

文章编号:1007-2985(2011)06-0043-04

# 声超常材料:负参数声学材料的实现<sup>\*</sup>

邓 科

(吉首大学物理与机电工程学院,湖南 吉首 416000)

**摘 要:**声超常材料是质量密度和模量可以为负的新型人工材料,其现在概念上推动了声理论的发展,同时也为研究各种新奇性质提供了可能,从而在应用上为设计各种新型波功能器件提供了基础.对声超常材料的研究成为当前国际上的一个研究热点.对声超常材料的研究进展评述,同时对局部共振机制实现负参数的基本原理进行阐述.

**关键词:**超常材料;局部共振;负参数材料

中图分类号:O415

文献标志码:A

经典波(电磁波、弹性波和声波)在人工结构中的传播是近 20 多年来倍受关注的一个研究热点.该热点始于上世纪 80 年代末期对于光子晶体<sup>[1]</sup>和声子晶体<sup>[2]</sup>的研究.在传统的光子/声子晶体中,其内部结构的尺度与其相应的工作波长相当,因而波在其中传播的规律与它们的结构密切相关.上世纪 90 年代末期,对电磁超常材料(metamaterial)<sup>[3-4]</sup>这一新型亚波长光学人工结构的研究逐渐成为学术界的研究热点.与光子/声子晶体不同,超常材料的结构尺度比工作波长小一个量级左右,于是其电磁性质可以用 2 个有效材料参数(有效介电常数和有效磁导率)来描述,从理论上说这 2 个参数可以在材料设计时通过引入适当的微观结构单元而实现任意的数值,从而实现超常材料电磁性质的可剪裁性.正如半导体超晶格概念的提出开辟了人工物性剪裁的广阔天地一样,电磁超常材料的出现一方面推动了电磁基本理论的发展,另一方面也为实现各种新奇波功能应用提供了可能.超常材料电磁性质的这种可人工剪裁性引起了科学界极大兴趣,大量的研究者被吸引到这个研究方向.目前,在电磁人工结构领域中,无论是早期对于光子晶体的研究,还是现在关于电磁超常材料的实现、性质及其应用方面的研究都已经取得了巨大成就.

但是,在声学人工结构领域中,除了在声子晶体研究上取得很大进展外<sup>[5-8]</sup>,对于声超常材料的研究还处于刚刚起步的阶段.与电磁超常材料对于电磁波的意义类似,声超常材料的实现不仅将在概念上推动着弹性波、声波理论的发展,同时也将为研究各种新奇性质,包括声波的负折射、反常多普勒效应、超常介质界面波、亚波长成像等提供了可能,从而在应用上为设计各种新型波功能器件提供了基础<sup>[9]</sup>.此外,由于弹性波中同时包括了纵波与横波,相对于只包含横波的电磁模式而言,声超常材料必将提供更丰富的物理内涵以及更大尺度的物性剪裁空间.目前,对声超常材料的研究大多集中于负材料参数的实现方面<sup>[10-18]</sup>.笔者对局部共振型声超常材料的研究进展进行评述,同时对局部共振机制实现负材料参数的基本原理进行介绍.

## 1 局部共振机制实现负参数声学材料

由于结构尺度比在其中传播的声波波长小 1 个量级,超常材料的声学性质可以用有效质量密度和有效模量来描述.众所周知,自然界中不存在质量密度和模量为负值的材料.通过在超常材料中引入适当的局部共振结构单元,可以实现其有效质量密度和有效模量分别或者同时为负.声学中对于超常材料的研究开始于 2000 年 Liu 等人关于局部共振声子晶体的研究<sup>[10]</sup>,该工作奠定了利用局部共振机制实现声超常材料的理论以及实验基础,开辟了声超常材料这一崭新研究领域.

