

多孔材料填充薄壁结构吸能的相互作用效应¹⁾

宋宏伟^{*,†,2)} 虞 钢^{*} 范子杰[†] 王青春[†]

^{*}(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

[†](清华大学汽车工程系汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 研究多孔材料填充薄壁结构的相互作用效应产生的机理, 并建立了表征模型. 以泡沫铝填充帽形结构为例, 发现压溃的填充物分为致密区、过致密区和未变形区 3 个区域. 基于理想可压缩假设建立了填充多孔材料分析模型, 获得各区域体积变化和等效应变等关系; 结合薄壁结构超叠缩单元模型, 对填充结构各组分能量吸收进行了拆分. 研究表明, 薄壁结构的吸能略有增加, 多孔材料的吸能增加 40% 左右. 过致密区的形成是相互作用效应的主要原因.

关键词 多孔材料, 薄壁结构, 相互作用, 能量吸收, 耐撞性

中图分类号: O344 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2005)06-0697-07

引 言

普通的实体结构在塑性屈服阶段体积不可压缩, 在单轴压缩下以较大的侧向应变保持体积守恒, 此时泊松比为 0.5^[1]. 多孔材料发生塑性屈曲或塌陷的胞壁可填充到周围的胞孔中, 轴压下体积可大规模压缩, 无侧向应变或侧向应变极小, 泊松比近似为零.

典型的多孔材料如泡沫铝具有密度小、比吸能高、可回收等优点, 在结构耐撞性等领域有广泛的应用前景. 但是, 泡沫铝自身抗拉、压、弯、扭等载荷的能力较差, 易发生断裂破坏或有碎屑产生, 不适于单独用作承载结构^[2]. 近年来, 研究者将多孔材料与薄壁结构相结合, 获得了满意的吸能效果^[3~7]. 其中一个重要现象就是相互作用效应 (interaction effect), 即: 填充结构的吸能大于相同加载条件下独立的多孔材料和独立的薄壁结构的吸能之和. Santosa 等人^[3] 和 Hanssen 等人^[4] 分别采用有限元分析和实验归纳等方法, 研究了含相互作用效应函数的压溃力经验表达式. 上述仅有的相关研究不能有效地对填充结构的吸能进行拆分, 也没有探讨相互作用效应产生的机制. 本文以泡沫铝填充薄壁帽形结构为例, 基于多孔材料的理想可压缩假定并结合薄壁结构超叠缩单元模型, 建立起填充结构能量吸收拆分模型, 定量讨论了相互作用效应.

1 实验研究

采用低碳钢的单帽和双帽薄壁结构, 其截面如图 1 所示, 其中 $a = b = 50 \text{ mm}$, $f = 15 \text{ mm}$, $t = 1.5 \text{ mm}$. 熔融法制备的闭孔泡沫铝的密度为 0.37 g/cm^3 , 切

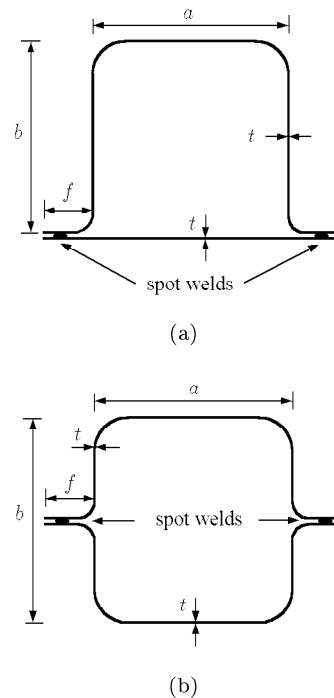


图 1 单帽结构 (a) 与双帽结构 (b) 截面图

Fig.1 Cross-section of top-hat (a) and double-hat (b) sections

2004-06-28 收到第 1 稿, 2005-04-18 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10502049) 和中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室基金资助项目.

2) E-mail: songhw@tsinghua.edu.cn

割成 50 mm×50 mm×200 mm 的柱体填充到帽形结构中或单独进行测试. 长度均为 200 mm 的空心结构、填充结构和泡沫铝分别在 Instron 材料试验机上以 5 mm/min 的准静态速度沿轴向 (长度方向) 压缩 120 mm.

