

防冲吸能液压支架点阵负泊松比吸能结构设计及优化

沈佳兴^{1,2*} 董建秀² 范中海² 于英华²

1. 辽宁工程技术大学矿产资源开发利用技术及装备研究院, 阜新, 123000

2. 辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新, 123000

摘要:为提高吸能液压支架的吸能特性和支撑特性,设计了一种点阵负泊松比材料的吸能结构。采用仿真分析方法研究了圆形截面、矩形截面的直边内凹星形胞体和内凹六边形胞体的比吸能性能和单位质量支撑力性能,并对比分析确定了矩形截面阶梯边内凹星形胞体的综合性能最佳。利用 Workbench 软件基于参数分析法研究负泊松比材料胞体的高度、胞体宽度、胞体厚度、胞体内缩量对吸能结构的吸能特性和支撑特性的影响规律;建立了吸能和支撑力的神经网络预测模型;建立了吸能结构的多目标参数优化数学模型;基于 fmincon 函数对吸能结构的优化数学模型求解,并确定三个局部最优解。通过对比验证分析确定了吸能结构的最佳结构参数:胞体高度为 40 mm,胞体宽度为 9.2 mm,胞体厚度为 10 mm,胞体内缩量为 5.2 mm。最优参数吸能结构的最大吸能为 1083.36 kJ,平均支撑力为 2162.56 kN,支撑力波动系数为 1.123,支撑力标准差为 28.58 kN,支撑大小适中且支撑力稳定。

关键词:吸能液压支架;负泊松比材料;吸能结构;优化设计

中图分类号:TD355;TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Optimization of Negative Poisson's Ratio Energy Absorption Structures for Anti-shock and Absorption Hydraulic Support Lattices

SHEN Jiaying^{1,2*} DONG Jianxiu² FAN Zhonghai² YU Yinghua²

1. Research Institute of Technology and Equipment for the Exploitation and Utilization of Mineral Resources, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, 123000

2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, 123000

Abstract: In order to improve the energy absorption and supporting characteristics of energy absorption hydraulic supports, an energy absorption structure of lattice material with negative Poisson ratio was designed. Specific energy absorption performance and support force per unit mass performance of straight-edged concave star-shaped cells and concave hexagonal cells with circular cross section and rectangular cross section were investigated using simulation analysis methods. It was determined that the comprehensive performance of the cells with rectangular cross-section stepped edge concave stars was the best. Using Workbench software based on parametric analysis, the influence rules of cell body height, cell body width, cell body thickness and cell body shrinkage of materials with negative Poisson ratio on energy absorption and support characteristics of the energy absorption structure were studied, and the neural network prediction model of energy absorption and support forces was established. The multi-objective parameter optimization mathematical model of energy absorption structures was established. The optimization mathematical model of energy absorption structures was solved based on fmincon function, and three local optimal solutions were determined. Through comparison and verification analyses, the optimal structural parameters of energy absorption structures were determined as follows. The height of the cell body is as 40 mm, the width of the cell body is as 9.2 mm, the thickness of the cell body is as 10 mm, and the shrinkage of the cell body is as 5.2 mm. The maximum absorption energy of the optimal parameter energy absorption structures is as 1083.36 kJ, the average supporting force is as 2162.56 kN, and the supporting force fluctuation coefficient is as 1.123, the standard deviation of supporting force is as 28.58 kN. The support size is moderate and the supporting force is stable.

Key words: energy absorption hydraulic support; negative Poisson ratio material; energy absorbing structure; optimal design

0 引言

防冲吸能液压支架的核心是让位吸能结构,吸能结构的塑性让位变形使液压支架能够在较低的载荷水平下吸收冲击地压的能量进而保护液压支架。吸能结构性能的好坏对防冲吸能液压支架特性有关键影响,许多学者对吸能结构进行了研究。田立勇等^[1]研究了多胞薄壁结构的吸能特性,并采用 NSGA-II 遗传算法对其结构参数进行优化并确定最佳结构。刘亚强^[2]设计了瓦楞层叠式结构并研究其变形形式及吸能特性。程龙^[3]提出了一种新型的齿式金属切削吸能机理,探讨了不同齿形结构的吸能防冲性能。王春华等^[4]提出了一种变梯度薄壁圆筒吸能防冲构件,对不同尺寸的圆筒进行冲击压溃实验,确定了最优结构,提高了吸能防冲能力。许海亮等^[5]基于门式支架设计了一种柔性链支护结构,提高了支架的水平支护能力。肖晓春等^[6]设计了一种泡沫铝多胞方管结构,通过冲击仿真实验证明泡沫铝多胞方管结构比普通方管具有更高的抗冲击性能。唐治等^[7]设计了一种六边薄壁吸能防冲构件,研究其抗冲击能力,结果表明它拥有恒定的反作用。郝志勇等^[8]设计了折纹筒吸能构件,将其应用到立柱支护结构中,并进行准静态压缩实验,结果表明它具有较好的稳定性。杨雨泽^[9]设计了凹角圆管和多胞圆管式吸能结构,通过对不同参数的结构进行数值模拟分析,验证了吸能构件压溃吸能的可靠性。刘欢^[10]提出了一种能实现恒阻变形的直纹管外翻型构件,并通过 MATLAB 遗传算法优化结构参数。宋嘉祺^[11]设计了一种压溃过程中荷载-位移曲线波动较小的恒阻吸能装置并研究其吸能性和支护性。赵红斌^[12]研究了梯度蜂窝缓冲装置的力学性能,通过冲压实验得到其吸能位移曲线。韩冲^[13]提出一种加肋板圆管式的防冲吸能构件,研究其不同肋板布置方式和壁厚的吸能特性。上述研究均是以“正泊松比”材料的塑性变形实现防冲击吸能的,其吸能大小有待提高、支撑力波动较大。针对该问题,本文提出采用“负泊松比”材料作为吸能构件。负泊松比材料是一种特殊的力学超材料,受到轴向拉伸(或压缩)时,其垂直方向膨胀(或收缩)。该材料具有较高的抗冲击吸能性、抗断裂性、减振隔振,且受压收缩,具有保护包装结构等优点。目前,研究人员提出多种不同的负泊松比结构:星型结构、双箭头结构、手性结构、穿孔板结构^[14]、褶皱结构^[15]等。吴小莉等^[16]基于 YSH 结构胞元提出一种新型负泊松比材料结构,并研究结构参数对其吸能性的影响。

本文以三维内凹六边形和内凹星形为研究对象,分别研究截面为圆形和矩形及边形为直边和阶梯边胞体结构的吸能特性,确定最佳胞体结构。以此为基础,研究点阵负泊松比材料在防冲吸能液压支架上的应用,以吸能最高和支撑力波动系数最小为目标开展了多目标优化设计。

