

DOI: 10.11779/CJGE201902007

竖向动载下巷道支护相似模拟试验装置的研制

单仁亮¹, 黄 博^{2*}, 郑 赟¹, 孔祥松¹, 张书鹏¹, 张凌智¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 安徽工程大学建筑工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 为研制用于动压巷道支护技术相似模拟研究的试验装置, 从采动压力出发分析归纳了采动的静压效应和动压效应, 以此为设计思想, 设计制造了新型的动压巷道支护相似模拟试验装置, 给出了相应试验过程的设计, 并进行了测试试验。研究表明: 具有内、外框架嵌套式结构的新型试验装置可通过静载油缸模拟超前支承压力及侧向支承压力, 并通过动载油缸模拟由采区顶板断裂、垮落等因素产生的振动荷载。测试结果表明新型装置可实现静、动荷载的同时加载, 互不干扰; 新型试验装置模拟的巷道模型破坏规律符合巷道破坏的一般规律, 试验结果真实可靠。

关键词: 动压巷道; 试验装置; 相似模拟试验; 支护技术

中图分类号: TU435; TD32

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)02-0294-09

作者简介: 单仁亮(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: srl@cumt.edu.cn。

Development of similar simulation equipment for roadway support subjected to vertical dynamic loads

SHAN Ren-liang¹, HUANG Bo², ZHENG Yun¹, KONG Xiang-song¹, ZHANG Shu-peng¹, ZHANG Ling-zhi¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. College of Civil

Engineering and Architecture, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: For developing similar simulation equipment for roadway support subjected to dynamic pressure, the dynamic and static pressure effects related to mining are analyzed and summarized, which becomes the design idea for manufacturing the new similar simulation equipment to study the support technology of dynamic pressure roadway. Then the design of test processes is given, and the relevant experiments are performed. The results show that the inner-frame and outer-frame are the designed nested structure in the new equipment. The pressures on lead abutment and side abutment can be simulated by using the static load cylinder, and the vibration caused by mining such as roof breaking and roof caving can be simulated by using the vibrating cylinder. The new equipment makes reliable static and dynamic loads and is applied synchronously without interference. The failure laws of the roadway in the tests accord with the general ones of roadway damage, and the test results are reliable.

Key words: dynamic pressure roadway; test equipment; similar simulation experiment; support technology

0 引 言

在岩土工程领域, 物理模型试验具有易操作、低成本、高仿真的特点, 同时还可以进行一些实际工程中无法实现的研究, 近些年来得到了较为广泛的应用。

国内的相似模拟试验研究开始于 20 世纪 50 年代末, 最早由北京矿业学院矿压试验室在 1958 年建立了一台相似模拟试验架^[1]。发展至今, 关于岩土工程、采矿工程等地下工程领域的相似模拟试验装置已有不少, 从平面到三维, 从研究巷道到研究采场, 各具特色。

杨立云等^[2]以深部矿井工程的建设为背景, 研制了新型的平面、三维可灵活转换的模型试验系统, 并针对具体的巷道进行了相关研究; 李国彪^[3]、闫振东^[4]利用中国矿业大学(北京)的深部工程破坏过程模型试验系统, 进行了针对大断面巷道的物理模型试验; 吕

秀江^[5]利用自制的三维模型试验装置和模型掘进机, 研究了掘进巷道前方的应力场变化。

针对受采动影响巷道进行研究的模型试验, 常规方法是通过逐级加载来实现模拟回采引起的采动压力, 垂直加载增大的倍数即为支承压力的集中系数, 例如陈登红^[6]在研究深部回采巷道围岩变形特征时, 在模型试验中采用逐级加载的方式, 模拟回采产生的动压, 所模拟的集中系数 K 的范围为 $K=1.5\sim5$; 李迎富^[7]在相关试验研究中, 同样通过增加顶部加载来实

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474218); 安徽高校自然科学基金项目(KJ2018A0118); 安徽工程大学引进人才科研启动基金计划项目(2016YQQ026)

收稿日期: 2017-12-23

***通讯作者:** (E-mail: cumtbhuang@sina.cn)

现模拟采动压力的变化, 并给出了受采动影响时的顶部补偿荷载计算公式。

现有试验系统对巷道受采动影响的模拟偏重于给巷道逐级施加静荷载以模拟静压效应对巷道的影响, 对采动过程中由顶板断裂及工作面震动引起的动压效应考虑并不充分。为了给回采巷道支护技术的研究提供针对性强、经济性好、占用空间少、劳动强度低的模型试验装置, 本文从采动效应出发, 归纳总结了前人的研究成果, 提出了新装置的设计思路, 以此为基础设计并制造了新型的动压巷道支护相似模拟试验装置, 完成了测试试验, 验证了新装置的可行性。本试验装置发明专利已通过审查并获得授权^[8]。

1 设计思路

1.1 设计核心思想

新试验装置的设计核心思想是将巷道所受的采动作用简化为静荷载和动荷载两部分直接施加给模型巷道, 既可充分再现巷道受到的采动影响, 也利于制作大比例的巷道模型, 便于研究支护技术。其中, 静荷载模拟支承压力的影响, 即采动带来的静压效应; 动荷载模拟回采过程中由采区顶板断裂、垮落等因素产生的动载作用, 即采动带来的动压效应。试验中动、静荷载可通过动、静态油缸独立施加和控制。

