

文章编号: 1001-4888(2014)02-0231-08

矿用防冲吸能支护构件的数值分析与实验研究^{*}

潘一山, 马箫, 肖永惠, 李忠华

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 煤矿冲击地压会造成围岩剧烈震动、变形或突发破坏, 从而对支护体产生破坏性冲击作用。基于快速吸能让位防冲击支护理念, 研制了一种具有特殊形状的防冲击吸能支护构件, 可应用于巷道防冲吸能液压支架中。其机理在于利用构件的快速变形让位与吸能过程, 缓解支架受到的超额冲击, 保护支架不受损坏, 从而防止支护体系以及巷道围岩的失稳破坏。文中提出了吸能构件的承载力与吸能量简化公式, 采用 Abaqus 软件计算分析了构件参数设置的可靠性, 得到了理想的力-位移曲线、吸能量曲线和屈曲变形模态, 并通过实验室准静态压溃试验进行了一定的验证, 试验得到吸能构件承载力达 2660kN, 吸能量达 375.56kJ, 与预期值非常接近。此构件的设计与研制, 为支架的现场应用以及进一步的优化设计提供了一定的参考依据。

关键词: 冲击地压; 抗冲击; 吸能; 吸能构件

中图分类号: TD353

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-089

0 引言

冲击地压是煤矿中的重大动力灾害之一。冲击地压显现过程中, 围岩对支护体产生剧烈的冲击作用, 使支护体上的荷载瞬间激增, 超过静压的几倍、十几倍甚至更大, 常导致支护体突发局部损伤、变形或整体的垮塌破坏, 对矿下作业人员及生产设备的安全造成了严重威胁。因此, 针对这一问题, 潘一山等^[1]提出在支护中加入防冲吸能结构, 增强支护体系抗冲击的能力, 从而提高支护系统稳定性, 防止冲击地压显现造成的围岩-支护体系统的失稳破坏。

吸能结构作为一种重要的安全防护设置, 被广泛用于汽车、飞机、船舶以及高速列车等几乎所有交通工具的碰撞动能耗散系统中^[2]。其基本原理就是通过结构的屈曲变形过程放大冲击作用时间, 降低冲击荷载并迅速吸收有害冲击能^[3]。早在 20 世纪 60 年代, 国外 Florence, Gordienko 等^[4-6]人就已经开始对圆柱壳在轴向冲击载荷作用下的弹塑性动力屈曲问题进行了研究。国内以北京大学王仁教授、徐新生教授为代表, 对此方面研究也在同期开始进行^[7,8]。近些年, 以泡沫铝、镁为代表的泡沫金属吸能材料也备受关注, 并相继出现泡沫陶瓷、泡沫混凝土以及编织等高分子复合材料^[9-11]。这些吸能结构、材料的研究对缓冲防撞吸能装置的研制有着深远的影响与意义。但在煤矿支护中, 特别在防治冲击地压方面, 尚未发现吸能材料或结构的设置应用, 因此防冲吸能功能的引入值得考虑。

针对冲击地压的显现特点与现有支护存在的缺陷, 设计了一种用于防冲吸能巷道支架的薄壁金属构件, 旨在: 当冲击地压显现时, 利用其快速、稳定的变形让位和吸能过程, 缓解支架受到的围岩冲击, 保护支架不受损伤或破坏, 从而保护支架的支撑空间与内部人员安全。本文对该构件的形状设计、屈曲模

^{*} 收稿日期: 2013-06-01; 修订日期: 2013-09-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金面上项目(51174107); 国家自然科学基金面上项目(11172121)

通讯作者: 潘一山(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体力学和岩石力学的教学与研究。E-mail: panyish_cn@sina.com

