

文章编号: 1001-1455(2009)06-0654-05

开孔泡沫铝填充圆管的准静态压缩行为^{*}

刘伟明,程和法,黄笑梅,潘振亚

(合肥工业大学材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 采用开孔结构泡沫铝填充到薄壁圆形铝管中,制备出开孔泡沫铝夹芯铝管,并进行压缩实验,研究了这种结构材料的压缩力学行为和变形特征以及材料的结构特征参数对压缩力学性能和能量吸收特性的影响。在压缩过程中,泡沫铝夹芯铝管的载荷-位移曲线呈现出弹性段、波动的屈服平台段和压实段 3 个阶段特征;铝管的径厚比及泡沫铝本身的参数和强度对填充管的屈服强度、平均压溃力和吸能特性均有着非常显著的影响。填充泡沫铝后铝管的压缩变形方式发生改变,管壁只发生向外翻折变形,产生的环状褶皱减少。

关键词: 固体力学;夹芯铝管;静态压缩;泡沫铝;吸能特性

中图分类号: O347;TB383

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引 言

泡沫金属夹芯材料具有轻质、高比强度和比刚度及优异的吸能特性,可广泛应用于航空航天、汽车、高速列车等领域,是一种较理想的抗冲击、吸能、减振的结构材料^[1-3]。近年来,泡沫金属及其夹芯结构材料的力学行为和性能已经成为材料科学、力学等领域中的热点课题之一。A. Reyes 等^[4]通过实验研究了空心 and 填充了泡沫铝的薄壁铝管受准静态倾斜载荷的变形,并讨论了加入泡沫铝填充材料对能量吸收的影响。M. Güden 等^[5]进行了空管、填充和部分填充泡沫金属的铝管轴向压缩实验,发现部分填充泡沫金属的薄壁铝管的褶皱长度变小,管材的平均压溃载荷变大,证实了泡沫金属与薄壁管材之间的相互作用行为。由于泡沫金属夹芯板(或管)是一种新型的材料,有关泡沫金属本身的力学性能、结构特征参数等对夹芯结构的力学行为和性能的影响规律还有待于深入的研究。本文中,采用 2 种不同性质的开孔结构泡沫铝作为填充材料制备泡沫铝夹芯管,研究泡沫铝的特征参数、力学性能和圆管径厚比对夹芯管的压缩力学行为及吸能特性的影响。

2 实验方法

2.1 开孔泡沫铝夹芯管的制备

夹芯管的开孔泡沫铝采用加压渗流法制备,工艺原理参见文献[6]。选用力学性能差异较大的工业纯铝和 ZL101 合金制备不同力学性能的泡沫铝,制备好的泡沫铝铸块用电火花线方法切割,并切取用于单轴压缩的试样,尺寸为 $\varnothing 35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。经测量,所有泡沫铝试样的相对密度 ρ_r 为 0.390~0.442。选用 6063 铝合金薄壁圆管作为泡沫铝夹芯管的管材,将切割的泡沫铝填充到空心铝管中,泡沫铝和铝管之间采用卡夫特 3-TON 粘合剂粘接。然后,用线切割方法沿与圆管轴线垂直的方向截取一定长度的泡沫铝夹芯管(见图 1)。为了对比,还截取了相同长度的空心圆管进行实验。所制备的夹芯管圆管的长度为 24~50 mm,直径为 5~25 mm,径厚比 D/t 为 5.0~30.4。

2.2 准静态轴向压缩实验

准静态轴向压缩实验在 CMT5105 型电子万能材料试验机上进行。为了减少试样 2 个端面与压头及工作台之间的摩擦,加载前,在压头的中心部位及试样 2 个端面上涂抹润滑油。所有压缩实验均在变

* 收稿日期: 2008-09-24; 修回日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606034)

作者简介: 刘伟明(1981—),男,硕士研究生。

形速率 10^{-3} s^{-1} 下进行,由计算机控制并自动记录载荷-位移曲线。根据圆管压缩实验的国家标准 GB/T 3251-2006^[7],空心圆管压缩加载位移为试样高度的 1/2。

