

波纹型铝合金分层蜂窝结构轴向耐撞性分析

高大威 于文博 刘哲 王明杰 李辉

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要:【目的】针对汽车吸能盒结构在碰撞载荷下面临的初始峰值压溃力过高与能量吸收效率不足的问题,提出一种新型波纹结构分层蜂窝填充管(Hierarchical Honeycomb-Filled Tube, HHFT),旨在通过结构优化设计提升其轴向耐撞性能。【方法】首先,构建HHFT的有限元模型,分析圆形、三角形及矩形3种波纹形态对结构耐撞性的影响;其次,通过对比常规蜂窝填充管与波纹结构HHFT的力-位移响应与吸能特性,验证波纹槽设计对峰值压溃力的削减作用;然后,系统研究外壁厚度、第0阶与第1阶蜂窝壁厚等关键几何参数对结构比吸能、初始峰值压溃力及压溃力效率的影响规律;最后,结合Kriging模型与非支配排序遗传算法二代(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II),以诱导槽形态与厚度为设计变量开展多目标优化,获得兼顾高吸能与低峰值力的优化构型。【结果】结果表明,三角形波纹分层蜂窝填充管的初始峰值压溃力较常规填充管降低约36.2%,比吸能提升11.3%,压溃力效率提高至0.89;外壁厚度对初始峰值压溃力起主导作用,第1阶蜂窝壁厚对能量吸收贡献显著,而第0阶壁厚影响较小;优化后结构在保证质量不变的条件下,耦合效应吸能占比最高达16.67%,整体耐撞性显著提升。

关键词: 薄壁结构; 层次结构; 耐撞性设计; 波纹管; 仿真分析

中图分类号: U463.83 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.04.004

0 引言

如何在交通事故中有效保障人员生命安全,是汽车工业持续关注的核心问题。吸能盒通过可控的溃缩变形吸收碰撞能量,可显著降低传递至乘员舱的冲击载荷^{[1]834-840}。薄壁结构因具备质量轻、比强度高、制造成本低及吸能特性优异等特点,被广泛用作吸能装置的核心单元^{[1]834-840[2]}。研究表明,优化吸能盒内部填充结构的几何构型是提升整车正面碰撞安全性的有效途径之一。

为增强薄壁结构的耐撞性能,国内外学者围绕填充结构的构型设计开展了大量研究,其中蜂窝结构因其卓越的能量吸收能力而备受关注。刘涛等^[3]基于能量法推导了新型十字形负泊松比蜂窝结构的泊松比解析式,揭示了杆长比例系数与冲击速度对其变形模式的影响规律。张永忠等^[4]针对传统薄壁结构比吸能低、压溃力效率不高的问题,仿生设计了20种多级嵌套蜂窝薄壁结构,其中YMT20-3.6性能最佳,比吸能达到了10.87 J/g。邹震等^[5]采用变密度拓扑优化方法,研制了参数化密度映射蜂窝结构,阐明了映射系数与相对密度在不同冲击速度下对其面内变形模式及能量吸收的影响。任光辉等^[6]对比分析了三角形波

纹夹芯板与等面密度单层板的抗冲击性能,揭示了其动态损伤过程与能量耗散机制。邓云飞等^[7]通过落锤冲击试验,探究了冲击位置与能量对铝合金圆波纹夹芯板响应特性及失效模式的影响。崔岸等^[8]对泡沫填充铝合金波纹夹芯板进行了结构分析与优化,获得了面板与芯层厚度的最优匹配方案。陆欢等^[9]将三维负泊松比结构引入吸能盒设计,通过试验验证了其在低速冲击下的应用可行性。在结构优化设计方法方面,马芳武等^[10]以梯度负泊松比点阵结构为填充芯,以外壳厚度与芯层梯度为变量进行了多目标优化。任明伟等^[11]结合碳纤维湿法模压工艺,对复合材料防撞梁的铺层参数进行了优化。陈静等^[12-13]通过试验获得了碳纤维吸能盒的最佳锥角与诱导孔布局,并采用非支配排序遗传算法二代(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)对防撞梁铺层厚度进行了多目标优化,实现了65%的减重和耐撞性的提升。徐中明等^[14]以诱导槽间距为变量,采用NSGA-II对前纵梁吸能盒进行了优化,改善了其变形模式与能量吸收效率。综上,大多数研究都围绕着吸能盒的材料、板厚、截面形状,涉及吸能盒诱导槽的不同形状及不同形状下耐撞性指标的综合优化的研究较少。

基于上述研究的局限,本文结合分层蜂窝的吸

收稿日期: 2024-07-29 修回日期: 2024-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52405283, 52175239)

作者简介: 高大威,女,1979年生,辽宁抚顺人,博士,教授; 主要研究方向为智能车身设计; E-mail: gddwww1999@163.com。

刘哲(通信作者),男,1991年生,山东济宁人,博士,讲师; 主要研究方向为智能车身设计; E-mail: zheliu@foxmail.com。

引用格式: 高大威,于文博,刘哲,等. 波纹型铝合金分层蜂窝结构轴向耐撞性分析[J]. 机械强度,2026,48(4):30-38.

GAO Dawei, YU Wenbo, LIU Zhe, et al. Axial crashworthiness analysis of aluminum alloy hierarchical honeycomb-filled structures with corrugated configurations[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(4):30-38.



免费获取

能优势与波纹结构的诱导效应,提出一系列新型分层蜂窝填充管(Hierarchical Honeycomb-Filled Tube, HHFT)。通过有限元仿真与试验验证,系统研究不同波纹形态与壁厚参数对 HHFT 耐撞性能的影响规律,并采用 Kriging 模型与 NSGA-II 对关键结构参数进行多目标优化,以期为高性能吸能结构的设计提供理论依据与技术参考。

1 有限元建模和试验验证

1.1 分层蜂窝填充波纹管

以普通车辆的结构为例,给出了吸能盒几何构型

及其在车辆中的相对位置。图 1 所示为轴向载荷作用下的 HHFT 的原理。为了全面研究分层蜂窝结构对分层蜂窝填充波纹管耐撞性的影响,列举了 3 种典型的波纹管:圆形波纹(Circular Corrugation, CC)、三角形波纹(Triangular Corrugation, TC)、矩形波纹(Rectangular Corrugation, RC)。试验中,HHFT 的底部固定在刚性壁上,冲击块的初始速度为 15 m/s、质量为 600 kg。其中,波纹管高度 H 为 200 mm,宽度 L 为 60 mm,设波纹管厚度为 T_1 ,第 1 阶蜂窝厚度为 T_1 ,第 0 阶蜂窝厚度为 T_0 。

