

功能材料及其应用于换能器技术的研究进展

莫喜平[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 文章综述了功能材料及其应用于换能器技术的研究进展,包括声学换能器领域应用的功能材料发展状况及基于这些材料的换能器新设计,所提及的材料包括磁致伸缩材料、弛豫铁电材料、压电复合材料、压电聚合物材料及高温压电陶瓷材料等等.文章还概要介绍了一项应用于声学换能器领域的新技术——微机电(MEMS)技术及其换能器.

关键词 功能材料,换能器,微机电(MEMS)技术

Functional materials and their applications in acoustic transducers

MO Xi-Ping[†]

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Recent advances in the development of functional materials and their applications in acoustic transducers are reviewed. New transducer designs based on magnetostrictive materials, relaxor ferroelectrics, piezoelectric composites, piezoelectric polymers, high temperature piezoelectric ceramics, and so forth are discussed. As a new development, acoustic transducers based on MEMS technology are also mentioned.

Keywords functional material, transducer, MEMS

1 引言

换能器是声呐系统中实现能量转换的器件,功能材料是换能器中肩负这种特殊使命的核心部分.用来制作换能器的功能材料主要包括压电材料(如压电晶体、压电陶瓷、压电聚合物等)和磁致伸缩材料(如镍、钴、镍铁合金、铁氧体、稀土合金等),分别利用压电效应和磁致伸缩效应实现电场能或磁场能与机械能之间的相互转换.为了获得更佳的能量转换效果,功能材料根据需要被设计成各种复合结构——复合材料,新结构组件的设计与新工艺的发展使复合材料获得了技术性能的改善,可满足换能器多方面的技术需求.换能器技术的长足发展根本上决定于功能材料技术与性能的突破,当然换能器的综合性能与换能器的新型结构设计关系密切^[1],本文主要篇幅重点介绍源于功能材料材料发展的新型换能器研究动态.近些年在传感器技术领域异常活跃的新兴技术——微机电(MEMS)技术已经应用于声学换能器,在换能器中实现能量转换的 MEMS 器

件已经冲破传统功能材料的概念,它是集功能元件(敏感器件)、结构件、信号处理、电路和电源等部分于一体的微型机电系统,作为一个有源系统用于高灵敏度接收换能器和复杂基阵,实现声信号的感知和处理.本文将利用一定篇幅介绍这一新技术和新型换能器的发展动态.

2 磁致伸缩、弛豫铁电、压电材料的发展及在换能器领域中的应用

在换能器发展史上作为功能材料曾经普遍使用过磁致伸缩材料——镍.1917年,法国科学家朗之万用石英晶体制造了声呐换能器,开创了压电材料在声呐上应用的先例.20世纪40年代,具有较强压电性能的 BaTiO₃ 陶瓷研制成功,在“二战”期间被广泛用于声呐系统.50年代发展起来的 PZT 压电陶瓷,以其较宽的工作温度范围和优良的机电转换效

2008-11-20 收到

[†] Email: moxp@mail.ioa.ac.cn

率弥补了 BaTiO₃ 陶瓷的不足,一度成为水声换能器的首选材料。目前压电材料向无铅环保型、细晶粒结构型、耐高温型、压电聚合物柔性材料以及多元复合材料等方向发展,应用不同技术手段或配方工艺实现了材料某些性能的提高,也推动了换能器技术的发展,涌现出多种高性能新型换能器。弛豫铁电材料和稀土超磁致伸缩材料是目前备受关注的高应变、大功率新型功能材料,代表性材料为 PMN-PT, PZN-PT, Terfenol-D 等,它们可产生的应变约是 PZT-8 的 5 倍,是镍的 50 倍;PMN-PT、PZN-PT 的压电常数 d_{33} 是 PZT-8 的 6—8 倍。这些新材料所具有的优良性能让换能器的设计者为之一振,并作出不懈的努力,研制高性能换能器。

2.1 稀土超磁致伸缩材料及其换能器

稀土超磁致伸缩材料利用磁致伸缩效应实现磁场能与机械能之间的相互转换,典型的材料类型之一是铽镱铁合金——Terfenol-D。与镍相比, Terfenol-D 具有高于镍 2 倍以上的机电耦合系数和数十倍的磁致伸缩应变,主要用来研制低频大功率水声发射换能器。作为低频大功率水声换能器要求具有低的谐振频率和大的机械功率输出,因此设计中往往需要施加结构预应力和提供大的辐射面。为了实现宽带工作,还需要设计机械 Q 值较低的结构形式。一般在设计低频小尺寸宽带换能器时,需要权衡技术参数的相互制约关系,进行综合设计。主要的结构形式有纵向换能器(见图 1(a))、弯张换能器(见图 1(b))、圆环换能器(见图 1(c))和球形结构换能器(见图 1(d))等等。例如 Terfenol-D 纵向换能器^[2], 共振频率 2kHz, -3dB 带宽 200Hz, 最大声源级 200dB; Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器^[3], 采用一种具有双放大效应的变高度椭圆形外壳, 实现更大的体积位移输出, 谐振频率为 1.1kHz, 最大发射电流响应为 182dB, Q 值小于 3, 重量仅 3.5kg, 采用填充顺性材料的溢流式结构, 更适合深水工作; Terfenol-D 圆环换能器^[4], 谐振频率 200Hz, 内径 0.56m, 外径 0.94m, 高度 0.37m, 声源级 193dB, 重量 410kg; Terfenol-D 球形结构换能器^[5], 谐振频率 5.9kHz, 最大发射电流响应 171dB, 声源级 180dB, -3dB 带宽 3kHz, Q 值小于 2, 换能器直径 74mm, 重量 500g, 为小型低频宽带换能器。

