

Scholte 波与含泥沙两相流介质属性关系的分析及仿真验证*

韩庆邦[†] 徐杉 谢祖峰 葛蕤 王茜 赵胜永 朱昌平

(河海大学物联网工程学院, 常州 213022)

(2013年4月28日收到; 2013年6月21日收到修改稿)

基于四种超声悬浮液模型 Urick, Urick-Ament, HT, McClements 分析了 Scholte 波在两相流体与多孔介质固体界面处的传播特性. 结合各模型的复波数表达式建立含泥沙流体 - 多孔介质固体界面波特征方程, 分析了 Scholte 波速与两相流体积含量、粒径等介质属性的关系. 通过仿真实验获得界面波信号, 运用时延估计获得 Scholte 波速与泥沙含量、粒径的关系, 发现所得的波速与 Urick-Ament 和 HT 理论有相对好的一致性.

关键词: Scholte 波, 两相流体, 多孔介质, 泥沙含量

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d, 68.08.-p

DOI: 10.7498/aps.62.194301

1 引言

由于超声波具有频率高, 衍射效应小, 传播方向性好, 且在固体和液体传播过程中穿透力强、衰减减小^[1], 利用超声的传播和衰减属性可很好地反映两相流体积含量、压缩系数、密度、粒径等介质属性, 因此超声在两相流体中的传播特性一直是各研究学者的研究热点. 早在 1948 年, Urick 便第一个提出了超声在悬浮液中传播的波速形式^[2,3], 超声传播速度以等效密度和等效体积压缩系数来表示. 后 Ament 等人考虑了入射波、折射波、反射波以及散射的复杂情况, 提出了一个关系到真实流体传播波数的 Urick-Ament 模型^[4]; HT 模型从水动力学的角度推导了相间相互作用的黏滞阻力方程, 提出了耦合相概念^[5]; McClements 将经典的 ECAH 散射模型进行了简化并给出了在长波情况下的表达式^[6]. 近年来, Scholte 波的研究为检测和反演介质属性的研究领域提供了新的思路. Scholte 波是一种存在于流固间的界面波, 在界面处传播具有幅度大, 距离远, 损耗小、在传播过程中携带诸多介质信息的特点^[7]. 目前, Scholte 的相关研究主要是关

于分析固体侧的介质特性, 如地层勘探、井间探测等, 针对流体属性的研究尚少. 本文将 Scholte 波与两相流超声模型相结合, 为模拟真实流体中的复杂情况, 采用多孔介质固体和泥沙悬浮液为研究对象, 基于四种模型分析流体离散相的粒径、体积含量变化对 Scholte 传播的影响, 并进行仿真实验验证, 为两相流介质属性的检测和反演领域提供新的思路方法.

2 理论模型的建立

2.1 Urick 模型^[3]

Urick 模型是最早关于超声波在两相流介质中的传播研究模型, 超声在悬浮液中传播的波速以等效密度和等效体积压缩系数来表示, 而等效密度和等效体积压缩系数又与每个相的体积含量有关. 波速表达式为

$$c_1 = (\rho_{\text{eff}} \beta_{\text{eff}})^{-1/2}, \quad (1)$$

其中等效密度和等效体积压缩系数又可以表示为

$$\rho_{\text{eff}} = \rho(1 - \phi) + \rho'\phi, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 11274091, 11274092)和河海大学中央高校基金(批准号: 2011B11014)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: hqb0092@163.com

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_c(1 - \phi) + \beta'_c\phi. \quad (3)$$

这里的 c_1 表示超声在流体中的传播波速, ϕ 是表示悬浮流体中固体悬浮粒子的体积含量, ρ, β_c 表示水的密度、体积压缩系数, ρ', β'_c 表示悬浮粒子的密度、体积压缩系数.

2.2 Urick-Ament 模型 [4]

Urick-Ament 模型充分考虑了压缩波通过两相流中散射颗粒时直达波、折射波、反射波等复杂情况, 推导了复波数表达式.

$$k_1^2 = k^2 \frac{\beta_{\text{eff}}}{\beta_c} \times \left[1 + \frac{3\phi\xi(bR(2br+3) + 3i(br+1))}{br(4\xi br + 6br + 9) + 9i(br+1)} \right], \quad (4)$$

其中, $b = \left(\frac{\omega\rho}{2\alpha}\right)^{1/2}$, $\xi = \frac{\rho' - \rho}{\rho}$.

