

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209832

悬移质溶液超声衰减分析及固相浓度反演

董照诚, 郑慧峰, 唐佳玄

(中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310000)

摘要:基于 McClements 模型对悬移质两相流声传播进行分析,通过数值模拟探究了悬移质溶液中固相浓度、粒径以及超声频率对声衰减系数的影响作用,其中超声频率的 0.5 次幂、固相浓度分别与衰减系数呈现一次正相关,固相粒径与衰减系数则呈现一次负相关。分别得到 3 种因素单独影响下的拟合函数,并建立固相浓度的反演模型,该反演模型与 McClements 模型计算结果之间的相对误差小于 2%。搭建了悬移质溶液衰减系数及浓度测量试验系统,进行了在粒径 $r = 75 \mu\text{m}$, 超声频率分别为 700 kHz、1.1 MHz 条件下的固相浓度测量实验,实验结果表明,基于反演模型推演所得浓度值与实际设定浓度之间的最大相对误差为 11.2% (700 kHz) 和 9.6% (1.1 MHz)。所构建的反演模型可为悬移质浓度测量设备的研究提供一定的理论参考。

关键词: 悬移质溶液; 反演模型; 声衰减系数; 浓度测量; 数值模拟

中图分类号: TH835 TK314 TB559 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Ultrasonic attenuation analysis of suspended mass solution and inversion of solid phase concentration

Dong Zhaocheng, Zheng Huifeng, Tang Jiaxuan

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Based on the McClements model for the analysis of acoustic propagation in two-phase flow of suspended masses, the effects of solid phase concentration, particle size and ultrasonic frequency on the acoustic attenuation coefficient in suspended mass solutions are investigated by numerical simulation. Among them, the 0.5th power of ultrasonic frequency and the solid phase concentration have the positive correlation with the attenuation coefficient, respectively. The solid phase particle size and the attenuation coefficient have a negative correlation with the first order. The relative error between the inverse model and the McClements model is less than 2%. An experimental system is established to measure the attenuation coefficient and concentration of the suspension solution, and experiments are implemented to measure the solid-phase concentration under the conditions of particle size $r = 75 \mu\text{m}$ and ultrasonic frequency of 700 kHz and 1.1 MHz, respectively. Experimental results show that the maximum relative error between the concentration values deduced from the inverse model and the actual set concentration is 11.2% (700 kHz) and 9.6% (1.1 MHz). The inverse model constructed in this article can provide some theoretical reference for the study of suspension concentration measurement equipment.

Keywords: suspension solution; inversion model; attenuation coefficient; concentration measurement; numerical simulation

0 引言

近年来,有关悬移质两相流中颗粒相粒度和浓度的测量方法研究得到了越来越多的高校和研究机构的关注。两相流固相粒度和浓度的测量问题广泛存在于气力运输、水煤浆的管道运输、制药与化工领域相关乳剂生产过程以及河道水文检测、含沙量测量和环境保护方

面^[1-3]。其中,泥沙悬移质溶液是两相流溶液中的典型代表,本文将泥沙悬移质溶液作为研究对象。泥沙悬移质溶液的研究难点在于其浓度高,粒度较小,光线透射能力较弱,因此传统的基于光散射的研究方法将不再适用^[4]。更加原始的测量方法诸如沉降法、烘干法、筛分法等虽可以获得较好的测量精度,但这些方式即费时费力,难以满足实时性测量、持续性监控的需求^[5]。而基于声衰减的测量方法,其测量速度快、具有非接触的测量形式、穿透

能力强^[6-8],可提供可靠的解决方案。

1911年,Swell^[9]初步建立了两相流系统中的声衰减理论。随后 Urick 等^[10-11]研究了在长波长条件下,泥沙和高岭土等两相流悬移质溶液中超声波存在的粘滞衰减。Epstein 等^[12]基于粘性和热传导效应,研究了气液两相流系统中的声衍射效应。Allegra 等^[13]进一步拓展了文献[12]所建立的理论模型,将模型的应用范围拓展到了固液两相流系统中。该模型成为迄今为止考虑最全面,与实际情况最接近的理论模型,也即 ECAH 模型。Riebel 等^[14]研究了非长波区的超声衰减机制,认为大颗粒的超声衰减成分主要是散射衰减。McClements^[15]对 ECAH 模型进行了严谨的分析,其提出了一个适用于长波长条件下的简化模型,该模型在两相流测量领域影响巨大。

文献[16-18]基于声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)构建了一种自上向下测量的声学反向散射模型从频域完成了散射回波信号的重构,进一步反演悬浮沉积物浓度;张述仁等^[19]针对悬移质浓度测量中颗粒粒径分布与浓度相互耦合的问题,提出了基于蚁群算法的超声波水体悬移质浓度测量方法。虽然前人已经取得相当大的研究成就,但不同的悬移质溶液间的物理性质差异巨大,其中的声衰减表现也大不相同^[20],因此若获得高效的、可靠的、且适用于特定的悬移质溶液的浓度与径粒分布测量反演模型,仍需开展进一步的研究。本文以实验室配置的不同浓度的泥沙溶液(沙砾-水固液两相流)为研究对象,基于 McClements 模型对悬移质溶液进行数值仿真,充分探究固相颗粒的浓度、粒径以及超声频率对超声衰减系数的影响规律;并基于此推演得到一个可根据超声衰减系数计算固相浓度的反演模型,同时开展实验研究验证了反演模型的正确性,为悬移质浓度测量设备的研究提供一定的理论参考。

