低密度闭孔金属泡沫压缩屈服行为的数值模拟

卢子兴 张家雷

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对低密度闭孔金属泡沫的变形过程进行数值模拟是研究泡沫材料力学及失效行为的重要手段. 基于Kelvin多倍胞体模型和有限元方法数值模拟了低密度闭孔泡沫铝的压缩变形的过程, 给出了压缩变形曲线并确定了压缩屈服强度. 在计算过程中, 考虑了材料非线性和几何非线性效应以及胞体倍数对应力-应变关系的影响, 并采用理想弹-塑性和线性强化弹-塑性两种材料本构关系来考察其对于泡沫铝非线性压缩力学行为的影响. 结果表明, 有限元计算的结果与一些文献的理论工作有较好的一致性, 但是比实验值偏大.

关 键 词: 金属泡沫; Kelvin模型; 压缩屈服; 数值模拟

中图分类号: O 343; TB 383

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009) 03-0318-04

Numerical simulation on compressive yielding behavior of closed-cell metal foam with low density

Lu Zixing Zhang Jialei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract It is an important means to simulate the deformation process of metal foam with low density numerically for investigating their mechanical behavior and failure. Based on the geometric model of Kelvin containing multiple cells, the finite element method was used to obtain the compressive yield strengths and to simulate the deformation curves of closed-cell metal foams. The deformation processes of the Kelvin foam models were simulated at the same time. During the calculation, the material properties of nonlinearity and geometric nonlinearity were taken into account; also, the influences of the number of cells on the foam properties were discussed. In order to investigate their influences on the mechanical behaviors of foams, the two constitute relations, perfect elastic-plastic relation and linearly hardening elastic-plastic relation, were adopted. The results show that the calculated values agree well with the theoretical results ever reported by other researchers, but the values are higher than the former experimental results.

Key words: metal foam; Kelvin model; compressive yielding; numerical simulation

Kelvin模型能较真实地反映低密度泡沫材料的基本微结构特征, 且能完全填充整个空间, 较好地满足胞体特性条件, 故近年来常用于低密度开孔泡沫材料的胞体描述和力学行为研究[1-3]. 相对而言, 用该模型研究闭孔泡沫材料力学行为的工作并不多见, 主要有: 文献[4]利用Kelvin模型对闭孔泡沫进行了弹性性能分析, 修正了由立方体交错模型给出的弹性模量预测公式. 文献[5]利用该模型分析了壁厚变化对闭孔泡沫弹性性能的影响. 文献[6]等则利用该模型模拟了聚合物泡沫在压缩时的大变形力学行为, 得到了弹性模量、泊松比和屈服应力预测公式. 最近, 文献[2-3]也采用Kelvin模型对开孔和闭孔泡沫材料的弹性性能进行了有限元分析, 得到一些有价值的结果. 本文基于Kelvin多倍胞体模型和有限元方法数值模拟了低密度闭孔泡沫铝的压缩屈服

