

综述与论坛

# 超声波技术应用现状

席细平, 马重芳, 王伟

(北京工业大学环境与能源工程学院, “传热强化与过程节能”教育部重点实验室, 北京 100022)

**摘要:** 阐述了超声波的特性和基本原理, 探讨了目前超声波在废水处理、医疗、防除结垢、纳米材料制备等方面的应用现状, 指出超声波技术将会在纳米粉体材料的研制方面发挥巨大的作用。

**关键词:** 超声波; 空化作用; 纳米粉体; 应用

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1004-7050(2007)01-0025-05

## 引言

超声波是指频率在 20 kHz ~ 106 kHz 的机械波, 波速一般为 1 500 m/s, 波长为 0.01 cm ~ 10 cm。超声波的波长远大于分子尺寸, 说明超声波本身不能直接对分子起作用, 而是通过周围环境的物理作用影响分子, 所以超声波的作用与其作用的环境密切相关。超声波既是一种波动形式, 又是一种能量形式, 在传播过程中与媒介相互作用产生超声效应。超声波与媒介相互作用可分为机械作用、空化作用和热作用。

随着科学技术的发展, 相关技术领域相互渗透, 使超声波技术广泛应用于工业、化工、医学、石油化工等许多领域。超声波作为一种特殊的能量输入方式, 所具有的高效能在材料化学中起到光、电、热方法所无法达到的作用<sup>[1]</sup>。仅从超声波在液体中释放的巨大能量来说就是其他方法所望尘莫及的, 更不用说超声波定量控制的效果了。近年来, 随着超声波技术的日益发展与成熟, 其在新材料合成、化学反应、传递过程的强化以及废水处理等领域都得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。在材料合成中, 尤其是纳米材料的制备中, 超声波技术有着极大的潜力。通过超声波方法制备纳米材料, 达到了目前我们采用激光、紫

外线照射和热电作用所无法实现的目标, 具有很好的前景。

## 1 超声波的特性及作用原理

### 1.1 超声波的特性

与可闻波相比, 超声波由于频率高、波长短, 在传播过程中具有许多特性:

1) 方向性好。由于超声波的功率高, 其波长较同样介质中的声波波长短得多, 衍射现象不明显, 所以超声波的传播方向好。

2) 能量大。超声波在介质中传播时, 当振幅相同时, 振动频率越高能量越大。因此, 它比普通声波具有大得多的能量。

3) 穿透能力强。超声波虽然在气体中衰减很强, 但在固体和液体中衰减较弱。在不透明的固体中, 超声波能够穿透几十米的厚度, 所以超声波在固体和液体中应用较广。

4) 引起空化作用。在液体中传播时, 超声波与声波一样是一种疏密的振动波, 液体时而受拉时而逐级压, 产生近于真空或含少量气体的空穴。在声波压缩阶段, 空穴被压缩直至崩溃。在空穴崩溃时产生放电和发光现象, 这种现象称为空化作用。

### 1.2 超声波的作用原理

超声波在传播过程中与媒介相互作用, 相位和振幅发生变化, 使媒质的一些物理、化学和生物特性或状态发生改变, 或者使这种改变的过程加快, 从而

收稿日期: 2006-10-09

作者简介: 席细平, 男, 1979 年出生, 北京工业大学在读硕士研究生, 从事超声波技术应用研究。

产生一系列效应,如力学、热学、化学和生物效应等。这些效应可归结为以下三种基本作用<sup>[3]</sup>:

### 1.2.1 热作用

超声波在媒质中传播时,大振幅声波会形成锯齿形波面的周期性激波,在波面处造成很大的压强梯度。振动能量不断被媒质吸收转化为热量而使媒质温度升高,吸收的能量可升高媒质的整体温度和边界外的局部温度等。

### 1.2.2 机械作用

超声波是机械能量的传递形式,与波动过程有关,会产生线性的交变振动作用,原点位移、振动速度、加速度以及声压参数可以表现超声效应。超声波在液体中传播时,其间质点位移振幅虽然很小,但超声引起的质点加速度却非常大。当 20 kHz、1 W/m<sup>2</sup> 的超声波在水中传播时,其产生的超声波压力在 -173 kPa ~ 173 kPa,最大质点加速度达 14.4 km/s<sup>2</sup>。因此,超声波作用于液体时会产生激烈而快速变化的机械运动。

