

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0462

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0462

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

黄庆享,杜君武

(西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054)

摘要:为了探索浅埋煤层群开采减缓煤柱集中压力并实现地表均匀沉降和地表裂缝耦合控制,通过物理模拟和数值计算揭示了煤层群开采中不同区段煤柱错距的间隔岩层破断规律、煤柱集中应力分布规律、覆岩和地表裂缝发育规律及地表沉降规律,掌握了不同区段煤柱错距与煤柱应力集中及覆岩裂隙演化的关系。研究得出,根据煤层间岩层的破断规律,确定合理的上下煤层区段煤柱错距,可避免上下煤层区段煤柱间的集中应力叠加和煤柱支承影响区的岩层非均匀沉降,实现煤层群开采的应力和裂缝耦合控制。建立了浅埋煤层群开采的煤柱群集中应力和地裂缝控制模型,得出了避开煤柱集中应力和实现地表均匀沉降的耦合判据,揭示了减缓煤柱群集中应力和实现地表均匀沉降的机理。

关键词:浅埋煤层群;煤柱错距;煤柱应力;地表裂缝;耦合控制

中图分类号:TD32 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)03-0591-08

Coupling control of pillar stress and surface cracks in shallow coal seam group mining

HUANG Qingxiang, DU Junwu

(School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the coupling control of reducing coal pillar pressure concentration and realizing uniform surface subsidence to reduce surface cracks in shallow buried coal seams mining, the physical simulation and numerical calculation are employed. The interval strata breaking form, the concentrated stress distribution of coal pillars, the overburden and surface cracks and the ground surface subsidence in different coal pillar stagger distances are obtained. The relationship of the coal pillar stagger with the evolution of coal pillar stress concentration and of overburden fracture is discovered. According to the study, the determination of the reasonable upper and lower coal pillars stagger by interval layer breaking form can avoid the section coal pillar concentrated stress superposition and non-uniform strata subsidence in coal pillar supporting influence area, and realize the coupling control of stress and cracks in shallow coal seam group mining. In this paper, the control model of concentrated stress and ground crack of coal pillar group is established, and the coupling criterion to avoid the coal pillar concentrated stress and realize the uniform surface subsidence is put forward, so the mechanism of reducing the stress concentration of coal pillar and realizing the uniform subsidence of the ground surface is revealed.

Key words: shallow seam group; coal pillar stagger distance; coal pillar stress; surface crack; coupling control

收稿日期:2017-04-10 修回日期:2018-01-22 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674190,51174278)

作者简介:黄庆享(1966—),男,新疆沙湾人,教授,博士生导师。Tel:029-85583143, E-mail:huangqx@xust. sn. cn

陕北侏罗纪煤田是世界七大煤田之一,主要赋存浅埋煤层^[1-2],其中 60% 的储量属于浅埋煤层群开采^[3],实现环境友好的开采是该煤田科学采矿的重大课题^[4-5]。浅埋煤层群开采主要存在两方面问题:一是上煤层区段煤柱集中应力影响安全生产;二是煤层群开采形成的地表裂隙严重破坏环境。

长期以来,我国学者在单一浅埋煤层开采领域取得了丰硕的研究成果。对于煤层群开采,分别针对煤柱集中应力传递规律、煤巷留设位置^[6]及覆岩裂隙规律开展了研究。张百胜等^[7]研究了煤柱支撑压力在底板的分布规律,提出了采用应力改变率确定极近距离下部煤层回采巷道的合理位置方法;张炜等^[8]研究了极近距离上位煤层开采后底板破坏深度,确定了 9 m 间距条件下巷道内错 7.5 m 布置的方法;周道祥^[9]用拉梅-麦克斯韦方程给出了平面楔及半平面受集中力的解析解;王文学等^[10]对厚松散含水层下开采的覆岩裂隙发育时间和裂隙闭合效应研究表明,开采 15 a 后覆岩最大导水裂隙高度降低了近 40%;黄汉富等^[11]采用 UDEC 模拟了万利矿区煤层群采动裂隙发育高度;姚邦华等^[12]模拟了重复采动下覆岩裂隙发育规律;李树清等^[13]研究了煤层群双重卸压开采覆岩裂隙动态演化规律;于斌^[14]研究了多煤层上覆破断顶板群结构演化及其对下煤层开采的影响;胡振琪等^[15-16]研究了风沙区高强度开采的地表移动和变形特征和不同土层厚度的地表下沉规

律。目前,基于煤柱群合理布置及其应力场与地表裂隙耦合控制,实现井下安全开采与地表环境保护的系统研究较少。

本文以柠条塔煤矿北翼东区浅埋煤层群为背景,通过物理相似模拟、数值计算和地表裂缝实测,研究了不同错距的煤柱集中应力和地表裂缝发育规律,得出了煤柱应力和地表裂缝的耦合控制方法,为环境友好的浅埋煤层群开采提供科学依据。

1 浅埋煤层群的煤柱群结构效应模拟

1.1 实验模型设计

实验原型为柠条塔煤矿北翼东区工作面,主采 1⁻² 煤层和 2⁻² 煤层,为近水平煤层。1⁻² 煤层平均厚 1.84 m,2⁻² 煤层平均厚 5 m,1⁻² 煤层与 2⁻² 煤层平均间距 33 m。1⁻² 煤层埋深 110 m 左右,基岩厚度 70 m,松散土层厚度 40 m。矿井煤层属于近距离浅埋煤层群,采用长壁一次采全高综采,1⁻² 煤层工作面长度 245 m,2⁻² 煤层工作面长度 295 m,煤柱宽度 20 m。

实验采用 3 m 平面模型,几何相似比 1:200,煤岩层物理力学参数及相似配比见表 1,2。按照相似定理,时间相似比为 0.071,容重、泊松比、内摩擦角相似比为 1,应力相似比为 0.003 3。模型底部铺设称重传感器,岩层和地表设置位移测点,开采时进行位移、应力观测和覆岩裂隙照相素描。

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal strata

层序	岩性	容重/(MN·m ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	黏聚力/MPa	泊松比	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
1	红土	18.6	0.29	33.42	0.086	0.35	37	12
2	砂质泥岩	25.6	6.70	2 400	0.26	0.24	1 539	968
3	粉砂岩	24.2	31.9	605	0.65	0.32	560	229
4	中粒砂岩	21.6	35.3	1 599	0.80	0.29	1 269	620
5	粉砂岩	24.2	41.9	605	0.65	0.32	560	229
6	中粒砂岩	23.3	40.6	1 949	1.50	0.28	1 477	761
7	1 ⁻² 煤层	12.9	15.7	845	1.30	0.28	640	330
8	细粒砂岩	22.3	25.6	953	1.20	0.27	1 005	521
9	细粒砂岩	22.7	29.6	1 258	1.50	0.29	998	488
10	粉砂岩	24.4	46.0	995	0.90	0.30	829	383
11	细粒砂岩	23.4	48.5	1 629	1.90	0.27	1 180	641
12	粉砂岩	24.0	45.3	924	1.20	0.30	770	355
13	细粒砂岩	26.0	43.6	963	1.50	0.35	1 369	963
14	细粒砂岩	23.0	45.6	2 113	2.20	0.27	1 531	832
15	2 ⁻² 煤层	13.4	13.8	845	1.40	0.27	612	333
16	粉砂岩	23.4	20.5	135	0.15	0.34	141	51
17	细粒砂岩	22.8	39.1	3 627	2.20	0.27	2 628	1 428

表2 相似模拟材料配比
Table 2 Ratio of similar simulation material

序号	岩性	厚度/cm	配比号	耗材/(kg·cm ⁻¹)(每层用量)			
				河沙	石膏	大白粉	粉煤灰
1	红土	21	沙:土:油	*			
2	砂质泥岩	7	928	12.9	0.288	1.152	
3	粉砂岩	11	837	8.64	0.288	0.672	
4	中粒砂岩	14	837	4.32	0.144	0.336	
5	粉砂岩	3	937	4.32	0.144	0.336	
6	中粒砂岩	5	828	8.53	0.213	0.853	
7	1 ⁻² 煤层	1	20:20:1:5	3.39	0.170	0.850	3.39
8	细粒砂岩	1.5	937	8.64	0.288	0.672	
9	细粒砂岩	3	837	8.53	0.320	0.747	
10	粉砂岩	2	828	8.53	0.213	0.853	
11	细粒砂岩	3	837	8.53	0.320	0.747	
12	粉砂岩	0.5	937	4.32	0.144	0.336	
13	细粒砂岩	5.5	828	8.53	0.213	0.853	
14	细粒砂岩	1	937	6.48	0.216	0.504	
15	2 ⁻² 煤层	2.5	20:20:1:5	3.39	0.170	0.850	3.39
16	粉砂岩	2	937	7.78	0.259	0.605	
17	细粒砂岩	4	837	5.97	0.224	0.523	

注: *表示耗材每层用量河沙8.64:黏土8.64:硅油1.92。

1.2 不同煤柱错距的覆岩垮落与煤柱应力

根据物理模拟,当2⁻²煤层与1⁻²煤层区段煤柱重叠布置时(图1(a)),2⁻²煤层煤柱应力峰值最大。当上下煤柱边对边错距为0时(图1(b)),间隔岩层出现明显裂隙。随着煤柱错距增加,集中应力不断减小。当2⁻²煤层与1⁻²煤层的区段

煤柱错距40 m时(1.3倍层间距,图1(c)),上煤层煤柱随下煤层顶板垮落而下沉,上、下煤柱应力减小。随着煤柱错距继续增大,当2⁻²煤层煤柱处于1⁻²煤层采空区的压实区时,应力开始升高。下煤层的煤柱垂直应力呈先降低、后升高的变化规律,如图2所示。

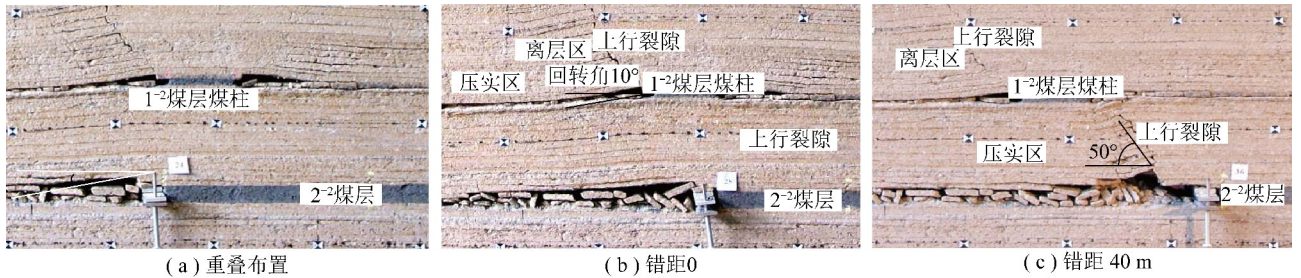


图1 不同区段煤柱错距覆岩垮落形态

Fig. 1 Overburden caving in different stagger of coal pillar

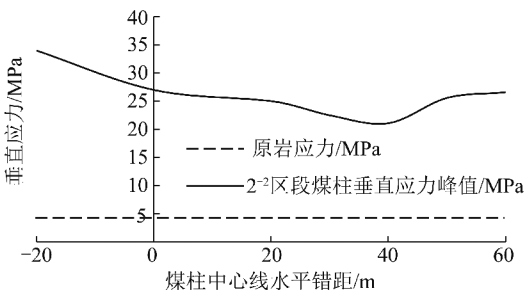


图2 不同煤柱错距时2⁻²煤层煤柱最大垂直应力变化规律

Fig. 2 Max. vertical stress of 2⁻² coal pillar in different stagger

1.3 不同煤柱错距覆岩裂隙演化规律

(1) 工作面地表裂缝发育基本规律

根据对柠条塔煤矿北翼东区工作面地表裂缝实测和覆岩裂隙物理模拟,得出如下基本规律:

覆岩裂隙:工作面开采后,覆岩内部不断出现离层裂隙和上行裂隙。离层裂隙由上部覆岩不同步下沉引起,随顶板下沉和垮落,在采空区中央的塌陷盆地内压实闭合。而在工作面四周边界附近,随着顶板断裂和回转,形成集中发育的“上行裂隙”。上行裂

隙的发育存在一定角度(约 50°),上煤层煤柱位于破断岩层线之内时,将充分下沉,煤柱的主要应力也不再向破断线外传递。因此,煤层间岩层厚度和岩层破断角决定着充分下沉的位置,也决定着避开煤柱应力叠加的距离。

地表裂缝:如图3所示,包括开切眼边界裂缝、沿工作面间区段煤柱的边界裂缝、平行工作面煤壁周期性出现的平行裂缝。其中,区段煤柱边界裂缝和平行裂缝为主要裂缝。随着工作面推进,地表平行裂缝进入下沉盆地后减小或闭合。而区段煤柱边界裂缝受留设煤柱位置、上下煤层区段煤柱错距等影响较大,是地表裂缝控制的主要对象。

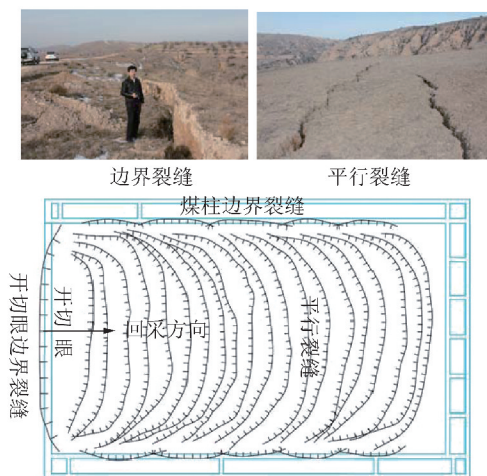


图3 实测 1^{-2} 和 2^{-2} 单一煤层工作面地表裂缝分布一般规律

Fig. 3 Distribution of surface crack of single coal seam face

(2) 2^{-2} 煤层与 1^{-2} 煤层区段煤柱重叠布置

2^{-2} 煤层与 1^{-2} 煤层区段煤柱重叠布置时, 2^{-2} 煤

层间隔层顶板向左侧采空区回转断裂,导致 1^{-2} 煤层煤柱左侧叠置采空区边界裂隙明显大于右侧单一煤层开采的裂隙,如图1(a)所示,下煤层开采后上煤层左侧边界裂隙由原来的0.5 mm宽(原型10 cm)扩大到1.5 mm(原型30 cm)。

(3) 2^{-2} 煤层与 1^{-2} 煤层区段煤柱错开布置

2^{-2} 煤层与 1^{-2} 煤层区段煤柱边对边错距15 m时,间隔层出现明显离层和上行裂隙,间隔层顶板回转, 1^{-2} 煤层区段煤柱下沉,边界裂隙减小。 2^{-2} 煤层与 1^{-2} 煤层区段煤柱错距40 m时,间隔层顶板整体破断垮落,破断角为 50° 。 1^{-2} 煤层区段煤柱随底板岩层整体沉降,煤柱支承影响区“倒梯形”顶板整体下沉(图4),工作面煤柱边界上行裂隙及地表裂缝趋于闭合,前后对比如图5(a)和(c)所示。

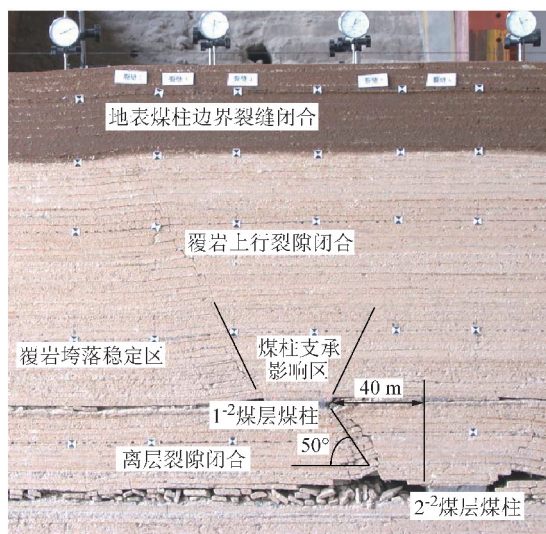
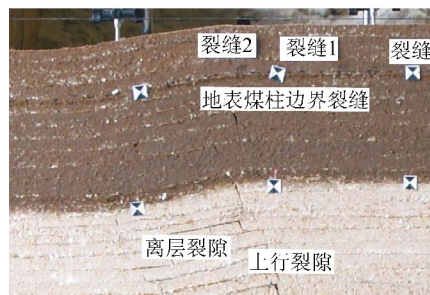
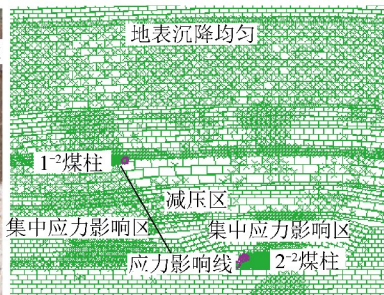


图4 区段煤柱错距大于40 m覆岩裂隙及地表裂缝

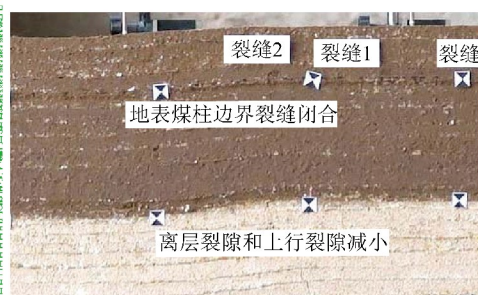
Fig. 4 Overburden crack closing when stagger over 40 m



(a) 重叠布置地表不均沉降,地表裂缝增大



(b) 煤柱错距40 m,煤柱应力错峰,地表沉降均匀



(c) 煤柱错距40 m,地表均匀沉降,地表裂缝闭合

图5 地表裂缝演化

Fig. 5 Surface crack evolution

(4)不同煤柱错距的地表沉降与裂隙演化

不同煤柱错距时的物理模拟地表下沉曲线如图6所示,当 2^{-2} 与 1^{-2} 煤层区段煤柱重叠布置时,煤柱群影响区(图中300 m左右)不均匀沉降落差最大,

为3.8 m;错距30 m时落差为2.6 m;错距40 m时,落差迅速减小为最小1.6 m,错距继续增大落差降低减缓。研究表明,合理错距煤柱群地表下沉落差减小58%,地表均匀沉降程度大大提高。

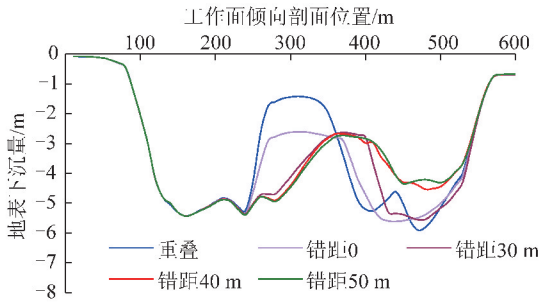


图6 不同煤柱错距时地表下沉曲线

Fig. 6 Surface subsidence at different stagger of coal pillar
1⁻²煤层左工作面位于60~305 m,右工作面位于325~570 m,煤柱右错布置

当重叠布置时,1⁻²煤层覆岩上行裂隙活化,不均匀沉降增大,导致地表边界裂隙扩大(图5(a))。煤柱错距40 m后,1⁻²煤层煤柱处于间隔岩层破断压实区(图5(b)),随破断岩层大幅下沉,煤柱应力集中区“错开”,不均匀沉降减弱,覆岩及地表裂隙减小甚至闭合(图5(c))。

2 避开煤柱集中应力的区段煤柱错距

2.1 不同错距煤柱垂直应力分布规律

采用 UDEC 计算得出,不同区段煤柱错距时下煤层煤柱垂直应力分布规律如图7和8所示。

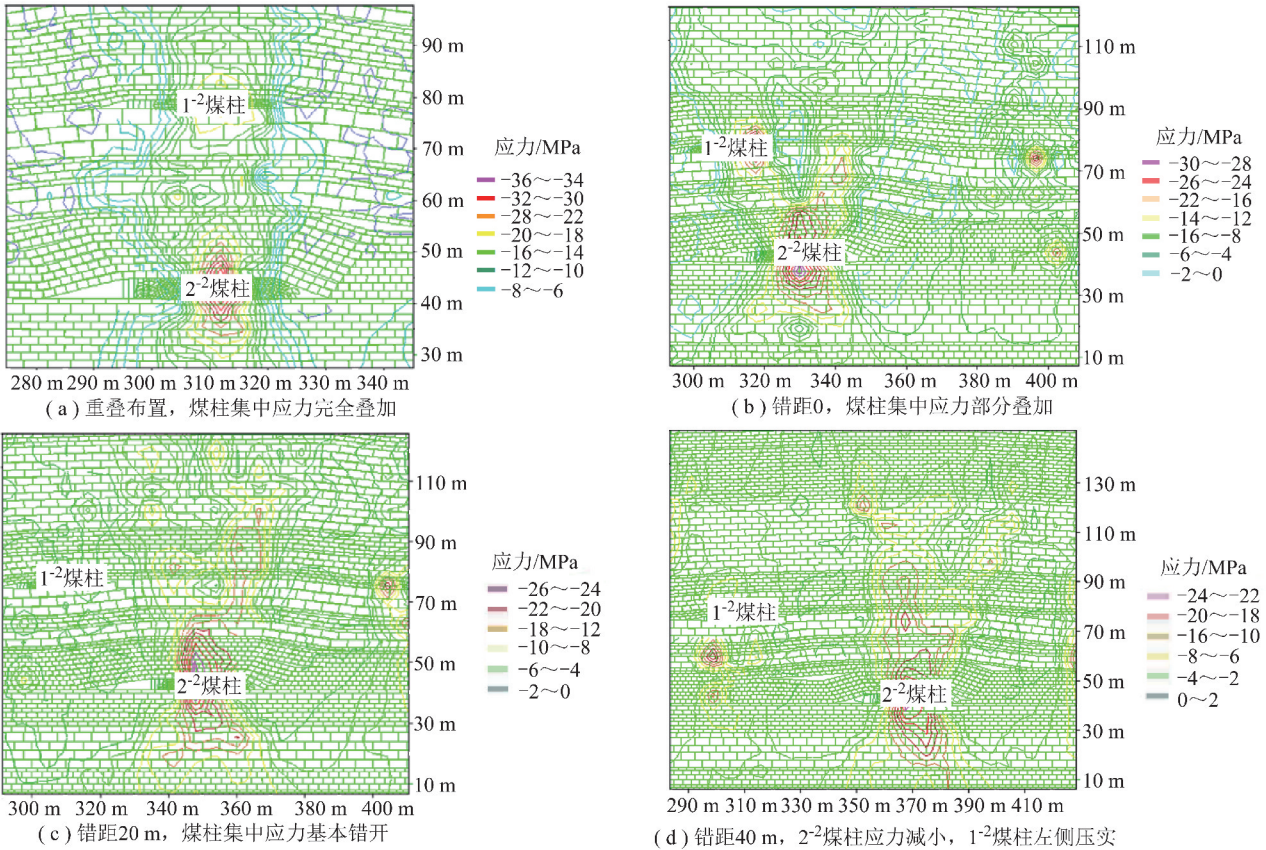


图7 不同煤柱错距的垂直应力

Fig. 7 Vertical stress of different stagger mining

(1)煤柱重叠布置或错距小于0(煤柱中心线水平错距0~20 m)时,下煤层工作面前方完全处于上下煤柱叠加应力影响区内,最大应力在煤柱的中间位置,支承应力水平分布范围达到8 m,应力值保持在20 MPa以上,导致下煤层工作面巷道围岩难以控制,煤壁容易出现片帮。

(2)随着煤柱错距的增大,下煤层煤柱垂直应力逐渐减小,当煤柱错距为40 m时,应力大于20 MPa的范围为3 m左右,且煤柱上应力分布基本均匀,煤柱稳定性较好,有利于巷道维护。

(3)当错距达到50 m时,下煤层区段煤柱处于上煤层开采的压实区中,下煤层煤柱的垂直应力值又略有增加,但增幅不大。

(4)不同错距的煤柱应力分布如图8所示,最大应力变化规律与物理模拟基本一致(图2)。随着煤柱错距的增加,下煤层煤柱垂直应力峰值呈现先降低、后升高的变化特征,存在最佳区间。当煤柱重叠布置时,下煤层应力峰值最大;随着水平错距的增加,下煤层区段煤柱应力峰值不断减小;当煤柱中心距为40 m时,下煤层煤柱应力峰值最小。煤柱错距大于

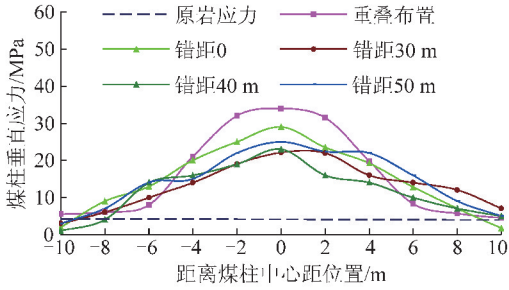


图 8 不同错距 2⁻² 煤层煤柱上的垂直应力分布规律

Fig. 8 Vertical stress distribution on 2⁻² pillar in different stagger

50 m 后,下煤层煤柱处于上煤层采空区压实区,应力峰值又开始有所上升。

综上所述,上下煤柱布置存在合理的错距,按照柠条塔煤矿条件,合理错距为 40 m 左右。

2.2 避开煤柱集中应力的区段煤柱错距

煤层群开采的合理的煤柱错距,应当避免上、下煤层区段煤柱集中应力叠加,保障安全生产;同时,减轻煤柱造成的地表非均匀沉降和裂缝发育。

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。即,使下煤层煤柱处于上煤层煤柱侧的减压区范围内。

根据物理模拟和数值计算分析,建立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

$$h \tan \varphi_1 + b \leq L_\sigma \leq h \tan \varphi_2 - a_2 - b \quad (1)$$

式中, L_σ 为合理煤柱错距, 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; φ_1 为减压区内夹角, (°); φ_2 为减压区外夹角, (°)。

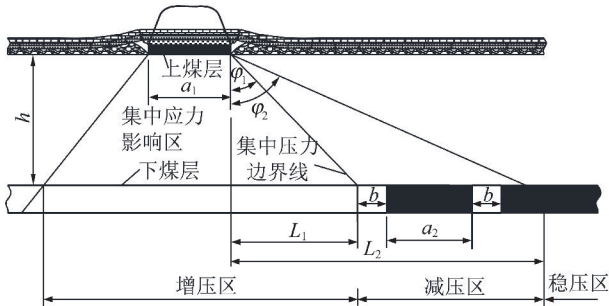


图 9 避开煤柱集中应力的煤柱错距计算模型

Fig. 9 Stagger distance model of avoiding coal pillar stress concentration

图 9 中,减压区内夹角 φ_1 为煤柱底板应力集中边界线与垂线的夹角,大致与间隔层破断角成余角关系。根据物理模拟,间隔层破断角为 50°,减压区内

夹角为 40°。减压区外夹角 φ_2 为下煤层稳压区边界至上煤层煤柱边界连线与垂线的夹角。 φ_1 和 φ_2 可按照下列公式计算:

$$\tan \varphi_1 = \frac{L_1}{h} \quad (2)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{L_2}{h} \quad (3)$$

式中, L_1 为上煤层煤柱集中应力在下煤层的影响距离, m; L_2 为上煤层采空区压实区边界距煤柱水平距离, m。

3 减轻地表损害的区段煤柱错距模型

浅埋煤层群开采的地表裂缝产生的主要原因是地表非均匀沉降,虽然采区边界裂缝难以避免,但在沉降盆地内普遍存在的工作面区段煤柱地表裂缝,可以通过合理的煤柱布置来减弱或消除。

物理模拟表明,不同的煤柱错距对地表均匀沉降具有显著影响。1⁻² 煤层和 2⁻² 煤层重叠布置和边对边错距 40 m 的地表下沉曲线如图 10 所示。可见,在地表下沉盆地内(曲线中部),煤柱重叠布置时煤柱上方的下沉最小,形成 W 型地表下沉曲线。随着煤柱错距的增加,盆地中央地表沉降趋于平缓。煤柱错距为 40 m 时,盆地中央煤柱区地表沉降差减少约 45%。

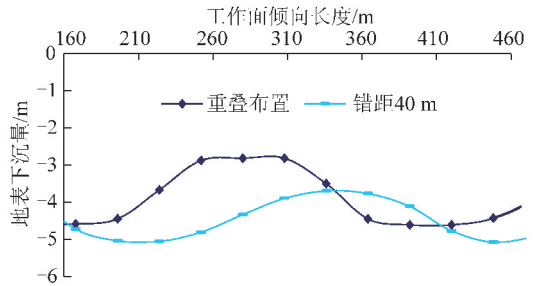


图 10 不同煤柱错距地表下沉曲线

Fig. 10 Surface subsidence curves of different coal pillar stagger

模拟还表明,工作面布置按照合理的错距布置,可以实现煤层群开采地表盆地均匀沉降。图 11 为柠条塔煤矿北翼东区 1⁻², 2⁻² 和 3⁻¹ 煤层(厚度 2.7 m, 与上煤层间距 36 m) 开采情况,通过合理的工作面错距布置,盆地内地表趋于平坦。

根据物理模拟,当上煤层煤柱进入下煤层顶板充分垮落压实区,煤柱充分下沉,释放煤柱支撑影响区的非均匀沉降,地层趋于均匀沉降,煤柱边界裂缝明显减小或闭合,如图 12 所示。则,兼顾地表均匀沉降和减轻地表裂缝的合理煤柱错距为

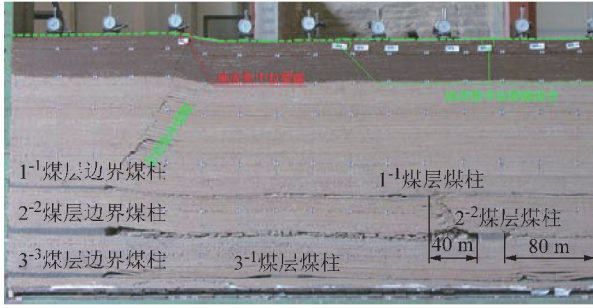


图 11 合理煤柱错距地表下沉盆地平坦

Fig. 11 Flat subsidence basin by reasonable coal pillars stagger

$$L_e \geq l_1 + l_2$$

式中, l_1 为上煤层煤柱与顶板压实区距离, m; l_2 为下煤层煤柱与顶板压实区距离, m。

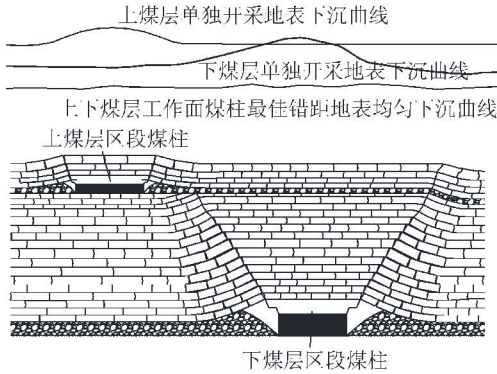


图 12 煤层群开采地表均匀沉降机理示意

Fig. 12 Surface homogeneous subsidence of group mining

根据物理模拟, 顶板压实区是由顶板结构自煤柱边界向采空区的回转运动造成, 设 α_1 为上煤层顶板至压实区的平均回转角, α_2 为下煤层顶板至压实区的平均回转角, 如图 13 所示, 则有 $l_2 = \frac{M_2}{\tan \alpha_2}$, $l_1 =$

$\frac{M_1}{\tan \alpha_1}$ 。可得上、下煤层合理煤柱错距为

$$L_e \geq \frac{M_1}{\tan \alpha_1} + \frac{M_2}{\tan \alpha_2} \quad (5)$$

式中, L_e 为减轻地表裂缝的合理煤柱错距, m; M_1 为上煤层采高, m; M_2 为下煤层采高, m; α_1 为上煤层顶板平均回转角, ($^\circ$); α_2 为下煤层顶板平均回转角, ($^\circ$)。

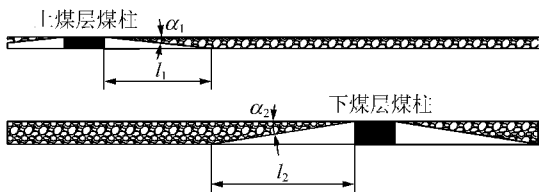


图 13 基于均匀沉降的煤柱错距计算模型

Fig. 13 Pillar stagger calculation model for uniform subsidence

4 应力场和裂隙场的耦合控制

根据物理模拟和数值计算分析, 煤层群开采中, 由于煤柱的存在导致覆岩非均匀沉降, 一方面造成煤柱压力集中影响下煤层巷道支护和安全开采; 另一方面在煤柱附近的顶板形成拉应力, 造成拉裂缝扩展。通过合理的上下煤层煤柱错距布置, 减小因煤柱引起的非均匀沉降, 就可以减轻煤柱压应力集中和顶板拉应力, 减小覆岩裂隙, 实现应力和裂隙的耦合控制。

(1) 应力场和裂隙场耦合控制的煤柱错距

浅埋煤层群开采中, 采用合理的煤柱错距, 使下煤层区段煤柱位于应力降压区(式(1)), 同时兼顾覆岩均匀沉降和减轻裂缝发育(式(5)), 就可实现环境友好的安全开采。则实现减轻煤柱集中应力和地表裂缝耦合控制的煤柱错距为

$$L \subseteq L_e \cap L_\sigma \quad (6)$$

式中, L 为合理的上下煤层错距, m。

(2) 柠条塔煤层群合理区段煤柱错距确定

柠条塔北翼东区煤层倾角 1° 左右, 目前主采煤层为 1^{-2} 煤层(上煤层)和 2^{-2} 煤层(下煤层), 1^{-2} 煤层平均厚度 $M_1 = 2.0$ m, 2^{-2} 煤层平均厚度 $M_2 = 5.0$ m, 层间距 $h = 33$ m, 上、下煤层煤柱宽度 $a_1 = a_2 = 20$ m, 2^{-2} 煤层巷道宽度 $b = 5$ m。根据物理模拟实验, 1^{-2} 煤层应力传递角 $\varphi_1 = 40^\circ$, $\varphi_2 = 70^\circ$, 顶板平均回转角 α_1 和 α_2 都取 10° 。

$$h \tan \varphi_1 + b \leq L_\sigma \leq h \tan \varphi_2 - a_2 - b$$

由式(1)计算可得 $33 \text{ m} \leq L_\sigma \leq 66 \text{ m}$; 由式(5)计算可得 $L_e \geq 11.3 + 28.4 \approx 40 \text{ m}$; 由式(6)可得 $L = 40 \sim 66 \text{ m}$ 。即可减轻煤柱集中应力和地表裂缝发育的合理煤柱错距为 $40 \sim 66 \text{ m}$, 该结果与物理模拟一致。