在稀土超磁致伸缩材料中,近些年倍受关注的

还有铁镓合金。铁镓合金具有高磁导率、高强度、高韧性、良好的延展性和温度特性、低饱和磁化场等特点,较高的磁致伸缩应变可满足中等功率水声换能器设计的需要。图 2 是 ETREMA 公司研制的铁镓合金纵向换能器, 谐振频率 13kHz, 直流偏磁场, 工作带宽 10—20kHz。

2.2 弛豫铁电材料及其换能器

弛豫铁电材料是一类颇有潜力的功能材料,可分为电致伸缩陶瓷类型和弛豫铁电单晶类型。弛豫铁电单晶比电致伸缩陶瓷材料制作工艺要复杂得多,其中典型的弛豫铁电单晶材料 PMN-PT、PZN-PT 具有高能量密度达 10 kJ/m³, 压电常数 d_{33} 是压电陶瓷的 4—6 倍, 机电耦合系数 k_{33} 为 0.9, 远远超过 PZT-8 (其典型值为 0.64), 具有实现宽带、大功率的潜力^[6-8], 引起了广泛关注。

文献 [6] 报道用 PMN-PT 单晶材料制作了纵向换能器和圆环形换能器, 采用图 3(a) 所示的纵向换能器结构形式, 通过碟形弹片保证施加恒定预应力, 同时保证有效输出振动位移, 利用 16 只这样的纵向换能器设计了 4×4 的基阵, 采用图 3(b) 所示的正 12 边形结构, 研制了圆环形换能器, 实际测量获得了宽带大功率特性, 文献中突出描述了其带宽特性, 纵向换能器基阵的品质因数 $Q_m = 1.17$, 圆环换能器的品质因数 $Q_m = 0.91$ 。文献 [7] 的工作设计了类似的纵向换能器, 采用 5 片 1.8×3.6×3.6 mm 的 PMN-32%PT 叠合成驱动单元, 16 个单元驱动共同的轻质量方形辐射面, 同时共用同一个钨合金方形尾质量, 4 根预应力螺栓将轻质量辐射面、并列排布的驱动单元及尾质量联结在一起, 预应力近似为 12MPa。换能器整体尺寸为 35×35×40 mm, 重量 260 g, 测量的发射电压响应曲线给出谐振频率为 30kHz, 最大发射电压响应为 156dB, -3dB 带宽约 30kHz, 品质因数 $Q_m = 1$ 。弛豫铁电单晶材料目前应用中面临最大的问题是克服非线性、提高材料的温度稳定性和机械稳定性。文献 [8] 研究了不同材料配比和温度、应力条件下的性能变化, 采用特殊切割方式, 通过激励场与应力方向彼此垂直, 利用 d_{32} 模式工作, 制作条形驱动元件纵向换能器(见图 4), 在 60℃ 和高预应力下, 消除了场诱发相变现象, 一定程度上克服了材料的弱点, 改善了换能器的线性特性, 设计的换能器经计算得到的声源级达 201dB。

