



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

矿用超前液压支架吸能构件仿真及试验研究

肖晓春 李子阳 丁鑫 徐军 朱恒 丁振

引用本文:

肖晓春, 李子阳, 丁鑫, 等. 矿用超前液压支架吸能构件仿真及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 247–258.

XIAO Xiaochun, LI Ziyang, DING Xin. Simulation and experimental study on energy absorption components of advanced hydraulic support for mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 247–258.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0088>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究

Numerical study on anti-impact characteristics of energy absorbing column with multicellular square tube filled with aluminum foam
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 302–311 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1608>

冲击地压矿井巷道吸能防冲液压支架防冲效果研究

Research on energy absorption characteristics and anti-bump effect of anti-bump hydraulic support in rockburst mine roadway
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 12–19 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f0884cbd-244c-447c-8c3b-44f9d650f31d>

新型矿用组合折纹柱构件防冲吸能特性分析

Analysis on characteristics of anti-impact and energy absorption of new type of composite folding column used in mining
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 225–232 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0460>

巷道防冲吸能钢管混凝土拱架支护性能研究

Study on the support performance of anti-impacting and energy-absorbing concrete-filled steel tube arches in roadways
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 53–62 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0487>

高冲击韧性锚杆吸能减冲原理及应用研究

Study on principle application of energy absorption and bump reduction of high impact toughness rock bolt
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4d9f9400-f59b-4fad-b21f-d3822db291b9>

新型缓冲吸能装置手性结构吸能特性对比分析

Comparison and analysis of energy absorption characteristics of chiral structure in novel energy buffering absorption device
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 396–403 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1138>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

机电工程与智能化



移动扫码阅读

肖晓春, 李子阳, 丁 鑫, 等. 矿用超前液压支架吸能构件仿真及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 247–258.

XIAO Xiaochun, LI Ziyang, DING Xin, *et al.* Simulation and experimental study on energy absorption components of advanced hydraulic support for mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 247–258.

矿用超前液压支架吸能构件仿真及试验研究

肖晓春^{1,2}, 李子阳^{1,2}, 丁 鑫^{1,2}, 徐 军^{1,2}, 朱 恒^{1,2}, 丁 振^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 辽宁省矿山环境与灾害力学重点实验室, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为了提高液压支架的能量吸收性能以解决巷道冲击地压发生时支架立柱爆缸等问题, 提出了将一种方管与圆管互相嵌套的多胞管吸能构件与立柱串联应用于液压支架中。基于简化的超折叠单元理论剖析了多胞管的能量耗散途径, 推导出了不同截面形状多胞管的等效轴向载荷预测公式; 采用数值模拟获得了不同截面形状多胞管在轴向压溃作用下的能量吸收性能及其屈曲变形形态, 发现多胞方管(SS 类型)具备相对吸能优势, 并通过试验验证了数值模拟的可靠性, 同时将数值模拟与试验得到载荷均值与理论预测的等效轴向载荷进行对比, 验证了等效轴向载荷预测公式具有较高的预测精度; 依托课题组多胞方管中泡沫铝填充方式研究基础, 选择具备相对吸能优势的 25% 填充率的填充方式, 开展不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管的轴向准静态压缩试验。结果表明: 泡沫铝的填充有助于提升多胞方管抵抗变形的能力, 其中 71.18% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管载荷波动最小, 有效变形长度和吸能量最大, 能量吸收效果最好, 可使吸能让位过程更加稳定; 当冲击速度保持不变时, 在不同冲击能量条件下, 泡沫铝填充多胞方管防冲支架与未添加吸能构件的传统液压支架相比, 支架部分的塑性能降低了 87% 左右, 冲击时间延长了 307% 左右, 让位距离增加了 282% 左右, 通过吸能构件的屈曲变形有效减少了防冲支架的塑性变形, 为支架立柱安全阀的开启提供了充足的时间。泡沫铝填充多胞方管的应用减小了支架立柱发生爆缸的危险性, 提高了立柱的抗冲击性能。

关键词: 冲击地压; 吸能构件; 多胞方管; 泡沫铝; 防冲支架

中图分类号: TD355

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)12-0247-12

Simulation and experimental study on energy absorption components of advanced hydraulic support for mining

XIAO Xiaochun^{1,2}, LI Ziyang^{1,2}, DING Xin^{1,2}, XU Jun^{1,2}, ZHU Heng^{1,2}, DING Zhen^{1,2}

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mining Environment and Disaster Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to improve the energy absorption performance of hydraulic support and solve the problems such as cylinder explosion of support column when roadway rock burst occurs, a kind of multi-cell tube energy absorption component with square tube and round tube nested with each other is proposed and applied in series to the hydraulic support. Based on the simplified super folding element theory, the energy dissipation path of multi-cell tubes is analyzed, and the equivalent axial load prediction formula of multi-cell tubes with different section shapes is derived. The energy absorption performance and buckling deformation morphology of multi-cell tubes with different section shapes under axial crushing were obtained by numerical simulation. It was found that multi-cell square tubes (SS type) had relative energy absorption advantages, and the reliability of numerical simulation was verified by experiments. Meanwhile, the average load obtained by numerical simulation and experiment was compared with the equivalent axial load predicted by theory. It is proved that the equivalent axial load prediction formula has high prediction accuracy. Based on the research foundation of aluminum foam filling method in multi-cell square tube, the filling method with 25% filling rate with relative energy absorption advantage was selected to carry

收稿日期: 2024-01-16

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0088

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274203, 51974186, 52204092)

作者简介: 肖晓春(1979—), 男, 内蒙古化德人, 教授, 博士。E-mail: xxc7902@163.com

out axial quasi-static compression test of aluminum foam filling multi-cell square tube with different porosity. The results show that the aluminum foam filling can improve the deformation resistance of the multicellular square tube. Among them, the load fluctuation of the multi-cell square tube with 71.18% porosity is the smallest, the effective deformation length and energy absorption are the largest, and the energy absorption effect is the best, which can make the energy absorption and displacement process more stable. When the impact velocity remains unchanged, under different impact energy conditions, compared with the traditional hydraulic support without adding energy absorbing components, the plastic energy of the support part is reduced by about 87%, the impact time is extended by about 307%, and the yield distance is increased by about 282%. The plastic deformation of the support is effectively reduced through the buckling deformation of the energy absorption component. Sufficient time is provided for the opening of the support column safety valve. The application of aluminum foam filled multi-cell square tube reduces the risk of cylinder explosion of the support column and improves the impact resistance of the column.