### 1.2.3 空化作用

超声波声化学效应的主要作用之一是声空化。声空化是指液体中的微小泡核(空化泡)在超声波作用下被激活产生振动,当声压达到一定值时发生振荡、生长、收缩乃至崩溃的一系列动力学过程。空化气泡在超声的作用下经历超声的稀疏相和压缩相时,气泡经多次周期振荡最终以高速崩裂。由于空化气泡寿命极短(约 0.1 μs),可产生高速(110 m/s)微射流,碰撞密度高达 1.5 kg/m<sup>2</sup>,产生高电流,并伴有强烈的冲击波。空化使气相反应温度达 5 000 K 左右,液相反应温度达 1 900 K 左右,局部压力 50 MPa,温度变化率高达 1.0 × 10<sup>9</sup> K/s<sup>[4]</sup>。这样可使媒质在空化气泡内发生化学键断裂、水相燃烧或热分解,并可促进均相界面的扰动和相界面的更新,从而加速界面间的传质和传热过程。

## 2 超声波技术的应用现状

超声技术是一门以物理、电子、机械以及材料为基础的通用技术之一。目前,超声技术的应用已经深入到社会生活的各个领域。超声技术是通过声波的产生、传播及接收的物理过程而完成的,它的应用研究正是结合超声波之独有特性而展开的。

### 2.1 超声波技术在废水处理中的应用

超声波对废水的处理主要利用空化作用以及由此引发的物理和化学变化。在超声波空化产生的局部高温、高压环境下,水被分解,产生 ·H 和 ·OH 自

由基(·OH的氧化能力仅次于元素F)。另外,溶解在溶液中的空气(N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>)也可以发生自由基裂解反应,产生·N和·O自由基,这些自由基会进一步引发有机分子的断链、自由基的转移和氧化还原反应,从而对废水进行有效的处理。

超声技术可用于各种难降解的废水,目前已用于卤代脂肪烃<sup>[5]</sup>、单环芳香族化合物和多环芳烃<sup>[6]</sup>、酚类、氯化烃、有机酸和染料等有机物,并取得了良好的效果。Kotronaron<sup>[7]</sup>采用超声技术处理含P、S的废水,结果完全转化为PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。Hoflman等发现卤代烃、杀虫剂、苯酚和酯类物质在超声的作用下能够降解成短链的有机酸、CO<sub>2</sub>和无机离子。祁梦兰<sup>[8]</sup>利用超声处理染料废水,发现废水的可生化性提高,BOD<sub>2</sub>/COD由0.22~0.28上升到0.44~0.51。Pertier<sup>[9]</sup>研究了超声生化处理四氯酚、五氯酚等,发现这些物质基本上降解为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O;生化处理中,在曝气同时进行超声处理1h,可除去10%~60%的低分子量氯代有机物。

### 2.2 超声波技术在造纸工业中的应用

超声技术以其作用力强、作用面宽、对环境无污染的特点在造纸工业中得到了很好的应用,特别在废纸的回收利用、废水处理和纸张在线检测方面显示了广阔的应用前景。

研究发现,在纤维预处理过程中,用超声波处理木浆具有与机械打浆、精浆相似的效果,可对纤维细胞壁产生位移、变形以及细纤维化等作用<sup>[10]</sup>。唐爱民等<sup>[11]</sup>将超声技术应用于速生材木浆纤维的预处理,实验发现,超声波处理不仅对纤维有机械打浆效应,而且经超声波处理后,纤维的保水值增大,纤维的可及度和反应性能显著提高。刘丽<sup>[12]</sup>等用超声波技术处理芳纶纤维,研究发现,超声作用可以活化纤维表面,使芳纶表面含氧官能团增加,纤维表面张力中极性分子增加了23.5%;研究还发现,超声对纤维表面有刻蚀作用,纤维比表面增加了35%,大大提高了纤维的层间结合能力。

