

# 大倾角煤层工作面采场围岩矿压分布规律光弹性 模量拟模型试验及现场实测研究

尹光志<sup>1,2</sup>, 李小双<sup>1</sup>, 郭文兵<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;  
3. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南, 焦作 454003)

**摘要:** 以平煤集团香山矿戊 9-0-22090 大倾角煤层工作面为工程背景, 通过室内光弹性模拟模型试验和工作面现场矿压实测, 对大倾角煤层工作面开采后采场围岩矿压分布规律进行研究。光弹试验和现场实测结果表明: 倾角对煤层工作面开挖后采场围岩应力分布、支撑压力的分布有显著影响。大倾角煤层工作面开采后, 采场顶板岩层的变形、破坏和运动形式不同于一般缓倾斜煤层工作面, 采场支架载荷的分布、来压显现程度、来压步距沿采场倾斜方向均不同。工作面煤层开采后, 采场顶板应力分布是高度不均匀、不对称的, 在采空区两侧保护煤柱角高度集中, 形成支撑压力区, 采空区上方形成支撑卸压区。采场顶底板应力释放, 两侧煤柱出现应力集中, 采场四个角部位出现较大剪应力。剪切应变主要出现在采场下端部顶板和上端部的底板, 而体积应变主要出现在煤层较近顶板和两侧煤柱。研究成果, 对香山矿和类似条件下大倾角炮采煤层工作面的开采和顶板的支护的优化和管理具有一定的指导意义。

**关键词:** 采矿工程; 矿压; 大倾角; 光弹性模量拟模型试验; 现场观测; 采场围岩

**中图分类号:** TD 313

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2010)增 1-3336-08

## PHOTO-ELASTIC EXPERIMENTAL AND FIELD MEASUREMENT STUDY OF GROUND PRESSURE OF SURROUNDING ROCK OF LARGE DIP ANGLE WORKING COALFACE

YIN Guangzhi<sup>1,2</sup>, LI Xiaoshuang<sup>1</sup>, GUO Wenbing<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

**Abstract:** Based on the large dip angle coal working face of WU9-0-22090 of Xiangshan mine of Pingdingshan Coal and Electricity Co., Ltd., the ground pressure distribution laws of surrounding rock is studied through photo-elastic stimulation experiment and field measurement after coal mining. The research results show that the angle has an important effect on the distribution of the stress and bearing pressure of surrounding rock after coal mining, the deformation behavior, destroy characteristic and moving laws of stope roof of large dip angle coal

**收稿日期:** 2009-04-10; **修回日期:** 2009-05-13

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50874124); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221502); 国家自然科学基金重点项目(50534080); 重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA6028)

**作者简介:** 尹光志(1962-), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学资源及环境科学学院采矿工程专业, 现任教授、博士生导师、重庆大学资源及环境科学学院院长, 主要从事采矿工程与安全工程方面的教学与研究工作。E-mail: gzyin@cqu.edu.cn

working face are different with usual inclined working coal face; and the distribution of prop loading, the weighting presentation degree and the weighting distance are all different along the inclination of stope, and the distribution of roof stress is high nonuniform and asymmetrical. The roof stress is apparently concentrated in the two sides protected pillars' corner of goaf; then the bearing pressure region is formatted; and the pressure relieved region in the goaf of coal working face is also generated. The stress of stope roof relieved and the stress of two sides protected pillars are high concentrated; the shear stress of the four corners of stope apparently increased. And the shear strain mainly appeared in the roof of the low part of coalface and the floor of the upper part of coalface; the bulk strain is mainly focused in the adjacent coal roof and the two sides protected pillars. The research results are of significance in coal mining and roof management and enhancement of Xiangshan and similar coal mines.

**Key words:** mining engineering; ground pressure; large dip angle; photo-elastic stimulation experiment; field measurement; surrounding rock

## 1 引 言

大倾角煤层占全国 15%~20% 的储量, 在我国西部矿区如: 主要产煤省(区)的四川、重庆、云南、贵州、新疆、甘肃、宁夏等, 大倾角煤层是许多矿区或矿井的主采煤层。大量的工程实践表明, 大倾角煤层开采后, 采场顶板岩层的变形、破坏、运动形式(包括沿层面的运动和垂直层面的下沉运动)不同于缓斜煤层, 由于倾角和采长的影响, 采场围岩在开采运动中形成的结构也有各自特点。21 世纪随着我国中东部煤炭资源的逐渐枯竭, 煤炭资源开采重心逐步西移, 开展大倾角煤层工作面开采的理论与技术研究意义重大。

