

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.012

## 轴向冲击下方形纸管的能量吸收性能和理论模型

廉晓根<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>, 潘 嘹<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学包装工程系, 无锡, 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡, 214122)

**摘要:** 为了研究薄壁方形纸管在轴向冲击下的力学响应和能量吸收性能, 利用落锤冲击试验机和万能材料试验机进行了动态冲击和准静态压缩试验。方形纸管在动态冲击试验和准静态压缩试验中具有相似的渐进压溃变形模式。试验结果显示, 方形纸管的比能量吸收和单位体积能量吸收能力与管件的边长和壁厚比( $c/h$ )相关。随着管件 $c/h$ 的增大, 管件比能量吸收和单位体积能量吸收能力迅速减小。同时, 本文分析了管件在冲击过程中的压溃力与冲击速度的关系。最后, 本文建立了方形纸管轴向冲击下的能量吸收性能理论模型, 理论模型与试验结果具有很好的相关性, 该模型为薄壁纸管结构应用到冲击防护装置设计提供了理论支撑。

**关键词:** 方形纸管; 轴向冲击; 应变率效应; 能量吸收; 理论模型

中图分类号: O342 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2020)04-0611-07

## Energy Absorption Performance and Theoretical Model of Square Paper Tube Under Axial Impact

LIAN Xiaogen<sup>1</sup>, LU Lixin<sup>1,2</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi, 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, 214122, China)

**Abstract:** To investigate the impact response and energy absorption performance of thin-walled square paper tube under axial impact, dynamic impact and quasi-static compression tests were carried out by drop hammer testing machine and universal material testing machine. The square paper tube has a similar progressive crushing collapse mode in dynamic impact test and quasi-static compression test. The test results show that the specific energy absorption and energy absorption capacity per unit volume of the square paper tube are related to the side length and wall thickness ratio ( $c/h$ ) of the tube. With the increase of  $c/h$ , specific energy absorption and volumetric energy absorption capability of the paper tube decrease rapidly. Furthermore, the relationship between the crushing force and the impact velocity during the impact process is analyzed. Finally, a theoretical model of energy absorption performance of the square paper tube under axial impact is proposed, which has a good correlation with the test results. The proposed model can contribute to the application of paper tube to the design of impact protection structure.

**Key words:** square paper tube; axial impact; strain rate dependence; energy absorption; theoretical model

薄壁管件在冲击载荷作用下, 可以发生稳定地渐进压溃行为, 从而吸收大量冲击动能, 被认为是有效的能量吸收结构<sup>[1]</sup>。因此, 由薄壁管件构成的能量吸收装置在航空航天、道路安全、汽车耐撞性

和产品防护等领域得到广泛应用<sup>[2-8]</sup>。薄壁纸管具有重量轻、成本低、易加工的特点, 以及合理的比能量吸收能力<sup>[9]</sup>。近年来, 纸管在物流、冲击防护工程等领域引起了广泛的关注。因此, 研究纸管结构

收稿日期: 2020-02-22; 修订日期: 2020-06-17

通信作者: 卢立新, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: luxl@jiangnan.edu.cn。

引用格式: 廉晓根, 卢立新, 潘嘹. 轴向冲击下方形纸管的能量吸收性能和理论模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 611-617. LIAN Xiaogen, LU Lixin, PAN Liao. Energy absorption performance and theoretical model of square paper tube under axial impact[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 611-617.

的力学性能和能量吸收性能具有重要意义。

Meng等<sup>[10]</sup>通过一系列硬质聚氯乙烯管和金属管的轴向压缩试验,研究了薄壁方管的变形模式和连续变形过程,并发现与圆管不同,方管的变形模式不随壁厚与边长的比值变化而变化。Wierzbicki和Abramowicz<sup>[11]</sup>通过对轴向载荷下薄壁方管的理论研究,提出了薄壁方管的典型折叠机制。在此基础上,通过分别计算各个塑性变形部分的能量耗散,推导出轴向平均压溃力的预测模型。Lian等<sup>[12]</sup>考虑了纸板材料的拉压不对称性,建立了轴向压缩下薄壁纸管的能量吸收性能理论模型,该模型为纸质管能量吸收性能的预测提供了可行性与分析方法。然而,在大部分应用环境中,纸管受到的载荷是动态冲击,如空投包装。薄壁管件在动态冲击下的力学性能和能量吸收性能与准静态压缩载荷下的结果存在较大差异<sup>[13-16]</sup>。