### 1.1 负质量密度的实现

2000 年,Liu 等人通过引入低频局部共振单元把通常声子晶体的带隙降低了近 2 个数量级,并据此提出了声带隙的局部共振机制<sup>[10]</sup>.后来被广泛称为局部共振型声子晶体的人工结构能突破 Bragg 机制的局限,使亚波长尺度的结构能对波起作

\* 收稿日期:2011-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11104113);湖南省自然科学基金资助项目(11JJ6007);湖南省高等学校科学研究项目(11C1057)

作者简介:邓 科(1978-),男,湖南湘潭人,吉首大学物理与机电工程学院讲师,博士,硕士生导师,主要从事凝聚态物理相关研究.

用,这使得声子晶体的设计无需再考虑晶格尺寸须与波长的匹配这一限制,从而打开了声子晶体更广阔的应用天地.进一步的研究表明<sup>[18]</sup>,局部共振型声子晶体中这种低频带隙的出现是由于引入的局部共振使整体结构的有效质量密度变成了负值. 同电磁波中通过引入电、磁局部共振单元使复合材料有效介电常数和磁导率变负类似,Liu 等人提出的局部共振型声子晶体实际上是通过引入低频局部共振单元而实现有效材料参数(质量密度)为负的声超常材料的第一个实现.图 1,2 给出了利用 Liu 等人局部共振机制实现负质量密度的一个简单例子.这里将超常材料的单个散射体设计为质地极软的橡胶包裹质量很大的金球,置于环氧树脂基体中(图 1).由该散射体组成的立方声子晶体带结构由图 2 给出,其中粗线和细线分别表示横波模式和纵波模式.可以看到纵波与横波同时出现了一个全方位带隙.该带隙和普通声子晶体的布拉格散射型带隙有很大区别,可以看到,该带隙的底部边缘接近水平,这说明在绝大部分波矢方向上,不同大小波场对应着相同的频率,即不同方向不同大小的波场对应着同样的振动模式.这是一个典型的局部共振型声子晶体带隙.与布拉格散射型带隙形成过程中声子晶体周期性也就是其全局作用起主导作用不同,在局部共振型带隙的形成过程中,起主导作用的是单个散射体的个体作用.将单个散射体设计为质地极软的橡胶包裹质量很大的金球,置于环氧树脂基体中,形成一个极低频的偶极谐振子:橡胶是谐振子的弹簧,金球可以看成谐振子的质点,环氧树脂基体支撑和装载该谐振子,它传递入射的扰动并提供与周围结构单元的相互耦合.把该结构单元周期性地排列,在接近结构单元的共振频率时,入射声波将受到强烈的共振散射,于是向前传播受到遏制,沿传播方向迅速衰减,从而形成带隙,这就是局部共振型声子晶体带隙形成的基本原理.简而言之,通过将具有局部共振性质的散射组成声子晶体从而使得带隙形成中个体或局部的作用得到了加强,而周期性的作用得到削弱,这就是局部共振型带隙与系统的周期性、填充率以及有序性关系不大的原因.以上局部共振结构产生负质量密度的物理图象可以如下理解:当入射波频率增加到散射体的共振频率时,发生偶极共振,此时复合介质的性质由共振散射体的个体行为决定,由于共振的发生使得金球的运动变得与基体的运动反相,从宏观“看”上去表现为局部的质心加速度与局部受力方向反相,即表现出负质量响应.可以看到,这里负质量响应是共振结构动力学行为的一种表现,负质量密度是一种动态密度,而在静态情况下质量是不能为负的.为了更容易的在实验上实现这种负质量响应,2008 年 Yang 等人设计了一个由弹性薄膜与小重块组合在一起的局部共振单元并同样得到了负质量密度<sup>[11]</sup>.该膜状单元结构简单从而更有利于样品的置备,但原理上仍基于 Liu 等人的局部共振机制.

