

## 仿生分形夹芯板芯体结构吸能特性研究

于地<sup>1</sup> 王兆阳<sup>2</sup> 刘岩松<sup>2</sup> 邹猛<sup>2</sup>

(1. 长春光华学院 机械工程学院, 长春 130033)

(2. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为提高传统夹芯板的能量吸收效率,受王莲叶脉树状分形结构启发,设计了一种仿生树状分形夹芯板芯体(Biomimetic Tree-Like Fractal Core, BTLFC)。首先,通过准静态压缩试验,发现二阶BTLFC的比吸能较传统蜂窝芯体提升了5.69%,平均压溃力提升了4.46%。其次,建立了BTLFC的有限元数值模型,结合准静态压缩试验数据,表明有限元模型误差在2.2%以内,证明了有限元模型具有较高的准确性。最后,采用拉丁超立方试验设计、Kriging代理模型及第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)对BTLFC的结构参数组合(尺寸比 $r$ 、分叉角度 $\theta$ 、分形阶数 $D$ )进行了多目标优化设计。优化后BTLFC的最优结构展现了更优异的综合性能,其比吸能较传统蜂窝芯体提升了10.19%,峰值压溃力降低了12.27%,质量减小了11.79%。研究结果可为开发高性能能量吸收结构提供新的仿生设计思路。

**关键词:** 叶脉结构; 仿生设计; 有限元; 能量吸收; 多目标优化

**中图分类号:** TB17 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.10.014

## 0 引言

夹芯板以轻质高强的特性广泛应用于汽车、船舶、航空航天等现代工业领域<sup>[1-3]</sup>。近年来,国内外科研人员受大自然生物结构启发,对仿生夹芯结构展开了深入研究。YANG等<sup>[4]</sup>受雀尾螳螂虾启发,设计了仿生双正弦波纹(Double-Sine Corrugated, DSC)夹芯结构,发现DSC夹芯结构显著提高了结构的耐撞性,并降低了初始峰值压溃力。HAO等<sup>[5]</sup>受甲虫鞘翅结构启发,设计了一种网格甲虫鞘翅板式泡沫填充芯材(Grid Beetle Elytron Plate foam-filled core, GBEP<sub>c</sub>),发现其比吸能比传统结构高20%。ZHOU等<sup>[6]</sup>提出了一种以海鸥羽毛轴截面为灵感的仿生夹芯结构,相比传统结构,仿生夹芯结构的比吸能和平均压溃力更加优越,有更好的耐撞性。LAM等<sup>[7]</sup>受益母草微观结构启发,设计了波纹倾斜蜂窝(Corrugated Tilted Honeycomb, CTH)夹芯结构,通过有限元模拟发现,CTH夹芯结构能够有效减小初始峰值压溃力,具有更高的平均压溃力和比吸能。ZHANG等<sup>[8]</sup>受龟壳结构启发,设计了2种仿生夹芯结构,发现仿生结构比传统结构具有更好的抗冲击性。张海燕等<sup>[9]</sup>提出了2种仿竹结构,发现双圆带肋的仿竹薄壁管结构的表现最佳,其峰值力较圆管结构降低了约18.39%,比吸能和

吸能效率分别提升了约50.8%、38.79%。

层级结构凭借独特的力学性能在众多领域展现出巨大潜力。李响等<sup>[10]</sup>设计了类弧形层级结构,发现增加层级数量可以有效降低类弧形层级结构的峰值碰撞力,且大幅度提高结构的平均碰撞力。徐飞等<sup>[11]</sup>受甲虫翅鞘微观小梁结构启发,提出了一种仿生层级薄壁方管(Bionic Hierarchical thin-walled Square Tube, BHST),研究发现BHST具有优异的耐撞性。ZHANG等<sup>[12]</sup>受柚子皮启发,设计了分层蜂窝结构,发现其变形模式受等效厚度控制,结构层次和几何尺寸的变化可提高抗压和吸能性能。李腾等<sup>[13]</sup>设计了基于面心立方的层级结构,发现增加塑性铰个数或引入蜂窝结构,可以大幅提高层级结构的能量吸收性能。

近年来,大自然中具有分形特征的生物结构为结构设计领域带来了新思路。AJDARI等<sup>[14]</sup>以六边形为基础构建了分形结构,发现1阶和2阶分形结构的刚度分别可达普通结构的2倍和3.5倍。XU等<sup>[15]</sup>基于Hilbert分形递归公式设计了Hilbert分形结构,研究发现其总吸能和比吸能均优于普通结构,且当阶数为2.5、壁厚为0.75 mm时比吸能最大。李雅萍等<sup>[16]</sup>受树状分形结构启发,设计了树状分形夹芯板(Tree-like Fractal Sandwich Plate, TFS)夹芯结构,结果表明,2阶

收稿日期: 2025-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52475019, 52075217)

作者简介: 于地,男,1989年生,吉林长春人,硕士,实验师; 主要研究方向为机械电子工程; E-mail: 292287091@qq.com。

王兆阳(通信作者),女,2000年生,辽宁朝阳人,在读硕士研究生; 主要研究方向为结构耐撞性仿生设计; E-mail: 1570594674@qq.com。

引用格式: 于地,王兆阳,刘岩松,等. 仿生分形夹芯板芯体结构吸能特性研究[J]. 机械强度, 2025, 47(10): 124-130.

