

文章编号: 1671-251X(2024)02-0042-07

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023080060](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023080060)

# 工作面液压系统流量补偿技术研究

赵叔吉<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究院 开采研究分院, 北京 100013)

**摘要:** 目前工作面液压系统的优化研究对连续推进过程中液压系统压力流量特性的分析较少, 对液压系统压力流量波动问题缺乏简单有效的解决方案。针对工作面快速移架需求, 以张家峁煤矿 2<sup>-2</sup> 煤层新建大采高工作面为工程背景, 采用 AMESim 软件建立了单台液压支架和成组液压支架仿真模型, 基于自动跟机移架中千斤顶的动作时序, 对煤炭开采过程中液压支架移架推溜过程进行仿真, 分析了不同数量液压支架同时动作时工作面液压系统的压力流量变化情况, 指出移架过慢的原因是液压支架瞬时需液量超过泵站最大流量, 同时在液压支架成组运动过程中存在瞬时需液量不足和部分时刻泵站供液能力过剩的矛盾。针对液压系统间歇性大流量需求, 提出了基于蓄能器的流量补偿技术, 通过仿真验证了安装蓄能器后液压系统的压力波动被明显抑制, 各千斤顶运动速度明显提升。在张家峁煤矿新建工作面对基于蓄能器的流量补偿技术进行现场试验, 结果表明接入蓄能器后, 液压系统平均压降降幅达 74.1%, 压力波动受到明显抑制, 验证了流量补偿技术可满足液压系统间歇性大流量需求, 为快速移架提供保障。

**关键词:** 工作面; 液压支架; 自动跟机移架; 快速移架; 液压系统; 流量补偿; 蓄能器

中图分类号: TD355 文献标志码: A

Research on flow compensation technology for hydraulic system in working face

ZHAO Shuji<sup>1,2</sup>

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China;  
2. Mining Research Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Currently, there is a lack of analysis on the pressure and flow characteristics of hydraulic systems during continuous propulsion in the optimization research of working face hydraulic systems. There is a lack of simple and effective solutions to the problem of pressure and flow fluctuations in hydraulic systems. In response to the demand for rapid support movement of the working face, with the construction of a new large mining height working face in the 2<sup>-2</sup> coal seam of Zhangjiaomo Coal Mine as the engineering background, a single hydraulic support and a group hydraulic support simulation model are established using AMESim software. Based on the action timing of the jack in the automatic follow-up and support movement, the hydraulic support movement and sliding process during coal mining are simulated. The study analyzes the pressure and flow changes of the hydraulic system in the working face when different numbers of hydraulic supports act simultaneously. It is pointed out that the reason for the slow movement of the supports is that the instantaneous liquid demand of the hydraulic supports exceeds the maximum flow rate of the pump station. At the same time, there is a contradiction between insufficient instantaneous liquid demand and excess liquid supply capacity of the pump station at some times during the movement of the hydraulic supports. Aiming at the intermittent high flow demand of hydraulic systems, a flow compensation technology based on accumulators is proposed. Through simulation verification, the

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2024-02-17; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874174, 51974159); 天地科技创新创业资金专项重点项目(2020-TD-ZD005); 中煤科工开采研究院有限公司科技创新基金面上项目(KCYJY-2024-MS-08)。

作者简介: 赵叔吉(1993—), 男, 山东临沂人, 助理研究员, 博士, 主要从事煤矿智能化技术研究与实践工作, E-mail: [zhao-sj16@tsinghua.org.cn](mailto:zhao-sj16@tsinghua.org.cn)。

引用格式: 赵叔吉. 工作面液压系统流量补偿技术研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(2): 42-48.

ZHAO Shuji. Research on flow compensation technology for hydraulic system in working face[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(2): 42-48.



扫码移动阅读

pressure fluctuation of the hydraulic system is significantly suppressed after the installation of accumulators, and the movement speed of each jack is significantly improved. On site experiments are conducted on the flow compensation technology based on accumulator in the new construction working face of Zhangjiamao Coal Mine. The results show that after the accumulator is connected, the average pressure drop of the hydraulic system decreases by 74.1%, and the pressure fluctuation is significantly suppressed. This verifies that the flow compensation technology can meet the intermittent high flow demand of the hydraulic system and provide guarantees for rapid support movement.

