



大倾角煤层俯伪斜工作面液压支架设计系统实用性分析

伍永平 胡涛 胡博胜 解盘石 杜玉乾 闫壮壮 王同 刘宝恒

引用本文:

伍永平, 胡涛, 胡博胜, 等. 大倾角煤层俯伪斜工作面液压支架设计系统实用性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 187–198.

WU Yongping, HU Tao, HU Bosheng. Practicability analysis of hydraulic support design system for steeply dipping coal seam inclined pseudo inclined working face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 187–198.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1451>

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平行四边形液压支架结构设计与运动响应

Structural design and motion response of parallelogram hydraulic support in pitching oblique mining face of steeply dipping coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 314–325 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1437>

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>

基于金刚石串珠绳锯的急倾斜薄及中厚煤层无人工作面开采方法探索

Analysis on mining method of unmanned working face in steeply inclined thin and medium thick coal seam based on beaded wire saw
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 233–240 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0575>

6~10 m厚煤层超大采高液压支架及其工作面系统自适应智能耦合控制

Adaptive intelligent coupling control of hydraulic support and working face system for 610 m super high mining in thick coal seams
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 276–288 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1692>

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>

急倾斜煤层铣采机机械化采煤方法

Mechanized mining method with milling excavation technology in steeply inclined seam
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3d43dc2c-54c9-45ed-9c02-2cdab771ac3f>



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, 胡 涛, 胡博胜, 等. 大倾角煤层俯伪斜工作面液压支架设计系统实用性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 187–198.

WU Yongping, HU Tao, HU Bosheng, *et al.* Practicability analysis of hydraulic support design system for steeply dipping coal seam inclined pseudo inclined working face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 187–198.

大倾角煤层俯伪斜工作面液压支架设计系统实用性分析

伍永平^{1,2}, 胡 涛¹, 胡博胜^{1,2}, 解盘石^{1,2}, 杜玉乾¹, 闫壮壮¹, 王 同¹, 刘宝恒¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 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)

摘 要:为解决大倾角煤层液压支架设计过程中多维受载特征被忽略、建模过程繁琐、设计周期长等问题,结合大倾角伪俯斜工作面液压支架受载特性,研发大倾角液压支架设计系统。采用运动仿真、强度测试、物理实验等综合研究方法,以 ZY5000/15.5/38 型大倾角煤层液压支架设计为例,根据大倾角伪俯斜采场液压支架多维受力特征建立力学模型,分析大倾角液压支架的空间受载特性,建立伪俯斜工作面液压支架顶梁、掩护梁力学线性矩阵,利用 VB.NET 为开发语言结合线性矩阵和 SOLIDWORKS 二次开发建模软件搭建液压支架设计系统,开发出良好的人机交互用户界面。研究分析表明:该系统生成下的模型液压支架顶梁前端运动轨迹范围 48 mm 左右,支架顶梁前端运动轨迹曲线满足双扭线特性;模型支架最大应力为 146.7 MPa,远小于材料屈服的等效力,最大变形位移也不超过 0.531 mm;研制相似比为 1:5 物理模型液压支架工作阻力在 38 kN 左右,在不同条件下测试支架顶梁、掩护梁受载特性,实验中模型支架的力学数据与系统生成的力学数据基本相符,且实验在初撑、增阻、恒阻及卸压各阶段均满足支架的运动要求及承载特性。研究结果体现了该设计系统下模型液压支架较好的适应性,对丰富大倾角煤层液压支架设计理论和指导液压支架设计生产具有一定的科学和实践意义。

关键词:大倾角煤层;液压支架;参数化设计系统;适应性检验

中图分类号:TD355.4

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2024)07-0187-12

Practicability analysis of hydraulic support design system for steeply dipping coal seam inclined pseudo inclined working face

WU Yongping^{1,2}, HU Tao¹, HU Bosheng^{1,2}, XIE Panshi^{1,2}, DU Yuqian¹, YAN Zhuangzhuang¹,
WANG Tong¹, LIU Baoheng¹

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

Abstract: In order to solve the problems of ignoring multi-dimensional load characteristics, cumbersome modeling process and long design cycle in the design process of hydraulic support in steeply dipping angle coal seam, combined with the load characteristics of hydraulic support in large dip angle pseudo-inclined working face, the design system of large dip angle hydraulic support is developed. Based on the comprehensive research methods of motion simulation, strength test and physical experiment, taking the design of ZY5000/15.5/38 hydraulic support for steeply dipping angle coal seam as an example, the mechanical model is established according to the multi-dimensional stress characteristics of hydraulic support in large dip angle pseudo-inclined stope. The spatial load characteristics of large dip angle hydraulic support are analyzed, and the mechanical linear matrix of top beam and shield beam of hydraulic support in pseudo-inclined working face is established. The design system of hydraulic support is built by using VB.NET as the development language combined with linear matrix and SOLIDWORKS secondary development modeling software, and a good human-computer interaction user interface is de-

收稿日期: 2023-12-20

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.12438/cst.2023-1451

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51634007, 52204151)

作者简介: 伍永平(1962—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 029-85583143, E-mail: wuyyp@xust.edu.cn

通讯作者: 胡 涛(2000—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生。E-mail: 1790245937@qq.com

veloped. The research and analysis show that the trajectory range of the front end of the top beam of the model hydraulic support generated by the system is about 48 mm, and the trajectory curve of the front end of the top beam of the support satisfies the characteristics of double torsion line. The maximum stress value of the model support is 146.7 MPa, which is far less than the equivalent stress value of the material yield, and the maximum deformation displacement is not more than 0.531 mm. The working resistance of the physical model hydraulic support with a similarity ratio of 1:5 is about 38 kN. The loading characteristics of the top beam and the shield beam of the support are tested under different conditions. The mechanical data of the model support in the experiment are basically consistent with the mechanical data generated by the system, and the experiment meets the motion requirements and bearing characteristics of the support in the stages of initial support, resistance increase, constant resistance and pressure relief. The research results reflect the good adaptability of the model hydraulic support under the design system, which has certain scientific and practical significance for enriching the design theory of hydraulic support in steeply dipping angle coal seam and guiding the design and production of hydraulic support.