YU Di, WANG Zhaoyang, LIU Yansong, et al. Study on energy absorption characteristics of biomimetic fractal sandwich plate core structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(10): 124-130.

TFS 夹芯结构的比吸能比 0 阶、1 阶结构分别提高了 16.71%、0.23%。CHEN 等<sup>[17]</sup>基于曲线、圆和六边形设计了 3 种自相似分形结构,发现仿竹分形夹芯结构的能量吸收能力最高。

综上所述,仿生和分形元素的加入有助于提升结构的吸能性能与承载能力,仿生树状分形夹芯板芯体的潜力有待进一步研究与开发。本文以王莲叶脉为仿生原型,基于结构仿生学原理与分形几何理论,设计了一种仿生树状分形夹芯板芯体(Biomimetic Tree-Like Fractal Core, BTLFC),通过准静态压缩试验与仿真,研究 BTLFC 的吸能特性。建立 BTLFC 有限元模型,并验证有限元仿真的准确性。采用拉丁超立方试验设计、Kriging 代理模型及非支配排序遗传算法 NSGA-II 对 BTLFC 进行多目标优化设计,以获取 BTLFC 的最优参数组合。

## 1 仿生夹芯板芯体结构设计

### 1.1 仿生原型分析

自然界中的生物经过数亿年的进化,逐渐演变出力学性能卓越的结构,以此适应复杂的自然环境。王莲隶属睡莲科,是一年生浮叶植物。在长期进化过程中,王莲叶片背部叶脉形成了树状分形结构,这种结构能够以较轻的重量支撑整个叶片,不仅展现出优异的力学性能,还实现了轻量化。如图 1(a)所示,王莲的主叶脉呈放射状分布且较粗壮,而次级叶脉则交织成细密的网状结构,形成规则排列的小方格单元<sup>[18]</sup>。这种逐级分支的脉络布局不仅赋予叶片良好的展平性,还能有效分散外部压力,从而显著提高叶片的稳定性与强度。王莲叶脉具有优异的承载能力和抗破坏能力,如图 1(b)所示,可承受约 50 公斤的成年人站立在上,且不发生破损,保持结构完整性<sup>[19-20]</sup>。王莲叶脉轻质高强的特性,为夹芯板芯体的结构设计提供了理想的仿生原型<sup>[21]</sup>。

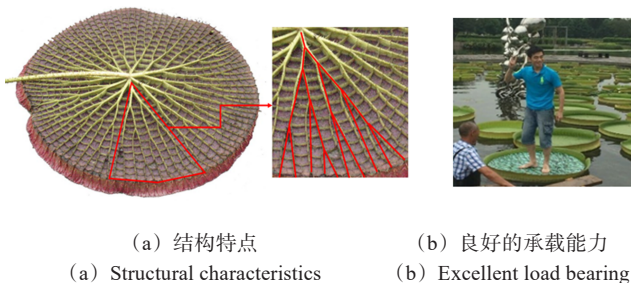


图 1 仿生原型(王莲叶脉)  
Fig. 1 Bionic prototype (the royal lotus leaf vein)

### 1.2 仿生芯体结构设计

图 2 为王莲叶脉树状分形结构演化过程。可以发现,随着分叉点的增加,叶脉开始逐级分叉,并逐渐生成新的子分支,形成层次分明的树状分形结构。受王

莲叶脉树状分形结构启发,本文提出了一种仿生树状分形夹芯板芯体,按照统一命名规则,以参数  $r$ 、 $\theta$ 、 $D$  作为下标对 BTLFC 进行命名,即  $BTLFC_{r-\theta-D}$ 。其中, $r$  为子分支与原分支尺寸比、 $\theta$  为分叉角度、 $D$  为分形阶数。按照如上命名规则设计了尺寸比  $r$  为 1、分叉角度  $\theta$  为  $60^\circ$ 、分形阶数  $D$  为 1 的  $BTLFC_{1-60-1}$ ,以及尺寸比  $r$  为 1、分叉角度  $\theta$  为  $60^\circ$ 、分形阶数  $D$  为 2 的  $BTLFC_{1-60-2}$ 。

