

文章编号:0253-9993(2009)10-1328-05

# 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征的物理模拟试验

勾攀峰, 张振普, 韦四江

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 利用自行研制的 YDM-E 型采矿工程物理模型试验系统, 通过相似材料模拟试验研究不同水平应力作用下锚杆支护巷道以及无支护条件下巷道围岩变形破坏特征。实验结果表明: 随着水平应力的提高, 巷道无支护情况下顶板呈现楔形冒落; 锚杆支护巷道顶板呈现层状整体垮落, 当水平应力加大到一定程度, 锚固体全部垮落之后, 锚固区外亦呈现楔形冒落; 巷道底板出现剪切滑移破坏, 破坏的外轮廓线呈反拱形; 巷道两帮的破坏程度小于顶、底板的破坏程度。因此, 高水平应力作用巷道围岩控制的重点在于控制巷道顶、底板。

**关键词:** 水平应力; 巷道围岩; 破坏特征

**中图分类号:** TD353 **文献标识码:** A

## Physical simulation test of damage character of surrounding rock under different levels of the horizontal stress

GOU Pan-feng, ZHANG Zhen-pu, WEI Si-jiang

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Using the YDM-E-type mining engineering physics model test system, which was self-developed, the deformation and failure character of the surrounding rock under different horizontal stress for using bolt support and non-support were researched by the similarity-simulation study. The experimental results show that the roadway shows a wedge-shaped roof caving for using non-support with the increased horizontal stress; while the roof of the roadway is strata falling for using bolt support, but the anchorage body would all fall if the horizontal stress increases to a certain extent and the anchorage area also shows wedge falling finally; the shear slip failure is occurred in the floor of the roadway, and the damage outer contour is anti-arched; the destruction extent of the two sides of the roadway is less than the level of the roof and floor. Therefore, it is a key to control the roof and floor of the roadway under the high level of stress.

**Key words:** horizontal stress; surrounding rock; damage character

构造应力是由于地壳运动在岩体中引起的应力。其主要特点是以水平应力为主, 具有明显的区域性和方向性, 它是影响巷道围岩稳定的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。一直以来, 人们只注重自重应力对巷道围岩稳定的影响, 而由构造应力引起巷道破坏的机理不是很清楚<sup>[3-5]</sup>。随着开采深度的增加, 特别是断层、背斜等地质构造附近, 人们发现水平应力对巷道围岩破坏起重要作用, 巷道底臃的原因也与高水平应力有很大的关

收稿日期: 2009-06-23 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50874037)

作者简介: 勾攀峰 (1966—), 男, 河南商水人, 教授, 博士。Tel: 0391-3987902, E-mail: goupf@hpu.edu.cn

系<sup>[6-7]</sup>。对于水平应力对巷道围岩稳定性的影响，国内外学者进行了相应的研究，指出巷道顶、底板破坏的主要因素是水平应力而不是垂直应力<sup>[8]</sup>。澳大利亚学者盖尔（W. J. Gale）提出了锚杆支护的最大水平应力理论，阐述了巷道掘进方向与最大主应力方向不同时巷道稳定性的差异。

随着矿井开采深度的增加，巷道围岩压力逐渐增加，尤其是地质构造影响区域，不仅表现在垂直应力的增加上，更主要表现在水平应力的增加上<sup>[3]</sup>。由于对于高水平应力作用巷道的破坏机理和支护措施研究不够充分，已造成大量矿井的工程失败和经济损失<sup>[9-10]</sup>。笔者利用物理模拟试验研究不同水平应力作用下巷道的围岩破坏特征，以期为高水平应力作用下的巷道围岩控制提供参考。

## 1 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征的相似材料模拟试验

### 1.1 模型设计

试验以焦作煤业集团赵固一矿开拓巷道掘进为工程背景，主要目的是通过相似模拟试验研究不同水平应力作用下锚杆支护巷道以及无支护条件下巷道围岩的变形破坏特征，为巷道围岩控制提供依据。模拟试验采用河南理工大学研制的YDM-E型采矿工程物理模型试验系统，该系统主要由强刚性加载框架、加载系统、平面变形控制系统、双向旋转系统、支撑系统、油压控制系统、模型平面垫板及减摩系统以及巷道开挖控制系统等组成（图1）。

