

具负泊松比特性的可展吸能单元结构优化设计

范春禹

沈阳建筑大学土木工程学院

DOI:10.12238/pe.v3i5.16596

[摘要] 具负泊松比特性的结构因其横向膨胀特性,在吸能与缓冲领域展现出显著优势。本研究基于可展几何单元,构建出一种质量轻、效果好且具有优异变形协调性的吸能结构。通过几何设计与物性实验设计一个兼具多重目标的设计策略来平衡吸能结构的吸能耗散效应、形态稳定以及重量约束;并运用有限元模拟分析不同拓扑因素设计下的物理反应特性。实验发现,通过优化设计后,结构受压时呈现出稳压区域及高比吸能能力,有望被应用到实际工程当中。该设计可为汽车防撞系统、航空航天缓冲及智能防护领域的吸能构件开发提供结构创新思路。

[关键词] 负泊松比; 吸能结构; 多目标优化; 数值仿真

中图分类号: F121.3 文献标识码: A

Optimal design of expandable energy-absorbing unit structure with negative Poisson's ratio characteristics

Chunyu Fan

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University

[Abstract] Structures with negative Poisson's ratio characteristics exhibit significant advantages in energy absorption and buffering due to their lateral expansion properties. Based on developable geometric elements, this study constructs an energy-absorbing structure that is lightweight, highly effective and has excellent deformation coordination. Through geometric design and physical property experiments, a design strategy with multiple objectives is designed to balance the energy absorption and dissipation effect, morphological stability, and weight constraints of the energy-absorbing structure. And the physical reaction characteristics under different topological factor designs were analyzed by using finite element simulation. Experiments have found that after optimized design, the structure exhibits a pressure-stabilizing area and a high specific energy absorption capacity under pressure, which is expected to be applied in practical engineering. This design can provide structural innovation ideas for the development of energy-absorbing components in the fields of automotive anti-collision systems, aerospace buffering and intelligent protection.

[Key words] Negative Poisson's ratio Energy-absorbing structure Multi-objective optimization Numerical simulation

引言

具负泊松比的结构在受载时会发生横向膨胀,比常规建造方式能源消耗和抗震性能都具有优势,已引起了交通、航空、防御等方向的关注。近年来,由于拓扑优化和智能材料的研发,这种新结构的设计正逐渐从传统经验设计进入模拟驱动的多目标优化阶段。如何以控制结构性能为条件适度优化结构反应,成为当前研究热点。为满足实际工程要求,本研究集中于几何、材料、吸能性能的优化,以期获得一种符合力学性能且能在实际工程环境下使用的创新型可展吸能单元。

1 负泊松比结构在力学响应中的独特优势

与传统多胞材料(正泊松比)不同,负泊松比(negative Poisson's ratio, NPR)多胞材料在单向拉伸作用下,会发生侧向膨胀。这种独特的拉胀现象使负泊松比多胞材料表现出更优异的力学性能,比如,良好的应力扩散效应,极低的体积模量,极高的剪切模量和能量吸收能力等。

这一特性在结构受压、冲击缓冲及吸能防护等工况中尤为突出。当外部载荷作用时,结构的横向膨胀不仅能有效分散集中应力,还能延缓局部屈曲和失稳的发生,使整体受力更加均匀稳定。与传统结构相比,其应力反应在平台区域较为平稳,具有较快的吸能速率,有助于等重量时提供更好的防护能力。^[1]该类构

件经过反复循环加载之后仍具有较高的恢复能力和耐磨损能力,能够在减轻重量的同时具备较强的吸能和高韧性,具有较大的工程应用价值。

2 吸能结构建模与优化设计

2.1 几何建模与材料建模

吸能结构的建模质量直接影响其在冲击和压缩工况下的力学响应与工程适用性。本研究基于负泊松比,将旋转多边形、六边形、正多面体以及星型元素等具有张开性质的构造形式建立成可以由变量参数决定的几何模型。设定几何变量,如单元边长、旋转角度、肋高、孔隙率、单元位置策略等,通过对几何模型的变量改变、调节,从而对整个吸能结构的刚性、耗能效率和变形结构进行控制。为了增加设计的灵活性和普适性,将在设计前期通过对几何模型用参数化的方式进行创建,这样完成最初设计后可以直接进入优化流程,从而帮助实现复杂吸能结构的快速更新循环和自动化设计。^[2]

基于吸能元件的使用背景,分析不同载荷、不同冲击环境,并对模型中的金属材料和复合高分子材料进行弹塑性模型和超弹性模型的建模;采用双线性强化本构模拟金属材料在从刚性到塑性过渡过程中材料强度及屈服前后的塑性流动特性;采用描述大变形材料软化的超弹性本构模型模拟复合高分子材料的能量吸收特性;弹性模量、泊松比、屈服压强、流变屈服因子、密度依据工况实测参数赋值,并考虑材料应变率对吸能特性的影响。

