

A 综述与评论

A1 功率超声发展近况和展望

林仲茂

(中国科学院声学院研究所 北京·100080)

近10年来大功率超声的产生、基本效应和技术应用的研究有较大的进展。大功率超声换能器除常用的纵振模式外,发展了扭转和弯曲振动模式以及纵扭、纵弯等复合振动模式换能器,扩展了新的应用领域。工作频率除应用较广的低频(60kHz以下)以外还发展了较高频率(几百kHz)的大功率超声换能器。功率容量为几十到几百kW,声强由每平方米几十到几千W。由于大功率和高声强超声源的长足进展,有力地推动工业应用并且大大拓宽了应用领域。基本效应方面,主要集中在研究超声空化,这是医学应用及声化学研究中迫切需要进一步研究的问题。功率超声技术应用方面,除传统应用的扩展外,近年来发展较快的新技术及新应用领域有声化学、超声马达、超声悬浮及超声治癌等。下面就几个主要方面的发展作一简介。

基础研究方面,这里只涉及换能器及超声空化两个问题。

· **功率超声换能器** 设计的主要问题是效率和功率限制;共振频率及导纳特性;几何尺寸和固定支撑面的计算等。一维纵振动考虑损耗及负载,多压电体及多元组合的设计计算已趋成熟。一般用传输矩阵方法分析并已有通用计算程序。二、三维分析一般用表观弹性及有限元素(FEM)方法计算。法国最近用FEM方法分析应力和温度沿换能器轴向分布以了解功率限制问题。

用于超声焊接和振动切削的弯曲振动系统,以前大多用纵振激发弯曲振动杆的组合系统。近年来日本发展一种夹心结构的弯曲振动换能器,简化了结构及增加工作稳定性,已用于超声振动切削。此外还有径向及纵向振动激发条状板或圆盘的弯曲振动系统,在空气介质中产生大功率超声。夹心扭转振动换能器亦已用于焊接塑料。发展了各种纵扭和纵弯复合换能器,构成各种形式的超声马达。由R-L及L-L变换的功率合成振动系统已经研制出几十kW大功率超声设备并成功地用于超声金属焊接和粉末压缩。这方面我国也取得新的进展。

· **超声空化研究** 由于医学应用中的安全问题及声化学的机理研究,近年来超声空化现象又成为研究的热点课题。如冲击波碎石治疗、超声洁牙以及超声诊断的高脉冲声压在生物体内有可能发生空化和产生自由基 OH^{\cdot} ,因而导致机械损伤和引起化学及生物效应。目前在生物体内直接测量或观察空化现象比较困难,因而大部分研究工作是在玻璃试管中进行。实验表明,上述的治疗设备在水溶液中都产生空化。但在生物体内是否会产生空化尚未定论,还需要继续研究。在固-液多相介质中对空化现象的细致观察,发现与在纯液体中所发生的空化现象有很大不同。在液-固体交界面观察不到象纯液体中那种对称、球状的空泡崩溃,发现

空泡崩溃时向固体表面喷出速度达100m/s的微射流。是固体表面受腐蚀的主要原因，也是固体催化剂加速催化过程的重要机理，在匀相液体介质中的空化现象，60年代Flynn曾提出稳态空化和瞬态空化两种类型。最近Vaughan和Leeman认为没有必要用瞬态空化来描述和解释实验结果。他们建议以气泡壁运动最大速度与声在液体和气体中的速度之间的大小关系，将空化分为三种状态能更好地解释实验结果。

· 功率超声技术及应用。

1. 新技术及应用。

声化学 新的学科分支——声化学，近10年来发展非常快。几乎每年都组织过国际性学术会议，在声及超声的国际会议中也常有这方面的特邀或专题报告。1987年欧州组织了声化学学会。出版了一些专著和专利。在合成化学、聚合物化学和电化学等方面的研究已取得很大进展。

