

文章编号: 1674-8190(2024)05-058-09

一种基于 Voronoi 图的三维开孔泡沫模型构建方法

屈青珩

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

摘要: 开孔泡沫材料是一种可以满足航空航天等高新技术领域实际需求的先进的功能结构一体化材料, 在工程实际生产应用方面有较好的发展前景。关于三维开孔泡沫的力学模型研究已经得到了一定的发展, 但是在声学方面鲜有研究。提出一种利用 Voronoi 图构建三维开孔泡沫模型的方法, 用于模拟开孔泡沫微结构的几何特性, 并定义扰动因子 K 来衡量微观结构的不规则程度; 利用光敏树脂打印技术生成对应的实物模型, 并通过力学及声学实验与仿真对生成模型的准确性进行验证。结果表明: 生成的带有截面属性的开孔泡沫实体模型可以导入多种有限元软件完成力学、声学等有限元计算, 对三维 Voronoi 开孔泡沫模型的构建提供了思路和方法, 对多孔材料的进一步性能研究和生产制备具有借鉴意义。

关键词: Voronoi 图; 三维开孔泡沫模型; 扰动因子; 光敏树脂打印; 有限元仿真

中图分类号: V250

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.05

A method for constructing a 3D open-cell foam model based on Voronoi diagram

QU Qingheng

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research
Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Open-cell foam material is an advanced functional and structural integration material, which can meet the practical needs of aerospace and other high-tech fields, and has a good prospect in practical engineering production applications. The research on the mechanical model of 3D open-cell foam has been developed, but there is little research on the acoustic model. A method of constructing a 3D open-cell foam model using Voronoi diagram is proposed to simulate the geometrical characteristics of the open-cell foam micro structure, and the disturbance factor K is defined to measure the degree of irregularity of the micro structure. The photosensitive resin printing technology is used to generate the corresponding physical model, and its accuracy is verified with mechanical and acoustic experiments and simulations. The results show that the generated porous foam solid model with cross-section properties can be imported into a variety of finite element software to complete the finite element calculation such as mechanics and acoustics, which can provide an idea and method for the construction of three-dimensional Voronoi open-cell foam model, and has certain reference significance for the further study of properties and production of porous materials.

Key words: Voronoi diagram; 3D open-cell foam model; disturbance factor; photosensitive resin printing; finite element simulation

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-07-11

通信作者: 屈青珩(1998-), 男, 硕士, 助理工程师。E-mail: 845565349@qq.com

引用格式: 屈青珩. 一种基于 Voronoi 图的三维开孔泡沫模型构建方法[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 58-66.

QU Qingheng. A method for constructing a 3D open-cell foam model based on Voronoi diagram[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 58-66. (in Chinese)

0 引言

与传统固体材料相比,多孔材料具有高比强度、高比刚度、高能量吸收效率以及各种各样的胞元尺寸和胞元微结构等优点,因此受到了各领域研究者的青睐,并在航空航天等领域中起着重要作用。Gibson等^[1]对多孔材料做出定义:多孔固体(Cellular Solid)是一种由相互贯通或封闭的孔洞构成网络结构的材料,孔洞的边界或表面由支柱或平板构成,而开孔泡沫材料的特点是组成泡沫材料的固体骨架单纯为胞元孔穴的棱边。在航空航天领域,越来越多的多孔材料被应用于实际生产中,例如:多孔材料作为框架结构中的填充物,不仅可以降低整机质量而且具有高效的能量吸收效率;多孔材料凭借其优异的隔声绝热性能填充机舱内壁从而成为抑制舱内噪声的一种重要手段;多孔材料在受到压缩的过程中有很长的平台阶段,表明其具有优异的缓冲吸能特性,因此由多孔材料作为重要组成部分制作而成的飞行器起落架、发动机声衬在减震降噪领域也得到了广泛的应用^[2]。

多孔材料的宏观行为和多孔材料的微观结构密切相关,因此对多孔材料的微观结构进行分析从而探究解释多孔材料宏观行为的机理。现如今越来越多的研究者采用有限元数值模拟方法研究多孔材料的微观结构的变化规律,并且尝试设计一些特殊形状的微观结构代表单元从而实现对多孔材料宏观性能的进一步提升。Gent等^[3]首先对开孔泡沫微观模型进行研究,首次提出开孔泡沫的微观结构可以用弹性支柱网络模型表征,随后构建了简单立方体模型;Gibson等^[1]在简单立方模型上进行进一步的研究,构建出交错立方模型;Liu P S^[4]在前人的研究基础上对模型进一步改进,提出了正八面体模型;Menges等^[5]根据开孔泡沫的微观结构构建五边十二面体模型;Kelvin正十四面体模型^[6]也是被诸多研究者用来描述开孔泡沫微观结构的重要模型之一。近年来,为了更加准确地描述多孔材料内部结构的随机性,研究者使用了Voronoi模型^[7]。该模型的生成过程与实际泡沫发泡技术生成的多孔材料具有极强的相似性,能够较准确地描述开孔泡沫内部随机的胞元形状和胞元分布,而且建模过程经济成本低。Gomez等^[8]利用Rhinoceros3D软件生成在三维空间中随

