

文章编号: 1001-4888(2011)02-0181-09

泡沫铝夹芯双圆管结构的 准静态轴向压缩性能研究*

郭刘伟^{1,2}, 虞吉林¹, 杨国栋¹

(1. 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, 安徽合肥 230027;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 对泡沫铝夹芯双圆管结构的准静态轴压性能进行了实验研究, 发现该新型结构的比质量吸能效率远远高于传统的泡沫铝夹芯单管, 并接近甚至超过相应的空管结构; 其内外管变形模式均与空管不同且受内外管组合的影响。本文讨论了它的变形机理, 分析了外管壁厚对其压缩行为的影响, 发现增大外管壁厚有利于增大结构的行程利用率, 提高结构的比质量能量吸收效率。实验研究还发现, 管壁与泡沫铝夹芯间粘合的效果并不明显。

关键词: 泡沫铝夹芯结构; 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

薄壁管状结构受轴向压力时发生屈曲, 能够比较平稳地吸收大量冲击能量, 是一种比较理想的吸能元件。对此已有大量的实验和数值研究^[1-9], 并已在工程实践中得到了广泛应用。

近年来出现的轻质多孔材料, 例如泡沫铝、蜂窝等等, 由于其质量轻, 压垮力平台比较平稳, 利于稳定吸能, 受到了广泛的关注。以闭孔泡沫铝为填充材料的薄壁结构作为一种新型吸能元件, 已经在很多工程领域得到应用。研究表明^[10-14], 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的压垮力之和。泡沫铝填充使得圆管变形由金刚石模式转变为手风琴模式^[11]。填充物降低了管子每个褶皱的长度, 增加了褶皱总数量^[12]。且管壁与填充物间胶合可以提升结构的平均压垮力^[13]。

Güden 和 Kavi^[14]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好于泡沫铝填充单管, 但仍低于相应的空管结构。Seitzberger 等^[15]研究了泡沫铝填充的方形、六边形和八边形钢管(包括单管夹芯和双管夹芯)结构, 指出虽然双管三明治结构的压垮距离会减小, 但与泡沫铝填充单管相比, 其整体吸能效率得到改善, 但与空管相比, 这些双管填充结构的吸能效率并没有优势。郭刘伟等^[16]对泡沫铝夹芯双方形铝管的准静态轴向压缩性能进行了实验研究, 得到了该类结构的不同变形模式, 并提出一种改进型结构—四角填充双管结构。

轻质、高承载力、高比质量吸能效率、高行程利用率、低压垮力振荡是承载吸能结构的主要性能要求。以往的研究发现, 填充泡沫虽然可提高结构的压垮力, 但泡沫铝填充单管的行程利用率和比质量吸能率并不优于空管, 仅在减小载荷振荡和结构体积上具有优势。虽然 Seitzberger 等^[13]、郭刘伟等^[16]对几种泡沫铝填充双钢管、方形铝管结构进行了研究, 但对于轻质及吸能效果更好的铝合金圆管双层夹芯

* 收稿日期: 2010-10-05; 修订日期: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(90916026, 10672156, 11002140)资助

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

结构并未进行研究。本文对泡沫铝夹芯双层铝合金圆管结构的轴向准静态压缩性能进行了实验研究。我们研究了轴向压缩时内外管变形模式的变化及其成因,分析了该结构的承载、吸能特性,并与空管及传统的泡沫铝夹芯单管结构进行了对比,同时探讨了外管及胶合作用对该种结构的影响。

1 实验

实验中管壁基体材料为 AA 6063 T6,其准静态拉伸工程应力—应变曲线见图 1。对于不同厚度的材料,其拉伸性能稍有不同。作为芯层的闭孔泡沫铝材料由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。

