

7-2-2020

Boundary Conditions for Model of Random Kelvin cell Open-cell Foam and Its Application on Open-cell Aluminum Foam

Minju Qi

1. Department of Computer and Information Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232001, China;;

Guangfa Gao

2. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;;3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;;4. Faculty of Engineering, National University of Singapore, Singapore 120425, Singapore;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Boundary Conditions for Model of Random Kelvin cell Open-cell Foam and Its Application on Open-cell Aluminum Foam

Abstract

Abstract: The random Kelvin cell open-cell foam model, the further investigations on the boundary conditions of the model were carried out using the Python scripting language and the commercial code ABAQUS. *The 'floating' edges in boundary, owing to being cut with slanted planes, were eliminated. The compressive behaviors of the material under free boundary condition and fixed boundary condition were investigated and comparatively analyzed. On the basis of the above results, the periodic boundary condition was developed, and the method of setting the periodic boundary condition under several different conditions was discussed.* The methodology for the design and implement for the key algorithms in the process of modeling were presented. Aiming at the open cell Aluminum foam, the compressive response of the random Kelvin cell open-cell foam structure under the three boundary conditions and quasi-static compression were numerically investigated and comparatively analyzed.

Keywords

algorithms design, open-cell foam, random kelvin cell, aluminum foam, boundary conditions

Recommended Citation

Qi Minju, Gao Guangfa. Boundary Conditions for Model of Random Kelvin cell Open-cell Foam and Its Application on Open-cell Aluminum Foam[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 190-199.

随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构模型边界条件及应用

齐敏菊¹, 高光发^{2,3,4}

(1.淮南师范学院计算机与信息工程系, 安徽 淮南 232001; 2.安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001;
3.中国科技大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 4.新加坡国立大学工程学院, 新加坡 120425)

摘要: 利用 Python 和 Abaqus 解决了泡沫材料非垂直切割造成边界出现“浮动”边等问题, 同时研究了自由边界、固定边界条件材料的准静态压缩特性, 在此基础上提出并分析了周期边界, 并对周期性边界设置中几种情况进行讨论和实现, 同时, 对此过程中相关思路、关键算法加以说明。最后, 以开孔泡沫铝为例, 对三种边界条件情况下随机 Kelvin 胞体开孔泡沫铝在准静态压缩过程中的力学行为进行了对比分析研究。研究成果对开孔泡沫材料的数值仿真研究具有一定的参考价值。

关键词: 算法设计; 开孔泡沫; 随机 Kelvin 胞体; 泡沫铝; 边界条件

中图分类号: TP399; O341 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0190-10

Boundary Conditions for Model of Random Kelvin cell Open-cell Foam and Its Application on Open-cell Aluminum Foam

Qi Minju¹, Gao Guangfa^{2,3,4}

(1. Department of Computer and Information Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232001, China; 2. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 4. Faculty of Engineering, National University of Singapore, Singapore 120425, Singapore)

Abstract: The random Kelvin cell open-cell foam model, the further investigations on the boundary conditions of the model were carried out using the Python scripting language and the commercial code ABAQUS. The ‘floating’ edges in boundary, owing to being cut with slanted planes, were eliminated. The compressive behaviors of the material under free boundary condition and fixed boundary condition were investigated and comparatively analyzed. On the basis of the above results, the periodic boundary condition was developed, and the method of setting the periodic boundary condition under several different conditions was discussed. The methodology for the design and implement for the key algorithms in the process of modeling were presented. Aiming at the open cell Aluminum foam, the compressive response of the random Kelvin cell open-cell foam structure under the three boundary conditions and quasi-static compression were numerically investigated and comparatively analyzed.

Keywords: algorithms design; open-cell foam; random kelvin cell; aluminum foam; boundary conditions

引言

多胞材料是一种含胞状微结构的一种固体材

料, 自然界中存在很多这样的材料, 如树木、骨头、珊瑚等。在过去的 40 多年内, 人造合成多胞材料得到了极大的发展, 已成为最重要的工程材料之一^[1-2], 其中, 泡沫材料和蜂窝材料因具有较低的相对密度、较高的强度以及压缩条件下卓越的吸能性能等优势, 是当前多个工程领域应用最广泛的两种最典型人造多胞材料^[3-4]。而在此类材料中, 工程金属



收稿日期: 2014-08-26 修回日期: 2014-12-29;
基金项目: 国家自然科学基金(11202206, 11472008);
教育部博士点专项基金(20123415120001);
作者简介: 齐敏菊(1978-), 女, 河北保定, 硕士, 讲师, 研究方向为计算机在工程中的应用; 高光发(1980-), 男, 湖北黄冈, 博士, 教授, 研究方向为波动力学、计算力学。

<http://www.china-simulation.com>

泡沫和高分子泡沫材料广泛应用于航空、海运、汽车和包装领域^[5-9]。根据微观结构划分, 泡沫材料主要包括开孔泡沫和闭孔泡沫 2 种^[10], 其中, 开孔材料是一种非常类似海绵结构的较新型的泡沫材料, 它具有更低的相对密度、较高的刚度和强度以及更优秀的吸能性能, 从而在许多先进工业应用中得到了推广^[11-12]。

