

泡沫铝填充多胞薄壁圆锥管轴向耐撞性分析

韦铁平, 林祖鹏, 赵梁彬, 张萌枝, 寇超, 宋宛权

(福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 建立了一款新型泡沫铝填充多胞圆锥管(aluminum foam-filled multi-cell conical tube, AFMCT)。基于LS-DYNA软件建立AFMCT有限元模型,采用准静态压缩实验验证,研究胞元数、锥角、壁厚以及泡沫铝密度等参数对AFMCT吸能特性的影响规律。结果表明:AFMCT具有较规整的变形模式,受结构参数的影响不大;壁厚的增大对结构吸能能力的影响最大;胞元数和锥角其次;泡沫铝密度影响最小。研究结果可为薄壁管吸能装置的设计提供参考。

关键词: 耐撞性;泡沫铝填充;多胞圆锥管;准静态;LS-DYNA

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0082-08

Axial crashworthiness analysis of aluminum foam-filled multi-cell thin-walled cone tube

WEI Tieping, LIN Zupeng, ZHAO Liangbin, ZHANG Mengzhi, KOU Chao, SONG Wanquan

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A new type of aluminum foam-filled multi-cell thin-walled cone tube (AFMCT) was established. Firstly, the finite element model of AFMCT was established based on LS-DYNA software, and the quasi-static compression experiment was used to verify it. Furthermore, the effects of cell number, cone angle, wall thickness and aluminum foam density on the energy absorption characteristics of AFMCT were studied by quasi-static compression experiments. Results show that AFMCT has regular deformation mode, which is not affected by structural parameters. The increase of wall thickness has the greatest impact on the energy absorption capacity of the structure, followed by the cell number and cone angle; the density of aluminum foam has the least impact. The research results can provide reference for the design of thin-walled tube energy absorption device.

Keywords: crashworthiness; aluminum foam filling; multi-cell cone tube; quasi-static state; LS-DYNA

薄壁管因其优异的耐撞性和较轻的质量,被广泛应用于汽车、航天航空、船舶、军事装备等领域^[1-2]。

近几十年来,随着国内外学者对薄壁管缓冲吸能结构的深入研究,多胞管^[3-5]和泡沫填充管^[6-8]相继被提出。靳明珠等^[3]通过引入Y型、三角形和四边形肋板对四、六、八边形薄壁多胞管的轴向吸能特性进行了研究。黄晗等^[4]基于雀尾螳螂虾的微观结构,提出了一种人字形的仿生多胞薄壁管。邹猛等^[5]借鉴竹子结构,设计了一种新型仿生多胞薄壁管。黄瑞等^[6]研究了泡沫

铝填充圆管的轴向准静态和动态响应。谢素超等^[7]对泡沫铝填充开孔方管的平均载荷和初始峰值载荷进行了优化设计。黄晶等^[8]研究了锥角、壁厚和泡沫铝密度对泡沫铝填充锥管轴向吸能特性的影响。从这些研究可看出,多胞管内部主要以传统肋板结构和仿生结构为主,泡沫填充结构也主要以泡沫铝作为填料。将泡沫铝与多胞管结合或将产生更优异的力学性能,基于此,姚如洋等^[9]基于动物长骨的特点设计了一款泡沫铝填充多胞方管,对其轴向吸能特性和变形机理进行了研究。肖晓春等^[10]将泡沫铝与多胞方管进

收稿日期:2023-11-19

基金项目:国家市场监督管理总局重点实验室开放课题基金项目(LZSYS202303)

第一作者简介:韦铁平(1984—),男,广西贵港人,副教授,博士,研究方向:缓冲装置设计及吸能机理。

行组合,研究了不同填充方式下结构的轴向动态响应。张勇等^[11]提出一种新颖的圆形多胞复合填充结构,分析了蜂窝和泡沫铝材料在完全填充和交互填充下结构的轴向耐撞性。孙光永等^[12]探讨了不同截面结构对多胞管的轴向耐撞性影响,包括空腔和泡沫铝在多胞管中的拓扑分布。从以上学者对泡沫铝填充多胞薄壁管的研究可发现,泡沫铝填充多胞薄壁管的研究以直管为主,对泡沫铝填充多胞薄壁圆锥管的研究还较少。

为此,本文设计了一种新型泡沫铝填充多胞薄壁圆锥管,并以锥角、壁厚、泡沫铝密度以及胞元数为设计变量,建立了 15 组有限元仿真模型。采用 LS-DYNA 对该结构进行轴向准静态加载,研究结构参数对 AFMCT 吸能特性的影响规律。

