

文章编号: 1001-4888(2018)05-0707-09

基于实验和数值模拟的深度梯度 刻槽管轴向耐撞性研究^{*}

姚如洋¹, 龚立平¹, 侯秀慧², 郝文乾², 张婉琪¹, 刘海明³, 尹冠生¹

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072;

3. 长安大学 现代工程训练中心, 西安 710018)

摘要: 带有外部周向宽刻槽的金属圆管受轴向冲击时将产生稳定的轴对称皱褶, 因而是一种性能卓越的吸能元件。然而, 均匀设置的刻槽将导致皱褶产生部位的随机性。为进一步控制刻槽管的屈曲模式并提高其轴向耐撞性, 对其沿管长方向设置连续的深度梯度刻槽。通过精确的实验和数值模拟对深度梯度刻槽管在不同冲击速度和冲击端下的耐撞性进行了讨论。结果表明: 刻槽管在轴向压溃过程中将产生随机渐进屈曲、随机塑性屈曲及顺序渐进屈曲三种变形模式。深度梯度刻槽管更容易产生稳定的顺序渐进屈曲模式, 并能克服高速冲击带来的局部效应。此外, 深度梯度的加入能够大幅度增强刻槽管轴向的耐撞性。

关键词: 深度梯度刻槽管; 能量吸收; 耐撞性; 屈曲模式; 力-位移曲线

中图分类号: O347.2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-122

0 引言

耐撞性是指结构受冲击荷载时的能量吸收特性, 涉及大量工程问题^[1]。薄壁结构作为一类性能卓越的吸能元件, 被广泛应用于能量吸收领域, 如车辆前部的缓冲装置^[2]、飞行器的着陆装置^[3]、高速公路护栏^[4]、防撞垫的鼻端和外壳等^[5]。其中, 薄壁管状吸能元件因其易加工、性能稳定的优势被大量学者所研究^[6,7]。结论表明, 金属薄壁圆管受轴向压溃时的吸能效果远大于其他加载方式^[4,7]。

对圆管轴向压溃问题的研究最早可追溯到1960年 Alexander^[8]提出的经典理论模型, 其简化方式对各类管状吸能元件的理论推导产生了深远的影响。Andrews 等^[9]对不同尺寸的圆管进行了大量轴向准静态压缩实验, 结论为: 圆管会受径高比和径厚比的影响产生轴对称屈曲、非轴对称屈曲、欧拉屈曲三种变形模式, 其中轴对称屈曲被认为是最理想的变形模式。在轴对称屈曲的前提下, Jones^[10]根据冲击速度的不同, 将圆管在动态荷载下的变形模式分为动力渐进屈曲和动力塑性屈曲。

为了进一步控制圆管的变形模式并提高其轴向耐撞性, 出现了一系列由普通圆管改进的吸能元件, 如缺口管^[11]、加肋管^[12]、波纹管^[13], 刻槽管^[14-17]等。其中, 刻槽管有着易加工且性能稳定的优势。Salehghaffari 等^[14]在圆管的外壁设置相互平行的周向宽刻槽并进行了轴向准静态压缩实验, 实验结果给出了刻槽管几何参数对其吸能特性的影响, 并证明了刻槽管极易发生理想的轴对称屈曲模式, 随后, Mokhtarnezhad 等^[15]对该结构进行了数值模拟和理论分析。通过响应面分析和遗传算法, Salehghaffari 等^[16]对刻槽管进行了多目标优化并给出在准静态工况下最佳的几何参数组合。Darvizeh 等^[17]在

^{*} 收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(11402035)

通讯作者: 尹冠生(1958-), 男, 教授/博士生导师, 主要研究领域: 结构动力学、工程力学。Email: yings@chd.edu.cn

文献[14, 15]的基础上,对刻槽管内部填充聚乙烯泡沫并进行了轴向冲击实验,结果表明泡沫填充能够大幅提升刻槽管的轴向耐撞性。

尽管文献[14—17]对刻槽管的轴向耐撞性能进行了深入的研究,但仍存在若干未考虑到的问题。从结构形式来看,刻槽沿管轴线方向均匀分布将导致压溃部位的顺序出现随机性。此外,在使用机床对刻槽管进行机加工的过程中,管的圆度、表面粗糙度和两端的垂直度会对实验结果和数值模拟的实施产生难以预测的影响,如文献[14, 15, 17]中的试件在加载前就已出现了较为严重的振纹和锈蚀。再者,现有研究仅对刻槽管的最终变形模式进行探讨,却未对其在压溃过程中的特征进行分类。本研究对刻槽管设置深度梯度,提出一种高效的新型吸能元件,并通过精确的实验和数值模拟对其在不同方向、不同冲击速度下的耐撞性和屈曲模式进行探究。

