

文章编号:1000-582X(2010)07-068-06

泡沫铝填充钢管横向压缩吸能特性试验

康建功, 石少卿, 张 忠

(后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401331)

摘 要:为了解填充泡沫铝对钢管吸收能量的影响及其能量吸收特性,通过试验方法研究了单个空钢管与泡沫铝填充钢管的准静态横向压缩性能及吸能特性。研究结果显示:空钢管在横向压缩作用下,其名义应力应变曲线关系与多孔金属材料比较相似。相同壁厚的钢管在横向压缩下,管径越大,其名义屈服应力越小,平台段越长。填充泡沫铝能改变其变形机制,提高钢管在横向压缩下的屈服应力值,较大地提高其能量吸收性能。泡沫铝密度对这种性能的提高影响较小,而钢管的直径对其影响较大。

关键词:冲击波;能量吸收;变形模式;泡沫铝填充管;压缩性能

中图分类号:O383

文献标志码:A

Experimental studies on the energy absorption property of aluminum foam filled steel pipe under transverse compression

KANG Jian-gong, SHI Shao-qing, ZHANG Zhong

(Department of Civil Engineering of Logistical University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: To understand the energy absorption property of aluminum foam-filled steel pipes and the energy absorption property affected by aluminum foam filler, the energy absorption ability and transverse compression property of steel pipes and aluminum foam-filled steel pipes are tested. The results show that the normal stress-strain curve of steel pipes is similar with that of cellular materials. The normal yield stress of a steel pipe with a large diameter under transverse compression is lower than that with the same wall thickness but a small diameter. The deformation mode of steel pipes can be changed by the filling of aluminum foam. The aluminum foam filler improve the energy absorption ability of steel pipes. The effect of aluminum foam density on the energy absorption ability of steel pipe is small, and the effect of pipe diameter on the energy absorption ability of aluminum foam-filled steel pipes is large.

Key words: shock waves; energy absorption; deformation model; steel pipe filled with aluminum foam; property of compression

金属材料塑性变形吸收撞击或爆炸冲击波能量的方法在提高车辆及舰船防撞击性能及提高防护门抵抗爆炸冲击波能力等领域有着广泛的应用^[1-4]。而利用泡沫金属材料优良地缓冲吸能性能降低撞击

或爆炸冲击波荷载作用的方法也是目前学者们普遍关注的热点问题之一^[5-11]。为此,讨论将两者结合起来作为防护撞击及爆炸冲击波荷载新结构形式的相关研究应运而生。王青春^[12]等人通过试验研究

收稿日期:2010-03-04

基金项目:国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ13B02)

作者简介:康建功(1980-),男,博士研究生,主要从事防护工程结构及材料研究。

石少卿(联系人),男,后勤工程学院教授,博士生导师,(E-mail)shishaoqing@sohu.com。

了泡沫铝填充帽盖型结构的吸能特性;研究结果显示:填充泡沫铝后,帽盖结构的轴向压缩稳定性和吸能特性有了很大提高。许坤^[13]等人通过实验研究了泡沫铝填充薄壁方铝管的弯曲性能;结果显示:填充泡沫铝可以改变铝管局部屈服的变形模式,提高铝管的抗弯刚度。谢中友^[14]等人通过数值模拟研究了泡沫铝填充铝合金管的弯曲性能。结果显示,通过填充泡沫铝材料能大大提高铝合金管的抗弯承载能力。于英华^[15]等人通过对比研究了泡沫铝填充管保险杠与空心管汽车保险杠吸能性能。研究结果显示:泡沫铝填充管的吸能性能明显高于空心管的吸能性能。

由以上研究可知,将泡沫铝作为金属管的填充体能大大提高各种金属管的抗弯刚度及吸能性能。故提出将横向放置的泡沫铝填充钢管用于降低防护门上爆炸冲击波的缓冲吸能装置。

要了解这种新型缓冲吸能装置的吸能效果及对防护门抗爆性能的提高程度,需要对其力学性能及吸能性能进行系统的研究。但目前对泡沫铝填充金属管力学性能的研究均处于定性的探讨阶段,对于泡沫铝填充钢管力学性能的系统研究相对较少。要找到设计过程中经济与安全的平衡点,就需要对影响泡沫铝填充管吸能性能的各种影响因素进行系统、定量的研究。而试验是非常直接的、重要的及有效的研究手段。为此,通过试验研究了泡沫铝填充钢管的力学性能。主要考查了泡沫铝的密度及钢管的直径对泡沫铝填充钢管力学性能及吸能性能的影响。同时对比分析了空钢管与泡沫铝填充钢管力学性能及吸能性能的差异。为全面了解这种新型吸能装置提供试验数据与理论参考。

