

文章编号: 1006-2467(2019)01-0077-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.01.011

不同冲击工况下蜂窝填充薄壁结构的耐撞性能

张 勇, 闫晓刚, 曾 意, 赖雄鸣

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 提出了一种方形蜂窝填充薄壁复合结构, 并采用实验研究与数值分析的方法研究了 12 种冲击工况下蜂窝填充薄壁结构与相应的非填充(薄壁空管)结构的耐撞性能. 同时, 结合 Kriging 近似技术与小种群遗传算法对蜂窝填充薄壁结构开展数值优化设计. 结果表明, 在各种冲击工况下, 蜂窝填充薄壁结构吸收的能量都高于薄壁空管结构, 且冲击的角度和速度对蜂窝填充薄壁结构吸能性能影响显著. 在相同的冲击速度下, 蜂窝填充薄壁结构吸收的能量随着冲击角度的增大而降低; 在相同的冲击角度下, 蜂窝填充薄壁结构吸收的能量随着冲击速度的增大而提高. 对 Kriging 近似技术与小种群遗传算法优化所得蜂窝填充薄壁结构进行最优参数匹配, 能够改善蜂窝填充薄壁结构的吸能性能.

关键词: 蜂窝填充结构; 冲击工况; 耐撞性能; 近似技术

中图分类号: U 271.1

文献标志码: A

Crashworthiness Research of Honeycomb-Filled Thin-Walled Structure Under Multi-Impacting Cases

ZHANG Yong, YAN Xiaogang, ZENG Yi, LAI Xiongming

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: A square honeycomb-filled thin-wall composite structure is proposed, and the crashworthiness of honeycomb filled structure and corresponding unfilled (thin-walled empty tube) structures under 12 kinds of impact conditions are systematically studied by experimental research and numerical analysis. At the same time, numerical optimization design of honeycomb filled structure is carried out by combining Kriging approximation technique and small population genetic algorithm. The results show that under various impact conditions, the energy absorption of the honeycomb filled structure is higher than that of the thin-walled empty tube structure, and the impact angle and velocity have significant effects on the energy absorption performance of the honeycomb filled structure. At the same impact velocity, the energy absorption of the honeycomb filled structure decreases as the impact angle increases. At the same impact angle, the energy absorption of the filled structure increases as the impact velocity increases. The Kriging approximation technique and the small population genetic algorithm optimize the optimal parameter matching of the honeycomb filled structure obtained by optimizing the honeycomb filled structure, which can improve the energy absorption of the honeycomb filled structure.

Key words: honeycomb-filled structure; impact conditions; crashworthiness; approximate technology

收稿日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51675190), 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介: 张 勇(1980-), 男, 重庆市人, 教授, 目前主要从事汽车碰撞安全性研究.

电话(Tel.): 0592-6162598; E-mail: zhangyong@hqu.edu.cn.

薄壁结构以其质量轻、吸能高等优点而被广泛用于汽车、高速列车、飞行器的吸能构件中。虽然薄壁空管能够吸收冲击产生的能量,但仍存在变形不稳定及易产生欧拉屈服的缺陷,从而导致其吸能性能降低^[1-3]。

近年来,新型多孔吸能材料——金属蜂窝引起了研究人员的广泛关注。早期的研究主要集中于蜂窝材料的面内和面外特性。El-Sayed 等^[4]对蜂窝面内方向的吸能性能进行了研究,并提出了耐撞性响应的预测公式;张新春等^[5]研究了胞元对六边形蜂窝面内的冲击变形和吸能特性的影响,以及胞元的微结构和密度呈梯度变化的蜂窝面内的冲击性能^[6-7];刘颖等^[8]研究了圆形蜂窝面内的冲击力与吸能特性;Tao 等^[9]通过实验和数值分析的方法研究了应变率对蜂窝材料面外冲击性能的影响;Xu 等^[10]和 Khan 等^[11]通过实验研究了六边形蜂窝的结构尺寸及相对密度对其面外冲击性能的影响,发现蜂窝结构在面外方向的吸能性能优于其在面内方向的,并可用于薄壁结构的填充材料;Santosa 等^[12]研究了铝蜂窝填充管的轴向压缩耐撞性能,发现蜂窝填充薄壁结构的耐撞性能优于传统的薄壁空管;Guden^[13]和 Zarei 等^[14]发现,将铝蜂窝填充到薄壁空管后,不仅能够提高薄壁结构的耐撞性能,而且能够使其变形模式更加稳定;闫晓刚等^[15]发现,环形蜂窝填充薄壁结构的耐撞性能优于中心填充薄壁结构;笔者的前期研究表明^[16],交错排布的三角形蜂窝填充薄壁结构具有更优异的动力学性能。

然而,以上研究主要针对蜂窝填充薄壁结构的轴向且在低速冲击工况的耐撞性能,但实际交通事故皆是不同的冲击角度和冲击速度并存的复杂冲击工况。因此,本文提出了一种方形蜂窝填充薄壁结构,并在不同的冲击角度和冲击速度下研究其动态耐撞性,获得了不同冲击工况下蜂窝填充薄壁结构的最优设计参数。

