DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312102

基于蒙特卡罗模型的高浓度浆液细度在线测量*

张世玮[1,2],刘鸿彬[1,2],陈朝雷[1,2],田 昌[1,2],苏明旭[1,2]
(1. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093)

摘 要:近年来颗粒粒径测量问题受到了国内外的广泛研究。针对燃煤电厂高浓度脱硫石灰石浆液细度在线测量,将基于蒙特卡罗方法的声衰减模型拓展至高浓度范围,高浓度蒙特卡罗模型(HC-MCM)预测衰减系数与实验测量值相吻合。构建 HC-MCM 矩阵用于颗粒粒径分布的反演可减小计算时间,且差分进化算法的计算结果与设定粒径和分布宽度的相对误差小于 1%。搭建基于透射和反射法的双模式超声检测装置并开发软件测量系统,加工适用于高浓度浆液细度测量的透射传感器和超声探针,依托燃煤电厂完成长达 168 h 的浆液细度在线测量实验。结果表明,两种模式超声衰减谱的变化趋势和数值大小基本吻合。粒径分布参数 D_{V50} 与激光粒度仪测量结果的相对误差小于 8%,其粒径分布满足燃煤电厂成品石灰石浆液的细度要求。

关键词: 高浓度;石灰石浆液;蒙特卡罗模型;超声测量;粒径分布
中图分类号: TB551 TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 535.10

On-line measurement of high concentration slurry fineness based on Monte Carlo model

Zhang Shiwei [1,2], Liu Hongbin [1,2], Chen Chaolei [1,2], Tian Chang [1,2], Su Mingxu [1,2]
(*1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: In recent years, particle size and concentration measurements have been widely studied at home and abroad. An ultrasonic attenuation model based on the Monte Carlo method is extended to a high concentration for online measurement of desulphurization limestone slurry fineness in coal-fired power plants. The attenuation coefficients of the high-concentration Monte Carlo model (HC-MCM) are consistent with experimental measurement values. The model matrix constructed by HC-MCM can be used for the inversion of particle size distribution to reduce the calculation time. The relative deviation between the calculated value by the differential evolutionary algorithm and the set diameter and distribution width is less than 1%. A transmission and reflection dual-mode ultrasonic measurement device and software measurement system have been developed. The transmission sensor and ultrasonic probe are made to be suitable for the fineness measurement of high-concentration slurry, and have completed the 168-hour online measurement experiments relying on a coal-fired power plant. The results show that the trend and value of the attenuation spectra obtained by the ultrasonic transmission and reflection methods are basically the same, and the relative deviation between the volume median diameter D_{V50} and the measurement results of the laser particle analyzer is less than 8%. Its particle size satisfies the fineness requirements of finished limestone slurry in coal-fired power plants.

Keywords: high concentration; limestone slurry; Monte Carlo model; ultrasonic measurement; particle size distribution

0 引 言

高浓度颗粒两相流中的颗粒粒径分布、浓度等参数的检测,在能源利用、材料制备、化工过程、医药及食品安全生产等诸多领域中具有非常重要的应用背景和科学意义[1-4]。其中,燃煤电厂石灰石浆液细度直接影响烟气脱硫效率和副产品石膏的质量,浆液与烟气的反应效率随

收稿日期:2023-11-01 Received Date: 2023-11-01
*基金项目:国家自然科学基金(52376162)项目资助

固体颗粒粒径的减小而提高,但粒径过小会造成磨机过磨,增加设备的运行能耗[5]。目前石灰石湿磨制浆后的浆液品质难以保证,现场只能通过磨机电流、运行经验和手工筛分等方法估算或测量浆液细度,其精度和实时性都无法满足指导湿磨优化运行的要求,浆液粒径的在线监测对于燃煤电厂的稳定运行和效率提升具有显著价值[6-7]。

在颗粒粒径和浓度等参数的众多测量手段中,超声法已显现出非常明显的优势或独特性[8-10],具有较强的穿透能力,可以检测光学不透明的对象;频带范围宽,适合检测从纳米到毫米级的颗粒物;同时超声传感器具有强的抗污染能力,可以快速实现非接触、在线无损检测。超声法颗粒粒度和浓度测量问题受到了国内外学者的广泛研究:例如,Silva 等[11]对高浓度油包水乳浊液体系进行了理论和实验研究,测得了具有双峰特征的颗粒粒径分布。Abda 等[12]利用多频超声衰减和散射信号测量高浓度浆液的粒径分布和浓度,应用于矿物泥浆和泥沙研究。不过,现有高浓度液固两相流颗粒粒径测量主要是在实验室条件完成的,在材料制备、化工过程等实际工程应用中的在线测量研究相对较少,对于高浓度液固两相流中颗粒粒径在线测量方法有必要展开进一步研究。

目前超声法颗粒测量主要通过构建理论模型从数值上“预测”超声衰减谱,构建模型矩阵,形成颗粒粒径测量的正向模型;根据实验技术,将实验超声衰减谱或相速度谱与模型矩阵相结合,反演出颗粒粒径分布和浓度。传统超声法颗粒测量模型主要分为两类:以 ECAH (epstein-carhart-allegra-hawley)为代表的单散射模型和耦合相模型,其中 ECAH 模型仅适用于稀释颗粒体系[13]。耦合相模型并未考虑颗粒与声波的相互作用,也无法解释高浓度颗粒两相流中的超声散射现象[14]。研究学者指出,采用基于超声法的经典理论模型预测悬浊液中声衰减的体积浓度上限为 15%,常规模型在高浓度体系预测结果的准确性和可信度将大幅下降[15]。由此可见,现有模型在高浓度颗粒两相流的研究和应用中已显现出不足,其复散射效应和颗粒相互作用对声衰减的影响还需进一步研究。

本文结合蒙特卡罗数理统计方法与声散射理论建立适用于颗粒粒径测量的超声衰减模型,引入等效介质概念将模型拓展至高浓度范围,通过数值模拟和实验研究讨论高浓度蒙特卡罗模型(high concentration Monte Carlo model, HC-MCM)在高浓度浆液中的适用性。根据石灰石-水多分散悬浊液理论衰减谱,验证模型矩阵和反演算法的计算准确性。另外,搭建基于透射和反射法的双模式超声装置并开发软件系统,将其应用于燃煤电厂湿磨制浆系统中,获取超声接收信号并计算实验衰减谱,通过差分进化(differential evolution, DE)算法计算颗粒粒径分布,实现燃煤电厂高浓度石灰石浆液细度的在线监测。

