

硅橡胶填充泡沫铝层合管的压缩和吸能性能

林 森, 凤 仪, 查海波, 李 庶, 王 娟, 朱琪琪

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 采用挤压法在开孔泡沫铝中充填硅橡胶, 以硅橡胶填充开孔泡沫铝为芯、铝管和钢管为面板制备层合管, 研究了静态压缩条件下充填硅橡胶后泡沫铝及其层合金属管的变形行为和能量吸收性能。研究表明: 在泡沫铝中充填硅橡胶后, 泡沫铝的平台区比原来增高、增长, 其吸能性能也得到提高; 由于泡沫铝的充填, 钢管的变形方式发生改变, 由不对称屈曲转变为轴对称屈曲; 充填硅橡胶的泡沫铝层合金属管具有比原来更高的屈曲褶皱载荷, 且屈曲褶皱的产生滞后, 其吸能性能也得到提高, 硅橡胶充填对层合钢管的影响比对层合铝管的影响更明显。

关键词: 泡沫铝; 硅橡胶; 层合管; 力学性能; 吸能性能

中图分类号: TB 339

文献标识码: A

Compression capability and energy absorption of foam aluminum cylinder sandwich with silicone rubber

LIN Sen, FENG Yi, ZHA Hai-bo, LI Shu, WANG Juan, ZHU Qi-qi

(School of Materials Science and Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Silicone rubber was extruded into foamed aluminum, then cylinder sandwich was produced when using foamed aluminum filled with silicone rubber as core, aluminum tube and steel tube as panel. The compression deforming activity and energy absorption ability of aluminum foam with silicone rubber and rubber cylinder sandwich with silicone rubber were studied. The results indicated that the length and height of plateau region of aluminum foam with silicone rubber is increased and the energy absorption ability is improved. The deforming mode of the steel tube filled with foamed aluminum is changed from “diamond mode” to “circular mode”. For cylinder sandwich filled with silicone rubber, higher load is needed to create fold, and the appearance of fold is lagged, the energy absorption ability is improved. The influence of filled with silicone rubber is more obvious on steel cylinder sandwich than on aluminum cylinder sandwich.

Key words: foamed aluminum; silicone rubber; cylinder sandwich; mechanical properties; energy absorption ability

近年来, 自然界中大量存在的疏松多孔材料以其优异的力学性能和多种应用功能引起科技工作者的广泛兴趣和不懈的探索研究, 泡沫金属成为近 20 年来迅速发展的新型结构功能材料^[1-2]。在欧美日等发达国家, 受汽车轻量化, 交通安全性、舒适性等技术要求的驱使, 近 10 年来研究者已经对泡沫金属进行大量研究^[3-4]。

泡沫铝是一种以铝或铝合金为基体, 包含大量孔洞的轻质多孔材料。它是一种物理和结构一体化的新型工程材料, 具备多种优异的性能, 已引起人们的广泛关注^[5-6]。泡沫铝由基体和孔洞组成, 压缩应力—应变曲线中包含一个很长的屈服平台, 因此它是一种具有良好吸能特性的轻质、高阻尼材料; 通孔泡沫铝具有大的表面积, 具有很好的散热能力, 可用于热交换, 而

基金项目: 日本 NSGF 资助项目(200412)

收稿日期: 2007-02-02; 修订日期: 2007-06-14

通讯作者: 凤 仪, 教授, 博士, 电话: 0551-3423150; E-mail: fy123@mail.hf.ah.cn

闭孔泡沫铝导热系数很低又可作绝热材料; 当声波进入泡沫铝孔洞时会发生漫反射, 进入孔洞的声波会使基体铝骨架振动, 释放能量而消耗声能, 因而泡沫铝又是一种优异的吸声材料, 可用于制作各种消音器; 同时也可以用于制作高频率的电磁波的电磁兼容、屏蔽材料^[7-8]。基于泡沫铝的这些优异性能, 目前其在汽车工业、航天航空、建筑工业和铁路运输等领域都已获得广泛应用^[9]。