由于在压缩加载状态下优异的吸能特性开孔泡沫材料广泛应用于吸能结构中, 因此研究该材料在压缩过程中胞体的变形特征和力学特性是非常必要和重要的^[2,6]。然而, 研究表明开孔泡沫材料的力学特性与其微观结构有着紧密的联系, 其微观结构在很大程度上影响着其吸能性能^[5], 了解并建立微观胞体模型是准确有效地分析其力学性能的必要前提。实验观察发现, 开孔材料微观结构中胞体一般皆为 11-17 面体^[13-15]。研究发现^[14,16-17], 利用规则的 Kelvin14 面体框架结构来近似开孔材料胞体结构能够取得较准确可信的结果。然而, 事实上胞体分布和尺寸具有其随机性, 而这种性质使开孔材料更精确科学模型的建立变得非常困难, 严重阻碍了开孔材料力学性能的进一步研究和发展^[8]。随着计算机科学与技术的飞速发展, 利用计算机建立模型并对泡沫材料的力学性能进行研究变得愈加可行和重要。同时, 在这些软件中建立 Kelvin 微观结构的泡沫材料模型仍然是一项较困难繁琐的工作, 特别是建立随机 Kelvin 胞体结构更是极其复杂。因而, 本课题组前期基于 Python 脚本语言和非线性力学分析软件 Abaqus, 研究并实现了随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构模型参数化设计, 使得此类模型的设计变得非常简单, 极大的提高了此类开孔泡沫结构力学性能研究中的建模效率和准确度。然而, 按照实物尺寸建立此类微结构而进行数值仿真, 其计算代价过大, 可行性值得探讨。很多研究表明, 设置合理的边界条件能够在一定程度上保证计算的准确性的同时极大地减小其计算代价, 事实上, 当前的数值仿真研究基本都是采用这种方式进行的。另一方面, 不同于一般材料的数

值仿真, 泡沫结构边界不是连续的面或连续面的集合, 而是一些分散的节点, 这使得其边界条件的设置与优化非常困难。

本文在前期研究所建立的随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构模型的基础上^[18], 利用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行进一步的二次开发, 优化该结构的边界区域, 实现自由边界、固定边界和周期性边界的参数化设计, 并就此 3 种边界条件下结构的准静态压缩行为进行研究和对比分析, 并给出其中关键算法和实现方法, 并以开孔泡沫铝为例, 对其在此 3 种边界条件下压缩过程中的力学行为进行仿真研究。研究对开孔材料在多个方面的性能如力学性能、热力学性能等数值仿真研究提供参考, 具有一定的应用价值。

1 边界问题及优化

利用微观结构研究泡沫材料的压缩力学行为能够在最大程度上观察压缩过程中内部微结构的力学响应, 从而得到相应的反馈信息, 以便对开孔泡沫材料进行优化设计。然而, 一般来讲, 工程中使用的泡沫材料至少含有成千上万个胞体, 甚至更多, 利用计算机对原型进行研究代价过大, 也不可行。通常采取的方法是: 首先, 分析研究材料微结构的特性, 提取特征结构; 其次, 从理论或实验观察上, 分析材料在压缩中的基本特性, 设置合适可行且相对准确的边界条件, 如图 1 所示。

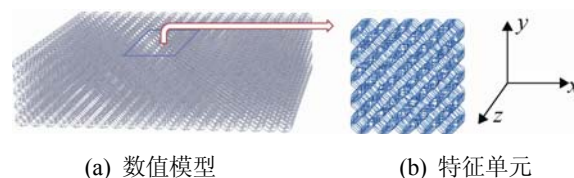


图 1 泡沫材料微结构数值模型的提取

图 1 中所示泡沫材料及其特征结构是一种理想情况, 即材料在应用时其承受压缩加载的方向正好与材料微结构中多层胞体布置的层面垂直, 从工程上讲, 就是材料在切割时切割面与层面垂直或平行。此时, 特征微结构的边界也非常理想, 如图 1

所示。然而，绝大多数情况下，切割面与微结构中的胞体分层面既不垂直也不平行，而是斜交的，如图 2 所示。图 2 中所示的只是材料在一个方向(Y 方向)上被斜切割的三维和二维视图，当材料在 XYZ 3 个方向上都是斜切割时将更为复杂。事实上，在工程中对泡沫材料进行切割时，特别是斜切割过程中，在切割边界经常有许多碎屑掉下，这些碎屑很多是因为在切割后原本相互连接的边被强行断开从而导致边界区域存在一些“被孤立”的“浮动”边或几个边的集合。在工程上这些“浮动”边由于重力原因不可能一直悬浮，而是直接掉下，但是在建模过程中这些边无法自行消除，还是存在的，如图 3(a)所示。图 3(a)中左右边界区域明显出现“浮动”边，实际上，垂直于纸面的内外方向边界上也存在类似情况，这些“浮动”边就是计算机模拟工程斜切割后材料边界出现的“碎屑”边。

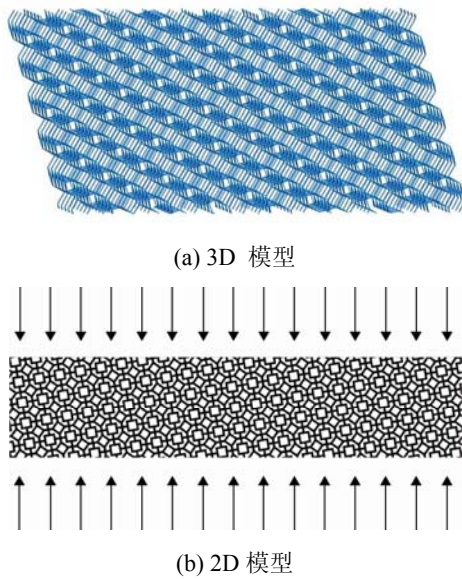
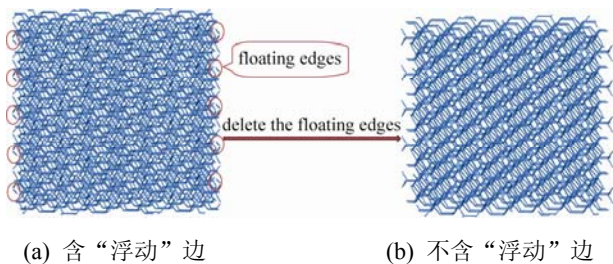


