

## 3D打印汽车吸能结构耐撞性分析

刘萍

(长安大学, 西安 710064)

**摘要:** 3D打印技术由于其耗材成本低、成品多样化的特点,在汽车吸能结构的耐撞性研究中已被研究人员关注与应用。通过3D打印技术针对相同结构尺寸,不同基体材料的防撞梁和蜂窝填充材料等汽车吸能结构,开展了准静态试验研究,对比分析了其力学响应及变形模式,进一步基于有限元仿真,研究了结构参数对其耐撞性指标的影响。研究结果表明,3D打印PLA防撞梁及蜂窝填充结构的载荷-位移曲线与金属结构呈现出相同的趋势,并且能反映汽车吸能结构的变形特征;结构壁厚的增加导致相对密度的增加,提高了防撞梁与蜂窝结构的耐撞性,此外,胞元尺寸的增加也会影响蜂窝结构的耐撞性。提出了基于3D打印技术的汽车吸能结构优化方案,采用试验与仿真相结合的方法系统地研究了结构参数对耐撞性的影响,对于汽车类专业教具设计及汽车吸能结构分析有一定的参考意义。

**关键词:** 3D打印; 保险杠横梁; 蜂窝; 三点弯曲; 轴向压缩

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.05.17

## Analysis of Crashworthiness in 3D-Printed Vehicle Energy-Absorption Structures

LIU Ping

(Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Due to its low material costs and versatility in producing diverse products, 3D printing technology has attracted attention from researchers studying the crashworthiness of automotive energy-absorbing structures. This paper conducts quasi-static experimental research on automotive energy-absorbing structures, such as crash beams and honeycomb fillers, made from different base materials but with identical structural dimensions, using 3D printing technology. A comparative analysis of their mechanical responses and deformation modes is performed. Furthermore, finite element simulations are employed to study the influence of structural parameters on crashworthiness indicators. The results show that the load-displacement curves of 3D-printed PLA crash beams and honeycomb filler structures exhibit similar trends to those of metal structures and reflect the deformation characteristics of automotive energy-absorbing structures. Increasing the wall thickness raises the relative density, which enhances the crashworthiness of both the crash beam and the honeycomb structure. Additionally, changes in the cell size also affect the crashworthiness of the honeycomb structure. This paper proposes an optimization scheme for automotive energy-absorbing structures based on 3D printing technology, systematically studying the effects of structural parameters on crashworthiness through experiments and simulations. This research offers valuable insights for designing educational tools in automotive engineering and analyzing automotive energy-absorbing structures.

收稿日期: 2024-06-24 改稿日期: 2024-07-19

参考文献引用格式:

刘萍. 3D打印汽车吸能结构耐撞性分析[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(5): 911-919.

LIU Ping. Analysis of Crashworthiness in 3D-Printed Vehicle Energy-Absorption Structures [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(5): 911-919. (in Chinese)



**Keywords:** 3D printing; bumper beam; honeycomb; three-point bending; axial compression

随着我国汽车行业的高速发展, 交通事故频发, 为保护乘客的生命财产安全, 需要对汽车的被动安全提出更高的要求, 因此, 汽车吸能结构的耐撞性研究尤为重要。在汽车吸能结构的耐撞性研究中, 采用真实的汽车吸能结构无疑会大幅增加研究成本, 急需探索新的研究方案解决这一问题。3D打印技术的发展与成熟为解决以上问题提供了一种新途径。相对于其他制造技术而言, 其具有价格便宜、成品多样化的特点, 在汽车吸能结构的耐撞性研究中已被研究人员关注并应用。

由于3D金属打印机价格昂贵, 基本在百万级别, 且金属基体材料成本较高, 在汽车吸能结构的耐撞性研究中使用3D打印金属材料较困难。而桌面级3D打印机具备操作简单、便捷的优点, 其常用的打印材料如ABS、PLA、PETG、TPU等, 可实现个性化制作和低成本生产, 因此, 在汽车吸能结构耐撞性分析及优化中被广泛应用。

在我国公安部交通管理局对碰撞事故的统计中, 汽车正面碰撞事故约占所有碰撞事故的66.9%。在这种情况下, 保险杠系统是汽车中第一个遇到冲击的部件。对于高速碰撞, 保险杠系统应至少吸收15%的总能量, 而对于低速碰撞, 其应吸收所有能量<sup>[1]</sup>。保险杠系统主要通过保险杠横梁的横向弯曲变形及吸能盒的坍塌耗散冲击能量。

汽车保险杠防撞梁作为保险杠系统中的重要吸能部件, 是安装在车辆后部或前部的一种缓冲吸能结构, 在发生碰撞时起到防止乘员生存空间侵入和通过塑性变形耗散碰撞能量的作用, 以保障车身结构的完整性以及人员安全。在实际碰撞安全事故问题中, 汽车保险杠防撞梁等薄壁结构经常受到横向载荷的作用, 主要通过弯曲变形来吸收冲击能量<sup>[2]</sup>。因此, 国内外大量学者对于保险杠防撞梁在三点弯工况下的力学行为开展研究。BILSTON等<sup>[3]</sup>采用准静态三点弯曲试验与仿真相结合的方法研究了常见截面形状对弯曲性能的影响。

