

# 功率超声振动系统及其应用的发展

林 仲 茂

(中国科学院声学研究所)

功率超声如同超声学的其他分支学科一样,由于它在技术上具有某些独特的优点,所以近年来发展迅速,应用范围也越来越广泛。

功率超声处理技术主要包括: 超声清洗, 超声塑料及金属焊接, 超声搪锡, 超声加工; 超声乳化、粉碎、分散、雾化、提取、凝聚; 超声加速干燥、过滤, 超声金属成形, 超声处理种子, 超声治疗和外科技术等。本文着重介绍功率超声换能器振动系统及其在某些领域中应用的发展情况。

## 一、换能器、变幅杆振动系统

### 1. 功率超声换能器

超声处理用的电声换能器,按其材料分类,主要有两类: 一类是压电换能器,其特点是电声转换效率高,采用夹心式结构可以在低频工作,并且提高了机械强度,制造不同工作频率的换能器也比较容易实现,所以目前得到广泛的应用。另一类是磁致伸缩换能器,它由金属材料制成,特点是性能比较稳定、耐用,可以获得较强的超声,特别在扭转振动方面可以得到较大的功率输出。但是电声转换效率一般较低,尤其是纯镍材料,效率只有30~50%。

近年发展了一些新材料,值得重视。例如,1968年报道了一种含铬2%的镍合金磁致伸缩材料。由这种材料做成的换能器,其潜在效率可达80~85%,已接近于锆钛酸铅压电材料。又如最近研究一种稀土和铁的金属互化物的新磁致伸缩材料,其组成是 $R_xTb_{1-x}Fe_2$ ,它的磁致伸缩应变比普通材料大30~40倍。纵向磁致伸缩应变可达 $10^{-3}$ 。此外,日本在清洗设备方面还广泛采用铁氧体磁致伸缩换能器。下面着重介绍压电换能器,特别是夹心式压电换能器。

#### (1) 单个夹心式换能器的结构和功率容量

由于压电陶瓷的抗张强度很差,材料不能做得很厚,所以在低超声频范围,大多采用夹心结构,即在压电材料两端用金属块夹紧加予压力。起初,作超声清洗用的夹心换能器是在压电片周围采用多螺钉的夹紧方式。这种结构的缺点是预应力不均匀,常出现不需要的振动模式。最近国外大多已采用压电片中心打孔

的单螺钉夹紧结构。高声强换能器还采用一种张力壳的结构,这种结构所加的预应力比较均匀,便于采用风冷或油冷却,大功率工作状态性能较好,可以达到较高的频率。

考虑到压电片所承受的应力水平、输入阻抗的高低以及实际应用中的固定支撑等问题,压电片位置有对称与不对称的节点安排等多种结构形式,图1给出一些例子。

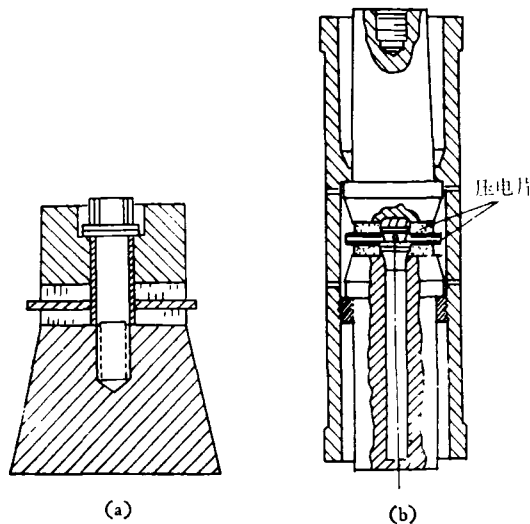


图1 夹心式换能器结构示意图  
(a) 单螺钉结构; (b) 张力壳结构

换能器的功率容量受材料的机械强度、绝缘强度、非线性等限制。国外大功率换能器材料的功率容量达3瓦/厘米<sup>3</sup>·千赫。据报道,张力壳换能器单个可做到四千瓦,在低频十千赫用单螺钉结构做到一万瓦。从功率容量和经济观点考虑,夹心式换能器的工作频率一般选在10~40千赫之间。

