

基于 TPU 材料的 Kelvin 结构缓冲性能研究

于敏, 周斌, 郑银环
(武汉理工大学, 武汉 430000)

摘要: **目的** 探究 TPU 材料 Kelvin 结构缓冲性能, 为包装缓冲减振提供新方案。**方法** 设计不同尺寸规格的 Kelvin 结构及正六边形结构, 利用 3D 打印完成实体成型, 开展力学压缩试验, 进行对比分析。**结果** TPU 材料 Kelvin 结构具备较优良的压缩回弹率; 随着相对密度、尺寸等级的不断增加, 其最大应力相应增加; 中等尺寸规格情况下, 其力学性能最优; 在吸收相同能量的情况下, TPU 材料的 Kelvin 结构的应力小于正六边形结构。**结论** TPU 材料的 Kelvin 结构具备较优良的力学性能, 有一定的工程适应性。

关键词: Kelvin 结构; 实验测试; 力学性能

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)17-0082-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.011

Cushioning Performance of Kelvin Structure Based on TPU Material

YU Min, ZHOU Bin, ZHENG Yin-huan

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the cushioning performance of Kelvin structure based on TPU material and provide a new solution for packaging cushioning and vibration reduction. Kelvin structures and regular hexagonal structures of different sizes and specifications were designed, 3D printing was adopted to complete the solid molding and mechanical compression test was carried out for comparative analysis. Kelvin structure based on TPU material had better compression resilience. With the continuous increase of relative density and size grade, the maximum stress increased correspondingly. In case of medium size specifications, the mechanical properties were the best. In case of absorbing the same energy, the stress of the Kelvin structure based on TPU material was less than that of the regular hexagonal structure. Kelvin structure based on TPU material has better mechanical properties and a certain degree of engineering adaptability.

KEY WORDS: Kelvin structure; experimental test; mechanical properties

3D 打印作为先进制造业中有代表性的技术领域, 改变了传统的生产模式。随着柔性材料 TPU (Thermoplastic Polyurethanes) 3D 打印技术的不断成熟^[1], 3D 打印的应用范围也逐渐扩大, 其中在缓冲领域的应用包括缓冲鞋垫^[2-3]、缓冲夹层等。常见 3D 打印 TPU 材料缓冲夹层结构包括正六边形^[4-5]、正四边形、正三角形^[6]、体心立方^[7]、Kelvin^[8-9]等结构

等。国内外学者在研究 TPU 材料 3D 打印缓冲结构的过程中, 往往通过三维建模完成缓冲结构设计, 借助 3D 打印由 TPU 材质线材完成实物成型, 进而通过静态压缩或动态冲击实验进行力学性能分析。蜂窝结构是目前国内研究最广泛的。Simon 等^[4-5]、刘翔^[6]、张亚男^[7]、阮班超^[10]借助 3D 打印, 完成了不同尺寸规格的蜂窝结构的成型, 并通过上述方法进行力学性能

收稿日期 2021-10-15

基金项目: 工信部工业互联网创新发展工程项目 (TC19084DY)

作者简介: 于敏 (1997—), 女, 硕士生, 主攻包装的缓冲与减振。

通信作者: 周斌 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能制造、故障诊断与分析、运输包装。

分析。结果显示, 由 3D 打印的 TPU 蜂窝结构与膨胀闭孔聚氨酯泡沫具备相当的能量吸收效率, 不同密度下, 吸收总能、质量比吸能等能量吸收性能会产生变化。Kelvin 结构作为一种新型结构, 借助于 3D 打印技术完成 TPU 材料的 Kelvin 缓冲结构制作, 在产品的缓冲减振和防护领域有良好的应用前景。Hawreliak 等^[11]、Oh 等^[12]通过实践, 验证了利用 3D 打印进行 TPU 材料的 Kelvin 结构的可实现性。Ge 等^[2]将 3D 打印技术同 TPU 材料结合, 研究 Kelvin 结构的缓冲性能。鲁埝坤^[13]利用 ANSYS15.0 进行恒定速度动态压缩、动态冲击跌落分析的有限元分析, 开拓了 TPU 材料的 Kelvin 结构的数字模拟。由此可见, 现有研究内容主要集中于 3D 打印技术及基于 3D 打印 TPU 缓冲结构性能, 在对其进行了有限元分析后, 尚缺乏试验进行论证, 同时对于 TPU 材料 Kelvin 结构的力学性能分析缺乏一定的对比。

1 基于 TPU 材料的 Kelvin 结构分析

Kelvin 结构包含 8 个正六边形和 6 个正四边形。图 1 为 Kelvin 结构的 4 种截面^[9], 图 1a—d 分别是曲边三角形、正三角形、正四边形、圆柱形。参考对 Kelvin 泡沫分析方式, 对文中圆柱截面 Kelvin 结构 (图 1d) 展开理论分析。

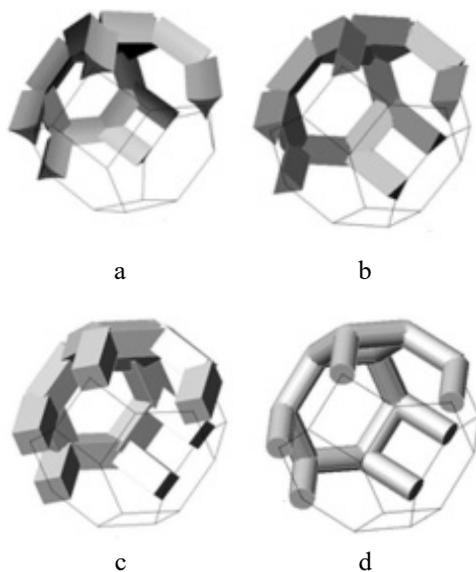


图 1 Kelvin 结构 4 种截面形状示意图
Fig.1 Schematic diagram of four cross-sectional shapes of Kelvin structure