机分布的种子点,并利用Grasshopper[®]软件将这些种子点划分出Voronoi多面体单元,再提取这些单元体的边线和面并进行布尔运算,生成杆件状的开孔泡沫多孔结构;Fantini等^[9]利用Voronoi划分生成多孔结构,通过两个控制因子 S_f 和 S_s 调节结构的孔隙率,并在Voronoi划分出的多面体中生成孔径球,用来评估多孔结构的孔径尺寸。

本文提出利用MATLAB中的Voronoin函数及Convhulln函数生成三维Voronoi开孔泡沫线模型的方法,介绍三维Voronoi开孔泡沫线模型、实体模型、实物模型的构建过程,利用有限元仿真和试验相结合的方式进一步验证生成模型的准确性。

1 Voronoi图

Voronoi图(Voronoi Diagram)也被称之为泰森多边形或Dirichlet图,是一种分割空间的算法^[7]。该算法有着极强的随机性,因此被广泛应用于几何学、材料学、建筑学等多门学科。

对于二维Voronoi图:在给定的平面内存在 n 个形核点构成的点集,可以将给定平面划分为 n 个区域,每个小的区域内有且仅有一个形核点,且这个区域内的任意一点到该区域内形核点的距离比到其余的 $n-1$ 个形核点的距离近,相邻两形核点连线(如图1(a)所示)中的虚线的垂直平分线构成二维Voronoi图的边,由此方法形成的二维图形即为二维Voronoi图(如图1(a)所示)。而对于三维Voronoi图:在给定的空间内存在 m 个形核点构成的点集,将给定空间划分为 m 个空间,每个小的空间内有且仅有一个形核点,且这个空间内的任意一点到该空间内形核点的距离比到其余的 $m-1$ 个形核点的距离近,相邻两形核点连线的垂直平分面构成三维Voronoi图的面,由此方法形成的三维图形即为三维Voronoi图(如图1(b)所示)。

根据Boots^[11]的研究成果,Voronoi图可以看作是根据发泡点位置泡沫增长过程的等效情况,即:

- 1) 形核点在三维空间中同时产生;
- 2) 每个形核点生成的泡沫的增长速度是相同的;
- 3) 泡沫的增长率是线性的,各个方向的权重相等;
- 4) 在生长过程中,形核点保持在原来的

位置。

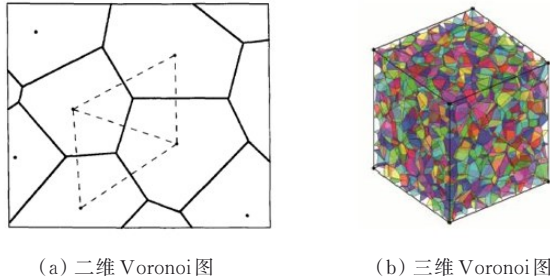


图1 Voronoi图^[10]
Fig. 1 Voronoi diagram^[10]

本文主要研究三维 Voronoi 模型,胞元形状为正十四面体,相邻两形核点之间的距离定义为

$$d = \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\sqrt[3]{\frac{V}{\sqrt{2}N}} \right) \quad (1)$$

式中: V 为生成模型所占立方体体积; N 为模型内形核点数量。

Zhu H X 等^[12]也给出了胞孔规则度的定义:

$$\alpha = \frac{\delta}{d} \quad (2)$$

式中: δ 为任意两形核点之间的最短距离。

2 三维 Voronoi 开孔泡沫模型的构建

自然界中的天然泡沫和利用发泡技术生成的人造泡沫的胞元形状和胞元分布既不是完全不规则的,也不是完全规则的,而是介于这两个界限之间且具有很强的随机性。三维 Voronoi 模型构建的数学过程和泡沫材料生成的物理过程有着极强的相似性,固体泡沫材料通常是由气泡的成核和生长形成的,如果气泡同时在空间中随机成核,并以相同的线性速度增长,则得到的结构和三维 Voronoi 模型几乎相同,因此可以利用 Voronoi 生成三维开孔泡沫模型。本文应用 MATLAB、ANSYS-APDL 以及 CAD 软件建立三维 Voronoi 开孔泡沫模型。

本文采用的三维开孔泡沫结构的建模过程主要概括以下 4 个步骤。

1) 在立方体中生成一系列规则排列的形核点;

2) 引入变量扰动因子 K 对规则排列形核点的初始位置添加随机扰动从而生成一系列不规则排

列的形核点;

3) 基于生成的不规则排列的形核点进行开孔泡沫材料线模型的生成;