从图 2 的载荷 - 位移曲线可直观地看到, 阴影区域的面积即为相互作用效应引起的吸能增加. 这种效应可用平均载荷或能量吸收表示为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{filled}} &> P_{\text{hat}} + P_{\text{foam}} \\ E_{\text{filled}} &> E_{\text{hat}} + E_{\text{foam}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, P_{filled} 和 E_{filled} 分别为填充结构的平均载荷和吸能, P_{hat} 和 E_{hat} 分别为空心帽形结构的平均载荷和吸能, P_{foam} 和 E_{foam} 分别为独立的泡沫铝的平均载荷和吸能.

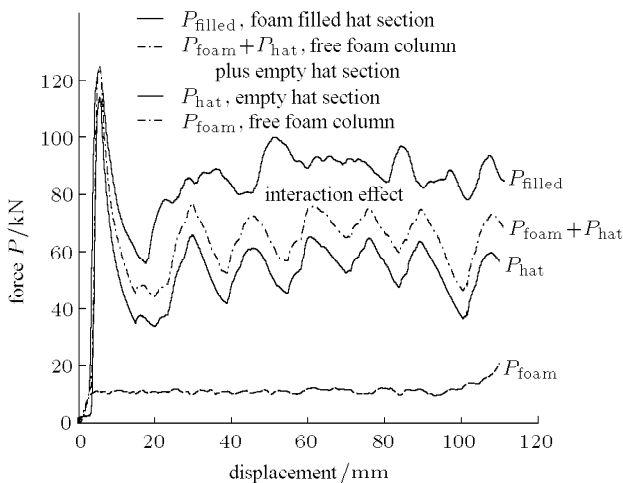


图 2 泡沫铝填充帽形结构的相互作用效应

Fig.2 Interaction effect in foam-filled hat section

图 3 表明泡沫铝单轴压缩历程可分为两个阶段: 平台压缩阶段和致密压缩阶段. 前者保持基本恒定的平台应力 σ_p (plateau stress); 当达到致密化应变 ϵ_c (densification strain) 后, 应力迅速上升. 可将应力 - 应变关系写成分段函数, 其中致密压缩阶段可用指数函数拟合

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} \sigma_p, & \text{当 } \epsilon \leq \epsilon_c \\ F(x)\sigma_p, & \text{当 } \epsilon > \epsilon_c \end{cases} \quad (2)$$

其中 $F(x) = 1 + a_0 e^{x/b_0}$

其中, a_0 和 b_0 是拟合系数, σ_p 是泡沫铝密度的函

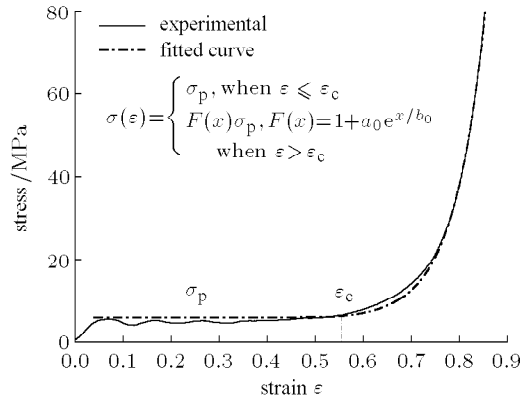


图 3 泡沫铝单轴压缩应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of uniaxial crushed aluminum foam

数 [8]. 泡沫铝等多孔材料可认为是理想可压缩 (perfectly compressible) 的. 所谓理想可压缩, 是指多孔材料在塑性区的泊松比为零, 则单向压缩时另外两个主应变为零, 压缩方向的应变等于体积变化率 [9]. 此时的能量吸收率为

$$\dot{E}_f = \int_{V_0} \sigma(\epsilon) \dot{\epsilon} dV = \int_{V_0} \sigma(V) \dot{V} dV \quad (3)$$

其中, $\dot{\epsilon}$ 和 \dot{V} 分别为单轴应变率和体积应变率, V_0 为原始体积. 若多轴压缩下仍满足式 (3), 则可定义等效应变

$$\epsilon_f = 1 - \frac{V_f}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (4)$$

其中 V_f 和 ΔV 分别为剩余体积和体积变化. 式 (4) 相当于认为结构内的体积应变是均匀的. 对式 (3) 积分, 则泡沫铝的能量吸收可表示为平均应力与体积变化之间的关系

$$E_f = \bar{\sigma} \Delta V \quad (5)$$

其中 $\bar{\sigma}$ 为 ϵ_f 下的平均应力.

