

文章编号:1001-4888(2012)01-0077-10

薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究*

李志斌¹, 虞吉林¹, 郑志军¹, 郭刘伟^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 绵阳 621900)

摘要: 对两种 AA 6063 T6 铝合金薄壁空管(方/圆管)结构以及填充泡沫铝的 5 种不同几何截面的薄壁夹芯管(单方/圆管填充, 双方/圆管填充, 双方管四角填充结构)分别进行了准静态轴向压缩实验, 研究了各种薄壁结构的变形模式和吸能性能, 比较了反映不同结构耐撞性的各种参数, 如比能量吸收和能量吸收效率因子等。同时, 研究了各种填充结构的几何参数对结构耐撞性能的影响, 发现填充结构内管的尺寸对结构的耐撞性影响显著。研究结果显示, 圆管类型的结构平均压垮载荷、比质量能量吸收、单位行程能量吸收以及能量吸收效率因子都较方管类型结构高。泡沫填充单/双圆管结构由于其较高的压垮力效率和能量吸收效率, 能够较平稳高效地吸能, 作为耐撞性结构元件具有很大的优势。

关键词: 薄壁管; 轴压; 耐撞性; 能量吸收效率因子; 实验研究

中图分类号: TB124 **文献标识码:** A

0 引言

结构耐撞性是评价在可能发生的碰撞事故中, 结构或构件对乘客或装载物实施保护能力的指标。碰撞发生后, 结构和乘客或装载物受到的伤害越小, 则结构的耐撞性越好^[1]。由于各种交通工具的数量越来越多, 速度越来越快, 碰撞事故也随之日益增加。碰撞问题已经引起科学家和工程师们的高度关注, 汽车、飞机、载人航天飞船、轮船等各种运载工具均要求结构具有良好的碰撞吸能性能。此外, 运载结构的轻量化可以有效降低能源消耗和缓解巨大的环境压力。安全和环境保护的要求促使科学家和工程师们研发高效轻质的能量吸收装置, 通过缓冲吸能部件的屈曲、损伤、断裂等破坏形式来减缓碰撞时的冲击载荷, 同时吸收大量的冲击能量, 以提高车辆、船舶、飞行器等运载工具的耐撞性, 减轻碰撞对人员和结构的伤害^[2]。例如, 汽车车身轻量化技术的研究, 对于汽车工业的可持续发展, 以及我国社会发展、能源战略都具有重大意义^[3]。因此, 合理有效地设计性能优异的缓冲吸能结构以满足耐撞性要求是汽车设计与发展的重要课题^[4]。

薄壁金属管是最传统、最有效的缓冲吸能结构, 已经广泛应用于汽车、铁路列车、飞机和船舶等几乎所有运载工具的碰撞能量耗散系统中。这种结构的缓冲吸能机理研究得到了众多研究者的关注。经过合理的设计, 薄壁管结构具有可控制的破坏模式, 较平稳的压缩载荷, 是一种优异的缓冲吸能元件^[5]。然而, 薄壁空管承受非轴向载荷的能力较弱, 而且容易发生欧拉屈曲, 导致吸能不充分。而近年来备受关注的轻质多孔材料^[6], 如泡沫铝、蜂窝等, 由于其质量轻, 压垮力平台较平稳, 利于平稳吸能。研究者

* 收稿日期: 2011-11-04; 修订日期: 2011-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(90916026)、中国科学院创新工程方向项目(KJ CX2-EW-L03)和国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01-B02-2)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

将多孔材料与薄壁结构相结合,获得了满意的吸能效果^[7-10]。轻质多孔材料的填充提高了薄壁结构轴向压缩的平均压垮力,由于耦合效应,填充结构的能量吸收远大于多孔材料和薄壁空管各自单独能量吸收的总和。在轴向压缩过程中,多孔材料对管壁褶皱的抑制效应导致塑性褶皱波长变短和褶皱数目增加^[8];同时管壁生成褶皱后侵入芯层多孔材料,对多孔材料形成多方向挤压,增加了多孔材料的塑性变形,从而使得填充结构整体的承载能力和能量吸收能力得到大幅提高^[7]。填充材料的引入还可以提高薄壁结构的稳定性,降低薄壁管发生整体屈曲的可能性,这些变形模式的转变也会提高薄壁结构的能量吸收能力^[1]。

截面几何形状对薄壁管耐撞性有较大影响,量化对比多种截面几何形状在能量吸收方面的性能,对于吸能缓冲结构的设计具有一定的指导意义。为研究薄壁管及其泡沫铝填充结构的耐撞性,本文对7种不同几何截面的薄壁管进行了准静态轴向压缩实验,对不同结构的变形模式及承载吸能特性进行了分析对比,给出了各种截面的薄壁管及其填充结构的载荷位移曲线,并通过比质量能量吸收和能量吸收效率因子^[11-13]等耐撞性参数来评价薄壁结构的耐撞性能。