4) 基于开孔泡沫线模型进行开孔泡沫材料实体模型的生成。

三维 Voronoi 开孔泡沫模型的构建流程图如图 2 所示。

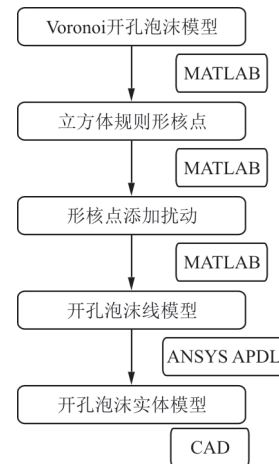


图2 三维 Voronoi 开孔泡沫模型的构建流程图

Fig. 2 Flowchart for the construction of 3D Voronoi open-cell foam model

在步骤 1) 中,形核点的分布选择了体心立方堆积排列^[13]来构造规则的 Voronoi 模型(又称 Kelvin 泡沫模型)如图 3(a)所示,该分布产生正十四面体单元,正十四面体单元填充空间,均匀成形。

在步骤 2) 中,为了引入不规则度,将规则排列的形核点的初始位置根据以下关系式进行移动:

$$x = x_0 + K [0.5 - \text{rand}(1)] \times d \quad (3)$$

$$y = y_0 + K [0.5 - \text{rand}(1)] \times d \quad (4)$$

$$z = z_0 + K [0.5 - \text{rand}(1)] \times d \quad (5)$$

式中: (x, y, z) 为添加扰动之后的形核点的坐标; (x_0, y_0, z_0) 为初始规则排列的形核点的坐标; d 为相邻两形核点之间的距离; K 为表征扰动大小的扰动因子。

MATLAB 中的 rand 函数可以产生 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数。新的形核点的位置位于以旧的形核点为圆心以 $Kd/2$ 为半径的球体空间内,位于初始位置的形核点 2 添加扰动因子后偏移至形核点 2'(如图 3(b)所示)。扰动因子 K 表征了生成的三维开孔泡沫的不规则程度:若 $K=0$,则生成的

Voronoi 开孔泡沫模型即为 Kelvin 开孔泡沫模型；若 $K=1$ ，则生成最不规则的 Voronoi 开孔泡沫模型。调整 K 值的大小即可得到不同规则度的三维开孔泡沫模型。

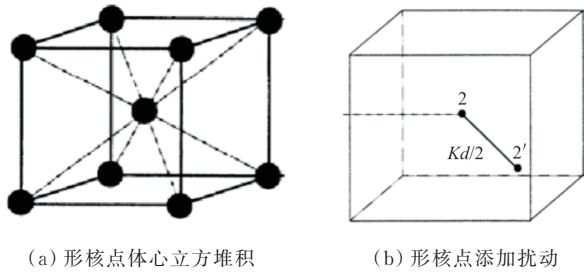
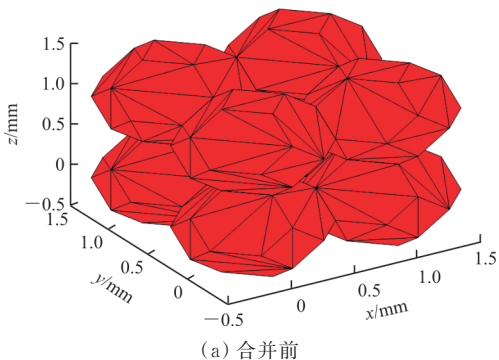
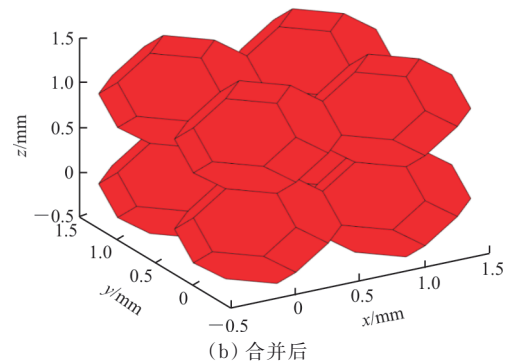


图 3 形核图
Fig. 3 Body-centered cubic

在步骤 3) 中, 由于已经获得了一系列形核点, 需要根据形核点的位置生成相关胞元。本文以 MATLAB 中 3D 空间划分的 $Voronoi(x, y)$ 函数为基础编写相关程序。程序第一步读取步骤 2) 中储存的形核点的空间坐标; 第二步应用 QHULL 算法^[14]对形核点进行空间划分; 第三步提取生成的包含形核点在内的胞元的几何信息, 几何信息包括两部分(一部分为生成单个 14 面体顶点的集合, 一部分为顶点的空间坐标信息); 第四步利用 Convhulln 函数读取上一步生成顶点的信息, 每三个顶点会生成一个三角形平面, 生成的三角形平面组合后生成带有胞壁的 14 面体闭孔模型。由于生成的三角形平面存在共面的情况, 过多共面的三角形平面会增加计算时间, 因此需要将共面的三角形平面合并。第五步利用 MATLAB 中集合工具箱中的 Merge 函数将共面的三角形平面合并为一个面, 以完全规则的 Kelvin 模型为例展示使用 Merge 函数合并共面三角形平面的过程, 具体合并过程如图 4 所示。优化后的模型即为带有胞壁的十四面体闭孔模型。