Key words: rock burst; energy absorption component; multi-cell square tube; aluminum foam; anti-impact support

0 引言

随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,煤矿开采已不断向深部发展,剧烈的采动响应不可避免,巷道冲击地压发生的频率显著提高,造成了严重的人员伤亡和经济损失^[1-2]。液压支架作为煤矿巷道中主要的支护设备,在冲击地压发生时,防冲支架立柱的溢流阀不能及时开启,造成立柱弯折破坏甚至爆缸等现象^[3-4]。对此,潘一山等^[5]在传统液压支架的基础上提出了防冲支护理论,即通过将吸能构件与液压立柱串联迅速吸收冲击能量并让位变形,同时为溢流阀的卸压提供充足的时间,防止支护体系发生失稳破坏。

吸能构件作为吸能防冲支架立柱中的关键部位,相关专家学者开展了大量的研究:马箫等^[6-7]设计了一种方形预折纹式吸能构件,但预折纹需要特定模具进行加工,制作成本相对较高。田立勇等^[8]设计了一种多胞圆管吸能构件,并通过理论分析和数值模拟研究了其能量吸收性能。郝志勇等^[9]提出了刚性结构与填充材料相结合的缓冲吸能装置,并通过试验验证了不同填充材料吸能缓冲装置的吸能防冲性能,但缓冲吸能装置结构较为复杂。GUO等^[10]提出了一种螺纹剪切吸能构件,但此构件结构较为复杂且不能充分利用液压立柱底座空间。王春华等^[11]提出一种加肋板式圆管吸能构件,通过布置肋板增加管内边界约束,抑制了圆管压溃过程中的欧拉失稳。张建卓等^[12]通过数值仿真方法设计了一种扭板吸能构件,发现其具有可控和可重复的变形模式,但让位距离较短。吸能构件种类繁多,吸能方式不尽相同,其中金属薄壁管由于制造简单且成本较低,被广泛应用于防冲支架中,但目前防冲支架中应用的吸能构件的能量吸收性能仍需进一步提升。在自然界中,植物和动物等生物系统为了适应各种极端环境,进化出了许多具有优异能量吸收性能的生物结

构。LIU等^[13]通过模仿棕榈和竹子茎的特征,提出了一种仿生多胞结构。甲虫前翅也是一种独特的生物结构,其重量轻、强度高,许多复杂的多胞吸能构件通过模仿甲虫前翅的结构特征被提出^[14-16]。薄壁管结构的另一种设计思路是在管内填充多孔材料,CHEN等^[17]对泡沫铝填充双孔和三孔方管进行了数值模拟研究,并验证了其较传统薄壁管的能量吸收性能比具有明显的优势。填充泡沫铝的多胞薄壁管具备优异的能量吸收性能,但在防冲支架中的应用较少,因此将填充泡沫铝的多胞薄壁管引入现有防冲支架中,应用前景十分可观。

基于此,笔者以ZQ4000型防冲支架为应用对象,提出了一种方管与圆管互相嵌套的多胞管。首先基于改进的超折叠单元理论分析多胞管的基本变形单元种类和数量,推导出不同截面形状多胞管的等效轴向载荷预测公式。其次采用ABAQUS对多胞管进行轴向压溃仿真,分析不同截面形状多胞管的能量吸收性能。对具备相对吸能优势的多胞方管进行准静态压缩试验,检验数值模拟与理论预测的准确性。此外,通过在多胞方管中填充泡沫铝,提高多胞管的承载能力,采用准静态压缩试验选出适合对多胞方管进行填充的泡沫铝孔隙度。并在此基础上对比分析不同冲击能量下未添加吸能构件的传统液压支架与泡沫铝填充多胞方管防冲支架的抗冲击性能,为超前支护防冲液压支架提供一种新的吸能构件设计思路。

1 结构设计方案及评价指标

1.1 多胞管结构设计方案

以ZQ4000型防冲支架为应用对象,设计多胞管结构。当冲击地压发生时,吸能构件让位变形吸收冲击能量,为溢流阀开启提供时间,在一定程度上减小冲击地压事故造成的损失。多胞管在防冲支架中的安装位置如图1所示。

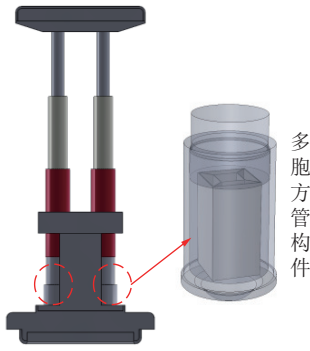


图 1 吸能构件安装方案

Fig.1 Installation scheme of energy absorption component

笔者提出的多胞管吸能构件是将金属圆管和方管互相嵌套,通过布置肋板将双层管划分为多胞管,提高吸能构件能量吸收性能。多胞管截面形状如图 2 所示,4 种结构多胞管的区别在于内管和外管的嵌套方式。根据 ZQ4000 型防冲支架尺寸设计多胞管尺寸,图 2 中外管内切圆直径 D 为 120 mm,内管内切圆直径 d 为 60 mm,内外管壁及肋板厚度 t 为 4 mm,多胞管高度 H 为 300 mm。

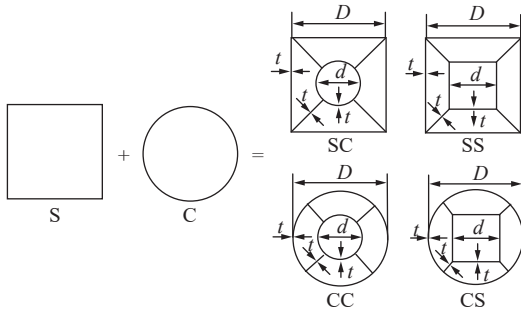


图 2 多胞管截面形状

Fig.2 Shape of cross section of multi-cell tubes

1.2 评价指标

在防冲支架的设计过程中,通过将吸能构件与立柱串联放置,使其共同承受工作过程中的静载及冲击载荷^[18]。在静载或冲击载荷较小时,吸能构件与立柱共同提供所需工作阻力,在冲击载荷超过支架特定阈值时,吸能构件应立即让位吸能,为防冲支架溢流阀的开启提供时间。为综合评价多胞管吸能构件的能量吸收性能,采用以下 5 个参数对多胞管的吸能效果进行分析:

1) 载荷初始峰值 P_{\max} , 可以通过构件的反力-位移曲线得到, 根据相关国家标准^[19], 要求吸能构件应满足

$$P_1 < P_{\max} < 1.5P_1 \quad (1)$$

式中: P_1 为液压支架工作阻力。

2) 载荷均值 P_{mean} , 体现了构件变形过程中的承载能力, 定义为

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{s} \int_0^s P(s) ds \quad (2)$$

式中: s 为构件的变形量; $P(s)$ 为构件变形量达到 s 时的载荷。

3) 吸能量 E_{total} , 可以通过反力-位移曲线积分得到, 定义为

$$E_{\text{total}} = \int_0^s P(s) ds \quad (3)$$

4) 载荷均方差 σ , 反映了构件压溃变形过程中的载荷波动程度, σ 越大, 构件变形中载荷波动越剧烈, 构件与液压立柱之间稳定性越差。

$$\sigma = \sqrt{\int_0^s (P(s) - P_{\text{mean}})^2 ds} \quad (4)$$

5) 载荷再次达到初始压溃峰值时构件变形量 δ , 即构件的有效变形长度。

基于此, 理想吸能构件设计的基本要求为: 吸能构件载荷初始峰值满足标准范围; 吸能构件的反力均方差越小越好; 吸能构件有效变形距离和有效吸能量越大越好。可使吸能让位过程更加稳定, 对防冲支架立柱提供平稳的缓冲保护。

2 多胞管等效轴向载荷理论模型

笔者采用改进后的 SSFE 超折叠单元理论^[20-21]分析不同结构多胞管的能量耗散途径, 建立多胞管在轴向压溃下能量吸收的理论模型。改进后的 SSFE 理论提出超折叠单元是由 3 个延展性三角形和静态塑铰线组成, 受载形式如图 3 所示, 假设多胞管在压溃过程中的变形形态为稳定屈曲, 即多胞管在压溃变形过程中产生规则的褶皱, 在计算多胞管的等效轴向载荷时, 只需计算一个褶皱的等效轴向载荷。其中一个褶皱可以分为不同种类和数量的基本变形单元, 通过计算基本变形单元所耗散的能量即可得出多胞管的等效轴向载荷和吸能量。根据能量守恒, 系统的能量平衡方程为

$$2hP_{\text{mean}}k = E_b + E_m \quad (5)$$

其中, h 为折叠波长; P_{mean} 为等效轴向载荷; E_b 为单元弯曲变形所耗散的能量; E_m 为单元薄膜变形所耗散的能量, 考虑到在实际中结构的压缩变形量不可能达到 $2h$, 为此引入有效压缩系数 k , 有效压缩系数 k 与 $2h$ 乘积代表折叠单元的实际有效压缩变形量, 根据已有的研究发现 k 取值为 0.6^[22]。

