

水声无源材料技术概要

缪荣兴 宫继祥 编著

浙江大学出版社

水声无源材料技术概要

缪荣兴 宫继祥 编著

责任编辑 杜希武

浙江大学出版社出版发行

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

德清第二印刷厂印刷

* * *

850×1168 32 开 10.5 印张 290 千字

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月第 1 次印刷

印数 001—660

ISBN 7-308-01614-5/TB·019 定价:14.10 元

符号表

- ρ : 密度
 C : 声速
 α : 衰减常数
 n : 两种介质的相对折声率
 E : 杨氏模量
 E' : 杨氏模量实部
 E'' : 杨氏模量虚部
 σ : 泊松比
 K : 体积压缩模量
 K' : 体积压缩模量实部
 K'' : 体积压缩模量虚部
 G : 剪切模量
 G' : 剪切模量实部
 G'' : 剪切模量虚部
 S : 平板模量
 λ, μ : 拉梅常数
 $\tan\delta$: 电或力学损耗因子
 R' : 贮能模量
 R'' : 损失模量
 ω_s : 每个周期内存贮的最大弹性能
 Δ_w : 每个周期内耗散的弹性能
 f : 频率
 M : 纵波模量
 ω : 角频率
 ϵ_m : 介电常数
 ϵ_0 : 自由空间介电常数
 η_E : 杨氏模量损耗因子

前 言

材料根据其用途通常可分为结构材料和功能材料。前者利用材料的力学性能,后者利用其物理学性能,如声、光、电、磁、热等学科方面的性能。声纳工程湿端设备中大量使用的有源材料,例如具有压电和压磁等性能的材料以及具有吸声或其它某种声学性能的无源材料都属于功能材料。这些材料非常重要,对声纳湿端设备的发展、性能的保证和改善以及可靠性的提高起非常重要的作用。本书主要论述有关无源材料的问题。因为对有源材料,国内外已出版了不少专著,而对无源材料给予系统论述的书还未见到出版。

然而,实践中由于声纳工程技术人员对无源材料选择不当和使用不尽合理而引起的达不到设计预期目的和可靠性不高等问题屡有发生。作者长期从事水声无源材料的开发研究和推广应用工作,有感于声纳湿端设备的设计师们在工作中经常遇到的这些麻烦,一直想编写一本书,较为系统地介绍有关无源材料技术方面的知识,供参考用。可是多少年来,因种种原因这一愿望始终未能实现。由于中国船舶工业总公司科技局的支持,本书现在出版了。遗憾的是,由于经费和篇幅的限制,有关无源材料性能测量技术方面的内容未能包括进去。不过,这部分内容在由哈尔滨工程大学出版社出版的“水声计量测试技术基础”一书中已包括了。需要了解这方面技术的读者可查阅该书。

本书共分十一章。其中第一章重点论述水声无源材料的基本概念和描述材料性能的有关参量。这些都是与无源材料有关的基础知识。第二章、第三章和第四章,重点介绍无源材料的发展和工程应用领域以及若干应用技巧问题。第五章和第六章主要介绍材料的配方

及制品的加工问题。这部分内容对材料工程技术人员很有用,由于这些因素直接影响材料制品的性能,声纳工程师,尤其是声纳湿端设备的设计师了解后对工作很有帮助。第七章是固体材料的性能资料,其中应用最广泛的弹性体的资料最丰富。大量研究表明,声纳换能器的失效多数来源于此,所以,它是声纳换能器的可靠性研究最关键的材料。不仅包括国内外声纳装备中在用的材料,还加进了将来可能使用的材料,比如三元乙丙橡胶,国内还未开发声纳中的应用。由于它兼有天然橡胶的声学性能和氯丁橡胶的老化性能,因此,国外已经开始在声纳换能器中应用。第八章用整章篇幅专门介绍换能器的填充(耦合)液。因为它有不同于固体材料的许多性能特点和选择方法,因此,单独列一章。第九章和第十章主要叙述换能器的粘接和封装技术问题。这是声纳换能器工艺领域中的两个重要技术问题。粘接和封装的质量提高与换能器可靠性的改善有很大关系。第十一章论及弹性体材料配方设计和管理的自动化问题,属于发展趋势,国内工作还未铺开,只作简单介绍。