#### (2) 功率合成

随着功率超声处理技术的发展和應用不断地扩大,越来越需要大功率、高声强的超声能源。如最近发展起来的金属成形技术,所需要的声功率往往要达到机械功率(如冷拔管拉力所需要的功率)的5~10%才能有效的处理。例如拉管机的机械功率为200马力时,则需要约15千瓦的声功率。对低声强应用,如超声清

洗,可以用比较多的换能器耦合到清洗槽,以达到大功率处理的目的;而对高声强应用,就不能用上述的方法来获得大功率超声,因为单个换能器的功率容量受限制。为获得大功率高声强的超声,发展了功率合成振动系统。实现这种合成目前主要有两种方法:一是纵向合成;二是通过振动方向变换的合成。

(a) 纵向振动功率合成:由几个换能器耦合到一个公共的机械波导(变幅杆)见图2。如图2(a)是一组12.6千瓦的装置,曾用两组这样的装置作25千瓦的超声焊接设备。图2(b)是用六个4.2千瓦的张力壳换能器推动外模作超声拉管用。这种合成方式也可以用磁致伸缩换能器。

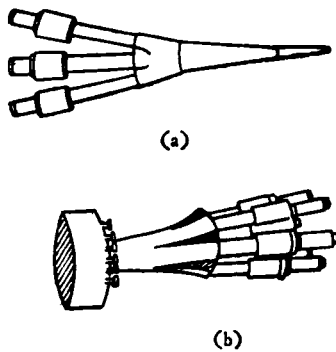


图2 功率合成振动系统

(b) 振动方向变换的功率合成:日本六十年代就开始这方面的研究,利用互相垂直的两个振动方向作变换,如图3所示。由圆盘的径向振动转换为棒的纵向振动,称为R-L变换,图3(a)。如果在圆盘上安装许多换能器,而且由许多段串接起来,则在棒端可以得到

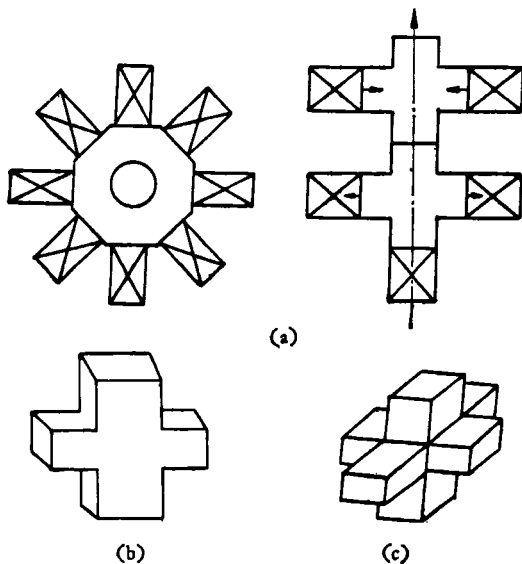


图3 振动方向变换

(a) R-L 变换 (b) L-L 变换 (c) L-L-L 变换

大功率的超声振动。日本在1971年曾用72个500瓦的夹心式换能器推动这种合成装置作拉管试验。总容量为36千瓦。其他变换方式还有L-L, L-L-L的变换,如图3(b, c)所示。

### (3) 大功率扭转振动换能器

利用扭转振动作超声处理,以前大多采用纵向振动变换为扭转振动的结构。利用压电换能器直接产生扭转振动曾有人做过,但不容易得到大功率的超声振动。近来报道用含铬2%的镍基磁致伸缩材料做成2万赫,功率100瓦的扭转振动换能器。

我国在夹心式换能器的设计方面取得了一些进展,并发展了一种多孔结构的宽频带夹心换能器。

## 2. 变幅杆、聚能器振动系统

变幅杆、聚能器是一种声波导,起着传递声能的作用。它具有阻抗、振动速度的变换等特性。在特定情况下,比如满足半波长或四分之一波长的条件下,就得到较大的变换。在超声处理中最常用的是纵向振动的变幅杆,另一类是一种盘状的聚能器,其他还有扭转及弯曲振动杆等。

