

文章编号:1001-4888(2010)03-0271-08

泡沫铝夹芯双方管结构准静态 轴压性能的实验研究*

郭刘伟, 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:对几种泡沫铝夹芯方管结构的准静态轴压性能进行了实验研究。结果表明,较空管及泡沫铝夹芯单管结构,泡沫铝夹芯双管结构的承载能力及能量吸收效率明显得到增强。双管夹芯结构中外管撕裂模式的结构行程利用率和能量吸收效率高于相应的外管周期折叠模式。而泡沫铝四角填充方式提高了双管夹芯结构相同变形模式下的能量吸收效率和结构变形的稳定性。同时研究了内管管壁及材料强度对泡沫铝夹芯双管结构的影响。随着内管壁厚增大,双管夹芯结构的能量吸收效率提高,而内管材料强度影响不明显。

关键词:泡沫铝夹芯方管; 准静态轴压实验; 能量吸收效率

中图分类号: O34 **文献标识码:** A

0 引言

薄壁管结构因其轴向承载平稳性而被用作能量吸收器,很多科研工作者对此进行了大量的研究^[1-6]。而轻质多孔材料—闭孔泡沫铝的引入使得薄壁管结构承载及总吸能能力得以提升。泡沫铝填充对管结构自身的垮塌变形有阻碍作用^[7],且填充物降低了结构中每个褶皱的长度,增加了褶皱总数量^[8]。由于薄壁管与内部泡沫铝填充物的相互作用,泡沫铝填充薄壁管的平均压垮力高于泡沫铝和薄壁管单独压缩时平均压垮力之和^[9]。

Seitzberger 等^[10]研究了泡沫铝填充方形、六边形、八边形钢管结构的准静态轴压性能,指出虽然双管夹芯结构压垮距离会减小,但与泡沫铝填充单管结构相比,整体吸能性能得到改善。Güden 和 Kavi^[11]研究了纯铝空管、泡沫铝填充铝管以及四方或六角排列的泡沫铝填充多管结构的轴向准静态压缩行为,发现泡沫铝填充管排的比质量吸能效率高于泡沫铝填充单管,但仍低于相应的空管结构。

轻质、高比质量吸能率、高行程效率、低压垮力振荡是承载吸能结构的主要性能要求。从以往实验研究结果发现,填充泡沫铝虽然可提高结构承载力,但传统的泡沫铝填充单管结构的行程利用率及比质量吸能效率较低,且研究的方管类型中多为钢管结构。本文提出了一种新型的泡沫铝四角填充铝合金双管结构,对这种结构以及泡沫铝填充双管、泡沫铝填充单管和空管的轴向压缩特性进行了准静态实验研究,对不同结构的变形模式及承载吸能特性进行了分析对比,同时研究了内管壁厚及材料强度对双管夹芯结构的影响。

1 实验

实验中管壁基体材料为 AA6063 T6,其准静态拉伸工程应力—应变曲线如图 1(a)所示。对于不同

* 收稿日期: 2009-12-17; 修订日期: 2010-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10532020, 10672156, 90916026)

通讯作者: 虞吉林(1946—),男,教授,主要从事材料力学行为和冲击动力学研究。E-mail: jlyu@ustc.edu.cn

厚度的材料,其拉伸性能稍有不同。作为内管材料之一的不锈钢 SS202A,其材料拉伸曲线见图 1(b)。芯层所用的闭孔泡沫铝材料为中国船舶重工集团公司七二五所泡沫铝研制中心提供,其准静态压缩工程应力—应变曲线如图 2 所示,总体呈现泡沫铝的典型平稳承载特性。