多孔材料是理想的吸能材料, 薄壁金属管也是有效的轴向能量吸收器, 已有研究表明两者层合后吸能能力有大幅提高^[10-11], 目前泡沫铝的研究主要集中在静态和动态力学性能方面, 对泡沫铝层合管, 尤其是充填硅橡胶的泡沫铝层合管的性能研究尚未见报道, 本文作者研究了在开孔泡沫铝中充填硅橡胶以及硅橡胶充填泡沫铝层合铝管、钢管的静态压缩性能和吸能性能, 分析填充硅橡胶对泡沫铝和不同材质层合管的压缩变形能力以及能量吸收能力的影响。

1 实验

实验采用渗流法制备的开孔泡沫铝材料, 孔隙率为 60%, 以线切割的方式对泡沫铝进行加工, 加工成直径分别为 15.9 mm 和 18.1 mm, 高度 40 mm 的圆柱体样品, 用以制作层合管; 取直径 15 mm、高度 10 mm 的样品用以填充硅橡胶后对泡沫铝的性能进行研究。实验采用如下两种不同材质的金属管: 1) 铝管, 直径为 17.5 mm, 壁厚 0.8 mm; 2) 钢管, 直径为 19 mm, 壁厚 0.4 mm。将以上两种金属管都线切割加工成高度为 40 mm 的样品, 用来与泡沫铝样品制作成层合圆管。

采用挤压法对泡沫铝进行硅橡胶的填充, 硅橡胶填充泡沫铝的照片如图 1 所示。在泡沫铝中充填硅橡

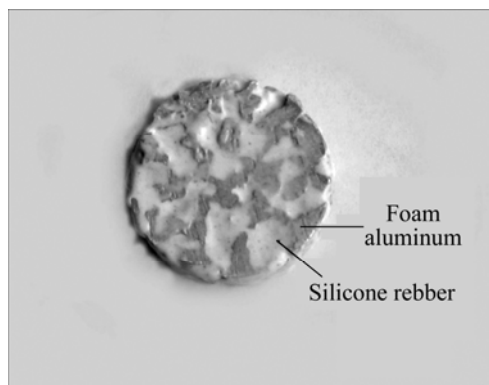


图 1 硅橡胶填充泡沫铝的照片

Fig.1 Photo of foam aluminum with silicone rubber

胶后使其在室温下固化 8 d, 待其固化后将高度为 40 mm 的样品分别与钢管、铝管制作成层合管。然后将各样品在岛津万能材料实验机分别进行静态压缩实验, 实验压缩速度为 3 mm/min。

2 结果与分析

2.1 硅橡胶充填泡沫铝的压缩性能

泡沫铝受到压力而产生的变形可分为 3 个阶段: 弹性区、屈服平台区以及致密区^[12-13]。

充填与未充填硅橡胶泡沫铝的应力—应变曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 在线弹性阶段, 充填硅橡胶的泡沫铝的应力—应变直线更明显, 而且进入平台区的应力提高、应变增大。这主要是因为充填硅橡胶的泡沫铝在压缩开始阶段表现为一个实体, 孔隙中的硅橡胶阻碍了泡沫铝的变形, 在使泡沫铝基体骨架受到弹性变形的同时, 还得外加一定应力使硅橡胶发生变形, 才能使泡沫铝基体坍塌进入屈服平台区, 而未充填的泡沫铝在开始阶段只有泡沫铝基体骨架承受弹性变形。屈服平台阶段, 充填硅橡胶的泡沫铝的平台区比未充填的泡沫铝的更长, 而且平台区的应力也有所提高。从图 2 中可以看出, 未充填泡沫铝在压缩到 4.5 mm 时就进入密实阶段, 而充填硅橡胶的泡沫铝压缩到 6 mm 才进入密实区。在这个阶段中, 硅橡胶对泡沫铝基体骨架起到支撑作用, 阻碍了泡沫铝的坍塌。在支撑力的作用下, 泡沫铝基体在坍塌的过程中同时向四周膨胀, 正是由于膨胀的存在使充填硅橡胶的泡沫铝在压缩到 4.5 mm 时依然有孔隙存在, 从而延长其平台区。

