

10 m 超大采高液压支架关键结构及其承载特性

韩会军^{1,2}, 雷亚军³, 张金虎^{1,2}, 韩存地³, 曾明胜^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司, 北京 100013; 3. 陕西陕煤曹家滩煤矿业有限公司, 陕西 榆林, 719001)

摘 要: 针对 10 m 超大采高综采工作面围岩控制需求, 研发了 ZYA29000/45/100D 两柱掩护式超大采高液压支架。阐述了超大采高采场围岩垮落及矿压显现特点, 总结了 10 m 超大采高工作面注重顶板、煤壁防护及承受强动载的支护需求; 在此基础上研发了 10 m 超大采高液压支架, 给出液压支架结构关键参数, 配套双层伸缩梁+三级协动护帮、 $\phi 630$ mm 大缸径抗冲击立柱等创新结构, 具备断面全防护、结构抗冲击、架体自稳定等技术特点; 以结构稳定性为切入点, 在分析工作面倾角及采高对支架稳定性影响的基础上, 研究了液压支架对不同工作面倾角及采高的适应性, 分析得出支架横向临界倾倒角度为 12° , 适应采高 7~10 m, 液压支架在正常工作区域内, 其理论支护效率并不会有较大变化, 而掩护梁受载是超大采高液压支架与小采高支架的最大区别; 针对两柱掩护式支架承载特点, 分析了不同支架参数下顶梁力平衡承载区域及其迁移特性, 两柱式掩护式支架力平衡区主要集中于立柱部位, 立柱与顶梁铰接点位置的变化对力平衡区影响显著, 平衡千斤顶参数的变化对力平衡区的影响有限; 分析了不同型式护帮结构的煤壁防护性能, 阐明双层伸缩梁+三级协动护帮结构在防护力度、防护面积等方面具有明显的优势; 通过分析支架在增阻状态下的等效刚度, 建立了液压支架动载力学仿真模型, 通过模拟试验方法研究了其在“给定变形”工作状态下承受动态载荷的响应过程, 得出顶梁承受动载主要通过立柱传递、掩护梁承受动载主要通过四连杆机构进行传递的特点; 分析了支架在曹家滩煤矿 122104 工作面的使用情况, 说明 ZYA29000/45/100D 对 10 m 超大采高工作面有较好的适应性, 且满足工作面超大采高围岩控制需求。

关键词: 超大采高; 液压支架; 围岩控制; 工作面支护; 支护技术及装备

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-1993-12

Key structure and bearing characteristics of 10 m super large mining height support

HAN Huijun^{1,2}, LEI Yajun³, ZHANG Jinhu^{1,2}, HAN Cundi³, ZENG Mingsheng^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Shaanxi Shanmei Caojiatan Mining Co., Ltd., Yulin 719001, China)

Abstract: ZYA29000/45/100D two column shield type hydraulic support was developed for controlling the surrounding rock of a 10 m high fully mechanized mining face. Elaborated on the characteristics of rock collapse and mining pressure

收稿日期: 2024-11-06 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1360

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907503); 天地科技股份有限公司科技创新资助项目 (2023-TD-ZD003-001)

作者简介: 韩会军 (1984—), 男, 山西吕梁人, 副研究员, 博士。E-mail: hanhj219@163.com

通讯作者: 张金虎 (1986—), 男, 山东德州人, 研究员, 博士。E-mail: 18810836118@126.com

引用格式: 韩会军, 雷亚军, 张金虎, 等. 10 m 超大采高液压支架关键结构及其承载特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 1993-2004.

HAN Huijun, LEI Yajun, ZHANG Jinhu, et al. Key structure and bearing characteristics of 10 m super large mining height support[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 1993-2004.



移动阅读

manifestation in the super high mining face, and summarized the support requirements for roof and coal wall protection and bearing strong dynamic loads in the 10 m super high mining face; On this basis, a 10 m super large mining height hydraulic support was developed, which is equipped with innovative structures such as double-layer telescopic beams+three-level cooperative protection, and a $\phi 630$ mm large cylinder diameter impact resistant column, and the key parameters of the structure have been provided. It has technical characteristics such as full section protection, structural impact resistance, and self stabilization of the frame; Taking structural stability as the breakthrough point, the adaptability of hydraulic supports to different working face angles and mining heights was studied, and the critical lateral tilt angle of the support is 12° , which is suitable for mining heights of 7-10 m; The force - balance area of the shield beam of the super large mining height hydraulic support is proposed. It is considered that within the normal working area of the hydraulic support, its theoretical support efficiency will not change significantly, and the load on the shield beam is the biggest difference between the super large mining height hydraulic support and the small - mining - height hydraulic support. Based on the bearing characteristics of the two column shield support, the force balance bearing area and its migration characteristics of the top beam under different support parameters were analyzed. The force balance area of the two column shield support is mainly concentrated in the column part, the change in the position of the hinge point between the upright post and the crown beam has a significant impact on the force - balance area, and the influence of changes in the balance jack parameters on the force balance area is limited; analyzed the coal wall protection performance of different types of protective structures, and clarified that the double-layer telescopic beam+three-level cooperative protective structure has obvious advantages in terms of protection strength and protection area; by analyzing the equivalent stiffness of the support in the increased resistance state, a dynamic-load mechanical analysis model of the hydraulic support was established, and the response process of the support under dynamic load in the "given deformation" working state was studied. It was found that the dynamic load borne by the top beam is mainly transmitted through the column, and the dynamic load borne by the shield beam is mainly transmitted through the four-bar linkage structure; analyzed the use of supports in the 122104 working face of Caojiatan Coal Mine, and demonstrated that ZYA29000/45/100D has good adaptability to 10 m ultra high mining face and meets the control requirements of surrounding rock for ultra high mining face.

Key words: super large mining height; hydraulic support; surrounding rock control; face timbering; support technology and equipment

0 引 言

煤炭安全高效开采对保障我国能源安全具有重要战略意义。厚及特厚煤层占我国煤炭储量约 44%, 是国家主力开采煤层; 对厚煤层开采, 增加工作面开采高度, 能提升煤层资源回收率, 减少资源浪费。对于一次截煤高度达到 6 m 的工作面即超大采高工作面, 其高度增加带来的超大开采空间围岩稳定控制及支护装备研发是超大采高开采面临的主要难题。国外采煤工作面高度普遍小于 6 m, 所采用液压支架支护高度一般在 2~6 m, 工作阻力低于 12 000 kN^[1]。国内在“十一五”期间着手开发 6 m 级液压支架并取得成功^[2], 2016 年, 首套 8 m 级液压支架在金鸡滩煤矿投产^[3], 2019 年, 8.8 m 液压支架井下服役, 创造了良好的社会及经济效益^[4]。2023 年, 陕煤曹家滩煤矿 10 m 超大采高工作面成套装备地面试运转成功, 揭开了厚煤层一次采全高综采的新篇章^[5]。由于工作面一次割煤高度达到 6~10 m, 直接顶垮落后对采空区充

填不充分, 工作面来压时矿山压力显现剧烈, 围岩控制难度大, 极易诱发煤壁片帮、冒顶、切顶压架等安全事故^[6], 为实现厚煤层开采围岩稳定性控制, 超大采高液压支架须在超大开采空间支护、超高煤壁防护、液压支架自稳定、覆岩有效支撑等方面取得技术突破。

1 超大采高工作面围岩支护需求

超大采高工作面在来压期间直接顶离层, 直接承担直接顶重量, 下位基本顶形成相对稳定的三角拱结构, 承担上覆岩层的重量, 当拱结构失稳后, 由于采空区充填不充分, 工作面覆岩垮落范围增大^[7], 基本顶滑落或回转下落, 造成对直接顶及支架的动态载荷, 引发工作面顶板冲击动载现象, 基本顶回转冲击力随采高增加而增大, 基岩厚度越小、来压步距越大, 冲击力越大, 即在硬煤层、薄基岩、超大采高工作面, 动载效应越发明显。如神东上湾煤矿 8.8 m 超大采高工作面, 周期来压动载系数平均 1.6^[8]。同时, 工作面推进速度越慢, 矿压显现越剧烈^[9], 直接顶离层距离越大, 基本

