



## 大倾角煤层伪俯斜工作面平行四边形液压支架结构与运动响应

伍永平 杜玉乾 解盘石 王红伟 胡博胜 闫壮壮 王同 胡涛

### 引用本文:

伍永平, 杜玉乾, 解盘石, 等. 大倾角煤层伪俯斜工作面平行四边形液压支架结构与运动响应[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 314–325.

WU Yongping, DU Yuqian, XIE Panshi. Structural design and motion response of parallelogram hydraulic support in pitching oblique mining face of steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 314–325.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1437>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 大倾角煤层伪俯斜工作面液压支架设计系统实用性分析

Practicability analysis of hydraulic support design system for steeply dipping coal seam inclined pseudo inclined working face  
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 187–198 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1451>

#### 大倾角走向长壁伪俯斜采场支架稳定性分析

Stability analysis of support under gangue filling condition in pitching oblique mining area of steeply dipping seam  
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 60–69 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/28d806d2-2f6a-4b36-b30e-577ba908c544>

#### 大倾角大采高采场塑性区分布及主控因素分析

Plastic zone distribution and main controlling factors analysis of large mining height face in steeply dipping coal seam  
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 55–64 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0949>

#### 大倾角大采高开采支架动载失稳机理及控制

Dynamic instability mechanism of support and its control in longwall mining of steeply dipping coal seam  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 58–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1746>

#### 大倾角工作面顶板漏冒飞矸运动轨迹分析及防护装置

Motion track analysis and protective device of flying gangue in roof leakage of steeply dipping working face  
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 139–144 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fa7b751c-dc52-40e1-9e09-6b065db26a12>

#### 大倾角过断层综采工作面支架失稳机理及控制技术

Mechanism and control technology of support instability in fully-mechanized mining face in thick coal seam with large dip angle and fault  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 16–22 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d602a4ea-91fc-4576-97ce-e8db6893dc71>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 机电工程与智能化



移动扫码阅读

伍永平, 杜玉乾, 解盘石, 等. 大倾角煤层伪俯斜工作面平行四边形液压支架结构与运动响应[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 314–325.

WU Yongping, DU Yuqian, XIE Panshi, *et al.* Structural design and motion response of parallelogram hydraulic support in pitching oblique mining face of steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 314–325.

# 大倾角煤层伪俯斜工作面平行四边形液压支架 结构与运动响应

伍永平<sup>1,2</sup>, 杜玉乾<sup>1,2</sup>, 解盘石<sup>1,2</sup>, 王红伟<sup>1,2</sup>, 胡博胜<sup>1,2</sup>, 闫壮壮<sup>1,2</sup>, 王 同<sup>1,2</sup>, 胡 涛<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 液压支架是大倾角煤层伪俯斜工作面“围岩—装备”系统稳定性的核心, 现有液压支架结构无法适应伪俯斜开采空间稳定性要求, 严重影响了该类条件下工作面安全高效开采。以大倾角煤层伪俯斜开采工作面为研究背景, 采用工程类比、结构运动学分析、数值仿真的综合研究方法, 分析了大倾角伪俯斜工作面“支架—围岩”稳定性特征, 并以ZY7000/22/45型液压支架为基础, 发明一种新型平行四边形液压支架, 进行了结构合理性设计, 分析了关键构件运动学响应特征。研究表明: 大倾角伪俯斜综采工作面垮落矸石非均匀填充以及矸石对支架的砸、压、推作用是影响支架稳定性的关键因素, 平行四边形顶梁与底座更适应伪俯斜工作面。设计的平行四边形支架顶梁、底座及立柱排布方式为平行四边形, 异形掩护梁与后连杆、油缸连杆、底座构成柔性四连杆结构。平行四边形支架立柱为主要承载结构, 油缸连杆为主要运动机构, 其运动特征影响因素主要为上下柱窝间距和前后连杆与掩护梁铰接位置间距, 其中掩护梁与后连杆是支架位姿调控的关键, 且支架运动过程中无双扭线产生。研究结果为该类条件工作面支架提供了一种选型, 一定程度上保障了该类煤层的安全生产。

**关键词:** 大倾角煤层; 伪俯斜; 平行四边形液压支架; 结构设计; 运动响应

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0314-12

## Structural design and motion response of parallelogram hydraulic support in pitching oblique mining face of steeply dipping coal seam

WU Yongping<sup>1,2</sup>, DU Yuqian<sup>1,2</sup>, XIE Panshi<sup>1,2</sup>, WANG Hongwei<sup>1,2</sup>, HU Bosheng<sup>1,2</sup>,  
YAN Zhuangzhuang<sup>1,2</sup>, WANG Tong<sup>1,2</sup>, HU Tao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Energy School, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The hydraulic support is the core of the stability of the ‘surrounding rock and equipment’ system in the pitching oblique working face of steeply dipping coal seam. The existing hydraulic support structure can not meet the requirements of spatial stability of pitching oblique mining, which seriously affects the safe and efficient mining of working face under such conditions. Taking the pitching oblique working face of steeply dipping coal seam as the research background, the comprehensive research methods of engineering analogy, structural kinematics analysis and numerical simulation are used to analyze the stability characteristics of ‘support-surrounding rock’ in the pitching oblique working face of steeply dipping coal seam. Based on ZY7000/22/45 hydraulic support, a new parallelogram hydraulic support is invented, the structural rationality design is carried out, and the kinematic response characteristics of key components are analyzed. The research shows that the non-uniform filling of the caving gangue and the crushing, pressing and pushing effect of the gangue on the support are the key factors affecting the stability of the support. The parallelogram top beam and the base are more suitable for the

收稿日期: 2023-10-10

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1437

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174126, 51974230); 国家自然科学基金青年资助项目(52204151)

作者简介: 伍永平(1961—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 029-85583143, E-mail: wuyp@xust.edu.cn

通讯作者: 杜玉乾(1998—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生。E-mail: 695123787@qq.com

pitching oblique working face. The arrangement of the top beam, base and column of the parallelogram support is parallelogram. The special-shaped shield beam, the rear connecting rod, the oil cylinder connecting rod and the base constitute a flexible four-link structure. The column of the parallelogram support is the main bearing structure, and the cylinder connecting rod is the main motion mechanism. The main influencing factors of its motion characteristics are the distance between the upper and lower column sockets and the distance between the front and rear connecting rods and the hinged position of the shield beam. The shield beam and the rear connecting rod are the key to the position and posture control of the support, and there is no double torsion line during the movement of the support. The research results provide a type selection for the support of this kind of working face, which ensures the safe production of this kind of coal seam to a certain extent.

**Key words:** steeply dipping coal seam; pitching oblique; parallelogram hydraulic support; structural design; motion response

## 0 引言

大倾角煤层广泛分布于我国西北、西南地区,大部分为优质焦煤和无烟煤等稀缺煤种<sup>[1-2]</sup>,受赋存条件以及成煤环境影响,重力倾角效应显著<sup>[3]</sup>,开采难度较大。大倾角伪俯斜开采方法相较于一般综采来说,减小了工作面倾角,降低了工作面飞矸对设备及人员的威胁,有利于抑制煤壁片帮、减缓煤流下滑,降低开采难度,提高大倾角煤层的开采效率。

大倾角煤层伪俯斜综合机械化开采的核心是工作面“R-S-F”(顶板-支架-底板)系统的稳定性,其关键技术主要是保证“R-S-F”系统的完整性<sup>[2]</sup>。该系统中,液压支架是维护采场安全生产的结构物<sup>[4]</sup>,是“R-S-F”中的可调因素,是控制围岩稳定的主要手段。工作面岩层控制的重点应加强支护系统的整体稳定性<sup>[5-6]</sup>。相较于真倾角工作面,大倾角伪俯斜工作面空间形态<sup>[7]</sup>、围岩运移规律<sup>[8]</sup>、矿山压力显现均发生了较大改变<sup>[9]</sup>,正常大倾角液压支架易出现尾部下滑(甩尾)<sup>[10]</sup>、推移空间及机道窜矸<sup>[11]</sup>、千斤顶易损<sup>[12]</sup>等问题。现有通过选配伸缩梁<sup>[13]</sup>、顶梁和掩护梁活动侧护板互不搭接设计<sup>[14]</sup>、前后调架千斤顶分开控制<sup>[15]</sup>、顶梁和底座采用平拉式结构<sup>[16]</sup>、设置限推杆千斤顶<sup>[17]</sup>等防倒防滑设计,来使现有普通支架适应大倾角煤层伪俯斜工作面开采,在一定程度上提高了支架的适应性<sup>[18]</sup>,但仍存在支架倾倒扶正难、支架过重稳定性差等问题,工作面产效有待进一步提高。