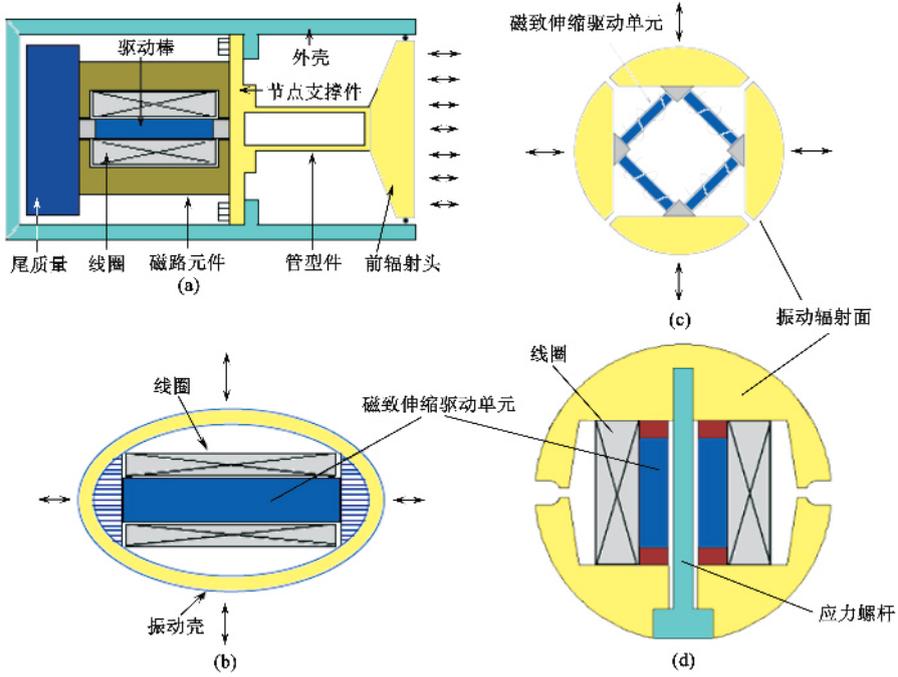


图1 稀土超磁致伸缩材料低频换能器结构示意图

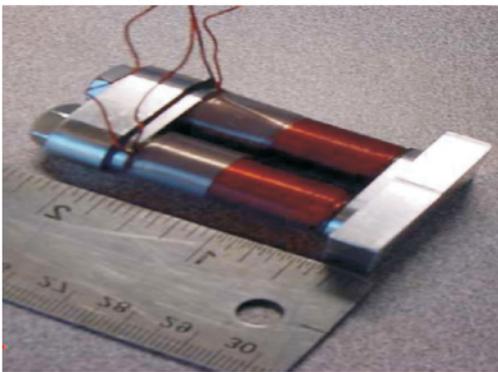


图2 铁钴合金纵向换能器

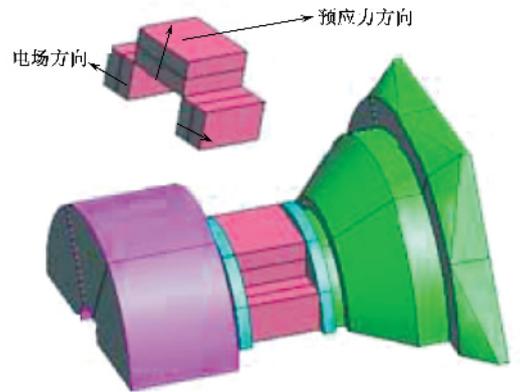


图4 d_{32} 模式条形驱动元件纵向换能器

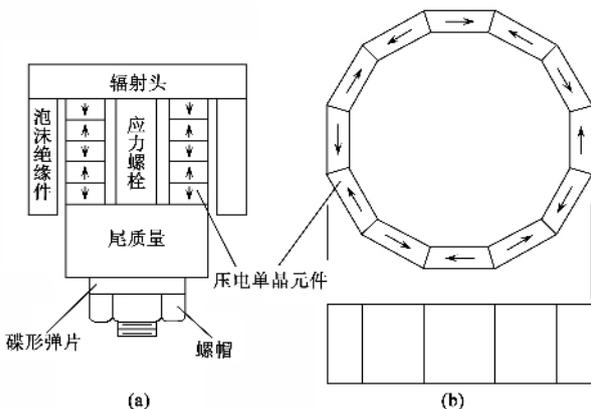


图3 纵向换能器与圆环换能器结构示意图

2.3 聚合物功能材料及其换能器

聚合物功能材料声阻抗率低,容易与水等流体介质及生物组织实现阻抗匹配、柔性、易弯,可以制作成任意形状换能器,常用来制作高频标准水听器、高频换能器、医学超声换能器、共形基阵及多元化复合换能器阵等。聚偏氟乙烯 PVDF 及其共聚物 P(VDF-TrFE) 是目前获得广泛应用的柔性聚合物功能材料。PVDF 材料可以保留剩余极化,属于压电材料;P(VDF-TrFE) 是经 1.2—3.0 MeV 电子辐照的具有大应变电致伸缩效应的功能材料,在 150MV/m 强电场下,纵向应变可达 -5%,而横向应变为 1%,制作换能器需要加直流偏置电场。图 5 (a) 是文献 [9] 利用这种电子辐照电致伸缩聚合物材料 P(VDF-TrFE) 研制的弯张换能器,结构类似

于 IV 型弯张换能器,设计中不是采用闭合弯曲椭圆壳,而是利用对称的弹性弯曲梁制成.采用 30 层宽 25mm、长 31mm、厚 $31\mu\text{m}$ 的薄膜叠合成厚度为 1mm 的聚合物薄膜叠堆,每层薄膜表面采用溅射技术镀上金电极,叠合后在厚度方向加偏置电场和交流激发电场,如图 5(b)所示.采用较薄的材料叠合的目的是为了获得高电场而不至于要求过高的偏置和激发电压.聚合物薄膜叠堆两端用带安装槽的有机玻璃夹块夹持,弯张壳采用厚度为 0.381mm 的一对弹性钢板,对称安装在聚合物薄膜叠堆两侧,通过弯曲变形装在有机玻璃夹块的安装槽内.由于弹性钢板具有回弹的势能,使聚合物薄膜叠堆处于被拉伸的状态,从而施加了伸张预应力,换能器用聚氨酯灌注.这种小型弯张换能器在水中谐振频率为 1.7kHz,在偏置电压为 1000V 时,测量发射电压响应为 123dB,接收灵敏度为 -177.5 dB , $Q_m = 1.55$,交流电压为 $200V_{\text{rms}}$,声源级为 169dB,并且还有进一步提高声源级的潜力.

