



工业检测技术及应用丛书

侯怀书 著

超声波纳米颗粒 粒度分布测量技术及应用



上海科学技术出版社

工业检测技术及应用丛书

超声波纳米颗粒粒度分布 测量技术及应用

侯怀书 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书共7章,内容包括纳米颗粒及其测量技术概述、超声波物理基础、纳米颗粒两相介质的声衰减及信号处理技术、超声波纳米颗粒测量的理论模型及反演计算、宽带超声波换能器的设计研究、超声波纳米颗粒测量系统和超声波纳米颗粒粒度分布试验测量。全书从理论和试验两方面,详细分析了纳米颗粒粒度分布的宽带超声波测量技术,具有重要的出版价值。

本书可供从事纳米颗粒粒度测量技术研究的科技人员工作参考,也可供高等院校相关专业师生学习参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

超声波纳米颗粒粒度分布测量技术及应用 / 侯怀书著.

—上海:上海科学技术出版社,2019.7

(工业检测技术及应用丛书)

ISBN 978-7-5478-4467-0

I. ①超… II. ①侯… III. ①纳米材料—粒度分析—超声
测量—研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 100079 号

超声波纳米颗粒粒度分布测量技术及应用

侯怀书 著

上海世纪出版(集团)有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

上海展强印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9

字数:130千字

2019年7月第1版 2019年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4467-0/TG·100

定价:58.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

前言

Foreword

纳米技术(nanotechnology),也称毫微技术,是研究结构尺寸在1~100 nm 范围内材料性质和应用的一种技术。该项技术始于20世纪80年代,并逐渐成为当今科学研究领域的热点之一,它的最终目标是直接以原子或分子来构造具有特定功能的产品。颗粒的粒度大小和粒度分布,决定着工业生产过程和许多应用过程中产品的质量和性能。能够准确地测量颗粒,对于改善产品质量、控制污染和保障人类健康等方面,有着重大的经济价值和社会意义。

纳米颗粒的测量技术受到越来越多的重视,许多方法被应用于纳米颗粒的检测。近年来国际上利用超声波测量纳米颗粒粒度的研究得到了迅速发展。2010年上海理工大学蔡小舒教授和苏明旭教授等出版过一本有关颗粒测量的著作——《颗粒粒度测量技术及应用》。该书对颗粒粒度测量的基础知识、颗粒测量理论和多种颗粒测量方法做了介绍。在该书的第7章中简单介绍了超声颗粒测量方法,但还是不能满足从事纳米颗粒研究的科技人员的需求。作者所在团队根据超声波具备较宽的频带范围且穿透能力强,适用于较高浓度颗粒两相介质测量的特性,在国内首次对超声波测量纳米颗粒粒度进行了深入研究,并重点关注了利用超声波衰减谱对纳米颗粒粒度进行测量,取得了一系列的研究成果。作者经过多年超声波检测的深入研究,特撰写本书,全面系统地介绍了超声波测量纳米颗粒的理论、方法和技术,供从事纳米颗粒粒度测量技术研究的科技人员参考,故本书具有重要的出版价值。

全书共7章,从理论和试验两方面详细分析了纳米颗粒粒度分布的宽带超声波测量技术。第1章介绍了现有纳米颗粒粒度分布的测量技术以及超声波颗粒测量技术尤其是超声波纳米颗粒测量技术的发展状况及特点。第2章介绍了超声波纳米颗粒测量技术中的超声场以及超声特征量概念。第3章详细分析了纳米颗粒两相介质中造成声能损失的超声衰减机制以及超声谱测量中所用的信号处理技术。第4章重点分析了超声波纳米颗粒测量中适用的理论模型,通过数值模拟研究不同理论模型的应用情况,介绍了基于光顺因子优化的Phillips-Twomey-NNLS算法。第5章介绍了宽带超声波换能器设计中改善超声波波形、增加探头频谱有效频带宽度的相关技术,并设计制作了水浸宽带超声波换能器。第6章在理论分析的基础上,介绍了超声波纳米颗粒测量的试验装置,包括超声波换能器与信号发生接收装置、数据采集系统、信号处理系统以及超声测量区装置,并分析了变声程脉冲回波法测量声衰减谱时超声近场的影响以及应采取的措施。第7章介绍了多种纳米颗粒粒度分布的超声波测量结果,并与透射电镜(TEM)测量结果以及离心沉降测量结果进行了对比,结果吻合较好。本书的研究表明了采用宽带超声衰减谱测量纳米颗粒粒度分布的可行性与可靠性,并证明了超声波测量纳米颗粒粒度分布快速、高效、准确,是纳米颗粒粒度分布测量的有效方法。

