

# 声学超材料基础 理论与应用

温激鸿 蔡力 郁殿龙 肖勇 编著  
赵宏刚 尹剑飞 杨海滨



科学出版社

国防科技大学学术著作出版资助专项经费资助

# 声学超材料基础理论与应用

温激鸿 蔡力 郁殿龙 肖勇 编著  
赵宏刚 尹剑飞 杨海滨



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍声学超材料的基础理论和应用探索研究成果。全书分为上、下两篇。基础理论篇详细讨论声学超材料的基本概念与内涵,系统介绍研究涉及的主要理论与分析方法,并归纳主要的超常特性及产生机理。应用探索篇系统介绍声学超材料在声隐身、减振降噪及新型声学器件设计方面探索研究的最新成果。

本书可供从事声子晶体、声学超材料及减振降噪领域的相关科技人员以及高年级本科生和研究生阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

声学超材料基础理论与应用/温激鸿等编著. —北京:科学出版社,2018.8  
ISBN 978-7-03-057691-0

I. ①声… II. ①温… III. ①声学材料 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122872 号

责任编辑:张艳芬 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 8 月第一次印刷 印张:19 3/4 插页:4

字数:384 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

弹性波在由人工结构单元构成的阵列结构中传播时,在波长远小于结构单元尺度的频段(亚波长频段,通常单元结构尺度小于波长的  $1/10$ ),能够获得与自然世界中物质迥然不同的超常物理性质,如负等效质量密度、负弹性模量、负折射、低频带隙、低频超常吸收等。这意味着能够在亚波长的介观尺度上构造人工“原子”,设计出天然材料不具备的超常声学、力学性质的新型人工材料,这类材料通常称为声学超材料。声学超材料具有的特殊物理效应极大地拓展了声学结构对弹性波传播的控制能力,为声波、振动控制及声学功能器件设计提供了全新的思路。

随着现代科学技术的发展,人类社会对各种材料的电磁、力学、声学等方面性能的挖掘和利用越来越深,进一步发展的难度越来越大。超材料力图从介观尺度上分析结构对波的控制原理及特性,通过对结构单元的创新设计,制备出具有天然材料所不具备的超常物理性能的新材料,提高对电磁波、声波传播的控制和操纵能力。超材料代表了一种崭新的复合结构/材料设计理念,在认识和利用当前材料的基础上,人们按照自己的意志设计、制备新型材料并实现特殊功能需求。其从介观尺度出发的思想既能突破常规材料的性能限制,产生新的物理现象和物理机制,又具有较强的物理可实现性,能够发展出具有重大军用和民用价值的新技术、新材料,促进和引领新兴产业的发展,其科学理论及应用价值引起了各国政府、学术界、产业界和军事界的高度关注。

作者所在的课题组长期从事声子晶体、声学超材料领域的研究工作,在声子晶体、声学超材料及传统人工周期结构中的弹性波传播特性及控制方面取得了较为可观的成果和经验,并提出将三者统一到弹性波人工周期结构这一范畴中的思想。2008年,作者出版了《声子晶体》一书,比较系统地阐述了声子晶体的基本概念、弹性波带隙理论及减振降噪应用探索研究工作。2015年,作者出版了《人工周期结构中的弹性波传播》一书,对课题组在梁类、板壳类人工周期结构的振动特性及体结构人工周期结构的吸声、隔声、声绕射等特性方面的研究工作进行了提炼、整理和总结。

本书突出基础性、先进性和前瞻性,可以作为研究者学习和研究声学超材料的入门书籍,作者由衷地期望本书的出版能为我国声学超材料技术的研究与发展起到一定的促进作用。

在撰写本书的过程中,课题组的研究生黄凌志、陆智森、方鑫、钟杰、陈幸、赵翔等也参与了部分工作,在此表示感谢。同时,感谢装备综合保障重点实验室其他老

师及同学给予的热情帮助。

感谢国家自然科学基金项目(51275519、51175501、11372346、11004250、51322502、51305448、51405502)的支持, 特别感谢国防科技大学学术著作出版资助专项经费的资助。

