

DOI: 10.11779/CJGE201807010

# 长壁采空区对采动煤岩应力分布规律的影响研究

王朋飞<sup>1</sup>, 冯国瑞<sup>1</sup>, 赵景礼<sup>2,3</sup>, CHUGH Yoginder P<sup>4,5</sup>, 王志强<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 3. 俄罗斯自然科学院, 莫斯科 119991;  
4. 美国南伊利诺伊大学采矿与矿物工程学院, 卡本戴尔 62901; 5. 美国发明家学会, 佛罗里达 33612)

**摘要:** 随着当前各类长壁采空区及其附近区段巷道留设技术的不断推广, 采空区及其对采动煤岩应力分布规律影响的认识愈发重要。鉴于当下此方面的研究较少, 以镇城底矿为工程背景, 通过理论分析、相似模拟、数值模拟和现场实测研究了长壁采空区对采动煤岩应力分布规律的影响。多种研究方法表明, 采空区承载越大, 实体围岩受载则越低, 反之亦然。错层位不对称工作面导致应力分布亦不对称, 缓坡段采空区应力大于无缓坡段, 而缓坡段侧支承压力小于无缓坡段侧, 缓坡段具有压力和能量缓冲耗散作用的矸石垫层, 可避免接续面巷顶沿空巷道受动载影响。得出基于采空区影响下的老顶关键块回转下沉量计算方法。断裂角越小, 采空区承载越小, 尤其采空区边缘应力越小。采空区会影响围岩体中应力集中区的应力集中程度、范围和方位, 同时影响煤岩体塑性区大小。理论分析、模拟分析和现场实测具有较好的一致性。

**关键词:** 采空区; 采动应力; 错层位; 不对称; 断裂角

**中图分类号:** TU456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)07-1237-10

**作者简介:** 王朋飞(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事采矿与岩石力学方面的研究。E-mail: 18801448768@163.com。

## Effect of longwall gob on distribution of mining-induced stress

WANG Peng-fei<sup>1</sup>, FENG Guo-rui<sup>1</sup>, ZHAO Jing-li<sup>2,3</sup>, CHUGH Yoginder P<sup>4,5</sup>, WANG Zhi-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China; 2. School of Resources and Safety

Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Russian Academy of Natural Sciences,  
Moscow 119991, Russia; 4. Mining and Mineral Resources Engineering, Southern Illinois University, Carbondale, Illinois 62901, USA;

5. National Academy of Inventors, 33612, Florida, USA)

**Abstract:** With the development of a variety of gateroads within or close to gob, the effect of gob on the distribution of mining-induced stress is increasingly important. In view of the fact that the studies in this respect are few, Zhenchengdi colliery is investigated through theoretical analysis, physical modelling, numerical modelling and field observation. Several research means show that the more load the gob bears, the less the abutment pressure and vice versa. The longwall mining with split-level gateroad (LMSG) has an asymmetrical panel geometry, which results in asymmetrical stress distribution. It has larger gob stress and smaller abutment stress on elevating section side and smaller gob stress and larger abutment stress on non-elevating section side. The caved rock cushion is conducive to avoiding dynamic ground pressure behavior for the LMSG gob-side entry. The method for calculating the subsidence and rotation of the key blocks based on gob effect is obtained. The smaller the angle of break, the smaller the gob pressure and the smaller the gob edge pressure. The gob affects the stress concentration degree, the area and location of the stress concentration zones as well as the area of the yielded zone. The theoretical analysis, physical modelling, numerical modelling and field observation have a good consistency.

**Key words:** gob; mining-induced stress; split-level; asymmetry; angle of break

## 0 引言

煤炭从地下采出必然引起覆岩移动和应力重新分布。长壁开采为中国煤炭的主要开采方法, 工作面采后覆岩形成三带, 即垮落带、裂隙带和弯曲下沉带。垮落带岩体呈散体和碎裂结构, 岩块间空隙大、连通性好; 裂隙带岩层断裂但层状特性仍存在; 弯曲下沉

带只弯曲不断裂, 保持连续性和原始特征<sup>[1-3]</sup>。

采空区对覆岩移动影响巨大。张俊英等<sup>[3]</sup>研究了采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律; Yavuz<sup>[4]</sup>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51404270); 国家留学基金委项目(201506430011)

