

# 液压支架虚拟仿真试验<sup>①</sup>

赵丽娟, 许 军, 何景强

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

**摘要:**以 ZY2600/07/14 两柱掩护式液压支架为工程对象, 以顶梁承受集中载荷与面载荷两种边界条件, 对支架进行外加载试验研究。根据支架的设计参数确定了集中载荷的大小与作用区域; 基于实测的顶梁 14 处压力分布值, 利用 Matlab、ANSYS 软件分别生成压力分布函数和包含面载荷分布信息的模态文件; 在机械系统运动学与动力学分析软件 ADMAS 和有限元分析软件 ANSYS 环境下创建了 1100mm 工作高度的液压支架虚拟样机模型, 实现了两种载荷形式的外加载试验。研究表明, 面载荷外加载更能真实反映支架整体受力状态, 是检验支架性能的一种可靠方法, 具有重要的理论意义和实用价值。

**关键词:** 液压支架; 集中载荷; 面载荷; 外加载; 虚拟样机技术

## Virtual Simulation of Hydraulic Support

ZHAO Li-Juan, XU Jun, HE Jing-Qiang

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Taking the ZY2600/07/14 mode two leg hydraulic powered shield supports as the engineering object, based on the concentrated load and surface load exerting on the roof, the outer load tests are carried. The load and application region is determined by the stents design parameter. Based on the 14 real pressure values, the pressure distribution function and modal file which contains surface load information are respectively produced by Matlab software and ANSYS software. The virtual sample model that the height of work is at 1100mm is built in ADMAS and ANSYS in order to achieve both forms of the load tests. The results of research indicate that the outer loading method using surface load is feasible and has a great importance in both theory aspect and practical aspect, because the load case of the hydraulic support can be reflected actually.

**Key words:** hydraulic support; concentrated load; surface load; outer load; virtual prototype technology

## 1 引言

液压支架作为重要的综采支护设备, 其支护工作的可靠性影响综采效率, 进行支架力学性能校核已成为当前液压支架优化设计的关键一步。根据 MT312-2000《液压支架通用技术条件》进行的强度校核压架试验<sup>[1]</sup>, 主要是采用内加载试验方法来验证支架的可靠性<sup>[2]</sup>, 但在综采工作面, 顶板的周期来压对支架的影响很大, 来压载荷作为直接作用在顶梁上的外载荷, 是检验支架是否稳定可靠的最关键因素。本文将顶梁在垫块处的作用力当作外力处理, 基于虚拟样机技术, 从两种边界载荷形式出发, 探讨在支架承

载时更能反映支架力学性能的试验方法。

## 2 外加载方式的载荷分析

合理确定顶板载荷的分布形式与有效作用区域是进行外加载试验的关键。为方便设计计算, 支架通常简化为平面杆系结构, 顶梁支护阻力视作集中载荷, 可以作为外加载试验的边界条件, 而支护阻力大小与作用点位置可根据力学平衡方程确定。支架实际支护时, 顶板周期来压以面压力的方式作用于顶梁, 模拟顶梁压力分布并作为边界条件施加也是进行外加载试验的一种手段。

① 基金项目:辽宁省教育厅创新团队项目(2007T070);中国煤炭工业科技计划(MTKJ2009-264)

收稿时间:2010-12-25;收到修改稿时间:2011-03-06

## 2.1 集中载荷计算

### 2.1.1 支架刚体结构平面受力分析

以 ZY2600/07/14 两柱掩护式液压支架为例，支架顶梁与底座均为整体箱型焊接结构。建立支架平面杆系数学模型（见图 1），取顶梁为分离体，各力对 O 点取矩，支护阻力  $F_1$  计算表达式为：

$$x = \frac{p_8 l_2 \sin \beta + p_8 (h_3 - h_2) \cos \beta + p_i (l_1 + l_2) \cos \alpha}{p_i (h_1 - h_2) \sin \alpha + F_1 w} F_1 \quad (1)$$

