第43卷 第5期
2011年5月
哈 尔 滨 工 业 大 学 学 报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Vol. 43 No. 5
May 2011

十四面体闭孔多孔材料表征量特性研究

朱 虹[1,2], 韩杰才[1], 张宇民[1], 张立刚[2]

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 150001 哈尔滨, zhuhong9@126.com;
2. 燕山大学 机械工程学院, 066004 秦皇岛)

摘 要: 为了研究多孔材料微观结构对其性能的影响,利用闭孔粗棱十四面体模型进行了数值模拟. 采用有限元法,对相对弹性模量、泊松比进行了数值计算. 模拟结果表明:单胞壁厚是相对密度增量的次要影响因素,壁面连接曲率半径是主要影响因素,壁厚、壁面连接曲率半径可简化为相对密度的2个无关影响因素;高孔隙率多孔材料,表面张力拉向孔穴棱边的固体对相对弹性模量的影响较小,低孔隙率多孔材料则影响较大. 得到了相对密度对微结构的依赖性及归一化关系同时也得到了微结构、相对密度对相对弹性模量、泊松比的影响规律.

关键词: 多孔材料;十四面体模型;弹性性能;有限元

中图分类号: TB383; O343 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)05-0071-05

Characterization of tetrakaidecahedral closed-cell cellular materials

ZHU Hong[1,2], HAN Jie-cai[1], ZHANG Yu-min[1], ZHANG Li-gang[2]

(1. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, zhuhong9@126.com;
2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, 066004 Qinhuangdao, China)

Abstract: To investigate the influence of cellular materials microstructure on it's properties, numerical simulation is done by closed-cell tetrakaidecahedron model with thick edge. By finite elements method, relative elastic modulus and Poisson' ratio are calculated. Simulation results show: single-cell wall thickness is the secondary factor of relative density increment, and wall-face connective curvature radius is the primary factor of the increment. The wall thickness and wall-face connective curvature radius can be simplified as two independent factors of relative density. For high porosity cellular materials, the solid of which the surface tension draws to cell-edge has little influence on relative elastic modulus, but for low porosity cellular materials, the influence becomes greater. The dependence of relative density on microstructure, the unitary relation and the influence of microstructure and relative density on relative elastic modulus and Poisson' ratio are obtained.

Key words: cellular materials; tetrakaidecahedral model; elastic properties; finite elements method

多孔材料以其高比强度、低热导率等优点,成为航空航天领域制备结构件、隔热体的备受青睐材料[1]. 随着泡沫金属、泡沫陶瓷材料制备技术的完善,其工程应用领域越来越广泛[2],故其力学性能得到了人们的广泛研究[3-6]. 十四面体模型是模拟多孔材料力学性能的理想模型,研究方法主要有结构分析法和有限元法. Zhu[7]、Warren[8-9]与Li[10]采用十四面体模型对开孔泡沫材料的线弹性力学性能进行了理论研究,取得了较为理想的研究成果. Simone[11]利用十四面体模型对闭孔泡沫进行了弹性性能分析,给出了弹性模量预测公式;Grenestedt[12]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[13-14]采用有限元法利用十四面体模型对多孔材料的力学性能进行了分析. 本文建立了描述多孔材料的十四面体闭孔粗棱几何模型,对其弹性性能进行了数值模拟,获得了微结构尺寸和相对密度对材料性能的影响规律.

收稿日期: 2010-04-18.
基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA121903).
作者简介: 朱 虹(1969—),女,讲师;博士生;
韩杰才(1966—),男,教授,博士生导师;
张宇民(1970—),男,教授,博士生导师.

1　几何模型的建立

熔融体的流变状态与表面张力是多孔材料形成的重要影响因素,表面张力将固体拉向孔穴的棱边,孔穴应为粗棱架住的薄壁组成的空间. 考虑此原理,建立了闭孔粗棱十四面体单胞模型,如图 1 所示. 依据多孔材料制备的发泡原理,建立几何模型时应首选壁厚相等. 单胞外型为规则十四面体,壁厚增大,孔穴形状从非规则十四面体变为八面体;孔穴形状为规则十四面体,壁厚增大,单胞外型为非规则十四面体. 高密度多孔材料孔穴等速扩张,应选择孔穴规则十四面体模型,低密度多孔材料单胞互相作用,应选择单胞外型规则十四面体模型. 单胞外型规则一种尺寸模型即可拓扑为多孔材料,孔穴规则需 2 种外形尺寸模型才可拓扑为多孔材料. 单胞外型规则多胞模型如图 2 所示.

