

9-2-2020

Modeling Random Kelvin Cell Micro-Structure for Open-cell Foam and Its Application on Compression Response of 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.

Modeling Random Kelvin Cell Micro-Structure for Open-cell Foam and Its Application on Compression Response of Open-cell Aluminum Foam

Abstract

Abstract: It is very difficult to model an applicable microstructure for the open cell foams. *Using the Python scripting language and the commercial code ABAQUS, the structures for regular Kelvin cell, regular Kelvin open cell foams and random Kelvin open cell foams were designed and modeled automatically. The methodology for modeling, the design and implement for the key algorithms in the process of modeling were presented. For the open cell Aluminum foam, the regular Kelvin cell open cell model and the random Kelvin cell open cell foams model were developed, respectively, and the mechanical responses of them under quasi-static compressive load were numerically investigated and compared.*

Keywords

algorithms design, open-cell foam, Python, Abaqus, random Kelvin cell, aluminum foam

Recommended Citation

Qi Minju, Gao Guangfa. Modeling Random Kelvin Cell Micro-Structure for Open-cell Foam and Its Application on Compression Response of Open-cell Aluminum Foam[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 262-269.

开孔泡沫材料随机化 Kelvin 微结构模型建立与应用

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, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学能源与安全学院, 淮南 232001;
3. 中国科技大学近代力学系, 合肥 230027; 4. 新加坡国立大学工程学院, 新加坡 120425)

摘要: 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。利用 Python, 对 Abaqus 进行二次开发, 实现规则 Kelvin 单胞结构、规则 Kelvin 多胞结构和随机 Kelvin 多胞结构等开孔泡沫结构的参数化设计和自动化建模, 并对建模思路、关键算法的设计与实现加以说明。以泡沫铝为例, 分别对规则 Kelvin 结构和随机 Kelvin 结构的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。研究成果对随机 Kelvin 胞体结构的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; Python; Abaqus; 随机 Kelvin 胞体; 泡沫铝

中图分类号: TP399; O341 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 02-0262-08

Modeling Random Kelvin Cell Micro-Structure for Open-cell Foam and Its Application on Compression Response of 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: It is very difficult to model an applicable microstructure for the open cell foams. Using the Python scripting language and the commercial code ABAQUS, the structures for regular Kelvin cell, regular Kelvin open cell foams and random Kelvin open cell foams were designed and modeled automatically. The methodology for modeling, the design and implement for the key algorithms in the process of modeling were presented. For the open cell Aluminum foam, the regular Kelvin cell open cell model and the random Kelvin cell open cell foams model were developed, respectively, and the mechanical responses of them under quasi-static compressive load were numerically investigated and compared.

Keywords: algorithms design; open-cell foam; Python; Abaqus; random Kelvin cell; aluminum foam

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



作者简介: 齐敏菊(1978-), 女, 河北保定人, 硕士, 讲师, 研究方向为计算机在工程中的应用; 高光发(1980-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向为波动力学、计算力学;
收稿日期: 2014-07-11 修回日期: 2014-10-21;
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)。

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

观结构划分, 泡沫材料主要包括开孔泡沫和闭孔泡沫两种^[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。当前, 一些学者采用非线性力学分析软件如 Abaqus, LS-Dyna 等等对开孔

Kelvin 泡沫结构的压缩性能进行了分析研究, 也取得了非常有价值的成果。然而, 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。研究并实现参数化自动建立随机 Kelvin 胞体结构的开孔泡沫材料模型显得格外重要。

本文利用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行二次开发, 实现 Kelvin 规则单胞结构、规则 Kelvin 胞体结构的开孔泡沫材料以及随机 Kelvin 胞体结构的开孔材料等模型参数化设计和自动化生成, 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、热力学性能等等数值仿真研究提供参考, 具有一定的应用价值。

1 模型与设计流程

从微观观察中可以看出, 开孔泡沫中胞体一般是 11-17 面体的框架结构, 当前很多研究利用 Kelvin 胞体简化结构来进行建模, 研究表明^[14,16-17], 计算结果与实际结果一致性较好。Kelvin 胞体结构即是一个典型的十四面体框架结构, 如图 1 所示, 它能够较好的体现开孔泡沫材料中的胞体结构。