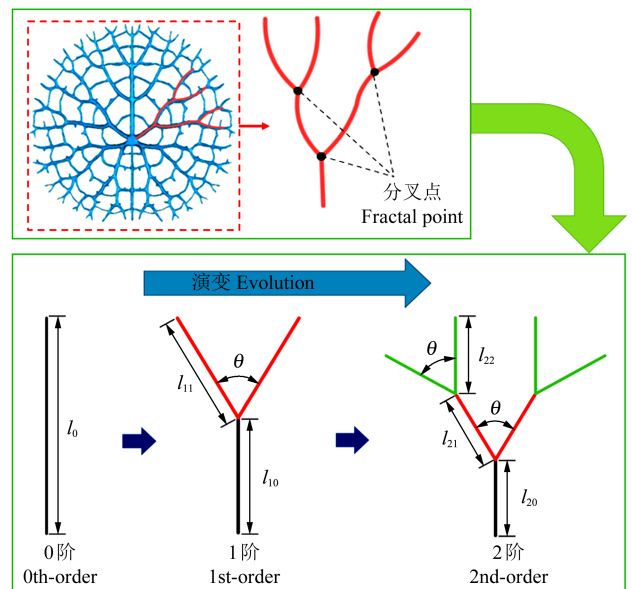


图 2 树状分形结构的演化过程

Fig. 2 Evolution process of tree-like fractal structure

BTLFC 胞元内部的树状分形结构采用圆周阵列分布,胞元外部周向肋板与树状分形结构的外围端点完全连接,图 3 为 BTLFC 的截面图形及其胞元示意图。

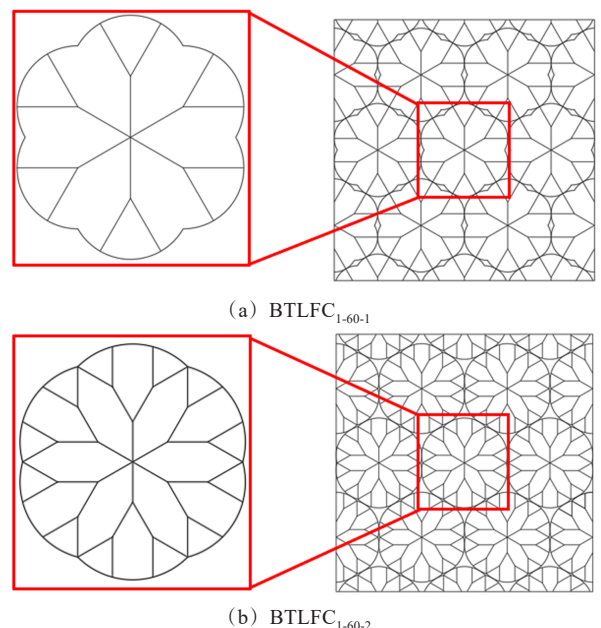


图 3 仿生芯体单个胞元及其截面图形

Fig. 3 Bionic core cell and its cross-section graphics

图4为使用3D打印技术得到的传统蜂窝芯体(Honeycomb Core Panel, HCP)与仿生芯体BTLFC。所有芯体的长和宽均为100 mm,高度均为18 mm,在保持质量近似相等的条件下,HCP的壁厚 $t$ 为1.7 mm,BTLFC<sub>1-60-1</sub>的壁厚 $t$ 为1.22 mm,BTLFC<sub>1-60-2</sub>的壁厚 $t$ 为0.94 mm,如表1所示。

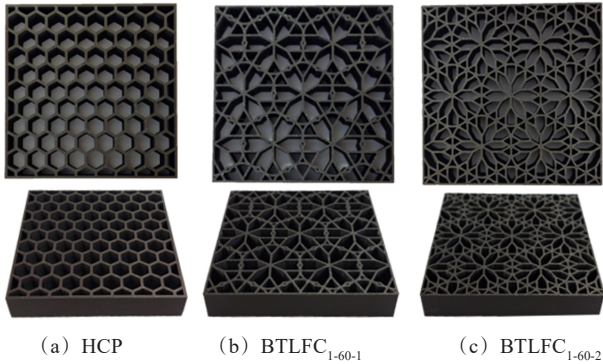


图4 3D打印蜂窝芯体和仿生芯体(尼龙PA12)

Fig. 4 3D printed honeycomb core and bionic core (nylon PA12)

表1 芯体试样的壁厚及质量

Tab. 1 Thickness and mass of the core sample

类型 Type	壁厚 Thickness $t$ /mm	质量 Mass $m$ /g
BTLFC <sub>1-60-1</sub>	1.22	70.05
BTLFC <sub>1-60-2</sub>	0.94	69.66
HCP	1.70	70.48

### 1.3 有限元模型

为更好地模拟仿生芯体在实际工况下的碰撞表现,本文建立了仿生芯体的有限元模型,在Abaqus软件中,设置模型上方刚性板下压速度为2 mm/min,方向沿 $z$ 轴向下,下压位移为14 mm,同时约束下方刚性板和模型底部单元的全部自由度,如图5所示。接触面之间的摩擦因数设置为0.2<sup>[22]</sup>,材料属性设置为尼龙PA12(具体数值见第3.1节)。

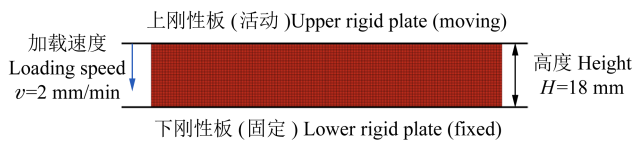


图5 夹芯板芯体的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the sandwich plate core

## 2 仿生芯体吸能特性分析

### 2.1 评价指标

为更好地评价仿生芯体的吸能特性,选取吸能(Energy Absorption, EA)、比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)、峰值压溃力(Peak Crushing Force, PCF)、平均压溃力(Mean Crushing Force, MCF)作为评价指标。

