



## 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究

肖晓春 朱恒 徐军 樊玉峰 李子阳 雷云

### 引用本文:

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. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1608>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 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>

#### 防治煤自燃的泡沫凝胶防灭火特性研究

Study on characteristics of foam gel for prevention and control of coal spontaneous combustion  
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b700f5c9-dad5-4933-970e-c905c568a34e>

#### 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>

#### CMC/ZrCit/GDL防灭火凝胶泡沫的制备及特性研究

Study on preparation and characteristics of CMC/ZrCit/GDL fire-fighting gel foam  
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 122–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1132>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息





移动扫码阅读

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.

## 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究

肖晓春<sup>1,2</sup>, 朱恒<sup>1,2</sup>, 徐军<sup>1,2</sup>, 樊玉峰<sup>1,2</sup>, 李子阳<sup>1,2</sup>, 雷云<sup>3</sup>

(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;

3. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:** 针对吸能防冲支架已有吸能构件防冲性能不足的问题, 提出了一种泡沫铝填充多胞方管结构, 根据泡沫材料填充薄壁结构轴向吸能理论得出其压溃平均载荷公式, 采用 ABAQUS/Explicit 完成了普通方管、多胞方管和泡沫铝填充多胞方管轴向冲击仿真, 并在此基础上对比研究了普通立柱与吸能立柱的抗冲击性能。结果表明: 相对于普通方管和多胞方管, 泡沫铝填充多胞方管产生了压溃形态理想的轴对称渐进叠缩变形, 变形中初始承载峰值、载荷均值与吸能量均明显提高, 有效变形距离减小, 载荷波动降低, 承载效率提高。随泡沫铝填充率增加, 构件有效变形距离与吸能量减小; 随泡沫铝孔隙度降低, 构件载荷均方差降低, 吸能量与承载效率提高。25% 填充率下 60% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管是较为理想的吸能防冲构件。普通立柱受冲击后载荷激增, 弯曲变形严重, 立柱依靠自身变形吸收冲击能量, 支护效果较差; 而吸能立柱受冲击后吸能构件启动变形让位吸能, 大幅度降低了立柱的载荷, 吸收了外界大部分的冲击能量, 避免了立柱的弯曲变形, 提高了支架的抗冲击性能。

**关键词:** 泡沫铝; 多胞方管; 吸能防冲特性; 孔隙度; 立柱

**中图分类号:** TD324

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2023)10-0302-10

### Numerical study on anti-impact characteristics of energy absorbing column with multicellular square tube filled with aluminum foam

XIAO Xiaochun<sup>1,2</sup>, ZHU Heng<sup>1,2</sup>, XU Jun<sup>1,2</sup>, FAN Yufeng<sup>1,2</sup>, LI Ziyang<sup>1,2</sup>, LEI Yun<sup>3</sup>

(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; 3. China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China)

**Abstract:** Aiming at the insufficient anti-impact performance of existing components of the energy-absorbing anti-impact support, a foam aluminum filled multicellular square tube structure is proposed. According to the axial energy absorption theory of thin-walled structures filled with foam materials, the formula of average crushing load is obtained. The axial impact simulation of square tube, multicellular square tube and foam aluminum filled multicellular square tube are completed by using ABAQUS/Explicit. On this basis, the impact resistance of ordinary hydraulic column and energy absorbing hydraulic column is analyzed. The results showed that compared with the square tube and multicellular square tube, the foam aluminum filled multicellular square tube has an ideal axisymmetric progressive deformation. The initial load peak value, load bearing-mean and energy absorption are greatly improved, the effective deformation distance is reduced, the load fluctuation is reduced, and the load carrying efficiency is improved. With the increase of foam aluminum filling ratio, the effective deformation distance and energy absorption of the component are reduced. As the porosity of aluminum foam decreases, the force variance decreases, and energy absorption and the load carrying efficiency increase. Aluminum foam-filled multicellular square tube with 60% porosity at 25% filling rate is an ideal energy absorption component. Ordinary column surges after impact load, bending deformation is

收稿日期: 2022-10-02

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1608

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974186, 51774164); 辽宁工程技术大学创新团队项目联合资助项目(LNTU20TD-17)

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

通讯作者: 朱恒(1998—), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生。E-mail: zhuheng06@126.com



serious, column relies on its own deformation to absorb energy, supporting effect is poor. After the energy-absorbing column is impacted, the energy absorption component begins to deform and absorb energy. Greatly reduce the load of the column, absorb most of the outside impact energy, avoid the column bending deformation, improve the impact resistance of the support.

**Key words:** aluminum foam; multicellular square tube; energy absorption and anti-impact characteristics; porosity; column

## 0 引言

煤炭是我国主体能源和重要的工业原料<sup>[1-2]</sup>。冲击地压是我国煤矿生产中主要的动力灾害<sup>[3]</sup>，近年来我国浅部煤炭资源日益枯竭，随着煤炭开采深度和强度的增加，冲击地压事故频发，造成了严重的人员伤亡和经济损失<sup>[4-6]</sup>。液压支架是煤矿巷道支护的主要设备<sup>[7]</sup>，常规的液压支架只具备较小能量冲击下的支护能力，在冲击地压发生时往往不能及时泄压，支架易产生弯折、爆缸等破坏性失效<sup>[8]</sup>。基于此，潘一山等<sup>[9-10]</sup>提出了吸能防冲支护理论，通过吸能防冲液压支架内的关键部件——吸能防冲构件在冲击作用下变形让位吸能增强支架的抗冲击能力，对巷道围岩起到了有效的控制，降低了冲击地压的破坏作用。

针对吸能防冲构件相关学者展开了大量的研究。韩冲<sup>[11]</sup>设计了一种加肋板圆管式吸能防冲构件，肋板抑制了圆管压溃屈曲的圆环模式变形和欧拉失稳，但在实际应用中易开裂、偏斜。唐治等<sup>[12-13]</sup>提出了一种六边形折痕吸能防冲构件和六边形薄壁构件，折痕降低了构件载荷波动系数，提高了能量吸收效率，但构件结构复杂，需要专门模具加工，生产成本较高；六边薄壁构件虽结构简单、变形模式稳定，但承载能力较小、能量吸收较低。刘欢<sup>[14]</sup>设计了一种可实现恒阻变形的直纹管外翻型吸能防冲构件，构件变形阻力近似为理想的水平直线，但构件结构复杂，需要定向导向装置，对于精度要求较高，面对实际复杂多变的工况易出现失效。

