

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0549

星形混合多胞管的耐撞性数值与理论研究*

孔志成, 胡俊, 郭智平

(安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为研发轻质高效的能量吸收装置, 提出了基于多边形截面与星形截面混合设计的星形混合多胞管。采用数值模拟方法研究了星形混合多胞管在轴向加载条件下的吸能特性和变形模式, 并结合简化超折单元理论推导了该管的平均碰撞力理论公式。研究表明, 星形混合多胞管的多边形截面与星形截面之间产生了协同效应, 额外吸收了更多的冲击动能; 当多边形边数 $N=6$ 时, 混合截面的协同性最好; 当 $N=8$ 时, 该管的能量吸收效率最高。在此基础上, 进一步开展了几何参数分析, 发现壁厚对于星形混合多胞管的耐撞性有显著的影响, 碰撞力水平随着壁厚的增加而线性增长。此外, 星形角度的变化对耐撞性的影响相对较小, 碰撞荷载效率和比吸能随着星形角度的增加表现出先增大后减小; 当星形角度 $\alpha=120^\circ$ 时, 该管拥有最佳的耐撞性。

关键词: 薄壁管; 混合截面设计; 能量吸收; 参数分析; 理论预测

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Numerical and theoretical investigations on crashworthiness of star-shaped hybrid multi-cell tubes

KONG Zhicheng, HU Jun, GUO Zhiping

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In order to develop a lightweight and efficient energy absorption device, a novel type of the star-shaped hybrid multi-cell (SHM) tubes based on the hybrid design of polygonal cross-section and star-shaped cross-section was proposed. The finite element (FE) models of the polygonal thin-walled (PT) tubes, the star-shaped thin-walled (ST) tubes and the SHM tubes were established by ABAQUS, and the reliability of the FE model was verified by simulating quasi-static axial crush tests. Then, the energy absorption characteristics and deformation modes of three kinds of thin-walled tubes under axial loading conditions were studied by numerical simulation. Based on the simplified super folding element (SSFE) theory, the theoretical formula of the mean crushing force of the SHM tubes under the progressive folding deformation mode is established. The numerical results show that there is a synergistic effect between the polygonal cross-section and the star-shaped cross-section of the SHM tubes. Compared with the PT tubes and the ST tubes, the energy absorption of the SHM tubes is significantly improved. When the number of polygon edges $N=6$, the cross-section synergistic effect of the SHM tubes is the best, and the energy absorption efficiency is the highest when $N=8$. Subsequently, the investigations on geometric parameters of the SHM tubes are carried out, and the effects of wall thickness and star angle on crashworthiness are discussed respectively. It is found that the wall thickness has obvious influence on the crashworthiness of the SHM tubes, and the crushing force level increases linearly with the increase of the wall thickness. In addition, the change of the star angle has little influence on crashworthiness. The crushing load efficiency and the specific energy absorption increase first and then decrease with the increase of the star angles. When the star angle $\alpha=120^\circ$, the SHM tubes has the most excellent crashworthiness. The research results can provide design methods and theoretical guidance for the cross-section design of multi-cell structures.

Keywords: thin-walled tubes; hybrid cross-section design; energy absorption; parametric analysis; theoretical prediction.

* 收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-03-20

第一作者: 孔志成(1997—), 男, 硕士研究生, 770589451@qq.com

通信作者: 胡俊(1973—), 男, 博士, 教授, 852527982@qq.com

薄壁管具有轻质高强度、高吸能等特点, 已广泛应用于工程领域^[1-4]。在薄壁管的耐撞性研究中, 数值模拟在研究效率方面具有明显优势^[5-7], 理论预测可作为辅助工具, 用于分析薄壁管在特定阶段的性能变化趋势^[8]。Zhao 等^[9]通过建立有限元模型, 探讨了三角形、方形、六边形等截面形状的薄壁管在多种冲击角度下的力学响应, 认为薄壁管的耐撞性与截面形状有着密切的关系。Deng 等^[10]采用实验分析了制造工艺对星形管耐撞性的影响, 发现星形管的肋角数过多会降低吸能效果, 基体材料会对变形模式产生影响。Tran 等^[11]研究了三角形多胞管的吸能特性, 发现胞元个数越多, 越有利于能量吸收。Wang 等^[12]针对方形多胞管进行了深入的讨论, 认为在同等的截面尺寸下, 增加方形多胞管的胞元数量可以减小折叠波长度。Ma 等^[13]发现, 相比于单胞元的圆形薄壁管, 圆形多胞管的初始峰值力更低, 变形过程更稳定。因此, 多胞结构在耐撞性应用方面具有很大的潜力。

最近, 仿生设计和层级设计作为多胞结构的两种重要截面设计思路, 成为研究热点^[14-16]。Zhang 等^[17]效仿甲虫鞘翅的微结构, 将多边形管的节点用圆柱代替, 认为仿生多边形管的承载能力更强, 且八边形截面的吸能效率最高。Ha 等^[18]研究了仿生树状结构, 分析了树状分形阶数对耐撞性的影响, 并结合理论预测对有限元数值模拟结果进行了验证。Fu 等^[19]基于竹子横截面纹理, 设计出了带肋条的仿生圆形管, 发现当肋条数为 6 时的仿生圆形管具有最佳的耐撞性。Gong 等^[20]提出了一组方形层级多胞管, 利用截面的自相似性, 将大胞元的边缘替换成多个形状相似的小胞元, 并研究了该管在不同排列形式下的性能变化。Xu 等^[21]采用顶点分层设计, 在主六边形的顶点处添加子六边形, 由此设计出具有自相似性的六边形层级结构, 证明了层级设计是提高薄壁结构耐撞性的有效方法。

但是, 仿生结构和层级结构的问题在于截面形状十分复杂, 对于制造工艺的要求较高。为此, 有学者提出了混合截面设计思路, 由该设计方法得出的截面形状相对精简, 同时保持了良好的吸能性能。Vinayagar 等^[22]将三角形薄壁管填充至圆形薄壁管内, 发现这种混合方式有助于增强管的变形稳定性。Bigdeli 等^[23]研究了圆形与方形通过肋杆连接的混合结构, 分析了方形截面的边长与厚度对混合结构耐撞性的影响。Xiong 等^[24]将多边形混合多胞结构应用于车辆的保险杠系统, 讨论了该结构在实际工况下的力学性能。然而, 在上述的研究中, 针对混合截面协同效应的分析不够细致, 混合截面的形状也不应局限于常见的圆形与多边形之间的组合。

本文进一步完善混合截面的设计理念, 建立基于多边形截面与星形截面混合设计的星形混合多胞管; 采用数值模拟的方法, 研究星形混合多胞管在轴向加载条件下的吸能特性和变形模式, 并通过模拟准静态加载实验验证有限元模型的可靠性; 在此基础上, 进一步讨论几何参数对耐撞性的影响, 基于简化折单元理论^[25]推导星形混合多胞管的平均碰撞力理论公式。

1 模型与验证

1.1 几何设计与数值模型

混合截面的设计思路如图 1 所示, 将多边形薄壁管 (polygonal thin-walled tubes, PT) 的截面与星形薄壁管 (star-shaped thin-walled tubes, ST) 的截面叠加, 从而形成了具有混合截面性质的星形混合多胞管 (star-shaped hybrid multi-cell tubes, SHM)。薄壁管试件的命名规律如下: 前面的字母为薄壁管的英文缩写, 末位的数字 N 为多边形的边数或星形的角数。图 1 中作为示例的星形角度 $\alpha=120^\circ$, 薄壁管的壁厚用 t 表示, 所有截面的外接圆尺寸相同, 外接圆直径 $D=69.28$ mm。