据此,基于已有研究成果<sup>[19]</sup>,针对大倾角伪俯斜综采工作面“支架-围岩”关系,设计一种适应伪俯斜开采空间稳定性要求以及适宜大倾角伪俯斜开采典型空间形态的“平行四边形”液压支架,并分析其结构与运动特征,对于大倾角煤层的综合机械化乃至智能化开采具有重要意义。

## 1 大倾角伪俯斜工作面“支架-围岩”相互作用特征分析

大倾角伪俯斜综采工作面液压支架布置呈阶梯

状,支架架间顶梁、掩护梁及底座前后互不搭接,如图1所示。

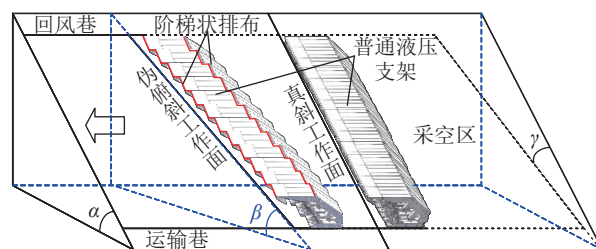


图1 大倾角伪俯斜普通液压支架工作面

Fig.1 Steeply dipping pitching oblique ordinary hydraulic support working face

大倾角伪俯斜综采工作面易发生架前漏冒现象。伪俯斜工作面沿走向呈非对称塑性破坏特征。工作面推进过程中,前方煤层顶板易发生破裂,产生局部扩展裂隙,支架前方部分顶板处于支护空挡三角区,容易引发架前漏冒现象<sup>[20]</sup>,从而导致支架-围岩关系成为“伪系统”。

与此同时,大倾角伪俯斜综采工作面顶板失稳后垮落矸石沿掩护梁向采空区滑落,且沿工作面倾向方向向工作面下端头滑移,垮落矸石充填过程可分为3个阶段:第1阶段-不均匀充填、第2阶段-上部、中部矸石下滑充填、第3阶段-密实充填,如图2所示。随着工作面推进,第2阶段与第3阶段交替循环,3个阶段均呈现明显的上下非均匀填充形态,造成其矿压显现具有分区性和时序性,中上部区域矿压显现大于下部,除了需克服自身下滑,工作面中、下部区域的支架比上部区域支架需要更大的支撑阻力抵抗矸石作用力的影响<sup>[21]</sup>。

采空区矸石的非均匀填充形态是影响支架稳定性的重要因素之一。垮落矸石对普通支架有“砸、压、推”作用,其中直接顶垮落矸石作用时间短、强度小、频率高,基本顶垮落矸石作用时间长、强度大、频率低。造成普通支架主要受载区域集中在支架顶梁侧护板后部、掩护梁侧护板中后部与底座侧推装置后部,使支架更易发生侧向破坏,且随伪斜角增大,矸



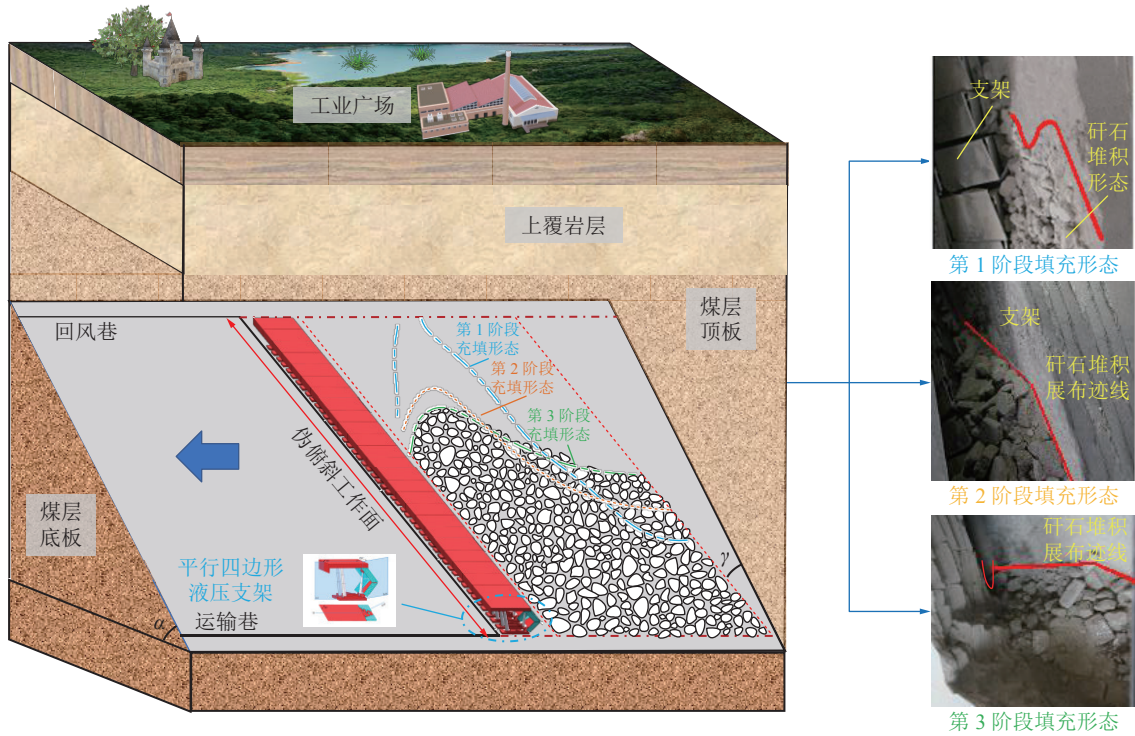


图 2 大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架围岩关系

Fig.2 Surrounding rock relationship of parallelogram hydraulic support in pitching oblique working face with steeply dipping

石在垮落和充填过程中对支架尾部产生的冲击作用和接触作用更加明显与强烈,影响工作面支架稳定状态。

针对此情况,研发一种大倾角伪俯斜平行四边形液压支架,其相比普通支架更适应伪俯斜开采空间稳定性要求,符合伪俯斜工作面顶板“平行四边形”典型形态,相邻平行四边形液压支架间顶梁、护帮板以及掩护梁在伪俯斜布置条件下能完美接洽,相互搭接,更容易保持稳定,发生下滑和转动失稳的临界阻力远小于支架正常工作状态时的工作阻力,且随着工作面伪斜角的增大而减小<sup>[22]</sup>,如图 2 所示。

## 2 大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架结构设计

### 2.1 支架型式确定

大倾角伪俯斜工作面液压支架通常适用于真倾角  $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 、伪斜角  $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$  的条件下,因此此类采场液压支架具有受力状态复杂、支架状态易失稳等特点。为实现支架自稳,支架质量需严格控制。掩护式支架质量一般较轻,经矿压观测研究与分析表明,两柱掩护式支架对采高适应性<sup>[23]</sup>、横向稳定性<sup>[24]</sup>均较好,较四柱支撑掩护式支架更能适应该类工作面,是大倾角液压支架架型发展的主导方向<sup>[1]</sup>,

以两柱掩护式 ZY7000/22/45 型大倾角液压支架为基础,如图 3 所示,设计了大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架。

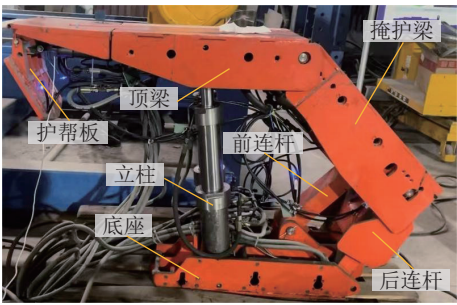


图 3 ZY7000/22/45 型两柱掩护式液压支架 1:5 模型  
Fig.3 ZY7000/22/45 two-leg shield hydraulic support 1:5 model

### 2.2 支架结构设计

为使支架伪俯斜工作面采场空间更好契合,根据大倾角伪俯斜综采工作面典型空间展布形态,以及两柱掩护式液压支架工作方式与液压支架主体构造,提出并设计一种适用于大倾角伪俯斜综采工作面的平行四边形液压支架,以期在回采过程中可以更好地支撑煤壁,防止矸石冒落和煤壁片帮,提供更为安全的工作空间。