本书在策划、编写及出版过程中,得到了上海物理气相沉积(PVD)超硬涂层及装备工程技术研究中心同仁的大力支持,以及上海理工大学苏明旭教授和同行的热忱指教。此外,本书在编写中引用了部分标准和技术文献资料。在此对上述单位和有关人员一并表示衷心感谢。

超声波纳米颗粒粒度检测过程涉及内容极为宽泛,影响因素还有很多,限于作者水平,书中定会存在不少不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2019年2月

目 录

Contents

第 1 章 纳米颗粒及其测量技术概述	001
1.1 纳米颗粒概述	001
1.2 纳米颗粒粒度及其浓度表征	003
1.2.1 纳米颗粒的粒径表示	003
1.2.2 纳米颗粒的粒径分布	005
1.2.3 纳米颗粒群的不同平均径	006
1.3 超声波颗粒测量技术的历史发展	007
1.4 超声波纳米颗粒测量技术的国内外概况	008
1.4.1 超声波纳米颗粒测量技术的国外概况	008
1.4.2 超声波纳米颗粒测量技术的国内概况	011
第 2 章 超声波物理基础	013
2.1 超声学概述	013
2.2 超声波的特性	014
2.3 超声波的波形	015
2.4 超声场及其特征量	016
2.4.1 描述超声场的物理量	017
2.4.2 超声场的物理性质	021
2.4.3 超声场的作用	022
2.5 弹性媒质空间中的声波	023

2.5.1	气体和液体中的声波	024
2.5.2	固体中的声波	027
第3章	纳米颗粒两相介质的声衰减及信号处理技术	031
3.1	纳米颗粒两相介质的超声衰减机制	031
3.2	纳米颗粒两相介质的超声衰减谱与速度谱处理技术	034
3.2.1	连续波测量	035
3.2.2	脉冲波测量	036
3.2.3	脉冲反射式超声谱测量的信号处理	038
第4章	超声波纳米颗粒测量的理论模型及反演计算	052
4.1	理论模型	052
4.1.1	ECAH 理论模型及其数值计算	053
4.1.2	McClements 理论模型	065
4.1.3	BLBL 理论模型	066
4.1.4	拓展耦合相理论模型	068
4.1.5	理论模型对声衰减与声速的预测	071
4.2	反演计算	081
第5章	宽带超声波换能器的设计研究	085
5.1	超声波压电换能器	085
5.2	超声波压电晶片	087
5.2.1	压电晶片主要性能参数	087
5.2.2	压电晶片材料	089
5.3	超声波换能器背衬设计	092
5.4	超声波换能器电匹配	098
5.5	超声波换能器检测匹配	100

第 6 章 超声波纳米颗粒测量系统	104
6.1 超声波换能器与超声波脉冲发射接收仪	104
6.2 数据采集与信号处理装置	106
6.3 超声波脉冲回波测量装置	109
6.3.1 变声程脉冲回波测量装置	109
6.3.2 反射式脉冲回波测量装置	112
6.4 超声波纳米颗粒在线测量系统	114
第 7 章 超声波纳米颗粒粒度分布试验测量	116
7.1 超声波纳米颗粒测量样品介绍	116
7.2 超声波纳米颗粒粒度分布测量	119
7.3 超声波纳米颗粒粒度分布测量误差分析	129
参考文献	133

第 1 章

纳米颗粒及其测量技术概述

随着纳米颗粒技术的发展,颗粒粒径越来越小,随之而来的粒径测量技术受到越来越多的重视。由于超声波具备较宽的频带范围,同时其测量颗粒范围较宽,可以完全覆盖纳米至毫米级;更为重要的是,超声波穿透能力强,适用于较高浓度颗粒两相介质的测量,因此超声波纳米颗粒测量技术正在得到快速发展且应用前景极为广阔。本章中介绍了现有纳米颗粒粒度分布的测量技术以及超声波颗粒测量技术尤其是超声波纳米颗粒测量技术的发展状况及特点。

