

新型防冲液压支架抗冲击特性研究

王成龙¹, 石敬龙¹, 尚欢¹, 张继伟¹, 王雪亭^{1,2}

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 266590 青岛; 2. 新风光电子科技股份有限公司, 272500 济南)

摘 要:针对现有液压支架抗冲击支护结构无法实现主动让位、让压等问题,在前期复合式抗冲击装置的研究基础上,对基于复合式抗冲击装置的新型防冲液压支架的抗冲击特性进行了深入研究,构建了新型防冲液压支架冲击动力学模型,探究了复合式抗冲击装置的最优安装位置,研究了不同载荷和不同电流条件下复合式抗冲击装置对液压支架抗冲击特性的影响。在理论研究的基础上,试制了产品样机并进行了试验验证。研究结果显示:复合式抗冲击装置可以有效降低冲击峰值力,当复合式抗冲击装置通0、2 A电流时,在1.1倍工作载荷的冲击力下,冲击峰值力分别降低了2.23%、1.68%、1.11%;在1.25倍工作载荷下的冲击力下,冲击峰值力分别降低了4.41%、3.22%、2.01%;在1.4倍工作载荷的冲击力下,冲击峰值力分别降低了7.62%、5.81%、3.23%。结合冲击动力学模型,研究了改进Bang-Bang控制与模糊PID(proportional-integral-derivative)控制的半主动控制策略,建立了仿真模型,研究结果表明:复合式抗冲击装置可以实现主动让位与主动让压,并能够提升抗冲击装置的吸能量、减小立柱所受冲击的峰值力。

关键词:防冲液压支架;动力学模型;抗冲击特性;半主动控制;试验验证

中图分类号:TH137;O39 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.007

文章编号:1000-4939(2026)01-0079-14 **CSTR:**32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.007

Impact resistance characteristics of new anti-impact hydraulic support

WANG Chenglong¹, SHI Jinglong¹, SHANG Huan¹, ZHANG Jiwei¹, WANG Xueting^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, 266590 Qingdao, China; 2. Wind Sun Science & Technology Co., Ltd., 272500 Jinan, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing anti-impact support structure of hydraulic support cannot achieve displacement and pressure release, based on the previous research of composite anti-impact resistance device, the anti-impact resistance characteristics of new anti-impact hydraulic support based on composite impact resistance device were studied in this paper. The impact dynamic model of the new anti-impact hydraulic support was constructed, and the optimal installation position of the composite anti-impact device was explored. The influence of the composite anti-impact device on the impact resistance of the hy-

收稿日期:2023-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51974170;52274132);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(No. 2020CXGC011502)

通信作者:石敬龙. E-mail:15610758295@163.com

引用格式:王成龙,石敬龙,尚欢,等. 新型防冲液压支架抗冲击特性研究[J]. 应用力学学报,2026,43(1):79-92.

WANG Chenglong, SHI Jinglong, SHANG Huan, et al. Impact resistance characteristics of new anti-impact hydraulic support[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 79-92.

draulic support under different loads and different currents was studied. Based on the theoretical research, the prototype of the product was trial-produced and verified by experiments. The results show that the anti-impact peak force can be effectively reduced by the composite anti-impact device. When the composite impact device is connected with 0 A, 1 A and 2 A currents, the impact peak force is reduced by 2.23%, 1.68% and 1.11%, respectively, under the impact force of 1.1 times the working load. Under the impact force of 1.25 times the working load, the peak impact force is reduced by 4.41%, 3.22% and 2.01%, respectively. Under the impact force of 1.4 times the working load, the impact peak force is reduced by 7.62%, 5.81% and 3.23%, respectively. Combined with the anti-impact dynamics model, the active control strategy of improved Bang-Bang control and fuzzy PID control is studied, and the simulation model is established. The results show that the composite anti-impact device can realize active displacement release and active pressure release, and the energy absorption of the anti-impact device can be improved and the peak force of the impact on the column can be reduced.

Key words: anti-impact hydraulic support; dynamic model; impact resistance characteristic; semi-active control; experimental verification

随着国民经济发展以及浅层煤炭资源日益枯竭,我国煤炭开采深度日益增加,当煤层开采到一定深度时,往往会伴随有煤岩结构失衡导致的冲击地压灾害^[1-2]。冲击地压灾害的发生给国家的财产和人民的生命安全将造成重大损失,现有的防冲液压支架支护结构均为被动支护式,在冲击地压发生时无法主动调节支护力,也无法进行主动让位及主动让压,因此如何提高液压支架的智能化抗冲击能力,使其在冲击地压发生时不发生结构性破坏是目前研究的热点。

我国液压支架技术在20世纪80年代得到了迅速发展^[3-4],但对于频发冲击地压的矿井,最先提高支架支护强度和支架抗冲击能力采用的方式是超前支护液压支架。王国法等^[5]以华亭煤矿强矿压冲击工作面为基础,研制了新型工作面超前支护系统,但安全阀往往来不及打开,造成液压支架变形损坏以及爆缸等问题。其次是通过在支架中添加吸能构件来改善液压支架防冲性能。王春华等^[6]提出了一种防冲液压支架用加肋板圆管式吸能防冲构件,但肋板的布置可能存在构件结构材料缺陷导致构件压溃出现不规则的偏斜、开裂现象;YAO等^[7]提出了一种新型混合波纹管,但波纹管结构尺寸严谨,制作过程复杂;DENG等^[8]提出了一种新型混合波纹管;GHASEMI等^[9]提出了一种由挤压棒材和薄壁圆管组合而成的新型吸能构件;TIAN等^[10]研究了非均匀沟槽圆管的能量吸收特性;董双勇等^[11]设计了一种吸能防冲锚杆支护构件,但此构件初始支撑强度小,圆管撕裂变形占用空间大;宋嘉祺^[12]通过仿真

与试验研究了刚性支护和吸能支护在冲击载荷作用下的力学行为;许海亮等^[13]设计了一种新型矿用圆弧形薄壁防冲吸能装置,但该构件在实际工况下,薄壁管易开裂,变形模式不稳定;王爱文等^[14]研发了一种膨胀-摩擦式吸能防冲锚索,但扩径台容易因强度、硬度不足而碎裂破坏;GUO等^[15]研制了一种置于液压支架顶梁的波纹叠层吸能元件;WANG等^[16]提出了一种适用于巷道液压支架的薄壁竖条圆管吸能构件并对其进行了仿真和试验研究。

近年来,越来越多的学者将磁流变缓冲技术应用到抗冲击领域,磁流变缓冲器目前已应用到汽车、航天、建筑等各大领域,且取得了众多成效^[17-20]。LUONG等^[21]基于磁流变缓冲器提出了一种基于模型参考滑模控制和自适应混合控制的鲁棒控制器;JIANG等^[22]基于磁流变缓冲器提出一种直升机半主动控制策略;BHAIYA等^[23]利用磁流变缓冲器与其他混合模式控制装置结合,以加强对建筑结构地震响应控制研究;BAGHERKHANI等^[24-25]研究了磁流变缓冲器在地震结构中的可靠性,提出了一种结合李亚普诺夫控制算法的优化策略;李赵春等^[26]对磁流变缓冲器进行了响应特性模型与试验研究;潘炜等^[27]针对磁流变阻尼器非线性强、PID (proportional-integral-derivative) 控制参数难实时调节等问题,设计了模糊PID控制器并进行了模拟仿真;杨辉静等^[28]对冲击载荷下磁流变缓冲器内部磁场进行了动态数值计算与瞬态试验测试;白先旭等^[29]对磁流变半主动落锤冲击缓冲系统进行了控制试验与分析;张超等^[30]研究了自动榴弹发射器磁

流变缓冲器的动态特性。

现有防冲液压支架抗冲击技术中的支护结构均为被动支护式,存在无法根据冲击工况进行支护力主动调节,也无法进行主动让位及主动让压等问题,在应对冲击地压时具有一定局限性。针对现有液压支架的防冲性能问题,王成龙等^[31-32]提出了一种将磁流变缓冲技术应用于液压支架的思路,通过仿真对比分析,表明安装磁流变缓冲装置的液压支架可以有效降低峰值力,具有更好的抗冲击性能。在前期研究的基础上,课题组提出了一种新型的复合式抗冲击装置^[33],但尚未研究不同电流、不同控制策略等因素对缓冲时间、峰值力等性能参数的综合影响。