ZHANG Hui等<sup>[4]</sup>对单胞、双胞胎和三胞截面薄壁矩形梁的抗弯性能进行了试验和数值研究, 分析了摩擦系数对梁的力学响应和变形模式的影响。FU Xinrong等<sup>[5]</sup>对比研究了方形截面薄壁拱形梁和方形截面薄壁直梁的三点弯曲工况下的能量吸收特性, 试验结果表明, 方形截面薄壁拱形梁的比吸能和压溃效率均由于方形截面薄壁直梁。ZHANG Xiong等<sup>[6]</sup>根据变形模式, 推导出在三点弯曲下的梁的中心截面上的弯矩。卢强等<sup>[7]</sup>开展碳纤维铝蜂窝复合材料保险杠横梁轻量化设计, 采用数值仿真方法分析复合材料面板的厚度、铝蜂窝的边长尺寸以及铝蜂窝的壁厚等结构参数对保险杠横梁力学特性的影响。陈光等<sup>[8]</sup>结合编织碳纤维增强复合材料方管的三点弯曲试验和有限元仿真分析, 对比研究了碳纤维复合材料方管和铝合金方管的单位质量峰值力、比吸能及其能量耗散方式。李聪等<sup>[9]</sup>研究了有限元分析和原位三点弯曲试验相结合的方法, 研究了45号钢V型缺口试件的承载能力。

吸能盒是一种装配在车辆保险杠和前纵梁之间的变形装置, 它能在碰撞发生时吸收冲击能量。然而, 传统吸能盒存在初始峰值载荷高, 压溃过程载荷波动较大的问题, 而填充材料不仅可以增强变形过程的稳定性, 还可显著提高其能量吸收效果。蜂窝是一种常用的吸能填充材料, 为探究其力学特性, 大量研究随之展开。KAVELOGLU等<sup>[10]</sup>通过3D打印分别制备了具有相同表面积和3种不同胞元尺寸和壁厚的PLA和ABS蜂窝结构, 结合试验和有限元方法对这些结构的抗压强度进行了分析。DOU Hao等<sup>[11]</sup>提出一种3D打印连续碳纤维增强蜂窝结构, 并开展准静态压缩试验探究其面内压缩下的力学性能, 该蜂窝表现出比PLA和铝合金更高的比吸能。LI Zhejian等<sup>[12]</sup>提出了一种新型的Kirigami(切割和折叠)改性蜂窝结构, 旨在降低面外破碎下的初始峰值力, 同时保持高能量吸收能力, 并增加面内抗压性。制备了3种铝制六方蜂窝

结构: 标准六边形蜂窝结构 (HC)、板增强蜂窝结构 (RHC) 和 Kirigami 改性蜂窝结构, 并在 3 个轴向的准静态压缩下进行了测试。比较了所提出的 Kirigami 改性蜂窝在 3 个轴向上与标准蜂窝和增强蜂窝的抗压性能。结果表明, Kirigami 改性对蜂窝结构的破碎性能有显著改善。可以发现, 目前的研究工作主要集中于单一基体材料吸能结构力学与吸能特性研究, 而关于桌面级 3D 打印机制备的吸能结构与真实结构的对比研究较少。

综上所述, 本文采用 3D 打印技术, 分别制备了与文献 [13]~[14] 结构相同但基体材料不同的 PLA 矩形截面汽车防撞梁以及 PLA 蜂窝, 对比分析了防撞梁在准静态三点弯曲工况以及蜂窝结构在准静态轴向压缩工况下的变形模式和载荷位移曲线, 进一步研究了结构参数对于耐撞性的影响。基于耐撞性研究结果, 提出了面向 3D 打印技术的汽车吸能结构优化方案。

## 1 耐撞性指标

为了全面了解汽车吸能结构耐撞性, 需要使用耐撞性指标进行定量分析。以下 5 个指标用于评估螺纹结构的耐撞性。

1) 总吸能 (Energy Absorption, EA): EA 是评估能量吸收结构强度的重要指标。能量吸收结构吸收的能量越大, 能量吸收特性就越强。

$$EA = \int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

式中:  $F(\delta)$ 、 $\delta$  和  $\delta_{\max}$  分别为载荷、轴向位移和最大挠度。

2) 比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA): SEA 表示结构每单位质量吸收的能量, 表示结构吸收能量的效率。

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

式中:  $m$  为吸能结构质量。

3) 初始峰值载荷 (Initial Peak Crushing Force, IPCF): IPCF 通常指结构在加载开始时受到力时所承受的最大载荷。该方法通常用于评估结构的强度和耐撞性。

4) 平均压溃载荷 (Mean Crushing Force, MCF): MCF 主要反映试件在平台阶段的力学性能。

$$MCF = \frac{EA}{\delta} \quad (3)$$

5) 冲击效率 (Crush Force Efficiency, CFE): CFE 等于平均压溃载荷与初始峰值载荷的比值。

$$CFE = \frac{MCF}{IPCF} \quad (4)$$

## 2 矩形截面汽车防撞梁

汽车保险杠防撞梁作为车辆碰撞能量吸收和分散的重要结构, 其设计和性能直接关系到乘员的安全。特别是在三点弯曲工况下, 防撞梁的力学特性决定了其在碰撞时的变形模式和能量吸收效率。通过研究矩形截面汽车保险杠防撞梁在这种特定工况下的力学表现, 可以为优化防撞梁设计、提高车辆安全性提供重要的理论依据和技术支持。