1 准静态轴压实验

实验中使用的薄壁管管壁材料为铝合金 AA 6063 T6,不同厚度下的方管和圆管管壁材料力学性能如表1所示。对于不同厚度的方管或圆管管壁材料,其拉伸性能稍有不同,这可能是由于不同壁厚的薄壁管在挤压成型时的挤压比不同造成的。从表中可以看出,圆管管壁材料的屈服强度略低于方管。薄壁填充管芯层所用的闭孔泡沫铝材料由中船重工集团七二五所泡沫铝研制中心提供,采用熔体发泡法制备,平均孔径为2~4mm,平均密度为0.45g/cm³。单轴压缩力学性能测试测得其弹性模量 $E=625\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_c=9.74\text{MPa}$, 平台应力 $\sigma_p=8.12\text{MPa}$ 。

表1 薄壁管管壁材料力学性能

Tab.1 Mechanical property of profile materials

Specimen type		Specimen number	Specimen size (mm)	Wall thickness t (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Ultimate stress σ_u (MPa)	Uniaxial tensile rupture strain ϵ_r
Circular	Outer tube	3	$\Phi 38 \times 90$	2.0	47	126	138	0.070
	Inner tube	1	$\Phi 20 \times 90$	1.2	42	128	140	0.070
		2	$\Phi 22 \times 90$	1.4	42	134	146	0.070
		3	$\Phi 24 \times 90$	1.2	42	128	140	0.070
Square	Outer tube	1	$38 \times 38 \times 114$	0.9	53	160	192	0.089
	Inner tube	2	$25 \times 25 \times 114$	0.9	53	160	192	0.089
		4	$25 \times 25 \times 114$	2.0	52	203	227	0.089

实验中设计了7种结构,不同几何截面的结构示意图如图1所示:(a)空方管结构,(b)单方管填充结构,(c)双方管填充结构,(d)双方管四角填充结构,(e)空圆管结构,(f)单圆管填充结构以及(g)双圆管填充结构。实验中使用到的管材见表1所示。实验所用圆管有3种,壁厚均为2.0mm,其中外管外径均为38mm,而内管外径有所不同。为方便地对比各种薄壁管结构的性能。实验中试件遵循下列规则命名。以“CD32”为例,编号中第一个字母:C表示圆管结构,S表示方管结构。第二个字母:E表示空管结构,S表示单管填充结构,D表示双管填充结构,C表示泡沫铝四角填充结构。紧接着两个数字,前者为外管类型,后者为内管类型(见表1)。相同结构类型的重复性实验以最后的字母区别,对于统计结果不再显示这个编号。实验中所有方管试件总长 $L=114\text{mm}$,圆管试件总长 $L=90\text{mm}$ 。

单轴压缩实验在中国科学技术大学工程实验中心 MTS 809 材料试验机上进行,实验过程中没有特殊的固定装置(如夹具),试验机压头直接对薄壁管试件两端面进行加载,加载速率为0.1mm/s。

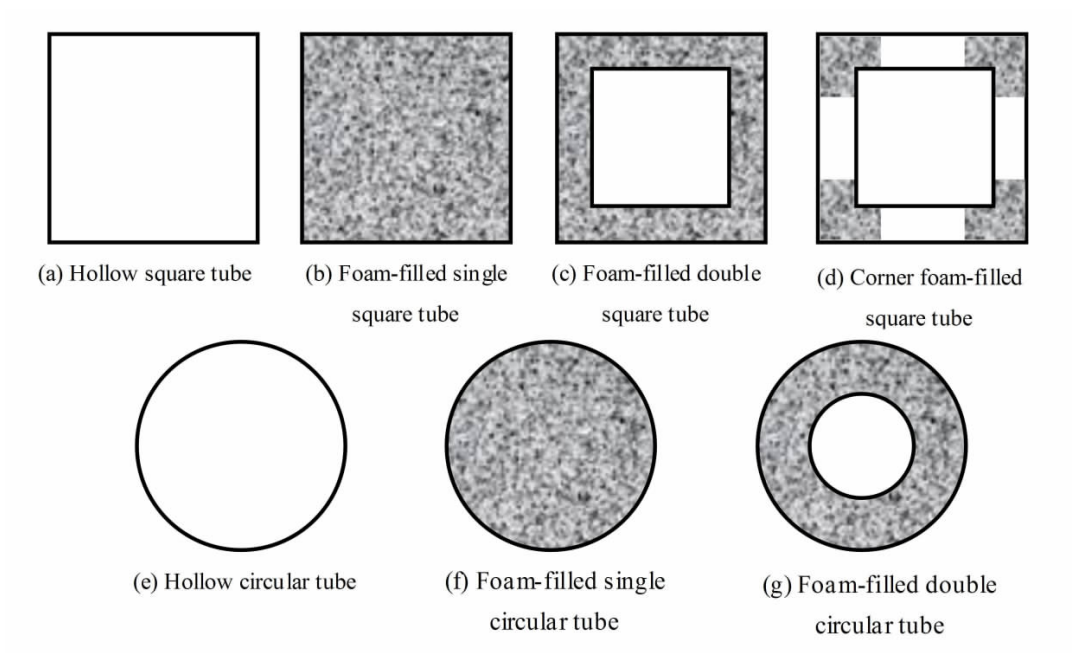


图 1 不同几何截面的薄壁管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of geometrical sections for seven types of the thin-walled structures

