DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513887

流固两相流颗粒参数全波长超声衰减模型研究*

王 蜜[1,2],刘杰贵[1,2],佟凯杰[1,2],崔雪丽[1,2],方立德[1,2]
(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002)

摘 要:随着工业流程的精密化发展,流固颗粒两相流体系在化工、能源等领域的应用日益广泛。根据连续相介质的不同,流固两相流可分为气固和液固两相流,其中颗粒粒径和浓度特征参数的精确测量对于过程控制和效率优化至关重要。针对经典超声衰减模型难以适应不同介质种类且无法覆盖全波长范围这一问题,基于热粘性声学物理场数值模拟方法,分析经典理论模型的优势与不足,采用 McClements 模型和 BLBL 模型的耦合叠加方法,实现不同衰减机制的综合表征,建立了适用于低浓度流固两相流在全波长区的超声衰减 McBL 模型,结合粒子群算法实现了对颗粒粒径与浓度的同步反演,将仿真衰减系数作为反演输入,初步验证该模型的适用性。仿真结果表明,与仿真模型的颗粒参数相比,反演获得的颗粒平均粒径和浓度,误差均在±15%以内。此外,搭建了超声衰减实验装置,采用双频透射法测量流固颗粒两相流的超声衰减系数,并利用 McBL 模型结合粒子群算法对实验衰减系数进行反演计算,反演输出颗粒平均粒径和浓度。实验结果显示,与激光粒度仪测量结果对比,颗粒平均粒径误差在±10%以内,进一步验证了 McBL 模型结合粒子群算法在流固两相流全波长区特征参数反演中具有较高的准确性,该研究对流固两相流特征参数的在线精确测量具有重要意义。

关键词: 流固两相流;超声衰减法;颗粒粒径;颗粒浓度;参数反演
中图分类号: TH814 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 440.55

Research on full-wavelength ultrasonic attenuation model of fluid-solid two-phase flow particle parameters

Wang Mi[1,2], Liu Jiegui[1,2], Tong Kaijie[1,2], Cui Xueli[1,2], Fang Lide[1,2]
(*1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Measuring Instruments and Systems, Baoding 071002, China*)

Abstract: With the development of industrial process precision, fluid-solid particle two-phase flow systems have been widely used in the chemical industry, energy, and other fields. According to the different mediums in the continuous phase, the fluid-solid two-phase flow can be divided into gas-solid and liquid-solid two-phase flow, in which the accurate measurement of particle size and concentration characteristic parameters are very important for process control and efficiency optimization. To address the problem that the classical ultrasonic attenuation model is difficult to adapt to different medium types and cannot cover the full wavelength range, this article analyzes the advantages and disadvantages of the classical theoretical model based on the numerical simulation method of thermal viscous acoustic physical field. The coupled superposition method of the McClements model and the BLBL model are adopted to achieve the comprehensive characterization of different attenuation mechanisms. An ultrasonic attenuation McBL model suitable for low-concentration fluid-solid two-phase flow in the full wavelength region is formulated. Combined with the particle swarm optimization algorithm, the simultaneous inversion of particle size and concentration is achieved. The simulated attenuation coefficient is taken as the inversion input to preliminarily verify the applicability of the model. Compared with the particle parameters of the simulation model, the simulation results show that the errors of the average particle size and concentration obtained by inversion are both within ±15%. In addition, an ultrasonic attenuation experimental device is set up to measure the ultrasonic attenuation coefficient of the fluid-solid particle two-phase

收稿日期:2025-04-02 Received Date: 2025-04-02
*基金项目:河北省自然科学基金项目(F2024201038)、河北大学高层次人才科研启动项目(521100222043)、河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2025003)资助

flow employing a dual-frequency transmission method, and the McBL model combined with particle swarm optimization algorithm is used to invert the experimental attenuation coefficient. Compared with the measurement results of the laser particle size analyzer, the experimental results show that the average particle size error of the particles is within ±10%. This further verifies that the McBL model combined with the particle swarm optimization algorithm has high accuracy in the inversion of characteristic parameters in the full wavelength region of fluid-solid two-phase flow. This research is of great significance for the online precise measurement of characteristic parameters of flu-solid two-phase flow.

Keywords: fluid-solid two-phase flow; ultrasonic attenuation method; particle size; particle concentration; parameter inversion

0 引 言

随着工业生产过程的复杂化和精细化,含固体颗粒的两相流研究在化工、能源、环保等领域的重要性日益凸显。在其相关应用中,颗粒粒径和浓度对于工作效率和过程控制至关重要。例如,通过调整水煤浆[1-2]中颗粒粒径和浓度,不仅能提升其流动性和燃烧效率,还能降低输送阻力、减轻环境污染,从而优化能源使用效率。通过科学调控高炉喷吹系统中煤粉[3-4]的粒径分布和浓度参数,不仅能显著提高燃烧效率和置换比,还能改善炉内还原气氛、降低焦炭消耗,从而提升高炉冶炼效率和经济性。同样,合理控制液固流化床或气固流化床[5-7]中的固体颗粒粒径和浓度,对于优化流化床性能,包括提高传热传质效率,控制流态化质量、床层密度以及延长设备寿命具有重要意义。

水煤浆、煤粉喷吹和流化床等流固两相流中的颗粒粒径能从几微米到几百微米,测量难度较大,选择合适的测量技术尤为重要。目前颗粒特征参数测量技术有显微镜法[8]、筛分法[9]、电学法[10]、光学法[11-12]和超声衰减法[13]等。其中,超声衰减法在颗粒粒径和浓度测量中展现出非侵入性、无需样品制备、适用于多种介质和具有高分辨率等显著优势,在相关领域应用广泛。