本书的出版曾得到中国船舶工业总公司科教局张秀云高级工程师的理解和热情支持。在编著中曾间接或直接引用了国内外同行发表的文章、资料和书稿,对此特表示衷心感谢。

由于水平和人力有限,书中难免有疏漏和错误之处,欢迎读者批评指正。

编著者

1994年8月

目 录

第一章 概述.....	1
1.1 水声无源材料的基本概念	1
1.1.1 水声无源材料的定义	2
1.1.2 水声无源材料的分类	2
1.1.3 水声无源材料的技术规范	4
1.2 描述无源材料性能的参量	5
1.2.1 弹性模量	5
1.2.2 静态模量与动态模量	7
1.2.3 力学损耗因子	9
1.2.4 复弹性模量及其与温度、压力和时间的关系	9
1.2.5 密度及其与温度和压力的关系	12
1.2.6 声速和衰减常数	12
1.2.7 声阻抗	13
1.2.8 介电强度	14
1.2.9 电损耗因子	14
1.2.10 硬度	14
1.2.11 低温劲度	14
1.2.12 耐臭氧	15
1.2.13 相对介电常数	15
1.2.14 抗张强度	15
1.2.15 300%模量	15
1.2.16 扯断伸长率	15
1.2.17 粘度	15

1.2.18 体积电阻率	16
1.2.19 透水率	16

第二章 水声无源材料的研究与发展 17

2.1 吸声材料	17
2.2 透声材料	21
2.3 反声材料	24
2.4 去耦材料	28
2.5 折声材料	35

第三章 无源材料在水声工程中的应用 38

3.1 无源材料在水听器设计中的应用	38
3.2 无源材料在发射换能器中的应用	43
3.3 无源材料在声学基阵设计中的应用	49
3.4 无源材料在波束形成器中的应用	54
3.5 无源材料在声纳导流罩设计中的应用	56
3.6 无源材料的其它应用	64
3.6.1 在换能器中的扩展应用	64
3.6.2 水下噪声控制中的应用	66
3.6.3 用作水池消声器	66
3.6.4 在水声对抗中的应用	67

第四章 使用无源材料应考虑的几个问题 70

4.1 一般性问题	70
4.2 其它问题	71

第五章 弹性体的配料技术 78

5.1 引言	78
5.2 弹性体的胶种选择因素	78

5.3 弹性体的硫化体系.....	80
5.3.1 丁基橡胶的硫化体系.....	81
5.3.2 氯化丁基橡胶的硫化体系.....	83
5.4 填充剂.....	85
5.4.1 填充剂的使用条件.....	85
5.4.2 碳黑—补强剂填料.....	86
5.5 抗降解剂.....	96
5.6 操作助剂和软化剂	101
5.7 其它配合剂	105
第六章 弹性体的加工	106
6.1 硫化	106
6.2 弹性体的模制方法	107
6.3 平板硫化	108
6.4 注压硫化	109
6.5 柱塞注压硫化	109
6.6 模具的公差	110
第七章 材料的性质	112
7.1 聚丁二烯橡胶	112
7.2 丁基橡胶	114
7.3 氯化丁基橡胶	124
7.4 氯磺化聚乙烯(Hypalon—20)	128
7.5 三元乙丙胶(EPDM)	130
7.6 氟碳橡胶(CFM—聚氯四氟乙烯)	132
7.7 聚异丁烯(PIB).....	135
7.8 天然橡胶(填充的和非填充的)	136
7.9 氯丁橡胶(CR)	140
7.10 丁腈橡胶(NBR,BUNA—N)	149

7.11	硅橡胶(MQ):G. E. RTV—31	172
7.12	丁苯橡胶(SBR)	175
7.13	聚氨酯橡胶(U)	176
7.14	液体聚硫橡胶.....	209
7.15	国内研制的几种软木橡胶.....	212
7.16	其它材料.....	215
7.16.1	307 聚酯树脂玻璃钢	215
7.16.2	PLY-30 闭孔泡沫塑料	219
7.16.3	DEC-706-3 水声去耦材料	223
7.16.4	其它泡沫塑料.....	226
7.16.5	橡胶塑料复合材料(声纳罩用).....	232
第八章	换能器填充(耦合)液.....	244
8.1	引言	244
8.2	关于换能器若干充液条件的讨论	244
8.3	填充液的性质	255
第九章	胶粘剂及粘接技术.....	279
9.1	胶粘剂的定义	279
9.2	胶粘剂的分类	279
9.3	水声工程中常用的胶粘剂	280
9.4	胶粘剂的选择	283
9.5	弹性体同金属粘接的有关因素	287
9.6	粘接表面的准备工作	287
9.7	粘接的操作方法	288
9.8	粘接破坏问题	290
9.9	国外市售的粘接系统	291
第十章	水声换能器的密封.....	292