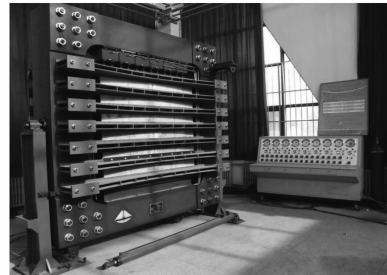


图1 YDM-E型采矿工程物理模型试验装置

Fig.1 Testing apparatus of YDM-E physical model in mining

该系统模型块体尺寸为160 cm × 160 cm × 40 cm。模型边界实施两向三面主动加载，可加单向荷载、双向荷载和阶梯型荷载。模型边界最大荷载集度为5 MPa，荷载集度偏差小于1%。模型块体内应变场均压范围可达130 cm × 130 cm，应变场均匀度相对偏差小于5%。巷道原型为沿煤掘进的开拓巷道，断面大小为5 m × 4 m。试验考虑4种巷道支护参数，第1种是不进行支护，第2~4种巷道支护参数是在顶板和巷道两帮分别进行间排距为0.6, 0.8, 1.0 m的锚杆支护。根据实验目的、模型架大小以及巷道开掘后影响范围，模拟煤层厚度原型为4.0 m，顶、底板岩层均为砂质泥岩，厚度为18 m。模型试验采用几何相似比为1:50，容重相似比1:1.8，则应力相似比为1:90。顶、底板岩层模拟采用砂、石膏和碳酸钙（配比号：455）制作，其单轴压缩强度为0.318 MPa，模拟的岩层强度为28.62 MPa；煤层模拟采用砂、石膏和碳酸钙（配比号：937）并添加一定比例的粉煤灰配比而成，强度为0.074 6 MPa，模拟的煤层强度6.72 MPa。试验用长40 mm、直径1.33 mm、拉断力为111 N的铝丝模拟锚杆，锚杆的间排距分别为12, 16和20 mm。打入锚杆之前在钻孔中注入HY-914胶（环氧树脂）以粘结锚杆，加长锚固，托盘用5 mm × 5 mm × 1 mm硬纸板。

### 1.2 加载试验步骤

根据现场实际情况，赵固一矿开拓巷道埋深600 m左右，铅垂应力为16.2 MPa。取侧压系数 $\lambda$ 为1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0。根据相似比，确定顶部及两帮加压大小。加载步骤：①模拟压力环境。堆砌模型，风干4~5 d后垂直荷载缓慢加载到位；②开挖巷道。将4条巷道一次逐步开挖完毕，并安装设计的模拟支护材料，稳压1~2 d；③阶梯加载。根据设计的水平应力与铅垂应力的比值，按照1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0的侧压系数依次加载水平应力。

在每一个应力水平加载结束之后，稳压1.5 h，记录巷道表面及其围岩的变形情况，测试巷道周边的应力分布。

### 1.3 结果分析

通过试验得到了一定垂直压力和不同水平压力情况下巷道的破坏情况和巷道周边应力和位移变化规

律, 以无支护和锚杆间排距 20 mm 支护 2 种情况进行对比分析.

### 1.3.1 不同水平应力作用下巷道的破坏形态

当侧压系数为 1.0 时, 无支护巷道围岩变形如图 2 所示. 无支护时, 巷道局部出现掉块现象, 而支护巷道则没有明显的变形.

当侧压系数为 1.5 时, 无支护时巷道顶、底板出现明显的松动变形, 顶板逐步产生离层掉落, 最终形成楔形变形, 顶板冒落的最大高度为 22 mm, 底板出现松动的最大高度为 29 mm, 而巷道两帮则没有明显变形; 锚杆间排距 20 mm 支护时, 顶板呈现整体破坏, 破坏的高度为 16 mm, 占顶板锚固范围的 40%, 两帮的变形仍不明显, 如图 3 (a) 所示.