如图 2 所示, 利用 ABAQUS 有限元软件建立薄壁管的数值模型, 试件长度 $L=110$ mm, 通过 S4R 壳单元进行建模, 厚度方向设置 5 个积分点。薄壁管试件的上端设置为移动端, 采用一块质量为 500 kg^[26] 的刚性板以 $v=10$ m/s 的速度向下冲击; 下端为固定端, 在整个冲击过程中保持静止。管体与刚性板之间采用通用接触, 摩擦因数为 0.2^[26]。选取铝合金 AA6061-O 和不锈钢分别作为薄壁管试件和刚性板的基体材料, 相关的材料参数如表 1 所示, 图 3 给出了 AA6061-O 的工程应力-应变曲线^[26]。本模型忽略了应变率的影响^[26-28]。此外, 选取 PT6 试件开展了有限元网格收敛性测试, 计算结果如图 4 所示, 综合考虑后选取 1.0 mm 进行网格划分, 其中 A 为吸收能量。

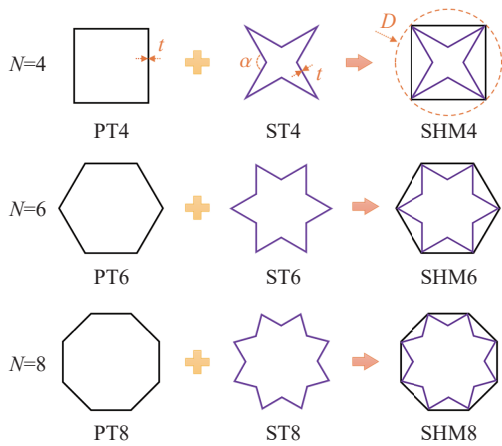


图 1 混合截面的设计方法

Fig. 1 Design method of hybrid cross-sections

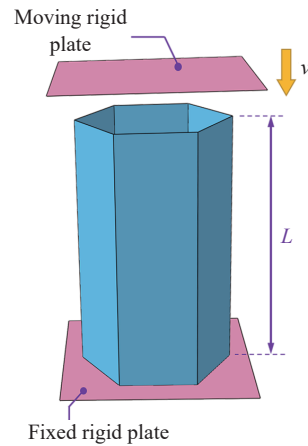


图 2 有限元模型的边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of finite element model

表 1 有限元模型的材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	初始屈服应力/MPa	极限应力/MPa
不锈钢	7800	210	0.3	—	—
AA6061-O ^[26]	2700	68.2	0.3	96.8	195.0

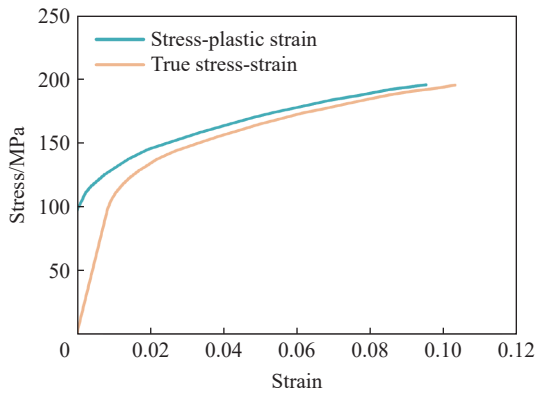


图 3 铝合金 6061-O 的工程应力-应变曲线^[26]

Fig. 3 Engineering stress-strain curves of AA6061-O^[26]

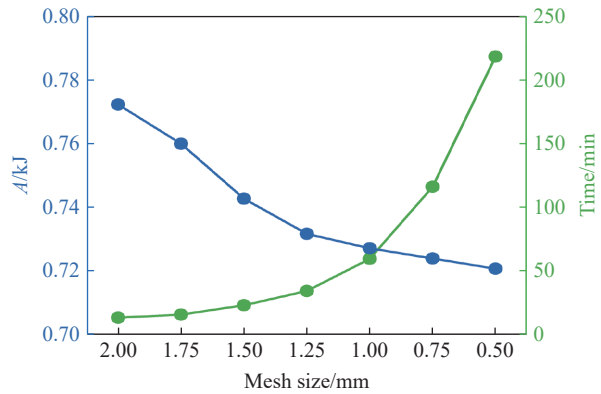


图 4 TP6 试件的网格收敛性测试

Fig. 4 Mesh convergence test on TP6

1.2 耐撞性指标

薄壁管塑性变形的能量吸收 A 定义为:

$$A = \int_0^d F(x) dx \tag{1}$$

式中: $F(x)$ 为瞬时碰撞力, d 为压缩位移。

比吸能 a 表示单位质量下薄壁管吸收的能量:

$$a = \frac{A}{m} \tag{2}$$

式中: m 为薄壁管的总质量。

碰撞荷载效率 η , 用于评价薄壁管的承载稳定性:

$$\eta = \bar{F} / F_p \tag{3}$$

式中: F_p 为初始峰值碰撞力; \bar{F} 为平均碰撞力, $\bar{F} = A/d$ 。

1.3 可靠性验证

通过模拟准静态加载实验以检验有限元模型的可靠性, 为了提高有限元软件的计算效率, 以 $v=0.5 \text{ m/s}$ 的低速加载模拟准静态过程^[26-28]。如图 5 所示, 采用六边形薄壁管, 模拟试件与实验试件的尺寸为: $L=120 \text{ mm}$, $D=72 \text{ mm}$, $t=1.2 \text{ mm}$ ^[28]。此外, 还设置了与实验相同的边界条件, 试件底部与底板绑定, 以最大程度还原实验过程。图 5 给出了实验与模拟之间的数据对比和变形对比。结果表明, 数值模拟得出的碰撞力波幅与实验结果保持了良好的一致性, F_p 和 \bar{F} 的误差较小, 分别为 2.87% 和 5.86%。同时, 二者的变形特征相似, 均为渐进式折叠变形, 有相同的折叠波数。因此, 有限元模型具备足够的精确度, 可以有效地模拟出薄壁管的性能趋势和变形规律。

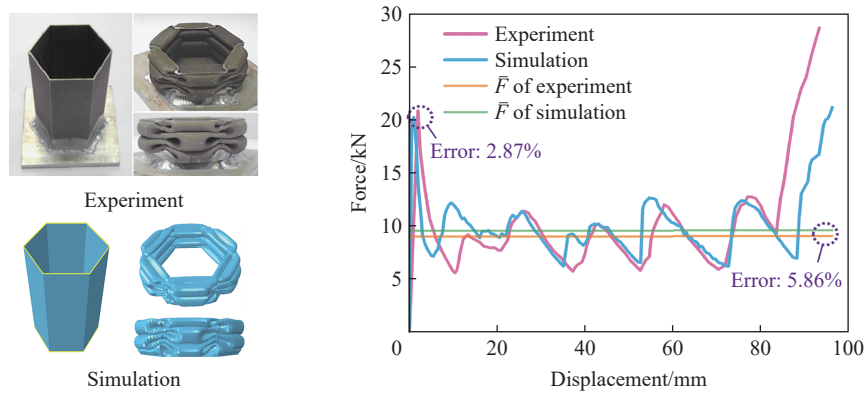


图 5 实验与有限元模拟的结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and finite element simulation results