顶冲击效应越明显。

除覆岩垮落产生明显动载效应外,煤壁片帮也是超大采高工作面围岩控制需要解决的关键问题。硬煤条件下煤壁片帮常表现为拉剪或拉裂破坏形式^[10],煤壁片帮受支承压力、采高、周期来压和埋深等因素影响,随采高增加,煤壁水平位移增加^[11],片帮可能性增加,且最易发生片帮的位置位于煤壁中上部^[12-13];同时,液压支架刚度对煤壁稳定性影响明显,随支架刚度的增加,煤壁稳定性提升。通过增强支架工作能力、增大护帮防护面积和护帮力可提高煤壁稳定性^[14]。

因此,相对于中厚煤层开采,厚煤层超大采高要求兼顾液压支架顶板及煤壁稳定的“双因素”控制方法,除具有足够的承载能力外,还需要有良好的动态服役特性及煤壁防护能力^[15]。

2 超大采高液压支架结构参数及其适应性

2.1 液压支架整体技术参数及结构特点

根据曹家滩煤矿 122104 超大采高工作面围岩控制需求,确定支架工作阻力为 29 000 kN,支撑高度 4.5~10 m,新研发 $\phi 630$ mm 大缸径立柱,支护强度 1.88~1.95 MPa,支架初撑压力设置为 23 368 kN,达到工作阻力 81%,提高了支护系统增阻等效刚度;采用宽体架型设计,支架中心距 2.4 m,一方面是适应大缸径立柱布置需要,另一方面,较大的宽度能有效提升支架稳定性。支架技术参数见表 1。

根据配套尺寸,将液压支架主体机构模型数字化,对四连杆的各参数进行优化设计,整体支护范围内梁端距的总变化量为 285 mm,在采高 7~10 m 范围内的梁端变化量为 180 mm;支架由高降低时,梁端轨迹

摆向煤壁,可为抵抗顶板变形产生的水平应力,利于顶板的维护。

表 1 ZYA29000/45/100D 支架技术参数
Table 1 Technical parameters of ZYA29000/45/100D

项目	参数
支架型号	ZYA29000/45/100D
支架高度/mm	4 500~1 000
支架中心距/mm	2 400
支护强度($f=0.2$)/MPa	1.88~1.95
初撑力($P=37.5$ MPa)/kN	23 368
工作阻力($P=46.5$ MPa)/kN	29 000
立柱外缸直径/mm	630
平衡千斤顶/mm	320/220
推移千斤顶/mm	280/185

ZYA29000/45/100D 两柱掩护式液压支架采用四连杆稳定机构,前、后双连杆具有良好的抗偏载能力,通过平衡千斤顶调节顶梁合力作用点,对坚硬顶板具有较好的适应性,支架前端采用刚性整体顶梁带双层伸缩梁结构,如图 1 所示,上层伸缩梁支护架前空顶,下层伸缩梁前部设有三级协调护帮装置实现架前顶板及煤壁的可靠防护。

底座采用刚性开底式,排矸性能好,带有底调架千斤顶,配备抬底、推移机构,移架速度快;采用锻造的拼装式柱窝,增加其承载能力的同时,减少加工缺陷,有效改善柱窝力学性能。加工过程中,柱窝通过两侧双层 U 型板加固,增加了柱窝与支架梁体间的焊缝连接强度。

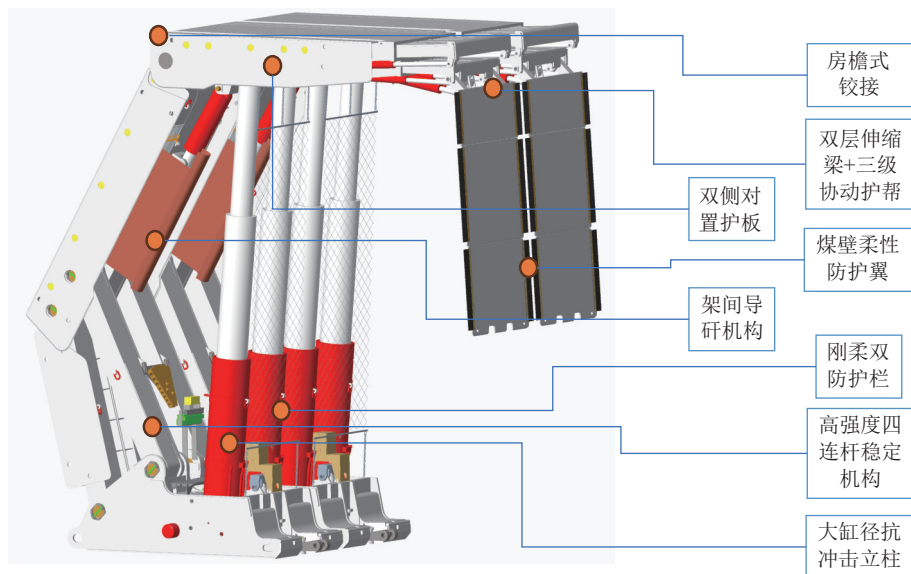


图 1 ZYA29000/45/100D 数字样机

Fig.1 Digital Prototype of ZYA29000/45/100D

针对超大采高工作面可能出现的煤矸自煤壁崩落及自顶梁间缝隙散落问题, 10 m 支架在护帮板侧边安装橡胶柔性翼, 立柱前从顶梁至底座直拉一道柔性防护网, 立柱间安装圆钢焊接的刚性防护栏, 综合形成三道防护; 掩护梁设置“L”形导矸装置, 将顶板散落煤矸导入采空区, 防止架间煤块崩落直接进入人员作业空间。通过“刚柔合济”多维防护, 提高支架对超大采高工作面的安全适应性。

2.2 基于稳定特性的 10 m 液压支架适应性分析

超大采高液压支架重量大, 重心位置随采高增加, 其整架稳定性对工作面倾角和地质条件的变化更加敏感, 工作面存在倾角或底板起伏不平时, 支架可能出现下滑或倾倒趋势。

1) 对工作面倾角的适应性

正常状态下, 支架在其自重 G 、顶梁外载 Q 、底板反力 W 、掩护梁背矸重量 P 、摩擦力 f 作用下保持平衡状态。当工作面倾角较大, 支架与顶、底板摩擦力不足以抵抗自重及背矸重量, 支架出现下滑可能, 其临界下滑角度为

$$\alpha_m = \arctan \left[f \left(1 + \frac{2Q}{G+P} \right) \right] \quad (1)$$

空载状态下, 支架受自重及其在其作用下的摩擦力, 临界下滑角度与底座-底板间的摩擦系数有关, 一般为 $11^\circ \sim 16^\circ$ 。当支架重载时, 支架顶梁承载 Q 只提供更大的摩擦力, 支架支撑力越大, 摩擦力越大, 如图 2 所示, 即支架良好的接顶状态能提高其对工作面倾角的适应性。

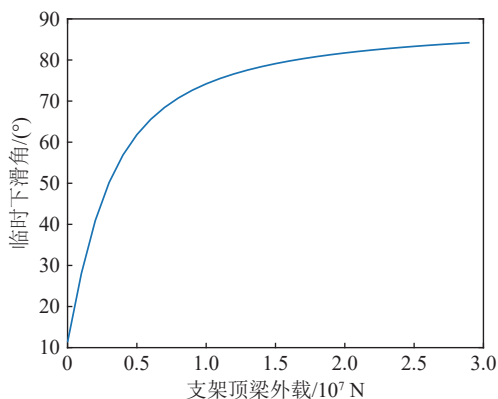


图2 顶梁外载与临界下滑角度的关系

Fig.2 Relationship between the external load of the top beam and the critical sliding angle