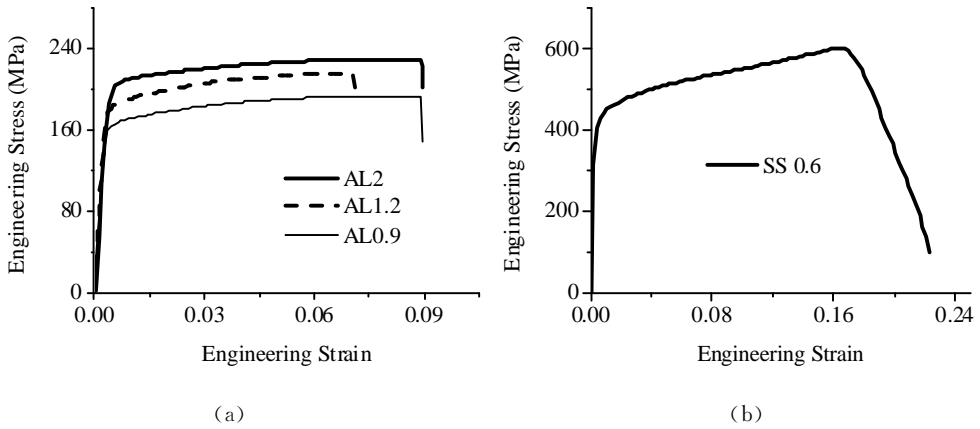


图 1 管壁材料拉伸性能曲线: (a) AA6063 T6, (b) 不锈钢

Fig. 1 The engineering tensile stress-strain curves of profile materials. (a) AA6063 T6, (b) Stainless steel.

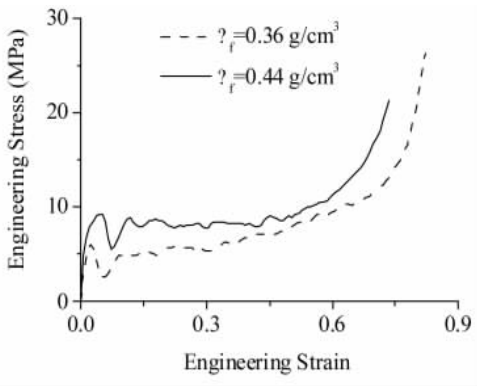


图 2 闭孔泡沫铝准静态轴压性能曲线
Fig. 2 The uniaxial compression results of aluminum foam

本文所研究的不同结构的截面如图 3 所示。本实验中涉及到的结构包括: a) 空管、b) 泡沫铝夹芯单管结构、c) 泡沫铝夹芯双管结构及 d) 泡沫铝四角填充双管结构(下文简称“角填”双管结构),角填双管结构的具体尺寸如图 4 所示。实验中的方管类型见表 1。本实验中试件遵循下列规则命名:例如“D12a”中,第一个字母:E 表示空管,S 表示泡沫铝夹芯单管,D 表示泡沫铝夹芯双管。紧接着两个数字,前者为表 1 中外管类型代号,后者为内管类型,最后的字母是该结构类型的重复性实验编号。所有试件总长 114mm,试件详细参数见表 2。单轴压缩实验在 MTS 809 材料试验机上进行,试件两端为自由面,加载应变率为 $10^{-3}/\text{s}$ 。

表 1 方管类型

Tab. 1 The types of square tubes

	Out tube		Inner tube	
	Section (mm)	Thickness (mm)	Section (mm)	Thickness (mm)
	1	38×38		0.9
AL*	2		25×25	0.9
	3		25×25	1.2
	4		25×25	2.0
SS*	5		24×24	0.6

* AL: AA6063 T6

SS: Stainless Steel

表 2 试件数据

Tab. 2 The parameters of specimens

Specimen	Out tube-Inner tube		Foam		m_t (g)	Mode*	St_c	E_s (J/g)
	Thickness (mm)	Mass (g)	Mass (g)	Density (g/cm ³)				
E10a	0.9-0	36.8-0			36.8	A	0.64	10.84
E10b	0.9-0	36.8-0			36.8	A	0.69	11.28
E10c	0.9-0	36.8-0			36.8	A	0.70	10.92
S10a	0.9-0	36.8-0	65.9	0.44	102.7	B	0.58	10.24
S10b	0.9-0	36.8-0	65.7	0.44	102.5	B	0.66	11.32
S10c	0.9-0	36.8-0	65.6	0.44	102.4	B	0.62	10.13
D12a	0.9-0.9	36.8-24.5	31.0	0.40	92.3	B	0.69	13.68
D12b	0.9-0.9	36.8-24.5	29.6	0.38	90.9	C	0.61	12.15
D12c	0.9-0.9	36.8-24.5	29.5	0.38	90.8	B	0.75	12.79
D13a	0.9-1.2	36.8-38.8	32.6	0.42	108.2	B	0.69	13.95
D13b	0.9-1.2	36.8-38.8	35.4	0.45	111.0	B	0.69	14.10
D13c	0.9-1.2	36.8-38.8	36.7	0.47	112.3	B	0.69	14.48
D14a	0.9-2.0	36.8-55.3	36.1	0.46	128.2	B	0.68	19.39
D14b	0.9-2.0	36.8-55.3	35.5	0.45	127.6	B	0.69	20.27
D14c	0.9-2.0	36.8-55.3	33.2	0.42	125.3	B	0.66	19.55
D15a	0.9-0.6	36.8-50.8	34.3	0.41	121.9	B	0.73	12.68
D15b	0.9-0.6	36.8-50.8	35.7	0.43	123.3	B	—	—
D15c	0.9-0.6	36.8-50.8	31.3	0.37	118.9	C	0.64	12.00
D12a-Corner	0.9-0.9	36.8-24.5	17.1	0.37	78.4	C	0.63	13.18
D12b-Corner	0.9-0.9	36.8-24.5	18.3	0.40	79.6	C	0.63	13.98