1 悬移质两相流声传播模型

基于不同假设条件进行推演,悬移溶液质参数测量领域已经有许多数学模型对悬移质溶液进行较为准确的描述,如 Urick 模型^[21-22]、Urick-Ament 模型、ECAH 模型、Harker & Temple 模型等,其中 ECAH 模型的应用范围最为广泛,在描述两相流系统中的声波传播现象表现十分优秀^[23]。

ECAH 模型假设悬移质溶液的分散项为粒径单一的球形粒子,考虑了超声在传导过程中因粘滞作用和热传导所造成的声波耗散。模型指出,在入射平面波作用到液固两相的界面时会在固相和液相中产生包括压缩波、剪切波及热波在内的六列波束,根据规则球形微粒的质量、动量以及能量守恒三大定律获得波动方

程。运用边界条件在球坐标系下进行求解,按照 Bessel 函数和球谐函数的级数展开求解得到与声衰减和相速度有关的系数序列 $A_0 \sim A_n$,将系数代入如式(1)可求得声衰减与相速度^[23]。

$$\left(\frac{K}{k}\right)^2 = 1 + \frac{3\varphi}{jk^3 r^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)A_n \quad (1)$$

式中: K 是悬移质溶液的复波数, $K = \omega/V_s + j\alpha$, V_s 和 α 分别表示悬移质溶液的声速和声衰减; r 为粒径; ω 为角频率; φ 为固相浓度; k 为连续相波数。该模型指出当悬移质两相之间的密度相近但是热力学属性有较大差异时,声衰减将主要由热力学损失提供。

虽然 ECAH 模型可以较为全面的考虑声波损耗,但在求解方程组的过程中球贝塞尔和汉克尔函数常常会出现溢出现象、线性方程组严重病态,进而无法得到真值。因此若需要利用 ECAH 模型进行数值仿真,就需要简化求解方法。

McClements 认为 ECAH 的模型的系数序列 A_n 中,只有前两个系数 A_0 和 A_1 起到了主要作用^[24]。固相颗粒的波动产生了一个单波段散射场,其振幅与 A_0 项有关,主要代表热传导损耗; A_1 项主要代表悬移质溶液中的粘性损失,与悬移质溶液的两相密度密切相关。在长波长($kr < 0.1$)条件下可对 ECAH 模型进行简化且不影响其精度,其中 A_0 和 A_1 表达式^[25]如下:

$$A_0 = \frac{j(kr)^3 \times \left[\frac{\rho k'^2}{\rho' k^2} - 1 \right]}{3} - k^2 r c T \rho \tau H \times \left(\frac{\beta}{\rho C_p} - \frac{\beta'}{\rho' C_p'} \right)^2 \quad (2)$$

$$A_1 = -j \frac{(kr)^3}{3(\rho - \rho')} \times \left\{ 2(\rho' - \rho) \left/ \left(1 + \frac{3(j+1)\delta_v}{2r} + \frac{3j\delta_v^2}{2r^2} + 3\rho \right) \right. \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中: $H = \{1/(1-jz) - \tau/\tau' \times \tan(z') / [\tan(z') - z']\}^{-1}$; T 为绝对温度; β 为体膨胀系数; $z = (1+j) \times r/\delta_i$, $\delta_i = \sqrt{2\tau/\omega\rho C_p}$ 为热集肤深度; $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$ 为粘性集肤深度, μ 为剪切粘度; c 为连续相声速; C_p 和 C_p' 、 ρ 和 ρ' 、 τ 和 τ' 、 k 和 k' 分别表示连续相和分散相的比热容、密度、热导率、波数。

为探究固相浓度、粒径以及超声频率对声衰减系数的影响规律以及反演模型的建立,本文将基于此简化模型进行研究。

2 悬移质两相流声衰减数值仿真

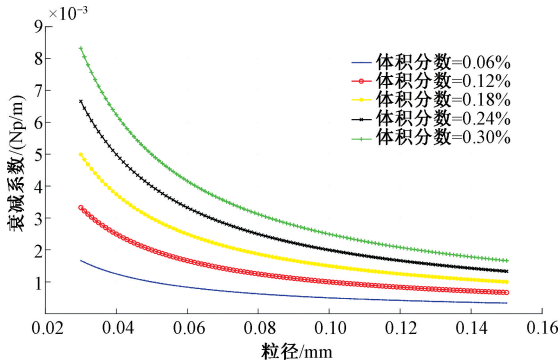
本文使用 MATLAB 软件进行数值仿真,其中用到的连续相和离散相物性参数如表 1 所示。

表1 连续相与离散相的物性参数(25°C)

Table 1 Physical parameters of continuous phase and discrete phase (25°C)

物性参数	连续相(水)	离散相(SiO ₂)
密度/(kg·m ⁻³)	1.255	5 640.0
声速/(m·s ⁻¹)	1 496.7	2 500.0
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 004.0	829.0
剪切粘度/(kg/(s·m))	18.2×10 ⁻⁶	9.03×10 ⁻⁴
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.48×10 ⁻²	68.2
热膨胀系数/K ⁻¹	3.47×10 ⁻³	9.6×10 ⁻⁶

