

周期开孔圆管的准静态轴压特性

李德龙, 张科, 崔世堂, 唐志平

(中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 结合多胞材料的可压缩性和圆管结构的轴对称性, 提出了一种周期开孔圆管的缓冲吸能新结构. 通过数值模拟研究了该结构在轴向准静态加载下的力学响应. 加工了典型尺寸的试件, 对其进行了准静态实验研究, 实验结果证明了数值模拟的可靠性. 数值模拟和实验的结果表明在准静态轴压下, 该结构主要变形模式为整体轴向均匀压缩, 载荷位移曲线平滑, 载荷力稳定且幅值较大, 比吸能和冲程效率适中, 缓冲吸能性能较好. 讨论了几何参数对结构吸能性能的影响, 发现圆管厚度对平均载荷的大小起决定性支配, 二者呈现较好的线性关系, 随着周期开孔数或者胞元壁厚的增加, 平均载荷逐渐增加, 冲程效率逐渐减小, 比吸能变化不大.

关键词: 周期开孔; 圆管; 轴向加载; 准静态; 吸能

中图分类号: O34 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.09.006

引用格式: 李德龙, 张科, 崔世堂, 等. 周期开孔圆管的准静态轴压特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(9): 731-739.

LI Delong, ZHANG Ke, CUI Shitang, et al. Quasi-static axial compression properties of circular tube with periodic holes[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(9): 731-739.

Quasi-static axial compression properties of circular tube with periodic holes

LI Delong, ZHANG Ke, CUI Shitang, TANG Zhiping

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: By combining the compressibility of the multi-cell material and the axisymmetry of the circular tube, a new energy absorption structure of circular tube with periodic holes was proposed. The mechanical properties of the structure under axial quasi-static loading were studied by numerical simulation. The specimens of typical dimensions were processed and quasi-static experiments were carried out. The experiment proved the reliability of the numerical simulation. The numerical simulation and the experiment show that under the quasi-static axial compression, the main deformation mode of the structure is the overall axial uniform compression, the load displacement curve is smooth, the load force is stable and the amplitude is large, the specific energy absorption and stroke efficiency are moderate, and the cushioning energy absorption performance is good. The influence of geometric parameters on the energy absorption performance of the structure was discussed. It is found that the thickness of the circular

收稿日期: 2019-03-31; **修回日期:** 2019-05-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2480000003, WK2480000002)资助.

作者简介: 李德龙, 男, 1994年生, 硕士. 研究方向: 冲击动力学. E-mail: lidelong@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 张科, 博士/副研究员. E-mail: zhangke@ustc.edu.cn

tube decides the magnitude of the mean force, and the relationship between them is linear; with the increase of the number of periodic openings or cell wall thickness, the mean force increases gradually, the stroke efficiency decreases gradually, and the specific energy absorption changes little.

Key words: periodic opening; circular tube; axial loading; quasi-static; energy absorption

0 引言

在日常生活和工业生产中发生着各种冲击碰撞事件,安全防护问题引起了人们广泛的关注.为了保护人身及财产安全,大量缓冲吸能结构已开发使用.利用金属塑性变形来吸收冲击能量是现在工程中应用最多的,其中比较典型的有金属多胞材料及其复合结构的压缩以及金属薄壁圆管和—些诱导变形圆管结构的轴向压缩.

金属多胞材料具有相对密度小、质量轻、比强度和比刚度高等优异的结构特性^[1],在缓冲吸能方面得到广泛应用.经常使用的有泡沫铝、蜂窝铝^[2],这些多胞材料具有较长的压缩行程,载荷力相对平稳,但整体刚度低,载荷力幅值小.这类材料通常不单独使用,而是填充金属圆管、方管^[3-4],或者复合成三明治板^[5-6]来对防护物进行保护.

金属薄壁圆管作为一种价格便宜、效率高的缓冲吸能结构,被广泛应用于各种缓冲吸能系统中^[7].薄壁圆管在轴压下变形模式为渐进屈曲,该变形模下载荷力相对较大,压缩行程长,能量吸收率较高,但其初始峰值载荷大,载荷力周期波动大^[8].当管长较长时,还会容易发生整体失稳^[9].为了改善薄壁圆管轴压下的吸能性能,一些学者们提出了翻转管^[10]、膨胀管^[11]及劈裂管^[12]等吸能结构,这些结构变形模式稳定,载荷力平滑,振荡较小,但耗能效率降低,而且都需要安装模具触发诱导变形.

