

文章编号: 1001-1455(2009)01-0049-07

基于十四面体模型的闭孔泡沫材料 动态力学性能的有限元分析*

宋延泽, 李志强, 赵隆茂

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 应用有限元方法分析了基于十四面体模型的三维闭孔泡沫材料的动态力学性能。计算中所有十四面体具有相同的尺寸, 主要研究了不同初始冲击速度、不同相对密度以及组成泡沫的机体材料的应变强化对泡沫材料的变形模态、平台力及密实化应变能的影响, 尽可能全面地描述了泡沫材料的能量吸收特性。数值结果表明: 冲击速度对泡沫模型的模态影响较大, 特别受到高速冲击时, 冲击端泡沫形成“I”形然后向支撑端传播; 相对密度对能量吸收能力的贡献较大, 密实化应变能随相对密度呈二次曲线变化; 冲击速度、相对密度及机体材料的应变强化分别与坪应力呈线性关系。

关键词: 固体力学; 动态力学性能; 有限元分析; 泡沫材料; 十四面体

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·1570

文献标志码: A

1 引言

多孔材料具有高的比刚度和比强度, 在汽车、铁路、航空航天等领域得到了越来越广泛的应用。另外, 多孔材料在受到压缩时呈现出几乎保持恒定应力的大变形过程, 具有很好的能量吸收能力, 也作为吸能部件被广泛应用于可能遭受高速冲击的结构中(例如高速轨道车辆前部的吸能器和宇宙飞船的着陆垫等), 以保护结构受到冲击时其中的乘员和其他结构不被损害。在包装方面, 多孔材料良好的能量吸收能力, 可以满足吸收冲击力或由于减速而产生的惯性力的能量, 避免内含物遭受危险应力的作用的要求^[1], 成为包装吸能材料的首选。在对于这种结构-功能材料力学性能的研究中, 绝大多数的研究与这两方面的主要应用密切相关。为改善多孔材料的比刚度和比强度, 这一方面的研究主要集中在改善弹性特性和塑性坍塌强度等方面。除了具有代表性的工作^[1], 还有其他大量的理论和实验研究工作^[2-12]。

多孔材料应用于能量吸收方面时, 其服役环境常受到爆炸、高速冲击等强动态载荷作用。因此, 研究高速撞击情况下多孔材料的大变形、动态特性及能量吸收机理十分重要, 特别是其动态变形过程所表现出的动态力学性能和微观变形机理之间的关系。到目前为止, 这方面的研究工作才刚刚开始。

D. Ruan 等^[13]用 ABAQUS 软件研究了规则蜂窝结构的平面动态冲击问题, 考虑了孔壁厚度和冲击速度对变形模态和“坪”应力的影响。模拟结果发现改变孔壁厚度和冲击速度, 结构会出现“X”、“V”和“I”形的变形。分析还发现结构的平台应力与相对密度之间满足立方的关系。当冲击速度很高时, 甚至平台应力与相对密度之间满足平方的关系。P. J. Tan 等^[14]在有关泡沫铝动态压缩强度特性的研究中, 采用有限单元法和简单的二维 Voronoi 蜂窝材料模型相结合的方法, 图解了为什么伴随多孔固体的“冲击”压缩有较多的能量消耗的问题。ZHENG Zhi-jun 等^[15]研究了泡孔不规则性和冲击速度对变形模态和平台应力的影响。研究结果显示, 增加泡孔的不规则程度可改善其能量吸收能力。最近, K. Li 等^[16]运用 Voronoi 随机分布技术和有限元方法分析了孔的不规则性和孔壁厚度的均匀性对蜂窝结构动态响应(包括平台应力、应变能密度和初始应变等)的影响, 得到的变形模态与文献^[13]类似。然而, 对动态力学性能的研究仅限于二维多孔结构。事实上, 采用三维模型能够更加真实地反映多孔材料特性, 目前有关这方面的研究未见文献报道。

本文中基于十四面体建立三维闭孔泡沫材料的模型, 然后应用有限元方法研究不同冲击速度、不同相对密度以及组成泡沫的机体材料的应变强化对泡沫材料的变形模态、平台力及密实化应变能的影响。

* 收稿日期: 2007-08-14; 修回日期: 2007-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572100); 山西省自然科学基金项目(20041006);