### (1) 纵向振动变幅杆

这一类变幅杆的形状很多,中心问题是怎样有效地把声能传递到所处理的对象去,并满足处理应用中所遇到的实际问题。在塑料超声焊接中所用的变幅杆的形状是多种多样的。

在某些应用场合,有时需要特别大的振动速度。由于受杆材料疲劳强度的限制,所以在设计上有人考虑如何减小杆中的应力振幅的问题,即出现所谓“高斯”形的变幅杆。这种变幅杆的应力沿轴向的分布是均匀的,形状因数最大,但其放大系数小。为获得大的振动振幅,常用两节变幅杆组成,第一节用放大系数大的变幅杆,而第二节用形状因数大的变幅杆组成。这样可以获得较大的振动振幅而不致于产生疲劳破坏。在另一些场合,超声能需要拐弯传输,所以有人研究圆环的一段作拐弯的传输器。

### (2) 圆盘形聚能器

在发展超声冷拔管技术中,有一种外模加超声振动的工作方式,需要外模内孔有较强的超声,因而发展了圆盘形聚能器,其外径所处的截面积大而内径面积小,厚度按各种曲线形状变薄。在外圆周安装许多纵向振动的换能器,而在内圆周得到较大振幅的超声振动,其形状如图4所示。

我国在变幅杆和聚能器的理论设计方面取得了一些新的结果,例如分析了负载力阻抗对变幅杆特性的影响,并发展了一些新型的变幅杆等。

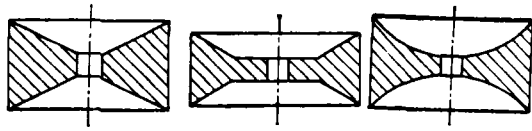


图4 圆盘形聚能器

### 3. 超声频电发生器

国外目前几乎淘汰了电子管发生器的商品,而广泛采用晶体管发生器。最近有人利用微波技术中的混合电路制作大功率超声功率放大器,可以得到大功率的输出。其优点是每个信号互相隔离,当其中有一个晶体管损坏时,不致于像以前用多个晶体管并联工作那样使其他晶体管也跟着损坏。用这种方案已做成8千瓦的功率放大器并已有商品出售。

目前无论是超声清洗设备或高声强处理设备(如焊接、加工),大多采用频率自动跟踪的发生器,超声焊接设备还采用恒振幅输出控制,以保证焊接质量。还有另一种发生器即高频电机,其优点是维护简单,容易得到大功率输出,使用方便;缺点是频率固定。如果配合宽频带换能器作大功率超声清洗或处理,将是发展大功率超声处理的一个途径。

## 二、测量问题

在超声处理应用中常常需要对设备的功率、声强、效率、振动位移和应力的分布、振动模式及阻抗或导纳进行测量和计量。近年来激光技术的迅速发展,为测量提供了有力的工具,大大简化了对位移振幅、振动模式以及振动分布的测量。目前对传送到液体或固体负载中的声功率测量方面还没有一种准确、简单而可靠的测量方法。曾经研究了各种测量声功率的方法,例如量热法、假负载的方法、测速度差的方法、驻波法、测量有载及空载时的输入电功率来确定声功率的方法以及非接触的实时测量方法等等,但都还不能满足科学研究和工业应用的要求。

## 三、新的应用领域

### 1. 金属成形及冶金方面的应用和实验

1955年 Blaha 和 Langenecker 在对锌单晶作拉伸过程中加超声振动实验时,发现张应力减小的“软化”现象,后来称为“Blaha 效应”。随后他们又作了不同声强的实验,发现拉伸过程中加低声强(小于15瓦/厘米<sup>2</sup>)振动时有软化作用;而高声强(高于25瓦/厘米<sup>2</sup>)有硬化作用。这种现象在15千赫~1兆赫很宽的频率范围内与频率无关。之后,进行了一些工业性的拉丝拉管实验,证明在冷拉过程中加超声能够减少拉力,

提高产品质量。但对机理有争论:一种观点认为所以能减小拉力,其原因与位错的能量吸收有关;另一种观点则认为认为是交变应力的叠加效应。此后,在应用及机理的探讨方面又做了许多工作。

