

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.263

双重上保护层叠加开采应力分布规律

秦冰^{1a}, 叶栋林^{1b}, 石占山^{1b,1c}, 孙维吉^{1a}, 李刚^{1b}, 张晋京²

(1. 辽宁工程技术大学 a. 力学与工程学院; b. 矿业学院; c. 矿产资源开发利用技术及装备研究院, 辽宁阜新 123000; 2. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南平顶山 467000)

摘要:为获取双重上保护层重叠采动作用下的煤层卸压规律及保护层间的相互影响,以平煤八矿一采区为原型,采用 FLAC3D 软件模拟了丁、戊组煤层多工作面重叠开采过程。研究表明,仅丁组煤层开采时,采区边界煤柱对应范围出现应力集中现象,最大应力值达到 19 MPa,影响范围达到下方 80 m,不利于被保护层卸压。工作面间区段煤柱最大应力值达 39 MPa,但向底板传递范围较小。丁组单独开展卸压区域能够影响至己组,己组煤层应力卸压值约为 1 MPa;丁组、戊组煤层重叠开采,当戊组工作面位于丁组煤层区段煤柱下方,同时丁组工作面位于戊组工作面区段煤柱上方,使丁组煤层工作面间区段煤柱应力集中减弱利于卸压,丁组煤层区段煤柱应力值由 39 MPa 卸载至 7.5~10 MPa 之间;同时当己组煤层位于戊组单独保护范围时,垂直应力卸压值为 2~3 MPa,当己组煤层位于丁戊共同保护范围时,垂直应力卸压值为 4~6.5 MPa。

关键词:双重保护层;采动应力;叠加开采;数值模拟;煤柱集中应力

中图分类号:TD311

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)02-043-014

Pressure relief law of double upper protective layer superposition mining

QIN Bing^{1a}, YE Donglin^{1b}, SHI Zhanshan^{1b,1c}, SUN Weiji^{1a}, LI Gang^{1b}, ZHANG Jinjing²

(1a. School of Mechanics & Engineering; 1b. School of Mines; 1c. Liaoning Academy of Mineral Resources Development and Utilization Technical and Equipment Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P. R. China; 2. China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan, Henan 467000, P. R. China)

Abstract: To obtain the law of stress redistribution of coal seam under the action of overlapping mining in multi seam working face, taking Pingmei No.8 Coal Mine No.1 mining area as the prototype, the process of overlapping mining in group D and group E coal seams was simulated using FLAC3D software. The results show that the stress concentration occurs in the corresponding range of the coal pillar at the boundary of the mining area only when the coal seam in group D is mined. The maximum stress value of the coal pillar

收稿日期:2022-02-19 **网络出版日期:**2022-05-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52004118);辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”资助项目(LJ2020QNL009);辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-11)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52004118), “Cultivation of Seedlings” Funding Project for Young Scientific and Technological Talents of Department of Education of Liaoning Province(LJ2020QNL009), and Disciplinary Innovation Team Project of Liaoning Technical University(LNTU20TD-11).

作者简介:秦冰(1987—),博士,主要从事渗流力学及煤与瓦斯共采方面的研究,(E-mail)qinbing20071111@163.com。

通信作者:石占山,男,博士,主要从事瓦斯灾害防治方面的研究,(E-mail)shizhanshan@163.com。

reaches 19 MPa, and the influence range is 80 m below it. The maximum stress value of the coal pillar in the section between working faces reaches 39 MPa. The pressure relief affects J group, and the stress relief value of J Group coal seam is about 1 MPa. When the D group and E group coal seams are overlapped, and when the E group working face is located under the coal pillar of the D group coal seam section, and the D group working face is located above the coal pillar of the E group working face section, the stress concentration of the coal pillar of the D group coal seam section is weakened, and the stress value of the coal pillar of the D group coal seam section is unloaded from 39 MPa to the range of 7.5 MPa to 10 MPa. At the same time, when the coal seam of group I is located in the independent protection range of group E, the vertical stress relief value is 2 MPa to 3 MPa. When the coal seam of group I is located in the joint protection range of group E, the vertical stress relief value is from 4 MPa to 6.5 MPa.

Keywords: double upper protective layer; mining stress; superposition mining; numerical simulation; concentrated stress of coal pillar

保护层开采后,下伏煤岩体应力降低、采动裂隙发育、煤岩层透气性增大,使煤层瓦斯解吸、运移^[1-2],利于通过瓦斯抽采降低煤层瓦斯含量,在国内已有较成熟的应用。目前,针对保护层开采应力重分布规律已有大量研究。石必明等^[3-4]研究了保护层开采上覆岩层的应力变化以及膨胀变形规律;施龙青等^[5]和朱第植等^[6]从工程力学角度出发,对岩石损伤及断裂特征进行了大量的实验,并结合工程实践将采场下伏煤岩体分为“四带”;沈明荣等^[7]分析了工作面回采后采场底板及下覆煤岩体向采场无应力区弹性恢复的过程;李树清等^[8]和袁志刚等^[9]应用岩土力学数值计算软件 FLAC 模拟了保护层的开采过程并给出卸压角及保护效果影响参数;黄光利^[10]运用 COMSOL Multiphysics 软件的固气耦合模型计算了煤矿上保护层开采的保护范围;朱志洁等^[11]开展了远距离重叠开采条件下,煤柱集中应力影响下的强矿压显现机制,分析了煤柱对强矿压显现的影响机理;Gao 等^[12]通过数值计算分析了应力分布特征,并考虑了上覆煤柱的存在,同时揭示了采空区应力释放与上覆煤柱应力集中对最终应力分布的共同影响;李杨等^[13]开展了多煤层开采中,中间岩层对覆岩移动的影响机理研究,提出了上覆岩层与中间岩层厚度之比并不是控制覆岩移动的决定性因素;Yin 等^[14]研究考察了重庆地区煤样在开采过程中应力路径下的应力-应变-渗透率关系。康钦容等^[15]利用自行研制的“多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统”,进行了三维采动应力条件下的三维模拟开采实验,对多煤层卸压采动后的底板岩层破坏规律进行了研究。

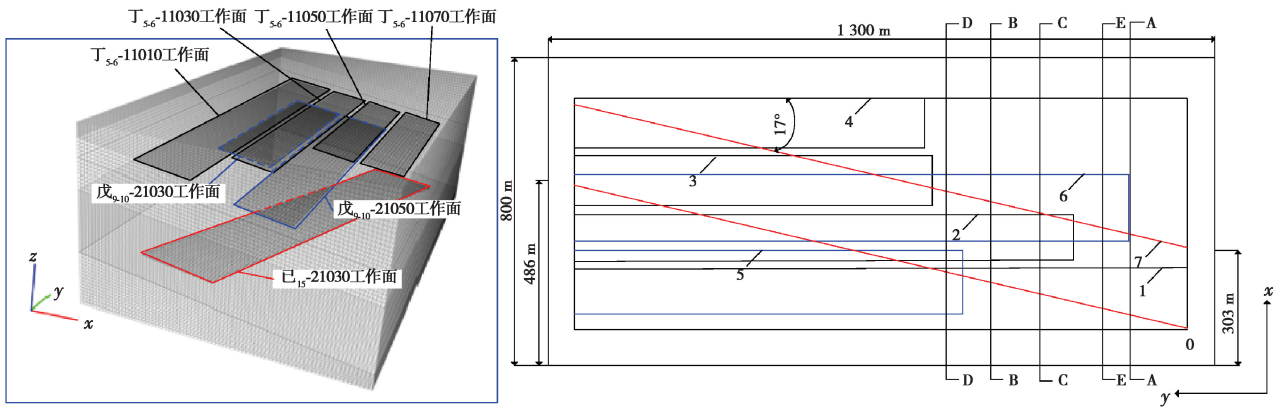
然而当前研究中大多考虑单一上保护开采工况^[16-21],且以单一工作面为研究对象,忽略了上保护层多工作面布置时区段煤柱产生的应力集中对下保护层卸压的影响,及多重上保护层开采的卸压增强效应。同时在保护层效果判定中,《AQ1050—2008 保护层开采技术规范》^[22]中给出,上保护层开采时对于缓倾斜煤层保护最大有效垂距为 50 m,规范给出的保护有效距离是基于单一保护层开采提出的,对于多重上保护层叠加开采保护有效距离的评价未见相关规范指南,多重上保护层开采的卸压效果需要具体分析。