在薄壁结构动态冲击的相关研究中经常用到的应变率效应模型是Cowper-Symonds唯象本构方程<sup>[17]</sup>。Abramowicz和Jones<sup>[18-20]</sup>考虑了材料的应变率敏感性,在渐进屈曲行为的理论预测公式中引入了Cowper-Symonds方程。同时,对圆形和方形金属管进行了大量的轴向冲击试验。考虑了材料应变率敏感性影响的理论结果与试验结果基本一致,但理论结果整体偏低。除了考虑材料自身的应变率敏感性外,鄂玉萍<sup>[21]</sup>和Wang等<sup>[22]</sup>通过考虑结构内部封闭气体的压强变化,研究了动态冲击对薄壁蜂窝结构的平均压溃力的影响。然而,关于纸管结构的动态冲击响应和相关应变率效应模型的适用性仍需进一步研究。

因此,本文的重点是研究动态冲击下方形纸管的能量吸收性能。采用试验和理论分析相结合的

方法,对薄壁方形纸管在轴向冲击下的力学响应和能量吸收性能进行了研究,分析了管件边长与壁厚比、管件长度等参数对纸管能量吸收性能的影响,以及压溃过程中,冲击速度对管件压溃力的影响。并对Lian等<sup>[12]</sup>提出的理论模型进行改进,建立了方形纸管在轴向冲击载荷下的能量吸收性能理论预测模型。

## 1 试验

### 1.1 试件与材料

本文研究的方形纸管由广州海方科技股份有限公司提供。试验采用了两种纸板材料的纸管。P1纸管的主体原纸为衡山新金龙纸业有限公司生产的C级纱管纸,定量360 g/m<sup>2</sup>,厚度0.48 mm;P2纸管的主体原纸为衡山新金龙纸业有限公司生产的A级纱管纸,定量360 g/m<sup>2</sup>,厚度0.48 mm;表层原纸均为广东玖龙纸业(控股)有限公司生产的牛卡纸,定量160 g/m<sup>2</sup>,厚度为0.22 mm;所用胶黏剂为广州一江化工有限公司生产的“江与海”白乳胶,其主要成分为醋酸乙烯和聚乙烯醇,胶黏剂涂覆量为50~55 g/m<sup>2</sup>。方形纸管在广州海方科技股份有限公司的专用设备HF-中型机上制备,首先将工业原纸分切成宽度104~106 mm纸带,然后将涂布胶黏剂后的1层表层原纸带和6层主体原纸带逐层错位,螺旋缠绕在设备的方形模具上,经过滚轮挤压出管,制成试验用方形纸管。纸管裁切后需要在75~80℃烘房中干燥8~15 h。试验用纸管经过裁切得到的纸板材料的力学性能如表1所示<sup>[12]</sup>,所有试验均在温度23℃、相对湿度50%的环境中完成,试验加载速度为1 mm/min。

表1 纸板材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of the composite paperboard

纸板材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	拉伸弹性模量/ MPa	压缩弹性模量/ MPa	拉伸屈服强 度/MPa	压缩屈服强 度/MPa	拉伸强度/ MPa	压缩强度/ MPa
P1	816.19	3 022.52	240.03	14.92	2.32	17.15	5.74
P2	816.09	3 061.00	545.16	17.46	3.37	31.42	9.78

### 1.2 试验方法

本文研究的动态冲击试验在西安广博检测设备有限公司生产的XG-HC型落锤冲击试验机上进行。试件竖直放于落锤冲击试验机的基座中心。通过调节落锤的质量和落锤下表面到试件上表面的距离,获得不同的冲击动能和速度。设备通过加速度传感器测量落锤冲击过程中的加速度,该加速度与落锤质量的乘积即为试件所受的冲击

载荷。

准静态压缩试验在协强仪器制造(上海)有限公司生产的CTM2500型万能材料试验机上进行。试件直接放置于基座中心,管端不受任何约束。试验机的上压板以10 mm/min的速度加载在试件上。

参照国家标准GB/T 10739—2002<sup>[23]</sup>,所有试件在试验前均置于台湾庆声科技有限公司生产的

THS-D7C-100AS型恒温恒湿箱中温湿度处理72 h,温度为 $(23\pm 1)^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $(50\pm 2)\%$ 。试件离开预处理环境状态后需在2 min内完成试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 变形模式和能量吸收机理