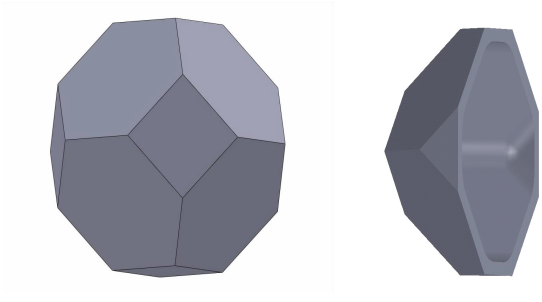

图 1　闭孔粗棱十四面体单胞模型

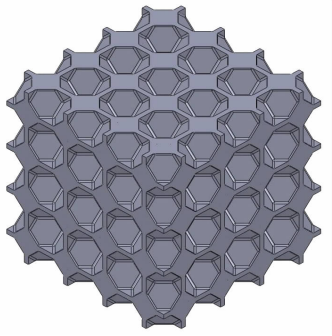

图 2　闭孔粗棱十四面体多胞模型

2　相对密度计算及分析

多孔材料的孔穴棱边及壁面的显微结构是多孔材料对载荷、传热、耗能响应的重要影响因素,其影响规律具有重要的理论研究价值. 孔穴棱边及壁面的显微结构信息皆蕴于多孔材料的相对密度参量之中,宏观表述多孔材料的性能,相对密度成为权重最大的影响因素.

2.1　相对密度对壁厚的依赖性

利用三维设计软件建立理想闭孔十四面体几何模型,运用切片法对多孔材料的相对密度进行数值求解. 依据几何学可知理想闭孔十四面体多孔材料的相对密度应为 t/l 的 3 次多项式,多孔材料的相对密度对壁厚的依赖性如图 3 所示,拟合关系为

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.18\frac{t}{l} - 0.462\left(\frac{t}{l}\right)^2 + 0.059\left(\frac{t}{l}\right)^3. \quad (1)$$

式中: l 为孔穴棱长; t 为孔壁厚度; ρ^* 为多孔材料的密度; ρ_s 为固体材质的密度. 式(1) 为无量纲关系式,对孔穴棱长、孔壁厚度、固体材质的密度任意变化模型皆适用. 式(1) 适用于无限大体,不包含有限体的边界影响.

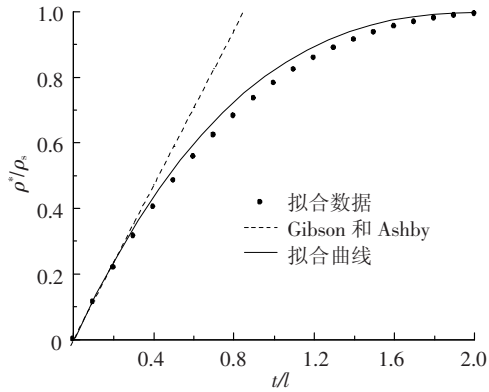

图 3　相对密度对壁厚的依赖性

由图 3 可见,当多孔材料的相对密度 < 0.2 时,1 次多项式的表述即可满足精度要求,研究低密度多孔材料的特性时,使用该结论具有诸多优越性.

2.2　相对密度对壁面连接曲率半径的依赖性

多孔材料单胞外型恒定,壁厚增大,孔穴壁面面积逐渐减小,壁面连接曲率半径的存在范围随壁厚增大而减小.

闭孔十四面体单胞的 3 条棱在顶点处以 90° 和 2 个 120° 相交,2 个六边形面在棱边处以 109.47°相交,六边形面与四边形面在棱边处以 125.26°相交,顶点处、棱边处的相交几何关系不随壁厚的改变而改变,表面张力拉向孔穴顶点处、单位棱长处的固体与壁厚变化无关. 闭孔十四面体单胞外形尺寸确定,内棱边总长度随壁厚增加而减小,壁厚变化依赖内棱边总长度改变影响表面张力拉向孔穴棱边处的固体. 单胞壁厚及壁面连接曲率半径变化对多孔材料相对密度增量影响关系如图 4 所示.