Key words: steeply dipping coal seam; hydraulic support; parametric design system; adaptability test

0 引言

大倾角煤层是指埋藏倾角在 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层, 是国内外采矿界公认的难采煤层^[1-2]。在我国西部如四川、新疆、甘肃等地大倾角煤层储量占总储量的 50% 以上, 且大倾角煤层中有 50% 以上为优质焦煤和无烟煤等稀缺煤种。而大倾角煤层“支架-围岩”系统相互作用关系与缓斜煤层差异较大, 随煤层倾角增大支架重力沿工作面倾向的分力增大, 垂向分量减小, 支架稳定性变差, 导致支架下滑、倾倒, 架间挤压、咬架等现象发生, 且支架在顶底板岩层、煤壁、矸石和相邻支架等因素影响下处于一个非均衡的复杂受力环境中^[3-4]。

液压支架是综采工作面的主要配套设备, 其适应性决定工作面能够安全、高效生产的关键要素之一^[5]。目前, 代表性的液压支架设计建模方法方面, 徐亚军等^[6]利用 VB 6.0 编程工具, 调用 Solidworks API 对 ZY8400/26/52 两柱式大采高液压支架进行了动态尺寸干涉检查, 提高了支架设计的可靠性; 何明等^[7]运用 Pro/E 搭建三维参数化模型, 并利用 Mechanism 运动仿真模块分析运动仿真, 导入 ANSYS 进行有限元分析, 提高了支架的设计效率及缩短了设计周期; 蔡文书等^[8]利用 Solidworks 软件对 ZF720 放顶煤液压支架简化模型进行机械结构分析, 提出了支架整机虚拟装配及运动仿真; 于涛等^[9]利用 Pro/E 与 Visual C++ 软件结合的方式搭建了液压支架参数化建模的辅助设计系统。刘晓莲等^[10-11]利用 AMESim 软件对 ZY12000/28/64 型号的液压支架进行了系统的建模, 模拟了立柱上升工况和平衡缸液压回路升降以实现液压系统的建模和仿真。对液压支架适应性检验方面, 郭军等^[12]制造出微型四柱式放顶煤支架通过运动仿真、结构屈服强度检测、强度测试、刚度测试、承载性能测试等方式论证了支架的可行性; 赵锐^[13]对二柱掩护式液压支架进行了不同

工作阻力的测试, 解决了液压支架实验力无法准确测试的技术难题。

目前, 大倾角综采液压支架的设计制造及样架型式实验标准大多数基于缓倾斜支架开采结构的基础上进行局部改装 (如增加防倒防滑装置、采用邻架操作等), 以满足煤层开采支架的性能, 一定程度上保证了支架的稳定性, 但缺乏系统性的理论支持和设计标准, 在大倾角煤层实际开采过程中仍会出现支架部件损坏、支架过重、稳定性差、倾倒后扶正难和飞矸频发等众多研究难题, 导致生产效率低、安全状况差^[4]。针对以上, 文中基于大倾角俯伪斜综采工作面的矿压显现规律^[14-15]、俯伪斜综采工作面支架稳定性分析^[16]以及俯伪斜综采工作面液压支架选型问题基础上^[17], 分析在大倾角煤层下液压支架的空间受力模型, 结合大倾角液压支架受力特性来研发设计系统。分析在大倾角煤层液压支架的空间受力模型, 结合大倾角液压支架受力特性来研发设计系统, 并对物理模型支架运动、静应力、结构、刚度等方面进行了分析, 验证了系统的实用性, 提高大倾角支架适应性, 促进大倾角煤层长壁综采装备的发展。

1 工程背景

某矿 3132 工作面位于二采区 5 号煤层, 煤层倾角 $36^{\circ} \sim 47^{\circ}$, 平均倾角 43° , 平均厚度 2.5 m, 密度 1.44 t/m^3 。煤层分布主要以半暗半亮型焦煤、焦肥煤为主, 赋存较稳定, 工作面采用伪俯斜综合机械化开采, 俯斜角度为 25° , 布置 38 个 ZY5000/15.5/38 两柱式液压支架和 6 架 ZY6000/15.5/38 过渡液压支架, 工作面液压支架如图 1a 所示。值得注意的是, 大倾角液压支架在研制过程中因结构、测量技术有限, 不能适应大倾角工作面复杂多维施载的特性, 导致液压支架在工作面开采过程中出现失稳、支架下滑、倾倒后难以扶正等问题, 且液压支架油缸、结构件等损

坏频发^[18],如图1b所示。

图2为大倾角煤层长壁工作面液压支架三维空间受力特征示意,由图2可知,在工作面走向、倾向、垂向共同作用下支架处于三维动态平衡状态。因此,

分析大倾角工作面液压支架受力特征,应从特殊三维受力特征下力学响应作为大倾角液压支架设计建模的厘定条件,为大倾角工作面液压支架三维模型参数化设计提供理论支撑。



图1 大倾角煤层长壁工作面液压支架工作状态

Fig.1 Working state of hydraulic support in longwall face of steeply dipping coal seam

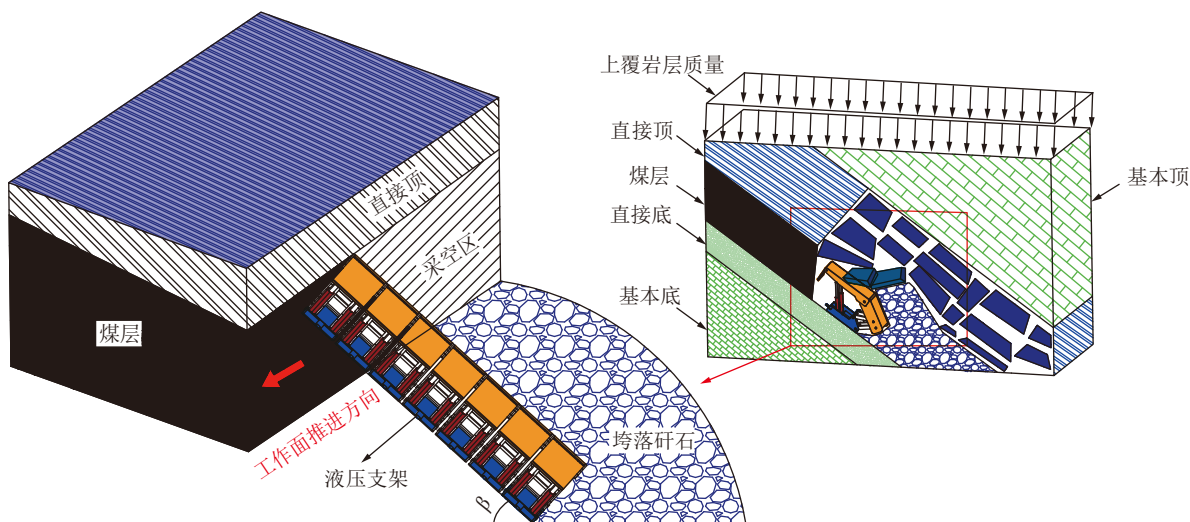


图2 大倾角工作面液压支架三维受力特征

Fig.2 Three-dimensional loading characteristics of hydraulic support in steeply inclined coal seam coal working face

2 大倾角工作面液压支架受力特性

大倾角工作面液压支架的稳定性一直以来是大多学者们研究的重点,在实际应用中液压支架经常处于复杂的三维受力状态。支架各构件的受力特征反映了支架与围岩之间的相互作用关系,同时,支架立柱、前后连杆、平衡千斤顶和顶梁-掩护梁铰接点的受力主要与伪斜角、煤层倾角、顶板载荷作用位置等因素有关。为更好地反映支架在工作面的实际受力状态,进而设计系统的开发,先对伪俯斜工作面条件下支架二维力学模型进行了分析,得出支架保持稳定的临界工作阻力;在支架稳定性的基础上,再对大倾角工作面液压支架工作状态下三维空间受力特性进行分析,研究支架的失稳机理,指导大倾角煤层

液压支架建模系统的搭建。

2.1 伪俯斜采场液压支架二维力学模型

伪俯斜工作面支架发生倒滑和扭摆将造成与其上下邻架间的支架发生“咬、挤”现象,会形成支架间拉架和移架困难,诱发顶板漏冒,最终导致工作面大范围的“支架-围岩”系统灾变^[19]。大倾角液压支架的二维力学模型如图3所示,其中 y 轴沿伪斜工作面向下, z 轴垂直煤层向上,支架逆向转动为正。