吸能为结构通过变形吸收的总能量,其值 $E_{EA}$ 可由承载曲线对位移的积分得到。

比吸能为单位质量结构所吸收的能量,其值 $S_{SEA}$ 越大,吸能效果越好。表达式为

$$S_{SEA} = \frac{E_{EA}}{m} \quad (1)$$

式中, $m$ 为结构质量。

峰值压溃力是指结构在压缩过程承受的最大载荷,可以直接由载荷-位移曲线得到,即 $P_{PCF} = F_{max}$ 。

平均压溃力代表单位压缩距离的碰撞载荷,其表达式为

$$M_{MCF} = \frac{E_{EA}}{d} \quad (2)$$

式中, $d$ 为压缩距离。

### 2.2 试验测试

为对比仿生芯体与蜂窝芯体的吸能特性,分别开展了准静态压缩试验。试验时,设置控制方式为位移控制,压板下压速度为2 mm/min,试样的压缩位移需达到整体高度的60%~70%,因此设置压缩位移为13 mm,如图6所示。在压缩过程中,计算机系统实时采集载荷与位移数据,持续更新峰值压溃力,最终在试验结束时输出载荷-位移曲线,并保存所有测试数据。

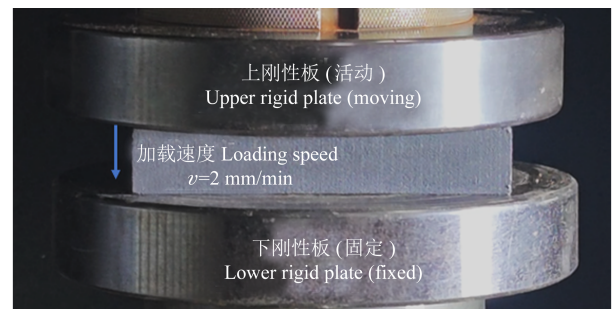


图6 准静态压缩试验

Fig. 6 Quasi-static compression test

### 2.3 结果分析

试验得到了各芯体试样的载荷-位移曲线,如图7所示。通过分析图7可以发现,当压缩位移达到12 mm左右时,仿生芯体和蜂窝芯体的载荷均出现快速上升的趋势。这表明材料在该阶段进入了致密化过程。因此可以确定芯体的有效位移为12 mm。

在有效压缩位移内,载荷-位移曲线的分析结果显示,在质量近似相等的情况下,仿生芯体的峰值压溃力出现得更早,且BTLFC<sub>1-60-2</sub>的峰值压溃力较蜂窝芯体提高了4.25%,这说明仿生芯体BTLFC<sub>1-60-2</sub>能够承受更大的外力,同时表现出更快的承载响应速度。而仿生芯体BTLFC<sub>1-60-1</sub>的峰值压溃力则略小于蜂窝芯体。

结合表1中的质量数据,进一步计算仿生芯体和蜂窝芯体在有效压缩位移内的比吸能、平均压溃力,如图8所示。结果表明,相较于HCP,BTLFC<sub>1-60-2</sub>在能量吸收特性方面表现出显著优势,其比吸能较蜂窝芯体提高了5.69%;平均压溃力提高了4.46%,而

BTLFC<sub>1-60-1</sub> 的比吸能和平均压溃力均低于 HCP。综上,相较于 HCP, BTLFC<sub>1-60-2</sub> 的能量吸收能力与承载能力更优, 仿生分形设计合理。

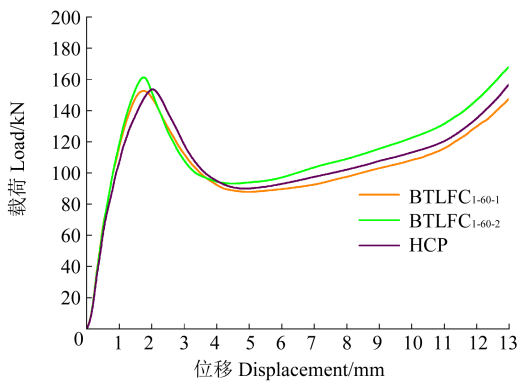


图 7 仿生芯体 (BTLFC) 与蜂窝芯体 (HCP) 的载荷-位移曲线  
Fig. 7 Loading-displacement curves of the bionic core BTLFC and the honeycomb core panel

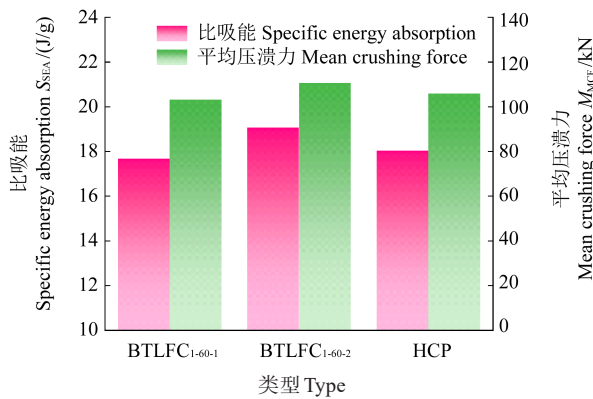


图 8 芯体吸能指标的对比  
Fig. 8 Comparison of energy absorption index of cores

以上分析表明, 仿生芯体 BTLFC 凭借逐级分支的结构形态, 表现出了优异的能量吸收能力。与传统结构相比, BTLFC 的树状分形结构能够在外力作用下, 将载荷沿各分支在多个方向上进行分散与传递, 使能量在不同层次的分支之间有效流动, 避免出现局部应力集中, 显著增强了仿生芯体 BTLFC 的能量吸收。