**Key words:** working face; hydraulic support; automatic follow-up and support movement; rapid support movement; hydraulic system; flow compensation; accumulator

## 0 引言

提高煤炭产能、实现煤炭资源高效开采是煤矿智能化开采的核心任务之一<sup>[1-4]</sup>。随着工作面长度不断增加,工作面液压系统的供液能力受到挑战<sup>[5]</sup>。为了保障工作面的快速跟机移架和采煤机快速高效截割,提高工作面采煤效率,对工作面现有液压系统存在的问题进行分析、改进和优化势在必行。

目前工作面液压系统的优化主要集中于关键液压元器件<sup>[6-7]</sup>、供液网络<sup>[8]</sup>和控制系统<sup>[9-10]</sup>3个方面。如:在关键液压元器件优化方面,文献[6]以最短移架时间和最低成本为目标,给出了不同泵站流量、工作面巷道管路直径及管路布置方式等多种组合的优化设计;在供液网络优化方面,文献[8]建立了工作面液压系统仿真模型,分析了不同元器件参数对液压支架动作速度的影响;在控制系统优化方面,文献[9]基于液压系统进液压力预测拉架时间,提高了自动跟机的准确性。此外,为了满足超长工作面的供液需求,提高液压系统供液能力,许多学者从开发新的控制算法<sup>[11-12]</sup>、控制硬件和液压系统监测软件<sup>[13]</sup>、新的供液模式和供液系统拓扑结构<sup>[14]</sup>等方面展开研究与实践。

目前的研究工作大多着眼于泵站和其他液压系统元器件参数为基础的工作面液压系统控制技术,而相关软硬件的开发和维护会带来较高的时间和人力成本。另外,对连续推进过程中液压系统压力流量特性的分析较少,针对液压系统压力流量波动问题缺乏简单有效的解决方案。

本文基于陕煤集团张家峁矿业有限公司(简称张家峁煤矿)2<sup>-2</sup>煤层新建大采高工作面的液压系统工程设计实践,利用AMESim软件建立液压支架仿真模型,研究液压支架连续动作时液压系统的压力流量特性,指出移架过慢的原因是瞬时增大的流量需求。开发了基于蓄能器的流量补偿技术,仿真分析了蓄能器作用下液压支架移速和液压系统压力流量特性变化,并通过现场试验验证了流量补偿技术

的有效性,为液压系统的改进提供了方向。

## 1 工程背景

张家峁煤矿是国家发展改革委在神府南区总体规划建设的4对大型矿井之一。矿井井田东西宽约9.5 km,南北长约19.5 km,主采煤层为低灰分、低硫、低磷、高热值、高挥发分的优质动力煤<sup>[15]</sup>。

张家峁煤矿2<sup>-2</sup>煤层埋深为21.47~134.55 m,平均埋深为130 m左右。松散层平均厚度约为40 m,基岩层平均厚度约为90 m,基岩岩性以砂岩为主。煤层自然厚度(含夹矸)为5.26~10.07 m,平均厚度为8.38 m。直接顶初次垮落步距为18.6 m,属3类稳定顶板,采用全部垮落法开采。

煤矿新建大采高工作面长度为320 m,配套设备平均采高为7.6 m,配套液压支架型号为ZY21000/37/80D,采煤机装机总功率为3 050 kW,带式输送机带宽为1 600 mm。以掩护式中部液压支架为例,部分参数见表1。

表1 张家峁煤矿2<sup>-2</sup>煤层新建工作面中部液压支架部分参数

Table 1 Part parameters of hydraulic support in the middle of new working face of Zhangjiamao Coal Mine 2<sup>-2</sup> coal seam

参数	值	参数	值
支架结构高度/mm	3 700~8 000	立柱中心距/mm	1 110
支架宽度/mm	1 950~2 200	推移步距/mm	800
支架中心距/mm	2 000	质量/t	80

## 2 单台液压支架仿真建模

根据液压支架液压系统图及其使用说明书,液压支架仿真建模时所用结构参数见表2。本文主要研究液压支架移架和推溜动作下的液压系统特性,因此忽略侧护板千斤顶、底调千斤顶、顶梁喷雾等液压系统零部件的动作及漏液等情况。

参照液压系统图,根据液压支架移架和推溜动作控制时序,对同一动作的成组千斤顶建立相应子模型,并配合时序控制器来控制每组千斤顶的运动顺序和时间。为了简化计算,省略各子模型中的泄

表 2 液压支架立柱和千斤顶结构参数  
Table 2 Structural parameters of hydraulic support columns and jacks

结构名称	缸径	杆径	行程	mm
立柱	530/380	500/355	2 090/2 090	
推移千斤顶	250	160	1 080	
平衡千斤顶	320	230	750	
伸缩千斤顶	125	85	900	
一级护帮千斤顶	160	105	900	
二级护帮千斤顶	140	95	295	
三级护帮千斤顶	80	60	360	
抬底千斤顶	200	140	320	