其中， $p_8$  表示平衡千斤顶的推力、拉力（推力时，受力方向向上；拉力时相反）； $p_i$  表示立柱工作阻力； $x$  表示顶梁外载荷合力作用点与顶梁与掩护梁铰接点之距； $w$  表示摩擦系数，一般取值 0.1~0.3；

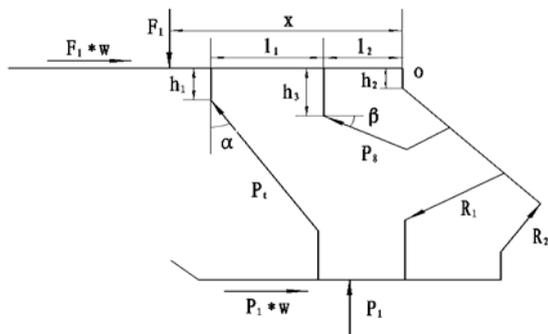


图 1 二柱掩护式支架平面杆系数学模型

基于垫块在支架压架试验时提供的约束反力，依据 MT312-2000 确定垫块的尺寸及在顶梁上的布置方式。外加载试验以垫块中心外载荷、作为输入激励，载荷值由、组成的力系平衡方程求解得出。

根据液压支架顶梁载荷测定结果，各种牌号的两柱掩护式液压支架顶梁合力作用点至立柱铰点的距离多变化在 150~300mm<sup>[3]</sup>。ZY2600/07/14 两柱掩护式液压支架立柱铰点至顶梁与掩护梁铰接点之距为 989mm，取工作高度为 1100mm 时，根据公式 1 得到 4 组临界值如表 1 所示。

表 1 顶梁外载合力与作用点位置

外载合力作用点距离顶梁立柱铰点值 (mm)	x 取值 (mm)	外载合力大小 $F_1$ (kN)	$F_{11}$ (kN)	$F_{12}$ (kN)
立柱前 300	1289	1406.7	847.2	559.5
立柱前 150	1139	1596.9	1035.7	561.2
立柱后 150	839	2692.4	1995.4	697
立柱后 300	689	3305.2	2602.6	702.6
在立柱铰点处	989	推力: 1846.7	1283.2	563.5
		拉力: 2271.3	1577.9	693.1

目前，平面算法中应用较多的是根据支架工作时结构之间的几何关系，编写掩护式支架受力计算的计算机算法<sup>[4]</sup>，确定顶梁支护阻力大小与作用点位置，如表 2 所示。

表 2 基于计算机算法的支架各参数值

	平衡千斤顶推力 (kN)	平衡千斤顶拉力 (kN)
支架工作高度 (mm)	1100	1100
摩擦系数	0.2	0.2
顶梁支护阻力作用点至顶梁后铰点之距 X (mm)	1335	920
顶梁支护阻力 $F_1$ (kN)	1971.8	2349.6
顶梁与掩护梁 x 向约束力 $F_2$ (kN)	991	197.7
顶梁与掩护梁 y 向约束力 $F_3$ (kN)	637	-99.2
前连杆与掩护梁约束力 $F_5$ (kN)	1754	768.7
后连杆与掩护梁约束力 $F_6$ (kN)	1186	407.9
底座反作用力 $F_7$ (kN)	1971.8	2349.6

### 2.1.2 支架刚体结构空间受力分析<sup>[5]</sup>

液压支架受扭曲和偏载作用时，各结构件一般受空间力系作用。按照空间力系的平移与转化原理，将外载荷分解为作用在顶梁平面内任一点处的三向力与三向力矩。通常将左右立柱与连杆力合二为一，同时略去对支架受力影响不大的力或力矩，以便将静不定结构转化为静定结构进行求解。