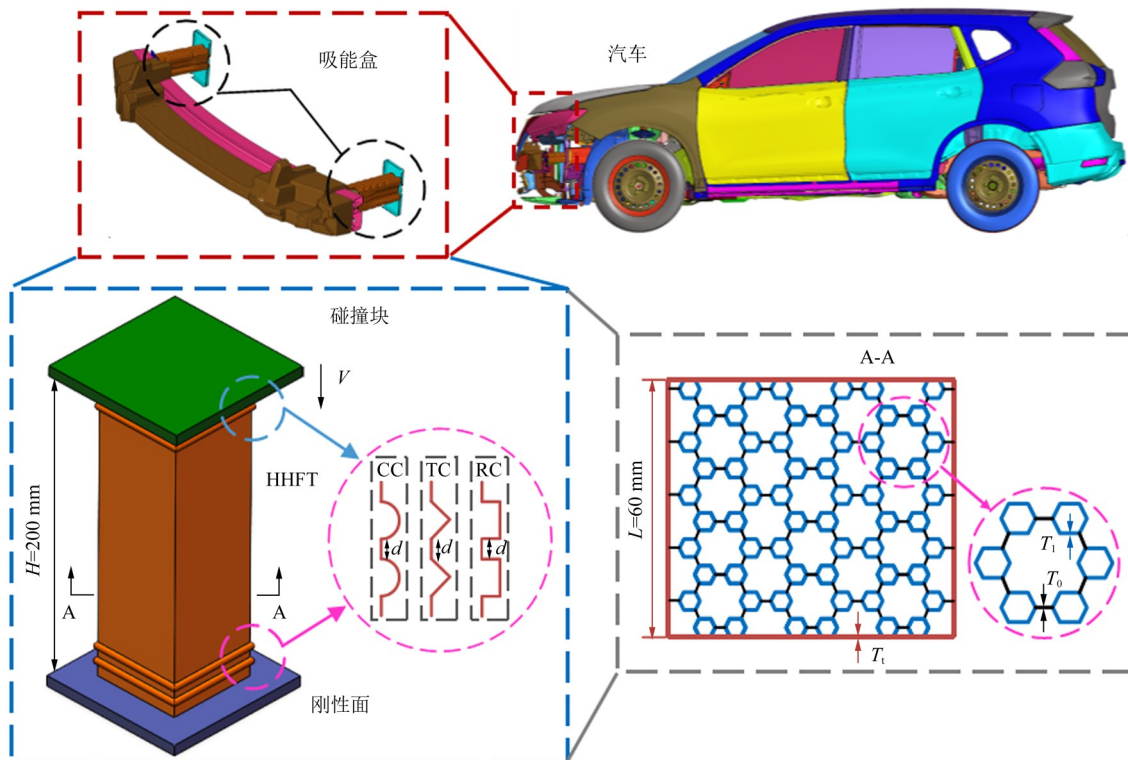


图 1 HHFT 结构安装位置与截面示意图

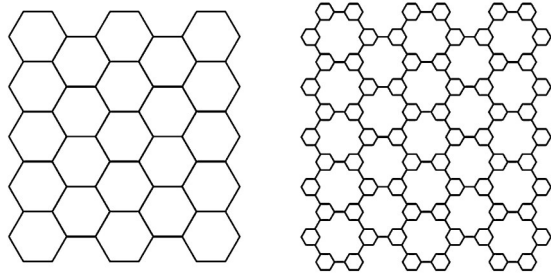
Fig. 1 Schematic diagram of installation location and cross section of the HHFT structure

分层蜂窝通过分形方法构建:将正六边形网络的每个顶点替换为缩小的六边形拓扑,重复该过程形成更高阶的分形结构。本文采用的填充蜂窝为 1 阶分层蜂窝,其拓扑结构如图 2 所示。

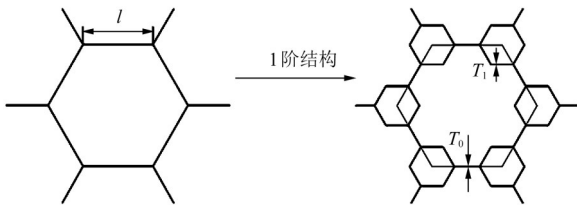
1.2 有限元模型

基于图 1 所示构型,利用 Ls-Dyna 971 非线性显式有限元程序建立 4 种结构的有限元模型,如图 3 所示。采用 Belytschko-Tsay 简化积分薄壳单元,在厚度方向上设置 5 个积分点,建立标准蜂窝填充管(Honeycomb-Filled Tube, HFT)、圆形分层蜂窝填充波纹管(HHFT-CC)、三角形分层蜂窝填充波纹管(HHFT-TC)、矩形分层蜂窝填充波纹管(HHFT-RC)的有限元模型。上述 4 种填充结构的管壁厚度分别为 1.00、1.08、1.00、0.93 mm,4 种蜂窝的厚度为 0.10、

0.09、0.09、0.09 mm。上述 4 种填充结构的质量均为 0.19 kg。试验发现 1 mm×1 mm 的单元尺寸足以满足壳体单元的精度,且在计算成本和有限元分析精度之间取得合理的平衡。蜂窝和管采用弹塑性材料(Ls-Dyna 中的 MAT_24)表征,冲击块采用刚性材料。蜂窝和管均采用 AA6060-T5 铝合金加工而成,其材料参数为:密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;弹性模量为 68 GPa;屈服强度为 165 MPa;泊松比为 0.3^[15]。波纹管与蜂窝结构之间采用“Automatic surface to surface”接触,避免变形过程中的相互渗透。采用“Automatic single surface”接触用于模拟自接触交互。刚性面与填充结构之间采用“Node to surface”接触,静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.3 和 0.2^[16]106475。



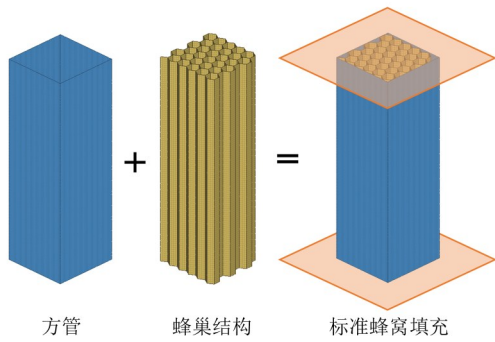
(a) 规则蜂窝和1阶分层蜂窝截面图



(b) 单胞规则蜂窝和1阶分层蜂窝

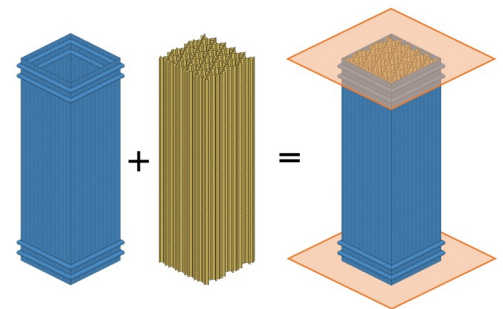
图2 标准蜂窝与1阶分层蜂窝截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of standard honeycomb and first-order hierarchical honeycomb cross sections