试验结果表明,方形纸管在轴向压缩试验和落锤冲击试验中具有相似的渐进压溃行为。在轴向

载荷作用下,纸管经短暂的弹性变形后开始屈曲,形成第一个褶皱,如图1(a)所示。随后,第一个褶皱被压平,第二个褶皱开始形成。管件发生渐进稳定的坍塌行为,直至被完全压实,如图1(a)和(c)所示。管件在冲击过程中通过塑性变形进行能量耗散。图1(b)中可以清楚观察到管件塑性变形的3种形式:水平塑性铰处的弯曲变形、倾斜移行铰处的滚动弯曲和环形曲面处的能量耗散。

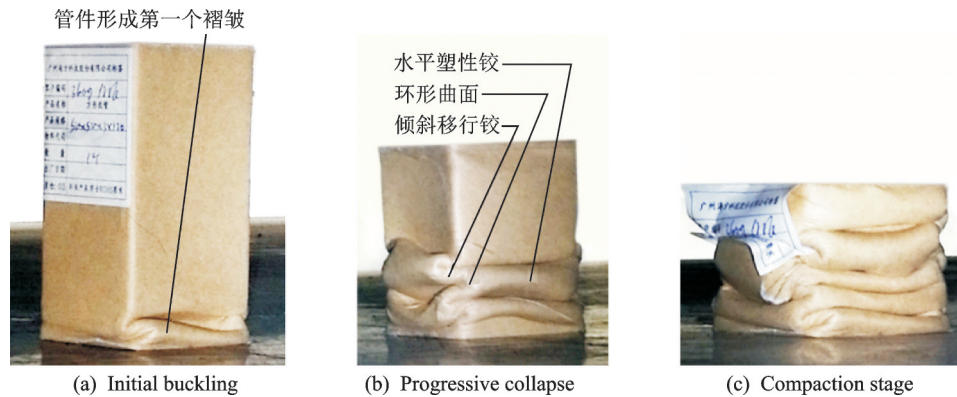


图1 纸管的渐进压溃变形模式

Fig.1 Progressive collapse mode of the paper tube

### 2.2 方形纸管能量吸收性能

纸管动态冲击试验和准静态压缩试验的试件规格和试验数据如表2和表3所示,其中A、B、C系列试件为P1材料管件,D系列试件为P2材料管件。 $L$ 为管件长度, $c_1$ 和 $c_2$ 为管件边长, $h$ 为管件壁厚。 $M$ 为落锤质量, $s$ 为试样轴向被压溃距离, $v$ 为初始冲击速度。试件所获得的外界总能量 $W_{\text{out}}$ 等于落锤的初始动能 $(Mv^2/2)$ 和试样在轴向压溃过程中落锤损失的重力势能 $(Mgs)$ 之和。动态平均压溃力 $P_m^d$ 定义为外界总输入能量 $W_{\text{out}}$ 除以试件轴向压溃距离 $s$ 。 $s_{\text{ef}}$ 为有效压溃距离,表征了试件从开始到压实阶段的压溃距离。准静态平均压溃力 $P_m^s$ 定义为试件在有效压溃距离 $s_{\text{ef}}$ 内的平均压溃力。对比表2和表3的平均压溃力,可以看出纸管的能量吸收性能具有明显的应变率相关性。

#### 2.2.1 比能量吸收能力

比能量吸收 $W_s$ ,是用于评估结构能量吸收性能的重要参数。它反映了单位质量的能量吸收能力,因此对于需要重点考虑能量吸收装置自重的情况,如航空航天结构,比能量吸收指标具有重要意义<sup>[24]</sup>。比能量吸收定义为单位质量的压溃管件所吸收的能量

$$W_s = \frac{W_{\text{out}}}{m} = \frac{W_{\text{out}}}{2(c_1 + c_2)\rho hs} \quad (1)$$

式中: $m$ 为管件压溃段的质量; $\rho$ 为管件材料的密度。通过表2的试验数据可以很容易得到试验管件的比能量吸收。图2所示为不同 $c/h$ 和 $L$ 的方形纸管在轴向冲击下的比能量吸收性能,冲击速度为3.43 m/s, $c=(c_1+c_2)/2$ 。从图中可以看出,随着管件 $c/h$ 的增大,管件比能量吸收迅速减小。这是因为 $c/h$ 较大的管件,褶皱波长较大,从而相同长度下褶皱数量较少。对比相同 $c/h$ 的管件,不同长度的纸管比能量吸收值差异并不显著,表明管件长度对纸管比能量吸收影响不明显。