图 2 斜切割时微结构的三维模型与二维模型



(a) 含“浮动”边 (b) 不含“浮动”边
图 3 存在“浮动”边的模型与删除这些“碎屑”后的模型

然而，在边界条件设置过程中，特别是复杂边界条件的设置过程中(如下文的周期性边界条件的设置)就存在一定的影响，这些边的存在使得边界条件在设置之初就存在理论上的不足。为了克服这些问题，删除这些“浮动”边是非常有必要的。

图 3(a)是前期研究成果随机 Kelvin 胞体开孔泡沫微结构的参数化设计结果，从图中椭圆形框中可以看到，在其边界区域存在首尾两端都与其它边没有连接关系的被“孤立”的“浮动”边，同时，在不同切割角度时也有模型边界上存在 2 条边“浮动”的情况。这些边的共同点是与之相连接的边数总和 ≤ 2 ，针对这一特点，利用 Python 对这些边进行了删除处理，主要思路见流程图 4 所示。

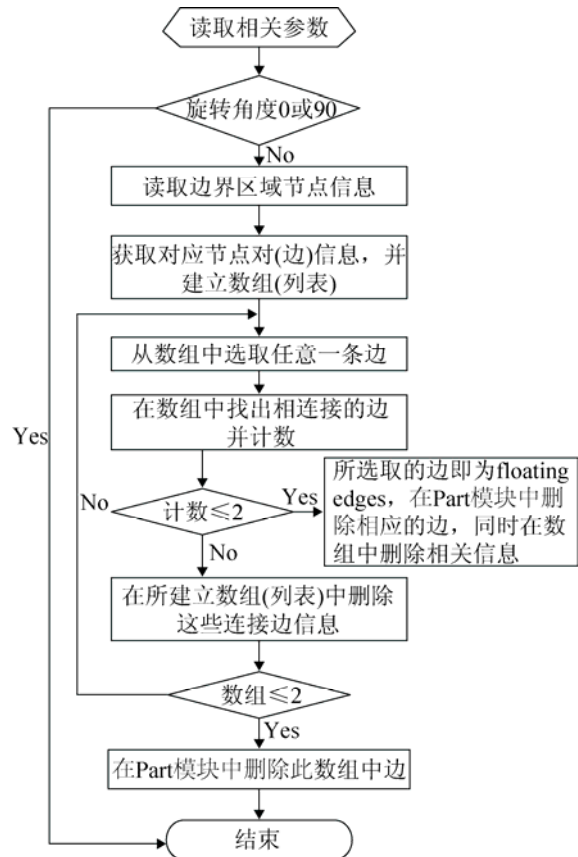


图 4 删除“下浮动”边的程序设计思路

首先，判断切割方向是否与层面垂直或平行，如果不平行即斜切割，才有可能有边界“碎屑”存在，此时才寻找并删除“浮动”边。第 2 步，为缩小循环区域，减少计算代价，操作在边界区域进行，

因此边界区域的定义和选择就相对重要了, 因为, 如果边界区域过大, 则起不到减少计算代价的目的, 反之, 如果太小, 怎会出现边界区域边数值里面绝大部分不连接, 即都为“浮动”边而进行删除的错误结果, 本次研究定义一个材料边界内胞体宽度区域为边界区域。第 3 步, 将边界区域中所有边放入原始边数值中, 并利用图 4 所示算法找出浮动边。最后, 利用 Python 语言在 Abaqus 的 Part 模块中删除所有浮动边。此时即得到没有“浮动”边的泡沫材料微结构, 如图 3(b)所示。

其中所用的 Abaqus 和 Python 的方法、属性与函数见表 1 所示, 删除“浮动”边的算法核心部分如下所示:

```
if angleofcutplane ≠ 90° or 0°:
    .....
alldgesarraylist = [the indexes of all edges in
the boundary region]
temporaryedgeslist=[],temporaryveriticeslist=[],
floatingedgeslist=[]
```

```
while len(alldgesarraylist) > 2:
temporarylist1 = [the index of any one edge in
the alldgesarraylist]
temporarylist2 = [the indexes of corresponding
vertices of the edge in the temporarylist1]
for i in alldgesarraylist:
if qmjrandomcellpart.edges[i].getVertices()[0] in
temporarylist2 or
qmjrandomcellpart.edges[i].getVertices()[1] in
temporarylist2:
temporarylist1.append(i)
lengthoftemporarylist = lengthoftemporarylist+1
alldgesarraylist.remove(i)
if len(temporarylist1) <=2
floatingedgeslist.extend(temporarylist1)
floatingedgeslist.extend(alldgesarraylist)
.....
qmjrandomcellpart.RemoveWireEdges(wireEdgeList=alldges in the floatingedgeslist)
```

表 1 所用的 Abaqus 与 Python 方法、属性与函数

Abaqus 方法	assembly.Set(...), model.Equation(...), model.part[...].edges[...].getVertices(), sequenceFromLabels(...), model.part[...].RemoveWireEdges(...), model.part[...].vertices[...].getEdges(), model.DisplacementBC(...), findAt(...)
Abaqus 属性	model.part[...].edges, model.part[...].vertices, label, coordinates, index, pointOn
Python 函数	max(...), min(...),sqrt(...), str(...), list.append(...), list.remove(...), len(...), range(...),tuple(...), list.sort(...), list.extend(...)

