

超声衰减法测量悬浊液中颗粒粒度和浓度^{*}

苏明旭 蔡小舒 徐 峰 张金磊 赵志军

(上海理工大学颗粒与两相流测量技术研究所 上海 200093)

2003 年 1 月 10 日收到

2004 年 1 月 31 日定稿

摘要 研究了由颗粒悬浊液中 3 个频率下声衰减系数测量颗粒粒度分布和浓度的方法。用 FFT 对测得的 1, 2 和 5 MHz 3 个频率的声信号进行降噪后得到声幅度和声衰减系数, 再根据描述不同频率下声衰减系数与颗粒粒径及浓度关系的 ECAH 模型, 运用 Philip-Twomey-NNLS 算法和改进 Chahine 算法求解相关的第一类 Fredholm 方程, 反演出颗粒的尺寸分布和浓度。用该方法对两种不同尺寸体积浓度为 5% 的玻璃微珠-水悬浊液颗粒进行测量, 结果与显微镜法结果吻合。这表明: 测量 3 个频率下的声衰减信号, 结合 Philip-Twomey-NNLS 或改进的 Chahine 算法, 可在较高浓度条件下较准确地测得颗粒粒度和浓度, 从而简化了现有的高频率宽频带测量方法。

PACS 数: 43.35

The measurement of particle size and concentration in suspensions by untrasonic attenuation

SU Mingxu CAI Xiaoshu XU Feng ZHANG Jinlei ZHAO Zhijun

(Institute of Particle & Two Phase Flow Measurement Technology, University of Shanghai for Science and
Technology Shanghai 200093)

Received Jan. 10, 2003

Revised Jan. 31, 2004

Abstract A particle sizing method based on the principle of ultrasonic attenuation (UA) with three frequencies is presented. As a theoretical basis, the ECAH model is employed to analyze relationship between attenuations and particle size and concentration. Experiments are carried out to measure the particle size distribution (PSD) of aqueous glass beads suspensions with vol.5% concentration, in which ultrasonic signal has been generated and received by three transducers with fixed frequencies 1, 2 and 5MHz. Amplitude and attenuation can be obtained using FFT technique. The measured data are evaluated by both Philip-Twomey-NNLS algorithm and the modified Chahine algorithm to solve the first kind Fredholm integral equation and get the PSD and concentration. The ultrasonic measurement results show good consistence with those from microscopical measurement, which indicates the exact PSD and concentration can be obtained and equipment can be simplified by the promoted method.

引言

超声波在颗粒两相介质传递过程的衰减谱含有颗粒的粒度大小和浓度信息。由于超声波具有穿透力强、频带宽、非接触的特性, 这一理论方法较传统的测量技术如筛分法、离心沉降法等有很大优越性。而与当前普遍应用的基于光散射、电子显微镜以及图

像处理等测量原理的光学方法相比, 更能解决较高浓度下颗粒的测量和在线监测难题。

声波在颗粒两相介质中传播时会发生衰减。从物理机理上讲, 主要有如下机制: 声散射, 对它的描述可以与光散射类比; 热耦合, 即颗粒与连续介质间的非稳定热交换, 且与相间的压力波动密切关联; 黏性耦合, 由颗粒与连续介质物性差异, 如密度差导

^{*} 国家自然科学基金 (50176033) 和上海理工大学博士启动项目基金资助项目

致的二者相互运动而产生耗散。在颗粒尺寸远小于声波波长时, 散射机制可以被忽视, 后两者起主导作用。除了上述与颗粒粒度有关的衰减外, 介质本身的声吸收在颗粒测量过程中也应考虑。近年来 ECAH 以及其它模型的发展, 使得颗粒两相介质的数值模拟有了较为可靠的保证。而与此同时, 在极高频率下声衰减谱颗粒测量技术也发展得很快。国内在此领域的研究主要集中在颗粒平均粒度测量上, 而研究颗粒粒度分布测量的报道较少^[1-3]。通常认为用超声测量颗粒的粒度分布需要很宽的频率范围, 如英国 Malvern 公司和德国 Sympatec 公司的超声颗粒测量仪器采用从 1MHz 到 150MHz 内的连续频率范围。如此宽的频率给超声换能器及相应电路的制作带来很大困难。本文试图研究通过较少的测量频率来得到准确的粒度分布及浓度。

