

文章编号:0253-9993(2012)04-0578-07

# 深部残采区域下冲击危险易突出煤层开采的相似模拟试验

王爱文<sup>1 2</sup> 潘一山<sup>1 2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 冲击地压研究院 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**针对深部残采区域下伏煤层工作面的安全开采问题,采用相似模拟试验的方法,通过监测残采区域形成过程中及稳定后下伏煤层应力变化情况,分析应力变化规律,根据应力卸压准则确定了残采区域的走向和倾向的卸压角及保护范围。试验结果表明,残采区域下伏煤层工作面开采过程中上覆岩层运动经历了“正常—剧烈—缓和—剧烈—正常”5个阶段和2次瞬时大面积整体失稳,工作面进风巷位于高应力集中区域内;在工作面走向方向上存在2处危险区域,结合应力观测数据划定了2处危险区域的范围。该研究作为制定残采区域下伏煤层工作面防冲、防突安全措施提供了可靠的基础数据。

**关键词:**深部开采;残采区域;相似模拟试验;下伏煤层;危险区域

中图分类号:TD823.82;TD823.86 文献标志码:A

## Similar simulation test on mining of rockburst danger and easy outburst coal seam under deep residual area

WANG Ai-wen<sup>1 2</sup>, PAN Yi-shan<sup>1 2</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Research Institute of Rock Burst, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** For the safety problem on mining underlying coal seam workface of deep residual area, similar simulation test was adopted to analyze the rule of the stress variation by monitoring coal stress in the formation process and stable state of residual area. Stress-relief angles and protection scope on the dip and strike were ascertained based on the protection rule of stress-relief. The result shows that the overlying strata movement experienced twice instantaneous instability in large and five stages such as “normal—severe—ease—severe—normal” during the mining process of underlying coal seam workface. And transportation lane is in the high stress concentration region. There are two dangerous areas on the strike direction of workface. The scope of two dangerous areas was delimited combined with stress observation data. Simulation results also provide valuable primary data for formulating prevention measures of rock burst or coal and gas outburst in deep residual area.

**Key words:** deep mining; residual area; similar simulation; underlying coal seam; dangerous area

残采区域是矿井动力灾害的主要影响因素之一<sup>[1]</sup>。特别是对一些具有多年开采历史的老矿井,这一因素体现得尤为突出。此外,近年来随着我国对煤炭需求量的持续增加,一些开采时间短的矿井为增加煤炭产量,改变正常的采掘顺序,形成残采区域,也面

临着同样问题。残采区域的采动围岩应力分布对其下伏工作面安全开采有至关重要影响<sup>[2-3]</sup>。研究残采区域的围岩应力分布规律,确定下伏煤层的保护范围,具有重要的意义<sup>[4-7]</sup>。

本文针对某矿具体条件,采用相似模拟手段,研

究了残采区域形成过程中及其稳定后的应力分布规律,并分析了残采区域下伏煤层开采过程中关键区域的应力分布及变化规律<sup>[8-9]</sup>。

### 1 试验概况

某矿已<sub>15</sub>-31010 采面是三水平首采面,煤层平均厚度 3.3 m,倾角 4°~6°,埋深 1 025~1 100 m,瓦斯压力 2.85 MPa,瓦斯含量 25~28 m<sup>3</sup>/t,具有冲击地压及煤与瓦斯突出危险。上部为已<sub>14</sub>煤层,层间距为 10 m。考虑到已<sub>15</sub>-31010 工作面埋深大、冲击地压、煤与瓦斯突出威胁严重的实际,开展了开采上保护层已<sub>14</sub>煤层。已<sub>14</sub>-31010 工作面由于地质因素在工作面推进 140 m 后,被迫停采,形成残采区域,工作面布置如图 1 所示。此后,改用高位瓦斯抽排巷穿层预抽、高位瓦斯抽排巷穿层预裂松动爆破、掘进工作面前 30 m 区域高压注水挤排瓦斯等措施将瓦斯含量降低至 8 m<sup>3</sup>/t 后进行开采。