这里的 k_1 表示超声在流体中的传播复波数, α 为水的黏滞系数, ω 为超声频率, r 为悬浮粒子的半径, β_{eff} 为等效体积压缩系数, 见 (3) 式.

2.3 HT 模型 [5]

Harker 和 Temple 从水动力学的角度出发考虑悬浊液中的声波动现象, 推导了相间相互作用的黏滞阻力方程, 提出了耦合相模型的概念, 又叫做 HT 模型.

其波数表达式如下:

$$k_1^2 = \beta_{\text{eff}}\omega^2 \left[\frac{\rho\{\rho' + (\phi\rho' + (1-\phi)\rho)S(\omega)\}}{(\phi\rho + (1-\phi)\rho') + \rho S(\omega)} \right], \quad (5)$$

其中参数 $S(\omega)$ 称为耦合系数, 其表达式如下:

$$S(\omega) = \frac{1+2\phi}{2(1-\phi)^2} + \frac{1}{1-\phi} \frac{9\varepsilon_v}{4} \left[1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{R}\right)i \right], \quad (6)$$

式中 ρ 为连续相介质密度, ρ' 为颗粒相密度, ϕ 为体积含量, β_{eff} 为等效体积压缩系数. r 表示颗粒半径, $\varepsilon_v = \sqrt{2\eta/\omega\rho}$ 称为黏性集肤深度, η 为黏滞度.

2.4 McClements 模型 [6,8,9]

McClements 模型是对经典超声悬浮液模型 ECAH 模型的改进. ECAH 模型的复波数表达式如下:

$$\left(\frac{k_1}{k}\right)^2 = 1 + \frac{3\phi}{ik^3r} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)A_n, \quad (7)$$

其中 k 为连续相液体波数, ϕ 为体积含量, r 为颗粒半径, A_n 为 n 阶散射系数矩阵, 由 6 阶复杂线性方程求得.

由于 ECAH 模型复杂, 计算量大, 在计算中容易数值溢出和计算失败 [10]. McClements 认为 ECAH 模型系数的序列只有前两项起着主导作用, 并给出了他们在长波情况下的表达式, 这一模型可以看做 ECAH 模型在长波情况下的简化.

$$A_0 = i(kr)^3/3(\rho k'^2/\rho' k^2 - 1 - k^2rcT\rho\tau H(\beta/\rho C_b - \beta'/\rho' C'_b))^2, \quad (8)$$

$$A_1 = -i(kr)^3/3 \cdot (\rho - \rho')/\{2(\rho - \rho')/[1 + 3(1+i)\delta_v/2r + 3i\delta_v^2/2r^2] + 3\rho\}, \quad (9)$$

其中

$$H = \{1/(1-iz) - \tau/\tau' \cdot \tan(z')/[tan(z') - z']\}^{-1},$$

$$z = (1+i) \cdot r/\delta_t,$$

$$\delta_t = \sqrt{(2\tau/\omega\rho C_b)},$$

$$\delta_v = \sqrt{(2\eta/\omega\rho)}.$$

T 为绝对温度, β 为热膨胀系数, C_b 为定压比热容, τ 为导热系数, η 为黏滞度, δ_t, δ_v 为热和黏性集肤深度, 带上标 ' 指颗粒相参数, 不带上标表示连续相介质参数.

2.5 界面波特征方程的建立

如图 1 所示, 流体侧和固体侧为半无限空间的介质层. 介质 I 为两相流体介质, 介质 II 为流体饱和和多孔固体介质. $y = 0$ 界面为两相流体与流体饱和和多孔介质的流固分界面.