由图 4 可见,单胞壁厚是多孔材料相对密度增量的次要影响因素,壁面连接曲率半径是主要影响因素. 利用可分离变量法,依据几何学选取壁面连接曲率半径、壁厚多项式拟合模式,无量纲相对密度增量拟合关系为

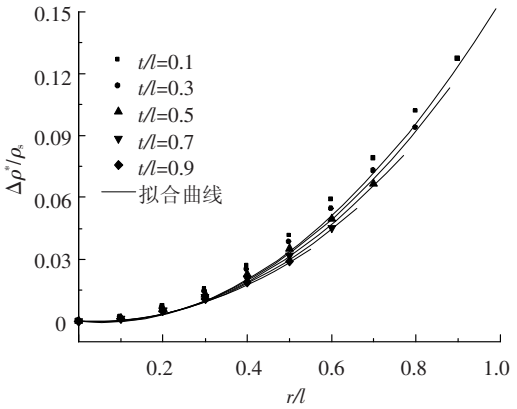

图 4　相对密度增量对壁面连接曲率半径的依赖性

$$\frac{\Delta\rho^*}{\rho_s} = 0.010\,4\frac{r}{l} - 0.008\,6\frac{t}{l}\frac{r}{l} + 0.152\left(\frac{r}{l}\right)^2 - 0.046\,5\frac{t}{l}\left(\frac{r}{l}\right)^2. \qquad (2)$$

由于单胞壁厚是多孔材料相对密度增量的次要影响因素，因此在理论研究时，可把式(2)简化为无耦合项的关系式. 使用无耦合项关系式不仅具有诸多优越性，也可满足精度要求.

3　弹性模量计算及分析

采用经典力学中微元体分析方法，建立十四面体闭孔多孔材料有限元求解模型. 鉴于材料微观结构特性，有限元求解模型的几何尺寸不应按单位尺度选择，按单胞结构参数整数倍选择，适用于材料无限大情况，非整数倍选择，含有边界影响因素，适用于有限体材料特性模拟.

3.1　相对弹性模量对微结构参数的依赖性

利用有限元计算时，应力求模型尺度尽可能小的情况下获得尽可能准确的材料宏观性能. 从单胞外型规则多孔材料几何模型中切割出 2 倍单胞尺寸的几何模型作为有限元计算模型，该模型中含有 1 个完整单胞，非完整单胞皆是半胞. 将该几何模型导入 ANSYS 有限元软件，采用 3-SOLID95 结构实体单元对其进行进行数值分析. 有限元计算模型如图 5 所示.

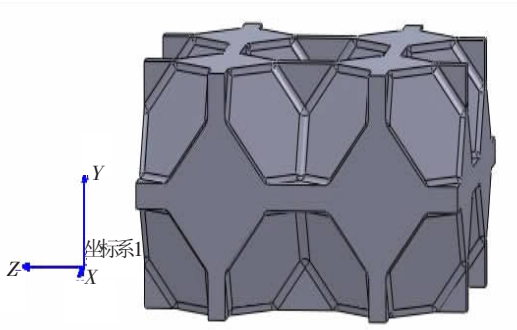

图 5　有限元计算模型

选择模型 y 方向为载荷方向，对模型非承载方向的法平面选择自由边界，图 5 中上表面施加对称边界，图 5 中下表面施加压缩位移载荷 δ_y，直接可以获得加载方向等效应变 ε_y.

$$\varepsilon_y = \delta_y / l_1.$$

式中 l_1 为几何模型的边长. 在弹性分析完成之后，提取承载端面 y 方向之合力 F_y，模型在 y 方向的等效弹性模量 E^* 为

$$E^* = F_y / (l_1^2\,\varepsilon_y).$$

基体材料选取 Al_2O_3，弹性模量 E_s = 380 GPa，泊松比 ν = 0.3，胞体壁厚 t/l 从 0.1 开始以 0.1 步长增加，胞体壁面连接曲率半径 r/l 从 0 开始以 0.1 步长增加的相对弹性模量数值计算结果如图 6 所示. r/l = 0 曲线为理想十四面体模型的相对弹性模量. t/l 曲线为粗棱十四面体模型的相对弹性模量，数据的横坐标为胞体壁面连接曲率半径 r/l 的变化，交点处 r/l 为 0，数据间的量值变化为 0.1.

