

泡沫铝填充薄壁方形铝管的 静态弯曲崩毁行为*

许 坤 寇东鹏 王二恒 虞吉林

(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥, 230027)

摘 要 研究了泡沫铝填充的方形铝管的准静态三点弯曲行为. 实验表明: 泡沫铝填充有效地改变了铝管的局部崩毁变形模式; 界面粘接提高了填充结构的抗弯刚度, 但使结构易在较小转角下发生破坏. 最后, 基于实验提出了一个分析填充结构弯曲崩毁行为的理论方法, 在小转角下给出了与实验相当吻合的结果.

关键词 泡沫铝, 薄壁方管, 泡沫填充, 弯曲崩毁行为

0 引言

在过去 20 年里, 研究人员做了大量的工作研究薄壁构件轴向压缩的崩塌机制. 然而, 除了轴向渐进折叠, 多数实际撞击还涉及到构件的弯曲崩塌失效. 最初的棱柱结构弯曲崩塌的详尽研究是由 Keenan^[1]在 1983 年完成的. 他从实验和理论上研究了矩形薄壁管的弯曲崩塌性能, 提出了包含静止和移动塑性铰线的简单失效机制, 计算了包括后屈曲大转角情况下的力矩和转角关系. Wierzbicki 等^[2,3]将最初应用于轴向加载结构的超折叠单元的概念扩展到了弯曲和弯曲/压缩组合加载的情形, 推导出了弯曲大变形情况下力矩和转角特性的封闭解.

为了获得更高的单位质量能量吸收率, 引入蜂窝或泡沫金属等超轻材料作为薄壁空心结构内填充物的想法引起了广泛的研究兴趣. 泡沫铝作为一种新型多功能工程材料, 以其低密度、高的比刚度和比强度以及良好的吸能、隔音、绝热性能, 在轻质结构的填充中显示出光明的前景, 受到了越来越多的关注. 近年来, 人们对以泡沫铝为内填充物的梁、管、壳等复合结构的准静态破坏行为和结构设计优化已做了较多研究, 但这些研究多为吸能装置的轴向压缩行为分析, 对于结构弯曲崩毁力学行为的研究还较少. Santosa 和 Wierzbicki 等^[4,5]通过实验和数值模拟研究了泡沫铝填充对薄壁不锈钢管结构准静态抗

弯刚度的影响, 发现填充物对管壁的支持抑制了受压侧结构的崩塌, 从而改善了结构的承载能力和吸能效率. 他们还研究了局部填充的泡沫铝填充构件在冲击载荷下的抗弯刚度, 给出了局部填充结构的有效填充长度. Hall 等^[6]研究了泡沫铝填充的圆形铝、钢、钛管的横向和纵向压缩行为, 发现横向压缩后的泡沫铝有明显的侧面变形, 填充结构的横向压缩能量改善优于纵向压缩. Hanssen 和 Hopperstad 等^[7]进行了泡沫铝填充方形铝管弯曲性能的实验研究, 并给出了简单的结构设计准则.

本文通过对 30 个试件的实验测试来研究泡沫铝填充方管的静态弯曲崩毁行为, 涉及到的参数包括方管厚度、泡沫铝密度以及界面粘接条件, 最后给出的理论分析方法可以作为评价小转角时未粘接泡沫铝填充方管抗弯性能的设计准则.

1 实验材料和实验装置

实验中所用方形铝管材料为 AA6063T5, 截面外尺寸 b 为 25.4 mm, 壁厚 t 分别为 0.4 mm、0.9 mm 和 1.2 mm. 管壁材料的拉伸曲线如图 1, 弹性模量 E_c 为 66.4 GPa, 特征应力 σ_0 取为屈服应力 σ_y 和断裂应力 σ_u 的平均值. 实验选用淮北虹波泡沫金属材料厂提供的基体为纯铝 (密度 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$)、密度 ρ_f 分别为 0.24 g/cm^3 (平均胞孔尺寸 3~4 mm) 和密

* 国家自然科学基金 (90205003, 10072059) 资助.
2004-04-26 收到第 1 稿, 2004-11-18 收到修改稿.