吸能防冲构件实质是一种能量吸收装置。金属薄壁结构作为典型的吸能装置因其生产成本较低、具有良好的吸能能力而被广泛应用于汽车工业、航空航天等轨道交通领域<sup>[15-18]</sup>，在矿业领域内金属薄壁结构式吸能防冲构件也正快速发展。现有的研究成果已经表明，与单胞薄壁结构相比，多胞薄壁结构在轴向冲击下塑性变形更充分、比吸能更高<sup>[19]</sup>，而泡沫金属材料具有密度低、孔隙度高、能量吸收率高等优异特点，与薄壁结构相结合既可以提高结构整体的稳定性，也显著提高了结构的承载能力与吸能能力<sup>[20]</sup>。基于此提出了一种新型的泡沫铝填充多胞方管式吸能防冲构件，通过泡沫材料填充薄壁结构轴向吸能理论得出其压溃平均载荷公式，进一步采用

数值方法对比研究了轴向冲击下普通方管、多胞方管和泡沫铝填充多胞方管的吸能防冲特性，考察了泡沫铝不同填充率和不同孔隙度泡沫铝填充下构件吸能特性差异，并在此基础上对比分析了普通液压立柱与吸能液压立柱的抗冲击性能，最终为吸能防冲液压支架提供了一种新型可靠的吸能防冲构件。

## 1 泡沫填充薄壁管件吸能理论

泡沫铝填充多胞方管本身作为一种泡沫填充薄壁结构，其自身变形吸能的理论依据就是泡沫材料填充薄壁圆柱壳轴向吸能理论<sup>[21]</sup>。假设材料为理想刚塑性且在屈服准则中弯曲和拉伸并没有交互作用，则构件变形产生的一个褶皱被完全压实后塑性弯曲产生的能量为

$$W_b = 2M_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \pi(D + 2H \sin \theta) d\theta + \pi^2 M_0 D \quad (1)$$

或

$$W_b = 2\pi M_0 (\pi D + 2H) \quad (2)$$

拉伸耗散的能量为

$$W_s = 2 \int_0^H \pi Y D h \ln[(D + 2s \sin \theta)/D] ds \quad (3)$$

式中： $M_0$  为单位宽度的塑性极限弯矩； $D$  为圆管直径； $H$  为褶皱半长； $Y$  为屈服应力。

当  $\theta = \pi/2$  时有

$$W_s \approx 2\pi Y h H^2 \quad (4)$$

根据能量平衡，外力做功等于弯曲和拉伸损耗能量之和，可求得外力为

$$P_m = \frac{W_b + W_s}{2H} \quad (5)$$

对于具有轴对称破损模式的圆管，假设管壁只向外做运动，当管件整体轴向应变达到充填泡沫的锁定应变  $\varepsilon_l$  时，一个褶皱的破损变形停止，薄壁管件的轴向名义应变为

$$\varepsilon_l = 1 - \cos \theta_0 \quad (6)$$

因此有

$$\theta_0 = \cos^{-1}(1 - \varepsilon_l) \quad (7)$$

以上公式确定了一个褶皱的完成状态，泡沫材料的锁定应变与其相对密度  $\rho^*/\rho_s$  相关，其中  $\rho^*$  为泡沫材料的密度， $\rho_s$  为泡沫铝壁固体材料密度，若取此应变对应的应力为平台应力的三倍 ( $3\sigma_p$ )， $\sigma_p$  为平台



应力,则锁定应变近似于

$$\varepsilon_1 = 1 - 3\rho^*/\rho_s \quad (8)$$

将其代入上式得

$$\theta_0 = \cos^{-1}(3\rho^*/\rho_s) \quad (9)$$

在式(1)和式(2)中用  $\theta_0$  代替  $\pi/2$ , 仅对薄壁管而言修正后的平均力为

$$P_{mt}(\theta_0) = 2\pi M_0 \left[ \frac{D(\theta_0 + 2\sin\theta_0)}{H(1 - \cos\theta_0)} + 1 \right] \quad (10)$$

假定褶皱长度  $2H \approx 2\sqrt{Dh}$  则得到

$$P_{mt} = 2\pi M_0 \left\{ \sqrt{\frac{D}{h}} \frac{\cos^{-1}(3\rho^*/\rho_s) + 2\sin[\cos^{-1}(3\rho^*/\rho_s)]}{1 - 3(\rho^*/\rho_s)} + 1 \right\} \quad (11)$$

根据平台应力与相对密度之间的关系

$$\frac{\sigma_f}{Y_s} = 0.3(\rho^*/\rho_f)^{1.5} \quad (12)$$

泡沫材料的压溃力为

$$P_f = \sigma_f \frac{\pi D^2}{4} = 0.3Y_s(\rho^*/\rho_f)^{1.5} \frac{\pi D^2}{4} \quad (13)$$

因此泡沫填充管件的平均力为

$$P_m = P_{mt} + P_f \quad (14)$$

## 2 吸能构件设计及评价参数

### 2.1 结构设计

根据现有防冲液压支架中吸能防冲装置的相关尺寸参数,设计构件结构形式及尺寸见表 1。

### 2.2 吸能防冲性能评价参数

吸能防冲构件是液压支架吸能装置中的核心部件,应具备静压下的刚性支护能力和冲击下的柔性吸能能力。对吸能防冲构件的要求和评价参数如下:

1)合理的初始承载峰值  $P_{\max}$ , 满足式(15)的要求,其中  $P_1$  为液压立柱工作阻力,  $P_2$  为液压立柱的临界破坏载荷。

$$P_1 < P_{\max} < P_2 \quad (15)$$

2)承载力达到初始峰值时构件变形量  $\delta_1$ 。

3)承载力再次达到初始峰值水平时构件变形量  $\delta_2$ , 即有效变形距离。

4)较高的载荷均值  $P_{\text{mean}}$ , 定义为:

