

声电转换材料的研究进展

梁盛德 李全禄 张晴 巫建功

陕西省西安市长安南路 199 号陕西师范大学应用声学研究所 710062

电子邮件: lql0314@hotmail.com

马晴

陕西省咸阳市咸阳师范学院物理系 712000

电子邮件: slmaqing@126.com

本文简要地叙述了目前国内外应用于声电转换方面的两类材料——压电与压磁声电转换材料的研究进展。就常用的压电和压磁材料的结构、性能及应用作了初步分析和归类比较。最后指出了当前声电转换材料研究开发的过程中应注意的问题,并对今后研究开发的方向,提出了一些建议。

关键词: 压电性, 压磁性, 声电转换材料, 应用

RESEARCH PROGRESS OF ACOUSTOELECTRIC TRANSDUCER MATERIALS

Sheng-De LIANG, Quan-Lu LI, Qing ZHANG, Jian-Gong WU

Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710062, China

E-mail: lql0314@hotmail.cn

Qing MA

Department of Physics, Xian Yang Normal University, Xian Yang, 712000, China

E-mail: slmaqing@126.com

This paper briefly summarizes the current research progress in China and other countries of the acoustoelectric transducer materials, i.e. piezoelectric and piezomagnetic transducer materials. The structures, properties and applications are of these materials are analyzed and compared. The future research and development of the field are finally suggested.

Keywords: piezoelectricity, piezomagnetism, acoustoelectric transducer material, application

1. 引言

声电转换材料在现代功能材料中占有非常重要的地位,它具有非常广泛的用途。近几年来声电转换材料被广泛应用于制作换能器、变压器、滤波器和蜂鸣器等器件。可以预见,随着电子、信息、航空、航天等高科技领域日新月异的发展,声电转换材料的研制技术和应用开发及相关的科学研究将越来越受到人们的重视。

2. 声电材料的研究现状及分类

本文把现已投入使用的大多数声电转换材料归结为两大类型:压电型和压磁型,它们的族系分别如下(少数为天然材料,大多数为人工制造的)[1]。

2.1. 压电材料的分类

压电型材料包括压电陶瓷、压电单晶、压电半导体、压电高聚物、压电复合材料等。

2.1.1. 压电陶瓷

压电陶瓷是指把氧化物(氧化锆、氧化铅、氧化钛等)高温烧结,固相反应后制成的多晶体,并通过直流高压极化处理使其具有压电效应的铁电陶瓷的统称。目前常见的压电陶瓷主要有:

(1) 单元系压电陶瓷

最早具有压电性的陶瓷(BaTiO_3)是 1947 年由美国的 Robert [2]发现的,由于其居里温度点不高(120°C)和第二相变点(0°C)都在工作温区附近,性能随温度和

时间的变化太大从而限制了其应用。但是 BaTiO₃ 压电性的发现却成为探索新型氧化物铁电体的转折点,人们在此基础上研制出了置换 BaTiO₃ 所获得的同 BaTiO₃ 有类似结构的 ABO₃ 型铁电体。

(2) 二元系压电陶瓷

1955 年美国 NBS 研究所(现称 NIST)的 Jaffe [3] 等人发现了 Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃(简称 PZT)系固溶体的高压电活性和高介电常数,该类材料以其优异的性能成为压电陶瓷领域中的研究主流。PZT 的出现,增加了许多在 BaTiO₃ 时代不可能有的新应用,如陶瓷滤波器和压电点火装置等。

(3) 三元系及多元系压电陶瓷

1965 年日本松下电气公司的科研人员在二元系组分中加入 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 后,试制成了三元系压电陶瓷。常见的三元系压电陶瓷材料有如下几种:① 铋镁锆钛酸铅系,主要成分是 xPb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})-yPbTiO₃-zPbZrO₃。此材料特点是具有高机电耦合系数,高介电常数,较大的机械品质因数数值和较好的稳定性,用途广泛。② 铋钨锆钛酸铅系,主要成分 xPb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})-yPbTiO₃-zPbZrO₃。此材料特点是稳定性好,烧成范围宽,成分易控制,致密度高,绝缘性能好,压电性能优异。③ 铋锰锆钛酸铅系,主要成分是 xPb(Mn_{1/2}Te_{1/2})O₃-yPbTiO₃-zPbZrO₃。此材料特点是在受机械压力和电负载时,压电性能衰减少。④ 铋钨锆钛酸铅系,主要成分是 xPb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})-yPbTiO₃-zPbZrO₃。此材料特点是机电耦合系数和机械品质因数数值都高,且谐振频率的时间稳定好,损耗也小。目前三元系压电陶瓷的研究工作还在不断深入,而且部分研究人员在三元系材料的基础上添加了第四、第五种组元,开拓出了人们所说的四元系、五元系压电陶瓷,预计将会有更优良的压电陶瓷新材料出现。