#### 2.2.2 单位体积能量吸收能力

在空间有限的情况下,设计吸能结构的一个重要参数是单位体积能量吸收能力。单位体积能量吸收能力 $W_v$ 定义为外界输入的总能量与管件压溃体积 $V_{\text{vol}}$ 的比值

$$W_v = \frac{W_{\text{out}}}{V_{\text{vol}}} = \frac{W_{\text{out}}}{c_1 c_2 s} \quad (2)$$

图3所示为不同 $c/h$ 和 $L$ 的方形纸管在轴向冲击下的比能量吸收性能,冲击速度为3.43 m/s。从图中可以看出,随着管件 $c/h$ 的增大,管件的单位体积能量吸收也迅速减小。 $c/h=10.00$ 的管件的单位体积能量吸收值大约是 $c/h=31.03$ 管件的12倍,而 $c/h=10.00$ 的管件的比能量吸收值大约是 $c/h=31.03$ 管件的4倍,表明管件的 $c/h$ 值对纸管的

表2 方形纸管动态冲击试件尺寸和试验结果

Table 2 Specimen dimensions and test results of dynamic impact test of square paper tube

试件 编号	$L /$ mm	$c_1, c_2, h /$ mm	$M /$ kg	$v /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$W_{out} /$ J	$s /$ mm	$P_m^d /$ N
A1	60	30, 30, 3.0	22	3.427	135.22	28	4 829
A2	60	30, 30, 3.0	37	2.423	118.76	28	4 242
A3	90	30, 30, 3.0	22	2.424	67.65	14	4 832
A4	90	30, 30, 3.0	22	3.429	135.38	28	4 835
A5	90	30, 30, 3.0	22	4.202	205.87	54	3 812
A6	120	30, 30, 3.0	22	4.206	203.00	39	5 205
A7	120	30, 30, 3.0	37	2.426	117.95	25	4 718
A8	120	30, 30, 3.0	37	3.432	237.85	55	4 325
B1	60	65, 75, 3.0	22	3.430	134.70	24.5	5 498
B2	120	65, 75, 3.0	22	3.434	135.32	26	5 205
B3	120	65, 75, 3.0	22	4.196	203.80	47	4 336
B4	120	65, 75, 3.0	37	2.425	119.31	29	4 114
B5	150	65, 75, 3.0	22	2.420	67.55	14.5	4 658
B6	150	65, 75, 3.0	22	3.429	136.88	35	3 911
B7	150	65, 75, 3.0	22	3.426	135.36	29	4 668
B8	150	65, 75, 3.0	22	4.200	206.11	56	3 681
B9	180	65, 75, 3.0	37	3.429	233.84	45	5 196
B10	180	65, 75, 3.0	37	4.198	359.03	91	3 945
C1	60	90, 90, 2.9	22	3.433	138.26	40	3 457
C2	120	90, 90, 2.9	37	2.425	121.12	34	3 562
C3	120	90, 90, 2.9	22	3.425	135.72	31	4 378
C4	150	90, 90, 2.9	22	2.423	66.74	10	6 674
C5	150	90, 90, 2.9	22	3.425	137.23	38	3 611
C6	150	90, 90, 2.9	22	4.196	204.88	52	3 940
C7	180	90, 90, 2.9	22	3.426	140.54	53	2 652
D1	60	50, 50, 3.0	22	2.423	67.25	12.5	5 419
D2	60	50, 50, 3.0	22	3.426	134.23	24	5 649
D3	120	50, 50, 3.0	22	2.421	67.19	12.5	5 330
D4	120	50, 50, 3.0	22	3.431	134.79	24.5	5 481
D5	120	50, 50, 3.0	22	4.198	201.48	35	5 699
D6	150	50, 50, 3.0	22	4.204	202.17	36	5 615

表3 方形纸管准静态压缩试件尺寸和试验结果

Table 3 Specimen dimensions and test results of quasi-static compression test of square paper tube

试件编号	$L /$ mm	$c_1, c_2, h /$ mm	$s_{cl} /$ mm	$P_m^s /$ N
A9	120	30, 30, 3.0	69.70	1 939
B11	120	65, 75, 3.0	88.00	2 081
C8	120	90, 90, 2.9	90.14	1 953
D7	120	50, 50, 3.0	79.43	2 723

