复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 35 卷 第 8 期 8 月 2018 年
Vol. 35 No. 8 Aug 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170906.001

新颖圆形多胞复合填充结构的耐撞性

闫晓刚，张勇*，林继铭，徐翔，赖雄鸣
（华侨大学 机电及自动化学院，厦门 361021）

摘 要： 提出一种新颖的圆形多胞复合填充结构，该结构采用蜂窝和泡沫两类材料的交错复合填充。采用实验验证与数值研究相结合的方法，系统地研究了蜂窝和泡沫材料在全填充、部分填充及交互填充结构中的耐撞性。研究结果表明，针对单一材料填充的多胞圆管，部分填充结构比全填充结构具有更好的耐撞性能，其中，环形蜂窝填充结构(H40)和中心泡沫填充结构(F01)具有更优异的能量吸收特性。针对双材料复合填充的多胞圆管，则是中心泡沫填充与环形蜂窝填充的复合结构(F01H40)具有最佳的耐撞吸能性。最后，进一步结合 Kriging 近似技术与粒子群数值优化方法，对复合填充结构进行多目标优化设计，探索其最优耐撞性与最优参数匹配。结果表明，环形蜂窝部分填充结构(H40)，中心泡沫填充与环形蜂窝填充的复合全填充结构(F01H40)具有最优的耐撞性能。

关键词： 薄壁结构；复合填充结构；耐撞性；多孔材料；多目标优化

中图分类号： TB331；U463 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-3851(2018)08-2166-11

Crashworthiness for novel circular multi-cell composite filling structures

YAN Xiaogang，ZHANG Yong*，LIN Jiming，XU Xiang，LAI Xiongming
(College of Mechanical Engineering and Automation，Huaqiao University，Xiamen 361021，China)

Abstract： A novel circular multi-cell composite filling structure with honeycomb and foam materials was proposed. Based on the methods of experiment validation and numerical simulation，the crashworthiness of honeycomb and foam materials in full filling，partly filling and interaction filling structures were investigated. The results show that the partial filling structures have better crashworthiness performance than the full filling structures for multi-cell circular tubes with single filling material，in which the annular honeycomb filling structure (H40) and the center foam filling structure (F01) have more excellent crashworthiness performance. The center foam filling and annular honeycomb filling compound structure (F01H40) has the best crashworthiness performance for the composite filling tube with double filling materials. Lastly，the Kriging approximation technique and the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm were employed to explore the optimal crashworthiness performance and match the optimal parameters. The results show that partial filling the annular honeycomb partially filling structure (H40) and the center foam filling and annular honeycomb compound full filling structure (F01H40) yield the optimal crashworthiness performance.

Keywords： thin-walled structures；composite filling structures；crashworthiness；porous material；multi-objective optimization

圆形薄壁吸能结构已被广泛地应用于汽车、航空及其他工业领域。早期主要集中于圆形单管的耐撞性研究，Alexander[1]用一种近似理论模型对圆管在轴向冲击下的平均碰撞力进行了预测；

收稿日期： 2017-07-12；**录用日期：** 2017-08-27；**网络出版时间：** 2017-09-06 13:52
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170906.001
基金项目： 国家自然科学基金（51675190；51305143）；福建省自然科学基金(2015J01204)；福建省高等学校新世纪优秀人才计划；华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目
通讯作者： 张勇，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为汽车碰撞安全性 E-mail：zhangyong@hqu.edu.cn
引用格式： 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 X G，ZHANG Y，LIN J M，et al. Crashworthiness for novel circular multi-cell composite filling structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(8)：2166-2176 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

Wierzbicki 等[2]对圆管的轴向冲击进行了实验研究和理论预测；此外，圆形薄壁结构的能量吸收性能与其所受载荷、几何参数和材料性能都紧密相关[3-5]。Alavi 等[6]对不同截面空管开展碰撞研究，发现圆形结构比同质量的其他结构具有更好的吸能性。然而，圆形单管仍存在吸能形式单一、吸能效率低等局限。因此，具有更好轴向刚度及吸能性[7]的多胞结构逐渐引起了人们的关注。Chen 和 Wierzbicki[8]通过对多胞结构进行轴向冲击研究，发现多胞结构的吸能性能较单胞结构有大幅提升；Tang 等[9]采用数值分析方法对不同截面多胞圆管进行研究，发现圆形多胞管比方形多胞管具有更好的能量吸收能力。

近年来，金属蜂窝和泡沫作为新颖的多孔吸能材料逐渐引起了人们广泛关注。郑吉良等[10]和田爱平等[11]分别通过压缩试验研究了蜂窝和泡沫的力学性能。Hussein 等[12]对铝蜂窝填充结构的轴向压缩耐撞性进行研究，发现填充结构的折叠模式更有规律，且耐撞性也较空管有大幅提升；Cakiroglu[13]研究了蜂窝填充薄壁圆管在准静态压缩下的耐撞性，发现管壁和填充材料的交互作用对结构耐撞性有重要影响。Pandarkar 等[14]对泡沫填充结构耐撞性进行了综述，其主要结论是薄壁填充结构可以极大地改善结构的稳定性。Wang 和 Chen 等[15-16]对泡沫填充结构进行了仿真研究，发现泡沫填充能很好地提高管的耐撞性能。

然而，前人的研究主要集中于单一多孔材料对薄壁结构的全填充设计，而部分填充与多材料复合填充结构的研究仍未见相关公开报道。因此，本文提出开展蜂窝或泡沫部分填充或全填充的交互设计，并研究其复合填充结构的耐撞性能。

1 多胞填充结构

1.1 几何模型

图 1(a)为新颖圆形多胞复合填充结构的几何冲击示意图。薄壁结构的长度 L 和壁厚 T 分别为 200 mm 和 0.8 mm，为使 4 个环形胞元和中心胞元的面积相等，外径 D 和内径 d 分别为 70 mm 和 30 mm。蜂窝的厚度和边长分别为 0.05 mm 和 3 mm。多胞复合填充结构固定在支撑板上，质量 $m=500$ kg 的冲击块以速度 $V=20$ m/s 冲击填充结