1 数值模拟

1.1 几何表征

图 1 为 AFMCT 的几何模型。结构高度 H 为 150 mm,底端外径 D 为 80 mm,胞元数 N 、锥角 θ 、壁厚 t 、泡沫铝密度 ρ ,结构设计尺寸如表 1 所示。

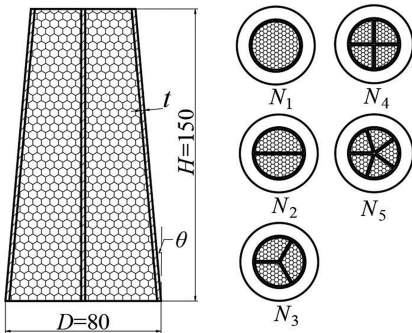


图 1 AFMCT 几何模型(单位:mm)

Fig.1 Geometric model of AFMCT(unit:mm)

表 1 AFMCT 参数设计

Tab.1 Parameter design of AFMCT

编号	$H/$ mm	$D/$ mm	$\theta/$ ($^{\circ}$)	$t/$ mm	$N/$ 个	$\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)
AFMCT-N1	150	80	5	2.0	1	0.51
AFMCT-N2	150	80	5	2.0	2	0.51
AFMCT-N3	150	80	5	2.0	3	0.51
AFMCT-N4	150	80	5	2.0	4	0.51
AFMCT-N5	150	80	5	2.0	5	0.51
AFMCT-A1	150	80	0	2.0	4	0.51
AFMCT-A2	150	80	3	2.0	4	0.51

续表

编号	$H/$ mm	$D/$ mm	$\theta/$ ($^{\circ}$)	$t/$ mm	$N/$ 个	$\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)
AFMCT-A3	150	80	7	2.0	4	0.51
AFMCT-A4	150	80	10	2.0	4	0.51
AFMCT-T1	150	80	5	1.0	4	0.51
AFMCT-T2	150	80	5	1.5	4	0.51
AFMCT-T3	150	80	5	2.5	4	0.51
AFMCT-T4	150	80	5	3.0	4	0.51
AFMCT-d1	150	80	5	2.0	4	0.64
AFMCT-d2	150	80	5	1.0	4	0.71

1.2 有限元模型

采用非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对泡沫铝填充多胞薄壁圆锥管进行准静态数值模拟。图 2 为 AFMCT-1 的有限元模型。其中,上冲头与固定底座均设置为刚体,采用 MAT20 模拟。锥管采用 Belytschko-Tsay 4 节点壳单元,沿厚度方向设置 5 个积分点,采用分段线性塑性模型 MAT24 模拟。分析管材为铝合金 6061-T6,其应力应变曲线如图 3(a) 所示。材料的密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E = 68.9 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\mu = 0.3$ 、屈服强度 $\sigma_s = 273 \text{ MPa}$ 。铝合金为应变率不敏感性材料,可忽略^[13]。内部泡沫铝用 8 节点单点缩减积分体单元建模,采用 63 号可压缩泡沫材料的本构模型模拟。材料的应力应变曲线如图 3(b) 所示,密度 ρ 分别为 0.51、0.64 和 0.71 g/cm^3 ;弹性模量 E 分别为 382.3、586.1 和 853.2 MPa。由于泡沫铝在单轴压缩过程中不会发生太多侧向膨胀,所以将所有泡沫密度的泊松比设为零^[13],研究表明,闭孔泡沫铝在较低应变率($10^{-3} \sim 10^2$)下不具有应变率敏感性^[14],本文的应变率在 $6.6 \sim 1.6 \times 10^{-3}$ 之间,故可忽略泡沫铝的应变率效应。在仿真过程中对底板全约束,上冲头以 1 m/s 的速度对结构进行准静态轴向压缩,多胞圆锥管与上下钢板采用自动点面接触 AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 模拟,泡沫铝与上下钢板及多胞圆锥管采用自动面面接触 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE。由于泡沫铝在仿真过程中极易发生负体积而导致计算终止,对泡沫铝进行内部接触 INTERIOR 定义及包壳处理,采用 MAT9NULL 材料模型,厚度定义为 0.01 mm。

