

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.259

不同单胞形貌和承载方向下蜂窝结构 吸能特性及防冲能力评估

张永祥^a, 王睿智^a, 刘浩^a, 邹全乐^b, 龚愉^a

(重庆大学 a. 航空航天学院; b. 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要:为研究单胞形状和承载方向对蜂窝结构力学性能及失稳模式的影响,采用增材制造技术制备了不同蜂窝结构并进行了试验与动态仿真模拟。结果表明:蜂窝结构应力曲线呈四阶段变化趋势;单胞对角承载的六边形蜂窝结构拥有最高的平台应力以及总应变能密度;单胞的坍塌主要原因在于单胞的剪切变形,四边形蜂窝单胞在剪切变形同时胞壁发生严重的屈曲失稳;整体蜂窝结构的失稳模式为基于斜向或横向初始变形带的两类逐层坍塌模式;在大尺寸蜂窝结构仿真模拟中其防冲能力得到了评估,结构吸能值能达 10^5 J, 满足吸能防冲器要求。所得结论能为液压支架防冲吸能器的设计提供理论依据。

关键词:冲击地压;吸能防冲器;失稳模式;蜂窝;增材制造

中图分类号:TD355.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)12-001-13

Energy absorption characteristics and impact resistance evaluation of honeycomb structures under different unit cell morphologies and bearing directions

ZHANG Yongxiang^a, WANG Ruizhi^a, LIU Hao^a, ZOU Quanle^b, GONG Yu^a

(a. College of Aerospace Engineering; b. School of Resources and Safety Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To study the effect of unit cell shape and loading direction on the mechanical properties and buckling mode of honeycomb structures, different honeycomb structures were prepared by additive manufacturing technology, and static load tests and dynamic simulations were carried out. The results show that the stress curve of the honeycomb structure shows a four-stage change trend. The hexagonal honeycomb structure supported by the unit cell diagonally has the highest platform stress and total strain energy density. In addition, the collapse of the unit cell is mainly due to the shear deformation of the unit cell, and the quadrilateral honeycomb unit cell undergoes severe buckling instability during shear

收稿日期:2022-01-06 网络出版日期:2022-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(12172067, 11902054);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金项目(KFJJ2018004)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(12172067, 11902054) and Open Fund Project of State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining(KFJJ2018004).

作者简介:张永祥(1978—),男,博士,教授,主要从事材料疲劳断裂力学性能、振动噪声及应力测量分析技术等方向的研究,(E-mail)zhangyx@cqu.edu.cn。

通信作者:王睿智,男,硕士,主要从事吸能结构研究与应用,(E-mail)201931021019@cqu.edu.cn。

deformation. The instability mode of the overall honeycomb structure can be divided into two types: oblique and transverse initial shear bands. In the simulation of large-scale honeycomb structure, its anti-shock ability has been evaluated. The analysis shows that the energy absorption value of the structure can reach 10^5 J, which meets the requirements of the energy absorption shock absorber. The findings can provide a theoretical foundation for the design of the hydraulic support anti-shock energy absorber.

Keywords: rock burst; energy-absorbing shock absorber; instability mode; honeycomb; additive manufacturing

中国以煤炭为主体的能源格局在很长一段时间内不会改变,煤炭开采仍然是一个备受关注的问题。目前浅部煤炭资源逐渐枯竭,煤炭开采逐步向深部延伸,冲击地压动力灾害愈发严重,造成了大量的人员伤亡和财产损失。巷道支护是防止冲击地压动力灾害的一个重要手段,而目前煤矿的支护广泛采用刚性支护,在受到较强冲击地压后支护系统容易发生突发的失稳破坏^[1]。因此,在目前煤炭开采深度越来越大的趋势下,提高支护系统的防冲能力是亟需解决的问题。

目前大部分巷道采用的刚性支架在遭遇强烈冲击时,易产生整体突发性失稳破坏。为了改善刚性支护方式易破坏的问题,许多学者将重点放在了吸能支护系统上。王其州等^[2]针对 U 型钢支架支护动压影响巷道强烈变形的难题,提出了 U 型钢支架-锚索协同支护技术,实现了 U 型钢支架高阻可缩的特性。Wang 等^[3]提出了一种能量吸收元件和锚杆支撑的组合支护系统,在极端易爆的条件下建立了一种非常有效且具有延展性的支撑类型。为了解决液压支架让位不及时的问题,潘一山等^[4-5]提出了吸能让位防冲支护理论,在液压支架中加入防冲吸能器,通过防冲吸能器的变形吸能来吸收冲击地压最先开始的能量,为液压排筏提供缓冲时间。针对防冲吸能器的设计,唐治等^[6]设计了一种矿用立柱恒阻让位防冲装置,能有效降低立柱承受冲击力。许海亮等^[7]提出了一种新型矿用圆弧形薄壁防冲吸能装置,可有效降低压溃峰值荷载。防冲吸能器的核心在于增大支护中的阻尼,利用优秀的变形吸能特性来使支护体系在围岩冲击下快速吸能并及时发生变形让位,防止整体支护体系失效。

金属泡沫材料与折棱管结构是目前广泛采用的吸能防冲器核心构件,但这两种结构仍存在局限性,金属泡沫材料平台期短,而折棱管结构载荷上升过快且制备复杂。蜂窝结构是一种拥有良好特性的结构,因其比强度高和优异的缓冲性能广泛应用于航空航天、汽车及包装等领域^[8-10]。以蜂窝结构为基础的汽车防冲阻尼器、纸做缓冲外包装、航空航天蒙皮等已证明蜂窝结构的优异性^[11-12]。而在巷道支护领域中,蜂窝结构应用还不广泛。蜂窝结构优异的缓冲吸能特性能够满足防冲吸能器缓冲吸能的理念,是能用于巷道支护的优秀结构。蜂窝结构最基本的胞元截面形状为正六边形,在此基础上又发展了许多其他胞元截面形状的多孔材料。但目前对于蜂窝结构的研究多集中于其力学特性,缺乏对蜂窝结构变形失稳机理的研究,关于单胞承载方向对蜂窝力学性能及失稳模式的影响研究仍有欠缺。

笔者将蜂窝结构引入矿井支护,研究不同单胞形状与不同承载方向蜂窝结构的力学特性,并观测其失稳模式的变化;进行了仿真数值模拟,从单胞变形出发,阐明蜂窝变形失稳机理;开展真实尺寸下蜂窝吸能结构的仿真模拟,与常规吸能防冲器进行比较,对蜂窝结构防冲能力进行评估,所得结论可以为支护系统防冲吸能器的设计提供理论依据。

1 单胞形貌和承载方向对蜂窝结构吸能特性影响

1.1 试样制备与试验仪器

蜂窝结构防冲吸能器如图 1 所示,防冲吸能器设置于液压支架底部,在防冲吸能器中加入蜂窝结构,在冲击来临时立柱受压将冲击能量传导至蜂窝结构,蜂窝结构变形吸能从而为液压支柱排液让位提供缓冲阶段。

