

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.06.007

# 矿用立柱恒阻让位防冲装置的设计及其特性分析

唐 治<sup>a,b</sup>, 潘一山<sup>a,b</sup>, 朱小景<sup>a</sup>, 崔乃鑫<sup>a,b</sup>

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

**摘要:**为提高立柱的抗冲击力学性能,设计了一种由接头、卡箍、吸能构件套、吸能构件和销钉构成的矿用立柱恒阻让位防冲装置,并根据立柱国标确定了防冲装置的承载力,给出了防冲装置工作原理及防冲原理。对常规立柱和安装防冲装置立柱在冲击载荷作用下的变形和受力进行了对比分析,得出在相同冲击载荷作用下,防冲立柱变形大大小于常规立柱变形,吸能防冲构件变形阶段能有效降低立柱承受的冲击力。防冲装置可方便安装于现有常规立柱上,防冲装置的使用大大增强了立柱的抗冲击性能。此恒阻让位防冲装置也可用于汽车、航空航天工业、高速公路安全防护等领域。

**关键词:**立柱;防冲装置;冲击地压;恒阻让位;安全防护

中图分类号:TD802

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)06-054-06

## Design of constant resistance giving way and anti-impact device of mining column and its characteristic analysis

TANG Zhi<sup>a,b</sup>, PAN Yishan<sup>a,b</sup>, ZHU Xiaojing<sup>a</sup>, CUI Naixin<sup>a,b</sup>

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

**Abstract:** In order to improve the anti-impact mechanical properties of column, a kind of constant resistance giving way and anti-impact device of mining column is designed. The device is composed of a joint, clamp, energy absorption component cover, energy absorption component and pin. According to the Chinese standard of column, the bearing capacity of anti-impact device is determined, and the working and anti-impact principle of the device is given out. The contrastive analysis is conducted to study the deformation and stress of conventional column and the column installing anti-impact device under impact loading. The results show that under the same impact loading, the deformation of anti-impact column is far less than that of conventional column. The energy absorption and anti-impact component can effectively reduce the impact force on column in the deformation stage. The anti-impact device can greatly enhance the anti-impact properties of column, and it can be easily installed on the existing conventional column. And the constant resistance giving way and anti-impact device can be used in the automotive, aerospace industry, highway safety protection and other fields.

**Keywords:** column; anti-impact device; rockburst; constant resistance giving way; safety protection

收稿日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金应急管理资助项目(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资助项目(LNTU16KF09)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51641404), and the Open Projects of Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization, Liaoning(LNTU16KF09).

作者简介:唐治(1983-),男,博士,主要从事矿山灾害力学研究,(E-mail)tangzhi0127@163.com。

冲击地压是煤矿开采中遇到的重大灾害之一<sup>[1]</sup>,随着煤矿开采深度逐渐增加,冲击地压矿井越来越多,冲击地压造成的灾害越来越严重,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,而立柱是液压支架的关键动力元件<sup>[2]</sup>。现有常规立柱的抗冲击性能有限,不能满足冲击地压巷道防冲支护要求,主要原因是突发冲击地压时,传递到立柱的外载表现为瞬间急增阻,常规立柱安全阀的动态响应速度跟不上冲击载荷造成的立柱增阻速度,在冲击急增阻阶段立柱发生弯曲破坏<sup>[3-5]</sup>。因此,立柱的抗冲击性能亟待提高。在立柱上安装让位防冲装置能有效提高立柱的抗冲击力学能力<sup>[6]</sup>,但需要让防冲装置压缩过程中具有恒定的承载力(无载荷波动性或较小的载荷波动系数)和稳定的变形破坏模式。而现有的锥形管、蜂窝管、复合材料管、泡沫填充管、折纹管等吸能装置或吸能构件在压缩过程中没有恒定承载力(均具有较大的载荷波动性)<sup>[7-12]</sup>,不能满足立柱吸能装置的力学特性要求。