1.2 采动静压效应

(1) 超前支承压力

关于超前支承压力的分布, 很多学者做了研究。陆士良^[9]、宋振骐等^[10]推导了超前支承压力分布形式, 宋振骐等^[11]研究了采场支承压力的分布规律, 研究表明随着工作面的推进, 工作面前方任意一点均会受到超前支承压力的影响, 即超前支承压力分布曲线以一定的速率向前传播, 如图1所示。

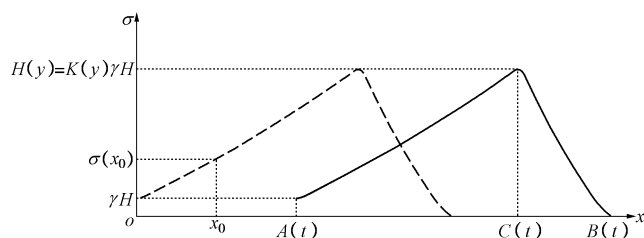


图1 支承压力的传播

Fig. 1 Propagation of pressures on lead abutment

图1中超前支承压力的传播规律, 可以表示为

$$\sigma(x, y, t) = \begin{cases} K(y)\gamma H & \left(t < \frac{A(t_0) - x}{v} \right) \\ a \cdot e^{b[x - A(t_0) + vt]} + c & \left(\frac{A(t_0) - x}{v} < t < \frac{C(t_0) - x}{v} \right) \\ a \cdot e^{-b[x - C(t_0) + vt]} + c & \left(\frac{C(t_0) - x}{v} < t < \frac{B(t_0) - x}{v} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ 为工作面前方某一点的竖向应力; x, y, t 为空间时间变量; v 为回采速率; t_0 为初始时间; K 为压力集中系数; γ 为上覆岩层加权平均重度; H 为上覆岩层高度; a, b, c 为与岩层参数、支架状态等相关的常数项。

(2) 侧向支承压力

对于侧向支承压力, 研究表明^[12-13]其分布形式与超前支承压力分布形式类似。但是关于侧向支承压力在巷道走向上的分布规律, 还没有比较成熟的理论公式。因此, 研究时需要借助数值模拟的手段。

为了得到这一规律, 在设计仪器前开展了相关的研究工作^[14]。利用了 FLAC^{3D} 软件, 围绕汾西矿区一回采工作面进行了模拟研究, 得到了煤柱一侧侧向支承压力的变化规律。研究中采用的计算模型如图2所示, 其中巷道的尺寸为 4.5 m (宽) × 3 m (高), 模拟了巷道左侧区域煤层的回采。

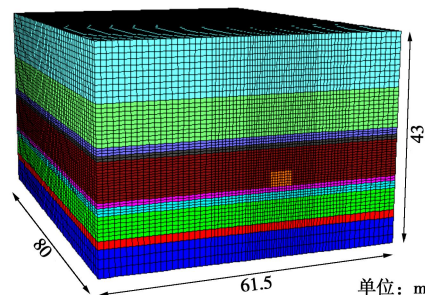


图2 计算模型

Fig. 2 Computational model

应力监测点的布置如图3所示, 共计14个监测点。图4为具有代表性的#12测点的竖向应力变化曲线。表1给出了#9~#14测点变化曲线的拟合结果。研究发现, 监测点的应力曲线均符合以 e 为底的指数函数形式, 即 $a_1 e^{b_1 x}$ ($b_1 > 0$)。

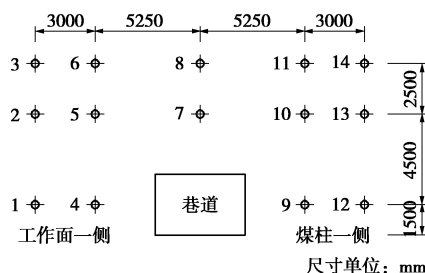


图3 数值模拟中的应力测点

Fig. 3 Measuring points of stress in numerical simulation

通过分析发现, 工作面回采 20~25 m 时, 即工作面至监测断面 5~10 m 时, 巷道靠工作面一侧的竖向应力先增大后减小, 靠煤柱一侧的竖向应力逐渐增大。

因此, 采动巷道的静压效应可以总结为: 巷道开

始时处于原始应力场的作用，应力值基本保持不变，随着工作面的推进，巷道逐渐受到超前支承压力和侧向支承压力的共同作用，接近回采面时，超前支承压力逐步衰减，此后巷道以受侧向支承压力作用为主。

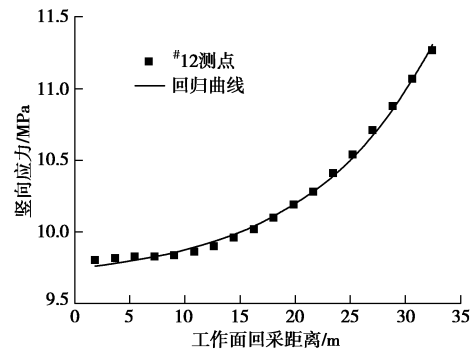


图 4 测点应力变化曲线

Fig. 4 Variation curves of stress of measuring points

表 1 应力变化曲线拟合公式

Table 1 Fitting formulas of stress curves

测点	拟合公式	R^2
#9	$\sigma_z = 12.8089 + 0.3233e^{\frac{x}{14.5278}}$	0.9898
#10	$\sigma_z = 8.2180 + 0.0484e^{\frac{x}{8.1990}}$	0.9993
#11	$\sigma_z = 7.4424 + 0.0588e^{\frac{x}{9.3528}}$	0.9981
#12	$\sigma_z = 9.6584 + 0.0895e^{\frac{x}{11.1101}}$	0.9964
#13	$\sigma_z = 9.0439 + 0.0686e^{\frac{x}{9.9833}}$	0.9982
#14	$\sigma_z = 8.5481 + 0.0627e^{\frac{x}{10.0689}}$	0.9982