(a) 合并前

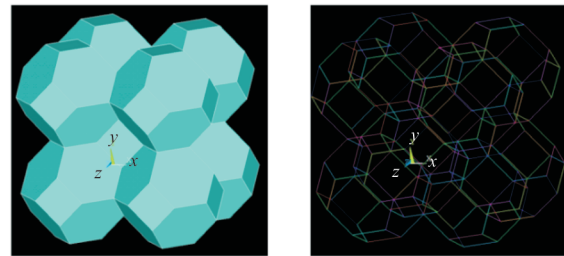


(b) 合并后

图 4 三角形平面合并过程

Fig.4 Kelvin closed cell foam model triangular plane merging

输出生成模型几何信息至 ANSYS-APDL 中, 本文编写相关命令流将上述拓扑信息导入从而生成闭孔泡沫模型, 将胞壁删除得到最终的开孔泡沫线模型, 完全规则的 Kelvin 闭孔模型和开孔线模型如图 5 所示。

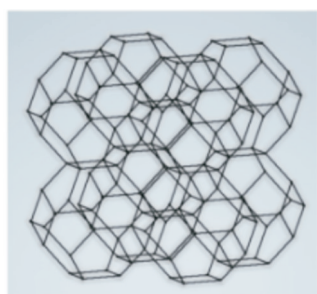


(a) 闭孔泡沫模型

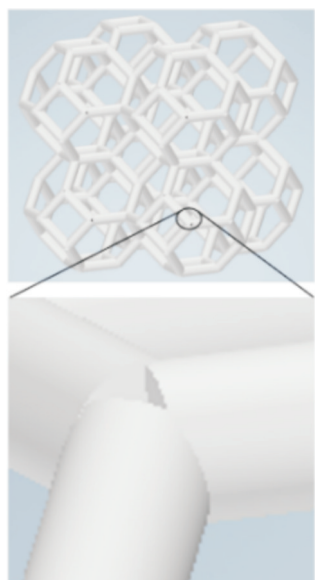
(b) 开孔泡沫线模型

图 5 Kelvin 模型
Fig. 5 Kelvin model

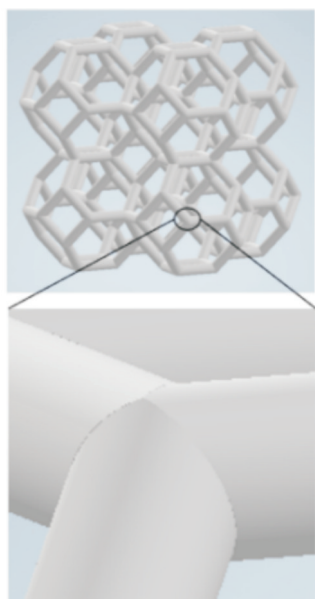
在步骤 4) 中, 本文不仅生成了开孔泡沫线模型并且进一步生成具有截面属性的实体模型。一般情况下, 创建沿某一直线和截面形状的实体支柱是通过拉伸操作实现的, 当直线数量较少且垂直或平行于水平面时, 这种方法简单快捷, 但对于生成的复杂三维开孔泡沫模型, 该操作难度过大, 逐一生成实体支柱所需时间过长。本文采取了一种不同的方法, 利用 CAD 软件中的框架生成器。在框架生成器中可以创造所需横截面的形状及尺寸, 导入前文生成的开孔泡沫线模型, 随后选取开孔泡沫线模型作为被插入框架的骨架部分, 点击生成模型即可自动生成所需截面属性的实体支柱, 在整个开孔泡沫线模型上完成这一操作会生成一个带有截面属性的开孔泡沫模型, 完成上述步骤之后需要对支柱连接末端进行斜接处理, 处理完成后得到最终所需的开孔泡沫实体模型。本文以完全规则的 Kelvin 模型为例展示开孔泡沫实体模型生成的过程, 具体过程如图 6 所示。



(a) Kelvin 开孔泡沫线模型



(b) 未进行末端处理的 Kelvin 开孔泡沫实体模型



(c) 末端处理后的 Kelvin 开孔泡沫实体模型

图 6 模型生成过程

Fig. 6 Model generating process

不同扰动因子下的开孔泡沫实体模型如图 7 所示。

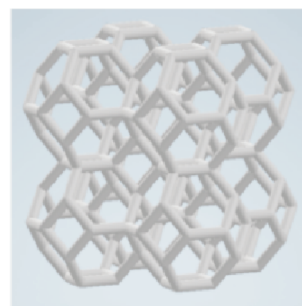
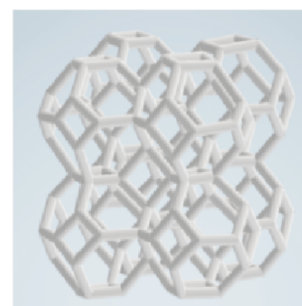
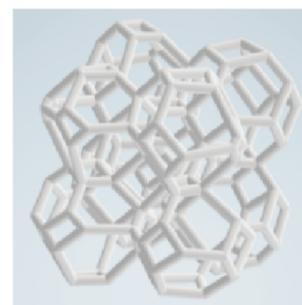
(a) $K=0$ (b) $K=0.1$ (c) $K=0.2$