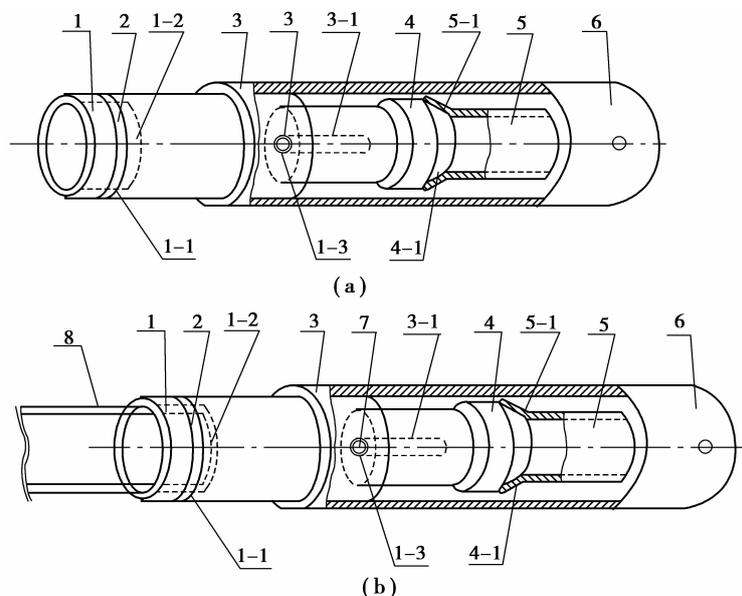
## 1 恒阻让位防冲装置设计

### 1.1 设计依据

根据中华人民共和国国家标准<sup>[13-14]</sup>,立柱应在承受 1.5 倍的额定力静载荷时和由机械冲击动载荷达到 1.5 倍的额定工作压力时,不出现功能失效,当液压控制系统产生冲击力时,冲击力在不大于安全阀工作压力 150% 的情况下,安全阀不应失效。因此,立柱让位防冲装置的承载力需要大于立柱工作阻力而小于 1.5 倍立柱工作阻力,这样可将防冲装置的承载力可设定为 1.3 倍立柱工作阻力。

### 1.2 结构设计

矿用立柱恒阻让位防冲装置由接头、卡箍、吸能构件套、吸能构件和销钉构成,如图 1(a)。防冲装置是在圆形的金属管状的吸能构件套 3 内的下端插装有接头 1,接头 1 的下端设一段空心段 1-2,在空心段 1-2 处的接头 1 外圆周壁上设有卡箍槽 1-1,在卡箍槽 1-1 中设有卡箍 2,用于与常规立柱上端 8 连接时紧固。接头 1 的上端面与压头 4 的下端面接触连接,压头 4 为上端成带圆锥面 4-1 的圆柱体,在压头 4 的圆锥面 4-1 上连接喇叭形薄壁圆管 5 的喇叭口 5-1,喇叭形薄壁圆管 5 采用薄壁的金属管制成,由压头 4 和喇叭形薄壁圆管 5 组成吸能构件。在吸能构件和吸能构件套 3 的上方固定连接带有销钉孔的吸能装置连接圆顶 6,吸能装置连接圆顶 6 采用销钉通过圆顶 6 上销钉孔与支架顶梁连接。在接头 1 和吸能构件套 3 对应部位设有销钉孔 1-3,在吸能构件套外圆周上对应设有圆柱销钉滑槽 3-1,在圆柱销钉滑槽 3-1 中通过圆柱销钉 7 把吸能构件套 3 和接头 1 组合连接一起。防冲装置与立柱装配如图 1(b)。



1—接头;1-1—卡箍槽;1-2—空心段;1-3—销钉孔;2—卡箍;3—吸能构件套;  
3-1—圆柱销钉滑槽;4—压头;4-1—圆锥面;5—喇叭形薄壁圆管;5-1—喇叭口;  
6—吸能装置连接圆顶;7—圆柱销钉;8—常规立柱上端

图 1 防冲装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of anti-impact device