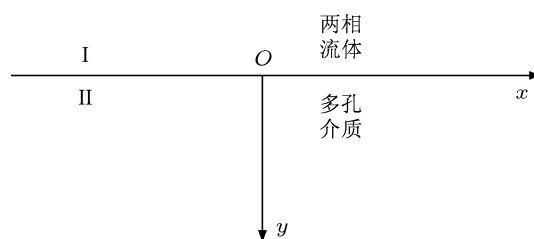


图 1 半无限空间流-固介质层

根据 Biot 提出的流体饱和和多孔介质理论, 认为流体饱和和多孔介质是由固体骨架和相互连通的孔隙构成的均匀的各相同性介质, 孔隙大小一致和分布均匀, 且孔隙内充满可以压缩的黏滞流体 [11], 这里流体侧的流体和多孔介质中的流体都取同种流

体水. 由于 $y \rightarrow \pm\infty$ 时, 平面波的位移为零, 因此流—固界面波的位移势函数可以表示为

$$\varphi_{f1} = A_1 \exp[a_1 ky + ik(x - ct)], \quad (10)$$

$$\varphi_{f2} = A_1 \exp[-a_1 ky + ik(x - ct)], \quad (11)$$

$$\varphi_{g2} = A_2 \exp[-a_2 ky + ik(x - ct)], \quad (12)$$

$$\psi_{g2} = B_2 \exp[-b_2 ky + ik(x - ct)]. \quad (13)$$

(7)—(10) 式中, $i = \sqrt{-1}$, φ_{f1} 为流体介质中的纵波波势函数, φ_{f2} 为多孔介质中孔隙内流体的纵波波势函数, 由于流体中不存在横波, 所以没有横波波势函数. φ_{g2} 和 ψ_{g2} 分别为固体骨架中的纵波波势函数和横波波势函数, A_1, A_2, B_2 为任意系数, k 为传播波数, c 为相速度. $a_1 = \sqrt{1 - c^2/c_1^2}$; $a_2 = \sqrt{1 - c^2/c_p^2}$; $b_2 = \sqrt{1 - c^2/c_s^2}$; c_1 为流体中的纵波波速, c_p 和 c_s 分别为流体饱和多孔介质中的快纵波波速和横波波速, 可由复合介质等效弹性模量的自治理论求得流体饱和多孔介质的体变模量 K_b 和切变模量 μ_b , 并带入多孔介质的横波和纵波波动方程所得^[11-13]. 下标 1, 2 分别代表分界面上方的流体介质和分界面下方的流体饱和多孔介质.

当平面波在流—固介质界面 ($y = 0$) 传播时, 应满足以下边界条件:

1) 界面处的法向应力连续

$$\sigma_{yg2} + \sigma_{yf2} = \sigma_{yf1}. \quad (14)$$

展开即可得到多孔介质—流体 Scholte 波特征方程. 为方便与两相流体超声模型结合, 可将界面波特征方程写成复波数的形式. 表达式如下:

$$\begin{aligned} & A(\Phi - 1)\sqrt{1 - \frac{k_p^2}{k^2} \frac{k_1^2 k_s^2}{k^4}} + (1 + \Phi)\sqrt{1 - \frac{k_1^2}{k^2}} \\ & \times \left[\left(2 - \frac{k_s^2}{k^2}\right) \left(2\mu_b - B \frac{k_p^2}{k^2}\right) \right. \\ & \left. - 4\mu_b \sqrt{\left(1 - \frac{k_p^2}{k^2}\right) \left(1 - \frac{k_s^2}{k^2}\right)} \right] = 0, \quad (19) \end{aligned}$$

其中

$$A = \frac{(K_{gf}/K_{gs} - \Phi)K_b - (1 - \Phi)K_{gf}}{1 - \Phi - K_b/K_{gs} + \Phi K_{gs}/K_{gf}},$$

2) 界面处切向应力连续

$$\delta_{xy1} = \delta_{xy2} = 0. \quad (15)$$

3) 界面处流体体积守恒

$$\Phi u_{yf2} + (1 - \Phi)u_{yg2} = u_{yf1}, \quad (16)$$

式中, σ, δ 分别表示界面处的法向应力和切向应力, u 表示位移. 下标 yf2, yg2 分别代表流体饱和多孔介质中流体和干燥的多孔介质固体骨架在 y 方向的分量, yf1 代表界面上方流体在 y 方向的分量. Φ 为流体饱和多孔介质孔隙度.