2 数值模拟

2.1 混合截面的协同效应

2.1.1 吸能特性

为了分析混合截面设计带来的性能增强现象, 同时揭示截面之间形成的协同效应, 图 6 对比了多边形薄壁管、星形薄壁管和星形混合多胞管在不同的多边形边数 N (星形角数) 情况下的碰撞力-位移曲线, 三种薄壁管的壁厚 $t=1.0 \text{ mm}$, 星形角度 $\alpha=120^\circ$ 。研究发现, 薄壁管在受到外力冲击时, 碰撞力首先会迅速上升达到较高的局部峰值, 随后减小并保持在相对较低的平台处上下波动。与多边形薄壁管和星形薄壁管相比, 星形混合多胞管的碰撞力曲线显著提升, 故采用混合截面设计可以增加管的整体刚度, 从而产生了更强的力学响应。由式 (1) 可知, 薄壁管吸收的能量等于碰撞力曲线的积分, 因此, 碰撞力曲线越高, 管吸收的冲击动能就越多。

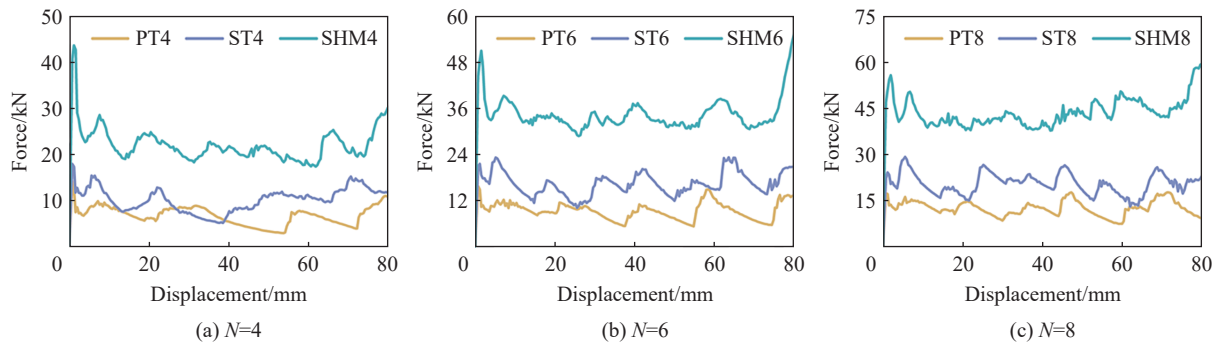


图 6 三种薄壁管的碰撞力-位移曲线

Fig. 6 Force-displacement curves of three thin-walled tubes

图 7 给出了三种薄壁管的能量吸收曲线, 可以清楚地看到, 星形混合多胞管的能量吸收曲线始终高于多边形薄壁管与星形薄壁管的总和, 图中的阴影部分代表了星形混合多胞管通过协同效应额外吸收的能量。

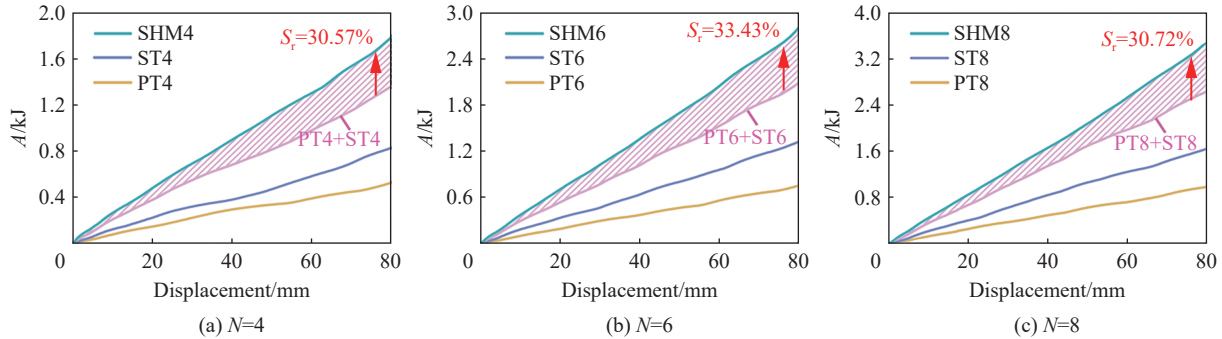


图 7 三种薄壁管的能量吸收

Fig. 7 Energy absorption curves of three thin-walled tubes

这里引入协同比概念^[26], 以描述协同效应在吸能方面的作用体现, 协同比定义为

$$S_r = \frac{A_{SHM} - (A_{PT} + A_{ST})}{A_{PT} + A_{ST}} \quad (4)$$

式中: S_r 为协同比, $S_r=0$ 表明没有产生协同效应, S_r 值越大, 则混合截面的协同性越好; A_{PT} 、 A_{ST} 和 A_{SHM} 分别为多边形薄壁管、星形薄壁管和星形混合多胞管的能量吸收值。

星形混合多胞管的协同比均超过了 30%, 在多边形边数 $N=6$ 时获得了最高的协同比, 达到了 33.43%。上述结果表明, 混合截面产生的协同效应明显增强了星形混合多胞管的吸能性能, 协同比的大小与多边形边数 N 有关, 六边形截面与六角星形截面之间的组合拥有最好的截面协同性。

表 2 详细比较了三种薄壁管的耐撞性指标值。不难发现, 薄壁管的耐撞性与多边形边数 N 是正相关的, N 越大, 薄壁管的碰撞力水平越高。得益于协同效应的积极作用, SHM4 吸收的能量 A 要比对应 N 相同的多边形薄壁管与星形薄壁管之和多出 0.40 kJ, 而 SHM6 和 SHM8 则分别多出 0.68 和 0.78 kJ。值得注意的是, 星形薄壁管的 η 要高于星形混合多胞管, 这是由于其 F_p 相对较低导致的结果, 但也可以说明, 星形截面具有更好的承载稳定性。此外, PT8、ST8 和 SHM8 的比吸能 a 均为同类型薄壁管中的最高, 且 SHM8 拥有最佳的能量吸收效率, 其比吸能 a 比起 ST8 高出 12.35%, 相比于 PT8 则达到了 60.62%。因此, 采用混合截面设计的星形混合多胞管表现出了明显的性能优势, 通过协同效应额外吸收的能量会随着 N 的增加而增加, 薄壁管的综合耐撞性得到了有效改善。

2.1.2 变形模式

选取 $N=8$ 时, 三种薄壁管的变形过程进行分析, 如图 8 所示, 压缩位移 d 的记录点分别为总位移的 10%、30%、50% 和 70%, 图中的 lobes 表示折叠波数。研究发现, 三种薄壁管的压溃褶皱均从初始接触的上端逐步发展, 随着塑性坍塌过程的进行, 相邻管壁的变形相互干扰、交替折叠, 表现出渐进式折叠变

表 2 三种薄壁管的耐撞性指标值

Table 2 Crashworthiness indicators of three thin-walled tubes

试件	F_p /kN	\bar{F} /kN	η /%	A /kJ	a /(kJ·kg ⁻¹)
PT4	14.16	6.55	46.25	0.51	8.68
PT6	15.98	9.38	58.69	0.72	11.74
PT8	17.48	12.49	71.47	0.97	15.32
ST4	17.94	10.41	58.03	0.80	11.96
ST6	21.77	16.52	75.87	1.27	17.88
ST8	24.22	20.63	85.20	1.59	21.90
SHM4	43.58	22.15	50.83	1.71	13.64
SHM6	50.99	34.53	67.73	2.67	20.05
SHM8	55.65	43.24	77.70	3.34	24.60