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{s} \int_0^s P(s)ds \quad (16)$$

5)较大的吸能量  $E$ 。吸能量  $E$  是构件压溃变形过程中吸收的能量,是构件吸能防冲能力最直接的体现,可以通过载荷-变形量曲线得到,其定义为

表 1 构件的结构尺寸

Table 1 Structural dimensions of components

编号	边长/mm	高度/mm	壁厚/mm	类型	孔隙度
ST	180	350	8	普通方管	无
MT1	180	350	4	多胞方管	无
MT2	180	350	5	多胞方管	无
MT3	180	350	6	多胞方管	无
MT4	180	350	7	多胞方管	无
MT5	180	350	8	多胞方管	无
AMT1	180	350	6	A型填充管	90%
AMT2	180	350	6	B型填充管	90%
AMT3	180	350	6	C型填充管	90%
AMT4	180	350	6	D型填充管	90%
AMT5	180	350	6	E型填充管	90%
AMT6	180	350	6	A型填充管	60%
AMT7	180	350	6	A型填充管	70%
AMT8	180	350	6	A型填充管	80%

$$E = \int_0^s P(s)ds \quad (17)$$

6)较低的载荷均方差  $\sigma$ 。构件稳定的压溃变形过程有利于对液压支架的缓冲保护,其评价标准为构件压溃变形过程中的载荷均方差  $\sigma$ 。

$$\sigma = \sqrt{\int_0^s (P(s) - P_{\text{mean}})^2 ds} \quad (18)$$

7)较高的承载效率  $\eta$ 。吸能构件产生理想的渐进屈曲模式变形时具有较高的承载效率,理想的承载效率是 100%。

$$\eta = \frac{P_{\text{mean}}}{P_{\max}} \quad (19)$$

### 2.3 仿真模型建立

如图 1 所示,采用 ABAQUS/Explicit 动态分析,构件上方刚性板与构件顶面接触,参照冲击地压实际监测数据沿构件轴向方向施加 5 m/s 的冲击载荷,

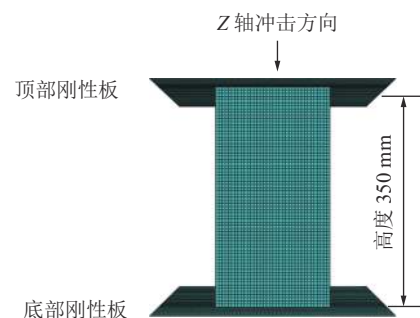


图 1 构件轴向冲击数值计算模型

Fig.1 Numerical model of axial impact crushing of components



并约束刚性板沿构件轴向方向以外的所有自由度；下方刚性板与构件底面绑定约束，并限制所有方向的自由度。模型整体采用通用接触，沿切向方向摩擦系数设为 0.25，法向方向接触为硬接触，线性体积粘性参数设为 0.06，二次体积粘性参数设为 1.2。构件的网格为 3.5 mm 的 S4R 壳单元，沿壁厚方向取 5 个积分点；泡沫铝为 Crushable Foam 各向同性强化可挤压模型，网格为 3.5 mm 的 C3D8R 实体单元；刚性板的网格设为 8 mm 的 R3D4 单元。

多胞方管的材料为 Q235B 钢，密度  $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量  $E = 210\text{ GPa}$ ，泊松比  $\mu = 0.274$ ，塑性定义采用真实应力与塑性应变，参数见表 2。泡沫铝参考文献 [22] 的参数，不同孔隙度的泡沫铝参数见表 3、如图 2 所示。

表 2 Q235B 真实应力-塑性应变

Table 2 True stress and plastic strain of Q235B

真实应力/MPa	235	281	329	409	472	515
塑性应变	0	0.024	0.047	0.094	0.138	0.180

表 3 泡沫铝性能参数

Table 3 Parameters of aluminum foam

孔隙度/%	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\sigma_y/\text{MPa}$
60	1 080	357	0	14.65
70	810	278	0	8.34
80	567	253	0	6.29
90	393	82	0	2.15

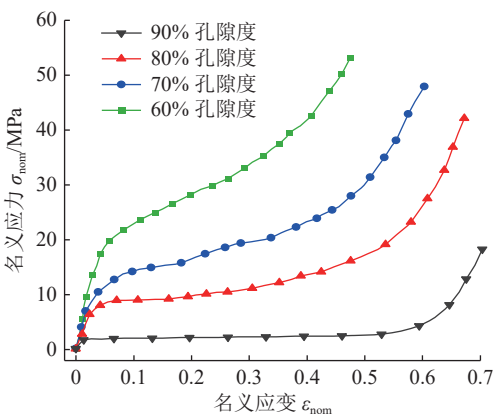


图 2 泡沫铝名义应力-名义应变

Fig.2 Nominal stress-nominal strain of aluminum foam

3 数值计算结果与分析

能量输出是 ABAQUS/Explicit 分析的重要部分，可以应用在各能量分量之间的比较以帮助评估一个分析是否得到了合理的响应，一般认为伪应变能 AL-

LAE、动能 ALLKE 和总能量 ETOTAL 与内能 ALLIE 之比应小于 5%。以多胞方管 MT3 为例，图 3 给出了其冲击过程的能量历史，上述各能量与内能比值分别为 4.306%、0.016% 和 0.553%，结果表明数值计算的结果是稳定可靠的。

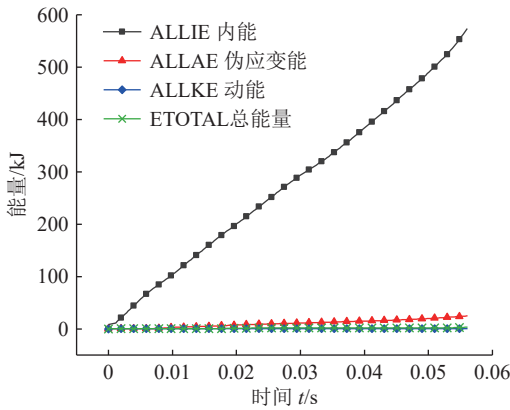


图 3 多胞方管能量历史

Fig.3 Energy history of multicellular square tube

如图 4 所示为不同壁厚多胞方管的载荷变化曲线，构件自 MT1 至 MT5，壁厚分别为 4、5、6、7 和 8 mm，各构件初始载荷峰值分别为 1 421.81、1 804.41、2 292.09、3 056.74 和 3 667.41 kN。根据式 (15) 中  $1\,960\text{ kN} < P_{\max} < 2\,950\text{ kN}$  的要求，满足条件的仅有壁厚为 6 mm 的 MT3。在以后的计算中选择 MT3 作为填充泡沫铝的管件。