1　蒙特卡罗模型

蒙特卡罗是一种以概率统计理论为基础的数值方法,可将其用于构建超声法颗粒粒径测量的理论模型[16-18],称为蒙特卡罗模型(Monte Carlo model, MCM),其核心思想是将入射声波按照“声子”概念抽象并离散化处理。如图 1 所示的液固两相体系中,结构参数 L 为发射器(T)和接收器(R)之间的距离,d 为接收器直径,H 为上下边界距离,l_n 为第 n 次($n=1,2,3,\cdots$)随机散射后声子运动自由程。声子行为包括透射、吸收、越界和散射,通过统计接收器获取声子数,即可模拟在一定颗粒粒径、体积浓度和超声频率时液固两相体系中的声波行为并计算超声衰减系数。

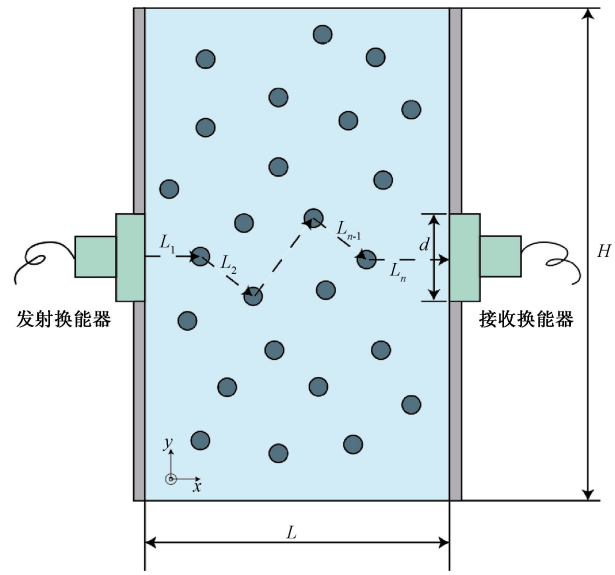


图 1　声子在两相体系中的传播过程

Fig. 1　Propagation of phonons in two-phase system

首先,对声子事件进行表征。判定声子与颗粒碰撞后的行为,定义 P 为超声散射和消声系数的比值。

$$P = Q_s / Q_T \tag{1}$$

其中,消声系数 $Q_T = Qa + Qs$。Qa 和 Qs 为吸收系数和散射系数,由 Alex Hay 和 Mercer 方法计算[19]。接下来根据设定条件判断声子的下一事件。

$$\begin{cases} (\varepsilon_1 > P)\&(n \geqslant 1) & \text{吸收} \\ (x > L)\&(n < 1) & \text{透射} \\ (x < 0) \parallel (y \geqslant H) & \text{越界} \\ \text{其他} & \text{复散射} \end{cases} \tag{2}$$

式中:ε_1 是[0,1]区间服从均匀分布的随机数,n 为散射次数,x 为声子沿 X 方向的运动距离,y 为声子沿 Y 方向的运动距离。

通常进入液固两相体系中的声子可能被接收器直接

接收(透射)、被颗粒吸收、越界逃逸或散射。前 3 种情况下,声子历程终止,而对于散射行为,则需进一步追踪声子。在液体中传播的声子遇到颗粒发生散射时,需确定声子散射方向及声子两次散射之间的自由程。采用式(3)计算归一化散射声压$f(\theta)$。

$$f(\theta)=\frac{p(\theta)}{\int_0^{360}p(\theta)\mathrm{d}\theta} \tag{3}$$

式中:θ 为散射角,取值范围为 0°~360°。$p(\theta)$是颗粒表面散射声压分布函数,对于弹性固体颗粒,可由 Faran 理论计算[20],式(4)给出计算公式:

$$p(r,\theta)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n[j_n(kr)+in_n(kr)]p_n(\cos\theta)] \tag{4}$$

式中:j_n 和 n_n 为第 1 类和第 2 类球 Bessel 函数,k 为入射声波波数,r 为接收点距离,$P_n(\cos\theta)$为勒让德多项式,i 为虚数单位,散射系数 A_n 由 Faran 理论计算。

为确定声子出射方向,将散射角 θ 从 0°~360°划分为 360 份,引入另一随机数 ε_2 与归一化散射声压分布 $f(\theta)$比较,如果:

$$\varepsilon_2 \leqslant \sum_{i=1}^{M}f(\theta_i) \tag{5}$$

则声子散射后的出射角就为 θ_M,M 取值范围为 1~360。之后确定随机散射声子的自由程 l:

$$l=-\ln(1-\varepsilon_3)/Q_T \tag{6}$$

式中:ε_3 是在[0,1]区间服从均匀分布的另一随机数。

重复式(2)~(6)的声子运动过程,在确定经过 $n+1$ 次散射后声子仍在颗粒体系中后,可得其散射坐标:

$$\begin{aligned}x_{n+1}&=x_n+l_n\cos(\theta_M)\\ y_{n+1}&=y_n+l_n\sin(\theta_M)\end{aligned} \tag{7}$$

式中:x_n 和 y_n 是声子第 n 次散射后的坐标位置。

至此,所有声子都要经历上述过程,根据式(2)判断并统计其最终去向,模型中声子运动全过程如图 2 所示,超声衰减系数计算公式为:

$$\alpha=-\frac{\ln(N_{\mathrm{det}}/N_{\mathrm{tot}})}{L} \tag{8}$$

式中:N_{det} 是探测接收器接收声子数目,N_{tot} 是声子样本容量。

2 模型修正及数值计算

2.1 高浓度蒙特卡罗模型

以 石灰石-水悬浊液为研究对象,分别从颗粒粒径、超声频率和体积浓度 3 个方面讨论超声衰减的内在变化规律,并将其预测结果与 ECAH 模型[21]进行比较。定义模拟系统左右边界间距 L 为 50 mm,上下间距 H 为