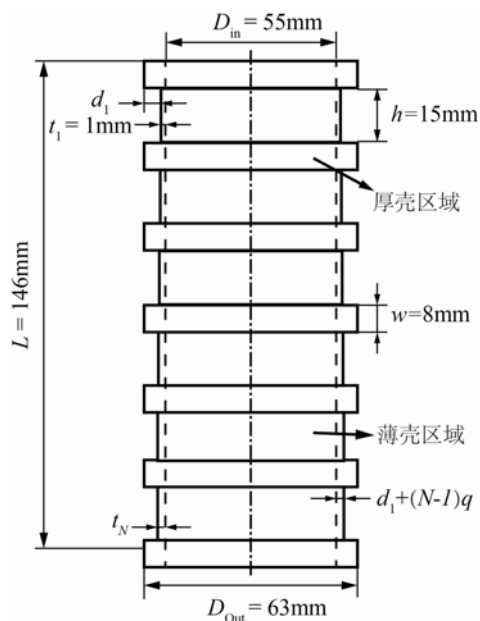


图 1 深度梯度刻槽管示意图

Fig. 1 Schematic of depth gradient grooved tube

1 工况设计及评价指标

1.1 实验及数值模拟工况设计

深度梯度刻槽管的几何特征如图 1 所示,称刻槽处的薄壁圆管为薄壳区域,称连接两个薄壳区域的厚壁圆管为厚壳区域^[17],薄壳区域和厚壳区域沿管轴向的几何关系可表示为:

$$(N+1)\omega + Nh = L \quad (1)$$

其中, N 为刻槽个数; ω 为厚壳区域的宽度; h 为薄壳区域的宽度; L 为管长。薄壳区域和厚壳区域沿管径向的几何关系可表示为:

$$d_n + t_n = (D_{out} - D_{in})/2 \quad (2)$$

其中, D_{out} 和 D_{in} 分别为刻槽管的外径和内径; d_n 和 t_n 分别为第 n 个刻槽处的深度和对应薄壳区域的厚度。设该结构中刻槽的深度沿着管长以等差数列的形式分布,且为方便讨论,将刻槽的深度问题转换为对应薄壳区域的厚度问题。因此, t_n 可表示为:

$$t_n = t_1 + (n-1)q, \quad q \geq 0 \quad (3)$$

其中, t_1 为初始薄壳区域的壁厚; q 为厚度梯度; n 为刻槽所在位置。

本研究所选刻槽管的固定几何参数为: $L=146\text{mm}$, $D_{out}=63\text{mm}$, $D_{in}=55\text{mm}$, $N=6$, $\omega=8\text{mm}$, $h=15\text{mm}$, $t_1=1\text{mm}$ 。表 1 所列须使用实验和数值模拟进行讨论的参数,设薄壳区域厚度梯度的选择区间为 $[0, 0.2]$, 由于国内高速公路的速度限值为 120km/h ^[18], 故选择不高于 37.5m/s 的速度进行加载。此外,为研究冲击端的选择对深度梯度刻槽管轴向耐撞性的影响(较高的加载速度会引起结构的局部变形),定义正向加载为从 t_1 (最薄)端进行加载,定义负向加载方向为从 t_N (最厚)端进行加载。

表 1 实验和数值模拟所需参数

Tab. 1 Parameters required for experiment and numerical simulation

深度梯度/mm			加载速度				加载方向	
$q^{(1)}$	$q^{(2)}$	$q^{(3)}$	$v^{(1)}/(\text{mm}/\text{min})$	$v^{(2)}/(\text{m}/\text{s})$	$v^{(3)}/(\text{m}/\text{s})$	$v^{(4)}/(\text{m}/\text{s})$	+	-
0	0.1	0.2	5	12.5	25	37.5	正	负

注:参数上标括号内的数字代表工况序号,如工况($q^{(2)}$, $v^{(1)}$, +)代表对 $q=0.1\text{mm}$ 的刻槽管以 $5\text{mm}/\text{min}$ 的速度正向加载;对于 $q=0\text{mm}$ 的刻槽管,正、负向加载对计算结果无影响,因此直接记为($q^{(1)}$, $v^{(i)}$),其中 $i=1\sim 4$; $q=0\text{mm}$ 为均匀刻槽管,认为其是深度梯度刻槽管的特殊形式; $v=5\text{mm}/\text{min}$ 为受准静态加载的工况,认为其是冲击荷载的特殊形式。

1.2 能量吸收结构的耐撞性评价指标

从结构形式上来看,可以使用总吸能 E_t ^[19]、平均压溃力 P_m ^[20]、比吸能 SEA ^[21] 三项指标评价深度

梯度刻槽管的轴向耐撞性。

本研究中, E_t 为刻槽管被完全压实之前吸收的内能,在不考虑其他因素的条件下,数值越大说明能量吸收能力越强; SEA 为 E_t 与刻槽管质量之比,比值越大说明结构在单位质量下的材料利用率越高。 P_m 为 E_t 与刻槽管被完全压实时的冲程之比,反映了整个压溃过程中荷载的平均大小,其值越大越好。

