

孤岛工作面上覆岩层变形破坏规律相似试验研究

王锦山^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 河北科技师范学院 城市建设学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对平煤八矿孤岛工作面的实际开采条件,采用相似材料模拟试验的方法,研究了巷道掘进和工作面开采过程中上覆岩层的变形破坏规律,得到了孤岛工作面上覆岩层运动特征。分析结果认为,合理的巷道位置应布置在靠近采空区的应力降低区内,煤柱宽度取5~6 m为宜,不宜大于10 m。

关键词:孤岛工作面;上覆岩层;变形破坏;相似试验

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0006-06

Similar Test Research on the Law of Deformation and Failure of Overlying Strata in an Isolated Island Face

WANG Jinshan^{1,2}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Urban Construction, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: According to the actual mining conditions of an isolated island face in Pingdingshan 8 coalmine, the law of deformation and failure of overlying strata in the process of roadway driving and face mining was studied by using similar material simulation experiment research method, obtaining the movement characteristics of overlying strata of an isolated island face. The analysis concluded that the reasonable location of roadway should be allocated at the stress lowered zones and the coal pillar width should be 5~6 m, not larger than 10 m.

Key words: isolated island face; overlying strata; deformation and failure; similar test

随着煤矿资源的不断开采,采空区面积逐渐增加,开采难度逐渐加大,开采工作面环境日益恶化^[1-4],形成孤岛工作面的煤层,开采难度和强度更大,开采安全也更难保证^[2-3]。因此,研究孤岛工作面上覆岩层变形破坏规律,对于指导现场生产具有重要的应用价值。以往研究往往是根据现场支架受力监测结果,分析工作面来压显现规律,利用相似试验模拟孤岛工作面上覆岩层运动规律,再现孤岛工作面上覆岩层变形破坏过程比较少。而通过相似试验模拟其发生过程,对于现场安全生产具有重要意义。

本研究针对平煤八矿孤岛工作面实际开采情况,采用相似材料试验方法,对开采过程中上覆岩层变形和破坏过程进行分析,得到孤岛工作面上覆岩层运动特征以及合理的巷道布置和煤柱留设宽度。

1 相似原理

欲使模型与实体相似,必须满足各种对应量的比例关系并使各对应量所组成的数学物理方程相同^[5-7]。具体说来,要保证试验模型和实体模型在以下三方面相似。

收稿日期:2011-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51004061);河北科技师范学院博士科研启动基金项目(2009YB002)。

作者简介:王锦山(1966—),男,河北唐山人,教授,博士,主要从事地下工程稳定性分析与控制技术方面的研究。

E-mail:wjswlwgybkd@163.com.

1.1 几何相似

要求模型与原型的几何形状相似,为此,必须将原形的尺寸,包括长、宽、高等都按比例缩小或放大:

$$\alpha_L = \frac{L_H}{L_M} = \text{常数}, \alpha_L^2 = \frac{A_H}{A_M}, \alpha_L^3 = \frac{V_H}{V_M} \quad (1)$$

其中: α_L —原模型与模型长度比, L_H —原模型广义长度, L_M —模型广义长度, A_H —原模型面积, A_M —模型面积, V_H —原模型体积, V_M —模型体积。模型越大,越能反映原型的实际情况,但是由于各方面条件限制,一般取 $\alpha_L = 20 \sim 500$ 。

1.2 运动相似

要求模型与原型所有各对应点的运动情况相似,即要求各对应点的速度、加速度、运动时间等都成一定比例:

$$\alpha_t = \frac{t_H}{t_M} = \sqrt{\alpha_L} = \text{常数} \quad (2)$$

其中: α_t —时间比, t_H —原型运动所需时间, t_M —模型运动所需时间。

1.3 动力相似

要求模型与原型的所有作用力都相似,对于研究地层移动以及压力等问题,主要考虑重力作用,要求重力相似。

$$P_H = r_H \cdot V_H, P_M = r_M \cdot V_M, \frac{P_H}{P_M} = \frac{r_H}{r_M} \cdot \alpha_L^3 \quad (3)$$