(4) 无铅压电陶瓷

上述的压电陶瓷均含有大量的铅,制造和使用过程中

① (1-x)BaTiO₃-xABO₃ (A=Ba、Ca 等; B=Zr、Sn、Hg、Ce 等); ② (1-x)BaTiO₃-xA¹B¹O₃ (A¹=K、Na; B¹=Nb、Ta); ③ (1-x)BaTiO₃-xA¹¹0.5NbO₃ (A¹¹=Ca、Sr、Ba 等)。BNT 基无铅压电陶瓷主要有五类,即: ① (1-x)BNT-xBi_{1/2}K_{1/2}TiO₃; ② (1-x)BNT-xATiO₃; (A = Ba、Sr、Ca 或由它们组成的复合离子); ③ (1-x)BNT-xA₁NbO₃ (A₁=K、Li、Na); ④ (1-x)BNT-xA¹¹B¹¹O₃ (A¹¹=Bi、La; B¹¹=Cr、Fe、Sc、Mn); ⑤ (1-x-y)BNT-xBaTiO₃-yBiFeO₃。铋层状结构无铅压电陶瓷主要有: ① Bi₄Ti₃O₁₂ 基压电陶瓷; ② MBi₂N₂O₉ 基压电陶瓷(M=Sr、Ca、Ba、Na_{1/2} Ba_{1/2}、K_{1/2}Bi_{1/2}; N=Nb、Ta); ③ Bi₃TiM'O₉ 基压电陶瓷(M' = Ta、Ta); ④ 复合铋层状结构无铅压电陶瓷。⑤ (1-x)BaBiTi₄O₁₅-xBa₄Ti₁₃O₃₀。近几年来, BNT 基和铋层状结构无铅压电陶瓷的研究和开发极为活跃。BNT 陶瓷具有铁电性强(Pr 为 38 uc/m²)、压电系数大(k_t、k₃₃ 约为 40%~50%)、介电常数小(为 240~340)、声学性能好(N_p=3200 Hz·m)等优点。以 Takenaka 为代表的日本学者对 BNT 基无铅压电陶瓷进行长期的掺杂改性研究[5],成功地解决了矫顽场过高的问题,并得到了许多性能良好的 BNT 基压电陶瓷。表 1 给出了 BNT 基陶瓷中加入第二组元配方陶瓷体系的压电性能。铋层状结构无铅压电陶瓷具有介电常数低(127~154)、自发极化强、居里温度高(>500℃)、机械品质因数 Q_m 高(2000~7200)、电阻率高、谐振频率的时间和温度稳定性好等特点。表 2 给出了部分铋层状结构无铅压电陶瓷的压电性能。

表 1. BNT 基陶瓷中加入第二组元配方陶瓷体系的性能

组元	k _p /%	k ₃₃ /%	ε ₃₃ ^T / ε ₀	Q _m
BaTiO ₃	-	57	1001	-
NaNbO ₃	10.8	43.3	339	-
NaSbO ₃	36.8	49.2	1462	84
BiCrO ₃	31.2	41.7	155	1288
LaFeO ₃	28	37.2	602	472
BiFeO ₃	20.6	43.8	618	861

表 2. 部分铋层状结构无铅压电陶瓷性能

组成	d ₃₃ /pC/N	ε ₃₃ ^T / ε ₀	Q _m	k _t /%
0.95Bi ₄ Ti ₁₃ O ₁₂ +0.05YMnO ₃		144	5650	25
0.95Bi ₄ Ti ₁₃ O ₁₂ +0.05HoMnO ₃		145	4700	22
(SrBi ₂ Ta ₂ O ₉) _{0.3} (SrBi ₂ Nb ₂ O ₉) _{0.7}	80	-	-	-
(BaBi ₂ Nb ₂ O ₉) _{0.4} (CaBi ₂ Ta ₂ O ₉) _{0.6}	45	-	-	-