掩护梁背矸重量可看作支架自重的附加。在支架工作阻力完全发挥即顶梁载荷 29 000 kN 状态下, 掩护梁后部存在背矸, $P \neq 0$, 由式 (1) 分析 10 m 支架工作阻力完全发挥时背矸重量及其对应的极限下滑角

度如图 3 所示, 当背矸重量 P 增加, 掩护梁载荷在支架下滑方向分力影响变大, P 越大, 支架越容易下滑。

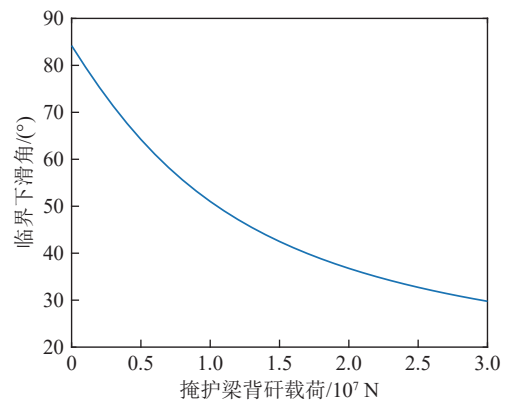


图3 掩护梁负载与临界下滑角度的关系

Fig.3 Relationship between shield beam load and critical sliding angle

图 4 为支架顶梁外载 Q 、掩护梁背矸重量 P 、极限下滑角度 α_m 之间的关系曲线, 从其中可知, Q 与 α_m 之间正相关, P 与 α_m 之间为负相关, 但影响程度并不为线性, 不同工作阻力情况下, 掩护梁背矸对支架下滑稳定性的影响起始角度不同。

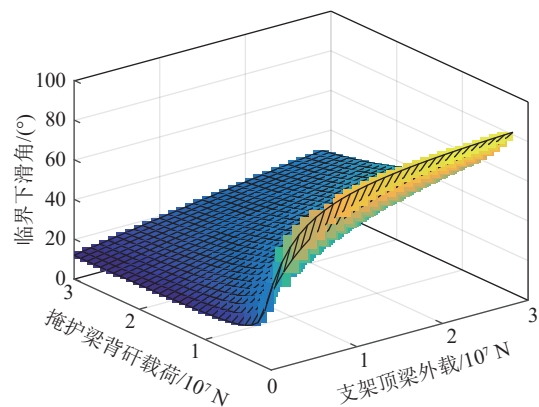


图4 支架载荷与临界下滑角度的关系

Fig.4 Relationship between bracket load and critical sliding angle

正常工作状态下, 可认为顶梁外载 Q 介于初撑力与工作阻力之间, 即支架支撑力越大, 下滑几率越小, 可认为支架充分接顶状态下不发生下滑。

2) 对采高的适应性

超大采高液压支架重心位置高, 支架最小高度 4.5 m 时重心高度距离底板 2 553 mm, 重心位置的过高使支架存在横向倾倒趋势, 其倾动力矩为

$$M = fHQ + 0.5B_wQ + 0.5(G+P)B_w \cos \alpha - GH_g \sin \alpha + PH_p \sin \alpha \quad (2)$$

其中, B_w 为支架底座宽度; H_g 为支架重心位置高度; G 为支架质量; H_p 为背矸重力作用在支架掩护梁

上的竖直方向的位置。将支架重心高度随采高变化规律进行拟合, 根据拟合后的支架重心函数, 可得到支架空载条件下的临界倾角如图5所示。

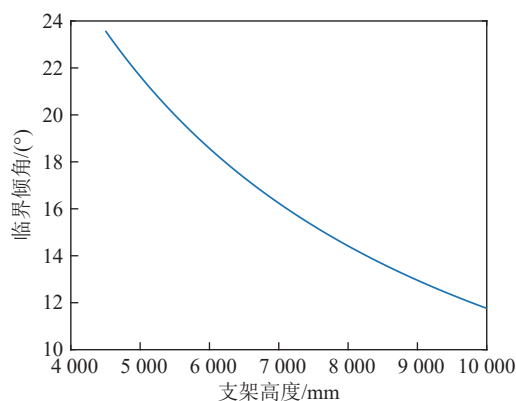


图5 采高与临界倾角的关系

Fig.5 Relationship between mining height and critical tipping angle

与普通液压支架相比, 超大采高支架为适应高度的变化, 支架掩护梁及连杆长度大幅增加, 在支架最大采高时掩护梁与水平方向夹角较大, 掩护梁容易背矸, 这一点是与小采高液压支架的最大区别。设支架掩护梁背矸重量为 P , 且看作是集中载荷, 则在不同支护高度及工作面倾角, 在支架不倾倒的前提下, 掩护梁能承受背矸重量为

$$P = \frac{fHQ + 0.5B_W G \cos \alpha + x_Q Q - GH_g \sin \alpha}{H_P \sin \alpha - x_P \cos \alpha} \quad (3)$$

其中, x_Q 为支架顶梁外载荷作用位置; x_P 为背矸重力作用在支架掩护梁上的水平方向的位置。当支架倾角为 α , 从支架倾斜基点画一条经过掩护梁投影面的直线, 在该线一侧背矸会增加倾倒风险, 该区域可认为掩护梁平衡失稳区, 而在另一侧则会使支架趋于稳定, 可认为平衡保障区。如图6所示, 倾角一定, 随采高增加, 失稳区面积占比增大, 因此超大采高支架工作时需要减少掩护梁上方背矸。

液压支架工作过程中, 当采高降低时, 立柱倾斜程度增加, 支架支护效率减小, 7 m 采高时支护效率出现拐点, 如图7所示, 继续降低采高支护效率将快速减小, 因此支架应尽可能保持在设计采高范围内工作。另一方面, 若支架长时间工作于较低采高状态下, 掩护梁背角减小, 其在水平方向投影长度甚至超过顶梁长度, 采空区垮落矸石有可能直接作用于掩护梁, 造成支架受力远超设计阻力, 给支架支护状态造成不利影响。综合考虑煤炭安息角及其与钢材摩擦力, ZYA29000/45/100D 液压支架设计最低采高为 7 m, 此时掩护梁背角约 30° , 其在水平方向的投影长度约 5 300 mm, 如图8所示。

