

文章编号: 1000-8055(2009)09-2007-05

开孔 Voronoi 泡沫支柱形状变化对力学性能的影响

卢子兴, 王建月

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对开孔泡沫材料提出了新的支柱形状控制方程, 并在 Voronoi 随机泡沫模型基础上, 研究了支柱形状变化对其各向同性弹性性能、非线性压缩和拉伸力学行为的影响; 讨论了支柱细腰程度和模型随机度共同作用的影响效果, 并比较了两种因素作用效果的大小. 结果表明, 支柱细腰程度的增大明显降低了泡沫材料的弹性模量和无量纲应力. 同时, 支柱细腰程度对泡沫力学性能的影响要大于模型随机度的影响, 并随模型随机度的增加而增大.

关 键 词: 泡沫材料; 力学性能; Voronoi 模型; 支柱形状

中图分类号: V214

文献标识码: A

Influence of cell strut shape on the mechanical properties of Voronoi open-cell foams

LU Zixing, WANG Jianyue

(School of Aeronautic Science and Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The new equation was proposed to control the cell strut shape of three dimensional foams. Based on the Voronoi random foam models, the influences of cell strut shape on isotropic elastic properties, nonlinear compressive behavior and tensile behavior were investigated. In addition, effects of the interaction between the cell strut shape and the model irregularity were discussed on a comparative basis. The results show that the elastic modulus and the dimensionless stresses under compression and tension decrease evidently as struts turn into a concave shape. Effects of cell strut shape are larger than those of model irregularity, and become more significant as the models are more irregular.

Key words: foams; mechanical properties; Voronoi model; cell strut shape

已有开孔泡沫材料模型无论是规则的, 如弹性杆支柱网络模型^[1]、立方体交错模型^[2]、十四面体模型^[3], 还是不规则的, 如 Voronoi 随机模型^[4-5], 一般均假设材料支柱为细长直梁, 且各支柱截面面积相同、支柱截面沿长度方向不变. 然而, 在实际泡沫微结构中支柱形状沿长度方向是变化的, 呈两头粗中间细的变截面结构形态(本文

简称为细腰结构形态)^[6-8]. Harders 等^[6]讨论了支柱截面变化对二维蜂窝材料弹性性能的影响, 发现支柱截面变化对杨氏模量影响较大; Gong 和 Kyriakides^[7-8]等在采用十四面体模型研究开孔泡沫材料性能时考虑了支柱截面变化, 但没有对该因素的影响进行单独分析, 所给出的截面形状控制方程也不具有一般性. 本文针对开孔泡沫

收稿日期: 2008-09-23; 修订日期: 2008-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(10572013); 北京市教育委员会共建项目建设计划(XK100060522)

作者简介: 卢子兴(1960-), 男, 河北枣强人, 教授、博导, 主要从事复合材料结构分析和泡沫材料力学行为的研究.

材料提出了新的支柱截面形状控制方程, 在建立 Voronoi 随机泡沫模型的基础上, 研究了支柱呈细腰结构形态时对开孔泡沫材料各向同性弹性性能、非线性压缩和拉伸力学行为的影响, 讨论了支柱细腰程度与模型随机度两种因素共同作用时对泡沫材料力学性能的影响, 并比较了两种因素影响效果的大小。

1 模型的建立

Voronoi 随机泡沫模型的建立方法在文献 [9] 中已有详细的论述, 这里不再赘述。对模型随机度为 α 的 Voronoi 模型, 假设支柱为细长直梁, 则其截面尺寸(厚度)可由相对密度、胞体尺寸以及支柱长度给出, 即

$$t_0 = \sqrt{\frac{CL_1L_2L_3R}{N} \sum_{i=1}^N 2l_i} \quad (1)$$

其中 $R = \rho/\rho_s$ 是相对密度; L_1, L_2 和 L_3 分别是胞体在 3 个方向上的长度, l_i 是第 i 根支柱一半的长度; N 是模型中支柱的总数目, C 为常数, 与截面形状有关, 当截面形状分别为圆形、正方形、等边三角形和曲边三角形时, C 的取值分别为 $4/\pi, 1, 4/\sqrt{3}$ 和 $1/(\sqrt{3} - \pi/2)$ 。