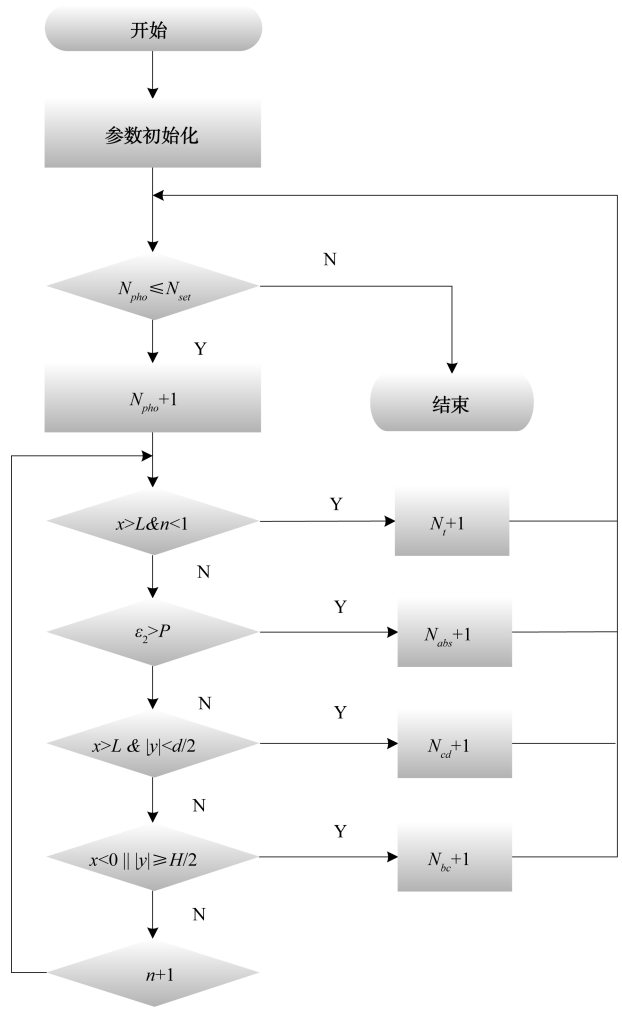


图 2 蒙特卡罗模型算法流程

Fig. 2 Flowchart of the algorithm for Monte Carlo model

100 mm,换能器直径 d 为 5 mm,声子数 N_{tot} 为 10×10^4。表 1 为颗粒相和连续相的物性参数。

表 1 水和石灰石颗粒的物性参数

Table 1 Physical parameters of water and limestone particle

物性参数	符号	单位	水	石灰石
密度	ρ	kg/m^3	997	2 715
压缩波速	c	m/s	1 496.7	5 260
剪切粘度	η	Pa·s	9.03×10^{-4}	-
剪切模量	μ	N/m^2	-	3.0×10^{10}
导热系数	τ	W/(m·K)	0.595	68.2
比热容	C_p	J/(kg·K)	4 178.5	829
声吸收系数	α	Np/m	2.2×10^{-14}	0.080 6
热膨胀系数	β	K^{-1}	2.57×10^{-4}	4.8×10^{-6}

如图 3(a)所示,超声衰减系数随颗粒直径先减小后增大,且 MCM 与 ECAH 模型的变化趋势和数值大小基本吻合。从图 3(b)中不难看出,MCM 在图示频率范围内与 ECAH 模型结果相同。随着超声频率的增加,声衰减系数迅速增大,声波能量的主导耗散机制由吸收衰减向散射衰减过渡。

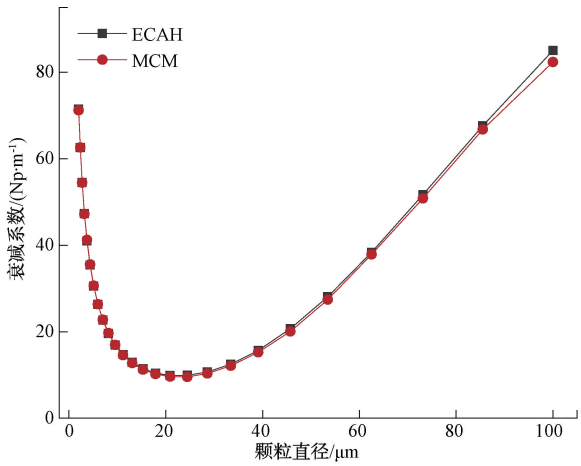


图 3　超声衰减随颗粒粒径和频率的变化

Fig. 3　Variation of attenuation with particle size and frequency

图 4 给出了 MCM、ECAH、H&T+BLBL(Harker & Temple and Bouguer-Lambert-Beer-Law)[22]模型和实验衰减系数(3.1 节实验获得)随浆液体积浓度的变化曲线。当体积浓度较低时,MCM 计算结果与实验测量值基本一致,但随着体积浓度的增加,测量值出现了 ECAH 和 MCM 模型没有的非线性增长现象,表明其预测高浓度悬浊液声衰减时,有着明显的浓度适用范围和常出现的过度预测行为。另外,H&T 为基于流体动力学观点提出的耦合相模型,宏观处理了液固两相中颗粒间相互作用,使其能够适应更高浓度的情形;同时类比光学方法通过 BLBL 模型对颗粒散射现象进行描述,两个叠加称为 H&T+BLBL 模型。体积浓度小于 30% 时,H&T+BLBL 模型预测衰减系数与实验值基本吻合;而当体积浓度大于 30% 时,衰减系数随体积浓度的增加而减小,逐渐偏离实验测量值。