当侧压系数为 2.0, 巷道无支护时, 巷道顶、底板变形严重, 顶板出现尖顶状冒落, 最大冒落高度为 37 mm, 底板可见明显的隆起, 底板松动的最深处为 50 mm, 其外轮廓线为一反拱形; 锚杆间排距 20 mm 支护时, 巷道顶、底板出现明显的松动变形, 顶板产生逐步离层冒落, 最大冒落高度为 27 mm, 底板产生挤压式错动, 其外轮廓线为反拱形, 其最大深度为 35 mm, 如图 3 (b) 所示.

当侧压系数为 2.5, 巷道无支护时, 巷道顶、底板变形严重, 顶板尖顶状冒落范围进一步扩大, 其最大高度位于顶板以上 50 mm, 其底板岩层出现褶皱状滑移变形, 外轮廓线反拱形的范围进一步扩大, 其最深处为 65 mm, 两帮也出现不同程度的片帮, 但与顶、底板比较来看, 两帮变形范围较小. 锚杆间排距 20 mm 支护时, 巷道顶板冒落为近似拱形, 拱的最大高度为 35 mm, 底板出现褶皱状鼓起, 滑移明显; 但外轮廓线仍为拱形, 拱的最大深度为 50 mm. 由于顶板的变形带来两帮的片帮严重, 最大片



图 2  $\lambda = 1.0$  时无支护巷道的破坏状态  
Fig. 2 Damage status of tunnel in  $\lambda = 1.0$

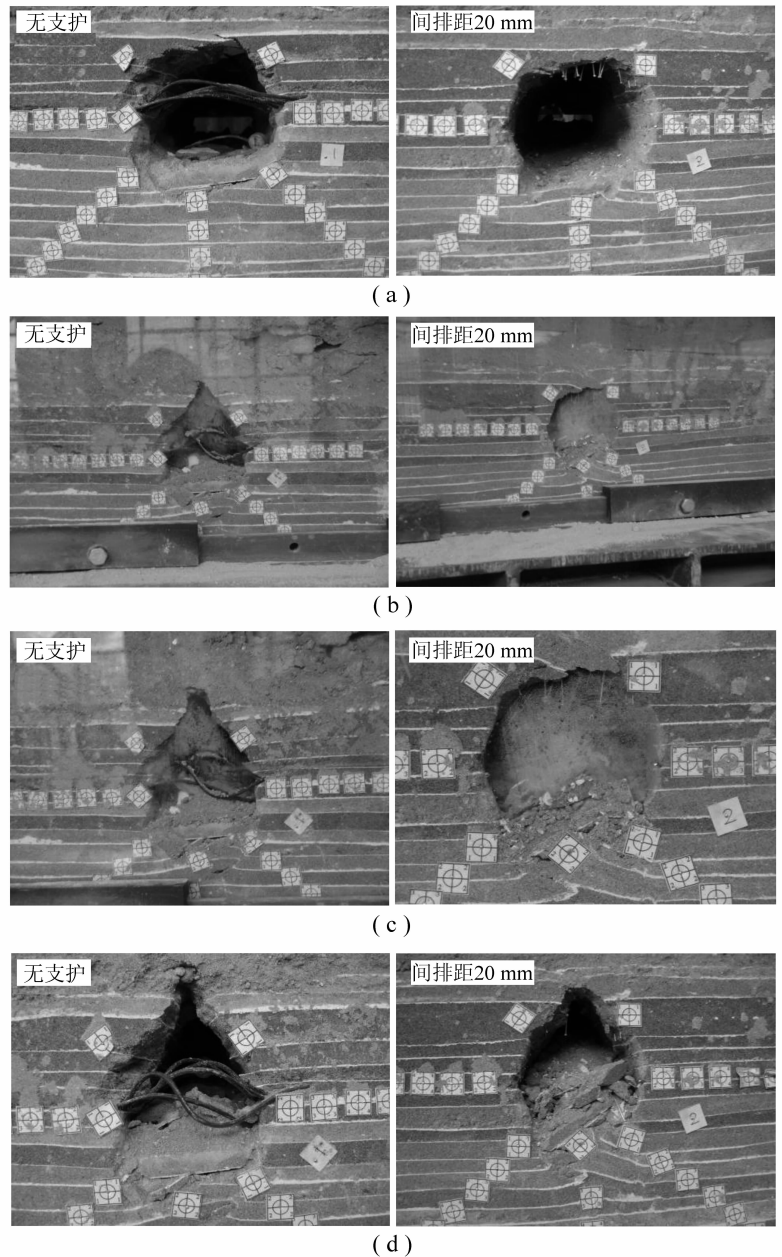


图 3  $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  时巷道的破坏状态  
Fig. 3 Damage status of tunnel in  $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$