图 7 不同扰动因子的开孔泡沫实体模型

Fig. 7 Solid model of open cell foam with different disturbance factors

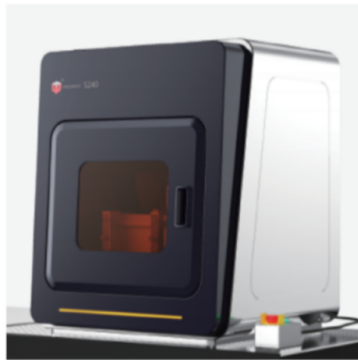
从图 7 可以看出:扰动因子 K 越大,开孔泡沫模型的不规则程度越大。

3 三维 Voronoi 开孔泡沫实物模型的构建

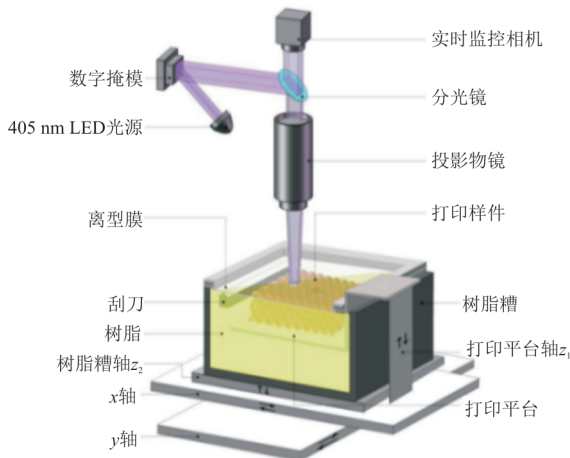
近年来增材制造 (Additive Manufacturing, 简称 AM) 工艺迅速发展^[15], 其中 P μ SL (Projection MicroStereolithography) 是一种面投影微尺度超高精度光固化增材制造技术, 使用高精度紫外光刻投影系统, 将需要打印的三维模型分层投影至树

脂液面,分层制造逐层累加,快速进行光固化无模具成型,最终从数字模型直接加工得到立体样件。该技术具有成型效率高、制造成本低和打印精度高等突出优势,这种工艺对于不规则开孔泡沫的打印具有很强的适用性,具有打印尺寸精度高、打印实物表面平滑、造型自由度高的优点。

本文选用深圳魔方精密有限公司生产的型号为 M160 光固化 3D 打印机,该打印机实物图和打印原理图如图 8 所示。打印开孔泡沫实物模型的基体材料使用低粘度超韧性树脂(UTL)。



(a) M160 打印机实物图



(b) 打印原理图

图 8 光固化 3D 打印机

Fig. 8 Light curing 3D printer

利用 M160 光固化 3D 打印机打印 Kelvin 开孔泡沫式样的操作流程可以简单划分为以下四步：1) 三维建模过程,构建试样的几何模型并导入 3D 打印机适配的模型读取软件;2) 在模型读取软件中将导入的模型进行逐层切片处理;3) 数显投影机读取每层切片的信息,然后进行投光处理,每层图片的读取和投光使得模型逐层打印成型;4) 3D 打印机逐层光固化打印最终形成所需模型式样。

由于相邻韧带之间的间距受打印精度的影响,因此本文共制作出扰动因子 $K=0$ 以及 $K=0.1$ 的开孔泡沫模型,如图 9 所示。模型最小胞元尺寸为 5 mm,韧带直径为 0.5 mm,长宽相等恒为 50 mm,高度为 40 mm。

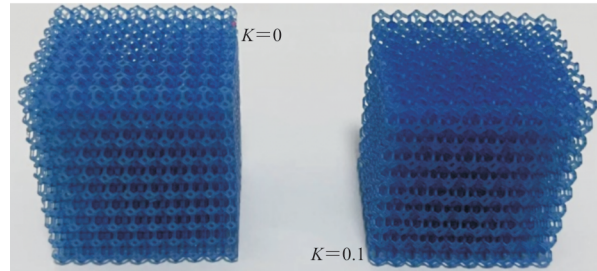


图 9 扰动因子 $K=0$ 试样及扰动因子 $K=0.1$ 试样

Fig. 9 Disturbance factor $K=0$ sample and disturbance factor $K=0.1$ sample

4 模型准确性验证

Zhu H X 等^[12]利用正十四面体模型模拟准静态压缩过程,推导出了预估开孔泡沫弹性特性(多孔材料的弹性模量和基体材料的弹性模量的比值)作为相对密度函数的解析结果:

$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{3}{5} \left[\left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 / \left(1 + 0.9 \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \right] \quad (6)$$

