

◇ 综述 ◇

固液悬浮体系下超声波浓度测量技术进展*

陈俊羽¹ 张 乐^{1†} 鲍 锦¹ 曹秀华² 任海东² 付振晓^{2†} 陈 浩¹

(1 江苏师范大学物理与电子工程学院 江苏省先进激光材料与器件重点实验室 徐州 221116)

(2 广东风华高新科技股份有限公司新型电子元器件关键材料与工艺国家重点实验室 肇庆 526020)

摘要: 在工业生产和科学实验中,固液悬浮体系是一种非常重要的流体类型,其浓度与均匀性变化直接决定了最终制品的物理化学性能及服役稳定性。对其进行实时、原位、高精度测量具有重要意义。因为超声波技术具有非接触、精度高、响应速度快等优点,所以该文重点介绍了基于该技术实现固液悬浮体系浓度测量的方法,回顾了国内外发展状况,特别是对该技术在浆液混合过程监控方向的应用做出了介绍和总结。最后,对该领域的发展趋势进行了展望。

关键词: 超声波;固液悬浮体系;浓度;过程监控

中图法分类号: TB51+7; TV698.1+5; T-19

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)04-0880-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.04.024

Progress of ultrasonic concentration measurement technology in solid-liquid suspension system

CHEN Junyu¹ ZHANG Le¹ BAO Jin¹ CAO Xiuhua² REN Haidong² FU Zhenxiao² CHEN Hao¹

(1 Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

(2 State Key Laboratory of Advanced Materials and Electronic Components, Guangdong Fenghua Advanced Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526020, China)

Abstract: In industrial production and scientific experiments, the solid-liquid suspension system is a very important type of fluid, and its concentration and uniformity changes directly determine the physical and chemical properties and service stability of the final products. It is of great significance to measure it in real time, in situ and with high precision. Because ultrasonic technology had the advantages of non-contact, high precision, and fast response speed, the methods for realizing concentration measurement of solid-liquid suspension system based on this technology was mainly introduced, and its development status at home and abroad was reviewed. In particular, the application of this technology in the monitoring direction of slurry mixing process was also introduced and summarized. Finally, the development trend of this field was prospected.

Keywords: Ultrasonic wave; Solid liquid suspension system; Concentration; Process monitor

2022-04-20 收稿; 2022-08-02 定稿

*国家重点研发计划项目 (2021YFB3501700), 国家自然科学基金项目 (61975070, 51902143, 61971207), 江苏省高校优势学科建设项目 (PAPD), 江苏省重点研发项目 (BE2019033), 江苏省自然科学基金项目 (BK20191467), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX21_1135), 江苏省国际科技合作项目 (BZ2019063, BZ2020045, BZ2020030), 江苏省高校自然科学研究基金项目 (19KJB430018, 20KJA430003), 徐州市科技创新专项 (KC19250, KC20201, KC20244), 新型电子元器件关键材料与工艺国家重点实验室开放课题 (FHR-JS-202011017)

作者简介: 陈俊羽 (1998-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向: 超声波监测, 过程控制与研究。

†通信作者 E-mail: zhangle@jsnu.edu.cn; fuzx@china-fenghua.com

0 引言

监测和控制颗粒悬浮物状态是许多现代工业过程的重要环节之一。浓度则是监测工业浆体的一个重要的物理参数,反映在制造行业的各个领域,尤其反映在处于我国战略发展重要位置的电子元器件制造领域。例如随着5G的发展,在智能手机、航天、军工等方面对多层陶瓷电容器(Multi-layer ceramic capacitors, MLCC)的需求都持续增长^[1]。而流延成型是MLCC生产的关键步骤。在流延成型工艺流程中,陶瓷浆料性能决定流延素坯的均匀性及微观结构,进而决定电子陶瓷产品质量^[2],而浆料性能评价的关键指标则是其整体浓度的均匀性^[3-4]。因此浆料的浓度直接影响着产品器件的质量。与此同时,河流和水库等地表水体中的悬浮泥沙浓度是解决水利设计、水资源管理等工程问题的最重要的水文数据之一^[5]。因此浆体浓度的高精度测量在生产和勘测过程中举足轻重,如何能够方便快捷又准确地测出浆体中固定成分的浓度成为当下研究的热点。

1 基于超声波传感器的浓度检测方法

超声波是一种机械波,其频率高于20 kHz,在工业应用中常采用的频率范围是20 kHz~10 MHz。超声波具有如下特性:(1) 适应性强,能够应对不同的生产环境;(2) 功耗低,成本低;(3) 精度高,响应速度快。根据超声波在不同悬浮液中的衰减和传播特性,目前主要分为超声波衰减、超声波声速这两种基于超声波的悬浮液浓度测量方法,因此需要综合考虑两者针对不同浆料的变化响应,选用合适的方法。