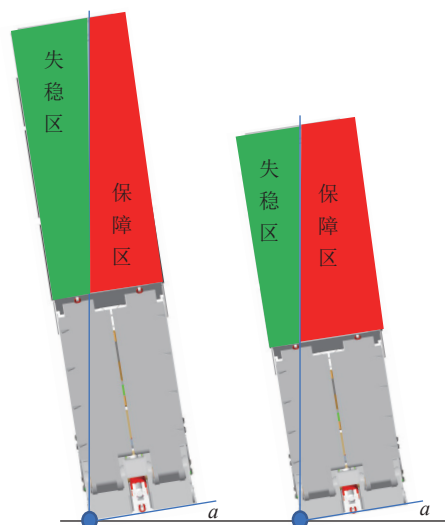


图6 超大采高支架掩护梁平衡区分布

Fig.6 Distribution of balance zone for super mining height support shield Beam

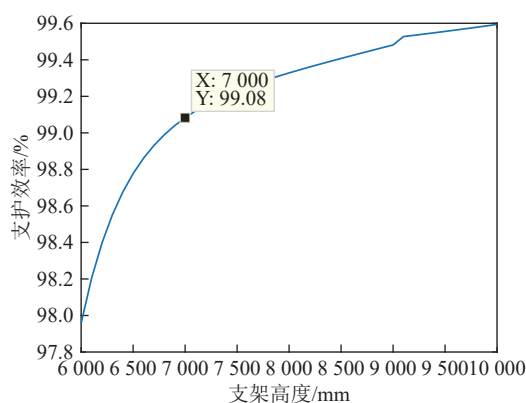


图7 10 m 支架支护效率随采高变化

Fig.7 Efficiency of 10 m support varies with mining height

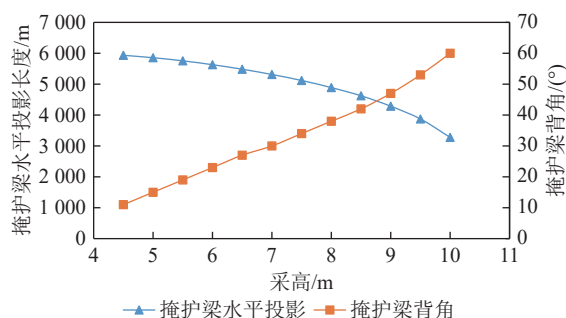


图8 采高与掩护梁状态的关系

Fig.8 Relationship between mining height and shield beam status

3 液压支架承载能力分析

超大采高液压支架支护目标包括顶板支撑及煤壁防护, 顶板支撑主要通过主体四连杆机构及顶梁完成, 煤壁防护通过护帮机构实现。

3.1 液压支架顶梁承载特性

液压支架在支护顶板过程中,主要受到垂直向下的顶板压力及附加水平载荷,将顶板压力作用等效为集中作用力,通过对支架平面模型受力分析后得出支架承载区可分为3个主要区域,即平衡受拉区、立柱承载区、平衡受压区,不同区域内保持顶梁平衡条件下的载荷分别如下:

$$\begin{cases} Q_z = \frac{N_l \cos \theta (L_7 + L)}{L + X} \\ Q_y = \frac{T_{y\max} R (L_7 + L)}{L(X - L_7)} \\ Q_l = \frac{T_{l\max} R (L_7 + L)}{L(L_7 - X)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, Q_z 、 Q_y 、 Q_l 分别为立柱承载、平衡受压、平衡受拉3个区域, kN; N_l 为立柱工作阻力, kN; R 为顶掩铰点到平衡千斤顶的垂直距离, mm; L_7 为立柱上铰点到顶/掩铰点的水平距离, mm; X 为顶梁集中载荷作用点到顶/掩铰点的水平距离, mm; L 为前、后连杆瞬心到顶/掩铰点的水平距离, mm; θ 为立柱与铅垂方向的夹角, ($^\circ$); $T_{y\max}$ 及 $T_{l\max}$ 为平衡千斤顶承受的最大压力及最大拉力, kN。

将液压支架所受上覆岩层压力等效为集中载荷 Q , 则在支架顶梁保持水平的前提下, 顶梁外载 Q 的大小与其在顶梁的作用位置, 将形成一条曲线, 即 Q-S 曲线, 曲线下方的区域为力平衡区, 表示在若支架顶梁承受的集中载荷在该区域内, 则顶梁保持平衡。Q-S 曲线可较好的表征液压支架的承载性能^[16]。根据式 (4) 绘制两柱掩护式支架承载区 Q-S 曲线, 如图 9 所示, 顶梁最大承载能力 29 000 kN 位于立柱承载区内, 集中于立柱上铰点前后约 200 mm 范围内, 当集中载荷位置超过该范围, 承载能力将出现明显下降, 平衡千斤顶参与承载, 当集中载荷位于立柱上铰点与顶掩铰点之间时, 平衡千斤顶受拉, 集中载荷位于立柱上铰点与顶梁前端范围内时, 平衡千斤顶受压。当支架外载合力作用点及大小在承载区内部, 支架顶梁可

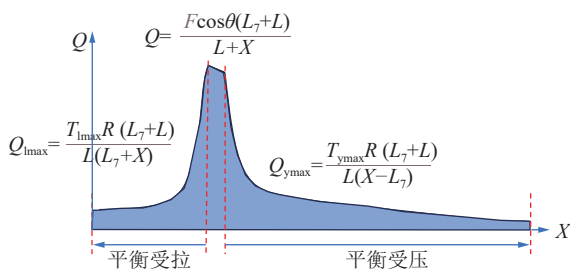
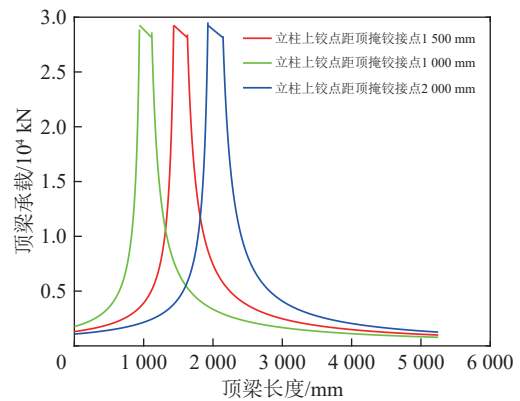


图9 两柱掩护式支架 Q-S 曲线示意

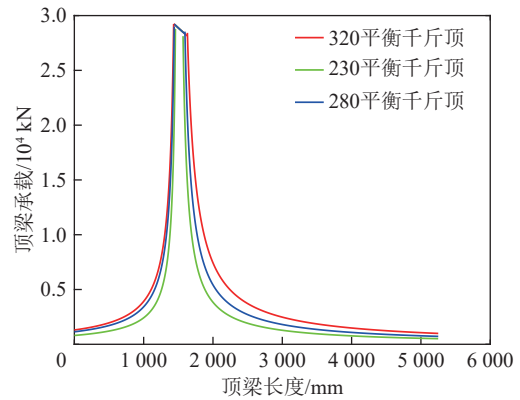
Fig.9 Schematic diagram of Q-S curve for two column shield support

以在水平位置稳定工作, 当外载荷合力作用在承载区以外时, 支架顶梁出现“抬头”或“低头”现象。

当立柱上铰点位置变化时, 顶梁承载 Q-S 曲线相应出现变化, 立柱承载区域随之变化, 但承载能力整体布局不变, 只是该曲线的整体迁移, 如图 10a 所示; 增加立柱支撑力可以增大支架最大承载力, 但改变平衡千斤顶参数对支架整体承载影响较小, 如图 10b 所示, 平衡千斤顶参数变化时, Q-S 曲线整体布局无明显变化, 仅在平衡千斤顶受载区域内有所变动, 千斤顶作用力增大时承载能力有所增加, 但增加幅度有限。



(a) 不同立柱上铰点位置的 Q-S 曲线



(b) 不同平衡千斤顶参数下 Q-S 曲线

图 10 支架 Q-S 曲线迁移示意

Fig.10 Schematic diagram of Q-S curve migration of bracket

3.2 液压支架煤壁防护特性

合理的顶梁前端支顶力和护帮机构参数是控制工作面片帮的重要条件^[17-18]。在保证支架支撑能力的同时, 整体顶梁具有更好的前端接顶能力, 能有效削弱顶板悬臂对煤壁的压裂效应, 顶梁前端的伸缩梁+护帮板联合支护机构, 伸缩梁能在采煤机通过时临时支护裸露的架前顶板, 大面积护帮板及其及时的护帮动作可为煤壁提供较强的防护力, 减少煤壁拉裂破坏造成的水平位移。