另有一些学者通过在管状结构自身上施加缺陷来诱导管状结构稳定变形.谭丽辉等^[13]采用凹槽、凸槽和凸凹交错槽三种圆弧形槽来诱导薄壁圆管变形,数值模拟发现施加诱导槽后降低了初始峰值载荷.梁玉等^[14]对薄壁圆管分别设置了矩形凸槽、矩形凹凸交替槽、外波纹、内外表面波纹四种诱导,发现四种诱导方式能够减小载荷波动系数,使载荷位移曲线更加平稳.张涛等^[15]利用数值模拟的方法研究了在轴向和周向均匀开狭长小孔的圆管和方管的吸能特性,发现开孔后薄管初始峰值载荷减小,载荷力周期波动频率也减小,缓冲环境得到改善.

本文结合多胞材料的可压缩性和圆管结构的轴

对称性,在一定厚度金属圆管表面周期性开六边形孔,得到了周期开孔圆管新结构.通过数值模拟和实验的方法研究了该结构在准静态轴压下的力学响应和吸能特性,讨论了圆管材料和结构几何尺寸对吸能性能的影响.数值模拟和实验的结果证明了该结构具有优良的缓冲吸能特性和静态承载能力,为该结构的实际应用提供了参考.

1 周期开孔圆管结构设计

本文提出的周期开孔圆管缓冲吸能新结构如图 1 所示,通过在圆管表面周期性开六边形孔得到.该结构有两套基本参数,即圆管参数和胞元参数(开孔参数).对于圆管,三个尺寸参数即可唯一确定圆管的大小:圆管外径 D ,圆管厚度 d ,圆管高度 h .胞元参数相对复杂,如图 1(c)所示,胞元各边壁厚相同为 t ,胞元斜边中性层长度为 L ,胞元竖边中性层长度为 H ,胞元倾角即斜边与水平线夹角为 θ .为形成完美的轴对称结构,必须满足 $\pi D / (2L \cos\theta) = N$, N 为正整数, N 相对 L 是更实用的独立参数,称 N 为周期开孔数.另外,可以定义胞元总层数 $C = h / (H + L \sin\theta)$.假设斜壁材料的剪切变形是该结构的主要耗能机理,还可以定义胞元斜壁理想最大剪应变

$$\lambda = \left(\frac{H + t \tan\theta - t / \cos\theta}{2(L \cos\theta - t)} + \tan\theta \right) \cdot \frac{D}{D - d}.$$

在实际设计中,胞元斜壁理想最大剪应变 λ 比胞元竖边中性层长度 H 更方便有用.

本结构的设计目标及思路是:由于圆管厚度及胞元壁厚都较大,结构的刚度、强度较大,在正常工况下,结构能起到较好的承载支撑作用.当轴向冲击碰撞事件发生时,六边形胞元斜壁主要发生剪切和弯曲变形,胞元逐渐被压实,结构起到缓冲吸能作用.相比于较厚的实体承载圆管,该结构由于周期开孔,在轴向可压缩,具有缓冲吸能性能;相对蜂窝多胞材料,该结构拥有更大的刚度,具有良好的静态承载能力,且单位体积下能够耗散更多能量;相对于薄壁圆管,该结构由于周期开孔可以有效引导变形,极大降低初始峰值载荷和周期波动,优化缓冲吸能

性能.

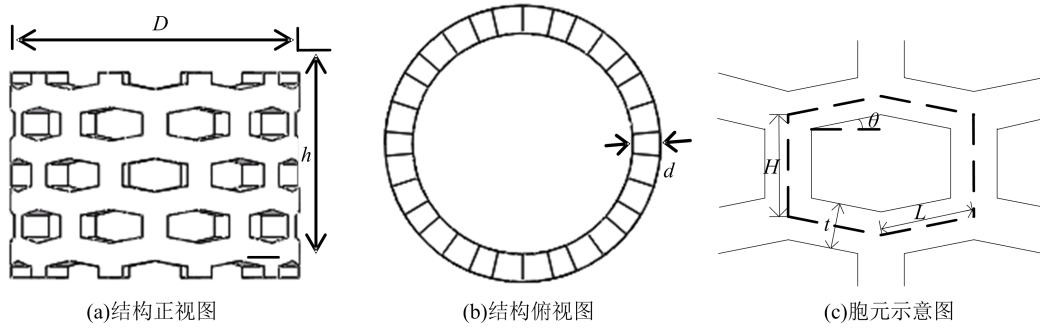


图 1 周期开孔圆管几何构型图

Fig. 1 Geometric configuration of circular tube with periodic holes

2 典型结构的数值模拟与实验研究

2.1 数值模拟

采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对该周期开孔圆管在轴向准静态载荷作用下的变形模式和力学响应作数值模拟. 有限元几何模型如图 2 所示, 上板为加载端, 下板为支撑端, 上下两端均为刚性平板 (简称: 刚板). 中间是周期开孔圆管, 其圆管外径 D 为 50 mm, 圆管厚度 d 为 5 mm, 圆管高度 h 为 36.1 mm, 周期开孔数 N 为 10, 胞元壁厚 t 为 3.6 mm, 倾角 θ 为 10° , 设计胞元斜壁理想最大剪应变 λ 为 0.8, 周期开孔圆管总层数 C 为 4 层. 圆管和刚板均采用 solid164 实体单元, 通过网格收敛性分析, 周期开孔圆管网格尺寸取为 0.6 mm, 以保证计算结果精确性并减少计算时间. 加载时, 支撑刚板完全固定, 加载刚板沿圆管轴向运动. 模型中周期开孔圆管的自身接触以及圆管与两块刚板均采用自动的面面接触算法, 设置摩擦系数为 0.16.

