

基于Voronoi模型的泡沫铝声学性能研究

王海岩¹, 徐成宇^{1,2}, 姜泰儒¹, 王永华^{1*}

¹长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春

²长春理工大学重庆研究院, 重庆

收稿日期: 2026年5月16日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

在闭孔泡沫铝的模拟研究中, 因内部结构随机、复杂, 仿真模型构建待突破。为获取准确泡沫铝仿真结果, 开展系列研究, 提出了基于Voronoi的随机点算法, 利用ABAQUS软件二次开发接口, 建立高质量闭孔泡沫铝实体模型。其次, 依托COMSOL多物理场仿真平台, 计算打孔后闭孔泡沫铝吸声系数, 发现86%孔隙率泡沫铝, 同厚度、同打孔率下, 孔径0.4 mm、1 mm、1.6 mm时, 孔径1.0 mm模型平均吸声系数达0.42; 借助COMSOL声振耦合模块, 分析未打孔闭孔泡沫铝隔声量, 2~4 mm、4~6 mm、6~8 mm孔径模型里, 2~4 mm孔径模型隔声性能最优。最后, 以中走丝线切割、高速电火花打孔机, 加工与仿真模型参数一致样件, 在阻抗管测试吸声、隔声系数, 与仿真数据对比, 结果显示仿真实接近试验值。

关键词

泡沫铝, 几何建模, 有限元仿真, 吸声性能, 隔声性能

Closed-Cell Aluminum Foam Voronoi Homogenization Modeling and Its Acoustic Performance

Haiyan Wang¹, Chengyu Xu^{1,2}, Tairu Jiang¹, Yonghua Wang^{1*}

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Chongqing Research Institute of Changchun University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 16, 2026; accepted: June 16, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

In the simulation study of closed-cell aluminum foam, the internal structure is random and complex,

*通讯作者。

文章引用: 王海岩, 徐成宇, 姜泰儒, 王永华. 基于 Voronoi 模型的泡沫铝声学性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 131-142. DOI: 10.12677/ms.2026.166145

and the construction of the simulation model needs breakthroughs. To obtain accurate simulation results of the aluminum foam, a series of studies were conducted. This research proposes a Voronoi-based homogenization random point algorithm to establish a high-quality solid model of closed-cell aluminum foam using the secondary development interface of ABAQUS software. Next, based on the COMSOL multiphysics simulation platform, the sound absorption coefficient of the perforated closed-cell aluminum foam is calculated. It was found that for aluminum foam with a porosity of 86%, under the same thickness and hole ratio, when the hole diameters are 0.4 mm, 1 mm, and 1.6 mm, the model with a hole diameter of 1.0 mm achieves a peak sound absorption coefficient of 0.78. Finally, a sample with parameters consistent with the simulation model was processed using a high-speed electrical discharge machine, and the sound absorption coefficient was tested in an impedance tube. The experimental results were compared with the simulation data, and the results showed that the simulation closely matched the experimental values.

Keywords

Aluminum Foam, Geometric Modeling, Finite Element Simulation, Sound Absorption Performance, Sound Insulation Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化进程加快、人口密度增大导致噪声污染加剧,既影响工业生产又危害人体健康,长期暴露于噪声环境危害显著[1],人们对生活区域声环境要求随之提高。多孔金属材料因兼具轻质、高孔隙率、大比表面积及防潮、隔热、高比强度、成本低廉等优势,优于其他多孔材料[2],利用其吸声降噪是当前经济实惠且效果较好的噪声治理方式[3]。多孔金属泡沫材料分开孔与闭孔两类,泡沫铝应用最广泛:开孔泡沫铝吸声性能优异,学者通过优化内部结构、加工微结构提升其声学性能[4];未经加工的闭孔泡沫铝吸声差但隔声好,学者围绕结构参数等因素开展试验[5],另有学者通过钻孔大幅提升其吸声性能[6]。不过,泡沫材料内部结构复杂,研究多集中在试验,声学仿真少,CT扫描建模成本高[7],三维 Voronoi 建模虽可信,但需 Matlab 计算、过程复杂且多用于力学仿真[8],导致研究缺乏模拟与试验结合,浪费材料。

闭孔泡沫铝主要制备方法有三种:注气发泡法(加拿大国际铝业专利)注气搅拌制泡,简单快速但孔结构难控[7];熔体发泡法加发泡剂与增粘剂制泡,工艺简单、孔隙率可控[8];粉末冶金法压坯加热制泡,产品稳定但孔径小、工艺复杂[9][10]。泡沫铝综合性能优良:力学上,弹性参数随孔隙率指数下降,吸能效率达 90%,压缩分三阶段,孔隙率等影响吸能曲线[10]-[12];声学上,金属-空气交界摩擦耗声能,开孔吸声、闭孔隔声[13]-[16];加工上,传统工艺可行,电火花打孔、线切割优于传统加工[17]-[20];热学上,隔热性好可作阻燃材料[21];电磁屏蔽上,开孔泡沫铝高频屏蔽优,孔径小、孔多则屏蔽好[22][23]。泡沫铝在多领域广泛应用:军事与航天领域,可作轻质支撑与吸能部件,降低航天器发射成本[24][25];机械制造行业,可减振动、作电子仪器外壳[26];建筑领域,可作吸隔声建材,安全环保[27];交通运输领域,契合汽车轻量化,提升框架刚度且减重。当前泡沫铝研究侧重试验,仿真与理论薄弱:Gibson-Ashby 模型(正六面体)奠定力学计算基础,但适用范围有限[28];八面体模型精度高但难表征信孔分布[29];Kelven 模型(十四面体)接近胞孔结构但计算误差大[30];Voronoi 模型最接近真实闭孔泡沫铝[31]。声学性能研究以试验为主:吸声上,孔径等影响吸声系数,打孔后复合其他材料可提升吸声性能[32];隔声上,孔隙率、厚度影响隔声量,闭孔水下隔声优于开孔。