研究发现, 压缩后的填充泡沫铝可分为 3 个典型区域: A 致密区; B 过致密区; C 未变形区, 见图 4 破坏试件剖面照片. 未变形区远离压缩端, 泡沫铝基本未发生变形, 即 $\Delta V \cong 0$, 因此无能量吸收. 致密区在填充物的中部, 压溃的胞壁呈扁平状沿水平方向排列, 说明主要受沿压缩方向的载荷作用, 可近似为单轴等截面压缩. 过致密区分布在周边, 除受轴压载荷作用外, 还受到管壁的内向挤压作用而发生侧向收缩, 实际处于多向载荷状态, 胞孔被致密压缩, 局部应变极大. 轴向和周向压缩共同作用的结果使得过致密区的 ΔV 和 ϵ_f 大幅增加.

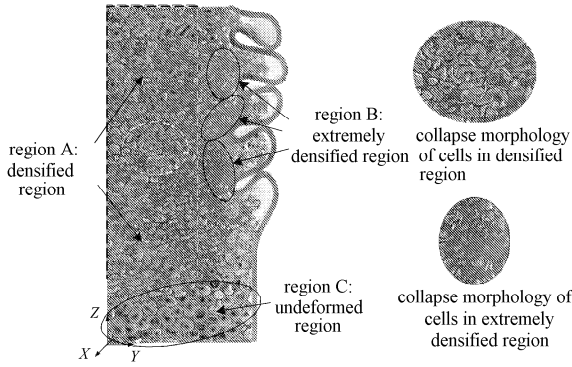


图 4 填充泡沫铝压溃形貌

Fig.4 Collapse profile of foam filler in thin-walled structure

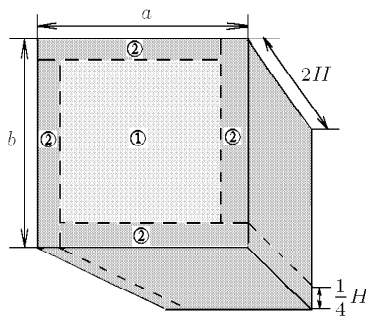
2 填充结构能量吸收拆分模型

为了探求相互作用效应产生的机理，首先要对填充结构各组分的吸能进行拆分，然后与相应的独立结构进行比较，从而评价各组分对相互作用效应的贡献。根据式 (5)，多孔材料的吸能仅与体积变化和平均应力有关。因此，在求解填充物吸能时只需建立与实际体积变化关系等价的模型即可，对破坏模式可作适当的等效和简化。参考图 4，采取平均化等效，可认为在一个叠缩周期内薄壁结构的每一条边均向内侵入 $H/4$ (H 为叠缩周期的半波长)，如图 5 所示。可将泡沫铝的变形区域分两个部分进行分析：①等截面压缩区域，即致密区；②周边挤压区域，即过致密区。

等截面压缩区域是截面为 $(a-H/2)(b-H/2)$ 的柱体 (本研究中 $a=b$)，可认为此区域的应变是均匀分布的，则剩余体积 V_{f1} ，体积变化 ΔV_1 和等效应变 (或体积应变) ε_{f1} 分别为

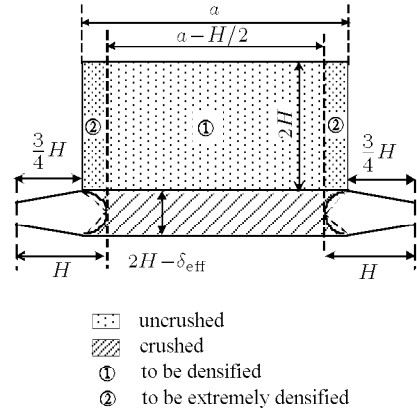
$$V_{f1} = \frac{1}{4}(2H - \delta_{eff})(2a - H)^2 \quad (6)$$

$$\Delta V_1 = \frac{1}{4}\delta_{eff}(2a - H)^2 \quad (7)$$



(a) 俯视图

(a) Bird view



(b) 侧视图

(b) Side view

图 5 填充泡沫铝压缩模型图

Fig.5 Analytical model for collapse behavior of foam filler

$$\varepsilon_{f1} = \frac{\Delta V_1}{\Delta V + V_{f1}} = \frac{\delta_{eff}}{2H} = \kappa \quad (8)$$

