

特约稿件



窦林名(1963—)男,青海平安人,中国矿业大学教授,博导,博士后,波兰西里西亚工业大学博士。中国矿业大学冲击地压研究团队带头人,“中国矿业大学—安徽理工大学”冲击地压防治工程研究中心主任,江苏省矿业协会副会长。曾任中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室主任;全国煤炭行业“653 工程”首席专家。享受国务院政府特殊津贴,江苏省“333”中青年科技领军人才、“青蓝工程”学术带头人、“六大人才高峰”高层次人才;孙越崎“青年科技奖”。

主要从事采矿工程、冲击矿压、煤矿围岩控制、采矿地球物理学等方面的科研和教学工作。研究提出了“一个理论、三种原理”,研发了一个平台,开发了八项技术(一个理论:动静载叠加诱发冲击机理;三种原理:“应力—震动—能量”三场耦合监测原理、冲击地压强度弱化减冲原理、巷道围岩强弱强结构原理;一个平台:冲击地压风险智能判识与监测预警云平台;八项技术:冲击危险性预测与

评价技术、电磁辐射监测技术、地音监测技术、应力场 CT 探测技术与装备、冲击变形能监测预警技术、冲击地压多参量监测预警技术、钻孔高压射流卸压技术、顶板高压定向水力致裂技术)。

主持国家重点研发计划、国家“973”、科技支撑计划等课题,国家自然科学基金重大(面上)项目,中波政府合作项目、波兰国家科学基金、国家博士后基金项目等国内外合作项目 30 项,企业合作项目 200 余项。研究成果获国家科技进步二等奖 2 项、波兰采矿奖 1 项、省部级一等奖 4 项、二等奖以上奖励 18 项;指导的博士生获全国百篇优博 1 篇,江苏省优博 4 篇,中国矿业大学优博 10 篇;出版著作 12 部,发表论文 300 余篇,其中被 SCI 收录 80 余篇, EI 收录 140 多篇,专利 50 多项,软件著作权 16 项。研究成果先后在国内 26 个矿业集团公司及其所属 90 多个煤矿以及澳大利亚、孟加拉煤矿现场实践中得到了成功应用,取得了良好的社会效益。成果编入了《煤矿安全规程》《煤矿安全规程执行说明》《防治煤矿冲击地压细则》《煤矿安全工程通用规范》等规程规范和相关标准。

文章编号:1008-3731(2021)02-0001-09

## 双煤层不规则煤柱应力—能量演化规律 及防冲技术研究

窦林名<sup>1,2</sup>, 卢安良<sup>1,2</sup>, 曹晋荣<sup>1,2</sup>, 白金正<sup>1,2</sup>, 刘建军<sup>3</sup>, 马宏军<sup>3</sup>

(1. 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 开滦能源化工股份有限公司 唐山矿, 河北 唐山 063000)

**摘 要:** 煤矿开采遗留煤柱区域往往是高应力和能量聚集区,多煤层开采条件下,当上部遗留煤柱与工作面煤柱重叠时,多重应力作用下煤柱区应力分布及能量演化更为复杂,工作面回采过程中易发生动力现象。以某矿双煤层开采遗留不规则煤柱区开采为背景,采用数值模拟和工程实践等方法,研究了工作面开采过程中煤柱区的应力分布、能量演化规律,建立了不规则煤柱区冲击危险监测体系,并制定了针对性防冲方案。结果表明:不规则煤柱区应力集中程度受采动影响较高,煤柱内高静载是影响工作面冲击危险性的主要因素;工作面回采临近煤柱时,“双层”煤柱中应变能积聚程度显著高于采空区下单层煤柱;现场微震分析可知,高能事件多分布于煤层中,煤柱为能量积聚释放的主体;钻屑法与应力在线监测结果表明煤柱区域为高应力集中区。根据数值模拟及现场监测结果,提出了煤体大

收稿日期:2020-12-07; DOI:10.19896/j.cnki.mtkj.2021.02.001

基金项目:国家自然科学基金项目(51934007,51874292);中央高校基础研究经费资助项目(2019CXNL06)

作者简介:窦林名(1963—)男,青海平安人,教授,博士后,博士生导师,波兰西里西亚工业大学博士,国务院政府特殊津贴获得者。

引用格式:窦林名,卢安良,曹晋荣,等.双煤层不规则煤柱应力—能量演化规律及防冲技术研究[J].煤炭科技,2021,42(2):1-9.

DOU Lin-ming, LU An-liang, CAO Jin-rong, et al. Study on stress-energy evolution law of irregular coal pillar in double coal seams and anti-scouring technology [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2021, 42(2): 1-9.

直径卸压方案,并进行了效果验证。

关键词:双煤层;不规则煤柱;应力分布;能量演化;监测防治

中图分类号:TD324 文献标志码:A

### Study on stress-energy evolution law of irregular coal pillar in double coal seams and anti-scouring technology

DOU Lin-ming<sup>1,2</sup>, LU An-liang<sup>1,2</sup>, CAO Jin-rong<sup>1,2</sup>, BAI Jin-zheng<sup>1,2</sup>, LIU Jian-jun<sup>3</sup>, MA Hong-jun<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Mine Earthquake Monitoring Engineering Laboratory, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Tangshan Mine of Kailuan Energy and Chemical Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Coal pillar area left by coal mining is often high stress and energy accumulation area. Under the condition of multi seam mining, when the upper remaining coal pillar overlaps with the coal pillar of the working face, the stress distribution and energy evolution of the coal pillar area under the action of multiple stresses are more complex, and the dynamic phenomenon is easy to occur in the process of mining. Based on the mining of irregular pillar area left by double seam mining in a mine, this paper studied the stress distribution and energy evolution law of pillar area in the mining process of working face by using numerical simulation and engineering practice, and established the impact risk monitoring system of irregular pillar area, formulated the targeted anti impact scheme. The results showed that the degree of stress concentration in the irregular coal pillar area is highly affected by mining, and the high static load in the coal pillar is the main factor affecting the impact risk of the working face;

when the working face is close to the coal pillar, the degree of strain energy accumulation in the "double layer" coal pillar is significantly higher than that in the single layer coal pillar under the goaf; field microseismic analysis showed that high energy events are mostly distributed in coal seam, and coal pillar is the main body of energy accumulation and release; the results of drilling cuttings method and on-line stress monitoring showed that the coal pillar area is a high stress concentration area. According to the results of numerical simulation and field monitoring, a large diameter pressure relief scheme is proposed and verified.