态与吸能性能做了一定的分析与试验研究,可为支架的优化设计与改进提供一定的参考依据,也对整个支护体系的防冲性能提升起到一定的促进作用。

1 防冲吸能构件设计

1.1 吸能构件设计的出发点

冲击地压显现时,围岩剧烈震动,局部岩体变形突出或骤然破坏,引起支护体变形垮塌、巷道堵塞等^[12,13],皆因常规的刚性支护体不具备快速吸能让位的能力,即在受到突如其来的冲击作用时,不能立即让位和吸收冲击能,导致围岩中的有害能量不能及时释放而传递至支护体上,造成支护体损伤变形甚至破坏垮塌。所以,吸能构件应首先保证一定承载力,以满足围岩静压下的支护需求;其次,在冲击超过某一阈值时,构件能够即刻变形让位,实现快速吸能缓冲的作用。

1.2 理想吸能构件的六个基本要素

(1)合理的承载峰值。吸能构件应根据所要保护的支架结构整体及局部的具体参数设置一个合理的承载峰值,既能够保证构件可与支架其他部分一同提供初撑力与工作阻力,又可以使突发的冲击力不会超过支架整体与局部的破坏荷载。

(2)恒定的反作用力。吸能构件在冲击下的屈曲变形过程中,反作用力应当尽可能保持恒定,以支持支架在变形让位过程中有效地遏制围岩变形破坏。

(3)较长的变形让位行程。吸能构件应具有较大的可变量,以确保拥有足够让位行程来缓解支架受到的冲击荷载作用,吸收传递至支架上的冲击能。

(4)不可逆的能量转换。吸能构件应能够将绝大部分输入动能通过塑性变形转化为自身内能耗散掉,而不是转换为弹性能积聚起来。

(5)稳定的变形模式。为了承受不确定的冲击荷载作用,吸能构件的变形模式和能量吸收能力应当是稳定的,以确保在复杂不可预测围岩冲击下的可靠性。

(6)吸能构件应形式简洁,单位重量的能量吸收率高,且装卸更换容易。

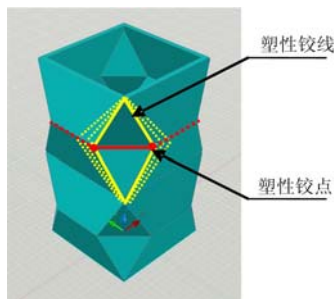


图 1 双节吸能构件图示

Fig. 1 The diagrams of two-section energy-absorbing components

1.3 吸能构件形状设计

该吸能构件属于一种薄壁管件吸能结构,并预先设计有一定形状的折纹,其特点就是通过折纹的引导来实现预期方式的屈曲变形。如图 1 所示,倾斜的折纹在构件屈曲的初始时刻最先进入塑性阶段,形成塑性铰线(黄实线);铰线交点(红圆点)构成塑性铰点,在构件纵向压溃变形过程中,铰线与铰点分别沿黄虚线和红虚线发生移动,实现构件的大幅度的压溃变形。

2 理论分析

薄壁管件吸能结构的吸能实质就是通过薄壁结构的弹塑性屈曲大变形将外力的作用或输入动能转化为自身内能以及一小部分弹性能,实现吸能缓冲的目的。而薄壁结构的最基本的理论依据就是薄壁圆柱壳轴向屈曲变形理论^[14],薄壁圆柱壳的简化模型(如图 2 所示)。

假定材料是理想塑性的。弯曲和拉伸没有交互作用,因此材料的屈服或是仅由弯曲引起的,或是仅由拉伸引起的。当一个皱褶完全被压扁时,塑性弯曲所耗散的能量为:

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

或者

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

式中: H 为皱褶的半长; D 为圆管直径; M_0 为单位宽度的塑性极限弯矩。

拉伸耗散能量为:

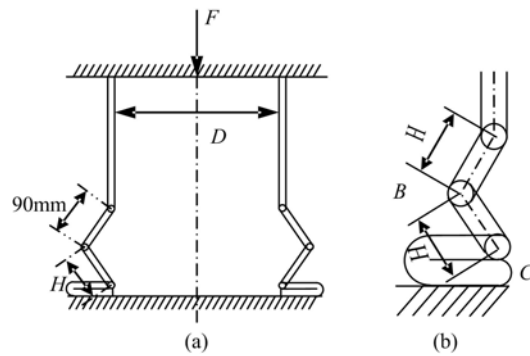


图2 轴对称塑性压溃的简单理论模型

Fig. 2 Simple theoretical model of axial symmetry plastic collapse

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

当 $\theta = \pi/2$ 时,有

$$W_s \approx 2 \pi Y h H^2$$

式中:Y 为屈服应力。

承载力的计算公式为:

$$P_m = \frac{\int_0^\delta P(x) dx}{\delta} \quad (4)$$

式中: δ 为最后的冲击位移; P_m 为平均承载力; $P(x)$ 为力的函数曲线。

以薄壁圆柱壳和矩形壳为主的吸能构件,皆是利用塑性铰弯曲变形和壳体径向伸张两部分来达到吸能目的的,其变形形态与承载力效果极不稳定。因此,本文中的吸能构件预设折纹的目的,就是通过折纹的引导实现以稳定的模态变形(如图3所示)。总结来看,吸能构件有以下几个优点:

- (1) 利用预设的折纹可以引导整体构件的变形趋势,且变形模态稳定可靠;
- (2) 在变形过程中,利用塑性铰点和塑性铰线的运动带动较大面积薄壁的屈曲变形,使材料的能量吸收率很高;
- (3) 可以通过改变吸能构件的参数设置来满足不同的构件承载力与吸能能力的需求。

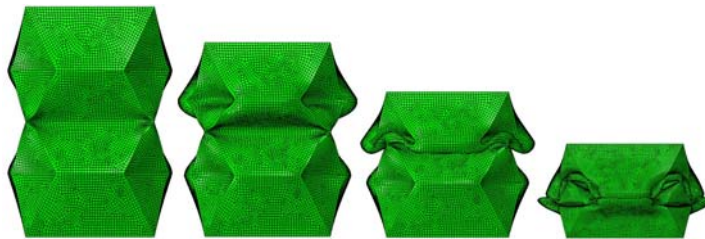


图3 吸能构件屈曲模态

Fig. 3 The bucking deformation mode of the energy-absorption component

研究发现,吸能构件的承载力与变形效果主要是由薄壁板块的倾角决定的,两者在一定程度上具有相悖性,即板块倾角越小,其承载力越大,但变形效果越不稳定;反之,倾角越大,承载力越小,而变形效果越稳定。因此,可以通过倾角的合理选取,实现构件承载力与变形效果的最佳协调状态,并达到理想的吸能效率。于是,计算分析求得构件板块的最佳倾角为 78° (如图4)。

3 吸能构件的参数设置与数值模拟研究

3.1 吸能构件参数设置

在防冲吸能液压支架的结构设计中,吸能构件作为阻尼耗能元件与液压支柱串联,在静态围岩压力下与支柱一同提供初撑力与工作阻力,而在突发围岩冲击时,构件需通过自身的屈曲变形,实现一个快速让压缓冲的过程,以缓解支柱及支架受到的冲击荷载作用。因此,吸能构件的承载力应在支柱工作阻力 P_w 与破坏荷载 P_b 之间,约 $1.40P_w \sim 1.65P_w$ 之间为宜(考虑一定的安全系数),于是根据液压支柱参数求得吸能构件承载力范围为 $2310\text{kN} \leq P \leq 2720\text{kN}$ 。

如图 4 所示,吸能构件模型参数初步设定为:正方形开口,边长 180mm(外围),高度 352mm,壁厚 8mm,所用材料 $\sigma_s=700\text{MPa}$, $\sigma_b=795\text{MPa}$, $E=210\text{GPa}$, $\nu=0.3$ 。

