

基于曲面力学超材料的吸能减振设计

刘佳佳^{1,2}, 张军舰³, 龚林辉², 高利军², 廖国良³, 王永桢⁴, 曾庆磊³

(1. 西北工业大学 无人系统技术研究院, 陕西 西安 710072; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 3. 北京理工大学 先进结构技术研究院, 北京 100081; 4. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 爆炸冲击载荷严重威胁了国防和工业装备的服役安全, 吸能缓冲材料可有效降低冲击引起的结构振动和破坏。泡沫铝等传统吸能材料力学性能较为单一, 设计域大小有限, 亟需发展新型吸能缓冲材料。基于冲击响应数值模型, 系统研究了冲击过程中多孔材料的吸能机理, 表明吸能材料强度适中时才能发挥较好的缓冲减振效果; 为了实现吸能材料的定制化设计, 进一步基于机器学习和遗传算法设计了具有不同吸能特性的曲面力学超材料, 并通过仿真结果验证了曲面力学超材料在吸能减振中的有效性。该研究为新型吸能材料和降冲击优化设计提供了重要的技术支撑。

关键词: 吸能; 减振; 多孔材料; 曲面力学超材料

中图分类号: 0344

文献标志码: A

Energy-Absorption and Vibration-Attenuation Design Using Shell-Based Mechanical Metamaterials

LIU Jiajia^{1,2}, ZHANG Junjian³, GONG Linhui², GAO Lijun², LIAO Guoliang³, WANG Yongzhen⁴, ZENG Qinglei³

(1. Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 3. Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Explosion and impact loadings pose a serious threat to the service safety of defense and industrial equipment. Energy-absorbing materials can effectively reduce structural vibration and the damage caused by impact. Traditional energy-absorbing materials, such as aluminum foam, have a relatively limited design space. Therefore, it is urgent to develop new energy-absorbing materials. In this paper, the energy-absorbing mechanism of porous materials

was systematically investigated based on numerical modelling of the impact process. The simulation results indicate that energy-absorbing materials can have a good shock absorption performance only when the strength is appropriate. In order to realize customized design of energy-absorbing materials, shell-based mechanical metamaterials with different energy-absorbing characteristics were designed based on the machine learning and genetic algorithm. The effectiveness of the newly designed metamaterials in energy-absorption and vibration-attenuation was verified through simulation results. This study can provide important technical guidelines for the design and optimization of new energy-absorbing materials.

Keywords: energy absorption; vibration attenuation; porous materials; shell-based mechanical metamaterials

爆炸和冲击载荷广泛存在于国防和工业高端装备的服役过程中, 比如各种飞行器和航天器承受高速碎片冲击、船舶承受水下爆炸, 以及汽车高速碰撞等。为了有效吸收爆炸冲击产生的能量, 降低冲击载荷引起的振动, 需要选择合适的吸能缓冲材料, 提升结构的冲击防护能力, 保障设备服役安全^[1-2]。

常见的吸能缓冲材料包括泡沫等多孔材料, 以及橡胶等聚合物材料。比如王志亮等^[3]基于有限元数值仿真, 研究了不同密度的聚苯乙烯泡沫填充材料在混凝土爆破过程中的吸能减振效果; 朱洪波等^[4]制备了水泥-聚苯乙烯轻质材料, 并测量了其冲击力与冲击能量的吸收能力; Zheng 等^[5]建立了多胞金属材料在冲击载荷作用下动态力学行为的数值模型, 系统研究了多胞金属的率敏感响应; 为了降低爆炸分离后高速螺栓引起的冲击, 张忠凯等^[6]对比分析了泡沫铝、金属橡胶和钢蜂窝等缓冲材料的降

收稿日期: 2023-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(12002050, 12372347)

第一作者: 刘佳佳, 研究员, 主要研究方向为运载器总体设计与优化技术。E-mail: 67994573@qq.com

通信作者: 曾庆磊, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为先进材料和结构动态力学行为。E-mail: qzeng@bit.edu.cn



论文
拓展
介绍

冲击效果,表明泡沫铝的缓冲效果最好,金属橡胶次之,钢蜂窝最差。

上述常用的吸能材料力学性能较为单一,材料设计域大小有限。随着增材制造等先进制造工艺的发展,桁架点阵结构、极小曲面等轻量化力学超材料/超结构近年来得到广泛关注^[7-10]。基于传统材料,通过微结构设计可以在较大范围调控超材料的力学性能,从而为吸能缓冲材料设计提供了有效手段。易建坤等^[11]综述了点阵结构在爆炸冲击作用下的吸能缓冲特性,分析了其变形和失效形式对吸能的影响。同时,深度神经网络等机器学习技术的发展也为力学超材料微结构设计提供了支撑^[12]。比如,Li等^[13]结合深度学习和图像有限元,从样本图像中提取拓扑特征,根据训练后的模型设计了具有预期带隙的声子晶体;Mao等^[14]采用生成式对抗网络设计了弹性模量接近Hashin-Shtrikman上限的具有复杂微结构的材料;Bastek等^[15]结合深度学习和物理约束,实现了具有指定各向异性刚度的点阵结构逆向设计;在前期工作中建立了深度神经网络来预测曲面力学超材料的载荷曲线,并结合遗传算法进行全局优化,设计出具有目标加载曲线的曲面点阵结构^[16]。

