

文章编号: 1000-8055(2010)03-0592-05

壁面厚度随机度对闭孔 Voronoi 泡沫材料弹性性能的影响

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: 基于闭孔 Voronoi 随机模型, 通过引入壁面厚度随机度, 研究了壁面厚度不均匀性对各向同性和各向异性闭孔泡沫弹性性能的影响, 并讨论了壁面厚度随机度与模型随机度共同作用下的影响效果. 结果表明, 壁面厚度随机度对各向同性和各向异性弹性模量均起减小的作用, 且其在各向同性时的影响效果要低于模型随机度的影响, 而在各向异性情况下则要高于模型随机度的影响. 但是, 壁面厚度随机度对闭孔泡沫的泊松比影响却很小.

关 键 词: 闭孔泡沫; 弹性性能; Voronoi 模型; 壁面厚度随机度; 各向异性
中图分类号: TB301; TB115 **文献标识码:** A

Effect of random cell wall thickness on the elastic properties of Voronoi foam with closed cells

LU Zixing, WANG Jianyue
(School of Aeronautical Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the Voronoi random model for closed cell foam, the effect of non-uniformity of cell wall thickness on isotropic and anisotropic elastic properties of closed cell foams was investigated. The combined effect of random cell wall thickness and model irregularity was also discussed. Results indicate that the random cell wall thickness has a reducing effect on the isotropic and anisotropic elastic moduli, and such effect of random cell wall thickness is less than that of model irregularity for isotropic foams, contrary to anisotropic foams; however, the effect of random cell wall thickness on the Poisson's ratio for closed cell foam is very small.

Key words: closed cell foam; elastic properties; Voronoi model;
effect of random cell wall thickness; anisotropy

目前尽管国内外对闭孔泡沫材料力学性能的理论研究和数值模拟已有不少工作发表^[1-2], 但這些工作中无论是立方体交错模型^[1]、十四面体模型^[3-4]等规则模型, 还是闭孔 Voronoi 随机模型^[5], 一般均假设闭孔泡沫材料的壁面为等厚度的. 然而, 在实际闭孔泡沫微结构中却存在着壁面厚度不均匀性问题^[6]. 文献[6]采用闭孔 Kelvin 十四面体泡沫模型, 研究了胞体壁面厚度的不均匀性分布对闭孔泡沫力学性能的影响, 发现其对剪切模量和体积模量均起减小作用, 但仅讨论了

收稿日期: 2009-03-19; 修订日期: 2009-10-29
基金项目: 国家自然科学基金(10572013)
作者简介: 卢子兴(1960-), 男, 河北枣强人, 教授、博导, 博士, 主要从事泡沫力学、航空航天新型材料力学建模、飞行器复合材料结构强度分析与设计等研究.

对各向同性. 弹性性能的影响. 而 Li^[7] 等采用二维 Voronoi 随机模型研究了胞体壁厚的不均匀分布对 2-D 蜂窝弹性性能和动态冲击性能的影响, 因此, 本文在建立三维非周期性闭孔 Voronoi 随机泡沫模型基础上, 通过引入壁面厚度的随机度, 研究了壁面厚度不均匀性对各向同性和各向异性闭孔泡沫材料弹性性能的影响, 并讨论了壁面厚度随机度与模型随机度共同作用下的影响效果, 从中得到一些有价值的结论.

1 模型的建立

Voronoi 随机模型的建立方法在文献[7-12] 中已有详细的论述, 这里不再赘述. 对模型随机度为 α 的 Voronoi 模型来说, 若其胞体壁面厚度为均匀分布, 则其取值 t_0 可由相对密度、胞体尺寸以及支柱长度给出, 即

$$t_0 = RL_1L_2L_3 / \sum_{i=1}^N A_i \tag{1}$$

其中 $R = \rho/\rho_s$ 是相对密度, L_1, L_2, L_3 分别是胞体在三个方向上的尺度, A_i 是第 i 个壁面的厚度, N 是模型中壁面的总数目. 本文采用与文献[6] 类似的方法, 在建立模型中引入壁面厚度随机度, 由此得到任一壁面 i 的随机壁面厚度为

$$t_i = c(1 + \eta\phi_i)t_0 \tag{2}$$

其中 $\eta \in [0, 1]$ 定义为壁面厚度随机度(代表厚度的不均匀性), $\phi_i (\in [-1, 1])$ 为随机变量, c 为使相对密度保持定值的无量纲因子, 且由下式确定:

$$c = \sum_{i=1}^N A_i / \left[\sum_{i=1}^N (1 + \eta\phi_i) A_i \right] \tag{3}$$

图 1 给出了相对密度为 0. 01, 模型随机度 α 为 0. 5, 壁面厚度随机度 η 取 0. 5 时的各向同性和各向异性泡沫模型的细观结构图. 若给定闭孔泡沫材料的相对密度和模型的随机度, 则通过改变 η 的取值, 就可研究胞体壁面厚度随机度对闭孔泡沫材料力学性能的影响.

