



# 我国功率超声的现状及其发展

张福成 程存弟

(陕西师大应用声学研究所)

这里所说的功率超声,主要是指利用较大的超声能量进行清洗、加工、处理,以及超声治疗和外科手术等,所使用的频率一般在  $10\text{kHz}$ — $60\text{kHz}$  (有的达  $\text{MHz}$  以上),声强度从零点几瓦/ $\text{cm}^2$  到几百瓦/ $\text{cm}^2$  (一些特殊应用还要高)。

我国从事功率超声的研究,已有近三十年的历史。五十年代后期,除研制出供科研用的较大型的超声设备之外,一般的功率超声设备已供应市场。目前,功率超声已渗透到国防和国民经济的许多重要领域。诸如:机械、电子、半导体、冶金、化工、能源、医药、农业、原子能以及纺织、印染和工艺美术等行业。一支功率超声的科研队伍已逐步成长起来,为国家解决了一批生产技术中的难题。特别是近几年为国家做出了显著的成绩,已有几十项成果受到省市级部门的奖励,有的还受到中央部门和国家级的奖励。设备的生产能力已达到一定的规模,每年可为市场提供约四千台设备,年产值约三千多万元。不仅通用设备已逐渐系列化,而且一些专用设备和半自动化与自动化的设备也已陆续投入市场。

国际学术交流,也陆续开展起来。近几年来已提供近十篇文章参加了国际性的学术交流,有的受到国外同行的重视和好评。我国功率超声的研究已跻身于国际行列。

下面想从功率超声的基础研究,设备的研制和生产,功率超声的应用和对国民经济建设的作用三方面,阐明我国功率超声的现状及其发展。

## 一、基础理论研究

换能振动系统设计理论的研究,是功率超声中最重要的基础研究,我国的功率超声工作者在这方面作出了不少有创造性和实用价值的工作。

夹心换能器虽然早已发现,但其设计理论似乎还没有很系统地建立,而由于这种换能器效率高,不需要置偏场,因而在功率超声领域中获得越来越广泛的应用。我国大约从七十年代开始了这种换能器的基础研究,提出了夹心换能器的一维设计理论<sup>[1]</sup>。研制了宽带夹心式换能器。研究表明,当辐射块设计为  $\lambda/4$ , 具有较大钻孔面积和钻孔深度时,不但使换能器对负

载变动较不敏感,而且具有较大的带宽<sup>[2-3]</sup>。

大功率状态下压电换能器的效率,是衡量换能器性能的重要参数,因而是人们十分关心的重要问题,曾利用 Hickman 的方法研究过效率与负载和输出功率的关系以及效率的频率特性<sup>[4]</sup>。结果表明,在大功率状态下,压电换能器的声负载处于最佳匹配时,其电声效率可达 90%,甚至更高。而当匹配较差时,其电声效率则显著下降。因此,如何使换能器把声能尽可能多的传给负载是功率超声当前需要研究的重要问题。

在“有力、电负载和损耗时夹心式压电换能器的共振频率及效率”<sup>[5]</sup>的研究中,则不仅考虑了电源的内阻抗及实际应用中常见的单边负载的情况,而且也考虑了金属材料的损耗及压电

材料的介电和机械损耗的情况下,得出了压电元件两端的金属棒为不同材料,不同长度时共振频率和效率的表达式,并进行了部分实验验证。实验表明,当换能器的横向尺寸小于  $\lambda/4$  时,所得理论计算与测量结果符合较好。随着横向尺寸与波长比值之增大,其偏离也逐渐增大。当横向尺寸大于  $\lambda/4$  时,应考虑二维振动的影响。因此,研究计及横向耦合的变幅杆和换能器的设计方法是十分必要的,最近几年已经开始了这方面的研究工作<sup>[6-8]</sup>。

为了解决调节换能器工作频率的困难,研究了可调频率的压电换能器的工作原理<sup>[9]</sup>。这种换能器是基于改变其电负载,进而通过压电耦合来实现其频率调节。预期这种理论将在多种换能器中获得应用。

