各向异性弹性开孔泡沫压缩行为的数值模拟

卢子兴 陈 鑫 张家雷

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：基于各向异性开孔泡沫的随机模型，对低密度弹性开孔泡沫材料的压缩力学行为进行了有限元数值模拟，得到了其应力-应变曲线及弹性坍塌强度.讨论了模型的随机度、各向异性比及相对密度对力学性能的影响.结果表明，沿不同方向加载时，各向异性胞体的微观变形机制不尽相同，且变形较大时，支柱的弹性屈曲占主导地位；模型随机度的增大，使两个方向的压缩无量纲应力-应变曲线均有所降低，且$\lambda=1$时的无量纲应力-应变曲线与实验曲线吻合得较好.此外，开孔泡沫各向异性比的增大可使胞体伸长方向的弹性坍塌强度增大，而垂直方向的弹性坍塌强度则减小.

关 键 词：各向异性；泡沫；力学性能；有限元方法；大应变

中图分类号：V 214.4$^+$1；TB 30

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)05-0564-04

Numerical modeling of high strain compression of anisotropic elastic open-cell foams

Lu Zixing Chen Xin Zhang Jialei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the anisotropic irregular model, the compressive mechanical properties of low-density open-cell elastic foams were simulated by finite element analysis. The compressive stress-strain curves and elastic collapse strength were obtained in order to investigate the influence of anisotropic ratio, random degrees and relative densities on the mechanical properties. The results show that the deformation mechanism is different when loads are applied in different directions, and strut buckling becomes the main deformation mechanism at large compressive strains. A larger anisotropic ratio leads to larger elastic collapse strength along the cell rising direction and lower elastic collapse strength in the vertical direction. Meanwhile, the higher random degree causes lower stress-strain curves in both directions. When $\lambda=1$, the effective stress-strain curves well accord with the experimental curves.

Key words: anisotropy; foams; mechanical properties; finite element method; high strain

泡沫材料的力学性能与其微观几何结构密切相关，多年来学者们一直致力于建立适当的胞体结构模型来更好地模拟泡沫材料的力学行为.针对低密度开孔泡沫材料，人们已提出许多力学模型，例如，Gent 和 Thomas 的弹性支柱网络模型、Chan 和 Nakamura 的 5 边 12 面体模型、Gibson 和 Ashby 的立方体交错模型、Warren 和 Kraynik 的 4 面体支柱结构模型和 Kelvin 的 14 面体结构模型等[1].虽然上述规则模型使用起来较为方便，但因真实泡沫材料的胞体结构随机性较强，故规则模型往往存在一定的局限性.为弥补这一不足，Van der Burg 和 Shulmeister[2-3]提出了 Voronoi 随机胞体模型，并用有限元模拟了弹性开孔泡沫材料压缩和拉伸时的非线性力学行为.之后，Zhu

收稿日期：2007-05-08

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

作者简介：卢子兴(1960－)，男，河北枣强人，教授，luzixing@buaa.edu.cn.

等[4-5]也基于随机胞体模型对开孔泡沫的压缩行为进行了模拟,预测了其弹性性能和大变形的应力-应变关系. 最近,国内卢子兴等[6-7]也利用 Voronoi 随机模型模拟了低密度开孔弹性泡沫材料的大变形压缩行为,并对各向异性随机泡沫模型的弹性性能进行了较为深入的讨论. 但是,已有的工作还没有对各向异性开孔泡沫在大变形下的压缩应力-应变行为进行分析. 因此,本文将讨论各向异性低密度弹性开孔泡沫材料大变形压缩行为的数值模拟问题,以填补国内外在此方面的研究空白.

1　模型选择及边界条件

各向异性开孔泡沫随机模型的建立过程已在文献[7]中详细介绍,此处不再赘述. 为更好地说明问题,本文用随机度 α 描述胞体结构的随机程度(α 的取值介于 0 和 1 之间,$\alpha=0$ 对应规则的 14 面体泡沫结构,$\alpha=1$ 对应完全随机的泡沫结构),而用建模过程中的尺寸拉伸比 λ 来表示模型的各向异性比,反映胞体结构的各向异性,其中 λ 在 1.0～2.0 之间变化取值.

图 1 中给出了一幅真实的开孔泡沫塑料微结构扫描电镜照片[8],可见材料存在一定程度的结构各向异性,沿发泡方向胞体被拉长.



图 1　开孔聚氨酯泡沫塑料 SEM 照片[8]

图 2 给出了 $\alpha=0.4$,$\lambda=1.8$ 时 3 倍胞体尺寸的随机模型. 一般说来,所选模型尺度越大,计算结果就越准确,但同时也会消耗大量的机时,因此,选取适当的模型尺度是非常重要的. 根据文献[6]可知,当选择 3,4,5 倍胞体尺寸的模型时,对计算结果的影响并不大,因此,文中选 3 倍胞体尺度模型进行计算.

