

# 基于 Biot-喷射流统一模型 Maxwell 流体饱和 孔隙介质中的弹性波\*

崔志文<sup>†</sup> 刘金霞 王春霞 王克协

(吉林大学物理学院, 长春 130012)

(2010 年 1 月 14 日收到; 2010 年 7 月 13 日收到修改稿)

推广 Biot-Tsiklauri 声学模型的同时借鉴 Dvorkin 和 Nur 的工作, 建立了具有任意孔径分布并顾及喷射流动机制的非牛顿流体饱和孔隙介质声学模型, 研究了非牛顿流体 (Maxwell 流体) 饱和孔隙介质中的弹性波的衰减和频散特性. 着重讨论充孔隙 Maxwell 流体的非牛顿流效应对弹性波的频散和衰减的影响. 研究表明, 饱和流体的非牛顿流效应和喷射流动机制均是引起弹性波波频散和衰减的重要因素. 依据非牛顿流体 (Maxwell 流体) 饱和各向同性孔隙介质的 Biot-喷射流声学模型, 喷射流动只影响纵波的频散和衰减, 而饱和流体的非牛顿流效应不仅影响纵波, 而且还影响横波的频散和衰减.

**关键词:** 孔隙介质, Maxwell 流体, 喷射流, 弹性波

**PACC:** 4320, 6265, 9130

## 1. 引 言

多孔介质声学是应用性很强的声学分支<sup>[1]</sup>. 流体饱和孔隙介质的波动理论在地球物理勘探、地震工程、岩土动力学、水下声学 and 地基工程等领域有着重要的理论和实际意义<sup>[2-9]</sup>. 弹性波传播特性的测量对研究流体饱和孔隙介质的内在性质是一种非常有用的手段. 在孔隙介质弹性波的传播理论中, 沉积岩和孔隙岩石中的声速和衰减与其物理性质密切相关. 理解弹性波传播过程中声能量耗散、速度频散的整个机制对声学 and 地球物理学等领域是重要的也是令人感兴趣的问题. Biot<sup>[10,11]</sup> 建立了流体饱和孔隙介质弹性波动力学理论, 后人称之为 Biot 理论. Biot 理论成功地描述了弹性波在牛顿黏性流体饱和孔隙介质中传播的基本规律, 已得到越来越广泛的应用. 然而, 在许多情况下依据 Biot 理论预测的波频散和衰减比实测偏低, 低孔低渗的情况更为明显. 实际的岩石存在着微裂隙, 当弹性波通过时, 孔隙流体就会喷出和挤入裂隙, 这种喷射流动被认为是重要的动力学机制. 宏观描述的 Biot

流动机制和微观描述反映局部特征的喷射流动机制, 对流体饱和孔隙介质中的弹性波的衰减和频散均产生重要影响. Dvorkin 和 Nur<sup>[12]</sup> 将 Biot 流动机制和喷射流机制有机地结合起来, 提出了 Biot-喷射流统一模型, 简称为 BISQ 模型. 该模型已引起许多研究者的兴趣, 国内外都有这一模型的研究成果<sup>[13-23]</sup>, 如 Parra<sup>[13]</sup> 和杨顶辉等<sup>[14,15]</sup> 分别将其发展为各向异性情况下的理论, 文献<sup>[17-19]</sup> 基于 BISQ 理论进行了弹性波场的模拟, 文献<sup>[20,21]</sup> 顾及了骨架黏弹性等. 这些研究使得对牛顿流体饱和孔隙介质中的弹性波特性的认识更加深入.

然而, 非牛顿流体在自然界中是广泛存在的, 比如动物的血液、地下稠油等. 牛顿流体可以看作是非牛顿流体的一种特殊情况, 即非牛顿流体效应趋向无限小的情况. 由于油和其他有机物更有意义地呈现了非牛顿流效应, 将孔隙填充物视为 Maxwell 流体来模拟油储层将可能更接近实际情况, 也有利于人们深入地认识弹性波在其中的传播特性. 近年来, Tsiklauri<sup>[24]</sup> 将孔隙填充物视为 Maxwell 流体模型引起了人们的注意. 受文献<sup>[24]</sup> 的启发, 注意到实际情况不可能是单一直孔模型, 借鉴 Yamamoto