会导致环境污染。国内外报道的无铅压电陶瓷体系主要有以 BaTiO₃ 为基的无铅压电陶瓷、以 Bi_{1/2}Na_{1/2}Bi_{1/2}Na_{1/2}TiO₃ (BNT)为基的无铅压电陶瓷、碱金属铋酸盐基的无铅压电陶瓷、钙青铜结构无铅压电陶瓷和铋层状结构无铅压电陶瓷[4]。目前研究的 BaTiO₃ 为基的无铅压电陶瓷体系主要有三类,即:

2.1.2. 压电单晶

压电单晶是一种温度稳定性好的压电材料,传统的有应用价值的压电晶体主要有:石英(Si)、铌酸锂(LiNbO₃)、钽酸锂(LiTaO₃)、锆酸锂(LiGeO₃)、镓酸锂(LiGaO₃)、锆酸铋(BiGe₁₂O₂₀)等。目前各

国都在研究新型压电单晶材料,研究的重点主要在各种弛豫基铁电单晶($\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}$)- PbTiO_3 、 $\text{Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})$ - PbTiO_3 (PYN-PT)、 BiScO_3 - PbTiO_3 (BSPT)、 BiScO_3 - BiGaO_3 - PbTiO_3 、 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PMNT)、 $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PZN-PT)等,它们均表现出了高的居里温度和相对优良的介电和压电性能。另外,硅酸镓镧 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS)系列新型压电单晶和通过离子置换得到的类 LGS 结构单晶 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGN)、 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGT)、 $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ (SGG)、 $\text{Na}_2\text{CaGe}_6\text{O}_{14}$ (NCG)等在声表面波器件方面得到了广泛应用。

2.1.3. 压电半导体

具有压电效应的半导体材料称为压电半导体,它们既具有半导体特性同时也具有压电性。这些半导体材料包括硒(Se),碲(Te), II-VI族化合物如氧化锌(ZnO)、硒化镉(CdSe)、碲化镉(CdTe)、碲化锌(ZnTe), III-VI族化合物如砷化镓(GaAs)、碲化铟(InTe)、磷化镓(GaP),还有三元化合物如硫砷银(Ag_3AsS)、砷锗镉(CdGeAs),等等。利用它们的压电效应可以制作许多声电器件和电声器件,如晶体拾音器、晶体振荡器和扬声器等。

2.1.4. 压电高聚物

压电高聚物一般可分为压电塑料、压电橡胶、压电树脂、压电高聚物复合材料及压电薄膜等。人们发现较早的压电高聚物是聚偏氟乙烯(PVDF),这是一种薄膜型压电材料,具有柔韧性、热塑性和易于加工等特点。近几年来,奇数尼龙、亚乙烯基二氧 VDCN 共聚物及芳香族和脂肪族聚脲等的研究也表明它们呈现出了和 PVDF 类似强度的压电活性。

2.1.5. 压电复合材料

压电复合材料是由两相或多相材料复合而成的,通常见到的是由压电陶瓷和聚合物组成的两相复合材料。与纯粹的压电陶瓷材料或高聚物相比,压电复合材料具有低密度、低阻抗、低机械品质因数、高频带、高

的抗机械冲击性能和低的横向耦合振动等优点。目前已被广泛应用于无损检测、水声和医用声学等领域。

2.2. 压磁材料的分类

传统的压磁材料包括铁磁金属类材料及其合金和铁氧体材料等,不过由于它们的机电转换效率较低,其应用范围已经很小。近年来,以 Terfenol-D 为代表的稀土超磁致伸缩材料,由于其部分性能优于压电陶瓷(PZT)等材料,压磁材料的研究又受到了人们的重视[6]。

2.2.1. 铁磁金属类

包括 Fe、Co、Ni 及其合金和化合物。其在居里点以下,当加上外电场时,各磁畴内磁矩趋向于外磁场方向整齐排列,使材料具有较大的磁化强度。如 Ni、Co、Al-Fe、Ni-Fe、Fe-Co-V、Ni-Co 等铁磁金属及合金都是良好的磁致伸缩材料。