对于 2×2 的 Kelvin 结构模型, 选择其中 2 个并列 Kelvin 结构单元为观测主要对象, 见图 2。选择其最具周期性且数目最小的支柱作为分析的基本单元, 如图 2a 中所示, 并沿其对称轴方向建立总坐标系。由图 2 可知, AO、BO、CO、DO 4 根支柱分别

平行于 xz、yz 平面, 在压缩的过程中, 其产生的主要变形和应变在 xy 平面内。采用图 2b 所示的正六面体单元来代表整体模型, 分析 Kelvin 结构的受力情况。图 2b 中各个边长为图 2a 中单独 Kelvin 结构对称轴, 水平方向上的支柱选取原支柱长度的 1/2。

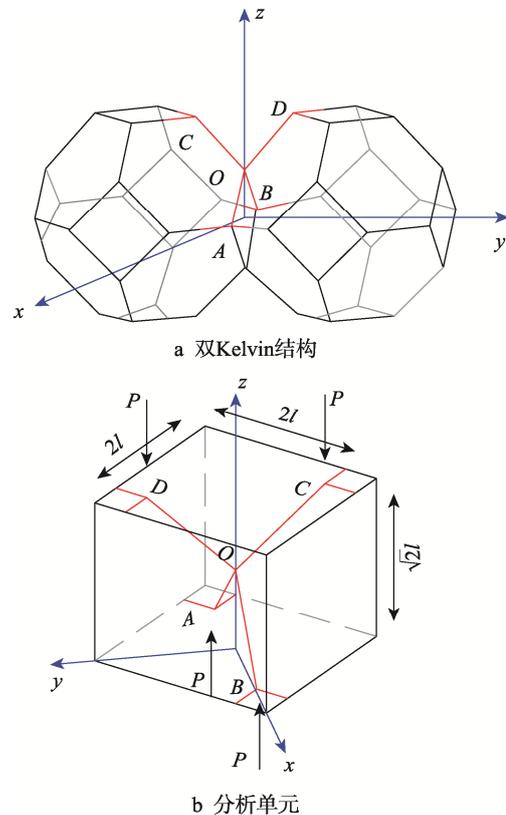


图 2 模型简化图
Fig.2 Simplified diagram of model

根据图 2, 推导出 Kelvin 结构模型相对密度和所受应力的关系, 为:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{3S}{2\sqrt{2}l^2} \tag{1}$$

式中: ρ 、 ρ_s 分别为 Kelvin 结构密度和 TPU 线材密度; S 为 Kelvin 结构支柱的横截面积; l 为 Kelvin 结构支柱的长度。通过对图 2b 所示模型展开研究, 进行力学计算, 获得 Kelvin 结构所受应力大小为:

$$P = 2l^2\sigma_z \tag{2}$$

式中: P 为 Kelvin 结构所加载荷。由图 2b 可知, 图中所示支柱具备一定的对称性, 故选取 CO 及其对应的水平支柱的一半进行分析。当上、下表面同时施加压缩载荷 P , 上、下表面保持相对平行, 则中间部分的支柱可视为两端固定简支梁。设 CO 中点为 M , 则支柱中点 M 位置的弯矩为 0, 仅受 z 方向上的压缩应力的作用, OM 支柱受力分析图见图 3。

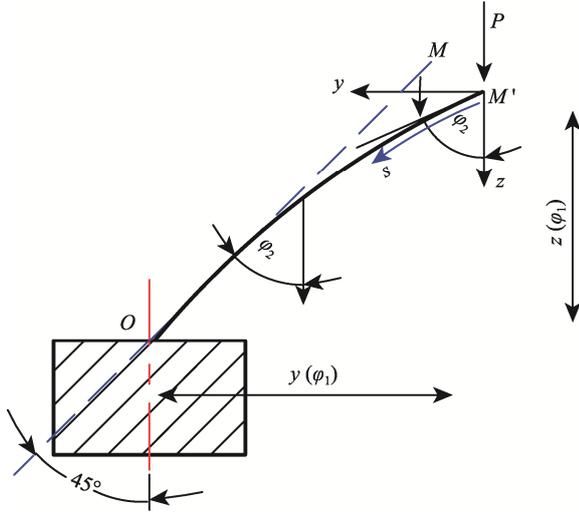


图3 EM 支柱受力分析图
Fig.3 Analysis of stress of EM pillar

根据工程力学中梁的理论,可知其挠曲线方程见式(3),式中 E 、 I 分别为梁的弹性模量和截面惯性矩。

$$EI \frac{d\phi_2}{ds} = -Py$$

通过角 ϕ_2 、 y 轴变形长度和 z 轴变形长度的关系,对式(3)两边同时对 s 求导,

$$EI \frac{d^2\phi_2}{ds^2} = -P \sin \phi_2 \quad (3)$$

将式(3)两边同时乘 $d\phi_2/ds$, 并对 s 进行积分,通过分部积分法,得到

$$EI \int_{\phi_2}^{\phi_1} \frac{d^2\phi_2}{ds^2} \cdot \frac{d\phi_2}{ds} ds = -P \int_{\phi_2}^{\phi_1} \sin \phi_2 \cdot \frac{d\phi_2}{ds} ds$$

$$EI \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d\phi_2}{ds} \right)^2 + C_1 = -P \int_{\phi_2}^{\phi_1} \sin \phi_2 d\phi_2 \quad (4)$$

$$EI \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d\phi_2}{ds} \right)^2 + C_1 = -P \cos(\phi_2 - \phi_1) + C_2$$