1 蜂窝填充薄壁结构及数值模型

1.1 蜂窝填充薄壁结构

图 1(a)所示为不同的冲击角条件下蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管结构的冲击过程示意图。其中, α 为冲击角,表示冲击块平面法向与薄壁管顶端平面法向之间的夹角,蜂窝填充薄壁结构的底部固定在支撑板上。图 1(b)为蜂窝填充薄壁结构的横截面及蜂窝芯的放大图,图 1(c)为相应的薄壁空管的横截面。其中:蜂窝填充薄壁结构的长度 $L=250$ mm,外管的横截面尺寸为 60 mm \times 60 mm,薄壁外管的

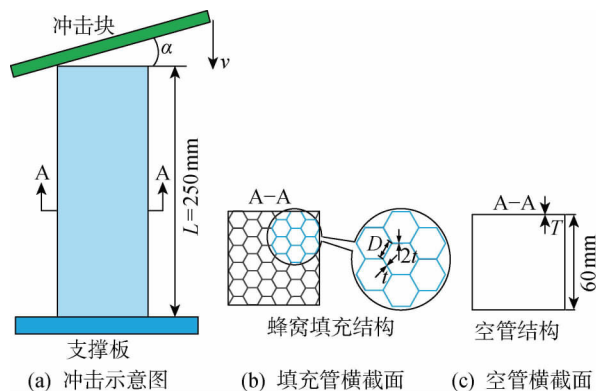


图 1 蜂窝填充薄壁结构的几何模型

Fig. 1 Geometric model of honeycomb-filled thin-walled structures

壁厚 $T=0.8$ mm,蜂窝胞元的厚度 $t=0.05$ mm,胞元边长为 $D=3$ mm。

1.2 蜂窝填充薄壁结构的数值模型

根据图 1 的几何模型,利用 LS-DYNA 软件所建薄壁空管及蜂窝填充薄壁结构的有限元数值模型如图 2 所示。模型采用 2 mm \times 2 mm 的 Belytschko-Tsay 四节点壳单元进行离散,冲击块与薄壁管之间的接触定义为自动点-面接触,薄壁管自身的变形采用自动单面接触,薄壁管与蜂窝芯之间采用自动面-面接触,接触中的静摩擦系数与动摩擦系数分别设为 0.3 和 0.2 。薄壁空管及蜂窝填充芯的材料均为铝合金 AA6060,其密度为 2.7 g/cm³,弹性模量为 68.2 GPa,泊松比为 0.3 ,其应力(σ)-应变(ϵ)曲线如图 3 所示,且忽略应变率对铝合金材料动态冲击性能的影响^[17]。

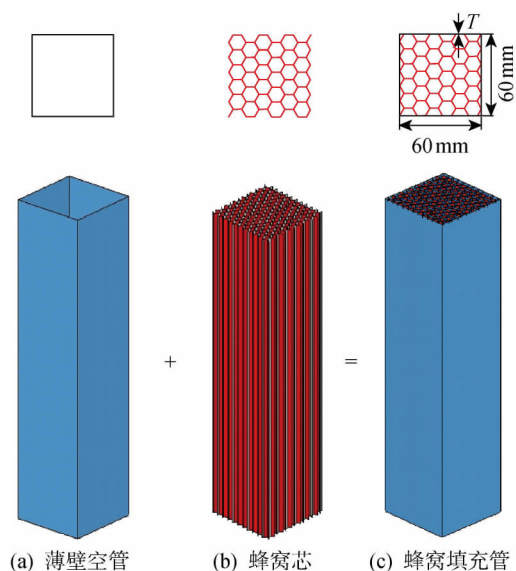


图 2 蜂窝填充薄壁结构的数值模型

Fig. 2 Numerical model of honeycomb-filled thin-walled structures

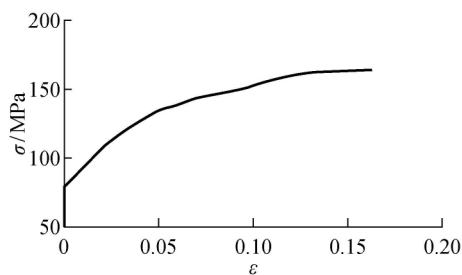


图 3 铝合金 AA6060 的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of AA6060 alloy

1.3 耐撞性能评价指标

在动态冲击过程中,以比吸能(SEA)和瞬时碰撞冲击力峰值(F_{\max})作为耐撞性能评价指标.其中,SEA 为单位质量所吸收的能量,即

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (1)$$

$$E_a = \int_0^d F(x) dx \quad (2)$$

式中: m 为薄壁构件的总质量; E_a 为吸收的总能量; d 为碰撞吸能过程中的有效压缩位移,文中取管长的 70%; x 为压缩距离; $F(x)$ 为瞬时碰撞冲击力.

SEA 值越大,表示结构的能量吸收能力越强,较高的 F_{\max} 值将会引起较大的减速度,从而导致严重的乘员伤害.因此,冲击过程中需确保 F_{\max} 在人体可承受的范围^[18].