\* 国家自然科学基金 (批准号: 40974067, 40674059, 10534040) 和声场声信息国家重点实验室研究基金 (批准号: 200807) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: cuizw@jlu.edu.cn

等<sup>[25]</sup>提出的使 Biot 理论可用于孔隙大小有一定分布的多孔介质模型的工作,文献[26]将 Maxwell 流体饱和孔隙介质 Biot-Tsiklauri 声学模型推广到适于多种孔径分布的情况,以孔径的对数正态分布为例,考察了弹性波的频散和衰减特性,与 Biot 模型进行对比后发现,衰减和频散得到一定的改善.但是文献[26]在推广 Biot-Tsiklauri 模型时并没有顾及微观描述反映局部特征的喷射流动机制.本文在文献[12]的工作基础上,顾及喷射流动机制,研究 Maxwell 流体饱和孔隙介质中弹性波的衰减和频散特性.作为文献[12,24,26]的进一步发展,在 BISQ 模型中用非牛顿流体(Maxwell 流体)代替牛顿流体,在传统的 BISQ 模型中考虑非牛顿流效应,建立了具有任意孔径分布的顾及喷射流动机制的非牛顿流体饱和孔隙介质声学模型.本文的研究对于弹性波在含流体多孔介质中传播时的频散和衰减机理的认识有参考价值.

## 2. 模型的建立

### 2.1. 各向同性孔隙介质的 BISQ 模型

Dvorkin 和 Nur<sup>[12]</sup>将 Biot 流动机制和喷射流动机制相综合后提出了 BISQ 模型.该模型将纵波的频散和衰减与岩石参数特征喷射流长度联系起来.其结果是将 Biot 理论中的弹性模量  $M$  由含有喷射流动因子  $S(\omega)$  的  $\bar{M}$  所代替,它们的具体表达式如下<sup>[23]</sup>:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= MS(\omega), \\ S(\omega) &= 1 - 2J_1(\lambda R)/[\lambda RJ_0(\lambda R)], \\ M &= K_r K_s / [\phi K_s + (1 - K_b/K_s - \phi)K_r], \\ \lambda &= \omega \sqrt{\tilde{\rho}(\omega)/M}, \\ \tilde{\rho}(\omega) &= i\eta / [\omega \kappa(\omega)], \\ \kappa(\omega) &= \kappa_0 [F(\omega) - i\omega/\omega_c]^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $K_s$  是固相体积模量,  $K_r$  是流相体积模量,  $K_b$  是骨架体积模量,  $\phi$  是孔隙率,  $J_0(x)$  和  $J_1(x)$  分别是零阶和一阶 Bessel 函数,  $R$  是特征喷射流长度,  $\eta$  是流体动力黏滞系数,  $\kappa(\omega)$  是动态渗透率,  $F(\omega)$  是 Biot 高频黏滞修正因子,  $\omega_c = -\eta\phi/(\rho_f \kappa_0)$  是 Biot 临界频率,其中  $\kappa_0$  是渗透率,  $\rho_f$  是流相体密度. BISQ 模型从形式上将 Biot 理论中模量  $M$  由  $\bar{M}$  取代,从而将局域微观特性的喷射流作用转化为宏观描述.这

一模型的优点在于它具有像 Biot 理论一样的对孔隙弹性体的宏观描述,同时又顾及了喷射流动机制对孔隙介质中纵波速度和衰减的影响.

### 2.2. Maxwell 流体饱和孔隙介质的 BISQ 模型

当将孔隙填充物视为 Maxwell 流体时,借鉴 Dvorkin 等<sup>[12]</sup>的推导思路,要实现在 Biot-Tsiklauri 模型中顾及喷射流动机制,只需在(1)式中将  $F(\omega)$ <sup>[23]</sup>用  $F_M(\omega)$ <sup>[26]</sup>代替,

$$F_M(\omega) = i(\omega/\omega_c)Z(\omega)/[Z(\omega) - 1]. \quad (2)$$

这里

$$Z(\omega) = \int_0^\infty 2J_1(\beta a)/[\beta a J_0(\beta a)]f(a) da,$$

$$\beta^2 = (\omega^2 t_M + i\omega)\rho_f/\eta,$$

其中  $t_M$  是 Maxwell 流体的松弛时间.此处我们设孔隙介质是由孔道半径概率密度函数为  $f(a)$  的圆柱管构成,没有考虑孔道弯曲度的影响.