1.3 采动动压效应

受采动影响的巷道除了会受到变化的静压力作用，还会受到由开采引起的动载作用。王家臣等^[15]认为采场老顶的断裂，若断裂部分岩块与直接顶或支架之间存在间距时，岩块会对下方产生动载冲击作用；曹安业^[16]在相似试验中，对顶板断裂和工作面回采过程进行了震动信号监测，发现工作面回采过程中，随着顶板的断裂和垮落，都会产生一定的振动作用，振动频率在 0~25 Hz 范围内；张少泉等^[17]对矿山冲击的类型进行了分类，共 6 大类，同时对强度进行了分级。

动态荷载的来源一部分是顶板断裂释放能量，以应力波的形式传播，引起巷道围岩产生振动；另一部分是采空区大面积顶板垮落，形成了冲击荷载并向四周传播。两种振动均会引起巷道围岩的变形破坏，因此设计试验装置时考虑加入动荷载，从而模拟开采动载的作用。将动压对巷道产生的振动作用简化为两类，一类震源在巷道顶部，另一类震源在巷道远端。第一类震源模拟顶板活动引起的动荷载，第二类震源模拟远端振动传播到该处时引起的巷道围岩振动。

开采引发的矿震可以采用天然地震的分析方法进行研究，在地震力学中，能量是描述地震波的一个重要的物理量。震源产生的地震波传播到巷道位置时，在巷道位置产生的振动位移 y 为

$$y = A_0 \cos(2\pi t / T_0) \quad , \quad (2)$$

式中， A_0 为振幅， T_0 为波的周期：

假设震源和巷道之间距离为 L ，波的传播速度为 c ，波列持续时间为 $t=nT_0$ ，通过计算可得，总地震能量 E 为^[18]

$$E = 3\pi^3 L^2 c t \rho (A_0 / T_0)^2 \quad . \quad (3)$$

因此，对于巷道受到的动载作用，在试验中进行模拟时，可以从能量的角度对动荷载进行控制，模型试验中动荷载的能量应与实际中的能量相似、相匹配。选择合理的动载能量，便可以确定试验中动荷载的振幅、频率等参数。

2 试验装置及试验过程

2.1 结构设计

试验装置需要能对模型合理地、独立地施加动、静荷载，并控制模型尺寸，减小仪器的体积和占地面积，降低试验人员的劳动强度。最终确定的动压巷道支护相似模拟试验装置的结构设计如图 5 所示。

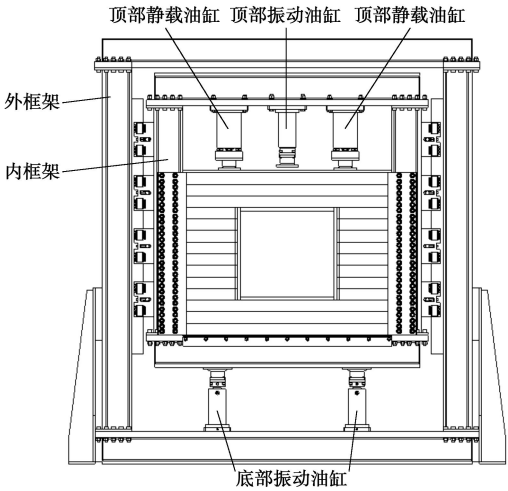


图 5 试验装置整体结构图

Fig. 5 Structure of test equipment

试验装置主要由外框架和内框架 2 个独立的部分构成：外框架与地面通过地脚螺栓连接在一起，起固定与引导作用；内框架内部为模型材料的填筑空间和顶部加载装置，由滚轮组和导轨嵌入外框架，并通过一对底部振动油缸产生竖向振动，形成了类似振动台的结构。在这种结构中，顶部油缸施加给模型材料的作用力仅作用于内框架，不传递给底部油缸，而底部油缸只需带动内框架做整体振动，不必为了克服顶部油缸的荷载而额外出力。这样就降低了底部振动油缸

的要求, 大幅降低设备制造的成本。

与常规试验台相比, 新型试验装置具有占地面积小, 且底部与顶部油缸互不干扰, 可独立施加振动荷载的优点。

顶部振动油缸直接作用在模型上, 底部振动油缸带动模型整体振动。从震源方位而言, 前者震源位于巷道上方, 可模拟由采区顶板断裂、垮落等因素产生的振动; 后者震源位于水平方向远处, 可模拟远端振动传播到该处时引起的巷道围岩振动。

外框架、内框架的结构图如图6所示, 外框架各组成部分通过螺栓连接而成, 底梁的上端面设置了底部振动油缸, 立柱内侧面设置了导轨, 见图6(a)。内框架由各组成部分通过螺栓连接而成, 顶梁下端面设置了1对顶部静载油缸和1个顶部振动油缸, 油缸下方连接有加载板, 立柱外侧面上设置了滚轮组, 可以使外框架的导轨嵌入其中, 见图6(b)、(c)。内框架上还设置了前、后挡板, 通过螺栓与内框架立柱连接, 前挡板的中心区域开设了可视窗口, 用于观察试验过程中巷道的变形破坏过程。