1.4 有限元模型验证

为了确保数值分析中有限元模型的准确性,本文对蜂窝填充薄壁结构的有限元模型进行了实验对比研究.图 4 所示为蜂窝填充管的实验与模拟的结果对比.图 4(a) 为蜂窝填充薄壁结构的实验样品.实验过程:首先,采用锯切割铝外管,并对其端面进行磨平处理;将蜂窝填充芯用线切割的方法切割成合适尺寸并直接填充在外管中,薄壁外管的 $T=1.2$ mm,蜂窝芯胞元的 $D=3.00$ mm、 $t=0.05$ mm;再将试件放置于 MTS 材料力学试验机的支撑板与压头之间,使压头以 5 mm/min 的速度压缩蜂窝填充管.同时,采用相同的约束和载荷边界条件建立实验样品的有限元数值模型,模型采用 0.5 m/s 的加载速度以模拟实验的准静态压缩工况.图 4(b)~(d) 所示为 3 个压缩位移 d 的条件下蜂窝填充管的实验与有限元模型模拟的变形模式.由图 4 可见,蜂窝填充薄壁结构的模拟变形与实验样品的变形模式基本一致.表 1 列出了在不同压缩位移下有限元数值模拟和实验所得吸收能量的对比.可以看出,在不同压缩位移下实验与模拟所得吸收能量较为接近,最大绝

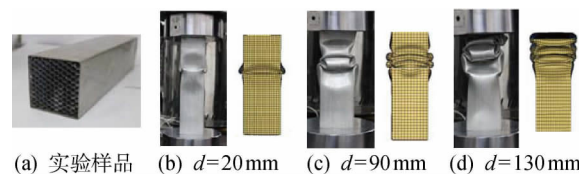


图 4 蜂窝填充管的实验与模拟的变形模式

Fig. 4 Deformation modes of experiment and simulation results for honeycomb-filled tube

表 1 实验与模拟结果对比

Tab. 1 Comparisons between simulations and experiments

d/mm	E_a/kJ		相对误差/%
	模拟值	实验值	
20	301.72	277.17	8.85
90	1 211.81	1 170.42	3.54
130	1 684.85	1 666.15	1.12

对误差约为 8%.由此可见,本文建立的蜂窝填充薄壁结构的有限元模型具有较高的准确性.

2 蜂窝填充薄壁结构的耐撞性

为了研究蜂窝填充薄壁结构在不同冲击工况下的耐撞性能,根据图 1 的几何模型,本文探测了 12 种冲击工况下蜂窝填充薄壁结构及传统的薄壁空管结构的耐撞性响应.其中,包含了 4 种冲击角($\alpha=0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 20^\circ$)和 3 种冲击速度,即 $v=30$ km/h(低),60 km/h(中),100 km/h(高).图 5 示出了不同的冲击工况下薄壁空管和蜂窝填充薄壁结构的比吸能.由图 5(a)可见,当冲击速度一定时,随着 α 增加,蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的 SEA 均逐渐降低,这主要是由于冲击角增大时,作用在薄壁结构上的横向弯矩逐渐增大,结构易发生全局弯曲而减小了轴向折叠次数.对于薄壁空管而言,当 α 从 0° 变化为 20° 时,SEA 的降幅较为平稳,表明其在斜向冲击工况下的稳定性较好.相对而言,蜂窝填充薄壁结构在小角度冲击工况(α 处于 $0^\circ \sim 15^\circ$ 之间)下的 SEA 的降幅也较为平稳;但当 $\alpha=20^\circ$ 时,蜂窝填充薄壁结构的 SEA 出现了显著降低,其降幅最高可达 62.1%,表明蜂窝填充薄壁结构在大角度冲击工况下的稳定性较差.图 6 示出了在 $\alpha=20^\circ$ 的冲击工况下,薄壁空管与蜂窝填充薄壁结构在 $v=100$ km/h 和不同压缩距离时的变形模式.可以看出,蜂窝填充薄壁结构的底部出现了全局弯曲失稳的情况,从而导致其 SEA 大幅降低.