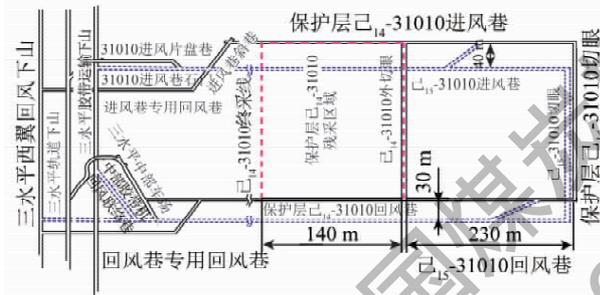


图 1 已<sub>15</sub>-31010 工作面布置

Fig. 1 Layout of V<sub>15</sub>-31010 workplace

### 2 模拟试验

#### 2.1 模型设计

模拟试验设计 2 个模型。模型 1 为走向平面模型,模拟残采区域已<sub>14</sub>-31010 工作面开采过程中及稳定后所引起的采动支承压力沿煤层走向在煤层底板传播、分布规律;已<sub>15</sub>-31010 工作面开采过程中煤壁前方的支承压力分布规律及时空演化规律<sup>[10]</sup>。模型 2 为倾向平面模型,该模型的研究对象为残采区域已<sub>14</sub>-31010 工作面开采过程中及稳定后所引起的采动支承压力沿煤层倾斜方向在煤层底板传播、分布规律和其倾斜方向卸压保护范围<sup>[11-12]</sup>。

试验采用长×宽×高为 2.5 m×0.3 m×2.0 m 的平面应力模型台,模型底部为 *x*, *y* 方向位移不动的铰支,两侧为 *x* 方向位移不动,而 *y* 方向可移动的滚支。模型上未能模拟的岩层厚度,采用杠杆加载方式实现,如图 2 所示。

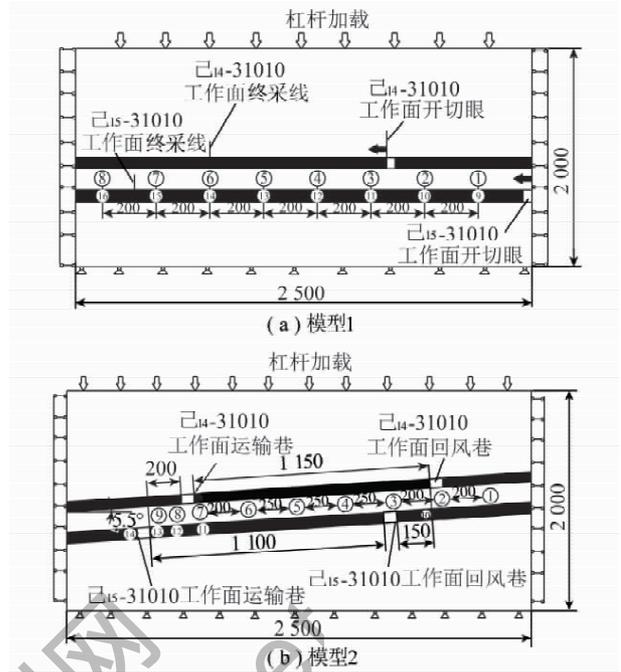


图 2 力学模型及应力测点布置

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical model and stress sensor arrangement

采用几何相似比  $\alpha_L = \frac{L_H}{L_M} = 200$ , 容重相似比

为 1:1.7, 强度相似比  $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{\gamma_H}{\gamma_M} \alpha_L = 340$ , 时间相

似比  $\alpha_t = \frac{t_H}{t_M} = \sqrt{\alpha_L} = 14$ 。

#### 2.2 应力测点布置

试验在模型 1 中布设两排应力测点,每排布置 8 个测点,第 1 排位于已<sub>14</sub>煤层底板砂质泥岩中,测点编号从右到左依次为 1~8,1 号测点距离模拟右边界 20 cm;第 2 排位于已<sub>15</sub>煤层中,测点编号从右到左依次为 9~16,9 号测点距离右边界 20 cm。两排测点间距均为 20 cm,如图 2(a) 所示。模型 2 的测点布置如图 2(b) 所示,其中 1 号测点距已<sub>14</sub>-31010 工作面回风巷左帮 20 cm,2,10 号测点分别位于已<sub>14</sub>-31010 工作面回风巷左帮正下方的砂质泥岩中和已<sub>15</sub>煤层中,7,11 号测点分别位于已<sub>14</sub>-31010 工作面进风巷右帮正下方砂质泥岩中和已<sub>15</sub>煤层中,8,12 号测点距已<sub>14</sub>-31010 工作面进风巷左帮 5 cm,9 号测点距已<sub>15</sub>-31010 工作面进风巷右帮 5 cm。14 与 13 号测点分别距已<sub>15</sub>-31010 进风巷左右各 5 cm。选用 BW-0.5 微型压力盒与 YJZ-32A 型智能数字应变测试系统自动连续监测煤层开采过程中煤层及岩层相对应力变化情况。