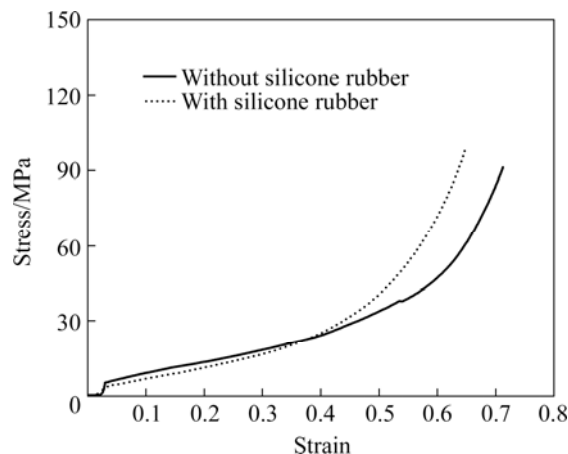


图 2 充填与未充填硅橡胶泡沫铝的压缩应力—应变曲线

Fig.2 Compressive stress—strain curves of foam aluminum without or with silicone rubber

泡沫铝在压缩过程中具有优良的吸能性能, 泡沫铝吸收的能量(W)可以用压缩载荷(F)—位移(S)曲线所包围的面积表征为

$$W = \int_0^S F dS \quad (1)$$

图3所示为充填与未充填硅橡胶泡沫铝的压缩吸能情况, 充填硅橡胶泡沫铝的能量吸收比未充填的明显提高, 而且随着应变的增大, 能量吸收越多, 这也充分说明充填硅橡胶可以提高泡沫铝的吸能性能。

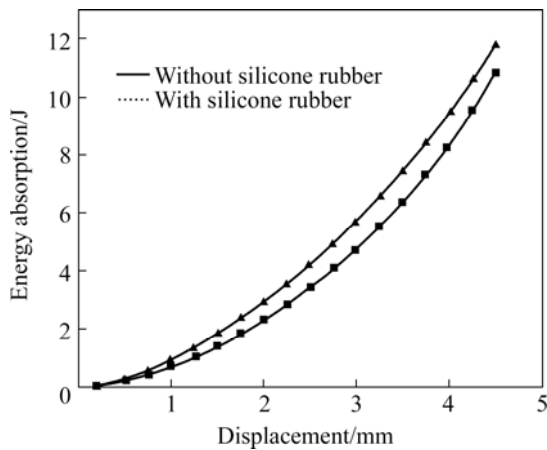


图3 充填与未充填硅橡胶泡沫铝的压缩吸能曲线
Fig.3 Energy absorption curves of foam aluminum without or with silicone rubber

2.2 金属管的压缩性能

延性金属管在受轴向压缩时可能发生轴对称屈曲或非轴对称的菱形屈曲, 圆管的直径和壁厚之比是决定在弹性或塑性屈曲中呈现对称屈曲或菱形屈曲形式的主要因素。通常直径与壁厚之比(D/t)小于40时, 金属管发生轴对称屈曲, 而当 $D/t > 40$ 时, 发生非对称的菱形屈曲^[14]。

