

谢苗,刘治翔,卢进南,等.超前支架相似实验样机研制及其与顶板耦合力学实验[J].煤炭学报,2017,42(5):1319-1324. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0847

Xie Miao, Liu Zhixiang, Lu Jinnan, et al. Development of similar experimental prototype of the advanced support and the experimental study on its coupling mechanics with roof[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1319-1324. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0847

超前支架相似实验样机研制及其与顶板 耦合力学实验

谢苗,刘治翔,卢进南,毛君

(辽宁工程技术大学机械工程学院,辽宁阜新 123000)

摘要:针对大型综掘巷道超前支架体积大,不易于在实验室中对其进行全面动力学特性以及其与围岩耦合力学特性的实验研究等问题,根据相似理论,建立缩比为1:8的相似实验模型样机。并建立了模拟巷道顶板的实验平台和测量基准框架。对超前支架和顶板耦合系统进行力学实验,测量在无支护和有支护,静态加载和动态加载情况下,顶板和支架顶梁的变形和受力情况。最后对模型样机进行模态实验分析,测得两者前6阶的固有频率以及各阶的模态阵型。通过基于相似理论搭建的实验样机和实验平台能够实现在条件有限的实验室条件下对超前支架进行静、动力学实验和测试,有助于节约设备研发成本以及提高设备质量。

关键词:相似理论;巷道超前支架;实验样机;实验平台;静、动力学测试

中图分类号:TD355.4 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)05-1319-06

Development of similar experimental prototype of the advanced support and the experimental study on its coupling mechanics with roof

XIE Miao, LIU Zhi-xiang, LU Jin-nan, MAO Jun

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

Abstract: The size of advance support for mechanized mining roadway is large, therefore it is not easy to investigate its comprehensive dynamic characteristics and its coupled mechanical characteristics with surrounding rock in laboratory. According to the similarity theory, the similar experimental prototype of the support with a shrinkage ratio of 1:8 was built. And a platform and measurement reference frame simulation of roadway roof were established. An experimental mechanics test was conducted on the advance support and roof coupling system to measure the deformation of roof and support beam and stress with support and without support, and with static loading and dynamic loading. Finally the experimental modal analysis was conducted on the model prototype, and the first 6 order natural frequency and modal shape of each order were measured. It is good to save equipment development cost and improve the quality of equipment through building the prototype and the experimental platform with the limited laboratory conditions for doing static and dynamic experiments and tests based on the similarity theory.

Key words: similarity theory; roadway leading support; experimental prototype; experimental platform; static and dynamic test

收稿日期:2016-06-27 修回日期:2016-09-20 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304107);辽宁省教育厅重点实验室资助项目(LJZS006);辽宁省煤矿液压技术与装备工程研究中心开放基金资助项目(CMHT-201206)

作者简介:谢苗(1980—),女,辽宁大连人,副教授,博士生导师,博士。Tel:0418-3351727, E-mail:xiemiao1121@126.com

传统的巷道支护材料与支护结构已不能满足复杂条件下巷道支护要求,在巷道掘进成巷作业中,采用传统支护方式所需的时间约占总作业时间的70%,且支护作业人员众多,劳动强度过大,耗时长,效率低,安全性差。研究更加合理和实用的巷道支护理论对促进综掘自动化的发展进程显得尤为重要。超前支护属于综掘工作面的一种临时支护设备,可以及时支护掘进工作面巷道围岩;保护掘进施工人员的安全;与掘进设备和锚固设备配套使用,实现掘、支、锚成套装备平行作业;在较大程度上增加掘进时间的同时有效降低非掘进时间,提高工作效率的同时也提高了综掘工作的安全性^[1-3]。近些年来,随着煤矿行业的发展以及对煤矿安全开采意识的增强,超前支架技术得到广泛关注与研究。

文献[4-6]中针对综掘巷道超前支架与围岩相互作用机理以及超前支架结构设计和强度校核等进行了基础研究并使用 ANSYS 有限元软件进行了静动力学特性分析。文献[7]中使用模糊 PID 控制算法对超前支架的支撑力自动控制进行研究;文献[8]以对顶板扰动量最小为控制目标,针对超前支架在迈步过渡过程的支撑力控制系统进行研究;文献[9]中以超前支架升降过程效率和对顶板扰动量最小为控制目标,针对超前支架的电液伺服位置和压力复合控制方法进行了研究;文献[10]中针对超前支架多缸同步控制方法进行研究。