支架与底板间的最大静摩擦力为 F_{Fmax} ,当支架下滑分力大于最大静摩擦力时,支架将发生滑移。分析支架处于临界下滑失稳状态时的平衡方程为

$$G \sin \beta - F_R - \Delta S + F_S - F_{Fmax} = 0 \quad (1)$$

经计算:

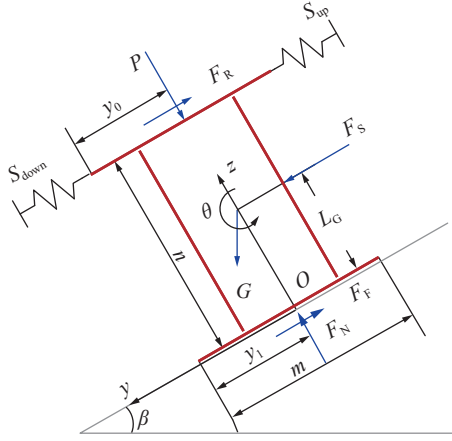


图 3 伪俯斜采场液压支架二维力学模型

Fig.3 Two-dimensional mechanical model of hydraulic support in pseudo-inclined stope

$$\begin{cases} F_R = \mu P \\ \Delta S = S_{\text{down}} - S_{\text{up}} \\ F_{F_{\text{max}}} = \mu(P + G \cos \beta) \end{cases} \quad (2)$$

式中, G 为支架在工作面伪斜方向的重力分量, kN; β 为工作面倾角, ($^\circ$); F_R 为顶板对支架的切向载荷, 即支架与顶板间摩擦力, kN; ΔS 为相邻支架间作用载荷之和; F_S 为矸石对支架尾部的作用力, kN; $F_{F_{\text{max}}}$ 为支架与底板间的最大静摩擦力, kN; μ 为支架与顶底板之间的摩擦因数; P 为顶板对支架的法向载荷, kN; $S_{\text{up}}, S_{\text{down}}$ 为相邻支架间作用载荷, kN。

支架工作阻力过大时, 支架将发生下沉; 当支架所受的转动力矩大于支架本身的抗转动力矩时, 支架将发生转动。这里假设支架绕底座中点 O 转动, 支架下沉以及处于临界转动失稳状态时的平衡方程^[18] 分别为:

$$F_N - P - G \cos \beta = 0 \quad (3)$$

$$F_N \left(y_1 - \frac{m}{2} \right) - \Delta S n + L_G G \sin \beta + \quad (4)$$

$$\frac{n}{2} F_S - F_R n + P \left(\frac{m}{2} - y_0 \right) = 0$$

$$F_N = \frac{2}{2y_1 - m} \left[n \Delta S - L_G G \sin \beta - \frac{n}{2} F_S + F_R n - P \left(\frac{m}{2} - y_0 \right) \right] \quad (5)$$

式中, F_N 为底板对支架的法向载荷, kN; L_G 为支架重心高度, m, 取 $L_G = n/2$; y_0 为顶板载荷作用位置, m; y_1 为底板载荷作用位置, m; m 为支架宽度, m; n 为支架高度, m; F_R 为顶板对支架的切向载荷, 即支架与顶板之间摩擦力, kN。

整理化简式 (1)~(2), 可得液压支架不发生下滑失稳的临界工作阻力 P_1' 为

$$P_1' = \frac{1}{2\mu} [G(\sin \beta - \mu \cos \beta) + F_S - \Delta S] \quad (6)$$

由式 (3)~(5) 可得使液压支架不发生转动的临界工作阻力 P_2' 为

$$P_2' = \frac{1}{2(\mu n + y_0 - y_1)} [(2y_1 - m) \cos \beta G + n(G \sin \beta + F_S - 2\Delta S)] \quad (7)$$

由式 (6)、(7) 可得, 在工作面倾角 β 不变、不考虑相邻支架间作用载荷 ΔS 情况下, 支架临界工作阻力 P_1', P_2' 随着矸石作用力 F_S 如图 4 所示, 支架临界工作阻力 P_1', P_2' 随着矸石作用力 F_S 的增大而增大。因此在大倾角液压支架的设计过程中, 为使工作面支架能稳定工作, F_R 和 F_F 的作用位置和大小与支架的工作阻力有关, 在工程实践中应适当增大侧推千斤顶的侧推力以及支架的工作阻力, 增强支架的调架能力和稳定性。

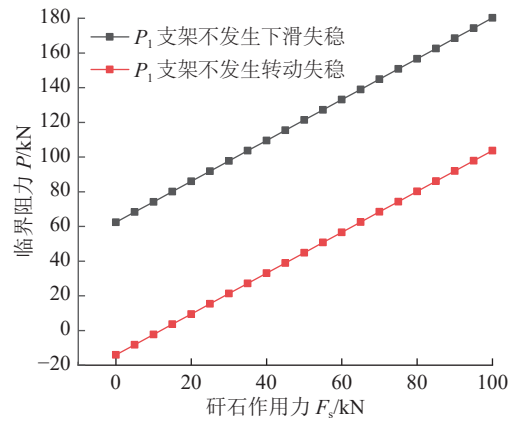


图 4 支架临界阻力随矸石作用力的变化关系

Fig.4 Relationship between critical resistance of support and force of the waste rock

2.2 大倾角液压支架三维空间力学模型

支架各构件的受力特征反映了支架与围岩之间的相互作用关系以及支架的失稳机理, 同时决定着支架是否能正常受载, 尤其对顶底板凹凸不平 and 间隙碎裂时, 支架外载荷离散分布, 集中载荷可能与支架中心线不在同一垂直面内, 造成支架平面力学分析结果与实际受载情况不吻合^[20]。为明确大倾角煤层伪俯斜工作面支架的受载特征, 分离顶梁以及掩护梁分别进行空间力学分析, 建立两柱支撑掩护式支架空间力学模型的一般数学方程^[21], 代入支架有关几何参数, 对支架载荷进行计算, 支撑掩护式支架力学模型如图 5 所示。

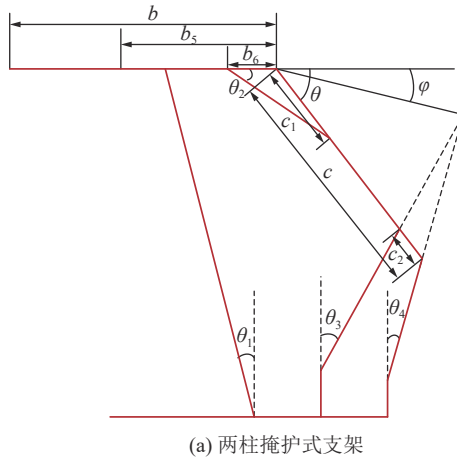
根据大倾角煤层伪俯斜工作面下液压支架稳定后顶梁受力状态建立平衡关系式:

$$\begin{cases} R_{1x} + R_{2x} - (P_1 + P_2)\sin\theta_1 - P_E\cos\theta_2 + Q_x + f_x + F_m = 0 \\ R_{1z} + R_{2z} + (P_1 + P_2)\cos\theta_1 + P_E\sin\theta_2 - Q_z - G_1\cos\alpha = 0 \\ R_{1y} + R_{2y} - F + S_{up} - S_{down} + G_1\sin\alpha - Q_y - f_y = 0 \end{cases} \quad (8)$$

