

## 薄壁圆管轴向冲击下的动态特性研究

朱文波<sup>1</sup>, 杨黎明<sup>1\*</sup>, 余同希<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 香港科技大学 机械工程系, 香港 999077)

**摘要:** 采用落锤冲击实验机和材料实验机(MTS)研究薄壁圆管轴向载荷下的动态力学特性, 得到不同冲击速度下的轴向力一位移曲线. 发现惯性对薄壁圆管轴向压缩的动态吸能特性影响不大, 而落锤不同冲击加载速度即代表应变率的变化引起的薄壁圆管材料屈服应力的提高, 使得薄壁圆管比吸能 SEA(单位质量结构所吸收的能量)和平均轴向压缩力  $P_m$  随着应变率的增加而呈上升趋势. 对不同应变率下的  $P_m$  进行无量纲化处理, 发现实验结果与前人推导的理论结果趋势一致. 对比动态和准静态实验结果, 发现圆管的动态变形模态相比准静态结果发生了改变, 更高速度冲击下薄壁圆管的动态特性有待进一步研究.

**关键词:** 薄壁圆管; 轴向压缩; 动态特性; 应变率效应

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0092-05

薄壁圆管在轴向压缩下常发生稳定的渐进式的压溃变形模式(主要有圆环模式、金刚石模式、混合模式), 并且具有较长的压缩行程, 不仅能够吸收耗散大量的冲击能量, 而且通过设计薄壁圆管壁厚  $t$ 、直径  $D$ 、选取材料等, 能有效地控制碰撞反作用力, 这些优点使薄壁圆管结构在各种实际工程中被广泛地用作能量吸收装置. 文献[1-2]系统地研究了薄壁金属圆管的轴向压溃行为, 发现其变形模式主要依赖于几何参数  $L/D$  ( $L$  为管长)和  $D/t$ . 定义  $L/D > 4$  的为长管,  $L/D < 4$  的为短管, 长管一般易发生欧拉屈曲. 对于短管, 如果  $D/t < 50$  易发生圆环模式变形; 如果  $D/t > 50$  易发生金刚石模式变形; 当短管  $L/D > 2$ , 且  $D/t < 50$  时, 易发生混合模式变形.

为了预报薄壁圆管结构在轴向压缩下的吸能能力, 估计其相应的轴向压缩力, 有必要调查它们在轴向压缩加载下响应的各种特征. 对结构的加载一般有准静态加载和动态加载. 准静态加载速度非常缓慢, 可认为结构一直处在平衡状态; 而动态加载常在短时间内发生, 因此结构可能处于不平衡状态<sup>[3]</sup>. Florence 等<sup>[4]</sup>和 Lindberg 等<sup>[5]</sup>做了铝合

金薄壁圆管在高速冲击下的动态塑性屈曲实验, 发现铝合金圆管在长度方向上的屈曲波长几乎是一致的, 且屈曲变形具有可重复性. 通常动态塑性屈曲经常与高速冲击相联系, 而渐进式屈曲常假定由低速轴向压缩引起. 然而 Murase 等<sup>[6]</sup>对铝合金管做了一些高速冲击实验, 发现铝合金管在高速冲击下同样发生了渐进式的屈曲, 说明动态塑性屈曲并不仅仅与惯性效应有关. Abramowicz 等<sup>[7]</sup>发现薄壁圆管轴向加载的各种动态屈曲响应主要是由惯性效应和非弹性材料特性的耦合作用引起的. 文献[8-10]认为动态弹塑性屈曲是一个与惯性效应和应变率效应相关的非常复杂的过程.

笔者通过 MTS 机和落锤冲击试验机装置对一种薄壁圆管进行准静态和动态的轴向压缩实验, 得到了不同应变率范围内的轴向压缩力一位移曲线, 并分析得到了薄壁圆管轴向冲击下的动态特性.

### 1 实验准备和装置

#### 1.1 实验试件的制备

实验所用的薄壁圆管取自一种饮料罐, 采用线切割技术将其头尾切去, 留下中间的金属空管.

收稿日期: 2013-12-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11032001).