度 0.40 g/cm^3 (平均胞孔尺寸 $1\text{-}2 \text{ mm}$) 的两种闭孔泡沫铝. 泡沫铝压缩曲线如图 2 所示, 弹性模量 E_f 分别为 0.23 GPa 和 0.6 GPa , 平台应力 σ_f 分别为 1.5 MPa 和 4.7 MPa . 泡沫铝与铝管间留有少量空隙, 使泡沫铝能够在管中滑动.

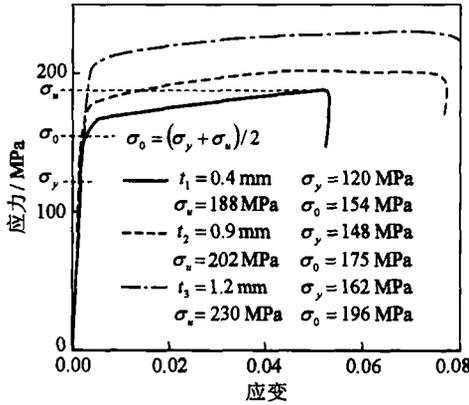


图 1 管壁铝合金材料的拉伸应力-应变曲线

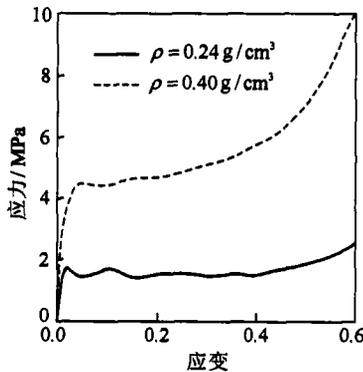


图 2 闭孔泡沫铝的压缩应力-应变曲线

表 1 实验测试试件参数

截面形状	加载形式	管壁厚度	泡沫铝密度	界面粘接
方形	静态	$t_1 = 0.4 \text{ mm}$	—	Unbonded
		$t_2 = 0.9 \text{ mm}$	$\rho_1 = 0.24 \text{ g/cm}^3$	bonded
		$t_3 = 1.2 \text{ mm}$	$\rho_2 = 0.40 \text{ g/cm}^3$	

实验共有 15 组参数不同的试件, 每组两个试件, 以 a, b 区分. 试件的参数如表 1 所示. 实验段跨距 L 为 250 mm , 压头和支撑处的刚性圆柱直径均为 10 mm , 实验采用位移加载方式, 压头加载速率为 0.1 mm/s . 所有准静态三点弯曲的实验测试都在中国科学技术大学工程与材料科学实验中心的 MTS810 材料试验机上进行.

2 泡沫铝填充方形铝管的准静态三点弯曲测试

从三点弯曲实验的载荷-位移数据可以推导出结构的弯矩-转角关系. 如果忽略压头与方管间摩擦力的影响, 弯矩和转角可以近似用以下公式计算

$$M = \frac{PL}{4} \quad (1)$$

$$= 2 \arctan \frac{2}{L} \quad (2)$$

其中 P 和 δ 分别为压头处载荷和位移.

2.1 空心薄壁方形铝管

图 3 是空心薄壁方形铝管三点弯曲的最终变形状态和加载的弯矩-转角曲线. 变形初始状态, 弯矩值急剧上升, 随着加载点附近局部褶皱的出现, 进一步弯曲所需的弯矩值减小, 当弯曲到一定程度, 压头两侧的褶皱相互挤压在一起, 致使弯矩值略有上升. 实验发现, 薄壁管的弯曲变形主要集中在局部的塑性铰处, 而其它部分则发生刚性旋转, 局部结构的塑性变形导致抗弯刚度的明显下降. 由图亦可见实验的重复性很好.