压阀等元器件。液压管路选用可综合考虑摩擦力和液体体积模量影响的 C-R 模型<sup>[16]</sup>, 其长度和半径均按照实际设计尺寸设置。乳化液密度、体积模量和动力黏度分别设置为  $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,  $2.0\ \text{GPa}$ ,  $1.49 \times 10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[17-18]</sup>。电液控换向阀型号为 FHD500/31.5Z, 标称流量为  $500\ \text{L}/\text{min}$ , 对应流阻为  $6\ \text{MPa}$ <sup>[19]</sup>; 立柱外缸进液口与快速供液阀相连, 根据说明书可知快速供液阀公称流量为  $1\ 000\ \text{L}/\text{min}$ , 对应流阻为  $6\ \text{MPa}$ , 每个立柱由 2 个快速供液阀供液; 推移千斤顶无杆腔由 2 个电液控换向阀共同供液, 其余各腔由单台电液控换向阀单独供液。各子模型如图 1、图 2 所示。其中标号为 1 的接口均为回液口, 标号为 2 的接口均为进液口; 抬底千斤顶和立柱处标号为 4 的接口相互连接, 以便升立柱时联动抬底千斤顶收缩; 推移千斤顶和伸缩千斤顶处标号为 4 的接口相互连接, 以便移架时打开伸缩千斤顶的双向锁。