3 实验结果及分析

3.1 不同基体和相对密度泡沫铝的准静态压缩特征

图 2 为泡沫纯铝和泡沫铝硅合金的准静态压缩应力-应变曲线。由图可见,2 种泡沫铝具有泡沫金属的典型压缩应力-应变 3 个阶段特征,即弹性变形段、屈服平台段和致密化段。当相对密度相近时,泡沫铝硅合金的力学性能明显高于泡沫纯铝,弹性模量、屈服强度和流变应力均比泡沫纯铝大,对应的屈服平台段高。



图 1 泡沫铝夹芯管

Fig.1 Aluminum foam-filled tubes

3.2 径/厚比对铝合金圆管压缩特征的影响

图 3 为空心圆管轴向压缩的载荷-位移曲线。从图可以看出,铝合金圆管在轴向静载作用下,初始处于弹性变形阶段,当载荷初次达到最大值时,由于管壁局部屈服失稳,圆管首次出现褶皱(外翻),载荷开始下降,在形成褶皱的上下 2 段管壁接触压紧前,载荷达到最小。由于未发生屈曲部分的管壁强度基本保持不变^[8],当加载位移进一步增大时,载荷-位移曲线开始上升,即受载管壁相当于又一次的弹性屈曲,当载荷再次达到一定的峰值,管壁再次出现局部屈服失稳,载荷-位移曲线逐渐下降,管壁逐步形成第 2 个褶皱。随加载位移的继续增大,载荷呈周期变化,载荷-位移曲线呈现不稳定的波动行为。在管壁每形成 1 个褶皱的上下 2 段管壁各发生一次同样的屈曲,在载荷-位移曲线上对应 2 个相邻波峰。

空心铝管的压缩载荷-位移特征与结构参数密切相关。圆管径厚比越大,圆管越容易发生变形。径厚比为 30.4 的圆管的最大初始屈服载荷为 11.6 kN,是径厚比为 11.7 的 51.9%。且当径厚比为 5.0 时,圆管轴向压缩相当于实体压缩,即径厚比足够小,圆管静态压缩屈曲行为与实体压缩行为相似。

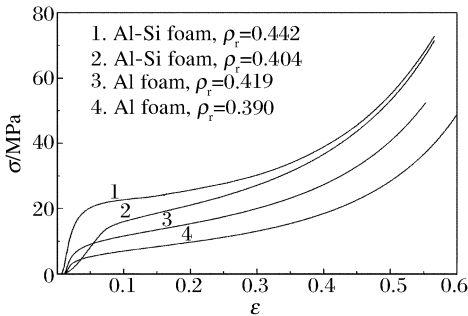


图 2 开孔泡沫铝的压缩应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of open-cell Al foams

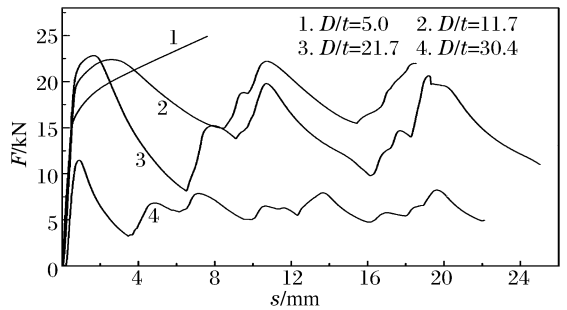


图 3 不同径厚比空心圆管的载荷-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves of empty tubes with different diameter thickness ratios

3.3 泡沫铝夹芯管的轴向压缩行为和特征

图 4 为径厚比为 30.4 时泡沫纯铝夹芯管和泡沫铝硅合金夹芯管的载荷-位移曲线。从图中可以看出,2 种夹芯管的载荷-位移曲线都有 3 个阶段特征,即弹性段、波动的平台段及压实段。