合成化学 主要研究对象是多相反应，特别是有有机金属反应。在有机物氧化、缩合、取代、偶联、加氢、环丙烷化和氢硅化反应等方面都得到应用。声化学反应一般在低超声频段(20-50kHz)进行。反应大致有4种基本类型：A.有金属表面参与的反应金属作为试剂或者只起催化作用。声空化所产生的冲击波和溶剂向金属表面喷射高速的微射流而不断清洗、腐蚀、更新和激活金属表面，提高了反应速率。B.有粉末状的固体颗粒参与的反应空化作用将固体颗粒进一步破碎，增加反应面积和激活表面，有可能替代相转移催化剂(PTC)，作为促进固-液多相反应的一种新手段。美国Suslick等人曾用强超声处理镍粉时，其催化活性可提高 10^5 倍。C.乳化反应声空化迅速乳化两种不相溶的液体，增加反应区域，可以代替PTC，如果将PTC和声空化作用结合起来，效果更好。D.均相反应空化所产生的局部高温、高压，产生自由基以及冲击波的作用会改变溶剂结构而影响反应。由上面举出的几种类型反应可能受益的有以下几个方面：A.加速化学反应提高反应产率。B.降低反应条件。C.缩短反应诱导时间。D.进行有些传统方法难以进行的合成反应。此外还能改变反应产物，减少某些经典反应步骤及避免某些副反应产生等等。

聚合物化学 聚合物反应一般在低频($<400\text{kHz}$)高声强($>3\text{W}/\text{cm}^2$)的超声作用下进行。A.聚合反应。用超声辐照丙烯腈、丙烯酸酯和甲基丙烯酸等溶解或分散在水中的溶液，能够聚合。B.高分子降解反应。超声作用高聚物溶液能引起粘度持久性降低。降解有均裂、异裂及分子内歧化等方式。已提出各种理论来解释机理。C.共聚反应。超声合成共聚物有两条途径：一是通过高聚物降解产生大自由基引发单体共聚；另一种是通过两种高聚物降解产生的大自由基交叉结合。超声共聚反应快、操作简便，特别是那些用普通方法难以进行的共聚反应更有发展前途。

声电化学 电镀方面，超声引入有两种方式。一是直接引入电镀槽；另一种是将超声振动加在阴极上，超声的作用是增加电流密度，增加镀层速率，增加微硬度或使晶粒变细而光亮。另一应用领域是非电镀化学沉积，提高沉积速率，得到更均匀的镀层。

我国在应用和基础研究方面也取得不少进展。例如聚氧化乙烯(PEO)分别与聚丙烯酰胺(PAM)和丙烯腈(AN)在超声作用下的嵌段共聚。PEO与聚醋酸乙烯形成的接枝共聚。超声强化异丙醇铝水解反应。超声激活血卟啉抗癌作用及醇的氧化反应；声场结构对声化学反应的影响，自由基产生的检测等的研究都取得进展。

超声马达 超声马达在60年代已提出，但至80年代以后才得到迅速发展，超声马达的优

点是转速低、转矩大、体积小、重量轻和响应速度快，且便于控制和无电磁干扰，因此引起人们的重视，尤其在日本正在大力发展。目前仍然在研究各种适用于超声马达的振动模式及由振动到运动的转换机制，研究摩擦材料和各种结构。目前已用于镜头的自动聚焦，薄片的传送和扫描装置。在精密定位、控制和测量方面有广阔应用前景。体积仅有 $100(\mu\text{m})^3$ 的超声马达已研制出来，可以 100mm/s 的速度作直线运动，目前纵扭复合振动的超声马达最大转矩达 $200\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 。大功率超声马达受压电材料和摩擦材料的限制，是今后技术发展的关键问题之一。90年代初我国也步入超声马达研究的行列，并已取得可喜成果。

超声悬浮 声悬浮是物体的重力在驻波声场中受辐射力的平衡而稳定悬浮在声场中或在空中移动的技术。在重力或微重力空间用来进行材料的无容器处理和加工，避免容器带来的污染而制备高纯度的材料，受到各国的重视，在航天装置已进行过多次的太空实验。目前声悬浮装置已由单轴发展到3轴定位和输送。能够在高温($1200^\circ\text{C}\sim 1600^\circ\text{C}$)稳定悬浮材料样品。用声学方法能够激发样品振动和旋转。除已研制出各种气体悬浮装置外，还发展了液体超声悬浮装置，进行流体材料的流体力学和物性的测量等，我国在声与超声悬浮技术及装置的研究方面也取得重要成果。