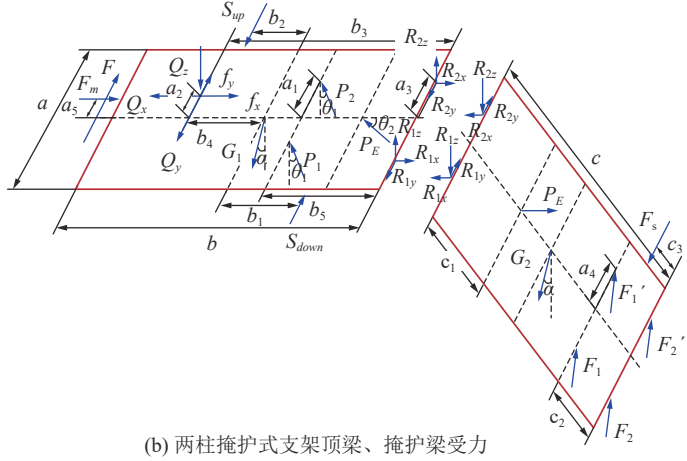
$$\begin{cases} (P_1 - P_2)a_1\cos\theta_1 + Q_z a_2 + (R_{1z} - R_{2z})a_3 = 0 \\ (R_{1x} - R_{2x})a_3 - (R_{1y} + R_{2y})\frac{b}{2} - Q_x a_2 - Q_y b_4 - f_x a_2 - f_y b_4 + S_{up}b_2 - S_{down}b_1 + F\frac{b}{2} + F_m a_5 + (P_2 - P_1)a_1\sin\theta_1 = 0 \\ Q_z b_3 - (P_1 + P_2)b_5\cos\theta_1 + G_1\frac{b}{2}\cos\alpha - P_E b_6\sin\theta_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, α 为煤层倾角, ($^\circ$); $R_{1x}, R_{2x}, R_{1y}, R_{2y}, R_{1z}, R_{2z}$ 为顶梁与掩护梁铰接点约束力, kN; P_1, P_2 为立柱工作阻力, kN; P_E 为平衡千斤顶工作阻力, 推力为正, 拉力为负, kN; F 为支架与煤壁之间的摩擦力, kN; a 为支架宽度, m; b 为顶梁长度, m; c 为掩护梁长度, m; θ 为顶梁与掩护梁最大夹角, ($^\circ$); θ_1 为立柱与垂直方向夹

角, ($^\circ$); θ_2 为平衡千斤顶与顶梁、掩护梁夹角, ($^\circ$); θ_3 为前连杆与垂直方向夹角, ($^\circ$); θ_4 为后连杆与垂直方向夹角, ($^\circ$); G_1 为支架顶梁、掩护梁重力, kN; Q_x, Q_y, Q_z 为顶板作用载荷分力, kN; f_x, f_y 为支架与顶板间摩擦力分力, kN; F_m 为煤壁对支架的作用力, kN。



(a) 两柱掩护式支架



(b) 两柱掩护式支架顶梁、掩护梁受力

图 5 大倾角液压支架力学模型图

Fig.5 Force diagram of steeply inclined coal seam hydraulic support

由式 (8) 可得顶梁沿 x, y, z 方向的受力平衡关系式。煤层倾角 α 不变下, 沿顶梁 x, y 的约束力主要和立柱工作阻力 P 、顶板作用载荷 Q 、支架顶梁重力等有关; 沿顶梁 z 方向的约束力还受到 S_{up}, S_{down} 的影响。式 (9) 可得顶梁沿 x, y, z 方向的力矩平衡关系式, 各铰接点约束力主要与立柱工作阻力、千斤顶工作阻力有关, 同时, 立柱及千斤顶与顶梁的夹角也会影响支架的约束力。因此, 当煤层倾角和伪斜角发

生变化时, 应适当增大支架立柱工作阻力和平衡千斤顶工作阻力以保持支架稳定, 同时应做好顶板管理, 防止支架顶梁发生偏载, 避免支架结构损坏、支架倒滑等发生, 在对大倾角液压支架设计建模过程中, 需考虑大倾角采场三维空间受力特征的影响来指导液压支架的具体结构设计。

根据大倾角煤层伪俯斜工作面下液压支架稳定后掩护梁受力状态建立平衡关系式:

$$\begin{cases} R_{1x} + R_{2x} - P_E\cos\theta_2 - (F_1 + F'_1)\sin\theta_3 - (F_2 + F'_2)\sin\theta_4 = 0 \\ (F_1 + F'_1)\cos\theta_3 - (R_{1z} + R_{2z}) - P_E\sin\theta_2 + (F_2 + F'_2)\cos\theta_4 - G_2\cos\alpha = 0 \\ F_S - (R_{1y} + R_{2y}) + G_2\sin\alpha = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} (R_{1x} - R_{2x})a_3\sin\theta + (R_{1z} - R_{2z})a_3\cos\theta + (F'_1 - F_1)a_4\cos(\theta - \theta_3) + (F'_2 - F_2)a_4\cos(\theta - \theta_4) = 0 \\ (R_{1x} - R_{2x})a_3\cos\theta + (R_{2z} - R_{1z})a_3\sin\theta + (R_{1y} + R_{2y})\frac{c}{2} + (F_1 - F'_1)a_4\sin(\theta - \theta_3) + (F_2 - F'_2)a_4\sin(\theta - \theta_4) - F_S c_3 = 0 \\ P_E c_1\cos(\theta - \theta_2) - G_2\frac{c}{2}\cos\theta\cos\alpha + (F_1 + F'_1)(c - c_2)\cos(\theta - \theta_3) + (F_2 + F'_2)ccos(\theta - \theta_4) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, F_1, F'_1 为前连杆力, kN; F_2, F'_2 为后连杆力, kN;

G_2 为支架顶梁、掩护梁重力, kN; F_S 研石对支架尾部

的作用力, kN。

由式(10)一式(11)可得掩护梁沿 x, y, z 方向的受力平衡关系式及力矩平衡关系式, 与顶梁空间受力不同的是, 掩护梁还受到前后连杆力、矸石尾部作用力的影响, 伪斜角和顶板载荷作用位置对支架各构件受载影响较大, 当煤层倾角和伪斜角发生变化时, 应适当增大支架立柱工作阻力、前后连杆力、平衡千斤顶工作阻力以保持支架稳定, 同时应做好顶板管理, 预防支架尾部矸石的冲击载荷, 防止支架顶梁发生偏载, 避免支架结构损坏、支架倒滑等围岩灾害发生。

为建立顶梁两端、顶端扭转和顶梁偏载状态下顶梁和掩护梁的通用稳定性力学计算公式, 将式(6)一式(7)、式(8)一式(11)进行联立, 可得到一个 14 维的线性矩阵, 如下式所示:

$$\begin{aligned} X = [P_1', P_2', P, P_E, F_1, F_1', F_2, F_2', \\ R_{1x}, R_{2x}, R_{1y}, R_{2y}, R_{1z}, R_{2z}] \end{aligned} \quad (12)$$