结合势函数与位移以及势函数与应力的关系, 并将势函数带入结合给定的边界条件 (14)—(16) 可整理化简得到

$$\begin{aligned} & (a_1^2 - 1)(Q + R - K_{gf})A_1 + 2ib_2\mu_b B_2 \\ & + [(P + Q)(a_2^2 - 1) + 2\mu_b]A_2 = 0, \\ & - 2ia_2 A_2 + (b_2^2 + 1)B_2 = 0, \\ & (1 + \Phi)a_1 A_1 + (1 - \Phi)a_2 A_2 + (1 - \Phi)iB_2 = 0. \quad (17) \end{aligned}$$

要使方程组 (17) 有非零解, 则方程组 (17) 的系数行列式需要等于零, 便可得出流—固界面波的特征方程, 即

$$\begin{vmatrix} (a_1^2 - 1)(Q + R - K_{gf}) & (P + Q)(a_2^2 - 1) + 2\mu_b & 2ib_2\mu_b \\ 0 & -2ia_2 & b_2^2 + 1 \\ (1 + \Phi)a_1 & (1 - \Phi)a_2 & (1 - \Phi)i \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

$$B = \frac{(\Phi K_{gs}/K_{gf} - 1)K_b + (1 - \Phi)K_{gs}}{1 - \Phi - K_b/K_{gs} + \Phi K_{gs}/K_{gf}} + \frac{4}{3}\mu_b,$$

K_{gs}, K_{gf} 分别为固体骨架的体变模量和孔隙内流体的弹性模量; K_b 和 μ_b 分别为流体饱和多孔介质的体变模量和切变模量; k_p, k_s 为多孔介质快纵波波速和横波相速度复波数. k_1 为两相流体复波数, 可根据不同悬浮液传播模型取不同的表达式. 对于弹性固体, 该方程有两个根分别对应伪 Rayleigh 波及 Scholte 波, 另外有两个支点引起的侧面波^[14]; 但对于多孔介质孔隙介质情况就比较复杂, 对于孔中流体而言分为开孔和闭孔两种, 可能出现的界面波形式更多, 如支点引起就有快纵波、慢纵波、横波侧面波, 根可能有伪 Rayleigh、伪 Scholte 波真实界面波^[15]. 本文以开孔多孔介质模型建立的频率方程,

主要研究 Scholte 波与泥沙特性关系, 只在 Scholte 波速附近范围进行求解. 其中, k 即为所求 Scholte 波的复波数. 由波数表达式 $k = \omega/c + i\alpha$ 可知, 波数的实部表示传播, 虚部表示衰减.

3 理论分析与比较

为模拟河底的真实情况, 固体以水饱和致密岩石多孔介质来表示; 两相流体为河流中的泥沙悬浮液, 认为泥沙颗粒大小一致且分布均匀, 主要成分是二氧化硅, 不考虑泥沙颗粒相的沉降作用, 连续相介质为水. 表 1、表 2 分别为多孔介质弹性骨架, 泥沙悬浮液相关介质的参数表.

图 2 为四种超声悬浮液模型下界面波频散特性对比图. 从图 2 可以看出除 Urick 模型外, HT, Urick-Ament, McClements 模型 Scholte 波频散曲线

趋势相一致, Scholte 波速在 20—500 kHz 范围内随频率的增大而增大, 大于 500 kHz 频段时基本无频散. Urick 模型的差异性可以从该模型的表达式理解, 其表达式仅考虑了密度和体积压缩系数对波速的影响, 因此该模型不能反映流体中多种介质属性对界面波的影响. 下文对粒径的讨论同样可以反映这一问题. 本文为了更加清楚的表明流体中离散颗粒对界面波的影响, 加入了纯水模型, 即固体侧为多孔介质, 流体侧为不含泥沙的纯水. 从仿真结果可以看出, 纯水模型基本也无频散现象, 这是因为固体侧对界面波造成影响主要来自多孔介质的固体密度、孔隙度、渗透率、体变模量、切变模量等自身参量的改变, 而频率对波速的影响就相对较弱. 可以认为对 Scholte 波的频散影响主要来自于两相流体中颗粒相之间的黏滞和散射作用.