**Keywords:** double coal seam; irregular coal pillar; stress distribution; energy evolution; monitoring and prevention

**CLC number:** TD324 **Document identification:** A

近年来,随着煤炭资源不断开采,我国东部老矿区剩余可采能源愈发紧张。多煤层开采下工作面层位关系复杂,遗留煤柱较多,不规则煤柱区往往是高应力和能量聚集区,应力分布及能量演化规律相对复杂,下层位煤层开采时经常诱发冲击矿压灾害<sup>[1-3]</sup>。针对遗留煤柱区域的应力及能量演化规律,许多学者已经进行了大量研究,并取得丰硕成果。王存文等<sup>[4]</sup>通过建立煤柱力学模型分析了残留煤柱内的应力状态,认为煤柱外围的强剪切区导致煤体破裂是造成煤柱冲击矿压的主要原因。李佃平等<sup>[5]</sup>分析了上覆岩层结构特征与诱冲机理及其控制措施,得出孤岛煤柱特殊覆岩结构造成了工作面高应力与弹性能积聚,动静载应力叠加使煤体失稳是诱发冲击矿压的主要原因。张科学<sup>[6]</sup>综合考虑上区段采空区侧向支承应力分布规律和煤柱应力分布、巷道围岩应力分布、巷道围岩变形与煤柱宽度的关系及护巷煤柱宽度的理论计算等因素,得出了深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定方法。李文峰等<sup>[7]</sup>分析了孤岛煤柱巷道底鼓的因素,通过

数值计算得到该类巷道具具有围岩塑性区分布大、最大主应力等值线远离底板、底板岩层易挤压流动造成巷道剧烈底鼓等特点。赵毅鑫等<sup>[8]</sup>研究了冲击矿压孕育过程中“煤—围岩”系统能量耗散特征和系统内熵的变化,冲击矿压是煤(岩)体内能量的涨落达到一定值后出现的自组织现象,其孕育过程是煤(岩)储能和耗能竞争的过程。曹晋荣<sup>[9]</sup>分析了急倾斜煤层顶板处于高静载应力状态的原因,并认为煤(岩)高静载与动载荷引起的应力增量叠加超过煤(岩)临界应力是顶板发生冲击矿压的原因。沈志平<sup>[10]</sup>根据冲击危险性评价及数值模拟结果,建立中央采区下山煤柱区冲击矿压防治对策体系。王春雷等<sup>[11]</sup>研究分析了掘巷后煤柱内应力重新分布状况及其对巷道稳定性的影响,提出临界不稳定宽度来限制沿空掘巷煤柱宽度的范围,确定了合理的煤柱宽度。窦林名等<sup>[12]</sup>基于强度弱化减冲原理,提出了控制静载和动载的针对性防治方案。郑晓晨<sup>[13]</sup>分析了大采深、强冲击条件下掘进工作面冲击地压发生的机理,制定了掘进期间冲击地压综合治

理方案。

上述研究成果主要是针对规则遗留煤柱,而对于双煤层开采不规则煤柱的应力—能量演化规律研究较少。本文以某矿 Y394 工作面过不规则煤柱为工程背景,采用数值模拟、现场监测和工程实践等方法,研究了工作面回采过程中不规则煤柱区应力—能量演化特征,建立了不规则煤柱区冲击危险监测体系,提出了工作面过不规则煤柱区的冲击矿压防治方案,取得了较好的效果。研究结论对类似具有双煤层开采遗留煤柱条件的工作面防冲安全生产具有良好的指导意义。

### 1 工程概况

某矿 5 煤平均厚度 2.8 m,8-9 煤合层区平均厚度 10.8 m,层间距约为 40 m。目前 5 煤层已回采完毕,主要可采煤层为 8-9 煤层。Y394 工作面埋深为 753~795 m,走向长度 750 m,倾向长度 130 m。工作面内无褶曲和断层构造,采用综合机械化放顶煤采煤法。上覆为 T<sub>1</sub>454 与 T<sub>1</sub>455 采空区,北翼为 Y394 采空区和 Y486 采空区,东翼、西翼和南翼均为实体煤。工作面综合柱状如图 1 所示。

柱状	层号	岩性	厚度/m	埋深/m
	1	细粒砂岩	4.92	736.17
	2	粉砂岩	2.26	741.09
	3	5煤	2.86	743.35
	4	细粒砂岩	3.91	746.21
	5	粉砂岩	4.24	750.12
	6	细粒砂岩	1.53	754.36
	7	6煤	0.83	755.89
	8	粉砂岩	4.42	756.75
	9	细粒砂岩	13.15	761.17
	10	细粒砂岩	5.17	774.32
	11	粉砂岩	6.37	779.49
	12	8煤	5.36	785.86
	13	黏土岩	0.20	791.22
	14	9煤	5.24	791.42
	15	黏土岩	2.29	796.66
	16	粉砂岩	5.61	798.85
	17	粉砂质泥岩	5.24	804.56

图 1 Y394 工作面综合柱状  
Fig. 1 Y394 working face comprehensive columnar

顶板以细粒砂岩、粉砂岩为主,底板以泥岩、粉砂岩为主。Y394 工作面北翼遗留有 T<sub>1</sub>454 采空区下伏的单层煤柱与双煤层开采形成的“双层”煤柱,导致不规则煤柱区应力及能量分布情况较为复杂,当工作面推进至该区域时,强矿压显现情况频发,尤其是煤柱侧面临较高的冲击危险性。Y394 工作面及不规则遗留煤柱分布情况如图 2 所示。