第一作者: 朱文波(1987-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: zhuwenbo0108@gmail.com

\*通信作者: 杨黎明(1957-), 男, 福建长乐人, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

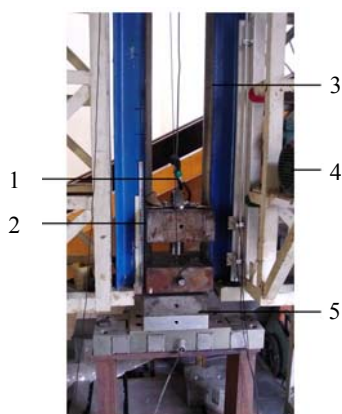
为了使薄壁圆管在轴向压缩过程中没有弯矩产生,线切割后的端面必须与圆管轴线保持垂直。薄壁圆管试件参数见表1。

表1 试件参数

| 质量/g | 长度/mm      | 直径/mm      | 厚度/mm     | 屈服强度/MPa |
|------|------------|------------|-----------|----------|
| 22.3 | 90.00±0.10 | 52.19±0.20 | 0.25±0.01 | 248      |

## 1.2 落锤式冲击试验机装置及原理

落锤式冲击试验机是常用的冲击实验装置,通过电磁装置将金属锤头可控制地从任意高度落下,获得不同的冲击动能和速度,具有加载重复性好,载荷控制灵活等优点,本实验所用的落锤冲击装置如图1所示。



1 为脱钩; 2 为锤头; 3 为导轨; 4 为电磁装置; 5 为底座。

图1 大型落锤式冲击试验机

通过加速度传感器测量锤头的加速度(测量出的加速度已减去重力加速度),该加速度与锤头质量的乘积即薄壁圆管对锤头的反作用力。实验中采用的加速度传感器的频响为 200 kHz; 通过频响为 20 kHz 的激光位移传感器测量锤头底面的位移变化,当锤头与试件表面接触时,假设锤头底面与试件端面的位移变化相同,通过这2组数据可得到薄壁圆管轴向力—位移曲线,分析轴向载荷随位移的变化趋势,能够确定其动态吸能特性;基于该力—位移曲线,通过积分运算就可以得到吸收能量—位移曲线。

## 2 结果与分析

薄壁圆管准静态轴向压缩实验和材料屈服强度的测试在 MTS 实验机上完成,设定加载速率均为  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。轴向冲击压缩实验在宁波大学冲击

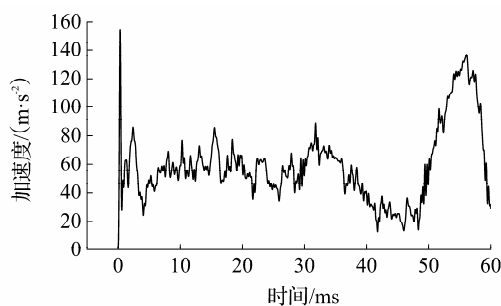
与安全工程重点实验室大型落锤式冲击实验机上完成,所用的锤头重量为 41 kg,下落高度范围为 0.4~0.8 m,研究薄壁圆管对不同冲击速度轴向压缩的动态响应。薄壁圆管轴向冲击压缩后的变形如图2所示。



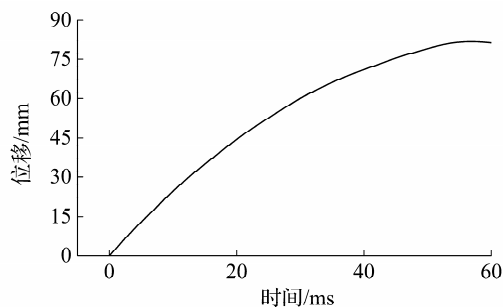
图2 薄壁圆管轴向冲击压缩后变形

图2从左至右落锤的下落高度分别为0.4、0.5、0.6、0.8 m。观察变形后的试件可以发现,随着锤头下落高度的提高,薄壁圆管被压得越来越密实,但总的褶皱数并未发生改变,均为9~10个;薄壁圆管的变形模式也未发生变化,为金刚石变形模式,且每个褶皱的瓣数  $N$  都为4.5。而准静态实验变形后的薄壁圆管褶皱的瓣数  $N$  为3.5,比动态实验的瓣数少。对薄壁圆管进行更高速度的动态轴向压缩实验,高速冲击下的试件相对于低速冲击下的试件可能会发生变形模态的改变,这还有待于进一步的研究。

落锤下落高度为0.4 m时传感器测得的结果如图3所示。对加速度—时间曲线进行积分处理,同



(a) 加速度传感器测得的加速度—时间曲线



(b) 激光位移传感器测得的位移—时间曲线

图3 落锤下落高度为0.4 m时传感器测得数据

样能够得到薄壁圆管动态轴向压缩下的位移—时间曲线. 与激光位移传感器测得的数据进行比较, 能够验证 2 种传感器的吻合度, 如图 4 所示. 从图 4 可以发现, 曲线前半段吻合较好, 后半段则出现微小的分岔, 可能是由于锤头与导轨之间有摩擦, 以及试件未摆放在锤头下正中心位置造成.