由于当 $\phi_1 = \phi_2$ 时,其曲率为 0,故将式(4)简化为式(5):

$$EI \left(\frac{d\phi_2}{ds} \right)^2 = 2P(\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \quad (5)$$

对式(5)再次进行积分,考虑到半支柱长度的边界条件,得:

$$\frac{l}{2} = \sqrt{\frac{EI}{2P}} \int_{\phi_1}^{\pi/4} \frac{1}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2 \quad (6)$$

另 $M(\phi_1) = \int_{\phi_1}^{\pi/4} \frac{1}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2$, 则推到 Kelvin

结构所加载 P 为:

$$P = \frac{2EI}{l^2} M^2(\phi_1) \quad (7)$$

同式(1)联立,得 z 方向上的宏观压缩应力为:

$$\sigma_z = P/2l^2 = EIM^2(\phi_1)/l^4 \quad (8)$$

结合式(1)和表1将式(8)写为式(9),公式前部分的常量称为支柱截面形状参数,常见的支柱截面形状参数可参考表1^[14]。

$$\sigma_z = \frac{2}{9\pi} E \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 M^2(\phi_1) \quad (9)$$

考虑 Kelvin 结构在压缩过程中支柱产生的位移变化。

在 z 轴方向上,存在 $dz = \cos \phi_2 ds$ 的等式关系成立,将其与式(6)相结合,得

$$z(\phi_2) = \frac{1}{2M(\phi_1)} \int_{\phi_2}^{\pi/4} \frac{\cos \phi_2}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2 \quad (10)$$

对于 M 点,则存在:

$$z(\phi_2) = \frac{1}{2M(\phi_1)} \int_{\phi_2}^{\pi/4} \frac{\cos \phi_2}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2$$

由于半支柱在 z 方向的高度为 $l/2\sqrt{2}$, 所以 z 方向的应变 ϵ_z 可以表示为

$$\epsilon_z = \frac{z(\phi_1) - l/2\sqrt{2}}{l/2\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{M(\phi_1)} \int_{\phi_2}^{\pi/4} \frac{\cos \phi_2}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2 - 1 \quad (11)$$

类似地,在 y 方向上,存在:

$$y(\phi_2) = \frac{1}{2M(\phi_1)} \int_{\phi_2}^{\pi/4} \frac{\sin \phi_2}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2 \quad (12)$$

在 M 点处,则存在:

$$y(\phi_1) = \frac{l}{2M(\phi_1)} \int_{\phi_1}^{\pi/4} \frac{\sin \phi_2}{\sqrt{\cos \phi_1 - \cos \phi_2}} d\phi_2$$

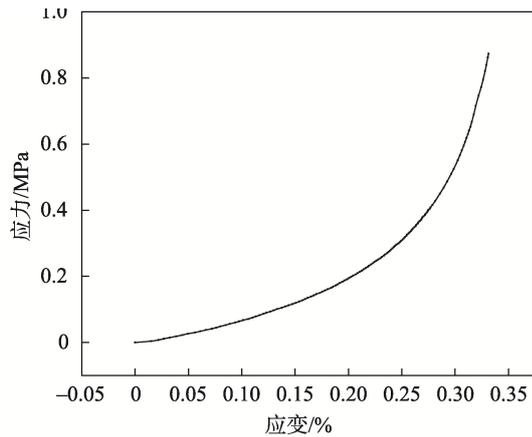
表1 支柱截面形状参数
Tab.1 Shape parameters of pillar section

截面形状	等边三角形	正方形	圆形	曲边三角形
惯性矩和面积的关系	$I = \frac{S^2}{6\sqrt{3}}$	$I = \frac{S^2}{12}$	$I = \frac{S^2}{4\pi}$	$I = \frac{20\sqrt{3} - 11\pi}{6(2\sqrt{3} - \pi)} S^2$
支柱截面形状参数	$\frac{4\sqrt{3}}{81}$	$\frac{2}{27}$	$\frac{2}{9\pi}$	$\frac{4(20\sqrt{3} - 11\pi)}{27(2\sqrt{3} - \pi)^2}$

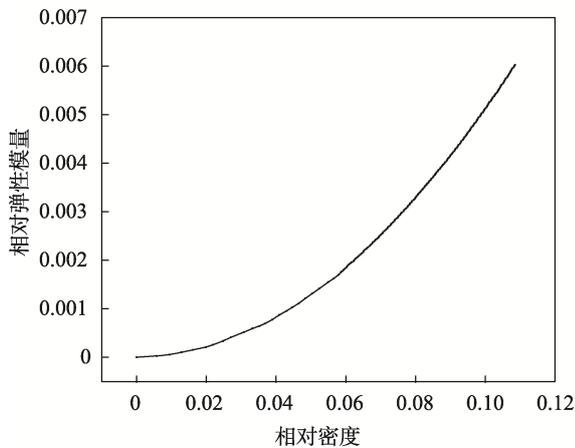
由于模型在 y 方向的初始长度为 $2\sqrt{2}l$, 变形后的长度为 $\sqrt{2}l + y(\alpha)$, 故 y 方向上的应变可以表示为:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{\sqrt{2}F(\phi_2)} \int_{\phi_2}^{\frac{\pi}{4}} \frac{\sin\phi_1}{\sqrt{\cos\phi_2 - \cos\phi_1}} d\phi_1 - \frac{1}{2}$$

由 Matlab 进行编程求解, 计算压缩情况下的应力、应变值, 并绘制其应力-应变曲线见图 4。在考虑减少原始材料对计算结果影响的情况下, 使用无量纲形式来计算应力。



a 应力-应变关系



b 相对模量-相对密度

图 4 数据处理结果
Fig.4 Data processing results

由图 4a 可知, 对于圆柱截面的 Kelvin 结构, 随着应变的逐渐增加, 应力-应变曲线由线性关系逐渐转为上凹形状, 随着加载过程的进行, Kelvin 结构整体刚度呈现上升趋势。由图 4b 可知, 随着相对密度的增大, 其相对弹性模量呈指数上升的趋势。