实验采用的铝管的直径与壁厚之比 $D/t=21.875 < 40$, 钢管的 $D/t=47.5 > 40$, 经压缩后铝管发生轴对称屈曲, 而钢管发生非对称菱形屈曲(见图4和5)。由图可知, 铝管产生5个轴对称外翻圆形褶皱, 每个褶皱的高度基本相同, 依次从管的底部向管顶部产生。钢管产生的却是5个非轴对称内翻三角形褶皱。图6所示为铝管和钢管的应力—应变曲线。由图6可知, 在压缩过程中铝管褶皱的产生分为两步: 第一步为褶皱的外翻, 第二步为褶皱的内翻。在褶皱内翻的同时, 下一个褶皱的外翻也在进行, 由图6中可知每个外翻峰的左侧都存在一个峰值较小的内翻峰; 钢管褶皱的产生也分两步, 但由于管壁较薄, 褶皱内翻完成的同时外翻也已经完成, 所以在图6中只能观察5个内翻

峰。

2.3 硅橡胶填充泡沫铝层合管的压缩性能

充填泡沫铝的层合圆管的平均屈服载荷 F_{af} 可以

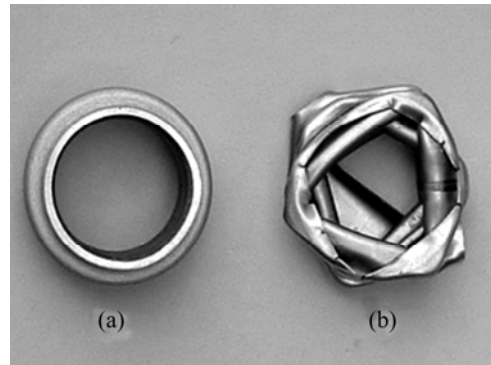


图4 铝和钢管压缩后的俯视图
Fig.4 Top views of aluminum tube (a) and steel tube (b) after compression

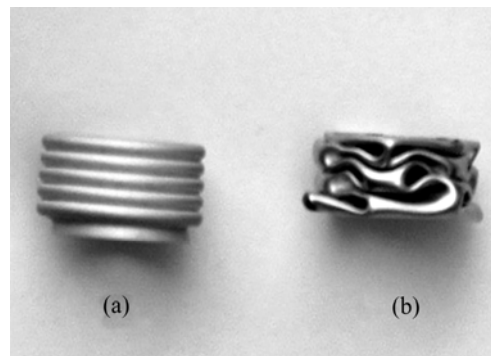


图5 铝、钢管压缩后的侧视图
Fig.5 Side views of aluminum tube (a) and steel tube (b) after compression

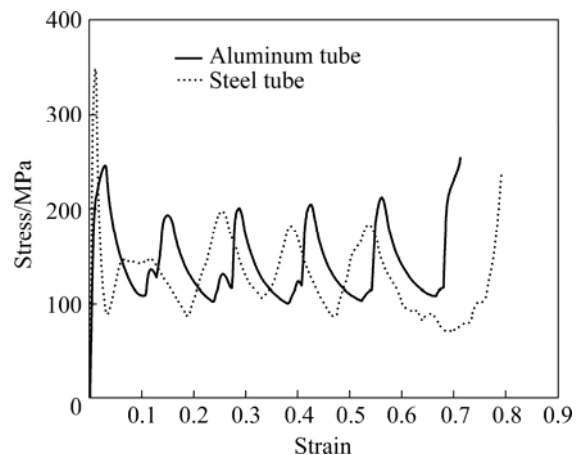


图6 铝管和钢管的压缩应力—应变曲线
Fig.6 Compressive stress—strain curves of steel tube and aluminum tube

用 Hansen 等^[15]提出的公式计算为

$$F_{af} = F_{ae} + \sigma_{pl} b^2 + C_{avg} \sqrt{\sigma_{pl} \sigma_0} b t \quad (2)$$