至此,我们就可以得到基于 BISQ 模型 Maxwell 流体饱和孔隙介质中弹性波的运动方程

$$\begin{aligned} G \nabla^2 \mathbf{u} + (\hat{H} - G) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \hat{C} \nabla \cdot \mathbf{w} &= \rho \ddot{\mathbf{u}} + \rho_f \ddot{\mathbf{w}}, \\ \nabla(\hat{C} \nabla \cdot \mathbf{u} + \hat{M} \nabla \cdot \mathbf{w}) &= \rho_f \ddot{\mathbf{u}} + \rho_M \ddot{\mathbf{w}}. \end{aligned} \quad (3)$$

这里

$$\begin{aligned} \hat{H} &= K_b + \frac{4G}{3} + (1 - K_b/K_s)^2 \hat{M}, \\ \hat{C} &= (1 - K_b/K_s) \hat{M}, \\ \rho_M &= i\eta / [\omega \kappa_M(\omega)], \\ \kappa_M(\omega) &= \kappa_0 [F_M(\omega) - i\omega/\omega_c]^{-1}, \\ \hat{M} &= MS_M(\omega), \\ S_M(\omega) &= 1 - 2J_1(\lambda_M R)/[\lambda_M R J_0(\lambda_M R)], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda_M = \omega \sqrt{\rho_M(\omega)/M},$$

其中  $G$  为剪切弹性模量.我们用  $De$  表示 Deborah 数,它是黏滞效应的特征时间与松弛时间之比.  $De$  较大时黏滞效应起主导作用,  $De$  较小时系统呈现黏弹行为.当  $De = \infty, R = \infty$  时,若  $\sigma = 0$ ,则模型对应于 Biot 模型<sup>[10]</sup>,若  $\sigma \neq 0$ ,则模型对应于考虑孔径分布推广的 Biot 模型<sup>[25]</sup>;当  $De \neq \infty, R = \infty$  时,若  $\sigma = 0$ ,则模型为 Biot-Tsiklauri 模型<sup>[24]</sup>,若  $\sigma \neq 0$ ,则模型为推广的 Biot-Tsiklauri 模型<sup>[26]</sup>;当  $De = \infty, R \neq 0$  时,模型对应于 BISQ 模型<sup>[12]</sup>.

弹性波的速度和衰减由下式给出:

$$V_j = 1/\text{Re} \sqrt{Y_j}, \quad (5a)$$

$$Q_j^{-1} = 2\text{Im} \sqrt{Y_j}/\text{Re} \sqrt{Y_j}, \quad (5b)$$

其中下标  $j$  表示  $P_1, P_2, S$ .

两类纵波  $P_1, P_2$  的慢度  $Y_{P_1, P_2}$  由二次方程给定,

$$c_2 Y^2 - c_1 Y + c_0 = 0, \quad (6)$$

其中

$$c_2 = \hat{H}\hat{M} - \hat{C}^2,$$

$$c_1 = \hat{H}\rho_M + \hat{M}\rho - 2\rho_f\hat{C},$$

$$c_0 = \rho\rho_M - \rho_f^2,$$

$$\rho_M = \rho_f/\phi_0 + i\eta F_M/(\omega\kappa_0).$$

横波  $S$  的慢度可表示为

$$Y_S^2 = (\rho - \rho_f^2/\rho_M)/G. \quad (7)$$

从(6)和(7)式可以看出:在各向同性介质中,横波的相速度和衰减不受喷射流动的影响,只受非牛顿流效应的影响;而快、慢纵波的相速度和衰减不仅受喷射流动的影响,还受非牛顿流效应的影响.

### 3. 计算结果及分析

计算中采用下列典型的低孔低渗孔隙介质参数<sup>[22]</sup>:  $\phi = 0.05, K_s = 38.0 \times 10^9 \text{ Pa}, K_b = 16.0 \times 10^9 \text{ Pa}, G = 14.61 \times 10^9 \text{ Pa}, \rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3, K_f = 2.25 \times 10^9 \text{ Pa}, \rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3, \eta = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . 图 1 和图 2 是只考虑单一孔径的情况下两类纵波的速度频散和衰减考察结果. 计算中孔道半径取为  $1 \mu\text{m}$ , 对应的渗透率为  $6.25 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ .

图 1 给出了两类纵波的相速度随频率的变化曲线. 从图 1 可以看出,对于没有顾及喷射流动的情况,Maxwell 流体的非牛顿流效应导致的快、慢纵波在高频端的相速度  $V_{P_1}, V_{P_2}$  值增大,使快、慢纵波相速度频散增强. 喷射流动使快纵波低频区的速度降低<sup>[12]</sup>, 频散明显增强. 从图 1(a) 可以看出,除低频区外 Maxwell 流体的非牛顿流效应对快纵波的相速度  $V_{P_1}$  是有影响的,  $De$  越小影响越大,且曲线有振荡现象. 从图 1(b) 可以看出,对于顾及了喷射流动的情况,喷射流动使慢纵波相速度频散减小,而孔隙流体的非牛顿流效应使慢纵波高频区的相速度  $V_{P_2}$  值增大,  $De$  越小影响越大,且曲线出现振荡现象,特别是在中低频区存在振荡较大的峰值.

图 2 给出了快、慢纵波的衰减  $Q_{P_1}, Q_{P_2}$  随频率的变化曲线. 从图 2 可以看出,对于没有顾及喷射流动的情况,Maxwell 流体的非牛顿流效应导致的快纵波

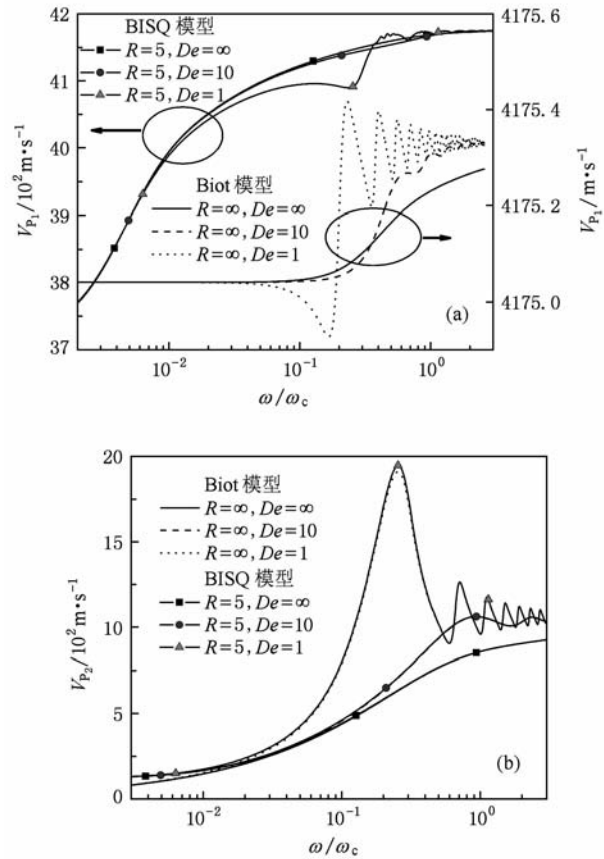


图 1 两类纵波的相速度随频率的变化 图中  $R$  的单位为  $\text{mm}$ .  
(a) 快纵波, (b) 慢纵波

的衰减在中低频区有所增加,高频区整体减小,  $De$  越小曲线振荡越明显,特别是在中低频区存在振荡较大的峰值. 顾及喷射流动的情况,非牛顿流效应使得快纵波在高频区的衰减增加,而在低频区略有减小,  $De$  越小曲线振荡越明显. Maxwell 流体饱和孔隙介质中慢纵波的衰减在低频区受喷射流动的影响明显,衰减很大,这可能是地震频率范围很难观测到慢纵波的原因. 与快纵波明显不同,非牛顿流效应使得慢纵波在高频区的衰减整体上明显变小,这表明用非牛顿流体做孔隙填充物可能更有利于实验室观测研究慢纵波特性和  $De$  越小曲线出现振荡现象越明显.

