

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.04.018

一种基于 SLM 技术的抗冲击弹性阻尼单元

张庆标^{1,2,3}, 张志雄⁴, 唐 力^{1,3}, 梁科山³, 訾飞跃³

(1. 湖南交通工程学院 高新技术研究院, 长沙 410000; 2. 中国人民解放军 72465 部队, 济南 250000;
3. 国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410000; 4. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410000)

摘 要: 具有高强度和高能量吸收能力的轻质夹芯结构在机械领域具有至关重要的应用. 提出了一种基于 SLM(激光选区熔化)技术的弹性阻尼单元结构, 该结构在受载时可以产生较大的弹性变形, 从而在弹性变形阶段吸收大量的能量. 根据 SLM 工艺特征, 设计了弹性阻尼单元的结构和布局, 并研究了其可制造约束条件. 最后, 采用 SLM 技术加工了三组具有不同结构参数的弹性阻尼单元和与其具有相同高度的 Kagome 结构, 并进行了压缩试验. 根据试验结果分析了单元结构参数对其承载性能和能量吸收能力的影响, 并对比了弹性阻尼单元和 Kagome 结构性能的差异. 试验结果表明, 弹性阻尼单元强度和能量吸收能力优于 Kagome 结构. 且参数为 $a=2.2\text{ mm}$, $m=3.1\text{ mm}$, $n=4.6\text{ mm}$ 弹性阻尼单元, 在相同的质量下, 强度比 Kagome 结构高约 36.11%, 在破坏时吸收能量比 Kagome 结构高约 26.83%, 弹性变形时吸收能量比 Kagome 结构高约 39.1%.

关键词: 轻质夹芯结构; SLM 技术; 弹性阻尼单元; 可制造性; 抗冲击; 能量吸收

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)04-0695-08

Anti-impact elastic damping unit based on SLM technology

ZHANG Qing-Biao^{1,2,3}, ZHANG Zhi-Xiong⁴, TANG Li^{1,3}, LIANG Ke-Shan³, ZI Fei-Yue³

(1. High and New Technology Research Institute, Hunan Institute of Traffic Engineering, Changsha 410000, China;
2. 72465 Troops, The Chinese People's Liberation Army, Jinan 250000, China;
3. College of Artificial, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China;
4. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Lightweight sandwich structures with high strength and high energy absorption ability are of paramount importance in the mechanical field. An elastic damping unit structure based on SLM (laser selective melting) technology is proposed, which can generate large elastic deformation when loaded, so that a large amount of energy is absorbed in the elastic deformation stage. According to the characteristics of SLM process, the structure and layout of the elastic damping unit are designed, and the manufacturability constraints are studied. Finally, three sets of elastic damping units with different structural parameters and the Kagome structure with the same height were processed by SLM technology, and the compression test was carried out. According to the test results, the influence of unit structure parameters on its bearing capacity and energy absorption capacity was analyzed, and the difference of elastic damping unit and Kagome structure performance was compared. The test results show that the strength and energy absorption capacity of elastic damping unit are better than Kagome, and when the parameters

收稿日期: 2019-03-14
基金项目: 国家自然科学基金(51875571)
作者简介: 张庆标(1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究.
通讯作者: 唐力. E-mail: tanglimail@163.com

are $a=2.2\text{ mm}$, $m=3.1\text{ mm}$, $n=4.6\text{ mm}$, at the same weight, the strength of the elastic damping unit is about 36.11% higher than that of the Kagome structure, the energy absorbed at the time of failure is about 26.83% higher than that of the Kagome structure, and the energy absorbed during elastic deformation is about 39.1% higher than that of the Kagome structure.

Keywords: Lightweight sandwich structure; SLM; Elastic damping unit; Manufacturability; Anti-impact; Energy absorption

1 引言

冲击是机械运动中零件需要承受的最普遍的载荷之一^[1]. 一些经常承受大冲击载荷的零件对抗冲击能力有着极高的要求. 一些复杂材料结构对抗冲击载荷有一定的抵抗能力^[2],但是这些结构往往过于复杂,采用传统加工方式极为困难,甚至无法加工. 3D 打印具有强大的自由成型能力,在解决复杂零件结构可制造性方面具有巨大的优势^[3-7]. 随着 3D 打印的发展,人们将一些具有抗冲击能力的结构,以单元的形式直接打印到材料内部,提升零件的抗冲击能力.