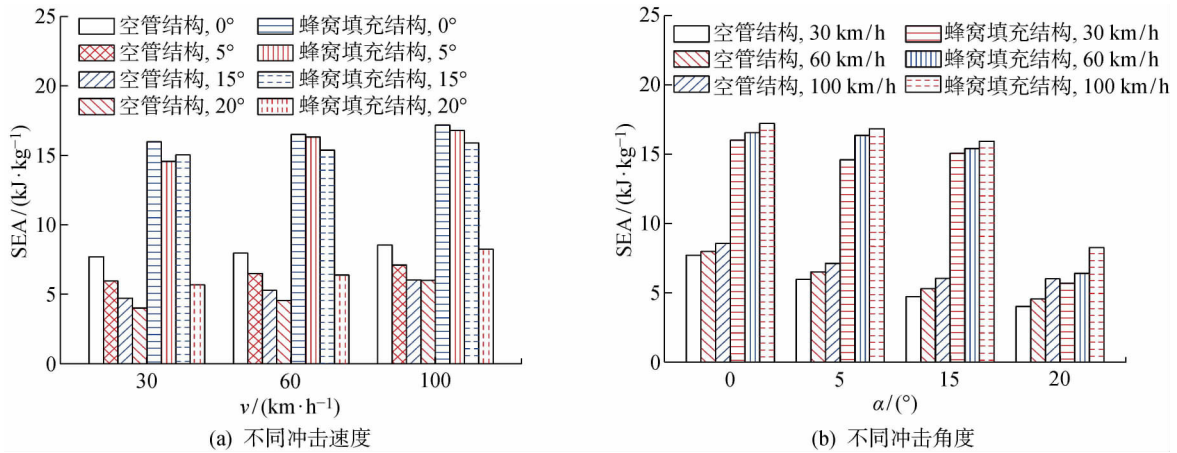


图 5 不同的冲击工况下蜂窝填充管和薄壁空管的比吸能

Fig. 5 SEA of honeycomb-filled tubes and thin-walled hollow tubes under multiple impact loadings

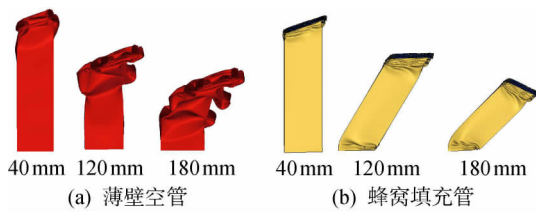


图 6 薄壁结构的变形模式

Fig. 6 Deformation shape of thin-walled structures

另外,由图 5(b)还可见,当冲击角一定时,随着冲击速度增加,蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的 SEA 均有所增加,表明冲击速度引起的惯性效应对其耐撞性和吸能性均有显著影响.图 7 所示为 $\alpha = 5^\circ$, v 由 30 km/h 增至 100 km/h 时薄壁空管及蜂窝填充薄壁结构的变形模式.可见,当冲击速度增加时,薄壁结构在变形与挤压的过程中拥有的惯性增强,使得相同的压缩距离内触发了更多折叠变形,从而减小了折叠波长,增加了材料利用率和吸收能量.

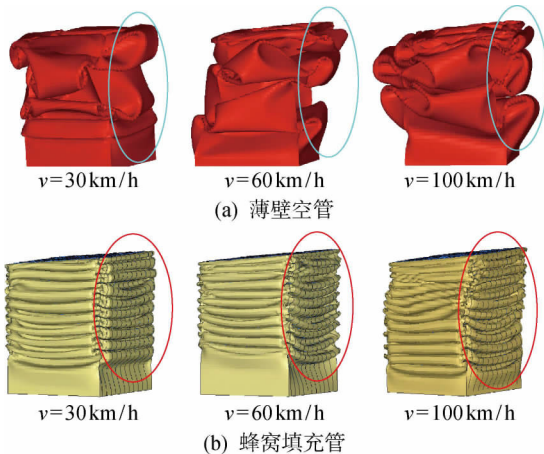


图 7 不同冲击速度下蜂窝填充薄壁结构与薄壁空管的变形模式

Fig. 7 Deformation modes of honeycomb-filled tubes and empty tubes under different impact velocities

综合分析薄壁空管及蜂窝填充薄壁结构的比吸能(见图 5)可见,与薄壁空管相比,不同的冲击工况下蜂窝填充薄壁结构的 SEA 都有显著提升.表 2 列出了不同的冲击工况下蜂窝填充薄壁结构相对于薄壁空管的 SEA 的提升率,即

$$\Delta SEA = \frac{SEA_f - SEA_e}{SEA_e} \quad (3)$$

式中: SEA_f 、 SEA_e 分别为蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的比吸能.

表 2 蜂窝填充薄壁结构与薄壁空管的比吸能的提升率

Tab. 2 Increasing rates of specific energy absorption between honeycomb filled structure and thin-walled empty tube

$\alpha/(^\circ)$	$\Delta SEA/\%$		
	30 km/h	60 km/h	100 km/h
0	107.5	107.1	136.2
5	143.9	150.6	136.2
15	217.5	190.4	163.1
20	41.4	40.4	37.4

由表 2 可见,在小角度(α 处于 $0^\circ \sim 15^\circ$) 的冲击工况下,随着 α 增加,蜂窝填充薄壁结构的 SEA 大幅增加(1 倍以上),即使在蜂窝填充薄壁结构发生全局弯曲的大角度($\alpha = 20^\circ$) 冲击下,SEA 的增幅也达到约 40%,表明蜂窝填充对增强薄壁结构吸能性能的作用显著,这主要是由于蜂窝芯与薄壁结构之间的交互作用^[15] 而使得蜂窝填充薄壁结构的变形模式更加稳定和均匀、大幅增加了其逐级折叠的次数的缘故(如见图 7 所示).图 8 示出了不同冲击工况下薄壁空管和蜂窝填充薄壁结构的冲击力峰值.由图 8(a)可见,当冲击速度相同时,随着 α 增加,蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的 F_{\max} 都逐渐减小,这