帮深度为 25 mm，如图 3 (c) 所示。

当侧压系数为 3.0 时，巷道出现不同程度的破坏，无支护时巷道顶、底板变形严重，顶板尖顶状冒落范围进一步扩大，其最大冒落高度为 76 mm，底板最大松动深度为 80 mm。锚杆间排距 20 mm 支护时，巷道顶板锚固区全部垮落，之上出现楔形冒落。最大冒落高度为 45 mm，巷道底板岩层出现非常严重的鼓起，出现明显的剪切滑移破坏，如图 3 (d) 所示。

从以上变形破坏特征可以看出：① 随着侧压系数加大，水平应力提高，巷道无支护情况下顶板呈现楔形冒落，冒落高度逐步增加；底板出现剪切滑移破坏，破坏的外轮廓线呈反拱形，松动范围逐步扩展。② 随着侧压系数加大，水平应力提高，锚杆支护巷道顶板呈现层状整体垮落，到水平应力加大到一定程度后，锚固体全部垮落，之后，随着水平应力的增加，锚固区外亦呈现楔形冒落；底板的破坏形态与无支护时巷道底板破坏形态相同。③ 随着侧压系数加大，在水平应力作用下，两帮的破坏程度小于顶底板的破坏。

### 1.3.2 巷道周边位移分析

模型试验对巷道周边以及不同深度的围岩表面位移进行了观测，由于巷道顶板冒落、底板鼓起以及巷道两帮的变形，巷道表面位移的观测不连续。试验给出了巷道周围不同深度随着水平应力增加巷道围岩的位移变化。图 4 为顶板和一帮测线上位移随着侧压系数变化的情况。

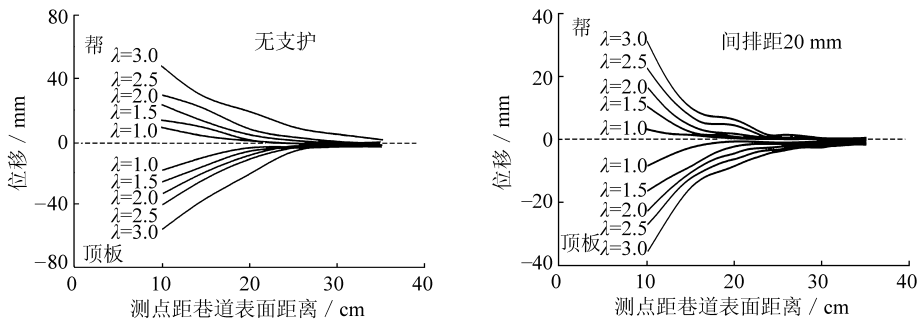


图 4 不同水平应力时巷道周边位移

Fig. 4 Displacement along surveying line of wall and roof in different horizontal stress

综合观测结果：① 在顶压和侧压相同时，巷道顶板、两帮位移相差不大，巷道稳定；随着侧压系数的增加，顶、底板位移明显增加，而两帮位移较小，说明顶、底板的破坏范围大于两帮。所以在高水平应力作用下顶、底板的控制是重点。② 无支护情况下，顶、底板位移相差不大。有支护时，巷道底板位移比顶板大。③ 对无支护巷道，在巷道围岩 30 cm 深处，位移变化不明显。巷道围岩位移随着距巷道表面距离的增加衰减很快。随着水平应力逐步增加，巷道周边围岩的移动范围增加缓慢；对支护巷道，在巷道围岩 15 cm 深处位移不明显。

