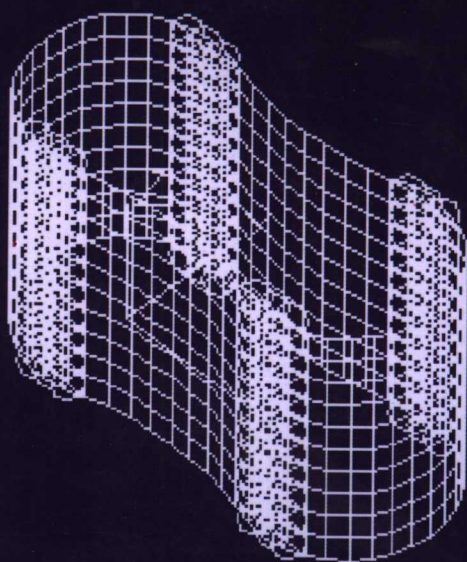


稀土超磁致伸缩换能器

◎ 贺西平 著



2



科学出版社

www.sciencep.com

TN712

1

稀土超磁致伸缩换能器

贺西平 著

陕西师范大学出版基金资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本介绍稀土超磁致伸缩大功率换能器的设计理论和设计方法的专著。全书共分9章。第1章是绪论,主要介绍了常用的换能器材料、现代弯张换能器的设计方法及各型弯张换能器的特点;第2章分析了稀土超磁致伸缩材料的工作特性,导出了使稀土棒高效工作时沿棒轴径向均匀切割最小份数的计算公式和等效电路;第3~9章,论述了稀土超磁致伸缩大功率换能器的设计理论,并对研制出的VII和Tonpilz型换能器的性能作了测试和分析。书中先后用到了ALGOR、SYSNOISE和ANSYS这三种有限元计算软件,在相关部分都相应作了简单介绍,并在第9章中重点介绍了ANSYS在设计换能器中的应用。

本书可供从事声换能器研究工作的科技工作者、专业技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土超磁致伸缩换能器/贺西平著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-017413-5

I. 稀… II. 贺… III. 磁致伸缩换能器 IV. TN712

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第061744号

责任编辑:胡 凯/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年12月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年12月第一次印刷 印张:8 3/4

印数:1—2 500 字数:157 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

近几十年来,随着科学技术的高速发展,人类对覆盖地球总面积 71% 的海洋的认识逐渐深化,海洋因其经济上的无穷潜力和战略上的重要地位,越来越被人们所重视。

影片《泰坦尼克号》吸引全世界观众的原因之一就是扑朔迷离的沉船原因、神秘的海底世界……美国加州海洋研究中心的罗伯逊说,深海发现给人类带来的利益要比那些耗资庞大的太空计划实惠得多。

可以预言,21 世纪将是海洋的世纪。

海水是一种导电介质,因而电磁波在海水中的传播受到严重限制。光波本质上属于高频率的电磁波,被海水吸收损失的能量更为严重。因此,这两者在海水中都不能有效地传递信息。在海水中,声波的传播性能最佳。正因为这样,声呐技术不仅在反潜作战中享有重要的地位,而且要深入地认识海洋、开发海洋也必须借助于声呐技术。水声换能器(或基阵)是声呐的一个重要组成部分。

现代声呐技术对发射水声换能器提出的要求是:低频、大功率、高效率,并能在深海中工作等。根据水声物理的研究,人们发现用低频声波来传递信号,对于远距离目标和噪声源的定位和检测有着明显的优越性:因为低频声波在海水中传播时,被海水吸收的数值较高频声波要低,故衰减小,能比高频声波传播更远的距离,这对增大探测距离是有益的;且各型舰艇的噪声级,其低频范围内的量级远比高频范围内要高,这对用接收换能器进行检测是有利的。为了防止声波在海水中过早地产生空化效应,将换能器或基阵置于大深度上,还能使换能器发射出更大的功率。在较大的水深位置工作时,还能更有效地利用“声道效应”,以达到增大探测距离的目的。

磁致伸缩换能器是最早被采用的声学换能器类型之一,后来压电材料的发现,尤其是 PZT 材料的广泛应用,磁致伸缩材料几乎被取代。因为功率要求不大时,压电换能器具有结构工艺简单、性能稳定及成本低廉等优点。

