

填充梯度泡沫铝锥形吸能盒轴向压缩行为与设计

吴熙蔚^{1,2}, 张建勋¹

(1. 西安交通大学航天航空学院, 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命国家重点实验室, 710049 西安;

2. 中北大学机电工程学院, 030051 太原)

摘 要: 为了满足结构轻量化和吸能需求, 设计和研究优异的吸能盒结构, 采用 ABAQUS 有限元软件对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒准静态轴向压缩行为进行了仿真模拟和轻量化设计。通过与文献实验对比, 验证了有限元计算模型的有效性。接着研究了正方形截面吸能盒锥形底角、诱导槽数目、诱导槽的高度和深度以及梯度材料参数等因素对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构轴向压缩下吸能特性的影响。之后以同等质量结构较低峰值载荷及优异能量吸收为优化目标, 对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构进行了优化设计。结果表明: 这些因素对提高吸能盒吸能特性有较好的效果, 优化后的填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构最大峰值力降低了 20%、比吸能提高了 3.6%, 并且其碰撞力-位移曲线更加平缓, 更有利于吸能盒能量吸收。

关键词: 锥形吸能盒结构; 梯度泡沫铝; 准静态压缩; 有限元仿真; 轻量化设计

中图分类号: O34

文献标志码: A

文章编号: 1000-4939(2025)05-1086-12

Quasi-static axial compressive behavior and design of conical energy-absorbing box filled with gradient foam aluminum

WU Xiwei^{1,2}, ZHANG Jianxun¹

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China; 2. College of Mechatronic Engineering, North University of China, 030051 Taiyuan, China)

Abstract: In order to meet the requirements of lightweight structure and energy-absorbing box, and to design and study the performance of excellent energy-absorbing box structure, we adopt Abaqus finite element software to simulate the quasi-static axial compression behavior and lightweight design of gradient aluminum foam conical energy-absorbing box. First, the validity of the finite element model was verified by comparing with the literature experiment. Then, the effects of the conical bottom angle, the number of induction slots, the height and depth of induction slots, and the gradient material parameters on the energy absorption characteristics of the gradient aluminum foam conical energy-absorbing box were studied. Then, with the same mass structure of low peak load and excellent energy absorption as the optimization objectives, the gradient aluminum foam packed conical energy-absorbing box structure was optimized. The results show

收稿日期: 2023-04-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12272290; 11872291); 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目 (No. KFY2202)

通信作者: 张建勋, 副教授。E-mail: jianxunzhang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 吴熙蔚, 张建勋. 填充梯度泡沫铝锥形吸能盒轴向压缩行为与设计[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1086-1097.

WU Xiwei, ZHANG Jianxun. Quasi-static axial compressive behavior and design of conical energy-absorbing box filled with gradient foam aluminum[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1086-1097.

that these factors have a good effect on improving the energy absorption characteristics of the energy-absorbing box. The conical bottom angle of the energy absorbing box can greatly increase the specific energy absorption of the energy absorbing box structure while reducing the initial peak force, and reduce the crushing force in the collision process to a certain extent. The existence of the induction groove makes the deformation process approach to the idealized symmetric deformation. While guiding the deformation process, it also reduces the initial peak force, the height and depth of the induction groove have a greater role in reducing the peak force and increasing the specific energy absorption. The density gradient of foam aluminum and the number of divided layers have obvious effects on reducing the impact force, and have certain effects on guiding lightweight and improving specific energy absorption. Compared with the constant section energy absorbing box, the optimized structure of gradient aluminum foam cone energy absorbing box reduces the maximum peak force by 20% and increases the specific energy absorption by 3.6%. It is found that the collision force-displacement curve is milder, which is more conducive to the energy absorption of the energy-absorbing box.

Key words: conical energy-absorbing box structure; gradient foam aluminum; quasi static compression; finite element simulation; lightweight design

金属薄壁构件因其良好的能量吸收特性和质轻的特点,被应用在各种吸能防撞结构中。在轴向挤压载荷作用下,薄壁构件能按预定的模式发生塑性屈服,压溃模式可控,压溃行程较大,具有其他结构无法相比的能量吸收能力^[1-6]。

由于薄壁结构的重量减轻,使得部件变得轻量化,若将这一结构应用于吸能盒结构上,则能在减轻重量的同时也有着优异的吸能能力^[7-10]。此外,在吸能盒里填充金属多孔材料可以明显提高吸能特性^[11-15]。在轻量化的发展趋势下,合理设计有效的吸能部件尤为重要。

对于泡沫铝填充吸能盒结构的研究,任梦等^[16]使用 ABAQUS 软件对比发现正方形截面比圆形截面吸能盒更适合作为其工况下的研究对象,接着对正方形截面的吸能盒引入了厚度上的正、负梯度设计,结果表明,具有正梯度设计的吸能盒的吸能特性更好。SANTOSA 等^[17]探究了填充材料对于吸能盒碰撞性能的影响,结果表明,泡沫铝填充吸能盒的吸能和防碰撞效果优于传统吸能盒。TOKSOY 等^[18]讨论了泡沫材料的填充方式是否影响吸能盒的吸能效果,研究了吸能盒在无充填、部分充填和完全充填条件下的抗冲击性能。曹娇^[19]基于实验和数值计算,研究了密度梯度泡沫填充铝合金吸能盒结构轴向压溃行为,为密度梯度泡沫铝填充吸能盒结构的研究提供了可借鉴的经验。

对于锥形吸能盒的研究,MAMALIS 等^[20]采用理论和实验方法研究了薄壁圆锥管轴向压力作用下

的弯曲问题,率先给出了圆锥管在弯曲下的理论模型,给出了考虑长细比、半顶角以及长径比影响的平均压溃力理论解。REID 等^[21]通过理论和实验的方法研究了锥形薄壁方管作为吸能器在总变形模态稳定性方面的变形,还考虑了锥形管在斜向冲击载荷作用下的响应问题,给出了方锥管平均压溃力的理论解。张翼^[22]采用有限元方法研究了锥形多胞填充吸能盒结构,采用响应面分析的方法,以吸能盒的锥角和壁厚为目标,优化设计了锥形多胞吸能盒。刘影^[23]采用数值仿真的方法对吸能盒倾角和诱导槽半径进行多目标优化,以总吸能、比吸能和压溃力为目标,优化后的锥形吸能盒有良好的耐撞性。

对于吸能盒结构诱导槽结构的研究,孟翔耀等^[24]在理论分析的基础上,进行了圆形截面吸能盒结构在轴向载荷作用下的数值模拟,并引入诱导槽,发现具有诱导槽的吸能盒有更小的峰值力。杨昆等^[25]对正六边形吸能盒结构的耐撞性能进行了数值计算,并基于减小峰值载荷为目标,对诱导槽位置和深度进行了优化,发现诱导槽参数对吸能盒吸能特性有很大影响。徐中明等^[26]以吸能盒结构为对象,建立了整车模型,以吸能盒上诱导槽之间的间距为设计变量,对吸能盒结构的耐撞性进行了多目标优化设计,为整车的耐撞性研究有借鉴意义。