为探讨 3D 打印 PLA 结构对于分析汽车保险杠横梁在三点弯曲工况下的力学特性的可行性, 本文通过 3D 打印技术制备了与文献 [13] 中相同尺寸参数的矩形截面汽车防撞梁, 并开展了三点弯曲试验, 矩形截面防撞梁的相关尺寸如图 1 所示。

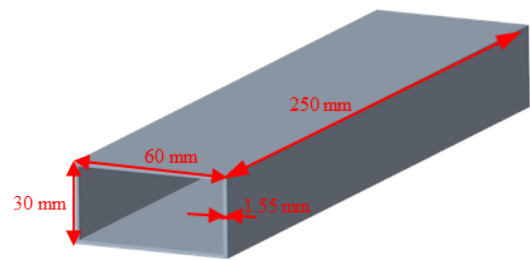


图1 矩形截面汽车保险杠横梁示意图

### 2.1 准静态三点弯曲试验结果与分析

准静态三点弯曲试验在万能试验机 SANS CMT-5205 进行, 如图 2 所示。3D 打印 PLA 矩形截面防撞梁放置于两水平支座中间。压头直径为 20 mm, 位于方管中间位置, 以 2 mm/min 的速度向下压缩。试验的结束条件设置为定位移, 当压头的位移到达 30 mm 时, 试验结束。载荷和位移通过传感器传输到计算机记录。

如图 3 为 Q235 钢与 3D 打印 PLA 保险杠横梁在三点弯工况下的变形过程。从最开始的压头施加载

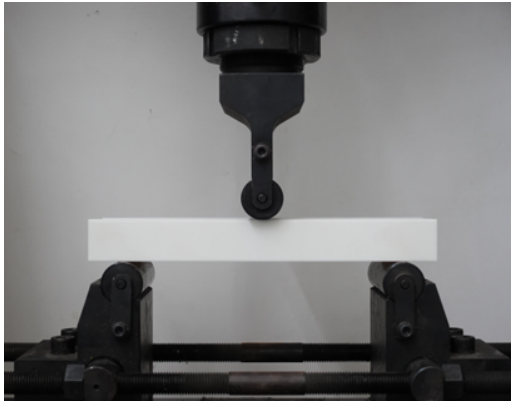


图2 矩形截面方管三点弯试验设置

荷到方管塑性变形区域的形成,可以看出,此过程中方管发生了弯曲失稳,在发生弯曲失稳后,方管的弯曲变形模式基本稳定,通过塑性铰来分散产生弯矩和吸收能量。在压头位移为4 mm时,方管首先发生弹性变形,随着加载的进行,进入塑性阶段,方管发生了弯曲失稳,在压缩区域产生塑性铰来吸收分散所承受的弯矩,从而吸收能量。而当压缩位移达到30 mm时,方管呈现出明显的弯曲效果。从图3中可以看出3D打印PLA保险杠横梁与Q235钢保险杠横梁的变形模式吻合良好。

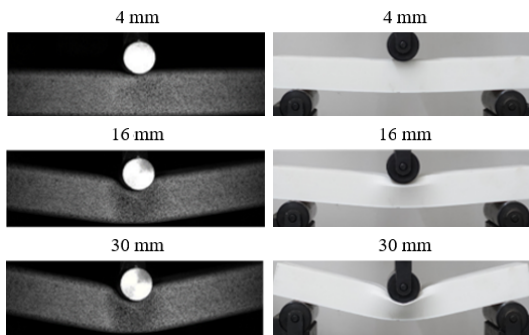


图3 Q235钢与3D打印PLA保险杠横梁变形模式

Q235钢与3D打印PLA保险杠横梁的载荷-位移曲线如图4所示。Q235钢保险杠横梁与3D打印PLA保险杠横梁呈现出相似的规律,即在位移达到5 mm左右时,载荷达到峰值,峰值之后载荷开始下降并趋于稳定,这是由于此过程保险杠横梁发生了弯曲失稳,而在失稳以后方管的弯曲变形模式基本稳定,通过塑性铰来分散产生弯矩和吸收能量。总体而言,3D打印保险杠横梁能较好地反映Q235钢保险杠横梁在准静态三点弯曲工况下的变形模