随着现代声呐技术的发展和声学应用范围的不断扩大,研究新型换能器材料及新型水声换能器或基阵显得尤为重要,这也已经受到专家学者们的高度重视。20 世纪 70 年代初期发现的稀土超磁致伸缩材料,由于其卓越的性能以及在远程声呐和其他低频水声系统中的适用性,引起了高技术领域内的广泛重视。现在,稀土超磁致换能器研究已经成为换能器领域内的热点研究方向之一。

本书研究的是低频大功率稀土超磁致换能器的设计理论和方法。书中具体研究了 Tonpilz 换能器、Ⅶ型弯张换能器,在第 9 章中给出了一个超声频稀土超磁致换能器的设计计算实例。

全书共分 9 章:

第 1 章:介绍了各种常用换能器材料,尤其是稀土超磁致伸缩材料的性能,论述了发展中的现代弯张换能器的设计方法,简单分析了各型弯张换能器的特点,并说明了Ⅶ型大功率弯张换能器很适合于深水处工作。

第 2 章:分析了 Terfenol 棒的工作特性。确定有源材料的工作点为使稀土棒能高效工作,探讨并导出了在给定的工作频率下沿棒轴向均匀切割最小份数的计算公式;为能定性描述组成 Terfenol 棒以外的外部磁路材料对等效电路(或换能器)的影响,并方便换能器的设计,导出了 Terfenol 棒工作的等效电路。

第 3 章:对传统的等效电路、传输矩阵、有限元的设计方法(包括考虑预应力螺栓)从理论上做出归纳、总结,并用具体的设计结果,对这几种设计方法作比较分析,发展并形成了一套计算机辅助 Tonpilz 换能器设计的实用软件。

第 4 章:分析了磁致伸缩换能器各组件中有限单元的能量关系,导出磁致伸缩换能器有限元设计的动力学方程及计算换能器性能参数的表达式。

第 5 章:对 Tonpilz 换能器进行了设计,并利用 SUPER ALGOR 有限元软件计算了这种换能器的振动模态。

第 6 章:建立了换能器流固耦合有限元动力学方程,以及辐射声场的计算理论。

第 7 章:利用 SUPER ALGOR 有限元软件计算Ⅶ型弯张换能器的振动模态以及换能器的尺寸与呼吸模态频率之间的变化关系;计算了弯张壳体装配位移与作用在壳体上的拉伸应力之间的关系曲线;结合 Terfenol 棒材料的工作特性,从理论上计算了弯张换能器在不同水深处,与其对应的工作的偏磁场之间的关系;利用 SYSNOISE 大型声学工作站计算了弯张换能器的辐射声场。

第 8 章:对研制出的Ⅶ型换能器,进行了全面的声学性能方面的实验测试研究。

第 9 章:简单介绍了 ANSYS 有限元软件用于设计、分析换能器的压电耦合功能,并在压电-压磁比拟法的基础上,用 ANSYS 软件对超声频稀土换能器的设计作了探讨和研究。

在从事本书科研的过程中,在国内最先容易接触到的有限元软件是 ALGOR,接下来是 SYSNOISE,最后为 ANSYS。作者先后都用到了这 3 种计算机软件。因此,书中对与这 3 种软件结合的研究内容都作了简要的介绍。

借此机会,对西北工业大学航海学院的孙进才教授、李斌教授、张允孟教授,还有给予作者极大帮助的中国科学院声学研究所的莫喜平研究员,表示最诚挚的谢意!

由于水平有限,书中缺点与错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

贺西平

2005年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 常用的换能器材料	1
1.1.1 压电材料	1
1.1.2 压电高聚物	3
1.1.3 复合材料	3
1.1.4 磁致伸缩材料	4
1.1.5 金属玻璃材料	4
§ 1.2 稀土超磁致伸缩材料及其应用	5
1.2.1 稀土超磁致伸缩材料	5
1.2.2 在水声学上的应用	7
1.2.3 在微控制领域中的应用	12
1.2.4 电声学上的应用	13
1.2.5 在声发射技术领域的应用	14
1.2.6 大功率超声频换能器	14
§ 1.3 弯张换能器的发展简史及其特点	15
1.3.1 弯张换能器的早中期发展	15
1.3.2 各型弯张换能器的特点	16
1.3.3 IV型和Ⅶ型弯张换能器的特点比较	17
§ 1.4 发展中的换能器设计方法	18
1.4.1 解析解法	18
1.4.2 波动力学法和等效电路法	18
1.4.3 有限元法	19
1.4.4 边界元法	21
1.4.5 有限元和边界元法对比	22
第 2 章 稀土超磁致伸缩棒的工作特性	24
§ 2.1 稀土超磁致伸缩棒的特性	24
2.1.1 不同压力下稀土棒的磁致伸缩特性	24
2.1.2 不同压力下的 d_{33} 与偏磁场之间的关系	26
2.1.3 材料的杨氏模量	27
2.1.4 材料的其他参数	27