山西省归国留学人员项目(2003-23); 山西省青年科技研究基金项目(2007021005)

作者简介: 宋延泽(1981—), 男, 硕士。

2 模型的建立

2.1 十四面体的生成

十四面体模型能较真实地反映泡沫材料的几何特征,并能完全填充整个空间,较好地满足发泡过程中泡体表面能为最小的形成条件^[17],因此基于十四面体模型研究闭孔泡沫的动态力学性能。图 1 所示为十四面体单胞模型,由 6 个四边形面和 8 个正六边形面围成。图 2 给出本文建立的立方体胞体结构模型,即在三个方向具有相等的胞体组成,皆为 7 倍胞体。

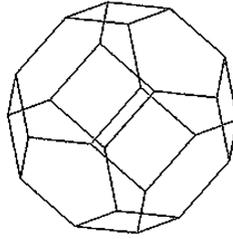


图 1 十四面体单胞模型

Fig. 1 Tetrakaidecahedron model

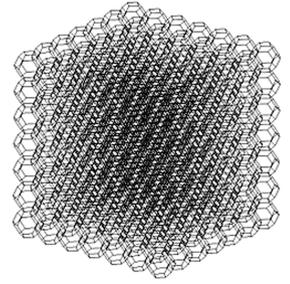


图 2 7 倍胞体结构

Fig. 2 The proposed cubic model for three-dimensional closed-cell foams

2.2 有限元分析

应用 LS-DYNA970 计算了不同冲击速度下泡沫材料的动态响应。有限元模型如图 3 所示,共有 343 个胞体,划分单元 120 528 个。每个胞体的胞壁都采用壳单元,拥有相同的单元厚度。采用 Belytscho-Lin-Tsay 算法计算壳单元^[18]。

材料模型采用双线性应变强化模型,机体材料取铝的材料参数:弹性模量 $E_s = 68.97 \text{ GPa}$,屈服应力 $\sigma_s = 76 \text{ MPa}$,强化模量 $E_{tan} = 0.6897 \text{ GPa} = E_s/100$,泊松比 $\nu_s = 0.35$,密度 $\rho_s = 2.7 \text{ t/m}^3$ 。为了研究应变强化对结构动态响应的影响,还计算了另外两个强化模量值, $E_{tan} = E_s/20$ 和 $E_{tan} = E_s/5$ 。同时认为机体材料为率无关材料。计算中为了研究相对密度的影响共考虑了以下几个值: $\rho/\rho_s = 0.05, 0.10, 0.15, 0.25, 0.30, 0.35$ 。

质量为 9.12 kg 的钢板以一定的速度压缩泡沫时(如图 4),钢板与泡沫之间产生相互作用,通过 DYNA 中的罚函数接触算法实现,在运动钢板与泡沫之间以及泡沫与支撑钢板之间定义自动面对面接触。泡沫变形后孔壁之间也可能发生类似的接触,采用自动单面接触完成。所有接触面之间均被认为是光滑的(即不计摩擦)。支撑端钢板被完全约束(即对应的单元中所有节点的六个自由度都被约束)。

2.3 相对密度的确定

泡沫结构的相对密度

$$\rho = \rho^* / \rho_s = \left(\sum_{i=1}^N A_i t \right) / V_0 \quad (1)$$

式中: ρ^* 是泡沫的密度, ρ_s 是组成泡沫的机体材料的密度, A_i 是泡沫材料每个孔壁的面积, N 是立方体块中孔壁的个数, V_0 为立方体的体积, t 是泡沫孔壁的厚度。

2.4 平台力的确定

图 5 为通过有限元计算得到的某一冲击速度下的力-位移曲线,清楚地描述出泡沫材料受压缩后变形的三个不同区域,即瞬态响应区域、较长的坍塌平台区域以及密实化区域。在坍塌平台区域的冲击力 F 可以被定义为平台力^[16]