2 实验结果

2.1 载荷位移曲线

薄壁结构轴向压缩时典型的载荷位移曲线如图 2(a)所示,不同几何截面薄壁管结构载荷位移曲线的对比见图 2(b)。泡沫铝填充提高了结构的承载力和结构的承载稳定性,但同时也降低了结构的行程利用率。

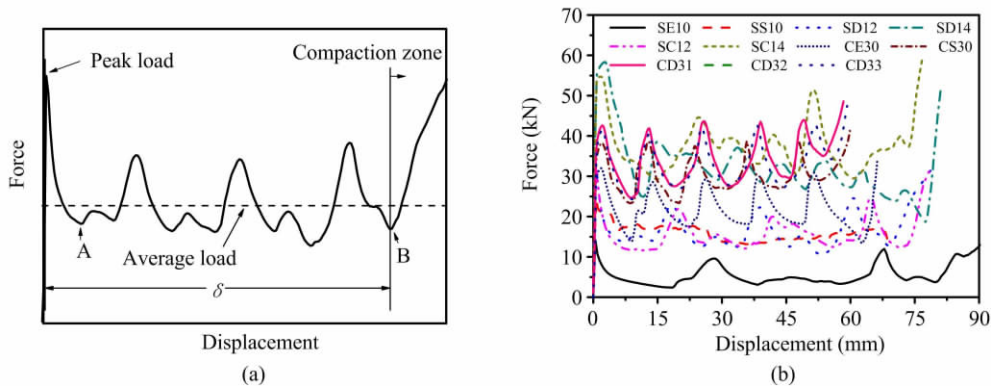


图 2 (a) 典型的载荷位移曲线, (b) 不同结构间的对比

Fig. 2 (a) A typical load-displacement curve and (b) comparison among different structures

2.2 变形模式

不同几何截面薄壁管结构准静态轴压变形模式见图 3。空方管(SE)的变形均为紧凑型模式^[1],而空圆管(CE)轴向压溃时,其变形模式受管径与壁厚比值 D/T 的影响,可能是轴对称的圆环模式或非轴对称的金刚石模式(图 3(a))。

对于单方管填充结构(SS),由于泡沫铝阻碍管壁向内变形,且未经热处理的铝合金材料较脆,故此类结构容易在最薄弱的四角处发生撕裂(图 3(b)),即四角撕裂模式。且随着四角撕裂发展,外管四边逐渐向外卷曲。这种模式并不适合结构的稳定变形且不易控制。双方管填充结构(SD)因引入了内管,

即使泡沫铝夹芯双管结构发生外管四角撕裂模式,但因内管的持续稳定变形(图3(c)),结构的承载力及变形稳定性也得到一定程度的保证。这使得该结构即使在外管存在不稳定变形的情况下,也表现出比传统的单管填充结构更稳定的变形。双方管四角填充结构(SC)在去除了对外管向内变形有严重阻