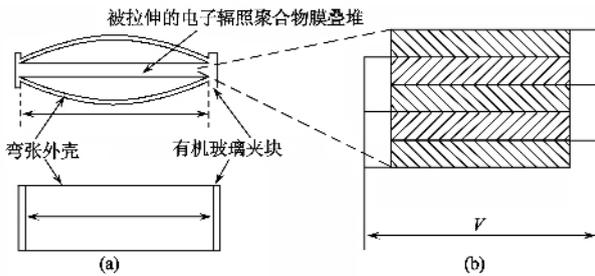


图 5 电子辐照聚合物 (PVDF-TrFE) 弯张换能器

图 6 是利用 PVDF 材料制成皱状膜换能器,应用于收发共用的超声测距系统^[10],PVDF 薄膜 $30\mu\text{m}$ 厚度,涂上 $6\mu\text{m}$ 的银电极,有效面积直径 11mm,圆膜制成 3 个周期的波动皱状,利用皱状结构可以增加功能材料的体积和工作表面积,于是可以增大发射和接收声波的能力.换能器工作频率为 200kHz,相对带宽为 33%.

3 发展中的压电复合材料及其在换能器技术中的应用

功能材料在大部分换能器中以单一材料形式设计成器件,可以是独立的一个器件或者一系列器件经过特定的结构方式组装在换能器中,制成各种结构和具有不同功能的换能器.在某些应用条件下,或者为了突出提高换能器的某些方面的性能,把功能材料以某些特定的方式与其他功能材料或无源材料进行组

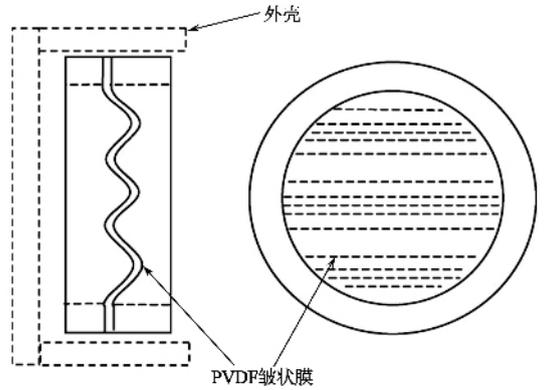


图 6 PVDF 皱状膜换能器

合,设计成复合材料器件,应用于高性能换能器.

3.1 多种类型功能材料组合应用的复合材料换能器

功能材料有多种类型,如压电陶瓷、电致伸缩材料、磁致伸缩材料、压电聚合材料等.根据几种类型功能材料的优点和不足或利用激励磁场-电场的相互关系进行组合应用设计成混合型换能器,如磁致伸缩材料与压电材料组合,压电陶瓷与压电聚合物组合,电致伸缩材料与压电聚合物组合,等等.在 PZT 与 PVDF 组合设计换能器^[11]的应用例子中,利用 PVDF 做接收元件,因为 PVDF 具有平坦的接收响应特性,同时作为 PZT 发射器的匹配层实现与水介质良好阻抗匹配,这种收发组合的换能器便于利用两种功能材料的共同优点,实现两种元件独立使用时所达不到的效果,与同一套元件的“收发合置”类型换能器相比,既得到了功能上兼顾,又在电路设计上方便了许多.

图 7 是两例电场-磁场联合驱动的双功能材料的纵向复合结构换能器.图 7(a)^[12]为利用 PZT 和 Terfenol-D 材料组合设计的纵向换能器,换能器长度 40.6cm,重量 29.5 kg,辐射面面积 363 cm^2 .换能器具有宽带特性,对应磁致伸缩驱动的谐振频率为 1.8 kHz,对应压电堆驱动的谐振频率为 3.5 kHz,在 1.5—6kHz 频带内,最大发射电压响应高于 150dB,响应起伏在 10dB 以内.文献 [12]中还报道了关于这种宽带换能器组成 4×4 平面阵的研究成果,基阵最大声源级为 230dB,1.5—6kHz 频带内最小声源级为 225dB,声源级起伏在 5dB 以内.图 7(b)^[13]为利用 PMN-PT 和 Terfenol-D 材料组合设计的纵向换能器,换能器长度 152.4 mm,通过测试辐射面速度响应曲线,证明所设计的换能器具有宽带特性,在 1—6kHz 频率范围内具有平坦的响应.文献 [14]设计制作了磁致伸缩-压电联合激励凹筒型发射换能器, Terfenol-D 棒与 PZT

压电陶瓷堆机械串联成纵向振子激励凹筒形外壳 构成宽带换能器 特殊的阻抗变换匹配变压器实现了两组激励元件的功率容量均衡发挥(图8所示),该换能器尺寸为 $\Phi 88\text{mm} \times 316\text{mm}$,水中谐振频率为 1.30kHz, -3dB 带宽 Q 值 1.43,谐振频率下发射电压响应级为 135.1dB.