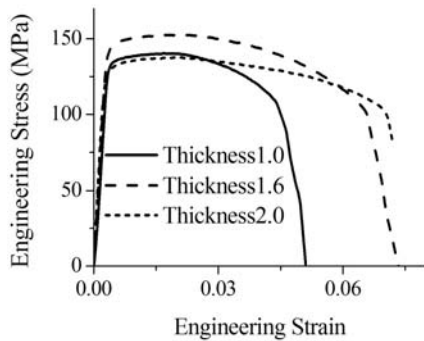


图 1 管壁材料单轴拉伸性能曲线
Fig. 1 The uniaxial tensile test results of the profile material

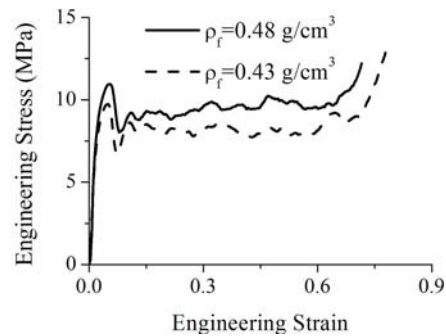


图 2 芯层泡沫铝准静态压缩性能曲线
Fig. 2 The uniaxial compressive test results of aluminum foams

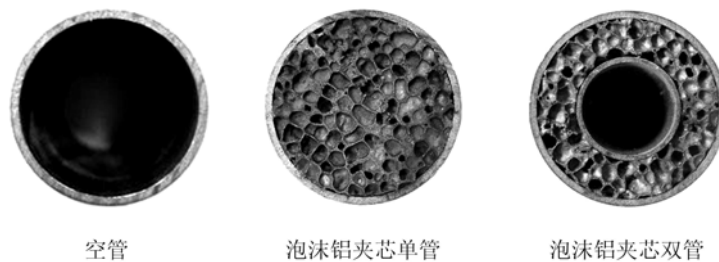


图 3 不同类型结构的截面

Fig. 3 The sections of different kinds of structures

表 1 圆管尺寸(mm)

Tab. 1 The dimensions of cylindrical tubes (in mm)

	Outer tube		Inner tube	
	Diameter	Thickness	Diameter	Thickness
1	38	1.0	20	1.2
2	38	1.6	24	1.2
3	38	2.0	22	1.4

实验中所用方管类型见表 1。本文中试件的命名规则如下:如"D21a"中,首字母表示结构的填充状态如:E表示空管结构,S为泡沫铝夹芯单管结构,而D则为泡沫铝夹芯双管结构;紧接着的两个数字分别为表 1 中外管及内管类型代号;最后的字母 a 表示该类试件的重复性实验编号。不同类型的结构截面如图 3 所示。所有试件长度均为 90mm,详细参数见表 2。用于轴向压缩的设备为 MTS809 材料试验机,试件两端自由,加载应变率为 $10^{-3}/s$ 。每种试件重复三次实验,图 4 为不同结构重复性实验的力—位移曲线,可见,各类结构的平均压垮力及行程利用率重复性较好,故各类结构中只选择其中一个实

验结果来进行性能对比。

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:

结构压实前的总能量吸收 $E_t = \int_0^U Fdu$, 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, 如图 4(a) 所示。

