



综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用

马英 张德生 赵叔吉 张帅

引用本文:

马英, 张德生, 赵叔吉, 等. 综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 238-247.

MA Ying, ZHANG Desheng, ZHAO Shuji. Research and application of liquid supply system with distributed energy accumulators in fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 238-247.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿综采工作面巡检机器人系统研究

Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0988492b-5856-4082-a405-ee00721d312b>

工作面智能供液技术进展与应用

Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 247-253 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0487>

综采工作面智能供液技术及发展趋势

Intelligent fluid supply technology in fully-mechanized coal miningface and its development trend

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a09b94e8-42ca-45b8-b4b1-3308c69ebb8d>

大采高综采工作面设备智能控制系统研究

Research on equipment intelligent control system in large mining height fully-mechanized face

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 192-199 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6bab11b4-5102-4674-bc02-770a75f731a0>

综采工作面自动巡检机器人系统设计

Design of automatic inspection robot system for fully-mechanized coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 145-149 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8b2026b0-3666-4b22-a290-41ab7b075fcb>

冲击地压矿井综采工作面两巷超前支护液压支架研究

Research of hydraulic powered supports for entries' advanced support in fully-mechanized working face of rock burst mine

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 1-12 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a9b966da-ea17-4349-9741-9f9dd388c875>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

马英,张德生,赵叔吉,等.综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用[J].煤炭科学技术,2024,52(9):238-247.

MA Ying, ZHANG Desheng, ZHAO Shuji, *et al.* Research and application of liquid supply system with distributed energy accumulators in fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 238-247.



马英,男,辽宁海城人,研究员,博士生导师,博士,教育部“长江学者”校企特聘学者,中国煤炭科工集团一级首席科学家,中煤科工开采研究院智能开采装备分院院长,中国矿业大学(北京)兼职博士生导师,兼任国家矿山安全监察局煤矿安全智能化开采重点实验室副主任。荣获 2020 年度“孙越崎青年科技奖”;2022 年荣获“杰出工程师青年奖”。主要成果:主持国家自然科学基金面上项目 2 项,参与包括国家重点研发计划、国家自然科学基金重点项目、省部级等各类科研项目 20 余项。获得国家科技进步奖二等奖 1 项,省部级特等奖 3 项,省部级一等奖 8 项。发表论文 35 篇,授权发明专利 23 项,制订国家标准 6 项,出版专著 3 部。主要从事煤矿工作面智能化开采与高端煤机装备研发、大型煤矿智能化建设等创新技术与工程实践。

综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用

马英^{1,2},张德生^{1,2},赵叔吉^{1,2},张帅^{1,2}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013)

摘要:为解决综采工作面跟机移架速度慢的问题,提出了基于蓄能器的分布式供液系统,并在柠条塔 S1204 工作面开展了试验应用。根据工作面的采煤工艺和产能要求确定了跟机移架速度,建立了全工作面供液系统仿真模型,对液压支架单架、双架和三架同时移架的动作过程进行模拟并分析影响移架时间的因素,结果表明:为使工作面生产能力提升到 1 000 万 t/a,中部液压支架跟机速度要达到 12 m/min 以上,需采用双架或三架成组移架来满足其移架时间的要求。为解决该工况压力波动大且易产生丢架的现象,提出在液压支架上设置“蓄能器+单向阀”的分布式蓄能稳压方案,以平衡工作面液压系统瞬时大流量供给不足与平均供液能力过剩的矛盾,并给出了基于流量补偿的蓄能器选型方法。仿真分析表明在安装分布式稳压供液系统后,双架和三架成组移架时间分别减少 6.2% 和 11.5%,尤其在受到其他系统用液扰动条件下,双架成组移架时间可缩短 15% 以上。井下应用结果表明,安装的分布式蓄能供液系统显著降低了成组拉架中的丢架现象,保证了采煤机运行速度达 12 m/min 以上;对工作面平均日进尺由 16.7 刀提高到 19.8 刀起到重要支撑作用,实现了常态化日进尺 22 刀,达到了年产 1 000 万 t 的生产能力,研究工作为综采工作面快速成组跟机移架提供了有效解决方案。

关键词:综采工作面;液压系统;快速移架;分布供液;蓄能器

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2024)09-0238-10

Research and application of liquid supply system with distributed energy accumulators in fully-mechanized mining face

MA Ying^{1,2}, ZHANG Desheng^{1,2}, ZHAO Shuji^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: To solve the problem of rapid following and advancing speed of support in the fully mechanized mining face, a distributed liquid supply system based on accumulators was proposed and tested in the S1204 working face in Ningtiaota Coal Mine. The speed of ad-

收稿日期:2024-05-20 责任编辑:常琛 DOI: 10.12438/cst.2024-1115

基金项目:国家重点研发计划课题资助项目(2023YFC2907504);国家自然科学基金面上项目(52374207);中煤科工开采研究院有限公司科技创新基金面上资助项目(KCYJY-2024-MS-08)

作者简介:马英(1982—),男,辽宁海城人,研究员,博士。E-mail: maying1982129@163.com

vancing support movement in the middle of working face was determined based on the coal mining process and capacity requirements, and a simulation model was established for the existing liquid supply system to simulate the advancing process of single, double, and triple supports, and the factors affecting the advancing time of supports were analyzed. The results showed that the following speed should reach 12 m/min to meet the capacity requirements which is 10 million tons per year of the working face. The double or triple support moving in groups was necessary to meet the requirements of advancing time. To solve the problem of large pressure fluctuations and easy support loss in this working condition, the distributed energy storage and pressure stabilization promoting scheme was proposed to balance the contradiction between insufficient instantaneous flow supply and excessive average flow supply capacity in the hydraulic system of the working face by installing “accumulator+check valve” on the hydraulic support. The design method of accumulators based on the flow compensation was also provided. The simulation results showed that after installing the accumulator, the advancing time for double and triple support movement in groups was reduced by 6.2% and 11.5% respectively. Especially after continuous interference, the advancing time for double support movement in groups could be reduce by 15%. The underground application results showed that after installing the distributed accumulators in the liquid supply system, the advancing speed of the supports was significantly improved, and the phenomenon of loss in group pulling was significantly reduced. It played an important supporting role in increasing the average daily footage of the working face from 16.7 to 19.8 cuts, with a normalized daily footage of 22 cuts, achieving an annual production capacity of 10 million tons. This study provides an effective solution method to achieve rapid movement of support in groups.

