

类向日葵夹芯圆柱壳径向冲击数值模拟

闫栋 王根伟 宋辉 王彬

Numerical Simulation of Radial Impact on Sunflower-Like Sandwich Cylindrical Shell

YAN Dong, WANG Genwei, SONG Hui, WANG Bin

引用本文:

闫栋, 王根伟, 宋辉, 等. 类向日葵夹芯圆柱壳径向冲击数值模拟[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):054201. DOI: 10.11858/gywlb.20190858

YAN Dong, WANG Genwei, SONG Hui, et al. Numerical Simulation of Radial Impact on Sunflower-Like Sandwich Cylindrical Shell[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):054201. DOI: 10.11858/gywlb.20190858

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190858>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属蜂窝夹芯结构抗水下冲击性能

Impulsive Resistance of Metallic Honeycomb Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loading
高压物理学报. 2020, 34(3): 035102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190790>

焊接薄壁弹体侵彻多层钢筋混凝土靶实验研究

Welding Thin-Walled Projectiles for Penetrating Multi-Layered Reinforced Concrete Targets
高压物理学报. 2017, 31(4): 469 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.016>

多层级夹芯结构的变形与能量吸收

Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures
高压物理学报. 2019, 33(5): 055902 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180707>

轴向冲击载荷作用下梯度圆管的动力学行为

Dynamic Crushing Behavior of Graded Hollow Cylindrical Shell under Axial Impact Loading
高压物理学报. 2017, 31(6): 778 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.06.013>

混凝土类材料在SHPB实验中惯性效应的数值模拟研究

Numerical Study of Inertial Effects of Concrete-Like Materials in Split Hopkinson Pressure Bar Tests
高压物理学报. 2017, 31(2): 114 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.02.003>

多三明治结构反应装甲干扰射流的数值模拟

Numerical Simulation of Interference Effect of Multi Sandwich Structure Reaction Armor to Jet
高压物理学报. 2018, 32(6): 065107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180571>

类向日葵夹芯圆柱壳径向冲击数值模拟

闫 栋^{1,2}, 王根伟^{1,2}, 宋 辉^{1,2}, 王 彬^{1,3}

- (1. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024;
2. 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
3. 伦敦布鲁内尔大学机械与航空工程系, 英国 伦敦 UB8 3PH)

摘要: 金属薄壁结构由于其优异的轻质性和耐撞性, 一直被广泛地应用在汽车、飞机和火车等交通工具的碰撞动能耗散系统中。以一类向日葵薄壁夹芯吸能结构为研究对象, 研究了在瓣尖压和瓣间压两种径向冲击载荷下, 类向日葵薄壁夹芯结构的变形模式、能量吸收能力、比吸能和平均压缩力。结果表明, 类向日葵薄壁夹芯结构的壁厚、花瓣数、加载速度以及加载方向都会对结构的耐撞性产生一定的影响。在质量恒定条件下, 随着外壳厚度的增加, 瓣尖压冲击方式下薄壁结构的吸能效率降低, 瓣间压比瓣尖压的比吸能最高多出了 44.6%。随着花瓣数的变化, 金属薄壁结构的吸能效率存在一个最优值。

关键词: 金属薄壁结构; 能量; 径向压缩; 仿真

中图分类号: O347

文献标识码: A

金属薄壁结构的耐撞性研究在人身和设备安全防护方面方兴未艾。在汽车等交通工具发生的碰撞事件中, 薄壁结构或构件对人或汽车实施保护的能力就是结构的耐撞性。在碰撞过后, 如果金属薄壁结构及其人或汽车的损伤越小, 则结构的耐撞性就越高。在实际的工程应用中, 由于安全保护的需要, 公路上的护栏及各种海陆空交通工具如汽车、飞机、轮船等, 都必须满足一定的耐撞性要求, 须依靠薄壁结构的塑性变形来吸收缓冲碰撞时的能量, 确保人员安全和重要器材的完好。我国载人航天飞船返回着陆时人体防护研究中的一项重要内容就是改善宇航员座椅的冲击吸能性能。近年来由于交通事故所造成的人员伤亡不断增加, 汽车在碰撞下的安全引起了全世界的高度关注, 所以研究薄壁结构的耐撞性显得尤为重要。

金属薄壁结构的耐撞性研究的核心问题在于能量的吸收。在结构的设计过程中一般需要遵循以下基本原则。首先, 所设计的薄壁结构和所用的材料能够满足大部分冲击动能通过薄壁结构的塑性变形或其他方式的能量耗散转换为非弹性能, 而不是以弹性能量的方式储存下来。其次, 能量吸收器的初始峰值力应当低于一个临界值。在金属薄壁结构的大变形过程中, 理想状况下的反作用力应当尽可能的保持恒定, 是一个近似矩形的力-位移曲线特性。再者, 力所作的功等于其大小乘以沿力作用线发生的位移, 所以金属薄壁结构要吸收的能量应该足够大, 行程足够长, 同时冲程效率要足够高。这是因为当吸能结构受到冲击载荷开始变形时, 一直到结构变实, 这段距离是吸能效率最高的一段, 当结构由实到完全密实化, 有效冲程很短, 触头受到的反作用力非常大, 对能量的吸收是无效的, 而且反复冲击会对触头产生很大的损害, 影响触头的使用寿命。最后, 为了应对实际工程中不稳定的工作载荷, 所设计的金属薄壁结构的变形模式和能量吸收能力应当是稳定、可重复的, 确保金属薄壁结构在实际复杂