表 1 弹性骨架介质参数表

介质	密度/(kg/m ³)	体变模量/GPa	空隙回曲系数	渗透率/mm ²	孔隙度	孔径大小/ μm
弹性骨架	2650	38	3.67	1.0	1.2	0.2

表 2 泥沙悬浮液介质参数表

介质	密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /GPa	黏滞度 /mPa·s	纵波速度 /(m/s)	横波速度 /(m/s)	体积压缩系数 /10 ¹⁰ Pa	热膨胀系数 /10 ⁻⁶ K ⁻¹	导热系数 /(W/mK)	比热容 /(J/kg·K)
水	1000	2.2	1.0	—	1500	10 ⁻⁹ /2.25	2570	0.595	4178.5
泥沙	2640	—	—	6600	2750	10 ⁻⁹ /88.378	0.5	0.269	920

图 3 为四种模型的泥沙体积含量对波速的影响曲线对比图. 由图 3 可以看出流体中泥沙体积含量对波速的影响作用明显. HT 和 Urick-Ament 模型下 Scholte 波速随着泥沙含量的增加而提高. Urick 模型呈现先递减后递增的趋势, 在泥沙浓度为 20% 左右呈现拐点. McClements 呈现截然不同的趋势, Scholte 波速随泥沙体积含量的递增而递减.

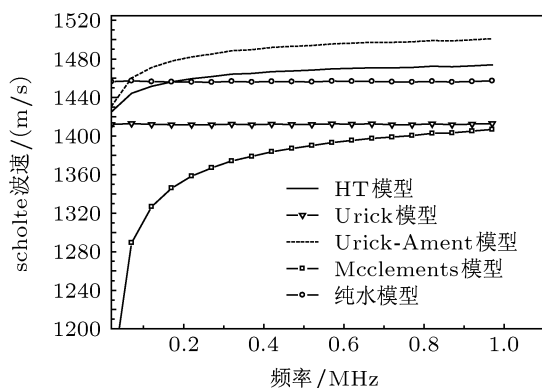


图 2 四种模型频散曲线对比

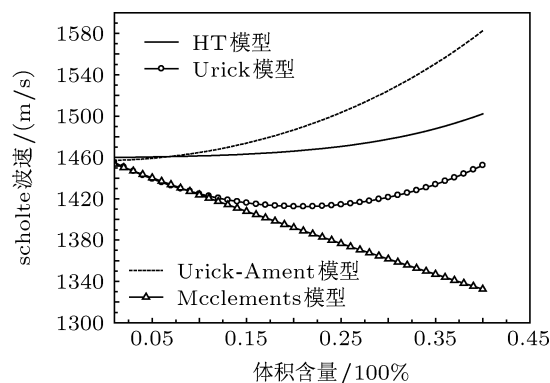


图 3 四种悬浮液模型颗粒相体积含量对 Scholte 波速的影响关系曲线

图 4 为泥沙悬浮液中泥沙颗粒粒径与 Scholte 波速的关系曲线. 数值仿真了频率为 100 kHz, 泥沙体积含量 10% 的泥沙悬浮液中泥沙粒径与 Scholte 波速的关系. 从图中可以看出 Urick-Ament, HT, McClements 模型模拟结果一致, 在 1—10 μm 粒径下波速随粒径的增大而增高, 泥沙颗粒粒径在大于这一

范围时波速变化很小. 在一般情况下, 河流中泥沙颗粒粒径的平均分布均在微米级或更大, 可以认为在一定粒径范围内, 界面波的波速稳定. 上文指出 Urick 模型表达式中并无考虑到粒径对波速的影响, 其曲线上也反映出这一趋势. 在数值模拟过程中, McClements 模型在纳米数量级范围内波形振荡很显著, 这是由于该模型复波数方程只考虑了系数项的前两项, 导致界面波特征方程根的取值不稳定.

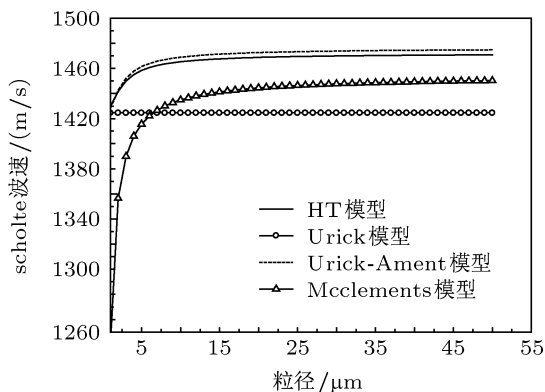


图4 悬浮液颗粒相粒径与 Scholte 波速的关系曲线

从数值模拟中可以发现, Scholte 波在界面传播时具有一定的规律性, 其传播特性与两相流体的体积含量和粒径有对应的关系. 在上述讨论的四种模型中, Urick 模型由于其波速表达式仅考虑了密度和压缩系数的影响, 不能反映 Scholte 波与多种量的复杂关系; McClements 模型的差异性最大, 并且数值仿真中存在不收敛的问题, 该模型不适用于分析 Scholte 波的传播特性. Urick-Ament 模型和 HT 模型模拟结果比较接近.