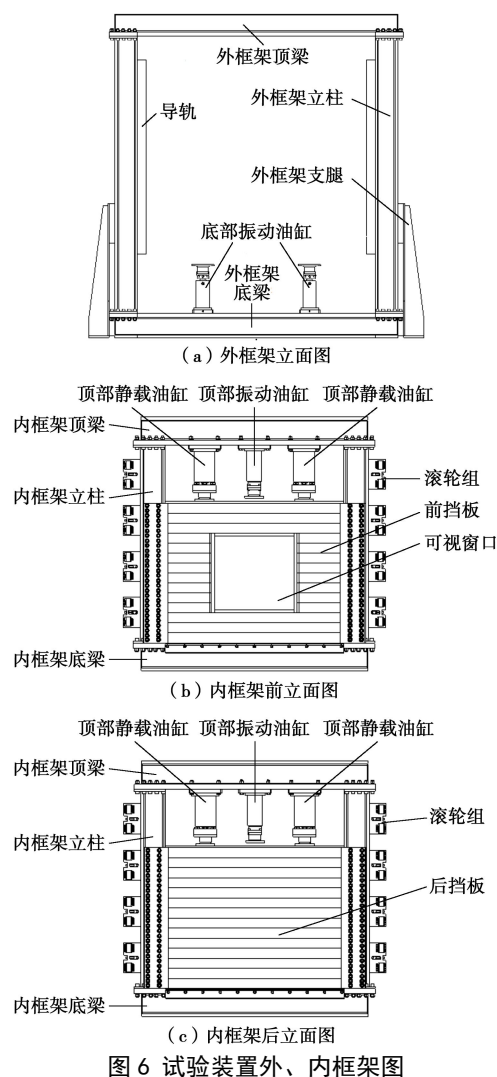


图6 试验装置外、内框架图

Fig. 6 Outer-frame and inner-frame of test equipment

图7为试验装置侧向剖视图。前、后挡板中间为试验材料的填筑空间, 尺寸为1800 mm(宽)×1400 mm(高)×200 mm(厚), 在试验材料和前挡板中间放置了有机玻璃板, 有机玻璃板不与内框架连接, 直接放置在专门设置的安装空间内即可, 有机玻璃板的厚度为100 mm。

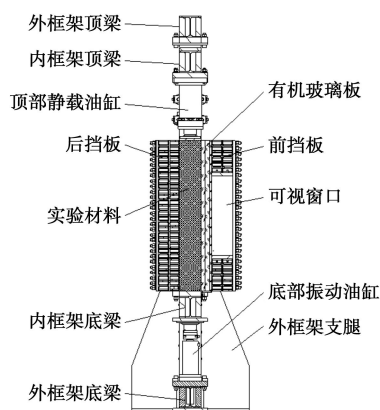


图7 试验装置整体侧向剖视图

Fig. 7 Lateral view of test equipment

在首次设计试验装置的过程中, 没有能融入侧向加载装置, 因此在设计中预留了加装空间, 现正在完善侧向加载装置。

2.2 制造与安装

新试验装置的尺寸最终确定为, 外框架宽为3760 mm, 高为3670 mm, 内框架宽为2430 mm, 高为2540 mm。

框架和挡板均采用HW型钢作骨架、腹板两侧焊接钢板制作而成。后挡板均为断面尺寸为100 mm×100 mm的长挡板, 共计28根, 分两层安装; 前挡板由于开设有可视窗口, 因此包含了12根长挡板、32根短挡板和1个800 mm×800 mm的方形窗口, 挡板拼装效果如图8所示。



图8 挡板组装效果图

Fig. 8 Photo of assembled baffles

由于挡板是按照最大加载值设计的, 因此在实际试验中当加载值较小时, 可以灵活调整前挡板的布置方式, 减小安装挡板的工作量, 如图9所示。

完整的动压巷道支护相似模拟试验装置, 还包含了电液伺服加载装置、监控装置及相应的控制软件等。

动、静态油缸上均安装有力传感器，静态油缸上安装了数字式位移传感器，动态油缸上安装了 LVDT 位移传感器。试验系统的部分参数详见表 2。



图 9 试验装置的安装

Fig. 9 Assembling of test equipment

表 2 试验装置部分参数

Table 2 Parameters of test equipment

名称	数量	规格
静态油缸	2	最大出力 750 kN
顶动态油缸	1	最大出力 200 kN, 频率 1~10 Hz, 振幅±0.2 mm (顶部)
	1	最大出力 400 kN, 频率 1~10 Hz, 振幅±1 mm (底部)
数字式位移传感器	2	量程 0~200 mm, 精度 0.005 mm
LVDT 位移传感器	1	量程 0~200 mm, 精度 0.001 mm
静态油缸力传感器	2	量程 1000 kN
动态油缸力传感器	2	量程 200 kN/400 kN

2.3 试验过程

试验过程主要由两个部分组成，第一部分是模拟巷道所受超前支承压力和侧向支承压力变化的加载过程；第二部分是模拟巷道受到由开采导致的顶板断裂、垮落等因素产生的振动作用过程。

第一部分是试验的主线过程，贯穿试验始终。巷道开始时处于原始应力场的作用，应力值基本保持不变，随着工作面的靠近，到某一距离时开始受到超前支承压力和侧向支承压力叠加作用的影响，当快邻近工作面时，超前支承压力开始衰减，巷道主要受侧向支承压力的影响，直至最终回采结束。因此，在试验中需要通过静载油缸模拟超前支承压力和侧向支承压力的变化，独立控制一侧的静载油缸加载，模拟逐步增大的侧向支承压力，同时独立地控制另一侧的静载油缸先进行加载后卸载，模拟先增大随后衰减的超前支承压力。