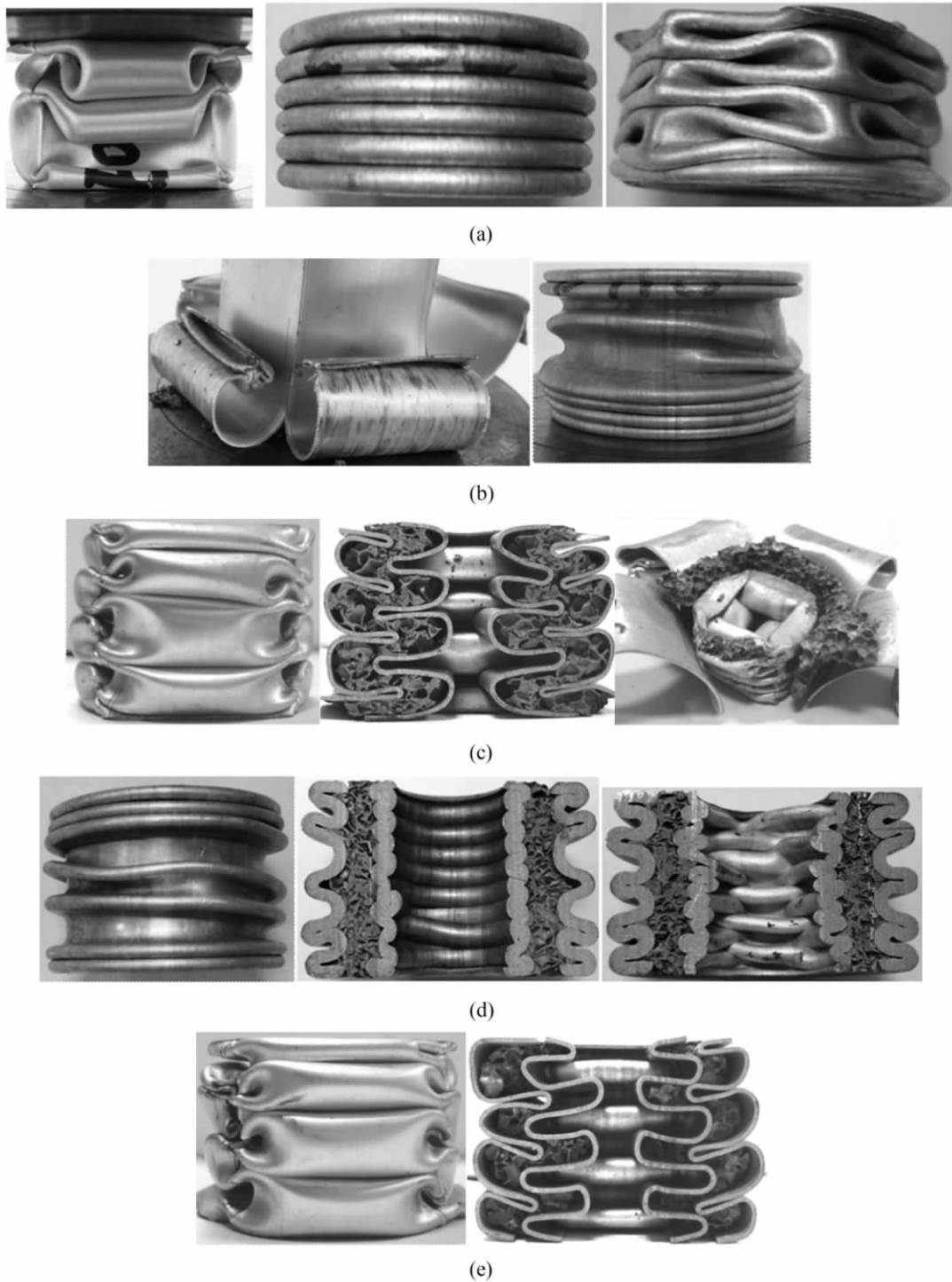


图3 不同几何截面薄壁管的变形模式:(a)空方/圆管结构;(b)单方/圆管填充结构;
(c)双方管填充结构;(d)双圆管填充结构;(e)双方管四角填充结构。

Fig. 3 Deformation modes of different thin-walled structures; (a) hollow thin-walled tubes; (b) foam-filled single tubes; (c) foam-filled double square tubes; (d) foam-filled double circular tubes; (e) Corner foam-filled double square tubes.

碍作用的四边部分泡沫铝后,发生周期折叠模式变形,如图 3(e)所示,大大增强了泡沫铝填充结构变形的稳定性与可控性。

对于单圆管填充结构(CS),由于芯层泡沫铝对外管壁向内变形的阻碍作用,致使外管变形模式发生改变,如图 3(b)所示。管壁向内有突出变形的金刚石模式不易发生,继而转变为规则的圆环模式,中间夹杂有部分螺旋形褶皱,且结构的褶皱数量明显增加。该螺旋形褶皱的产生可能与芯层泡沫铝的剪切变形局域化有关,因芯层泡沫铝较脆,当轴向压缩时,会产生局部剪切变形集中,薄壁外管受其影响严重,发生螺旋形变形。双圆管填充结构(CD)外管变形模式与泡沫填充单圆管结构类似(图 3(d))。而内管大多发生非轴对称的金刚石模式,且变形不规则,每个褶皱瓣数不统一。这主要是因为与内管接触的芯层泡沫铝孔径分布不均,有利于金刚石模式的发生,且实验结果表明,相同结构非轴对称变形中每个褶皱所消耗的能量低于轴对称变形,故内管大多发生非轴对称变形。由于内管发生不规则的非轴对称金刚石变形模式,内管不规则褶皱的向外凸起部位挤压芯层泡沫铝,而泡沫铝本身较脆,导致发生螺旋形剪切变形,如图 4 所示。