真实泡沫的支柱一般呈中间细、两端粗的细腰形状, 基体在结点处堆积。为模拟支柱的这种真实结构形态, 采用如图 1 所示的细腰支柱模型, 并利用厚度方程来控制支柱的细腰程度。

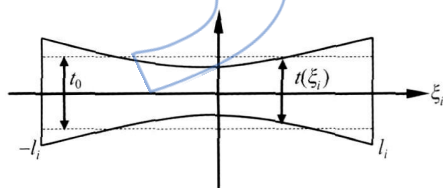


图 1 细腰支柱形状

Fig. 1 Concave cell strut shape

假设支柱厚度控制方程为

$$t(\xi_i) = t_0 [k(\xi_i/l_i)^2 + b] \quad (2)$$

其中 ξ_i 表示支柱沿长度方向的位置坐标, 如图 1 所示; t_0 为支柱划分为细长、等直梁单元时由式 (1) 确定的厚度, l_i 为半支柱长度, k 和 b 为常数。

引入中心厚度 $t_{\xi=0}$ 与 t_0 的比值

$$\beta = t_{\xi=0}/t_0 \quad (3)$$

其中 β 反映了支柱细腰程度的大小。当 β 取 1 时支柱截面沿长度方向不变, β 小于 1 时支柱为细

腰形状, 而大于 1 时支柱为鼓形形状。

从而由式 (2) 满足单根支柱体积独立于 β 而保持定值的条件, 可得

$$t(\xi_i) = t_0 \left[\left[\sqrt{5 - \frac{20}{9}\beta^2} - \frac{5}{3}\beta \right] \left(\frac{\xi_i}{l_i} \right)^2 + \beta \right] \quad (4)$$

该方程能保证单根支柱体积 $V = 2lt_0^2$, 从而支柱细腰程度变化时, 相对密度保持不变。若给定开孔泡沫材料的相对密度和模型随机度, 则通过改变 β 的取值, 即可研究支柱形状的变化对泡沫材料力学性能的影响。

在建立 Voronoi 泡沫有限元模型的过程中, 采用能考虑剪切变形的梁单元来模拟支柱, 并在划分梁单元时通过 β 来调节支柱细腰的程度。图 2 给出了相对密度为 0.01, 支柱截面形状为圆形, 模型随机度 α 为 0.5, β 取 0.3 和 0.7 时的模型微结构图。可以看出, 当 β 较小时, 支柱明显地呈细腰形状, 而较大时, 支柱的形状变化并不明显。

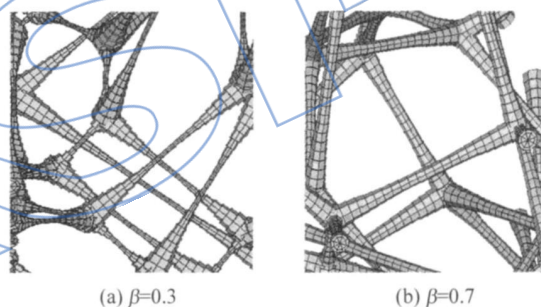


图 2 模型的微结构图

Fig. 2 Microstructure of models

文中采用与文献 [9] 类似的耦合边界条件, 并施加位移载荷进行模拟。模拟非线性压缩和拉伸行为时, 同样主要考虑泡沫材料支柱的几何非线性效应。类似于文献 [9], 为使模型具有更广泛的适应性, 计算结果仍用无量纲应力 $\bar{\sigma}$ 表示, 则它可以看作是模型随机度 α 、支柱细腰程度 β 、支柱截面形状系数 γ 、相对密度 R 和泡沫材料应变 ϵ 的函数, 即

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{E_s(\rho/\rho_s)^{2/3}} = F(\alpha, \beta, \gamma, \rho/\rho_s, \epsilon) \quad (4)$$