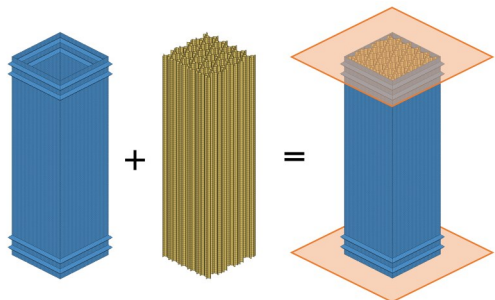
方管 蜂巢结构 标准蜂窝填充

(a) HFT



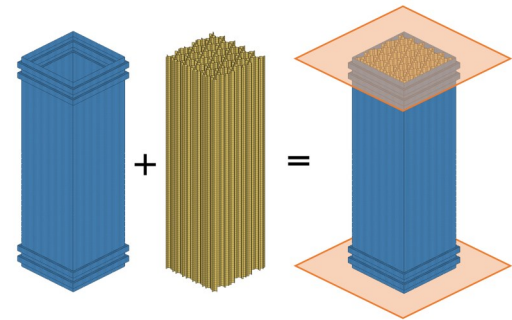
圆形波纹管 分层蜂巢结构 分层蜂窝填充圆形波纹管

(b) HHFT-CC



三角形波纹管 分层蜂巢结构 分层蜂窝填充三角形波纹管

(c) HHFT-TC



矩形波纹管 分层蜂巢结构 分层蜂窝填充矩形波纹管

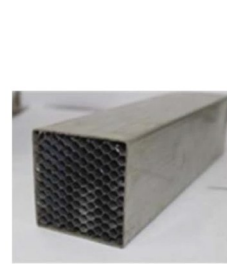
(d) HHFT-RC

图3 4类填充管结构有限元模型

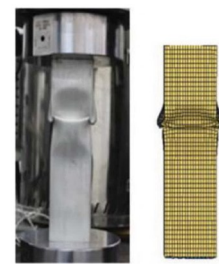
Fig. 3 Finite element models of four types of filled tube structures

1.3 试验验证

数值模型的好坏直接影响到有限元分析的精度。为了保证后续有限元分析的准确性,有必要通过试验对数值模型的准确性进行验证。基于试验边界条件,建立HFT结构的数值分析模型,并进行压缩试验。图4所示为不同压缩位移下的试验与数值模拟的变形对比结果^[17]。由图4可知,试验和数值模拟的变形模式上具有较好的一致性。由图5可知,试验与仿真的力-位移曲线吻合较好。因此,本文所建立的有限元模型具有足够的精度,可用于后续HHFT结构的耐撞性分析与优化。



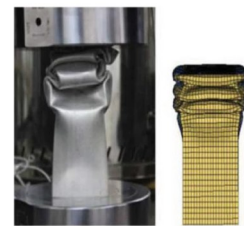
(a) HFT 试样



(b) HFT 被压缩 20 mm



(c) HFT 被压缩 90 mm



(d) HFT 被压缩 130 mm

图4 HFT结构压缩变形试验与仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of compression deformation test and simulation results of the HFT structure

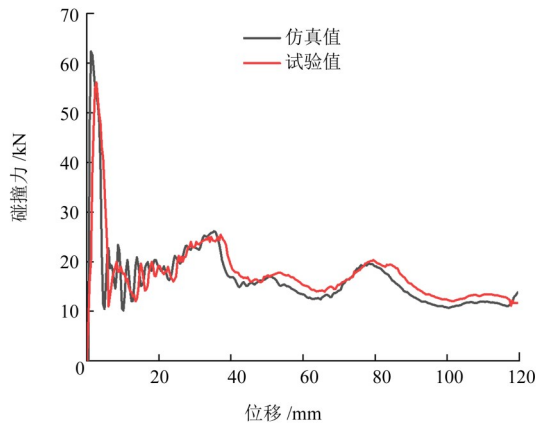


图 5 HFT 结构压缩力-位移试验与仿真曲线

Fig. 5 Compression force-displacement test and simulation curves of the HFT structure

2 耐撞性分析

2.1 防撞性指标

为定量评价 HHFT 的耐撞性能,采用以下 3 个关键指标。比能吸收 (Specific Energy Absorption, SEA) 定义为单位质量吸收的能量,表示能量吸收性能,可表示为^{[16]106475}

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

式中, M 为整个结构的质量; E_a 为轴向压溃过程中吸收的总能量。 E_a 可以表示为

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

式中, d 为有效变形位移; $F(x)$ 为轴向压溃力。

压溃力效率 (Crush Force Efficiency, CFE) 用于对设备在压缩状态下的碰撞载荷效率进行评价,可表示为

$$e_{CFE} = \frac{F_{mean}}{F_{IPCF}} \quad (3)$$

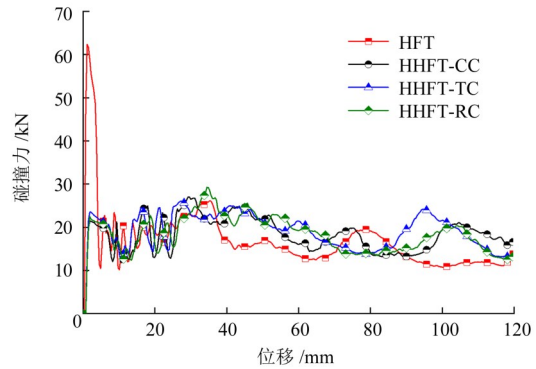
式中, e_{CFE} 为压溃力效率,值越高表示负载一致性越好; F_{IPCF} 为初始压溃阶段的初始峰值压溃力 (Initial Peak Crushing Force, IPCF), 定义为有效压缩位移期间的初始最大瞬时压溃力; F_{mean} 为总有效变形时的平均压溃力,表示承载力水平,可定义为

$$F_{mean} = \frac{\int_0^d F(x) dx}{d} \quad (4)$$

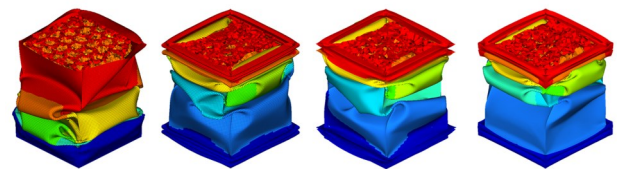
2.2 比较分析

考虑到过大的力在短时间内会对人体造成不可预测的伤害,具有优良耐撞性的结构设计应避免过大的 IPCF。图 6(a) 所示为不同波形构型蜂窝状填充结构在轴向载荷作用下的力-位移曲线,图 6(b) 所示为