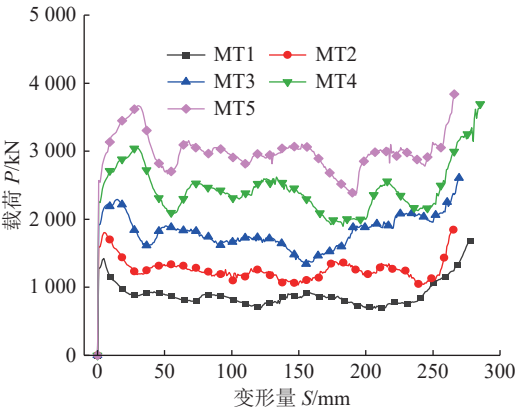


图 4 多胞方管载荷-变型量曲线

Fig.4 Load-displacement curve of multicellular square tubes

3.1 泡沫铝不同填充方式下多胞方管吸能特性差异

由图 5 和图 6 可见，多胞方管未填充泡沫铝前内部存在 1 个正方形胞体和 4 个环绕其周围的等腰梯形胞体，考虑到泡沫铝填充各胞体之间存在的不同组合方式，根据泡沫铝轴对称填充多胞方管内部胞体的原则设计了 A~E 共 5 种类型填充方式如图 5 所示(黑色阴影区域表示泡沫铝材料)，如图 6 所示



以 A 型填充方式下构件 AMT6 为例给出了其主视图、俯视图和侧视图(正方形蓝色区域表示泡沫铝材料)。从 A 型到 E 型, 泡沫铝填充率逐渐提高, 填充率依次为 25%、37.5%、62.5%、75% 和 100%, 其中 A 型仅填充多胞方管内部正方形胞体, 填充率 25%, E 型在 A 型基础上进一步填充 4 个等腰梯形胞体, 多胞方管内部被完全填充, 填充率达到 100%。

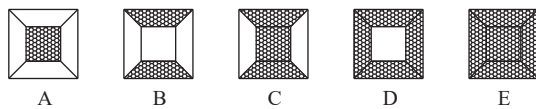


图 5 不同填充方式下构件截面示意

Fig.5 Schematics sectional view of components under different filling methods

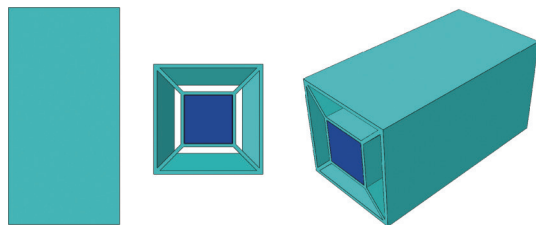


图 6 构件 AMT6 主视图、俯视图和侧视图

Fig.6 Front view, top view and side view of component AMT6

分别对泡沫铝在不同填充方式下构件(AMT1~AMT5)进行了轴向冲击的数值计算。通过计算得出各填充方式下构件的吸能特性评价参数见表 4, 结果

显示随着泡沫铝填充率的增加: 构件载荷初始峰值和载荷均值增大, 增幅较小; 载荷均方差与承载效率无明显变化, 基本维持在 210 kN 和 85%; 有效变形让位距离减少, 依次减少了 10.60、9.27、10.72 和 7.60 mm; 吸能量降低, 依次降低了 14.66、14.36、10.86 和 14.92 kJ。这是由于从 A 至 E 型填充, 随着泡沫铝填充率的增加, 构件内部空腔减少, 受压时可变形空间越小, 越早进入密实化阶段。经过对比得出填充率为 25% 的 A 型填充下构件吸能防冲性能较好, 是较理想的填充方式。

### 3.2 泡沫铝填充多胞方管变形模式与吸能特性

如图 7 所示为 60% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管 (AMT6) 轴向冲击下的压溃变形过程 ( $s = 50$ 、100、150、200 mm)。

变形初始构件顶部应力首先达到屈服值 515 MPa 并产生了横向扩张的塑性变形;  $s = 100$  mm 时构件顶部形成第 1 层褶皱, 2/3 高度处产生凹陷, 而中部区域产生了较小的外凸, 随后构件顶部进一步受压, 外凸变形加剧;  $s = 200$  mm 时构件中部形成了第 2 层褶皱, 两层褶皱相互折叠堆积, 构件逐渐被压缩密实。在构件自上而下依次变形的过程中, 构件底部未产生明显变形。构件最终产生了依次交替的外凸与内凹的渐进叠缩变形, 是一种压溃形态稳定可靠、吸能特性较为理想的变形模式。

表 4 不同填充方式下构件吸能防冲特性

Table 4 Energy absorption characteristics of components under different filling modes

填充方式	填充率/%	$P_{\max}/\text{kN}$	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	$\sigma/\text{kN}$	$E/\text{kJ}$	$\delta_2/\text{mm}$	$\eta/\%$
A型	25	2 415.67	2 031.41	208.04	505.62	248.90	84.09
B型	37.5	2 418.81	2 060.26	212.77	490.96	238.30	85.53
C型	62.5	2 422.19	2 080.95	203.62	476.60	229.03	85.91
D型	75	2 432.35	2 133.37	212.81	465.74	218.31	87.71
E型	100	2 440.46	2 139.53	210.71	450.82	210.71	87.67

