

声子玻璃三维建模研究

蒙丹¹, 陈猛¹, 姜恒^{1,2}, 王育人¹, 吕世金²

(1 中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京, 100190;

2 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

3 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 声子玻璃是一种基于网络化局域共振机制的新型水下吸声材料, 不仅可以在宽频 (12kHz-30kHz) 范围内对声波进行有效的强吸收, 同时还具备良好的抗压能力。本文利用有限元方法, 建立了三维隐函数模型。该模型能够描述声子玻璃的吸声机理与宽频强吸声性能, 计算结果与实验结果相符, 可以用来研究各个因素对声子玻璃吸声性能的影响以及它的吸声机理, 可以为实验中组分材料的选择及性能优化提供理论支撑。

关键词: 声子玻璃; 互穿网络; 水下吸声; 有限元; 三维模型

1 引言

局域共振声子晶体 (Locally Resonant Phononic Crystal) 具有不同于布拉格散射等周期结构材料的声学特性, 它可以打破质量密度定律, 可以以较小尺度实现对长波长声波的有效控制, 大幅降低了低频声学材料的尺度, 是最近声学材料领域的研究热点^[1,2]。研究表明, 当考虑材料粘弹性时, 它可以对带隙频率处的声波产生有效吸收^[3,4], 因此局域共振声子晶体可以用作水下吸声材料^[5,6]。但受吸声机制所限, 直接将其用于水下吸声材料只能在很窄的频率范围内实现强吸声, 这不能满足实际的应用需求。为了解决这一问题, 我们在局域共振声子晶体中引入一些互穿网络结构, 制备了一种小尺度宽频强吸声的水下声隐身材料——声子玻璃^[7-9]。声子玻璃是一种基于局域共振的新型水下吸声材料, 它不仅可以在宽频 (12kHz-30kHz) 范围内对声波进行有效的强吸收, 同时还具备良好的抗压能力。它的三种组分材料构成复杂的互穿网络结构, 影响吸声性能的因素众多, 难以解耦, 这给声子玻璃的结构设计、组分选择以及性能优化带来困难。虽然在前期的研究中, 通过一维质量弹簧模型对声子玻璃的宽频吸声性能进行了研究, 但模型过于简单, 且由于计算方法所限无法给出吸声系数。因此, 建立一个能够描述声子玻璃吸声机理与吸声性能的力学模型, 进而开展性能优化是十分必要的。

在传统的局域共振声学材料中, 散射体往往为柱状或者球形孤立散射单元^[10], 强吸声效应依赖于散射单元在局域共振频率处的振动及声波在组分材料界面处的波形转换^[11,12]; 在声子玻璃中, 虽然硬-软-硬的结构和局域共振声学超材料单元一致, 但它的三种组分材料连接成网络化结构, 再加上多尺度的单元分布, 使吸声机制更为复杂^[7-9]。结构的复杂性使以往局域共振声学超材料中的计算方法和简化模型均不再适应, 因此需要在局域共振吸声机制的基础上, 考虑泡沫金属的互穿网络结构, 建立新的物理模型, 开展声子玻璃的吸声系数及

模态响应的研究。

有限元方法可以对连续系统进行离散化处理，将质量集中到有限的节点上形成集中质量，具有收敛性好等优点，特别适合复杂结构的理论计算。因此，本文利用有限元方法，根据泡沫金属的真实结构建立三维隐函数模型，开展声子玻璃吸声系数数值计算研究。

2 模型构建

虽然二维泡沫金属网状模型考虑到了泡沫金属网络结构的实际构型，但两种软硬聚氨酯组分材料仍然处于分离状态，而实际样品中三种组分材料均为互穿网状结构，两者之间仍存在一定的差异性，这也是二维几何模型无法避免的局限。因此在二维虚拟弹簧模型及泡沫金属网状模型的基础上，本文开展了声子玻璃的三维模型构筑研究。