不同模型仿真压缩后的三维结果。与 HFT 相比, HHFT 的 IPCF 较低,说明 HHFT 具有良好的 IPCF 性能。表 1 所示为所有耐撞性指标的具体值。由表 1 可知,与 HFT 相比, HHFT 不仅具有更低的初始峰值冲击力,还具有更高的 E_{SEA} 和 e_{CFE} 。综上所述, HHFT 比 HFT 具有更强的耐撞性。



(a) 力-位移曲线



(b) 模型压溃

图 6 不同 HHFT 结构轴向压缩力-位移曲线与压溃变形模型

Fig. 6 Axial compression force-displacement curves and crushing deformation models of different HHFT structures

表 1 4 类填充管结构耐撞性指标数据

Tab. 1 Crashworthiness index data of four types of filled tube structures

序号	结构	$E_{SEA}/(J/g)$	F_{IPCF}/kN	e_{CFE}
1	HFT	12.16	62.35	0.31
2	HHFT-CC	12.86	21.42	0.77
3	HHFT-TC	13.44	23.52	0.89
4	HHFT-RC	13.34	22.4	0.74

蜂窝填充结构的能量吸收由 3 部分构成: 薄壁管变形吸能、蜂窝芯变形吸能, 以及二者间的耦合效应吸能。图 7 所示为不同类型蜂窝状填充结构各组成部分的吸能-位移曲线和吸能占比信息。由图 7 可知, 薄壁管与蜂窝的耦合效应可以提高蜂窝填充管的吸能能力, HHFT 的耦合效应占总吸能的比例高于 HFT; 对于相互作用效应的能量吸收百分比贡献, HFT 为 8.16%, HHFT-CC 为 14.83%, HHFT-TC 为 14.16%, HHFT-RC 为 16.67%, 表明波纹管与分层蜂窝之间的相互作用能更有效地激发材料塑性变形, 从而提升整体吸能能力。

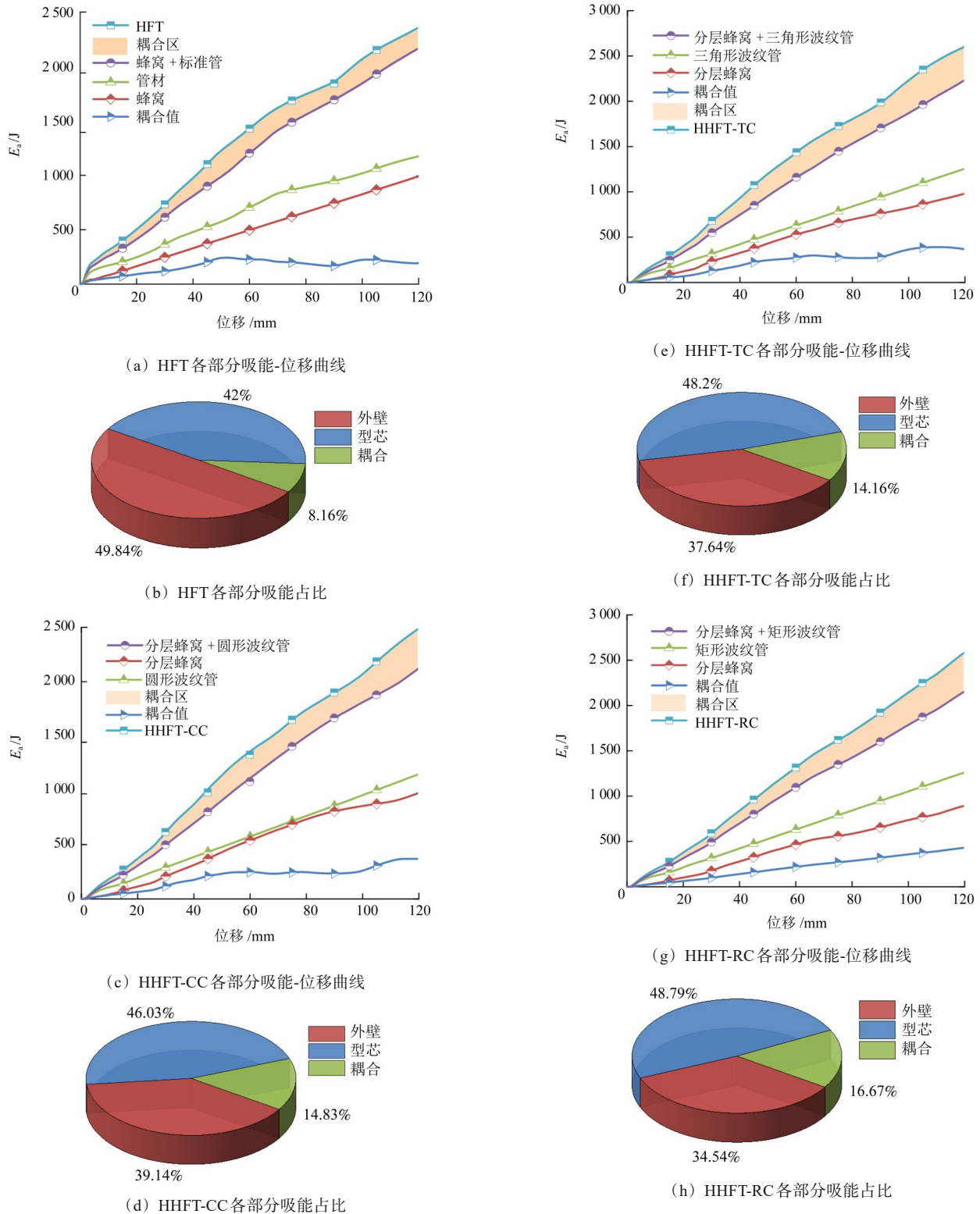


图 7 不同填充管结构各部件吸能-位移曲线与吸能占比分布

Fig. 7 Energy absorption-displacement curves and energy absorption proportion distribution of each component of different filled tube structures