收稿日期: 2017-04-03

研究了地表沉陷与采空区应力分布的关系; 徐光等<sup>[5]</sup>研究了采空区顶板导水裂隙的侧向边界; 万虹等<sup>[6]</sup>研究了地下空区的稳定性; 王朋飞等<sup>[7]</sup>研究了采空区与煤岩柱的耦合作用。来兴平等<sup>[8]</sup>给出了河下开采扰动诱发采空区动态失稳定量预计与综合评价; 张清峰等<sup>[9]</sup>研究了不同夯击能和夯击次数作用下不同深度煤研石地基动应力的分布特征及其衰减规律; 方勇等<sup>[10]</sup>分析了隧道衬砌结构受荷特性; 蔡美峰等<sup>[11]</sup>分析了采空区围岩断裂失稳过程中微破裂的时空演化规律以及变形与声发射间的内在联系。

鉴于采空区的重要作用,许多学者对研石力学特性进行了研究。缪协兴等<sup>[12]</sup>研究了袁州矿区3种岩煤样的碎胀与压实特性; 殷亚君等<sup>[13]</sup>对重庆矿区研石山体特性进行了现场试验研究; 刘松玉等<sup>[14]</sup>研究了煤研石颗粒破碎及其对工程力学特性影响; Pappas等<sup>[15]</sup>在不同矿井长壁采空区采样,进行多组研石压实实验,所得结果较权威,得到广泛认可,结果表明采空区研石应力-应变曲线符合 Salamon 经验公式:

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon / \varepsilon_m} \quad , \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为加载于材料上的轴向压力 (MPa),  $\varepsilon$  为在该压力下的应变 (m/m),  $E_0$  为初始切线模量 (MPa),  $\varepsilon_m$  为最大可能应变。且有<sup>[4]</sup>

$$E_0 = \frac{10.39 \sigma_c^{1.042}}{b^{7.7}} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_c$  为垮落区研石单轴抗压强度。 $\varepsilon_m$  只与初始碎胀系数  $b$  有关<sup>[4]</sup>:

$$\varepsilon_m = \frac{b-1}{b} \quad , \quad (3)$$

初始碎胀系数

$$b = \frac{H_c + m}{H_c} \quad , \quad (4)$$

其中,  $H_c$  为煤层上方垮落带高度 (m),  $m$  为煤厚 (m)。

采空区上方覆岩运动对采场矿压分布具有决定性作用。钱鸣高等提出的砌体梁模型和关键层理论认为, 覆岩结构及动态演化过程控制着采场和巷道的矿压显现<sup>[2]</sup>。谢和平等<sup>[16]</sup>指出该演化过程除了与覆岩的分层力学性质和几何特性有关外, 还受工作面布置、开采方法的显著影响。理论和实践均表明: 冲击地压的发生亦与采区区段设计和煤岩柱尺寸密切相关<sup>[17]</sup>。

鉴于常规长壁留煤柱开采在矿压和回采率方面存在的难题, 大量学者根据采动煤岩应力分布规律提出新型区段煤岩柱设计方法, 如错层位开采、沿空留巷、沿空掘巷以及分层开采下分层低应力区布置和掘进巷道等技术。这些技术均利用了采动应力的分布规律, 即在煤柱边缘和采空区存在低应力区。王朋飞等<sup>[7, 18]</sup>、

冯国瑞等<sup>[19]</sup>对错层位采煤法进行了研究; 赵景礼等<sup>[20-23]</sup>、康红普等<sup>[24]</sup>介绍了葛泉矿井下采空区留巷试验; 白兰永<sup>[25]</sup>介绍了一种利用工作面内冒落研石进行巷旁自行充填的沿空留巷实际应用, 是采空区研石对覆岩的支承作用的典型案例和佐证; 何满潮等<sup>[26]</sup>对无煤柱切顶卸压自成巷聚能切缝技术进行了研究, 印证了采空区碎胀研石的自承载特性和巷道围岩的协同支撑作用。这些地下工程均涉及采空区与煤岩(柱)体内的应力分布规律。

目前鲜见采空区对采动煤岩应力分布规律的影响研究。论文以镇城底矿为工程背景, 通过理论分析、相似模拟、数值模拟和现场实测, 研究了采空区对采动煤岩应力分布规律的影响, 包括开采方式对采空区响应的影响、区段工作面和煤岩柱(体)尺寸及形状设计对采动煤岩应力分布的影响、老顶关键结构与采空区协同作用的力学机制等。