2 自由边界与固定边界

2.1 自由边界条件

在所有边界条件里, 最简单的莫过于自由边界条件, 即没有任何边界约束, 如图(b)所示。由于开孔泡沫材料的泊松比非常小, 即其在压缩过程中横向变形较小, 也就是说其边界所受的反作用力相对于实体材料而言有时可以忽略; 另一方面, 由于开孔泡沫结构边界的不连续性, 使得其边界条件的边界变得相当复杂, 因此, 在很多情况下, 我们假设边界反作用力为 0, 而利用自由边界下结构的压

缩特性来反映整个泡沫材料在准静态压缩过程中的力学特性。

2.2 固定边界条件

绝大多数实验表明, 无论是开孔泡沫金属材料还是开孔泡沫高分子材料, 其在压缩过程中有一定的横向膨胀, 也就是说, 如图 5(b)所示模型边界(包括内外及左右)在压缩过程中应该存在反作用力的, 忽略其反作用力虽然能够在某种程度上对泡沫材料的压缩力学性能进行标定, 但在准确性上还是存在一定的误差, 理论上也存在一定的不足之处。

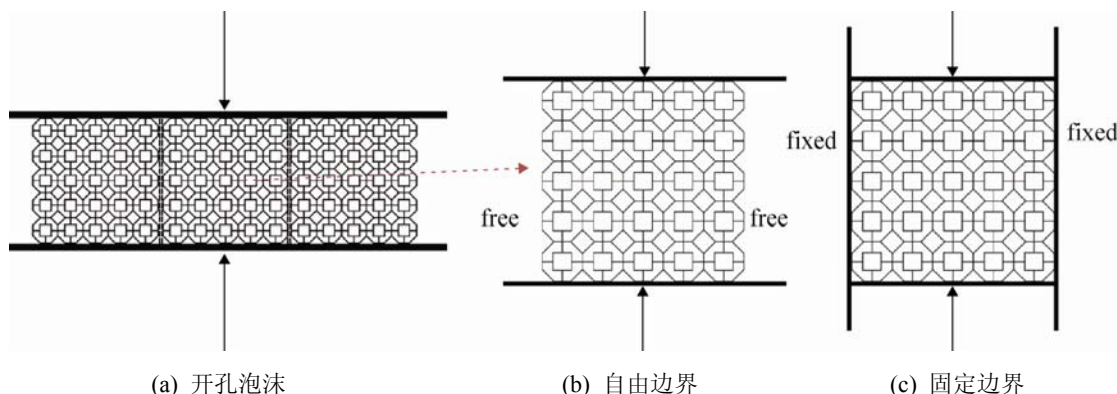


图 5 自由边界条件和固定边界条件示意图

同样，由于泡沫材料压缩过程中横向变形相对较小，我们也可以对边界上的反作用力不加关注，而是认为边界上的垂直于边界面上的位移在压缩过程中为 0，即假设边界节点相对固定，这就是我们所示的固定边界条件。如图 5(c)所示。

固定边界条件的设置步骤和方法如下：首先，确定边界节点，也就是左右和内外边界的节点特性，以右边界为例，假设其为 X 轴正方向(图 1 所示)，那么在此边界上的节点有一个共同点，即其 x 坐标值相等且皆等于所有节点的最大值，这里需要说明的是，由于该模型的目标是参数化设计，其中也包括微结构大小(XYZ 方向上胞体个数和胞体尺寸、结构切割尺寸等)也可以根据全局变量控制，以达到最大程度上通用，所以其结构的最大值不是事先给定的，而是根据用户所给的参数自动计算出来了，所以，节点的最大值要通过 Python 中 max 函数求出。第 2 步，建立一个列表，将所有边界节点放入，同时设置其 $UX=0$ ，即 X 方向上不允许出现位移。其他边界进行类似的设置，其中所用到的主要方法、属性和函数见表 1 所示。

2.3 两种边界条件的对比分析

事实上，此两种边界条件是两种极端假设，其中自由边界认为边界没有任何反作用力，而固定边界确是考虑边界节点所受的外部反作用力最大时的情况。从图 6 可以看出，自由边界条件下，结构在压缩过程中膨胀非常明显，而固定边界确如其假

设，边界基本没有膨胀效应，这点反映到加载时应力时程曲线上就明显地显示为固定边界是结构的抗压强度明显高于其在自由边界时的值，下文中的泡沫铝的应力应变曲线说明了这一点。

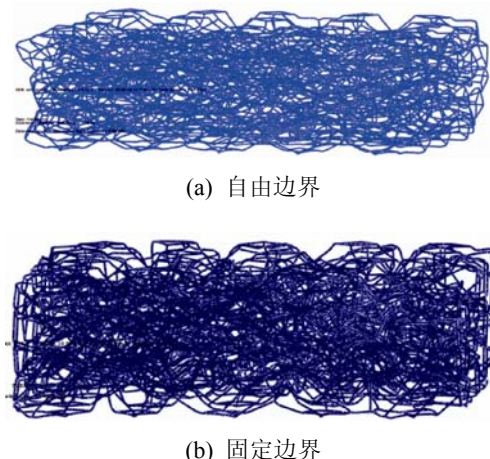


图 6 2 种边界条件下结构的压缩变形

3 周期边界设置的算法及实现

如同上节的分析，自由边界和固定边界条件是实际上边界条件的两个极端，也就是说，实际上的边界条件应该处于两者之间的一种情况。一般情况下，开孔泡沫微结构的数值仿真模型相对于工程实际泡沫材料而己在尺寸上相差一个甚至更多的量级，因此，我们可以近似认为在数值仿真的尺度下，相邻特征结构受力状况和边界条件是相同的，如图 7 和式(1)所示。

