



冲击载荷下四柱支撑掩护式液压支架动态响应特征分析

曾庆良 徐鹏辉 孟昭胜 万丽荣

引用本文：

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 Zhaocheng. Dynamic response characteristics analysis of four column chock shield support under impact load[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 437–445.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0975>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击地压载荷下O型棚支架动力响应规律研究

Study on dynamic response law of O-shaped support under rockburst loading

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 49–57 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6c0b9d25-5c44-47e5-93e8-2b4492a6ff80>

冲击载荷作用下矿柱力学响应特征分析

Mechanical response analysis of rock pillar under the impact loading

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 102–110 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7c41841c-ab20-40eb-8f1d-af96fcce98f1>

两柱掩护式液压支架内外加载支护对比试验研究

Experimental study on supporting status of internal and external loading of two-legs shielded hydraulic support

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/832b46ce-99e2-402d-b06a-4a2fb188fc02>

冲击荷载下煤的动态力学性质研究

Study on dynamic mechanical properties of coal under impact loading

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/16e655e5-fe13-4725-afd1-099e1d129a80>

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>

液压支架硬件在环仿真系统研究

Research on hardware-in-the-loop simulation system of powered support

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 294–305 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0453>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

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.

冲击载荷下四柱支撑掩护式液压支架动态响应特征分析

曾庆良^{1,2},徐鹏辉¹,孟昭胜^{3,4},万丽荣¹

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250358; 3. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 4. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 液压支架装备通常用于采煤工作面的支护。液压支架在工作过程中承受了大量冲击载荷, 导致其动态稳定性受到威胁。为研究四柱支撑掩护式支架在对称与非对称承载工况下顶梁及掩护梁承受冲击载荷时的动力学响应特征, 采用动力学软件 Adams 以等效变刚度阻尼系统代替立柱的方法, 建立了支撑掩护式支架的数值分析模型。其中, 顶板压力由主动静载荷垂直施加于顶梁上方, 冲击载荷垂直于顶梁及掩护梁向下施加。基于上述模型, 分析了不同冲击载荷作用于支架顶梁与掩护梁时支架关键部位的动力学响应, 以及偏置加载对支架稳定性的影响。随后通过设置不同立柱初撑力, 讨论了液压支架在非对称支撑条件下承受冲击载荷时的动力学特性。结果表明, 单一顶梁冲击载荷条件下, 前立柱载荷变化系数达到 1.41, 对顶梁前端冲击载荷最敏感。顶梁和掩护梁同时承受冲击载荷时, 支架各铰接点对于顶梁前端与掩护梁上部区域作用的冲击载荷响应更剧烈, 最大载荷变化系数为 0.64, 极大地影响液压支架整体稳定性。支架承受横向扭矩时, 偏置载荷作用于不同位置对支架承载性能的弱化效果基本一致, 且偏置载荷的大小与削弱效果呈正相关。在考虑立柱不同初载比时, 顶梁-掩护梁铰接点对初载比变化的敏感程度最高, 且前立柱初撑力不足时将对支架承载性能形成最大削弱效应。研究结果可辅助优化支撑掩护式支架结构, 改善液压支架承载可靠性。

关键词: 煤矿支护; 液压支架; 冲击载荷; 动态响应; 变刚度; 偏置加载

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)01-0437-09

Dynamic response characteristics analysis of four column chock shield support under impact load

ZENG Qingliang^{1,2}, XU Penghui¹, MENG Zhaosheng^{3,4}, WAN Lirong¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 4. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Cofounded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The hydraulic support equipment is usually used to support the roof in underground mining. During this process, the support bears frequent impact load, which greatly weakens its dynamic stability. To study the dynamic response characteristics of the support, when it bears the impact load at the top beam and shield beam, the numerical model of the support is established using ADAMS and the equivalent variable stiffness damping system was used to replace the column system. An active static load is applied vertically above the top beam to simulate the roof gravity force, and the impact load is applied downward perpendicular to the top beam and shield beam. Based on the above model, the dynamic response of the key parts of the support, when different impact loads are applied to the top beam and shield beam, and the influence of offset loading on the stability of the support are analyzed. Then, when considering asymmetric bracing conditions, the dynamic characteristics of hydraulic support under impact load are discussed by setting different initial support forces.

收稿日期: 2022-06-25 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0975

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974170, 52104164); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE103)

作者简介: 曾庆良(1964—), 男, 山东高密人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: qlzeng@sdu.edu.cn

通讯作者: 孟昭胜(1991—), 男, 山东聊城人, 讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: skdmzs@163.com

The results show that when under a single impact load, the load variation coefficient of the front column reaches 1.41, which is the most sensitive to the impact load at the front end of the top beam. When the top beam and shield beam bear the impact load at the same time, the support hinge joint response more violently to the impact load acting on the top beam end and the upper area of the shield beam, and the maximum load change coefficient is 0.64, which greatly affects the overall stability of the hydraulic support. When the support bears to lateral torque, the weakening effect of offset load acting on different positions on the bearing performance of the support is the same, and the magnitude of offset load is positively correlated with the weakening effect. When considering the different initial load ratios (ILR) of the column, it is found that the hinge joint of top beam and shield beam is the most sensitive to the change of ILR, and the insufficient initial support of the front column has the greatest weakening effect on the bearing performance of the support. The research results can help to optimize the structure of the support shield support and improve the bearing reliability of the hydraulic support.