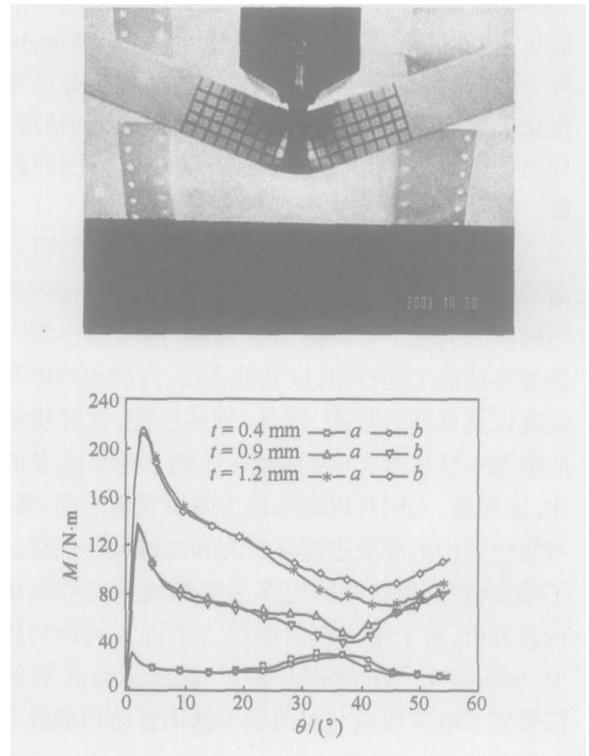


图 3 空心薄壁方形铝管三点弯曲的变形状态和弯矩-转角曲线

2 2 未粘接泡沫铝填充薄壁方形铝管

图 4是泡沫铝填充薄壁方形铝管三点弯曲的变形模式和受载的弯矩 转角曲线. 鉴于类似图 3的良好的可重复性, 为表述清晰, 每组试件只取一条曲线列于图中.

管壁厚 0.4 mm 的填充试件, 变形为多褶皱模式. 在弯矩峰值处, 对应着新褶皱的形成, 将引起结构的局部崩塌, 导致弯矩值的下降; 在极小值处, 对应形成的褶皱开始接触并挤压, 导致弯矩值的上升. 实验观察到泡沫铝填充阻碍了薄壁管受压侧向内部的局部崩塌, 使变形模式发生了改变, 导致褶皱长度明显减小, 薄壁管将形成局部的多重褶皱形态, 在相同转角下能形成更多塑性铰线; 另一方面, 薄壁管的

存在使泡沫铝的弯曲变形更加平滑, 避免了泡沫铝梁由于单一裂纹扩展而失效的变形模式, 将裂纹分散并且阻止了各裂纹的进一步扩展, 从而使填充复合结构的弯矩能维持在较高水平. 在实验结束后, 均可观察到有部分泡沫铝被挤出铝管. 对于管壁厚度为 0.9 mm 及 1.2 mm 的填充试件, 壁厚的增加使方管刚度变大, 当填充低密度泡沫铝时, 无法有效改变方管褶皱形成模式, 无法形成多褶皱, 方管的变形仍为类似空管单褶皱的变形模式; 当填充高密度泡沫铝时, 泡沫铝相对较大的刚度限制了方管完整的褶皱的形成, 在较小的转角下, 方管下表面就受拉伸裂, 填充结构发生破坏失稳.

