

文章编号: 1001-1455(2012)02-0169-05

# 低速冲击下泡沫金属填充薄壁圆管的弯曲行为\*

谢中友<sup>1,2</sup>, 虞吉林<sup>2</sup>, 郑志军<sup>2</sup>

(1. 铜陵学院土木建筑系, 安徽 铜陵 244000;

2. 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 230026)

**摘要:** 采用实验方法研究了低速冲击下泡沫金属填充薄壁圆管的弯曲行为, 详细说明了实验方法和原理。通过与准静态实验结果比较发现, 冲击加载使泡沫金属填充圆管跨中截面的局部压入变形增大, 跨中截面高度变小, 结构下缘拉裂破坏延迟。由于结构的惯性效应, 锤头总冲击力高于准静态加载时的对应值。

**关键词:** 固体力学; 弯曲; 低速冲击; 薄壁圆管

**中图分类号:** O347.3

**国标学科代码:** 13015

**文献标志码:** A

薄壁圆管在遭受到横向撞击时, 容易发生局部压入变形, 从而导致结构承载能力大大降低。泡沫金属是一种新型的多孔材料, 具有低密度、高强度和比刚度的特点。用泡沫金属来填充薄壁圆管, 可以在结构质量增大不多的情况下, 大大提高结构抵抗局部变形能力, 因而提高结构的使用寿命。文献[1-3]用实验和数值模拟的方法研究了泡沫铝合金填充薄壁圆管的弯曲行为, 结果表明填充泡沫铝后结构承载力有很大提高。通过实验观察发现, 其变形可分为压入、压入弯曲和管壁下缘拉裂破坏 3 个阶段<sup>[2]</sup>。进而, 在数值模拟的基础上分析了结构的承载机理, 同时研究了部分填充管的填充长度对结构承载能力的影响<sup>[3]</sup>。L. W. guo 等<sup>[4]</sup>提出了一种新型的泡沫金属夹芯双管结构, 比传统的填充管具有更好的承载性能和吸能效果。

经受冲击载荷的结构, 其响应同静载情况相比, 有着许多不同的规律。冲击加载会改变结构的变形模式, 引起材料的应变率效应和结构的惯性效应。另外, 撞击物的巨大动能会引起结构产生超大变形、屈曲、断裂, 甚至垮塌失效, 造成灾难性事故, 因此研究结构的耐撞性有很大的学术和工程意义。泡沫金属有着良好的吸能性能, 可以承受很大的塑性变形, 且不会像实体结构那样发生突然的断裂垮塌, 因此泡沫夹芯结构在承受冲击载荷方面具有非常优良的力学性能<sup>[5-6]</sup>。

本文中拟主要研究低速冲击下泡沫金属填充薄壁圆管的弯曲行为。通过与准静态实验结果比较, 得到 2 种加载条件下结构力学响应的差别, 并重点分析其中的机理。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置及原理

动态弯曲实验在导轨式落锤实验系统上进行。实验时先将落锤提升至预定高度  $H$ , 释放后沿导轨自由下落对结构实施冲击加载。忽略导轨摩擦, 落锤撞击试件前为自由落体运动, 初始冲击速度可近似按式  $v_0 = \sqrt{2gH}$  计算, 其中  $g$  为重力加速度。

落锤锤头的刚度远大于泡沫金属填充圆管结构的结构刚度, 加之锤头设计较为紧凑, 因此落锤系统自振频率的特征时间远小于冲击力响应时间。因此, 在研究泡沫金属填充圆管的结构冲击响应时, 可将落锤锤头当作刚体, 锤头对试件的冲击力  $p(t)$  可以近似按式  $p(t) = ma(t)$  计算, 其中  $m$  为锤头加配重后的总质量,  $a(t)$  为锤头加速度,  $t$  为时间。虽然锤头的刚度和加速度传感器的埋设方式对加速度信号

