

采矿与岩层控制工程学报

JOURNAL OF MINING AND STRATA CONTROL ENGINEERING



厚黄土层极近距离采空区下相邻工作面相向开采时序研究

杜君武 黄庆亭 韦业豪 王雨凡

Study on time sequence for opposite mining of adjacent working faces under ultra-close coal seam goafs with thick loess layer

DU Junwu, HUANG Qingxiang, WEI Yehao, WANG Yufan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1351>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极近距离煤层开采无煤柱自成巷控制方法研究

Research on control methods of automatically-formed roadway without coal pillar for extremely close-distance coal seams

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(1): 013532-013532 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20240023.001>

近距离煤层群半煤岩上保护层开采卸压增透效应研究

Study on pressure relief and permeability enhancement effect of upper protective layer mining of semi-coal rock in close distance coal seam group

采矿与岩层控制工程学报. 2022, 4(2): 023524-023524 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20211111.001>

浅埋近距离煤层过平行煤柱开采强矿压机理研究

Research on the mechanism of strong ground pressure under parallel coal pillars in shallow close-distance coal seam mining

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(5): 053022-1-053022-12 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024.05.005>

浑春河下近距离煤层开采及对河堤损害影响的研究

Research on river dike failure of short-distance coal seams mining under Hunchun River

采矿与岩层控制工程学报. 2020, 2(1): 013538-013538 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2020.01.004>

厚硬顶板10 m超大采高工作面煤壁片帮特征及影响因素

Study on rib spalling characteristics and influencing factors of coal wall in 10 m ultra-large mining height working face with thick and hard roof

采矿与岩层控制工程学报. 2025, 7(1): 013026-1-013026-15 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1301>

堰塞湖下特厚煤层综放开采安全性及采动影响研究

Study on the safety and mining influence of fully-mechanized caving mining with ultra-thick seam under barrier lake

采矿与岩层控制工程学报. 2021, 3(1): 013525-013525 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20200805.001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杜君武, 黄庆享, 韦业豪, 等. 厚黄土层极近距离采空区下相邻工作面相向开采时序研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 023543.

DU Junwu, HUANG Qingxiang, WEI Yehao, et al. Study on time sequence for opposite mining of adjacent working faces under ultra-close coal seam goafs with thick loess layer[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 023543.

厚黄土层极近距离采空区下相邻工作面 相向开采时序研究

杜君武^{1,2,3}, 黄庆享^{1,3}, 韦业豪^{1,3}, 王雨凡^{1,3}

(1. 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对厚黄土层极近距离采空区下2个相邻工作面相向开采应力叠加效应显著, 工作面间煤柱易失稳诱发强矿压灾害问题, 以陕北侏罗纪煤田海湾煤矿三号井2206工作面和王才伙盘矿2201工作面相向开采为工程背景, 采用数值模拟方法分析了2个工作面相向开采前后上部覆岩应力环境及煤柱稳定性, 揭示了不同开采时序下2个工作面的围岩应力叠加效应及巷道围岩变形破坏规律。研究表明: 2^{-2} 煤层开采后, 房柱区顶板和煤柱较为稳定, 长壁式采空区覆岩破坏使采空区内的应力降低, 工作面间遗留煤柱垂直应力呈非对称分布, 长壁式采空区侧垂直应力峰值高于房柱区侧; 2^{-2} 煤层相邻工作面相向开采过程中, 上部遗留煤柱集中应力和工作面采动应力的叠加效应影响工作面间煤柱和巷道围岩的稳定性, 当2个工作面相向开采距离小于30 m时, 仅2206工作面开采时煤柱最大垂直应力分别比仅2201工作面开采和2个工作面同时开采减小4.7%和10.0%; 仅2206工作面开采时2206回风巷围岩变形量最小, 2个工作面同时开采时巷道围岩变形量最大, 2个工作面交错-20 m后煤柱应力及巷道围岩变形量基本趋于稳定。最后, 结合现场开采实际情况, 确定了相邻工作面相向开采时序, 并通过物理模拟验证了其合理性。研究成果在现场进行了应用, 效果良好, 从而避免了工作面的搬家倒面和停产, 取得了显著的经济效益, 可为类似条件的工作面安全开采提供借鉴。

关键词: 厚黄土层; 极近距离煤层群; 工作面开采时序; 应力叠加效应; 煤柱稳定性

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2025)02-3543-13

Study on time sequence for opposite mining of adjacent working faces under ultra-close coal seam goafs with thick loess layer

DU Junwu^{1,2,3}, HUANG Qingxiang^{1,3}, WEI Yehao^{1,3}, WANG Yufan^{1,3}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In opposite-direction underground mining of two adjacent working faces under the ultra-close goafs

收稿日期: 2024-09-29

修回日期: 2024-11-29

责任编辑: 付玉凯

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1351

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204154); 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室开放研究基金资助项目(SKLCRSM22KF004)

作者简介: 杜君武(1988—), 男, 陕西渭南人, 工程师, 博士研究生, 主要从事矿山压力与岩层控制、煤炭绿色减损开采等方面的研究工作。E-mail: dujw@xust.edu.cn

通信作者: 黄庆享(1966—), 男, 新疆沙湾人, 教授, 博士生导师。E-mail: huangqx@xust.edu.cn

with the thick loess layer, significant stress superposition occurs and the coal pillar stability between the working faces is in question, which may trigger strong ground pressure disasters. Taking the opposite-direction mining of the 2206 working face in the Haiwan No. 3 Well and the 2201 working face in the Wangcaihuopan Mine of the Northern Shaanxi Jurassic Coalfield as the engineering background, the overburden stress environment and the stability of the coal pillar between the two working faces before and after the opposite-direction mining were investigated using the numerical simulation, and the stress superposition effect of the surrounding rocks of the two working faces under different mining time sequences and the deformation laws of the surrounding rocks of the roadway were analyzed. The results show that the roof of the room-and-pillar area and the coal pillars are relatively stable after the mining of the 2-2 upper coal seam. The overburden failure of the longwall goaf reduces the stress in the goaf. The vertical stress of the remaining coal pillars between the working faces is asymmetrically distributed, and the peak of vertical stress on the side of the longwall goaf is higher than that on the side of the room-and-pillar area. During the opposite-direction mining of adjacent working faces of the 2-2 coal seam, the superposition effect of the concentrated stress of the remaining upper coal pillars and the mining-induced stress of the working faces affects the stability of the coal pillars and the surrounding rocks of roadway between the working faces. When the opposite-direction mining distance between the two working faces is less than 30 m, the maximum vertical stress of the coal pillar during the mining of the 2206 working face alone is 4.7% and 10.0% lower than that during the mining of the 2201 working face alone and the simultaneous mining of the two working faces, respectively. When only the 2206 working face is mined, the deformation of the surrounding rocks of the 2206 ventilation roadway is the smallest, while the two working faces are mined simultaneously, the deformation of the surrounding rocks of the ventilation roadway is the largest. After the two working faces stagger by -20 m, the stress of coal pillars and the deformation of surrounding rocks of the roadway almost tend to be stable. Considering the actual situation of on-site mining, a reasonable and safe mining time sequence for adjacent working faces was determined, and its rationality was verified through physical simulation. The findings are implemented on site with good performance by avoiding the relocation and shutdown of the working faces and achieving remarkable economic benefits. The research provides a reference for the safe mining of working faces under similar geological and mining conditions.