3D 打印,又称增材制造,是一种让材料快速成型的技术,在航空、生物学、建筑等领域使用频繁^[13-14]。3D 打印最大的优点在于使材料摆脱模具的束缚而且能够制备成复杂几何形状,同时 3D 打印结构参数容易控制,能够因地制宜,根据现场情况单独设计结构参数制备出最优结构。因此试验所用蜂窝结构采用增材制造代替传统工艺。

试验选取聚乳酸(PLA)材料,PLA 是一种合成的高分子材料,其相容性、可降解性、机械性能和物理性能良好,加工便利,应用广泛。为了重点研究蜂窝形貌对其力学性能的影响,增材制造所用材料选择了加工方便、价格低廉的 PLA 材料。本次试验所使用 PLA 材料具体参数如表 1 所示。

表 1 PLA 材料参数

Table 1 Material parameters

材质	打印温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	屈服强度/MPa	熔点/℃
PLA	200~230	1.25	36	150

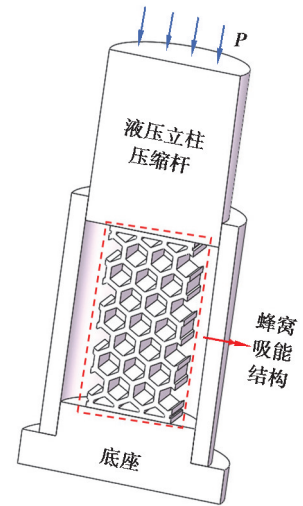


图 1 蜂窝结构防冲吸能器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of honeycomb structure antishock energy absorber

选取四边形和六边形(图 2)作为蜂窝的单胞截面,研究 2 种单胞形状的蜂窝轴向吸能能力。相对密度是蜂窝结构的重要结构参数,控制相对密度的稳定能保证在相同体积下不同蜂窝结构的真实体积一致。在此选用了六边形单胞形状与四边形单胞形状的蜂窝结构,其相对密度依次为 ρ_a 和 ρ_b ^[9,15]。

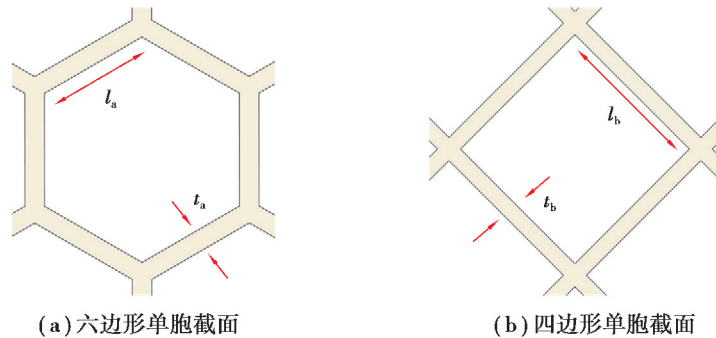


图 2 不同单胞形状的蜂窝结构截面图

Fig. 2 Cross-sectional views of honeycomb structures with different unit cell shapes

$$\rho_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t_a}{l_a} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t_a}{l_a} \right), \quad (1)$$

$$\rho_b = 2 \frac{t_b}{l_b} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t_b}{l_b} \right), \quad (2)$$

式中: l_a 是正六边形蜂窝单胞边长; t_a 是正六边形单胞壁厚; l_b 是正四边形蜂窝单胞边长; t_b 是正四边形单胞壁厚。

考虑蜂窝单胞形状的影响之外,还考虑了单胞承载方向的影响。因此选取 4 种单胞形貌的蜂窝结构,具体参数见表 2。具体制备流程为:利用 Solidworks 软件对蜂窝结构进行设计并建模,如图 3 示,控制相对密度在 0.19。将制作好的模型以 STL 文件导入切片软件,模型的角度控制、弦长等参数均按默认设定,填充率设定为 95%。3D 打印机采用 MakerBot Replicator, xy 轴定位精度: 1.1×10^{-2} mm, z 轴: 2.5×10^{-3} mm,打印精度:0.1 mm,喷嘴直径:0.4 mm。

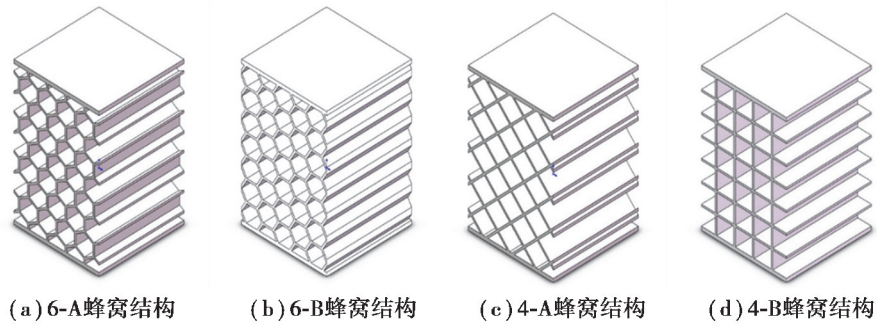


图 3 蜂窝结构 3D 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of honeycomb structure

表 2 蜂窝结构具体参数表

Table 2 Parameters of honeycomb structure

名称	尺寸/mm	单胞截面形状	单胞承载方向	单胞边长 l /mm	单胞壁厚 t /mm
4-A	40×40×60	正四边形	对角承载	8.00	0.8
4-B	40×40×60	正四边形	横边承载	8.00	0.8
6-A	40×40×60	正六边形	对角承载	4.62	0.8
6-B	40×40×60	正六边形	横边承载	4.62	0.8

为测试不同蜂窝结构在受压状态下的吸能作用,采用三思微机控制电子万能试验机进行单轴压缩试验,试验系统如图 4 所示。装置型号为 UTM5305SYXL,设计最大试验力 300 kN,试验力测量范围为 0.4%~100.0%,准确度等级 0.5,位移控制速率范围为 0.001~250.000 mm/min。为了分析蜂窝结构失稳机制,选择静态加载模式,试验采用位移加载,速率为 2 mm/min。

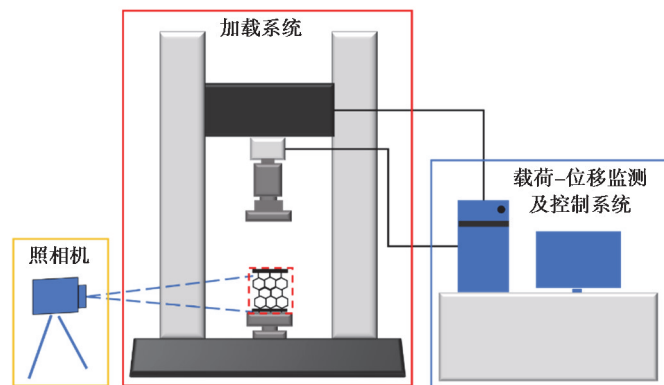


图 4 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the test system

1.2 应力应变曲线特征

试验结束后对获得的载荷位移曲线进行处理,将载荷位移转换为名义应力与名义应变,如式(3)和(4)所示。用名义应力与名义应变更能体现单位体积上的吸能作用,处理过的应力应变曲线如图 5。