目前具有抗冲击能力的 3D 打印单元结构主要有金属泡沫结构、点阵结构等. 国内外学者已经进行了大量的探索. Hutchinson 等^[8]通过对比分析,发现在相同质量的情况下蜂窝结构可以承受两倍以上的水冲击. Pinnoji 等^[9]利用有限元分析和试验发现与具有同样密度的 ABS 头盔相比,低密度金属泡沫结构头盔使头部受到前面和上面的正应力分别减少约 25%和 22%. Kumar^[10]发现采用梯度孔隙率的方式,可以在保证较高的冲击吸收能力和拉压性能的前提下,获得支架结构更大幅度的轻量化. Pinto^[11]通过试验发现与单尺寸泡沫铝结构相比,双重尺寸泡沫铝结构的刚度提高了 29%,压缩强度提高了 83%,能量吸收能力提高 27%以上. Ullah 等^[12]证明了 Kagome 结构比三种典型的原子点阵结构(体心立方结构、面心立方结构、体面混合结构)具有更优的强度、能量吸收能力和抗压性能. Moon 等^[13]比较了三维 Kagome 结构、三维金字塔结构和六边形钻石结构的各项性能,发现三维 Kagome 结构的承载能力最强,而六边形钻石结构的能量吸收能力最强.

上述研究发现了金属泡沫结构和点阵结构出色的抗冲击效果. 然而,金属泡沫结构属于一种非周期分布的结构,普遍存在材料分布不均匀的现象,对于强度、稳定性要求较高的场合不适用. 另外,金属泡沫结构 3D 打印可制造性差,一般需要

先打印出零件的非金属模具,再使用熔模铸造的方式加工零件. 而点阵结构属于刚性结构,弹性变形小,一般通过自身的塑性变形以及自身结构破坏来消耗冲击能量,多用于一次性使用的防护性零件.

本文基于 SLM 技术,面向经常承受大冲击载荷的零件,研究了一种可在弹性变形阶段吸收大量能量的弹性阻尼单元. 通过理论分析,设计了单元的设计和布局,并基于 SLM 技术分析了单元的可制造性约束条件. 同时,本文采用 SLM 技术将弹性阻尼单元烧结成型,并通过合理的热处理工艺改善单元的加工缺陷,最后进行压缩试验得到了单元的机械性能曲线,分析了结构参数对单元性能的影响. 为了更好的描述弹性阻尼单元的机械性能,本文选取与弹性阻尼单元高度相同的 Kagome 结构进行了对比试验. 研究发现,本文所提出的弹性阻尼单元抗冲击能力强,且在弹性变形阶段就可以吸收大量能量,减振耗能作用更加明显,适用范围更广,在机械设计领域具有重大意义.

2 弹性阻尼单元的设计与性能分析

2.1 弹性阻尼单元的结构设计

为了吸收冲击时产生的巨大的能量,弹性阻尼单元首先需要一定的弹性变形. 在传统的机械结构中,板簧结构简单、强度大、缓冲和减振性能好、可靠性高^[14]. 本文合理地优化改进板簧结构,设

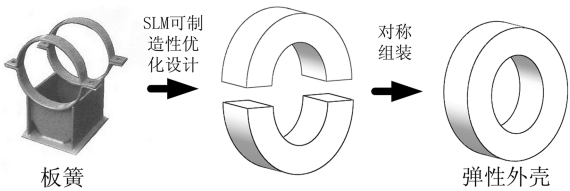


图 1 弹性外壳设计
Fig. 1 The design of elastic shell

计了弹性阻尼单元的弹性外壳. 为了增大弹性外壳的吸收能力,将弹性外壳设计成两个板簧结构对称组装的形式,增大弹性外壳的弹性位移,如图 1 所示.

将单元参数化,此时,弹性外壳内孔为横轴 $2a$ 、纵轴 $2b$ 的椭圆,外壳厚度为 m ,单元宽度为 n ,高度为 H . 如图 2(a)所示,弹性外壳沿横轴、纵轴对称. 但是,对单元的性能分析一般是建立在某个确定的单元高度下的,且弹性阻尼单元在应用时要求具有相同的高度 H . m 、 a 、 b 的变化都会对 H 产生影响,且考虑到弹性外壳上端支撑面积较小,会导致零件上板悬空面积过大而难以加工,不符合 3D 打印工艺性要求. 本文所研究的弹性阻尼单元高度限定在 $H=10\text{ mm}$,这也是 3D 打印单元结构较为典型的一个高度. 为了保证 H ,本文同样将弹性外壳竖轴限定在 $2b=8\text{ mm}$,同时以单元横轴为中心,将距单元 $H/2$ 以外的部分切除,此时弹性阻尼单元如图 2(b)所示.