为实现吸能缓冲材料的定制化设计,本文基于数值仿真研究了冲击过程中多孔材料的吸能机理,提出了吸能缓冲材料的设计方法;在此基础上结合

前期发展的机器学习和遗传算法,设计了具有不同吸能特性的曲面力学超材料,并验证了其在高速冲击环境中的吸能减振效果,有效拓宽了吸能材料的设计范围。

1 数值模型

本文首先建立了简化的结构冲击响应模型,如图 1a所示,包括冲击块、吸能块和基底结构等。吸能块与冲击块均为圆柱体,具体几何尺寸见图 1b。基底四周采用固支边界,冲击块初始速度设置为 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。基于有限元软件 Abaqus 进行模拟,采用显式动力学分析步,模拟过程总时长为 1 ms。基底结构和冲击块为钢材,吸能块为典型多孔吸能材料(比如泡沫铝)。在有限元模型中,钢材选用线弹性模型,多孔材料选用可压碎泡沫(crushable-foam)模型,相关模型参数如表 1所示。在单轴压缩下,典型多孔吸能材料的宏观等效应力-应变响应可以分为如图 1c所示的三段,即弹性段、平台段与压实段,其中 σ_c 为平台应力, ϵ_d 为压实应变。在吸能减振设计中,一般吸能材料的体积和重量受到约束,因此吸能材料的初始密度(孔隙度)仅能在较小范围内选择。在本文模型中选择固定的初始孔隙度,压实应变为 0.5。

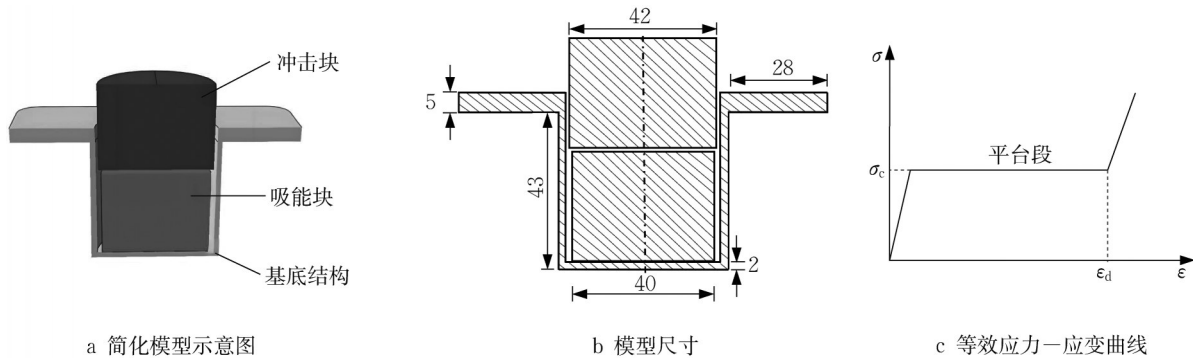


图 1 冲击过程简化数值模型(单位:mm)

Fig. 1 Simplified numerical model for impact process (unit: mm)

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Basic properties of materials in simulation

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/MPa	ν	σ_c/MPa	ϵ_d
多孔材料	0.27	3 000	0	10/15/20/30/50	0.5
钢材	7.83	211 000	0.28		

2 典型多孔材料吸能减振机理分析

为了研究不同强度的多孔材料吸能减振效果,针对图 1c所示的典型多孔材料等效应力应变模型,考虑 5 种不同的平台应力(10、15、20、30、50 MPa)。不同强度的多孔材料吸能块在冲击后的等效塑性应变(PEEQ)分布如图 2所示。图 2a中 P 点为基底结

构中部一特征点。根据吸能块的变形模式,可以将 吸能减振情况分为如下三类:

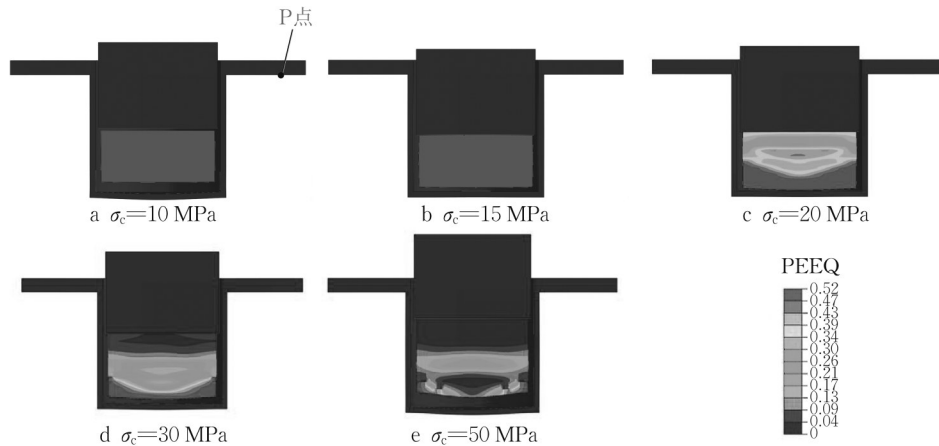


图2 不同强度的吸能块冲击变形后等效塑性应变(PEEQ)分布

Fig. 2 Distribution of equivalent plastic strain(PEEQ) after impacting on energy absorption blocks with different strengths