通常支架最大支撑高度达到 6 m 级, 护帮机构采用二级护帮板, 到 7~8 m 级支架开始采用三级护帮

机构,整体护帮高度可达到 4 m。根据不同煤层条件及开采工艺,伸缩梁与护帮板的结构有分体式与整体式 2 种方式,整体式布置伸缩梁与护帮板直接连接,伸缩梁带动护帮板,能更完整地贴合煤壁;分体式布置伸缩梁与护帮板分别动作,有利于裸露围岩的及时支护,但会在煤壁上方形成支护空白^[19]。对于整体式安装的护帮机构,其护帮板需要在收回时与顶梁接近平行,伸出时尽可能接触煤壁,必要时一级护帮板作为二级护帮板的加长装置,伸出使二级护帮板接触煤壁,其加长长度取决于煤壁片帮后的凹陷深度;分体式安装的护帮机构,其一级护帮板一般作为二级护帮板的加长装置,接触煤壁的是二级护帮板,但其加长的长度一般不会超过伸缩梁伸出长度。因此相对而言,整体式护帮机构需要更大的旋转角度,常规的设置是在整体式护帮机构上设置小四连杆,而分体式护帮机构的千斤顶与护帮板直连。通过对不同结构护帮机构的运动分析,在护帮板回转相同角度的情况下,整体式结构的护帮千斤在小四连杆辅助下所需行程更小,这种情况下能提供更加紧凑的结构。

ZYA29000/45/100D 液压支架结合不同护帮机构的优点,采用“双层伸缩梁+三级协动护帮板”结构型式,实现顶板与煤壁防护的双驱动快速响应,护顶与护帮动作相互独立,加快支架前方接顶与煤壁防护响应速度,提升围岩支护效率的同时,有效增加护帮高度。

针对 3 种不同护帮结构进行分析,如图 11 所示,以相同杆件长度及千斤顶推力方案为基准,对比不同结构护帮效果如图 12 所示。对于一级护帮板而言,整体式与分体式均无法提供护帮力,而护帮板与伸缩梁整体结构由于小四连杆结构的存在,使一级护帮板末端支护力相对较小,双层式结构的一级护帮板能够提供较大防护力;对于二级护帮板,整体式与分体式支护形式类似,均具有较大防护力矩,双层式如果在下层伸缩梁全部伸出时,二级护帮板的防护力臂较小,使所得防护力矩变小,但由于双层伸缩梁的存在,使

二级护帮板的末端防护点位置更低,因此整体防护力与其余结构基本相同;三级护帮板结构基本无差别,因此所提供的防护力也一致,只是双层式结构的防护点能覆盖更大范围。

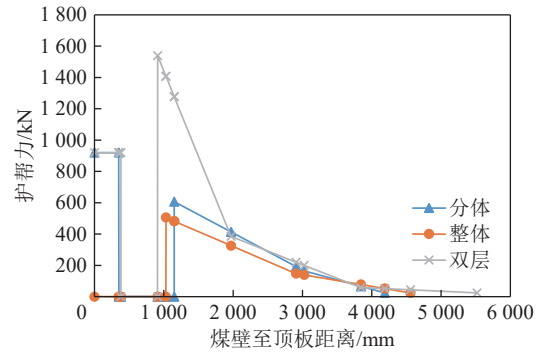


图 12 不同护帮结构的护帮力及护帮高度对比

Fig.12 Comparison of protective force and height of different protective structures

此外,上伸缩梁在支护架前顶板的同时对裸露煤壁上部提供防护作用,因此双层伸缩梁布置有效增加了对煤壁的防护面积,结合其支护工艺,相比传统护帮形式,双层式结构有效护帮高度增加约 1 m,护帮面积明显更大,且对于煤壁的防护空白部分最小,其护帮力最大,见表 2。相对而言,双层伸缩梁+三级协动护帮结构(图 13)具有明显优势。

表 2 不同结构护帮力比较

Table 2 Comparison of Protection Forces of Different Structures

项目	一级护帮力矩/ (kN · mm)	二级护帮力矩/ (kN · mm)	三级护帮力矩/ (kN · mm)	护帮高度/ mm
分体式	379 488	309 960	41 184	4 190
整体式	347 250	276 750	41 184	4 580
双层式	484 785	108 240	41 184	5 510

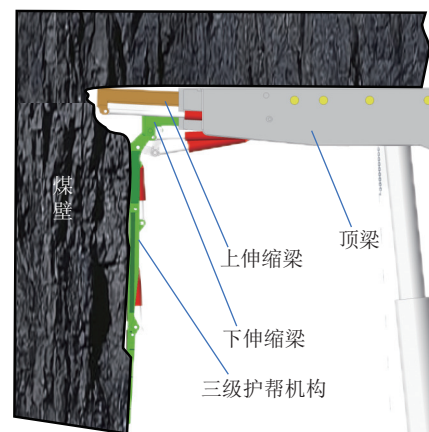


图 13 双层伸缩梁+三级护帮结构

Fig.13 Double layered telescopic beam+three-level protective mechanism

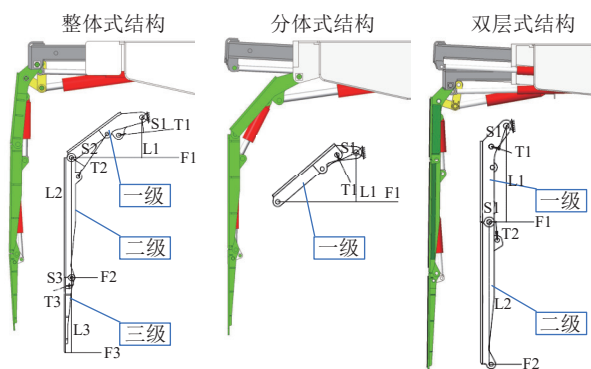


图 11 不同护帮结构支护分析

Fig.11 Analysis of different support structures

双层伸缩梁设计,可使其对架前空顶及超高煤壁的防护独立运转,减少液压支架支护动作时的用液压力波动,增大煤壁防护高度,解决了由原有分体式护帮的煤壁防护不全面问题,且大大改善了原整体式护帮机构护顶护帮关联产生的时效滞后及护帮板与煤壁贴合不紧密问题,实现架前围岩控制的双保险防护。

4 超大采高液压支架结构动载响应特性

超大采高工作面矿压显现剧烈,动载效应明显,液压支架需要具有良好的动载适应能力。液压支架工作状态分初撑、增阻、恒阻 3 个阶段,在增阻阶段即开始外载的被动承载过程。目前缺乏对液压支架结构承受动态载荷的试验测试方法,可通过仿真模拟支架动载响应特性。

1) 动载仿真模型。仿真过程需要对支架受载模型进行等效及简化。近似认为立柱增阻阶段所承载荷与压缩位移成正比,考虑到立柱柱间存在摩擦力和黏性阻尼力,立柱等效元件确定为弹簧阻尼系统^[20]。将缸内乳化液和缸体分别等效为液体弹簧和固体弹簧,则立柱及平衡千斤顶的等效刚度就相当于等效液体弹簧和等效固体弹簧的串联,如图 14 所示。

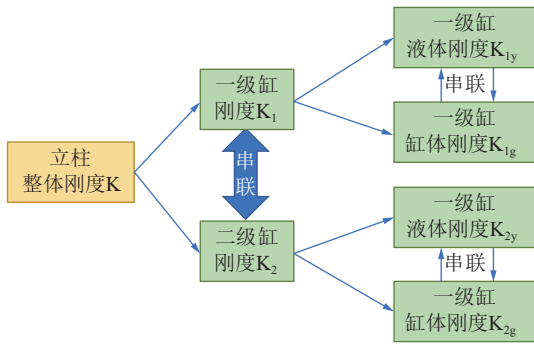


图 14 立柱固液耦合刚度组成

Fig.14 Composition of solid-liquid coupling stiffness of columns

由体积弹性模量定义可得 i 级缸液体等效刚度为

$$K_{ir} = \frac{\Delta P A_i}{d_i h_i} = K_r \frac{A_i}{h_i} \quad (5)$$

式中: ΔN 为压力变化, N; A_i 为 i 级缸内径所在圆的面积, m^2 ; d_i 为 i 级缸内径, m; h_i 为 i 级缸内液柱高度, m; $K_r=1.82 \text{ GPa}$ 为 5% 乳化液的体积弹性模量。