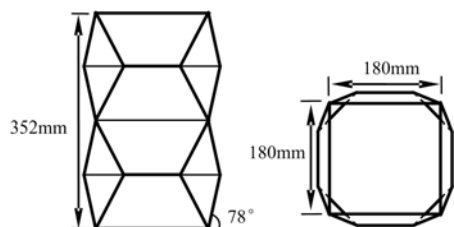


图 4 吸能构件规格

Fig. 4 Specifications of the energy-absorption component

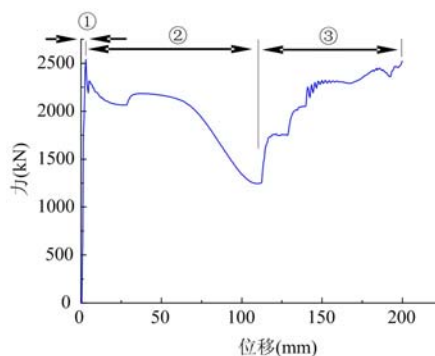


图 5 吸能构件的反力—变形量曲线

Fig. 5 Counter-force-deformation curve of the energy-absorption component

3.2 吸能构件的数值模拟计算

在 ABAQUS 软件模拟中,模型选用 shell 单元,两端固支,以 5m/s 的速度冲压 200mm(在 ABAQUS 模拟中 0~50m/s 匀速压缩所得结果与实际准静态压缩试验中的结果基本一致)。计算结果如图 5,图 5 为吸能构件压溃屈曲中的全程反作用力—变形量曲线,其大致可以分为三个阶段:线性上升阶段、抛物线式下降阶段和起伏攀升阶段。结合图 6 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)吸能构件的屈曲模态与应力云图来分析:

①第一阶段:线性上升阶段。吸能构件的变形近似属于完全弹性变形,其反作用力短时间内线性上升,在压缩量至 3mm 时,反力第一次达到峰值 2540kN。如图 6(a)所示,除了两节中间的横折线部位由于应力集中进入塑性阶段,其他大部分区域都在弹性范围以内,因此,构件变形极不明显。

②第二阶段:抛物线式下降阶段。确切地说,此阶段中包括构件整体发生的小幅度屈服变形过程,如图 6(b)所示,构件中间的横折线部位稍有内收,上下节的斜折纹与横折纹都进入塑性阶段并发生了结构上的屈曲变形,因此,反力曲线呈现一个短暂的指数下降过程,至 2060kN 然后又陡然升起。随后,由于上方的冲击来压,构件上半部分首先开始大幅度弹塑性屈曲压溃变形,如图 6(c)所示,构件上半部分总体应力较高,并由折痕的屈曲变形引导整个半节的压溃变形,这个过程中反力呈抛物线式下降态势,直至变形达 109.488mm,反力降至最低值 1240kN,上半部分完全压溃。

③第三阶段:起伏攀升阶段。此阶段构件的上半部分几乎不再变形,高应力区域转移至构件下半部分,如图 6(d)、(e)所示,构件下半部分开始进入大幅度的弹塑性屈曲压溃阶段,反力再次攀升,纵有多次急缓变化,但总体趋势仍保持上升态势,直至 200mm 时,反力达 2520kN。如果继续加压,由于构件薄壁压溃堆积,导致反力将不再下降。

构件压缩过程中,外力做功转化为构件内能和极少部分的冲击动能,因此,吸能量可按照力—位移全程曲线积分求得。如图 7 所示,随着时间的增加,吸能量稳步上升,至 0.04s(变形量 200mm)时,吸能