* A: Buckling, B: Out-tube tearing, C: Out-tube buckling.

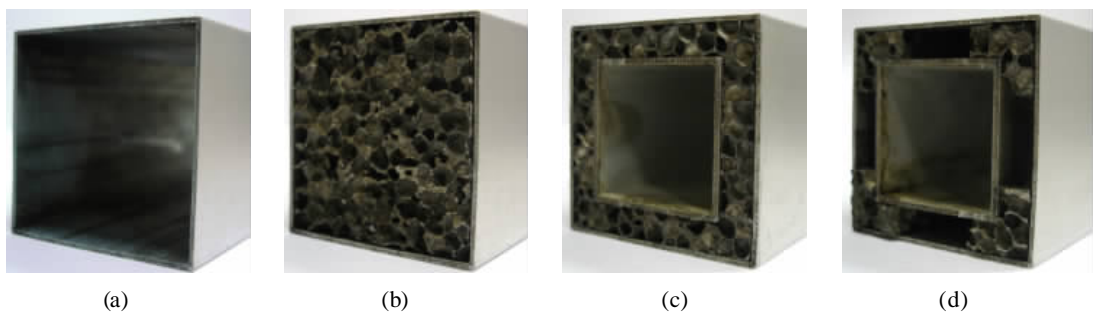


图 3 (a) 空管, (b) 单管夹芯结构, (c) 双管夹芯结构, (d) 四角夹芯结构

Fig. 3 (a) Empty tube, (b) foam-filled single tube, (c) foam-filled double tube, (d) foam filled in corners

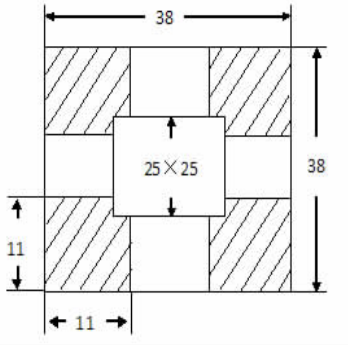
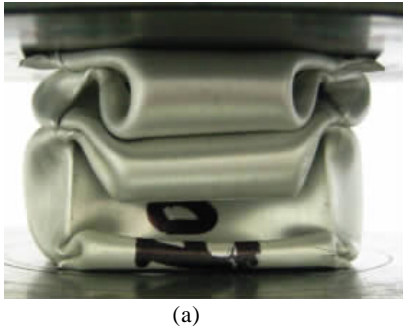


图4 四角夹芯结构截面尺寸

Fig. 4 The dimensions of the structure with foam filled in corners



(a)



(b)



(c)