图 7 中为开孔泡沫结构中两个相邻的特征结构，我们可以假设两者的受力情况一致，其边界条

件也一致, 这个假设同上分析是合理的且相对科学准确的。根据此假设, 二者的左边界的位移条件应该也是一致的, 即:

$$D_{B1L} = D_{B2L} \quad (1)$$

式中: D 表示 Displacement, 即 XYZ 3 个方向的位移; B 表示 Boundary condition, 即边界条件; L 表示 Left, 即左端, 下式中 R 表示 Right, 即右端, 1 和 2 分别表示图 7 中的特征结构 1 和 2。

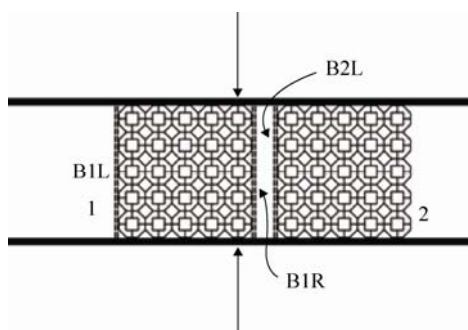


图 7 周期性边界条件示意图

另一方面, 根据连续方程可知, 此两个相邻的特征结构满足以下关系:

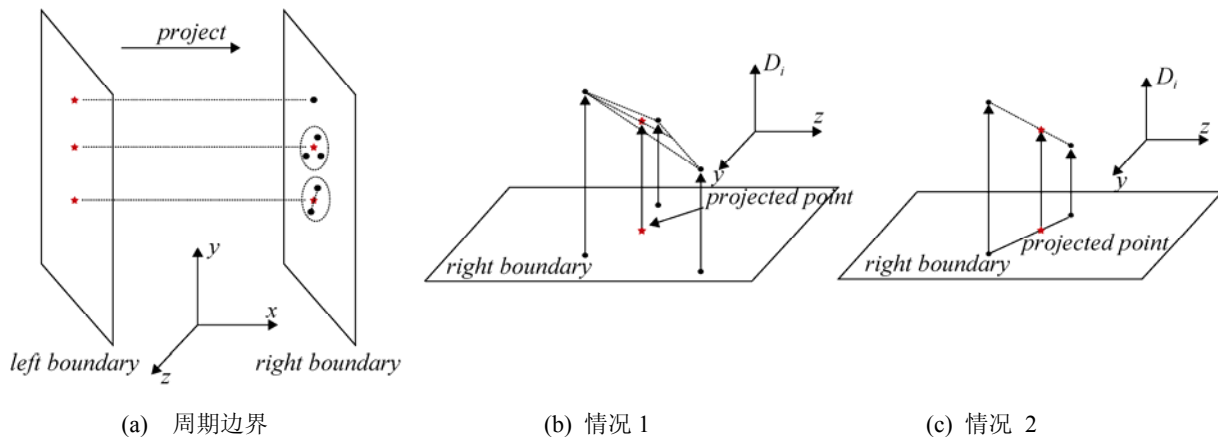


图 8 周期边界约束方程的建立

如图 8(a)所示, 约束方程根据其节点空间布置情况也分多种情况。主要存在的情况及在此条件下约束方程的建立如下所示:

(1) 两端存在空间相对应的节点。如图 8(a)所示, 这种情况是最理想的情况, 即此两节点坐标除了 x 坐标外皆相同, 此类情况直接用式(3)建立 6 个位移约束方程。

$$D_{B1R} = D_{B2L} \quad (2)$$

因此, 我们可以得到如下关系:

$$D_{B1R} = D_{B1L} \quad \text{即} \quad D_{B1R} - D_{B1L} = 0 \quad (3)$$

即特征结构对应边界面对应节点的位移是相等的, 这个边界称之为周期性边界, 简称周期边界。

事实上, 在 Abaqus 中存在一种边界与之类似, 即循环边界, 但这个边界要求两端边界几何形状必须相同, 而对于随机 Kelvin 胞体开孔泡沫材料而言, 特别是斜切割时的泡沫材料而言, 这个条件基本不成立, 而当节点较多时(一般节点都较多), 人为设置限制方程极其复杂, 例如此次仅 $5 \times 5 \times 5$ 的胞体结构其方程就超过了 1 000 个, 而且更为复杂的是, 当材料是斜切割后生成时, 即如图 3 所示情况时, 两端界面中绝大部分节点坐标并不相互对应, 而是出现类似图 8(b)(c)这 2 种情况, 此时通过手动来建立约束方程, 基本是不可能的。所以, 本研究在理论分析的基础上, 利用 Python 脚本语言来实现, 是非常有意义的。

(2) 两端不存在空间上对应的节点。如图 8(a)所示, 首先将左边界上的节点投影到右边界相应的位置(见图 8 中星形点), 再以该节点为中心画圆, 其半径不断扩大, 直到圆内包含 3 个节点为止(见图 8 中圆点所示)。此时又可细分为以下情况分析:

1) 映射点与相邻 3 点中任意 2 点不共线, 即如图 8(b)所示, 此时建立 (y, z, D_i) 空间, 使得在此

空间内映射点与相邻三点共面, 根据这些点的(y, z)坐标值, 利用空间解析几何很容易就能够建立其位移之间代数关系的 6 个约束方程。

2) 映射点与相邻 3 点中的两点共线, 即如图 8(c)所示情况, 此时同上建立(y, z, D_i)空间, 使得此空间内映射点与平面上共线的两点在空间上共线, 根据这些点的(y, z)坐标值, 利用空间解析几何也很容易就能够建立其位移之间代数关系的 6 个约束方程。

利用表 1 中 model.Equation(...)等方法或属性, 结合 Python 内部函数, 建立其边界约束方程。

4 三种边界条件下开孔泡沫铝准静态压缩行为的数值仿真

为验证上述所建立算法和约束方程的可行性和准确性, 利用上述模型对泡沫铝在此 3 种边界条件下准静态压缩加载作用的力学行为进行数值仿真研究。研究所用的特征参数(设置为全局变量)见表 2 所示。

表 2 随机胞体开孔泡沫铝特征参数

补充类型	特征边长	特征角度	x 方向层数	y 方向层数	z 方向层数	随机半径系数
取值	10 mm	45°	5	5	5	1/3

泡沫铝的本构模型选用 Johnson-cook 模型^[19], 如式(4)(5)所示:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] \left[1 + c \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (4)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f}$$

$$\epsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{P}{\sigma}) (\bar{\epsilon}^p)^n \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (5)$$

上两式中右端 3 项分别代表等效塑性应变硬化、等效塑性应变率硬化和温度软化。在常温准静态压缩过程中, 温度软化和应变率硬化效应的影响都可以忽略, 所以, 可以简化为:

$$\sigma = \left[A + B(\bar{\epsilon}^p)^n \right] \quad (6)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f},$$

$$\epsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{P}{\sigma}) (\bar{\epsilon}^p)^n \right] \quad (7)$$

材料参数见表 3 所示^[19-20], 选择 beam 单元, 截面形状为圆形, 半径为 0.4 mm, 应变率为 0.01/s。

表 3 Aluminum 6061 的本构参数

参数	单位	参数值	参数	单位	参数值
密度 ρ ₀	g/cm ³	2.703	参数 D ₁		-0.77
杨氏模量 E	GPa	68.9	参数 D ₂		1.45
泊松比 ν		0.33	参数 D ₃		0.47
JC 参数 A	MPa	324.1	参数 D ₄		0.0
JC 参数 B	MPa	113.8	参数 D ₅		0.0
JC 参数 n		0.42			

数值仿真结果表明, 3 种边界条件下随机 Kelvin 胞体开孔泡沫铝微结构在准静态压缩过程中的变形特征基本类似, 如图 9 所示(图 9 为周期边界时结构的变形过程), 从图中可以看出: 第 1 阶段, 泡沫材料特征结构呈现出一种“准弹性”变化过程, 无明显局部大变形情况发生(图 9(a)所示); 第 2 阶段是材料的主要吸能阶段, 这一阶段材料明显出现局部屈曲变形(图 9(b)所示), 因而在应力时程曲线中出现明显的平台阶段, 直到整个结构都存在明显变形(图 9(c)所示), 压缩强度而出现明显增加阶段, 这一阶段出现的时间比例最大, 变形量也最大; 第 3 阶段即压实阶段, 当整体都发生过局部变形后(图 9(d)), 此时材料的强度明显增大, 而且这种增加的趋势也逐渐加速, 直到材料完全压实(图 9(e))。

需要说明的是, 图 9 中(d)(c)两图看起来出现倾斜情况, 这不符合实际情况, 事实上, 因为此数值仿真是三维仿真, 所以由于视角的问题, 才出现这种“错觉”。

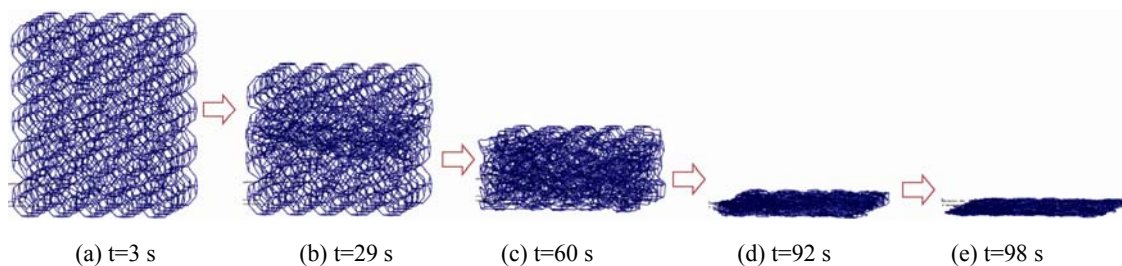


图 9 周期边界下压缩过程中泡沫结构的变形

图 10 是准静态(工程应变率为 0.01)压缩过程中泡沫铝特征结构在 3 种边界条件下的工程应力应变曲线。从图中可以看出, 3 种边界条件下, 结构在准静态压缩过程中皆呈理论上的“三段式”行为(图 10 中两条虚线), 材料在压缩过程中呈现明显的平台阶段。图 9 和图 10 所显示出的力学行为特征, 与开孔泡沫铝准静态压缩响应的实验测量基本一致, 这说明本模型是合理可信的。