### 3 仿生芯体的优化设计

#### 3.1 有限元模型材料标定

为得到尼龙 PA12 的材料性能, 参照国家标准 ASTM E8<sup>[23]</sup>, 加工了标准哑铃形拉伸试样。在万能试验机上以 2 mm/min 的速率对试样进行了 3 次重复拉伸。通过处理试验数据得到了尼龙 PA12 材料的应力-应变曲线, 如图 9 所示。尼龙 PA12 的主要力学性能指标为: 弹性模量  $E$  为 1 279.33 MPa; 初始屈服应力  $\sigma_y$  为 18.46 MPa; 极限应力  $\sigma_u$  为 45.15 MPa; 泊松比  $\mu$  为 0.33<sup>[24]</sup>; 密度  $\rho$  为  $1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 3.2 模型验证

为验证仿生芯体有限元模型的准确性, 选取

BTLFC<sub>1-60-1</sub> 和 BTLFC<sub>1-60-2</sub> 开展仿真分析, 并与第 2.3 节中的试验结果进行对比。二者试验与仿真载荷-位移曲线对比如图 10 所示。

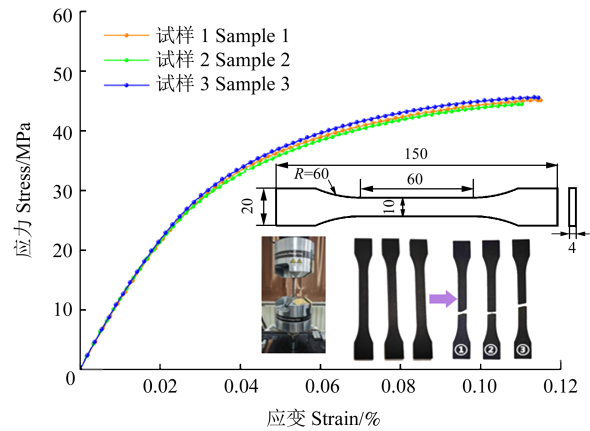
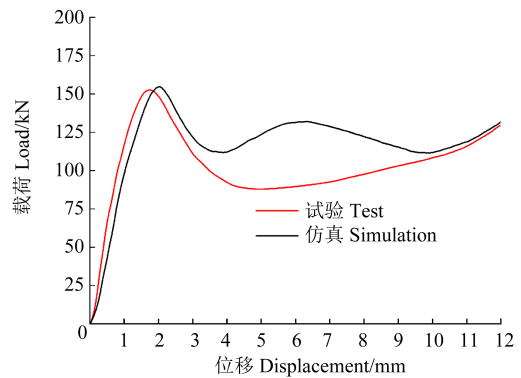
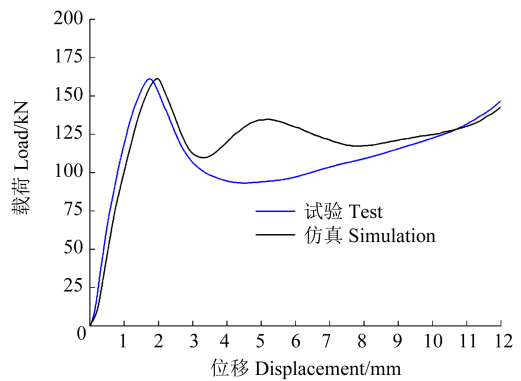


图 9 尼龙 PA12 的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of nylon PA12



(a) BTLFC<sub>1-60-1</sub>



(b) BTLFC<sub>1-60-2</sub>

图 10 试验与仿真载荷-位移曲线的对比  
Fig. 10 Comparison of loading-displacement curves between test and simulation

由图 10 可知, 仿真载荷-位移曲线在峰值后出现了第 2 个峰值, 而试验载荷-位移曲线则仅表现出单一峰值。其差异主要源于仿真中未引入材料失效准则, 无法模拟实际加载过程中材料的局部屈服与损伤扩展, 从而使结构在仿真中继续承载, 产生额外的载荷波动。这种现象在理想化模型中较为常见, 材料一旦发生损伤, 结构往往在峰值后迅速失稳并失去承载能力, 不会出现类似特征。

尽管仿真和试验整体曲线存在差异,但两者在加载初期(0~3 mm 位移区间)保持较高的一致性,表明有限元模型能够较为准确地捕捉结构在加载初期的力学响应特征。该阶段虽为整体变形的早期,但正是结构建立应力分布和载荷传递路径建立的关键时期,其响应特性对后续吸能行为具有决定性影响。