边界条件方面,采用了刚性压力板加载、底部约束和节点间接触链接,以分别表示准静态压缩和冲击时的频率加载和限制情况,确保模型对应结构的受力过程符合实际。在此基础上,对几何构造、材料构造两部分进行有机结合,有利于更准确描述结构形变特征和能量消耗机理,具有一定的灵活性和扩展性,为后续的多目标优化与数值仿真提供坚实的基础支撑。

2.2 多目标优化设计策略

通过优化负泊松比吸能结构的设计,以满足高效能量吸收及减轻质量、结构稳定性、易加工生产等多方面的要求。将比吸收功、最大冲击荷载、结构质量以及应力分布的合理性作为主要的性能准则,结构变量包括几何形态、角度、肋板厚度、空腔大小和材料属性等。^[3]使用参数敏感性分析确定关键参数,以针对性地减少设计搜索空间,提高优化效率。

在优化算法的选择上,采取将遗传算法和响应面法相结合的混合优化法来确定最适合的优化算法,遗传算法具备全域搜索的能力,可在复杂非线性设计空间中找到最优解;利用响应面法以有限元计算结果构建性能预测模型,可以极大地降低计算开销并加快收敛速度,且设计中加入一些约束条件如最大结构变形值、平台最大压力范围、生产上的可行性、拓扑稳定性的要求,以确保设计的结果满足性能要求和具有可操作性。

通过Paretofront对所得最优结果进行综合测试,清楚直观地展现了各性能指标之间的相互关联和对偶关系,可根据各性

能指标的不同需要,对性能进行优选。最终测试结果表明,该优化方案可较好地实现吸能效果、结构重量、形变稳定性之间的协调,在严酷冲击环境下具有较高的耗能率和稳定的应力应变状态。^[4]这一基于性能限制条件同时也兼顾设计实际的优化设计理念,更具有导向性和实用性。

2.3 数值仿真与性能分析

有限元数值计算是检测吸能结构设计有效性的手段之一,也是优化设计的重要环节。研究中以有限元数值模拟为手段建立几何构型与材料特性关系数据库,并采用显式动力学计算方法模拟吸能结构的准静态压入与动载撞击工况。试验测试工况设定典型边界条件:恒压和冲击载荷两种形式。同时分别开展不同压力及撞击程度研究,得出其对物理反应及耗能效果的影响关系。观测变量选取应力应变曲线、耗能曲线、峰值冲击力、形变特性、单元破坏特征等。

仿真结果显示,负泊松比的蜂窝吸能结构能够获得大、稳定、持续的平台压力区域来实现对力的均布和平稳变形,其纵向扩张特性有效减缓部分不稳定现象和破坏现象的产生,从而提高了整体的吸能率。相比正泊松比结构,同等质量条件下的负泊松比结构的吸能增量更加明显,冲击水平有所降低,对于保护被碰撞物体的完整性和提高其安全性水平是有益的。比较不同结构形式,其中旋转型蜂窝子单元在减轻重量和保持稳定性方面表现较好,具有良好的吸能特性、平滑的变形特性及屈曲控制性,可适用于汽车防护栏杆、航空航天防护等典型吸能结构。

为了验证改进模型的效果,进行了改进前改进后的模拟对比,可以发现经过改进后结构的抗震性能大约提高了20%~35%,破坏峰值力下降超过15%,而更为稳定的形变曲线使毁坏分布更加均匀,并且平台长度与毁坏耗能速率也明显有所增加。以上结果验证了模型的建立以及优化方式的有效性与实用性,并为进一步研究多尺度设计以及在工程应用提供了数据基础。

3 工程应用场景与发展展望

3.1 工程应用场景拓展

具负泊松比特性的吸能结构在横向膨胀、能量分散和平台区延展方面具有显著优势,在遭受冲击载荷时能够释放能量、加固结构,符合车类制造、航空航天、防护装备、防灾减震等领域应用与创新需求。采用合理的拓扑组合与几何形状,能够实现重量轻、吸能量大、结构稳定的目标。

3.1.1 白车身防撞结构

在车辆碰撞过程中,白车身结构是最关键的冲击吸能载体。传统结构容易造成集中受力导致某些部位弯折或者断裂;而负泊松比特结构具有负泊松比特在受压的同时产生横向扩张、加大受力面的作用,延缓失效过程。这种特性能够保持稳定的应力水平,有利于提高吸收能量及减少最大冲击力峰值的产生。结合车身各部位设置差异的参数,可以实现防撞梁的高吸能与门板的高稳定协同,使车舱变形减小,有效提升乘员安全性。

表1 不同吸能结构在白车身防撞中的性能对比

结构类型	吸能方式	峰值冲击力(kN)	比吸能(J/g)	变形稳定性	质量变化
波纹梁结构	塑性塌缩	42.6	0.85	一般	基准
泡沫芯材结构	压溃吸能	38.1	0.9	一般	增加5%
负泊松比结构	横向膨胀	29.5	1.12	良好	增加3%

