

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.07.019

# 多胞铝合金薄壁管耐撞性分析与区间优化设计\*

钱立军<sup>1</sup>, 俞陆新<sup>1,2</sup>, 谷先广<sup>1</sup>, 梁文宇<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽机电职业技术学院机械工程学院, 芜湖 241002)

**[摘要]** 铝合金多胞薄壁管轴向压缩在能量吸收方面比普通方形管具有更优的力学性能, 在汽车、航空、军事装备以及其他产业应用前景非常广泛。为研究挤压型材6061-T6铝合金材料各向异性特征, 在板材上分别沿挤压方向0°、45°、90°取样进行单轴拉伸力学特性试验, 获取相应的应力-应变曲线和各向异性特征参数, 基于各向异性硬化行为的屈服准则建立材料本构模型。设计口字、日字、目字等构型截面并对管件进行准静态压溃试验, 通过对比分析变形-压溃力曲线表明目字型多胞铝合金薄壁结构具有更加优越的耐撞性能。为进一步获得目字型薄壁管最优设计参数, 考虑泊松比、弹性模量等材料参数波动对结构耐撞性能产生不确定性影响, 建立多胞铝合金薄壁管耐撞性区间不确定性优化模型, 采用区间可能度方法将其转化为确定性问题, 结合人工神经网络 (artificial neural networks, ANNs) 模型与交错投影寻踪遗传算法 (intergeneration projection genetic algorithm, IP-GA) 方法对该问题进行双层嵌套优化, 分析不同可能度水平对不确定性优化结果的影响, 为不同可靠性优化设计的选择提供指导性意见。

**关键词:** 铝合金薄壁管; 材料本构; 多胞结构; 耐撞性; 区间优化

## Crushing Analysis and Interval Optimization Design for Multi Cell Aluminum Alloy Thin-Walled Tubes

Qian Lijun<sup>1</sup>, Yu Luxin<sup>1,2</sup>, Gu Xianguang<sup>1</sup> & Liang Wenyu<sup>1</sup>

1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. School of Mechanical Engineering, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241002

**[Abstract]** Aluminum alloy multi-cell thin-walled tubes have better mechanical properties in energy absorption than ordinary square tubes in axial compression conditions, with a wide range of application prospects in automotive, aviation, military equipment, and other industries. To study the anisotropic characteristics of extruded 6061-T6 aluminum alloy material, uniaxial tensile mechanical properties tests are conducted on the sheet along the extrusion direction of 0°, 45°, and 90°. The corresponding stress-strain curves and anisotropic characteristic parameters are obtained, and the material constitutive model is established based on the yield criterion of anisotropic hardening behavior. Tubes with different cross-sectional configurations shaped as the Chinese characters of mouth, day and eye are designed and quasi-static crushing tests are conducted. By analyzing the deformation crushing force curve, it is shown that the thin-walled structure of the triple-cell alloy has superior crash resistance performance. In order to further obtain the optimal design parameters of the triple-shaped tube, considering the uncertain effect of material parameter fluctuations such as Poisson's ratio and elastic modulus on the structural impact resistance, the multi-cell aluminum alloy thin-walled tube impact resistance interval uncertainty optimization model is established. The interval possibility degree method is used to transform it into a deterministic problem. By combining the Artificial Neural Networks (ANNs) model with the Intergeneration Projection Genetic Algorithm (IP-GA) method, a dou-

\* 安徽省科技重大专项项目(202203a05020029)资助。

原稿收到日期为2024年01月23日, 修改稿收到日期为2024年02月17日。

通信作者: 谷先广, 副教授, 博士, E-mail: gxghfut@163.com。

ble-layer nested optimization is performed on this problem to analyze the impact of different likelihood levels on uncertainty optimization results, providing guidance for the selection of different reliability optimization design.

**Keywords:** aluminum alloy thin-walled tubes; material constitutive; multi cell structure; crash resistance; interval optimization

## 前言

汽车轻量化是解决新能源汽车续航里程焦虑和节能减排的关键技术,已经成为汽车新技术发展的重要方向之一<sup>[1-3]</sup>。近几年,很多新能源车企都开发出了全铝式的车身结构设计,铝合金材料作为一种理想的轻质化材料受到了广泛的应用,其中铝合金多胞结构因具备质量轻、耐撞性能优异等优点更受到广泛关注<sup>[4-6]</sup>。在铝合金车身结构研究中,如何确定截面形状是关键问题。传统铝合金车身常采用单胞结构以节约生产成本,同时提高结构刚强度,但发生碰撞时的吸能和冲击分散能力较差;而随着制造技术的发展,多胞铝合金逐渐突破高成本的局限,开始在车身结构中广泛应用,如图1所示。

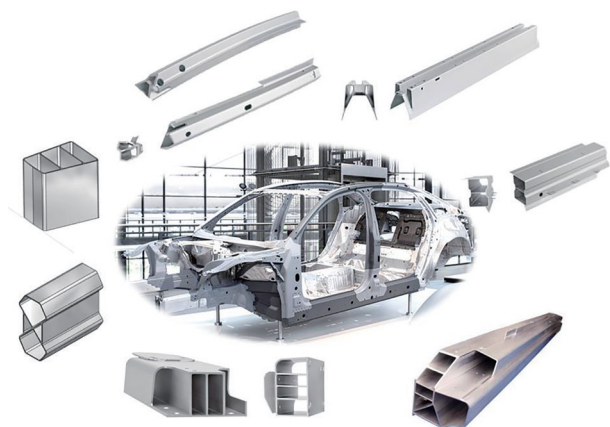


图1 多胞铝合金在汽车结构中的应用

多胞结构特点包括:(1)其由多个胞体模块构成,每个胞体可以是不同的材料,利用该优势可根据不同的工况要求选用不同的材料,例如在需要高强度的部位使用高强度材料,在需要吸能和减震的部位使用吸能材料;(2)多胞结构可提供更好的能量吸收和冲击分散特性,可以在碰撞时减轻车辆乘员的冲击力和减少车辆受损。总之,多胞铝合金结构通过合理的截面设计和材料组合,以适应更多复杂工况,具有更高的研究价值,吸引了国内外大量学者对其研究。