式中: E^* 为多孔材料的弹性模量; E_s 为基体材料的弹性模量; ρ^* 为多孔材料的密度; ρ_s 为基体材料的密度。

本文利用商用有限元模拟分析软件 Abaqus 中的 Abaqus/Explicit 显式分析模块进行相关有限元计算,从而研究三维 Voronoi 开孔泡沫模型的力学性能。建立尺寸大小为 6 mm × 6 mm × 6 mm 的三维 Voronoi 开孔泡沫的模型,上下两个钢体平板将试样模型夹持,上下两个刚体平板均设置为三维刚体,厚度为 0.2 mm,上方的刚体平板固定 x 和 y 两个方向的位移,在 z 方向上施加速度边界条件从而控制 z 方向上的位移;下方的刚体平板则在 x 、 y 、 z 三个方向上完全固定即控制三个方向上的位移为零。模型中的胞元棱边采用带缩减积分和沙漏控制 B32 梁单元,开孔泡沫模型的基体材料选择为 Al-6101-T6 的弹塑性材料,弹性区域由各向同性硬化模型定义,弹性性质完全由其相对密度 $\bar{\rho}$,杨氏模量 E 和泊松比 ν 定义。对于 Al-6061-T6

材料,密度 ρ 为 $2\ 700\ \text{kg/m}^3$,杨氏模量 E 为 $68.9\ \text{GPa}$,泊松比 ν 为 0.33 。塑性性质则由 Johnson-Cook 模型定义,有限元模型中包含两种接触对摩擦即试件模型内部韧带之间的接触以及试件模型与上下钢体平板之间的接触,本文将两种可能出现的接触均设置为通用接触,摩擦系数为 0.02 。绘制本文生成三种模型的等效弹性模量及等效平台应力随相对密度变化的曲线分别如图 10~图 11 所示。相对弹性模量定义为多孔材料的弹性模量和基体材料的弹性模量的比值。平台应力定义为多孔材料在压缩过程中随着应变的不断增大,应力值趋于稳定平台段的平均应力值。相对平台应力定义为多孔材料的平台应力与坍塌应力的比值。

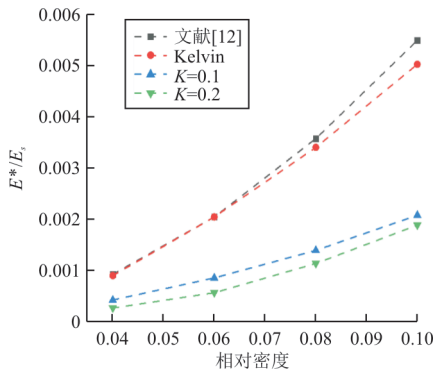


图 10 相对弹性模量—相对密度曲线图

Fig. 10 Relative elastic modulus–relative density curve

从图 10 可以看出:当模型为 Kelvin 正 14 面体模型时开孔泡沫模型的弹性模量随相对密度变化曲线和文献[12]推导的正十四面体弹性模量预估式吻合良好。

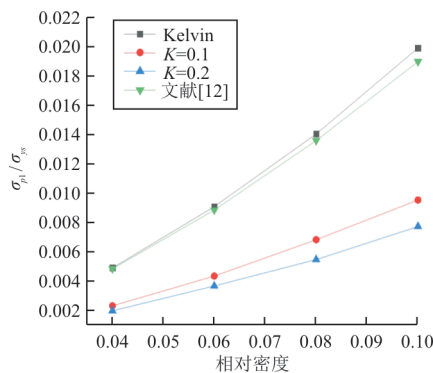
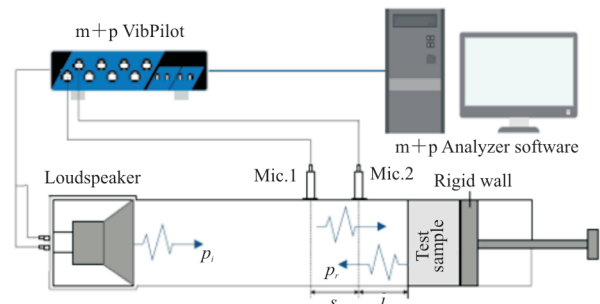


图 11 相对平台应力—相对密度曲线图

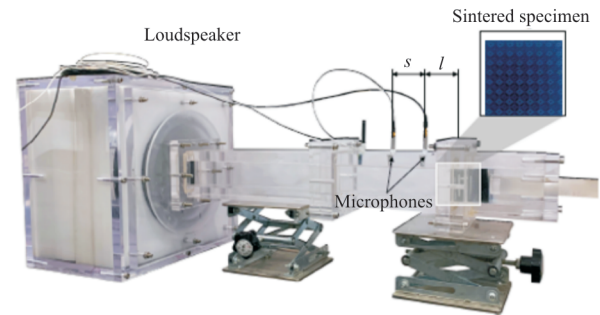
Fig. 11 Relative platform stress–relative density curve