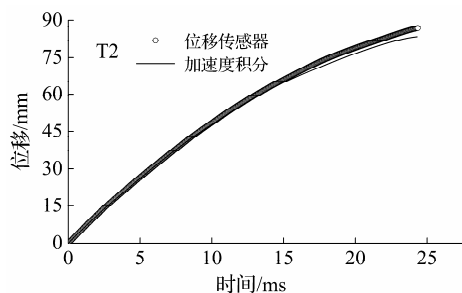


图 4 2 种位移—时间曲线比较

图 5 为薄壁圆管动态与准静态轴向压缩下的力—位移曲线比较, 以及能量吸收—位移曲线比较, 发现动态实验下薄壁圆管的轴向力—位移, 以及能量吸收—位移曲线都要高于准静态结果, 即薄壁圆管动态轴向压缩的吸能能力要优于准静态轴向压缩. 图 6 为落锤下落高度为 0.8 m 时, 圆管上端面的速度—时间曲线.

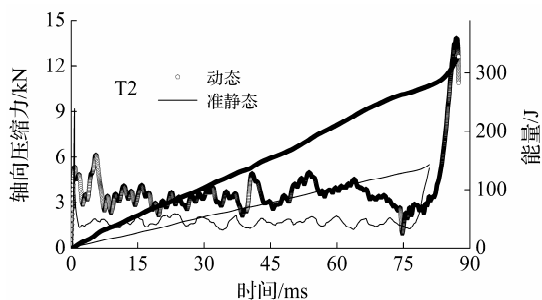


图 5 力—位移与能量吸收—位移曲线比较

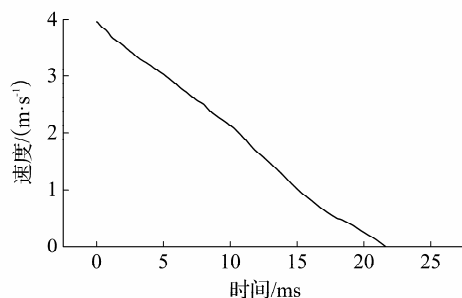


图 6 下落高度为 0.8 m 时圆管上端面的速度—时间曲线

## 2.1 惯性影响

研究薄壁圆管轴向冲击压缩的特性, 主要需

要考虑惯性和应变率效应的影响. 首先探讨惯性对薄壁圆管轴向吸能动态特性的影响.

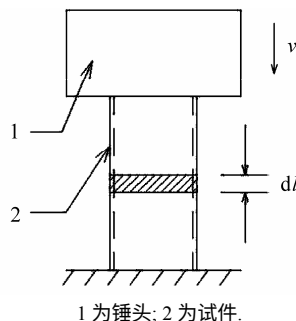


图 7 薄壁圆管轴向压缩示意图

笔者所用薄壁圆管的质量  $M$  为 22.25 g, 轴向长度  $L$  为 90 mm, 引入薄壁圆管线密度  $l_\rho$  的概念, 即单位长度薄壁圆管的质量. 研究用试件, 线密度  $l_\rho = M/L = 0.25 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 取薄壁圆管轴向方向微元  $dl$  长度, 如图 7 所示, 则该微元的质量  $dm = l_\rho dl$ , 其中单位长度  $dl = v_i dt$ ,  $v_i$  表示薄壁圆管轴向压缩过程中该微元的轴向速度. 根据动量守恒定律, 该微元满足:

$$F_i dt = v_i dm, \quad (1)$$

其中:  $F_i$  表示该微元由于惯性作用引起的惯性力, 代入公式  $dm = l_\rho dl$ , 可得该微元惯性力为:

$$F_i = l_\rho v_i^2. \quad (2)$$

薄壁圆管在轴向压缩的过程中, 薄壁圆管与锤头接触的端面速度呈下行趋势, 取  $v_i$  最大值, 即圆管端面开始与锤头接触时的轴向速度. 当下落高度为 0.8 m 时, 不考虑锤头与导轨的摩擦, 根据机械能守恒定律,  $v_0 = \sqrt{2gh} = 3.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 代入(2)式, 得薄壁圆管动态轴向压缩时, 由于惯性作用引起的惯性力  $F_i = 3.88 \text{ N}$ , 远小于落锤动态实验中由传感器测得的轴向压缩力, 因此在分析薄壁圆管轴向冲击压缩力时可以忽略惯性作用的影响.

