


李邓化 居伟骏 贾美娟 许晓飞 著

# 新型压电复合 换能器及其应用

 科学出版社  
www.sciencepress.com

# 新型压电复合换能器及其应用

李邓化 居伟骏 贾美娟 许晓飞 著

科学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要讨论了两类压电复合换能器,即 1-3 型压电复合换能器和金属-陶瓷压电复合换能器。对于 1-3 型压电复合换能器,主要从它的制备方法, PZT 相体积百分比以及 PZT 小柱的形状参数对换能器的静水压性能及机电性能的影响等方面进行了讨论,同时研究了 1-3 型压电复合材料的剩余极化强度、退极化等。对于金属-陶瓷压电复合换能器,主要围绕钹式压电复合换能器进行研究。运用有限元分析方法,分析计算了不同工作模式下,钹式压电复合换能器的纵向位移;用理论和试验的方法,研究了金属端帽及 PZT 圆片的形状参数对换能器性能的影响,同时还对换能器基阵进行了研究。

本书可作为微电子学与固体电子学、检测技术和自动化装置、智能科学与技术、测试计量技术与仪器专业的本科生和研究生的教学参考书,也适用于相关专业的工程技术人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型压电复合换能器及其应用/李邓化等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019113-7

I. 新… II. 李… III. 压电换能器 IV. TN712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 087165 号

责任编辑:王志欣 吴凡洁/责任校对:刘小梅

责任印制:刘士平/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.sciencecp.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—3 000 字数: 222 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 序

我以非常欣慰的心情翻阅了李邓化博士等撰写的《新型压电复合换能器及其应用》一书的打印稿。压电复合材料是 20 世纪 70 年代末 80 年代初由美国宾州州立大学材料研究所 Newnham 教授等率先开创并研制成功的一大类新型材料，其优越的性能迅速引起了科技界的广泛关注。国际上对此类新型材料开展了大规模的、系统的研究工作，并迅速用于制造水声换能器，使其性能得到了飞跃式的提高。通过近 30 年的研究已经开发出了由不同材料和不同复合结构构成的数十种新型材料和器件，发表了数以百计的论文，其中一些综合性能优越的压电复合材料已经进入到工业化的批量生产。通过广泛的研究，人们对于这种新型材料和材料内部所发生的物理过程的认识和理解也大大加深了，促进了对新型复合结构的进一步探索，减少了盲目性。然而就我所知，迄今还没有有关的专著问世。该书的问世填补了这一空缺，必将为推动压电复合材料的深入研究做出重要的贡献。

20 世纪 80 年代初，我正在美国宾州州立大学材料研究所，就近看到了此类新型材料的研究发展过程并意识到其潜在的应用价值。我曾向有关方面推荐，惜当时未能及时形成相关的研究项目。李邓化博士率先在国内开展了系统和深入的研究，从较为成熟的 PZT/聚合物 1-3 型压电复合材料入手，集中研究了当时发现不久的 2-2 型 PZT/金属钹式压电复合换能器结构，坚持这一方向 10 余年，涉及到结构的设计与计算、材料的选择、制作工艺、性能及其测试，以及器件和应用等多方面的内容。特别值得指出的是，作者对几种主要的复合结构进行了有限元分析，其结果对理解复合结构内部的物理过程、结构与性能关系，以及复合结构的设计和性能优化有很重要的启示。该书是作者在自己的研究工作基础上撰写而成的，和许多有关材料的研究工作不同，该书把材料的研究和换能器的开发与应用更加紧密地结合在一起，扩展了思路，使该书对压电换能器的开发有更重要指导意义。我衷心地祝贺该书的问世。



中国科学院院士 姚焘

2007 年 5 月 4 日

## 前 言

自 1880 年居里 (Curie) 兄弟发现石英晶体存在压电效应至今, 100 多年过去了, 压电晶体、压电复合材料及其换能器的研究和应用已经渗透到自动化技术、智能检测技术、计算机技术等领域。新型压电复合换能器是将具有压电效应和不具有压电效应的两相或多相材料按照一定的结构性能关系组合起来, 形成一种新的复合结构。这种新的复合结构具备比原有的压电材料构成的换能器更优越的压电性能, 是传统学科和新技术进行综合集成和应用的结果, 体现了多学科的交叉、融合和延拓, 在自动化及其智能检测技术领域有着广泛的应用。