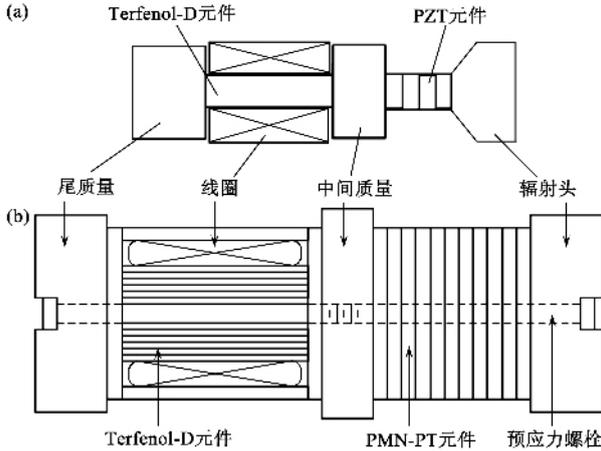


图7 磁致伸缩-压电联合激励纵向换能器

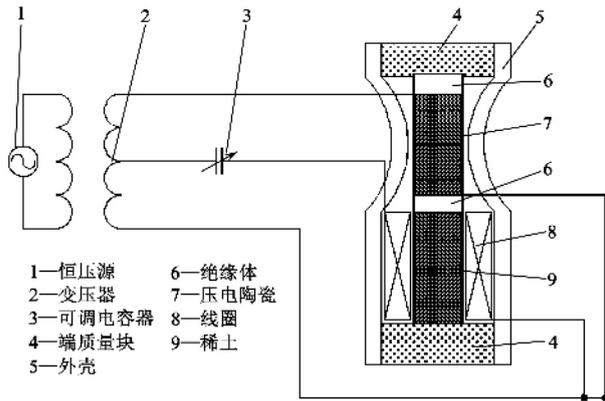


图8 磁致伸缩-压电联合激励弯张换能器

3.2 功能材料与无源材料组合的复合材料换能器

无机压电陶瓷和有机高分子树脂构成的压电复合材料,兼备无机和有机压电材料的性能,并能产生优于两相材料独立工作所具有的特性.因此,可以根据换能器需要,综合两相材料的优点,制作出多种联通方式和规格的优良性能的复合功能元件,如考虑增大材料机械韧性,提高接收灵敏度,抑制横向机械耦合实现单模特性,提高声发射能力,展宽频带,基阵集成设计等等.文献[15]利用 2-2 压电复合材料制作了纵向换能器,复合材料结构见图9,复合材料采用 PZT-5H,材料的厚度 $t = 1.2\text{mm}$,PZT 和聚合物的组元宽度和为 $w = 0.64\text{mm}$.根据对元件的

机电耦合系数 k_t 的优化,设计得到 PZT 材料的体积百分比为 60% 和宽高比 w/t 值为 0.7 的复合材料.利用这种复合材料制作成内半径 4mm、外半径 9mm、厚度 2mm(包括电极材料)的圆环,叠合 8 片这样的元件,前端是内半径 2.5mm、外半径 13.2mm、厚度 16mm 的铝材料辐射头,后端是内半径 2.5mm、外半径 9mm、厚度 16mm 的钢材料尾质量,中心用直径为 5mm 的钢材料螺栓施加预应力.研制的换能器发射电压响应比纯 PZT 材料激励的换能器高 5—8dB.

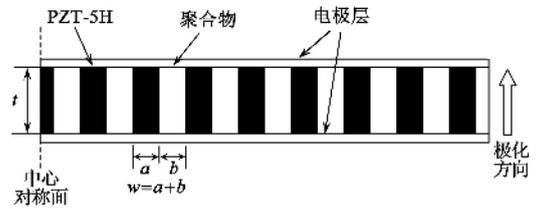


图9 2-2 压电复合材料

文献[16]应用一种特殊的复合材料研制了接收换能器,元件的非压电陶瓷相是空气,即一种 PZT-空气复合材料,又称作泡沫压电陶瓷复合材料.用这种材料研制了双叠片水听器(见图10),这种材料比 PZT-聚合物复合材料具有更低的机械刚度,因此获得了比 PZT-聚合物复合材料水听器更高的接收灵敏度,其灵敏度值为 -198dB ,而且由于克服了径向谐振,平坦响应的上限频率延展到 140 kHz.文献[17]对这种材料的微孔结构进行有限元建模,实现了材料优化和换能器设计的新突破.

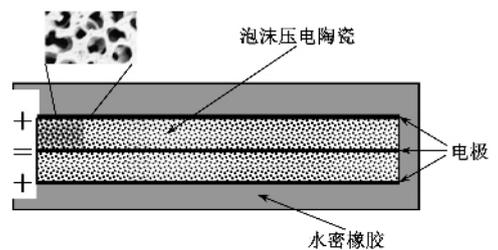


图10 泡沫压电复合材料水听器

文献[18]设计了一种多层复合材料加预应力的超声换能器,多层复合材料的结构形式如图11所示,包括 1-3 和 3-1 两种联通方式,6 层压电陶瓷叠合通过共同贯穿的聚合物联结起来,在相邻两片压电陶瓷的界面处设计电极接线点,供焊接引线用.在两端加夹片,通过预应力螺栓施加预应力,得到谐振频率低于 20kHz 的复合材料超声换能器.

在实际应用中,为了有效抑制横向耦合振动造

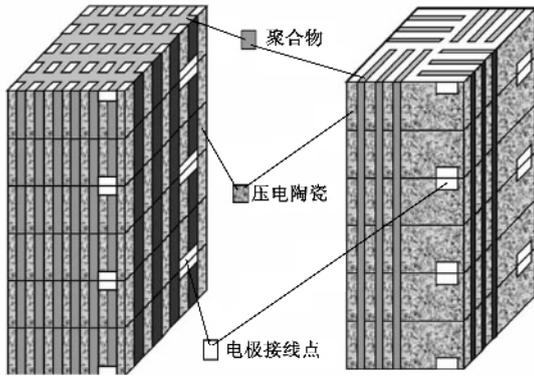


图 11 多层复合材料结构示意图

成响应曲线多峰现象,可以将 2-2 复合材料的结构取向设计成倾斜方式^[19],如图 12 所示,图中 a、b 是常规的 2-2 复合材料结构,c、d、e 是 2-2 倾斜取向复合材料结构,由立体视图可以看出,在这种结构器件中,功能材料和聚合物相包括了不同长度的斜条,它们横向共振频率彼此分离,而达到有效抑制横向耦合的目的。文献利用这种结构形式的复合材料研制了几 MHz 频段的换能器。