1.1 超声波衰减

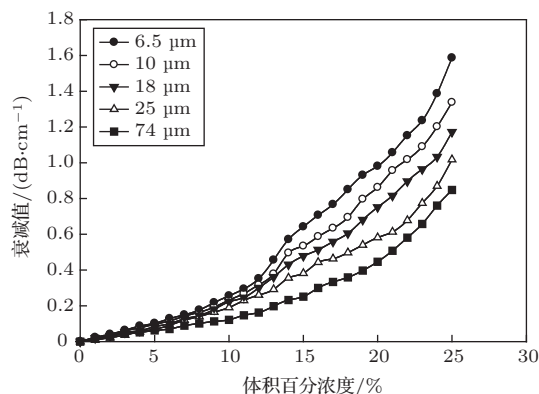
基于超声波衰减的悬浮液浓度测量方法是目前使用较多的测量方式。波的吸收和散射是引起衰减现象的主要因素^[6]。当超声波穿过浆体时,信号强度会因超声波与浆体中的颗粒之间的相互作用而降低^[7]。这种情况将超声能转化为热能,从而间接降低了波信号的初始振幅^[8]。被测液体中的悬浮颗粒物的含量与超声波信号的衰减成正比,因此通过分析在线测量的衰减信号可以得到相应的浆料体积百分浓度。在部署传感器之前,要利用已知浓度的浆料对传感器声衰减进行校准,以防出现异常测量结果。

超声衰减定义为^[9]

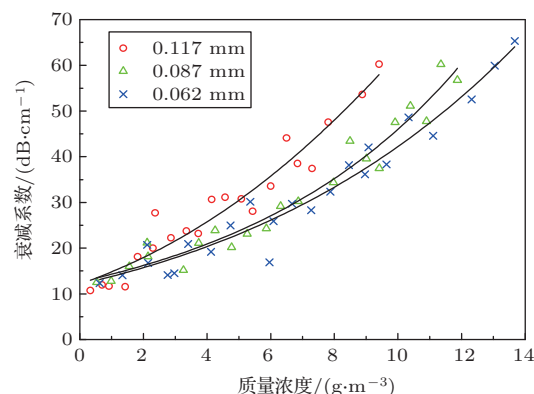
$$\alpha = -\frac{1}{L} \ln \frac{P}{P_0} = -\frac{1}{L} \ln \frac{V}{V_0}, \quad (1)$$

式(1)中, P_0 表示初始位置处的声压, P 表示声波传播了距离 L 后的声压; V_0 表示初始位置处的接收电压, V 表示声波传播了距离 L 后的接收电压。

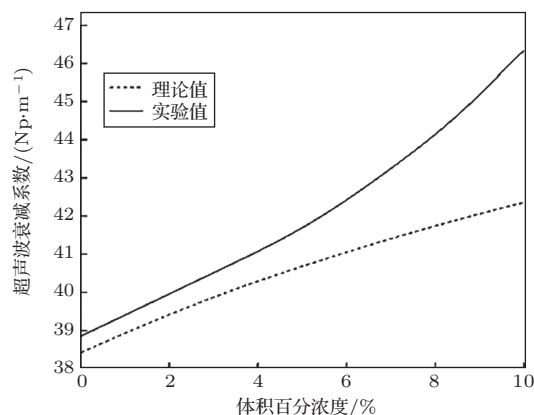
目前,已有学者根据超声衰减原理得出不同悬浮液下的浓度—声衰减关系曲线,如图1所示。



(a) 石英砂浓度与声衰减关系^[10]



(b) 不同粒径下浓度与衰减系数的关系^[7]



(c) 衰减系数实验值与计算值的对比^[11]

图1 不同的浓度-声衰减关系图

Fig. 1 The different charts of relationship between concentration and attenuation coefficient

1.2 超声波声速

与声衰减不同的是, 超声波的传播速度取决于介质的密度和可压缩性等特性^[12]。因此, 当超声波在介质中传播时, 其传播速度与悬浮液的浓度有关, 当悬浮液中的颗粒发生变化时, 超声波的传播速度也会因此发生改变。所以, 可以通过测量超声波在介质中的传播速度来间接测量悬浮液的浓度。

悬浮液的声速由基于多重散射理论的浓度函数给出^[13], 如下:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{(1 + \phi \operatorname{Re}\{a_0\})(1 + 3\phi \operatorname{Re}\{a_1\}) + 6\phi^2 (\operatorname{Re}\{a_1\})^2}}, \quad (2)$$

式(2)中, v_0 是纯溶液中的声速, ϕ 是浓度, 系数 a_n 由公式(3)组成:

$$a_n = -\frac{3iA_n}{k^3 r^3}, \quad (3)$$

其中, k 为波数, r 为粒子半径, 当阶数 $n=0$ 和 $n=1$ 时:

$$A_0 = -i \frac{k^3 r^3}{3} \left(1 - \frac{\rho k'^2}{\rho' k^2} \right) - k^2 r v_0 T \rho \tau \left(\frac{\beta}{\rho C_p} - \frac{\beta'}{\rho' C'_p} \right)^2 \times \left(\frac{1}{1 - iz} - \frac{\tau \tan z'}{\tau' \tan z' - z'} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$A_1 = -i \frac{k^3 r^3}{3} (\rho - \rho') \times \left[\frac{2(\rho - \rho')}{1 + \frac{3(1+i)\delta_v}{2r} + \frac{i3\delta_v^2}{2r^2}} + 3\rho \right]^{-1}, \quad (5)$$