§ 2.2 稀土超磁致伸缩棒的高效应用方法	28
2.2.1 计算方法	29
2.2.2 算例	30
§ 2.3 稀土超磁致伸缩棒的等效电路	31
2.3.1 Terfenol 棒的等效电路	31
2.3.2 算例	34
第 3 章 Tonpilz 换能器的设计理论	36
§ 3.1 集中参数设计法	36
§ 3.2 传输矩阵设计法	39
3.2.1 基本原理	39
3.2.2 考虑预应力螺栓的影响	41
3.2.3 程序实现	43
§ 3.3 谐振频率附近处的等效电路	44
第 4 章 稀土超磁致伸缩换能器的有限元设计理论	46
§ 4.1 稀土超磁致伸缩棒的有限元模型及设计理论	47
4.1.1 单元插值函数	48
4.1.2 应变	49
4.1.3 单元中的能量关系	49
4.1.4 动态方程	52
§ 4.2 壳体的有限元模型	53
4.2.1 平面矩形单元的刚度矩阵	54
4.2.2 平板矩形弯曲单元的刚度矩阵	55
4.2.3 矩形薄壳单元的刚度矩阵	56
§ 4.3 弯张换能器中块体的有限元模型	58
§ 4.4 弯张换能器的性能参数	59
4.4.1 共振频率	60
4.4.2 反共振频率	60
4.4.3 电阻抗	61
4.4.4 有效机电耦合系数 k_e	61
第 5 章 Tonpilz 换能器的设计及实验研究	63
§ 5.1 Tonpilz 换能器的设计	63
§ 5.2 Tonpilz 换能器中 Terfenol 棒的分割	63
§ 5.3 Tonpilz 换能器偏磁场及预应力的施加	64
§ 5.4 有限元法分析 Tonpilz 换能器的振动模态	65
§ 5.5 Tonpilz 换能器性能测试	65

5.5.1 换能器的性能测试	65
5.5.2 设计结果与测试误差分析	67
第6章 换能器的流固耦合方程及其辐射声场的计算	68
§ 6.1 流固耦合有限元动力学方程的建立	68
6.1.1 亥姆霍兹积分方程的应用	69
6.1.2 换能器在水中振动方程的建立	70
§ 6.2 辐射声场指向性的计算	71
第7章 弯张换能器的设计理论	74
§ 7.1 ALGOR 有限元软件简介	74
§ 7.2 弯张壳体的振动模态	75
7.2.1 呼吸模态	75
7.2.2 呼吸模态与弯张壳体的几何尺寸之间的变化关系	76
§ 7.3 换能器的振动模态	76
7.3.1 呼吸模态	77
7.3.2 弯张换能器尺寸与同相振动谐振频率的关系	78
§ 7.4 换能器装配预应力的计算	80
§ 7.5 换能器入水深度与偏磁场之间的关系	82
7.5.1 入水深度与变化的预应力之间的关系	82
7.5.2 入水深度与偏磁场的关系	83
§ 7.6 换能器的静态电感	84
§ 7.7 SYSNOISE 有限元软件简介	85
7.7.1 SYSNOISE 的功能	85
7.7.2 SYSNOISE 的分析方法	85
7.7.3 SYSNOISE 一般分析步骤	86
7.7.4 SYSNOISE 的后处理	86
§ 7.8 换能器的水下振动及其辐射特性	87
7.8.1 呼吸模态频率	87
7.8.2 换能器声辐射特性	87
§ 7.9 换能器的功率极限	88
7.9.1 电功率极限	89
7.9.2 机械功率极限	90
7.9.3 热功率极限	90
第8章 弯张换能器的实验研究	92
§ 8.1 弯张壳体的弹性测试	92
8.1.1 测试装置	92