(1) 当吸能材料的平台应力较低,比如 $\sigma_c=10$ MPa时,吸能材料被完全压实,如图 2a 所示。但是因为材料吸能能力有限,即使充分吸能变形,仍不足以完全吸收冲击块的惯性能。以 $\sigma_c=10$ MPa 为例,系统的能量演化过程如图 3a 所示。初始时刻系统仅包含冲击块的惯性能,随着撞击过程的进行,惯性能逐渐转化为吸能块的塑性能;在 0.4 ms 后,吸能块

达到压实状态,但由于吸能块的平台应力较低,此时系统内有相当一部分惯性能并未被转化为塑性能,而是转化为结构弹性能,从而引起结构振动。提取 P 点沿冲击方向的加速度,加速度演化历程如图 3b 所示,在 0.4 ms 之前的吸能过程中振动较小,但是 0.4 ms 后 P 点加速度迅速增大,说明结构中产生了较大振动。

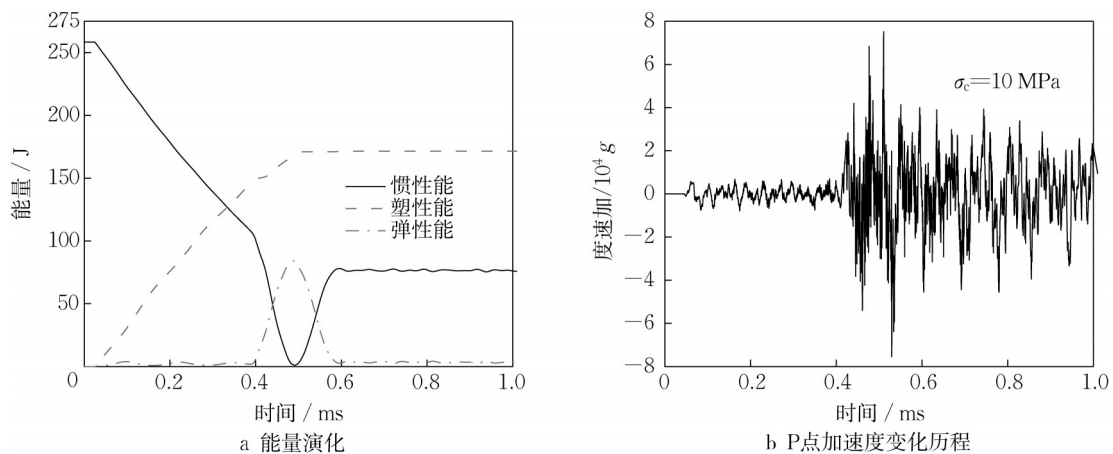


图3 平台应力为 10 MPa 时系统能量和采样点加速度演化图

Fig. 3 Evolutions of energy inside the system and acceleration at Point P at a σ_c of 10 MPa

(2) 当吸能材料的平台应力较高,比如 $\sigma_c=50$ MPa 时,吸能块的吸能能力较强,可以吸收系统大部分惯性能(图 4a),且吸能块仅靠局部的变形吸能即可实现大部分能量吸收(图 2e)。

但是较高的平台应力导致了在整个吸能过程中系统的应力水平一直较高,在吸能阶段(0.25 ms 之

前)产生了比较明显的弹性能,采样点的加速度维持在较高的水平(图 4b)。

(3) 当吸能材料的平台应力适中,比如 $\sigma_c=15\sim 30$ MPa 时,既能保证吸能块可以吸收大部分的惯性能,又能保证系统整体的应力水平不会太高,采样点加速度响应相对较小。该情况下的塑性变形分布如图 2b 至