2 实验分析

2.1 材料性能测试

对一根内、外径分别为 40mm 和 66mm 的 LY12 铝合金长圆管进行机加工。为得到准确的材料性质,需在胚料上取下条状块体并按照 GB/T228—2002 标准^[22]加工为比例试件,且做重复实验以验证结果的可靠性。图 2(a)为加工完成并抛光后的拉伸试件,其详细尺寸如图 2(b)所示。其中,试件标距段的长度为 40mm,直径为 8mm。

实验采用微机控制 20 吨 SUNS UTM5000 电液伺服动静万能试验机对试件以 5mm/min 的速度进行拉伸,直至断裂。实验过程中确保试件的两端已被夹紧不产生任何滑移,并使用引伸计测量标距段的线应变。由试验机的力传感器和引伸计测得的数据为工程应力—应变,由于压溃过程中材料大多处于塑性变形阶段,因此需要根据式(4)得到考虑试件颈缩效应的真实应力—应变数据:

真实应变 = $\ln(1 + \text{工程应变})$ (4a)

真实应力 = 工程应力 $\times \ln(1 + \text{工程应变})$ (4b)

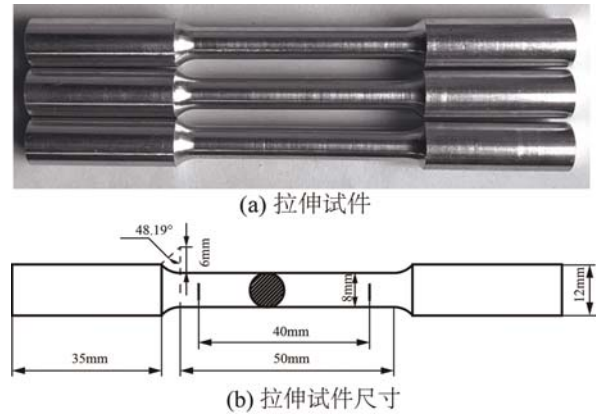


图 2 拉伸试件及其尺寸
Fig. 2 Tensile specimens and their dimensions

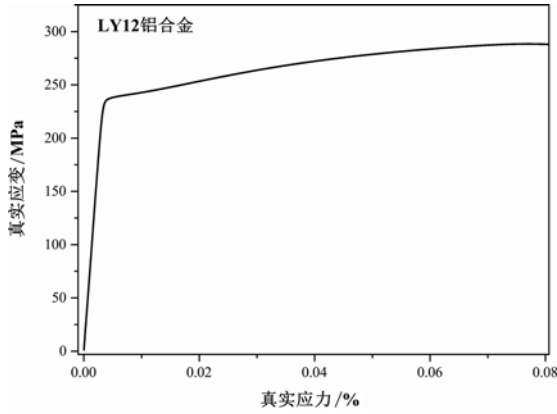


图 3 LY12 铝合金的真实应力—应变曲线
Fig. 3 True stress-strain curve of LY12 Aluminium

对图 2(a)中三根试件的真实应力、应变数据进行平均得到真实应力—应变曲线(图 3)。通过分析实验数据,LY12 铝合金的具体材料性质如表 2 所列。

表 2 LY12 铝合金材料性质
Tab. 2 Material parameters of LY12 aluminum alloy

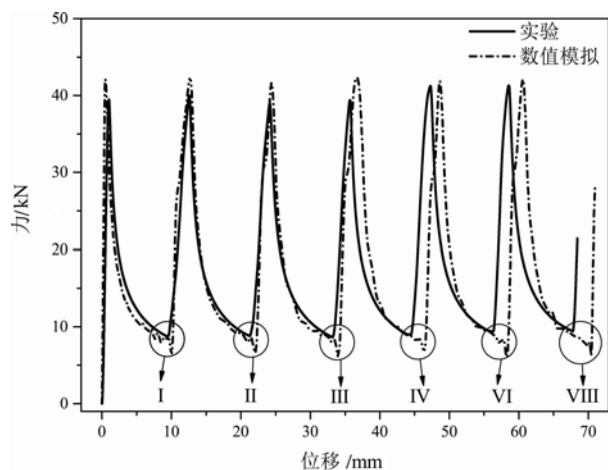
材料	E/GPa	$\rho/(\text{kg}/\text{mm}^3)$	σ_y	σ_u	μ
LY12 铝合金	73	2.65×10^{-6}	235.65	288.01	0.3