其中: P_H —原模型作用力, r_H —原模型天然视密度, P_M —模型作用力, r_M —模型视密度。

在几何相似条件下,对动力相似还要求 r_H 、 r_M 的比尺 α_r 为常数, α_r 为视密度比尺,即

$$\alpha_r = \frac{r_H}{r_M} \quad (4)$$

由式(1)、式(2)、式(4)3个比尺 α_L 、 α_t 、 α_r ,根据各对应量所组成的物理方程式,还可推得位移、应变和应力等其它比尺:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{C_H}{C_M} = \frac{E_H}{E_M} = \frac{r_H}{r_M} \cdot \alpha_L, \varphi_H = \varphi_M, \mu_H = \mu_M \quad (5)$$

其中: α_σ —原模型与模型应力比; α_H —原模型应力; α_M —模型应力; C_H —原模型内聚力; C_M —模型内聚力; E_M —模型弹性模量; E_H —原模型弹性模量; ϕ_M —模型内摩擦角; ϕ_H —原模型内摩擦角; μ_M —模型泊松比; μ_H —原模型泊松比。

2 试验模型

2.1 模拟条件

模拟工作面可采走向长度为 1 051 m,倾斜平均宽 197 m,工作面煤层厚度为 3.7~4.8 m,平均 4.3 m,煤层倾角为 $9^\circ \sim 12^\circ$,平均为 10° ,煤层埋藏深度为 620.5~736.2 m,赋存整体稳定。基本顶为细砂岩,直接顶为砂质泥岩,距煤层顶板 2.2~8.8 m 为煤层(煤厚 0.6~0.9 m),直接底为泥岩及砂质泥岩,老底为砂质泥岩及粉砂岩,局部地段受断层影响,煤层顶底板破碎,裂隙发育。

2.2 模型尺寸及相似配比

1) 模型尺寸

工作面煤层平均厚度 4.3 m,煤层倾角 $9^\circ \sim 12^\circ$,平均 10° ,煤层埋藏深度 620.5~736.2 m,赋存整体稳定。基本顶为细砂岩,直接顶为砂质泥岩,直接底为泥岩及砂质泥岩,老底为砂质泥岩及粉砂岩,局部地段受断层影响,煤层顶底板破碎,裂隙发育。根据某煤矿孤岛工作面柱状图、岩石物理力学性质等有关地质采矿资料以及框架系统的几何尺寸,依据相似条件试验原理,确定与研究对象和研究任务相适应的相似比,其中几何比为 1:200,容重比为 1:1.7,强度比为 1:340,时间比为 1:14。

2) 相似材料配比

试验模型选择硅砂作为骨料,石灰、石膏作为胶结物。实际煤岩层分布极其复杂,各层的厚度也不相同,煤岩层共分为40层,不同的煤岩层为12种,使用不同的材料配比相似实际煤岩层强度。由于各煤岩层在相似模型中厚度较小,且相同岩性分布在不同的位置,因此,在模型中标注比较困难。按照相似比例制作模型如图1所示,各层材料配比见表1。