以上研究内容对超前支架的结构设计、液压系统、控制策略以及动力学特性仿真等进行了深入研究,但是对于超前支架的实验研究相对较少:文献[11]采用 Polymax 模态识别方法对实验样机模型在全支撑和单组支撑等工况下进行了测试,将测试数据与仿真实验结果进行比较,分析其动力学特征及变化规律,为支护设备的设计与研发提供理论依据。文献[12]以劳斯-赫尔维茨判据作为其动态稳定性判断条件,参考煤矿井下常用激扰力数学模型,利用超前支护装备实验样机和振动测试系统,对超前支护装备进行模态分析,研究结果表明,超前支护装备易发生共振的频率范围 42.353~42.994 Hz。

本文根据相似理论,建立缩比为 1:8 的相似实验模型样机,对实验模型样机进行静、动力学实验分析。

1 超前支架组成

超前支架组成如图 1 所示,迈步式超前支架由主、副支撑组、推移机构等组成,每架支撑组的主要组成部件有纵梁、横梁、顶部阻尼体、各类千斤顶、立柱

组等,支撑纵梁均布安装在横梁上,以超前支架的中轴线为对称布置且与巷道轴向平行。

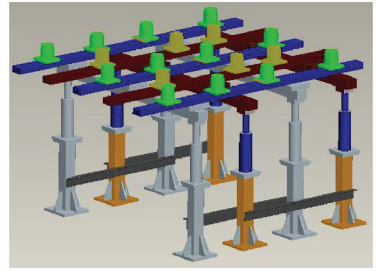


图 1 超前支护设备结构

Fig. 1 Structure of the supporting equipment in advance

2 样机的相似准则建立

相似理论广泛应用于实验室模拟煤矿岩层以及大型机械结构零件实验,相似理论的关键是进行相似准则的求解,通常使用方程分析法和量纲分析法求解,其中量纲分析法使用的最为广泛,也最为方便^[13-14]。本文使用量纲分析法求解相似准则,建立相似实验样机。

超前支架在外界载荷作用下产生振动,设外界激励为 F ,外界激励作用时间为 t ,超前支架的振动位移为 u ,振动速度为 v ,振动加速度为 a ,超前支架材料弹性模量为 E ,材料密度为 ρ ,超前支架的几何尺寸为 l ,固有频率为 ω ,阻尼比为 ξ ,固有振型为 φ ,建立物理模拟相似准则:

$$f(F, t, E, \rho, l, \xi, \omega, \varphi, u, v, a) = 0 \quad (1)$$

使用质量量纲(M)、长度量纲(L)和时间量纲(T)作为基本量纲,可得超前支架相似实验样机的量纲矩阵见表 1。

表 1 超前支架相似实验样机的量纲矩阵

Table 1 Dimensional matrix of the similar model of the lead bracket

参数	符号	量纲	M	L	T	指数
外界激励	F	$M^1 L^1 T^{-2}$	1	1	-2	a_1
激励时间	t	$M^0 L^0 T^1$	0	0	1	a_2
振动位移	u	$M^1 L^{-1} T^{-2}$	1	-1	-2	a_3
振动速度	v	$M^1 L^{-3} T^0$	1	-3	0	a_4
振动加速度	a	$M^0 L^1 T^0$	0	1	0	a_5
弹性模量	E	$M^0 L^0 T^0$	0	0	0	a_6
材料密度	ρ	$M^0 L^0 T^{-1}$	0	0	-1	a_7
几何尺寸	l	$M^0 L^0 T^0$	0	0	0	a_8
固有频率	ω	$M^0 L^1 T^0$	0	1	0	a_9
阻尼比	ξ	$M^0 L^1 T^{-1}$	0	1	-1	a_{10}
固有振型	φ	$M^0 L^1 T^{-2}$	0	1	-2	a_{11}

由表 1 可得关于指数的齐次线性方程:

$$\begin{cases} [M: a_1 + a_3 + a_4 = 0 \\ \{L: a_1 - a_3 - 3a_4 + a_5 + a_9 + a_{10} + a_{11} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$[T: -2a_1 + a_2 - 2a_3 - a_7 - a_{10} - 2a_{11} = 0$$