超声衰减法测量技术的核心在于理解声波与颗粒的相互作用,确定合适的超声衰减理论模型。通常将颗粒半径 r 与波长 λ 关系划分为:$r<\lambda/20$ 为长波长区、小颗粒;否则为非长波长区、大颗粒。早在上世纪中期研究者就开始进行相关理论的探索,1951 年 James 等[14]提出描述声波在悬浊液传播时的散射效应,适用于非长波长区,完善了声波散射理论,但是无法准确预测小颗粒的衰减。1989 年 Riebel 等[15]利用超声波光谱学分析非长波长区颗粒大小,提出了仅包含散射衰减的 BLBL 模型。除此之外,研究者们也在关注长波长区超声衰减相关理论。1953 年 Epstein 等[16]首次完整考虑了热衰减、粘性衰减和散射衰减等影响声衰减的因素,建立了适用低浓度乳浊液的声衰减模型。1972 年 Allegra 等[17]将此模型拓展到固体颗粒,统称为 ECAH 模型,但该模型求解复杂,方程严重病态以至于存在颗粒区域无解的情况,限制了模型的应用。1992 年 McClements[18]忽略了散射衰减,引入粘性厚度和热厚度概念对 ECAH 模型进行简化,简化模型显著提高了计算效率,但其应用范围仅限于长波长,在高浓度或非长波长区的预测偏差较大。1988 年 Harker 等[19]采用等效参数方法,仅考虑粘性效应,针对全浓度悬浊液构建了长波长区的耦合相模型。1997 年 Evans 等[20]纳入热效应,扩展了上述耦合相模型,使其不仅适用于长波长区固体颗粒,还进一步涵盖了流体颗粒。同年,Hemar 等[21]考虑了介质本身的热吸收和介质间热传递的相互作用,推导出了一种针对长波长区高浓度乳浊液的超声衰减模型,称为 Core-Shell 模型。2002 年 Hipp 等[22-23]为了弥补 ECAH 模型的局限性,结合 Core-Shell 模型,形成了适用于高浓度颗粒两相流的声衰减模型,但比原 ECAH 模型更复杂,求解更困难。2021 年 Wang 等[24]结合 McClements 模型和 BLBL 模型,考虑了热、黏性和散射衰减机制,提出适用于全波长区的 MCBL 模型,但该模型仅对空气-液滴两相流进行了验证。

上述模型为超声测量颗粒粒径和浓度提供了理论基础,但研究大多局限于特定波长范围和介质种类。为了建立流固两相流在全波长区的超声衰减模型,仿真分析作为关键研究手段,在其中发挥重要作用。

2015 年 Su 等[25]利用基于压力声学的“声-结构”耦合物理场,对直径为 2 mm 大颗粒水-油滴两相流进行仿真分析,获得不同颗粒体积分数下的超声衰减系数。2018 年邵一哲等[26]对水中 0.5~2 mm 粒径的油滴颗粒,采用“声-结构”和“声-压电”耦合场进行仿真,探究超声波的衰减机制。2022 年 Fan 等[27]利用“电-结构-声”耦合场,对粒径范围 0.2~1 mm 的空气-煤粉颗粒两相流声传播特性进行数值模拟,研究颗粒半径、超声频率等因素对超声反射波幅值的影响。以上对于长波长区大颗粒两相流的数值模拟均在压力声学物理场中完成。经典压力声学模型假设流体绝热,且忽略粘性效应,仅考虑流体散射作用,在非长波长、大颗粒范围的声衰减仿真中表现良好,但难以适应于长波长、小颗粒的声传播特性研究。2020 年董俊[28]利用热粘性声学物理场,针对空气-液滴两相流,建立了长波长区 4~12 μm 和非长波长区 200~500 μm 不同颗粒半径范围的几何模型,证明了热粘性声学物理场在不同波长区的适用性。然而,目前热粘性声

学物理场对颗粒两相流的研究仅限于流体颗粒,缺乏全波长区固体颗粒的仿真研究。

基于热粘性声学物理场,采用数值仿真方法分析经典理论模型的适用范围,提出了适用于流固两相流全波长区超声衰减的 McBL 理论模型,并初步验证新模型在流固两相流中的适用性。通过实验测量,进一步表明 McBL 模型在流固两相流颗粒粒径和浓度反演中具有良好的可靠性。

1　数值模拟研究

1.1　仿真物理场选择

数值模拟的准确性高度依赖于物理场的合理选择。热粘性声学物理场由质量、动量和能量守恒方程共同控制,涵盖散射衰减、热衰减和粘性衰减。相比仅考虑散射衰减的压力声学物理场,热粘性声学物理场能够准确描述两相介质交界壁处的粘性损失和热损失,特别适用于狭窄几何物体中的声传播。其中,粘性效应和热效应会在壁面附近形成声压变化层,被称为粘性厚度 δ_v 和热厚度 δ_t,如式 (1) 所示。该声压变化层导致超声波能量衰减,是热粘性声学物理场模拟精度的关键因素。

$$\begin{cases}\delta_v = \sqrt{\dfrac{\eta}{\pi f \rho}} \\ \delta_t = \sqrt{\dfrac{\kappa}{\pi f \rho C_p}}\end{cases} \tag{1}$$

其中,κ 是导热系数,f 是超声频率,ρ 是密度,C_p 是定压比热容,η 是动力粘度。

1.2　几何模型建立

建立流固颗粒两相流简化的二维矩形几何模型,如图 1 所示。探头间距 L 为 50 mm,发射探头直径 a_1 和接收探头直径 a_2 均为 10 mm,求解区域的宽度 L_2 设为 14 mm,长度 L_1 设为 50.002 mm,L_0 为完美匹配层厚度。采用打靶法生成随机分布的颗粒坐标,步骤为:1)定义目标区域,限定颗粒生成范围;2)利用随机数生成器抽取坐标点作为颗粒中心;3)放置颗粒并计算间距,确保无重叠且满足颗粒浓度要求。根据颗粒坐标和颗粒粒径生成颗粒几何模型。

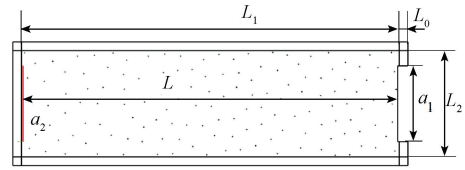


图 1　仿真几何模型

Fig. 1　Simulated geometric model

1.3　仿真设置及网格划分

1) 介质物理参数设置

由于两相介质间的声阻抗差异,在液固体系中,液体与固体颗粒的声阻抗较为接近,导致声波在界面处的反射和散射较弱;而在气固体系中,气体与固体的声阻抗差异悬殊,使得界面处的声能损耗更为显著。这种物理性质的差异表现为,液固两相流的超声衰减系数通常小于气固两相流。

为提升低浓度条件下的仿真精度,建立了空气-二氧化硅气固两相流构建仿真模型。一方面,气固体系固有的高衰减特性可有效克服低浓度工况下信号衰减不足的问题;另一方面,相较于高浓度模型,该方案显著降低了计算复杂度,在保证结果可靠性的同时提高了计算效率。

在实验中采用水-二氧化硅和水-聚苯乙烯的液固两相流,所用到的介质物理参数如表 1 所示。

表 1　介质的物理参数

Table 1　Physical parameters of the medium

物理参数	水	空气	二氧化硅	聚苯乙烯
密度/($kg\cdot m^{-3}$)	997.0	1.25	2 500.0	1 053.0
压缩波速/($m\cdot s^{-1}$)	1 496.7	344.3	5 640.0	2 330.0
动力粘度/(Pa·s)	9.03×10^{-4}	18.1×10^{-6}	—	—
剪切模量/($N\cdot m^{-2}$)	—	—	2.78×10^{10}	1.27×10^{9}
导热系数/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	0.595 2	2.59×10^{-2}	68.2	0.115 1
定压比热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	4 178.5	1 004	829	1 193.2
声吸收系数/($dB\cdot s^{2}\cdot m^{-1}$)	1.91×10^{-13}	1.48×10^{-10}	7.0×10^{-14}	8.69×10^{-13}
热扩散系数/(K^{-1})	2.57×10^{-4}	3.66×10^{-3}	9.6×10^{-6}	2.64×10^{-4}