其中, τ 是热导率, C_p 是比热容, ρ 是密度, T 是绝对温度, r 是粒子半径, β 是立方膨胀系数, $z = \frac{(1+i)r}{\delta_t}$, $\delta_t = \sqrt{\frac{2\tau}{\omega \rho C_p}}$, $\delta_r = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega \rho}}$, ω 和 η 分别是角频率和黏度。这种方法目前处于初步的探索阶段^[14], 并没有普遍应用。

2 超声波浓度测量国内外进展

2.1 国内

近年来, 随着材料科学、电子技术和信号处理技术的发展, 超声波技术包括新型换能器的开发、流

体超声波特性、超声波发射和接收以及超声波信号处理技术都取得了很大的进步^[15-17], 从而促使国内超声波测量悬浮液浓度领域不断前进发展。目前国内此领域研究基于角度主要分成3类。

一是根据超声波在不同悬浮液中的传播特性, 改进理论模型, 探索声衰减与浓度之间的关系。夏多兵等^[10]利用低频超声波体积百分浓度小于25%、不同粒径的石英砂悬浮液进行非侵入式声衰减测量, 根据分析透射信号, 证明了浓度测量方案的可行性。Gu等^[18]针对不同颗粒, 10%悬浮液。在此基础上, Huang等^[19]通过改进传统单散射模型, 利用40%。Yu等^[20]考虑多重散射效应的超声散射衰减机制, 为了解决水合物-水分散体的衰减预测问题, 提出了一种基于超声衰减机理的模拟退火与遗传算法相结合的反演算法, 以解决反演计算中的不适定问题。

二是通过补偿算法解决环境参数对于声衰减的影响。Zhan等^[21]将联合区间偏最小二乘(Syn-energy interval partial least square, Si-PLS)模型结合超声光谱与温度补偿模型, 提出了通过温度补偿的方法测量16℃~40℃范围内多组分混合物浓度的新技术, 以解决温度对超声信号的影响。之后, 考虑到工业浆料中可能存在的气泡同样会对超声信号有较大的影响, 在此基础上Zhan等^[22]同样利用此方法消除了单组分悬浮液浓度测量的气泡效应。

三是匹配最佳模型, 提升测量精度。Zhan等^[23]开发出基于最小二乘支持向量机(Least square support vector machine, LS-SVM)和核偏最小二乘(Kernel partial least squares, KPLS)的超声测量系统, 通过, 在低浓度条件下能针对多组分悬浮液中的颗粒浓度实现高精度在线测量。

目前, 国内学者针对二元体系下悬浮液的浓度检测方面取得了较好的进展。但对于三元乃至多元体系下混合浆料浓度的测量研究较少, 由于超声波对浆料颗粒粒径、形态、絮凝/凝聚以及对颗粒表面特性的影响, 需要进一步建模分析声波在多元混合悬浮液中的衰减与各个物理参数的变化关系, 建立适合多元体系下的悬浮液声衰减-浓度模型。

2.2 国外

近年来, 关于浆体浓度测量的国外相关研究文献层出不穷, 超声测量技术发展迅速, Greenwood等^[24]提出了一种简单的单频超声波测量技术, 通过研究超声波频率与高岭土浆液超声衰减的关系,

证明了超声衰减与浆液浓度、超声波频率存在比例关系。Stolojanu等^[12]在实验中发现超声信号不同浓度下特定粒径颗粒的浆体的不同变化趋势,证明了声速和衰减各适用于不同浓度范围的浆体。Greenwood等^[25]通过观察超声回波信号,研究了不同浓度浆体声速的误差,验证了超声衰减方法的准确性。Geier等^[26]将超声波速度和超声波衰减与酵母和麦芽糖浓度建立联系,在减少结果误差情况下实现了测定酵母和麦芽糖浓度值,取代了以往用密度计和光学浊度仪相结合的测量方法。Krause等^[27]利用多元线性回归方法预测水溶液中麦芽糖的浓度,通过对各个温度点使用不同多元回归模型,可以预测不同温度下的浓度。Greenwood^[28]针对大型管道中的浆料设计了带有聚焦功能的超声换能器,提高了测量灵敏度的同时提高了信噪比。之后,Greenwood^[29]利用超声衍射光栅(Ultrasonic diffraction grating, UDG)技术成功表征20 wt%聚苯乙烯悬浮液的声衰减。

目前国外学者研究声信号与悬浮液的各个物理参量之间的变化关系,取得了突出的成果,并且通过改进超声换能器对低浓度的二元乃至多元悬浮液的浓度变化过程进行了深入研究,但是针对高浓度悬浮液的浓度变化过程研究不足,距离广泛应用在工业悬浮液生产监测方面还有一定的差距。