Key words: thick loess layer; ultra-close coal seams; mining time sequence of working face; stress superposition effect; coal pillar stability

陕北侏罗纪煤田煤炭储量丰富, 煤层埋藏浅, 可采层数多, 层间距小。近年来, 该煤田大部分矿井开始进行下部煤层开采, 由于开采历史原因, 部分矿井存在近距离采空区下相邻工作面相向开采情况。与单一煤层开采相比, 近距离采空区下开采覆岩结构由上部遗留区段煤柱、房柱式煤柱及一次垮落顶板构成, 覆岩不均匀沉降明显, 遗留煤柱集中应力造成下部煤层应力环境复杂, 易引发强矿压灾害^[1-3]。因此, 极近距离长壁式和房柱式采空区下 2 个相邻工作面相向开采面临诸多安全挑战。

国内外学者对近距离采空区下安全开采理论与技术开展了大量研究。在近距离煤层长壁式采

空区下开采方面, 黄庆享等^[4-5]提出了浅埋近距离煤层群科学分类, 建立了 3 类煤层群顶板结构模型, 揭示了顶板活化结构演化规律, 并给出了工作面支架工作阻力确定方法; 鲁岩等^[6]研究了上薄下厚近距离煤层同时开采覆岩破坏特征, 建立了上薄下厚近距离煤层开采支架-围岩关系模型, 为顶板控制和支架选型提供了依据; 洛锋^[7]、李松峰^[8]等阐明了上部煤层底板应力-应变演化规律, 探讨了下部煤层巷道围岩支护技术; 付兴^[9]、王路军^[10]和娄金福^[11]等通过物理模拟和现场实测分别揭示了极近距离长壁式采空区下工作面覆岩失稳特征、矿压规律及应力场演化规律; 杨国枢^[12]、程志恒^[13]等研究

认为极近距离长壁式采空区顶板垮落对下部煤层工作面顶板具有一定的卸压作用, 下部煤层开采时覆岩破碎程度通常较高。在近距离煤层长壁式采空区下合理开采方式方面, 黄庆亨等^[14-17]提出了井下减压和地表减损的工作面布置方法; 秦凯等^[18]认为提高下部煤层工作面推进速度可有效避免长壁式采空区遗留煤柱下强矿压灾害的发生; 陈冬冬等^[19]研究了近距离煤层上下工作面合理的终采线位置关系; 张浩春^[20]给出了极近距离煤层安全开采的接续规划。

除此以外, 我国学者在近距离煤层房柱式采空区下开采方面也开展了诸多研究, 解兴智^[21]研究得出房柱式采空区下长壁工作面周期来压不等距和不等强性是造成强矿压的主要原因; 霍丙杰等^[22]揭示了房柱式采空区对下部长壁工作面动载矿压的影响机制, 认为房柱失稳区不稳定砌体梁结构及未失稳房柱滑落易造成下部长壁工作面强矿压发生; 冯国瑞等^[23]揭示了房柱式采空区下近距离煤层开采超前煤柱群冲击失稳机制; 刘欣欣等^[24]研究认为浅埋房柱式煤柱多米诺骨牌式破坏对下部煤层开采影响较大; 张杰等^[25]提出了浅埋近距离间隔式采空区下部工作面顶板的“双拱桥”结构; 朱德福^[26]、屠世浩^[27]、屠洪盛^[28]等研究了间隔式煤柱下采动应力传播规律, 揭示了房柱式煤柱集中应力分布特征, 给出了房柱式采空区下长壁工作面开采冲击灾害预防的措施。

综上所述, 现有研究在近距离煤层采空区下单一长壁工作面开采的顶板结构、强矿压控制及合理开采方式等方面取得许多有益研究成果, 有效指导了工程实践。然而, 关于近距离采空区下 2 个相邻工作面相向开采的研究相对较少。相邻工作面相向开采时, 煤柱支承压力的叠加显著^[29], 严重威胁工作面安全开采。通过研究极近距离采空区下相邻工作面相向开采的应力叠加规律, 采用科学的开采时序能有效减缓应力叠加效应, 从而实现相邻工作面的安全开采。因此, 以陕北侏罗纪煤田厚黄土层极近距离长壁式采空区和房柱式采空区下相邻工作面相向开采条件为工程背景, 研究了 2 个工作面不同相向开采方式下的围岩应力演化规律, 分析了工作面间煤柱的稳定性, 提出了 2 个工作面相向安全开采时序规划, 并通过物理模拟验证了其可靠性。研究成果可为类似条件的工作面安全开采提供借

鉴。

1 工程背景

陕北侏罗纪煤田海湾煤矿三号井 2206 工作面与王才伙盘矿 2201 工作面为相邻相向开采工作面, 均开采 2^{-2} 煤层, 煤层倾角小于 8° , 采用长壁综合机械化采煤方法, 全部垮落法管理顶板。 2^{-2} 煤层距上部 2^{-2+} 煤层 7.00 m 左右, 埋深 99.86~159.49 m, 平均埋深 128.49 m, 基岩层平均厚度 40.12 m, 黄土层平均厚度 88.37 m, 属于厚黄土层极近距离煤层开采。2 个工作面平剖面空间关系如图 1 所示。

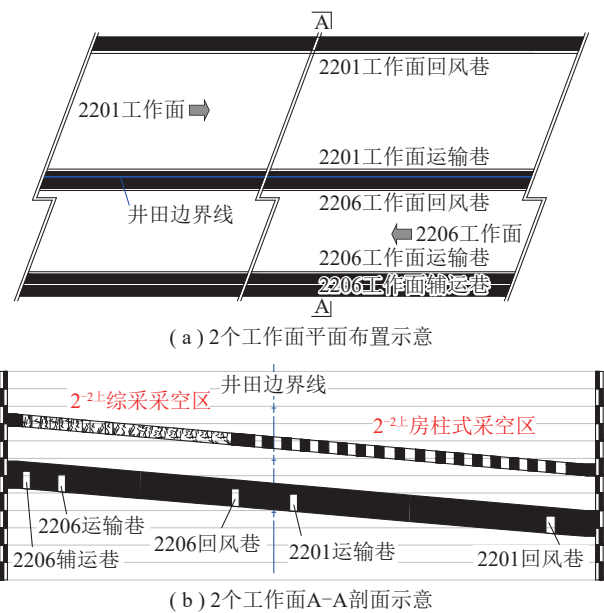


图 1 2 个工作面空间关系示意

Fig. 1 Schematic diagram of spatial relationship between the two working faces

2206 工作面倾向长度 160 m, 采高 6.8 m, 平均推进速度 5.0 m/d; 2201 工作面倾向长度 230 m, 采高 6.3 m, 平均推进速度为 3.0 m/d。2 个工作面之间的煤柱宽度 23 m, 2206 工作面上部为 2^{-2+} 煤层长壁式采空区, 2201 工作面上部为 2^{-2+} 煤层房柱式采空区。 2^{-2+} 煤层平均厚度 3.3 m, 房柱式采空区煤柱尺寸为长×宽×高=6.0 m×6.0 m×3.2 m。2206 工作面回风巷巷宽 5.0 m, 巷高 5.0 m, 2201 工作面运输巷巷宽 6.0 m, 巷高 4.2 m。2 个工作面直接顶和直接底均为粉砂岩, 工作面附近 H08-4 钻孔柱状如图 2 所示。根据实验室测试结果, 2^{-2} 煤层单轴抗压强度 19.52 MPa, 弹性模量 1.90 GPa, 黏聚力 1.92 MPa, 内摩擦角 35.65° , 抗拉强度 1.21 MPa。