1 试验简介及材料性能

1.1 钢管及泡沫铝填充管

图1为钢管与泡沫铝填充钢管示意图。试验时,考虑到缓冲吸能层不宜太厚,故钢管选用截面为圆形的20JHJ钢管作为研究对象。钢管的壁厚选用比较常用的厚度 $t=2\text{ mm}$,为节省费用,将单位长度缩小10倍,选用长度 $l=100\text{ mm}$,钢管的直径选用目前市场上比较常用的3种直径,分别为 $d=32\text{ mm}$ 、 $d=40\text{ mm}$ 及 $d=52\text{ mm}$ 。泡沫铝填充管与空钢管的材料与尺寸均相同,只是在其中填充了泡沫铝材料。填充的泡沫铝材料是根据钢管直径从生产好的泡沫铝柱体上切割而成的。泡沫铝填充体与钢管之间没有采取任何粘接措施。每种工况进行3次试验,取其平均值作为最后试验结果。

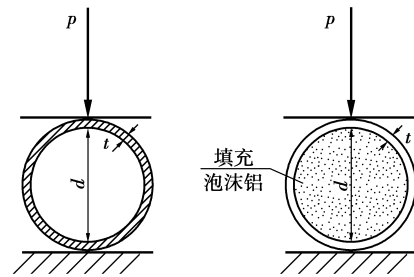


图1 钢管及泡沫铝填充钢管示意图

由于闭孔泡沫铝材料容易加工,故填充泡沫铝材料选用由中国船舶重工集团七二五所研制,通过熔体发泡法生产的闭孔泡沫铝材料。泡沫铝材料的密度选用从 0.127 g/cm^3 至 0.48 g/cm^3 。考虑到泡沫铝材料不同密度的影响,对不同密度的泡沫铝分别进行了压缩实验,以测试其应力应变关系随密度变化的情况。对钢管也进行了拉伸性能测试。图2为试验中空钢管及泡沫铝填充钢管试件图。



图2 试验中所用的空钢管及泡沫铝填充钢管

1.2 钢管准静态拉伸及泡沫铝的准静态压缩

试验设备采用深圳市新三思材料检测有限公司生产的微机控制电子万能试验机,型号为CMT5105。可施加的最大静荷载为 100 kN 。试验时,加载速度均采用 5 mm/min 。

图3为钢管典型的拉伸应力应变曲线及不同密度泡沫铝压缩应力应变曲线关系图。对钢管拉伸实验的结果进行整理,取钢管的屈服强度为 283 MPa ,弹性模量为 200 GPa 。通过图3(b)可以看出,泡沫铝压缩应力应变曲线呈现出典型的3个阶段特征,即弹塑性段、平台段及压实段。同时平台段的应力随着相对密度(与实体材料密度的比值)及平均密度(质量与体积的比值)的增大相应地增加。王青春等人通过试验对密度为 0.37 g/cm^3 的相应泡沫铝进行了不同方向的压缩试验,通过研究发现,各个方向压缩应力应变曲线平台应力相差较小,即此种泡沫铝材料具有较好的各向同性。