单位体积能量吸收能力影响更显著。

### 2.2.3 压溃力-时间曲线

由于通过冲击加速度进行二重积分得到压溃

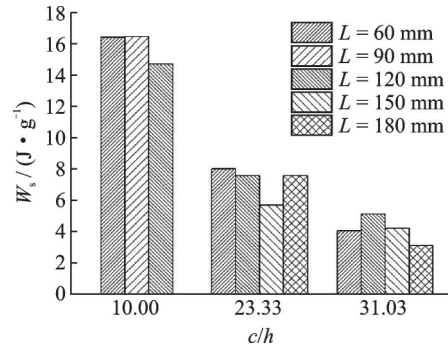


图2 不同  $c/h$  和  $L$  的方形纸管比能量吸收性能对比 ( $v=3.43$  m/s)

Fig.2 Comparison of specific energy absorption capability of square paper tubes with various  $c/h$  and  $L$  at impact speed of 3.43 m/s

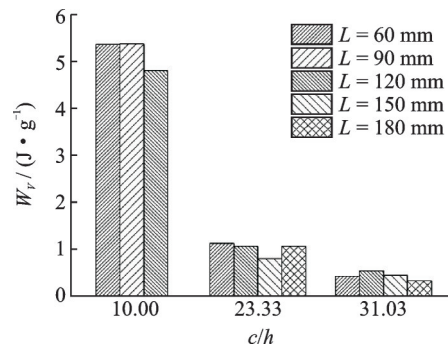


图3 不同  $c/h$  和  $L$  的方形纸管单位体积能量吸收性能对比 ( $v=3.43$  m/s)

Fig.3 Comparison of volumetric energy absorption capability of square paper tubes with various  $c/h$  and  $L$  at impact speed of 3.43 m/s

距离的方法会放大误差,从而计算结果和实际压溃距离差异较大,所以本文使用压溃力-时间曲线对纸管在动态冲击下的力学响应进行分析。

图4为管件轴向冲击下的压溃力-时间曲线,从图中曲线可以看出,纸管压溃过程可分为3个阶段。第一阶段为弹性阶段,压溃力随时间线性增大到初始峰值力。第二阶段为渐进压溃阶段,管件达到初始峰值力后发生屈曲,压溃力迅速减小,并随着时间周期性波动。最后,如果冲击能量足够大,管件将进入压实阶段,载荷迅速增大。从图中可以看出,A5试件被压实。管件压溃力-时间曲线的每一个波峰代表一次褶皱,通过观察压溃力-时间曲线可以看出,压溃力的波峰值随着时间依次减小。这一现象表明,在压溃过程中,随着冲击速度逐渐减小,管件完成褶皱所需的压溃力也越来越小,并逐渐接近准静态压缩下的压溃力,如图4(c)中C4、C5和C6所示。