2）本体粘度计算

介质的本体粘度 η_b 在数值仿真中是一个关键参数，该参数源于压力传播过程中介质单元的形变，其数值计算方式如式（2）所示。

$$\alpha_L = \frac{w^2}{2\rho c^3}\left[\frac{4}{3}\eta + \eta_b + \kappa\left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p}\right)\right] \tag{2}$$

其中，α_L 是介质的声吸收系数，w 是超声波的角频率，c 是超声波纵波声速，C_v 是定容比热容，C_p 是定压比热容。

3）完美匹配层设置

几何模型求解域外部设置有完美匹配层，其能高效吸收声波，消除壁面超声反射，减少仿真干扰。通常完美匹配层厚度是最大网格厚度的 6~8 倍，为了使其达到最好的吸收效果，本研究完美匹配层厚度取最大网格尺寸的 8 倍，曲率参数和比例因子分别设置为 3 和 1。

4）声源与声衰减计算

在物理场中设置声源，将图 1 中发射探头设为线声源，其初始声压为 1 000 Pa。接收探头采用同尺寸的二维线段，以其线平均声压作为接收探头声压。分别测量在纯净连续相中的接收探头声压 P_0 和颗粒两相流中的接收探头声压 P_1，根据式（3）计算声衰减系数 α(dB/m)。

$$\alpha = \frac{20\lg\left(\frac{P_0}{P_1}\right)}{L} \tag{3}$$

1.4 网格划分

颗粒相内部和连续相均采用自由三角形网格进行划分，其中，颗粒相内部通过物理场自适应实现预定义极细化网格划分，颗粒相的边界层可分为内、外层，均用边界层网格剖分，如图 2 所示。

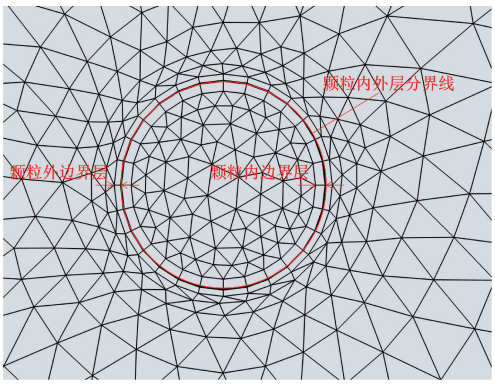


图 2 流固两相流局部网格划分

Fig. 2 Local mesh division of fluid-solid two-phase flow

以 f = 0.3 MHz 为例，根据式（1），计算出热厚度 $\delta_t \approx 5.9$ μm 作为内边界层厚度，粘性厚度 $\delta_v \approx 3.9$ μm 作为外边界层厚度。

此外，为了确保仿真结果的准确性和稳定性，对连续相网格进行网格无关性验证，结果如图 3 所示。随着网格细化，仿真结果趋于稳定，当网格细分至 $\lambda/10$ 以后，声衰减系数的仿真值在一定范围内趋于稳定。为平衡仿真质量与计算机能力，最大网格尺寸设为 $\lambda/12$，排除网格划分影响，提升仿真结果的可信度。

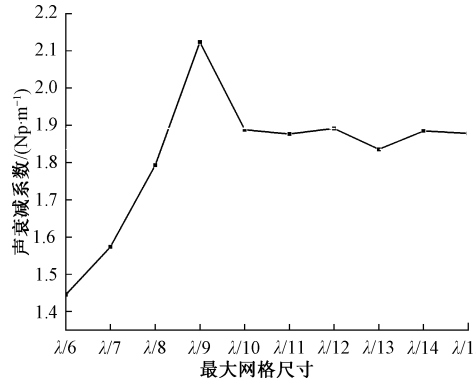
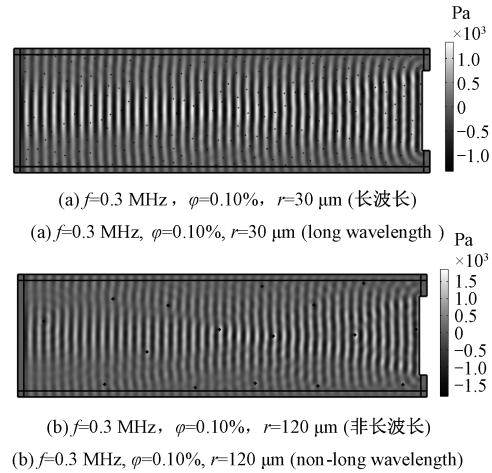


图 3 网格无关性验证曲线

Fig. 3 Line chart of grid independence verification

1.5 仿真声压分布

对流固两相流进行仿真研究，在 f = 0.3 MHz，φ = 0.10% 条件下，颗粒半径 r = 30 μm（长波长）和 r = 120 μm（非长波长）的两相流仿真声压分布特征，如图 4 所示。相比之下，在大颗粒的仿真模型中，声压分布具有明显的散射现象。



(a) f=0.3 MHz，φ=0.10%，r=30 μm (长波长)

(a) f=0.3 MHz, φ=0.10%, r=30 μm (long wavelength)

(b) f=0.3 MHz，φ=0.10%，r=120 μm (非长波长)

(b) f=0.3 MHz, φ=0.10%, r=120 μm (non-long wavelength)

图 4 仿真声压分布

Fig. 4 Simulation sound pressure distribution

2 超声衰减理论模型研究

2.1 经典模型

经典超声衰减理论模型对各类衰减机制表现出敏感

性差异,表 2 对其进行了总结。ECAH 模型作为最完备的理论框架,完整包含了热衰减、粘性衰减和散射衰减 3 种基本机制。McClements 模型是 ECAH 模型的简化形式,仅保留热衰减和粘性衰减,忽略散射效应。耦合相模型考虑颗粒与流体之间的相互作用,描述了热衰减和粘性衰减。Core-Shell 模型基于有效介质理论,对两相流的声学特性计算进行了简化,只考虑了热衰减。BLBL 模型重点描述颗粒散射衰减引起的声能损耗。

表 2　经典超声衰减理论模型影响机制总结

Table 2　Summary of influence mechanism of classical ultrasonic attenuation theoretical models

模型	ECAH 模型	McClements 模型	耦合相模型	Core-Shell 模型	BLBL 模型
热衰减	√	√	√	√	-
粘性衰减	√	√	√	-	-
散射衰减	√	-	-	-	√