图 3 和图 4 是当孔径以对数  $\log(a)$  正态分布<sup>[26]</sup>时计算得到的弹性波的相速度和衰减随频率的变化情况. 显然,考虑具有一定孔径分布更接近真实孔隙介质的实际情况. 需要说明的是,正如 Yamamoto 和 Turgut<sup>[25]</sup> 所讨论弹性波的传播特性强烈地依赖于孔径分布情况,我们的目的是考察在顾及喷射流机制后 Maxwell 流体饱和孔隙介质中弹性

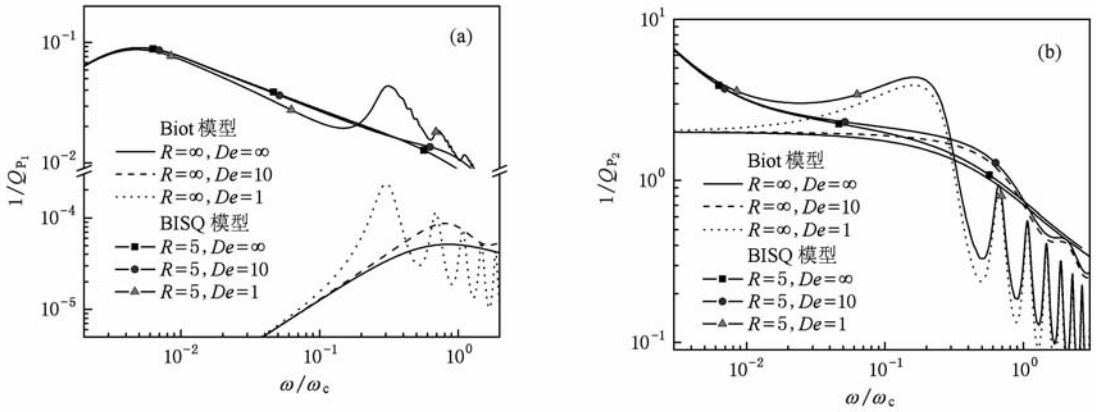


图2 两类纵波的衰减随频率的变化 图中R的单位为mm。(a)快纵波,(b)慢纵波

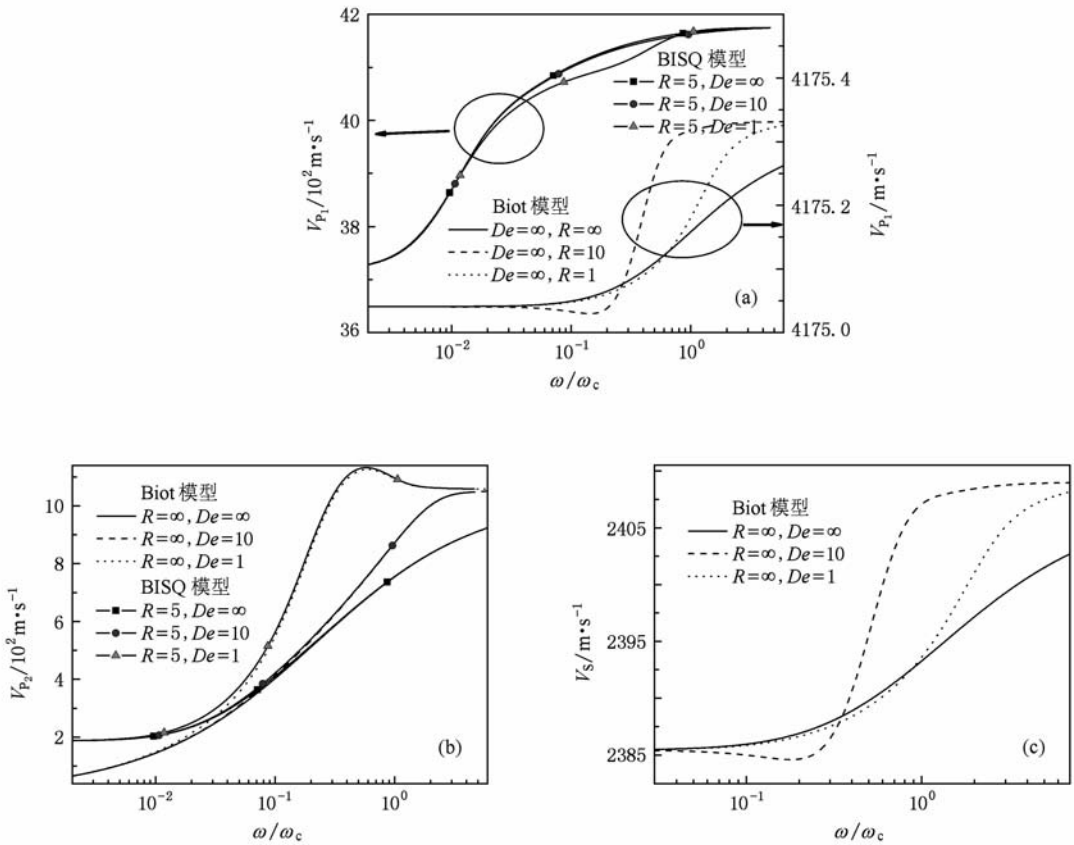


图3 弹性波的相速度随频率的变化 图中R的单位为mm。(a)快纵波,(b)慢纵波,(c)横波

波的特点,而不研究孔径分布的影响. 计算中以对数  $\log(a)$  正态分布  $N(0, 0.2^2)$  为例,对应的渗透率为  $9.22 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ . 考虑了孔径分布后,曲线的强烈振荡现象明显地得到了改善,这是基于  $Z(\omega)$  不同孔径分布权重叠加的结果. 图3(a),(b)分别是快、慢纵波的相速度  $V_{p1}, V_{p2}$  随频率  $\omega$  的变化曲线. 由此可以看出,对于喷射流动发生的情况,流体的非牛顿流效应导致快纵波相速度  $V_{p1}$  在中低频区略有减

小, $De$  较小的情况影响明显. 孔隙流体的非牛顿流效应使得对于喷射流动发生时慢纵波的相速度  $V_{p2}$  在中高频区明显地增加,频散增强. 图3(c)表明,喷射流动不影响横波相速度  $V_s$ ,但非牛顿流体效应使横波在中高频区的相速度比牛顿流体饱和情况的速度增大,使横波频散增强.