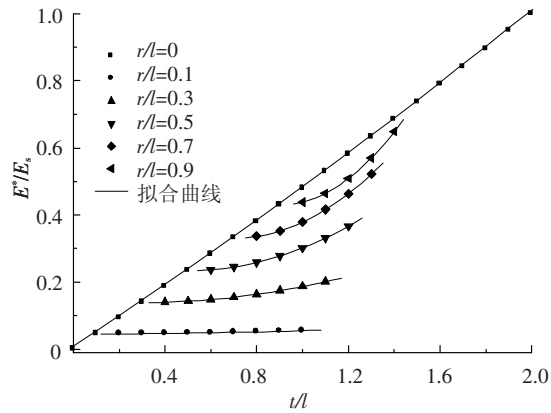

图 6　相对弹性模量对微结构参数的依赖性

采用 2 次多项式模式，对壁厚对相对弹性模量的影响规律进行拟合. 利用可分离变量法，壁面连接曲率半径、壁厚皆选取 2 次函数模式，无量纲微结构参数对相对弹性模量的影响拟合关系为

$$\frac{E^*}{E_s} = 0.457\frac{t}{l} + 0.022\,7\left(\frac{t}{l}\right)^2 + 1.08\left(\frac{t}{l}\right)^2\left(\frac{r}{l}\right)^2. \qquad (3)$$

式中 E_s 为基体材质的密度弹性模量. 由图 6 可见，基体材料的弹性模量为常数，多孔材料结构参数变化，产生材料特性的非线性变化；多孔材料结构参数不变，载荷变化弹性模量不增加材料特性的非线性变化.

3.2　相对弹性模量对相对密度的依赖性

相对密度与相对弹性模量之间的关系，理想十四面体模型，可由式(1)、无壁面连接曲率半径参量的式(3)联立直接导出；粗棱十四面体模型，含有壁面连接曲率半径影响因素，宏观描述时需要添加新参量，即孔穴棱边所含固体的体积分数

或相对密度增量,利用式(1)~式(3)联立导出较为困难. 利用有限元数值计算结果,较易给出相对密度对相对弹性模量的影响关系,如图 7 所示.

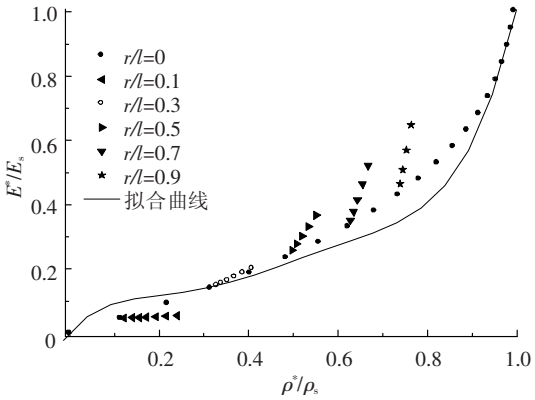

图 7 相对弹性模量对相对密度的依赖性

采用 5 次多项式模式,对相对密度对相对弹性模量的影响规律进行拟合. 利用可分离变量法,相对密度增量选取比例函数模式,相对密度选取 3 次多项式模式,对相对密度对相对弹性模量的影响规律进行修正拟合,无量纲拟合关系为

$$\frac{E^*}{E_s} = \left(0.978 + 3.02\frac{\Delta\rho^*}{\rho_s}\right)\frac{\rho^*}{\rho_s} - \left(5.56 + 12.9\frac{\Delta\rho^*}{\rho_s}\right)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + \left(18.5 + 31.1\frac{\Delta\rho^*}{\rho_s}\right)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3 - 24\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^4 + 11.1\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^5.$$

由图 6,7 可见,理想模型的相对密度对相对弹性模量产生的非线性明显强于壁厚. 低密度多孔材料,表面张力拉向孔穴棱边的固体对相对弹性模量的增大贡献较小,高密度多孔材料则较大. 壁面相对密度在 20% ~40% 的范围内,壁面和壁面相交处增加固体对弹性模量的影响效果相同.

4 泊松比计算及分析

均匀连续介质的泊松比与应变和载荷作用下体积的变化相关,影响规律为

$$\nu = (1 - \sqrt{(1+\psi)/(1+\varepsilon)})/\varepsilon.$$

式中: ψ 为载荷作用下体积的变化率,收缩为负; ε 为拉压载荷方向应变,拉伸为正. 在体积不变假设情况下,泊松比随应变数值的增大而减小. 在弹性小变形条件下,拉伸收缩会增大泊松比,压缩收缩会减小泊松比,导致材料弹性变形泊松比趋于常数.

多孔材料包含基体和结构 2 种因素导致体积改变. 高密度多孔材料,结构因素影响体积改变是孔穴物质与基体物质不同导致的. 低密度多孔材料,结构因素影响体积改变存在不同介质和壁面屈曲 2 种因素. 不同介质产生的体积收缩是叠加关系,壁面屈曲则不同. 由于存在壁面屈曲方向不同现象,壁面屈曲对体积存在收缩、膨胀 2 种情况的改变,如果此种因素对体积变化的影响高于其他因素的综合影响,低密度多孔材料则可以出现负泊松比现象.