结构的比质量能量吸收效率 $E_s = E_t/m$, 其中 m_t 为结构总质量。

结构的行程利用率 $St_e = U/L$, 其中 L 为试件总长度。

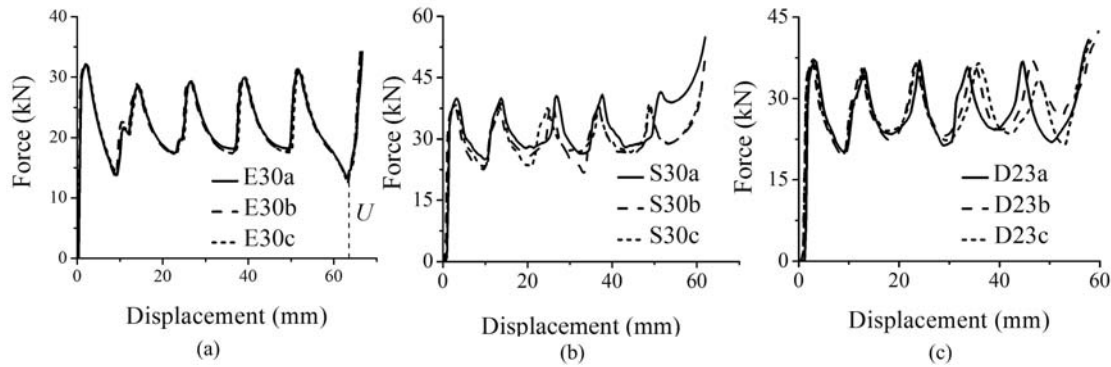


图 4 不同结构的重复性实验结果 (a)空管, (b)泡沫铝夹芯单管, (c)泡沫铝夹芯双管
Fig. 4 The reproducibility of experiments for (a) empty tubes, (b) foam-filled single tubes and (c) foam-filled double tubes

3 结果及讨论

3.1 变形模式

实验中结构的变形模式如图 5 所示。空管结构因直径 D 与壁厚 T 的比值不同, 有非轴对称模式 N_E 及轴对称模式 A_E 。对于泡沫铝填充结构, 外管发生混合变形模式 L 及轴对称变形模式 Z , 其中混合

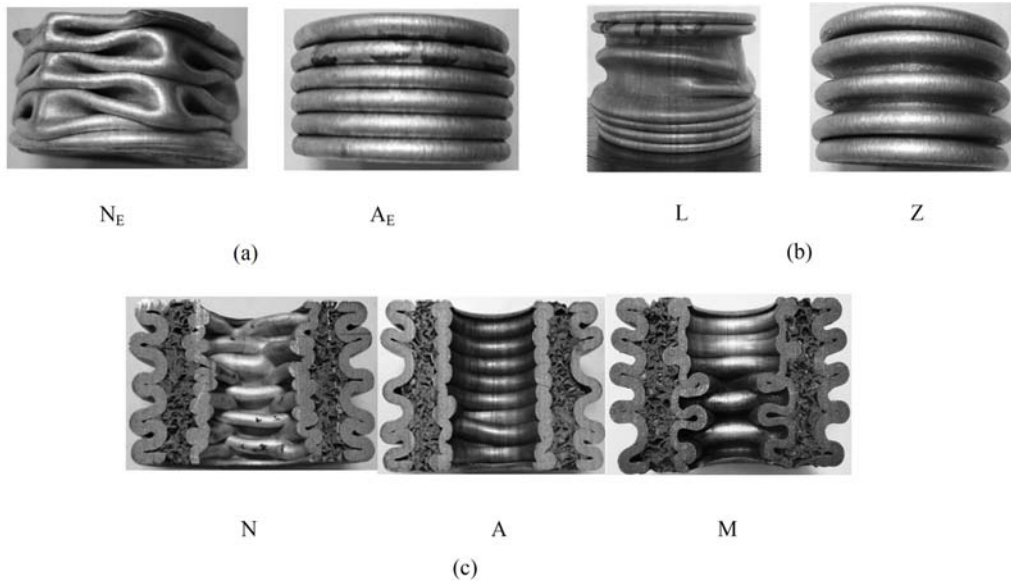


图 5 各类结构的变形模式 (a)空管 (b)泡沫铝夹芯管结构外管 (c)泡沫铝夹芯双管内管
Fig. 5 Deformation modes of different structures: (a) empty tubes, (b) outer tube of foam-filled tubes and (c) Inner tube of foam-filled double tubes