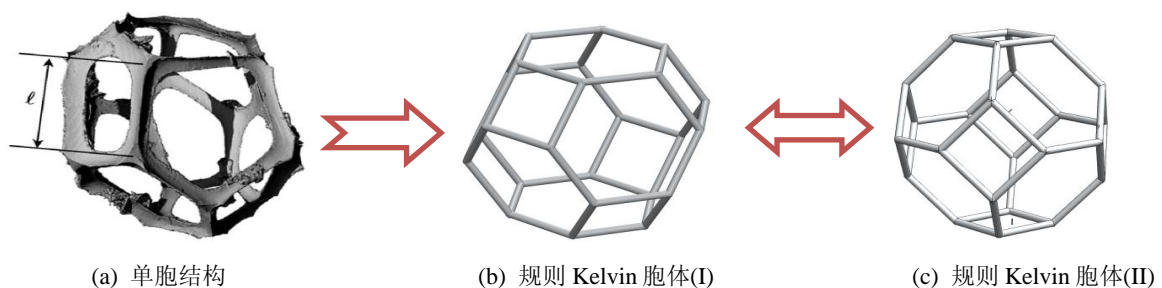


图 1 胞体的几何特征及 Kelvin 等效结构^[13]

根据 Kelvin 开孔泡沫材料的结构特征和 Abaqus 的软件特性, 随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构的生成整体来讲包括 3 步: 单胞的参数化设计, 规则泡沫结构的参数化设计和随机胞体泡沫结构的参数化设计, 如图 2 所示。这 3 个步骤分

别在 Abaqus 软件中的 Part 模块和 Assembly 模块中完成。在 Abaqus 中, 绘制图形基本都在 Part 模块中完成; Assembly 模块仅能够进行阵列、偏移与旋转等功能, 不能够对基本 part 结构进行修改编辑, 所以, 图 2 中的第 2 步到第 3 步的实现一

般比较困难,大多通过生成 `inp` 文件,提取其中的节点和边的信息,再利用 `Matlab` 等工具进行随机化,最后返回到原 `inp` 文件中进行替换操作。这种方法存在几个不足之处:(1) `Kelvin` 胞体结构在 `Abaqus` 中绘制比较复杂,如不能实现参数化设计对于胞体尺寸的调整非常困难,需重复这种复杂的工作;(2)通过 `inp` 文件提取数据并通过相关

软件进行随机化需要人工操作,效率较低且容易出错,同时,此种随机化操作很难控制,如为了方便之后边界条件的设置,有时仅需在内部随机化,而在外部节点或边保持不变,这种功能很难通过修改 `inp` 文件实现;(3)不经过二次开发,很难对此类微结构的较复杂边界条件进行设置。

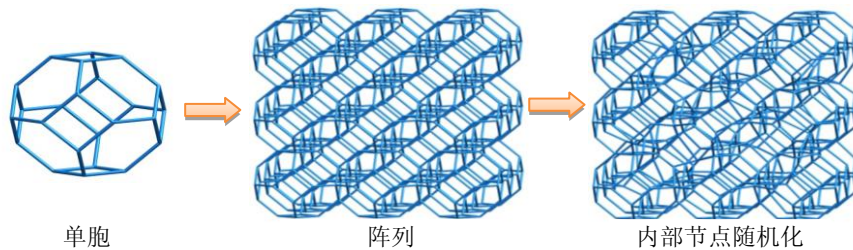


图 2 随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构建模的 3 个步骤

基于 `Abaqus` 中 `Part` 模块和 `Assembly` 模块的特点,本研究提出了一种新的建模方式。第 1 步,通过分析随机 `Kelvin` 胞体开孔泡沫结构的特征,得到并设置其关键全局变量和特征参数,如单胞的特征边长、特征角度、泡沫结构 `xyz` 三个方向上的层数、随机化范围控制参数等等;第 2 步,利用 `Python` 语言求出含参数的单胞节点坐标方程,进而自行在 `Part` 模块中绘制规则单胞微结构;第 3 步,在 `Assembly` 模块中进行阵列从而得到图 2 中的规则泡沫结构,阵列参数为通过上述特征参数以及经过 `Python` 语言求解后的参数;第 4 步,通过 `Python` 语言获取各节点和节点对(边)的信息,并自行识别并删除由于阵列而造成的重复的节点和边;第 5 步,利用 `Python` 提取其中内部节点信息并进行随机化计算,得到随机化后的节点坐标;最后,通过 `Python` 语言,利用上述生成的节点坐标并结合第 4 步获取的节点对信息(如节点之间的连接信息等)重新在 `Abaqus` 中 `Part` 模块中绘制模型,即得到图 2 中所示的随机 `Kelvin` 胞体多孔泡沫材料微结构模型。