由体积模量与弹性模量的关系可得 i 级缸缸体等效刚度为

$$K_{ig} = K_g A_i = \frac{\pi d_i^2 E}{12(1-2\mu)} \quad (6)$$

式中: K_g 为缸体体积模量, Pa; E 为缸体的弹性模量, GPa; μ 为缸体的泊松比。

则 i 级缸的等效刚度为

$$K_i = \frac{K_{ig} K_{ir}}{K_{ig} + K_{ir}} = \frac{\pi d_i^2 E K_r}{12(1-2\mu) K_r + 4 E h_i} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 液压缸的等效刚度主要取决于等效的液体弹簧, 而液体弹簧刚度与缸内含液量负相关, 缸内液体越多, 液面越高, 等效弹簧刚度越小。

按照型式试验标准的高位状态, 选支架最大使用高度减支架行程的 1/3, 高度在 8 150 mm 时为分析工况, 得出立柱与平衡千斤顶的等效刚度分别为 $1.1 \times 10^7 \text{ N/m}$ 及 $5.5 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。液压缸阻尼受到液体黏性、配合间摩擦力等影响, 选取一般值 $200 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。分析过程约束支架底座, 限制其所有自由度, 结构为刚性, 其余结构件为柔性体, 结构件间连接方式为回转连接副。建立 10 m 支架动载仿真模型, 如图 15 所示。

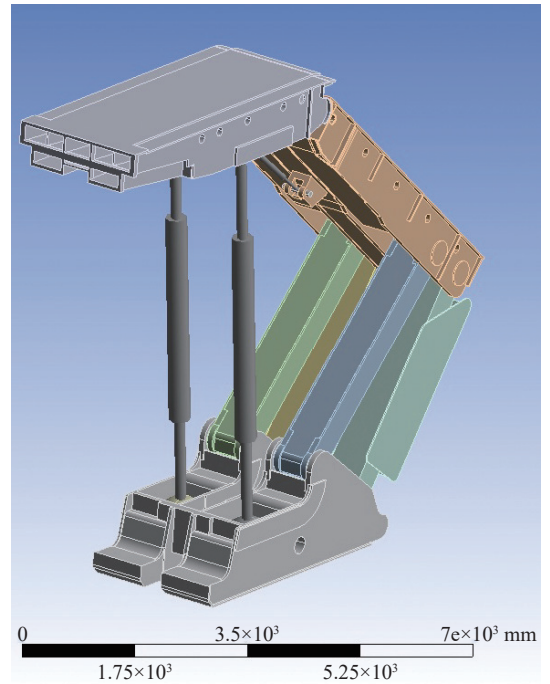


图 15 10 m 支架动载仿真模型

Fig.15 10 m support dynamic load simulation model

2) 边界条件及载荷施加。液压支架主要支撑状态有“给定压力”和“给定变形”状态。液压支架正常工作时, 假设支架与顶板处于“给定变形”的理想状态, 支架顶梁呈水平与顶板紧密接触, 此时支架载荷包括直接顶重量造成的静态均布载荷和基本顶来压断裂造成的动态集中力载荷; 采用外部集中力模拟顶板来压情况^[21]。

根据上述分析,可将支架预加载初撑压力,模拟初撑状态,使立柱初步受压,再施加短时间内的阶跃载荷,模拟直接顶断裂后造成的动态载荷^[22]。仿真过程将动载系数设置为 2,即动态载荷在 0.1 s 内增加 29 000 kN。具体载荷施加历程如图 16 所示。

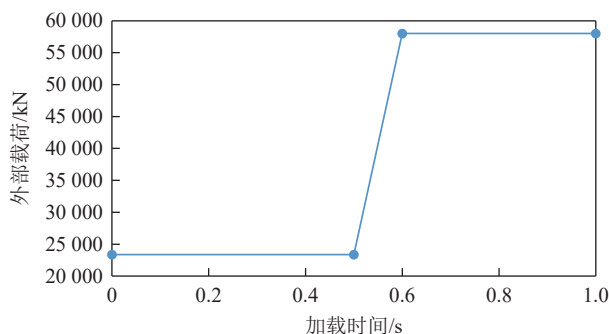


图 16 支架动态载荷施加历程

Fig.16 Dynamic load application process of support

液压支架两侧为对称结构,载荷可在支架的单侧施加,为研究不同接顶状态下顶板载荷对支架结构的冲击影响。将支架顶梁划分为不同区域,在顶梁上划出 3 纵 7 横 10 条辅助线,载荷以集中力形式分别施加在共 21 个辅助线交点上,如图 17 所示, $F(x,y)$ 为集中载荷,其中 X 方向表示横向即顶梁宽度方向, Y 方向表示纵向即顶梁长度方向,以顶梁中部最前端为坐标原点,其中 $y=5$ 为支架柱窝所在区域。

10 m 支架在 8 m 高度状态时,其掩护梁水平投影达到 4.7 m,其受力必将影响支架的整体承载状态。因此分析时考虑掩护梁受力,载荷施加方式同顶梁,即采用 3 纵 7 横分区域加载。

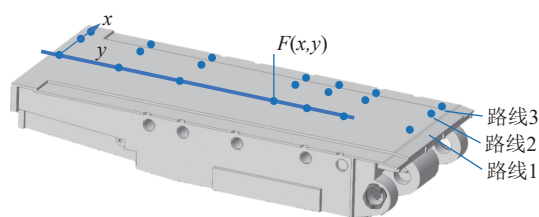


图 17 顶梁载荷施加示意

Fig.17 Schematic diagram of top beam load application

3) 动载响应仿真结果分析

根据上述分析设置仿真过程,集中载荷方向为垂直向下,得到液压支架结构在动载条件下的响应特性。整体而言受到冲击载荷时,支架各铰点在载荷及立柱作用下呈现振动状态,且不同位置铰点力相对初始施加载荷有不同变化。将机构各铰点力与输入的载荷进行对比,选取铰点力的波动峰值的最大值为输出值,记为 $F_{out}^{max}(x,y)$,初始施加的集中载荷为输入值,定义输出值与输入值的比为力传递系数,即力传递系数为

$$Q(x,y) = \frac{F_{out}^{max}(x,y)}{F(x,y)} \quad (8)$$

根据二力杆件原理,连杆与掩护梁及底座的铰接点处力是相等的,因此分析结果中只给出前、后连杆的 1 个点,如图 18 所示,前、后连杆处铰点力大小基本维持输入力值,相对而言顶掩铰点处力小于四连杆力,而立柱力被放大为输入力的 3 倍左右,说明顶梁受到动载作用下,力主要依靠立柱向下传递。

同样,将同样的边界条件及载荷施加于掩护梁上,分析结果如图 19 所示,外部动载沿掩护梁纵向位置变化,前、后连杆处铰点力响应变化较大,铰点力最大

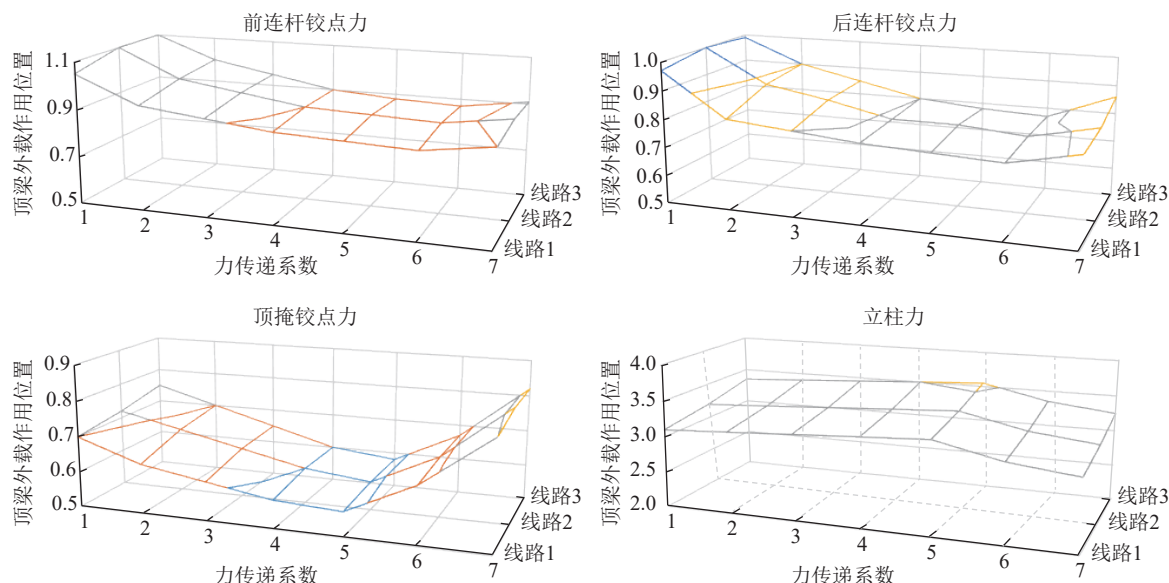


图 18 顶梁动载条件下铰点力传递系数

Fig.18 Transmission coefficient of hinge force under dynamic load conditions of top beam