## 1 工程概况

镇城底煤矿位于山西省西山矿区, 构造为简单单斜构造, 22202 和 22204 工作面开采#2~#4 煤层, 埋深约 230 m, 工作面沿倾斜布置, 倾角平均 4°。工作面长 130 m, 走向推进 680 m, 煤层平均厚 5 m, 低瓦斯煤层。顶板自下至上为 2.2 m 细砂岩和 6.4 m 砂质泥岩; 底板自上至下为 3.1 m 砂质泥岩和 4.2 m 粉砂岩。该矿过去将工作面两端的区段巷道沿底板布置, 区段间留 20 m 煤柱。然而, 这造成顺槽内煤壁片帮、冒顶和冲击事故, 如图 1 所示, 且采出率低。



(a) 支柱弯折、歪斜 (b) 钢带弯曲 (c) 支柱铁鞋失效

图 1 留 20 m 煤柱巷道矿压显现情况

Fig. 1 Ground pressure in gateroad with gate pillar of 20 m

鉴于常规放顶煤方法的弊端, 该矿随后改用错层位开采方法。图 2 所示为错层位开采方法, 工作面两端的区段巷道位于煤层内的不同高度, 即进风巷沿底板掘进, 回风巷沿顶板掘进, 通过调整支架和溜槽等设备在工作面右端形成缓坡段。对于相邻 22204 工作面进风巷, 即沿空巷道沿底板掘进, 与 22202 面进风巷内错布置, 位于采空区边缘下方, 该沿空巷道为巷顶沿空, 而非常规巷旁沿空, 巷帮为实体煤, 巷顶为金属网假顶, 与分层开采中下分层巷道布置在上分层

采空区下类似。与 22202 面回风巷相似, 22204 面回风巷沿顶板掘进, 两个工作面形态相同。

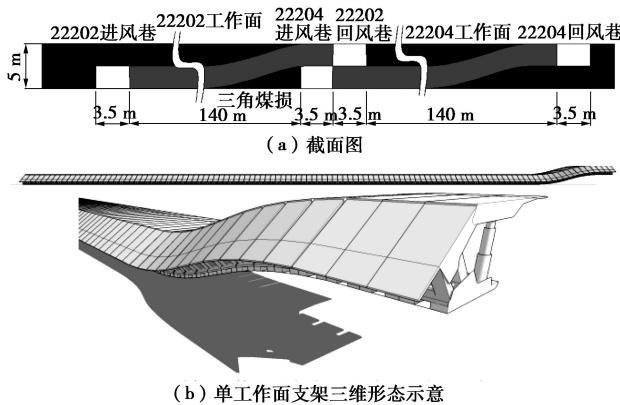


图 2 错层位开采设计  
Fig. 2 LMSG design

## 2 采空区对煤岩体采动应力的影响机制

由引言可知, 采空区与其周边煤岩(柱)体这两系统是对立而又统一的。采空区压力是一部分覆岩重量转移至其上形成, 不能转移到采空区的压力则形成支承压力, 可以推断, 采空区承载的覆岩重量越多, 则周边煤岩体载荷越低, 反之亦然。从应力积分的角度考虑亦是如此: 即某一水平面上岩层的竖直应力积分值应与该面上部所有岩层重量相等。例如, 煤炭采出后分布在煤层底板的竖直压力积分应等于未开挖前覆岩重量减去已开挖煤层的重量, 只是压力重新分布而已, 有的地方高, 有的地方低, 如采空区应力或煤柱边缘则为低应力区, 支承压力即为高应力区。可见, 采空区对煤岩(柱)体采动煤岩应力具有重要的影响, 采空区应力发生改变, 必然导致煤岩(柱)体应力的重新调整, 达到应力分布的稳定和平衡。