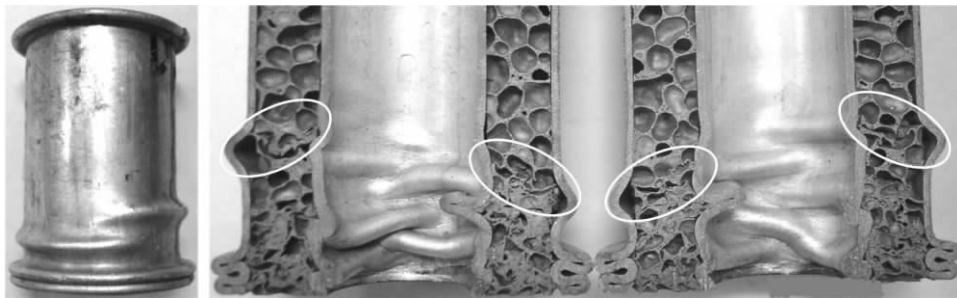


图 4 泡沫填充双圆管结构剖面图

Fig. 4 The profile of the foam-filled double circular tube

3 结构耐撞性

载荷—位移曲线的主要参数如图 2(a)所示。薄壁结构作为承载吸能元件,稳定的承载力、高行程利用率以及高比质量能量吸收效率是其基本要求。本文引入如下参数来评价薄壁管结构的吸能和耐撞性能:

- (1) 初始载荷峰值, P_{\max} ;
- (2) 结构压实前的总位移, δ ;
- (3) 结构压实前的总能量吸收 E , 即结构压实前载荷位移曲线下的面积:

$$E = \int_0^{\delta} P ds \quad (1)$$

(4) 结构压实前的比质量能量吸收 SEA (Specific Energy Absorption), 定义为压垮试件单位质量吸收的能量:

$$SEA = \frac{\int_0^{\delta} P ds}{m_t} \quad (2)$$

- (5) 平均压垮载荷 \bar{P} , 定义为图 2 中 AB 段的承载力平均值;
- (6) 压垮力效率 CFE (Crush Force Efficiency), 定义为初始载荷峰值 P_{\max} 与平均压垮载荷 \bar{P} 的比值;
- (7) 行程利用率 SE (Stroke Efficiency), 定义为结构压实前的总位移 δ 与结构总长度 L 的比值;
- (8) 最大压缩强度 σ_{\max} , 定义为初始载荷峰值 P_{\max} 与结构横截面面积 A 的比值;
- (9) 单位行程能量吸收 EPS (Energy Per Stroke), 定义为结构压实前的总能量吸收 E 与结构压实前的总位移 δ 的比值。

3.1 载荷/能量吸收性能

图 5~图 8 给出了实验所研究的各种薄壁管及其填充结构的吸能和耐撞性能参数的比较, 包括初

始载荷峰值 P_{\max} 、结构压实前的总位移 δ 、结构压实前的总能量吸收 E 、比质量能量吸收 SEA 、平均压垮载荷 \bar{P} 、压垮力效率 CFE 、行程利用率 SE 、最大压缩强度 σ_{\max} 以及单位行程能量吸收 EPS , 误差线表示具有相同几何截面试件的标准差。

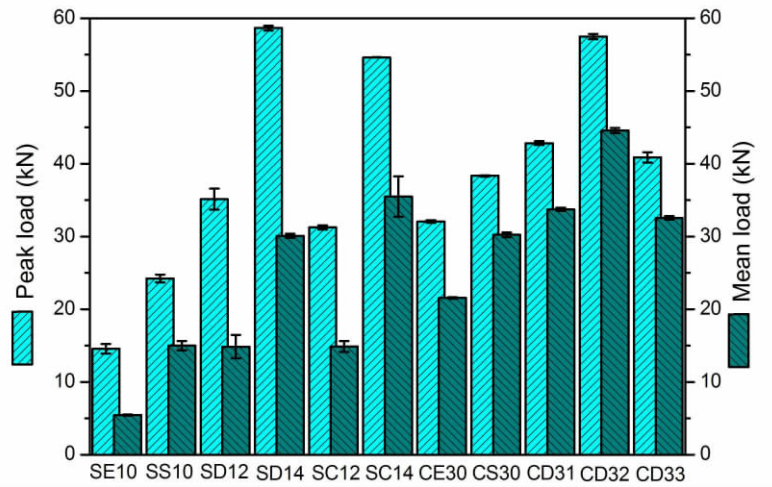


图5 不同几何截面的薄壁管结构的载荷峰值和平均载荷

Fig. 5 Peak and average load characteristics of thin-walled structures with various section geometries

3.1.1 载荷峰值和平均载荷

峰值和平均压缩载荷图(图5)描绘的是每种结构类型的初始峰值载荷 P_{\max} 和平均压垮载荷 \bar{P} 。从图中可以看出,双管填充结构(SD14/CD32)和双方管四角填充结构(SC14)具有较高的初始峰值载荷,但是同时也具有较高的平均压垮载荷,且载荷大小是与内管尺寸紧密相关的。如四角填充方管 SC12 和 SC14 具有相同的截面几何形状,由于内管厚度不同,初始峰值载荷和平均压垮载荷分别从 31.25kN 和 14.89kN 上升到 54.62kN 和 35.50kN。同时从图中可以看出,圆管类型结构的载荷普遍高于方管类型的结构。