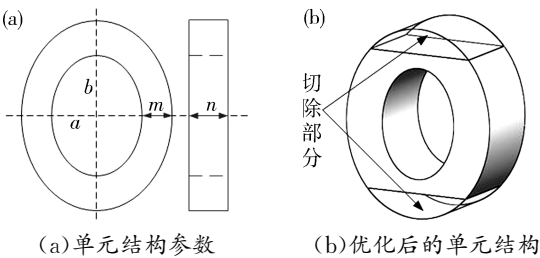


图 2 单元参数化与结构优化
Fig. 2 The parameterization and structure optimization of unit

根据传统机械结构能量耗散原理,结构间的摩擦是能量耗散的一个重要手段. 本文基于 SLM 工艺特点,在弹性外壳内部设计摩擦锤结构,实现弹性阻尼单元在工作过程中结构间的摩擦,以增大单元对冲击能量的耗散能力. 摩擦锤结构如图 3 所示,摩擦锤上表面距离弹性外壳外 0.3 mm ,当弹性外壳受到冲击产生的弹性位移的时候,弹性外壳和摩擦锤就会相互碰撞、摩擦,耗散冲击能量.

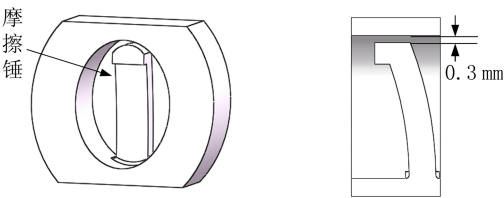


图 3 摩擦锤设计
Fig. 3 The design of friction hammer

2.2 弹性阻尼单元布局设计

弹性阻尼单元作为一种功能支撑的结构填充到零件内部,使零件本身带有单元的功能性,如图 4 所示. 一般情况下,有

$$H_1=H_2=\frac{H_0-H}{2} \tag{1}$$

式中, H_1 、 H_2 分别为零件上、下夹板厚度, H_0 为零件厚度, H 为单元厚度.

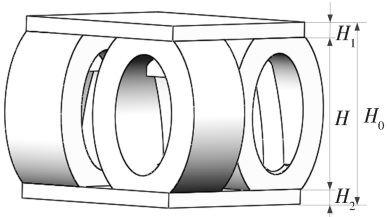


图 4 弹性阻尼单元应用方式
Fig. 4 The application method of unit

为了保证零件受力的各向同性,在弹性阻尼单元的应用布局中,弹性阻尼单元四个一组组成一个小结构体,每个结构体中相邻的两个单元相互垂直,单元中心距离为 L ,如图 5 所示. 然后,根据应用零件的结构和受力特征,依次阵列排列这些小结构体,为保证 3D 打印的可制造性要求,不足一个单元的边缘使用点阵结构作为支撑. L 的大小直接影响零件的性能, L 越小,零件的强度越大,但同时零件的质量也增加. L 过小会导致单元横向变形空间不足,进而影响零件性能, L 过大会使零件的悬空面积增大,进而影响零件的可制造性.

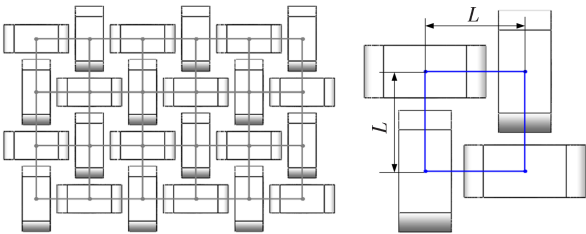


图 5 弹性阻尼单元的布局设计
Fig. 5 The layout method of unit

2.3 弹性阻尼单元的可制造性

弹性阻尼单元的设计必须进行可制造性分析. SLM 技术主要工艺约束有最小加工尺寸约束、最大结构间悬空尺寸约束、最小倾斜角度约束和最大悬臂尺寸约束等,如图 6 所示. 根据目前商业化的 SLM 设备工艺性能,其可制造的最小柱状零件尺寸为 $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$,当零件小于这个尺寸时,零件形状会产生失真,质量也会产生问题. 零件结构间可加工的最大悬空支撑间隔为 5 mm ,但是当支撑间隔大于 3 mm 时,零件悬空部分会产生不同程度的塌陷和变形,进而影响零件性能,故本文将零件结构间最大悬空约束在 3 mm 以内. 零件结构的最小可加工倾斜角度为 45° ,倾斜角小于 45° 的结构容易出现翘曲变形.