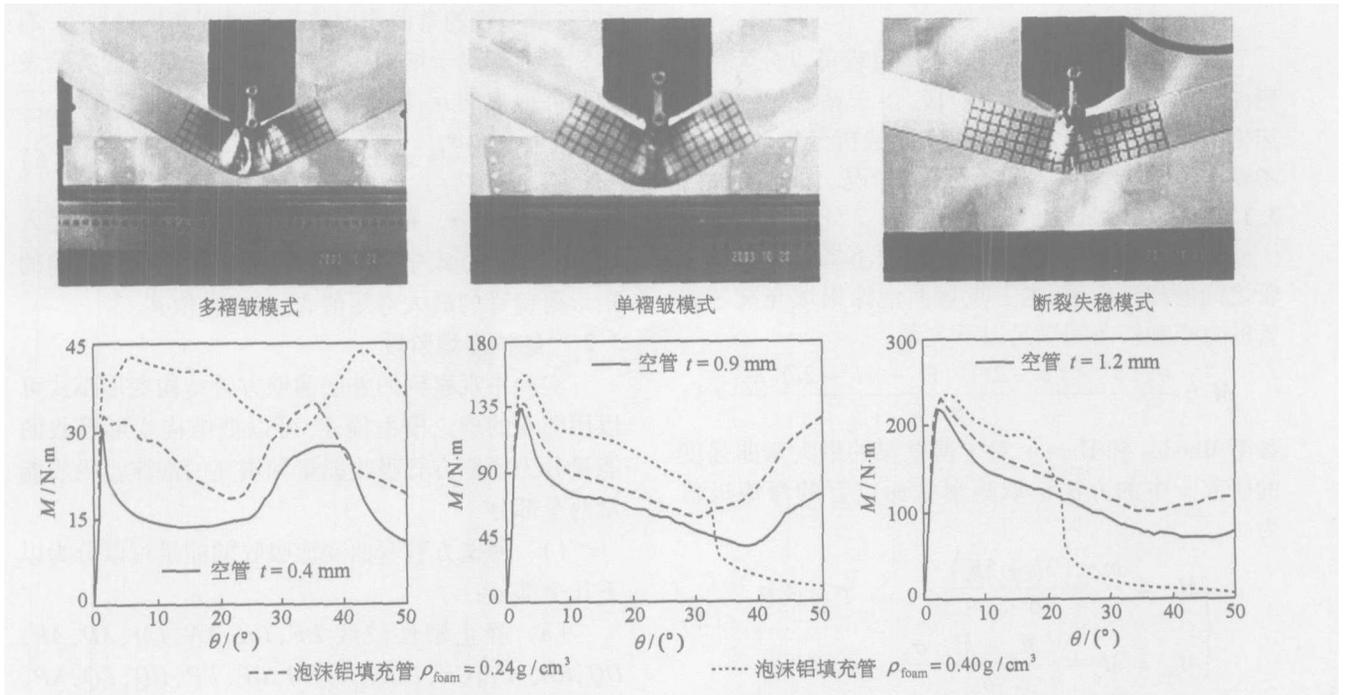


图 4 泡沫铝填充薄壁方形铝管三点弯曲的变形模式和弯矩 转角曲线

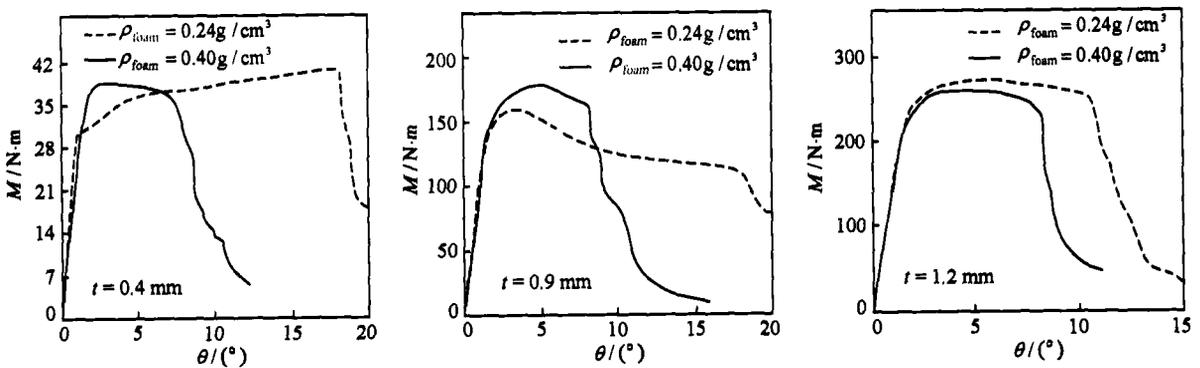


图 5 粘接泡沫铝填充薄壁方形铝管三点弯曲的变形状态

2 3 粘接泡沫铝填充薄壁方形铝管

图 5是粘接泡沫铝填充薄壁方形铝管三点弯曲

的弯矩-转角曲线. 实验中选用 SA103快速耐撞冲击胶, 分别涂于铝管和泡沫铝内表面, 然后将其迅速施压粘接, 粘胶的质量约为结构总质量的 10% ~ 30%. 当粘胶质量完好时 (试件在变形过程中不脱胶), 试件在较小转角时方管下表面就发生拉伸断裂, 造成弯矩值的急剧下降. 从实验可以发现, 界面粘接虽然提高了相同转角下填充结构的抗弯刚度及承载能力, 但是限制了方管上壁褶皱的形成, 使下表面的拉应力增大, 填充结构在较小的转角时就容易发生破坏, 所以从吸收能量方面考虑粘胶不一定是有利的.

3 泡沫铝填充方管弯曲崩塌的理论研究

泡沫铝填充方管的弯曲崩塌过程可以分为弹性弯曲和结构塑性崩塌两个阶段, 由于粘胶导致的泡沫铝与管壁之间的复杂作用难以解析分析, 本文仅考察泡沫铝与管壁之间无粘胶的情况.

3.1 弹性加载阶段

在初始的弹性弯曲阶段, 如果不考虑泡沫铝和管之间的相互作用, 则三点弯曲泡沫铝填充夹芯方管的弯矩和转角间满足以下关系

$$M = \frac{[Ib^4 - (b - 2t)^4]E_c + (b - 2t)^4 E_f}{6L} \quad (3)$$

参考 Rhodes和 Harvey对于薄壁梁的最大弯曲强度的研究^[8]中的方法选取矩形截面空管的弯矩极值为

$$\begin{cases} M_m = \frac{bt_y(3b + 5b_e)}{6}, & \sigma_{cr} < \sigma_y \\ M_m = M_p - \frac{(M_p - M_e)\epsilon}{\sigma_{cr}}, & \sigma_{cr} > \sigma_y \end{cases} \quad (4)$$

其中 σ_{cr} 为管壁压缩侧屈曲的临界应力, b_e 为描述压缩侧屈曲的有效宽度, ϵ 是由式 (5) 定义的应力函数