图5 试件变形模式

Fig. 5 The deformation mode observed in the experiments

3 结果及讨论

实验中试件变形模式如图5所示,其中(a)为空管变形模式——周期折叠模式,简称A类变形模式。(b)-(c)为填充结构的变形模式,包含泡沫铝填充单管结构,泡沫铝填充双管及角填双管结构。其中(b)为外管四角撕裂模式,简称B类变形模式,(c)为外管周期折叠模式,简称C类变形模式。各种结构具体变形模式如表2所示。空管均为周期折叠模式,且褶皱数量较少。相同变形模式下泡沫铝填充物使得结构褶皱数量增加,褶皱长度变短。与以往泡沫铝夹芯钢管结构的周期折叠及外扩模式^[10]不同,实验中铝合金方管韧性较差,泡沫铝对管壁向内变形的阻碍作用致使泡沫铝填充单管及新型的双管结构基本发生B类四角撕裂模式。这种模式并不适合结构稳定变形且不易控制。经改进,去除对外管向内变形有严重阻碍作用的四边部分泡沫铝后,角填双管结构基本为C类周期折叠模式变形,大大增强了夹芯结构变形的稳定性及可控性。

不同结构承载曲线对比如图6所示。为方便与空管对比,双管夹芯结构选择稳定变形模式—C类周期折叠模式的试件D12b。可见,泡沫铝填充大大提高了结构承载力,但降低了结构的行程利用率。单管填充结构在首峰过后,因外管撕裂,结构承载力急剧下降并维持一定水平,当外管一角全部撕裂后,结构承载能力基本丧失,如图中单管填充结构S10a,其承载力在最后阶段急剧跌落。而空管、双管夹芯结构及角填双管结构均呈现周期性承载,且角填双管结构与双管夹芯结构的承载特性基本相同。

2 相关参量定义

为方便不同结构间的性能对比,定义以下参量:

$E_t = \int_0^U F du$,该量表征了结构压实前的总能量吸收。其中, F 为结构承载力; u 为加载位移,而 U 为结构压实前的总位移,定义为承载曲线最终急速上升前的总位移。对于四角撕裂模式的单管夹芯结构,定义为承载力最终急剧下降前的总位移,分别如图6所示。

$E_s = E_t/m_t$,该量表征了结构的比质量能量吸收效率。其中 m_t 为结构总质量。

$St_e = U/L$,该量为结构的行程利用率,其中 L 为试件总长度。

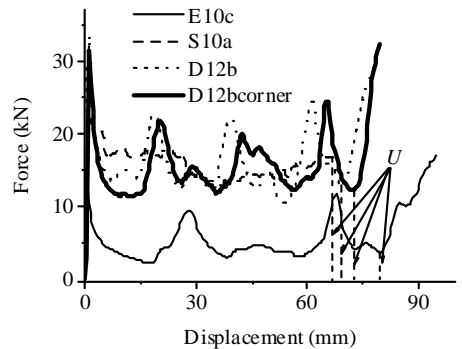


图6 不同结构力—位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of the force-displacement curves of different structures

三种填充结构中,单管填充结构质量最大,角填双管结构质量最小。各结构能量吸收能力对比如图 7 所示。填充结构的总吸能能力远远高于空管结构。双管夹芯结构的比质量能量吸收效率高于泡沫铝填充单管结构及相应的空管结构,其中,角填双管结构的比质量吸能效率最高而单管填充结构最低。可见,双管填充结构中增添了内管与夹芯泡沫铝间的相互作用,并去除了单管填充结构中未能充分发挥吸能作用的中间部分泡沫铝,减轻了结构总质量,提高了夹芯结构的比质量吸能效率。而角填双管结构进一步去除了吸能效率较低且影响结构稳定变形的四边部分泡沫铝,使得结构变形稳定、总质量减轻及比质量吸能效率提高。