把上述几何模型导入有限元软件, 采用能考虑剪切变形的壳单元来模拟闭孔泡沫材料的胞体壁面. 由于模型在空间上是非周期性的, 所以需采用合适的边界条件, 以便使模拟的边界约束和真实泡沫材料的情况相似, 并尽量减小边界对模型宏观力学性能的影响. 文中采用了与文献[8] 类似的耦合边界条件, 并施加位移载荷进行模拟. 当模

拟闭孔泡沫材料各向异性的弹性性能时, 类似于文献[9], 使模型在某一方向变形来模拟泡沫的各向异性, 并将模型变形方向和垂直于变形方向的尺寸比定义为各向异性尺寸比, 用来描述模型各向异性程度, 以 λ 表示, 并引入胞体壁面厚度随机度来研究其对泡沫材料各向异性弹性性能的影响.

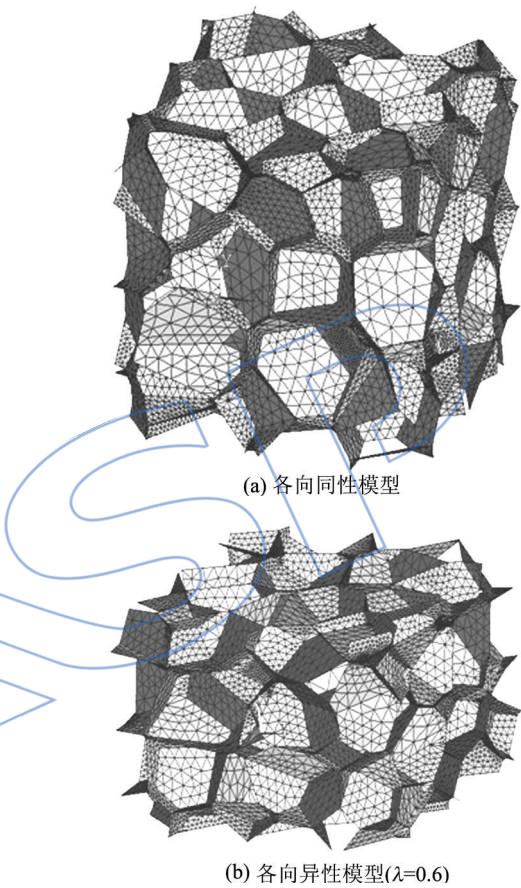


图 1 闭孔泡沫随机模型 ($\alpha = 0. 5, \eta = 0. 5$)
Fig. 1 Random model of closed cell foams
($\alpha = 0. 5, \eta = 0. 5$)

2 计算结果与讨论

在模拟中, 基体材料杨氏模量 $E_s = 1 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0. 45$, 泡沫的杨氏模量和泊松比分别用 E, ν 表示, 相对杨氏模量定义为泡沫的杨氏模量与基体材料的杨氏模量的比值, 即 E/E_s . 考虑到计算量并保证一定的精度^[8], 计算模型取 5 倍胞体尺寸规模, 同时, 为使计算结果具有统计意义, 一般取 10 个模型计算结果的平均值.

2. 1 对各向同性弹性性能的影响

为研究壁面厚度随机度对闭孔泡沫材料各向同性弹性力学性能的影响, 图 2(a) 给出了模型随

机度 α 为 0.5, 而壁面厚度随机度 η 取不同值时的相对杨氏模量与相对密度的关系曲线. 可以看出, 在相对密度 ρ/ρ_s 一定时, 相对杨氏模量随 η 的增加而减小, 并且当 R 取 0.01, η 从 0.1 增大到 0.9 时相对杨氏模量减小了 0.29%, 而在 R 为 0.25 时, η 变化同样的幅度时相对杨氏模量减小了 14.1%, 这表明壁面厚度随机度的影响随相对密度的增加而增大, 在相对密度较小时可以忽略, 而在相对密度较大时则需要考虑. 图 2(b) 给出了不同 η 下的泊松比与相对密度的关系曲线. 可以看出, 在 ρ/ρ_s 一定时, η 的增大对泊松比也起减小的作用, 并且, 其影响随相对密度的增加而增大, 而在相对密度为 0.25, 且当 η 从 0.1 变化到 0.9 时, 泊松比减小了 3.4%, 这说明泊松比受壁面厚度随机度的影响不如相对杨氏模量明显.

