

20 世纪功率超声在国内外的发展

林仲茂

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文就强超声的产生系统, 强超声在液体媒质中的主要作用机理以及多种多样超声处理技术和应用在国内外近百年来的发展概况作一简要回顾, 同时涉及一些领域的最近发展。

关键词: 强超声; 声空化; 技术应用

中图分类号: T B 559 **文献标识码:** A

Development of high power ultrasonics in China and abroad during 20 century

LIN Zhong-mao

(Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The brief developments of high power ultrasonic generating system, interaction mechanism of high power ultrasound in liquid and variety ultrasonic processing techniques and applications, in China and abroad during 20 century are reviewed. The new development in some areas of power ultrasonics is also described.

Key words: high power ultrasonics; acoustic cavitation; technique application

功率超声是超声学的一个分支, 它主要研究大功率和高强度超声的产生, 强超声在媒质中的传播规律, 强超声和物质的相互作用, 以及各种功率超声技术和应用。下面就主要内容介绍发展概况。

1 在国外的的发展

最知名的超声发生器是 1883 年 F. Galton 发明的气哨。第一次世界大战期间 Langevin 发明的钢-石英-钢结构的夹心(复合)压电换能器是产生低频大功率超声的重大进展。50 年代初 H. B. Miller 对这种结构换能器作了重大改进, 发展了加预应力的复合换能器, 为工业应用奠定基础, 其基本结构沿用至今并得到广泛应用^[4]。40 年代 W. P. Mason 发明变幅杆^[1], 它与压电换能器连接而获得高强度超声, 开创了强超声在固体中的应用。除纵振动外, 其它振动模式的换能器, 由于能承受的功率小, 应用不多。80 年代森荣司^[2,3]等提出夹心弯曲换能器结构, 扩

大了工业应用。换能器理论方面, 40 年代 W. P. Mason 首先提出等效网络分析方法^[5], 近年来在此基础上发展了传输矩阵方法用于复杂结构的一维纵振分析。70 年代森荣司^[6]提出表观弹性法, 分析二维振动问题。目前发展有限元及边界元方法分析三维振动问题。

继 Mason 发明的指数型变幅杆之后, 50 年代 Л. Г. Меркулов 等^[7]提出悬链线型变幅杆及由多级组合的变幅杆, 扩展了变幅杆类型。60 年代 E. Eisner^[8]提出了形状因数的概念, 发展了一种应力沿杆件均匀分布的高斯型变幅杆, 获得很高的位移振幅。同时森荣司^[9]提出振动方向变换器, 开辟了用功率合成方法获得特大功率的高强度(50kW 以上)超声的新途径。

强超声在液体中的应用机理主要是声空化现象, 于 1894 年第一次被 O. Reynolds^[10]观察到。1919 年 Rayleigh 提出声空化泡理论模型来预计空化泡崩溃时所产生的压力。1944 年 E. N. Harvey 及其合作者做了重要的研究, 确定空化产生所必须的空化核。1948 年 Knapp 和 HoNender 用高速照相研究空化过程, 证实了 Rayleigh 预言的声空化泡高速崩

收稿日期: 99-11-15; 修订日期: 2000-01-04

作者简介: 林仲茂(1932-), 男, 研究员。

溃。1952年 Eshe 测量了空化所产生的噪声,表明频谱极宽,并出现分谐波。Noltingk 和 Neppiras 于 50 年代初在空化理论方面取得重大进展,建立了气泡动力学模型^[4]。60 年代 H. G. Flynn 进一步将声空化分为稳态空化和瞬态空化来描述^[10]。同时 Naude 和 Ellis^[11]用高速摄影观察到在液-固相介质中,声空化泡崩溃时,向固体表面喷射高速(100m/s)微射流轰击固体表面,这是固体受空化腐蚀的主要原因。