类似于文献[6]的做法,将定型后的各向异性随机模型导入商用软件 Ansys 进行计算,分别沿着胞体伸长方向(y 方向)和垂直于胞体伸长方向(x 方向)施加压缩位移载荷. 所用边界条件与文献[6]一致,即为保持单元胞体模型变形时的空间连续性,约束所有表面节点的转动自由度,并对平行于加载方向的 4 个平面上所有节点的法向位移进行耦合控制,使得这 4 个平面始终保持平面运动,从而使变形后的胞体仍然保持立方体的形状.

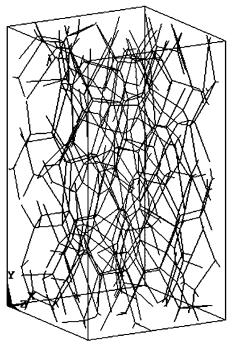


图 2　各向异性随机模型

2　计算结果与讨论

2.1　压缩变形过程模拟

胞体的几何结构直接决定了材料的宏观力学性能. 沿不同方向加载,胞体结构的内部变形机制存在着差异. 图 3 和图 4 分别给出了沿不同方向加载时胞体结构随压缩变形增加所表现的不同形态(本文相对密度为 0.025, $\alpha=0.4$,$\lambda=1.8$). 从图中可以发现,当加载垂直于胞体伸长方向时,支柱在整个变形过程中基本上保持均匀变形,屈曲并不明显. 与此不同的是,当加载沿着胞体伸长方向时,支柱的变形随压缩应变的增加变得不再均匀,靠近加载端面的支柱变形明显大于远离端面的支柱. 当变形较大时,支柱不仅发生弯曲、转动变形,大部分支柱已明显屈曲,甚至在加载端面附近,支柱完全坍塌. 上述不同的胞体变形形貌决定了不同方向上压缩应力-应变曲线的不同走势.

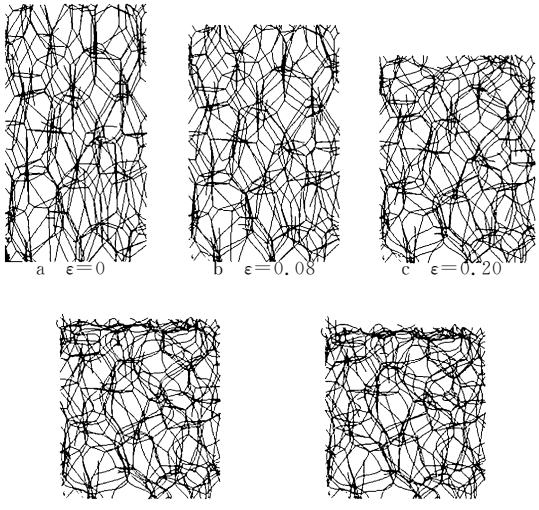


图 3　沿 y 方向加载时各向异性随机模型的变形

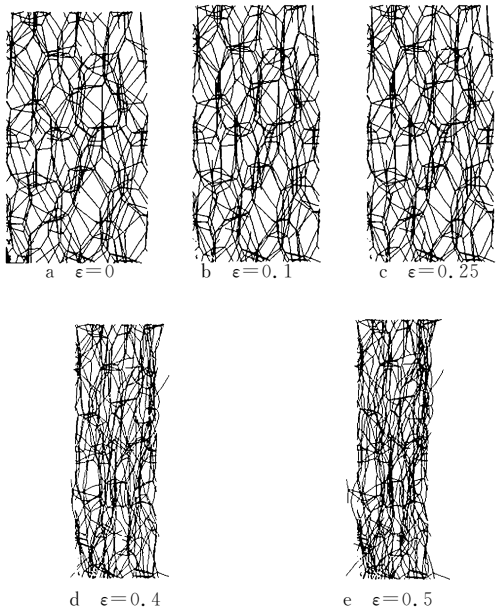


图4 沿 x 方向加载时各向异性随机模型的变形

2.2 无量纲应力-应变曲线

类似于文献[6],为使模型具有更广泛的适应性,计算结果仍用无量纲应力表示,它是相对密度、随机度、截面形状和应变等因素的函数[6]. 实际上,基体泊松比对计算结果的影响很小,而基体杨氏模量的取值对结果没有影响,故计算中取基体杨氏模量为1,泊松比为0.45. 因随机胞体模型计算存在一定的分散性[6],故最后结果一般取多次计算结果的平均值.