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta x}{L} \tag{4}$$

区别于普遍的 3 阶段划分方式^[16],将蜂窝结构的试样整体应力应变曲线划分为以下 4 个阶段。

I:首次坍塌前,应力曲线先随应变线性增长,随后除 4-B 外将会进入屈服阶段。应力曲线为逐渐缓慢的增长趋势,随后到达第 1 次峰值。在第 1 次峰值来临之前蜂窝没有发生坍塌,撤去外力后蜂窝还能恢复本身基础形貌。

II:稳态塑性压溃段(平台期),在此阶段蜂窝开始逐层坍塌。应力曲线随蜂窝的坍塌呈现出波动,但整体应力曲线保持平稳。

III:密实压缩段,此时蜂窝结构内部大部分胞元发生坍塌,整体蜂窝单胞被压密,但此时仍存在未压溃的蜂窝单胞,因此应力随应变呈现出波动式的增长趋势。

IV:完全压密段,此时全部蜂窝都发生坍塌,应力曲线随应变呈指数增长。

如图 6 所示,4-A 结构拥有波动最小的稳态塑性压溃段,其次是 6-B 结构。6-A 蜂窝拥有最高的平台应力和适中的均差,因此其平台应力期承载力高且波动较低。6-B 蜂窝与 4-A 蜂窝首次坍塌应力峰值较低,而 4-A 蜂窝平台应力期波动最小。六边形蜂窝平台应力普遍大于四边形蜂窝。4-B 蜂窝平台应力低且波动最大。

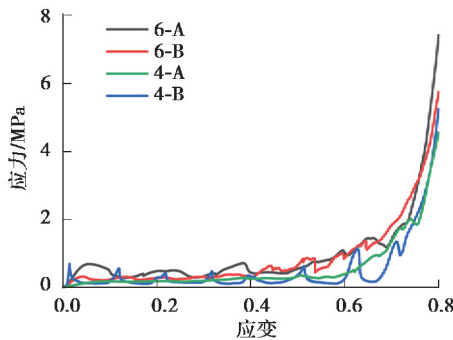


图 5 不同截面形貌蜂窝应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of honeycomb

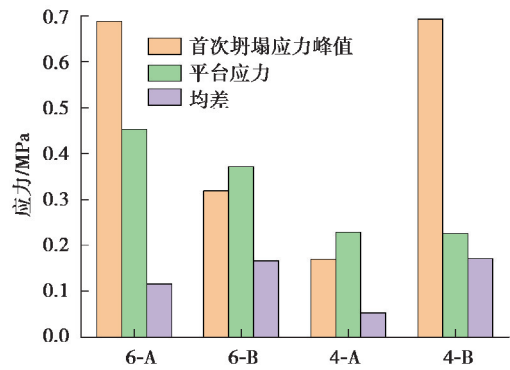
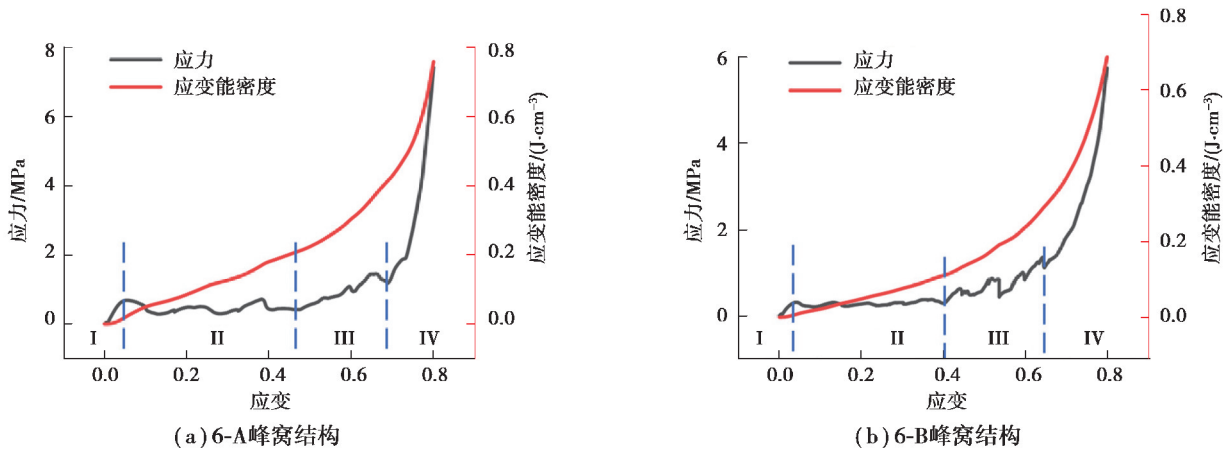


图 6 不同单胞形貌蜂窝应力曲线参数
Fig. 6 Mechanical response characteristic parameters

对应力应变曲线进行积分,能得到单位体积下的应变能(式(4))及应变能密度随应变的演化规律,如图 7 所示。整体应变能密度变化为指数增长。六边形蜂窝结构拥有比四边形蜂窝结构更高的吸能效率。四边形蜂窝结构有更缓慢的吸能曲线,且承载方向对四边形蜂窝结构吸能效率影响较小。