模式 L 是以螺旋形变形为突出特征、轴对称变形为主的变形模式。而内管变形分为非轴对称模式 N 、

轴对称模式 A 及混合模式 M。内管混合模式 M 以轴对称变形为主, 掺杂二瓣或多瓣非轴对称变形模式。各试件具体变形模式见表 2。对于泡沫铝填充管结构, 泡沫铝阻碍管壁向内变形, 使得外管由非轴对称模式转变为 L 类混合变形模式, 而管壁较厚且本身为轴对称变形的管则受内部泡沫铝的影响较小, 变形模式不变。双管夹芯结构中, 因泡沫铝的多孔性及不均匀性, 内管一般发生不规则的非轴对称变形 N。但对于特定的内外管组合如 D32 系列, 内管则发生短褶皱长度的轴对称变形模式 A 及以轴对称变形为主的混合模式 M。对比其他内外管组合可知, 内外管直径比可能在很大程度上影响内管的变形模式。

表 2 试件参数和实验结果

Tab. 2 The parameters and experimental results of specimens

Samples	Profiles (outer-inner)		Aluminum foams		M_i (g)	St_e	E_i (J)	E_s (J/g)
	Mass (g)	mode	Mass (g)	ρ_f (g/cm ³)				
E10a	27.6-0	NE	—	—	27.6	0.74	604	21.9
E10b	27.6-0	NE	—	—	27.6	0.74	582	21.1
E10c	27.6-0	NE	—	—	27.6	0.70	526	19.1
E20a	41.4-0	AE	—	—	41.4	0.70	1022	24.7
E20b	41.4-0	AE	—	—	41.4	0.70	1022	24.7
E20c	41.5-0	AE	—	—	41.5	0.70	1021	24.6
E30a	50.8-0	AE	—	—	50.8	0.70	1365	26.9
E30b	50.8-0	AE	—	—	50.8	0.70	1369	26.9
E30c	50.9-0	AE	—	—	50.9	0.70	1353	26.6
S10a	27.6-0	—	43.3	0.47	70.9	—	—	—
S10b	27.7-0	L	37.1	0.41	64.8	0.53	863	13.3
S10c	27.7-0	L	43.9	0.48	70.6	0.53	943	13.3
S20a	41.5-0	Z	39.1	0.46	80.6	0.55	1279	15.9
S20b	41.6-0	L	40.3	0.47	81.9	0.54	1314	16.0
S20c	41.4-0	Z	40.9	0.48	82.3	0.55	1344	16.3
S30a	50.8-0	Z	38.4	0.47	89.2	0.55	1498	16.8
S30b	50.9-0	Z	33.3	0.41	84.1	0.59	1546	18.4
S30c	50.8-0	Z	34.4	0.42	85.3	0.59	1568	18.4
D21a	41.5-14.1	Z-N	25.2	0.44	80.8	0.54	1398	17.3
D21b	41.5-14.1	Z-N	22.6	0.39	78.2	0.60	1472	18.3
D21c	41.5-14.1	Z-N	23.3	0.41	78.9	0.56	1390	17.6
D22a	41.5-20.0	Z-N	23.9	0.47	85.4	0.57	1978	22.8
D22b	41.5-20.0	L-N	20.9	0.41	82.4	0.55	1857	22.5
D22c	41.5-20.0	Z-M	20.4	0.40	81.9	0.61	2100	28.6
D23a	41.5-17.1	Z-N	20.3	0.45	78.9	0.56	1343	17.0
D23b	41.5-17.1	L-N	19.7	0.44	78.3	0.58	1446	18.4
D23c	41.5-17.1	Z-N	19.8	0.44	78.4	0.59	1425	18.1

(续表 2)