在铝合金材料方面,杜汉斌等<sup>[7]</sup>为研究挤压型材6061-T6铝合金材料各向异性特征,在板材上分别沿挤压方向 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 取样进行单轴拉伸和剪切力学特性试验,并根据各向异性硬化行为的屈服准则建立材料本构模型。Huang等<sup>[8]</sup>研究了复合材料CFRP包裹的铝合金薄壁管的准静态特性,并通过耐撞性分析评价其吸能效果,结果表明,复合材料增强的管材的抗弯性能明显提升。在多胞结构方面,白芳华等<sup>[9]</sup>通过甲虫鞘翅的客车八边形仿生多胞薄壁管防撞研究,表明该多胞薄壁管具有良好的防撞性能。Gong等<sup>[10]</sup>提出了一种新的多单元方管及其层次结构,以提高多单元薄壁结构的能量吸收效率。结果表明,该新型多单元方管及其分层结构比相应的传统多单元方管具有优越的耐撞性能。铝合金多胞结构参数优化方面,文桂林等<sup>[11]</sup>以多胞结构比吸能为优化目标,多结构峰值力为约束,通过多目标粒子群优化算法进行了结构截面尺寸优化,证明了新型多胞结构在汽车及航空等领域应用前景广泛。Shen等<sup>[12]</sup>研究了不同形状截面薄壁管碰撞吸能特性,并通过NSGA-II进行了截面尺寸参数优化,得到的最优解表明,厚度分布和内肋排列合适的不均匀三胞管在能量吸收方面优于初始设计。

以上研究表明,目前铝合金多胞结构薄壁管的研究还需要进一步深入,首先是材料各向异性力学性能表征问题需要解决,其次是多胞结构的参数影响因素需要深入研究,最后是考虑材料参数波动对性能不确定性的区间优化方法在结构设计上的应用。本文以6061-T6铝合金多胞薄壁管为对象进行研究。首先,通过拉伸试验获取6061-T6铝合金材料力学特性参数,建立材料各向异性本构模型并进行参数表征;其次,进行不同截面形状和不同长度的薄壁管压溃试验与仿真,得出最佳的截面尺寸;最后,通过不确定区间优化算法对截面参数进行优化,得到最佳尺寸参数。

## 1 挤压铝合金材料力学特性研究

### 1.1 铝合金材料力学性能试验

挤压铝型材在不同方向上呈现不同的力学特

征,即金属材料的正交各向异性。为研究挤压成型6061-T6铝合金材料力学性能,如图2(a)所示,在板材上分别沿轧制方向 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 取样进行准静态单向拉伸试验。根据GB/T228.1—2010,尺寸采用标准设计,样件宽35 mm,标距长60 mm,标距宽15 mm,过渡段圆弧半径25 mm,总长200 mm,尺寸如图2(b)所示。

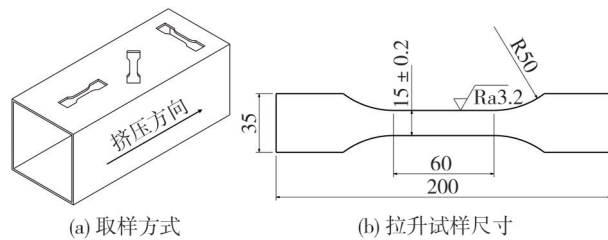


图2 试验取样方式及试样尺寸

采用8801型电液伺服疲劳试验机进行6061-T6铝合金材料单轴拉伸试验,该试验机具有10 t最大加载能力,载荷精度可以达到满量程的 $\pm 0.005\%$ 。整套材料试验装备系统如图3所示。

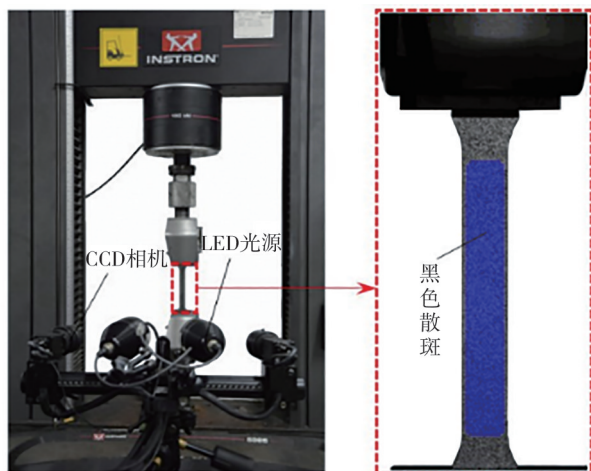
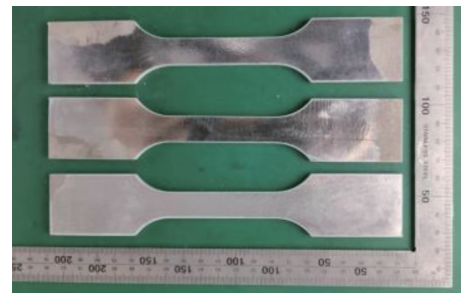


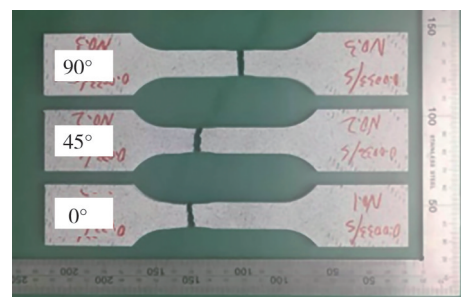
图3 准静态材料试验系统

在进行力学测试之前,需要对样品进行准备,确保其符合测试要求和标准规范。确保测试的一致性和可比性,制备不同挤压方向各截取3个试件进行试验,拉伸前后试件如图4所示。不同方向试件试验后颈缩程度略有差异, $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 方向相近且比 $90^\circ$ 方向试件颈缩程度略大。对比试验后不同角度下试件断口方向, $90^\circ$ 试件沿挤压垂直方向发生断裂,而 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 方向试件为斜口断裂。材料真实应力-应变曲线如图5所示, $0^\circ$ 方向试件的屈服应力最大, $45^\circ$ 方

向试件屈服应力最小, $90^\circ$ 方向的材料延伸率最小,这也证明了该方向的试件断口颈缩程度最小,总体来说该材料有一定的各向异性特征。



(a) 试件拉伸前



(b) 试件拉伸后

图4 不同挤压方向材料拉伸结果

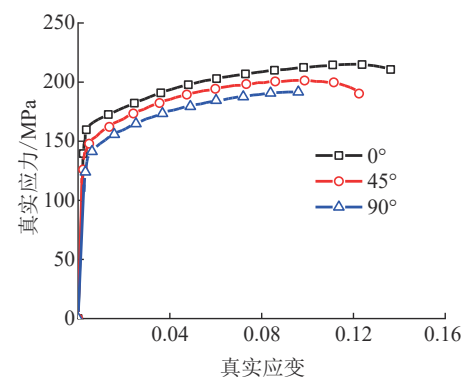


图5 试验真实应力-应变曲线

为了反映材料各方向塑性变形行为,须根据材料性能试验数据得出各向异性性能参数。常常通过DIC试验分析得到的各向异性系数( $r$ 值)表征。各向异性系数定义为材料样品宽向应变与厚向应变之比,由体积不可压缩条件,即 $\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0$ ,可得到 $r$ 值随试件长度和宽度变化的关系:

$$r = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(l/l_0)} \quad (1)$$

式中: $w_0$ 、 $w$ 分别为初始和终了的试样宽度; $l_0$ 、 $l$ 分别

为初始和终了的试样长度。通过DIC试验测得的各项异性系数见表1。

表1 6061-T6 铝合金各向异性系数

$r_0$	$r_{90}$	$r_{45}$
0.44	0.913	0.745

### 1.2 各向异性材料力学性能表征

首先,各向异性材料拉伸过程中材料的硬化行为有所不同,即随着应变的增加,表现在材料抗力增强行为上的差异;其次,不同拉伸方向下材料进入屈服阶段的应力状态不同。因此,须进行不同方向拉伸硬化模型及各向异性屈服准则的研究。

