

六边薄壁构件在准静态径向压缩下的吸能特性\*

唐治<sup>1,2</sup>,付洪源<sup>2</sup>,王建<sup>2</sup>,唐巨鹏<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 矿山安全技术装备研究院,辽宁 阜新 123000;2.辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**为增强巷道超前液压支架抵抗冲击地压能力,有效支护巷道防煤矿冲击地压灾害发生,设计一种六边薄壁吸能防冲构件安装在支架顶梁上方来提高支架抵抗冲击能力。对构件的吸能防冲特性进行理论和实验研究,结果表明:六角处为圆弧形的吸能防冲构件压缩过程中具有非常稳定的变形破坏模式、恒定的反作用力和较高的冲程效率。材料参数和几何尺寸对载荷波动系数和冲程效率影响较小。构件压溃峰值载荷、平均压溃载荷和总吸能均随长度增加而增大;构件压溃峰值载荷和平均压溃载荷随内边长增加而减小,内边长对总吸能影响较小。构件吸能防冲特性的理论解与实验结果有较好的吻合,为构件选取提供了理论依据。六边薄壁吸能防冲构件也可作为高速公路护栏或汽车防撞前梁等。

**关键词:**六边薄壁构件;准静态;吸能防冲特性;冲击地压

中图分类号:TD355      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)01-0072-06

Energy Absorption Characteristics of Hexagonal Thin-walled Component under Quasi-static Radial Compression

Tang Zhi<sup>1,2</sup>,Fu Hongyuan<sup>2</sup>,Wang Jian<sup>2</sup>,Tang Jupeng<sup>2</sup>

(1. Technology &Equipment of Coal Mine Safety, Liaoning Technical University, Fuxin,Liaoning 123000, P.R.China;  
2. School of Mechanics and Engineering,Liaoning Technical University,Fuxin,Liaoning 123000, P.R.China)

**Abstract:** In order to enhance the capacity of roadway hydraulic forepoling to resist rockburst, and support the roadway effectively to prevent the occurrence of rockburst disasters in coal mine, a kind of hexagonal thin-walled energy absorption and anti-impact component installed above top beam is designed to improve the anti-impact abilities of support.The theoretical and experimental study is conducted to analyze the energy absorption and anti-impact characteristics of component.The results show that: In the process of compression,the energy absorption and anti-impact component with the six corners of circular arc has very stable deformation and failure mode, constant reactive force, and higher stroke efficiency. The influences of material parameters and geometric size on load fluctuation coefficient and stroke efficiency are smaller. The crushing peak load, mean crushing load, and total energy absorption increase with component length increasing. The crushing peak load and mean crushing load decrease with length of inner side increasing. The influence of inner side length on total energy absorption is smaller. The experimental results and theoretical solution of the energy absorption and anti-impact characteristics of component are in good agreement. This provides a theoretical basis for components selection. The hexagonal thin-walled energy absorption and anti-impact component can be used as highway guardrail or automotive anti-collision beam, etc.

**Keywords:** hexagonal thin-walled component; quasi-static; energy absorption and anti-impact characteristics; rockburst

\* 收稿日期:2017-08-28(修改稿)  
作者简介:唐治(1983-),男,云南宣威人,博士,讲师,主要从事矿山灾害力学研究。E-mail:tangzhi0127@163.com  
基金项目:国家自然科学基金应急管理项目(51641404);辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金(LNTU16KF09);国家重点研发计划(2016YFC0600901)

0 引言

冲击地压是煤矿开采中遇到的重大灾害之一<sup>[1]</sup>,近年来研究发现,大多数冲击地压发生在巷道中。然而,目前巷道支护大多没有从防冲角度进行设计,抗冲击载荷能力有限,不能满足冲击地压矿井支护要求。冲击地压对支架的冲击是影响煤层开采安全的关键问题之一<sup>[2]</sup>。突发冲击地压时,会造成支架支柱弯曲、断裂和爆缸等(液压支架很难抵抗强大的冲击载荷,冲击地压过程几秒到几十秒,冲击加载到最大载荷在几毫秒到几十毫秒,溢流阀来不及打开)<sup>[3,4]</sup>。