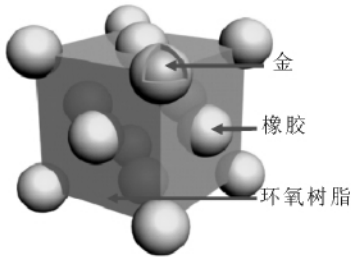


图 1 负质量密度超常材料结构示意图

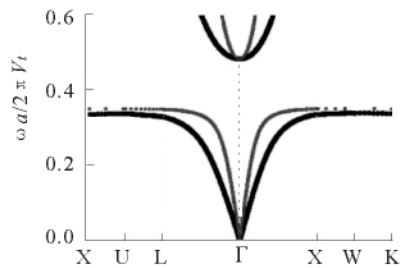


图 2 负质量密度超常材料带结构

### 1.2 负体模量的实现

如果说 Liu 等人利用偶极共振单元实现负质量密度是声超常材料的第 1 个实现,随后加州大学伯克利分校的 Fang 等人通过引入具有单极共振的亥姆赫兹共振腔把另一种声学材料参数体模量变为负从而完成了声超常材料的第 2 个实现<sup>[12]</sup>.该结构由一系列亥姆赫兹谐振腔周期排列在空气基体中所形成.事实上,其他具有单极共振的局部共振单元都可以用来实现负体模量,比如水中的空气泡就在某些频率段具有极强的单极共振行为.图 3,4 给出了利用局部共振机制实现负体模量的一个简单例子.这里将超常材料的单个散射体设计为注入空气泡的水球,置于环氧树脂基体中(图 3).由该散射体组成的立方声子晶体带结构由图 4 给出,其中粗线和细线分别表示横波模式和纵波模式.可以看到纵波出现了一个局部共振型带隙,不能传播,而横模在此频率段不受影响.正是由于将单个散射体设计为注入空气泡的水球,置于环氧树脂基体中,形成一个极低频的单极谐振子,当发生共振时,此时复合介质的性质由共振散射体的个体行为决定,由于共振的发生使得注入空气泡的水球体积膨胀与收缩的趋势与外力反相,从宏观“看”上去表现为外力压缩复合介质时其反而表现为膨胀的趋势,从而表现出负体模量效应.同样,这里的负模量是一种动态的,而在静态情况下是不能为负的.由于弹性介质中纵波横式代表体积的膨胀收缩变化

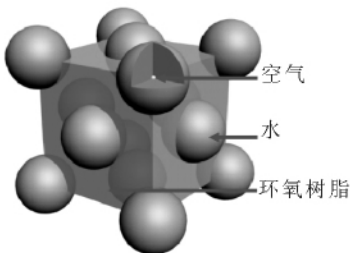


图 3 负体模量的超常材料结构示意图

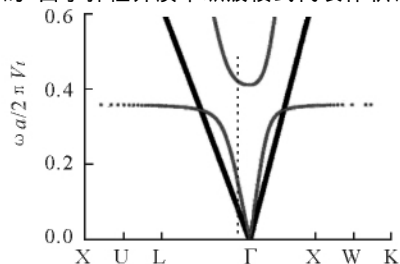


图 4 负体模量的超常材料带结构

以波形式向四周的传播,所以在图 3.4 中纵波出现了带隙,而横波代表弹性介质中旋转运动的波,在图中其色散线不受影响. Hu 等人随后在均匀化的层次上对亥姆赫兹共振腔进行了系统研究,证实了其负体模量的有效性<sup>[12]</sup>.