限于作者水平, 书中难免存在不妥之处, 敬请读者批评指正。

作者

# 目 录

## 前言

## 上篇 基础理论

第 1 章 声学超材料概述	3
1.1 引言	3
1.2 声学超材料	3
1.2.1 声子晶体	4
1.2.2 左手材料与电磁超材料	5
1.2.3 声学超材料的概念及基本特征	8
1.2.4 声学超材料的主要研究内容	10
1.2.5 研究意义	11
1.3 声学超材料的研究历程与发展趋势	13
1.3.1 理论研究	14
1.3.2 结构设计与制备	15
1.3.3 应用探索	18
1.3.4 声学超材料研究的发展趋势	20
1.4 国内外研究概况	21
1.4.1 国外研究概况	21
1.4.2 国内研究概况	26
1.4.3 研究概况小结	32
1.5 前沿动态	33
1.5.1 非线性声学超材料	33
1.5.2 声学超表面	34
1.5.3 声学黑洞	37
1.5.4 零折射率声学超材料	39
参考文献	40
第 2 章 声学超材料理论基础	54
2.1 引言	54
2.2 弹性动力学基础	54
2.2.1 形变、位移与应变	54

2.2.2	力与应力	57
2.2.3	运动方程与本构方程	58
2.2.4	频域响应	61
2.2.5	弹性波与声波	62
2.3	弹性波传播的能带结构分析	63
2.3.1	晶格理论	63
2.3.2	Bloch 定理与能带理论	65
2.3.3	一维离散周期系统的能带结构	68
2.3.4	二维连续周期系统的能带结构	76
2.4	弹性波传播的等效介质分析	82
2.4.1	参数反演分析	82
2.4.2	能带结构分析	87
2.5	弹性波能流传输分析	90
2.5.1	弹性波能流密度矢量	90
2.5.2	弹性波的群速度、相速度与等频率面	91
	参考文献	96
<b>第3章</b>	<b>声学超材料的主要特性</b>	<b>98</b>
3.1	引言	98
3.2	声学超材料的低频带隙效应	98
3.2.1	声学超材料带隙的基本特征	99
3.2.2	声学超材料带隙的形成机理	103
3.2.3	声学超材料带隙的主要影响因素	106
3.3	声学超材料的超常吸声效应	109
3.3.1	球形局域共振结构的吸声特性	110
3.3.2	柱形局域共振结构的吸声特性	123
3.4	声学超材料的负折射效应	130
3.4.1	声学超材料负折射的基本特征	131
3.4.2	声学超材料负折射的形成机理	135
3.4.3	声学超材料负折射的主要影响因素	138
3.5	声学超材料的表面反常效应	140
3.5.1	声学超材料表面反常效应的基本特征	141
3.5.2	声学超材料表面反常效应的形成机理	143
3.5.3	声学超材料表面反常效应的主要影响因素	145
	参考文献	148

## 下篇 应用探索

第4章 声学超材料的声隐身应用	153
4.1 引言	153
4.2 声学坐标变换设计理论	153
4.2.1 声波方程的坐标变换	154
4.2.2 圆柱形声隐身超材料设计	159
4.2.3 椭圆柱形声隐身超材料设计	161
4.2.4 任意形状的闭合声隐身超材料设计	163
4.2.5 声幻象及地毯声隐身超材料设计	165
4.3 声隐身超材料的声学特性分析	167
4.3.1 声隐身超材料的多层介质模型	167
4.3.2 声隐身超材料的影响因素及规律分析	176
4.4 声隐身超材料的结构设计	186
4.4.1 声隐身超材料的材料参数约束分析	186
4.4.2 惯性隐身超材料	188
4.4.3 五模隐身超材料	190
参考文献	196
第5章 声学超材料的减振降噪应用	199
5.1 引言	199
5.2 轻质结构低频减振设计	199
5.2.1 轻质结构减振的概念、意义	199
5.2.2 基于声学超材料的轻质结构设计	202
5.2.3 减振特性分析	206
5.2.4 实验测试与验证	211
5.3 薄膜型声学超材料的低频隔声设计	216
5.3.1 隔声的基本理论与概念	216
5.3.2 薄膜型声学超材料的低频隔声现象及机理	217
5.3.3 薄膜型声学超材料的隔声特性调控规律	224
5.3.4 薄膜型声学超材料的隔声特性实验研究	234
5.4 基于声学超材料的管路噪声控制	241
5.4.1 传统管路噪声控制理论与方法	241
5.4.2 基于超材料的管路低频隔声设计原理与设计方法	243
5.4.3 隔声性能仿真分析	247
5.4.4 实验测试与验证	253