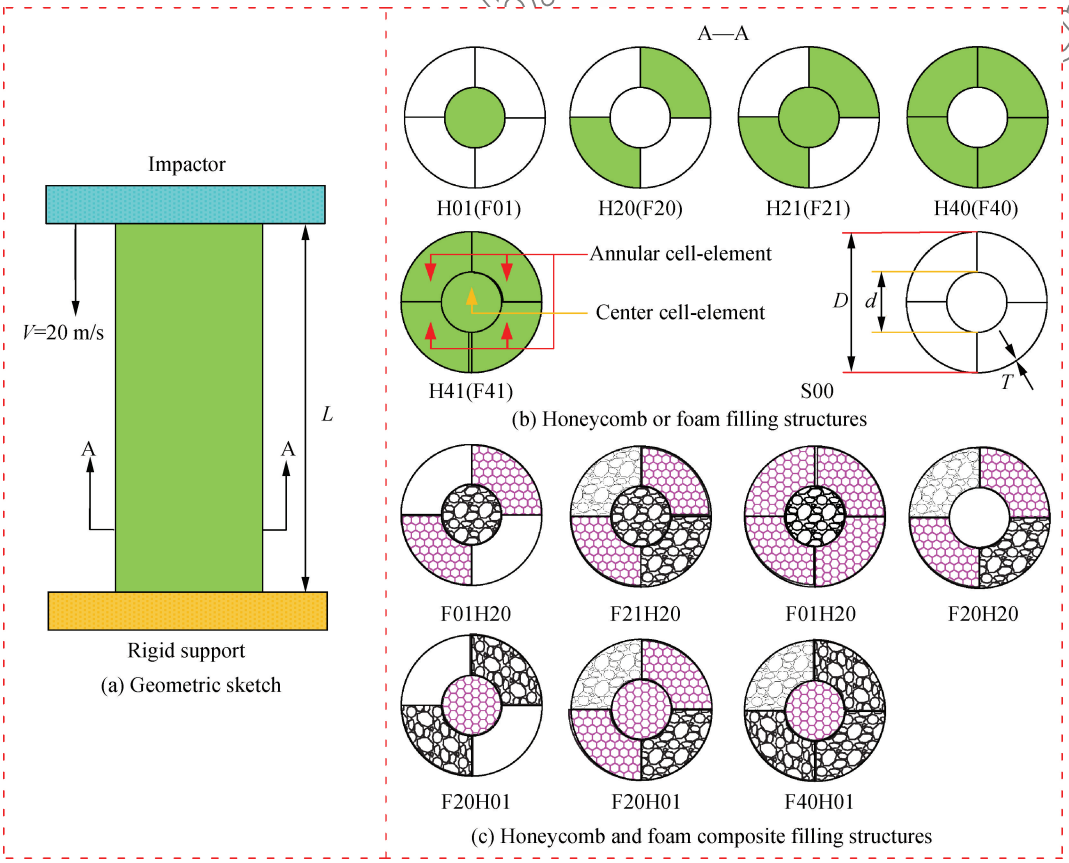


图 1 复合填充结构的几何和截面示意图

Fig. 1 Geometric and section sketch of composite filling structures

http://tcxb.buaa.edu.cn

构。图 1(b)、图 1(c)分别为蜂窝或泡沫单一填充结构及蜂窝和泡沫复合填充结构的截面示意图。填充结构采用如下命名规则：H 和 F 分别表示蜂窝和泡沫，第一个数字(0、2 或 4)表示环形胞元填充数目，第二个数字(0 或 1)表示是否填充中心胞，0 表不填充，1 表填充。如 F01H40 表示泡沫填充中心胞，蜂窝填充 4 个环形胞，而 S00 表示无填充多胞结构。

1.2　数值模型

根据图 1 的几何模型，在 LS-DYNA 中建立如图 2 的填充结构有限元数值模型。多胞圆管与蜂窝采用尺寸为 1 mm×1 mm 的 BT 四节点壳单元进行离散，泡沫铝采用尺寸为 1 mm×1 mm 的 8 节点实体单元。冲击块与薄壁管之间采用自动点面接触，蜂窝或泡沫与管壁之间采用自动面面接触，管壁和蜂窝自身采用自动单面接触，且动、静摩擦系数分别设为 0.2 和 0.3。冲击块和支撑板定义为刚性材料，薄壁管和蜂窝材料均为铝合金 AA6060，其密度 $\rho=2.7\times10^3$ kg/m^3，弹性模量 $E=68.2$ GPa，屈服应力 $\sigma_y=160$ MPa，极限应力 $\sigma_u=206$ MPa 及切线模量 $E_t=300$ MPa。由于铝合金对应变速率不敏感，故在建模时忽略应变速率的影响[16]。多胞铝管采用 LS-DYNA 中的 24 号本构模型，而密度为 2.7×10^2 kg/m^3 的铝泡沫则采用基于各向同性材料的 154 号本构模型[17-18]。其屈服准则定义为

$$\varphi=\sigma_e-Y\leqslant 0 \tag{1}$$

式中：φ 为屈服面；Y 为屈服强度；σ_e 为等效应力，且

$$\sigma_e^2=\frac{1}{1+(\alpha/3)^2}(\sigma_v^2+\alpha^2\sigma_m^2) \tag{2}$$

式中：σ_v 和 σ_m 分别为 von Mises 有效应力和平均应力；α 为屈服面形状参数，其表达式为

$$\alpha^2=\frac{9(1-2\nu^p)}{2(1+\nu^p)} \tag{3}$$

式中：ν^p 为塑性泊松比。对铝泡沫而言，$\nu^p=0$，$\alpha=2.12$。应变硬化准则：

$$\sigma_y=\sigma_p+\gamma\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_D}+\alpha_2\ln\left[\frac{1}{1-(\varepsilon_e/\varepsilon_D)^\beta}\right] \tag{4}$$

式中：ε_e 为等效应变；σ_p、α_2、γ、β 和 ε_D 是材料参数，其可表示为泡沫密度和基材密度比的指数函数：

$$\begin{cases}(\sigma_p,\ \alpha_2,\ \gamma,\ 1/\beta)=C_0+C_1(\rho_f/\rho_{f0})^q\\ \varepsilon_D=-\dfrac{9+\alpha^2}{3\alpha^2}\ln(\rho_f/\rho_{f0})\end{cases} \tag{5}$$

式中：ρ_f 和 ρ_{f0} 分别表示泡沫密度和基材密度；C_0、C_1 和 q 为材料常数(表 1)。

表 1　铝泡沫的材料参数

Table 1　Material parameters for aluminum foam

	σ/MPa	α_2/MPa	$1/\beta$	γ/MPa
C_0/MPa	0	0	0.22	0
C_1/MPa	590	140	320	40
q	2.21	0.45	4.66	1.42

Notes: σ, α_2, β and γ — Material parameters; C_0, C_1 and q — Material constants.