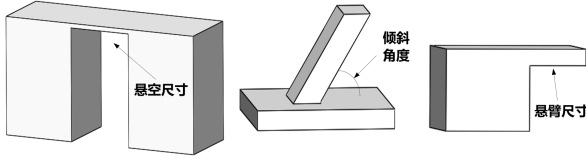


图 6 SLM 技术工艺约束

Fig. 6 The process constraints of SLM technology

根据图 2(a),在限定了单元内孔竖轴 b 之后,单元主要有结构参数横轴 a 、壁厚 m 、宽度 n 和布局参数 L . m 和 n 需要满足 SLM 技术的最小可制造尺寸要求,即有 $m \geq 0.4 \text{ mm}$ 、 $n \geq 0.4 \text{ mm}$. 但是当 $m < 1 \text{ mm}$ 时,将不能满足单元高度 $H = 10 \text{ mm}$ 的要求,如图 7(a)所示. 因此,弹性阻尼单元壁厚 m 的取值为

$$m \geq 1 \text{ mm} \quad (2)$$

单元外壳曲率需要满足最小倾斜角度要求,如图 7(b)所示,单元外壳最下端曲率应大于 45° . 单元外壳最下端的上的点近似在横轴为 $a_1 = a + m$ 、纵轴 $b_1 = b + m$ 的椭圆上,可根据椭圆标准式求得此点的曲率,因此有

$$k_{\min} = \frac{(b+m)^2}{H \cdot (a+m)/2\sqrt{1 - \frac{(H/2)^2}{(b+m)^2}}} \geq \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

单元的布局需要满足 SLM 技术的最大悬空尺寸要求. 为了增大单元的支撑面积,同时消除单元在承载时的应力集中,基于 SLM 工艺最大悬臂尺寸约束,本文在单元与零件上夹板连接处添加 $r = 1 \text{ mm}$ 的倒角,如图 7(c)所示. 此时有

$$n \geq L - 5 \quad (4)$$

图 7(d)为相互垂直分布的两个单元在横轴 a 所在平面的剖视图,根据弹性阻尼单元的布局设计,可知有

$$L = a + m + n/2 + d \quad (5)$$

其中 d 为单元之间预留出的横向变形间距,本文取 $d \geq 0.5 \text{ mm}$.

L 减小会使单元的等效力和等效屈服应力增大,但 L 并不代表单元本身的性能,而是代表着单元在以布局参数 L 应用到零件后的力学性能. 因此,单纯的研究结构参数与单元力学性能的关系,并不需要考虑 L 的影响. 但是, L 大小影响着单元结构参数的取值范围. 此时,为了方便研究,可给 L 一个固定值,研究在 L 为某个确定值时单元结构参数可制造性. 本文取值 $L = 9 \text{ mm}$.

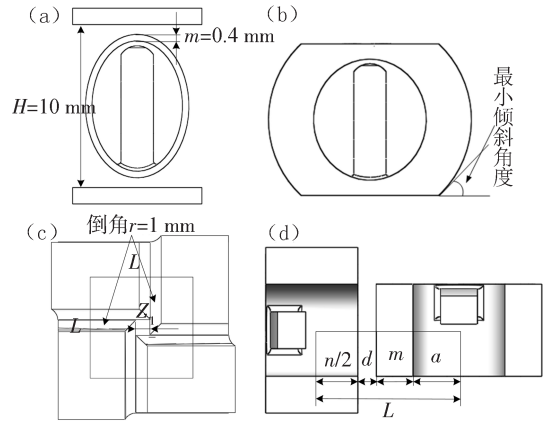


图 7 弹性阻尼单元的可制造性条件

Fig. 7 The manufacturability condition of uinit

综上所述,为满足 SLM 工艺约束,弹性阻尼单元结构参数约束条件为:

$$\begin{aligned} m &\geq 1 \text{ mm}, \\ n &\geq 4 \text{ mm}, \\ a + m + n/2 &< 8.5 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{(b+m)^2}{H \cdot (a+m)/2\sqrt{1 - \frac{(H/2)^2}{(b+m)^2}}} \geq \frac{\pi}{4}$$

公式(6)为弹性阻尼单元的可制造性域,在对弹性阻尼单元进行设计时,其结构参数必须满足公式(6)的约束.

3 性能试验与分析

为了在研究弹性阻尼单元性能特征的同时探究结构参数对其质量、力学性能以及能量吸收能力的影响,本文根据公式(6),选取三组单元结构参数组合进行制造和压缩试验. 其中,当 $a = 2.6 \text{ mm}$ 、 $n = 4.6 \text{ mm}$ 时, m 分别取 2.5 、 2.7 、 2.9 、 3.1 、 3.3 mm ,当 $m = 3.1 \text{ mm}$ 、 $n = 4.6 \text{ mm}$ 时, a 分别取 2.2 、 2.4 、 2.6 、 2.8 、 3.0 mm ,当 $m = 3.1 \text{ mm}$ 、 $a = 2.6 \text{ mm}$ 的时候, n 分别取 4.3 、 4.6 、 4.9 、 5.2 、 5.5 mm .