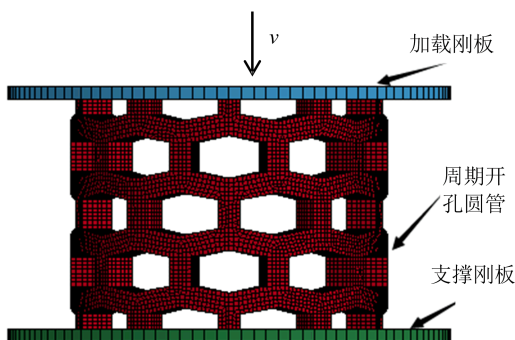


图 2 有限元几何模型

Fig. 2 Finite element geometric model

材料本构模型采用弹塑性双线性模型, 其形式简单, 计算速度快, 不考虑材料的应变率效应, 适用于准静态过程, 数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, \varepsilon \leq \sigma_0/E; \\ \sigma &= \sigma_0 + E_t(\varepsilon - \sigma_0/E), \varepsilon > \sigma_0/E \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, E 为弹性模量, σ_0 为屈服应力, E_t 为切线模量. 圆管材料分别采用工程上大量使用的 A3 钢和 304 不锈钢, 其价格便宜, 塑性稳定, 加工容易, 具有较典型的代表意义. 参照文献[16-17]中的实验数据, A3 钢和 304 不锈钢的弹塑性双线性本构模型的具体参数见表 1. 为了提高计算效率, 在不影响计算精度的前提下, 根据文献[18]的研究结果, 将加载刚板加载速度提高到 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

表 1 材料双线性本构模型参数

Tab. 1 The parameters of bilinear elastic-plastic constitutive model of materials

材料	E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_0/MPa	E_t/MPa
A3 钢	200	0.33	7 800	293.8	300
304 不锈钢	170	0.33	7 800	270	1 800

两种材料的周期开孔圆管在轴向准静态载荷作用下的变形过程基本相同. 304 不锈钢周期开孔圆管变形过程如图 3 所示. 结构变形整体上以轴向均匀压缩为主, 附带发生了略微扩径效应. 压缩过程中, 周期开孔圆管各层胞元变形大致同步, 但上下两端受刚板摩擦约束较难滑动, 实质上相对中间层胞元增加了变形刚度, 结构最终压实略微呈鼓形. 从局部来看, 胞元四条斜边发生剪切弯曲变形, 上端竖柱向下压缩六边形孔, 胞元由正泊松比状态(图 3(a))变为零泊松比状态(图 3(b))进而变为负泊松比状态, 直至孔被压实(图 3(c)), 即上下竖柱完全接触, 缓冲吸能过程结束.

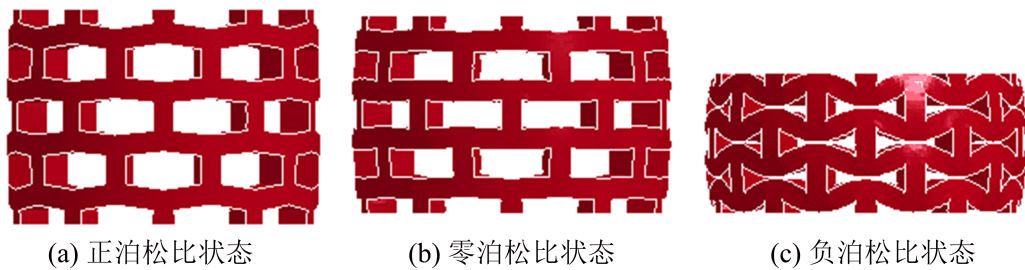


图 3 304 不锈钢周期开孔圆管变形过程

Fig. 3 Deformation process of 304 stainless steel circular tube with periodic holes

图 4 和图 5 分别给出了两种圆管材料下该周期开孔圆管的载荷位移曲线. 从图中可以看出, 两种不同圆管材料下, 加载端和支撑端的载荷位移曲线都基本重合; 载荷位移曲线平滑, 载荷力从弹性段平稳进入塑性, 没有初始峰值载荷, 进入塑性段后, 载荷力随着材料的塑性硬化平滑增加, 载荷力稳定可靠且幅值较大; 载荷力可明显地分为弹性上升段、塑性平台段和压实段.