* 收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(11872265); 山西省青年科技研究基金(201701D221142)

作者简介: 闫 栋(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属薄壁夹芯结构的耐撞性研究。

E-mail: 1690617047@qq.com

通信作者: 王根伟(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新能源汽车安全与轻量化研究。

E-mail: gwang@tyut.edu.cn

工程应用条件下的可靠性和实用性。

薄壁构件作为汽车车身的主要吸能装置,学者们很早就开始了研究。1960年,Alexander^[1]首先建立了金属薄壁模型在轴向加载下的塑性变形吸能理论,为金属薄壁结构的耐撞性研究做出了巨大的贡献。在 Alexander 研究的基础上,Wierzbicki 等^[2]创建了一个新的超折叠单元分析理论,他们还发现了金属薄壁结构在管壁发生大变形的情况下,折叠管壁是曲线而不是直线。研究者也对薄壁结构横截面形状进行了大量的研究。Gupta 等^[3]研究了长径比对金属薄壁结构吸能效率的影响,通过试验得到了多种破坏模式、载荷-变形行为以及初始峰值力和平均压缩载荷。Hanssen 等^[4-5]对泡沫填充管的吸能特性进行了理论研究,并做了大量准静态和动态轴向压缩实验,验证了泡沫填充管良好的吸能效率。赵凯等^[6]对圆环在径向冲击下的吸能特性进行了模拟和实验研究,结果表明:圆环壁厚越薄,其变形越大,圆环的吸能效率越高;多圆环系统会使单个圆环的吸能效率降低,但是随着冲击速度的增大,多个圆环系统与单个圆环的吸能效率差值逐渐减小。Najafi 等^[7]利用有限元模拟和实验研究了不同多胞、多角构型的轴向冲击金属薄壁结构的吸能特性。李志斌等^[8]对设置了诱导结构的铝合金管进行了轴向冲击实验,发现诱导结构可以降低结构响应的初始峰值力。杨鹏飞^[9]进行了波纹板的压缩实验,通过变化波纹板的厚度、高度以及波间距,得到了承载能力最优的模型参数。陈亦涛等^[10]对不同排列方式的圆环系统进行了实验研究,得出:在抗力允许的范围内,减小圆环的径厚比有助于提高多圆环系统的比吸能;随着圆环层数的增加,正方形排列的圆环系统的比吸能降低,而六边形排列的圆环系统的比吸能几乎没有变化,说明六边形排列的圆环系统比正方形排列的圆环系统更具有工程应用价值。于渤等^[11]对泡沫铝填充波纹板的动态压缩性能做了数值模拟研究,在不同冲击速度下,泡沫铝填充波纹板展现出了不同的压缩性能,具体划分为准静态模式、中间模式和冲击波模式。在准静态模式下,由于填充泡沫所产生的约束,使波纹板的抗弯曲能力得到提高;在中间模式下,波纹板的波长由于惯性作用减小,泡沫的约束作用不明显;在冲击模式下,高速冲击使泡沫内部产生了冲击波,导致波纹板不发生屈曲。Tarlochan 等^[12]研究了圆管、方管以及多边形管的金属薄壁结构在动态冲击载荷下的耐撞性。随着社会的发展和科技的进步,由于实验和理论研究的局限性,学者利用有限元模拟做了大量的金属薄壁构件的耐撞性研究。杨彬彬等^[13]研究了传统多胞金属管和夹层多胞金属管受径向冲击时的吸能特性,结果表明:在两种类型的多胞管中,夹层多胞管的吸能特性整体较优;与夹层多胞管相比,传统多胞管在缓冲后出现了特别明显的回弹现象,对触头产生很大的反作用力,影响触头的使用寿命。Wang 等^[14]研究了不同科赫分形阶数对吸能效率的影响,通过实验测试和数值模拟,发现科赫分形结构与外壳之间所产生的协同作用极大地提高了薄壁结构的吸能效率,并且得出二阶科赫分形设计具有更好的吸能效率。韩宾^[15]对闭孔泡沫铝和不锈钢波纹复合夹芯板进行了面外压缩实验研究,发现泡沫填充使复合芯体的面外压缩强度以及能量吸收能力都得到了极大的提升,此外复合芯体中的蜂窝泡沫铝与波纹板之间的强耦合作用,使得复合芯体和蜂窝泡沫铝的承载能力和能量吸收效率都大大的提高。Ngoc 等^[16]根据啄木鸟的喙设计出了波纹夹芯结构,并且进行了轴向压缩研究,取得了很好的吸能效果。本研究将波纹板弯曲形成类向日葵结构,放入两个同心圆柱壳之间,组成双圆柱壳夹芯结构,即类向日葵夹芯薄壁圆柱壳结构,分析此结构在径向冲击载荷下的吸能特性。