#### 2.3 开采方案

模型制作好后,打开晾干一周左右进行试验。对

于走向模型来讲,工作面原型开采速度为每 24 h 开采 1.8 m,根据时间比计算出模型开采速度为每 2 h 采 1 cm;对于倾向模型来讲,工作面原型开采速度为每 24 h 割 3 刀煤,考虑模型宽度,根据时间比计算出模型开采进速度为每 0.5 h 采 1 cm。结合矿井实际开采情况和试验目的,试验首先开采模型 1,在距离模拟右边界 50 cm 处开挖切眼,模拟开采残采区域  $\text{己}_{14}$ -31010 工作面,工作面向左推进 70 cm 后停止开采,如图 3(a) 所示。第 1 阶段开采稳定后,进行第 2 阶段开采,在模拟右边界处开挖切眼,模拟开采残采区域下伏的  $\text{己}_{15}$ -31010 工作面,工作面向左推至距离 16 号压力盒 10 cm 处,如图 3(b) 所示。模型 2,第 1 步开采  $\text{己}_{14}$ -31010 工作面,工作面斜长 115 cm,如图 3(c) 所示。第二步开采  $\text{己}_{15}$ -31010 工作面,工作面斜长 110 cm,如图 3(d) 所示。

### 3 模型 1 试验结果与分析

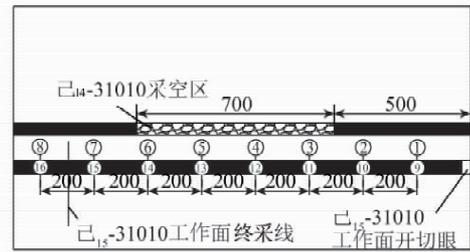
#### 3.1 覆岩运动规律分析

##### (1) 残采区域 $\text{己}_{14}$ -31010 工作面开采。

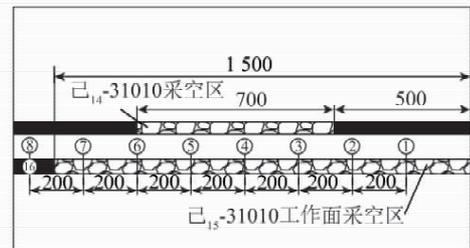
工作面回采过程中,上覆岩层运动经历了直接顶垮落、低位岩层整体离层。垮落呈明显的关键层效应,即随着关键层结构的破断,关键层上方厚度相对较小的岩层也随之垮落,表现出成组垮落失稳,离层裂隙呈向上跳跃式发展。工作面推进 140 m 后形成残采区域,上覆岩层共发生 7 次周期性垮落,垮落步距为 14~16 m,垮落带高度 12 m,断裂带高度 53 m。

##### (2) 残采区域下伏工作面 $\text{己}_{15}$ -31010 开采。

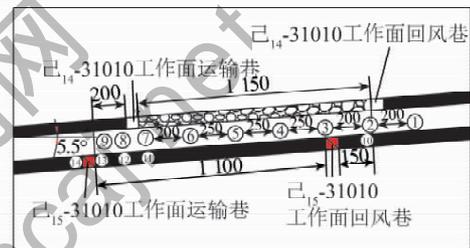
$\text{己}_{15}$ -31010 工作面从右向左推进过程中,上覆岩层运动经历了“正常—剧烈—缓和—剧烈—正常”5 个阶段:第 1 阶段从工作面切眼向左推进至距离残采区域 60 m 范围内,该阶段工作面上覆岩层运动“正常”经历了直接顶初次垮落,基本顶的初次垮落与周期垮落;第 2 阶段从残采区域右 40 m 至残采区域右边缘,该阶段内工作面上覆岩层运动剧烈,随着工作面的推进承载上覆岩层的煤岩柱宽度逐渐减小而显现更加剧烈,尤其是在工作面推进 104 m 后上覆岩层出现大面积瞬时失稳;第 3 阶段为在残采区域下方,由于采空区的卸压作用,工作面上覆岩层运动“缓和”,呈不明显的周期性垮落,离层裂隙只在水平方向向前扩展而没有继续垂直向上发育;第 4 阶段为工作面进入残采区域的超前支承应力区内,此阶段内上覆岩层周期性垮落步距较小,应力测点的变化量较大。工作面推进 264 m 时,上覆岩层又一次发生大面积瞬时垮落;此后随着工作面的继续向前推进覆岩运动逐渐转为“正常”阶段,如图 4 所示。