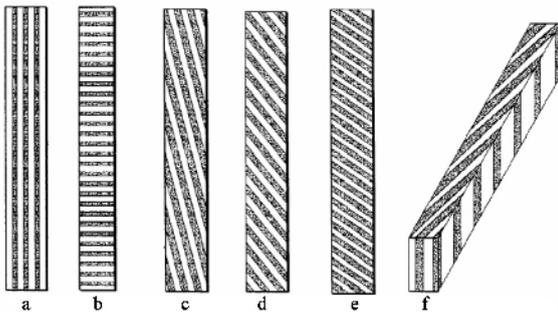


图 12 多种取向的 2-2 复合材料结构示意图

在压电复合材料换能器设计中,通常将这种复合功能元件经过优化设计后独立使用,或者将复合材料的功能元件单元分组得到一定功能的基阵,这方面的研究文献比较多,在此不一一列举。

4 适于高温条件的功能材料及其换能器

现代科技领域经常需要高温超声换能器。例如有下述两种情况:其一是换能器要耐得住本身发热所造成的温度升高;其二是在高温环境下使用承担发射与接收声波的使命。如核工业技术中用到的超声无损检测,冶炼金属工业中用到的超声多普勒测速与超声测温,石油工业中用于井下的声活化和超声测井,太空航天技术领域用于登月或到其他天体

星球表面取样作业等等。这些都对功能材料及换能器的使用温度提出挑战性的需求,通过几十年的材料技术和换能器工艺技术的发展,在一定程度上满足了某些工程需要。

文献[20]利用激光束成像方法对 Fe-Co 多晶合金从室温到 700℃ 温度范围内的磁致伸缩性能进行研究,结果表明,这种合金材料适合高温条件下应用,其中 Co 的重量比为 27% 和 50% 的合金材料具有宽的磁致伸缩应用温度范围,在 200—400℃ 范围内,磁致伸缩应变为 100ppm,显示了这种合金在高温环境下的应用前景。

目前可用于高温条件下的压电材料有十余种^[21],概括起来最合适的材料是钛酸铋($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, 简写成 BIT)、改性钛酸铋、偏铌酸铅和通过溶胶凝胶工艺得到的 BIT/PZT 薄膜等。钛酸铋属于软铋矿结构陶瓷系,有非常高的居里温度,并具有低的介电常数和介电损耗,灵敏度低于 PZT 材料,投入应用的该类材料产品的居里温度 T_c 一般为 500—920℃。改性钛酸铋是一种理想的高温压电材料,具有非常好的压电稳定性,居里温度 $T_c = 600^\circ\text{C}$ 。铌酸锂的 $T_c = 1210^\circ\text{C}$,但是遗憾的是这种材料在 600℃ 时具有释放氧到环境中的特性而不能应用。偏铌酸铅(PbNb_2O_6)的居里温度为 540℃,有较低的机械品质因数,适合制作接收传感器,但是很难制造具有良好压电特性的致密陶瓷。利用溶胶凝胶工艺得到的复合压电材料,一般有两种压电材料组分,其一具有高压电性,其二具有高温特性,典型的组合是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{PZT}$ 。

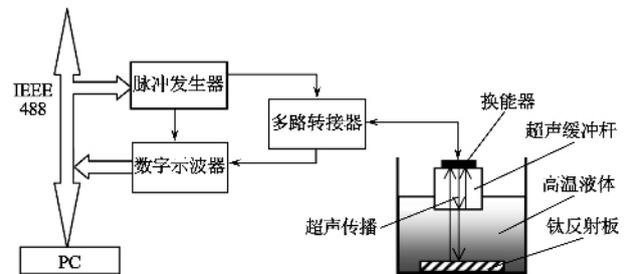


图 13 研究高温压电材料的实验装置

作为高温超声换能器,除需要选择高居里温度的压电材料,还需要两项特殊处理的工艺,否则将无法达到目的,这就是上电极和焊接引线,这两项工艺起到画龙点睛的作用。关于焊接电极的最佳手段是将金属金或银用扩散粘接技术粘合在材料表面。关于引线可采用搭接方法或用特殊焊料焊接,被采用的高温焊料是以金为主的合金,如 $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$, $\text{Au}_{82}\text{In}_{18}$ 。