本文围绕闭孔泡沫铝声学性能研究的创新点主要体现在三方面：其一，模型构建层面，基于 Voronoi 原理并通过 AbaqusCAE 软件接口，建立可灵活调控孔隙率、孔径、壁厚等关键参数的闭孔泡沫铝三维实体模型，同时针对性优化模型孔径均匀性，解决了传统仿真模型难以精准匹配实际闭孔泡沫铝结构且参数可调性差的问题；其二，仿真设计层面，利用 COMSOL 软件搭建阻抗管仿真模型，分别针对相同孔隙率、相同厚度下的闭孔泡沫铝开展吸声系数仿真，以及相同厚度下不同孔径闭孔泡沫铝开展隔声量仿真，实现了对闭孔泡沫铝不同结构状态下声学性能的精准模拟与差异化分析；其三，验证逻辑层面，通过在声学阻抗管内测试与仿真参数完全对应的闭孔泡沫铝样件，在相同频率条件下获取试验数据并与仿真结果对比，形成“参数化建模 - 针对性仿真 - 试验验证”的完整研究闭环，为闭孔泡沫铝声学性能的精准调控与应用提供了更具可信度的技术路径。

2. 泡沫铝模型构建

Voronoi 图由俄国数学家 Georgy Voronoi 提出(如图 1(a)所示)，是基于随机点划分空间的算法，具体为将空间划分为多个区域，每个区域内任意点到其所属随机点的距离均最近，该方法广泛应用于建筑、设计、人工智能等领域；三维 Voronoi 结构(如图 1(b)所示)是二维 Voronoi 图在三维空间的延伸，其构建方式为在空间中生成一组随机点，连接任意两点并取连线的垂直平分面，通过多个平分面相交构建连续多面体，在笛卡尔坐标系中分布 N 个随机点时，基于 Voronoi 原理可将空间划分为 N 个不规则多面体，每个多面体仅含一个随机点，且体内任意位置到该点的距离小于到其他随机点的距离。

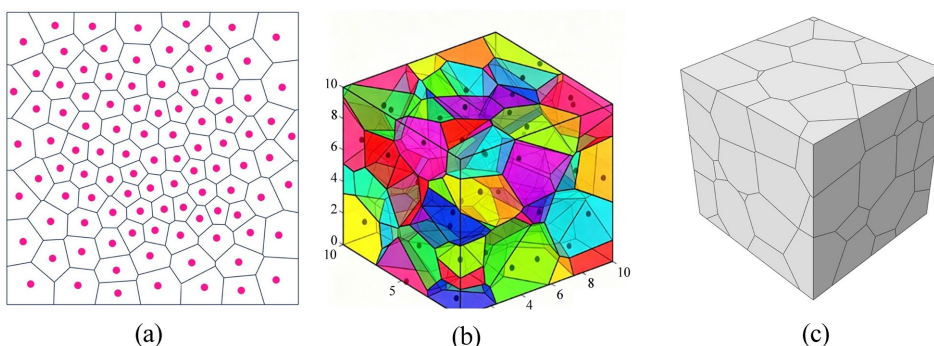


Figure 1. (a) 2D Voronoi diagram; (b) 3D Voronoi diagram; (c) 3D Voronoi housing model
图 1. (a) 二维 Voronoi 图; (b) 三维 Voronoi 图; (c) 三维 Voronoi 壳体模型

R_i 代表第 i 个多面体内部的随机点位置坐标，该多面体由其各顶点连接而成，各顶点 P 到其他随机点距离大于等于到内部随机点 R_i 的距离：

$$V_i = \bigcap_{i \neq j} \{P \in D \mid d(P, R_i) \leq d(P, R_j), i \neq j\} \quad (1)$$

其中， $d(P, S)$ 为 Voronoi 多面体顶点 P 与其所围成的多面体内部随机点的三维空间距离：

$$d(P, R) = \sqrt{(P_x - R_x)^2 + (P_y - R_y)^2 + (P_z - R_z)^2} \quad (2)$$

结合二维与三维 Voronoi 模型的特点可知，其与闭孔泡沫铝结构高度相似：三维 Voronoi 的构建方式与传统发泡法制备泡沫铝类似，均以成核点为中心形成空腔实现空间划分；如图 1(c)所示，上述方法生成的无厚度壳体模型存在明显局限：其一，无法真实反映闭孔泡沫铝的孔壁结构，因片体无厚度，在声学仿真中难以准确模拟穿孔孔板特性，易导致较大误差，即便在仿真中赋予厚度，也会产生壁重叠问题，

影响模型质量；其二，壳体模型无法体现孔隙率这一关键参数，致使模型在声学计算中适用性受限。因此，需进一步优化 Voronoi 模型，使其更接近闭孔泡沫铝真实结构，为后续声学性能研究奠定可靠基础。

为了提高模拟的准确性，在后续的工作中，利用新的算法公式添加 Voronoi 三维模型的壁厚，具体思路为假定壁厚为 D ，在计算三维 Voronoi 模型的各点间垂直平分面时，令垂直平分面沿着垂直于控制点的直线方向上对称偏移 $\frac{D}{2}$ 的距离，构建出壁厚 D 后，原本的中点及其所在的垂直平分面也将沿平面法线向两个方向分别移动 $\frac{D}{2}$ 的距离，移动后的两中点坐标分别为：

$$P_{m1} \left(x_m - \frac{D}{2}i, y_m - \frac{D}{2}j, z_m - \frac{D}{2}k \right) \quad (3)$$

$$P_{m2} \left(x_m + \frac{D}{2}i, y_m + \frac{D}{2}j, z_m + \frac{D}{2}k \right) \quad (4)$$

垂直平分面移动后其单位法向量并未改变，其偏移后两垂直平分面方程为：

$$i \left(x - x_m \pm \frac{D}{2}i \right) + j \left(y - y_m \pm \frac{D}{2}j \right) + k \left(z - z_m \pm \frac{D}{2}k \right) \quad (5)$$

该式中，朝原控制点方向移动的平面取正号，朝新控制点方向移动的平面取负号。引入壁厚后的三维 Voronoi 模型结构更接近真实闭孔泡沫铝，且壁厚与孔隙率关键参数的加入，可显著提升仿真计算中数据统计与结果分析的准确性。如图 2 所示，壳体模型由无厚度平面组成，声学计算误差较大；而壁厚 0.2 mm 的实体模型更贴合实际结构，适合用于声学性能研究。