对比空心圆管,夹芯管的压缩载荷-位移曲线有以下的不同。首先,夹芯管与空心圆管相比,屈服强度增大,载荷-位移曲线上的波峰、波谷及对应的载荷以及平均载荷均有提高。由图 4 可以看出,泡沫纯铝和泡沫铝硅合金夹芯管的初始最大屈服载荷分别为 13.6 和 18.6 kN,分别为空心铝管的约 1.2 和 1.6 倍。在整个压缩过程中,相同位移下夹芯管的压缩载荷相比空心管的均有很大提高。其次,当变形达到一定值时,夹芯管的载荷-位移曲线开始上升,而此变形范围内,空心圆管依然处在波动的屈服平台段。这是由于泡沫铝受压致密化导致变形应力上升所引起的。再者,夹芯管与空心圆管的载荷-位移曲线均呈一种不稳定的波动行为,但在相同的平台段位移范围内,夹芯管的载荷-位移曲线上波峰的个数

比空心圆管的少。

此外,泡沫铝本身的性质对夹芯管的屈服强度和平均载荷也有显著影响。从图 4 中可以看出,泡沫铝硅合金夹芯管的压缩载荷-位移曲线的屈服平台段的波动幅度较泡沫纯铝夹芯管小。并且,当泡沫铝的相对密度相近以及圆管的径厚比相同时,泡沫铝硅合金夹芯管的最大初始屈服载荷比泡沫纯铝夹芯管增加 36.8%,且任意压缩位移所对应的载荷都比泡沫纯铝夹芯管的大,表明泡沫铝本身的抗压强度对夹芯管的力学性能有较大影响。

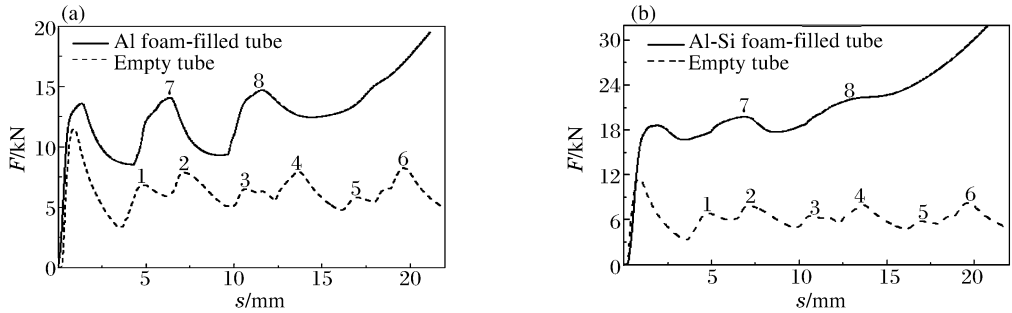


图 4 泡沫纯铝夹芯管和泡沫铝硅合金夹芯管的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of Al foam-filled and Al-Si foam-filled tubes

夹芯管载荷-位移曲线上出现的波动及波峰的位置与夹芯管在压缩过程中出现的褶皱数量和位置相关。在形成褶皱的上下 2 段管壁相互接触但未压紧之前,载荷降到最小,在载荷-位移曲线上形成波谷。观察压缩后的试样发现,泡沫铝使圆管的变形模式发生改变。图 4 中波峰 1、3、5 为圆管管壁受力向内翻折,波峰 2、4、6 为向外翻折,叠缩后的管壁规则地分布在未变形管壁的内外两侧。而夹芯管的管壁只发生向外翻折(如图 5 所示),在载荷-位移曲线上紧临的 2 个波峰 7、8 均对应于向外翻折变形,中间少了 1 个向内翻折变形的波动变形过程。这是由于填充泡沫铝阻碍了管壁向内翻折变形,在载荷-位移曲线上表现为相邻 2 个向外翻折变形之间夹芯管比空心铝管少 1 个波峰(波峰 1 或 3 或 5)。

3.4 泡沫铝填充圆管轻质结构吸能特性

衡量结构的吸能特性的指标有平均压溃力和比吸能等,这里使用平均压溃力来分析铝合金圆管在泡沫铝填充前后吸能特性的变化。

平均压溃力 F_m 是表征结构吸能特性的重要指标,定义为^[9]

$$F_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} F(s) ds \quad (1)$$

式中: δ 为压缩位移; $F(s)$ 为任意位移时的压缩载荷。根据式(1)和实验所得到的载荷-位移曲线,求出 $\delta = 20$ mm 时各个试样的平均压溃力,对每组试样所得到的值分别求平均值,如表 1 所示。表中, r 为泡沫夹芯管与空心圆管的平均压溃力之比。