Samples	Profiles (outer-inner)		Aluminum foams		M_i (g)	St_e	E_i (J)	E_c (J/g)
	Mass (g)	mode	Mass (g)	ρ_f (g/cm ³)				
D11a	27.6—14.1	—	24.0	0.35	65.7	—	—	—
D11b	27.6—14.2	L-N	26.7	0.39	68.5	0.56	1148	16.7
D11c	27.6—14.1	L-N	24.8	0.36	66.5	0.56	1074	16.1
D13a	27.7—17.1	L-N	19.1	0.34	63.9	0.51	903	14.1
D13b	27.7—17.1	L-N	21.5	0.38	66.3	0.55	1030	15.4
D13c	27.7—17.1	L-N	19.4	0.35	64.2	0.56	987	15.3
D31a	50.8—14.1	L-N	23.6	0.37	88.5	0.61	1782	20.0
D31b	50.8—14.1	Z-N	24.3	0.38	89.2	0.62	1855	20.7
D31c	50.8—14.1	Z-N	24.2	0.38	89.1	0.61	1793	20.1
D32a	50.8—20.0	Z-M	24.3	0.42	95.1	0.63	2245	23.6
D32b	50.8—20.0	Z-M	23.0	0.40	93.8	0.59	2156	23.0
D32c	50.8—20.0	Z-A	22.1	0.39	92.9	0.60	2302	24.8
D33a	50.8—17.1	L-N	17.9	0.35	85.8	0.60	1657	19.2
D33b	50.8—17.1	Z-N	18.8	0.37	86.7	0.60	1720	19.8
D33c	50.8—17.1	Z-N	18.6	0.37	86.5	0.63	1803	22.8
D22Ga	41.5—20.0	Z-N	24.2	0.47	89.1	0.58	2088	23.4
D22Gb	41.5—20.0	L-N	24.1	0.47	88.1	0.59	2068	23.5
D22Gc	41.5—20.0	L-N	22.6	0.44	87.2	0.55	1948	22.3

双管夹芯结构内部泡沫铝的变形如图 6 所示。内管的不规则非轴对称变形导致泡沫铝夹芯层产生一系列剪切带,这些泡沫铝内部的剪切带直接导致了薄壁外管的非连续性螺旋变形,而壁厚较厚的外管受内部泡沫铝变形的影响较小。

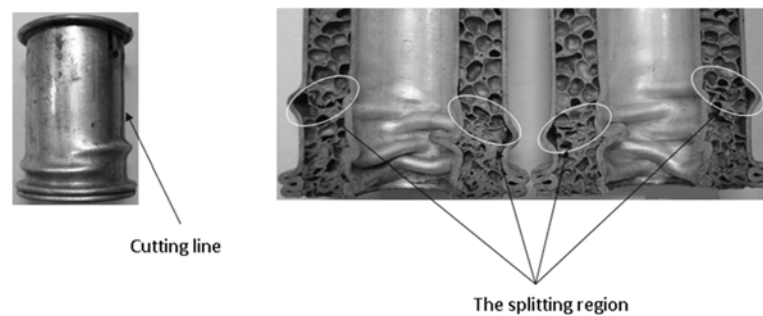


图 6 泡沫铝夹芯双管结构剖面分析

Fig. 6 The axial cutting section view of the foam-filled double tube with deformation mode L.

3.2 承载和吸能性能

各类结构轴向承载曲线如图 7。泡沫铝填充提高了结构的平均压垮力和承载的稳定性,但同时也降低了结构的行程利用率。双管夹芯结构中,以 D22 组合的承载力为最高,其他组合结构的承载力与单管填充结构基本一致。且由表 1 中内管对比可见,与内管壁厚相比,内管直径对双管夹芯结构承载力特性的影响可能更大。较单管填充结构,双管夹芯结构稍微提高了结构的行程利用率,但仍低于空管结构,如图 8(a) 所示。泡沫铝填充提高了结构的总能量吸收能力,以双管夹芯结构 D22 最为突出。单管