$$U = \int \sigma d\epsilon \tag{4}$$



(a) 6-A 蜂窝结构

(b) 6-B 蜂窝结构

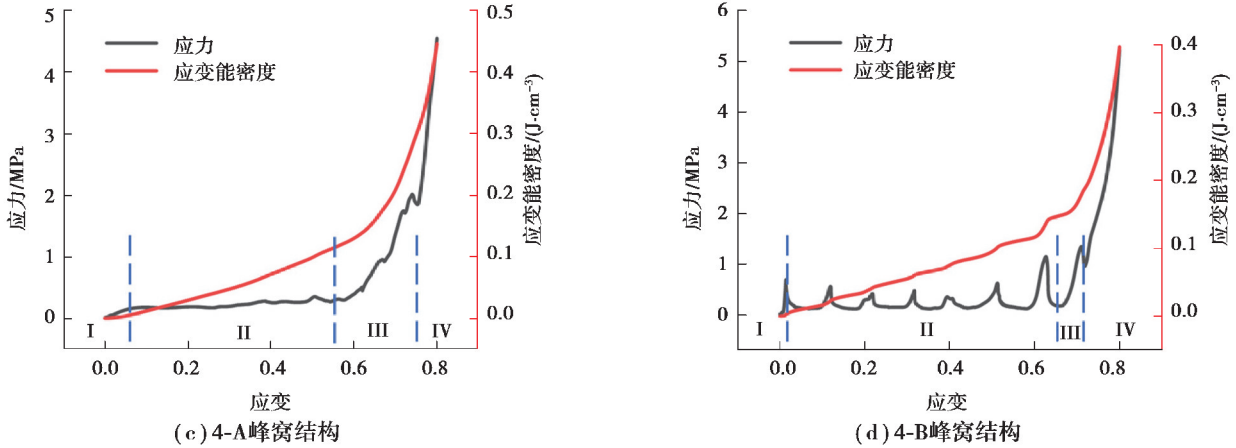


图 7 应力与应变能密度演化曲线

Fig. 7 Stress and strain energy density evolution curve

比较各个形貌蜂窝每个阶段占比,如图 8 所示。从图 8 中可知,蜂窝单胞的承载方向将会影响蜂窝的 III、IV 阶段。对角承载的蜂窝结构 III 阶段总是长于横向承载的蜂窝,而对角承载的蜂窝 IV 阶段和 I 阶段占比短于横向承载。六边形单胞的蜂窝结构相比四边形单胞蜂窝结构 II 阶段结束得更快,先进入压密段。相比之下 4-B 结构拥有最长的稳态塑性压溃段,6-A 结构拥有最长的密实压缩段和最短的稳态塑性压溃段。如图 9 所示,6-A 结构总应变能密度最高,且大部分应变能积累在 II、III 阶段,在较为平稳的坍塌阶段吸收了大部分能量。6-B 结构总应变能密度其次,但其主要吸收能量阶段在 IV,而 IV 阶段为完全密实压缩段,应力曲线呈指数上升,应力增幅过高。四边形单胞蜂窝结构应变能密度普遍低于六边形单胞。

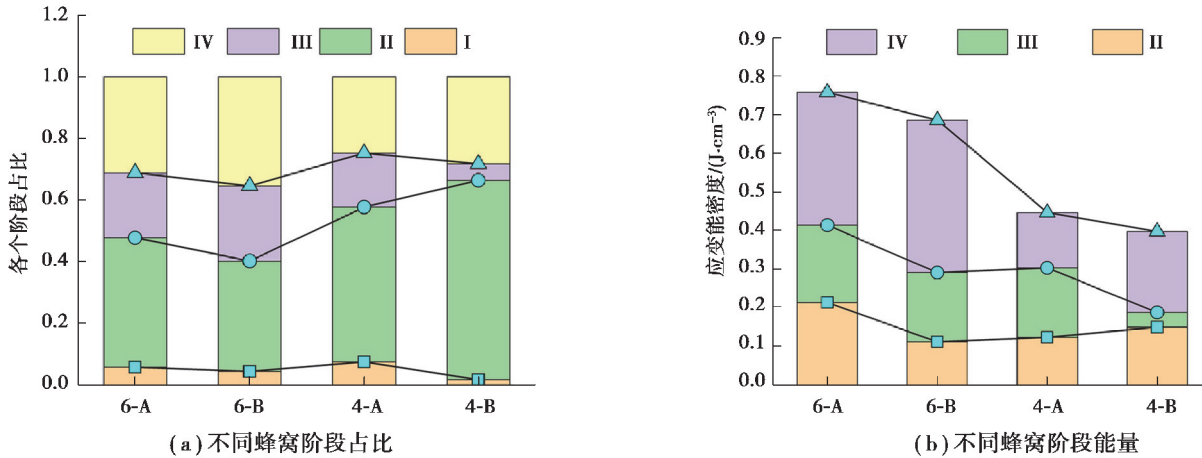


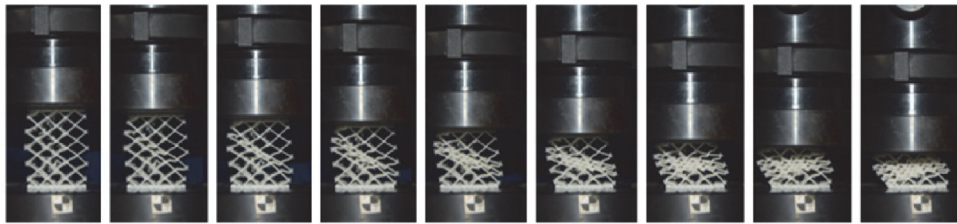
图 8 不同单胞形貌与承载方向影响下蜂窝结构四阶段演化规律

Fig. 8 Four-stage evolution law of honeycomb structure

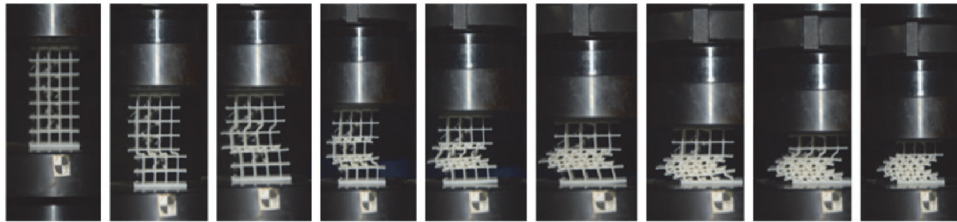
1.3 变形失稳特征

图 9 展示了不同蜂窝结构的试样压缩变形过程。变形模式可以分为 2 类,第 1 类是 4-A 蜂窝结构和 6-B 蜂窝结构,试样整体变形先是斜向的一层层压溃,出现斜向变形带,随后变形带在竖向压力作用下发生旋转变形,逐渐变成横向变形带,最后压密。第 2 类变形模式是 4-B 蜂窝和 6-A 蜂窝结构,试样整体变形是横向的一层一层压溃,且最先压溃区域总是在中部。四边形蜂窝,在结点与结点间的梁出现了明显的失稳,四边形胞壁由“I”型向“S”型转换,导致蜂窝单胞胞壁失效,致使蜂窝单胞受到偏心压力,产生剪切变形。4-A 蜂窝相较 4-B 蜂窝在失稳前表现出明显的塑性变形,4-A 单胞在竖直压力作用下由正菱形向扁平菱形转变,随后发生了胞壁失效。影响单胞失效的主要因素在于剪切变形。对于 4-B 蜂窝,其单层蜂窝失稳对上下相邻蜂窝单胞影响较小。六边形蜂窝胞壁也有向“S”型转换趋势,但相较四边形蜂窝变化程度较低。正六边形单

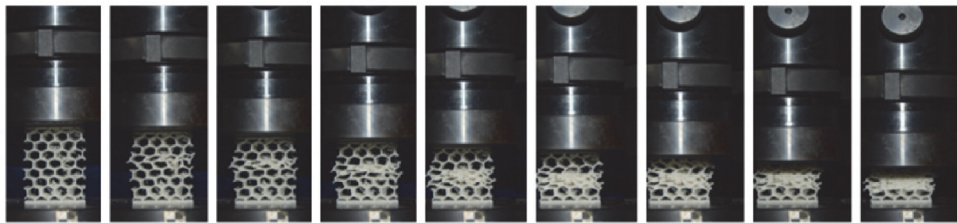
胞在竖直压力作用下胞壁发生轻微屈曲,致使单胞产生不均匀受力,从而受到剪切应力作用,导致单胞朝一个方向剪切变形,进而影响到相邻胞元,最终导致一层蜂窝坍塌。