#### 2.2.1 顶梁设计

ZY7000/22/45 型两柱掩护式液压支架的主要结

构有顶梁、底座、掩护梁、前后连杆、护帮板、立柱等,如图3所示。根据大倾角伪俯斜工作面矿压显现规律及典型空间结构与形态,确定支架的顶梁从传统的矩形设计为平行四边形,且设计侧护板沿顶梁短边推出,护帮板沿顶梁长边推出,如图4所示。有效解决矩形顶梁支架前端与煤壁不匹配、阶梯状侧护接续问题,使支架能更好地适应伪俯斜工作面,支撑煤壁前三角形空顶顶板,防止矸石冒落和煤壁片帮的发生。

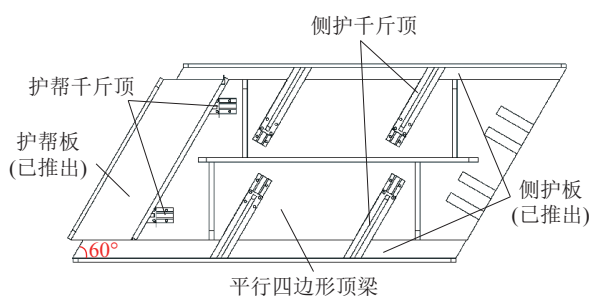


图4 顶梁结构仰视示意

Fig.4 Top beam structure upward view schematic

## 2.2.2 底座及液压立柱空间位置设计

伪俯斜工作面推进过程中,为了使刮板输送机与液压支架保持稳定,必须保证推进过程中工作面成直线,要求液压支架底座与刮板输送机呈直线适配。将底座设计为平行四边形,解决矩形底座与刮板输送机不匹配问题(图5)。

为适配液压支架顶梁底座平行四边形形状,将两组立柱排列在一条直线上,该直线与底座前端平行。且立柱向顶梁前端倾斜,与竖直方向的夹角在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内,从而使得立柱与掩护梁之间构成一个小空间,工作面支架组依次整齐排列时可形成一条通道,该通道可供操作人员行走和移动。该类布置方式使得平行四边形支架顶梁载荷均匀分布,提高了支架稳定性。

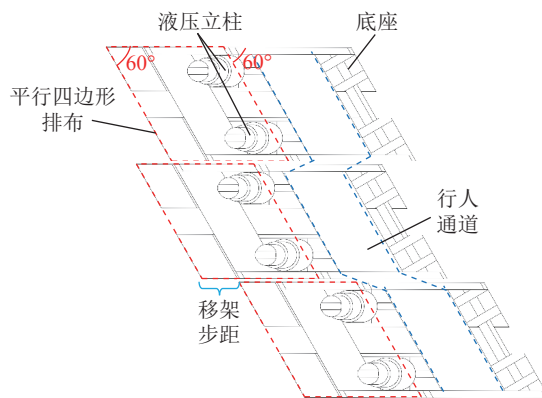


图5 底座结构俯视示意

Fig.5 Top view schematic of base structure

## 2.2.3 四连杆机构设计

前连杆、后连杆、掩护梁和底座组成的四连杆机构是液压支架稳定性设计基础<sup>[25]</sup>,其主要作用是保证支架纵向和横向的稳定性,使支架升降保持比较稳定的梁端距,以提高管理顶板性能,承受和传递载荷以及保持液压支架的整体刚度等。在传统掩护式液压支架的设计过程中,应确保四连杆机构满足并具备以下约束条件,掩护梁与后连杆长度比 $L/L_1=1.4 \sim 2.1$ ,掩护梁与后连杆夹角 $\alpha \geq 5^\circ$ ,支架最大高度时掩护梁与水平夹角 $\theta_{H,max}=58^\circ \sim 62^\circ$ ,后连杆与水平夹角 $\theta_{H,max}=75^\circ \sim 85^\circ$ ,最小高度时掩护梁与水平夹角 $\theta_{H,min} \geq 12^\circ$ ,后连杆与水平夹角 $\theta_{H,min}=25^\circ \sim 30^\circ$ ,双扭线运动轨迹的最大宽度应不超过0.07 m,前连杆与后连杆的长度比值 $L_3/L_1=0.9 \sim 1.2$ 等几何特征<sup>[23]</sup>,如图6a所示。

1) 运动设计。为确保大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架在顶梁、底座为平行四边形的基础上可以正常的进行升降架以及支护作业,经过大量的理论以及结构分析,笔者发现掩护梁与后连杆的铰接销轴需实时位于顶梁与底座之间的中轴面,即顶梁尾端斜边与底座尾端斜边要实时位于同一竖直

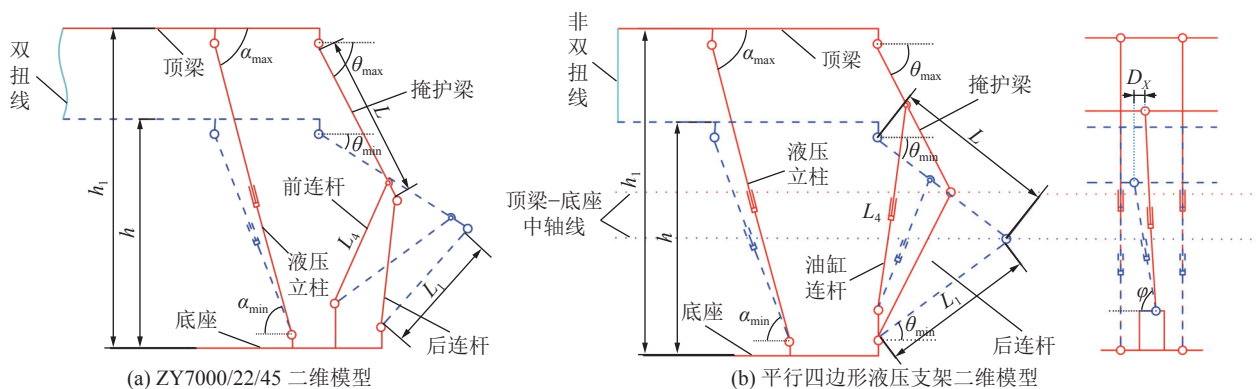


图6 液压支架二维模型图

Fig.6 Two-dimensional model of hydraulic support

面上,从而要求掩护梁与后连杆长度相同,顶梁底座只存在相对平行运动;掩护梁上端与顶梁尾端沿顶梁斜边使用销轴铰接;后连杆与底座尾端沿底座斜边使用销轴铰接;掩护梁与后连杆铰接销轴平行于顶梁与底座尾端,且掩护梁与后连杆铰接销轴沿其轴向进行支架姿态调控,产生沿工作面倾向的距离  $D_x$ 。

大倾角伪俯斜平行四边形液压支架升降过程中前连杆的长度非定值,随支架的升降发生改变,因此使用液压油缸作为平行四边形液压支架前连杆进行使用,并取消了平衡千斤顶,使油缸连杆“一缸两用”,既与掩护梁、后连杆、底座形成了平行四边形的柔性四连杆结构,保证了平行四边形液压支架的正常工作,又额外提供一部分支护力与平衡作用。

基于上述分析,在平行四边形液压支架设计过程中,应初步遵循下述约束:掩护梁与后连杆长度比值  $L/L_1=1$ ;支架在最大高度时,  $\theta_{H,\max}=60^\circ$ ;支架在最低位置时,  $\theta_{H,\min}\leq 30^\circ$ ;顶梁与底座只存在平行运动,顶梁前端由直线运动替代传统支架双纽线运动;前连杆与后连杆的长度比值  $L_3/L_1$  由定值变为随支架的高度变化的不定值。

采用解析法确定掩护梁  $L$  和后连杆的长度  $L_1$  以及  $D_x$ ,如图 6b 所示,  $\gamma$  为伪俯斜工作面伪倾角。由几何关系可得:

$$h_1 = L \sin \theta + L_1 \sin \theta \quad (1)$$

$$L = L_1 = \frac{h_1}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

$$D_x = L_4 \sin \gamma (\cos \varphi_{\max} - \cos \varphi_{\min}) \quad (3)$$

2) 掩护梁及后连杆设计。为实现大倾角伪俯斜工作面的完整适应,在顶梁与底座均为平行四边形的基础上,掩护梁及后连杆结构需与顶梁结合形成平行四边形(图 7),才能使得支架后部与相邻支架形成完整的闭合平面,不会出现普通支架架间掩护梁