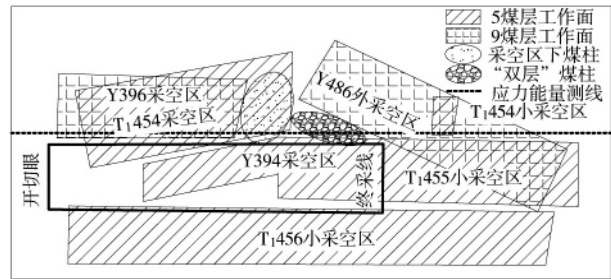


图 2 Y394 工作面布置  
Fig. 2 Y394 working surface layout

### 2 数值模拟

#### 2.1 数值模型建立及基本参数

根据该矿 Y394 工作面实际地质情况,采用 Rhino 6 软件进行高精度真实建模,建立如图 3 所示的数值计算模型,并导入 FLAC<sup>3D</sup> 进行计算。

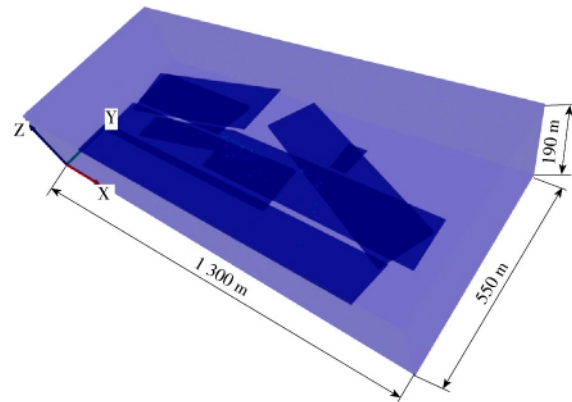


图 3 数值模型示意  
Fig. 3 Numerical simulation schematic

模型 1 300 m × 550 m × 190 m,共计 236 021 个节点,1 312 072 个单元。模型底部约束垂直位移,四周约束水平位移,模型顶部施加 15 MPa 的垂直载荷模拟工作面实际的垂直应力,水平应力分别为 15 MPa 和 25 MPa,来模拟构造应力分布情况。数值模型采用摩尔—库仑破坏准则,煤(岩)体采用的物理力学参数见表 1。首先,将 Y394 邻近工作面按实际

回采顺序依次开采;然后,分步回采 Y394 工作面,分析工作面开采过程中双煤层不规则煤柱区的应力分布特征和能量演化规律。

表 1 煤(岩)体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock mass

岩性	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa	内摩擦角/ (°)
细粒砂岩	2 690	6.70	5.80	3.80	5.20	35
中粒砂岩	2 580	4.70	3.90	3.00	3.20	38
粗粒砂岩	2 650	5.70	4.10	3.20	3.80	34
粉砂岩	2 630	5.00	3.80	2.80	3.50	36
砂质泥岩	2 450	1.59	0.80	2.10	2.10	33
8-9 煤	1 370	0.20	0.15	1.10	0.60	27
5 煤	1 390	0.40	0.25	1.30	0.70	28

### 2.2 不规则煤柱应力分布特征

Y394 工作面回采过程中的煤层垂直应力分布情况如图 4 所示。

由于 Y396 和 Y486 外工作面的开采,两采空区煤柱边缘处形成了一定的应力集中。同时在上覆遗留煤柱作用下,“双层”煤柱区域应力集中的程度和范围均高于采空区下单层煤柱。且随着 Y394 工作面的回采,不规则煤柱内的高静载与超前采动应力相互叠加,应力集中程度和范围进一步加大,导致冲击危险性升高。

为了定量研究工作面回采过程中不规则煤柱内的应力变化规律,在 Y394 刮板机道外侧 20 m 煤柱内布设 1 条测线(图 2),记录 Y394 工作面回采过程中的垂直应力变化情况,结果如图 5 所示。由图 5 可知,回采过程中产生的垂直应力峰值约为 59.11 MPa,对应的应力集中系数为 2.95。该不规则煤柱区域的垂直应力呈中间低、两边高的“马鞍形”,且煤柱内应力随着工作面的开采呈上升趋势。

### 2.3 不规则煤柱能量演化规律

根据弹性力学理论<sup>[14]</sup>,模型中的单元体满足摩尔-库仑屈服准则,采用式(1)计算模型的弹性应变能密度:

$$U = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (1)$$

式中  $U$  为弹性应变能; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为煤(岩)体的三向应力; $E$  为弹性模量; $\mu$  为泊松比。

则模型中任意一单元体中的能量应变能为:

$$U' = U_i V_i \quad (2)$$

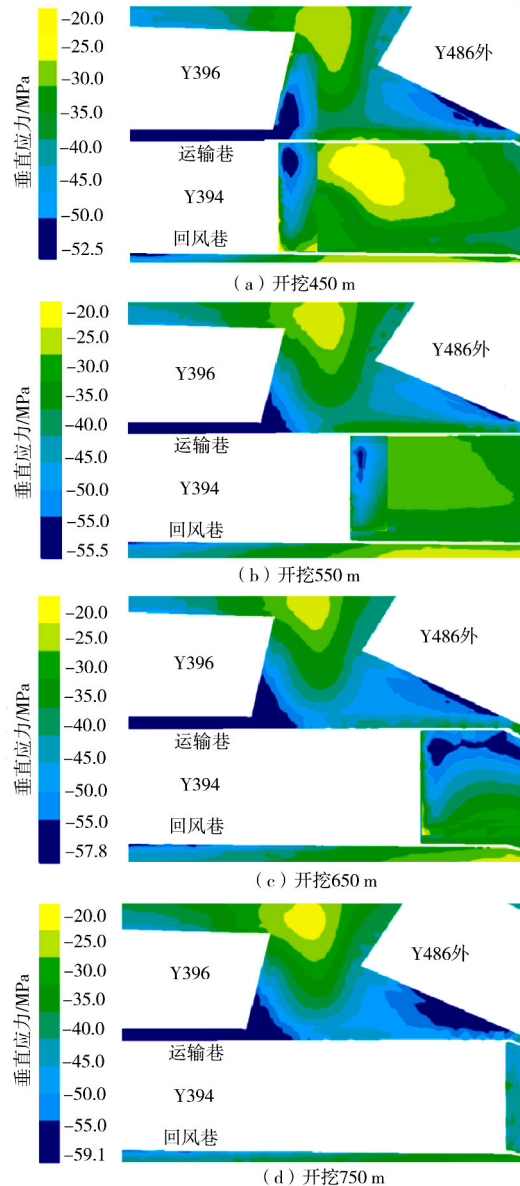


图 4 不规则煤柱区域垂直应力分布  
Fig. 4 Vertical stress distribution in irregular coal pillar area

式中  $U_i$  为模型中任意一单元体弹性应变能密度; $V_i$  为该单元体的体积。

采用 FLAC<sup>3D</sup> 内嵌 Fish 语言编写程序,分步开挖 Y394 工作面,用式(1)输出煤(岩)体弹性应变能密度,用式(2)输出开挖前与开挖后模型中煤(岩)体应变能,作差值得到开挖过程中模型单元体积聚或释放的能量值,从而分析开挖过程中不规则煤柱内的弹性应变能演化特征。

Y394 工作面回采过程中不规则煤柱区的应变能如图 6 所示。

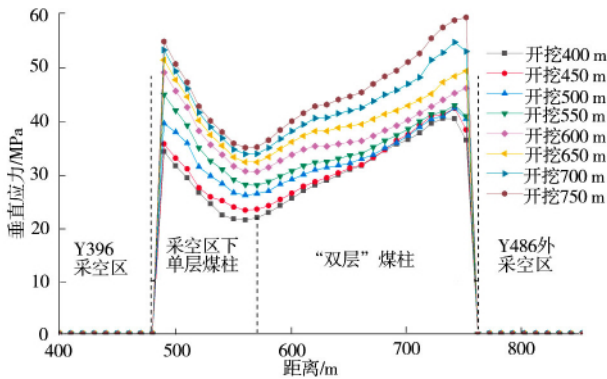


图5 不同开挖距离本煤层煤柱内垂直应力分布曲线

Fig. 5 Vertical stress distribution curve in coal pillar of this coal seam with different excavation distance

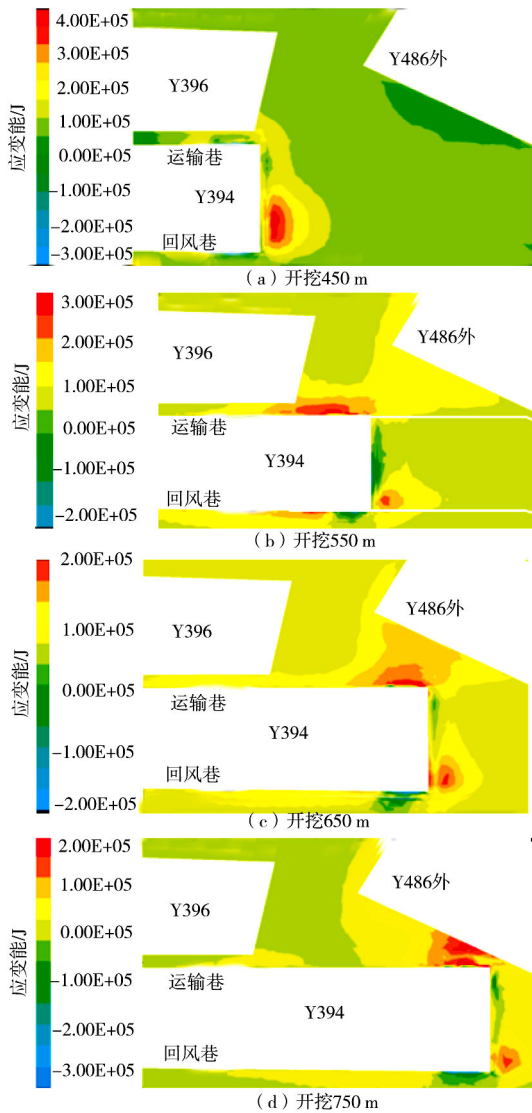


图6 不规则煤柱区域应变能积聚/释放情况

Fig. 6 Accumulation/release of strain energy in irregular coal pillar area

Y394工作面开采过程中煤柱区域积聚的应变能不断增加,且随着工作面的推进,能量积聚程度与范围不断扩大,最大值约为  $2.14 \times 10^5$  J; 能量耗散区域主要为工作面前方及两侧,可能为工作面开采顶板破坏所致。记录的Y394刮板机道外20 m(测线位置如图2所示)不同层位的煤柱应变能变化曲线如图7所示。