是由于随着 α 增大,刚性冲击块与薄壁结构的初始接触面积逐渐减小的缘故。然而,不同的 α 下薄壁结构的 F_{\max} 的降幅却不同。对于薄壁空管而言,在 $\alpha < 15^\circ$ 的小角度冲击下, F_{\max} 的下降率达 50%,而当 α 由 15° 增加到 20° 时, F_{\max} 的下降率低于 10%,表明薄壁空管的 F_{\max} 对小角度冲击较为敏感;此外,对于蜂窝填充薄壁结构,在 $\alpha < 5^\circ$ 的小角度冲击下,其 F_{\max} 的下降率较大,最大可达 40%,而当 $5^\circ < \alpha < 20^\circ$ 时,其 F_{\max} 在相邻角度之间的下降率保持在 16%~20%,与薄壁空管相比,其 F_{\max} 的波动幅度较小。

由图 8(b)可见,当 α 一定时,蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的 F_{\max} 值都随着冲击速度增加而增加,这是因为速度越大,薄壁结构受到冲击时的惯性力越大,从而使得冲击力越大。与 30 km/h 的低速

冲击相比,60 km/h 的中速冲击时,薄壁空管在各种冲击角度下的 F_{\max} 的平均增幅为 7.24%;与 60 km/h 的中速冲击相比,在 100 km/h 的高速冲击下,各种冲击角度下薄壁空管的 F_{\max} 的平均增幅均达到 26.00%。同时,蜂窝填充薄壁结构也有类似变化规律,表明薄壁结构冲击力对高速冲击更为敏感。

综合图 8 中各工况下的 F_{\max} 可见,蜂窝填充薄壁结构在各工况下的 F_{\max} 都比相应的薄壁空管的 F_{\max} 大,但相对于 SEA 而言(见表 2),蜂窝填充薄壁结构的 F_{\max} 的提升幅度比 SEA 的提升幅度小。图 9 示出了不同的冲击工况下蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的 SEA 与 F_{\max} 的提升率。其中, F_{\max} 的提升率可表示为

$$\Delta F_{\max} = (F_{f,\max} - F_{e,\max}) / F_{e,\max} \quad (4)$$

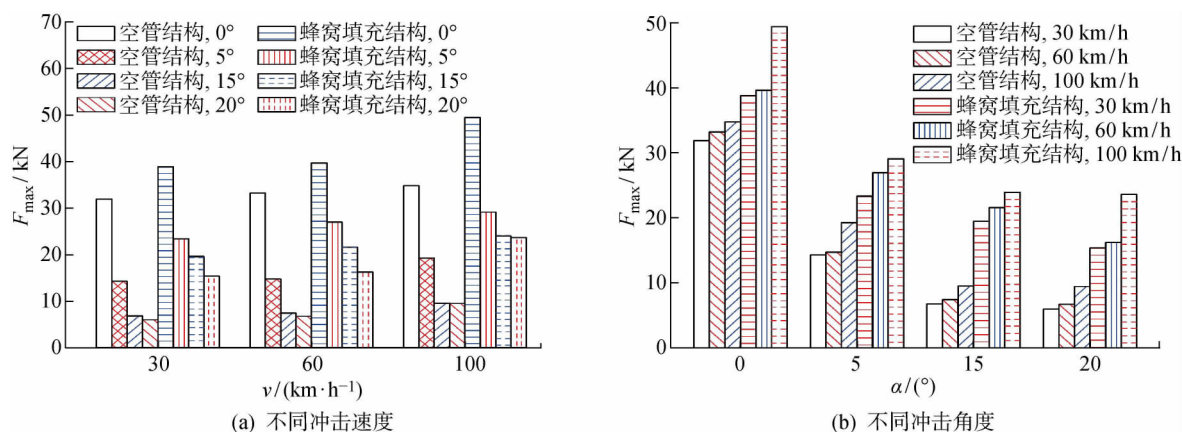


图 8 多种冲击工况下蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的冲击力峰值

Fig. 8 F_{\max} of honeycomb-filled tubes and thin-walled hollow tubes under multiple impact loadings