2　耐撞性指标和数值验证

2.1　耐撞性指标

为评估不同填充结构的耐撞性能，必须首先定义耐撞性指标。通常用总吸能(Total energy absorption，E_a)、比吸能(Specific energy absorption，

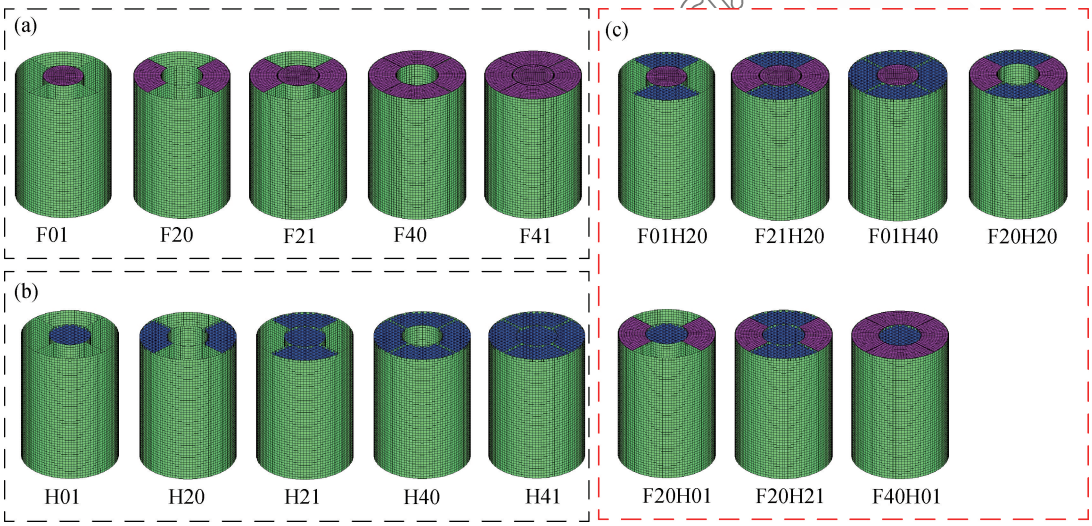


图 2　不同泡沫(a)、蜂窝(b)及泡沫和蜂窝复合(c)填充结构的有限元模型

Fig. 2　Finite element models of different foam (a), honeycomb (b) and foam and honeycomb composite (c) filling structures

http://fhcxb.buaa.edu.cn

E_{sa})、平均碰撞力(Mean crushing force，F_{MC})、峰值碰撞力(Peak crushing force，F_{PC})、碰撞力效率(Crash load efficiency，η_{CL})和吸能效率 η 来评估薄壁结构的耐撞性能。

E_a 是塑性变形时吸收的总应变能，其方程为

$$E_a = \int_0^{\delta} F(x)\mathrm{d}x \tag{6}$$

其中：$F(x)$是瞬时碰撞力；x 为压缩位移。本文中，数值模型的有效位移 δ 均为 140 mm[19]。

E_{sa}表示单位质量的能量吸收率，可定义为

$$E_{sa} = E/m \tag{7}$$

其中，m 表示结构的总质量。可见，E_{sa}越高，结构的吸能性越好。

平均碰撞力 F_{MC}的表达式：

$$F_{MC} = \frac{1}{\delta}\int_0^{\delta} F(x)\mathrm{d}x \tag{8}$$

F_{PC}是和减速度紧密相关的最大的瞬时碰撞力，高的 F_{PC}对保护乘客的安全是非常不利的。因此，应该尽量减小 F_{PC}，或者将其限定在安全的范围内。

此外，η_{CL}表示结构的载荷稳定性，其表达式为

$$\eta_{CL} = F_{MC}/F_{PC} \tag{9}$$

由上式可知，η_{CL}越高，表明薄壁结构的载荷稳定性越好。

吸能效率 η 定义为 E_a 和 F_{PC}的比值[20]，其表达式为

$$\eta = \frac{E_a}{F_{PC}} \tag{10}$$

当 E_a 越大、P_{CF}越小时，η 越大，可见，η 越大，结构的吸能性越好。

2.2 实验分析及有限元模型验证

为保证有限元模型的准确性，本文首先开展了环形泡沫填充多胞圆管的实验研究。建立了图3(b)所示的环形填充结构，其截面几何尺寸与仿真模型一致，试件高度为 110 mm，壁厚为 0.8 mm。将泡沫直接嵌入环形胞元。利用材料试验机(图3(a))对其开展速度为 5 mm/min 的准静态轴向压缩实验，并采集压缩位移与载荷数据，其在不同压缩位移的实验与仿真对比如图 3(c)～3(e)所示，实验与仿真的变形模式吻合较好，其呈现出较好的逐级折叠模式。

另外，图 4 进一步给出了实验与仿真得到的力-无量纲位移(F-S)曲线。其中 F 表示压缩力，位移无量纲化因子 S 表达式为

$$S = \frac{x}{\delta} \tag{11}$$

式中：x 为压缩位移；δ 为最终有效压缩位移，文中 δ=70 mm。

由图 4 可知，两曲线整体趋势较吻合。因此，综合对比变形模式与 F-S 曲线可知，文中建立的有限元模型具有较高的精度。

3 不同填充结构的数值分析和讨论

3.1 泡沫填充结构

图 5 为不同泡沫填充结构的 E_a 和 E_{sa}的雷达图。从图 5(a)可看出，泡沫填充结构的 E_a 随着泡沫填充胞元的增多而逐渐增加，全填充结构 F41 的 E_a 最大，接下来依次为 F40、F21、F20、F01 和

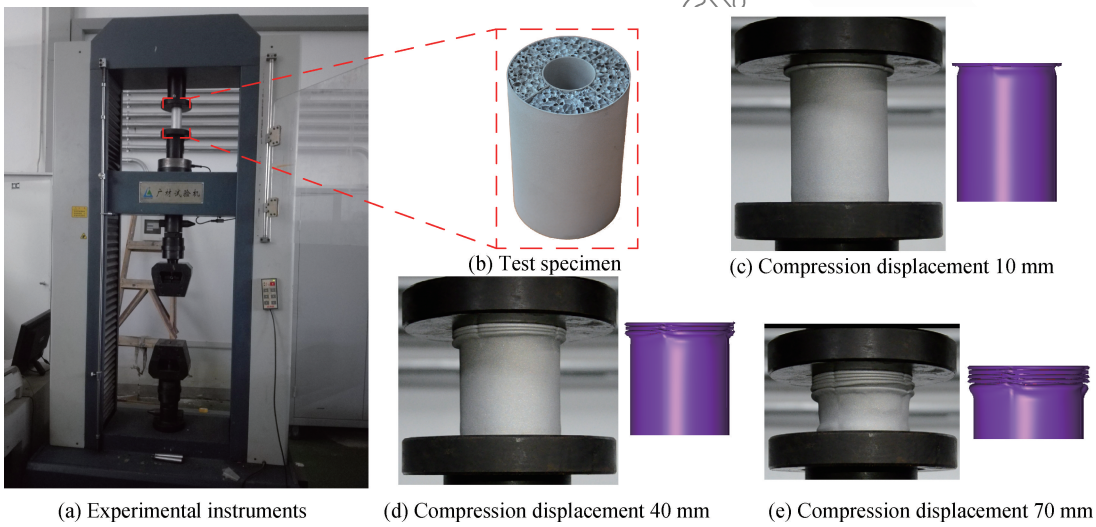


图 3 泡沫填充多胞圆管的实验与仿真对比

Fig. 3 Comparison of simulation and test for the circular multi-cell tube filled with foam