对于超前支承压力的加载，如图 10 所示，函数曲

线由两段组成，分别为加载阶段和卸载阶段，持续时间分别为 T_1 和 T_2 。

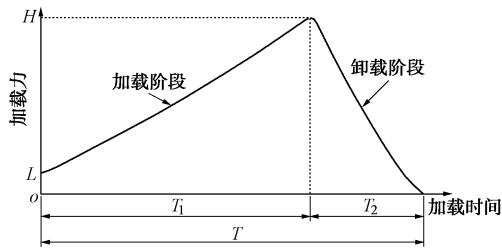


图 10 超前支承压力加载曲线

Fig. 10 Loading curve of pressures on lead abutment

加载曲线可以通过函数表示，其中加载阶段函数为 $a_1 \cdot e^{b_1 x} + c_1 (b_1 > 0)$ ，从初始值 L 开始加载，加载至终值 H 结束，而卸载阶段函数的基本形式为 $a_2 \cdot e^{b_2 x} + c_2 (b_2 < 0)$ ，从加载阶段的终值 H 开始，逐步卸载至 0。其中终值 H 为初始值 L 的 K 倍， K 即为超前支承压力集中系数，初始值 L 为试验材料上表面所需要补偿的自重应力值，其值的确定需要计算原型中对应位置的自重应力，再通过相似比换算得到。 K 值可依照现场实测结合工程经验确定，可以通过 1.2 节中数值模拟的方式确定，也可以在合理的范围内进行假定，进行探究性试验。

而两个阶段的持续时间 T_1 和 T_2 ，总和为 T ，即为超前支承压力的影响时间，转化为距离即为超前支承压力的影响范围，时间和距离之间的转化，可根据经验假定一个合理的超前支承压力影响范围和回采速率，换算出相应回采过程所需要的时间，再根据相似理论计算得到持续时间 T_1 和 T_2 。对于侧向支承压力的加载，可以根据数值模拟或现场实测获得的煤柱一侧围岩的竖向应力变化规律设计加载方案。

在试验的第一部分进行过程中，穿插着试验的第二部分，即在模拟支承压力变化的过程中，对模型材料进行动态加载。第二部分需要通过顶部振动油缸和底部振动油缸实现，如图 11 所示，在试验第一部分进行的过程中多次施加振动荷载，首次施加的时间为 T_3 ，其后每次施加的时间间隔为 T_n 。

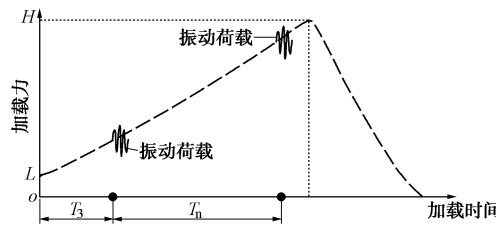


图 11 动载油缸加载示意图

Fig. 11 Loading of vibrating cylinder

动荷载可以由顶部振动油缸产生，也可以由底部

振动油缸产生, 顶部振动油缸用来模拟的震源在巷道上方, 模拟的对象是巷道受到上部由顶板断裂释能量等因素产生的振动, 产生的振动方向与传播到巷道的方向一致, 而底部振动油缸模拟的震源是在水平方向某一距离处, 即远区采空区位置, 模拟的对象为由采空区顶板周期性垮落等因素产生的地震波传播至模型巷道区域时引起的振动, 模型中质点的振动方向与假想振动波传播方向是垂直的。

选择加载振动油缸时, 应综合考虑工程实际情况和试验的研究目的。底部振动油缸施加振动荷载的时机, 可以与周期来压密切结合, 模拟采空区老顶垮落引起的振动影响。首次施加振动荷载的时间 T_3 可根据试验需求进行安排; 每次施加振动荷载时间间隔 T_n , 可先确定合理的周期来压步距, 再根据回采速率换算得到周期来压的间隔时间并通过相似比确定。

试验开始前, 首先需要填筑试验材料, 达到预期强度后, 开挖并支护好模型巷道。完成试验的准备工作后, 利用顶部静载油缸对试验材料进行加载, 加载至初始值 L 至稳定。随后通过顶部静载油缸对试验材料施加支撑压力作用; 并根据加载间隔时间 T_n 穿插施加振动荷载。

3 测试性试验

3.1 测试试验 1

测试试验选择几何相似常数 $C_l=18$, 原型巷道尺寸为 $4500\text{ mm}\times3000\text{ mm}$, 因此模型中巷道的尺寸为 $250\text{ mm}\times167\text{ mm}$ 。重度相似常数 C_γ 取 1.4, 因此 $C_\rho=1.4\times18=25.2$ 。

模型分成 4 个岩层, 厚度分别为直接顶 380 mm, 煤层 420 mm, 直接底 100 mm 和老底 500 mm, 如图 12 所示, 模型巷道沿煤层底部布置。

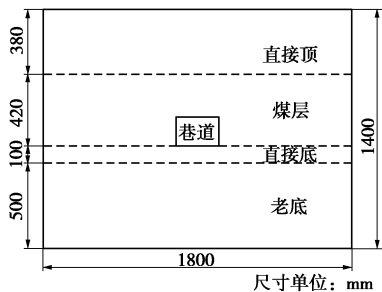


图 12 模型分层图

Fig. 12 Layered-graph of model

测试试验 1 中静荷载仅考虑了模拟超前支撑压力的作用, 加载初始值 $L=154\text{ kN}$, 超前压力集中系数 $K=1.5$, 最大值为 $H=154\times1.5=231\text{ kN}$ 。试验中将荷载划分了 30 级, 其中加载阶段 20 级, 加载函数为