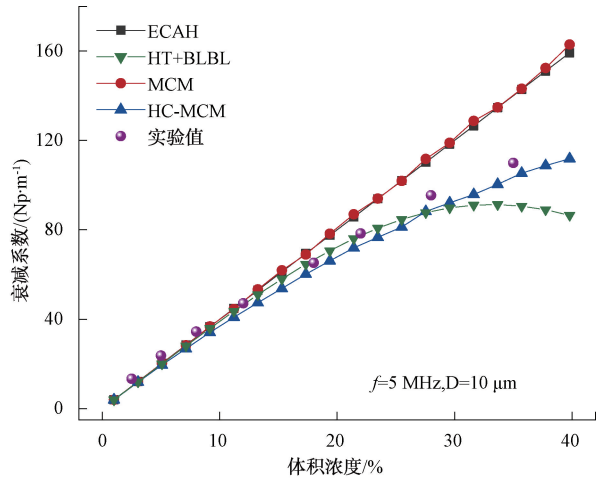


图 4　超声衰减随浓度的变化

Fig. 4　Variation of ultrasonic attenuation with concentration

为将高浓度时颗粒间的相互作用引入基于蒙特卡罗方法所构建的声衰减模型,类比耦合相模型中提出的“等效介质”概念。当声子与固体颗粒发生相互作用时,将原本该颗粒周围的连续介质用等效介质替代,从宏观角度出发考虑周围其他颗粒对该颗粒的声传播影响[23]。在此基础上发展适用于高浓度声衰减预测的 HC-MCM 模型,定义 ϕ 为颗粒相体积浓度,则等效介质物性参数的计算公式为:

$$\begin{aligned}
&\phi = (m_1/\rho_1)/(m_2 + (m_1/\rho_1))\\
&\rho^* = \phi\rho_1 + (1-\phi)\rho_2\\
&c^* = (\phi/c_1 + (1-\phi)/c_2)^{-1}\\
&\eta^* = \eta_2\\
&\mu^* = \mu_1\\
&\tau^* = \phi\tau_1 + (1-\phi)\tau_2\\
&C_P^* = \phi C_{P1} + (1-\phi)C_{P2}\\
&\alpha^* = \phi\alpha_1 + (1-\phi)\alpha_2\\
&\beta^* = \phi\beta_1 + (1-\phi)\beta_2
\end{aligned} \tag{9}$$

式中:表 1 给出了各物性参数的对应符号,颗粒相和连续相参数分别用下标 1 和 2 表示,等效介质物性参数用上标“*”表示。

如图 4 所示,体积浓度 1%~35% 范围内,HC-MCM 预测衰减系数与实验值基本吻合。浓度较低时,衰减系数随浓度近似线性变化;浓度大于 10%,HC-MCM 预测衰减系数随浓度非线性增加。相比 H&T+BLBL 模型,HC-

MCM 预测结果与实验测量值更为接近,因此使用该模型预测浆液超声衰减谱。

2.2 模型矩阵计算

蒙特卡罗是以概率统计为基础的数值方法,直接由声子统计反演颗粒粒径时所需时间较长,因此借鉴如 ECAH、耦合相等模型反演方法,将模型矩阵用于颗粒粒径反演可减小计算时间。图 5 为 HC-MCM 计算得到的石灰石-水悬浊液声衰减系数矩阵,其中体积浓度 20%,声子数 10×10^4。

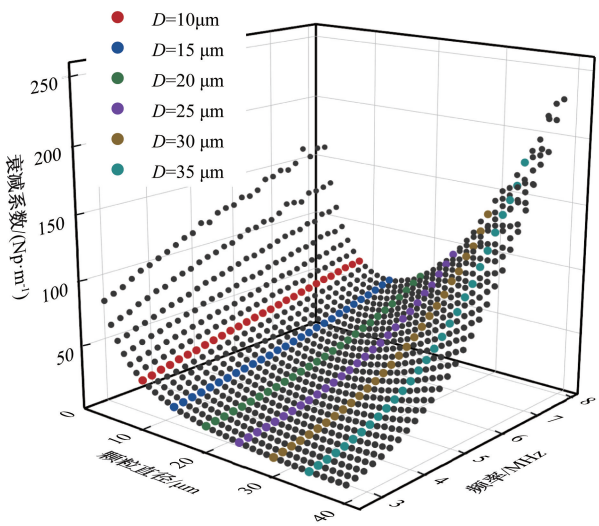


图 5 HC-MCM 系数矩阵及衰减谱

Fig. 5 Coefficient matrix and attenuation spectra of HC-MCM

得到模型矩阵后,颗粒粒径可由式(10)计算:

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{F} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{G}$ 为声衰减向量,$\boldsymbol{A}$ 为系数矩阵,$\boldsymbol{F}$ 为粒径分布。

为便于采用最优化理论求解,比较 HC-MCM 理论谱与实验衰减谱,定义误差函数:

$$E_{SSD}=\sum_{j=1}^{N}(\alpha_m-\alpha_s)^2 \tag{11}$$

式中:α_s 为理论衰减谱,α_m 为实验衰减谱或设定颗粒粒径和分布宽度的衰减谱。

通过反演算法使误差函数最小化便可得到最优粒径分布。通常颗粒系被描述为频率分布服从一定的函数形式,例如,R-R(Rosin-Rammler)分布、高斯分布或对数正态分布。其中,R-R 分布函数为:

$$f(R)=\frac{K}{R}(R/R_{\text{bar}})^{K-1}\exp(-(R/R_{\text{bar}})^K) \tag{12}$$

其中:R_{bar} 为特征半径,K 为分布宽度。

相比常规 LM(Leveberg-Marquart)、BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)等局部优化算法,差分进化算法(differential evolution, DE)具有较好的全局搜索能力和鲁棒性。设置 DE 算法参数为:种群尺度 50,缩放因子 0.35,交叉因子 0.85,迭代次数 100,每次计算时间为 3 s[24]。以直径 10~30 μm 石灰石-水多分散体系(服从 R-R 函数)为例,按照式(11)构造目标函数。如表 2 所示,差分进化算法计算结果与设定直径和分布宽度高度吻合,相对误差小于 1%。

表 2 HC-MCM 和 DE 算法数值分析结果

Table 2 Numerical analysis results of HC-MCM and DE algorithm

序号	设定值		反演结果	
	D/μm	K	D/μm	K
1	10	5	10	5
2	15	7	15	7
3	20	10	20	9.99
4	25	12	25	12
5	30	15	30	15

为研究浆液体积浓度变化时 HC-MCM 的适用性问题,以直径 20 μm 的石灰石-水悬浊液为对象,计算浆液体积浓度 5%~30% 的超声衰减谱,使用体积浓度 20% HC-MCM 矩阵反演浆液粒径分布,表 3 为计算结果的相对误差。结果表明,体积浓度 20% 衰减谱计算结果的相对误差仅为 0.45%。体积浓度在 10%~30% 范围内,计算结果的相对误差均小于 2.5%,表明 HC-MCM 在高浓度时具有较好的适应性。