伴随声空化产生的现象是声发光(sonoluminescence)。是 Frenzel 和 Schultes^[12]于 1943 年首先发现的。曾提出电学和热学两种理论来解释,到目前还在争论和发展中。这一问题的研究到 90 年代初才有突破性的重大进展。D. F. Gaitan^[13]等用声悬浮方法使单个气泡在母液中悬浮并稳定地长时间发光。发现在微小的单泡中能量密集度达 10^{12} ,光脉冲宽度小于 50ps ($p=10^{-12}$),与声场同步精于 50ps。从声致发光谱与黑体辐射比较,发光温度在 16200°K-25000°K 之间。这一重大实验发现,引起声学和物理学界的震动和极大兴趣,竞相投入研究,到目前为止尚未能完全解释声致发光的机制。

多种多样的超声处理技术应用面很广。应用最广泛的有超声清洗、焊接、加工、超声雾化、乳化、粉碎和提取以及超声治疗。自 50 年代出现第一台超声清洗设备以来,超声清洗发展很快,应用面遍及国民经济各个部门,特别是高精尖产品的清洗已离不开超声清洗工艺。近年来发展的高频(兆赫级)清洗大规模集成电路基片,能清洗 $1\mu\text{m}$ 以下的污物。同一年代发现的超声金属焊接,已广泛用于集成电路引线焊接。近年来用于塑料—金属复合管的焊接很有发展前途。由于工艺上的突出优点,更为广泛应用的是热塑性塑料的超声焊接。焊接设备除传统的切向和纵向振动外,还发展了扭转和多系统的复合振动。焊接方式由叠焊发展到端面对接焊,功率容量达 50kW。超声加工也是最早应用技术之一。20 年代已观察到超声钻孔现象。50 年代出现一系列超声钻孔设备。除传统的纵振加工之外,发展了旋转加工,振动切削^[14,15]、抛光、研磨和珩磨。30-40 年代已开始进行超声乳化,分散和粉碎等一系列研究。50 年代用簧片哨粉碎和分散染料、药物和化妆品^[16]。近年来在食品工业得到广泛的应用。超声生物效应,早在 20 年代已发现强超声会破坏红血球,杀死单细胞。30 年代 Pohlman 进行过仔细的研究,并用于理疗。

70 年代以来在医学上的应用发展很快,例如体外超声碎石,用于神经外科的超声吸引器,手术刀,治疗前列腺炎;超声洁牙及摘除白内障,近年来发展加热治疗癌等等。

大部分尚处于实验室阶段的新技术有:超声金属成型,这是 1955 年 P. Blaha 和 B. Langenecker 发现在超声作用下金属的“软化现象”的基础上发展起来的^[4]。这项技术包括超声冷拔金属管,超声拉丝,拉伸棒、挤压、铆接和弯管与矫直。部分已有工业应用;另一项技术是超声疲劳试验,比传统的材料疲劳试验快几百倍,但由于在高低频率下的测量结果差别较大,尚未得到解释而影响工业应用。

近 10-20 年来发展起来的新技术有:声和超声悬浮,超声马达和声化学。声悬浮是 70 年代发展起来的,主要用于无容器的材料处理及液滴的力学研究等^[17]。发展单轴及三轴声悬浮装置用于太空实验。超声马达是 60 年代提出来的。70 年代才出现模型,到 80 年代才得到迅速的发展已发展多种类型,有线性和旋转马达;行波、驻波和声表面波马达;接触与非接触驱动马达等。90 年代初出版了第一部专著^[18]。超声马达的特点是低速,大力矩,响应快,没有电磁干扰。最大力矩达 $200\text{kg}\cdot\text{cm}$ ^[19],发展的另一个方向是微型化,92 年研制出 2mm 直径的器件^[20]。超声马达已用于照相机的自动聚焦及微机器人。声化学是近 10 年来发展起来的一门新的边缘交叉学科。在合成化学,高聚合物化学及声电化学等方面都取得重要进展,尤其是有机合成发展很快,主要是研究多相反应,特别是有机金属反应。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得到广泛应用。其特点主要是加速化学反应,提高产额,降低反应条件和开辟新的反应途径等。在化工方面已有许多实际应用^[60]。