大倾角煤层开采的研究源于急倾斜煤层, 国内外学者在此方面作了一定的工作, 相关的研究内容涉及大倾角煤层开采工艺、设备、开采灾害、采场围岩控制等几个方面, 如: 张俊英<sup>[1]</sup>对大倾角多煤层条带开采进行了三维有限元模拟研究。员东风和伍永平<sup>[2]</sup>对大倾角煤层综采工作面调伪仰斜的原理与方法进行相关研究; 尹光志等<sup>[3]</sup>运用实验室相似模型试验和 FLAC 程序, 对南桐煤矿二井三区煤层开采引起的岩体移动、矿山压力分布和地表沉陷的基本规律进行了研究; 黄建功<sup>[4]</sup>根据大倾角煤层采场矿压显现特点, 对采场顶板岩层的运动、破坏形式进行了研究; 来兴平等<sup>[5]</sup>综合分析了大倾角特厚煤层综采放顶煤工作面关键位置的煤岩力学性态、支架受力的模态、开采过程煤岩运动规律和应力分布规律; 林忠明等<sup>[6]</sup>从静力学角度对大倾角条件下综采开采液压支架抗倾覆、滑移、扭斜稳定进行了分析; 伍永平<sup>[7]</sup>基于 W & Kane 原理, 利用 Lagrange

动力学理论, 得到“R-S-F(顶板-支护-底板)”系统动力学一般方程; 戴华阳等<sup>[8]</sup>运用相似材料模型试验, 对某矿急倾斜特厚大倾角煤层深部开采岩层与地表移动规律进行了系统研究; 赵元放等<sup>[9]</sup>采用 FLAC<sup>2D</sup> 模拟了煤层开采过程中的顶板垮落和围岩应力分布特征; 伍永平等<sup>[10]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 对东峡煤矿大倾角煤层群走向长壁开采进行了数值模拟研究; 李伟等<sup>[11]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 分析了放顶煤采场覆岩与顶煤的应力场特征、端面顶煤的破坏规律以及位移特征; 袁永等<sup>[12]</sup>对大倾角煤层开采中支架下滑、倾倒、尾部受扭 3 种主要失稳方式的机制进行了研究。

目前关于综采特别是综放大倾角煤层工作面开采采场围岩矿压分布规律相关研究较多, 但涉及到中厚煤层的炮采工作面整体较少, 且由于不同矿井煤层赋存采矿地质条件不同, 开采方法各异, 深入系统开展相关研究工作需持续进行, 以满足现场工程的技术需求。平煤集团香山矿戊 9-0-22090 属于炮采工作面, 2006 年 4 月开始回采, 工作面西起 -250 水平井底车场, 东至十一矿 16080 采面切眼(相距 25 m), 下限标高 -42 m。地面标高 +110~+130 m。有效走向长为 400 m, 倾斜长为 75~100 m, 平均为 88 m, 有效面积为 37 437 m<sup>2</sup>。根据掘进时揭露的情况分析, 该煤层结构简单, 厚度稳定。煤层倾角为 35°~53°, 平均为 44°, 煤层厚度 2.2~3.0 m, 平均为 2.4 m, 具有大倾角的特点。本文以该大倾角煤层工作面为工程背景, 通过光弹性模拟模型试验和现场实测研究, 对其开采过程中采场围岩矿压分布规律进行系统研究, 研究成果对现场类似条件下大倾角煤层的安全高效开采具有重要指导意义。

## 2 光弹性模量拟模型试验

光弹性模量拟方法具有模型制作方便、灵敏度高、成本低、试验结果直观性强等优点，可直接观测到研究对象的应力分布和应力集中状态。采用软光弹材料便于模拟岩层自重和不同性质的岩层，因此采用它模拟大倾角煤层工作面采场围岩内部应力分布和集中状态是比较理想的方法之一<sup>[13-16]</sup>。本次试验主要研究不同煤层倾角下，戊9-0-22090大倾角工作面采场围岩应力分布及变化规律。

### 2.1 试验模型设计

光弹性模量拟试验中模型的设计非常重要。一方面要对实际原有模型进行合理的简化，另一方面要尽可能地保持模型与原型的相似性。本次试验以戊9-0-22090工作面为蓝本，通过改变煤层的倾角，研究煤层开采时采场顶底板应力场随煤层倾角的变化规律。经过分析，设定了3种倾角，即煤层倾角分别为 $\alpha = 35^\circ, 45^\circ$ 和 $55^\circ$ ，分别进行光弹性模拟试验研究。

#### (1) 原型的选取及简化

试验原型为戊9-0-22090工作面，依据现场收集资料，将模拟岩层划分为煤层底板、煤层、煤层顶板三大区域。由于试验的模型尺寸限制，煤层顶板以上部分无法模拟到地表，通过施加相应比例的载荷来实现上覆岩层的作用。各岩层的物理力学参数见表1。