众所周知,在功率超声中,实际工作状态下的变幅杆也都是有负载的,其中最一般的情况是,变幅杆的负载既含有阻分量,又含有抗分量,而且在工作过程中,它还在一定范围内变动。因此,如何根据负载及其变化性质合理地设计变幅杆,是当前功率超声中一个具有重要意义的理论研究课题。研究者们把复变函数解析映象理论用于变幅杆的研究,成功地解决了有复数、变动负载阻抗的情况下三种常用变幅杆(圆锥形、指数型和悬链线型)的一些特性分析<sup>[10]</sup>,为进一步研究在实际工作状态下功率超声振动系统的特性,提供了一种新的方法。

有的研究者则考虑到变幅器是有负载的,而不是自由谐振的,因而将现有的变幅器加以推广,提出了广义变幅器理论<sup>[11]</sup>。根据这种理论,振幅放大不仅可以在变截面杆的截面小的一端获得,而且在等截面杆中,甚至在变截面杆大的一端发生,使人们研究换能振动系统的思路开阔了。

对盘形聚能器的设计理论也进行了研究,得出了阶梯形、锥形和指数型圆盘聚能器纯径向振动和纯扭转振动的解析解,给出频率方程、位移分布、节点位置等的计算公式,理论计算与实测结果符合较好。

功率合成是获得大功率高强度超声的一种

方法,已研究出一种纵向振动功率合成系统<sup>[12]</sup>,它由若干个(目前为3—4个)换能器共同驱动一个变幅杆。这种功率合成换能器,已用于超声冷拔钢管实验中。利用振动方向变换的功率合成换能器,如R-L变换器,国内已开始探讨。

在解决脆性材料深小孔的加工中,研究了局部共振超声振动系统<sup>[13]</sup>。这种系统能以局部共振的特殊方式工作,工具长度任意,加工中工具长度变化允许达80%,只须适当调节电发生器的频率,就能良好地工作。这项研究工作的意义,在于摆脱了超声加工用长工具杆按半波长叠加的概念,打破了超声振动系统仅按“全谐振”的设计方法,使用比较方便。

自七十年代起,国外就陆续把有限元法应用于求解压电换能器及指数变幅杆等的振动问题,近几年来我国虽已开始了对这类问题的应用研究<sup>[14-15]</sup>,但工作也刚刚开始,还有待进一步深入。

为了解决变幅杆设计中繁琐的运算,提高工作效率,进行了用计算机编制超声变幅杆设计用表的研究。已用计算机编制了指数型、圆锥型等等变幅杆的设计用表。利用所编制的这些用表来设计上述类型的变幅杆是很方便的<sup>[16-17]</sup>。

另外,还对向空气中辐射声能的高效率超声辐射器<sup>[18]</sup>和高频超声处理用的声透镜<sup>[19]</sup>等也进行了研究。对功率换能器在实用状态下电声效率的测量也进行了初步探讨<sup>[20]</sup>。

总之,对换能振动系统而言,尚需进行以下几个方面的基础工作: 1. 研制适用于功率超声的优质换能材料; 2. 展宽频带,实现最佳匹配,提高功率容量和换能效率; 3. 继续研究功率合成的换能振动系统和频率可调的功率换能器; 4. 研究换能器及聚能器的测试方法,制定测试标准。

关于应用方面的基础研究还很薄弱,特别在超声处理和治疗方面,理论远远落后于实际,很多现象尚未解释,作用机制有待探讨,很有加强研究的必要。

各种哨的基础及其在乳化、节能等方面的

应用研究本文不拟述及。

## 二、设备的研制和生产

在国内有 30 多个单位从事或部分从事功率超声设备的生产,它们分布在 20 个省市,所产设备的频率在 10kHz—1MHz 之间,功率容量有 0.5, 3.5, 20, 35, 50, 60, 100, 200, 250, 500, 600, 1k, 2k, 5k, 10k (W) 等。通用设备也逐渐系列化,部分小功率设备已开始晶体管化。在降低设备噪声方面,已引起了各厂家的重视,已有部分低噪声设备应市。有的设备已采用频率自动调谐。一些专用设备的研制和应