### 2.1 开采方式对采动应力分布的影响

对镇城底矿而言, 常规放顶煤工作面关于中心线对称, 则压力分布也关于中心线对称, 左右两侧支承压力相同, 采空区压力也关于工作面中心线对称。采空区应力自边缘向远离边缘处逐渐接近或恢复至原岩应力, 而相邻实体煤内产生固定支承应力, 实体煤分为 4 个区: 破裂区 I; 塑性区 II; 弹性区应力升高部分 III; 以及原始应力区 IV。煤柱边缘至应力峰值的距离  $x_0$  为<sup>[2]</sup>

$$x_0 = \frac{m}{2\xi f} \ln \frac{K\gamma H + ccot\varphi}{\xi(p_1 + ccot\varphi)} \quad (5)$$

式中  $m$  为采高;  $\varphi$  为内摩擦角;  $c$  为黏聚力;  $\gamma$  为重度;  $H$  为埋深;  $K$  为应力集中系数;  $p_1$  为作用在煤帮的外部支护阻力;  $f$  为煤岩层交界面摩擦因数;

$$\text{三轴应力系数 } \xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

错层位工作面关于中心线不对称, 应力分布必然亦不对称, 如图 3 所示右侧(红色箭头)支承压力小于左侧(蓝色箭头)。而错层位工作面右侧存在缓坡段, 研石垮落空间小, 则所承担的覆岩重量就大, 因此缓坡段采空区应力比常规放顶煤大, 支承压力相对减小<sup>[27]</sup>。错层位一侧采空后煤岩采动应力分布如图 4 所示。根据经验, 受断裂角影响, 顶板一般会存在一定长度的悬臂<sup>[2]</sup>, 采空区边缘一定距离内无垮落研石或极少量研石。因此, 与常规煤柱相比多出两区: V 为免压区, 即无垮落研石或只有很少量垮落研石作用于该区; VI 为低压区, 处于采空区边缘附近, 尚未恢复至原岩应力。以上两区得益于断裂角及顶板岩层断裂垮落后的保护结构。

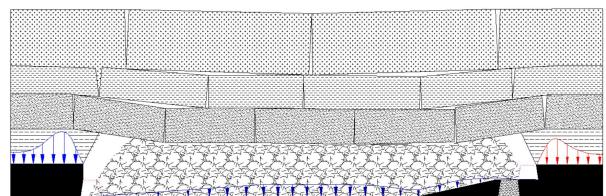


图 3 错层位开应力分布  
Fig. 3 Stress distribution for LMSG

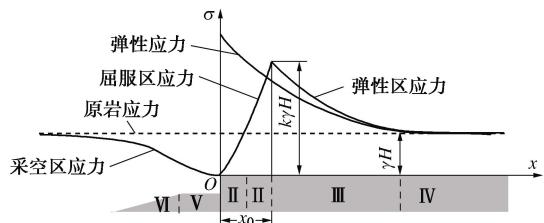


图 4 错层位采煤法一侧采空应力分布  
Fig. 4 Stress distribution for LMSG after one side is extracted

由于 22204 接续面进风巷位于 22202 面采空区边缘下方卸压处, 侧向支承压力始终“越过”该巷道而位于 22204 面实体煤中, 超前和侧向支承压力交汇峰值处则也始终位于 22204 工作面前方实体煤中, 因此 22204 进风巷既不受固定支承压力影响也不受超前支承压力影响, 此表述得到后文的模拟分析和现场实测验证。

### 2.2 采空区—老顶大结构—煤岩(柱)体协同体系

常规放顶煤常需留设较大煤柱, 使相邻工作面顺槽位于图 4 所示 III 或 IV 区以避开支承压力, 带来大量煤损。为此, 文献[27~30]对沿空掘巷技术进行了研究, 认为窄煤柱在巷道服务期限内经历多次复杂动载, 承载能力因两侧损伤而下降, 变形破坏严重, 巷道维护困难。采空区—老顶大结构—煤岩(柱)体无疑构成一个复杂动力系统。Qiao<sup>[32]</sup>研究动力系统不稳定集

合的几何结构对动力系统稳定性的影响,为预测矿山灾变的临界特征提供了理论依据。从窄煤柱的几何结构可见,它的灾变威胁不容忽视(参见文献[31])。目前沿空巷道通常采用成本较高的充填体提高承载、抵抗变形或增加墙体自身变形和卸压的能力,采取围岩加固或附加支护措施(如钢筋梯、锚索槽钢等),以及其他卸压措施。

常规留窄煤柱沿空掘巷技术中,老顶关键块在回转下沉过程中,不可避免挤压煤柱,造成直接顶、老顶和窄煤柱接触部位相对滑移剪切和挤压变形破坏。因此老顶关键块对沿空巷道矿压显现具有决定作用。