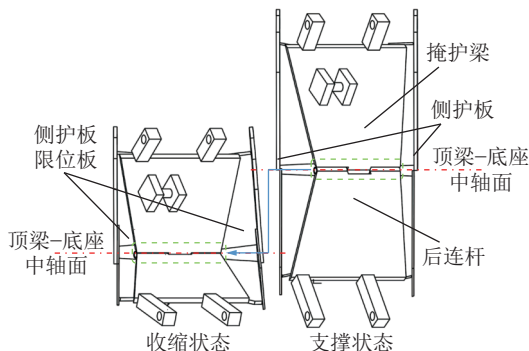


图 7 掩护梁-后连杆结构示意图

Fig.7 The front view of the shield beam structure and the rear connecting rod structure

不平齐,尾部矸石易冲击、易堆积的问题。

掩护梁与后连杆铰接销轴平行于顶梁与底座尾端斜边并实时位于顶梁底座中轴面上,并且掩护梁与后连杆分别绕顶梁与底座后端斜边旋转,故将掩护梁与后连杆设计为异形四边形,支架处于最高与最低位置时不会扭转超出顶梁横向支护范围。同时将掩护梁侧护板与掩护梁搭接部分设计为异形结构,在支架升架降架过程中,使掩护梁侧护板始终与顶梁侧护板平行,侧护板限位板始终与掩护梁搭接,限位板部分与侧护部分使用销轴铰接,改变传统侧护板焊接方式。

后连杆与掩护梁采用沿顶梁-底座中轴面完全对称设计。

### 3 大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架运动学分析

为系统性地研究平行四边形液压支架的可行性,进一步对平行四边形液压支架进行运动学分析,并对影响其运动特征因素进行判定,为后续结构优化提供思路。

大倾角伪俯斜平行四边形液压支架结构尺寸设计完成后,通过 SolidWorks 三维建模软件,对液压支架的顶梁、底座、立柱、掩护梁、油缸连杆及后连杆等进行三维建模,各部件采用相同实体建模方式。创建完支架所有零部件,根据预先设计平行四边形液压支架的结构以及运动方式,将顶梁、底座、立柱、掩护梁、油缸连杆及后连杆等零部件进行装配,定义零部件间的配合和运动关系,设计运动轨迹,使其按预定方式运动,如图 8 所示。

液压支架的运动轨迹是由四连杆机构决定的,不同型号的液压支架四连杆机构的设计参数是不同的,其运动轨迹也存在着差异性<sup>[26-27]</sup>,大倾角伪俯斜平行四边形液压支架整体结构与普通液压支架有较大不同,四连杆机构更是改变原有刚性杆体,设计为长度可变的油缸杆体,组成柔性四连杆机构,运动方式由简易的二维运动转为复杂的三维空间运动,主要体现在油缸连杆、掩护梁、后连杆绕顶梁与底座平行四边形斜边进行旋转运动,其旋转过程会产生 3 个方向位移以及 3 个方向角度,与普通支架相比产生了沿工作面倾向的位移及角度。

#### 3.1 运动特征分析

将大倾角伪俯斜平行四边形液压支架简化为图 9b 所示的三维空间数学模型,并连接顶梁平行四边形两短边中点建立剖面 I—I,沿顶梁尾端及底



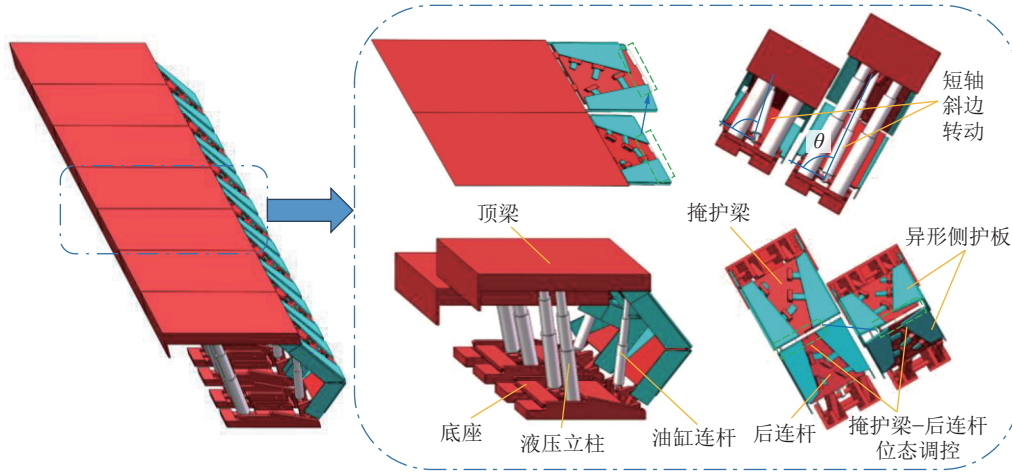


图 8 大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架三维模型

Fig.8 Three-dimensional model of parallelogram hydraulic support in pitching oblique mining face of steeply dipping coal seam

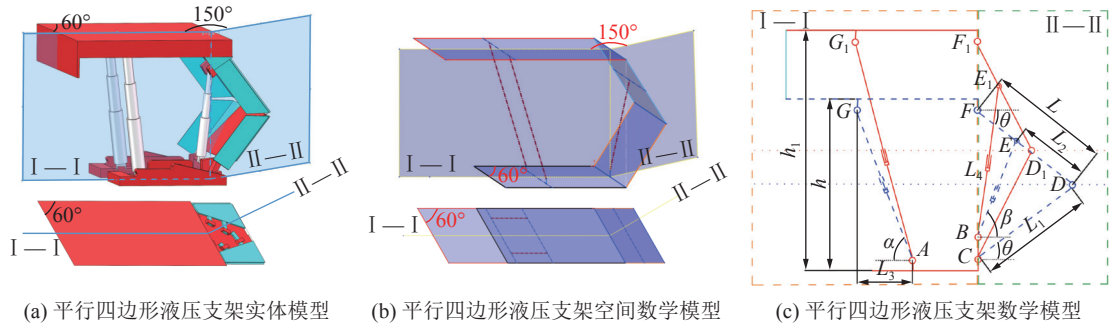


图 9 液压支架运动学模型

Fig.9 Kinematic model of hydraulic support

座尾端中点建立垂直于两尾端短边剖面Ⅱ—Ⅱ，剖面Ⅰ—Ⅰ与剖面Ⅱ—Ⅱ之间夹角为 $150^\circ$ 。为简化计算，化三维为二维，沿两剖面分别建立剖视图，并去除与运动无关的非必要冗余部分，如图9c所示，左侧线框内为剖面Ⅰ—Ⅰ正视图，右侧框线内为剖面Ⅱ—Ⅱ正视图，左右框线支架运动学模型合并起来与普通支架二维运动学模型无明显差异，可按照普通支架运动学推导方式进行计算。为便于描述支架运动特性，对主要构件赋予辅助参数，如图9c所示，下面进行运动轨迹方程理论推导。

设后连杆与水平面夹角为 $\theta$ ， $\theta$ 为时间的函数；后连杆长度为 $L_1$ ，掩护梁长度 $L$ 与后连杆长度相同；油缸连杆与掩护梁后连杆的铰接销轴距离为 $L_2$ ；立柱上柱窝与下柱窝之间距离为 $L_3$ ，由几何关系可得，支架高度 $h$ ：

$$h = 2L_1 \sin \theta \quad (4)$$

立柱与水平面夹角 $\alpha$ ：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2L_1 \sin \theta}{L_3}\right) \quad (5)$$

油缸连杆与水平面夹角 $\beta$ ：

$$\beta = \arctan\left[\frac{(L_1 + L_2) \sin \theta - L_{BC}}{(L_1 - L_2) \cos \theta}\right] \quad (6)$$

则立柱与油缸连杆之间的角度关系 $\alpha/\beta$ ：

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\arctan\left(\frac{2L_1 \sin \theta}{L_3}\right)}{\arctan\left[\frac{(L_1 + L_2) \sin \theta - L_{BC}}{(L_1 - L_2) \cos \theta}\right]} \quad (7)$$

油缸连杆长度 $L_{BE}$ ：

$$L_{BE} = \sqrt{[(L_1 - L_2) \cos \theta]^2 + [(L_1 + L_2) \sin \theta - L_{BC}]^2} \quad (8)$$