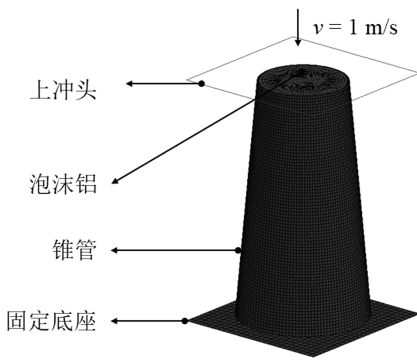
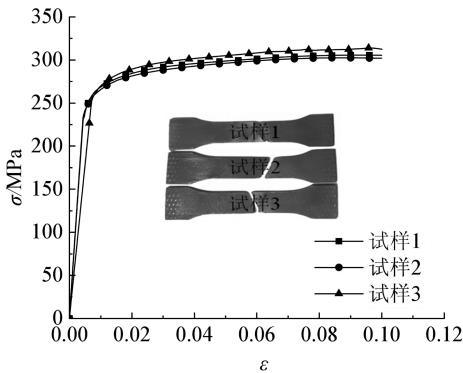
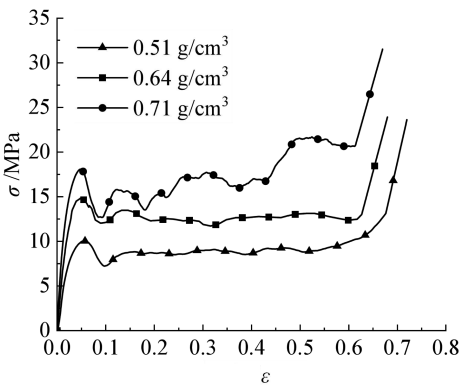


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model



(a) 铝合金 6061-T6



(b) 闭孔泡沫铝

图 3 材料工程应力应变曲线

Fig.3 Material engineering stress-strain curve

1.3 有限元模型的验证

采用 INSTRON2382 材料试验机对模型 AFMCT-1 进行准静态压缩试验, 压缩速度取 5 mm/min。图 4 为实验与仿真的载荷-位移曲线与变形模式对比图。通过观察载荷-位移曲线发现两者吻合较好。经计算, 实验与仿真的初始峰值载荷分别为 110.7、101.7 kN, 误差为 8.1%, 平均载荷分别为 96.07、94.64 kN, 误差为 1.5%, 均在 10% 以内。通过观察变形模式, 发现实验与仿

真皆是从上端开始变形。综上, 本文仿真得到可靠的验证。仿真过程中模型网格尺寸取 2 mm, 其他具体设置参照 1.2 节。

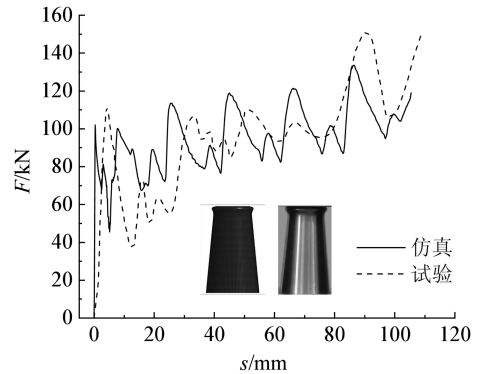


图 4 试验与仿真荷载-位移曲线的对比

Fig.4 Comparison between test and simulation force-displacement curves

2 耐撞性分析

2.1 评价指标

为对 AFMCT 的耐撞性做出评价, 引入下列评价指标:

(1) 初始峰值载荷 (initial peak crushing force, IPCF): 压缩过程中形成第一个褶皱时出现的最大载荷。

(2) 总吸能 (energy absorption, EA): 结构在 70% 压缩位移下吸收的总能量。

$$EA = \int_0^{\delta} F(u) du \quad (1)$$

式中, $F(u)$ 为作用在结构上的力, kN; δ 为力作用下结构产生的位移, mm。

(3) 比吸能 (specific energy absorption, SEA): 结构单位质量吸收的能量。

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

式中, m 为结构的总质量, g。

(4) 平均载荷 (mean crushing force, MCF): 总吸能 EA 与最终压溃距离 δ 的比值。

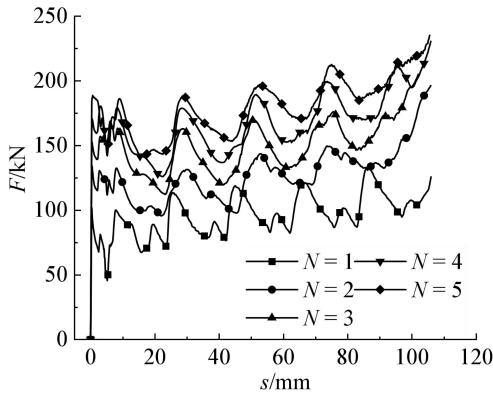
(5) 压缩力效率 (crushing force efficiency, CFE): 平均载荷与最大载荷的比值。该值越接近 1, 结构吸能越稳定, 表示为:

$$CFE = \frac{MCF}{F_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

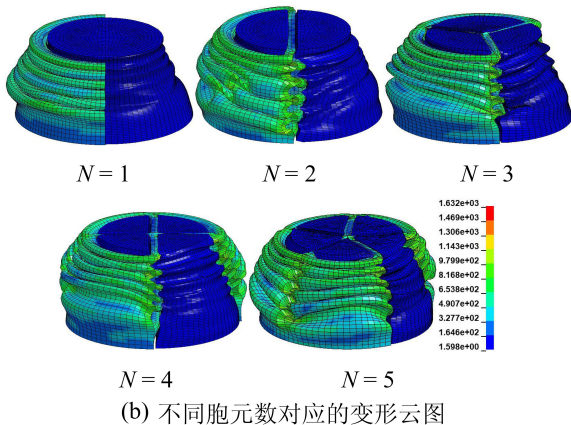
式中, F_{max} 为有效压缩过程中的最大载荷, kN。

2.2 胞元数的影响

图 5 为压缩位移 70%、锥角 5°、壁厚 2 mm、泡沫密度为 0.51 g/cm³ 时,改变胞元数(1、2、3、4、5) 获得不同的泡沫铝填充多胞圆锥管载荷-位移曲线及变形模式。由图 5(a)可知,每个胞元均产生一个个规整的波形,对应变形模式中的一个塑性铰(褶皱)。通过对比不同胞元数对应的载荷-位移曲线可发现:①随着胞元数增大,结构的初始峰值载荷增大。②随着胞元数增大,曲线所包围的面积变大,结构的总吸能变大。产生上述现象的原因是,胞元数增加,增加了结构的刚度以及发生塑性变形的结构数。由图 5(b)可知,不同胞元数的应力主要集中在隔板与外管的交界处以及塑性铰的内外边界,从变形模式上看,外管都为手风琴模式,内部泡沫铝受外管的挤压向内凹陷,且凹陷深度随压溃位移的增大而减小,随胞元数的增大而增大。



(a) 载荷-位移曲线



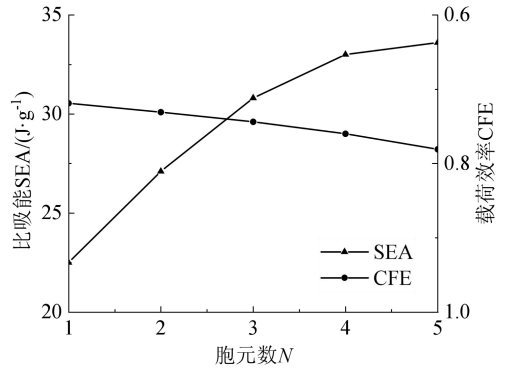
(b) 不同胞元数对应的变形云图

图 5 不同胞元数对 AFMCT 曲线及变形云图的影响

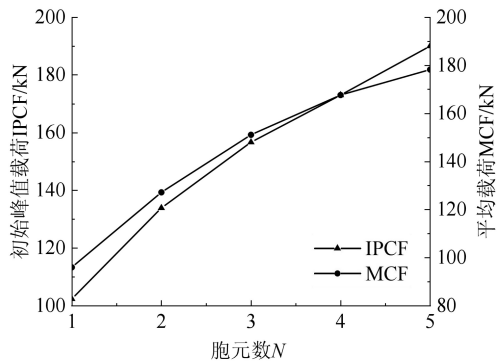
Fig.5 Influence of different cell numbers on AFMCT curves and deformation nephograms

图 6 为比吸能、载荷效率、初始峰值载荷以及

平均载荷随锥角改变的变化曲线。从图 6(a) 可看出,结构的比吸能和载荷效率都随着胞元数的增多而提高。载荷效率几乎与胞元数呈线性关系,比吸能增长幅度在 $N > 4$ 时开始减弱。从图 6(b) 可看出,结构初始峰值载荷和平均载荷随胞元数的增多而增大,且二者受胞元数的影响程度几乎一致。综上分析,过度增加胞元数,并不能大幅度提高结构吸能的作用,反而会增大初始峰值载荷,不利于结构的吸能。此外,胞元数过多会增加结构的复杂程度和制造成本,故在本文结构设计中胞元数取 4 为宜。