性能优异的多孔固体材料广泛存在于自然界和工程结构中，例如骨骼、催化剂载体、生物支架和桁架^[13]。由于具备多孔拓扑结构和大的比表面，这些多孔材料通常具备优异的力学和其他物理化学性能。随着微加工和 3D 打印技术的发展，如何对这些多孔材料实现可控制备成为研究的热点。为此，在传统周期人工结构的基础上，研究者建立了一系列的三维多孔材料数学模型，能够量化的描述这些多孔材料的微结构，为其可控制备奠定了基础，这也为声子玻璃三维模型构建提供了思路。

图 1 展示三种不同的多孔微结构，它们与晶体中空间点阵的反结构类似，被命名为简单立方、体心立方及面心立方。其中简单立方可以用以下函数形式描述：

$$f_{sc}(x, y, z) = \cos(x) + \cos(x) + \cos(x) - 0.5 \cos(x) \cos(y) - 0.5 \cos(x) \cos(z) - 0.5 \cos(z) \cos(y) + t \quad (1)$$

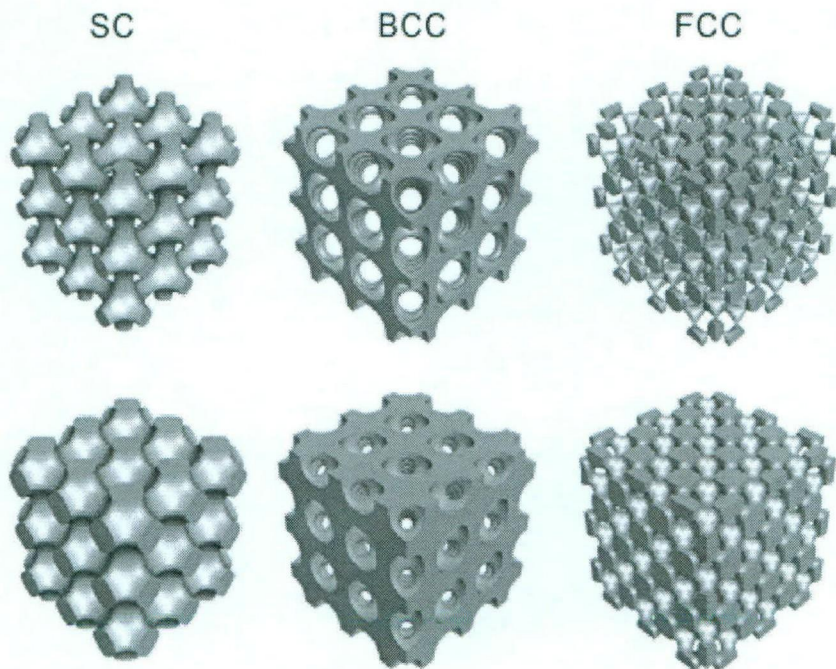


图 1 三维简单立方、体心立方及面心立方多孔固体微结构示意图

体心立方可以由以下函数形式描述：

$$f_{BCC}(x, y, z) = \cos(x)\cos(y) + \cos(x)\cos(z) + \cos(z)\cos(y) + t \quad (2)$$

面心立方可以由以下函数形式描述:

$$f_{FCC}(x, y, z) = 4\cos(x)\cos(y)\cos(z) + \cos(2x)\cos(2y) + \cos(2x)\cos(2z) + \cos(2z)\cos(2y) + t \quad (3)$$