注: E 为弹性模量; ρ 为密度; σ_y 和 σ_u 分别为屈服拉应力和极限拉应力; μ 为泊松比。

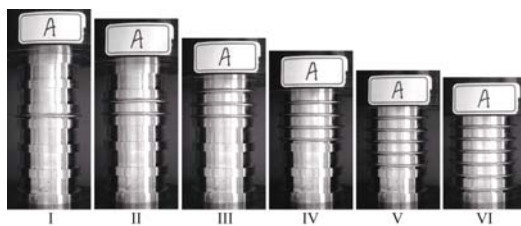
2.2 刻槽管轴向压缩实验

本研究对工况($q^{(1)}$, $v^{(1)}$)进行实验分析,为了尽可能缩小误差,试件的尺寸公差被控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 之内,且需对试件仔细打磨以消除表面振纹的不利影响。将加工完成的试件不加任何约束竖直放置在 20 吨 SUNS UTM5000 电液伺服动静万能试验机的底部托盘上,控制试验机的上压头预加载 10N 以消除机械间隙,之后以 5mm/min 的速度正式加载,直至试件被压至密实。

图 4 中实线为从试验机上压头传感器提取的力—位移曲线,可观察到 6 个大小和形状基本相同的

图 4 工况($q^{(1)}, v^{(1)}$)下典型的力-位移曲线Fig. 4 Typical force-displacement under condition ($q^{(1)}, v^{(1)}$)

在图 5 所示的变形模式中,后一个皱褶总是在前一个皱褶完全形成后才出现,且皱褶出现的位置是随机的,这与文献[14,15]的实验结果一致。根据对圆管和波纹管变形模式的命名方式^[10,23],本研究将这种变形模式定义为:随机渐进屈曲。

图 5 由实验测得的工况($q^{(1)}, v^{(1)}$)下典型的变形模式(随机渐进屈曲)Fig. 5 Typical deformation mode under condition ($q^{(1)}, v^{(1)}$) obtained by experiments (random asymptotic buckling)

3 基于显式有限元的数值模拟

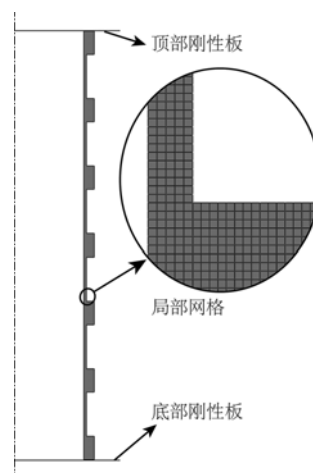
对比于常规的实验分析,基于数值模拟的仿真实验有成本低、效率高、可靠性强等特点,在薄壁结构的耐撞性研究中常常作为扩充常规实验样本的工具^[24]。

3.1 数值模型的建立

使用显式有限元软件 ABAQUS/Explicit 对深度梯度刻槽管进行数值模拟。由实验(图 5)可知,在本研究给定的几何参数和材料下,刻槽管的位移、应力、应变、作用荷载、边界条件都轴对称于其轴线,因此可以选用轴对称的建模方式。

如图 6 所示,取出工况($q^{(1)}, v^{(1)}$)的任一子午面进行建模,并将图 3 所示的力-位移曲线和表 2 所列的材料数据直接输入 ABAQUS/Explicit,不考虑铝材的应变率效应。分别使用 4 节点双线性轴对称应力单元 CAX4R 和 2 节点线性轴对称离散刚体单元 RAX2 对刻槽管和上、下刚性板进行划分。为保证

结构能够平滑变形,需在薄壳区域的厚度方向设置 5 个单元,遂将全局网格尺寸设置为 0.2mm。无需约束刻槽管上任意部位的自由度,约束下刚性板的所有自由度,约束上刚性板除竖向平动以外的所有自由度并沿竖直方向施加冲击荷载。为准确模拟刻槽管与上、下刚性板之间的接触以及其薄壳区域形成皱褶过程中的自摩擦,刻槽管与不锈钢上、下刚性板之间设置为面面接触,摩擦系数为 0.35^[25];刻槽管

图 6 工况($q^{(1)}, v^{(1)}$)下典型的数值模型Fig. 6 Typical numerical model under condition ($q^{(1)}, v^{(1)}$)

内、外表面分别设置为基于罚函数法的单面接触,摩擦系数为 0.59^[25]。使用一台配备 24 核心 Xeon 处理器的图形工作站对数值模型进行计算,并使用 ABAQUS 的 Visualization 模块提取结果数据。

3.2 数值模型的可靠性验证

由图 4 虚线可知,数值模拟测得的 $(q^{(1)}, v^{(1)})$ 工况下力—位移曲线与实验结果基本重合。为进一步验证数值模型的可靠性,提取图 4 虚线波谷处的变形模式与实验结果进行对比,图 7 为将数值模型沿对称轴扫掠 360°的结果。对比图 5 与图 7 可知,实验与数值模拟给出的变形模式完全一致。表 3 所列为 $(q^{(1)}, v^{(1)})$ 工况轴向耐撞性参数, E_c 、SEA 和 P_m 三项指标的数值与实验结果相当吻合,误差在百分之三以内。综合屈曲模式、力—位移曲线和轴向耐撞性参数,验证了 3.1 节数值模型的可靠性。因此,所有工况的数值模拟设置均可与 $(q^{(1)}, v^{(1)})$ 工况取为一致。