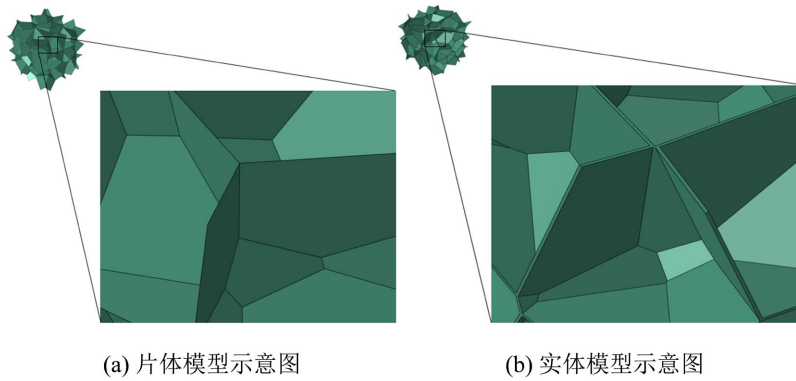


Figure 2. Model comparison diagram
图 2. 模型对比示意图

闭孔泡沫铝的孔隙率最常规的计算方法为：采用线切割等方式，在大面积的闭孔泡沫铝板上截取一块容易计算其体积的样件，通过称量其质量，计算出其密度，多次重复实验后取得其平均密度 $\bar{\rho}$ ，由公式可知该闭孔泡沫铝的孔隙率 S 为：

$$S = \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\rho_a} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中 ρ_a 为纯铝的密度。通过 Voronoi 三维模型构建的闭孔泡沫铝孔隙率可用下式表示：

$$S = \left(1 - \frac{V_s}{V} \right) \times 100\% \quad (7)$$

该式中 S 为三维 Voronoi 模型的孔隙率, V_s 为模型中骨架所占体积, V 为 Voronoi 模型的总体积, 实体模型的孔隙率计算方法简单, 而片体模型需要后期设定其平面厚度及其他属性, 所以片体模型的孔隙率计算如下:

$$S = \left(1 - \frac{D \sum A_i}{V} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中 D 为设定的壁厚, A_i 为壁面的面积, 该公式为近似公式, 通过计算 $T \sum A_i$ 来近似得出 V_s 。

如图 3 所示为片体模型与实体模型孔隙率的误差成因示意图, 从图中可以看出, 图 3(a) 中通过软件自动添加出的壁厚会出现重复的体积, 会对孔隙率的计算造成误差, 声学计算对网格的划分较为严格, 片体模型的体积重合会造成绘制网格时出现报错, 使得计算结果错误, 无法正确地仿真出闭孔泡沫铝的声学性能, 图 3(b) 中实体模型的构建解决了上述问题, 使得声学计算的结果更准确。

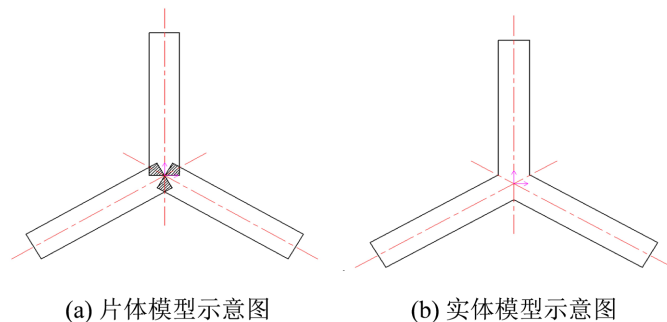


Figure 3. Schematic diagram of error causes
图 3. 误差成因示意图

网格划分是有限元建模中的关键步骤, Voronoi 多面体因结构复杂、存在大量尖点, 容易在划分过程中出错, 影响仿真精度。COMSOL 中要求将模型细分为网格, 但由于胞孔大小差异大, 结构复杂, 常导致网格过密或过小区域相互挤压, 引发误差和结果失真。因此, 现有随机 Voronoi 模型难以满足声学仿真要求。为此, 本文提出一种均匀化建模方法, 优化内部多面体结构, 减小尺寸差异, 提升建模质量。从图 4(a) 和图 4(b) 可见, 未约束随机点生成的模型未能准确反映闭孔泡沫铝的孔分布特性。

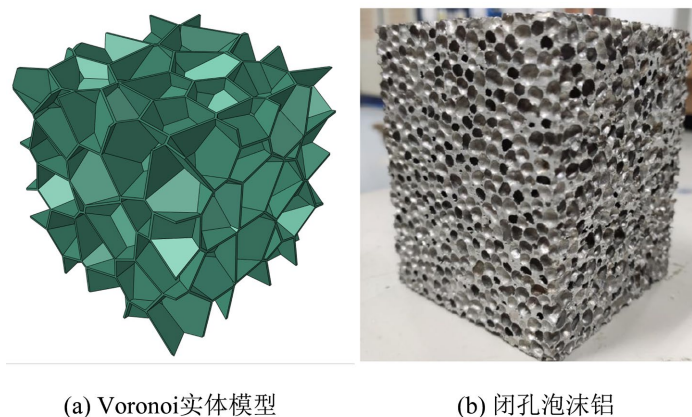


Figure 4. Unoptimized model and closed-cell foam aluminum
图 4. 未优化模型与闭孔泡沫铝

由于 Voronoi 模型生成过程中其内部多面体是按照随机成核点的位置进行生成的，所以想要均匀化内部多面体的体积，需要从成核点的分布着手。本文通过控制随机点之间的最小距离来调整三维 Voronoi 模型中多面体的大小关系，通过多次迭代的方法来移动模型中各多面体的随机成核点，将随即点控制在多面体的质心位置。图 5(a)展示了均匀化随机点的算法逻辑图。