对于各项异性材料硬化准则,通过将塑性应力应变曲线导入LS-DYNA的MAT36#各向异性材料本构模型,定义关键字为\*MAT\_3-PARAMETER\_BARLAT。可以较为准确仿真出铝合金材料力-位移曲线,而想要准确预测出力-位移曲线,还须借助合适的本构模型进行拟合外推。本文应用Swift-Hockett-Sherby 加权硬化准则<sup>[12]</sup>能很好地描述6061-T6挤压型材在拉伸过程中产生颈缩前应力应变的变化,并通过试验与仿真结果的对比得出适用于各向异性挤压铝的硬化准则,函数模型如下:

$$\sigma = (1 - \alpha)C(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n + \alpha[\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{-\alpha\varepsilon_p^q}] \quad (2)$$

式中: $\alpha \in [0, 1]$ 为权重系数; $C, \varepsilon_0, n, \sigma_{sat}, \alpha, q$ 为待拟合参数。

通过对硬化本构进行拟合,得到3个方向的硬化模型参数,如表2所示。

表2 不同方向硬化模型参数

参数	0°	45°	90°
$C$	435.43	426.64	406.12
$\varepsilon_0$	0.002	0.002	0.002
$n$	0.31	0.30	0.32
$\sigma_{sat}$	310.25	304.31	299.52
$\alpha$	0.77	0.75	0.77
$q$	0.89	0.95	0.82

20世纪四五十年代, Hill首次考虑材料屈服过程的各项异性,参考各向同性的Mises屈服准则,建立了二次各向异性屈服准则(简称Hill48屈服准则),到目前为止,该方法在研究材料各向异性问题中应用最广泛<sup>[13]</sup>。考虑到板材的成型过程可认为是一个平面问题,屈服函数如下:

$$f^2(\sigma) = (G + H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H + F)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (3)$$

式中: $G, H, F, N$ 分别为屈服函数参数; $f(\sigma)$ 为屈服函数。各参数可用各向异性指数表示:

$$G = \frac{1}{1 + r_0} \quad (4)$$

$$H = \frac{r_0}{1 + r_0} \quad (5)$$

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1 + r_0)} \quad (6)$$

$$N = \frac{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}{2r_{90}(r_0 + 1)} \quad (7)$$

由表1的各向异性系数求得屈服函数参数,见表3。

表3 屈服函数参数标定值

$G$	$H$	$F$	$N$
0.706	0.293	0.315	1.289

### 1.3 本构模型参数验证

基于LS-DYNA软件建立不同方向的拉片有限元模型,选定单元尺寸为1.5 mm,如图6所示。

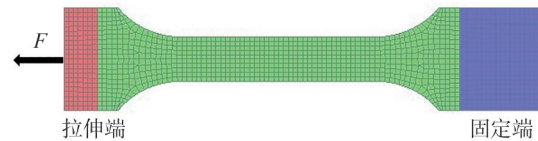


图6 单拉样片有限元模型

将拟合完成的硬化曲线和各项异性系数输入LSDYNA各向异性材料模型,以挤压方向为参考方向,设置弹性模量为70 585 MPa,泊松比为0.33,进行单轴拉伸仿真。输出等效塑性应力应变结果如图7所示,可以看到,3个方向的仿真结果与试验基本

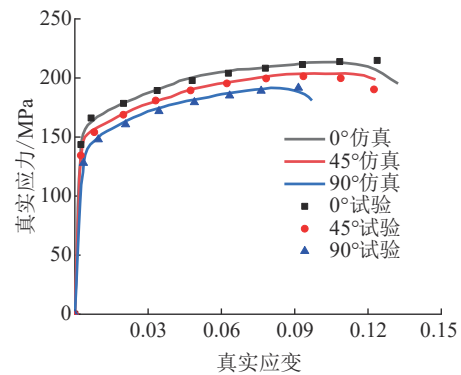


图7 不同方向拉伸试验与仿真对比

吻合,验证了本构模型的合理性。

## 2 多胞铝合金结构耐撞性分析

### 2.1 耐撞性评价准则

比吸能 (special energy absorption, SEA) 是衡量多胞铝合金薄壁管结构吸能效果的重要指标:

$$SEA = \frac{EA}{M} \quad (8)$$

式中:  $M$  为吸能结构的质量;  $EA$  为吸能结构所能吸收的能量。

$$EA(l) = \int_0^l f(\delta) d\delta \quad (9)$$

式中:  $l$  表示结构压溃变形总长度;  $f(\delta)$  表示压溃行程中各个时刻压溃力大小。

另外一个衡量结构耐撞性的重要指标是压溃力效率 (crushing force efficiency, CFE), 由下式计算:

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (10)$$

$$\text{其中 } MCF = \frac{1}{d} \int_0^d F(\delta) d\delta \quad (11)$$

式中: 峰值压溃力  $PCF$  (peak crushing force) 是指薄壁结构变形-压溃力曲线中的第 1 个峰值力; 平均压溃力  $MCF$  (mean crushing force) 是指压溃行程中压溃力的平均值。

当结构发生正面碰撞时, 主要依赖薄壁管件的纵向压溃变形, 为了降低碰撞过程的冲击力, 尽量保证  $PCF$  和  $MCF$  数值较小, 为了满足碰撞过程中结构对能量的吸收效率, 希望获得较大的  $SEA$ 。

### 2.2 试验研究

本文以口字型、日字型和目字型 3 种不同截面的 6061-T6 铝合金挤压型材薄壁管件进行压溃试验, 截面尺寸如图 8 所示, 截面尺寸数据见表 4。其中口字型和日字型轴向长度为 300 mm, 同时对比轴向长度不同的目字型铝合金薄壁管的耐撞性, 目字型轴向长度为 300 和 400 mm。