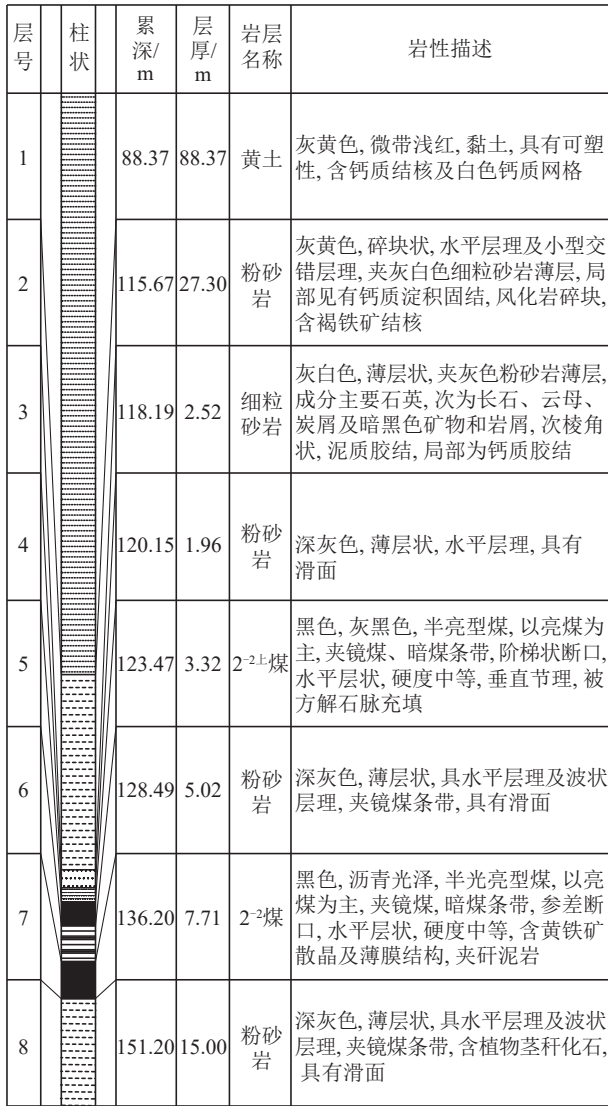


图2 H08-4 钻孔柱状

Fig. 2 Borehole histogram of the H08-4

2 相邻工作面相向开采时围岩应力演化及变形规律

2.1 数值计算模型建立及模拟方案

根据 2206 工作面和 2201 工作面附近 H08-4 钻孔柱状及开采参数构建 FLAC3D 数值计算模型, 模型尺寸长 (x)×宽 (y)×高 (z)=580 m×500 m×132 m, 顶部设置为自由边界, 底部、左右和前后边界设置为固定边界, 重力加速度取 9.80 m/s²。本构模型采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 煤岩物理力学参数根据现场取样实测获得, 煤岩物理力学参数见表 1。

模型赋值后, 进行应力平衡计算, 应力平衡后 2⁻²上煤层原岩应力 1.90 MPa, 2⁻²煤层原岩应力 2.10 MPa。模拟方案如下: ①首先开采 2⁻²上煤层,

表 1 煤岩物理力学参数表

Table 1 Physical mechanical parameters of coal and rock

层号	岩层名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
1	黄土	1371	0.03	0.43	23.7	0.80	0.05
2	粉砂岩	2450	1.48	0.28	41.0	2.18	2.59
3	细粒砂岩	2460	1.90	0.21	35.3	2.65	2.71
4	粉砂岩	2500	2.18	0.28	41.0	3.75	2.59
5	2 ⁻² 上煤	1310	1.90	0.19	35.6	1.92	1.26
6	粉砂岩	2520	1.48	0.28	41.0	3.80	2.65
7	2 ⁻² 煤	1310	1.90	0.19	35.6	1.92	1.21
8	粉砂岩	2550	2.18	0.28	41.0	3.64	2.65

采高 3.2 m, 分别形成 2⁻²上煤层长壁式采空区和房柱式采空区, 长壁式采空区宽 153 m, 房柱式采空区宽 312 m, 房柱式开采参数为开采 6 m、留煤柱 6 m; ②在 2⁻²上煤层长壁式采空区和房柱式采空区下分别进行 2⁻²煤层 2206 工作面 (宽 160 m) 和 2201 工作面 (宽 230 m) 同时相向开采、仅 2206 工作面开采和仅 2201 工作面开采 3 种模拟计算, 2206 工作面和 2201 工作面间煤柱宽度为 23 m, 对比分析以上 3 种开采方式下相向开采距离分别为 80、60、40、35、30、20、10、0、-10、-20、-25 m 条件下工作面间煤柱应力演化规律和巷道变形特征。构建的三维数值计算模型如图 3 所示。

2.2 2⁻²上煤层开采时垂直应力演化规律

2⁻²上煤层长壁式和房柱式工作面开采结束后, 围岩及遗留煤柱应力分布如图 4 所示, 房柱式煤柱应力范围占比如图 5 所示。从图中可以看出, 2⁻²上煤层房柱式煤柱垂直应力位于 2.00~8.00 MPa 之间, 其中 84 个煤柱应力在 2.00~3.00 MPa 之间, 占房柱式煤柱总个数的 9.5%; 756 个煤柱应力在 3.00~7.50 MPa 之间, 占房柱式煤柱总个数的 85.5%; 44 个煤柱应力在 7.50~8.00 MPa 之间, 占房柱式煤柱总个数的 5%。整体来看, 2⁻²上煤层房柱式煤柱应力集中程度不高, 房柱区顶板和煤柱稳定性较好。2⁻²上煤层长壁式采空区覆岩垮落充分, 顶板覆岩破坏使采空区内的应力降低至 1.20 MPa, 较原岩应力减小 37%。2⁻²上煤层长壁式采空区和房柱式采空区间 15 m 遗留煤柱垂直应力呈非对称分布, 长壁式采空区侧垂直应力峰值 8.00 MPa, 房柱区侧垂直应力峰值 5.50 MPa。