Key words: coal mine support; hydraulic support; impact load; dynamic response; variable stiffness; offset loading

0 引言

在煤矿开采过程中,如何有效支护剧烈活动的上覆顶板,维护工作面安全作业有效空间一直是煤炭行业发展的重要课题^[1-2]。世界范围内几十年的开采实践经验证明液压支架是行之有效的工作面支护装备,在开采过程中,液压支架主要作用是支撑煤层顶板,推移刮板输送机,提供作业人员足够操作空间^[3-4]。因此,保障液压支架安全、可靠运行是工作面安全开采的重要前提。

我国煤层赋存条件复杂多变,因此影响液压支架支护性能的因素较为复杂,其中来自顶板的冲击载荷是造成支架失效的关键因素^[5]。冲击载荷会打破支架原有平衡状态,增加液压支架各结构件铰接点处载荷负担,影响液压支架的支护稳定性。尤其是近年来随着煤炭资源开采深度、开采高度的增加,顶板压力显现愈加剧烈,从而对工作面液压支架形成更频繁、更剧烈的冲击载荷^[6-8]。

因此,众多专家学者对液压支架在冲击载荷作用下的力学性能展开了研究。在支架静力学分析方面,王学文等^[9]为研究双伸缩立柱稳定性及静力学强度特性,采用有限元网格化方法分析了国标、欧标两种条件下立柱轴向受载时的应力应变特征。通过建立二维静力学模型,徐亚军等^[10]、孟昭胜等^[11]研究了液压支架的超前支护失效机理,得到顶板载荷偏离最佳平衡区是支架失效的关键因素。张德生等^[12]通过搭建ZY6400/17/31型掩护式液压支架缩比模型,对比分析了内外2种试验加载条件下支架的静力学响应,指出液压支架位移等响应对非对称偏置工况更敏感。在支架动力学研究方面,梁利闯等^[13]通过建立支架等效力学模型,分析了未考虑溢流条件下冲击载荷作用于顶梁不同位置时各铰接点力学变化规律。曾庆良等^[14]提出了考虑立柱、平衡千斤顶恒阻效应的变刚度弹簧阻尼系统,搭建了不

同采高的仿真模型,分析了支护高度以及顶板压力变化对支架承载特性的影响。任怀伟等^[15]通过搭建液压支架试验模型,借助试验和数值模拟手段对比分析了不同幅度冲击载荷作用于液压支架顶梁时的能量分配特征。

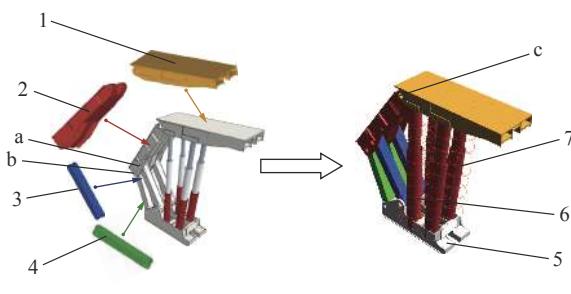
综上所述,现有的涉及液压支架动态响应特性的文献多考虑掩护式支架在对称支撑条件下的支护性能,且顶板冲击载荷通常被单一施加至支架掩护梁或者顶梁,无法综合考量二者同时承受冲击载荷时的动力学性能。基于此,以7 m液压支架为例,建立了刚柔耦合分析模型,通过将外载荷施加至支架不同位置,研究了不同冲击外载作用下支撑掩护式液压支架的载荷传递规律,并通过改变双排立柱初始支撑条件分别模拟了支架的对称和非对称支撑工况,分析了2种不同承载工况下支撑掩护式支架的动力学响应。

1 支撑掩护式液压支架数值模型建立

1.1 支撑掩护式液压支架刚柔耦合模型

在讨论液压支架在冲击载荷作用下的动态载荷传递规律时,仅采用刚性体建模分析方法,无法真实反映各关键承载部件形变对支架力学性能的影响^[16]。因此,对支架顶梁、掩护梁以及前后连杆进行柔性化(Hypermesh),并将支架模型各刚性结构件替换为柔性体,最后在顶梁与底座柱窝处添加变刚度弹簧阻尼系统以模拟立柱系统的主动初撑力,图1展示了支架刚柔耦合模型的替换过程。

基于上述建立以底座为刚性基座的支撑掩护式液压支架刚柔耦合分析模型如图1右侧所示。模型中液压支架的支护高度选定为7 m。各结构材料定义为结构钢,其密度为7 860 kg/m³,杨氏模量为 2.1×10^{11} Pa,泊松比为0.3。液压支架立柱系统通过变刚度弹簧阻尼系统替代,其刚度定义过程见1.2节。支架底座设置为垂向固定约束,各运动结构间连接



1—顶梁; 2—掩护梁; 3—前连杆; 4—后连杆; 5—底座; 6—后立柱;
7—前立柱; a—掩护梁-前连杆铰接点; b—掩护梁-后连杆铰接点;
c—顶梁-掩护梁铰接点

图 1 支撑掩护式支架数值模型

Fig.1 Numerical model of chock shield support

设置为“旋转铰接”，重力方向设置为垂向地面。

1.2 立柱系统刚度分析

在液压支架承载阶段，受顶板沉降载荷作用影响，立柱内乳化液压缩量不断变化，这导致立柱刚度亦始终处于动态变化当中。为有效模拟液压支架立柱系统这一变刚度特性，提出采用变刚度弹簧阻尼系统对立柱进行等效替换，式(1)为单级液压缸封闭乳化液等效刚度的计算公式^[17-21]。表 1 为前后立柱液压缸的相关参数。

$$K_R = \frac{A\beta}{L} \quad (1)$$

式中： K_R 为单级液压缸等效刚度系数，N/m； A 为液压缸承载腔有效承载面积， m^2 ； β 为液压缸工作介质体积弹性模量，MPa，此处选用 1.95×10^3 MPa； L 为液压缸承载腔密闭液柱长度，m。