(a) SEA-N、CFE-N



(b) IPCF-N、MCF-N

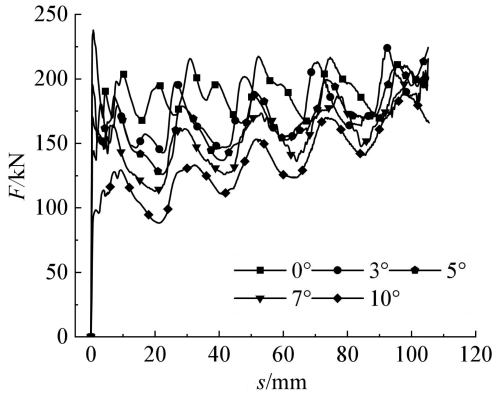
图 6 各评价指标随胞元数的变化曲线

Fig.6 Curves of various evaluation indicators with change of cell numbers

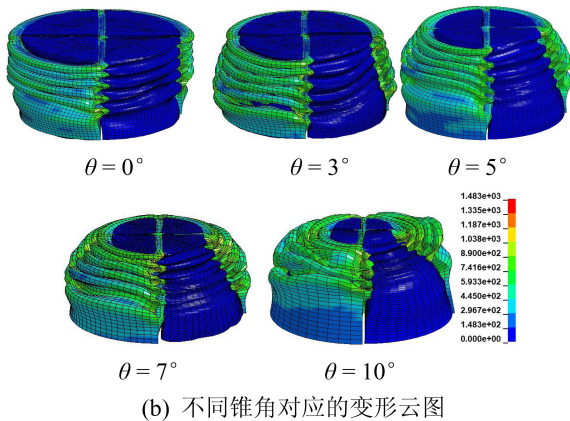
2.3 锥角的影响

图 7 为压缩位移 70%、胞元数 4、壁厚 2 mm、泡沫密度 0.51 g/cm³ 下,改变锥角(0°、3°、5°、7°、10°) 获得不同的泡沫铝填充多胞圆锥管的载荷-位移曲线及变形模式。由图 7(a)可知,锥角为 0° 时,结构载荷-位移曲线的平台阶段较平稳。随着锥角的增大,初始峰值载荷骤减,在达到初始峰值载荷后,曲线呈逐渐上升趋势,且随锥角的增大变得愈加明显。随着锥角的增大,曲线所包围的

面积减小,结构总吸能减小。产生上述现象的原因是:锥角的增大,减少了结构参与变形的总体积。由图 7(b)可知,不同角度的应力主要集中在隔板与外管的交界处以及塑性铰的内外边界,且随着角度的增大,边界处受力增大。从变形模式上看,在锥角小于 7°时,外管变形模式均为手风琴模式,锥角大于 7°时,转变为混合模式,内部泡沫铝受外管的挤压向内凹陷,随锥角的增大凹陷数量减少,下端凹陷变小或消失。



(a) 载荷-位移曲线

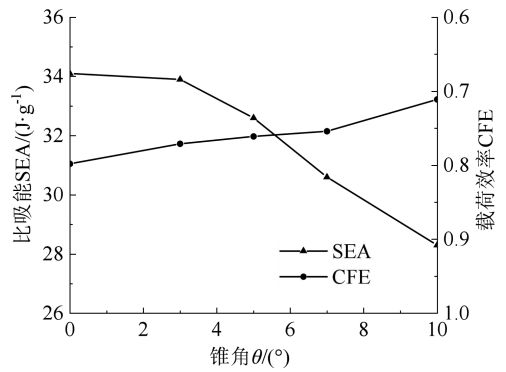


(b) 不同锥角对应的变形云图

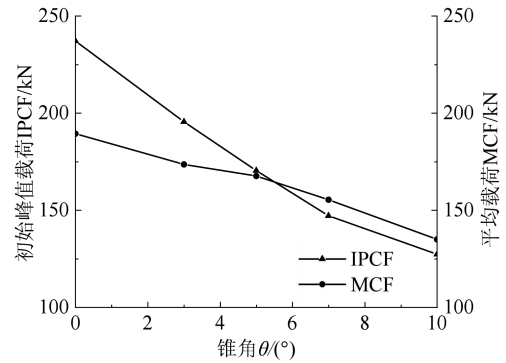
图 7 不同锥角对 AFMCT 曲线及变形云图的影响

Fig.7 Influence of different cone angles on AFMCT curves and deformation nephograms

图 8 为比吸能、载荷效率、初始峰值载荷以及平均载荷随锥角改变的变化曲线。图中显示,结构比吸能、载荷效率、平均载荷及初始峰值载荷随锥角的增大而减小。当锥角大于 5°时,结构的平均载荷比初始峰值载荷大,这也说明锥角的增大会使力位移曲线平台阶段呈递增趋势。综上分析,增大锥角虽然使结构初始峰值载荷显著下降,但其他指标也会有所下降。因此,在不降低太多其他指标的前提下,锥角为 5°是不错的选择。