### 1.3.3 巷道两帮支承压力分布

图 5 为锚杆间排距 20 mm 支护时，巷道两帮随着侧压系数加大，支承压力的变化规律。

从观测结果可以看出，随着侧压系数的增加，支承压力峰值由  $\lambda = 1.0$  时的 0.22 MPa 逐渐减小到  $\lambda = 3.0$  时的 0.20 MPa；距巷道表面距离逐渐增加，由 9.40 cm 增加到 39.54 cm；当侧压系数低于 2.0 时，在 0.2 ~ 0.3 m 范围内趋近原始应力，峰值作用范围距巷道周边 9.40 ~ 18.24 cm 处。当  $\lambda > 2.0$  时，由于相邻巷道支承压力的叠加，支承压力开始增加。

## 2 结 论

(1) 无支护矩形巷道在围岩应力作用下，随着水平应力的逐步加大，巷道顶板呈现楔形冒落，且冒落的范围逐渐增加。

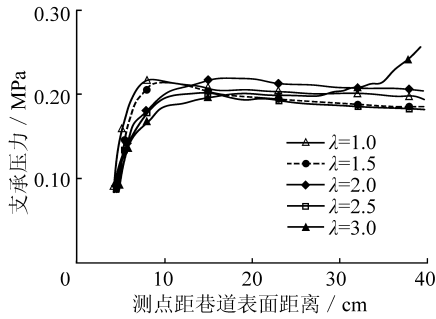


图5 巷道两帮支承压力分布规律

Fig. 5 Abutment pressure distribution in walls of tunnel

(2) 随着巷道水平应力的逐步提高, 锚杆支护矩形巷道顶板呈现层状整体垮落, 水平应力加大到一定程度后, 锚固体全部垮落, 之后, 随着水平应力的再增加, 锚固区外呈现楔形冒落。

(3) 随着水平应力的逐渐加大, 巷道顶、底板位移明显增加, 而两帮位移增加较小, 两帮的破坏程度小于顶、底板的破坏程度。

(4) 在水平应力作用下, 巷道底板出现剪切滑移破坏, 破坏的外轮廓线呈反拱形, 松动范围随着水平应力的加大逐步扩展。

## 参考文献:

- [1] Phillipson S E. Texture, mineralogy, and rock strength in horizontal stress - related coal mine roof falls [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 75 (3): 175 - 184.
- [2] Hongliang Wang, Maochen Ge. Acoustic emission/microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (5): 720 - 728.
- [3] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16): 2 803 - 2 813.  
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16): 2 803 - 2 813.
- [4] 孔德森, 蒋金泉. 深部巷道在构造应力场中稳定性分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2000 (4): 56 - 59.  
Kong Desen, Jiang Jinquan. Stability analysis of deep roadway in structural stress field [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000 (4): 56 - 59.
- [5] Zhao Chongbin, Hebblewhite B K, Galvin J M. Analytical solutions for mining induced horizontal stress in floors of coal mining panels [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 184 (1): 125 - 142.
- [6] 宋志敏, 程增庆, 张生华. 构造应力区软岩巷道围岩变形与控制 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005 (4): 48 - 50.  
Song Zhimin, Cheng Zengqing, Zhang Shenghua. Deformation and its controlling of soft rock tunnel in the tectonic stress area [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005 (4): 48 - 50.
- [7] 陈立伟, 唐 征, 田坤云. 构造应力对煤层巷道围岩稳定性的影响研究 [J]. 煤矿现代化, 2007, 76 (1): 38 - 39.  
Chen Liwei, Tang Zheng, Tian Kunyun. The research of effect of the tectonic stress to surrounding ground stability of coal bed tunnel [J]. Coal Mine Modernization, 2007, 76 (1): 38 - 39.
- [8] Brady B H G, Brown E T. 地下采矿岩石力学 [M]. 冯树仁, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [9] 单晓云, 梅海斌, 徐东强, 等. 在构造应力场中采动对底板运输巷道稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (12): 2 101 - 2 106.  
Shan Xiaoyun, Mei Haibin, Xu Dongqiang, et al. Mining-induced influences on stability of floor haulage roadway in tectonic stress field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (12): 2 101 - 2 106.
- [10] 张生华. 构造应力作用下软岩巷道变形与控制研究 [J]. 矿业工程, 2003, 1 (3): 14 - 18.  
Zhang Shenghua. Deformation and its control of tunnel surrounded by weak wallrock under condition of textural stress [J]. Mining Engineering, 2003, 1 (3): 14 - 18.