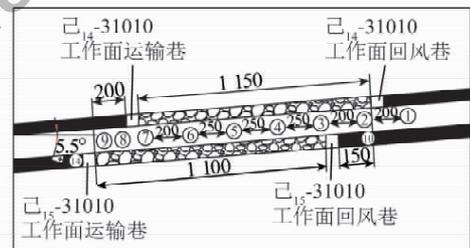
(a) 模型1开采残采区域  $\text{己}_{14}$ -31010 工作面



(b) 模型1开采残采区域下伏  $\text{己}_{15}$ -31010 工作面



(c) 模型2开采残采区域  $\text{己}_{14}$ -31010 工作面



(d) 模型2开采残采区域下伏  $\text{己}_{15}$ -31010 工作面

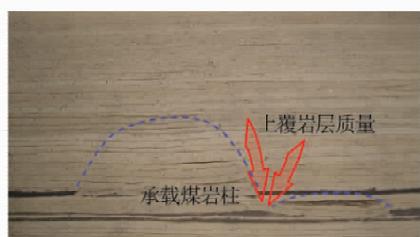
图 3 设计开采方案

Fig. 3 Mining design plan

#### 3.2 应力分布规律分析

##### (1) 残采区域 $\text{己}_{14}$ -31010 工作面开采。

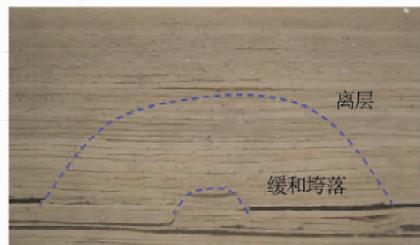
图 5 为  $\text{己}_{14}$ -31010 工作面开采过程中各应力测点的应力变化系数曲线。其中,纵坐标为各个测点的应力变化系数,数值为“1”表示该点处于原岩应力区,大于“1”表示该点处于应力升高区,小于“1”表示该点处于应力降低区。从图 5 可以看出,随着工作面的推进,  $\text{己}_{15}$  煤层应力经历了采前高度集中、采后急剧降低和恢复 3 个阶段。相应地 11, 12, 13 号应力测点也经历了应力升高、降低和恢复。从应力变化趋势得知,充分卸压带的最终应力为残余应力,充分卸压起始点作为走向保护范围的起始点,应力变化系数降至最低的测点都在保护范围内,可以作为走向保护范围的考察点。11, 12, 13 号应力测点的应力变化系



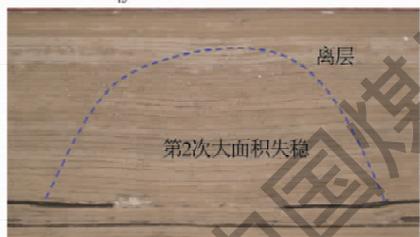
(a) 己<sub>15</sub>-31010工作面覆岩“正常”垮落



(b) 己<sub>15</sub>-31010工作面覆岩第1次瞬时大面积失稳



(c) 己<sub>15</sub>-31010工作面覆岩“缓和”垮落



(d) 己<sub>15</sub>-31010工作面覆岩第2次瞬时大面积失稳

图 4 己<sub>15</sub>-31010 工作面开采上覆岩层运动过程

Fig. 4 The overlying strata movement during the mining process of V<sub>15</sub>-31010 workface

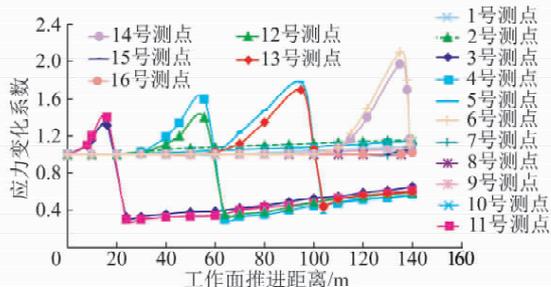


图 5 己<sub>14</sub>-31010 工作面开采过程中各测点应力变化曲线

Fig. 5 Stress variation curves of measuring points during the mining process of V<sub>14</sub>-31010 workface