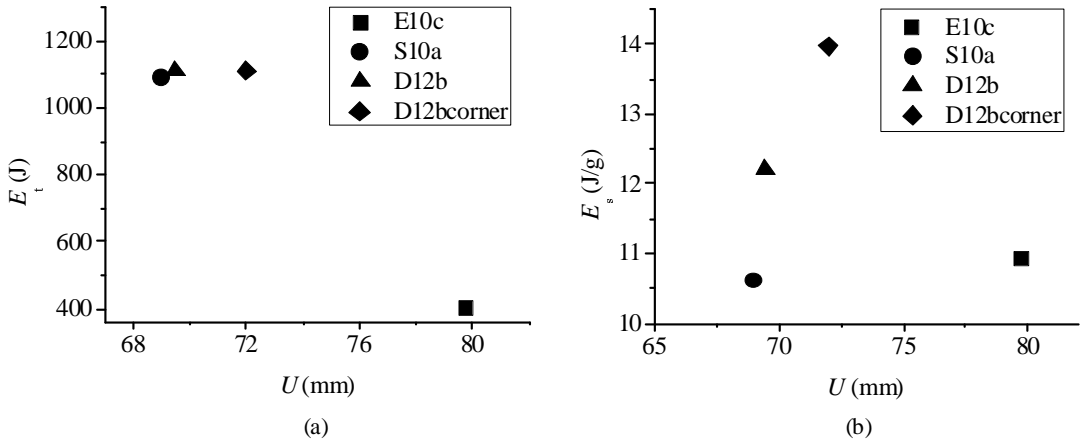


图 7 不同结构能量吸收能力对比: (a) 总能量吸收能力, (b) 比质量能量吸收能力

Fig. 7 Comparison of the energy absorption abilities of different structures.

(a) total energy absorption, (b) specific energy absorption.

双管夹芯结构不同变形模式承载曲线对比如图 8 所示。四角撕裂模式的双管夹芯结构承载力总体呈现下降趋势,但一直稳定至结构压实,并未出现单管填充结构中承载力的最终急剧下降。因为双管夹芯结构中引入了内管,在外管撕裂的同时,内管持续保持周期折叠模式变形,所以结构承载呈现下降但一直稳定至内管压实。较周期折叠模式,四角撕裂模式下结构的后续承载力较低,但行程利用率较高。两种模式下的能量吸收特性对比如图 9 所示。可见,四角撕裂模式下双管夹芯结构的总能量及比质量能量吸收效率均高于相应的周期折叠模式。这主要是由于四角撕裂模式下结构行程利用率的增大弥补了承载力下降的劣势。结合图 7 可见,两种变形模式下,双管夹芯结构的能量吸收效率均高于空管及单管夹芯结构。

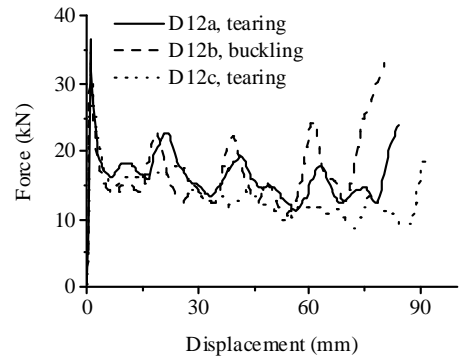


图 8 双管夹芯结构不同变形模式的力-位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of the force-displacement curves of different deformation modes of foam-filled double tube structure

内管壁厚对双管夹芯结构承载能力的影响如图 10 所示。为便于对比,图中均选择外管四角撕裂模式试件。可以看出,随着内管壁厚增大,结构承载力提高,行程利用率降低。其能量吸收能力对比如图 11 所示。在目前实验范围内,增大壁厚有利于提升结构的总能量及比质量能量吸收能力。对于外管为周期折叠变形模式的双管夹芯结构,内管材料强度对其承载及吸能能力影响分别如图 12、图 13 所示。增强内管强度,提高了结构的承载能力,同时,结构总质量相应地增加,结构的比质量能量吸收效率稍有降低。所以相比于增强内管材料强度,增大内管壁厚对结构比质量吸能能力的提高效果更明显。

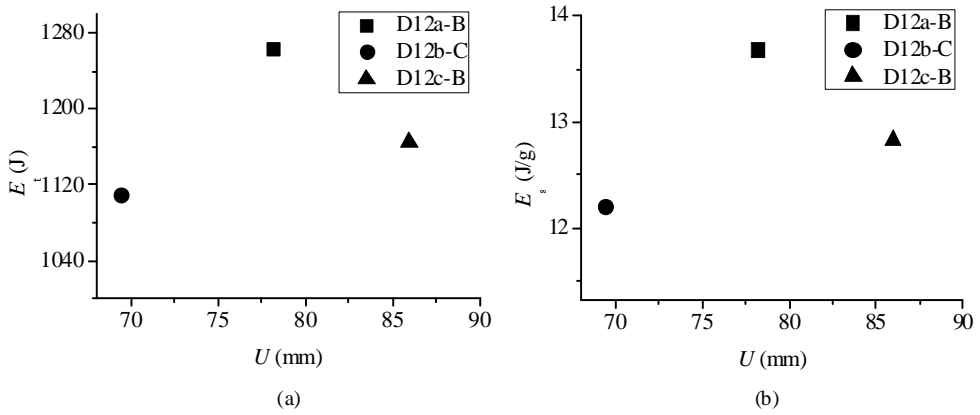


图9 双管夹芯结构不同变形模式的能量吸收能力对比: (a) 总能量吸收能力, (b) 比质量能量吸收能力

Fig. 9 Comparison of the energy absorption abilities of different deformation modes of foam-filled double tube structure. (a) total energy absorption, (b) specific energy absorption.