其中 σ 为泡沫材料的应力, E_s 为基体弹性模量。

2 计算结果与讨论

为了研究支柱细腰程度对泡沫材料力学性能的影响, 以及与模型随机度的共同作用效应, 模拟分析了模型在 α 与 β 在四种不同取值组合下的情

况, 即: ① $\alpha=0.3, \beta=0.3$ 对应两种因素均较小情况; ② $\alpha=0.3, \beta=0.7$ 对应细腰程度较小情况; ③ $\alpha=0.7, \beta=0.3$ 对应模型随机度较大情况; ④ $\alpha=0.7, \beta=0.7$ 对应两种因素均较大的情况。

在模拟分析中, 基体材料的杨氏模量 $E_s=1\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_s=0.45$, 支柱截面形状均为圆形, 并且在模拟非线性压缩和拉伸行为时, 取相对密度为 0.01。模型采用 3 倍胞体进行计算, 由于讨论随机因素的影响, 故取 10 个模型结果的平均值。

2.1 对各向同性弹性性能的影响

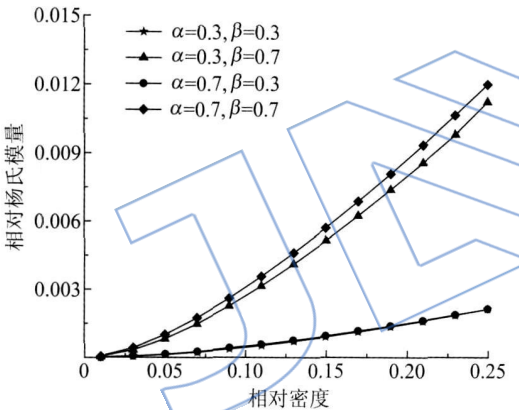
图 3 给出了 α 与 β 取不同值时, 相对弹性模量和泊松比随相对密度变化的曲线。对相对弹性模量的影响如图 3(a) 所示。将 α 与 β 在四种组合情况下的结果进行对比, 可见, 在相对密度与 α 一定时, β 的减小对相对弹性模量起减小作用, 说明支柱明显地呈细腰形状时模型的相对模量要小于支柱形状变化不明显时的情况, 并且 β 的影响作

用随相对密度的增加而增大; 而 α 与 β 都单独变化相同幅度时, β 的影响要明显大于 α 的影响。此外, $\alpha=0.7$ 时 β 对相对模量的影响作用要大于 $\alpha=0.3$ 的情况, 说明 β 的影响效果受 α 的影响, 并随 α 的增加而增大; 由于 α 和 β 的增加都对相对弹性模量起增强作用, 因而 α 与 β 两种因素对相对模量的共同作用效应增强了。

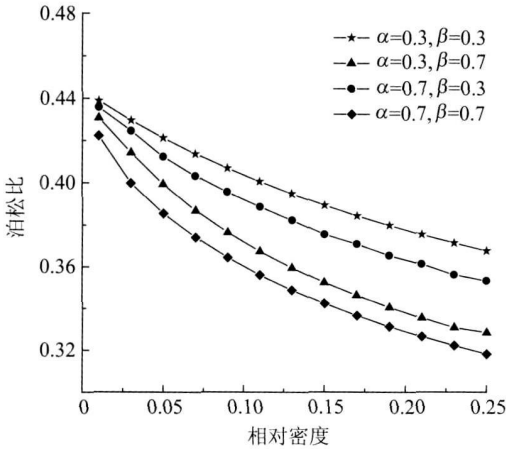
对泊松比的影响如图 3(b) 所示。结果表明, 相对密度一定时, β 的增大对泊松比起减小作用, 并且其影响作用要明显大于 α 的影响; 由于 α 也对泊松比起减小作用, 因而 α 与 β 的共同影响效果要大于 α 与 β 单独作用时的情况。

2.2 对非线性压缩行为的影响

类似于对弹性性能的讨论, 图 4(a) 给出了 α 与 β 取不同值时对无量纲压缩应力-应变曲线的影响。从图中可以看出, α 与应变一定时, 无量纲应力随 β 的增加而明显增大, 且 β 的影响随应变的增大而更加明显; 而 α 与 β 都发生变化时, β 的