3 超声波浓度在线测量技术

在浆料生产、储存过程中,不同生产条件或环境,往往伴随着理化反应,发生物质与能量的转移和传递,其本身就存在大量的不确定性和非线性因素。过去,生产过程中通常采用的定时离线分析法由于时间滞后大,根本不能满足随时获取检测数据的要求。在线检测技术正是为了解决这类变量的实时测量和控制问题而逐渐发展起来的。超声波浓度在线检测技术具有以下优点:可直接测量浆体浓度,且无需停止生产过程;减少不合格产品,快速识别异常状况减少不必要的资源消耗,使生产过程控制得更加理想。

3.1 超声波浓度在线测量技术分类

3.1.1 插入式超声波浓度计

插入式超声波浓度计是将浓度计的探头浸入浆体当中,通常需要在浆体容器上钻孔,然后将浓度计固定在洞中,根据探头发射-反射-接收的超声波回波信号分析得出所检测浆体的浓度值,精度较高,

但安装过程繁琐复杂且工厂在安装时必须断管、停产。此外对于处于静止状态的浆体进行检测会破坏其均匀性,且探头长时间接触浆体易遭受腐蚀。插入式超声波浓度计装置示意图如图2(a)所示。

3.1.2 夹装式超声波浓度计

夹装式超声波浓度计是用两个超声波换能器将容器包夹起来,根据一端超声波换能器发射,另一端超声波换能器接收到的回波信号分析得出所检测浆体的浓度值。相较于插入式超声波浓度计精度较低,但安装过程简单;因为是非接触式,对于处于稳定状态的浆体进行检测不会破坏其均匀性;且工厂在安装时无需断管、停产,可根据实际生产要求自由选择高度进行测量,是目前主要研发的超声波浓度计类型。夹装式超声波浓度计装置示意图如图2(b)所示。

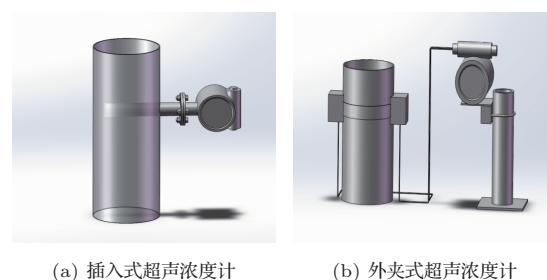


图2 两种超声波浓度测量装置示意图

Fig. 2 The diagram of two ultrasonic concentration measuring devices

3.2 超声波浓度在线测量浓度计应用情况

超声波浓度计广泛应用于食品行业、造纸业、化工行业等,可测量多种参数。笔者调研使用了世界上两款主流的超声波在线浓度测量计,并与其他浓度测量领域的仪器进行了对比。从适用性看,其能满足大部分工业浆料种类;从技术性看,其能针对不同的粒径和温度做出对应的补偿,且灵敏度较高,数据精准。表1为在线测量浓度计应用的基本情况。其中测量浓度范围会随着近年来技术、设备更新而有所变化。

4 基于超声波浓度测量的浆液混合过程监控

传感技术是工业4.0中最重要的技术之一^[30]。世界正在经历第四产业革命,其中数字技术,包括人工智能、机器人和物联网都被用于改进提升制造

工艺的生产率、效率和可持续性^[31]。数据收集和使用对于工业生产越来越重要。而浆液混合是工业生产过程中重要环节之一。在聚合物、水泥和橡胶行业的材料制造中,最终产品的质量取决于其混合程度^[32]。混合过程中的浆液的浓度会不断发生变化,因此实现浆料的混合监控至关重要^[33]。在陶瓷生产领域中,实现陶瓷浆料混合均匀性评估的最终目的是确定其存放周期,因而只有洞悉混合浆料的当

前浓度状态,并判定剩余存放时间,才能够合理调整浆料的优先级顺序,避免浆料失效。尽管存在流变测量、离心沉降测试、粒度分布测量以及 zeta 电位分析表征方法,但除了从大型容器中获取代表性样品的困难之外,将样品运送到实验室和表征测试也需要时间。因此这几种方法无法在浆料混合过程中实时反馈其状态信息,所以仍需要更先进的技术来实时监控浆料混合过程。

表 1 固液悬浮体系浓度测量方法比较

Table 1 Comparison of concentration measurement methods in the solid liquid suspension system

类型	测量原理	优点	缺点	测量浓度范围/%
射线浓度计	射线辐射	量程大,精度高	放射源存在环境和安全隐患	0 ~ 100
光学浓度计	反向散射	精度高,无污染	量程小,受色度影响	0 ~ 4
力学浓度计	剪切力	精度高,适用管道流体浓度测量	维修率高,易挂浆	0.07 ~ 16
微波式浓度计	介电常数	量程大,精度高	对环境敏感	0 ~ 60
插入式超声波浓度计	超声波衰减	精度高,无污染	侵入性,对环境敏感	0 ~ 50
夹装式超声波浓度计	超声波衰减	安全性高,安装便捷,非侵入性	对环境敏感	0 ~ 40