1.1 纳米颗粒概述

纳米颗粒,又称纳米尘埃、纳米尘末,指纳米量级的微观颗粒。一般指粒径范围在 1~100 nm 的微小粒子;小于 10 nm 的半导体纳米颗粒,由于其电子能级量子化,又被称为量子点。

纳米颗粒具有重要的科学研究价值,其在大颗粒物质和原子、分子之间搭起了一座桥梁。通常情况下,大颗粒物质的物理特性与其尺寸大小没有关系,但是到了纳米尺度却并非如此,一些和尺寸相关的物理特性已经被知晓,例如:半导体纳米颗粒的量子束缚;一部分金属纳米颗粒的表面胞质共

振(surface plasmon resonance);纳米磁性材料的超顺磁性;类固体和软的纳米颗粒也被制造出来。脂质体是典型的具有类固体特性的纳米颗粒。由于纳米颗粒自身具备的许多特性,从20世纪80年代开始的纳米科技成为当今科学研究的一个热点领域。

纳米颗粒的存在形式多种多样,它的形态可能是乳胶体、聚合物、陶瓷颗粒、金属颗粒或者碳颗粒等,正在被越来越多地应用于医学、防晒化妆品以及电子产品等多种行业中。在医药领域,由于纳米颗粒能够渗透到膜细胞中,沿神经细胞突触、血管和淋巴管传播,并有选择性地积累在不同的细胞和一定的细胞结构中,因此不仅为药物的使用提供了有效性,同时也对人体健康带来了潜在威胁。在电子行业中,录音带、录像带和磁盘等都是采用磁性颗粒作为磁记录介质。随着社会的信息化,要求信息储存量大、信息处理速度快,推动着磁记录密度日益提高,促使磁记录用的磁性颗粒尺寸趋于超微化。目前用金属磁粉(20 nm左右的纳米磁性颗粒)制成的金属磁带、磁盘,国外已经商品化,其记录密度可达 $4 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7$ 位/cm($10^7 \sim 10^8$ 位/in),即每厘米可记录400万~4000万的信息单元;与普通磁带相比,它具有高密度、低噪声和高信噪比等优点。另外,美国的F-117A型隐形战斗机,其机身外表所包覆的红外与微波隐身材料中亦包含有多种纳米颗粒,它们对不同波段的电磁波有强烈的吸收能力。在火箭发射的固体燃料推进剂中添加1%重量比的超微铝或镍颗粒,每克燃料的燃烧热可增加1倍。由此可见,纳米颗粒在国防、国民经济各领域均有广泛的应用。

综上所述,纳米颗粒的粒度直接关系到其在工艺过程和各种应用过程中的性质和行为。随着颗粒技术的发展,纳米颗粒的测试技术受到越来越多的重视,对改善产品质量、控制环境污染、保障人身健康等有着重大的经济意义和深远的社会意义。

目前,众多方法被应用于纳米颗粒的检测,常用的纳米颗粒测量手段有电镜法、动态光散射法、离心沉降法、X射线衍射法等。其中电镜法是测量纳米颗粒粒度与形态最常用的方法,但是由于设备价格昂贵,使用条件严格以及取样的代表性问题等限制了该方法的应用。动态光散射法作为纳米

颗粒测试的新方法,近年来发展较快,国外一些著名的仪器生产公司如马尔文、贝尔曼库尔特、新帕泰克等都推出了性能优异的产品,而国内尚无该产品问世,表明国内在同类仪器产品的开发与生产方面与国外还存在较大差距。X射线由于其波长极短,也是一种测量纳米颗粒的理想手段,国外已见商品仪器面世,国内也已经将该技术的研发列入了国家开发计划,国家钢铁研究总院也对此进行了大量研究。

与上述几种检测方法相比,超声波测量纳米颗粒具备了特殊的优点:①检测成本相对较低;②超声波由于具备较宽的频带范围,可以测量从纳米至毫米级较宽的颗粒范围;③更为重要的是,超声波穿透能力强,适用于较高浓度颗粒两相介质的测量,因此具备了在线测量的潜质。