$$F_p = \frac{1}{u - u_0} \int_{u_0}^u F(x) dx \quad (2)$$

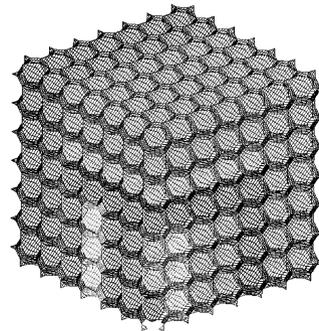


图 3 泡沫有限元模型

Fig. 3 FEM of foams

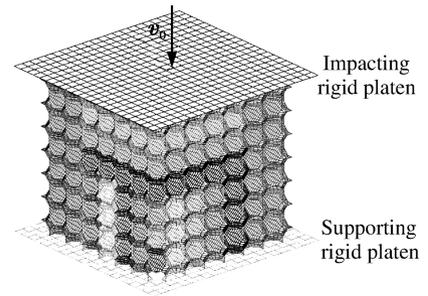


图 4 加载示意图

Fig. 4 Schematic of loading

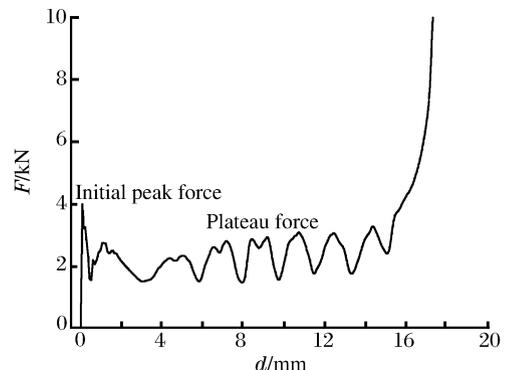


图 5 力-位移曲线

Fig. 5 Force varying with the displacement

式中: u 是泡沫受压面相对于初始位置的垂直位移, u_0 是冲击力达到第一个峰值时的值。在动态压缩过程中, 由于 u_0 非常小, 因此在这里可以假设为零。根据式(2), 可以得到

$$W(u) = \int_0^u F(x) dx = F_p u + C_1 \quad (3)$$

式中: $W(u)$ 是外力功。式(3)可以用来计算平台力 F_p 和积分常数 C_1 。而外力功可以通过积分 $F-u$ 曲线得到。

3 计算结果与分析

3.1 有限元模型的可靠性分析

为了验证有限元模型的可靠性, 首先对已建立的泡沫模型进行准静态加载分析, 计算泡沫材料的弹性模量与机体材料弹性模量的比值与相对密度之间的关系, 并与文献结果比较。加载分别沿直角坐标轴的三个相互垂直的方向, 得到

$$E_x^*/E_s = 0.295(\rho^*/\rho_s)^2 + 0.317(\rho^*/\rho_s)$$

$$E_y^*/E_s = 0.316(\rho^*/\rho_s)^2 + 0.321(\rho^*/\rho_s)$$

$$E_z^*/E_s = 0.323(\rho^*/\rho_s)^2 + 0.315(\rho^*/\rho_s)$$

以上三式表明, 基于十四面体的泡沫材料模型趋于各向同性, 而且与文献[19]的计算结果 $E^*/E_s = 0.32[(\rho^*/\rho_s)^2 + (\rho^*/\rho_s)]$ 基本相同。

图6给出了名义应力-应变关系, 同时给出了文献[1]中的 $\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = 0.44(\rho^*/\rho_s)$, 其中 $\rho^*/\rho_s = 0.05$, $\sigma_{ys} = 76$ MPa, 其应力值为 1.672 MPa, 与有限元模拟值比较接近。由此可见本文建立的模型是可靠的。鉴于各向同性的性质, 下文仅作 z 方向的分析。

3.2 冲击速度的影响

应用五个不同的冲击速度压缩泡沫模型, 分别是 8.5、17.0、34.0、68.0、136.0 m/s, 相对密度为 0.1。D. Ruan 等^[13]曾用这几个值来研究蜂窝铝的动态冲击行为; K. Li 等^[16]也用他们来研究二维 Voronoi 随机模型的动态冲击力学性能。另外, 本文中采用的速度值还覆盖了美国 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) 车辆碰撞实验推荐的速度范围^[20]。