双重上保护层开采应力重分布不同于单一煤层开采。对于双重上保护层开采工作面,不仅能够对下方煤层进行双重卸压,而且在工作布置时能够对双重保护层内区段煤柱进行相互掩护,双重卸压规律及相互掩护对卸压的影响有待进一步研究。因此笔者充分考虑了现场实际工况,以平煤八矿丁₅₋₆煤层、戊₉₋₁₀煤层、己₁₅煤层组成的煤层群开采为工程背景,依据现场多煤层多工作面的实际采掘布置,建立了双重上保护层多工作面开采数值计算模型,对双重上保护层开采采动应力分布规律开展研究,进一步依据应力重分布规律给出被保护煤层的瓦斯治理措施及采掘布置计划,达到瓦斯精准治理^[23]的目标。

1 FLAC3D 模型的建立及参数确定

1.1 模型的建立

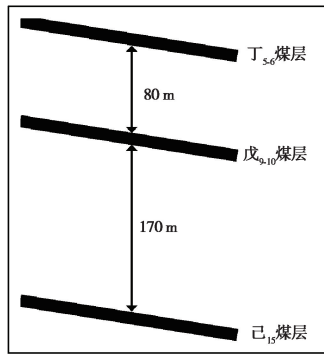
平煤八矿为高瓦斯矿井,主要可采煤层有丁₅₋₆、戊₉₋₁₀、己₁₅和己₁₆₋₁₇煤层,本次研究重点区域为丁₅₋₆、戊₉₋₁₀、己₁₅煤层组成的煤层群,其中丁₅₋₆煤层和戊₉₋₁₀煤层间距是 70~90 m,戊₉₋₁₀煤层和己₁₅煤层间距平均约 170 m,煤层倾角平均 9°。研究区域丁₅₋₆煤层布置有 4 个工作面,戊₉₋₁₀煤层布置有 2 个工作面,且均已开采完毕。现阶段拟开采己₁₅煤层 21030 工作面。采区内丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层的工作面走向相同,长短不一,在倾向上交错布置。己₁₅煤层 21030 工作面走向与丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面走向呈 17°交角。拟分析丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层双重上保护层开采对己₁₅煤层工作面应力分布的影响。各工作面空间位置如图 1 所示。



注: 1—丁₅₋₆-11010 工作面; 2—丁₅₋₆-11030 工作面; 3—丁₅₋₆-11050 工作面; 4—丁₅₋₆-11070 工作面; 5—戊₉₋₁₀-21030 工作面; 6—戊₉₋₁₀-21050 工作面; 7—己₁₅-21030 工作面
黑线工作面位于丁₅₋₆煤层, 蓝线工作面位于戊₉₋₁₀煤层, 红线工作面位于己₁₅煤层

(a) 多煤层工作面空间位置

(b) 多煤层工作面平面投影



(c) 煤组层位关系

图 1 工作面空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of working faces

根据平煤八矿确定的研究区域工作面布置情况,采用 FLAC^{3D}数值计算软件,建立了等比例模型,模型尺寸为 800 m(x)×1 400 m(y)×500 m(z)生成网格 884 800 个,节点 913 680。丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层间距选取 80 m,戊₉₋₁₀、己₁₅煤层间距选取 170 m。模型上表面距离地表约 400 m,覆岩平均容重取 20 kN/m³,上表面施加载荷为 8 MPa。模拟煤层倾角为 9°,采用摩尔-库仑本构模型,模型前后、左右 4 个面约束其法向自由度,底面约束 x、y、z 3 个方向自由度。建立的模型如图 2 所示。

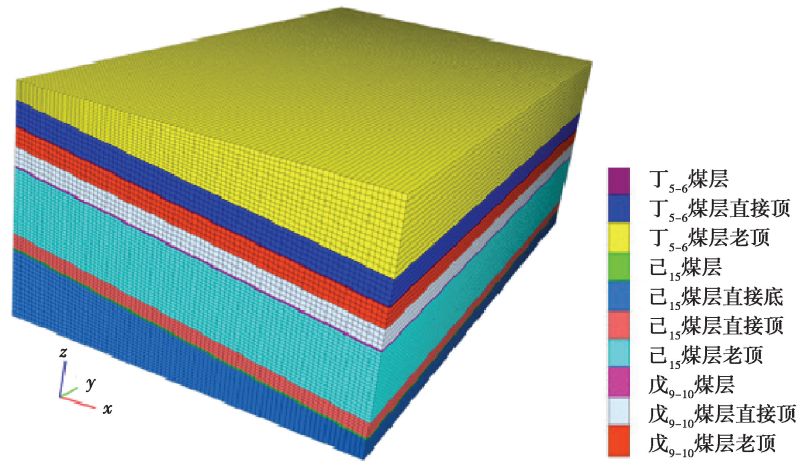


图 2 数值模型建立

Fig. 2 Numerical modeling

1.2 计算参数及数值模拟设计方案

1.2.1 计算参数

依据现场取样在实验室进行的参数测试结果,并结合现有论文中关于平煤股份八矿煤岩物理力学参数测试结果^[24-25],考虑岩层与岩石试件在应力换算中存在的尺度效应,依据数值模拟计算结果反演模拟计算采用的岩体力学参数如表 1 所示。

表 1 数值计算岩体力学参数

Table 1 Rock mass mechanical parameters of numerical calculation

岩层名称	岩性	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
丁 ₅₋₆ 煤层老顶	细粒砂岩	2.92	22.80	4.68	32.274	3.77	18.83
丁 ₅₋₆ 煤层直接顶	砂质泥岩	2.57	15.82	1.36	2.160	3.64	35.15
丁 ₅₋₆ 煤层	煤	1.33	2.21	0.96	1.712	0.49	34.80
戊 ₉₋₁₀ 煤层老顶	中粒砂岩	2.99	29.74	3.85	32.274	3.77	18.83
戊 ₉₋₁₀ 煤层直接顶	砂质泥岩	2.57	15.82	1.36	2.160	3.64	35.15
戊 ₉₋₁₀ 煤层	煤	1.33	2.21	0.96	1.712	0.49	34.80
己 ₁₅ 煤层老顶	泥岩	2.33	9.14	1.36	2.160	3.64	35.15
己 ₁₅ 煤层直接顶	砂质泥岩	2.57	15.82	1.36	2.160	3.64	35.15
己 ₁₅ 煤层	煤	1.33	2.21	0.96	1.712	0.49	34.80
己 ₁₅ 煤层直接底	砂质泥岩	2.57	15.82	1.36	2.160	3.64	35.15