Key words: fully-mechanized mining face; hydraulic system; rapidly moving support; distributed liquid supply system; accumulator

0 引言

近年来以超长、超高工作面为代表的千万吨工作面不断涌现,随着综采工作面长度和采高不断加大、采煤机运行速度不断提高^[1-4]。现有综采工作面供液系统在多架成组动作时管路压力降低、瞬时流量不足,经常会遇到移架速度过慢或丢架等现象^[5],严重影响了采煤机的正常运行,对自动跟机移架等自动化功能的实现也带来挑战^[6-7]。为了实现工作面稳定高质量供液,保证采煤工作面连续高效运行,相关文献从高压大流量泵站、液压系统关键元部件、液压系统拓扑结构、供液系统控制等方面进行了相关研究。在大流量泵站方面,文献[8]综合采用大流量乳化液泵、超高压泵、电磁卸荷阀与智能变频控制软硬件等组成超大采高综采工作面智能集成供液系统,提高了泵站供液效率;在关键元部件方面,文献[9]通过在液压支架架间安装双进双回多通块、反冲洗过滤器、支架立柱液控换向阀、立柱液控单向阀、换向阀组等液压元件,来实现支架快速降架、移架和升架的动作要求;在液压系统拓扑结构优化方面,文献[10]提出了地面集中配液及采区远距离供液系统,保障了采煤工作面高质量用液需求;在控制系统优化方面,分为定频供液技术和变频供液技术,在定频供液方面,文献[11-12]对多泵联动的控制方法进行了研究,利用泵站运行过程在线检测结果调整乳化液泵启动顺序,在变频供液方面,文献[13]根据采煤机、刮板输送机 and 液压支架自动跟机参数,计算出液压支架动作时的流量需求,对泵站供液系统提前进行变频调节,从而实现智能供液。

当前供液系统主要问题在于瞬时的大流量需求和平均供液能力过剩之间的矛盾,蓄能器作为机械中常用的能量储存装置,可作为容性元件对液压系统起到稳压和流量补偿的作用^[14-15]。以柠条塔S1204工作面为示范,提出了工作面液压支架分布式蓄能供液技术,给出了蓄能器选型方法,通过井下工业性试验,验证了分布式蓄能供液系统效果。

1 工作面基本情况及跟机需求

1.1 工作面基本情况

柠条塔煤矿S1204工作面煤层属于陕北侏罗纪浅埋煤层,厚度4.1~4.5 m,平均厚度4.31 m,埋藏深度169~200 m,煤层结构简单、赋存稳定,煤层硬度系数 $f=1.22$ 。工作面走向长度4 021.6 m,倾向长度339.1 m,采用一次采全高方式采煤。采煤机割煤后,依次滞后采煤机后滚筒2~3架及时移架支护顶板,刮板输送机滞后采煤机10~12架逐段推出。

工作面液压支架型式为两柱掩护式,型号为ZY10000/22/45D,中心距1.75 m。支架整体刚性顶梁,前端设一级护帮装置,顶梁和掩护梁设双侧活动式侧护板,前后连杆均为分体式双连杆。底座采用刚性结构形式,中部底板全开档。推移机构为整体推移框架长推杆,推移千斤顶倒装。立柱及千斤顶规格见表1。

工作面的供液系统如图1所示,采用双供、双回环形供液系统。主进、主回、供水胶管规格见表2。

1.2 跟机移架速度需求

工作面采用割三角煤端部斜切进刀双向割煤方式回采,割煤方式如图2所示。在割一刀煤循环过

表1 立柱及千斤顶规格
Table 1 Leg and ram specifications

项目	缸径/mm	杆径/mm	行程/mm
立柱	400/290	380/260	2 300
推移千斤顶	200	140	960
侧推千斤顶	80	60	200
平衡千斤顶	230	160	—
抬底千斤顶	160	120	—
护帮千斤顶	125	85	—
底调千斤顶	140	105	260

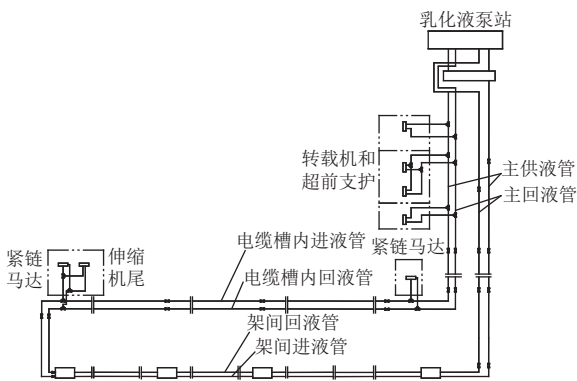


图1 S1204工作面供液系统

Fig.1 Liquid supply system of S1204 working face

表2 胶管规格
Table 2 Hose specification

胶管	胶管规格	工作压力/MPa	长度/m
主供液管	DN63S	40	600
主回液管	DN75	20	600
电缆槽内主供液管	DN50S	40	400
电缆槽内主回液管	DN63	20	400

程中采煤机运行路线为: A→B→C→B→A→B→C→D→E, 依次为割底煤、斜切进刀、割三角煤、割底煤、跑空刀、正常割煤阶段。

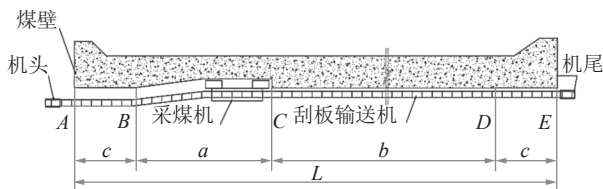


图2 割煤方式

Fig.2 Coal cutting method

此割煤方式循环时间的计算公式为

$$T_s = \frac{c}{V_d} + \frac{a-c}{V_j} + t_0 + \frac{c}{V_d} + \frac{a}{V_s} + t_1 + \frac{c}{V_d} + \frac{a-c}{V_k} + \frac{b+c}{V_c} + t_1 \quad (1)$$