4 仿真实验验证

本仿真实验基于有限元 Comsol Multiphysics 3 软件获取流固界面波信号, 在 Comsol 声场模块下构建流固耦合模型, 经过求解域和边界条件设定、划分网格、求解器参数设置等步骤, 通过 Comsol 强大的数据处理能力可清晰直观地分析流固界面的瞬态声场, 并获取实验界面波信号. 其模型结构如图 5 所示.

模型 R_1 为多孔介质固体, 这里采用混凝土材料; 模型 CO_1 是泥沙悬浮液. 边界 1 为激发信号源, 采用线源激发单脉冲. 在流固界面设置 4 个采集点 PT_1, PT_2, PT_3, PT_4 接受界面波信号, 各探测点间距为 2 cm.

建模时, 采用二维模型, 可认为无厚度方向的信号反射和折射. 同时, 为模拟两个半无限空间的界面波传播条件, 流固介质模型的高度要尽量大, 考虑到系统运行效率, 一般情况下模型的高度大于波长的四倍, 且在边界设定时将上下边界设置为软声场可忽略来自边界的影响. 为使流固两种介质在边界处方程耦合, 将流体侧分界面的边界条件设置为法向加速度, $a_n = nx_acpn \times utt + ny_acpn \times vtt$, 该表达式表示平面应变 $acpn$ 在 x 和 y 方向上的法向加速度的和; 固体侧分界面的设置分别用边缘载荷在 x 和 y 方向上分量表示:

$$F_x = -p \times nx_acpn, \quad F_y = -p \times ny_acpn,$$

其中 p 为流体中的声压.

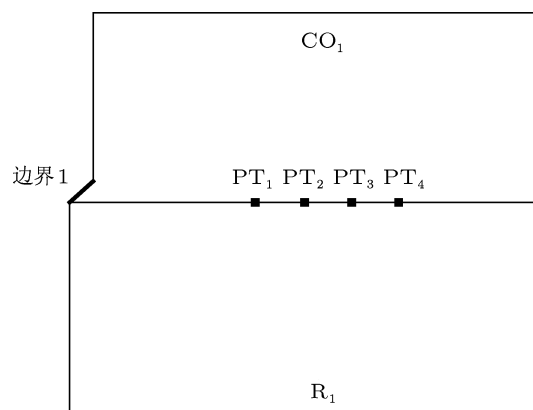


图5 流固耦合模型结构图

在 Comsol 仿真中认为流体中的泥沙是均匀分布的, 且不考虑泥沙的沉降作用, 可在求解域设定中改变流体密度和声速的不同来表征含泥沙两相流体中浓度和粒径的参数信息, 其具体数值可根据上文提出的悬浮液模型计算得出. 固体采用混凝土介质, 可在求解域设定时通过材料库直接导入材料参数, 导入杨氏模量为 2.5×10^{10} Pa, 泊松系数为 0.33, 密度为 2300 kg/m^3 , 各种量的设定与仿真数据相近似. 激发源采用中心频率为 500 kHz 的脉冲信号激发界面波, 脉宽为 $1 \mu\text{s}$.

图 6 为 $10 \mu\text{s}$ 时 Comsol 仿真结果图. 受到泥沙散射及多孔介质散射的影响, 信号中有些高频杂波, 但从图 6 中还是可以明显看出流固界面上 3 个波阵列, 分别是头波、漏 Rayleigh 波、Scholte 波, 其中 Scholte 的幅度最大. 通过界面某点处探测信号也反应出这一规律, 如图 7 所示.

图 8 为界面上 4 个采样点的波形. 从图中可以明显看出 Scholte 波随界面传播的情况.