1 吸能液压支架吸能基本理论指标

吸能液压支架的性能通常以吸能量、比吸能、初始支撑力峰值、支撑力均值、支撑力波动系数及支撑力标准差等评判。其中吸能量和比吸能是描述结构吸能特性的指标,初始支撑力峰值、支撑力均值、支撑力波动系数及支撑力标准差是描述支撑特性的指标。

吸能量^[13]

$$E = \int_0^{\Delta} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

式中: δ 为吸能结构的变形量; $F(\delta)$ 为变形量为 δ 时的支撑力; Δ 为最大压缩量。

比吸能

$$\gamma = E/m = \int_0^{\Delta} F(\delta) d\delta / m \quad (2)$$

式中: m 为吸能结构的质量。

吸能装置受到冲击载荷后,吸能结构的支撑力迅速升高然后开始下降,并会在一个较低的水平下吸能并持续变形,当吸能结构被压实后,支撑力会再次逐步提高。初始支撑力峰值 F_{\max} 为首次达到的最大支撑力。支撑力均值 \bar{F} 为吸能结构压缩过程中有效支撑力范围内支撑力的平均值。支撑力波动系数 λ 是初始支撑力峰值 F_{\max} 与支撑力均值 \bar{F} 之比,它反映初始支撑力峰值波动大小, \bar{F} 值越小表明局部波动越小。支撑力标准差 σ 用于描述吸能结构在有效支撑力范围内吸能结构整体波动性^[4]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [F_i(\delta) - \bar{F}]^2}{N}} \quad (3)$$

式中: N 为吸能结构在有效支撑力范围内支撑力的样本容量; i 为样本序号。

2 负泊松比胞体结构设计及性能分析

负泊松比材料的截面拓扑结构分为内凹六边形和内凹星形,结构的边形分为直边和阶梯边,如图 1 所示,其截面为矩形和圆形两种(图中只画出正方形一种)。图 1a 和图 1b 所示内凹六边形的中心轨迹线宽 180 mm,高 150 mm,腰部距中心 50 mm。方形杆截面的长宽均为 5 mm,圆形杆

截面直径为 5 mm。图 1b 阶梯边内凹六边形的阶梯边纵向边长为 12.5 mm, 横向边长均为 10 mm。图 1c 和图 1d 所示内凹星形的中心轨迹线宽和高均为 180 mm, 腰部距中心 50 mm。矩形杆截面长宽均为 5 mm, 圆形杆截面直径为 5 mm。图 1d 的阶梯边的纵向边长均为 18 mm, 横向边长均为 10 mm。将负泊松比材料绕纵向中心轴旋转 90° 得到三维负泊松比材料。

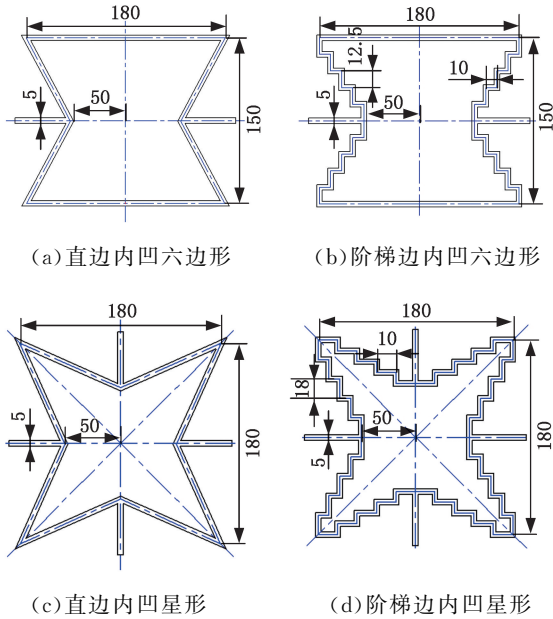


图 1 负泊松比材料截面结构

Fig.1 Negative Poisson ratio material cross-section structure

为研究各种负泊松比胞体结构的吸能特性, 采用 Workbench 显式动力学模块对由两个三维胞体单元构成的负泊松比材料进行压缩吸能特性和支撑特性仿真分析。胞体单元材料通过 Workbench 软件库调取, 型号为 STEEL 4340, 其密度为 7850 kg/m³、泊松比为 0.285, 弹性模量为 205 GPa、屈服强度为 470 Pa, 剪切模量为 818 MPa。分析时网格划分方式为自由网格, 大小为 5 mm, 煤矿井下冲击地压的冲击速度通常为 5~15 m/s^[17], 仿真时施加最大冲击速度 15 m/s, 冲击速度施加在负泊松比材料顶部, 在负泊松比材料底部施加固定约束。各负泊松比胞体压缩比 ϵ 达到 70% 的变形如图 2~图 5 所示。由图可知阶梯边和直边的内凹六边形及内凹星形的整体变形形式基本一致, 均有明显的压缩内凹变形过程。但阶梯边结构会在阶梯弯折区域产生局部弯曲变形, 进而提高结构吸能性。