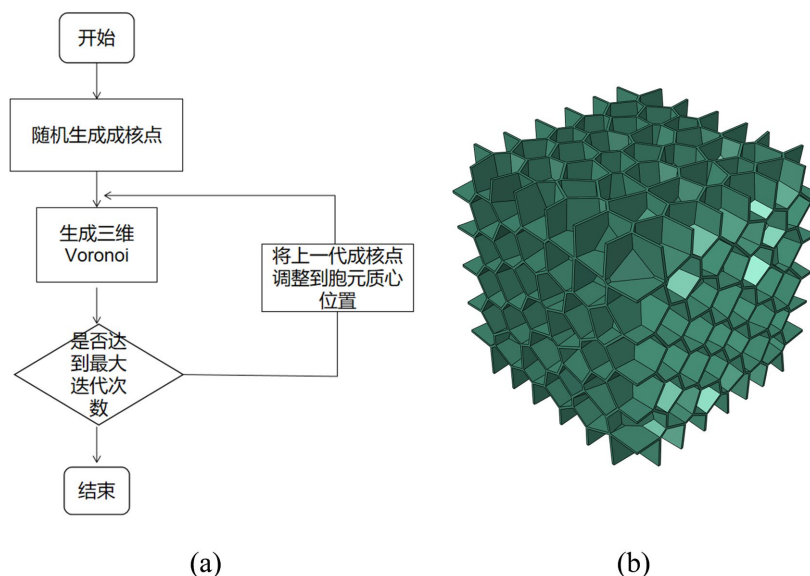


Figure 5. (a) Optimization flowchart based on random point homogenization algorithm; (b) Optimized model
图 5. (a) 基于随机点均匀化算法的优化流程图; (b) 优化后模型

通过代码控制随机成核点的分布，使其均匀化地分布在空间中是解决 Voronoi 模型中存在较为悬殊体积的多面体的直接方法。这种方法的基本思想是在 Voronoi 多面体分裂过程中，将每个 Voronoi 多面体的随机成核点调整为 Voronoi 多面体的质心，通过均匀化随机点分布来为后续均匀化内部多面体的工作打下基础，均匀化分布的随机成核点，可以使得根据其形成的三维 Voronoi 模型中各胞体的体积均匀化，不会出现较大的差距。首先，与现有的构建 Voronoi 模型相同，通过 Python 语言中的函数，生成随机分布的成核点，并按照成核点生成闭孔泡沫铝三维模型。在这里，有必要对种子点的 Voronoi 分布的方式进行详细说明，在现有的构建 Voronoi 三维模型中，随机点的生成通常使用 rand 命令，该命令可以在空间中随机分布 N 个点，但该函数生成的随机点分布并不均匀，尤其在较小空间内容易出现随机点分布过密或过于稀疏的问题。基于该命令的缺点，本文采取了通过排列的方法来生成随机点，让随机点处于一定的约束下，确保任意两成核点距离存在最小值，以实现均匀化闭孔泡沫铝内部多面体的预期。

如图 5，通过随机点均匀化算法，获得了较为均匀的 Voronoi 三维实体模型，相较于随机点生成的 Voronoi 三维模型，均匀化后的模型不会出现孔径的极端分布现象，该特性与真实闭孔泡沫铝的结构较为相似，为后续的 COMSOL 声学仿真模拟提供了模型基础。

3. 基于 Voronoi 三维模型的仿真运算和试验

首先我们利用随机点均匀化算法生成不同孔径的闭孔泡沫铝模型，根据市面上现有的泡沫铝孔径尺寸，我们生成三种不同孔径的泡沫铝模型，如图 6 所示。孔径分别为 2~4 mm、4~6 mm、6~8 mm，经过对比测量可以发现构建出的模型与实物具有很高的相似性。

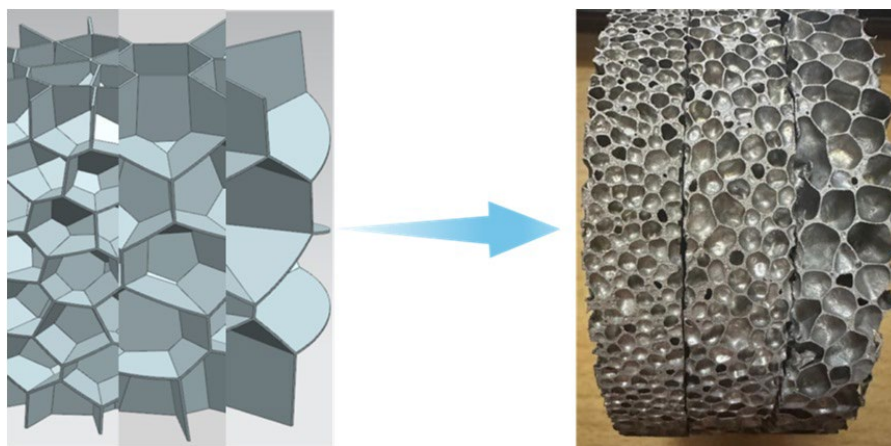


Figure 6. Comparison of Voronoi closed-cell aluminum foam models with different pore sizes and actual materials
图 6. Voronoi 闭孔铝泡沫型号与不同孔径与实际材料的比较

部分学者研究表明, 打孔闭孔泡沫铝吸声机理与穿孔板近似, 穿孔结构吸声频率特性受系统阻尼影响大, 该阻尼主要源于带声波空气传播中路径宽度突变产生的粘滞性, 其与孔径、孔深、打孔率直接相关, 且孔径越小, 空气热损失与粘滞损失越需重视。计算其吸声系数时, COMSOL 热粘性声学模块可纳入空气粘滞性影响, 但该模块计算量大; 故本文先借其算单位单元传递阻抗, 再用压力声学模块的阻抗边界, 实现吸声系数计算以减少计算资源消耗。

打孔泡沫铝打孔参数如表 1 所示, 在建模中通过控制孔心距来改变打率。取孔径 4~6 mm、厚度为 15 mm 的闭孔泡沫铝样件作为研究对象。通过单因素试验, 研究打孔孔径对吸声性能的影响规律。使通孔结构按照正方形均匀排列, 打孔率、打孔孔径和孔心距有如下关系:

$$\sigma = \frac{\pi \left(\frac{d}{B}\right)^2}{4} \times 100\% \approx 0.79 \left(\frac{d}{B}\right)^2 \times 100\% \quad (9)$$