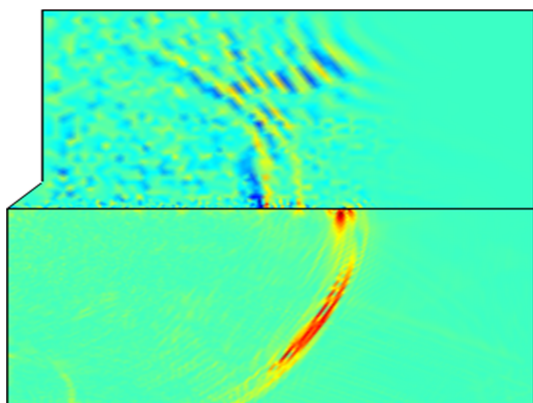


图6 10 μs 时 Comsol 仿真界面波瞬态响应

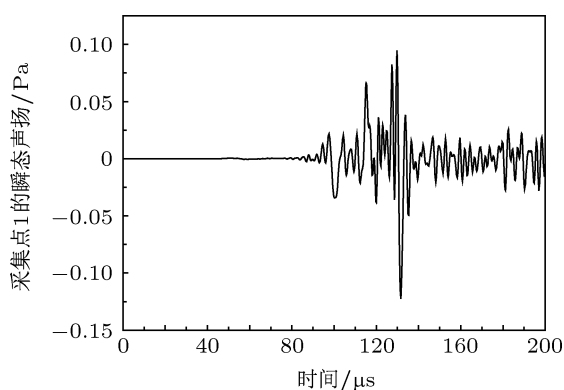


图7 采集点 PT₁ 点探测波形图

本文基于互相关时延分析法处理各采集点获取的界面波信号, 由于 Scholte 波的能量最大, 对信号做互相关处理, 其互相关函数最大值位置乘以采样频率即为所求 Scholte 波的时延, 再将采集点间距除以时延时间即可求得 Scholte 波速. 然在实际处理过程中, 噪声信号影响采集信号的相关系数, 无法保证处理结果的精确度. 采用小波多层分解可有效滤除噪声成分, 依层对有用成分作互相关最大值的比较, 将该层分解后产生的低频部分作为下一次分解的输入, 并逐层分解. 最后, 互相关函数最大值所在的层即为所需要的信号.

在不同泥沙体积含量情况下, 采用上述方法处理界面多处采集点信号并求平均, 可得到 Scholte 波速与泥沙含量关系曲线, 如图 9 所示.

可以发现, 实验 Scholte 波速介于理论上 Urick-Ament 和 HT 模型之间, 同样的, 运用相同方法测量不同粒径大小构成的泥沙悬浮液中 Scholte 波速, 泥沙悬浮液体积含量为 10%. 如图 10 所示, 当粒径大于 10 μm 时 Scholte 波速稳定在 1463.4—1475.6 m/s 之间, 波速略高于 Urick-Ament 和 HT 模型, 总体趋势与 Urick-Ament 和 HT 模型一致.