1.2.2 数值模拟设计方案

开挖过程如下:①对丁₅₋₆煤层工作面全部开采;②开挖后计算平衡,再进行戊₉₋₁₀煤层工作面全部开采;③戊₉₋₁₀煤层工作面开采后计算平衡,对己₁₅煤层 21030 工作面进行分次开采模拟回采过程,工作面每次推进距离为 100 m,每次推进后计算平衡,共计开采 12 次。

为获取实际工作面布置条件下双重上保护层开采应力分布规律,设计了 5 种方案进行对比。①丁₅₋₆煤层开挖后,通过选取截面 A-A 分析丁₅₋₆煤层单一工作面保护时,己₁₅煤层应力分布规律。通过选取截面 B-B

分析丁₅₋₆煤层多工作面共同保护时,己₁₅煤层应力分布规律;②丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层均开挖后,通过选取截面 C-C 分析戊₉₋₁₀煤层单一工作面保护时,己₁₅煤层应力分布规律。通过选取截面 D-D 分析丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层多工作面交错掩护布置共同保护时,己₁₅煤层应力分布规律。通过选取截面 E-E 分析丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面未相互掩护共同保护时,己₁₅煤层应力分布规律。截面布置如图 1(b)所示,通过多方案对比阐明双重上保护层开采对被保护层应力分布的影响,如表 2 所示。

表 2 模拟方案
Table 2 Simulation schemes

对比分析方案	保护类型	选取截面	对应开采过程
方案 1	丁 ₅₋₆ 煤层单一工作面保护己 ₁₅ 煤层	截面 A-A (y=200 m)	丁 ₅₋₆ 煤层全部工作面开采计算平衡后
方案 2	丁 ₅₋₆ 煤层多工作面保护己 ₁₅ 煤层	截面 B-B (y=500 m)	丁 ₅₋₆ 煤层全部工作面开采计算平衡后
方案 3	戊 ₉₋₁₀ 煤层单一工作面保护己 ₁₅ 煤层	截面 C-C (y=400 m)	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 全部工作面开采计算平衡后
方案 4	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 多工作面交错掩护保护己 ₁₅ 煤层	截面 D-D (y=580 m)	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 全部工作面开采计算平衡后
方案 5	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 多工作面未交错掩护保护己 ₁₅ 煤层	截面 E-E (y=260 m)	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 全部工作面开采计算平衡后

2 双重保护层叠加开采应力分布规律研究

2.1 单一保护层开采被保护层倾向应力分布规律

模型初始应力平衡后,选取了 y=700 m 截面即模型中部,给出各煤层工作面位置的初始应力分布状态,如图 3 所示。其中应力值为负值表示该位置受压,反之受拉,卸压值为卸压后应力值与初始应力值之差。图 3 中水平应力值方向对应图 1(a)中 x 轴所示的方向。图 3 中标记了截面对应的工作面分布位置,图中数字为各工作面名称。

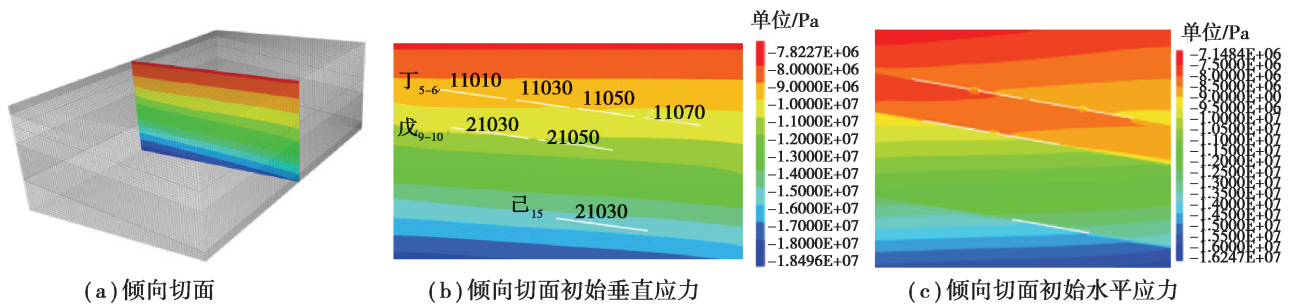


图 3 倾向 y=700 m 截面初始应力分布状态

Fig. 3 The initial stress distribution state of tendency y=700 m section

2.1.1 丁₅₋₆煤层单独保护己₁₅煤层应力分布规律

为对比双重保护层开采与单一煤层保护层开采应力分布的差异,开展了丁₅₋₆煤层工作面单独保护己₁₅煤层时的应力分布规律研究。在丁₅₋₆煤层工作面开挖后戊₉₋₁₀煤层工作面未开挖前,丁₅₋₆煤层对己₁₅煤层存在两种保护形式,分别为丁₅₋₆单一工作面开采保护己₁₅煤层(y=200 m 截面);丁₅₋₆多工作面开采保护己₁₅煤层(y=500 m 截面)。

1) 丁₅₋₆单一工作面保护己₁₅煤层。如图 4 所示,该截面为表 2 中方案 1。丁₅₋₆单一工作面开挖,戊₉₋₁₀、己₁₅煤层未开挖,丁₅₋₆开挖工作面两侧煤柱发生应力集中现象,应力分布状态如表 3 所示。单一工作面开挖后两侧为采区边界煤柱,煤柱集中应力最大值为-19 MPa,应力集中传递至底板下方 80 m。丁₅₋₆保护下,

己₁₅煤层卸压区域垂直应力值由-14~-16 MPa 下降至-13~-15 MPa,下降 1 MPa。由于单一保护层边界煤柱集中应力传递范围较大的影响,对己₁₅煤层 21030 工作面布置位置卸压作用不明显。

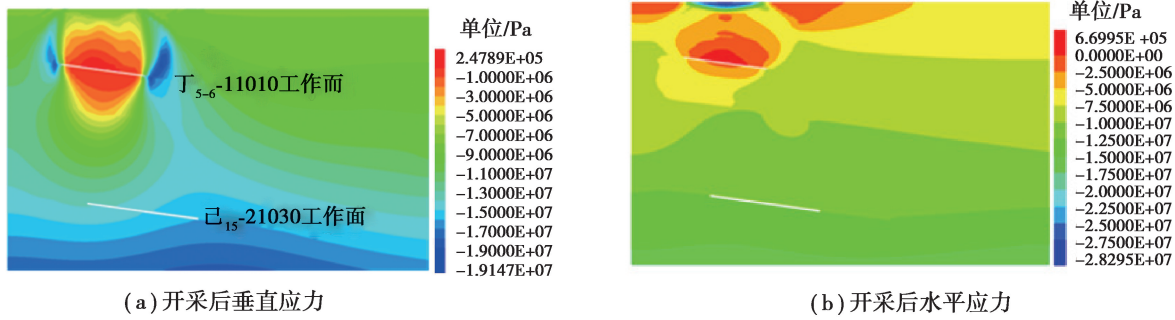


图 4 丁₅₋₆单一工作面保护己₁₅工作面应力分布云图(y=200 m 截面)