2 试验准备工作

2.1 试验设计

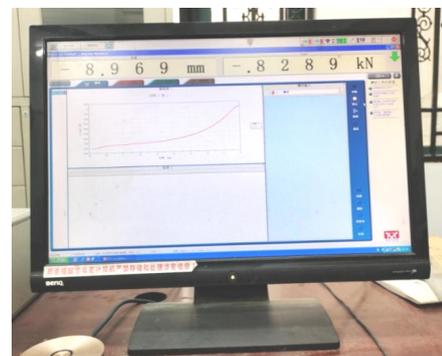
为了进一步评估不同尺寸等级、不同相对密度的

Kelvin 缓冲结构力学性能, 通过 INSTRON 5882 万能试验机对缓冲结构的力学性能进行压缩加载-卸载测试。万能试验机的载荷范围为 ± 100 kN, 位移精度为 0.1μ 。将 3D 打印 TPU 缓冲结构放置于下压缩板中心位置处, 设置上压板应变速率为 2 mm/min , 由计算机控制上压板施加载荷, 压缩至缓冲结构达到密实状态。达到密实状态后, 计算机控制上压板以 2 mm/min 的速率卸载, 卸载至缓冲结构初始高度。每组试样 5 个, 每组试样循环上述过程循环 5 次。

图 5 为压缩试验现场的图, 图 5a、b 分别为试验设备及其配套的计算机测试及处理系统。计算机测试及处理系统可记录压缩试验过程中其力-位移的数值, 并会根据输入的试样尺寸以及其设备对位移的测量换算成应力-应变曲线。通过对应力-应变曲线进行分析, 整理统计或计算出每个缓冲结构在压缩循环内的能量损失效率等, 求出每组的平均值。



a 试验设备



b 计算机测试及处理系统

图 5 压缩试验现场图
Fig.5 Compression test site

通过前期的预压缩试验,可知在压缩循环达到第4次时,所得曲线与第3次循环曲线基本重合,可推断缓冲结构的压缩回弹率、能量损失效率在第3次循环后逐渐趋向稳定。为保证所计算数据的准确性,根据第5次循环所得试验数据,计算缓冲结构在单轴压缩下的压缩回弹率、压缩能量损失率,计算见式(5)。

$$R = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100\% \quad (13)$$

式中: h_0 为缓冲结构初始厚度,在一个压缩循环内; h_1 为压缩循环加载开始在为 0 的位移; h_2 为压缩循环卸载结束载荷降为 0 的位移。

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0 - U_1}{U_0} \times 100\% = \frac{\int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon - \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon} \times 100\% \quad (14)$$

式中: U_0 为试样压缩至应变 1 的过程中缓冲结构存储的能量; U_1 为由应变 1 卸载至载荷为 0 时的应变 2 释放的能量,是在一次加载卸载循环内,试样吸收或压缩损失的能量。

2.2 样品制备

以 Kelvin 结构为基本单元,通过横向、纵向阵列完成缓冲结构的设计。图 6 为 3D 打印 TPU 材料缓冲结构基本单元,基本单元的长度和宽度分别由 L 和 b 表示,其中支柱的截面宽度、长度分别以 b_1 和 l_1 表示。

影响缓冲结构力学性能的因素有很多,如相对密度^[15-16]、尺寸等级、原始材料等。对于此类缓冲结构,国内尚未存在具体的试验标准。故此处参考 ASTM D 395—2003《橡胶压缩特性的标准试验方法》、GB/T 181—2009《硫化橡胶回弹性的测定》等相关标准,并依照试验设备通用的尺寸大小,设计缓冲结构的长、宽、高为 30 mm×30 mm×30 mm,并通过 SolidWorks 2020 建模见图 7。

对于尺寸为 30 mm×30 mm×30 mm 的缓冲结构,随着构成单元支柱截面尺寸、支柱长度的增大,构成

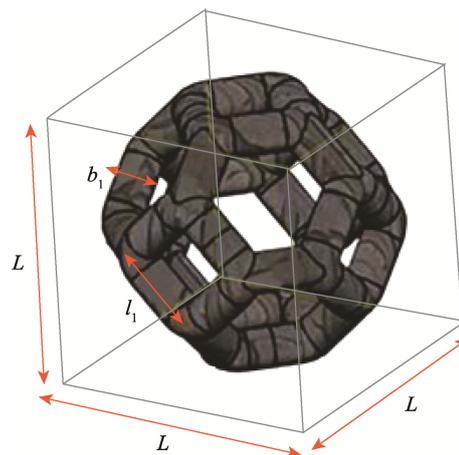


图 6 Kelvin 缓冲结构基本单元
Fig.6 Basic unit of Kelvin cushioning structure

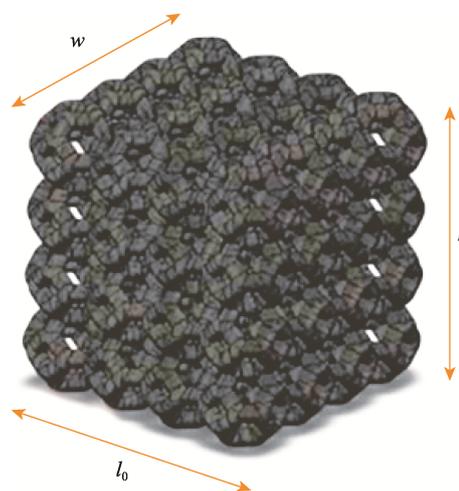


图 7 缓冲结构示意图
Fig.7 Schematic diagram of cushioning structure

其结构的基本单元尺寸也逐渐缩小。故拟定 3 种尺寸等级的缓冲结构,即密多边形缓冲结构、中多边形缓冲结构、疏多边形缓冲结构,同时使其相对密度为 40%。除设计 3 种尺寸等级的 Kelvin 结构外,设计 3 种相对密度的 Kelvin 缓冲结构,即相对密度分别为 17%、40%、71%的缓冲结构,详细数据参见表 2。