在轴向压溃过程中, 一个折叠单元弯曲变形消

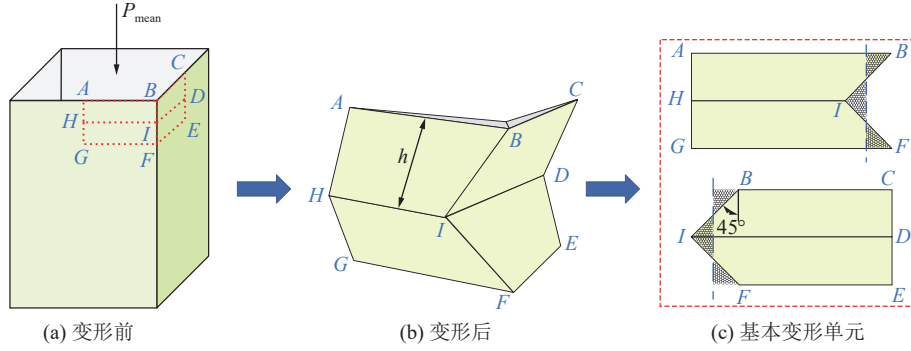


图 3 简化超折叠单元理论变形过程

Fig.3 Deformation processs of implified super folding element theory

耗的能量为面板单元中的 3 条静态塑铰线弯曲变形的能量, 3 个塑性铰线的转角分别为 π 、 0.5π 、 0.5π , 因此弯曲变形所耗散的能量为

$$E_b = 2\pi M_0 L_c \quad (6)$$

其中, L_c 为折叠单元面板的总长度; M_0 为单位宽度的塑性极限弯矩, 其中:

$$M_0 = \frac{1}{4} \sigma_0 T^2 \quad (7)$$

式中: σ_0 为屈服应力; T 为壁厚。

不同类型多胞管内部存在着不同的基本单元如图 4 所示。如图 5 所示, 可将这些基本单元按类型从左到右依次划分为圆型单元、T 型单元、板型单元、Y 型单元。

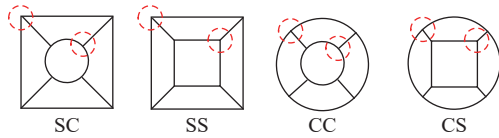


图 4 多胞管的基本单元

Fig.4 Basic unit of multi-cell tubes

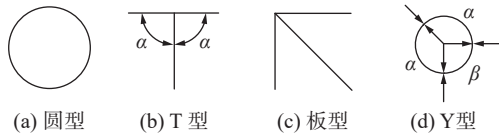


图 5 不同类型基本单元

Fig.5 Different types of basic units

对于圆型单元, 薄膜变形能为

$$E_m^a = \frac{8\pi M_0 h^2}{T} \quad (8)$$

对于 T 型单元, 夹角为 α 时的薄膜变形能为

$$E_m^b = \frac{4M_0 h^2}{T} \left[\frac{\tan \alpha}{(\tan \alpha + 0.05/\tan \alpha)/1.1} + 2 \tan \frac{\alpha}{2} \right] \quad (9)$$

对于板型单元, 可认为是 T 型单元中 $\alpha = \frac{\pi}{4}$ 时的特殊形式, 采用式(9)可得板型单元薄膜变形能为

$$E_m^d = \frac{7.5M_0 h^2}{T} \quad (10)$$

对于 Y 型单元, 夹角为 β 时的薄膜变形能为

$$E_m^e = \frac{2M_0 h^2}{T} \left(3 \sin \beta + 2 \sin \frac{\beta}{2} + 4 \tan \frac{\beta}{4} \right) \quad (11)$$

对于 SS 型多胞管, 内部存在 4 个板单元和 4 个 Y 型单元, 结构整体的薄膜变形能为

$$E_m = \frac{78.56M_0 h^2}{T} \quad (12)$$

将式(6)和式(12)代入到式(5)中

$$2hP_{\text{mean}}k = 2\pi M_0 L_c + \frac{78.56M_0 h^2}{T} \quad (13)$$

对 h 求导, 使等效轴向载荷 P_{mean} 取最小值

$$\frac{\partial P_{\text{mean}}}{\partial h} = \frac{\pi M_0 L_c}{k} \left(-\frac{1}{h^2} \right) + \frac{39.28M_0}{Tk} \quad (14)$$

令式(14)等于 0 可得

$$h = \sqrt{\frac{\pi L_c T}{39.28}} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)可得 SS 型方管的等效轴向载荷表达式为

$$P_{\text{mean}} = 5.56 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{L_c} T^{1.5} = 5.56 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{4D + 4d + \sqrt{2}DT}^{1.5} \quad (16)$$

通过该方法可以计算不同结构多胞管弯曲变形和薄膜变形所耗散的能量, 推导出对应多胞管的等效轴向载荷预测公式, 见表 1。

3 多胞管轴向压溃仿真

3.1 仿真模型建立

如图 6 所示, 以 SS 型多胞管为例, 采用 ABAQUS/CAE 建立轴向冲击数值模型, 采用 ABAQUS/Explicit 完成多胞管轴向冲击数值模拟。多胞管底面与下端刚性板绑定并约束所有方向的自由度, 顶面与上端刚性板接触, 参照冲击地压实际监测数据沿构件

表 1 不同结构多胞管等效轴向载荷预测公式

Table 1 Equivalent axial load prediction formula for multi-cell tubes with different structures

类型	圆型单元	T型单元	板型单元	Y型单元	P_{mean}
SC	1	4	4	—	$6.40 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{4D + \pi d + 2\sqrt{2}D - 2dT}^{1.5}$
SS	—	—	4	4	$5.56 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{4D + 4d + \sqrt{2}DT}^{1.5}$
CC	2	8	—	—	$7.64 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{\pi D + \pi d + 2D - 2dT}^{1.5}$
CS	1	4	—	4	$6.94 \frac{\sigma_0}{k} \sqrt{\pi D + 4d + 2D - 2\sqrt{2}dT}^{1.5}$

轴向方向施加 5 m/s 的冲击速度载荷^[23],并约束上方刚性板沿多胞管轴向方向以外所有方向的自由度。模型整体采用通用接触,沿切向方向摩擦因数设为 0.25,法向方向接触为硬接触。经网格收敛性分析,确定网格尺寸为 4 mm 的 S4R 壳单元。多胞管材料为 304 不锈钢,密度 $\rho=7\,930\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=210\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

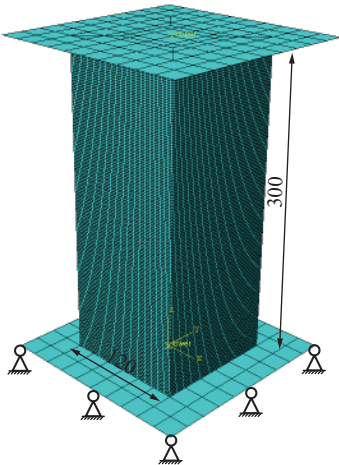


图 6 多胞方管构件有限元模型
Fig.6 Finite element model of multi-cell square tube component

3.2 不同结构类型多胞方管构件分析

为进一步分析多胞管的能量吸收性能,绘制出不同结构类型多胞管在轴向压溃过程中的反力-位移曲线,如图 7 所示。图 8 为多胞管的变形形态以及变形后的截面俯视图,结合图 7 中多胞管的反力-位移曲线可分为 3 个阶段:① 弹性变形阶段,冲击作用下多胞管首先发生弹性变形,然后反力迅速增至初始压溃峰值;② 塑性变形阶段,反力达到初始压溃峰值后进入有规律的波动起伏状态,多胞管开始产生塑性大变形;③ 密实阶段,多胞管压溃进入密实状态,反力迅速增加。在图 7 中,以 SS 型多胞方管为例,对多胞管反力-位移曲线的 3 个阶段进行了划分。