1 类向日葵夹芯结构

1.1 有限元模型

在本研究中,提出了一种类向日葵夹芯金属薄壁吸能结构,利用有限元分析软件 ABAQUS 对薄壁构件进行了模拟。有限元模型如图 1 所示。在薄壁构件的上下两端,有两个质量均为 6 kg 的刚性板,薄壁构件质量 $m = 2.45$ g 恒定,网格为实体单元。为了保证计算精度,最大单元网格控制为 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 。在外壳中层直径为 90 mm、内壳中层直径为 30 mm 的条件下,通过改变壁厚($t = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2\text{ mm}$)和花瓣数(9、10、11、12、13、14、15、16 瓣),采用图 1 中的瓣尖压(Tip side pressure, TSP)和瓣间压(Gap side pressure, GSP)两种方式进行径向冲击数值模拟。试件材料为铝合金 6061-O,密度

$\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 杨氏模量 $E = 68.2\text{ GPa}$ 。铝合金 6061-O 的应力-应变曲线来自文献 [14] 中的图 4。

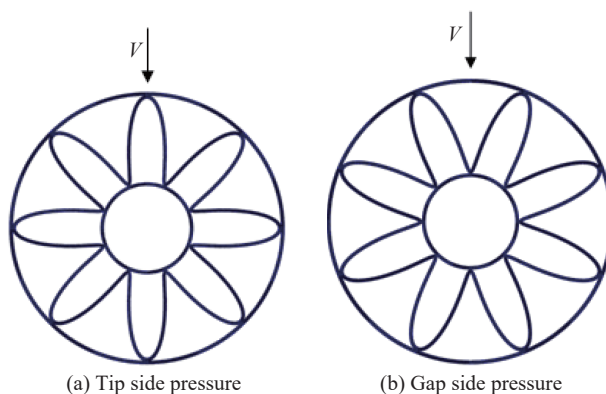


图 1 类向日葵夹芯结构有限元模型

Fig. 1 Finite element model of sunflower sandwich structure

1.2 耐撞性指标

尽管薄壁吸能结构各不相同,有圆管、多边形管、多胞管、填充泡沫管以及复合材料管等,研究人员也从不同的角度、不同内容,运用理论分析、数值模拟以及实验验证等不同方法研究薄壁结构的吸能特性,但最终都有同样的参考指标,对比不同薄壁结构的吸能特性,综合各方面的优势,选出最佳的薄壁吸能结构。一般用总吸能(EA)、平均压缩力(MCF)、比吸能(SEA)等评价薄壁结构的耐撞性能。

EA 是压缩过程中吸收的总能量,反映了在整个压缩过程中吸收能量的大小,表达式为

$$E_t(d) = \int_0^d F(x)dx \quad (1)$$

式中: E_t 为总吸能; d 为有效变形位移,在本研究中为 75 mm; $F(x)$ 为瞬时压缩载荷。

MCF 代表薄壁结构的平均压缩强度,反映了在整个压缩过程中压缩载荷的大小,其表达式为

$$F_{ave}(d) = \frac{E_t(d)}{d} \quad (2)$$

式中: F_{ave} 为平均压缩力。

SEA 为单位质量所吸收的比能,反映了薄壁结构的吸能效率,是区分不同材料吸能能力的关键指标,其表达式为

$$e(d) = \frac{E_t(d)}{M} \quad (3)$$

式中: e 为比吸能, M 为结构的总质量。

2 数值模拟

2.1 壁厚的影响

在保持相同质量的前提下,改变外壳壁厚 t (t 为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 mm),花瓣壁厚等厚,内壳壁厚随外壳壁厚的增加而减小。采用瓣尖压和瓣间压两种加载方式,以不同冲击速度(v 为 20、30、50 m/s)对薄壁构件进行径向压缩,得到了两种加载方式下不同位移对应的变形云图,如图 2 所示。

图 3 给出了类向日葵夹芯结构(花瓣数相同、外壳壁厚不同)在不同冲击速度下的载荷-位移曲线。从图 3 可以看出,当刚性板接触到薄壁构件时,瓣尖压首先出现一个峰值,而瓣间压则逐渐增大,达到一个峰值。这是因为在瓣尖压加载方式下,刚性板首先接触到花瓣尖端,尖端为主要承载部分,而瓣间压是花瓣尖端之间承受冲击力,在压缩到两个尖端开始承受力时,出现一个峰值。在瓣尖压加载

方式下, 出现第二个峰值是因为下端的花瓣尖端开始成为主要承载部分, 当最下端花瓣开始屈曲, 曲率达到最大的时候, 力减到最小, 最后, 吸能元件逐渐密实化。瓣间压在达到峰值后, 力逐渐减小, 是因为下端的花瓣也开始变形, 最后力趋于一个稳定的波动范围, 直到密实化。相对于瓣尖压, 瓣间压的力的波动性更小, 更符合理想化的“矩形”载荷-位移曲线。