(a) SEA-N、CFE-N



(b) IPCF-N、MCF-N

图 8 各评价指标随锥角的变化曲线

Fig.8 Curves of various evaluation indicators with change of cone angles

2.4 壁厚的影响

图 9 为压缩位移 70%、胞元数 4、角度 5°、泡沫密度 0.51 g/cm³ 下,改变壁厚(1、2、3、4、5 mm)获得不同的泡沫铝填充多胞圆锥管的载荷-位移曲线及总吸能-位移曲线。

由图 9(a)可知,壁厚为 1 mm 的 AFMCT 拥有最多、最平缓的波动以及最低的峰值载荷。随着壁厚的增大,曲线波动数量减少,波动幅度以及初始峰值载荷显著增大。随着壁厚的增大,曲线所包围的面积增大,结构总吸能增大。产生上述现象的主要原因是壁厚的增大增加了结构的刚度。由图 9(b)可知,不同壁厚的应力主要集中在隔板与外管的交界处以及塑性铰的内外边界,且随着壁厚的增大,边界处受力增大。从变形模式上看,壁厚为 1 mm 的 AFMCT 具有最多和最小的塑性铰,随着壁厚的增大,塑性铰数量减少,大小增大,整体的变形模式皆为手风琴模式。内部泡沫铝受外管的挤压向内凹陷,随壁厚的增大凹陷深度增大。

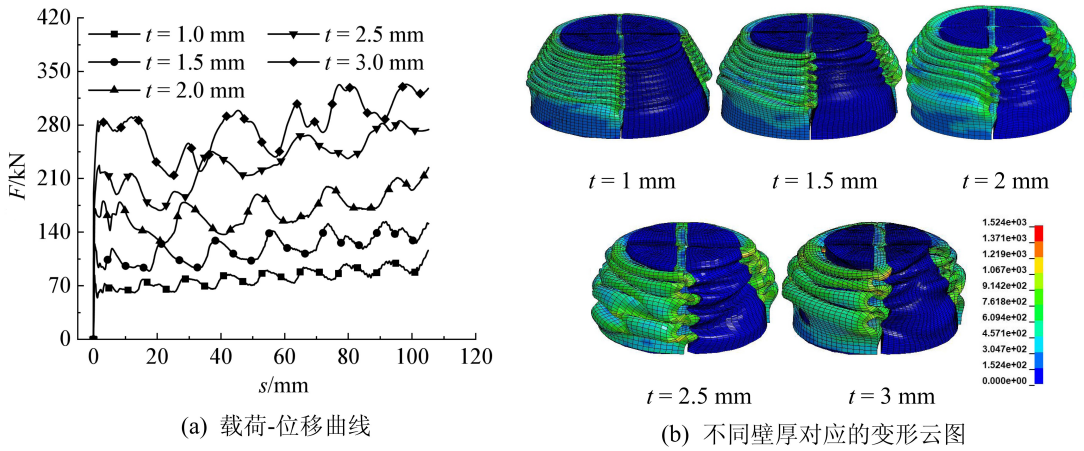


图 9 不同壁厚对 AFMCT 曲线及变形云图的影响

Fig.9 Influence of different wall thicknesses on AFMCT curves and deformation nephograms

图 10 为比吸能、载荷效率、初始峰值载荷以及平均载荷随壁厚变化的曲线,从图 10(a)可看出,结构比吸能受壁厚的影响显著,随壁厚的增大呈线性增长趋势,载荷效率在 $t \leq 2$ mm 时几乎不受影响,在 $t > 2$ mm 时开始有所提升。从图 10(b)

可看出,平均载荷和峰值载荷都随锥角的增大而增大,且趋势显著。综上所述,壁厚对各项指标的影响都很大,但过大的峰值载荷会使结构综合吸能减弱。故在结构设计过程中,壁厚的选取不宜过大。