图 7 由数值模拟给出的工况 $(q^{(1)}, v^{(1)})$ 下典型的变形模式(随机渐进屈曲)

Fig. 7 Typical deformation mode under condition $(q^{(1)}, v^{(1)})$ obtained by numerical simulations (random asymptotic buckling)

表 3 工况 $(q^{(1)}, v^{(1)})$ 下刻槽管轴向耐撞性的实验和数值模拟结果

Tab. 3 The axial crashworthiness of grooved tube under condition $(q^{(1)}, v^{(1)})$ obtained experimentally and numerically

E_c /J			P_m /kN			SEA/(J/g)		
实验结果	数值结果	误差/%	实验结果	数值结果	误差/%	实验结果	数值结果	误差/%
1143.16	1161.84	1.63	16.87	16.46	-2.25	7.56	7.68	1.59

注:误差为数值结果相对实验结果的相对误差。

3.3 不同冲击速度下深度梯度刻槽管的轴向耐撞性分析

使用数值模型对表 4 所列的 20 种工况进行计算,并得到屈曲模式、力—位移曲线、轴向耐撞性评价指标。

除 2.2 节提出的随机渐进屈曲以外,深度梯度刻槽管在变形中还会出现另外两种模式。如图 8(a)所示,在冲击荷载作用下,刻槽管的两个或多个薄壳区域可能同时产生褶皱,且位置随机,本研究称之为随机塑性屈曲。另一模式如图 8(b)所示,褶皱总是从刻槽管最薄的薄壳区域开始产生,且后一个褶皱总是在前一个褶皱完全形成后才出现,本研究称之为顺序渐进屈曲。

从工程应用角度看,顺序渐进屈曲能够更好地预测结构的响应,是最理想的变形模式。由表 4 可知, $q=0\text{mm}$ 的工况在受到轴向荷载时,无论速度大小均不可能产生顺序渐进模式。对于 $q=0.1\text{mm}$ 和 $q=0.2\text{mm}$ 的工况,当结构处于正向加载时,所有工况均产生顺序渐进屈曲,典型的变形模式如图 8(b)所示;当结构处于负向加载时,绝大多数工况(除工况 $(q^{(2)}, v^{(4)}, -)$ 以外)仍发生顺序渐进压溃,只有当速度足够大且梯度不明显时,梯度

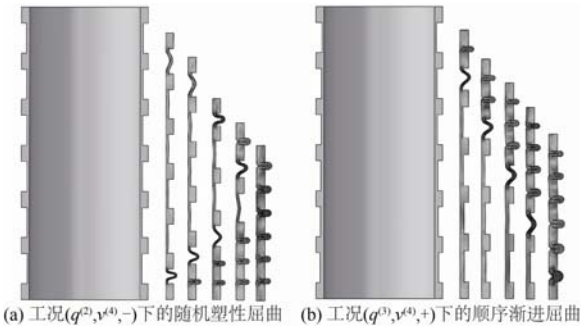


图 8 典型的随机塑性屈曲和顺序渐进屈曲

Fig. 8 Typical random plastic buckling and sequential asymptotic buckling

的设置无法抵消高速冲击下的局部效应,出现如图 8(a)所示的随机塑性屈曲。

表 4 深度梯度刻槽管轴向耐撞性参数的数值模拟结果

Tab. 4 The axial crashworthiness parameters of depth gradient grooved tube obtained by numerical simulation

$q=0\text{mm}$	E_t	P_m	变形	$q=0.1\text{mm}$	E_t	P_m	变形	$q=0.2\text{mm}$	E_t	P_m	变形
工况	/J	/kN	模式	工况	/J	/kN	模式	工况	/J	/kN	模式
$(q^{(1)}, v^{(1)})$	1161.84	16.46	A	$(q^{(2)}, v^{(1)}, +)$	1678.26	23.45	B	$(q^{(3)}, v^{(1)}, +)$	2407.30	35.25	B
$(q^{(1)}, v^{(2)})$	1163.21	16.52	A	$(q^{(2)}, v^{(1)}, -)$	1693.35	23.29	B	$(q^{(3)}, v^{(1)}, -)$	2413.66	34.98	B
$(q^{(1)}, v^{(3)})$	1239.37	17.64	C	$(q^{(2)}, v^{(2)}, +)$	1705.10	23.67	B	$(q^{(3)}, v^{(2)}, +)$	2460.07	35.65	B
$(q^{(1)}, v^{(4)})$	1346.60	19.17	C	$(q^{(2)}, v^{(2)}, -)$	1711.32	23.53	B	$(q^{(3)}, v^{(2)}, -)$	2452.07	35.54	B
				$(q^{(2)}, v^{(3)}, +)$	1817.71	25.00	B	$(q^{(3)}, v^{(3)}, +)$	2533.06	36.71	B
				$(q^{(2)}, v^{(3)}, -)$	1808.33	24.87	B	$(q^{(3)}, v^{(3)}, -)$	2519.43	36.51	B
				$(q^{(2)}, v^{(4)}, +)$	1960.65	26.97	B	$(q^{(3)}, v^{(4)}, +)$	2651.86	38.42	B
				$(q^{(2)}, v^{(4)}, -)$	1795.24	24.69	C	$(q^{(3)}, v^{(4)}, -)$	2692.28	39.01	B