其中 t 为控制参量, 可以用来调节孔隙率大小。

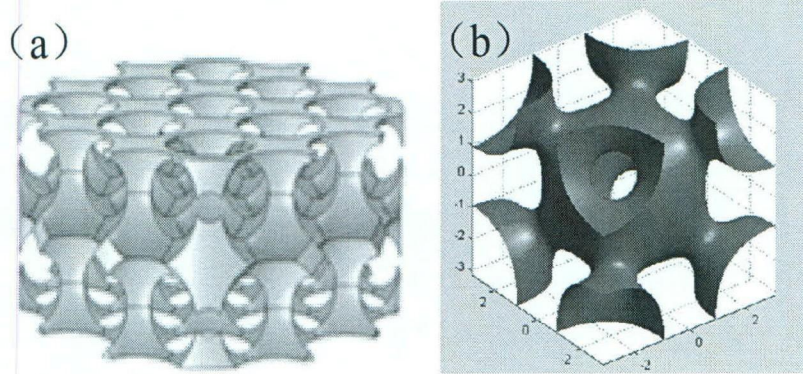


图 2 (a) 泡沫铝结构示意图及 (b) 三维体心立方多孔固体微结构单元示意图

当忽略泡沫铝结构的无序性时, 结构示意图如图 2 (a) 所示, 其结构单元与体心立方单元微结构 (如图 2 (b) 所示) 最具相似性, 因此泡沫铝结构可以利用三维体心立方多孔固体的数学表达进行近似描述。由声子玻璃制备工艺可以看出, 软聚氨酯包覆在泡沫铝结构的外侧, 其结构与泡沫铝结构一致, 它们均可以用相同的数学表达形式进行描述, 仅体现在孔隙率参数 t 取值的不同。因此, 本文在声子玻璃三维力学模型的构建中, 采用体心立方即公式 2 对它的结构进行了建模分析。

由于公式 2 在形式上为隐函数, 难以用几何图形来真实描述其真实内部结构, 为了便于计算, 在本文的三维模型中, 利用公式 2 分别对三种组分材料的参数进行了定义, 虽然模糊了真实结构, 但其物理内涵保持不变。经过定义之后, 三维声子玻璃模型单元示意图如图 3 所示, 可以看出三种组分材料均构成互穿网络结构, 与真实的泡沫铝结构类似。利用有限元