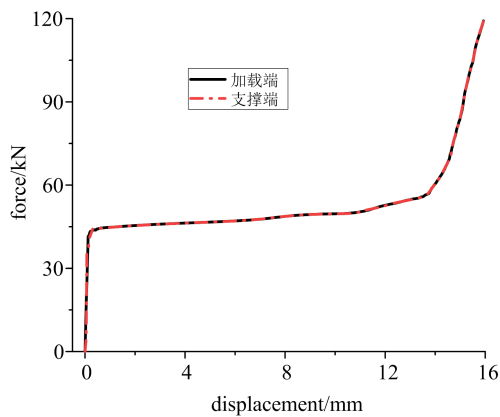


图 4 A3 钢材料结构载荷位移曲线

Fig. 4 Load displacement curve of A3 steel structure

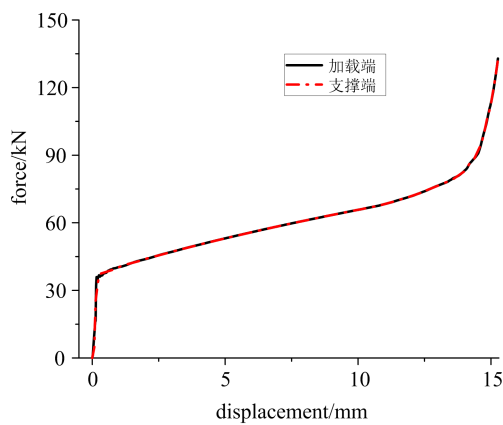


图 5 304 不锈钢材料结构载荷位移曲线

Fig. 5 Load displacement curve of 304 stainless steel structure

2.2 准静态实验研究

为了验证数值模拟的可靠性并为其实际工程应用提供实验基础, 我们按照节 2.1 中模型的尺寸, 加工制造了实验试件 1~3, 试件材料采用的是 304 不锈钢, 试件两端有部分延长预留为安装段, 试件总高约 46 mm. 准静态实验在中国科学技术大学工程实验中心 MTS809 型材料试验机上进行, 实验时压头以 0.1 mm/s 加载速度轴向压缩该周期开孔圆管. 用相机记录了三次实验的整个加载变形过程, 实验中试件 1~3 变形过程基本相同, 图 6 所示为试件 1 在加载过程中的变形照片.

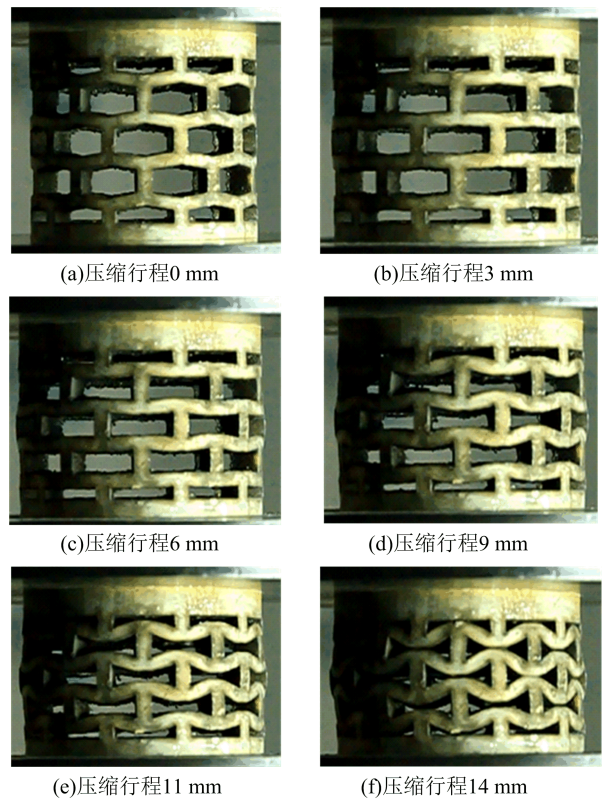


图 6 试件 1 的变形过程

Fig. 6 Deformation process of Specimen 1

对比图 6 和图 3,可以看出实验中该结构的变形过程与数值模拟大致相同,圆管变形整体上以轴向均匀压缩为主,附带发生了略微扩径效应,各个胞元由正泊松比状态压实到负泊松比状态,结构最终压实略呈鼓形.三次实验的载荷位移曲线基本重合,图 7 给出了准静态实验和数值模拟的载荷位移曲线.从图 7 可以看出,在圆管材料为 304 不锈钢时,实验和数值模拟的载荷位移曲线形状基本相同,实验的载荷力比数值模拟的略小,实验的压实行程比数值模拟的略大.这主要是由于试件加工精度的问题以及激光切割具有一定的厚度和扩散,导致实验试件胞元的平均壁厚比数值模拟偏小,试件的孔高比数值模拟偏大,造成实验的载荷力略偏小,压实行程略大.由于 A3 钢材料的屈服强度大于 304 不锈钢的,而塑性硬化强度小于 304 不锈钢的,这使得数值模拟时其平台段的载荷力先大于随后小于 304 不锈钢结构的.