用已显示其威力,如超声清洗钢丝专用设备的研制,使清洗的钢丝表面质量显著提高,增强了在国际市场的竞争力。深小孔加工设备的研制,使玻璃深小孔加工提高到一个新的水平,受到国家的奖励。超声旋转加工机和超声微波集成电路基片加工机也即将鉴定投产。已用功率合成法试制出 300W 超声发生器样机,工程塑料的超声焊接设备也正在研制。超声腹膜透析仪已投入临床使用,超声穴位治疗机已鉴定投产,超声局部加热治疗机已在动物实验中取得好的效果,可望在某些癌症治疗方面有所突破。

现将国内具有一定批量生产或即将批量投产的功率超声设备,择其要者列于表 1。

表 1 国内批量或即将批量投产的功率超声设备

| 设备名称                                      | 系列型号           | 品种数 | 频率范围 (kHz)     | 功率容量 (W)          | 备 注      |
|-------------------------------------------|----------------|-----|----------------|-------------------|----------|
| 超声清洗机                                     | CSF 系列         | 8   | 18—22          | 250、500、1k、2k     |          |
|                                           | CSF-G          |     | 800—1000       | 500               | 未成系列     |
|                                           | H66 系列         | 6   | 16.5—40        | 50、250、1k、2k、5k   | 有低噪声一种   |
|                                           | CX 系列          | 7   | 20—35          | 50、100、250、500、1k | 晶闸管      |
|                                           | CFS 系列         | 6   | —20            | 250、500、1k、2k     |          |
|                                           | CQ 系列          | 2   | —33            | 50、250            | 低噪声、晶体管化 |
| 其他尚有 JCY-1, BCQ-1 半自动, CQJ 核素清洗机,珠江 250-B |                |     |                |                   |          |
| 超声加工机                                     | CSF-7          | 1   | —20            | 100               | 未成系列     |
|                                           | J93-025        | 1   | —20            | 250               |          |
|                                           | J3060          | 2   | —20            | 1000              | 频率跟踪     |
| 超声搪锡机                                     | H43            | 2   | —20            | 250               | 未成系列     |
|                                           | CTX-1          | 1   | 17—19          | 250               |          |
| 超声处理机                                     | JC-3, CPS, CSS | 4   | —23            | —200              |          |
| 超声治疗机                                     | C2, CSY 等      | 20  | —800,有脉冲连续两种波形 | 声强分档可调            |          |
| 医用超声雾化器                                   | CW             | 4   | 1500           |                   |          |
| 医用洁牙机                                     | DJY            | 2   | 43             | 3.5               |          |

超声点焊机 (40KHz, 0.5W)、研磨机、电影接片机、超声腹膜透析仪也有一定产量

根据当前清洗设备的情况看,以下问题尚待考虑: 1. 进一步解决换能器工作的稳定性。由于多螺钉换能器预应力不均匀,且常出现不需要的振动模式,稳定性较差。似乎张力壳和

单螺钉宽带状式的较稳定,应进一步研究比较,择优选用; 2. 降低清洗设备噪声; 3. 研究换能器在清洗槽壁上的合理布局及其它措施,使声场尽可能均匀,研究特殊清洗设备; 4. 解决换能

器与清洗槽的连接问题,如研究粘合强度大、声能损失小、使用寿命长的粘结剂等。5. 提高清洗槽的寿命。

从整个功率超声设备的现状看,需要考虑的共同问题是:1. 同一标称规格,不但不同厂家和型号的设备,其声学性能相差很大,甚至同一型号的设备也有明显的差异,这就给实际应用带来了困难;2. 目前给出的设备性能指标,主要是频率及纯阻负载时的输出电功率,而却无声学性能指标,这是需要解决的问题;3. 有的匹配不好,效率不高,因此,应建立超声设备声学性能的测试方法和规范,使设备的检验有所依据,尽可能实现最佳匹配。