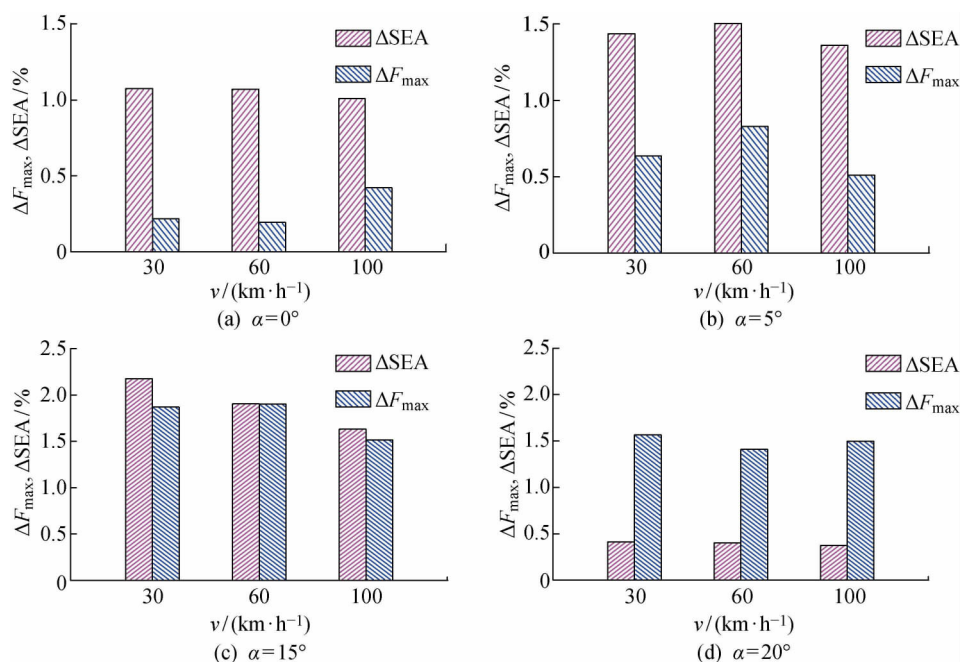


图 9 蜂窝填充薄壁结构的 SEA 和 F_{\max} 的提升率

Fig. 9 Increasing rates SEA and F_{\max} for honeycomb-filled tube

式中: $F_{f, \max}$ 和 $F_{e, \max}$ 分别为蜂窝填充薄壁结构和薄壁空管的冲击力峰值。

由图 9 可见: 当 $\alpha < 20^\circ$ 时, 在所有冲击工况下 ΔF_{\max} 都小于 ΔSEA , 且 ΔF_{\max} 与 ΔSEA 的差距较大, 其最大差值达 87.6%, 表明在 $\alpha < 20^\circ$ 的冲击工况下, 蜂窝填充薄壁结构能够更好地改善薄壁空管的吸能特性; 在 $\alpha = 20^\circ$ 时, 则表现为 ΔF_{\max} 大于 ΔSEA , 这主要是由于在大角度冲击工况下蜂窝填充薄壁结构发生了全局弯曲而使其吸能性能降低的缘故。整体而言, 蜂窝填充薄壁结构比薄壁空管具有更优异的耐撞性能。

3 蜂窝填充结构的优化设计

3.1 蜂窝填充薄壁结构的优化模型

合理匹配蜂窝填充薄壁结构的设计参数, 使其具有最优的吸能特性仍是目前结构耐撞性设计的关键。因此, 本文以外管的壁厚 T 以及蜂窝胞元的厚度 t 为设计变量, SEA 与 F_{\max} 为设计响应, 对蜂窝填充薄壁结构进行耐撞性的优化设计。其数学模型可表示为

$$\left. \begin{array}{l} \max \text{SEA}_{(a, v)} \\ \text{s. t. } F_{\max(a, v)} \leq 45 \text{ kN} \\ 0.8 \text{ mm} \leq T \leq 1.2 \text{ mm} \\ 0.01 \text{ mm} \leq t \leq 0.10 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中: $\text{SEA}_{(a, v)}$ 为设计目标, 表示蜂窝填充薄壁结构在不同冲击工况 (不同的 α 和 v) 下的比吸能; $F_{\max(a, v)}$ 为不同冲击工况下的冲击力峰值。式 (5) 表示在满足 $F_{\max(a, v)}$ 不大于 45 kN 的条件下, 使 $\text{SEA}_{(a, v)}$ 取得最大值。

本文采用对非线性响应模拟具有较高精度的 Kriging 近似技术构建蜂窝填充薄壁结构的 $\text{SEA}_{(a, v)}$ 与 $F_{\max(a, v)}$ 的近似模型^[19]。首先, 采用均匀拉丁方^[20]实验设计方法对不同冲击工况的设计空间分别进行 20 次采样, 以此建立 $\text{SEA}_{(a, v)}$ 与 $F_{\max(a, v)}$ 的 Kriging 近似模型。由于 Kriging 近似模型的精度决定后续优化的可行性, 所以本文进一步采用拟合度 (R^2)、最大相对误差 (e_{\max}) 和平均相对误差 (e_{avg}) 来评价其拟合精度, 其定义分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^q (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^q (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$e_{\max} = \max_{i \in \{1, 2, \dots, q\}} \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \right) \quad (7)$$

$$e_{\text{avg}} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \right) \quad (8)$$

式中: y_i 为第 i 点的计算值; \bar{y} 为 y_i 的平均值; \hat{y}_i 为

近似模型第 i 点的近似值; q 为采样点的数量。

由式 (6) 可知, R^2 值越接近于 1, 表明 Kriging 近似模型越精确。

本文采用随机采样法对不同工况下的设计空间分别进行了 8 次采样, 以验证 Kriging 近似模型的精度。表 3 列出了在 $\alpha = 0^\circ$, $v = 30 \text{ km/h}$ 的冲击工况下 $\text{SEA}_{(0, 30)}$ 与 $F_{\max(0, 30)}$ 的模型精度的 3 个评价指标。由表 3 可见, R^2 值接近于 1, e_{\max} 和 e_{avg} 均小于 5%, 而且在其他冲击工况下也可得到类似结果, 表明本文所建设计响应的 Kriging 近似模型的精度能够满足优化设计的需求。