式中 σ 为打孔率, %;

d 为孔径, mm;

B 为孔心距, mm。

根据上式计算得出相应孔心距, 构建仿真模型。

Table 1. Parameters of perforated foam aluminum

表 1. 打孔泡沫铝参数

试样	厚度(mm)	孔径(mm)	打孔孔径(mm)	打孔率(%)	打孔深度(mm)	孔心距(mm)
1	15	4~6	0.4	0.8	15	4
2	15	4~6	1.0	0.8	15	10
3	15	4~6	1.6	0.8	15	18

为了探索均匀化随机点算法 Voronoi 三维模型与实际打孔泡沫铝的性能对比, 利用 COMSOL Multiphysics6.2 多物理场平台对 Voronoi 三维模型进行仿真。在热粘性声学模块内构建单元模型如图 7(a)所示, 模型从左到右依次为 PML 完美匹配层、背景压力场、闭孔泡沫铝模型、空气介质、以及 PML 完美匹配层。

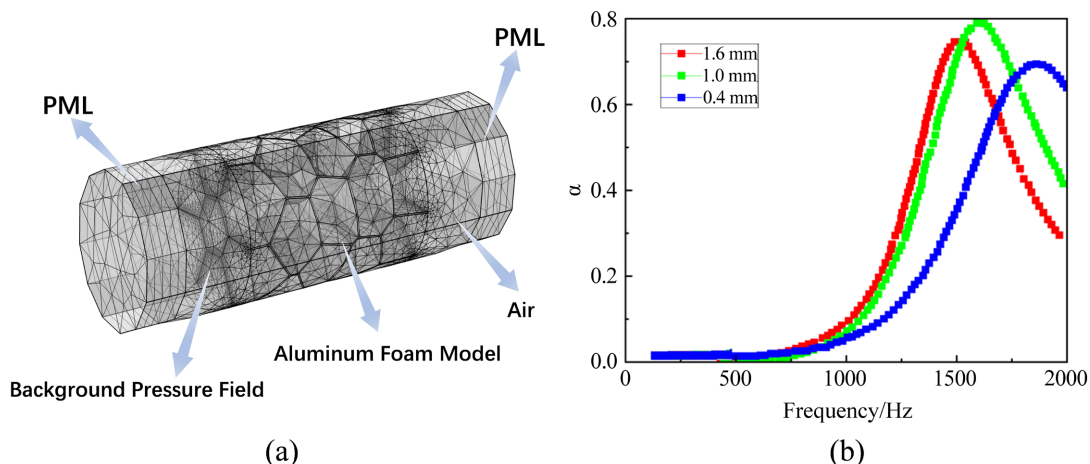


Figure 7. (a) Perforated closed-cell aluminum foam mesh division model; (b) Simulation Comparison of Sound Absorption Coefficients for Different Hole Diameters

图 7. (a) 打孔闭孔铝泡沫网格划分模型; (b) 仿真不同打孔孔径的吸声系数对比示意图

运行仿真之后，绘制吸声系数图与隔声量曲线图。如图 7(b)所示分别为打孔孔径为 0.4 mm、厚度为 15 mm 打孔率为 0.8% 的闭孔泡沫铝，吸收峰在 1750 Hz 处，吸声系数 0.68；打孔孔径为 1.0 mm、厚度为 15 mm 打孔率为 0.8% 的闭孔泡沫铝，吸收峰大约在 1480 Hz 处，吸声系数 0.78；打孔孔径为 1.6 mm、厚度为 15 mm 打孔率为 0.8% 的闭孔泡沫铝，吸收峰在 1420 Hz 处，吸声系数 0.68。

不同打孔参数下闭孔泡沫铝的吸声系数对比显示：随着孔径减小，吸声峰值频率向高频移动。这是由于泡沫铝内部胞孔与打孔小孔形成共振结构，且共振频率与孔径成反比，孔径越大，峰值频率越低。图中可见，孔径为 0.4 mm 的样品吸声性能最低，而 1.0 mm 孔径的样品在频率上优于 1.6 mm，但吸声峰值更高。根据马大猷院士的研究，在相同穿孔率下，孔径越小，孔数越多，空气与材料接触面积越大，导致流动阻力增加，从而吸声系数减小。

综上所述，闭孔泡沫铝的打孔孔径不宜过大或过小，仿真结果表明孔径约为 1 mm 时吸声性能最佳。不同孔径会影响吸声峰值频率，孔径越大，峰值频率越低。因此，在实际应用中应根据具体需求合理选择打孔参数，以优化吸声效果。

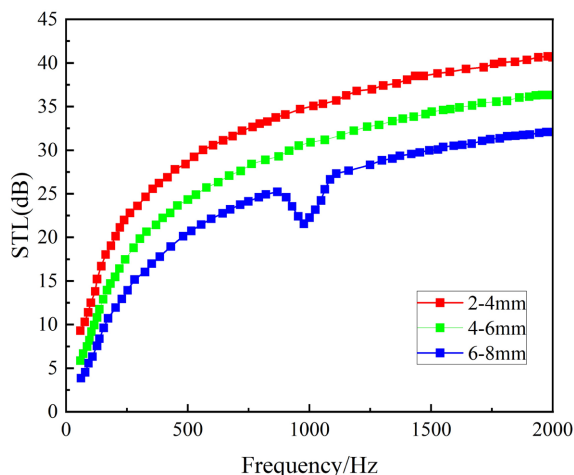


Figure 8. Simulated comparison diagram of sound insulation coefficients for closed-cell foam aluminum with different pore sizes

图 8. 仿真不同孔径闭孔泡沫铝隔声系数对比图

由图 8 可以看出,随着频率增加闭孔泡沫率的隔声量呈现上升趋势,隔声量的增速到中高频区域时逐渐放缓,仿真的样件厚度为 15 mm, 2~4 mm 孔径的闭孔泡沫铝隔声量为 10.89 到 41.09 dB; 4~6 mm 孔径的闭孔泡沫铝隔声量为 7.95 到 37.00 dB; 6~8 mm 孔径的闭孔泡沫铝隔声量为 5.95 到 32.94 dB。