式中, T_s 为双向割煤端头斜切进刀采煤工艺的循环时间, min; t_0 为停机等待移动端头支架及输送机头(尾)时间, min; t_1 为采煤机在升降前后滚筒和翻转滚筒挡煤板所需时间(只在与其他工序不平行时参与计算), min; a 为斜切进刀段长度, m; b 为正常割煤段长度, $b = L - a - 2c$, m; L 为工作面长度, m; c 为采煤机在端头割底煤段长度, 一般取采煤机机身长度, m; V_j 为采煤机在斜切进刀时的割煤速度, m/min; V_s 为采煤机在割三角煤时的割煤速度, m/min; V_c 为采煤机正常时的割煤速度, m/min; V_d 为采煤机在割底煤时的割煤速度, m/min; V_k 为采煤机走空刀时的运行速度, m/min。

按一年工作 330 d, 一天工作 18 h, 开机率按 88% 计算, 移架步距 0.865 m, 煤的密度为 1.3 t/m³, 每一刀煤产量为 1 643.48 t。不同采煤机速度下, 循环时间及年实际产量见表 3。

表3 不同采煤机速度对应的年产量

Table 3 Annual production under different mining rates

V_j /(m·min ⁻¹)	V_s /(m·min ⁻¹)	V_c /(m·min ⁻¹)	V_d /(m·min ⁻¹)	V_k /(m·min ⁻¹)	循环时间/min	每日实际循环刀数	实际年产量/万t
2	4	6	4	10	92	10	542
3	6	10	6	12	64	15	814
4	8	12	8	14	50	19	1 030

由表 3 可见, 为将工作面产能由 800 万 t 提升到 1 000 万 t, 中部支架跟机速要达到 12 m/min 以上, 即单架依次顺序式移架时, 移架时间要求为 $t_1 \leq 8.75$ s; 成组移架 (2 架) 时, 移架时间要求为 $t_2 \leq 17.5$ s。

2 工作面液压支架用液需求及动作时间

2.1 需液量理论计算分析

液压支架移架过程主要包括降—移—升 3 个阶段^[16-17], 以及收和伸护帮操作, 液压支架升降架时需要的流量分别为

$$V_1 = \frac{n\pi D_1^2 L_1}{4 \times 10^6} \times 2 \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{n\pi(D_1^2 - d_1^2)L_1}{4 \times 10^6} \times 2 \quad (3)$$

式中, V_1 为立柱升柱需液量, L; V_2 为立柱降柱需液量, L; n 为成组移架数; D_1 为立柱底缸缸径, mm; d_1 为立柱中缸杆径, mm; L_1 为立柱升降柱位移, mm。

同理, 移架时的需液量^[18]为

$$V_3 = \frac{n\pi D_2^2 L_2}{4 \times 10^6} \quad (4)$$

式中： V_3 为推移千斤顶移架需液量， L ； D_2 为推移千斤顶杆径，mm； L_2 为移架步距，mm；

因刮板输送机滞后采煤机逐段推出，故对应推溜时的需液量^[18]为

$$V_4 = \frac{n\pi(D_2^2 - d_2^2)L_2}{4 \times 10^6} \quad (5)$$

式中： V_4 为推移千斤顶推溜需液量， L ； d_2 为推移千斤顶杆径，mm

单架推溜移架时，将 $n=1$ ， $D_1=400$ mm， $d_1=380$ mm， $L_1=150$ mm， $D_2=200$ mm， $d_2=140$ mm， $L_2=865$ mm 代入公式。得到推溜移架时的所需乳化液总体积为

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 82.39 \text{ L} \quad (6)$$

目前安装在工作面的单台乳化泵额定流量为 530 L/min，日常使用时 2 台并用，泵站总的流量为 1 060 L/min。假设泵站以额定流量输出时，全部流量用于支架动作，移架时间 $T_1=4.66 \text{ s} < 8.75 \text{ s}$ 。表明在理想状态下，泵站流量可满足液压系统需求。但在实际液压支架成组推溜移架过程中，由于供液管路和阀等液压元器件的液阻、液压支架惯性以及其他系统用液需求，经常会出现移架过慢，丢架等现象，无法保证跟机需求。为了综合考虑各类情况，建立工作面液压系统仿真模型，对影响跟机移架过程的因素进行分析。

2.2 跟机移架仿真模型

2.2.1 液压系统仿真模型设置

根据 S1204 工作面的液压系统管路图和割煤后

的移架工序，建立全工作面供液系统模型，因为只关注采煤机前进过程中各支架的推溜和移架情况，对超前支架、转载机等供液系统进行了简化，具体模型如图 3 所示，该模型包含了 2 台泵站、10 个推移油缸及对应的载荷和三位四通换向阀、3 台液压支架仿真模型等组成，默认采煤机位置在液压支架模型右侧向右行走。

根据采煤机割煤后的移架顺序（依次滞后采煤机后滚筒 2~3 架及时移架支护顶板，刮板输送机滞后采煤机 10~12 架逐段推出），液压支架阶梯式推进。设计动作顺序从时间为 0 时开始，左侧推移油缸同时收缩，模拟推溜动作；右侧 3 个液压支架单架、双架或 3 架同时循环进行降—移—升动作，分别模拟单架依次顺序式、双架成组移架和 3 架成组移架 3 种移架模式，以此模拟推溜移架过程中液压系统的压力—流量状态，仿真模型运行总时间为 25 s，其具体的初始参数设置见表 4。

2.2.2 液压支架仿真模型

因为液压支架包含大量的液压系统元件，故在液压系统仿真模型中建立液压支架为超元件 (super model)，在图 3 中以支架图片表示。同时对喷雾、底调、侧推油缸进行了简化，支架仿真模型如图 4 所示。

2.2.3 仿真逻辑控制

在液压支架动作时，动作时序如图 5 所示。首先降立柱，收护帮板，等待支架降到一定高度后，抬底千斤顶和推移千斤顶伸出，进行移架动作；移架动作完成后，升立柱、伸护帮等进行升架动作；最后推