其中 $\delta_{eff} = 2\kappa H$ 为有效压缩距离^[10]， κ 为系数。周边挤压区域 (或过致密区域) 的应变很大，将圆弧处近似为三角形，则此区域的剩余体积 V_{f2} 、体积变化 ΔV_2 和体积应变 ε_{f2} 分别为

$$V_{f2} = \frac{1}{8}H(2H - \delta_{eff})(4a - H) \quad (9)$$

$$\Delta V_2 = \frac{1}{8}H(4a - H)(\delta_{eff} + 2H) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{f2} = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_2 + V_{f2}} = \frac{\delta_{eff} + 2H}{4H} = \frac{1 + \kappa}{2} \quad (11)$$

κ 的经验值在 0.68~0.71 之间。由式 (8) 和 (11) 可得致密区的等效应变 ε_{f1} 在 0.68~0.71 之间，过致密区的等效应变 ε_{f2} 在 0.84~0.86 之间。本文在以下的分析中采用 $\kappa = 0.70$ 。

由式 (2) 可获得泡沫铝在某一等效应变 ε_f 下的平均应力为

$$\bar{\sigma}(\varepsilon_f) = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \sigma_p + \frac{1}{\varepsilon_f} a_0 b_0 \sigma_p (e^{\varepsilon_f/b_0} - e^{\varepsilon_c/b_0}) \quad (12)$$

将致密化应变的经验值 $\varepsilon_c = 0.55$ ，推导得的 $\varepsilon_{f1} = 0.70$ ， $\varepsilon_{f2} = 0.85$ ，拟合得的参数 $a_0 = 2.3 \times 10^{-5}$ ， $b_0 = 0.06411$ 代入式 (12)，可获得致密区和过致密区平均应力分别为 $\bar{\sigma}(\varepsilon_{f1}) = 1.102\sigma_p$ 和 $\bar{\sigma}(\varepsilon_{f2}) = 1.993\sigma_p$ 。尽管应变仅差 0.15，过致密区的平均应力却为致密区的 1.8 倍。生成一个叠缩泡沫铝填充物的能量吸收为

$$E_f = \bar{\sigma} \Delta V = \bar{\sigma}(\varepsilon_{f1}) \Delta V_1 + \bar{\sigma}(\varepsilon_{f2}) \Delta V_2 \quad (13)$$

将式 (7) 和式 (10) 代入式 (13) 可得泡沫铝的能量吸收

$$E_f = \sigma_p [C_1(2a - H)^2 + C_2H(4a - H)] \cdot 2H \quad (14)$$

系数 $C_1 = 0.193, C_2 = 0.424$.

实验观察发现, 填充多孔材料后薄壁结构的基本破坏模式不变, 只是由于填充材料限制内向位移的作用使得薄壁结构的叠缩数日增多、半波长缩短. 对于空心帽形结构, White 等人^[11]建立了简化的超叠缩单元 (superfolding element) 模型, 压溃 $2H$ 长度帽形结构的吸能为

$$E_h = M_0 \left(A_1 \frac{r}{t} + A_2 \frac{L}{H} + A_3 \frac{H}{r} \right) 2H \quad (15)$$

其中, $M_0 = \sigma_0 t^2 / 4$ 为全塑性弯矩, σ_0 为屈服应力; r 为扭转区域的转角半径; $L = 2a + 2b + 4f$. 对于单帽结构, $A_1 = 17.76, A_2 = \pi, A_3 = 9.184$; 对于双帽结构, $A_1 = 35.52, A_2 = \pi, A_3 = 18.368$. 填充结构的能量吸收为多孔材料填充物与空心薄壁结构之和

$$E_{filled} = E_h + E_f \quad (16)$$

将式 (14) 和式 (15) 代入式 (16), 可得填充结构在一个叠缩周期的平均压缩载荷

$$\bar{P}_f = \left\{ M_0 \left(A_1 \frac{r}{t} + A_2 \frac{L}{H} + A_3 \frac{H}{r} \right) + \sigma_p [C_1(2a - H)^2 + C_2H(4a - H)] \right\} \frac{2H}{\delta_{eff}} \quad (17)$$

由于填充了多孔材料, 薄壁结构的叠缩数日和半波长也发生了改变, 式 (17) 中填充结构的半波长 H 和 r 是待定的量. 当 $\partial \bar{P}_f / \partial H = 0, \partial \bar{P}_f / \partial r = 0$ 时能量最小, 即

$$2\sigma_p(C_2 - C_1)H^3 - 4\sigma_p a(C_2 - C_1)H^2 - M_0 \left(\frac{A_1 A_3 H^3}{t} \right)^{0.5} + M_0 A_2 L = 0 \quad (18)$$