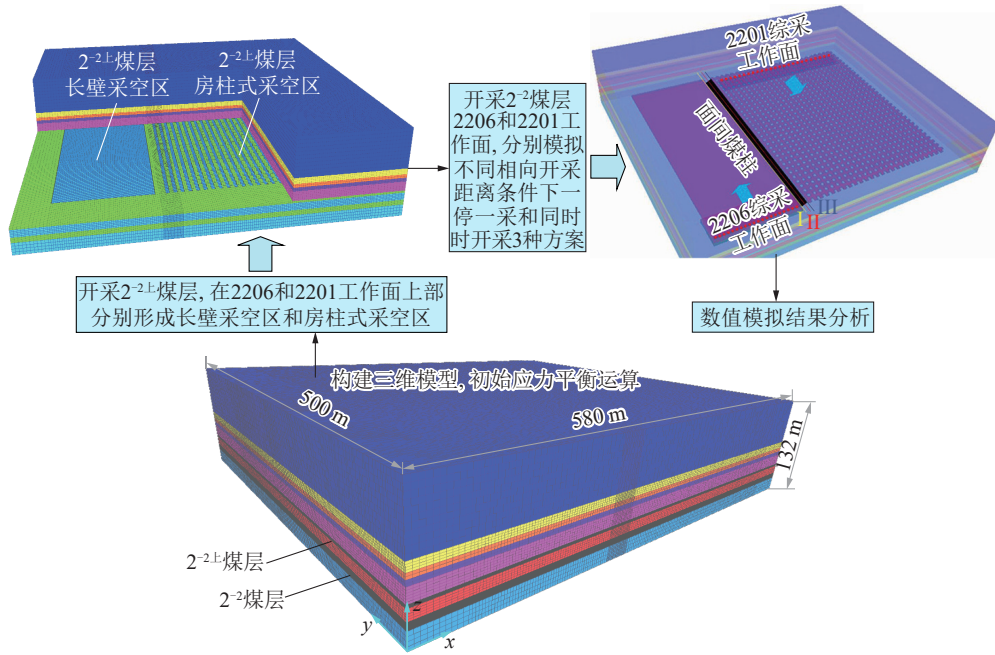


图3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model

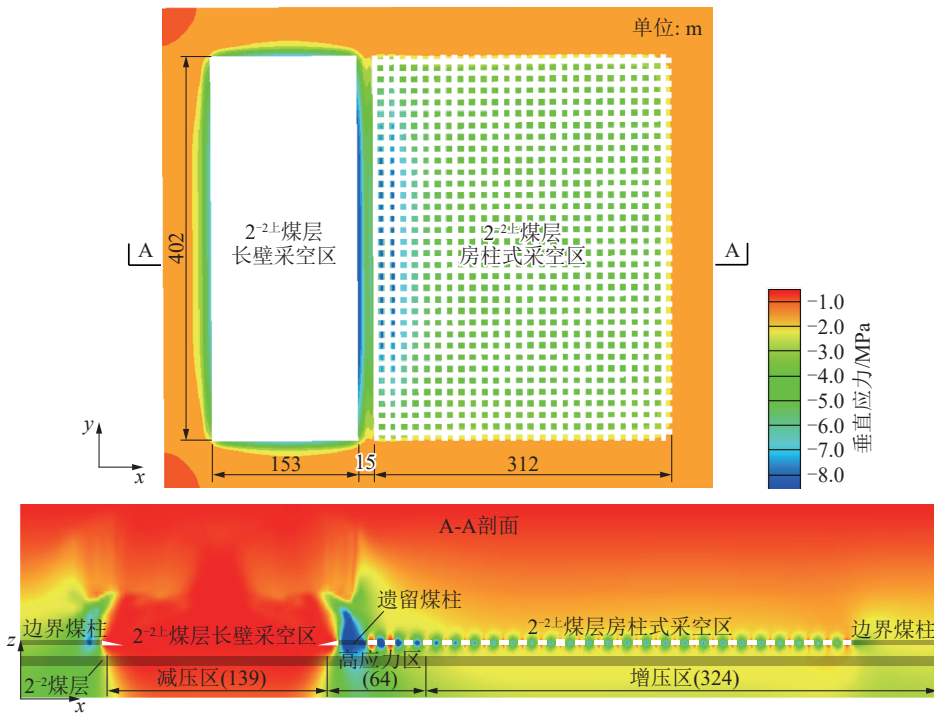


图4 2^{-2} 煤层工作面开采后覆岩垂直应力分布

Fig. 4 The vertical stress distribution of the overburden after the mining of the working face in the 2^{-2} upper coal seam

2^{-2} 煤层开采前覆岩应力分布规律如图6所示, 应力数据采集自A-A剖面 2^{-2} 煤层顶部位置。从图中可以看出, 2^{-2+} 煤层长壁式采空区和房柱式采空区下的 2^{-2} 煤层应力环境差异较大, 长壁式采空区下 2^{-2} 煤层有139 m宽度处于减压区, 该区域 2^{-2} 煤

层垂直应力分布较均匀, 应力值1.60 MPa左右, 为 2^{-2} 煤层原岩应力的76.2%; 2^{-2+} 煤层遗留煤柱及右侧3排房柱式煤柱下的 2^{-2} 煤层有64 m宽度处于高应力区, 该区域 2^{-2} 煤层垂直应力在2.5~7.5 MPa之间, 最大垂直应力为 2^{-2} 煤层原岩应力

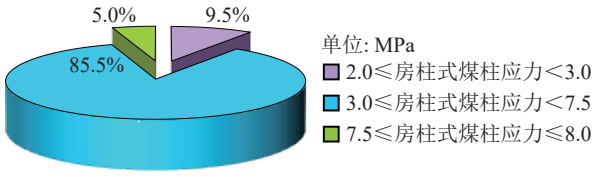


图5 房柱式煤柱应力范围占比

Fig. 5 Proportion of room-and-pillar coal pillars stress range

的3.6倍;房柱式采空区下 2^{-2} 煤层有324 m宽度处于增压区,该区域 2^{-2} 煤层垂直应力分布比较均匀,应力值2.50 MPa左右,为 2^{-2} 煤层原岩应力的1.2倍。

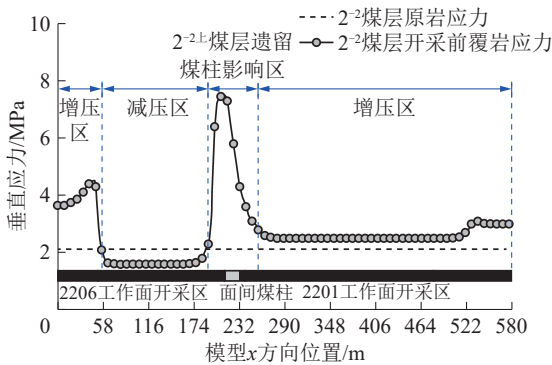


图6 2^{-2} 煤层开采前覆岩应力分布

Fig. 6 Overburden stress distribution before 2^{-2} seam mining

2.3 2^{-2} 煤层工作面相向开采时围岩垂直应力演化规律

在2206工作面和2201工作面相向开采过程中,2个工作面间的煤柱位于 2^{-2} 煤层遗留煤柱影响区,因受上部遗留煤柱集中应力和2个工作面采动应力的影响,工作面间煤柱应力集中程度较高,通过分析2个工作面不同相向开采距离时围岩及煤柱的应力演化规律,从而为确定2个工作面合理的相向开采提供依据。

(1) 互不影响阶段工作面超前支承压力分布规律

当2206工作面和2201工作面距离80 m时,工作面充分采动后不同位置围岩支承压力分布规律如图7所示。从图中可以看出,在上部遗留煤柱影响区内,2206工作面和2201工作面超前支承压力影响范围及峰值大小均大于长壁式采空区和房柱式采空区下。因受上部 2^{-2} 煤层遗留煤柱集中应力的影响,2206工作面超前支承压力影响范围24.0 m左右,应力峰值3.40 MPa;2201工作面超前支承压力影响范围35.0 m左右,应力峰值4.50 MPa。

总体来看,遗留煤柱影响区内2201工作面超前支承压力峰值和影响范围分别为2206工作面的1.3倍和1.5倍,当2个工作面相向开采距离60 m时,工作面超前支承压力影响范围开始叠加(图8)。

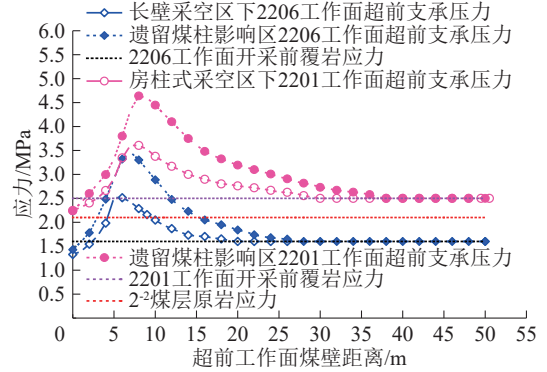


图7 互不影响阶段工作面超前支承压力分布规律
Fig. 7 The front abutment pressure distribution law of the working faces in non-interference stage