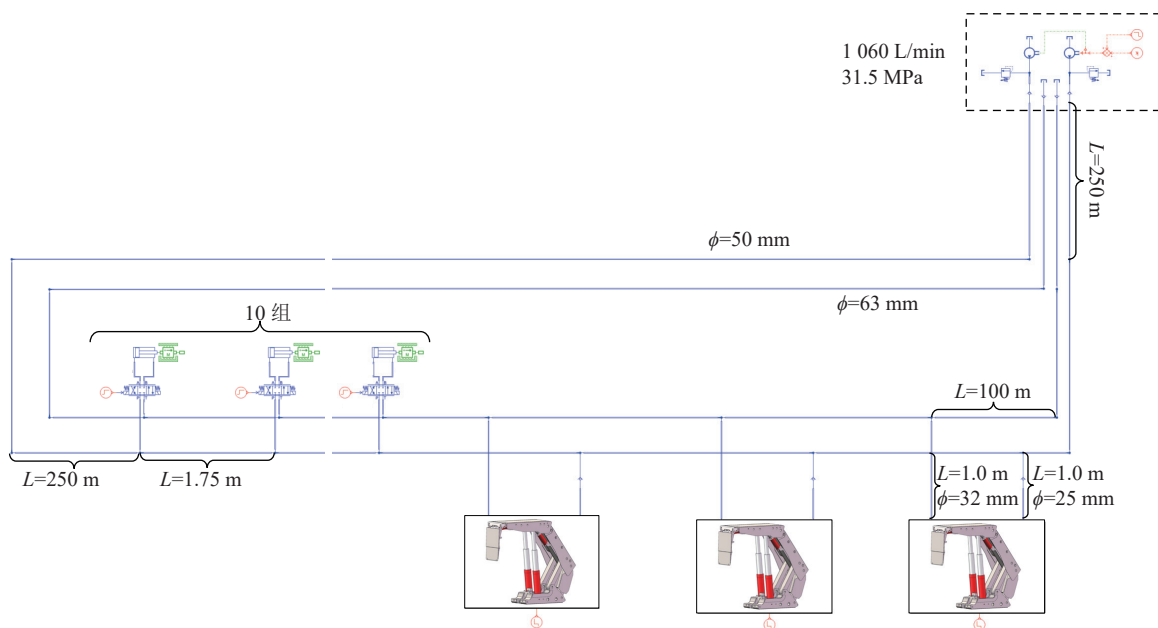


图 3 工作面液压系统仿真模型

Fig.3 Simulation model for hydraulic system

表4 仿真参数

Table 4 Simulation parameters

项目	关键初始参数
乳化液泵站	流量530 L/min
推移千斤顶	行程0.865 m, 杆径/缸径140 mm/200 m
立柱液控阀	额定流量500 L/min, 对应压降6 MPa
推移千斤顶液控阀	额定流量400 L/min, 对应压降6 MPa
其他千斤顶液控阀	额定流量125 L/min, 对应压降6 MPa
卸荷(溢流)压力	溢流压力31.5 MPa
推移阻力	100 000 N
乳化液	密度998 kg/m ³ [19], 绝对黏度1.49 mPa·s[20]

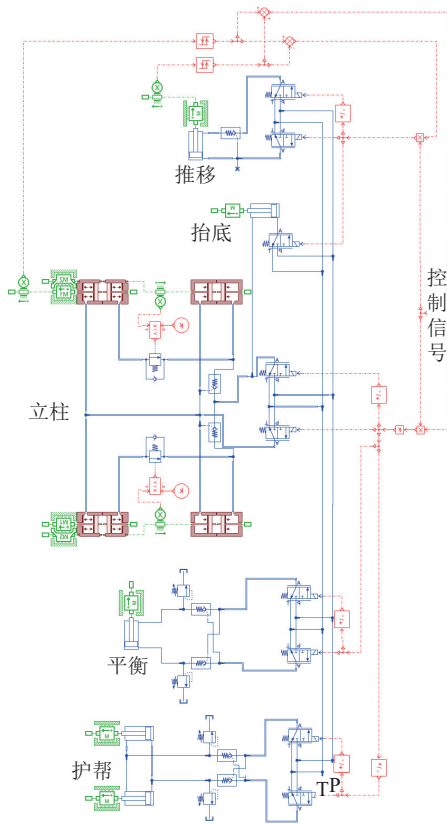


图4 超元件仿真模型

Fig.4 Hyperelement simulation model

移千斤顶收回, 刮板输送机推出, 完成移架推溜的整个动作循环。这里需要说明, 收护帮动作在采煤机前方的支架发生, 这里将降柱和收护帮版动作一起

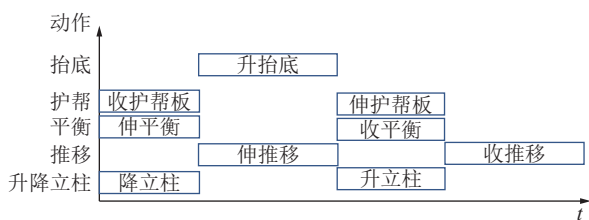


图5 液压支架动作时序

Fig.5 Action sequences of supports

完成以简化仿真模型。在仿真系统中设置逻辑模块如图6所示, 通过判断液压支架中的千斤顶行程来控制支架动作。

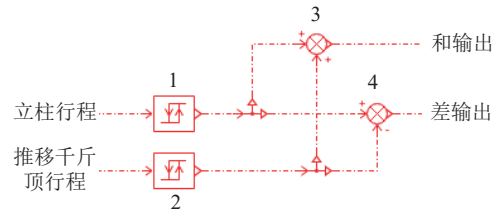


图6 逻辑控制模块

Fig.6 Logic control modules

图6中1,2代表触发模块,3,4代表加减运算模块。触发模块表示输入值大于或小于某个值时, 输出对应的值,1号触发模块接收的是立柱的位移信号,2号触发模块接收的是推移千斤顶的位移信号,其判断值和输出值分别记为 X_1, X_2 和 Y_1, Y_2 ,见表5。

表5 触发模块输出条件

Table 5 Output condition of triggers module

序号	初值	触发条件
1	-1	$X_1 > 2.3, Y_1 = -1; X_1 < 2.15, Y_1 = 1$
2	-1	$X_1 > 0.865, Y_2 = 1; X_1 < 0, Y_2 = -1$

加减运算模块可将输入的两个值进行加减, 符号由输入口的符号确定。

初始时, 设置立柱位移为其行程, 即 2.3 m, 推移千斤顶位移为 0。通过对触发器输出值的加减, 可以得到 4 种状态值, 规定 $Y_1 = -1, Y_2 = -1 (Y_1 + Y_2 = -2, Y_1 - Y_2 = 0)$ 时立柱下降; $Y_1 = 1, Y_2 = -1 (Y_1 + Y_2 = 0, Y_1 - Y_2 = 2)$ 时推移千斤顶前进; $Y_1 = 1, Y_2 = 1 (Y_1 + Y_2 = 2, Y_1 - Y_2 = 0)$ 时立柱上升; $Y_1 = -1, Y_2 = 1 (Y_1 + Y_2 = 0, Y_1 - Y_2 = -2)$ 时推移千斤顶收回, 这样我们可以得到触发模块输出值和液压缸按照规律运动的曲线, 以某次仿真的结果如图7所示。