为了更好地分析弹性阻尼单元的机械性能,本文采用 Kagome 点阵结构作为对比试验,比较弹性阻尼单元和 Kagome 结构力学性能和能量吸收能力. Kagome 结构和弹性阻尼单元高度 H 相同,当支撑直径 $d = 1.2 \text{ mm}$,倾斜角度为 $\theta = 60^\circ$ 时, Kagome 具有最优的力学性能^[12].

这些试样首先在 Solidworks 软件中进行设计,然后导出 STL 格式进行切片,最后导入 FS271M 金属打印机进行制造. 每种弹性阻尼单元加工 3 个试样、Kagome 加工 4 个试样来平衡制造和试验误差. 所有的试样均通过 850°C (2 h) +

炉冷的退火处理改进综合力学性能^[15-16].

3.1 试样的制备

本文试验均采用 Ti₆Al₄V 钛合金粉末作为原料. 该粉末由顶立科技公司生产,其化学组成为 Al (5.5%~6.75%)、V (3.5%~4.5%),杂质元素 Fe(0.3%最大)、N(0.05%最大)、O (0.2%最大)、C (0.08%最大)、H(0.015%最大). 粒径为 15~45 μm,松装密度 2.587~2.656 g/cm³. 采用 TC4 钛合金加工的零件具有良好的力学性能,其抗拉强度大于 1100 MPa,屈服强度为 1000 ± 100 MPa,在经过退火工艺后,断后伸长率可以达到 13%以上.

本文试验试件采用华曙高科公司研发的开源可定制化金属 3D 打印机 FS271M 加工而成,如图 11 所示. 其最大成型尺寸为 275 mm × 275 mm × 320 mm. 加工参数如表 1 所示. 在整个打印过程,成型室中必须充满氩气作为保护气体. 氧气含量控制在 1000 ppm 以下,防止零件在加工过程出现氧化现象.



图 8 FS271M 金属 3D 打印机
Fig. 8 The FS271M metal 3D printer

表 1 加工参数

Tab. 1 The processing parameters

参数类型	参数值
激光功率(W)	225
铺粉层厚度(μm)	30
扫面速度(mm/s)	1000
聚焦光斑直径(μm)	136
平台温度(℃)	200

加工的试样如图 9 所示,由于 FS271M 金属打印机成型空间的限制,本文所用的试样分两次加工完成,但是在两次加工过程中,SLM 工艺参数都严格保持一致,且两次加工时间相隔非常短,可排除材料、机器设备状态以及环境因素对试件性能的影响.

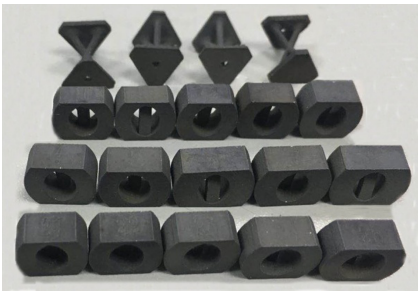


图 9 弹性阻尼单元和 Kagome 结构试验件
Fig. 9 The specimens of elastic damping unit and Kagome structure

3.2 弹性阻尼单元与 Kagome 结构压缩试验

本次试验采用的设备为万能材料试验机为 WDW-100 型万能材料试验机,如图 10 所示.

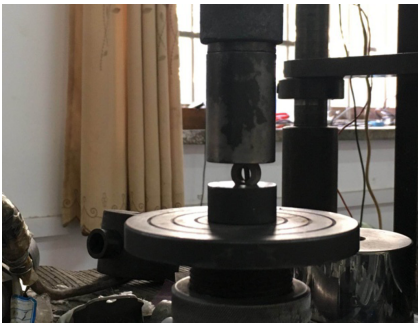


图 10 弹性阻尼单元和 Kagome 结构试验件
Fig. 10 The specimens of elastic damping unit and Kagome structure

其最大载荷量程为 ±100 kN,载荷测量精度为 ±0.5%,加载速度为 5 mm/min. 整个试验都是在室温条件下进行的. 通过传感器采集试件的应力—应变数据.

4 结果与讨论

如图 9 所示,所有的试样都加工成功,采用电镜观察了所有试验的加工效果,未发现有明显的气孔、翘曲等加工缺陷,其表面质量如图 11 所示. 但

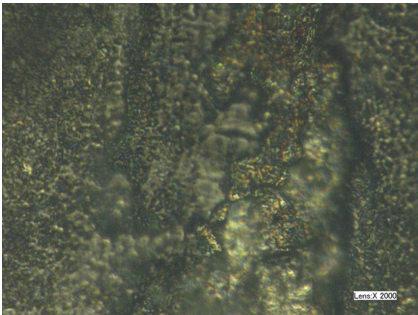


图 11 试样的表面质量
Fig. 11 The specimens of elastic damping unit and Kagome structure

是试样的表面质量并不高,当零件对表面质量有较高的要求时,需要进行适当的后期表面处理. 试样加工完成后,会有一些松散的粉末粘附在试样表面,造成试样质量的增加.