2 Kelvin 单胞的参数化设计

从图 2 可以看出, `Kelvin` 结构能够较好的描

述开孔泡沫材料中胞体微结构。而对于此类框体的设计 `Abaqus` 并不具备优势,一般只能通过输入节点坐标信息进行绘制。事实上,这种结构具有明显的规律性特征,总体来讲,规则的 `Kelvin` 单胞结构只需要设置两个基本参数(特征边长 l 和特征角度 θ)就能够生成,如图 3(a)所示。当 $\theta = 45^\circ$ 时,胞体即为等边的“正”`Kelvin` 结构;但 $\theta > 45^\circ$ 时,即为类似图 3(b)中的胞体结构,此类结构在开孔高分子泡沫材料中常见。通过这两个特征参数,我们可以通过图 3(c)中的分析得到各节点的坐标,然后通过下列 `Python` 代码实现单胞模型的自行绘制。这样,只需要调节两个全局变量(即两个特征参数)即可实时调节单胞的形状和尺寸,从而实现参数化设计。

```

qmjcellpart = qmjmodel.Part(name='Kelvincell',
    dimensionality=THREE_D,
    type=DEFORMABLE_BODY)
qmjcellpart.WirePolyLine(points=((x1, y1, z1),
    (x2, y2, z2)),.....),mergeWire=ON,
    meshable=ON)
qmjcellpart = qmjmodel.parts['Kelvincell']
qmjviewport.setValues(displayedObject=qmjcell
    part)

```

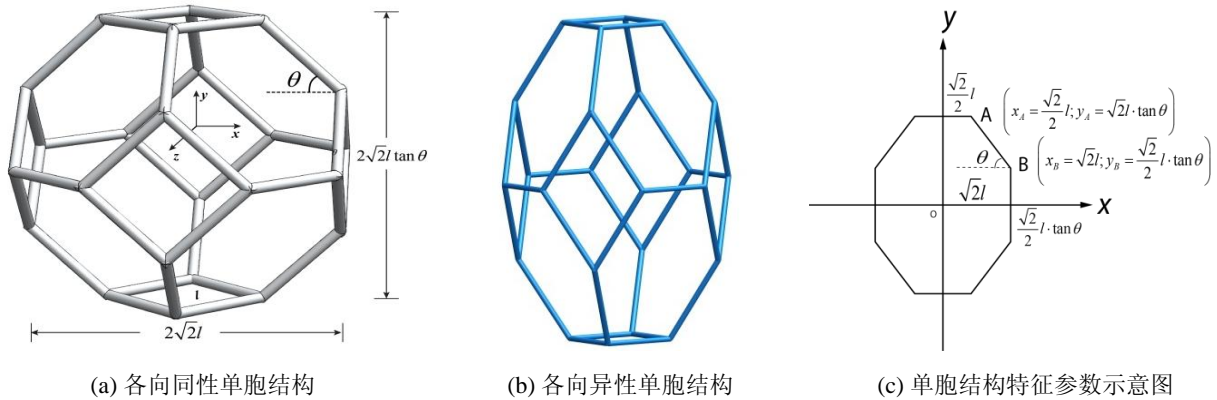



图 3 Kelvin 单元结构与特征参数

3 规则 Kelvin 开孔泡沫结构模型的参数化设计与优化算法设计

对于规则 Kelvin 胞体开孔泡沫微结构而言, 完全利用 Abaqus 的 Part 模块中的绘图功能来实现是非常不方便且浪费的, 因为就整个结构而言, 只有 3 个“变量”: 单元、xyz 3 个方向的层数和 3 个方向的阵列距离, 因此, 为简化建模过程和所

占用资源, 在 Part 模块中完成单元的参数化设计后, 一般进入 Assembly 模块进行阵列操作。阵列控制参数为 xyz 3 个方向的阵列层数及相应的阵列间距, 而后者可以通过图 3(c)计算得出, 因此, 在此阶段只需要设定 xyz 3 个方向的阵列层数 3 个全局变量即可, 阵列结果如图 4(a)所示, 图中 3 个方向的层数设定为 2。