收稿日期: 2008-04-01

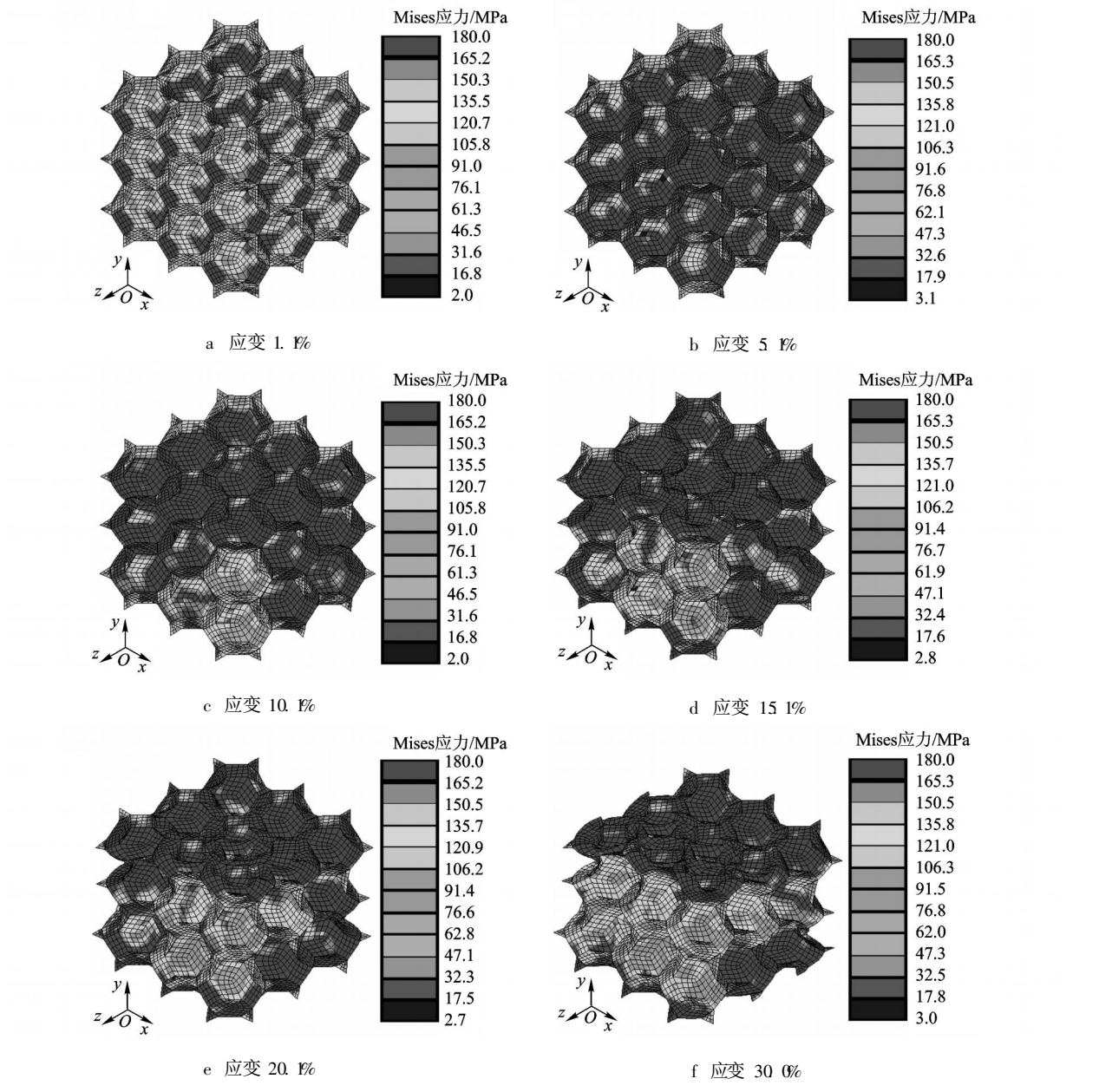
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572013); 北京市教育委员会共建资助项目(XK100060522)

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

强度和压缩变形曲线. 在计算中考虑材料和几何非线性效应, 同时采用理想弹-塑性和线性强化弹-塑性两种材料本构关系来考察其对于泡沫铝非线性压缩力学行为的影响. 结果表明, 预测值与文献中的工作有较好的一致性.

1　几何模型和有限元模型的建立

在 ABAQUS/CAE中建立几何模型, 所用方法与文献[3]类似. 为了减小边界条件的影响, 反映胞体之间的相互作用, 同时控制一定的计算量和精度[3], 文中一般选取 3倍胞体模型来进行计算 (限于篇幅, 这里略去模型图, 可参考图 1压缩变形下的 Mises应力云图). 计算中基体材料取为纯铝, 其本构模型分别采用理想弹塑性和线性强化弹-塑性模型, 材料参数定义如下: 对理想弹-塑性模型, 弹性模量为70GPa, 屈服强度为 180MPa, 泊松比为 0.3; 而对线性强化弹-塑性模型, 再增加硬化模量 (hardening modulus) 25MPa. 计算中不仅考虑材料非线性, 也考虑几何非线性效应. 由于模型中胞体形状规则, 且压缩应变控制在 30% 以内, 故不考虑接触效应. 考虑到模型中的胞体数目较多, 在大变形情况下过强的约束会与实际的情况不符合, 所以加载时对模型在 y 方向施加位移载荷进行压缩, 使模型四周自由, 可向外膨胀. 计算完成后, 得到在不同压缩位移载荷下的压缩面上各节点的反力总和, 经处理可以得到压缩应力-应变曲线. 因文中主要讨论压缩屈服阶段情况, 故只给出 15% 应变范围内的曲线.