基于空间受力分析方法的 ZY2600/07/14 两柱掩护式液压支架各结构件受力如表 3 所示。

表 3 空间力系部分参数

	下腔回液	上腔回液
立柱工作阻力 (kN)	2600	2600
平衡液压缸作用力 (kN)	493	493
前连杆作用力 (kN)	1754.3	768.68
后连杆作用力 (kN)	1186.5	407.93
顶梁垂直方向作用力 (kN)	1613.4	2468.3
顶梁水平方向作用力 (kN)	980.06	1704.4
顶梁合力 (kN)	1887.7	2999.6
顶梁合力沿长度方向距离 (mm)	1463.6	910.03

德国经验公式:

$$F_1 = p_1 l_{01} / l_{02} \quad (2)$$

式中,  $F_1$  表示顶梁外载合力;  $p_1$  表示立柱工作阻力;  $l_{01}$  表示顶梁与掩护梁铰接点与顶梁与立柱铰接点之距;  $l_{02}$  表示顶梁与掩护梁铰接点与顶梁外载合力作用点之距;

根据公式 (2), 平衡液压缸作用力指向采煤区与采空区时顶梁合力分别为: 1772.2kN、2850.2kN, 而基于空间力系算法的顶梁合力分别为: 1887.7 kN、2999.6 kN。显然, 两种算法的结果在数值上相差不大。

## 2.2 面载荷计算

### 2.2.1 顶梁压力分布函数

支架工作时, 顶板与顶梁一般是全面接触。顶梁上的载荷由分布在顶梁上的压力枕测量, 利用应力等值线软件程序绘制顶梁压力分布曲线<sup>[6]</sup>, 提供了一个顶板接触压力更实际的表达。以靠近采空区顶梁端部为基准, 提取 14 处压力枕力数据 (如表 4), 基于 MATLAB 软件与样条插值方法, 模拟顶梁压力载荷分布函数, 取代集中力加载。

表 4 顶梁上不同位置处承载压力

压力枕位置 x(mm)	顶梁承载压力 y (MPa)	压力枕位置 x(mm)	顶梁承载压力 y (MPa)
500	1.9907	2250	0.531
750	1.845	2500	0.4407
1000	1.636	2750	0.376
1250	1.375	3000	0.35
1500	1.0779	3250	0.363
1750	0.869	3500	0.4148
2000	0.674	3750	0.506

利用三次样条插值方法, 3 次到 10 次函数模拟规范残差依次为: 3.3789、0.86841、0.76302、0.4415、0.35429、0.33221、0.32467、0.32452, 可以看出函数达到 7 次后就已趋于稳定 (见图 2)。为方便计算, 选取 7 次函数作为顶梁压力分布函数, 其表达式为:

$$y = -0.0059562 * x^7 + 0.089851 * x^6 - 0.53007 * x^5 + 1.4905 * x^4 - 1.7884 * x^3 + 0.18539 * x^2 + 0.17948 * x + 2.0036$$

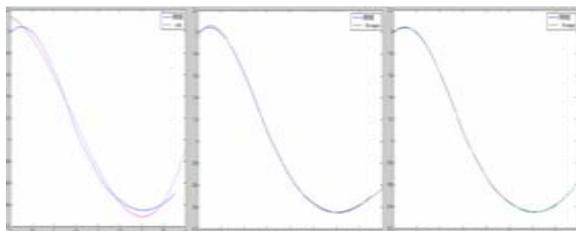


图 2 3 次、5 次、7 次样条函数模拟顶梁压力分布

### 2.2.2 模态力载荷

在液压支架虚拟样机模型中, 将顶梁、底座、掩护梁和连杆作为柔性件考虑, 在 ANSYS 中建立包含载荷分布信息的顶梁模态中性文件 (mnf 文件), 考虑到顶梁与顶板接触表面是外载荷的直接加载区, 为更好的定义表面载荷, 将顶梁进行简化处理, 以实现顶梁上表面网格单元规则化 (见图 3)。假设载荷沿顶梁宽度方向是均匀分布的, 节点载荷值则根据顶梁压力分布函数在顶梁上相应位置处压力值进行确定。