形模式。当 $d=77\text{ mm}$ 时, 三种薄壁管最终产生的折叠波数量有所不同, PT8 和 ST8 分别产生了 3 个和 4 个折叠波数, 而 SHM8 的折叠波数达到 4~5 个。通过对 SHM8 变形过程细节的观察, 发现其折叠波的形成伴随着混合截面之间强烈的协同效应: 内外两层管壁同时受压并发生塑性屈曲, 内层的星形管壁对外层的多边形管壁具有约束作用, 限制其延伸与扭转, 从而缩短了折叠波长度, 获得了产生更多折叠波数量的潜力。

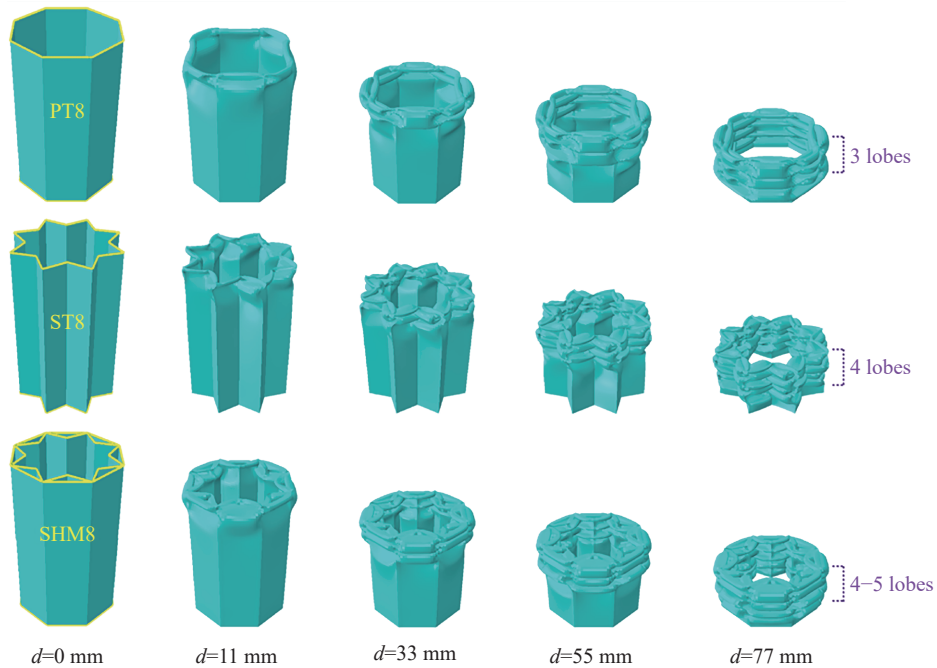


图 8 PT8、ST8 和 SHM8 的变形过程

Fig. 8 Deformation processes of PT8, ST8 and SHM8

图 9 全方位比较了三种薄壁管压溃后 ($d=77\text{ mm}$) 的顶面、侧面和剖面变形视图, 从中可以看到, 薄壁管产生的折叠波数量与多边形边数 N 有着密切的关系, 当 $N=4$ 时折叠波数最少, $N=6$ 时数量居中, 而

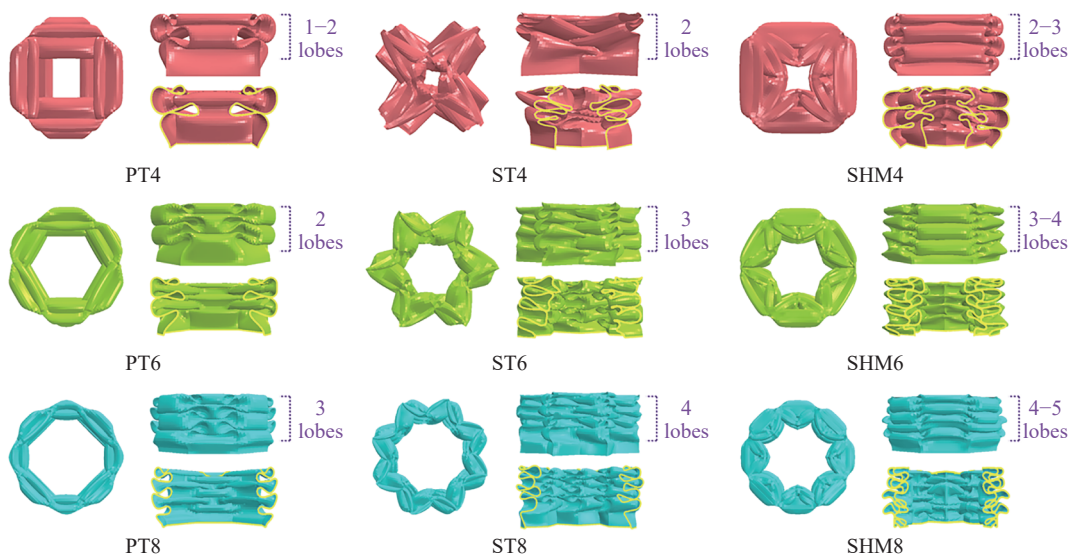


图 9 三种薄壁管压溃后的变形视图

Fig. 9 Deformation views of three thin-walled tubes after collapse

当 $N=8$ 时折叠波的数量最多。同时, 混合截面的协同效应增强了管的折叠变形能力, 星形混合多胞管的折叠波数要比多边形薄壁管多出 1~2 个, 材料利用效率明显提高。折叠波的数量决定了薄壁管在压溃过程中形成的塑性铰数, 对于管的吸能性能有着直接性的影响^[15]。综上所述, 协同效应在变形模式中的体现, 归因于内外两层管壁的不同步变形, 以及管壁之间形成的约束作用, 并取决于多边形边数 N 的大小。随着 N 的增加, 参与折叠变形的角单元数量随之增多, 内外壁接触的面积加大, 促进了塑性铰的形成, 耗散冲击动能的能力显著提升。

2.2 参数分析

2.2.1 壁厚对耐撞性的影响

壁厚的大小决定了薄壁管的刚度, 因此, 有必要讨论壁厚对星形混合多胞管耐撞性的影响。壁厚的变化范围定义在 0.8~1.6 mm 之间, 星形角度 α 固定为 120° 。如图 10 所示, 星形混合多胞管的 F_p 和 \bar{F} 会随着壁厚的增加而呈现出线性增长的趋势, 且与多边形的边数 N 有关, N 越大, 曲线的增长幅度就越大。其中, SHM8 的 F_p 在壁厚 1.6 mm 时达到了最高的 106.56 kN, 比起壁厚 0.8 mm 时提升了 157.58%, 说明该管在初始阶段的承载能力得到了明显改善。如图 11 所示, 壁厚的增加对于提高星形混合多胞管的 η 和 a 同样有着促进的作用。研究发现, 星形混合多胞管在 $N=8$ 时的吸能效率明显优于 $N=4$ 和 $N=6$ 时。SHM8 的 η 最大值出现在壁厚 1.4 mm 时, 达到了 83.52%, 之后有所减小, 故星形混合多胞管的 η 存在上限, 继续增加壁厚则不利于获得较好的承载稳定性。此外, SHM8 的 a 在壁厚 1.6 mm 时取得最大值 31.20 kJ/kg, 比起壁厚 0.8 mm 时多了 41.68%, 相较于同等厚度情况下的 SHM4 高出 69.03%。可以认为, 壁厚会对星形混合多胞管的能量吸收产生显著的影响, 适当的增加壁厚或增加多边形边数 N , 都是提升耐撞性的有效方法。