2.2　仿真和超声衰减理论模型对比

根据对流固两相流的仿真和经典理论模型的研究,得到声衰减系数随粒径变化曲线图。如图 5 是超声频率 f=0.3 MHz,空气中二氧化硅颗粒的体积浓度 φ=0.10% 时,超声衰减系数随颗粒粒径 r=20~335 μm 的变化规律。在该频率下,长波长和非长波长的界限 r_0=57.4 μm。随着颗粒粒径增大,误差棒也逐渐增大,表明数据结果波动较大,离散性增强,这是由于颗粒数目减少,颗粒分布对衰减结果更敏感,故本文均采用 10 次仿真的平均值作为最终结果。

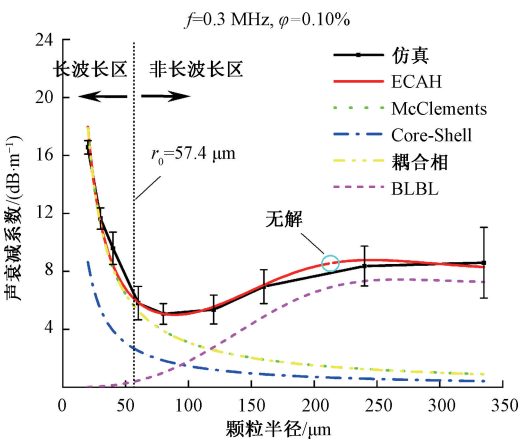


图 5　仿真和理论衰减值随颗粒粒径变化曲线

Fig. 5　Attenuation value curves of simulation and theoretical with particle size

从图 5 中曲线来看,仿真衰减值随颗粒粒径变化先显著减小再缓慢增大。其中,ECAH 模型与仿真值高度吻合,这得益于模型考虑的衰减机制最全面,包含了热衰减、粘性衰减和散射衰减,但在图中的圆圈标记处有一段数值缺失,模型计算过程出现了严重病态,导致在颗粒区域出现无解的现象。而 McClements 模型和耦合相模型仅在长波长区域与仿真值接近,这是由于模型都考虑了热衰减和粘性衰减,而未考虑散射衰减。而 Core-Shell 模型预测值明显偏低,这与其仅考虑热衰减机制直接相关,BLBL 模型则只在非长波长区域接近仿真值,反映出其专注于散射衰减的特点。

通过上述对比分析,验证了各理论模型在不同颗粒粒径范围内的适用性和稳定性,例如 ECAH 在全波长范围内预测性能良好,但是存在无解的情况。这源于模型采用贝塞尔和汉克尔函数展开波函数,当函数阶数过高且自变量极大或极小时,可能会出现函数发散,导致矩阵病态、数值计算不稳定。McClements 模型和耦合相模型仅在长波长区域适用,在非长波长区域的预测值趋于 0,BLBL 模型刚好相反,即在非长波长区域适用而在长波长区域失效。其次,也发现在长波长区,热衰减和粘性衰减占主导,散射衰减几乎为 0,而非长波长区,散射衰减显著提升,热衰减和粘性衰减非常微弱。以上表明,要准确预测全波长区衰减,必须涵盖全面的衰减机制,包括热衰减、粘性衰减和散射衰减,也充分揭示了单一经典超声衰减理论模型的固有局限性。

2.3　全波长模型构建

为实现对全波长区流固颗粒两相流声衰减系数的精确预测,通过叠加长波长区和非长波长区的优势模型来构建新模型。其中,BLBL 模型的散射衰减机制契合非长波区的声衰减特点,而长波长区的耦合相模型和 McClements 模型的衰减机制相似,但是耦合相模型的数学表达式明显更为复杂。基于计算效率与预测精度的综合考量,本文选择 McClements 模型与 BLBL 模型结合,建立了 McBL 模型,其显性表达式如式 (4) 所示。

$$\alpha_{\mathrm{McBL}}=\frac{3\varphi}{2k_c^{\,2}r^3}\left[\sum_{n=0}^{9}(2n+1)\,|B_n|^2-(A_0+3A_1)\right] \tag{4}$$

其中,φ 是颗粒的体积浓度,k_c 是压缩波波数,r 是颗粒半径,B_n 是 BLBL 模型的散射系数,计算方式如式 (5) 所示。

$$B_n=-\mathrm{j}e^{-\mathrm{j}\eta_n}\sin\eta_n=\frac{-\mathrm{j}\tan\eta_n}{1+\mathrm{j}\tan\eta_n} \tag{5}$$

其中,η_n 是散射波的相位差角,j 为虚数单位。McClements 模型的散射系数 A_0、A_1,采用式 (6) 的数学表达式计算。

$$\begin{cases} A_0 = \dfrac{\mathrm{j}k_c^{\ 3}r^3}{3}\left(1-\dfrac{\rho k_c^{\ '2}}{\rho' k_c^{\ 2}}\right) - k_c^{\ 2}rcT\rho\kappa H_M\left(\dfrac{\beta}{\rho C_p}-\dfrac{\beta'}{\rho' C_p'}\right)^2 \\ A_1 = \dfrac{-\mathrm{j}(k_c r)^3(\rho-\rho')}{6(\rho'-\rho)} + 3\rho \\ \qquad\qquad 1+3(1+\mathrm{j})\dfrac{\delta_v}{2r}+\dfrac{3\mathrm{j}\delta_v^{\ 2}}{2r^2} \end{cases} \tag{6}$$

其中,参数 T 是环境温度,β 是热扩散系数,H_M 为该模型的散射系数,带“′”表示颗粒相参数,否则是连续相参数。

为了验证 McBL 模型在全波长区的适用性,将新模型的预测数据与仿真结果进行对比分析。当超声频率 $f=0.3$ MHz,颗粒体积浓度 $\varphi=0.10\%$ 时,超声衰减系数随颗粒粒径 $r=20\sim335$ μm 的变化规律,如图 6 所示。在长波长区,McClements 模型的热衰减和粘性衰减主导了衰减过程;随着颗粒尺寸增大,BLBL 模型的散射衰减渐渐主导总衰减,其中,McClements 模型和 BLBL 模型在长波长到非长波长过渡区域出现更替交叠现象。McBL 模型在全波长区与仿真值贴近,其理论衰减与仿真衰减的相对误差在±13% 以内,且曲线连续无间断,未出现无解的情况。

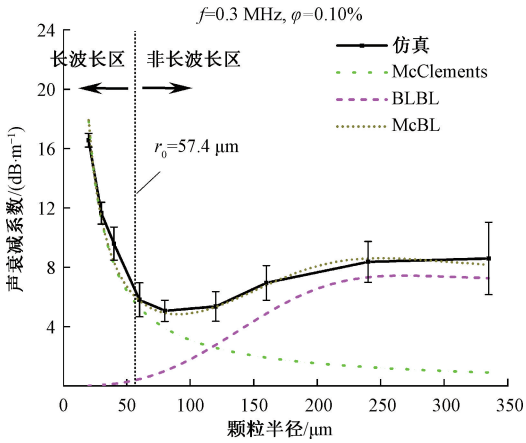
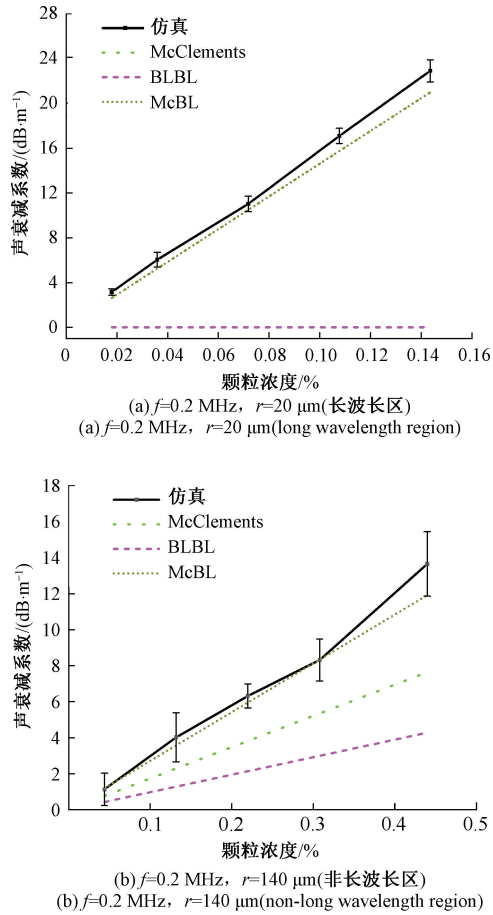


图 6 McBL 模型衰减值随颗粒粒径变化曲线

Fig. 6 Attenuation value curves of the McBL model with particle size change

如图 7 所示,给出了两种典型工况下超声衰减系数随颗粒体积浓度的变化规律:图 7(a)中超声频率 $f=0.2$ MHz,颗粒半径 $r=20$ μm(长波长区),颗粒体积浓度范围 $\varphi=0.02\%\sim0.14\%$;图 7(b)中超声频率 $f=0.2$ MHz,颗粒半径 $r=140$ μm(非长波长区),颗粒体积浓度范围 $\varphi=0.04\%\sim0.44\%$。在图 7(a)中,颗粒处于长波长区域,BLBL 模型的散射衰减几乎为 0,McBL 模型中主要是 McClements 模型的热衰减和粘性衰减在起作用,与仿真值相比相对误差在±17% 以内。在图 7(b)中,颗粒处于非长波长区域,BLBL 模型的散射衰减开始增大,和 McClements 模型共同主导 McBL 模型的衰减,总衰减与仿真值的相对误差在±13% 以内。



(a) f=0.2 MHz, r=20 μm(长波长区)

(a) f=0.2 MHz, r=20 μm(long wavelength region)

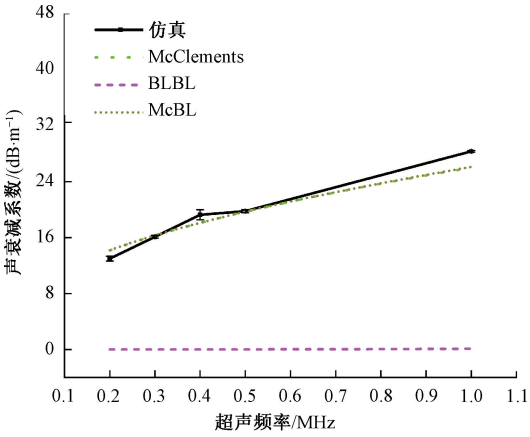
(b) f=0.2 MHz, r=140 μm(非长波长区)

(b) f=0.2 MHz, r=140 μm(non-long wavelength region)

图 7 McBL 模型衰减值随颗粒浓度变化曲线

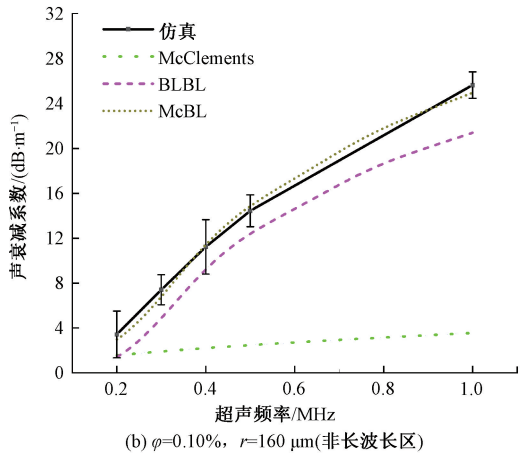
Fig. 7 Attenuation value curves of the McBL model with particle concentration

图 8 展示了 2 种工况下超声衰减系数随超声频率的变化规律:图 8(a)中颗粒体积浓度 $\varphi=0.04\%$,颗粒半径 $r=10$ μm(长波长区),超声频率范围 $f=0.2\sim1$ MHz;图 8(b)中颗粒体积浓度 $\varphi=0.10\%$,颗粒半径 $r=160$ μm(非长波长区),超声频率范围 $f=0.2\sim1$ MHz。图 8(a)是在长波长区,McBL 模型中 BLBL 模型计算的散射衰减成分为 0,衰减主要是 McClements 模型的热衰减和粘性衰减主导,其相对误差在±15% 以内。图 8(b)是在非长波长区,BLBL 模型的散射衰减主导衰减并且所占比重逐渐增大,McClements 模型初始值与 BLBL 模型相近,但增长较慢且数值始终偏低。因为随着频率增大,波长 λ 越来越小,致使 λ/r 越来越小,导致粒径进一步深入非长波长区,散射效应显著增强。McBL 模型考虑了散射衰减、热衰减和粘性衰减,相对误差不超过±14%。



(a) φ=0.04%，r=10 μm(长波长区)

(a) φ=0.04%，r=10 μm(long wavelength region)



(b) φ=0.10%，r=160 μm(非长波长区)

(b) φ=0.10%，r=160 μm(non-long wavelength region)

图 8　McBL 模型衰减值随超声频率变化曲线

Fig. 8　Attenuation value curves of the McBL model with ultrasonic frequency

综上可见,McBL 模型能够在全波长区准确预测流固颗粒两相流声衰减系数随颗粒粒径、颗粒浓度及超声频率的变化规律。说明 McBL 模型综合考虑了超声在流固颗粒两相流中的衰减机制,包括热衰减、粘性衰减和散射衰减,并且相比于 ECAH 模型利用贝塞尔和汉克尔函数的完整表达式展开波函数,McBL 模型采用了函数的近似表达式进行展开,避免了函数发散,克服了在部分粒径区域出现无解的问题。

2.4　反演方法研究

粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)是一种基于群体智能的优化算法,模拟鸟群或鱼群的觅食行为,通过个体与群体历史最优解的引导,在解空间中搜索最优解,具有简单易实现、收敛速度快的特点。算法的实现流程如算法 1 所示。

算法 1　粒子群算法

开始

1)初始化粒子群:设置粒子个数 n 最大为 50

位置 $X_n(0)=[r(0),\varphi(0)]$

速度 $V_n(0)=[v(0),q(0)]$

局部最优解 $P_{best}=X_n(0)$,局最优解 $G_{best}=X_n(0)$,

半径 $r(0)\in[10^{-7},10^{-5}]$,浓度 $\varphi(0)\in[10^{-4},5\times10^{-2}]$,

半径迭代速度 $v(0)\in[0,1]$,

浓度迭代速度 $q(0)\in[0,1]$

2)进行迭代

迭代次数 $k\leqslant$最大迭代次数 $K=1\ 000$

(1)更新惯性权重(线性递减):

$W_n(k)=W_{start}-(W_{start}-W_{end})\cdot(k/K)$

$W_{start}=1.0, W_{end}=0.2$

(2)评估每个粒子的适应度:

$f(k)=\Sigma(\alpha_I-\alpha_A)^2$

α_I:反演衰减系数

α_A:实际衰减系数

(3)更新 P_{best} 和 G_{best}:

if $f(k)<P_{best}\rightarrow$Update $P_{best}=X_n(k)$,

if $f(k)<G_{best}\rightarrow$Update $G_{best}=\text{argmin}[f(P_{best})]$

(4)更新“速度”和“位置”:

$V_n(k+1)=W_n(k)\cdot V_n(k)+c_1\cdot r_1\cdot[P_{best}-X_n(k)]+c_2\cdot r_2\cdot[G_{best}-X_n(k)]$

$X_n(k+1)=X_n(k)+V_n(k+1)$

学习因子 $c_1=1.49, c_2=1.49$,

随机参数 $r_1=\text{rand}([0,1])$,$r_2=\text{rand}([0,1])$

(5)检查是否停止迭代:

if $k=K$ or $f(k)_{min}<10^{-14}\rightarrow$break

3)**输出**:

G_{best}

结束

利用 McBL 模型和 PSO 算法组合而成的反演算法,在超声频率 f=0.3 和 0.5 MHz 下,针对 φ=0.04%,D=20 μm 和 φ=0.10%,D=40、160、240、320 μm 这 5 个仿真工况点的超声衰减系数进行反演,结果如表 3 所示。

表 3　仿真反演结果

Table 3　Simulation inversion results

给定粒径/μm	给定浓度/%	反演粒径/μm	粒径相对误差/%	反演浓度/%	浓度相对误差/%
20	0.04	22.441	12.203	0.046	14.848
40	0.10	41.929	4.823	0.109	5.615
160	0.10	153.294	−4.191	0.100	−3.378
240	0.10	229.536	−4.360	0.118	13.700
320	0.10	314.905	−1.592	0.105	1.205

数据显示,粒径反演的相对误差在±13%以内,浓度反演的相对误差在±15%以内。这一结果充分表征了PSO算法在颗粒参数估计中的精度特性,也初步验证了McBL理论模型在固体颗粒体系中的适用性和有效性。

3 实验测量研究

3.1 实验装置搭建

为了进一步说明McBL模型和PSO算法的准确性,进行流固两相流颗粒特征参数的实验测量。搭建了双频透射法声衰减测量系统,如图9所示,主要包括待测管段(内含液固两相流)、超声探头、磁力搅拌器、稳压电源、自研式超声收发电路、数据采集卡和计算机。超声收发电路在稳压电源供电下,通过计算机编程控制可产生频率10 kHz、幅值-80 V、脉宽2 μs的高压激励脉冲。在该负脉冲电压的激励下,管段上嵌入的发射探头1A和发射探头2A分别产生2和5 MHz的超声波信号,超声波经过磁力搅拌器均匀分散的流固两相流介质后,分别由正对的2 MHz接收探头1B和5 MHz接收探头2B捕获,声波信号被转化为模拟电信号传回超声收发电路,经过电路放大、滤波处理后,数据采集卡以100 MHz的采样频率采集超声信号,并传输至计算机进行数据显示、存储和后续计算。

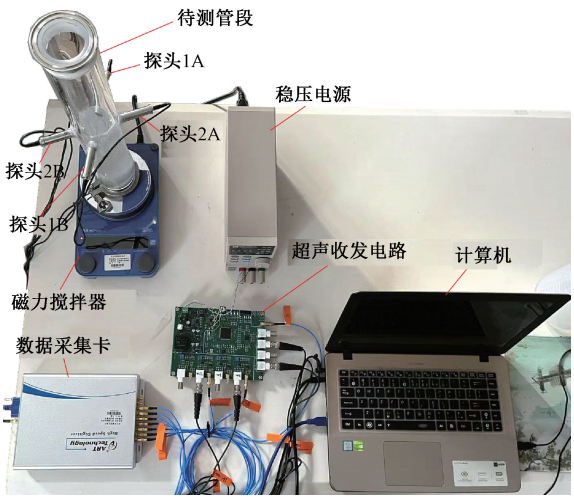


图9 实验装置

Fig. 9 Diagram of experimental device

3.2 悬浊液制备与表征

选取二氧化硅和聚苯乙烯两种介质作为固体颗粒相,制备了2份不同粒径的水-二氧化硅颗粒悬浊液,和1份水-聚苯乙烯颗粒悬浊液,分别标记为S1、S2、P1。为了分散团聚的颗粒,对悬浊液进行了5 min的超声波振荡处理,随后使用马尔文激光粒度仪测量颗粒粒径分布。为直接了解颗粒表面特征、分散状态等,通过扫描电子显微镜对样本S1和P1进行观察。

其中,样本S1的显微镜图如图10所示,从图10中可以看出,二氧化硅颗粒呈表面光滑的规则球形,且无明显的团聚现象,大部分粒径<1 μm,但颗粒尺寸大小不一,单分散性较差。

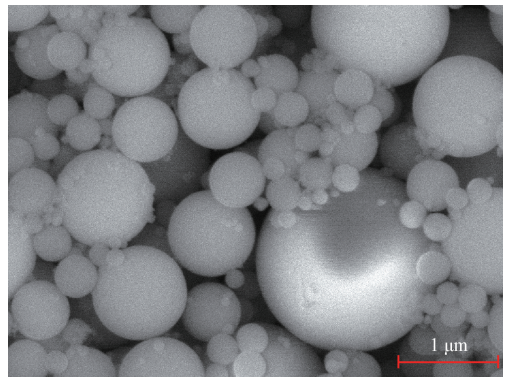


图10 S1样本扫描电子显微镜图

Fig. 10 Scanning electron microscope image of the S1 sample

采用马尔文激光粒度仪测量样本中固体颗粒的粒度分布如图11、12所示。

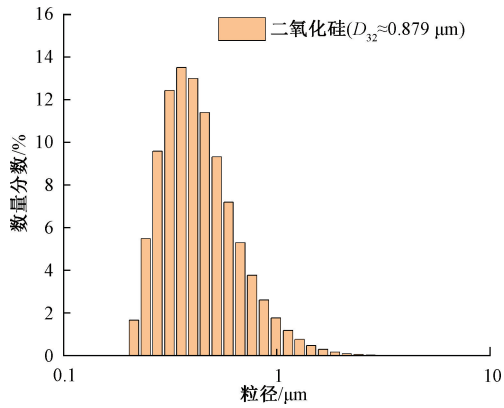


图11 S1样本粒度分布

Fig. 11 Particle size distribution of the S1 sample

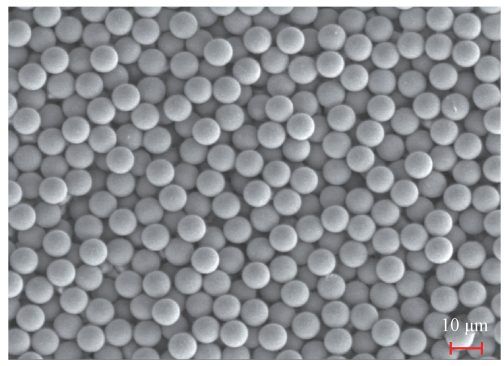


图12 P1样本扫描电子显微镜图

Fig. 12 Scanning electron microscope image of the P1 sample

由索特平均粒径 D_{32} 作为标准的平均粒径,其计算方式如式(7)所示。

$$D_{32}=\frac{\sum N_i D_i^{3}}{\sum N_i D_i^{2}} \tag{7}$$

其中,N_i 为颗粒粒径 D_i 所对应的颗粒个数或颗粒数量分数。

从图 11 可以看出,S1 样本中大部分二氧化硅颗粒的粒径分布在 0.357 μm 左右,然而,颗粒的粒径最大为 2.420 μm,最小粒径则达到 0.214 μm,颗粒粒径分布较为分散,根据粒径分布计算出 S1 样本中颗粒的平均粒径 $D_{32}=0.879$ μm。

P1 样品的扫描电子显微镜图如图 12 所示,与二氧化硅颗粒相比,聚苯乙烯颗粒不仅具有良好的光滑度和球形度,而且尺寸更大,粒径分布更均匀,略小于 10 μm,未观察到任何团聚现象,进一步表明其具有优异的单分散性。

P1 样本的粒径分布如图 13 所示,大部分聚苯乙烯颗粒集中在 6.720 μm 左右,粒径分布范围较窄,最大的粒径达到 12.700 μm,最小粒径为 3.550 μm,分布较为集中,单分散性显著优于二氧化硅颗粒,其平均粒径计算得出 $D_{32}=8.100$ μm。

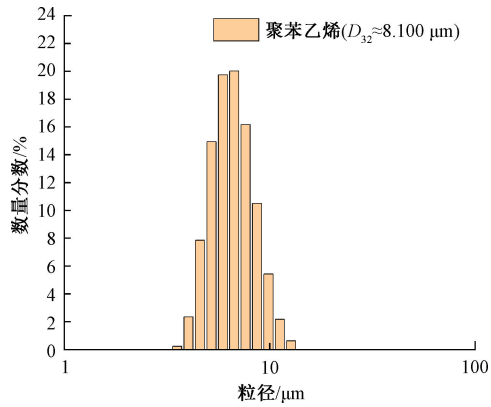


图 13　P1 样本粒度分布

Fig. 13　Particle size distribution of the P1 sample

3.3　实验结果和误差分析

利用上述实验装置和流固两相流介质,开展了超声衰减测量实验,通过控制磁力搅拌器转速尽量分散颗粒、防止颗粒沉降的同时,保证两相流内无明显漩涡,获得在 2 和 5 MHz 频率下的声衰减系数。基于 McBL 模型与 PSO 算法对衰减系数进行反演,得到颗粒平均粒径和浓度,并与激光粒度仪测量的颗粒粒径进行对比,结果如表 4 所示。粒径的相对误差在±10%以内,处于可接受范围,表明该方法在流固两相流颗粒平均粒径反演中具有较高的可靠性。

表 4　实验测量反演结果

Table 4　Inversion results of experimental measurement

悬浊液	2 MHz 探头衰减系数/(dB·m^{-1})	5 MHz 探头衰减系数/(dB·m^{-1})	标准粒径/μm	反演粒径/μm	相对误差/(%)	反演浓度/(%)
S1	3.364 9	8.015 3	0.879	0.822	-6.462	0.028 6
S2	1.388 9	1.957 8	4.150	4.285	3.241	0.033 7
P1	0.690 5	0.501 2	8.100	7.776	-4.003	0.121 6

以上分析可知,虽然本研究提出的超声衰减法测量流固两相流颗粒特征参数具有一定的准确性和可靠性,但是仿真和实验结果均存在一定的误差,其主要来源为:

1)理论模型的局限性:McClements 模型和 BLBL 模型为了简化计算进行近似处理,可能导致模型预测与实际情况存在偏差。

2)仿真模型的随机性:每次利用打靶法产生的颗粒位置坐标有所不同,会导致超声传播路径和相互作用方式的差异,从而引起仿真结果的波动。

3)悬浊液的非理想状态:随着时间的推移,两相流中的固体颗粒可能出现大颗粒沉降、小颗粒团聚、或颗粒粘附于管壁及探头表面等现象,从而影响测量精度。

需在后续研究中进一步优化模型和实验方法,以提高测量精度。

4　结　　论

本文研究了低浓度流固两相流颗粒特征参数全波长区超声衰减测量方法,通过热粘性声学物理场对气固两相流进行仿真,对比分析了超声衰减理论模型,并深入讨论了超声衰减机制,构建了 McBL 模型,通过液固两相流实验验证其准确性。本研究结论为:

1)针对全波长区的流固两相流,建立了基于热粘性声学物理场的仿真模型,进行超声衰减仿真分析,为完善超声衰减理论模型提供了依据。

2)通过经典声衰减理论模型和流固两相流仿真的对比,构建了适用于全波长区流固两相流的 McBL 模型,揭示了超声波长与衰减机制的联系。

3)结合 McBL 模型与 PSO 算法,形成了颗粒特征参数的反演方法,对仿真衰减系数进行反演,与给定粒径和浓度相比,相对误差均在±15%以内,初步验证了 McBL 模型的准确性。

4)搭建双频透射法声衰减测量系统,开展了流固两相流声衰减测量实验,并对衰减系数进行反演。粒径的

相对误差在±10%以内,进一步验证了 McBL 模型的精确性和可靠性。

参考文献

[1] ZHAO B L, ZHOU B N, CHU ZH Q, et al. Enhancing packing efficiency in coal water slurry systems through multi-model particle size distribution optimization[J]. Powder Technology, 2025, 455: 120729.