德国著名颗粒测量仪器和技术公司 Sympatec 推出的 OPUS 系列超声波在线颗粒粒度检测仪器,采用 20~200 MHz 的检测频率,可实现 200 nm~1 000 μm 的颗粒粒度分布测量;英国 Leeds 大学的 Povey 教授长期以来一直致力于超声波颗粒粒度分布测量的研究,在纳米颗粒粒度分布测量方面走在了世界的前列。但是到目前为止,为拓展纳米颗粒粒度分布测量的下限,国际上所采用的超声波频率均为高频,动辄几百兆,由此所带来的问题显而易见:一方面提高了对检测仪器的要求;另一方面带来很多如信号采集、信号处理等方面的问题。本书正是基于此,将对中、低频超声波测量纳米颗粒粒度分布以及浓度展开研究。

1.2 纳米颗粒粒度及其浓度表征

1.2.1 纳米颗粒的粒径表示

纳米颗粒之所以具有一系列特殊的光、电、磁等物理和化学特性,与其自身的比表面积密切相关,而决定其比表面积的主要因素为颗粒粒径大小以及颗粒浓度。

要全面衡量某一纳米颗粒两相介质中的粒径大小是十分困难的,这是因为同一颗粒两相介质中纳米颗粒的大小不一且形状各异。因此表征纳米颗粒粒径大小的一般途径是在某个关于粒形的近似假设下引入一些统计量的定义。

对于球形颗粒而言,可直接以其直径大小表示颗粒的粒径,而对于非球形颗粒,通常按照某些规定的线性尺度加以表示。

根据 Heywood 规定,相距最近且刚好夹颗粒投影像的两平行线的间距被称为颗粒宽度,并以 b 表示;与宽度方向垂直且刚好夹颗粒投影像的两平行线的间距被称为颗粒长度,以 l 表示;同时垂直于长度和宽度方向被称为颗粒高度,以 h 表示。颗粒投影像的周长和面积分别以 L 和 a 表示;颗粒的表面积和体积分别以 s 和 v 表示。

依据上述几何量,可以定义表 1.1 的不同颗粒粒度和当量直径。

表 1.1 颗粒粒度与当量直径

名 称	符号与表达式
长轴径	l
短轴径	b
周长径	$D_L = L/\pi$
二轴平均径	$(b + l)/2$
三轴平均径	$(b + l + h)/3$
圆形相当径(Heywood 直径)	$D_a = \sqrt{4a/\pi}$
表面积相当径	$D_s = \sqrt{s/\pi}$
体积相当直径	$D_v = \sqrt[3]{6v/\pi}$
表面积体积相当直径	$D_{sv} = 6v/s$

此外,在颗粒测试中,颗粒粒度常常依据测量原理,采用与测量原理相当的球的直径来表示。比如阻力直径 D_d 是与颗粒在相同介质中以相等速度运动时遭遇阻力相同的球的直径;Stokes 直径 D_{st} 是等效在层流区的自由沉降直径;筛分直径是以颗粒恰能通过一正方形筛孔的球的直径;Coulter

直径则是 Coulter 法所对应的等效意义上的球的直径。

1.2.2 纳米颗粒的粒径分布

为了从统计上表征一个分散系中大量纳米颗粒粒径的平均水平和彼此差异程度,引入粒径分布的概念:将取样纳米颗粒按粒径大小分档(档数由实际需求确定),计量每档颗粒的某个量化参数占样本总量的份额,以列表、直方图或所服从的某种形式确定的连续概率分布函数表示。量化参数可以是颗粒的数目或体积,也可以是其他正比于颗粒数量的参数。按数目计量的粒径分布简称“数目-粒径分布”,按体积计量的粒径分布简称“体积-粒径分布”。当某分散系的计量参数分布相等或近似相等,称该分散系是单分散体系,通常情况下颗粒群中所含颗粒的粒度有一个分布范围,称为多分散体系。对于绝大多数纳米颗粒而言,其粒度分布可以看作连续分布,因此适用频度分布曲线或者累积分布曲线加以描述。本研究中,将数目-粒径分布的粒径概率分布密度函数记作 $f(D)$,体积-粒径分布的粒径分布密度函数记作 $V(D)$,累积分布函数记作 $F(D)$ 。对于单峰分布,将频度分布函数对粒径求导并令其为零 $df(D)/dD = 0$,即可求得最可几分布粒径(最多数径) D_m 。此外,平均粒径 \bar{D} ,中位径 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 等也可由频度分布函数求出,具体公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{D} = \int_0^{\infty} D f(D) dD \\ \int_0^{D_{50}} f(D) dD = 50\% \\ \int_0^{D_{10}} f(D) dD = 10\% \\ \int_0^{D_{90}} f(D) dD = 90\% \end{array} \right.$$