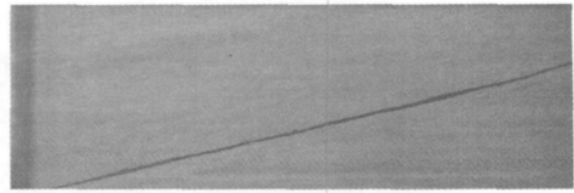


图1 相似材料试验模型图

Fig. 1 The model of similar material experiment

表1 相似材料配比表

Table 1 The proportions of similar materials

配比号	材料配比(质量比)				抗压强度/ ($\times 10^{-2}$ MPa)	抗拉强度/ ($\times 10^{-2}$ MPa)	视密度/ (g/cm^3)	备注
	砂:胶	胶结物		水/总重				
		石灰	石膏					
337		0.3	0.7	1/9	36.80	4.400	1.5	
355	3:1	0.5	0.5	1/9	25.20	2.800	1.5	
373		0.7	0.3	1/9	14.12	1.900	1.5	
437		0.3	0.7	1/9	28.70	2.900	1.5	
455	4:1	0.5	0.5	1/9	21.41	2.500	1.5	
473		0.7	0.3	1/9	13.43	2.500	1.5	采用硅砂
537		0.3	0.7	1/9	17.71	2.860	1.5	
555	5:1	0.5	0.5	1/9	13.65	1.960	1.5	
573		0.7	0.3	1/9	6.89	0.970	1.5	
637		0.3	0.7	1/9	3.17	0.420	1.5	
655	6:1	0.5	0.5	1/9	0.90	0.086	1.5	
673		0.7	0.3	1/9	0.76	0.064	1.5	

2.3 试验设备和测点布置

试验设备主要由框架系统、加载系统和测试系统组成。框架系统规格为长 \times 高 \times 宽=5 m \times 0.3 m \times 2 m的平面应力模型试验台,根据模型中煤层倾斜特点,采用杠杆加载方式,加载力大小呈三角分布。观测方法包括压力传感器连续监测法、直接量测法。压力传感器连续监测法是将压力传感器埋入模型中设计位置,监测开采过程中煤岩层应力变化情况,采用网格法测量位移测点变形量。

孤岛工作面煤层底板1 cm处布设一排44个压力测点,压力传感器编号从右到左依次为1—44。其中,第1测点距离工作面回风巷2.5 cm,各个测点间距为2.5 cm。为准确获得三带发育高度、裂隙的分布规律,沿岩层倾斜方向设置多层位移观测点,模型设置9层306个观测点,观测点间排距为10 cm \times 10 cm,第1层位于煤层上方5 cm处。各测点布置情况如图2所示。

3 结果与分析

3.1 孤岛工作面开采过程分析

工作面倾斜向上推进46 m时工作面上覆垮落岩层厚度为4 m,且较破碎,工作面继续推进过程中上覆岩层垮落的厚度与长度逐渐增加,横向离层裂隙与纵向破断裂隙比较发育^[5,7]。从图3可以看出,工作面推进160 m时,老顶岩层垮落高度为20 m,垮落长度为130 m。