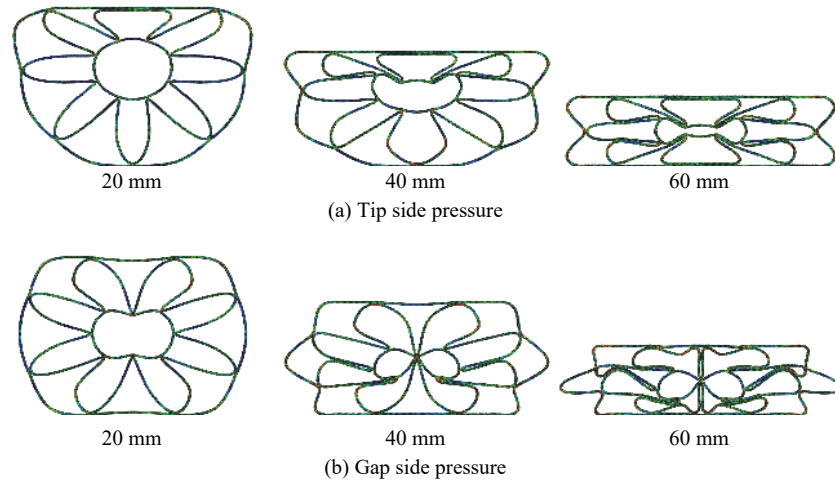
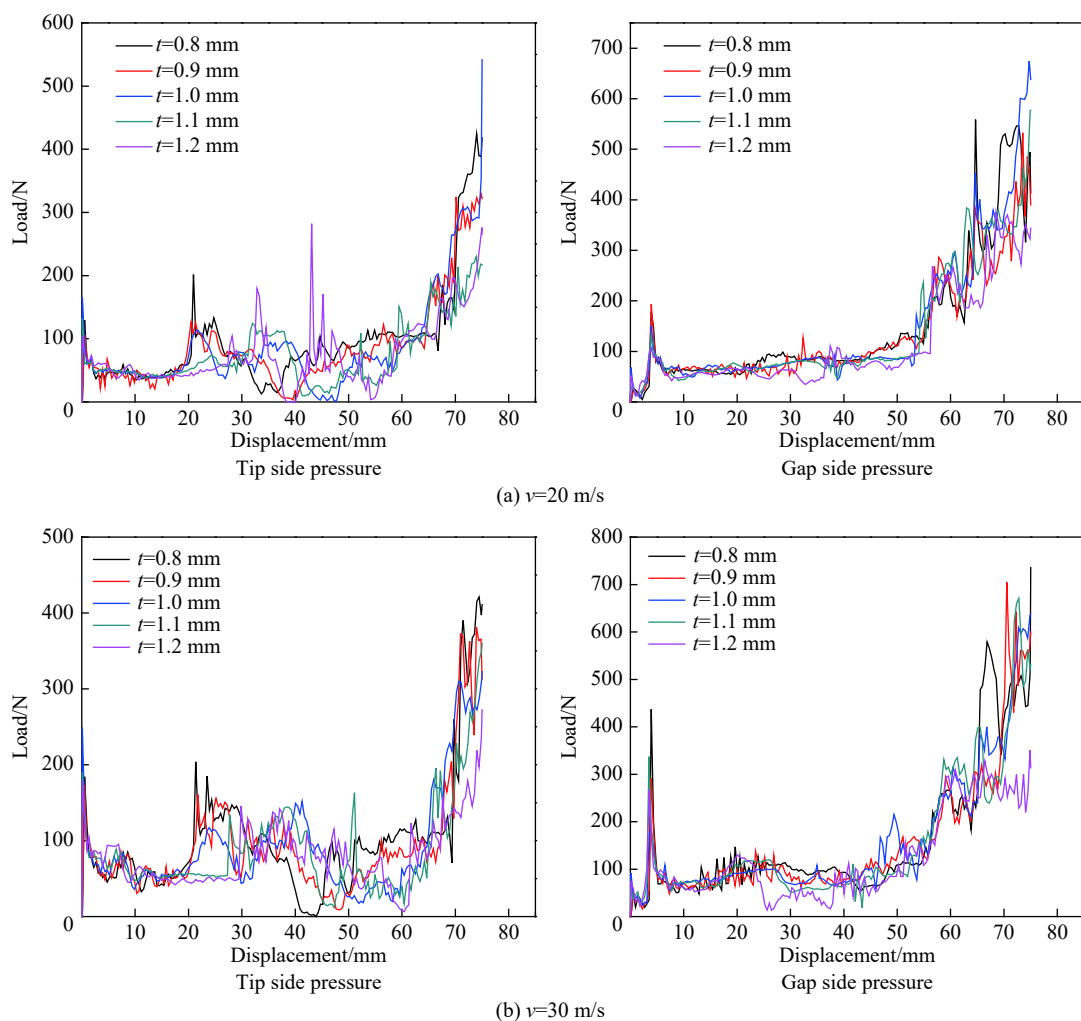