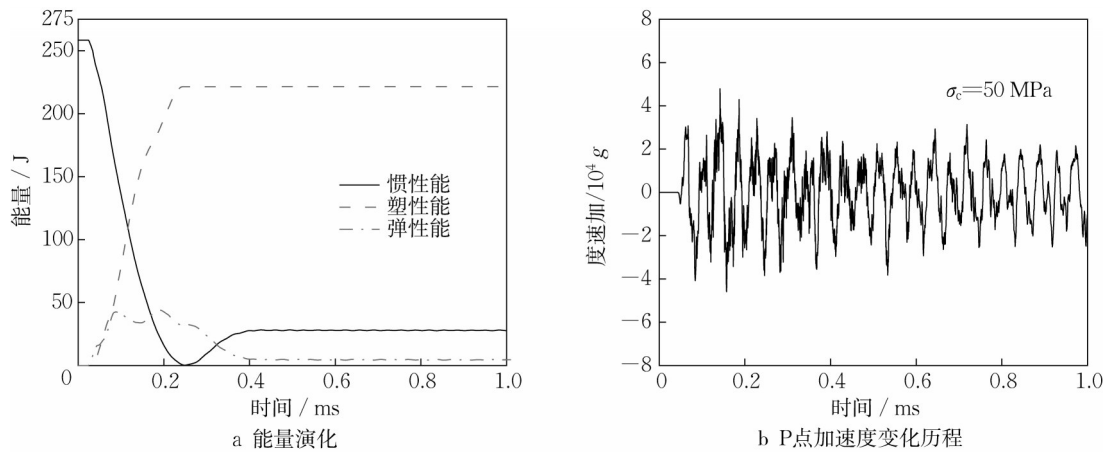


图4 平台应力为50 MPa时的系统能量和采样点加速度演化图

Fig. 4 Evolutions of energy inside the system and acceleration at Point P at a σ_c of 50 MPa

图2d所示,吸能块大部分区域发挥吸能效果。 $\sigma_c=30$ MPa时能量演化如图5a所示,冲击块初始的惯性能大

部分转换为吸能块的塑性变性能,系统弹性能所占比例较小,因此加速度响应也比较小(图5b)。

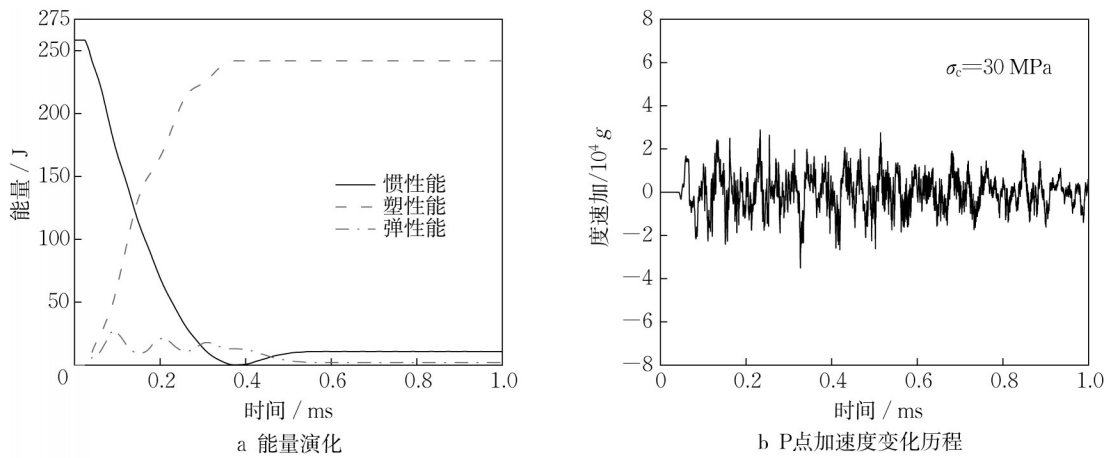


图5 平台应力为30 MPa时的系统能量和采样点加速度演化图

Fig. 5 Evolutions of energy inside the system and acceleration at Point P at a σ_c of 30 MPa

为了进一步展示吸能材料强度对减振效果的影响,模拟了平台应力在2.5~50 MPa之间的多种吸能材料的减振效果,采样点的最大加速度与平台应力的关系如图6所示。整体变化趋势和上述三类吸能模式一致,即吸能材料的平台应力太大或者太小,冲击引起的最大加速度都较大,只有当平台应力适中时,吸能块被完全压实时的塑性耗散与冲击块的惯性能相当时,最大加速度才能维持在较低的水平。

综合以上模拟结果,可以得到以下结论:当多孔材料强度较低(σ_c 较小),吸能能力较差,对冲击块的惯性能吸收不足从而产生较大振动;当多孔材料强度较高(σ_c 较大),大部分惯性能被吸收,但是吸能过程应力水平较高,引起的振动也较大;当多孔材料强度适中,即吸能块被完全压实时的塑性耗散刚好接

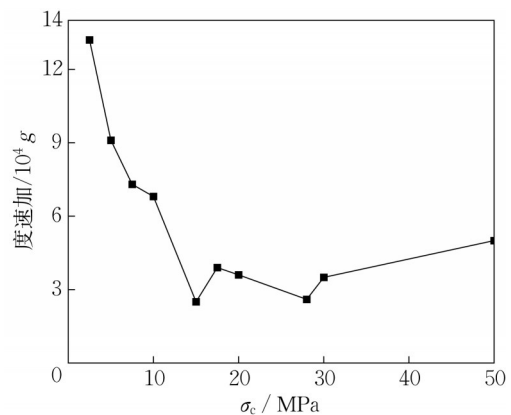


图6 结构加速度峰值随吸能材料平台应力变化

Fig. 6 Peak acceleration for energy absorption materials at different plateau stresses