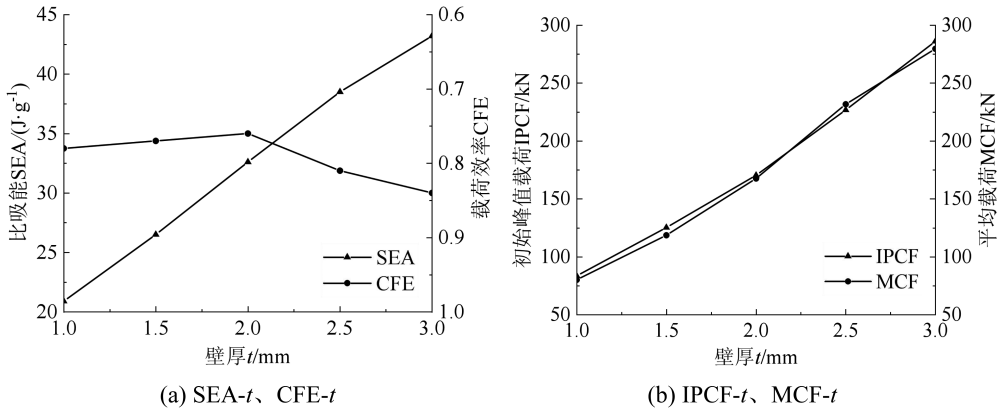


图 10 各评价指标随壁厚的变化曲线

Fig.10 Curves of various evaluation indicators with change of wall thicknesses

2.5 泡沫铝密度的影响

图 11 为压缩位移 70%、锥角 5° 、壁厚 2 mm、胞元数为 4 时,改变泡沫铝密度 (0.51、0.64、0.71 g/cm^3) 获得不同的泡沫铝填充多胞圆锥管的载荷-位移曲线及变形模式。由图 11(a)可知,不同密度下结构的初始峰值载荷和波动形式几乎一致,密度增大,曲线的平台阶段增大,形成一个波峰的位移提前。密度增大,曲线所包围的面积增大,结构总吸能增大。产生上述现象的原因是:高密度的泡沫铝更容易达到

实压阶段。由图 11(b)可知,不同密度的应力主要集中在隔板与外管的交界处以及塑性铰的内外边界。从变形模式上看,外管均为手风琴模式,内部泡沫铝受外管的挤压向内凹陷,随密度的增大凹陷深度有所减小。

图 12 为比吸能、载荷效率、初始峰值载荷以及平均载荷随壁厚变化的曲线。图中显示:在密度范围为 0.51 ~ 0.71 g/cm^3 之间的泡沫铝,对结构吸能指标的影响甚微,故采用密度为 0.51 g/cm^3 的泡沫铝将更具有经济型。

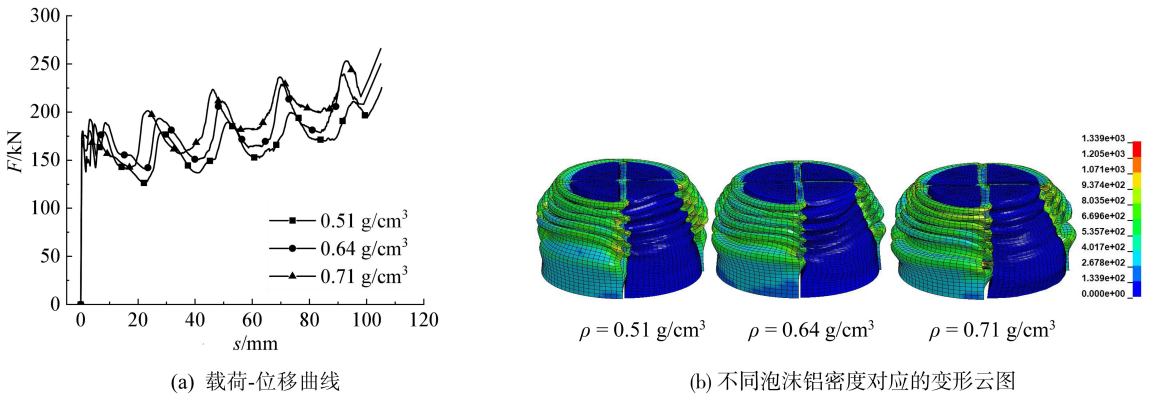


图 11 不同泡沫铝密度对 AFMCT 曲线及变形云图的影响

Fig.11 Influence of different foam aluminum density on AFMCT curves and deformation nephograms