http://hbclxb.buaa.edu.cn

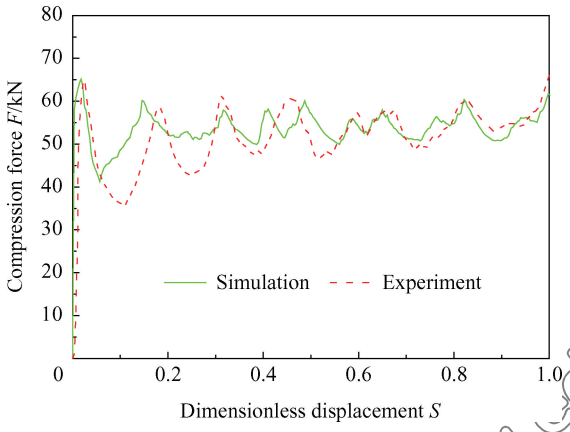


图 4　泡沫填充多胞圆管压缩力-无量纲位移(F-S)的实验和仿真曲线

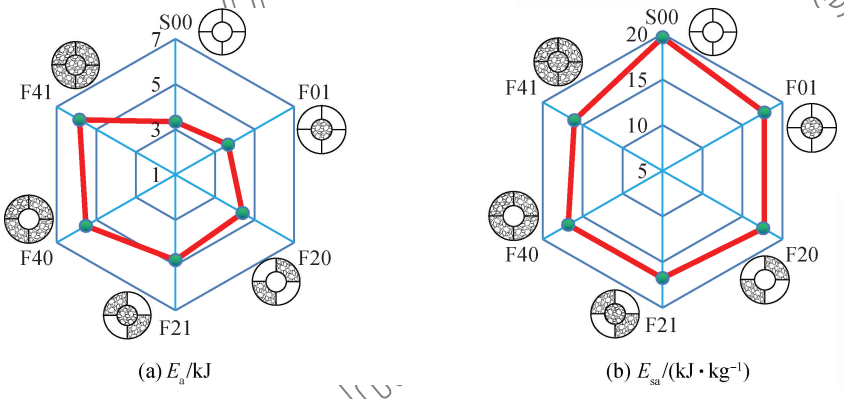
Fig. 4　Circular multi-cell tube filled with foam of experiment and simulation of compression force-dimensionless displacement (F-S) curves

S00，且在填充结构中吸能最小的 F01 的 E_a 也比非填充结构(S00)的 E_a 提高约 10%。从而表明泡沫填充能较好地提高薄壁结构的吸能能力。然而，泡沫填充结构的 E_{sa} 却随着泡沫填充胞元的增多而逐渐减小(图 5(b))，这主要是由于闭孔铝泡沫相对密度较大，使整体质量增加较大。由此可知，针对圆形多胞结构而言，泡沫填充能较好的改善其吸能能力，但却不一定能改善其比吸能。

为进一步探索泡沫填充结构的耐撞性能，图 6 给出压缩位移在 140 mm 处不同填充结构的变形模式。可看出，随着填充泡沫的增加，薄壁结构不仅折叠数量增加，并且折叠更均匀，折叠波长更短。这也是填充结构的 E_a 均大于非填充结构且随着填充泡沫的增加 E_a 也逐渐增加的原因。比较 F21 和 F20 及 F41 和 F40 的变形模式可以发现，当中心胞元被填充时，薄壁结构的折叠变形更均匀，表明中心胞元填充可以改善结构的变形稳定性。

图 7 进一步给出了不同泡沫填充结构的 F_{PC} 和 η_{CL}。从图 7(a)可知，泡沫填充结构的 F_{PC} 均大于空管结构，且随着填充泡沫的增多而增大，其主要原因是填充泡沫的增多导致了结构刚度的增大。中心胞元部分填充结构(F01)的 F_{PC} 最小，仅比 S00 增加了 1.9%，而 F20 的 F_{PC} 比 F01 增加了约 7%，表明中心胞元填充对结构刚度的增量影响更小。此外，填充泡沫结构的 η_{CL} 随填充胞元的增加而逐渐上升(图 7(b))，且均比 S00 的大，填充单个胞元 η_{CL} 的平均增幅为 6.9%，从而表明泡沫填充能较好改善圆形多胞结构的载荷稳定性。

总体而言，综合 E_{sa} 与 F_{PC} 等指标，中心胞元部分填充结构(F01)的 E_{sa} 最高，F_{PC} 最低，且 η_{CL} 也比 S00 高，因此，F01 有相对更优异的耐撞性能。



(a) E_a/kJ　　(b) E_{sa}/(kJ·kg^{-1})

图 5　不同泡沫填充结构的总吸能(E_a)和比吸能(E_{sa})

Fig. 5　Total energy absorption (E_a) and specific energy absorption (E_{sa}) of different foam filling structures

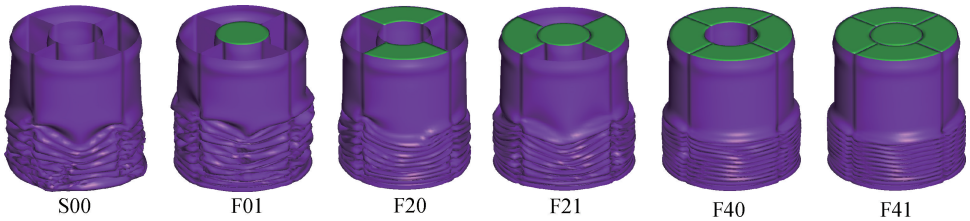


图 6　不同泡沫填充结构的变形图

Fig. 6　Deformation of different foam filling structures

3.2 蜂窝填充结构

图 8(a)为不同蜂窝填充结构的 E_a 的雷达图。可见，E_a 也随蜂窝填充胞元的增多而逐渐增大，其中全填充结构(H41)的 E_a 最大，而 H01 最小，并且，H41 与 H01 分别比空管 S00 的 E_a 高出 57.5% 和 5.2%，从而表明蜂窝填充也能大大提高薄壁管的吸能能力。故图 8(b)进一步给出了不同蜂窝填充结构的 E_{sa}。可知，除 H01 之外，填充结构的 E_{sa} 均较非填充结构(S00)有显著提升。另外，H20 的 E_{sa} 比 S00 的 E_{sa} 提升了 7.2%，而 H01 的 E_{sa} 却比 S00 的 E_{sa} 降低了 3%，可见，蜂窝填充环形胞元是比填充中心胞元更有效的填充形式，并且，从 H21 的 E_{sa} 分别比 H01 和 H20 的 E_{sa} 高了 13.6% 和 2.8%也可以得出类似的结论。