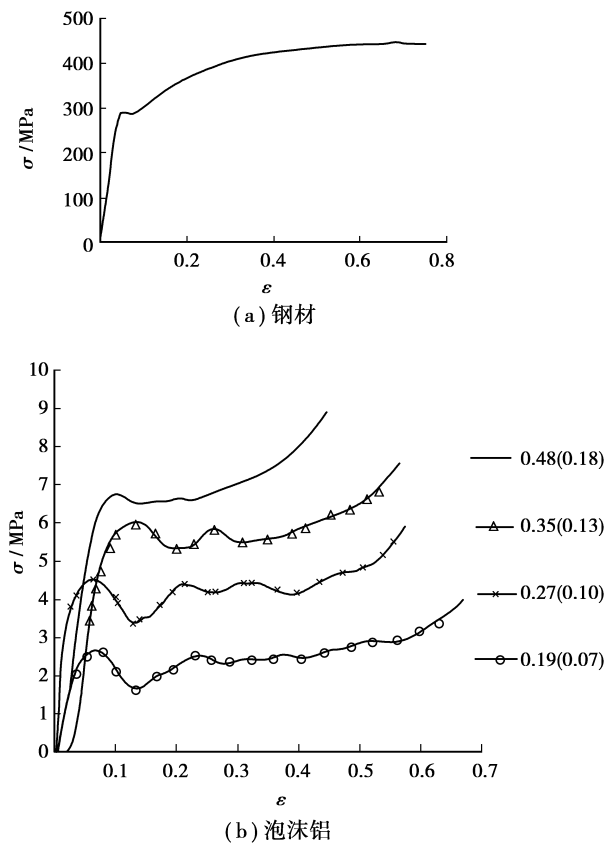


图3 钢材及泡沫铝应力应变曲线

2 空钢管及泡沫铝填充管的压缩试验

2.1 空钢管横向准静态压缩

空钢管压缩所使用的设备与前面试验的设备相同。如图4所示,试件放置在压头与工作台之间,不施加任何约束,加载速度采用5 mm/min。实验中控制压头的下降距离为钢管直径的65%作为压缩结束标志,即压缩应变为65%左右即可,此时,钢管横向压缩的平台区基本结束。试验数据通过电脑自动读取,计算机可以直接给出压缩过程中力与位移曲线及相应的其他数据。



图4 试验加载设备及数据采集系统

图5显示了直径分别为32 mm、40 mm及52 mm空钢管横向压缩变形图。图6为3种钢管的名义应力应变曲线图。其中空钢管应力等于压头的力 p 与钢管投影面积 $s(s=d \times l)$ 两者之间的比值,而应变则通过压头移动的距离与钢管直径 d 两者比值进行计算。由图中可以看出,当钢管直径较小时,对应的屈服应力较大。直径较小的钢管与直径较大的钢管相比,相同应变下,直径较小管对应的应力值偏大、应力平台区较窄,且在较小应变条件下,应力上升较快。相同应变条件下,较小直径管吸收的能量较直径大的钢管要多。同时,直径较大的钢管其屈服应力较小直径管的屈服应力小,在相同应变条件下,可提供更大的行程。与直径小的钢管相比,在吸能过程中,大直径管对主体结构产生的影响相对较小。相同能量吸收条件下,大直径管需要更大的变形空间,但对主体结构影响相对较小。

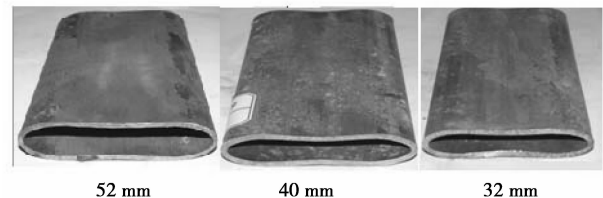


图5 不同直径空钢管压缩变形图

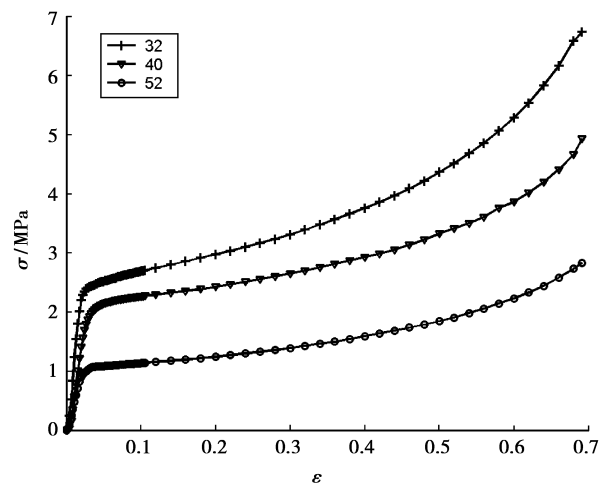


图6 不同直径空钢管压缩应力应变曲线

通过上面的分析可知,利用钢管作为能量吸收装置时,需要针对主体结构的特性选取不同类型的能量吸收装置。如果主体结构能够提供较大的抗力,同时对变形空间有限制时,可以选取直径较小地钢管作为能量吸收装置。反之,如果结构提供的抗力较小,同时具有足够地空间进行塑性变形,就应该选取直径较大的钢管作为能量吸收装置。