图 12 弹性阻尼单元破坏形式
Fig. 12 The failure mode of elastic damping units

图 12 展示了弹性阻尼单元试件在经过压缩试验后几种主要的破坏形式. 可以看出,虽然单元试件的破坏形式多种多样,但是试件断裂的地方皆为单元的端面边缘,断裂面大致与单元外壳曲面切面相垂直. 初步分析,因为单元在受力变形时,单元两侧环状部分为单元自由变形部分,在承载时变形较大. 而单元两端与试验台直接接触,不易产生变形,为单元变形死区. 当单元自由变形部分达到一定程度的变形时,两部分连接处的应力会急剧增大,因此最先损坏.

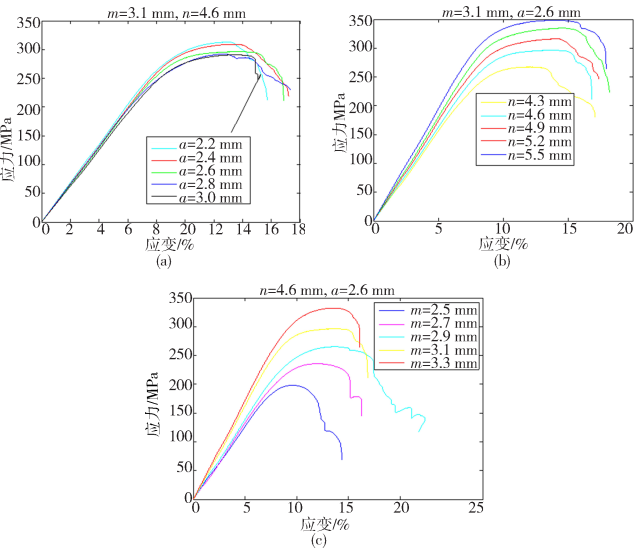


图 13 不同结构参数下弹性阻尼单元的压缩特性曲线
Fig. 13 The compress property graphs of elastic damping units under different structural parameters

图 13 为不同结构参数下弹性阻尼单元的压缩特性曲线. 由图 13(a)可知,在 m 和 n 为定值时, a 的变化对单元的力学性能影响不大,随着 a 的增大,单元的屈服强度和弹性模量微微减小. 例如,

当 a 从 2.4 增大到 2.8 mm 时,单元的弹性模量由 3.32 减小到 3.22 GPa,屈服强度从 259 减小到 243.2 MPa. 由图 13(b)可见,当 m 和 a 为定值时,单元的强度和弹性模量随着 n 的增大而增大. 例如,当 n 从 4.6 增大到 5.2 mm 时,单元的屈服强度由 243.2 增大至 265.6 MPa,弹性模量由 3.2 增大至 3.65 GPa. 从图 13(c)可知,当 n 和 a 为定值时,单元的强度和弹性模量同样随着壁厚 m 的增大而增大,而且增幅比宽度大. 例如当 m 从 2.7 增大至 3.1 mm 时,单元的屈服强度由 198.4 增大至 243.2 MPa,弹性模量由 2.65 增大至 3.2 GPa.

为了更好地观察单元能量吸收能力与结构参数的关系,本文绘制出了不同结构参数弹性阻尼单元能量吸收能力的柱状对比图,如图 14 所示. 由图 14 可见,随着结构参数 m 的增大,单元单元的整体能量吸收能力增大,其单位质量的能量吸收能力也在增加,当 m 从 2.5 增大至 3.3 mm 时,单元弹性变形阶段的能量吸收能力增加了 3.01 J,弹性阶段单位质量能量吸收能力增加了 0.81 J/g,单元初始破坏时能量吸收能力增大了 15.42 J,初始破坏时单位质量能量吸收能力增加了 6.73 J/g. 随着结构参数 a 的增大,单元在弹性变形阶段的能量吸收能力降低,同时单元在弹性阶段单位质量的能量吸收能力也降低. a 的变化对单元的初始破坏能量吸收能力影响不大. n 的增大会使单元在弹性变形阶段和初始破坏时的能量吸收能力增大,但是 n 对单元弹性变形阶段的能量吸收能力影响较小,当 n 从 4.3 增大至 5.5 mm 时,其在弹性变形阶段吸收的能量仅增加了 1.75 J,单位质量吸收能量几乎没有变化. n 的取值对单元的影响主要在其屈服阶段.

Kagome 结构的压缩性能曲线如图 15 所示,取 4 个 Kagome 试样平均值,此时,Kagome 结构的屈服应力约为 28.51 MPa,屈服位移约为 3.6 mm. 其在弹性变形阶段吸收能量约为 0.80 J,初始破坏时吸收能量约为 2.73 J.

