

圆弧刻槽薄壁圆管轴向压溃吸能特性数值研究

李飞, 张凯, 温金鹏

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621900)

摘要: **目的** 为了提高能量吸收效率, 设置出一种合理的诱导结构, 对吸能构件产生积极影响。 **方法** 薄壁圆管设计一种环向圆弧刻槽诱导结构, 在不同长径比、径厚比和刻槽深度的条件下研究薄壁结构吸能特性。 **结果** 吸能量与圆管长径比和径厚比成反比, 初始压溃载荷随刻槽深度增加而减小。 **结论** 在不同的条件下, 刻槽结构能够有效降低初始载荷, 并获得较为平稳的压溃载荷平台。

关键词: 薄壁圆管; 刻槽; 轴向压溃; 吸能

中图分类号: TH123.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)07-0110-06

Numerical Investigation on Energy Absorption Characteristics of Thin-Walled Circular Tube with Groove under Axial Crushing

LI Fei, ZHANG Kai, WEN Jin-peng

(Institute Systems of Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: In order to improve the efficiency of energy absorption, a reasonable induced structure was designed to produce positive impact on energy absorption components. A circular arc induced structure was designed for thin-walled pipe, and its energy absorption characteristics were studied under different length to diameter ratios, diameter thickness ratios and the depth of the groove. The simulation results showed that the energy absorption moved in opposite direction with the change of length to diameter ratio and diameter-thick ratio. And with the increase of groove depth, the initial crushing load decreased. The initial load was efficiently reduced by using groove induced structure under different conditions, and a relatively stable crushing load platform was obtained.

KEY WORDS: thin-walled circular tube; groove; axial crushing; energy absorption

人们日常生活中常见的缓冲吸能材料比较多, 比如塑料泡沫、聚乙烯复合气泡垫、PVC板、波纹纸板等在运输、包装行业被广泛应用, 建筑工人的安全帽、自行车或摩托车的头盔、拳击比赛中的护具等都对人员安全起着至关重要的作用。同时, 随着工程领域对结构耐撞性设计的日益关注, 吸能构件在汽车^[1-2]、轨道交通和高速公路安全防护栏的安全设计中的应用越来越受到重视, 并且在军事应用领域的武器装备防护^[3-4]中也得到了广泛应用, 在美国和德

国等国家就利用填充有云杉木材的薄壁圆管作为大型武器装备的防护包装箱的缓冲吸能器件, 并且在国内也有相似的包装结构, 它们依靠结构吸能元件可控的塑性变形或脆性断裂等破坏模式来缓冲碰撞时的冲击载荷, 吸收和耗散尽可能多的碰撞能量, 从而确保人员安全和重要器材完好。金属薄壁结构或具有填充材料的吸能结构, 在武器防护包装领域具有广泛的应用前景。形式多样的吸能结构被国内外研究学者和工程应用人员广泛关注, 其中以金属薄壁结构为

收稿日期: 2015-07-17

基金项目: 2015年中国工程物理研究院总体工程研究所创新与发展基金(15CXJJ27)

作者简介: 李飞(1984—), 男, 安徽蒙城人, 中国工程物理研究院硕士生, 主攻结构吸能研究。

通讯作者: 张凯(1973—), 男, 重庆人, 博士, 中国工程物理研究院总体工程研究所研究员, 主要研究方向为机械设计和功能高分子材料研制与应用。

典型代表,它具有较高的吸能率和承载能力,尤其在受到碰撞时容易被触发而发生塑性变形,从而吸收碰撞时产生的能量,并且其制造工艺简单、质量轻、成本低,因此成为吸能结构研究和应用的重要对象。Daneshi G H和 Hosseinipour S J^[5]运用弹塑性理论研究解决带沟槽薄壁圆管在轴向载荷下的初始压溃力; Shariati M和 Rokhi M M^[6]对带椭圆孔的金属圆柱壳在轴向压缩屈曲进行了数值模拟和实验研究; Zhang X W^[7-8]等人研究了几种不同的预置屈曲薄壁圆筒和方管的吸能特性;朱文波等人^[9]研究了薄壁圆管轴向冲击下的动态特性,并得到不同应变率范围内的轴向压缩力-位移曲线;谭丽辉和谭洪武^[10-11]研究了具有凹凸结构的薄壁管轴向抗撞性能。目前,国内外研究预设屈曲薄壁结构吸能特性,多是在管壁开孔、管端加预设结构或者管壁设置凹凸结构,从研究结果来看,仅能在一定程度上降低初始压溃载荷,这里基于显式有限元分析方法,设计了带有预置圆弧刻槽的薄壁圆管,数值分析结果表明,它能够较大程度(50%~60%)地降低初始压溃峰值载荷,且平均压溃载荷更加稳定。