## 2 防冲装置的工作及防冲原理

当液压立柱受静载时,立柱正常工作,防冲装置不发生变形破坏,即使受较大静载,当达到立柱工作阻力时,液压阀正常开启,防冲装置承受力达不到防冲装置最大承载力,防冲装置也不发生变形破坏。当立柱受冲击载荷时,液压阀来不及打开,立柱受力大于工作阻力,当受力达到 1.3 倍的立柱工作阻力时(防冲装置最大承载力),防冲装置中的吸能构件被压缩变形,吸能构件变形破坏过程有效避免立柱受力持续增加,吸能构件变形破坏时间为溢流阀开启提供时间,可有效提高支架的抗冲击性能。

将立柱恒阻让位防冲装置安装于液压支架立柱上用于巷道支护就将形成“围岩-吸能支护”系统,突发冲击地压时,一是防冲装置本身吸收冲击能;二是防冲装置间接吸收冲击能(防冲装置被压缩后,让位空间给煤岩提供一定的能量释放空间);三是将形成新的支护系统(防冲装置让位,支护体与围岩自调节后又形成新的“围岩-支护”系统);四是防冲装置变形破坏过程缓解立柱所受冲击力,也为溢流阀开启提供时间。这将大大提高“围岩-支护”系统抵抗冲击地压能力,能有效防治和降低冲击地压灾害。

## 3 防冲装置抗冲特性分析

### 3.1 吸能构件特性模拟

采用 ABAQUS 有限元分析软件建立吸能构件模型<sup>[15-16]</sup>,压头假定为刚体,高 160 mm,圆锥面粗端直径为 110 mm,细端直径为 100 mm。考虑薄壁圆管材料对构件防冲性能影响,对 3 种材料(T700L、Q550、Q235)进行压缩模拟研究,材料参数见表 1。喇叭形薄壁圆管壁厚 3 mm、内直径 105 mm、圆管高度 150 mm。3 种材料构件的网状主要是四边形单元,单元特征长度为 2 mm。构件压缩过程是约束压模头所有自由度,把薄壁圆管放在压头上方,采用一刚性板从薄壁圆管上方轴向以 1 m/s 恒定速度压下。刚性板与构件间采用自动点面接触,在变形过程中构件的内外表面设为自接触,摩擦系数均为 0.3。

表 1 构件材料参数

Table 1 Material parameters of components

材料型号	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$
T700L	7850	210	0.3	720	790	16
Q550	7850	200	0.3	550	620	16
Q235	7850	200	0.3	235	380	16

部分材料吸能构件压缩变形数值模拟结果见图 2,图 2(a)为 T700L 材料吸能构件压缩变形过程图,图 2(b)为 Q550 材料吸能构件压缩变形过程图,图 2(a)、(b)从左至右变形图压缩率分别为 0%、30%、60%、100%。结果表明不同材料吸能构件压缩过程中均具有相同的稳定变形破坏模式。

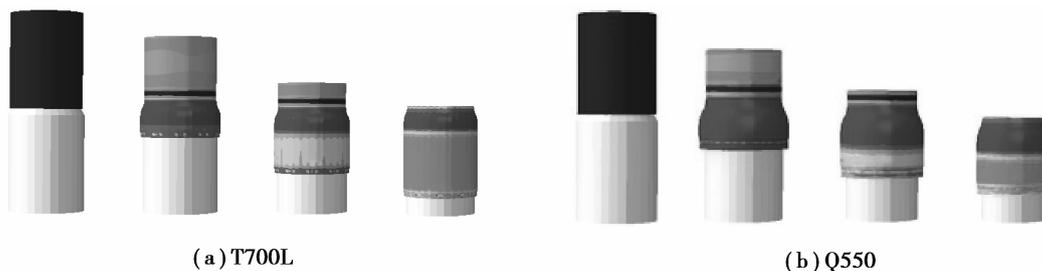


图 2 吸能构件变形

Fig.2 Deformations of energy-absorption component

不同材料的吸能构件压缩过程中力-位移曲线、吸能-位移曲线见图 3、4。从图 3、4 可得:不同材料吸能构件压缩过程中均具有恒定的承载力,构件吸收能量随压缩距离增加而近线性增大。