累积分布函数则是频度分布函数对颗粒粒径的积分,其表示公式如下:

$$F(D) = \int_0^D f(D') dD'$$

$$F'(D) = \int_D^{\infty} f(D') dD'$$

式中 $F(D)$ ——粒径小于 D 的纳米颗粒所占的百分率；

$F'(D)$ ——粒径大于 D 的纳米颗粒所占的百分率。

很明显,对于同一纳米颗粒分散系, $F(D) + F'(D) = 1$ 。

在纳米颗粒测量中,常见的粒度分布函数主要包括以下几种:

1) 正态分布(normal distribution)

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(D-\bar{D})^2}{2\sigma^2}\right)$$

式中 \bar{D} ——平均粒径；

σ ——粒度分布标准偏差。

2) 对数正态分布(lg-normal distribution)

$$f(\lg D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\lg D}} \exp\left(-\frac{(\lg D - \lg \bar{D})^2}{2\sigma_{\lg D}^2}\right)$$

式中 $\sigma_{\lg D}$ ——纳米颗粒粒度分布宽度参数。

3) Rosin-Rammler 分布(Rosin-Rammler distribution)

$$f(D) = k \frac{D^{k-1}}{D^k} \exp\left[-\left(\frac{D}{\bar{D}}\right)^k\right]$$

式中 \bar{D} ——纳米颗粒群的粒度大小；

k ——粒度分布范围。

\bar{D} 值越大表明该纳米颗粒群的粒径越大,而 k 值越大则表示纳米颗粒的粒径分布范围越窄。

1.2.3 纳米颗粒群的不同平均径

将纳米颗粒群的个数频度分布函数定义为 $f_N(D)$,相应的重量(体积)

频度分布函数定义为 $f_w(D)$, $f_N(D)$ 与 $f_w(D)$ 之间满足关系式 $f_w(D) = C \cdot f_N(D)/D^3$ 。其中, C 为比例常数。个数平均径 \bar{D}_N 和重量平均径 \bar{D}_w 分别由式(1.1)和式(1.2)给出:

$$\bar{D}_N = \frac{\left[\int_0^{\infty} f_N(D) D^\alpha dD \right]^{\frac{1}{\alpha-\beta}}}{\left[\int_0^{\infty} f_N(D) D^\beta dD \right]} \quad (1.1)$$

$$\bar{D}_w = \frac{\left[\int_0^{\infty} f_N(D) D^{\alpha-3} dD \right]^{\frac{1}{\alpha-\beta}}}{\left[\int_0^{\infty} f_N(D) D^{\beta-3} dD \right]} \quad (1.2)$$

在式(1.1)中,当 $\alpha=1$ 、 $\beta=0$ 时称之为个数长度平均径 D_{NL} , 简称平均径, 以 \bar{D} 表示; 当 $\alpha=2$ 、 $\beta=0$ 时称之为个数面积平均径; 当 $\alpha=2$ 、 $\beta=1$ 时称之为长度表面积平均径 $D_{LS}(D_{21})$; 当 $\alpha=3$ 、 $\beta=2$ 时称之为表面积体积平均径 $D_{SV}(D_{32})$, 也被称为 Sauter 直径。

按照式(1.2), 当参数 α 、 β 取不同值时, 也有与之相对应的各种不同平均径。

1.3 超声波颗粒测量技术的历史发展

作为一种机械扰动波, 超声波在穿过颗粒两相介质时会产生各种“吸收”现象, 称为声衰减。实际上, 早在 20 世纪初, 科学家就已经意识到了这种现象。从 1910 年英国学者 Swell 研究超声波在雾中的“吸收”开始, 不断有学者对超声波在液-固、液-液、固-固两相介质中的传播状况进行研究。1945 年, Foldy 对高浓度颗粒两相介质中的超声波复散射现象做了详尽的描述。1948 年, Urick 通过研究发现, 超声波在颗粒两相介质中所发生的“吸收”现象, 很大一部分是由于悬浮颗粒与连续介质之间存在的黏性效应造成的。1953 年, Epstein 和 Carhart 通过对超声波在悬浮液和乳剂中的传