根据煤矿初始设计参数可计算得到液压支架的 $P, P_E, F_1, F_2, F_1', F_2', R_{1x}, R_{2x}, R_{1y}, R_{2y}, R_{1z}, R_{2z}$, 即液压支架的平衡千斤顶工作阻力、前后连杆力、铰接点接触力等力学响应数据, 对后节大倾角液压支架三维建模结构参数设计具有重要的判据依据。

3 大倾角煤层液压支架结构建模与优化系统

3.1 基于 Top-Down 建模设计方法

目前, 产品在设计建模过程中大部分是由零件到装配, 形成整架模型, 该方法增加了支架零部件之间的尺寸、运动干涉, 而 Top-Down(自顶向下)设计顺序是产品→部件→组件→零件, 即在装配体中完成零部件的设计与配合^[22], 如图 6 所示。由于是在装配体上直接设计出零部件, 因此从根本上避免了干涉现象的产生, 同时当装配体设计完毕, 零部件也自动生成, 减少了工作量, 提高了工作效率。利用 Top-Down 的设计方法, 先构建液压支架的底座、前后连杆、掩护梁、顶梁、前梁等模型, 各部件尽量采用单一的实体建模方式。然后创建完支架所有的零件后, 对零件进行装配, 通过面匹配、面对齐、轴对齐、联接等装配关系, 将前后连杆、掩护梁、顶梁、立柱等零部件一次进行装配。

3.2 大倾角煤层液压支架设计系统的开发

SolidWorks 这款软件为用户提供免费的 2 次开发工具, 2 次开发支持 C#, Visual Basic, C++, VB.NET 等多种语言, 可以适应不同用户的开发基础^[23]。此系统以 Visual Studio 2019 作为系统开发工

具, VB.NET 为开发语言, 对 SolidWorks 建模完后系统的 2 次开发, 设计开发良好的人机交互用户界面^[24], 其中包括对液压支架的参数选型、力学分析、强度计算、计算参数模块、更新产品模块和打包项目模块。如图 7 所示。

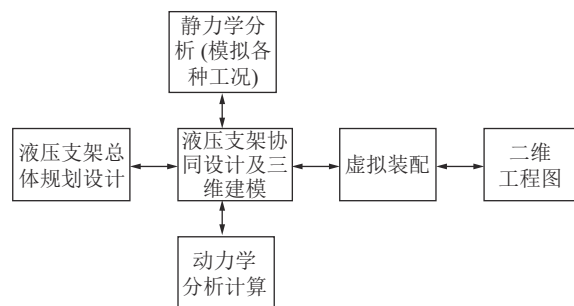


图 6 大倾角煤层液压支架设计流程

Fig.6 Design process of hydraulic support in steeply inclined coal seam

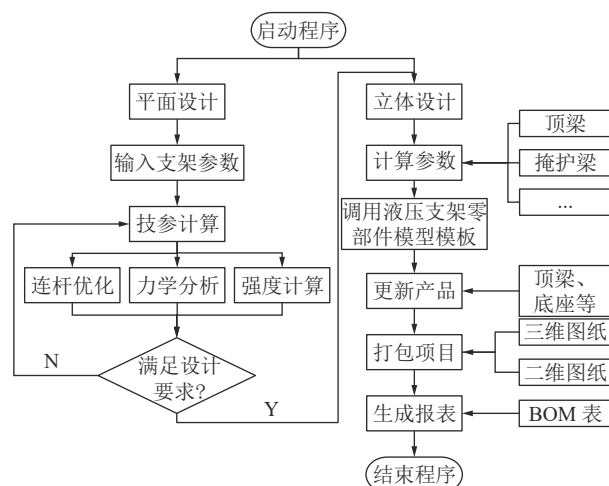


图 7 大倾角煤层液压支架设计系统流程

Fig.7 Flow chart of hydraulic support design system for steeply inclined coal seam

该系统主要由两部分组成, 一是平面设计模块, 主要是对支架的技术参数化计算, 由大倾角工作面液压支架的临界工作阻力、平衡千斤顶工作阻力、前后连杆力、铰接点接触力等进行系统计算, 为实时反馈支架多维受力特征, 提高支架受力的可视化程度, 并对支架连杆进行优化, 指导支架三维模型的建立; 二是立体设计, 主要针对平面设计优化后的参数进行三维物理模型的搭建, 包括对支架零部件、三维图纸、二维图纸等的生成, 然后生成支架的 BOM 表指导液压支架的实际生产过程。

以 ZY5000/15.5/38 型液压支架为例, 设计系统的主要步骤如下操作:

1) 设计的人机交互界面如图 8a 所示, 液压支架



图8 大倾角液压支架建模设计系统基本参数设定

Fig.8 Basic parameter setting of modeling design system for steeply inclined coal seam hydraulic support

进行四连杆优化参数如图8b所示。

2) 基于空间力学理论分析的大倾角液压支架指导设计方法。

基于表达式(12)建立顶梁、掩护梁受力状态下的通用力学分析矩阵,利用系统算法计算通用力学分析矩阵,分析支架各构件的受力特征,建立空间力学系统分析数据库,将分析数据库嵌入建模设计系统中,生成大倾角工作面环境静态平衡下液压支架的相关数据,为大倾角液压支架三维建模各个数据提供基础。

以某矿3132工作面为工程背景,取煤层倾角 $\alpha=43^\circ$ 等相关开采参数。模拟大倾角煤层液压支架顶梁前端受力过程中的参数如图9a所示。系统依次对顶梁、掩护梁加载完成后,将输出本次设计的结果,如图9b所示。

通过系统生成的设计参考数据对液压支架进行Top-Down方法三维建模,生成的模型后期需要手工加入其他的标准件(如螺母、垫块、标准油缸等)如图10所示。

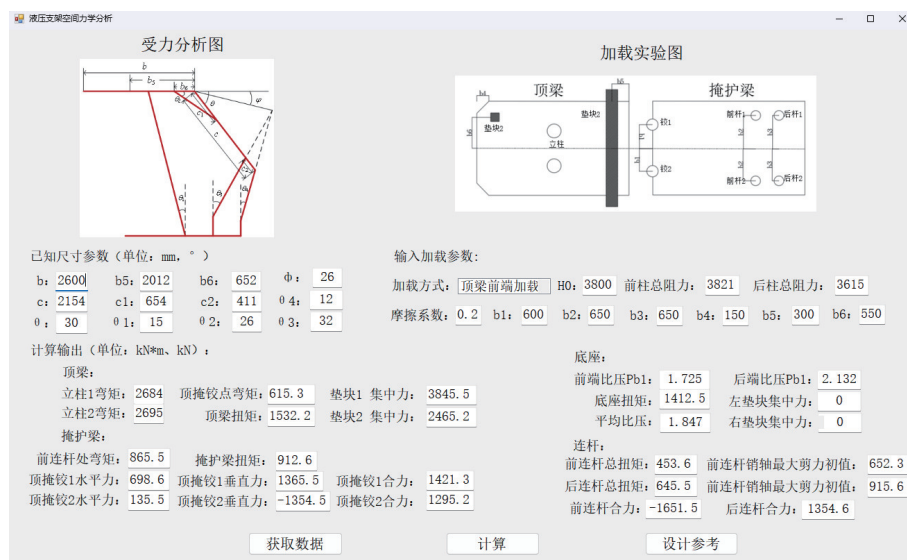
4 大倾角煤层液压支架适应性检验

4.1 运动仿真检验

运动检验中四连杆的优劣直接影响着支架掩护梁和四连杆的受力状况以及支架的正常升降过程,本小节利用Solidworks Motion插件对液压支架的运动进行了重点分析检验。