2. 传统技术应用的进展

超声焊接 用微机控制焊接质量的超声塑料焊接机已有商品。金属焊接发展了多换能器、多振动系统的焊接装置。固态超声电源的输出功率达到 100kW 。

塑料焊接 焊接质量和耗散在焊区的能量、焊头与焊件之间的压力以及振动系统的下降速度有关。以前的焊机都是开环工作，即各焊接参量都是单独选定的，不能进行反馈控制。新一代的焊机用微机控制，使焊接质量大为提高，能精确重复，减少废品。能给出某一焊接过程的功率、压力及下降速度与时间的关系曲线。进行功率时间限制，以达到最佳焊接质量。对每一具体的焊接过程调整最佳参数并贮存，可供随时调用。美国Branson公司生产的900系列焊机能储存和调出20个不同的设定，并可进行质量统计。与机器人配合在自动生产线上使用。参数不合适时会发出警报。影响塑焊质量的另一个因素是焊头(horn)端面振动分布是否均匀。尤其是高频率(如 40kHz)大截面焊头的振动分布更为重要。Branson-Krautkramer公司发展一种测绘焊头端面振动振幅的三维图像装置，可帮助正确设计焊头。除纵振动模式外最近还发展了用扭转振动模式作塑料焊接的设备。适用于环状焊接。焊聚氯乙烯时不产生碳化物、变形小。大横截面的焊头也容易设计。

金属焊接 近年来日本发展一些多换能器、多振动系统组合的大功率超声金属焊接和成形装置。用两套纵振动系统作点焊，能够焊 10mm 厚的铝板，也能焊环状盖。用多个换能器组成R-L振动变换的装置作端面对接焊。铝和铜焊件的厚度为 $6\sim 10\text{mm}$ ，所用声强为 $7\sim 9\text{kW}/\text{cm}^2$ 。用两同频或不同频率的纵振系统共同推动一焊接杆的复合振动系统焊接铝或铜线。焊接端头的运动轨迹，由控制两纵振系统的振幅及相位差来实现，可以是直线、椭圆或圆的运动轨迹。焊接所需要的时间及振幅小，而且焊接强度与导线的排向无关。用双振动系统焊薄塑料时，每一系统的振动速度比一般焊接系统(单系统)小一半，焊件表面损伤小，在作远距离塑料焊接时，通过调节两同频率振动系统(上、下)的振动相位差，可以改变焊件中应力最大点的位置，即可以改变焊接条件。

我国已有几家公司生产超声塑料焊接机，并逐步推广应用。变幅杆或变幅器(声头)的设计理论和测量方法具有特色。

超声清洗 一般超声清洗设备的改进主要有两方面，一方面是输入换能器电功率的自动调整，当清洗液的高度、温度或者清洗件形状改变时，会影响输入换能器的电功率，为此发展一些保持输出功率一定的电发生器；另一方面是改善清洗槽中因驻波形成的空化强度不均匀分布而影响清洗质量。目前改进的方法是采取调频或多频工作方式。例如，工作频率为25kHz的清洗机，调频范围为 $\pm 500\text{Hz}$ 或更宽，为保持换能器高效率的工作，最好是用宽频带换能器。我国已研制出调频超声清洗机及具有特色的宽频带换能器。并研制出双频交替工作的清洗器以及多频清洗机。

除一般清洗设备以外，还发展了各种各样的专用和特殊清洗器，例如镜片、轴承和集成电路专用清洗设备，深盲孔、管道和水上船壳表面的聚焦特殊清洗设备。利用聚焦空气声（声强达170db）来清除物体表面的水滴，非接触式清除指纹等。超声清洗设备向自动化，半自动化发展。

空气介质中的强超声及其应用 近年来是利用弯曲振动板在空气中产生强超声，弯曲振动模式在气体介质中辐射效率高。西班牙曾用纵振换能器推动阶梯圆板作弯曲振动，在空气中可获得153db的声强。板的直径为48cm，工作频率20kHz，功率为350W。直径、频率和功率分别为96cm、192cm、10kHz，5kHz和1300W、5100W的声源正在设计中。主要用于消除泡沫，在医药及食品工业中有些地方不能用化学消泡剂来消除泡沫，用强超声消泡效果好，而且不会污染食品，另一重要应用是除尘。

在空气介质中产生强超声的其他方法还有用两纵振换能器作反相振动共同推动一条状板而产生弯曲振动，在1米远可得135db的声压，或者用一径向振动的圆环，在环的缺口处镶一板作弯曲振动，也可得到130db的声压。如果采取适当的反射器，则可以得到更高的声强。照射于液体表面时可以使液体雾化。