本研究建立了基于复合式抗冲击装置的液压支架冲击动力学模型,研究了复合式抗冲击装置的最优安装位置以及不同载荷和不同电流条件下复合式抗冲击装置对液压支架抗冲击特性的影响,并对此进行了试验验证;结合冲击动力学模型,提出了改进 Bang-Bang 控制与模糊 PID 控制的复合式抗冲击装置半主动控制策略,为提高液压支架的抗冲击特性提供了新的解决方案。

1 抗冲击特性研究

1.1 基于复合式抗冲击装置的防冲液压支架设计

基于复合式抗冲击装置研究的防冲液压支架如图1所示。该支架为双柱支架,单柱额定工作阻力为2 400 kN,整个支架额定工作阻力为4 800 kN。

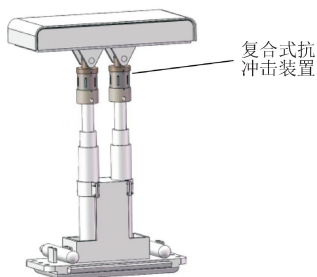


图1 基于复合式抗冲击装置的防冲液压支架

Fig. 1 Anti-impact hydraulic support based on composite anti-impact device

复合式抗冲击装置结构图如图2所示,由吸能构件及磁流变缓冲器共同组成。

吸能构件以及磁流变缓冲器的一些主要参数如

表1所示。

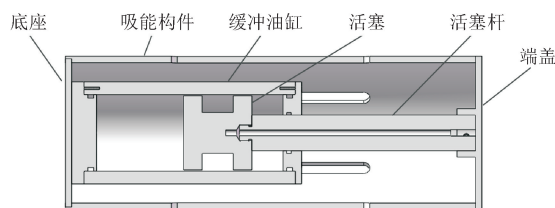


图2 复合式抗冲击装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of composite anti-impact device

表1 吸能构件及磁流变缓冲器参数

Tab. 1 Parameters of energy absorbing components

and magnetorheological buffer (单位:mm)

名称	取值	名称	取值
吸能构件外径	280	缓冲油缸内径	200
吸能构件内径	270	活塞杆直径	140
吸能构件高度	300	总高度	300
缓冲油缸外径	220		

1.2 复合式抗冲击装置力学模型

复合式抗冲击装置的力学模型包括磁流变缓冲器力学模型、磁流变缓冲器电磁模型、吸能构件的力学模型以及冲击载荷下防冲液压支架力学模型。

1) 磁流变缓冲器力学建模

在冲击过程中,磁流变缓冲器的阻尼力包括黏性阻尼力、库仑力、节流阻力、惯性阻力以及摩擦力,且工作模式为剪切阀式。

磁流变液 Bingham 本构方程可以表示为

$$\begin{cases} \tau = \tau_y \operatorname{sgn} \left(\frac{du}{dy} \right) + \eta_1 \frac{du}{dy}, (\tau > \tau_y) \\ \frac{du}{dy} = 0, (\tau \leq \tau_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; τ_y 为剪切屈服应力极限值; η_1 为液体屈服后黏度; $\frac{du}{dy}$ 为剪切应变率。

磁流变缓冲器总阻尼力由黏性阻尼力 F_c 、库仑力 F_τ 、节流阻力 F_j 、惯性阻力 F_g 组成,可表示为

$$\begin{aligned} F_{MR} &= F_c + F_\tau + F_j + F_g \\ &= \left(A_p v + \frac{w y_3}{2} v \right) \frac{12 \eta_1 A_p}{w y_3^3} + c \frac{\tau_y A_p}{y_3} \operatorname{sgn}(v) \cdot \\ &\quad \frac{\rho S_p^3}{2 c_d^2 S_c^2} v^2 + I \rho \left[\frac{A_p^2 (A_p - A_d)}{A_d^2} \right] \dot{v} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_p 为活塞有效工作面积; w 为等效平板厚度; c 为补偿系数; ρ 为磁流变液密度; S_c 为环形阻尼孔横截面积; S_p 为活塞工作面积。

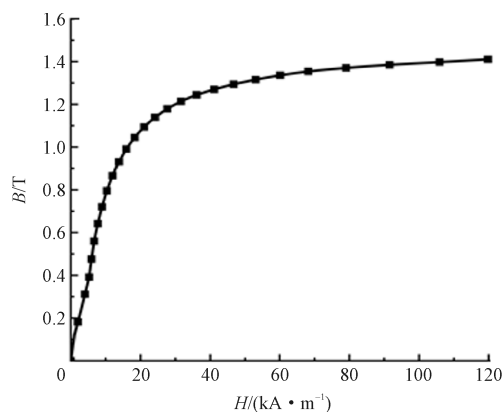
$$\text{令 } C_1 = \left(A_p + \frac{wy_3}{2} \right) \frac{12\eta l A_p}{wy_3^3}, C_2 = c \frac{l A_p}{y_3} \text{sgn}(v), C_3 = \frac{\rho S_p^3}{2c_d^2 S_c^2},$$

$$C_4 = l\rho \left[\frac{A_p^2(A_p - A_d)}{A_d^2} \right], \text{则总阻尼力可表示为}$$

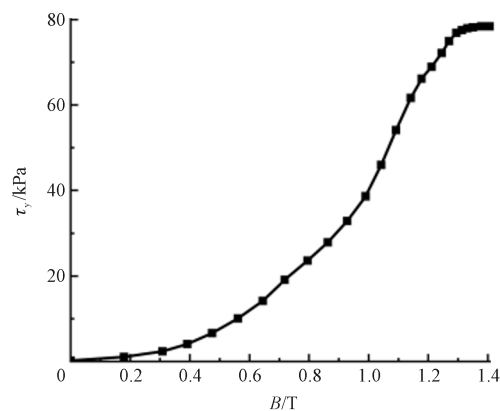
$$F_{MR} = C_1 v + C_2 \tau_y + C_3 v^2 + C_4 \dot{v} \quad (3)$$

2) 磁流变缓冲器电磁模型

磁流变缓冲器所采用的磁流变液为 A186, 该型号磁流变液的磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系以及屈服应力 τ_y 与磁感线强度 B 之间的关系如图 3 所示, 可以看出 τ_y 与 B 呈正相关, 但 τ_y 在 $B = 1.2 \text{ T}$ 时稳定。基于 COMSOL 软件对磁流变缓冲器^[33]进行仿真建模, 通过不同电流下的电磁仿真分析, 得到在不同电流下阻尼通道内的磁感应强度和磁感应线分布如图 4 所示, 可以看出磁流变缓冲器线圈产生的磁场均匀分布于其周围, 阻尼通道处的磁感线较为密集, 能够产生较大的阻尼力。而磁流变液和活塞杆等远离阻尼通道处的部位没有磁场存在, 这证明磁流变缓冲器活塞的尺寸设计较为合理, 能够有效利用励磁线圈产生的磁动势。



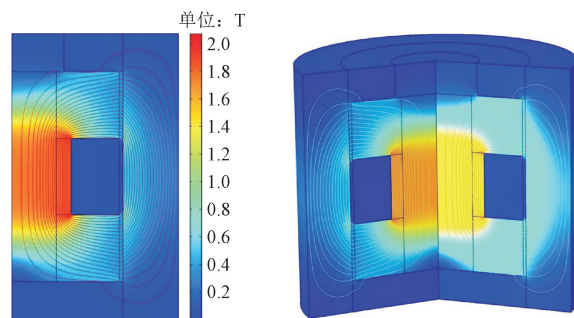
(a) 磁流变液 B - H 曲线



(b) 磁流变液 τ_y - B 曲线

图 3 磁流变液 B - H 曲线和磁流变液 τ_y - B 曲线

Fig. 3 B - H curve of magnetorheological fluid and τ_y - B curve of magnetorheological fluid



(a) 磁感线强度分布图

(b) 磁感线分布图

图 4 磁感应强度和磁感应线分布图

Fig. 4 Magnetic induction line intensity and magnetic induction line distribution map