$$\begin{cases} W_{EF+GH+KN+LM} = 2bM_0, & W_{AD} = 4M_0(b + 2H \sin \alpha) \\ W_{AP+DQ} = 4M_0(b - 2H \sin \alpha) \arctan \left[\frac{2H \sin \alpha}{H - b \sin \alpha + H \sin \alpha \tan \alpha} \right], & W_{KL+MN} = 4M_0 H \arcsin \left[\frac{2H \sin \alpha}{b} \right] \\ W_{GK+EL+HN+FM} = 4bM_0 \arctan \left[\frac{H \sin \alpha}{H \cos \alpha - b \sin \alpha \cos \alpha + H \sin \alpha \sin \alpha} \right] \\ W_{GP+EP+HQ+FQ} = 4M_0 \sqrt{(b/2)^2 + H^2} + b(b - 2H \sin \alpha - \sqrt{b^2 - 4H^2 \sin^2 \alpha} \cos \alpha) \times \\ \arccos \left[\frac{H^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha + (H - b \sin \alpha) [H \cos \alpha - \sqrt{(b/2)^2 - H^2 \sin^2 \alpha} \sin \alpha]}{\sqrt{H^2 \sin^2 \alpha + [H \cos \alpha - \sqrt{(b/2)^2 - H^2 \sin^2 \alpha} \sin \alpha]^2}} \right] \times \frac{1}{\sqrt{H^2 \sin^2 \alpha + (H - b \sin \alpha)^2}} \\ W_{KP+LP+MQ+NQ} = 4M_0 \sqrt{(b/2)^2 + H^2} \times \arctan \left[\frac{2H \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{b^2 + 4H^2}}{2H \sqrt{b^2 - 4H^2 \sin^2 \alpha} \cos \alpha - b^2 \sin \alpha} \right] \end{cases} \quad (7)$$