表 3 不同体积浓度衰减谱粒径相对误差

Table 3 Relative error of particle size for different volume concentration attenuation spectra (%)

体积浓度	5	10	15	20	25	30
相对误差	4.69	1.98	1.53	0.45	1.92	2.31

针对燃煤电厂脱硫石灰石浆液细度测量问题,计算不同体积浓度的 HC-MCM 矩阵,在线测量过程中根据石灰石浆液的含固量(体积浓度)调用对应浓度的模型矩阵用于浆液粒径分布计算,能够减小浆液浓度变化对测量结果的影响。

3 实验测量及结果分析

3.1 高浓度模型实验验证

为得到浆液实验衰减系数随体积浓度的变化关系,采用振动筛分仪获取中位直径约 10 μm 的石灰石粉末,配置体积浓度 2.5%~35% 的浆液。

在接触式样品池(长 100 mm,宽 50 mm,高 40 mm)两端同轴安装超声发射和接收换能器(Olympus V 310,中心频率 5 MHz),两换能器间距为 15 mm。为避免固体颗粒的沉降现象对测量区体积浓度的影响,采用双叶搅拌器确保被测浆液浓度的一致性。分别将水和浆液置于样品池中,使用和图 8 相同超声测量装置获得水和浆液的超声透射信号。根据式(13)计算不同浓度浆液超声衰减谱,结果如图 6 所示。

$$\alpha_{s,i}=\frac{\ln(A_{w,i}/A_{s,i})}{l} \tag{13}$$

式中:$A_{w,i}$ 和 $A_{s,i}$ 分别为水和浆液信号在频率 f_i 的幅值,l 为测量区宽度。

如图 6 所示,随着浆液体积浓度的增加,超声衰减谱逐渐上移。局部放大图为频率 5 MHz 时不同体积浓度的衰减系数,其数值随体积浓度非线性增加,与图 4 中 HC-MCM 预测结果基本吻合。共计 8 个浓度下模型预测和实验测量衰减系数的均方根误差为 7.10%,说明了 HC-MCM 在高浓度预测的准确性。

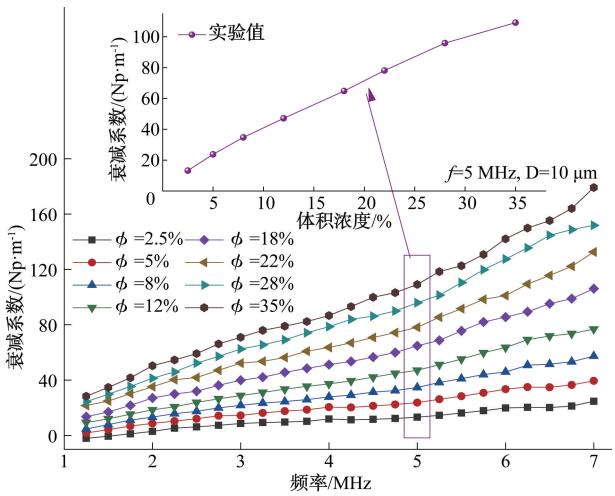


图 6　不同体积浓度浆液超声衰减谱

Fig. 6　Ultrasonic attenuation spectra of slurries with different volume concentrations

3.2　燃煤电厂浆液细度在线测量

图 7 为石灰石浆液细度双模式超声测量系统示意图,由信号采集和测量模型两部分组成。基于汕头超声 CTS-02UT 双通道超声发射接收仪搭建透射和反射双模式超声测量装置及系统,通道 1 和 2 分别为透射法和反射法模式,仪器有效带宽为 0.5 ~ 15 MHz,采样率为 100 MHz。超声发射接收仪激励换能器产生的超声波与水或浆液相互作用后经过换能器接收,并通过信号放大和 A/D 采集获取波形信号,通过网线将检测装置获得的波形数据传输至软件测量系统。由背景水和浆液信号计算实验超声衰减谱,通过 HC-MCM 矩阵和 DE 算法反演颗粒系的粒径分布。另外,使用 Qt 跨平台 C++图形用户界面应用程序开发了软件检测系统,主要包含人机交互界面、模型矩阵调用、实验衰减谱计算、粒径反演和测量结果保存,用于燃煤电厂脱硫石灰石浆液细度的在线测量。

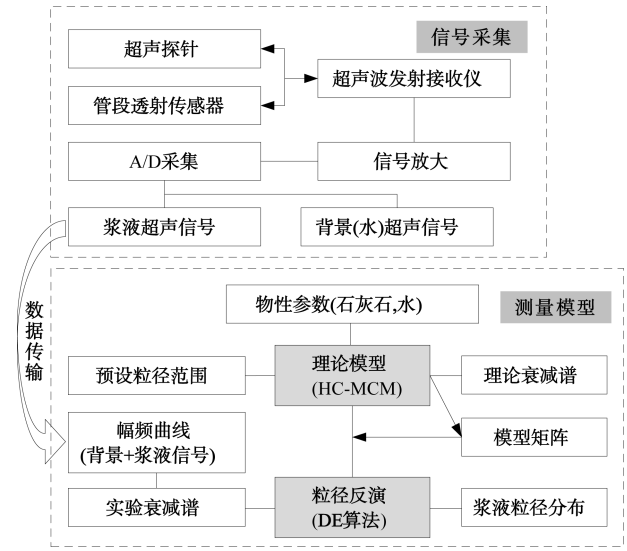


图 7　浆液细度双模式超声测量系统示意图

Fig. 7　Diagram of the slurry fineness dual-mode ultrasonic measurement system

据了解,该燃煤电厂脱硫石灰石浆液体积浓度为 20%左右,通过变声程实验测量并分析可知,当透射传感器和超声探针的测量区宽度分别为 18 和 8 mm 时,能够得到用于衰减谱计算的有效接收信号。在超声换能器前端耦合石英玻璃耐磨层,避免长期测量造成换能器磨损,影响接收信号质量。分别采用中心频率 2.25、5、10 MHz 超声换能器获取体积浓度 20%浆液超声信号并计算衰减谱,2.25 MHz 换能器获得衰减谱的有效频率带宽仅为 1~4 MHz;10 MHz 换能器的接收信号幅值小,信噪比较低;5 MHz 换能器获得衰减谱的有效带宽为 2~8 MHz,能够用于浆液粒径分布的反演计算。因此,选用中心频率 5 MHz 的超声换能器用于燃煤电厂现场实验。