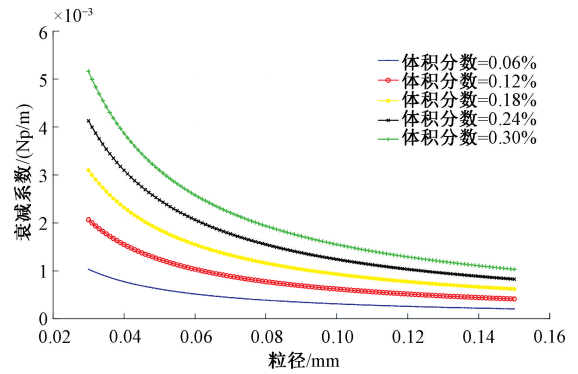
图1所示是固相粒径对声衰减系数的影响规律,其中粒径范围30~150 μm,这是普通泥沙颗粒的粒径范围;同时设置5种不同的固相体积分数进行对比,以探究体积分数(固相浓度)在此的影响作用。其中体积分数分别设置为0.06%、0.12%、0.18%、0.24%、0.30%,超声频率设置为1.5 MHz。

图1 r 对 α 的影响($f=1.5$ MHz)Fig. 1 Effect of r on α ($f=1.5$ MHz)

由图1可知,频率固定的情况下随着固相粒径的逐渐变大,衰减系数逐渐降低,后期有趋于平稳的趋势,基本与粒径呈反比。固定颗粒相的粒径后,纵向观察仿真结果可知随着颗粒相体积分数的增大,衰减系数逐渐增大,也即固液两相流的浓度越高,声波衰减效应越强。

本文探究了在同样参数条件下仅改变超声波频率为500 kHz、750 kHz、1 MHz、1.3 MHz时声衰减系数的变化规律。在其他物性参数都保持相同的情况下,随着频率的逐渐增加,衰减系数也随之增大。这可能是由于随着频率变大,波长随之变短,声波经过悬移质溶液时的散射损耗逐渐增加造成的。展示超声频率为500 kHz时的仿真结果如图2所示。

分析可知, $\alpha \propto r^b$,其中 $b \in (-\infty, 0)$,也即 $\alpha = ar^b$,其中 a 和 b 是待定系数,此时假设超声频率 f 和固相浓度 φ 已知。故在 $f=1$ MHz、 φ 分别等于0.06%、0.12%、

图2 r 对 α 的影响($f=500$ kHz)Fig. 2 Effect of r on α ($f=500$ kHz)

0.18%、0.24%、0.30%条件下,以 $\alpha = ar^b$ 为目标函数,使用Curve Fitting Tool进行函数拟合得到结果如表2所示。

表2 $\alpha = ar^b$ 拟合结果与评价Table 2 $\alpha = ar^b$ fitting results and evaluation

浓度/%	目标函数	a	b	SSE	RMSE
0.06	$\alpha = ar^b$	3.566×10^{-5}	-1	9.786×10^{-16}	2.868×10^{-9}
0.12		7.131×10^{-5}	-1	3.907×10^{-15}	5.730×10^{-9}
0.18		1.070×10^{-4}	-1	8.772×10^{-15}	8.586×10^{-9}
0.24		1.426×10^{-4}	-1	1.556×10^{-14}	1.144×10^{-8}
0.30		1.782×10^{-4}	-1	2.427×10^{-14}	1.428×10^{-8}

拟合方差(SSE)和均方根误差(RMSE)这两个值越接近0表示拟合效果越好。由表1可知, $b=-1$,也即在一定范围内颗粒相粒径的大小与衰减系数在数学上呈现一次反比关系。经实验验证,当 $f \in [500 \text{ kHz}, 1.5 \text{ MHz}]$ 时,拟合结果均符合上述结论。

图3所示为超声频率对声衰减系数的影响。为满足长波长限制条件,本文设置频率从500 kHz逐步增加到1.5 MHz,步长为10 kHz;固相粒径设置为37.4 μm;同时设置5种固相体积分数(0.06%、0.12%、0.18%、0.24%、0.30%)进行对比研究,以探究固相浓度在此情况下的影响作用。

由仿真结果可知,小范围内声衰减系数随着超声频率的增加而增加,且固相浓度的变化对此影响甚小;该趋势基本保持线性增加,频率越高,衰减效果越强。

本文探究在相同参数条件下仅改变固相粒径(分别为45、75、150 μm)时,声衰减系数的变化规律。图4所示为设置固相粒径为150 μm时的声衰减系数随频率的变化情况。

综合分析模拟结果后,可发现4种粒径下的衰减系数变化趋势相同,但随着粒径的增大衰减系数在整体上有减弱的趋势。

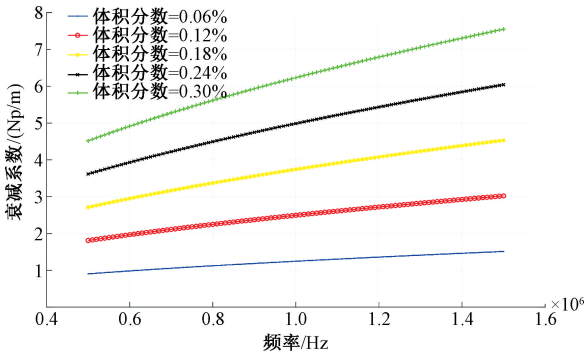


图 3 f 对 α 的影响 ($r = 37.4 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Effect of f on α ($r = 37.4 \mu\text{m}$)