表 3 SEA 与 F_{\max} 的 Kriging 近似模型误差

Tab. 3 Error of Kriging model for SEA and F_{\max}

设计响应	R^2	$e_{\max} / \%$	$e_{\text{avg}} / \%$
SEA	0.92	3	2.0
F_{\max}	0.98	3	1.9

3.2 优化结果分析

采用小种群遗传算法对 Kriging 近似模型寻优^[21], 表 4 列出了各工况下蜂窝填充薄壁结构的初始参数与最优参数 (蜂窝最优参数取整)。由表 4 可见, 在各种工况下 SEA 的优化值与初始值均有所提高, 但不同的冲击角下 SEA 提高的幅度不同。在 $\alpha = 0^\circ$ 时, SEA 的优化值比初始设计值平均提高了 3.31%; 在 $\alpha = 5^\circ, 15^\circ$ 时, SEA 的优化值比初始值提高的幅度较大, 分别为 22.09% 和 25.89%; 在 $\alpha = 20^\circ$ 的冲击工况下, SEA 的优化值比初始值平均提高了 6.84%。由此可见, 优化设计可使蜂窝填充薄壁结构在斜向冲击下的 SEA 大幅提升, 尤其是在 $\alpha = 15^\circ, v = 60 \text{ km/h}$ 的冲击工况下 SEA 的增幅达 32.76%。图 10 所示为 $\alpha = 15^\circ, v = 60 \text{ km/h}$ 的冲击

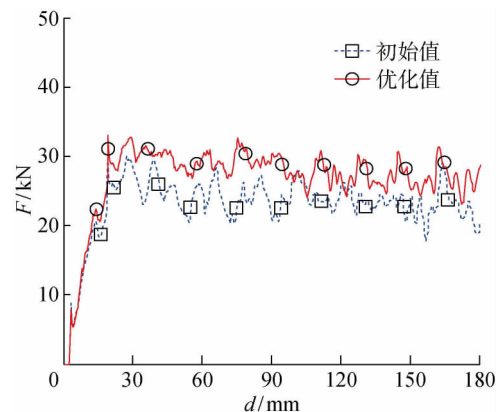


图 10 初始模型和优化模型的冲击力-位移曲线
Fig. 10 The force-displacement curve of initial model and optimization

表 4 蜂窝填充薄壁结构的单目标优化结果

Tab. 4 The optimization results of single objective for the honeycomb-filled tubes

参 数		$\alpha=0^\circ$			$\alpha=5^\circ$			$\alpha=15^\circ$			$\alpha=20^\circ$		
		30 km/h	60 km/h	100 km/h	30 km/h	60 km/h	100 km/h	30 km/h	60 km/h	100 km/h	30 km/h	60 km/h	100 km/h
T/mm	初始	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	优化	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	0.80	0.82	0.80	0.80	0.86	0.84	1.00
t/mm	初始	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	优化	0.07	0.07	0.07	0.08	0.10	0.09	0.07	0.10	0.10	0.07	0.08	0.06
$\text{SEA}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	初始	16.97	17.45	18.05	15.41	17.23	18.37	15.25	16.39	17.92	5.95	7.41	8.37
	优化	17.48	18.12	18.60	19.06	21.38	21.77	18.68	21.76	21.94	6.10	8.15	9.04
F_{\max}/kN	初始	46.18	49.43	49.50	31.26	42.40	39.34	27.42	30.47	32.39	26.25	29.36	36.48
	优化	44.98	44.99	45.00	31.56	45.00	41.78	28.36	33.76	36.52	26.79	33.07	40.83

工况下初始模型和优化设计模型的冲击力与位移曲线.可见,优化使得蜂窝填充薄壁结构的冲击力有所提高,从而具有更好的吸能性能.另一方面,由表 4 还可以看出,优化后的 F_{\max} 与初始设计的 F_{\max} 较为接近,表明本文提出的数值优化方法能够较好地改善蜂窝填充薄壁结构的耐撞性能,且具有较好的可行性.

4 结论

(1) 在不同的冲击工况下,蜂窝填充薄壁结构能够较好地改善薄壁空管变形的均匀性和稳定性.蜂窝填充薄壁结构比薄壁空管的能量吸收能力更强.

(2) 冲击速度和冲击角度对薄壁结构的耐撞性能都具有很大影响:当冲击角度一定时,随着冲击速度增加,2 种薄壁结构的 SEA 和 F_{\max} 均逐渐增大;当冲击速度一定时,随着冲击角度增大,2 种薄壁结构的 SEA 和 F_{\max} 均逐渐减小.

(3) 在大角度冲击下,蜂窝填充薄壁结构的第 1 个塑性铰发生在冲击底部,且易发生全局弯曲变形.