提取有限元计算结果中非载荷 x 方向端面 x 方向的位移,进而可以算出 x 方向上的等效应变为

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_x}{l_1}.$$

式中 δ_x 为有限元模型 x 方向 2 个端面 x 方向的相对位移. 多孔材料的泊松比可表示为

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}.$$

多孔材料壁面厚度和壁面连接曲率半径变化情况下的泊松比如图 8 所示. $r/l = 0$ 曲线为理想十四面体模型的泊松比. t/l 曲线为粗棱十四面体模型的泊松比,数据的横坐标为胞体壁面连接曲率半径 r/l 的变化,数据间的量值变化为 0.1.

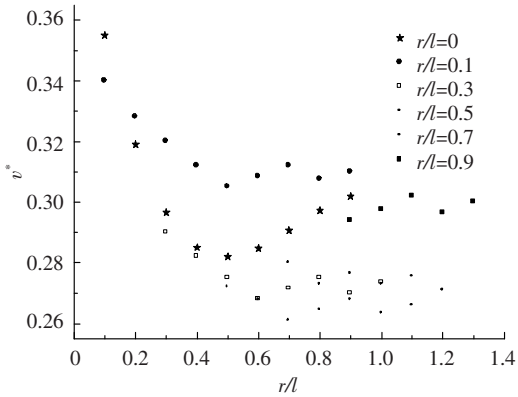

图 8 微结构参数与泊松比之间的关系

由图 8 可见,多孔材料的结构属性使泊松比出现了非线性变化. 低密度多孔材料在载荷作用下,壁面屈曲通过体积变化对泊松比产生了较大的影响. 厚壁多孔材料不存在壁面屈曲且堆积基体材料对孔穴体积的影响逐渐减弱,因而泊松比呈水平带状分布. 图 8 中计算结果的振荡变化是数值计算误差产生的现象,同时说明泊松比趋于稳定.

5 结 论

1) 建立了描述多孔材料的闭孔粗棱十四面体几何模型,采用有限元法,对相对弹性模量、泊松比进行了数值计算. 获得了相对密度对微结构的依赖性及归一化关系. 得到了微结构、相对密度对相对弹性模量、泊松比的影响规律.

2）表面张力拉向孔穴棱边的固体对多孔材料相对密度增量的影响，壁面连接曲率半径是主要因素，单胞壁厚是次要因素，壁厚、壁面连接曲率半径可简化为相对密度的 2 个无关影响因素.

3）高孔隙率多孔材料，表面张力拉向孔穴棱边的固体使相对弹性模量增加的能力较弱，壁面相对密度在 20% ~40% 的范围内，壁面和壁面相交处增加固体对弹性模量的影响效果相同，低孔隙率壁面相交处增加固体对弹性模量的影响效果强于壁面厚度增加产生的影响.

4）低密度多孔材料泊松比的确定需要考虑壁面屈曲和相对密度 2 种因素的影响，高密度多孔材料的泊松比可以确定为常数.

参考文献：

[1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford: Pergamon Press, 1997: 175 – 344.

[2] 戴长松，张亮，王殿龙，等. 泡沫材料的最新研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 337 – 340.

[3] 谢兰生，童国权，高霖. Kelvin 结构开孔泡沫材料的弹性性能研究[J]. 应用力学学报，2007，24(1): 75 – 78.

[4] SILVA M J, GIBSON L J. The effect of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids[J]. Int J Mech Sci, 1997, 39(5): 549 – 563.

[5] GARBOCZI R A P. Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solid[J]. J Mech Phys Solids, 2002, 50(1): 33 – 55.

[6] KWEN Y W, COOKE R E, PARK C. Representation unit-cell models for open-cell metal foams with or without elastic filler[J]. Mater Sci Eng, 2003, A343: 63 – 70.

[7] ZHU H X, MILLS N, KNOTT J F. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells[J]. J Mech Phys Solids, 1997, 45(3): 319 – 343.

[8] WARREN W E, KRAYNIK A M. The linear elastic properties of open-cell foams[J]. J Appl Mech, 1988, 55(2): 341 – 346.

[9] WARREN W E, KRAYNIK A M. Linear elastic behavior of a low-density Kelvin foam with open cells[J]. J Appl Mech, 1997, 64(4): 787 – 794.

[10] LI K, GAO X L, ROY A K. Micromechanics model for three-demensional open-cell foams using a tetrakaidecahedral unit cell and Castigliano's second theorem[J]. Comp Sci Technol, 2003, 63(12): 1769 – 1781.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

（编辑　张　红）