从图 11 可以看出:当模型为 Kelvin 正 14 面体模型时开孔泡沫模型的平台应力随相对密度变化曲线和文献[12]推导的正十四面体平台应力预估式吻合良好。

为了测试本文制备的开孔泡沫样品的表面阻抗及吸声系数,根据 ISO 10534-1 标准^[16]设计了一个横截面为 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 的声学阻抗管。数据采集模块(m+p VibPilot)系统包括两个麦克风(G. R. A. S. 46BD)插入阻抗管的预制孔中,具体位置如图 12 所示,测量的频率范围为 $200 \sim 3\ 000\ \text{Hz}$ 。



(a) 经典双传声器阻抗管示意图

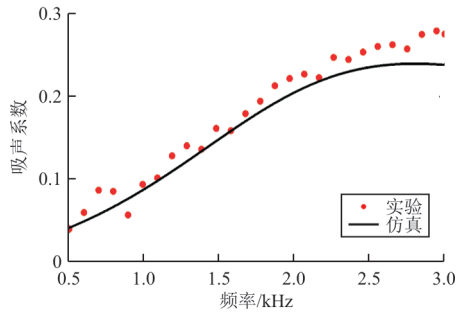


(b) 本文测试中使用的真实设备

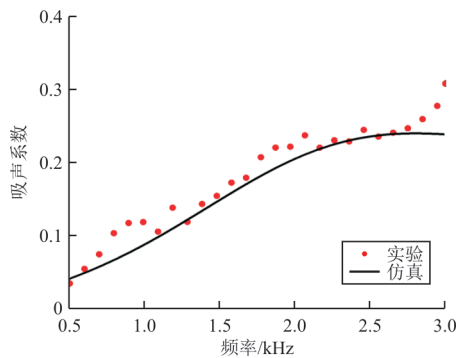
图 12 声学测量系统

Fig. 12 Acoustic measurement

根据本文介绍的实验方法对生成的两种开孔泡沫进行实验:扰动因子 $K=0$ 以及 $K=0.1$ 的开孔泡沫模型如图 9 所示。模型最小胞元尺寸为 $5\ \text{mm}$,韧带直径为 $0.5\ \text{mm}$,长宽相等恒为 $50\ \text{mm}$,高度为 $40\ \text{mm}$ 。将计算结果归一化表面阻抗以及吸声系数与仿真结果的归一化表面阻抗及吸声系数进行对比验证。两种周期性开孔泡沫样品吸声系数和归一化表面特征阻抗的仿真结果与实验结果如图 13~图 14 所示。

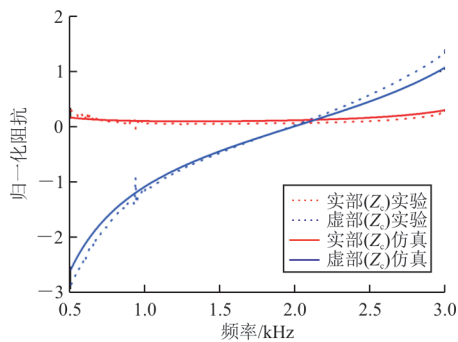


(a) 试件 1, $K=0$

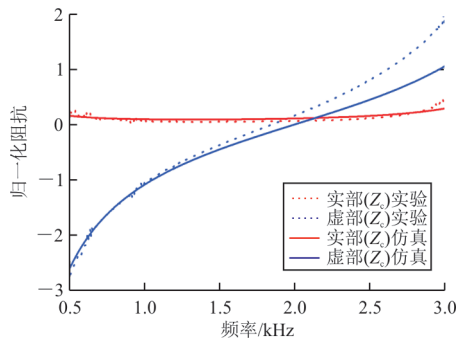


(b) 试件 2, $K=1$

图 13 吸声系数的实验值与仿真值的比较
Fig. 13 Comparison of experimental and simulation values of sound absorption coefficient



(a) 试件 1, $K=0$



(b) 试件 2, $K=1$

图 14 归一化特征阻抗
Fig. 14 Normalized characteristic impedance

从图 13~图 14 可以看出：实验结果与 JCA 模型的仿真预测结果^[17]吻合，从而验证了生成模型的准确性。

5 结 论

1) 本文以 Voronoi 图原理为基础构建了与实际开孔泡沫材料微观结构相似的模型即三维 Voronoi 开孔泡沫模型，并定义了扰动因子 K 作为衡量三维 Voronoi 开孔泡沫模型不规则程度的参数。

2) 给出了三维 Voronoi 开孔泡沫线模型的生成方法：首先在 MATLAB 中生成形核点，根据形核点的分布生成 Voronoi 闭孔泡沫模型；然后将闭孔泡沫模型导入 ANSYS-APDL 中生成 Voronoi 开孔泡沫线模型。