3.2.1 变形模态

图7(a)为钢板以 8.5 m/s 冲击时泡沫材料的变形模态。图中显示, 开始时泡沫与钢板的接触面附近出现很小的变形, 而模型中部几乎没有变化; 当应变达到 0.3 左右的时候, 模型中间区域开始出现局部变形带(即塑性坍塌), 此时两端钢板与泡沫的接触表面仍没有太多变化, 随着应变的增长, 变形带向两端扩展, 应变达到 0.5 左右时, 模型两端开始变形, 也出现坍塌折叠。与二维模型压缩^[13,16]不同的是, 泡沫被压缩的过程中始终没有看到“X”形或“V”形模态。以 17.0 m/s 的速度压缩时(见图7(b)), 泡沫的变形模态略有变化, 应变较小时与冲击速度为 8.5 m/s 时类似(即应变达到 0.3 左右时出现锯齿形折叠坍塌), 但变形带的出现相比速度为 8.5 m/s 时要靠近冲击端, 随着应变的继续增长这种趋势越加明显, 之后应变达到 0.9 时, 变形带出现了明显的倾斜。图7(c)描述的是冲击速度为 34.0 m/s 时泡沫模型的变形模态, 应变较小(如 $\epsilon < 0.35$)时, 模型基本上看不到变化, 当应变达到 0.35 时(如图7(c)中 $T=0.2$ ms, $\epsilon=0.35$ 所示), 模型中间区域并没有很快出现变形带, 应变增至 0.5 左右时在冲击端出现了较多折叠, 模型其他部位没有明显特征, 随着应变的急剧增长, 坍塌区域从压缩端向支撑端传播, 应变达到 0.9 左右时折叠线(变形带)没有倾斜。图7(d)~(e)给出了高速冲击(速度分别为 68.0 m/s 和 136.0 m/s)时泡沫模型的变形模态。相同的应变下, 随着冲击速度的变化, 变形模态发生了较大的变化, 如两图中应变为 0.35 时, 图7(e)中靠近压缩端出现了较多的锯齿形坍塌折叠, 应变继续增大时, 这种状态越加明显, 类似于二维模拟中高速冲击时出现的“1”形模态^[11,16]。

综合以上分析, 钢板低速($v=8.5$ m/s)冲击时, 加载过程类似于准静态实验, 泡沫模型的变形比较均匀, 塑性坍塌带从中间区域向两端“慢慢”传播; 中速($v=17.0, 34.0$ m/s)冲击时, 模型变形加快, 不再均匀, 冲击带开始从压缩端附近出现并向两端传播; 随着冲击速度的进一步增大, 受到高速($v=68.0, 136.0$ m/s)冲击时, 因为模型冲击端接触钢板的时间相比中速和低速冲击快很多, 在其他区域来不及变形时接触面附近已出现塑性坍塌, 形成“1”形向支撑端传播。总之, 冲击速度对变形模态有较大影响。