根据仿真结果,分析多胞管能量吸收性能,选取适用于 ZQ4000 型防冲支架的多胞管结构。ZQ4000

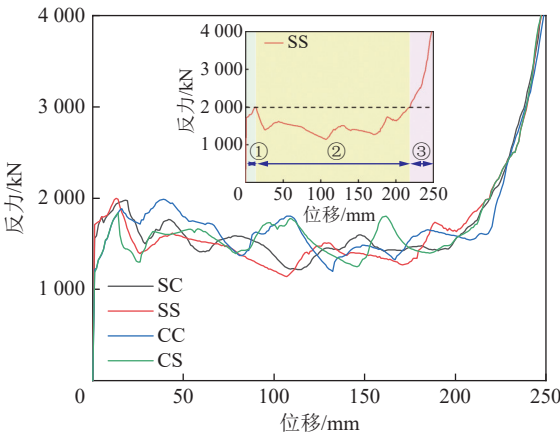


图 7 不同类型多胞管反力-位移曲线
Fig.7 Reaction-displacement curves of different types of multi-cell tubes

型防冲支架单个立柱工作阻力为 1 963 kN,由式 (1) 可知: $1\,963\text{ kN} < P_{max} < 2\,944.5\text{ kN}$ 。根据表 2 中多胞管初始压溃峰值的仿真结果,CC 和 CS 两种类型的多胞管不符合初始压溃峰值范围。对于 SC 和 SS 两种类型多胞管,SC 类型多胞管有效变形长度和有效吸能量均小于 SS 型多胞管,且反力均方差大于 SS 型多胞管。根据吸能构件的评价指标,SS 型方管变形过程中载荷波动较低,变形过程稳定可靠,吸能防冲性能最好,综合考虑选择 SS 型多胞方管作为 ZQ4000 型防冲支架立柱的吸能构件。

将 4 种多胞管结构参数代入到表 1 中公式,得到多胞管的等效轴向载荷,根据表 2 中不同类型多胞管的平均反力,验证等效轴向载荷理论模型。如图 9 所示为等效轴向载荷预测公式得到不同类型多胞管等效轴向载荷及其相对误差。通过理论模型计算与数值仿真得到的等效轴向载荷相对误差在 15% 以内,表明多胞管等效轴向载荷理论模型较为准确,能够为多胞管的结构设计提供理论参考。

3.3 多胞管准静态压缩

采用数值模拟对不同结构类型多胞管能量吸收性能研究后,发现 SS 型多胞方管吸能性能最好。加工制作 SS 型多胞方管试件进行轴向准静态压缩试

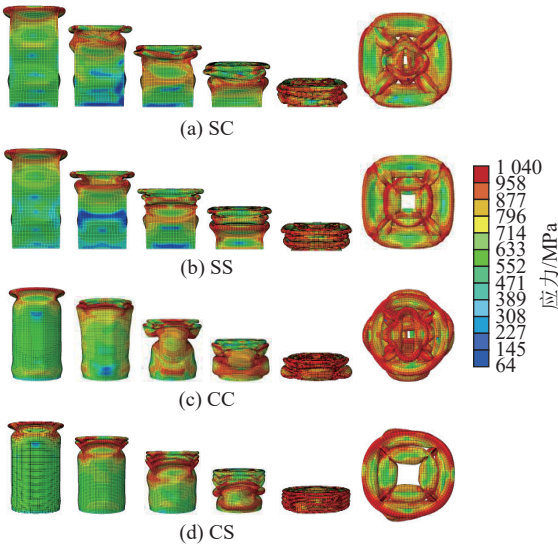


图 8 多胞管变形过程

Fig.8 Deformation process of multi-cell tubes

表 2 不同结构多胞管能量吸收性能

Table 2 Energy absorption performance of multi-cell tubes with different structures

类型	P_{\max}/kN	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	$E_{\text{total}}/\text{kJ}$	σ/kN	δ/mm
SC	1 980	1 523	330	205	217
SS	1 989	1 511	331	200	219
CC	1 885	1 549	342	216	221
CS	1 839	1 538	330	207	215

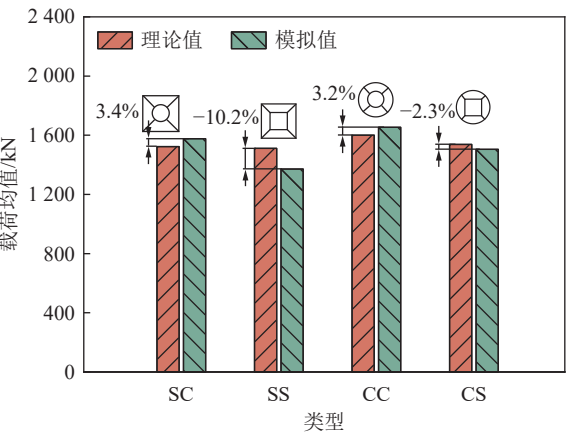


图 9 不同类型多胞管等效轴向载荷预测结果及误差

Fig.9 Prediction result and error of equivalent axial load for different types of multi-cell tubes

验,试件的尺寸与 3.1 节中数值模型几何尺寸比例为 1 : 2。采用 YAW-2000 微机控制电液伺服压力试验机,加载方式选择位移加载,速率为 0.3 mm/s,如图 10 所示,通过控制系统采集反力-位移曲线,并用工业相机记录多胞方管在整个压溃过程中的变形形态。

多胞方管受压后首先在中间位置产生外凸塑性铰,随后在试件顶部和底部依次产生第 2 和第 3 个外凸塑性铰,最终被完全压缩至密实化状态,多胞方

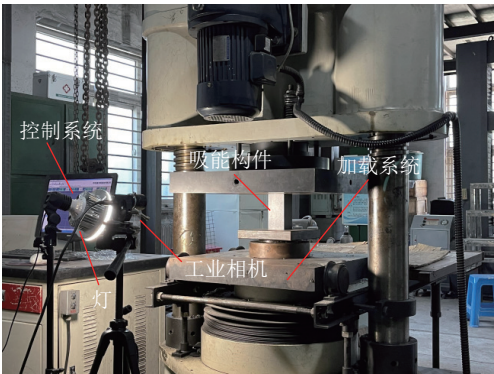


图 10 准静态压缩试验装置

Fig.10 Quasi-static compression experimental device

管轴向压缩后的主视图与俯视图如图 11b 所示,试验结果与图 11a 中数值模拟结果基本吻合,试件均产生轴对称叠缩变形,并形成 3 层褶皱。

如图 12 所示为数值模拟与试验所得到的反力-位移曲线,数值模拟与试验的反力变化趋势基本一

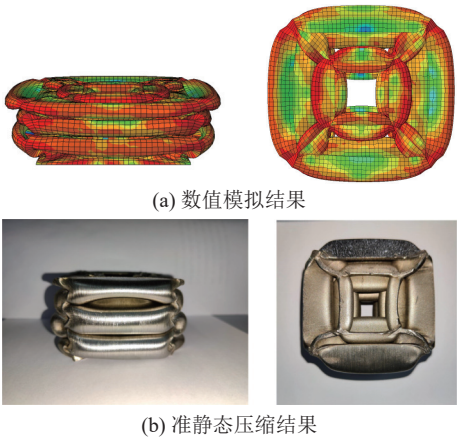


图 11 SS 型多胞方管准静态压缩变形形态

Fig.11 Quasi-static compression deformation morphology of SS-type multi-cell square tube