进一步化简得到:

$$\begin{cases} a_3 = -a_1 + \frac{1}{2}a_2 - \frac{1}{2}a_7 - \frac{1}{2}a_{10} - a_{11} \\ a_4 = -\frac{1}{2}a_2 + \frac{1}{2}a_7 + \frac{1}{2}a_{10} + a_{11} \\ a_5 = -2a_1 - a_2 + a_7 - a_9 + a_{11} \end{cases} \quad (3)$$

根据相似第2定理(π 定律)可得独立的 π 个数为8,推导出各个物理参数的 π 矩阵:

表2 超前支架相似实验样机的 π 矩阵

Table 2 π matrix similarity model of advance support

π	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
$\pi_1(a_1)$	1	0	-1	0	-2	0	0	0	0	0	0
$\pi_2(a_2)$	0	1	1/2	-1/2	-1	0	0	0	0	0	0
$\pi_3(a_6)$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$\pi_4(a_7)$	0	0	-1/2	1/2	1	0	1	0	0	0	0
$\pi_5(a_8)$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$\pi_6(a_9)$	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0
$\pi_7(a_{10})$	0	0	-1/2	1/2	0	0	0	0	0	1	0
$\pi_8(a_{11})$	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	1

相似实验样机需要满足3个方面的物理学相似关系:初始条件和边界条件相似、模型材料与原型材料的应力应变关系相似、几何尺寸相似^[15-17]。相似实验样机根据原型机缩小而成,因此设样机的几何比例缩尺为 λ , $\lambda = C_l = l_p/l_m$ 。边界条件相似可以得到外接激励作用时间 $C_t = \lambda$ 。由材料相似可知相似实验样机与原型机的密度和弹性模量相等,即 $C_\rho = C_E = 1$ 。综上,各个参数相似倍数:

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{F}{El} = \frac{F_m}{E_m l_m} \Rightarrow C_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{E_p l_p^2}{E_m l_m^2} = \lambda^2 \\ \vdots \\ C_\xi = 1; C_\varphi = 1; C_\omega = 1/\lambda; C_u = \lambda; C_v = 1 \\ C_a = 1/\lambda \end{cases} \quad (4)$$

使用相似理论建立相似实验样机时,几何缩比越大,原型机和相似实验样机的相似精度越低,本文使用几何缩比 $C_l = 8$ 建立相似实验样机。顶部阻尼体、立柱等直接影响超前支架整机的弹性模量,刚度、固有频率和阻尼比,因此对顶部阻尼体、立柱的几何尺寸和弹性模量参数进行相似变换。外界激励 F 即顶部加载油缸施加力,按照上述推导结论进行相似变换。

3 原型机与实验样机模态实验对比

对巷道超前支架原型机和实验样机进行模态实验。使用单点脉冲锤击,多点响应测量方法测量超前支架的模态参数^[18-19]。实验边界条件与工程实际边界应尽量相同,因此进行模态测试时,对支架顶部施加约束条件,即通过相似准则,对顶板施加20 kN的载荷。通过模态测试得到巷道超前支架原型机与实验样机的固有频率对比如图2所示。

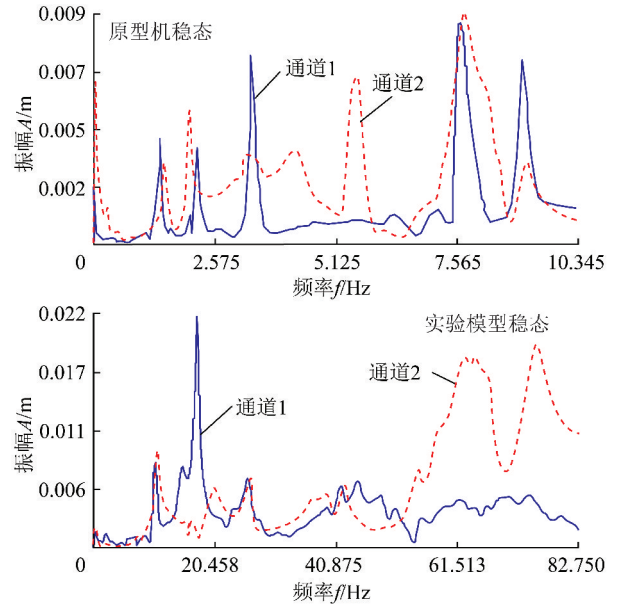


图2 原型机与实验模型的固有频率对比

Fig. 2 Compared with natural frequency of prototype test model 巷道超前支架原型机与实验模型的实测固有频率,以及由实验得到的固有频率通过相似原理得到的巷道超前支架原型机固有频率对比见表3。