1 非线性有限元模型的建立

目前,国内外对薄壁结构的吸能研究大多数采用有限元方法建立模型,其中 Ansys 软件的使用最为广泛,它具有强大的有限元分析和优化设计功能,非常适合对薄壁结构吸能进行有限元分析、动态压溃模拟和优化设计等。由于在极短时间内的碰撞过程中薄壁圆管结构受到冲击载荷的作用,将产生非线性的塑性变形,因此采用非线性有限元分析软件 Ansys/LS-DYNA 对薄壁圆管碰撞缓冲吸能进行模拟研究。

1.1 薄壁圆管的几何参数

为了研究带有预设刻槽的薄壁圆管吸能特性,设置不同尺寸的吸能薄壁结构,见图1,其中,长度为 L ,内直径为 D ,壁厚为 T ,圆弧刻槽深度为 C ,圆弧刻槽半径为 r ,刻槽中心点距离薄壁结构上端为 b ,为便于描述不同几何参数的薄壁结构,将其统一符号为 L200D100T1.5C0.5 的基本形式,表示长度为 200 mm,内直径为 100 mm,壁厚为 1.5 mm,槽深为 0.5 mm,这里涉及到的薄壁结构圆弧刻槽半径 r 为 5 mm,刻槽中心点距离薄壁结构上端 b 为 5mm,为固定值。为了确保薄壁结构的整体强度,刻槽深度一般不大于管壁厚的一半,同时,为避免在压溃过程中出现应力集中现象,刻槽两端点处的切线与管壁夹角应大于 90° 。

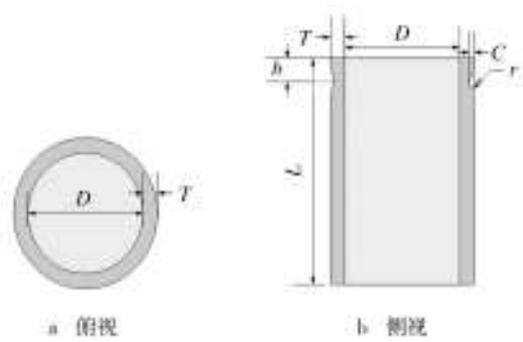


图1 薄壁圆管结构

Fig.1 Structure diagram of thin-wall circular tube

1.2 有限元数值模型的参数选择

薄壁吸能结构的物理模型见图2,刚体质量为 400 kg,以 $v_0=10$ m/s的初速度冲击一端受刚性墙约束的薄壁圆管。有限元模型见图3,采用 Ansys/LS-DYNA 有限元分析软件,薄壁圆管单元类型采用具有 8 节点的 3D-solid164 实体单元,采用单点积分算法,单元连续性采用 Lagrange 列式,材料模型采用 Bilinear Isotropic 双线性各向同性硬化模型。分析过程中采用两种接触类型:考虑到在压缩过程中管壁自身变形可能产生接触,采用 automatic single-surface contact 自动单面接触,管壁面与面接触发生摩擦时,静摩擦因数和动摩擦因数均设置为 0.2;圆管与刚体之间采用 automatic node-to-surface contact 自动点面接触。采用 LS-DYNA 求解器自带的后处理程序 LS-PREPROST 对计算结果的图形、动画显示与输出、结果数据的图示与分析、历史变量的提取及数据进行分析处理。

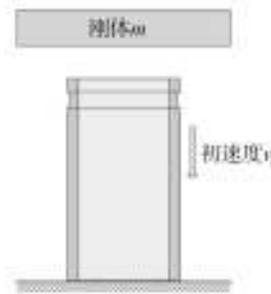


图2 物理模型
Fig.2 Physical model



图3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

圆管材料采用 0Cr18Ni9 不锈钢,材料属性如下:密度 $\rho = 7930$ kg/m³,杨氏模量 $E=204$ GPa,泊松比 $\mu = 0.285$,屈服应力 $\sigma_s=206$ MPa,极限应力 $\sigma_b=520$ MPa,切线模量 $E_T=7$ GPa。