式中 C_{avg} 、 σ_0 、 b 和 t 均为常数; C_{avg} 为表示面板与夹芯之间界面交互作用的常数; σ_0 、 b 和 t 分别表示面板材料的屈服强度、管直径和管壁厚度。式(2)综合考虑了空管的平均屈服载荷 F_{ae} 、泡沫铝的平台区应力 σ_{pl} 以及面板与夹芯之间的交互作用对层合圆管屈服载荷的贡献。由式(2)可以得出:

$$F_{af} > F_{ae} + \sigma_{pl} \quad (3)$$

式(3)表明层合圆管的平均屈服载荷大于空管的平均屈服载荷和泡沫铝的平台区应力的简单叠加, 层合圆管结构充分利用面板与夹芯之间的交互作用提高了整体的抗变形能力。正是由于面板和泡沫铝夹芯之间的交互作用使钢管的变形方式发生了改变(见图 7) 泡沫铝层合钢管在压缩后产生轴对称屈曲。但褶皱的产生不再是从管底部依次往上产生, 而是取决于泡沫铝在哪个部位发生坍塌, 从图中可以看到, 在管的底部和顶部都出现褶皱。



图 7 泡沫铝层合钢管压缩后的照片

Fig.7 Photos of steel cylinder sandwich after compression

图 8 所示为泡沫铝、钢管、层合钢管和硅橡胶充填层合钢管的压缩载荷—位移曲线, 图 9 所示为泡沫铝、铝管、层合铝管、硅橡胶充填层合铝管的压缩载荷—位移曲线。从图可知, 泡沫铝、金属管、层合金属圆管以及硅橡胶充填层合金属圆管压缩载荷—位移曲线均由线弹性段、平台段和紧实段 3 个阶段组成, 不同的是泡沫铝的平台区为平滑的曲线, 而其他的平台区均表现出显著的锯齿状波动。在平台阶段, 各层合金属管所承受的载荷均大于泡沫铝和金属管所承受的载荷之和, 这与式(3)所反映的趋势一致。

金属层合管的压缩载荷—位移曲线与金属管的压缩载荷—位移曲线明显不同, 从图 8 和 9 中可知, 层

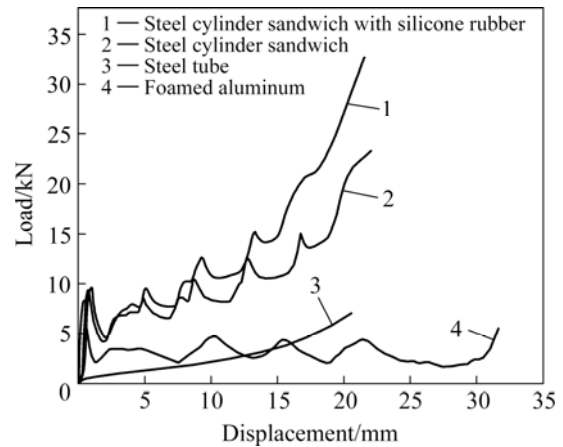


图 8 泡沫铝、钢管、层合钢管和硅橡胶充填层合钢管的压缩载荷—位移曲线

Fig.8 Load—displacement curves of foamed aluminum, steel tube, steel cylinder sandwich and steel cylinder sandwich with silicone rubber

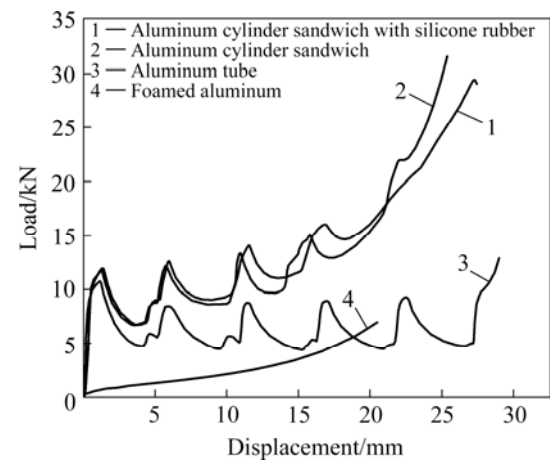


图 9 泡沫铝、铝管、层合铝管和硅橡胶充填层合铝管的压缩载荷—位移曲线

Fig.9 Load—displacement curves of foamed aluminum, aluminum tube, aluminum cylinder sandwich and aluminum cylinder sandwich with silicone rubber