8.1.2	测试结果	93
8.1.3	实验与理论计算的比较	94
8.1.4	误差分析	94
§ 8.2	弯张壳体振动模态测试	95
8.2.1	模态分析理论基础	95
8.2.2	实验装置简介	96
8.2.3	实验结果	97
§ 8.3	弯张换能器的振动模态测试	98
8.3.1	未装夹上下盖板时	98
8.3.2	装夹上下盖板后	98
§ 8.4	谐振频率附近处的性能测试结果	100
8.4.1	换能器谐振频率、阻抗特性	100
8.4.2	换能器的发射特性、机械品质因数 Q_m 、有效耦合系数 k_e	100
8.4.3	换能器发射声源级随输入电流的关系	103
8.4.4	换能器的电声效率与输入电功率的关系	104
8.4.5	结果分析	104
§ 8.5	换能器声辐射特性	105
§ 8.6	稀土超磁致伸缩换能器的测量系统介绍	106
第9章	用 ANSYS 软件设计稀土换能器	108
§ 9.1	ANSYS 有限元软件简介	108
9.1.1	软件简介	108
9.1.2	ANSYS 软件应用于声学及换能器领域解决的具体问题	109
§ 9.2	ANSYS 方法及工作过程简介	110
9.2.1	换能器机电耦合问题的理论基础	110
9.2.2	ANSYS 有限元软件用于换能器分析的基本理论	112
9.2.3	ANSYS 处理器	114
9.2.4	ANSYS 软件一般分析步骤	114
§ 9.3	压磁-压电比拟法	116
§ 9.4	稀土超声频圆环型换能器的设计	119
9.4.1	稀土换能器结构	119
9.4.2	理论计算及实验测试	119
9.4.3	与同频率压电陶瓷换能器尺寸比较	122
参考文献		124
附录		128

第 1 章 绪 论

§ 1.1 常用的换能器材料

广义地说,换能器就是进行能量转换的器件,是将一种形式的能量转换成另一种形式能量的器件。声学上所说的换能器,一般都是指电声换能器,即进行电能和声能相互转换的换能器。

通常换能器都有一个电的储能元件和一个机械振动系统。这个电的储能元件中的电场或磁场的变化,借助于某种物理效应实现电机或机电转换。按其物理效应的不同,又可分为两大类:一类是由电-力效应形成换能的器件,称为电场性换能器,如电容式、压电式、压电陶瓷式、高分子材料、铁电反铁电相变式均属此类换能器;另一类是由磁-力效应形成换能的器件,称为磁场性换能器,如电动式、电磁式、磁致伸缩式、超导电式、铁磁流体等均属此类换能器。

当然,要得到声波,除了上述的物理转换机制以外,还可以利用电子束、激光、涡流、微波等来激发出声波。这方面典型的应用是用于无损检测中的激光超声技术。

材料研究是换能器研究的基础,换能器的工作机制取决于材料的工作特性。换能材料的研究,构成了换能器研究很重要的一个方面。为了对本书所采用的新型材料有较深的认识和全面的理解,这里先简单评价一下常用的几种换能器材料。

换能器材料主要分为两大类:一类是压电材料;另一类是磁致伸缩材料。常见的材料有:压电材料、压电高聚物、复合材料、金属玻璃材料、磁致伸缩材料等。

1.1.1 压电材料

1880 年居里(Curie)兄弟发现了石英、电气石等具有压电效应的材料,但其真正应用是到电子管放大器发明以后才开始的。1917 年,第一次世界大战时,法国物理学家朗之万(Langevin)为了制造探测潜艇用的水声器件,利用石英压电晶体发明夹心式换能器,这是换能器在水声领域中的首次应用。1946 年,第二次世界大战时,对钛酸钡压电陶瓷进行了研究,在原来无一定极化方向的电畴构成的陶瓷上,施加强直流场,使整个陶瓷被极化而具有压电性。这就是压电陶瓷从单晶发展到多晶新领域的开端。

压电材料主要有两类:一类是真正的单晶体,如石英、电气石、酒石酸钾钠(罗谢耳盐)、磷酸二氢铵(ADP)、磷酸二氢钾(EDT)、硫酸锂等,其压电性是由于晶

体结构的不对称性而产生的;另一类是极化的多晶陶瓷,即压电陶瓷,如钛酸钡(BT)、锆钛酸铅(PZT)、铌镁锆钛酸铅等,其压电性质是人为产生的。此外,反铁电材料也属于多晶陶瓷材料。

多晶陶瓷的发现和应用已有 50 多年的历史,其发展速度是很迅速的。20 世纪 50 年代美国研制成功了锆钛酸铅,60 年代日本研制成功了铌镁酸铅陶瓷系,代号为 PCM,随后又相继研制成功了铌钴酸铅陶瓷,代号为 SPM 及铌铜酸铅陶瓷系等。

压电陶瓷材料的优点是:

(1) 其机电耦合系数,尤其是 PZT 的机电耦合系数高于一般的磁致伸缩材料,稀土超磁致伸缩材料除外。这就使得用该材料制成的换能器有较高的发射效率和较高的灵敏度,并且能在宽频带上工作。

(2) 特别是 PZT 具有较高的机电能量密度,可发射较大的功率。

(3) 除了稀土超磁致伸缩材料外,其变形比一般的磁致伸缩材料大。

(4) 可以制成所需要的任意形状,例如,平板、圆管、圆球、镶嵌结构、长条等,且可任意选取极化轴方向。

(5) 改变陶瓷的组成和工艺,能较易得到不同特性的陶瓷,以便用于不同场合。

压电陶瓷材料的缺点是:

(1) 抗张强度低于磁致伸缩材料。这不仅有碍于高功率发射,而且制造过程中易碎,不能制成大功率的换能器。可以通过施加一适当的预应力来控制,但通常预应力会改变陶瓷特性。

(2) 性能会随组合、成型或者是烧结过程中的微小变化而变化,使之性能不稳定,这在制造过程中又是难以控制的。

(3) 声速较高,不利于制成低频大功率换能器。

(4) 密度大,特性阻抗高,不利于与低特性阻抗的工作介质相匹配。

(5) 导热系数低,必须增加散热措施。

钛酸钡系陶瓷的居里点较低,约为 120°C ,同时还存在 -80°C 和 10°C 两个相变点,这使得机电常数在常用温度范围内不够稳定,使用受到限制。该系陶瓷的压电性能较弱,在强电场下电损耗也较大,这使大功率发射换能器的使用受到极大限制,尽管有人曾试图对这两方面性能进行改善,但收效甚微。

基于上述的钛酸钡系陶瓷的缺点,美国于 20 世纪 50 年代研制成功了锆钛酸铅($\text{PbTiO}_3\text{-PbZnO}_3$)固溶体陶瓷,即 PZT。后来又发展了一系列的 PZT 陶瓷,如 PZT-2、PZT-4、PZT-5A、PZT-5H、PZT-6A、PZT-6B、PZT-7A、PZT-8 等。由于它们具有较优异的机电性能,因而在水声换能器和大功率超声换能器中得到广泛应用。

PZT 材料的居里点较高,约为 $300\sim 360^{\circ}\text{C}$,又无其他相变点,因而温度稳定性好于钛酸钡系陶瓷,压电性能比钛酸钡系陶瓷强。若改变基方配比,离子取代或掺以微量杂质,PZT 性能可发生变化,以用于特殊场合。PZT 陶瓷的压电耦合系数高,PZT-4、PZT-8 陶瓷的平面耦合系数达 50% 以上,制成的换能器的耦合系数也超过 50%。耦合系数高,意味着作为发射器时它的转换效率高,作为接收器时,它的灵敏度高,且能在宽频带上工作。

PZT-4、PZT-8 适合作发射换能器材料,PZT-5 适合作接收换能器材料,PZT-7 适合作各种机械延迟线等。

压电晶体和压电陶瓷的频率可以从很低的值到 10^9 Hz 以上。因而,它可用作水声换能器、功率超声换能器、检测换能器及各种高频超声器件。

另一类重要的压电材料是那些可以通过不同的沉积技术,在各种基体上沉积成薄膜的材料。在这些材料中最突出的是氧化锌(ZnO)、硫化镉(CdS)和氮化铝(AlN)。

1.1.2 压电高聚物

1969 年,日本 H. Kawai 发现了聚偏二氟乙烯(简称 PVDF 或 PVF_2)经极化处理后具有较强的压电性,所产生的内电场值可达 10^6 V/cm 。 PVF_2 是一种柔软的塑性薄膜,这种压电体的特点是:可制成大面积任意形状的薄膜,密度小于 2 g/cm^3 ,其声阻抗与水相近;压电常数 g_{33} 较高(灵敏度高),介电系数和耦合系数较低;压电常数 d_{33} 低,机械损耗大,谐振峰不明显;制作的成本低,但极化较困难。

因而, PVF_2 适合于作水听器、滤波器、延迟线换能器,把薄膜直接贴在船壳上,可解决换能器的笨重问题,不宜用作发射换能器材料。

另外, PVF_2 还可以制成永久极化的驻极体。其特点是:结构简单(因驻极体本身已带电,所以这种传声器无需再加极化电源);电声性能好;抗振能力强;音质较好,频率响应宽且平坦,易小型化;价格低。