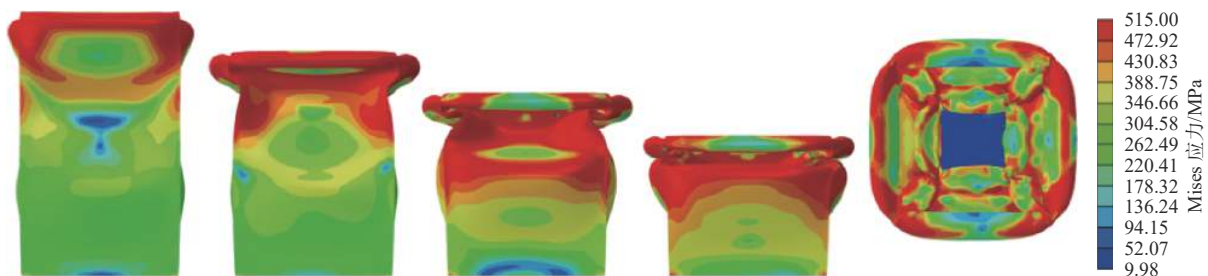


图 7 泡沫铝填充多胞方管轴向冲击变形过程

Fig.7 Impact deformation process of multicellular square tube filled with aluminum foam



### 3.3 不同类型构件吸能防冲特性对比

普通方管(ST)、多胞方管(MT3)和60%孔隙度泡沫铝填充多胞方管(AMT6)轴向冲击下载荷-变形量曲线如图8所示,不同构件载荷变化呈现相似规律,可分为3个阶段,以ST为例:第1阶段为弹性阶段,变形量0~9 mm,载荷从0近似呈线性关系跃升至初始峰值1 660.72 kN,构件产生弹性变形,能量吸收较少;第2阶段为塑性阶段,随着变形量增大到43 mm,载荷下降至783.82 kN,而后随变形量增加产生两次幅值约为400 kN的波动,变形量为202 mm时载荷达到最小值608.29 kN,其后非线性上升直至变形量为282 mm时再次达到1 660.72 kN,在此阶段内构件产生较大的塑性变形吸收了较多的冲击能量;第3阶段为密实阶段,构件逐渐被压缩密实,载荷以约32 kN/mm的速度线性增加,构件变形吸能结束。

同样,对于MT3和AMT6,弹性阶段内变形量分别为15、16 mm时载荷分别线性跃升至2 394.98、2 458.32 kN,曲线基本重合;在塑性阶段,MT3载荷在达到最小值1 463.25 kN前产生了2次幅值约为260 kN的波动,而AMT6在变形量47 mm时载荷首次达到最小值1 942.30 kN,变形量60~160 mm时载荷未产生明显波动,近似呈水平直线,维持在2 160 kN左右。相对于普通方管(ST)和多胞方管(MT3),60%孔隙度泡沫铝填充多胞方管(AMT6)拥有较为

理想的载荷变化曲线,如图9所示。

由表5可知,相对于普通方管(ST),多胞方管(MT3)吸能量提高了87.61%,载荷均方差减小了10.58%,承载效率由61.32%提高到79.77%,可见多胞方管具有更高承载力和吸能量的同时变形稳定性更高,吸能效果更好;而在MT3内部填充了泡沫铝后,AMT6在初始承载峰值仅增大2.64%的情况下,吸能量提高了14.89%,载荷均方差降低了29.67%,承载效率也由79.77%增大到89.29%,可见泡沫铝的填充提高了整体结构的承载能力和变形中的稳定性,增强了能量吸收能力与效率。

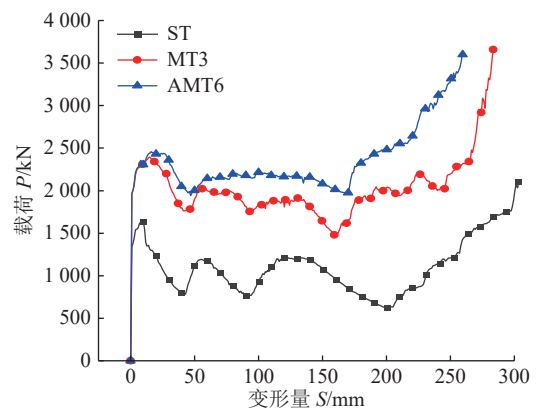


图8 不同构件载荷-变形量曲线

Fig.8 Load-displacement curve of different components

表5 不同构件吸能防冲特性

Table 5 Energy absorption characteristics of different components

编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	$\sigma/\text{kN}$	$E/\text{kJ}$	$\delta_1/\text{mm}$	$\delta_2/\text{mm}$	$\eta/\%$
ST	1 660.72	1 018.36	221.31	203.67	9	281.2	61.32
MT3	2 394.98	1 910.58	197.89	382.12	15	265.3	79.77
AMT6	2 458.32	2 195.09	139.18	439.02	16	194.4	89.29

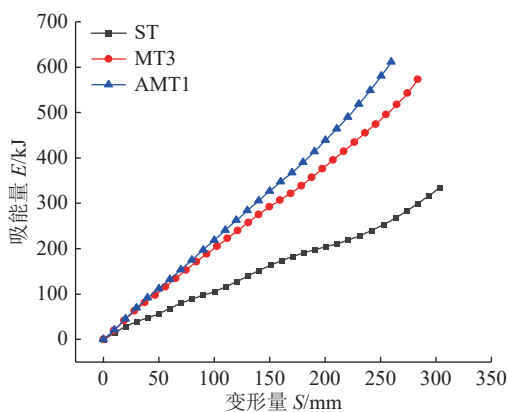


图9 不同构件吸能特性曲线

Fig.9 Energy absorption characteristics curves of different components

### 3.4 不同孔隙度泡沫铝对构件吸能特性的影响

孔隙度是泡沫铝的重要特征之一,决定了泡沫铝的内部孔隙体积与总体积之比。不同孔隙度泡沫铝在密度、弹性模量和屈服应力等方面存在较大差异,受压时吸能特性也各不相同。

随着孔隙度从90%依次降低至60%,构件变形中的初始承载峰值依次增加了18.71 kN、2.50 kN和21.44 kN。泡沫铝孔隙度越低,其密度、弹性模量与屈服极限越高,抵抗变形的能力越强,因此降低孔隙度提高了构件变形的初始承载峰值和载荷整体水平。但泡沫铝作为一种多孔金属材料,无论密度、弹性模量和屈服极限与Q235B钢相比都小得多,构件变形阈值仍主要取决于Q235B,因此构件载荷初始峰值