某些在核工业系统中用作冷却的介质是液态重

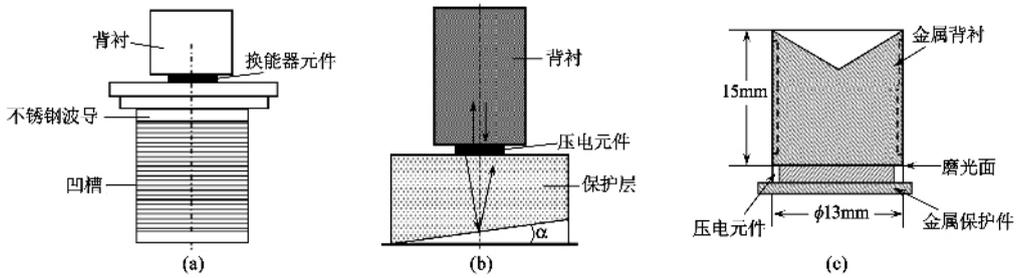


图 14 不同设计的高温超声换能器

金属合金,如 Pb/Bi 液态合金,文献 [22] 研究了应用于这种高温液体中进行成像和测试的超声换能器,图 13 是作者比较研究几种高温压电材料的实验装置,其特殊之处是需要设计一个插入到高温液体中的超声缓冲杆(或称波导),将超声波传到液体中.设计几 MHz 的超声换能器,采用独立压电元件可以实现,特殊的应用环境和为了提高超声发射性能及便于检测回波的需要,换能器设计了金属背衬,前端设计了波导和保护层部件(如图 14 所示).在超声探测中多次反射是非常不利的影响因素,尤其在成像系统中更是如此.对于这种换能器,为了避免在保护层中产生多次反射,需要采用表面不平行的保护层结构,见图 14(b);在后背衬的设计上同样存在多次反射需要克服的问题,采用凹锥形背衬结构可以达到此目的,见图 14(c).

5 微机电(MEMS)技术与声学换能器

5.1 MEMS 技术的特点与优势

MEMS 技术的目标是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统. MEMS 技术是一种典型的多学科交叉的前沿性研究领域,几乎涉及到自然及工程科学的所有领域,如电子技术、机械技术、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等,在当前 MEMS 技术所能达到的尺度下,宏观世界基本的物理规律仍然起作用,但由于尺寸缩小带来的影响和效应,许多物理现象与宏观世界有很大区别,如力的尺寸效应,微结构的表面效应,微观摩擦效应等等. MEMS 技术主要包括设计与仿真技术、材料与加工技术、封装与装配技术、测量与测试技术、集成与系统技术等.人们已经逐步将 MEMS 技术与航空航天、信息通信、生物化学、医疗、自动控制、消费电子以及兵器等应用领域相结合,制作出符合各领域要求的微传感器、微执行器、微结构等 MEMS 器件与系统,这些传感器具有微小的几何尺寸,可以减小无效的体

积,降低功耗和材料消耗,具有结构紧凑、集成度高和容易构成智能化系统等优点,对于声学换能器来讲, MEMS 换能器具有小几何尺寸、高谐振频率、容易设计成基阵、减小联结引线和降低分布阻抗等技术优势,应用于高频基阵和高频宽带水听器时具有常规尺度换能器所不能匹敌的优势.

5.2 基于 MEMS 技术的新型换能器

常规换能器具有几类典型结构,如纵向复合棒结构、钹式结构、弯张 IV 型结构、三叠片结构、弯曲梁结构等等.利用常规加工和制作工艺,为了得到高频换能器,最小尺寸仅能达到毫米或厘米量级,要想进一步提高工作频率,达到 MHz 以上频段,需要将这类器件制作成百微米的大小,其结构件的工艺尺寸在微米或亚微米量级.如此细微的器件加工、组装、引线、布阵等工艺过程以及设计仿真均需要借助 MEMS 技术来完成.文献 [23] 研究了微壳结构超声换能器基阵,基元结构类似于单侧 V 型弯张换能器,见图 15,其中图 15(b)是敏感单元的顶视图.所有材料包括基材、压电材料、载板材料、电极材料等的选择均需符合可利用微机械加工和集成电路制作工艺完成的需要.制作完成的换能器基元情况如下:氮化硅载板半径 $57.5\mu\text{m}$ 、厚度 $0.3\mu\text{m}$;氧化锌压电元件内半径 $15\mu\text{m}$ 、外半径 $40\mu\text{m}$ 、厚度 $0.3\mu\text{m}$;金电极厚度 $0.1\mu\text{m}$.小基元的谐振基频 0.32MHz ,二阶谐振频率 1.55MHz ,三阶谐振频率 4.17MHz .该文献还设计得到了高频二维平面阵,具有宽带特性,可应用的频带为 $0.45\text{—}4.5\text{MHz}$.有关应用于 MHz 频段的 MEMS 换能器的研究工作还有许多^[24,25]. MEMS 技术已经是这一领域换能器应用研究的新热点,并且将继续发挥其独特的技术优势,形成一项有代表性的新兴换能器工艺技术,随着换能器和基阵技术的发展,集成化程度日益提高,这项技术将会有更广阔的应用前景.