依托大唐环境产业集团股份有限公司旗下许昌龙岗燃煤电厂,2023/07/21-2023/07/28 期间在湿磨制浆系统 2 号磨机进行浆液细度在线测量实验。图 8 为燃煤电厂超声测量系统安装示意图,主要包含浆液循环装置、超声检测装置、测量传感器和软件系统。

超声透射法测量时,打开阀门使冲洗水流经透射传感器并保存透射信号。湿磨制浆系统运行时,浆液经输送管道流至储液箱,使用浆液泵(河北川远泵业有限公司,型号 40DT-A17,流量 4.5 m^3/h,转速 1 450 r/min,扬程 10.3 m,功率 2.2 kW)抽取储液箱中的浆液,使其沿管道自下而上稳定流动,在管道中的流速约为 0.7 m/s,通过法兰连接的透射传感器实时获取浆液透射信号,最终

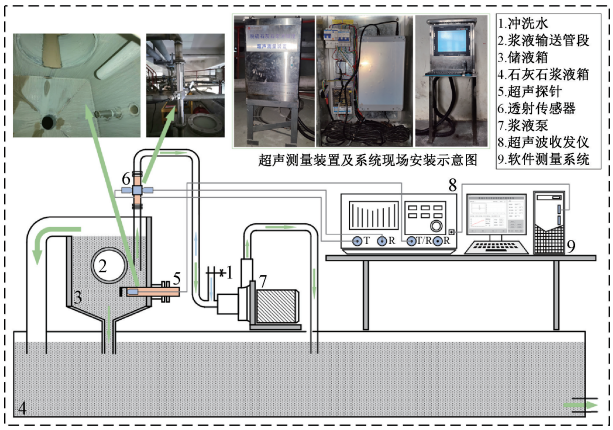
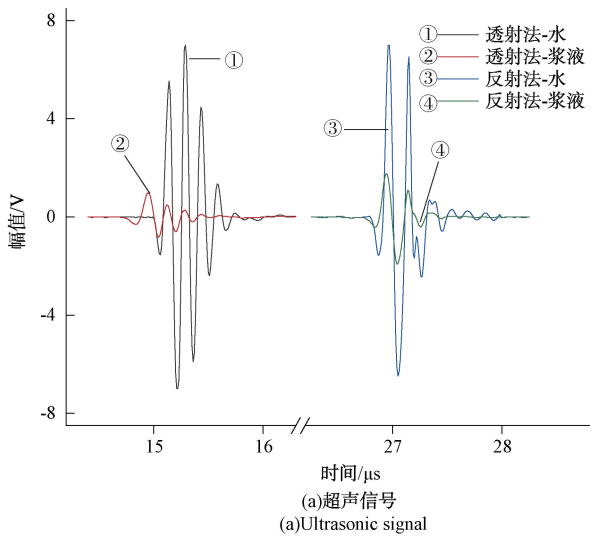


图 8 燃煤电厂超声测量系统安装示意图

Fig. 8 Installation diagram of ultrasonic measurement system in coal-fired power plant

流至底部的石灰石浆液箱。反射法测量时,首先将超声探针置于水中保存背景信号,然后将超声探针通过储液箱侧壁的法兰进行连接,制浆系统运行时超声探针会浸没在浆液中,超声波穿过浆液经界面反射后得到超声回波信号。另外,对于储液箱中的局部浓度变化,可选取多个测点进行同步测量,取多点均值为最终粒径测量结果。透射传感器的发射和接收分离,更易获得信噪比高的超声信号;超声探针测量装置简单,易于加工和安装,只需一个超声换能器即可获得回波信号。透射传感器和超声探针协同测量可实现细度结果的相互验证,能够有效避免管道堵塞或探针磨损时无法测量浆液细度的问题。

图 9(a)为浆液细度在线测量过程中由透射传感器和超声探针得到的波形信号,并计算实验超声衰减谱,如图 9(b)所示。超声波在石灰石-水悬浊液中传播时的能量衰减使浆液信号相比水信号幅值明显降低。有效带宽 2.5~7.8 MHz 范围内,衰减系数均随超声频率的增加而增大,频率 7.8 MHz 时达到 170 Np/m。



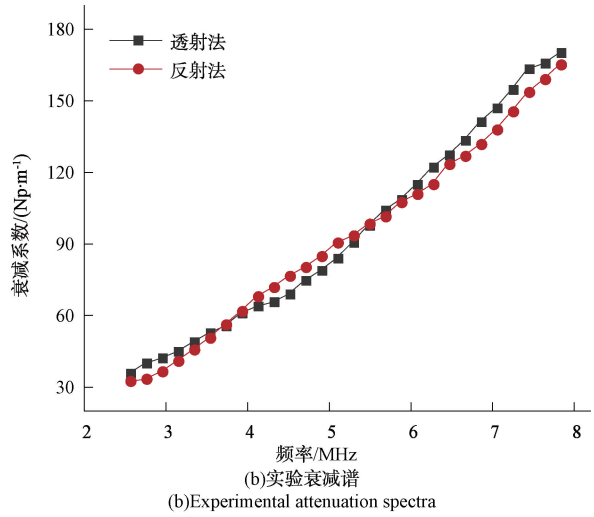


图 9 石灰石浆液超声信号及实验衰减谱

Fig. 9 Ultrasonic signals and experimental attenuation spectra of limestone slurry

基于软件测量系统,结合 HC-MCM 矩阵和 DE 算法计算透射和反射法衰减谱对应的颗粒粒径分布。在同一时间对浆液进行取样,样品稀释后采用丹东百特 BT-9300ST 激光粒度仪测量浆液粒径分布。图 10 为超声透射法、反射法和激光粒度仪的测量结果,表 4 为不同模型及方法的浆液粒径分布统计。