表3 巷道超前支架原型机与实验模型固有频率对比
Table 3 Advance laneway support prototype and test model of natural frequency comparison

阶数	原型机实测固有频率/Hz	由相似原理推算原型机固有频率/Hz	实验模型实测固有频率/Hz	推算误差/%
1	1.105	1.048	8.386	5.11
2	2.158	1.987	15.894	7.93
3	2.964	2.821	22.565	4.85
4	5.610	5.294	42.353	5.63
5	7.769	7.605	60.837	2.12
6	8.508	8.280	66.238	2.68

对比表3中数据可以看出,由实验得到的原型机固有频率与由相似原理推算原型机固有频率相差不大,平均误差为4.72%,最大和最小误差分别为7.93%和2.12%,能够满足要求,通过1:8的比例

制作模型样机,对模型样机进行模态分析以及动力学特性研究基本能够反映原型样机的动力学特性。

4 超前支架与顶板耦合力学实验

4.1 实验平台

实验平台由模拟顶板框架、符合相似比例的超前支架样机以及测量基准框架组成。实验台采用“三边固支一边简支”的边界条件处理两帮和掘进工作面煤壁的支护条件,即两帮和掘进工作面煤壁为固支,将水泥板与框架进行刚性连接,支架后方顶板为简支,使用钢筋与框架进行连接,模拟锚杆对顶板的支护作用^[20]。

测试点布置如图3所示,以模拟顶板的纵向中轴线为基准,其位置上为第3测试线,在中轴线两侧各取两条测试线,各测试线的间隔距离为超前支护实验样机两相邻纵梁中心线的距离,以简支边为基准,在每条测试线上从右向左每个400 mm选取一个测试点,各测试点的位置与实验样机的弹性阻尼块位移一致。

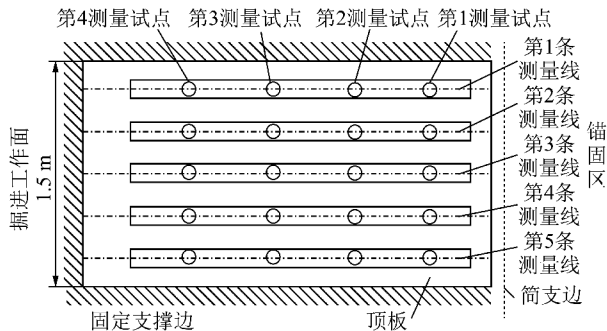


图3 综掘巷道超前支护装备实验检测分组

Fig. 3 Experimental detection of advance support equipment in fully mechanized heading face

4.2 顶板无支护实验

为测量未支护状态下顶板在激励作用下的动态特性,对模拟顶板施加激励。传感器测试每条测试线上各测试点位移变化规律,采样频率为0.1 s,截取5 s测试时间,顶板5条测试线的动态位移曲线如图4所示。

第1测试线上的各测试点位移在0~2.5 s时变化趋势平缓,变化幅值较小,2.5 s之后变化频率上升,但最大变形量仍较小。第1测试线较为接近固支边,顶板由于固支边的边界条件限制,变形量较小。第2测试线各测试点位移在0~3.0 s变化趋势平缓,3.0 s之后各测试点的扰动频率较大,与第1测试线相比,其位移极值略大,稳定性较差。第3测试线各点位移量最大,扰动频率最高,其最大变形量为19.25 mm。由于测试线是对称布置,顶板在简谐激