各负泊松比胞体结构的单位质量支撑力曲线和比吸能曲线如图 6 所示。由图 6a 可知, 矩形内凹星形、矩形阶梯内凹星形、圆形内凹星形的初始

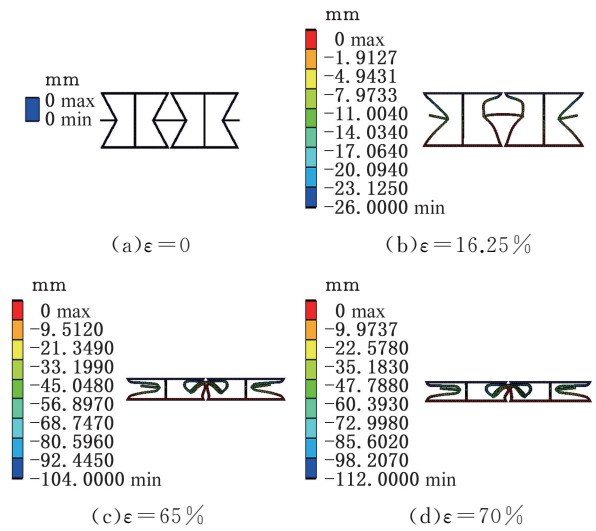


图 2 直边内凹六边形变形

Fig.2 Deformation of straight sides concave hexagon

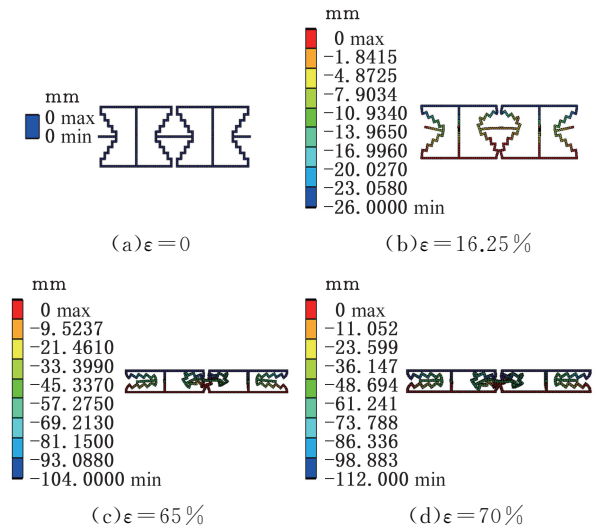


图 3 阶梯边内凹六边形变形

Fig.3 Deformation of stepped side concave hexagon

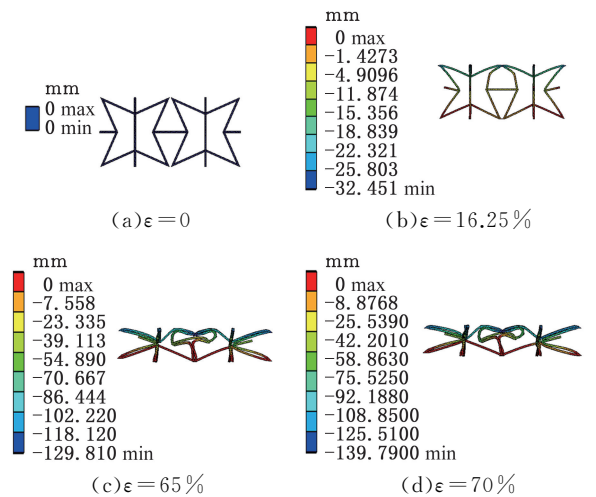


图 4 直边内凹星形变形

Fig.4 Deformation of straight edge concave star

支撑力峰值较大, 随后支撑力迅速降低。当压缩比 ϵ 为 40%~70% 时矩形阶梯内凹星形的单位

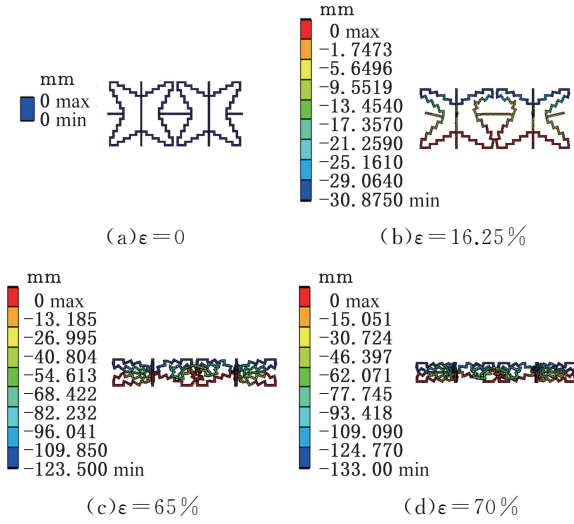


图 5 阶梯边内凹星形变形

Fig.5 Deformation of step edge concave star

质量支撑力最大,说明支撑效果较好。由图 6b 可知,在压缩前期矩形内凹星形比吸能最高,但当矩形阶梯内凹星形的压缩比高于 60%后,比吸能大小迅速增大,且压缩比为 70%时其比吸能最大,达到 15.90 kJ/kg。各胞体的支撑力峰值、支撑力均值、波动系数及支撑力标准差如表 1 所示。由表可知,矩形截面阶梯内凹星形虽然支撑力标准差较大,但其比吸能和支撑力均值最大,支撑力峰值也较高,且波动系数较小,表明矩形截面阶梯内

表 1 胞体性能参数

Tab.1 Cell performance parameters

参数	矩形截面				圆形截面			
	内凹星形	阶梯内凹星形	内凹六边形	阶梯内凹六边形	内凹星形	阶梯内凹星形	内凹六边形	阶梯内凹六边形
比吸能/(kJ · kg ⁻¹)	13.02	15.90	6.62	5.46	5.48	5.71	4.00	3.02
峰值/(kN · kg ⁻¹)	171.30	131.49	60.19	62.14	122.13	57.14	60.07	37.76
均值/(kN · kg ⁻¹)	49.50	56.02	25.56	25.05	24.22	24.82	14.00	13.23
波动系数	3.46	2.35	2.36	2.48	5.04	2.30	4.29	2.85
标准差/(kN · kg ⁻¹)	41.74	40.84	16.44	16.97	28.07	17.69	12.96	8.59

3 吸能结构参数响应曲面分析

3.1 吸能液压支架吸能结构设计

本文以 ZQ3300 型吸能液压支架为研究对象,设计吸能结构如图 7 所示,包括底座、内置的吸能结构、缸筒、液压立柱底部。当吸能液压支架受到冲击载荷时,液压支架立柱的底部发生位移

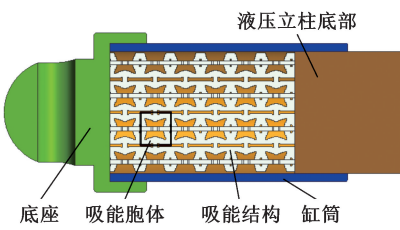


图 7 吸能结构

Fig.7 Energy absorption structure

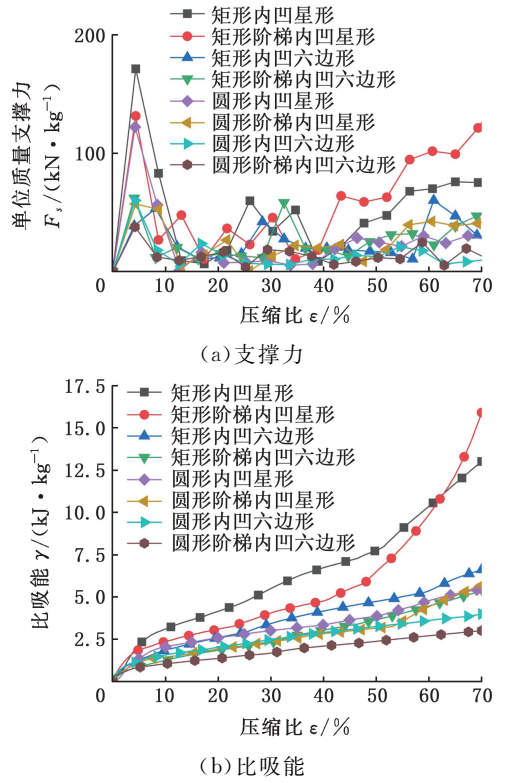


图 6 不同胞体结构性能

Fig.6 Different cell body structural properties

凹星形结构负泊松比胞体既能够保持较大的吸能性且支撑力波动性也较小,因此是最优胞体结构,选择该形胞体为吸能液压支架的吸能结构。

压缩吸能,吸能结构变形产生支撑力并在压缩变形时保证合适的支撑力情况下持续吸收冲击能量达到吸能作用。ZQ3300 型吸能液压支架的初始峰值载荷范围为 1652~2478 kN,压缩吸能结构的内径为 230 mm,压缩行程 350 mm。