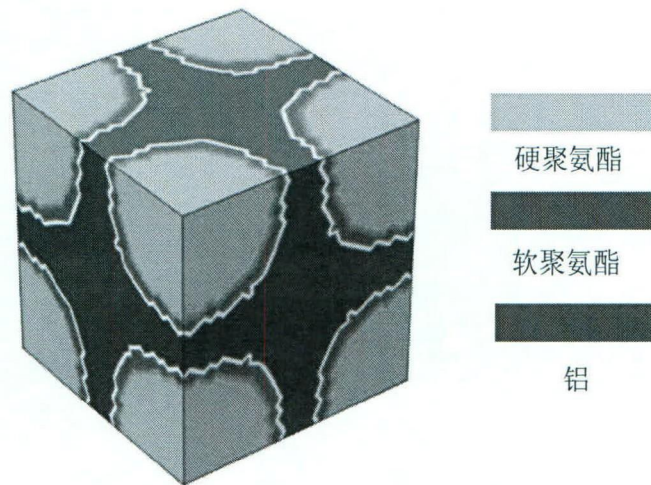


图 3 三维声子玻璃模型单元示意图

计算方法, 对三维声子玻璃隐函数模型的吸声系数进行了计算, 计算结果如图 4 所示。

3 结果与讨论

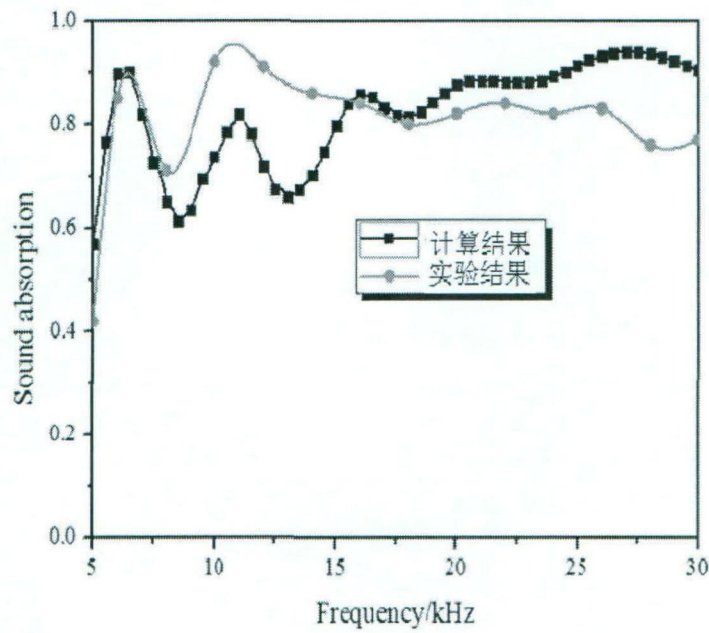


图 4 孔隙率为 65% 三维隐函数模型计算与实验结果对比图

图 4 给出了利用三维隐函数模型对孔隙率为 65% 的声子玻璃的吸声系数计算结果，可以看出，计算结果与实验结果有较好的一致性，整个曲线变化趋势基本一致，在 6kHz-30kHz 频率范围内吸声系数在 0.6 以上，实现了对声波的宽频吸收。同时应该注意到，在 10kHz-15kHz 计算结果与实验结果误差较大，造成这种现象的原因可能是：在三维隐函数模型中采

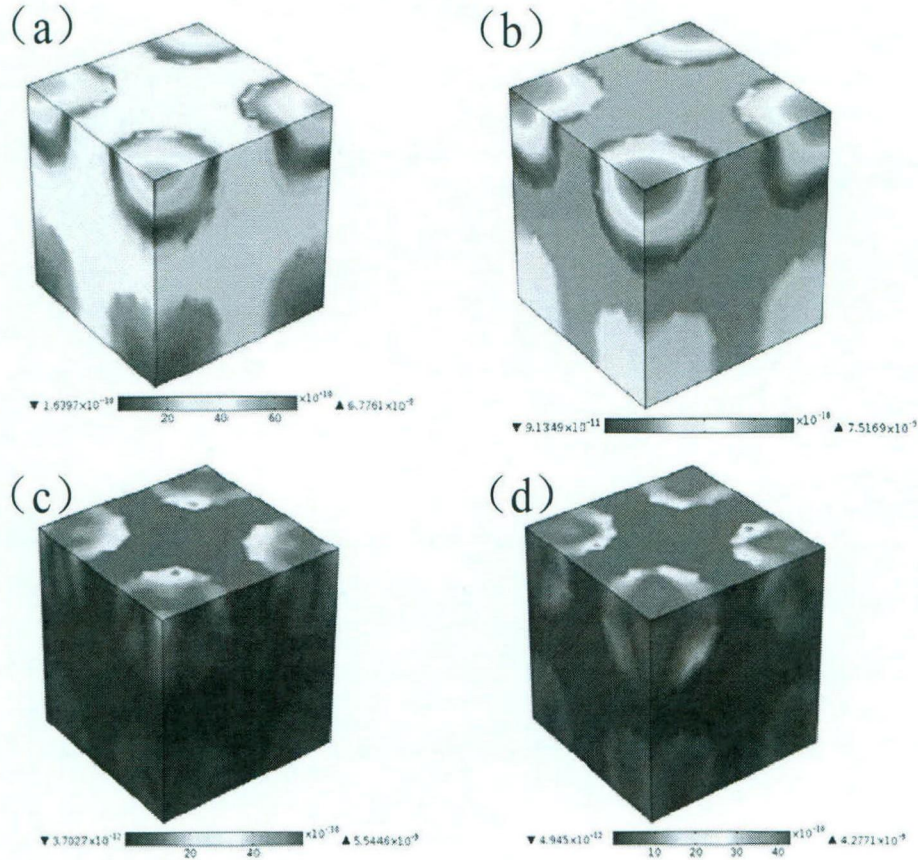


图 5 三维隐函数模型结构单元在 (a) 5kHz, (b) 7kHz, (c) 18kHz, (d) 24kHz 处材料的模态响应图

用了周期性边界条件忽略了结构单元无序性及多尺度带来的影响;另外在计算时并未考虑缺陷对吸声性能的影响,这与实际情况并不相符。上述结果证实,可以利用三维隐函数模型开展声子玻璃吸声性能优化以及吸声机理研究。