1.3 有限元模型验证

为了验证有限元模型的准确性,首先对管长度为200 mm,直径为100 mm,厚度为1 mm的无刻槽触发结构的圆管,在准静态的恒定压溃速度 $v_0=0.83$ m/s下进行有限元分析,采用LS-DYNA中的双线性强化模型(material_003)模拟该金属材料,采用文献[12]提到的圆柱管状结构轴向压溃经验公式,对比评估吸能结构最重要的两个参数:初始压溃力峰值 F_{peak} 和平均压溃力 F_{mean} ,分别用下式表示:

$$F_{peak}=2\pi R\sigma_y T \quad (1)$$

$$F_{mean}=4\pi R\sigma_u T \left(\frac{2T}{R}\right)^{0.7} \quad (2)$$

式中: R 为圆管半径, T 为壁厚, σ_y 为屈服应力, σ_u 为极限应力。通过计算得到上述模型的初始压溃力峰值 F_{peak} 的数值模拟结果为62.09 kN,理论计算结果为65.977 kN,相对误差5.55%;平均压溃力 F_{mean} 的数值模拟结果为32.037 kN,理论计算结果为34.513 kN,相对误差7.17%。对比分析可知,所建立的有限元分析模型和理论模型有很好的 consistency,可以用来分析评估圆管结构的吸能特性研究。

由于不锈钢材料在动态冲击中力学性能受材料应变率影响较大,因此在有限元分析中要考虑材料应变率的变化对动态力的影响,这里采用最为广泛使用的Cowper-Symonds关系式考虑应变率影响:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{B}\right)^{1/q} \quad (3)$$

其中, σ_d 为动态屈服应力, σ_0 为静态屈服应力, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, B 和 q 为与应变率相关的材料常数^[13],在上述材料计算中 B 为 100 s^{-1} , q 为10。

2 数值模拟分析

薄壁结构轴向动态冲击压溃是个非常复杂的力学过程,目前,国内外对其吸能机理和变形模式还在深入的研究之中,尤其是对具有预设触发的薄壁结构还没有统一理论,大多数是建立在实验观察和数值模拟^[14-15]的基础上,即使是相同材料特性参数的薄壁结构^[16],设置不同的几何尺寸和触发结构,其吸能效果也完全不同。

2.1 不同的长径比

不同长径比的无预设刻槽结构模型和不同长径比的带预设刻槽结构模型压溃力-位移曲线见图4,数

值模拟计算结果见表1,可知,无论是有无预设刻槽,它们的初始压溃力峰值都随圆管长径比的减小而增大;其压溃力-位移曲线的走势和形状基本类似,都是在极短的压溃时间内,压溃力急剧上升,而又快速下降,随后呈现出较为稳定的压溃力平台;对比图5中的3条曲线,在初始压溃峰值之后,都有一个明显的第二波峰,这是因为在刻槽位置发生动态压溃屈曲后,在持续的冲击力作用下管壁要继续发生屈曲,由于接下来的管壁结构是完整的,并没有设置触发结构,使得压溃力上升,形成第二个波峰,随后进入稳定的动态屈曲过程;对比表1中的数据,有触发刻槽模型与原始模型相比,压溃力峰值降低约50%,平均压溃力降低约65%,因此设置刻槽触发能够很大程度地降低初始压溃力和平均压溃力,但随之带来的负面影响就是吸能量的大幅降低,如何在保证吸能量的前提下,降低压溃力,是预置触发设计的关键所在。