将不同电流下的磁感应强度进行统计, 得到电流 I 与磁感应强度 B 以及屈服应力 τ_y 之间的关系表, 如表 2 所示。

表 2 电流与磁感应强度以及屈服应力关系

Tab. 2 Relationship of current with magnetic induction intensity and yield stress

I/A	B/T	τ_y/kPa
0.25	0.42	5.35
0.50	0.72	17.87
0.75	0.94	32.16
1.00	1.12	53.58
1.25	1.28	70.26
1.50	1.39	76.27
1.75	1.42	78.20
2.00	1.46	78.60

将表中数据进行拟合, 得到了描述磁流变液屈服应力 τ_y 与激励电流 I 之间的关系曲线, 如图 5 所示。

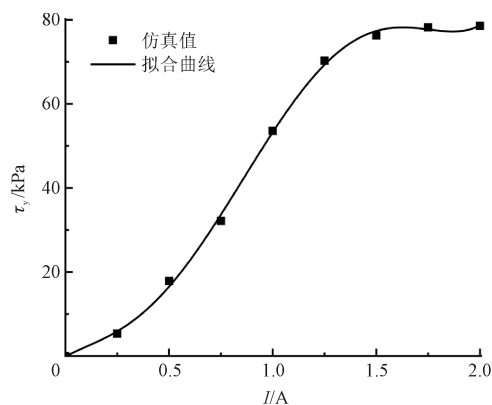


图 5 磁流变液 τ_y - I 曲线

Fig. 5 τ_y - I curve of magnetorheological fluid

图 5 中拟合曲线数学公式为

$$\tau_y = 14.66I^4 - 86.202I^3 + 142.09I^2 - 18.02I + 0.6822 \quad (4)$$

3) 吸能构件力学模型

基于课题组前期研制的吸能构件(图6)^[33],通过在最大载荷为5 000 kN的WDW电子万能试验机上进行的压溃试验,得到吸能构件压溃支反力与形变量的关系曲线,如图7所示。研究数据表明:吸能构件在第一次达到最大支反力之前属于弹性变形,在达到最大支反力之后属于塑性变形,支反力从减小变为增大的阶段属于密实阶段。



图6 竖条吸能构件试件^[33]

Fig. 6 Energy absorbing component specimen^[33]

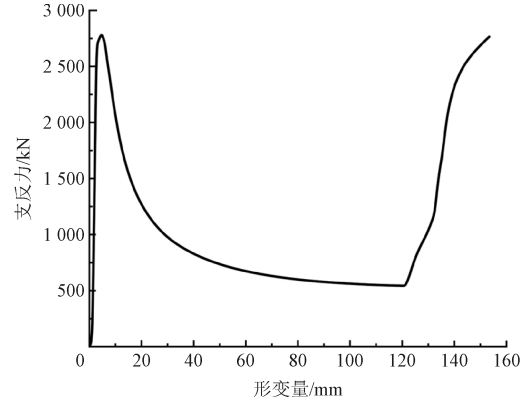


图7 支反力与形变量的关系

Fig. 7 Relationship between reaction force and deformation variable

将支反力试验值及其等效刚度计算值分为3部分进行拟合,分别对形变量为0~2.5 mm、2.5~20 mm、20~100 mm的支反力试验值以及等效刚度计算值进行多项式拟合,得到了吸能构件支反力及其等效刚度与位移的关系式

$$F_{支} = \begin{cases} 91.78x^5 - 822.81x^4 + 2332x^3 - 1972x^2 + 606x - 12.48, & (0 \leq x < 2.5) \\ 1.9745 \times 10^{-9}x^9 - 4.1051 \times 10^{-7}x^8 + 4.5972 \times 10^{-5}x^7 - 0.002889x^6 + 0.11166x^5 - 2.7304x^4 + \\ 41.695x^3 - 372.57x^2 + 158.3x + 336.22, & (2.5 \leq x < 20) \\ 0.000519x^4 - 0.08643x^3 + 5.6347x^2 - 179.95x + 3192.1, & (20 \leq x < 100) \end{cases} \quad (5)$$

$$k_2 = \begin{cases} -240.72x^3 + 1037.6x^2 - 799.74x + 244.69, & (0 \leq x < 2.5) \\ 0.029618x^4 - 1.689x^3 + 37.213x^2 - 388.71x + 1758.4, & (2.5 \leq x < 18) \\ 0.0000078595x^4 - 0.0022466x^3 + 0.23601x^2 - 10.9x + 201.32, & (18 \leq x \leq 100) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_{支}$ 为吸能构件支反力,单位为kN; k_2 为等效刚度,单位为kN/mm; x 为形变量,单位为mm。

4) 冲击载荷下防冲液压支架力学模型

将复合式抗冲击装置放置于立柱下方以及立柱上方,构建以复合式抗冲击装置及立柱为核心、以冲击地压等效冲击力为输入的抗冲击动力学模型,如图8所示。

根据牛顿第二定律,复合式抗冲击装置在立柱下方时的力学模型微分方程可以描述为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - m_1 g + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - F = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - m_2 g + k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \\ k_2 x_2 + c_2 \dot{x}_2 + F_1 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

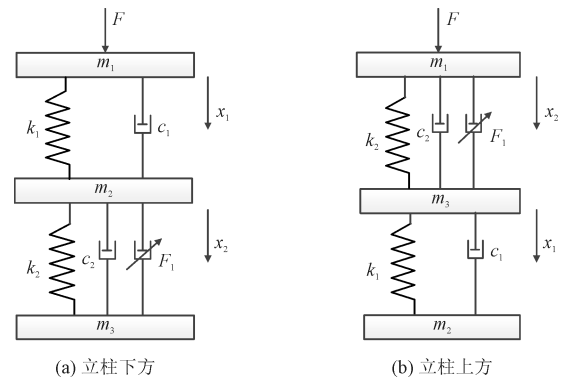


图8 复合式抗冲击装置在立柱下方和上方的力学模型

Fig. 8 The mechanical model of the composite impact device under and above the column

复合式抗冲击装置在立柱上方时的力学模型微分方程可以描述为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_2 - m_1 g + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \\ F_1 - F = 0 \\ m_3 \ddot{x}_1 - m_3 g + k_1 x_1 + c_1 \dot{x}_1 - k_2(x_2 - x_1) - \\ c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.3 抗冲击特性研究

1.3.1 复合式抗冲击装置安装位置对防冲液压支架影响分析

考虑到控制电流对抗冲击特性的影响,在仿真模型中对控制电流分别设定为0、1、2 A,施加额定工作载荷作为系统输入,得到不同安装位置及不同电流下的立柱及复合式抗冲击装置位移曲线,如图9所示。

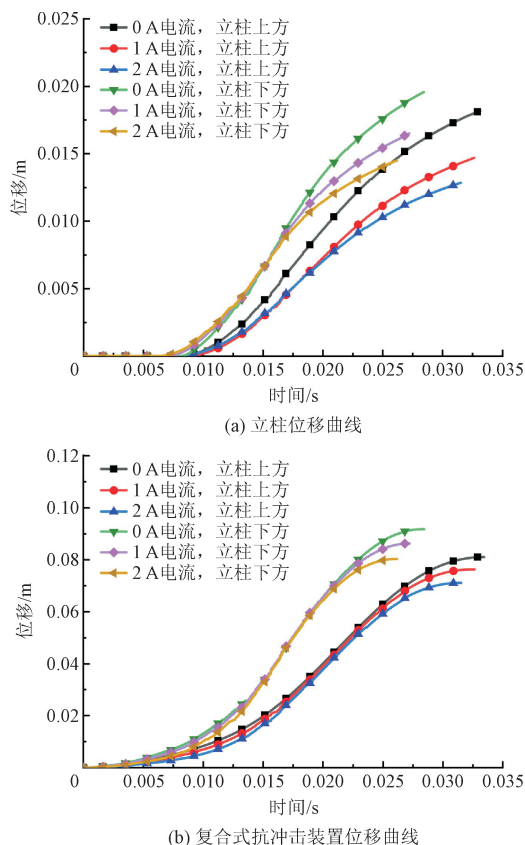


图9 不同安装位置及不同电流下立柱及复合式抗冲击装置位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of column and composite impact device under different installation positions and different currents

由图9可知,初始阶段冲击力未能使立柱产生位移,复合式抗冲击装置却产生了大于立柱的位移,说明复合式抗冲击装置起到了缓冲吸能的作用。在

相同电流下,复合式抗冲击装置在立柱上方时的立柱位移以及抗冲击装置位移均比安装在立柱下方时小;在相同的安装位置下,随着电流增大,复合式抗冲击装置的阻力变大,从而使得立柱位移及抗冲击装置位移会减小,整个抗冲击过程持续时间也会减少。研究表明,不论复合式抗冲击装置安装在立柱上方还是立柱下方均会起到抗冲击的作用,但当其安装在立柱上方时防冲液压支架具有更优的让位时间;电流的改变会影响立柱以及抗冲击装置的位移,但不会影响不同安装位置下两者位移的规律;冲击结束后需要对复合式抗冲击装置进行更换,但抗冲击装置安装在立柱下方因吸能构件形变可能会出现卡死情况,增加更换难度。综合考虑,复合式抗冲击装置安装在立柱上方时对防冲液压支架更为有利。

1.3.2 复合式抗冲击装置对液压支架抗冲击特性分析

对冲击过程的模拟是在立柱的正常工作条件下,即额定工作载荷2 000 kN^[33],施加峰值载荷分别为1.1倍、1.25倍、1.4倍额定工作载荷的冲击载荷对冲击过程进行模拟。

图10~图12为不同冲击载荷且不同电流情况下,安装复合式抗冲击装置后的立柱受力情况。

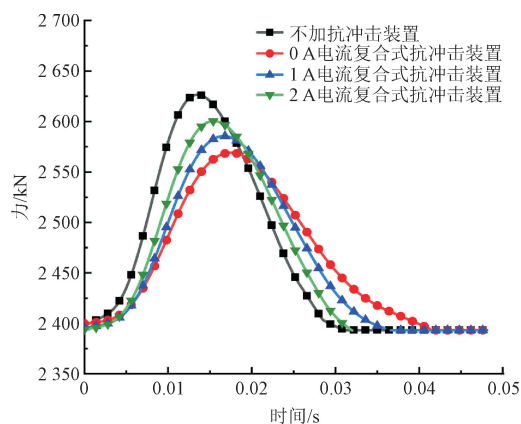


图10 峰值为1.1倍工作载荷冲击,不同电流下立柱受力情况

Fig. 10 The peak value is 1.1 times the working load impact and the force of the column under different currents is different

将不同冲击载荷且不同电流情况下安装复合式抗冲击装置后的立柱受力情况与不安装抗冲击装置相对比,如表3~表4所示,试验数据在峰值为1.1倍工作载荷的冲击力下,复合式抗冲击装置分别通0、1、2 A电流,与不安装抗冲击装置相比,立柱所受

冲击力分别降低了 2.23%、1.68%、1.11%,峰值时间分别延后了 4.06、3.38、2.34 ms;在峰值为 1.25 倍工作载荷的冲击力下,复合式抗冲击装置分别通 0、1、2 A 电流,与不安装抗冲击装置相比,立柱所受冲击力分别降低了 4.41%、3.22%、2.01%,峰值时间分别延后了 4.88、3.99、2.66 ms;在峰值为 1.4 倍工作载荷的冲击力下,复合式抗冲击装置分别通 0、1、2 A 电流,与不安装抗冲击装置相比,立柱所受冲击力分别降低了 7.62%、5.81%、3.23%,峰值时间分别延后了 6.97、6.42、2.86 ms。研究结果表明:相同冲击载荷下,增大电流会增加立柱所受冲击的峰值力;在相同电流下,增大冲击载荷,复合式抗冲击装置的抗冲击能力也相应增加。

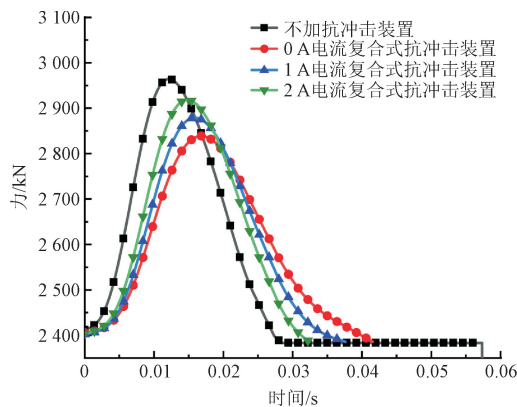


图 11 峰值为 1.25 倍工作载荷冲击,不同电流下立柱受力情况

Fig. 11 The peak value is 1.25 times the working load impact and the force of the column under different currents is different

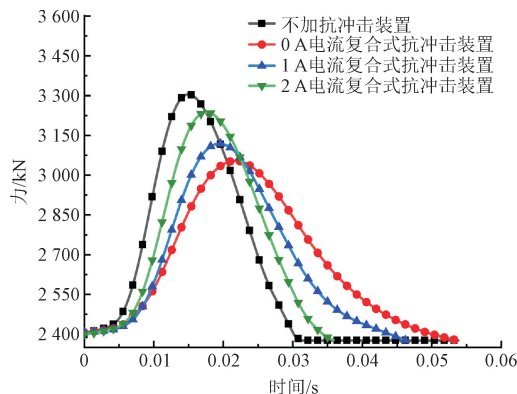


图 12 峰值为 1.4 倍工作载荷冲击,不同电流下立柱受力情况

Fig. 12 The peak value is 1.4 times the working load impact and the force of the column under different currents is different

表 3 不安装抗冲击装置与安装复合式抗冲击装置后立柱所受冲击力降低幅度对比

Tab. 3 Comparison of the reduction in impact force on columns after installing composite impact devices and without installing impact resistance devices

(单位:%)

工作载荷	电流		
	0 A	1 A	0 A
1.1 倍	2.23	1.68	1.11
1.25 倍	4.41	3.22	2.01
1.4 倍	7.62	5.81	3.23

表 4 不安装抗冲击装置与安装复合式抗冲击装置后立柱所受冲击力峰值延后时间对比

Tab. 4 Comparison of the delay time of the peak impact force on the column after installing composite impact devices and without installing impact resistance devices

(单位:ms)

工作载荷	电流		
	0 A	1 A	0 A
1.1 倍	4.06	3.38	2.34
1.25 倍	4.88	3.99	2.66
1.4 倍	6.97	6.42	2.86

2 半主动控制策略研究

为提高抗冲击装置的抗冲击能力,结合动力学模型对其在冲击过程中的半主动控制策略进行了研究。

2.1 基于改进 Bang-Bang 控制

改进 Bang-Bang 控制算法的思路为:通过设定阈值 F_k ,总支反力在增大过程中只有超过阈值位置前的某一支反力 F_z ,磁流变缓冲器的库仑力才可以输出为最大,则可实现在液压支架正常支护时磁流变缓冲器不工作,输出为最小库仑力。当总支反大于 F_z 时输出最大库仑力快速逼近阈值位置 F_k ,总支反力大于 F_k 时输出最小库仑力主动让位、让压减小支反力峰值,而当总支反力再次小于阈值位置 F_k 时再次输出最大库仑力增大复合式抗冲击装置吸能量。

改进 Bang-Bang 控制在原来 Bang-Bang 控制基础上除了引入阈值位置 F_k ,还在 $\dot{F}_k > 0$ 的区域上引

入 F_z 来使得支架正常支护时磁流变缓冲器不工作,改进 Bang-Bang 控制表达式可以表示为

$$F_{\tau} = \begin{cases} 0 & F_{\text{总}} > F_k \parallel (F_{\text{总}} \leq F_z, \dot{F}_{\text{总}} > 0) \\ F_{\tau_{\text{max}}} & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中, F_z 为大于 0 的正数,为磁流变缓冲器开始工作和不工作时的支反力划分阈值。

图 13 为基于改进 Bang-Bang 控制算法仿真后的电流变化曲线,从图中可以看出电流在控制过程中发生了 3 次突变。图 14 为基于改进 Bang-Bang 控制算法仿真后的磁流变缓冲器阻尼力曲线与 0 A 电流被动冲击时的阻尼力曲线对比图。从图中可以看出,在冲击过程中,磁流变缓冲器在改进 Bang-Bang 控制下吸收的能量多于被动冲击下吸收的能量,阻尼力发生了 3 次突变,且在第 2 次突变结束后的阻尼力高于 0 A 电流被动冲击时的阻尼力。

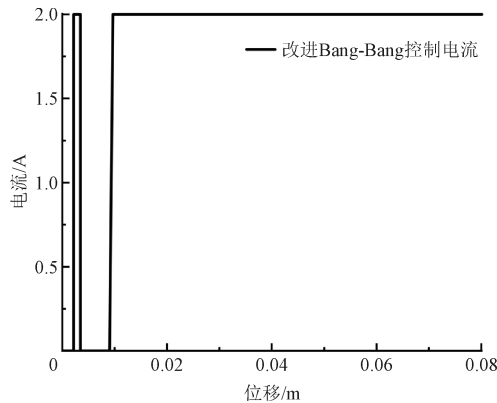


图 13 改进 Bang-Bang 控制电流变化曲线

Fig. 13 Improved Bang-Bang control current curve

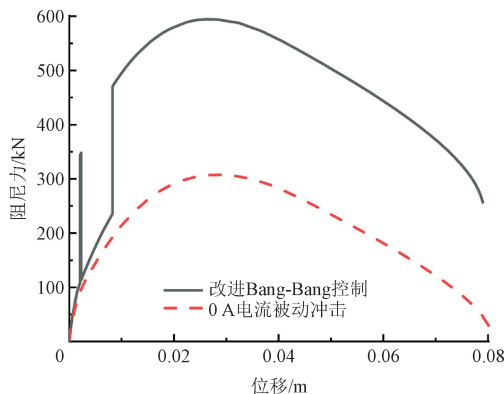


图 14 改进 Bang-Bang 控制磁流变阻尼器阻尼力对比曲线

Fig. 14 Improved Bang-Bang control magnetorheological damper damping force contrast curve

图 15 为改进 Bang-Bang 控制算法仿真后的复合式抗冲击装置支反力对比图。可以看出改进

Bang-Bang 控制算法的总支反力峰值较 2 A 电流被动冲击时有明显削弱,峰值削弱了 7.8%,该数值与 0 A 电流被动冲击时比较接近;且具有 Bang-Bang 控制的复合式抗冲击装置所吸收的能量较 2 A 电流被动冲击时,并没有大幅度减小,这是因为改进 Bang-Bang 控制算法引起阻尼力突变,诱导了复合式抗冲击装置中吸能构件的压溃,使得整个复合式抗冲击装置在峰值到来之前主动让位、让压,避免立柱承受更大的峰值压力,也使得其支反力-位移曲线有所前移,所以在后续吸能过程中改进 Bang-Bang 控制算法的支反力大于 2 A 电流被动冲击时的支反力。

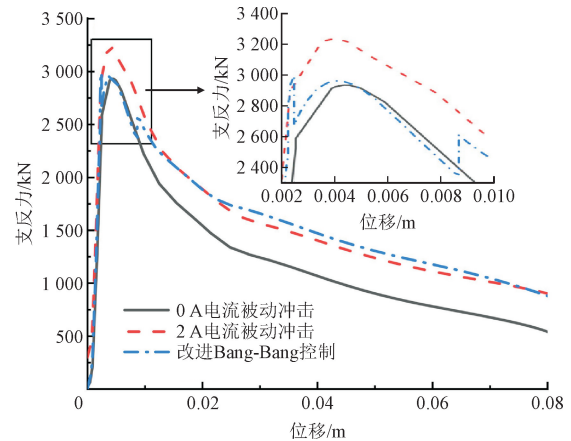


图 15 改进 Bang-Bang 控制复合式抗冲击装置值支反力对比

Fig. 15 Comparison of value support reaction force of improved Bang-Bang control composite impact device

2.2 基于模糊 PID 控制

模糊 PID 控制系统主要由参数可调整 PID 和模糊控制系统两部分组成,基本原理是模糊控制器根据输入与反馈的差值以及差值变化率经过模糊推理、解模糊等步骤得到 PID 的 3 个参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 以及 ΔK_d 来自适应修正 PID 的 3 个参数,增强系统控制效果并提高系统抗干扰能力。

模糊规则表的建立是设计模糊 PID 控制器的核心,首先对输入、输出进行模糊化处理。针对该控制系统,复合式抗冲击装置支反力与设定值的偏差 E 及其偏差变化率 E_c 的模糊论域为 $[-6, 6]$, 输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 以及 ΔK_d 的模糊论域为 $[-0.6, 0.6]$, 然后将 E 、 E_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 以及 ΔK_d 的模糊子集均分为 [负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大] 7 个等级 (即 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB), 按照上述 PID 参数整定规则可得输出参数模糊规则表, 如表 5~表 7 所示。

表 5 ΔK_p 控制规则表Tab. 5 Control rule table of ΔK_p

ΔK_p	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE
	NS	PM	PM	PM	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB
	PB	ZE	ZE	NM	NM	NB	NB

表 6 ΔK_i 控制规则表Tab. 6 Control rule table of ΔK_i

ΔK_i	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
	NS	NB	NM	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PM	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB

表 7 ΔK_d 控制规则表Tab. 7 Control rule table of ΔK_d

ΔK_d	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	PS	PS	NB	NB	NB	PS
	NM	PS	NM	NB	NB	NB	PS
	NS	ZE	NS	NM	NM	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

图 16~图 17 为基于模糊 PID 控制仿真后的电流以及磁流变缓冲器的阻尼力对比曲线。可以看出在仿真中后期 2 种控制算法控制效果基本一致,在仿真前期模糊 PID 控制时的阻尼力要略高于改进 Bang-Bang 控制,因此模糊 PID 控制时磁流变缓冲器的整体吸能效果优于改进 Bang-Bang 控制。

图 18 为基于模糊 PID 控制的复合式抗冲击装置支反力对比图。可以看出,模糊 PID 控制与改进 Bang-Bang 控制的支反力峰值相同,均小于 2 A 电流时的支反力峰值,且模糊 PID 控制的复合式抗冲击装置的整体吸能效果优于改进 Bang-Bang 控制。

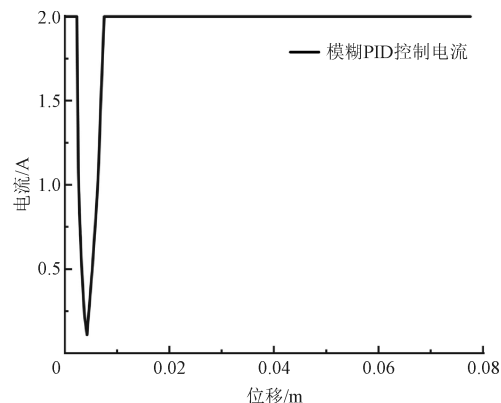


图 16 模糊 PID 控制电流变化曲线

Fig. 16 Fuzzy PID control current curve

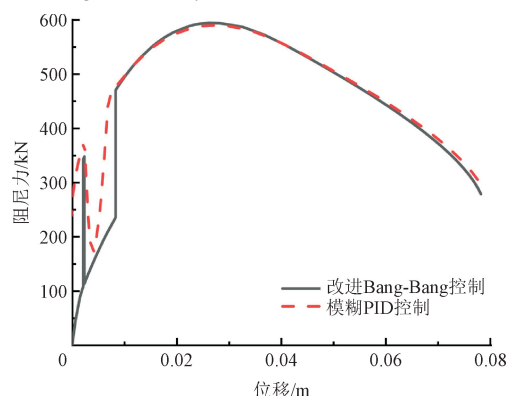


图 17 模糊 PID 控制磁流变缓冲器阻尼力对比

Fig. 17 Comparison of damping force of magnetorheological buffer controlled by fuzzy PID

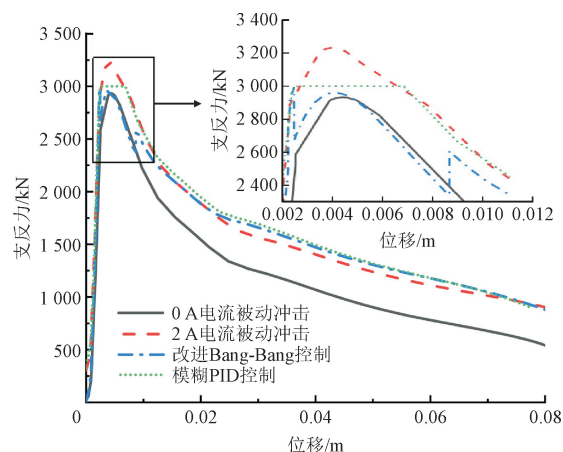


图 18 模糊 PID 控制复合式抗冲击装置支反力对比

Fig. 18 Comparison of composite impact device support reaction force controlled by fuzzy PID

2.3 基于改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制

采用改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制器设计,可以增强复合式抗冲击装置的吸能效果,其原理如图 19 所示。

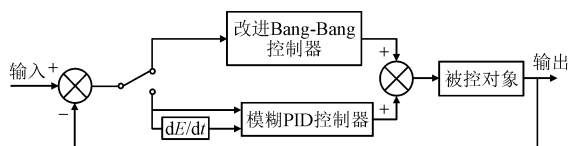


图 19 改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制器原理图

Fig. 19 Schematic diagram of improved Bang-Bang and fuzzy PID composite controller

图 20~图 21 为基于改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制仿真后的电流变化曲线以及磁流变缓冲器阻尼力对比曲线。

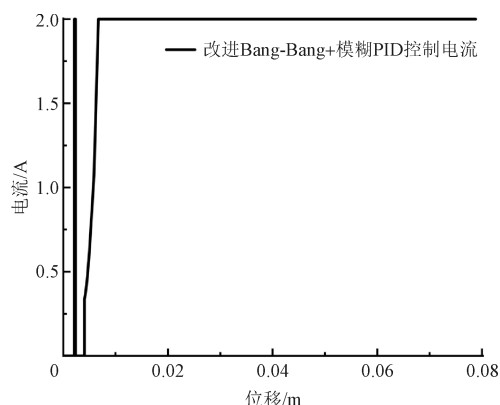


图 20 改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制电流变化曲线

Fig. 20 Curves of improved Bang-Bang and fuzzy PID composite control current change

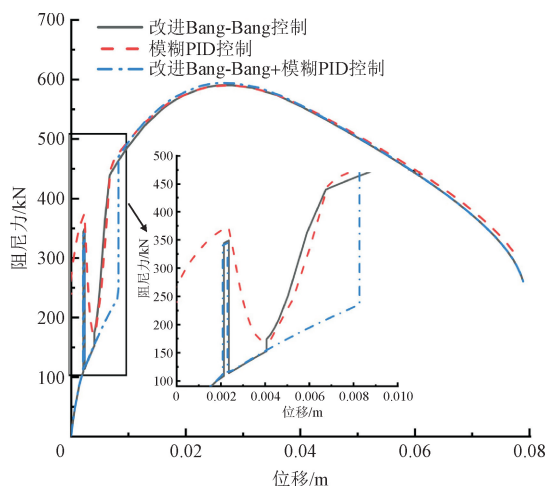


图 21 改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制磁流变缓冲器阻尼力对比

Fig. 21 Comparison of damping force between improved Bang-Bang and fuzzy PID compound control magnetorheological buffer

从图 21 中可以看出,在复合控制算法的切换点之前,其阻尼力与改进 Bang-Bang 控制的阻尼力保持一致,在切换点之后,其阻尼力与模糊 PID 控制算

法的阻尼力基本保持一致。由此可以看出,结合 2 种控制算法的优势,使复合式抗冲击装置既能实现主动让压又能保证其具有较大的吸能效果。

图 22 为基于改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制仿真后复合式抗冲击装置的支反力曲线对比。从图 22 中可以看出,复合控制后的支反力曲线拥有了改进 Bang-Bang 控制与模糊 PID 控制 2 种算法的特性,复合式抗冲击装置在保证目标支反力可控的前提下既可以诱导吸能构件压溃实现主动让位、让压,又能够具有较优的吸能效果。

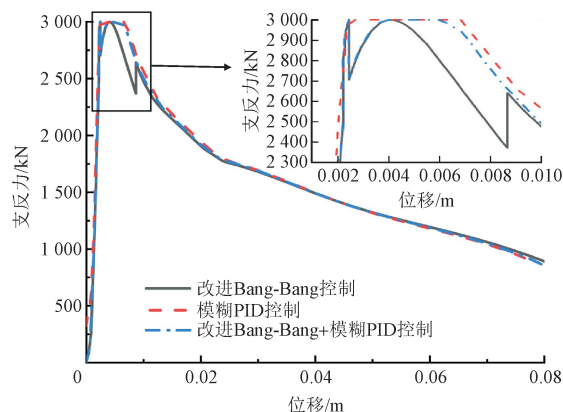


图 22 改进 Bang-Bang 与模糊 PID 复合控制复合式抗冲击装置支反力对比

Fig. 22 Comparison of the reaction force of the improved Bang-Bang and the fuzzy PID composite control composite impact device

3 试验研究

在前期研究基础上,通过对液压支架立柱以及复合式抗冲击装置进行简化并制作了试验样机,如图 23 所示。



图 23 试验样机

Fig. 23 Experimental prototype

试验系统原理图^[34]如图 24 所示,主要包括试

验台的机械结构、位移传感器(量程 100 mm,独立线性率 $\pm 0.1\%$,分辨率 0.01 mm)、压力传感器(量程 0~25 MPa,测量精度 0.5%F.S.)、数据采集系统、电磁控制器、电流控制器以及供电电源等。

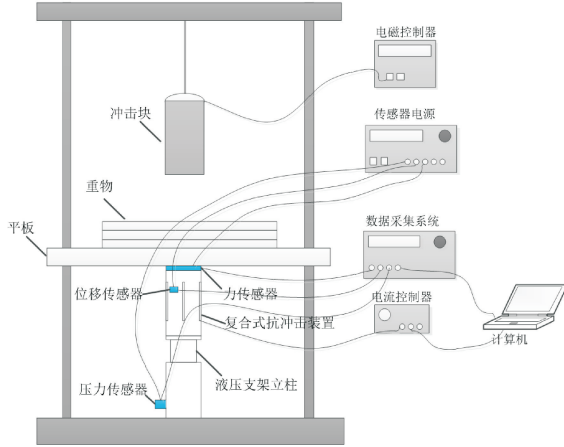


图 24 试验系统原理图^[34]

Fig. 24 Test system schematic diagram^[34]

3.1 不同安装位置下的试验验证

将磁流变缓冲器分别置于立柱上方以及立柱下方,采用电流控制器分别通 0、1、2 A 的电流,设定冲击块质量为 200 kg,冲击距离为 200 mm 进行冲击,数据采集系统采集冲击过程中的各项动态数据。图 25 和图 26 分别为磁流变缓冲器在不同安装位置下的仿真和试验位移曲线。从图中可以看出,试验位移曲线与仿真位移曲线所表现的规律特性趋于一致。在同一冲击工况,同一电流下磁流变缓冲器在立柱下方时的位移要大于在立柱上方时的位移,而且磁流变缓冲器位移和冲击作用时间会随着电流的增加而减小。

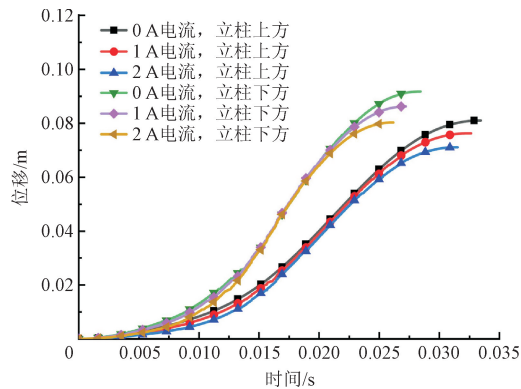


图 25 磁流变缓冲器在不同安装位置下的仿真位移曲线

Fig. 25 The simulation displacement curves of magnetorheological at different installation positions

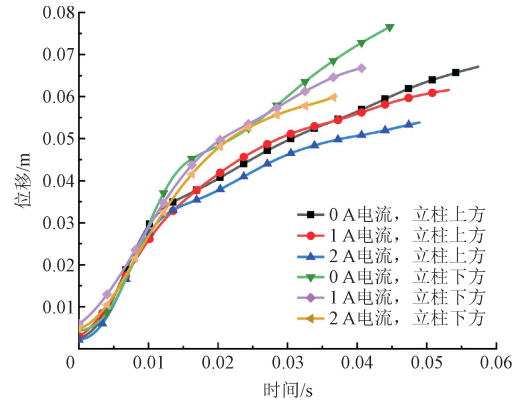
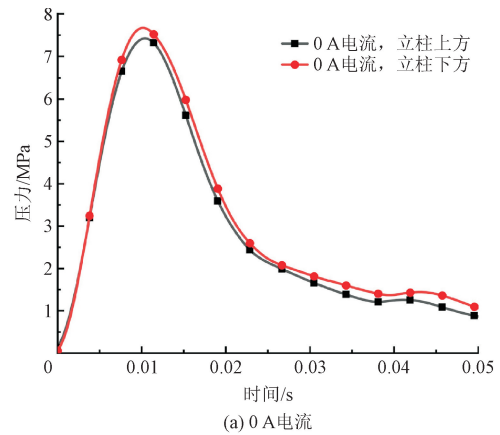


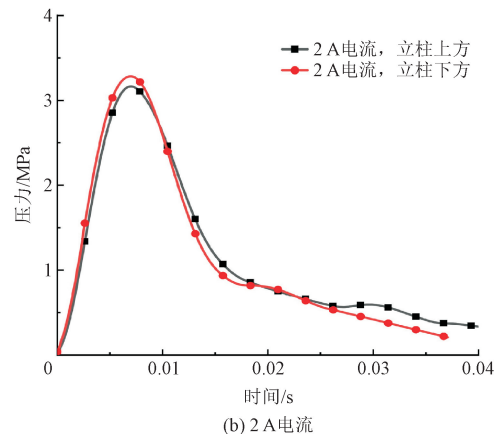
图 26 磁流变缓冲器在不同安装位置下的试验位移曲线

Fig. 26 Test displacement curves of magnetorheological buffer at different installation positions

图 27 为 0 A 电流和 2 A 电流时磁流变缓冲器在不同安装位置下立柱压力试验曲线。从图中可以看出,同一冲击工况,不同电流下磁流变缓冲器在立柱下方时的立柱压力均大于在立柱上方时的立柱压力,而且立柱压力会随着电流的增大而减小。



(a) 0 A 电流



(b) 2 A 电流

图 27 0 A 电流和 2 A 电流时磁流变缓冲器在不同安装位置下立柱压力试验曲线

Fig. 27 0 A current and 2 A current, the column pressure test curves of magnetorheological buffer at different installation positions are obtained

综合考虑,磁流变缓冲器在立柱下方时要多吸收由于立柱本身重量所产生的冲击能量,因其总吸能量是定值,所以在达到其总吸能量时所吸收的由冲击块产生的冲击能量会较小,通过磁流变缓冲器不同安装位置下的冲击试验也间接说明了复合式抗冲击装置安装在立柱上方能够吸收较多的冲击地压能量,验证了其安装在立柱上方较优的结论。

3.2 液压支架等效立柱抗冲击特性试验

设定冲击块质量为 200 kg,冲击距离为 800 mm,对不安装抗冲击装置的立柱以及安装复合式抗冲击装置的立柱进行冲击试验,数据采集系统采集冲击过程中的各项动态数据。图 28 为不同电流下复合式抗冲击装置以及防冲立柱冲击后的压溃形态,可以看出在 0 A 时复合式抗冲击装置抗冲击能力和吸能效果最好,随着电流的增加,复合式抗冲击装置抗冲击能力和吸能效果会降低。

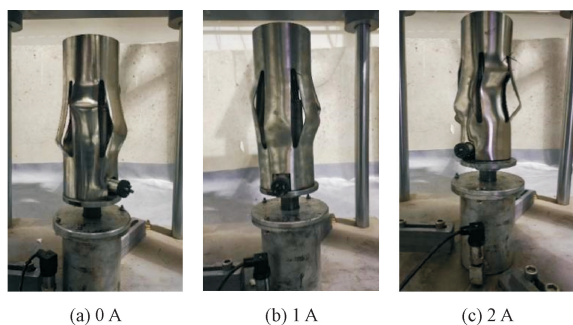


图 28 不同电流下复合式抗冲击装置立柱压溃图

Fig. 28 Column crushing diagram of composite impact devices under different currents

图 29 为立柱安装复合式抗冲击装置在峰值为 1.4 倍工作载荷冲击力作用下的仿真值与安装磁流变缓冲器在 800 mm 冲击距离下的试验值对比。研究表明,安装磁流变缓冲器可以有效减小并延后冲击时立柱的峰值力,改变电流在一定程度上可以改变冲击时立柱的峰值力,且等效立柱试验值的特性规律与仿真值基本趋于一致。图 29 的试验值与仿真值均表明了安装抗冲击装置会使得冲击作用时间延长并延后立柱所受冲击的峰值力,且减小电流可以延后立柱所受冲击的峰值力。基于以上对比分析,可以看出等效立柱所表现的抗冲击特性规律与仿真值基本趋于一致,由此间接验证了前文仿真的有效性。

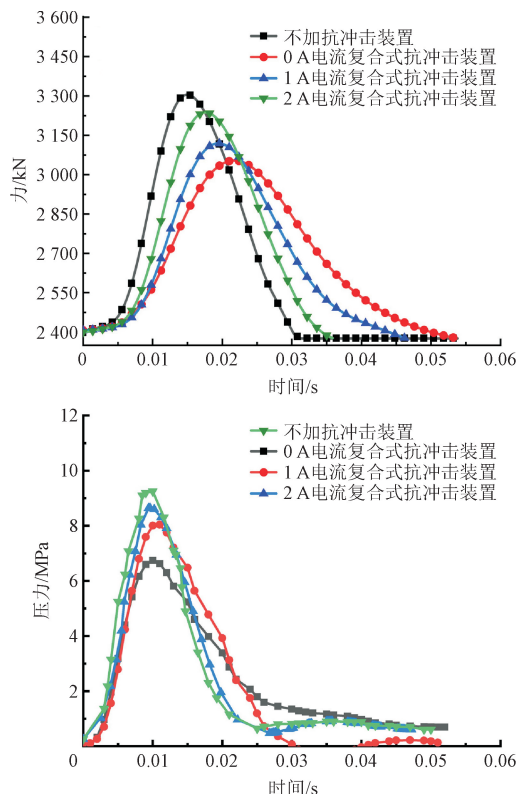


图 29 峰值为 1.4 倍工作载荷冲击仿真值与 800 mm 冲击距离试验值对比

Fig. 29 The impact simulation value of the peak value of 1.4 times the working load is compared with the 800 mm impact distance test value

4 结 论

为了提高液压支架的抗冲击特性与吸能效果,以复合式抗冲击装置的液压支架为对象,建立了液压支架的冲击动力学模型,首先对其抗冲击特性进行了仿真分析,其次结合力学模型提出了复合式抗冲击装置半主动控制策略,并进行了试验验证。

1) 基于复合式抗冲击装置的防冲液压支架,建立了冲击动力学模型,研究了复合式抗冲击装置的最优安装位置,并通过试验对比分析,复合式抗冲击装置安装在立柱上方能够吸收较多的冲击地压能量,并有效降低峰值力,验证了其安装在立柱上方效果更优。

2) 研究了新型防冲液压支架的抗冲击特性,并进行了试验验证,研究表明:复合式抗冲击装置可以有效降低冲击峰值力,复合式抗冲击装置通 0、1、2 A 电流时,1.1 倍工作载荷的冲击力下,峰值力分别降低了 2.23%、1.68%、1.11%;1.25 倍工作载荷下,峰值力分别降低了 4.41%、3.22%、2.01%;

1.4倍工作载荷下,峰值力分别降低了7.62%、5.81%、3.23%。

3)提出了一种面向防冲液压支架的复合式抗冲击装置在冲击载荷下的半主动控制策略,仿真结果表明,复合式抗冲击装置可以实现主动让位与主动让压,并能够提升抗冲击装置的吸能量,减小立柱所受冲击的峰值力。

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):1844-1851.
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] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [3] 王国法. 液压支架技术体系研究与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11):1903-1908.
WANG Guofa. Study and practices on technical system of hydraulic powered supports[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11):1903-1908(in Chinese).
- [4] 曹连民,孙云鲁,庞斌,等. 液压支架制造工艺技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4):83-88.
CAO Lianmin, SUN Yunlu, PANG Bin, et al. Study on manufacturing technology of hydraulic powered support[J]. Coal science and technology, 2016, 44(4):83-88(in Chinese).
- [5] 王国法,李前,赵志礼,等. 强矿压冲击工作面巷道冲击倾向性测试与超前支护系统研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2011, 30(4):1-9.
WANG Guofa, LI Qian, ZHAO Zhili, et al. The impact tendentiousness testing of working faces and roadways with strong rock burst and fore support system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(natural science), 2011, 30(4):1-9 (in Chinese).
- [6] 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.
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 (in Chinese).
- [7] YAO S G, HUO Y F, YAN K B, et al. Crashworthiness study on circular hybrid corrugated tubes under axial impacts[J]. Thin-walled structures, 2019, 145:106358.
- [8] DENG X L, LIU W Y. Experimental and numerical investigation of a novel sandwich sinusoidal lateral corrugated tubular structure under axial compression[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 151:274-287.
- [9] GHASEMI A, SHAKERI M, VANINI S A S. A multi-objective optimization of energy absorption properties of thin-walled circular tube with combined bar extrusion under quasi-static axial loading: experiments and numerical simulation[J]. International journal of mechanical sciences, 2020, 180:105691.
- [10] TIAN K, ZHANG Y, YANG F, et al. Enhancing energy absorption of circular tubes under oblique loads through introducing grooves of non-uniform depths[J]. International journal of mechanical sciences, 2020, 166:105239.
- [11] 董双勇,褚晓威. 矿用锚杆吸能防冲支护构件的设计与分析[J]. 煤矿机械, 2020, 41(11):62-64.
DONG Shuangyong, CHU Xiaowei. Design and analysis of energy absorption and rock burst prevention support component for mine bolt[J]. Coal mine machinery, 2020, 41(11):62-64 (in Chinese).
- [12] 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.
- [13] 许海亮,郭旭,宋义敏,等. 新型矿用圆弧形薄壁防冲吸能装置屈曲特性数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9):90-96.
XU Hailiang, GUO Xu, SONG Yimin, et al. Numerical analysis on buckling characteristics of a new circular arc thin-wall anti-impact and energy-absorbing device for mine[J]. Journal of safety science and technology, 2021, 17(9):90-96(in Chinese).
- [14] 王爱文,范德威,潘一山,等. 膨胀-摩擦式吸能防冲锚索及其力学特性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2):695-710.
WANG Aiwen, FAN Dewei, PAN Yishan, et al. Expansion-friction energy-absorption anti-impact cable and its mechanical characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2):695-710(in Chinese).
- [15] GUO C H, MAO J, XIE M. Analysis of energy absorption characteristics of corrugated top beams of anti-impact hydraulic supports[J]. Alexandria engineering journal, 2022, 61(5):3757-3772.
- [16] WANG C L, CHEN Y F, ZENG Q L, et al. Simulation and experiment of a kind of thin-walled tube crushing member used for anti-impact column[J]. Shock and vibration, 2021, 2021(1):6624934.
- [17] HAN C, KANG B H, CHOI S B, et al. Control of landing efficiency of an aircraft landing gear system with magnetorheological dampers[J]. Journal of aircraft, 2019, 56(5):1980-1986.
- [18] KIM B G, YOON D S, KIM G W, et al. Design of a novel magnetorheological damper adaptable to low and high stroke velocity of vehicle suspension system[J]. Applied sciences, 2020, 10(16):5586.
- [19] AZIZ M A, AMINOSADATI S M. State-of-the-art developments of bypass magnetorheological (MR) dampers;a review[J]. Korea-Australia rheology journal, 2021, 33(3):225-249.
- [20] LÜ H Z, ZHANG S S, SUN Q, et al. The dynamic models, control strategies and applications for magnetorheological damping systems;a systematic review[J]. Journal of vibration engineering & technologies, 2021, 9(1):131-147.
- [21] LUONG Q V, JANG D S, HWANG J H. Robust adaptive control

- for an aircraft landing gear equipped with a magnetorheological damper[J]. Applied sciences, 2020, 10(4):1459.
- [22] JIANG M, RUI X T, ZHU W, et al. Design and control of helicopter main reducer vibration isolation platform with magnetorheological dampers[J]. International journal of mechanics and materials in design, 2021, 17(2):345-366.
- [23] BHAIYA V, BHARTI S D, SHRIMALI M K, et al. Hybrid seismic control of buildings using tuned mass and magnetorheological dampers[J]. Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings, 2020, 173(7):471-487.
- [24] BAGHERKHANI A, BAGHLANI A. Reliability assessment and seismic control of irregular structures by magnetorheological fluid dampers[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2021, 32(16):1813-1830.
- [25] BAGHERKHANI A, BAGHLANI A. Reliability assessment of MR fluid dampers in passive and semi-active seismic control of structures[J]. Probabilistic engineering mechanics, 2021, 63:103114.
- [26] 李赵春, 顾权, 周冰倩, 等. 冲击缓冲用磁流变阻尼器的响应特性模型与实验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(5):163-168.
- LI Zhaochun, GU Quan, ZHOU Bingqian, et al. Modeling and tests for response features of MR damper as a shock isolation device[J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(5):163-168(in Chinese).
- [27] 潘炜, 闫政涛, 朱石坚. 基于模糊PID控制的磁流变半主动抗冲击系统最优设计研究[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(3):28-31.
- PAN Wei, YAN Zhengtao, ZHU Shijian. Research on optimal design of MR semi-active resistance system based on fuzzy PID control[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(3):28-31(in Chinese).
- [28] 杨辉静, 陈巍, 陈冬. 冲击载荷下磁流变阻尼器内部磁场动态数值计算与瞬态试验测试[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4):1756-1762.
- YANG Huijing, CHEN Wei, CHEN Dong. Dynamic numerical simulation analysis and transient experimental test of internal magnetic field for magneto-rheological damper during the impact[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(4):1756-1762(in Chinese).
- [29] 白先旭, 杨森. 磁流变半主动落锤冲击缓冲系统的“软着陆”控制试验与分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1):121-127.
- BAI Xianxu, YANG Sen. Experimental test and analysis of "soft-landing" control for drop-induced shock systems using magneto-rheological energy absorber[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(1):121-127(in Chinese).
- [30] 张超, 韩晓明, 李强, 等. 自动榴弹发射器磁流变缓冲器设计及特性分析[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(2):25-29.
- ZHANG Chao, HAN Xiaoming, LI Qiang, et al. Design and characteristic analysis of magnetorheological buffer for automatic grenade launcher[J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2021, 41(2):25-29(in Chinese).
- [31] 王成龙, 苗根远, 刘延玺, 等. 基于磁流变缓冲的液压支架抗冲击技术研究[J]. 液压与气动, 2021, 45(6):33-40.
- WANG Chenglong, MIAO Genyuan, LIU Yanxi, et al. Anti shock support based on MR damper[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2021, 45(6):33-40(in Chinese).
- [32] 山东科技大学. 一种复合式抗冲击装置及其应用: CN112923002A;CN202110201245.0[P]. 2021-06-08.
- [33] 王成龙, 陈一方, 王成乐. 冲击地压薄壁圆管吸能构件仿真与试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(5):142-147.
- WANG Chenglong, CHEN Yifang, WANG Chengle. Simulation and experiment on energy-absorbing component of thin-walled round pipe under rock burst[J]. Coal engineering, 2021, 53(5):142-147(in Chinese).
- [34] 山东科技大学. 一种用于冲击地压工况下液压支架性能的综合试验系统及应用:CN202010080318.0[P]. 2020-06-05.

(编辑 李坤璐)