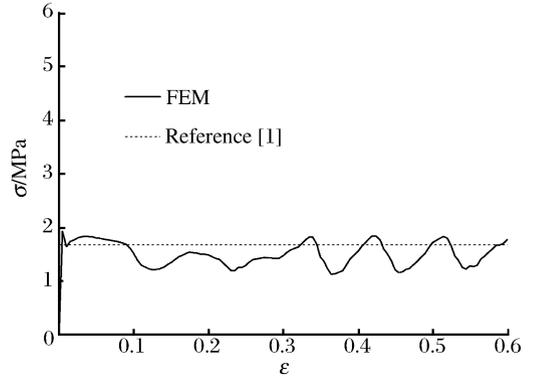


图6 准静态加载下的应力-应变关系

Fig. 6 Stress varying with strain under quasi-static crushing

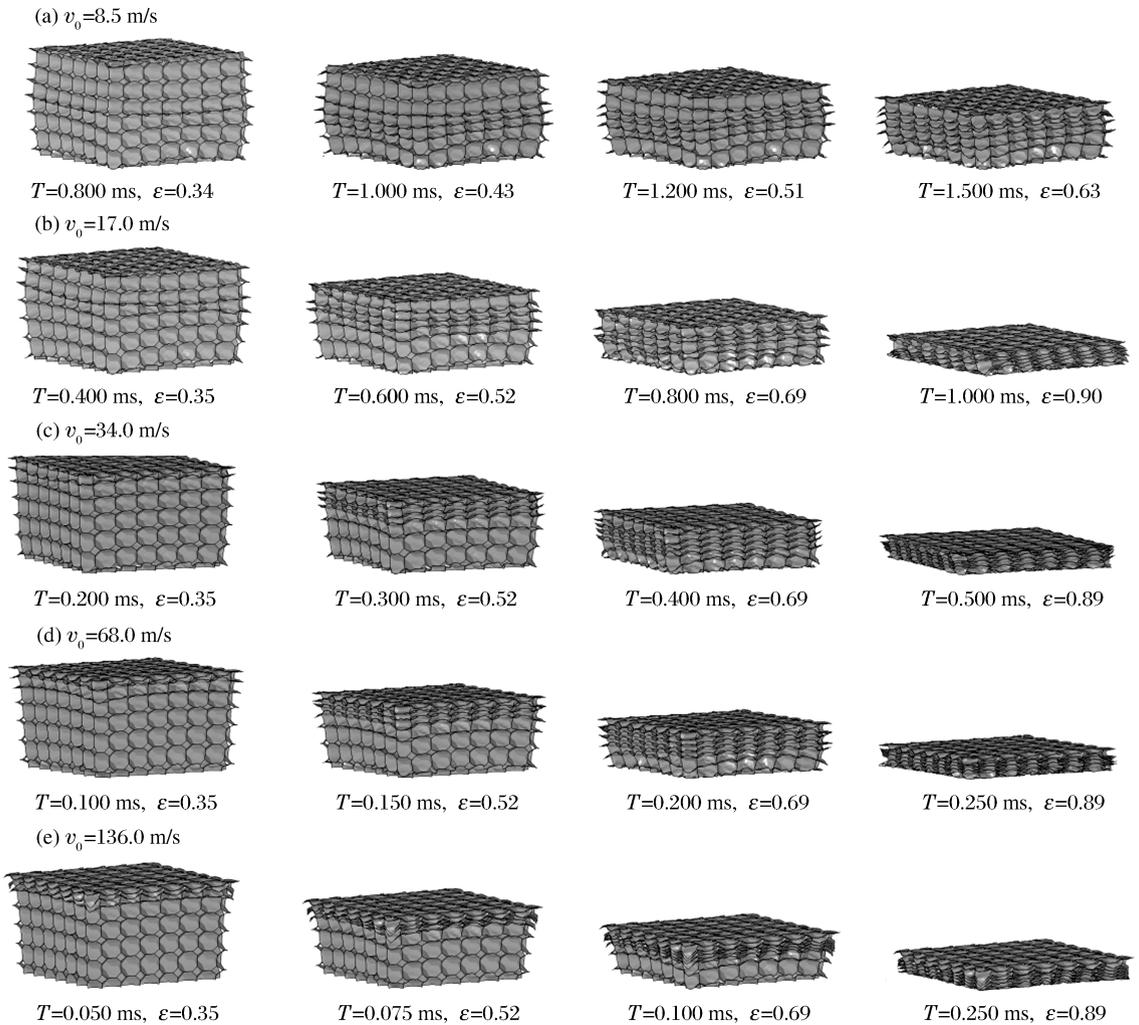


图 7 不同冲击速度下变形模式的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of deformation modes at different impacting velocities

3.2.2 坪应力和密实化应变能

坪应力是衡量能量吸收能力的另一个重要参数。冲击速度对坪应力的影响是一项重要的研究内容,众多学者对其说法不一。W. J. Stronge 等^[21]对冲击载荷下具有周期结构的多孔材料变形机制及其力学性能进行了研究,发现在冲击速度为 30 m/s 时,其动态破坏强度比准静态的提高了 20%~70%。而 V. S. Deshpande 等^[22]提出不同的观点,他们利用 SHPB 实验技术和直接撞击实验技术研究了高应变率(约 $5\,000\text{ s}^{-1}$)下 Alulight(闭孔)和 Duocel(开孔)两种铝合金泡沫材料的动力特性,发现这些材料的静动态特性非常相似,其坪应力对应变率并不敏感。K. A. Dannemann 等^[23]在应变率为 $400\sim 2\,500\text{ s}^{-1}$ 下对闭孔 Alporas 和开孔 Duocel 泡沫铝材料进行了动态特性研究,得到在开孔材料中与文献[22]相同的结论,而在闭孔材料中发现了应变率敏感效应(特别是当相对密度高于 15% 时)。本文中应用有限元方法研究了不同冲击速度对坪应力的影响(如图 8(a)所示)。发现随钢板冲击速度的增大坪应力随之增加,中低速冲击时两者之间大约呈线性关系,曲线斜率较小;高速冲击时,随着速度的增大,坪应力变化加快。由此可见,组成泡沫铝的机体材料对应变率不敏感,而闭孔泡沫材料中坪应力对速度敏感。