2.2.2. 铁氧体

铁氧体作为一种具有铁磁性的金属氧化物,是由铁与其他一种或多种金属组成的复合氧化物。用作压磁材料的铁氧体有: Ni-Zn 系铁氧体、Ni-Cu 系铁氧体、Mn-Zn 系铁氧体、Ni-Cu-Co 铁氧体和其他掺有 Cu、Co、Zn、Cd、Cr、Li 等不同成分组成的 Ni-Fe 基铁氧体磁致伸缩材料。工业上应用最多的是镍锌铁氧体 $\text{Ni-ZnFe}_2\text{O}_4$ 、镍铜铁氧体 $\text{Ni-CuFe}_2\text{O}_4$ 和镍镁铁氧体 $\text{Ni-MgFe}_2\text{O}_4$ 等。

2.2.3 稀土超磁致伸缩材料

以 Terfenol-D 为代表的稀土超磁致伸缩材料与压电材料(PZT)和传统的磁致伸缩材料相比,具有独特的性能。表 3 是 Terfenol-D 稀土超磁致伸缩材料、Ni 和 PZT 的物理性能比较。其中 λ_s 为饱和磁致伸缩系数, k_{33} 为机电耦合因数, v 为能量密度, n 为能量转换效率。

表 3. Terfenol-D 稀土超磁致伸缩材料、Ni 和 PZT 的物理性能比较

参数	Terfenol-D	Ni	PZT	参数	Terfenol-D	Ni	PZT
$\lambda_s/10^{-6}$	1500~2000	-40	100~450	$t/\mu\text{s}$	<1	-	10
k_{33}	0.7~0.75	0.3	0.48~0.72	E/GPa	25~35	210	50
$v/\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	14~25	0.03	0.65	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1720	4950	3130
$n/\%$	49~56	9	23~52	$T_c/^\circ\text{C}$	380	>500	130~400

3. 压电与压磁材料的性能改进

要提高声电转换材料的性能,通常采用两种方法:一

种是通过改善制备工艺及其条件对其进行改性,另一种是采用掺杂的方法对其进行改性。

3.1. 压电材料 (PZT) 的性能改进

当前为了进一步提高材料的压电活性,以满足不同功能器件的特殊需要,研究人员进行了多方面的探讨。

3.1.1. 压电陶瓷制备方法的改进

粉体合成:功能陶瓷对合成粉体的基本要求是:高纯、超细、粒度分布均匀、分散性好、化学计量准确以及掺杂均匀等。另外从烧结角度和压电陶瓷的微观结构以及最终性能来看,当合成的陶瓷粉体颗粒越细,分布越均匀,化学计量比越准确,就越有可能实现低温烧结。目前制备 PZT 粉体的方法主要有固相法和液相法。液相法制备的陶瓷粉体,具有合成温度低、粉体纯度高、粒径小等优点,是目前实验室和工业上广泛采用的制备纳米超细粉体的方法。液相法中主要包括共沉淀法、溶胶—凝胶法和水热法等。但溶胶—凝胶法和沉淀法对溶液的 pH 值的变化较为敏感,操作难度大;而水热法制备陶瓷粉体,工艺相对简单,粉体不需要高温处理,得到的粉体具有结晶好,团聚少,粒度分布窄、烧结活性高等优点,因此得到广泛的重视。同时,只有水热法可成功地在较低温度(160℃)下合成高纯、超细、均一的 PZT 陶瓷粉体。

压电陶瓷材料大都是铅基氧化物,高温下氧化铅的挥发,使得烧成温度和保温时间与材料的相组成和显微结构有着密切的关系,直接影响着材料的物理性能。因此低温烧结变成了重要的研究向。目前,实现低温烧结的方法有:添加助溶剂法、超细粉体法、热压烧结法、冷压烧结法等。研究表明[7],在利用水热法合成 PZT 陶瓷粉体时参加微量的 Fe^{2+} 、 Bi^{3+} 、 Cu^{2+} 等离子,在合成的粉体中再外加 BCW [$\text{Ba}(\text{CuW})\text{O}_3$], 可以在空气中 850℃完成烧结,比不加烧结助剂的粉体的烧结温度降低 250℃左右。清华大学李龙士等在陶瓷原料中加入由 $x\text{BO}_{1.5}\text{-yBiO}_{1.5}\text{-zCdO}$ 组成的玻璃料可使烧结温度得到较大程度的降低,且其压电性和介电性都得到了改善。Patel 等人对 PZT 材料进行热压烧结,烧结温度较普通烧结降低了 150-200℃,性能也有所提高[8]。