2.3 参数影响

填充结构的壁厚与吸能盒的质量、刚度、初始弹性响应有关,直接影响吸能盒的耐撞性能。为了研究不同部位壁厚对结构性能的影响,本文考虑HHFT 3种位置厚度参数的变化:波纹管外壁厚度 T_1 ,第0阶蜂窝壁厚 T_0 ;1阶蜂窝壁厚 T_1 。 T_1 、 T_0 、 T_1 的采样空间

分别设置为 $\{0.5\text{ mm}, 1.0\text{ mm}, 1.5\text{ mm}\}$ 、 $\{0.05\text{ mm}, 0.10\text{ mm}, 0.15\text{ mm}\}$ 、 $\{0.05\text{ mm}, 0.10\text{ mm}, 0.15\text{ mm}\}$ 。

图8所示为比能吸收随不同波纹形状和壁厚 T_1 、 T_0 、 T_1 的变化趋势。其中,图8(a)、图8(d)、图8(g)分别表示HHFT-CC、HHFT-TC和HHFT-RC结构在 $T_1=0.5$ 、 1.0 、 1.5 mm厚度下的SEA。同样地,分别对 T_1

和 T_0 厚度取值为 0.05、0.10、0.15 mm 时,比能吸收的变化结果分别如图 8(b)、图 8(e)、图 8(h)和图 8(c)、图 8(f)、图 8(i)所示。由图 8 可知, T_i 、 T_0 和 T_1 对 HHFT 结构的 E_{SEA} 的影响是相似的。以 HHFT-CC 为例,当 T_i 保持不变时,增加 T_1 可以有效增加结构的 E_{SEA} ,且 T_1 对 E_{SEA} 的影响大于 T_0 。当 T_1 保持不变时, T_i 对 E_{SEA} 的影响趋势明显,而 T_0 对 E_{SEA} 的影响变化相对平缓。当 T_0 为 0.05、0.10、0.15 mm 时,3 个表面位置

接近,说明 T_0 在设计空间中对 E_{SEA} 的影响不显著。此外,随着设计空间中 T_i 值的增加, E_{SEA} 先减小后增大,响应面的间隙随之变动;随着 T_1 的增加, E_{SEA} 不断增大,响应面间的最大间隙出现;随着 T_0 的变化, E_{SEA} 变化不明显,响应面的间隙基本不变。通过观察不同响应面的间隙,可以直观地观察到不同参数对 E_{SEA} 的影响程度。其中,参数效应对 E_{SEA} 的贡献度由大到小排序为 $T_1 > T_i > T_0$ 。

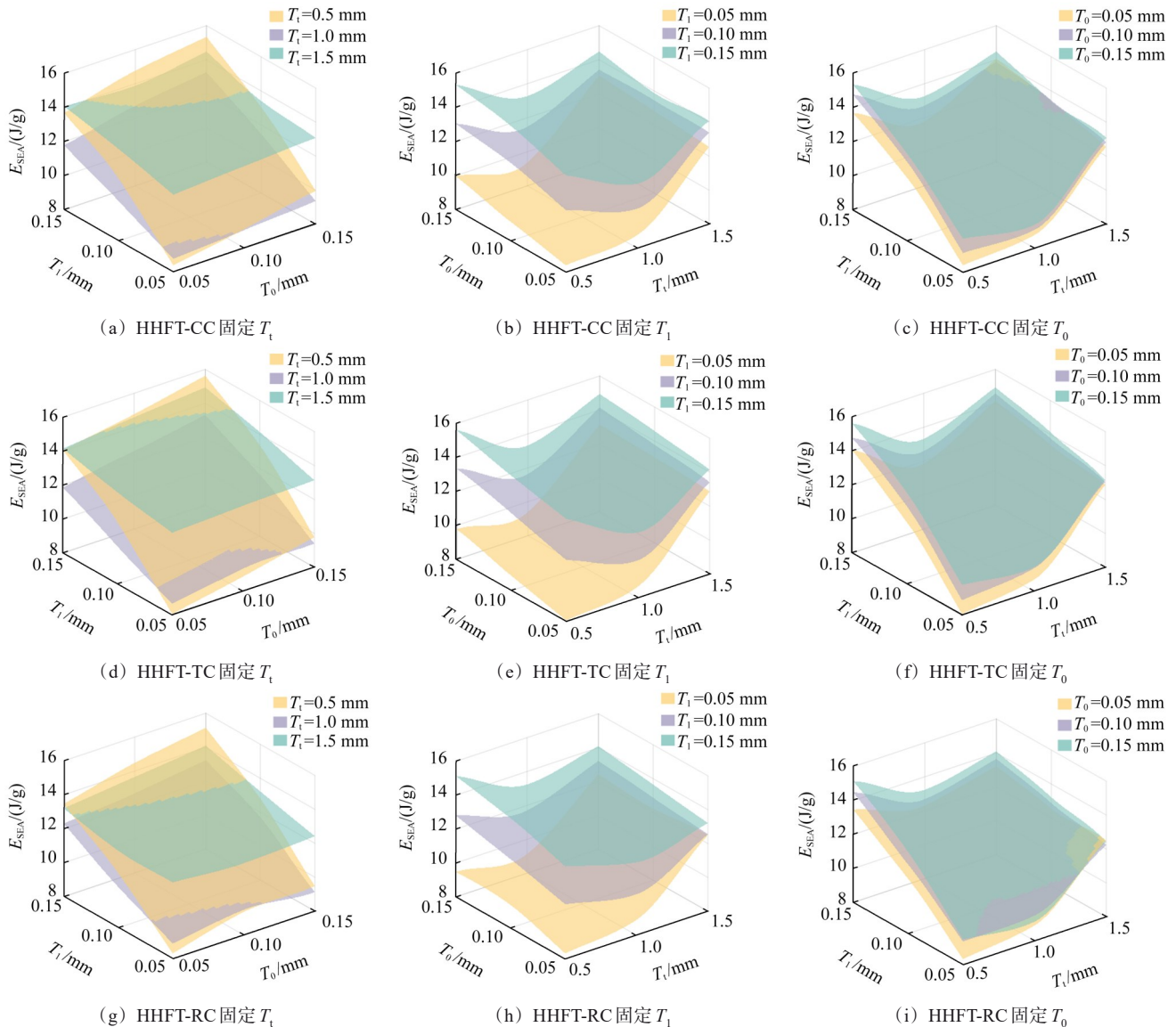


图 8 不同结构与壁厚参数下比吸能 E_{SEA} 变化规律

Fig. 8 Variation law of specific energy absorption E_{SEA} under different structures and wall thickness parameters