3 结果与讨论

将几何参数 a, L, t ; 材料参数 σ_0, σ_p ; 系数 A_1, A_2, A_3, C_1, C_2 代入式 (18), 其中低碳钢的屈服应力 σ_0 为扯断应力 σ_u 的 0.92 倍, 即 $\sigma_0 = 0.92\sigma_u$ ^[12]. 编制迭代程序, 可得泡沫铝填充结构的半波长: 填充单帽结构为 $H = 15.24 \text{ mm}$, 填充双帽结构为 $H = 10.57 \text{ mm}$. 将 H 和 r 分别代入式 (17) 即可得到帽形结构平均载荷. 表 1 为模型分析的主要结果与试验结果的比较. 就填充结构的平均载荷而言, 模型结果与试验结果非常吻合 (单帽和双帽的误差分别为 5.3% 和 1.6%). 同时, 填充结构半波长比空心结构的要小, 这也与试验规律相符.

表 1 所列模型可将填充结构各组分的能量吸收拆分, 与相应的独立结构的比较即为对相互作用效应的贡献, 见表 2. 其中, 独立的泡沫铝平均载荷的

表 1 模型分析结果与试验结果比较

Table 1 Comparison of analytical results with experimental

		Mean crushing force of empty hat section	Mean crushing force of filled hat section	Half wavelength of empty hat section	Half wavelength of filled hat section
		\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	H/mm	H/mm
top-hat	experimental	36.2	57.6	23	18
	analytical	40.8	60.67(error 5.3%)	18.3	15.24
double-hat	experimental	56.0	82.8	18	16
	analytical	64.8	84.13(error 1.6%)	11.5	10.57

表 2 模型推导获得的各组分对相互作用效应的贡献

Table 2 Contribution of each component of foam-filled structure to interaction effect, theoretical analysis

Individual structure			Component of filled structure			Contribution to interaction effect			
empty hat section	free foam column	sum	hat section	filled foam	total	hat section	foam	overall	
\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	\bar{P}/kN	$\bar{P}/\text{kN}(\%)$	$\bar{P}/\text{kN}(\%)$	$\bar{P}/\text{kN}(\%)$	
top-hat	40.8	12.24	52.32	42.92	17.75	60.67	2.12/(5.2)	5.51/(45.0)	8.35/(16.0)
double-hat	64.8	12.24	77.04	67.67	16.45	84.13	2.87/(4.4)	4.21/(34.4)	7.09/(9.2)

求解是通过式 (12) 获得 $\bar{\sigma}(0.6) = 1.0155\sigma_p$, 再乘以横截面积即得. 填充后帽形结构平均载荷的增加分别为 5.2%(单帽) 和 4.4%(双帽); 而泡沫铝平均载荷的增加分别为 45.0% 和 34.4%. 可见, 泡沫铝对相互作用效应的贡献更为显著.

根据式 (17), 可得填充结构的半波长随泡沫铝平台应力增大而缩短, 平均压溃力随平台应力增加而呈线性增大的规律, 见图 6. 此外, 双帽的半波长比单帽的小, 而压溃力要大. 同样, 也可以分析几何参数 (a, L, t) 、材料参数 σ_0 等对填充结构半波长 H 以及平均载荷 \bar{P}_f 的影响. 在材料参数和几何参数不发生变化时, 可以考究填充结构平均载荷随 H 变化关系, 见图 7. 此图进一步说明了填充多孔材料后薄壁结构自身的能量吸收变化不大. 例如, 根据图 7(a), 当 H 从 18.3 mm(空心) 减小到 15.24 mm(填充) 时, 薄壁结构的平均载荷仅增加 0.43 kN.