\* 收稿日期: 2010-12-24; 修回日期: 2011-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(90205003, 10532020, 10672156)

作者简介: 谢中友(1976—), 男, 博士研究生, 讲师。

有影响,但只是在原始信号上迭加了高频信号,这种影响可以通过将加速度信号对时间积分加以消除。因此,可以较准确地计算试件上表面冲击点速度和位移随时间变化的信号

$$v(t) = v_0 - \int_0^t a(t) dt, \quad s(t) = \int_0^t v(t) dt$$

进而,可以得到冲击力与锤头位移之间的关系曲线。

## 1.2 试件制备

试件由薄壁圆管内填泡沫金属构成,管壁与泡沫铝合金芯棒间未加粘接,间隙为 0.15 mm。薄壁圆管材料为 AA6063T6 铝合金,外径  $D=38$  mm,有 3 种不同的壁厚: $\delta=1.0, 1.5, 1.8$  mm。泡沫金属芯基体材料为铝硅合金,主要成分为:工业铝 88%、硅 7%、钙 4%、铁 1%,基体密度约为  $2.98 \text{ g/cm}^3$ 。选用的泡沫金属平均胞孔尺寸为 4~6 mm,密度取 2 种,分别为  $\rho_1=0.486 \text{ g/cm}^3$  和  $\rho_2=0.518 \text{ g/cm}^3$ 。管壁材料和泡沫金属的基本力学性能详见文献[2]。

试件总长 300 mm,由 2 个距离为 250 mm 的固定支座上的刚性圆柱支撑,跨中加载,压头和支撑圆柱直径均为 10 mm。为了更深入地了解低速冲击下结构响应的特点,同时开展了准静态实验研究作为比较。准静态实验在 MTS810 材料试验机上进行,载荷和位移数据分别由力传感器和位移传感器给出。试件编号列于表 1 中,以 CS101 为例,C 表示圆管,S 表示准静态,10 表示壁厚 1.0 mm,1 表示泡沫铝合金密度为  $\rho_1$ ,其他依此类推。

## 1.3 实验参数设置

落锤的落高统一设为 1.4 m,使冲击初速度基本相同。另外,管壁相同的试件选取相同的冲击质量,使冲击能量基本相同。表 2 中列出了实验中各个参数的具体值。

表 1 试件编号方法

Table 1 Numbering method of specimens

截面形状	加载方式	$\delta/\text{mm}$	$\rho/(\text{g/cm}^3)$
C	S	1.0	0
	D	1.5	$\rho_1$
		1.8	$\rho_2$

表 2 冲击实验的参数值

Table 2 Parameter values of impact experiment

$\delta/\text{mm}$	$H/\text{m}$	$m/\text{kg}$	$E/\text{J}$
1.0	1.4	3.401	46.7
1.5	1.4	6.803	93.3
1.8	1.4	8.163	112.0

## 2 实验结果及分析

### 2.1 变形及失效模式

图 1 给出了圆管结构低速冲击下的变形图。可以看出,空管的跨中截面逐渐扁化,扁化区域较长。另外,比较不同壁厚的空管发现,随着管壁厚度的增加扁化幅度和扁化区域逐渐减小。填充泡沫金属后,结构的轴向扁化区域缩短,同时在锤头下方一个小区域内产生了一定的压入变形。随着泡沫金属密度的增大,结构趋向于发生下缘拉裂失效。