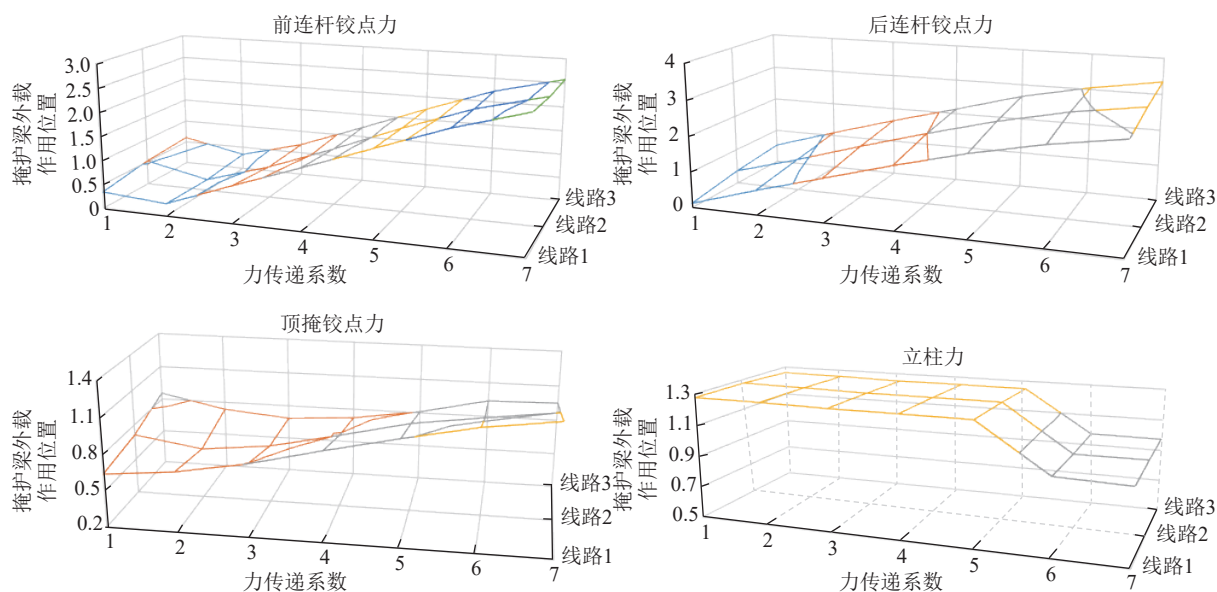


图 19 掩护梁动载条件下铰点力传递系数

Fig.19 Transmission coefficient of hinge force under dynamic load conditions of shield beam

可达输入力的 3.3 倍,且在外载施加于掩护梁尾部时铰点力达到最大值,与顶梁受载状态类似,顶掩铰点处力小于四连杆力,不同的是,立柱力与输入力的大小相仿。

对比顶梁与掩护梁承受外载的分析结果可认为,顶梁受外部动载时,外载作用主要通过立柱向下传递到底座及底板,而掩护梁受外部动载时,外载作用主要通过四连杆机构向下传递,如图 20 所示,尤其当外载作用于掩护梁尾部时,四连杆机构将受到 3 倍左右外载力。超大采高液压支架掩护梁相对地面角度越小,其在水平面的投影面积越大,越容易受到垮落矸石的冲击,因此要尽量避免支架在低采高状态长时间工作,且在研发过程中,应相应加强四连杆及其铰接销轴强度。为提升支架结构对顶板动载的适应性,立柱柱窝下部焊接垫板,在垫板与支架梁体间焊接“井”字型筋板,如图 21 所示,使柱窝与底板间形成蜂窝状的箱型结构,蜂窝箱型结构具有良好的吸能效果,可

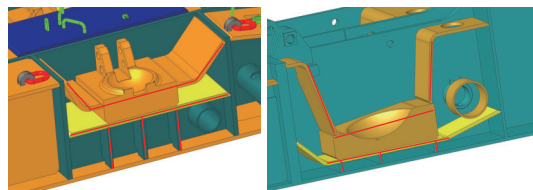


图 21 顶梁及底座柱窝结构型式

Fig.21 Type of column socket structure for top beam and base

以有效提高支架的抗冲击能力。

5 工业性试验

ZYA29000/45/100D 超大采高成套液压支架经过系统研发后顺利通过 63 000 次循环耐久性疲劳试验,在 10 m 超大采高综采工作面正常服役。

工作面采高范围分布 7~9.6 m,工作面 90 min 可完成 1 个开采循环。开采过程随顶板周期来压,支架阻力一般在较短时间内迅速增加,来压期间阻力可在 10 min 内由 20 000 KN 升高至 30 000 KN,工作阻力随工作面推进呈“几”字型分布,即工作阻力在达到峰值后在短时间内降低,若支架提供的支撑力较小,顶板压力容易发生激增现象,可见动载相对强烈。开采初期煤厚较薄,支架支撑高度在 7 m 左右,掩护梁背矸严重,其合力作用点位于平衡千斤顶受拉区域,支架易形成“高射炮”状态,来压时立柱下缩量较大,进一步掩护梁受载确实是超大采高液压支架工作过程中的关键问题,给支架设计分析提供了更明确的方向;开采高度超过 8 m 后,支架支护效率得到良好发挥,支架保持较好工作姿态,保障了工作面内作业空间的安全支护。

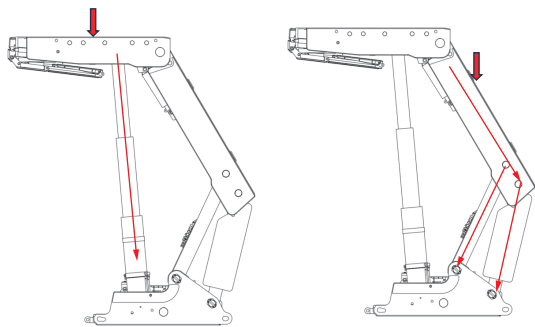


图 20 液压支架外部动载传递路径示意

Fig.20 Schematic diagram of external dynamic load transmission path of hydraulic support

回采过程中工作面煤壁未发生大面积片帮情况, 以 0.2~0.5 m 的轻微片帮居多, 1.0 m 以下片帮比例占 91.8%, 片帮主要在煤壁中部或中上部, 大致位于距顶板 3.5 m 以上范围内, 当护帮板贴实煤壁并有足够护帮力时, 可阻止煤壁上部破坏后的煤岩体片落。需要指出的是, “双层伸缩梁+三级协动护帮” 机构表现出对煤壁防护良好作用的同时, 由于结构创新为现场作业带来不同于普通支架的需求, 即采煤机接近时, 液压支架需要先收回护帮板及下层伸缩梁, 后收回上层伸缩梁, 而采煤机通过后, 支架先伸出上层伸缩梁后再伸出下层伸缩梁与护帮板, 否则将因下层伸缩梁直接承受顶板压力造成结构故障。