参考文献	257
<b>第 6 章 基于声学超材料的新型声学功能器件设计探索</b>	<b>262</b>
6.1 引言	262
6.2 声学超材料声透镜技术	262
6.2.1 声透镜的概念、意义	262
6.2.2 单负参数声学超材料透镜	264
6.2.3 双负参数声学超材料透镜	270
6.2.4 各向异性声学超材料透镜	273
6.3 声学超材料声整流技术	277
6.3.1 声整流的概念、意义	277
6.3.2 基于零折射率超材料的声整流	278
6.3.3 基于声波反常透射的声整流	282
6.3.4 基于声学梯度材料的声整流	287
6.4 声学超材料定向声发射技术	290
6.4.1 定向声发射的概念、意义	290
6.4.2 基于声表面波模式调制的定向声发射	291
6.4.3 基于界面声阻抗调制的定向声发射	297
参考文献	303

## 彩图

# 上篇 基础理论



# 第 1 章 声学超材料概述

## 1.1 引言

新材料技术是 21 世纪科技发展的主要方向之一,它标志着人类对物质性质的认识和应用向更深层次拓展,对科学技术进步和国民经济发展具有重大的推动作用,是现代社会的三大支柱之一。半导体、新型合金材料和先进陶瓷技术等都是新材料领域中对推动社会进步具有显著作用的新技术。材料是由原子、分子按一定规律排列构成。通常,材料的力、热、声、电磁等宏观性能都由微观的原子、分子种类及其排列规律来决定,微观组成及排列方式确定以后,其力学、电磁、热学等参数就固定不变。科技的不断发展使人们对材料性能的要求越来越高,需要发展新的材料设计技术和理念<sup>[1]</sup>。

超材料选择介于原子、分子的微观结构尺寸与宏观尺寸间的介观尺度来构建人工微结构,或者说“人工原子或分子”。由这样的微结构阵列构成的人工材料的材料参数可以通过微观结构的设计实现大范围的人为调节,甚至实现负折射率等自然界中不存在的超常特性。超材料的出现不仅为电磁、声学等众多领域提供了性能更高的材料选择,更代表了一种崭新的材料设计理念,即人类在利用现有材料的基础上,能够按照自己的意志逆向设计微结构来获得新型材料。这在材料科学领域具有重大意义。

作为超材料研究领域的重要分支,声学超材料通过在亚波长物理尺度上的结构设计,获得具有超常力学、声学性能的复合材料或复合结构,为人们控制弹性波的传播提供了新的技术途径,为物理学、力学、声学、机械工程噪声与振动控制等领域开辟了全新的研究方向。

## 1.2 声学超材料

弹性波的传播特性及其控制是力学、声学、机械工程等领域的重要研究方向。始于 1992 年的声子晶体研究表明<sup>[2,3]</sup>,利用人工结构材料来调制弹性波,能够为声波及振动的操控提供新的手段。始于 1998 年的电磁超材料研究则进一步激发了研究亚波长结构控制波的热潮<sup>[4,5]</sup>。这两方面的研究推动了声学超材料研究的出现和迅速发展。本节结合声子晶体和电磁超材料的发展论述引入声学超材料的概