表 2 Kelvin 缓冲结构设计参数
Tab.2 Design parameters of Kelvin cushioning structure

形状类型	边界尺寸/mm	支柱截面尺寸/mm	支柱长度/mm	尺寸级别	相对密度/%
Kelvin 结构	30×30×30	2.770	2.806	疏	
		2.130	2.154	中	40
		1.420	1.484	密	
		1.270			17
		2.130	2.154	中	40
		2.310			71

利用 SolidWorks2020 三维建模软件,设计如图 8、图 9 所示的不同尺寸等级、不同相对密度的 Kelvin 缓冲结构。

通过 SolidWorks2020 完成缓冲结构建模,将 SolidWorks2020 建好的*.sldprt 格式的文件导出为*.stl 格式,从而将*.stl 格式的文件拖放至 Simplify3D 软件中的 Build Table 上,并将模型安排至软件构建板的中心位置,设定其打印参数:打印尺寸为 30×30×30,细丝直径为 0.75 mm,喷头直径为 0.35 mm,打印喷头温度为 210 °C,填充率为 45%。预览模型的 3D 打印效果,确定无误后开始打印,留意其打印完成所需时间及其所耗线材的长度。为保证喷头可正常吐丝并以优良的品质完成缓冲结构模型的打印,先使用易生 TPU 材料线材(如图 10 所示)进行预打印工作,确保打印机稳定工作后,开始缓冲结构的打印工作。



a 疏尺寸

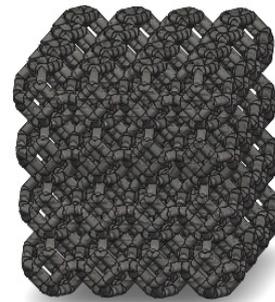


b 中尺寸



c 密尺寸

图 8 不同尺寸等级的 Kelvin 缓冲结构
Fig.8 Kelvin cushioning structures of different size grades



a 相对密度 17%



b 相对密度 40%



c 相对密度 71%

图 9 不同相对密度的 Kelvin 缓冲结构
Fig.9 Kelvin cushioning structures of different relative density



图 10 选用线材
Fig.10 Selected wire

打印后的缓冲结构见图 11、图 12。在获得打印的缓冲结构之后,对其实际总体尺寸进行测量,测量结果显示,打印尺寸与设计尺寸的误差控制在误差允许范围内。在打印效果上,除部分 Kelvin 结构存在少许多余吐丝或成型不够完善的现象,大多打印效果良好,与设计初始的效果一致,故可用于后续的压缩测试试验。

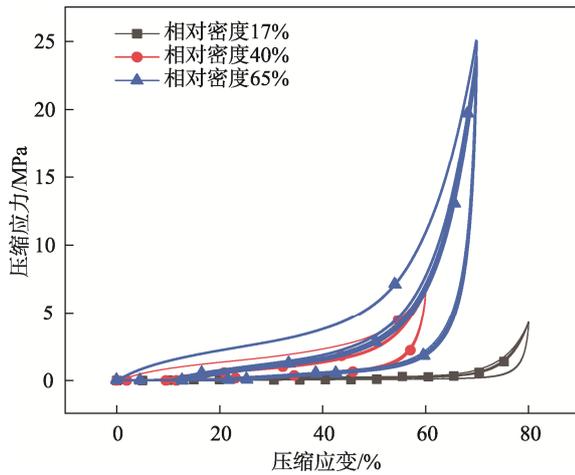


图 14 以 Kelvin 为基本单元缓冲结构的压缩应力-应变曲线 (不同相对密度)
Fig.14 Compressive stress-strain curve of cushioning structure with Kelvin as the basic unit (different relative density)

由图 15 可知, 所设计的不同尺寸规格、不同相对密度的 Kelvin 缓冲结构在单轴压缩的情况下, 具备良好的压缩回弹性能。在相对密度或尺寸等级逐渐增大时, 其压缩应力也增大, 整体的能量损失率在 60%左右。

3.1.2 压缩变形分析

为更详细地分析不同规格缓冲结构的压缩变形情况, 选择一组对所设计的试样进行压缩。在一个压缩循环内, 当试样的应变达到 20%、40%、60%时, 对试验过程中的试样侧面进行拍摄, 整理压缩过程见图 16。

对于以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构, 在应变不断增加的过程中, 上表面施加应力导致的屈服逐渐由上下边缘位置向中间传递 (图 16a)。在相对密度较低的情况下, 会产生 z 方向上的旋转位移, 即发生扭转失稳, 而在相对密度较高的情况下, 随着压缩试验的进行, 其在水平方向上会产生位移导致左右轮廓膨起, 当相对密度和尺寸等级居中时, 试样未发生明显的失稳情况。

3.2 Kelvin 结构与正六边形柱体试验数据对比

静态、动态材料本构关系往往通过静态压缩应力-应变曲线、动态峰值加速度-静应力曲线^[17]表示。二者分别通过电子材料试验机压缩试验和跌落试验进行测定。材料缓冲吸能特性评估包括缓冲曲线、Janssen 因子 J、Rusch 曲线、能量吸收图等。能量吸收图主要表示缓冲材料收到的应力和吸收能量之间的关系。由前文可知相对密度为 40%的 Kelvin 缓冲结构的力学性能较好, 故为进一步验证以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的力学性能, 补充设计以正六边形为基本单元的相对密度为 40%的缓冲结构, 所设计缓冲结构基本单元示意图、3D 打印实物见图 17。