从设备发展方向来说:1. 应及早确定设备的系列,并按系列生产,可能对设备的标准化有利;2. 发展功率合成的宽带设备;3. 继续研制晶闸管、晶体管设备,探讨无电源变压器、无输出变压器线路的方案及D类放大在超声设备中的应用;4. 继续研究和普及设备的频率自动调谐。

### 三、应用及对经济建设的意义

功率超声已广泛地应用于工业、农业、国防、医药卫生和环境保护等部门。近几年来,除了将基础好,工艺较成熟,经济效益显著的应用继续推广扩大之外,功率超声还在放射性污染和高聚物及低聚物的清洗、涤纶长丝含油率的快速测定、燃油掺水乳化节能、金属成型、深小孔加工、超声振动切削、抛光、研磨、新型共聚物的合成、环境样品中某些强致癌物质的提取、超声处理农作物种子、医学治疗等方面,取得了可喜的成绩。现列举数例,以说明功率超声应用发展的概貌及对经济建设的意义。

#### 1. 超声清洗

与常用的其他清洗方法相比,超声清洗效率高,质量好,可清洗复杂零件、深孔、盲孔及狭缝中的污物,且易于实现自动化。因此,它已成为许多工业部门中不可缺少的一种工艺,是功率超声最主要的应用之一。

近几年来,超声清洗有了新的发展:(1)应用的领域扩大了。由原来的电子、机械等行业,现正向轻工、纺织、食品、化工、航空、原子能、核医学等部门渗透;(2)清洗的物品类别增多了。由原来的清洗半导体器件、机械零件、光学玻璃等,逐渐扩大到清洗手表、自行车、缝纫机、电镀表、医疗器机、精密轴承、纤维、织物等多种类别的物品;(3)被清洗的污染物对象增加了。已由原来清洗尘埃、油污等普通污物发展到清洗研磨膏、积炭、氧化物、放射性污染、高聚合物和低聚合物等特种污物;(4)洗涤剂的研制向前发展了。现已研制出多种合成洗涤剂。采用这类洗涤剂,清洗液成本低、效果好、使用安全,根据污垢性质和清洗要求,还可辅以各种添加剂,如助溶剂、稳定剂、消泡剂、缓蚀剂等,以便更好地满足各种清洗的目的、要求;(5)清洗工艺开始有人研究了。

#### 2. 超声加工

(1) 超声钻孔: 超声加工硬脆性材料,特别是玻璃方面的应用有了新的突破。用所研制的局部共振的工具系统,可在玻璃上加工出直径6mm,深达280mm的小孔,用一根工具杆就可以完成多个深孔的加工而无须更换,其累计总加工深度可达2000—3000mm以上。在玻璃上的钻孔速度( $\phi 6\text{mm}$ ),一般为 $6\text{mm}/\text{min}^{[1]}$ 。

(2) 超声振动切削: 超声振动切削就是在机械切削工具上加上超声振动。它是一种新的精密切削方法。它较好地解决了普通切削中存在的切削阻力大,切削温度高,工件变形大,切削中的自激振动等要害问题,为精密切削和超精密切削提供了一种新的途径,见表2。

(3) 超声振动抛光: 它是把一定的超声振动功率(0.1—1kW)附加在抛光工具上,使其以一定频率(20—50KHz)和振幅(10—30 $\mu\text{m}$ )沿工件表面作高频振动,在抛光剂的帮助下,使工件得到抛光。

在金钢钻石拉丝模的生产中,采用超声来进行研磨抛光,不仅速度快,光洁度高,而且还可获得较长的模孔定径区,提高了模子的使用寿命,由表3可以看出,用超声研磨来提高拉丝

表2 普通车削与振动车削比较

| 车削方法      | 普通车削 |       |               | 振动车削 |       |     |
|-----------|------|-------|---------------|------|-------|-----|
| 车削材料      | 铝    | 45# 钢 | 淬火钢<br>HRC=64 | 铝    | 45# 钢 | 淬火钢 |
| 表面<br>光洁度 | ▽7   | ▽6    | 不能车           | ▽10  | ▽9    | ▽8  |