试验平台为如图 9 所示的 MTS-Landmark 370.50 材料试验机, 加载速度为 0.145 mm/s, 压头

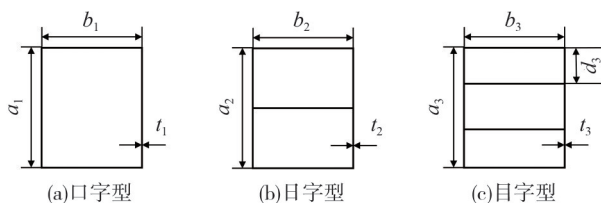
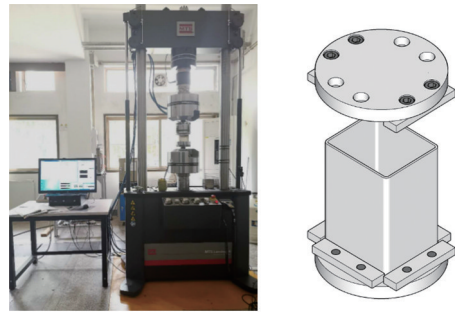


图8 截面尺寸标注

表4 截面尺寸表

序号	a/mm	b/mm	t/mm	d/mm
1	80	70	2.2	
2	88	70	2.2	
3	110	60	2.2	22

速度设定为匀速 50 mm/min, 管件被固定在压溃台上。测试过程中试验机上端保持固定。为确保测试结果的准确性和可靠性, 事先需要对测试设备进行轴度标定。设备轴度标定通过对设备进行校准, 使其符合标准规范, 从而提高测试结果的准确性。通过轴度标定可以消除设备本身的误差, 并确保测试结果的一致性。



(a) 试验装置



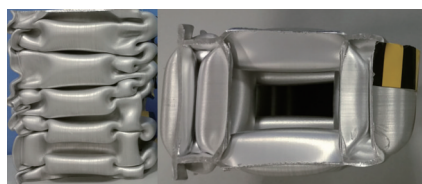
(b) 压溃前后对比图

图9 准静态压溃试验装置

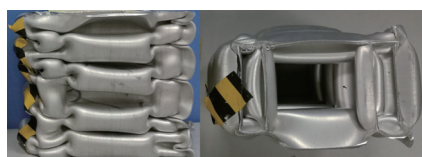
### 2.3 试验结果分析

在汽车、船舶等结构耐撞性设计时, 采用薄壁管压溃折叠方式吸收能量, 折叠区域数量会直接影响管件的吸能能力, 折叠区域越多则管件吸收的能量也越多, 耐撞性也就越好。图 10 中分别呈现了薄壁结构不同截面和长度的溃缩结果, 口字型和日字型管件压溃过程中分别产生了 3 和 4 个折叠区域, 长度为 300 和 400 mm 的目字型管分别产生了约 4 和 5 个折叠区域。由于折叠区域数量多, 所以长 400 mm 的目字型管件吸能较 300 mm 多。考虑到长 400 mm 采

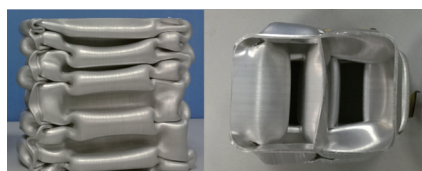
用的材料增多,通过管件的变形-压溃力曲线分析压溃力变化趋势并计算峰值压溃力、平均压溃力、压溃效率、比吸能等耐撞性能指标值。



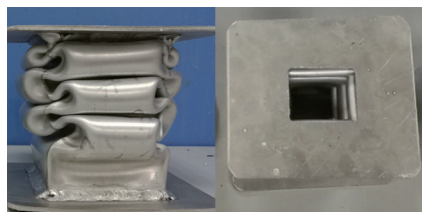
(a) 目字型400 mm



(b) 目字型300 mm



(c) 日字型300 mm



(d) 口字形300 mm

图10 压溃试验结果图

图11所示为300和400 mm长度下的口字型、日字型、目字型管件变形-压溃力曲线。4种管件的压溃力曲线表现出共同特点:压溃力达到峰值后迅速下降,之后逐渐在某一值附近波动,呈现典型的渐进压溃模式。按照相同的截面类型或长度,将4种压溃力曲线分为两类,如图12和图13所示,相同长度下,目字型的多胞铝合金薄壁管的峰值压溃力最小,意味着在发生碰撞时冲击力相对较小,吸能效果更好。而在相同截面下,长度为400和300 mm的目字形结构薄壁管的峰值压溃力在数值上基本一致,但400 mm的薄壁管具有更低的平均压溃力(虚线表示平均压溃力)。

由不同管件的压溃力曲线分析得到的耐撞性指标如表5所示。长300 mm日字型管件相对于口字

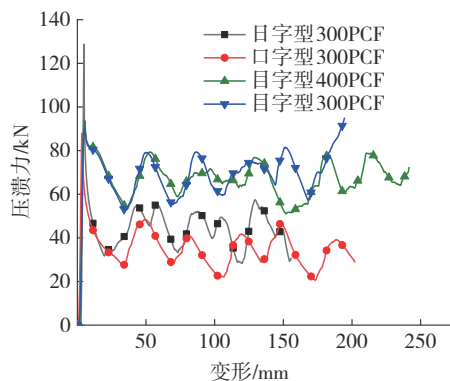


图11 不同截面变形-压溃力曲线图

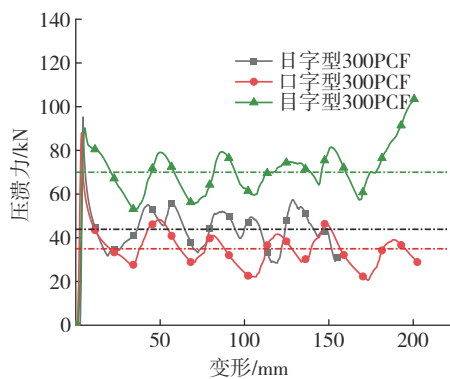


图12 不同截面变形-压溃力曲线图

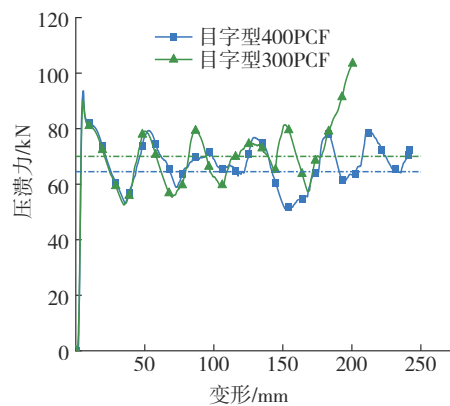


图13 目字形截面变形-压溃力曲线对比

型,平均压溃力提高约9 kN,压溃力效率提高约15%,比吸能提升约2.38 J/g;目字型相对于口字型平均压溃力提高约35 kN,压溃力效率提高约90%,比吸能提升约3.11 J/g。针对目字型,长300 mm管件的平均压溃力超过400 mm的管件约2.65 kN,但是峰值压溃力、压溃效率和比吸能均优于400 mm长管件。