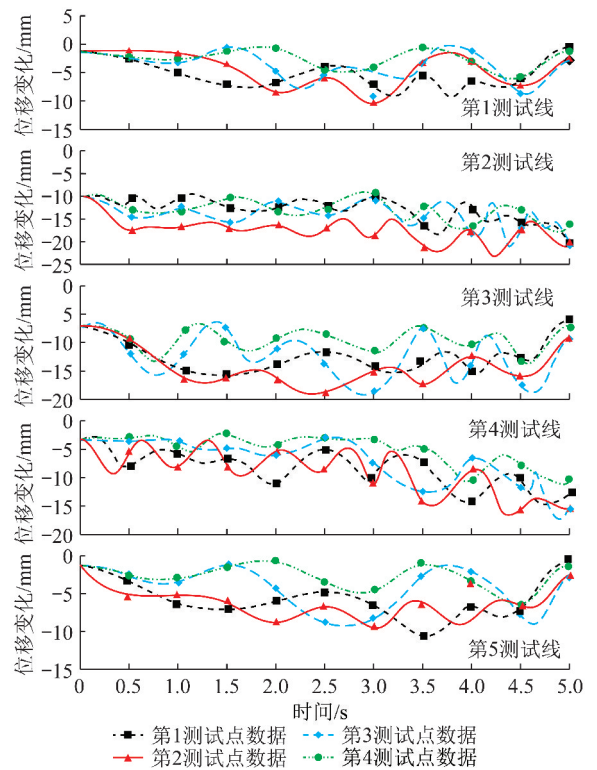


图4 顶板5条测试线的动态位移曲线

Fig. 4 Displacement curves of five test lines of top plate
励作用下,第4测试线与第2测试线、第5测试线与第1测试线测试的动态位移变化规律基本相同。

4.3 超前支架-顶板体系静态加载力学实验

通过实验样机对顶板进行支护,在顶板上施加均布载荷,测量顶板变形和实验样机纵梁的变形。图5为顶板的变形情况。

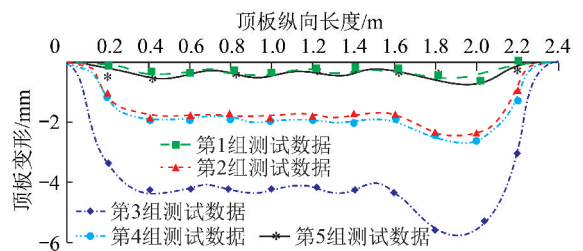


图5 顶板的变形

Fig. 5 Deformation of the roof

顶板在有效支撑区(0.4~1.6 m)变形很小,最大位移约为4.54 mm,超前支架进行临时支护时有效支撑区对顶板的控制较好,在非有效支撑区(0~0.4 m,1.6~2.35 m),首端及尾端处顶板位移均大幅减小。