$154e^{0.04x}$, 卸载阶段 10 级, 加载函数为 $231e^{-0.22(x-10)}$, 加载的时间间隔定为 20 min。

测试试验 1 中振动荷载仅使用了顶部振动油缸, 按照正弦波进行加载, 振动荷载施加在第 10 级静荷载时。振动荷载的施加通过振幅和频率进行控制, 参数取振幅 $\pm 0.2\text{ mm}$, 振动频率为 8 Hz。

试验选择了砂、水泥、石膏制作相似材料, 为了保证相似试验的可靠性, 进行了相似材料的配比试验, 配比试验中涉及的相关参数和测试结果详见表 3。

表 3 材料参数表

Table 3 Parameters of materials

岩层		原型抗压强度/MPa	模型抗压强度/MPa	配比抗压强度 MPa	配比
直接顶	泥岩	17.0	0.675	0.667	9:4:6
煤层	煤	11.6	0.460	0.461	10:5:5
直接底	铝质泥岩	14.7	0.583	0.596	10:6:4
老底	砂质泥岩	21.5	0.853	0.830	9:6:4

锚杆和锚索选择了锡丝作为相似材料, 并进行了简单的抗拉强度测试, 测试结果及试验中涉及的相似材料的选择详见表 4。

表 4 拉断力测试结果

Table 4 Test results of tensile force

原型材料	原型材 料拉断 力/kN	相似材料	相似材 料拉断 力/N
$\phi 22\text{ mm}$ 螺纹钢锚杆	216.6	$\phi 1.2\text{ mm}$ 锡丝	27
$\phi 20\text{ mm}$ 螺纹钢锚杆	179.0	$\phi 1.0\text{ mm}$ 锡丝	22
$\phi 16\text{ mm}$ 圆钢锚杆	98.5	$\phi 0.8\text{ mm}$ 锡丝	13
$\phi 21.6\text{ mm}$ 锚索	681.2	2 根 $\phi 1.5\text{ mm}$ 锡丝	78

试验针对汾西矿区原型巷道的常用支护开展, 支护形式如图 13 所示。顶板支护使用了 $\phi 22\times2200\text{ mm}$ 的螺纹钢锚杆, 间排距为 $780\text{ mm}\times800\text{ mm}$; 顶板锚索的尺寸为 $\phi 21.6\times4200\text{ mm}$, 布置方式为“三花”布置, 排距 800 mm, 同排之间间距 2340 mm; 帮部使用的是 $\phi 16\times1800\text{ mm}$ 的圆钢锚杆, 间排距 $900\text{ mm}\times800\text{ mm}$ 。

试验全过程的图像如图 14 所示。可以看到常用支护方案在不受采动压力作用时 (图 14 (b)), 能起到较好的支护效果, 围岩仅是产生裂纹, 并没有发生围岩失稳。但在回采阶段中, 随着支撑压力的作用加剧, 帮部支护不足的弱点开始显现, 帮锚杆出现了被拉断的现象, 造成帮部失稳、顶板下沉, 支护效果较差。

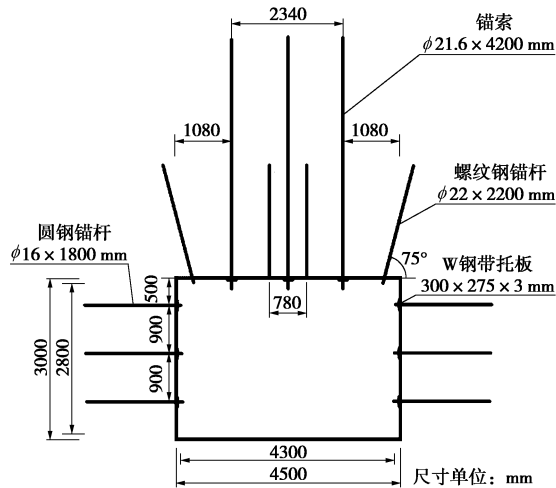


图 13 常用支护方案图

Fig. 13 Common support

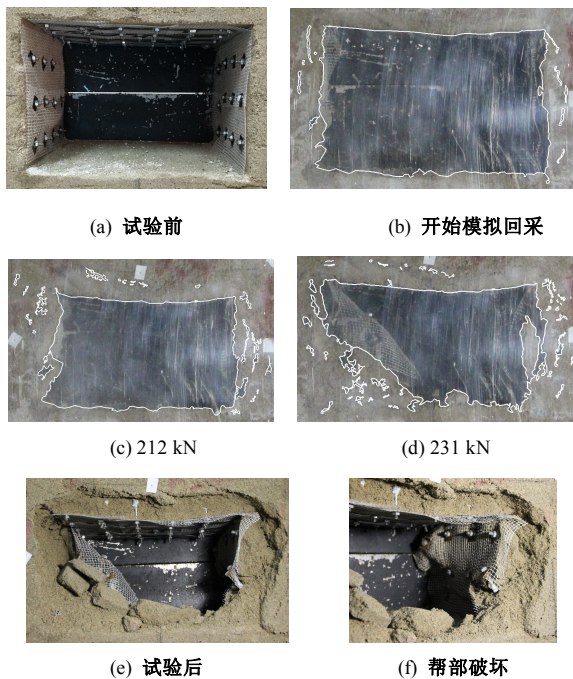


图 14 试验前后巷道对比

Fig. 14 Comparison of roadway before and after tests

试验中得到的两帮收敛量和顶板下沉量随距模拟工作面距离变化的曲线，如图 15 所示。最终两帮收敛量是顶板下沉量的 1.96 倍。回看整个过程，两帮变形量突增正是由于两帮支护破坏造成的，两帮岩石向巷道内倾倒导致两帮收敛加剧。