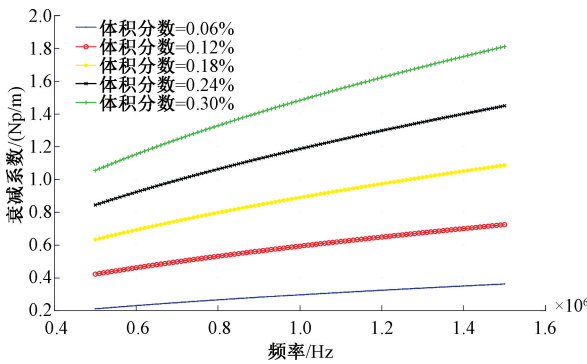


图 4 f 对 α 的影响 ($r = 150 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Effect of f on α ($r = 150 \mu\text{m}$)

另外可以得到 $\alpha \propto f^b$, 其中 $b \in (0, 1)$, 即 $\alpha = af^b + c$, 其中 a, b 和 c 均为待定系数、此时假设粒径 r 和颗粒相浓度 φ 已知。故在 $r = 75 \mu\text{m}$ 、 φ 分别为 0.06%、0.12%、0.18%、0.24%、0.30% 条件下, 以 $\alpha = af^b + c$ 为目标函数, 进行数值拟合可得拟合结果如表 3 所示。

表 3 $\alpha = af^b + c$ 拟合结果与评价

Table 3 $\alpha = af^b + c$ fitting results and evaluation

浓度/ %	目标函数	a	b	c	SSE	RMSE
0.06	$\alpha = af^b + c$	4.765×10^{-4}	0.5	0.014 30	7.952×10^{-13}	9.008×10^{-8}
0.12		9.511×10^{-4}	0.5	0.028 56	3.170×10^{-12}	1.799×10^{-7}
0.18		1.426×10^{-3}	0.5	0.042 80	7.107×10^{-12}	2.693×10^{-7}
0.24		1.901×10^{-3}	0.5	0.057 03	2.708×10^{-14}	1.662×10^{-8}
0.30		2.376×10^{-3}	0.5	0.071 21	6.081×10^{-14}	2.491×10^{-8}

由表 3 可知, SSE 和 RMSE 的量级都非常小, 这表明拟合效果很好; 其中 $b = 0.5, a > 0$ 这表明在数学上超声频率的平方根与衰减系数呈现一次正比关系。同样地, 在 $r \in [30 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}]$ 时函数拟合结果均符合上述结论。

图 5 所示为继续探究固相浓度对声衰减系数影响的数值仿真结果, 其中固相浓度范围为 0.01% ~ 0.32%; 同时选取 500、700、900 kHz、1.1、1.3、1.5 MHz 等 6 个超声频率进行数值模拟, 探究在当前实验条件下频率对衰减系数的影响作用; 粒径设置为 $37.4 \mu\text{m}$ 。仿真结果再一次验证了浓度与衰减系数呈现较好的线性正相关; 主要是由于浓度增加会导致超声在两相流中传播时的粘滞衰减、热传导作用以及散射耗散都有所增加。从 6 个频率的衰减曲线分布可知, 频率越高声波耗散越严重; 且随着频率的升高, 在同一浓度条件下, 声波频率每次增加固定值 200 kHz 后的衰减系数变化量却在减少。

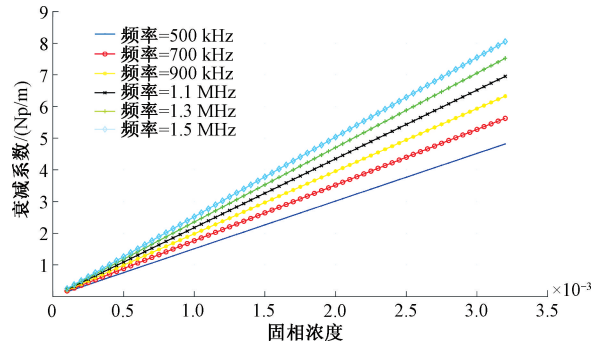


图 5 c 对 α 的影响 ($r = 37 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Effect of concentration on attenuation coefficient ($r = 37 \mu\text{m}$)