增幅较小。由图 10 可见随着孔隙度降低,载荷整体水平增大的同时波动减小,载荷较早进入了密实阶段持续上升,这是因为孔隙度越低,泡沫铝内部可压缩变形体积越小,受压时越早被压缩密实。

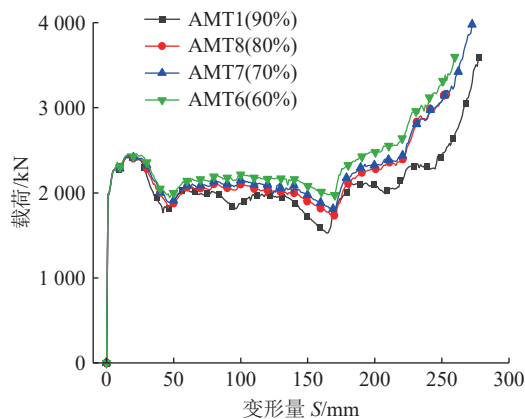


图 10 不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管载荷-变形量曲线  
Fig.10 Load-displacement curve of multicellular square tubes under different porosities

由图 11 可知,对于相同孔隙度泡沫铝,载荷均值随变形量增加呈现先减小后增大的趋势,且变形量约为 170 mm 时均值达到最小,这是因为载荷在塑性阶段持续波动,基本呈降低趋势,进入密实阶段载荷才持续上升。对于不同孔隙度泡沫铝,在相同变形量下随着孔隙度降低,载荷均值显著提高,60% 孔隙度填充多胞方管 AMT6 在变形中载荷水平最高,承载能力最强。

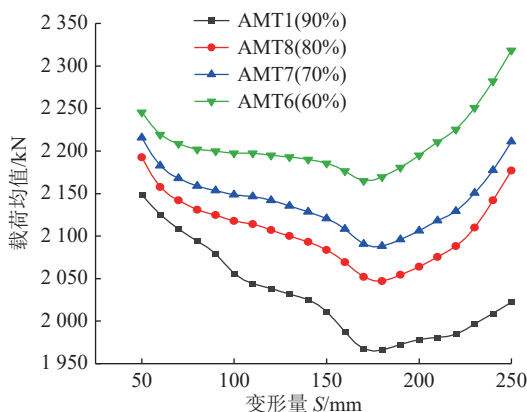


图 11 载荷均值-变形量曲线  
Fig.11 The mean force-displacement curves

由图 12 可知,对于相同孔隙度泡沫铝,载荷均方差呈现以下规律:随变形量增加,除 AMT1 在变形量为 170 mm 时载荷均方差突然跃升至 204.51 kN 外,其余基本呈现先减小后增大的趋势,且当变形量为 150 mm 时载荷均方差达到最小值。对于不同孔隙度泡沫铝,在变形量达到 230 mm 前,载荷均方差

基本呈现  $AMT6 < AMT7 < AMT8 < AMT1$ , 可知 60% 孔隙度填充多胞方管 AMT6 变形稳定性最好。

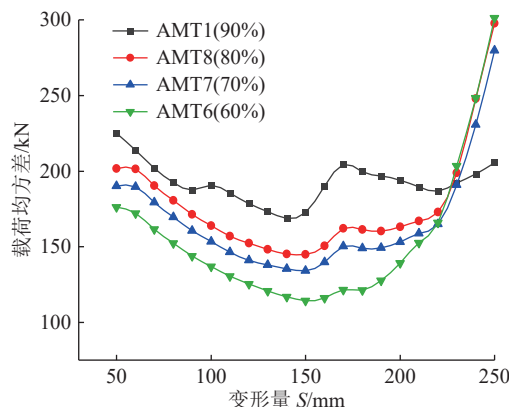


图 12 载荷均方差-变形量曲线  
Fig.12 The force variance-displacement curves

由图 13 可见,随着变形量增加,吸能量近似线性增加,孔隙度由 90% 到 60%,吸能量分别以 1.978、2.064、2.106、2.195 kJ/mm 的速度增加,相同变形量下 AMT6 能量吸收效率最高。结合表 6 可知,泡沫铝孔隙度对  $\delta_1$  影响较小,而承载效率随泡沫铝孔隙度降低由 81.89% 依次增大至 84.79%、86.43% 和 89.29%,60% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管 AMT6 承载效率最高,吸能防冲性能最好,是较为理想的吸能防冲构件。

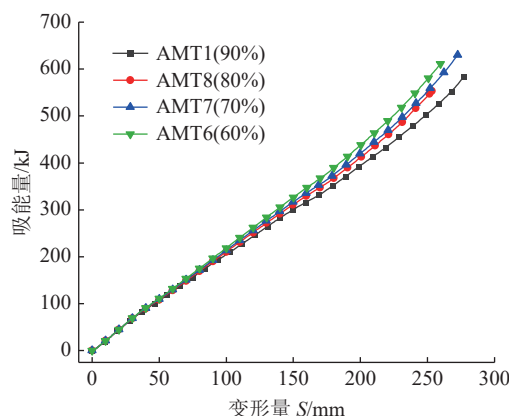


图 13 吸能特性曲线  
Fig.13 Energy absorption characteristics curves

### 3.5 普通立柱与吸能立柱抗冲击性能对比

为分析泡沫铝填充多胞方管与液压立柱组合下的吸能防冲立柱抗冲击性能,采用 ABAQUS 分别建立了普通液压立柱与吸能防冲液压立柱数值计算模型,立柱共分为两级杆,一级杆直径 230 mm,高度 1 440 mm,二级杆直径 160 mm,高度 1 440 mm,材料为 Q550 钢;吸能立柱中的吸能防冲构件为 60% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管(AMT6)。如图 14 所示对



表 6 不同孔隙度泡沫铝填充多胞方管吸能特性

Table 6 Energy absorption characteristics of multicellular square tubes under different porosities