数降至最低时,工作面推进距离分别为 24, 64, 106 m, 经计算 3 测点的走向卸压角分别为 69°, 69°, 59°。由此,上保护层开采后,走向卸压角为 59°~69°,考虑安全因素取 59°。

图 6 为残采区域形成后己<sub>15</sub> 煤层及顶板内应力分布,其中 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 的数值通过插值方法获得。图 6 中 3, 4, 5, 11, 12, 13 号测点应力变化系数明显小于 1, 说明工作面开采后各测点所在区域卸压效果明显; 6, 14 号应力测点应力变化系数接近 1, 表明工作面煤壁正下方区域为非卸压区, 但 6, 14 与 7, 15 号测点之间的应力变化系数有明显的升降过程, 最小为 1.02, 说明该区域为应力升高区。可以确定残采区域切眼和终采线附近侧的影响范围均为 0~40 m。

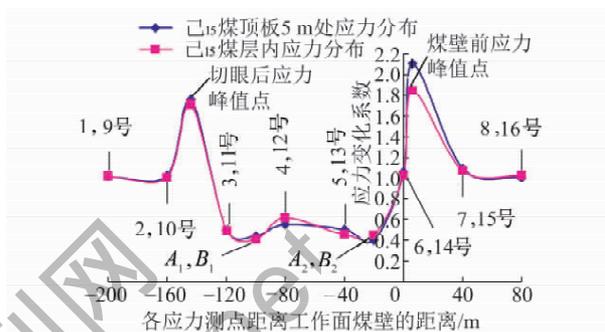


图 6 残采区域形成后己<sub>15</sub> 煤层及顶板应力分布

Fig. 6 Stress distribution of V<sub>15</sub> coal seam and floor when residual area of V<sub>14</sub> coal seam formed

(2) 残采区域下伏工作面己<sub>15</sub>-31010 开采。

图 7 为己<sub>15</sub>-31010 工作面开采过程中各应力测点的应力变化系数变化情况。由图 7 可以看出,工作面从右向左推进 0~60 m 范围内 1 和 9 号应力测点的应力变化情况与上煤层工作面应力变化情况相类似; 工作面继续推进至 60~76 m 范围时 2 与 10 号两测点的应力迅速增加, 最大应力变化系数分别为 4.1 和 4.0, 这是因为该工作开采形成的超前支承应力与残采区域开切眼附近的支承应力相互叠加而形成高应力集中。

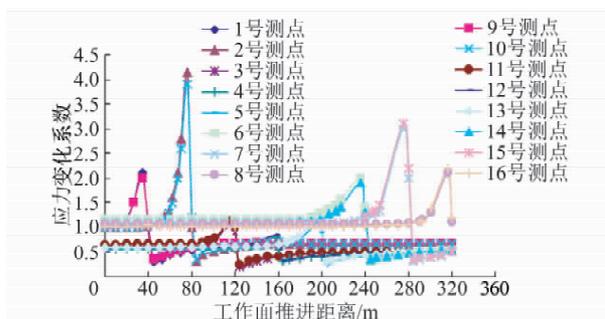


图 7 己<sub>15</sub>-31010 工作面开采过程中各测点应力变化曲线

Fig. 7 Stress variation curves of measuring points during the mining process of V<sub>15</sub>-31010 workface

由此判断,工作面推进 60 m 后进入高应力叠加区域,即进入危险区域。3, 4, 5, 11, 12, 13 号测点在残采区域的卸压保护范围内,各应力测点的应力变化

系数变化不大,最大值在 1.1~1.3 范围内,说明在卸压区内,己<sub>15</sub>-31010 工作面的采动影响较小;工作面推进 276 m 时,7、14 号应力测点的最大应力变化系数分别为 3.2 和 3.1。同样可以判断,工作面推进 240 m 后又一次进入高应力叠加区域,即进入危险区域。工作面继续推进至 320 m 时,8 和 16 号应力测点经历了应力升高和降低过程,最大值分别为 2.1 与 2.0,此时工作面前方应力变化恢复至“正常”开采情况下的变化。综上己<sub>15</sub>-31010 工作面推进过程中的危险区域如图 8 所示。

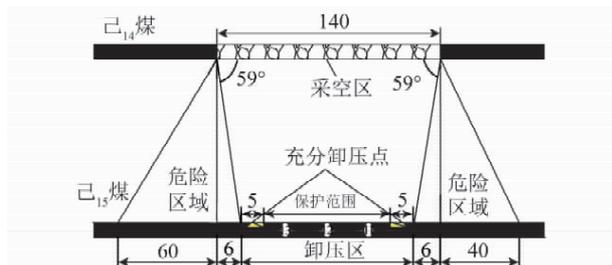


图 8 己<sub>15</sub>-31010 工作面开采过程中危险区域分布(单位:m)