随机度是影响胞体压缩变形行为的主要因素之一. 为考察随机度的影响,图5给出了相对密度为0.025、各向异性比为1.6的不同随机度模型在 y 方向加载下的无量纲应力-应变曲线. 可见,当沿着胞体伸长方向对模型加载时,即便随机度很小,无量纲应力-应变曲线也呈现出较强的非线性特征,曲线的平台区也较为明显,这一结果与各向同性随机模型的压缩有所不同. 另外,不同随机度下的无量纲应力-应变曲线在初始线弹性区基本重合,但随着应变的增大,曲线彼此分开,逐渐进入平台区,并且,模型的随机度越大,无量纲应力-应变曲线进入平台区就越早,平台区所对应的应力也越小. 但是,当加载方向垂直于胞体伸长方向时,其无量纲应力-应变曲线的变化趋势却不尽相同(见图6). 可见,当 $\alpha=0.2$ 时,无量纲应力-应变曲线基本呈直线关系增加;而随着随机度的增大,曲线的非线性特点更加明显,所对应的应力也越小,当 $\alpha=0.7$ 时,无量纲应力-应变曲线的平台区已经十分明显了. 为检验文中计算结果的有效性,利用 Schraad 和 Harlow[9] 给出的低密度聚亚安酯泡沫材料(扫描电子显微镜照片显示这种材料近似呈各向同性结构)的单轴压缩应力-应变曲线,进行无量纲化处理后与本文的模拟结果进行比较(如图7所示),可以发现:当随机模型为各向同性时,模拟的无量纲应力-应变曲线与实验曲线是基本吻合的,这在一定程度上说明了本文模型的适用性. 此外,从图7还可见,y 方向加载时,在整个变形过程中应力水平都随着各向异性比的增大而提高,而 x 方向加载时则正好相反. 并且,各向异性比相同时,模型在 x 方向加载时的无量纲应力-应变曲线具有更长的线弹性区,坍塌应力也更低一些.

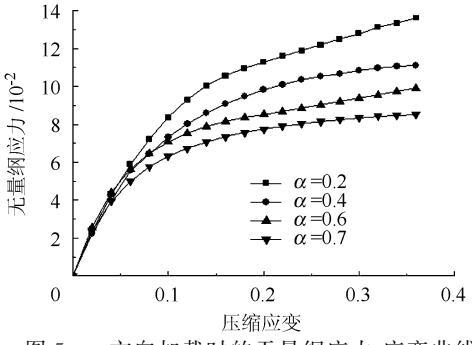


图5 y 方向加载时的无量纲应力-应变曲线

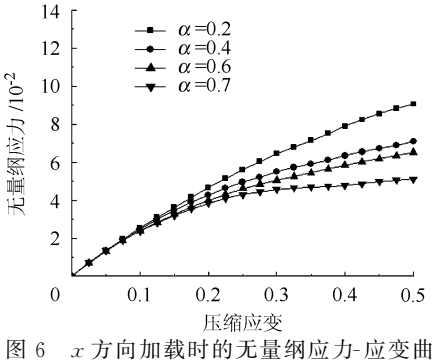


图6 x 方向加载时的无量纲应力-应变曲线

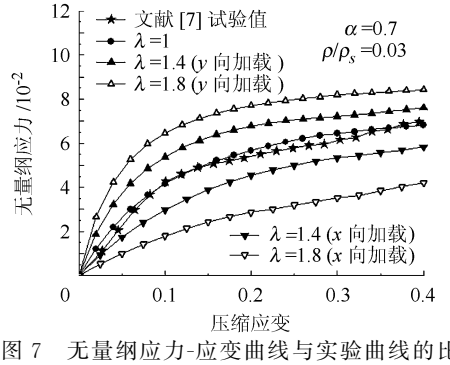


图7 无量纲应力-应变曲线与实验曲线的比较

2.3 弹性坍塌强度

胞体结构的各向异性使材料在不同方向上的弹性坍塌强度也有所不同. 从图7可见,沿不同方向加载时,各向异性弹性开孔随机泡沫模型进入

平台区的应变一般在 0.1～0.2 之间.

为使结果具有可比性,分别选取两个方向加载时、应变为 0.15 所对应的无量纲应力值作为模型在该方向上的弹性坍塌强度.图 8 给出了相对弹性坍塌强度比$(\sigma_{el})_\lambda/(\sigma_{el})_1$与各向异性比的关系,其中$(\sigma_{el})_\lambda$为各向异性比为$\lambda$时的弹性坍塌强度,$(\sigma_{el})_1$为各向同性时的弹性坍塌强度.