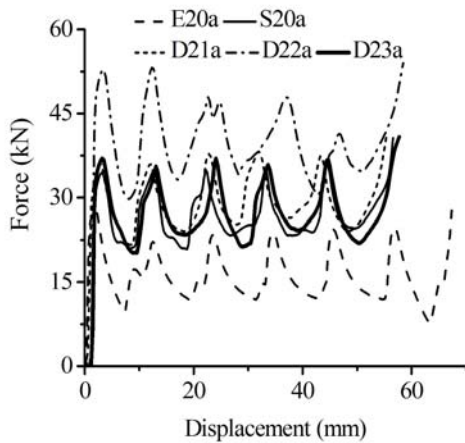


图 7 不同结构间载荷位移曲线的对比

Fig. 7 A comparison of force-displacement curves of different structures

填充结构的比质量能量吸收效率远远低于空管结构,而双管夹芯结构的比质量能量吸收效率高于一管填充结构。特别是双管夹芯结构 D22,其总质量与单管填充结构 S20 基本相同,但比质量能量吸收效率远远高于 S20,且接近甚至高于相应的空管结构 E20,如图 8(b)(c) 所示。可见,合理的内外管组合,可以在保持总质量不变的情况下,大大提高结构的能量吸收效率。

外管壁厚对双管夹芯结构的影响如图 9 所示。在目前的实验范围内,增大外管壁厚有效地提高了结构的承载力及行程利用率。这可能是因为薄壁外管受内部填充物的影响严重,发生非连续性螺旋变形,致使结构未能充分被压缩,行程利用率降低。而随着外管壁厚增大,外管变形受内部泡沫铝的影响变小,变形模式不变,仍为

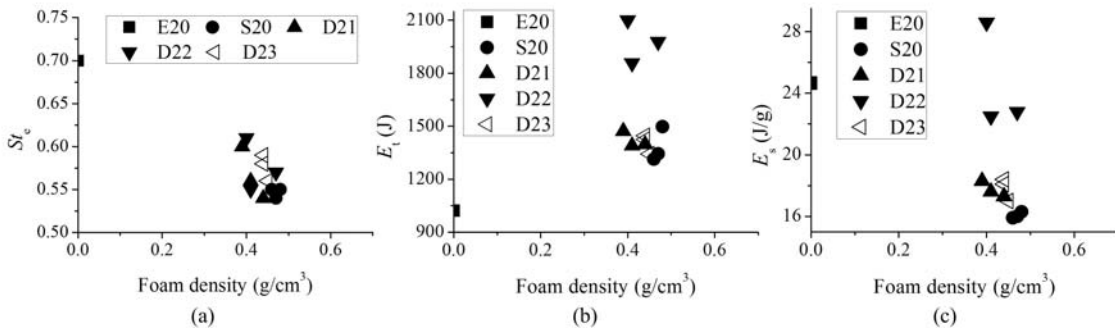


图 8 不同结构间 (a)行程利用率, (b)总能量吸收, (c)比质量能量吸收的对比

Fig. 8 Comparisons of (a) the stroke efficiency, (b) the total energy absorption and (c) the specific energy absorption among different structures

双管夹芯结构中内外管与泡沫铝夹芯层间的胶合作用如图 10 所示。管壁与芯层间胶合后,该结构的行程利用率及总能量吸收能力稍有提高,但比质量能量吸收能力基本一致,甚至变得更低。故在目前的实验结果内,管壁与芯层间胶合对结构的积极贡献有限。

4 结论

本文对泡沫铝夹芯圆管结构的轴向准静态压缩性能进行了实验研究。泡沫铝填充使得薄壁外管由非轴对称变形模式转变为以轴对称变形为主、螺旋变形为特征的混合变形模式,而管壁较厚外管的变形模式受泡沫铝填充影响较小。双管夹芯结构中因泡沫铝的多孔性及不均匀性,内管更易发生不规则的非轴对称变形,从而引发泡沫铝夹芯层内的剪切带,故薄壁外管易发生非连续性螺旋变形。而双管夹芯结构中内管的变形模式受内外管组合影响较大,随组合不同可发生轴对称、非轴对称及混合模式变形。

泡沫铝填充物提高了圆管结构的平均压垮力及承载的稳定性,但传统的泡沫铝填充单管结构的比质量能量吸收效率远远低于空管,而新型的双管夹芯结构因引入了内管,使得芯层泡沫铝充分被压缩,故该新型结构的比质量能量吸收效率远远高于传统的单管夹芯结构,且合理的内外管组合使得该结构的比质量能量吸收效率接近甚至超过对应外管的空管结构。在目前的实验范围内,增大外管壁厚,有利于提高结构的承载力、行程利用率及比质量能量吸收效率,而管壁与芯层间的胶合对于结构性能的影响

