

跌倒防护用高吸能超材料研发

钟伟琦 姜通驰 陶智志 高彦涛*

上海工程技术大学, 上海 201620

摘要: 针对当前老年跌倒防护服装厚重、影响行动且吸能防护效果有限的问题, 本研究以高吸能超材料研发为核心, 设计并制备适用于跌倒防护的 3D 结构负泊松比超材料。通过熔融沉积技术 (FDM) 以 TPU 为原料打印弧形结构、手性结构等负泊松比胞元模型和格栅结构模型, 结合冲击性能测试, 分析模型的吸能特性与力学性能, 验证实验结果。研究表明, 所设计的 3D 负泊松比超材料在轻量化前提下, 具备优异的低速冲击吸能能力, 为老年跌倒防护服装的研发提供了新型材料解决方案, 有望解决传统防护服装的痛点, 提升老年人日常活动的安全性与舒适性。

关键词: 高吸能超材料; 负泊松比; 跌倒防护; 3D 打印; TPU 材料

引言

(1) 研究背景

人口老龄化是当前我国社会发展面临的重要趋势, 老年人群的健康与安全问题日益受到广泛关注。根据民政部、全国老龄办《2023 年度国家老龄事业发展公报》数据, 截至 2023 年末, 全国 60 周岁及以上老年人口达 29697 万人, 占总人口的 21.1%, 较 2013 年的 14.9% 呈逐年递增态势^[1]。随着年龄增长, 老年人机体功能逐渐衰退, 骨骼密度降低、平衡能力减弱, 导致跌倒事件频发。《中华流行病学杂志》的研究调查显示, 2015-2018 年间我国有超过 20 万老年人发生跌倒事故, 跌倒是我国 65 岁及以上老年人因伤害死亡的首位原因, 同时也是导致老年人创伤性骨折及前往医疗机构就诊的首要原因^[2]。

为降低跌倒对老年人的伤害, 防护服装成为重要防护手段。传统防护服装多聚焦于高强耐磨等基础性能, 但在抗冲击防护方面存在明显不足——为达到一定防护效果, 服装往往设计得厚重笨重, 不仅影响老年人的穿着体感, 更会限制其行动能力, 反而间接增加了跌倒概率^[3]。因此, 研发兼具轻量化、高吸能与良好舒适性的新型防护材料, 成为解决老年跌倒防护问题的关键需求。

(2) 研究现状

超材料作为人工设计的具有特殊结构与性能的材料, 因天然材料无法具备的优异物理特性, 在防护、航空航天、半导体等领域展现出广阔应用前景^[4]。其中, 负泊松比材料凭借轻质、高阻尼、吸声、隔热等特性, 成为功能材料领域

的研究热点, 其在冲击能量吸收方面的优势, 为防护材料的创新提供了新思路^[4]。

近年来, 学者们围绕超材料的结构设计与性能优化展开大量研究。林华刚等 (2025) 提出一种负泊松比手性超材料结构, 通过将弧形结构与手性结构结合, 显著提升了材料的承载能力与抗冲击性能, 同时实现了低宽频弹性波带隙, 在带隙范围内振动传递损失, 为低宽频振动抑制与冲击防护提供了新方案^[5]。徐时吟等 (2013) 对六韧带手性结构的能带特性进行参数化分析, 发现结构尺寸与填充物对带隙特性存在显著影响^[6]。然而, 现有研究多集中于超材料在航空航天减振、高频冲击防护等领域的应用, 针对老年人跌倒场景的低速冲击防护需求, 结合服装轻量化、可穿戴性的 3D 负泊松比超材料研究仍较为匮乏, 且超材料与服装面料的复合适配性研究也有待进一步深入。

本论文聚焦 3D 负泊松比超材料在老年跌倒防护领域的应用空白, 企图解决传统防护服装“厚重-防护-舒适”的矛盾。采用 3D 打印技术制备弧型结构、手性结构等负泊松比胞元, 选用无毒可降解、回弹性能优异的 TPU 材料, 在保证高吸能特性的同时, 实现材料轻量化与良好柔韧性, 以满足跌倒防护服装材料需求;