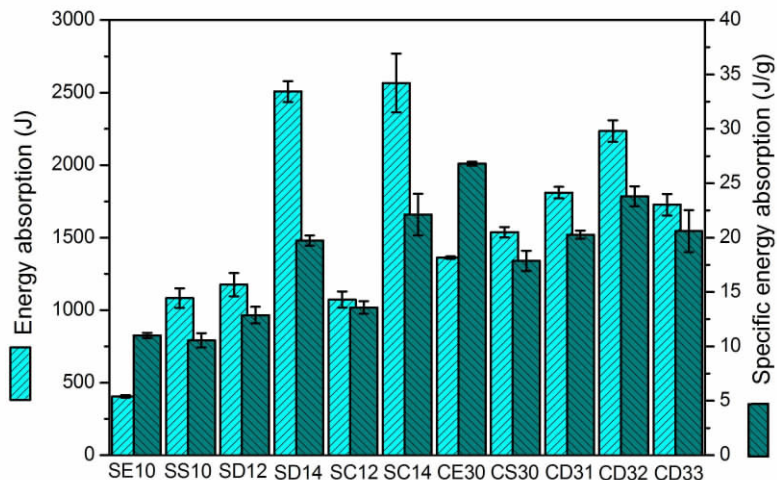


图6 不同几何截面的薄壁管结构的总能量吸收和比质量能量吸收

Fig. 6 Total and specific energy absorption of thin-walled structures with various section geometries

3.1.2 总能量吸收和比质量能量吸收

图6显示的是各种类型结构的总能量吸收 E 和比质量能量吸收 SEA 。各种类型的结构总能量吸收在 400J 和 2600J 之间起伏(方管试件和圆管试件总长分别为 114mm 和 90mm), 而比质量能量吸收

则比较平稳,除了空圆管达到了 26.8J/g 之外,各种类型结构的比质量能量吸收都在 10~20J/g 之间。值得注意的是,传统的泡沫铝填充单管结构的比质量能量吸收都远低于相应的空外管,而泡沫铝填充双管结构的比质量能量吸收则有较大提高,双方管结构以及四角填充结构的比质量能量吸收甚至远高于相应的空方管。这说明合适的内外管组合可以充分发挥内外管与泡沫铝芯层间的相互作用,使得泡沫铝被充分压缩。而四角填充结构(SC12/SC14)进一步增强了结构变形的稳定性,并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,减少结构的总质量,使结构变形更为稳定,从而提高了结构的比质量吸能效率。图 6 显示在能量吸收效率方面圆管类型结构也高于方管类型结构。

3.1.3 单位行程能量吸收和最大压缩强度

如图 7 所示,四角填充方管结构的最大压缩强度远远高于其它结构,达到了 423.67MPa(SC12)和 319.38MPa(SC14),空方管和空圆管次之,分别为 109.09MPa 和 141.74MPa。圆管结构的单位行程能量吸收普遍都高于方管结构,这是与圆管的变形模式有关的。增大填充双方管结构和四角填充方管结构的内管壁厚同样可以提高方管结构的单位行程能量吸收,如 SD14 和 SC14。

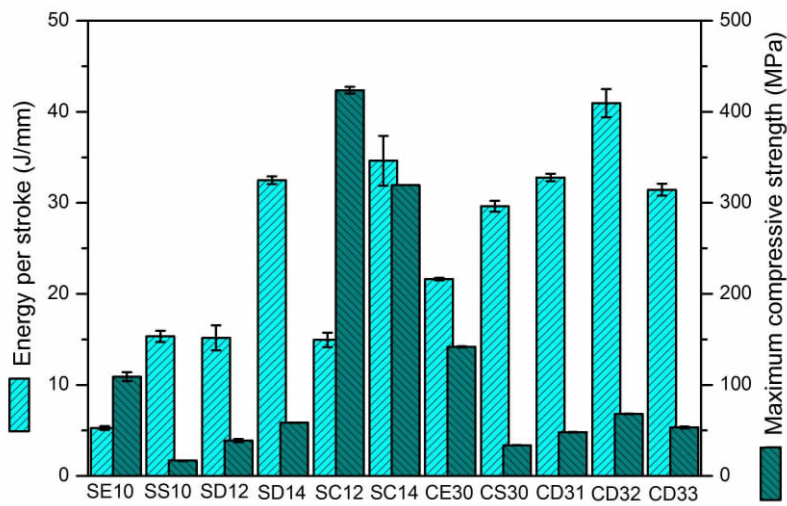


图 7 不同几何截面的薄壁管结构的单位行程能量吸收和最大压缩强度

Fig. 7 Energy absorption per stroke and maximum compressive strength of thin-walled structures with various section geometries