图 2 两种加载方式下不同位移对应的变形云图

Fig. 2 Deformation nephogram under two loading modes at different displacements



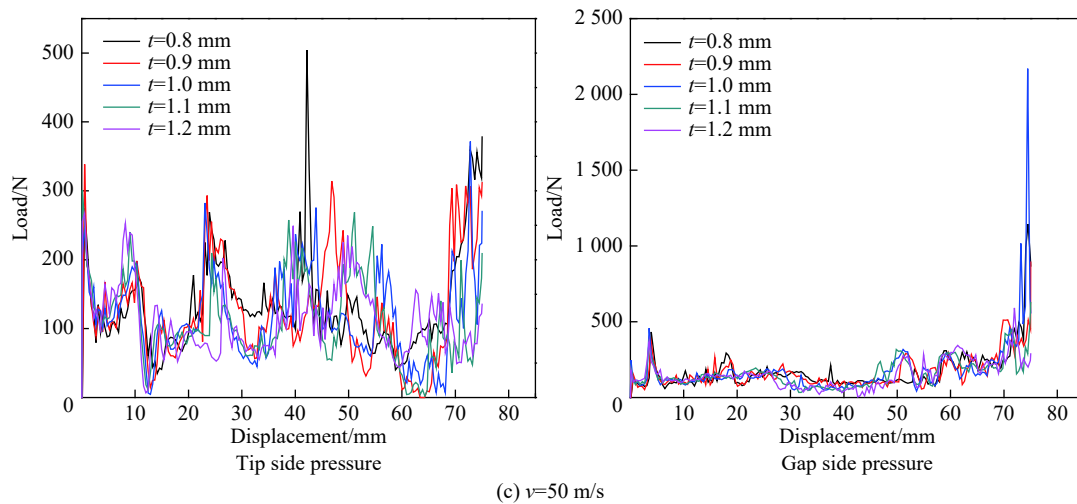


图 3 不同冲击速度下的力-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves at different impact velocities

图 4 给出了类向日葵夹芯结构(花瓣数相同、外壳壁厚不同)在不同冲击速度下的 SEA 和 MCF, 可见, 外壳厚度的变化对 SEA 和 MCF 有显著的影响。瓣尖压加载下, SEA 随着外壳壁厚的增大而减小, 这是因为外壳壁厚越小, 外壳进入塑性的区域越大, 外壳质量占整个构件质量的比例比内壳高, 材料利用率也更高。瓣尖压加载下的初始峰值力大于瓣间压加载, 所以瓣间压模式对车辆的保护更好。随着冲击速度的增大, SEA 和 MCF 都增大, 瓣间压加载下的 SEA 比瓣尖压加载下高, 在 $t=1.1$ mm、 $v=20$ m/s 时, 瓣间压下的 SEA 比瓣尖压下高 44.6%。表 1、表 2 和表 3 列出了 3 种冲击速度下的 SEA 和 MCF。

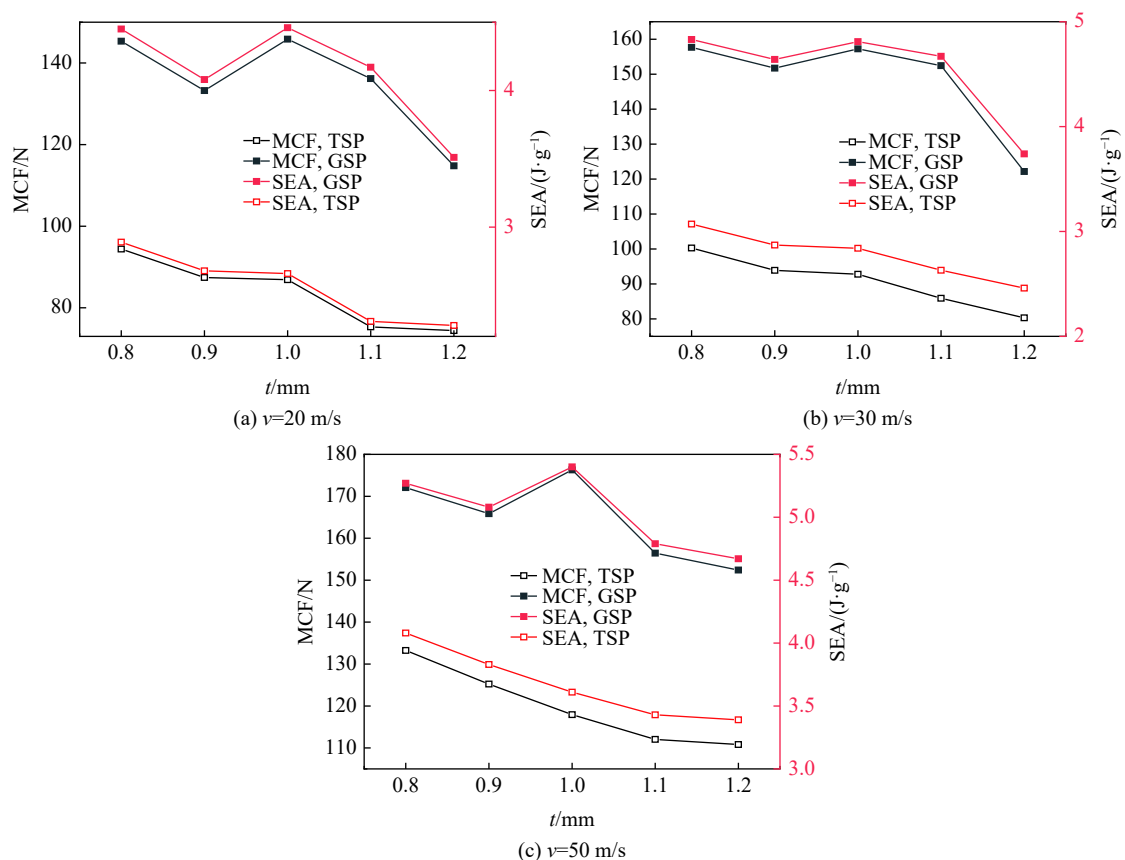


图 4 不同冲击速度、不同外壳壁厚条件下类向日葵夹芯结构的 SEA 和 MCF

Fig. 4 SEA and MCF of sunflower sandwich structure with different wall thicknesses at different impact velocities