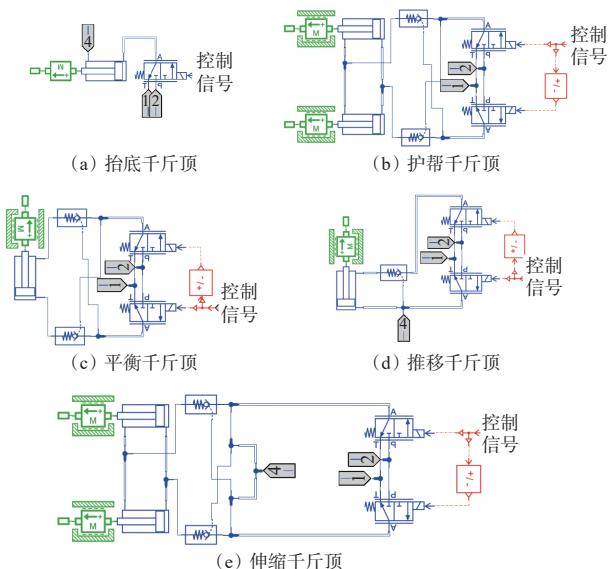


图 1 支架液压系统子模型

Fig. 1 Submodels of support hydraulic system

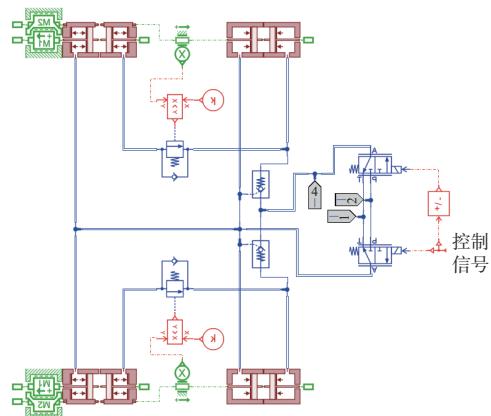


图 2 立柱子模型

Fig. 2 Submodel of columns

按照管路连接逻辑, 建立单台液压支架仿真模型, 如图 3 所示。

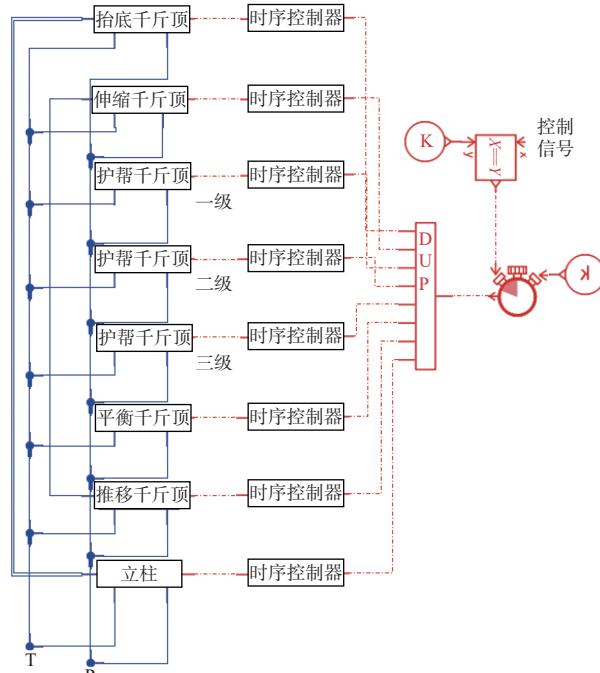


图 3 单台液压支架仿真模型

Fig. 3 Simulation model of single hydraulic support

参考液压支架自动化跟机移架工艺流程<sup>[20]</sup>, 结合工作面实际参数和单架仿真结果, 对工作面中部单台液压支架各千斤顶推溜移架时的动作时序安排如图 4 所示。本文主要研究循环移架过程中液压系统相关参数的变化, 忽略伸缩、平衡和护帮等千斤顶的动作, 以及顶底板情况对移架过程的影响。

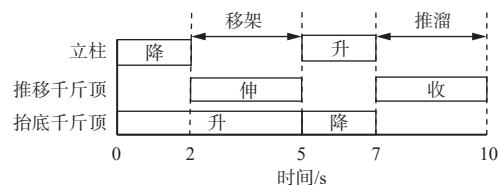


图 4 仿真模型中各千斤顶动作时序

Fig. 4 Each jack action timing of simulate model

### 3 成组液压支架仿真建模

搭建完单台液压支架仿真模型后,根据工作面液压系统图,建立工作面液压系统仿真模型,如图5所示,其中 $L_1\sim L_7$ 为各段管路长度, $\phi$ 为对应管路公称直径。受算力限制,并考虑采煤机截割速度、液压

支架移架速度、液压支架等因素,在仿真模型中放入4台液压支架。工作面进回液采用三进三回形式,进回液管规格分别为DN51G和DN63D,整个工作面长度为320 m,机头距泵站所在列车长度 $L_0=250$  m。单台乳化液泵额定流量为1 250 L/min,2台并用。

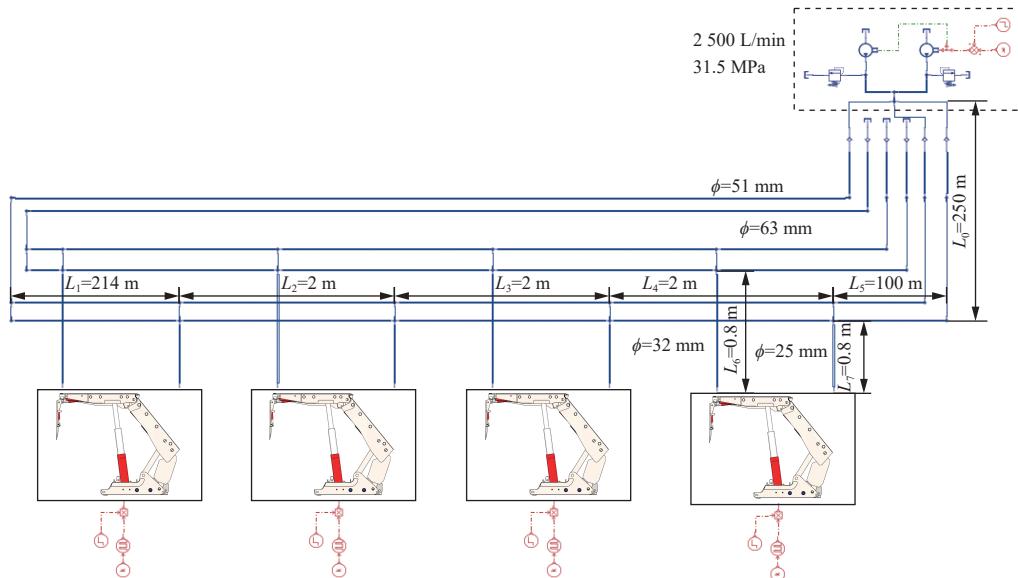


图5 液压系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of hydraulic system

按照千斤顶动作时序,仿真1~4台液压支架循环移架推溜过程中液压系统压力流量情况,共进行5个循环。对应的推移千斤顶、立柱行程随时间变化曲线如图6、图7所示。可看出1~2台液压支架进行循环移架推溜动作时,推移千斤顶能完成完整的行程(0.80 m),与工作面采掘规划相符;3~4台液压支架循环动作时,由于瞬时供液量不足,推移千斤顶最大位移分别为0.70, 0.53 m;1~4台液压支架动作时,立柱的最大收缩量分别为0.12, 0.10, 0.09, 0.08 m,基本满足移架要求,但4台液压支架同时动作时,升柱位移小于降柱位移,立柱高度逐步下降,表明升柱时泵站供液量不足。