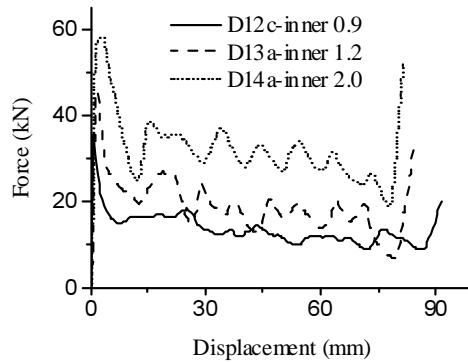


图10 内管壁厚对双管夹芯结构力—位移曲线的影响

Fig. 10 The effect of the inner tube thickness on the force-displacement curves of foam-filled double tube structure

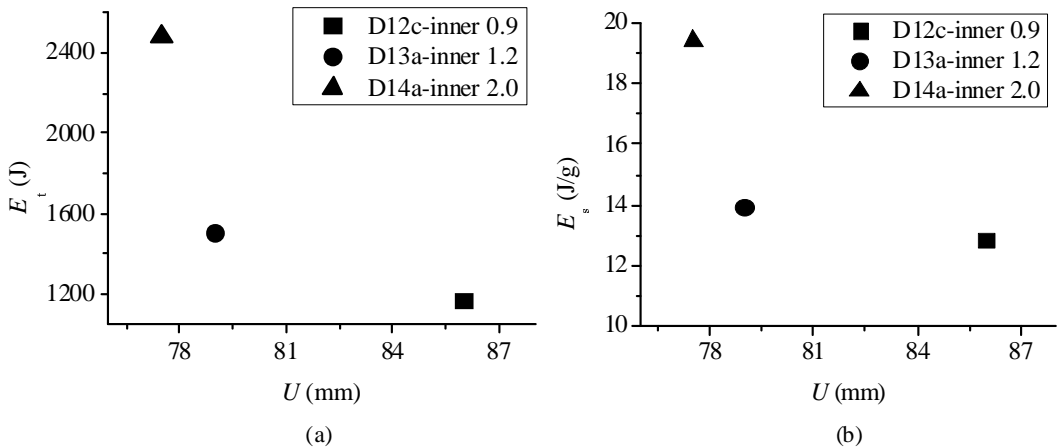


图11 内管壁厚对双管夹芯结构能量吸收能力的影响: (a) 总能量吸收能力, (b) 比质量能量吸收能力

Fig. 11 The effect of the inner tube thickness on the energy absorption of the foam-filled double tube structure. (a) total energy absorption, (b) specific energy absorption.

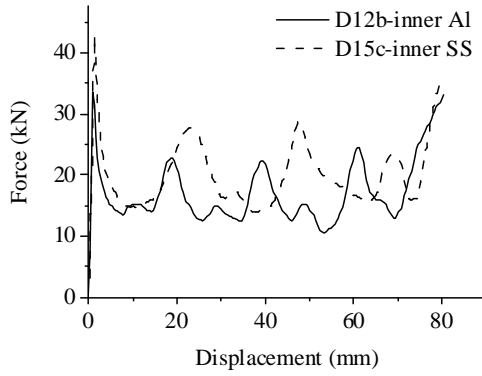


图 12 内管材料强度对双管夹芯结构力—位移曲线的影响

Fig. 12 The effect of the inner tube material on the force-displacement curves of foam-filled double tube structure