1 实验部分

1.1 实验材料与设备

1.1.1 实验材料

本研究选用热塑性聚氨酯 (TPU) 作为 3D 打印原料, 该材料具备良好的成型性能、缓慢的回弹性能与无毒可降解

特性，符合防护服对材料安全性与舒适性的要求。

1.1.2 实验设备

(1)3D 打印设备：选用 Bambu Lab A1 mini 打印机，喷嘴最高温度为 300 摄氏度，标准配置喷嘴直径是 0.4 毫米，也可选 0.2 毫米、0.6 毫米、0.8 毫米口径的喷嘴。打印平台最高温度能达到 80 摄氏度；

(2) 顶破性能测试设备：弹子式顶破强力机，进行顶破过程的数值模拟，分析应力分布与能量吸收规律。

1.1.3 性能测试方法与条件

(1). 测试前准备：开机预热弹子式顶破强力机，检查弹子垂直度、夹具牢固性；定期校准力传感器，确保测试精度。

(2). 测试参数设置：参照材料测试标准，设定顶破速度为 500mm/min。

(3). 测试操作：将 3D 打印的超材料模型（50mm×50mm×10mm）固定于夹具，启动设备进行顶破测试，通过力传感器记录力值与伸长量数据，生成力-伸长量曲线。

1.2 超材料模型设计与制备

1.2.1 模型设计

参考负泊松比材料的结构特性，设计两种核心胞元结构以及简单的规则对称单元的立方体：

如图 1(a) 弧形结构：厚度为 t_2 、四边圆弧半径为 R_2 （圆心与手性结构中心圆心距离为 L ）、四角为半径 R_3 的 1/4 圆；^[7]

如图 1(b) 手性结构：厚度为 t_1 、韧带夹角为 α 、中心圆半径为 R_1 、四角为半径 r 的 1/4 圆；

如图 1(c) 格栅组织，简单的规则对称单元的立方体

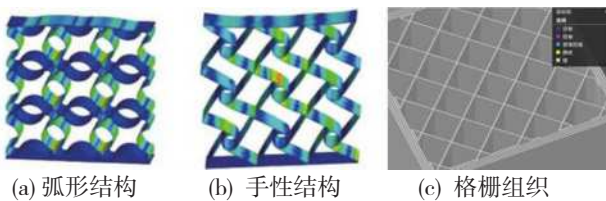


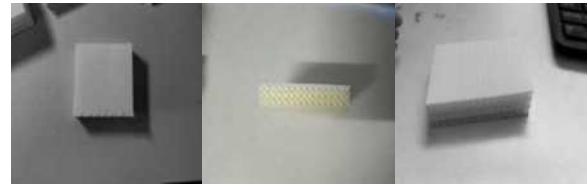
图 1 弧形结构、手性结构、格栅组

采用 SolidWorks 软件构建两种结构的数字模型，导出为 STL 格式，导入 3D 打印机切片软件 Bambu Studio 进行切片处理，设置层厚 0.2mm，填充率 80%。

1.2.2 模型制备

将 TPU 线材装入 3D 打印机，按照预设参数进行

打印，打印完成后去除支撑结构，得到三种种胞元的 3D 实体模型，分别为图 2.2.2 弧形结构小样（尺寸：100mm×50mm×10mm）、手性结构小样（尺寸：50mm×50mm×10mm）、格栅结构小样（尺寸：50mm×50mm×10mm）。