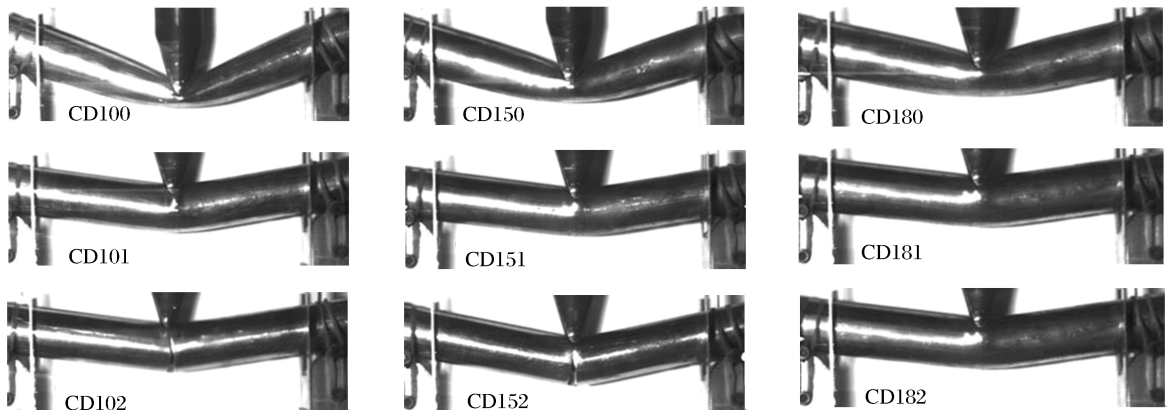


图 1 低速冲击下的结构变形

Fig. 1 Deformation of the structures under low-velocity impact

### 2.2 落锤加速度、速度以及位移随时间的变化

影响锤头冲击加速度的因素很多,主要有锤头中的应力波、锤头的横向振动、梁自身弹性自激振动、梁内冲击应力波。其中前 3 项由弹性引起,与梁的冲击力学性能无关,需要滤除。最后一项是结构本征属性,且和支撑条件相关,反映了特定条件下结构的性能,需要保留。选用相邻平均法进行光滑滤波。

对于锤头,与试件的碰撞是一个减速过程,加速度信号是负值。图 2 给出了空管和填充管结构在低速冲击下典型落锤加速度时间曲线。为了得到完整的结构响应信号,一般都要提前一段时间开始记录。结构响应信号的起点时间,可采用在速度曲线上读取的方法确定。在经受试件碰撞之前,锤头近似以重力加速度加速运动,当碰到试件后,速度开始下降,因此速度下降点即为结构响应信号起点。

对图 2 所示的加速度信号进行积分,得到图 3(a)所示的落锤速度时间曲线。锤头从约相同的初速度开始逐渐下降,当速度变为负值时说明锤头开始反弹。试件 CD102、CD152 的速度曲线在响应历时分别约 4、6 ms 时突然变为几乎水平,这是由于试件下缘发生拉裂失效,对锤头的阻力消失。