Fig. 4 The stress distribution nephogram of the single working face of D₅₋₆ protecting J₁₅ working face (y=200 m section)

表 3 丁₅₋₆单一工作面保护己₁₅工作面应力分布

Table 3 The stress distribution of the single working face of D 5-6 protecting J 15 working face MPa

工作面	未开挖初始垂直应力值	丁 ₅₋₆ 工作面开挖后垂直应力值	丁 ₅₋₆ 开挖后两侧煤柱垂直应力最大值	未开挖初始水平应力值	丁 ₅₋₆ 工作面开挖后水平应力值	丁 ₅₋₆ 开挖后两侧煤柱水平应力最大值
丁 ₅₋₆ 煤层工作面	-8~-9	0.24~-1	-19	-9~-10	0.66~-5	-7.5
己 ₁₅ 煤层工作面	-14~-16	-13~-15	-15	-13~-14	-10~-12.5	-12.5

2)丁₅₋₆多工作面保护己₁₅煤层。如图 5 所示,该截面为表 2 中方案 2。丁₅₋₆多工作面开挖,戊₉₋₁₀、己₁₅煤层未开挖,应力分布状态如表 4 所示。丁₅₋₆煤层工作面间的区段煤柱应力集中值增加为-39 MPa,应力值较大,但其向底板传递的距离较短,约为 26 m。下方己₁₅煤层工作面所在位置最大卸压值 2 MPa。由于丁₅₋₆煤层多工作面开采,且己₁₅煤层工作面不在边界煤柱下方,己₁₅煤层 21030 工作面位置卸压值有所增加。

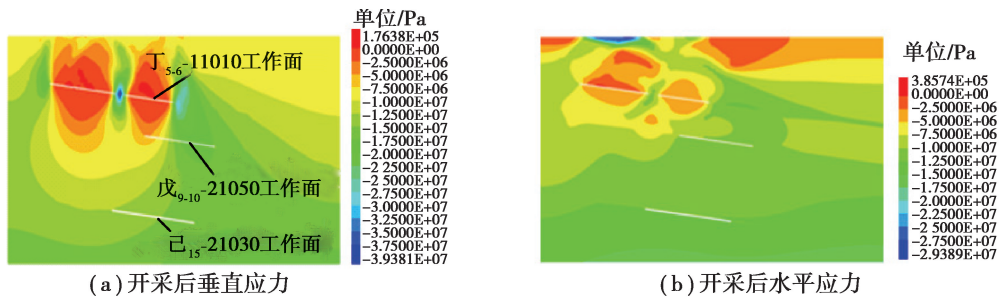


图 5 丁₅₋₆多工作面保护己₁₅工作面应力分布云图(y=500 m 截面)

Fig. 5 The stress distribution nephogram of the multiple working faces of D₅₋₆ protecting J₁₅ working face (y=500 m section)

表 4 丁₅₋₆多工作面保护己₁₅工作面应力分布

Table 4 The stress distribution of the multiple working faces of D₅₋₆ protecting J₁₅ working face MPa

工作面	未开挖初始垂直应力值	丁 ₅₋₆ 工作面开挖后垂直应力值	丁 ₅₋₆ 开挖后两侧煤柱垂直应力最大值	未开挖初始水平应力值	丁 ₅₋₆ 工作面开挖后水平应力值	丁 ₅₋₆ 开挖后两侧煤柱水平应力最大值
丁 ₅₋₆ 煤层工作面	-8~-9	0.17~-2.5	-39	-9~-10	0.38~-5	-5
己 ₁₅ 煤层工作面	-14~-16	-12~-17	-17	-13~-14	-12~-15	-15

2.1.2 戊₉₋₁₀煤层单独保护己₁₅煤层应力分布规律

如图 6 所示,该截面为表 2 中方案 3。丁₅₋₆工作面开挖后对戊₉₋₁₀工作面进行了开挖。由于戊₉₋₁₀煤层工作面走向长度不同,该截面戊₉₋₁₀煤层对应单一工作面,同时戊₉₋₁₀煤层单一工作面左半部分上方有丁₅₋₆工作面,丁₅₋₆煤层工作面右侧煤柱位于戊₉₋₁₀煤层工作面采空区上方,戊₉₋₁₀工作面左侧煤柱位于丁₅₋₆工作面采空区下方,使得区段煤柱应力集中现象减弱。戊₉₋₁₀工作面右半部分形成单一煤层保护己₁₅煤层工作面的条件,该保护区域内己₁₅被保护层垂直应力由-14~-16 MPa 卸载至-7.5~-12 MPa 之间,如表 5 所示,右侧单独保护区域卸压最大值为 4 MPa。

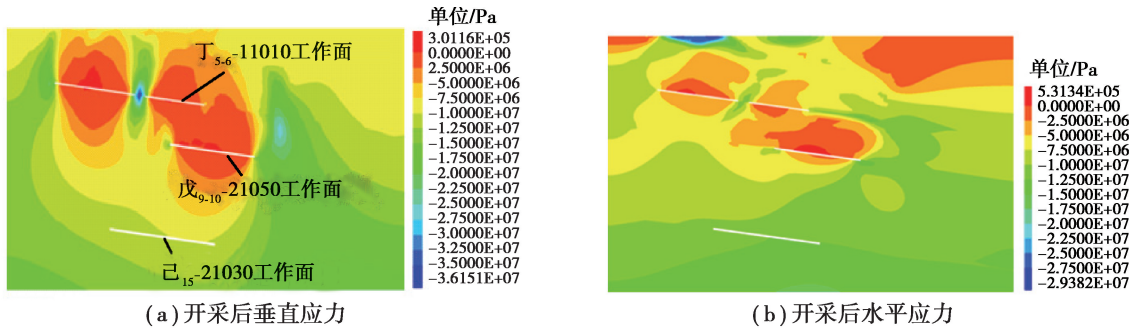


图 6 戊₉₋₁₀单一工作面保护己₁₅工作面应力分布云图(y=400 m 截面)

Fig. 6 The stress distribution nephogram of the single working face of E₉₋₁₀ protecting J₁₅ working face (y=400 m section)

表 5 戊₉₋₁₀单一工作面保护己₁₅工作面应力分布

Table 5 The stress distribution of the single working face of E₉₋₁₀ protecting J₁₅ working face

MPa

工作面	未开挖初始垂直应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后垂直应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱垂直应力最大值	未开挖初始水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱水平应力最大值
戊 ₉₋₁₀ 煤层工作面	-11~-12	0.3~-2.5	-22	-10~-11	-0.5~-5	-5
己 ₁₅ 煤层工作面	-14~-16	-7.5~-12	-12	-13~-14	-10~-12	-12