表5 耐撞性指标结果汇总

截面	长度/mm	SEA/(J·g <sup>-1</sup> )	PCF/kN	MCF/kN	CFE
口子型	300	13.02	88.0	34.82	0.40
日字型	300	15.40	95.3	43.89	0.46
目字型	300	16.13	92.7	69.83	0.75
目字型	400	15.38	93.6	67.18	0.71

2.4 有限元模型建立及验证

通过准静态压溃试验得出目字型截面多胞铝合金截面管的耐撞性优于其他截面的铝合金截面管,因此本节针对目字型截面管进行有限元建模并验证其精确性,进一步对目字型进行参数优化提供有效的有限元模型。有限元模型主要由管件本身、固定刚性墙以及移动刚性墙3个部分组成,如图14所示。

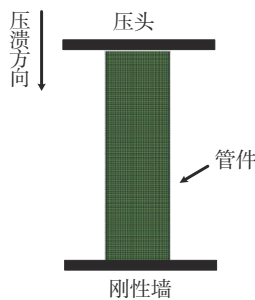
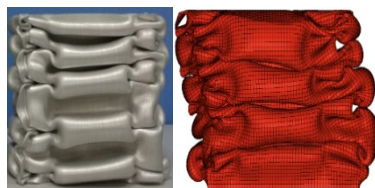
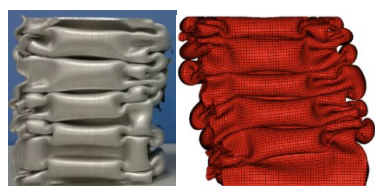


图14 准静态压溃试验仿真模型图

准静态压溃试验和仿真结果对比如图15所示,两者变形模式和压溃褶皱基本一致;相关耐撞性指标数值如表6所示,各指标误差均在6%以内;不同长度的目字型管件仿真与试验力-位移关系如图16



(a) 300 mm



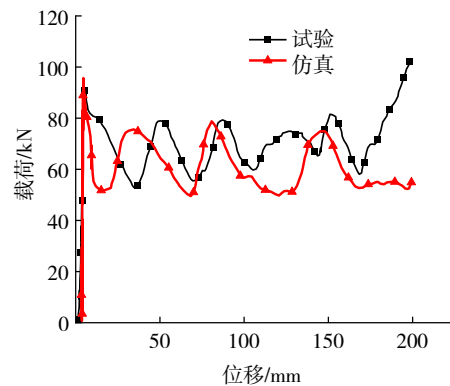
(b) 400 mm

图15 管件试验与仿真结果对比图

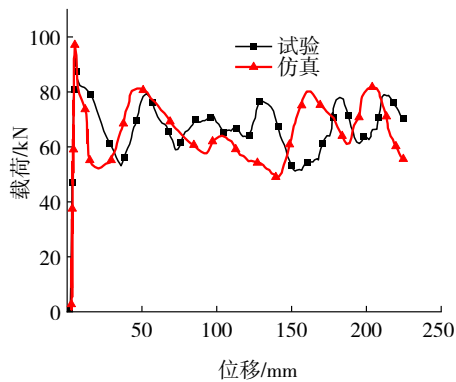
所示,两者趋势基本一致,表明薄壁管有限元模型与压溃试验结果一致性较高,可用于接下来的优化设计。

表6 仿真与试验耐撞性指标对比

截面	项目	SEA/(J·g <sup>-1</sup> )	PCF/kN	MCF/kN	CFE
目字型 (300 mm)	试验	16.13	92.7	69.83	0.75
	仿真	15.93	95.3	67.04	0.71
	误差	1.86%	2.84%	4.00%	5.33%
目字型 (400 mm)	试验	15.38	93.6	67.18	0.71
	仿真	15.95	97.1	65.23	0.67
	误差	3.71%	3.73%	2.90%	5.63%



(a) 目字型(300 mm)



(b) 目字型(400 mm)

图16 管件变形-压溃力曲线仿真与试验对比

3 多胞铝合金结构区间优化设计

3.1 区间优化理论

结构轴向压溃力由截面几何特性和材料特性共同决定,而吸能由压溃力决定,经验公式<sup>[14]</sup>为

$$P_{max} = 2 \left[ \kappa_p E / \beta (1 - \nu^2) \right]^{0.43} t^{1.86} b^{0.14} (1 + \alpha) \sigma_y^{0.57} \tag{12}$$

式中： $\kappa_p$ 为根据周边约束程度得到的系数； $\sigma_y$ 、 $E$ 、 $\beta$ 、 $\nu$ 分别为材料屈服强度、弹性模量、泊松比及硬化因子参数；截面的宽高比 $\alpha = d/b$ 。考虑到弹性模量、泊松比等部分材料参数在制造过程中会有一定不确定性，会影响最终的结构性能。区间不确定性优化是在确定性优化问题的基础上引入不确定性变量，目标函数和约束函数都是关于设计变量 $X$ 及不确定性变量 $U$ 的函数，其优化模型表示为

$$\begin{cases} \min_X f(X, U) \\ \text{s. t. } g_i(X) \leq (=, \geq) b_i^l = [b_i^l, b_i^u], \\ \quad i = 1, 2, \dots, p, X \in \Omega^n \\ \quad U \in U^l = [U^l, U^u], U_j \in U_j^l = [U_j^l, U_j^u], \\ \quad j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (13)$$

式中： $X$ 为 $n$ 维设计向量，其取值范围为 $\Omega^n$ ； $U$ 为 $q$ 维不确定向量，其不确定性用 $q$ 维区间向量 $U^l$ 描述； $f$ 和 $g$ 分别为目标函数和约束函数，它们都是关于 $X$ 和 $U$ 的非线性连续函数； $b_i^l$ 为第 $i$ 个不确定约束的允许区间； $b_i^u$ 、 $b_i^l$ 分别为其上、下限。

通过区间序关系<sup>[15]</sup>将式(13)不确定性优化问题转换为如下的确定性优化问题：

$$\begin{cases} \min_X (f^c(X), f^w(X)) \\ \text{s. t. } P(M_i^l \leq N_i^l) \geq \lambda_i, i = 1, 2, \dots, k \\ X \in \Omega^n \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\lambda_i$ 为一预先给定的可能度水平，其取值范围为 $0 \leq \lambda_i \leq 1$ ； $f^c(X)$ 为目标函数区间中点； $f^w(X)$ 为目标函数区间半径值，定义如式(15)所示。

$$\begin{cases} f^c(X) = \frac{\min_U f(X, U) + \max_U f(X, U)}{2} \\ f^w(X) = \frac{\max_U f(X, U) - \min_U f(X, U)}{2} \end{cases} \quad (15)$$