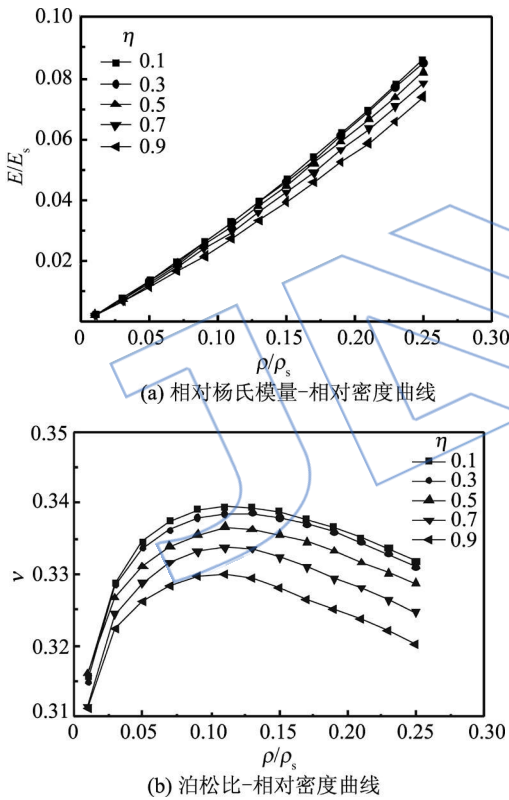


图 2 壁面厚度随机度对模型各向同性弹性性能的影响

Fig. 2 Isotropic elastic properties relative density curves of models with different η

为讨论 α 与 η 共同作用下模型的弹性性能以及比较两种因素影响的大小, 对模型在 α 与 η 四种不同取值组合下进行了模拟分析: ① $\alpha = 0.1$, $\eta = 0.1$ 对应两种因素均较小的情况; ② $\alpha = 0.1$, $\eta = 0.7$ 对应壁面厚度随机度较大的情况;

③ $\alpha = 0.7$, $\eta = 0.1$ 对应模型随机度较大的情况; ④ $\alpha = 0.7$, $\eta = 0.7$ 对应两种因素均较大的情况. 图 3 给出了 α 和 η 取不同值时, 相对杨氏模量和泊松比随相对密度变化的曲线. 相对杨氏模量的结果如图 3(a) 所示. 将第 ① 种与第 ② 和第 ③ 种组合情况进行对比发现, 由于 α 对相对杨氏模量起增大作用, 而 η 起减小作用, 从而两种随机因素共同作用下的影响效果削弱了, 要大于 η 单独作用的情况而小于 α 单独作用时的情况. 并且, 在相对密度小于 0.17, η 从 0.1 变化到 0.7 时, 相对杨氏模量的减小幅度要大于 α 发生相同变化时的情况, 从而两种随机度均较大情况下的相对杨氏模量要小于两种随机度均较小的情况; 而在相对密度大于 0.17 时, 由于 η 的影响效果要小于 α 单独作用时的情况, 从而两种随机度均较大情况下的相对杨氏模量要大于两种随机度均较小的情况.

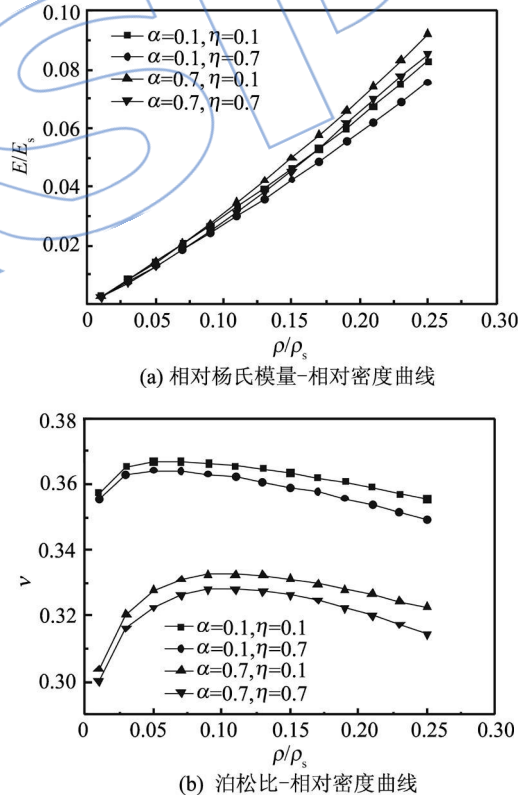


图 3 α 和 η 取不同组合对模型各向同性弹性性能的影响

Fig. 3 Isotropic elastic properties relative density curves of models with different assembly of α and η