Bamberger 等^[9]通过在实验容器的不同高度安置侵入式超声换能器来原位测量跟踪混合浆料的浓度变化过程来反映浆料的沉降情况,对于一直沉积变化的浆体,不同高度的原位测量更直观地体现出其混合过程中的浓度变化。Yucel 等^[34]在监测油中糖晶体的混合、结块和沉降的过程中发现衰减会在到达稳态值之前高于原始值的峰值,证明了该体系中超声衰减与聚集状态有关。Langlois 等^[35]先利用声速确定悬浮液中的颗粒浓度,再利用声衰减进一步分析悬浮液中聚集体形成的清晰特征,最后通过实验证明结合声衰减和声速可以得出悬浮液高精度的混合状态。Hunter 等^[36]在实验中利用声学反向散射系统 (Acoustic backscatter system, ABS) 来测量低浓度情况下絮凝玻璃分散体的沉降过程,得到了较为直观的浓度分布图,见图 3(a)。相较于过去的设备,ABS 能够通过单探头来展现沿纵向深度悬浮液的浓度变化。在此基础上,Bux 等^[37]继续利用 ABS 来进行二氧化钛悬浮液沉降的原位表征,对二氧化钛颗粒的沉降速率进行分析,同时以 5 s 时间为步长分析原始散射数据,得到了颜色浓度分布图,见图 3(b)。Tonge 等^[38]则发现随着悬浮液的剖面浓度和深度的增加,多重散射效应增强会导

致 ABS 测量值出现明显偏差,如图 4 所示。他们提出了可以将单频和双频反演相结合的方法应用到 ABS 测量上以减少误差。

Bux 等^[39]使用声学反向散射技术来表征具有冲击射流且用于核废料处理的高活性储罐中污泥悬浮液的混合、沉降。Hussain 等^[40]通过测量反向散射电压函数来实现校准核废料悬浮液整体浓度的变化,并分析悬浮液中未絮凝的颗粒与絮凝颗粒造成超声衰减差异原因。Li 等^[41]成功采用分布式声学传感器 (Distribution acoustic sensor, DAS) 系统演示了固液流动中的实时含砂量测量,其中通过检测沙粒在沙水两相流中撞击管壁产生的信号来测量 0 wt.%~0.14 wt.% 范围内的含砂量浓度。Bowler 等^[42]分别研究了蜂蜜-水混合和面粉-水混合体系。利用人工神经网络 (Artificial neural network, ANN)、支持向量机 (Support vector machine, SVM)、长短时记忆 (Long short term memory, LSTM) 与卷积神经网络 (Convolutional neural networks, CNN),以对混合状态进行分类并预测两个模型混合系统的混合完成剩余时间,从而判定悬浮液是否充分混合,并根据其现有状态,来计算直到充分混合完成为止的剩余时间。