从图4可以看出,孤岛工作面开采完毕后,上覆岩层垮落形成的新采空区与两侧已经形成的采空区连通

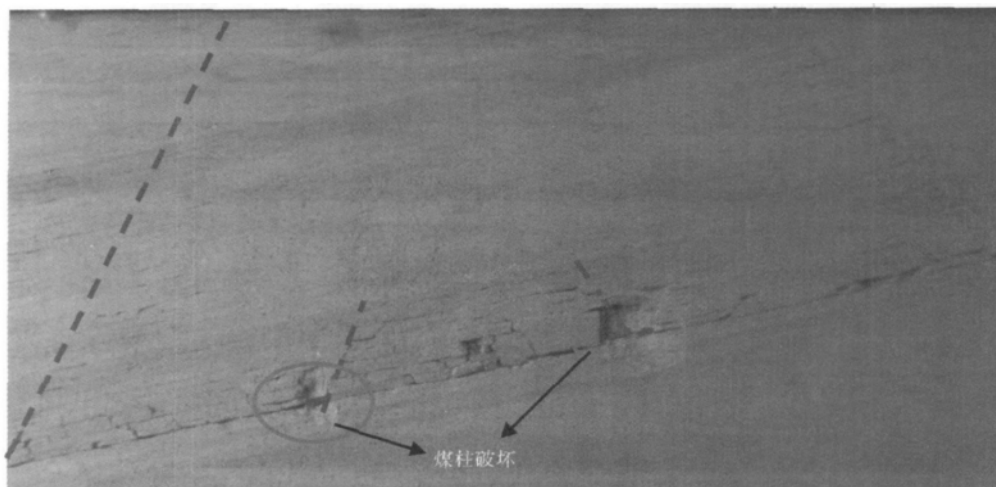


图4 工作面开采完毕时覆岩垮落状况图

Fig. 4 The falling situation of overlying strata after the face mining

3.2 上覆岩层变形规律分析

孤岛工作面开采完毕后,其上覆岩层垮落形成的新的采空区与两侧已经形成的采空范围连通成一个整体,导致整体上覆岩层断裂高度迅速扩大至模型上边界,各岩层整体下沉,其中第一、第二、第三条测线下沉量 3.5~4.1 m,第三条测线以上各岩层下沉量相对较小,在 3.1~3.5 m 范围内,各测线间下沉量相差较小,且同一岩层测点下沉量分布较均匀,表明孤岛工作面开采后,各个工作面采空区上覆破断岩层连通后,呈协调统一运动,岩层与岩层之间的离层不发育;从裂隙分布规律上来看,裂隙主要分布在新形成的大范围采空区两侧的岩层断裂线附近,而在大范围采空区内部与开采后形成的破断裂隙与离层裂隙基本被压实闭合^[5,7]。图 5 为工作面开采后各测点下沉量结果。

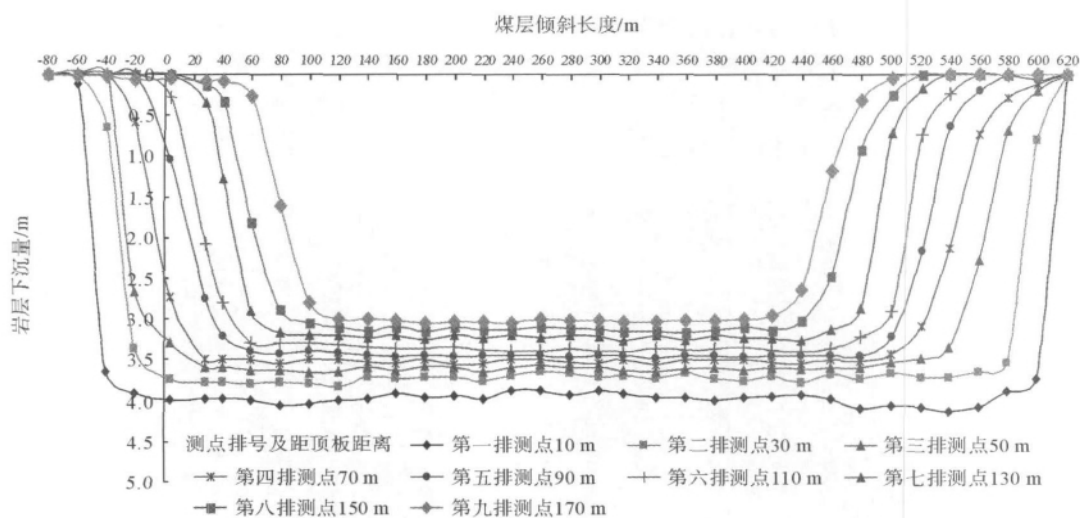


图5 工作面开采后各排测点下沉量图

Fig. 5 The convergences of the monitoring points after face mining

3.3 上覆岩层应力变化特征分析

图 6 和图 7 分别为工作面上、下两巷掘进后各应力测点的变化曲线图。由两图可以看出,工作面上、下两巷掘进后,上下区段煤柱的应力测点(1号与44号)的应力集中系数分别上升至 2.2 与 2.1,而位于两煤柱

边缘的 2 号与 43 号测点应力集中系数分别下降到 0.6 与 0.7^[8]。说明工作面两巷掘进后,改变了煤柱附近的应力分布规律,致使上、下区段煤柱中间处于应力集中状态,边缘处于残余应力状态,巷道变形量较大。虽然处于应力集中状态,但是在没有工程扰动或是应力的突然上升或下降及地质构造的影响时,上、下区段煤柱会保持相对的稳定,即亚稳定状态。