立柱长度 $L_{AG}$ ：

$$L_{AG} = \frac{2L_1 \sin \theta}{\sin \alpha} \quad (9)$$

则立柱与油缸连杆长度关系 $L_{AG}/L_{BE}$ ：

$$\frac{L_{AG}}{L_{BE}} = \frac{L_3 \sqrt{1 + \frac{4L_1^2 \sin^2 \theta}{L_3^2}}}{\sqrt{(L_1 - L_2)^2 \cos^2 \theta + [(L_1 + L_2) \sin \theta - L_{BC}]^2}} \quad (10)$$

分别将公式(4)—(9)对时间进行求导，可以得

出  $F$  点即顶梁抬升速度  $v_F$  与  $\theta$  之间的关系为,

$$v_F = \dot{h} = 2L_1\omega\cos\theta \quad (11)$$

立柱伸长的速度  $v_{Gr}$ :

$$v_{Gr} = \frac{2L_1^2\sin 2\theta \frac{d\theta}{dt}}{\sqrt{L_3^2 + 4L_1^2\sin^2\theta}} \quad (12)$$

立柱转动的速度  $\omega_{AG}$ :

$$\omega_{AG} = -\frac{2L_1L_3\cos\theta \frac{d\theta}{dt}}{4L_1^2\sin^2\theta - L_3^2} \quad (13)$$

油缸连杆伸长的速度  $v_{Er}$ :

$$v_{Er} = \frac{\frac{d\theta}{dt}[4L_1L_2\sin\theta - L_{BC}(L_1 + L_2)]\cos\theta}{\sqrt{L_{BC}^2 - 2L_{BC}(L_1 + L_2)\sin\theta - 4L_1L_2\cos^2\theta + (L_1 + L_2)^2}} \quad (14)$$

油缸连杆转动速度  $\omega_{BE}$ :

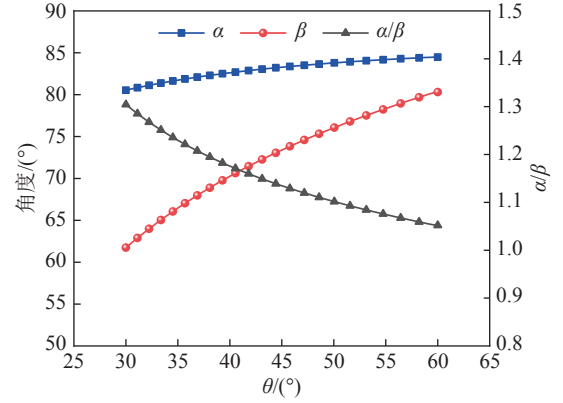
$$\omega_{BE} = \frac{(L_1 - L_2) \frac{d\theta}{dt} (L_1 + L_2 - L_{BC}\sin\theta)}{L_{BC}^2 - 2L_{BC}(L_1 + L_2)\sin\theta - 4L_1L_2\cos^2\theta + (L_1 + L_2)^2} \quad (15)$$

则立柱与油缸连杆伸长速度之间的关系  $v_{Er}/v_{Gr}$ :

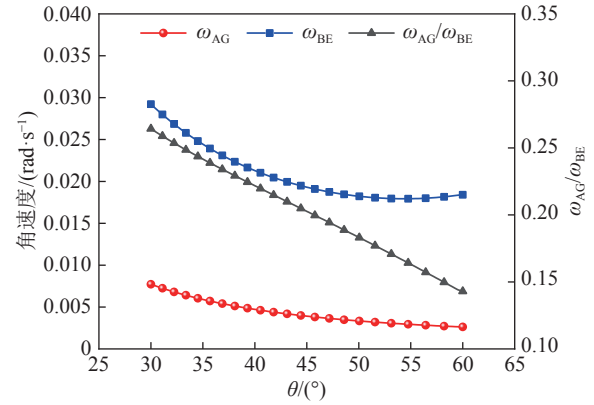
$$\frac{v_{Er}}{v_{Gr}} = \frac{\frac{d\theta}{dt}[4L_1L_2\sin\theta - L_{BC}(L_1 + L_2)]\cos\theta}{4L_1^2\sin\theta\sqrt{L_{BC}^2 - 2L_{BC}(L_1 + L_2)\sin\theta - 4L_1L_2\cos^2\theta + (L_1 + L_2)^2}} \quad (16)$$

通过 Matlab 对以上公式进行代值分析, 获得了立柱-油缸连杆角度变化关系和立柱-油缸连杆长度变化关系, 并将分析结果绘制成图 10 和图 11, 其中横坐标  $\theta$  角为掩护梁与水平面夹角,  $\theta$  角越大, 代表支架抬升高度越大。图 10a 所示立柱与水平面的夹角  $\alpha$  和油缸连杆与水平面的夹角  $\beta$  随着掩护梁与水平面夹角  $\theta$  增大而增大; 且当  $\theta$  增至  $60^\circ$  时,  $\alpha$  与  $\beta$  分别趋近于  $85^\circ$  和  $80^\circ$ , 且两者比值由 1.3 趋近于 1.06, 表明随支架高度增大, 立柱与油缸连杆支撑能力增强, 油缸连杆参与主动承压, 立柱让压与油缸连杆, 支护能力达到最大; 图 10b 所示为立柱-油缸连杆角速度变化情况, 立柱与油缸连杆角速度均随  $\theta$  角增大而减小, 立柱角速度始终小于油缸连杆的角速度, 表明油缸连杆承担前连杆的作用, 作为主要的运动构件, 维护平行四边形液压支架运动稳定。

立柱-油缸连杆长度变化关系如图 11 所示。立柱长度  $L_{AG}$  与油缸连杆长度  $L_{BE}$  均随  $\theta$  角增大而增大, 且近似匀速伸长; 立柱与油缸连杆长度比值随  $\theta$  角增大逐步增大, 伸长速度比值逐步减小, 呈现以  $L_{AG}$  为主要变化, 变化速度相对恒定,  $L_{BE}$  为次要变化,



(a) 立柱-油缸连杆角度变化



(b) 立柱-油缸连杆角速度变化

图 10 平行四边形液压支架立柱-油缸连杆角度变化关系  
Fig.10 Angle change relationship between the column of parallellogram hydraulic support and the connecting rod of oil cylinder

变化速度相对增大; 表明立柱随顶梁抬升而变化量较大, 为主要承载结构, 油缸连杆变化量较小, 为次要承载结构。

### 3.2 构件多因素运动学响应分析

大倾角伪俯斜平行四边形液压支架作为一种特殊煤层支架, 其中立柱与油缸连杆是其主要的驱动机构, 并决定着支架的运动方式与稳定。因此, 对比分析立柱和油缸连杆与上下柱窝间距( $S_1$ )、与前后连杆和掩护梁之间铰接位置间距( $S_2$ )双因素对支架稳定性的影响。通过 Matlab 仿真模型得到双因素影响下, 立柱和油缸连杆角度、长度以及伸长速度的演化过程, 如图 12 所示。

$\alpha$  为立柱与水平面之间的夹角,  $\beta$  为油缸连杆与水平面夹角。  $S_1$  增大时,  $\alpha$  线性减小,  $\beta$  无明显变化;  $S_2$  增大时,  $\beta$  呈线性增大趋势,  $\alpha$  无明显变化, 及  $S_1$ 、 $S_2$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  影响关系一一对应, 且影响程度相似 (图 12a)。  $S_1$  增大时, 立柱长度呈线性逐渐增加, 增量较小,  $S_2$  增大时, 油缸连杆长度呈非线性急剧增大 (图 12b)。 立柱伸长速度随  $S_1$  增大而减小, 油缸连杆伸长速度随  $S_2$  增大而显著增加 (图 12c)。 即  $\alpha$ 、 $\beta$