表3 研磨工效比较

| 模孔规格 (mm)  | 机械研磨<br>(分/只) | 超声研磨<br>(分/只) | 提高工效<br>(倍) |
|------------|---------------|---------------|-------------|
| φ0.08—0.20 | 480           | 20—40         | 24—12       |
| φ0.21—0.40 | 720           | 30—50         | 24—14       |
| φ0.41—1.20 | 960           | 60—90         | 16—10.7     |

模的生产率,其效果是很显著的。这种技术已得到应用。

从国外的报道看,超声振动加工,不仅在飞机及飞行器制造业中具有广阔的应用前景,而且在一般机械制造业中的车、镗、铣、刨、冲(孔)、钻等工艺中都有其光明的前途。美国的振动切削设备有的已供工业应用,且受到使用者的很高评价。日本不但把超声振动切削应用于普通设备上,而且在大型设备上取得了很好的应用效果,就连数控机床也引入了超声振动系统。

(4) 超声金属成型: 将超声用于冷拔金属管和各種丝材方面,已取得显著效果。已研制出 2kW, 250W 超声冷拔装置,超声冷拔的特点是,可降低拉拔力,能进行多道连拉,减少中间处理,可提高延伸系数、截面压缩率和模具寿命,并能改善润滑。在拉制低塑性材料的管、丝材时就更加显示出超声冷拔的优越性。超声在冷连轧金属管材中的应用,也已见到效果。预计超声在减小摩擦,使连轧管的芯棒顺利脱出方面会做出自己的贡献。

### 3. 超声处理

(1) 在医药工业中的应用: 可以制备粒子在  $1\mu$  左右、稳定性良好的乳剂,如鱼肝油乳剂;制备颗粒在  $1\mu$  左右,供口服或静脉注射的混悬

应用声学

剂;制备  $0.1\mu$  左右,供静脉注射的最新型制剂;制备诊断肺癌的肺扫描诊断剂的载体;用超声将细菌或病毒杀死,再用适当方法制成疫苗;中草药提取——超声有破坏植物组织、加速溶剂穿透组织的作用。因此,用超声可提高中草药有效成份的提取效率,如金鸡纳树皮中的生物碱,用一般方法全部浸出需 5 小时以上,采用超声则只需半小时就能完成。超声在抗菌素提取、杀菌、消毒、动物组织的粉碎等方面也已有所应用,但工作才刚刚开始,还有待于进一步深入。

(2) 在农药方面的应用: 农药混合成液剂,在常温下会有固体析出,所以在农药厂中常因堵死喷头而停产,经超声处理 15min 后,晶粒被粉碎,并呈均匀分布,虽经 9 个星期搁置,仍无晶体析出;25—30% 的西维因农药水悬剂,经 180 目筛过滤,但粒度仍大,影响药效,经 30 min 超声分散后,粒度细化,并成水乳剂,药效显著提高。

(3) 在环境保护方面的应用: 环境样品中的强致癌物质 3、4 苯并芘,若用索氏提取法,需连续提取 8—24 小时,而用超声提取法,则仅需 6min。

(4) 染料工业中的应用: 粘胶丝染料原来的粒度有 30% 在  $20\mu$  以上,经超声分散 15min 后,其粒度几乎全部细化为  $1\mu$  以下,使染色效果大为改善。

(5) 用于新型共聚物的合成<sup>[21]</sup>: 在大功率超声的作用下,先后成功地合成了部分水解聚丙烯酰胺-丙烯腈;聚丙烯酯-聚氧化乙烯;部分水解聚丙烯酰胺-聚醋酸乙烯酯;羟乙基纤维素-聚氧化乙烯等多种共聚物,它们具有多种功能,可望用于油、汽田开发。这些共聚物,有的是难以用通常的化学方法制取的。这些共聚的合成,为功率超声在高分子材料合成方面的应用,展示了美好的前景。