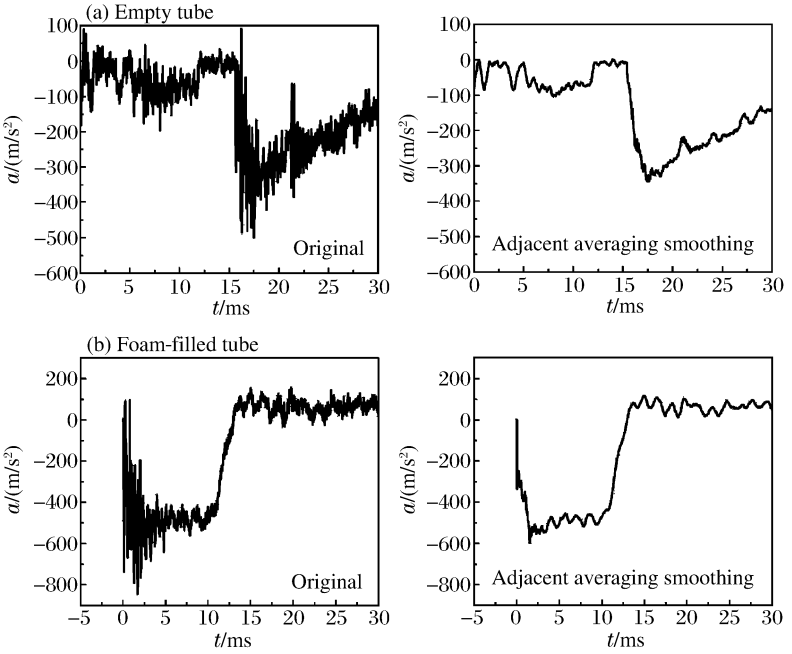


图 2 典型落锤加速度-时间曲线

Fig. 2 Typical acceleration-time curves of hammer

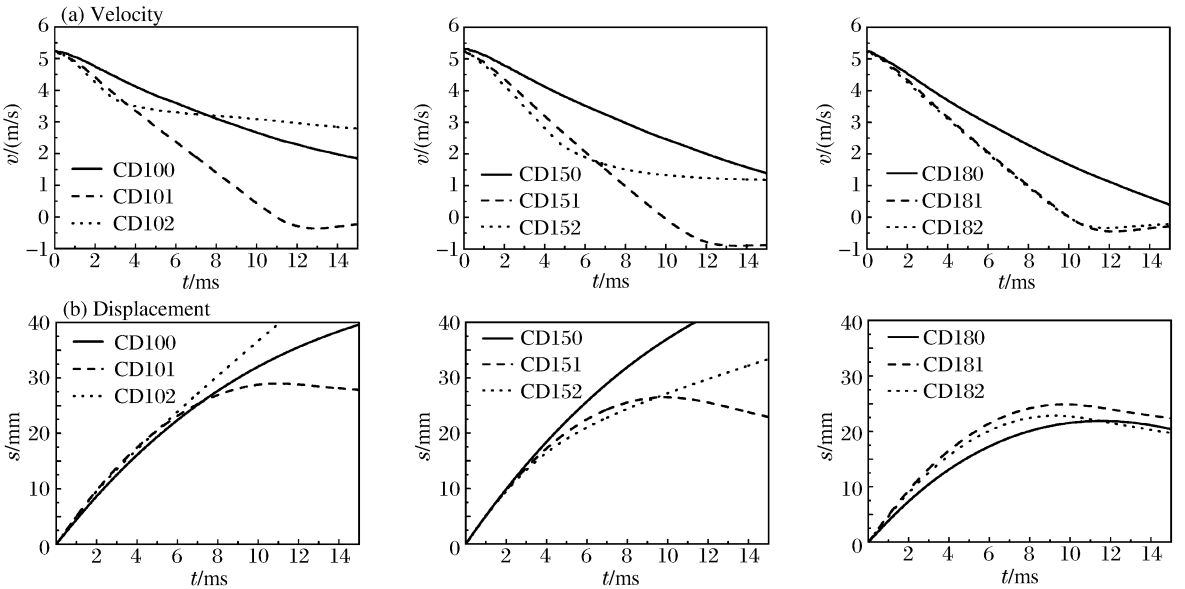


图 3 落锤锤头的速度-时间和位移-时间曲线

Fig. 3 Velocity-time and displacement-time curves of the hammer head

速度曲线的切线斜率就是加速度,因此可以由速度曲线反过来分析加速度的变化特点。从图 3(a)上可以看出,空管的锤头速度下降趋势较缓,说明锤头加速度较小。填充泡沫金属后,加速度增大。另外还可以发现,管壁相同的填充管,如试件 CD101 和 CD102,加速度非常接近,壁厚为 1.5、1.8 mm 的填充管也有类似特点。特别是试件 CD181 与 CD182,速度曲线几乎重合。这可能是由于填充的泡沫金

属密度相差较小,结构响应较接近,有待于进一步确定。进一步对图3(a)所示的速度曲线进行积分,可以得到落锤的位移时间曲线,如图3(b)所示。当位移达到峰值时,落锤开始反弹,位移减小。