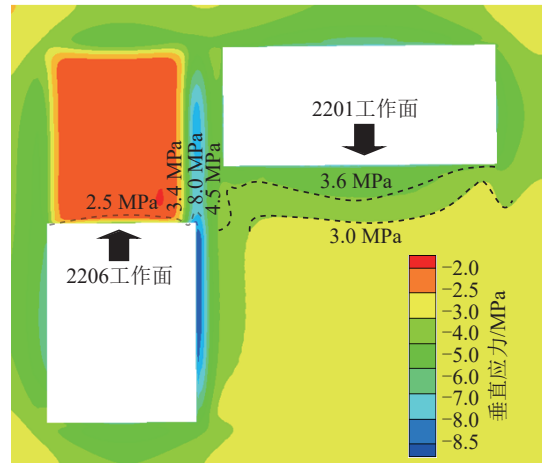


图8 工作面相向距离60 m时围岩垂直应力分布
Fig. 8 The vertical stress distribution of surrounding rock with a opposite distance of 60 m

(2) 相互影响阶段工作面间煤柱应力演化规律

2个工作面相向开采距离小于60 m时进入相互影响阶段,该阶段2个工作面同时开采、仅2206工作面开采和仅2201工作面开采条件下,不同相向开采距离下工作面间煤柱垂直应力分布规律如图9所示。

当工作面相向开采距离大于30 m时,随着相向开采距离的减小,工作面间煤柱垂直应力缓慢增大,2个工作面同时开采、仅2206工作面开采和仅2201工作面开采条件下,工作面间煤柱最大垂直应力分别为9.96、9.35和8.89 MPa,垂直应力分布形

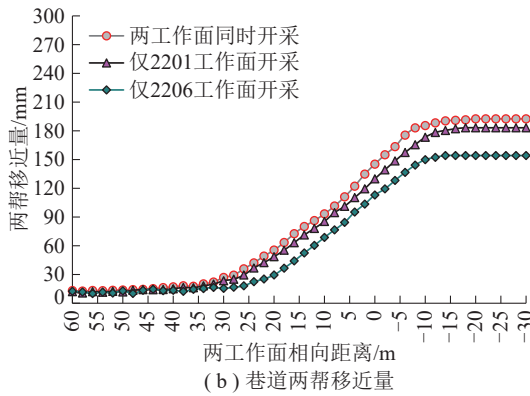


图 10 不同相向开采距离时 2206 工作面回风巷围岩变形规律

Fig. 10 The surrounding rock deformation law of ventilation roadway in 2206 working face under different opposite distances

最大为 272.5 mm, 两帮移近量最大为 192.5 mm。仅 2201 工作面开采时巷道顶底板移近量最大为 264.9 mm, 两帮移近量最大为 183.2 mm。仅 2206 工作面开采时巷道顶底板移近量最大为 242.5 mm, 两帮移近量最大为 154.2 mm。

总之, 仅 2206 工作面开采时巷道围岩顶底板移近量和两帮移近量最小, 这说明合理的工作面开采时序能够明显降低巷道围岩变形量, 对保障巷道围岩稳定具有重要作用。

3 相邻工作面相向开采时序确定

由上可知, 2 个工作面相向开采距离从 30 m 减小至 -20 m 时, 工作面采动应力叠加效应对煤柱应力和巷道围岩变形影响显著, 仅 2206 工作面开采时煤柱应力集中程度和巷道围岩变形量小于仅 2201 工作面开采和 2 个工作面同时开采。此外, 由于 2201 工作面超前支承压力的峰值和影响范围均大于 2206 工作面, 且 2201 工作面实际开采速度小于 2206 工作面, 那么先开采 2206 工作面能够明显缩短 2 个工作面侧向支承压力的相互叠加影响时间。因此, 确定 2 个工作面合理的开采时序为, 首先 2 个工作面同时开采至相向距离 30 m 左右, 2201 工作面停止开采, 2206 工作面保持正常开采至相向距离为 -20 m, 然后 2201 工作面恢复正常开采。2206 工作面平均推进速度为 5.0 m/d, 2201 工作面平均推进速度为 3.0 m/d, 按照上述工作面开采时序规划, 2 个工作面相向开采距离从 30 m 减小至 -20 m 时, 仅 2206 工作面开采较仅 2201 工作面开

采的相互影响时间可缩短 6.7 d, 这样能够缩短 2 个工作面相向开采的时间, 从而显著提升了相邻工作面相向开采的安全性和生产效率。

4 相邻工作面相向开采相似模拟

4.1 相似模型设计

为验证提出的相邻工作面相向开采时序可靠性, 根据陕北侏罗纪煤田海湾三号井 2206 工作面与王才伙盘煤矿 2201 工作面地质和开采条件, 构建平面应力相似物理模型。物理模型满足几何相似、运动相似及边界条件相似, 其中几何相似比 1 : 100, 内摩擦角和重力加速度相似比 1 : 1, 强度相似比 1 : 150, 应力相似比 $6.7 \times 10^{-7} : 1$ 。物理模型长×宽×高为 200 cm×18 cm×96 cm, 选用河沙作为骨料, 石膏和大白粉作为胶结材料, 云母粉作为分层材料, 最上层黄土采用沙、土和油配制, 厚度 45.0 cm, 对应岩层厚度 88.4 m, 需要的材料质量分别为 2.92、2.92 和 0.65 kg/cm³⁰。根据相似比确定的相似材料配比见表 2。模型顶部铺装铁砖等效剩余厚度的黄土层载荷, 模型底部铺装高精度无线压力传感器监测 2⁻² 煤层相邻工作面间煤柱应力变化。

表 2 物理模型岩层情况及配比

Table 2 Physical model rock strata conditions and proportioning

层号	岩层名称	模型厚度/cm	配比号	材料质量/(kg·cm ⁻³)			
				河沙	石膏	大白粉	粉煤灰
1	粉砂岩	27.3	737	17.07	0.64	1.49	
2	细粒砂岩	2.6	728	5.04	0.14	0.58	
3	粉砂岩	2.0	837	16.8	0.48	1.92	
4	2 ⁻² 上煤	3.3	20 : 1 : 5 : 20	2.03	0.10	0.51	2.03
5	粉砂岩	5.1	737	5.04	0.22	0.50	
6	2 ⁻² 煤	7.7	20 : 1 : 5 : 20	2.03	0.10	0.51	2.03
7	粉砂岩	3.0	837	5.12	0.19	0.45	

4.2 2⁻² 煤层开采前后覆岩结构及房柱式煤柱稳定性

(1) 2⁻² 煤层开采前覆岩结构特征及房柱式煤柱稳定性

模型铺装自然风干后, 左侧和右侧分别留设 15 cm 和 10 cm 边界煤柱消除边界效应影响, 然后开挖 2⁻² 上煤层, 形成长壁式采空区和房柱式采空区, 开挖后覆岩结构特征如图 11 所示。从图中可以看

出, 2^{-2} 煤层长壁式采空区覆岩卸荷破坏明显, 下部覆岩垮落充分, 垮落角 60° 左右, 最上部主关键层未完全破断, 垮落顶板与上部主关键层存在明显离层; 房柱式采空区顶板及房柱式煤柱总体比较稳定, 未出现明显垮落, 与数值模拟结果较为吻合。