1 颗粒粒度的计算

1.1 颗粒两相介质中声衰减数值模拟

建立一套准确描述声在颗粒两相介质中传播衰减的理论模型对于超声测粒至关重要。Epstein, P.S 等学者从微体积元中的质量、动量和能量守恒定律出发, 建立了能精确描述球形颗粒两相离散系中声波动行为的 ECAH 模型^[4,5], 该模型中声衰减和声速的计算最终归结为一 6 阶的线性方程组求解问题。作者对该模型和其它模型^[8,9]介绍及数值模拟可见文献 6 和文献 7 中。图 1 为数值模拟得到体积浓度 5% 的玻璃微珠-水悬浊液中在 3 种声频率下超声衰减系数随颗粒粒径变化关系。由图可见, 不同频率的超声衰减系数随颗粒粒度变化趋势不同。利用该特性, 可通过不同频率声衰减系数比较来测量颗粒粒度。

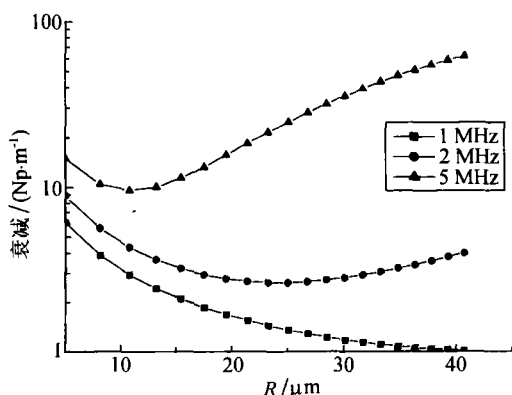


图 1 玻璃微珠-水悬浊液中声衰减系数 (ECAH 模型, $\phi=5\%$)

1.2 颗粒平均粒度的计算

在颗粒粒度小于声波长时, 颗粒的平均粒度和

浓度与声衰减系数间的关系为^[8]:

$$\alpha = \frac{\ln(I_0/I)}{2L} = \frac{3\phi}{4D_{32}} K_{ext}(f, D_{32}, \dots, t), \quad (1)$$

式中, I_0 和 I 分别是原始声强和通过颗粒两相介质衰减后声强, L 为声程, ϕ 为体积浓度, K_{ext} 为消声系数。式 (1) 表述了声衰减和浓度、颗粒粒径 D_{32} 以及频率 f 和物性参数之间的函数关系。可以看到, 在颗粒粒度确定时, 如果不考虑复散射效应, 声衰减与颗粒相浓度呈线性关系。排除多值性影响, 只需要测得至少两个频率下的声衰减, 即可求出颗粒的平均直径 D_{32} 。将其代入式 (1) 即可求出颗粒相浓度。

1.3 颗粒粒度分布计算

基于式 (1), 考虑不同粒度颗粒的贡献, 多分散颗粒系中声衰减系数的计算改写为:

$$\alpha = \frac{\ln(I_0/I)}{2L} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{3\phi}{4D} \frac{dV}{dD} K_{ext} dD, \quad (2)$$

其中, dV/dD 是颗粒粒度分布频度函数, 为待求值。式 (2) 在数学上称为第一类 Fredholm 积分方程, 对 dV/dD 的求解是典型的反问题。由于该积分方程至今没有理论解析解, 必须采用其它方法求解。将式 (2) 离散, 可得:

$$\alpha = \frac{3\phi}{4} \sum V(c) \int_{\Delta D} \frac{K_{ext}(D)}{D} dD, \quad (3)$$

考虑多个频率的测量, 式 (3) 可以写成矩阵形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{G}. \quad (4)$$

这里 \mathbf{A} 是系数矩阵, 其中的每个元素是由对式 (3) 右边 ΔD 区间内的核函数积分求得; \mathbf{F} 即离散化的颗粒尺寸频度分布 $V(c)$, 为待求值; \mathbf{G} 为不同频率下声衰减构成的向量, 由实际测量得到。式 (4) 所示线性方程组高度病态, 无法按高斯迭代法等通常算法求解。为解决这个问题已有一些算法被提出。数值模拟^[1]表明 Philip-Twomey-NNLS 算法和改进的 Chahine 算法在求解式 (4) 中是十分有效的。