表 1 立柱主要参数

Table 1 Main parameters of column

液压缸	液压缸直径/mm	液压杆直径/mm	有效液柱长度/mm
前立柱	一级缸	390	370
	二级缸	290	260
后立柱	一级缸	335	305
	二级缸	230	210
			1 956
			2 006
			2 076
			2 052

前后立柱系统承载过程简化模型如图 2 所示，结合式 1 与表 1，不难得出前立柱相关参数： $F_a = 3.96 \times 10^6 \text{ N}$, $F_b = 2.08 \times 10^6 \text{ N}$ ；后立柱： $F_a = 2.53 \times 10^6 \text{ N}$, $F_b = 1.31 \times 10^6 \text{ N}$ 。当支架外载荷 F 不高于 F_b 时，立柱表现为近刚性体。当外载荷 F 高于 F_b 但低于 F_a 时，二级缸处于受载状态，一级缸表现为近刚性。这一阶段二级缸刚度可近似处理为立柱整体刚度。当外载荷 F 高于 F_a 时，一级缸、二级缸同时进入受压状态，这一阶段立柱整体刚度表现为两缸并联刚度。

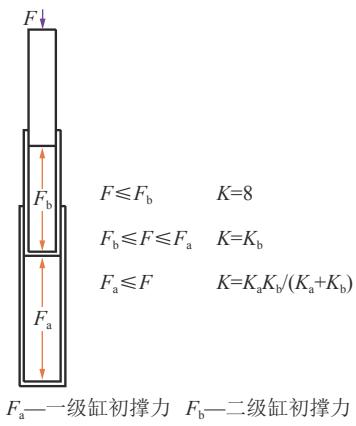


图 2 立柱承载简化模型

Fig.2 Simplified model of column bearing

式(2)为立柱系统一级缸及二级缸并联时刚度计算公式：

$$K = \frac{K_a K_b}{K_a + K_b} \quad (2)$$

其中， K 为立柱并联刚度，kN/mm； K_a 为立柱一级液压缸等效刚度，kN/mm； K_b 为立柱二级液压缸等效刚度，kN/mm。根据上述立柱工作原理及刚度计算方法，通过分析不同高度下立柱刚度特性，获取立柱变刚度曲线并将该曲线赋予等效弹簧阻尼系统。

1.3 静态加载测试

对液压支架进行静态加载，可以测试支架系统在静载荷作用下各结构的稳态响应结果，从而辅助评估支架模型在承受额定载荷时的表现是否合理，因此建立液压支架静态加载三维模型如图 3 所示。其中，加载平板水平放置于顶梁上，二者接触面采用碰撞连接。外载荷通过加载平板施加至支架顶梁以模拟液压支架与工作面顶板的接触加载效应。其中加载平板在高度方向始终水平、垂向自由约束。论文所研究的液压支架额定工作阻力为 17 000 kN，因此设置垂向静载荷为 17 000 kN，加载方式如图 3 所示，系统的静态加载时间为 0.5 s。

在静态加载下，支撑掩护式液压支架立柱的响应如图 4 所示。图中接触力在 0.5 s 内增加到 17 030 kN 并趋于稳定，其中前立柱载荷稳定在 5 250 kN，后立柱载荷稳定在 3 360 kN。从图 4 可以看出，在 0~0.2 s 由于外载荷低于支架初撑力，此时立柱高度无明显变化，立柱刚度趋于无穷大。在 0.2~0.35 s，外载荷逐步上升并高于支架初撑力，二级液压缸在外载荷作用下被压缩，立柱刚度由近刚性降至 459 kN/mm。在 0.35~0.5 s，外载荷高于一级缸初撑力，此时支架刚度由 459 kN/mm 降至 280 kN/mm(两缸并联刚度)。在整个加载过程，前立柱压缩量为 60.41 mm，后立柱