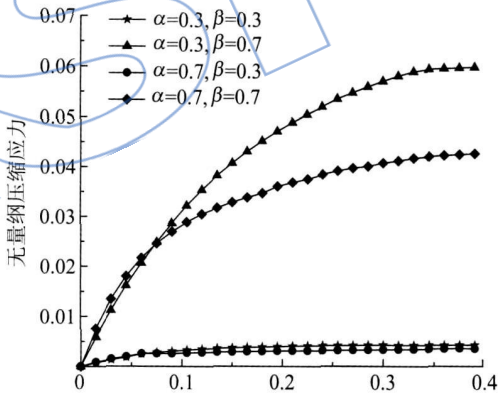


(a) 相对杨氏模量-相对密度曲线

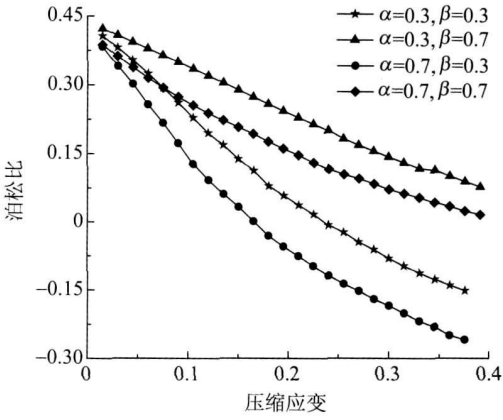


(b) 泊松比-相对密度曲线

图 3 α 和 β 共同作用对各向同性弹性性能的影响
Fig. 3 Effects of α and β on isotropic elastic properties of models



(a) 无量纲压缩应力-压缩应变曲线



(b) 泊松比-压缩应变曲线

图 4 α 和 β 共同作用对模型压缩力学行为的影响
Fig. 4 Effects of α and β on compressive behavior of models

影响仍要高于 α 的影响, 与弹性性能时类似. 在应变小于 6% 时, α 和 β 的增加对应力起增强作用, 从而两种因素共同作用的效果要大于 α 或 β 单独作用时的情况; 但当应变大于 6% 时, α 的增大对应力起减小作用而 β 起增强作用, 由于 β 的影响作用更强, 从而两种因素共同作用的效果要大于 α 单独作用而小于 β 单独作用时的情况, 说明两种因素的共同作用效应被削弱了.

对泊松比的影响如图 4(b) 所示. 可见, 随应变的增大, 其影响趋势与对应力-应变曲线的影响类似. 十分有趣的是, β 取 0.3 而 α 变化时, 若应变大于某一数值则泊松比为负值, 即产生了负泊松比现象, 这与 Lakes^[10] 通过三向压缩工艺获得负泊松比泡沫材料的方法是不同的.

2.3 对非线性拉伸行为的影响

对拉伸行为进行类似的讨论. 图 5(a) 给出了

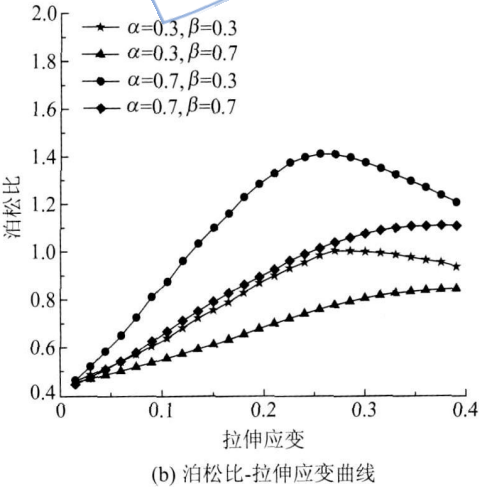
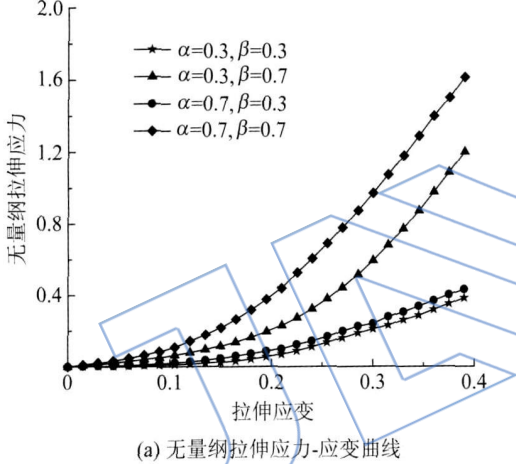