图 8(b)给出了不同冲击速度对密实化应变能的影响。图中可见,低速冲击时,速度的变化对能量吸收的影响较小(如速度从 8.5 m/s 增加至 17.0 m/s 时,能量变化仅为 $4\text{ N}\cdot\text{m}$);而中速冲击时,能量的变化明显加快(如速度从 17.0 m/s 增至 34.0 m/s,能量变化为 $24\text{ N}\cdot\text{m}$);当泡沫受高速冲击时,能量发生巨大变化(如速度从 34.0 m/s 增至 68.0 m/s,能量变化为 $90\text{ N}\cdot\text{m}$);特别当受到很高的速度压缩时,能量变化比较剧烈,速度从 68.0 m/s 增至 136.0 m/s,能量变化为 $437\text{ N}\cdot\text{m}$ 。应变能与冲击速度大约呈二次曲线变化,可以用下式拟合: $U_d = 0.034\,1v^2 - 0.579\,5v + 273.31$,其中, U_d 、 v 的单位分别为 $\text{N}\cdot\text{m}$ 、 m/s 。因此,随着冲击速度的增大,能量吸收能力越强,且呈二次抛物线形。

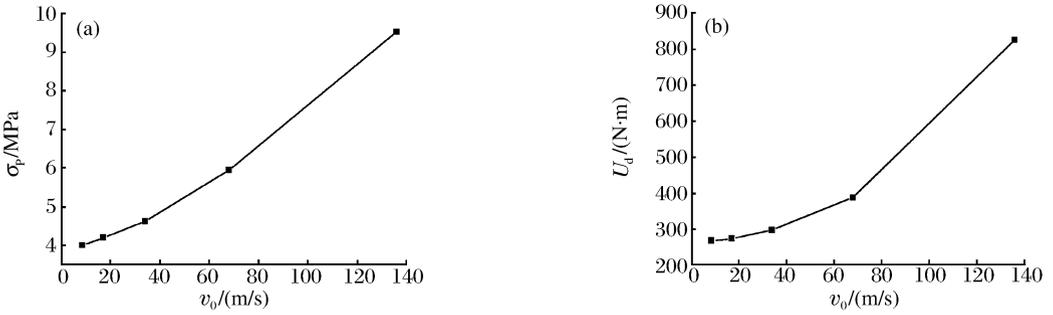


图 8 不同冲击速度下的模拟结果

Fig. 8 Simulation results at different impacting velocities

3.3 相对密度的影响

泡沫材料的性能主要取决于相对密度,其权重超出所有其他影响因素^[1]。随着相对密度的增大,泡沫的强度和刚度增强,坪应力逐渐增大,图 9(a)所示。坪应力随着相对密度基本呈线性增长,可以用下式定量描述相对密度对坪应力的影响程度: $\sigma_p = 62.674R - 1.5109$,其中, σ_p 的单位为 MPa。

根据 K. Li 等^[16]的计算表明,二维情况下密实化应变能随着相对密度的增加而不断增大;本文中通过三维闭孔泡沫的模拟得到了不同的结论。图 9(b)是密实化应变能随着相对密度变化的曲线。图中表明,当相对密度小于 0.3 时,应变能随相对密度的增大而增大,但当相对密度较大(即超过 0.3)时,趋势发生逆转,随相对密度的增大,应变能减小。两者之间的变化关系可以通过下式拟合: $U_d = -6890.2R^2 + 4098.8R - 57.976$,其中, U_d 的单位为 N·m。因此,选择合适的最大化能量吸收的相对密度在工程应用中很重要。