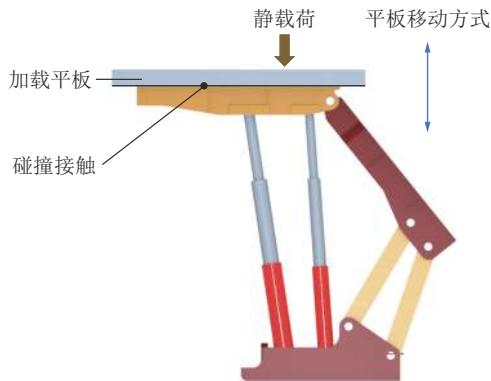


图3 静力学加载示意
Fig.3 Static loading model

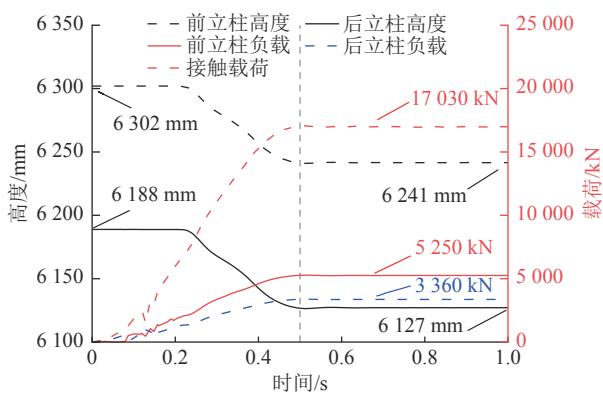


图4 立柱系统的动态响应曲线
Fig.4 Dynamic response curves of column system

压缩量为 61.78 mm, 支架模型整体位移、力响应与实际支架动作流程一致, 模型可信性良好。

2 冲击载荷加载方式

依据参考文献^[10-11], 当支架未对顶板形成有效初撑载荷且顶梁两端承受载荷时, 支架很快就形成超前支护失效状态。因此, 为了更好对比液压支架在不同冲击载荷下的动态响应, 论文假定液压支架与顶板处于初撑预紧状态。在数值模拟中给支架立柱中心位置处施加 14 000 kN 静载荷以模拟支架对顶板的初撑效果(图 5 中 F_1 与 F_2 , 各 7 000 kN)。在此基础上, 分别在顶梁 X_i 处与掩护梁 Y_i 处施加对称冲击载荷以模拟液压支架的对称载荷工况(载荷大小为 600 kN), 在 Z_i 处施加偏置冲击载荷以模拟液压支架的偏置载荷工况, 如图 5 所示。所述加载方式能有效模拟液压支架在初撑顶板后, 顶梁和掩护梁分别、同时承受对称冲击载荷及偏置冲击载荷等工况。

模型中静载荷与冲击载荷由 ADAMS 软件中的阶跃函数控制(静载荷为 $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.5, 7000000)$, 冲击载荷为 $\text{step}(\text{time}, 1.5, 0, 1.51, 600000)$)。如图 5

所示, 冲击载荷共有 18 个加载位置等间隔分布($X_1 \sim X_6$, $Y_1 \sim Y_6$, $Z_1 \sim Z_6$)。在分析对称载荷工况时, 作用于顶梁与掩护梁的冲击载荷依次放置于 X 、 Y 轴的坐标 1~6。当只有顶梁承受冲击载荷时, F_{X_i} 顺序激活。当顶梁与掩护梁同时承受冲击载荷时, F_{X_i} 与 F_{Y_i} 激活, 基于上述得到 42 组结果。在分析顶梁偏置加载工况时, 首先将 F_{Z_i} 顺序激活得到 6 组结果, 然后顺序激活 $F_{X_1} \sim F_{X_6}$, 获得 6 组对照结果。

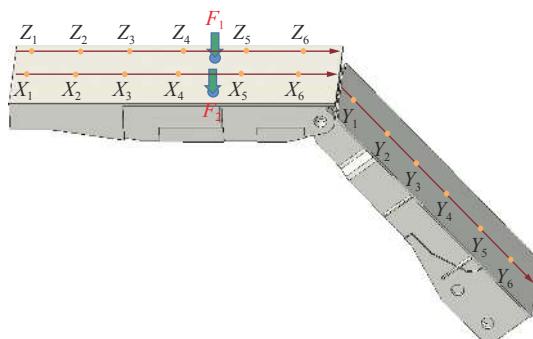


图5 载荷加载位置
Fig.5 Load action position diagram

3 冲击载荷作用下液压支架动态响应

为更方便地观察模拟结果, 分别定义顶梁加载点和掩护梁加载点为 X 、 Y 轴坐标, 同时定义支架在静加载状态下各结构载荷数据为墨绿色曲面, 当仅有顶梁承受冲击载荷时支架各结构的载荷数据为深棕色曲面, 当掩护梁与顶梁同时承受冲击载荷时支架各结构载荷数据为彩色曲面。通过对比数值模拟结果, 可以获取四柱支撑掩护式支架在不同受载情况下的载荷变化规律。为便于对比, 将支架各结构相较于静加载状态下的载荷变化值与冲击载荷的比值叫做载荷变化系数。

3.1 顶梁-掩护梁铰接点力响应

顶梁-掩护梁铰接点的力学变化如图 6 所示。当仅有顶梁承受冲击载荷时, 沿顶梁的长度方向, 载荷由大变小, 最大载荷变化系数仅为 0.04, 该铰接点对顶梁处冲击载荷的敏感程度较低。当顶梁与掩护梁上同时作用冲击载荷时, 观察掩护梁长度方向的发展趋势, 可以发现当载荷作用点从掩护梁下端移至掩护梁上端时, 铰接点载荷有明显的线性上升趋势, 最大载荷变化系数为 0.44。显然, 掩护梁上部区域作用的冲击载荷对顶梁-掩护梁铰接点承载稳定性的影响显著。且随着冲击载荷沿顶梁、掩护梁长度方向前移, 铰接点载荷迅速上升, 因此应尽量避免顶梁、掩护梁同时承受前端载荷。

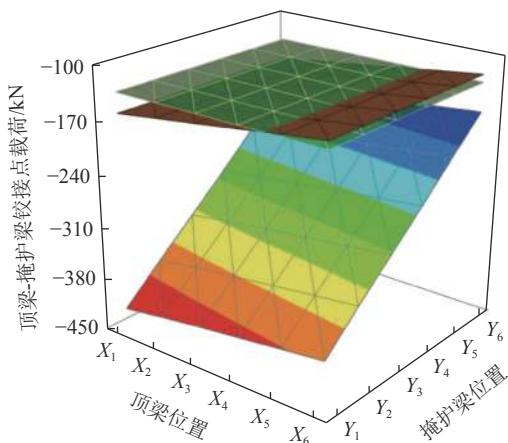


图 6 顶梁-掩护梁铰接点力变化

Fig.6 Force change at hinged joint between top beam and goaf shield

3.2 掩护梁-前连杆铰接点力响应

掩护梁-前连杆铰接点力学变化如图 7 所示。当向顶梁作用冲击载荷时, 沿顶梁的长度方向($X_1 \sim X_6$), 前连杆处铰接点载荷呈明显的降低趋势, 但载荷变化系数均为正值, 其中最大载荷变化系数 0.63。在顶梁与掩护梁上同时作用冲击载荷的情况下, 沿掩护梁长度方向($Y_1 \sim Y_6$), 该点载荷呈线性降低的趋势, 其载荷变化系数从 0.61~0.62。显然, 掩护梁上部与下部区域作用的冲击载荷对该铰接点载荷的影响是相反的, 其影响的程度却是相似的。