为了与大倾角工作面液压支架实际三维空间力学受载特征相结合,根据3.2节ZY5000/15.5/38型液压支架计算得出的数据,在支架上施加不同方向的应力边界以保持平衡,进一步模拟支架的升架、降架过程。由图2可得液压支架在伪斜工作面倾斜方向受到不同的力,同时,施加顶板、底板方向的力以保持支架平衡。具体地,对图10生成的物理模型施加重力,液压立柱设置线性马达,速度0.1 m/s,护帮板设置旋转马达,速度0.1 RPM,设置运动帧数为25 f/s,在对其运动仿真过程中,具体布置如图11所示。

以液压支架底座与底板接触的面为平面坐标系,分析液压支架顶梁前端的运动轨迹。支架从最高位



(a) 顶梁单侧加载受力分析



(b) ZY5 000/15.5/38 支架设计参考

图9 大倾角液压支架平面参数设计指导

Fig.9 Plane parameter design guidance of steeply inclined coal seam hydraulic support

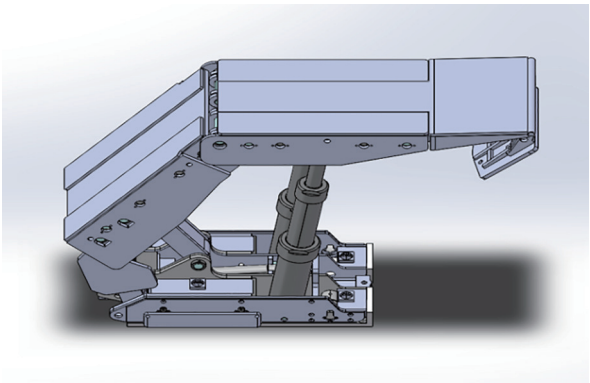


图10 ZY5000/15.5/38 型液压支架模型

Fig.10 ZY5000/15.5/38 hydraulic support model

轨迹为双扭线, 液压支架在 3.71 s(支架高度为 2 900 ~ 2 700 mm)和 7.95 s 左右(支架高度为 2 000 ~ 1 800 mm)发生转折, 小于设计规范中 e (70 mm)。

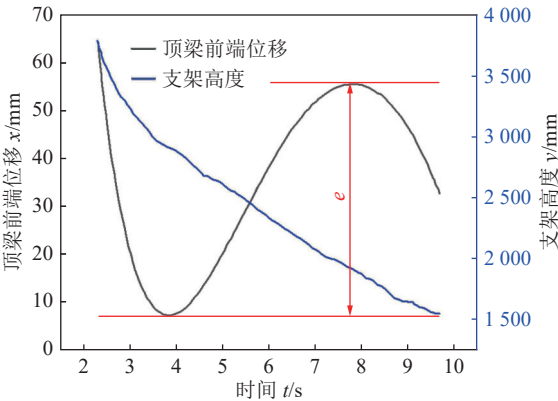


图12 大倾角煤层液压支架顶梁前端运动轨迹

Fig.12 Front end trajectory of top beam of hydraulic support in steeply inclined coal seam

4.2 支架屈服强度检测

液压支架满足基本运动要求后其强度也需要满足开采实践需求, 需保证支架在受载过程中不发生变形破坏, 维持工作面正常生产。本节对大倾角煤层液压支架整架模拟采场三维受力情况, 分析支架设计是否满足要求。

对图10系统生成的模型简化后, 导入到 Solidworks Simulation 中, SolidWorks Simulation 在静应力分析过程中是基于剪切应变能的一种等效应力, 遵循材料力学的第4强度理论(形状改变比能理论)^[25], 支架顶梁、掩护梁、底座等材料属性设置为标

置降到最低位置时, 轨迹宽度 e 为 48 mm 左右, 在缓慢下降过程中, 由图12可以看出支架顶梁前端运动

准 45 号钢,材料的屈服应力值为 530 MPa;弹性模量为 201 GPa,泊松比为 0.26,密度为 7.85 g/cm³,液压支架按照图 11 布置在俯斜工作面上,平衡后单个支架的应力分析。边界条件包括初始参数压力 P 取 7 500 kN、煤层 α 取 43°、重力 G 取 9.8 N/kg;相邻支架间作用载荷 ΔS 在平稳状态下之和为 0,矸石对掩护梁的作用力 $F_s(F_s=68\text{ kN})$ 由 3.2 节公式计算出的数据。模型网格划分后进行屈服强度分析如图 13 所示。

实验中以 1.5 倍的理论应力(支架额定工作阻力时承受的最大压力)施加强度分析,由图 13a 可得液压支架顶梁柱窝的最大应力值为 146.7 MPa,图 13b 可得最大位移不超过 0.531 mm;支架掩护梁最大应力值为 131.5 MPa,最大位移不超过 0.314 mm;支架连杆位置最大应力 120.1 MPa,最大位移不超过 0.302 mm。结果表明,支架受力远小于其可屈服的应力,且最大变形位移不超过 0.6 mm。

4.3 支架物理模型性能检测

通过前述对支架结构研发设计、物理建模、运动仿真、系统搭建的叙述,验证了设计参数满足实验需求,进一步对系统生成的三维模型支架进行物理模拟实验,而在大型二维、三维相似模拟实验过程中需

要遵循相似准则。支架的相似性在于其实体支架承载能力的相似,即需要满足施加载荷过程中初撑、增阻、恒阻 3 个阶段的性能要求^[12]。原 ZY5000/15.5/38 型支架的额定工作阻力 5 000 kN,系统设计出的模型进行 1 : 5 的物理模型液压支架,如图 14 所示。

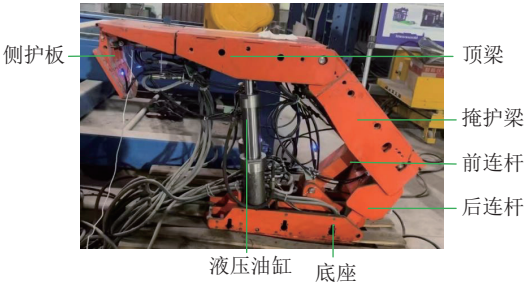


图 14 液压支架 1 : 5 实验样机

Fig.14 Hydraulic support 1 : 5 experimental prototype diagram

模型相似比见表 1。

表 1 液压支架模型相似比

Table 1 Similarity ratio of hydraulic support model

参数	取值
几何相似比	$\alpha_l = 5$
容重相似比	$\alpha_\gamma = \gamma_p / \gamma_m = 1$
强度相似比	$\alpha_\sigma = \sigma_p / \sigma_m = \alpha_l \alpha_\gamma = 5$
外力相似比	$\alpha_F = \alpha_\sigma \alpha_l^2 = 125$