由曲线可以看出, 通过逻辑控制模块监测立柱和推移千斤顶输出值, 可完整控制液压支架完成降—移—升—推溜的动作循环。

2.3 快速供液系统影响因素仿真分析

2.3.1 千斤顶位移仿真分析

对液压系统仿真模型进行仿真, 分别模拟单架、双架和三架同时进行移架推溜连续动作时的情况, 得到不同情况下液压支架推移千斤顶和立柱的位移如图8、图9所示。

从图8、图9可以看到, 液压支架立柱下降前期速度较低, 因为此时液压支架进行推溜动作, 进液管

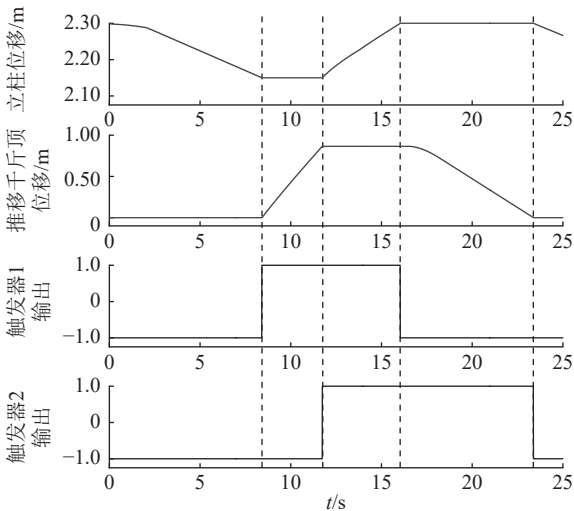


图 7 逻辑控制模块与千斤顶行程

Fig.7 Logic control module with ram stroke

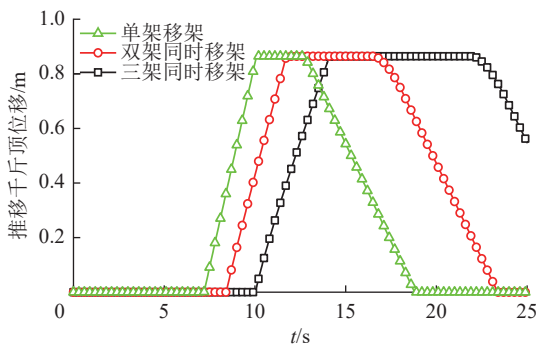


图 8 推移千斤顶位移曲线

Fig.8 Displacement of advancing ram

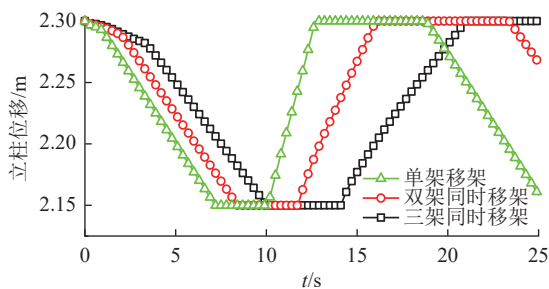


图 9 立柱位移曲线

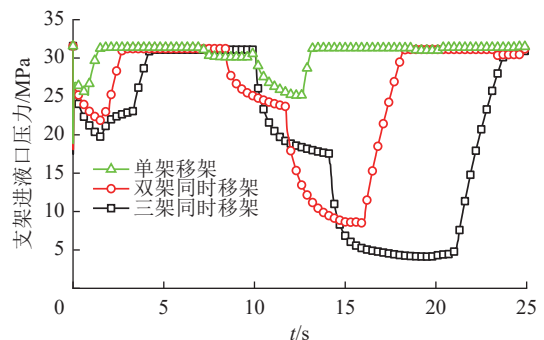
Fig.9 Displacement of leg

流量不足。随着同时动作支架数目增多，液压支架完成移架动作（降—移—升）所需的时间逐渐增长，分别为 12.68, 16.02、20.95 s。在仿真计算中降移升所需时间分别为理想值的 2.72, 1.71 和 1.49 倍，为达到平均每架移架时间小于 8.75 s 的设计要求，必须采用双架或三架成组移架方式。在实际生产中，为保证工作面安全支护，工序简单便于操作，实际移架多以两架成组移架为主。为了提高支架跟机速度，接下来对推溜移架过程液压系统的压力流量波动情况

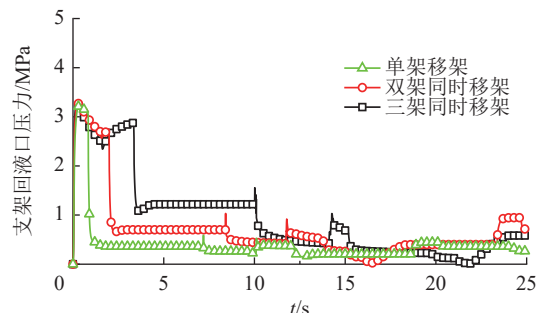
进行分析，研究影响移架时间的因素。

2.3.2 液压系统压力流量波动仿真分析

移架过程中液压支架进回液口压力曲线如图 10 所示。结合图 8 和图 9 的立柱和推移千斤顶位移曲线发现，支架立柱降柱时，支架进液口压力系统基本始终保持在额定压力 (31.5 MPa)，表明此时流量充足，支架运动过慢主要原因是沿程液阻。而在支架进行立柱升柱动作时，进液口压力均有较大降低，其中 3 架同时升柱时压力降至 4.2 MPa，表明此时影响移架的因素为泵站流量不足。



(a) 支架进液口压力曲线



(b) 支架回液口压力曲线

图 10 支架进回液口压力曲线

Fig.10 Pressure curves of Inlet and outlet

除最开始 10 架液压支架同时进行推溜动作时回液口背压较高外，支架回液口背压绝大部分时间低于 2 MPa，故回液背压不是移架过慢的主要原因。泵站处溢流阀的流量曲线如图 11 所示。