通过优化 $f^c(X)$ 以提高目标函数在不确定性下的设计性能， $f^w(X)$ 最小化可以降低目标函数对于不确定性的敏感程度。

采用线性加权法将式(14)进一步转换为单目标优化问题：

$$\begin{cases} \min_X f_d(X) = (1 - \beta)(f^c(X) + \xi)/\varphi + \\ \quad \beta(f^w(X) + \xi)/\psi, X \in \Omega^n \\ \text{s. t. } P(M_i^l \leq N_i^l) \geq \lambda_i, i = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (16)$$

式中： $f_d(X)$ 为多目标评价函数， $0 \leq \beta \leq 1$ 为多目标权重系数； $\xi$ 为保证 $f^c(X) + \xi$ 和 $f^w(X) + \xi$ 非负的参数； $\varphi$ 和 $\psi$ 为多目标函数的正则化因子。可进一步将上式转换为如下以罚函数 $f_p(X)$ 表示的无约束单目标优化问题：

$$\begin{aligned} \min f_p(X) = f_d(X) + \sigma \sum_{i=1}^k \phi(P(M_i^l \leq N_i^l) - \lambda_i) = \\ (1 - \beta)(f^c(X) + \xi)/\varphi + \beta(f^w(X) + \xi)/\psi + \\ \sigma \sum_{i=1}^k \phi(P(M_i^l \leq N_i^l) - \lambda_i) \end{aligned} \quad (17)$$

式中： $X \in \Omega^n$ ，也是一组约束，通常以设计向量的边界形式给出，求解过程中 $X \in \Omega^n$ 可直接在算法中设定而并不需要做约束处理； $\sigma$ 为罚因子，一般取较大的值； $\phi$ 为罚函数，如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \phi(P(M_i^l \leq N_i^l) - \lambda_i) = \\ \max(0, -(P(M_i^l \leq N_i^l) - \lambda_i))^2 \end{aligned} \quad (18)$$

### 3.2 区间优化流程

结合ANNs模型与IP-GA方法求解非线性区间数优化问题，计算流程如图17所示。

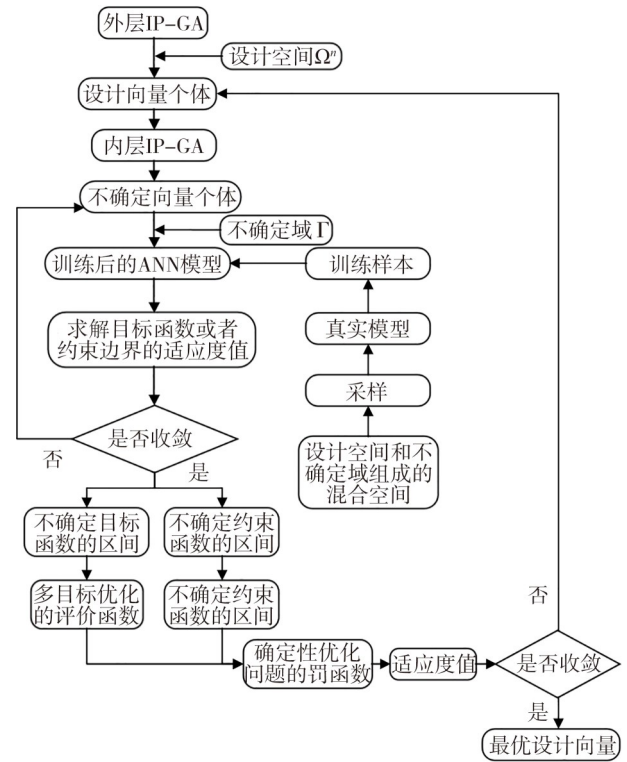


图17 单网络混合优化算法

(1) 对于设计空间 $\Omega^n$ 和不确定域 $\Gamma$ 所组成的混合空间内进行采样，由设计变量和不确定变量共同组成样本点；

(2) 通过真实模型计算所有采样点对应的不确定目标函数值 $f(X', U')$ 和约束值 $g_i(X', U')$ ， $i = 1, 2, \dots, l$ ，从而得到一组训练样本；

(3) 建立ANN模型，输入为设计向量和不确定向量，输出为相应的不确定目标函数值和约束值；

(4) 通过得到的训练样本,训练设计向量和不确定向量与不确定目标和约束函数之间的 ANN 模型;

(5) 将训练后的 ANN 模型代替原有的真实模型,与 IP\_GA 相结合对转换后的确定性优化问题进行双层嵌套优化,使得整个优化的效率得到极大提高。

### 3.3 区间优化模型建立以及结果分析

#### 3.3.1 优化模型建立

通过研究发现,从口字型、日字型到目字型结构的多胞铝合金薄壁管,随着结构的不断复杂化,管件的耐撞性也随之有所提高,目字型的结构较其他两种结构具有更好的耐撞性能,但耐撞性的优劣不仅仅与截面类型有关,还受到其他参数的一定影响,如材料、管件壁厚、多胞结构肋板的位置布置等,本文选取 300 mm 长度的目字型结构为优化对象。

比吸能 (SEA) 为优化目标;平均压溃力 (MCF) 和初始峰值力 (PCF) 定义为约束。约束条件初始响应和优化目标要求如表 7 所示;设计变量选择为目字型结构薄壁关键的厚度  $t_1, t_2, t_3$  以及可以反映肋板位置的参数  $d$ ,如图 18 所示,表 8 为设计参数初始值及设计上下限,表 9 显示了材料参数泊松比和弹性模量不确定性变量的上下界。

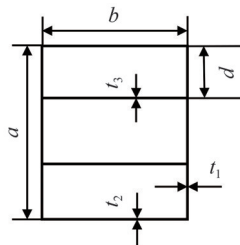


图 18 目字型结构优化设计参数

表 7 设计目标

项目	目标函数	约束函数	
	SEA/(J·g <sup>-1</sup> )	MCF/kN	PCF/kN
目标	Maximize	≤67.04	≤95.30

表 8 设计变量及取值范围

设计变量	初始值/mm	设计下限/mm	设计上限/mm
$t_1$	2.2	1.8	3.0
$t_2$	2.2	1.8	3.0
$t_3$	2.2	1.8	3.0
$d$	22.0	12.0	32.0

表 9 不确定变量取值范围

区间变量	初始值	设计下限	设计上限
$U_1$ (泊松比)	0.33	0.30	0.36
$U_2$ (弹性模量)	70 GPa	65 GPa	75 GPa

对于其考虑的参数,建立数学模型:

$$\begin{cases} \min_X f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \\ \text{s. t. } g_1(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \leq b_1 = 67.04 \\ g_2(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \leq b_2 = 95.30 \\ \mathbf{X}_1 \in [1.8, 3.0]; \mathbf{X}_2 \in [1.8, 3.0] \\ \mathbf{X}_3 \in [1.8, 3.0]; \mathbf{X}_4 \in [12, 32] \\ \mathbf{U}_1 \in U_1^l = [U_1^l, U_1^u] = [0.30, 0.36] \\ \mathbf{U}_2 \in U_2^l = [U_2^l, U_2^u] = [65, 75] \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4$  为设计向量,分别为目字型结构薄壁关键的厚度  $t_1, t_2, t_3$  以及可以反映肋板位置的参数  $d$ ;  $\mathbf{U}$  为不确定向量;  $U_1$  和  $U_2$  分别为泊松比和弹性模量;  $f$  和  $g$  分别为目标及约束,其都是关于  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{U}$  的非线性连续函数;  $f$  为目标函数比吸能 SEA;  $g_1$  和  $g_2$  为结构平均压溃力 MCF 以及初始峰值压溃力 PCF。