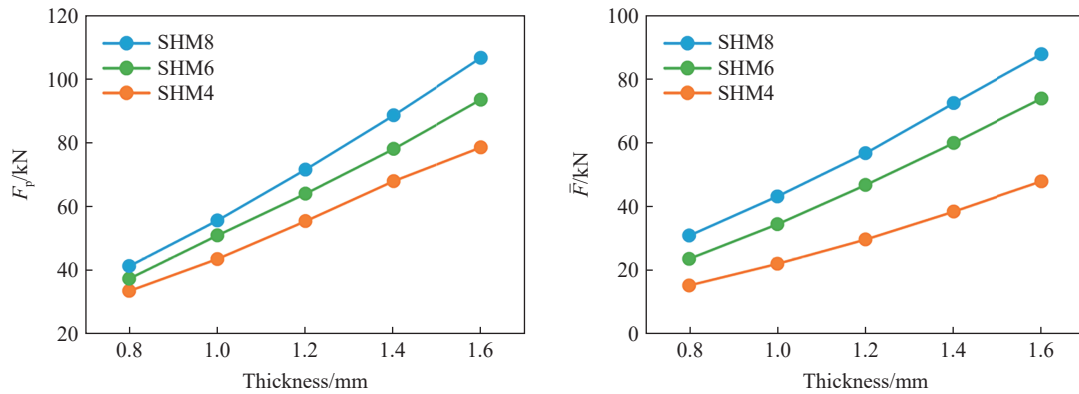


图 10 不同壁厚条件下星形混合多胞管的初始峰值碰撞力 F_p 和平均碰撞力 \bar{F}

Fig. 10 Initial peak impact force (F_p) and average impact force (\bar{F}) of the SHM tubes with different wall thicknesses

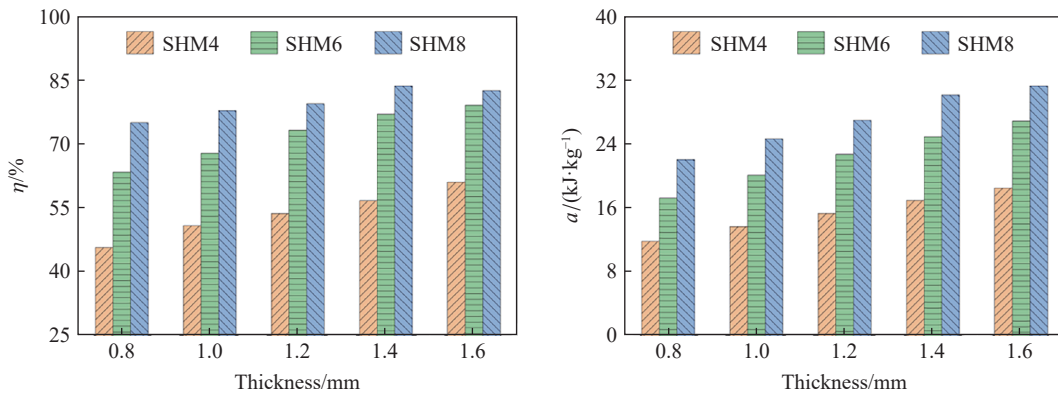


图 11 不同壁厚条件下星形混合多胞管的碰撞载荷效率 η 和比吸能 a

Fig. 11 Efficiency of impact load (η) and specific absorbed energy (a) of the SHM tubes with different wall thicknesses

2.2.2 星形角度对耐撞性的影响

星形角度是星形混合多胞管特有的参数指标, 具备一定的研究意义。星形角度 α 的变化范围定义在 $100^\circ \sim 140^\circ$ 之间, 壁厚 t 固定为 1.0 mm。从图 12 中不难发现, 随着星形角度的增加, F_p 和 \bar{F} 出现了小幅度的下降。该现象可从几何学层面并结合折叠变形机理^[25] 进行解释, 星形角度的增加使得 α 角两侧折边趋向于平直, 由折边组成的角单元约束变形的效果减弱, 进而降低了角单元膜能量的耗散水平。其中, 对于 SHM8 的 \bar{F} 影响最为突出, 当 $\alpha > 120^\circ$ 后, SHM8 的 \bar{F} 下降幅度明显大于 SHM4 和 SHM6, SHM8 在 $\alpha=140^\circ$ 时的 \bar{F} 相较于 $\alpha=100^\circ$ 时减小了 17.70%, 同等情况下, SHM4 只减小了 6.85%。由此可知, 星形角度的变化对于 N 较小的星形混合多胞管影响不显著。此外, 如图 13 所示, 多边形边数 N 与吸能效率之间的规律并没有改变, SHM8 的 a 依然优于 SHM4 和 SHM6。但值得注意的是, 星形混合多胞管的 η 和 a 会随着星形角度的增加表现出先增加后减小, 在 $\alpha=120^\circ$ 时取得最大值。因此, 星形混合多胞管最佳的星形角度为 120° , 角度过大或过小都不利于能量吸收。

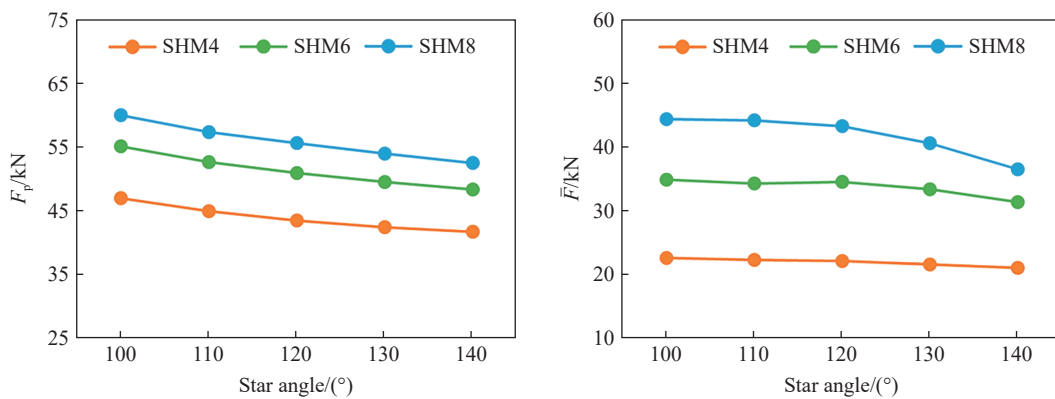


图 12 不同星形角度条件下星形混合多胞管的初始峰值碰撞力 F_p 和平均碰撞力 \bar{F}

Fig. 12 Initial peak crushing force (F_p) and average impact force (\bar{F}) of the SHM tubes with different star angles