### 2.3 锤头冲击力随位移的变化

影响锤头冲击力的因素主要有结构的力学性能、材料的应变率效应和结构的惯性效应。低速冲击下,材料的应变率效应影响很小。一般地,动态加载时结构的局部变形比准静态时加大,因此圆管梁的跨中截面的局部压入变形增大,结构的承载力将下降。另一方面,冲击加载时结构将获得一定的速度和动能,该动能须由额外的冲击力提供,因此总冲击力将增大。二者共同作用,构成动态冲击力与准静态压力之间的差别。把图2加速度乘以锤头质量即可得到锤头冲击力,结合图3(b)位移曲线即可得到锤头冲击力与位移的关系曲线,见图4。从图中可以看出,低速冲击时落锤冲击力普遍高于准静态时的压头静压力,说明提供结构动能的冲击力增加量超过因结构局部变形增大引起的承载力减少量。

根据前面的分析,动态加载时圆管梁跨中截面的局部压入变形超过准静态加载时的值,由此跨中截面高度变小,圆管下缘的拉伸应变随之变小,结构下缘拉裂破坏将会延迟。比较试件CD102和CS102下缘拉裂破坏时的锤头位移可知,前者略大于后者。试件CD102和CS152相比也有类似特点。试件CD182尚未达到破坏但位移已超过试件CS182的破坏位移,考虑到达到破坏时位移将会更大,因此综合上面的实验结果不难得出这样的结论,低速冲击时的填充结构破坏位移高于准静态时的量。

### 3 结论

实验发现冲击加载改变了结构的变形模式,同时引起材料的应变率效应和结构的惯性效应。与准静态加载相比,冲击加载使泡沫金属填充圆管跨中截面的局部压入变形增大,跨中截面高度变小,由此圆管下缘的拉伸应变随之变小,结构下缘拉裂破坏延迟。另外,局部压入变形增大使结构自身的承载力降低。然而,由于结构的惯性效应使冲击力增加更多,锤头总冲击力高于准静态加载时的对应值。