3.2 胞体结构参数响应曲面分析

为分析胞体结构参数对吸能结构性能的影响,研究图 8 所示的各参数。各参数及范围分别为:胞体高度 $H = 40 \sim 80$ mm、胞体内缩量 $L = 2 \sim 10$ mm、胞体边宽度 $B = 2 \sim 10$ mm、胞体边厚度 $T = 2 \sim 10$ mm。利用 Workbench 参数化分析模块自动生成表 2 所示 55 种参数组合,并利用软件分析吸能结构性能。

分析时采用 Workbench 软件内置的三维建模模块建立吸能结构的仿真模型,因模型具有对

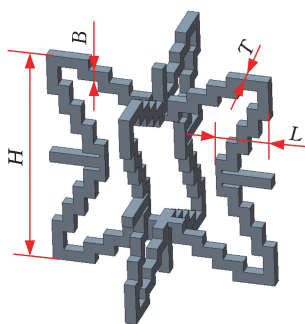


图 8 胞体参数

Fig.8 Cell body parameters

称性,因此,为提高计算效率分析整体模型的 1/4 结构,采用 Explicit Dynamics 模块分析图 9 所示的吸能结构压缩吸能性,模型中包括 1/4 负泊松比材料吸能结构、底板及上压板。吸能结构的材料与第 2 节相同,为 STEEL 4340,材料参数同上文。仿真时设置上压板为刚体,其余结构为柔性体。

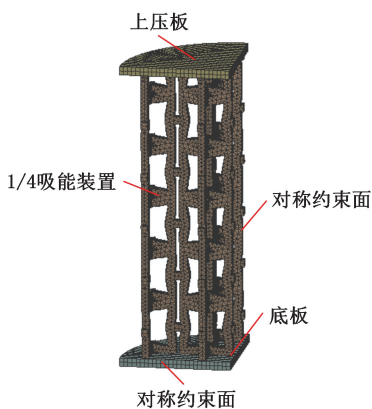


图 9 吸能结构模型

Fig.9 Energy absorption structure mode

采用 5 mm 的网格对模型进行网格划分。为模拟冲击地压压缩效果,在上压板施加竖直向下、15 m/s 的速度载荷,在底板地面施加固定约束,在图 9 中两个对称面施加对称约束。为保证仿真效率和仿真收敛,分析压缩比达到 60% 时的支撑力和吸能特性。

以表 2 中 4 号为例,其吸能量曲线、支撑力曲线及变形如图 10 所示。由图可知,吸能结构压缩后发生收缩。在压缩比为 0~10% 范围内支撑力迅速提高,在压缩比为 10~30% 范围内支撑力变化较平稳。压缩比继续增大后结构逐渐被压实,支撑力开始显著提高,当压缩比达到 51% 时支撑力下降,这是因为吸能结构局部位置发生坍塌。根据吸能量曲线可知,在压缩比为 0~30% 范围内吸能量增速略低于后半程,这与吸能结构逐渐被压实有关。

采用相同的分析方法依次对表 2 中各组参数

表 2 参数化分析数据

Tab.2 Parameterized analysis data

序号	H/mm	B/mm	L/mm	T/mm
1	50	4	8	4
2	80	2	4	4
3	70	2	6	6
4	44	4	10	5
5	60	3	9	6
6	50	6	6	8
7	70	4	4	10
8	80	4	6	7
9	80	8	8	6
10	70	8	10	8
11	60	8	2	10
12	50	8	4	2
13	50	2	10	10
14	70	6	2	4
15	40	6	5	8
16	40	2	3	2
17	60	4	6	2
18	80	10	6	10
19	40	8	6	4
20	60	10	10	4
21	50	10	2	6
22	70	10	8	2
23	80	6	10	2
24	40	10	4	8
25	60	6	4	6
26	60	6	6	6
27	40	4	4	6
28	80	5	10	6
29	60	6	8	6
30	60	2	3	6
31	60	2	6	6
32	76	10	6	6
33	78	6	6	2
34	60	4	6	10
35	46	3	3	2
36	74	3	5	3
37	46	3	5	3
38	72	5	9	3
39	46	9	3	3
40	74	8	6	3
41	46	5	5	3
42	46	3	3	2
43	74	3	7	9
44	46	3	5	9
45	74	3	9	9
46	46	9	3	9
47	80	10	10	10
48	46	9	5	9
49	74	9	9	10
50	40	2	2	2
51	48	4	4	4
52	66	6	8	6
53	52	5	7	4
54	60	2	6	7
55	70	7	10	8

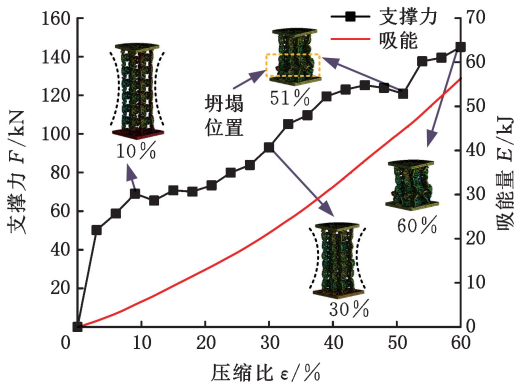


图 10 压缩吸能曲线

Fig.10 Compression energy absorption curve

的吸能结构进行仿真分析,结果见表 3。为研究各参数对吸能结构吸能性和初始支撑力峰值的影响规律,采用 MATLAB 软件建立各参数与其性能的神经网络预测模型。选取前 50 组数据作为神经网络训练样本,后 5 组数据作为验证样本。为保证神经网络精度分别建立吸能和初始支撑力峰值两个神经网络预测模型,两个模型均是四节点输入、单节点输出。两个神经网络预测模型的隐含层数均为 3,其中吸能模型各隐含层的节点数分别为 12、2、1;支撑力峰值各隐含层的节点数分别为 30、30、1,两模型各层的传递函数均为 logsig,预测回归性结果如图 11 所示,可知两个神经网络模型的回归值 R 均达到 0.999 以上,均接近 1。