10.1	橡胶密封材料的分子结构与透水性的关系	292
10.2	密封橡胶的吸水机理和吸水性	295
10.3	换能器的密封工艺	298
10.3.1	待密封的换能器	298
10.3.2	灌注前的准备	299
10.3.3	灌封材料的配方及工艺过程	299
10.3.4	聚乙烯材料封装换能器	307
10.3.5	用玻璃钢密封换能器	308
10.3.6	用防水涂层提高换能器的密封性能	310
第十一章 弹性材料配方设计与管理自动化		314
附录		316
参考文献		317

第一章 概 述

1.1 水声无源材料的基本概念

众所周知,制造一部完整的声学系统,必须具备两类材料,一类是换能材料;另一类是构成完整声学结构的辅助材料。前者是把电能转换成机械能,或者把机械能转换成电能的功能材料。这种材料不但在水声领域中得到应用,同时,在其它领域也得到了广泛应用,因为任何一个发声系统或接收系统都离不开它。

在空气声学中,通常将具有吸声、隔声和振动阻尼等功能的材料叫做声学材料。在水声学中,则把具有吸声、反声、透声、折声和去耦(及或隔声)等五种典型功能的材料称之为水声声学材料。

随着水声工程学的发展,人们又提出了水声无源材料这个新概念。这一概念是从声纳工程中派生出来的。因为构成声纳设备的声学系统(包括基阵、换能器和声纳罩等)常常涉及到两类材料。一类叫作水声换能材料,这类材料具有电声或声电转换能力,它能将一种有用的能量形式转换成另一种有用的能量形式;另一种材料本身并不具备上述功能,可是在声学系统内部,能有效地影响声学系统的声性能。换能材料在水声工程中非常重要,但无源材料也不可缺少。声纳工程实践证明,无源材料器件的性能好坏,直接影响着声纳系统的技术指标,同样十分重要。

关于换能材料的研究,国内外已有大量的文献与专著作了详细报道,本书重点介绍无源材料。

1.1.1 水声无源材料的定义

任何一个声系统(小到单个换能器、水听器或传感器、大到声学基阵或整个水声系统)基本上是由敏感器件和结构部件组成的。敏感器件是系统的主要部件,决定各种能量的转换形式(如声能转换成电能或电能转换成声能),因此,称为有功器件或有源器件(active unit),制造这些器件的材料就称之为有源材料(active material)。

结构部件是一种辅助器件,对电声能量的转换不起决定作用,只对有功器件的功能起某种保障作用。相对而言,这些结构部件就称为无源器件(passive unit)。用来制造无源器件的材料就称为无源材料(passive material)。

由此,我们可以给无源材料概括出一个定义:在任何声系统中,用来控制或保障有源部件功能的所有构件材料统称为无源材料。

这个定义是确切的,它对被定义事物的所有事例都是适用的。比如,就一个水听器而言,它必定由压电元件和透声包复材料(如透声橡胶)组成。压电元件用来进行电与声的能量转换,而透声包复材料对电-声能量的转换不起决定作用,只对压电元件起保护作用,并使压电元件发出的声能无损失地传输。又如,水声换能器用的“O”形橡胶圈,它对换能器压电元件的能量转换也不产生作用,只起水密作用。“O”形圈的水密性不好,会导致压电元件电绝缘性能下降,并且“O”形圈材料的选择,还可能影响水声换能器的Q值,从而影响换能器的带宽,如此等等。像透声橡胶、“O”形圈等都属于无源材料或器件的范畴。

1.1.2 水声无源材料的分类

制造水声无源器件的材料种类很多,按它们的属性,有金属和非金属材料。若按它们的形态分,有固态、液态和气态材料。如果按它们的组成成分,则又有单组份、双组份或多组份材料之分。所以,从不同的角度对无源材料可有不同的分类标准。通常,都按它们的功能或作

用进行分类。例如,大家比较熟悉的用来制作水声吸声器的水声吸声材料,制作透声窗或声纳罩的水声透声材料以及用来制作声反射器或声反射镜的水声反声材料等等。

本世纪 70 年代,有人将水声无源材料归纳成五种功能(吸声、透声、折声、反声和去耦)和两个范畴(失配和匹配)。然而,如果做进一步的深入分析,就可以发现,水声无源材料除上述五种功能外,还有其它一些功能,而这些功能又无法纳入上述两个范畴。因此,确切的分类应如图 1-1 所示。