2 在国内的发展

我国于 50 年代开始大功率超声的研究。以研究超声加工、清洗、焊接、粉碎和乳化等应用为先导,进而研究磁致伸缩换能器,压电换能器和簧片哨。提出位移反馈控制的簧片发声机理,研制出 X 型系列的悬臂式簧片哨^[21]。60 年代以后集中研究夹心式压电换能器,用等效网络建立一维理论。首先给出有力、电负载和损耗时换能器的共振频率和效率表达式。提出决定换能器最大效率的参量,指出最佳设计方

向^[22, 23]。提出一种新型可调频率换能器^[24]。70-80年代发展并提出两种新型的功率超声换能器。一种是半穿孔结构宽频带压电换能器,理论上予以阐明工作原理,并广泛用于超声清洗设备^[25];另一种是双向辐射换能器,用于超声乳化设备^[26]。提出换能器的声匹配问题^[27],为改进功率超声换能器设计指出方向。90年代以来开展了大尺寸压电换能器的二维分析^[28]弯曲振动、扭转振动^[29-32]和复合振动的压电换能器设计计算,为这类换能器的在工业方面的应用奠定基础。

60年代以来对纵振动的单一和组合变幅杆的特性进行过系统的分析^[32, 33]。于80年代初首次用复变数解析映象理论研究了有负载的变幅杆^[34],建立了有负载变幅杆的阻抗映象图,是变幅杆理论的重要发展。出版了国内外第一部有关超声变幅杆的专著^[33]。90年代以来研究了大尺寸单一和复合变幅杆的二维振动^[35, 36],弯曲振动模式变幅杆^[63]以及纵一扭,纵一弯复合振动模式的变幅杆^[37]。提出新型扭转振动变幅杆,并分析了几种扭振复合变幅杆,填补了这一方面的空白^[38, 39]。我国在变幅杆,变幅器方面的研究处于世界前列。我国60年代已进行过单一空化气泡的电磁辐射和光辐射^[40],确定空化气泡闭合前的短瞬间有电磁辐射和光辐射。80年代以来进行过多气泡发光的研究,近年来开展了单泡声致发光的实验和理论研究^[41],取得一定进展。超声处理技术和应用方面,50年代已开始研究,主要有:超声清洗、焊接、加工、搪锡、超声乳化,分散、粉碎和萃取,超声雾化,金属成型,超声疲劳试验,超声生物效应和治疗等。超声清洗。50年代开始生产设备,70年代以来发展很快,部分产品已达到国际水平,目前已成为不可缺少的一种工艺设备,应用最为广泛,并取得多项专利。超声焊接。50年代开始进行超声金属材料焊接应用研究,包括点焊,缝焊和集成电路引线焊接。近十年来主要生产超声塑料焊接设备,已得到广泛应用。超声加工。50年代开始研究,60年代生产千瓦级的各种型号加工机床。发明一种新型的超声加工深小孔的工具系统^[42]。研制出超声锉刀,超声旋转加工机及超声振动车、镗削和研磨装置,解决一些难加工技术。90年代研制出有特色的超声珩磨设备^[43, 44]。超声搪锡。60年代研制出一套独创的超声铝母线搪锡设备,用于电力开关板铝母线的大面积搪锡,减少铝铜接触的电化腐蚀,提高允许温升,缩