a　应变 1.1%　　b　应变 5.1%

c　应变 10.1%　　d　应变 15.1%

e　应变 20.1%　　f　应变 30.0%

图 1　3倍胞体模型的变形过程及 Mises应力云图

2 压缩变形模拟

图 1给出了 3倍胞体模型在不同压缩变形下的 Mises应力云图. 可见,胞体的变形情况是: 初始阶段变形较为均匀,应变为 1.1% 时胞体即开始进入屈服状态,而当应变为 5.1% 时胞体基本上都进入了塑性变形状态 (根据颜色变化来识别);进一步,当应变增大到 10.1% 以后,部分胞体开始坍塌,部分胞体出现卸载,变形不再均匀,且胞体的坍塌是一层一层推进的.

3 压缩屈服强度的讨论

图 2给出了 3倍模型尺度下相对密度为 0.1 的泡沫材料的压缩曲线. 由图可见,其应力-应变曲线具有明显的屈服平台区,且屈服点对应的应变较小,这同泡沫铝的压缩实验曲线是一致的[7]. 随着应变的增大应力有减小的趋势,这主要归结为部分胞体发生了塑性坍塌. 此外,还可以看出,采用理想弹-塑性和线性强化弹-塑性本构模型所得结果相差不大.

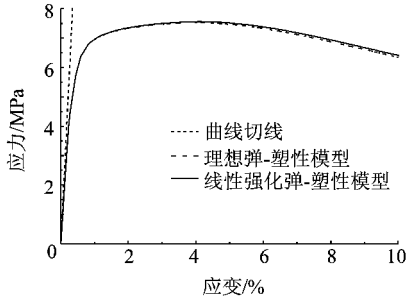


图 2 3倍胞体模型压缩应力-应变曲线

图 3给出了 3倍胞体和 4倍胞体模型压缩曲线的比较 (均采用理想弹-塑性模型). 可以看出,在弹性阶段二者几乎重合,但在屈服阶段 4倍胞体模型的应力水平要大一些,说明胞体尺度对模型的后屈服行为有明显影响,部分胞体的塑性坍塌对较大胞体尺度模型的整体性能的影响较小.

对闭孔 Kelvin泡沫材料弹性性能的预测,采用文献[3]中公式 (1)计算弹性模量,与在图 2的压缩应力-应变曲线中作切线得到的弹性模量吻合较好,这说明弹性和弹塑性的分析结果是一致的.

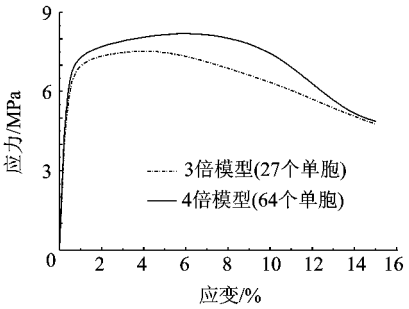


图 3 不同模型尺度下的压缩应力-应变曲线比较

需指出,文献[4]用 Kelvin模型给出了闭孔塑性泡沫材料屈服强度的拟合公式,而文献[8]利用截头立方体闭胞模型也给出了屈服强度的拟合公式. 对相对密度为 0.1的闭孔泡沫铝,文献[4]公式的预测结果为 8.6MPa,文献[8]公式的预测结果为 5.7MPa,而本文采用 4倍胞体模型计算的应力-应变曲线在应变为 5.0% 时的峰值应力作为屈服强度,其值为 8.2MPa,这与文献[4]的预测结果比较接近. 此外,与闭孔泡沫铝的实验数据比较[7]可以发现,泡沫铝的屈服强度比上述预测值都要低,且与 Gibson的塑性开孔泡沫材料屈服强度的预测结果相接近[9],即泡沫铝的实验值并没达到理论预测值. 导致该结果的主要原因可能有: ①基体屈服强度的不确定性,即基体的力学性能指标与实体的相比有一定差距; ②泡沫铝胞体壁面的缺陷较多,这些缺陷表现为壁面的褶皱、开裂以及缺失,如图 4所示[8],壁面缺陷较多的闭孔泡沫其表现与开孔泡沫相当; ③在这些泡沫中基体的存在形式以支柱为主,壁面非常薄,壁面影响即使存在也较小.