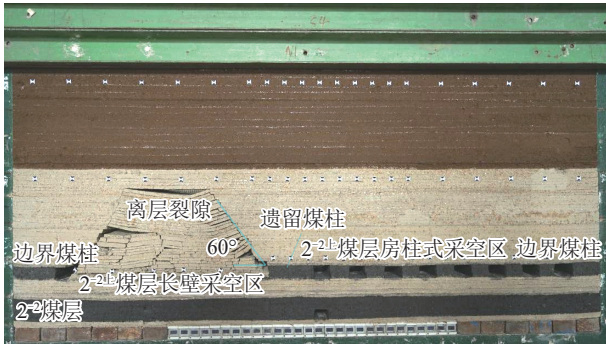


图 11 2^{-2} 煤层开采前覆岩破坏结构特征

Fig. 11 The structural characteristics of the overburden failure before 2^{-2} coal seam mining

(2) 2^{-2} 煤层开采后覆岩结构特征及房柱式煤柱稳定性

在 2^{-2} 煤层长壁式和房柱式采空区下分别进行 2206 工作面 and 2201 工作面开采, 在 2206 工作面开采过程中, 间隔岩层破断导致 2^{-2} 煤层已垮落覆岩再次活化, 主关键层完全破断, 上覆黄土层随之变形破坏, 工作面超前煤壁位置地表出现裂缝。工作面开采结束后, 上部遗留煤柱仍然保持稳定, 如图 12 所示。在 2201 工作面开采过程中, 顶板初次垮落及周期垮落时间间隔岩层与上部房柱式煤柱同步垮落, 主关键层破断后上覆黄土层随之变形破坏。此时, 采空区上方房柱式煤柱并未崩溃失稳, 对顶板仍有一定的支撑能力。工作面煤壁前方房柱式煤柱无明显破坏, 稳定性较好, 如图 13 所示。

4.3 2^{-2} 煤层工作面间煤柱稳定性相似模拟

(1) 相似模拟方案

根据数值模拟结果可知, 2 个工作面相向开采距离为 30 m 左右时, 2201 工作面停止开采, 2206 工作面在开采过程中, 随着相向开采距离从 30 m 减小至 -20 m 时, 工作面间煤柱应力集中程度不断增加, 工作面相向开采距离达到 -20 m 后逐步趋于稳定, 相向开采距离为 10、0、-10 和 -20 m 时的煤柱最大垂直应力分别为 9.0、10.1、10.8 和 11.8 MPa, 分别为原岩应力的 4.3、4.8、5.1 和 5.6 倍。根据数值模拟得出的不同相向开采距离围岩支承压力的叠

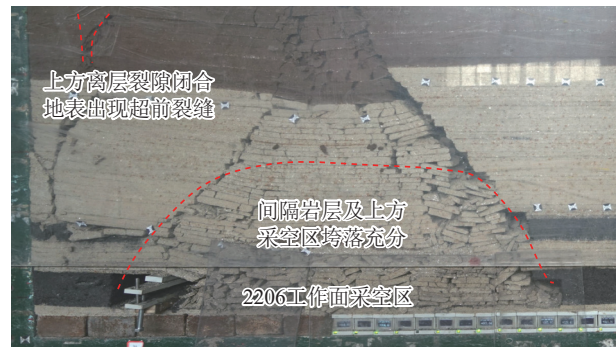


图 12 2206 工作面开采后顶板结构及煤柱稳定性

Fig. 12 The roof structure and coal pillar stability after the 2206 working face mining

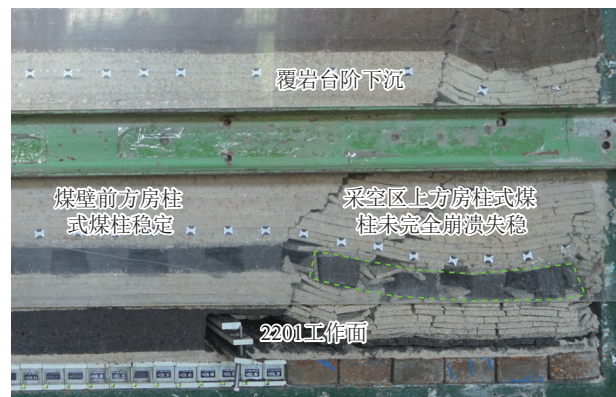


图 13 2201 工作面开采后顶板结构及煤柱稳定性

Fig. 13 The roof structure and coal pillar stability after the 2201 working face mining

加情况, 在物理模型顶部采用 2 台液压油缸对模型进行加载, 等效模拟 2206 工作面开采过程的不同相向开采距离时围岩支承压力的叠加效应。物理模型 2^{-2} 煤层原岩应力为 1.5 Pa, 应力相似比 $6.7 \times 10^{-7} : 1$, 换算后的 2^{-2} 煤层原岩应力为 2.24 MPa, 与数值模拟结果 (2.10 MPa) 基本保持一致, 物理模拟加载方案见表 3。

(2) 相似模拟结果分析

相似模型 2201 工作面和 2206 工作面之间煤柱宽度为 23 m, 不同加载条件下工作面间煤柱垂直应力分布规律如图 14 所示。

由图 14 可知, 当液压油缸加载至 4.3 倍原岩应力时煤柱垂直应力峰值为 6.14 Pa, 煤柱垂直应力分布形态为典型的“马鞍形”, 2206 工作面一侧应力峰值稍大于 2201 工作面一侧; 当液压油缸加载至 4.8 倍原岩应力时, 煤柱垂直应力峰值为 7.09 Pa, 煤柱垂直应力分布形态演变为“近马鞍形”; 当液压油缸加载至 5.1 倍原岩应力时, 煤柱垂直应力峰值为

表 3 物理模拟加载方案
Table 3 Physical simulation loading scheme

相向 距离/m	模型 2 ⁻² 煤层 原岩应力/Pa	液压油缸加载 补偿应力/Pa	加载后原岩 应力倍数
10	1.50	4.95	4.3
0	1.50	5.70	4.8
-10	1.50	6.15	5.1
-20	1.50	6.90	5.6

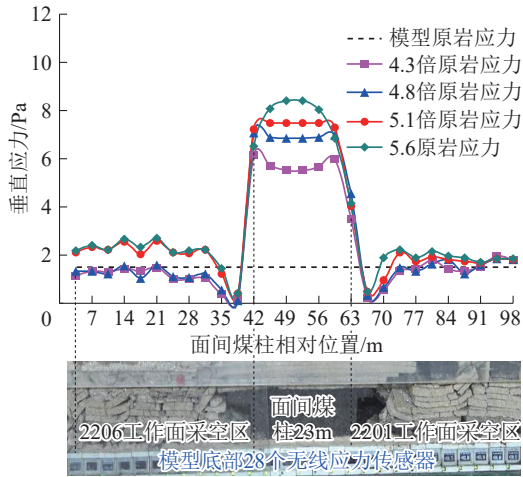


图 14 不同加载条件下工作面间煤柱垂直应力分布
Fig. 14 The vertical stress distribution law of coal pillar between working faces under different loading conditions

7.50 Pa, 煤柱垂直应力分布形态呈现“平台形”;当液压油缸加载至 5.6 倍原岩应力时,煤柱垂直应力峰值为 8.42 Pa, 小于物理模型煤层单轴抗压强度,煤柱垂直应力分布形态演变为“缓拱形”。总体来看,不同加载条件下煤柱均能保持稳定,工作面间煤柱及覆岩结构最终形态如图 15 所示,相似物理模型验证了相邻工作面开采时序确定的合理性。