图 9 所示为吸能盒 F_{IPCF} 随不同结构和结构壁厚 T_i 、 T_0 、 T_1 的变化趋势。其中,图 9(a)、图 9(d)和图 9(g)分别为 HHFT-CC、HHFT-TC 和 HHFT-RC 3 种结构在 $T_i=0.5$ 、1.0、1.5 mm 时的 F_{IPCF} 。图 9(b)、图 9(e)、图 9(h)和图 9(c)、图 9(f)、图 9(i)分别为不同波纹形状下, T_0 、 T_1 分别取值 0.05、0.10、0.15 mm 时的

F_{IPCF} 。以 HHFT-CC 结构为例,在保持 T_i 不变的情况下,改变设计空间中的 T_0 和 T_1 后,3 个表面的起伏变化很小,说明更改内部填充结构的壁厚对整个结构的 F_{IPCF} 的影响并不明显,即 T_0 和 T_1 对 F_{IPCF} 的影响很小。由此可见,薄壁管的厚度参数对整个吸能盒结构的 F_{IPCF} 起着决定性的作用。

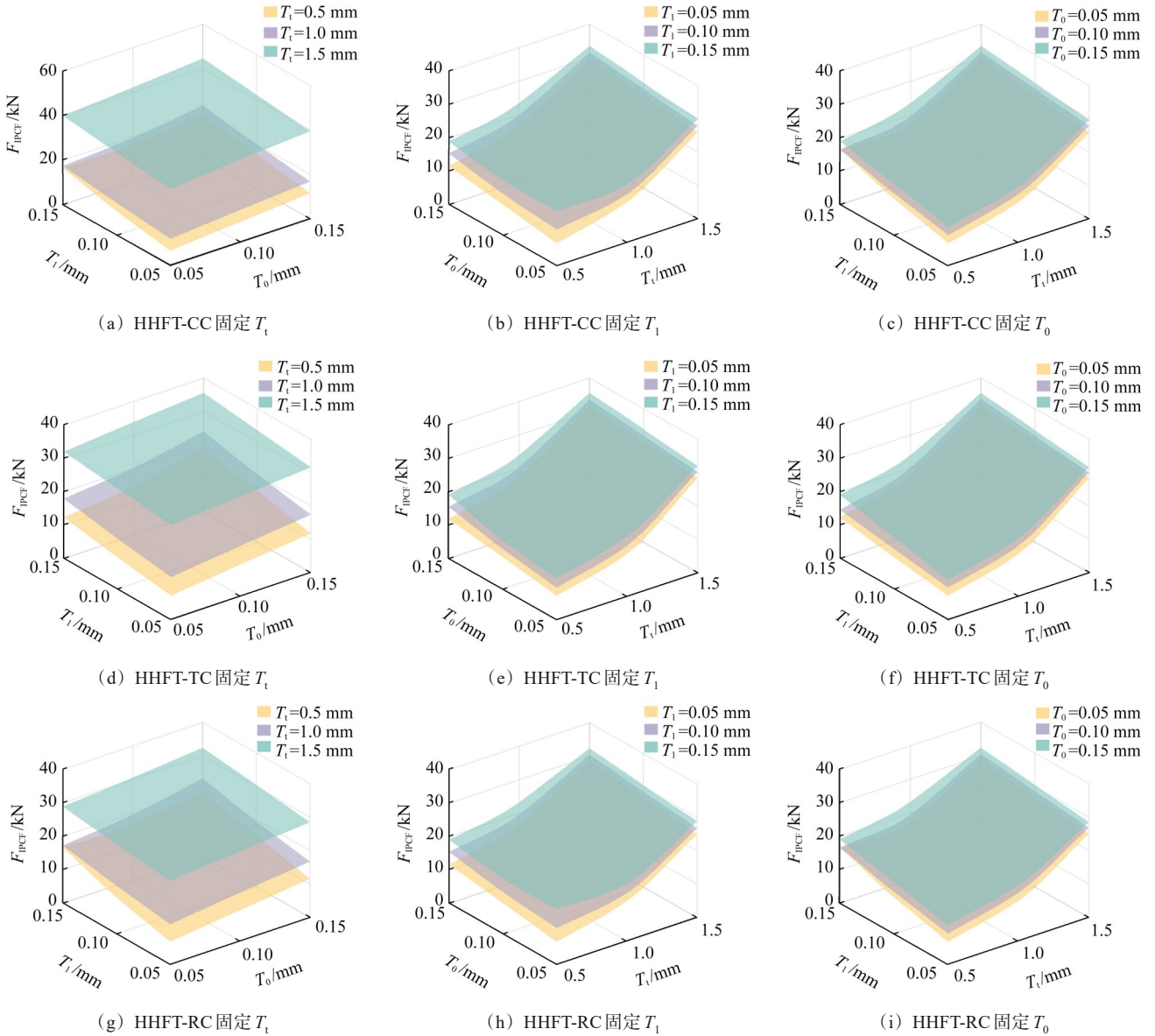


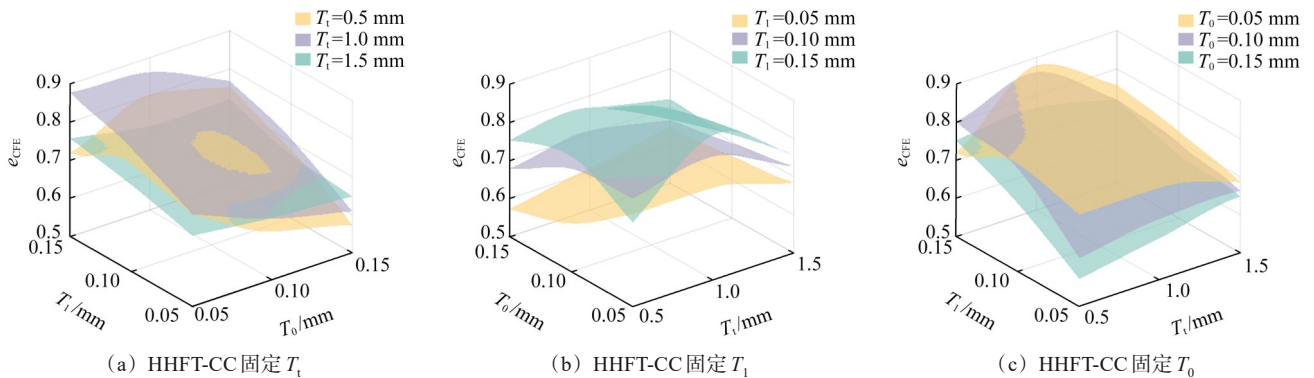
图9 不同结构与壁厚参数下初始峰值压溃力 F_{IPCF} 变化规律

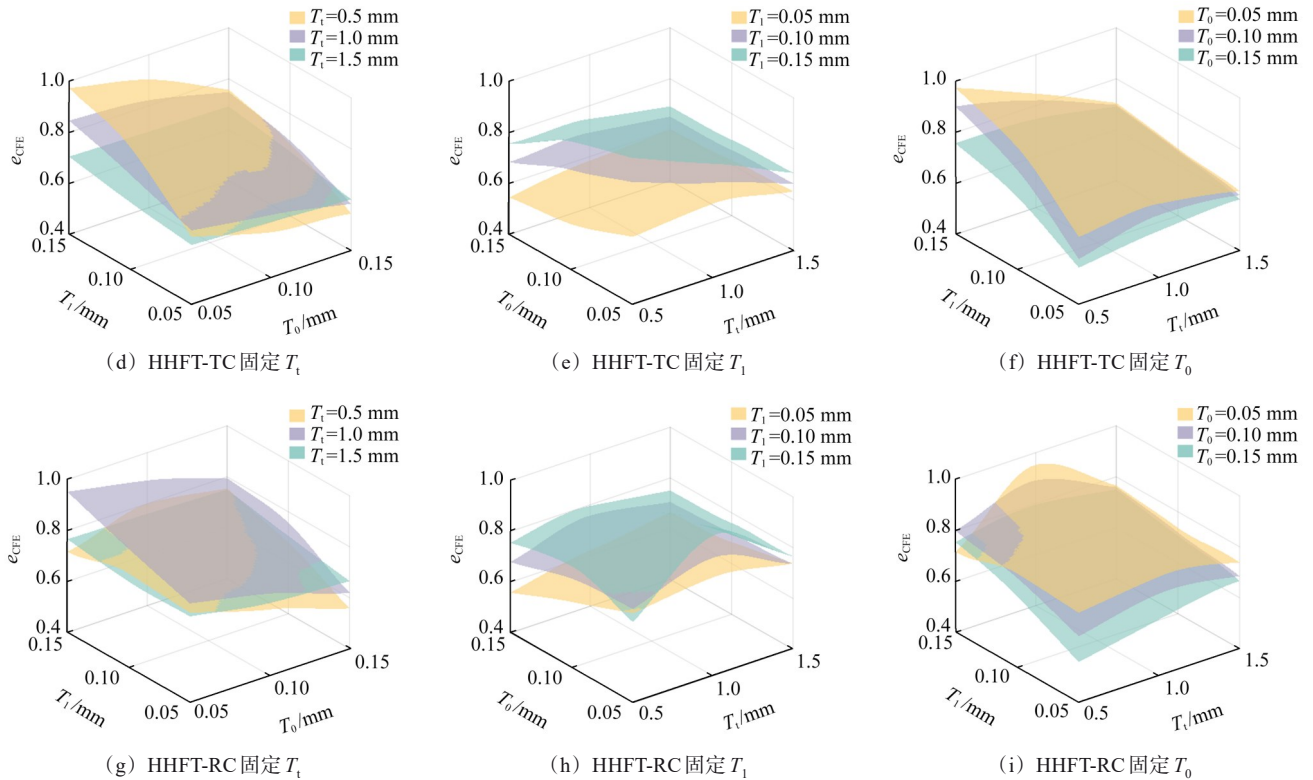
Fig. 9 Variation law of initial peak crushing force F_{IPCF} under different structures and wall thickness parameters