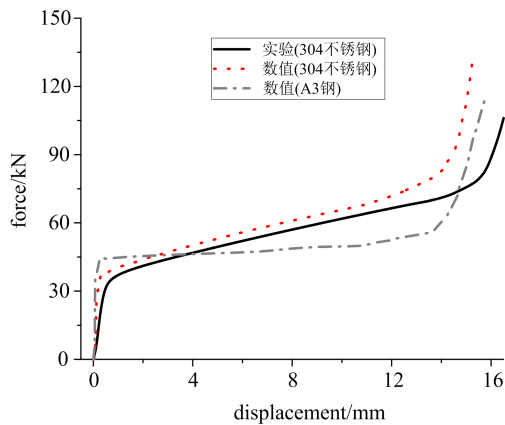


图 7 载荷位移曲线对比图

Fig. 7 Comparison chart of load displacement curves

总的来讲,在相同的圆管材料下,实验的整个变形过程和载荷位移曲线与数值模拟基本相同,实验

的结果验证了数值模拟的可靠性.在不同的圆管材料下,结构的变形过程与载荷位移曲线趋势大致相同,结构变形模式稳定.

2.3 典型结构吸能性能分析

吸能评价指标对结构吸能能力具有重要意义,常用的吸能评价指标有比吸能 SEA,平均载荷 P_m ,冲程效率 η 等^[19].单位质量耗散的能量定义为比吸能,可以表示为

$$SEA = \frac{E_z}{M} = \frac{\int F d\delta}{M} \quad (2)$$

式中, E_z 为结构吸收的总能量,由载荷力 F 对压缩距离 δ 积分得到, M 为结构的总质量.平均载荷定义为结构吸收的总能量 E_z 与压缩距离 δ 的比值,其表达式为

$$P_m = E_z / \delta \quad (3)$$

当结构压缩到一定距离后,结构被压实,载荷力将迅速上升,结构已没有缓冲吸能效果.参照文献[20]中对多胞材料压实应变的定义,将总吸能与载荷力比值最大的点取为压实点,结构压缩到压实点的行程定义为有效压缩距离 D_c ,冲程效率定义为有效压缩距离 D_c 与结构总高 h 的比值,其表达式为

$$\eta = \frac{D_c}{h} = \frac{\max(\int_0^\delta F d\delta / F)}{h} \quad (4)$$

按照上述定义,得到该周期开孔圆管在准静态轴压下吸能评价指标,如表 2 所列.从表 2 中可以看出,在数值模拟下,由于圆管材料的属性不同,304 不锈钢周期开孔圆管比吸能更大,平均载荷更大,冲程效率略大.在相同的 304 不锈钢材料下,实验的总吸能和平均载荷与数值模拟相当,但实验试件由于两端有延长,其比吸能和冲程效率小于数值模拟.

表 2 周期开孔圆管具体吸能结果

Tab. 2 Concrete energy absorption results of circular tube with periodic holes

研究方法	材料	总吸能/J	比吸能/(J · g ⁻¹)	平均载荷/kN	有效压缩距离/mm	冲程效率
数值	A3 钢	665.6	6.5	48.2	13.8	38.2%
数值	304 不锈钢	810.9	7.9	57.9	14	38.8%
实验	304 不锈钢	811.3	5.4	54.5	14.9	32.4%

数值模拟和实验的结果表明该结构变形稳定,载荷力平滑且幅值较大,没有初始峰值载荷,没有周

期波动,比吸能和冲程效率适中,缓冲吸能性能较好.

3 不同几何参数的周期开孔圆管的仿真结果及分析

3.1 数值模拟结果

由于该周期开孔圆管几何尺寸参数较多,本文重点研究了在圆管外径 D 为 50 mm,胞元斜壁倾角 θ 为 10° ,胞元斜壁理想最大剪应变 λ 为 0.8 以及总

层数 C 为 4 层不变的情况下,不同圆管厚度 d ,周期开孔数 N 和胞元壁厚 t 的周期开孔圆管在轴向准静态加载下的吸能特性.按照与上文完全相同的有限元建模方法,对这些周期开孔圆管进行数值模拟,圆管材料采用 A3 钢.其具体几何尺寸参数及主要计算结果如表 3 所列.