类似于对相对杨氏模量的分析, α 和 η 取不同组合对泊松比的影响如图 3(b) 所示. 结果表明, α 和 η 的增加都对泊松比起减小作用, 因而 α

与 η 共同作用下的影响效果就增强了,其共同作用的影响效果要大于 α 与 η 其中一种因素作用下的情况,并且, η 的影响幅度要明显小于 α 对泊松比的影响。

2.2 对各向异性弹性性能的影响

类似于对各向同性弹性性能的讨论,为研究壁面厚度随机度对闭孔泡沫材料各向异性弹性性能的影响,取模型随机度 α 为 0.5,相对密度 ρ/ρ_s 为 0.01,研究模型各向异性尺寸比变化时的相对杨氏模量和泊松比受壁面厚度随机度 η 影响的模拟结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,在各向异性尺寸比一定时,两个方向上的相对杨氏模量都随 η 的增加而减小,但 η 对胞体变形方向上相对杨氏模量的影响要大于对垂直于胞体变形方向上相对杨氏模量的影响。并且,在各向异性尺寸比较小时, η 对胞体变形方向的相对杨氏模量影响较小,而对垂直于胞体变形方向的相对杨氏模量影响比较明显;随着各向异性比的增大,这种影

响趋势正好相反。这说明在各向异性尺寸比较小时,壁厚随机度对垂直于胞体变形方向的相对杨氏模量的影响是需要考虑的,而对胞体变形方向相对杨氏模量的影响则可以忽略;而在各向异性尺寸比较大时,则情况正好相反。从图 4(b)中可以看出,模型各向异性尺寸比从较小值增加到较大值时, η 的变化对两个方向上的泊松比都几乎没有影响,这表明,壁面厚度随机度并不引起泊松比的明显变化,与各向同性时的结论一致。

为了研究各向异性尺寸比一定而相对密度变化时壁厚随机度的影响,图 5 给出了各向异性尺寸比为 0.6 时,相对杨氏模量随相对密度变化的曲线。可以看出,在 ρ/ρ_s 一定时,两个方向上的相对杨氏模量都随 η 的增加而减小,并且, η 的影响随相对密度的增加而增大,这与各向同性时的结论一致。

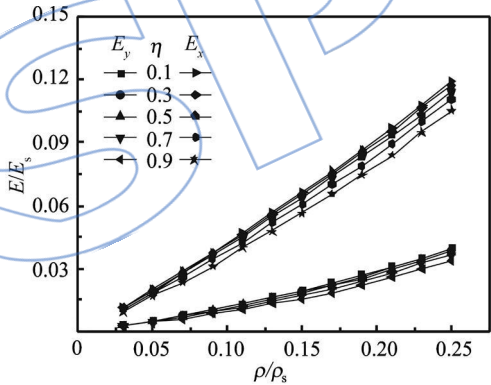
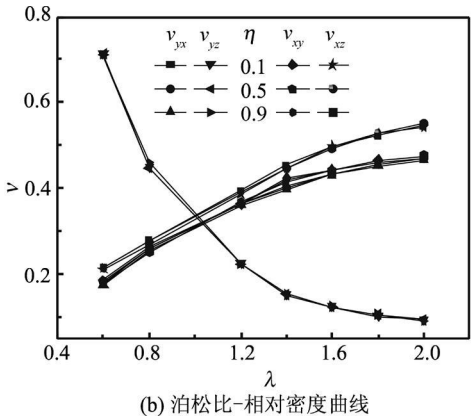
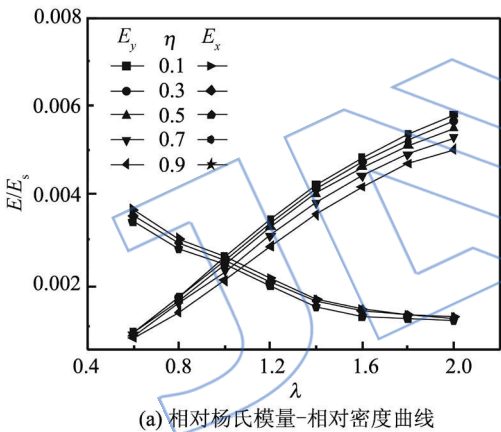