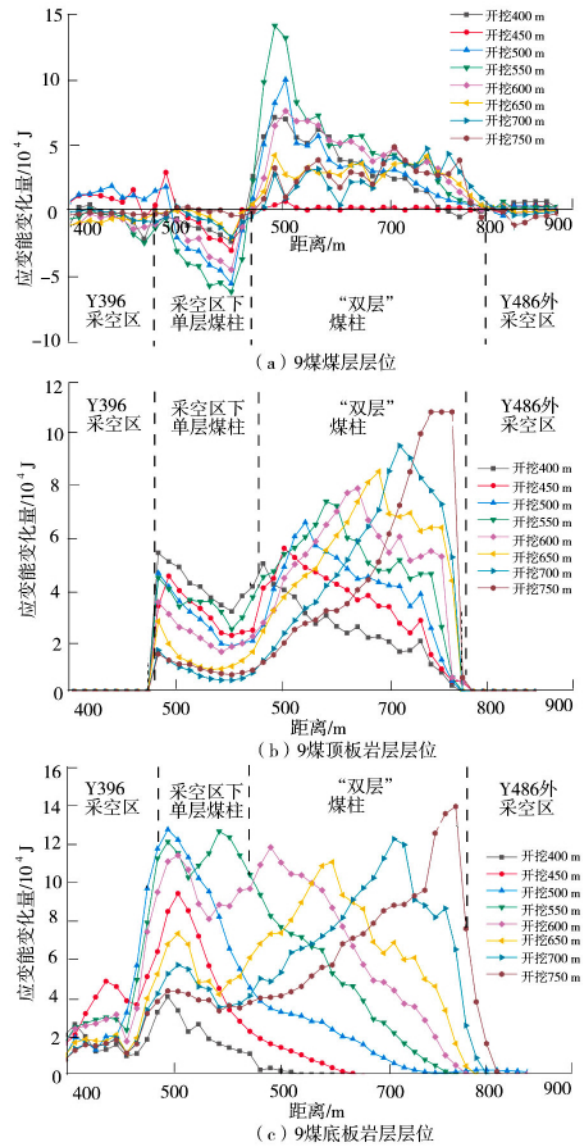


图7 不规则煤柱区域应变能积聚/释放情况

Fig. 7 Strain energy variation curve of irregular coal pillars with different excavation distances

由图7可知: ① 上覆5煤层采空区下方煤柱应变能差为负值,呈现耗散状态,原因为上覆5煤层工作面回采后对下伏岩层起到了“降载缓冲”作用,垂

直方向应力降低,应变能也随之减少;“双层”煤柱区域应变能差为正值,呈现积聚状态,且随着推进距离的增加应变能积聚速率变缓。采空区下煤柱与“双层”煤柱交界区域为能量释放与积聚的分界线,煤(岩)体发生破裂导致能量的释放,能量积聚反映了冲击危险性的升高。② 9煤顶板层位应变能差为正值,整体呈现积聚状态,且随着工作面回采,顶板岩层应变能不断升高。“双层”煤柱区域能量积聚程度要高于上覆5煤层采空区下方区域,考虑为岩层中应力集中使得三向应力升高、应变能增加。③ 9煤底板层位应变能整体均呈积聚状态,受采动影响,峰值区随工作面回采逐渐发生移动。

### 3 不规则煤柱区冲击危险监测体系

#### 3.1 微震监测法

目前该矿安装了 ARAMIS M/E 微震系统,共配置 16 台拾震器,其中第 5 代拾震器 14 台,第 6 代拾震器 2 台,可对 Y394 工作面过不规则煤柱期间矿震活动进行监测,在以大量监测数据为基础的前提下,分析矿震活动规律。台站位置随工作面推进逐渐前移。工作面接近煤柱区和工作面处于煤柱区的微震事件平面分布情况如图 8 所示,Y394 工作面回采期间微震事件剖面定位情况如图 9 所示。

当工作面接近不规则煤柱时,微震事件主要分布在工作面超前范围内,不规则煤柱区域内分布较少;当工作面推进至煤柱区中部时,受工作面超前采动及侧向支承压力影响,煤(岩)体内应力集中程度升高,导致煤柱区的煤体率先破坏,微震事件数增多,能量和频次显著升高。当工作面继续向前推进时,在上覆遗留煤柱作用下,微震能量和频次进一步增加,表明此时工作面冲击危险性升高。

从图 9 来看,微震事件垂直方向分布范围为煤层上方 153 m、下方 13 m,影响范围较大。高能事件(大于  $10 \times 10^4$  J)主要定位于 9 煤层附近,表明煤层中的高应力与能量积聚是造成工作面冲击危险性升高的主要原因,与数值模拟结果相符。

#### 3.2 钻屑法

工作面回采期间,在超前工作面煤壁 100 m 范围内进行钻屑法监测。钻屑法具有施工方式简单、施工速度快等优点,可对不规则煤柱区静载应力进行监测,根据钻屑量及钻孔过程中的动力现象来评判煤体中的应力状态。具体参数为:孔直径 42 mm,孔深 12 m,孔距底板 0.5 ~ 1.5 m,钻孔沿煤层走向

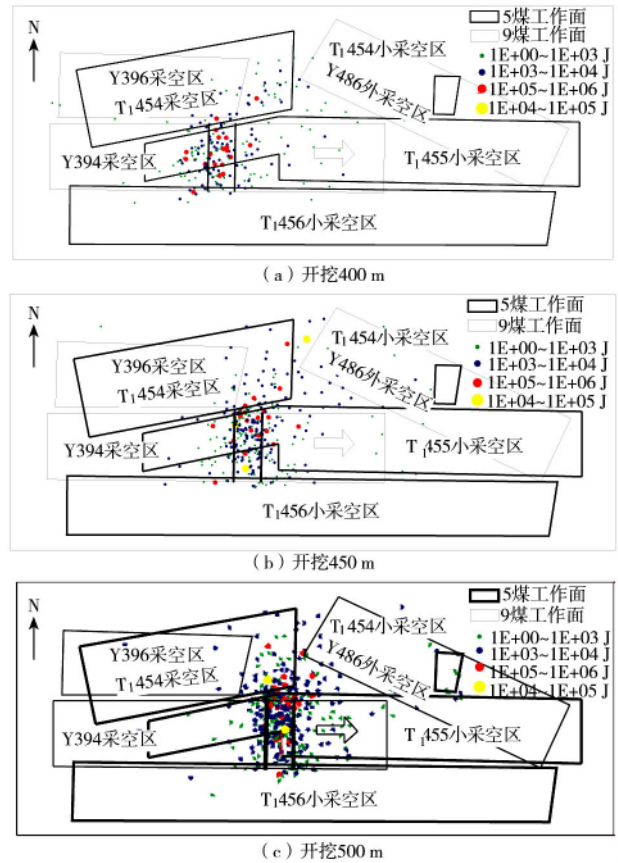


图 8 不同回采阶段微震定位平面  
Fig. 8 Microseismic positioning planes at different mining stages