3.1.2. 压电陶瓷的掺杂改性

取代改性,即等价离子置换 Pb^{2+} 或 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 构成固溶体。置换 Pb^{2+} 的常用等价离子主要是碱土金属离子,如 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等。置换后的固溶体的某些性能会发生改变。例如,居里温度下降,机电耦合系数、介电系数和压电系数有一定程度的增加。置换 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 的等价离子主要是 Sn^{4+} 和 Hg^{4+} 。引入这些离子后,将使轴比(c/a)降低,居里温度下降,介电常数稍有增加,有时还能使介电常数和机电耦合系数的稳定性有一定的改善,但是它们的作用并不明

显。

添加物改性,即添加不等价离子化合物置换 Pb^{2+} 或 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 离子。掺杂的方式可分为三类:第一类是受主掺杂,即用低价正离子取代高价正离子,如 Li^+ 、 Fe^{3+} 取代 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 。为保持电中性,材料中将出现氧空位。受主掺杂能使介电常数降低、频率常量升高、机械品质因数增大、老化率增大。第二类是施主掺杂,即用高价正离子取代低价正离子,如 La^{3+} 取代 Pb^{2+} 、 Nb^{5+} 取代 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 。施主杂质使材料中出现铅空位,能使介电常数提高、机电耦合系数增大、机械品质因数降低、老化率降低。另外,根据具体要求,也可采用共掺杂的方式,例如同时以 La^{3+} 取代 Pb^{2+} 、以 Fe^{3+} 取代 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 。

3.2. 压磁材料的性能改进

不管是压电还是压磁材料,要对其进行性能改进,采用的方法就是上面所说的工艺改进或材料组分改进。

3.2.1. 稀土超磁致伸缩材料的制备方法的改进

稀土超磁致伸缩材料的制备技术主要采用定向凝固方法和粉末冶金方法。 $\text{Tb}_2\text{Dy}_2\text{Fe}$ 的 $\lambda_{111} \gg \lambda_{100}$, 人们一直希望得到具有<111>方向择优取向的样品。当生长速度 V 小于 6 mm/min 时,晶体为<110>轴向择优取向,当 $8 < V < 12$ mm/min 时,为<112>择优取向,当 $V > 15$ mm/min 时,发生从<112>轴向向<110>轴向的转变,但是不能得到<111>方向取向的样品。文献[9]中报道,在磁场和微重力条件下,生长出了<111>方向生长的 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$ 材料,最大应变可达 2000×10^{-6} 。文献[10]中北京有色金属研究总院稀土材料国家工程研究中心开发的“一步法”新工艺,将熔炼一定向凝固—热处理等工艺在一台设备上完成可成功生产出直径 70mm,长 250mm 的大直径、高性能的稀土超磁致伸缩棒材。武汉理工大学首创的以提拉法无污染磁悬浮冷坩埚技术为核心的加工技术生产出来的 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$,其磁致伸缩系数为 $2000 \times 10^{-6} \sim 2400 \times 10^{-6}$ 。

3.2.2. 稀土超磁致伸缩材料的掺杂改性

自从发现高性能 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$ 磁致伸缩材料后,人们利用各种元素来分别取代 Tb、Dy、Fe 这三种元素,期望能提高材料的性能并且降低材料的成本。用 Al、Ni、V、Co、Mn 等取代 Tb-Dy-Fe 中的 Fe 原子进行大量的研究,发现 $\text{Tb}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}(\text{Fe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1})_2$ 比 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ 的各向异性小,本身的磁致伸缩应变也较大,多晶材料在 14 kOe 磁场条件下的应变可达 1320×10^{-6} ,但是 Mn 替代 Fe 会降低 Tb 和 Dy 之间各向异性的平衡温度。Al 替代 Fe 也可以降低