(a) 弧形结构小样 (b) 手性结构小样 (c) 格栅结构小样

图 2 弧形结构小样、手性结构小样、格栅结构小样

2 结果与讨论

如图 3 三种结构的力-位移曲线对比

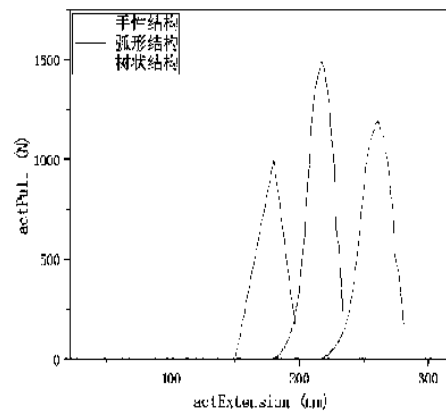


图 3 三种结构的力-位移曲线对比

2.1 防护材料的对比

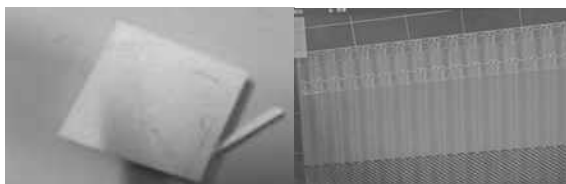
实验结果表明，在相同载荷条件下，弧形结构与手性结构的力学响应存在显著差异：弧形结构的最大应力与最大变形均大于手性结构，且临界屈曲载荷更低；从作用机制来看，弧形结构主要依靠孔洞壁面单向承载，冲击过程中易在孔洞中心形成应力集中，孔洞的“挤压-塌陷”形变呈现非均匀特征，屈曲后残余承载力大幅下降，稳定性较弱。而手性结构通过韧带绕中心圆的旋转变形，能将垂直冲击载荷转化为水平方向的剪切力，实现应力多向分散，同时中心圆的刚性支撑形成“抗屈曲网格”，结合负泊松比效应进一步抑制局部过度变形，不仅抗冲击时的最大应力和变形更小，临界屈曲载荷也更高，屈曲后仍能保持较高的残余承载力，在抗载荷断裂、抗压痕方面表现更优，更适配对冲击防护与结构耐久性有要求的工程场景。

2.2 模型形变与损伤分析

三种在测试过程总发生的形变与损伤情况存在显著差异:

2.2.1 弧形结构

如图 4(a) 弧形结构破损实物 ,(b) 弧形结构三维切片, 在弹子式顶破测试全过程中, 其形变与损伤呈现“渐进式孔洞失效”特征: 受弹子垂直冲击载荷作用时, 结构内部由弧形单元围合形成的周期性孔洞首先发生弹性挤压形变, 孔洞壁面沿冲击方向产生弯曲变形, 通过材料的弹性应变能初步吸收冲击能量。通过孔洞空间的压缩变形延长冲击作用时间, 将冲击动能转化为材料塑性形变能; 但受限与弧形单元的单向承载特性, 孔洞壁面易因局部应力集中出现开裂, 导致能量吸收效率受限, 且整体形变协调性较差。



(a) 弧形结构破损实物 (b) 弧形结构三维切片

图 4 弧形结构破损实物, 弧形结构三维切片

2.2.2 手性结构

如图 5(a) 手性结构破损实物 ,(b) 手性结构三维切片

冲击载荷作用下, 手性结构的韧带绕中心圆产生微小旋转变形, 中心圆通过刚性支撑传递载荷, 此时结构整体应力分布均匀, 无明显应力集中区域;

塑性卸力阶段: 当载荷超过屈服应力后, 韧带旋转角度增大, 带动结构向两侧发生滑移卸力, 通过韧带的剪切形变与拉伸形变分散冲击载荷, 实现“冲击能量向多方向耗散”

断裂失效阶段: 随着载荷持续增加, 韧带与中心圆连接处出现塑性屈服, 最终以“韧带拉伸撕裂”形式失效, 损伤沿韧带均匀分布, 无局部突发性断裂, 且断裂前的塑性形变历程较长, 能量吸收充分。

该结构的优势在于“韧带旋转 - 中心圆支撑”的协同作用: 通过降低结构对称性实现各向异性力学响应, 将垂直冲击载荷转化为水平方向的滑移力, 有效减小冲击面的局部应力与变形, 临承载稳定性与抗失效能力显著更优。