本书由北京市属市管高等学校“拔尖创新人才选拔计划”项目资助出版, 是作者在近十几年科研实践的基础上总结而成的。本书主要包括以下三方面的内容: ①1-3 型压电复合材料及其换能器; ②钹式压电复合换能器; ③1-3 型压电复合换能器及钹式压电复合换能器的应用。本书用一章的篇幅介绍了等静压压电常数的测试方法。第 1、2、4、6~11 章由李邓化执笔; 第 3、5、12 章由居伟骏、贾美娟执笔; 第 13 章由许晓飞执笔。

本书可作为微电子学与固体电子学、检测技术与自动化装置、智能科学与技术、测试计量技术与仪器等专业的本科生和研究生的教学参考书, 也适用于相关专业工程技术人员。

本书大部分内容的研究工作, 是在导师姚熹院士的指导下完成的, 研究成果倾注了恩师的大量心血, 谨以此薄书献给我们敬爱的姚老师, 以表崇敬和感激之情。

感谢北京大学的王志光老师对我们的研究工作提供的极大方便和无私帮助; 感谢北京大学的栾桂冬教授、张金铎教授在压电换能器理论方面给予的悉心指导; 感谢中国科学院声学研究所的朱厚卿教授、王桂荣老师在水听器的制作及声学测试方面给予的指导和帮助; 感谢清华大学的方岱宁教授、刘彬博士在有限元理论方面给予的指导和帮助; 感谢清华大学的岳振星博士、江冰博士在复合结构的铁电性及压力性能测试方面的友好合作和帮助。

感谢所有给予我们支持和帮助的人。

新型压电复合材料及其换能器的研究日新月异, 许多研究工作者在此领域做

出了非常优秀的成绩，给予了我们很多启示，是我们学习的榜样。本书仅仅罗列了我们在压电复合换能器领域里一个比较窄的范围内的研究结果和体会，奉献给同行，以期达到抛砖引玉的目的。

由于水平有限，书中难免有不足之处，诚恳欢迎各位读者对本书提出批评指正，可 E-mail 至 [xuxiaofei@bit.edu.cn](mailto:xuxiaofei@bit.edu.cn)，欢迎赐教，不胜感激。

作者

2007年3月

## 主要物理量符号集

纵波声速	$c_1$
自由电容量	$C^T$
微分算子 $\frac{d}{dt}$	$D$
1-3型压电复合材料的等效压电常数	$d_{ij}^s (i, j = 1, 2, 3)$
静水压压电常数	$d_h^s$
杨氏模量	$E$
电场	$E_j$
压电陶瓷片的杨氏模量	$E_p$
试样的并联谐振频率	$f_p$
试样串联谐振频率	$f_s$
复合材料静水压压电电压常数	$g_h^e$
复合材料静水压灵敏值	$d_h^e \cdot g_h^e$
等静压压电电压常数	$g_h$
静水压	$P$
试样在压力下所产生的电荷量	$Q$
机械品质因素	$Q_m$
铍式压电复合换能器的纵向应变	$S$
在电场为定值时的弹性常数	$S_{ik}^E (h, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
切向应变分量	$S_\theta$
端帽与压电陶瓷 PZT-5A 黏结的面积	$S_{ep}$
应变	$S_h$
压电陶瓷 PZT-5A 的电极表面积	$S_p$
应力	$T_k$
声速	$V^D$
在应力为定值时的介电常数	$\epsilon_{ij}^T (i, j = 1, 2, 3)$
泊松比	$\sigma$
密度	$\rho$
弹性极限	$\sigma_b$

复合材料介电常数	$\epsilon^c$
相对阻尼系数	$\xi$
最小谐振阻抗	$ Z_m $
振动体振动角频率	$\omega$
试样的介电常数	$\epsilon^T$