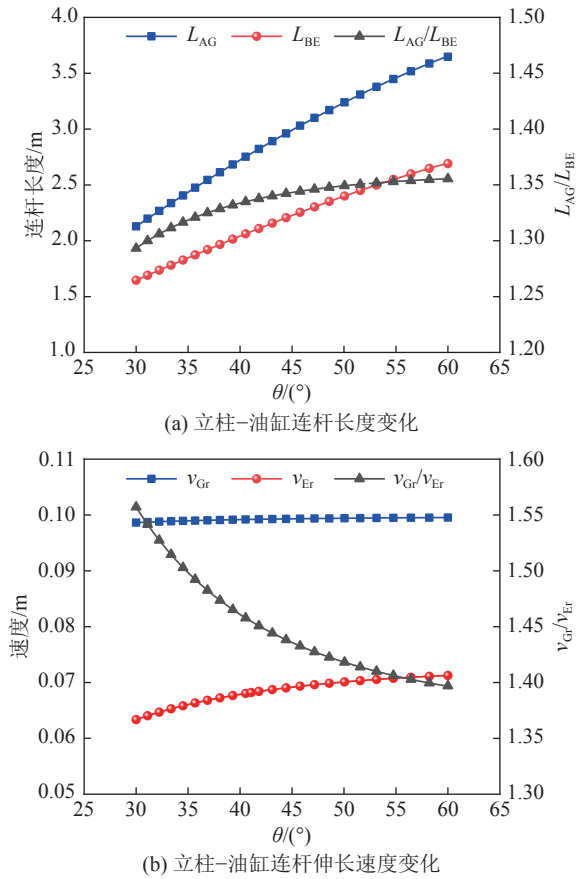


图 11 平行四边形液压支架立柱-油缸连杆长度变化关系  
Fig.11 Relationship between the length change of the parallelogram hydraulic support column and the connecting rod of the oil cylinder

越大,立柱长度越小且伸长速度越大、油缸连杆长度及伸长速度越大时,立柱和油缸连杆与上下柱窝间距越小,与前后连杆和掩护梁之间铰接位置间距越大,支架呈现的支撑效果最好。

如图 13 所示,根据立柱和油缸连杆角度、长度、伸长速度间比值,建立了二者之间的关系。 $S_1$ 、 $S_2$  增

大时,三类比值均减小。其中角度比在  $S_1$  大于 0.15 m 及  $S_2$  大于 1.7 m 后小于 1,即  $\beta$  大于  $\alpha$ ,油缸连杆开始主动承压;其余两类比值均大于 1,即立柱相对于油缸连杆变化程度逐渐减缓,油缸连杆在支架整体运动起主导作用。同时立柱作为支架支撑结构,其适应顶板变形能力远远小于油缸连杆,因此支架运动调优时,应首先考虑油缸连杆。

#### 4 大倾角伪俯斜工作面平行四边形液压支架运动仿真及可行性验证

##### 4.1 ADAMS 运动仿真

ADAMS,即机械系统动力学自动分析,是美国 MSC 公司开发的虚拟样机分析软件<sup>[28]</sup>。为简化计算,将图 8a 大倾角伪俯斜平行四边形液压支架实体模型简化合并销轴等细小零件,形成 11 个实体,导入到 ADAMS View 中,分析其主要结构运动学特征。期间建立两组坐标系,以顶梁与底座尾端短边斜轴为界,左边以支架底座长边为横向  $X$  轴,垂向为  $Y$  轴,纵向为  $Z$  轴;右边以垂直底座尾端短边斜轴为  $X_1$  轴,垂向为  $Y_1$  轴,纵向为  $Z_1$  轴;其中  $X$  轴与  $X_1$  轴夹角为  $30^\circ$ ,如图 14 所示。

液压支架模型需考虑实际运动,约束贴近运动,避免过度约束影响仿真,以确保仿真进行,将设置如下所示约束关系,并在立柱上添加驱动,模拟支架升降架过程,进行仿真后在 ADAMS/PostProcessor 对平行四边形支架立柱、油缸连杆位移与角度变化量、掩护梁位态调控、及  $F$  点运动轨迹进行绘制。

平行四边形液压支架  $F$  点运动轨迹线是升降架过程中顶梁前端的轨迹线,即普通支架运动所形成的双扭线,运动轨迹线如图 15 所示。图中  $X$  轴表示为水平位移,  $Y$  轴表示为支架支撑高度的变化,由  $F$

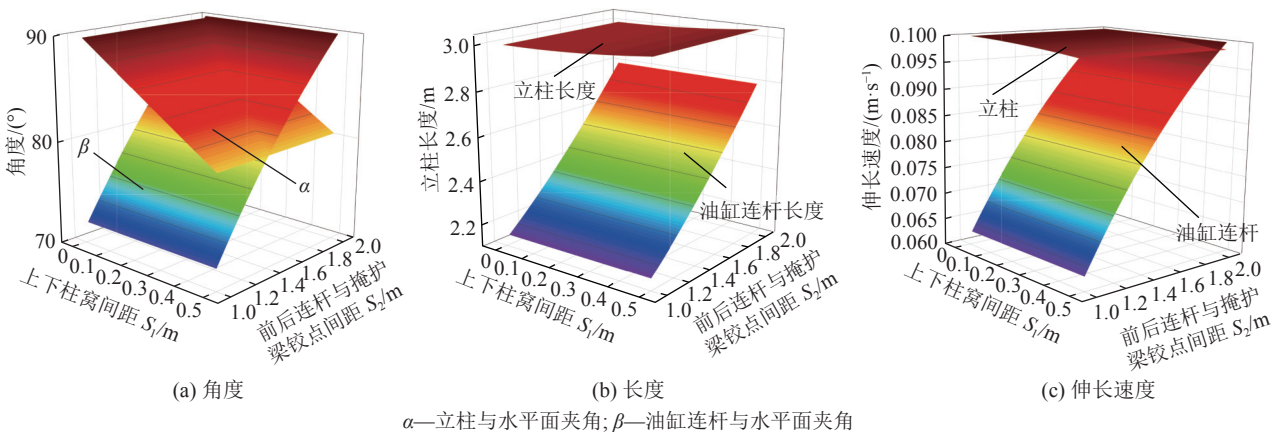


图 12 双因素下立柱-油缸连杆不同指标演化过程

Fig.12 Angle evolution process of column and cylinder connecting rod under two factors

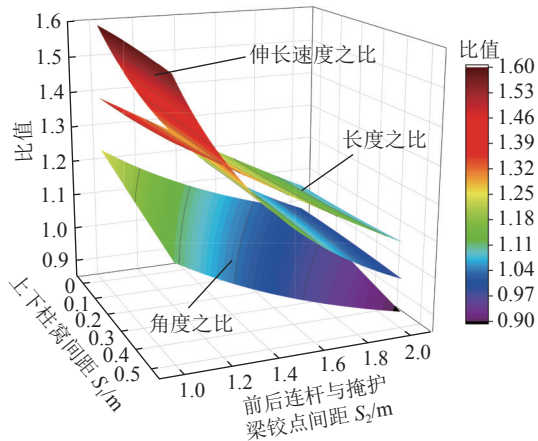


图 13 双因素下立柱-油缸连杆多维联系

Fig.13 Multidimensional connection between column and cylinder connecting rod under two factors

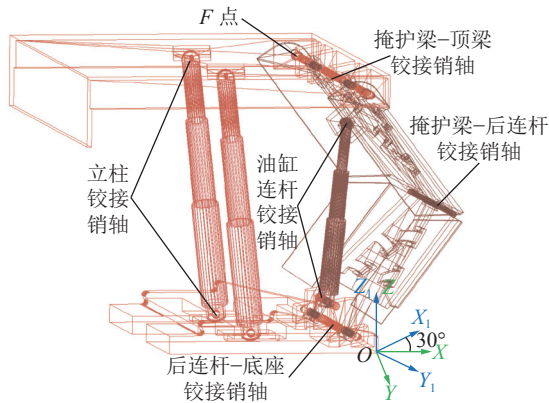


图 14 平行四边形液压支架 ADAMS 数值模型

Fig.14 ADAMS numerical model of parallelogram hydraulic support

装置	约束类型
底座	固定约束
后连杆与底座短边斜轴	转动副
后连杆与掩护梁铰接销轴	转动副
掩护梁与顶梁短边斜轴	转动副
顶梁与底座	平行约束
立柱与顶梁和底座铰接销轴	转动副
三级油缸	移动副
油缸连杆与掩护梁和底座铰接销轴	转动副

点轨迹变化曲线可知,在支架支撑高度发生变化时,梁端的水平位移为 0,顶梁与底座之间在横向上无明显位移,无普通支架双扭线产生,避免了普通支架支护过程中梁端运动趋势指向采空区,削弱了煤壁片帮的风险,对顶板管理十分有利,与理论设计结果相同。