编号	孔隙度/%	$P_{\max}/\text{kN}$	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	$\sigma/\text{kN}$	$E/\text{kJ}$	$\delta_1/\text{mm}$	$\eta/\%$
AMT1	90	2 415.67	1 978.29	193.86	395.66	15	81.89
AMT8	80	2 434.38	2 063.99	163.03	412.80	16	84.79
AMT7	70	2 436.88	2 106.19	153.19	421.24	16	86.43
AMT6	60	2 458.32	2 195.09	139.18	439.02	16	89.29

于普通立柱和吸能立柱的边界条件设置如下：普通立柱底部与刚性板绑定连接完全固定，约束所有方向的自由度；在吸能立柱中吸能构件上端面与立柱底部绑定，下端与刚性板绑定连接并完全固定。立柱顶部与刚性体连接，通过赋予刚体以一定质量和初始速度来模拟外界巨大能量的冲击，刚体初始速度设为 5 m/s，冲击方向沿立柱轴向方向自上而下，冲击总能量为 1 000 kJ。

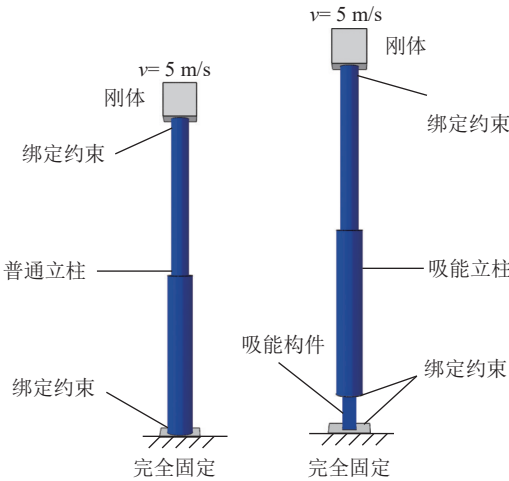


图 14 立柱轴向冲击边界条件  
Fig.14 Boundary condition of column under axial impact

图 15 是普通立柱受冲击下(10 ~ 40 ms)的变形形态，立柱一级杆未发生明显变形，二级杆中部弯曲变形严重；图 16 是吸能立柱受冲击下(10 ~ 60 ms)的变形过程，可见在冲击的过程中吸能构件首先产生变形直至被压缩密实，立柱整体未见明显变形，吸能立柱抵抗冲击变形的能力优于普通立柱。

如图 17 所示，普通立柱受冲击后载荷激增，在 0 ~ 10 ms 内载荷基本维持在 11 500 kN，而后随时间增加逐渐降低，在 40 ms 时降低至 4 788.01 kN，立柱承受外界冲击载荷较大，支护体现为刚性；在吸能立柱中立柱与吸能构件串联，在冲击下吸能构件率先变形，立柱载荷变化与吸能构件载荷变化情况相同，载荷在 2 400 kN 上下较小波动，立柱体现为柔性支

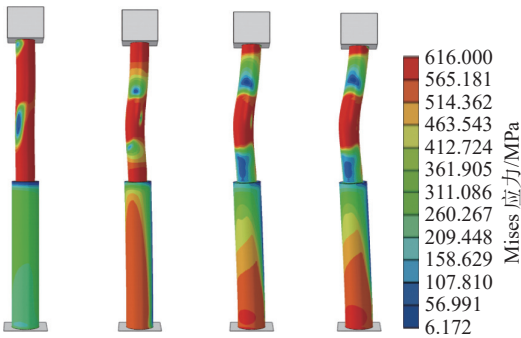


图 15 普通立柱变形形态  
Fig.15 Deformation form of ordinary column

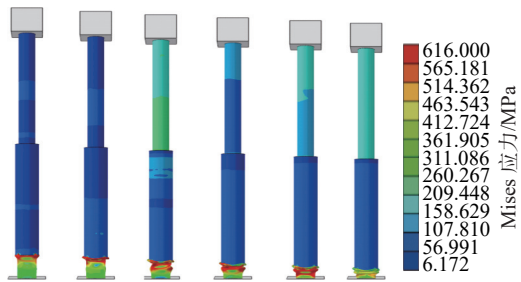


图 16 吸能立柱变形形态  
Fig.16 Deformation form of energy absorbing column

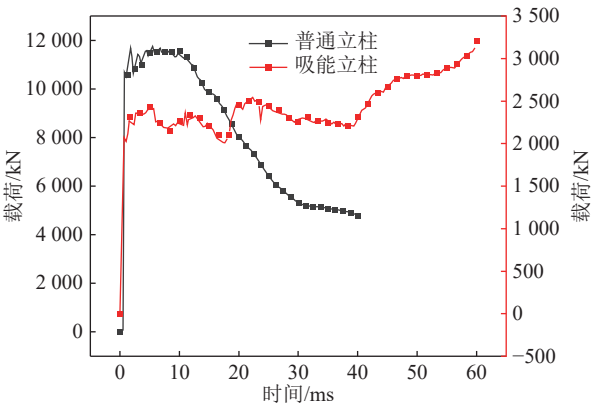


图 17 立柱载荷变化  
Fig.17 Load change of columns

护，吸能构件稳定可靠的变形过程大大降低了立柱的载荷。

立柱本身作为支护体，在冲击下吸收较大能量



的同时必然伴随着承受较大载荷与产生较大的变形,往往不利于支护的可靠性与稳定性。如图 18 给出了普通立柱与吸能立柱受冲击过程中的外界冲击能量的变化情况,对于普通立柱与吸能立柱,外界总的冲击动能为 1 000 kJ, 0~40 ms 内普通立柱吸收了 958.87 kJ, 剩余动能 39.85 kJ, 其他形式损耗能量为 1.28 kJ, 立柱变形严重; 0~60 ms 内吸能构件吸收了 590.93 kJ 能量, 剩余动能 384.80 kJ, 其他形式损耗能量为 24.27 kJ, 吸能构件吸收了大部分冲击能量, 大大降低了立柱的载荷与变形程度。