Fig. 8 Dangerous area distributions during the mining process of V<sub>15</sub>-31010 workface

## 4 模型二试验结果与分析

### 4.1 覆岩运动规律分析

#### (1) 残采区域己<sub>14</sub>-31010 工作面开采。

己<sub>14</sub>-31010 工作面开采完毕形成残采区域,上覆岩层垮落稳定后沿采空区倾斜方向形成“断裂带—压实带—断裂带”,靠近进风巷的断裂带宽度约为 40 m,靠近回风巷的断裂带宽度约为 35 m,如图 9 所示。



图 9 己<sub>14</sub>-31010 工作面覆岩最终垮落状况

Fig. 9 Eventual collapse status of overlying strata of V<sub>14</sub>-31010 workface

#### (2) 残采区域下伏工作面己<sub>15</sub>-31010 开采。

残采区域垮落稳定后,进行己<sub>15</sub>-31010 工作面开采。根据试验研究内容,确定工作面沿倾斜方向自回风巷由上而下推进。工作面推进至 186 m 时,其上覆岩层垮落状况如图 10 所示,可以看出,靠近工作回风巷与进风巷附近的离层裂隙与破断裂隙明显增加,中

间部位岩层整体下沉,离层与破断裂隙不发育,呈压实状态。此外,工作面上下两侧的岩层垮落角与残采区域的岩层垮落角基本相同,由此可以推断工作面推至进风巷附近时,上覆岩层不会在倾斜方向上沿残采区域左帮发生大面的剪切垮落而诱发冲击或突出<sup>[13-14]</sup>。

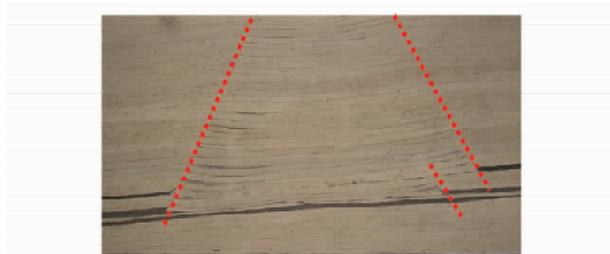


图 10 己<sub>15</sub>-31010 工作面下推进 186 m 时覆岩垮落状况

Fig. 10 Collapse status of V<sub>15</sub>-31010 workface overlying strata after mining 186 m

图 11 为工作面开采完毕,岩层运动稳定后所拍摄的照片。工作面沿倾斜向下推进 186 m 后已经推过残采区域而进入其侧向支承压力影响范围内,受推进速度与侧向支承应力的作用,工作面推进至进风巷时,上覆岩层发生突然垮落,垮落岩层厚度为 10 m,垮落长度为 40 m。如此长度与厚度的岩层突然垮落会带来巨大的冲击能量而诱发巷道发生冲击或突出。因此,建议己<sub>15</sub>-31010 工作面推进过程中及时进行进风巷超前支护并保证支护质量。加强监测,制定好该防冲或防突措施。



图 11 己<sub>15</sub>-31010 工作面覆岩最终垮落状况

Fig. 11 Eventual collapse status of overlying strata of V<sub>15</sub>-31010 workface

### 4.2 应力分布规律分析

#### (1) 残采区域己<sub>14</sub>-31010 工作面开采。

图 12 为己<sub>14</sub>-31010 工作面倾斜向上推进过程中各应力测点的应力变化系数变化情况。测试结果表明 2~7 号应力测点在卸压保护范围内,煤层应力得到了释放;1 号应力测点在工作推进过程中始终保持不变,说明工作面开采后,靠近回风巷侧的侧向应力影响范围小于 20 m。结合应力测点布置图(图 2),根据所测数据和上述分析可知:11 和 10 号测点所在

位置为残采区域的卸压线边缘,由 $\text{己}_{14}$ 和 $\text{己}_{15}$ 层的层间距和两测点的位置确定其上下边界卸压角为 $72^\circ$ 。可以判断出 $\text{己}_{15}$ -31010工作面回风巷位于残采区域的卸压保护范围内。