超声波在脱墨和提高纸张性能方面也都取得了令人满意的效果。William等<sup>[13]</sup>研究了超声波处理静电复印纸的办公混合废纸油墨脱除情况,结果表明,浮选之前采用间歇法或连续法超声波处理能够裂解油墨粒子,降低油墨粒子尺寸,裂解后的油墨粒子采用浮选的方法较易脱除。伍红、谢益民等<sup>[14]</sup>进行了酶与超声波协同作用对废旧彩色胶印新闻纸的脱墨研究,处理后浆的白度比空白样提高5%ISO,无机颜料含量明显降低,纤维表面的油墨粒子大部

分被除掉。研究发现,超声波的主要作用是提高了酶对纤维素表面碳水化合物水解速度,因而有利于油墨的脱除。

### 2.3 超声波技术在防除结垢中的应用

Nishida<sup>[15]</sup>、Dalas<sup>[16]</sup>研究表明,超声波防垢主要是利用超声波强声场处理流体,在超声场作用下流体中成垢物质的物理形态和化学性能发生一系列变化,使之分散、粉碎、松散、松脱而不易附着管壁形成积垢。目前,与传统清垢方法有着本质区别的超声波防垢,因其具有在线连续工作、自动化程度高、工作性质可靠、无环境污染和运行费用低等特点,被大量应用在防止和清除水质结垢的管线中。另外,在流体物料结垢的管线中也取得了成功的应用,有的甚至还应用在流体物料温度高达 360 的条件下。

梁成浩<sup>[17]</sup>对水处理系统施加 20 kHz 的超声波,研究了其对阻垢的作用。结果表明,超声处理具有明显的阻垢作用,阻垢率可达 85% 以上,适宜的超声处理时间间隔为 10 min,开启 3 min。李淑琴等<sup>[18]</sup>研究了超声技术在工业除水垢方面的作用,发现加超声比不加超声除垢效果可提高 2 倍~8 倍。南方七间糖厂的经验表明<sup>[19]</sup>,超声波防垢技术可降低糖液黏度,使蒸发罐的传热系数和蒸发强度分别提高 42.4% 和 15.2%,可停止使用化学清洗剂煮罐。华南理工大学轻化所将其研制的超声波防除积垢技术及设备于 1998 年在广东省紫金糖厂进行工业化应用,取得了明显效果。2001 年该项技术通过鉴定,被认为具有广阔的应用前景和推广价值。孙晓霞等<sup>[20]</sup>介绍了中国石化金陵分公司重油催化裂化装置油浆循环系统应用超声波防垢技术的工业试验情况。结果表明,重油催化裂化装置油浆循环系统应用超声波防垢技术可行,防垢设备本体能够满足在线运行工况的要求;向换热器管程油浆(约 360 )辐射超声波能量,壳程介质进出口温差提高了 3 ~ 5 ,除垢器连续运行,并使换热器的传热效果维持在较好水平上,油浆循环系统畅通无阻。刘天庆等<sup>[21]</sup>在低臭氧用量条件下,采用超声与臭氧处理相结合的方法来控制生物垢的情况,每天用 22 mg/L ~ 28 mg/L 的臭氧水处理模拟循环冷却水 3 h,然后再用 20 kHz、20% 振幅的超声处理生物膜,结果表明,超声技术可以十分有效地控制生物垢的生长,并移除 90% 以上在壁面已经形成的生物垢。