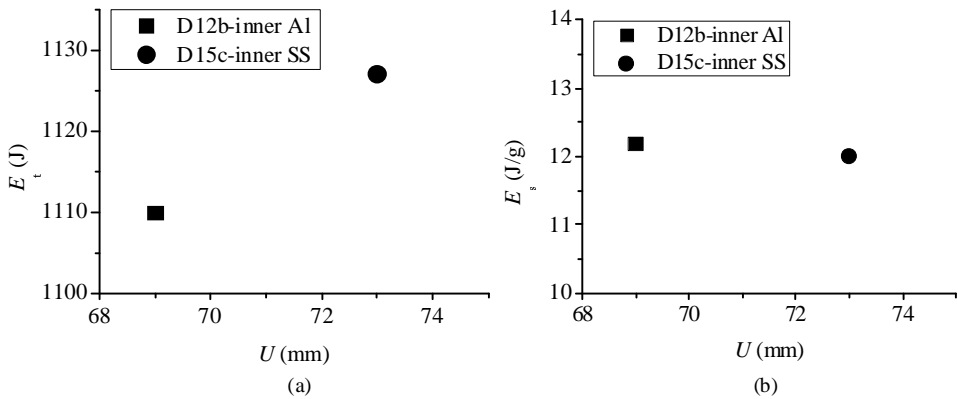


图 13 内管材料强度对双管夹芯结构能量吸收能力的影响：(a) 总能量吸收能力，(b) 比质量能量吸收能力

Fig. 13 The effect of the inner tube material on the energy absorption ability of foam-filled double tube structure.

(a) total energy absorption, (b) specific energy absorption.

4 结论

本文对几种泡沫铝夹芯铝合金方管结构的轴压准静态性能进行了实验研究。与空管相比，泡沫铝填充提高了结构的承载能力。泡沫铝夹芯单管及双管结构易发生外管四角撕裂模式，该模式严重影响结构的吸能能力及变形的稳定性。但由于内管的持续稳定变形，泡沫铝夹芯双管结构在外管撕裂模式下也能较稳定承载吸能，且其在外管四角撕裂模式下的能量吸收效率高于传统的外管周期折叠模式。两种模式下，泡沫铝夹芯双管结构的比质量能量吸收效率均高于泡沫铝夹芯单管结构及空管结构。目前实验表明，对比内管材料强度，内管壁厚对泡沫铝夹芯双管结构性能的影响更为显著。

本文提出的四角填充双管结构，由于去除了双管夹芯结构中四边部分泡沫铝，有效地增强了结构的变形稳定性，降低了结构总质量，提高了结构的比质量吸能效率。但这种填充方式具体参数的影响和优化仍待进一步研究。

参考文献：

- [1] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading [J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13:10-5.
- [2] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(3):263-81.
- [3] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4(4):243-70.

- [4] Jones N. Structural Impact [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50:727—39.
- [6] Thornton P H. Energy absorption by Foam-filled structures [M]. 8000081, Society of Automotive Engineers, 1981.
- [7] Santosa S, Wierzbicki T, Hanssen A G, Langseth M. Experimental and numerical studies of foam-filled sections [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:509—534.
- [8] Santosa S P, Wierzbicki T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam [J]. Computers & Structures, 1998, 68:343—367.
- [9] Hanssen A G, Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:347—383.
- [10] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, Gardinger R, Degischer H P, Blaimschein M, Walch C. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminum foam [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37:4125—4147.
- [11] Güden M, Kavi H. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(7):739—750.

Experimental investigations on the quasi-static axial crushing of foam-filled double square columns

GUO Liu-wei, YU Ji-lin

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract: Experimental studies on the quasi-static axial crushing of foam-filled double square columns were carried out. It was revealed that the load carrying capacity and the energy absorption efficiency of the foam-filled double tube structure are higher than those of the corresponding empty and foam-filled single square columns. For the foam-filled double tube structure, the stroke efficiency and the energy absorption efficiency under the outer tube tear failure mode is higher than that under the progressive buckling mode. And a new filling method, i. e. foam filled in corners of the double square column, is tested and it is found that its deformation mode is much stable and the energy absorption efficiency is higher. The effect of the inner tube thickness and material on the response was also investigated. It shows that, thickening the inner tube will increase the energy absorption ability. But enhancing the inner tube material affects the structural response little.

Keywords: foam-filled double square columns; quasi-static axial crushing behavior; mass efficiency of energy absorption