同样地,对不同结构和结构壁厚下 e_{CFE} 进行探究,结果如图10所示。结果显示, T_i 、 T_0 和 T_1 对 e_{CFE} 均有显著影响。对比图10(b)、图10(e)、图10(h)与图10(c)、图10(f)、图10(i)可知, e_{CFE} 与 T_i 呈正相关,与 T_0 呈负相关。因此,要获得更高的 e_{CFE} ,需要平衡参数 T_i 和 T_0 ,进

而寻求一个最优值。

由以上分析可知,参数 T_i 和 T_1 对吸能盒 E_{SEA} 的影响比 T_0 大, T_i 对吸能盒 F_{IPCF} 的影响比 T_0 和 T_1 显著, T_i 、 T_0 和 T_1 均对吸能盒 e_{CFE} 有影响。可见,适当调整不同局部位参数的参数,可调节吸能盒的各项性能。



图 10 不同结构与壁厚参数下压溃力效率 e_{CFE} 变化规律Fig. 10 Variation law of crush force efficiency e_{CFE} under different structures and wall thickness parameters

3 结论

提出了一系列具有波纹结构的新型分层蜂窝填充模型。根据分析结果,得出如下主要结论:

1) 与常规填充蜂窝管相比,波纹结构分层蜂窝填充管不仅具有更低的 IPCF,还具有更高的比能吸收和压溃效率。分层蜂窝作为薄壁结构的填充芯具有较好的耦合效果,设置波纹槽有利于提高结构的耐撞性。

2) 分析不同局部位置的参数效应可知, T_i 和 T_1 对 E_{SEA} 的影响显著高于 T_0 , T_i 对 F_{IPCF} 的影响显著高于 T_0 和 T_1 。此外, T_i 、 T_0 和 T_1 均对 e_{CFE} 有显著影响。可见,适当调整不同局部位置的参数,有助于调节耐撞性指标。

本文提出的新型波纹结构分层蜂窝填充管具有优越的耐撞性能,为吸能防护结构提供了更多的思路。

参考文献 (References)