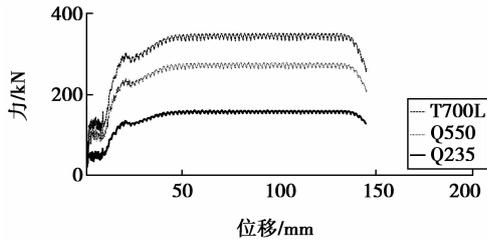


图 3 不同材料力-位移

Fig.3 Force-displacement with different matirals

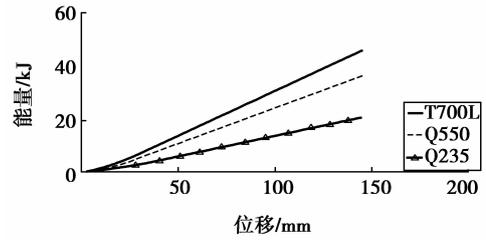


图 4 材料吸能特性

Fig.4 Energy absorption characteristicwith

### 3.2 防冲立柱特性模拟

采用 ABAQUS 软件对防冲装置安装在常规立柱上受冲击载荷进行模拟分析,将常规液压立柱简化为无液压功能立柱,立柱长 2 m,直径 11 cm,立柱材料密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.3、屈服应力为 80 MPa。防冲装置简化为吸能构件,长 0.3 m,其中薄壁圆管壁厚 4 mm、内直径 105 mm、圆管高度 150 mm,材料为 T700L。用一个刚体来模拟冲击物,给冲击物质量和速度来模拟冲击能量。

模拟冲击物的速度为 2 m/s,冲击能为 1 000 kJ,常规立柱变形如图 5(a),安装防冲装置的立柱变形见图 5(b),图 5(a)、(b)从左至右变形图受冲击时间分别为 0、0.03、0.06、0.09、0.12、0.15s。常规立柱与安装防冲装置立柱受冲击时间-力对比见图 6,时间-变形对比见图 7。

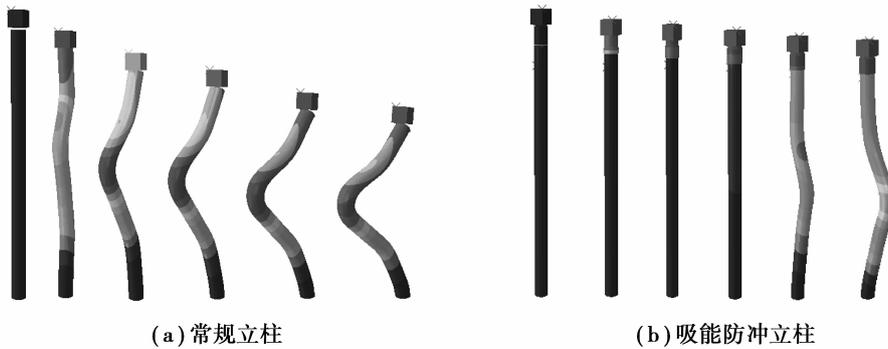


图 5 立柱变形

Fig.5 Column deformation

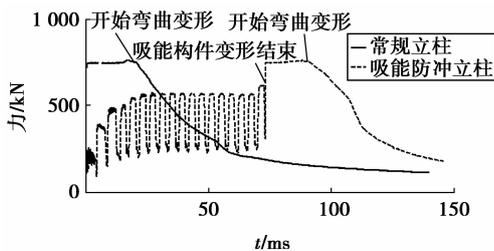


图 6 立柱时间-受力

Fig.6 Time force of columns

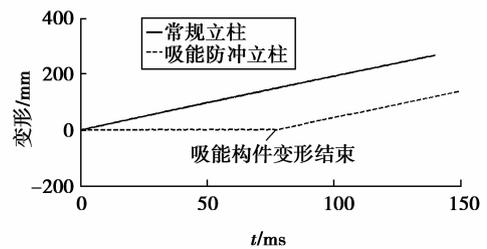


图 7 立柱时间-变形

Fig.7 Time deformation of columns

由图 5 可知:冲击载荷作用下,常规立柱在 0.03 s 时就发生了弯曲变形;而吸能防冲立柱是吸能防冲构件先变形破坏(吸收部分冲击能),然后立柱再开始弯曲变形破坏,在 0.09 s 时还未发生弯曲变形,且防冲立