表1 各岩层的物理力学参数

岩层名称	弹性模量 /MPa	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	备注
顶板	20 073.3	1.787	
煤层	17 600.0	1.400	煤层厚度为 2.4 m，工作面开采的起始位置-250 m 水平，工作面采场 88 m
底板	18 657.4	1.590	

#### (2) 相似条件的确定

根据相似理论<sup>[14]</sup>确定3个模型的相似常数，见表2，模型模拟原型各分层特征值见表3。

表2 3个模型的相似常数

几何相似常数	密度相似常数	载荷及应力相似常数	弹性相似常数
250	1.30	2 000	2 000

表3 模型各岩层的物理力学参数

岩层名称	弹性模量 /MPa	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	备注
顶板	1.120	1.144	各分层物理力学参数遵守表2的相似比值
煤层	0.982	1.078	
底板	1.041	1.225	

#### (3) 模拟模型的边界条件

在模型的设计过程中尽可能保证模型的边界条件与原型的边界条件一致。试验中，3个模型采用同样的边界条件，模型底部采取位移边界条件，四周在水平方向约束，竖直方向无约束，如图1所示。

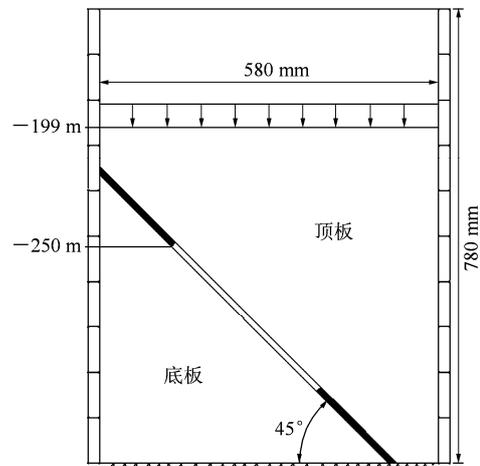


图1 模型尺寸及边界条件示意图

Fig.1 Size and boundary condition of models

#### (4) 模型材料的选取

根据相似理论，在配制模型材料时，改变明胶、甘油和水的配比，从试验材料上保证模型与原型的相似。模型各地层采用的软胶成分及性能参数见表4。

表4 各模型材料成分及性能参数

岩层名称	材料质量配比/%			密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量 /kPa	应力光学常数	材料条纹值
	明胶	甘油	水				
顶板	35	15	50	1.144	1 120	5 775	45.50
底板	35	25	40	1.225	1 041	5 600	55.25

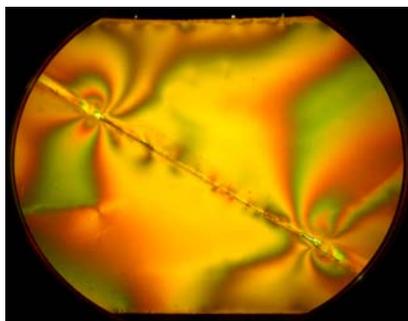
#### (5) 模型的加载

自行设计加工了一套简易加载设备，根据研究对象的特点，选择相应的载荷及应力相似常数。试

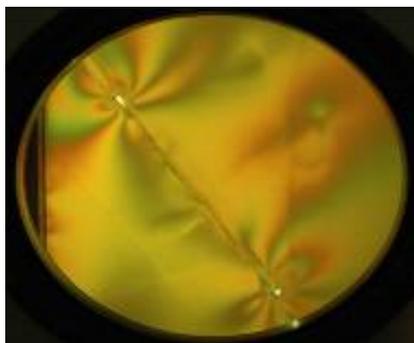
验所用的模型架规格为 580 mm×780 mm, 几何相似比为 250, 容重相似比为 1.30, 载荷相似比为 2 000。保持 3 个模型中工作面采场上侧保护煤柱的最低点 -250 m 水平不变, 模型中煤层厚度为 26 mm, 工作面采长均为 88 m。模型加载后, 静置一昼夜, 使之保持稳定后再进行观测, 否则因模型蠕变使观测结果不准确。

### 2.2 光弹性模量拟模型的观测

将加载稳定后的模型放在 PA - 420 光弹性仪上进行观测, 采用摄影的方法将模型的应力条纹图记录下来。图 2~4 分别为煤层倾角等于 35°, 45°和 55°时的记录照片。为了便于应力的分析计算, 绘出 3 个方案模型的等差线及等倾线图。图 5(a)~(c)分别为 3 种倾角时应力条纹, 条纹级数表示主应力差 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) 相等点的轨迹, 主应力差与条纹级数成正比。