总量为 407881J。

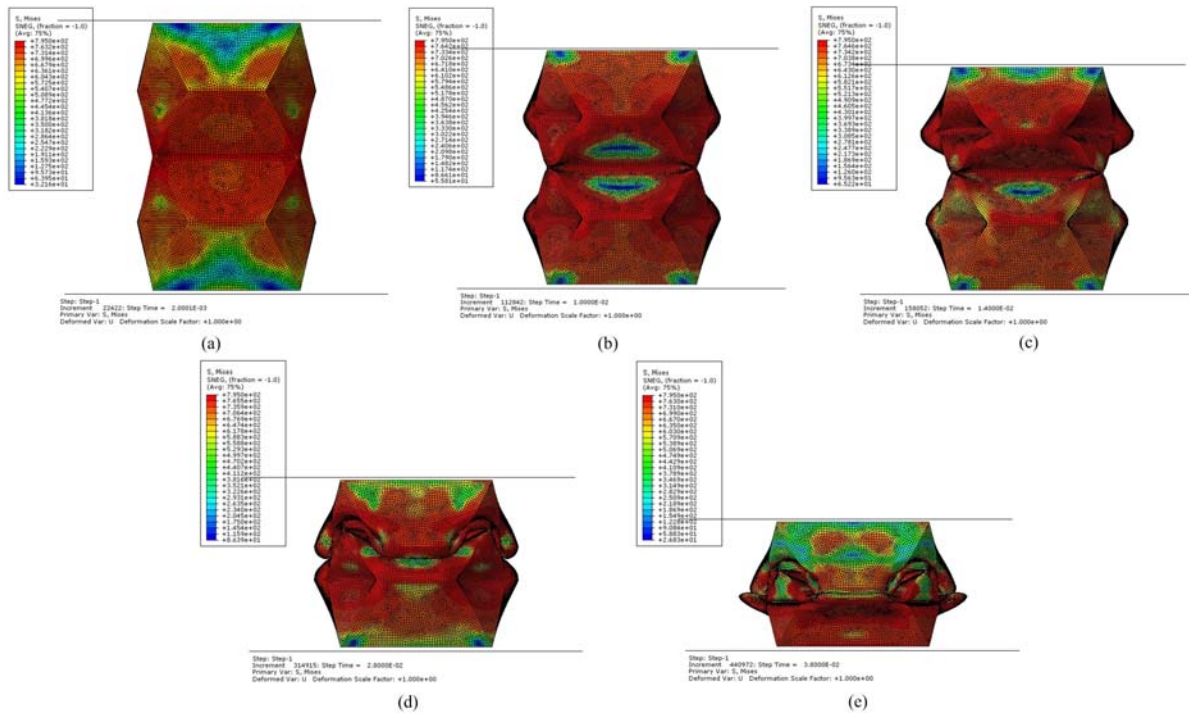


图6 吸能构件的屈曲模态和应力云图

Fig. 6 The buckling mode and stress nephogram the energy-absorption component

从数值模拟结果来看,吸能构件在压缩变形过程中都能够按照预先设计的折纹来引导变形,且变形模态非常稳定;经多次计算,承载峰值基本一致,都达到 2500kN;反作用力虽然未实现保持恒定状态,但变化趋势较为理想;构件变形量较大($\geq 200\text{mm}$),可以为支架变形让压实现足够的让位行程;外界做功绝大部分转化为构件的内能,吸收的能量不可逆。这些特点足以说明吸能构件的参数设定能够实现预期设计的目标,从理论上能够满足快速吸能让位的防冲需求。

4 吸能构件的准静态压缩试验

为研究和验证数值计算结果的可靠性,检验吸能构件实际承载效果与吸能能力,按已设定的吸能构件技术参数来制备试件,然后对试件进行实验室初步的准静态压溃试验。试验准备如下:

- ①准静态压力试验系统,包括 I8164(0.5)型压力试验机和 LXW-1500(0.5)位移采集、记录系统。
- ②吸能构件试件规格:正方形开口,边长 180mm(外围),构件高度 352mm,壁厚 8mm。
- ③试件材料性能:屈服强度 720MPa,极限强度 790MPa,延伸率 18%。

试验准备就绪,开始进行压缩试验。根据试验方案,将吸能构件置于压力试验机上进行轴向准静态压缩,压力和位移监测系统同步实时记录,直至试件卸载,如此共做 3 组,如图 8。

试验结果分析:

图 9(a)为三个试件压缩过程中的力—位移曲线。可以看到,三条曲线走势基本一致,都呈现出三

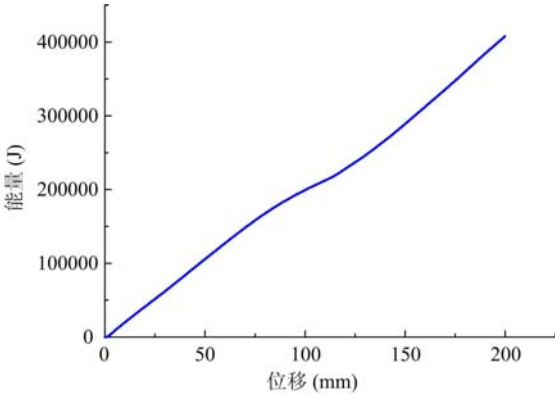


图7 吸能构件吸能量—位移曲线

Fig. 7 Total energy-time curve of the energy-absorption component



图 8 吸能构件准静态压缩试验

Fig. 8 Duasi-static compression test of the enery-absorbing components

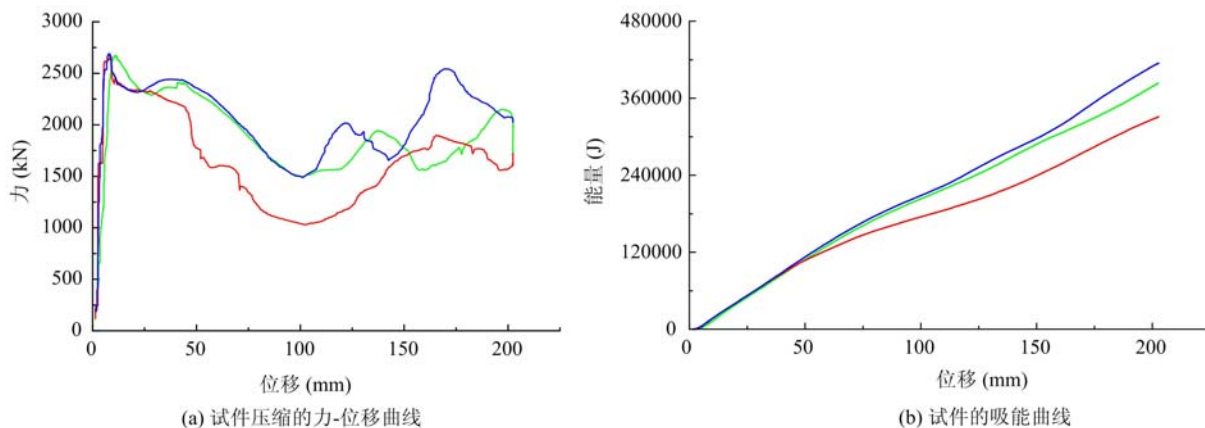


图 9 吸能构件的试验曲线

Fig. 9 Trial curve of energy-absorption component

个明显的阶段,即线性上升阶段、抛物线式下降阶段和起伏攀升阶段。三条曲线的反力极值(试件的承载力)分别为 2691kN、2620kN 和 2668kN,平均 2660kN。图 9(b)为三条力一位移曲线积分所得能量(试件吸能量)曲线,三个试件最终吸能量分别为 407.90kJ、383.11kJ 和 335.68kJ,平均值 375.56kJ。

图 10 所示为 1 号试件屈曲变形过程中三个阶段的模态图片,分别为结构弹性变形阶段、上部弹塑性屈服阶段和下部弹塑性屈服阶段,其变形模态与预期的模拟计算结果极为相似,且变形比较稳定,很好的证实了吸能构件能够按照预折纹的引导来进行屈曲变形,实现了我们预期的设计目标。