将预测结果也列于表 3 中,预测值与仿真值的相对误差如表 3 所示,根据表可知,吸能最大相对误差仅为 5.03%,初始支撑力峰值的最大相对误差仅为 6.98%。利用建立的两个神经网络预测模型检验表 2 中后 5 组数据的相对误差,结果如图 12 所示。可知支撑力的相对误差范围为 1.05%~3.87%,吸能大小相对误差为零,证明两个神经网络预测模型预测精度较高。

利用神经网络预测模型通过响应曲面法分析各结构参数对吸能结构的吸能性及支撑性能影响。因有 4 个结构参数,响应曲面分析时控制 2 个变量,其余 2 个变量作为自变量,如图 13 和图 14 所示。由图可知,各响应曲面在研究域内均有多个极大值,且吸能大小和初始支撑力峰值整体上与胞体高度 H 成负相关,与其他变量成正相关,吸能大小和初始支撑力峰值在局部位置存在最大值。在后续优化设计时要考虑响应曲面存在多极值问题,优化设计时要选取多个优化初始点进行多次优化设计并对比,进而选取最优结果。

表 3 分析结果及训练误差

Tab.3 Analysis results and training errors

序号	仿真吸能/kJ	仿真支撑力/kN	预测吸能/kJ	预测支撑力/kN	吸能相对误差/%	支撑力相对误差/%
1	40.91	101.19	40.91	97.20	0	3.94
2	6.17	14.80	6.17	14.86	0	0.38
3	10.66	30.43	10.54	29.71	1.12	2.36
4	72.42	176.15	72.42	178.25	0	1.19
5	32.48	62.33	32.48	62.49	0	0.26
6	49.99	304.70	49.99	304.25	0	0.15
7	48.22	174.13	48.22	173.41	0	0.41
8	22.63	87.87	22.63	87.86	0	0.01
9	40.44	56.42	39.37	55.53	2.65	1.57
10	91.08	173.48	90.58	160.52	0.55	7.47
11	144.94	331.22	144.94	335.45	0	1.28
12	243.81	482.06	243.81	468.15	0	2.89
13	62.17	98.87	62.17	98.85	0	0.03
14	29.65	89.73	29.65	89.45	0	0.32
15	283.45	553.89	283.45	549.51	0	0.79
16	9.59	24.13	9.78	25.12	1.96	4.14
17	13.91	45.24	14.39	46.68	3.43	3.18
18	111.09	281.54	111.09	287.00	0	1.94
19	112.56	307.20	112.56	306.69	0	0.17
20	69.41	179.46	69.41	179.23	0	0.13
21	90.91	321.85	92.53	322.07	1.78	0.07
22	0.94	55.38	0.94	53.65	0.35	3.12
23	7.89	23.53	7.89	23.65	0	0.54
24	337.38	540.68	337.38	537.66	0	0.56
25	54.23	155.14	53.78	158.12	0.83	1.92
26	45.90	150.93	44.26	150.34	3.56	0.39
27	106.67	248.46	106.67	251.32	0	1.15
28	11.05	30.59	11.05	30.60	0	0.02
29	45.27	151.72	45.27	149.19	0	1.67
30	21.83	35.35	21.83	35.69	0	0.96
31	18.79	36.86	18.79	38.34	0	4.01
32	14.78	48.00	14.04	47.99	5.03	0.03
33	10.51	32.44	10.51	33.94	0	4.64
34	92.17	187.61	92.17	186.96	0	0.35
35	18.03	36.79	17.95	38.19	0.44	3.81
36	10.71	50.74	11.12	51.61	3.79	1.73
37	37.19	128.38	37.19	121.35	0	5.48
38	26.69	65.37	27.67	64.23	3.70	1.75
39	77.15	149.88	77.77	151.29	0.80	0.94
40	34.86	110.98	34.86	107.13	0	3.47
41	48.62	110.98	48.43	111.93	0.39	0.86
42	17.88	42.55	17.95	40.19	0.44	5.53
43	30.89	37.01	30.89	38.03	0	2.75
44	31.82	85.58	31.82	85.76	0	0.21
45	28.57	78.32	28.57	77.15	0	1.49
46	188.81	82.79	188.81	82.49	0	0.37
47	126.25	424.93	120.74	436.47	4.36	2.72
48	211.73	272.90	211.73	273.32	0	0.15
49	134.76	380.76	135.05	374.94	0.21	1.53
50	4.24	256.56	4.24	238.64	0	6.98