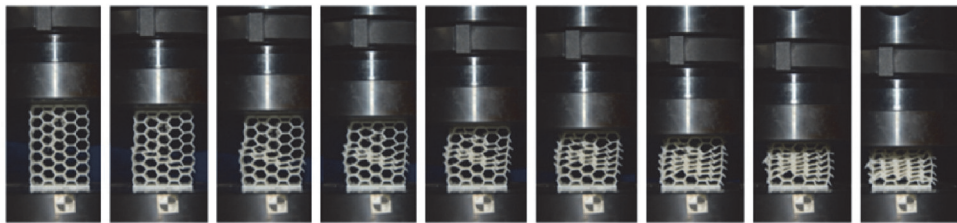
(a) 4-A蜂窝结构整体变形模式演化图



(b) 4-B蜂窝结构整体变形模式演化图

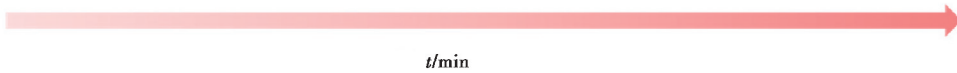


(c) 6-A蜂窝结构整体变形模式演化图



(d) 6-B蜂窝结构整体变形模式演化图

3 6 9 12 15 18 21 24 27



t/min

图 9 试样变形过程

Fig. 9 Sample deformation process

对四边形蜂窝单胞进行受力分析,如图 10 所示。4-A 单胞结构可能存在 3 种受力状态^[17]。4-A 单胞在外力作用下产生变形转化为扁平菱形单胞。此时蜂窝单胞处于弹性阶段,铰点因为单胞形状的改变存在竖直和横向两个方向位移。因为蜂窝结构相邻单胞共用一个铰点,因此相邻单胞会受到横向应力作用,同时纵向及横向两种变形情况的影响下蜂窝会受到剪切作用。将胞壁简化为梁模型,单胞胞壁受到复杂应力影响会发生弯曲变形,此时的弯曲变形将进一步加剧蜂窝的剪切变形。如图 10(b)所示,对 4-B 蜂窝结构的 1 个单胞进行受力分析,4-B 单胞结构存在 2 种受力状态。4-B 单胞在单轴应力作用下主要是胞壁在竖直应力下产生了压杆失稳,压杆失稳导致胞壁发生屈曲变形进而影响到铰点产生位移,使 4-B 单胞发生剪切变形。

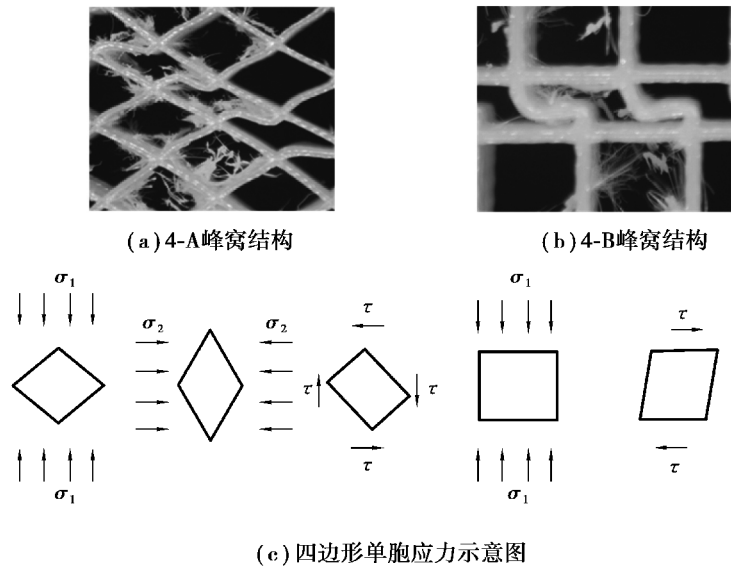


图 10 四边形蜂窝单胞变形模式

Fig. 10 Deformation mode of quadrilateral honeycomb unit cell

如图 11 所示,对六边形蜂窝结构的 1 个单胞进行受力分析。六边形单胞结构存在 3 种受力状态。6-A 蜂窝与 6-B 蜂窝结构都存在这 3 种受力状态,区别在于其发生 3 种受力状态的顺序及缘由不同。与四边形单胞结构不同的是,六边形蜂窝单胞 3 个单胞胞壁共用 1 个铰点,且更容易发生剪切变形而不是胞壁失稳。但六边形单胞的变形同样是 1 个单胞的变形影响到铰点的位移,进而引发了相邻六边形单胞的变形,最终导致整行蜂窝发生了坍塌。

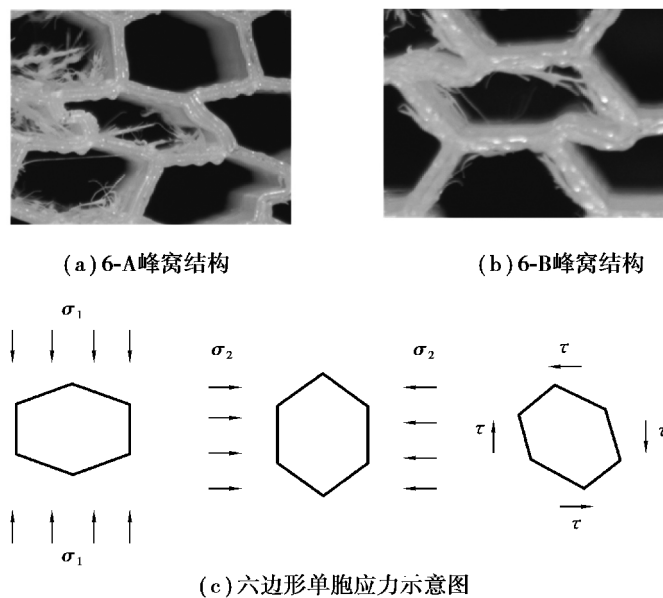


图 11 六边型蜂窝单胞变形模式

Fig. 11 Deformation mode of hexagonal honeycomb unit cell

2 蜂窝吸能结构防冲能力评估

这里采用通用仿真模拟软件 Abaqus 对吸能构件进行有限元分析,模型选用 Solid 实体单元,通过 Solidworks 阵列进行建模并导入 Abaqus。基于 PLA 材料力学属性,采用理想弹塑性模型,具体参数如表 3