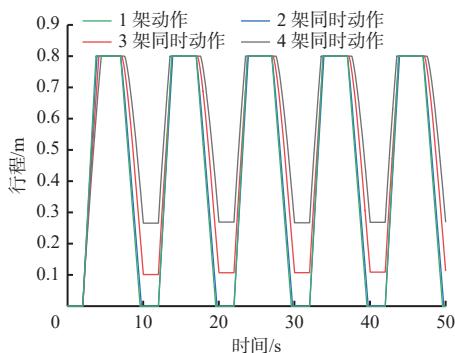


图6 推移千斤顶行程随时间变化曲线

Fig. 6 Displacement change curves of push jack over time

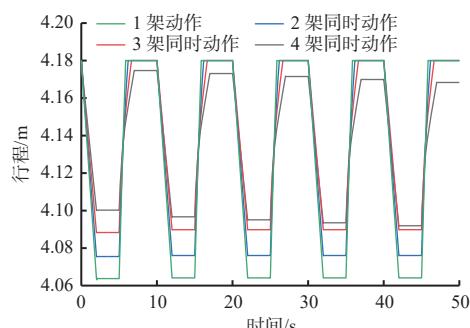


图7 立柱行程随时间变化曲线

Fig. 7 Displacement change curves of columns over time

1~4台液压支架动作时,泵站的输出压力如图8所示。可看出在立柱伸出和推移千斤顶运动过程中,泵站最大输出流量不足,输出压力明显下降,最低至额定压力(31.5 MPa)的14.5%;在循环移架过程中,存在泵站输出压力为额定压力的时间段,表明泵站流量高于需液量,溢流阀溢流。如何将多余的流量存储并补偿到供液量不足的时间段,成为解决快速成组移架中泵站最大流量不足的关键。

### 4 基于蓄能器的流量补偿技术

为了解决快速成组移架过程中某些时刻最大流量不足、某些时刻供液能力浪费的问题,在工作面的

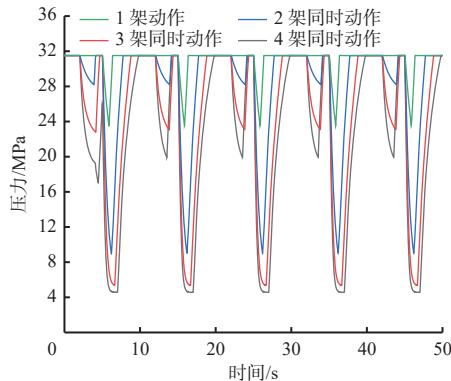


图 8 泵站的输出压力

Fig. 8 Output pressure of pump station

每个进液管处安装气囊式蓄能器。

整个移架过程中,由立柱和各千斤顶的直径及行程可计算出单台液压支架移架过程所需的总乳化液体积 $V_0=107.2\text{ L}$ 。根据现场实操经验,设立柱降柱和升柱位移为 0.1 m,其余千斤顶走完全部行程。

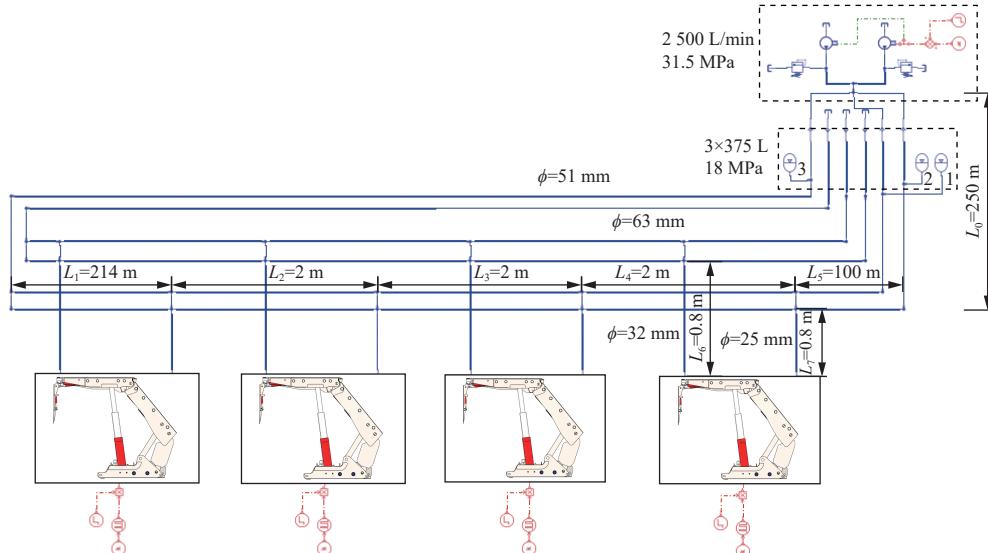


图 9 安装蓄能器后的液压系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of hydraulic system with accumulators