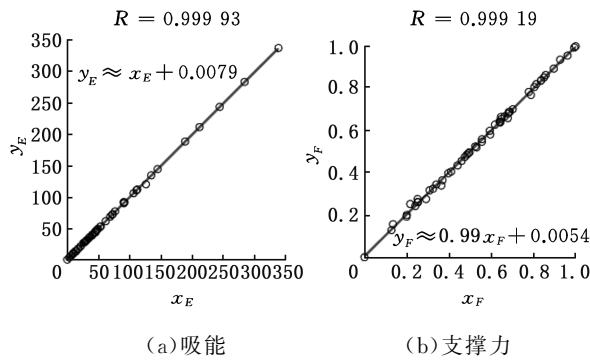


图 11 神经网络预测精度

Fig.11 Prediction accuracy of neural network

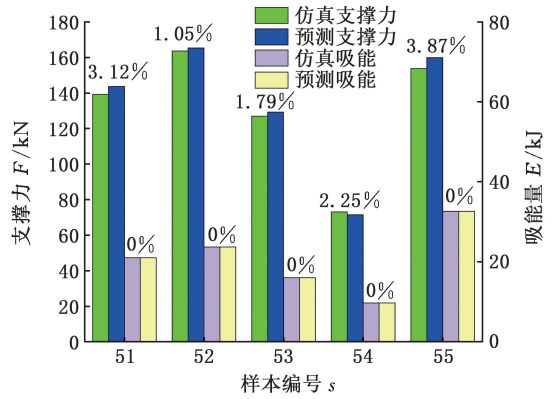


图 12 样本相对误差对比

Fig.12 Comparisons of sample relative errors

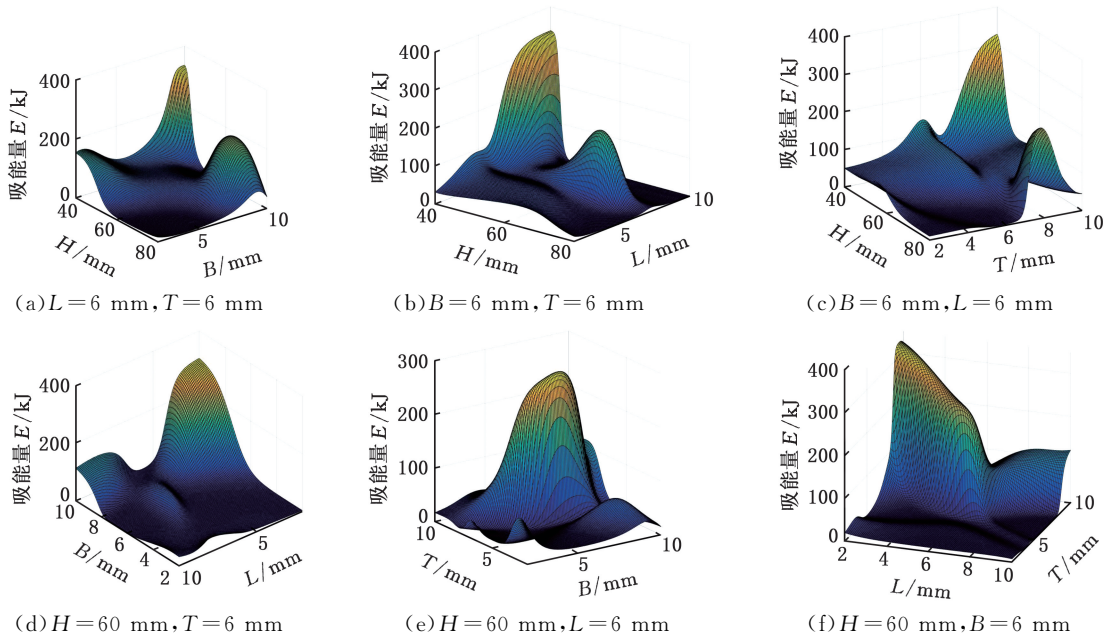


图 13 吸能响应曲面

Fig.13 Energy absorption response surface

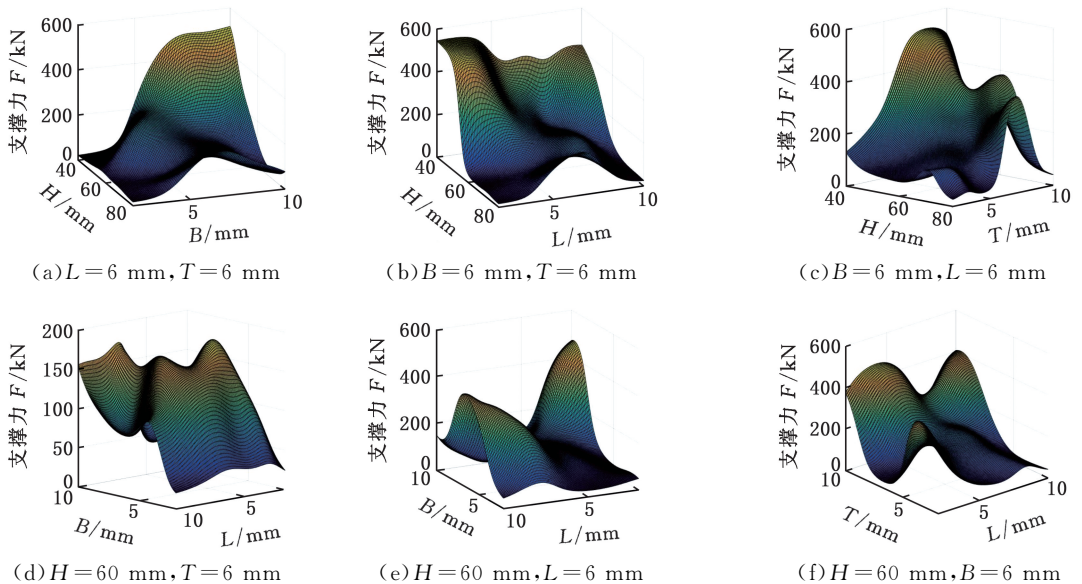


图 14 初始支撑力响应曲面

Fig.14 Initial supporting force response surface

4 吸能结构参数多目标优化设计

本次优化设计的变量由上文胞体的结构参数构成,分别为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4) = (H, B, L, T)$,各设计变量的范围与上文相同。

综合目标函数 F 由吸能目标函数和初始支撑力目标函数构成,二者均是越高越好。综合目标函数是最小值优化,因此取综合目标函数 F 的负值为优化目标。同时考虑到两个目标函数的量纲及量级区别,对各个子目标函数进行无量纲化处理,综合目标函数如下:

$$F(\mathbf{X}) = -(\omega_1 \frac{f_1(\mathbf{X}) - f_{1min}}{f_{1max} - f_{1min}} + \omega_2 \frac{f_2(\mathbf{X}) - f_{2min}}{f_{2max} - f_{2min}}) \quad (4)$$

式中: $f_1(\mathbf{X})$ 为吸能目标; $f_2(\mathbf{X})$ 为初始支撑力目标; f_{1max} 、 f_{1min} 分别为表 2 中吸能仿真结果的最大值和最小值; f_{2max} 、 f_{2min} 分别为表 2 中初始支撑力仿真结果的最大值和最小值; ω_1 、 ω_2 为权重,因吸能目标是主目标, ω_1 取 0.8, ω_2 取 0.2。

约束条件为吸能结构的初始支撑力大小应该在许用范围 1652 ~ 2478 kN,因为模型分析时是基于 1/4 结构研究的,因此约束条件有:

$$\frac{1652}{4} \text{ kN} \leq f_2(\mathbf{X}) \leq \frac{2478}{4} \text{ kN}$$

优化设计模型:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{X}) = -(\omega_1 \frac{f_1(\mathbf{X}) - f_{1min}}{f_{1max} - f_{1min}} + \omega_2 \frac{f_2(\mathbf{X}) - f_{2min}}{f_{2max} - f_{2min}}) \\ \text{s.t. } 413 \text{ kN} \leq f_2(\mathbf{X}) \leq 619.5 \text{ kN} \\ 40 \text{ mm} \leq x_1 \leq 80 \text{ mm} & 2 \text{ mm} \leq x_2 \leq 10 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq x_3 \leq 10 \text{ mm} & 2 \text{ mm} \leq x_4 \leq 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

采用 MATLAB 软件中最大最小函数 fmincon 进行多目标优化设计。根据图 13 和图 14 选取 3 个初始优化点,初始点 1(H, B, L, T) = (40, 10, 6, 10)、初始点 2(H, B, L, T) = (42, 8, 6, 10)、初始点 3(H, B, L, T) = (40, 9, 6, 9)。优化后得到 3 个优化结果,最优点 1(H, B, L, T) = (40, 9.2, 5.2, 10)、最优点 2(H, B, L, T) = (42, 8.8, 5.1, 9.4)、最优点 3(H, B, L, T) = (40, 8.7, 5.5, 9.5)。