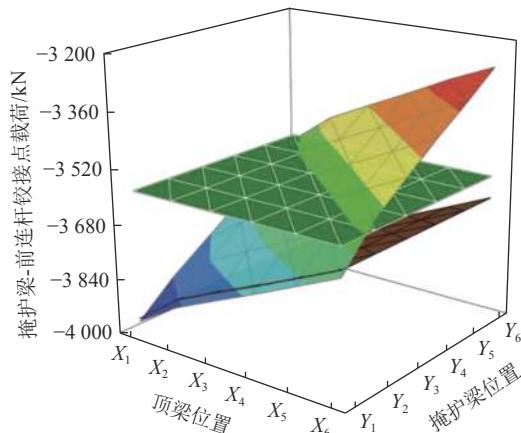


图 7 前连杆铰接点力变化

Fig.7 Force change at hinge point of front bar

3.3 掩护梁-后连杆铰接点力响应

掩护梁-后连杆铰接点的力变化如图 8 所示。冲击载荷到达液压支架顶梁后, 该点载荷较之前有一定的增长, 最大载荷变化系数为 0.67。当顶梁与掩护梁上同时作用冲击载荷时, 掩护梁长度方向($Y_1 \sim Y_6$)上后连杆铰接点的载荷逐渐减小, 其载荷变化系数由 0.64~1.03, 但相较于顶梁单独加载工况来说, 该

铰接点载荷均有不同程度的减弱。显然, 该铰接点对顶梁前部作用的冲击载荷更加敏感, 掩护梁下部区域作用的冲击载荷能够有效降低掩护梁-后连杆铰接点的载荷。

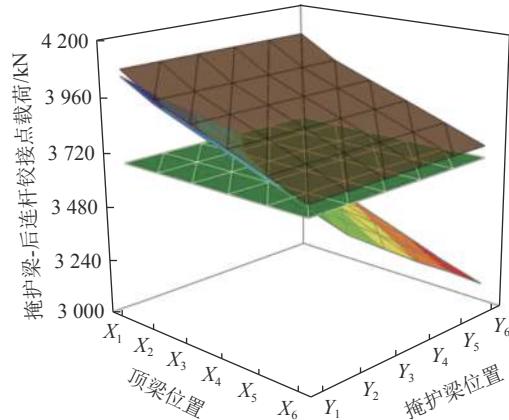


图 8 后连杆铰接点力变化

Fig.8 Force change at hinge point of rear bar

对比图 7、图 8 可知, 前后连杆铰接点对不同位置的冲击载荷均表现的较为敏感(为 0.6~1.0 倍冲击载荷), 因此在支架的设计过程中应适当加强前后连杆处销轴强度以提升支架系统可靠性。顶梁前部区域是支架承载的薄弱点, 冲击载荷作用于此区域威胁到支架的承载稳定性, 掩护梁后端承受冲击载荷时有助于前连杆释放顶梁冲击压力峰值。

3.4 立柱力响应分析

在大多数对于液压支架支撑刚度的研究中, 研究者们直接将立柱刚度作为支架的整体刚度, 这就体现出了立柱在液压支架中的重要地位。分析立柱在承载条件下的载荷变化对于研究支架的整体传力特性至关重要。基于此, 对施加冲击载荷后立柱的力学变化进行了仿真分析, 得到了立柱的载荷变化数据, 图 9 所示为支架前立柱的试验结果。

当只有顶梁受到冲击载荷影响时, 在顶梁的长度方向上, 前立柱载荷的波动幅度大, 最大载荷变化系数达到 1.41, 但顶梁后部的载荷却减弱了前立柱的负载压力。当顶梁和掩护梁同时承受冲击载荷时, 立柱上的载荷在掩护梁的长度方向上呈上升趋势, 但相较于顶梁单独承载, 载荷变化系数均为负值, 其中最小载荷变化系数仅为-0.19, 可见前立柱对掩护梁上的冲击载荷并不敏感。

后立柱的试验结果如图 10 所示。只有顶梁受到冲击载荷影响时, 沿顶梁的长度方向, 后立柱载荷呈线性的增长趋势, 其中最大载荷变化系数达 0.86。当顶梁、掩护梁同时承受冲击载荷时, 相比于单一的

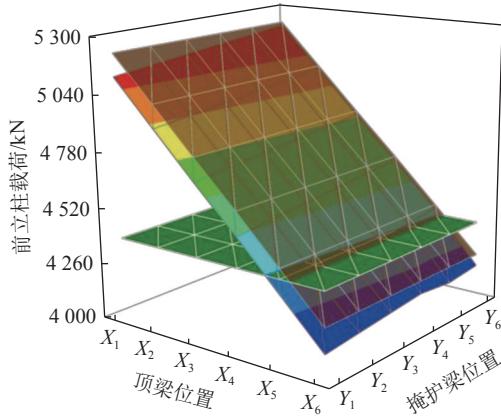


图 9 前立柱力变化

Fig.9 Force change of front column

加载方式,后立柱载荷存在一定波动,但在掩护梁长度方向上总体呈增加趋势,最大载荷变化系数为0.63。对比图9、图10,显然,顶梁柱窝之间的区域抗冲击性能较好,掩护梁整体承载性能优异。相比于后立柱,前立柱对冲击载荷响应更敏感,通过改善支架前后立柱结构参数,提升支架前后立柱工作阻力比,有助于提升液压支架顶梁承载适应性。