提高“围岩-支护”系统抵抗冲击地压能力是解决目前巷道难支护和改善支护效果的关键问题,是煤矿动力灾害防治研究的重点之一。假设采用吸能支护,形成“围岩-吸能支护”系统,突发冲击地压时,一是吸能构件本身吸收冲击能,二是吸能构件间接吸收冲击能(吸能构件被压缩后,让位空间给煤炭提供一定的能量释放空间),三是将形成新的支护系统(吸能构件让位,支护体与围岩自调节后又形成新的“围岩—支护”系统),这将大大提高“围岩-支护”系统抵抗冲击地压能力<sup>[5-6]</sup>。但需要吸能防冲构件压缩过程中具有稳定的变形破坏模式和恒定的反力等特性,而现有的锥形管<sup>[7-9]</sup>、蜂窝管<sup>[10]</sup>、复合材料管<sup>[11-12]</sup>、泡沫填充管<sup>[13]</sup>、折纹管<sup>[14-15]</sup>等吸能构件在压缩过程中具有较大的载荷波动性,不满足支架顶梁吸能构件要求。因此,设计一种六边薄壁吸能防冲构件,对构件的吸能防冲特性进行实验研究。

1 六边薄壁构件吸能特性理论分析

六边薄壁构件在两平板径向对压下是三次超静定结构,如图 1(a) 所示。由于结构和载荷的对称性,可取四分之一六边薄壁构件进行分析,计算简图如图 1(b) 所示,结构为一次超静定,设弯矩为多余未知力。

将单位弯矩和载荷弯矩代入位移计算公式,得系数及自由项分别为

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M}_1^2 ds}{EI} = \frac{1}{EI} \left( \frac{L}{2} + L \right) = \frac{3L}{2EI} \quad (1)$$

$$\Delta_{1p} = \int \frac{\overline{M}_1 M_p}{EI} ds = - \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{3} \times \frac{PL}{8} \times \frac{L}{2} + \frac{PL^2}{4} \right) = - \frac{13PL^2}{48EI} \quad (2)$$

可得

$$X_1 = - \frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} = \frac{13PL}{72} \quad (3)$$

可得 CB 段上的弯矩为

$$M_{CB} = \overline{M}_1 X_1 + M_p = \frac{13PL}{72} - \frac{Px^2}{2L} \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (4)$$

BA 段上的弯矩为

$$M_{BA} = \overline{M}_1 X_1 + M_p = \frac{13PL}{72} - \frac{P(L+x^2)}{8} \quad 0 \leq x \leq L \quad (5)$$

四分之一六边薄壁构件弯矩图如图 1(c) 所示。

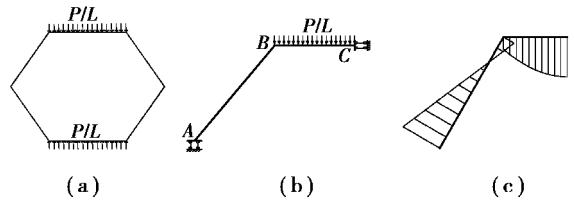


图 1 构件受力分析

Fig.1 Force analysis of components

由此可得构件左右两角处先形成塑性铰,然后在构件上下边中部形成塑性铰。即 A 点先形成塑性铰,然后 C 点形成塑性铰,C 点形成塑性铰时构件开始破损。

$$M_c = \overline{M}_1 X_1 + M_p = \frac{13PL}{72} \quad (6)$$

可得六边薄壁构件初始破损载荷

$$P_0 = \frac{72M_s}{13L} = \frac{18\sigma_s dt^2}{13L} \quad (7)$$

式中: $M_s$  为塑性极限弯矩; $\sigma_s$  为材料屈服强度; $L$  为构件边长; $d$  为构件长度; $t$  为构件壁厚。

当构件长度大于边长时,应考虑平面应变条件, $\sigma_s$  应当乘以一个系数  $k$  (不同壁厚对应的系数要适当调整),得出修订的六边薄壁构件初始破损载荷(峰值载荷)。