## 2.2 率相关本构模型

能量吸收装置一般受快速变化的动载荷作用, 结构快速变形, 从而出现高应变率. 而很多工程材料的力学性能恰恰与应变率有关. 应变率效应起着增强材料屈服应力的作用. 在各种用于工程材料的率相关本构方程中, Cowper-Symonds 关系在结构碰撞中应用最为广泛. 其定义为:

$$\frac{Y^d}{Y} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{B} \right)^{1/q}, \quad (3)$$

其中:  $Y^d$  为考虑应变率的动态屈服应力,  $Y$  为准静态屈服应力,  $B$  和  $q$  是率敏感性材料参数. 对实验中所用的薄壁圆管材料, 其率敏感性材料参数  $B$  为  $40\text{ s}^{-1}$ ,  $q$  为 5, 准静态屈服应力为  $248\text{ MPa}$ .

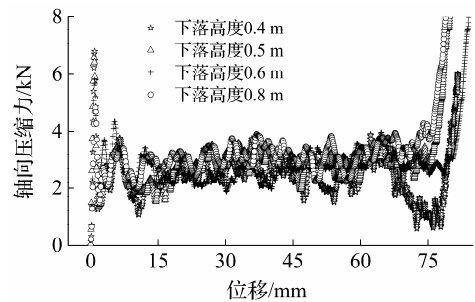
Abramowicz 等<sup>[7]</sup>对 Alexander 薄壁圆管轴向压缩的变形模式模型提出了修正, 推出圆管在轴向冲击下发生金刚石变形模式时的应变率为:

$$\dot{\epsilon} = 0.74v_0 / D.$$

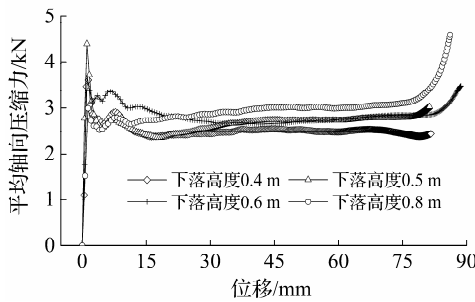
(4)

2.3 应变率效应

为研究不同应变率下薄壁圆管的动态特性, 进行了 4 组不同下落高度, 即不同冲击速度下的落锤实验, 并与 MTS 材料实验机做的准静态实验结果比较, 每组实验 2~3 个试件, 结果取平均值, 得到薄壁圆管不同冲击速度下的轴向力—位移曲线, 基于吸能效率的概念得到轴向平均力—位移曲线, 如图 8 所示. 当薄壁圆管吸能效率取最大值时, 计算其比吸能、平均轴向压缩力等评价指标(表 2). 利用(4)式计算不同冲击速度代表的应变率, 并把表 2 数据描点画图, 如图 9 所示. 从图 8(b)和图 9 可以看出, 随着应变率提高, 薄壁圆管比吸能和平均轴向压缩力也随之提高. 对平均压缩力进行无量纲化, 并与前人理论模型公式比较, 得到不同理论模型和实验数据点平均压缩力与应变率  $\dot{\epsilon}$  的变化曲



(a) 薄壁圆管实测轴向力—位移曲线



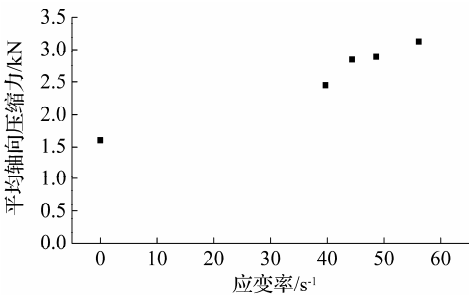
(b) 基于吸能效率概念平均力—位移曲线

图 8 薄壁圆管不同下落冲击速度下轴向力—位移曲线

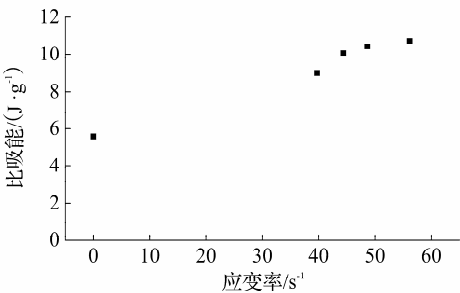
线, 发现实验数据趋势与前人理论模型趋势一致. 由此我们认为薄壁圆管轴向压缩具有一定的应变率效应.