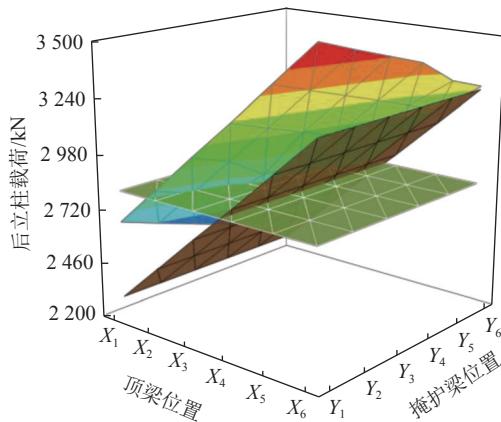


图 10 后立柱力变化

Fig.10 Force change of rear column

3.5 偏置载荷作用于顶梁的力学响应分析

当承受偏置载荷时,支架还承受附加的横向扭矩,为研究附加扭矩对支架力学状态的影响,对比冲击载荷作用于顶梁中心与侧面的2种情况。在进行仿真试验时,先对支架施加8000 kN静载荷,在支架平衡后,于1.5 s对支架顶梁施加1000 kN冲击载荷。当冲击载荷施加于支架顶梁中心时,支架系统的力学变化如图11所示($X_1 \sim X_6$ 是顶梁中心加载位置)。

从图11可以看出,当无偏置冲击载荷加载于顶梁时,观察负载随冲击载荷作用位置的变化趋势(顶梁前端至顶梁后端: $X_1 \sim X_6$),前立柱、掩护梁与前后

连杆铰接点载荷整体趋势是由大变小,且前立柱的载荷变化幅度最大,但在顶梁中部区域($X_3 \sim X_4$),载荷变化并不明显。后立柱负载随冲击载荷作用位置后移整体呈现增加趋势,同样的,在顶梁的中间区域,载荷变化并不明显。显然,支架对于顶梁中部区域的载荷有较高的适应性,就载荷变化曲线来看,立柱对于载荷加载位置的变化有较高的敏感性。当冲击载荷作用于顶梁侧面时,支架系统的力学变化如图12所示($Z_1 \sim Z_6$ 是顶梁侧面加载位置)。

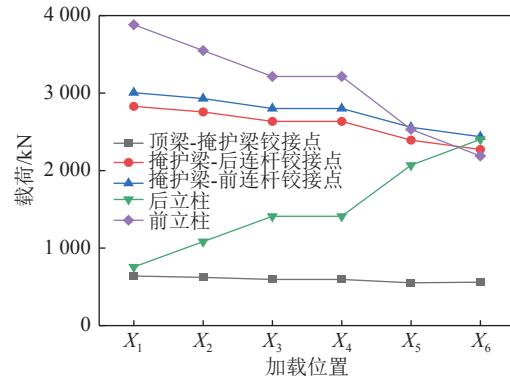


图 11 无偏置载荷支架力学响应曲线

Fig.11 Mechanical response curve without offset load

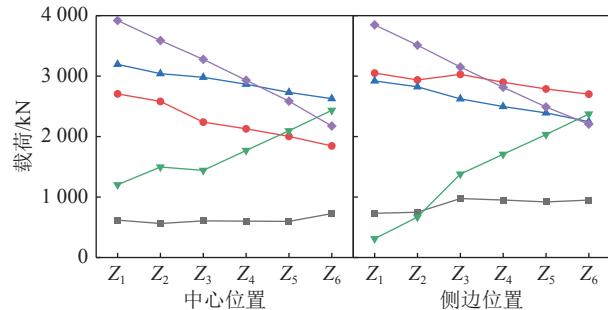


图 12 偏置载荷作用下支架力学响应曲线

Fig.12 Mechanical response curve under offset load

观察图12,当冲击载荷沿顶梁侧面加载时,负载随冲击载荷作用位置的变化趋势与无偏置载荷加载相似,但由于受附加横向扭矩的影响,支架各结构两侧载荷呈现较大差异,最大差值出现在两侧后立柱上,达到冲击载荷的0.89倍,但是对于同一结构来说,载荷加载位置的变化对两侧差值的影响并不大。显然,顶梁不同位置承受的偏置载荷,对于支架两侧关键结构的影响近乎相同,为确保支架的承载可靠性应避免支架承受过大的偏置载荷。

4 非对称载荷工况对支架稳定性的影响

4.1 非对称载荷工况下立柱特性曲线分析

液压支架初始布置于工作面,由液压泵站供给立柱高压油液以支撑顶板。在不考虑立柱加工精度

误差及管路阀件加工精度误差条件下，支架左右立柱系统基本工作于对称载荷工况。随着时间推移，由于液压支架工作环境恶劣，立柱系统动密封磨损泄露、管路系统损耗不一，此时支架左右立柱系统初撑力随工作介质压力损失会产生不同程度的削弱，从而逐渐形成非对称载荷工况。不妨定义支架右侧立柱初撑力与左侧立柱初撑力的比值为初载比，为研究初载比变化对支架承载性能的影响，建立了不同工作介质压力下的液压支架数值模型，通过对其分别加载，分析了非对称工况对支架承载性能的影响。

由于选用的液压支架立柱系统额定初撑压力为31.5 MPa，因此分别设置立柱初始油压为11.5~31.5 MPa，取样间隔为5 MPa对立柱系统进行承载特性曲线计算。图13a、图13b分别是前、后排双侧立柱在不同初撑力下的承载特性曲线。显然在不同初撑力条件下，后立柱系统承载特性曲线整体变化趋势与前立柱相同。