2.2 双重保护层开采被保护层倾向应力分布规律

2.2.1 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面区段煤柱相互掩护

如图 7 所示,该截面为表 2 中方案 4。此时丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面均开采完毕,己₁₅煤层 21030 工作面位于双重保护层下方。由表 6 可知,当己₁₅工作面位于丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面叠加采动卸压区域下方时,卸压范围进一步向下延伸,己₁₅煤层卸压值进一步增加,由-14~-16 MPa 卸压至-7.5~-10 MPa,卸压值最大达 6.5 MPa。同时,对应的丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面间的区段煤柱的集中应力降低。丁₅₋₆工作面右侧集中应力是由于丁₅₋₆右侧存在一个较短工作面,该截面恰好位于该工作面走向边界导致。

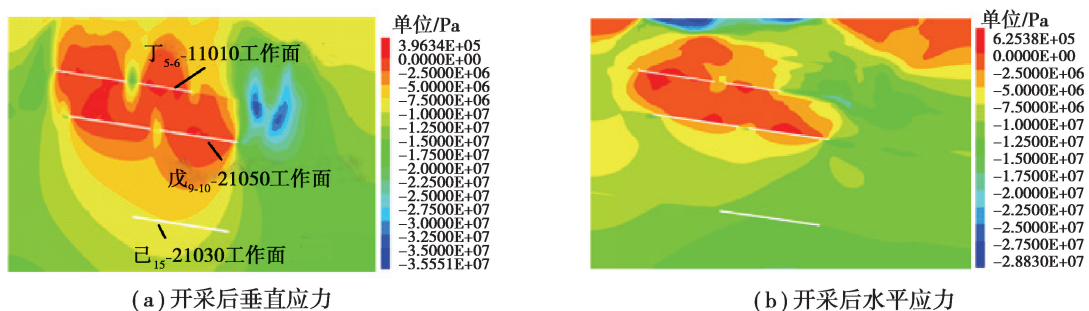


图 7 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面交错布置保护己₁₅工作面应力分布云图(y=580 m 截面)

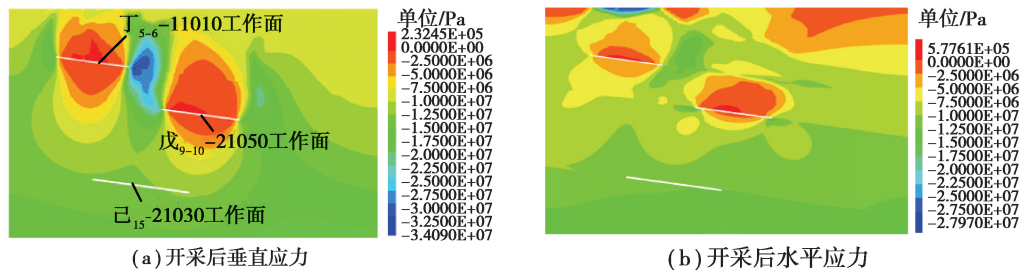
Fig. 7 The stress distribution nephogram of D₅₋₆ and E₉₋₁₀ working faces staggered arrangement to protect J₁₅ working face (y=580 m section)

表 6 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面交错布置保护己₁₅工作面应力分布Table 6 The stress distribution of D₅₋₆ and E₉₋₁₀ working faces staggered arrangement to protect

工作面	J ₁₅ working face						MPa
	未开挖初始垂直应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后垂直应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱垂直应力最大值	未开挖初始水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱水平应力最大值	
丁 ₅₋₆ 煤层工作面	-8~-9	0.3~-2.5	-10	-9~-10	0.5~-5	-5	
戊 ₉₋₁₀ 煤层工作面	-11~-12	0.3~-2.5	-10	-10~-11	-0.5~-5	-5	
己 ₁₅ 煤层工作面	-14~-16	-7.5~-12	-10	-13~-14	-10~-12	-12	

2.2.2 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面区段煤柱未相互掩护

如图 8 所示,该截面为表 2 中方案 5。此时丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面均开采完毕,丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面区段煤柱未相互掩护。由表 7 可知,己₁₅煤层由-14~-16 MPa 卸压至-11~-13 MPa,卸压值最大达 3 MPa。同时,对应的丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面间区段煤柱集中应力增加,最大集中应力达到 34 MPa。

图 8 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面未交错布置保护己₁₅工作面应力分布云图($y=260$ m 截面)Fig. 8 The stress distribution nephogram of D₅₋₆ and E₉₋₁₀ working faces without staggered arrangement to protect J₁₅ working face ($y=260$ m section)表 7 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面未交错布置保护己₁₅工作面应力分布Table 7 The stress distribution of D₅₋₆ and E₉₋₁₀ working faces without staggered arrangement to protect

工作面	J ₁₅ working face						MPa
	未开挖初始垂直应力值/	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后垂直应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱垂直应力最大值	未开挖初始水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 工作面开挖后水平应力值	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 开挖后两侧煤柱水平应力最大值	
丁 ₅₋₆ 煤层工作面	-8~-9	0.2~-2.5	-34	-9~-10	0.5~-5	-5	
戊 ₉₋₁₀ 煤层工作面	-11~-12	0.2~-2.5	-22	-10~-11	-0.5~-5	-5	
己 ₁₅ 煤层工作面	-14~-16	-11~-13	-12	-13~-14	-10~-12	-12	

2.3 双重保护层开采被保护层走向应力分布规律

前述给出了丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层工作面开采不同保护类型时,己₁₅煤层工作面倾向应力分布规律。为进一步确定己₁₅煤层工作面走向应力分布情况,取丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层开采后,己₁₅煤层 21030 工作面的走向切面应力进行分析,如图 9 所示。

由图 9(b)(c)可知,己₁₅煤层工作面在走向方向上卸压角不同。当己₁₅煤层工作面走向边界位于戊₉₋₁₀煤层工作面单独保护区域时,卸压角较大为 65°;位于丁₅₋₆煤层工作面单独保护区域时,对应的卸压角较小为 50°,如图 9(b)中虚线所示,且水平应力变化较小。