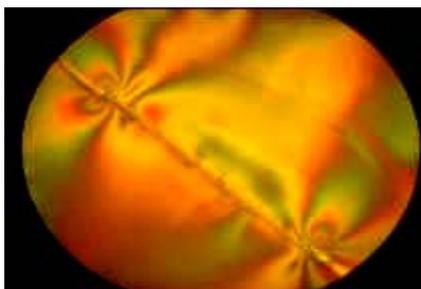
(a) 工作面开采后的整数级条纹图



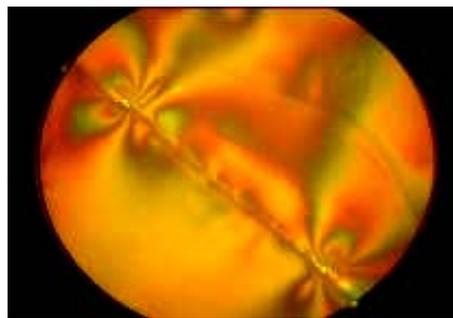
(b) 工作面开采后的半数级条纹

图 2  $\alpha = 35^\circ$ 模型的等差线图

Fig.2 Model isochromatic patterns when the coal seam's angle is  $35^\circ$



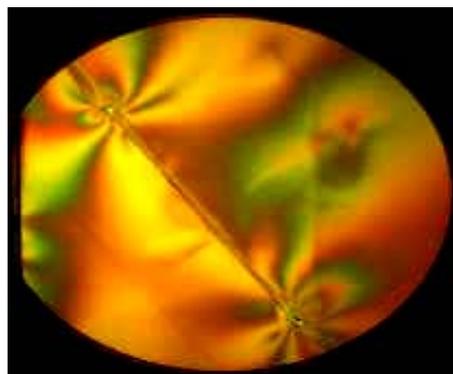
(a) 工作面开采后的整数级条纹图



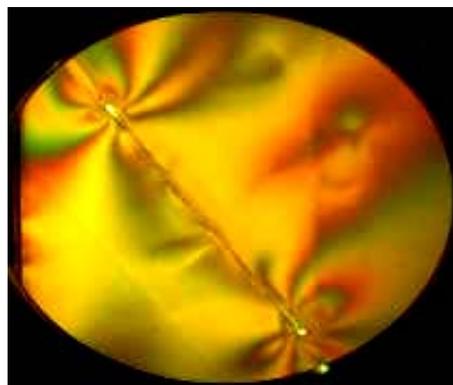
(b) 工作面开采后的半数级条纹

图 3 煤层倾角等于  $45^\circ$ 模型等差线图

Fig.3 Model isochromatic patterns when the coal seam's angle is  $45^\circ$



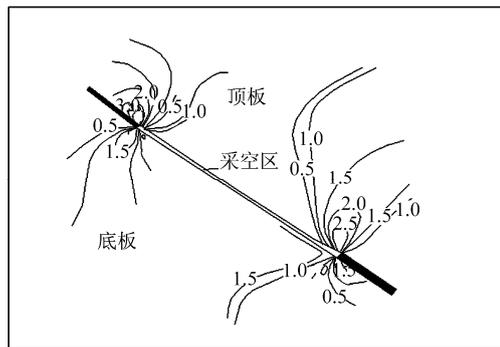
(a) 工作面开采后的整数级条纹图



(b) 工作面开采后的半数级条纹

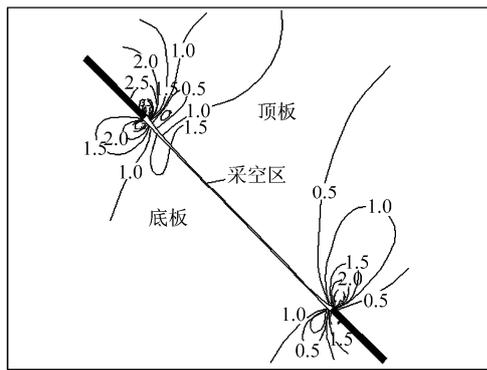
图 4  $\alpha = 55^\circ$ 模型的等差线图

Fig.4 Model isochromatic patterns when the coal seam's angle is  $55^\circ$

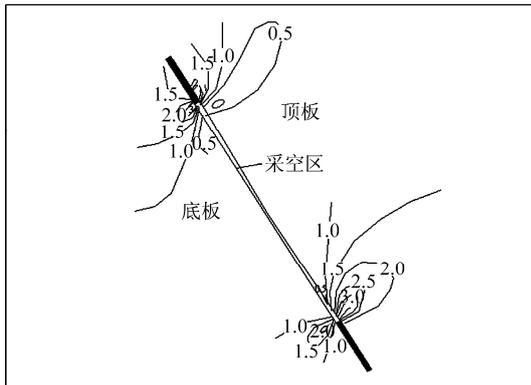


(a) 倾角为  $35^\circ$

(a) 倾角为  $35^\circ$



(b) 倾角为 45°



(c) 倾角为 55°

图 5 模型的等差线描绘图

Fig.5 Copied model isochromatic patterns

### 2.3 试验结果分析

从不同倾角光弹模拟模型的应力条纹图 2~4 和等差线描绘图 5, 并结合相关矿压理论可以分析得出:

(1) 大倾角煤层工作面开采后, 沿倾斜方向在工作面采场上覆岩层中形成非对称性的压力拱, 该压力拱具有传力、承载功能; 该结构拱的一个拱脚位于采空区上侧煤柱上, 另一个拱脚位于采空区下部冒落充填矸石上。由此带来的结果是, 在大倾角、大采长工作面上下两侧顶底板中出现了明显的应力集中的剪切滑移区, 该区域的存在加大了大倾角工作面上部及回风平巷端头的支护困难, 因此是岩层控制的重点区域, 需要确保该区域支架的强度和稳定性。

(2) 大倾角煤层工作面开采后, 采场顶底板应力释放, 两侧煤柱出现应力集中, 采场 4 个角部位出现较大剪应力。剪切应变主要出现在采场下端部顶板和上端部的底板, 而体积应变主要出现在煤层较近顶板和两侧煤柱。

(3) 大倾角煤层工作面开采后, 采场上方岩体荷载向两侧岩体和煤柱转移, 在采空区两侧保护煤

柱角处出现应力高度集中的现象, 形成支承压力区, 而采空区上方形成压力卸载区。采空区上下两侧顶底板应力值明显小于采空区两侧保护煤柱角上下两侧顶底板应力值, 采空区上侧保护煤柱上下两侧顶底板应力值和应力集中程度高于采空区下侧保护煤柱上下两侧顶底板应力值和应力集中程度, 并且随着煤层倾角由 35°变化到 45°, 55°, 这种差异有扩大的趋势, 具体情况见表 5。

表 5 模型采场顶板条纹级数  $n$  值变化表

Table 5 Stripe rank of models' stoppe roof

方案	条纹级数 $n$ 值		
	采场上边界 保护煤柱上方	工作面 采空区上方	采场下边界 保护煤柱上方
$\alpha = 35^\circ$	3.0	1.0	3.5
$\alpha = 45^\circ$	4.0	1.0	4.5
$\alpha = 55^\circ$	3.0	0.5	4.0

## 3 现场工程实测

### 3.1 观测方案

(1) 观测内容

① 工作面支柱载荷观测。

② 工作面超前单体液压支柱载荷观测。

③ 工作面回风巷顶底板及两帮移近量、移近速度观测。

(2) 测站布置及观测方法

① 工作面测站布置及观测方法: 沿工作面长度方向自上而下布设 I, II, III 三个观测站, I, III 两测站距工作面端头长度为 10 m, II 测站位于工作面中部, I, II 设置 2 条观测线, II 测站设置 3 条观测线。支柱载荷用压力表观测, 将压力表与单体支柱液压腔导通, 即可从压力表读出液压腔压强, 由  $F = PS$  得到支柱的工作阻力。

② 工作面回风巷测站布置及观测方法: 对超前支撑液压支柱载荷和巷道的表面变形进行观测。巷道测点布置方法为单十字布点法。由煤壁开始每 5 m 布置一组顶底及两帮变形量测点, 本次在上风巷内设 10 对测点, 研究范围为距离煤壁 50 m。顶底板移近量用测杆测取, 两帮移近量用测枪读取。超前支护单体支柱工作阻力每 2 m 设一测点, 用压力表测读。距煤壁 20 m 以内测双排柱, 20 m 以外测单排柱即可。

### 3.2 实测结果及其分析

大倾角工作面矿压测试结果见表 6 所示, 图 6 列出了工作面单体液压支柱平均工作阻力的分布情况; 图 7~10 给出了大倾角工作面回风巷道各测点顶底板变形情况和超前单体液压支柱的受力情况, 因篇幅有限, 列出其中具有代表性的部分测点整理后结果。

表 6 工作面矿压实测结果

Table 6 Field measurement of rock pressure of work face

测站序号	来压步距 /m	来压前平均载荷/kN	来压时平均载荷/kN	平均来压动载系数 K
I	27	86.758	109.31	1.26
II	20	100.510	162.63	1.62
III	26	137.610	205.75	1.50