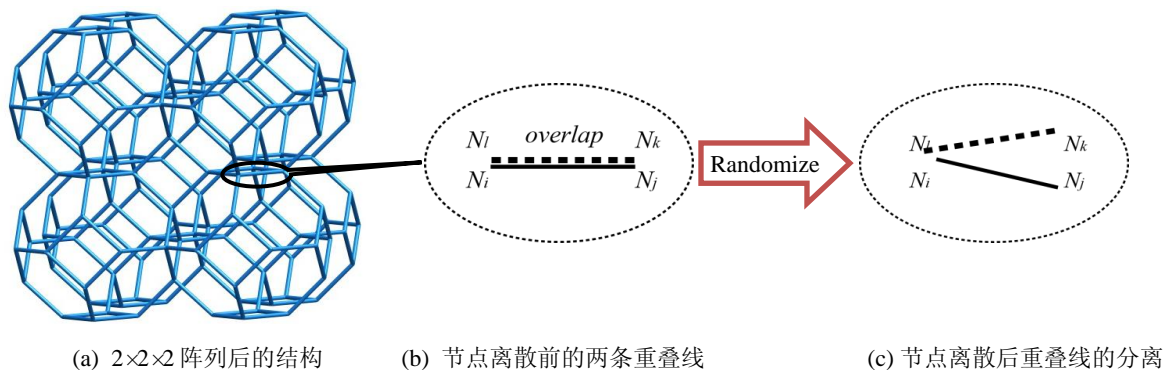


图 4 阵列过程中边的重叠

从外观上讲, 通过以上方式通过设定层数似乎已经得到规则 Kelvin 胞体开孔泡沫结构模型, 实际上图 4(a)所示的模型还存在一个最基本的问题: 每个胞体之间没有物理上的联系和相互限制。这相当于简单的类似“积木”一样将若干胞体按照层数要求堆积起来而已, 在后期的随机化操作和压缩过程中显示其不足之处。如图 4(b)所示, 在结构中的所显示的一条直线其实是两个直线的重合, 这种重合虽然在规则结构中不能显示出来, 但经过后期的随机化之后, 两条直线就会

分离, 如图 4(c)所示, 这样随机化得到的图形就是许多不规则胞体不联系空间布置的图形, 并不是一种联系的 Kelvin 胞体泡沫结构。因此, 需要对其进行合并, 事实上, 在 Abaqus 中的 Assembly 模块中存在 Merge 命令, 然而, 由于多种原因, 此种合并后的结果并不一定令人满意, 如图 4(a)所示的 2×2 结构中, 原总边数为 288, 执行 Merge 命令之后系统统计的边数为 272, 实际边数应为 240, 可见执行 Merge 命令之后还是存在重叠现象。因此, 为防止这种情况的出现, 需要提

取所有节点与节点对信息，删除重复边。

同上思路实现重复节点的删除后，节点与节点、边与边之间的关系得到了建立，然而，如图 4(a)结构系统仍然视为 8 个 instance，而不是一个整体的 part，这对后期随机化操作和边界条件的设置等带来了许多不便之处，因此，我们可以将删除重复节点后的节点与节点对提取出来，再返回到 Part 模块中同上节方法重新自行生成规则 Kelvin 胞体开孔泡沫微结构 Part，并同时删除上述生成的临时 assembly。

本节中所使用的 Abaqus 中主要方法、属性以及 Python 中的主要函数如表 1 所示。

4 Kelvin 开孔泡沫胞体随机化模型的算法设计

利用上节的方法生成规则 Kelvin 胞体的开孔泡沫微结构 part 之后，重新提取所有的节点与节点对信息，利用 Python 实现节点坐标的随机化，从而生成随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构，如图 5(a)所示。

为方便后期的边界条件的设置，本研究中只将内部节点进行坐标随机化，事实上，这很大程度上方便了后期的边界条件的设置(复杂边界条件

的参数化设计问题本文中不做详述)，同时因为相对于整个结构而已，边界点所占比例很小，层数越多越是如此，所以对结构压缩性能的研究影响可以忽略。因此，在随机化之前先将节点信息进行分类，只对内部节点进行坐标随机化，而边界节点坐标保持不变。这个随机化过程中，控制参数(也设定为全局变量)只有一个即随机半径，如图 5(b)所示，为了能够最大程度上实现参数化设计，研究中采用随机半径系数来代替，所谓随机半径系数是指随机半径与图 3(a)中 Kelvin 胞体边长的比值，取值范围为[0, 1)，取值为 0 时即为规则 Kelvin 胞体的泡沫结构。最后利用随机化后的节点与节点对信息在 Part 模块中重新生成新的泡沫结构 part，同时删除前一个阶段生成的临时规则胞体泡沫结构 part。