(a) 手性结构破损实物 (b) 手性结构三维切片

图 5 手性结构破损实物, 手性结构三维切片

2.2.3 格栅结构

如图 6(a) 格栅结构破损实物图, (b) 格栅结构三维切片

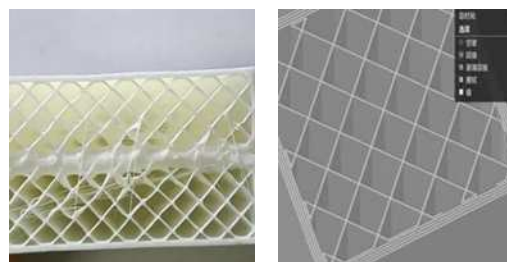
阶段 1: 无承载形变, 冲击初始阶段, 格栅结构的立方体单元连接节点(棱边)因应力集中瞬间屈服——因对称结构无法分散冲击能量, 节点处应力远超材料屈服强度, 结构开始无承载变形。

阶段 2: 瞬间断裂, 立方体单元的连接节点发生脆性断裂: 棱边断裂后, 单元间失去连接, 结构解体为多个小立方体, 无整体承载能力, 形变量随冲击持续增大(断裂后的单元自由位移)。

阶段 3: 自由变形, 结构完全解体, 仅剩破碎的立方体单元, actExtension 增大仅为单元的自由堆积或位移, 无任何承载或耗能作用, 测试后期, 结构已完全失去完整性。

损伤情况

格栅结构的损伤为毁灭性脆性破坏, 是三种结构中最严重的, 损伤程度: 重度至毁灭性, 属于脆性断裂(无塑性变形缓冲), 冲击后无法修复, 无任何剩余承载能力。



(a) 格栅结构破损实物图 (b) 格栅结构三维切片

图 6 格栅结构破损实物图, 格栅结构三维切片

2.3 总结对比

2.3.1 弧形结构: 高承载能力突出

弧形结构的核心抗冲击优势是能承受更大外力, 是三种结构中“抗冲击力上限”最高的。

最大承载达 1572.86N, 为三者中最高, 意味着面对强冲击时, 能抵御更大的拉力或冲击力而不立即失效。

虽损伤程度为“中度(局部塑性)”, 但在需要优先保

证“扛住大力”的场景中，其高承载能力是核心价值。

2.3.2 手性结构：抗变形与低损伤兼顾

手性结构的优势集中在“变形能力强”且“损伤程度轻”，适合需要通过变形吸收冲击能量的场景。

最大形变量达 265.90mm，为三者中最大，可通过“韧带扭转 + 中心圆位移”的形变机制，有效吸收冲击能量，减少冲击对整体的破坏。

损伤程度仅为“轻度（弹性扭转）”，说明冲击后不易产生永久性损伤，甚至可能恢复，抗冲击后的“耐用性”和“恢复性”更优。

2.3.3 格栅结构：无明显抗冲击优势

格栅结构的各项关键指标均处于劣势，抗冲击性能最弱，无突出优势。

最大承载（986.54N）为三者最低，意味着承受冲击的能力最弱。

损伤程度为“毁灭性（解体）”，一旦遭遇冲击，极易发生节点脆性断裂并导致整体解体，抗冲击安全性和稳定性最差。

3 材料抗冲击测试对比

三种结构材料抗冲击性能如表 1 所示。

表 1 三种结构抗冲击测试数据对比

结构类型	形变核心机制	最大承载 (N)	最大形变量 (mm)	损伤程度
弧形结构	圆弧韧带弯曲	1572.86	218.08	中度(局部塑性)
手性结构	韧带扭转 + 中心圆位移	1187.46	265.90	轻度(弹性扭转)
格栅结构	节点脆性断裂	986.54	184.37	毁灭性(解体)