小体积而节约大量有色金属^[45],成为我国工艺标准,并扩展到电子工业中电子器件引线的搪锡,形成一类工业专用设备。超声乳化、分散、粉碎和萃取。60年代研制了一系列流体动力声及超声发生器,用于染料粉碎和油蜡乳化。研制并生产超声破碎处理机,在医药,动植物研究及环境保护等部门得到广泛应用^[64]。80年代系统地研究了燃油掺水乳化燃烧,包括乳化油性质,燃烧特性,节油降污的实验研究。在节油降污,特别是降低排放污染方面取得很好的结果,并初步得到推广应用。近年来进行声波防焦除垢除灰,取得很好结果^[21]。超声雾化。60年代研制成超声喷雾及雾化并用于吸入治疗。近年来大量用于居室加湿及少量的工业加湿调湿及雾化燃烧。超声金属成型。我国于1978年研制成超声冷拔钢管设备^[47],并首批生产出精密高压油管。与此同时也进行一系列超声冷拔金属丝试验^[48]。超声疲劳试验。60年代研制出千瓦级超声材料疲劳试验设备,并进行过一些实验^[49]。超声生物效应和治疗。我国在60年代已开展超声治疗,以后一段时间主要开展超声理疗、药物导入和透析。70年代以来研制并应用于临床的有:体外冲击波碎石,超声洁牙,超声乳化脂肪减肥,超声手术刀和超声摘除白内障等。近年来在超声治癌,治疗前列腺炎,超声针灸和穴位治疗以及超声激活血卟啉治癌等方面也取得进展。超声对生物的影响。我国在60年代进行过处理小麦种子和梗稻,能促进种子发芽,增产。超声处理中草药,如重楼种子,丹参,桔梗等在大面积范围内取得明显的缩短发芽生长期,提高产量的效果^[3]。声和超声悬浮。于80年代研制出单轴声悬浮装置,能悬浮塑料和石膏小球及比重为2.7的铝球,最大声压为154dB(参考值为20微巴),于90年代初研制出三轴装置,声压达150dB^[50]。超声马达。我国研究起步于80年代末。在振动模式理论,新结构和新驱动方式,如三梁支架纵弯扭耦合驻波马达;切扭复合马达等方面都取得进展。

声化学,在机理研究方面,60年代已开始研究空化现象^[40]。80年代以来研究利用电子自旋共振和荧光光谱技术检测声致自由基·OH和·H^[51, 52]。近年来研究双频声场对声化学产额的影响^[53, 54],取得提高产额的结果。研究混响场和行波场情况下声致自由基的产额^[55]。应用研究方面。在超声辐照下获得聚乙烯醇与丙烯晴,聚氧化乙烯和甲基丙烯酸已

酯等新的共聚物^[56]。这些共聚物用一般方法难以制备,在新型合成纤维等方面有较大的应用价值。利用超声辐照,在分子键中引入一些化学基团,可以将生物酶固定在高分子载体上而获得价廉而可重复使用的酶^[57]。超声强化异丙醇铝水反应,提高反应速度几十倍^[58],利用高频(1.4MHz)聚焦超声激活活细胞对癌细胞的杀伤效果比单独超声作用提高50%,达到98%的杀伤率^[59]。

3 最新发展

3.1 声空化和声化学

如上述,90年Gaitan等人对单泡声致发光的研究获得突破性的重大进展。是当前一个重要的基础研究课题。声空化在液体中造成局部高温高压的物理环境,这无疑会大大促进化学反应,已引起化学界的极大兴趣。近十年来竞相研究,形成新的边缘交叉学科—声化学。这一期间几乎每年都召开国际性会议。在欧洲成立了欧洲声化学学会,并出版专门杂志[sonochemistry]。除在学术方面非常活跃外,工业界也投以很大的热情,主动提供资金支持研究。有人预言不久的将来在化工生产方面可能产生革命性的变化。面对这一迅速发展 and 诱人的前景,我国的研究力量显得非常薄弱而分散。首先是宣传不够,未能引起各方面的重视,没有什么投入,不能吸引一批研究力量进行稳定地长期研究。应在各方面采取相应措施。

3.2 治疗和保健

最近报导,利用高频(1.5MHz)低强度脉冲超声(空间,时间平均强度30mW/cm)处理骨损伤区,会使伤区血流增加,加快骨的愈合。利用辐射力和声流来诊断乳房的病变,区分液态囊肿或固态囊肿^[61]。超声加热治癌及清除血栓预计在21世纪初会有突破性进展,并进入临床应用。将会利用超声的热效应及按摩、清洗作用,更多的发展保健设备。对于制药尤其是中草药有效成分的提取将得到广泛应用。

3.3 大功率,高强度超声换能器及新材料

据美国工业协会[UIA]28届年会(98年)报导,ETREMA products公司用terfenol-D磁致伸缩合金设计,制造25kW的超声源,进行声化学及废水的工业处理^[61]。报导一种固溶单晶,其应变大于1.7%,比PZT大一个数量级,而耦合系数达94%。利用硅单晶制作变幅器,用于微型雾化器。工作在72kHz时振幅大约50 μ m。硅的特点是极限应变高,