对比溢流阀的流量曲线和立柱与推移千斤顶位移曲线，降柱和推溜动作时，卸荷阀溢流，表明此时流量过剩；而在移架和立柱升柱时，溢流阀溢流流量为 0，表明此时泵站供给流量不能满足支架动作的需要。因此针对多架同时动作的情况，除沿程液阻的影响外，目前影响支架降—移—升动作的主要因素为流量不足带来的压力下降。S1204 工作面采用的旧设备，液压元器件口径、液压系统拓扑结构已定型，为了进一步提高移架速度，提升工作面煤炭产量，需要提出新的解决方案，该工况适合安装蓄能器对液

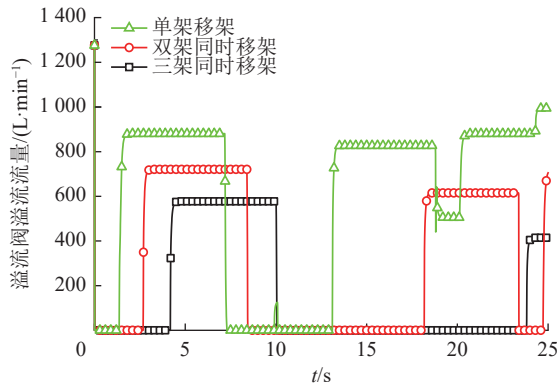


图11 溢流阀溢流流量曲线

Fig.11 Flow curves of overflow valve

压系统进行流量补偿。

3 分布式蓄能供液系统原理及方案

3.1 分布式蓄能供液系统原理

3.1.1 蓄能器工作原理

蓄能器作为常用的液压系统元件,其工作原理为利用气体/弹簧的可压缩性来存储液体,当液体压力升高时,液体由回路进入蓄能器,气体/弹簧被压缩;当系统压力下降时,气体膨胀/弹簧弹出,液体进入回路中。蓄能器作为一种容性元件,主要用于液压系统临时补液和消除液压回路压力波动^[21],其特性十分适合用于解决液压支架移架时面临的流量不足和平均流量过剩这一核心矛盾。

3.1.2 分布式蓄能供液系统原理

利用蓄能器可存储高压液体的特性,设计分布式蓄能供液系统,其原理如图12所示,在每个液压支架上随架安装随架蓄能器,每支蓄能器从进液管经由单向阀到液压支架主阀进行供液,单向阀起到隔离和保压的作用。

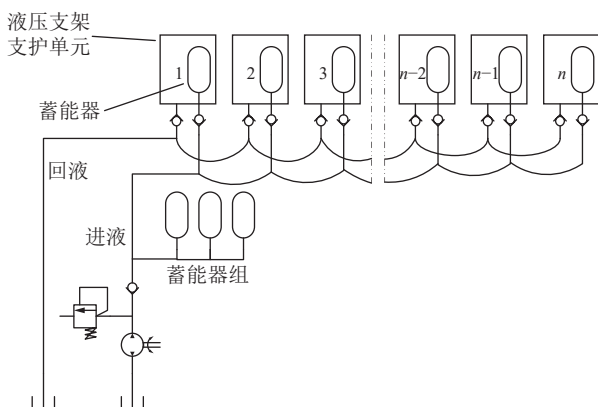


图12 分布式蓄能供液系统

Fig.12 Liquid supply system with distributed energy accumulators

3.1.3 分布式蓄能供液系统蓄能器选型方法

下面给出计算活塞蓄能器有效体积和预充压力方法。

由第2节仿真可知,推溜移架时的流量缺口主要为移架和升柱阶段,其中升柱阶段压力下降最多,以立柱升柱阶段为参考计算蓄能器需求。升柱阶段,立柱克服支架顶梁、护帮板等零部件的重力和之间的摩擦力做功,此时液压系统所需最小压力为:

$$cP_{\min} = \frac{4F_f}{\pi D_1^2} \quad (7)$$

式中, F_f 为立柱升柱阻力, N; P_{\min} 为液压系统所需最小压力, MPa。

此时,为使蓄能器储存的高压乳化液起作用,蓄能器预充气体压力应当满足: $P_0 \geq P_{\min}$, 此时蓄能器储存液体体积可完全用于立柱升柱。

为了方便计算,将气囊中气体认为是理想气体,整个充放液过程温度变化不大,则立柱升柱过程蓄能器可提供的最大乳化液体积为

$$V_m = V_0 \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \quad (8)$$

式中: V_m 为提供最大乳化液体积, L; V_0 为蓄能器体积, L; P 为系统额定压力, MPa。

因此,为了保证立柱升柱阶段蓄能器补偿的流量能够满足需求,蓄能器乳化液体积应满足如下不等式:

$$\frac{1}{4} n \pi L_1 D_1^2 \times 2 \times \frac{1}{10^6} \leq V_m + \frac{Q_0 T}{60} \quad (9)$$

式中: Q_0 为泵站额定流量, L/min; T 为立柱升柱时阀开启时间, s。

即立柱升柱所需乳化液体积小于泵站和蓄能器提供的乳化液体积,当 $V_m = 0$ 时,计算得三架液压支架同时升柱时,阀开启时间 $T \geq 6.40$ s,与仿真所得无蓄能器时升柱所用时间(6.85 s)相近。

基于式(9),蓄能器能提供的有效体积越大越好,综合考虑蓄能器使用要求和安装空间,选定预充压力为 12 MPa,额定体积为 36 L 的蓄能器组成分布式蓄能供液系统。此时计算得 $T \geq 5.13$ s,理论最大升架速度可提高 19.8%。

3.2 分布式蓄能供液系统效果仿真

为验证分布式蓄能供液系统效果,根据图3全工作面液压系统仿真模型进一步建立分布式蓄能供液系统模型,在液压支架进液口处安装单向阀及蓄能器,双架成组移架时推移千斤顶和立柱位移如图13