### 1.3 质量密度和体模量同时为负的实现

2007 年, Ding 等人设计了一个固体基的双共振单元结构,一种单元提供偶极共振使整体结构的质量密度变负,而另一种单元提供单极共振使体模量变负,分别把 2 个材料参数的负频率区间调节到同一位置,从而实现了密度和体模量同时为负的声超常材料<sup>[14]</sup>. 值得指出的是,质量密度和体模量同时为负也可以由单一的结构单元如置于水中的橡胶小球产生<sup>[15]</sup>,但这种方式产生的“双负带”具有方向性,而且产生的负质量效应和负体模量效应是耦合在一起的,很难做到分别调节单个效应. 从而限制了这种单一结构的适用性. 而双结构的优势则在于质量密度和模量可以分别独立调整,从而有利于声超常材料有效参数的人工设计<sup>[16-17]</sup>. 图 5,6 中给出一个用三组元双局部共振声子晶体实现复合材料双负响应的一个简单例子. 这里将超常材料的单个散射体设计为由 2 个共振单元在环氧树脂基体中复式排列成尖晶石结构而构成的声子晶体,其中一种单元由金球核包裹软橡胶层而构成,另一种单元由注入小气泡的水球构成. 2 个单元各自构成一个面心立方排列(图 5). 由于金球核包裹软橡胶层嵌于硬环氧树脂中的结构能提供偶极共振,而包含有空气泡的水球结构则能提供单极共振,这 2 种共振单元分别导致声超常材料的有效质量密度和有效纵波模量反常频率响应. 分别设计 2 种共振单元使其在同一频率范围发生共振,那么将 2 种单元以复式格子形式镶嵌在同一种基体中将使使得复合材料的有效质量密度和有效纵波模量同时具有反常频率响应,也就是说,可以实现双负的声超常材料. 由该散射体组成的复式晶体带结构由图 6 给出,其中粗线和细线分别表示横波模式和纵波模式. 可以看到 2 种散射体被放到一起时,出现了一条新的纵波导带,而横波仍处于禁带不能传播. 此时由于质量密度和体模量同时为负的响应,纵波在声子晶体中是左手性的,所以出现了图中这条负斜率的纵波带,由此实现了质量密度和体模量同时为负.

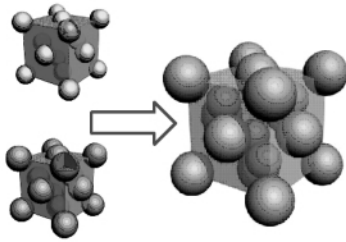


图 5 双负超常材料结构示意图

图 5 中利用局部共振机制实现双负超常材料结构示意图,该结构由图 1,2,3,4 中 2 种共振单元嵌套而成.

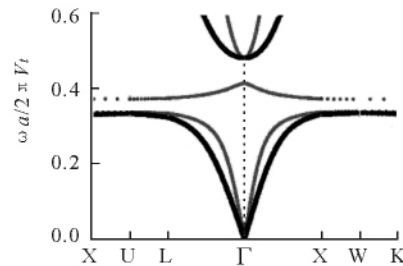


图 6 双负超常材料带结构

## 2 结语及展望

超常材料这一概念的提出极大拓展了人们以往关于自然界材料性质的理解,开辟了人工物性剪裁的新天地. 在过去短短的几年中,超常材料的发展非常迅速,已成为当今科学界的前沿和热点. 其中关于声超常材料的研究更是方兴未艾,前景广阔,同时也存在着巨大的挑战. 首先,如何有效实现横波模量为负仍是与声超常材料相关的一个极具挑战性的问题. 由于有效横波模量对应的是散射矩阵的角动量取时的高阶量,其共振耦合非常弱,用局部共振机制实现其为负值比较困难<sup>[19]</sup>,目前还没有在实验上得以实现. 同时,基于局部共振机制的声超常材料一般来说结构比较复杂,实验上制备超常材料有困难,于是机制上寻找更简单的结构来实现超常材料负参数也是目前一个颇受关注的重要问题,比如,最近 He 等<sup>[20]</sup>提出利用软板反对称表面模式来实现负质量的工作就为该问题提供了一个全新的解决思路. 此外,目前对于声超常材料奇异性质的研究还相对比较欠缺,即便有也大多仅仅集中在其参数为负的区间. 事实上,弹性波中同时包括了纵波与横波,其反常材料响应可以提供非常广阔的利用空间. 在与声超常材料相关的三个参数,即质量密度、体模量、切模量的组合下,作为全矢量波的弹性波在参数趋向于各种极限值时的奇异行为具有极其丰富的物理内容<sup>[21]</sup>. 对这些反常性质的探索和调控,以及利用这些性质设计新型波功能应用并实现器件的制备,无疑将成为声超常材料领域接下来最重要的发展方向.