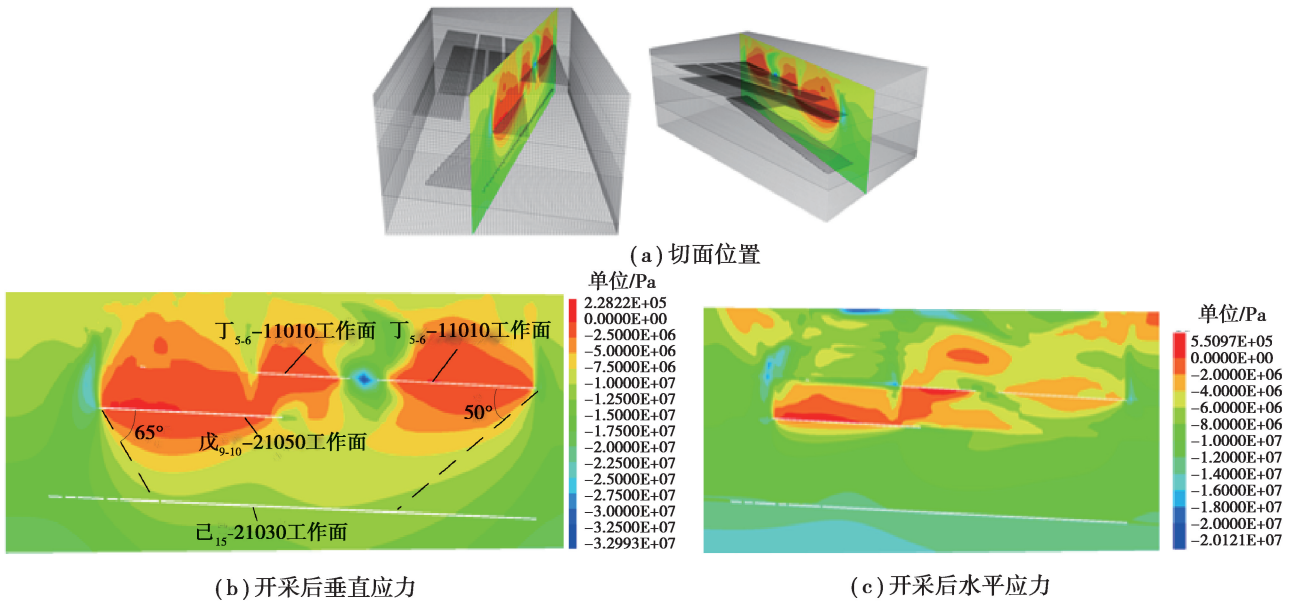


图 9 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀工作面开采后己₁₅-21030 工作面走向切面

Fig. 9 The trend section of J₁₅-21030 working face after the mining of D₅₋₆ and E₉₋₁₀

图 10 为丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层开采前后己₁₅煤层 21030 工作面的走向应力分布对比。由图 10 可知,最大卸压值位于工作面走向 300~700 m 范围内,此处为双重保护层叠加保护区域,卸压影响范围为工作面走向 100 m 到 1 150 m 范围内。

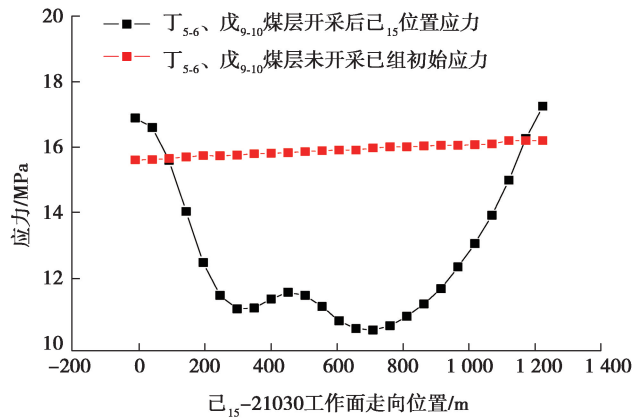


图 10 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层开采前后己₁₅-21030 工作面走向切面应力值对比

Fig. 10 Comparison of the stress values of trend section of J₁₅-21030 working face before and after the mining of D₅₋₆ and E₉₋₁₀

图 11 为丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层开采后,己₁₅煤层全区的应力分布情况。由图 11 可知,在双重保护层保护区域的卸压值较大,且呈椭圆形。当丁₅₋₆煤层工作面或戊₉₋₁₀煤层工作面单独保护时,卸压区域不规则延伸,且卸压值减小。

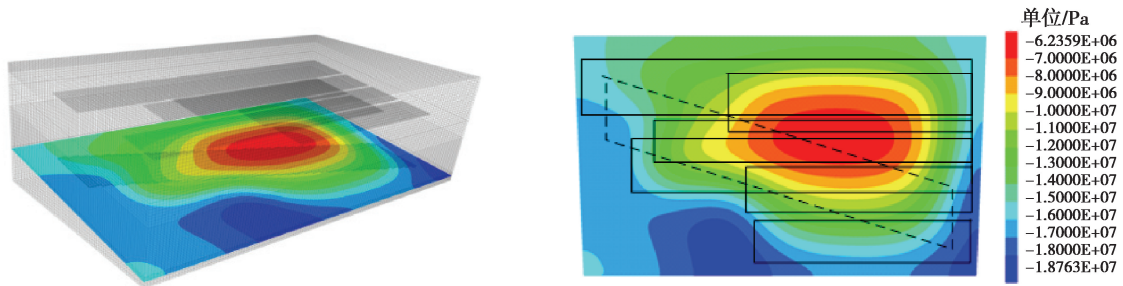


图 11 丁₅₋₆、戊₉₋₁₀开采后己组煤层全区应力分布

Fig. 11 Stress distribution in the whole area of the Group J coal seam after the mining of D₅₋₆ and E₉₋₁₀

2.4 双重保护层开采后已₁₅煤层工作面回采应力演化规律

为指导已₁₅煤层工作面采掘计划设计并优化瓦斯抽采钻孔布置,进一步分析了已₁₅煤层 21030 工作面回采过程中工作面前方支承压力应力集中系数的演化规律。依据图 12 所示应力云图,统计应力集中系数如表 8 所示。