图 6~8 所示为粒径为 45、75、150 μm 时探究浓度对衰减系数影响的数值仿真结果。

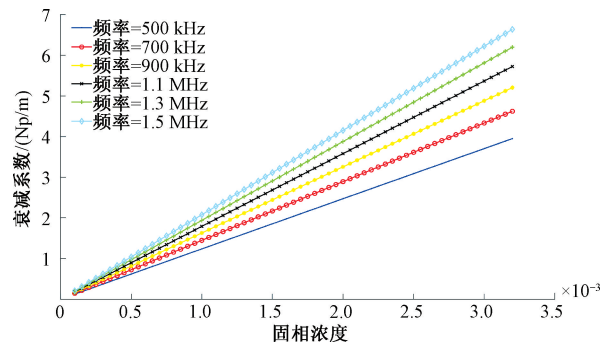
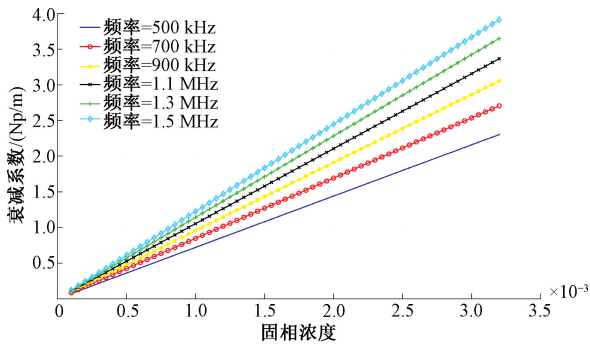
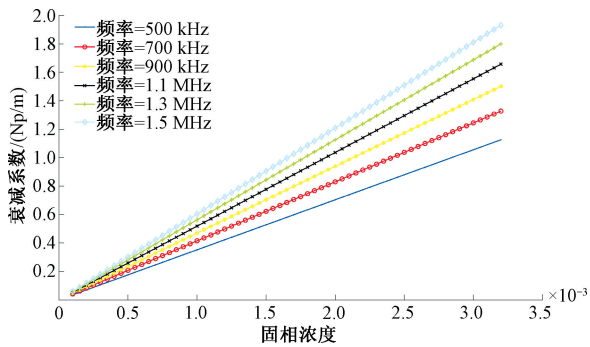


图 6 c 对 α 的影响 ($r = 45 \mu\text{m}$)

Fig. 6 Effect of concentration on attenuation coefficient ($r = 45 \mu\text{m}$)

由上述可知, 1) 随着固相浓度的增加, 衰减系数亦呈现线性增加; 2) 固相粒径的影响也不容忽视, 在满足 1) 的情况下, 随着固相粒径的增大, 衰减系数呈现递减趋势; 3) 结合 6 种频率的对比仿真曲线可知, 衰减系数的变化趋势在满足结论 1) 和 2) 的情况下还遵循频率越大, 衰减系数越大的规律。

图7 c 对 α 的影响 ($r=75 \mu\text{m}$)Fig. 7 Effect of concentration on attenuation coefficient ($r=75 \mu\text{m}$)图8 c 对 α 的影响 ($r=150 \mu\text{m}$)Fig. 8 Effect of concentration on attenuation coefficient ($r=150 \mu\text{m}$)

从上述针对固相浓度的数值模拟分析可知 $\alpha \propto \varphi$, 也即 $\alpha = a\varphi + b$, 其中 a 、 b 是待定系数, 假设超声频率 f 和颗粒粒径 r 已知。故在 $r=150 \mu\text{m}$, 频率 f 分别为 500 kHz、700 kHz、900 kHz、1.1 MHz、1.3 MHz、1.5 MHz 时以 $\alpha = a\varphi + b$ 为目标进行函数拟合, 得到结果如表 4 所示。

表4 $\alpha = a\varphi + b$ 拟合结果与评价Table 4 $\alpha = a\varphi + b$ fitting results and evaluation

频率	目标函数	a	b	SSE	RMSE
500 kHz	$\alpha = a\varphi + b$	286.0	0.000 151 7	2.203×10^{-7}	6.009×10^{-5}
700 kHz		337.3	0.000 176 0	2.962×10^{-7}	6.968×10^{-5}
900 kHz		381.6	0.000 196 9	3.710×10^{-7}	7.798×10^{-5}
1.1 MHz		381.6	0.000 215 7	4.449×10^{-7}	8.540×10^{-5}
1.3 MHz		457.5	0.000 232 8	5.183×10^{-7}	9.218×10^{-5}
1.5 MHz		490.9	0.000 248 6	5.912×10^{-7}	9.845×10^{-5}

由表 4 可知, SSE 和 RMSE 均接近于 0, 表明拟合效果非常好; 从数学上表明固相浓度与衰减系数存在严格

的正相关。同时经过实际模拟发现, 在 $r \in [30 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}]$ 时, 均符合上述规律。

3 固相浓度反演模型

3.1 模型建立

衰减系数 α 是颗粒浓度 φ 、颗粒粒径 r 以及超声频率 f 等多参数相互耦合的结果, 故衰减系数必定是颗粒浓度、粒径粒径和超声频率等变量的多元函数。本文基于此构建简单的反演模型, 以便于通过衰减系数反演颗粒浓度等目标信息。基于上述的数值模拟结论, 整合表 2~4 得到超声衰减系数如下:

$$\alpha = \frac{a}{r} + b\sqrt{f} + c\varphi + d \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为待定系数; r 为固相粒径; f 为超声频率。

当自变量固相浓度 φ 在 0.01% ~ 0.32% 区间, 固相粒径 r 在 30 ~ 150 μm 区间, 超声波频率 f 在 500 kHz ~ 1.5 MHz 区间时, 待定系数可通过多元线性回归拟合得到结果如表 5 所示。