表 3 不同计算模型及数值模拟结果

Tab. 3 Different computational models and numerical simulation results

算例	周期开孔数	胞元壁厚 /mm	圆管厚度 /mm	圆管高度 /mm	总吸能 /J	比吸能 /($J \cdot g^{-1}$)	平均载荷 /kN	有效压缩距离/mm	冲程效率
1	9	3.6	5	40.5	656.9	6.3	40.3	16.3	40.2%
2	9	4	5	40.1	730.2	6.4	47.7	15.3	38.1%
3	9	4.4	5	39.7	800	6.5	55.6	14.4	36.2%
4	9	4.8	5	39.3	834.1	6.4	63.2	13.2	33.6%
5	10	3.2	5	36.5	584.9	6.3	39.8	14.7	40.2%
6	10	3.6	5	36.1	665.6	6.5	48.2	13.8	38.2%
7	10	4	5	35.7	725.4	6.5	56.7	12.8	35.8%
8	10	4.4	5	35.3	763.7	6.4	65.3	11.7	33.1%
9	12	2.8	5	30.3	515.6	6.4	43.7	12.4	40.9%
10	12	3.2	5	29.9	582	6.5	53.9	11	37%
11	12	3.6	5	29.5	651.9	6.6	64.6	10.1	34.2%
12	12	4	5	29.1	683.9	6.65	75.2	9.1	31.3%
13	15	2	5	24.5	373.4	6.3	37	10.1	41.2%
14	15	2.4	5	24.1	470.8	6.9	50	9.4	39%
15	15	2.8	5	23.7	523.7	6.8	63	8.3	35%
16	15	3.2	5	23.3	529.1	6.24	75.6	7	30%
17	10	3.6	3	36.1	395.1	6.2	27.6	14.3	39.6%
18	10	3.6	4	36.1	529.6	6.3	37.8	14	38.8%
19	10	3.6	6	36.1	805	6.7	58.8	13.7	37.9%
20	10	3.6	7	36.1	945	6.9	69.5	13.6	37.6%

3.2 不同几何参数对吸能结果的影响

3.2.1 圆管厚度

算例 6 和算例 17~20 对比研究了适当范围内不同圆管厚度对周期开孔圆管在轴向准静态载荷作用下吸能性能的影响.这些算例的周期开孔圆管变形模式极其相似(图 3),载荷位移曲线形状也趋于相同.图 8 和图 9 分别给出了这些算例的载荷位移曲线和不同圆管厚度对比吸能和平均载荷的影响.

在其他尺寸不变的情况下,圆管厚度越大,胞元斜壁和竖壁的径向厚度越大,结构的刚度增大,斜壁塑性变形耗能更多,结构总吸能更多.从表 3、图 8 和图 9 中可以看出,该周期开孔圆管的平均载荷大致随圆管厚度呈线性增加,当圆管厚度由 3 mm 增加到 7 mm 时,平均力从 27.6 kN 增加到 69.5 kN,增加了 151.8%,而有效压缩行程与冲程效率略微降低,比吸能略微增加.根据这一规律,在实际工况

中可以灵活地选取合适的圆管壁厚来满足载荷需求。

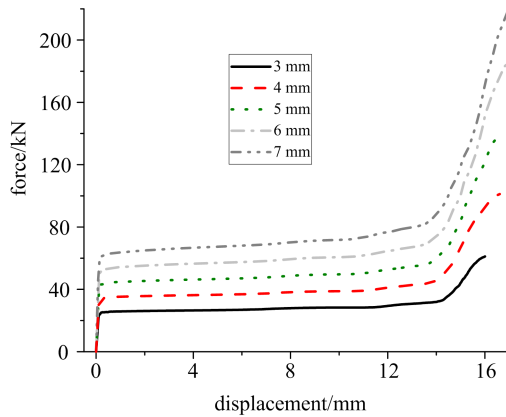


图 8 不同圆管厚度载荷位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of different thicknesses of circular tubes

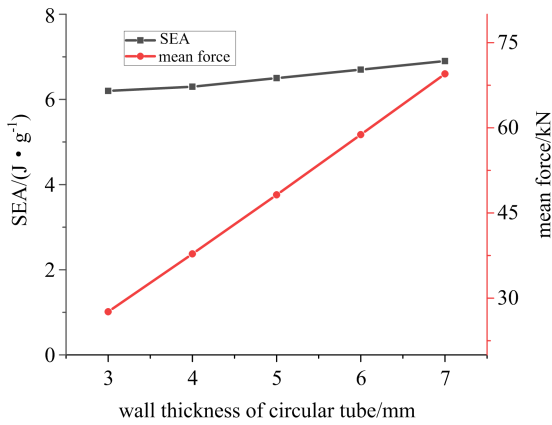
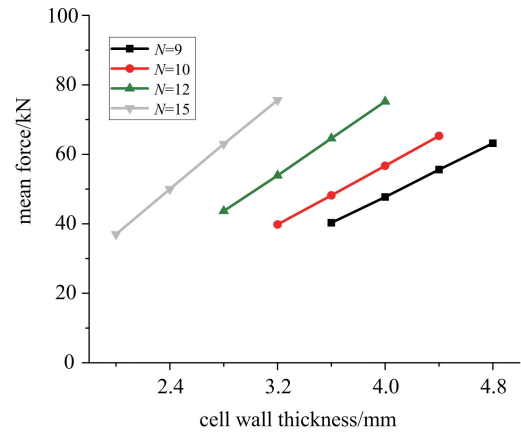


