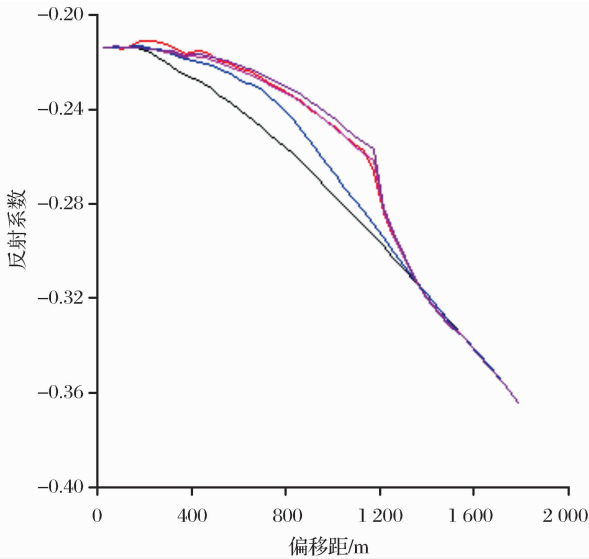


图 20 反射系数随偏移距变化对比

模型中的速度刚好在此位置有了一个急剧下降。也就是说,反射系数随偏移距的变化曲线趋势与小尺度体内速度的变化有直接关系。

3 结论

横向变速小尺度反射系数的研究是一个新课题,属基础理论研究,也是有效地预测非均质性储层是油气勘探开发的一个关键环节。通过模型试算及与理论值的对比分析得到如下结论与认识:

(1)对相同尺寸的尺度体而言,速度对反射系数变化有较大影响;随着速度的增加,反射系数曲线的变化率在明显增大。

(2)相同弹性参数条件下,随尺度体尺寸的减小,反射系数的变化率减小。相对速度变化而言,尺度体的大小对反射系数的影响起着主要作用。

(3)横向变速尺度体内的弹性参数变化影响着反射系数曲线随偏移距变化的趋势,随着尺度体内速度的增加,反射系数的变化更加明显。

参考文献(References):

- [1] Ostrander W J. Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence[J]. *Geophysics*, 1984, 49(10): 1637-1648.
- [2] Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. Comparison of AVO approximate with P-P wave; Qualitative analysis[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(supplement): 164-171. [孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-P波 AVO 近似对比研究: 定性分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(增刊): 164-171.]
- [3] Andreas Ruger. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry[J]. *Geophysics*, 1997, 62(3): 713-722.
- [4] Vaclav Vavrycuk, Ivan Psencik. PP-wave reflection coefficients in weakly anisotropic elastic media[J]. *Geophysics*, 1998, 60(6): 2129-2141.
- [5] Research Group of Method for Yangwu 3-D Integrating Processing into Interpretation. Study of AVO theory and its application in VTI medium[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(4): 363-371. [羊屋三维处理、解释一体化方法研究组. VTI介质的 AVO 理论与研究方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(4): 363-371.]
- [6] Yin Ke, Yang Huizhu. AVO in anisotropic media[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(3): 382-390. [阴可, 杨慧珠. 各向异性介质中的 AVO[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3): 382-390.]
- [7] Lu Jimeng. Principles of Seismic Exploration; Next[M]. Beijing: Petroleum University Press, 2001: 163-168. [陆基孟. 地震勘探原理: 下册[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001: 163-168.]
- [8] Wang Hongqi, Qu Shouli, Ning Junrui, *et al.* Application of tomographic inversion static correction in complex areas of western China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 258-262. [王红旗, 曲寿利, 宁俊瑞, 等. 层析反演静校正方法在西部复杂地区的应用[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 258-262.]
- [9] Li Shengjun, Sun Chengyu, Gao Jianhu. Analysis of dispersion suppression in wave equation numerical simulation[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(5): 444-448. [李胜军, 孙成禹, 高建虎. 地震波数值模拟中的频散压制方法分析[J]. *石油物探*, 2008, 47(5): 444-448.]
- [10] Li Shengjun, Sun Chengyu, Ni Changkuan. Acoustic equation numerical modeling on a grid of varying spacing[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(3): 207-212. [李胜军, 孙成禹, 倪长宽. 声波方程有限差分数值模拟的变网格步长算法[J]. *工程地球物理学报*, 2007, 4(3): 207-212.]
- [11] Xuan Yihua, Yuan Lizhong, Wang Ruiliang, *et al.* Realization and application of AVO fluid inversion based on statistical petrophysics[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(5): 839-843. [轩义华, 袁立忠, 汪瑞良, 等. 基于统计岩石物理学的流体成分反演应用实例研究[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(5): 839-843.]
- [12] Wang Jianhua. A New Method on Prestack Elastic Parameters Inversion[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. [王建华. 叠前弹性参数反演新方法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]

Reflectivity Coefficient in Laterally Variable Velocity and Small-scale Area

LI Sheng-jun, GAO Jian-hu, ZHAO Ying-cheng, LIU Wei-hua, LIU Jun-ying

(Northwest Subsidiary of Research Institute of Exploration and Development, CNPC, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In past 30 years, the development of amplitude versus offset (AVO) research went up and down. In recent years, the AVO application has been extensively accepted and used rapidly. In the exploration of the heterogeneous reservoir, the AVO is an irreplaceable method, in comparison with others. In this paper, we discuss the influence of lateral small-scale size and velocity variation on the reflectivity coefficient by means of transverse small-scale design, forward simulation calculation, and comparison of theoretical values of Zoeppritz equation. The reflectivity variation depends on the lateral scale size and velocity. We find a rule of reflectivity coefficient with offset distance in the lateral velocity.

Key words: Lateral velocity variation; Small-scale area; Reflectivity coefficient; Zoeppritz equation.