2.2 泡沫铝填充钢管横向准静态压缩

试验设备与前面相同,加载速度也相同。主要考查了填充泡沫铝对提高钢管屈服应力及应力应变曲线平台段的影响程度。同时还对比了密度泡沫铝对填充钢管屈服应力及应力应变关系的影响程度。

图7给出直径为32 mm钢管分别填充密度为 0.127 g/cm^3 与 0.239 g/cm^3 泡沫铝的应力应变曲线关系图。由前面研究可知,不同密度对应泡沫铝平台应力的大小是不相同的,但从图中显示的结果可知,就本文讨论范围而言,泡沫铝本身的平台应力对泡沫铝填充钢管的应力应变平台段的影响较小。密度为 0.127 g/cm^3 泡沫铝的平台应力几乎是密度为 0.239 g/cm^3 的1/2,而这种平台差异对泡沫铝填充钢管的平台应力影响几乎可以忽略。通过分析,笔者认为造成这种现象的主要原因是填充泡沫铝材料改变了钢管的受力状态,在钢管内壁提供一个均布的分布力。这大大增加了钢管压缩过程中由于应变的增加而降低的弯曲承载力。从而比较明显地增加了钢管压缩过程中的平台应力值。而不是依靠填充泡沫铝材料本身的抗压强度来增加其平台应力水平的。

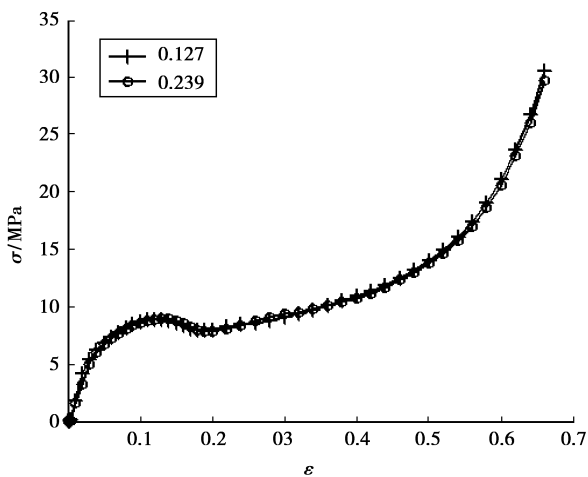


图7 不同密度泡沫铝填充钢管的应力应变曲线对比图

图8显示了不同管径泡沫铝填充管的应力应变曲线图。由图中可以看出,填充泡沫铝后,钢管平台应力的增强效果与管径有一定的关系。当管径为32 mm与40 mm时,泡沫铝填充管的平台应力相差较小,平台应力也比较高。而当管径增加至52 mm时,填充泡沫铝对钢管平台应力的提高效果显著下降。因此,在选择泡沫铝填充钢管增大其平台应力及能量吸收性能时,应考虑这种影响因素。

图9为空钢管与泡沫铝填充钢管压缩后变形比

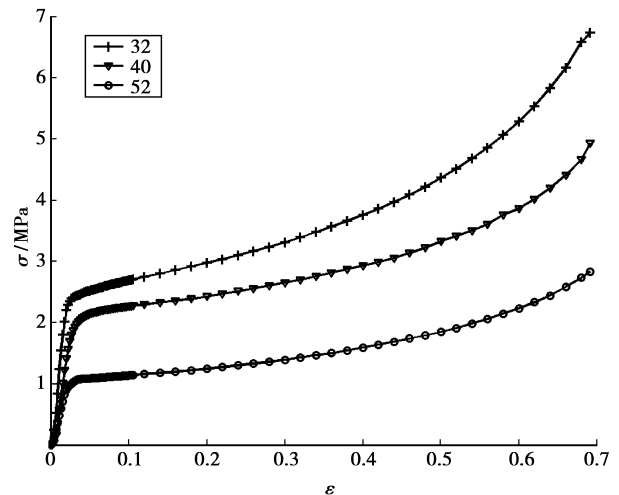


图8 不同管径泡沫铝填充钢管应力应变曲线图



图9 空钢管与泡沫铝填充管压缩变形图

较图。由中可以看出,空钢管的变形模式呈现出两头大,中间小的哑铃状,而填充泡沫铝钢管的压缩变形模式为两边圆弧,中间近似矩形的变形模式。由图9还可以看出,在两端面没有约束的情况下,泡沫铝会沿着管开口的方向发生挤出现象。这对于填充管的力学性能也有一定的影响。因此,在实际工程中应考虑泡沫铝挤出对其平台应力的影响。由图10中可以看出,在相同应变条件下,填充泡沫铝钢管的平台应力较空钢管提高了3倍左右。同样的应变下,泡沫铝填充钢管吸收的能量同样是空钢管吸收能量的3倍左右。