布置;超前回采煤壁 10 m 布置第 1 个钻孔,钻孔间距 10 m;监测频率为每天监测 1 组,1 组 3 ~ 5 个钻孔,监测范围超前工作面 100 m(图 10)。同时记录卡钻、吸钻、顶钻、孔内冲击等情况。

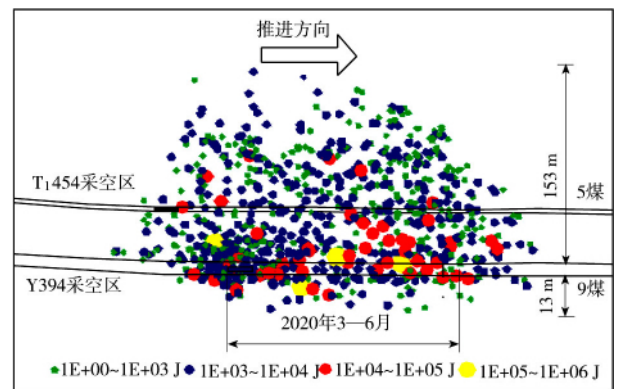


图 9 Y394 工作面回采期间微震定位剖面  
Fig. 9 Microseismic positioning section during the mining at Y394 working face

工作面进入煤柱影响区域后,刮板输送机道与

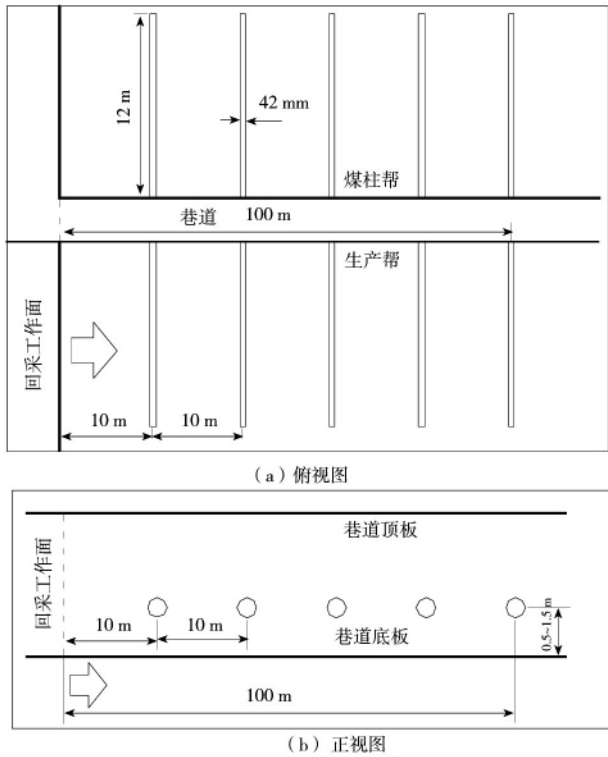


图 10 不规则煤柱区钻屑法钻孔布置  
Fig. 10 Drilling layout of drilling cuttings in irregular coal pillar area

风道侧工作面超前 30 m 和 50 m 的钻屑量对比如图 11 所示。由图 11 可知, 进入不规则煤柱区域后, 风道侧钻屑量未出现明显变化, 刮板输送机道侧钻屑量较风道侧有明显上升, 且刮板输送机道侧超前 30 m 钻孔钻屑量接近临界值, 表明煤柱内应力出现明显积聚。

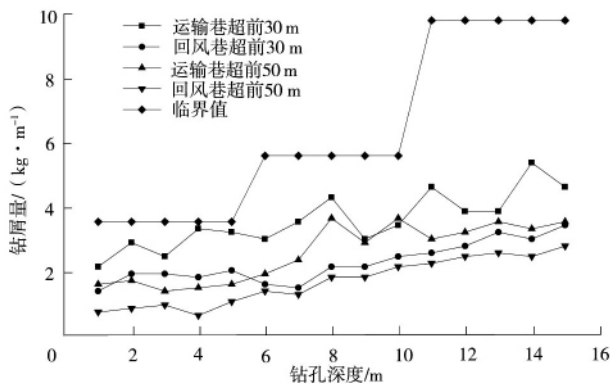


图 11 煤柱影响区两巷钻屑量对比  
Fig. 11 Comparison of the amount of drill cuttings between two roads in the coal pillar affected area

### 3.3 应力在线监测法

Y394 工作面回采期间, 采用应力在线监测系统 进行监测。监测内容为工作面围岩应力情况, 以控制矿岩深部的局部作用应力。测点布置在刮板机道、风道两巷生产帮全长范围内, 每组测点安装 2 个围岩应力传感器, 采掘期间深基点钻孔为 15 m, 浅基点钻孔为 9 m。每组内 2 个应力计测点间距为 0.5 ~ 1.0 m, 组间距 20 m, 如图 12 所示。

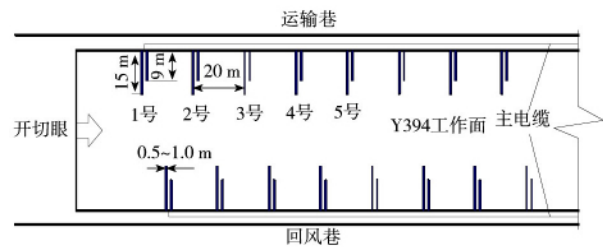


图 12 工作面应力实时监测测点布置  
Fig. 12 Layout of real time monitoring points for working face stress