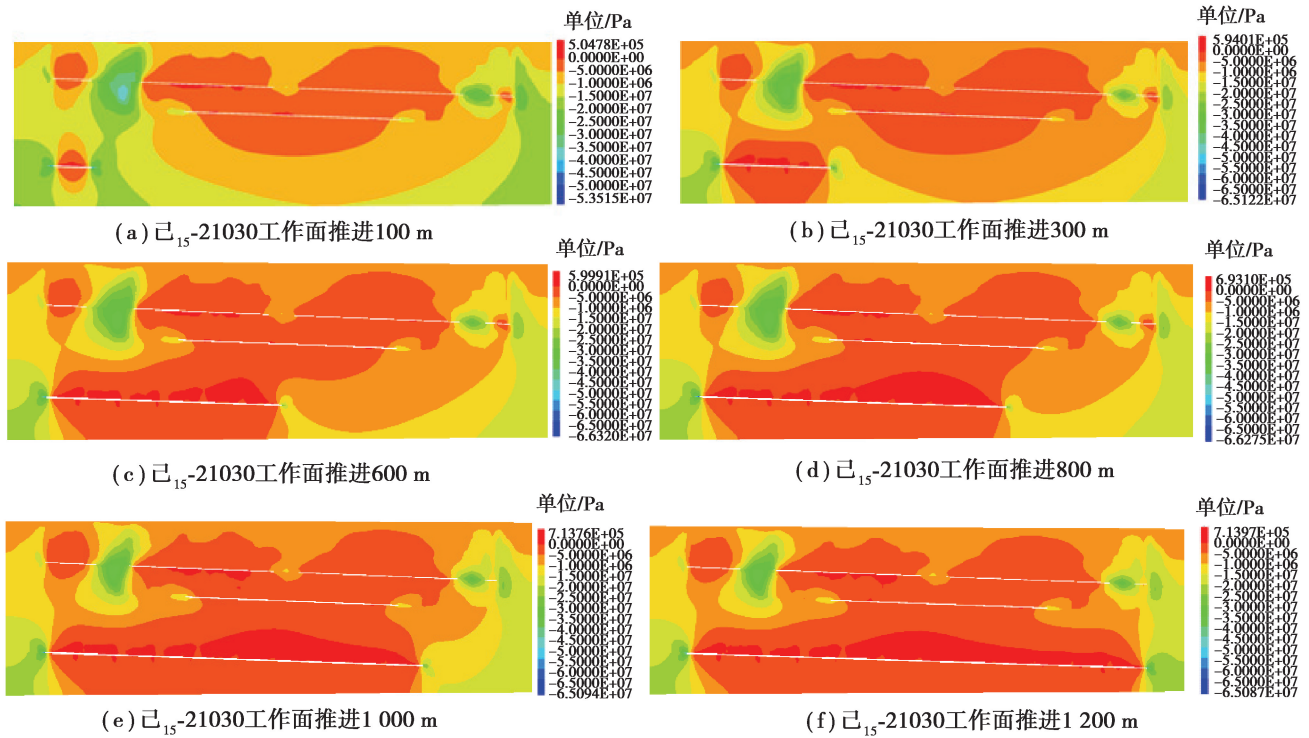


图 12 已₁₅煤层回采应力演化规律

Fig. 12 Law of evolution of mining stress in coal seam of J₁₅

表 8 工作面推进应力集中系数

Table 8 Stress concentration factor during working face advance

工作面推进 距离/m	初始应力值/ MPa	最大应力值/ MPa	应力集中 系数	工作面推进 距离/m	初始应力值/ MPa	最大应力值/ MPa	应力集中 系数
100	15.36	41.4	2.70	700	15.68	31.0	1.98
200	15.42	52.4	3.40	800	15.74	31.8	2.02
300	15.47	36.8	2.38	900	15.79	33.3	2.11
400	15.52	35.9	2.31	1 000	15.84	37.7	2.38
500	15.58	33.5	2.15	1 100	15.89	46.5	2.93
600	15.63	31.8	2.03	1 200	15.94	58.6	3.68

推进过程中距开切眼 300~1 000 m 范围内应力集中系数相对较小。最大应力集中系数为 3.40,最小应力集中系数为 1.98,在回采中应注意对应力集中系数较大区域提前给出安全防护措施。

3 应力分布规律现场验证

3.1 测试方法及原理

钻屑量是一种综合反映煤体应力、瓦斯压力和煤的物理力学性质的指标。钻孔形成后,在其周围将形成破碎区、塑性软化区和弹性区,不同围岩应力环境下钻孔三区分布范围不同,导致钻屑量不同,钻屑量测试能间接反映钻孔围岩应力分布情况,围岩应力值越大,钻屑量越大。

3.2 测试方案

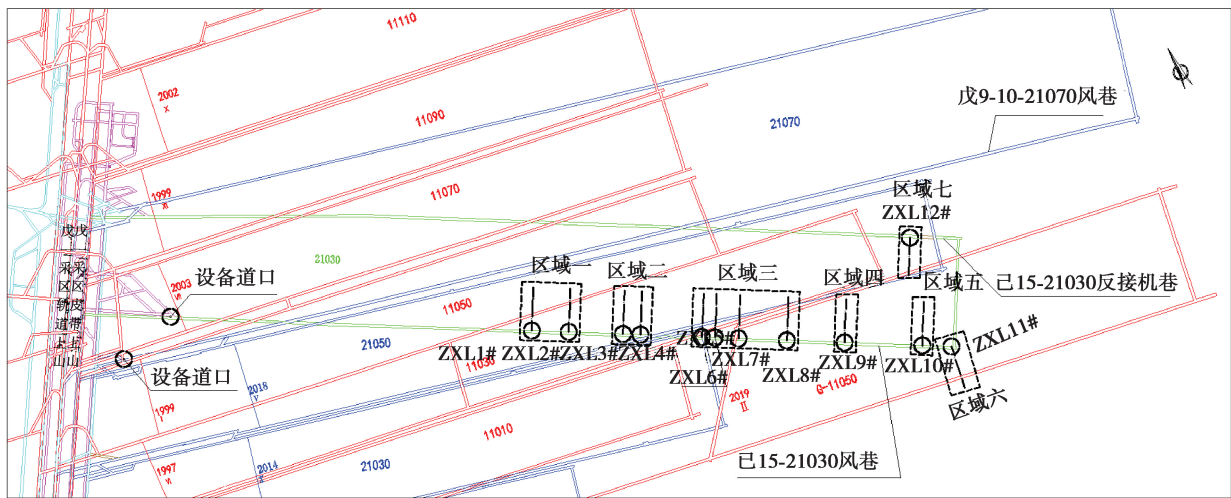
针对丁₅₋₆、戊₉₋₁₀煤层对已₁₅煤层的保护类型,共设计了 7 个考察区域布置了 13 个施工位置开展钻孔钻屑量考察,如表 9 所示。

表 9 分区情况说明
Table 9 Partition description

钻孔区域编号	测试内容	对应钻孔	备注	对应数值计算方案
区域一	丁 ₅₋₆ +戊 ₉₋₁₀ 开采后已 ₁₅ 煤层钻屑量变化	ZXL1#、ZXL2#	钻孔穿过被戊 ₉₋₁₀ 掩护的丁 ₅₋₆ 煤层遗留煤柱可考察相互掩护对煤柱集中应力的影响	对应方案 4,验证相互掩护煤柱应力分布
区域二	丁 ₅₋₆ +戊 ₉₋₁₀ 开采后已 ₁₅ 煤层钻屑量变化	ZXL3#、ZXL4#	丁 ₅₋₆ 、戊 ₉₋₁₀ 双重卸压对已 ₁₅ 应力分布的影响	对应方案 4 验证双重卸压区域应力分布
区域三	丁 ₅₋₆ +戊 ₉₋₁₀ 开采后已 ₁₅ 煤层钻屑量变化	ZXL5#、ZXL6#、ZXL7#、ZXL8#	钻孔穿过戊 ₉₋₁₀ 煤层遗留煤柱且该煤柱未被掩护,可考察未掩护煤柱引起的应力集中	对应方案 4,验证两煤层区段煤柱未相互掩护集中应力分布,与区域一对比
区域四	丁 ₅₋₆ 开采后已 ₁₅ 煤层钻屑量变化	ZXL9#	丁 ₅₋₆ 多工作面保护戊 ₉₋₁₀ 被保护层应力分布	对应方案 2,验证多工作面保护时对应卸压区域与煤柱区域对被保护层的影响
区域五	未扰动区域钻屑量变化	ZXL10#、ZXL11#	已 ₁₅ 原岩应力分布	对应原始区域,与其余方案对比
区域六	未扰动区域钻屑量变化	ZXL12#	已 ₁₅ 原岩应力分布	对应原始区域,与其余方案对比
区域七	戊 ₉₋₁₀ 开采后已 ₁₅ 煤层钻屑量变化	ZXL13#	戊 ₉₋₁₀ 单独卸压对已 ₁₅ 影响	对应方案 3,验证戊 ₉₋₁₀ 单一工作面保护已 ₁₅ 应力分布规律

3.3 测试过程及结果

静水压力下巷道围岩处于弹性变形阶段,切向及径向集中应力影响范围为 3~5 倍巷道半径,巷道宽度为 4.8 m,估算应力集中影响范围为 14.4~24 m。剔除巷道周围应力重分布影响,从钻进至 24 m 处开始取屑,直至钻进至 79 m 终止,测试位置如图 13 所示,部分测试结果如图 14 所示。