在实际工程中,结构初期能否有效吸收冲击能量,直接关系到其后续响应的可控性与系统的整体安全。例如,汽车碰撞或航天器着陆时,结构必须在极短时间内承受并吸收初始冲击载荷,从而为后续的缓冲与保护创造条件。若初期响应不足,易导致能量集中与结构失控破坏,严重危及系统稳定与人员安全。

因此,本文将选取 0~3 mm 位移区间作为验证有限元模型精度及评估结构性能的核心阶段。

通过计算得出试验与仿真在位移 0~3 mm 内的各项吸能指标,如表 2 所示。由表 2 可知,BTLFC<sub>1-60-1</sub>和 BTLFC<sub>1-60-2</sub>各项吸能指标的试验值与仿真值之间误差较小,均在 2.2% 以内。在 0~3 mm 位移内,有限元模型能够很好地预测芯体的 SEA、PCF、MCF 等关键吸能指标,可以使用有限元方法对仿生芯体进行优化研究。

表 2 试验与仿真的吸能指标对比

Tab. 2 Comparison of energy absorption indexes between test and simulation

吸能指标 Energy absorption index	BTLFC <sub>1-60-1</sub> (0~3 mm)			BTLFC <sub>1-60-2</sub> (0~3 mm)		
	试验 Test	仿真 Simulation	误差 Error/%	试验 Test	仿真 Simulation	误差 Error/%
EA/J	333.32	328.46	-1.46	336.01	343.15	2.13
PCF/kN	152.59	155.06	1.62	161.34	161.91	0.35
SEA/(J/g)	4.76	4.69	-1.47	4.80	4.90	2.08
MCF/kN	111.10	109.49	-1.45	112.01	114.38	2.12

### 3.3 多目标优化

为更好发挥仿生芯体的吸能潜力,选取比吸能和峰值压溃力作为重点优化目标,对仿生芯体的主要几何结构参数(尺寸比  $r$ 、分叉角度  $\theta$ 、分形阶数  $D$ )进行优

化研究。因此,选取  $r$ 、 $\theta$ 、 $D$  为自变量,比吸能和峰值压溃力作为响应值,构建多目标优化模型,具体描述为

$$\begin{cases} \min(-S_{SEA}, P_{PCF}) \\ 0.6 \leq r \leq 1, r \in 0.01N \\ \theta \in \{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 72^\circ, 90^\circ\} \\ D \in \{1, 2\} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $N$  为样本数量。

除以上几何参数外,仿生芯体 BTLFC 的尺寸为 100 mm×100 mm,高度为 18 mm,壁厚为 1 mm。

采用拉丁超立方试验设计得到 25 组不同参数取值的样本点,在 Hypermesh 软件中建立相应的有限元模型,在 Abaqus 软件中完成分析,并输出 25 组样本点对应的比吸能和峰值压溃力。

根据 25 组样本点的响应值,构建 Kriging 代理模型。为确保 Kriging 代理模型的精度,使用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)  $E_{RMSE}$  和拟合度  $R^2$  评估模型的预测性能。均方根误差表示预测值与实际值之间的平均偏差,计算式为

$$E_{RMSE} = \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] / N \quad (4)$$

式中,  $y_i$  为实际的目标函数值;  $\hat{y}_i$  为通过 Kriging 模型预测的目标函数值。  $E_{RMSE}$  越小,表示模型的预测精度越高。

拟合度  $R^2$  用来衡量模型的拟合优度,其值越接近 1,表示拟合程度越好,计算式为

$$R^2 = 1 - \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] / \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \right] \quad (5)$$

式中,  $\bar{y}_i$  为目标函数实际值的均值。

使用随机采样选取不同结构参数的 5 个仿生芯体进行误差分析,将仿真所得的比吸能、峰值压溃力与代理模型预测值作对比,如表 3 所示。Kriging 代理模型所预测的响应值和实际值之间的误差控制在 2% 之内,精度较高。响应值  $S_{SEA}$ 、 $P_{PCF}$  的拟合度  $R^2$  分别为 0.990 08、0.999 76,接近 1;均方根误差  $E_{RMSE}$  分别为 0.185 1、0.077 2,均小于 0.2。证明了代理模型的预测精度较高,可用于优化分析。

表 3 Kriging 代理模型预测值与实际值的误差

Tab. 3 Error between the predicted value and the actual value of the Kriging surrogate model

结构参数 Structural parameter			比吸能 SEA			峰值压溃力 PCF		
尺寸比 Size ratio $r$	分叉角度 Bifurcation angle $\theta/(^\circ)$	分形阶数 Fractal order $D$	预测值 Predicted value/(J/g)	实际值 Actual value/ (J/g)	误差 Error/%	预测值 Predicted value/kN	实际值 Actual value/ kN	误差 Error/%
0.65	90	1	4.310	4.272	0.892	106.61	106.38	0.224
0.75	72	2	4.624	4.627	-0.084	117.12	118.16	-0.881
0.85	60	1	4.344	4.386	-0.960	111.56	112.59	-0.918
0.95	45	2	4.652	4.596	1.214	166.89	167.72	-0.495
1	30	1	3.895	3.885	0.268	145.52	145.57	-0.036