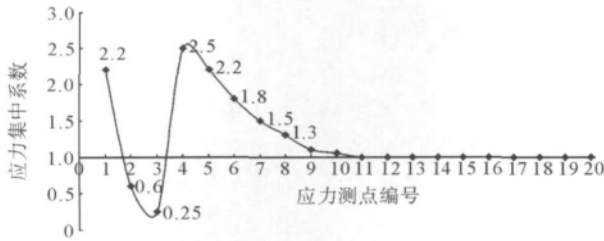


图 6 工作面掘进回风巷后应力测点变化曲线图
Fig. 6 The curves of stress measuring points after driving the face return airway

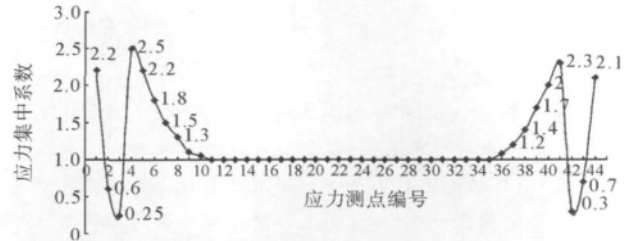


图 7 工作面掘进进风巷后应力测点变化曲线图
Fig. 7 The curves of stress measuring points after driving the face intake airway

图 8 为工作面沿倾斜方向向上推进 204 m 时各个应力测点的应力曲线图。由于工作面倾斜推进完毕后,三个工作面采空区上覆破断岩层连通,破断岩层瞬时大面积移动,致使上、下区段煤柱发生冲击破坏^[8],因而位于工作面上区段保护煤柱中心的 43 号应力测点未监测到致使煤柱失稳破坏的最大应力值,而进风巷侧煤柱测点的应力集中系数为冲击破坏前的最大值。上、下区段处测点应力集中系数达到 3.5,在如此高的应力集中程度下,上、下区段煤柱边缘侧煤体在无支护条件下,煤体强度降低至最低,区段煤柱处于失稳的临界状态。而主关键层断裂后上覆岩层大面积运动带来巨大能量^[9],从而导致区段煤柱发生瞬时冲击破坏^[6]。根据上覆岩层应力分布和实际煤柱留设宽度可知,合理的巷道位置应布置在靠近采空区的应力降低区内,煤柱宽度取 5~6 m 为宜,不宜大于 10 m。

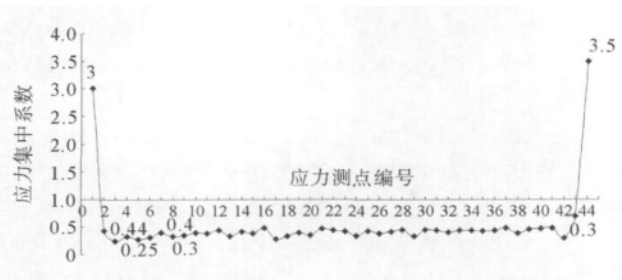


图 8 工作面开采完毕后应力测点变化曲线图
Fig. 8 The curve of stress measuring points after completion of the face mining

4 结论

通过对某煤矿孤岛工作面上覆岩层变形破坏规律的相似试验研究,得到以下主要结论:

1) 孤岛工作面开采完毕后,三个工作面采空区上覆破断岩层连通,破断高度急速上升至模拟上边界,其上覆岩层与两侧采空区的上覆岩层的重量几乎全部转移至孤岛工作面两侧的煤柱上,致使煤柱在巨大的载荷作用下发生冲击破坏。

2) 根据上覆岩层应力分布可知,合理的巷道位置应布置在靠近采空区的应力降低区内,煤柱宽度取 5~6 m 为宜。该范围内压力已基本释放,开巷时应力扰动程度最低,不会出现因压力集中而产生破坏现象,对巷道维护是有利的。

参考文献:

[1] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001.

[2] 袁志刚,王宏图. 急倾斜多煤层上保护层保护范围的数值模拟[J]. 煤炭学报,2009,34(5):594-598.

YUAN Zhigang, WANG Hontu. Numerical simulation for protection scope of upper protective seam in steeply inclined multi-coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 594-598.