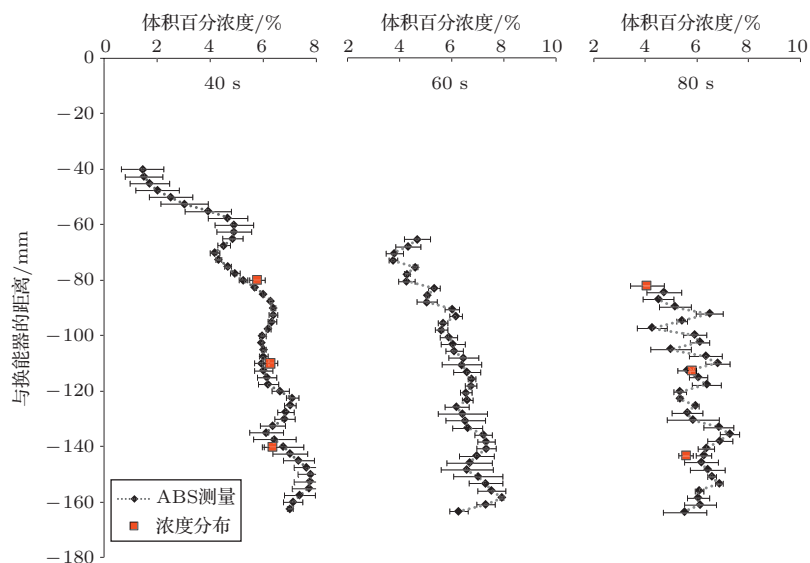
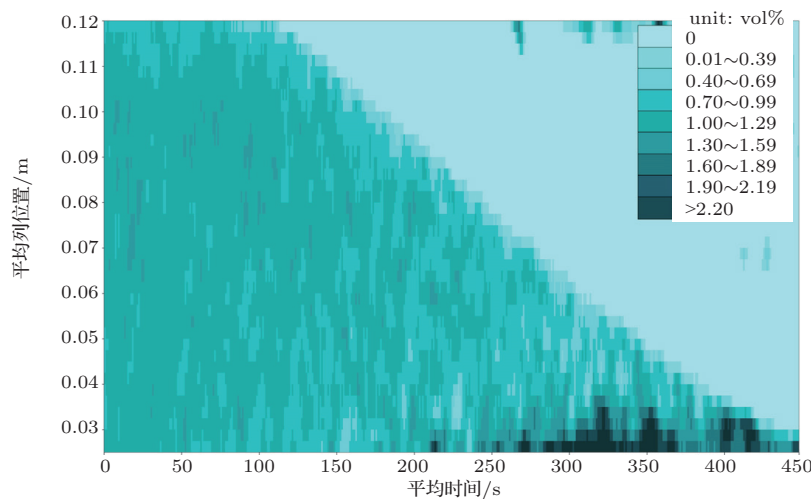
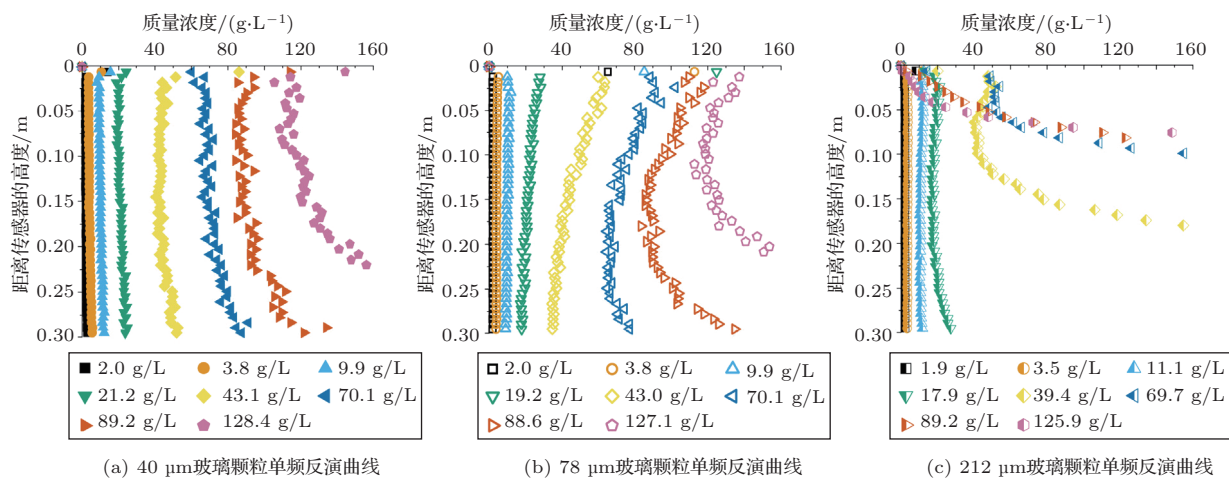
(a) ABS 测量的40 s、60 s和80 s沉降絮凝面玻璃分散体的浓度分布测量图^[36](b) 描述浓度变化的ABS颜色图^[37]

图3 ABS装置浓度测量图

Fig. 3 Concentration charts of ABS measurement

图4 不同粒径的玻璃颗粒在2.25 MHz下的单频反演曲线^[38]Fig. 4 Single frequency inversion profiles of glass particles with different particle sizes at 2.25 MHz^[38]

5 超声波浓度测量技术展望

本文概述了不同测量固液悬浮体浓度的方式,并重点介绍了用于浓度测量的超声波方法,详细阐述了超声波浓度传感器的测量原理。因为用于监控浆体浓度的在线超声波浓度传感器拥有非侵入、环保、廉价等优势,正在成为监视整个浆体制造、混合、沉降过程中最重要的环节之一。但是目前来看,在线超声波浓度传感器还无法大规模应用到工业生产监测当中,主要需要突破两点技术难关。

浓度范围受限制: 过去的超声波浓度测量装置仅仅局限于浓度较小的悬浮液之中,目前已经有学者通过改进超声衰减模型,提升超声波硬件设备水平,相比于过去实现了较高浓度的测量,但其测量浓度还远远达不到主流工业生产的悬浮液的浓度,能够测量的悬浮液种类较少,离大规模应用还有一定差距。

无法分析浆料整体状态: 仅凭当前超声技术难以从宏观角度探测整个悬浮液的浓度状况,虽然国内外学者对此不断进行研究,但其浓度测量范围远未达到工业生产悬浮液浓度水平。目前主流的设备只能通过定点插入或是外夹的方式检测该高度下的浓度,通过该高度下的悬浮液浆料浓度去了解整个悬浮液浆液的状态。然而由于悬浮液的特殊性质,随着时间延长,均匀状态下的浆料在陈化过程中会发生颗粒沉降,而不同粉体颗粒之间由于质量、体积、表面积及团聚程度等参数的差异,必然导致其沉降速率的差异,最终导致悬浮液浆料的浓度沿着高度轴不断地处于变化中。