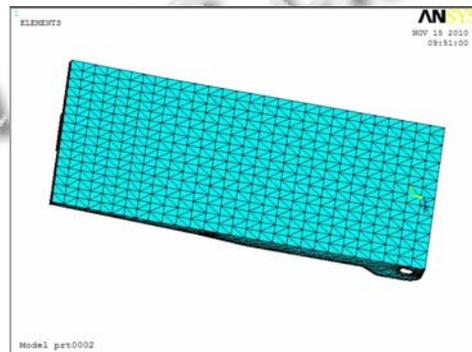


图 3 简化处理后的顶梁规则网格

## 3 仿真试验结果比对

### 3.1 集中力外载仿真结果

将液压支架作为刚-柔耦合多体系统<sup>[7]</sup>进行研究, 分析在不同方式的边界载荷作用下, 支架结构的力学性能变化。

液压支架虚拟样机模型主要是由支架中起承载与传力功能的结构件组成, 如图 4 所示。在支架模型中, 立柱与平衡液压缸作为刚体, 不考虑其变形对支架整体结构的影响; 在仿真分析中, 约束与驱动不能直接施加在结构件上, 故需要在结构件的模态文件中建立经刚性化处理的界面点, 界面点是包含 6 个方向自由度的节点单元。基于有限元软件 ANSYS 与机械动力学软件 ADMAS 进行联合仿真分析, 得到不同工况方式下的支架应力结果 (见表 5)。根据表 5 数据可知, 顶板外载合力作为集中力加载, 平衡液压缸作用力指向采空区时, 支架受力情况比较恶劣, 前连杆与上下销轴应力偏大。空间力系分析结果相比平面力系而言, 各结构件受力趋势一致, 但最大应力值均有所降低。图 5 为前连杆与掩护梁、底座连接销的应力云图, 两销轴最大应力值分别达到 1172.5419MPa、1099.4729MPa, 超过了销轴的许用应力 930.769 MPa, 销轴强度不足,

需要进行强度优化。

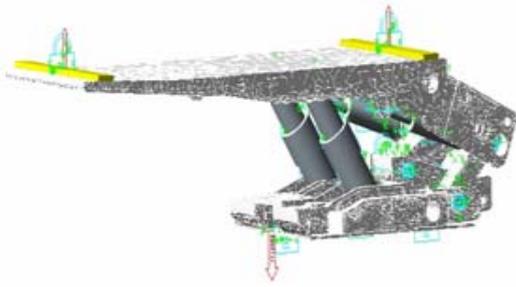


图 4 液压支架虚拟样机模型

表 5 顶梁面节点全耦方式下的集中力加载结果

	平面力系		空间力系	
	下腔	上腔	下腔	上腔
平衡液缸 工作状态	回液	回液	回液	回液
前连杆下销轴 (MPa)	685.0822	1099.4729	512.4883	686.4148
前连杆上销轴 (MPa)	732.1647	1172.5419	551.4853	730.9443
前连杆 (MPa)	463.8551	640.244	355.31	460.7857
后连杆 (MPa)	187.0991	289.2344	131.5322	190.4789
掩护梁 (MPa)	346.6968	564.8129	269.1026	344.8952
底座 (MPa)	291.7392	483.2022	212.6544	192.6431
顶梁 (MPa)	238.5339	232.2984	198.4113	297.4821

点, 作为载荷曲线施加点, 均匀施加 14 次, 来模拟顶梁 1100mm 工作高度下的载荷分布。如图 6 所示, 箭头指示形式表现为顶梁压力分布, 各结构件间的销轴连接及立柱与顶梁、底座的面面接触均采用节点自由度耦合的方式进行处理, 底座全约束。