注: A 为随机渐进屈曲; B 为顺序渐进屈曲; C 为随机塑性屈曲

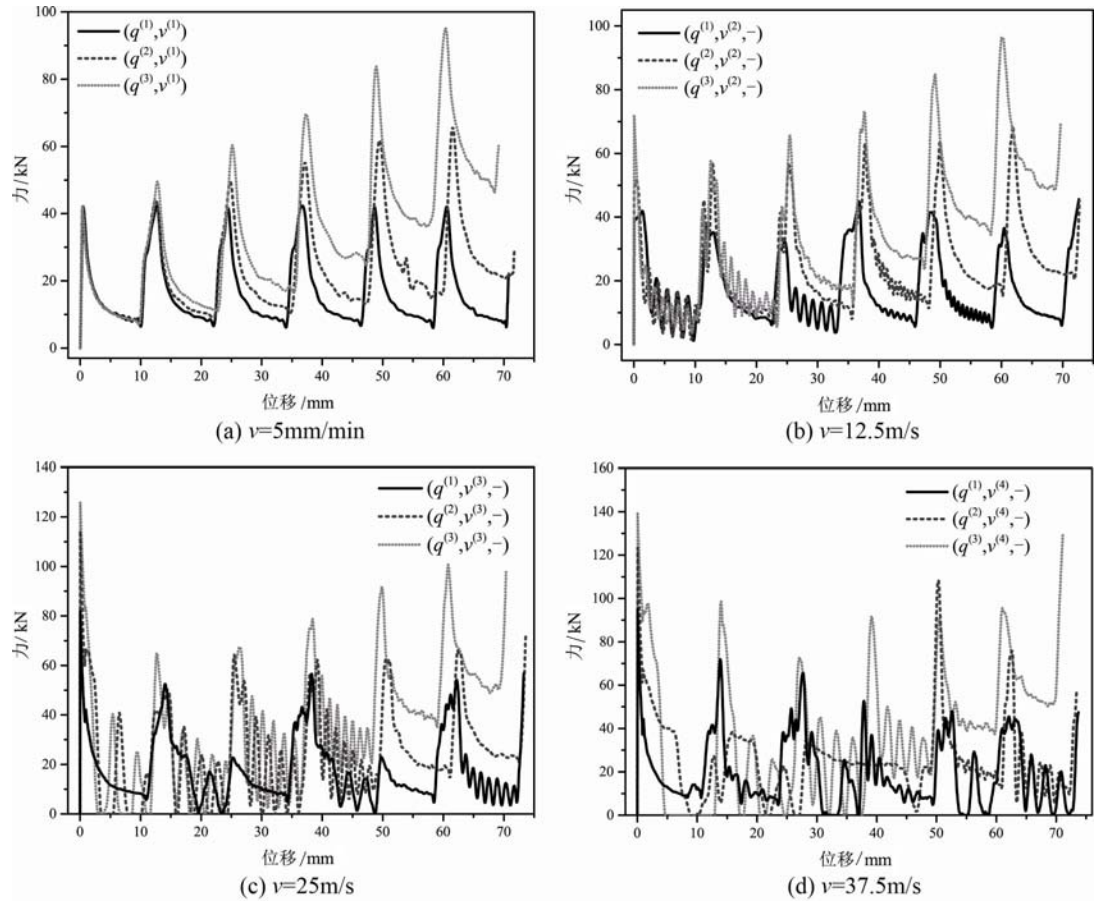


图 9 深度梯度刻槽管在不同冲击速度下典型的力—位移曲线

Fig. 9 Typical force-displacement curves of depth gradient grooved tube under difficult impact velocity

图 9(a-d)为负向加载时深度梯度刻槽管在不同冲击速度下典型的力—位移曲线。 $v=5\text{mm/min}$ 时,对比均匀刻槽管($q=0\text{mm}$),深度梯度刻槽管($q\neq 0\text{mm}$)的力—位移曲线有明显的上升趋势,这表明能量吸收的能力逐渐上升,是一种十分理想的吸能结构。当 $v=12.5\text{m/s}$ 时,曲线因碰撞过程中的非线性