# 目 录

序

前言

主要物理量符号集

第 1 章 绪论	1
1.1 压电材料的发展历程	1
1.2 压电复合材料的研究现状	3
1.2.1 压电复合材料的连通性及其结构	3
1.2.2 0-3 型、1-3 型压电复合材料	5
1.2.3 金属-陶瓷压电复合换能器	7
1.2.4 压电复合材料的结构-性能关系	8
1.2.5 压电复合材料目前存在的问题及发展方向	9
1.3 压电复合材料及其换能器在水听器领域的应用研究	10
1.4 压电复合换能器在振动测量领域的应用研究	11
参考文献	11
第 2 章 1-3 型压电复合材料	14
2.1 1-3 型压电复合材料的工作原理	14
2.2 1-3 型压电复合材料的制备	15
2.3 1-3 型压电复合材料的铁电性	17
2.3.1 电位移的测量	17
2.3.2 电场的测量	18
2.3.3 应变的测量	18
2.3.4 1-3 型压电复合材料的铁电性	18
2.4 $d_h^e(g_h^e)$ 值的测试方法	19
2.5 PZT 相体积分数与压电复合材料性能之间的关系	20
2.5.1 与静水压压电电荷常数 $d_h^e$ 之间的关系	20
2.5.2 与相对介电常数 $\epsilon$ 之间的关系	20
2.5.3 与静水压压电电压常数 $g_h^e$ 的关系	21
2.5.4 与静水压灵敏度 $d_h^e \cdot g_h^e$ 的关系	21
2.5.5 与厚度模机电耦合系数 $K_t$ 的关系	21
2.5.6 与机械品质因素 $Q_m$ 值之间的关系	22

2.5.7	与声速 $V^D$ 之间的关系	22
2.5.8	与特性阻抗 $Z$ 的关系	23
2.6	PZT 小柱的长宽比 $(l/w)$ 与复合材料的性能关系	23
2.7	PZT 小柱的宽厚比 $w/t$ 与复合材料的性能关系	24
2.7.1	与 $d_{31}^*$ 、 $g_{31}^*$ 及 $d_{31}^* \cdot g_{31}^*$ 之间的关系	25
2.7.2	与声学特性及机电特性之间的关系	25
2.8	聚合物对复合材料静水压性能的影响	26
2.9	复合材料性能与压力的关系	27
2.9.1	压应力与复合材料的极化强度	27
2.9.2	相对介电常数 $\epsilon^e/\epsilon_0$ 与静水压 $P$ 的关系	28
2.9.3	静水压压电常数 $d_{31}^*$ 值与静水压 $P$ 的关系	29
2.10	小结	29
	参考文献	31
<b>第 3 章</b>	<b>基于 ANSYS 的 1-3-2 型压电复合材料有限元分析</b>	<b>32</b>
3.1	1-3-2 型压电复合材料	32
3.2	基于 ANSYS 的 1-3-2 型压电复合材料有限元分析	33
3.2.1	ANSYS 的操作界面和一般分析过程	33
3.2.2	前处理过程	34
3.2.3	施加载荷与求解	48
3.2.4	后处理过程	51
3.3	基于 ANSYS 的 1-3-2 型压电复合材料面板应力放大作用有限元分析	53
3.3.1	应力放大作用分析过程	53
3.3.2	1-3-2 型复合材料的表面应力分布和位移分布	54
3.3.3	金属面板参数对复合材料压电性能的影响	55
3.4	命令流的输入	57
3.5	小结	61
	参考文献	61
<b>第 4 章</b>	<b>基于轴对称薄壳截锥单元的钹式压电复合换能器有限元分析</b>	<b>62</b>
4.1	基于轴对称薄壳截锥单元的钹式压电复合换能器有限元分析	62
4.2	陶瓷片为纵向极化时钹式换能器的纵向位移	65
4.3	陶瓷片为径向极化时钹式换能器的纵向位移	66
4.4	陶瓷片为切向极化时钹式换能器的纵向位移	67
4.5	结果与分析	68
4.6	小结	70