为了直观地比较弹性阻尼单元和 Kagome 结构的力学性能和能量吸收能力. 图 16 绘出了结构参数为 $a=2.2$ mm、 $m=3.1$ mm、 $n=4.6$ mm 的弹性阻尼单元和 Kagome 结构在单位质量情况下的力学性能以及能量吸收能力的对比图. 如图 16 所示,在单位质量的情况下,弹性阻尼单元弹性模量比 Kagome 结构弹性模量低 45.56%,屈服强度高 36.11%,弹性变形阶段吸收能量高 39.10%,初始破坏时吸收能量高 26.83%. 总之,弹性阻尼单元

比 Kagome 结构拥有更高的强度和能量吸收能力。

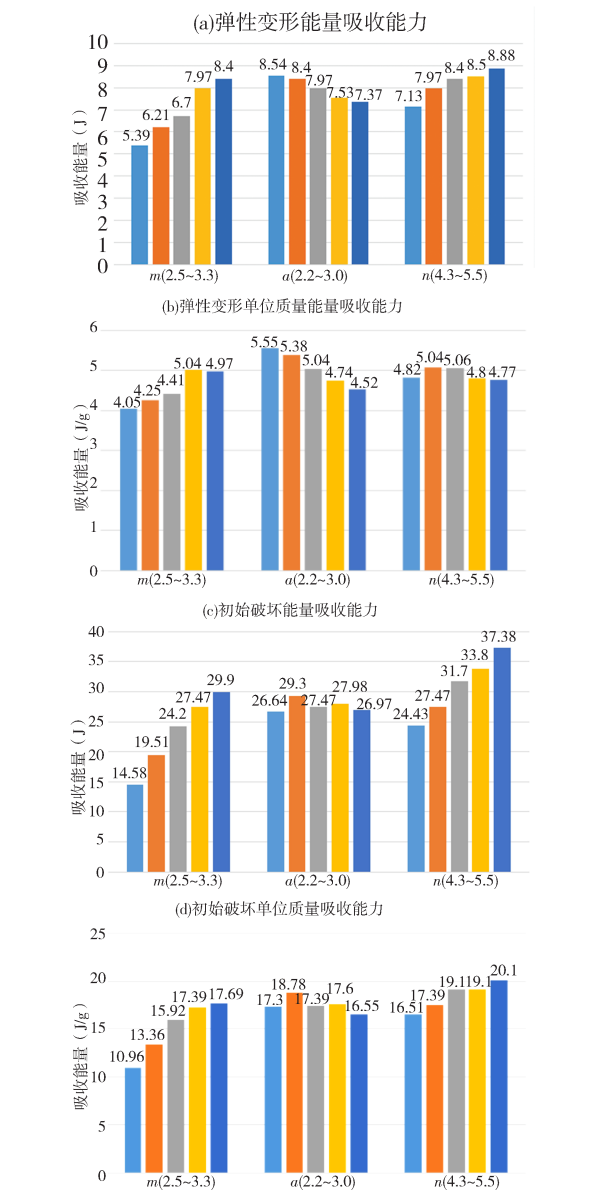


图 14 不同结构参数下弹性阻尼单元能量吸收能力
Fig. 14 The comparison diagrams of elastic damping unit and Kagome structure