对上述结构进行单轴压缩试验, 压缩至零件密实状态, 记录并整理力-位移曲线, 获得能量吸收曲线见图 18—19。

由图 18、图 19 可知, 2 种结构的能量吸收曲线仍然满足, 4 个典型的特征阶段, 即线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段、密实阶段。在静态压缩的过程中, 分析 2 类结构的肩点坐标, 可发现以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构肩点位置均在以正六边形为基本单元的缓冲结构的左下侧, 则说明以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的能量吸收总量小于正六边形为基本单元的缓冲结构。由图 18、图 19 可知, 对比分析线性阶段两曲线对应的横纵坐标, 可得在线弹性阶段, 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的斜率大于以正六边形为基本单元的缓冲结构的斜率, 即说明在吸收相同的能量的情况下, 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的应力较小。

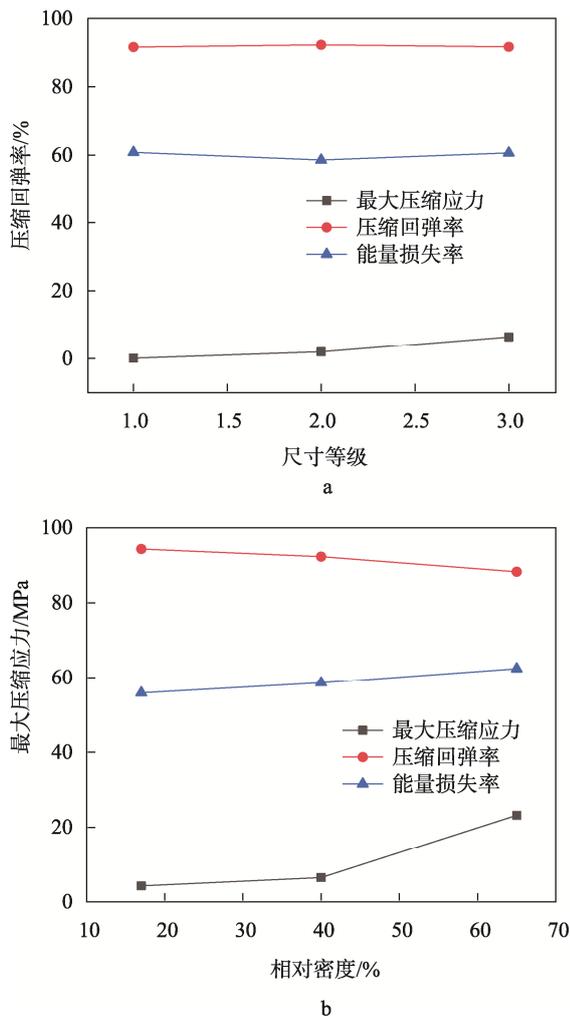
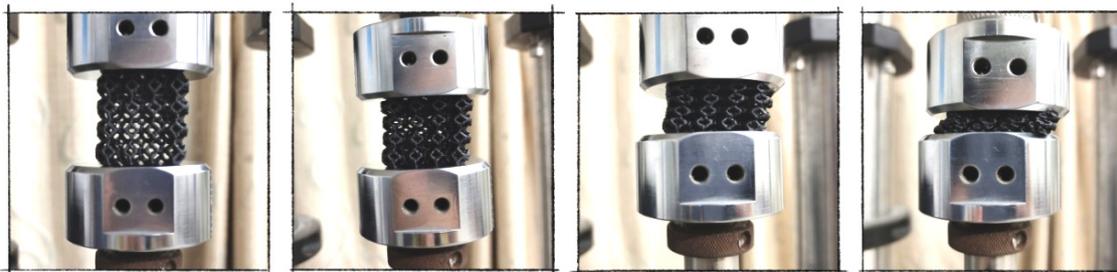
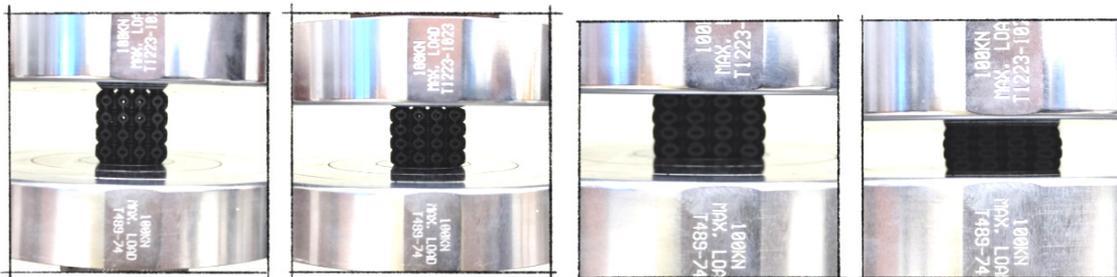


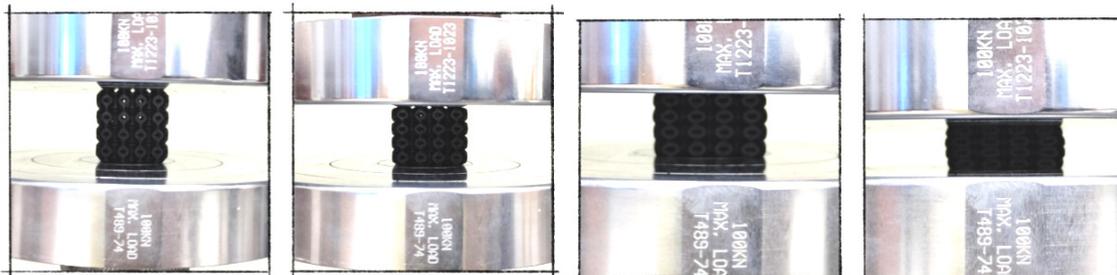
图 15 实验数据整理
Fig.15 Experiment data collation