分析对比图很明显可以看出闭孔泡沫铝的隔声系数与其孔径有较大的联系,孔径的大小在一定程度上决定了闭孔泡沫铝的隔声性能,三种孔径的闭孔泡沫铝中,2~4 mm 孔径的材料隔声性能最好。计算结果符合质量定律,即板材的隔声量与其表面密度成对数关系,由于闭孔泡沫铝的孔径缩小,闭孔泡沫铝的密度增加,表面密度也随之增加,因此闭孔泡沫铝的隔声量随着孔径的缩小会增加。但根据姚广春研究发现,闭孔泡沫铝隔声量并不会随着孔径的缩小而一直增加,隔声量增加量会逐渐放缓。

试验选取孔径为 2~4 mm、4~6 mm、6~8 mm 的闭孔泡沫铝,吸声测试采用 4~6 mm 中等孔径样件。根据前述有限元仿真方法,在阻抗管测试系统中进行实验,并按测试要求将样件加工为 $\varnothing 100$ 圆饼。吸声测试样件采用高速电火花打孔机加工,具有孔径小、速度快、污染少等优点,如图 9(a)所示。

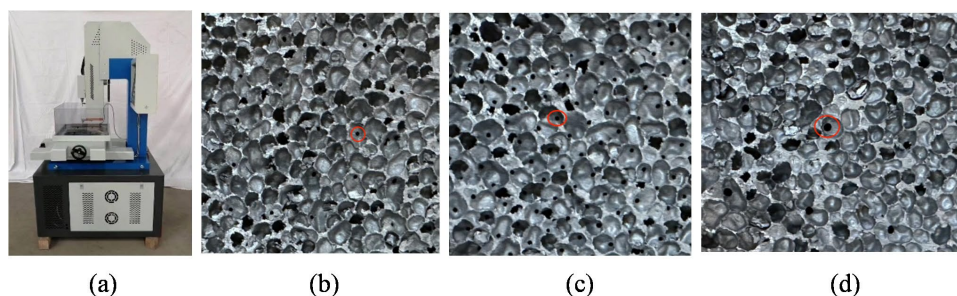


Figure 9. Actual images of high-speed EDM drilling equipment and closed-cell aluminum foam with different hole sizes: (a) EDM drilling; (b) 0.4 mm; (c) 1.0 mm; (d) 1.6 mm

图 9. 高速电火花打孔设备及不同孔径闭孔铝泡沫的实际图像: (a) EDM 钻孔; (b) 0.4 mm; (c) 1.0 mm; (d) 1.6 mm

打孔完成后样件再次清洗烘干备用。共准备 6 块闭孔泡沫铝样件: 相同材料不同孔径(0.4 mm, 1.0 mm, 1.6 mm)用于吸声测试, 相同厚度不同原始孔径样件用于隔声测试。打孔后样件实物如图 9(b)~(d)所示。

图 10 所示为不同孔径闭孔泡沫铝样件实物图。孔径分别为 2~4 mm、4~6 mm、6~8 mm。

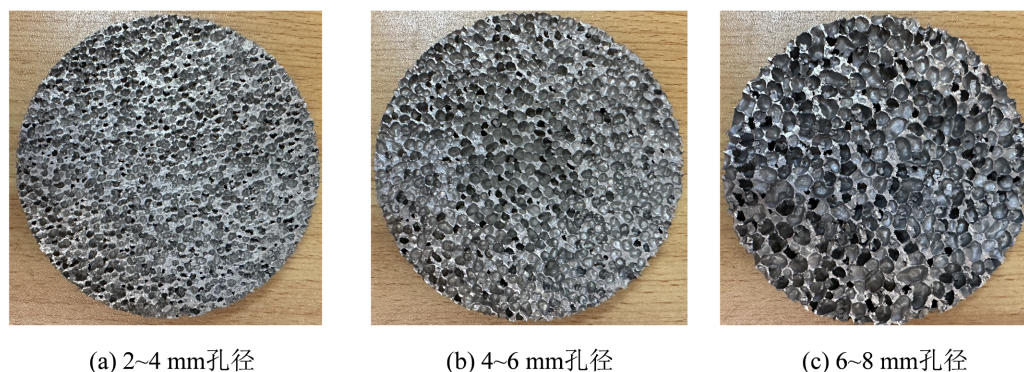


Figure 10. Physical diagram of closed-cell foam aluminum with different pore sizes

图 10. 不同孔径闭孔泡沫铝实物图

阻抗管的测量范围由以下两点决定:

第一, 根据避免出现非平面波筒正波模式的原则, 测量上限频率满足:

$$d < 0.58\lambda_u; f_u d < 0.58C_0 \quad (10)$$

第二，两个传声器之间的间距 $s(m)$ 满足不等式：

$$f_u s < 0.45C_0 \quad (11)$$

其中， d 为阻抗管直径， λ_u 为测量上限波长， f_u 为测量上限， C_0 为声速， s 为两个传声器的间距。

4. 结论

如图 11(a) 所示。结果表明，吸声峰值集中在 1000 Hz~2000 Hz，说明打孔后的闭孔泡沫铝主要在中频段具备良好吸声性能。在相同打孔率(0.8%)下，随着孔径减小(0.4 mm、1.0 mm、1.6 mm)，吸声峰值向高频移动。这是由于小孔径对应更多孔数，增加了空气与材料接触面积及流阻，从而影响吸声性能。流阻过高会使吸声频带变窄，平均吸声系数降低。图 11(a) 中可见，1.0 mm 孔径样件吸声效果最佳，峰值达 0.83，平均吸声系数为 0.42，覆盖频段为 1300 Hz~1800 Hz，且半峰宽较大，适用范围广。而 0.4 mm 与 1.6 mm 样件的平均吸声系数分别为 0.31 和 0.28。综上，打孔孔径为 1.0 mm 时闭孔泡沫铝的吸声性能最优，过大或过小的孔径均不利于提升吸声效果，应根据具体频段需求合理选择孔径。