有关吸能盒影响因素的研究也很多,如截面形状^[1,7,16]、锥角^[22-23]、梯度填充材料^[5,17-18]、诱导槽结构参数^[24-26]等。本研究将以正方形截面泡沫铝填充吸能盒为研究对象,采用数值计算的方法,对不同

因素影响下其准静态轴向压缩特性进行仿真分析。以同等质量结构较低峰值力及优异能量吸收为优化目标,对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构进行优化设计,并与设计前的吸能盒结构进行对比,以期对吸能盒的设计提供参考数据。

1 吸能盒性能评价指标与设计原则

1.1 性能评价指标

基于吸能盒结构设计需求,为评价泡沫铝填充吸能盒在准静态压缩下的吸能特性,本研究采用吸能盒性能评价指标为最大峰值力 $F_{\max}$ 、总吸能 E_{abs} 和比吸能 r_{SEA} [27]。

最大峰值力 $F_{\max}$ 是吸能盒结构在压溃过程中产生的碰撞力最大值,其值越大,对于吸能盒结构造成的伤害越严重。因此,最大峰值力越低,吸能盒的缓冲特性越好。

总吸能 E_{abs} 指吸能盒在整个压溃过程中用自身压溃变形而吸收的所有能量。总吸能与压溃力和压溃位移有关,表达式为

$$E_{\text{abs}} = \int_0^{\delta_{\max}} F(s) ds \quad (1)$$

式中: $\delta_{\max}$ 为吸能盒的压溃位移; $F(s)$ 为压溃力。

比吸能 r_{SEA} 指吸能盒在压溃过程中吸收能量和总质量的比值,反映单位质量吸能盒所吸收的能量,对于轻量化设计有重要指导意义,表达式为

$$r_{\text{SEA}} = \frac{E_{\text{abs}}}{m} \quad (2)$$

式中: E_{abs} 为压溃过程中吸能盒的总吸能; m 为吸能盒的质量。

1.2 设计原则

在吸能盒的设计和材料选择过程中,需要遵循以下原则 [28]。

- 1) 在吸收能量时尽可能转化为不可逆的变形能,即动能在转换过程中尽可能转换为塑性能。
- 2) 变形模式必须尽可能稳定且可重复,以提高结构的可靠性。
- 3) 在压缩过程中,最大碰撞力越低越好。
- 4) 在压缩作用下,载荷-位移曲线越稳定、越平滑越好。
- 5) 单位质量吸收的能量越多越好。

2 有限元计算模型

2.1 有限元模型与实验结果比较

为了验证有限元模型计算的准确性,本研究将有限元计算结果与文献[29]的吸能盒静态压缩实验结果进行比较,尺寸和材料与实验保持一致,具体参数如表1~表2所示。图1给出了计算和实验的荷载-位移曲线,发现两者吻合很好,验证了本研究有限元模型计算的准确性。

表1 验证模型的部件尺寸

Tab. 1 Component size of the verified model

材料	部件尺寸
圆形铝管	外径 20.5 mm、内径 18.6 mm、高 30 mm
圆形泡沫铝	直径 18.5 mm、高 30 mm

表2 验证模型的材料属性

Tab. 2 Material properties of the verified model

材料	参数	取值
铝	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
	弹性模量/GPa	75
	泊松比	0.33
	屈服应力/MPa	230
	塑性应变	0
	线性强化模量/GPa	1
泡沫铝	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	675
	弹性模量/GPa	0.7
	弹性泊松比	0.33
	屈服压应力比	1.51
	塑性泊松比	0.12
	屈服应力/MPa	5.3, 11, 14
	等轴塑性应变	0, 0.75, 1

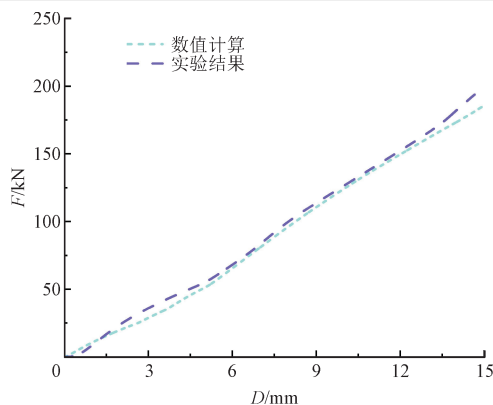


图1 计算与实验荷载-位移曲线对比图

Fig. 1 Comparison of numerical and experimental load-displacement curves

2.2 有限元计算模型

采用 ABAQUS/EXPLICIT 有限元软件,对底角(底角定义见 3.1 小节)为 85° 的正方形截面梯度泡沫铝填充吸能盒在准静态轴向压缩下的吸能特性进行数值模拟。模型由上端刚性板、填充泡沫铝和锥形铝管三部分组成。为了和实际吸能盒形状保持一致,在末端对铝管和填充泡沫进行部件拆分,对末端拆分的正方体块进行耦合固定约束,约束全部的 6 个自由度。上端刚性板约束除 z 轴方向平动自由度之外的所有自由度,且对 z 轴方向施加具有平滑载荷的加载位移。

铝管采用 4 节点壳单元减缩积分单元类型 (S4R),刚性板采用 4 结点三维双线性刚性四边形单元类型 (R3D4),填充泡沫采用 8 节点实体单元线性六面体减缩积分单元类型 (C3D8R)。相互作用则采用通用接触,在两者之间留有 0.1 mm 间隙,设置切向摩擦系数为罚系数 0.2。铝管壁厚为 3 mm。对于密度梯度泡沫铝材料,假设密度的改变只会使弹性模量和塑性屈服强度等比例变化,其余数值均保持不变。铝管遵从屈服应力为 $\sigma_f = 210$ MPa 的弹塑性模型,线性强化模量 $E_{uf} = 1$ GPa。泡沫铝的弹性模量为 1 GPa,屈服应力和平台应力为 $\sigma_c = 8$ MPa,密实化应变为 $\varepsilon_d = 0.75$,密实后线性强化模量为 $E_{tc} = 56$ GPa,如图 2 所示。部件尺寸和材料属性如表 3 ~ 表 4 所示。