近冲击块惯性能时,吸能减振效果最好。为了进一步给出吸能材料的选择标准,可以假设吸能块被完全压实时的塑性耗散刚好等于冲击块的惯性能,即:

$$\frac{1}{2}mv^2 \approx V\sigma_c \epsilon_d \quad (1)$$

式中: m 冲击块质量; v 为冲击速度; V 为吸能块体积; ϵ_d 为压实应变。代入相应数值可得吸能材料临界平台应力 $\sigma_c=13.76$ MPa。考虑到吸能块在实际吸能过程中变形并不均匀,部分材料可能无法压实(可参见图2c至图2e),实际需要材料的吸能强度略大于该临界平台应力才能实现较好的吸能效果。

3 曲面力学超材料单胞设计

从第2节仿真结果可以看出,多孔材料的强度对于吸能减振效果具有重要影响。但是吸能材料在一定的体积和密度约束下,通过改变材料加工工艺能够调控的强度范围有限。力学超材料基于金属等常规材料,通过改变组分材料的微观分布来调控力学性能,因此可以针对吸能需求进行定制化设计。前期结合机器学习和遗传算法实现了曲面力学超材料载荷曲线的逆向设计^[16]。压缩载荷曲线决定了材料的吸能能力,从而可以设计具有不同强度的曲面力学超材料满足特定吸能需求。

图7展示的三周期极小曲面结构是典型的曲面力学超材料^[17],包括金刚石型(Diamond)、螺旋型(Gyroid)、I-WP型和简单型(Primitive)等。极小曲面是指平均曲率为零的曲面,其光滑、连续等几何特征使得由极小曲面构成的结构表现出比传统点阵更加优异的力学性能,在冲击防护等领域具有很大的应用潜力。

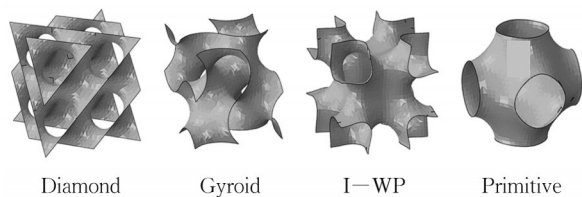


图7 典型三周期极小曲面示例

Fig. 7 Schematic of representative triply periodic minimal surfaces

3.1 单胞设计

严格的极小曲面结构本身类型有限,因此首先由极小曲面推广得到一类曲面力学超结构。极小曲面的优异力学性能依赖于其特殊的几何特征:周期性、光滑性、立方对称性、以及中心/镜像对称性等。

基于式(2)函数形式表达的曲面力学超结构可以满足以上特征:

$$f(x, y, z) = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 + \alpha_4 f_4 \quad (2)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 是 $[-1, 1]$ 范围内的实数; $f_1 \sim f_4$ 是三角函数的组合, f_1 是一阶, $f_2 \sim f_4$ 是二阶,其表达式如式(3)所示:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sin x + \sin y + \sin z \\ f_2 &= \cos x \sin x + \cos y \sin y + \cos z \sin z \\ f_3 &= \cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x \\ f_4 &= \cos x \sin z + \cos y \sin x + \cos z \sin y \end{aligned} \quad (3)$$

任意一组 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 即可表示一种曲面力学超材料构型。基于给定的目标载荷曲线,可以通过调整参数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$,获得相对应的曲面力学超材料几何构型。这里设置单胞边长为10 mm,假设组分材料力学性能接近不锈钢,密度 $7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,杨氏模量200 GPa,泊松比0.3,屈服强度400 MPa,本构模型为理想弹塑性。通过改变曲面厚度将单胞的等效密度固定为10%。

曲面力学超材料的单胞构型设计可以分为“正向预测”和“逆向设计”两部分,前者基于神经网络在给定构型后可以快速预测载荷曲线,后者采用遗传算法根据目标载荷曲线设计对应的构型,具体模型和相关参数可参见我们的前期工作^[16]。

3.2 单胞力学性能分析

根据冲击防护对吸能材料强度需求的大致范围,可以设计具有不同吸能能力的曲面力学超材料。在这里约束压实应变为0.6,在平台应力5~15 MPa之间生成6种不同的曲面力学超材料单胞构型,分别记为构型A~F,如图8a所示。需要说明的是,在单胞设计分析过程中采用了周期性边界条件(PBC),所以图中所示的部分“不连续”结构在考虑周期性后实际上是连续的。

为了验证设计出来的单胞构型的实际强度,建立单胞在单向压缩下力学响应的有限元模型。如图8b所示,每个有限元模型包含单胞和两块刚性板,下面刚性板固支,上面刚性板施加准静态压缩,单胞周边施加周期性边界条件(PBC);网格选择3节点三角形壳单元S3。压缩后得到的整个单胞的等效名义应力-名义应变曲线(注:此处定义压应力和压应变为正值)如图9所示。