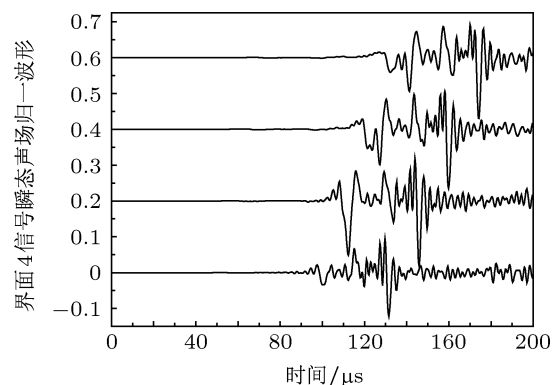


图8 界面4个采集点瞬态声场归一波形图

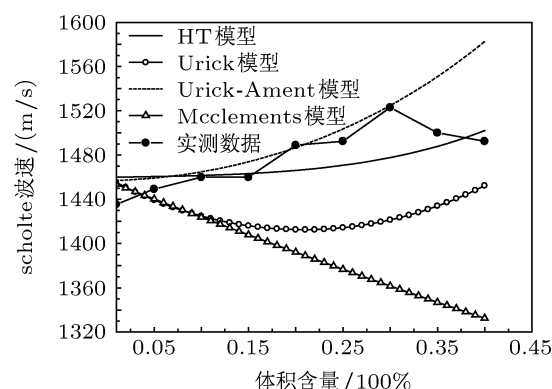


图9 仿真实验测量不同泥沙体积含量下 Scholte 波速变化情况

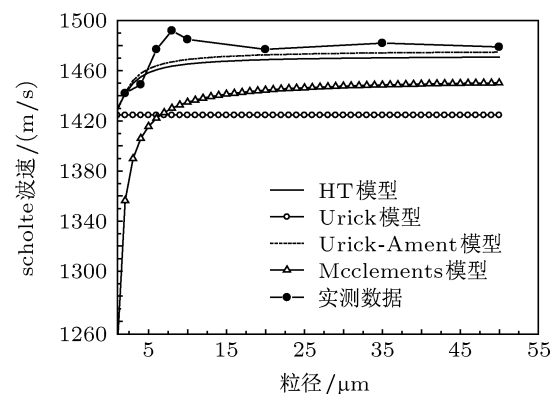


图10 仿真实验测量不同粒径泥沙悬浮液中 Scholte 波速变化情况

5 结论

本文将超声两相流传播模型与流固界面波特征方程相结合, 基于 Urick, Urick-Ament, HT, McClements 四种超声传播模型, 分析两相流体介质属性对 Scholte 波速的影响, 最后通过仿真实验并运用基于小波变换的互相关时延分析法处理实验结果, 仿真结果表明, Scholte 波速与 Urick-Ament 模

型、HT 模型有相对好的一致性, 对粒径的实验也可得到相同的结论. 说明在研究含泥沙流体与固体 Scholte 波时, Urick-Ament 和 HT 模型相对比较合

适. 所得结论将为利用 Scholte 波对含泥沙两相流中泥沙特性检测奠定理论基础.

- [1] Wang X F, Xiong X C, Gao M Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **60** 114303 (in Chinese) [王新峰, 熊显潮, 高敏忠 2011 物理学报 **60** 114303]
- [2] Tebbutt J S, Challis R E 1996 *Ultrasonic* **34** 363
- [3] Urick R J 1948 *J. Acoust. Soc. Am.* **20** 983
- [4] Urick R J, Ament W S 1949 *J. Acoust. Soc. Am.* **21** 115
- [5] Harker A H, Temple J A G 1988 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 1576
- [6] McClements D J 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 849
- [7] Han Q B, Qian M L, Zhu C P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 314 (in Chinese) [韩庆邦, 钱梦霖, 朱昌平 2007 物理学报 **56** 314]
- [8] Epstein P S, Carhart R R 1953 *J. Acoust. Soc. Am.* **25** 553
- [9] Allegra J R, Hawley S A 1971 *The Journal of the Acoustical Society of America* **51** 1545
- [10] Su M X, Cai X S 2002 *Acta Acustica* **27** 218 (in Chinese) [苏明旭, 蔡小舒 2002 声学学报 **27** 218]
- [11] Qiao W X 1989 *Geophysical Prospecting For Petroleum* **28** 88 (in Chinese) [乔文孝, 王跃俊, 吴文虬 1989 石油勘探 **28** 88]
- [12] 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]
- [13] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 167
- [14] Han Q B, Qian M Y, Wang H 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 3104
- [15] Feng S C, Johnson D L 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **74** 915

Analysis and experimental verification of the relation between Scholte wave velocity and sediment containing two-phase fluid properties*

Han Qing-Bang[†] Xu Shan Xie Zu-Feng Ge Rui Wang Xi
Zhao Sheng-Yong Zhu Chang-Ping

(Hohai University IOT institute, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

(Received 28 April 2013; revised manuscript received 21 June 2013)

Abstract

Based on several ultrasonic suspension models, i.e. Urick, Urick-Ament, HT and McClements, the Scholte wave propagation characteristics are analyzed at the interface between sediment concentration two-phase fluid and porous medium solid. The interface wave propagation characteristic equation are found using the complex wave number equation given by the aforementioned four models. Relationships between Scholte velocity and the two-phase fluid properties, (e.g., dispersion, volume content, particle size) are discussed. Scholte wave propagation and signal are obtained by Comsol simulation. By using the time delay estimation method, it is found that the obtained Scholte wave velocity are in accord with that given in Urick-Ament and HT models.

Keywords: Scholte wave, two-phase fluid, porous media, sediment concentration

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d, 68.08.-p

DOI: 10.7498/aps.62.194301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274091, 11274092), and the Funds for the Central Universities of Hohai university, China (Grant No. 2011B11014).

[†] Corresponding author. E-mail: hqb0092@163.com