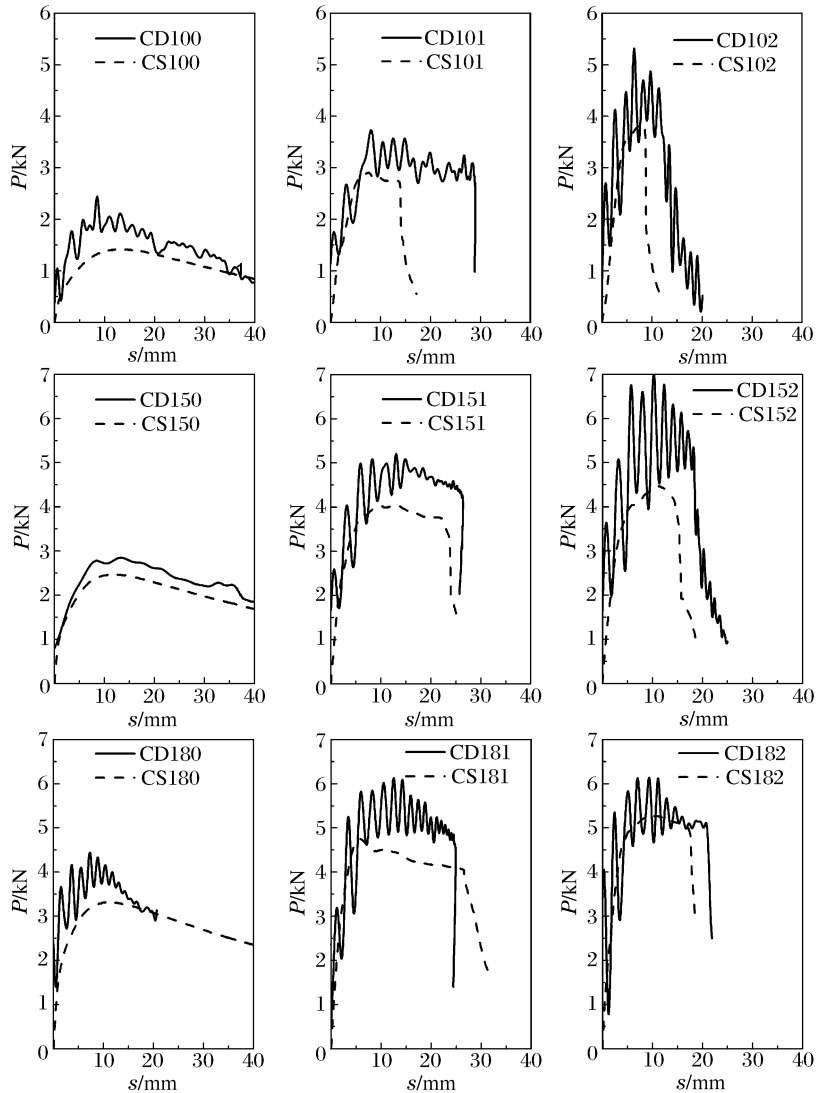


图4 锤头载荷位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of the hammer head

## 参考文献:

- [1] Kim A, Chen S S, Hasan M A, et al. Bending behavior of thin-walled cylindrical tube filled with aluminum alloy foam[J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 270/271/272/273:46-51.
- [2] 谢中友, 虞吉林, 李剑荣. 泡沫铝合金填充圆管三点弯曲实验研究实验力学[J]. *实验力学*, 2007, 22(2):104-110.  
XIE Zhong-you, YU Ji-lin, LI Jian-rong. An experimental study on three-point bending of aluminum alloy foam-filled cylindrical aluminum alloy pipe[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(2):104-110.
- [3] 谢中友, 李剑荣, 虞吉林. 泡沫铝填充薄壁圆管三点弯曲实验的数值模拟固体力学学报[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-walled cylindrical tubes filled with aluminum foam[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2007, 28(3):261-265.
- [4] Guo L W, Yu J L. Bending response of sandwiched double tube structures with aluminium foam core[C]//Lu J W Z, Leung A Y T, Iu V P, et al. *ISCM II and EPMESC XII*. New York: American Institute of Physics, 2010:602-607.
- [5] Yu J L, Wang X, Wei Z G, et al. Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminium-foam core[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(3):331-347.
- [6] Yu J L, Wang E H, Li J R, et al. Static and low-velocity impact behavior of sandwich beam with closed-cell aluminium foam core in three-point bending[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8):885-894.

## Bending behavior of thin-walled cylindrical tubes filled with metallic foam under low-velocity impact\*

XIE Zhong-you<sup>1,2</sup>, YU Ji-lin<sup>2</sup>, ZHENG Zhi-jun<sup>2</sup>

(1. *Department of Civil and Architectural Engineering, Tongling University, Tongling 244000, Anhui, China;*

2. *CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

**Abstract:** Three-point dynamic bending tests and quasi-static tests were carried out, respectively. And the experimental methods and the corresponding experimental principle were introduced in details. In the experiments, aluminum alloy 6063T6 was chosen as the thin-walled tube material, the tubes with three different thicknesses of 1.0, 1.5 and 1.8 mm had an identical outside diameter of 38 mm, and the aluminum-alloy foam with two different densities was used as filling cores. The experimental results display that under low-velocity impact, the thinner-walled tubes are prone to tensile damage at the lower edges of the middle sections; that due to the inertia effect, the punch forces under low-velocity impact are higher than those under quasi-static load. In addition, the local indentation by low-velocity impact is larger than that by quasi-static load, which makes the tensile failure of the lower edge of the structure delay. Hence, the bending stiffness of the middle sections under low-velocity impact significantly decreases and the ultimate displacement when the structures fracture increases.

**Key words:** solid mechanics; bending; low-velocity impact; thin-walled cylindrical tubes

\* Received 24 December 2010; Revised 16 April 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (90205003, 10532020, 10672156)

Corresponding author: XIE Zhong-you, zyxie@mail.ustc.edu.cn