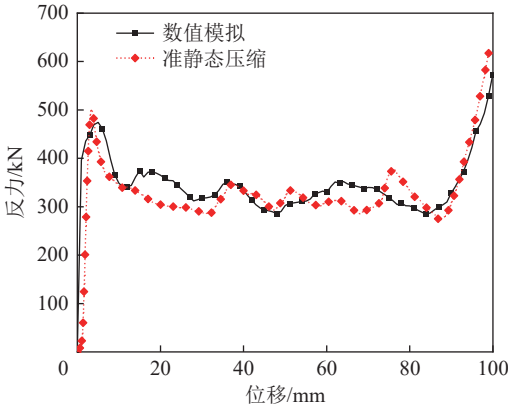


图 12 SS 型多胞方管数值模拟与准静态压缩试验反力-位移曲线对比

Fig.12 Comparison of reaction-displacement curves between numerical simulation and quasi-static compression experiment of SS-type multi-cell square tube

致,反力自初始压溃峰值后迅速降低并产生了 3 次明显的波动,反力波动形成波峰的过程对应了图 11b 中试件形成褶皱的过程。通过对比发现数值模拟比试验中波峰形成的时间早,这是由于试验中试件被压缩后中间部分率先产生塑性铰,随后被进一步压缩最终形成 3 层褶皱,而数值模拟中多胞方管受到冲击后自顶部开始向下形成 3 层褶皱,褶皱产生的时间要提前于试验。

表 3 为多胞方管轴向冲击数值模拟与准静态压

缩试验的能量吸收性能对比,由表 3 可知,数值模拟与试验的相对误差较小,表明准静态压缩试验下 SS 型多胞方管的能量吸收性能与数值模拟结果间有较好的吻合。将试件的材料参数代入到第 2 节公式中,通过等效轴向载荷理论计算得出多胞方管的等效轴向载荷为 342 kN,对比表 2 中数值模拟与试验的载荷均值 P_{mean} ,误差分别为 1.1% 和 9.5%,通过理论、数值模拟和试验间的相互印证,验证了等效轴向载荷理论模型及数值模拟的可靠性。

表 3 SS 型多胞方管数值模拟与准静态压缩试验的吸能性能

Table 3 Energy absorption performance of SS-type multi-cell square tube under numerical simulation and quasi-static compression experiment

P_{max}			P_{mean}			E_{total}			σ			δ		
仿真/kN	试验/kN	误差/%	仿真/kN	试验/kN	误差/%	仿真/kJ	试验/kJ	误差/%	仿真/kN	试验/kN	误差/%	仿真/mm	试验/mm	误差/%
474.52	501.64	5.41	338.14	309.50	9.25	32.91	30.87	6.61	55.67	65.32	14.77	97.12	96.31	0.84

4 泡沫铝填充多胞方管吸能防冲特性研究

4.1 泡沫铝填充方式设计

SS 型多胞方管的内部有 1 个正方形胞体和 4 个环绕的等腰梯形胞体,根据泡沫铝轴对称分布的填充原则,按泡沫铝填充率从低到高依次设计了 5 种填充方式,从左到右泡沫铝填充率依次为 25%、37.5%、62.5%、75% 和 100%,如图 13 所示。目前课题组已对不同填充率泡沫铝填充多胞方管吸能性能进行了数值模拟研究^[24],选取了具备相对吸能优势的 25% 填充率的泡沫铝填充多胞方管。基于课题组已有成果,对 25% 填充率下不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管进行准静态压缩试验。

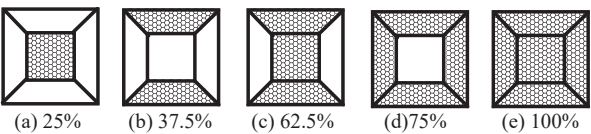


图 13 不同填充率下泡沫铝填充多胞方管示意

Fig.13 Schematic diagram of aluminum foam filled multi-cell square tubes with under different filling rates

4.2 泡沫铝准静态压缩

如图 14 所示为 4 种采用粉末冶金发泡法制作而成的不同孔隙度闭孔泡沫铝。通过测量 4 种泡沫铝的体积和质量计算出其各自的密度,分别为 416、526、694、778 kg/m³,由于纯铝的密度为 2 700 kg/m³,进一步计算可以得出泡沫铝孔隙度分别为 84.60%、80.52%、74.30% 和 71.18%。泡沫铝的孔隙度越高,孔径越大,孔隙体积越大,密度越小。

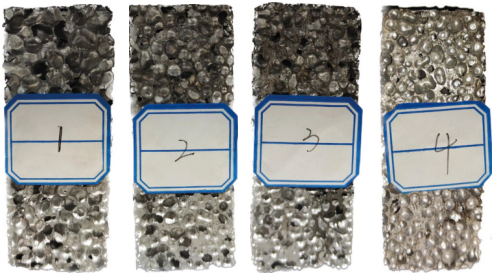


图 14 泡沫铝试件

Fig.14 Specimen of aluminum foam

采用 YAW-2000 型电液伺服试验机,开展准静态压缩试验研究泡沫铝在轴向压溃作用下的能量吸收性能。加载方式选择为位移加载,速率为 0.3 mm/s。由于泡沫铝内部存在较多的孔隙为压缩过程提供了较大的变形空间,泡沫铝在初始阶段内水平方向未产生明显的变形,随着孔隙被压缩密实,泡沫铝内部变形空间逐渐减小,泡沫铝被逐渐压缩密实并在水平方向产生轻微的膨胀扩张变形,直至完全被压缩进入密实化。泡沫铝被压溃到密实化后的形态如图 15 所示。

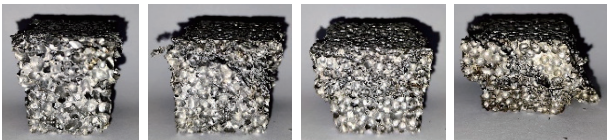


图 15 泡沫铝压缩形态

Fig.15 Compressed form of aluminum foam

图 16 为不同孔隙度泡沫铝轴向压溃作用下的反力-位移曲线。由图可知,随着泡沫铝孔隙度降低,泡沫铝变形过程中的反力整体水平提高。泡沫铝变

形初始反力近似线性跃升到初始压溃峰值,而后反力下降进入有规律的波动起伏状态,之后以较低的速率缓慢上升,随着泡沫铝被逐渐压缩密实,载荷迅速上升。

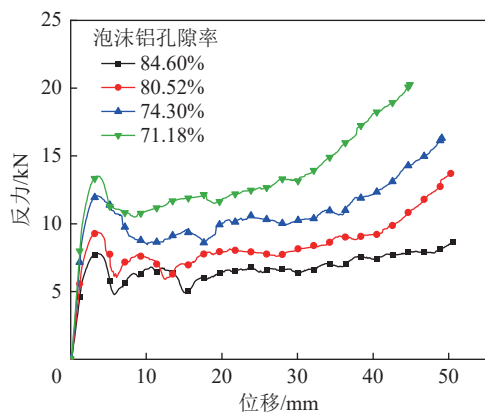


图 16 不同孔隙度泡沫铝反力-位移曲线

Fig.16 Reaction-displacement curves of aluminum foam with different porosity

为进一步分析不同孔隙度泡沫铝的能量吸收性能,绘制出不同孔隙度泡沫铝吸能量与位移曲线,如图 17 所示。随着变形量增加,泡沫铝吸能量近似线性增加,随着泡沫铝孔隙度的降低,泡沫铝分别以约 6.69、8.40、10.71、13.24 J/mm 的速率吸收能量,在相同变形量下泡沫铝孔隙度越低其能量吸收能力越强。