图 9(a)和图 9(b)进一步给出了 6 种不同蜂窝填充结构的力-无量纲位移曲线和变形模式。从图 9(a)和图 9(b)均可看出，随着填充蜂窝的增多，结构的力-无量纲位移曲线逐渐升高，表明其平均压缩力逐渐增大，相应的吸能也会增加，这也是 E_a 逐渐增大的原因，并且，曲线波动也随着蜂窝填充的增多而更加趋于平稳，表明了蜂窝填充能较好地改善结构的载荷稳定性。另外，相较于非填充结构，填充结构的力-无量纲位移曲线产生了更多更有规律的折叠波形。同样，填充结构也会产生折叠波长更小且有规律的变形，从而吸收更多的冲击能量。且从图 9 也发现 F_{PC} 随蜂窝填充增多而逐渐递增。此外，环形胞元填充结构的变形比中心填充结构更均匀，如 H40 和 H41 的变形分别优于 H20 和 H21，表明环形胞元与管壁的交互作用优于中心胞元与管壁的交互作用，且填充环形胞元能更有效地提高结构的耐撞性能。此外，图 10(a)也给出了不同蜂窝填充结构的 η_{CL}。图中显示 η_{CL} 先增后降，且所有填充结构的 η_{CL} 均大于 S00 的 η_{CL}，表明填充结构能较好地改善薄壁结构的载荷稳定性，且从图 9 中填充结构更有规律的折叠变形也能得到相似的结论。部分环形填充 H40 具有最大的 η_{CL}，它比 S00 的 η_{CL} 高了 22.6%。另一方面，图 10(b)为不同填充结构的 η，易发现 H40 的吸能效率也是最高，同

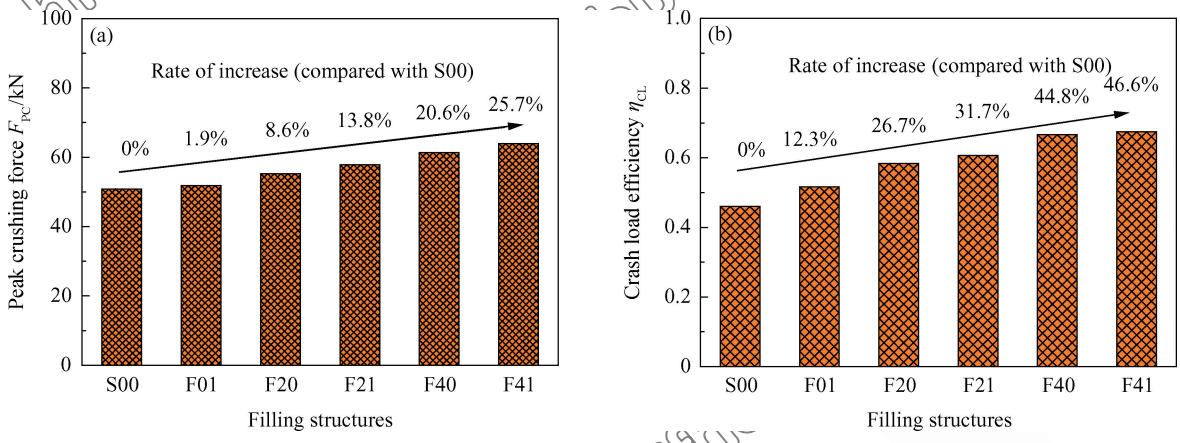


图 7 不同泡沫填充结构的峰值力(F_{PC})和碰撞力效率(η_{CL})

Fig. 7 Peak crushing force (F_{PC}) and crash load efficiency (η_{CL}) of different foam filling structures

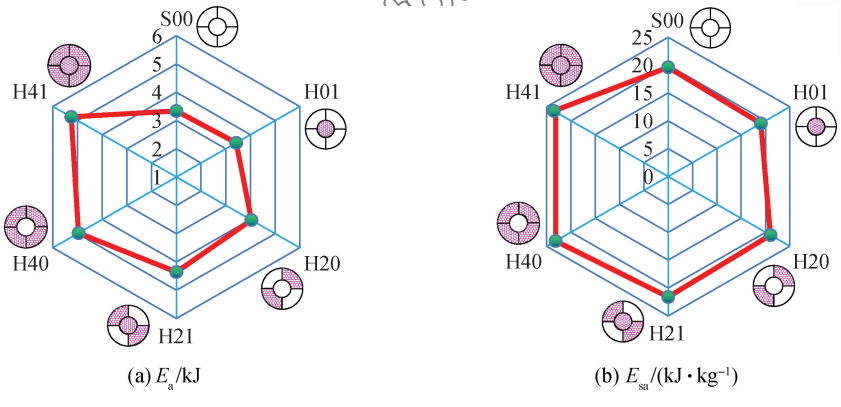


图 8 不同蜂窝填充结构的总吸能和比吸能

Fig. 8 Total energy absorption and specific energy absorption of different honeycomb filling structures

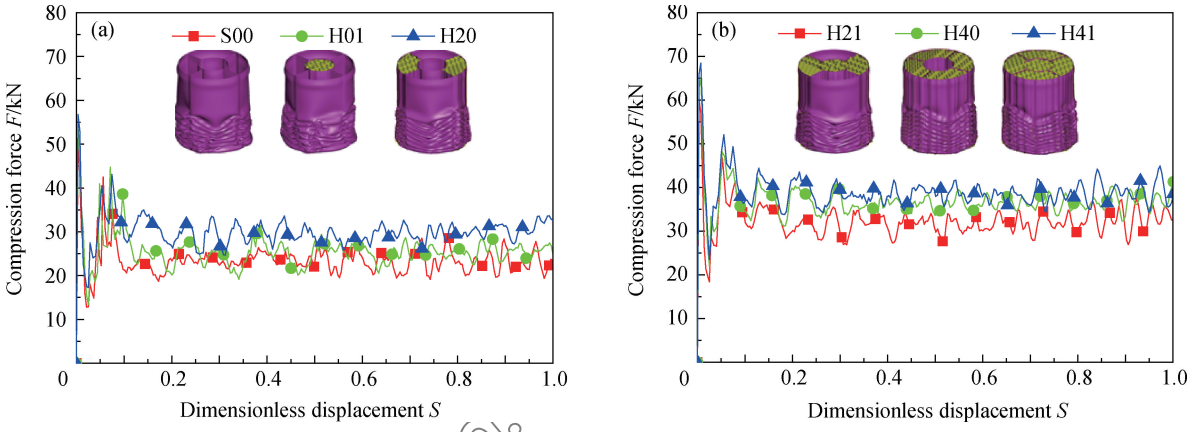


图 9　不同蜂窝填充结构的压缩力-无量纲化位移(F-S)曲线和变形模式

Fig. 9　Compression force-dimensionless displacement (F-S) curves and deformation of different honeycomb filling structures