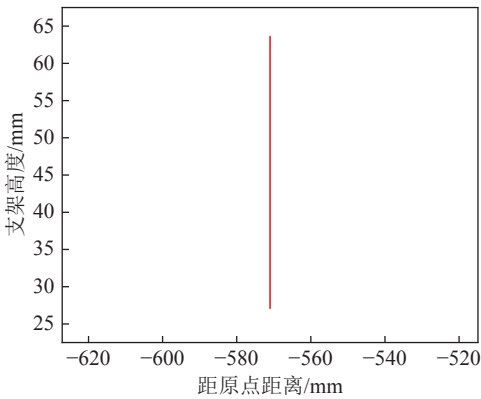


图 15 F 点轨迹线

Fig.15 F point trajectory line

平行四边形液压支架立柱与油缸连杆角度变化如图 16 所示。 $X$ 轴表示后连杆与底座之间的夹角,表示为 $\theta$ ,左 $Y$ 轴表示 $\alpha$ 与 $\beta$ 的角度,右 $Y$ 轴表示 $\alpha$ 与 $\beta$ 的比值。从图中可以看出,随着 $\theta$ 角的逐渐增大,即支撑高度的不断增加,立柱与油缸连杆和底座之间的夹角呈现明显的上升趋势,两者的支撑能力逐步增强;平行四边形液压支架掩护梁沿 $X$ 轴方向平动位移较大,立柱上下柱窝相对位置并未随着支架的支护高度变化发生改变,从而使得 $\alpha$ 角度变化较小, $\beta$ 角度变化较大,二者比值近似与一条双曲线,其值逐渐趋近于 1,表明立柱与油缸连杆和底座不断接近垂直状态,支护能力更强。

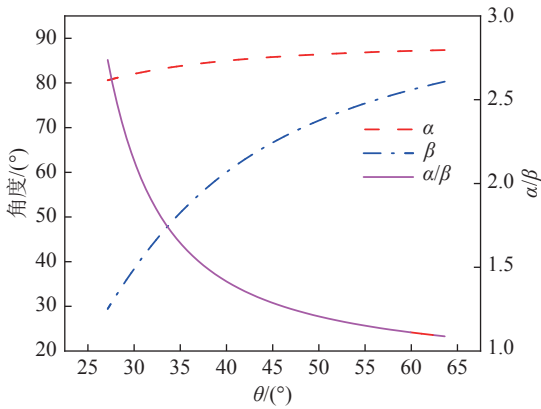


图 16 前后油缸角度

Fig.16 Angle of front and rear oil cylinder

平行四边形液压支架立柱与油缸连杆长度变化如图 17 所示。左 $Y$ 轴表示两者长度,右 $Y$ 轴表示两者之间的比值。随着液压支架的升高,立柱与油缸连杆的长度不断增大,两者长度比值始终大于 1,且随支架的升高逐渐减小,油缸连杆为次要承载结构,主要依据自身的变化调控支架的运动状态,变化率较大,而立柱为主要承载结构,变化主要集中在随支架升降过程中二力杆长的变化,变化率较小。与理

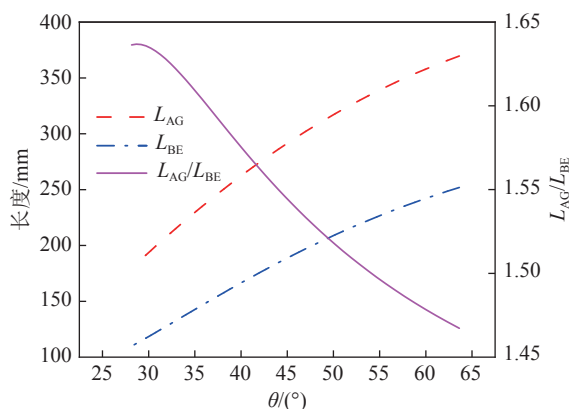


图 17 前后油缸长度

Fig.17 Length of front and rear cylinders

论分析结果相似,趋势变化相同。

平行四边形液压支架掩护梁位态调控即为满足顶梁底座在平行四边形条件下,将掩护梁与后连杆的运动限制在支架宽度内,随着支架升架与降架,掩护梁与后连杆会随着高度的改变在支架垂向位移,调整补全支架支护结构。掩护梁位态调控变化趋势如图 18 所示。左 Y 轴为掩护梁距顶梁内侧侧护板垂直距离,右 Y 轴为掩护梁与顶梁内侧侧护板面夹角。支架升起时,掩护梁逐渐远离顶梁侧护板面,与顶梁侧护板面夹角近似线性缩小,与该面差值口逐步缩小,该口由掩护梁侧护板盖板补全,另一侧侧护板面差值口逐步扩大,由另一侧掩护梁侧护板盖板补全,此过程近似为差值口缩小侧回收侧护板,差值口扩大侧推出侧护板,两边同时进行;此过程中,时刻保持掩护梁侧护板与顶梁侧护板平行,两者无相对位移。

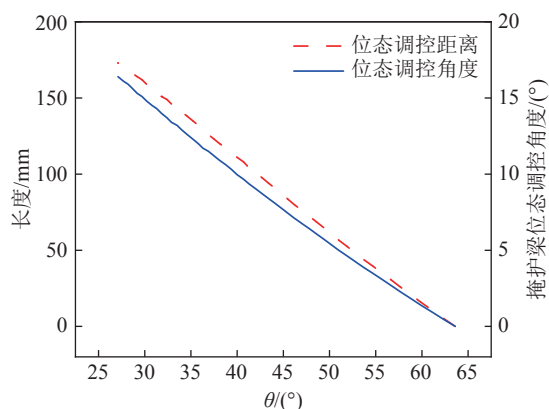


图 18 掩护梁位态调控

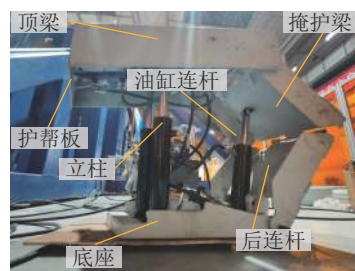
Fig.18 Position control of shield beam

ADAMS 运动仿真总体与理论分析结果相同,结果表明平行四边形液压支架较好的适应于大倾角伪俯斜工作面。平行四边形支架特征在于顶梁与底座之间只有纵向位移,梁端运动过程中无双扭线产生,

为煤壁维护提供有力支持;支架立柱作为主要承载结构,其位移及角度的变化率较小,油缸连杆作为主要的运动机构和次要承载结构,其位移及角度的变化率较大,为随时适应不同的支护高度;平行四边形支架掩护梁支护体系中,掩护梁与后连杆是处于顶梁宽度范围内来回摆动,摆动幅度与  $\theta$  角近似呈现线性相关;同时掩护梁与后连杆也是维护支架处于平行四边形结构下正常运动,无三维运动的关键。

## 4.2 可行性验证

根据文章对该支架的结构设计及运动学分析结论,制作 1:5 缩小支架模型,进行实验室运动验证。1:5 缩小平行四边形支架模型主体构件采用 Q235 号钢,液压油缸、油缸连杆及推移千斤顶采用表面镀铬 Q45 号钢,模型支架实体如图 19a 所示。采用自主设计液压控制系统,分别对各油缸进行控制,如图 19b 所示。



(a) 支架实体模型



(b) 液压控制系统

图 19 平行四边形液压支架 1:5 实体模型

Fig.19 1:5 solid model of parallelogram hydraulic support

大倾角平行四边形液压支架 1:5 实体模型运动过程如图 20 所示,其中图 20a—图 20c 为支架升架过程,图 20d—图 20f 为支架降架过程,图 20g 为不同时期支架梁端位置图。支架运动过程中,支架顶梁与底座平行运动,梁端水平位移为 0,掩护梁与后连杆铰接销轴沿其轴向平移;掩护梁侧护板限位板与后连杆侧护板限位板均按照既定路线进行位移;油缸连杆保证了在顶梁与底座均为平行四边形,且掩护梁与后连杆绕平行四边形短边斜转的基础上仍能进行正常支护作业。与理论分析及数值仿真结果相符合。