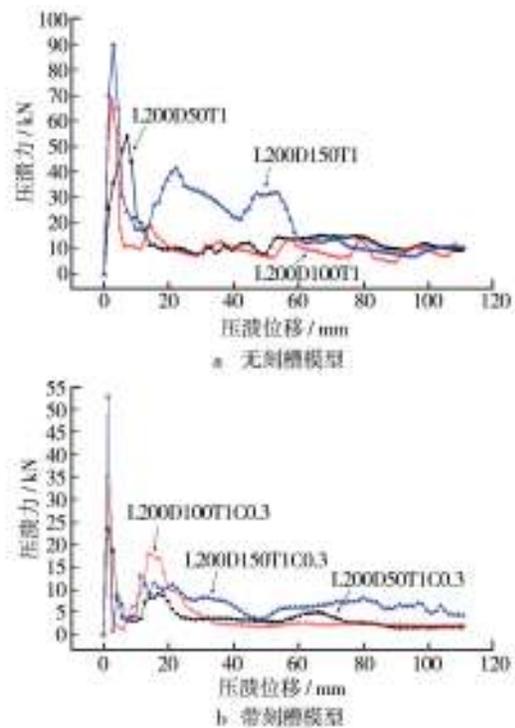


图4 不同长径比的压溃力-位移曲线

Fig.4 Crushing force-displacement curve of different diameter

2.2 不同的径厚比

不同径厚比的无预设刻槽结构模型和不同径厚比的带预设刻槽结构模型压溃力-位移曲线见图5,数值模拟计算结果见表2。从计算结果可以看出,压溃力峰值和吸能量都随壁厚的增大而增大,这是由于在相同的压缩距离下,增加厚度,相当于增加了用于吸

表1 数值模拟计算结果

Tab.1 The results of numerical simulation

| 模型 | 长径比 | 压溃模式 | 压溃力峰值 F_{peak}/kN | 压溃距离/mm | 吸能量/J | 平均压溃力 F_{mean}/kN | 比吸能 $E_s/(kJ \cdot kg^{-1})$ |
|----------------|------|----------------|---------------------|---------|--------|---------------------|------------------------------|
| L200D50T1 | 4 | 四边形,两端压溃 | 53.967 | 110 | 1551.7 | 14.11 | 6.11 |
| L200D50T1C0.3 | 4 | 圆环、四边形、不规则压溃转变 | 23.471 | 110 | 430.4 | 3.91 | 1.69 |
| L200D100T1 | 2 | 四边形,顶端压溃 | 68.708 | 110 | 1225.1 | 11.14 | 2.44 |
| L200D100T1C0.3 | 2 | 圆环向不规则压溃转变 | 35.307 | 110 | 470.1 | 4.27 | 0.93 |
| L200D150T1 | 1.33 | 四边形,顶端压溃 | 89.747 | 110 | 2386.2 | 21.69 | 3.17 |
| L200D150T1C0.3 | 1.33 | 圆环向不规则压溃转变 | 52.978 | 110 | 807.1 | 7.34 | 1.07 |

表2 数值模拟计算结果

Tab.2 The results of numerical simulation

| 模型 | 径厚比 | 压溃模式 | 压溃力峰值 F_{peak}/kN | 压溃距离/mm | 吸能量/J | 平均压溃力 F_{mean}/kN | 比吸能 $E_s/(kJ \cdot kg^{-1})$ |
|----------------|--------|----------------|---------------------|---------|--------|---------------------|------------------------------|
| L200D50T1 | 100 | 四边形,顶端压溃 | 68.708 | 80 | 1007.3 | 12.59 | 2.01 |
| L200D50T1C0.3 | 66.667 | 四边形,顶端压溃 | 156.34 | 80 | 2470.8 | 30.89 | 3.26 |
| L200D100T1 | 50 | 四边形,顶端压溃 | 224.77 | 80 | 7127.5 | 89.094 | 7.02 |
| L200D100T1C0.3 | 100 | 圆环、六边形、不规则压溃转变 | 29.405 | 115 | 983.2 | 8.55 | 1.95 |
| L200D150T1 | 66.667 | 圆环、六边形、不规则压溃转变 | 42.117 | 115 | 1017.5 | 8.85 | 1.34 |
| L200D150T1C0.3 | 50 | 圆环、六边形、不规则压溃转变 | 99.125 | 115 | 2082.6 | 18.11 | 2.05 |