如图 15 所示,优化点 1 曲线中 a 点压缩比为 3%,其支撑力迅速提高,压缩变形如图 16a 所示,该点因冲击载荷的突然作用,支撑力迅速升高并伴随着吸能结构的轻微变形。在 b 点吸能结构支撑力达到峰值,其压缩比为 21%,其变形如图 16b 所示,该时刻吸能结构压缩较大并有屈曲变形。 c 点的压缩比为 35%,其变形如图 16c 所示,该时刻吸能结构发生坍塌,结构明显堆积,因此支撑力

最小。当压缩比达到 57%时吸能结构的支撑力达到许用支撑力上限,其变形如图 16d 所示,吸能结构已基本被压密实,因此支撑力迅速提高。

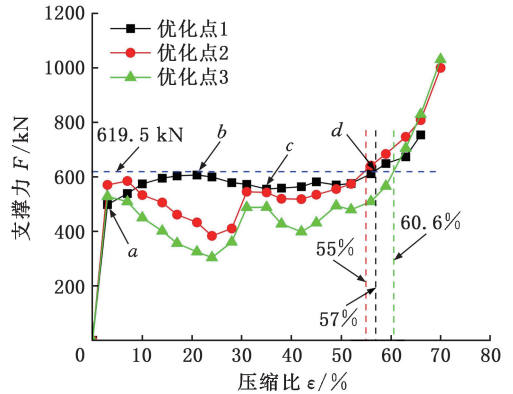


图 15 最优结果支撑力曲线

Fig.15 Optimal result supporting force curve

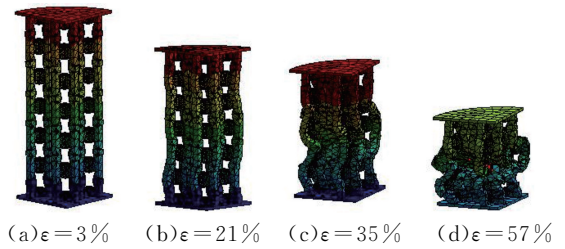


图 16 优化点 1 的压缩变形

Fig.16 Compression deformation of optimize point 1

由图 17 可知,优化点 1 在压缩行程内的最大吸能为 270.8 kJ,优化点 2 在压缩行程内的最大吸能为 189.9 kJ,优化点 3 在压缩行程内的最大吸能为 178.8 kJ。所以综合比较可知优化点 1 的支撑性和吸能性均最好。因模型具有完全对称性,整体模型可以沿各个对称面划分为 4 个子结构,仿真时为保证计算结果能够反映出整体模型的特性,在模型的各对称面施加了对称约束,因此该仿真的 1/4 结构的变形、支撑力及吸能变化规律与其余每个 1/4 子结构相同,因此整体模型的最大吸能为 $270.84 \times 4 = 1083.36$ kJ,支撑力为 $607.323 \times 4 = 2429.292$ kN < 2478 kN,符合要求。

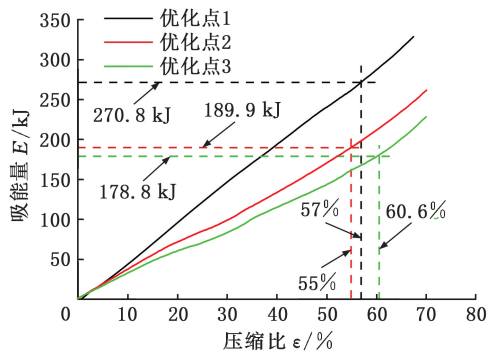


图 17 最优结果吸能曲线

Fig.17 Optimal result energy absorption curve

根据图 16 分析可知,优化点 1 的平均支撑力为 2162.56 kN,支撑力波动系数为 1.123,标准差为 28.58 kN,支撑力适中且稳定,证明该点阵负泊松比材料吸能结构具有良好的吸能、支护效果,即为最优结果。

5 实验研究

根据优化点 1 参数采用金属粉末 3D 打印工艺制造单层负泊松比吸能结构,实验试件按照 1:4 比例等比例缩放,如图 18 所示。

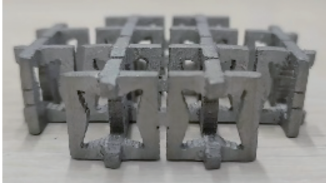


图 18 实验试件

Fig.18 Experimental specimen

采用液压机对试件进行压缩实验,压缩速度为 5 mm/min,试件变形过程如图 19 所示。实验试件压缩时因为轴向没有约束,变形中发生了一定的偏载,但仿真变形形式与实验压缩变形形式基本一致,且从压缩中期可以看出实验试件同样产生了内缩变形(图中黄色矩形框)。

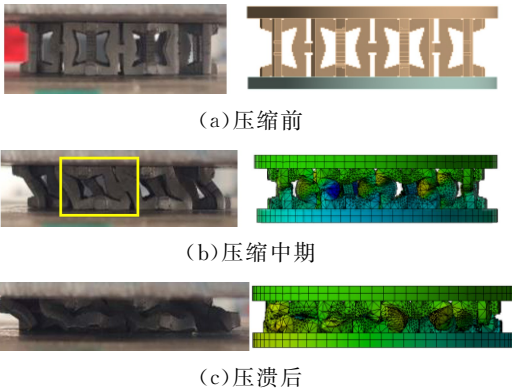


图 19 变形图

Fig.19 Deformation diagram

仿真和实验支撑力曲线及吸能曲线如图 20 所示。由图 20 可知,实验和仿真的压缩支撑力曲线和吸能曲线整体上基本一致,二者均是在压缩初期存在较大的支撑力峰值后迅速下降。在整体上仿真支撑力结果大于实验结果,特别是压缩变形后期。这是由于实验试件是采用 3D 打印制造,实验试件内部组织会存在气孔等瑕疵导致其强度降低。图 20 中 A 区的实验支撑力比仿真结果略高是由于压缩过程中试件偏载部分结构卡死影响内缩变形,导致支撑力略高。