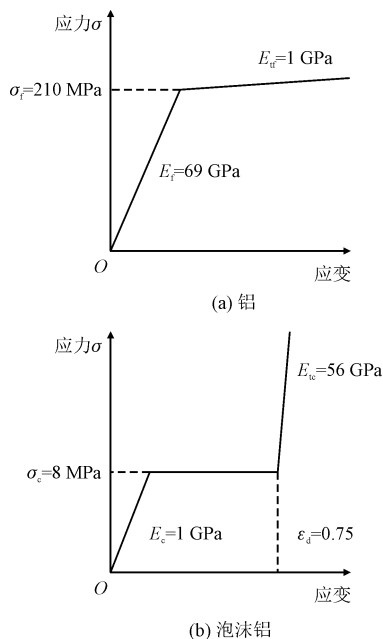


图 2 材料应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of materials

表 3 计算模型的部件尺寸

Tab.3 Component size of the calculation model

材料	部件尺寸
铝	上端边长 70 mm、下端边长 48.35 mm、高 175 mm
泡沫铝	上端边长 69.8 mm、下端边长 48.15 mm、高 175 mm

表 4 计算模型的材料属性

Tab.4 Material properties of the calculation model

材料	参数	取值
铝	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
	弹性模量/GPa	69
	泊松比	0.3
	屈服应力/MPa	210
	线性强化模量/GPa	1
泡沫铝	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	270
	弹性模量/GPa	1
	泊松比	0.3
	屈服压应力比	1.732
	塑性泊松比	0
	屈服应力/MPa	8
	线性切线模量/GPa	56

2.3 网格收敛性验证

网格尺寸对模型计算精度和成本有重要影响,合理选择尺寸既能保证精度又能节约计算资源。选取 2.2 节的模型进行网格收敛性验证,如图 3 所示。

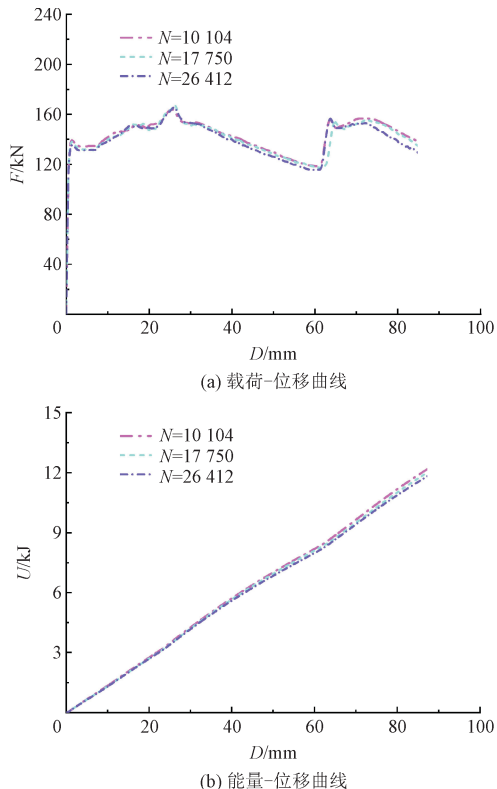


图 3 不同网格数量下吸能盒轴向压缩性能曲线图
Fig.3 The axial compressive performance of the box with different mesh number

由图3可知,当网格总数量为17 750时曲线与网格数量为26 412时相差不大,故为了保证计算精度并节约计算时间,将使用网格数量为17 750的模型进行之后的有限元模拟。

2.4 准静态合理性验证

对于准静态问题,需要保证在模拟过程中,动能ALLKE不能大于内能ALLIE的1%,同时也需要控制沙漏能大小,使伪应变能ALLAE不能超过内能ALLIE的5%。满足这些条件,认为计算过程近似为准静态过程,且过程的模拟是合理的。同样,选取2.2节的模型进行准静态合理性验证,如图4所示。

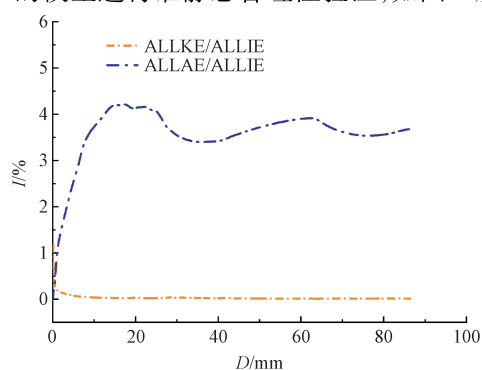


图4 吸能盒各能量比值关系图

Fig.4 Relationship diagram of energy ratio of energy-absorbing box

吸能盒压缩时的系统能量构成合理,满足准静态分析要求,沙漏能控制在很小的正值范围内,始终不超过系统内能的5%。动能与内能的比值控制在1%以内,且随着压缩过程的进行,基本维持在0%附近。

3 吸能盒参数对吸能特性的影响

本节分别对不同锥角、诱导槽参数及梯度材料的吸能盒结构进行准静态轴向压缩特性的数值模拟,分析各种参数对吸能盒缓冲能力和吸能性能的影响。

3.1 锥形底角

吸能盒的底角定义为底面对角线与顶面对角线所成的侧线之间的夹角^[30],如图5所示。

假定面积较大的截面端远离上压板为正向布置方式,相反为反向布置,2种布置方式如图6所示。为区分方便,把正向布置80°命名为F-80,反向布置80°命名为R-80。

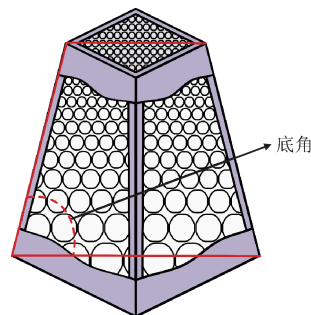


图5 底角示意图

Fig.5 Schematic diagram of bottom angle

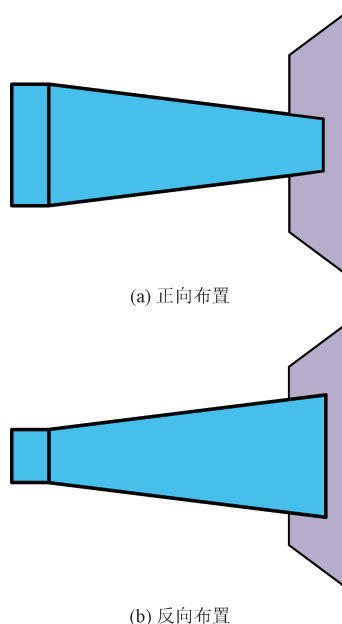


图6 吸能盒布置方式定义示意图

Fig.6 Schematic diagram of energy-absorbing box arrangement

图7给出了吸能盒在不同布置方式下各底角的载荷-位移曲线和能量-位移曲线。表5给出了吸能盒结构的最大峰值力、总吸能和质量以及比吸能。

表5 不同布置方式各底角的吸能盒吸能评价指标

Tab.5 The evaluation indexes of the energy-absorbing boxes with different bottom angles