在颗粒测量中, 为得到较多的颗粒粒度分布信息, 一般希望颗粒粒度分布的尺寸分档较多, 这意味着需要较多的频率来解析测量。例如消光法颗粒测量中, 为得到颗粒的粒度分布, 需要数十个波长的单色光。而在超声测量中, 采用较多的频率测量会使仪器设计和结构复杂化。这就要求用尽可能少的频率来反演出待测颗粒的粒度分布。但由于待测颗粒系的浓度通常是未知数, 而描述颗粒系分布最少需要两个参数, 这样最少需测量 3 个频率的声衰减确保反演成立。事实上, 对于超声测粒, 采用 3 频率测量声衰减可以简化实验设备, 有利于粒度的在线监测和反演。

2 实验装置与声衰减系数测量

图 2 所示为超声颗粒测量实验装置, 由信号发生器、发射换能器、样品池、接收换能器、信号放大调理系统和计算机组成。考虑当前的技术条件和成本, 以及所测样品的尺寸在微米级范围, 信号发生器所产生脉冲信号的频率选定为 1, 2 和 5 MHz; 换能器压电晶片材料为锆钛酸铅压电陶瓷。声信号经放大处理后由数据采集卡 (虚拟示波器) 接收。为形成均匀性较好的悬浮颗粒, 样品池底部设计了搅拌器, 同时安置了温度计记录悬浊液温度。

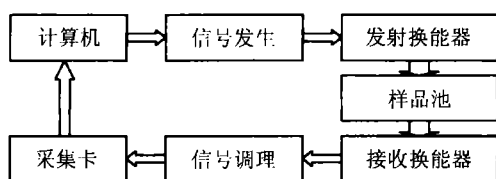


图 2 实验装置示意图

实验样品为两种规格的玻璃微珠 (见图 3 照片)。表 1 为用显微镜目测观察和摄像法随机进行的 10 次测量结果。该结果可作为本文方法测量结果的比较。

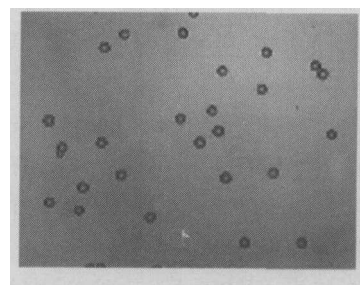
表 1 玻璃微珠样品的显微镜和摄像法测量结果

	方法	玻璃微珠尺寸 $D(\mu\text{m})$										平均值
样品 1	显微镜	50	58	57	54	50	64	65	58	59	61	57.6
	摄像法	53.8	99.7	54.7	51.5	60.1	59.3	61.5	58.1	62.0	68.7	62.94
样品 2	显微镜	43	40	30	54	44	30	45	50	40	35	41.1
	摄像法	32.6	55.1	40.8	52.5	48.9	43.5	35.3	12.7	71.6	43.0	43.6

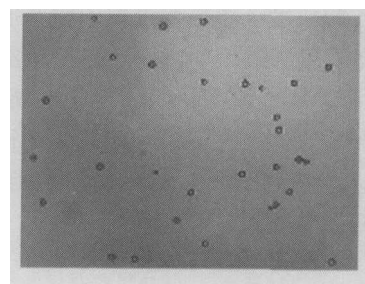
实验前配制 5% 体积浓度的悬浊液, 声衰减测量利用未加入颗粒前清水中所测幅值 A_0 和加入颗粒形成悬浊液后所测幅值 A_1 计算, 如下式^[10,11]:

$$\alpha = \frac{20\log(A_0/A_1)}{L}, \quad (\text{dB/m}) \quad (5)$$

这里, 幅值 A 通过对测得的声信号 (如图 4 所示) 进行快速傅里叶变换 (FFT) 处理消除杂波和噪声影响后得到回波 RMS 幅值, 即输出波形的全波整流输出。RMS 又称信号水平 (Signal Level), 是反映声发射能量强弱的非常重要的量。由于在清水和悬浊液中声发射换能器辐射阻抗不同, 利用该式计算声衰减系数存在一定误差, 按 5% 体积浓度条件作者计算出忽略辐射阻抗变化可能使颗粒粒度结果产生约 2% 误差。