表 1 冲击速度 $v = 20 \text{ m/s}$ 下的 SEA 和 MCFTable 1 SEA and MCF at $v = 20 \text{ m/s}$

t/mm	SEA/(J·g ⁻¹)		MCF/N		Increase ratio/%
	TSP	GSP	TSP	GSP	
0.8	2.89	4.45	94.40	145.34	35.05
0.9	2.68	4.08	87.43	133.23	34.31
1.0	2.66	4.46	86.90	145.84	40.36
1.1	2.31	4.17	75.33	136.18	44.60
1.2	2.28	3.51	74.42	114.79	35.04

表 2 冲击速度 $v = 30 \text{ m/s}$ 下的 SEA 和 MCFTable 2 SEA and MCF at $v = 30 \text{ m/s}$

t/mm	SEA/(J·g ⁻¹)		MCF/N		Increase ratio/%
	TSP	GSP	TSP	GSP	
0.8	3.07	4.83	100.26	157.66	36.44
0.9	2.87	4.64	93.87	151.72	38.15
1.0	2.84	4.81	92.76	157.25	40.96
1.1	2.63	4.67	85.89	152.42	43.68
1.2	2.46	3.74	80.29	122.14	34.22

表 3 冲击速度 $v = 50 \text{ m/s}$ 下的 SEA 和 MCFTable 3 SEA and MCF at $v = 50 \text{ m/s}$

t/mm	SEA/(J·g ⁻¹)		MCF/N		Increase ratio/%
	TSP	GSP	TSP	GSP	
0.8	4.08	5.27	133.24	172.06	22.58
0.9	3.83	5.08	125.23	165.85	24.61
1.0	3.61	5.40	117.93	176.28	33.15
1.1	3.43	4.79	112.05	156.44	28.39
1.2	3.39	4.67	110.81	152.41	27.41

2.2 花瓣数的影响

考虑到花瓣个数可能会影响薄壁构件的吸能效率, 本研究采用瓣尖压和瓣间压两种径向加载模式, 以不同冲击速度 ($v = 20、30、50 \text{ m/s}$) 对 8 种类向日葵夹芯结构, 花瓣数分别为 9、10、11、12、13、14、15、16, 进行径向压缩模拟计算。

图 5 给出了类向日葵夹芯结构(花瓣数不同)在不同冲击速度下的载荷-位移曲线。从图 5 可以看出, 在瓣间压径向加载下, 花瓣数越多, 载荷越先到达峰值。这是因为花瓣数越多, 花瓣之间的角度越小, 相邻的两个花瓣越早开始承受载荷, 最先达到峰值。随着冲击速度增大, 初始峰值力增大, 载荷-位移曲线的波动性更明显, 并且瓣尖压径向加载下载荷-位移曲线的波动比瓣间压径向加载下更大。这是因为瓣尖压加载下, 上下两个花瓣在受到冲击时, 屈曲部分变形的抖动比较剧烈, 而瓣间压加载下花瓣变形相对稳定。

图 6 给出了类向日葵夹芯结构(花瓣数不同)在不同冲击速度下的 SEA 和 MCF。从图 6 可以看出: 在冲击速度 $v = 20 \text{ m/s}$ 的条件下, 不同花瓣数的 SEA 和 MCF 之间的差距很大, 花瓣数为 13 的 SEA 和 MCF 都是最小的; 随着冲击速度的增大, 花瓣数为 15 的 SEA 和 MCF 增加明显; 在冲击速度 $v = 50 \text{ m/s}$ 下,

瓣间压加载下的 SEA 和 MCF 都是最高的。同时从图 6 还可以看出, 随着花瓣数的增加, 瓣尖压和瓣间压径向加载下的吸能效率差值减小。这是因为随着花瓣数的增加, 花瓣间的角度逐渐减小, 瓣尖压和瓣间压两种加载方式对薄壁构件吸能效率的影响减小。