5 开孔泡沫铝准静态压缩行为的数值仿真

为验证上述所建立随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构模型可行性，利用上述模型对泡沫铝在自由边界条件准静态压缩加载作用下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 1 所用的 Abaqus 与 Python 方法、属性与函数

Abaqus 方法	<i>assembly.Instance(...)</i>	Abaqus 属性	<i>assembly.instances[...].edges[...].getVertices</i>
Abaqus 方法	<i>assembly.LinearInstancePattern(...)</i>	Abaqus 属性	<i>assembly.instances[...].edges</i>
Abaqus 方法	<i>assembly.rotate(...)</i>	Abaqus 方法	<i>model.Part(...)</i>
Abaqus 属性	<i>assembly.instances[...].vertices</i>	Abaqus 方法	<i>Part.WirePolyLine(...)</i>
Abaqus 属性	<i>assembly.instances[...].vertices[...].pointOn</i>	Python 函数	<i>list.append(...), list.remove(...)</i>
Python 函数	<i>len(...), range(...), tuple(...), max(...), min(...)</i>	Python 函数	<i>sin(...), cos(...), radians(...), random(...)</i>

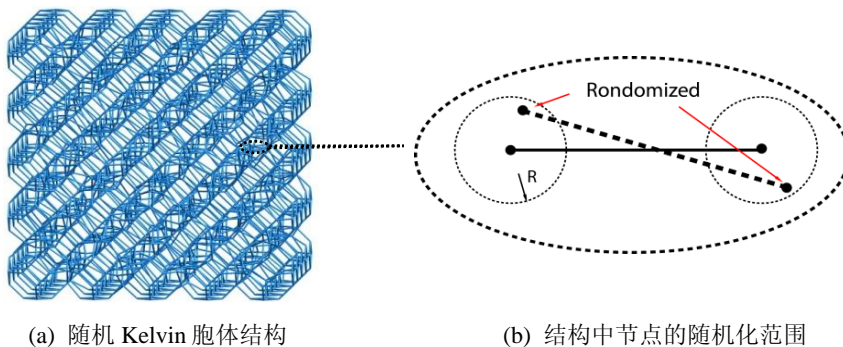


图 5 随机开孔泡沫结构

表 2 随机胞体开孔泡沫铝特征参数

	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	10mm	45°	5	5	5	1/3

泡沫铝的本构模型选用 Johnson-cook 模型^[18], 如式(1), (2)所示。

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

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

$$\epsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{p}{\bar{\sigma}}) (\bar{\epsilon}^p)^n \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (2)$$

上两式中右端三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:

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] \quad (3)$$

图 6 和图 7 显示开孔泡沫铝结构在准静态压缩过程中的变形情况, 从图中可以看出: 第 1 阶段, 材料呈现出一种“准弹性”变化过程, 无明显局部大变形情况发生(图 6(b)); 第 2 阶段是材料的主要吸能阶段, 这 1 阶段材料明显出现局部屈曲变形(图 6(c)), 这 1 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 6(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 6(e))。

从图 7 中的应力应变曲线可以看出, 材料在准静态压缩过程中呈理论上的“三段式”行为(图 7 中虚线), 材料在压缩过程中呈现明显的平台阶段。在这点上规则 Kelvin 胞体的开孔泡沫结构与随机 Kelvin 胞体的结构是一致的, 两者整体的力学特征相似, 且“弹性”屈服强度基本相等, 约 42.5KPa。不同的地方在于: (1) 在“弹性”屈曲阶段, 前者明显震荡较强, 而后者显得相对光滑; (2) 后者明显比前者提前进入压实状态。

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

$$\epsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{p}{\bar{\sigma}}) (\bar{\epsilon}^p)^n \right] \quad (4)$$

材料参数见表 3 所示^[18-19], 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
密度 ρ_0	g/cm ³	2.703
杨氏模量 E	GPa	68.9
泊松比 ν		0.33
A	MPa	324.1
B	MPa	113.8
n		0.42
D_1		-0.77
D_2		1.45
D_3		0.47
D_4		0.0
D_5		0.0