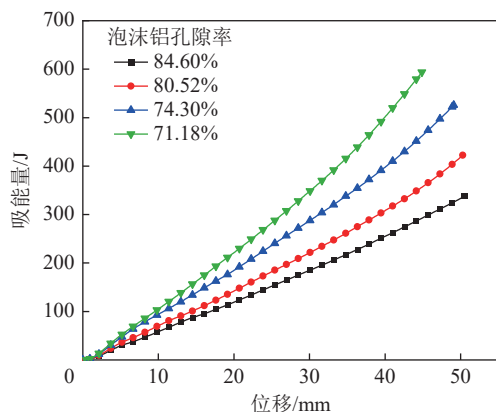


图 17 不同孔隙率泡沫铝吸能量-位移曲线

Fig.17 Energy absorption-displacement curves of aluminum foam with different porosity

4.3 不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管准静态压缩

将 4.1 节中 4 种不同孔隙率的泡沫铝按照填充率为 25% 的填充方式依次填充到 304 不锈钢 SS 型多胞方管内,开展轴向准静态压缩试验。试验采用与第 3 节相同的 YAW-2000 微机控制电液伺服压力试验机,加载方式选择为位移加载,加载速率为 0.3 mm/s,如图 18 所示。

由图 19 可见,在轴向压溃过程中,弹性变形阶段和密实阶段的反力变化趋势基本相同,塑性变形阶段内反力波动存在较为明显的差异,这是由于弹性变形阶段内构件刚刚开始发生变形,密实阶段内构件被逐渐压缩密实,而塑性变形阶段是多胞方管形成塑性铰的阶段,不同构件在塑性变形阶段内产生褶皱的位置和时间存在差异,也是能量吸收主要阶段,因此反力在塑性阶段内波动情况存在差异。



图 18 准静态压缩试验装置

Fig.18 Quasi-static compression experimental device

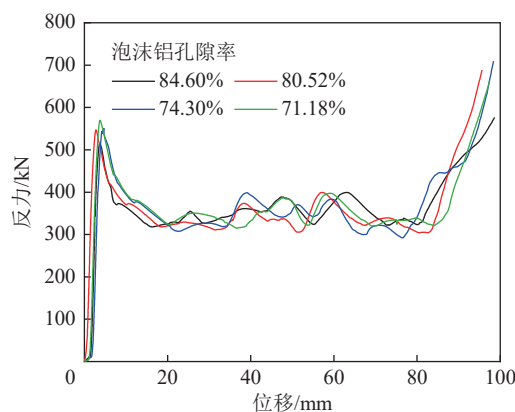


图 19 不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管反力-位移曲线

Fig.19 Reaction-displacement curve of multi-cell square tube filled with aluminum foam with different porosity

由图 20 中泡沫铝填充多胞方管轴向压溃后的俯视图和侧视图可见,不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管最终的变形模式均为轴对称叠缩变形。多胞方管在受压过程中泡沫铝内孔洞被压缩密实,孔洞之间相互挤压的过程中吸收了部分能量,同时与多胞方管变形产生的褶皱相互挤压变形,耗散了较多的能量。泡沫铝作为一种多孔金属材料,其密度、弹性模量与屈服强度都远低于 304 不锈钢,主要决定吸能构件承载能力的仍是以 304 不锈钢为材料的 SS 型多胞方管。但泡沫铝的填充有助于提升多胞方管抵抗变形的能力,与不填充泡沫铝的多胞方管相比,泡沫铝填充多胞方管在轴向压溃过程中反力整体水

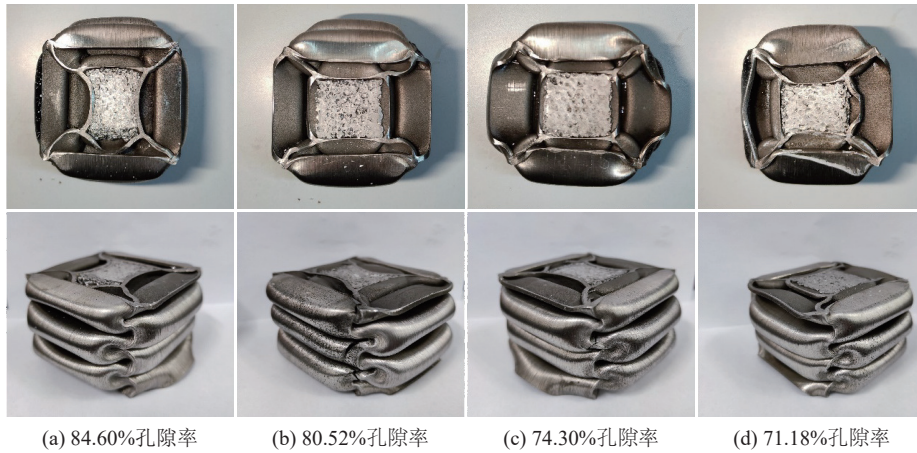


图 20 不同孔隙率泡沫铝填充多胞方管准静态压缩变形形态

Fig.20 Quasi-static compression deformation morphology of multi-cell square tube filled with aluminum foam with different porosity

平明显提高,载荷波动明显降低,且泡沫铝填充多胞方管的吸能量大于多胞方管与泡沫铝吸能量之和。

由表 4 可知,随着 SS 型多胞方管中填充的泡沫铝孔隙率从 84.60% 降低至 71.18%,多胞方管的载荷初始峰值依次增加 31.75、35.43、55.05 kN,载荷均值依次增加 10.23、14.82、24.33 kN,吸能量依次增加 0.91、1.46、2.34 kJ,而有效变形让位距离基本保持不变,约为 95 mm。综上所述,在 4 种不同孔隙率的泡沫铝填充多胞方管中,71.18% 孔隙率泡沫铝填充多胞方管载荷波动最小,有效变形长度和吸能量最大,吸能防冲性能最好。

表 4 不同孔隙率泡沫铝填充多胞方管能量吸收性能

Table 4 Energy absorption performance of multi-cellular square tubes filled with aluminum foam with different porosity

孔隙率/%	P_{\max}/kN	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	σ/kN	$E_{\text{total}}/\text{kJ}$	δ/mm
84.60	514.65	330.27	54.78	31.21	94.51
80.52	546.40	340.50	54.73	32.12	94.33
74.30	550.08	345.09	57.64	32.67	94.68
71.18	569.70	354.60	54.14	33.55	94.61

5 传统液压支架与防冲支架抗冲击性能对比

5.1 仿真模型建立

吸能防冲支架在传统液压支架的基础上,将吸能构件安装在刚性支架立柱底部。为分析泡沫铝填充多胞方管防冲支架的防冲性能,采用 SOLIDWORKS 软件建立防冲支架模型如图 21 所示。防冲支架主要由顶梁、立柱、吸能构件和底座组成,为简化计算,忽略了乳化液和对计算影响较小的倒角。采用 HYPERMESH 软件对防冲支架模型进行网格