工作面刮板机道其中一组压力传感器安装位置 距离工作面切眼 450 m, 即为煤柱边缘区域。距工 作面切眼 450 m 测点垂直应力变化曲线如图 13 所 示。

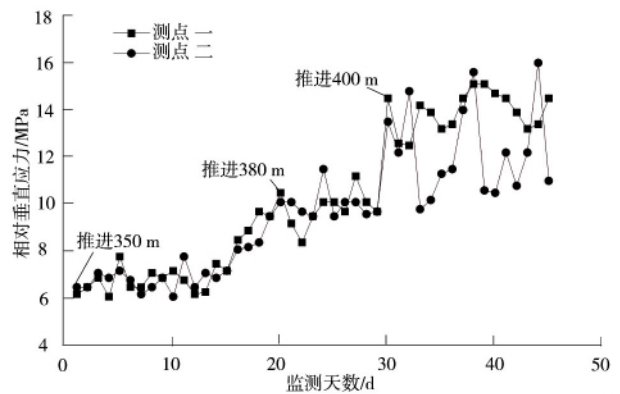


图 13 距工作面切眼 450 m 测点垂直应力变化曲线  
Fig. 13 Vertical stress change curve at 450 m measuring point

由图 13 可以看出: 当工作面推进至 350 m、工 作面煤壁距离测点 100 m 左右时, 该测点的垂直应 力表现为小范围波动变化, 考虑为煤柱区域内部破 裂应力突然释放所致, 该测点还未进入超前支承压 力影响范围内; 当工作面推进至 380 m、工作面煤壁 距离测点 70 m 左右时, 该测点的垂直应力开始增 加, 表明该测点进入超前支承压力初始影响范围; 当 工作面推进 400 m、工作面煤壁距离测点 50 m 左右

时,该测点的垂直应力突然升高,相对垂直应力最高为 15.2 MPa,表明该测点进入煤柱影响区域范围内,不规则煤柱内的高静载与超前支承压力相互叠加导致冲击危险性升高,需采取一定的卸压措施。

#### 4 冲击矿压防治方案及效果分析

根据数值模拟与现场监测结果,确定刮板输送机靠近煤柱侧为应力及能量演化异常区域,煤柱区域高静载是造成工作面冲击危险性的主要原因。为降低不规则煤柱区煤体应力与能量积聚,弱化煤(岩)体强度,减小工作面冲击危险性,制定了煤体大直径钻孔卸压防治方案。具体为:在刮板输送机两帮沿煤层布置大直径钻孔,孔径 110 mm,孔深 20 m,钻孔间距为 1.5 m,距底板 1 m,如图 14 所示。

同时采用钻屑法对卸压效果进行检验。卸压前后煤柱帮钻屑量统计情况如图 15 所示。

通过对煤柱区域实施大直径钻孔前后的钻屑量进行对比,不规则煤柱区钻屑量由浅到深均呈增加趋势,卸压前 1~5 m 内钻屑量最大为工作面超前 30 m 钻孔,且深孔 3 m 和 5 m 钻屑量已超临界值,其余各钻孔钻屑量均未超过临界值;卸压后,不规则

煤柱区钻屑量均呈下降趋势,平均钻屑量降低了 37.5%,卸压方式有效,达到了降低煤柱区应力集中的目的。

大直径钻孔实施前后日最大能量-频次曲线如图 16 所示。由图 16 可知,大直径钻孔卸压实施后,微震日频次略有升高,而高能事件明显减少,能量释放呈现显著的“高频次、低能量”特征。表明在大直径钻孔实施后,卸压钻孔周围形成了一定的破碎区,积聚的弹性能得到了有效释放。不规则煤柱区的应力集中和弹性应变能积聚程度明显降低,有效避免了其突然、猛烈释放导致工作面发生冲击矿压。

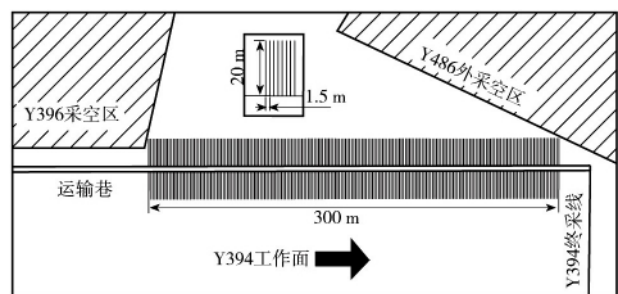


图 14 大直径钻孔布置

Fig. 14 Large diameter drilling layout

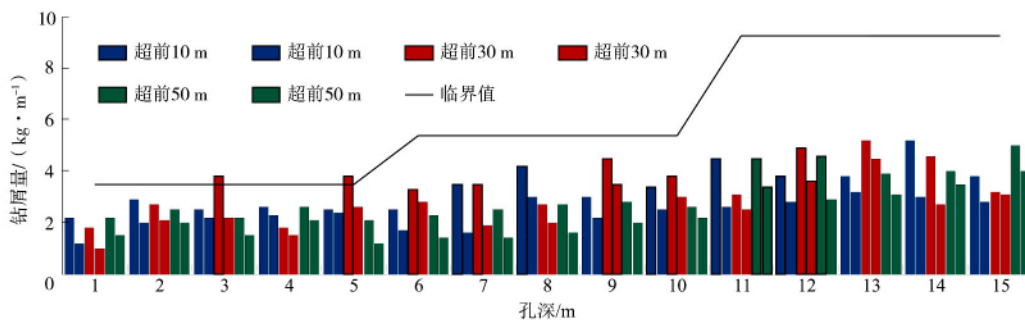


图 15 刮板机道煤柱帮卸压前后钻屑量

Fig. 15 Amount of drill cuttings before and after the pressure relief of the coal pillar of the scraper road