可见不同单胞的平台应力各不相同,大致在5~15 MPa之间,且在应变达到0.6之后应力迅速上升,即接近压实状态。由此可见,可以在保持单胞宏观密度不变的前提下,通过调控单胞的内部微结构达到控制力学超材料吸能能力的目的。

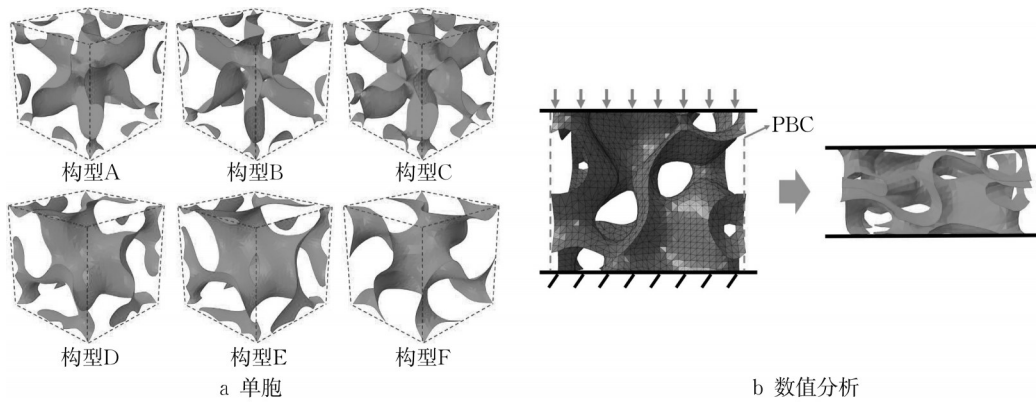


图8 不同的曲面力学超材料单元构型和力学性能仿真模型

Fig. 8 Configurations of different shell-based mechanical metamaterials and numerical model

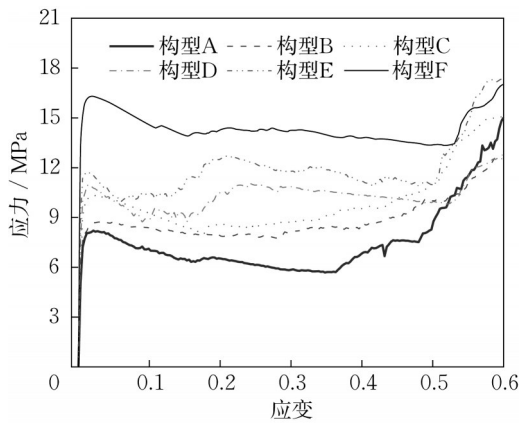


图9 曲面力学超材料单元压缩应力-应变响应曲线

Fig. 9 Stress-strain of shell-based mechanical metamaterials under compression

4 曲面力学超材料吸能块设计

4.1 吸能块设计

下面将以上具有不同吸能能力的曲面力学超材料单元应用到吸能块设计。这里将立方体单元进行几何映射^[18],形成圆柱形吸能块以适配基底结构形状。如图10a所示,首先将原始单元对应的边长为10 mm的正方形映射到外半径为20 mm、内半径为10 mm的圆环中;再在圆环区域沿着环向进行周期排列,同时在高度方向周期堆叠,得到由3层单元构成的高度为30 mm的缓冲块。以构型F为例,映射后得到的吸能块结构如图10a所示,同时图10b中展示了吸能块装配后的示意图。

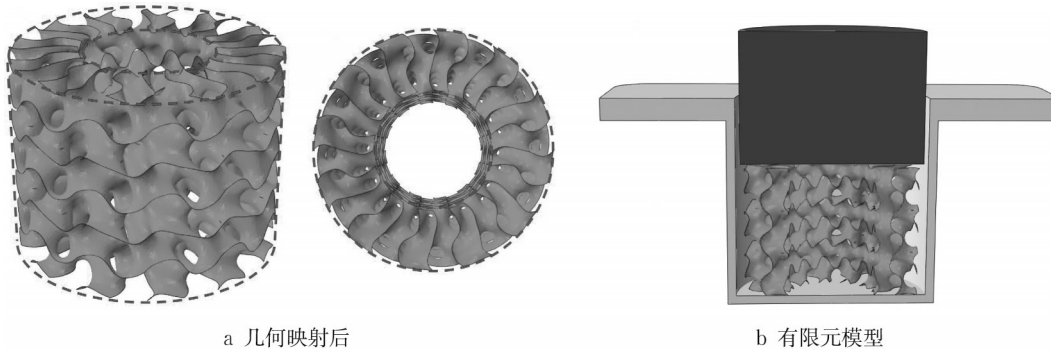


图10 曲面力学超材料构成的吸能块

Fig. 10 Energy absorption block composed by shell-based mechanical metamaterials

4.2 结构冲击响应分析

为了进一步验证曲面力学超材料吸能块的吸能减振效果,以图8a中的构型A,E和F为例生成吸能块。除了吸能材料不同之外,有限元模型的其他设置和图1模型完全相同。三种构型的吸能块在冲击之后的变形(等效塑性应变)如图11所示。