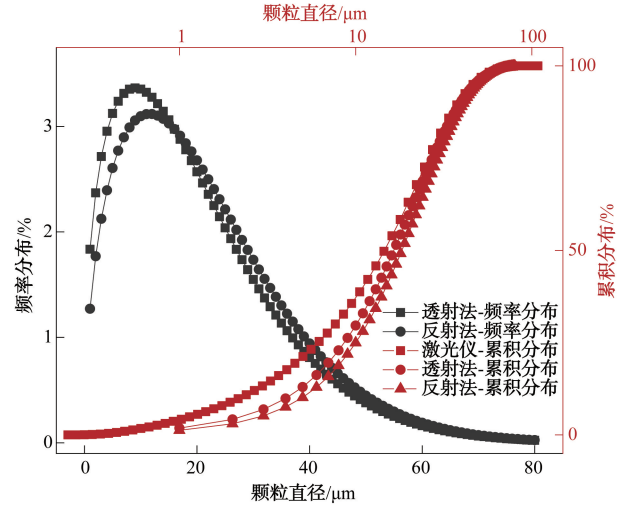


图 10 不同方法浆液粒径分布测量结果

Fig. 10 Measurement results of slurry particle size distribution by different methods

根据激光粒度仪测量数据,燃煤电厂生产的石灰石浆液体积中位径 D_{V50} 为 16.2 μm。超声透射和反射法测量得到的粒径分布基本吻合,中位径分别为 16.8 μm 和 17.4 μm,且与激光粒度仪测量结果的相对误差为 3.70% 和 7.41%。从图 10 中不难发现,超声法和激光粒

表 4　石灰石浆液粒径分布计算结果统计

Table 4　Calculation results of particle size distribution of limestone slurry

理论模型	测量方法	粒径分布特征参数		
		D_{V10}/μm	D_{V50}/μm	D_{V90}/μm
HighCv-MCM	透射法	4.5	16.8	39.7
	反射法	4.5	17.4	41.6
/	激光粒度仪	2.4	16.2	42.4

度仪测量结果的粒径分布存在差异。燃煤电厂石灰石颗粒形状特征较为明显,而 HC-MCM 采用等效球模型;在粒径求解中设定其频率分布服从 R-R 函数,而激光粒度仪则为真实测量得到的,因此超声法测量粒径分布相对偏窄。

为验证双模式超声测量系统长时间运行的稳定性和测量精度,在河南许昌龙岗燃煤电厂完成 168 h 不间断测量。图 11 为体积中位径 D_{V50} 随时间的变化曲线,测量时间 2023/07/23/8:32 ~ 2023/07/24/8:32,持续时长 24 h,测量间隔 20 s 满足电厂浆液细度测量的时间精度需求。在 2023/07/23/8:32 ~ 10:24、14:34 ~ 22:50 和 2023/07/24/01:40 ~ 08:32 时间范围内,测量结果为 0 μm 表示磨机停运。在 2023/07/23/10:24 ~ 14:34 和 2023/07/23/22: 50 ~ 2023/07/24/01:40 时间范围内,磨机正常运行完成浆液细度的在线测量。在磨机运行两段时间范围内,两种方法测量结果随时间的变化曲线基本吻合。综上所述,燃煤电厂浆液处于流动状态时,透射传感器和超声探针均能准确测量石灰石浆液细度。

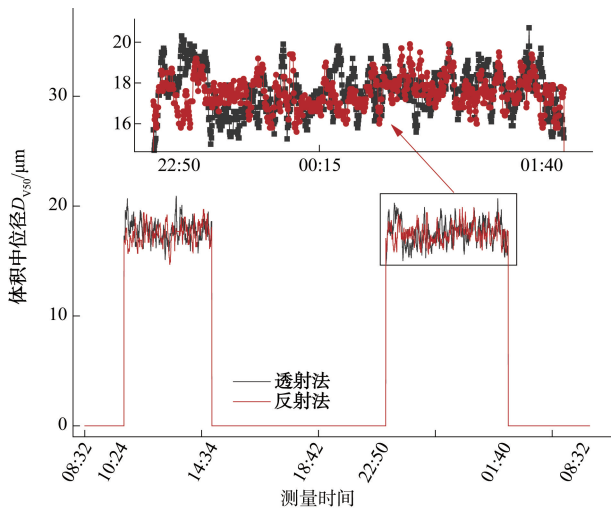


图 11　浆液粒径分布 D_{V50} 随时间的变化

Fig. 11　The variation of slurry size distribution D_{V50} with time

为指导燃煤电厂湿磨制浆系统的优化运行,超声测量装置可将粒径结果以 0~20 mA 电流量输出至 DCS 系统,磨机停运时 0 μm 输出 0 mA,4~20 mA 对应颗粒粒径的实际测量值。根据燃煤电厂烟气脱硫工艺主要技术指标,在图 11 所示测量时间,磨机运行时体积中位径 D_{V50} 变化不大,基本保持在 15~20 μm 范围内,满足燃煤电厂成品石灰石浆液的细度要求。

4　结　　论

本文针对燃煤电厂高浓度脱硫石灰石浆液细度的在线测量,开展了超声法颗粒测量理论模型和实验测量技术研究,主要结论如下:

1) 基于蒙特卡罗方法建立适用于高浓度多分散液固两相体系的 HC-MCM 超声衰减模型,相比常规 ECAH、H&T+BLBL 和 MCM 模型,HC-MCM 预测衰减系数与实验测量结果更为接近。

2) 根据 HC-MCM 计算石灰石-水两相体系模型矩阵,基于理论衰减谱的差分进化算法计算结果与设定直径和分布宽度的相对误差小于 1%。

3) 燃煤电厂浆液细度在线测量过程中,超声透射和反射法实验衰减谱的趋势和数值大小吻合,体积中位径 D_{V50} 分别为 16.8 和 17.4 μm,与激光粒度仪测量结果的相对误差均小于 8%,脱硫石灰石浆液细度测量精度满足指导湿磨优化运行的要求。

参考文献

[1] GUAN J, LIU Q Y, LIU J, et al. Elucidation of alginate-drug miscibility on its crystal growth inhibition effect in supersaturated drug delivery system[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115601.

[2] 付加, 祁贵生, 刘有智,等. 超重力湿法脱除气体中细颗粒物研究[J]. 化学工程, 2015, 43(4): 6-10.
FU J, QI G SH, LIU Y ZH, et al. Removal of fine particle by high gravity wet cleaning[J]. Chemical Engineering, 2015, 43(4): 6-10.