合管的屈服载荷增大, 平台区的载荷也明显高于金属管的载荷, 层合管经压缩产生的褶皱数目也有所减少(铝管的褶皱为 5 个, 泡沫铝层合铝管的褶皱为 4 个), 褶皱的波长也有所缩短。而且相对与金属管各褶皱产生的载荷基本相同, 层合管各褶皱产生的载荷依次增大, 从图 8 和 9 中可知, 层合管的各褶皱最大载荷随着位移的增大呈阶梯状上升, 这主要是因为随着压缩的进行, 管中的泡沫铝逐渐被压实, 需要更高的载荷才能使其进一步被压缩; 虽然层合管平台区的载荷增大, 但相对金属管而言, 层合管提前进入紧实段, 图

8 中钢管在 30 mm 处进入紧实段, 层合钢管在 20 mm 处就进入紧实段, 图 9 中铝管在 25 mm 处进入紧实段, 而层合铝管在 17 mm 处就已经进入紧实段, 其原因是泡沫铝被压实后阻止了褶皱的产生。

硅橡胶的充填导致泡沫铝层合金管的压缩变形产生如下变化: 1) 从图 8 和 9 中可以看出, 硅橡胶充填泡沫铝层合钢管、铝管产生褶皱的载荷增大, 随着位移的增加, 载荷增大越明显。这主要是因为泡沫铝孔隙中的硅橡胶对泡沫铝基体框架产生支撑作用, 从而支撑了层合管, 而且随着压缩的进行, 支撑效果越明显。硅橡胶充填在泡沫铝层合钢管中使载荷的提高比充填在泡沫铝层合铝管明显得多, 这是由于铝的延展性比钢好。正如上面提到的在压缩过程中, 硅橡胶被迫从孔隙中挤出, 向四周膨胀, 铝管也随之膨胀, 减弱了硅橡胶的支撑作用, 而钢管则有效阻止了硅橡胶的挤出。从图 10 中可以清楚看到硅橡胶充填层合铝管经压缩后发生了膨胀; 2) 硅橡胶的充填使层合管褶皱的产生滞后, 随着位移的增加, 滞后效果越明显。这可能是因为压缩过程中, 泡沫铝孔隙中硅橡胶向外挤出, 对金属管褶皱的产生起到阻碍作用, 随着位移的增加, 挤出的硅橡胶越多, 起到的阻碍作用越明显; 3) 从图 8 中看到, 硅橡胶充填泡沫铝层合钢管比泡沫铝层合钢管提前进入了紧实段, 而在图 9 中, 硅橡胶充填泡沫铝层合铝管比泡沫铝层合铝管进入紧实段更晚。这是由于钢管有效阻止泡沫铝的膨胀和硅橡胶的挤出, 使泡沫铝在硅橡胶作用下提前进入实体状态, 而铝的延展性较好, 压缩过程中随着泡沫铝一起膨胀, 导致泡沫铝被压实的位移增大。

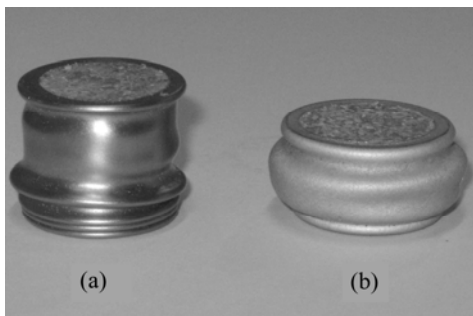


图 10 硅橡胶充填泡沫铝层合钢管和铝管压缩后的照片
Fig.10 Photos of steel cylinder sandwich with silicone rubber (a) and aluminum cylinder sandwich with silicone rubber (b) after compression