表5 待定系数回归结果

Table 5 Regression results of the coefficients to be determined

待定系数	回归结果
a	6.381×10^{-5}
b	3.219×10^{-4}
c	1.622×10^{-6}
d	0.037 6

3.2 反演模型误差分析

反演问题又称为反演算法, 即根据数学模型由测得的声衰减或声速求得颗粒系的尺寸分布、固相浓度。本文根据声衰减系数反演求得颗粒相的浓度, 由式 (4) 反解得到:

$$\varphi = \frac{1}{c} \left(\alpha - \frac{a}{r} - b\sqrt{f} - d \right) \quad (5)$$

通过使用某一指定频率的超声波探头测得某指定固相粒径悬移质溶液中的衰减系数, 代入式 (5) 中即可求得当前溶液中颗粒相的浓度 φ 。

分别使用 McClements 提出的长波长限制条件下的简化模型计算得到颗粒相浓度 φ_1 , 并结合同等参数条件下由式 (5) 求解的颗粒相浓度 φ_2 , 相对误差为:

$$\delta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_2} \times 100\% \quad (6)$$

假定使用频率 $f=1 \text{ MHz}$ 、 $r=75, 150 \mu\text{m}$, 并设定一组

颗粒相浓度 φ , 分别使用上述两种方式计算求得 φ_1 、 φ_2 。进一步求得相对误差如表 6 所示。

表 6 反演模型误差 ($\delta\%$)
Table 6 Inverse model error ($\delta\%$)

粒径/ μm	0.06%	0.09%	0.12%	0.15%	0.18%	0.21%	0.24%	0.27%	0.30%
75	1.245	1.003	0.972	0.873	1.268	1.065	1.373	0.879	0.801
150	0.943	1.521	1.075	1.341	0.798	1.652	1.354	1.461	1.002

由表 6 可知,式(5)的反演模型的相对误差均小于 2%,这足以表明反演模型的精度较高。

3.3 物性参数对反演结果的影响

反演模型是在特定的物性参数条件下得到的,但 McClements 模型计算时需要较多的物性参数,然而其中一部分参数很难获得其准确值。此外模型对于不同物性参数的偏差也有不同程度的敏感性。因此有必要对物性参数偏差如何影响反演模型计算结果进行研究。本文以粒径为 $75\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅-水溶液为研究对象,超声频率为 $1\ \text{MHz}$ 不变,固相浓度为 0.2% ,每次仅改变一个物性参数 $+15\%$ 、 -15% ,其他物性参数保持不变,进行数值模拟,其影响结果如表 7。

表 7 物性参数偏差对模型的影响(相对误差 $\delta\%$)

Table 7 Effect of deviation of physical parameters on the model (relative error $\delta\%$)

二氧化硅物性参数	改变 $+15\%$	改变 -15%
密度	23.423	-21.127
声速	15.386	-12.981
比热容	0.572	-0.381
剪切粘度	0.326	-0.456
导热系数	0.042	-0.091
热膨胀系数	0.345	-0.643

由表 7 可知,不同的物性参数对计算结果的影响差别很大,其中密度和声速的影响较大,其余物性参数的影响则较小。模型计算结果对密度的改变最为敏感、声速次之,因此推演反演模型时颗粒相密度和声速的准确性是保证反演模型准确可靠的主要因素。

4 浓度测量实验

本文验证了反演模型相对于 McClements 模型的准确性,通过具体的实验将测得的声衰减系数应用到反演模型计算固相浓度;并将所得固相浓度与设定的浓度值相比较以确定反演模型的准确性。

4.1 实验装置和方法

实验系统中使用两个水浸探头分别放置在尺寸为 $400\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 的外层容器两侧,尺寸为 $150\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 270\ \text{mm}$ 的内层容器放在两个水浸探头之间。实验系统中的主要仪器为 RIGOL 的信号发生器 (DG4062)、RIGOL 的数字示波器 (MSO5104) 以及上海尚仪的磁力搅拌器 (SN-MS-20L),实验系统全局如图 9 所示。

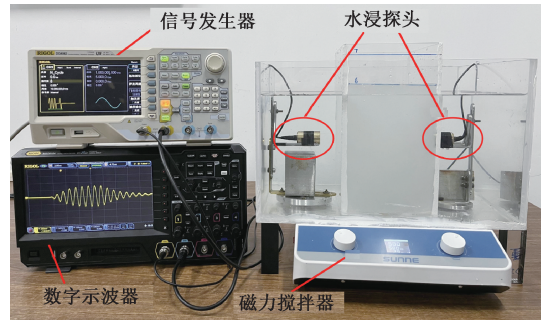


图 9 实验系统

Fig. 9 The experimental system

声衰减系数测量时,首先按照图示连接好线缆。信号发生器提供频率为 $1.1\ \text{MHz}$ 和 $700\ \text{kHz}$ 的猝发正弦波,设置猝发波循环数为 8、周期为 $10\ \text{ms}$ 、幅值为 $10\ \text{V}_{\text{pp}}$;调整发射、接收换能器相互正对,以保证接收换能器在发射换能器的声轴上;发射换能器在猝发波的激励下发射超声波,经过悬移质溶液后被接收换能器接收,并利用示波器显示与存储;之后在计算机中对实验数据进一步处理分析。