1 : 5 模拟液压支架的具体参数见表 2。

表 2 液压支架参数

Table 2 Hydraulic support parameter table

参数	原型支架参数取值	模型支架参数取值
支架高度/mm	1 550 ~ 3 800	310 ~ 760
额定工作阻力/kN	5 000	40
额定初撑力/kN	3 619	28.925
支架宽度/mm	1 680 ~ 1 880	336 ~ 376
适应工作面倾角/(°)	≤ 60	≤ 67
泵站压力/MPa	31.5	6.3

在可变角“支架-围岩”系统物理模拟与仿真实验平台上进行模拟实验如图 15a 所示。该实验平台能够模拟 0 ~ 67°倾角范围内采场物理环境,监测液压支架在平台中的姿态和状态,满足液压支架在大倾角工作的各种动作操控以及不同形式的加载实验。

液压支架的力学性能在于支架的结构力学性能,由于整体主要由金属构成,可视作刚性体。模型液压支架的额定工作阻力为 40 kN。为增加液压支架

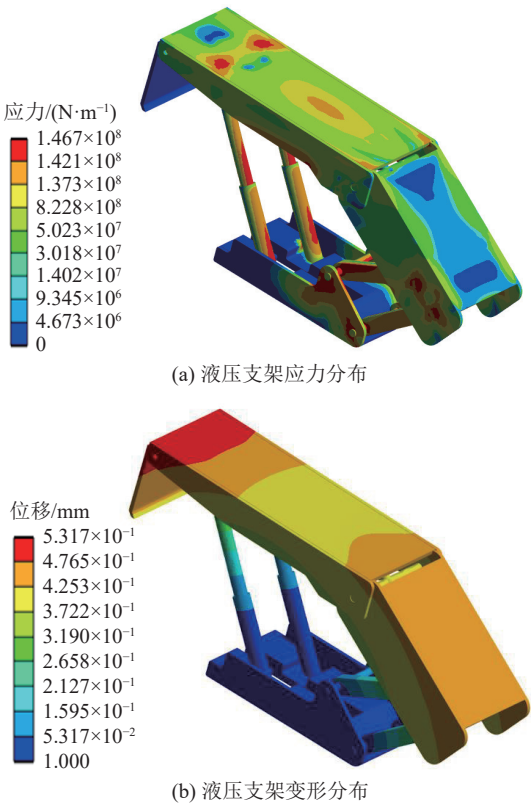


图 13 大倾角煤层液压支架三维载荷作用下数值分析

Fig.13 Numerical analysis diagram of hydraulic support under three-dimensional load in steeply inclined coal seam

空间受力可视化,由2.2节可得液压支架空间受力分析结果,在模型支架顶梁立柱位置、平衡千斤顶位置等安装压力传感器,在掩护梁矸石作用位置、前后连杆铰接点位置等安装压力传感器如图16所示,图中以支架顶梁上带有①~⑨和掩护梁带有①~⑥标记的传感器,以及相邻支架安装传感器⑪~⑫测量在俯伪斜工作面下支架所收到力的大小。

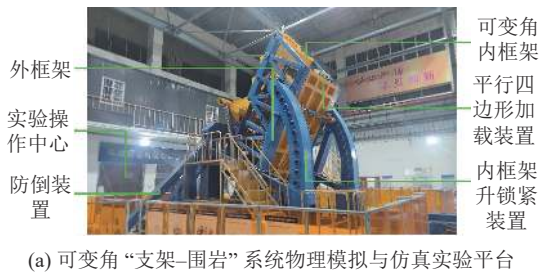


图15 大倾角液压支架物理模拟实验

Fig.15 Physical simulation experiment of steeply inclined coal seam hydraulic support



图16 传感器布置

Fig.16 Sensor layout diagram

将图14液压支架放入可变电角实验平台中进行性能测试,如图15b所示。支架在供油后与顶板接触,随着压力升高,待达到初撑力后停止供油,然后压力机持续对支架进行施压,待达到支架额定工作阻力后,停止加压,实验观测施加载荷过程中满足液压支架初撑、增阻、恒阻3个阶段的性能要求。

实验将实验平台调升43°时,对顶梁施加静载荷40 kN,实验测得静载荷下顶梁载荷受载情况如图17所示。支架顶梁上传感器平均受载3.74 kN,

在受载过程中支架传感器平均所受载荷逐渐增大至3.9 kN,总受载最大达38.7 kN。

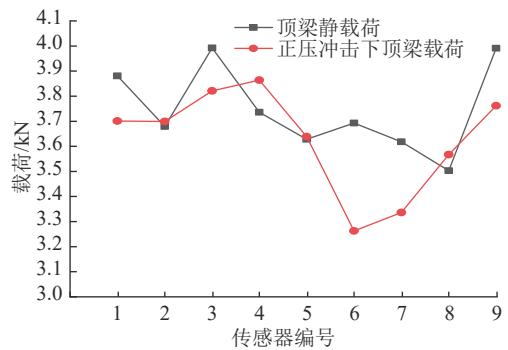


图17 静、动载荷作用下顶梁传感器载荷

Fig.17 Size of load of top beam sensor under static and dynamic loads

实验模拟动载荷正压冲击下顶梁的动载荷情况如图17所示,顶梁的平均受载为3.62 kN,与静载荷下没有明显差异,这是因为动载冲击作用时间短,且正压冲击下受载比较均匀;后推、侧推作用下掩护梁的受载比静载荷状态下明显增大,如图18所示,但变化趋势均匀,且在实验观测中支架能够在静载、动载下保持稳定状态。顶梁在受到正压冲击载荷下6,7号和掩护梁受到侧推作用下4传感器数值较低,这是由于在伪俯斜工作面顶梁和掩护梁所受正压或侧推作用力的载荷位置、范围不同引起。由表1可得外力相似比为125,由图9b可得液压支架顶梁、掩护梁所受最大受压载荷,根据相似准则计算顶梁、掩护梁受载静载荷与系统计算得出的静载荷基本相符。

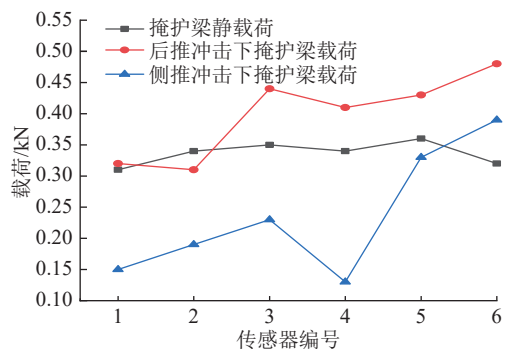


图18 静、动载荷作用下掩护梁传感器载荷

Fig.18 Size of load of shield beam sensor under static and dynamic loads

综上所述,实验结果得出该系统生成下的模型液压支架顶梁前端运动轨迹范围48 mm左右,曲线满足双扭线特性;模型支架应力远小于材料屈服的等效应力值,最大变形位移也不超过0.531 mm;研制