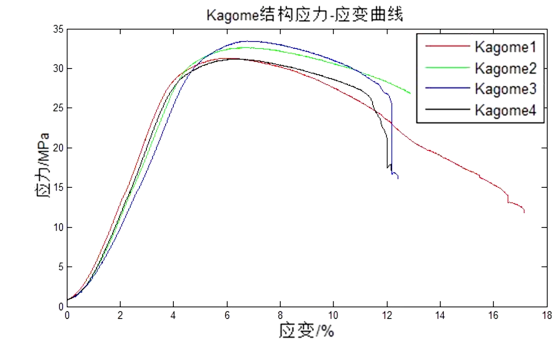


图 15 Kagome 结构压缩特性曲线
Fig. 15 The compress property graphs of Kagome

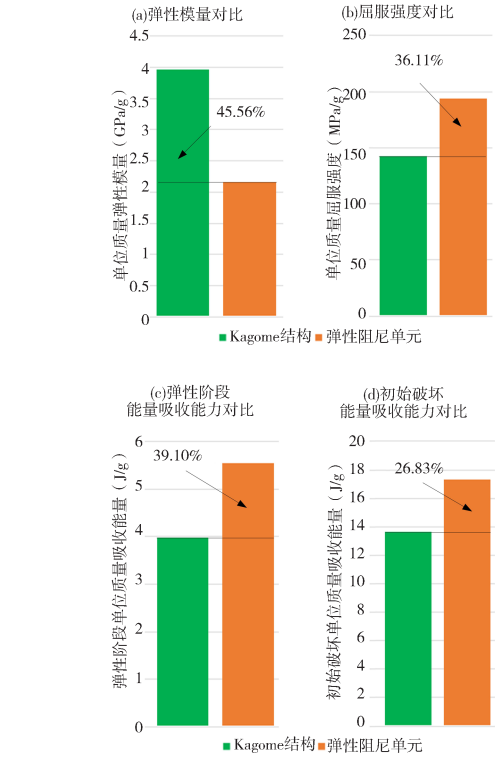


图 16 Kagome 结构和弹性阻尼单元对比图
Fig. 16 The energy absorption capacity of elastic damping units under different structural parameters

5 结 论

(1)弹性阻尼单元在保证零件强度的同时,具有较强的能量吸收能力,通过对单元合理的结构和布局设计,可以将该单元填充到零件内部,改善零件的抗冲击性能。

(2)压缩试验表明,单元的实际破损处为单元的端面一角,断裂线大致与单元外壳切线相垂直。这是因为单元在受力变形时,单元两侧环状部分变形较大,而单元两端与实验台直接接触,不易产生变形,此时,两部分连接处产生了应力集中。

(3)试验结果表明,在高度同为 H 的情况下,弹性阻尼单元比 Kagome 结构拥有更高的强度和能量吸收能力。在质量相同的情况下,且参数为 $a=2.2\text{ mm}$ 、 $m=3.1\text{ mm}$ 、 $n=4.6\text{ mm}$ 的弹性阻尼单元弹性模量比 Kagome 结构弹性模量低 45.56%,屈服强度高 36.11%,弹性变形阶段吸收能量高 39.10%,初始破坏时吸收能量高 26.83%。

(4)本文所提出的弹性阻尼单元在弹性变形阶段具有其他单元结构不可比拟的能量吸收性能。将单元应用到零件内部后,可以使零件不经过屈服和损坏就吸收大量的能量,大幅度提升了零件的使用性能和应用范围,在机械领域具有先进的应用价

值. 后续的研究拟建立起与弹性阻尼单元对应的理论模型,系统地研究其结构性能.

参考文献:

[1] 曾嵩. 铝合金四棱锥点阵夹芯材料的制备及其力学性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 16.

[2] 林晓虎, 杨庆生. 航空航天夹层结构抗冲击性能的研究现状[J]. 航空制造技术, 2013, 430: 71.

[3] 史玉升, 刘锦辉, 闫春泽, 等. 粉末材料选择性激光快速成形技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[4] 刘海涛, 赵万华, 唐一平. 电子束熔融直接金属成型工艺的研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41: 1307.

[5] 陈光霞, 曾晓雁, 王泽敏, 等. 选择性激光熔化快速成型工艺研究[J]. 机床与液压, 2010, 38: 1.

[6] 费群星, 张雁, 谭永生, 等. 激光近净成形 Ni-Cu-Sn 合金[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 36: 2052.

[7] Huang Y, Leu M C, *et al.* Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations [J]. J Manuf Sci Eng, 2017, 137: 1.

[8] Hutchinson J W, Xue Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses [J]. Int J Mech Sci, 2005, 47: 545.

[9] Pinnoji P K, Mahajan P, Bourdet N. Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets;

experiments & numerical modeling [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37: 274.

[10] Kumar A, Nune K C, Murr L E, *et al.* Biocompatibility and mechanical behaviour of three - dimensional scaffolds for biomedical devices: process - structure - property paradigm [J]. Int Mater Rev, 2016, 61: 20.

[11] Pinto P, Peixinho N, Silva F, *et al.* Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with modified cellular geometry [J]. J Mater Process Tech, 2014, 214: 571.

[12] Ullah I, Brandt M, Feih S. Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures [J]. Mater Design, 2016, 92: 937.

[13] Moon S K, Yu E T, Hwang J, *et al.* Application of 3D printing technology for designing light - weight unmanned aerial vehicle wing structures [J]. Int J Pr Eng Man: GT, 2014, 1: 223.

[14] 成大先, 王德夫, 姬奎生, 等. 机械设计手册: 弹簧[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[15] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, *et al.* Heat treatment of Ti₆Al₄V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties [J]. J Alloy Compd, 2012, 541: 177.

[16] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 7: 1263.

引用本文格式:

中 文: 张庆标, 张志雄, 唐力, 等. 一种基于 SLM 技术的抗冲击弹性阻尼单元[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 695.

英 文: Zhang Q B, Zhang Z X, Tang L, *et al.* Anti-impact elastic damping unit based on SLM technology [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 695.