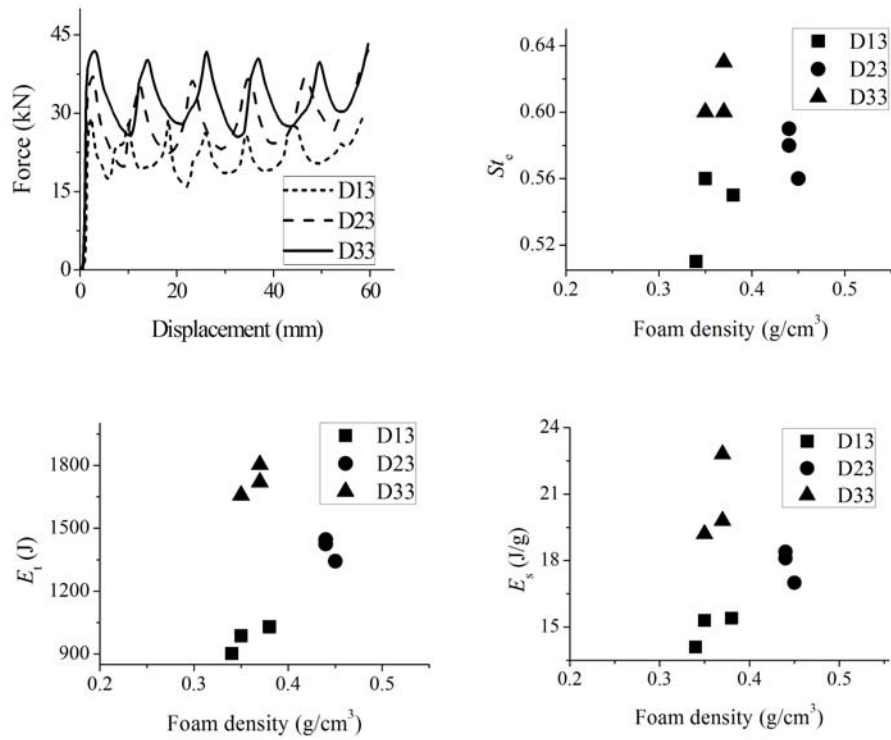


图 9 外管壁厚对双管夹芯结构 (a)承载力 (b)行程利用率 (c)总能量吸收 (d)比质量能量吸收的影响
 Fig. 9 The effect of the outer tube thickness on the (a) load carrying capacity, (b) the stroke efficiency (c) the total energy absorption and (d) the specific energy absorption of foam-filled double tubes