[3] EISENSCHMIDT H, BAJCINCA N, SUNDMACHER K. Optimal control of crystal shapes in batch crystallization experiments by growth-dissolution cycles[J]. Crystal Growth & Design, 2016, 6(6):3297-3306.

[4] ULRICH T, ULRICH F B. Rheological behavior of nitromethane gelled with nanoparticles[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(1): 40-43.

[5] 潘丹萍, 郭彦鹏, 黄荣廷,等. 石灰石-石膏法烟气脱硫过程中细颗粒物形成特性[J]. 化工学报, 2015,

66(11): 4618-4625.
PAN D P, GUO Y P, HUANG R Y, et al. Formation of fine particles in flue gas desulphurization process using limestone-gypsum[J]. CIESC Journal, 2015, 66(11): 4618-4625.

[6] GUPTA V K. Hold-up weight in continuous wet ball milling: Relationship with the size distribution of the particulate contents of the mill[J]. Powder Technology, 2023,415, 118137.

[7] GU S W, YANG Z Z, CHEN Z, et al. Insights into the desulfurization mechanism of low-grade limestone as absorbent induced by particle size[J]. Fuel, 2021, 305, 121444.

[8] 胡子健, 苏明旭, 李俊峰. 基于超声衰减和声速动态监测石蜡的相变过程[J]. 过程工程学报, 2019, 19(6): 1160-1166.
HU Z J, SU M X, LI J F. Dynamic monitoring of paraffin phase change process by ultrasonic attenuation and velocity [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(6): 1160-1166.

[9] GREENWOOD M S. Attenuation measurements with ultrasonic diffraction grating show dependence upon particle size of slurry and viscosity of base liquid[J]. Ultrasonics, 2018, 84: 134-149.

[10] 田昌, 苏明旭, 蒋瑜,等. 超声法在线测量烟气脱硫浆液粒度分布、密度方法和装置[J]. 化工进展, 2021, 40(12): 6516-6522.
TIAN CH, SU M X, JIANG Y, et al. Method and device for on-line measurement of particle size distribution and density of desulfurization slurry by ultrasonic [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(12): 6516-6522.

[11] SILVA C A M, SARAIVA S V, BONETTI D, et al. Measurements of bimodal droplet size distribution of emulsions using ultrasonic spectroscopy in the long and intermediate wavelength regimes [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 252: 117274.

[12] ABDA F, AZBAID A, ENSMINGER D. Ultrasonic device for real-time sewage velocity and suspended particles concentration measurements[J]. Water Science and Technology, 2009, 60(1): 117-125.

[13] POVEY M J W. Ultrasound particle sizing: A review[J]. Particuology, 2013, 11(2): 135-147.

[14] BAUDOIN M, THOMAS J L, COULOUVRAT F, et al. An extended coupled phase theory for the sound propagation in polydisperse concentrated suspensions of rigid particles[J]. The Journal of the Acoustical Society of America. 2007, 121: 3386-3387.

[15] 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.

[16] 郭盼盼, 苏明旭, 陈丽,等. 用蒙特卡罗方法预测液固两相体系中颗粒的超声衰减[J]. 过程工程学报, 2014, 14(4): 562-567.
GUO P P, SU M X, CHEN L, et al. Prediction of ultrasonic attenuation in liquid-solid particulate two-phase system with Monte Carlo method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(4): 562-567.

[17] 李运思, 苏明旭, 杨芸楠,等. 混合弹性颗粒体系声衰减数值模拟[J]. 声学学报, 2017, 42(5): 586-592.
LI Y S, SU M X, YANG H N, et al. Simulation of ultrasonic attenuation in the elastic mixing particle system[J]. Acta Acustica, 2017, 42(5): 586-592.

[18] 王敏, 申玉清, 陈震宇,等. 随机多孔介质的蒙特卡罗重构与渗流特性模拟[J]. 计算物理, 2021, 38(5): 623-630.
WANG M, SHEN Y Q, CHEN ZH Y, et al. Reconstruction and seepage simulation of random porous media with Monte Carlo method[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2021, 38(5): 623-630.

[19] HAY A E, MERCER D G. On the theory of sound scattering and viscous absorption in aqueous suspensions at medium and short wavelengths [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78(5): 1761-1771.

[20] FARAN J J. Sound scattering by solid cylinders and spheres[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1951, 23(4): 405-418.

[21] ALLEGRA J R., HAWLEY S A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments[J]. Journal of the Acoustical society of American, 1972, 51(5): 1545-1564.

[22] 薛明华, 苏明旭, 蔡小舒. 超声法测量高浓度矿浆两相流粒径分布和浓度[J]. 工程热物理学报, 2010,

31(9): 1520-1523.
XUE M H, SU M X, CAI X SH. Particle size distribution and concentration characterization in mineral slurry by ultrasonic methods[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1520-1523.

[23] HUANG B F, FAN F X, LI Y S, et al. Numerical prediction of ultrasonic attenuation in concentrated emulsions and suspensions using Monte Carlo method[J]. Ultrasonics, 2019, 94: 218-226.

[24] 蒋瑜, 贾楠, 苏明旭. 基于改进差分进化算法的超声衰减谱反演计算[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(4): 332-338.
JIANG Y, JIA N, SU M X. Inverse calculation of ultrasonic attenuation spectrum based on an improved differential evolution algorithm[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(4): 332-338.

作者简介

张世玮,2017 年于上海第二工业大学获得学士学位,2020 年于上海应用技术大学获得硕士学位,现于上海理工大学攻读博士学位,主要研究方向为多相流测试技术。
E-mail:zsw9363@ 126. com

Zhang Shiwei received his B. Sc. degree from Shanghai Polytechnic University in 2017, and received his M. Sc. degree from Shanghai Institute of Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest is multiphase flow test techniques.

苏明旭(通信作者),分别于 1996,1999 年获得南京航空航天大学学士,硕士学位,2002 年于上海理工大学获得博士学位,现为上海理工大学教授,主要研究方向为光散射和超声法颗粒两相流测量理论及技术。
E-mail:sumx@ usst. edu. cn

Su Mingxu (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1996 and 1999, respectively, and received his Ph. D. degree from University of Shanghai for Science and Technology in 2002. He is currently a professor at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include the theory and technology of particle two-phase flow measurement by light scattering and ultrasonic method.