### 4. 超声治疗

超声已在内科、外科、皮肤科和五官科等 20 余种疾病的治疗中取得了较好的效果<sup>[22]</sup>,治疗方法的研究也有新的进展,研究了超声穴位

疗法,据报道这种疗法用于治疗高血压、腹泻、菌痢疾病取得了较好的疗效;超声药物透入疗法,利用超声的作用,将药物通过粘膜或皮肤透入人体,这样可得到超声和药物双重治疗的作用;超声雾化吸入疗法,药物可直接作用于病灶,药物浓度高,疗效增强;超声局部加热疗法,这在我国,是近几年才开展起来的,这种方法可以聚焦,穿透组织较深,防护简单,使用方便、安全。经大量的动物实验表明情况较好,现已转入临床应用。国外在这方面的研究,近几年又形成高潮,且已取得了较好的进展。我们深信,在我国超声加热疗法的研究一定会给肿瘤患者带来福音。但也必须看到,加热区域中温度的控制及测量,超声对人体各部位的作用剂量,对人体组织的生物物理和生物效应等,还应做深入的研究。

本文撰写过程中,杨瑞民同志曾多方给予帮助,功率超声的同行们提供了宝贵的资料,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 汪承浩等,《夹心换能器设计理论基础》,第二届全国功率超声学术会议,1973年。
- [2] 侯立琪等,声学学报,4(1979),271。
- [3] 中国科学院物理所超声处理组,物理学报,25(1976),87。
- [4] 林仲茂等,第三届全国功率超声学术会论文摘要,1981年,4。
- [5] 林仲茂等,应用声学,1(1983),22。
- [6] 强盘富,声学学报,3(1982),186。
- [7] 强盘富,声学学报,1(1984),47。
- [8] 郭纪捷等,声学学报,5(1983),290。
- [9] 汪承浩等,声学学报,6(1982),364。
- [10] 侯立琪等,声学学报,4(1982),209。
- [11] 汪承浩,声学学报,1(1980),12。
- [12] 苏敦珍等,第一届应用声学学术会议论文摘要,1980,65。
- [13] 范国良等,应用声学,1(1982),2。
- [14] 鲍小琪等,声学学报,3(1982),157。
- [15] 强盘富,声学学报,1(1984),47。
- [16] 阮世勋,应用声学,4(1982),23。
- [17] 阮世勋,应用声学,4(1983),29。
- [18] 吴永芬等,应用声学,2(1982),37。
- [19] 张福成等,应用声学,4(1984),21。
- [20] 董彦武等,应用声学,1(1982),24。
- [21] 沈楚,应用声学,3(1983),46。
- [22] 周万松,应用声学,2(1983),29。

## 中国声学学会第一届第一次常务理事会在京召开

中国科协批准了由原中国物理学会所属二级学会中国声学学会和中国电子学会应用声学学会联合组成的一级学会中国声学学会已成立了新的理事会和常务理事会。1985年5月15—17日在北京召开了中国声学学会第一届第一次常务理事会,应到的常务理事19人,除2人现在国外不能参加会议外,其余的常务理事全部出席了会议。

本次会议先由原中国声学学会理事长马大猷同志主持,会议先由筹备组报告学会筹备经过,然后讨论通过了中国声学学会会章(草案),拟提交理事会全体会议讨论通过。会议还讨论了学会组织机构的设置;选举了理事长、副理事长及秘书长;聘任了副秘书长及各工作委员会的正、副主任委员;确定了各分科学会或专业委员会的召集人,以筹备成立各分科

学会或专业委员会。最后讨论通过了将于今年10月中旬在南京召开的中国声学学会成立大会及85年全国声学学术会议的日程安排。

本届常务理事会的成员为:马大猷、车世光、冯绍松、关定华、陈通、吴文虬、吴凌愚、杜连耀、应崇福、张家骥、张淑仪、李耀堂、周永昌、郑光祖、赵恒元、谢兴甫、管善群、魏荣爵、魏墨鑫。

会议选举应崇福同志为本届理事长,关定华、魏墨鑫、魏荣爵同志为副理事长,关定华同志兼任秘书长。会议还聘任了徐唯义、张家骥同志为副秘书长,徐唯义同志兼任学会办公室主任。

(学会办公室报导)