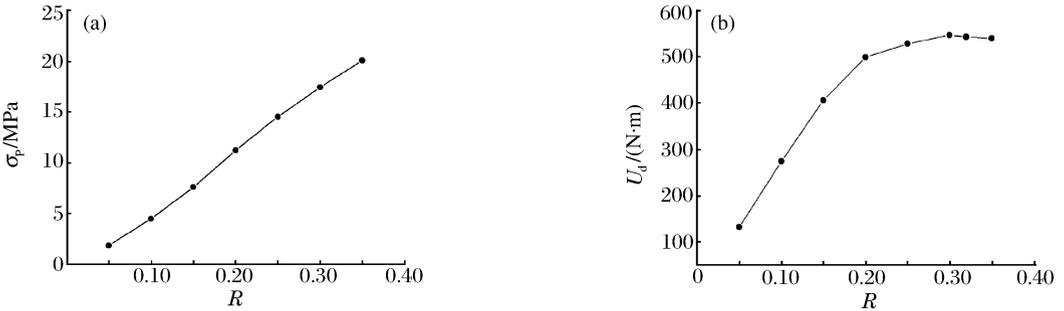


图 9 不同相对密度下的模拟结果

Fig. 9 Simulation results at different relative densities

3.4 机体材料应变强化的影响

组成泡沫的机体材料的性能对泡沫材料的力学性能也有重要作用。图 10 为机体材料的应变强化对坪应力及密实化应变能的影响。不难发现,坪应力随 E_{tan}/E_s (机体材料强化模量与弹性模量的比值)线性变化,对密实化应变能的分析也得到同样的结论,即密实化应变能与 E_{tan}/E_s 呈线性关系。组成泡沫的固体材料的强化增加了胞壁的刚度和强度,也就提升了整个泡沫的抵抗变形和破坏的能力,从而对于坪应力而言随着固体材料的强化的增强会而越大,泡沫吸收能量的能力也随之增强。

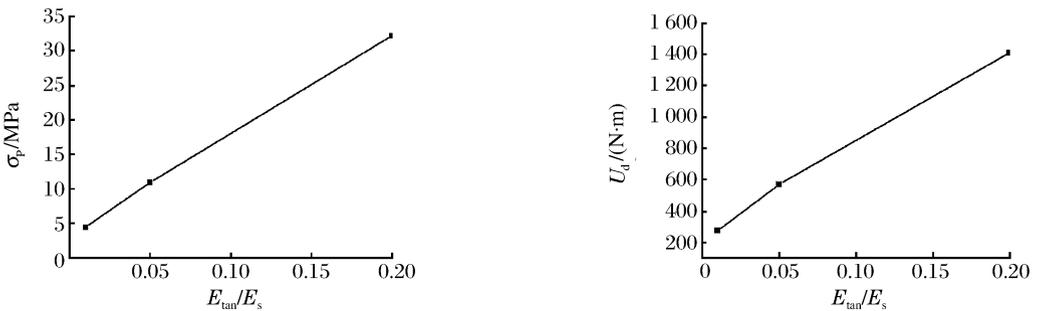


图 10 应变强化的影响

Fig. 10 Effects of strain hardening

4 结 论

基于由十四面体模型,应用 LS-DYNA970 对三维闭孔泡沫材料的动态力学性能进行了分析。模拟研究了五种冲击速度对泡沫模型变形模态和力学性能的影响,相对密度对泡沫材料能量吸收能力和坪应力的影响。还分析了组成泡沫的固体材料的应变强化对密实化应变能及坪应力的影响。根据分析可得出下面的结论:

(1)冲击速度对泡沫模型的模态影响较大,当以低速压缩时,塑性坍塌首先从中间开始,而且随着进一步压缩,变形带向两端扩展;中速冲击时,变形带首先出现在靠近压缩端区域,之后向两边逐渐扩展;高速冲击时,冲击端出现“1”形,然后逐渐向支撑端压缩。

(2)冲击速度和相对密度对密实化应变能的影响均可拟合为二次曲线,有利于定量描述能量吸收。当相对密度小于 0.3 时,随着相对密度的增加能量吸收效果越好;当相对密度大于 0.3 时,继续增加相对密度反而降低了泡沫材料的能量吸收效果。机体材料的应变强化对应变能也有明显的影响,两者基本呈线性关系。