### 2.4 超声波技术在生活及服务行业中的应用

超声波在生活及服务行业中主要用于清洗和消毒。日常生活中,眼镜、首饰都可以用超声波进行清

洗,且速度快、无损伤;大型的宾馆、饭店用它清洗餐具,不仅清洗效果好,而且还具有杀灭病毒的作用。这主要是利用了超声波的空化效应。与其他清洗手段相比,超声波具有以下优点:1) 清洗效果优。清洗能力比较见表 1。2) 清洗质量高,清洗效果均匀,一致性好。3) 缩短清洗时间并节能,降低生产成本。4) 降低工人的生产强度,改善劳动条件。5) 绿色环保。超声波清洗采用的洗涤剂为低污染型,易于降解。崔运花<sup>[22]</sup>研究了不同条件下的超声波洗毛效果,并与传统乳化洗毛进行了对比。研究结果表明,利用超声波洗毛可以降低洗毛温度,缩短洗毛时间,降低溶剂和助剂用量。超声波处理后的洗净毛蓬松性好,羊毛之间不发生纠缠,白度高,洗净毛中几乎无细小杂质,洗净毛纤维细度分布更趋集中。虽然长时间超声波洗毛会使羊毛纤维直径变小,断裂伸长增大,但其对纤维断裂强力无明显损伤。目前,国内已有厂家推出超声波洗衣机。此外,超声波洗碗机的专利也已经有人申请。

表 1 超声波与其他清洗方法的清洗能力比较

清洗方法	清洗程度/ %
超声波清洗	100
有机溶剂清洗	70
机械方法清洗	50
手工清洗	40
浸泡清洗	20

### 2.5 超声波技术在医学中的应用

自 1942 年超声技术应用于医学领域以来,超声检查已逐渐成为诊断领域里非侵入性检查的主要方法之一。1955 年美国莱斯科尔首次利用超声波观测人的心脏,这项技术经不断改进,特别在使用了微信息处理机后更趋于完善。第一台具有 CFM 功能的超声诊断仪的问世,促进了医学影像诊断设备的迅猛发展,它标志着诊断超声学从形态学过渡到动力学,使超声诊断设备不仅能获得人体脏器的解剖信息,而且能获得功能信息,提高了医学诊断水平。20 世纪 70 年代发展起来的二维 B 型超声成像技术极大地扩大了超声影像设备的临床应用范围。现在超声类诊断器种类很多,常见的有 A 型超声波诊断仪、B 型超声波诊断仪、超声心动图仪等。A 型超声波诊断仪又称幅度调制型超声仪器,能提供体内器官的一维信息,不能显示整个器官的形状,故常用来测量界面距离和脏器的厚度,如判断视网膜剥离的性质等。B 型超声波诊断仪又称断面显像仪,它能显示的图像具有与人体解剖位置直接对应的特

点,十分直观,使用方便,诊断正确率高。近年来,B型超声显像仪已被用于许多脏器的检查。利用超声多普勒效应来测量血流速度的仪器称为多普勒血流仪。由超声发生器发出的超声波通过探头输出进入血管,经血液中红血球的散射回声信号的多普勒频移,可以测量红血球的运动速度,继而得到血流速度。多普勒血流仪可用于了解血液动力学方面的生理病理状况,如心脏运动状况及血管中是否存在栓塞等。

超声技术在医学上还可用来治疗疾病<sup>[23]</sup>。利用强度较低的超声波的热效应、机械效应等疾病部位进行“加热”和机械刺激称为超声理疗,主要包括超声按摩、超声针灸及超声热疗。利用较强的超声波的剧烈作用来切断、破坏某些组织称为超声手术,主要有超声碎石和超声手术刀。

## 2.6 超声波技术在军事中的应用

超声波在军事中的应用主要运用超声波方向性好的特性。由于超声波基本上是沿直线传播的,可以定向发射,如果渔船载有水下超声波发生器,它旋转着向各个方向发射超声波,当超声波遇到鱼群时会反射回来,渔船探测到反射波就知道鱼群的位置了,这种仪器叫声纳。它也可以用来探测水中的暗礁和敌人的潜艇以及测量海水的深度。在现代高科技中,虽然雷达的应用很广,但在水中依然采用落后的声纳技术,这主要是因为海水有良好的导电性,对电磁波的吸收能力很强,雷达无法探测水下作战目标的方位和距离,超声波在空气中衰减较快,而在固体、液体中的衰减却很小,这正好与电磁波相反,在这种情况下,声纳技术可以发挥巨大的威力。由于海水吸热能力太强,使红外线技术无用武之地;又由于水的透光能力差,吸收光能力很强,故光学设备如望远镜也使用不上。因此,声纳技术在特殊领域中占有不可取代的地位。