3 试验结果分析

3.1 钢管压缩的变形机构

对于空钢管,在压缩作用下,其变形一般出现如图11所示的四铰机构。在屈服弯矩的作用下,空钢管的变形最后呈现出图9所示的哑铃状。而在填充泡沫铝材料后,钢管的变形机构由四铰机构转变为八铰机构(如图11所示),最终变形也由哑铃状变为近似的矩形状。因此,在形成更多塑性铰的过程中,外力需要做更多的功,其平台应力及消耗的能量就会相应增加。

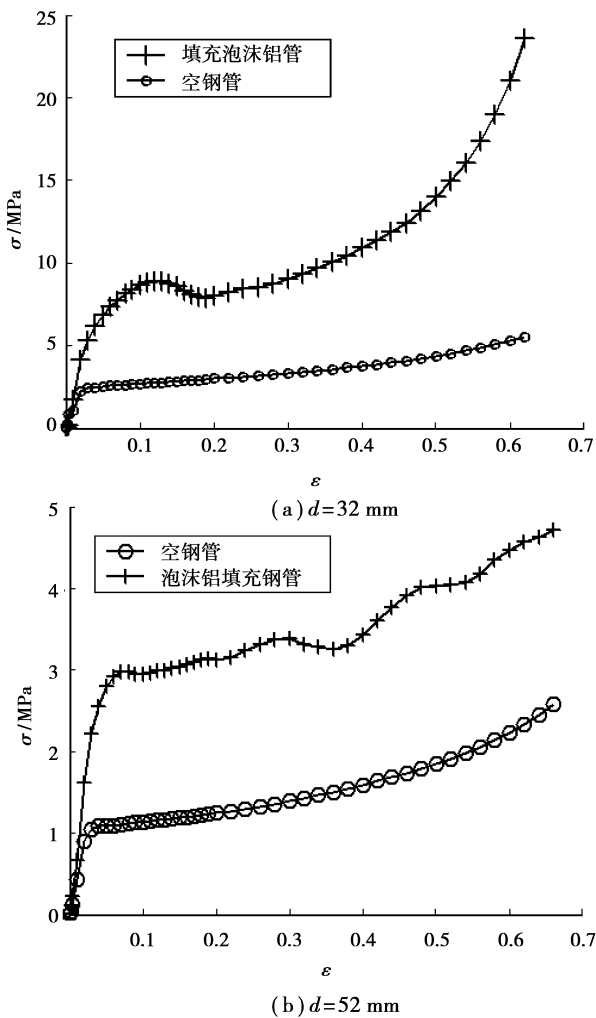


图10 泡沫铝填充钢管与空钢管应力应变曲线对比图

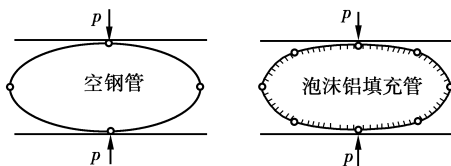


图11 钢管的变形机构

3.2 钢管压缩过程的能量吸收

材料的能量吸收性能通常用吸能特性 C (单位体积所吸收的能量) 及比吸能 W_e (单位质量吸收能量的能量) 等参数来表征。两者的计算公式如下:

$$C = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon, W_e = \frac{W}{m}; \quad (1)$$

式中: σ 为压缩应力; ϵ 为应变; W 为整个结构吸收的能量; m 为整个结构的质量。由式(1)可知, 材料吸收能量的能力取决于应力应变曲线下所包含的面积, 表1为填充前后钢管的吸能特性及屈服应力的对比。

表1 钢管与泡沫铝填充钢管能量吸收对比表

工况	吸能能量/J	结构质量/kg	比吸能	平台应力/MPa
32 空钢管	2.21	1.57	1.47	2.40
32 填充管	6.84	1.76	3.89	8.90
40 空钢管	1.73	1.96	0.88	2.05
40 填充管	4.75	2.15	2.21	8.00
52 空钢管	0.95	2.55	0.37	1.10
52 填充管	2.11	2.74	0.77	3.10