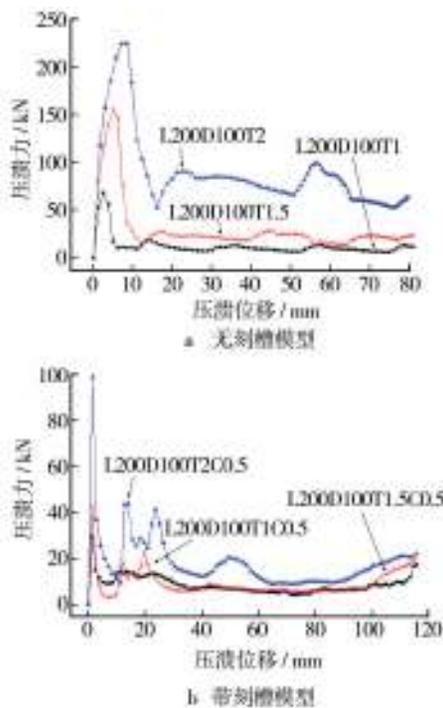


图5 不同厚度的压溃力-位移曲线

Fig.5 Crushing force-displacement curve of different thickness

收压溃动能的质量。从图5b可知,当壁厚为1.5 mm和2 mm时,在初始压溃峰值之后又出现2个较为明显的波峰,使得压溃力不够平稳,反之当壁厚为1 mm

时,压溃力曲线相对平缓。对比L200D100T1C0.5和L200D100T1.5C0.5这两个模型,前者吸能量比后者稍小,但前者的比吸能却比后者高约45%,这是由于在相同的压溃距离下,前者的质量约为后者的2/3,较大的质量降低了吸能效率。

2.3 不同的刻槽深度

不同刻槽深度模型压溃力-位移曲线见图6,不同刻槽深度模型压溃模式见图7,数值模拟计算结果见表3。从图6可以看出最大压溃力随着刻槽深度的增加而减小,这是因为槽深的增加导致圆管初始刚度降

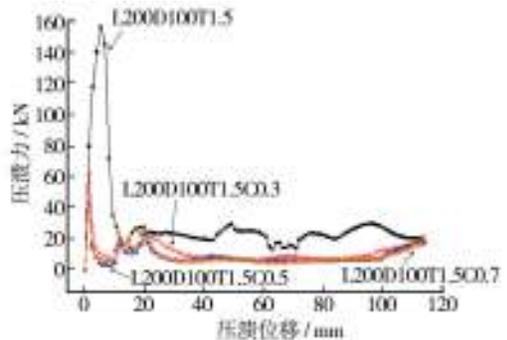


图6 不同刻槽深度模型压溃力-位移曲线

Fig.6 Crushing force-displacement curve of different groove depth model



图7 不同刻槽深度模型压溃模式

Fig.7 Crushing pattern of different groove depth model

表3 数值模拟计算结果

Tab.3 The results of numerical simulation

| 模型 | 压溃模式 | 压溃力峰值 F_{peak}/kN | 压溃距离/ mm | 吸能 量/J | 平均压溃力 F_{mean}/kN | 比吸能 $E/$ ($kJ \cdot kg^{-1}$) |
|------------------|----------------|------------------------|-------------|-----------|------------------------|------------------------------------|
| L200D100T1.5 | 四边形, 顶端压溃 | 156.34 | 113 | 3333.8 | 29.51 | 4.39 |
| L200D100T1.5C0.3 | 圆环、四边形、不规则压溃转变 | 61.775 | 113 | 1262.7 | 11.17 | 1.67 |
| L200D100T1.5C0.5 | 圆环、六边形、不规则压溃转变 | 42.117 | 113 | 997.1 | 8.82 | 1.32 |
| L200D100T1.5C0.7 | 圆环、六角星、不规则压溃转变 | 40.983 | 113 | 1034.1 | 9.15 | 1.36 |

低, 从而影响圆管轴向压溃时产生第一个褶皱的压力。但是在压溃峰值后, 管壁没有设置刻槽触发, 并且圆管几何参数相同, 压溃力变化对比相差不大; 从吸能量方面来看, 模型 L200D100T1.5C0.3 吸能量最大, 比吸能也最大, 模型 L200D100T1.5C0.5 最小。从图7可以看出, 在其他条件相同的情况下, 仅仅改变刻槽深度, 便能产生完全不同的压溃模式, 导致吸能效果有很大差异, 这是因为刻槽深度不同, 影响了应力波的传播, 产生了不同的压溃变形模式。