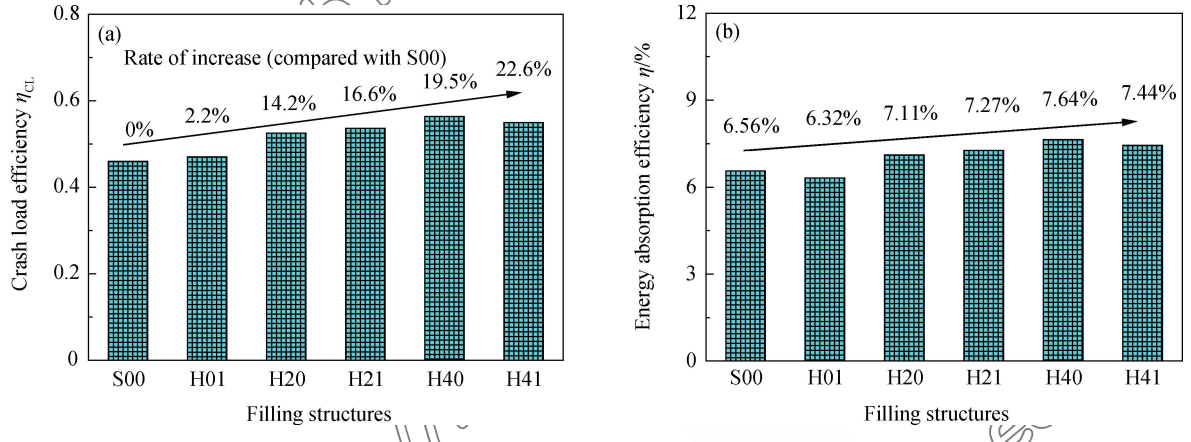


图 10　不同蜂窝填充结构的碰撞力效率(η_{CL})和吸能效率(η)

Fig. 10　Crash load efficiency (η_{CL}) and energy absorption efficiency (η) of different honeycomb filling structures

样表明其是蜂窝填充结构中耐撞性最优的结构。

3.3　蜂窝和泡沫复合填充结构

为充分地探测不同材料填充结构的耐撞性，蜂窝与泡沫复合填充结构的 E_a 和 E_{sa} 也被表示于图 11 中。从图 11(a)可看出，所有复合填充结构的 E_a 均大于空管结构 S00，表明复合填充是改善结构吸能特性的有效填充方式，其中，F40H01 具有最大的 E_a，比 S00 提高了 73.0%。此外，全复合填充结构(F01H40、F20H21、F21H20 和 F40H01) 的 E_a 均比部分复合填充结构(F01H20、F20H01 和 F20H20)的高。然而，从图 11(b)中不同结构的 E_{sa} 可以发现，复合填充形式也未必能使薄壁结构的 E_{sa} 发生明显改善，尤其泡沫填充胞元占多数的复合填充结构(F40H01、F21H20 和 F20H01)，其 E_{sa} 仍小于非填充结构(S00)。由此可知，从改善结构 E_{sa} 的观点出发，复合填充结构中用蜂窝填充胞元比泡沫填充更有优势，例如 E_{sa} 最高的 F01H40 分别比 F20H21 和 F21H20 高了 11.7%和 20.3%。

图 12 为不同复合填充结构的变形模式及 E_{sa}、F_{PC} 和 η_{CL} 相对于 S00 的增长率。由变形模式可知，不同材料复合填充诱导薄壁管产生更有规律且波长更短的折叠变形，从而能有效地提高结构的吸能性能。且全填充结构比部分填充结构的折叠变形规律更强且数量更多，这也是图11(a)中所有全填充结构的 E_a 均大于部分填充结构的原因。

另外，从图 12 可看出，所有复合填充结构的 F_{PC} 均大于 S00 的 F_{PC}。4 种全填充结构(F01H40、F20H21、F21H20 和 F40H01)的 F_{PC} 增长率相互较接近，最大的 F01H40 和最小的 F40H01 仅差 4.5%。部分填充结构(F01H20、F20H01 和 F20H20)的 F_{PC} 增长率与此类似。总的来说，全复合填充结构的 F_{PC} 比部分复合填充的高约 10%。此外，从 η_{CL} 增长率曲线可看出复合填充结构可以大大地改善薄壁结构的载荷稳定性，其中，η_{CL} 最高

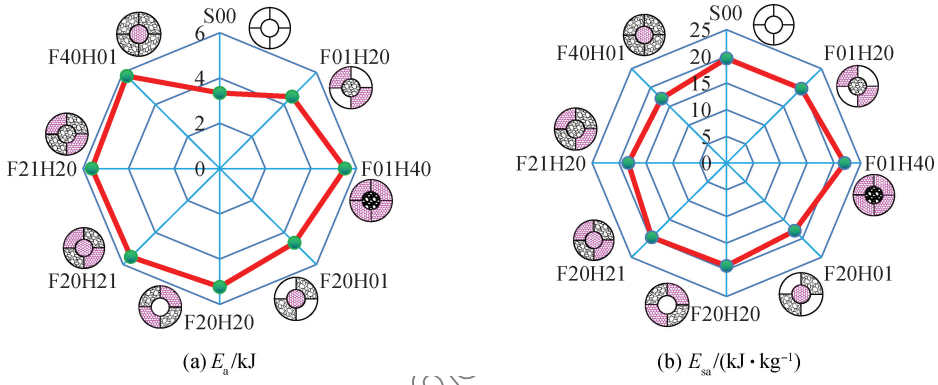


图 11　不同蜂窝和泡沫复合填充结构的总吸能(E_a)和比吸能(E_{sa})

Fig. 11　Total energy absorption (E_a) and specific energy absorption (E_{sa}) of different honeycomb and foam composite filling structures

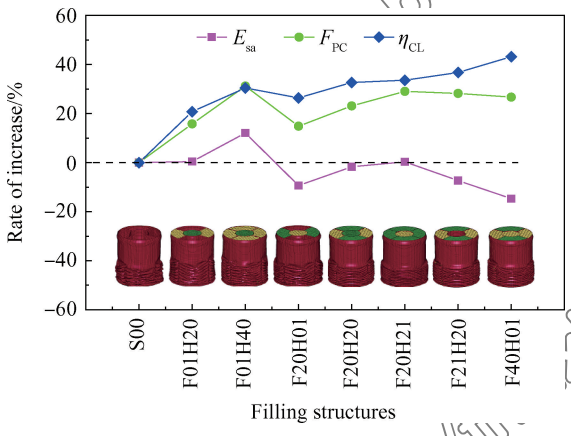


图 12　不同复合填充结构的变形模式和耐撞性指标(E_{sa}、F_{PC}和 η_{CL})的增长率

Fig. 12　Deformation and rate of increase of crashworthiness indicators (E_{sa}, F_{PC} and η_{CL}) of different composite filling structures

F40H01 和最低的 F20H01 分别比 S00 提高 43.2% 和 26.4%。并且全填充结构的 η_{CL} 增长率普遍高于部分填充结构，即其载荷均匀性和稳定性会更好。最后，从图 12 中还可看出，F01H40 在吸能及载荷特性上都具有较好的性能，因此，其为复合填充结构中耐撞性能最佳的结构。