1.1.3 复合材料

压电陶瓷材料 PZT,由于其具有较大的压电系数和机电耦合系数,被广泛用作换能器的材料。但是,用 PZT 材料制作水声和医学超声换能器,其致命弱点是密度大,特性阻抗很高,很难与水或是人体的特性组织相匹配。这样就不能充分发挥这种材料的优点。此外,由于 PZT 材料的 d_h 很小,介电系数 ϵ 又很大,因而 $g_h(=d_h/\epsilon)$ 很小,使得用 PZT 材料制作的水听器灵敏度很低。为了克服以上缺点,1978 年美国宾州大学的 R. E. Newnham 等人提出了用压电 PZT 材料与聚合物复合材料复合的构想,并对复合后的微观结构进行了研究。随后,压电复合材料的工艺、特性及振动模式等的研究得到了迅速的发展,取得了显著的成果。

压电 PZT/聚合物两相复合材料,由于 PZT 相及聚合物相自身连通方式的不同,其微观结构共有十种连通方式,其中研究最多的,也是在实际中最有用的只有三种,即 0-3 型、1-3 型和 3-3 型。第一个数字代表压电相的连通维数,第二个数字代表聚合物相的连通维数。两相复合材料的微观结构不同,其压电特性、机电特性也不同。0-3 型压电材料,由于具有柔软抗冲击、 d_h 及 g_h 大等特性,是较理想的水听器材料;3-3 型材料,由于其压电性能好、密度低,是较好的水声换能器材料;1-3 型材料不但压电性能好,特性阻抗低,而且具有较高的机电耦合系数,容易做成高频、高灵敏度、宽带聚焦、检测及医学超声换能器。

与纯压电陶瓷相比,复合材料可能制成尺寸更大的元件,它将具有较大的构形灵活性,不易破碎,研制它的目的也在于能够得到这些改善的物理性能,并保持或改善压电陶瓷的机电参数。

1.1.4 磁致伸缩材料

自 20 世纪 20 年代起,陆续发现了各种具有磁致伸缩效应的材料。依据具有磁致伸缩效应材料特性的不同,可分为两类材料。一类是金属磁致伸缩材料,如镍、铁钴合金、铝铁合金、镍铁合金、镍钴合金等。这类材料的特点是具有高机械强度、高居里点及工作性能稳定。声呐设备中常采用这种材料制成的换能器。因这类材料的电阻率低,涡流大,故在叠片前需经过退火处理,以便每一叠片表面所形成的氧化薄膜可以作为绝缘层。另一类是铁氧体磁致伸缩材料,如镍锌铁氧体、镍铜钴铁氧体、镍钴铁氧体。这种材料最大优点是涡流和磁致损耗小,灵敏度高,可用来做水听器和工作频率要求较高的水声换能器。

磁致伸缩材料的磁致伸缩系数、磁导率、机电耦合系数均与极化场的大小有关,而其磁致伸缩系数一般在 $30 \sim 60 \text{ ppm}^{\text{①}}$ 。

以上这些可称为传统的磁致伸缩材料。一般情况下,由于效率低、笨重,以及要求偏磁场而带来的不方便,磁致伸缩换能器大多已被压电换能器所取代。不过,这些换能器仍然有一些特色是压电换能器不能与之相比的,如它的电输入阻抗低、强度高不易损坏。因此,大家对这些磁致伸缩换能器的兴趣始终不减。

近年来,又研究了几种新的磁性换能材料——稀土超磁致伸缩材料、金属玻璃磁致伸缩材料及铁磁流体。本书即是采用稀土超磁致伸缩材料研究低频、大功率水声换能器。

1.1.5 金属玻璃材料

金属玻璃是一种过渡金属(如铁或镍)与一种非金属(如硼、硅、磷或碳)的玻璃

^① $1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6}$ 。

态合金,是从熔化状态经快速冷却得到的。由于冷却速度快但仍保持着金属的延展性和柔韧性,故称为金属玻璃。金属玻璃还具有表面硬度高、抗张强度大、耐腐蚀、易于磁化的特点,其电阻率也比镍大。它的有效机电耦合系数比最好的稀土铁合金还大。遗憾的是,金属玻璃的磁致伸缩系数与镍类似,仅到 40~50ppm 就饱和了,不过它相应的应变饱和点的磁场强度很低,只有 1.89~3.14Oe,而镍为 126Oe,稀土铁合金就更高了。这些限制了金属玻璃的应用,它只适合于水听器或高频换能器等小位移场合。