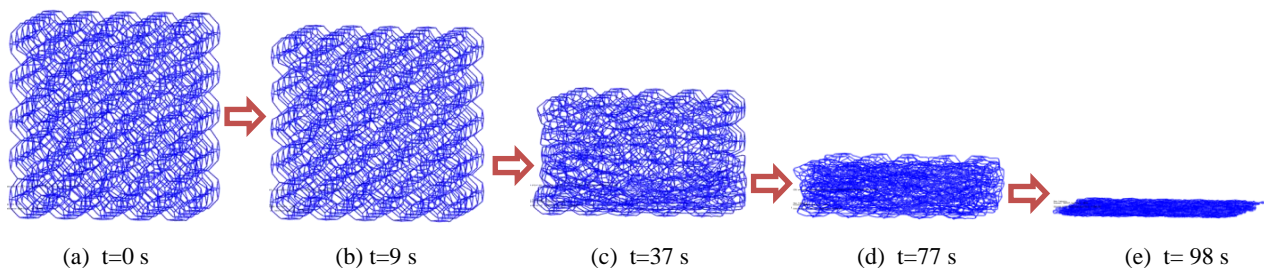


图 6 压缩过程中泡沫结构的变形

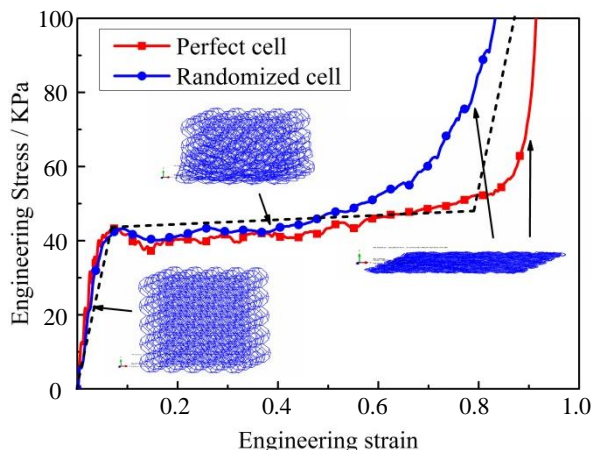


图 7 压缩过程中泡沫结构的变形及其力学行为

图 6 和图 7 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观察^[15]基本一致，这说明本模型是合理可信的。

6 结论

建立开孔泡沫材料的微观胞体结构模型特别是能够在一定程度上对结构中节点的随机分布特征进行表征的微观模型是一项极其复杂但又极具价值的一项工作。利用 Python 脚本语言，对 Abaqus 非线性力学分析软件进行二次开发，实现了规则 Kelvin 单胞结构、规则 Kelvin 开孔泡沫微观结构和随机 Kelvin 开孔泡沫微观结构的参数化设计和自动化建模，主要结论有以下几点：

(1) 利用 Python 脚本语言对 Abaqus 非线性分析软件进行二次开发，特别是对复杂结构进行参数化建模具有极其明显的优势。针对随机 Kelvin 胞体的开孔泡沫材料微结构，利用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行二次开发，实现了通过只需设定几个特征参数就能够实现此种复杂结构模型的建立，并给出建模的具体思路、所用的主要函数、方法与属性。

(2) Kelvin 胞体可以通过特征边长和特征角度两个参数即可定义，通过修改此两个参数可以实现不同形式的、不同尺寸的 Kelvin 胞体的生成；除阵列间距可以通过前面的单胞体特征参数计算得出外，随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构的特征参

数有 xyz 三个方向的层数随机半径系数，通过设置和调节这些参数即可实现不同结构模型的建立。

(3) 以泡沫铝为例，建立了规则 Kelvin 胞体开孔泡沫结构和随机 Kelvin 胞体开孔泡沫结构，并对此两种微观开孔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。数值计算结果所显示材料在准静态加载过程中的力学响应特征与实验中所观察到的相关特征相符。

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, Gibson L J, Hutchinson J W, Wadley H N G. *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] 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.
- [19] 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, Austria: LSTC, 2009.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源，首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》（CAJ-IJCR 年报），第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序，发布了“中国最具国际影响力学术期刊”（排序 TOP5%）和“中国国际影响力优秀学术期刊”（排序 TOP5-10%），在国内外学术界产生了较大反响。之后，2013 年版年报，将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前，2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成，《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续三年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊，走向世界，进入国际一流，指日可待！