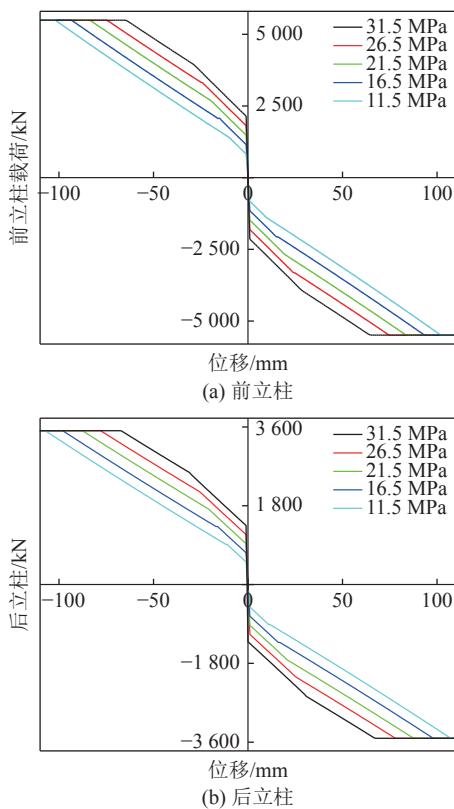


图13 立柱承载特性曲线

Fig.13 Load bearing characteristic curve of column

4.2 非对称工况下液压支架承载性能分析

本节以左侧立柱初始油压作为X轴，铰接点压力作为Y轴，讨论管路损失对支架承载稳定性的影响。图14a为前立柱初载比变化对液压支架承载性

能的影响，图14a左侧为支架左侧铰接点的力学变化，图14a右侧为支架右侧铰接点的力学变化。

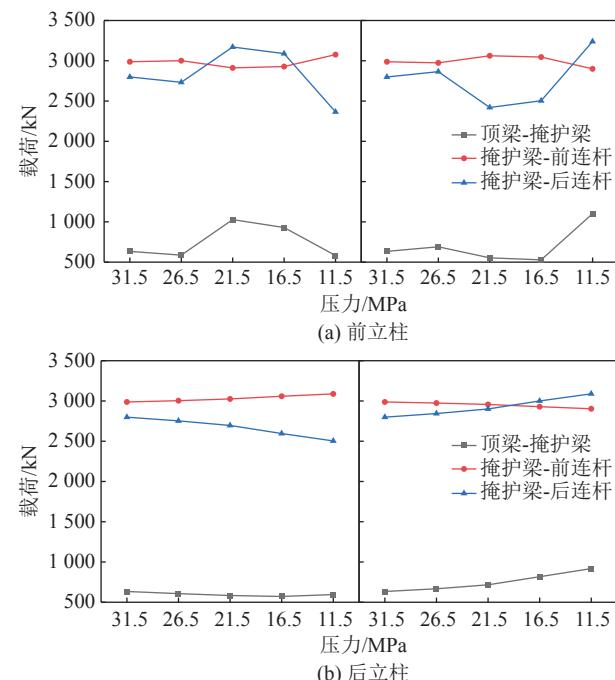


图14 立柱初载比变化时支架的承载曲线

Fig.14 Bearing curve of support when ILR of column changes

观察图14a中左侧曲线，顶梁-掩护梁铰接点与掩护梁-后连杆铰接点的载荷沿X轴的发展趋势为先小幅降低，然后迅速增长，随后再次降低，降低速度先慢后快，其中，立柱初载比较低时支架整体性能较为稳定。掩护梁-前连杆铰接点载荷变化比较平稳，沿X轴的发展趋势为先轻微增长，然后小幅降低，然后再增长，增长幅度先小后大，载荷波动并不明显。支架右侧铰接点载荷的发展趋势与左侧恰好相反，但支架两侧铰接点载荷变化幅度有一定差异。显然，前立柱初载比小幅度升高对于支架的整体承载性能影响较弱，随着前立柱初载比大幅上升，使得支架的承载特性出现较大波动。

图14b为后立柱初载比变化对液压支架承载性能的影响，图14b左侧为支架左侧铰接点的力学变化，图14b右侧为支架右侧铰接点的力学变化。观察图14b，支架左侧掩护梁-后连杆与顶梁-掩护梁铰接点载荷随着初撑力的降低呈下降趋势，其中，顶梁-掩护梁铰接点变化趋势相对平稳。掩护梁-前连杆铰接点沿X轴的发展趋势是缓慢上升。支架右侧铰接点的表现与左侧恰好相反，但顶梁-掩护梁铰接点载荷随初撑力的降低呈现较快增长，其它铰接点的整体走势较为和缓。显然，后立柱初载比变化对顶梁-掩护梁铰接点的影响较为明显，但总体而言其

对支架整体性能的影响较弱。

5 结 论

1)当顶梁前部区域承受冲击载荷时,前连杆、后连杆铰接点以及前后立柱的载荷变化均较明显,应适当加强前后连杆处销轴强度以提升支架系统可靠性。相比于后立柱,前立柱对冲击载荷响应更敏感(载荷变化系数达1.41)。在四柱支撑掩护式液压支架设计过程中,适当提升其前后立柱工作阻力比可以有效改善其抗冲击性能。

2)当冲击载荷同时施加到顶梁、掩护梁时,支架各铰接点载荷对冲击载荷作用位置变化的敏感程度及变化趋势是不同的,但各铰接点普遍对顶梁与掩护梁前端同时作用冲击载荷工况更敏感,最大载荷变化系数为0.64。因此在井下作业时,应尽量避免支架出现顶梁、掩护梁同时承受前端载荷工况。