根据式(1)得到泡沫铝、钢管、铝管以及泡沫铝层合钢管、泡沫铝层合铝管和硅橡胶充填泡沫铝层合钢管、硅橡胶充填泡沫铝层合铝管的能量吸收曲线。如

图 11 和 12 所示。

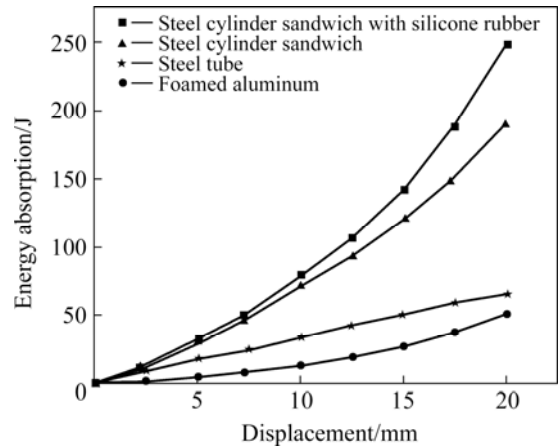


图 11 硅橡胶充填泡沫铝层合钢管、泡沫铝层合钢管、钢管、泡沫铝的压缩吸能曲线
Fig.11 Energy absorption curves of foamed aluminum, steel tube, steel cylinder sandwich and steel cylinder sandwich with silicone rubber

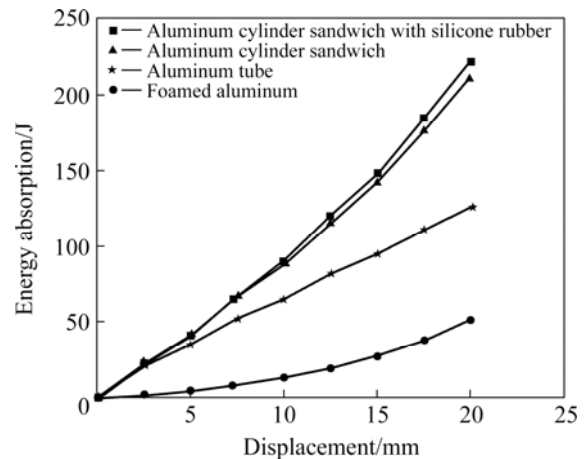


图 12 硅橡胶充填泡沫铝层合铝管、泡沫铝层合铝管、铝管、泡沫铝的压缩吸能曲线
Fig.12 Energy absorption curves of foamed aluminum, aluminum tube, aluminum cylinder sandwich and aluminum cylinder sandwich with silicone rubber

从图 11 和 12 可以看出, 硅橡胶的充填提高了泡沫铝层合金管的吸能能力, 随着位移的增大, 充填硅橡胶的泡沫铝层合金管吸能能力的增加比泡沫铝层合金管更加快。这是由于硅橡胶的充填导致泡沫铝的骨架得到了有效的支撑, 在压缩过程中提高了泡沫铝坍塌所需的应力, 随着位移的增大, 泡沫铝逐渐被压实, 硅橡胶的支撑效果越明显, 以及硅橡胶在压缩过程中的挤出, 与泡沫铝孔壁之间摩擦吸收大量能量, 从而提高了层合金管的吸能能力。硅橡胶的填

充对泡沫铝层合钢管的影响比对泡沫铝层合铝管的影响大得多,从图可知,位移 20 mm 时,硅橡胶的充填使泡沫铝层合钢管的吸能量从 190 J 提高到 250 J,而泡沫铝层合铝管的吸能量只是从 210 J 提高到 222 J。这说明硅橡胶的充填对由延展性比较差的金属管和泡沫铝组成的层合管的吸能能力的提高有更好的效果。