#### (1) 超声冷拔钢管

1960年美国已有工业应用的雏形,1966年以后得到较大的发展,1970年以来发展较快。应用于生产已有十多年。美国、苏联、英国、日本和罗马尼亚等国都相继进行了这方面的研究工作。据 Buckley 等报道,他们设计了电功率为50千瓦的设备,输送到内模的声功率可达15千瓦。用9千瓦声功率可以冷拔直径82毫米,管壁厚8.3毫米的钢管。而用13千瓦可以冷拔直径100毫米,壁厚13毫米的管子。日本报道了用R-L变换功率合成装置,功率容量为36千瓦作超硬合金及工具钢等的拉管实验。罗马尼亚1973年以来也进行了超声冷拔碳钢管的试验性生产,其生产速度比不加超声快100~150%。

超声的作用现在比较一致的看法是减少外摩擦(表面效应)及内摩擦(体积效应),其优点是:1.减少拉力,能拔制难拉的材料,如铝合金、铌、钛合金及硼钢等。2.减少破裂,提高表面光洁度,尤其是内表面的光洁度。3.能拔制复杂形状的管子,如核反应堆用的U型管,航空高压管,易于控制尺寸的精度,可拔制直径厚度比达500:1的管子。4.延长工具寿命,节约劳动时间。目前看来,超声冷拔钢管对表面光洁度要求高而截面积较小的异型管子比较有前途。

#### (2) 超声拉丝

美国 Ohio 大学用8.5千赫的声频控制直径5毫米的钢丝。奥地利利用小功率(150~250瓦)超声控制直径1~3毫米的钼丝,张力减少80%。整个拉丝工艺由控制5次减少到2次。

#### (3) 超声深拉

深拉的加工速度比较慢,有利于声能的作用,因而认为较有发展前途。英国 Aston 大学报告用3千瓦,13千赫的磁致伸缩换能器推动外模作径向振动。拉制黄铜材料,冲载可以减少,拉深度增加20%。

#### (4) 超声铆接

1969年 Ohio 大学发表了与波音公司协作飞机超声铆接的实验结果。换能器为一千瓦,十千赫,以100千瓦的电机推动,对铝合金作铆接实验,所需的静压力降低到原来的百分之一,且表面光滑,没有发现裂纹,但疲劳寿命如何,尚未回答。其他还有超声滚轧、弯管及挤压等应用。

在冶金方面,如用喷雾法得到锡铝、锌铋等新合

金,把振动的钛棒浸入低熔点金属溶液中得到钛锌合金等。苏联报道曾用低频50千瓦的声功率处理钢液,改善结晶。1972年报道,在3000℃处理硼钢得到当时耐压最高的钢。

## 2. 塑料焊接

(1)1963年以后硬塑料的远场焊接发展很快。其优点是不需要夹具及烘干,焊接速度快,干净而经济,易于实现自动化。设备在1千瓦以下频率一般用20千赫。焊接大部件时则用较低的频率。现在已有一些能焊任意长度的连续焊机。超声塑料焊接的主要应用有:硬热塑性塑料的远区焊接,薄膜缝焊及束纤维叠焊,金属零件嵌入塑料,超声打桩,即用塑料钉联接塑料制品,塑料切割及印花等等。为提高硬热塑料的焊接速度和质量,超声塑料焊接的发展趋势是提高焊机功率。

(2)最近日本报道用频率为400千赫,功率为2.4千瓦的超声加热60千伏的超高压电缆绝缘套聚乙烯(利用聚乙烯对声能的吸收而发热),效率提高2倍,据称已在生产中应用四年了。

## 3. 超声搪锡

国外一度发展较慢,最近几年由于铝制热交换器等搪锡需要又发展起来。据报道用72个换能器做成的搪锡槽,用压电换能器时遇到带宽问题没有解决,所以国外有人还提倡用磁致伸缩换能器。此外还发展了一种搪马达线圈引线的专用设备。重新又出现超声烙铁,用来焊钛合金。

我国于1966年就搞大面积超声搪锡,并成功地应用于电力开关板的铝母线搪锡,目前在电子工业中得到进一步的发展,已成为功率超声应用的一个重要方面。

## 4. 超声疲劳测试

对这个问题感兴趣的主要原因有两个方面,一是可能缩短测试时间,二是有些部件或设备可能承受高频振动。在这方面,1950年以来进行了许多研究。目前主要存在两个问题:一是频率效应未弄清楚,高频疲劳极限值高于低频疲劳试验所得的数值;二是测试的技术问题,例如如何控制温升、试件表面腐蚀等环境因素的影响等等。所以目前所发表的文章大多围绕上述问题进行探讨和改进。有人认为在低振幅试验,即循环数 $N > 10^6$ 时,在频率为200赫及2万赫所测试的结果很接近。这是由于低应力振幅时塑性应变的影响较小的缘故。可以期望得到某些实际应用。