图 5 α 和 β 共同作用对模型拉伸力学行为的影响

Fig. 5 Effects of α and β on tensile behavior of models

α 与 β 取不同值时模型的无量纲拉伸应力-应变曲线. 从图中可以看出, 在相同应变和 α 取值的情况下, 应力水平随着 β 的增加而增大, 与压缩时相似, 且 β 的影响随应变的增大而更加明显; 由 α 和 β 都单独变化相同幅度时的结果发现, β 对无量纲拉伸应力的影响明显大于 α 的作用, 而 β 在 $\alpha=0.3$ 时的影响作用要小于 $\alpha=0.7$ 时的情况, 说明支柱细腰程度对泡沫拉伸行为的影响受模型随机度 α 的影响, 随 α 的增加而更加明显; 由于 α 和 β 的增大都对无量纲拉伸应力起增大作用, 因而 α 与 β 都较大时的应力要大于 α 或 β 单独作用时的情况, 表明两种因素的共同作用增强了.

对泊松比的影响如图 5(b) 所示. 结果表明, 在应变一定时泊松比随 β 的增加而减小, 与压缩情况时相反; β 的影响作用要大于 α 的影响, 并且其影响作用受 α 的影响, 随 α 的增加而增大. 由于 α 对泊松比起增大作用而 β 起减小作用, 因而 α 与 β 共同作用时的泊松比要大于 β 单独作用而小于 α 单独作用时的情况, 说明两种因素的共同作用效应削弱了.

3 结 论

本文提出了新的支柱形状控制方程, 并基于 Voronoi 随机泡沫模型, 研究了支柱形状变化对开孔泡沫材料各向同性弹性性能、非线性压缩和拉伸力学行为的影响, 讨论了支柱细腰程度与模型随机度两种因素的共同作用对泡沫材料力学性能的影响, 并比较了两种因素影响效果的大小. 结果表明, 支柱细腰程度的增大降低了泡沫材料的相对弹性模量而增大了泊松比, 并且其影响随相对密度的增加而增大; 支柱细腰程度的增大也大大降低了泡沫材料的无量纲应力, 压缩情况时对泊松比起减小作用, 而在拉伸时对泊松比起增大作用, 且其影响随应变的增加而增大. 支柱形状变化对泡沫材料力学性能的影响受模型随机度的影响.

参考文献:

[1] 卢子兴, 石上路. 低密度开孔泡沫材料力学模型的理论研究进展[J]. 力学与实践, 2005, 27(5): 13-20
LU Zixing, SHI Shanglu. Theoretical studies on mechanical models of low density foam[J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(5): 13-20 (in Chinese)
[2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997

- [3] 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)
- [4] 袁应龙, 卢子兴. 利用随机模型计算低密度开孔泡沫材料的弹性模量[J]. 航空学报, 2004, 25(2): 130-132
YUAN Yinglong, LU Zixing. Calculation of the elastic modulus of low density open cell foams with random model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 130-132 (in Chinese)
- [5] ZHANG Jialei, LU Zixing. Numerical modeling of the compression process of elastic open cell foams[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(3): 215-222
- [6] Harders H, Hupfer K C, Joachim R S. Influence of cell wall shape and density on the mechanical behaviour of 2D foam structures [J]. Acta Materialia, 2005, 53: 1335-1345
- [7] 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: 1355-1379
- [8] Gong L, Kyriakides S. Compressive response of open cell foams: Part II —Initiation and evolution of crushing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 1381-1399
- [9] 张家雷. 泡沫材料微结构模型和力学性能的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
ZHANG Jialei. Investigation into the microstructure model and the mechanical properties of foams [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007 (in Chinese)
- [10] Choi J B, Lakes R S. Analysis of elastic modulus of conventional foams and reentrant foam materials with a negative Poisson's ratio[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1995, 37(1): 51-59