性出现了震荡,总体上与 $v=5\text{mm/min}$ 时区别不大。当 $v=25\text{m/s}$ 和 $v=37.5\text{m/s}$ 时,由于应力波和惯性力效应,均匀刻槽管($q=0\text{mm}$)的曲线已经不再规则,而深度梯度刻槽管($q\neq 0\text{mm}$)的曲线还可以保持较为平稳上升的趋势。特别地,随着冲击速度增加,所有工况曲线的第一个峰值显著增大,这是由于碰撞瞬间第一个薄壳区域的轴向和径向惯性力迅速增大所致。此外,由图 9(b-d)可知, q 的增大可以明显减轻碰撞过程中产生的噪声和震荡。

20 组深度梯度刻槽管轴向耐撞性参数的数值模拟结果如表 4 所列,除工况 $(q^{(2)}, v^{(4)}, -)$ 外,正负加载对深度梯度刻槽管轴向耐撞性的影响不大。正向加载且加载速度相同时,结构的 E_t 和 P_m 随 q 的增大显著增大,表明设置深度梯度能大幅度增加刻槽管的轴向耐撞性。当梯度 q 被固定且增大加载速度 v 时, E_t 和 P_m 也呈上升趋势,这是由于撞击过程中薄壳区域径向和轴向的惯性力随着加载速度逐渐上升导致。对于负向加载的工况, $(q^{(2)}, v^{(4)}, -)$ 表现出较低的轴向耐撞性水平,这里猜测深度梯度刻槽管在随机塑性屈曲模式下的耐撞性低于顺序渐进屈曲。为评价能量吸收过程中材料的利用率,图 10 给出了不同工况下深度梯度刻槽管的 SEA 值。由图 10 可知 SEA 与 E_t 和 P_m 呈相同的趋势,除工况 $(q^{(2)}, v^{(4)}, -)$ 外,冲击速度和深度梯度的增大都会使刻槽管的 SEA 值上升,这表明 q 的增大可提高单位质量的材料利用率。

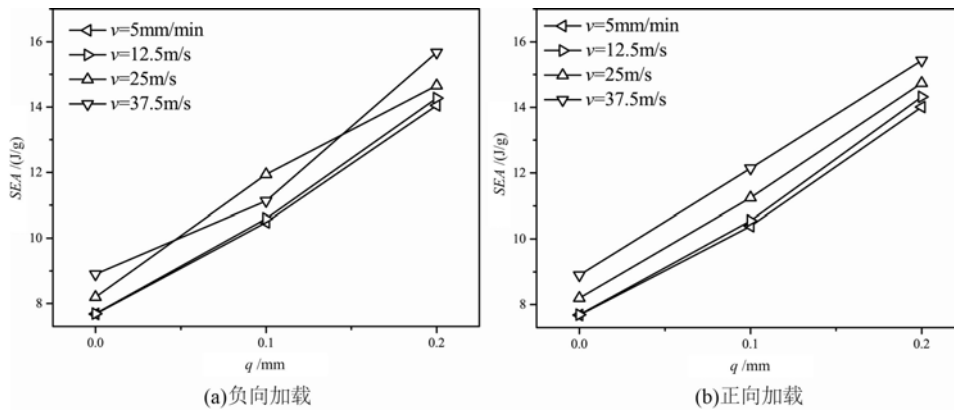


图 10 不同工况下深度梯度刻槽管的比吸能

Fig. 10 SEA of depth gradient grooved tube under different conditions

4 结论

本研究通过实验和数值模拟对深度梯度刻槽管在不同冲击速度和不同冲击端下的耐撞性进行了讨论,得到以下结论:

(1) 深度梯度刻槽管在轴向压溃过程中会产生三种变形模式:随机渐进屈曲、随机塑性屈曲、顺序渐进屈曲。从工程应用角度看,顺序渐进屈曲能够更好地预测结构的响应,是最理想的变形模式。

(2) 对均匀刻槽管加入深度梯度能够更好地控制变形模式即产生顺序渐进屈曲,同时还能使其力-位移曲线呈现平稳上升的趋势。

(3) 负向加载时,深度梯度刻槽管可以极大地克服高速冲击带来的局部效应,产生从最深刻槽处开始的顺序渐进屈曲。此外,提高加载速度也可使深度梯度刻槽管的能量吸收能力进一步提升。

参考文献:

- [1] Lu G X, Yu T X. Energy absorption of structures and materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [2] Ahmad Z, Thambiratnam D P. Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures[J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(4): 349—363.
- [3] Bisagni C. Crashworthiness of helicopter subfloor structures[J]. International Journal of Impact Engineering,