仿真结果支撑力初始峰值为 135.143 kN,实验获得的初始支撑力峰值为 127.1 kN,仿真与实

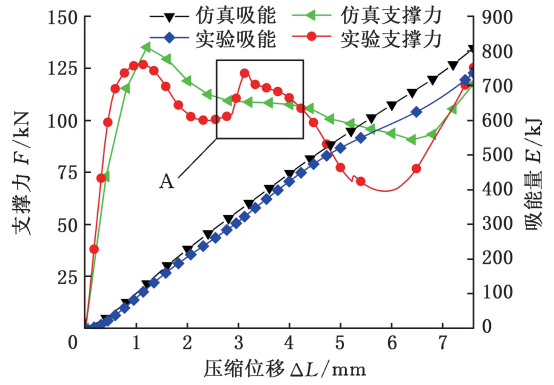


图 20 支撑力和吸能曲线

Fig.20 Supporting force and energy absorption curves

验相对误差为 6.3%。仿真最大吸能量为 808.09 kJ,实验最大吸能量为 744.141 kJ,二者相对误差为 8.6%,相对误差均在 10% 以内,误差较小,证明了有限元仿真分析及优化结果的可靠性。

6 结论

本文分析了圆形截面和矩形截面的直边、阶梯边内凹星型和内凹六边形的比吸能和单位质量支撑力特性,证明矩形阶梯内凹星形结构的负泊松比胞体结构的性能最优,可作为吸能结构的胞体结构。建立了吸能液压支架吸能结构的支撑力和吸能大小的神经网络预测模型,确定吸能结构的最优结构参数为 $H=40$ mm、 $B=9.2$ mm、 $L=5.2$ mm、 $T=10$ mm,吸能量为 1083.36 kJ,支撑力为 2429.292 kN,平均支撑力为 2162.56 kN,支撑力波动系数为 1.123,支撑力标准差为 28.58 kN。研究证明该最优结构点阵负泊松比材料吸能结构具有良好的吸能、支护效果。

参考文献:

- [1] 田立勇,周禹鹏,孙业新,等.防冲支架立柱多胞薄壁吸能构件能量吸收性能[J].煤炭学报,2023,48(5):2224-2235.
TIAN Liyong, ZHOU Yupeng, SUN Yexin, et al. Energy Absorption Performance of Multicellular Thin-walled Energy-absorbing Components of Anti-shock Support Columns[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5):2224-2235.
- [2] 刘亚强.防冲液压支架顶梁楞层叠式吸能构件研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
LIU Yaqiang. Research on Corrugated Layered Energy Absorbing Components of Top Beam of Scouring-proof Hydraulic Support [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [3] 程龙.防冲液压支架齿式金属切削吸能构件研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2022.

- CHENG Long. Research on Toothed Metalcutting Energy Absorbing Component of Anti-impact Hydraulic Support[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.
- [4] 王春华, 牛慧超, 安达, 等. 防冲液压支架变梯度薄壁吸能构件研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9):3546-3551.
- WANG Chunhua, NIU Huichao, AN Da, et al. Research on Variable Gradient Thin-walled Energy Absorbing Component of Scour-proof Hydraulic Support[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9):3546-3551.
- [5] 许海亮, 高哈钧, 郭旭, 等. 巷道多向吸能防冲支护结构性能研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(5):224-231.
- XU Hailiang, GAO Hanjun, GUO Xu, et al. Study on Anti-impact Support Structure Performance of Multi-direction Energy Absorption for Roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(5):224-231.
- [6] 肖晓春, 朱恒, 徐军, 等. 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10):302-311.
- XIAO Xiaochun, ZHU Heng, XU Jun, et al. Numerical Research on Anti-scour Characteristics of Multi-cell Square Tube Energy-absorbing Column Filled with Aluminum Foam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10):302-311.
- [7] 唐治, 付洪源, 王建, 等. 六边薄壁构件在准静态径向压缩下的吸能特性[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1):72-77.
- TANG Zhi, FU Hongyuan, WANG Jian, et al. Energy Absorption Characteristics of Hexagonal Thin-walled Component under Quasi-static Radial Compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1):72-77.
- [8] 郝志勇, 王率领, 潘一山. 矿用防冲折纹筒屈曲吸能特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13):141-148.
- HAO Zhiyong, WANG Shuailing, PAN Yishan. Anti-impact Folding Barrels' Buckling Energy Absorbing Characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13):141-148.
- [9] 杨雨泽. 巷道超前支护液压支架吸能防冲构件设计与研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
- YANG Yuze. Design and Research of Energy Absorbing Anti-impact Component of Hydraulic Support for Roadway Advance Support[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.
- [10] 刘欢. 防冲吸能液压支架直纹管外翻型吸能构件的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
- LIU Huan. Research on Straight Corrugated Tube Eversing Component for Anti-impact Energy-absorbing Hydraulic Support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [11] 宋嘉祺. 冲击地压巷道支架防冲性能及优化设计[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- SONG Jiaqi. Anti-scour Performance and Optimization Design of Support in Rock Burst Roadway[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020.
- [12] 赵红斌. 基于梯度方形蜂窝结构支架缓冲装置性能研究[J]. 矿山机械, 2022, 50(10):7-15.
- ZHAO Hongbin. Research on Performance of Support Buffer Based on Gradient Square Honeycomb Structure[J]. Mining & Processing Equipment, 2022, 50(10):7-15.
- [13] 韩冲. ZHD6000 型吸能防冲液压支架新型吸能构件的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- HAN Chong. Research on New Energy-absorbing Components Using ZHD6000 Energy-absorbing Gantry Hydraulic Support [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [14] ZHANG Huikai, FENG Xiqiao. Buckling-regulated Bandgaps of Soft Metamaterials with Chiral Hierarchical Microstructure[J]. Extreme Mechanics Letters, 2021, 43:101166.
- [15] GRIMA J N, WINCZEWSKI S, MIZZI L, et al. Tailoring Graphene to Achieve Negative Poisson's Ratio Properties[J]. Advanced Materials, 2015, 27(8):1455-1459.
- [16] 吴小莉, 李兆凯. 新型负泊松比材料等效性能与吸能性能研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4):826-837.
- WU Xiaoli, LI Zhaokai. Study on the Equivalent Properties and Energy Absorption Properties of a Novel Material with Negative Poisson's Ratio[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4):826-837.
- [17] 唐治. 自移式吸能防冲巷道支架研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- TANG Zhi. Study on Self-moving Energy Absorption and Anti-impact Roadway Support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 沈佳兴*, 男, 1990 年生, 副教授, 博士。研究方向为机械系统动力学分析与控制。E-mail: 329833309@qq.com。

本文引用格式:

沈佳兴, 董建秀, 范中海, 等. 防冲吸能液压支架点阵负泊松比吸能结构设计及优化[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):515-524.

SHEN Jiaying, DONG Jianxiu, FAN Zhonghai, et al. Design and Optimization of Negative Poisson's Ratio Energy Absorption Structures for Anti-shock and Absorption Hydraulic Support Lattices[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):515-524.