通过上述的不确定优化问题可转换为无约束单目标优化问题的区间序关系转换模型:

$$\begin{aligned} \min f_p(\mathbf{X}) = & f_a(\mathbf{X}) + \sigma \sum_{i=1}^2 \phi(P(g_i^l \leq b_i) - \lambda_i) = \\ & (1 - \beta) \cdot f^c(\mathbf{X})/\varphi + \beta \cdot f^w(\mathbf{X})/\psi + \\ & \sigma \sum_{i=1}^2 \phi(P(g_i^l \leq b_i) - \lambda_i) \end{aligned} \quad (20)$$

其中  $\mathbf{X} \in [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4]$

#### 3.3.2 区间优化的结果

本文优化过程中,外层采用 IP-GA 对设计变量寻优,内层通过 IP-GA 方法确定约束上下界。算法中,外层和内层的优化求解器都采用全局优化性能优异的 GA 算法,一方面克服了非连续和不可导对外层优化造成的求解困难,另一方面也能在一定程度上避免内层优化的局部最优,相关的参数设置<sup>[16]</sup>:  $\xi$  为 0.0, 罚因子  $\sigma$  为 10 000。对于 IP-GA, 3 个搜索参数  $r, s$  和  $t$  都设为 0.6, 种群大小、交叉概率和变异概率分别设为 50、0.8 和 0.1。另外, IP-GA 外层和内层的最大迭代数分别设为 500 和 200, 通过计算验证参数设置满足要求。

本文中给定的固定多目标权系数  $\beta$  为 0.5, 分别将区间可能度水平设置为 0.2、0.5、0.8、1.0 进行优化, 结果如表 10 所示。在满足相应的可能度水平的要求下, 不同可能度水平获得了不同的最优设计向

量。随着约束可能度水平的减小,最优设计目标性能呈现上升趋势。这是因为,较小的约束可能度水平,使得转换后的确定性优化问题可行域变大,从而可获得更优的目标函数性能。反之,设计者也可以通过适当的性能代价追求更高设计可靠性。选取可

能度为0.8情况下的 $f^e(X)$ 和 $f^w(X)$ 优化结果与不确定变量上、下限代入模型计算获得初始结果进行对比如表11所示。由表可知,优化后的目标性能有一定的提升,同时降低了设计约束和目标对不确定性的敏感程度。

表10 不同可能度水平下不确定性优化结果

可能度	设计变量/mm	$SEA/(J \cdot g^{-1})$	$MCF/kN$	$PCF/kN$
0.2	[1.8, 1.5, 2.8, 15]	[19.48, 20.76]	[66.86, 69.95]	[94.16, 103.33]
0.5	[2.6, 2.0, 1.6, 18]	[17.38, 18.84]	[65.52, 68.95]	[93.27, 101.37]
0.8	[2.1, 2.1, 2.4, 21]	[16.73, 18.26]	[64.37, 67.50]	[91.12, 99.26]
1.0	[2.0, 2.1, 2.2, 20]	[15.73, 17.26]	[63.02, 67.04]	[89.23, 94.17]

表11 优化结果对比

项目		优化前	优化后	性能提升
$SEA/(J \cdot g^{-1})$	目标函数区间	[14.72, 16.84]	[15.73, 17.26]	
	$f^e(X)$	15.78	16.50	4.56%
	$f^w(X)$	1.01	0.77	23.81%
$MCF/kN$	约束区间	[65.34, 69.72]	[64.37, 67.50]	
	$f^e(X)$	67.53	65.94	2.35%
	$f^w(X)$	2.19	1.56	28.76%
$PCF/kN$	约束区间	[92.67, 100.83]	[91.12, 99.26]	
	$f^e(X)$	96.75	95.19	1.6%
	$f^w(X)$	4.08	4.07	0.2%
变量	$[t_1, t_2, t_3, d]$	[2.2, 2.2, 2.2, 22]	[2.1, 2.1, 2.4, 21]	

## 4 结论

(1)根据GB/T228.1—2010,在挤压成型6061-T6铝合金板材上分别沿挤压方向 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 取样进行了准静态单向拉伸试验,结果表明在 $0^\circ$ 方向试件的屈服应力最大, $45^\circ$ 方向试件屈服应力最小,表明该材料有一定的各向异性力学特性,基于材料应力-应变曲线和各向异性特征参数,建立了能够表征硬化规律各向异性材料本构模型。

(2)选取3种不同截面(口字型、日字型和目字型)和不同长度(300和400 mm)铝合金薄壁管件进行了压溃试验,结果表明目字型结构的多胞铝合金薄壁管较其口字和日字截面薄壁管有更加优秀的比吸能,更易满足结构轻量化与耐撞性的要求,400 mm目字型结构薄壁管与300 mm的相比具有更低平均压溃力,但300 mm长度比吸能、初始峰值力和压溃效率更优。

(3)考虑材料参数波动引起的不确定性影响,建立了目字型结构区间不确定性优化模型,采用ANNs和IP-GA相结合的双层嵌套寻优方法,降低了计算

量。优化结果获得了满足设计要求且质量更轻的设计结果,并研究了改变可能度水平对设计结果的影响,为不同可靠性要求的设计过程提供指导。

## 参考文献

- [1] DAEHN G S, DAEHN K E, KUTTNER O. Environmentally responsible lightweight passenger vehicle design and manufacturing[J]. Automotive Innovation, 2023, 6(3):300-310.
- [2] 靳春宁,高妍,高世哲,等.基于辊冲一体式纵梁的轻量化拖挂车房车底盘[J].汽车工程,2023,45(5):865-872.  
JIN C N, GAO Y, GAO S Z, et al. Lightweight trailer chassis based on roll punching integrated longitudinal beam[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(5): 865-872.
- [3] WANG D F, XIE C, LIU Y C, et al. Multiobjective collaborative optimization for the lightweight design of an electric bus body frame[J]. Automotive Innovation, 2020, 3(3):250-259.
- [4] LIANG H, ZHAO Y, CHEN S, et al. Review of crashworthiness studies on cellular structures[J]. Automotive Innovation, 2023, 6(3):379-403.
- [5] 王登峰,卢春达,梁鸿宇.多角度冲击工况下铝/CFRP复合管诱导槽多目标优化设计[J].汽车工程,2023,45(7):1286-1298.  
DWANG D F, LU C D, LIANG H Y. Multi-objective optimization design of induction groove for aluminum/CFRP hybrid tube