和图 14 所示。

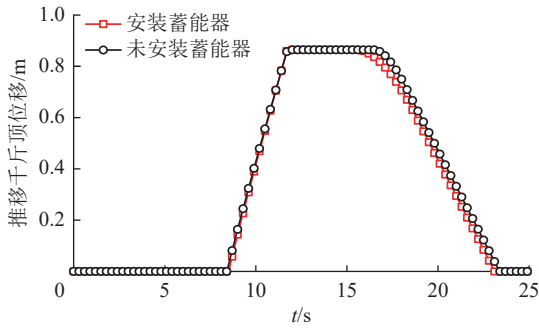


图 13 立柱位移对比

Fig.13 Correlation curves of leg displacement

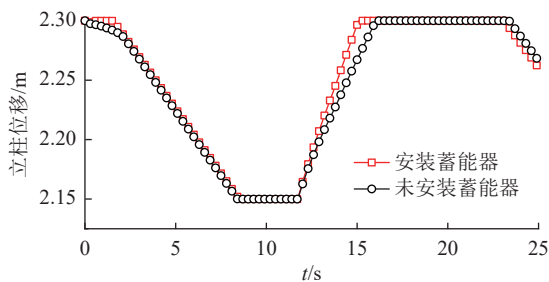


图 14 推移千斤顶位移对比

Fig.14 Correlation curves of advancing ram displacement

由图 13 和图 14 可以发现，安装分布式蓄能供液系统后，单架移动时间和原系统系统一致，双架和三架同时动作时推移千斤顶和立柱速度均有显著提升，液压支架完成移架动作（降—移—升）所需的时间分别为 15.08 s 和 18.79 s，分别减少 6.2% 和 11.5%。

移架过程蓄能器压力流量如图 15 所示，单架支架立柱升柱时，蓄能器体积基本没有变化，与之相对应的安装分布式蓄能供液系统后，单架移架时间没有减少，而双架支架同时动作时蓄能器内乳化液体积减少但未耗尽存储的乳化液，三架支架同时动作时蓄能器内乳化液耗尽，说明若继续增大蓄能器体积，其移架时间可进一步减少。

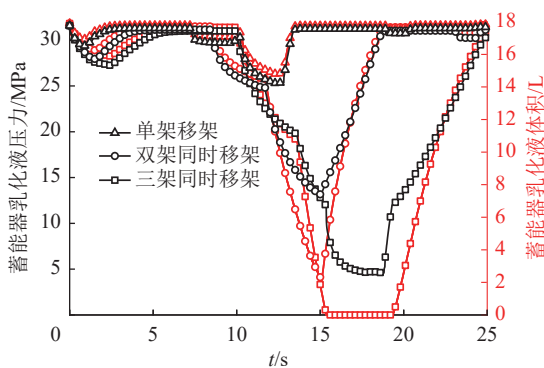


图 15 蓄能器压力流量

Fig.15 Pressure and flow curves of energy accumulators

除此外，分布式蓄能供液系统还有抵抗液压系统波动的作用。模拟井下实际采样的波动情况，假设分流导致一个周期 25 s、幅度 265 L/min 的正弦分流影响，在有无蓄能器的条件下，液压支架动作过程中的压力波动如图 16 所示。无蓄能器时，完成接顶时间为 18.46 s，有蓄能器时，接顶时间为 16.77 s，移架时间减少 15.8%。值得注意的是，支架接顶后蓄能器从液压系统补液，压力升高减慢，降低了支架顶梁对顶板的冲击。

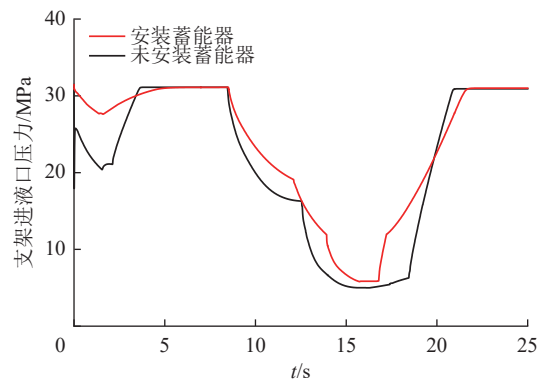


图 16 液压支架进液口压力

Fig.16 Inlet pressure of hydraulic support

4 现场应用效果

在柠条塔煤矿 S1204 工作面进行了工业试验，液压支架安装蓄能器后的井下现场如图 17 所示，蓄能器安装于掩护梁下方，并增加单向阀和开关阀等液压元件。

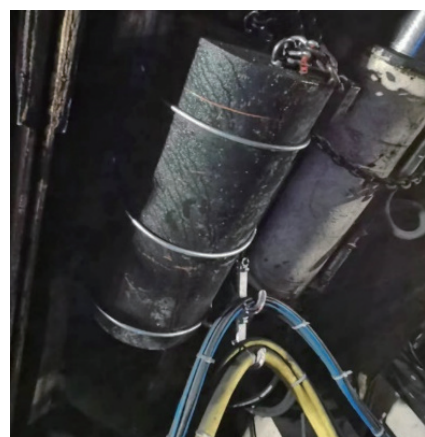


图 17 蓄能器安装现场

Fig.17 Field photo of energy accumulator

移架过程中液压系统各部分压力监测曲线如图 18 所示。可以发现，在外部压力出现波动时（75 s 附近、100 ~ 150 s 区间），蓄能器对支架压力有着很好的保压效果，和泵站压力保持一致，可保证支

架移架时较高的启动压力,符合液压支架的工作特性,显著减小了丢架现象的发生,推移速度提高10%~20%,煤机速度达到12 m/min以上,最高运行速度达到15 m/min,运行过程压力较为平稳。

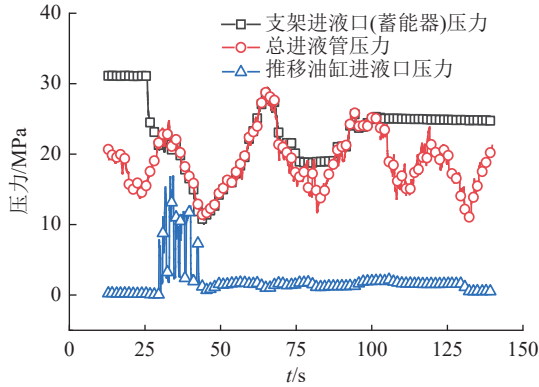


图18 压力波动曲线

Fig.18 Pressure curves

根据统计对比,分布供液系统部署后,保障了跟机移架速度,并通过三角煤自动截割等工艺的优化,将日均进尺由5月的16.7刀提升为8月的19.8刀,并实现了日进尺22刀的常态化推采,达到了提高支架推移速度,增加工作面产量的目标。图19为在安装分布式蓄能后的产量对比(5月20日后开始试运行)。