式,并且载荷-位移曲线与Q235钢保险杠横梁呈现相似的趋势。

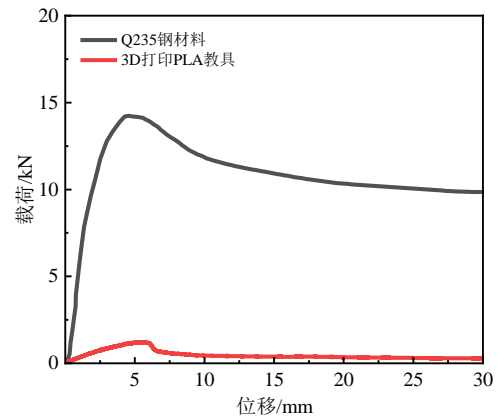


图4 Q235钢与3D打印PLA保险杠横梁载荷-位移曲线

## 2.2 准静态三点弯曲耐撞性数值模拟研究

为进一步探讨汽车防撞梁的结构参数对其耐撞性的影响,进一步开展数值模拟研究。为了准确获取本章研究中使用的PLA的材料属性,使用3D打印技术制备了符合ASTM标准的试样,对试样进行拉伸试验以确定其机械性能。拉伸试验使用SANS CMT-5205万能试验机进行,拉伸速率设置为1 mm/min。完成拉伸试验后,获得PLA材料的真实的应力-应变曲线,如图5所示。本研究所使用的基体材料为PLA,其密度为1 200 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为2.09 GPa,屈服强度为41 MPa,泊松比为0.3。参考真实试验工况,建立准静态三点弯曲的有限元模型。

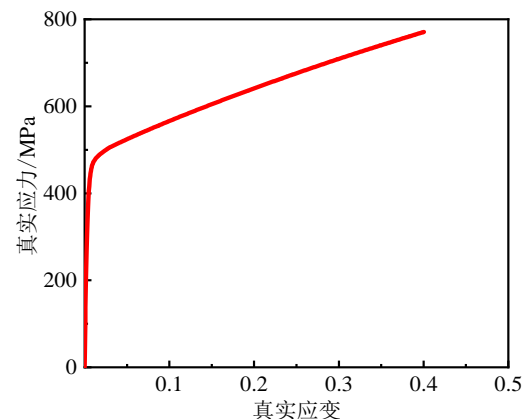


图5 基体材料PLA准静态拉伸的应力应变曲线

图 6 显示了试验与有限元仿真的力位移曲线对比，两者的总体趋势吻合度较高，即先在位移达到 5 mm 时，曲线出现峰值，随后载荷开始下降最终趋于恒定水平。试验及仿真的变形模式如图 7 所示，压头对变形区域的影响基本一致，两者的变形模式是一样的，这证明了有限元模型的准确性。

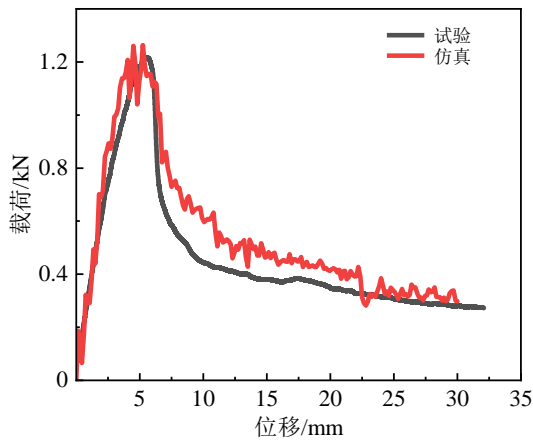


图 6 三点弯曲试验与仿真载荷-位移曲线

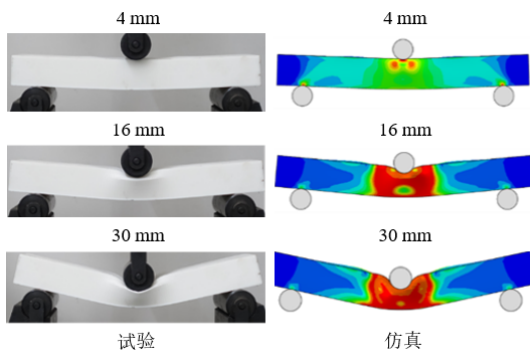


图 7 三点弯曲试验与仿真变形模式

图 8 所示分别为壁厚为 1、2、3 和 4 mm 的矩形截面防撞梁在准静态三点弯曲工况下的载荷位移曲线和耐撞性指标。不同壁厚的曲线呈现出相同的趋势，即载荷先随着压头位移的增加而达到峰值，而后载荷开始下降并趋于稳定。随着壁厚的增加，防撞梁的载荷水平增加。这是因为随着防撞梁壁厚的增加，其整体刚度增加，防撞梁抵抗弯曲变形的能力变强。图 9 和图 10 是不同壁厚防撞梁耐撞性指标。SEA、CFE、IPCF 和 MCF 随着壁厚的增加而增加。