$$F_{max} = P_0 = \frac{72M_s}{13L} = k \frac{18\sigma_s dt^2}{13L} \quad (8)$$

从式(8)可得:六边薄壁构件的初始破损载荷与材料屈服强度、长度和壁厚的平方成正比,与边长成反比。

为得出六边薄壁构件被压缩  $\delta$  (构件进入破损变形阶段且顶底边没有接触) 时的力,对变形段 ABC 受力分析,如图 2(a) 所示。当变形段 AB 的转角为  $\theta$  时,由平衡条件有

$$\frac{1}{2}PL\cos(60^\circ - \theta) = 2M_s \quad (9)$$

由几何关系有

$$\delta/2 = L\sin 60^\circ - L\sin(60^\circ - \theta) \quad (10)$$

联立式(9)和式(10),可得六边薄壁构件被压缩 $\delta$ (构件进入破损变形阶段且顶底边没有接触)时的反力为

$$P = \frac{4M_s}{L\sqrt{1 - ((\sqrt{3}L - \delta)/2L)^2}} = \frac{k\sigma_s dt^2}{L\sqrt{1 - ((\sqrt{3}L - \delta)/2L)^2}} \quad (11)$$

令 $P = P_0$ 可得构件进入破损变形阶段前的压缩距离为

$$\delta_0 = 2L\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \sqrt{1 - \left(\frac{13}{18}\right)^2}\right) = 0.34L \quad (12)$$

可得六边薄壁构件被压缩到 $\delta_0$ 前的反力为峰值载荷。

可得六边薄壁构件被压缩 $\delta$ (构件进入破损变形阶段且顶底边没有接触)时吸收能量为

$$E = \delta_0 P_0 + \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{k\sigma_s dt^2}{L\sqrt{1 - ((\sqrt{3}L - \delta)/2L)^2}} d\delta = 0.34LP_0 + 2k\sigma_s dt^2 \left[ \frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\delta}{2L}\right) \right] \quad (13)$$

可得六边薄壁构件被压缩 $\delta$ (构件进入破损变形阶段且顶底边没有接触)时平均压溃载荷为:

$$F_{\text{mean}} = \frac{E}{\delta} = \frac{0.34LP_0 + 2k\sigma_s dt^2 [\pi/4 - \arcsin(\sqrt{3}/2 - \delta/2L)]}{\delta} \quad (14)$$

顶底边压缩到接触时的变形让位量和接触后反力升高到峰值载荷的让位量之和为构件有效变形让位行程。如图2(b)所示,在三角形 $ABC$ 中,由余弦定理可得 $AC$ 边长为

$$AC = \sqrt{L^2 + \frac{L^2}{4} + 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{L^2}{2}} = \frac{\sqrt{7}L}{2} \quad (15)$$

$$\cos\alpha = \left(\frac{7L^2}{4} + L^2 - \frac{L^2}{4}\right) \times \frac{\sqrt{7}}{7L^2} = \frac{5\sqrt{7}}{14} \quad (16)$$

可得顶底边压缩到接触时的变形让位量:

$$\delta_1 = \sqrt{3}L - 2h = \sqrt{3}L - 2\sin\alpha = \sqrt{3}L - 2 \times \frac{\sqrt{21}L}{14} = 1.1L \quad (17)$$

假设从顶底边接触后到反力升高到峰值载荷的让位量为 $\delta_2$ 。

可得六边薄壁构件冲程效率 $SE$ 为:

$$SE = \frac{\delta_1 + \delta_2}{H} \times 100\% = \left(\frac{1.1L}{\sqrt{3}L} + \frac{\delta_2}{H}\right) \times 100\% \quad (18)$$