由表1可见,负泊松比结构在峰值冲击力和比吸能方面均优于传统结构,能够在不显著增加重量的情况下提升车身防护性能。

3.1.2 飞行器缓冲与吸能构件

飞行器着陆时冲击载荷将大为增加,对减震结构的能量吸收和形变平稳均有较高要求。负泊松比构型有助于形成稳定的平台应力面,增加接触面宽度以降低局部最大冲击应力,并增加系统运行平衡性。负泊松比材料结构基于多种模块划分布局可用于飞机起落架、座椅缓冲垫及机身对接,提升了装置的柔韧性和轻量化,使其能够有效适应复杂冲击载荷环境。

表2 飞行器缓冲结构性能对比

结构类型	吸能方式	峰值冲击力(kN)	吸能效率(%)	平台区长度(mm)	质量
铝蜂窝结构	塌缩吸能	54.2	68.5	11.2	基准
复合泡沫结构	压溃吸能	48.7	74.3	14.6	增加8%
负泊松比结构	横向膨胀	36.5	87.1	19.8	增加5%

从表2可见,负泊松比结构在吸能效率和平台区延展性方面表现最佳,特别适用于高冲击载荷下的轻量缓冲构件设计。

3.1.3 智能可展开护具、防灾减震装置等领域应用可能性分析

负泊松比结构另一个优点是良好的应变性能与变形性能,使其可以用于智能防护与地震后应力缓解等方面的发展机遇。例如,在个人防护设备(如消防员消防服、运动员装备、工人防护膝盖、头盔等)中,可伸缩部件可以在遇到冲击的瞬间产生径向膨胀来加强包裹、吸收冲击,并依旧保持较高的柔韧性。地震、山体滑坡等突发事件中,运动防护设备常常要求在最短的时间内到达和开展,在此情况下,用负泊松比设计可制备出轻薄与可折叠模块化的防护箱或碰撞垫等,既可以紧凑折叠方便运输和贮存,也可以在使用的时候迅速展开作为有效的防护和应力缓解层。随着智能材料技术的发展,此结构还可结合传感器和执行器,发展出一种具备自我调节能力的“主动防护”系统,能在突发事件来临时自动开启并定位。

3.2 存在问题与后续研究方向

3.2.1 结构复杂度与制造成本控制问题

尽管性能良好但其特异的几何结构及单元连接手段使其制

造费用较高,在大面积应用方面传统制造方法难以达到高度精密度和高效化的要求。后期制造上可考虑运用添加制造、整体模具成型、自动接装等方法降低制作难度和成本,实现大规模工业生产;同时对于零部件模块可做标准化设计,降低定制的零件数量,提高组装速度。

3.2.2 模型可扩展性与多尺度优化潜力

现有负泊松比结构的设计大多集中在单一尺度或单一载荷情境下,扩展性和多参数作用耦合方面能力不足。现实中工程中的建筑结构却经常需要适应诸如冲击、温度、湿度及疲劳等不同类型的复杂工况条件。有必要建立一种具有同时适应各种规模和不同物理场的结构设计和优化平台,通过拓扑优化、参数优化和材料优化的结合在多个水平上达到对结构功能行为的调整控制目的。

3.2.3 融合智能材料提升结构响应主动性

目前绝大部分负泊松比吸能结构仍停留在“被动防御”的状态,只能在撞击后产生相应的物理效应。随着智能材料和主动传感技术的发展,将这两种技术结合到负泊松比结构后,可使其具备“主动反应”和“主动吸能”功能,在撞点前获取周围环境信息,根据材料弹性模量或形状的变化提前开启吸能保护装置以提升防护效果的时间效率和能源利用效率。这将为交通安全、防灾减震和航空航天装备提供更加智能化的防护体系。

4 结语

负泊松比吸能结构凭借横向膨胀、能量分散和平台区延展等力学特性,在车辆安全减震、航空航天减压、军事防御与装备、灾害防治等领域得以广泛运用。其优异的比吸收能力和相对应的规律变化结构特性在强度冲击条件下拥有传统结构无法实现的多维化功用。随着制造工艺的进步以及更多优化规模运用,结构的复杂性和成本问题将有望得到改善。未来,将智能材料与该类结构结合,实现自动反应自我调节保护,将拓宽更多的工程应用范围,对于高安全性可靠设备发展具有重要的支撑作用。

参考文献

- [1] 王伟婧,张伟明,郭孟甫,等.内凹-星型三维负泊松比结构设计及冲击吸能特性[J].振动与冲击,2024,43(6):75-83.
- [2] 吴文旺,肖登宝,孟嘉旭,等.负泊松比结构力学设计,抗冲击性能及在车辆工程应用与展望[J].力学学报,2021,53(3):28.
- [3] 胡启华,聂瑞,张超,等.可调负泊松比蜂窝结构在变面积机翼上的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(8):24-33.
- [4] 曾家琛,宋燕平,黄鹏飞.负泊松比手性结构圆薄板的参数设计[J].空间电子技术,2024(001):021.

作者简介:

范春禹(2001--),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生在读,研究方向:折纸超材料。