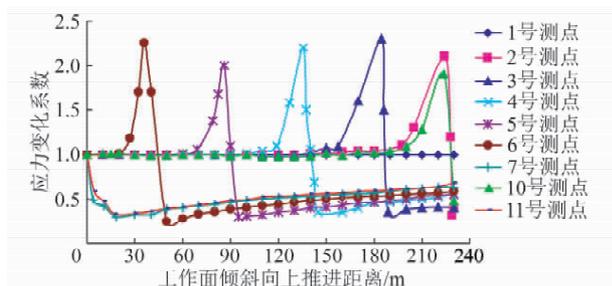


图12  $\text{己}_{14}$ -31010工作面开采过程中应力测点变化曲线

Fig. 12 Stress variation curves of measuring points during the mining process of  $V_{14}$ -31010 workface

图13为 $\text{己}_{14}$ -31010工作面倾斜向上推进过程中进风巷附近各应力测点的应力变化系数变化情况。可知工作面推进过程中8、9、12、13、14号5个测点应力都呈缓慢升高趋势,工作面推进至回风巷时升至最高。8、12号测点位于进风巷左帮10m左右,工作面推进至回风巷时测点应力变化系数为1.50和1.30。9、13号测点位于 $\text{己}_{14}$ -31010工作面进风巷左帮30m,工作面推进至回风巷时该测点应力变化系数为1.25和1.10。可以推断残采区域形成后,进风巷侧的侧向应力影响范围30m左右,最大应力峰值位于进风巷左帮煤体内10m左右。因此分析出 $\text{己}_{15}$ -31010工作面进风巷位于该工作面的采动应力影响范围的边缘,基本不受残采区域影响。

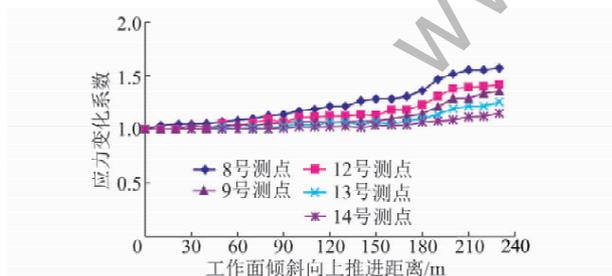


图13  $\text{己}_{14}$ -31010工作面下部测点应力变化曲线

Fig. 13 Stress variation curves of lower measuring points during the mining process of  $V_{14}$ -31010 workface

## (2) 残采区域下伏工作面 $\text{己}_{15}$ -31010开采。

通过以上分析可知 $\text{己}_{15}$ -31010工作面回风巷位于残采区域的卸压保护范围内,所以在 $\text{己}_{15}$ -31010工作面开采时主要的研究对象为工作面进风巷附近的煤岩体应力变化情况。图14为 $\text{己}_{15}$ -31010工作开采时各测点应力变化曲线。可以看出当工作面倾斜向下推进至150m左右时8和12号测点开始有微小增

加,当推进至180m时,应力变化系数增加至1.8,随后又开始降低;推进至206m时,9和13号应力测点的应力变化系数分别达到3.0和3.5,原因是9和13号位于残采区域的侧向应力影响范围内,当 $\text{己}_{15}$ -31010开采至该位置附近时引起二次采动应力叠加,形成高应力区。在如此高的应力集中程度下,该区域发生冲击或突出的几率大大增加<sup>[15]</sup>。

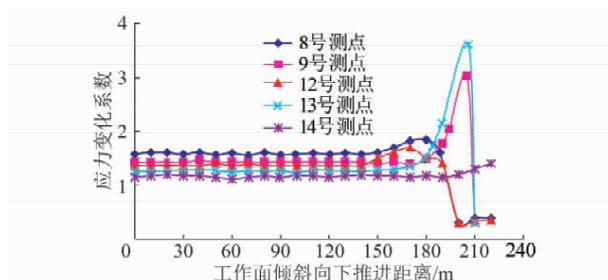


图14  $\text{己}_{15}$ -31010工作面下部测点应力变化曲线

Fig. 14 Stress variation curves of lower measuring points during the mining process of  $V_{15}$ -31010 workface

## 5 结 论

(1)  $\text{己}_{14}$ 煤层残采区域形成后,开切眼与终采线附近的影响范围均为0~40m;回风巷侧侧向应力影响范围0~20m,进风巷侧侧向应力影响范围0~30m;其下伏的 $\text{己}_{15}$ 煤层的应力降低为原来应力的0.6~0.7倍,形成有效的卸压区域,走向卸压角 $59^\circ$ ,倾向卸压角 $72^\circ$ 。