最后,基于 Kriging 代理模型,使用 NSGA- II 对 BTLFC 的参数组合( $r$ 、 $\theta$ 、 $D$ )进行多目标优化,得到 Pareto 前沿解集,如图 11 所示。

在 Pareto 前沿解集上得到最优解为 $r=0.6$ 、 $\theta=90^\circ$ 、 $D=2$ 。最优解的比吸能和峰值压溃力预测值与实际值如表 4 所示。其中,比吸能预测值与实际值之间的误差为 0.37%,峰值压溃力预测值与实际值之间的误差为 0.57%,表明使用 NSGA- II 得到的优化结果精度较高。即仿生芯体 BTLFC<sub>0.6-90-2</sub>(尺寸比 $r=0.6$ 、分叉角度 $\theta=90^\circ$ 、分形阶数 $D=2$ )的吸能性能最优,其比吸能较蜂窝芯体提升了 10.19%,峰值压溃力降低了 12.27%,质量减少了 11.79%。

综上,最优解 BTLFC<sub>0.6-90-2</sub>在降低结构质量的同时,

拥有更高的比吸能和更低的峰值压溃力,有助于结构吸收碰撞带来的能量,提升能量吸收效率。

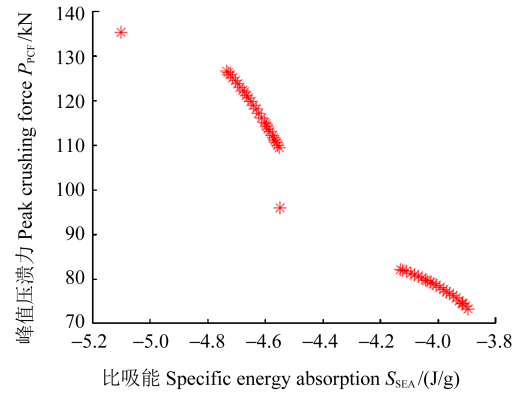


图 11 仿生芯体的 Pareto 前沿解集

Fig. 11 Pareto frontier solution set of the bionic core

表 4 最优解的预测值与实际值

Tab. 4 Predicted value and actual value of the optimal solution

尺寸比 Size ratio $r$	分叉角度 Bifurcation angle $\theta/(^\circ)$	分形阶数 Fractal order $D$	质量 Mass $m/g$	比吸能 SEA			峰值压溃力 PCF		
				预测值 Predicted value/ (J/g)	实际值 Actual value/ (J/g)	误差 Error/%	预测值 Predicted value/ kN	实际值 Actual value/ kN	误差 Error/%
0.6	90	2	61.75	5.100	5.081	0.37	135.26	136.04	0.57

## 4 结论

以王莲叶脉为仿生原型,设计了一种仿叶脉树状分形夹芯板芯体,通过试验与仿真,研究了其在准静态压缩下的吸能特性,并针对几何参数组合(尺寸比 $r$ 、分叉角度 $\theta$ 、分形阶数 $D$ )开展了多目标优化研究。得到主要结论如下:

1) 仿生芯体 BTLFC 凭借逐级分支的结构形态,展现出了优异的能量吸收能力。在等质量条件下, BTLFC<sub>1-60-2</sub>的比吸能较 HCP 提升了 5.69%;平均压溃力提高了 4.46%。

2) 基于 Kriging 代理模型,使用 NSGA- II 对 BTLFC 进行优化设计,得到最优解为 $r=0.6$ 、 $\theta=90^\circ$ 、 $D=2$ ,即 BTLFC<sub>0.6-90-2</sub>的吸能性能最佳,其比吸能较 HCP 提升了 10.19%,峰值压溃力降低 12.27%,质量降低了 11.79%。

以上结论表明,基于分形的仿生夹层设计方法可行,并可有效提升夹层结构的性能。

## 参考文献 (References)

[1] BIRMAN V, KARDOMATEAS G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 221-240.

[2] TARLOCHAN F. Sandwich structures for energy absorption applications: a review [J]. Materials, 2021, 14(16): 4731.

[3] ZHAO Y, YANG Z H, YU T L, et al. Mechanical properties and energy absorption capabilities of aluminium foam sandwich

structure subjected to low-velocity impact [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121996.

[4] YANG X F, MA J X, SHI Y L, et al. Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load [J]. Materials & Design, 2017, 135: 275-290.

[5] HAO N, SONG Y H, CHEN J X, et al. Compressive performance of a foam-filled fiber-reinforced grid beetle elytron plate [J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(3): 830-840.

[6] ZHOU J F, NG B F, HAN N, et al. Crashworthiness and optimization of bionic sandwich cores under out-of-plane compression [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 246: 108137.

[7] LAM L, CHEN W S, HAO H, et al. Crushing behaviour of corrugated tilted honeycomb core inspired by plant stem [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 188: 110852.

[8] ZHANG D, GUO D B, WANG F F, et al. Low-velocity impact response of a novel bionic turtle shell back armor sandwich structure [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 910-923.

[9] 张海燕, 周国华. 汽车防撞栏仿竹薄壁管结构的能量吸收特性 [J]. 机械强度, 2024, 46(4): 831-838.