图6为梁的变形情况。顶梁在纵向方向上变形量逐渐增大,但变化趋势平缓;在横向方向上,支撑梁的变形量由中间向两侧逐渐减小。

4.4 超前支架-顶板体系动态加载力学实验

在外部激励作用下,对顶板的变形情况进行研

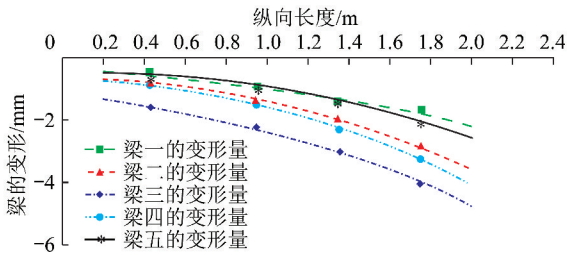


图6 梁的变形曲线

Fig. 6 Deformation of the beam

究。使用加载液压缸施加简谐载荷,记录5 s内顶板20个测试点的位移变化情况,如图7所示。

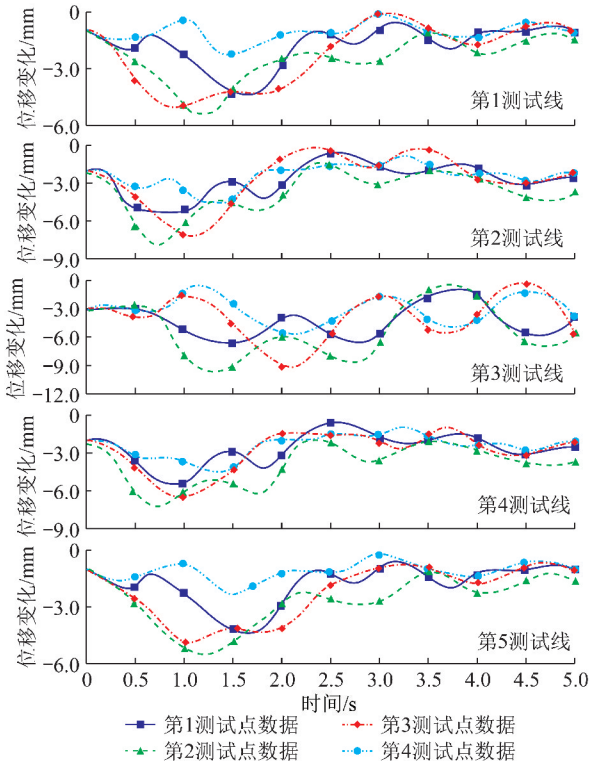


图7 5条测试线各个测试点位移实测数据

Fig. 7 Displacement measured data of each test point on the five test line

第1测试线上,在0~3 s时,由于受到顶板激励作用下将产生一定变形量,3 s后测试点的测试结果趋于平稳。各测试点位移幅值有明显差别,这是因为第1,4测试点处于顶板边缘,靠近简支边和固支边,其最大位移量约为5.83 mm,位移量变化波动相比中间的两个测试点略小。

第2测试线上,最大位移量约为8.72 mm,位移波动比第1测试线更剧烈,其总体变化趋势与第1测试线较为接近。

第3测试线上,受到动态载荷的激励后产生的位移波动最为剧烈。在0~5 s内由于受到激励,顶板产生了剧烈的变形,直到5 s以后各测试点的位移波动才渐渐趋于稳定。由于其位于顶板的中心,因此边

界条件对其约束作用最小,受到外界激励的作用最大,产生的波动最为明显。

第4,5测试线上测试点结果分别与第2,1测试线相似,这是因为他们的分布位置均相对于顶板的中心线对称,因此受到的外界激励而产生的波动也基本相当。

5 结 论

(1)原型机和实验模型各阶模态阵型基本一致,由相似理论推算原型机固有频率与实测原型机的固有频率基本一致,满足工程要求。

(2)对实验模型进行模态分析以及动力学特性研究基本能够反映原型机的动力学特性。通过对实验模型进行模态测试,提出相应优化措施。

(3)对超前支架和顶板耦合系统进行力学实验,测量在无支护和有支护,静态加载和动态加载情况下,顶板和支架顶梁的变形和受力情况。

参考文献 (References) :

[1] 卢进南,毛君,谢苗,等. 巷道超前支架全支撑态动力学模型[J]. 煤炭学报,2015,40(1):50-57.
 Lu Jinnan, Mao Jun, Xie Miao, et al. Dynamics model of advanced powered support in heading under full support situation[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 50-57.

[2] 谢苗,刘治翔,毛君,等. 巷道超前支护装备降架过程控制方法的研究[J]. 工程设计学报,2015,22(4):365-371.
 Xie Miao, Liu Zhixiang, Mao Jun, et al. Research on control method of advanced supporting equipment in falling process[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(4): 365-371.

[3] 毛君,杨振华,卢进南,等. 迈步式超前支护装备过渡过程支撑力控制系统设计[J]. 工程设计学报,2015,22(4):387-393.
 Mao Jun, Yang Zhenhua, Lu Jinnan, et al. Supporting for control system design for transition process of stepping-type advanced supporting equipment[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(4): 387-393.

[4] 栾丽君,姚立泽,齐建峰,等. 自移式掘进机辅助支护设备立柱力学分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(4):527-530.
 Luan Lijun, Yao Lize, Qi Jianfeng, et al. Column mechanics analysis of self-motion assisted powered support equipment for tunneling machine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(4): 527-530.

[5] 栾丽君,任金萍,卢景文. 巷道用自移式辅助支护设备顶梁的优化及有限元分析[J]. 煤矿机械,2010,31(3):93-94.
 Luan Lijun, Ren Jinping, Lu Jingwen. Optimization and finite-element analysis of self-motion assisted powered support equipment for roadway[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(3): 93-94.