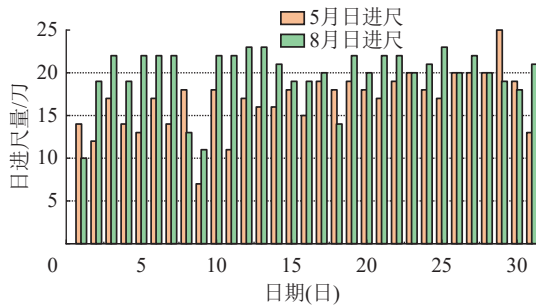


图19 工作面产量对比

Fig.19 Comparison of coal production

5 结 论

1) 针对液压支架成组移架过程的问题,提出了在工作面每台液压支架上设置“蓄能器+单向阀”的分布蓄能器供液系统方案,并给出了以液压系统所需最小压力和流量缺口为依据的蓄能器选项原则。

2) 建立了全工作面液压系统仿真模型,分析影响移架速度的因素并比较了有无蓄能器对单架、双架和三架同时移架时的影响,结果表明在1 060 L/min供液条件下,单架的供液能力基本处于饱和状态,移架速度基本一致,两架和三架同时移架的速度

分别提升6.2%和11.5%。在扰动条件下,双架速移架速度可提升15%以上,分布式蓄能供液系统表现出较强的稳压和保压能力。

3) 在柠条塔S1204工作面进行了分布式蓄能供液系统的试验应用。工作面现场观测和统计数据表明,该系统部署后液压系统压力波动明显抑制,保证了较高的拉架启动压力,日均进尺由5月的16.7刀变为8月的19.8刀,并实现了日进尺22刀的常态化推采,助力完成工作面年产量从800万t提升至1 000万t的目标。该技术的成功应用,对于提高支架推移速度,提高煤炭开采效率和智能化水平具有重要价值。

参考文献(References):

- [1] 王国法,任怀伟,赵国瑞,等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. 工矿自动化,2021,47(6): 1-11.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO guorui, *et al.* Analysis and Countermeasures of Ten “Pain Points” of intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1-11.
- [2] 王国法,徐亚军,张金虎,等. 煤矿智能化开采新进展[J]. 煤炭科学技术,2021,49(1): 1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinghu, *et al.* New Development of Intelligent Mining in Coal Mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [3] 王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1): 1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [4] 刘峰,郭林峰,张建明,等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J]. 煤炭学报,2024,49(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, *et al.* Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [5] 刘清,韩秀琪,徐兰欣,等. 综采工作面采煤机和液压支架协同控制技术[J]. 工矿自动化,2020,46(5): 43-48.
LIU Qing, HAN Xiuqi, XU Lanxin, *et al.* Cooperative control technology of shear and hydraulic support on fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 43-48.
- [6] 任怀伟,张帅,张德生,等. 液压支架精准推移与快速跟机技术研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化,2022,48(8): 1-9, 15.
REN Huaiwei, ZHANG Shuai, ZHANG Desheng, *et al.* Research status and development trend of hydraulic support precision pushing and fast follow-up technology[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(8): 1-9, 15.
- [7] 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 Huaiwei, 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.
- [8] 刘永亮, 李艳杰, 崔耀. 超大采高工作面智能集成供液系统研究与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(S2): 387–392.
- LIU Yongliang, LI Yanjie, CUI Yao. Research and application of intelligent integrated liquid supply system for super high mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S2): 387–392.
- [9] 李福洪. 液压支架立柱快速供液系统研发与应用[J]. *智能矿山*, 2024, 5(2): 67–71.
- LI Hongfu. Development and application of hydraulic support rapid liquid supply system[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2024, 5(2): 67–71.
- [10] 李永明. 采煤工作面集中配液及远程供液系统应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(S1): 183–187.
- LI Yongming. Application of centralized liquid distribution and remote liquid supply system in coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(S1): 183–187.
- [11] 冯广生. 智能高端乳化液泵站控制系统研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- FENG Guangsheng. The research of intelligent control system for emulsion pump station[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [12] 张盼盼. 乳化液泵站自动监控系统研究与开发[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- ZHANG Panpan. The research and development of emulsion pump station automatic monitoring system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.
- [13] 李然. 综采工作面智能供液技术及发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 203–207.
- LI Rang. Intelligent fluid supply technology in fully-mechanized coal mining face and its development trend[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 203–207.
- [14] 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 Machinery*, 2022, 50(12): 1–6.
- [15] 李雨亭, 张燕燕, 韩俊伟, 等. 超大流量蓄能器组优化设计及其压力控制方法[J]. *液压与气动*, 2018(7): 29–32.
- LI Yuting, ZHANG Yanyan, HAN Junwei, *et al.* Optimization Design and Pressure Control Method for Accumulator with Ultra-large Rate of Flow[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(7): 29–34.
- [16] 高有进, 杨艺, 常亚军, 等. 综采工作面智能化关键技术现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 1–22.
- GAO Youjin, YANG Yi, CHANG Yajun, *et al.* Status and prospect of key technologies of intelligentization of fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 1–22.
- [17] 高卫勇, 张敏娟. 综采工作面液压支架跟机自动化工艺研究[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(11): 14–17.
- GAO Weiyong, ZHANG Minjuan. Research on following automation technology of hydraulic support on fully-mechanized coal mining face[J]. *Journal of and Mine Automation*, 2018, 44(11): 14–17.
- [18] 赵叔吉. 工作面蓄能器选型方法及仿真验证[J]. *煤矿机械*, 2024, 45(1): 65–67.
- ZHAO Shuji. Type selection method and simulation verification of accumulator in working face[J]. *Coal Mine Machinery*, 2024, 45(1): 65–67.
- [19] 周如林, 乔子石, 孟令宇. 综采工作面液压支架立柱快速供回液方案研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(11): 74–80.
- ZHOU Rulin, QIAO Zishi, MENG Lingyu. Study on the fast fluid supply and return scheme of hydraulic support column in fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(11): 74–80.
- [20] 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.
- [21] 李军霞, 程昆鹏. 蓄能器对断带保护装置控制系统特性影响仿真试验[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(8): 143–149.
- LI Junxia, CHENG Kunpeng. Simulation experiment on accumulator affected to control system characteristics of belt-broken protective device[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 143–149.