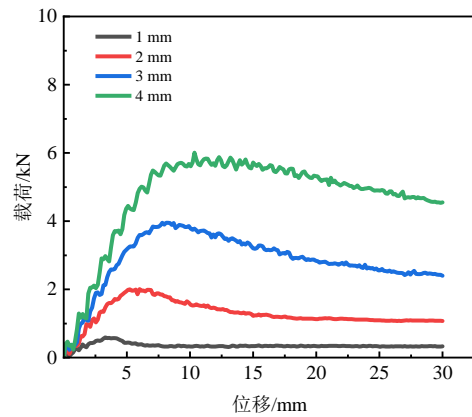


图 8 不同壁厚方管载荷-位移曲线

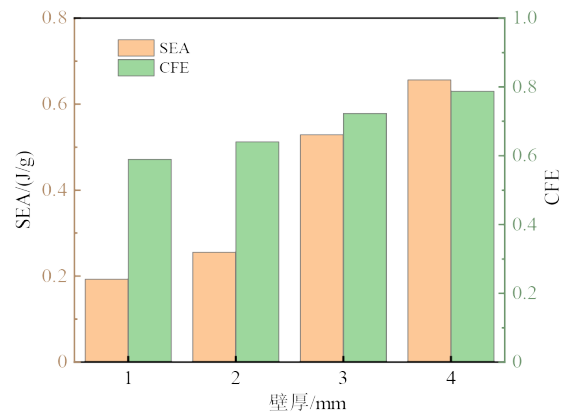


图 9 不同壁厚方管 SEA 和 CFE

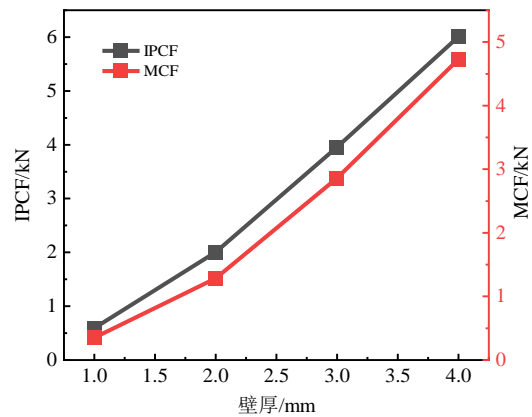


图 10 不同壁厚方管 IPCF 和 MCF

### 3 蜂窝填充结构

蜂窝结构作为吸能盒的填充材料，研究其在轴向压溃下的变形模式及力学特性对于实现汽车被动安全同样具有重要意义。本文通过 3D 打印技术制备了与文献 [14] 中相同结构参数的蜂窝，并开展了准静态压缩试验，蜂窝结构如图 11 所示。其中，胞元尺寸  $l$  为 10 mm，内壁厚度  $t$  为 4 mm。

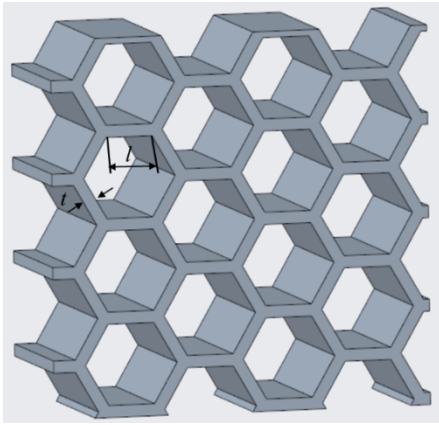


图 11 蜂窝结构

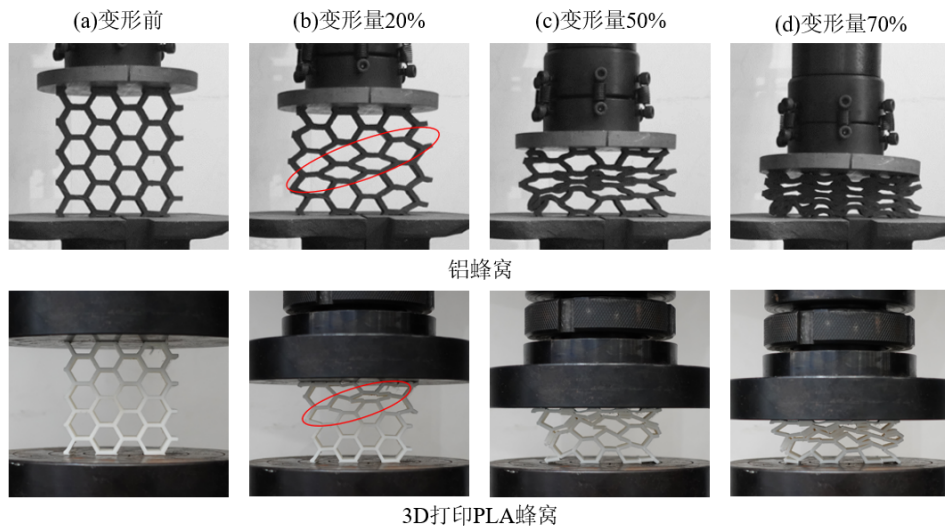


图 12 蜂窝结构准静态压缩过程

从图 13 中可以发现，蜂窝铝及 PLA 蜂窝的压缩曲线均可以分为 3 部分：弹性段、平台段和密实段。在弹性阶段，胞壁发生弹性弯曲，产生非线性弹性，蜂窝铝受力随着变形量的增加呈线性增长，表现为曲线上的峰值。在平台阶段，变形首先发生在薄弱点处，屈曲单元壁上出现塑性铰，这导致局部塑性坍塌，载荷得到释放。随着持续的压缩，塌陷孔隙的上下表面相互受到挤压和摩擦，导致力出现回升。曲线呈现较长且不断波动的平台。在致密化阶段，洞穴完全坍塌，胞壁相互挤压，蜂窝完全压实并导致载荷急剧上升。通过变形模式及曲线的对比，说明 3D 打印的 PLA 蜂窝可以很好地反映铝蜂窝在轴向压缩下的特征及力学特性。