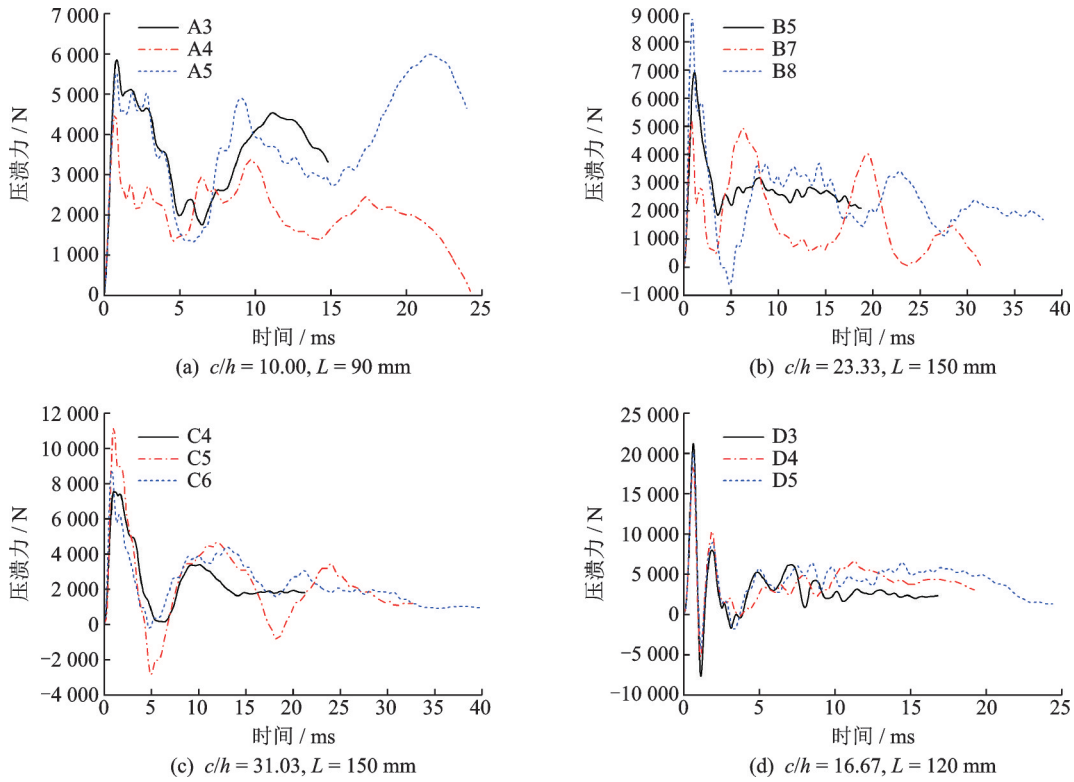


图4 纸管轴向冲击下的压溃力-时间曲线

Fig.4 Force-time curves of paper tubes under axial impact

### 2.3 方形纸管能量吸收理论模型

在先前研究中Lian等<sup>[12]</sup>讨论了方形纸管在轴向准静态压缩下的破坏模式和能量吸收性能,并基于典型折叠机制提出了纸管轴向压缩下的平均压溃力理论预测方程

$$P_m^s = \frac{15.18}{0.83 - 2.40(h/c)} \left( \frac{\lambda}{1 + \lambda} \right)^{2/3} \sigma_{0T} h^{5/3} c^{1/3} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{0T}$ 为准静态拉伸屈服强度; $\lambda$ 为材料压缩屈服强度和拉伸屈服强度的比值; $c$ 为方形纸管的边长,对于长方形纸管为 $c=(c_1+c_2)/2$ <sup>[3]</sup>。

用于结构材料应变率效应的评估常用模型是Cowper-Symonds本构方程<sup>[17]</sup>

$$\frac{\sigma_0^d}{\sigma_0} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{Q_1} \right)^{Q_2} \quad (4)$$

图5为P1纸板材料在不同应变率下拉伸测试得到的屈服强度试验数据<sup>[25]</sup>,对相关结果进行拟合得到 $Q_1=51.29, Q_2=0.26$ ,纸板材料应变率效应本构方程可以表示为

$$\frac{\sigma_{0T}^d}{\sigma_{0T}} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{51.29} \right)^{0.26} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{0T}^d$ 为纸板材料动态拉伸屈服强度; $\sigma_{0T}$ 为纸板材料静态拉伸屈服强度。

薄壁方管在整个动态压溃过程的平均应变率的估计值为<sup>[20]</sup>

$$\dot{\epsilon} = hv_m / (2b\delta) \quad (6)$$

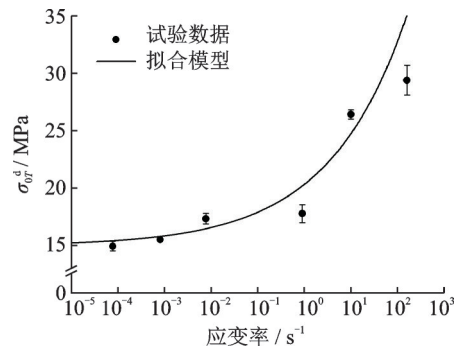


图5 拉伸屈服强度 $\sigma_{0T}^d$ 随应变率的变化规律

Fig.5 Variation of tensile yield strength ratio  $\sigma_{0T}^d$  with strain rate

假定方形纸管冲击压溃速度随时间线性减少<sup>[3]</sup>,则压溃过程的平均速度

$$v_m = v/2 \quad (7)$$

方形纸管单个褶皱的有效压溃距离<sup>[12]</sup>

$$\delta = 2H(0.83 - 2.40h/c) \quad (8)$$

方形纸管在轴向压溃过程中的折叠半波长 $H$ 和环形曲面折叠半径 $b$ 分别为<sup>[12]</sup>

$$H = \sqrt[3]{\frac{\pi^2 \lambda}{8I_1 I_3 (1 + \lambda)} c^2 h}, b = \sqrt[3]{\frac{\pi I_3 \lambda^2}{8I_1^2 (1 + \lambda)^2} c h^2} \quad (9)$$