综上可知，针对单一材料填充结构而言，部分填充结构比全填充结构具有更优异的耐撞性。多材料复合填充结构则是全填充结构比部分填充结构具有更好的耐撞性。

4　不同填充结构的耐撞性对比优化

4.1　优化设计

虽然通过第 3 节的分析可知，部分填充结构 H40、F01 及全填充复合结构 F01H40 有较好的耐撞性能。但是，这些结构的最优耐撞性仍取决于不同的几何及材料参数。因此，文中进一步以外管壁厚 T，蜂窝厚度 t 及泡沫密度 ρ 为设计变量，E_{sa} 和 F_{PC} 为设计响应，用多目标优化法来进一步探索 3 种结构的最佳耐撞性。3 种填充结构的多目标问题可描述为：首先，H40 的优化表达式为

$$\begin{cases} \min & F_{PC},\ -E_{sa} \\ \text{s.t.} & 0.5\ \text{mm} \leqslant T \leqslant 1.5\ \text{mm} \\ & 0.01\ \text{mm} \leqslant t \leqslant 0.1\ \text{mm} \end{cases} \tag{12}$$

式中，T 和 t 分别为多胞管和蜂窝芯的壁厚。

其次，F01 的优化表达式为

$$\begin{cases} \min & F_{PC},\ -E_{sa} \\ \text{s.t.} & 0.5\ \text{mm} \leqslant T \leqslant 1.5\ \text{mm} \\ & 0.2\ \text{g/cm}^3 \leqslant \rho \leqslant 0.5\ \text{g/cm}^3 \end{cases} \tag{13}$$

式中，ρ 为填充泡沫的密度。

最后，F01H40 的优化表达式为

$$\begin{cases} \min & F_{PC},\ -E_{sa} \\ \text{s.t.} & 0.5\ \text{mm} \leqslant T \leqslant 1.5\ \text{mm} \\ & 0.01\ \text{mm} \leqslant t \leqslant 0.1\ \text{mm} \\ & 0.2\ \text{g/cm}^3 \leqslant \rho \leqslant 0.5\ \text{g/cm}^3 \end{cases} \tag{14}$$

4.2　Kriging 近似模型及其精度验证

由于近似模型技术能较好地解决高度非线性数值分析时高计算成本的问题[21]，因此，文中采用 Kriging 近似技术来构建 E_{sa} 与 F_{PC} 的近似模型，结合多目标粒子群优化方法[22]以获得填充结构的最优设计参数。首先，采用均匀拉丁方试验设计方法分别对 H40、F01 和 F01H40 的设计空间进行了 30 次采样，以此建立设计响应的 Kriging 近似模型，并采用拟合度(R^2)、最大相对误差(e_{max})和平均相对误

http://fmcxb.buaa.edu.cn

差(e_{avg})三个指标来评价该近似模型的精度。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{q}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{q}(y_i - \bar{y})^2} \tag{15}$$

$$e_{max} = \max_{i\in\{1,\cdots q\}}\left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}\right) \tag{16}$$

$$e_{avg} = \frac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}\left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}\right) \tag{17}$$

式中：y_i 表示第 i 点的计算值；$\hat{y}_i$ 表示近似模型第 i 点的近似值；q 表示采样点的数量。由式(15)可知，R^2 的值越接近 1，表明近似模型越精确。

文中采用了 10 次随机采样样本来验证 Kriging 近似模型的精度，表 2 为 3 种填充结构的 E_{sa} 和 F_{PC} 在随机样本下的精度。可知，R^2 的值接近 1，并且，e_{max} 和 e_{avg} 均小于 5%。因此，Kriging 模型的精度可满足优化设计的需求。

表 2　环形蜂窝填充结构(H40)、中心泡沫填充结构(F01)和中心泡沫填充与环形蜂窝填充的复合结构(F01H40)的 E_{sa} 和 F_{PC} 的 Kriging 模型误差

Table 2　Error of Kriging model for E_{sa} and F_{PC} of the annular honeycomb filling structure (H40), the center foam filling structure (F01) and the center foam filling and annular honeycomb filling compound structure (F01H40)

	H40				F01				F01H40			
	F_{PC}/kN		E_{sa}/(kJ·kg^{-1})		F_{PC}/kN		E_{sa}/(kJ·kg^{-1})		F_{PC}/kN		E_{sa}/(kJ·kg^{-1})	
	Kriging	FEA	Kriging	FEA	Kriging	FEA	Kriging	FEA	Kriging	FEA	Kriging	FEA
1	113.14	119.02	29.84	28.96	71.47	68.37	18.36	19.07	54.23	51.84	16.82	17.39
2	98.92	101.98	25.93	26.67	76.98	80.62	21.66	22.52	82.08	86.19	22.50	21.64
3	68.53	66.72	24.72	23.81	71.02	74.51	21.10	20.35	113.96	118.57	27.65	28.46
4	44.51	42.43	20.12	20.74	58.82	56.16	17.01	16.37	62.27	65.13	19.46	19.87
5	83.52	88.46	24.60	25.55	95.52	99.39	22.09	22.99	52.71	55.23	21.88	21.07
6	50.05	47.73	20.02	19.40	41.98	44.06	17.68	17.02	91.27	87.06	22.87	23.42
7	88.16	90.72	26.25	27.02	52.06	50.09	17.12	16.54	106.03	110.81	25.62	26.38
8	61.02	63.16	26.41	25.63	59.88	62.15	18.75	19.46	82.42	78.84	26.44	25.77
9	118.03	114.37	28.35	29.48	96.56	93.00	22.38	23.29	48.58	50.74	20.81	20.22
10	83.56	80.93	23.01	23.94	33.30	32.17	14.10	13.57	93.47	89.40	24.02	24.84
e_{max}/%	4.94	3.88	4.73	3.91	4.84	3.97						
e_{avg}/%	3.64	3.31	4.20	3.79	4.47	3.01						
R^2	0.98	0.92	0.98	0.94	0.97	0.95						

Notes: e_{max}—Maximum relative error; e_{avg}—Mean relative error; R^2—Degree of fitting; Kriging—Kriging approximation model; FEA—Finite element analysis.

4.3　优化结果分析与讨论

采用多目标粒子群算法对 H40、F01 及 F01H40 填充结构的 Kriging 近似模型寻优，得到 3 种填充结构的 Pareto 最优解如图 13 所示。可知，H40 和 F01H40 的 Pareto 曲线非常接近，表明两者具有相对接近的最优耐撞性能，且它们的 Pareto 曲线在 F01 右下方，在峰值力相等时，H40 和 F01H40 有更高的比吸能，即 H40 和 F01H40 在 3 种结构中的耐撞性能最优，而 F01 的耐撞性能则相对较差。因此，蜂窝部分填充结构(H40)或蜂窝和泡沫复合填充结构(F01H40)是更理想的吸能结构。

为进一步验证优化结果的准确性，基于 Pareto 曲线，表 3 给出了 3 种结构在峰值力为 80 kN 的最优参数配置。可看出，Kriging 近似模型与有限元优化模型误差在 1%以内，因此，可以确保最优解的精确性。