蜂窝结构在实际的应用中工况会有所不同，而

### 3.1 蜂窝结构准静态单轴压缩实验

通过万能试验机对 3D 打印制备的蜂窝试件进行了准静态压缩试验，将蜂窝材料夹在两盘之间，试验机上压盘速度设置为 2 mm/min，试验方向为压向，控制方式为位移控制，试验结束条件为定位移 64 mm。记录试验数据位移和载荷。

图 12 为铝蜂窝与 3D 打印 PLA 蜂窝在准静态压缩下的变形过程。蜂窝铝和 PLA 蜂窝的变形模式相似，即首先在试件中间沿着对角线位置发生塑性变形，而后变形延展至加载端与支撑端，最终压实。

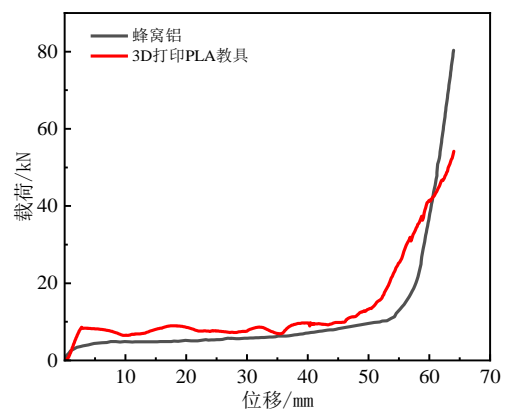


图 13 蜂窝结构准静态压缩曲线

在不同的应用领域对结构的吸能量以及承载能力有不同的要求，改变蜂窝结构的壁厚和单胞尺寸会直接影响结构的吸能特性，所以研究不同壁厚和胞元尺寸下结构的吸能特性也非常重要。因此，本文采

用数值模拟的方法，进一步探讨蜂窝结构参数对其力学特性的影响。

### 3.2 蜂窝结构耐撞性数值模拟研究

参考准静态试验，建立蜂窝结构的有限元模型。蜂窝夹在两刚性板之间，上端为加载板，对其施加竖直向下的位移载荷，速度为 1 m/s，下端为固定不动的支撑端。上下板分别与模型设置接触，同时模型设置自接触，仿真过程中发现模型接触面会在两个刚性板上轻微摩擦滑动。上下板与模型间的摩擦因数均设置为 0.3。使用六面体实体网格对试样进行网格划分。3D 打印 PLA 蜂窝结构试验与

仿真载荷-位移曲线及变形模式分别如图 14 和 15 所示，两者吻合良好，证明了有限元模型的准确性。

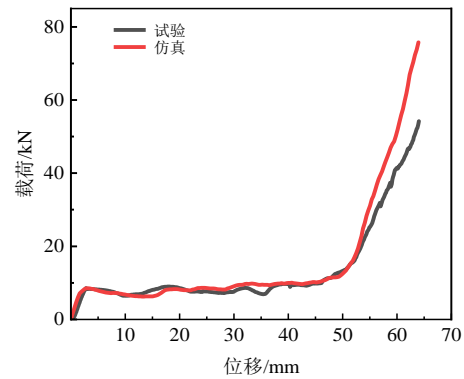


图 14 3D 打印 PLA 蜂窝结构试验与仿真载荷-位移曲线

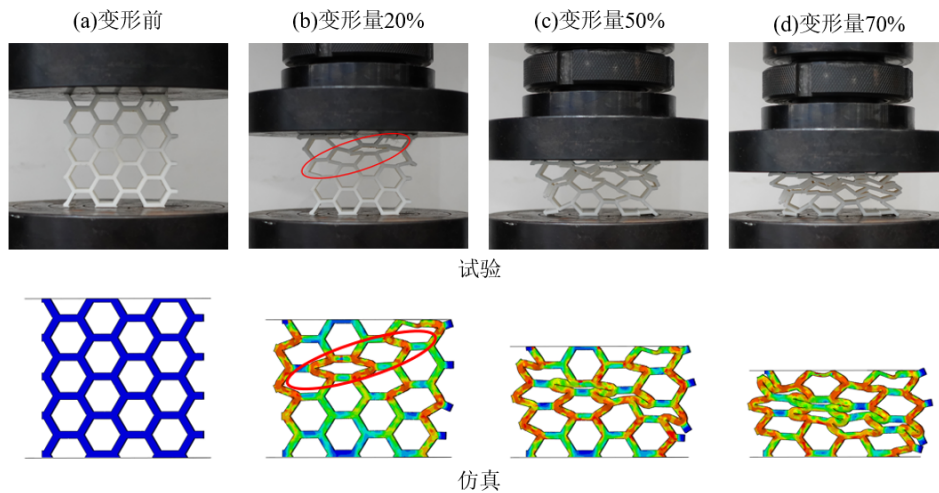


图 15 3D 打印 PLA 蜂窝结构试验仿真变形模式对比

#### 3.2.1 壁厚影响

图 16 是不同壁厚蜂窝的载荷-位移曲线。随着壁厚的增加，蜂窝的载荷水平显著上升。由于胞元壁厚的增加，相对密度的增大，蜂窝的整体强度增大，导致胞壁产生塑性较所需的能量增大。