- [1] 杨鄂川,黄路,庞通,等. 铝制多胞吸能盒多目标优化设计[J]. 机械强度,2021,43(4):834-840.
YANG Echuan, HUANG Lu, PANG Tong, et al. Multi-objective optimal design of aluminum cell [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 834-840. (In Chinese)
- [2] 林长波,李东海,邓聚才,等. 某商用车驾驶室结构碰撞仿真与优化研究[J]. 机械强度,2024,46(2):381-387.
LIN Changbo, LI Donghai, DENG Jucan, et al. Research on collision simulation and optimization of cab structure of a commercial vehicle [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(2): 381-387. (In Chinese)
- [3] 刘涛,肖正明,黄江成,等. 新型十字形负泊松比蜂窝结构的抗冲击性能[J]. 振动与冲击,2023,42(11):183-192.
LIU Tao, XIAO Zhengming, HUANG Jiangcheng, et al. Impact resistance of new cross negative Poisson's ratio honeycomb structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(11): 183-192. (In Chinese)
- [4] 张永忠,马云海. 具有高效吸能特性的新型仿蜂窝多级薄壁结构[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(1):259-267.
ZHANG Yongzhong, MA Yunhai. New honeycomb multi-stage thin-walled structure with high efficiency energy absorption characteristics [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(1): 259-267. (In Chinese)
- [5] 邹震,徐峰祥,徐智钊,等. 基于拓扑优化的变密度蜂窝结构参数化设计及冲击性能研究[J]. 振动与冲击,2023,42(22):29-39.
ZOU Zhen, XU Fengxiang, XU Zhizhao, et al. Parametric design and impact performance research of variable density honeycomb structure based on topology optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 29-39. (In Chinese)
- [6] 任光辉,赵鑫,邓云飞,等. 铝合金三角波纹夹芯板抗平头弹冲击的损伤特性研究[J]. 振动与冲击,2024,43(3):179-188.
REN Guanghui, ZHAO Xin, DENG Yunfei, et al. Damage characteristics of aluminum alloy triangular corrugated sandwich plate against flat headed bullet impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(3): 179-188. (In Chinese)
- [7] 邓云飞,安静丹,任光辉,等. 铝合金圆波纹夹芯板对半球形体的低速冲击响应特性及失效机制[J]. 材料导报,2022,36(24):169-174.
DENG Yunfei, AN Jingdan, REN Guanghui, et al. Response on the characteristics and failure mechanism of aluminum alloy circular corrugated sandwich panels under low velocity impact [J]. Materials Reports, 2022, 36(24): 169-174. (In Chinese)

- [8] 崔岸,刘芳芳,张晗,等. 车身泡沫填充铝合金波纹夹芯板结构性能分析与优化[J]. 汽车工程,2019,41(10):1221-1227.
CUI An, LIU Fangfang, ZHANG Han, et al. Performance analysis and optimization of foam-filled aluminum-alloy corrugated sandwich panel structure for vehicle body[J]. Automotive Engineering, 2019,41(10):1221-1227. (In Chinese)
- [9] 陆欢,王小鹏,陈天宇. 具有3D负泊松比结构填充的新型吸能盒设计与耐撞性研究[J]. 西安交通大学学报,2024,58(10):188-198.
LU Huan, WANG Xiaopeng, CHEN Tianning. Design and crashworthiness of novel energy-absorption box filled with the 3D negative Poisson's ratio structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024,58(10):188-198. (In Chinese)
- [10] 马芳武,孙昊,梁鸿宇,等. 自相似分层蜂窝结构多碰撞工况耐撞性研究[J]. 汽车工程,2022,44(6):886-892.
MA Fangwu, SUN Hao, LIANG Hongyu, et al. Study on crashworthiness of self-similar hierarchical honeycomb structure under multiple collision conditions [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6):886-892. (In Chinese)
- [11] 任明伟,洪治国,周玉敬,等. 复合材料防撞梁低速碰撞优化设计[J]. 复合材料学报,2022,39(2):854-862.
REN Mingwei, HONG Zhiguo, ZHOU Yujing, et al. Low-speed collision optimization design of composite bumper[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022,39(2):854-862. (In Chinese)
- [12] 陈静,徐森,刘震,等. 基于碰撞安全性的铝合金吸能盒轻量化优化[J]. 汽车工程,2021,43(2):241-247.
CHEN Jing, XU Sen, LIU Zhen, et al. Lightweight optimization of aluminum alloy energy absorbing box for crash safety[J]. Automotive Engineering, 2021,43(2):241-247. (In Chinese)
- [13] 陈静,唐傲天,田凯,等. 碳纤维复合材料防撞梁轻量化设计[J]. 汽车工程,2020,42(3):390-395.
CHEN Jing, TANG Aotian, TIAN Kai, et al. Lightweight design of carbon fiber composite anti-collision beam [J]. Automotive Engineering, 2020,42(3):390-395. (In Chinese)
- [14] 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)
- [15] SUN G Y, JIANG H, FANG J G, et al. Crashworthiness of vertex based hierarchical honeycombs in out-of-plane impact[J]. Materials & Design, 2016, 110:705-719.
- [16] GAO Q, LIAO W H. Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 201:106475.
- [17] ZHANG Y, XU X, LU M H, et al. Enhance crashworthiness of composite structures using gradient honeycomb material[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018, 23(5):569-580.

Axial crashworthiness analysis of aluminum alloy hierarchical honeycomb-filled structures with corrugated configurations

GAO Dawei YU Wenbo LIU Zhe WANG Mingjie LI Hui

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of excessive initial peak crushing force and insufficient energy absorption efficiency of automotive crash boxes under impact loading, a novel hierarchical honeycomb-filled tube with corrugated configurations was proposed to enhance its axial crashworthiness through structural optimization. [Methods] Firstly, finite element models of hierarchical honeycomb-filled tubes were established to analyze the influence of three corrugation patterns (circular, triangular, and rectangular) on crashworthiness. Secondly, the force-displacement responses and energy absorption characteristics of conventional honeycomb-filled tubes and corrugated hierarchical honeycomb-filled tubes were compared to validate the peak force reduction effect of corrugation design. Then, the effects of key geometric parameters, including outer wall thickness, 0-order and 1-order cell wall thicknesses, on specific energy absorption (SEA), initial peak crushing force (IPCF), and crushing force efficiency (CFE) were systematically investigated. Finally, multi-objective optimization was performed using the Kriging model and NSGA-III algorithm, with corrugation shapes and wall thicknesses as design variables, to achieve an optimal configuration balancing high energy absorption and low peak force. [Results] The results show that the triangular corrugated hierarchical honeycomb-filled tube reduces the IPCF by approximately 36.2%, increases the SEA by 11.3%, and improves the CFE to 0.89 compared to the conventional tube. The outer wall thickness plays a dominant role in determining the IPCF, while the 1-order cell wall thickness contributes significantly to energy absorption, and the effect of the 0-order cell wall thickness is relatively minor. Under constant mass, the optimized structure achieves an interaction energy absorption ratio of up to 16.67%, demonstrating substantially enhanced overall crashworthiness.

Key words: Thin-walled structure; Hierarchical structure; Crashworthiness design; Corrugation tube; Simulation analysis

Corresponding author: LIU Zhe, E-mail: zheliu@foxmail.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52405283, 52175239)

Received: 2024-07-29 Revised: 2024-09-16

(编辑:刘欢欢)