

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.10.012

# 浅部隔离煤柱对覆岩运移的控制及其合理留设

师修昌<sup>1,2</sup>

(1. 河南财经政法大学 BIM 技术与智慧建造河南省工程实验室, 郑州 450046; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为了揭示西部浅埋工作面沿倾向方向开采时隔离煤柱对覆岩运移的控制作用,以大柳塔煤矿为工程背景,采用相似材料模拟试验方法,分析工作面开采中隔离煤柱对覆岩垮落、移动变形的控制作用及其应力变化特征,并确定煤柱的合理留设。研究表明,采区倾向方向上,由于工作面间存在隔离煤柱,各工作面开采会形成彼此独立的垮落带,隔离煤柱有效地分隔了相邻工作面垮落空间的横向贯通和纵向扩展,隔开了相邻工作面上覆岩层沉降曲线;覆岩垮落高度与工作面倾向开采长度密切关系,非充分采动较充分采动时覆岩垮落高度明显降低。在煤层开采过程中,留设 30 m 宽的 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>煤柱处于稳定状态,但 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>煤柱安全性较低。理论计算出了 2<sup>-2</sup>煤和 5<sup>-2</sup>煤合理煤柱宽度分别为 18.6 m、24.5 m,得出了避开煤柱集中应力与控制地表均匀沉降的上下煤层煤柱最佳错距为 95.5 m。

**关键词:**隔离煤柱;垮落高度;覆岩运移;煤柱应力;煤柱错距

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)10-106-09

## Control of overlying strata migration by shallow isolated coal pillars and their reasonable setting-up

SHI Xiuchang<sup>1,2</sup>

(1. BIM Technology and Intelligence Construction in Henan Engineering Laboratory, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, P. R. China; 2. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** In order to reveal the control effect of overlying strata movement by isolated coal pillars during mining along inclined direction in western shallow working face, Daliuta coal mine is taken as engineering background, the control effect of overlying strata collapse, movement and deformation by isolated coal pillars and the characteristics of stress change in mining face are analyzed by using similar material simulation test method, and the rational setting of coal pillars is determined. The results show that in the direction of mining area inclination, each working face will form an independent caving zone with isolated coal pillars between them, which effectively separates the lateral penetration and vertical expansion of the

收稿日期:2019-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41372163);河南高等学校重点科研项目(19B170003);河南财经政法大学博士科研启动基金(800527)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (41372163) and Key Scientific Research Project in Henan Universities (19B170003) and Scientific Research Initial Funding for Doctors of Henan University of Economics and Law(800527).

作者简介:师修昌(1989—),男,博士,讲师,主要研究方向为矿井工程地质及采动损害,(E-mail)sxccumtb@126.com。

caving space in adjacent working faces and divides off the settlement curve of overlying strata on adjacent working faces; the caving height of overlying strata is closely related to the mining length of working face inclination not filled with coal pillars. The collapse height of overburden rock decreases when sublevel mining is more fully exploited. In the process of coal seam mining, the No.1# to No.4# pillar with a width of 30 m is in a stable state, but the safety of No.3# and No.4# pillars is low. The reasonable pillar widths of No. 2<sup>-2</sup> and 5<sup>-2</sup> coal seam are 18.6 m and 24.5 m, respectively. The optimum offset of upper and lower coal pillars is 95.5 m to avoid the concentrated stress of pillars and control the uniform settlement of the surface.

**Keywords:** isolation coal pillar; collapse height; overburden migration; coal pillar stress; coal pillar stagger distance

随着中国东部地区煤炭资源逐步枯竭,煤炭资源开发的战略重心将逐步西移。由于西部煤炭资源煤层埋藏浅,厚度大,上覆松散含水砂层,浅埋煤层开采覆岩结构破坏严重,极易发生突水溃沙地质灾害<sup>[1-3]</sup>,同时造成水资源流失,这不但严重威胁矿井安全生产,也进一步加剧了西部矿区原本脆弱的生态环境退化。因此,研究西部浅埋煤层开采覆岩运动及移动变形对煤矿安全开采和地下水资源保护具有重要意义。

长期以来,中国学者在浅埋煤层开采覆岩裂隙演化领域取得了丰硕的研究成果。薛东杰等<sup>[4]</sup>定量分析了浅埋深薄基岩煤层组开采采动裂隙演化规律,并探索了覆岩台阶式切落形成机制;范钢伟等<sup>[5]</sup>模拟了神东矿区 3 类典型的煤层赋存条件为下煤层长壁开采覆岩移动与裂隙在空间扩展与分布的动态演变特征;师修昌等<sup>[6-7]</sup>研究了大柳塔煤矿双煤层开采覆岩裂隙发育及地表沉陷特征;施峰等<sup>[8]</sup>采用相似模拟试验分析了煤层倾角变化对采动覆岩变形规律影响,发现上覆岩层变形的破坏程度总体上是随煤层倾角的增加呈减小趋势;鞠金峰等<sup>[9]</sup>研究了浅埋特厚煤层综放长壁覆岩破断特征及引起的地表台阶沉降规律;潘瑞凯等<sup>[10]</sup>综合运用多种方法分析了神东矿区浅埋近距离双厚煤层开采覆岩移动与裂隙发育规律;尹光志等<sup>[11]</sup>利用三维相似模拟试验设备模拟了煤岩裂隙网络演化规律,得出了三维应力条件下裂隙网络的空间演化规律。然而,已有成果大多侧重于沿工作面走向方向的长壁开采覆岩垮落及裂隙发育,而对沿工作面倾向方向的覆岩运移特征研究较少。基于此,在本文中采用相似材料模拟试验方法,分析工作面沿倾向开采过程中留设的隔离煤柱对覆岩垮落、移动变形的控制作用,理论计算煤柱的合理留设,为突水溃沙灾害预警和防治提供理论基础。

## 1 相似模拟试验设计

试验原型为神东矿区大柳塔煤矿 63# 钻孔区域地层,煤层倾角平均为 1.5°,2<sup>-2</sup>煤和 5<sup>-2</sup>煤厚度平均为 4.2 m 和 6.6 m,埋藏深度平均为 70.5 m 和 227.7 m。矿井煤层属于浅埋煤层,采用一次采全高开采方法。根据大柳塔矿井 63# 钻孔柱状资料,对岩层分层特性作了合并均匀化处理,建立了与实际情况基本吻合的相似材料模型,主要的煤岩物理力学性质参数见表 1。相似材料平台尺寸为 4.2 m×0.25 m×2.0 m(长×宽×高),根据相似模拟试验中的相似理论,结合本试验的实际情况,确定相似比分别为:几何相似常数  $C_1 = 1/150$ ,时间相似比  $C_t = \sqrt{C_1} = 1/12.25$ ,容重相似比  $C_r = 1/1.5$  弹性模量与强度相似比  $C_E = 1/225$ 。相似材料选择细沙、石灰、石膏、云母粉,加少量的水。原型与模型材料物理力学参数及配比见表 1。

表 1 原型与模型材料物理力学参数及配比

Table 1 Mixing ratios and parameters of prototype and model materials

岩性	层厚/m	原型容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	原型抗压 强度/MPa	模型容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	模型抗压 强度/MPa	配比(细砂: 碳酸钙:石膏)
粉砂岩	6.0	16.1	16.5	10.7	—	7:6:4
粘土岩	30.0	18.0	15.3	12.0	0.076	8:7:3
细砂岩	7.5	28.0	36.5	18.7	0.118	7:5:5

续表 1

岩性	层厚/m	原型容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	原型抗压 强度/MPa	模型容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	模型抗压 强度/MPa	配比(细砂: 碳酸钙:石膏)
泥岩	3.0	24.3	15.3	16.2	0.068	8:7:3
粉砂岩	24.0	24.1	26.5	16.1	0.162	7:6:4
2 <sup>-2</sup> 煤	4.2	13.0	15.0	8.7	0.076	8:7:3
粉砂岩	42.0	24.1	26.5	16.1	0.067	7:6:4
泥岩	3.0	24.3	15.3	16.2	0.076	8:7:3
细砂岩	27.0	28.0	36.5	18.7	0.118	7:5:5
中砂岩	30.0	25.2	37.0	16.8	0.068	7:5:5
粉细砂岩互层	18.0	24.1	25.0	16.1	0.162	7:6:4
中砂岩	33.0	25.2	37.0	16.8	0.076	7:5:5
5 <sup>-2</sup> 煤	6.6	13.0	18.0	8.7	0.118	8:6:4
细砂岩	12.0	28.0	36.5	18.7	0.008	7:5:5

为了分析工作面开采覆岩移动变形及煤柱应力变化规律,在煤层上覆岩层中布置位移基点,位移基点沿煤层上方共布设 13 层、19 列,每一排位移基点距煤层的高度如表 2 所示。在工作面间留设的 1#~4#煤柱(见图 2)上面埋设压力传感器。

表 2 岩层位移测点水平观测线布置情况

Table 2 Arrangement of horizontal observation line of overlying strata displacement measuring points

测线层位编号	所处岩层	距 2 <sup>-2</sup> 煤距离/m	距 5 <sup>-2</sup> 煤距离/m
1	粉砂岩	65.4	227.7
2	粘土岩	60.6	217.5
3	粘土岩	41.0	198.3
4	粉砂岩	18.9	176.4
5	粉砂岩	5.3	162.5
6	粉砂岩	—	151.8
7	粉砂岩	—	132.9
8	粉砂岩	—	113.0
9	细砂岩	—	91.1
10	中砂岩	—	69.0
11	粉细砂岩	—	48.3
12	中砂岩	—	25.8
13	中砂岩	—	6.5

模型中 2<sup>-2</sup>煤布置 3 个工作面,从左向右各工作面的编号依次为 2201 面、2202 面、2203 面,2201 面和 2203 工作面宽度 105 m,2202 工作面宽度 210 m,工作面间的隔离煤柱宽度 30 m。5<sup>-2</sup>煤布置 3 个工作面,从左向右各工作面的编号依次为 5201 面、5202 面、5203 面,5201 面和 5203 工作面宽度 105 m,5202 工作面宽度 210 m,工作面间的隔离煤柱宽度 30 m。先开采 2<sup>-2</sup>煤,待覆岩移动破坏稳定后,再开采 5<sup>-2</sup>煤,2<sup>-2</sup>煤层一次采全高 4.2 m,5<sup>-2</sup>煤层一次采全高 6.6 m。工作面开采顶板垮落后,立即采用经纬仪观测移动变形量,采用应力采集仪器监测煤柱应力数据,并拍摄垮落图像。

## 2 相似模型试验结果分析

### 2.1 煤层覆岩垮落过程

#### 2.1.1 2<sup>-2</sup>煤覆岩垮落

2<sup>-2</sup>煤覆岩垮落图像见图 1。2201 工作面开采 57.5 m 时,基本顶初次垮落,垮落高度 5.0 m,垮落长度 52 m。工作面继续向前推进,顶板周期垮落步距平均为 20 m,覆岩离层裂缝和竖向破断裂隙向上部岩层发展。开采至 105 m 时,覆岩破坏高度达 60.8 m,顶部离层裂缝值为 1.2 m。开切眼一侧岩层破断角为 60°,开采侧岩层破断角为 55°。

2202 和 2201 工作面中间留设 1# 隔离煤柱,2202 工作面开采 63 m 时,基本顶初次垮落,覆岩破坏高度为 14.3 m,最大离层裂缝值 3.3 m。此后顶板周期性垮落,平均垮落步距 22.5 m。当工作面推进 135 m 时,覆岩破断发展到地表,地表呈现出塌陷坑。开采至 230 m 时,工作面停采,整个垮落空间呈不对称梯形,开切眼一侧岩层破断角为 64°,开采侧岩层破断角为 53°。

2203 和 2202 工作面中间留设 2# 隔离煤柱,开采至 62 m 时,基本顶初次垮落,覆岩破坏高度为 9.8 m。推进至 100 m 时,覆岩继续垮落,垮落高度达 37.5 m,工作面推进到 105 m 时停采。开切眼一侧岩层破断角为 60°,开采侧岩层破断角为 51°,呈偏态断裂。

在西部浅埋煤层高强度开采中往往难以形成稳定的“砌体梁”结构,顶板易出现台阶下沉,工作面顶板沿煤壁全厚切落<sup>[12]</sup>。模拟大柳塔煤矿 63# 钻孔地层结构,粉砂岩直接处露地表,没有厚散层,工作面顶板承担的压力较小。此外,煤层开采过程中模拟的是顶板自然垮落情况下的裂隙发育,没有布置支架。综合这两个原因,模拟中没有切顶现象,工作面顶板也没有出现沿煤壁全厚切落的现象。

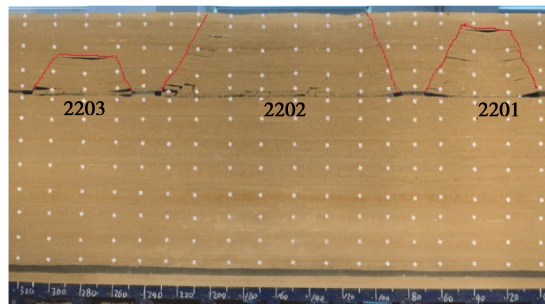


图 1 2<sup>-2</sup>煤层开采覆岩垮落

Fig. 1 Collapse of overlying strata after No. 2<sup>-2</sup> seam mining

#### 2.1.2 5<sup>-2</sup>煤覆岩垮落

5<sup>-2</sup>煤覆岩垮落图像见图 2。5201 工作面开采至 67.5 m,基本顶初步垮落,垮落高度 9 m。开采至 87 m 时,覆岩破坏高度为 21 m。工作面继续向前推进,离层裂隙和破断裂隙继续向上发展,开采至 105 m,再次出现较大范围的垮落,覆岩破坏高度为 35.5 m。开切眼一侧岩层破断角为 68°,开采侧岩层破断角为 56°。

5202 工作面开采至 67 m,基本顶初次垮落,垮落高度 4.5 m。开采至 85.5 m,覆岩破坏高度为 24 m,上部岩层形成悬臂梁(铰支梁)结构。工作面继续开采,顶板周期垮落步距平均为 25 m,当工作面推进至 230 m 时,覆岩垮落高度达 144.8 m,采空区中部裂隙逐渐压实,两侧破断裂隙发育。开切眼一侧岩层破断角为 60°,停采侧岩层破断角为 54°。

5203 工作面开采推进至 63 m,基本顶初次垮落,垮落高度 2.4 m。当工作面开采至 82.5 m 时,覆岩破坏

破断高度为 21.5 m,与上部未破断岩层形成较大离层空间。当推进至 105 m 时,覆岩破坏高度发展为 30 m。开切眼一侧岩层破断角为  $68^\circ$ ,开采侧岩层破断角为  $61^\circ$ 。

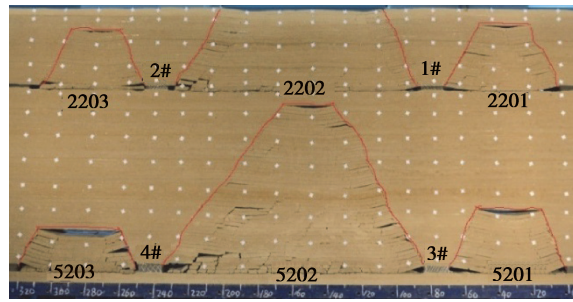


图 2  $5^{-2}$ 煤层开采覆岩垮落

Fig. 2 Collapse of overlying strata after No.  $5^{-2}$  seam mining

### 2.1.3 采动覆岩裂隙场演化规律

由采动裂隙网络素描图可知(图 3),沿工作面倾向开采,覆岩裂隙逐渐向工作面推进方向和上覆岩层方向扩展,对应于不同的开采距离形成不同的裂隙网络分布。采空区中部裂隙逐渐闭合,裂隙富集区主要集中在采空区两侧。采空区倾向方向,工作面间存在 30 m 宽的隔离煤柱,5201 面与 5203 面被煤柱隔开而成为非充分开采单元;隔离煤柱有效地分隔了工作面覆岩裂隙的横向贯通,同时也抑制了垮落空间的纵向扩展,使得各工作面开采形成了彼此独立的裂隙网络。

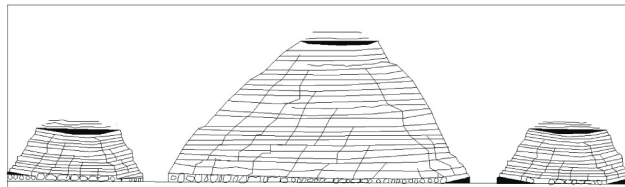


图 3  $5^{-2}$ 煤层开采覆岩裂隙网

Fig. 3 Fracture network of overlying strata after  $5^{-2}$  coal seam mining

## 2.2 上覆岩层移动规律

### 2.2.1 $2^{-2}$ 煤上覆岩层移动变形

$2^{-2}$ 煤 3 个工作面沿倾向方向开采结束后,上覆岩层沉降曲线分别如图 4 所示。越靠近煤层,顶板沉降量越大,2201 和 2203 工作面宽度 105 m,为非充分采动,上覆岩层沉降曲线呈“V”型,地表只发生较小沉降;2202 工作面开采达到充分采动,上覆岩层沉降曲线呈“U”型,地表发生较大沉降,中部区域形成下沉盆地。1# 和 2# 隔离煤柱正上方覆岩下沉量为零,是相邻工作面上覆岩层沉降曲线的拐点。

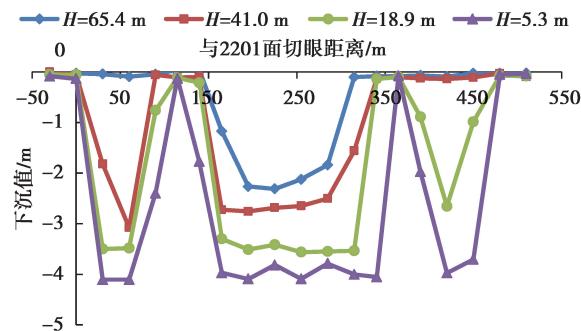


图 4  $2^{-2}$ 煤开采上覆岩层开采沉降曲线

Fig. 4 Subsidence curve of overburden after  $2^{-2}$  coal seam mining

### 2.2.2 $5^{-2}$ 煤上覆岩层移动变形

$5^{-2}$ 煤 3 个工作面沿倾向方向开采结束后,上覆岩层沉降曲线分别如图 5 所示。5201 工作面开采 105 m,



其上方第 11~13 行测点所在岩层发生较大沉降,沉降曲线呈“V”型,第 11 行( $H=48.3$  m)和第 10 行( $H=69$  m)测点所在岩层之间存在较大的离层空间。5202 工作面开采 230 m,第 7~13 行测点所在岩层破断垮落,沉降量较大,第 6 行测点所在岩层仅产生弯曲下沉,第 7 层( $H=132.9$  m)和第 6 层( $H=151.8$  m)测点所在岩层之间存在较大的离层空间。采空区上覆岩层沉降曲线呈“U”型,采空区中部沉降量大于两侧。5203 工做面推开采 105 m,仅上方的第 12、13 行测点所在岩层发生较大沉降,第 12 层和第 11 层测点所在岩层之间存在较大的离层空间。

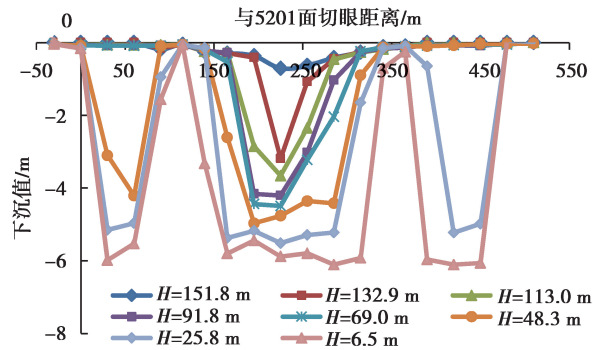


图 5  $5^{-2}$ 煤开采上覆岩层开采沉降曲线

Fig. 5 Subsidence curve of overburden after  $5^{-2}$  coal seam mining

### 2.3 煤柱应力变化特征

留设的 4 个煤柱中布置的压力盒记录了工作面开采过程中煤柱应力变化,如图 6 所示。1#煤柱的应力变化规律为:在 2201 和 2202 工作面开采过程中不断增加,越靠近 1#煤柱时应力增加速率越快,说明随 2201 工作面开采进行,垮落范围增大,形成的应力拱增大,需要煤柱及其上部岩层承担的荷载不断增大,1#煤柱最大应力为 5.86 MPa,应力集中系数为 3.15,由于 2203 工作面与 1#煤柱的距离过远,其开采对 1#煤柱应力没有影响。

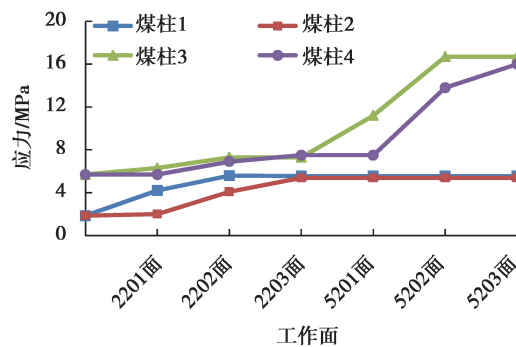


图 6 工作面开采中煤柱应力变化

Fig. 6 Stress change of coal pillars during working face mining

2#煤柱的应力变化规律为:2201 工作面开采对 2#煤柱没有影响,应力保持不变。在 2202 和 2203 工作面开采过程中,2#煤柱应力持续增加至 5.38 MPa,应力集中系数为 2.83。由于 5-2 煤工作面开采覆岩垮落高度和范围有限,没有波及到 2-2 煤工作面及留设的 1#煤柱和 2#煤柱,5-2 煤开采中应力基本不变。

3#煤柱的应力变化规律为:3#煤柱在 2201 和 2202 工作面开采后的增压区范围内,3#煤柱应力在 2201 和 2202 工作面开采中略微增加。在 5201 和 5202 工作面开采中 3#煤柱应力持续增大至 16.56 MPa,应力集中系数为 2.83;沿 5203 工作面倾向开采时,3#煤柱的压力基本保持不变,说明其开采对 3#煤柱没有影响。

4#煤柱的应力变化规律为:4#煤柱在 2202 和 2202 工作面开采 3 的底板增压区范围内,其应力在 2202 和 2203 工作面开采中有所增加。4#煤柱与 5201 工作面距离太远,其开采对 4#煤柱没有影响。在 5202 和

5203 工作面开采中 3 号煤柱应力持续增大至 16.0 MPa, 应力集中系数为 2.73。

实验测得研究区 2-2 煤和 2-2 煤的极限抗压强度分别为 14.5 和 19.5 MPa。根据煤柱应力变化, 计算得出 1 号煤柱和 2 号煤柱的安全系数分别为 2.47 和 2.70, 表明留设 30 m 宽的 1 号煤柱和 2 号煤柱处于稳定状态; 计算出 3 号煤柱和 4 号煤柱的安全系数分别为 1.18 和 1.22, 表明由于 30 m 宽的 3 号煤柱和 4 号煤柱在 2-2 煤开采的底板增压区范围内, 虽然处于稳定状态, 但安全性较低。

### 3 隔离煤柱合理留设

相似材料模拟试验结果表明, 隔离煤柱对控制覆岩运移及裂隙发育有重要作用。此外, 隔离煤柱的合理留设不仅能提高煤炭资源采出率, 还可以避开煤柱集中应力以提高巷道围岩稳定性, 减轻覆岩与地表非均匀沉降保护矿区地表生态<sup>[13]</sup>。

#### 3.1 区段煤柱合理留设宽度理论计算

区段煤柱的两侧分别为回采空间和采准巷道, 其掘进会在煤柱两侧产生各自的塑性区, 在煤柱中央存在一定宽度的弹性核区。若弹性核区的宽度大于煤层开采高度的 2 倍, 则煤柱处于稳定状态。根据塑性理论计算法, 煤柱保持稳定状态的宽度为<sup>[14]</sup>

$$B = x_0 + 2M + x_1, \quad (1)$$

式中:  $x_0$  为采空区在护巷煤柱一侧形成的塑性区宽度, m;  $M$  为采高, m;  $x_1$  为巷道在护巷煤柱另一侧形成的塑性区宽度, m。

考虑开采扰动影响的煤柱两侧塑性区宽度计算公式为<sup>[15]</sup>

$$x_0 = \frac{Md}{2 \tan \varphi_0} \left\{ \ln \left[ \frac{C + \sigma_1 \tan \varphi_0}{C + (\sigma_x \tan \varphi_0) / \beta} \right]^\beta + \tan^2 \varphi_0 \right\}, \quad (2)$$

式中:  $d$  为开采扰动因子,  $d = 1.5 \sim 3.0$ , 与开采扰动程度有关;  $\varphi_0$  为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $C$  为煤层黏聚力, MPa;  $\sigma_1$  为煤柱极限强度, MPa;  $\sigma_x$  为煤壁侧向平均约束应力, MPa;  $\beta$  为塑性区与核区界面的侧压系数, 按屈服区宽度最大的中性面位置计算。

根据大柳塔煤矿采矿地质生产条件以及实验、现场观测结果, 区段煤柱塑性区宽度计算的相关参数见表 3。

表 3 煤岩体计算参数

Table 3 Calculation parameters of coal and rock

煤层	$M/m$	$d$	$C/MPa$	$\varphi/(^\circ)$	$\beta$	$\sigma_1/MPa$	$\sigma_x/MPa$
2 <sup>-2</sup> 煤	4.2	3.0	1.2	30	0.3	14.5	0
5 <sup>-2</sup> 煤	6.6	3.0	1.4	32	0.4	19.5	0

取煤柱两侧塑性区宽度  $x_0 = x_1$ , 将各参数代入式(2), 得出 2<sup>-2</sup>煤和 5<sup>-2</sup>煤留设的区段煤柱的合理宽度分别为 18.6 m 和 24.5 m, 与大柳塔煤矿现场实测结果基本一致<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 上下煤柱合理错距

现场生产实践表明, 煤层群开采时区段煤柱应该留设合理的煤柱错距, 这不但能避免上、下煤层区段煤柱集中应力叠加, 还可以减轻煤柱造成的覆岩与地表非均匀沉降, 最大程度地保障煤矿安全生产。在煤层群下行式开采中, 合理的煤柱错距应该使下煤层巷道处于上煤层煤柱应力集中区之外, 并避免煤柱错距过大而使下煤层煤柱进入上煤层采空区压实区。根据物理模拟试验和生产实践, 避开煤柱集中应力叠加的合理煤柱错距计算模型如图 9 所示。则避开上煤层煤柱集中应力的合理区段煤柱错距为

$$H \tan \varphi_1 + b \leq L_s \leq H \tan \varphi_2 - a_2 - b, \quad (3)$$

式中:  $L_s$  为避开压力集中的合理煤柱错距, m;  $H$  为上下煤层间距, m;  $a_1$  为上煤层煤柱宽度, m;  $a_2$  为下煤层煤柱宽度, m;  $b$  为巷道宽度, m;  $\varphi_1$  为减压区内夹角, ( $^\circ$ );  $\varphi_2$  为减压区外夹角, ( $^\circ$ );  $L_1$  为上煤层煤柱集中应力

在下煤层的影响距离,  $m$ ;  $L_2$  为上煤层采空区增压区边界距煤柱水平距离,  $m$ 。

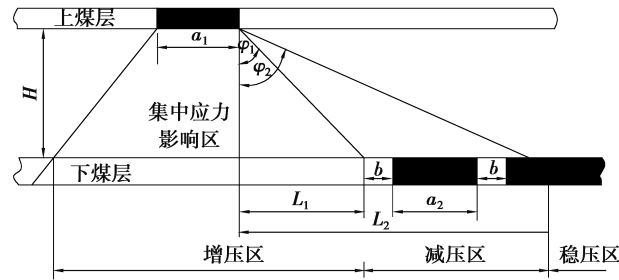


图 7 上下煤层煤柱错距计算模型

Fig. 7 Calculation model of coal pillar displacement in upper and lower coal seams

大柳塔煤矿三盘区的 52306 采掘工作面目前主采煤层为  $5^{-2}$  煤层, 煤层平均厚度 6.94 m, 地层平缓, 倾角多  $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ,  $5^{-2}$  煤层巷道宽度  $b = 5$  m,  $5^{-2}$  煤与上部  $2^{-2}$  煤层平均间距  $H = 156.8$  m。根据理论计算得出上、下煤层合理煤柱宽度分别为  $a_1 = 18.6$  m,  $a_2 = 24.5$  m。根据物理模拟实验,  $2^{-2}$  煤层应力传递角  $\varphi_1 = 30^{\circ}$ ,  $\varphi_2 = 60^{\circ}$ 。将上述参数代入式(3)得出,  $L_s$  的范围为 95.5~242.1 m。

煤柱合理留设不但要避免煤柱集中应力, 还应该控制覆岩与地表沉陷。物理模拟实验结果表明, 上、下煤柱对齐时, 覆岩与地表非均匀沉降明显, 这会导致矿区生态的损伤。在煤层开采过程中, 覆岩非均匀沉降是由覆岩结构自煤柱边界向采空区的回转运动造成的, 非均匀沉降区范围取决于顶板回转角, 黄庆享提出了基于均匀沉降的煤柱错距计算模型<sup>[17]</sup>:

$$L_s \geq \frac{M_1}{\tan \theta_1} + \frac{M_2}{\tan \theta_2}, \quad (4)$$

式中:  $M_1$  为上煤层采高,  $m$ ;  $M_2$  为下煤层采高,  $m$ ;  $\theta_1$  为上煤层顶板至压实区的回转角,  $(^{\circ})$ ;  $\theta_2$  为下煤层顶板至压实区的回转角,  $(^{\circ})$ 。

根据相似材料模拟试验结果,  $2^{-2}$  煤层和  $5^{-2}$  煤层顶板平均回转角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  均取值为  $10^{\circ}$ ,  $M_1 = 4.2$  m;  $M_2 = 6.6$  m, 将参数代入式(4)得出减轻覆岩与地表非均匀沉降的煤柱合理错距  $L_s \geq 61.4$  m。

综合考虑避免煤柱集中应力和控制覆岩与地表沉陷的煤柱错距, 以及提高煤炭资源回采率, 上下煤柱最佳错距为 95.5 m。

## 4 结 论

1)  $2^{-2}$  煤工作面沿倾向开采直接顶初次垮落步距一般为 60 m, 周期垮落步距为 15~22.5 m。  $5^{-2}$  煤工作面沿倾向方向开采基本顶初次垮落一般为 67 m, 周期垮落步距为 20~25 m。垮落空间呈不对称梯形, 开切眼侧的破断角大于开采侧  $10^{\circ}$  左右。

2)  $2^{-2}$  煤非充分采动冒裂带高度未发展至地表, 充分采动冒裂带高度发展至地表。  $5^{-2}$  煤充分采动冒裂带高度 144.8 m, 明显大于非充分采动冒裂带高度 35.5 m, 但不会导通  $2^{-2}$  煤采空区。

3) 采区倾斜方向上, 由于工作面间存在 30 m 宽隔离煤柱, 各工作面开采形成了彼此独立的垮落带, 隔离煤柱有效地分隔了相邻工作面垮落空间的横向贯通, 同时也抑制了垮落空间的纵向扩展。由于工作面间留设煤柱的支撑作用, 煤柱正上方覆岩沉降量很小, 是相邻工作面上覆岩层沉降曲线的拐点。

4) 根据煤柱应力动态变化, 工作面间留设 30 m 宽的 1#~4# 煤柱在  $2^{-2}$  煤层和  $5^{-2}$  煤层开采过程中应力最大值小于其极限抗压强度, 煤柱处于稳定状态。理论计算出了  $2^{-2}$  煤和  $5^{-2}$  煤合理煤柱宽度分别为 18.6 m 和 24.5 m, 得出了避开煤柱集中应力与控制地表均匀沉降的上下煤层煤柱最佳错距为 95.5 m。

## 参考文献:

- [1] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Linmin, et al. Coal mining and ecological water level protection in ecologically fragile areas. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [2] Zhang J C, Peng S P. Water inrush and environmental impact of shallow seam mining[J]. Environmental Geology, 2005,



- 48(8): 1068-1076.
- [ 3 ] Fan G W, Zhang D S. Mechanisms of aquifer protection in underground coal mining[J]. *Mine Water and the Environment*, 2015, 34(1): 95-104.
- [ 4 ] 薛东杰, 周宏伟, 任伟光, 等. 浅埋深薄基岩煤层组开采采动裂隙演化及台阶式切落形成机制[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1746-1752.  
XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, et al. Stepped shearing-induced failure mechanism and cracks propagation of overlying thin bedrocks in shallow deep coal seams mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1746-1752.(in Chinese)
- [ 5 ] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(2): 196-201.  
FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(2): 196-201.(in Chinese)
- [ 6 ] 师修昌, 孟召平, 杨圣, 等. 大柳塔煤矿多煤层开采覆岩变形破坏模拟研究[J]. *金属矿山*, 2015(3): 53-57.  
SHI Xiuchang, MENG Zhaoping, YANG Sheng, et al. Simulation of overburden deformation-failure during multi-coal mining in Daliuta coal mine[J]. *Metal Mine*, 2015(3): 53-57.(in Chinese)
- [ 7 ] Meng Z P, Shi X C, Li G Q. Deformation, failure and permeability of coal-bearing strata during longwall mining[J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 69-80.
- [ 8 ] 施峰, 王宏图, 舒才. 煤层倾角变化对采动覆岩变形规律影响的相似模拟试验研究[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(12): 36-45.  
SHI Feng, WANG Hongtu, SHU Cai. Similar simulation study on the influence of seam angle change on deformation law of overburden strata in coal seam mining[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(12): 36-45.(in Chinese)
- [ 9 ] Ju J F, Xu J L. Surface stepped subsidence related to top-coal caving longwall mining of extremely thick coal seam under shallow cover[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 78: 27-35.
- [10] 潘瑞凯, 曹树刚, 李勇, 等. 浅埋近距离双厚煤层开采覆岩裂隙发育规律[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2261-2268.  
PAN Ruikai, CAO Shugang, LI Yong, et al. Development of overburden fractures for shallow double thick seams mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2261-2268.(in Chinese)
- [11] 尹光志, 李星, 韩佩博, 等. 三维采动应力条件下覆岩裂隙演化规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 406-413.  
YIN Guangzhi, LI Xing, HAN Peibo, et al. Experimental study on overburden strata fracture evolution law in three dimensional mine-induced stress conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 406-413. (in Chinese)
- [12] 杨登峰, 陈忠辉, 洪钦锋, 等. 浅埋煤层开采顶板切落压架灾害的突变分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1): 122-127, 133.  
YANG Dengfeng, CHEN Zhonghui, HONG Qinfeng, et al. Catastrophic analysis of support crushing disasters while roof cutting in shallow seam mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1): 122-127, 133.(in Chinese)
- [13] Suchowerska A M, Carter J P, Merifield R S. Horizontal stress under supercritical longwall panels[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 240-251.
- [14] Jaiswal A, Shrivastva B K. Numerical simulation of coal pillar strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(4): 779-788.
- [15] Wang Q, Gao H K, Jiang B, et al. Research on reasonable coal pillar width of roadway driven along goaf in deep mine[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(21): 466.
- [16] 宋选民, 窦江海. 浅埋煤层回采巷道合理煤柱宽度的实测研究[J]. *矿山压力与顶板管理*, 2003, 20(3): 31-35.  
SONG Xuanmin, DOU Jianghai. Observation on rational coal-pillar width of mining tunnels of shallow coal seam[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2003, 20(3): 31-35. (in Chinese)
- [17] 黄庆享, 杜君武. 浅埋煤层群开采的区段煤柱应力与地表裂缝耦合控制研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 591-598.  
HUANG Qingxiang, DU Junwu. Coupling control of pillar stress and surface cracks in shallow coal seam group mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 591-598.(in Chinese)