参考文献 .....	71
<b>第 5 章 基于 ANSYS 的钹式压电复合换能器有限元分析</b> .....	72
5.1 钹式压电复合换能器的轴对称分析 .....	72
5.2 在 ANSYS 软件中建立钹式压电复合换能器模型 .....	72
5.2.1 定义单元类型及属性 .....	73
5.2.2 设置材料属性 .....	74
5.2.3 实体模型的建立 .....	75
5.2.4 划分网格 .....	78
5.2.5 施加约束和耦合条件 .....	80
5.3 钹式压电复合换能器特性研究 .....	81
5.3.1 力与位移的关系 .....	81
5.3.2 等效压电常数 $d_{33}^e$ 与钹式压电复合换能器形状参数的关系 .....	82
5.4 小结 .....	84
参考文献 .....	84
<b>第 6 章 钹式压电复合换能器的制作</b> .....	85
6.1 端帽制作 .....	85
6.2 钹式压电复合换能器的制作 .....	85
6.3 端帽材料的选定 .....	86
6.4 黄铜箔厚度的选定 .....	87
6.5 端帽几何尺寸的选定 .....	87
6.6 压电陶瓷的选定 .....	88
6.7 黏结剂的选定 .....	88
6.8 黏结层厚度的确定 .....	90
6.9 老化工艺的确定 .....	91
6.10 小结 .....	92
参考文献 .....	92
<b>第 7 章 钹式压电复合换能器的高位移性能</b> .....	93
7.1 位移与端帽形状参数的关系 .....	93
7.1.1 力-位移关系 .....	93
7.1.2 电场-位移关系 .....	94
7.1.3 位移迟滞特性 .....	94
7.1.4 位移与端帽的形状参数 $t_e$ 、 $t_b$ 的关系 .....	96
7.2 等效压电常数 $d_{33}^e$ 与端帽形状参数的关系 .....	97
7.2.1 等效压电常数 $d_{33}^e$ 与端帽深度 $t_e$ 的关系 .....	97
7.2.2 等效压电常数 $d_{33}^e$ 与端帽底部直径 $d_{e2}$ 及铜箔厚度 $t_b$ 的关系 .....	98

7.3	位移与压电陶瓷厚度 $t_p$ 的关系	99
7.4	小结	100
	参考文献	101
<b>第8章</b>	<b>钽式压电复合换能器的静水压压电性能</b>	102
8.1	钽式压电复合换能器在静水压条件下的工作原理	102
8.1.1	纵向极化的钽式压电复合换能器	102
8.1.2	切向极化的钽式压电复合换能器	104
8.2	静水压压电常数及静水压灵敏值的测试结果	104
8.3	钽式压电复合换能器的耐压性能研究	107
8.4	小结	108
	参考文献	109
<b>第9章</b>	<b>钽式压电复合换能器的机电性能研究</b>	110
9.1	等效机电耦合系数和能量传输系数	110
9.2	钽式压电复合换能器的频率特性	112
9.2.1	频率响应特性	112
9.2.2	形状参数与基波谐振频率的关系	113
9.3	小结	115
	参考文献	115
<b>第10章</b>	<b>钽式压电复合换能器基阵</b>	116
10.1	平面均匀基阵的静水压性能	116
10.1.1	并联基阵	116
10.1.2	串联基阵	118
10.2	钽式压电复合换能器的堆叠结构	119
10.3	平面均匀基阵的水听器性能	121
10.3.1	水听器的自由场电压接收灵敏度及测试方法	121
10.3.2	均匀平面基阵的指向性	122
10.4	小结	125
	参考文献	126
<b>第11章</b>	<b>基于1-3型压电复合材料的圆柱形水听器</b>	127
11.1	圆柱形水听器在低频接收时的静态理论分析	127
11.1.1	弹性力学分析及其应力解	128
11.1.2	自由场开路电压及开路接收电压灵敏度	129
11.2	径向极化圆柱形水听器的设计	130
11.2.1	背衬材料的厚度与透射系数	130
11.2.2	背衬材料的杨氏模量与抗静水压能力	131