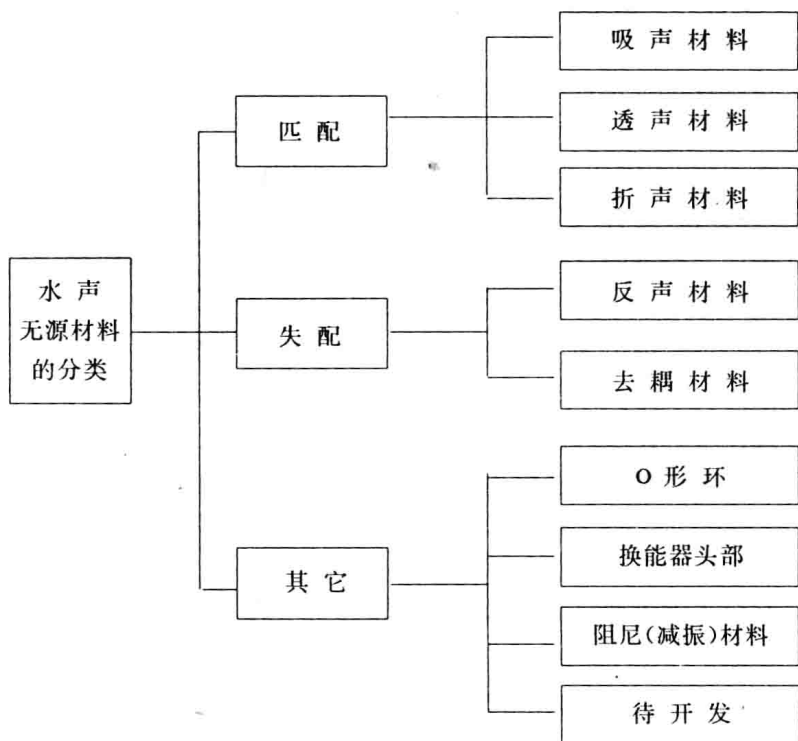


图1-1 水声无源材料分类图

图 1-1 中所示的匹配和失配两个范畴中的内容是水声工作者和声纳专家们已熟知的。但对这两个范畴以外的其它内容,目前了解得还不多。然而,已有证据表明,在提高和改善声纳换能器或系统的性能方面,这个范畴中确实存在着有待挖掘和开发的潜在因素。例如,传统的纵向振动换能器的头部(即匹配层)是由合金铝制作的,可是,研究表明,如果用某种合适的组合材料代替合金铝制作匹配头,则传统的通毕兹式声纳换能器不仅能增加带宽,同时还能提高效率。还有高阻尼声纳罩材料的开发,也大大提高了近代声纳系统的性能。可以预料,随着声纳工程的发展,这个范畴的内容将日益丰富。

1.1.3 水声无源材料的技术规范

技术规范是指各种水声无源材料构件在完成各自功能时必须满足的性能要求。

透声窗(或声透镜),声反射器、声去耦器(或声障板)以及吸声器(或消声复盖)等,就它们的功能而论,构成了一个完整的组合。制作这几种构件所用的材料,对入射在它们上面的声波分别要求:(1)透过 100%,(2)反射 100%,(3)透过 0%,(4)反射 0%。这些都是理想的要求。可以采用把构件材料的样品浸在水中来测量它们对声波透过和反射的百分比来评价这几种构件或材料中的每一种的性能是否满足或接近上述要求。

材料或构件的功能特性要求同材料的物理参数间存在着内在关系。这些物理参数是每种材料所独有的。从声学的角度看,材料的主要物理参数有三个:密度 ρ 、声速 C 和衰减系数 α 。

各种水声无源材料的声学参数必须符合规范。上述三个参数的规范化要求如表 1-1 所示。不过,表 1-1 中的要求只是对匹配型和失配型材料适用。对其它的材料,目前还知之甚少,还未归纳出通用的技术规范。

表 1-1 无源材料的技术规范

功 范 能	匹 配 $\rho_1 C_1 = \rho_2 C_2$	失 配 $\rho_2 C_2 \neq \rho_1 C_1$	高衰减 常数 α	低衰减 常数 α	折声率= $\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$
吸声器	✓		✓		$n=1$
声窗	✓			✓	$n=1$
折声器	✓			✓	$n \neq 1$
反射器		✓		✓	不能用
去耦器		✓	✓		不能用

表 1-1 中 ρ_1 和 C_1 分别表示无源材料的密度和声速, α 是材料的衰减常数, ρ_2 和 C_2 分别表示与无源材料相邻介质的密度与声速, n 表示两种介质的相对折射率, 可称为折声率。

1.2 描述无源材料性能的参量

完整地描述水声无源材料的性能要用到许多参量, 但是, 从不同角度出发, 所关注的参量会有不同的侧重面。归纳起来, 用下列 18 个参量就足以描述水声无源材料的性能, 包括物理、机械、化学等性能。

1.2.1 弹性模量

按照弹性理论, 对于大多数固体材料, 若应力不超过弹性极限, 则物体中任意一点上的 6 个应力分量的每一个都是应变分量的线性函数。也就是说, 应力应变的关系可用 6 个线性方程表示。这个方程组就是胡克定律的通式, 它有 6 个应力分量、6 个应变分量和 36 个系数, 称为弹性常数 C_{ij} , 其中 $i=1\sim 6, j=1\sim 6$ 。由于弹性性质是应变的单位函数, 因此, $C_{ij}=C_{ji}$ 。于是, 独立的系数由 36 个减少到 21

个。如果材料具有对称形状,则独立系数还可以相应减少。对于各向同性的均匀的固体材料,只剩下两个独立系数,用 λ 和 μ 表示,它们被称为拉梅(Lame')常数。于是胡克定律的方程就可以写成下列形式:

$$\sigma_{xx} = \lambda_1 + 2\mu\varepsilon_{xx}$$

$$\sigma_{yy} = \lambda_1 + 2\mu\varepsilon_{yy}$$

$$\sigma_{zz} = \lambda_1 + 2\mu\varepsilon_{zz}$$

$$\sigma_{yz} = \mu\varepsilon_{yz}$$

$$\sigma_{zx} = \mu\varepsilon_{zx}$$

$$\sigma_{xy} = \mu\varepsilon_{xy}$$

其中 $\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$, 它表示单元立方体的体积改变,称之为膨胀。

实践中,拉梅常数 λ 不易单独测量,所以,不直接应用它,而是采用由拉梅常数转化来的各个弹性模量来描述材料的弹性性质。这些模量将应力和应变直接联系起来。在工程中,根据应力和边界条件可推出常用的弹性模量,有杨氏模量 E 、泊松比 σ , 体积压缩模量 K 和剪切模量 G 。不同的场合应当注意用不同的模量。比如,如果要设计一个定向发射换能器的声窗,则选择材料时应比较它们的动态纵波模量,因为纵波模量与流体介质中传播的平面波所引起的形变相当。此时,如果选择换能器护套的材料又是在圆周方向以膨胀和压缩方式被激励,则比较被选材料的切变模量才是正确的。顺便还指出,用作“O”形环材料的软硬程度,有可能影响某些换能器的 Q 值。

1. 杨氏模量 E

杨氏模量 E 表示:当长柱体试件的平端面上受到均布应力而侧面为自由时所加应力与相对伸长之比。可通过公式(1)进行计算

$$E = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \quad (1)$$

其中 λ 和 G 分别为弹性常数和剪切模量。

2. 泊松比 σ

泊松比 σ 是一个无量纲的量,它表示在长柱体试件的平端面上

受到均布应力,而侧面表面为自由时横向相对缩短与纵向相对伸长之比,表示为

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (2)$$

3. 体积压缩模量 K

体积压缩模量 K 表示:当固体受均匀的流体静压力时,所加压力与体积相对改变之比,可表示为

$$K = \lambda + \frac{2}{3}G \quad (3)$$

4. 剪切模量 G

剪切模量 G 表示:材料在剪切力作用下,其剪应力和剪应变之比,它与拉梅常数 μ 完全相同。

5. 平板模量 S

弹性模量除 E 、 K 、 G 以外,经常遇到的还有体积纵波模量,它直接影响无限介质中平面纵波的传播速度。由于这种传播方式的重要性,许多人将这种模量也作为基本模量之一,符号为 S 。有时也叫做平面波模量、声学劲度等。它与拉梅常数的关系为

$$S = \lambda + 2\mu \quad (4)$$

1. 2. 2 静态模量与动态模量

当作用力为恒定力时,此时的模量值为静态模量值。当作用力如同声波那样随时间变化时,则产生的应变也随时间变化,此时所定义的模量称为动态模量。一般手册、文献中给出的弹性模量往往是静态弹性模量,杨氏模量也经常是指静态杨氏模量、而在声学文献中给出的数据,则为各种形式的动态弹性模量。

动态弹性模量与静态弹性模量的重要差别是,在动态条件下,由于粘滞、热传导和结构松弛效应等,材料振动时总有部分弹性能转变为热能,导致耗损。对聚合物材料,这种内摩擦机构更为突出。一般说来,动态弹性模量的值总高于静态弹性模量值。表 1-2 给出了各模量之间相互换算之关系。