3 结论

1) 硅橡胶的填充使泡沫铝的平台区应力提高,并使平台区有了明显的延长,从而提高了泡沫铝的吸能能力,但在压缩的过程中泡沫铝会向四周膨胀。

2) 泡沫铝层合钢管的变形方式相对于钢管本身发生了改变,由不对称屈曲转变为轴对称屈曲,而且泡沫铝层合钢管的吸能能力远大于钢管和泡沫铝吸收的能量之和,并随着位移的增大,层合钢管的吸能能力增加更为快速。

3) 在泡沫铝层合钢管和泡沫铝层合铝管中充填硅橡胶,使层合管的褶皱产生载荷增大、褶皱产生滞后,随着位移的增加,载荷增大、褶皱滞后越明显。硅橡胶的填充使泡沫铝层合金管的吸能能力得到提高,但由于铝管的延展性好,未能有效的阻止泡沫铝膨胀,其吸能能力没有硅橡胶填充泡沫铝层合钢管提高得多。

REFERENCES

- [1] Hall I W, Ebil O, Guden M. Quasi-static and dynamic crushing of empty and foam-filled tubes[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36: 5853-5860.
- [2] 王松林, 凤仪, 徐屹, 等. SiC-P 增强泡沫铝基复合材料的制备工艺研究[J]. *金属功能材料*, 2005, 12(6): 22-26.
WANG Song-lin, FENG Yi, XU Yi, et al. Fabricating process of SiC particle-reinforced aluminum foam matrix composite[J]. *Metallic Functional Material*, 2005, 12(6): 22-26.
- [3] 息志臣, 陈浩然. 复合材料层合梁理论[J]. *复合材料学报*, 1994, 11(2): 1-6.
XI Zhi-cheng, CHEN Hao-ran. The theory for composite laminated beams[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1994, 11(2): 1-6.
- [4] 凤仪, 郑海务, 朱震刚. 闭孔泡沫铝的电磁屏蔽性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(1): 33-36.
FENG Yi, ZHENG Hai-wu, ZHU Zhen-gang. Electromagnetic shielding effectiveness of closed-cell aluminum alloy foams[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(1): 33-36.
- [5] FENG Yi, ZHU Zhen-gang. The microstructure and electrical conductivity of aluminum alloy foams[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 39(8): 815-820.
- [6] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 4-49.
LIU Pei-sheng. Introduction to cellular materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 16-49.
- [7] Andrews E, Sanders W, Gibson L J. Compressive and tensile behavior of aluminum foams[J]. *Mater Sci Eng A*, 1999, A 270(2): 113-124.
- [8] 王录才, 王芳. 泡沫铝吸声性能的研究[J]. *金属功能材料*, 2004, 11(5): 17-18.
WANG Lu-cai, WANG Fang. Sound absorption properties of aluminum foam[J]. *Metallic Functional Material*, 2004, 11(5): 17-18.
- [9] FENG Yi, ZHU Zhen-gang, ZU Fang-qiu. Strain rate effects on the compressive property and the energy-absorbing capacity of aluminum alloy foams[J]. *Materials Characterization*, 2001, 47: 417-422.
- [10] Toksoy A K, Guden M. The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2005, 43: 333-350.
- [11] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A. 泡沫金属设计指南[M]. 刘培生, 王习述, 李言祥, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 157-162.
Ashby M F, Evans A G, Fleck N A. Metal foams: a design guide[M]. LIU Pei-sheng, WANG Xi-shu, LI Yan-xiang, transl. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 157-162.
- [12] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 277-298.
- [13] Gibson L J, Ashby M F. 多孔固体结构与性能[M]. 刘培生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003: 196-197.
Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. LIU Pei-sheng, transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 196-197.
- [14] Mikkelsen L P. A numerical axisymmetric collapse analysis of viscoplastic cylindrical shells under axial compression[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(5): 643-668.
- [15] Hansen A G, Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic crushing of circular aluminum foam filler[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 475-507.

(编辑 龙怀中)