3.1.4 行程利用率和压垮力效率

各种不同结构的行程利用率和压垮力效率如图 8 所示。渐进屈曲模式的一个重要特征就是较高的压垮力效率,表示在整个压缩实验过程中相对均衡的加载过程。理想吸能结构的压垮力效率应该是 1,但是实际的渐进压溃的压垮力效率都小于 1,图 8 中方管类型结构的压垮力效率都在 0.5 左右,而圆管类型结构的压垮力效率都大于 0.5,甚至达到了 0.8。而各类结构的行程利用率都差不多,大概在 0.6 左右,方管类型结构稍微高一点。

3.2 能量吸收效率因子

为了评估新型材料和新型结构的效率,Hsu 和 Jones^[11]引入了一个新的参数:能量吸收效率因子 ψ ,并将其定义为结构单元所吸收的弹性和塑性应变能与相同体积的材料在拉伸实验中所能吸收的最大能量的比值。研究者对能量吸收效率因子进行了深入的研究,并把这一参数推广应用于多种材料和结构、包括泡沫填充结构轴压^[12]和斜压^[13]等情况。能量吸收效率因子是一个无量纲参数,对我们所研究的泡沫填充管结构,可以写成如下形式:

$$\psi = \frac{P_m \delta}{\epsilon_r (\sigma_{0e} A_e + \sigma_{0i} A_i + \sigma_f A_f) L} \quad (3)$$

其中 P_m 是平均压垮载荷 ($P_m = \bar{P}$); ϵ_r 是材料单轴拉伸工程断裂应变(如表 1); σ_{0e} 和 σ_{0i} 分别是外管和内

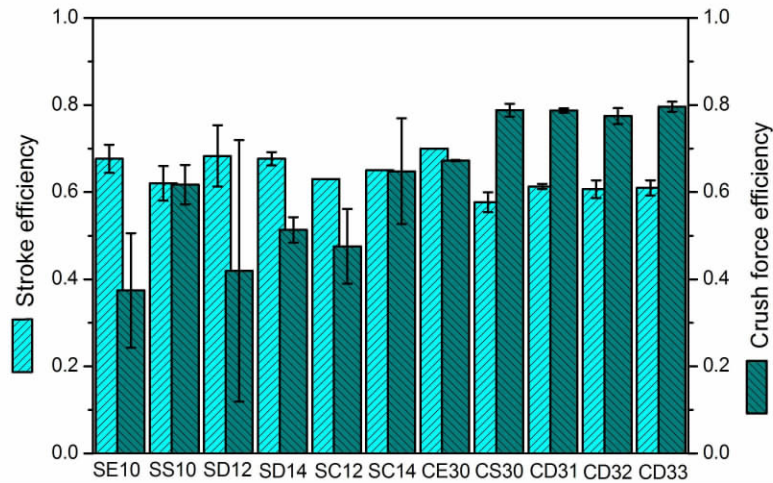


图8 不同几何截面的薄壁管结构的行程利用率和压垮力效率

Fig. 8 Stroke efficiency and crush force efficiency of thin-walled structures with various section geometries

管材料的准静态流动应力,本文中取值为 $(\sigma_{0.2} + \sigma_u)/2$ 来近似材料应变硬化效应的影响; A_e 和 A_i 是外管和内管的横截面面积; σ_f 是泡沫铝材料的平台应力; A_f 是泡沫铝填充截面面积; δ 是结构压实前的总位移; L 是试件总长度。

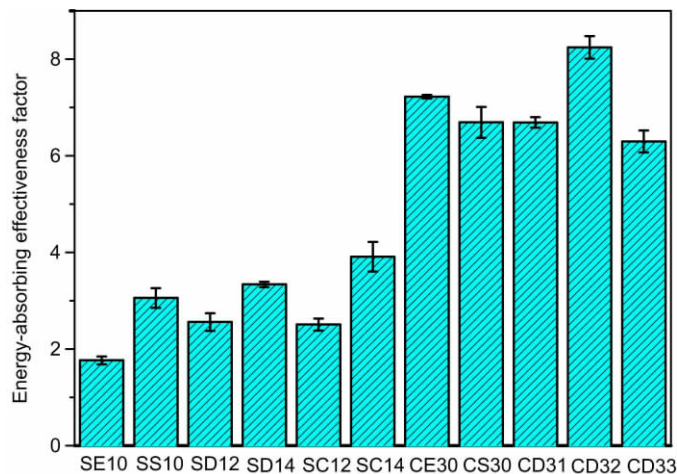


图9 不同几何截面的薄壁管结构的能量吸收效率因子

Fig. 9 Energy-absorbing effectiveness factor of thin-walled structures with different section geometries