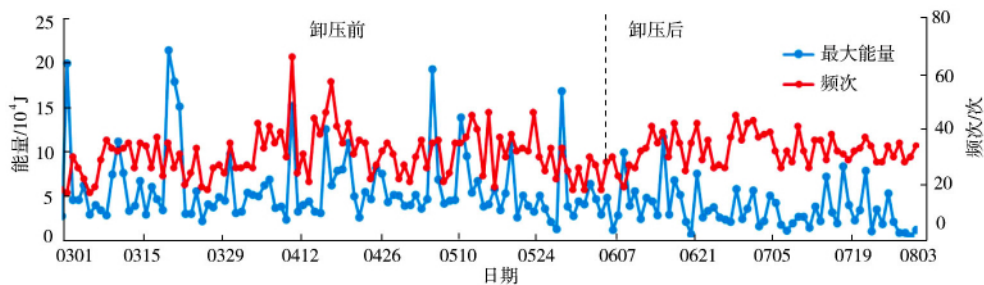


图 16 日最大能量-频次曲线

Fig. 16 Maximum daily energy-frequency curve



## 5 结论

(1) 根据现场工程地质情况,模拟分析了工作面回采过程中双煤层遗留不规则煤柱的应力演化规律,结果表明:受采动及侧向支承压力的叠加影响,煤柱垂直应力曲线呈中间低、两边高的“马鞍形”,峰值为 59.11 MPa,且不规则煤柱内应力集中程度随着工作面的开采不断升高。

(2) 数值模拟结果同时表明,工作面回采至煤柱区域时,采空区下煤柱能量呈耗散状态,“双层”煤柱能量呈积聚状态,“双层”煤柱间岩层能量呈积聚状态。煤柱边缘区域、上覆采空区下煤柱和“双层”煤柱的交界处为能量积聚释放的主要区域。

(3) 对微震事件分布情况进行分析,微震事件多数分布于下伏煤层及煤层间的岩体中,高能事件主要分布于煤层中,能量积聚释放频繁,煤柱为能量积聚释放的主体;钻屑法和应力在线法监测结果表明,煤柱区域为高应力集中区,验证了数值模拟结果。

(4) 根据数值模拟与现场监测结果,确定煤柱区域为应力集中及能量积聚区域,冲击危险性较高。在刮板输送机道煤柱帮侧采取大直径卸压措施后,微震能量以“高频低能”释放,经检验,卸压效果良好。

### 参考文献(References):

- [1] 窦林名,赵从国,杨思光,等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [2] 窦林名,何学秋. 采矿地球物理学[M]. 北京:中国科学文化出版社,2002.
- [3] 吕长国,窦林名,徐长厚,等. 上解放层开采解放作用机理数值模拟研究[J]. 煤矿开采,2011(2):12-15,82.  
LYU Chang-guo, DOU Lin-ming, XU Chang-hou, et al. Numerical simulation research on the mechanism of liberation action of upper liberated layer mining[J]. Coal Mining Technology, 2011(2):12-15,82.
- [4] 王存文,姜福兴,王平,等. 煤柱诱发冲击矿压的微震事件分布特征与力学机理[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1169-1173.  
WANG Cun-wen, JIANG Fu-xing, WANG Ping, et al. Distribution characteristics and mechanical mechanism of microseismic events induced by coal pillars with rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(9):1169-1173.
- [5] 李佃平,窦林名,牟宗龙,等. 孤岛型边角煤柱工作面反弧形覆岩结构诱冲机理及其控制[J]. 煤炭学报,2012,37(5):719-

724.

- LI Dian-ping, DOU Lin-ming, MU Zong-long, et al. Mechanism and control of inverted arc-shaped overlying strata structure in island-shaped corner coal pillar working face[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(5):719-724.
- [6] 张科学. 深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定[J]. 煤炭学报,2011,36(S1):28-35.  
ZHANG Ke-xue. Determination of reasonable coal pillar width for roadway driving along next goaf in deep coal seam group[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(S1):28-35.
- [7] 李文峰,柏建彪,伊西锋,等. 孤岛煤柱下沿空掘巷底鼓机理及控制技术[J]. 煤炭科学技术,2010,38(4):17-20.  
LI Wen-feng, BAI Jian-biao, YI Xi-feng, et al. Mechanism and control technology of floor heave of road driving along goaf under isolated island coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2010,38(4):17-20.
- [8] 赵毅鑫,姜耀东,田素鹏. 冲击矿压形成过程中能量耗散特征研究[J]. 煤炭学报,2010,35(12):1979-1989.  
ZHAO Yi-xin, JIANG Yao-dong, TIAN Su-peng. Study on the characteristics of energy dissipation during the formation of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(12):1979-1989.
- [9] Cao J, Dou L, Zhu G, et al. Mechanisms of rock burst in horizontal section mining of a steeply inclined extra-thick coal seam and prevention technology[J]. Energies, 2020,13(22):6043.
- [10] 沈志平,姚桥煤矿中央采区下山煤柱区冲击危险防治对策研究[J]. 煤炭科技,2020,41(5):58-61.  
SHEN Zhi-ping. Research on prevention and cure countermeasures of shock hazard in the downhill coal pillar area of Yaoqiao Coal Mine central mining area[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2020,41(5):58-61.
- [11] 王春雷,柏建彪,庞美俊,等. 沿空掘巷窄煤柱合理宽度的研究[J]. 煤炭科技,2008(4):1-3.  
WANG Chun-lei, BAI Jian-biao, PANG Mei-jun, et al. Research on reasonable width of narrow coal pillar in roadway driving along goaf[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2008(4):1-3.
- [12] 窦林名,白金正,李许伟,等. 基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(10):1-8.  
DOU Lin-ming, BAI Jin-zheng, LI Xu-wei, et al. Research on prevention technology of rock burst disaster based on the principle of dynamic and static load superposition[J]. Coal Science and Technology, 2018,46(10):1-8.
- [13] 郑晓晨. 大采深、强冲击掘进工作面冲击地压防治技术[J]. 煤炭科技,2020,41(2):64-65.  
ZHENG Xiao-chen. Prevention and control technology of rock burst in the working face with large mining depth and strong impact[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2020,41(2):64-65.
- [14] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,1980.