式中: $I_1=0.58, I_3=1.11$ 。

将式(7)和(9)代入式(6),得到平均应变率为

$$\dot{\epsilon} = \frac{0.092(1+\lambda)v}{\lambda(0.83-2.40h/c)c} \quad (10)$$

因此,考虑材料应变率效应后,得到方形纸管轴向冲击下平均压溃力的理论预测方程

$$P_m^d = \frac{15.18\sigma_{0T}h^{5/3}c^{1/3}}{0.83-2.40(h/c)} \left( \frac{\lambda}{1+\lambda} \right)^{2/3} \left[ 1 + \left( \frac{0.092(1+\lambda)v}{Q_1\lambda(0.83-2.40h/c)c} \right)^{Q_2} \right] \quad (11)$$

根据表1的材料参数可知,本研究的P1纸管试件 $\lambda=0.155$ ,P2纸管试件 $\lambda=0.193$ 。

图6为不同截面规格的方形纸管在轴向冲击

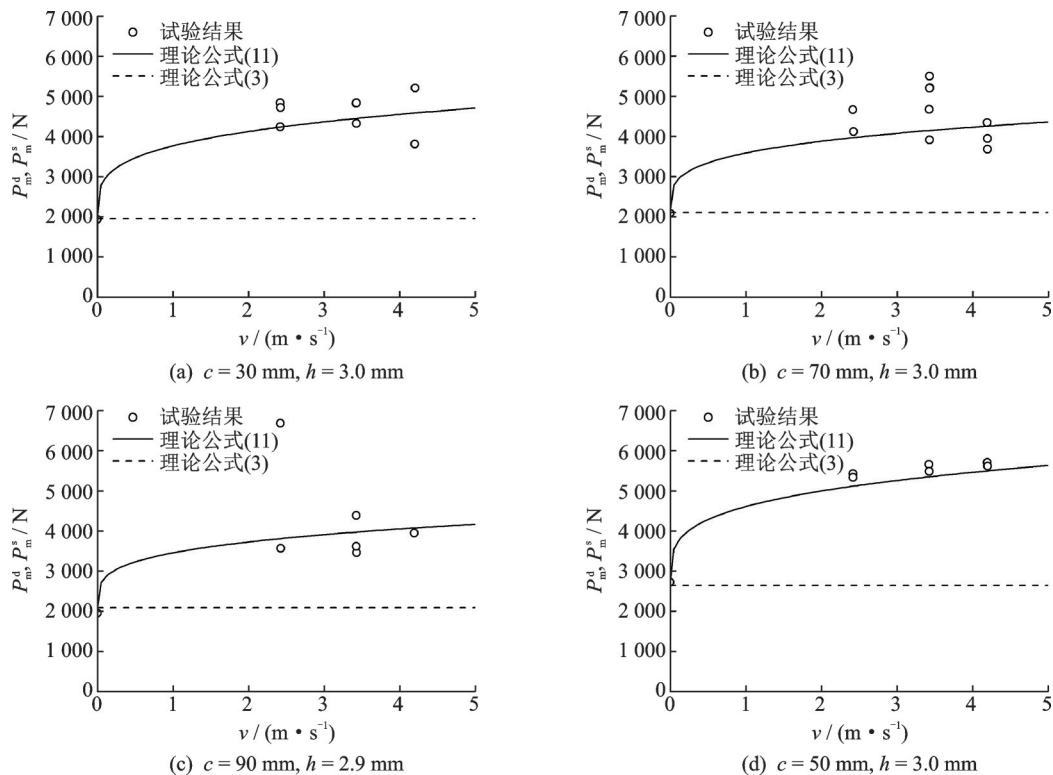


图6 方形纸管在不同冲击速度下的平均压溃力

Fig.6 Mean crushing force of square paper tubes at different impact velocities

### 3 结 论

(1)薄壁方形纸管在轴向冲击试验和准静态压缩试验中具有相似的渐进压溃行为。纸管在冲击载荷下的稳定变形模式有利于结构的能量吸收,为其在冲击防护装置中的应用提供了依据,研究其能量吸收性能具有重要意义。

(2)薄壁方形纸管的比能量吸收和单位体积能量吸收能力与管件的 $c/h$ 相关。随着管件 $c/h$ 的增大,管件比能量吸收和单位体积能量吸收能力迅速减小。但是管件长度对纸管比能量吸收和单位体积能量吸收能力的影响不明显。