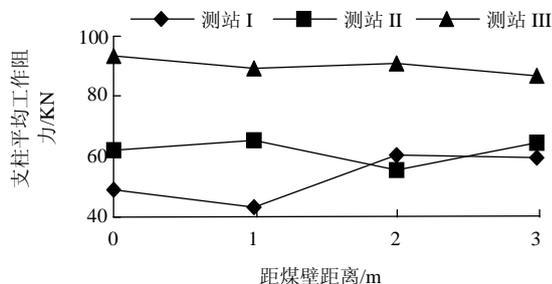


图 6 工作面平均工作阻力的分布

Fig.6 Distribution of prop working resistance in working face

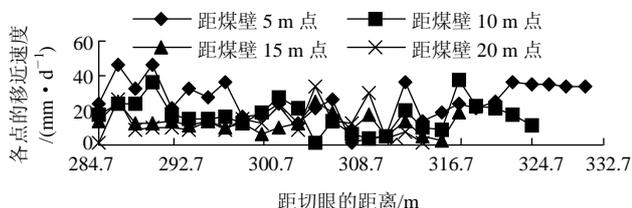


图 7 巷道各测点顶底板移近速度与工作面推进距离的关系  
Fig.7 Relationship between the advanced distance of coal face and the moving velocity of roof and floor of the test points in roadway

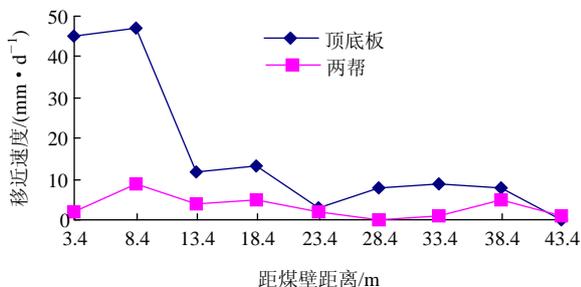


图 8 巷道各测点顶底板和两帮平均移近速度与工作面推进距离的关系

Fig.8 Relationships between the advanced distance of coal face and the average moving velocity of roof and floor and sidewalls the test points in roadway

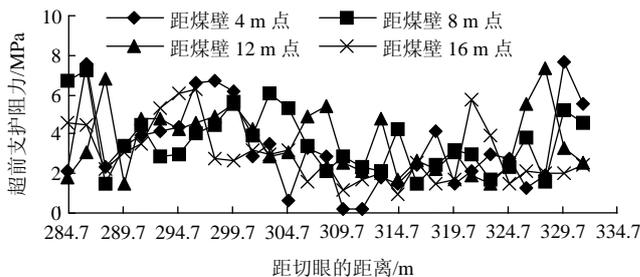


图 9 巷道各测点支护阻力与工作面推进距离的关系

Fig.9 Relationships between the advanced distance of coal face and the support force of the test points in roadway

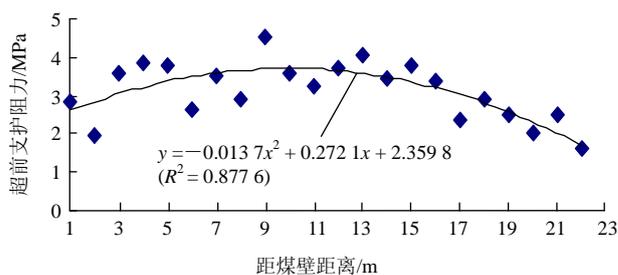


图 10 超前支护阻力分布图

Fig.10 Distribution of advanced of prop working resistance

由表 6 和图 6 可以得出, 大倾角煤层工作面开采后, 大倾角煤层采场支架载荷的分布、顶板下沉量、来压显现程度、来压步距等沿采场倾斜方向均不同。表现为, 大倾角工作面采场上段、中段、下段支柱来压前和来压时平均载荷分别为 86.758, 109.31, 100.51, 162.63, 137.61 和 205.75 kN, 整体上呈单调减小趋势; 采场上段、中段、下段来压时平均动载系数分别为 1.26, 1.62 和 1.50, 下部大于上部, 而中部大于下部; 大倾角煤层工作面采场的上、中、下段平均来压步距分别为 27, 20 和 26 m, 下段略大于上段, 而中段明显小于上下 2 段。

由图 7~10 可分析得到, 大倾角煤层工作面开采后, 回风巷道顶底板和两帮移近速度以及超前单体液压支柱的工作阻力呈现周期性变化, 回风巷道顶底板移近速度明显大于两帮移近速度, 回风各测点的最大顶底板移近速度和两帮移近速度和支柱平均工作阻力均在距工作面端头 3.4 m 左右开始明显变大, 在 8.4 m 处达到最峰值, 13.4 m 之后开始明显变小, 因此可以初步确定超前支承压力峰值的范围为距煤壁 3.4~13.4 m, 结合由超前支护单体支柱载荷的实测数据绘制的散点图(见图 10)的拟合曲线可知, 超前支承压力峰值位置超前煤壁 8.4~10.0 m。巷道表面变形速度较大区域有两个部分, 即距煤壁