## 5. 超声在环境保护及节约能源中的应用

例如超声和臭氧联合净化水质,超声把油、水和固

体分离,超声澄清液体等。由于世界能源短缺,各国都在大力开展这方面的研究工作。最近报道了利用超声制备油-水-煤的乳化液,利用75千赫的管形谐振器来雾化燃油以及用压电雾化器来减少汽化器里的沉积率等。

## 6. 超声外科术

(1)据苏联报道,利用高频超声在组织深处聚焦作“无刀外科手术”。在耳科临床及实验神经外科方面已成为一种常规手术。

(2)在普通外科工具上(刀、锯)加超声振动。用“超声刀、锯”切割软组织和骨头,切割力可减少到原来的 $1/5 \sim 1/6$ ,从而减轻创伤,在某些情况下还可以减少出血。胸外科用它来切肋骨、做支气管、胸膜及胸壁手术等。在切骨时不会使疏松骨破碎。在矫形外科及骨肿瘤摘除方面很有用处。

(3)超声接骨或愈合。用一种单体ciacrin与骨粉混合放在骨缝中加超声振动,使其迅速聚合,其优点是金属加强物。

此外,在活塞式声辐射器与反射器之间建立起的声驻波场能使一克固体或液体物质飘浮在空中。可以实现无接触地使材料固化或液化,可用来生长晶体。

我国在功率超声处理方面也开展了一些有效的和新的应用,取得了不少成绩,例如超声清洗各种零部件、清洗油咀偶件及放射性沾污;超声处理中草药种子;超声加工玻璃、玉器和激光晶体超声研磨拉丝模;铝母线、航空电缆及无线电元件的超声搪锡;超声焊接晶体管引线,焊接塑料薄膜及复合材料,尼龙拉锁超声定形,超声冶炼焊料,超声雾化,超声破碎细胞及超声治疗等等。

## 四、几点看法

随着超声处理技术的发展,应用领域不断的扩大,越来越需要发展经济、可靠、使用方便的大功率超声能源,例如新发展起来的超声金属成形必须有大功率的超声才能有效地处理;超声清洗及种子处理等方面的应用也都需要经济、耐用的大功率超声。

产生大功率超声的关键部份是大功率超声换能器。目前我国在单个压电换能器的功率容量方面还存在一定差距,应大力加强研究。研究各种功率合成方式,寻找新的产生大功率、高声强超声的方法。与此有关还应加强换能器材料的研究,探索新的材料。

加强测量方法及声能传输的研究。例如研究在液体、固体及生物组织中声强或声功率的测量方法,复杂形状变幅器的设计及提高超声加工、焊接设备的效率等。

为提高应用效果及发展新的应用,必须同时对超

声处理的有关机理进行研究。总之,必须加强基础研究,大力开展应用研究,提高设备质量,扩大应用范围,使功率超声处理技术为四个现代化作出更大的贡献。

### 参 考 文 献

[1] K. F. Graff, 1974 Ultrasonics Symposium Proceedings, 628—648.  
 [2] A. Shoh, *IEEE Trans.*, **SU-22**(1975), 60.  
 [3] A. Shoh, Ultrasonics International 1977, 75.  
 [4] Nicholas Maropis, *IEEE Trans.*, **SU-16**(1969), 132.  
 [5] 森荣司等, 日本音響学会研究发表会講演論文集, (1975), 141.  
 [6] 森荣司等, 日本音響学会誌, **28-2** (1972), 93.  
 [7] E. A. Neppiras, Ultrasonics International 1975 Conference Proceedings, 166.  
 [8] К. П. Белов, *Акуст. Ж.*, **XXII-5** (1976), 768.  
 [9] П. Е. Васильев, В. Ф. Казанцев, *Акуст. Ж.*, **XXII-6** (1976), 825.