图5(a)(b)(c)(d)分别给出了声子玻璃在5kHz,7kHz,18kHz及24kHz频率处的模态响应图。从各个频率处的模态响应可以看出:5kHz吸声主要发生在软硬聚氨酯中,反射主要发生在金属部分,故吸声系数不高;7kHz吸声主要发生在软聚氨酯中,而反射发生在硬聚氨酯中,相比较5kHz频率处,反射强度变小,故吸声系数有一定提高;18kHz处,声波在样品表面反射很少,大多集中在组分材料的界面处,因此吸声性能较好;24kHz模态响应与18kHz类似,故该处吸声系数也较高。另外从18kHz及24kHz的模态响应图中可以看出,声波在声子玻璃材料的表面处反射大幅下降,大部分声波能够进入材料内部,吸收效率得到有效提高,故吸声系数较大。

4 结 论

本文利用有限元方法,通过体心立方多孔材料的数学描述建立了声子玻璃三维力学模型。该模型能够描述声子玻璃的吸声机理与宽频强吸声性能,计算结果与实验结果相符,可以用来研究各个因素对声子玻璃吸声性能的影响以及它的吸声机理,可以为实验中组分材料的选择及性能优化提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, P. Shen. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [2] Y. Liu, X. Zhang. Metamaterials: a new frontier of science and technology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [3] H. G. Zhao, Y. Z. Liu, J. H. Wen, D. Yu, G. Wang, X. Wen. Sound absorption of locally resonant sonic materials. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(8): 2132-2134.
- [4] J. H. Oh, Y. J. Kim, Y. Y. Kim. Wave attenuation and dissipation mechanisms in viscoelastic phononic crystals. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(10): 106101 1-3.
- [5] H. Zhao, Y. Liu, D. Yu, J. Wen, X. Wen. Absorptive properties of three-dimensional phononic crystal[J]. *Journal of sound and vibration*, 2007, 303(1): 185-194.
- [6] H. Zhao, Y. Liu, J. Wen, D. Yu, X. Wen. Tri-component phononic crystals for underwater anechoic coatings[J]. *Physics Letters A*, 2007, 367(3): 224-232.
- [7] H. Jiang, M. Zhang, Y. Wang, Y. Hu, D. Lan, B. Wei. A wide band strong acoustic absorption in a locally network anechoic coating[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(10): 106202 1-4.
- [8] H. Jiang, Y. Wang, M. Zhang, Y. Hu, D. Lan, Q. Wu, H. Lu. Wide-band underwater acoustic absorption based on locally resonant unit and interpenetrating network structure[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(2): 026202 1-6.
- [9] H. Jiang, Y. Wang. Phononic glass: a robust acoustic-absorption material[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2012, 132(2): 694-699.
- [10] Z. Liu, C. T. Chan, P. Sheng. Analytic model of phononic crystals with local resonances[J]. *Physical Review*

B, 2005, 71(1): 014103 1-8.

- [11] Y. Liu, D. Yu, H. Zhao, J. Wen, X. Wen. Theoretical study of two-dimensional phononic crystals with viscoelasticity based on fractional derivative models[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(6): 065503 1-7.
- [12] J. Wen, H. Zhao, L. Lv, B. Yuan, G. Wang, X. Wen. Effects of locally resonant modes on underwater sound absorption in viscoelastic materials[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 130(3): 1201-1208.
- [13] M. Maldovan, C. K. Ullal, J. H. Jang, E. L. Thomas. Sub-Micrometer Scale Periodic Porous Cellular Structures: Microframes Prepared by Holographic Interference Lithography[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 3809-3813.