22~33 m 部分和距煤壁 8 m 以内部分:前者范围内巷道变形速度较大是由于受顶板断裂的影响,而后者范围内巷道变形速度较大主要受工作面超前支承压力的影响。

## 4 讨 论

煤层倾角是影响采场矿山压力的重要因素之一。大倾角煤层多受较剧烈地壳运动形成,煤层顶底板遭受破坏程度相对比缓倾斜煤层大,在开采大倾角煤层时,与缓倾斜煤层相比采场围岩的所受矿山压力显现发生较大的变化。沿工作面走向方向,上覆岩层破坏的形态特点是冒落带和裂隙带的上部轮廓类似一个上下不对称的抛物线,中、上部略呈马鞍状。底板的破坏和滑移加剧了采场围岩体的失稳,岩层控制的难度比缓倾斜煤层更大,特别是深部大倾角煤层的开采,地应力增大、来压强度加剧的问题非常突出。

大倾角煤层工作面开采后,随着工作面的推移,工作面上方矿压随之重新分布,上方岩体垮落形成采空区,两侧上覆岩体的重量向两侧转移,在工作面前方形成一个随工作面推进而向前移动的动态支承压力带,其表现形式是巷道断面的变形破坏和超前液压支架载荷的周期性变大。一般理想情况下大倾角工作面采场上段支架载荷大于下段,上段顶板下沉量和下沉速度均比下段大,来压动载系数(采场来压时的剧烈程度)也是上段大于下段,上段的矿压显现比下段大,煤层倾角越大,这种差异也就越大。同时,大倾角煤层采场的来压步距则是下段略大于上段,来压时间则滞后于上段。当然,这里一般理想情况不能包括一些存在断层,构造或者邻近采空区存在的复杂条件下的情况,另外大倾角煤层的布置位置与方向,以及煤层工作面的开采长度与赋层条件也是影响其矿压分布规律的重要因素。本文现场观测得到的实测结果与一般理想情况下的结论有所不同,究其原因与煤层开采方式、开采方法、工作面上部有回采完毕过后残存的采空区以及受邻近工作面采动有关,这些因素的存在,使得大倾角煤层采场顶板岩层运动及其力学结构的特点更加复杂化,同时也使得大倾角煤层工作面的矿压显现规律呈现非一致性和多机制化。

## 5 结 论

(1) 大倾角炮采煤层工作面开采后,采场顶板应力分布是高度不均匀、不对称的,采场顶板应力在采空区两侧保护煤柱角高度集中,形成支承压力区,采空区上方形成支承卸压区。采场顶底板应力释放,两侧煤柱出现应力集中,采场 4 个角部位出现较大剪应力。剪切应变主要出现在采场下端部顶板和上端部的底板,而体积应变主要出现在煤层较近顶板和两侧煤柱。煤层倾角对采场围岩应力分布、支承压力的分布有显著影响。随着煤层倾角的增大,这种差异有扩大的趋势。

(2) 大倾角炮采煤层工作面条件下,采场顶板岩层的变形、破坏和运动形式不同于缓倾斜煤层,采场支架载荷的分布、来压显现程度、来压步距等沿采场倾斜方向均不同。大倾角、大采长工作面支柱来压载荷不平衡,平均来压载荷下部大于中部,中部大于上部;来压步距上部最大,中部最小;来压动载系数中部最大,下部次之,上部最小。支承压力峰值的范围为距煤壁 3.4~13.4 m,支承压力峰值位置超前煤壁 8.4~10.0 m。

(3) 在大倾角炮采煤层工作面上部顶板中存在明显的高应力集中的剪切滑移区,该区域的存在加大了大倾角工作面上部及回风平巷端头的支护困难,因此是岩层控制的重点区域,需要确保该区域支架的强度和稳定性。

(4) 煤层赋层体条件、开采方式、开采方法、工作面所出位置、邻近残存采空区的存在以及邻近工作面采动影响因素的存在,使得大倾角煤层工作面采场顶板岩层运动及其力学结构的特点更加复杂化,同时也使得大倾角大采场煤层工作面的矿压显现规律呈现非一致性和多机制化。复杂条件下大倾角煤层工作面采场围岩的稳定性研究是下一步研究工作。

**致谢** 感谢河南理工大学采矿教研室的郭宝华博士和张杰硕士在试验中的大力支持和帮助,感谢中国矿业大学的刘义新博士,同时对香山矿各级领导和技术人员在现场提供的支持和帮助表示感谢!

### 参考文献(References):

- [1] 张俊英. 大倾角多煤层条带开采三维有限元模拟研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 242-246. (ZHANG Junying. Study on 3D finite element method simulation of strip mining of great inclined and