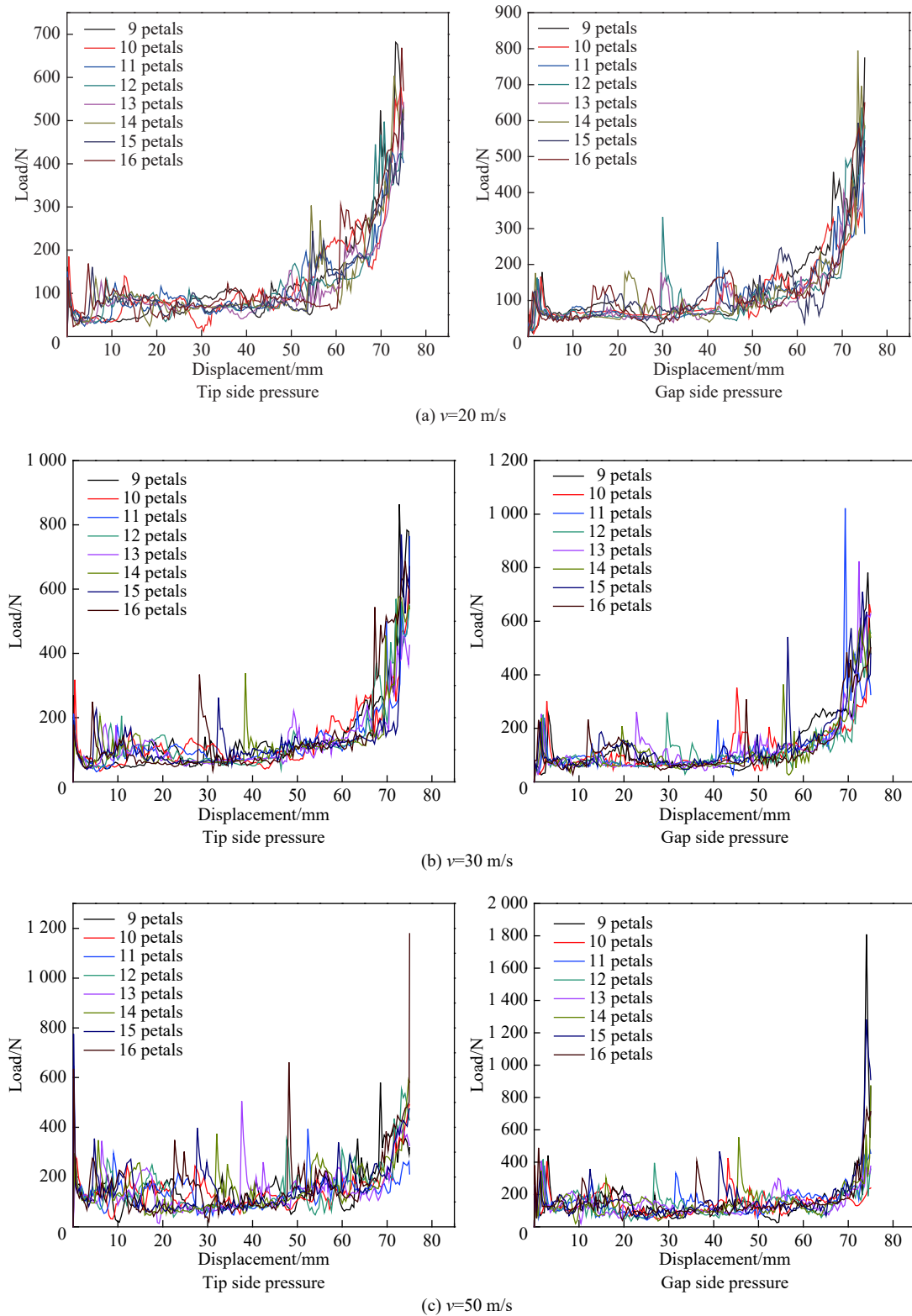


图 5 不同冲击速度下的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves at different impact velocities

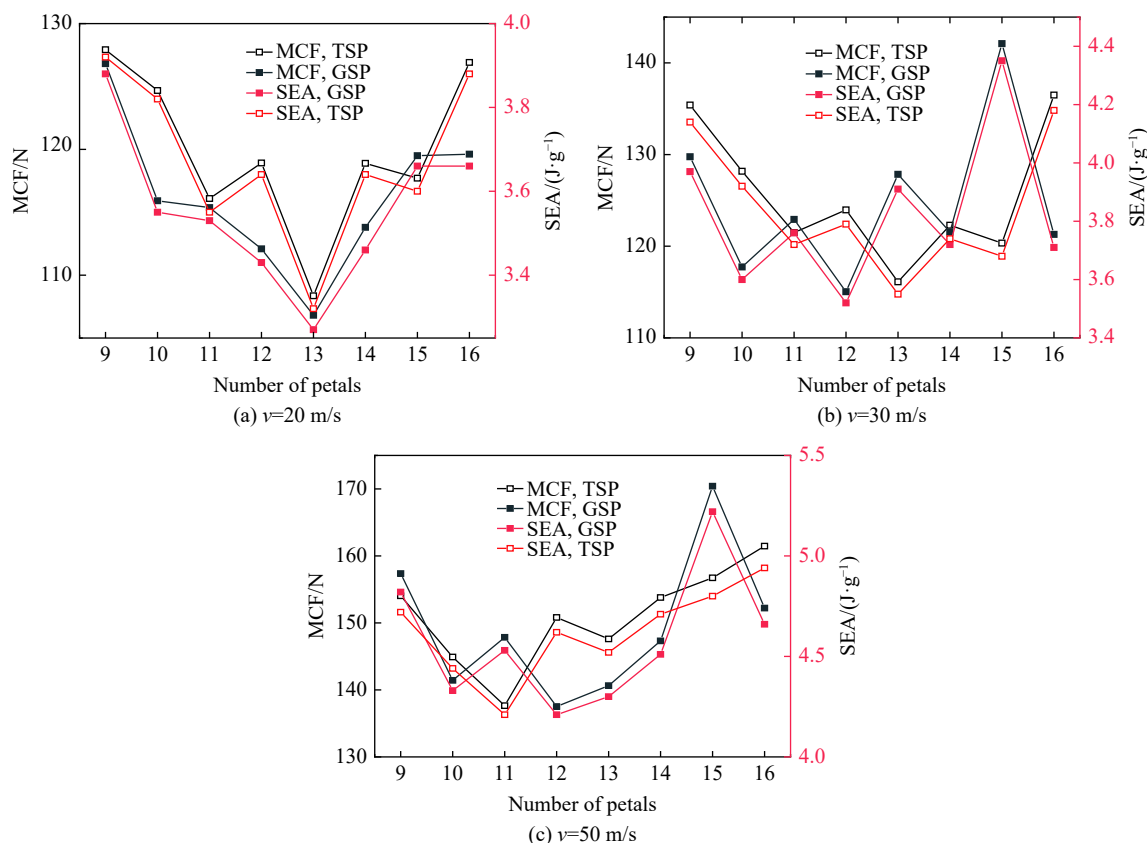


图 6 不同冲击速度、不同花瓣数下类向日葵夹芯结构的 SEA 和 MCF

Fig. 6 SEA and MCF of sunflower sandwich structure with various numbers of petals at different impact velocities