图 8 将填充泡沫铝的吸能拆分为致密区和过致密区的能量吸收. 以填充单帽结构为例, 根据式 (7),

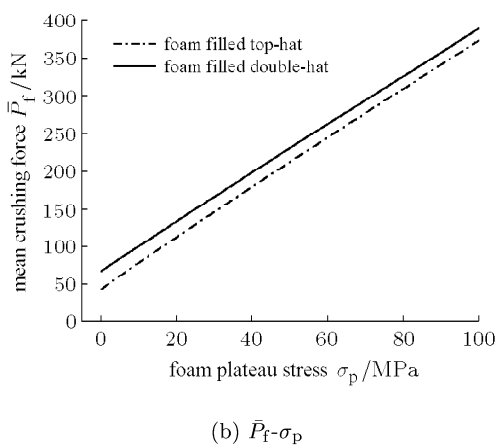
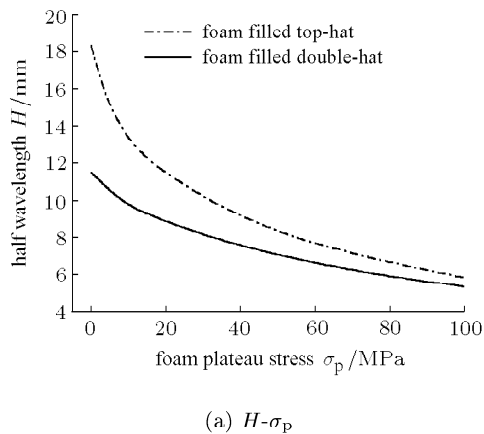


图 6 填充结构的半波长和平均载荷与泡沫铝平台应力的关系
Fig.6 Variation of half wavelength and mean crushing force with plateau stress of Al foam

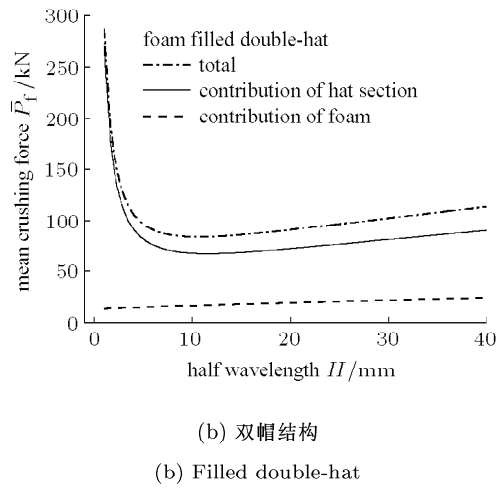
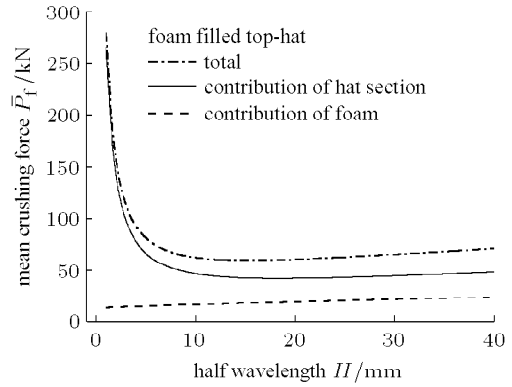


图 7 各组件的平均载荷与半波长的关系

Fig.7 Variation of mean crushing force of each component with half wavelength

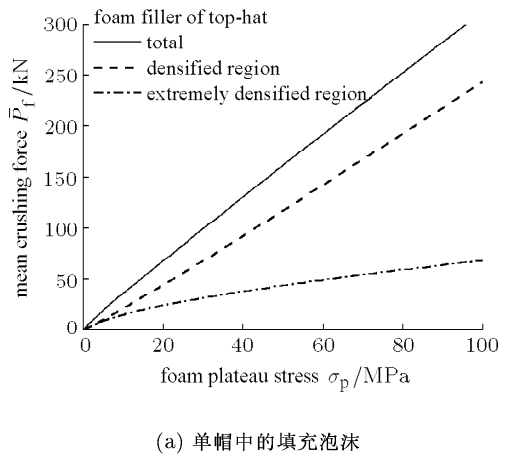
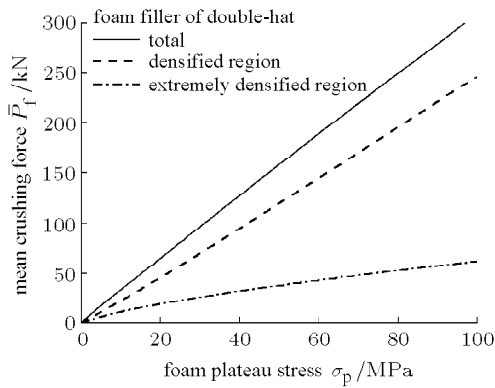


图 8 泡沫铝各区域对能量吸收的贡献

Fig.8 Contribution of each region to the energy absorption



(b) 双帽中的填充泡沫

(b) Foam filler in double-hat

图 8 泡沫铝各区域对能量吸收的贡献 (续)