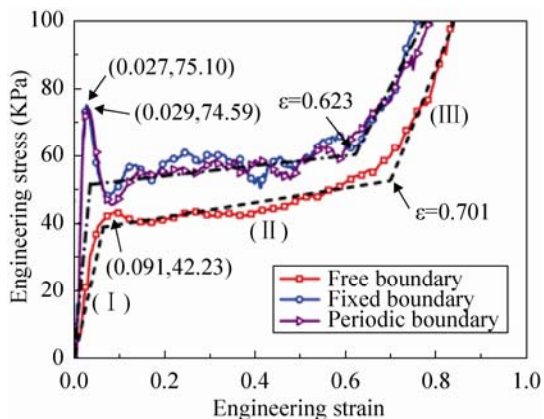


图 10 三种边界条件下压缩过程中泡沫结构的力学行为

同上文分析, 3 种边界条件的本质在于: 自由边界是假设在泡沫材料中每个特征单元(即本文中 $5 \times 5 \times 5$ 胞体结构)之间互无干扰, 边界可以自由膨胀; 固定边界则代表另一个极端, 即每一个特征单元的外部单元对其自身的反作用极大, 以至于无法膨胀变形; 而周期边界理论上考虑了特征单元之间的相互影响, 其假设结构足够大, 以至于相邻 2 个特征单元在压缩过程中变形特征相同, 其可用于利用尺度较小的特征单元来模拟相对来讲无限大的结构。从图 10 可以看出, 3 种边界条件下结构压缩性能的不同之处有以下几个方面:

1) 自由边界条件下结构的强度, 无论是“弹性屈服”强度(即第 I 阶段与第 II 阶段交点应力值)还是屈服平台高度(即第 II 阶段的应力均值), 甚至是压实强度(即第 II 阶段与第 III 阶段交点应力值), 都明显小于固定边界和周期边界条件下对应的值;

2) 同上文分析, 固定边界条件下, 结构的强度整体来讲是最大的;

3) 周期边界条件下, 结构的压缩行为与固定边界条件下的非常类似, 这也充分说明了泡沫结构在压缩过程中横向膨胀非常小, 利用自由边界条件进行数值仿真其准确性相对较差;

4) 相对于自由边界而言, 固定边界和周期边界由于边界的约束和干扰, 其在第 I ~ II 阶段的过渡阶段由于屈曲效应出现明显的应力骤降行为;

5) 无论是屈服应变还是压实锁应变, 自由边界条件下其值明显大于其他两者, 这主要是因为, 在压缩过程中自由边界条件下, 结构横向膨胀较大, 在相同体积变化下, 其压缩方向的应变就随之变大。

5 结论

开孔泡沫材料因其低密度和卓越的吸能特性是当今应用非常广泛的新型工业材料之一, 研究其压缩作用下的力学性能非常重要。然而, 建立较准确的微观胞体结构模型是一项极其复杂但极具价值的一项工作。本文在前期的研究(随机 Kelvin 胞体开孔泡沫微结构的参数化设计与实现)基础上, 利用 Python 脚本语言和非线性力学分析软件 Abaqus, 对随机 Kelvin 胞体开孔泡沫微结构的仿真模型做进一步的研究。主要结论有以下几点:

1) 一般情况下, 利用专业软件对开孔泡沫材料进行细观尺度下进行数值仿真研究很难做到全尺寸研究, “细”而“全”不仅在模型建立上, 而且在计算代价上是不可取的。因而取其特征结构进行研究是行之有效的一种方法, 此时结构边界处理和边界条件的选取和建议有着非常重要的意义;

2) 由于斜切割的原因, 工程上泡沫材料边界都会产生“孤立”的碎屑, 同样地, 在数值模型的建立的过程中, 模仿工程进行斜切割也会在边界产生相应的“浮动”边, 不同于实际环境, 在数值仿真条件下, 这些“碎屑”式的“浮动”边不会自行掉下而消失。这种“浮动”边的存在对边界条件的建立和计算过程都有着一定的影响, 因此需要进行删除。本研究利用 Python 语言能够自行识别边界区域中的“浮动”边, 并实现从模型中自行删除等功能;

3) 分别研究了特征结构在自由边界和固定边界条件下准静态压缩性能, 并对其进行了对比分析。结果表明: 自由边界是建立在开孔泡沫材料由于横向膨胀较小从而使得其特征结构外部受力较小这个前提下的, 其所得的压缩性能是材料的“下限”; 反之, 固定边界是建立在开孔泡沫材料压缩过程中横向位移较小这个事实前提下进行假设的, 其所得的压缩性能是材料的“上限”。此两种边界条件在理论上显得有些“粗糙”, 需要进一步改进;

4) 提出并建立了周期边界条件, 并对几种复杂边界情况下如边界对上节点不对应等等进行了系统的分析, 并给出其关键算法, 同时, 利用 Python 语言实现了自动选取对应节点或节点集、自动建立约束方程等功能。

以开孔泡沫铝为例, 利用所建立的结构模型和 Johnson-cook 本构模型, 对随机 Kelvin 泡沫结构在准静态压缩过程中的力学行为进行了对比分析研究, 数值仿真结果所显示材料在准静态加载过程中的力学响应与实验所发现的特征一致性较好。

以开孔泡沫铝为例, 对比了 3 种边界条件下特征结构的压缩行为, 结果表明: 首先, 自由边界条

件下结构的强度, 无论是“弹性屈服”强度还是屈服平台高度, 甚至是压实强度, 都明显小于固定边界和周期边界条件下对应的值, 而且固定边界条件下结构的强度整体来讲是最大的; 其次, 周期边界条件下结构的压缩行为与固定边界条件下的非常类似, 这也充分说明了泡沫结构在压缩过程中横向膨胀非常小, 利用自由边界条件进行数值仿真其准确性相对较差。

参考文献:

- [1] 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* (S0020-7683), 2005, 42: 1355-1379.
- [2] Okumura Dai, Okada Atsushi, Ohno Nobutada. Buckling behavior of Kelvin open-cell foams under $[0\ 0\ 1]$, $[0\ 1\ 1]$ and $[1\ 1\ 1]$ compressive loads [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2008, 45: 3807-3820.
- [3] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. *Metal Foams: A Design Guide* [M]. Boston, USA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] Bensoussan A, Lions J-L, Papanicolaou G. *Asymptotic Analysis for Periodic Structures* [M]. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1978.
- [5] Gan Y X, Chen C, Shen Y P. Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2005, 42: 6628-6642.
- [6] Takahashi Yuji, Okumura Dai, Ohno Nobutada. Yield and buckling behavior of Kelvin open-cell foams subjected to uniaxial compression [J]. *International Journal of Mechanical Sciences* (S0020-7403), 2010, 52: 377-385.
- [7] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular solids: structure and properties* [M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [8] Lu Zixing, Liu Qiang, Huang Jixiang. Analysis of defects on the compressive behaviors of open-cell metal foams through models using the FEM [J]. *Materials Science and Engineering A* (S0921-5093), 2011, 530: 285-296.
- [9] Harb Rani, Taciroglu Ertugrul, Ghoniem Nasr. Partitioning of elastic energy in open-cell foams under finite deformations [J]. *Acta Materialia* (S1359-6454), 2013, 61: 1454-1468.

- [10] Kucherov Leonid, Ryvkin Michael. Fracture toughness of open-cell Kelvin foam [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2014, 51: 440-448.
- [11] Demiray Serkan, Becker Wilfried, Hohe Jörg. Investigation of the fatigue behavior of open cell foams by a micromechanical 3-D model [J]. *Materials Science and Engineering A* (S0921-5093), 2009, 504: 141-149.
- [12] Kumar Prashant, Topin Frederic, Vicente Jerome. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams [J]. *International Journal of Thermal Sciences* (S1290-0729), 2014, 81: 13-28.
- [13] Jang Wen-Yea, Kraynik Andrew M, Kyriakides Stelios. On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2008, 45: 1845-1875.
- [14] Gaitanaros Stavros, Kyriakides Stelios, Kraynik Andrew M. On the crushing response of random open-cell foams [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2012, 49: 2733-2743.
- [15] Jang Wen-Yea, Kyriakides Stelios, Kraynik Andrew M. On the compressive strength of open-cell metal foams with Kelvin and random cell structures [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2010, 47: 2872-2883.
- [16] Mills N J. The high strain mechanical response of the wet Kelvin model for open-cell foams [J]. *International Journal of Solids and Structures* (S0020-7683), 2007, 44: 51-65.
- [17] Sullivan Roy M, Ghosn Louis J. Shear moduli for non-isotropic, open cell foams using a general elongated Kelvin foam model [J]. *International Journal of Engineering Science* (S0020-7225), 2009, 47: 990-1001.
- [18] 齐敏菊, 高光发. 开孔泡沫材料随机化 Kelvin 微结构模型建立与应用 [J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(2): 262-269.
- [19] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering fracture mechanics* (S0013-7944), 1985, 21(1): 31-48.
- [20] Schwer L. Aluminum plate perforation: a comparative study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and smooth particle hydrodynamics [C]// 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg: LSTC, 2009.

(上接第 189 页)

- [5] Dao Van Phuong, 左加阔, Bui Thi Oanh, 等. 网络模拟软件 NS2 与 OPNET 的剖析比较 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2014, 44(3): 90-95.
- [6] 谭盛彪, 刘俊. OPNET 在水声通信网中的应用研究 [J]. *数字通信*, 2013 (3): 37-41.
- [7] 韩晶, 黄建国, 冉茂华. 基于 OPNET 的水声通信网络设计与仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(17): 5498-5502. (Han Jing, Huang Jian-guo, Ran Mao-hua. Design and simulation of underwater acoustic communication network based on OPNET [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2009, 21(17): 5498-5502.)
- [8] Yuan Fei, Wang Shanhong, Lin Bilan, et al. Research of the multiple access protocol for underwater acoustic networks based on OPNET [C]// *Control Conference (CCC)*, 2010, Beijing, China. USA: IEEE, 2010: 4147-4150.
- [9] Jianxiong Wen, Lianghui Ding, Feng Yang, et al. Improved multi-hop time synchronization for Underwater Acoustic Networks [C]// *Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, 2013, Hangzhou, China. USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [10] 丁元明, 姜大鹏. 基于 OPNET 的水声网络信道仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(7): 1529-1536. (Ding Yuanming, Jiang Dapeng. Research and Simulation of Underwater Acoustic Network Channel Based on OPNET [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2012, 24(7): 1529-1536.)
- [11] 程荣涛. 水声通信网络设计与 OPNET 平台下仿真 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2014 (6): 173-176.
- [12] 王明. 基于 Chirp 超宽带通信技术的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 7-13.
- [13] 尉宇. 线性调频和非线性调频信号的检测与参数估计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 6-14.
- [14] 王军梅, 钟洪声, 周国勇. 实现 $\pi/4$ -DQPSK 调制的一种快速算法 [J]. *电子科技大学学报*, 2005 (6): 747-750.
- [15] B M Porter, H P Bucker. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* (S0001-4966), 1987, 82(10): 1349-1359.
- [16] P Xie. Underwater Acoustic Sensor Networks: Medium Access Control, Routing and Reliable Transfer [D]. Connecticut, USA: University of Connecticut, 2007.