由载荷-位移曲线计算得到不同壁厚下蜂窝结构各耐撞性指标，如图 17~18 所示。随着壁厚的增加结构的 SEA、CFE、MCF 均相应提高，这是因为相对密度随着壁厚的增加而增加，增强了蜂窝的承载能力。但同时，由于 IPCF 也随之增加，在发生碰撞时对车身造成的冲击变大。因此，在实际工程应用中应避免盲目增加蜂窝填充结构壁厚，应综合考虑其对 SEA 和 IPCF 的影响，根据不同的需要适当改变结构的壁厚来满足要求。

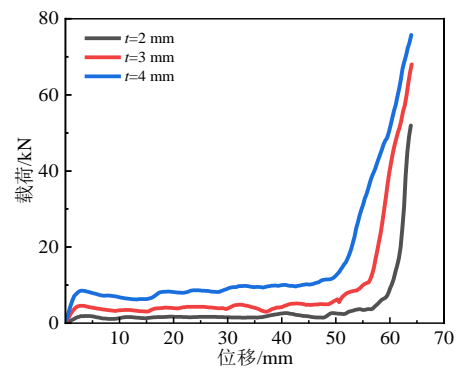


图 16 不同壁厚蜂窝载荷-位移曲线

#### 3.2.2 胞元尺寸

图 19 为相同壁厚不同胞元尺寸蜂窝的载荷位移曲线。由于胞元尺寸的减小，导致胞元数量增加，在相同壁厚的条件下蜂窝的相对密度增加，蜂

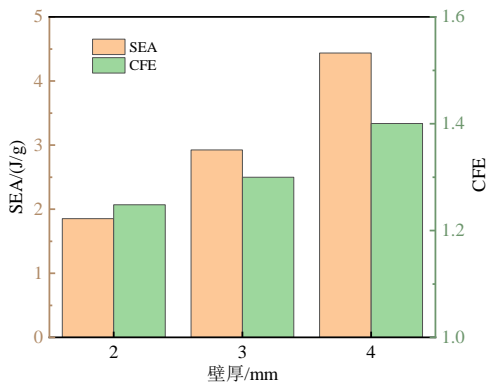


图 17 不同壁厚蜂窝结构SEA和CFE

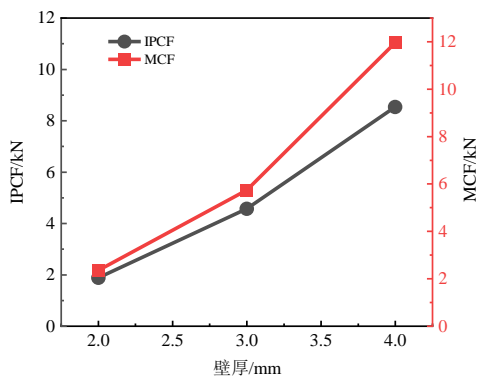


图 18 不同壁厚蜂窝结构IPCF和MCF

窝材料的整体强度较大，因此，蜂窝平台区的载荷逐渐提高，抗压性能不断增强。此外，胞元尺寸大的蜂窝材料的平台阶段较长，进入密实化区域较晚。

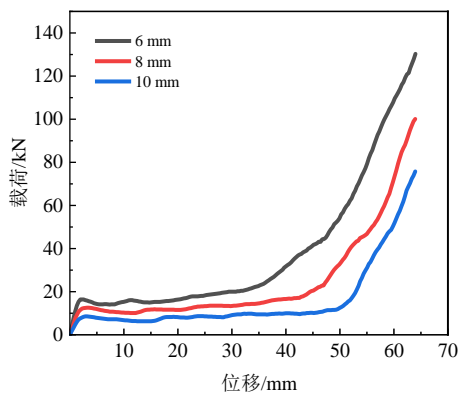


图 19 不同胞元尺寸蜂窝结构载荷-位移曲线

由载荷-位移曲线计算得到不同胞元尺寸下蜂窝结构各耐撞性指标，分别如图 20 和图 21 所示。在相同壁厚条件下，SEA、CFE、IPCF、MCF 均随着胞元尺寸的增大而减小，这与蜂窝结构的相对密度增加有关。壁厚的增加及胞元尺寸的减小均会导