§ 1.2 稀土超磁致伸缩材料及其应用

1.2.1 稀土超磁致伸缩材料

20 世纪 70 年代初期,美国水面武器中心的 Clark 博士首先发现 TbFe_2 , DyFe_2 等二元稀土铁化合物在室温下有很大的磁致伸缩系数,80 年代初期以后进一步发展成了三元稀土铁化合物,即 RFe_2 类合金,其中 R 是 Tb、Dy、Sm 和 Ho 等二元或更多种的稀土元素,典型材料为 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$,它有较低的各向异性,并可以获得更大的磁致伸缩系数,被称为超磁致伸缩(giant magnetostriction)材料,也称稀土超磁致伸缩材料或稀土铁合金磁致伸缩材料。式中的 x 表示 Tb/Dy 之比, y 代表 R/Fe 之比, x 一般为 0.27~0.35, y 为 0.1~0.05。这三元稀土合金材料是由美国 Ames 实验室制成的,现在美国 Edge Technologies 公司生产,商品牌号为 Terfenol-D[式中 Ter 表示元素铽(Terbium),fe 表示元素铁,nol 代表该材料的开发实验室的名称:Naval Ordnance Laboratory,最后的 D 代表元素镝(Dysprosium),表示加入 Dy 后磁晶各向异性变小],成分为 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.93}$,并已实现商品化生产。

继美国人的研究之后,瑞典、日本、英国和中国等国也进行了这方面的研究工作。现已全面研究了材料的磁学、电学、力学、热学以及它们之间的耦合特性。三元稀土铁化合物 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$ 中的 x 、 y 可有一定范围内的变化。当添加一定数量的 Mn、Al、B 等元素,有可能在常温低磁场下,不同程度地提高磁致伸缩系数和机电耦合系数,降低材料声速。因此,各国所研究的成分可能有所不同^[1]。F. Claeysen、Mark B. Moffett、A. E. Clark、D. Boucher^[2~6] 对这一类材料及其换能器进行了一系列研究,他们的研究工作主要包括:计算测量材料的各向异性电弹参数,不同预应力和不同偏磁场下材料的磁致伸缩系数,不同配比合金的材料性能比较及各种形式换能器的研究设计等。

我国稀土资源丰富,在世界上储量第一。开展这方面的研究虽然较晚,但进展较为迅速。稀土超磁致伸缩材料的制备技术主要采用定向凝固法和粉末冶金法。

定向凝固法通过增加母合金中稀土元素含量,弥补制作过程中的稀土烧损,同时控制温度梯度和热流方向,采用适当的退火工艺,改进组织结构,并且不断改进制作设备。2003年北京有色金属研究总院稀土材料国家工程研究中心自行研究开发了“一步法”新工艺,将熔炼一定向凝固—热处理等工序在一台设备上连续完成,可用来制备大直径、高性能、低成本的稀土超磁致伸缩材料,且易于批量生产。用这种工艺研制的稀土超磁致伸缩材料成本仅为国际售价的18%,现已成功生产出直径70mm,长250mm的 TbDyFe_2 超磁致伸缩棒材,主要技术经济指标均达到国际先进水平。武汉理工大学首创了以提拉法无污染磁悬浮冷坩埚技术为核心的整套单晶制备和加工新技术,生产的 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$ 单晶,超磁致伸缩系数为 $2000 \times 10^{-6} \sim 2400 \times 10^{-6}$ 。北京科技大学生产的稀土超磁致伸缩材料的成分为 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}(\text{Fe}, \text{M})_{1.95}$ (式中M代表Mn、Al、B)。粉末冶金法也在不断改进,国外黏结磁致伸缩材料的磁性能已接近定向凝固棒材, Sandual等学者制作的黏结磁致伸缩材料的磁致伸缩效应可与Terfenol-D相当。北京有色金属研究总院稀土材料国家工程研究中心也在进行这方面的研究工作,现成功制备出 $\phi 40\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的Terfenol-D黏结磁致伸缩棒材。2004年经全国稀土标准技术委员会审定,由甘肃天星稀土功能材料有限公司制定的“钕镝铁大磁致伸缩材料”标准为国家标准。该种材料国家标准的建立,对保护国家知识产权,在国际上占据制造该种材料的技术制高点有重要意义。

各国研制的材料成分可能略有些差异,但都具有共同点。以Terfenol-D为例,与传统有源材料的几个典型性能参数相比较而言,具有以下特点:

Terfenol-D的应变值很大,比镍大40~50倍,比PZT压电陶瓷大5~8倍,故在低频下可使得水声换能器获得很高的体积速度和声源级;能量密度高,比镍大400~500倍,比PZT压电陶瓷大10~14倍;耦合系数大,有利于换能器的宽带高效率工作;声速低,比镍小3倍,约为压电陶瓷的1/2,有利于换能器小型化设计;居里点温度高。对大功率而言,即使是瞬间过热都将致PZT压电陶瓷的永久性极化完全消失,而Terfenol-D工作到居里温度以上只会使其磁致伸缩特性暂时消失,冷却到居里点温度以下时,其磁致伸缩特性又可完全恢复,故无过热失效问题。几张常见材料性能比较见表1.1所示。用稀土超磁致伸缩材料制成的换能器,很适合于远程声呐和其他低频水声系统中应用。以上特性,也引起了高技术领域的广泛重视。

自从20世纪70年代发明稀土超磁致伸缩材料以来,稀土超磁致伸缩材料制造工艺不断完善,性能不断提高,成本不断降低,应用领域不断扩大,市场迅速发展,在军民两用高技术领域显示出了广阔的应用前景,是21世纪军工与高新技术的重要战略材料。稀土功能材料已发展成为一个新兴的科学技术领域,是目前功能材料研究的热点,稀土超磁致伸缩材料的生产和应用被普遍认为将是新的经济增长点。近30年来,随着稀土超磁致伸缩材料应用范围逐渐扩大,产量不断增加。

表 1.1 几种常见材料性能比较

性能参数	Terfenol-D	纯镍	压电陶瓷	
	Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe _{1.93}	>98%Ni	PZT-4	PZT-8
杨氏模量/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	2.65×10^{-10}	20.60×10^{-10}	11.30×10^{-10}	11×10^{-10}
声速/ ms^{-1}	1690	4900	4150	4500
居里点/ $^{\circ}\text{C}$	387	354	300	300
伸缩系数/ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	1500~2000	-40	400	250
机电耦合系数 k_{33}	0.72	0.16~0.25	0.68	0.5~0.6
d_{33}/mA^{-1}	1.7×10^{-9}	—	—	—
d_{33}/mV^{-1}	—	—	496×10^{-12}	225×10^{-12}
磁导率	9.3	60	—	—
磁弹密度/ Jm^{-3}	14000~25000	30	960	2500

据美国前沿技术公司统计,全世界 Terfenol-D 合金产量从 1989 年的 100kg 增加到 1997 年的 70t。据业内人士推算美国 Etrema 公司 1999 年产值约 8 千万到 1 亿美元。该公司的总裁 Larson 预测稀土超磁致伸缩材料已进入一个稳定的需求增长期,其成长趋势与 NdFeB 永磁材料极为相似;TbDyFe 材料的未来市场预计为:2010 年 8 亿美元,2015 年 17.5 亿美元。2004 年 3 月,美国某公司用稀土超磁致伸缩材料制作燃汽轮机喷嘴,每天需要用稀土超磁致伸缩材料 20~30kg,全年约用 10t 左右。稀土超磁致伸缩材料技术和器件的研究在快速发展。据 Etrema 公司统计,2003 年与 Terfenol-D 有关的专利为 43 项,2004 年 1~7 月已申请和批准的专利为 81 项。

近十几年来,国际上相继召开了多次稀土超磁致伸缩材料的基础研究和应用开发的国际会议。国外有的把稀土超磁致伸缩材料称为 Smart 材料,国内有人翻译为智能材料,其功能还在不断地开发与发展,其应用领域也还在不断地扩大之中^[7,8]。

1.2.2 在水声学上的应用

1.2.2.1 各型主动声呐发射型换能器

近些年来,用此种材料研制的水声换能器主要有复合棒纵向伸缩型(也称活塞式或 Tonpilz 换能器)^[9,10]、环形或曲面弯张型换能器^[11,12]、鱼唇式换能器^[13]、溢流镶拼式换能器^[14]以及圆环弯张式换能器等^[15]。

文献[9]描述了英国研制的一具有 2kHz 的 Terfenol-D 纵向磁致伸缩声源。图 1.1 是它的结构示意图。为了使换能器在深水下不受到静水压的影响而导致其性能参数的变化,可在用钢制成的节点平面 4 上套一铝制的框架将有源材料所在