3 结语

通过对预置圆弧刻槽的薄壁圆管的动态冲击有限元数值模拟计算, 进行了定性和定量分析, 得到以下主要结论: 这里所讨论的薄壁结构中, 由于在管壁设置了薄弱环节, 致使结构整体强度降低, 即初始压溃力、平均压溃力和吸能量的降低; 在壁厚相同的情况下, 吸能量与圆管半径成正比, 在半径相同的情况下, 吸能量与壁厚成正比, 在不同的刻槽深度条件下, 压溃力峰值随刻槽深度增加而减小, 吸能量规律与压溃模式直接相关; 数值模拟结果显示, 圆弧刻槽在对圆管压溃变形起始阶段影响较大, 但圆管的平均承载力水平与触发结构的设计参数相关性不明显。

参考文献:

- [1] 李亦文, 徐涛, 徐天爽. 车身低速碰撞吸能结构的优化设计[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1175—1179.
- [2] 任润国, 尉庆国, 王秒秒. 汽车薄壁直梁抗弯曲特性的仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2014(3): 84—87.
- [3] 王新春, 马大为, 庄文许, 等. 某空投装备在不同缓冲装置下的冲击响应分析[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 47—51.
- [4] 齐明思, 刘守君, 赵奇, 等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 13—17.
- [5] DANESHI G H, HOSSEINIPOUR S J. Elastic-Plastic Theory for Initial Buckling Load of Thin-Walled Grooved Tubes under Axial Compression[J]. Materials Processing Technology, 2002, 125(36): 826—832.
- [6] SHARIATI M, ROKHI M M. Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(11): 1251—1261.
- [7] ZHANG X.W, TIAN Q D, YU T X. Axial Crushing of Circular Tubes with Buckling Initiators[J]. Thin-Walled Structures,

LI Yi-wen, XU Tao, XU Tian-shuang. Optimal Design of Energy-absorbing Structure of Autobody under Low-speed Crash [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(10): 1175—1179.

- [2] 任润国, 尉庆国, 王秒秒. 汽车薄壁直梁抗弯曲特性的仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2014(3): 84—87.

REN Run-guo, WEI Qing-guo, WANG Miao-miao. Simulation Study on the Bending Resistance Characteristic of Thin-walled Straight Beam in Vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2014(3): 84—87.

- [3] 王新春, 马大为, 庄文许, 等. 某空投装备在不同缓冲装置下的冲击响应分析[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 47—51.

WANG Xin-chun, MA Da-wei, ZHUANG Wen-xu, et al. Impact Response Analysis of Airdrop Equipment with Different Buffer Device[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 47—51.

- [4] 齐明思, 刘守君, 赵奇, 等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 13—17.

QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research of the Cushioning Airbag during the Landing Process Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 13—17.

- [5] DANESHI G H, HOSSEINIPOUR S J. Elastic-Plastic Theory for Initial Buckling Load of Thin-Walled Grooved Tubes under Axial Compression[J]. Materials Processing Technology, 2002, 125(36): 826—832.

- [6] SHARIATI M, ROKHI M M. Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(11): 1251—1261.

- [7] ZHANG X.W, TIAN Q D, YU T X. Axial Crushing of Circular Tubes with Buckling Initiators[J]. Thin-Walled Structures,