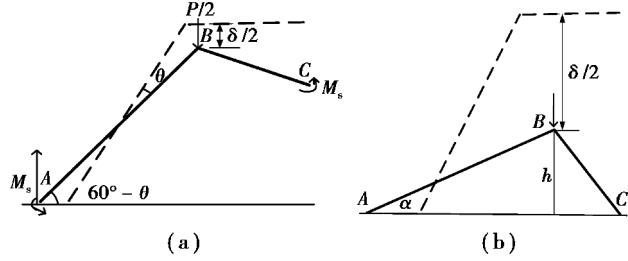


图2 作用在变形段上的力

Fig.2 Force acting on deformation section

## 2 六边薄壁构件吸能特性实验分析

### 2.1 实验装置和试件制备

采用微机控制电液伺服压力试验机(YAW-2000型)对构件进行准静态压缩实验,加载系统工作额定值为2 000 kN,压缩速率设置为0.5 mm/s。为研究六边薄壁构件承载力、反力变化规律、吸能特性、破坏的可重复性及尺寸、材料对构件吸能特性影响规律,采用45号钢( $\sigma_s = 461$  MPa,  $\sigma_b = 670$  MPa,  $\delta = 16\%$ , 密度为7.85 g/cm<sup>3</sup>, 弹性模量为210 GPa, 泊松比为0.269)、低碳钢Q235( $\sigma_s = 255$  MPa,  $\sigma_b = 400$  MPa,  $\delta = 20\%$ , 密度为7.85 g/cm<sup>3</sup>, 弹性模量为205 GPa, 泊松比为0.26)、201号钢( $\sigma_s = 450$  MPa,  $\sigma_b = 650$  MPa,  $\delta = 23\%$ , 密度为7.85 g/cm<sup>3</sup>, 弹性模量为210 GPa, 泊松比为0.26),加工了7组六边薄壁构件进行压缩实验。部分试件实物如图3,试件编号和尺寸如表1。考虑六角形状对构件吸能特性影响,第一组(LS1)的六角处为规整的120°角;第三组(LS3)的六角处外部为圆弧形,内部为规整的120°角;其余的六角处均为圆弧形。



图3 六边薄壁构件实物

Fig.3 Hexagonal tubular physical components

表 1 六边薄壁构件尺寸及吸能特性

Table 1 Geometry sizes and energy absorption characteristics of hexagonal tubular components

构件 编号	材料 型号	内边长 /mm	厚度 /mm	长度 /mm	$F_{\max}/$ kN	预测值 $F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\text{mean}}/$ kN	预测值 $F_{\text{mean}}/\text{kN}$	$\Delta$	$E/$ kJ	预测值 $E/\text{kJ}$	SE/ %
LS1-1	45 号	32	5	56	44.1	41.89	33.3	37.17	1.33	1.43	1.60	78
LS1-2	45 号	32	5	56	45.0	41.89	34.5	37.32	1.30	1.45	1.57	76
LS1-3	45 号	32	5	56	44.1	41.89	33.2	37.02	1.33	1.46	1.63	79
LS2-1	45 号	14	3	50	27.29	30.78	26.7	26.67	1.02	0.56	0.56	86
LS2-2	45 号	14	3	50	27.47	30.78	26.7	26.67	1.03	0.56	0.56	86
LS2-3	45 号	14	3	105	56.95	64.63	54.8	56.19	1.04	1.15	1.18	86
LS2-4	45 号	14	3	101	54.54	62.17	53.3	54.29	1.02	1.12	1.14	86
LS2-5	45 号	14	3	150	81.4	92.33	79.5	80.48	1.02	1.67	1.69	86
LS2-6	45 号	14	3	151	82.05	92.94	80.5	80.95	1.02	1.69	1.70	86
LS3-1	Q235	16	2	40	5.31	5.30	5.2	4.58	1.02	0.13	0.11	90
LS3-2	Q235	16	2	40	5.33	5.30	5.2	4.58	1.03	0.13	0.11	90
LS4-1	201 号	118	2.7	300	13.41	13.33	12.7	11.79	1.05	2.06	1.91	79
LS4-2	201 号	118	2.7	300	13.58	13.33	13.3	11.82	1.00	2.12	1.88	78
LS5-1	201 号	118	2.7	350	15.51	15.56	14.9	13.74	1.04	2.43	2.24	80
LS5-2	201 号	118	2.7	350	15.03	15.56	14.2	13.77	1.09	2.26	2.19	78
LS6-1	201 号	137	2.7	300	10.87	11.49	10.5	10.10	1.09	2.04	1.96	82
LS6-2	201 号	137	2.7	300	10.77	11.49	10.5	10.10	1.10	2.03	1.96	82
LS7-1	201 号	157	2.7	350	10.6	11.69	10.2	10.27	1.15	2.26	2.28	82
LS7-2	201 号	157	2.7	350	10.5	11.69	10.1	10.27	1.15	2.24	2.27	81