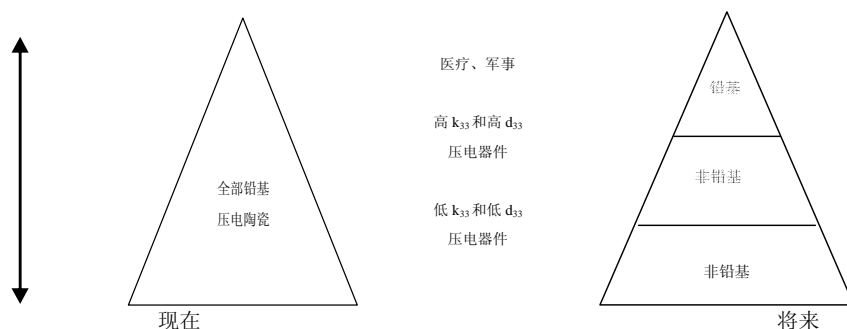


图 1. 铅基和非铅基压电陶瓷材料与器件的应用领域

Tb-Dy-Fe 的各向异性, V 替代 Fe 可以有效地提高合金的磁致伸缩性能, 且居里温度可以提高到 426 °C。对于 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2B_x$ 合金, B 的加入可以抑制恶化磁致伸缩性能的富铁相的形成, 当 $x = 0.2$ 时, 几乎不出现富铁相。也有人在研究用 Pr、Nd、Ho 等轻稀土替代 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 中的 Tb 或 Dy。他们发现对于 $Tb_{0.3}Dy_{0.6}Pr_{0.1}(Fe_{0.95}Mn_{0.05})_x$ 合金当 $x = 1.85$ 时, 在 2kOe 的磁化场条件下, 磁致伸缩应变可达 1710×10^{-6} 。

4. 声电转换材料的应用

已投入市场的压电产品主要有压电滤波器、压电变压器、压电换能器、压电超声马达与驱动器、压电点火器等。图 1 给出了铅基和非铅基压电陶瓷材料与器件的应用领域[11]。由表 3 可知 Terfenol-D 材料的磁弹、声学、力学性能呈现出明显的优势, 因此将其制成换能器具有位移大、功率高、控制精密、响应快、频带宽、能量供应简单及可靠等优点。世界著名的美国 Etrema 公司销售经理 Todd Kreamer 曾经说过“材料的应用行业及应用产品几乎是无限的”。用稀土超磁致伸缩材料制作的水声换能器和电声换能器已成功用于海军装备、油井探测、噪声与振动控制系统、海洋勘探与水下通讯等领域[12]。

5. 结论

目前声电转换材料的研究是一门多学科互相交叉的综合性应用基础研究, 是介于基础科学与应用科学之间的一门技术科学, 与其它相关学科联系密切, 且相互渗透、相互促进。作者认为压电和压磁声电转换材料将长期共存, 压电材料取代压磁材料的可能性不大, 而且在实际应用中相互弥补各自的不足, 各有独到的应用。在压电和压磁声电转换材料中改性研制兼有多种性能如压阻、压敏、热释电、光电和磁光等多功能材料, 以适应未来相关电子器件的智能化、集成化和小型化的多功能器件的需要, 将成为材料工程

领域内的一个重要的发展趋势。

致谢

此文工作得到了国家自然科学基金(No. 10374064)、陕西省自然科学基金(No. 2006A03)、陕西省教育厅计划科研项目(No. 06JK322)的资助。

参考文献

1. 李全禄, 压电与压磁声电转换材料的研究及应用, 压电与声光 **17**(2), 43 (1995).
2. 张福学等, 压电铁电应用, 国防工业出版社, 北京 (1987).
3. B. Jaffe, W. R. Cook Jr., H. Jaffe, 压电陶瓷, 科学出版社, 北京 (1971).
4. 尹奇异等, 无铅压电陶瓷及其应用研究, 金属功能材料 **11**(6), 40 (2004).
5. T. Takenaka, Current status and prospects of lead-free piezoelectric ceramics, *J. Euro. Ceramic Soc.* **25**(12), 2693 (2005).
6. 余声明, 智能磁性材料及其应用, 磁性材料及器件 **35**(5), 1 (2004).
7. 周桃生等, 低温烧结改性 $BaTiO_3$ 压电陶瓷材料的研究, 压电与声光 **23**(2), 106 (2001).
8. 紫京鹤, 李龙士等, 低温烧结 PZT 压电陶瓷的研究, 清华大学学报(自然科学版) **28**(3), 1 (1988).
9. H. Minaga, et al., Synthesis of $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$ magnetostrictive alloy by unidirectional solidification in magnetic field and microgravity, *J. Magn. Magn. Mater.* **248**(2), 230 (2002).
10. 李扩社, “一步法”制备高性能稀土超磁致伸缩材料的研究, 北京有色金属研究总院学位论文, 北京 (2004).
11. 肖定全, 关于无铅压电陶瓷及其应用的几个问题, 电子元件与材料 **23**(11), 62 (2004).
12. 李素珍, 稀土超磁致伸缩材料与器件发展现状, 稀土信息 (4), 28 (2005).