所示。为进行动态防冲能力评估,采用动态显示分析步。为防止出现单元畸变,步长设置为 0.01。吸能结构放置在 2 块刚性压板中间,在压板中心设置参考点,参考点与刚性压板耦合连接,下压板参考点上所有自由度约束为 0,上压板参考点设置向下 45 mm 的位移边界条件,位移加载采用平滑分析步,最终使得样品完全压溃。有限元模型中压板与样品间摩擦系数为 0.3。样品采用通用接触,压板与样品表面切向接触属性采用罚接触。采用八节点六面体减缩积分实体单元对整体进行网格划分,共面蜂窝网格尺寸为 1 mm,异面侧网格尺寸为 4 mm,重点分析共面侧,刚性板网格尺寸为 10 mm,如图 12 所示。导出上压板参考点支反力与位移变化数据和中心蜂窝结构上端节点应力应变数据。

表 3 模拟材料参数设置

Table 3 Simulation material parameters

E/MPa	ν	Σ/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1 024	0.24	36	1 000

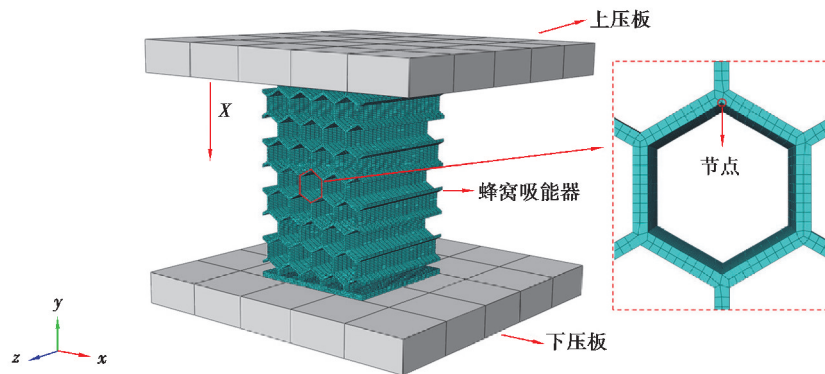


图 12 六边形蜂窝吸能结构有限元模型

Fig. 12 Finite Element Model of Hexagonal Honeycomb Energy Absorption Structure

仿真结果如图 13 所示,在压溃阶段模拟曲线与试验曲线匹配度良好,在压密阶段试验曲线先于模拟曲线进入压密上升段,这是由于材料假设理想弹塑性而材料本身屈服阶段后有强化阶段,以及使用动态分析步考虑了惯性力作用致使应力曲线呈现出滞后现象。如图 14 所示是压缩过程中六边形吸能结构的变形过程,其仿真模拟的破坏模式与试验结果一致,都是正六边形变形导致的单层单胞坍塌进而引发的连锁压溃效应,整体蜂窝坍塌的原因仍然在于单胞的剪切变形。且从图 14 中能看出单胞承载力主要集中于铰点两侧,而在剪切变形后应力主要集中于铰点一侧,表现为铰点两侧应力不平衡从而导致铰点发生位移,整体单胞呈现出剪切变形。

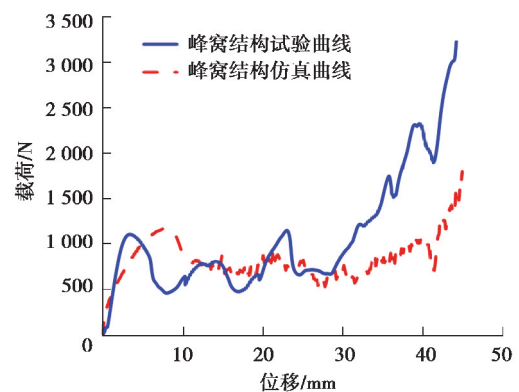


图 13 六边形蜂窝吸能结构有限元模拟及试验位移—载荷曲线图

Fig. 13 Finite Element Simulation and Test Displacement-Load Curve of Hexagonal Honeycomb Energy-absorbing Structure

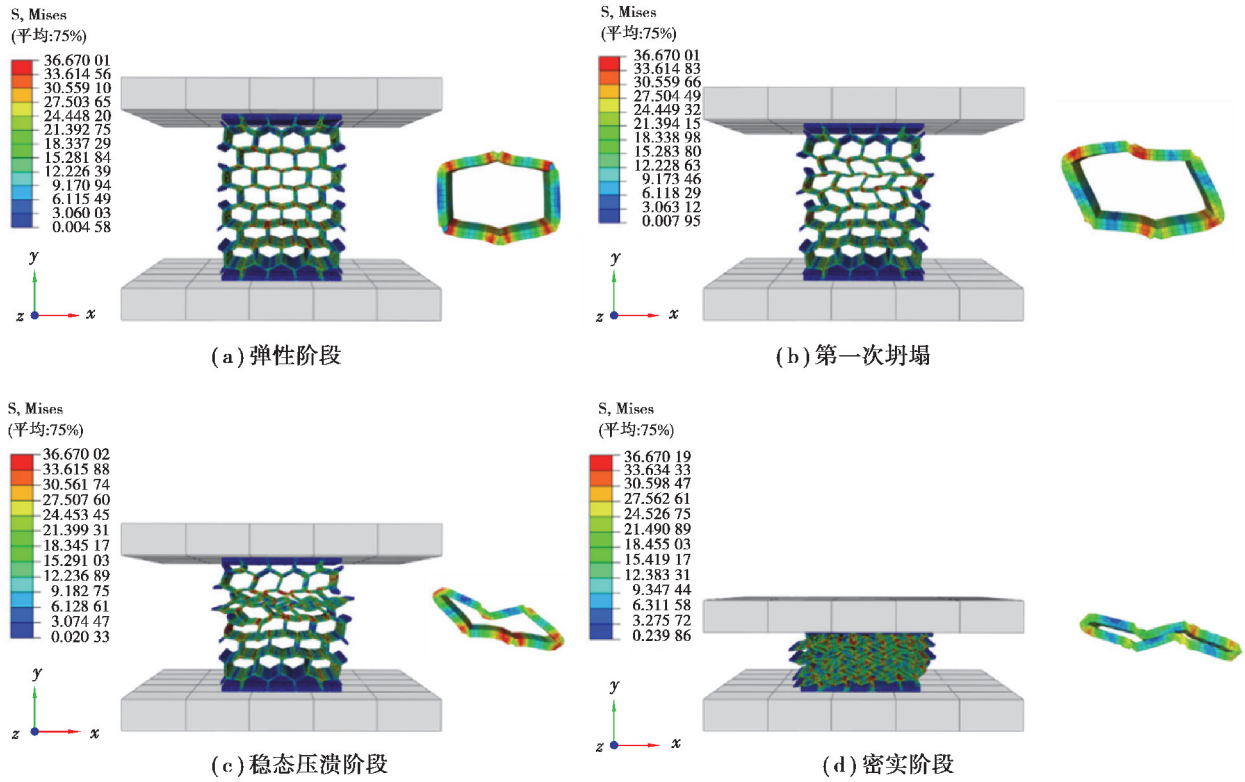


图 14 六边形蜂窝吸能结构有限元模拟应力云图及中心单胞应力云图

Fig. 14 Finite element simulation stress nephogram and central unit cell stress nephogram of hexagonal honeycomb energy-absorbing structure