这里再介绍一个比较有特色的研究工作^[26],作

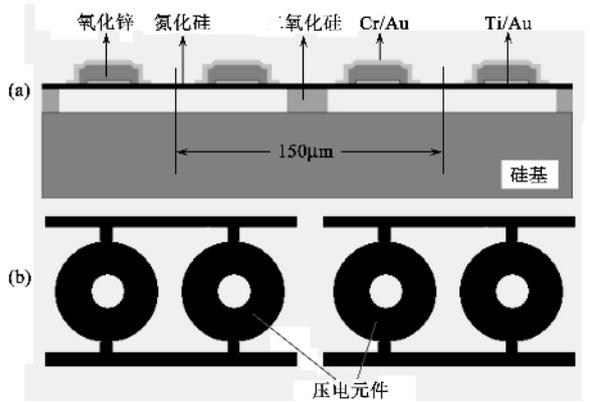


图 15 压电微壳超声换能器结构示意图

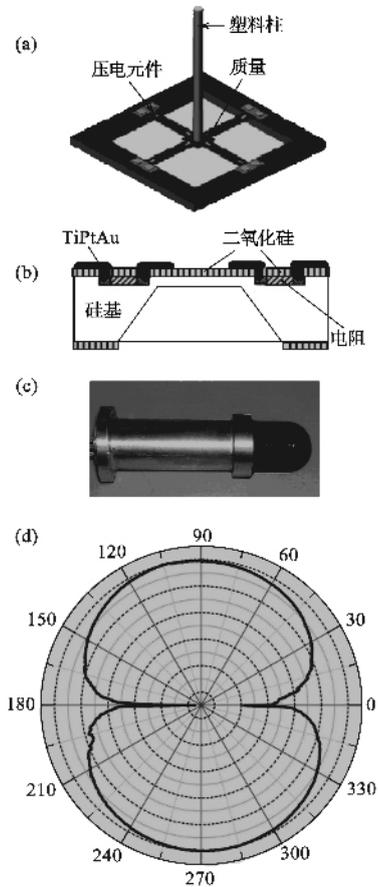


图 16 MEMS 压阻式矢量水听器

者研究了一种压阻式二维矢量水听器,设计中采用了摆动柱感知声压梯度信号,通过摆动柱的摆动运动,引起敏感元件的电阻值变化,从而可以感知水下矢量声信息.其中压阻式敏感元件部分是采用 MEMS 技术实现的高灵敏度敏感器件,图 16(a)是这种换能器的工作原理图,图 16(b)是敏感元件部分结构图,图 16(c)是其实物照片,图 16(d)是矢量水听器样品的指向性图测试结果($f = 31.5\text{Hz}$),所得到的指向性图具有典型的偶极子指向性,正交方向凹点深度在 -20dB

以下,接收灵敏度大于 -197.7dB .

参考文献

[1] 莫喜平. 物理, 2006, 35 :14 [Mo X P. Physics(Wuli), 2006, 35 :14 (in Chinese)]

[2] Steel G A. A 2 - kHz magnetostrictive transducer. In McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. Transducers for Sonics and Ultrasonics, Orlando Florida, U. S. A. , 1992. 250—258

[3] Mo X P. Chinese Journal of Acoustics. 2001, 20 :39

[4] Toshiaki Nakamura *et al.* A 20Hz giant magnetostrictive source for monitoring of global ocean variability. In : International Symposium Acoustic Tomography and Acoustic Thermometry Proceedings. Tokyo, 1999. 217 - 224

[5] 柴勇, 莫喜平, 刘永平等. 应用声学, 2005, 24 :164 [Chai Y, Mo X P, Liu Y P *et al.* Applied Acoustics, 2005, 24 :164 (in Chinese)]

[6] Moffetta M B, Robinson H C, Powers J M. J. Acoust. Soc. Am. 2007, 121 :2591

[7] Powers J, Moffett M, Nussbaum F. Single crystal naval transducer development. In Streiffer S K. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics. Honolulu, Hawaii, U. S. A. , Vol. 1, 21 July—2 Aug. 2000. 351—354

[8] Snook K A, Rehrig P W, Jiang X N *et al.* In : 2005 IEEE Ultrasonics Symposium 2005. 1065

[9] Cheng Z Y, Xu T B, Zhang Q M *et al.* IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 49 :1312

[10] Toda M, Dahl Jerry. Sensors and Actuators A 2006, p. 1

[11] Kim M J, Kim D H, Lyeol Ha K. J. Acoust. Soc. Am. , 1998, 103(5) Pt. 2 :3041

[12] Butler S C, Tito F A. In : OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition 2000, 3 :1469

[13] Downey P R, Dapino M J, Smith R C. In : SPIE 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2003. 1

[14] Chai Y, Mo X P, Liu Y P *et al.* Chinese Journal of Acoustics. 2006, 25 :371

[15] Roh Y, Lu X G, Acoust. J. Soc. Am. 2006, 119 :3734

[16] Hudai Kara, Rajamani Ramesh, Ron Stevens *et al.* IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50 :289

[17] Ramesh R, Kara H, Bowen C R. Computational Materials Science, 2004, 30 :397

[18] Robertson D, Cochran S. Ultrasonics, 2002, 40 :913

[19] Li W, James M G, Frederick J B. In : 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, 2004. 1666

[20] Lorenz B E, Graham C D Jr. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40 :2751

[21] Kazys R, Voleišis A, Voleišiene B. Ultragarasas (Ultrasound), 2008, 63 :7

[22] Rymantas Kazys, Algirdas Voleišis, Reimondas Sliteris *et al.* IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52 :525

[23] Percin G, Khuri-Yakub B T. Ultrasonics, 2002, 40 :441

[24] Zhang Q Q, Djuth F T, Zhou Q F *et al.* In : 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference 2004. 1954

[25] Hyun - Joong Kim, Babak Ziaie. Fabrication Techniques for Improving the Performance of PVDF-on-Silicon Ultrasonic Transducer Arrays. In : Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference. New York, 2006. 3491—3494

[26] Chen S, Xue C Y, Zhang B Z *et al.* In : Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007. 1839