从表1可以看出, 填充泡沫铝后, 钢管的吸能性能得到较大的提高, 而比吸能也显著增加。证明填充泡沫铝提高钢管吸能性能的方法是可行的, 效果也比较明显。相同质量下, 填充管吸收的能量较空钢管吸收的能量大。吸收相同能量所需要填充管的质量远小于空钢管的质量。同时, 填充泡沫铝对提高钢管的平台应力也有明显的效果, 填充后钢管的平台应力约为未填充泡沫铝钢管的平台应力的3倍。

4 结 语

对泡沫铝、空钢管及泡沫铝填充钢管进行了准静态压缩试验。通过对比空钢管与泡沫铝填充钢管能量吸收性能及屈服应力发现, 填充泡沫铝对提高钢管结构的吸能性能及屈服平台应力有显著的效果。填充后钢管结构的屈服应力随着管径的增加相应减小。泡沫铝填充后对钢管能量吸收性能的提高随着管径的增加相应地降低。

参考文献:

- [1] ANDREWS E W, MOUSSA N A. Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 36(3): 1-8.
- [2] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] KARAGIOZOVA D, NURICK G N, YUEN S C K. Energy absorption of aluminium alloy circular and square pipes under an axial explosive load [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(7): 956-982.
- [4] IDRIS M I, VODENITCHAROVA T, HOFFMAN M. Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminum foam panels in uniaxial

- compression[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 517(1/2): 37-45.
- [5] NMEMAT-NASSER S, KANG W J, MCGEE J D, et al. Experimental investigation of energy-absorption characteristics of components of sandwich structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(6): 1119-1146.
- [6] SONG H W, FAN Z J, YU G. Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(9/10): 2575-2600.
- [7] LI Y, LI J B, ZHANG R Q. Energy-absorption performance of porous materials in sandwich composites under hypervelocity impact loading [J]. *Composite Structures*, 2004, 64(1): 71-78.
- [8] HOSUR M V, MOHAMMED A A, ZAINUDDIN S, et al. Impact performance of nanophased foam core sandwich composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 498(1/2): 100-109.
- [9] MCSHANE G J, STEWART C, ARONSON M T, et al. Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(16): 4407-4426.
- [10] RUBINO V, DESHPANDE V S, FLECK N A. The collapse response of sandwich beams with a Y-frame core subjected to distributed and local loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(2): 233-246.
- [11] 刘颖芳,刘仁辉,石少卿,等. 应用泡沫铝降低地下爆炸冲击波的数值分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(2): 230-233.
LIU YING-FANG, LIU REN-HUI, SHI SHAO-QING, et al. Numerical simulation analysis of reducing blast by using foam aluminum[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(2): 230-233.
- [12] 王青春,范子杰,宋宏伟,等. 泡沫铝填充帽盖型结构轴向压缩吸能特性的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(11): 98-102.
WANG QING-CHUN, FAN ZI-JIE, SUN HONG-WEI, et al. Experimental studies on the axial crushing behaviors of aluminum foam filled hat sections [J]. *Chinese Journal of mechanical engineering*, 2004, 40(11): 98-102.
- [13] 许坤,寇东鹏,王二恒,等. 泡沫铝填充薄壁方形铝管的静态弯曲崩毁行为[J]. *固体力学学报*, 2005, 26(3): 261-266.
XIU KONG, KOU DONG-PENG, WANG ER-HENG, et al. Bending collapse behavior of square aluminum extrusions with aluminum foam filler [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2005, 26(3): 261-266.
- [14] 谢中友,李剑荣,虞吉林. 泡沫铝填充薄壁圆管的三点弯曲实验的数值模拟[J]. *固体力学学报*, 2007, 28(3): 261-265.
XIE ZHONG-YOU, LI JIAN-RONG, YU JI-LIN. Numerical simulation of three-point bending experiments of thin-wall tubes filled with aluminum foam[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2007, 28(3): 261-265.
- [15] 于英华,杨春红,梁冰. 泡沫铝填充管汽车保险杠的研究[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(6): 907-910.
YU YIN-HUA, YANG CHUN-HONG, LIANG BING. Study on automobile bumper circular tube filled with foam aluminum[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(6): 907-910.

(编辑 王维朗)