数, M_p 和 M_e 分别是薄壁管的塑性极限弯矩和最大弹性弯矩

$$\begin{cases} \sigma_{cr} = \frac{5.39 E_c (t/b)^2}{12(1 - \nu_c^2)} \\ \epsilon = \frac{(\sigma_u - \sigma_y)(\sigma_{cr} - \sigma_y)}{\sigma_y} \\ b_e = b \left[0.7 \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} + 0.3 \right] \\ M_p = \frac{2b^2 + (b - 2t)^2}{2} \\ M_e = \frac{b^3 - (b - 2t)^4 / b}{6} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\nu_c = 0.3$, 为管壁材料的泊松比, 加入泡沫铝填充后, 薄壁管的弯曲崩塌将受到限制并推迟发生. 泡沫铝填充相当于增加了薄壁管的临界应力, 实验发现临界应力的 σ_{cr} 增加值 $\Delta \sigma_{cr}$ 可以表示为^[9]

$$\frac{\Delta \sigma_{cr}}{\sigma_{cr}} = 2 \left(\frac{t}{b} \right)^2 \left(\frac{t}{b} \right) \left(\frac{E_c}{E} \right) \quad (6)$$

如果将 $\sigma_{cr} = \sigma_{cr} + \Delta \sigma_{cr}$ 作为新的临界应力值代入 (3)、(4)、(5) 式中, 即得考虑了泡沫铝填充影响的矩形薄壁管的最大弯矩值 M_m 和临界角 α .

3.2 结构崩塌阶段

实验中观察到的外层薄壁方管结构变形模式可以用图 6 的理论模型描述. 可以把结构变形吸收的能量分为薄壁方管吸收能量和填充的泡沫铝吸收能量两个部分

(1) 薄壁方管弯曲变形吸收的能量可以分为以下几个部分:

(a) 静止塑性绞线 EF, GH, KN, LM, AD, AP, DQ, KL, MN, GK, EL, HN, FM, GP, EP, HQ, FQ, KP, LP, MQ, NQ 的塑性变形吸收的能量. 这些塑性绞线所吸收的能量分别为

其中 $\alpha = \theta/2$, $\beta = \theta/2 - \arcsin [1 - (b \sin \theta) / H]$, $\gamma = \theta - \beta$, $M_0 = \sigma_0 t^2 / 4$ 为单位宽度管壁的完全塑性矩.

(b) 外延变形集中在相对较小的环形区域, 但是将吸收相当比例的能量, 具体推导可以参考 Wierzbicki 和 Abramowicz 有关超折叠单元的工作^[10], 其中 p 和 q 分别代表环形表面较大和较小的半径, 将 q 定义为旋转半径

$$2W_{cor} = 2 \int_s N_0 \phi dS = 2 \int_0^{\theta/2} \left[N_0 \frac{q \sin \alpha}{r} \right] q r d\alpha = 32M_0 \frac{Hq}{t} [\sin \alpha + \cos \alpha - 1] \quad (8)$$

(c) 沿移动塑性绞线 GA, EA, HD, FD 可观察到旋转变形. 假设沿移动绞线, q 固定不变, 吸收的能量为

$$W_8 = W_{GA+EA+HD+FD} = 4M_0 L d = 8M_0 \frac{H}{t} \int_0^{\theta/2} \sqrt{1 + \sin^2 \alpha} \frac{H \cos \alpha}{q} d\alpha = 4M_0 \frac{H^2}{q} [\sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \sin^2 \alpha} + \ln (| \sin \alpha + 1 + \sqrt{1 + \sin^2 \alpha} |)] \quad (9)$$