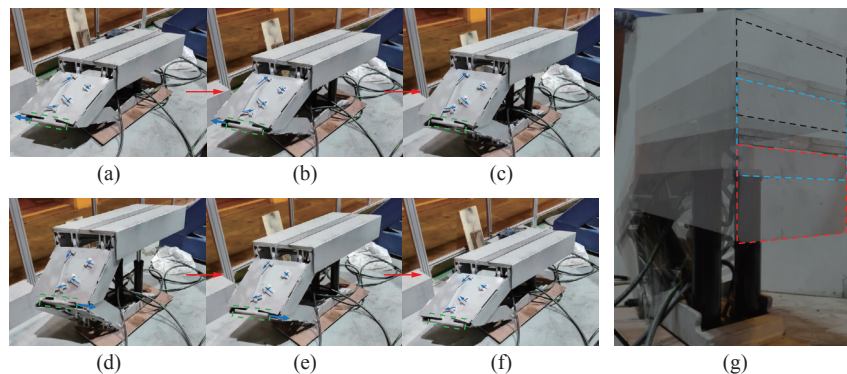


图20 平行四边形液压支架升降运动过程

Fig.20 Lifting motion process of parallelogram hydraulic support

## 5 结 论

1) 基于大倾角伪俯斜工作面“支架-围岩”相互作用特征, 设计了适应于回采空间的平行四边形液压支架, 主要结构特点表现为: 顶梁、底座及立柱排布方式为平行四边形, 异形掩护梁与后连杆、油缸连杆、底座构成柔性四连杆结构, 掩护梁与后连杆沿顶梁-底座中轴面完全对称。

2) 平行四边形液压支架运动方式为三维空间运动, 立柱与油缸连杆是支架主要的驱动机构, 其与上下柱窝间距越小、与前后连杆和掩护梁铰接位置间距越大, 支架支撑效果越好, 同时立柱适应顶板变形能力远小于油缸连杆, 支架运动调优需先考虑油缸连杆。

3) 支架运动仿真过程中梁端的水平位移为 0, 立柱位移及角度变化率较小, 为主要承载结构, 柱窝间距大于 0.15 m 及前后连杆铰点间距大于 1.7 m, 油缸连杆开始主动承压; 油缸连杆位移及角度变化率较大, 为主要运动结构, 适应不同的支护高度。实验室验证了制作完成的平行四边形液压支架 1:5 实物模型可正常运动, 证明了支架设计理论、仿真的合理性。

### 参考文献(References):

- [1] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24-34.  
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, *et al.* Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24-34.
- [3] 伍永平, 解盘石, 负东风, 等. 大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 100-113.  
WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, *et al.* Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal

seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 100-113.

- [4] 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.
- [5] 孟祥瑞, 赵启峰, 刘庆林. 大倾角煤层综采面围岩控制机理及回采技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(8): 25-28.  
MENG Xiangrui, ZHAO Qifeng, LIU Qinglin. Surrounding rock control mechanism and mining technology of fully mechanized mining face in steep seam[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(8): 25-28.
- [6] 伍永平, 负东风. 大倾角综采支架稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 1999, 16(3): 82-85.  
WU Yongping, YUN Dongfeng. Stability control of fully mechanized support in deeply inclined coal seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3): 82-85.
- [7] 尹光志, 代高飞, 皮文丽, 等. 伪俯斜分段密集支柱采煤法缓和急倾斜煤层矿压显现不均匀现象的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1483-1488.  
YIN Guangzhi, DAI Gaoifei, PI Wenli, *et al.* Study on uneven ground pressure in pitching oblique underhand mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2003, 22(9): 1483-1488.
- [8] 施 峰, 王宏图, 范晓刚, 等. 伪俯斜采煤法基本顶破断的力学分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1001-1005.  
SHI Feng, WANG Hongtu, FAN Xiaogang, *et al.* Mechanical analysis of basic top breaking in the pseudo-polt coal mining method[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1001-1005.
- [9] 杨胜利, 赵文斌, 李良晖. 急倾斜煤层伪俯斜走向长壁工作面煤壁破坏机理[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 367-376.  
YANG Shengli, ZHAO Wenbin, LI Lianghui. Coal wall failure mechanism of longwall working face with false dip in steep coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 367-376.
- [10] 田 权. 大倾角工作面支撑掩护式液压支架稳定性分析与防倒滑设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(8): 139-141.  
TIAN Quan. Stability analysis and anti-backsliding design of support shield type hydraulic support in large-dip working face[J].

- Coal Mine Machinery, 2020, 41(8): 139–141.
- [11] 贡东风, 杨晨晖, 伍永平等. 大倾角煤层长壁综采顶板冒落形态与支架稳态控制[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(2): 255–263.
- YUN Dongfeng, YANG Chenhui, WU Yongping, *et al.* Roof caving form and steady state control of shield powered support longwall fully-mechanized mining with steeply dipping seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 255–263.
- [12] 王祥生, 陈再明, 赵天佑. 推移千斤顶在推溜工况下力学行为分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 345–349.
- WANG Xiangsheng, CHEN Zaiming, ZHAO Tianyou. Mechanical behavior analysis of propelling jack under sliding working situation[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2019, 38(4): 345–349.
- [13] 贡东风, 刘柱, 程文东, 等. 大倾角支架底调机构应用效果分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(5): 230–233.
- YUN Dongfeng, LIU Zhu, CHENG Wendong, *et al.* Analysis of application effect of steeply dipping powered support base adjust mechanism[J]. Coal Technology, 2015, 34(5): 230–233.
- [14] 贡东风, 谷斌, 伍永平等. 大倾角煤层长壁综采支架典型应用实例及改进研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 60–67, 72.
- YUN Dongfeng, GU Bin, WU Yongping, *et al.* Typical application examples and improvement research of hydraulic powered-support applied to fully-mechanized longwall coal mining face in steep dipping seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 60–67, 72.
- [15] 章之燕. 大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 705–709.
- ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 705–709.
- [16] 李大政, 高海亮, 王洪武. 大倾角综放长工作面设备防倒防滑技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S2): 75–77.
- LI Dazheng, GAO Hailiang, WANG Hongwu. Technology of fall prevention antiskid to equipment in fully mechanized caving coal long face with large angle[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S2): 75–77.
- [17] 曹树刚, 李毅, 雷才国, 等. 采煤工作面轻型架间挡矸装置研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 51–56.
- CAO Shugang, LI Yi, LEI Caiguo, *et al.* Research on lightweight device for blocking gangue between hydraulic supports in steeply inclined coal face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 51–56.
- [18] 王国法, 杜毅博, 徐亚军, 等. 中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践: 纪念《煤炭科学技术》创刊 50 周年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1–18.
- WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, *et al.* Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: commemorate the 50th anniversary of the publication of Coal Science and Technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1–18.
- [19] 伍永平, 杨玉冰, 王同, 等. 大倾角走向长壁伪俯斜采场支架稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 60–69.
- WU Yongping, YANG Yubing, WANG Tong, *et al.* Stability analysis of support under gangue filling condition in pitching oblique mining area of steeply dipping seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 60–69.
- [20] 解盘石, 张颖异, 张艳丽, 等. 大倾角大采高煤矸互层顶板失稳规律及对支架的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 344–356.
- XIE Panshi, ZHANG Yingyi, ZHANG Yanli, *et al.* Instability law of the coal-rock interbedded roof and its influence on supports in large mining height working face with steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 344–356.
- [21] 杨科, 池小楼, 刘帅. 大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1821–1828.
- YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1821–1828.
- [22] 解盘石, 田双奇, 段建杰. 大倾角伪俯斜采场顶板运移规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 2974–2982.
- XIE Panshi, TIAN Shuangqi, DUAN Jianjie. Experimental study on the movement law of roof in pitching oblique mining area of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 2974–2982.
- [23] 王国法. 液压支架技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [24] 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.
- [25] 郭军, 郭星辰, 冯国瑞, 等. 微型四柱式放顶煤液压支架设计及其适应性研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 766–777.
- GUO Jun, GUO Xingchen, FENG Guorui, *et al.* Design and adaptability research of micro four-column top coal caving hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 766–777.
- [26] 李提建, 靳丰田. 支架四连杆机构解析法设计与优化[J]. 矿山机械, 2015, 43(11): 25–27.
- LI Tijian, JIN Fengtian. Design and optimization on analytic method of support four-bar linkage[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(11): 25–27.
- [27] 许盛业. ZZ5000 型液压支架运动误差及强度分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- XU Shengye. Motion error and strength analysis of ZZ5000 hydraulic support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [28] 曾庆良, 徐鹏辉, 孟昭胜, 等. 冲击载荷下四柱支撑掩护式液压支架动态响应特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 437–445.
- ZENG Qingliang, XU Penghui, MENG Zhaosheng, *et al.* Dynamic response characteristics analysis of four column chock shield support under impact load[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 437–445.