11.2.3 灵敏度与背衬材料 .....	132
11.2.4 灵敏度与复合材料的厚度 .....	134
11.3 径向极化圆柱形水听器的研制 .....	135
11.4 小结 .....	136
参考文献 .....	137
<b>第 12 章 新型压电振动加速度传感器 .....</b>	<b>138</b>
12.1 压电式加速度传感器的结构 .....	138
12.2 压电加速度传感器的工作原理 .....	139
12.3 频响特性 .....	139
12.4 新型压电振动加速度传感器的结构设计 .....	141
12.4.1 1-3 型振动加速度传感器结构设计 .....	141
12.4.2 钹式振动加速度传感器的结构设计 .....	142
12.5 新型压电振动加速度传感器的电压灵敏度 .....	143
12.5.1 新型振动加速度传感器电压灵敏度的静态理论分析 .....	143
12.5.2 新型振动加速度传感器输出电压与电压灵敏度 .....	144
12.6 新型压电振动加速度传感器的信号处理电路设计 .....	150
12.6.1 压电振动加速度传感器对测量电路的要求 .....	150
12.6.2 电荷放大器的工作基本原理 .....	152
12.6.3 电荷放大电路的设计 .....	155
12.6.4 低通滤波电路的设计 .....	156
12.7 电压灵敏度的非线性补偿设计 .....	157
12.7.1 线性插值的实现方法 .....	158
12.7.2 利用线性插值实现非线性补偿 .....	158
12.7.3 补偿结果 .....	159
12.8 小结 .....	159
参考文献 .....	161
<b>第 13 章 等静压压电常数的测试方法 .....</b>	<b>162</b>
13.1 等静压压电常数 .....	162
13.2 等静压压电电压常数测试系统 .....	163
13.2.1 信号的检测 .....	163
13.2.2 基于 PKD01 峰值保持器的 $g_b$ 值测试系统 .....	165
13.2.3 基于虚拟仪器的 $g_b$ 值测量系统 .....	167
13.3 小结 .....	170
参考文献 .....	170
<b>附录 有限元分析计算程序 .....</b>	<b>171</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 压电材料的发展历程

压电材料是指具有压电效应的材料。所谓压电效应则是指晶体由于机械应力的作用而使介质极化,并使其晶体表面荷电的效应。反之,当外加电场于晶体时,晶体会产生形变,这便称之为逆压电效应<sup>[1]</sup>。由于压电材料具有力电耦合性能,属于功能材料,因而被广泛用于换能器,实现机械能与电能的相互转换。随着科学技术的发展,利用压电材料研制的器件在现代工业技术中占有重要的地位。

从压电材料发展的历史来看,对压电换能器的需求促进了压电材料的不断发展。虽然早在 1880 年居里 (Curie) 兄弟就已发现石英晶体存在压电效应,但当时未利用石英晶体的压电效应制作实际换能器。直到第一次世界大战期间,法国物理学家郎之万 (Langevin) 研制成第一个实用的压电换能器,用来探测潜水艇,才使得压电效应得到了实际应用。在以后的 10 多年中,石英晶体成为唯一的压电器件材料。1855 年药剂师塞格涅特 (Seignette) 在法国罗谢尔 (Rochelle) 首先制造出罗谢尔盐 (酒石酸钾钠晶体),1880 年发现了罗谢尔盐的压电性,1921 年由罗谢尔盐的介电性反常的测量中,人们在历史上第一次发现了铁电性。在 20 世纪 40 年代,罗谢尔盐作为换能器材料曾起了重要的作用,并应用于水下声学换能器中<sup>[2]</sup>。第二次世界大战期间,又研制出磷酸二氢铵 (ADP)、铌酸锂等压电晶体。1941~1949 年间,美国科研人员首先进行了钽钛氧化物的研究,发现了钛酸钡陶瓷具有良好的压电性能。1954 年美国的 Jaffe 等发现了锆钛酸铅 (PZT) 陶瓷的压电性。在以后的 30 多年中,PZT 材料以其较强且稳定的压电性能成为压电换能器的主要材料,在工业宏观声学、无损探测、医疗诊断、水下通信领域得到了广泛应用。近 10 年来,以钛酸铅 (PT) 为基础的新型功能陶瓷获得了很快的发展,它具有的良好性能,非常适用于低频水下换能器、医疗诊断高频换能器和无损探测等。1968 年后出现了各种压电半导体,如硫化锌 (ZnS)、氧化锌 (ZnO) 等,这些压电半导体材料既具有压电性,又具有半导体特性,但其压电效应较弱。

20 世纪 20 年代,人们开始了对聚合物高分子材料的研究。1969 年,日本的 Kawai 发现了聚偏二氟乙烯 (PVDF) 具有压电性<sup>[3]</sup>。PVDF 的声阻抗与水的接近,能很好地与水介质匹配,可以制作宽频带水听器,也可以制作频率较高的超