吸能盒编号	$F_{\max}/\text{kN}$	E_{abs}/J	m/g	$r_{\text{SEA}}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
F/R-90	186.032	14 200	627.38	22.64
F-87.5	203.296	13 300	562.38	23.65
R-87.5	167.532	13 148	562.38	23.37
F-85	181.342	12 179	502.38	24.24
R-85	159.412	12 050	502.38	23.99
F-82.5	171.753	11 385	445.38	25.56
R-82.5	149.044	11 054	445.38	24.82
F-80	163.061	10 467	392.38	26.68
R-80	149.088	10 522	392.38	26.82

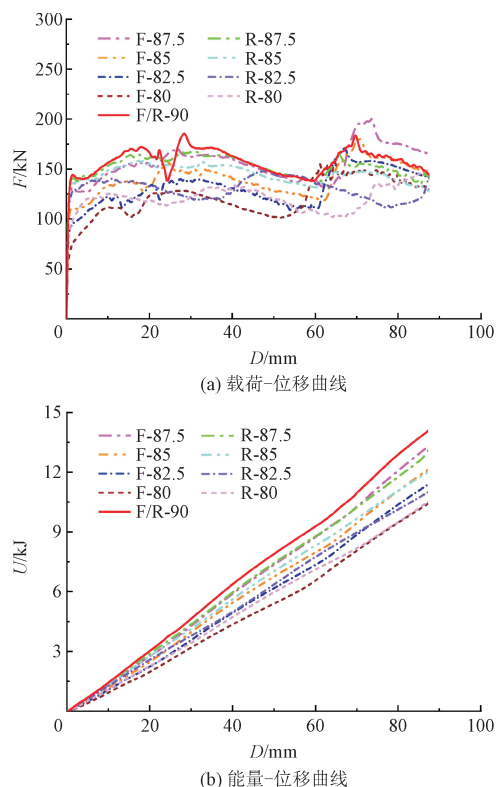


图7 不同布置方式各底角的吸能盒
准静态轴向压缩曲线

Fig. 7 Quasi-static axial compressive curves of
energy-absorbing boxes at each bottom
angle in different arrangement

由表5可知,随着锥形底角的减小,吸能盒的最大峰值力在不断降低且比吸能不断提高。此外,同一底角的吸能盒正、反向布置对于总吸能和比吸能的变化影响不大,两者基本维持在同一水平,但反向布置对于峰值力的减小效果明显强于正向布置,且曲线更加平稳光滑,吸能特性明显强于正向布置。

通过对比,发现反向布置底角为 80° 的吸能盒构件相对于底角为 90° 的直吸能盒最大峰值力降低了37 kN,减少了20%;比吸能增加了4.18,提高了18.5%,因此将采用反向布置底角为 80° 的吸能盒构件进行下一步研究。

3.2 诱导槽结构参数

诱导槽的布置会略微减少吸能盒的能量吸收,但可以大幅减小初始峰值力,并使得载荷-位移曲线平稳增加,达到平稳吸收碰撞能量的目的。接下来将探究诱导槽数目、高度和深度尺寸对吸能盒吸能特性的影响。

3.2.1 诱导槽数目

本小节研究4、3、2、1个诱导槽情况下,诱导槽数量对吸能盒吸能特性的影响。分别在吸能盒距离顶部35、70、105、140 mm处创建基准平面,并依次从上到下,设置深度 $d=4$ mm(深度的定义以槽上端深入距离为准),高度 $h=5$ mm的诱导槽,如图8所示。

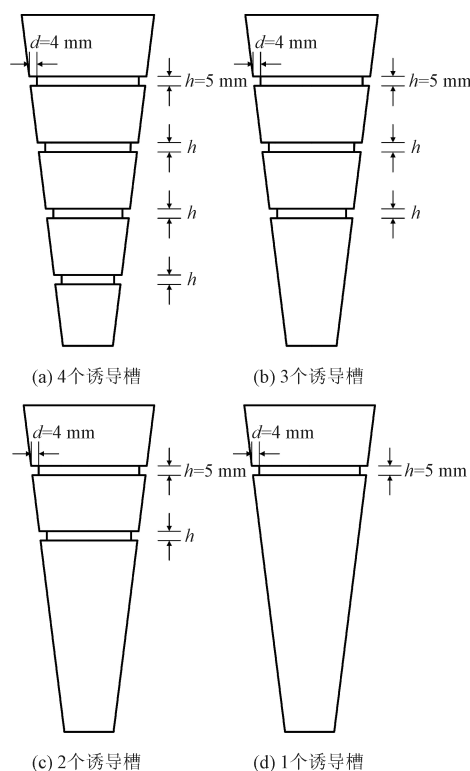


图8 不同诱导槽数量吸能盒示意图

Fig. 8 The schematic diagram of energy-absorbing boxes
with different number of induction grooves

图9给出了4种吸能盒结构的最终变形模式。由于诱导槽的设置,使得变形能够在特定部位产生褶皱,诱导槽的存在可以让吸能盒的变形过程看起来更加趋近于理想化的变形模式,具有4个诱导槽的吸能盒构件更适宜于作为理想的吸能盒构件进行使用。

图10给出了吸能盒在不同诱导槽数量下的载荷-位移和能量-位移曲线。表6给出了评价指标的具体数值。随着诱导槽数量增加,会稍微降低吸能盒总吸能量,但对于初始峰值力的降低效果和引导吸能盒结构变形是十分明显的,使得压溃力-位移曲线更加平稳的上升,非常有利于保护设备的安全。

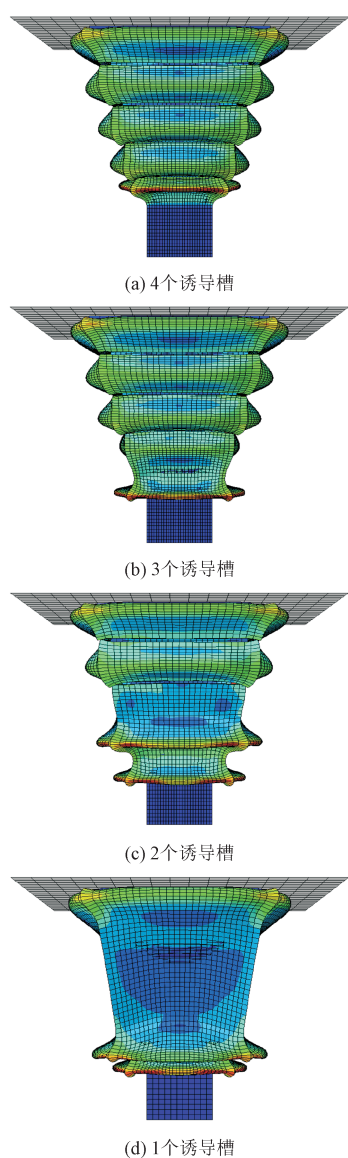


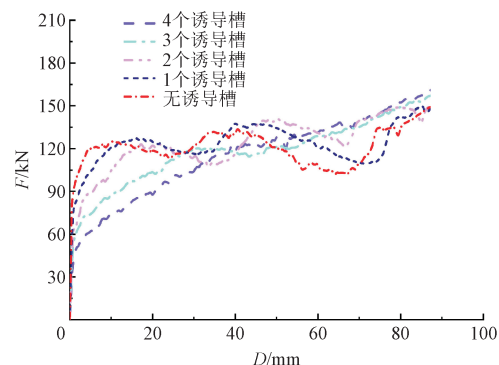
图9 不同诱导槽数量的吸能盒变形模式图

Fig. 9 The deformation patterns of the energy-absorbing boxes with different number of induction grooves