构型A由于自身强度较低,受冲击后很快进入

压实段,变形较为剧烈;构型F由于自身强度较大,受冲击后只有部分结构产生塑性变形吸能;构型E的强度和变形程度都在两者之间。这三种变形吸能模式和第3节中给出的模式一致。

选择图2中示意的P点作为采样点,提取冲击过程中该点的加速度演化历程,对于不同构型吸能块的计算结果如图12a所示。构型A吸能块因为吸能

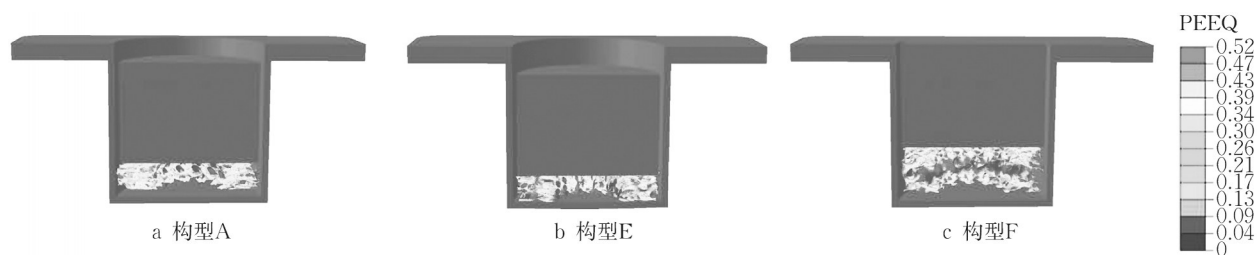


图11 曲面力学超材料冲击后等效塑性应变云图

Fig. 11 Distribution of equivalent plastic strain after impacting on energy absorption blocks of shell-based mechanical metamaterials

能力不足,在撞击后期产生较大加速度;构型F吸能块强度较高,从撞击开始加速度就比较大;构型E吸能块对应的加速度在三者中最小。将以上加速度时

域曲线进行频谱转换得到冲击响应谱。计算过程中放大系数为 $Q=10$,分析的频率范围为 $1\sim 10\,000$ Hz,计算结果如图12b所示。

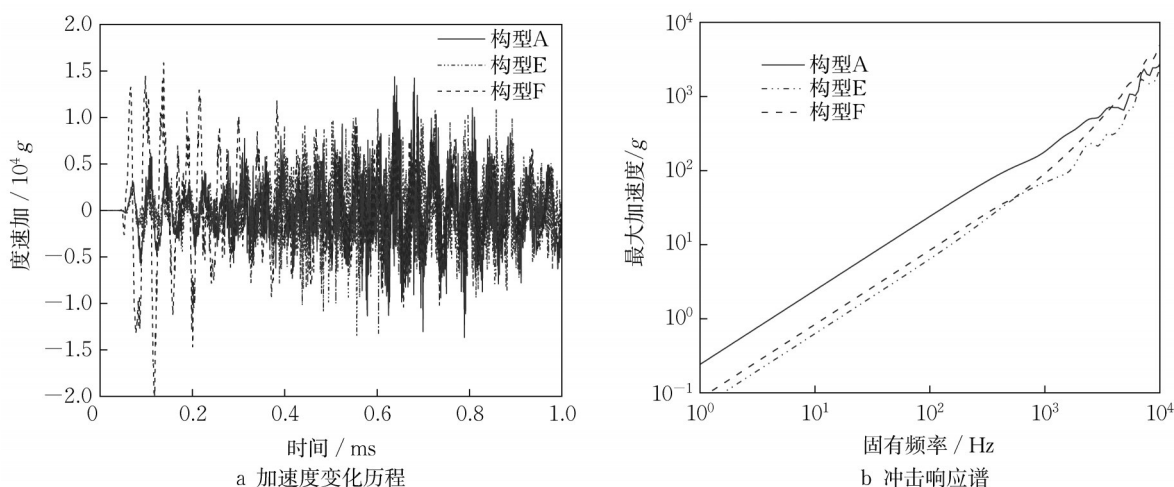


图12 不同构型吸能块冲击后产生的结构响应

Fig. 12 Impact response of structures with energy absorption blocks of different configurations

可以看出在该频率范围内,构型E吸能块的加速度峰值始终保持最低。计算结果进一步证明采用曲面力学超材料进行冲击防护设计的可行性。

5 结论

本文基于结构冲击响应的有限元模型,研究了典型多孔材料的吸能减振机理,提出了吸能材料设计方法,并将可定制化调控性能的曲面力学超材料应用于吸能减振设计,为发展新型吸能材料提供了支撑。主要结论如下:

(1)泡沫铝等典型多孔吸能材料在冲击防护应用中需要具有合适的强度(平台应力),才能发挥最优的减振效果:吸能材料强度太小,会由于吸能能力不足在后期产生较大振动;吸能材料强度太大,会由于吸能过程应力水平太高在前期产生较大振动。

(2)在相同的等效密度下,通过调控曲面力学超材料的内部微结构,可以在较大范围内设计单胞的强度和吸能能力。

(3)在时域和频域内分析了不同曲面力学超材料填充的吸能块减振效果,曲面力学超材料单胞强度适中时可以发挥较好的吸能效果,因此可以基于实际冲击工况定制化设计单胞构型来实现最优吸能减振。

在本文的研究中并未考虑吸能材料在动态载荷下的应变率效应,对于应变率效应敏感的吸能材料需要在未来的研究中进一步考虑。

此外,本文数值模型采用了理想弹塑性本构,而真实的金属材料在塑性变形过程中大多表现出应变硬化现象,对吸能效果会产生较大影响,因此在未来的研究中需要结合真实材料的力学响应开展结构设计。

作者贡献声明:

刘佳佳:项目构思,模型构建,论文修改。
张军舰:数据处理,结果讨论,论文修改。
龚林辉:数据处理,结果讨论,论文修改。
高利军:模型构建,研究方法,结果讨论。
廖国良:数据处理,结果讨论,论文修改。
王永桢:模型构建,数据处理,结果讨论。
曾庆磊:项目构思,模型构建,论文修改。

参考文献:

- [1] 余同希,朱凌,许骏. 结构冲击动力学进展(2010—2020)[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(12):4.
YU Tongxi, ZHU Ling, XU Jun. Progress in structural impact dynamics during (2010—2020)[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(12):4.
- [2] QIU X M, YU T X. Some topics in recent advances and applications of structural impact dynamics[J]. Applied Mechanics Reviews, 2011, 64(3):030801.
- [3] 王志亮, 诸斌. 径向不耦合爆破中聚苯乙烯泡沫吸能数值研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(7):1020.
WANG Zhiliang, ZHU Bin. Numerical analysis on energy-absorption of expanded polystyrene foam in radical uncoupled blast [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(7):1020.
- [4] 朱洪波,李晨,闫美珠,等. 水泥-聚苯乙烯轻质材料的制备及抗冲击性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):745.
ZHU Hongbo, LI Chen, YAN Meizhu, *et al.* Preparing and impact resistance properties of lightweight material with cement and expanded polystyrene [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5):745.
- [5] ZHENG Z, WANG C, YU J, *et al.* Dynamic stress - strain states for metal foams using a 3D cellular model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 72: 93.
- [6] 张忠凯,夏冬星,杨安民,等. 三种缓冲材料在某型爆炸螺栓降冲击中的应用研究 [J]. 火工品, 2018(2): 25.
ZHANG Zhongkai, XIA Dongxing, YANG Anmin, *et al.* Study on the application of three cushioning materials to an explosive bolt for impact reduction [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(2): 25.
- [7] CHEN Y, MA Y, YIN Q, *et al.* Advances in mechanics of hierarchical composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2021, 214: 108970.
- [8] SAN H N, LU G. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 181: 107496.
- [9] FLECK N A, DESHPANDE V S, ASHBY M F. Micro-architected materials: Past, present and future[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 466(2121): 2495.
- [10] 段晟昱,王潘丁,刘畅,等. 增材制造三维点阵结构设计,优化与性能表征方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(14): 36.
DUAN Shengyu, WANG Panding, LIU Chang, *et al.* Research progress on design, optimization and performance characterization of additive manufactured 3D lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14): 36.
- [11] 易建坤,马翰宇,朱建生,等. 点阵金属夹芯结构抗爆炸冲击问题研究的综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2):116.
YI Jiankun, MA Hanyu, ZHU Jiansheng, *et al.* Review of explosion and shock wave resistance of metallic lattice sandwich structure [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(2):116.
- [12] GUO K, YANG Z, YU C H, *et al.* Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials[J]. Materials Horizons, 2021, 8(4): 1153.
- [13] LI X, LIU Z L, CUI S Q, *et al.* Predicting the effective mechanical property of heterogeneous materials by image based modeling and deep learning [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 347: 735.
- [14] MAO Y, HE Q, ZHAO X. Designing complex architected materials with generative adversarial networks [J]. Science Advances, 2020, 6(17): eaaz4169.
- [15] BASTEK J H, KUMAR S, TELGEN B, *et al.* Inverting the structure - property map of truss metamaterials by deep learning [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022, 119(1): e2111505119.
- [16] WANG Y, ZENG Q, WANG J, *et al.* Inverse design of shell-based mechanical metamaterial with customized loading curves based on machine learning and genetic algorithm[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 401: 115571.
- [17] HAN L, CHE S. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems[J]. Advanced Materials, 2018, 30(17): 1705708.
- [18] WANG Y, REN X, CHEN Z, *et al.* Numerical and experimental studies on compressive behavior of Gyroid lattice cylindrical shells [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108340.