图 4 相对密度为 0.1的铝泡沫材料[8]

4 结 论

通过考虑胞体变形过程中的材料非线性和几何非线性效应,利用有限元分析方法模拟了低密度闭孔泡沫铝的压缩变形过程,预测了压缩屈服强度. 所得压缩应力-应变曲线具有明显的平台区,随着应变的增大胞体坍塌,曲线有下降的趋势. 同文献[4]的公式预测进行了比较,二者较吻合,但比文献[8]的公式预测要高. 闭孔泡沫铝的压缩屈服强度预测值均高于实验值,实验值更接近开孔塑性泡沫材料的理论预测值. 这说明泡沫铝胞体的壁面缺陷较多可能会导致压缩变形过程

中胞体坍塌与开孔泡沫相像, 因而使泡沫铝实际屈服强度明显偏低. 另一方面也说明, 改进生产工艺, 减小泡沫铝的微结构缺陷, 对于提高材料的抗压缩能力具有重要意义.

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] 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)

[3] 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 tetrakaidecahedron model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(2): 315-319(in Chinese)

[4] Simone A E, Gibson L J. Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams[J]. Acta Mater, 1998, 46(6): 2139-2150

[5] 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: 1327-1338

[6] Mills N J, Zhu H X. The high strain compression of closed-cell polymer foams[J]. J Mech Phys Solids, 1999, 47: 669-695

[7] Andrews E, Sanders W, Gibson L J. Compressive and tensile behavior of aluminum foams[J]. Mater Sci Eng, 1999, A270: 113-124

[8] Santosa S, Wierzbicki T. On the modeling of crush behavior of a closed-cell aluminum foam structure[J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46(4): 645-669

[9] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. Second ed. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 1997

(责任编辑: 刘登敏)

(上接第 279页)

对值最大可达进口平均速度的 20%以上; 径向哥氏力在侧壁附近与主流方向相同, 使流体加速, 在中心区与主流方向相反, 使流体减速; 切向哥氏力推动主流型偏向后缘面, 通道截面内的双涡二次流的输运作用使得径向速度沿着与旋转轴平行的方向呈双峰分布, 径向哥氏力的存在则加剧了这一趋势; 单纯的哥氏力对主流速度型的影响比较有限, 在有浮升力存在的情况下, 旋转通道充分发展区主流型的偏移被大大加强. 离心浮升力的影响与哥氏力场的分布以及哥氏力二次流的发展程度密切相关: 当哥氏力场的强度较弱或哥氏力二次流未充分发展时, 浮升力减缓近壁流体速度, 将导致通道整体换热的削弱; 当哥氏力场较强并且哥氏力二次流充分发展时, 浮升力加剧了主流型的偏移、增强了掺混作用, 有利于通道整体换热的增强.

参考文献 (References)

[1] Harasgama S P, Morris W D. The influence of rotation on the heat transfer characteristics of circular, triangular, and square-sectioned coolant passage of gas turbine rotor blade[J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110: 44-50

[2] Wagner J H, Johnson B V, Hajek T J. Heat transfer in rotating passages with smooth walls and radial outward flow[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113: 42-51

[3] 刘传凯, 陶智, 丁水汀, 等. 3种转角下旋转 U形方通道的局部换热[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(3): 284-287
Liu Chuankai, Tao Zhi, Ding Shuiting, et al. Local heat transfer in a rotating U-shaped square channel with three channel orientations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(3): 284-287(in Chinese)

[4] Bons J P, Kerrebock J L. Complementary velocity and heat transfer measurements in a rotating cooling passage with smooth walls[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121: 651-661

[5] Liou T M, Hwang Y S, Chen M Y. Characteristics of pressure, flow, and heat transfer in rotating internal cooling passages with attached-detached ribs[R]. ASME 2005-GT-68661, 2005

[6] Dutta S, Andrews M J, Han J C. Prediction of turbulent heat transfer in rotating smooth square ducts[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(12): 2505-2514

[7] Rigby D L, Ameri A A, Steinthorsson E. Internal passage heat transfer prediction using multiblock grids and a k-ω turbulence model[R]. ASME 96-GT-188, 1996

[8] Sleiti A, Kapat J S. Effect of Coriolis and Centrifugal forces at high rotation and density ratios[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(1): 67-79

[9] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD[M]. California: DCW Industries Inc, 1993

[10] 刘传凯. 旋转蛇形通道内冷气的流动与换热机理研究[D]. 北京: 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 2006
Liu Chuankai. Study on fluid flow and heat transfer in rotating serpentine cooling channels[D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

(责任编辑: 张　嵘)