念,并对声学超材料的基本特征、主要研究内容及研究意义进行阐述。

### 1.2.1 声子晶体

人们对晶体的认识源于自然界中存在的、呈现规则的几何形状,就像有人特意加工出来的固体,如天然的冰晶体呈六角棱柱体,食盐晶体呈立方体,明矾晶体呈八面体,如图 1.1 所示。X 射线衍射分析表明,内部原子或分子在空间按一定的规律周期性重复排列是这类固体的最基本特征<sup>[6]</sup>。结构的周期性使晶体表现出具有规则几何外形、固定熔点、高折射率、电子能带等众多特性。这些特性在力学、光学、热学方面都拓展了广阔的应用领域,尤其是源于周期性原子势场的固体电子能带特性<sup>[7]</sup>,为人们操控电子的流动提供了手段。自 20 世纪 50 年代,基于固体电子能带的半导体技术带来了一次科学技术革命,对人类文明的进步产生了深远的影响。固体电子能带理论极大地丰富了波在周期结构中传播的研究。最初的研究可以追溯到 1883 年,Floquet<sup>[8]</sup>针对一维 Mathieu 方程研究了波在周期介质中的传播问题。Bloch<sup>[9]</sup>于 1928 年将 Floquet 的结论推广到三维,得到了著名的 Bloch 定理。电子能带理论就是 Bloch 定理应用于量子力学薛定谔方程发展起来的。20 世纪 80 年代,人们将能带理论引入折射率周期性变化介质中的光传播研究中,得到能操控光传播的光子能带结构和光子带隙,这种存在光子带隙的周期性结构称为光子晶体<sup>[10,11]</sup>。光子晶体的提出给新的光电或光子器件的发明和应用创造了条件,因此迅速成为光电子和信息技术领域研究的热点。1998 年和 1999 年, *Science* 都将光子晶体研究成果列入当年的十大研究进展。



图 1.1 晶体的有序结构导致规则外形

从波动的共性出发,弹性波在周期性弹性复合介质中传播是否也产生能带结构和带隙就成为人们关注的问题。1992 年,人们首次从理论上证实了由两种或两种以上介质形成的、弹性常数或密度周期性变化的结构中存在弹性波能带结构及弹性波带隙。Martínez-Sala 等<sup>[12]</sup>在 1995 年对西班牙马德里的一座具有 200 多年历史的雕塑“流动的旋律”进行了声学特性测试,从实验角度证实了弹性波带隙的存在。这种弹性常数及质量密度周期性分布且存在弹性波能带结构和弹性波带隙

的周期性复合结构称为声子晶体。

声子晶体按周期性分布的维数可分为一维声子晶体、二维声子晶体和三维声子晶体。一维声子晶体一般为两种或多种材料组成的周期性层状结构或杆状结构。二维声子晶体一般为柱体材料中心轴线均平行于空间某一方向并将其埋入基体材料中所形成的周期性点阵结构。柱体材料可以是中空的或实心的,柱体的横截面通常是圆形,也可以是正方形。柱体的排列形式可以是正方形排列、三角形排列、六边形排列等。三维声子晶体一般是球形散射体埋入某一基体材料中所形成的周期点阵结构。周期点阵结构形式可以是体心立方结构、面心立方结构、简单立方结构等。图 1.2 给出了各种维度的典型声子晶体结构示意图。

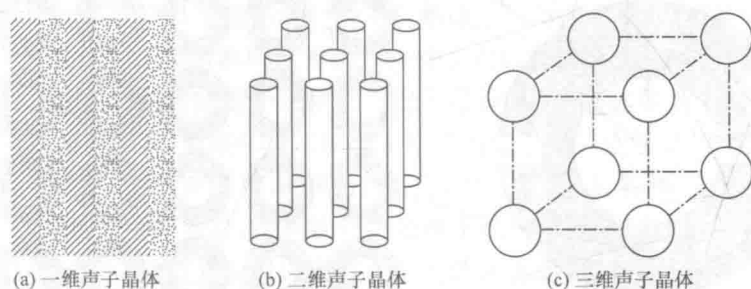


图 1.2 各种维度的典型声子晶体结构示意图

声子晶体的主要特征如下:

- (1) 具有周期性,两种或两种以上弹性材料周期性排列构成;
- (2) 具有带隙特性,落在带隙频率范围中的弹性波被禁止传播;
- (3) 当周期性结构中存在点缺陷、线缺陷和面缺陷时,弹性波会被局域在点缺陷处,或只能沿缺陷方向传播。

通过对声子晶体周期结构及其缺陷的设计,可以人为地调控弹性波的传播。

### 1.2.2 左手材料与电磁超材料

超材料概念的提出始于左手材料的发展。左手材料是苏联物理学家 Veselago<sup>[13]</sup>于 1968 年提出的理论模型,他从 Maxwell 方程出发,分析了电磁波在同时具有负磁导率和负介电常数材料中传播的特性。理论分析表明:在具有负介电常数和负磁导率的材料中,电磁波的能量传播方向(群速度)与相位传播方向(相速度)相反,这时波矢( $\mathbf{K}$ )、电场( $\mathbf{E}$ )、磁场( $\mathbf{H}$ )三矢量之间满足左手螺旋规则,这与电磁波在传统材料(磁导率和介电常数都为正)中的传播规律相反。由于自然界中观察不到这样材料的存在,因此 Veselago 的这一工作长期停留在理论上。

随着二元光学、光子晶体等人工电磁结构研究的不断深入,Pendry 等<sup>[14]</sup>于 1999 年提出了以开口谐振环(split-ring resonator, SRR)为单元的周期结构

(图 1.3),能够实现负的等效磁导率,为左手材料的实现开辟了道路。在此基础上,Shelby 等<sup>[15]</sup>于 2001 年将两种微结构——铜直导线(实现负的电响应)与 SRRs (实现负的磁响应)组合在一起,通过结构尺寸设计使两种单元负响应的频段相同,首次从实现上验证了介电常数和磁导率同时为负的材料。左手材料的实现为人工电磁材料的设计开拓了广阔的空间。研究表明,左手材料具有一系列自然界中天然材料不具有的特性,如折射时入射方向与折射方向处于法线同侧的负折射(图 1.4)、负的切连科夫效应<sup>[16]</sup>、反多普勒效应<sup>[17]</sup>等。其表现出的新颖的电磁响应特性成为 21 世纪初国际物理学界研究的热点。