分析结果如图 7 所示, 顶梁前端变形最大, 出现最大位移 23.01mm, 立柱与顶梁柱冒铰接处有最大应力 586.265MPa, 低于柱冒材料的许用应力 642.3 MPa, 各结构件轴孔处应力也较大, 但均在材料的许用范围内, 符合设计要求。底座则因边界条件限制, 靠近立柱的两内筋板处出现较大变形, 其他区域变形较小, 与支架实际工作中的受力状态比较一致。

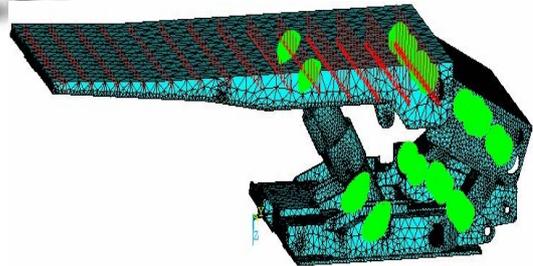


图 6 液压支架整机有限元模型

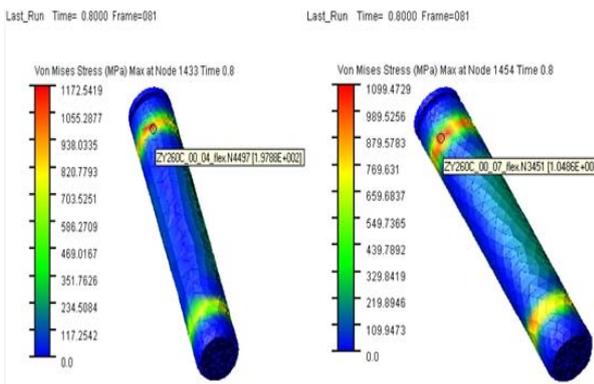


图 5 前连杆与掩护梁、底座连接销轴应力云图

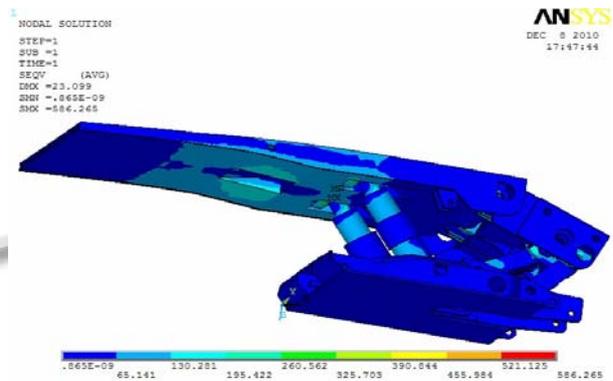


图 7 支架 1100 工况下应力云图

### 3.2 面外载仿真结果

基于有限元软件 ANSYS 在复杂函数加载方面的优势, 编写顶梁压力分布函数。根据 14 处压力枕测量值, 选取顶梁表面规则网格区域, 即沿宽度方向选取 14 条等间距的节点线, 长度方向等间距选取 14 个节

销轴属于敏感件, 其自身的受力变形会影响支架的支护效果, 销轴与结构件之间的接触关系, 可基于 ANSYS Workbench 模块进行接触区域自定义, 减少人工创建接触对的工作量。图 8 为前连杆上下销轴的应力云图, 其最大应力值分别为 643.51 MPa、883.35MP。很明显, 下销轴是支架中受力最恶劣元件, 最大应力接近材料许用值, 容易失效, 这种分析结果比较符合实际。