5 工程应用

根据上述数值模拟和试验结果来确定相邻工作面的开采时序,2206 工作面与 2201 工作面相向开采相距 30 m 左右时,2201 工作面暂停开采,2206 工作面继续快速开采至与 2201 工作面交错 20 m 后,2201 工作面恢复开采。仅 2206 工作面开采期间,2206 工作面回风巷顶底板移近量最大为 215 mm,两帮移近量最大为 136 mm。2206 工作面支架后方采空区顶板垮落充分,工作面间煤柱安全稳定,2206 工作面回风巷顶板未见明显离层,两帮仅在局部区域出现片帮现象,最大片帮深度 0.3 m,巷道整体效果如图 16 所示。

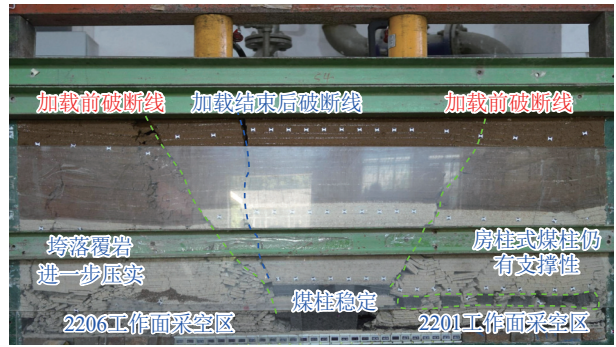


图 15 工作面间煤柱及覆岩结构最终形态
Fig. 15 The final morphology of the coal pillar between the working faces and the overburden structure

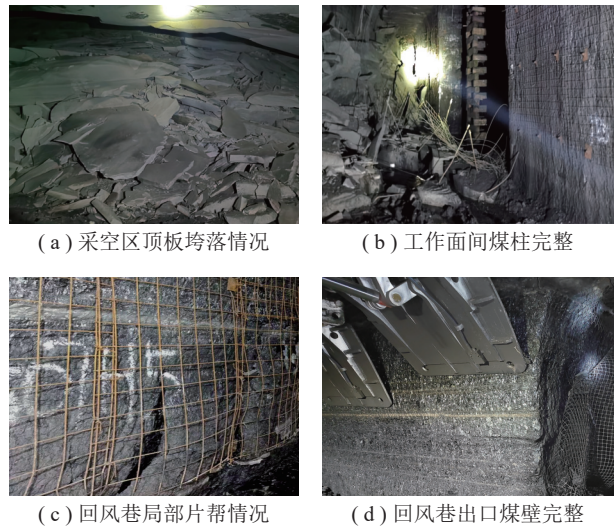


图 16 2206 工作面开采期间巷道及煤柱变形情况
Fig. 16 The deformation of the roadway and coal pillar during the mining of the 2206 working face

在 2201 工作面停采期间,工作面上方房柱式煤柱未出现多米诺骨牌式破坏现象,矿压显现较为缓和,2201 工作面运输巷顶底板移近量最大为 185 mm,两帮移近量最大为 112 mm,巷道顶板未见明显离层,两帮无片帮现象,2201 工作面停采期间巷道整体效果如图 17 所示。

目前,2 个工作面已安全开采完毕,根据地表变形实测,2206 工作面地层垮落充分,工作面煤壁前方 9~12 m 地表出现拉伸裂缝,裂缝宽度 0.2~0.5 m,裂缝呈弧形状,工作面地表裂缝实测剖面如图 18 所示。2201 工作面煤壁后方 5~8 m 地表出现台阶式下沉,台阶高度 0.6~1.5 m,这说明 2201 工作面上方房柱式煤柱未发生大面积失稳破坏情况,2201 工作面地表塌陷实测剖面如图 19 所示。总之,合理的相邻工作面开采时序能够提升工作面



图 17 2201 工作面停采期间煤壁及运输巷道围岩情况
Fig. 17 The conditions of the coal wall and the surrounding rocks of the transportation roadway during the shutdown period of 2201 working face

间煤柱及巷道围岩的稳定性, 显著提高工作面的安全性和生产效率, 经济效益显著。本研究提出的相邻工作面相向开采时序方法可为类似地质条件及开采条件的工作面安全开采提供借鉴。

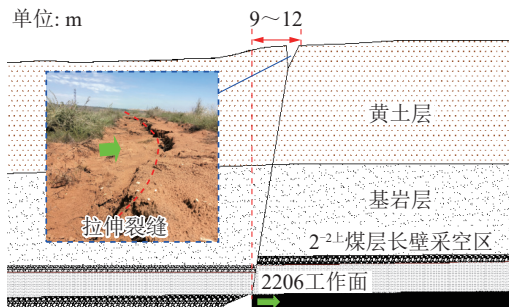


图 18 2206 工作面开采地表裂缝实测剖面
Fig. 18 The measured profile of the surface cracks during the mining of the 2206 working face

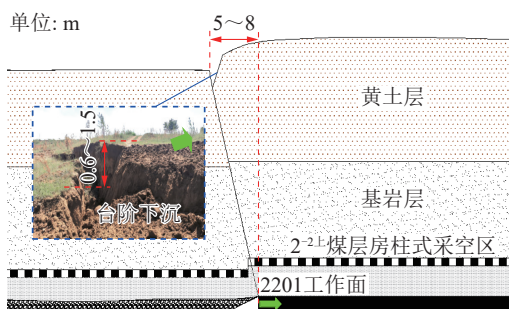


图 19 2201 工作面开采地表塌陷实测剖面
Fig. 19 The measured profile of the surface subsidence during the mining of the 2201 working face

6 结论

(1) 2^{-2} 煤层开采后, 房柱式煤柱应力集中程度不高, 房柱区顶板和煤柱较为稳定。长壁式采空区覆岩垮落充分, 顶板覆岩破坏使采空区内的应力降低。工作面间遗留煤柱垂直应力呈非对称分布, 长壁式采空区侧垂直应力峰值高于房柱区侧。

(2) 2^{-2} 煤层相邻工作面相向开采过程中, 上部遗留煤柱集中应力和 2^{-2} 煤层 2 个工作面采动应力的叠加效应影响工作面间煤柱稳定性和 2206 工作面回风巷、2201 工作面运输巷的围岩变形。

(3) 为减缓 2 个工作面相向开采时的应力叠加效应和缩短影响时间, 提出了相邻工作面合理的开采时序。2206 工作面和 2201 工作面相向开采距离为 30 m 左右时, 2201 工作面暂停开采, 2206 工作面保持正常开采至相向开采距离-20 m 后, 2201 工作面恢复生产。

(4) 现场应用表明, 合理的工作面开采时序能够保障工作面间煤柱及巷道围岩的稳定性, 避免工作面搬家倒面和停产, 缩短了工作面等待时间, 显著提高了工作面的安全性和生产效率。

参考文献 (References):

- [1] 王琦, 刘寄婷, 江贝, 等. 极近距离煤层开采无煤柱自成巷控制方法研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 013532.
WANG Qi, LIU Jiting, JIANG Bei, et al. Research on control methods of automatically-formed roadway without coal pillar for extremely close-distance coal seams[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6 (1): 013532.
- [2] 杜君武, 黄庆享. 浅埋煤层群不同煤柱错距覆岩结构演化规律及煤柱稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013018.
DU Junwu, HUANG Qingxiang. Overburden structure evolution and coal pillar stability analysis with different offset distance of coal pillars in shallow multi-seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013018.
- [3] 黄庆享, 杜君武. 浅埋煤层群覆岩运动与减损开采研究[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [4] 黄庆享, 曹健, 贺雁鹏, 等. 浅埋近距离煤层群分类及其采场支护阻力确定[J]. 采矿安全工程学报, 2018, 35(6): 1177-1184.
HUANG Qingxiang, CAO Jian, HE Yanpeng, et al. Classification of shallow buried close seams group and sup-