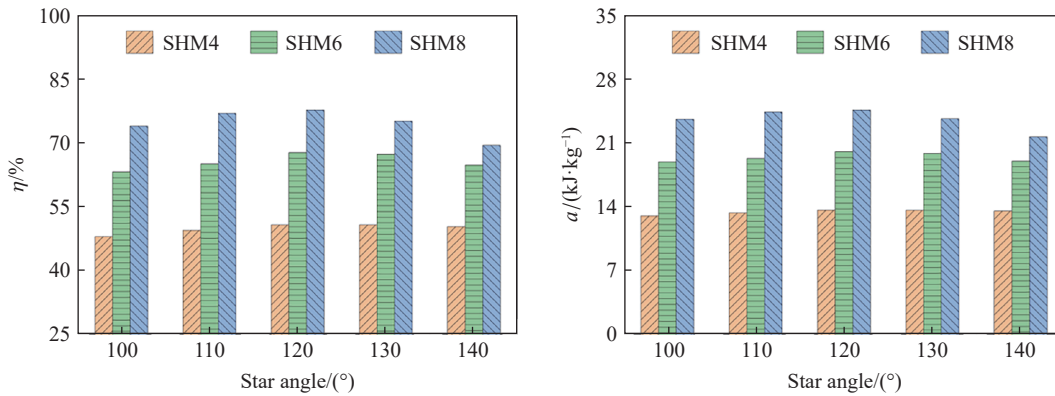


图 13 不同星形角度条件下星形混合多胞管的碰撞载荷效率 η 和比吸能 a

Fig. 13 Efficiency of impact load (η) and specific absorbed energy (a) of the SHM tubes with different star angles

2.2.3 几何参数变化时的变形模式

图 14(a) 给出了不同壁厚条件下星形混合多胞管压溃后的变形视图。可以看出, 由于壁厚的增加, 星形混合多胞管的刚度得到了明显提升, 管壁抵抗弯曲变形的能力随之增强。然而, 压溃后产生的折叠波数量会因 N 的不同, 而表现出不同程度的减少。SHM4 和 SHM6 的折叠波数量变化较小, 而 SHM8 在 $t=1.6$ mm 时的折叠波数要比壁厚为 0.8 mm 时减少了 2 个。同时注意到, SHM8 在壁厚 1.6 mm 时折叠波的规律性较差, 这也是其 η 下降的主要原因, 因此, 薄壁管的壁厚不宜太大。图 14(b) 比较了星形角度变化时的变形情况, 视图上的差异主要发生在横截面处, 较小的星形角度促进了管内部空间的利用率, 有

利于保持良好的变形稳定性。在对折叠波数量的影响上, SHM4 和 SHM6 基本不变, 只有 SHM8 在 $\alpha > 120^\circ$ 后, 折叠波的数量减少了 1 个, 故 SHM8 对几何参数的变化最为敏感。总体来说, 星形角度的变化产生的影响相对较小, 而壁厚的变化对于星形混合多胞管耐撞性的影响非常显著。

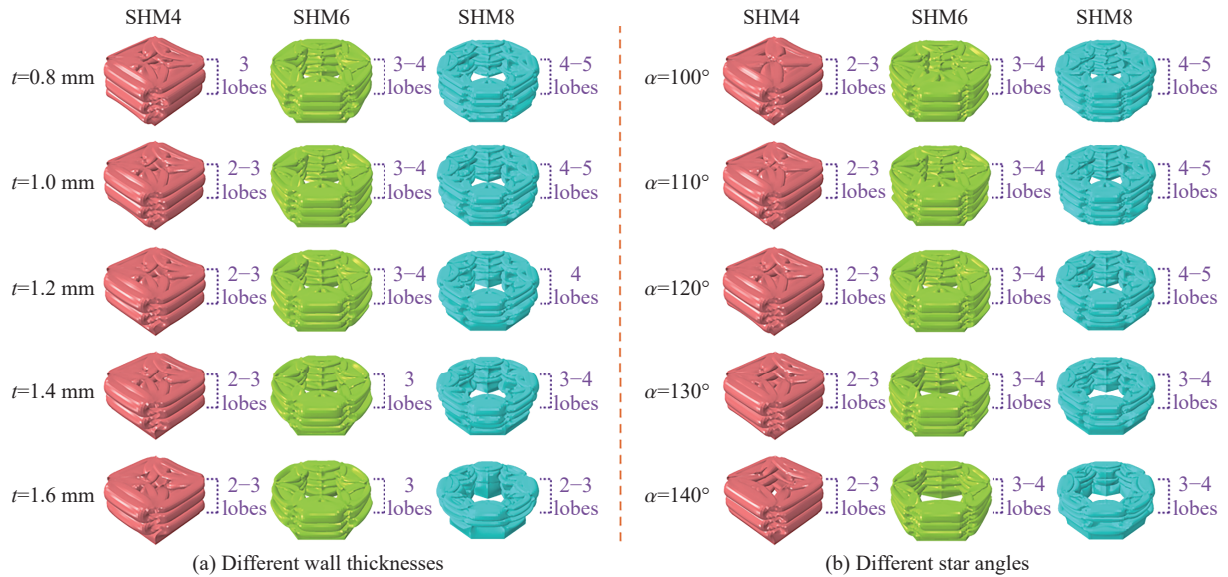


图 14 不同几何参数的星形混合多胞管变形视图

Fig. 14 Deformation views of the SHM tubes with different geometric parameters

3 理论预测

3.1 平均碰撞力公式

理论预测是一种便捷的手段, 可用于分析薄壁管在特定阶段的力学性能。本节基于简化超折单元理论^[25], 推导星形混合多胞管在渐进式折叠变形模式下的平均碰撞力理论公式。

如图 15 所示, 假设星形混合多胞管的每个折叠波长为 $2H$, 由塑性铰线和折叠区域组成^[25]。根据能量守恒, 外力做功等于薄壁管塑性变形产生的总弯曲能量 B 和总膜能量 M , 即

$$\bar{F} \cdot (2H) \cdot \mu = B + M \tag{5}$$

式中: μ 为有效碰撞因数, 其取值为 $0.7^{[15]}$ 。

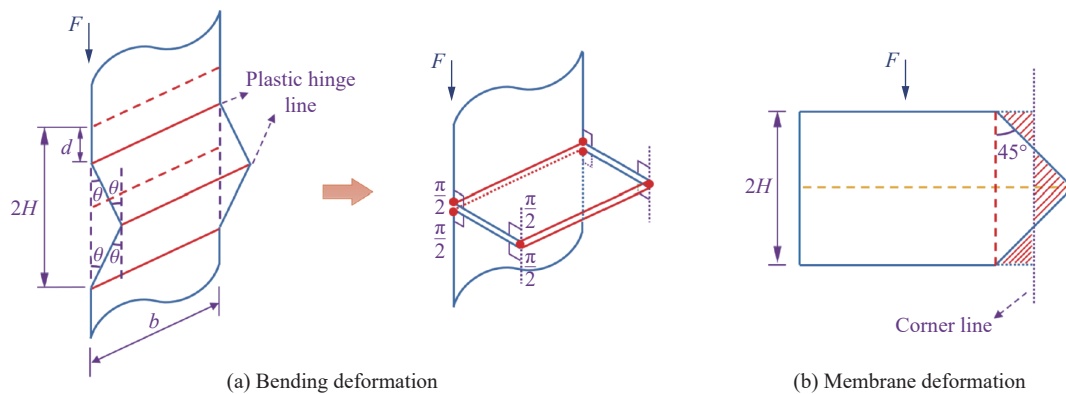


图 15 折边的变形示意图

Fig. 15 Schematic of the flange deformation

弯曲能量 B 取决于折边的转动角度 θ 和固定铰线的长度 b , 其计算公式如下^[25]

$$B = \sum_{i=1}^4 \theta_i m_0 b \quad (6)$$

式中: m_0 为全塑性弯矩, $m_0 = \sigma_0 t^2 / 4$, t 为壁厚, σ_0 为材料的流动应力^[15, 29], $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_u) / 2$, σ_y 为初始屈服应力, σ_u 为极限应力。