- 2009,47(6):788—797.
- [8] ZHANG X W, SU H, YU T X. Energy Absorption of an Axially Crushed Square Tube with a Buckling Initiator[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3):402—417.
- [9] 朱文波, 杨黎明, 余同希. 薄壁圆管轴向冲击下的动态特性研究[J]. 宁波大学学报, 2014, 27(2):92—96.
ZHU Wen-bo, YANG Li-ming, YU Tong-xi. Study on Dynamic Properties of Thin-Walled Circular Tubes under Axial Compression[J]. Journal of Ningbo University, 2014, 27(2):92—96.
- [10] 谭丽辉, 谭洪武, 刘巍. 具有圆弧形诱导凹槽薄壁圆管抗撞性分析[J]. 吉林化工学院学报, 2014, 31(9):46—49.
TAN Li-hui, TAN Hong-wu, LIU Wei. The Analysis of Crashworthiness of Thin-Walled Cylinders with Induced Indentations[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2014, 31(9):46—49.
- [11] 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, 35(6):731—734.
TAN Li-hui, TAN Hong-wu. Analysis of Axial Crashworthiness under Different Inducing Structure[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2014, 35(6):731—734.
- [12] HAN H P, TAHERI F, PEGG N. Quasi-Static and Dynamic Crushing Behaviors of Aluminum and Steel Tubes with a Cut-out[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(3):283—300.
- [13] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 华云龙, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
YU Tong-xi, LU Guo-xing. Energy Absorption of Structures and Materials[M]. HUA Yun-long, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [14] YAMASHITA M, GOTOH M, SAWAIRI Y. Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-sections Numerical Simulation and Experiment[J]. Materials Processing Technology, 2003(1):59—64.
- [15] HOSSEINIPOUR S J. Mathematical Model for Thin-Walled Grooved Tubes under Axial Compression[J]. Materials and Design, 2003, 24(24):463—469.
- [16] 陈淑琴, 周利强. 材料特性参数对金属薄壁元件耐撞性的影响[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(1):69—73.
CHEN Shu-qin, ZHOU Li-qiang. Influence of Material Parameters to the Crashworthiness of Metal Thin-Walled Components[J]. Mechanical Research and Application, 2015, 28(1):69—73.

(上接第95页)

- [J]. 机械传动, 2011, 35(12):60—62.
LI Long, CAO Ju-jiang, TIAN Xiao-hong. Planetary Wheel Box of Institutional Research and Analysis[J]. Mechanical Transmission, 2011, 35(12):60—62.
- [7] 李龙, 田晓鸿, 曹巨江. 高速取盒机构运动轨迹设计与研究[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(3):28—30.
LI Long, TIAN Xiao-hong, CAO Ju-jiang. The Box of Trajectory Design and Research Institutions[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(3):28—30.
- [8] 吴德孚. 介绍一种自动取袋机构[J]. 包装与食品机械, 1986(3):55—59.
WU De-fu. This Paper Introduces an Automatic Picking Bag Mechanism[J]. Packaging Engineering, 1986(3):55—59.
- [9] 王文博, 阎敏. 行星轮系的旋轮线和图案设计[J]. 北京服装学院学报, 1994, 14(1):80—85.
WANG Wen-bo, YAN Min. The Cycloid Planetary Gear Train and Pattern Design[J]. Journal of Beijing institute of fashion technology, 1994, 14(1):80—85.
- [10] 张竹青, 陆佳平. 实现旋轮线轨迹的取袋机构设计与参数分析[J]. 机械设计, 2015, 32(3):82—85.
ZHANG Zhu-qing, LU Jia-ping. Achieve the Cycloid Trajectory Taking Bag Mechanism Design and Parameter Analysis [J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 32(3):82—85.
- [11] 孙平. 简析塑料袋的质量要求[J]. 印刷技术, 2006(26):52—53.
SUN Ping. Analysis the Quality Requirements of Plastic Bags [J]. Journal of Printing Technology, 2006(26):52—53.
- [12] 司振鹏, 曹西京. 真空吸附式机械手系统设计[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(6):26—30.
SI Zhen-peng, CAO Xi-jing. Vacuum Adsorption Manipulator System Design[J]. Journal of Packaging and Food Machinery, 2009, 27(6):26—30.
- [13] 腾红华. 真空吸盘吸持物体的动力学分析[J]. 包装工程, 2004, 25(2):68—69.
TENG Hong-hua. Vacuum Suction Cup Holding Dynamics Analysis of the Object[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(2):68—69.
- [14] 朱建萍, 王鹏. 包装机械设计方法研究[J]. 包装工程, 2007, 28(7):89—91.
ZHU Jian-ping, WANG Peng. Packaging Machinery Design Method Research[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7):89—91.
- [15] 刘守谦. 改进包装机械设计方法的新思路[J]. 轻工机械, 2005, 23(4):1—3.
LIU Shou-qian. Improve the Packaging Machinery Design Method of New Thinking[J]. Journal of Light Industrial Machinery, 2005, 23(4):1—3.
- [16] 熊永刚, 朱小东. 现代设计理论和方法在包装机械中的应用[J]. 包装工程, 2002, 23(3):69—70.
XIONG Yong-gang, ZHU Xiao-dong. Modern Design Theory and Method of Application in the Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(3):69—70.