表 2 不同冲击速度下薄壁圆管比吸能、平均力等评价指标

| 冲击速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | SEA/(J·g <sup>-1</sup> ) | Pm/kN | Sf/mm |
|---------------------------|--------------------------|-------|-------|
| 2.80                      | 9.01                     | 2.45  | 81.65 |
| 3.13                      | 10.07                    | 2.85  | 78.64 |
| 3.43                      | 10.45                    | 2.89  | 82.82 |
| 3.96                      | 10.74                    | 3.12  | 76.59 |



(a) 不同应变率下的平均压缩力



(b) 不同应变率下的比吸能

图 9 平均压缩力、比吸能随应变率变化曲线

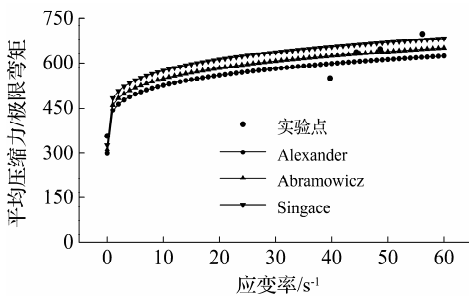


图 10 平均压缩力  $P_m$  与应变率  $\dot{\epsilon}$  的变化

3 结论

(1) 与准静态相比, 在冲击载荷下薄壁圆管的比吸能和平均轴向压缩力评价指标都有较大提升, 且圆管的变形模式发生改变, 金刚石模式每个褶

皱的瓣数  $N$  由 3.5 增到 4.5. 更高冲击速度的轴向压缩对薄壁圆管变形模态的变化有待进一步研究.

(2) 薄壁圆管轴向冲击压缩下, 其惯性对轴向力的影响较小, 可以忽略不计.

(3) 随着冲击速度的提升, 薄壁圆管的比吸能和平均轴向压缩力也随之升高, 对不同应变率下的平均轴向压缩力进行无量纲化处理, 发现实验结果与前人推导的理论结果变化趋势一致, 说明薄壁圆管轴向压缩行为具有一定的应变率效应.

#### 参考文献:

- [1] Andrews K R F, England G L, Ghani E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25:687-696.
- [2] Guillow S R, Lu G, Grzebieta R H. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2103-2123.
- [3] 余同希, 邱信明. 冲击动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011:81-82.
- [4] Florence A L, Goodier J N. Dynamic plastic buckling of cylindrical shells in sustained axial compressive flow[J]. J Appl Mech, 1968, 35(1):80-86.
- [5] Lindberg H E, Florence A L. Dynamic pulse buckling-theory and experiment[M]. Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- [6] Murase K, Jones N. The variation of modes in the dynamic axial plastic buckling of circular tubes[C]// Gupta N K. Plasticity and impact mechanics. New Delhi: Wiley Eastern Limited, 1993:222-237.
- [7] Abramowicz W, Jones N. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically[J]. Int J Impact Eng, 1997, 19:415-437.
- [8] Tam L L, Callandine C R. Inertia and strain rate effects in a simple plate-structure impact loading[J]. Int J Impact Eng, 1991, 11(3):349-377.
- [9] Harrigan J J, Reid S R, Peng C. Inertia effects in impact energy absorbing materials and structures[J]. Int J Impact Eng, 1999, 22(9/10):955-979.
- [10] Langseth M, Hopperstad O S, Berstad T. Crashworthiness of aluminum extrusions: Validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity[J]. Int J Impact Eng, 1999, 22:829-845.

## Study on Dynamic Properties of Thin-walled Circular Tubes under Axial Compression

ZHU Wen-bo<sup>1</sup>, YANG Li-ming<sup>1\*</sup>, YU Tong-xi<sup>2</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China )

**Abstract:** The dynamic properties of thin-walled circular tubes under axial compression are studied using Drop Hammer and MTS (Material Test System). Axial load-displacement curves under different crushing speeds are obtained from the tests. On observation of the behavior of thin-walled circular tubes under axial compression, it implies that the inertia effect has negligible influence on dynamic properties while the increment of strain-rate enhances the specific energy absorption (SEA) and mean force ( $P_m$ ) of the tubes. Based on dimensionless analysis of  $P_m$  under different strain-rates, it shows that the experimental results are in good agreement with the theoretical ones obtained by former researchers. It is found from experimenting that the deformation mode of the tubes under impact is different from that under quasi-static, and further study is needed on the dynamic behavior of thin-walled circular tubes at higher speeds.

**Key words:** thin-walled circular tubes; axial compression; dynamic properties; strain-rate effect

(责任编辑 史小丽)