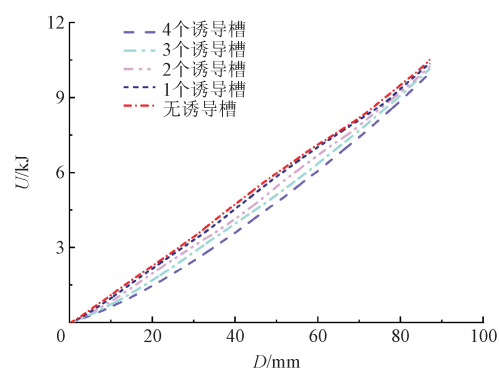
表6 不同诱导槽数量的吸能盒吸能评价指标

Tab. 6 The evaluation indexes of energy-absorbing boxes with different number of induction grooves

诱导槽数量/ 个	$F_{\max}/$ kN	$E_{\text{abs}}/$ J	m/g	$r_{\text{SEA}}/$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
4	161.45	10 178	424.98	23.95
3	157.83	10 224	419.98	24.40
2	150.53	10 304	412.98	24.95
1	150.52	10 406	402.98	25.83
0	149.09	10 522	392.38	26.82



(a) 载荷-位移曲线



(b) 能量-位移曲线

图10 不同诱导槽数量的吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 10 Quasi-static axial compressive characteristic curves of the energy-absorbing boxes with different number of induction grooves

3.2.2 诱导槽高度

本节在不改变深度 $d = 4 \text{ mm}$ 的条件下,选取高度 h 分别为 4、5、6 mm 的吸能盒进行吸能特性分析研究。

图 11 给出了吸能盒在不同诱导槽高度下的载荷-位移和能量-位移曲线。表 7 给出了评价指标的具体数值。发现三者压溃屈服开始阶段的压溃力是大致相同的,再通过能量-位移曲线以及表 7 中的总吸能和比吸能可以看出,诱导槽高度从 $h = 4 \text{ mm}$ 到 $h = 5 \text{ mm}$ 再到 $h = 6 \text{ mm}$ 的过程中,总吸能呈现出先增大后减小的趋势。

表7 不同诱导槽高度的吸能盒吸能评价指标

Tab. 7 The evaluation indexes of energy-absorbing boxes with different height of induction grooves

诱导槽高度/ mm	$F_{\max}/$ kN	$E_{\text{abs}}/$ J	m/g	$r_{\text{SEA}}/$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
4	142.34	8 941	424.98	21.04
5	161.45	10 178	424.98	23.95
6	139.65	8 557	423.98	20.19

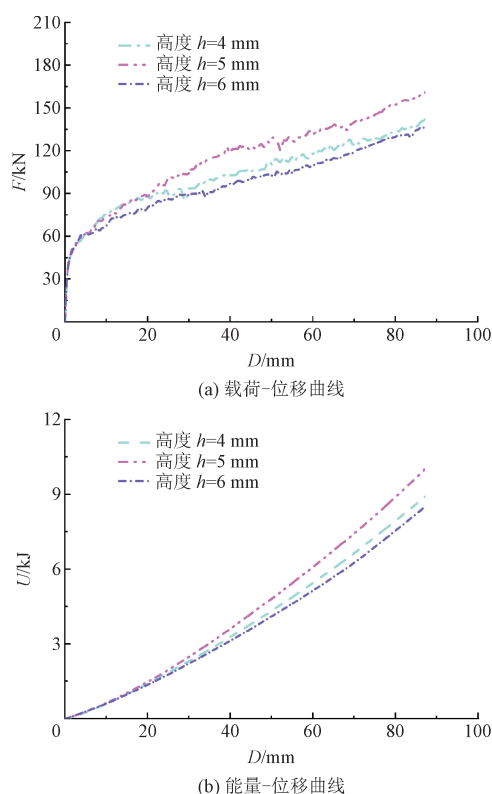


图 11 不同诱导槽高度的吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 11 Quasi-static axial compressive characteristic curves of the boxes with different height of the induction grooves

由表 7 可知, $h = 5 \text{ mm}$ 相比于 $h = 4 \text{ mm}$ 的吸能盒比吸能提高了 13.8%, 最大峰值力增加了 13.4%; $h = 5 \text{ mm}$ 相比于 $h = 6 \text{ mm}$ 的吸能盒比吸能提高了 18.6%, 最大峰值力增加了 15.6%。考虑到吸能盒结构的吸能量不能太小, 且比吸能对轻量化设计的意义, 因此综合各方面因素, 最终采用诱导槽高度为 5 mm 的吸能盒构件进行下一步研究。

3.2.3 诱导槽深度

本节在不改变高度 $h = 5 \text{ mm}$ 的条件下, 选取深度 d 分别为 3、4、5 mm 的结构进行吸能特性分析研究。

图 12 给出了吸能盒在不同诱导槽深度下的载荷-位移和能量-位移曲线。表 8 给出了评价指标的具体数值。在诱导槽深度从 3 mm 一直增大到 5 mm 的过程中, 初始峰值力不断降低, 使得碰撞力的曲线更加平稳的增加。最终的最大峰值力差异不大, 并且深度的改变不会影响到总吸能量。因此, 将选用深度 $d = 5 \text{ mm}$ 的吸能盒构件进行下一步研究。