声换能器。近年来还发展了聚偏二氟乙烯和聚偏三氟乙烯的共聚物<sup>[4~6]</sup>。

20世纪90年代初,美国宾州州立大学在实验室成功地研制出了新型的弛豫铁电单晶PZNT和PMNT,其压电电荷系数 $d_{33}$ 、机电耦合系数 $k_{33}$ 分别为2000pC/N和92%以上,应变量比PZT陶瓷高出10倍以上,达到1%~7%。美国著名的*Science*杂志在1997年介绍压电单晶时认为:它是材料科学领域的一项重大突破,是新一代高效能超声、电声、水声换能器和高性能微位移、微执行器的理想材料。2000年1月*Nature*杂志详细报道了该晶体材料在生长、性能与应用方面的研究进展。该材料已经成为国际铁电学及压电器件领域的一个研究热点。

中国科学院上海硅酸盐研究所罗豪魁等从1996年起开展弛豫铁电单晶的基础研究和晶体生长工艺方法的探索,经过几年的研究,已成功地生长出PZNT( $\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ )和PMNT( $\phi 50\text{mm} \times 60\text{mm}$ )单晶,其压电常数 $d_{33}$ 最大达到3000pC/N,介电常数约为5300,介电损耗小于0.8%,机电耦合系数 $k_{33}$ 为0.93。

在水听器研究领域,锆钛酸铅陶瓷从20世纪60年代初开始就被广泛用作水听器的换能材料<sup>[7]</sup>,但由于其静水压压电系数 $d_h = d_{33} + 2d_{31}$ ,因 $d_{33} \approx -2d_{31}$ ,所以 $d_h$ 很小,并存在声学阻抗高、硬而脆、成型加工困难等缺点,不能制作出性能优越的水听器。虽然高分子聚合物(PVDF)等材料不存在上述缺点,但由于其介电常数小、温度稳定性存在问题<sup>[8]</sup>,限制了其应用。为了制作出性能较好的水听器,70年代末研制出了压电复合材料,即把聚合物高分子材料的可加工性和陶瓷的压电性结合起来,制备具有良好材料性能的复合材料。80年代研制开发出玻璃陶瓷<sup>[9]</sup>,此类材料没有陶瓷材料固有的极化和老化等问题,可制作高温环境下工作的换能器。

从上述发展历程可看出,压电材料经历了从自然界存在的简单单晶材料到结构复杂的复合材料的发展过程。自1880年居里兄弟发现石英晶体具有压电效应以来,已发现和研制开发出多种压电材料,现可以将压电材料分为以下6类:

- (1) 单晶材料,如石英、磷酸二氢氨等;
- (2) 陶瓷材料,如锆钛酸铅、钛酸铅等;
- (3) 压电半导体,如氧化锌等;
- (4) 高分子聚合物,如聚偏二氟乙烯等;
- (5) 复合材料,如PZT/聚合物、PT/聚合物等;
- (6) 玻璃陶瓷,如 $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ba}_2\text{TiSiO}_6$ 等。

其中由压电陶瓷和聚合物构成的压电复合材料,由于具有多相材料的优越性能及可设计性,引起了人们的广泛关注,已开发研制出0-3型、1-3型、2-2型等一系列压电复合材料。

## 1.2 压电复合材料的研究现状

复合材料是由两种或两种以上组分材料所组成的新材料<sup>[10]</sup>。根据不同的工程技术需要,人们可以方便地选取不同的组分材料,采用最适合的复合材料结构,优化材料的性能。复合材料作为先进材料有许多传统材料所无法比拟的优越性,在航空航天、建筑、交通、机械、化工、电子技术等领域得到了越来越广泛的应用。

压电复合材料是指由压电陶瓷和聚合物按一定的连通方式、一定的体积或质量比,以及一定的空间几何分布复合而成的材料。在压电复合材料中,压电陶瓷相作为压电活性材料,一般选择具有高压电性能的压电陶瓷<sup>[11]</sup>,提供强压电效应。目前常用的有锆钛酸铅(PZT)、钛酸铅(PT)和掺杂钛酸铅。聚合物一般选择环氧树脂等高分子材料,这类材料声学阻抗低、柔性好,与压电陶瓷进行复合可降低材料的声阻抗、密度和介电常数,增加材料的弹性柔顺性。在过去的30多年中,人们做了大量的研究工作,取得了实用性进展。美国宾州州立大学材料实验室的Newnham等首先开创了这方面的工作,通过引入连通性概念<sup>[12]</sup>,研制出一些性能优越的压电复合材料,促进了压电复合材料的发展。

### 1.2.1 压电复合材料的连通性及其结构

大量的实验工作表明,为了制备出性能较好的压电复合材料,必须正确选择压电陶瓷、聚合物及它们的复合方式。Newnham等的研究工作指出,压电复合材料的结构,即相的连通性对压电复合材料的性能有着重要的影响。在压电复合材料中,各相以0、1、2、3维的方式自我连通,如果复合材料由两个相组成,则存在10种组合方式,即0-0、0-1、0-2、0-3、1-1、1-3、2-1、2-2、2-3、3-3(包括a、b两种)型(见图1-1),其中第一个数字代表压电相的连通维数,第二个代表聚合物的连通维数。这种按照各相材料的连通性分类的方法已为国际所公认<sup>[13]</sup>。

其中0-3型复合材料是将压电陶瓷(如PZT)粉与聚合物(如橡胶、硅橡胶、环氧树脂)混合制备而成。如果将许多等长的压电陶瓷细棒垂直于一个平面排成阵列,在细棒周围浇灌环氧树脂或其他聚合物,可以得到1-3型压电复合材料。3-3型压电复合材料是最复杂的复合材料结构,两相材料形成相互穿插连通的三维网络,这种结构的模型可以在某些泡沫塑料、两相玻璃和三维编织材料中找到,也可以从某些生物组织,例如木材和珊瑚中找到。几种型号压电复合材料的性能见表1-1。

在压电复合材料中,压电陶瓷和聚合物之间的电学性能和力学性能的匹配程



度对复合材料的性能同样有影响，如 0-3 型压电复合材料中，电学性能的匹配程度将影响到压电陶瓷颗粒的极化程度。其次，影响压电复合材料性能的因素还有压电陶瓷相的尺寸大小及其分布方式、界面效应、气隙等<sup>[15]</sup>。

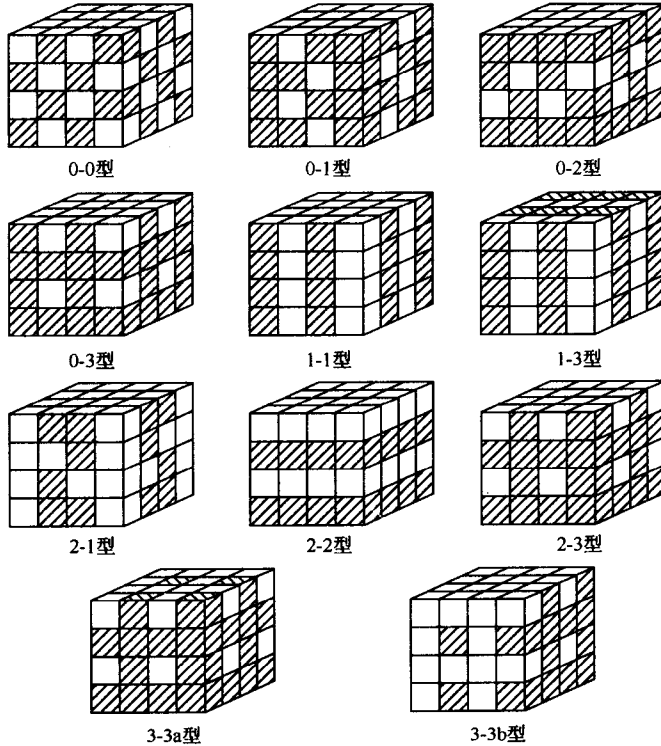


图 1-1 压电复合材料的 10 种组合模式

表 1-1 压电复合材料的性能<sup>[14]</sup>

材料类型	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	$d_{33}/\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$	$d_h/\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$	$g_h/\text{mV} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$	$d_h \cdot g_h/10^{-15}\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$
PZT	1800	450	40	2.5	100
PVDF	12	100	20	11	1100
PbNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	225	85	65	35	2300
3-3PZT/环氧树脂	620	150	100	18	1800
3-3PZT/橡胶	450	200	180	45	8100
3-2PZT/环氧树脂	410	320	200	55	11000
3-1PZT/环氧树脂	750	350	160	24	3800
1-3PZT/环氧树脂	70	150	50	30	1500
0-3PZT/橡胶	40	60	40	15	600
0-3PT/橡胶	40	30	100	35	3500