(下转第 21 页)

4)除了调节参数可以提高富集煤矿乏风瓦斯的效果外,通过减小节流子孔径也可以有效提高产品气中甲烷的体积分数,随着节流子孔径的减小而逐步增大。当节流子孔径为 0.4 mm 时,吸附压力可以达到 284.45 kPa,产品气甲烷体积分数可以上升到 0.717%,为原料气甲烷体积分数的 2.4 倍多。但随着压力的升高,相应的能耗也将成倍增加。因此,要根据合理的能耗指标选取合适的节流子孔径。

参考文献:

- [1]崔乐雨,张东辉,苏伟,等. 变压吸附法回收氮气中的微量甲烷:实验与模型[J]. 天然气化工,2008,33(6):1-5.
CUI Leyu,ZHANG Donghui,SU Wei,et al. Recovery of trace methane from nitrogen by PSA:experiment and model[J]. Natural Gas Chemical Industry,2008,33(6):1-5.
- [2]崔荣国. 国内外煤层气开发利用现状[J]. 国土资源情报,2005(11):22-26.
CUI Rongguo. Exploring and utilizing situation of coalbed methane at home and abroad[J]. Land and Resources Information,2005(11):22-26.
- [3]KRZYSZTOF W,MAREK T. Multicomponent pressure swing adsorption part modelling of large-scale PSA installations [J]. Chemical Engineering and Processing,1997,36:89-99.
- [4]鲜学福. 我国煤层瓦斯渗流力学的研究现状及进一步发展和应用的展望[R]. 重庆大学:矿山工程物理研究所,1997.
- [5]辜敏. 提高抽放煤层气中甲烷浓度的变压吸附基础研究[D]. 重庆:重庆大学,2000.
- [6]刘应书,李永玲,张辉,等. 煤矿低浓度瓦斯及其分离富集技术[J]. 气体分离,2010(1):53-59.
- [7]DELGADOA J A,RODRIGUESB A E. Analysis of the boundary conditions for the simulation of the pressure equalization step in PSA cycles[J]. Chemical Engineering Science,2008,63(18):44-52.
- [8]辜敏,鲜学福. 提高煤层气甲烷浓度的吸附剂的选择研究[J]. 矿业安全与环保,2006,33(3):11-13.
GU Min,XIAN Xuefu. Selective study on adsorbent for improving coal-bed methane concentration[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2006,33(3):11-13.

(上接第 11 页)

- [3]缪协兴,孙海,吴志刚. 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(4):428-431.
MIAO Xiexing SUN Hai,WU Zhigang. Mechanism analysis of rockburst in softrock mines in eastern of Xuzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1999,18(4):428-431.
- [4]窦林名,陆菜平,牟宗龙,等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报,2005,30(5):690-694.
DOU Linming,LU Caiping,MU Zonglong,et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society,2005,30(5):690-694.
- [5]张健全,闫保金,廖国华. 采动覆岩移动规律的相似模拟实验研究[J]. 金属矿山,2002(8):10-12.
ZHANG Jianquan,YAN Baojin,LIAO Guohua. Study on the rules of the overlying rock movement by equivalent material simulation[J]. Metal Mine,2002(8):10-12.
- [6]李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1987.
- [7]刘德乾,姜振泉,冯海英,等. 深埋煤层开采覆岩压力变化的相似材料试验研究[J]. 矿业研究与开发,2010,30(1):29-32.
LIU Deqian,JIANG Zhenquan,FENG Haiying,et al. Study on the pressure chang of overlying rock in mining of deep buried coal seam by similar material simulation experiment[J]. Mining Research and Development,2010,30(1):29-32.
- [8]温国惠,李秀山,浦志强,等. 孤岛煤柱膏体充填开采覆岩运动规律研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):46-50.
WEN Guohui,LI Xiushan,PU Zhiqiang,et al. Study on the law of overburden movement during isolated coal pillar mining with paste Filling[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(4):46-50.
- [9]王庆照,蒋升,司马俊杰. 厚煤层重复采动覆岩破裂发育规律研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):67-71.
WANG Qingzhao,JIANG Sheng,SIMA Junjie. Study on fracturing and development rules of overlying strata under repeated mining in thick coal[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(4):67-71.