由表 1 可知,圆管径厚比越大,夹芯管的平均压溃力相对空心圆管的增幅越大,径厚比相同时,泡沫铝硅合金夹芯管平均压溃力是泡沫纯铝夹芯管的 1.6 倍。

图 6 是泡沫铝硅合金、空心圆管和泡沫铝硅合金夹芯管的载荷-位移曲线。根据曲线,在任意压缩位移范围内各试样的吸能值为

$$W = \int_0^{\delta} F(s) ds \quad (2)$$

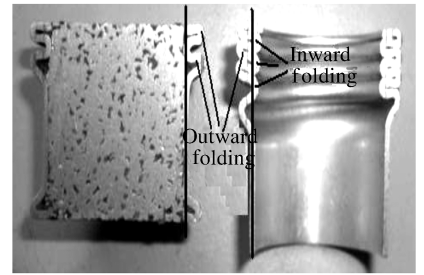


图 5 结构压缩变形比较

Fig. 5 Comparison between deformations of empty and foam-filled tubes

由图 6 可知,圆管填充泡沫铝硅合金后,压缩屈服载荷明显变大,结构吸收更多的能量。在压缩位移为 16 mm 时,泡沫铝硅合金夹芯管吸收的能量为 305.1 J,比单独压缩泡沫铝硅合金(100.5 J)和单独压缩空心圆管(100.1 J)两者的吸能量的叠加还要大,为两者简单数学叠加结果(200.6 J)的约 1.5 倍。填充泡沫铝硅合金增强了圆管的吸能效果,这是夹芯管充分利用泡沫铝硅合金与圆管管壁的相互作用而提高整体结构的抗变形能力的结果。

表 1 空心圆管与泡沫夹芯管的平均压溃力

Table 1 Mean crushing forces of empty tubes and foam-filled tubes

结构	D/t	F_m/kN	r
空心圆管	11.7	18.7	1.000
泡沫铝硅夹芯管	11.7	32.2	1.718
空心圆管	21.7	14.8	1.000
泡沫铝硅夹芯管	21.7	31.9	2.155
空心圆管	30.4	6.3	1.000
泡沫铝硅夹芯管	30.4	19.1	3.032
泡沫纯铝夹芯管	30.4	12.3	1.952

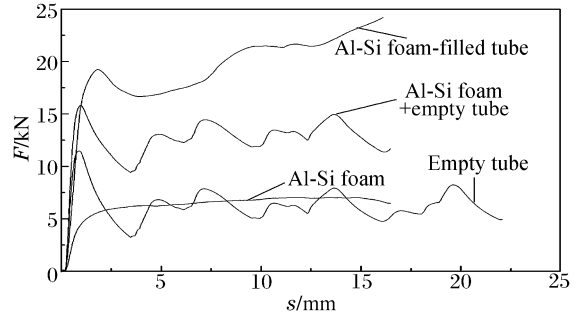


图 6 泡沫铝硅合金、空心圆管和泡沫铝硅合金夹芯管的载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of Al-Si foam, empty tube and Al-Si foam-filled tube

通过对试样的分析,认为相互作用主要表现为:在夹芯管轴向受载变形中,管壁和泡沫铝之间存在着相互约束作用,不仅使泡沫铝的微观变形机制发生变化,使孔壁发生变形的应力上升,泡沫铝的变形抗力增加,而且增强了管壁抵抗变形的能力;此外,由于管壁向外翻折变形,使粘结剂受力剥落;同时,由于泡沫铝和铝管管壁的变形方式不同,两者存在着相对运动并由此产生一定的摩擦力。以上作用机制都能进一步提高了夹芯管的抗变形能力。