柱变形大大小于常规立柱变形,说明防冲装置的使用能有效增强立柱的抗冲击性能。

由图6可得:常规立柱受冲击时,立柱受力瞬间增加,达到承载极限后,开始弯曲变形,抵抗冲击时间为20 ms。防冲立柱受冲击时,时间-力曲线主要分为吸能防冲构件恒承载力变形让位阶段、吸能防冲构件变形完成后立柱受力增大阶段和立柱弯曲变形后受力减小等3个阶段,抵抗冲击时间为90 ms,其中吸能构件抗冲击时间为70 ms。吸能防冲构件恒承载力变形让位阶段有效降低了冲击载荷时立柱承受的冲击力;防冲构件变形让位阶段吸收了部分冲击能量,降低了作用于立柱上的冲击能量,增加了立柱抗冲击时间,这说明防冲立柱抗冲击性能明显优于常规立柱。

由图7可得:强大冲击载荷作用下,常规立柱变形随冲击时间增加而增大,0.14 s时立柱变形量为268 mm;吸能防冲立柱在0~70 ms间不发生变形,70 ms后变形随冲击时间增加而增大,0.14 s时立柱变形量为120 mm,吸能立柱变形量仅为常规立柱的45%,这也说明防冲立柱抗冲击性能明显优于常规立柱。

## 4 结 论

1)设计了一种矿用立柱恒阻让位防冲装置,防冲装置由接头、卡箍、吸能构件套、吸能构件和销钉构成,并给出了防冲装置工作及防冲原理。

2)吸能构件压缩过程中具有恒定的承载力,不同材料吸能构件具有相同的稳定变形破坏模式。

3)冲击载荷作用下,安装防冲装置立柱的变形大大小于常规立柱变形,吸能防冲构件变形阶段有效降低了冲击载荷时立柱承受的冲击力,防冲装置的使用大大增强了立柱的抗冲击性能。

### 参考文献:

- [1] 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):1844-1844.  
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1844. (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] Vardoulakis I. Rock bursting as a surface instability phenomenon[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 137-144.
- [4] 李海波,蒋会军,赵坚,等.动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1887-1891.  
LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1887-1891. (in Chinese)
- [5] 何满潮,齐干,程骋,等.深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):987-993.  
HE Manchao, QI Gan, CHENG Cheng, et al. Deformation and damage mechanisms and coupling support design in deep coal roadway with compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 987-993. (in Chinese)
- [6] 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,2014,39(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. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] Chen W, 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.
- [10] 胡玉梅, 李晓红, 邓兆祥, 等. 微型客车正面碰撞仿真技术[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(9): 64-68.  
HU Yumei, LI Xiaohong, DENG Zhaoxiang, et al. JIANG. Numerical analysis techniques research for minicar front crash[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2003, 26(9): 64-68. (in Chinese)
- [11] 张勇, 李光耀. 序列响应面方法在薄壁梁轻量化设计中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(9): 14-18.  
ZHANG Yong, LI Guang yao. Application of sequential response surface method to thin-wall beam lightweight design[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(9): 14-18. (in Chinese)
- [12] 康建功, 石少卿, 张忠. 泡沫铝填充钢管横向压缩吸能特性试验[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(7): 68-73.  
KANG Jianguo, SHI Shaoqing, ZHANG Zhong. Experimental studies on the energy absorption property of aluminum foam filled steel pipe under transverse compression[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(7): 68-73. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 25974.2-2010. 煤矿用液压支架第二部分: 立柱和千斤顶技术条件[S/OL]. 2011[2015-06-29]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/36110267.html>. GB 25974.2—2010. Mine-Used Hydraulic support II: The technical requirement of pillar and the jack [S].
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 25974.2-2010. 煤矿用液压支架第三部分: 液压控制系统及阀[S/OL]. 2011[2015-06-29]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/18588642.html>. GB 25974.2—2010. Mine-Used Hydraulic support III: The hydraulic control system and valve [S].
- [15] 张建华, 丁磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
ZHANG Jianhua, DING lei. ABAQUS Proficient on introductory case[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)

(编辑 王维朗)