图 9 圆管厚度对比吸能和平均力的影响
Fig. 9 Effect of thickness of circular tube on SEA and mean force

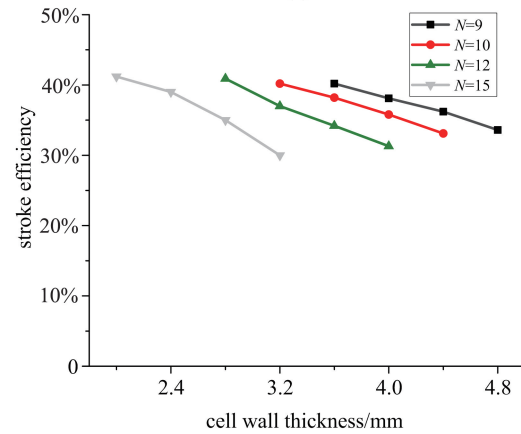
需要注意的是圆管厚度要适中,若管厚太薄,结构的刚度较低,承载力差,稳定性差,在轴向载荷作用下,周期开孔圆管变形模式会发生变化,压缩过程不再局限于圆柱面内;管厚太大,建模和加工比较困难,同样也会影响结构整体变形的稳定性。

3.2.2 周期开孔数与胞元壁厚

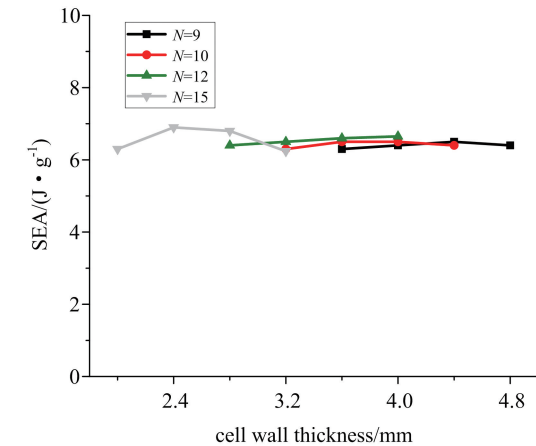
相较于圆管厚度,周期开孔数和胞元壁厚对结构缓冲吸能特性的影响要略微复杂.算例 1~16 对比研究了适当范围内不同周期开孔数和胞元壁厚对周期开孔圆管在轴向准静态载荷作用下吸能性能的影响.这些算例的周期开孔圆管变形模式同样较为一致(图 3),实际上本文中所有算例变形模式都大致一样,这说明该结构变形模式稳定可重复,载荷位移曲线形状也较为相似(图 4)。



(a)



(b)



(c)

图 10 胞元参数对平均载荷、冲程效率和比吸能的影响

Fig. 10 Effect of cell parameters on mean force, stroke efficiency and specific energy absorption

图 10 给出了不同周期开孔数和胞元壁厚对平均载荷、冲程效率以及比吸能的影响.从图 10 和表 3 可以看出,这些算例的平均载荷都在 37 kN 以上,载荷力稳定且幅值较大,说明结构刚度较大,静态承载能力较强.冲程效率都在 30% 以上,结构具有较长的缓冲行程.随着周期开孔数或者胞元壁厚的增

加,胞元竖柱的总横截面积增大,结构刚度增大,平均载荷逐渐增加,而胞元单个斜壁的有效变形长度变短,且结构尺寸都是按照胞元斜壁理想最大剪应变 λ 为 0.8 不变来设计的,这导致有效压缩行程变短,冲程效率逐渐降低.比吸能与结构的总吸能和质量有关,胞元参数对其的影响相对复杂.从图 10(c)中可知,所有算例的比吸能都在 $6.2 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,且各算例的比吸能差别不大,这是因为各算例的几何尺寸都是按照胞元斜壁理想最大剪应变 λ 为 0.8 不变来设计的,且当周期开孔数较大时,胞元壁厚的取值区间变小.在比吸能得到满足的情况下,对于实际工程中的具体缓冲力与压缩行程的需求,根据这些规律可以很好地对周期开孔圆管进行设计,选择合适的尺寸.