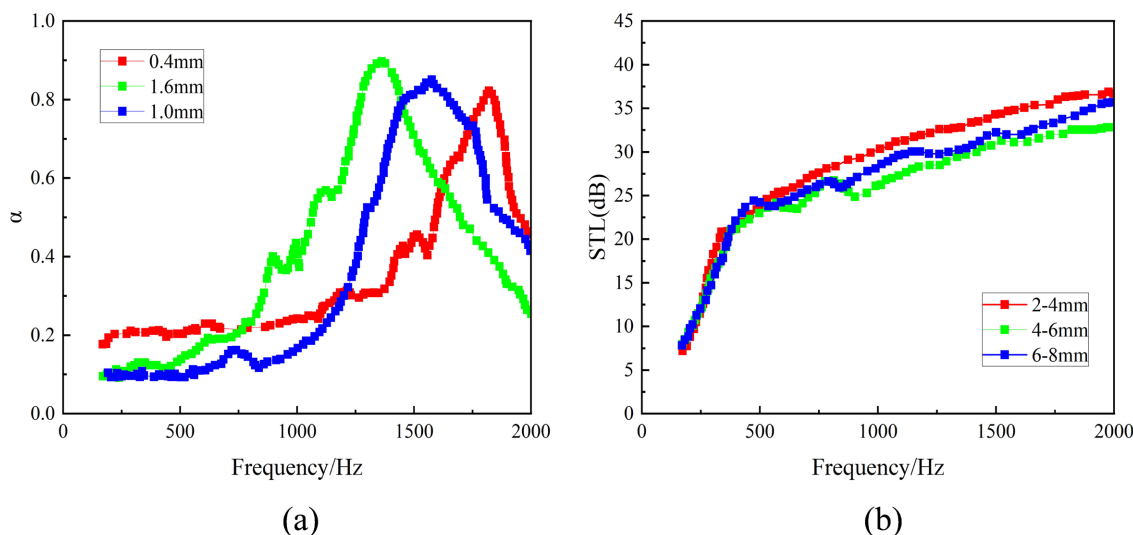


Figure 11. (a) Comparison of sound absorption coefficients of different apertures in the test; (b) Comparison of sound insulation curves of different apertures in the test

图 11. (a) 试验不同孔径吸声系数对比图; (b) 试验不同孔径隔声量曲线对比图

试验后通过配套软件导出闭孔泡沫铝的隔声数据，并绘制频率 - 隔声量曲线，如图 11(b) 所示。结果显示，在 50~2000 Hz 范围内，隔声量随频率上升而增加，但增幅逐渐减缓。其中，2~4 mm 孔径样件隔声量为 11.91~33.55 dB，平均 28.72 dB；4~6 mm 为 10.91~32.95 dB，平均 27.95 dB；6~8 mm 为 11.79~30.51 dB，平均 26.12 dB。可见，孔径越小、密度越大，隔声性能越好，但提升趋势趋缓。该现象符合质量定律，即在相同厚度下，密度越大表面密度越高，隔声量呈对数增长，增长速率减缓。三种孔径样件在低频隔声差异不大，中频段差值约为 2 dB，但随着孔径的缩小，其隔声量提高。

本次打孔闭孔泡沫铝吸声性能测试的统一条件为：泡沫铝基体孔径 4~6 mm、孔隙率 86%、厚度 15 mm、打孔率 0.8%，频率测试范围 50~2000 Hz。

在峰值吸声系数方面，打孔孔径为 0.4 mm 时，试验测得的峰值吸声系数为 0.80，仿真计算值为 0.78，

试验值比仿真值高 0.02; 打孔孔径为 1.0 mm 时, 试验峰值吸声系数为 0.83, 仿真值为 0.88, 试验值比仿真值低 0.05; 打孔孔径为 1.6 mm 时, 试验峰值吸声系数达到 0.90, 而仿真值仅为 0.75, 试验值比仿真值高 0.15。

在峰值频率方面, 0.4 mm 孔径下, 试验测得吸声峰值频率为 1800 Hz, 仿真计算值为 1750 Hz, 试验值比仿真值高 50 Hz; 1.0 mm 孔径下, 试验与仿真的吸声峰值频率均为 1500 Hz, 两者完全吻合; 1.6 mm 孔径下, 试验测得吸声峰值频率为 1250 Hz, 仿真计算值为 1400 Hz, 试验值比仿真值低 150 Hz。

可以发现仿真的结果较为接近试验值, 通过 COMSOL 多物理仿真软件将打孔后的闭孔泡沫铝吸声峰值较为准确地计算出来, 计算获得的曲线在趋势上与试验值也大致吻合。仿真曲线相较于试验值存在些许的误差, 试验所获得的曲线存在多个峰值, 在模拟所获得的曲线中并没有体现, 笔者认为尽管仿真可以计算出打孔后闭孔泡沫铝吸声峰值位置, 但闭孔泡沫铝本身结构复杂、表面粗糙同时其各胞孔之间并不是完全封闭, 在生产制造过程中会在薄壁上产生缺陷与裂纹, 将相邻胞孔联通, 通过微孔裂纹传递声波, 内部声波传递更为复杂, 仿真模拟仅仅只能针对于其在亥姆霍兹共振器原理上进行计算。在另一方面在试验测试过程中, 由于闭孔泡沫铝与阻抗管之间存在孔隙, 会导致测试存在误差。

本次未打孔闭孔泡沫铝隔声性能测试的统一条件为: 泡沫铝厚度 15 mm, 测试频率范围 50~2000 Hz。所有工况下仿真隔声量均高于试验值。

仿真对不同孔径闭孔泡沫铝隔声量的预测精度呈现明显的孔径依赖性, 孔径越小, 整体平均隔声量仿真与试验的差异越大: 泡沫铝孔径为 2~4 mm 时, 试验测得的平均隔声量为 28.72 dB, 仿真计算值为 32.50 dB, 试验值比仿真值低 3.78 dB; 泡沫铝孔径为 4~6 mm 时, 试验平均隔声量为 27.95 dB, 仿真值为 29.80 dB, 试验值比仿真值低 1.85 dB; 泡沫铝孔径为 6~8 mm 时, 试验平均隔声量为 26.12 dB, 仿真值为 27.30 dB, 试验值比仿真值低 1.18 dB。