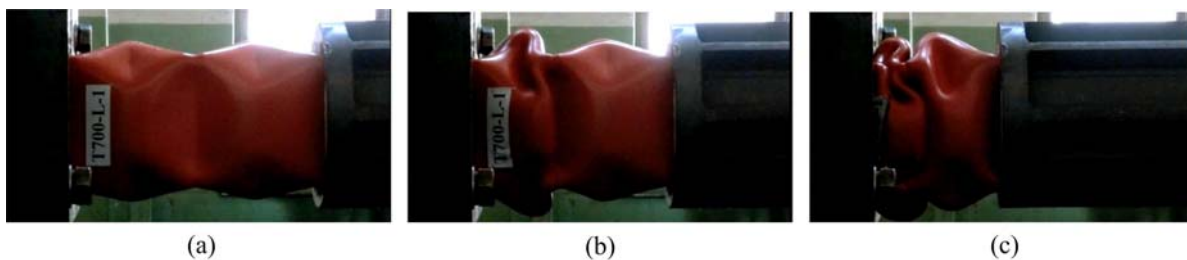


图 10 构件屈曲的三个阶段

Fig. 10 Three stages of the component buckling

试验总结:

(1) 在吸能构件的准静态压缩试验中,试件平均承载力达 2660kN(高于数值计算结果 120kN),实现了预期承载力设定值($2310\text{kN} \leq P \leq 2720\text{kN}$).

(2) 试件平均吸能量达 375.56kJ(比数值计算结果低 22.32kJ)。

(3) 试件基本都能按照预设的折纹进行屈曲变形,且变形模态比较稳定。

(4) 试件的承载力、吸能量与数值模拟结果极为接近,证实了数值模拟计算具有较高的精确度可信度,同时说明吸能构件的形式设计与参数设定比较合理,能够满足快速让位吸能的防冲支护需求。

由于条件限制,试验室试验只进行了吸能构件的准静态压缩研究,但试验结果已足以检验吸能构件

的吸能性能与防冲支护效果。试验过程中及试验结果仍存在问题,包括:①试件变形的第三阶段,反力回升幅度较低,导致试件吸能量略低于预期计算值。②试件卸压后发生微小的弹性恢复,因此构件的吸能量包含一小部分弹性变形能。③吸能构件屈曲模态对加载条件比较敏感,在变形的第二和第三阶段容易受偏载或边界约束影响而发生歪倒或局部撕裂等异常情况。这些问题也是以后吸能构件试验研究的重点内容。

5 结论

(1) 通过对吸能构件的理论分析、数值模拟和实验室试验研究发现,这种带有预折纹的薄壁金属筒结构具有非常理想的承载力、吸能能力以及屈曲变形模态,且稳定性较高。同时,通过试验与数值模拟对比可见,数值计算软件对于模拟吸能构件在冲击下的屈曲压溃过程具有较高的精确度与可信度,可以作为吸能构件性能研究的一项重要参考。