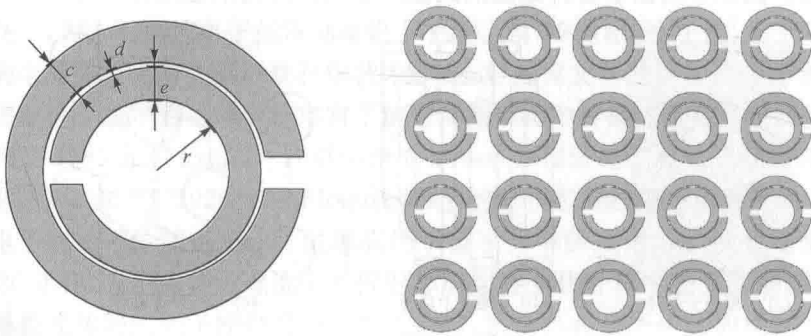


图 1.3 SRRs 结构及其阵列

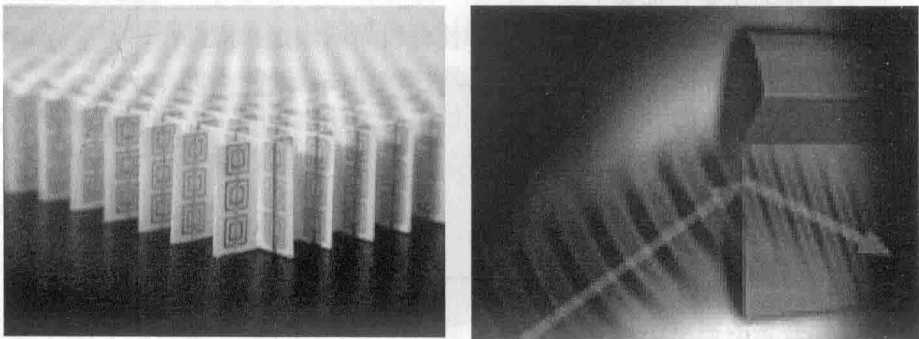


图 1.4 波的负折射现象

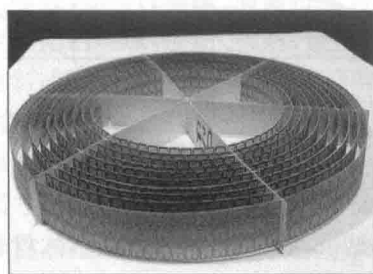
随着研究在深度和广度上的不断深入,通过对实现左手材料的微结构单元的研究发现,通过调整其几何参数和结构形式,可以在亚波长频段实现材料的磁导率或介电常数的任意调控,实现远大于 1、小于 1 甚至接近于 0,以及小于 0 的介电常数和磁导率。这种材料参数大范围可调的特性,为各种新型功能器件的设计提供了更为广泛的材料基础和设计自由度。由于这样的人工材料能够具有天然材料不具备的超常物理性质,研究者用一个新的学术词汇“Metamaterial”来描述,拉丁语为“meta-”,可以表达“超出”含义,因此称为超材料。

作为一种材料设计理念,超材料在微波<sup>[18]</sup>、可见光<sup>[19,20]</sup>、太赫兹<sup>[21,22]</sup>等众多研究领域得到了验证和发展。它表现出的卓越的、传统材料难以具备的特性使其在众多领域具有诱人的应用前景,如新型天线<sup>[23,24]</sup>、电磁隐身<sup>[25,26]</sup>、微波毫米波器件<sup>[27,28]</sup>、表面等离子体光子芯片<sup>[29,30]</sup>、超衍射极限高分辨成像<sup>[31,32]</sup>等。目前,超材料的概念还在扩展,其种类和范围也仍在进一步扩大。但普遍认为,超材料是在连续介质中周期或非周期地嵌入特殊的人工结构单元,能够在亚波长频段获得与自然界中物质迥然不同的超常物理性质的“新材料”。其基本特征如下:

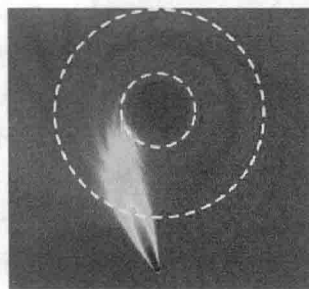
(1) 奇异或者超常物理特性。超材料具有负折射率、负磁导率、负介电常数等超越天然材料的奇异物理特性。这些特性源于波场入射人工结构产生的动态响应。特殊的结构单元设计使动态响应的宏观整体效果与通常材料不同。

(2) 亚波长结构。超材料的超常物理特性出现在波长远大于结构单元尺寸的亚波长频段。超材料的研究源于更早期对光子晶体、声子晶体等人工周期结构的研究。在这些研究中,当周期结构尺度与工作波长处于同一量级时,波场入射人工结构同样能够产生光子/声子带隙、负折射、定向传播等奇异特性,但与超材料不同,当波长与结构尺度相当时,这些效应主要源于结构单元之间的多重散射,或者说 Bragg 散射效应。这些效应可以通过色散曲线来分析,但目前还不能一般性地用等效介质分析将其等效为均匀介质,而超材料的物理性质和材料参数通常可以用等效介质理论来描述。

超材料的特性使人们可通过结构的设计和尺寸的调整来获得不同波段、不同物理性质的响应特性。目前,在电磁波领域,超材料的相关研究覆盖了从微波到可见光波段的广大区域,吸引了众多领域的研究者。由于介电常数和磁导率的人为设计可调特性,超材料为各种新型功能器件(图 1.5)的设计提供了更为广泛的材料基础和设计自由度。自 2005 年起,基于超材料的高分辨率透镜<sup>[33,34]</sup>、波束变换器<sup>[35,36]</sup>、场旋转装置<sup>[37]</sup>、隐身斗篷<sup>[38,39]</sup>等新型功能器件设计原理或方法陆续被提出。随后,超材料在隐身技术、小型化微波器件、天线、天线罩、频率选择表面等方面的应用研究得到了突飞猛进的发展。