$S_m c$ (S_m 为极限应变,c为材料声速)比钛合金高8倍,声损耗低,热传导好。用于超声外科器械,微泵及其他高振幅的微机电系统很有前途^[62]。利用形状记忆合金(Cu-Al-Me)作变幅杆,具有较高的疲劳寿命及抗空化腐蚀性能^[61]。

3.4 悬浮技术在太空中发挥作用

人类在下世纪更多的利用太空环境时,声悬浮技术将发挥更大的作用,例如发展无容器制备特殊材料及药品。

3.5 超声马达的前景

超声马达方面正朝大力矩,微型化发展,预计在微机电系统中将得到更多的应用。日本预计在21世纪初将取代10%的电磁马达。

参考文献:

- [1] W. P. Mason, [P]. U. S. Patent 2, 514, 080, 1945.
- [2] Eiji Mori, et al. [C]. Ultrasonics International 89 Conference Proceedings: 256.
- [3] 程存第主编. 超声技术—功率超声及其应用[M]. 陕西师范大学出版社, 1993: 64-71.
- [4] K. F. Graff, Ultrasonics: Historical Aspects [C], 1977 Ultrasonics Symposium Proceedings, Phoenix, Oct 1977.
- [5] W. P. Mason, Electromechanical Transducer and Wave Filters [M], Van Nostrand, New York 1948.
- [6] E. Mori, et al. [C]. Ultrasonics International 1977 Conference Proceedings, 262.
- [7] Л. Г. Меркурьев, Л. В. Харуцян. [J], Акуст. 1959, 5: 183-190.
- [8] E. Eisner. [J]. J. A. S. A., 1963, 35: 1367-1378.
- [9] 森荣司, 伊藤胜彦, 范思宏. [C]. 日本音响学会研究发表会讲演论文集, 1968, 5: 285.
- [10] H. Flynn, Physics of Acoustic Cavitation in Liquids, Physical Acoustics [J], W. P. Mason, ed., Academic Press, New York 1964, 1 B, 167.
- [11] C. E. Nuade and A. T. Ellis, [J], Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 1961, D83: 648.
- [12] H. Frenzel and H. Schultes, [J], Z. Physik Chem. 1934, 27: 421.
- [13] D. F. Gaitan, [J] J. A. S. A. 1992, 91: 3180.
- [14] J. Perthen. [P], German Patent 663, 454 1938.