- multiple coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(3): 242 - 246.(in Chinese))
- [2] 员东风, 伍永平. 大倾角煤层综采工作面调伪仰斜原理与方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(2): 152 - 155.(YUAN Dongfeng, WU Yongping. Research into principle and method on readjusting high angle full-mechanized coalface to false forward slant[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(2): 152 - 155.(in Chinese))
- [3] 尹光志, 鲜学福, 代高飞, 等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450 - 453.(YIN Guangzhi, XIAN Xufu, DAI Gaofei, et al. Basic behaviors of strata movement in seam with deep dip angle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 450 - 453.(in Chinese))
- [4] 黄建功. 大倾角煤层采场顶板运动结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 411 - 414.(HUANG Jianguo. Structural analysis for roof movement for steep coal Seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(5): 411 - 414.(in Chinese))
- [5] 来兴平, 程文东, 刘占魁. 大倾角综放顶煤开采数值计算及相似模拟分析[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 117 - 120.(LAI Xingping, CHENG Wendong, LIU Zhankui. Hybrid evaluation on numerical computing and similar simulation of steep dip angle and top coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 117 - 120.(in Chinese))
- [6] 林忠明, 陈忠辉, 谢俊文, 等. 大倾角综放开采液压支架稳定性分析与控制措施[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 264 - 268.(LIN Zhongming, CHEN Zhonghui, XIE Junwen, et al. Stability analysis and control measures of powered supports in greater and inclined full mechanized coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 264 - 268.(in Chinese))
- [7] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统的动力学方程[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 687 - 689.(WU Yongping. Dynan is equation of system “roof(R)-support(S)-floor(F)” in steely dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 687 - 689.(in Chinese))
- [8] 戴华阳, 易四海, 鞠文君, 等. 急倾斜煤层水平分层综放开采岩层移动规律[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(5): 409 - 412, 467.(DAI Huayang, YI Sihai, JU Wenjun, et al. Law of strata and surface movement due to horizontally-sliced mechanized top-caving mining at steep-inclined super-thick coal seam[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(5): 409 - 412, 467.(in Chinese))
- [9] 赵元放, 张向阳, 涂敏. 大倾角煤层开采顶板垮落特征及矿压显现规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 231 - 234.(ZHAO Yuanfang, ZHAN Xiangyang, TU Min. Roof caving characteristic and strata behavior in exploiting steep coal seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 231 - 234.(in Chinese))
- [10] 伍永平, 解盘石, 杨永刚, 等. 大倾角煤层群开采岩移规律数值模拟及复杂性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 391 - 395.(WU Yongping, XIE Panshi, Wu Yonggang, et al. Numerical simulation and complexity analysis of strata movement in exploiting steep coal seams group[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(4): 391 - 395.(in Chinese))
- [11] 李伟, 王志军, 姜福兴, 等. 大倾角综放面端顶煤稳定性控制数值模拟及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 797 - 801, 829.(LI Wei, WAN Zhijun, JIANG Fuxing, et al. Numerical simulation of head top coal's stability control of fully mechanized long-wall mining with sublevel caving face in large dip seam[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(6): 797 - 801, 829.(in Chinese))
- [12] 袁永, 屠世浩, 窦凤金, 等. 大倾角综放面支架失稳机制及控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 430 - 434.(YUAN Yong, TU Shihao, DOU Fengjin, et al. Support instability mechanism of fully mechanized top coal caving face with steep coal seams and its control[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(4): 430 - 434.(in Chinese))
- [13] 郭文兵, 刘明举, 李化敏, 等. 多煤层开采采场围岩内部应力光弹力学模拟研究[J]. 煤炭学报, 2005, 26(1): 8 - 12.(GUO Wenbing, LIU Mingju, LI Huamin, et al. The optics-elastic simulation study on the stress of the surrounding rock of the coal face in multi-coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 26(1): 8 - 12.(in Chinese))
- [14] 林韵梅. 试验岩石力学模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.(LIN Yunmei. Experimental rock mechanics-simulation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.(in Chinese))
- [15] 郭文兵, 柴一言. 条带开采采场应力分布光弹力学模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1998, 17(6): 570 - 574.(GUO Wenbing, CHAI Yiyen. The optics-elastic experiment study on the stress distribution law of strip mining[J]. Journal of Liaoning Technical University, 1998, 17(6): 570 - 574.(in Chinese))
- [16] 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, 1988.(LI Hongchang. The similitude material model test on the rock pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988.(in Chinese))