(a) 隐身斗篷



(b) 电磁黑洞

图 1.5 基于超材料的新型功能器件



### 1.2.3 声学超材料的概念及基本特征

超材料在电磁领域的发展表明,在连续介质中嵌入亚波长的微结构单元,可以得到具有与自然界中物质迥然不同的超常物理性质的新材料。而声子晶体研究中,通过周期性调制弹性模量或质量密度来控制弹性复合介质中弹性波传播的理论得到系统研究。在这两方面研究的基础上,如何设计亚波长单元控制弹性波传播的思路,即声学超材料(acoustic metamaterial),得到了多个领域研究者的关注。

声学超材料的研究源于局域共振声子晶体。Liu 等<sup>[40]</sup>于 2000 年提出了局域共振声子晶体:利用软橡胶材料包裹高密度芯体构成局域共振单元。在弹性介质中周期性排列局域共振单元构成人工周期结构,在亚波长频段利用弹性波的局域共振效应成功实现了低频弹性波带隙(图 1.6),为低频小尺寸的减振降噪开辟了新的途径。Mei 等<sup>[41]</sup>在局域共振声子晶体的等效介质研究中指出,局域共振单元使复合介质的动态等效质量密度发生了很大变化,在谐振频率附近产生了负的质量密度,正是负的质量密度实现了低频的弹性波带隙。Li 等<sup>[42]</sup>于 2004 年研究了一种由软硅橡胶散射体埋入水中构成的固/液复合周期结构,发现这种复合介质在一定频率范围内的等效质量密度和等效体积模量同时为负值,即表现出所谓的“双负”(double negative)声学参数特性,参照电磁超材料,他们提出了声学超材料的概念。Fang 等<sup>[43]</sup>于 2006 年研究了一种周期排列的 Helmholtz 共振腔阵列,发现其在共振频段具有负的等效体积模量,并给出了实验验证。Ding 等<sup>[44]</sup>于 2007 年设计了双共振单元的具有双负等效参数的固体声学超材料。这些研究都表明,电磁波超材料所具有的超常物理效应在弹性波领域同样存在。

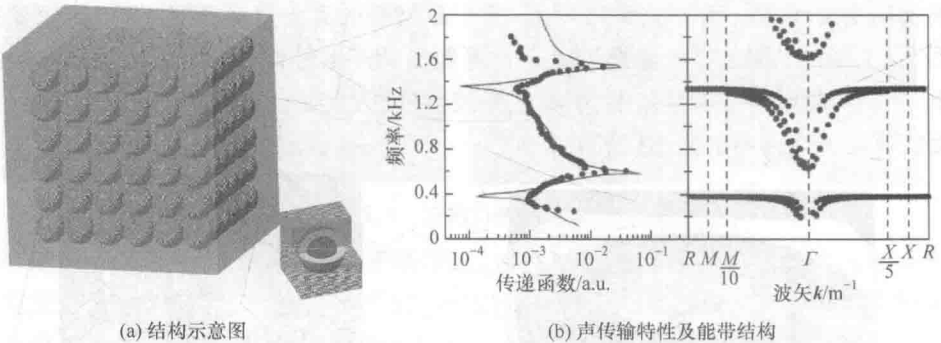


图 1.6 局域共振声子晶体结构及其低频带隙

初期的声学超材料都具有特殊设计的局域共振单元结构,即在基体材料中周期性地嵌入具有共振特性的微结构单元,即局域共振单元、Helmholtz 共振器等(图 1.7)。因此,Fok 等<sup>[45]</sup>于 2008 年在总结声学超材料的研究工作时,认为声学