图9给出了不同结构的能量吸收效率因子比较。结果显示,泡沫填充方管结构的 ψ 值要大于相应的空管结构;选择合适的内外管组合(如CD32),泡沫填充圆管结构的 ψ 值也要大于相应的空管结构,这说明从能量吸收效率因子的角度来说,在薄壁管结构中填充泡沫铝材料确实是有优势的。双管填充结构和四角填充结构的 ψ 值与泡沫填充单管结构差不多,但是从图中我们也可以看出,选择合适的内外管组合可以大大提高双管填充结构和四角填充结构的 ψ 值。值得一提的是,从图9中可以看出,圆管结构的能量吸收效率因子远大于方管结构,这说明圆管结构具有较高的能量吸收效率,适用于轻量化吸能元件的结构设计。

5 结论

本文对几种不同几何截面的空管和泡沫铝填充管结构的耐撞性能进行了实验研究,发现与相应空管相比,泡沫铝填充管结构的承载能力和能量吸收效率得到了提高。实验结果表明,单/双方管填充结

构外管易发生撕裂,严重影响结构的吸能能力及变形的稳定性,而双方管四角填充结构和圆管类型结构发生周期折叠模式变形,大大增强了泡沫铝夹芯结构变形的稳定性与可控性。同时,圆管类型结构的平均压垮载荷、比质量能量吸收、单位行程能量吸收以及能量吸收效率因子都较方管类型结构高,填充结构的能量吸收效率高于相应空管结构。单/双圆管填充结构由于其较高的压垮力效率和能量吸收效率,能够较平稳高效地进行能量吸收,作为耐撞性结构元件具有很大的优势。

从实验结果可以看出,除了截面拓扑构型以外,几何尺寸参数对结构耐撞性也有显著影响。选择合适的内外管组合可以有效地提高双管填充结构和双方管四角填充结构的能量吸收效率。此外,可以预见,材料参数(如泡沫铝的相对密度或平台应力)也会影响其吸能和耐撞性能。因此,通过进一步的实验研究和数值模拟,对泡沫铝夹芯结构进行设计优化,有望设计出更为高效轻质的吸能结构。

参考文献:

- [1] LU G, YU T X. Energy Absorption of Structures and Materials [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [2] Olabi A G, Morris E, Hashmi M S J. Metallic tube type energy absorbers: a synopsis [J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(7-8): 706-726.
- [3] ZHANG Y, ZHU P, CHEN G L. Lightweight design of automotive front side rail based on robust optimization [J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(7-8): 670-676.
- [4] 杜星文, 宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及结构耐撞性 [M]. 北京: 科学出版社, 2004 (DU Xingwen, SONG Hongwei. Impact dynamics and crashworthiness design of cylinder shell structure [M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese))
- [5] Jones N. Structural Impact [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [6] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solid: Structure and Properties, 2nd edition [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [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] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, et al. 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.
- [9] 郭刘伟, 虞吉林, 杨国栋. 泡沫铝夹芯双圆管结构的准静态轴向压缩性能研究 [J]. 实验力学, 2011(2): 181-189 (GUO Liuwei, YU Jilin, YANG Guodong. On the quasi-static axial crushing behavior of foam-filled double cylindrical tubes [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, (4): 181-189 (in Chinese))
- [10] 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, (3): 271-278 (in Chinese))
- [11] Hsu S S, Jones N. Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminum alloy tubes [J]. International Journal of Crashworthiness, 2004, 9(2): 195-217.
- [12] Jones N, Energy-absorbing effectiveness factor [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 754-765.
- [13] LI Z B, YU J L, GUO L W. Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 54(1): 48-56.

An Experimental Study on the Crashworthiness of Thin-walled Tubes and Their Metallic Foam-Filled Structures

LI Zhi-bin¹, YU Ji-lin¹, ZHENG Zhi-jun¹, GUO Liu-wei^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behaviour 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, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Quasi-static axial compression tests were conducted on two types of empty aluminum alloy tubes (circular and square) and five types of aluminum foam filled tube structures (foam-filled single circular and square tubes, foam-filled double circular and square tubes and corner-foam-filled square tube). The load-deformation characteristics, deformation mode and energy absorption ability of these thin-walled structures were investigated. Several parameters related to their crashworthiness were compared, including the specific energy absorption, the energy-absorbing effectiveness factor, etc. The influence of physical dimension on the crashworthiness of these structure was explored. It is found that the dimension of inner tube has significant influence on the structural crashworthiness of foam-filled double tube structures. The averaged crush force, the specific energy absorption, the energy per stroke and the energy-absorbing effectiveness factor of thin-walled circular structures are higher than those of the thin-walled square structures, respectively. Foam-filled single and double circular tube structures are recommended as crashworthy structures due to their high crush force efficiency and energy-absorbing efficiency.

Keywords: thin-walled tube; axial compression; crashworthiness; energy-absorbing effectiveness factor; experimental investigation