巷道帮部 3 个应力监测点的应力变化曲线，如图 16 所示，#2 监测点距离巷道 5 cm，#3 为 11 cm，#4 为 18 cm。可以发现，巷道帮部深部围岩受到的压力较小，上部岩层的主要荷载由巷道浅部围岩承担，当巷道帮部支护破坏后，帮部岩石随之发生较大变形、破裂、向巷道倾倒，这样靠近巷道的帮部岩石就不再承担上部荷载，荷载大部分转向帮部中等深处的围岩

承担，也就是#3 测点所在区域，此时造成了压力的突变，围岩应力分布对巷道支护不利。

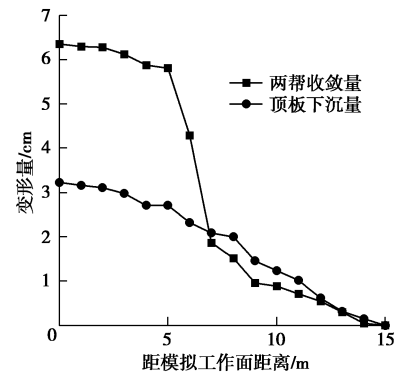


图 15 常用支护巷道变形

Fig. 15 Deformations of common support roadway

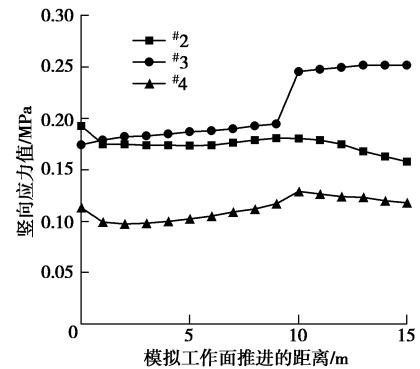


图 16 帮部竖向应力变化

Fig. 16 Variation of vertical stress of side walls

试验发现，模型巷道与现场原型巷道在帮部和顶板变形特征方面具有较为一致的变形破坏规律，两帮的收敛量比较明显，凸显出帮部支护的不足，原型巷道部分帮部的锚杆出现了破坏，而顶板则相对完整，表现出整体下沉的变形规律。

3.2 测试试验 2

为了进一步研究动态荷载的影响，做了两组对照试验：一组施加动、静荷载，另一组仅施加静荷载。通过超声波测试对模型损伤情况进行分析，并分析动荷载对模型变形破坏带来的影响。

图 17 给出了第一组试验前后测点声波速度的变化。#1~#3 测点位于巷道左帮围岩中，与巷道帮部中点处于同一水平面，分别距离巷道 18, 12, 6 cm；#4~#6 测点位于巷道顶板围岩中，与巷道顶板中点处于同一竖直面，分别距离巷道 6, 12, 18 cm。6 个测点的波速在试验前后均有所降低，如位于帮部的#1 测点声速由 853 m/s 降至 751 m/s，降幅为 12%。

第 2 组的结果如图 18 所示。6 个测点的波速在试验前后也均有不同程度的降低，此时测点 1 的声速由 838 m/s 降至 824 m/s，降幅为 2%。

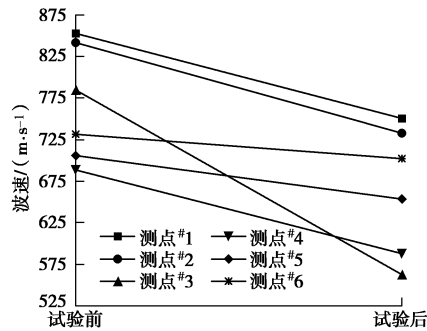


图 17 动荷载组试验前后波速变化图

Fig. 17 Wave velocities before and after dynamic load tests

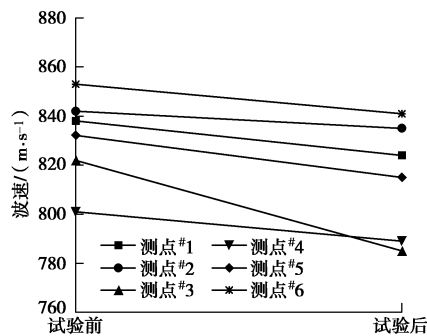


图 18 静荷载组试验前后波速变化图

Fig. 18 Wave velocities before and after static load tests

不难发现, 动静组合荷载和仅有静荷载作用时都可以使围岩发生不同程度损伤破坏, 但施加动静组合荷载的一组声速降低较明显, 这说明动荷载虽不能直接引起巷道围岩产生大变形破坏, 但对巷道围岩的损伤作用不容忽视。

同样的规律也体现在声波波形的变化中。以受振动影响最大的帮部#3 测点为例, 第一组试验后振幅的降幅达到了 23%, 而第二组仅为 3%。反映出振动荷载会引起巷道围岩产生微裂缝, 加剧了声波传递过程中的能量耗散。

4 结 论

(1) 总结了采动巷道的静压效应: 巷道开始时处于原始应力场的作用, 应力值基本保持不变, 随着工作面的推进, 巷道逐渐受到超前支承压力和侧向支承压力的共同作用, 接近回采面时, 超前支承压力逐步衰减, 此后巷道以受侧向支承压力作用为主。