参考文献:

[1] 陈吉清,周鑫美,饶建强,等.汽车前纵梁薄壁结构碰撞吸能特性及其优化的研究[J].汽车工程,2010,32(6):486-492.
CHEN Jiqing, ZHOU Xinmei, RAO Jianqiang, et al. A Research on the impact energy absorption characteristics and optimization of thin-walled structure of vehicle front rail [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(6): 486-492.

[2] 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(理工版),2014,27(2):92-96.

ZHU Wenbo, YANG Liming, YU Tongxi. Study on dynamic properties of thin-walled circular tubes under axial compression [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2014, 27(2): 92-96.

[3] YIN H, WEN G, LIU Z, et al. Crashworthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 75: 8-17.

[4] EL-SAYED F K A, JONES R, BURGESS I W. A theoretical approach to the deformation of honeycomb based composite materials [J]. Composites, 1979, 10(4): 209-214.

[5] 张新春,刘颖,李娜.具有负泊松比效应蜂窝材料的面内冲击动力学性能[J].爆炸与冲击,2012,32(5):475-482.
ZHANG Xinchun, LIU Ying, LI Na. In-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio effects [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 475-482.

[6] ZHANG X C, AN L Q, DING H M, et al. The influence of cell micro-structure on the in-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2015, 17(1): 26-55.

[7] ZHANG X C, AN L Q, DING H M. Dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with density gradient [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2014, 16(2): 125-147.

[8] 刘颖,何章权,吴鹤翔,等.分层递变梯度蜂窝材料的面内冲击性能[J].爆炸与冲击,2011,31(3):225-231.
LIU Ying, HE Zhangquan, WU Hexiang, et al. In-plane dynamic crushing of functionally layered metal

- honeycombs [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2011, 31(3): 225-231.
- [9] TAO Y, CHEN M J, CHEN H S, *et al.* Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: Experiment and theory [J]. **Composite Structures**, 2015, 132: 644-651.
- [10] XU S, BEYNON J H, DONG R, *et al.* Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs [J]. **Composite Structures**, 2012, 94(8): 2326-2336.
- [11] KHAN M K, BAIG T, MIRZA S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2012, 539(2): 135-142.
- [12] SANTOSA S, WIERZBICKI T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam [J]. **Computers & Structures**, 1998, 68(4): 343-367.
- [13] GUDEN M. Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes [J]. **Open Materials Science Journal**, 2011, 5(1): 184-193.
- [14] ZAREI H R, KRÖGER M. Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes [J]. **International Journal of Crashworthiness**, 2007, 12(3): 255-264.
- [15] 闫晓刚, 张勇, 林继铭, 等. 新颖圆形多胞复合填充结构的耐撞性[J]. **复合材料学报**, 2018, 35(8): 2166-2176.
- YAN Xiaogang, ZHANG Yong, LIN Jiming, *et al.* Crashworthiness for novel circular multi-cell composite filling structures [J]. **Acta Materialiae Composite Sinica**, 2018, 35(8): 2166-2176.
- [16] 张勇, 蔡检明, 赖雄鸣. 异面撞击载荷下金属蜂窝填充薄壁结构的动态力学性能[J]. **中国公路学报**, 2015, 28(1): 120-126.
- ZHANG Yong, CAI Jianming, LAI Xiongmeng. Dynamic mechanical behavior of metal honeycomb-filled thin-walled structures subjected to out-of-plane impact loading [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, 28(1): 120-126.
- [17] 文桂林, 孔祥正, 尹汉锋, 等. 泡沫填充夹芯墙多胞结构的耐撞性多目标优化设计[J]. **振动与冲击**, 2015, 34(5): 115-121.
- WEN Guilin, KONG Xiangzheng, YIN Hanfeng, *et al.* Multi-objective crashworthiness optimization design of foam-filled sandwich wall multi-cell structures [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2015, 34(5): 115-121.
- [18] 何乐新. 从汽车车身安全构件分析碰撞安全保护[J]. **汽车维修与保养**, 2013(2): 77-79.
- HE Lexin. Collision safety protection from the safety component analysis of car body [J]. **Motor for Repair & Maintenance**, 2013(2): 77-79.
- [19] 张冬冬, 郭勤涛. Kriging 响应面代理模型在有限元模型确认中的应用[J]. **振动与冲击**, 2013, 32(9): 187-191.
- ZHANG Dongdong, GUO Qintao. Application of Kriging response surface in finite element model validation [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2013, 32(9): 187-191.
- [20] MIN Z, CUI W C. Application of the optimal Latin hypercube design and radial basis function network to collaborative optimization [J]. **Journal of Marine Science and Application**, 2007, 6(3): 24-32.
- [21] 张勇, 林福泳. 铝泡沫填充薄壁结构耐撞可靠性优化设计[J]. **机械工程学报**, 2011, 47(22): 93-99.
- ZHANG Yong, LIN Fuyong. Crashworthiness reliability design optimization of aluminum foam filled thin-wall structures [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2011, 47(22): 93-99.