ZYA29000/45/100D 超大采高液压支架凭借其良好的适应性及可靠性实现了 10 m 厚煤层超大采高采场围岩稳定控制, 为厚煤层高效开采技术及装备研发提供了积极的技术借鉴及研发指引。

6 结 论

1) 在总结 10 m 超大采高工作面支护需求的基础上给出了 10 m 超大采高液压支架结构参数, 配套双层伸缩梁+三级协动护帮、 $\phi 630$ mm 大缸径抗冲击立柱等创新结构, 具备断面全防护、结构抗冲击、架体自稳定等技术特点。

2) 从稳定性切入, 分析了 ZYA29000/45/100D 液压支架对工作面倾角及采高的适应性, 分析得出液压支架横向临界倾倒角度为 12° , 适应采高 7~10 m; 分析了两柱掩护式支架不同参数下顶梁力平衡承载区域及其迁移特性, 说明支架力平衡区主要集中于立柱部位, 平衡千斤顶参数的变化对力平衡区的影响有限。

3) 分析了不同型式护帮结构的煤壁防护性能, 阐明 “双层伸缩梁+三级协动护帮” 结构在防护力度、防护面积等方面具有明显的优势; 通过分析支架在增阻状态下的等效刚度, 研究了其在 “给定变形” 工作状态下承受动态载荷的响应过程, 得出顶梁承受动载主要通过立柱传递、掩护梁承受动载主要通过四连杆机构进行传递的特点。

4) 分析了支架在曹家滩煤矿 122104 工作面的使用情况, 说明 ZYA29000/45/100D 对 10 m 超大采高工作面有较好的适应性, 且满足工作面超大采高围岩控制需求。

参考文献(References):

[1] 王国法, 庞义辉, 张传昌, 等. 超大采高智能化综采成套技术与装备研发及适应性研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 6-10.

WANG Guofa, PANG Yihui, ZHANG Chuanchang, et al. Intelligent longwall mining technology and equipment and adaptability in super large mining height working face[J]. Coal Engineering, 2016, 48(9): 6-10.

[2] 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.

[3] 韩会军, 曾明胜, 宋智鹰, 等. 8.2 m 大采高液压支架设计配套关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 63-68.

HAN Huijun, ZENG Mingsheng, SONG Zhiying, et al. Research on key technology of powered support design in 8.2 m large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 63-68.

[4] 冀宏波, 李玉福. 8.8 m 超大采高综采工作面支架选型应用及顶板管理研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(7): 92-96.

Ji Hongbo, LI Yufu. Research on supprot selection and roof management technology in 8.8 m ultra-high fully mechanized mining face[J]. China Coal, 2020, 46(7): 92-96.

[5] 韩会军, 韩春福, 李明忠, 等. 10 m 超大采高智能化开采关键技术及装备研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(7): 82-90.

HAN Huijun, HAN Chunfu, LI Mingzhong, et al. Research on key technologies and equipment for intelligent mining with 10 m super large mining height [J] China Coal, 2024, 50(7): 82-90.

[6] 徐刚, 黄志增, 范志忠, 等. 工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 1-11.

XU Gang, HUANG Zhizeng, FAN Zhizhong, et al. Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 1-11.

[7] 杨胜利, 王兆会, 吕华永. 大采高采场周期来压顶板结构稳定性及动载效应分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 315-322.

YANG Shengli, WANG Zhaohui, LYU Huayong. Analysis of structure stability of main roof and dynamic loading effect during periodic weighting in a large mining height stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 315-322.

[8] 杨俊哲, 刘前进. 8.8 m 超大采高工作面矿压显现规律实测及机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 69-74.

YANG Junzhe, LIU Qianjin. Analysis and measured of strata behavior law and mechanism of 8.8 m ultra-high mining height working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 69-74.

[9] 刘全明. 浅埋综采工作面矿压显现的推进速度效应分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 24-26.

LIU Quanming. Analysis on mining velocity effect of mine pressure behavior of fully mechanized longwall coal mining face with shallow mining depth[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 24-26.

[10] 王家臣, 王兆会, 孔德中. 硬煤工作面煤壁破坏与防治机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2243-2250.

WANG Jiachen, WANG Zhaohui, KONG Dezhong. Failure and prevention mechanism of coal wall in hard coal seam[J]. Journal of

- China Coal Society, 2015, 40(10): 2243–2250.
- [11] 吴浩, 宋选民. 8.5m 大采高综采工作面煤壁稳定性的理论分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 22–25.
- WU Hao, SONG Xuanmin. Theoretical analysis on coal wall stability of fully mechanized 8.5m high cutting longwall mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 22–25.
- [12] 黄庆享, 刘建浩. 浅埋大采高工作面煤壁片帮的柱条模型分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 187–191.
- HUANG Qingxiang, LIU Jianhao. Vertical slice model for coal wall spalling of large mining height longwall face in shallow seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 187–191.
- [13] 韩宇峰, 王兆会, 唐岳松. 大采高工作面支架刚度对煤壁稳定性的影响效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 1–9.
- HAN Yufeng, WANG Zhaohui, TANG Yuesong. Influence of support stiffness on face stability in longwall face with large cutting height[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 1–9.
- [14] 张金虎, 李明忠, 杨正凯, 等. 超大采高综采工作面煤壁片帮机理及多维防护措施研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 28(3): 487–495.
- ZHANG Jinhu, LI Mingzhong, YANG Zhengkai, et al. Mechanism of coal wall spalling in super high fully mechanized face and its multi-dimensional protection measures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 28(3): 487–495.
- [15] 王国法, 庞义辉, 许永祥, 等. 厚煤层智能绿色高效开采技术与装备研发进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 882–893.
- WANG Guofa, PANG Yihui, XU Yongxaing, et al. Development of intelligent green and efficient mining technology and equipment for thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 882–893.
- [16] 韩会军, 刘新华. 高端液压支架柱帽结构特点与适应性分析[J]. 煤矿开采, 2017(2): 34–36.
- HAN Huijun, LIU Xinhua. Adaptability analysis and structural characters of advanced hydraulic support prop cap[J]. Coal Mining Technology, 2017(2): 34–36.
- [17] 张银亮, 刘俊峰, 庞义辉, 等. 液压支架护帮机构防片帮效果分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 691–695.
- ZHANG Yinliang, LIU Junfeng, PANG Yihui, et al. Effect analysis of prevention rib spalling system in hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 691–695.
- [18] 杨培举, 刘长友, 吴锋锋. 厚煤层大采高采场煤壁的破坏规律与失稳机理[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 371–377.
- YANG Peiju, LIU Changyou, WU Fengfeng. Breakage and falling of a high coal wall in a thick mined seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 371–377.
- [19] 韩会军, 王国法, 李明忠, 等. 超大采高综采工作面支护技术及装备研究现状[J]. 煤矿安全, 2024, 55(5): 213–221.
- HAN Huijun, WANG Guofa, LI Mingzhong, et al. Present situation of support technology and equipment in fully mechanized mining face with supermining height[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(5): 213–221.
- [20] YANG Z K, SUN Z Y, JIANG S B, et al. Structural analysis on impact-mechanical properties of ultra-high hydraulic support[J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2020, 19(1): 17–28.
- [21] 梁利闯, 田嘉劲, 郑辉, 等. 冲击载荷作用下液压支架的力传递分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2522–2527.
- LIANG Lichuang, TIAN Jiajin, ZHENG Hui, et al. A study on force transmission in a hydraulic support under impact loading on its canopy beam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2522–2527.
- [22] KANG B S, PARK G J, ARORA J S. Optimization of flexible multibody dynamic systems using the equivalent static load method[J]. *AIAA Journal*, 2005, 43(4): 846–852.