如图 8 所示,沿 y 方向加载时,$(\sigma_{el})_\lambda/(\sigma_{el})_1$随着各向异性比的增加呈近似线性增加,而沿 x 方向加载时,所对应的$(\sigma_{el})_\lambda/(\sigma_{el})_1$变化趋势恰好相反,即随各向异性比的增加而减小.

图 9 给出了两个方向弹性坍塌强度比$(\sigma_{el})_y/(\sigma_{el})_x$与各向异性比的关系.可见,随着各向异性比的增加,坍塌强度比$(\sigma_{el})_y/(\sigma_{el})_x$也增加,这种变化趋势与实验结果基本一致,但计算值远高于实验值.导致此结果的原因是,在随机模型建立过程中只将某一方向的宏观几何尺寸进行拉伸,并假设所有支柱的截面保持不变.而真实泡沫材料在发泡过程中沿胞体生长方向一些支柱由于拉长而变细,从而导致更易于坍塌(屈曲);同时,在与胞体生长垂直的方向上支柱较为短粗,更不易于坍塌;两者的综合结果使得实验所得弹性坍塌强度比远低于计算值.因此,若进一步考虑支柱截面尺寸的各向异性,则可缩小计算值与实验值的差距[10].

此外,按照 Gibson 的经验公式,各向同性开孔泡沫的弹性坍塌强度与基体模量的比值同相对密度的平方成正比,且比例系数为 0.05[11].由本文随机模型,可分别计算出相对密度为 0.01,0.025,0.05,0.075和 0.1 时的弹性坍塌强度.计算结果表明,当 $\alpha=0.7$,$\lambda=1$ 时,开孔泡沫的弹性坍塌强度 σ_{el}与基体模量 E_s 的比值同相对密度$\frac{\rho}{\rho_s}$平方的比例系数 C 在0.04～0.055 之间,这与 Gibson 的经验公式是较为吻合的.如果放开对相对密度指数 n 的限制,假设各向异性开孔泡沫的弹性坍塌强度可写成下述形式:

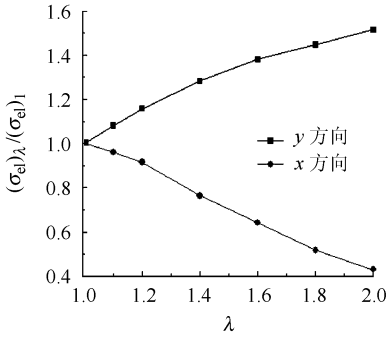


图 8　$(\sigma_{el})_\lambda/(\sigma_{el})_1$ 随各向异性比的变化

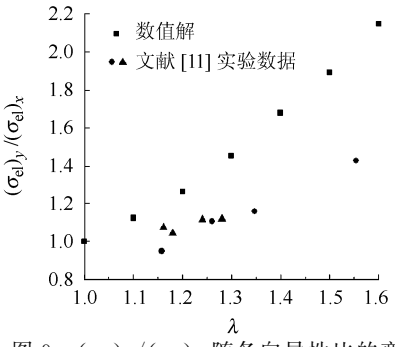


图 9　$(\sigma_{el})_y/(\sigma_{el})_x$ 随各向异性比的变化

$$\frac{\sigma_{el}}{E_s}=C\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n$$

则对 C 和 n 值进行数值拟合,可确定各向异性开孔泡沫材料的弹性坍塌强度与相对密度的关系,拟合结果如表 1 所示.

表 1　各向异性开孔泡沫材料的 C 和 n 的拟合值

λ	$(\sigma_{el})_y$		$(\sigma_{el})_x$	
	C	n	C	n
1.2	0.046 9	1.904	0.027 5	1.837
1.4	0.041 5	1.861	0.024 3	1.842
1.6	0.043 7	1.769	0.026 3	1.934
1.8	0.047 6	1.841	0.024 8	1.986

3　结 束 语

基于各向异性开孔泡沫随机模型,对低密度弹性开孔泡沫的压缩变形过程、无量纲应力-应变曲线和弹性坍塌强度进行了数值模拟和计算.结果表明,沿不同方向加载时,各向异性胞体的微观变形机制不尽相同,并且变形较大时,支柱的屈曲占主导地位.随着模型随机度的增大,两个方向的压缩无量纲应力-应变曲线的应力水平均有所降低,并且 $\lambda=1$ 时的无量纲应力-应变曲线与实验结果吻合得较好.此外,开孔泡沫材料各向异性比的增大,使 y 方向的弹性坍塌强度增大,使 x 方向弹性坍塌强度减小.若同时考虑支柱截面尺寸的各向异性,可得到与实验值更一致的预测结果.

参考文献(References)

[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] 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 foams models[J]. J Cell Plast, 1997,33:31－54

(下转第 571 页)