图 5 相对密度变化时 η 对模型各向异性弹性模量的影响

Fig. 5 Anisotropic stiffness relative density curves of models with different η

类似于对各向同性弹性性能的讨论,在 α 与 η 四种不同取值组合下对各向异性弹性性能也进行了研究。图 6 给出了相对密度为 0.01 时, α 与 η 为不同取值组合下各向异性杨氏模量随各向异性尺寸比变化的曲线。从图中可以看出,由于 α 和 η 的增大都对模量起减小作用,因而两种因素共同作用下的影响效果增强了,要大于 α 或 η 之一单独作用时的情况;并且, α 和 η 都变化相同的幅度时, η 的影响要大于 α 的影响,对胞体变形方向上的相对杨氏模量在各向异性尺寸比较大时更为明显,而对垂直于胞体变形方向上的相对杨氏模量在各向异性尺寸比较小时才更为明显。

图 4 各向异性尺寸比变化时 η 对模型各向异性弹性性能的影响

Fig. 4 Anisotropic elastic properties dimension scale curves of models with different η

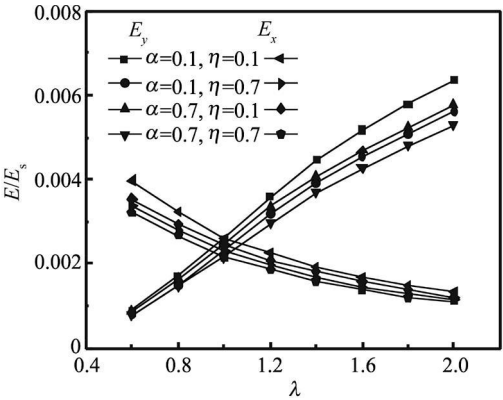


图 6 α 和 η 不同取值组合对模型各向异性弹性模量的影响

Fig. 6 Anisotropic stiffness relative density curves of models with different assembly of α and η

3 结 论

本文基于闭孔 Voronoi 随机模型,通过引入壁面厚度的随机度,研究了壁面厚度不均匀性对各向同性和各向异性闭孔泡沫弹性性能的影响.结果表明,壁面厚度随机度对各向同性和各向异性弹性模量均起减小作用,且其在各向同性时的影响效果要小于模型随机度的影响,而在各向异性情况下则要大于模型随机度的影响.但是,壁面厚度随机度对闭孔泡沫的泊松比却几乎没有影响.

参考文献:

[1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 1150.

[2] 卢子兴,王仁,黄筑平,等.泡沫塑料力学性能研究综述[J].力学进展,1996,26(3):306-323.

LU Zixing, WANG Ren, HUANG Zhuping, et al. A review of studies on the mechanical properties of foam plastics[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(3): 306-323. (in Chinese)

[3] Mills N J, Zhu H X. The high strain compression of closed cell polymer foams[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999, 47(3): 669-695.

[4] 张家雷,卢子兴.基于十四面体模型的闭孔泡沫材料弹性性能的有限元分析[J].机械强度,2007,29(2):315-319.

ZHANG Jialei, LU Zixing. Finite element analysis for the elastic properties of closed cell foams based on a tetrahedron model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(2): 315-319. (in Chinese)

[5] 王嵩,卢子兴.闭孔 Voronoi 泡沫的弹性性能分析[J].航空学报,2007,28(3):574-578.

WANG Song, LU Zixing. Investigation into elastic properties of closed cell voronoi foam[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 574-578. (in Chinese)

[6] Grenestedt J L, Bassinet F. Influence of cell wall thickness variations on elastic stiffness of closed cell cellular solids[J]. Int. J. Mech. Sci., 2000, 42(7): 1327-1338.

[7] Li K, Gao X L, Subhash G. Effects of cell shape and cell wall thickness variations on the elastic properties of two dimensional cellular solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(5): 1777-1795.

[8] 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)

[9] 卢子兴,张家雷,王嵩.各向异性随机泡沫模型的弹性性能分析[J].北京航空航天大学学报,2006,32(12):1468-1471.

LU Zixing, ZHANG Jialei, WANG Song. Investigation into elastic properties of anisotropic random foam model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12): 1468-1471. (in Chinese)

[10] ZHANG Jialei, LU Zixing. Numerical modeling of the compression process of elastic open cell foams[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20: 215-222.

[11] 卢子兴,张家雷.开孔弹性泡沫材料拉伸变形过程的数值模拟[J].机械强度,2009,31(3):432-436.

LU Zixing, ZHANG Jialei. Numerical solution of the tensile deformation process of low density open cell elastic forms[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(3): 432-436. (in Chinese)

[12] 卢子兴,王建月.开孔 Voronoi 泡沫支柱形状变化对力学性能的影响[J].航空动力学报,2009,24(9):2007-2011.

LU Zixing, WANG Jianyue. Influence of cell strut shape on the mechanical properties of Voronoi open cell foams[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2007-2011. (in Chinese)