仿真的结果与试验结果存在 5~10 dB 的误差, 造成误差的原因可以分为以下两点, 第一, 闭孔泡沫铝样件在加工过程中设定的直径需要略小于阻抗管的直径, 以便于, 因此在安装进入阻抗管时其位置无法准确的固定密封, 试件与安装管之间需要使用软质材料进行固定密封, 本试验采用了聚氨酯泡沫对样件外圈进行包裹, 聚氨酯泡沫的隔声性能相比于闭孔泡沫铝较差, 而在 COMSOL 进行声固耦合隔声测试中, 闭孔泡沫铝模型被无缝隙的放置在阻抗管模型中, 边界为理想约束边界, 不存在缝隙。另一方面通过 Abaqus 建立的闭孔泡沫铝模型为理想模型, 表面光滑无缺陷, 不存在闭孔泡沫铝孔壁上的微小裂纹与孔隙, 此种缺陷会导致材料的隔声量降低, 同时理想模型胞孔的分布较为均匀, 不会存在真实泡沫铝制造中出现的孔径过大与过小现象, 尽管在试验前对闭孔泡沫铝样件进行了选择, 但仍无法保证样件不存在瑕疵。

通过使用阻抗管对闭孔泡沫铝测试了吸声系数与隔声量, 对试验所获得的结果与仿真结果进行对比分析, 发现仿真所获得的吸声系数与隔声量与真实泡沫铝的声学性能较为相似。

基金项目

重庆市自然科学基金 CSTB2022NSCQ-MSX1643, 吉林省科技厅项目 YDZJ202301ZYTS490。

参考文献

- [1] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 237-241.
- [2] 孟庆瑞, 胡治流. 泡沫铝主要性能特征研究及工业应用[J]. 有色金属加工, 2010, 39(5): 6-8.
- [3] 梁李斯, 张杏, 宋亦非, 等. 泡沫铝吸声性能的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 64-71.
- [4] 余欢, 方立高, 严青松. 多孔泡沫铝的制备及其吸声性能测定[J]. 热加工工艺, 2001(1): 36-64.

- [5] 王录才,王芳,任建富. 泡沫铝隔声性能的研究[J]. 金属功能材料, 2001, 8(6): 21-24.
- [6] 梁李斯, 赵忠宇, 张韶华, 等. 打孔提高闭孔泡沫铝吸声性能的机理分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(9): 51-54.
- [7] 阿什比. 泡沫金属设计指南[M]. 刘培生, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 25-30.
- [8] 程长青. 随机胞元分布闭孔泡沫金属几何建模算法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [9] 杨焘. 泡沫铝制备技术专利分析[J]. 中国科技信息, 2019(14): 24-25.
- [10] 朱梦蛟, 周素洪, 王渠东, 等. 泡沫铝材料的制备技术及应用现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 21-25.
- [11] Navacerrada, M.A., Fernández, P., Díaz, C. and Pedrero, A. (2014) Thermal and Acoustic Properties of Aluminium Foams Manufactured by the Infiltration Process. *Applied Acoustics*, **74**, 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.10.006>
- [12] 李康, 王录才, 游晓红. 增黏温度对泡沫铝孔结构的影响及机理分析[J]. 铸造设备与艺, 2016(3): 30-32.
- [13] 梁李斯. 闭孔泡沫铝吸声降噪性能及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 40-64.
- [14] Wang, F., Chen, Z., Wu, C., Yang, Y., Zhang, D. and Li, S. (2019) Analysis of Acoustic Performance of Glass Fiber Felts after Water Absorption and Their Estimation Results by Artificial Neural Network. *The Journal of the Textile Institute*, **111**, 1008-1016. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1678559>
- [15] 王光荣, 何世平. 通孔与闭孔泡沫铝水下隔声性能实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(4): 76-96.
- [16] 刘培生, 崔光, 陈靖鹤. 多孔材料性能与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 177-182.
- [17] McRae, J., Naguib, H.E. and Atalla, N. (2008) Acoustic Performance and Compression Behaviour of Perforated Aluminium Foam. *SPIE Proceedings*, Marseille, 23-28 June 2008, 3453-3460. <https://doi.org/10.1117/12.776467>
- [18] 王军旗. 高速电火花小孔加工控制系统及穿透检测研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [19] 吴品, 裴景玉, 邓容. 电火花深小孔加工的实验研究[J]. 电加工与模具, 2007(1): 10-12.
- [20] 朱宁, 叶军, 王文浩. 多轴数控电火花高速小孔加工技术[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(3): 1-4.
- [21] 赵慧慧. 泡沫型电磁屏蔽复合材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [22] 苗莉莉, 王晓茹, 石阳, 等. 铸造泡沫铝合金压缩性能及电磁屏蔽性能[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(5): 24-29.
- [23] 秦福德, 童明波, 何思渊, 等. 航空航天返回过程的轻质能量吸收器[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 790-794.
- [24] 韩福生. 超轻开孔泡沫铝及其在航天领域的应用[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(6): 570-575.
- [25] 李志斌, 虞吉林, 郑志军, 等. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(1): 77-86.
- [26] 步向义. 建筑用降噪泡沫铝合金的吸声性能研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(8): 1934-1935.
- [27] 刘哲明. 多尺度高效吸声穿孔板结构优化及制造工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [28] 刘培生, 夏凤金, 罗军. 多孔材料模型分析[J]. 材料工程, 2009(7): 83-87.
- [29] 罗军, 夏凤金, 刘培生. 关于泡沫材料的开尔文模型研究浅析[C]//中国仪器仪表学会. 全国功能材料科技与产业高层论坛论文集. 2008: 706-709.
- [30] 杨承磊, 吕琳, 杨义军. Voronoi 图及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [31] Lu, T.J., Hess, A. and Ashby, M.F. (1999) Sound Absorption in Metallic Foams. *Journal of Applied Physics*, **85**, 7528-7539. <https://doi.org/10.1063/1.370550>.
- [32] 梁李斯, 刘诗薇, 赵俊学, 等. 闭孔泡沫铝板与铝板复合结构吸声性能[J]. 有色金属工程, 2016(4): 22-25.