3) 介绍了三维 Voronoi 开孔泡沫实体模型的生成过程：将线模型导入 CAD 中生成 Voronoi 开孔泡沫实体模型。

4) 使用光固化打印技术并利用 M160 打印机打印出本文设计的实物泡沫模型，通过力学和声学实验与仿真进一步验证了生成模型的准确性。

参考文献

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. The mechanics of three-dimensional cellular materials [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Mathematical and Physical Sciences, 1982, 382: 43-59.
- [2] GONG L, KYRIAKIDES S, JANG W Y. Compressive response of open-cell foams, part I: morphology and elastic properties [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(5/6): 1355-1379.
- [3] GENT A N, THOMAS A G. Mechanics of foamed elastic materials [J]. Rubber Chem Technol, 1963, 36: 597-610.
- [4] LIU P S. Failure by buckling mode of the pore-strut for isotropic three-dimensional reticulated porous metal foams under different compressive loads [J]. Materials & Design, 2011, 32(6): 3493-3498.
- [5] MENGES G, KNIPSCHILD F. Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams [J]. Polymer Engineering & Science, 1975, 15(8): 623-627.
- [6] 石上路, 卢子兴. 基于十四面体模型的开孔泡沫材料弹性模量的有限元分析 [J]. 机械强度, 2006, 28(1): 108-112. SHI Shanglu, LU Zixing. Finite element analysis for the elastic modulus of open-cell foams based on a tetrakaidecahedron model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 108-112. (in Chinese)
- [7] ZHU H, HOBDELL J, WINDLE A. Effects of cell irregu-

- larity on the elastic properties of open-cell foams[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(20): 4893-4900.
- [8] GOMEZ S, VLAD M D, LOPEZ J, et al. Design and properties of 3D scaffolds for bone tissue engineering[J]. *Acta Biomater*, 2016, 42: 341-350.
- [9] FANTINI M, CURTO M, De CRESCENZIO F. A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11(2): 77-90.
- [10] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述[J]. *图学学报*, 2004, 25(2): 125-132.
- LIU Jinyi, LIU Shuang. A survey on applications of Voronoi diagrams[J]. *Journal of Graphics*, 2004, 25(2): 125-132. (in Chinese)
- [11] BOOTS B N. The arrangement of cells in "random" networks[J]. *Metallography*, 1982, 15(1): 53-62.
- [12] ZHU H X, KNOTT J F, MILLS N J. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells [J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1997, 45(3): 319-343.
- [13] Van der BURG M W D, SHULMEISTER V, Van der GEISSEN E, et al. On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models[J]. *Journal of cellular plastics*, 1997, 33(1): 31-54.
- [14] BARBER C B, DOBKIN D P, HUHDANPAA H T. The Quickhull algorithm for convex hulls[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, 22: 469-483.
- [15] 杨延华. 增材制造(3D打印)分类及研究进展[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(3): 309-318.
- YANG Yanhua. Analysis of classifications and characteristic of additive manufacturing (3D Print)[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(3): 309-318. (in Chinese)
- [16] UNE. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-part 1: method using standing wave ratio: ISO 10534-1[S]. Spain: UNE, 2001.
- [17] CHAMPOUX Y, ALLARD J F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(4): 1975-1979.

(编辑:丛艳娟)

(上接第31页)

- [132] FACCHINI L, BETTI M, BIAGINI P. Neural network based modal identification of structural systems through output-only measurement[J]. *Computers & Structures*, 2014, 138: 183-194.
- [133] OLIVIERI C, DE PAULIS F, ORLANDI A, et al. Estimation of modal parameters for inter-area oscillations analysis by a machine learning approach with offline training[J]. *Energies*, 2020, 13(23): 6410.
- [134] BRINCKER R, ZHANG L, ANDERSEN P. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition [C] // *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*. USA: Society for Experimental Mechanics, 2000: 625-630.
- [135] KIM B H, STUBBS N, PARK T. A new method to extract modal parameters using output-only responses [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(1/2): 215-230.
- [136] JAMES G H, CARNE T G, LAUFFER J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating wind turbines[R]. Albuquerque: Sandia National Labs, 1993.
- [137] DE MOOR B, VAN OVERSCHEE P, SUYKENS J. Subspace algorithms for system identification and stochastic realization [C] // *Proceedings of MTNS*. Kobe, Japan: MTNS, 1991: 56-67.
- [138] XU Y F, LIU J M, ZHU W D. Accurate and efficient calculation of discrete correlation functions and power spectra[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 347: 246-265.
- [139] ZAHID F B, ONG Z C, KHOO S Y. A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(8): 398.
- [140] 王亮, 张妍, 蔡毅鹏, 等. 测量信息对飞行器工作模态辨识精度影响分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(6): 1221-1225, 1239.
- WANG Liang, ZHANG Yan, CAI Yipeng, et al. The influence of the measure information on the operational mode identification of the aircraft[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(6): 1221-1225, 1239. (in Chinese)
- [141] RAHMAN A G A, CHAO O Z, ISMAIL Z. Effectiveness of impact-synchronous time averaging in determination of dynamic characteristics of a rotor dynamic system[J]. *Measurement*, 2011, 44(1): 34-45.
- [142] RAHMAN A G A, ONG Z C, ISMAIL Z. Enhancement of coherence functions using time signals in Modal Analysis [J]. *Measurement*, 2011, 44(10): 2112-2123.

(编辑:马文静)