(a) 样品 1



(b) 样品 2

图 3 玻璃微珠样品

(照片为颗粒经显微镜放大后由 CCD 摄像机拍摄)

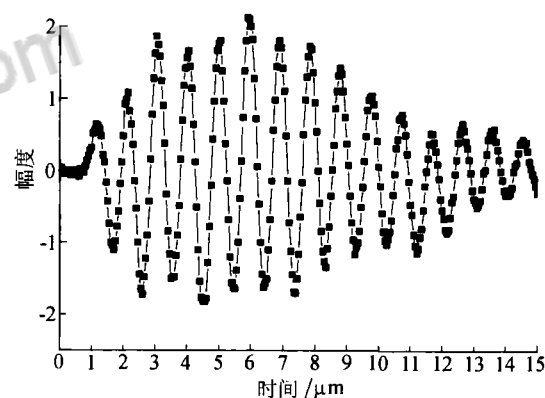


图 4 测得的声信号

3 测量结果

任意两个频率下声衰减获得后, 即可求得平均粒度。部分结果如表 2 和表 3 所示。由表可见, 超声测量平均粒度 D_{32} 结果与显微镜和摄像法得到的结果基本一致。表中显示测得体积浓度结果要比配置值偏大, 由于颗粒粒度计算过程只是利用衰减量相对关系, 而浓度计算需要测量准确的声衰减绝对量, 所以本方法中浓度的测量较粒度更困难, 测量误差也较大。

将频率为 1, 2 和 5 MHz 的声衰减, 按 1.2 节介绍方法处理后, 分别通过 Twomey 算法和改进的 Chahine 算法进行反演计算, 得到两种规格的玻璃微珠样品颗粒粒度相对频度分布如图 5 和图 6 所示。

进一步按该频度分布计算得到样品 1 的平均粒度是 $D_{32} = 50.2 \mu\text{m}$ (Twomey 算法) 和 $D_{32} = 49.1 \mu\text{m}$ (改进的 Chahine 算法), 样品 2 的平均粒度是 $D_{32} = 38.7 \mu\text{m}$ (Twomey 算法) 和 $D_{32} = 38.2 \mu\text{m}$ (改进的 Chahine 算法), 对于样品 1, 2, 两种反演算法均给出了基本一致的粒度分布形状和平均值。比较图 5 和图 6 可见分布图形很好地地将不同大小的颗粒群辨析出了, 颗粒群的粒度分布呈单峰状态, 且具有较宽广分布范围。另一方面, 将粒度结果与前述光学显微镜测量结果(见表 1)进行对比, 是基本吻合的。

表 2 玻璃微珠样品 1 测量结果: 平均粒度和浓度

$T = 19.2^\circ$	(1 MHz)									
A0	1.071	1.067	1.069	1.064	1.065	1.067	1.062	1.066	1.066	1.068
A0 平均	1.067									
A1	0.974	0.984	0.985	0.983	0.980	0.985	0.988	0.974	0.989	0.983
A1 平均	0.983									
$20\lg(A0/A1)/L$ (dB/m)	14.22									
	(2 MHz)									
A0	0.197	0.195	0.195	0.196	0.196	0.195	0.197	0.194	0.194	0.197
A0 平均	0.196									
A1	0.164	0.164	0.163	0.165	0.170	0.167	0.165	0.167	0.172	0.163
A1 平均	0.166									
$20\lg(A0/A1)/L$ (dB/m)	28.80									
α_{1M}/α_{2M}	0.494									
$D_{32}(\mu\text{m})$	52.25									
体积浓度 Φ	6.2%									

表 3 玻璃微珠样品 2 测量结果: 平均粒度和浓度

$t = 18.6^\circ$	(1 MHz)					(5 MHz)				
A0(相对值)	0.775	0.775	0.775	0.775	0.776	0.0697	0.0702	0.0695	0.0693	0.0692
A0 平均	0.776					0.0696				
A1(相对值)	0.685	0.685	0.691	0.693	0.698	0.0299	0.0312	0.0311	0.0317	0.0306
A1 平均	0.691					0.0309				
$20\lg(A0/A1)/L$ (dB/m)	20.11					140.8				
α_{1M}/α_{5M}	0.143									
$D_{32}(\mu\text{m})$	40.75									
体积浓度 Φ	7.1%									