4 结论

本文提出了一种周期开孔圆管的缓冲吸能新结构,对该周期开孔圆管在轴向准静态载荷作用下的力学响应进行了数值模拟和实验研究,得出以下结论:

(I)该周期开孔圆管变形模式稳定可重复,变形主要为整体轴向均匀压缩.

(II)加载端和支撑端载荷力基本相同,载荷位移曲线平滑,可明显地分为弹性上升段、塑性平台段和压实段.

(III)圆管厚度、周期开孔数以及胞元壁厚这三个几何参数对结构吸能性能具有重要影响.圆管厚度对平均载荷的大小起决定性支配,二者呈现较好的线性关系;随着周期开孔数或者胞元壁厚的增加,平均载荷逐渐增加,冲程效率减小,比吸能变化不大.

(IV)实验和数值模拟的结果证明了该结构有较强的静态承载能力和较好的缓冲吸能性能,且该周期开孔圆管结构简单、加工容易、成本低廉,应用前景广泛,尤其适用于空间狭小又需强力缓冲的场合.

本文只对周期开孔圆管的准静态轴压特性进行了数值模拟和实验研究,没有进行理论分析,也没有研究其动态轴压特性,今后将进行进一步研究.

参考文献(References)

[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 Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535.
- [2] SUN Y, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 74-115.
- [3] SEITZBERGER M, RAMMERSTORFER F G, GRADINGER R, et al. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminum foam[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(30):4125-4147.
- [4] 黄睿. 轴向载荷下泡沫铝填充薄壁金属管吸能特性的研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
HUANG Rui. Study on energy absorption properties of thin-walled metal tubes filled with aluminum foam under axial load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2015.
- [5] LI X, ZHANG P, WANG Z, et al. Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis [J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 1001-1008.
- [6] MEO M, VIGNJEVIC R, MARENCO G. The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(9): 1301-1325.
- [7] 张立玲,高峰.金属薄壁吸能结构耐撞性研究进展[J].金属加工:热加工,2006(1):76-78.
ZHANG Liling, GAO Feng. Research progress of antishock property of energy-absorbing structure of metal thin-wall[J]. *Machinist Metal Forming*, 2006 (1):76-78.
- [8] GALIB D A, LIMAMA. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2004,42(8):1103-1137.
- [9] HSU S S, JONES N. Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminum alloy tubes [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2004, 9(2):195-217.
- [10] YU X H, QIU X M, YU T X. Theoretical model of a metal tube under inversion over circular dies [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108-109: 23-28.
- [11] YANG J, LUO M, HUA Y, et al. Energy absorption of expansion tubes using a conical-cylindrical die:

- Experiments and numerical simulation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(5):716-725.
- [12] NIKNEJAD A, REZAEI B, LIAGHAT G H. Empty circular metal tubes in the splitting process: Theoretical and experimental studies[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 72(72):48-60.
- [13] 谭丽辉, 谭洪武. 不同诱导结构轴向抗撞性分析[J]. 长春工业大学学报, 2014(6): 731-734.
TAN Lihui, TAN Hongwu. Analysis of axial crashworthiness under different inducing structure[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2014(6): 731-734.
- [14] 梁玉, 姚松, 许平, 等. 不同诱导结构对折叠式压溃管动态吸能影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 178-188.
LIANG Yu, YAO Song, XU Ping, et al. Dynamic crashworthiness analysis of fold-collapse tube with different induced structures [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 178-188.
- [15] 张涛, 刘土光, 肖汉林, 等. 高速冲击下薄壁组合结构吸能特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 395-403.
ZHANG Tao, LIU Shiguang, XIAO Hanlin, et al. Energy absorption performance of thin-walled structures with triggering holes subjected to high-speed axial impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 395-403.
- [16] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
GUO Zitao. Research on characteristics of projectile water entry and ballistic resistance of targets under different mediums[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012.
- [17] 叶丽燕, 李细锋, 陈军. 不同拉伸速率对 SUS304 不锈钢室温拉伸力学性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20(2):89-93.
YE Liyan, LI Xifeng, CHEN Jun. Influence of tensile strain rates on mechanical properties of 304 austenitic stainless steel at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(2):89-93.
- [18] 王青春, 范子杰. 利用 Ls-Dyna 计算结构准静态压溃的改进方法 [J]. 力学与实践, 2003, 25(3):20-23.
WANG Qingchun, FAN Zijie. Improvement in analysis of quasi-static collapse with Ls-Dyna [J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(3): 20-23.
- [19] 张雄. 轻质薄壁结构耐撞性分析与设计优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
ZHONG Xiong. Crashworthiness analysis and design optimization of light thin-walled structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [20] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. Biaxial crushing of honeycombs [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(29): 4367-4423.