图 15(a)展示了选取的 1 个节点的空间位移演化曲线。节点除了竖直位移外还发生了横向偏移,且此偏移发生在弹性阶段之后。节点竖直位移呈明显的 3 段特征:第 1 段是线性上升阶段,此时单胞处于弹性阶段,节点随载荷上升产生竖直位移;第 2 阶段为平缓阶段,此时单胞进入塑性阶段,位移量随载荷的变化率下降;第 3 阶段为加速上升阶段,此时单胞胞壁发生屈曲失效导致单胞产生剪切变形,节点产生横向位移且竖直位移变化率加快。图 15(b)展示了单个节点的应力演化曲线,对节点影响最大的为横向与纵向的主应力。在位移加载作用下单胞节点先是受到了上一层单胞胞壁的竖向载荷,导致节点处受拉伸应力,表现为横向应力的快速增加,随后单胞发生剪切变形,节点处拉伸应力下降。而因为单胞一直受竖向的挤压,所以在纵向一直承受逐渐增大的纵向应力。

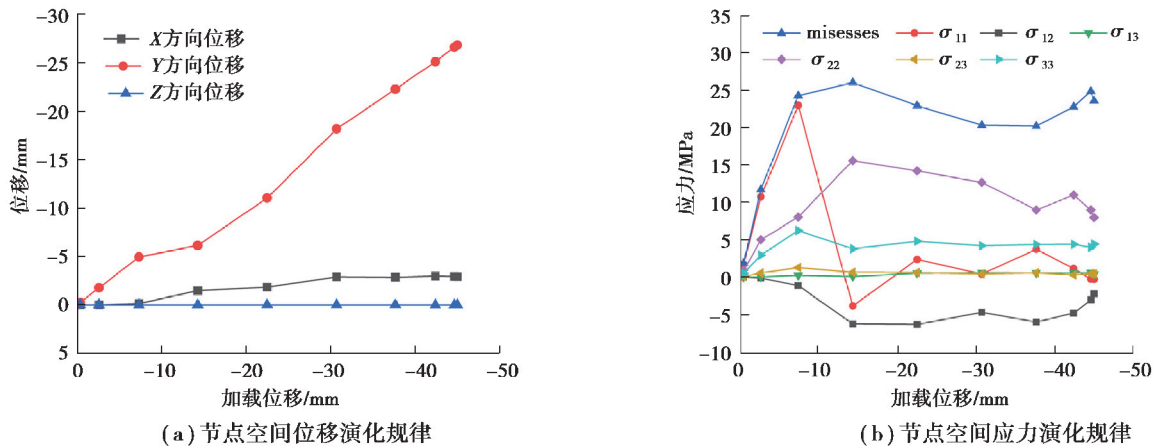


图 15 节点空间位移及应力演化曲线

Fig. 15 Nodal space displacement and stress evolution curve

采用有限元模拟对实际工况中运用的吸能结构进行防冲能力的评估。选取相对密度一致的蜂窝结构进行模拟,其壁厚为 4 mm,壁长为 40 mm。整体模型设置参考小尺寸仿真模拟,如图 12 所示。蜂窝结构尺寸调整为 160 mm×160 mm×350 mm,材料选用理想弹塑性材料,弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\mu=0.35$,密度为 7.9×10^3 kg/m³,材料屈服应力为 700 MPa^[18]。分析设置采用动态显示分析步,边界条件设置为上压板 4.5 m/s 恒速压缩,直至压溃。将已有金属泡沫材料与折楞管结构^[18-19]与仿真模拟蜂窝结构作比较,结果如图 16 所示。相比金属泡沫材料与折楞管结构,蜂窝结构载荷曲线有明显的缓冲上升段,其载荷曲线先是缓慢增长,随后呈指数增长趋势,而金属泡沫材料与折楞管结构在达到初次峰值前上升迅速,缺乏缓冲期。相比金属泡沫与折楞管结构,蜂窝结构拥有更平稳更长的平台应力期,因此其吸能效果更加稳定。同时蜂窝结构平台应力高于 100 kN,满足初撑力要求^[5],吸能值最高能达到 10^5 J,满足吸能器防冲能力需求。

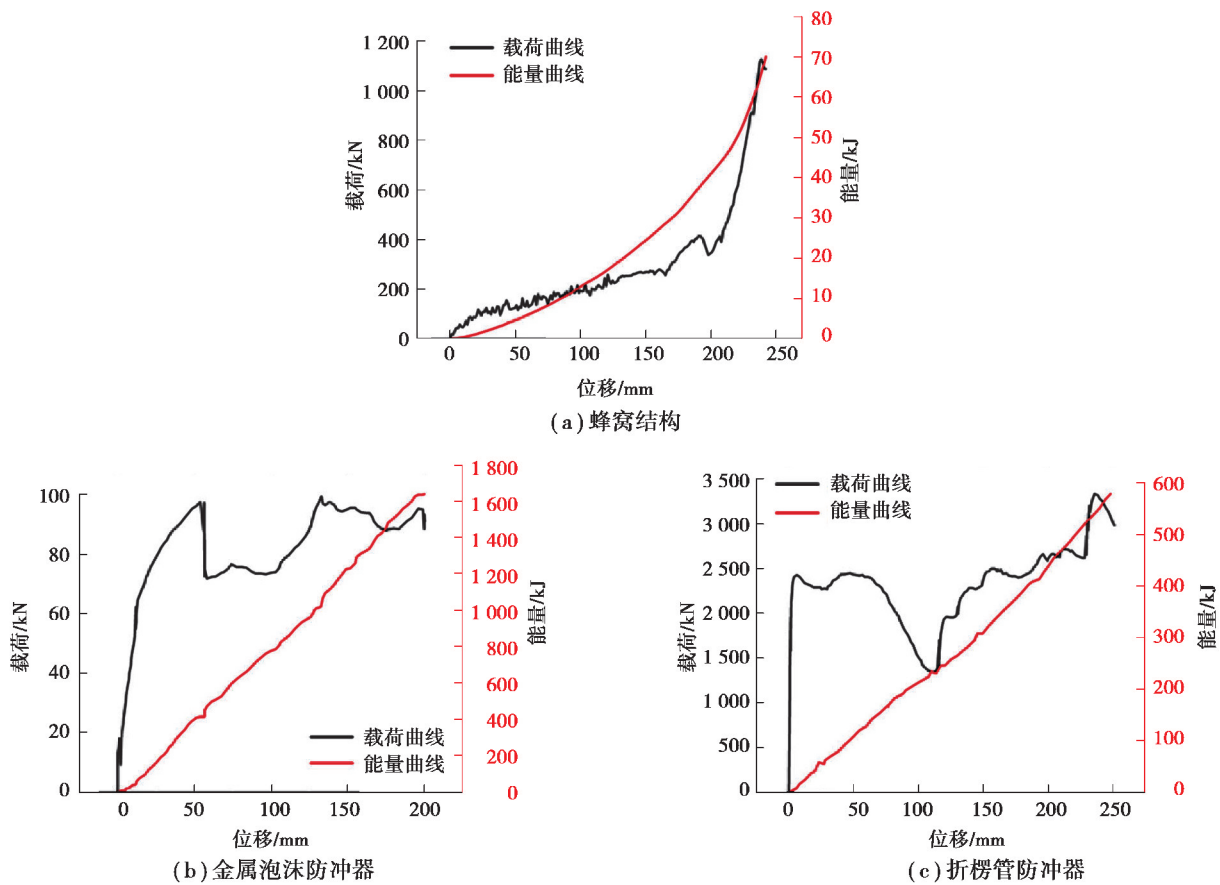


图 16 吸能结构位移—载荷曲线与位移—能量曲线图

Fig. 16 Displacement-load curve and displacement-energy curve of energy-absorbing structure