- [15] 阮世勋, 国外超声波振动切削概况[J]. 工具技术, 1982, 1:
- [16] 克洛福德著, 杜连耀, 应崇福译. 超声工程[M]. 科学出版社, 1959.
- [17] E. H. Trinh. [J]. J. A. S. A., 1994, 95[1]: 567
- [18] 上羽贞行, 富川义朗. 新版超音波モータ[M]. 昭和印刷社, 1992, 12.
- [19] 藤原信绪等, 复合振动子型超音波モータ高トレク化[J], 日本音响学会讲演论文集, 平成5年3月: 921.
- [20] Anitam, et al. [J]. J. Microelectro-Mechanical Systems, 1992, 1-13: 44-51.
- [21] 声学研究进展[C]—中国科学院声学研究所成立30周年论文集, 1994: 159.
- [22] 林仲茂. [J]. 声学学报, 1982, 7(4): 267-270.
- [23] 颜忠余, 林仲茂. [J]. 声学学报, 1995, 20(4): 18-25.
- [24] 汪承浩, 赵哲英. [J]. 声学学报, 1982, 7: 364-371.
- [25] 候立琪, 林仲茂, 应崇福. [J]. 声学学报, 1979, (4): 271-278.
- [26] Lin Zhong Mao, et al. A novel, high efficiency ultrasonic emulsification device and its applications [C]. Ultrasonic Technology 1987, (Editor: Kohji Toda), Toyohashi International Conference on Ultrasonic Technology, MYU Tokyo, 1987, 309-312.
- [27] Lin Zhong Mao. [C]. The Proceedings of China-Japan Joint Conference on Ultrasonics, Nanjing: May 1987: 343.
- [28] 林书玉, 张福成. [J]. 应用声学, 1994, 13(3): 30-33.
- [29] 林书玉. [J]. 压电与声光, 1994, 16(5): 27.
- [30] 林书玉, 张福成. [J]. 应用声学, 1994, 13(1): 37-39.
- [31] 林书玉. [J]. 声学技术, 1995, 14(3): 135-138.
- [32] 周静华, 林仲茂. [J]. 声学学报, 1965, 2: 122-131.
- [33] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 科学出版社, 1987.
- [34] 候立琪, 林仲茂等. [J]. 声学学报, 1982, 7: 209-221.
- [35] 林书玉, 张福成. [J]. 声学学报, 1992, 17(6): 451-455.
- [36] 林书玉, 张福成. [J]. 应用声学, 1992; 11(5): 34-38.
- [37] 林书玉. [J]. 应用声学, 1997, 16(5): 42-46.
- [38] 阮世勋. [J]. 声学学报, 1994, 19(6): 444-449.
- [39] 阮世勋. [J]. 应用声学, 1998, 17(1): 21-27.
- [40] 汪承浩, 张德俊. [J]. 声学学报, 1964, 1(2): 59-68.
- [41] 谢志行, 陈伟中, 魏荣爵. [J]. 物理, 1998, 27(1).
- [42] 范国良, 应崇福, 林仲茂, 彭翔. [J]. 应用声学, 1982, 1(1): 2-7.
- [43] 张云电, 王纯, 喻家英. [J]. 应用声学, 1994; 13(5): 18-22.
- [44] 张云电, 喻家英. [J]. 应用声学, 1996, 15(1): 26-29.
- [45] 铝母线超声搪锡[C]. 1967年上海超声会议
- [46] 声学研究进展. 中科院声学所成立30周年论文集, 1994: 154-16.
- [47] 上海钢管厂, 中科院声学所, 上海超声波仪器厂. 超声冷拔钢管的研究[C]. 重庆第二届应用声学学术会议论文集, 1984: 202.
- [48] 凌尔昌. [C]. 重庆第二届应用声学学术会议论文集, 1984: 205.
- [49] 林仲茂, 张香珠. [C]. 1964年全国超声应用学术会议(论文摘要) 37.
- [50] 王大珩主编. 中国空间应用的回顾与展望[M], 中国科学技术出版社, 1990: 169-175.
- [51] 冯若, 李化茂. [J]. 应用声学, 1989, 8(1): 32.
- [52] Feng Ruo, et al. [C]. Digest of the International Workshop on Physical Acoustics, Aug. 1990: 1-4, Nanjing China, 15.
- [53] 陈兆华, 朱昌平, 赵逸云等. [J]. 声学技术, 1997, 16(4): 192-193.
- [54] Qiping Fang, Beixing He and Zhongmao Lin. Enhancement of acoustic cavitation effects by multifrequency excitation [C]. ICA 1998.
- [55] 王双维等. [J]. 声学学报, 1993, 18: 122-128.
- [56] 刘启溶, 陈克强. [C]. 全国声学学术会议论文集摘要集, 中国声学会, 1988. 11, 上海, 61.
- [57] 江波, 徐僖. [C]. 全国功率超声学术会议论文集摘要, 1991. 11, 桂林, 64-65.
- [58] 杜士奎等. [C]. 同上文集摘要, 71.
- [59] 宋存牛等. [J]. 声学技术, 1998, 17(2): 61-73
- [60] 林仲茂. 声化学发展概况[J]. 应用声学, 1993, 12(1): 1-5.
- [61] UIA 28th Annual Symposium [C], May 1998: 13-15.
- [62] Amit Lal et al. Micromachined silicon ultrasonic atomizer. [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1996: 339-342.
- [63] 周光平. 超声弯曲模式变幅杆的研究[博士论文], 1999.
- [64] 马元杰, 林仲茂. [J]. 应用声学, 1981, 1(1): 45.