此外，优化后的蜂窝填充结构(H40)及复合填

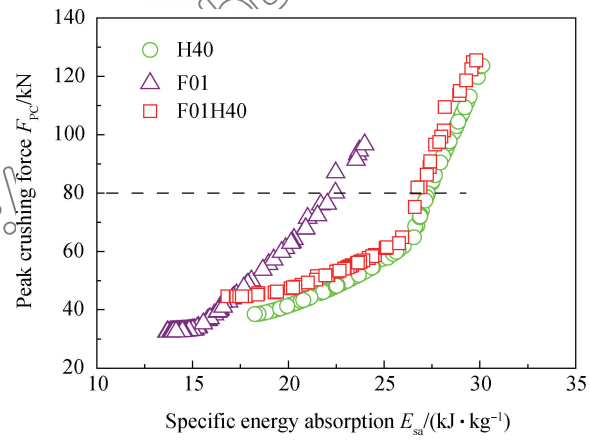


图 13　环形蜂窝填充结构(H40)、中心泡沫填充结构(F01)和中心泡沫填充与环形蜂窝填充的复合结构(F01H40)的 Pareto 曲线

Fig. 13　Pareto curves of the annular honeycomb filling structure (H40), the center foam filling structure (F01) and the center foam filling and annular honeycomb filling compound structure (F01H40)

http://fhclxb.buaa.edu.cn

表 3　环形蜂窝填充结构(H40)、中心泡沫填充结构(F01)和中心泡沫填充与环形蜂窝填充的复合结构(F01H40)关于 E_{sa} 和 F_{PC} 的最优设计参数

Table 3　Optimal design parameters of the annular honeycomb filling structure (H40), the center foam filling structure (F01) and the center foam filling and annular honeycomb filling compound structure (F01H40) for the design response of E_{sa} and F_{PC}

	T/mm	t/mm	ρ/(kg·m^{-3})	F_{PC}/kN		Error/%	E_{sa}/(kJ·kg^{-1})		Error/%
				Kriging	FEA		Kriging	FEA	
H40	0.76	0.10	—	79.86	79.76	0.12	27.29	27.28	0.02
F01	1.22	—	200	80.10	80.31	0.20	22.46	22.44	0.11
F01H40	0.77	0.10	230	80.90	80.44	0.57	26.75	26.73	0.05

Notes: T — Wall thickness of multi-cell tube; t — Wall thickness of honeycomb core; ρ — Density of foam; Kriging — Kriging approximation model; FEA — Finite element analysis.

充结构(F01H40)的 E_{sa} 分别比泡沫填充结构(F01)提高了 21.5%和 19.1%，表明蜂窝填充和复合填充结构的耐撞性明显优于泡沫填充结构。

5　结　论

本文对泡沫填充、蜂窝填充及两者复合填充结构进行了耐撞性研究。得到如下主要结构：

(1) 无论用蜂窝、泡沫还是两者复合填充均可有效地提高薄壁多胞管的总吸能，因为填充泡沫会大大增加结构质量，所以泡沫填充和复合填充未必能改善薄壁多胞结构的比吸能。

(2) 对蜂窝填充来说，填充环形胞元比中心胞元更有效。对泡沫填充则是中心胞元填充是更有效的填充方式。

(3) 不论是蜂窝填充还是泡沫填充，部分填充结构的耐撞性均好于全填充结构。但是针对两种材料的复合填充则是全填充结构具有更好的耐撞性。

(4) 多目标优化结果表明，部分填充蜂窝结构(H40)及复合填充结构(F01H40)是较优的耐撞吸能结构。

参考文献：

[1] 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.

[2] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(4): 727-734.

[3] SONG J, CHEN Y, LU G. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 54(2): 65-71.

[4] YU J G, FAN Z J. Cap of thin wall pipe welds in quasi-static crushing simulation process[J]. Automobile Engineering, 2006, 26(6): 750-754.

[5] ABRAMOWICZ W, JONES N. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5-6): 415-437.

[6] NIA A A, HAMEDANI J H. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(12): 946-954.

[7] 周鑫美，饶建强. 多胞结构在汽车前纵梁中的应用研究[J]. 机械制造，2010，48(1)：37-39.
ZHOU X M, RAO J Q. The application study of multi-cell structure in the automobile front longeron[J]. Machinery Manufacturing, 2010, 48(1): 37-39 (in Chinese).

[8] CHEN W, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam filled thin-walled structures in energy absorption[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(4): 287-306.

[9] TANG Z, LIU S, ZHANG Z. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 62(1): 75-84.

[10] 郑吉良，孙勇，彭明军. 等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的面内压缩性能[J]. 复合材料学报，2016，33(2)：408-417.
ZHENG J L, SUN Y, PENG M J. In-plane compressive properties for isosceles trapezoid honeycomb core of glass steel sandwich panel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 408-417 (in Chinese).

[11] 田爱平，余为，李东杰. 泡沫铝-空心玻璃微珠/环氧泡沫复合材料压缩及弯曲力学性能[J]. 复合材料学报，2013，30(4)：74-81.
TIAN A P, YU W, LI D J. Compressive and flexural mechanical properties of foam Al-HGM/epoxy foam composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 74-81 (in Chinese).

[12] HUSSEIN R D, DONG R, LU G, et al. Crushing response of square aluminum tubes filled with polyurethane foam and

http://fhclxb.buaa.edu.cn

aluminum honeycomb[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 110: 140-154.

[13] ÇAKIROGLU, C. Quasi-static crushing behavior of nomex honeycomb filled thin-walled aluminum tubes[D]. Izmir: Izmir Institute of Technology, 2008.

[14] PANDARKAR A, GOEL M D, HORA M S. Axial crushing of hollow and foam filled tubes: An overview[J]. Sādhanā, 2016, 41(8): 1-13.

[15] WANG Y, ZHAI X, WANG W. Numerical studies of aluminum foam filled energy absorption connectors under quasi-static compression loading[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 116: 225-233.

[16] CÔTÉ F, RUSSELL B P, DESHPANDE V S, et al. The through-thickness compressive strength of a composite sandwich panel with a hierarchical square honeycomb sandwich core[J]. Journal of Applied Mechanics, 2009, 76(6): 1089-1094.

[17] CHEN W G, DUBRAVKO R. Experimental study of crush behaviour of sheet aluminum foam-filled sections[J]. International Journal of Crashworthiness, 2000, 5(4): 447-468.

[18] HANGAI Y, TAKAHASHI K, YAMAGUCHI R, et al. Nondestructive observation of pore structure deformation behavior of functionally graded aluminum foam by X-ray computed tomography[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 556 (9): 678-684.

[19] ZHANG Y, LU M, SUN G, et al. On functionally graded composite structures for crashworthiness[J]. Composite Structures, 2015, 132: 393-405.

[20] YANG K, CHEN Y, LIU S, et al. Internally nested self-locked tube system for energy absorption[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 371-384.

[21] ACAR E, GULER M A, GERCEKER B, et al. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(1): 94-105.

[22] 张勇，刘舒然，赖雄鸣，等. 泡沫填充薄壁结构的抗弯性分析及多目标优化设计[J]. 机械工程学报，2016，52(24)：115-122.
ZHANG Y, LIU S R, LAI X M, et al. Bending resistance analysis and multiobjective optimization design of foam filled thin-walled structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 115-122 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn