

文章编号: 1671-251X(2024)08-0020-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024060046

综采支架液压系统动态特性研究及改进设计

郭新伟

(北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399)

摘要: 综采工作面液压支架工作中常存在支架初撑力不足、移架速度慢等问题, 目前大多基于支架液压系统的稳态运行规律, 采用增大泵站流量、降低压力损失等方案来解决, 对液压系统动态特性的研究较少。建立了综采支架液压系统动力方程, 理论分析了支架初撑力和移架速度相关的液压系统动态特性和乳化液管路系统的液压冲击特性, 得出立柱或千斤顶的近似空载运行和长距离管路液压冲击是造成支架液压系统压力大幅下降波动的主要原因。揭示了支架液压系统液压冲击的发生机理为电液换向阀突然启闭和立柱触顶加压。通过现场实测数据和 AMESim 仿真验证了理论分析的正确性。提出了综采支架液压系统改进方案, 在支架上设置多个蓄能器, 新增液控单向阀和电液换向阀控制液压系统蓄能器在不同移架阶段的充放液方式, 利用蓄能器的瞬时大流量特性和长距离管路液压冲击压力峰值产生的超压作用来提升支架初撑力。仿真结果表明, 改进系统能够有效提高液压支架的初撑力和移架速度。

关键词: 综采工作面; 液压支架; 液压系统; 支架初撑力; 移架时间; 液压冲击; 动态特性

中图分类号: TD355.4/67

文献标志码: A

Research on dynamic features of hydraulic system for fully mechanized mining support and its improvement design

GUO Xinwei

(Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: In the hydraulic support work of fully mechanized working face, there are often problems such as insufficient initial support force and slow moving speed of the support. Currently, most solutions are based on the steady-state operation law of the hydraulic system of the support, such as increasing the flow rate of the pump station and reducing pressure loss. There is relatively little research on the dynamic features of the hydraulic system. The dynamic equation of the hydraulic system for the fully mechanized mining support is established. The dynamic features of the hydraulic system related to the initial support force and moving speed of the support, as well as the hydraulic impact features of the emulsion pipeline system, are theoretically analyzed. It is found that the approximate no-load operation of the column or jack and the hydraulic impact of long-distance pipelines are the main reasons for the significant pressure drop and fluctuation in the hydraulic system of the support. The mechanism of hydraulic impact in the hydraulic system of the bracket is revealed to be the sudden opening and closing of the electro-hydraulic directional valve and the pressure of the column touching the top. The correctness of the theoretical analysis is verified through on-site measured data and AMESim simulation. An improvement plan for the hydraulic system of the fully mechanized mining support is proposed. It includes the installation of multiple accumulators on the support, the addition of hydraulic control one-way valves and electro-hydraulic directional valves to control the charging and discharging methods of the hydraulic system accumulators at different stages of frame movement. The method uses the instantaneous high flow features of the accumulators

收稿日期: 2024-06-13; 修回日期: 2024-08-13; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC2907504); 中国煤炭科工集团科技创新基金重点资助项目(2024-TD-MS012)。

作者简介: 郭新伟(1981—), 男, 安徽界首人, 助理研究员, 硕士, 现主要从事煤矿智能开采工作, E-mail: guoxw@tdmarco.com。

引用格式: 郭新伟. 综采支架液压系统动态特性研究及改进设计[J]. 工矿自动化, 2024, 50(8): 20-29.

GUO Xinwei. Research on dynamic features of hydraulic system for fully mechanized mining support and its improvement design[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(8): 20-29.



扫码移动阅读

and the overpressure generated by the peak hydraulic impact pressure of long-distance pipelines to enhance the initial support force of the support. The simulation results show that the improved system can effectively increase the initial support force and frame moving speed of the hydraulic support.

Key words: fully mechanized working face; hydraulic support; hydraulic system; initial support force of the bracket; relocation time; hydraulic impact; dynamic features

0 引言

在现代煤矿综采工艺中,液压支架是保障作业安全与机械设备稳定运行的关键装备。液压支架与综采工作面煤层及围岩共同构成复杂的力学系统,其通过调节初撑力、工作阻力、移架时间等关键参数,实现对围岩运动的适应与调控,尤其在减缓顶板下沉、维持顶板完整性方面发挥着重要作用^[1]。研究表明,液压支架通过对静载荷主动承压、动载荷被动让压来适应围岩运动,提高液压支架与围岩的系统刚度,可改变基本顶的断裂位置^[2-4]。虽然液压支架的支护强度不能改变基本顶断裂后的最终下沉量,但通过调节顶板下沉速率,可有效减小顶板快速下沉对支架的冲击,改善综采工作面作业环境^[5-6]。

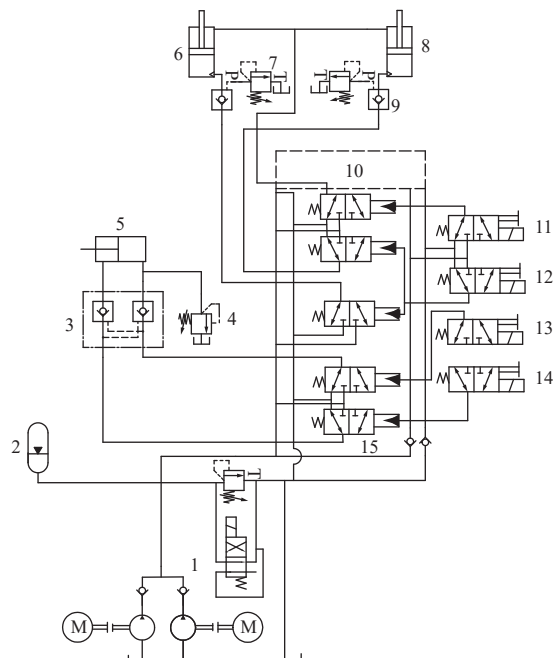
液压支架的初撑力、移架时间是调控围岩运动的关键因素^[7-9]。但实际工作中,常存在支架初撑力不足和移架速度慢等问题。目前针对该问题的研究大多集中在增大泵站流量和降低压力损失上^[10-13],如采用多台大流量乳化液泵、在泵站配置大容量蓄能器等方法增大泵站流量,通过增大供回液管路、电液换向阀和液控单向阀的口径,以及采用环形或梯形供液方式来降低压力损失^[14-15],也有采用增压阀^[16]、增压缸^[17]来提升初撑力的尝试。上述方法主要基于支架液压系统的稳态运行规律,目前对液压系统动态特性的研究较少。对此,本文分析了综采工作面支架液压系统的动态特性和乳化液管路系统的液压冲击特性,得出了支架液压系统压力大幅下降波动的主要原因,揭示了液压冲击现象的发生机理,提出一种液压系统改进方案:采用蓄能器产生稳压作用,利用液压冲击的压力峰值产生超压作用,从而提高初撑力,缩短移架时间。通过仿真验证了改进方案能够有效稳定液压支架的初撑力,加快系统动态响应。

1 综采支架液压系统动态特性分析

1.1 支架液压系统的动态压力

综采工作面支护系统通常包括 100 多台液压支架。单台支架液压系统结构如图 1 所示^[18]。

液压支架大部分时间处于恒阻工作状态,属于



1—乳化液泵站; 2—蓄能器; 3—双向锁; 4—推移千斤顶安全阀;
5—推移千斤顶; 6—左立柱; 7—立柱安全阀; 8—右立柱; 9—液控单向阀;
10—除推移千斤顶之外的其他千斤顶及其控制阀; 11—降柱控制阀;
12—升柱控制阀; 13—推溜控制阀; 14—拉架控制阀; 15—电液换向阀。

图 1 单台支架液压系统结构

Fig. 1 Hydraulic system structure of single support

静压支撑。支架降柱、移架、升柱为快速运动状态,三者时间和为移架时间。移架过程中液压系统压力随时间动态变化,同时在液控单向阀、电液换向阀和进回液管路上产生压降,形成动态压力分布,引起整个综采工作面液压管路供液压力波动,进而影响液压支架初撑力和移架时间。

初撑力是液压支架移架完成后对顶板的初始支撑力,等于液压支架在升柱过程中立柱下腔的最大压力与有效面积的乘积。初撑力可通过设定泵站压力来调控,也可以通过安装增压阀或增压缸来调控。但不论哪种方式,支架液压系统的供液压力须达到一定值才有效,因此支架液压系统的供液压力波动必然影响初撑力,有必要研究支架升柱过程中立柱下腔的压力变化规律,探讨支架液压系统供液压力波动幅度及主要原因。

支架升柱过程可分为立柱上升和触顶加压 2 个阶段。立柱上升阶段的负载包括支架顶梁等运动部分的重力、惯性力和阻尼力,动力平衡方程、立柱下

腔和上腔的流量方程如下。

$$\frac{\pi D^2}{4} p_1 - \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} p_2 = M \frac{d^2 y}{dt^2} + B \frac{dy}{dt} + Mg \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (2)$$

$$Q_2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \frac{dy}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (3)$$

式中: D 为立柱下腔直径, m ; p_1, p_2 分别为立柱下腔和上腔压力, MPa ; d 为立柱上腔杆径, m ; M 为支架顶梁和立柱运动部分质量, kg ; y 为立柱活塞位移, m ; t 为时间, s ; B 为立柱运动阻尼, N/m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Q_1, Q_2 分别为立柱下腔和上腔流量, L/min ; V_1, V_2 分别为立柱下腔和上腔容积, L ; β_e 为综合体积弹性模量, N/m^2 。

进液压力损失(即泵站出口压力到立柱下腔压力)包括进液管路沿程压力损失、局部压力损失, 以及电液换向阀、液控单向阀的阀压降, 即

$$p_p - p_1 = \left(\sum \frac{8\lambda\rho}{\pi^2 d_1^5} L_1 + \sum \frac{\xi\rho}{\pi^2 d_1^4} \right) Q_1^2 + k_{f1} Q_1^2 + k_{d1} Q_1^2 = k_1 Q_1^2 \quad (4)$$

式中: p_p 为泵站出口压力, MPa ; λ 为管路沿程阻力系数; ρ 为乳化液密度, kg/m^3 ; d_1 为进液管通径, m ; L_1 为进液管长度, m ; ξ 为管接头等元件的局部阻力系数; k_{f1} 为电液换向阀的进液阻力系数; k_{d1} 为液控单向阀的进液阻力系数; k_1 为进液通道的综合阻力系数。

回液压力损失(即立柱上腔压力)包括回液管路沿程压力损失、局部压力损失, 以及电液换向阀、液控单向阀的阀压降, 即

$$p_2 = \left(\sum \frac{8\lambda\rho}{\pi^2 d_2^5} L_2 + \sum \frac{\xi\rho}{\pi^2 d_2^4} \right) Q_2^2 + k_{f2} Q_2^2 + k_{d2} Q_2^2 = k_2 Q_2^2 \quad (5)$$

式中: d_2 为回液管通径, m ; L_2 为回液管长度, m ; k_{f2} 为电液换向阀的回液阻力系数; k_{d2} 为液控单向阀的回液阻力系数; k_2 为回液通道的综合阻力系数。

供液流量(即立柱下腔流量 Q_1)由乳化液泵输出流量 Q_p 与泵站蓄能器输出流量 Q_x 共同提供, 即

$$Q_1 = Q_p + Q_x \quad (6)$$

泵站蓄能器的绝热过程气态方程为

$$P_0 V_0^{1.4} = P_p V_p^{1.4} \quad (7)$$

式中: P_0, P_p 分别为蓄能器的充气压力和输出压力, MPa ; V_0, V_p 分别为蓄能器的初始容积和 P_p 对应的容积, L 。

根据式(7)可推导出绝热状态下蓄能器的输出流量:

$$Q_x = \frac{dV_p}{dt} = \frac{V_0 P_0^{0.7}}{P_p^{1.7}} \frac{dP_p}{dt} \quad (8)$$

式(1)—式(8)构成支架立柱上升阶段的封闭方程组。由于压力损失和摩擦阻尼消耗了振荡能量, 所以系统方程是收敛的, 存在所有变量的唯一解。由此得出以下推论。

1) 立柱上升阶段下腔压力 p_1 很小, 近似空载运行。由于立柱下腔有效面积远大于上腔有效面积, 顶梁和立柱的运动部分质量相对较小, 所以立柱上升阶段近似空载运行, 只需要很小的压力即可驱动负载。

立柱上升阶段, 在进回液管路、电液换向阀和液控单向阀上形成压力降, 压力降与流量的平方呈正比。压力在进液通道上经泵站、进液管路、电液换向阀、液控单向阀和立柱下腔逐级下降, 最小压力为立柱下腔压力 p_1 ; 压力在回液通道上经立柱上腔、液控单向阀、电液换向阀、回液管路逐级下降为 0。

2) 立柱上升阶段立柱下腔流量 Q_1 主要取决于进液通道的综合阻力系数(包括进液管路压力损失系数、电液换向阀和液控单向阀的进液阻力系数), 与泵站的额定流量弱相关。

由于泵站蓄能器与乳化液泵联合供液, 蓄能器频响很高, 瞬时流量可以达到很大值, 即使乳化液泵的额定流量较小, 联合供液的瞬时流量仍能达到较大值, 所以供液瞬时流量只受限于进液管路阻力损失、电液换向阀和液控单向阀的压力降。因升柱时间较短, 只需增加蓄能器容积, 以提供升柱所需的流量, 即可减小泵流量, 降低设备成本。升柱阶段立柱上升速度取决于供液流量, 采用蓄能器能够有效加快移架速度, 提高生产效率。

3) 立柱上升或除推移千斤顶之外的其他千斤顶近似空载运行是综采工作面液压支架供液压力大幅下降波动的主要原因。

立柱上升或其他千斤顶近似空载运行时, 驱动压力近似为 0, 急剧拉低了综采工作面支架液压系统的供液压力, 支架进液通道形成逐级下降的压力分布。蓄能器安装在泵站附近, 因此泵站出口压力波动较小, 泵站压力随蓄能器输出流量而不断下降, 下降幅度取决于蓄能器容量。综采工作面支架供液压力因长距离供液管路的压力损失而产生更大的压力波动。其他空载运行的千斤顶也会造成压力急剧波动, 如护帮千斤顶伸出或缩回将导致整个综采工作面支架系统的压力急剧下降。

立柱上升接触顶板后压实浮矸即进入触顶加压阶段。此时立柱活塞的速度和加速度均为 0, 回液管

路流量和阻力损失为0。力平衡方程、立柱下腔和上腔流量方程、进回液压力损失方程分别为

$$\frac{\pi D^2}{4} p_1 = Mg + F_0 \quad (9)$$

$$Q_1 = \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (10)$$

$$Q_2 = 0 \quad (11)$$

$$p_p - p_1 = \left(\sum \frac{8\lambda\rho}{\pi^2 d_i^5} L_i + \sum \frac{\xi\rho}{\pi^2 d_i^4} \right) Q_1^2 + k_{f1} Q_1^2 + k_{d1} Q_1^2 \quad (12)$$

$$p_2 = 0 \quad (13)$$

式中 F_0 为顶板对支架的约束反力,其最大值为支架初撑力,N。

式(9)—式(13)构成了支架立柱触顶加压阶段的封闭方程组。可看出液压系统只在进液通道上具有动态参数变化,而在回液通道上因没有流量,所以立柱上腔压力为0。

触顶加压阶段的起始段延续了立柱上升阶段的流体惯性,即方程组的初始条件为立柱下腔压力 p_1 近似为0,瞬时流量 Q_1 仍具有很大值,所以压力的时间变化率 $\frac{dp_1}{dt}$ 很大, p_1 急剧上升,使得 $p_p - p_1$ 迅速减小,瞬时流量 Q_1 急剧下降。当 $p_p - p_1 = 0$ 时,瞬时流量急剧降为0。此时立柱下腔乳化液在长距离供液管路流体惯性作用下将产生液压冲击。

结合立柱上升阶段的推论可知:

1) 在触顶加压阶段,立柱下腔压力虽然急剧上升至泵站压力,但泵站压力在立柱上升阶段的空载运行中大幅下降,且蓄能器无法及时恢复充液,因此立柱下腔压力无法达到支架初撑力要求。

2) 触顶加压阶段立柱停止动作,不需要流量供给,下腔瞬时流量降为0。此时泵站为蓄能器充液,以恢复供液压力。充液过程中关闭电液换向阀,结束触顶加压阶段,初撑力必然达不到要求;如果等待充液过程结束再关闭电液换向阀,结束触顶加压阶段,则移架时间延长,生产效率降低。

1.2 管路液压冲击对初撑力的影响

乳化液泵站距综采工作面任意一台支架的进回液管路均在200 m以上,应考虑管路液压冲击的影响。管路液压冲击是指当阀门突然开启或关闭时,管路内液体流速急剧改变,流体的惯性使管路内压力急剧升高或降低^[19-20]。支架升柱过程中立柱触顶进入加压状态时,立柱速度突然降为0,相当于液流突然降为0,必然产生液压冲击现象。

根据液压流体力学的管路液压冲击理论和1.1节分析结果,在立柱触顶加压阶段,立柱活塞速

度首先降为0,使立柱下腔压力 p_1 急剧上升,瞬时流量 Q_1 急剧降为0,此时流速突然降为0,紧邻活塞的一薄层乳化液先停止流动,之后这层乳化液被压缩,压力增大 Δp ,然后第2层乳化液被压缩,压力增大。依此类推,形成一个高压区与低压区分界的增压波面,以速度 c 沿管路向泵站传播,到达泵站时降为泵站输出压力,增高的压力 Δp 突然消失,形成减压波面并以速度 c 沿管路向立柱下腔传播。之后压力先降低再升高,形成压力冲击。此时电液换向阀处于全开状态,相当于全开通道,不影响液压冲击;而立柱上的液控单向阀仍是正向开启、反向截止状态,不影响正向压力升高,但截断了反向压力降低过程。因此,完整的液压冲击过程发生在立柱下腔液控单向阀至泵站的长距离供液管路内。理想的冲击压力波形为振幅 Δp 、周期 $4L/c$ (L 为管路长度)的方波,如图2所示^[21],其中 p_0 为初始压力。

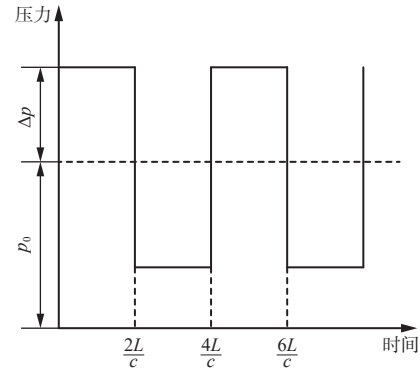


图2 理想情况下管路液压冲击波形

Fig. 2 Hydraulic impact waveform of pipeline under ideal condition

实际上,液压阻力及管壁变形需要消耗一定能量,因此实际管路液压冲击波形呈逐渐衰减的复杂曲线,如图3所示。

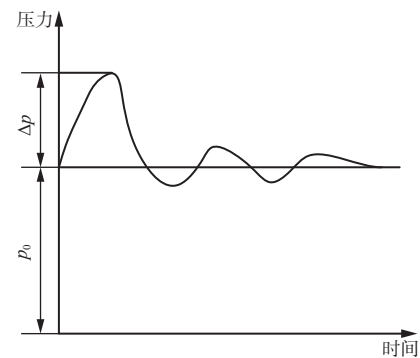


图3 实际情况下管路液压冲击波形

Fig. 3 Hydraulic impact waveform of pipeline under actual condition

考虑管壁弹性的冲击波传播速度为

$$c = \sqrt{\frac{E_0}{\rho \left(1 + \frac{E_0 d_0}{E \delta} \right)}} = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{E_0 d_0}{E \delta}}} \quad (14)$$

式中: E_0 为乳化液体积弹性模量, N/m^2 ; d_0 为管路直径, m ; E 为管路材料的弹性模量, N/m^2 ; δ 为管壁厚度, m ; c_0 为声波在乳化液中的传播速度, m/s 。

液压支架的进回液管路属于长距离管路, 所以液压冲击波具有相对较长的持续时间, 大于立柱上液控单向阀的启闭时间。而液控单向阀的单向流动特性截断了反向的压力降低过程, 保留了正向升高冲击压力。因此可利用液压压力冲击现象提升立柱下腔的初撑压力。

2 综采支架液压系统压力波动实测数据分析

为验证综采支架液压系统压力波动理论分析结果, 于 2024 年 4 月 8 日 9:00—21:00 在枣庄矿业(集团)有限责任公司滨湖矿 16108 工作面现场采集大量实测数据进行分析。综采工作面 6 号、46 号、86 号液压支架附近管路压力部分实测数据如图 4 所示。可看出综采支架液压系统管路压力具有压力波动特性, 大多集中在高压区域, 每隔几十秒有 1 次压力急剧下降, 降幅较大, 直达低压区域。液压系统压力急剧下降时 3 个支架附近管路压力基本上都有不同程度的下降。

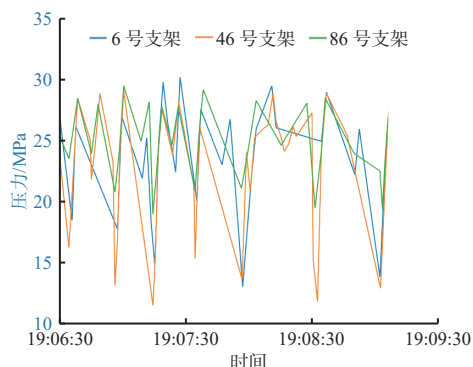


图 4 支架附近管路压力实测曲线

Fig. 4 Measured curves of pipeline pressure near supports

6 号、46 号、86 号支架附近管路压力部分实测数据峰谷值及对应时间见表 1。可看出压力急剧下降时, 3 个支架附近管路压力具有同升同降的特点, 但下降幅度和起止时间并不相同。去除实测误差的影响, 造成该现象的主要原因是测点到引起压力波动的千斤顶的距离导致管路压力损失和时间滞后。

支架附近管路压力即支架电液换向阀的输入压力, 实测数据证实了综采支架液压系统存在剧烈的压力波动, 与前文理论分析结果一致。

3 综采支架液压系统仿真分析

3.1 仿真建模

基于理论分析结果, 在 AMESim 软件中建立综

表 1 支架附近管路压力实测数据峰谷值及对应时间

Table 1 The peak and valley value of measured data of pipeline pressure near supports and corresponding time

6号支架		46号支架		86号支架	
时间	压力/MPa	时间	压力/MPa	时间	压力/MPa
19:06:27	30.1	19:06:27	28.0	19:06:23	28.2
19:06:35	18.6	19:06:35	16.4	19:06:35	23.6
19:06:37	26.2	19:06:38	28.5	19:06:38	28.5
19:06:57	17.9	19:06:44	21.9	19:06:44	24.0
19:07:00	27.0	19:06:48	28.9	19:06:48	28.0
19:07:09	22.0	19:06:55	13.3	19:06:55	20.9
19:07:11	25.3	19:07:00	29.1	19:07:00	29.5
19:07:15	14.9	19:07:14	11.7	19:07:08	25.0
19:07:19	29.8	19:07:18	27.6	19:07:11	28.2
19:07:25	22.5	19:07:25	23.9	19:07:15	19.1
19:07:27	30.2	19:07:27	28.2	19:07:19	27.8
19:07:35	20.1	19:07:34	15.5	19:07:25	—
19:07:37	27.6	19:07:38	26.2	19:07:27	27.8
19:07:46	23.1	19:07:57	13.8	19:07:35	24.7
19:07:51	26.8	19:08:11	28.9	19:07:37	27.8
19:07:57	13.2	19:08:17	24.2	19:07:35	21.0
19:08:11	29.5	19:08:30	27.3	19:07:38	29.2
19:08:34	25.0	19:08:33	12.0	19:07:56	21.2
19:08:37	29.0	19:08:37	28.9	19:08:03	28.3
19:08:51	22.3	19:09:03	13.1	19:08:15	24.7

采支架液压系统仿真模型(图 5), 分析液压支架降柱、拉架和升柱过程的动态特性。仿真参数根据现场实际情况设置, 具体见表 2。泵站到支架的长距离进回液管路采用液压冲击管路模型。

3.2 液压支架压力仿真结果分析

对液压支架降柱、拉架和升柱全过程进行仿真分析。输入信号为电液换向阀的开关信号。

立柱位移和速度曲线如图 6 所示。降柱过程从 1 s 开始, 给定持续时间为 3 s, 立柱上端由 2.8 m 下移至 2.6 m, 位移为 0.2 m, 速度为 0.08 m/s, 降柱结束时因电液换向阀切换引起立柱速度强烈振荡。拉架过程从 4 s 开始, 给定持续时间为 2 s(根据拉架实际距离调整), 立柱稳定在 2.61 m 位置, 起始段有振荡。升柱过程从 6 s 开始, 给定持续时间为 5 s, 立柱上升 0.2 m, 起始速度强烈振荡, 然后稳定在 0.15 m/s 左右。7.3 s 时立柱触顶加压, 8 s 时达到压力峰值, 表明升柱过程结束。电液换向阀延时 2 s 关闭。

移架过程中立柱下腔、液控单向阀进口、电液换向阀 P 口和泵站供液口的动态压力曲线如图 7 所示。

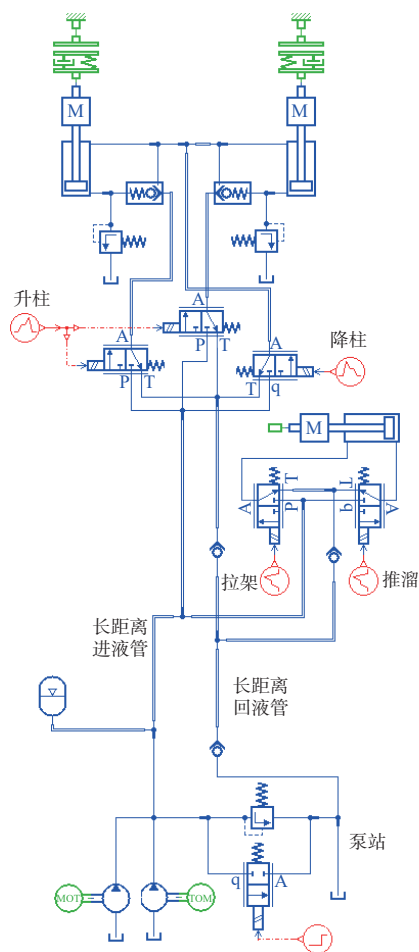


图5 支架液压系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of hydraulic system of support

表2 支架液压系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of hydraulic system of support	
部件名称	仿真参数
双立柱	活塞 ϕ 300 mm, 活塞杆 ϕ 280 mm, 行程3 m
推移千斤顶	活塞 ϕ 200 mm, 活塞杆 ϕ 140 mm, 行程1 m
液控单向阀	压力31.5 MPa, 压降6 MPa, 最大阀口开度时流量600 L/min
电液换向阀	压力31.5 MPa, 压降6.6 MPa, 最大阀口开度时流量500 L/min
乳化液泵站	压力31.5 MPa, 流量 2×400 L/min
泵站蓄能器	容积100 L, 充气压力12 MPa
主进液管	通径DN50
主回液管	通径DN63
高压进液管	通径DN25
其他回液管	通径DN32

在移架过程中, 泵站供液压力曲线因蓄能器的作用而稳定且平滑, 降柱和拉架过程中基本上稳定在泵站设定压力 31.5 MPa 处, 在升柱过程中泵站压力下降到 22 MPa, 原因是立柱近似空载运行而蓄能器输出大流量导致压力下降, 表明立柱空载运行拉低了整体系统压力。

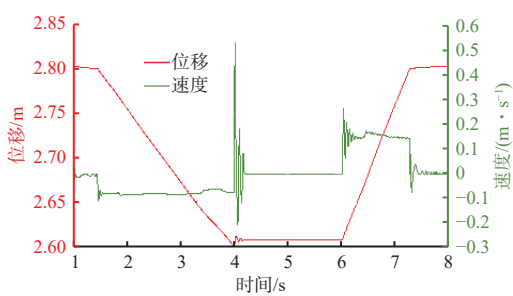


图6 立柱位移和速度曲线

Fig. 6 Column displacement and velocity curves

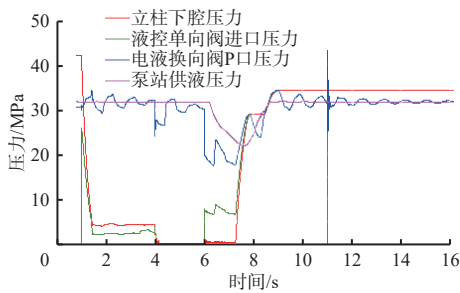


图7 支架动态压力曲线

Fig. 7 Dynamic pressure curves of support

电液换向阀 P 口压力因长距离进液管路中流体液压冲击而呈现压力急剧波动, 尤其是在换向阀突然开启瞬间, 压力急剧下降, 如拉架开始瞬间压力下降至 24 MPa, 升柱开始瞬间压力下降至 19.8 MPa, 然后呈斜方波急剧波动, 与液压冲击理论分析的压力波形一致, 随后波形衰减变形, 呈现阻力损失消耗能量的实际波形特征。这表明电液换向阀开启引起液压冲击现象, 千斤顶和立柱启动运行会急剧拉低综采支架液压系统压力, 空载运行比带载运行对系统压力的影响更大。

立柱下腔压力在整个移架过程中较低, 降柱开始 0.5 s 内瞬时压力从 42 MPa 急剧下降至 4.3 MPa, 然后立柱稳定下行。拉架过程中立柱下腔压力为 0, 推移千斤顶动作。在升柱过程的立柱上升阶段, 立柱下腔压力接近 0, 表明立柱上升近似空载运行; 在触顶加压阶段, 立柱下腔压力快速升高, 在 0.5 s 内瞬时压力达到泵站压力, 之后超过泵站压力产生振荡。

另外, 在降柱、拉架、升柱过程中压力波动始终存在, 支架运动结束后压力波动呈现衰减振荡特征并趋于稳态。这表明降柱、拉架、升柱各个过程持续时间都很短, 电液换向阀迅速切换, 使得液压冲击现象始终存在, 系统压力大幅波动, 在液压支架完成移架动作进入恒阻工作状态后, 液压冲击现象才消失。因此, 液压冲击作用是移架过程的主要影响因素之一, 与立柱或千斤顶的近似空载运行共同导致系统压力大幅波动。

升柱过程的压力曲线如图 8 所示。可看出在立柱上升阶段,立柱下腔压力呈现小幅衰减振荡,稳定在 0.5 MPa,与最大压力相比很小,表明立柱上升近似空载运行。泵站供液压力从 31.5 MPa 降到 19.8 MPa,电液换向阀 P 口压力从 19.8 MPa 降到 7.8 MPa,液控单向阀进口压力从 7.8 MPa 降到约 0.5 MPa,此时管路压力降最大。当第 1 个液压冲击压力峰值结束后,管路压力降变小,进一步表明了立柱空载运行和管路液压冲击是压力大幅波动的主要因素。在立柱触顶加压阶段,立柱下腔压力、液控单向阀进口压力、电液换向阀 P 口压力曲线快速上升,泵站供液压力曲线因蓄能器充液而缓慢上升,上述 3 条压力曲线同时达到峰值,之后立柱下腔压力因液控单向阀的隔压作用而保持在峰值,液控单向阀进口压力、电液换向阀 P 口压力曲线产生衰减振荡。由于蓄能器充液提升了泵站供液压力,使得第 2 个振荡压力峰值大于第 1 个,所以第 2 个峰值压力冲开液控单向阀继续为立柱下腔加压,压力冲到 34.2 MPa,峰值时间在 9.0 s。这表明升柱过程的触顶加压阶段存在液压冲击引起的压力振荡,使得立柱下腔压力能够超越泵站设定压力,发生超压现象。

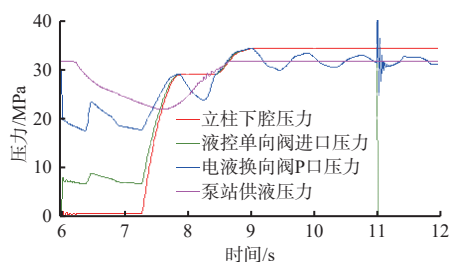


图 8 升柱过程中支架压力曲线

Fig. 8 Pressure curves of support in column lifting process

仿真分析表明,升柱过程中立柱空载运行使得泵站压力急剧降低,在立柱触顶加压阶段不能及时恢复到泵站设定压力,而蓄能器充液是泵站压力不能及时恢复的关键因素。若蓄能器在短时间内完成充液,达到泵站设定压力,则立柱下腔发生超压现象,提升支架初撑力;若蓄能器充液时间过长,液压冲击产生的压力振荡已衰减为 0,则不发生超压现象;若电液换向阀关闭时蓄能器仍在充液,供液压力低于泵站设定压力,则导致支架初撑力不足。

3.3 立柱动态流量仿真结果分析

移架过程中单个立柱下腔流量曲线如图 9 所示。可看出降柱过程中回液瞬时流量峰值达到 1 000 L/min,且快速稳定在 300 L/min;拉架过程中立柱下腔流量为 0,此时推移千斤顶动作;升柱过程中流量在 610~704 L/min 之间波动,在立柱触顶加压

阶段,下腔流量从 610 L/min 急速下降到 0,此时压力急速上升到第 1 个峰值,接着有 1 个 105 L/min 的流量波峰,对应第 2 个压力波峰。

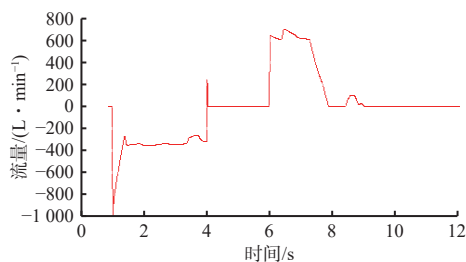


图 9 立柱下腔流量曲线

Fig. 9 Flow rate curve at the bottom of column

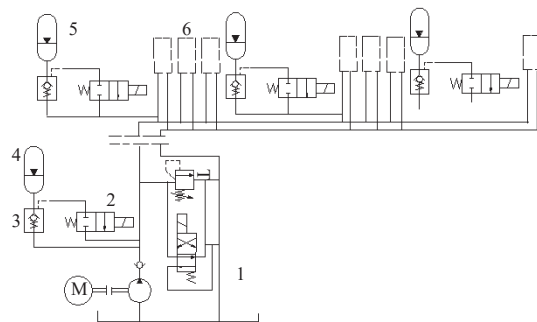
升柱过程中单个立柱下腔流量峰值为 704 L/min,双立柱流量峰值为 1 408 L/min,而泵站有 2 台 400 L/min 的乳化液泵,流量不足部分由蓄能器提供。这表明蓄能器能够提供非常大的瞬时流量。

由于升柱时间较短,且立柱上升所需的乳化液体积有限,所以增加多个蓄能器提供瞬时流量可满足升柱需求。蓄能器具有动态响应快、瞬时流量大的特点,在液压支架升柱或千斤顶工作时由蓄能器快速供液,支架进入恒阻静压支撑时可为蓄能器充液,所以增大蓄能器容积的设计方案具有可行性。

4 支架液压系统改进及仿真分析

4.1 改进方案及工作原理

综采支架液压系统改进方案如图 10 所示。



1—乳化液泵站;2—新增电液换向阀;3—新增液控单向阀;
4—泵站蓄能器;5—新增支架蓄能器;6—单架液压系统。

图 10 综采支架液压系统改进方案

Fig. 10 Improved scheme of hydraulic system for fully mechanized mining support

在综采工作面液压支架上设置多个蓄能器,在立柱和千斤顶工作时释放能量,静止时储存能量。新增液控单向阀和电液换向阀组成单向截断阀组,用于控制支架上新增的蓄能器和泵站上原有的蓄能器,使蓄能器在升柱阶段只能释放流量,不能充液,在升柱之外的任意时间段可以充液和释放流量。同时减少 1 台乳化液泵,减小主进液管通径。改进设

计参数见表3,其他参数不变。

表3 综采支架液压系统改进设计参数
Table 3 Improved design parameters of hydraulic system for fully mechanized mining support

名称	参数
乳化液泵站	压力31.5 MPa, 流量400 L/min
泵站蓄能器	容积100 L, 充气压力12 MPa
支架蓄能器	容积60 L, 充气压力12 MPa
主进液管	通径DN38

系统工作原理: 新增的多个蓄能器平均分布安装在不同支架上, 近距离驱动支架立柱和千斤顶, 减小长距离供液管路的压力损失, 提升支架液压系统的动态性能。利用蓄能器可稳定系统压力, 提供瞬时大流量的特性, 减小压力波动幅度, 加快立柱和千斤顶运行速度, 缩短移架时间。利用液压冲击压力峰值进一步提高支架初撑力, 使其超过泵站设定压力。

超压机理: 在升柱过程的立柱上升阶段, 多个蓄能器提供瞬时大流量, 使近似空载运行的立柱快速上升, 此时供液管路中流速很大, 存储了很大的流体惯性动能。当立柱触及顶板时突然停止上升运动, 立柱下腔进入加压阶段, 由于立柱下腔的综合体积弹性模量很大, 在瞬时大流量作用下立柱下腔压力急剧升高, 瞬时流量急剧下降。当立柱下腔压力升高到蓄能器压力时, 蓄能器不再供液。因单向阀在升柱期间的截断作用, 蓄能器也无法充液。此时立柱下腔瞬时流量降至 200 L/min 以下, 泵站单台乳化液泵额定流量为 400 L/min, 足以继续供液, 并有富余流量溢流, 迅速达到泵站设定压力。当立柱下腔瞬时流量急剧降为 0 时, 相当于阀门在极短时间内关闭, 必然产生长距离管路液压冲击, 通过合理匹配泵的额定流量与长距离供液管路通径来提升管路流速, 增大惯性冲击, 即可获得液压冲击压力; 合理设计立柱上液控单向阀的启闭特性, 获取长距离供液管路的液压冲击压力峰值, 使立柱下腔压力保持峰值压力状态, 使立柱下腔的初撑压力超过泵站的设定压力。

当增设的多个蓄能器具有足够容积时, 超压大流量液压系统相当于一个短时间独立工作的稳压系统, 蓄能器输出瞬时流量远大于泵站额定流量, 快速完成立柱或其他千斤顶的运行过程。升柱过程中, 由于单向截断阀组不允许蓄能器充液, 在立柱触顶加压阶段, 当压力大于蓄能器压力时, 液压系统相当

于没有蓄能器的小流量泵站和支架液压系统, 此时流量需求很小, 不仅能实现快速增压, 且长距离管路可以产生液压冲击压力, 从而提高支架初撑力。升柱过程结束后, 蓄能器可充放液, 此时液压系统相当于减小大幅度压力波动的稳压动力源。千斤顶动态特性与立柱升柱过程类似。

4.2 系统仿真与动态特性分析

改进的综采支架液压系统仿真模型如图 11 所示, 仿真参数按照表 3 设置, 其余参数不变。

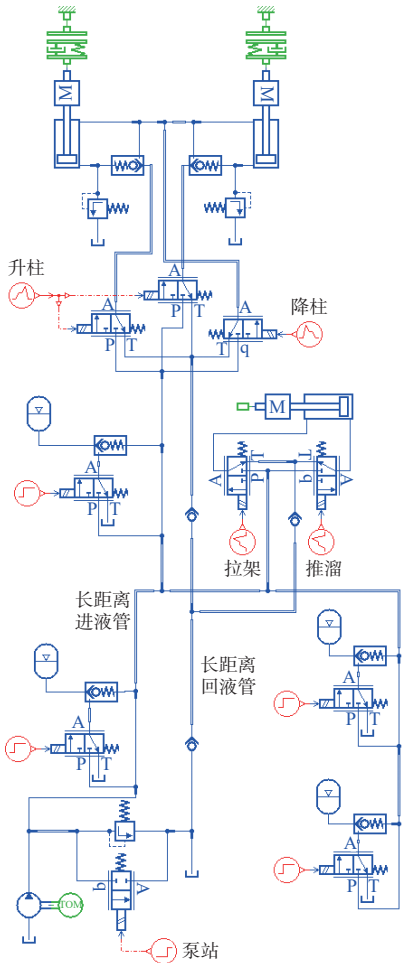


图 11 改进的综采支架液压系统仿真模型

Fig. 11 Simulation model of improved hydraulic system for fully mechanized mining support

液压支架降柱、拉架和升柱过程仿真曲线如图 12—图 14 所示。为便于对比分析, 各过程的起始时间和持续时间均与图 6—图 9 一致。

对比图 12 与图 6 可知, 系统改进后降柱过程中立柱位移和速度完全一致, 降柱速度为 0.08 m/s, 升柱过程位移不变, 升柱速度由改进前的 0.15 m/s 提升至 0.17 m/s, 速度略有提高, 表明改进系统满足降柱和升柱的性能要求。

对比图 13 和图 7 可知, 系统改进后蓄能器稳压特性消除了液压冲击, 使得泵站供液压力、电液换向

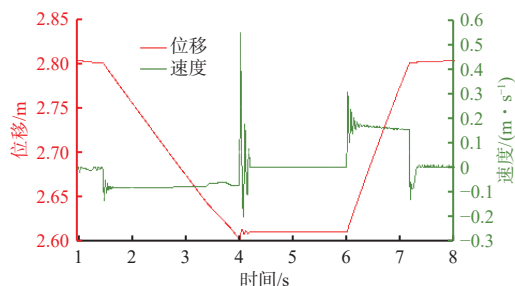


图 12 系统改进后立柱位移和速度曲线

Fig. 12 Displacement and velocity curves of column of the improved system

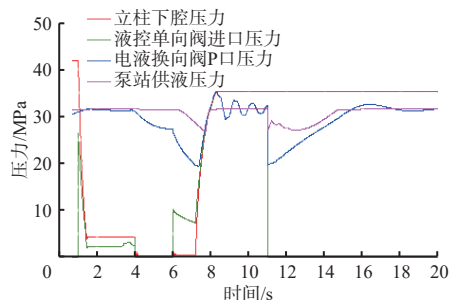


图 13 系统改进后支架动态压力曲线

Fig. 13 Dynamic support pressure curves of the improved system

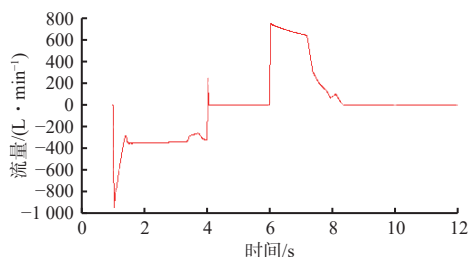


图 14 系统改进后立柱下腔流量曲线

Fig. 14 Flow rate curves at the bottom of the column of the improved system

阀 P 口压力平滑变化。在拉架和升柱过程的立柱上升阶段,电液换向阀 P 口压力呈现 2 次下降,表明推移千斤顶和立柱的运行拉低了系统压力,采用更大容积的蓄能器可减小压力下降幅度。在升柱过程的触顶加压阶段,由于单向阀截断了蓄能器充液,使得立柱下腔压力等 4 条压力曲线急速上升,在第 1 个液压冲击压力峰值即冲上压力最高点 35.2 MPa,超调量达 3.7 MPa,此时为 8.3 s。表明改进系统提升了立柱初撑压力,即提升了支架初撑力。

对比图 14 和图 9 可知,系统改进对降柱过程没有影响。升柱过程的动态流量初始即达到峰值流量 750 L/min,然后持续下降到 650 L/min。双立柱峰值流量合计达 1 500 L/min。乳化液泵额定流量为 400 L/min,表明蓄能器提供了 1 100 L/min 瞬时流量,证实了改进系统具有大流量特征。在立柱触顶加压阶段,流量急速下降到 70 L/min 后迅速反冲到

100 L/min,说明发生了管路液压冲击,对应第 1 个压力峰值。表明改进方案提升了动态流量,实现了大流量加速立柱上升的设计目标。

综上,改进系统在只有 1 台 400 L/min 乳化液泵的前提下,瞬时流量达到了 1 500 L/min,初撑压力达 35.2 MPa,超调量为 3.7 MPa,实现了超压大流量性能指标。

5 结论

1) 升柱或千斤顶的近似空载运行是造成综采支架液压系统压力大幅下降波动的主要原因,通常情况下系统压力下降会导致液压支架初撑力达不到要求。采用蓄能器能有效减小压力降幅。

2) 揭示了综采支架液压系统液压冲击现象的发生机理:电液换向阀突然启闭和立柱触顶加压均会产生液压冲击。液压冲击加剧综采支架液压系统的压力波动。在合理设计系统参数的前提下,利用液压冲击的压力峰值可提升立柱下腔压力,产生超压作用,进而提高初撑力。

3) 改进了综采支架液压系统,融合长距离管路液压冲击与蓄能器瞬时大流量技术,显著提升了液压支架初撑力和移架速度,在升柱触顶加压阶段,通过精细控制参数,可在泵站流量减半的情况下保持优异的系统动态性能。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30-34.
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30-34.
- [2] 王国法. 工作面支护与液压支架技术理论体系[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1593-1601.
WANG Guofa. Theory system of working face support system and hydraulic roof support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1593-1601.
- [3] 徐亚军, 王国法. 液压支架群组支护原理与承载特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 1): 3367-3373.
XU Yajun, WANG Guofa. Supporting principle and bearing characteristics of hydraulic powered roof support groups[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3367-3373.
- [4] 李恒, 康天合, 李晓坡, 等. 大采高综采支架初撑力对煤壁稳定性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 67-71, 92.
LI Heng, KANG Tianhe, LI Xiaopo, et al. Study on setting load of powered support in high cutting fully-

- mechanized coal mining face affected to coal wall stability[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9): 67-71, 92.
- [5] 阎建华. 综采工作面支架初撑力与围岩相互作用关系分析[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(4): 12-15.
YAN Jianhua. Analysis on interaction relationship between initial support load of powered support and surrounding rock in fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(4): 12-15.
- [6] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 84-90.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Ground pressure and strata control[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003: 84-90.
- [7] 史帆. 综放液压支架选型及工作阻力确定[J]. *机械管理开发*, 2022, 37(10): 112-113.
SHI Fan. Selection of hydraulic supports for heaving and determination of working resistance[J]. *Mechanical Management and Development*, 2022, 37(10): 112-113.
- [8] 刘前进, 徐刚, 卢振龙, 等. 液压支架工况综合评价与预警模型研究及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(10): 198-206.
LIU Qianjin, XU Gang, LU Zhenlong, et al. Research and application of comprehensive evaluation and early warning model of hydraulic support working condition based on working resistance analysis[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 198-206.
- [9] 徐刚, 张春会, 蔺星宇, 等. 基于分区支承压力学模型的综放工作面顶板矿压演化与压架预测[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3622-3633.
XU Gang, ZHANG Chunhui, LIN Xingyu, et al. Predicting ground pressure evolution and support crushing of fully mechanized top coal caving face based on zoning support mechanical model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3622-3633.
- [10] 李然. 矿用高压大流量乳化液泵站应用现状及发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(7): 93-96.
LI Ran. Current status of application and development trend of mining high-pressure and large-flow-rate emulsion pump station[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(7): 93-96.
- [11] 胡红伟. 大采高工作面液压支架初撑力实测及分析[J]. *能源与节能*, 2015(7): 99-101.
HU Hongwei. On the practical first support force measurement and analysis of hydraulic support in mining face with large height[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2015(7): 99-101.
- [12] 张德生, 谭震, 朱信龙, 等. 分布式供液模式下液压支架快速推移控制技术研究[J]. *矿山机械*, 2022, 50(12): 1-6.
ZHANG Desheng, TAN Zhen, ZHU Xinlong, et al. Research on control technology for rapid movement of hydraulic support in distributed liquid supply mode[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2022, 50(12): 1-6.
- [13] 李宇琛, 吴娟, 郭凯宇, 等. 综采面不同供液方式的压力损失分析[J]. *机床与液压*, 2022, 50(12): 131-136.
LI Yuchen, WU Juan, GUO Kaiyu, et al. Analysis on pressure loss of different liquid supply modes in fully mechanized face[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(12): 131-136.
- [14] 杨阳, 沈宏明, 赵忠辉. 蓄能器在液压支架立柱动载过载试验系统中应用的研究[J]. *煤矿机械*, 2015, 36(3): 206-207.
YANG Yang, SHEN Hongming, ZHAO Zhonghui. Research of accumulator in hydraulic support column impact testing system[J]. *Coal Mine Machinery*, 2015, 36(3): 206-207.
- [15] 车鹏, 吴勇, 赵玉贝, 等. 液压支架供液方式压力损失分析[J]. *液压气动与密封*, 2013, 33(7): 69-72.
CHE Peng, WU Yong, ZHAO Yubei, et al. Pressure loss analysis of hydraulic support different feed liquid manner[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2013, 33(7): 69-72.
- [16] 方中喜. 液压支架立柱自动增压阀的仿真与试验[J]. *煤矿机械*, 2022, 43(7): 45-47.
FANG Zhongxi. Simulation and test of automatic pressurization valve for hydraulic support column[J]. *Coal Mine Machinery*, 2022, 43(7): 45-47.
- [17] 曹连民, 郭震, 仲崇涛, 等. 液压支架初撑力手动增压装置设计与应用[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(6): 10-14.
CAO Lianmin, GUO Zhen, ZHONG Chongtao, et al. Design and application of manual pressurization device for initial support force of hydraulic support[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(6): 10-14.
- [18] 常宝瑞. 液压支架液压系统的优化设计[J]. *机电工程技术*, 2019, 48(12): 199-201.
CHANG Baorui. Optimum design of hydraulic system of hydraulic support[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(12): 199-201.
- [19] 王成宾, 权龙. 大惯量负载液压冲击的主动变阻尼抑制方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(8): 182-188.
WANG Chengbin, QUAN Long. Methods of restrain the hydraulic impact with active adjusting the variable damping in system with large inertia load[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(8): 182-188.
- [20] 陆春月, 寇子明, 吴娟, 等. 液压波动激励下的充液管道动力学特性[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 17-22.
LU Chunyue, KOU Ziming, WU Juan, et al. Dynamic characteristics of pipes conveying fluid excited by hydraulic fluctuation[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 41(5): 17-22.
- [21] 刘占, 孟兰蔚. 流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 130-131.
LIU Zhan, MENG Lanwei. Hydrodynamics[M]. Beijing: Science Press, 2017: 130-131.