划分,对应力集中处进行网格细化,其中支架立柱部分网格尺寸为 10 mm,顶梁和底座部分网格尺寸为 25 mm,多胞方管网格尺寸与第 3 节相同,共划分 288 554 个单元。液压支架材料为 Q550 钢材,吸能构件为 71.18% 孔隙率泡沫铝填充多胞方管,材料参数与第 4 节中相同。防冲支架底座与下端刚性板绑定并约束所有方向自由度,通过赋予上端刚性板质量和初速度提供冲击能量,并约束除竖直方向外所有方向自由度。上端刚性板的冲击能量通过式(17)计算。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (17)$$

式中: E 为冲击能量; m 为上端刚性板质量; v 为上端刚性板初速度。

设置上端刚性板初速度保持 10 m/s 不变^[25],冲

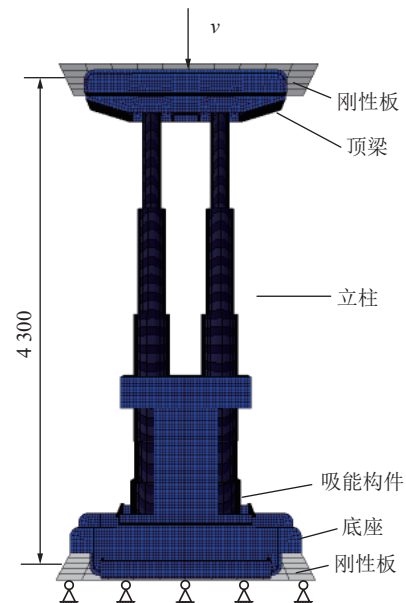
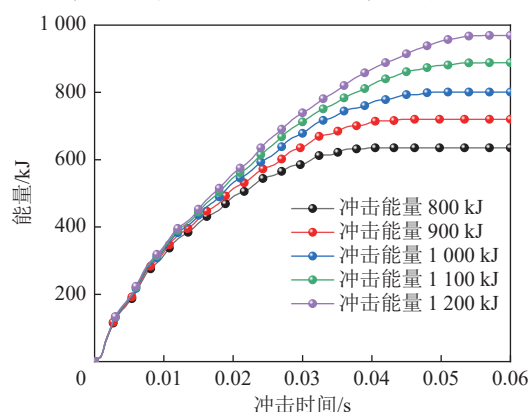


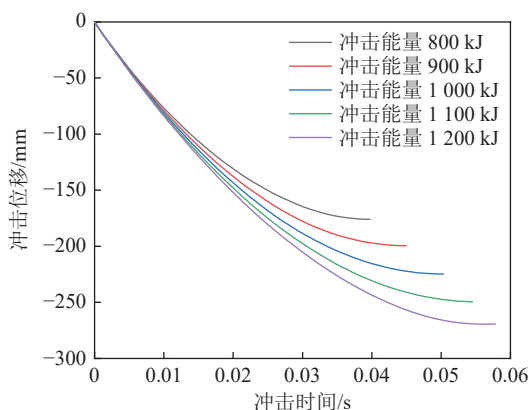
图 21 ZQ4000 型防冲支架有限元模型

Fig.21 Finite element model of ZQ4000 anti-impact support

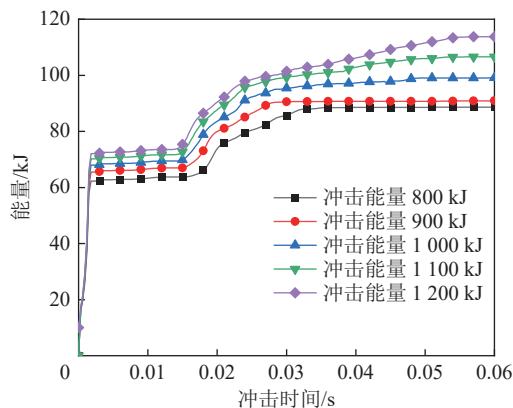
击能量分别取 800、900、1 000、1 100、1 200 kJ, 通过改变上端刚性板质量来研究泡沫铝填充多胞方管防冲支架在不同冲击能量下的防冲性能。图 22a 和图 23a 分别为不同冲击能量下防冲支架和传统支架整体塑性能随冲击时间变化的曲线, 从图中可以看出, 随着冲击能量的增大, 2 种支架整体产生的塑性能不断增大, 但 2 种支架整体塑性能大小基本相同。图 22b 和图 23b 分别为不同冲击能量下防冲支架和传统支架冲击位移随冲击时间变化的曲线, 从图中可以看出, 随着冲击能量不断增大, 上端刚性板的位



(a) 防冲支架整体塑性能-冲击时间曲线



(b) 防冲支架冲击位移-冲击时间曲线

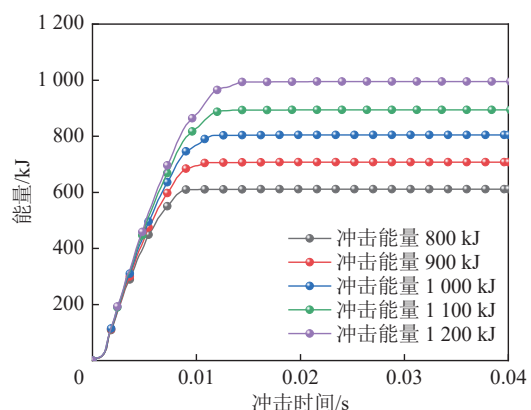


(c) 防冲支架支架部分塑性能-冲击时间曲线

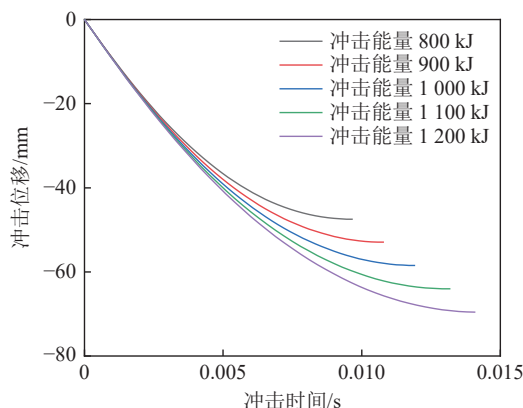
图 22 泡沫铝填充多胞方管防冲支架防冲性能

Fig.22 Anti-impact performance of foam-filled multi-cell square tube anti-impact support

移不断增大, 且上端刚性板下降的速度不断增大。将防冲支架整体塑性能分为支架部分的塑性能和吸能构件部分的塑性能, 图 22c 为防冲支架中支架部分的塑性能, 从图中可以看出, 在 0.001 8 s 前支架部分的塑性能迅速升高, 在 0.001 8 ~ 0.015 3 s 吸能构件发挥作用, 吸能构件作为主要承载部分吸收冲击能量并迅速让位变形, 支架部分的塑性能不变, 在 0.015 3 s 后支架部分和吸能构件部分共同作为承载部分, 支架部分的塑性能开始增大但较 0.001 8 s 前增长缓慢。由于传统支架中没有吸能构件, 支架整体的塑性能即支架部分的塑性能, 因此从图 22c 和图 23a 可以看出, 吸能支架与传统支架相比支架部分塑性能明显减小, 有效保护了支架不被破坏。