### 参考文献:

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58 (2): 2 059.
- [2] SIGALAS M, ECONOMOU E N. Elastic and Acoustic Wave Band Structure [J]. J. Sound Vib., 1992, 158(2): 377-382.
- [3] PENDRYR J B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 3 966.
- [4] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE C K. Metamaterials and Negative Refractive Index [J]. Science, 2004, 305: 5 685.

- [5] DENG K, DING Y, HE Z, et al. Graded Negative Index Lens with Designable Focal Length by Phononic Crystal [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, 42:18 5505.
- [6] HE Z J, LI X C, DENG K, et al. Far-Field Focusing of Acoustic Waves by a Two-Dimensional Phononic Crystal with Surface Grating [J]. *Europhys. Lett.*, 2009, 87:57 003.
- [7] WANG Y, DENG K, XU S J, et al. Applications of Antireflection Coatings in Sonic Crystal-Based Acoustic Devices [J]. *Phys. Lett. A*, 2011, 375:1 348.
- [8] LI B, DENG K, ZHAO H P. Acoustic Guiding and Subwavelength Imaging with Sharp Bending by Sonic Crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99:051 908.
- [9] DENG K, DING Y Q, HE Z J, et al. Theoretical Study of Subwavelength Imaging by Acoustic Metamaterial Slabs [J]. *J. App. Phys.*, 2009, 105:124 909.
- [10] LIU Z Y, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally Resonant Sonic Materials [J]. *Science*, 2000, 289:5 485.
- [11] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-Type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:204 301.
- [12] FANG N, XI D, XU J, et al. Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus [J]. *Nature Mater.*, 2006(5):6.
- [13] HU X H, HO K M. Homogenization of Acoustic Metamaterials of Helmholtz Resonators in Fluid [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77:172 301.
- [14] DING Y Q, LIU Z Y, QIU C Y, et al. Metamaterial with Simultaneously Negative Bulk Modulus and Mass Density [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99:093 904.
- [15] LI J, CHAN C T. Double-Negative Acoustic Metamaterial [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, 70:5.
- [16] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104:054 301.
- [17] CHENG Y, XU J Y, LIU X J. One-Dimensional Structured Ultrasonic Metamaterials with Simultaneously Negative Dynamic Density [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77:045 134.
- [18] LIU Z Y, CHAN C T, SHENG P. Analytic Model of Phononic Crystals with Local Resonances [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 71:1.
- [19] WU Y, ZHANG Z Q. Dispersion Relations and Their Symmetry Properties of Electromagnetic and Elastic Metamaterials in Two Dimensions [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 79:195 111.
- [20] HE Z J, QIU C Y, CHENG L, et al. Negative-Dynamic-Mass Response Without Localized Resonance [J]. *Europhys. Lett.*, 2010, 91:54 004.
- [21] LAI Y, WU Y, SHENG P, et al. Hybrid Elastic Solids [J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10:620.

## Acoustic Metamaterials: Realizing Acoustic Materials with Negative Parameters

DENG Ke

(College of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, Hunan China)

**Abstract:** Acoustic metamaterials are novel artificial materials that can be designed to possess negative mass density and modulus. Realization of such materials not only leads to conceptual advancements in the fundamental theory of acoustics, but also enables possibilities for the investigation of various kinds of novel properties. This in turn provides the foundation for designing a variety of novel wave-functional applications. Acoustic metamaterials have attracted enormous interests in recent years. In this paper the author presents an overview of the progress in the research on acoustic metamaterials and gives an illustration to the locally resonant mechanism for realizing negative material parameters.

**Key words:** metamaterials; local resonance; negative-parameter-materials

(责任编辑 陈炳权)