ZHANG Haiyan, ZHOU Guohua. Energy absorption characteristic of biomimetic bamboo thin-walled tube structure for car crash barriers [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(4): 831-838. (In Chinese)

[10] 李响, 李宁创, 孙爽, 等. 仿生类弧形层级蜂窝结构的耐撞性研究 [J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 63-70.

LI Xiang, LI Ningchuang, SUN Shuang, et al. Crashworthiness of bionic arc-like hierarchical honeycomb structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 63-70. (In Chinese)

[11] 徐飞, 秦睿贤, 陈秉智. 仿生层级薄壁方管耐撞性数值分析及优

- 化[J]. 机械强度, 2024, 46(3): 618-625.
- XU Fei, QIN Ruixian, CHEN Bingzhi. Numerical analysis and optimization of crashworthiness of bionic hierarchical thin-walled square tubes [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(3): 618-625. (In Chinese)
- [12] ZHANG W, YIN S, YU T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 163-172.
- [13] 李腾, 张晨帆, 邓庆田, 等. 基于 TPU 材料层级结构的优化设计及吸能特性[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 103-114.
- LI Teng, ZHANG Chenfan, DENG Qingtian, et al. Optimized design and energy absorption of TPU material based on hierarchical structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 103-114. (In Chinese)
- [14] AJDARI A, JAHROMI B H, PAPADOPOULOS J, et al. Hierarchical honeycombs with tailorable properties [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(11/12): 1413-1419.
- [15] XU X Y, SONG H Y, WANG L J. Cushioning performance of Hilbert fractal sandwich packaging structures under quasi-static compressions [J]. CMES-Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2022, 135(1): 275-292.
- [16] 李雅萍, 宋海燕, 王立军. 树状分形结构夹芯板动态冲击特性研究[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 293-299.
- LI Yaping, SONG Haiyan, WANG Lijun. Dynamic impact characteristics of sandwich plate with tree-like fractal structure [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(1): 293-299. (In Chinese)
- [17] CHEN Y L, JIN Z Y, KANG W B, et al. 3D printed bio-inspired self-similar carbon fiber reinforced composite sandwich structures for energy absorption [J]. Composites Science and Technology, 2024, 248: 110453.
- [18] 黄仕才, 吴福川. 王莲能承重的秘密[J]. 花卉, 2018(3): 6-7.
- HUANG Shicai, WU Fuchuan. The secret of Wang Lian's bearing capacity [J]. Flowers, 2018(3): 6-7. (In Chinese)
- [19] KOBAYASHI H, YABUGAKI Y, HORIKAWA K, et al. Vein structure and mechanical properties of a leaf of santa cruz water lily (*Victoria cruziana*) [C]//The Proceedings of the Bioengineering Conference Annual Meeting of BED. 2009: 265-266.
- [20] BOX F, ERLICH A, GUAN J H, et al. Gigantic floating leaves occupy a large surface area at an economical material cost [J]. Science Advances, 2022, 8(6): eabg3790.
- [21] ZHANG H K, ZHOU J Y, FANG W, et al. Multi-functional topology optimization of *Victoria cruziana* veins [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2022, 19(191): 20220298.
- [22] LIU S T, TONG Z Q, TANG Z L, et al. Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 88: 70-81.
- [23] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for tension testing of metallic materials: ASTM E8/E8M-15a [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [24] HABIB F N, IOVENITTI P, MASOOD S H, et al. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology [J]. Materials & Design, 2018, 155: 86-98.

## Study on energy absorption characteristics of biomimetic fractal sandwich plate core structure

YU Di<sup>1</sup> WANG Zhaoyang<sup>2</sup> LIU Yansong<sup>2</sup> ZOU Meng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changchun Guanghua University, Changchun 130033, China)

(2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To enhance the energy absorption efficiency of conventional sandwich panels, a biomimetic tree-like fractal core (BTLFC) inspired by the dendritic fractal structure of the royal lotus leaf vein was designed. Firstly, quasi-static compression tests revealed that the 2-order BTLFC exhibited a specific energy absorption 5.69% higher and an average load 4.46% greater than traditional honeycomb cores. Secondly, a finite element numerical model of the BTLFC was established; combined with quasi-static compression test data, the finite element model error was within 2.2%, demonstrating high accuracy of the model. Finally, Latin hypercube test design, Kriging surrogate model, and the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) were employed to perform multi-objective optimization on the structural parameter combinations of the BTLFC (size ratio  $r$ , bifurcation angle  $\theta$ , fractal order  $D$ ). The optimized BTLFC structure exhibited superior comprehensive performance, with specific energy absorption increased by 10.19%, peak crushing force reduced by 12.27%, and mass decreased by 11.79% compared to traditional honeycomb cores. The findings provide novel biomimetic design insights for developing high-performance energy absorption structures.

**Key words:** Leaf vein structure; Biomimetic design; Finite element; Energy absorption; Multi-objective optimization

Corresponding author: WANG Zhaoyang, E-mail: 1570594674@qq.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52475019, 52075217)

Received: 2025-04-02