Fig.8 Contribution of each region to the energy absorption (continued)

式 (10) 和式 (14), 过致密区体积变化占整个泡沫铝体积变化的 32.2%, 而能量吸收却占整体的 46.3%。可见, 过致密区的形成是相互作用效应的重要原因。根据式 (5) 和图 3, 过致密区之所以吸能巨大, 一方面是因为相对较大的 ΔV ; 另一方面是由于泡沫铝的应变达到 ε_c 后, 应力迅速上升。

4 结 论

以泡沫铝填充帽形结构为例, 研究了多孔材料填充物与薄壁结构的相互作用效应。建立起填充泡沫铝的等价模型, 获得了各典型破坏区域的体积变化规律: 致密区和过致密区的等效应变分别为 κ 和 $(1 + \kappa)/2$, 后者的应变约高出 0.15, 而平均应力却为前者的 1.8 倍。研究表明, 填充泡沫铝后, 薄壁结构的平均载荷增加仅为 5% 左右, 而泡沫铝填充物的平均载荷分别增加了 45.0% (单帽) 和 34.4% (双帽)。过致密区具有较高的 $\bar{\sigma}$ 和 ΔV , 该区域的高吸能是填充结构具有相互作用效应的主要原因。

这一模型可以推广到其他多孔材料填充薄壁结构中去。只要建立起与实验结果等价的多孔材料填充物体积变化和等效应变等关系, 利用理想可压缩假定和多孔材料的本构关系, 并结合薄壁结构的超叠缩单元等模型, 即可实现填充结构吸能拆分, 进

而分析相互作用效应。同时, 本文的研究方法也可推广到冲击载荷下。若低速冲击下填充结构的破坏模式与准静态没有显著差别, 且薄壁结构与多孔材料的应变率效应不显著, 则本研究工作的部分结论可直接应用到低速冲击条件下。

参 考 文 献

- 1 Miller R. A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2000, 42: 729~754
- 2 杜星文, 宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计. 北京: 科学出版社, 2004 (Du Xingwen, Song Hongwei. Impact Dynamic and Crashworthiness Design of Cylindrical Structures. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese))
- 3 Santosa SP, Wierzbicki T, Hanssen AG, et al. Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 509~534
- 4 Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41: 967~993
- 5 Hanssen AG, Hopperstad OS, Langseth M. Bending of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Acta Mechanica*, 2000, 142: 13~31
- 6 Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 153~176
- 7 Chen WG. Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38: 7919~7944
- 8 Gibson LJ. Mechanical behavior of metallic foams. *Annual Review of Materials Science*, 2000, 30: 191~227
- 9 Abramowicz W, Wierzbicki T. Axial crushing of foam-filled columns. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30: 263~271
- 10 Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50: 727~733
- 11 White MD, Jones N, Abramowicz W. A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41: 209~233
- 12 Abramowicz W, Wierzbicki T. Axial crushing of multi-corner sheet metal columns. *Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56: 113~120

INTERACTION EFFECT IN ENERGY ABSORPTION OF POROUS MATERIAL FILLED THIN-WALLED STRUCTURE¹⁾

Song Hongwei^{*,†,2)} Yu Gang^{*} Fan Zijie[†] Wang Qingchun[†]

^{*}(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[†](State Key Lab. of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The mechanism of “interaction effect” raised in porous material filled thin-walled structure is studied, and quantitative partition in energy absorption is reached with the proposed model in this paper. Taking aluminum foam filled hat section as example, we found three characteristic regions in the crushed foam filler, i.e., densified region, extremely densified region and undeformed region. An analytical model according to the experimental observation was built to find the volume reduction and volumetric strain in each region of the crushed porous material filler, based on the perfectly compressible assumption. Combining with the superfolding element model for thin-walled hat structures, the contribution of each component of the filled structure, i.e., hat section, porous filler; densified region and extremely densified region to the overall energy absorption was quantitatively partitioned. The study shows that little increase in energy absorption is found in the thin-walled structure, while the augmentation in porous material filler is about 40%. The extremely densified region accounts for mainly to the interaction effect.

Key words porous material, thin-walled structure, interaction effect, energy absorption, crashworthiness

Received 28 June 2004, revised 18 April 2005.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10502049) and the State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics CAS.

2) E-mail: songhw@tsinghua.edu.cn