2.2 实验结果与分析

部分六边薄壁构件进行径向压缩变形实验结果如图 4 所示。结果表明,压缩过程中构件具有以下变形破坏规律:在两平板对压下,构件在移动接触点处被压平,不同尺寸、不同材料的六边薄壁构件都具有相同的变形破坏规律,说明六边薄壁构件具有非常好的稳定变形破坏模式;六边薄壁构件主要通过塑性变形吸收能量,具有不可逆的能量转换形式。



图 4 六边薄壁构件变形

Fig.4 Deformations of hexagonal tubular components

部分六边薄壁构件径向准静态压缩力-位移曲线、吸能特性曲线如图 5~8 所示。实验结果表明压缩过程中六边薄壁构件反力和吸能特性具有以

下变化规律:

(1)不同尺寸、不同材料构件所吸收能量与压缩距离有较好的线性关系,即随压缩距离增加,吸收能量线性增加。

(2)构件压缩过程中反力变化趋势可大致分为 3 个阶段:弹性受力阶段,即构件是弹性变形,这一阶段构件位移较小,反力从 0 线性增加;塑性受力阶段,即构件发生塑性变形,这一阶段构件位移较大,反力较为恒定;致密阶段,即构件在移动接触点处被压平,这一阶段构件位移较小,反力较快增大。

(3)六角处为规整的 120°角构件(LS1),当压力达到峰值载荷后,随压缩距离增加,反力有减小趋势;六角处外部为圆弧形,内部为规整的 120°角(LS3),当压力达到峰值载荷后,随压缩距离增加,反力保持峰值载荷,但当左右两角处被压坏时反力出现一次急剧波动;六角处为圆弧形构件(LS2、LS4-7),当压力达到峰值载荷后,随压缩距离增加,反力保持峰值载荷,直至构件被压平。这说明构件