在安装蓄能器情况下,仿真 1~4 台液压支架循环移架推溜过程中液压系统的压力流量状况,共进行 5 个循环。推移千斤顶、立柱行程随时间变化曲线分别如图 10、图 11 所示。

由图 10、图 11 可看出,安装蓄能器后,推移千斤顶完成完整行程的时间明显缩短或最大位移明显增加,表明在液压系统中安装蓄能器可有效增加成组移架时的移架速度,补偿瞬时大流量需求;安装蓄能器前后立柱下降的速度差别不大,原因是降柱过程中,高压乳化液进入立柱外缸内径( $\phi=530\text{ mm}$ )和中缸外径( $\phi=500\text{ mm}$ )围成的有杆腔中,与升柱过程中高压乳化液进入立柱外缸围成的无杆腔相比,需液量较小,泵站流量充足。

为保证在蓄能器储存的乳化液耗尽前液压系统能维持在较高的压力水平上,蓄能器预充压力应尽可能高。根据蓄能器制造工艺,确定气囊预充压力 $P_a=18\text{ MPa}$ 。根据理想气体状态方程,所需蓄能器体积 $V_a$ 近似满足:

$$V_1 = V_a \left(1 - \frac{P_a}{P_0}\right) > 4V_0 \quad (1)$$

式中: $V_1$ 为液压系统额定压力下蓄能器可储存的乳化液体积; $P_0$ 为液压系统额定压力, $P_0=31.5\text{ MPa}$ 。

由式(1)可得 $V_a > 988.1\text{ L}$ 。

综合考虑目前蓄能器的制造水平并留出一定余量,在每个进液管处安装 3 台气囊式蓄能器,每台蓄能器的体积为 125 L,即每个进液管安装的蓄能器体积为 375 L,3 个进液管安装蓄能器总体积为 1125 L,预充压力为 18 MPa。安装蓄能器后的液压系统仿真模型如图 9 所示。