(2) 将巷道受到的采动作用简化成动、静荷载两部分, 在相似试验中直接施加给模型巷道, 围绕这个思路设计并制造了新型的动压巷道支护相似模拟试验装置。

(3) 设计了内框架与外框架的嵌套式结构, 内框架可在底部振动油缸的作用下, 沿外框架的滑轨上下移动, 内框架作为独立的力系, 可实现静、动荷载的同时加载、互不干扰。

(4) 设计了动压巷道支护相似模拟试验装置相应的试验过程, 主要由两个部分组成, 第一部分是模拟巷道所受超前支承压力和侧向支承压力变化的加载过程, 通过顶部静载油缸实现; 第二部分是模拟巷道受到的由开采导致的顶板断裂、垮落等因素产生的振动作用过程, 通过顶部、底部振动油缸实现。

(5) 开展了 2 次测试试验, 验证了新试验系统下的巷道模型破坏规律符合巷道破坏的一般规律, 并对比探究了动荷载对于巷道的影响, 发现了动荷载不会造成巷道的宏观破坏, 但会引起围岩的损伤, 这在声波测试结果中得以验证。

参考文献:

- [1] 李晓红. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (LI Xiao-hong. Simulation technologies in rock mechanical test[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 杨立云, 杨仁树, 马佳辉, 等. 大型深部矿井建设模型试验系统研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1424 - 1431. (YANG Li-yun, YANG Ren-shu, MA Jia-hui, et al. Development of a model test system for deep mine construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1424 - 1431. (in Chinese))
- [3] 李国彪. 干河煤矿大断面巷道围岩稳定性分析及控制技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013. (LI Guo-biao. Research on the surrounding rock stability and control techniques of large section roadway in Ganhe Coal Mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [4] 闫振东. 大断面煤巷支护技术试验研究及新型锚杆机研发应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010. (YAN Zhen-dong. Research on support technology experiment of large section coal roadway and development of new roof bolter for coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2010. (in Chinese))
- [5] 吕秀江. 煤巷掘进影响区动态应力响应及对动力灾害影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014. (LÜ Xiu-jiang. Research on the dynamic mechanical response of driving affected zone in coal roadway and its effect on dynamic disaster[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014. (in Chinese))
- [6] 陈登红. 深部典型回采巷道围岩变形破坏特征及控制机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014. (CHEN Deng-hong. Research on fractured deformation characteristics and control mechanism of surrounding rock on deep typical gateways[D].

- Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [7] 李迎富. 二次沿空留巷围岩稳定性控制机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012. (LI Ying-fu. Research on controlling mechanism of surrounding rock stability of the secondary gob-side entry retaining[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 单仁亮, 黄 博, 白 瑶, 等. 动压巷道支护物理模型试验装置及方法: 中国, 2015110213719[P]. 2017-05-31. (SHAN Ren-liang, HUANG Bo, BAI Yao, et al. Physical model experiment and test method for roadway support subjected to dynamic pressure: China, 2015110213719[P]. 2017-05-31. (in Chinese))
- [9] 陆士良. 无煤柱区段巷道的矿压显现及适用性的研究[J]. 中国矿业学院学报, 1980(4): 1 - 22. (LU Shi-liang. Roadways in pillarless districts: occurrence of mine pressure and adaptability[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1980(4): 1 - 22. (in Chinese))
- [10] 宋振骐, 宋 扬, 刘义学, 等. 关于采场支承压力的显现规律及其应用[J]. 山东矿业学院学报, 1982(1): 1 - 25. (SONG Zhen-qi, SONG Yang, LIU Yi-xue, et al. Behavior regularity of abutment pressure in stope and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 1982(1): 1 - 25. (in Chinese))
- [11] 宋振骐, 蒋金泉, 宋 扬. 关于采场巷道矿压控制设计问题[J]. 山东矿业学院学报, 1985(3): 1 - 11. (SONG Zhen-qi, JIANG Jin-quan, SONG Yang. Design of strata control in roadways ground working faces[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 1985(3): 1 - 11. (in Chinese))
- [12] 谢广祥, 杨 科, 刘全明. 综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 545 - 549. (XIE Guang-xiang, YANG Ke, LIU Quan-ming. Study on distribution laws of stress in inclined coal pillar for fully-mechanized top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 545 - 549. (in Chinese))
- [13] 王钰博. 特厚煤层综放工作面端部结构及侧向支承压力演化机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊 1): 30 - 35. (WANG Yu-bo. Evolution mechanism of end structure and abutment pressure on fully-mechanized top coal caving face in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 30 - 35. (in Chinese))
- [14] 单仁亮, 黄 博, 宋永威, 等. 新峪矿采空区下近距离巷道矿压特征研究[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(1): 29 - 37. (SHAN Ren-liang, HUANG Bo, SONG Yong-wei, et al. Ground pressure features of roadway under close range goaf in the Xinyu Mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(1): 29 - 37. (in Chinese))
- [15] 王家臣, 王兆会. 高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3987 - 3997. (WANG Jia-chen, WANG Zhao-hui. Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3987 - 3997. (in Chinese))
- [16] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (CAO An-ye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [17] 张少泉, 张兆平, 杨懋源, 等. 矿山冲击的地震学研究与应用[J]. 中国地震, 1993, 9(1): 1 - 8. (ZHANG Shao-quan, ZHANG Zhao-ping, YANG Mao-yuan, et al. The seismological research and development on mining tremors[J]. Earthquake Research in China, 1993, 9(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [18] 笠原庆一. 地震力学[M]. 北京: 地震出版社, 1984. (KASAHARA K. Earthquake mechanics[M]. Beijing: Seismological Press, 1984. (in Chinese))