(3)冲击速度、相对密度及机体材料的应变强化分别与坪应力之间呈线性关系。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997:19.
- [2] Silva M J, Gibson L J. The effect of non-period microstructure and defects on the compression strength of two-dimensional cellular solids[J]. International Journal of Mechanics Sciences, 1997,39:549-563.
- [3] Warren W E, Kraynik A M. Linear elastic behavior of a low-density Kelvin foam with open cells[J]. Journal of Applied Mechanics, 1997,64:787-794.
- [4] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of imperfections on the yielding of two dimensional foams[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999,47:2235-2272.
- [5] Zhu H X, Hobdell J R, Windle A H. Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams[J]. Acta Materialia, 2000,48:4893-4900.
- [6] Zhu H X, Hobdell J R, Windle A H. Effects of cell irregularity on the elastic properties of 2D Voronoi honeycombs [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001,49:857-870.
- [7] Roberts A P, Garboczi E J. Elastic moduli of model random three-dimensional closed-cell cellular solids[J]. Acta Materialia, 2001,49:189-197.
- [8] Roberts A P, Garboczi E J. Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002,50:33-55.
- [9] 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 Ying-long, LU Zi-xing. 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.
- [10] Zhu H X, Thprpe S M, Windle A H. The effect of cell irregularity on the high strain compression of 2D Voronoi honeycombs[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005,37:1061-1078.
- [11] 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 Shang-lu, LU Zi-xing. Finite element analysis for the elastic modulus of open-cell foams based on a tetrakaid-ecahedron model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006,28(1):108-112.
- [12] Li K, Gao X L, Subhashb G. Effects of cell shape and strut cross-sectional area variations on the elastic properties of three-dimensional open-cell foams[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006,54:783-806.
- [13] Ruan D, Lu G, Wang B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs: a finite element study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(2):161-182.
- [14] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams: “Shock” theory and comparison with experimental data and numerical models[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53:2206-2230.
- [15] ZHENG Zhi-jun, YU Ji-lin, LI Jian-rong. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,32:650-664.

- [16] Li K, Gao L X, Wang J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007,44:5003-5026.
- [17] 石上路. 泡沫塑料失效问题的研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2004.
- [18] LS-DYNA970 keyword user's manual[Z]. Livermore Software Technology Corporation, 2003:1370-1378.
- [19] Simone A E, Gibson L J. Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams[J]. *Acta Materialia*, 1998,46(6):2139-3150.
- [20] Ross H E, Sicking D L, Zimmer R A, et al. National cooperative highway research program report 350: Recommended procedures for safety performance evaluation of highway features[M]. Washington DC: National Academy Press, 1993.
- [21] Stronge W J, Shin V P W. Micro-dynamics of crushing in cellular solids[J]. *Journal of Engineering Material and Technology*, 1988,110:110-185.
- [22] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000,24:277-298.
- [23] Dannemann K A, Lankford J J. High strain rate compression of closed-cell aluminum foams[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000,293:157-164.

Finite element analysis of dynamic crushing behaviors of closed-cell foams based on a tetrakaidecahedron model

SONG Yan-ze, LI Zhi-qiang, ZHAO Long-mao*

(*Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: The cellular structures of closed-cell foams were modeled as tetrakaidecahedrons and their dynamic crushing behaviors were simulated by the finite element method. In the numerical simulation, all the tetrakaidecahedrons have the same sizes. Numerical calculations were carried out to investigate principally effects of different impacting velocities, relative densities and strain hardening moduli of solid materials on deformation modes, plateau stress and densification strain energy. Energy absorption capacities of foams were comprehensively described. Numerical results show that deformation modes are greatly affected by impacting velocity. Especially when the foams are subjected to high-velocity impact, the I-shaped mode can be observed near the impacting rigid platen, and this deformation mode propagates towards the supporting rigid platen. Relative density contributes to energy absorption capacity significantly. Densification strain energy varies parabolically with relative density. In addition, there is a linear relationship between the three parameters including impact velocity, relative density and ratio of hardening modul to elastic modul of solid material and the plateau stress respectively.

Key words: solid mechanics; dynamic crushing behavior; finite element analysis; foams; tetrakaidecahedron

* Corresponding author: ZHAO Long-mao
Telephone: 86-351-6010560

E-mail address: zhaolm@tyut.edu.cn