3 结 论

本研究提出了一种新型的金属薄壁结构——类向日葵夹芯圆柱结构,探讨了具有不同外壳壁厚和花瓣数的类向日葵夹芯结构在瓣尖压和瓣间压两种径向冲击载荷下的吸能特性。

(1)随着冲击速度的增大,初始峰值力增大,SEA 和 MCF 都增大。

(2)SEA 的大小与外壳壁厚的变化有关,在质量一定的前提下,随着外壳壁厚的增加,瓣尖压加载下的 SEA 逐渐减小。

(3)SEA 和 MCF 的大小与类向日葵夹芯结构的花瓣数有关。在质量一定的前提下,随着花瓣数的增加,瓣尖压和瓣间压两种加载方式对薄壁构件吸能效率的影响减小;随着冲击速度的增大,不同花瓣数的薄壁构件的吸能效果逐渐呈现规律性,在某一花瓣数下,SEA 和 MCF 达到最大。

参考文献:

- [1] ALEXANDER J. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading [J]. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1960, 13(1): 10–15.
- [2] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(4a): 727–734.
- [3] GUPTA N, PRASAD G E, GUPTA S. Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles [J]. *International Journal of Crash Worthiness*, 1997, 2(4): 349–366.
- [4] HANSSEN A G, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41(8): 967–993.
- [5] HANSSEN A G, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with

- aluminium foam filler [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(5): 475–507.
- [6] 赵凯, 卢国兴, 沈建虎, 等. 圆环列系统吸能特性研究 [J]. 北京大学学报, 2007, 65(3): 312–316.
ZHAO K, LU G X, SHEN J H, et al. Energy absorption characteristics of ring train system [J]. *Journal of Peking University*, 2007, 65(3): 312–316.
- [7] NAJAFI A, RAIS-ROHANI M. Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(1): 1–12.
- [8] 李志斌, 虞吉林, 郭刘伟. 具有诱导结构的铝合金薄壁方管轴向压缩吸能性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(6): 346–352.
LI Z B, YU J L, GUO L W. Experimental study on energy absorption performance of aluminum alloy thin-walled square tube with induced structure in axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(6): 346–352.
- [9] 杨鹏飞. 波纹夹芯板和结构的压缩与冲击吸能特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
YANG P F. Study on compression and impact energy absorption characteristics of corrugated sandwich plates and structures [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [10] 陈亦涛, 王帅, 刘凯欣. 径向冲击载荷下金属圆环系统的动态吸能特性 [C]//中国力学学会第 19 届学术年会. 北京, 2013.
- [11] 于渤, 张钱城, 金峰, 等. 泡沫铝填充波纹板的动态压缩性能研究 [C]//中国力学大会-2013. 西安, 2013.
- [12] TARLOCHAN F, SAMER F, HAMOUDA A M S, et al. Design of thin wall structures for energy absorption applications: enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 71: 7–17.
- [13] 杨彬彬, 赵修平. 多胞金属管受径向冲击时的吸能特性 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2014, 29(6): 552–556.
YANG B B, ZHAO X P. Energy absorption characteristics of polycellular metal tube subjected to radial impact [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering College*, 2014, 29(6): 552–556.
- [14] WANG J, ZHANG Y, HE N, et al. Crashworthiness behavior of Koch fractal structures [J]. *Materials & Design*, 2018, 144: 229–244.
- [15] 韩宾. 波纹强化复合型多孔材料的力学行为研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
HAN B. Study on mechanical behavior of corrugated reinforced composite porous materials [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [16] NGOC S H, LU G X, XIANG X M. Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(8): 6286–6300.

Numerical Simulation of Radial Impact on Sunflower-Like Sandwich Cylindrical Shell

YAN Dong^{1,2}, WANG Genwei^{1,2}, SONG Hui^{1,2}, WANG Bin^{1,3}

(1. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

2. *Key Laboratory of Material Strength and Structure Impact in Shanxi Province, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

3. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, London Brunel University, London UB8 3PH, UK*)

Abstract: Because of their excellent lightness and crashworthiness, metal thin-walled structures have been widely used in the collision kinetic energy dissipation system of vehicles such as automobiles, airplanes and trains. In this paper, the deformation mode, energy absorption capacity, specific energy absorption and average compression force of sunflower thin-wall sandwich structure under radial impact load in two directions are studied. The results show that the wall thickness, the number of petals, the loading speed and the loading direction of the thin-wall sandwich structure of sunflower have certain effects on the impact resistance of the structure. Under the condition of constant mass, with the increase of the thickness of the outer shell, the energy absorption efficiency of the thin-walled structure under the tip pressure is reduced. The specific energy absorption under gap side pressure was 44.6% higher than that under tip side pressure. With the change of the number of petals, the energy absorption efficiency of thin-walled metal structure has an optimal value.

Keywords: metal thin-walled structure; energy; radial compression; simulation