(a) 传统支架整体塑性能-冲击时间曲线



(b) 传统支架冲击位移-冲击时间曲线

图 23 传统支架防冲性能

Fig.23 Anti-impact performance of traditional support

从表 5 可以看出, 当冲击速度保持不变时, 在不同冲击能量条件下, 防冲支架与传统支架相比, 支架部分的塑性能降低了 87% 左右, 防冲支架通过吸能构件的屈曲变形有效减少了支架部分的塑性变形。防冲支架的冲击时间与传统支架相比延长了 307% 左右, 冲击位移增加了 282% 左右, 为支架立柱安全阀的开启提供了充足的时间, 减小了支架立柱发生

表 5 泡沫铝填充多胞方管防冲支架与传统支架防冲性能对比

Table 5 Comparison of anti-impact performance of aluminum foam filled multi-cell square tube support and traditional support

冲击能量/kJ	冲击时间			冲击位移			支架部分塑性能		
	传统支架/s	防冲支架/s	提升量/%	传统支架/mm	防冲支架/mm	提升量/%	传统支架/kJ	防冲支架/kJ	降低量/%
800	0.009 7	0.035 8	269	47.48	175.91	270	611	89	85
900	0.010 8	0.045 0	317	52.93	199.50	277	707	91	87
1 000	0.011 9	0.050 4	324	58.47	224.67	284	804	99	88
1 100	0.013 2	0.054 6	314	64.00	249.47	290	895	107	88
1 200	0.014 1	0.057 9	311	69.56	269.38	287	998	114	89

爆缸的危险性。

图 24 为泡沫铝填充多胞方管防冲支架与传统支架的屈服位置示意图,由于不同冲击能量下防冲支架与传统支架的屈服位置变化较小,因此以冲击能量为 800 kJ 工况为例,其中灰色部分为支架中发生塑性变形的部分,蓝色部分为未发生塑性变形的部分。从图 24 可以看出,防冲支架顶梁,立柱的连接位置及吸能装置是支架的主要承载部位,相比于传统支架,泡沫铝填充多胞方管防冲支架顶梁和立柱的连接位置发生塑性变形的面积小于传统支架,表明泡沫铝填充多胞方管吸能构件的应用有效保护了支架不发生破坏。

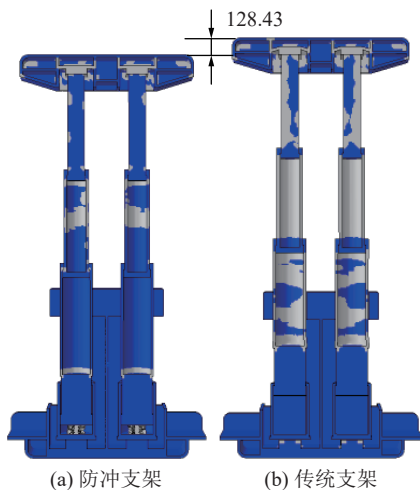


图 24 冲击能量 800 kJ 时防冲支架和传统支架屈服位置

Fig.24 Yield position of the anti-impact support and the traditional support when the impact energy is 800 kJ

6 结 论

1)根据改进的 SSFE 理论得出了多胞管的等效轴向载荷预测公式,公式表明多胞管的等效轴向载荷主要受多胞管的壁厚、截面周长和材料的影响,理论公式计算结果与数值模拟和试验结果有较好的吻合。

2)不同结构类型多胞管在轴向压溃作用下均产

生轴对称叠缩变形,多胞管在变形过程中反力均存在弹性变形阶段、塑性变形阶段与密实化阶段。在 4 种类型多胞管中,SS 型方管拥有合适的载荷初始峰值与较高吸能量和有效变形距离,且变形过程中反力较为稳定、波动较小,能量吸收性能最好。准静态压缩试验与数值模拟结果误差较小,验证了数值模拟的可靠性。

3)泡沫铝在轴向压溃作用下逐渐被压缩密实,反力存在较长的平台阶段,吸能特性较好。随着在 SS 型多胞方管内填充的泡沫铝孔隙度降低,泡沫铝填充多胞方管抵抗变形能力提高,变形过程中初始压溃峰值、载荷均值和吸能量增加,有效变形距离基本保持不变,其中 71.18% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管吸能防冲性能较好。

4)防冲支架顶梁,立柱的连接位置及吸能装置是支架的主要承载部位。当冲击速度保持不变时,在不同冲击能量条件下,防冲支架与传统支架相比,支架部分的塑性能降低了 87% 左右,冲击时间延长了 307% 左右,冲击位移增加了 282% 左右,防冲支架通过吸能构件的屈曲变形有效减少了支架部分的塑性变形,为支架立柱安全阀的开启提供了充足的时间,减小了支架立柱发生爆缸的危险性。后续将支架立柱制成实物,对 1 : 1 泡沫铝填充多胞方管防冲支架立柱进行轴向冲击试验。

参考文献(References):

[1] 王国法,潘一山,赵善坤,等. 冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 1-14.
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shankun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 1-14.

[2] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.

- [3] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203–213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203–213.
- [4] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188–2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188–2204.
- [5] 潘一山, 肖永惠, 李忠华, 等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究和应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222–228.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, 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.
- [6] 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 Xiao, PAN Yishan, ZHANG Jianzhuo, 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.
- [7] MA X, PAN Y S, XIAO Y H. Study on application of the mine anti-impact and energy-absorption device[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 470: 598–603.
- [8] 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.
- [9] 郝志勇, 刘亚强, 潘一山. 矿用缓冲吸能装置及其填充材料试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 620–628.
HAO Zhiyong, LIU Yaqiang, PAN Yishan. Experimental study on filling material of mining buffer energy absorption device[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 620–628.
- [10] GUO C H, HAN J Q. Research on energy absorbing components of ZQL hydraulic support[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(3): 176.
- [11] 王春华, 安达, 韩冲, 等. 冲击地压新型加肋板圆管式吸能防冲构件的仿真与试验[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 203–210, 241.
WANG Chunhua, AN Da, HAN Chong, et al. Simulation and tests for new tubular type energy-absorbing and anti-impact members with stiffened plate under rock burst[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 203–210, 241.
- [12] 张建卓, 刘欢, 王洁. 直纹管外翻式构件设计与吸能特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 49–56.
ZHANG Jianzhuo, LIU Huan, WANG Jie. Design and energy-absorbing properties of the everting components of straight corrugated tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9): 49–56.
- [13] LIU Q, MA J B, HE Z H, et al. Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 121: 134–144.
- [14] CHEN J X, XIE J, ZHU H, et al. Integrated honeycomb structure of a beetle forewing and its imitation[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2012, 32(3): 613–618.
- [15] CHEN J X, GU C L, GUO S J, et al. Integrated honeycomb technology motivated by the structure of beetle forewings[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2012, 32(7): 1813–1817.
- [16] CHEN J X, HE C L, GU C L, et al. Compressive and flexural properties of biomimetic integrated honeycomb plates[J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 214–220.
- [17] CHEN W G, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption[J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(4): 287–306.
- [18] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1585–1594.
PAN Yishan, QI Qingxin, WANG Aiwen, et al. Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1585–1594.
- [19] 煤矿用液压支架 第1部分: 通用技术条件: GB 25974.1—2010[S].
- [20] JIN M Z, YIN G S, HAO W Q, et al. Energy absorption characteristics of multi-cell tubes with different cross-sectional shapes under quasi-static axial crushing[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2022, 27(2): 565–580.
- [21] QIU N, GAO Y K, FANG J G, et al. Theoretical prediction and optimization of multi-cell hexagonal tubes under axial crushing[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 102: 111–121.
- [22] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50: 727.
- [23] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844–1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1844–1851.
- [24] 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 study on anti-impact characteristics of energy absorbing column with multicellular square tube filled with aluminum foam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 302–311.
- [25] 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 optimal design of roadway support in rockburst[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020.