柠条塔煤矿在北翼 2^{-2} 煤层 N1206 和 1^{-2} 煤层 N1112 工作面和 N1114 斜交叠置区进行了开采试验。实践表明, 在煤柱错开区域的下煤层煤柱片帮现象比重叠布置区明显减小, 地表边界裂缝宽度的增加也明显小于煤柱叠置区。矿区计划下一步按照 $40 \sim 60 \text{ m}$ 的错距平行布置工作面进行开采。

5 结 论

(1) 浅埋煤层群开采过程中, 随着上、下煤层区段煤柱错距的增大, 下煤层区段煤柱垂直应力呈现先降低、后升高的特征, 存在减压区。区段煤柱造成的地表煤柱边界裂缝是地表主要裂缝, 可以通过合理区段煤柱错距使地表裂隙减小或闭合。

(2) 煤柱集中应力和地表裂缝都与不均匀沉降有关, 通过合理布置上下煤层错距, 可以减弱煤柱支

承区的不均匀沉降,既可以减小煤柱集中应力,又可以减轻地裂缝发育,存在耦合控制效应。

(3)提出了避开上煤层煤柱集中应力和实现地表均匀沉降的煤柱错距计算公式,通过两个判据的交集,给出了合理区段煤柱错距确定方法。结合柠条塔煤矿北翼东区工作面地质条件,得出 2^{-2} 煤层和 1^{-2} 煤层区段煤柱合理错距范围为40~66 m,为环境友好的浅埋煤层群开采提供了科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.
HUANG Qingxiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam longwall mining [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [2] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.
HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [3] 王双明,黄庆享,范立民,等. 生态脆弱矿区煤炭资源保水开采关键技术研究[M]. 北京:科学出版社,2010:41-47.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. The key technology of water conservation mining in fragile ecologically mining coal resources[M]. Beijing: Science Press, 2010: 41-47.
- [4] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):1-10.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.
- [5] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green mining technology in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [6] 黄庆享,杜君武,刘寅超. 浅埋煤层群工作面合理区段煤柱留设研究[J]. 西安科技大学学报,2016,36(1):19-23.
HUANG Qingxiang, DU Junwu, LIU Yinchao. Study on section coal pillar of group mining in shallow buried coal seams[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(1): 19-23.
- [7] 张百胜,杨双锁,康立勋,等. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定方法的探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):97-101.
ZHANG Baisheng, YANG Shuangshuo, KANG Lixun, et al. Discussion on method for determining reasonable position of roadway for ultra-close multi-seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 97-101.
- [8] 张炜,张东升,陈建本,等. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(2):182-188.
ZHANG Wei, ZHANG Dongsheng, CHEN Jianben, et al. Determining the optimum gateway location for extremely close coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 182-188.
- [9] 周道祥. 用拉梅-麦克斯韦方程解平面楔及半平面受集中力问题[J]. 力学与实践,2007,29(4):71-73.
ZHOU Daoxiang. Use lame-plane wedge maxwell equations and half with concentrated force problem[J]. Mechanics and Practice, 2007, 29(4): 71-73.
- [10] 王文学,隋旺华,董青红,等. 松散层下覆岩裂隙采后闭合效应及重复开采覆岩破坏预测[J]. 煤炭学报,2013,38(10):1728-1734.
WANG Wenxue, SUI Wanghua, DONG Qinghong, et al. Closure effect of mining-induced fractures under sand aquifers and prediction of overburden failure due to remining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1728-1734.
- [11] 黄汉富,闫志刚,姚邦华,等. 万利矿区煤层群开采覆岩裂隙发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):619-624.
HUANG Hanfu, YAN Zhigang, YAO Banghua, et al. Research on the process of fracture development in overlying rocks under coal seams group mining in Wanli mining area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 619-624.
- [12] 姚邦华,周海峰,陈龙. 重复采动下覆岩裂隙发育规律模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(3):443-446.
YAO Banghua, ZHOU Haifeng, CHEN Long. Numerical simulation about fracture development in overlying rocks under repeated mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 443-446.
- [13] 李树清,何学秋,李绍泉,等. 煤层群双重卸压开采覆岩移动及裂隙动态演化的实验研究[J]. 煤炭学报,2013,38(12):2146-2151.
LI Shuqing, HE Xueqiu, LI Shaoquan, et al. Experimental research on strata movement and fracture dynamic evolution of double pressure-relief mining in coal seams group [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2146-2151.
- [14] 于斌. 多煤层上覆破断顶板群结构演化及其对下煤层开采的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(2):261-266.
YU Bin. Structural evolution of breaking roof group of multiple coal seams and its influence on lower coal seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 261-266.
- [15] HU Zhenqi, CHEN Chao, XIAO Wu, et al. Surface movement and deformation characteristics due to high-intensive coal mining in the windy and sandy region [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(3): 339-348.
- [16] HU Haifeng, LIAN Xugang. Subsidence rules of underground coal mines for different soil layer thickness; Lu'an Coal Base as an example, China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(3): 178-185.