3)当支架承受横向扭矩时,分析各铰接点的负载变化,发现相同的偏置载荷作用于不同位置对支架承载性能的弱化效果是相同的,且偏置载荷越大,对于支架承载性能的弱化效果越明显,为确保支架的正常工作,应尽量避免支架承受偏置载荷。

4)初载比的不同对支架稳定性的影响是有差异的,较小的初载比对于支架的整体承载性能影响较弱。随着立柱初载比升高,支架的承载特性出现较大波动,从整体来看,前立柱初载比变化对于支架整体稳定性的影响更强。

参考文献(References):

- [1] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].*煤炭学报*,2018,43(7):1789–1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000m[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1789–1800.
- [2] 同少宏,徐刚,范志忠.我国综合机械化开采50年发展历程与展望[J].*煤炭科学技术*,2021,49(11):1–9.
YAN Shaohong, XU Gang, FAN Zhizhong. Development course and prospect of the 50 years' comprehensive mechanized coal mining in china[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 1–9.
- [3] FRITH Russell C. A holistic examination of the load rating design of longwall shields after more than half a century of mechanised longwall mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 687–706.
- [4] 王国法,庞义辉,李明忠,等.超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J].*煤炭学报*,2017,42(2):518–526.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, et al. Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 518–526.
- [5] 潘俊锋,齐庆新,刘少虹,等.我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J].*煤炭学报*,2020,45(1):111–121.
PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 111–121.
- [6] 谢云跃,孟昭胜,曾庆良,等.深井冲击载荷下液压支架底板比压分布特性[J].*煤炭学报*,2020,45(3):982–989.
XIE Yunyue, MENG Zhaocheng, ZENG Qingliang, et al. Analysis of distribution characteristics of study on floor specific pressure of hydraulic support for deep mining based on impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 982–989.
- [7] 王国法,张金虎,徐亚军,等.深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J].*煤炭学报*,2021,46(3):763–773.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, et al. Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 763–773.
- [8] 潘立友,唐鹏,周脉来,等.悬顶结构巷道冲击地压防控研究[J].*煤炭科学技术*,2022,50(4):42–48.
PAN Liyou, TANG Peng, ZHOU Mailai, et al. Research on prevention and control of rock burst in entry with suspended roof structure[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 42–48.
- [9] WANG Xuwen, YANG Zhaojian, FENG Jiling, et al. Stress analysis and stability analysis on doubly-telescopic prop of hydraulic support[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 32: 274–282.
- [10] 徐亚军,王国法,刘业献.两柱掩护式液压支架承载特性及其适应性研究[J].*煤炭学报*,2016,41(8):2113–2120.
XU Yajun, WANG Guofa, LIU Xianye. Supporting property and adaptability of 2-leg powered support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 2113–2120.
- [11] 孟昭胜,曾庆良,万丽荣,等.掩护式液压支架顶梁承载特性及其适应性研究[J].*煤炭学报*,2018,43(4):1162–1170.
MENG Zhaocheng, ZENG Qingliang, WAN Lirong, et al. Supporting performance and canopy adaptability of shield support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1162–1170.
- [12] 张德生,任怀伟,何明,等.两柱掩护式液压支架内外加载支护对比试验研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(11):135–142.
ZHANG Desheng, REN Huawei, HE Ming, et al. Experimental study on supporting status of internal and external loading of two-legs shielded hydraulic support[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 135–142.
- [13] 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.
- [14] 曾庆良,杨春祥,刘鹏,等.不同顶板压力作用下特大采高液压支架受力分析[J].*煤炭技术*,2018,37(4):187–189.
ZENG Qingliang, YANG Chunxiang, LIU Peng, et al. Stress analysis of hydraulic powered support for ultra high mining under different roof pressure[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(4): 187–

189.

- [15] REN Huawei, ZHANG Desheng, GONG Shixin, *et al*. Dynamic impact experiment and response characteristics analysis for 1: 2 reduced-scale model of hydraulic support[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(3): 347–356.
- [16] WAN Lirong, WANG Jiantao, ZENG Qingliang, *et al*. Vibration response analysis of the tail beam of hydraulic support impacted by coal gangue particles with different shapes[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(4): 3656–3670.
- [17] 张志军, 顾克秋, 张鑫磊. 液压缸刚度有限元计算方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(1): 55–58,73.
ZHANG Zhijun, GU Keqiu, ZHANG Xinlei. Finite element method to calculate hydraulic cylinder stiffness[J]. *Journal of Gun Launch and Control*, 2016, 37(1): 55–58,73.
- [18] 徐伟. 冲击载荷下液压支架立柱的受载特性研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(2): 63–66.
XU Wei. Study on load characteristics of hydraulic support column under impact load[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(2): 63–66.
- [19] 赵忠辉, 姜金球, 王勇, 等. 立柱在冲击动载荷作用下的动应力及冲击力分析[J]. *煤矿机械*, 2010, 31(8): 118–119.
ZHAO Zhonghui, JIANG Jinqiu, WANG Yong, *et al*. Impacting dynamic stress and impacting force analysis of hydraulic column[J]. *Coal Mine Machinery*, 2010, 31(8): 118–119.
- [20] 万丽荣, 刘鹏, 孟昭胜, 等. 特大采高液压支架底板比压分析研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 34–39.
WAN Lirong, LIU Peng, MENG Zhaosheng, *et al*. Analysis of floor pressure of hydraulic powered support for ultra high mining[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2018, 37(5): 34–39.
- [21] ZENG Qingliang, MENG Zhaosheng, WAN Lirong, *et al*. Analysis on force transmission characteristics of twolegged shield support under impact loading[J]. *Shock and Vibration*, 2018(10): 1–10.