在固液悬浮液体系中,声信号受介质的组分、粒径、温度等各种因素的影响。目前还没有一种技术可以测量所有这些参数,要处理这两点关键性的问题,仅靠当前超声技术无法解决。所以从宏观出发,引入额外测量技术来补全参数,建立多点位、多数据分析悬浮液浆料整体状态。多传感器数据融合很可能成为未来过程监控的重要方法。通过将不同种类、不同位置的多个传感器的测量数据组合,以改进过程分析,而不是通过单个传感器输出来实现。此外,在构建数据处理算法方面可以进行额外的改进,将现有浓度测量技术结合深度学习神经网络,对工业悬浮液浓度状态的变化趋势进行预测判定,从而推动在线质量控制和各种先进控制策略的实施,使生产过程控制得更加理想。

如今,世界正在经历第四次工业革命,将数据和数字技术融入制造系统,需要合适的在线传感器监控关键参数,以提高生产力和效率,来实现工业4.0的优势。就目前来看,超声波浓度在线检测技术无论在经济角度,还是结合机器学习的智能化监测方面,在未来对整个工业过程进行宏观控制、总体优化都具有一定的优势。相信在不久的将来,这项技术能在工业生产中大规模应用,减少不必要的消耗,提升工业效益。

参 考 文 献

- [1] 黄昌蓉, 唐浩, 宋子峰, 等. MLCC在5G领域的应用及发展趋势[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(9): 1-4.
Huang Changrong, Tang Hao, Song Zifeng, et al. Development tendency and applications of MLCCs in 5G field[J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(9): 1-4.
- [2] 刘伟峰. 高效分散处理的MLCC陶瓷浆料性能分析[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(6): 353-356.
Liu Weifeng. Performance analysis of MLCC ceramic slurry with high efficiency dispersion performance analysis of MLCC ceramic slurry with high efficiency dispersion processing[J]. Electronics Process Technology, 2021, 42(6): 353-356.
- [3] Tsetsekou A, Agraftiotis C, Miliadis A. Optimization of the rheological properties of alumina slurries for ceramic processing applications Part I: slip-casting[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(3): 363-373.
- [4] Hernández V I, García-Gutiérrez D I, Aguilar-Garib J A, et al. Characterization of precipitates formed in X7R 0603 BME-MLCC during sintering[J]. Ceramics International, 2021, 47(1): 310-319.
- [5] Hsu Y S, Cai J F. Densimetric monitoring technique for suspended-sediment concentrations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(1): 67-73.
- [6] 侯怀书, 苏明旭, 蔡小舒. 高密度超细颗粒高浓度悬浊液超声衰减的数值模拟分析[J]. 应用声学, 2010, 29(2): 154-160.
Hou Huaishu, Su Mingxu, Cai Xiaoshu. Numerical analysis of ultrasonic attenuation in high concentration suspensions of superfine particles with high density[J]. Journal of Applied Acoustics, 2010, 29(2): 154-160.
- [7] Yidan X, Dailiang X, Yali A, et al. Application of focused ultrasonic sensors for suspension measurement of solid-liquid two-phase flow[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), F 22-25 May 2017, 2017.
- [8] 杜娜, 苏明旭. 有黏条件气泡声散射特性和衰减谱数值研究[J]. 应用声学, 2019, 38(6): 980-985.
Du Na, Su Mingxu. Numerical investigation on acoustic scattering property and attenuation spectrum of air bubbles with viscosity[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(6): 980-985.