六角处加工为圆弧形最好,在压缩变形过程中具有恒定的反作用力,能得到理想的力-位移变化曲线。

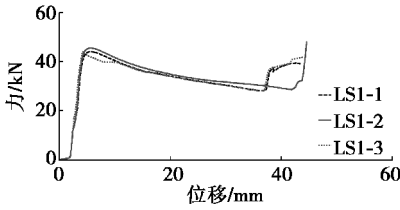


图5 力-位移

Fig.5 Force-displacement

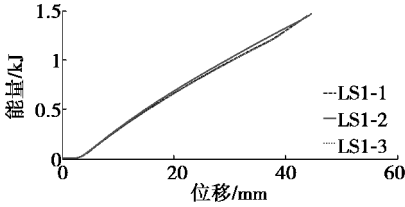


图6 吸能特性

Fig.6 Energy absorption characteristics

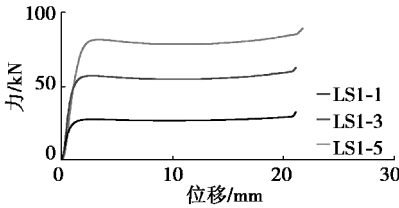


图7 力-位移

Fig.7 Force-displacement

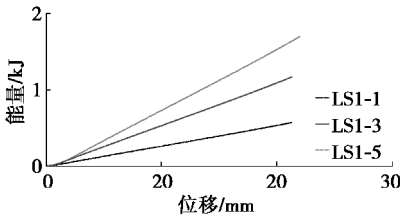


图8 吸能特性

Fig.8 Energy absorption characteristics

吸能防冲构件主要通过塑性变形来耗散围岩冲击能,采用压溃峰值载荷  $\sigma_a = \frac{M_w(y_a - y_c)}{J}$ 、冲程效率  $M_w$ 、平均压溃载荷  $\sigma_{max}$ 、载荷波动系数  $\Delta$ 、总吸能  $\sigma_{max} = \frac{M_w |y_i - y_c|_{max}}{J} < \frac{\sigma}{n}$  等指标来评估构件的防冲性能,六边薄壁构件指标如表1,实验结果表明构件吸能防冲评价指标具有以下变化规律:

(1)六边薄壁构件冲程效率在80%左右,几何尺寸对冲程效率影响较小,冲程效率有随材料强度增加而增大趋势。

(2)随长度增加,构件压溃峰值载荷、平均压

溃载荷和总吸能均增大;长度对冲程效率及载荷波动系数影响较小。

(3)随内边长增加,构件压溃峰值载荷、平均压溃载荷减小;内边长对总吸能、载荷波动系数和冲程效率影响较小。

(4)六角处的形状对构件峰值载荷没有影响,但六角处为规整的120°角构件的载荷波动系数比六角处均为圆弧形构件大,说明六角处为圆弧形构件性能较好。理论预测与实验结果有较好的吻合。

通过实验结果分析,可将六边薄壁构件吸收能量公式简化为

$$E = 0.75\sqrt{3}LP_0 = k \frac{27\sqrt{3}\sigma_s dt^2}{26} \quad (19)$$

式中:  $E_3$  为构件边长;  $P_0$  为构件初始破损载荷;  $E_k + E_g$  为材料屈服强度;  $E_1$  为构件长度;  $W_s = E_3 - E_1$  为构件壁厚;  $W_s$  为系数。

六边薄壁构件平均压溃载荷公式简化为

$$F_{mean} = \frac{E}{\delta} = \frac{18k\sigma_s dt^2}{13L} \quad (20)$$

式中:  $E$  为构件吸收能量;  $W_s - E_a$  为构件被压缩距离;  $E_3$  为构件边长;  $E_k + E_g$  为材料屈服强度;  $E_1$  为构件长度;  $W_s = E_3 - E_1$  为构件壁厚;  $W_s$  为系数。

六边薄壁构件冲程效率公式简化为

$$SE = \frac{\delta}{H} \times 100\% \approx 80\% \quad (21)$$

式中:  $W_s - E_a$  为构件被压缩距离;  $H$  为六边形两对边距离。

### 3 结论

提出一种矿用六边薄壁吸能防冲构件,并对其在径向压缩下的吸能防冲特性进行理论分析和实验研究,得出以下主要结论:

(1)径向压缩下六边薄壁吸能防冲构件(六角处为圆弧形)具有非常稳定的变形破坏模式,具有恒定的反作用力(无载荷波动性)和较高的冲程效率;主要通过塑性变形吸收能量,具有不可逆的能量转换形式;在有效变形让位行程内,随压缩距离增加,吸收能量线性增加。

(2)构件几何尺寸对冲程效率影响较小,冲程效率有随材料强度增加而增大趋势;构件压溃峰值载荷、平均压溃载荷和总吸能均随长度增加而增大;构件压溃峰值载荷和平均压溃载荷随内边长增加而减小,内边长对总吸能、载荷波动系数和冲程效率影响较小。