在理想的轴向变形过程中, 折边受压后会完全变平, 即 $\theta = \pi / 2$ 。因此, 总弯曲能量 B 为

$$B = 2\pi m_0 C \quad (7)$$

式中: C 为总截面的周长。

膜能量 M 是角单元在发生塑性屈曲时耗散的能量, 为此, 对星形混合多胞管的角单元进行了划分, 如图 16 所示。共有两种类型的角单元, 即二面角单元(2-panel)和四面角单元(4-panel)。表 3 给出了星形角度 $\alpha = 120^\circ$ 时, β 和 γ 的角度值。

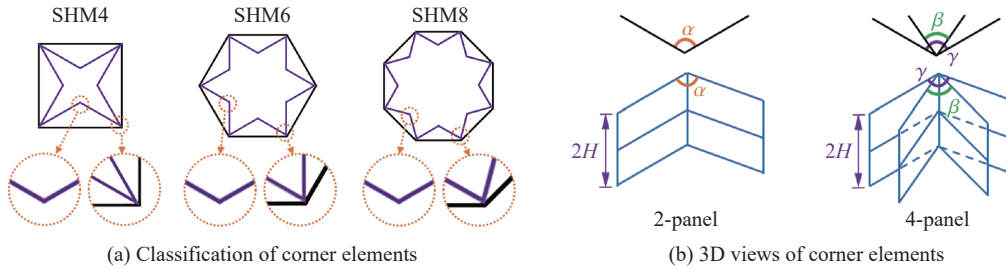


图 16 角单元划分与 3D 视图

Fig. 16 Classification of corner elements and 3D views

表 3 角单元的角度

Table 3 Angle of corner elements

试件	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$\gamma / (^\circ)$
SHM4	120	30	90
SHM6	120	60	120
SHM8	120	75	135

二面角单元 (2-panel) 作为最常见的角单元, 其膜能量 M_2 计算公式为^[15, 29]

$$M_2 = 4f(\alpha) m_0 H^2 / t \quad (8)$$

式中: $f(\alpha) = [1.1 \tan(\alpha/2)] / [\tan(\alpha/2) + 0.05 / \tan(\alpha/2)]$ 。

四面角单元(4-panel)可将其视为两个角度不同的二面角单元之间的叠加, 其膜能量 M_4 为

$$M_4 = 4 [f(\beta) + f(\gamma)] m_0 H^2 / t \quad (9)$$

式中: $f(\beta) = 1.1 \tan(\beta/2) / [\tan(\beta/2) + 0.05 / \tan(\beta/2)]$, $f(\gamma) = 1.1 \tan(\gamma/2) / [\tan(\gamma/2) + 0.05 / \tan(\gamma/2)]$ 。

接着, 将上述的角单元膜能量计算公式乘以对应的角单元数量 N (即多边形边数 N), 可得总膜能量

$$M = N M_2 + N M_4 \quad (10)$$

即

$$M = 4N [f(\alpha) + f(\beta) + f(\gamma)] m_0 H^2 / t \quad (11)$$

将式 (7) 和式 (11) 代入式 (5), 得

$$\bar{F} \cdot (2H) \cdot \mu = 2\pi m_0 C + 4N [f(\alpha) + f(\beta) + f(\gamma)] m_0 H^2 / t \quad (12)$$

根据静力平衡条件, 令 $\partial \bar{F} / \partial H = 0$, 由此可求出半波长

$$H = \sqrt{\frac{\pi t C}{2N [f(\alpha) + f(\beta) + f(\gamma)]}} \quad (13)$$

最后, 将 H 和 m_0 代入式 (12) 中。为了考虑惯性效应, 额外乘以动态增强系数 k , 其取值与截面形状有关, 通常在 1.1~1.6 之间^[29], 对于 SHM4、SHM6 和 SHM8 分别取 1.25、1.45 和 1.55。

综上所述, 可得星形混合多胞管的平均碰撞力通式

$$\bar{F} = \frac{k}{\mu} \sigma_0 t^{1.5} \sqrt{\frac{\pi}{2} N [f(\alpha) + f(\beta) + f(\gamma)] C} \quad (14)$$

星形角度 $\alpha=120^\circ$ 时, SHM4、SHM6 和 SHM8 的平均碰撞力理论公式

$$\bar{F}_{\text{SHM4}} = 7.460 5 \sigma_0 C^{0.5} t^{1.5} \quad (15)$$

$$\bar{F}_{\text{SHM6}} = 11.233 7 \sigma_0 C^{0.5} t^{1.5} \quad (16)$$

$$\bar{F}_{\text{SHM8}} = 14.011 9 \sigma_0 C^{0.5} t^{1.5} \quad (17)$$

3.2 误差对比

图 17 对星形混合多胞管的平均碰撞力理论公式的精确度进行了验证, 并标注了最大误差。结果表明, 理论预测值与有限元模拟值的吻合度较好, 误差在合理范围内, 最大误差均未超过 6%。同时也注意到, 随着壁厚的增加, 二者之间的误差可能会进一步加大。因此, 该理论公式可以有效地预测出星形混合多胞管的平均碰撞力变化趋势, 且在壁厚较小时的预测精确度更高。

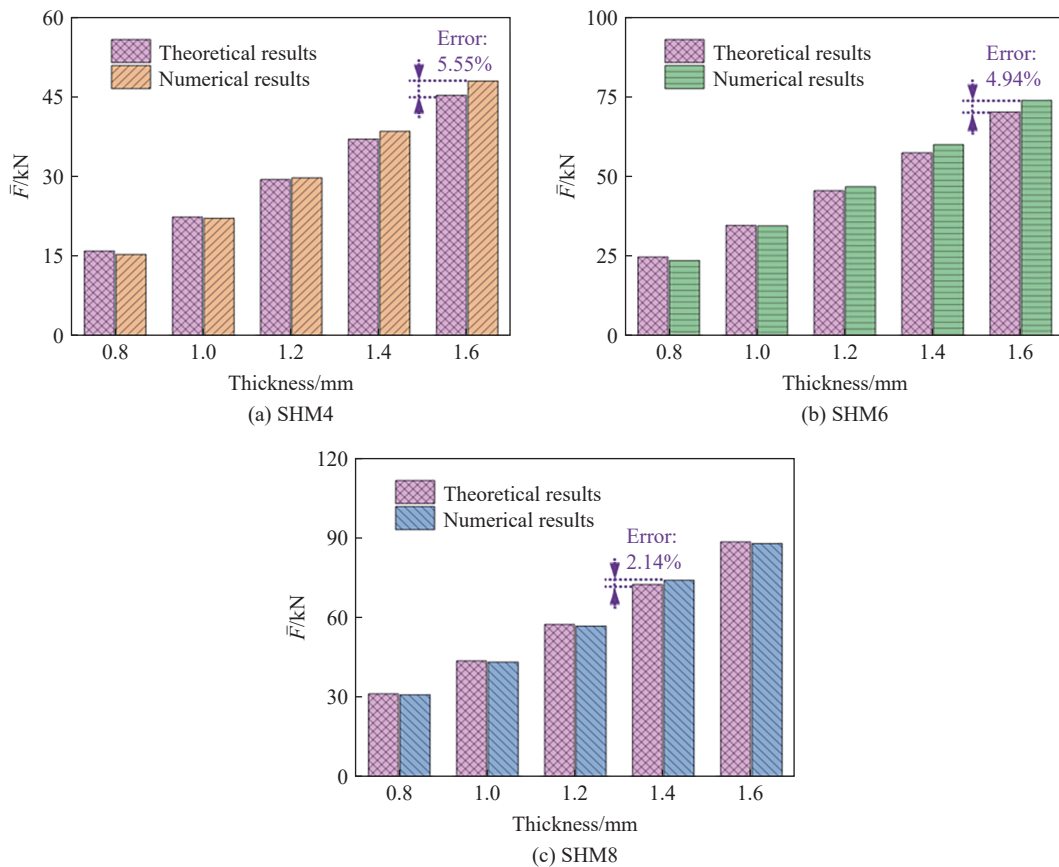


图 17 理论预测值与有限元模拟值的对比

Fig. 17 Comparison between theoretical predictions and finite element simulations