从上述可知,填充泡沫铝后,夹芯管的吸能总量除了包括圆管及泡沫铝各自的吸能量外,还包含了泡沫铝与圆管相互作用^[10]所吸收的附加能量,大小由相互作用的强度而决定。所以,圆管填充了泡沫铝之后,泡沫铝对圆管内部起到一定的支撑作用,与管壁相互作用,增强圆管的抗压能力,显著提高圆管的平均压溃力,从而吸收更多的能量,具有较高的吸收外能的能力。

4 结 论

(1)填充泡沫铝使得圆管管壁的变形方式发生改变,夹芯管管壁受载屈服只发生向外翻折,出现的环状褶皱比空心铝圆管少。

(2)填充泡沫铝后,圆管的平均压溃力和初始最大屈服载荷显著提高,吸收外能的能力增强,有效提高了圆管的稳定性。此外,管壁和泡沫铝的相互约束作用、粘结剂以及泡沫铝与铝管管壁间的摩擦力的作用均进一步提高了夹芯管的吸能性及承载能力。因此,夹芯管受载压缩的吸能量由 3 部分组成:单独压缩圆管和泡沫铝吸收的能量,及圆管与泡沫铝相互作用而吸收的附加能量。

(3)泡沫铝本身的性能对夹芯铝管的力学性能有较大影响。泡沫铝的屈服强度越大,夹芯管的屈服载荷越高,结构抗变形能力也越强。随着圆管径厚比的增大,填充泡沫铝的圆管的平均压溃力增幅越大,吸能效果越显著。

参考文献:

[1] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展,2006,36(4):517-535.
 LU Tian-jian, HE De-ping, CHEN Chang-qing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(4):517-535.

- [2] Badiche X, Forest S, Guibert T, et al. Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-nickel foams: Application of the mechanics of cellular solids and of porous materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000,289:276-288.
- [3] Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. *Progress in Materials Science*, 2001,46(2):559-632.
- [4] Reyes A, Hopperstad O S, Langseth M. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: Experimental and numerical study[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004,41:1645-1675.
- [5] Güden M, Toksoy A K, Kavi H. Experimental investigation of interaction effects in foam-filled thin-walled aluminum tubes[J]. *Journal of Material Science*, 2006,41(9):6417-6424.
- [6] 程和法,黄笑梅,陈国宏. 渗流法制备泡沫铝合金工艺研究[J]. *轻合金加工技术*,2001(1):38-40.
CHENG He-fa, HUANG Xiao-mei, CHEN Guo-hong. Study on the infiltrating process for preparation of Al foam [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2001(1):38-40.
- [7] GB/T 3251-2006, 铝及铝合金管材压缩试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [8] 杜星文,宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞击设计[M]. 北京:科学出版社,2004:186-192.
- [9] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, Degiseher H P, et al. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam[J]. *Acta Mechanica*, 1997,125:93-105.
- [10] Zarei H R, Kröger M. Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes[J]. *International Crashworthiness Conference*, 2007,12(3):255-264.

Quasi-static compression behaviors of cylindrical tubes filled with open-cell aluminum foam

LIU Wei-ming, CHENG He-fa^{*}, HUANG Xiao-mei, PAN Zhen-ya
(*School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China*)

Abstract: Aluminum foam-filled tubes were prepared by filling open-cell aluminum foam into thin-walled aluminum alloy tubes. Quasi-static compression experiments were conducted to investigate the compressive deformation behaviors of the foam-filled tubes. Influences of the structural characteristic parameters both of the aluminum foam and the hollow tube on the compressive properties and energy absorption behaviors of the tubes with foam filler were explored. Experimental results show that the compressive load-displacement curves of aluminum tubes with foam filler exhibit a distinct characteristic of three deformation regions, namely, elasticity region, serrated plastic plateau region and densification region. The factors, which include the diameter-thickness ratio of the aluminum tube, the density and property of aluminum foam, remarkable affect the mean crushing load and energy absorption characteristics of the foam-filled tube. The aluminum foam filler can modify the compressive deformation pattern of the aluminum tube. The wall of the aluminum tube with foam filler just folds outward during compression deformation.

Key words: solid mechanics; foam-filled tube; static compression; aluminum foam; energy absorption properties

* Corresponding author; CHENG He-fa

E-mail address: cheng12505@yahoo.com.cn