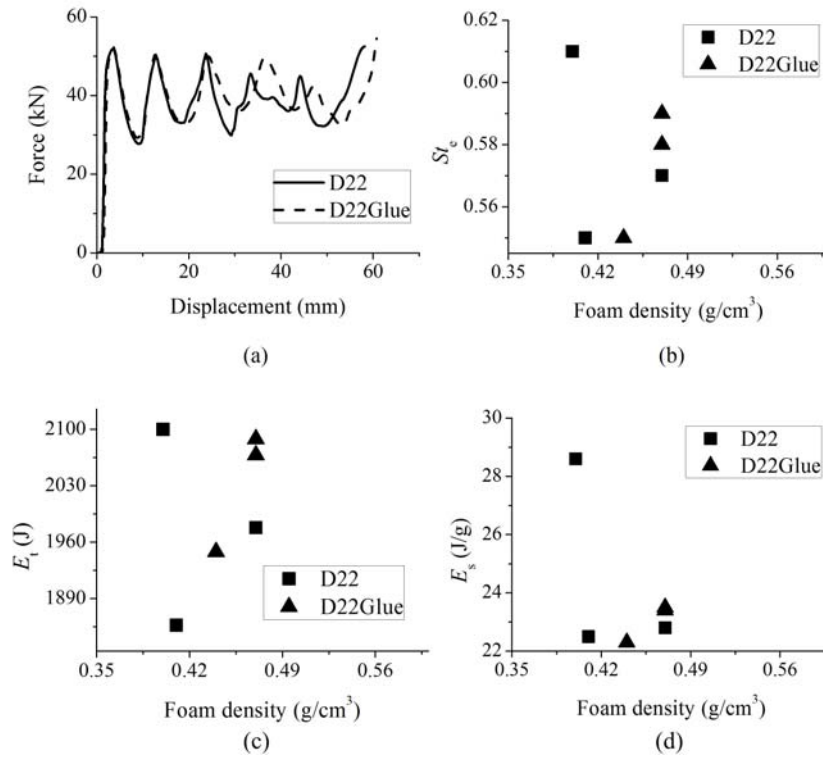


图 10 胶合对双管夹芯结构 (a)承载力 (b)行程利用率 (c)总能量吸收 (d)比质量能量吸收的影响
 Fig. 10 The influence of adhesive on (a) the load carrying capacity, (b) the stroke efficiency, (c) the total energy absorption and (d) the specific energy absorption of foam-filled double tubes

并不明显。

实验发现了双管夹芯结构轴向压缩时一些特有的变形模式,如外管的非连续性螺旋变形,其机理有待进一步研究。限于本实验中有限的内管类型,该新型夹芯结构中内外管的优化组合需进一步实验研究。

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—15.
- [2] Andrews K R F, England G L, Ohani E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25:687—696.
- [3] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50:727—739.
- [4] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(3):263—281.
- [5] Wierzbicki T, Bath S U. A moving hinge solution for axisymmetric crushing of tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1985, 28(3):135—151.
- [6] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4(4):243—270.
- [7] Gupta N K, Velmurugan R. Consideration of internal folding and non-symmetric fold formation axisymmetric axial collapse round tubes [J]. International Journal of Solids and Structure, 1997, 34:2611—2630.
- [8] Gupta N K, ABBAS H. Some considerations in axisymmetric folding of metallic round tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(4):331—344.
- [9] Guillois S R, Lu G, Grzebieta R H. Quasi static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43:2103—2123.
- [10] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, Degischer H P, Grandiger R. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam [J]. Acta Mechanica, 1997, 125:93—105.
- [11] 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.
- [12] Santosa S P, Wierzbicki T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam [J]. Computers & Structures, 1998, 68:343—367.
- [13] Santosa S, Wierzbicki T, Hanssen A G, Langseth M. Experimental and numerical studies of foam-filled sections [C]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:509—534.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 郭刘伟, 虞吉林. 泡沫铝夹芯双方管结构准静态轴压性能的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(3):271—278 (Guo Liuwei, Yu Jilin. Experimental investigations on the quasi-static axial crushing of foam-filled double square columns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(3):271—278(in Chinese))

On the Quasi-Static Axial Crushing Behavior of Foam-Filled Double Cylindrical Tubes

GUO Liu-wei^{1,2}, YU Ji-lin¹, YANG Guo-dong¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Science and Technology on Shock Waves and Detonation Physics Laboratory, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Quasi-static axial crushing behavior of foam-filled double cylindrical tube was studied experimentally. It is found that the specific energy absorption efficiency of this new structure is much higher than that of traditional foam-filled single tube and approaches to or even higher than that of empty tube. The profile's deformation mode of this new structure differs from that of empty tube and depends on the inner and outer tube arrangement. The deformation mechanism was discussed. The effect of the outer tube thickness on its compressive behavior was also analyzed. Results show that thicker outer tube wall increases the stroke efficiency and the specific energy absorption of the structure. It is also found that the adhesive did not effect on the response of this new structure obviously.

Keywords: foam-filled tube structure; quasi-static axial crushing; mass efficiency of energy absorption