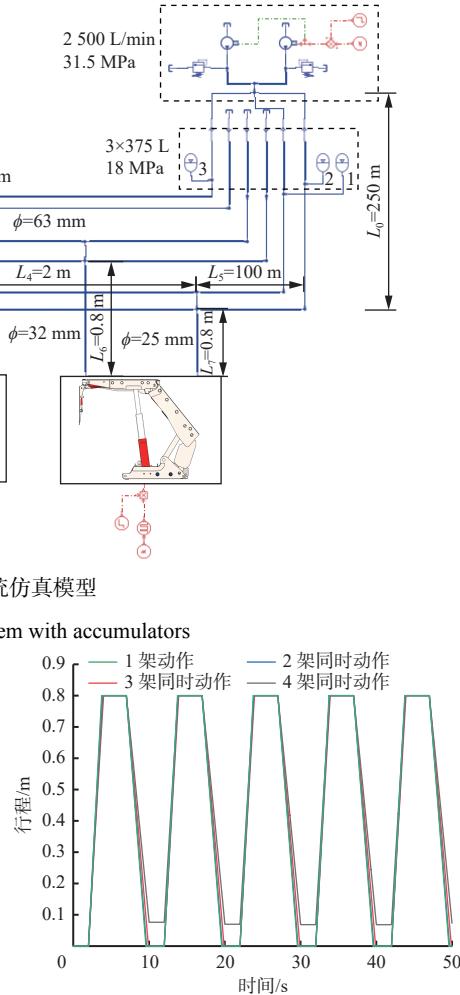


图 10 安装蓄能器后推移千斤顶行程随时间变化曲线

Fig. 10 Displacement change curves of push jack over time with accumulators

从图 10 可看出,当 4 台液压支架同时循环进行移架推溜动作时,推移千斤顶仍无法完成完整行

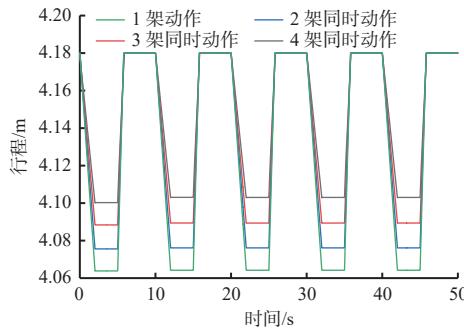


图 11 安装蓄能器后立柱行程随时间变化曲线

Fig. 11 Displacement change curves of columns over time with accumulators

程。以 1 号蓄能器压力随时间变化曲线(图 12)为例,4 台液压支架同时动作时,蓄能器处在不断充放乳化液过程中,且一直未达到液压系统额定压力(31.5 MPa)。这表明即使增加储能装置,泵站的稳压能力也不足以支撑 4 台液压支架同时移架,需增加液压支架移架动作的时间或增大泵站的输出流量。但安装蓄能器使得工作面液压系统输出的最小压力为额定压力的 76.2%(4 台液压支架同时动作时),是未安装蓄能器时的 5 倍,有效抑制了液压系统压力波动。安装蓄能器后泵站输出压力曲线如图 13 所示,可看出泵站输出压力波动与蓄能器压力波动相差不大,原因是泵站出口和蓄能器液口之间通过长 250 m、规格为 DN51G 的管路相连,阻力较小。

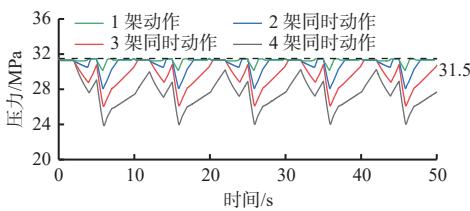


图 12 蓄能器压力曲线

Fig. 12 Pressure curve of accumulator

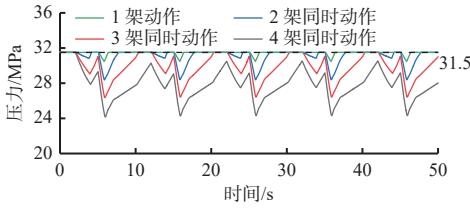


图 13 安装蓄能器后泵站输出压力曲线

Fig. 13 Output pressure curve of pump station with accumulators

## 5 现场试验

为了验证流量补偿技术的有效性,在目标工作面安装蓄能器站,利用研发的压力监测装置监测蓄能器站接入工作面液压系统前后系统压力波动情况(100 架处),如图 14 所示。

由于目前工作面推进仍以人工干预为主,移架

工序等不确定,推溜移架速度受到影响,所以无法按照实际移架工艺来仿真推溜移架情况,或按照仿真中的移架工艺来操作液压支架运动。本文截取采煤过程中液压支架连续移架时的压力进行比较。由图 14(c)可看出,接入蓄能器后,液压系统平均压力由 21.32 MPa 升至 28.86 MPa,平均压降由 10.18 MPa 降至 2.64 MPa(约为 1/4),压力波动受到明显抑制,表明基于蓄能器的流量补偿技术可满足液压系统间歇性大流量需求,为快速移架提供保障。

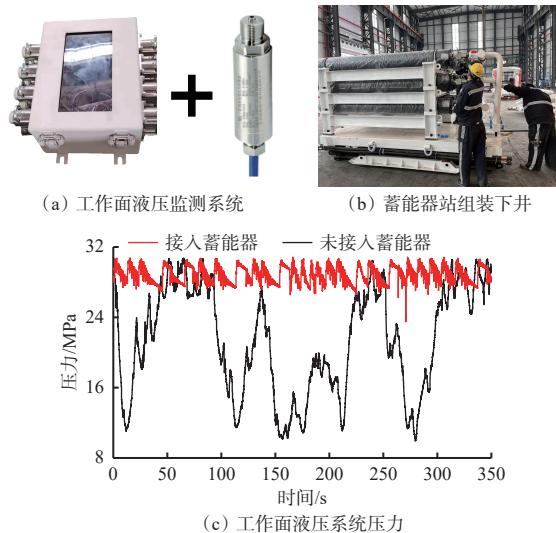


图 14 现场试验及结果

Fig. 14 Field experiment and its result

## 6 结论

1) 基于 AMESim 建立了工作面液压系统仿真模型,模拟了 1~4 台液压支架同时进行移架推溜动作时液压系统压力流量情况。结果表明液压支架成组动作过程中推移速度不足的主要原因是瞬时需液量超过泵站最大流量,同时在液压支架成组运动整个过程中存在瞬时需液量不足和部分时刻泵站供液能力过剩的矛盾。

2) 提出了基于蓄能器的流量补偿技术,将蓄能器安装于工作面进液口。仿真结果表明,安装蓄能器后液压系统的压力波动被明显抑制,各千斤顶运动速度明显加快。

3) 通过现场试验验证了采用流量补偿技术后,液压系统压降降幅为 74.1%,为采煤工作面液压支架快速移架指明了液压系统改进方向。

## 参考文献(References):

- [1] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.
- WANG Guofa, REN Huawei, PANG Yihui, et al.

- Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.
- [2] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.  
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1-27.
- [3] 庞义辉. 综采工作面智能化发展现状与展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 21-29.  
PANG Yihui. Intelligent development situation and prospect of fully mechanized mining face[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2020, 1(1): 21-29.
- [4] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.  
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage) [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 1-36.
- [5] 付翔, 王然风, 赵阳升, 等. 基于交叠协同逻辑的液压支架运行自适应稳压供液控制方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1891-1900.  
FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng, et al. Self-adaptive control method of fluid feeding with steady pressure for hydraulic support based on overlapping synergetic logic[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1891-1900.
- [6] 方中喜, 杜奇, 牟东, 等. 综采工作面支架液压系统优化设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(8): 120-123.  
FANG Zhongxi, DU Qi, MU Dong, et al. Optimal design of support hydraulic system in fully mechanized mining face[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(8): 120-123.
- [7] 朱建领. 金鸡滩煤矿乳化液泵站系统优化设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.  
ZHU Jianling. Design of system optimization of the emulsion pump station of Jinjitan Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [8] 于玲, 贾春强. 综采工作面支架液压系统仿真研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(2): 56-58.  
YU Ling, JIA Chunqiang. Simulation research on hydraulic system of powered support in fully mechanized face[J]. *Coal Mine Machinery*, 2014, 35(2): 56-58.
- [9] 任怀伟, 张帅, 薛国华, 等. 液压支架自动跟机动态规律研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 47-54.  
REN Huawei, ZHANG Shuai, XUE Guohua, et al. Research on the dynamic law of automatic following of hydraulic support[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 47-54.
- [10] 刘晓宾. 基于推移控制逻辑阀的液压支架推移控制系统优化研究[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(12): 13-15.  
LIU Xiaobin. Optimization of hydraulic support pushing control system with pushing control logic valve[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2021, 41(12): 13-15.
- [11] 司明, 邬伯藩, 王子谦. 综采工作面大流量智能供液系  
统研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(7): 66-72.  
SI Ming, WU Bofan, WANG Ziqian. Research on large flow intelligent liquid supply system in fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(7): 66-72.
- [12] 付翔, 王然风, 赵阳升. 工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1471-1478.  
FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng. Investigation of hydraulic system simulation and fluid feeding technology with steady pressure of working face supports[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1471-1478.
- [13] 田成金. 智能反冲洗高压过滤站的工作原理与控制模式[J]. 煤矿开采, 2015(6): 44-46.  
TIAN Chengjin. Working principle and control mode of intelligent backwash high-pressure filter station[J]. *Coal Mining Technology*, 2015(6): 44-46.
- [14] 张宁波, 郎瑞峰, 王大龙, 等. 采煤工作面远距离供液关键技术现状与展望[J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 71-75.  
ZHANG Ningbo, LANG Ruijing, WANG Dalong, et al. Current status and prospects of key technology for remote emulsion supply in coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(1): 71-75.
- [15] 任怀伟, 薛忠新, 巩师鑫, 等. 张家峁煤矿智能化建设与实践[J]. 中国煤炭, 2020, 46(12): 54-60.  
REN Huawei, XUE Zhongxin, GONG Shixin, et al. Intelligent construction and its practice in Zhangjiaomo Coal Mine[J]. *China Coal*, 2020, 46(12): 54-60.
- [16] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L, NITHIARAS P. The finite element method for fluid dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [17] 赵玉玲, 孔令坡, 谢恩情, 等. 微乳型液压支架用乳化油 HFAE10-5 的研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(增刊 2): 266-267.  
ZHAO Yuling, KONG Lingpo, XIE Enqing, et al. Application and research on emulsifying oil HFAE10-5 used in micro-emulsifying hydraulic support[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(S2): 266-267.
- [18] 严升明, 房风浩. 乳化液润滑的当量粘度系数[J]. 润滑与密封, 2006(3): 65-66, 87.  
YAN Shengming, FANG Fenghao. The equivalent viscosity coefficients of lubrication with emulsion[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(3): 65-66, 87.
- [19] 周如林, 李首滨, 韦文术, 等. 跟机液压系统压力流量耦合机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 129-136.  
ZHOU Rulin, LI Shoubin, WEI Wenshu, et al. Study on coupling mechanism of pressure and flow in following hydraulic system of mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(5): 129-136.
- [20] 张德生, 祝琨, 张赛, 等. 综采工作面快速采煤技术现状及发展趋势[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 1-5.  
ZHANG Desheng, ZHU Kun, ZHANG Sai, et al. Present situation and prospect of rapid mining technology in fully-mechanized mining face[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(11): 1-5.