(1) 弧形结构

性能：如表 1，弧形结构承载能力最高（1572.86 N），形变量居中（218.08 mm），说明它在变形过程中既保持了较高的强度，也有不错的延展性。

形变机制：圆弧韧带弯曲，属于比较均匀的弹性 / 塑性弯曲变形，应力分布相对均匀，能承受较大载荷。破坏实物图如图 7。

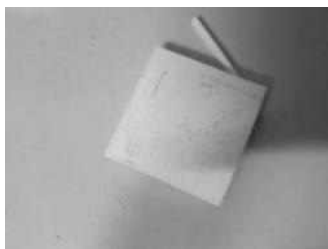


图 7 弧形结构破坏实物图

(2) 手性结构

性能：如表 1，手性结构承载能力居中（1187.46 N），但形变量最大（265.90 mm），说明它更“柔”，吸能特性可能更好，但强度低于弧形结构。

形变机制：韧带扭转 + 中心圆位移，这是一种通过旋转和位移吸收能量的方式，通常能够实现较大变形而不立刻破坏。破坏实物图如图 8



图 8 手性结构破坏实物图

(3) 格栅结构

性能：如表 1，格栅结构承载能力最低（986.54 N），形变量也最小（184.37 mm），说明其延性差，破坏突然。

形变机制：节点脆性断裂，一旦节点破坏，结构迅速失去承载能力。破坏实物图如图 9



图 9 格栅结构破坏实物图

数据对比与规律

承载能力排序：

弧形 > 手性 > 格栅形变量排序：

手性 > 弧形 > 格栅

规律：

形变机制决定力学性能：

弧形结构：能兼顾较高承载与较大变形。

手性结构：会降低刚度与强度，但允许更大的变形。

格栅结构：导致承载和形变能力都最差。

结论：

弧形结构：在承载和形变上较为均衡，综合性能最优。

手性结构：以牺牲部分强度为代价，获得最大的变形能力，适合大变形应用。

格栅结构：脆性破坏，承载与形变能力均较差。

综上，本研究的 3D 负泊松比超材料在轻量化前提下，吸敏性能显著优于传统防护材料，能够有效解决传统防护服装“厚重 - 吸能”的矛盾，具备应用于老年跌倒防护服装的潜力

4 结论

本研究以老年跌倒防护需求为导向，设计并制备了弧形结构和手性结构两种 3D 负泊松比超材料以及普通的格栅结构，通过冲击性能测试，系统分析了三种结构的吸能特性与力学性能，得出以下结论：

本研究为 3D 负泊松比超材料在防护领域的应用提供了实验依据与理论支撑，下一步可通过服装原型制备与实际穿着测试，推动该材料的产业化应用，为提升老年人群的生活安全与质量贡献力量。

参考文献

[1] 民政部、全国老龄办 .2023 年度国家老龄事业发展

公报 [Z].2024.

[2] 郝石盟,汪靓,郭文博.建成环境中老年人跌倒风险因素的研究现状与趋势综述 [J].世界建筑,2023(11):96-103.

[3] 许静.经济新常态下中国人口发展态势和健康状况研究 [J].中国软科学,2019(S01):8.

[4] 李思明,胡雨洁,方镁淇,等.具有形状记忆功能的负泊松比结构材料的研究进展 [J].服装学报,2020,5(4):10.

[5] 林华刚,张成旭,宋海征,等.一种具有承载和抗冲击的手性超结构带隙特性与减振性能研究 [J].航空科学技术,2025,36(03):20-30.

[6] 徐时吟,黄修长,华宏星.六韧带手性结构的能带特性 [J].上海交通大学学报,2013,47(2):167-172.

[7] 林华刚,张成旭,宋海征,等.一种具有承载和抗冲击的手性超结构带隙特性与减振性能研究 [J].航空科学技术,2025,36(03):20-30.

作者简介：钟伟琦（2003—），男，汉族，本科。

通讯作者：高彦涛（1984—），男，汉族，博士，研究方向：先进复合材料。