实验中为减少气泡对超声波的耗散作用,选择除气水作为连续相;根据预先设置的浓度参数换算好每次添加至溶液中的二氧化硅质量,使用电子天平精准测量后依次添加到溶液中;添加二氧化硅颗粒后设置磁力搅拌器转速为 $580\ \text{r}/\text{min}$ 并搅拌 $30\ \text{s}$ 以上,待溶液充分混合后读取超声信号。超声衰减系数计算公式为:

$$\alpha = \frac{\ln(A_0/A_i)}{L} \quad (7)$$

其中, α 为超声衰减系数; L 为声程,收发换能器间的距离; A_0 为声波在纯水传播时接收换能器的声压幅值;

A_i 表示声波在浓度为 i 的悬移质溶液传播时接收换能器的声压幅值。

4.2 结果分析

实验中选择 $r = 75 \mu\text{m}$ 的二氧化硅颗粒为离散相,逐

步增加悬移质溶液的固相浓度从 0.02% 变化至 0.30%, 共 8 个浓度值。在超声频率为 1.1 MHz 和 700 kHz 的情况下, 分别进行上述实验, 获得其超声衰减系数。实验结果如表 8 所示。

表 8 实验结果与反演误差

Table 8 Experimental results and inversion errors

$\varphi/\%$	700 kHz				1.1 MHz			
	α	α_m	$\varphi'/\%$	$\delta_\varphi/\%$	α	α_m	$\varphi'/\%$	$\delta_\varphi/\%$
0.02	0.204	0.205	0.019	5.0	0.311	0.317	0.019	5.0
0.06	0.515	0.511	0.055	8.3	0.645	0.651	0.058	3.3
0.10	0.910	0.912	0.093	7.0	1.105	1.114	0.094	6.0
0.14	1.278	1.289	0.139	0.7	1.499	1.506	0.135	3.5
0.18	1.656	1.641	0.190	5.6	2.013	2.034	0.170	5.5
0.22	1.805	1.819	0.205	6.8	2.353	2.385	0.209	5.0
0.26	2.009	2.195	0.231	11.2	2.691	2.748	0.245	5.7
0.30	2.517	2.593	0.268	10.7	3.038	3.185	0.271	9.6

表 8 中 φ 为实际的固相浓度、 α 为衰减系数、 α_m 为相同条件下 McClements 模型计算的衰减系数、 φ' 为反演预测的固相浓度、 δ_φ 为反演结果的相对误差。在 700 kHz 条件下, 反演结果的相对误差均小于 12%; 在 1.1 MHz 的条件下, 反演结果的相对误差均小于 10%, 小于同类研究中 15% 的相对误差^[26]。

5 结 论

本文首先基于长波长限制条件下的 ECAH 简化模型——McClements 模型利用计算机进行了数值模拟, 分析了影响二氧化硅悬移质溶液声衰减系数的 3 个主要因素, 固相浓度、固相粒径以及超声频率。其中固相浓度 φ 与衰减系数 α 呈现一次正相关; 超声频率 f 的 0.5 次幂与衰减系数 α 呈现一次正相关; 固相粒径 r 与衰减系数 α 呈现一次负相关。并基于数值模拟的研究结果构建了固相粒径 $r \in [30 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}]$ 、超声频率 $f \in [500 \text{kHz}, 1.5 \text{MHz}]$ 、固相浓度 $\varphi \in (0\%, 0.30\%)$ 条件下的反演模型; 由该反演模型可使用实验所得的声衰减系数显式计算固相浓度, 并对该反演模型进行了误差分析。结果表明, 反演模型的固相浓度预测结果与 McClements 模型计算结果之间的相对误差小于 2%, 与实验配置的固相浓度之间的相对误差小于 12%。后者的相对误差较大主要由实验平台的系统误差等因素造成, 系统误差的来源主要为实验平台未进行模块化设计导致每次实验都必须重新搭建; 经常拆卸与安装水浸探头, 且探头位置与距离的需要手动测量等。后续将采取如下措施降低系统误差:

- 1) 设计可安装于大水箱中的夹具, 保证夹具位置固定;
- 2) 设计有刻度的导轨与卡槽, 保证更换水浸探头时有精确的参照;
- 3) 隔离实验系统中的设备(示波器、信号发生器)与装置(大小水箱、磁力搅拌器), 固定装置保证非必要不拆卸移动。该反演模型解决了传统 ECAH 模型在实际计算过程中存在的耗时长、经常病态无解的棘手问题, 为悬移质浓度测量设备的研制提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 杨云平, 李义天, 孙昭华, 等. 长江口最大浑浊带悬沙浓度变化趋势及成因[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1240-1250.
YANG Y P, LI Y T, SUN ZH H, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1240-1250.
- [2] 仲苏珂, 吕恒, 杨子谦, 等. Sentinel-3 OLCI 数据的内陆湖泊有机悬浮物浓度遥感估算[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 155-167.
ZHONG S K, LYU H, YANG Z Q, et al. Remote sensing estimation method of organic suspended matter concentration in inland lakes based on Sentinel-3 OLCI data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 155-167.
- [3] 张瀚瑞, 董峰, 谭超. 液固两相流压降规律及超声法压降测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 46-54.