- [9] Bamberger J A, Greenwood M S. Using ultrasonic attenuation to monitor slurry mixing in real time[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1): 145–148.
- [10] 夏多兵, 苏明旭, 田昌. 非侵入式超声波浆料浓度测量技术研究[J]. *应用声学*, 2018, 37(6): 843–848.
Xia Duobing, Su Mingxu, Tian Chang. Technology research on noninvasive ultrasonic slurry concentration measurement[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(6): 843–848.
- [11] 汪建新, 程俊豪. 尾矿浆浓度与超声波衰减系数的关系研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(2): 45–49.
Wang Jianxin, Cheng Junhao. Research on relationship between tailing slurry concentration and ultrasonic attenuation coefficient[J]. *Journal of Mine Automation*, 2020, 46(2): 45–49.
- [12] Stolojanu V, Prakash A. Characterization of slurry systems by ultrasonic techniques[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 84(3): 215–222.
- [13] McClements D J. Ultrasonic determination of depletion flocculation in oil-in-water emulsions containing a non-ionic surfactant[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1994, 90(1): 25–35.
- [14] Kim J, Ha K, Kim J, et al. Sound speed change with concentration in nano particle suspension[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, F 18–21 Sept. 2016, 2016.
- [15] 陈燕, 林兴国, 李明, 等. 厚度模压电超声换能器无源声材料研究进展[J]. *应用声学*, 2022, 41(3): 490–502.
Chen Yan, Lin Xingguo, Li Ming, et al. Research progress of passive acoustic materials for thickness-mode piezoelectric ultrasonic transducers[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2022, 41(3): 490–502.
- [16] 张曦, 章兰珠. 声发射衰减特性管道泄漏定位方法[J]. *应用声学*, 2022, 41(1): 158–167.
Zhang Xi, Zhang Lanzhu. The pipeline leakage location method based on acoustic emission attenuation characteristics[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2022, 41(1): 158–167.
- [17] 盛斯雨, 郭微, 付金山, 等. 快速正交搜索算法在水声信号处理中的应用[J]. *应用声学*, 2019, 38(4): 712–719.
Sheng Siyu, Guo Wei, Fu Jinshan, et al. Application of fast orthogonal search algorithm in underwater acoustic signal processing[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(4): 712–719.
- [18] Gu J, Fan F, Li Y, et al. Modeling and prediction of ultrasonic attenuations in liquid–solid dispersions containing mixed particles with Monte Carlo method[J]. *Particuology*, 2019, 43: 84–91.
- [19] Huang B, Fan F, Li Y, et al. Numerical prediction of ultrasonic attenuation in concentrated emulsions and suspensions using Monte Carlo method[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 218–226.
- [20] Yu H, Tan C, Dong F. Measurement of particle concentration by multifrequency ultrasound attenuation in liquid–solid dispersion[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(3): 843–853.
- [21] Zhan X, Yang Y, Liang J, et al. Temperature effects and compensation in ultrasonic concentration measurement of multicomponent mixture[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 252: 146–153.
- [22] Zhan X, Yang Y, Liang J, et al. Gas bubble effects and elimination in ultrasonic measurement of particle concentrations in solid–liquid mixing processes[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(7): 1711–1718.
- [23] Zhan X, Jiang S, Yang Y, et al. Inline measurement of particle concentrations in multicomponent suspensions using ultrasonic sensor and least squares support vector machines[J]. *Sensors*, 2015, 15(9): 24109–24124.
- [24] Greenwood M S, Mai J L, Good M S. Attenuation measurements of ultrasound in a kaolin–water slurry: a linear dependence upon frequency[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 94(2): 908–916.
- [25] Greenwood M S, Adamson J D, Bamberger J A. Long-path measurements of ultrasonic attenuation and velocity for very dilute slurries and liquids and detection of contaminants[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: e461–e466.
- [26] Geier D, Heermann K, Hussein M, et al. Effects of yeast and maltose concentration on ultrasonic velocity and attenuation coefficient and its application for process monitoring[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2014, 14(4): 433–441.
- [27] Krause D, Hussein W B, Hussein M A, et al. Ultrasonic sensor for predicting sugar concentration using multivariate calibration[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(6): 1703–1712.
- [28] Greenwood M S. Design of ultrasonic attenuation sensor with focused transmitter for density measurements of a slurry in a large steel pipeline[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(6): 3846–3854.
- [29] 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.
- [30] Kang H S, Lee J Y, Choi S, et al. Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016, 3(1): 111–128.
- [31] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 616–630.
- [32] Bowler A L, Bakalis S, Watson N J. A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, 153(C): 463–495.
- [33] Wang M, Tan C, Dong F, et al. Quantitative sound velocity reconstruction based on ultrasonic tomography[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*

- (I2MTC), F 17–20 May 2021, 2021.
- [34] Yucel U, Coupland J N. Ultrasonic attenuation measurements of the mixing, agglomeration, and sedimentation of sucrose crystals suspended in oil[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2011, 88(1): 33–38.
- [35] Langlois V, Gautherin W, Laurent J, et al. Ultrasonic determination of the particle concentration in model suspensions and ice slurry[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(8): 1972–1979.
- [36] Hunter T N, Peakall J, Biggs S. An acoustic backscatter system for in situ concentration profiling of settling flocculated dispersions[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 27–28: 20–27.
- [37] Bux J, Peakall J, Biggs S, et al. In situ characterisation of a concentrated colloidal titanium dioxide settling suspension and associated bed development: application of an acoustic backscatter system[J]. *Powder Technology*, 2015, 284: 530–540.
- [38] Tonge A S, Peakall J, Cowell D M J, et al. Experimental validation of acoustic inversions for high concentration profiling of spherical particles, using broadband technology in the Rayleigh regime[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 180: 108100.
- [39] Bux J, Paul N, Hunter T N, et al. In situ characterization of mixing and sedimentation dynamics in an impinging jet ballast tank via acoustic backscatter[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(7): 2618–2629.
- [40] Hussain S T, Peakall J, Barnes M, et al. Characterizing flocculated suspensions with an ultrasonic velocity profiler in backscatter mode[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, F 11–16 Sept. 2021, 2021.
- [41] Li T, Qiao W, Li H, et al. Distributed acoustic sensor based sand content detection in solid–liquid two-phase flow[C]//*Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC)*, Beijing, China, F 2020/10/24, 2020.
- [42] Bowler A, Bakalis S, Watson N. Monitoring mixing processes using ultrasonic sensors and machine learning[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1813.