图4给出了弹性波的衰减随频率的变化曲线. 图4(a)表明,喷射流动的发生使得快纵波在低频区

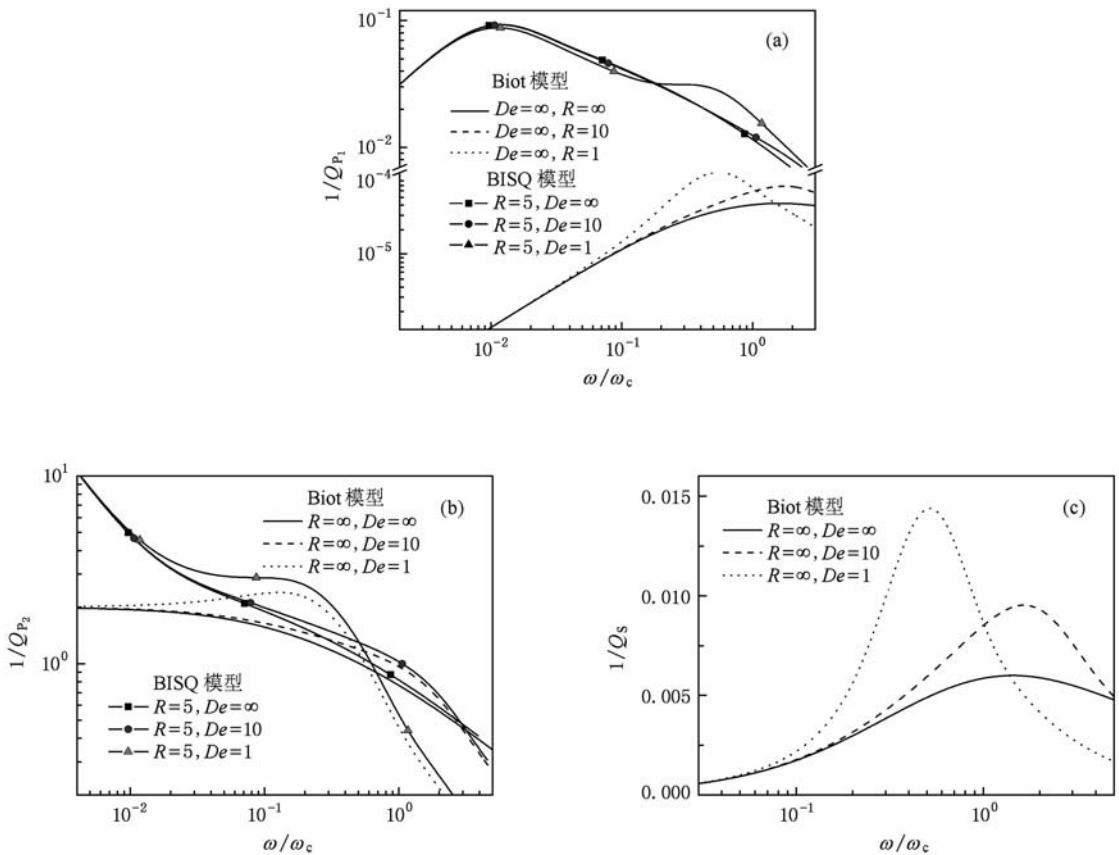


图4 弹性波的衰减随频率的变化 图中  $R$  的单位为 mm. (a) 快纵波, (b) 慢纵波, (c) 横波

的衰减略有减小,而在高频区却略有增加.图4(b)表明,非牛顿流效应使得慢纵波在低频区的衰减增大,而在高频区的衰减却明显变小.低频区纵波衰减主要由喷射流动的影响决定,但当给出的衰减仍然小于实际的衰减时,还需考虑其他能量耗散机制,如骨架黏弹效应和泥质含量<sup>[20,21]</sup>的影响等.非牛顿流效应对慢纵波传播特性的影响比较显著,而慢纵波在孔隙介质中声(震)电耦合效应中具有重要作用<sup>[4]</sup>,因此非牛顿流体饱和和孔隙介质中的声电耦合波的传播特性是值得深入研究的课题.图4(c)表明,虽然喷射流动不影响横波衰减,但 Maxwell 流体的非牛顿流体效应使横波在中低频区的衰减比牛顿流体饱和情况的衰减更大,峰值随  $De$  数的减小而增大并且向低频方向移动,表明非牛顿流效应使横波中低频区的衰减增强.

#### 4. 结 论

本文基于 Biot 理论,借鉴 Tsiklauri 关于 Maxwell

流体饱和和孔隙介质的声学模型<sup>[24]</sup>以及 Dvorkin 和 Nur 提出的顾及喷射流机制的 BISQ 模型<sup>[12]</sup>,建立了具有任意孔径分布的顾及喷射流动机制的非牛顿流体饱和和孔隙介质声学模型.作为文献[12,24,26]工作的进一步发展,在 BISQ 模型中用非牛顿流体(Maxwell 流体)代替牛顿流体,在传统的 BISQ 模型中考虑了非牛顿流效应.计算考察了弹性波在这种流体饱和和孔隙介质中的传播特性.结果表明,岩石流体的非牛顿流效应和喷射流动机制均是引起岩石弹性波波频散和衰减的重要因素.在非牛顿流体(Maxwell 流体)饱和和孔隙介质中,当喷射流动现象发生时,喷射流动机制主导纵波在低频的能量耗散.非牛顿流效应不仅影响快、慢纵波的频散和衰减,而且也影响横波的频散和衰减. Maxwell 流体的非牛顿流效应使快纵波的频散和衰减在中低频区减小,而在高频区增大;使横波的高频速度增加,频散增强,中低频衰减增大,高频衰减变小. Maxwell 流体的非牛顿流效应对慢纵波的影响较明显,慢纵波的高频速度增大;中低频的衰减进一步增大使得地震频率范围观测慢纵波更加困难;高频区衰减明显

减小说明利用 Maxwell 流体作为孔隙填充物有利于实验室观测慢纵波,这有待实验进一步验证.由于慢纵波在流体饱和孔隙介质声(震)电效应中有着

重要的作用<sup>[4]</sup>,因此非牛顿流体饱和孔隙介质中的声电耦合波也是值得深入研究的课题.