## 2.7 超声波技术在电镀工业中的应用

超声波技术在电镀工业中主要利用超声波的空化作用,表现在:1)空化产生的冲击波对电极表面进行彻底清洗;2)使氢气形成空化泡,从而加快氢气的析出;3)超声波空化所产生的高速微射流强化了溶液的搅拌作用,加强了离子的运输能力,减小了分散层厚度和浓度梯度,降低了溶液极化,加快了电极过程,优化了电镀操作条件。实验表明,超声波空化不仅提高了镀覆速度和效率,同时也提高了镀层的质量,它必将在工业生产中发挥越来越大的作用。

## 2.8 超声波技术在纳米材料制备中的应用

纳米材料是纳米科学中的一个重要研究发展方

向,在越来越多的领域中受到重视,成为材料科学研究的热点。近年来,声空化作用引起的特殊物理和化学环境为科学家制备纳米材料提供了新的途径,声空化方法正成为制备具有特殊性能材料的一种新技术,这其中包括超声化学法、超声雾化法等。这些方法的出现,扩展了纳米材料的制备技术,为纳米科学技术注入了新的活力。

著名声化学家 Suslick<sup>[24]</sup>的研究小组在纳米结构材料的制备和合成方面做了大量的工作,如在0 时用超声辐照  $\text{Fe}(\text{CO})_3$  的癸烷溶液时可产生暗黑色的铁粉末。经元素分析可知,粉末中铁的质量分数为96%以上;扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)的结果证实,这种材料是由粒径4 nm~6 nm的粒子组成的聚集体;磁性研究表明,这是一种非常软的铁磁性材料,居里温度高达580 K。王建等人<sup>[25]</sup>以无水四氯化锡为原料,在超声波的作用下,用溶胶-凝胶法制得纳米  $\text{SnO}_2$ ,并运用TEM和XRD对其结构进行了表征。在适当的条件下制得的纳米  $\text{SnO}_2$  粉末平均粒径为20 nm,颗粒为球形,粒径均匀,流动性能好,产品结构为四方晶系锡石结构,纯度95%以上,超声波在控制粒径大小和防止团聚方面起到了很好的作用。林金谷等<sup>[26]</sup>以溶于十氢萘的羰基铁  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  和六羰基铬  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  溶液注入一套专门设计的超声微粒制备装置,在超声功率120 W、频率20 kHz下分解3.5 h,得到粒径17 nm~28 nm的Fe-Cr合金纳米粉末。王菊香等<sup>[27]</sup>开发出制备纳米粉末的超声电解法,通过控制溶液浓度、超声功率、电解条件和电流密度等得到10 nm以下的铜和镍粉。该方法具有工艺简单、成本低和无毒、无污染等特点,是制备超细金属粉末的一种新方法。陈雪梅等首次将超声波法运用于沉淀法制备纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体,利用超声辐射工艺制得粒径为12 nm的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉体。结果表明,超声辐射通过对液体介质的空化作用而有效地细化了前驱体  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3$  沉淀颗粒,抑制了前驱体颗粒的聚焦,超声辐射延缓了前驱体向凝胶转化过程,得到含较小包裹水和结合水的三维疏松网络状骨架结构的凝胶。

## 3 展望

超声波技术已经在生活的各个领域得到了应用,作为一种强有力的手段,必将在科学研究以及社会生产等各方面发挥更为重要的作用,尤其在纳米粉体材料的制备上,超声波技术有着其他研究方法无法比拟的优越性。