(2) 填充的泡沫铝在弯曲过程中吸收的能量为

$$W_f = \int_v \sigma_f dV = \left[\int_0^f \sigma_f(\alpha) d\alpha \right] V \quad (10)$$

假设泡沫铝处于单轴压缩状态 (无侧面变形), 则近似有

$$f = 1 - \frac{V_f}{V_0} = \frac{V}{V_0} \quad (11)$$

其中 $V_0 = 2H(b - 2t)^2$, $V_f = H(b - 2t) [(b - 2t)(1 + \cos \theta) \cos \theta - H \sin \theta \cos \theta]$.

在管弯曲崩塌过程中认为泡沫铝处于屈服应力平台 σ_f 状态, 则

$$W_{10} = W_f = \sigma_f V \quad (12)$$

最终结构变形到两边褶皱接触位置, 保留对整个弯曲过程中总吸收能量有主要贡献的项, 那么平均压皱力为

$$P_m = \frac{\sum_{i=0}^{10} W_i}{H} \quad (13)$$

根据最小能量原理可得

$$\frac{\partial P_m}{\partial H} = \frac{\partial P_m}{\partial q} = 0 \quad (14)$$

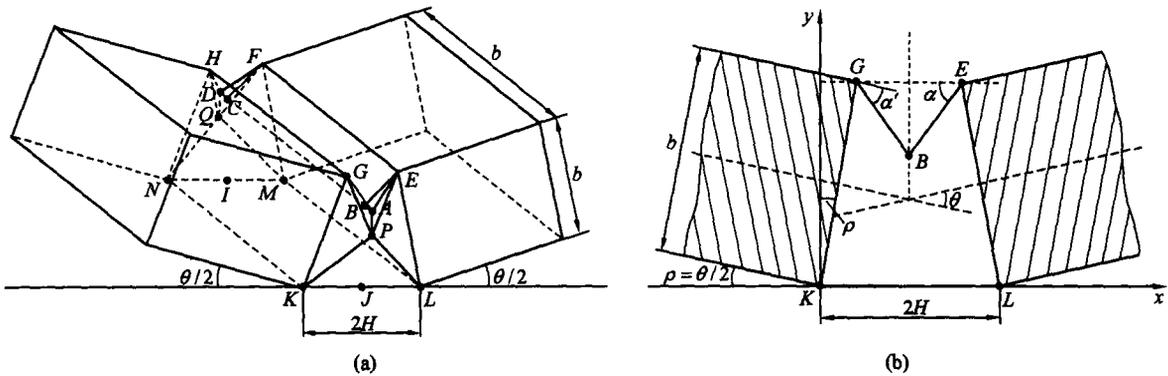


图 6 变形模式 (a) 及其纵向截面 (b)