[6] 谢苗,刘治翔,毛君,等. 迈步式超前支护系统设计与支护特性研究[J]. 机械强度,2016,38(2):302-310.
 Xie Miao, Liu Zhixiang, Mao Jun, et al. Design on step-type ad-

- vanced supporting system and research on the support characteristics [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2016, 38(2):302-310.
- [7] 毛君, 郑广辉, 谢苗, 等. 模糊PID的超前支护装备支撑力自动控制[J]. *智能系统学报*, 2015, 10(5):762-768.
Mao Jun, Zheng Guanghui, Xie Miao, et al. Support force automatic control system of advanced supporting equipment based on fuzzy-PID[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2015, 10(5):762-768.
- [8] 谢苗, 刘治翔, 鲁启通, 等. 超前支架迈步过程稳定控制方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(3):54-59.
Xie Miao, Liu Zhixiang, Lu Qitong, et al. Study on method for controlling stability of advanced support in step process[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(3):54-59.
- [9] 谢苗, 刘治翔, 池城, 等. 巷道超前支架的电液伺服位置压力复合控制方法[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(2):239-245.
Xie Miao, Liu Zhixiang, Chi Cheng, et al. Electro-hydraulic servo position and pressure hybrid control method of forepoling system on tunnelling [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(2):239-245.
- [10] 谢苗, 刘治翔, 毛君. 综掘巷道超前支护装备多缸同步控制方法研究[J]. *工程设计学报*, 2015, 22(2):193-200.
Xie Miao, Liu Zhixiang, Mao Jun. Multi-cylinder synchronous control method for advanced support of roadway support equipment [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2015, 22(2):193-200.
- [11] 谢苗, 白雅静, 毛君, 等. 不同工况下超前支护装备的模式分析[J]. *工程设计学报*, 2015, 22(3):236-242.
Xie Miao, Bai Yajing, Mao Jun, et al. Modal analysis of supporting in advance equipment under different working conditions[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2015, 22(3):236-242.
- [12] 卢进南, 谢苗, 毛君. 一种综掘巷道临时支护力学特性及振动特性研究[J]. *机械强度*, 2016, 38(3):435-441.
Lu Jinnan, Xie Miao, Mao Jun. Study on mechanical characteristics and vibration characteristics of temporary support equipment in fully mechanized mining tunnel [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2016, 38(3):435-441.
- [13] 陈喆. 基于相似理论和模型试验的结构动响应分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Chen Zhe. Structural response analysis based on similarity theory and model test [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [14] 李新华, 曹伟魏, 唐敏. 相似理论在大型复杂构件有限元分析中的应用[J]. *机械设计与研究*, 2013, 29(5):18-20.
Li Xinhua, Cao Weiwei, Tang Min. The application of similarity theory in the finite element analysis of complex and large components [J]. *Machine Design and Research*, 2013, 29(5):18-20.
- [15] 史先锋, 姜福兴, 朱海洲, 等. 特厚煤层分层工作面冲击地压事故后复产方案研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1):19-26.
Shi Xianfeng, Jiang Fuxing, Zhu Haizhou, et al. Research and practice on restoring production of rock burst accident working face in top slice during slice mining of extra-thick coal seams [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1):19-26.
- [16] 李石林, 冯涛, 朱卓慧. “煤体-支柱(架)-胶结体”联合作用下顶板超静定梁模型[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10):1735-1741.
Li Shilin, Feng Tao, Zhu Zhuohui. Mechanical model of statically indeterminate beam of roof under the combined action of coal body, pillar (Sort) and cemented fill [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10):1735-1741.
- [17] 顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水煤柱动力响应与稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7):1589-1597.
Gu Dazhao, Yan Yongguo, Zhang Yong, et al. Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal pillars in coal mine underground reservoir [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7):1589-1597.
- [18] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 大断面软弱破碎围岩煤巷演化规律与控制技术[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(8):1885-1895.
Meng Qingbin, Han Lijun, Qiao Weiguo, et al. Evolution law and control technology of surrounding rock for weak and broken coal roadway with large cross section [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8):1885-1895.
- [19] 林海飞, 翟雨龙, 李树刚, 等. 基于正交设计的“固-气”耦合相似材料力学与渗透特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3):672-679.
Lin Haifei, Zhai Yulong, Li Shugang, et al. Research on mechanics and permeability characteristics of similar material of solid-gas coupling based on orthogonal design [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3):672-679.
- [20] 徐刚, 宁宇, 闫少宏. 工作面上覆岩层蠕变活动对支架工作阻力的影响[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6):1354-1359.
Xu Gang, Ning Yu, Yan Shaohong. Effect of overburden strata creep activities on working face support resistance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6):1354-1359.