- ZHANG H R, DONG F, TAN CH. Liquid-solid two-phase flow pressure drop and ultrasound-based pressure drop measurement method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10):46-54.
- [4] 杨斌, 张驰, 平力, 等. 循环流化床颗粒团多参数的光散射测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):20-26.
- YANG B, ZHANG CH, PING L, et al. Light scattering measurement method for multi-parameters of particle clusters in circulating fluidized bed[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10):20-26.
- [5] XIA Y D, XIE D L, XU Z P, et al. Design of critical nozzles with conical inlet and calibration facility for small gas flowrate[C]. 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016.
- [6] WANG M, ZHENG D, DONG J, et al. Comparison of ultrasonic attenuation models for small droplets measurement based on numerical simulation and experiment[J]. Applied Acoustics, 2021, 183:108334.
- [7] 董学金, 苏明旭, 蔡小舒, 等. 一种纳米颗粒粒度分布的非接触测量方法[J]. 过程工程学, 2010, 10(2):231-235.
- DONG X J, SU M X, CAI X SH, et al. An investigation on measurement of nanoparticle size distribution using non-invasive method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(2):231-235.
- [8] 侯怀书, 苏明旭, 蔡小舒. 超细颗粒悬浊液超声衰减谱与声速谱测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2):241-247.
- HOU H SH, SU M X, CAI X SH. Study on measurement of ultrasonic attenuation and velocity spectra in superfine particle suspensions [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2):241-247.
- [9] SEWELL C. The extinction of sound in a viscous atmosphere by small obstacles of cylindrical and spherical form[C]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1910, 83(566):547-548.
- [10] URICK R J. The absorption of sound in suspensions of irregular particles[J]. Journal of the acoustical society of America, 1948, 20(3):283-289.
- [11] URICK R J, AMENT W S. The propagation of sound in composite media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1949, 21(2):115-119.
- [12] EPSTEIN P S, CARHART R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water fog in air[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(3):553-565.
- [13] ALLEGRA J R, HAWLEY S A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51(5B):1545-1564.
- [14] RIEBEL U, LÖFFLER F. The fundamentals of particle size analysis by means of ultrasonic spectrometry [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 1989, 6(1-4):135-143.
- [15] MCCLEMENTS D J. Ultrasonic characterisation of emulsions and suspensions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1991, 37(1-2):33-72.
- [16] 陈星宇, 黄善和, 何昊哲. 探测频率对多频声学测沙技术测量误差的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(2):307-316.
- CHENG X Y, HUANG SH H, HE H ZH. Measurement error due to frequency selection in multi-frequency suspended sediment measurement system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(2):307-316.
- [17] SHI L, XU W, XU Y. A broadband ADCP scattering echo model[C]. Oceans, IEEE, 2014.
- [18] YIN M, XU W, JIANG D. A dual-frequency inversion algorithm of suspended sediment concentration[C]. Global Oceans 2020, IEEE, 2020.
- [19] 张述仁, 徐雅, 谢代梁, 等. 基于蚁群算法的超声波水体悬移质浓度测量研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8):1163-1168.
- ZHANG SH R, XU Y, LIANG D L, et al. Ultrasonic water suspension mass concentration measurement based on ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(8):1163-1168.
- [20] MCCLEMENTS D J, COUPLAND J N. Theory of droplet size distribution measurements in emulsions using ultrasonic spectroscopy [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1996, 117(1-2):161-170.
- [21] URICK R J. A sound velocity method for determining the compressibility of finely divided substances [J]. Journal of Applied Physics, 1947, 18(11):983-987.

- [22] TEBBUTT J S, CHALLIS R E. Ultrasonic wave propagation in colloidal suspensions and emulsions: A comparison of four models [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2-5):363-368.
- [23] 乔榛. 超声法一次风流速和煤粉浓度在线测量研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
QIAO ZH. Research on on-line measurement of velocity and pulverized coal concentration of primary air using ultrasonic method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [24] 苏明旭, 蔡小舒. 超细颗粒悬浊液中声衰减和声速的数值分析研究[J]. *声学学报*, 2002(3):218-222.
SU M X, CAI X SH. The numerical study of acoustical attenuation and velocity in the suspension of superfine particles[J]. *Acta Acustica*, 2002(3):218-222.
- [25] MCCLEMENTS D J. Comparison of multiple scattering theories with experimental measurements in emulsions[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 91(2):849-853.
- [26] 潘晗, 王培红. 基于ECAH模型反演的气固两相流固相浓度测量方法[J]. *热能动力工程*, 2018, 33(2):33-38.
PAN H, WANG P H. Method for measuring the solid-phase concentration of a gas-solid two-phase flow based on an inversion model [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(2):33-38.

作者简介



董照诚, 2020年于上海第二工业大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为超声在悬移质浓度测量中的应用技术。

E-mail: 18221117930@163.com

Dong Zhaocheng received his B. Sc. degree from Shanghai Polytechnic University in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interests include application of ultrasound in the measurement of suspended mass concentration.



郑慧峰(通信作者), 分别在2003年和2009年于浙江大学获得学士学位和博士学位, 现为中国计量大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为超声波无损检测和视觉检测技术。

E-mail: zjufighter@163.com

Zheng Huifeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Zhejiang University in 2003 and 2009, respectively. He is currently an associate professor and a M. Sc. supervisor at China Jiliang University. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing and machine vision inspection.