(2) 吸能构件的形式设计和参数设定实现了预期的承载力、吸能量和稳定的屈曲模态,能够满足支架技术参数设定的要求和快速吸能让位的防冲支护需求。此构件的设计与研制,为支架的现场应用以及进一步的优化设计能够提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] 潘一山,王凯兴,肖永惠. 基于摆型波理论的防冲支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8):1537—1542 (PAN Yishan, WANG Kaixing, XIAO Yonghui. The design of the anti-scour support theory based on pendulum-type wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 2013, 32(8):1537—1542(in Chinese))
- [2] 张宗华. 轻质吸能材料和结构的耐撞性分析与设计优化[D]. 辽宁:大连理工大学, 2010:1—4 (ZHANG Zonghua. Crash worthiness analysis design optimization of lightweight materials and structures for energy absorption[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2010:1—4 (in Chinese))
- [3] 曲明. 汽车吸能构件结构低速正面撞击的数值仿真研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工程大学, 2008:7—10 (QU Ming. Simulation and research of the structure of crash box in the low speed front collision[D]. Heilongjiang: Harbin Engineering University, 2008:7—10(in Chinese))
- [4] Florence A L. Critical Viscoplastic Cylindrical Shells Due to Impulsive Loading[J]. AIAA Journal, 1968(1):532—537.
- [5] Gordienko B A. Buckling of inelastic cylindrical shells under axial impact[J]. Archives of Mechanics, 1972(3): 383—394.
- [6] 顾红军. 爆炸及冲击载荷下多排圆柱壳的结构响应[D]. 江苏:南京理工大学, 2003:4—6 (GU Hongjun. Structure response of multi-row cylindrical shells under explosion and shock[D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2003: 4—6(in Chinese))
- [7] 徐新生,苏先樾,王仁. 轴向应力波与弹塑性材料圆柱壳的动力屈曲[J]. 中国科学, 1995, 25(2):166—173 (XU Xinsheng, SU Xianyue, WANG Ren. Dynamic Buckling of Axial Stress Wave and Elastic-plastic Material Cylindrical Shell[J]. Science Chinese, 1995, 25(2):166—173(in Chinese))
- [8] 王仁,韩铭宝,黄筑平等. 受轴向冲击的圆柱壳塑性动力屈曲实验研究[J]. 力学学报, 1983, 19(5):509—514 (Wang Ren, Han Mingbao, Huang Zhuping, et al. Dynamic Plastic Buckling of Cylindrical Shell Under Axial Impact-an Experimental Study[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1983,19(5):509—514 (in Chinese))
- [9] 吕祥锋,潘一山,李忠华. 多孔金属材料刚柔吸能结构及其在冲击地压巷道支护中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(2):185—190 (LV Xiangfeng, PAN Yishan, LI Zhonghua. Rigid-flexible Energy Absorbing Structure with Porous Metal Material and Its Application to Roadway Support of Rockburst[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2):185—190 (in Chinese))
- [10] 刘海燕,李然. 泡沫混凝土吸能机理试验研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2010, 29(2):166—168 (LIU Haiyan, LI Ran. Experimental Study on Endergonic Mechanism of Foam Concrete[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2010, 29(2):166—168 (in Chinese))
- [11] 练军,顾伯洪. 三维编织复合材料动态冲击性能的数值模拟[J]. 纺织学报, 2011, 32(1):41—46 (LIAN Jun,

- GU Bohong. Numerical simulation of dynamic performance of three-dimensional braided composites[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(1):41–46(in Chinese))
- [12] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究[D]. 北京:清华大学, 1999:1–2 (PAN Yishan. Study on Rockburst Initiation and Failure Prpagation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999:1–2 (in Chinese))
- [13] 李忠华, 潘一山. 煤柱冲击地压的解析分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(2):62–65 (LI Zhonghua, PAN Yishan. Analytical Analysis Of Pillar Rockburst [J]. Journal of Geological Hzards and Envionment Preservation, 2001, 12(2):62–65 (in Chinese))
- [14] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 华云龙译. 北京:化学工业出版社, 2005:110–115 (YU Tongxi, LU Guoxing. Energy Absorption[M]. Translated by HUA Yunlong. Beijing:Chemical Industry Press, 2005:110–115 (in Chinese))

Numerical Analysis and Experimental Study of a Coal Mine Anti-Impact and Energy-Absorption Supporting Component

PAN Yi-shan, MA Xiao, XIAO Yong-hui, LI Zhong-hua

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: Coal mine rockbrust may cause severe vibration, deformation or sudden destruction for surrounding rock, thereby may produce devastating impact action on supporting body. Based on the ideas of quick energy absorption and displacement anti-impact, a kind of anti-impact, energy-absorption component with special shape was developed and was applied to roadway hydraulic support. The mechanism of the component is to alleviate the over impact applied to support based on quick deformation displacement and energy absorption of component. It protects support from damage, thereby prevents instability destruction of roadway supporting system. A simplified formula relating bearing capacity of energy absorption component and energy-absorbing amount is put forward in this paper. The reliability of component parameter setting was calculated and analyzed by Abaqus software. Ideal force-displacement curve, energy-absorbing amount curve and buckling mode were obtained, and verified by quasi-static compression experiment in laboratory. Experimentally obtained the bearing capacity is up to 2660kN, the energy-absorbing amount is up to 375.56kJ, that is very close to the expected value. The design and development of this component provide certain reference for optimization design of support.

Keywords: rockburst; anti-impact; energy-absorption; energy-absorption component