(2) 残采区域下伏的 $\text{己}_{15}$ -31010工作面走向推进过程中存在两处危险区域,危险区域I为残采区域切眼附近,危险区域II为残采区域终采线附近;上覆岩层运动经历了“正常—剧烈—缓和—剧烈—正常”5个阶段,发生2次出现瞬时大面积整体失稳,极有可能诱发突出或冲击。

(3) 残采区域下伏的 $\text{己}_{15}$ -31010工作面回风巷位于卸压保护范围内;进风巷位于残采区域的侧向应力影响范围的边缘,基本不受残采区域影响,但工作面开采时产生二次采动应力叠加,在进风巷附近煤岩体内形成高应力集中区,此时发生突出或冲击的可能性很大。

## 参考文献:

- [1] 龚林名,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: 35-39.  
Dou Linming, He Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 35-39.
- [2] 潘一山,耿琳,李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1975-1977.

- Pan Yishan ,Geng Lin ,Li Zhonghua. Research on evaluation indices for impact tendency and danger of coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2010 ,35( 12) : 1975-1977.
- [3] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究[D]. 北京: 清华大学 , 1999: 110-115.
- Pan Yishan. Study on rock burst initiation and failure propagation [D]. Beijing: Tsinghua University ,1999: 110-115.
- [4] 程远平 ,俞启香. 上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术 [J]. 辽宁工程技术大学学报 2003 22( 4) : 483-486.
- Cheng Yuanping ,Yu Qixiang. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University , 2003 22( 4) : 483-486.
- [5] Palchik V. Formation of fractured zones in overburden due to long-wall mining [J]. Environmental Geology 2003 44: 28-38.
- [6] Liu Hongyong ,Cheng Yuanping. Fissure evolution and evaluation of the pressure-relief gas drainage under the super-remote protected seams exploitation [J]. Mining Science and Technology ,2010 ,20( 2) : 178-182.
- [7] 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 ,Mou Zonglong ,et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application [J]. Journal of China Coal Society 2005 30( 5) : 690-694.
- [8] 马大勋. 关于上保护层的实验研究与探讨 [J]. 煤炭学报 ,1986( 3) : 1-9.
- Ma Daxun. Experimental research and discussion on extraction of upper protective seam [J]. Journal of China Coal Society 1986( 3) : 1-9.
- [9] 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 Hongtu. 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.
- [10] 姜福兴 ,马其华. 深部长壁工作面动态支承压力极值点的求解 [J]. 煤炭学报 2002 27( 3) : 273-275.
- Jiang Fuxing ,Ma Qihua. Mechanical solution of the maximum point of dynamic abutment pressure under deep long wall working face [J]. Journal of China Coal Society 2002 27( 3) : 273-275.
- [11] 王洛锋 ,姜福兴 ,于正兴. 深部强冲击厚煤层开采上、下解放层卸压效果相似模拟试验研究 [J]. 岩土工程学报 2009 31( 3) : 442-446.
- Wang Luofeng ,Jiang Fuxing ,Yu Zhengxing. Similar material simulation experiment on destressing effects of the deep thick coal seam with high burst liability after mining upper and lower protective seams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009 31( 3) : 442-446.
- [12] 胡国忠 ,王宏图 ,范晓刚 ,等. 急倾斜俯伪斜上保护层保护范围的三维数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报 2009 28( S1) : 2846-2852.
- Hu Guozhong ,Wang Hongtu ,Fan Xiaogang ,et al. Three-dimensional numerical simulation for protection scope of steep inclined upper-protective layer of pitching oblique mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28( S1) : 2846-2852.
- [13] 姜耀东 ,赵毅鑫 ,何满潮 ,等. 冲击地压机制的细观实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2007 26( 5) : 901-907.
- Jiang Yaodong ,Zhao Yixin ,He Manchao ,et al. Investigation on mechanism of coal mine bumps based on mesoscopic experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26( 5) : 901-907.
- [14] 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.
- [15] 潘一山 ,李国臻 ,章梦涛. 回采巷道冲击地压危险指标的确定 [J]. 矿山压力与顶板管理 1994( 1) : 56-59.
- Pan Yishan ,Li Guozhen ,Zhang Mengtao. Determination of rockburst hazardous indices in mining roadway [J]. Grounded Pressure and Strata Control 1994( 1) : 56-59.