- [1] Qiao W X, Wu W Q, Wang Y J 1996 *Prog. Phys.* **16** 386 (in Chinese) [乔文孝、吴文虬、王耀俊 1996 物理学进展 **16** 386]
- [2] Yang D H, Cheng X H 2001 *Oil Geophys. Prospec.* **36** 146 (in Chinese) [杨顶辉、陈小宏 2001 石油地球物理勘探 **36** 146]
- [3] Zhou Y F, Wang Y J, Ma L, Gao T F 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 480 (in Chinese) [周宇峰、王耀俊、马力、高天赋 2000 物理学报 **49** 480]
- [4] Hu H S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1954 (in Chinese) [胡恒山 2003 物理学报 **52** 1954]
- [5] Chotiros N P, Isakson M J 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **116** 2011
- [6] Zhao H B, Wang X M, Chen H 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2819
- [7] Guan W, Hu H S, Chu Z T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 267 (in Chinese) [关威、胡恒山、储昭坦 2006 物理学报 **55** 267]
- [8] Ryck L D, Groby J P, Leclaire P, Lauriks W, Wirgin A, Fellah Z E A, Depollier C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 181901
- [9] Zhang X M, Liu J Q, Liu K A 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 654 (in Chinese) [张新明、刘家琦、刘克安 2008 物理学报 **57** 654]
- [10] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 168
- [11] Biot M A 1962 *J. Appl. Phys.* **33** 1482
- [12] Dvorkin J, Nur A 1993 *Geophysics* **58** 523
- [13] Parra J O 2000 *Geophysics* **65** 202
- [14] Yang D H, Zhang Z J 2000 *Chin. Sci. Bull.* **45** 1333 (in Chinese) [杨顶辉、张中杰 2000 科学通报 **45** 1333]
- [15] Yang D H, Zhang Z J 2002 *Wave Motion* **35** 223
- [16] Diallo M S, Appel E 2000 *J. Appl. Geophys.* **44** 313
- [17] Yang K D, Yang D H, Wang S Q 2002 *Chin. J. Geophys.* **45** 853 (in Chinese) [杨宽德、杨顶辉、王书强 2002 地球物理学报 **45** 853]
- [18] Meng Q S, He Q D, Zhu J W, Wang D L 2003 *J. Jinlin Univ. (Earth Sci. Ed.)* **33** 217 (in Chinese) [孟庆生、何樵登、朱建伟、王德利 2003 吉林大学学报(地球科学版) **33** 217]
- [19] Li H X, Tao C H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2836 (in Chinese) [李红星、陶春辉 2009 物理学报 **58** 2836]
- [20] Cheng Y F, Yang D H, Yang H Z 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 445
- [21] Nie J X, Yang D H 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3079
- [22] Cui Z W, Wang K X 2003 *Int. J. Eng. Sci.* **41** 2179
- [23] Cui Z W, Wang K X, Cao Z L, Hu H S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3083 (in Chinese) [崔志文、王克协、曹正良、胡恒山 2004 物理学报 **53** 3083]
- [24] Tsiklauri D 2003 *Transport Porous Med.* **53** 39
- [25] Yamamoto T, Turgut A 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 1744
- [26] Cui Z W, Liu J X, Wang K X 2003 *Wave Random Complex Med.* **13** 191

# Elastic waves in Maxwell fluid-saturated porous media with the squirt flow mechanism\*

Cui Zhi-Wen<sup>†</sup> Liu Jin-Xia Wang Chun-Xia Wang Ke-Xie

(School of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

(Received 14 January 2010; revised manuscript received 13 July 2010)

## Abstract

Based on Biot-Tsiklauri model and the combined Biot/squirt model, a universal acoustic model for non-Newtonian fluid (Maxwell fluid) saturated porous medium with an arbitrary pore size distribution is presented, in which the squirt-flow mechanism has been taken into account. The influences of non-Newtonian effect of Maxwell fluid on the attenuation and the dispersion characteristics of elastic waves propagating in such a porous medium are investigated. It shows that the non-Newtonian effect and the squirt-flow effect are the important factors for elastic wave dispersion and attenuation. When the squirt flow mechanism occurs, the squirt flow mechanism dominates the contribution to the energy loss of compressional waves at low frequencies. It shows that the squirt flow only affects the dispersion and the attenuation characteristics of two compressional waves, while the non-Newtonian effect of Maxwell fluid not only affects the dispersion and the attenuation characteristics of the compressional waves, but also influences the dispersion and the attenuation characteristics of shear waves.

**Keywords:** porous medium, Maxwell fluid, squirt flow, elastic waves

**PACC:** 4320, 6265, 9130

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40974067, 40674059, 10534040) and the Research Foundation of State Key Laboratory of Acoustical Field and Information, China (Grant No. 200807).

<sup>†</sup> E-mail: cuizw@jlu.edu.cn