相似比为 1 : 5 模型液压支架在初撑、增阻、恒阻及卸压各阶段均满足支架的运动及承载要求,且实验中模型支架的力学数据与系统生成的力学数据基本相符。以上满足工程设计需求,由此可得此大倾角建模设计系统可以用来指导大倾角工作面条件下液压支架的三维建模。

5 结 论

1) 根据大倾角工作面液压支架三维受载特征,分析了三维倾斜采场空间液压支架的力学响应特征,提出了顶梁、掩护梁多维稳定性判据。

2) 构建以 Top-Down 设计理论、Solidworks 二次开发、VB.NET 为开发语言相结合的大倾角煤层液压支架参数化设计系统,包含平面设计和立体设计两部分,平面设计主要对液压支架的连杆优化、力学模型分析;立体设计主要针对平面设计优化后的参数进行液压支架三维模型的搭建。

3) 以 ZY5 000/15.5/38 型大倾角煤层液压支架为例,验证了液压支架参数化设计系统的可行性。结果表明系统生成下的支架顶梁前端运动轨迹为双扭线,轨迹宽度 e 为 48 mm;支架最大应力为 146.7 MPa,小于其屈服强度,且最大变形量 0.531 mm;研制 1 : 5 模型支架在承载过程中满足初撑、增阻、恒阻 3 个阶段性能要求,模型支架的力学响应数据与参数化设计系统的计算结果基本相符。

4) 大倾角煤层液压支架建模设计系统的研发,相比传统设计方法更加方便、节省人力,提高工作效率。研究成果不仅为大倾角工作面液压支架的建模设计提供了有力工具,同时对大倾角煤层综采设备参数化设计也具有一定的指导意义,有望在生产实践中进一步迭代升级。

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: 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.
- [2] 伍永平, 刘孔智, 负东风, 等. 大倾角煤层安全高效开采技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1611-1618.
WU Yongping, LIU Kongzhi, YUN Dongfeng, *et al.* Research progress on the safe and efficient mining technology of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1611-1618.
- [3] 负东风, 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 in longwall fully-mechanized mining with steeply dipping seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 255-263.
- [4] 负东风, 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 Bing, 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.
- [5] 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.
- [6] 徐亚军, 王国法. 基于虚拟样机技术的液压支架模型干涉检查[J]. 煤矿机电, 2005(1): 34-36.
XU Yajun, WANG Guofa. Interference detection of powered support model based on virtual prototyping[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2005(1): 34-36.
- [7] 何明, 曾庆良, 张鑫, 等. 基于 Pro/E 与 ANSYS 的液压支架运动仿真与有限元分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2): 75-77.
HE Ming, Zeng Qingliang, ZHANG Xin, *et al.* Motion simulation and finite element analysis of hydraulic support based on Pro/E and ANSYS[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(2): 75-77.
- [8] 蔡文书, 程志红, 沈春丰. 基于 SolidWorks 的液压支架三维建模和运动仿真[J]. 煤矿机械, 2008(11): 165-167.
CAI Wenshu, CHENG Zhihong, CHEN Chunfeng. 3D Modeling and Dynamic Simulation of Hydraulic Support with Solidworks[J]. Coal Mine Machinery, 2008(11): 165-167.
- [9] 于涛, 刘秀杰, 张玉娇, 等. 基于 Pro/E 的液压支架三维建模和运动仿真[J]. 工矿自动化, 2016, 42(4): 81-82.
YU Tao, Liu Xiujie, ZHANG Yujiao, *et al.* Three-dimension modeling and motion simulation of hydraulic support based on Pro/E[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(4): 81-82.
- [10] 刘晓莲, 李坤, 赵雄鹏. 液压支架上升回路的 AMESim 建模和仿真[J]. 机械工程师, 2020(12): 153-155.
LIU Xiaolian, LI Kun, ZHAO Xiongpeng. AMESim Modeling and simulation of hydraulic support lifting circuit[J]. Mechanical Engineer, 2020(12): 153-155.
- [11] 刘晓莲, 李坤, 赵雄鹏. 基于 AMESim 的液压支架降柱动态特性建模仿真[J]. 机电信息, 2020(33): 110-111.
LIU Xiaolian, LI Kun, ZHAO Xiongpeng. Modeling and simulation of dynamic characteristics of hydraulic support descending column based on AMESim[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(33): 110-111.
- [12] 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/OL]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 766-777. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1672.
GUO Jun, GUO Xingchen, FENG Guorui, *et al.* Design and ad-

- aptability research of micro four-column top coal caving hydraulic support[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 766–777. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1672.
- [13] 赵锐. 液压支架内加载试验力分析及直接测力装置研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 173–177.
- ZHAO Rui, Analysis of internal loading test force of hydraulic support and research on direct test force measuring device, 2020, 52(8): 173–177.
- [14] 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.
- [15] 解盘石, 吴少港, 罗生虎, 等. 大倾角大采高开采支架动载失稳机理及控制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 58–71.
- XIE Panshi, WU Shaogang, LUO Shenghu, *et al.* Dynamic instability mechanism of support and its control in longwall mining of steeply dipping coal seam[J/OL]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 58–71.
- [16] 伍永平, 郎丁, 负东风, 等. 我国大倾角煤层开采技术变革与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 25–51.
- WU Yongping, LANG Ding, YUN Dongfeng, *et al.* Reform and prospects of mining technology for large inclined coal seam in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 25–51.
- [17] 刘彦君. 大倾角煤层综采液压支架选型研究[J]. 山东煤炭科技, 2018(10): 147–149.
- LIU Yanjun. Research on Selection of Hydraulic Support for Fully Mechanized Mining in Large Angle Coal Seam[J]. Shandong Coal Science And Technology, 2018(10): 147–149.
- [18] 伍永平, 胡博胜, 解盘石, 等. 基于支架-围岩耦合原理的模拟试验液压支架及测控系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 374–382.
- WU Yongping, HU Bosheng, XIE Panshi, *et al.* Development and application of support and control system for simulating test based on the coupling principle of support-surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 374–382.
- [19] 罗生虎, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2664–2672.
- LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, *et al.* Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2664–2672.
- [20] 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.
- [21] 王国法. 液压支架技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [22] 曹银苟, 车艳春, 王永强. 基于 SolidWorks 的液压支架 Top-Down 三维设计方法的研究[J]. 河南科技, 2013(7): 116–117.
- CAO Yingou, CHE Yanchun, WANG Yongqiang. Research on Top-Down 3D design method of hydraulic support based on SolidWorks[J]. Henan Science and Technology, 2013(7): 116–117.
- [23] 吴开兴, 张令涛. 基于 SolidWorks 数字矿山模型中液压支架的二次开发[J]. 煤矿机械, 2015, 36(5): 255–257.
- WU Kaixin, ZHANG Lintao. Secondary development of hydraulic support in digital mining model based on solidworks[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(5): 255–257.
- [24] 孟照宏. 基于 Pro/E 的液压支架辅助设计系统的研发 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- MENG Zhaohong. Research and development of hydraulic support aided design system based on Pro/E[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014.
- [25] 邓晨韵. 基于 Solidworks Simulation 的滚动轴承温度场分析及结构优化 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
- DENG Chenyun. Temperature field analysis and structure optimization of rolling bearing based on solidworks simulation[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.