3 结 论

基于增材制造技术,制备了四边形及六边形单胞形状的蜂窝结构,并比较了单胞形状与承载方向不同的 4 种蜂窝结构应变能密度、平台应力长度及平台应力波动值等关键参数。基于此结果,选取对角承载的六边形单胞蜂窝结构进行动态仿真模拟,对蜂窝结构在冲击地压应用中的防冲能力进行了评估。得到如下主要结论:

1) 单胞结构的形状与承载方向皆会影响蜂窝整体的应力曲线,对角承载六边形单胞蜂窝结构拥有较高的平台应力,但其稳态压溃阶段较短。对角承载四边形单胞蜂窝结构拥有最稳定的平台应力阶段,其中横向

承载四边形单胞蜂窝和对角承载六边形单胞蜂窝拥有最高的首次压溃强度。在 4 种不同蜂窝结构中, 对角承载六边形单胞蜂窝在相同变形量下应变能密度最高。

2) 蜂窝结构的变形坍塌主要源于单胞壁的屈曲失稳以及单胞整体的剪切变形。蜂窝结构整体的失稳变形可以划分为初始横向变形带或斜向变形带 2 种逐层坍塌模式, 而这种失稳模式主要由蜂窝单胞的承载方向决定。四边形单胞蜂窝结构相比六边形单胞蜂窝结构胞壁屈曲更加严重, 而六边形单胞的失稳主要以剪切变形为主。

3) 蜂窝结构有限元模拟结果与试验结果位移-载荷曲线有相同趋势, 其整体破坏形式相同。切应力是造成单胞失稳的最主要因素, 拉伸应力在剪切变形前对单胞节点变形起主要作用。选取对角承载六边形单胞蜂窝结构进行防冲能力评估, 其载荷曲线上升稳定, 吸能值能达到 10^5 J 以上, 满足吸能防冲器要求, 且蜂窝型吸能结构加工方便, 失稳模式稳定, 载荷曲线上升缓慢, 有充足的缓冲阶段。

参考文献:

- [1] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1809-1814.
Kang H P, Wang J H, Lin J. Study and applications of roadway support techniques for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1809-1814. (in Chinese)
- [2] 王其洲, 谢文兵, 荆升国, 等. 动压影响巷道 U 型钢支架-锚索协同支护机理及其承载规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 301-307.
Wang Q Z, Xie W B, Jing S G, et al. Research on U-shape steel frame and anchor cable collaborative support mechanism and loading law of roadway under dynamical pressure impact[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 301-307. (in Chinese)
- [3] Wang G F, Li G, Dou L M, et al. Applicability of energy-absorbing support system for rockburst prevention in underground roadways[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104396.
- [4] 潘一山, 肖永惠, 李忠华, 等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222-228.
Pan Y S, Xiao Y H, Li Z H, et al. Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 222-228. (in Chinese)
- [5] 潘一山, 肖永惠, 李国臻, 等. 一种矿用消波耗能缓冲装置设计及试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 649-655.
Pan Y S, Xiao Y H, Li G Z, et al. Design of a buffer device for absorbing waves and energy in mining and its primary experiments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 649-655. (in Chinese)
- [6] 唐治, 潘一山, 朱小景, 等. 矿用立柱恒阻让位防冲装置的设计及其特性分析[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(6): 54-59.
Tang Z, Pan Y S, Zhu X J, et al. Design of constant resistance giving way and anti-impact device of mining column and its characteristic analysis[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(6): 54-59. (in Chinese)
- [7] 许海亮, 郭旭, 宋义敏, 等. 新型矿用圆弧形薄壁防冲吸能装置屈曲特性数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 90-96.
Xu H L, Guo X, Song Y M, et al. Numerical analysis on buckling characteristics of a new circular arc thin-wall anti-impact and energy-absorbing device for mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(9): 90-96. (in Chinese)
- [8] Xiang J W, Du J X. Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb structure under axial impact loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 696: 283-289.
- [9] Liu Y, Zhang X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98-109.

- [10] Zhang X, Zhang H. Theoretical and numerical investigation on the crush resistance of rhombic and kagome honeycombs[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 143-152.
- [11] Nia A A, Parsapour M. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 74: 155-165.
- [12] Ghamarian A, Zarei H R, Abadi M T. Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(10): 1312-1319.
- [13] 赵峻宏, 朱世范. 3D打印蜂窝结构在临时性建筑中的力学性能分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(12): 98-104.
Zhao J H, Zhu S F. Analysis of mechanical properties of 3D-printing honeycomb in temporary construction[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(12): 98-104. (in Chinese)
- [14] 沈响. 3D打印技术在航空制造中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
Shen X. Research on application of 3D printing technology in aeronautical manufacture[D]. Xi'an: Changan University, 2017. (in Chinese)
- [15] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 组合蜂窝材料面内冲击性能的研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(6): 220-225.
Zhang X C, Liu Y, Zhang Z M. Research on dynamic properties of supercell honeycomb structures under in-plane impact loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(6): 220-225. (in Chinese)
- [16] Wang A J, McDowell D L. Yield surfaces of various periodic metal honeycombs at intermediate relative density[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(2): 285-320.
- [17] 刘涛, 安子军. 菱形多孔结构线性性能分析[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(6): 1348-1354, 1521.
Liu T, An Z J. Linear performance analysis of rhombohedral porous structures[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(6): 1348-1354, 1521. (in Chinese)
- [18] 马箫, 潘一山, 张建卓, 等. 防冲支架的核心吸能构件设计与吸能性能研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 1171-1178.
Ma X, Pan Y S, Zhang J Z, et al. Design and performance research on core energy absorption component of anti-impact support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1171-1178. (in Chinese)
- [19] 高永新, 谭淼, 谢苗. 矿用缓冲吸能装置的优化与实验[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3325-3332.
Gao Y X, Tan M, Xie M. Improvement and experimental study of buffer energy absorption device for mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3325-3332. (in Chinese)

(编辑 张 苹)