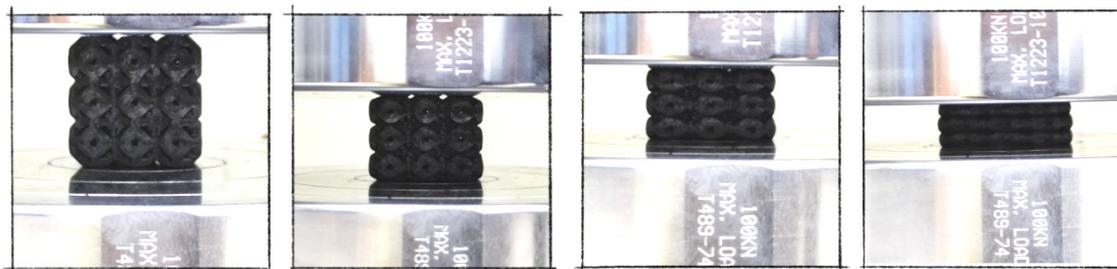
a 相对密度为 17%、中尺寸等级 (应变为 20%、40%、60%)



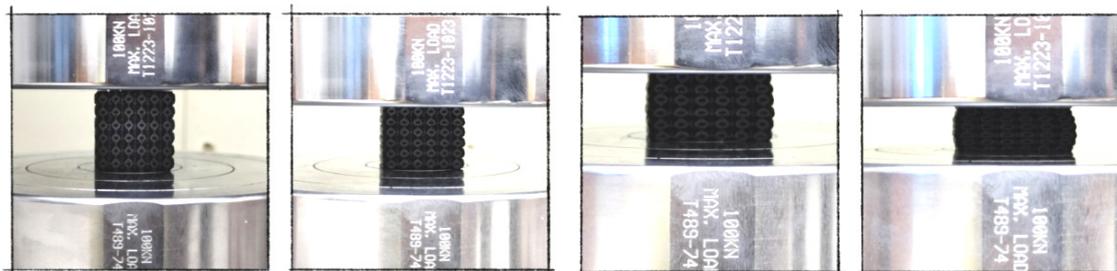
b 相对密度为 40%、中尺寸等级 (应变为 20%、40%、60%)



c 相对密度为 71%、中尺寸等级 (应变为 20%、40%、60%)



d 相对密度为 40%、疏尺寸等级 (应变为 20%、40%、60%)



e 相对密度为 40%、密尺寸等级 (应变为 20%、40%、60%)

图 16 缓冲结构单轴压缩过程
Fig.16 Uniaxial compression process of cushioning structure



图 17 3D 打印 TPU 材料的正六边形结构 (相对密度为 40%)
 Fig.17 3D printed regular hexagonal structure of TPU material (relative density is 40%)

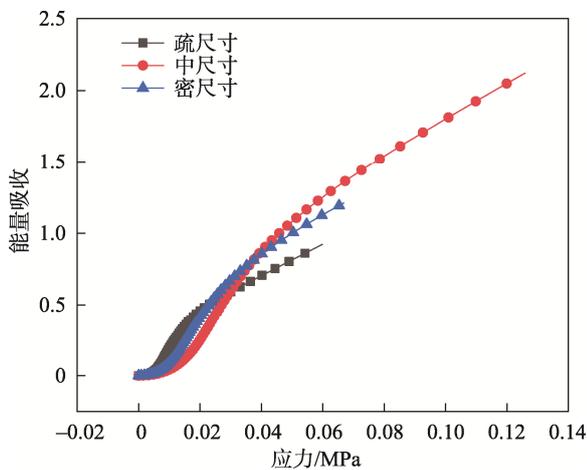


图 18 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的能量吸收曲线
 Fig.18 Energy absorption curve of cushioning structure with Kelvin structure as the basic unit

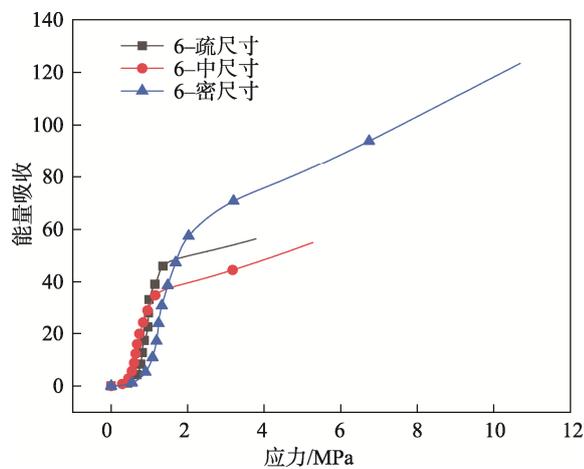


图 19 以正六边形为基本单元的缓冲结构的能量吸收曲线
 Fig.19 Energy absorption curve of cushioning structure with regular hexagon as the basic unit

4 结语

文中设计了以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构, 通过三维建模及 3D 打印完成实体成型。为比较其能量吸收能力, 补充设计了以正六边形为基本单元的缓冲结构, 通过单轴压缩试验, 可得出如下结论。