## 参考文献:

- [1] Suslick K S. Sonochemistry[J]. Science, 1990, 247:1439-1445.
- [2] 金长善. 超声工程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- [3] Wang Jun, Han Jiantao, Zhang Yang. The application of ultrasound technology in chemical production[J]. Contemporary Chemical Industry, 2002, 12(4):187-189.
- [4] Suslick K S, Choe S B, Cichow las A A, et al. Sonochemical synthesis of amorphous iron[J]. Nature, 1991, 353:414-416.
- [5] Cataid W J, Jhomas J. Sonochemical dechlorination of hazardous wasters in aqueous system[J]. Waste Management, 1995, 15(4):303-309.
- [6] Petrier C. Ultrasound and environment sonochemical destruction of chloroaromatic derivatives[J]. Environ Sci & Technol, 1998, 32:1316-1318.
- [7] Kotronarou A, Mills G, Hoffmann M R, et al. Decomposition of paratbion in aqueous solution by ultrasonic irradiation[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26(7):1460-1462.
- [8] 祁梦兰, 杜静. 声化学氧化-SBR法处理染料废水[J]. 河北科技大学学报, 1997, 18(1):76-80.
- [9] Petrier C, Micolle M, Merlin G, et al. Characteristics of pentachlorophenate degradation in aqueous solution by means of ultrasound[J]. Environ Sci Tech, 1992, 26(8):1639.
- [10] Hung Chihlin. Revealing fibril angle in wood sections by ultrasonic treatment[J]. Wood and Fiber Science, 1995, 27(1):49-54.
- [11] 唐爱民, 梁文芷. 超声波预处理对速生材木纤维结构的影响[J]. 声学技术, 2000, 19(2):78-82.
- [12] 刘丽, 张翔, 黄玉东, 等. 超声作用对芳纶纤维表面性质的影响[J]. 复合材料学报, 2003, 2(20):35-40.
- [13] Scott E W, Paul Gerber. Using ultrasound to deinking xerographic waste[J]. Tappi J, 1995, 78(12):125.
- [14] 伍红, 谢益民, 赖燕明. 彩色胶印新闻纸酶-超声波协同脱墨的研究[J]. 广东造纸, 2000(3):25-28.
- [15] Nishida I. Precipitation of calcium carbonate by ultrasonic irradiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11(6):423-428.
- [16] Dalas E. The effect of ultrasonic field on calcium carbonate scale formation[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 222(1/2):287-292.
- [17] 梁成浩, 白忻平. 超声波阻垢性能的研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(13):64-66.
- [18] 李淑琴, 程永清. 声化学法除垢研究[J]. 陕西化工, 1997(9):22-23.
- [19] 艾承泗, 俞明. 创源阵列式超声波防垢器用于糖厂蒸发罐防垢实例及展望[J]. 甘蔗糖业, 2001(3):35-36.
- [20] 孙晓霞, 杜平, 王建, 等. 重油催化裂化油浆换热设备应用超声防垢的研究及工业试验[J]. 石油炼制与化工, 2003, 34(6):52-56.
- [21] 刘天庆, Bott T R. 超声和臭氧控制生物垢生长的研究[J]. 水处理技术, 1999, 25(1):30-33.
- [22] 崔运花. 超声波在洗毛中的应用[J]. 东华大学学报:自然科学版, 1999(2):50-54.
- [23] 宋存牛. 声动力学疗法治疗肿瘤的研究现状及前景[J]. 物理, 2003, 32(2):110-113.
- [24] Kenneth S, Suslick G, Price J. Application of ultrasound to materials chemistry[J]. Annu Rev Master SCI, 1999, 29:295-326.
- [25] Wang Jian, Li Dunfang, Guan Hongtao. Preparation of nano tin dioxide powder with supersonic wave col-gel process[J]. Yunnan Metallurgy, 2002(8):13-16.
- [26] Lin jinggu, Wei yunian, Zhou binshuo, et al. Study of Fe-Cr nanometer particle prepared by ultrasonic decomposition[J]. Metallic Functional Materials, 1995(4/5):134-135.
- [27] Wang jiuxiang, Pan jing, Zhao xun, et al. Preparation of ultrafine metallic powder by ultrasonic electrolysis[J]. Metallic Functional Materials, 1997(3):115.

## Application situation of ultrasonic technology

XI Xi-ping, MA Chong-fang, WANG Wei

(Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation The Key Laboratory of Ministry of Education, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University Of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** The speciality and principle of ultrasound were described and its application situation in waste water treatment, medical services treatment, anti-scaling, preparation of nanosized materials, and so on. It pointed out that ultrasonic technology would make full use of development in nanopowder preparation.

**Key words:** ultrasonic; cavitation effect; nanopowder; application