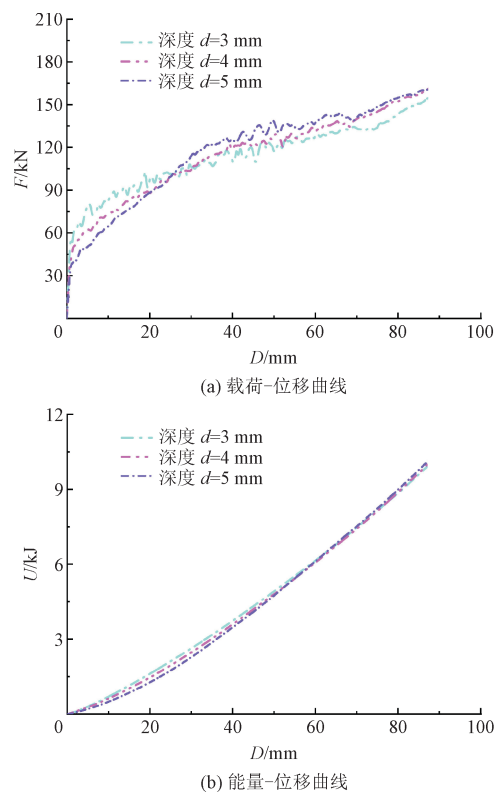


图 12 不同诱导槽深度的吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 12 Quasi-static axial compressive characteristic curves of the boxes with different depth of induction grooves

表 8 不同诱导槽深度的吸能盒吸能评价指标

Tab. 8 The evaluation indexes of energy-absorbing boxes with different depth of induction grooves

诱导槽深度/mm	$F_{\max}/\text{kN}$	E_{abs}/J	m/g	$r_{\text{SEA}}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
3	155.67	10 053	416.98	24.11
4	161.45	10 178	424.98	23.95
5	162.01	10 210	433.98	23.53

3.3 泡沫铝梯度

梯度材料的性能会随梯度方向的变化而变化, 这使得梯度材料具有许多优异的力学性能, 接下来将探究泡沫铝梯度材料对吸能盒结构静态压缩吸能特性的影响。

3.3.1 泡沫铝密度梯度

把从上端到下端泡沫铝密度逐渐增大定义为正密度梯度, 反之, 定义为负密度梯度, 且填充泡沫铝的密度 ρ 分为 180、225、270、315、360 kg/m^3 , 共 5 层, 如图 13 所示。设泡沫铝密度的改变只会使弹性模量和塑性屈服强度等比例变化。

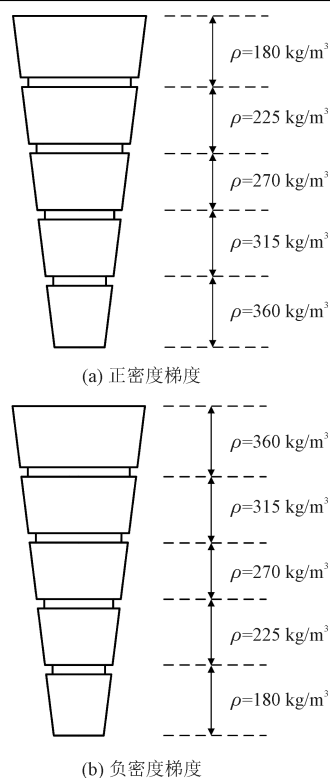


图13 填充正负密度梯度泡沫铝吸能盒模型示意图

Fig. 13 The schematic diagram of foam-filled energy-absorbing boxes with positive and negative density gradients

图14给出了吸能盒在不同泡沫铝密度梯度下的载荷-位移和能量-位移曲线。表9给出了评价指标的具体数值。可以看到,填充泡沫铝梯度不会改变初始峰值力的大小,3种情况在压溃初始阶段所产生的初始峰值力是相差不大的;正密度梯度明显降低了最大峰值力,负密度梯度则提高了最大峰值力;泡沫铝密度梯度对于吸能特性的影响是很小的。

表9 不同密度梯度泡沫铝填充吸能盒吸能评价指标

Tab. 9 The evaluation indexes of energy absorption of aluminum foam-filled energy-absorbing boxes with different density gradients

密度梯度	$F_{\max}/\text{kN}$	E_{abs}/J	m/g	$r_{\text{SEA}}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
负密度梯度	176.90	10 490	446.98	23.47
正密度梯度	153.87	9 850	419.98	23.45
无密度梯度	162.01	10 210	433.98	23.53

通过对比,发现正密度梯度比无密度梯度吸能盒的最大峰值力降低了5%,比吸能只降低了0.34%;负密度梯度比无密度梯度的最大峰值力提高了9.2%,比吸能降低了0.25%。因此,选取正密度梯度的吸能盒构件进行下一步研究。

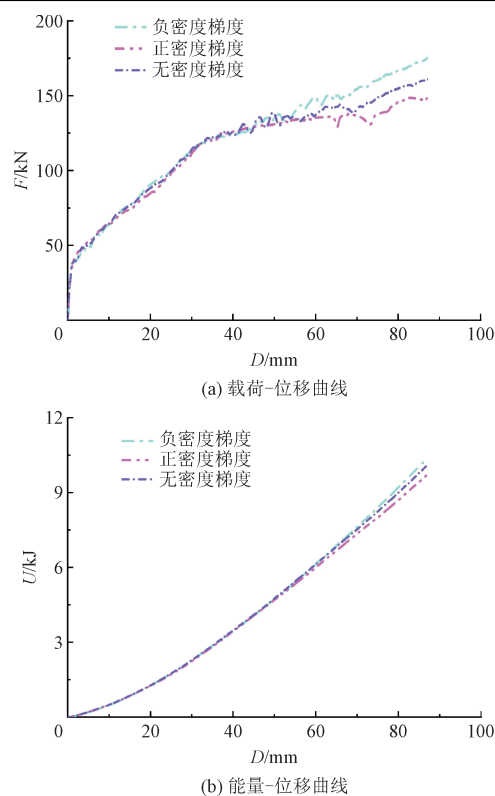


图14 不同泡沫铝密度梯度的吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 14 Quasi-static axial compressive characteristic curves of energy-absorbing boxes with different density gradients of aluminum foam

3.3.2 泡沫铝密度梯度划分层数

在本节中,考虑将密度变化划分成更多的份数,最上层的密度依然是 180 kg/m^3 ,最下层的密度依然是 360 kg/m^3 ,然后再分别将使用正密度梯度的填充泡沫铝部件均匀地划分为10层和17层,来探究填充材料密度梯度划分层数对吸能盒吸能特性的影响。

图15给出了吸能盒在不同泡沫铝密度梯度划分层数下的载荷-位移和能量-位移曲线。表10给出了评价指标的具体数值。

表10 不同泡沫铝密度梯度划分层数的吸能盒吸能评价指标

Tab. 10 The evaluation indexes of energy-absorbing boxes with different layer division of density gradients of aluminum foams

密度划分层数	$F_{\max}/\text{kN}$	E_{abs}/J	m/g	$r_{\text{SEA}}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
5层	153.87	9 850	419.98	23.45
10层	149.65	9 862	420.48	23.45
17层	147.87	9 873	420.98	23.45