- 2002, 27(10):1067—1082.
- [4] Jones N. Structural impact[M]. Cambridge University Press, 2011.
- [5] 张改, 邵永刚. 吸能梁式公路可导向防撞垫开发研究[J]. 公路, 2012, 30(3):174—178 (ZHANG Gai, TAI Yonggang. Highway redirective crash cushion in the form of absorbing energy beam development research [J]. Highway, 2012, 30(3):174—178 (in Chinese))
- [6] Qiu X M, Yu T X. Some topics in recent advances and applications of structural impact dynamics[J]. Applied Mechanics Reviews, 2011, 38(64):4001.
- [7] Baroutaji A, Sajja M, Olabi A G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118:137—163.
- [8] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960, 13(1):10—15.
- [9] 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(9):687—696.
- [10] Jones N. Recent progress in the dynamic plastic behavior of structures, Part III[J]. Shock & Vibration Digest, 1981, 13(10):3—16.
- [11] Han H, Taheri F, Pegg N. Quasi-static and dynamic crushing behaviors of aluminum and steel tubes with a cutout [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(3):283—300.
- [12] Adachi T, Tomiyama A, Araki W, et al. Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(2):65—79.
- [13] Hao W, Xie J, Wang F. Theoretical prediction of the progressive buckling and energy absorption of the sinusoidal corrugated tube subjected to axial crushing[J]. Computers & Structures, 2017, 191:12—21.
- [14] Salehghaffari S, Tajdari M, Panahi M, et al. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading[J]. Steel Construction, 2010, 48(6):379—390.
- [15] Mokhtarnezhad F, Salehghaffari S, Tajdari M. Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface[J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(6):601—611.
- [16] Salehghaffari S, Rais-Rohani M, Najafi A. Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(3):397—408.
- [17] Darvizeh A, Meshkinzar A, Alitavoli M, et al. Low velocity impact of empty and foam filled circumferentially grooved thick-walled circular tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 110:97—105.
- [18] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社, 2014 (JTG B01—2014 Technical standard of highway engineering[S]. Beijing: People's Transportation Publishing, 2014 (in Chinese))
- [19] 代连朋, 潘一山, 王爱文. 金属圆管抗卷曲劈裂变形吸能特性研究[J]. 实验力学, 2017(6):839—847 (DAI Lianpeng, PAN Yishan, WANG Aiwen. Study on energy absorption characteristics of a metal circular tube subject to curling splitting deformation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):839—847 (in Chinese))
- [20] 郝文乾, 谢佳苗, 赵翔, 等. 薄壁正弦波纹管在轴向载荷作用下的理论研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7):96—101 (HAO Wenqian, XIE Jiamiao, ZHAO Xiang, et al. Theoretical analysis of a thin-walled sinusoid corrugated tube under axial loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7):96—101 (in Chinese))
- [21] 郝文乾, 卢进帅, 黄睿, 等. 轴向冲击载荷下薄壁折纹管的屈曲模态与吸能[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3):380—385 (HAO Wenqian, LU Jinshuai, HUANG Rui, et al. Buckling and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes under axial impacting[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3):380—385 (in Chinese))
- [22] GB/T 228—2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2003 (GB/T 228—2002. Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003 (in Chinese))
- [23] Liu Z, Hao W, Xie J, et al. Axial-impact buckling modes and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes with sinusoidal patterns[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94:410—423.
- [24] Jones N. The credibility of predictions for structural designs subjected to large dynamic loadings causing inelastic

behavior[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 53(1):106–114.

- [25] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011 (QIN Datong, XIE Liyang. *Modern handbook of mechanical design*. Beijing: Chemical Press, 2011 (in Chinese))

On the axial crashworthiness of depth gradient grooved tube based on experimental study and numerical simulation

YAO Ru-yang¹, GONG Li-ping¹, HOU Xiu-hui², HAO Wen-qian²,
ZHANG Wan-qi¹, LIU Hai-ming³, YIN Guan-sheng¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Mechanics, Civil Engineering Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 3. Morden Engineering Training Center, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: Metallic circular tube with external circumference wide grooves will produce stable axisymmetric wrinkles when subjected to axial impact, so it is an excellent energy absorption element. However, uniformly arranged grooves will result in randomness the place where the wrinkle is produced. In order to further control the buckling mode of grooved tube and improve its axial crashworthiness, a continuous depth gradient groove is arranged along the length direction of the pipe. The crashworthiness of depth gradient grooved circular tube under different impact velocities and impact ends is discussed by accurate experiment and numerical simulation. Results conclude that the tube deformation can be classified into three buckling modes, namely, random asymptotic buckling, random plastic buckling, and sequential asymptotic buckling. The depth gradient grooved tube is easy to generate sequential asymptotic buckling and can overcome the local effect caused by high-speed impact. Additionally, the axial crashworthiness of grooved tube can be greatly enhanced by the depth gradient.

Keywords: depth gradient grooved tube; energy absorption; crashworthiness; buckling mode; force-displacement curve