播研究发现,颗粒之间产生的动量交换以及颗粒与连续相之间的热传递也是造成“声吸收”的一个重要因素。1955年,C. F. Ying对超声波在弹性固态媒质中传播时分别由球形颗粒、各向同性的非球形颗粒以及球形穴腔所造成的声散射现象进行了研究。1961年,Waterman和Trull提出了颗粒两相介质中声波复散射的数学模型。1972年,Allegra和Hawley一起在Epstein与Carhart工作的基础上,较为完整地研究了颗粒两相介质中的声衰减问题,提出了声衰减和声速的计算数学模型,被称为ECAH理论模型;该模型意义重大,在超声波颗粒测量的发展史上具有里程碑式的意义。1996年,Dukhin对超声波在颗粒两相介质中的衰减机制做了更为详尽的总结,将超声波的衰减原因归结为黏性损失、热损失、散射损失、内部吸收损失、结构损失、电应力损失六种机制,并提出了适用于高密度颗粒高浓度两相介质状态下的拓展耦合相(expanded coupled phase)模型。上述工作为利用超声衰减谱测量颗粒两相介质中的颗粒粒度分布提供了必要的理论支持。

1.4 超声波纳米颗粒测量技术的国内外概况

由于纳米颗粒自身所具备的独特效应,如量子表面效应、尺寸效应、宏观量子隧道效应等,使其具有许多特有的物理、化学性质,在医药工业以及新材料等诸多方面有着广阔的应用前景。始于20世纪80年代的纳米科技已经成为当今科学研究的一个热点领域。随着颗粒技术的发展,颗粒粒径测试的下限拓展受到广泛关注,尤其是纳米颗粒的测试技术,受到越来越多的重视。在众多的纳米颗粒检测方法中,超声波检测具有装置简单、易实现在线检测等优点;此外,超声波还可适用于相对较高浓度条件下的检测。

1.4.1 超声波纳米颗粒测量技术的国外概况

利用超声衰减谱测量纳米颗粒粒度分布的先行者当推英国利兹大学的

Malcolm Povey 教授及其工作团队。Povey 教授在食品科学领域工作多年,潜心研究了声学测量中的诸多物理量,阐述了声速、声衰减(损失)与超声波和颗粒相相互作用之间的关系,认为热损失、黏性损失和散射损失是造成纳米颗粒两相介质中超声波衰减的主要因素。Povey 提出三种超声波纳米颗粒测量的方式,即单频、宽带连续超声、宽带脉冲超声。其中,宽带脉冲超声是最为成熟且检测成本相对最低的方法,该方法采用对脉冲超声信号做快速傅里叶变换来得到衰减和声速关于频率的函数,然后纳米颗粒尺寸可以按照一个恰当的理论模型由测量所得的超声衰减谱获得。

英国诺丁汉大学的 R. E. Challis 教授,对超声颗粒测试的多种理论模型进行了大量的对比实验研究,分析了颗粒两相介质的不同物性对声速和声衰减的影响,并着重讨论了高浓度情况下超声波复散射的影响,为高浓度纳米颗粒的超声波测量提供了理论依据。

美国马萨诸塞大学的 D. J. McClements 对 ECAH 理论模型进行了简化与补充,提出了“长波长”条件下的声衰减与声速计算理论模型,并着重讨论了超声复散射以及温度的影响,因此被称为 McClements 理论模型,并在超声波纳米颗粒测量中得到实际应用。

除此之外,很多专业的仪器设计与制造公司在超声纳米颗粒测量方面也进行了大量的研究工作,并推出了他们的检测仪器。

美国颗粒离散技术有限公司(Dispersion Technology Inc.)的 Dukhin 教授,以“壳理论”为基础,着重讨论了高密度差异超细颗粒两相介质在高浓度情况下的声衰减理论模型。Dukhin 等人认为,在该种情况下,造成超声波衰减的机制除热损失和黏性损失之外,颗粒间相互作用所引起的超声损失不可忽视。此外,Dukhin 还将超声谱与电声谱融合在一起,并认为这种融合能够更为精确地描述颗粒两相介质中的各种属性。在 Dukhin 所给出的很多测量实例中,颗粒相的体积浓度可以达到 40%,而通常情况下的理论模型只能在颗粒相不超过 10% 体积浓度的情况下适用。此外,美国颗粒离散技术有限公司宣称该公司所生产的 DT 系列仪器,测量下限可以达到 1 nm,并可用于诸如云母、油漆、陶瓷、氧化锆、硝酸盐、氧化铝、氧化钡、钛酸