致相对密度的增加，这影响了蜂窝结构的承载性能。这说明真正对蜂窝材料的力学性能起决定作用的是相对密度。

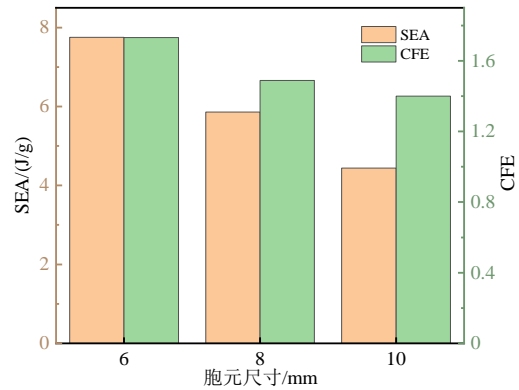


图 20 不同胞元尺寸蜂窝结构SEA和CFE

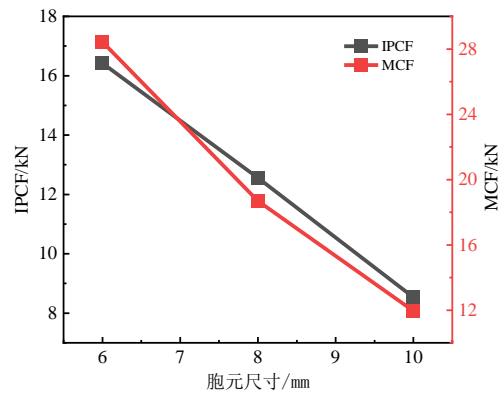


图 21 不同胞元尺寸蜂窝结构IPCF和MCF

## 5 总结

为探讨汽车吸能结构耐撞性，本文采用 3D 打印技术制造了相同结构及尺寸不同基体材料的汽车防撞梁及蜂窝结构，对比分析了变形模式及载荷-位移曲线。进一步开展了矩形截面防撞梁和蜂窝结构的耐撞性数值模拟研究，结论如下。

1) 3D 打印 PLA 防撞梁及蜂窝填充结构的载荷-位移曲线与金属结构呈现出相同的趋势，并且能反映汽车吸能结构在不同工况下的变形特征。

2) 随着防撞梁壁厚的增加，其整体刚度增加，防撞梁抵抗弯曲变形的能力变强，耐撞性指标随着壁厚的增加而增加。

3) 壁厚的增加及胞元尺寸的减小导致蜂窝结构相对密度的增加，这提高了蜂窝结构的耐撞性。此外，胞元尺寸大的蜂窝结构的平台阶段较长，进入密实化区域较晚。

## 参考文献 (References)

- [1] TANLAK N, SONMEZ F O, SENALTUN M. Shape Optimization of Bumper Beams Under High-Velocity Impact Loads [J]. *Engineering Structures*, 2015, 95: 49–60.
- [2] ÇAM S, SOFUĞLU H. An Investigation on Crashworthiness Performance of Adhesive Bonding in Automobile Hybrid Front Bumper System Subjected to High-Speed Impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 173: 104478.1–104478.14.
- [3] BILSTON D, RUAN Dong, CANDIDO A, et al. Parametric Study of the Cross-Section Shape of Aluminium Tubes in Dynamic Three-Point Bending [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 136: 315–322.
- [4] ZHANG Hui, ZHANG Xiong, FU Xinrong. Experimental and Numerical Investigations on Three-Point Bending Collapse of Thin-Walled Beams [J]. *Engineering Structures*, 2023, 293: 116614.1–116614.15.
- [5] FU Xinrong, ZHANG Xiong. Three-Point Bending of Thin-Walled Arched Beams with Square Sections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182: 110201.1–110201.17.
- [6] ZHANG Xiong, FU Xinrong. New Theoretical Models for the Bending Moment of Thin-Walled Beams Under Three-Point Bending [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 121: 21–42.
- [7] 卢强, 沈琴, 刘钢, 等. 碳纤维铝蜂窝复合材料汽车保险杠横梁轻量化设计[J]. *现代制造工程*, 2023(3): 77–82, 76.  
LU Qiang, SHEN Qin, LIU Gang, et al. Lightweight Design of Automobile Bumper Beam Made of Carbon Fiber Aluminum Honeycomb Composite [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(3): 77–82, 76. (in Chinese)
- [8] 陈光, 冯玉鹏, 解东旋, 等. 三点弯曲工况下编织碳纤维复合材料方管的材料特性研究[J]. *机械强度*, 2023, 45(3): 598–606.  
CHEN Guang, FENG Yupeng, XIE Dongxuan, et al. Research on the Material Characteristics of Woven Carbon Fiber Composite Square Tubes Under Three-Point Bending Load [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(3): 598–606. (in Chinese)
- [9] 李聪, 赵宏伟, 孙琳琳, 等. 45号钢承载能力的原位三点弯曲试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 869–874.  
LI Cong, ZHAO Hongwei, SUN Linlin, et al. Research on Load Capabilities of 45\* Steel via In-Situ Three-Point Bending [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(6): 869–874. (in Chinese)
- [10] KAVELOGLU S, TEMIZ S. An Experimental and Finite Element Analysis of 3D Printed Honeycomb Structures Under Axial Compression [J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2022, 30: 1–10.
- [11] DOU Hao, YE Wenguang, ZHANG Dinghua, et al. Comparative Study on In-Plane Compression Properties of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced Composite Honeycomb and Aluminum Alloy Honeycomb [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 176: 109335.1–109335.10.
- [12] LI Zhejian, YANG Qiusong, FANG Rui, et al. Crushing Performances of Kirigami Modified Honeycomb Structure in Three Axial Directions [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107365.
- [13] 徐威. 汽车保险杠横梁耐撞性能及其弯曲变形机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
XU Wei. Crashworthiness Analysis and Bending Collapse Research of Car Bumper Beam [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [14] 李开妍, 王晗, 郝海. 蜂窝铝材料的铸造工艺和压缩性能研究[J]. *铸造技术*, 2019, 40(8): 772–777.  
LI Kaiyan, WANG Han, HAO Hai. Study on Casting Process and Compressive Property for Aluminum Honeycomb [J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(8): 772–777. (in Chinese)

## 作者简介



刘萍 (1987–), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新能源汽车、教育技术与管理。

Tel: 17792030312

E-mail: 517014762@qq.com