1) 对于不同尺寸等级、相同相对密度的缓冲结构, 随着尺寸大小的逐渐变密, 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构性能表现出了先递减再递增的趋势。其中压缩回弹率始终保持在 90% 以上, 且中等尺寸等级的 Kelvin 基本单元结构拥有较小的能量损失率、较小的应力、较高的压缩回弹率。对于不同相对密度, 相同尺寸等级的缓冲结构, 随着相对密度的逐渐增大, 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构的压缩回弹率逐渐减小, 最大应力值逐渐增加, 能量损失率也逐渐增加。

2) 通过压缩过程缓冲结构的受力变形可知, 对于以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构, 在压缩的过程中, 其受力变形由上下边缘向中间传递。除相对密度为 17% 的缓冲结构发生了扭转变化外, 其余均因受压而弯曲, 进而导致部分缓冲结构侧面发生膨起, 无其他明显的失稳现象。

3) 以正六边形、Kelvin 结构为基本单元的中等尺寸等级、不同相对密度的缓冲结构为研究对象, 通过对比能量吸收曲线可知, 虽然以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构吸能总量小于以正六边形为基本单元的缓冲结构吸能总量, 但在吸收相同能量的情况下, 以 Kelvin 结构为基本单元的缓冲结构应力较小。

TPU 材料是近年来备受国内外学者关注的一种新颖的材料, Kelvin 结构应用于缓冲防护也是一个较新颖的领域。由于国内外研究尚处于发展阶段, 因此文中研究也处于摸索阶段中。希望随着科学技术的发展, 未来新型的缓冲结构也逐渐增多, 有关于 Kelvin 结构的缓冲也有相对应的具体应用。

参考文献:

- [1] 王军. 热塑性聚氨酯弹性体 3D 打印研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020: 8-12.
WANG Jun. Research on 3D Printing of Thermoplastic Polyurethane Elastomers[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020: 8-12.
- [2] 施勇猛. 基于 3D 打印技术的 AGV 智能车研制[J]. 装备制造技术, 2019(6): 58-61.
SHI Yong-meng. Development of AGV Intelligent Car Based on 3D Printing Technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(6): 58-61.
- [3] 李勇, 刘远哲. 3D 打印技术下的运动鞋设计发展趋势[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 152-157.
LI Yong, LIU Yuan-zhe. Development Trend of Sports Shoes Design under 3D Printing Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 152-157.
- [4] SIMON R G, FARROW B R, TRASK R S. Compressive Behaviour of 3D Printed Thermoplastic Polyurethane Honeycombs with Graded Densities[J]. Materials & Design, 2019, 162: 130-142.
- [5] SIMON R G, FARROW B R, TRASK R S. TRASK. 3D Printed Polyurethane Honeycombs for Repeated Tailored Energy Absorption[J]. Materials & Design, 2016, 112: 172-183.
- [6] 刘翔. 基于 3D 打印的负泊松比结构零件机械性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 26-28.
LIU Xiang. Research on Mechanical Properties of Negative Poisson's Ratio Structural Parts Based on 3D Printing[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 26-28.
- [7] 张亚男. 连续芳纶纤维增强 TPU 复合材料蜂窝结构设计及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019: 14-17.
ZHANG Ya-nan. Study on the Design and Properties of Honeycomb Structure of Continuous PPTA Fiber Reinforced TPU Composites[D]. Jinan: Shandong University, 2019: 14-17.
- [8] Ge chang-feng, Lakshmi p, Denis c, et al. A Preliminary Study of Cushion Properties of a 3D Printed Thermoplastic Polyurethane Kelvin Foam[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(5): 361-368.
- [9] KAOUAO S A, BOUTALEB S, DAHMOUN D, et al. Numerical Modelling of Open-Cell Metal Foam with Kelvin Cell[J]. Computational and Applied Mathematics, 2016, 35(3): 977-985.
- [10] 阮班超. 基于 3D 打印的多孔结构吸能特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019: 30-38.
RUAN Ban-chao. Study on Energy Absorption Characteristics of Porous Structure Based on 3D Printing[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019: 30-38.
- [11] HAWRELIAK J A, LIND J, MADDOX B, et al. Dynamic Behavior of Engineered Lattice Materials[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1-7.
- [12] OH S, OH J, KIM N. Ultrasonic Measurement of Elastic Modulus of Kelvin Foam[C]// MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016, 43: 01005.
- [13] 鲁埝坤. 开尔文结构缓冲力学性能分析[D]. 广州: 暨南大学, 2017: 8-40.
LU Nian-kun. Cushioning and Mechanical Properties Analysis of Kelvin Structure[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017: 8-40.
- [14] 卢子兴, 张家雷, 陈鑫. 低密度开孔弹性泡沫材料的非线性拉伸本构关系[J]. 机械强度, 2010, 32(3): 410-414.
LU Zi-xing, ZHANG Jia-lei, CHEN Xin. Nonlinear Tensile Constitutive Relation of open-Cell Elastic Foams with Low Density[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(3): 410-414.
- [15] 卢子兴, 黄纪翔, 陈鑫. 各向异性开孔弹性泡沫的压缩大变形分析与模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(9): 1083-1089.
LU Zi-xing, HUANG Ji-xiang, CHEN Xin. Analysis and Simulation of Large Compression Deformation of Anisotropic Open-Cell Elastic Foam[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2010, 40(9): 1083-1089.
- [16] HABIB F N, IOVENITTI P, MASOOD S H, et al. In-Plane Energy Absorption Evaluation of 3D Printed Polymeric Honeycombs[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2017, 12(2): 117-131.
- [17] 王军. 蜂窝纸板承载/缓冲机理及其性能表征[D]. 无锡: 江南大学, 2011: 21-23.
WANG Jun. Research on the Bearing/Cushioning Mechanism and Performance Characterization of Honeycomb Paperboards[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011: 21-23.