4 结 论

分别采用数值模拟和理论预测的方法,研究了星形混合多胞管在轴向加载条件下的耐撞性,主要得出以下结论。

(1) 星形混合多胞管的多边形截面与星形截面之间产生了协同效应,额外吸收了更多的冲击动能。此外,星形混合多胞管的协同比均超过了 30%,当多边形边数 $N=6$ 时,混合截面的协同性最好,协同比达到了 33.43%。

(2) 星形混合多胞管的耐撞性与多边形边数 N 有着密切的关系, N 的增加有助于形成更多的折叠波数,并使碰撞力曲线和能量吸收效率得到了有效的改善。当 $N=8$ 时,星形混合多胞管获得了最佳的综合耐撞性。

(3) 壁厚对于星形混合多胞管的耐撞性有显著的影响,初始峰值碰撞力和平均碰撞力会随着壁厚的增加而线性增长。SHM8 在壁厚为 1.6 mm 时的能量吸收值最高,最大比吸能为 31.20 kJ/kg。

(4) 星形角度的变化对耐撞性的影响相对较小,星形混合多胞管的碰撞荷载效率和比吸能会随着星形角度的增加表现出先增大后减小,在星形角度 $\alpha=120^\circ$ 时拥有最佳的碰撞荷载效率和比吸能。

参考文献:

- [1] WANG Z G, ZHANG J, LI Z D, et al. On the crashworthiness of bio-inspired hexagonal prismatic tubes under axial compression [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 186: 105893. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105893.
- [2] 牛枫, 黄晗, 向枳昕, 等. 仿生多胞薄壁管耐撞性分析及优化 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(10): 105901. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0527.
NIU C, HUANG H, XIANG Z X, et al. Crashworthiness analysis and optimization on bio-inspired multi-cell thin-walled tubes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(10): 105901. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0527.
- [3] MING S Z, SONG Z B, ZHOU C H, et al. The energy absorption of long origami-ending tubes with geometrical imperfections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107415. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107415.
- [4] 刘亚军, 何玉龙, 刘姗姗, 等. 正多边形基多胞薄壁管的吸能特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7): 071404. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0423.
LIU Y J, HE Y L, LIU S S, et al. Energy absorption capacity of regular polygon-based multi-cell tubes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 071404. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0423.
- [5] LIU H, CHNG Z X C, WANG G J, et al. Crashworthiness improvements of multi-cell thin-walled tubes through lattice structure enhancements [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 210: 106731. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106731.
- [6] 何强, 王勇辉, 史肖娜, 等. 引入 Sierpinski 层级特性的新型薄壁多胞管轴向冲击吸能特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(12): 123101. DOI: 10.11883/bzycj/2020-0055.
HE Q, WANG Y H, SHI X N, et al. Energy absorption of new thin-walled, multi-cellular, tubular structures with Sierpinski hierarchical characteristics under axial impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(12): 123101. DOI: 10.11883/bzycj/2020-0055.
- [7] PALOMBINI F L, DE ARAUJO MARIATH J E, DE OLIVEIRA B F. Bionic design of thin-walled structure based on the geometry of the vascular bundles of bamboo [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106936. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106936.
- [8] TRAN T, HOU S J, HAN X, et al. Crushing analysis and numerical optimization of angle element structures under axial impact loading [J]. *Composite Structures*, 2015, 119: 422–435. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.019.
- [9] ZHAO X, ZHU G H, ZHOU C Y, et al. Crashworthiness analysis and design of composite tapered tubes under multiple load cases [J]. *Composite Structures*, 2019, 222: 110920. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110920.
- [10] DENG X L, LIU W Y, LIN Z Q. Experimental and theoretical study on crashworthiness of star-shaped tubes under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 321–331. DOI: 10.1016/j.tws.2018.06.002.
- [11] TRAN T, BAROUTAJI A. Crashworthiness optimal design of multi-cell triangular tubes under axial and oblique impact

- loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 93: 241–256. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.07.003.
- [12] WANG Z G, LIU J F, YAO S. On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 132: 17–27. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.036.
- [13] MA W, LI Z X, XIE S C. Crashworthiness analysis of thin-walled bio-inspired multi-cell corrugated tubes under quasi-static axial loading [J]. *Engineering Structures*, 2020, 204: 110069. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110069.
- [14] HA N S, LU G X. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107496. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107496.
- [15] WU J C, ZHANG Y, ZHANG F, et al. A bionic tree-like fractal structure as energy absorber under axial loading [J]. *Engineering Structures*, 2021, 245: 112914. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112914.
- [16] FAN H L, LUO Y H, YANG F, et al. Approaching perfect energy absorption through structural hierarchy [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2018, 130: 12–32. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.05.005.
- [17] ZHANG L W, BAI Z H, BAI F H. Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 122: 42–51. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.010.
- [18] HA N S, PHAM T M, CHEN W S, et al. Crashworthiness analysis of bio-inspired fractal tree-like multi-cell circular tubes under axial crushing [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 169: 108315. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108315.
- [19] FU J, LIU Q, LIUFU K, et al. Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 135: 400–413. DOI: 10.1016/j.tws.2018.10.003.
- [20] GONG C, BAI Z H, WANG Y L, et al. On the crashworthiness performance of novel hierarchical multi-cell tubes under axial loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 206: 106599. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106599.
- [21] XU X, ZHANG Y, WANG J, et al. Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns [J]. *Composite Structures*, 2018, 194: 36–48. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.099.
- [22] VINAYAGAR K, KUMAR A S. Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 112: 184–193. DOI: 10.1016/j.tws.2016.12.008.
- [23] BIGDELI A, DAMGHANI NOURI M. Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019, 26(19): 1644–1660. DOI: 10.1080/15376494.2018.1444231.
- [24] XIONG J, ZHANG Y, SU L, et al. Experimental and numerical study on mechanical behavior of hybrid multi-cell structures under multi-crushing loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108588. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108588.
- [25] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(4a): 727–734. DOI: 10.1115/1.3167137.
- [26] WANG J, ZHANG Y, HE N, et al. Crashworthiness behavior of Koch fractal structures [J]. *Materials & Design*, 2018, 144: 229–244. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.02.035.
- [27] LI Z X, MA W, YAO S G, et al. Crashworthiness performance of corrugation-reinforced multicell tubular structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 190: 106038. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106038.
- [28] ZHANG X, ZHANG H. Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68: 156–163. DOI: 10.1016/j.tws.2013.03.014.
- [29] CHEN H C, ZHANG Y, LIN J M, et al. Crushing responses and optimization of novel sandwich columns [J]. *Composite Structures*, 2021, 263: 113682. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113682.

(责任编辑 王小飞)