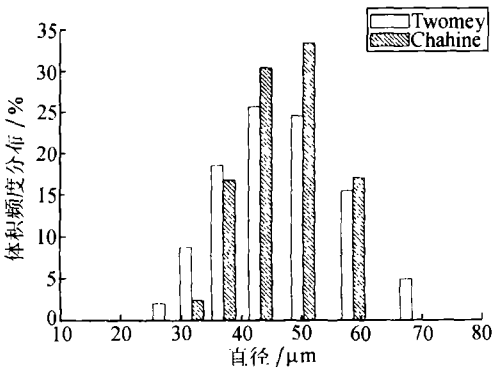


图 5 样品 1 粒度分布图

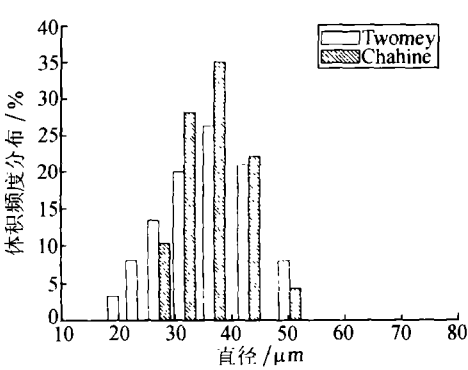


图 6 样品 2 粒度分布图

本实验中被测颗粒的体积浓度达到 5%, 已大大高于光学方法所能测量的颗粒浓度 (光程 10 mm 时 0.01% 左右), 因此更接近高浓度条件下的在线测量。由表 2 可见, 本文的 10 次实验得到的测量数据的标准随机误差 $\sigma = 0.0025$, 体现出较好的重复性。

4 结论

由 ECAH 模型出发, 研究了利用 3 频率声衰减测量悬浊液中颗粒粒度和浓度的理论和反演方法。并由此方法测量了浓度达 5% 悬浊液颗粒平均粒径和粒度分布及浓度, 粒度分布与显微镜测量结果吻合, 测量结果重复性很好。表明文中提出 3 频率声衰减法及采用的超声模型和反演算法可以在较高浓度两相颗粒系中测得合理的颗粒相浓度和粒度分布, 且方法实用, 装置简单。

参 考 文 献

- 1 苏明旭. 颗粒两相介质中颗粒粒径的超声测量理论研究. 博士论文, 上海理工大学, 2002
- 2 时 钟, 张叔英, Hamilton L J. 河口近细颗粒悬沙运动的声散射观测. 声学学报, 1998; 17(2): 36—40
- 3 张叔英. 悬浮泥沙声学观测的原理分析. 声学学报, 1999; 24(3): 269—274
- 4 Epstein P S, Carhart R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions: I. Water Fog in Air. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1953; 25(3): 553—565
- 5 Allegra J R, Hawley S A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972; 51(5): 1545—1564
- 6 苏明旭, 蔡小舒. 超细颗粒悬浊液中声衰减和声速的数值模拟—4 种模型的比较. 上海理工大学学报, 2002; 24(1): 21—25
- 7 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. 声学学报, 2002; 27(3): 218—222
- 8 Riebel U, Friedrich Löffler. The fundamentals of particle size analysis by means of ultrasonic spectrometry. *Part. Part. Syst. Charact.*, 1989; 6(3): 135—143
- 9 Tebbutt J S, Challis R E. Ultrasonic wave propagation in colloidal suspension and emulsions: a comparison of four models. *Ultrasonic*, 1996; 34(2): 363—368
- 10 田 坦, 樊世斌, 关 浩. 大动态范围水声脉冲信号的精确幅度测量及应答. 声学学报, 1995; 20(1): 42—48
- 11 David Julian McClements. Ultrasonic measurements in particle size analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Edited by Robert A. Meyers. ©John Wiley & Sons Ltd, Chichester. ISBN 0471 97670 9



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