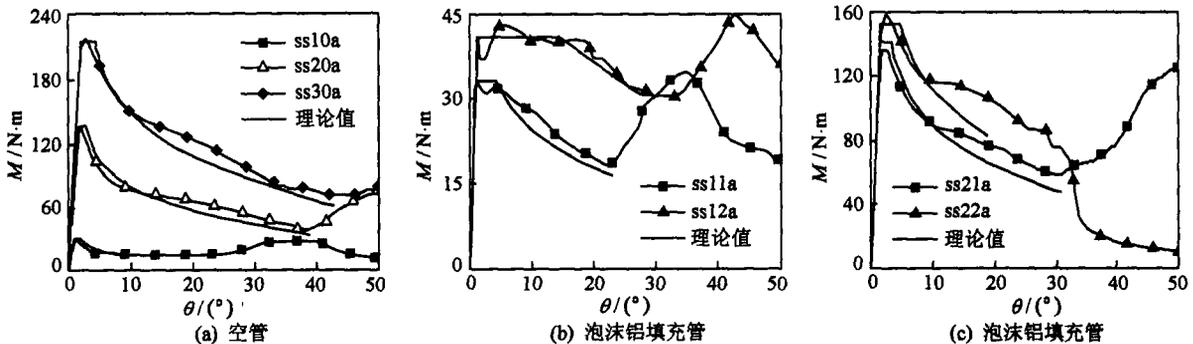


图 7 理论与实验结果比较

则先根据方程 (14) 确定折叠长度 H 和旋转半径 q , 然后对每个 θ 值求解各项塑性功, 代入方程 (13) 得到平均压应力. 图 7 是理论计算与实验数据的比较, 从图上可以看出, 在变形的初始阶段, 空管和填充管的理论值和实验值都很吻合. 在大转角时, 空管的理论值与实验值比较接近, 而泡沫铝填充管的理论值比实验值偏小, 这可能是由于我们假设了泡沫铝大转角下处于平台应力状态, 而实际上泡沫铝可能已有部分处于致密化应力上升状态.

4 结论

(1) 泡沫铝填充有效地改变了铝管局部崩毁变形模式, 显著提高了铝管的弯曲承载能力;

(2) 界面粘接增加了相同转角下填充结构的抗弯刚度, 但使得填充结构在较小转角时就容易发生破坏, 所以粘接从吸收能量方面考虑可能是不利的;

(3) 理论分析得到了与实验值比较吻合的结果. 在未来的研究中, 进一步考虑部分泡沫铝的应力强化影响和粘接对泡沫铝填充管弯曲性能的影响将是重点.

参 考 文 献

- 1 Kecman D. Bending collapse of rectangular and square section tubes *International Journal of Mechanical Sciences*, 1983, 25: 623 ~ 636
- 2 Wierzbicki T, Recke L, Abramowicz W, Cholami T. Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crushing loading-I *Compression Computers and Structures*, 1994, 51: 611 ~ 623
- 3 Wierzbicki T, Recke L, Abramowicz W, Cholami T. Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crushing loading-II *Bending Computers and Structures*, 1994, 51: 624 ~ 640
- 4 Santosa S, Wierzbicki T. Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41: 995 ~ 1019
- 5 Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Bending crush resistance of partially foam-filled sections *Advanced Engineering Materials*, 2000, 4: 223 ~ 227
- 6 Hall IW, Guden M, Claar TD. Transverse and longitudinal crushing of aluminum-foam filled tubes *Scripta Materialia*, 2002, 4: 513 ~ 518
- 7 Hanssen A G, Hopperstad O S, Langseth M. Bending of square aluminum extrusions with aluminum foam filler *Acta Mechanica*, 2000, 142: 13 ~ 31
- 8 Rhodes J, Harvey J M. *Design of thin walled beams* *Conf Exp Stress Analysis in Design*, Cambridge, 1970
- 9 许坤. 泡沫铝填充方管的弯曲崩塌行为研究. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2004
- 10 Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50: 727 ~ 739

BENDING COLLAPSE BEHAVIOR OF SQUARE ALUMINUM EXTRUSIONS WITH ALUMINUM FOAM FILLER

Xu Kun Kou Dongpeng Wang Erheng Yu Jilin
 (CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
 University of Science and Technology of China, Hefei, 230027)

Abstract The quasi-static three-point bending behavior of square aluminum extrusions with aluminum foam filler is studied. Main parameters concerned are the extrusion wall thickness and the foam density. Experimental results show that the foam filler change the local deformation pattern substantially. Moreover, the presence of adhesive improves bending resistance, meanwhile it results in an early failure of the extrusions at a small bending rotation angle. Finally, a theoretical method is developed which considers the interaction between the thin-walled tube and filled foam. Good agreement between theoretical predictions and experimental results at small bending rotation angles is obtained.

Key words aluminum foam, thin-walled square column, foam filler, bending collapse behavior