(3)理论推导得出的构件峰值载荷、吸能等理论公式与实验结果的构件评价指标有较好的吻合,并根据实验结果修订了理论公式,为构件选取提供了理论依据。

六边薄壁吸能防冲构件是理想的支架顶梁吸能防冲构件,安装在支架顶梁上可增强支架防冲性能。六边薄壁吸能防冲构件也是高速公路防护栏或作为汽车防撞前梁的理想吸能构件。

#### 参考文献(References)

- [1] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机制及防治研究[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. (in Chinese))
- [2] 王国法. 液压支架技术[M].北京:煤炭工业出版社,1999.(Wang Guofa. Technology of hydraulic support [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [3] 赵善坤,刘军,王永仁,等.煤岩结构体多级应力控制防冲实践及动态调控[J].地下空间与工程学报,2013,9(5):1057-1064,1102.(Zhao Shankun, Liu Jun, Wang Yongren, et al. Dynamical control and multi-field stress control of rock burst prevention for coal-rock structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1057-1064, 1102. (in Chinese))
- [4] 田利军. “三硬”条件煤层压变区域失衡冲击理论及应用[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1192-1197.(Tian Lijun. The pressure changing area imbalance theory of “three hard” coal seam and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1192-1197. (in Chinese))
- [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及应用[J].煤炭学报,2014,36(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. (in Chinese))
- [6] 王凯兴,孟村影,杨月.块系覆岩中摆型波传播对巷道支护动力响应影响[J].煤炭学报,2014,39(2):347-352.(Wang Kaixing, Meng Cunying, Yang Yue, et al. Dynamic response of roadway support on pendulum type waves propagation in overburden block rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 347-352. (in Chinese))
- [7] 亓昌,董方亮,杨姝,等.锥形多胞薄壁管斜向冲击吸能特性仿真研究[J].振动与冲击,2012,31(24):102-107.(Qi Chang, Dong Fangliang, Yang Shu, et al. Energy-absorbing characteristics of a tapered multi-cell thin-walled tube under oblique impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 102-107. (in Chinese))
- [8] Najafi A, Rais-Rohani M. Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes [J]. Thin-walled Structures, 2011, 49(1): 1-12.
- [9] Paik J K, Kim B J, Park D K, et al. On quasi-static crushing of thin-walled steel structures in cold temperature: Experimental and numerical studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(1): 13-28
- [10] Jang W Y, Kyriakides S. On the crushing of aluminum open-cell foams: Part I Experiments [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(3-4): 617-634.
- [11] 宋海洋.单壁碳纳米管力学性质的分子动力学模拟[J].西安邮电学院学报,2008,13(1):149-152.(Song Haiyang. Simulation of mechanical properties of single-walled carbon nanotubes by molecular dynamics [J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications Press, 2008, 13(1): 149-152. (in Chinese))
- [12] McKinney J, Taylor T. Use of LS-DYNA to simulate the airbag landing impact attenuation of the kistler k1 reusable launch vehicle [A]//Proc of 5th International LS-DYNA User's Conference [C]. Southfield, 1998: 21-30.
- [13] Jang W Y, Kyriakides S. On the crushing of aluminum open-cell foams: Part II analysis [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(3-4): 635-650.
- [14] 潘一山,马箫,肖永惠.矿用防冲吸能支护构件的数值分析与实验研究[J].实验力学,2014,29(2):231-238.(Pan Yishan, Ma Xiao, Xiao Yonghui. Numerical analysis and experimental study of a coal mine anti impact and energy-absorption supporting component [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2): 231-238. (in Chinese))
- [15] 唐治,潘一山,李祁,等.矿用防冲方形折纹薄壁构件吸能特性数值分析[J].振动与冲击,2014,33(23):87-91,115.(Tang Zhi, Pan Yishan, Li Qi, et al. Numerical simulation on the energy absorption properties of the mine thin-walled component with square folds for rock burst prevention [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(23): 87-91, 115. (in Chinese))