[2] XIE Y H, SUN D W, PAN SH L, et al. Evaluating the influence of coal particle size gradation on the properties of coal-water slurry[J]. Powder Technology, 2024, 435: 119431.

[3] NIE B SH, ZHANG H, LIU X F, et al. Study on explosion characteristics and microstructure correlation analysis of coal dust in the presence of various concentrations and particle sizes[J]. Fuel, 2024, 373: 132393.

[4] REN X F, LI H, XUAN W F, et al. Influence of particle size distribution on coal dust explosion sensitivity[J]. Powder Technology, 2025, 457: 120894.

[5] ZHONG L, GAO L L, LI L, et al. Deep learning meets visualization: A novel method for particle size monitoring in fluidized bed coating[J]. Microchemical Journal, 2025, 212: 113256.

[6] ZHANG P, CHENG J N, LI X K, et al. Dispersion characteristics of slurry particles in a gas-solid fluidized bed with continuous slurry injection[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 305: 121209.

[7] TIMSINA R, THAPA R K, Moldestad B M E, et al. Effect of particle size on flow behavior in fluidized beds[J]. International Journal of Energy Production and Management, 2019, 4(4): 287-297.

[8] VERLEYSEN E, WAGNER T, LIPINSKI H G, et al. Evaluation of a TEM based approach for size measurement of particulate (Nano) materials[J]. Materials, 2019, 12(14): 2274.

[9] 徐喜庆, 梁雪, 陈灵华, 等. 碎屑岩颗粒分布测量系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2004(S1): 377-378, 389.
XU X Q, LIANG X, CHEN L H, et al. Design and realization of measuring system of clasolite grain size distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(S1): 377-378,389.

[10] WANG CH, YU H Y, WU D Y. Volume fraction measurement of oil-water two-phase flow using a coaxial conductivity sensor[J]. Instrumentation, 2014(1): 49-58.

[11] KONSTANTY J, TYRALA D. Particle sizing and surface area measurements: A comparative assessment of commercial air permeability and laser light diffraction instruments[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4802.

[12] 翔云, 张凯华, 陈作辉, 等. 基于视觉的夜间细颗粒物浓度估计[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 33-42.
XIANG Y, ZHANG K H, CHEN Z H, et al. Vision-based night-time fine particulate matter concentration estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 33-42.

[13] 张世玮, 刘鸿彬, 陈朝雷, 等. 基于蒙特卡罗模型的高浓度浆液细度在线测量[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 170-179.
ZHANG SH W, LIU H B, CHEN CH L, et al. On-line measurement of high concentration slurry fineness based on Monte Carlo model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 170-179.

[14] JAMES J, FARAN J R. Scattering of sound by cylinders and spheres[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1951, 22(5): 405-418.

[15] 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.

[16] EPSTEIN P S, CARHART R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. water fog in air[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(3): 553-565.

[17] ALLEGRA J R, HAWLEY S A, Holton G. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51(5B): 1545-1564.

[18] 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.

[19] HARKER A H, TEMPLE J A G. Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1988, 21(11): 1576-1588.

[20] EVANS J M, ATTENBOROUGH K. Coupled phase theory for sound propagation in emulsions[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(1): 278-282.

[21] HEMAR Y, HERRMANN N, LEMARÉCHAL P, et al. Effective medium model for ultrasonic attenuation due to the thermo-elastic effect in concentrated emulsions[J]. Journal de Physique II, 1997, 7(4): 637-647.

[22] HIPP A K, STORTI G, MORBIDELLI M. Acoustic characterization of concentrated suspensions and emulsions. 1. model analysis[J]. Langmuir, 2002, 18(2): 391-404.

[23] HIPP A K, STORTI G, MORBIDELLI M. Acoustic characterization of concentrated suspensions and emulsions. 2. experimental validation[J]. Langmuir, 2002, 18(2): 391-404.

[24] WANG M, ZHENG D D, DONG J, et al. A new model for measurement of the droplet size and volume fraction in air-droplet two-phase flow based on ultrasonic attenuation method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9502613.

[25] SU Q, TAN CH, DONG F. Ultrasound attenuation characteristics in oil-water two-phase flow[C]. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015, 1179-1184.

[26] 邵一哲, 谭超, 董峰. 油水两相流超声测试机理仿真建模[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 987-994.
SHAO Y ZH, TAN CH, DONG F. Modeling of ultrasonic measurement mechanism in oil-water two-phase flow[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 987-994.

[27] FAN J H, WANG F. Ultrasonic simulation research of two-dimensional distribution in gas-solid two-phase flow by backscattering method[J]. Archives of Acoustics, 2022, 47(3): 373-382.

[28] 董俊. 基于超声衰减法测量液滴粒径分布的仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
DONG J. Simulation study on measurement of droplet size distribution based on ultrasonic attenuation method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

作者简介

王蜜(通信作者),2022 年于天津大学获得博士学位,现为河北大学讲师、硕士生导师,主要研究方向为多相流测试技术与仪器。
E-mail:wangmi@ hbu. edu. cn

Wang Mi (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2022. She is currently a lecturer and a master advisor at Hebei University. Her main research interests include multiphase flow measurement technology and instruments.

刘杰贵,2022 年于山东理工大学获得学士学位,现为河北大学硕士研究生,主要研究方向为流体流动参数检测与数值模拟。
E-mail:liujiegui@ stumail. hbu. edu. cn

Liu Jiegui received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. He is currently a master student at Hebei University. His main research interests include fluid flow parameter detection and numerical simulation.

方立德,2008 年于天津大学获得博士学位,现为河北大学教授、质量技术监督学院院长,主要研究方向为热工参数计量与控制、多相流检测技术。
E-mail:fanglide@ hbu. edu. cn

Fang Lide received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. He is currently a professor and the dean of College of Quality and Technical Supervision at Hebei University. His main research interests include the measurement and control of thermal parameters, multiphase flow detection technology.