- port resistance determination[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1177–1184.
- [5] 黄庆享, 贺雁鹏, 罗利卜, 等. 浅埋极近距离煤层采空区垮落顶板活化结构及支架阻力研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 561–566.
HUANG Qingxiang, HE Yanpeng, LUO Libo, et al. Study on the active structure of caved roof and support resistance in shallow buried and ultra-close coal seams mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 561–566.
- [6] 鲁岩, 刘长友, 周劲锋, 等. 上薄下厚近距离煤层同采覆岩破断结构特征及支架-围岩关系[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(5): 832–837.
LU Yan, LIU Changyou, ZHOU Jinfeng, et al. Failure structure characteristics of strata with upper thin and lower thick strata in ultra-close coal seams with simultaneous mining and relationship between shield and surrounding rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(5): 832–837.
- [7] 洛锋, 曹树刚, 李国栋, 等. 近距离下行逐层开采底板应变时空差异特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(5): 997–1004, 1013.
LUO Feng, CAO Shugang, LI Guodong, et al. Temporal-spatial variation characteristics of strain in coal seam floor during downward and layer-by-layer mining in ultra-distance coal seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 997–1004, 1013.
- [8] 李松峰, 陈军锋. 极近距离煤层下行开采巷道围岩支护技术研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(2): 127–131.
LI Songfeng, CHEN Junfeng. Research on supporting technology of roadway surrounding rock for downward mining in extreme contiguous seams[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(2): 127–131.
- [9] 付兴, 王鑫, 苏志刚, 等. 浅埋极近距离采空区下工作面矿压显现规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(7): 149–155.
FU Xing, WANG Xin, SU Zhigang, et al. Study on law of strata behavior in shallow-buried working face under contiguous gobs[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(7): 149–155.
- [10] 王路军, 朱卫兵, 许家林, 等. 浅埋深极近距离煤层工作面矿压显现规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(3): 47–50.
WANG Lujun, ZHU Weibing, XU Jialin, et al. Study on mine strata pressure behavior law of coal mining face in ultra contiguous seam with shallow depth[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(3): 47–50.
- [11] LOU Jinfu, GAO Fuqiang, YANG Jinghe, et al. Characteristics of evolution of mining-induced stress field in the longwall panel: insights from physical modeling[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(5): 938–955.
- [12] 杨国枢, 王建树. 近距离煤层群二次采动覆岩结构演化与矿压规律[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 353–358.
YANG Guoshu, WANG Jianshu. Overburden structure evolution and pressure law of second mining in close-range coal seam group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2): 353–358.
- [13] 程志恒, 齐庆新, 李宏艳, 等. 近距离煤层群叠加开采采动应力-裂隙动态演化特征实验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 367–375.
CHENG Zhiheng, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Evolution of the superimposed mining induced stress-fissure field under extracting of close distance coal seam group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 367–375.
- [14] HUANG Qingxiang, DU Junwu, CHEN Jie, et al. Coupling control on pillar stress concentration and surface cracks in shallow multi-seam mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(1): 95–101.
- [15] 黄庆享, 杜君武, 侯恩科, 等. 浅埋煤层群覆岩与地表裂隙发育规律和形成机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 7–15.
HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 7–15.
- [16] 杜君武, 黄庆享. 浅埋煤层群同采工作面合理走向错距研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(9): 122–127.
DU Junwu, HUANG Qingxiang. Research on reasonable staggered distance along strike of simultaneous mining faces in shallow seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 122–127.
- [17] 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.
- [18] 秦凯, 王健达, 李宏艳, 等. 集中煤柱诱发下伏近距离煤层异常矿压及机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(8): 102–107.
QIN Kai, WANG Jianda, LI Hongyan, et al. Study on abnormal mine pressure and mechanism of near-distance coal seam induced by concentrated coal pillar[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 102–107.
- [19] CHEN Dongdong, WU Yiyi, XIE Shengrong, et al. Reasonable location of stopping line in close-distance under-

- lying coal seam and partition support of large cross-section roadway[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2022, 9(1): 55.
- [20] 张浩春. 极近距离煤层群多工作面协调开采规划研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(12): 34–38.
ZHANG Haochun. Coordinated mining planning of multi-face mining in contiguous coal seams[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(12): 34–38.
- [21] 解兴智. 浅埋煤层房柱式采空区下长壁开采矿压显现特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(6): 898–902.
XIE Xingzhi. Study on the characteristics of strata behavior in shallow seam longwall mining under the room-and-pillar mining goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(6): 898–902.
- [22] 霍丙杰, 荆雪冬, 范张磊, 等. 浅埋房式采空区下长壁采场动载矿压发生机制[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1116–1123.
HUO Bingjie, JING Xuedong, FAN Zhanglei, et al. Mechanism of dynamic load of longwall mining under shallow room mining goaf[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 1116–1123.
- [23] 冯国瑞, 朱卫兵, 白锦文, 等. 浅埋近距离煤层开采超前煤柱群冲击失稳机制[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 114–125.
FENG Guorui, ZHU Weibing, BAI Jinwen, et al. Shocking failure mechanism of advanced coal pillars under the mining influence of shallow-buried closed distance coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 114–125.
- [24] 刘欣欣, 齐学元, 耿俊俊. 浅埋房柱式采空区煤柱稳定性及控制研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(2): 023537.
LIU Xinxin, QI Xueyuan, GENG Junjun. Stability and control of room-and-pillar mined-out area in shallow coal seam[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(2): 023537.
- [25] 张杰, 王斌, 白文勇, 等. 浅埋近距间隔式采空区顶板“双拱桥”结构稳定性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 598–605.
ZHANG Jie, WANG Bin, BAI Wenyong, et al. Stability study of the double-arch structure formed by short-distance discontinuous mining in shallow strata[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 598–605.
- [26] 朱德福, 屠世浩, 屠洪盛, 等. 冲沟地貌间隔式煤柱下采动应力传播规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(4): 701–707.
ZHU Defu, TU Shihao, TU Hongsheng, et al. Analysis of stress propagation mechanism in the interval coal pillars under the gully landform[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(4): 701–707.
- [27] 屠世浩, 窦凤金, 万志军, 等. 浅埋房柱式采空区下近距离煤层综采顶板控制技术[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 366–370.
TU Shihao, DOU Fengjin, WAN Zhijun, et al. Strata control technology of the fully mechanized face in shallow coal seam close to the above room-and-pillar gob[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 366–370.
- [28] 屠洪盛, 屠世浩, 袁永, 等. 厚煤层刀柱式采空区集中应力影响范围理论判据研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1345–1351.
TU Hongsheng, TU Shihao, YUAN Yong, et al. Theoretical criterion of concentrated stress influence scope with thick coal seam left-over goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1345–1351.
- [29] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. *矿山压力与岩层控制*[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [30] 贾栋, 姜德义, 陈结, 等. 综放工作面覆岩破坏特征及裂隙演化相似模拟试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(3): 19–25.
JIA Dong, JIANG Deyi, CHEN Jie, et al. Similar simulation study on failure characteristics and fracture evolution of overlying strata in fully-mechanized caving face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(3): 19–25.