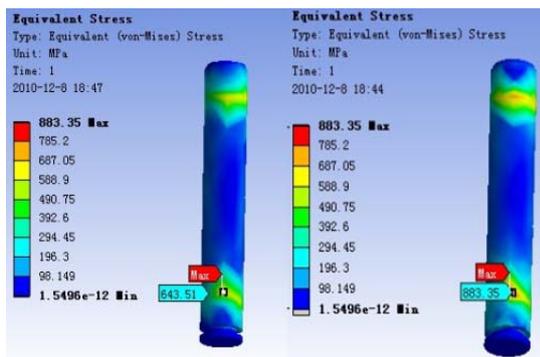


图8 前连杆上下销轴等效应力云图

### 3.3 内加载仿真试验结果

区别于利用有限元思想进行支架力学性能研究<sup>[2,8]</sup>,本文基于刚柔耦合虚拟样机技术,将垫块作用力作为边界约束条件处理,立柱工作阻力作为外载荷,均匀作用于柱窝表面,实现支架内加载。

仿真结果如图9所示,内加载方式下前连杆上下销轴最大应力值分别为783.5636 MPa、736.9108 MPa,上销轴较下销轴更易失效,但实际工作时下销轴更易失效,说明内加载方式不能够准确反映销轴实际工作时的力学性能。

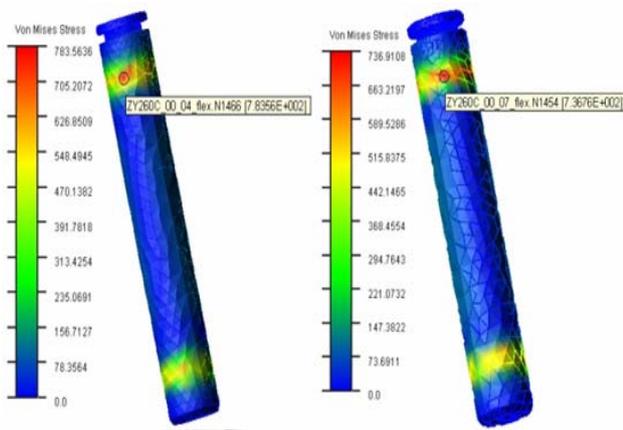


图9 内加载方式下的前连杆上下销轴应力云图

## 4 结语

1) 支架承载过程中,顶板与顶梁大面积接触几率大,面加载试验方式较集中力加载更贴合实际。

2) 外加载试验方式较内加载更能准确反映前连杆销轴力学性能,为支架结构件力学性能研究提供了一种手段。

3) 静态分析支架整体特性,有限元软件 ANSYS 在处理销轴连接时,多采用节点自由度耦合或刚性化手段。在有销轴连接的多体系统中,相比于人为创建接触对,基于 ANSYS Workbench 模块进行接触区域自定义,设置一定摩擦系数的接触方式会更有效。

4) 将液压支架作为刚-柔耦合多体系统建立虚拟样机模型,相比液压支架 ANSYS 模型,由于真实设置了结构件相对运动关系,这种模型仿真会更真实。同时,在顶梁模态文件中定义分布载荷,解决了机械动力学软件 ADMAS 无法进行面载荷加载的难题,但降低模态载荷值在求解时的突变是仿真试验成功的关键。

## 参考文献

- 1 中华人民共和国煤炭行业标准.MT312-2000 液压支架通用技术条件.北京:煤炭工业出版社,2001.290-294.
- 2 郑兰芳.液压支架虚拟压架试验研究.煤矿开采,2010,15(4):90-92.
- 3 赵宏珠.综采面矿压与液压支架设计.徐州:中国矿业学院出版社,1989.147.
- 4 丁绍南.采煤工作面液压支架设计.北京:世界图书出版公司,1992.102-105.
- 5 王国彪,饶明杰.液压支架优化设计与计算机模拟分析.北京:机械工业出版社,1994.69-74.
- 6 王国法.液压支架技术.北京:煤炭工业出版社,1999.61.
- 7 赵丽娟,刘杰.复杂机电系统的建模与仿真研究.沈阳:辽宁大学出版社,2007.8-10.
- 8 房虎林,曹连民,刘海峰.液压支架结构件有限元应力分析.煤矿机械,2009,30(1):80-82.