[10] L. Filipezynski, *Archiwum Akustyki*, **10-3**(1975), 257.  
 [11] M. E. Haraa et al., *JASA*, **57-6** (1975), Part II, 1436.  
 [12] J. T. Buekley and M. K. Freeman, *Ultrasonics*, **8-3**(1970), 152.  
 [13] B. Langenecker et al., Ultrasonics International 1973 Conference Proceedings, 34.  
 [14] Results from Recent Studies in Power Ultrasonic at Ohio State University, Ultrasonics International 1975 Conference Proceedings, 23.  
 [15] A. E. Eaves et al., *Ultrasonics*, **13-4**(1975), 162.  
 [16] A. Shoh, *Ultrasonics*, **14-5**(1976), 209.  
 [17] E. Mori et al., Ultrasonics International 1975 Conference Proceedings, 39.  
 [18] K. F. Graff, *Ultrasonics*, **15-2**(1977), 75.  
 [19] C. C. Libby, *IEEE Trans.*, **SU-16-3**(1969), 117.  
 [20] W. Kromp et al., Ultrasonics International 1975 Conference Proceedings, 238.  
 [21] S. Thompson, *Popular Science*, **206-2**(1975), 64.  
 [22] I. P. Goliamina, *Acoustics*, 1974 Edited by R. W. B. Stephens.

## 在地磁场中宇宙磁单极的行为

张世杰 贾桂斌

(云南大学物理系) (中国科学院高能物理研究所)

### 一、引 言

人类对磁现象的认识经历了三个发展阶段。第一阶段是关于天然磁石和地球磁场的发现、认识和应用。我国勤劳、勇敢、智慧的祖先最早发现了天然磁石并加以利用,因而在这一阶段中,我国的成就居于世界首位。更深入研究宏观磁现象与电现象之间的联系属于第二阶段,十九世纪建立的麦克斯韦电磁理论成为这一阶段的主要标志。第三阶段是从十九世纪末开始的。人们在研究物质的电磁结构的同时,认识到量子化是物质的微观特性。就在深入探讨电荷量子化的过程中,Dirac 发现孤立的磁极在理论上是容许存在的<sup>[1]</sup>。

磁单极是否确实存在?目前,这一问题无论在理论上或者在实验探测上都没有解决。因此,这一课题十分诱人,值得我们进一步去探索。要从实验上探寻磁单极,首先就必须推测磁单极的某些性质和可能的产生方式,以便选用和放置探测器。从已有的宏观理论来看,电场和磁场之间具有很好的对称性质。因此,除了上述 Dirac 预言的可能性之外,我们还可以从电场与磁场的对称性质,推知它们的荷源可能也有类似的

对称性质。这样,很自然地想到,磁单极的行为应该满足与经典理论类似的规律。由此可以预计,异性磁单极的耦合系数  $2\pi g^2/hc$  将比异性电荷的耦合系数  $2\pi e^2/hc$  的数量级大  $10^4$  倍!这样强的结合力,只有在超高能现象中才有可能存在。我们已知,产生电子对的能量阈值的数量级是  $10^6$  eV;产生质子对的能量阈值的数量级约为  $10^9$  eV。由此可知,即使磁单极具有质子质量,产生它所需的能量阈值也要达到  $10^{13}$  eV 的数量级。然而,目前的探测结果为负。有一种推测是磁单极的质量可能远比质子质量为大。这就使得目前世界上最大的质子加速器(能量达  $10^{12}$  eV)也没有能力打出磁单极来。所以,寻找磁单极的最引人注目的实验还是在广阔的星际空间这个“宇宙大实验室”中进行的。

以往,人们曾在宇宙线中发现过大量新粒子,为建立粒子物理学起过重要作用,可以预计这种作用还要继续下去。其原因一方面是由于宇宙线粒子能量高(现在已经发现了能量高达  $10^{21}$  eV 的粒子);另一方面是原始宇宙线本身就可能含有磁单极成分<sup>[2]</sup>。特别使人感兴趣的是,最新发现的许多高能天体很可能直接与磁单极有关<sup>[3]</sup>。因此,有可能在宇宙线中首先发现磁单极<sup>[4]</sup>。下面,我们仅从电、磁对称性出发,为探测宇