下平均压溃力与冲击速度的试验结果与理论模型的对比图。从图中可以看出,理论结果与试验结果相关性很好,尤其是图6(a)和(b),理论模型给出了很好的预测值。在图6(b)和(c)中,试验数据呈现了一定程度的散布,这是由于纸管材料存在不确定的薄弱位置,当 $c/h$ 值较大时, $2H$ 值较大,管件更易在最薄弱位置形成褶皱,导致压溃力的变化,但理论模型对试验结果的平均值提供了一个合理的预测值,这在薄壁管件的能量吸收研究中是可以接受的<sup>[18-20]</sup>。动态冲击下的能量吸收理论模型可以为薄壁纸管结构在冲击防护装置中的设计提供理论依据,并对相关结构在能量吸收领域的应用具有一定的推广意义。

(3)管件在冲击过程中的压溃力与冲击速度有关。在压溃过程中,随着冲击速度逐渐减小,管件完成褶皱的所需压溃力也越来越小,并逐渐接近准静态压缩下的压溃力。

(4)建立了方形纸管动态冲击下的能量吸收性能理论模型。模型结果与相应的试验结果相关性很好。模型可以为薄壁纸管结构在冲击防护装置中的设计提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] JONES N. Structural impact[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989.

- [2] REID S R. Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1993, 35(12): 1035-1052.
- [3] 余同希, 卢国兴, 华云龙. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
YU Tongxi, LU Guoxing, HUA Yunlong. Energy absorption of structures and materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] MAT F, ISMAIL K A, YAACOB S, et al. Impact response of thin-walled tubes: A prospective review[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 165: 130-134.
- [5] ZHANG X, ZHANG H. Crush resistance of square tubes with various thickness configurations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 107(107): 58-68.
- [6] MONTAZERI S, ELYASI M, MORADPOUR A, et al. Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 131: 646-653.
- [7] BAKAR M S, SALIT M S, YUSOFF M Z, et al. The crashworthiness performance of stacking sequence on filament wound hybrid composite energy absorption tube subjected to quasi-static compression load[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(1): 654-666.
- [8] ALGHAMDI A A A. Collapsible impact energy absorbers: An overview[J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(2): 189-213.
- [9] SINGACE A A. Recycled paper-rolled tubes as potential energy absorbing elements[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2000, 5(2): 207-217.
- [10] MENG Q, ALHASSANI S T, SODEN P D, et al. Axial crushing of square tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1983, 25(9/10): 747-773.
- [11] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(4): 727-734.
- [12] LIAN X G, PAN L, LU L X, et al. Investigation of energy absorption characteristics of square paper tubes subjected to axial loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106685>.
- [13] HSIAO H M, DANIEL I M. Strain rate behavior of composite materials[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(5): 521-533.
- [14] ISAAC C W, OLUWOLE O O. Structural response and performance of hexagonal thin-walled grooved tubes under dynamic impact loading conditions[J]. *Engineering Structures*, 2018, 167: 459-470.
- [15] BANK L C, GERHARDT T D, GORDIS J H. Dynamic mechanical properties of spirally wound paper tubes[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1989, 111: 489-490.
- [16] WANG D. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 110-114.
- [17] COWPER G R, SYMONDS P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams[R]. Providence: Brown University, 1957.
- [18] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of circular tubes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1984, 2(3): 263-281.
- [19] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of square tubes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1984, 2(2): 179-208.
- [20] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1986, 4(4): 243-270.
- [21] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2010.  
E Yuping. Influence of relative humidity and strain rate on the energy absorption properties of paper-based cushioning materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [22] WANG Z, E Y P. Mathematical modelling of energy absorption property for paper honeycomb in various ambient humidities[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(9): 4321-4328.
- [23] 全国造纸工业标准化技术委员会. 纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件: GB/T 10739—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [24] YU T X, XIANG Y F, WANG M, et al. Key performance indicators of tubes used as energy absorbers[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 626: 155-161.
- [25] 廉晓根, 卢立新, 吴健, 等. 复合纸板力学性能和应变率相关性测试和表征[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 438-444.  
LIAN Xiaogen, LU Lixin, WU Jian, et al. Testing and characterization of mechanical properties and strain rate dependence of composite paperboard[J]. *Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 438-444.