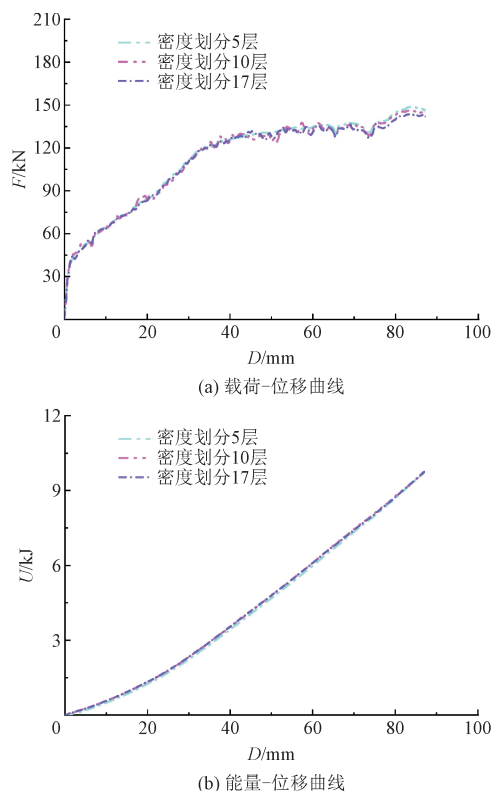


图 15 不同泡沫铝密度梯度划分层数的吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 15 Quasi-static axial compressive characteristic curves of the energy-absorbing boxes with different density gradients of aluminum foams

由表 10 可知,密度梯度的划分层数对于载荷-位移和能量-位移曲线的影响是很小的,可以降低吸能盒在压溃过程中的最大峰值力;且密度梯度划分的层数基本不会影响吸能盒的总吸能和比吸能。综合考虑,选取密度划分 17 层的正密度梯度作为最终的改进模型。

3.4 优化前后对比

本小节对比最终优化后的吸能盒结构与无倾角、无诱导槽、无密度梯度的正方形截面泡沫铝填充吸能盒。图 16 给出了吸能盒结构优化前后的载荷-位移和能量-位移曲线对比。表 11 给出了优化前后吸能盒结构最大峰值力、总吸能和质量以及比吸能。可以看到,优化后的吸能盒结构载荷-位移曲线更为平缓,且初始峰值力和最大峰值力都大为降低,更适合作为吸能结构;同样,吸能盒的总吸能在优化后比优化前有一定的降低,但比吸能得到明显的提高。

通过对比发现,最终优化后的吸能盒结构最大峰值力为 147.87 kN,优化前的吸能盒最大峰值力为

184.87 kN,降低 20%。优化后的结构比吸能为 23.45 J/g,优化前的结构比吸能为 22.64 J/g,提高 3.6%,并且碰撞力曲线更为平缓,更利于作为吸能盒结构使用。

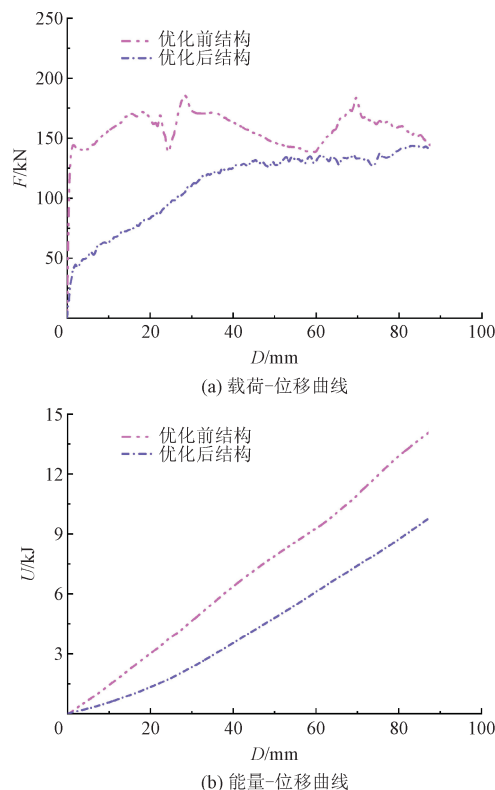


图 16 优化前后吸能盒准静态轴向压缩特性曲线

Fig. 16 Quasi-static axial compressive characteristic curves of energy-absorbing boxes before and after optimization

表 11 优化前后吸能盒吸能评价指标

Tab. 11 The energy-absorbing evaluation indexes of energy-absorbing boxes before and after optimization

吸能盒模型	$F_{\max}/\text{kN}$	E_{abs}/J	m/g	$r_{\text{SEA}}/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
优化前	184.87	14 200	627.38	22.64
优化后	147.87	9 873	420.98	23.45

4 结 论

本研究采用 ABAQUS 有限元分析软件模拟了填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构的准静态轴向压缩特性,对一些参数进行了研究分析,为吸能盒的模型设计提供了可借鉴的依据。以同等质量结构较低峰值载荷及优异能量吸收为优化目标,对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构进行了优化设计。结果表明所考虑的因素对提高吸能盒吸能特性有较好的效果。

主要结论如下。

1) 正方形截面吸能盒锥形底角、诱导槽数目、诱导槽的高度和深度以及梯度材料参数等因素对填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构轴向压缩下吸能特性影响较大。

2) 吸能盒锥形底角可以在降低初始峰值力的同时大大提高吸能盒结构的比吸能,并且在一定程度上降低碰撞过程中的压溃力大小。

3) 诱导槽的存在使得变形过程更加趋近理想化对称叠缩式变形,引导变形过程的同时,也降低了初始峰值力的大小,同时诱导槽的高度和深度对于降低峰值力和提升比吸能都有较大的作用。

4) 泡沫铝密度梯度及划分层数对于降低碰撞力的大小有着较为明显的作用,同时对于指导轻量化和提升比吸能有着一定的作用。

5) 与等截面吸能盒相比,优化后的填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构最大峰值力降低 20%、比吸能提高 3.6%。研究发现通过设计的填充梯度泡沫铝锥形吸能盒结构的吸能性能优于等截面吸能盒,其碰撞力-位移曲线更加平缓,更有利于吸能盒能量吸收。

参考文献:

- [1] 胡俊,王飞虎. 多种截面形状薄壁管轴向冲击吸能特性对比研究及优化设计[J]. 计算力学学报,2016,33(1):9-14.
HU Jun, WANG Feihu. Comparative analysis and optimization design of energy absorption characteristic of thin-walled tubes with various section geometries under axial impact[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2016, 33(1): 9-14 (in Chinese).
- [2] HUSSAIN N N, REGALLA S P, RAO Y V D, et al. An experimental and numerical analysis on influence of triggering for composite automotive crash boxes under compressive impact loads[J]. International journal of crashworthiness, 2022, 27(4): 1152-1166.
- [3] SONG K, YANG B C. Collision simulation and analysis of energy-absorbing box for vehicle[J]. Applied mechanics and materials, 2015, 721: 842-845.
- [4] LEE Y D, NAM K W, PARK S H, et al. Feasibility of using Al6060S-T6 for fabricating automobile crash boxes[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-a, 2021, 45(3): 267-274.
- [5] CAO J, KHAJEPOUR A, GAN N F, et al. Crash worthiness of functionally graded density aluminum foam-filled tapered thin-walled structures[J]. Journal of automotive safety and energy, 2016, 7(1): 35-48.
- [6] 简晓春,王笑. 正面和偏置碰撞的耐撞性仿真与车身结构改进[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(3): 212-216.
JIAN Xiaochun, WANG Xiao. Simulation of crash worthiness during front impact and offset impact and vehicle body structure improvement[J]. Journal of automotive safety and energy, 2011, 2(3): 212-216 (in Chinese).
- [7] 万鑫铭,徐小飞,徐中明,等. 汽车用铝合金吸能盒结构优化设计[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(1): 15-21.
WAN Xinming, XU Xiaofei, XU Zhongming, et al. Structure optimization design of aluminum alloy energy-absorbing box for automobiles[J]. Chinese journal of automotive engineering, 2013, 3(1): 15-21 (in Chinese).
- [8] ARNOLD B, ALTENHOF W. Experimental observations on the crush characteristics of AA6061 T4 and T6 structural square tubes with and without circular discontinuities[J]. International journal of crash worthiness, 2004, 9(1): 73-87.
- [9] MA F W, LIANG H Y, PU Y F, et al. Multi-objective optimization of crash box filled with three-dimensional cellular structure under multi-angle impact loading[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part d: journal of automobile engineering, 2021, 235(9): 2397-2412.
- [10] MOGHADDAM A M, KHERADPISHEH A, ASGARI M. A basic design for automotive crash boxes using an efficient corrugated conical tube[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part d: journal of automobile engineering, 2021, 235(7): 1835-1848.
- [11] 徐鹏,高猛. 高 g 值冲击下泡沫铝填充壳结构抗冲击性能多目标优化[J]. 应用力学学报, 2016, 33(5): 845-851.
XU Peng, GAO Meng. Multiobjective crashworthiness optimization for foam-filled thin-walled structures subjected to high g value impact[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2016, 33(5): 845-851 (in Chinese).
- [12] 陈镇山,秦庆华,赵桂平. 自相似多孔材料的力学性能与吸能特性[J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1846-1852.
CHEN Zhenshan, QIN Qinghua, ZHAO Guiping. Mechanical properties and energy absorption of self-similar porous materials[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(5): 1846-1852 (in Chinese).
- [13] LI Z K, YU Q, ZHAO X, et al. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body[J]. Advances in mechanical engineering, 2017, 9(8): 168781401770280.
- [14] 秦庆华,艾伟龙,张建勋. 孔结构金属复合夹芯板抗爆炸冲击响应及吸能特性研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(4): 491-497.
QIN Qinghua, AI Weilong, ZHANG Jianxun. Study on blast resist-

- ance and energy absorption of perforated metal sandwich plates[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2019, 36(4): 491-497 (in Chinese).
- [15] 汪高飞, 张永亮, 郑志军, 等. 泡沫铝填充吸能盒的轴向压缩性能实验研究[J]. 实验力学, 2021, 36(5): 581-591.
- WANG Gaofei, ZHANG Yongliang, ZHENG Zhijun, et al. Experimental investigations on the quasi-static axial crushing of aluminum foam-filled crash box [J]. Journal of experimental mechanics, 2021, 36(5): 581-591 (in Chinese).
- [16] 任梦, 董万鹏, 李佳意, 等. 基于 ABAQUS 对汽车低速吸能盒的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(12): 135-138.
- REN Meng, DONG Wanpeng, LI Jiayi, et al. Study on low-speed energy absorption box of automobile based on ABAQUS[J]. Agricultural equipment & vehicle engineering, 2021, 59(12): 135-138 (in Chinese).
- [17] SANTOSA S, WIERZBICKI T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam[J]. Computers & structures, 1998, 68(4): 343-367.
- [18] TOKSOY A K, GÜDEN M. Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes; the effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption[J]. Thin-walled structures, 2010, 48(7): 482-494.
- [19] 曹娇. 功能密度梯度泡沫铝及其填充结构的吸能性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [20] MAMALIS A G, MANOLAKOS D E, SAIGAL S, et al. Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers[J]. International journal of mechanical sciences, 1986, 28(4): 219-229.
- [21] REID S R, REDDY T Y. Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section [J]. International journal of mechanical sciences, 1986, 28(9): 623-637.
- [22] 张翼. 低速碰撞下汽车吸能盒结构优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [23] 刘影. 泡沫铝填充吸能盒在汽车碰撞过程中的吸能特性研究[D]. 阜阳: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [24] 孟翔耀, 董万鹏, 杨冬野. 基于 ABAQUS 的汽车吸能盒碰撞研究[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(5): 191-194.
- MENG Xiangyao, DONG Wanpeng, YANG Dongye. Collision research of automobile energy absorption box based on ABAQUS[J]. Intelligent computer and applications, 2020, 10(5): 191-194 (in Chinese).
- [25] 杨昆, 王江波, 邹健, 等. 汽车吸能盒结构参数的优化及其耐撞性能分析[J]. 制造业自动化, 2022, 44(2): 110-113.
- YANG Kun, WANG Jiangbo, ZOU Jian, et al. Structure optimization design and crashworthiness analysis of automobile energy absorbing box[J]. Manufacturing automation, 2022, 44(2): 110-113 (in Chinese).
- [26] 徐中明, 王青青, 范维春, 等. 汽车前纵梁吸能盒结构耐撞性多目标优化[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 212-217.
- XU Zhongming, WANG Qingqing, FAN Weichun, et al. Multi-objective optimization of crashworthiness of energy-absorbing box for vehicle front longitudinal beam[J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(3): 212-217 (in Chinese).
- [27] 都雪静, 陈占丽, 周华晨, 等. 纯电动 SUV 的 RCAR 低速碰撞吸能盒耐撞性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(12): 117-123.
- DU Xuejing, CHEN Zhanli, ZHOU Huachen, et al. Crashworthiness of RCAR low-speed collision energy absorbing box for pure electric SUV[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2020, 39(12): 117-123 (in Chinese).
- [28] 都雪静, 韦丽苹. 吸能盒盒体内部结构的改进[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(12): 7-12.
- DU Xuejing, WEI Liping. Internal structure improvement of box body of can suck box[J]. Journal of Chongqing University of Technology (natural science), 2015, 29(12): 7-12 (in Chinese).
- [29] 张益. 基于有限元方法对泡沫铝及其填充结构能量吸收性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [30] 张挺. 薄壁锥形构件缓冲吸能特性的研究及多目标优化[D]. 太原: 中北大学, 2020.

(编辑 李坤璐)