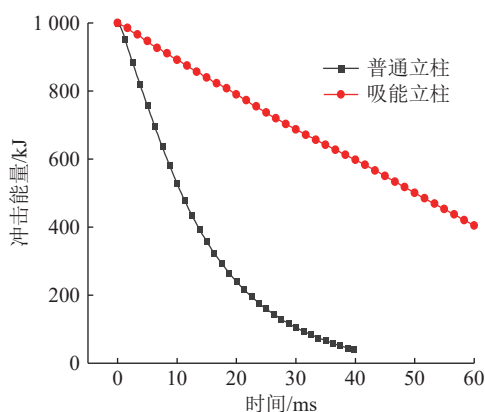


图 18 外界冲击能量变化情况

Fig.18 Change of external impact energy

## 4 结 论

1) 泡沫铝填充多胞方管在轴向冲击下产生了对称渐进叠缩变形, 构件整体压溃形态理想、吸能特性较好。

2) 与普通方管相比, 多胞方管和泡沫铝填充多胞方管初始承载峰值分别提高了 44.21% 和 48.03%, 吸能量增加了 87.61% 和 115.55%, 载荷波动降低了 10.58% 和 37.11%, 承载效率由 61.32% 提高至 79.77% 和 89.29%。泡沫铝填充多胞方管兼具多胞结构与缓冲吸能材料的优点, 承载能力更强, 变形稳定性更好, 能量吸收力与承载效率更高。

3) 随着泡沫铝填充率增加, 构件有效变形距离与吸能量减小; 对于相同孔隙度泡沫铝, 随变形量增加, 吸能量线性增加, 载荷均值与载荷均方差先减小后增大。随泡沫铝孔隙度降低, 构件初始承载峰值增大, 增幅较小; 载荷均值与吸能量增加, 载荷均方差减小, 承载效率由 81.89% 增大至 89.29%。25% 填充率下 60% 孔隙度泡沫铝填充多胞方管载荷变化曲线最理想, 吸能防冲性能最好。

4) 在相同冲击作用下, 普通立柱受冲击后载荷激增, 立柱弯曲变形严重, 立柱通过自身较大的变形

吸收耗散外界冲击能量, 支护体现为刚性, 支护效果较差; 吸能立柱在冲击下吸能构件率先产生变形, 变形过程中大幅降低了立柱的载荷水平, 吸收了外界大部分冲击能量, 立柱未见明显变形, 抗冲击性能较好。

## 参考文献(References):

- [1] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan and implementation path of “dual carbon” target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [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] 李宏艳, 莫云龙, 孙中学, 等. 煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 62-68.  
LI Hongyan, MO Yunlong, SUN Zhongxue, *et al.* Research status and prospect of coal bumps prevention and control technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 62-68.
- [4] 杜学领, 姚 旺, 李 杨. 2011—2013年4起典型冲击地压事故分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(1): 183-189.  
DU Xueling, YAO Wang, LI Yang. Analysis of 4 typical rock burst accidents from 2011 to 2013 in China[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(1): 183-189.
- [5] 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.
- [6] 张俊文, 宋治祥, 刘金亮, 等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 27-36.  
ZHANG Junwen, SONG Zhixing, LIU Jinliang, *et al.* Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.
- [7] 潘一山, 肖永惠, 李忠华, 等. 冲击地压矿井巷道支护理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222-228.  
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, *et al.* Study of tunnel support theory of rock burst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 222-228.
- [8] 齐庆新, 赵善坤, 李海涛, 等. 我国煤矿冲击地压防治的几个关键问题[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 135-143, 151.  
QI Qingxin, ZHAO Shankun, LI Haitao, *et al.* Several key problems of coal bump prevention and control in China's coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 135-143, 151.
- [9] 潘一山, 肖永惠, 李国臻. 巷道防冲液支架研究及应用[J]. 煤



- 炭学报, 2020, 45(1): 90-99.
- PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rock burst prevention in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 90-99.
- [10] 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.
- [11] 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 of ZHD6000-type energy-absorbing anti-impact hydraulic support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [12] 唐 治, 潘一山, 韩雪峰, 等. 矿用六边形折痕构件吸能防冲特性数值分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 54-58.
- TANG Zhi, PAN Yishan, HAN Xuefeng, *et al.* Numerical analysis of the mining hexagonal crease components and their energy absorption and anti-impact features[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 54-58.
- [13] 唐 治, 潘一山, 朱小景, 等. 六边形薄壁构件径向压缩下的吸能防冲特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 56-61.
- TANG Zhi, PAN Yishan, ZHU Xiaojing, *et al.* Analysis on energy absorption and impact prevention features of hexagonal thin-wall component under radial compression[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 56-61.
- [14] 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 outward energy absorption components of straight bellows of anti-impact energy absorption hydraulic support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [15] 李志超. 薄壁结构的吸能特性研究与抗冲击性优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LI Zhichao. Study on energy absorption characteristics and optimization of impact resistance of thin-walled structures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [16] 张秧聪, 许 平, 彭 勇, 等. 高速列车前端多胞吸能结构的碰撞性优化[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 31-36.
- ZHANG Yangcong, XU Ping, PENG Yong, *et al.* Crashworthiness optimization of high-speed train front multi-cell energy-absorbing structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12): 31-36.
- [17] 王婷婷, 张 娜, 秦东晨, 等. 基于碰撞性的汽车多腔结构吸能盒轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(5): 111-114.
- WANG Tingting, ZHANG Shan, QIN Dongchen, *et al.* The lightweight design of automotive multicavity structure energy-absorbing box based on crashworthiness[J]. Machinery Design and Manufacture, 2021(5): 111-114.
- [18] 周俊先, 陈秉智, 秦睿贤. 梯度厚度多胞管的轴向冲击性能分析和优化设计[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 52-61.
- ZHOU Junxian, CHEN Bingzhi, QIN Ruixian. Axial crushing performance analysis and optimal design of square multi-cell columns with graded thickness[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 52-61.
- [19] 董方亮. 用于汽车前纵梁的金属薄壁结构抗撞性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- DONG Fangliang. Study on crashworthiness of metal thin-walled structure for front side beams of automobiles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [20] 黄 睿. 轴向载荷下泡沫铝填充薄壁金属管吸能特性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- HUANG Rui. Study on energy absorption characteristics of thin-walled metal tubes filled with aluminum foam under axial load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [21] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [22] 王 巍. 泡沫铝填充双金属管轴向吸能特性数值模拟与实验研究[M]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.