生物医学应用 治疗方面主要发展肾、胆结石破碎，组织深部聚焦加热治疗。最近据英国报导，谢菲尔德总医院与美国旧金山心脏研究所和洛杉矶西奈医学中心共同研究超声清除动脉中的血栓。首先在腿动脉进行成功的手术，手术时仅需局部麻醉，其目标是心动脉和一般动脉血栓的清除。认为超声方法是治疗心脏病较好的方法。结石破碎仪已由电火花放电向压电聚焦在结石区碎石发展。最近日本在发展另一种设备，即利用细长而可弯曲的弹性波导将超声能量送到结石区进行破碎。临床用需通过内诊器进行。目前人们关心的另一个问题是冲击波对生物组织的损伤破坏作用。进行过一系列基础实验研究，例如研究生物液中含气量及不同温度时冲击波引起的自由基及其生物效应等。同时利用低强度超声来激发自由基的活性增加化学治疗效果。用换能器阵在组织深部聚焦加热治疗癌症是目前的热点课题。除治癌外还进行加热治疗前列腺炎。利用超声提取生物毒素时速度快，提取率高，例如提取河豚毒素作为镇痛剂，效果超过吗啡，用强超声制备含有微气泡的心肌造影剂，可能对心脏进行更安全而细致的检查，利用驻波声场分离悬浮于液体的生物粒子等等。我国在治疗设备方面已有不少产品，但基础研究还很少。

近10年来功率超声新技术和应用发展很快，目前主要的问题之一是如何从成功而有前途的实验室研究结果进入大规模工业生产。在这一过程中必须更深入地了解 and 解决一些关键问题。需要更深入地了解超声能量和物质的相互作用；强超声在各种介质中的传播；换能器振动模式和处理介质之间的声耦合；加深认识和发展新的换能器材料，发展高效率而工作稳定可靠的大功率固态超声发生器等。根据发展趋势，声化学方面将投入更多的研究。在加强机

理研究的同时会吸引工业界加速工业规模的应用研究，设备所需的功率容量相当可观。超声强化处理过程如乳化、匀化、破碎和除尘以及超声焊接等也都具有工业应用潜力。在食品、轻工及环保等方面将得到更广泛的应用。

参考文献

- 1 Ultrasonics International 91 Conference Proceedings, Butterworth Scientific Limited 1991.
- 2 Ultrasonics International 89 Conference Proceedings, Butterworth Scientific Limited 1989.
- 3 1992 Ultrasonics Symposium Proceedings Vol.2 1992, Edited by B.R.McAvog.
- 4 Bjørnø, L., High-power ultrasonics, theory and applications, 13th ICA, 77~89, Yugoslavia, 1989.
- 5 冯若, 李化茂编著. 声化学及其应用. 安徽科技出版社, 1992.
- 6 林仲茂. 声化学发展概况. 应用声学, 1993; 12(1): 1~5

A2 超声塑焊技术的发展

孙强毅 辛 乐

(中美合资上海必能信超声有限公司 上海·200233)

超声塑焊技术在1961年作为粘合薄片材料的方法引入至今，已有很大的发展。本文将就超声塑焊技术的应用、设备及其基础研究等方面的发展作一简述，并提出几个值得探讨的问题。

1 应用方面

1961年以来，世界各国先后在超声塑焊技术发展方面已做了大量工作，其中包括：塑焊设备的开发、焊接方法、材料、强度及某些应用的研究等。随着塑料工业迅猛发展，塑焊技术水平的日益提高和超声塑焊机的不断改进，超声焊接塑料之应用范围愈来愈广泛。

应用、推广超声塑焊技术卓见成效的单位有美国Branson公司、美国声能器材公司、日本海上电机株式会社、松下电器、德国KLN公司等等，其中尤为突出的数美国的Branson公司。他们1965年起运用开发制造成的塑焊机及已积累的应用经验在电子、汽车、电器、玩具、家庭用品、包装、纺织及一般塑胶行业实现了多种热塑材料超声焊接。

2 设备方面

发展至今，超声塑焊机已甚完善，其主要组成有：超声源、振动系统、加压装置、时间控制及相应检测装置等。而这些装置都应有自身之特点：超声源和振动系统应在20kHz、22kHz、40kHz工作频率上，有足够的功率耐量及范围；有频率跟踪和振幅控制环节；有精确的时间控制装置和液压或气压控制的加压装置；有功率指示和振幅测量装置。

纵观世界诸国应市超声塑焊机，首推美国Branson公司的各机型，其在1993年销售量占世界上销售总量1/3强，其次日本和德国的超声塑焊机亦有相当的市场占有率。