注:图中红色线为丁₅₋₆煤层工作面;蓝色线为戊₉₋₁₀煤层工作面;绿色线为已₁₅煤层工作面

图 13 已₁₅-21030 工作面钻屑量测试位置

Fig. 13 Drilling cuttings weight test position at J₁₅-21030 working face

戊₉₋₁₀煤层工作面相互掩护使得工作面区段煤柱集中应力由 39 MPa 卸载至 10 MPa。水平应力卸压值变化不明显。工作面区段煤柱未相互掩护时,垂直应力卸压值最大为 3 MPa,煤柱集中应力制约了被保护层的卸压。丁、戊煤层双重叠加掩护卸压增强了卸压效应降低了区段煤柱的应力集中,较单一煤层开采明显提高了被保护层的卸压值。

3)开展了现场工作面钻屑量测试,验证了双重保护层开采应力分布规律。得到己₁₅煤层 21030 工作面卸压影响范围为工作面 100 m 到 1 150 m,最大卸压值位于工作面走向 300 m 到 700 m 范围内,应力集中系数在 300~1 000 m 范围内较小。依据上述规律制定了采掘计划及抽采钻孔设计方案。

参考文献:

- [1] 耿朝光, 马建宏, 侯江涛. 中泰矿业下保护层开采数值模拟研究[J]. 能源技术与管理, 2018, 43(1): 4-6, 31.
Gen C G, Ma J H, Hou J T. Research on Numerical simulation of mining protective layer under Zhongtai mining[J]. Energy Technology and Management, 2018, 43(1): 4-6, 31. (in Chinese)
- [2] Zhang H T, Wen Z H, Yao B H, et al. Numerical simulation on stress evolution and deformation of overlying coal seam in lower protective layer mining[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(5): 3623-3633.
- [3] 石必明, 俞启香. 远距离保护层开采煤岩移动变形特性的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(2): 39-41, 45.
Shi B M, Yu Q X. Test and research on coal and rock movement deformation characteristics in coal mining with long distance protection layer[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(2): 39-41, 45.(in Chinese)
- [4] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 259-263.
Shi B M, Yu Q X, Zhou S N. Numerical simulation of far-distance rock strata failure and deformation caused by mining protecting stratum[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 259-263. (in Chinese)
- [5] 施龙青, 韩进. 底板突水机理及预测预报[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
Shi L Q, Han J. Floor Water-inrush Mechanism and Prediction[M]. Xuzhou, China: China University of Mining & Technology Press, 2004.(in Chinese)
- [6] 朱第植, 王成绪. 原位应力测试在底板突水预测中的应用[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 295-299.
Zhu D Z, Wang C X. Application of in situ stress measurement to forecast of water inrush from floor[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 295-299. (in Chinese)
- [7] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
Shen M R, Chen J F. Rock mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 李树清, 龙祖根, 罗卫东, 等. 煤层群下保护层开采保护范围的数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 34-40.
Li S Q, Long Z G, Luo W D, et al. Numerical simulation of protection scope when lower-protective layer mined in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(6): 34-40. (in Chinese)
- [9] 袁志刚, 王宏图, 胡国忠, 等. 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 Z G, Wang H T, Hu G Z, et al. 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.(in Chinese)
- [10] 黄光利. 砚石台煤矿急倾斜俯伪斜上保护层开采保护范围研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Huang G L. Study on protection scope of steep-inclined upper-protective layer with pseudo-incline technique for yanshitai coal mine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [11] 朱志洁, 张宏伟, 陈莹, 等. 远距离重叠煤柱作用下的强矿压显现作用机制: 以大同矿区多煤层开采为例[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 83-88.
Zhu Z J, Zhang H W, Chen Y, et al. Strong strata behavior mechanism under long distance overlapping coal pillar: taking multiple coal seams mining of Datong mining area as an example[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 83-88.(in Chinese)
- [12] Gao R, Yu B, Meng X B. Stress distribution and surrounding rock control of mining near to the overlying coal pillar in the working face[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 881-887.
- [13] 李杨, 王建鹏, 陈一鼎, 等. 多煤层开采中间岩层对覆岩移动的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 246-255.
Li Y, Wang J P, Chen Y D, et al. Study on effect of interburden on movement of overburden in multiple coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 246-255.(in Chinese)

- [14] Yin G Z, Li M H, Wang J G, et al. Mechanical behavior and permeability evolution of gas infiltrated coals during protective layer mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 292-301.
- [15] 康钦容, 张卫中, 韩佩博, 等. 三维应力条件下煤层底板采动破坏规律实验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(3): 612-618.
Kang Q R, Zhang W Z, Han P B, et al. Experimental study of mine-induced underlying strata failure regularity in three dimensional stress condition [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(3): 612-618. (in Chinese)
- [16] Yin W, Miao X X, Zhang J X, et al. Mechanical analysis of effective pressure relief protection range of upper protective seam mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(3): 537-543.
- [17] Wu X Q, Dou L M, Lv C G, et al. Research on pressure-relief effort of mining upper-protective seam on protected seam[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1089-1096.
- [18] Yao B H, Ma Q Q, Wei J P, et al. Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(4): 637-643.
- [19] Liu Z, Yang H, Cheng W M, et al. Stress distribution characteristic analysis and control of coal and gas outburst disaster in a pressure-relief boundary area in protective layer mining[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(16): 1-15.
- [20] Gao R, Yu B, Xia H C, et al. Reduction of stress acting on a thick, deep coal seam by protective-seam mining[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1209.
- [21] Song Z M, Gao X C, Tian K Y. Determination of protection range of mining upper protective layers and its numerical simulation[J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2012, 18(4): 368-373.
- [22] 国家安全生产监督管理总局. 保护层开采技术规范: AQ 1050—2008[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
State Administration of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Technical criterion of protective coal seam exploitation: AQ 1050—2008[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2009. (in Chinese)
- [23] 刘军, 周东平, 蒋和财, 等. 小甘沟煤矿工作面瓦斯涌出分析与精准治理研究[C]//2019年西南五省(市、区)煤炭学术年会(重庆部分)论文集. 重庆: 重庆市煤炭学会, 2019: 98-104.
Liu J, Zhou D P, Jiang H C, et al. Study on gas emission analysis and precision control in Xiaogangou Coal Mine working face[C] // Proceedings of the 2019 Southwest Five Provinces (City, District) Coal Academic Annual Conference (Chongqing Part). Chongqing: Chongqing Coal Society, 2019: 98-104. (in Chinese)
- [24] 李建伟, 刘艳辉. 平煤八矿远距离保护层开采可行性分析[J]. *矿业安全与环保*, 2011, 38(2): 80-81, 84.
Li J W, Liu Y H. Feasibility analysis of long-distance protective seam mining in Pingmei No. 8 Mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2011, 38(2): 80-81, 84. (in Chinese)
- [25] 翟新献, 涂兴子, 李如波, 等. 平煤八矿硐室围岩控制联合支护技术研究[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(5): 1-3.
Zhai X X, Tu X Z, Li R B, et al. Study on combined support technology of surrounding rocks deformation control of chamber in Pingdingshan No.8 coal mine[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(5): 1-3. (in Chinese)
- [26] 周洋, 梁冰, 石占山, 等. 考虑煤层倾角和钻孔倾角的钻屑量理论研究[J]. *矿业安全与环保*, 2020, 47(1): 26-30, 35.
Zhou Y, Liang B, Shi Z S, et al. Theoretical study on the drilling cuttings considering coal seam angle and borehole angle[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(1): 26-30, 35. (in Chinese)

(编辑 郑洁)