- under multi-angle compression condition [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(7): 1286-1298.
- [6] 贺良国,赵杰,谷先广.基于多胞结构的车身前端轻量化和耐撞性设计[J]. *汽车工程*, 2020, 42(6): 832-839, 846.  
HE L G, ZHAO J, GU X G. Lightweight and crashworthiness design of vehicle body front-end based on multi-cell structure [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(6): 832-839, 846.
- [7] 杜汉斌,杨海峰,胡峥楠,等.车用6061-T5铝合金的力学特性及各向异性硬化行为的屈服准则[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(3): 439-448.  
DU H B, YANG H F, HU Z N, et al. Yield criteria for mechanical properties and anisotropic hardening behavior of automotive 6061-T5 aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(3): 439-448.
- [8] HUANG Z, ZHANG X, YANG C. Experimental and numerical studies on the bending collapse of multi-cell aluminum/CFRP hybrid tubes [J]. *Composites Part B*, 2020, 181: 1-17.
- [9] 白芳华,张林伟,白中浩,等.基于甲虫鞘翅的客车八边形仿生多胞薄壁管耐撞性研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(21): 24-30.  
BAI Fanghua, ZHANG Weilin, BAI Zhonghao, et al. Crashworthiness of coach's octagonal bionic multi-cell thin-walled tubes based on beetle elytra [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(21): 24-30.
- [10] GONG C, BAI Z H, HU Y. Crushing behaviors of novel multi-cell square tubes and its hierarchical multi-cell structures under axial loading [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023, 30(15): 3156-3171.
- [11] 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 G L, KONG X Z, YIN H F, 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.
- [12] SHEN W, GU X G, JIANG P, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization design for rectangular unequal triple-cell tubes subjected to axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 117: 190-198.
- [13] HILL R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1033): 281-297.
- [14] MAHMOOD H F, SAHA N K, PALUSZNY A. Stiffness and crash strength characteristics of thin walled plate components [J]. *Computers in Engineering*, 1985, 1: 501-507.
- [15] JIANG C, ZHANG Z, ZHANG F, et al. A new nonlinear interval programming method for uncertain problems with dependent interval variables [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014: 238-245.
- [16] 董欣心,岳振江,王志,等.火箭整流罩锥壳夹层结构不确定性轻量化设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(3): 625-635.  
DONG X X, YUE Z J, WANG Z, et al. Uncertainty lightweight design of sandwich structure of rocket fairing cone [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(3): 625-635.
- (上接第 1322 页)
- [15] ESCHENAUER H A, OHLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: a review [J]. *Appl. Mech. Rev.*, 2001, 54(4): 331-390.
- [16] 李铁柱,华睿,黄维.基于拓扑优化的白车身扭转刚度性能设计[J]. *汽车实用技术*, 2019(17): 180-182.  
LI T Z, HUA R, HUANG W. Torsional stiffness performance design of body-in-white based on topology optimization [J]. *Automobile Applied Technology*, 2019(17): 180-182.
- [17] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct&HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.  
HONG Q Q, ZHAO K, ZHANG P, et al. OptiStruct&HyperStudy theoretical basis and engineering application [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [18] WANG D, ZHANG J, WANG S, et al. Frontal vehicular crash energy management using analytical model in multiple conditions [J]. *Sustainability*, 2022, 14(24): 16913.
- [19] C-NCAP 管理规则(2021年版)[S]. 天津:中国汽车技术研究中心有限公司, 2021.  
C-NCAP management rules(2021)[S]. Tianjin: CATARC, 2021.
- [20] LIU X, LIANG R, HU Y, et al. Collaborative optimization of vehicle crashworthiness under frontal impacts based on displacement oriented structure [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2021, 22: 1319-1335.
- [21] HUANG M. *Vehicle crash mechanics* [M]. CRC Press, 2002.
- [22] HUANG S, DONG J. Optimization study of vehicle crashworthiness based on two types of frontal impacts [C]. 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). IEEE, 2015: 409-413.
- [23] ABBASI M, GHAFARI-NAZARI A, REDDY S, et al. A new approach for optimizing automotive crashworthiness: concurrent usage of ANFIS and Taguchi method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, 49: 485-499.
- [24] LI Q Q, LI E, CHEN T, et al. Improve the frontal crashworthiness of vehicle through the design of front rail [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 162: 107588.
- [25] DUAN L, SUN G, CUI J, et al. Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53: 321-338.
- [26] GUAN Z, LI G, CHENG A, et al. The lightweight of auto body based on topology optimization and sensitivity analysis [C]. SAE Paper 2015-01-1367.
- [27] 雷正保,肖林辉,阳彪,等.纯电动汽车的碰撞相容性与NVH多目标拓扑优化[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2016, 40(1): 31-35.  
LEI Z B, XIAO L H, YANG B, et al. Multi-objective topology optimization design of electric vehicle based on collision compatibility and NVH [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, 40(1): 31-35.

# AUTOMOTIVE INNOVATION

## CALL FOR PAPERS

Feature Topic on Intelligent Transportation Systems



**Yongfu Li**  
Professor at Chongqing  
University of Posts and  
Telecommunications, China



**Xiaozheng (Sean) He**  
Associate Professor at  
Rensselaer Polytechnic  
Institute, USA



**Simone Baldi**  
Professor at Southeast  
University, China



**Michael W Levin**  
Assistant Professor at University of  
Minnesota, Twin Cities, USA



**Srinivas Peeta**  
Professor at Georgia  
Institute of Technology, USA



**Xianbiao Hu**  
Assistant Professor at  
Pennsylvania State  
University, USA



**Hang Zhao**  
Assistant Professor at  
Chongqing University of  
Posts and Telecommuni-  
cations, China

### Feature Topic Highlights

- Traffic collaborative perception and prediction methodologies and techniques
- End-edge-cloud communication techniques considering spectrum resources constraints
- Mixed traffic modelling methodologies under complex environments
- Decision-making strategies amidst human behavior uncertainty and/or unforeseen disturbances
- Traffic control methodologies based on human-vehicle-road coordination
- Traffic flow optimization with integrated ICV behavior modelling
- Artificial intelligence approaches for enhancing traffic efficiency and safety
- Sustainable transportation solutions leveraging ITS technologies
- Interoperability for seamless integration of ITS components
- ITS innovations to support public transportation systems

**Submission Deadline: Oct. 31, 2024**

[www.chinasaejournal.com.cn](http://www.chinasaejournal.com.cn)

[www.springer.com/42154](http://www.springer.com/42154)