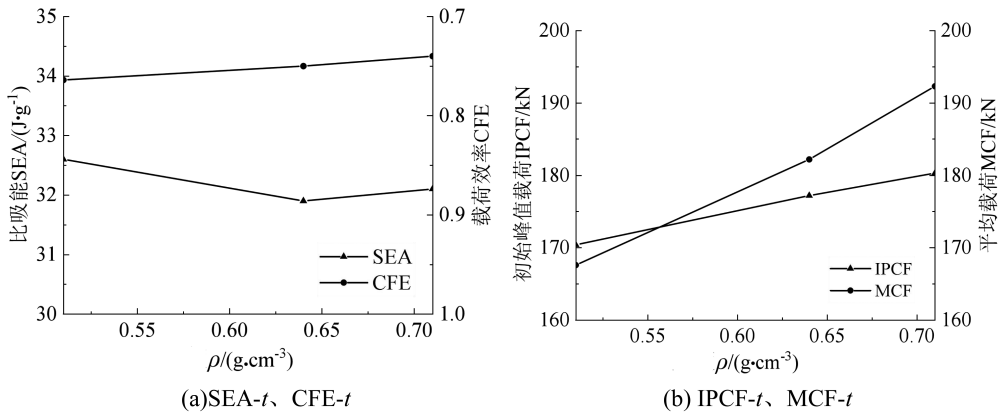


图 12 各评价指标随泡沫铝密度的变化曲线

Fig.12 Curves of various evaluation indicators with changing of foam aluminum density

3 结论

1) AFMCT 有限元模型的仿真与试验结果误差均在 10% 以内,为可接受范围,表明仿真结果可靠。

2) AFMCT 的总吸能、初始峰值载荷、比吸

能、平均载荷以及载荷效率随着胞元数和壁厚的增大而增大;随着锥角的增大而减小;受填充泡沫铝密度的影响不大。

3) AFMCT 具有较规整的变形模式,且受结构各参数的影响较小。

参考文献:

[1] YAO R Y, PANG T, ZHANG B, et al. On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials; state of the art and prospects[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 189: 110734.

[2] BAROUTAJI A, SAJJIA M, OLABI A G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: recent advances and future developments[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118: 137-163.

[3] 靳明珠, 尹冠生, 姚如洋, 等. 多边形薄壁多胞管的轴向吸能特性研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(1): 179-188.

[4] 牛枫, 黄晗, 向积昕等. 仿生多胞薄壁管耐撞性分析及优化[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(10): 169-182.

[5] ZOU M, XU S, WEI C, et al. A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo [J]. Thin-Walled Structures, 2016: 101(4): 222-230.

[6] 黄睿, 刘志芳, 路国运, 等. 轴向压缩下泡沫铝填充薄壁圆管吸能特性研究[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(1): 101-107.

[7] XIE S, ZHANG J, LIU X, et al. A reinforced energy-absorbing structure formed by combining multiple aluminum foam-

- filled open-hole tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022(224): 224.
- [8] 黄晶,龙永程,曹娇,等. 泡沫铝材料参数反求及其填充锥形薄壁管的吸能性能研究[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(5): 798-804.
- [9] YAO R, PANG T, HE S, et al. A bio-inspired foam-filled multi-cell structural configuration for energy absorption[J]. *Composites, Part B. Engineering*, 2022(1): 238.
- [10] 肖晓春,朱恒,徐军,等. 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 302-311.
- [11] 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.
- [12] SUN G, LIU T, HUANG X, et al. Topological configuration analysis and design for foam filled multi-cell tubes[J]. *Engineering Structures*, 2018, 155(15): 235-250.
- [13] ZHENG G, WU S Z, SUN G Y, et al. Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 87: 226-240.
- [14] 曾繁波. 泡沫铝填充管的吸能特性研究及其在轿车前纵梁结构中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2014.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 81 页)

- [4] 朱文魁,郭高飞,丁美宙,等. 一种基于 X 射线透射图像定量检测烟梗中粗梗率和长短梗率的测定方法: CN108007945A[P]. 2018-05-08.
- [5] 武凯,熊文,卢婷,等. 一种烟梗长度或直径的检测方法: CN115031667A[P]. 2022-09-09.
- [6] 雷光钰. 基于红外热波的缺陷自动检测识别与评估方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [7] 代长安,区昊辰,朱鼎天,等. 不规则多边形区域搜索航路规划算法[J]. *工业技术创新*, 2021, 8(6): 102-106, 112.
- [8] 曾凯,刘贺飞,何茜,等. 基于改进 Steger 算法的线结构光中心提取[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(1): 101-107.
- [9] 王志永,于宇,王武越,等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(1): 84-89.
- [10] GIULIETTI N, CHIARIOTTI P, REVEL G M. Automated measurement of geometric features in curvilinear structures exploiting Steger's algorithm[J]. *Sensors*, 2023, 23(8): 4023.
- [11] 南方,李大华,高强,等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取[J]. *激光杂志*, 2018, 39(1): 85-88.
- [12] 刁智华,吴贝贝,毋媛媛,等. 基于图像处理的骨架提取算法的应用研究[J]. *计算机科学*, 2016, 43(S1): 232-235.
- [13] 张国栋,韩佳池. 基于模糊距离变换的骨架剪枝算法[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2012, 29(1): 64-69.

(责任编辑: 方素华)