采高大比采高小时的矿压显现缓和,而采高实际影响的是采空区矸石的排列规则程度和压实程度<sup>[2]</sup>,间接影响老顶的回转下沉。若采高接近零,则老顶回转下沉量接近零,支承压力接近于原岩应力;随采高逐渐增加,老顶回转下沉量逐渐增大,支撑关键块的实体煤产生损伤变形,并不断扩大,区段巷道矿压显现愈发强烈,老顶回转量与煤岩(柱)体的支承压力存在内在联系。一定范围内支承压力随老顶回转量的增加而增加。可见,采空区—老顶大结构—煤岩(柱)体组成的协同体系对采场和巷道矿压显现有重要的作用。

由于错层位工作面形成搭接,无常规定形煤柱,缓坡段上方直接顶矸石垮落于缓坡段处,如图5所示,关键块B一端由实体煤支撑,一端则压靠在缓坡段矸石上。22204面进风巷处于老顶大结构保护之下,由于顶板上方存在矸石垫层缓冲耗散空间,即使关键块再次失稳,例如进一步回转下沉,则此矸石垫层可耗散应力和能量,避免了强烈动压。且由于错层位缓坡段矸石有所抬高,降低了块体B的回转下沉量,一定程度上降低了固定支承压力。由于22204进风巷同时不受超前支承压力和固定支承压力影响,支承压力转移至工作面前方,关键块B的再度回转下沉造成的动压显现则也只表现在工作面前方煤体中,而该压力对顶煤预破碎和提高顶煤放出率有一定意义。

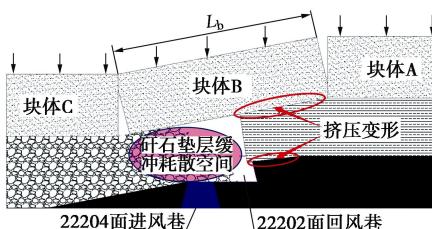


图5 错层位老顶关键块运动模型

Fig. 5 Model of movement of key blocks above coal pillar in

LMSG

采空区边缘关键块体长度  $L_b$  与老顶周期来压步

距  $L_p$  以及区段宽度  $L$  有关,表达式为<sup>[33]</sup>

$$L_b = \frac{2L_p}{17} \left[ \sqrt{\left( 10 \frac{L_p}{L} \right)^2 + 102} - 10 \frac{L_p}{L} \right] \quad (6)$$

基本顶断裂位置位于煤壁内部,断裂位置可按弹性交界面由式(5)计算,断裂线距煤壁的距离  $x_0$ 。

联立式(1)~(4)经恒等变换得采空区压缩量为

$$\varepsilon = \frac{\sigma m}{\frac{10.39 m \sigma_c^{1.042}}{b^{7.7}} + \sigma H_c + m \sigma} \quad (7)$$

再根据式(5)~(7),则知道直接顶高度、垮落带高度、初始碎胀系数、垮落矸石的抗压强度和老顶压力便可确定老顶关键块下沉量,即关键块采空区端对采空区的压缩量,从而确定老顶采空区端下沉量,再根据老顶长度和断裂位置确定老顶回转角,因此,老顶回转下沉量均可得到。

### 3 模拟研究

与以往相似模拟和数值模拟分开研究不同,本文将二者结合起来进行研究。

#### 3.1 模拟参数获取

为了得到准确的物理力学参数,分别在22204进风巷和回风巷超前100 m处打#1和#2钻孔获取并在实验室加工岩样,在试验机上进行力学测试。最终确定模拟中所用各岩层物理力学参数如表1所示。

#### 3.2 相似模拟

平面应力模型,实体与模型几何相似比  $\alpha_L=100:1$ ,重度比  $\alpha_g=1.5:1$ ,时间比  $\alpha_t=\sqrt{\alpha_L}=10$ ,应力相似满足  $\alpha_\sigma=\frac{\sigma_H}{\sigma_M}=\frac{P_H/A_H}{P_M/A_M}=\frac{\gamma_H \times L_H}{\gamma_M \times L_M}=\alpha_L \alpha_g=150:1$ 。

根据相似比及表1得到模型煤岩厚度、强度指标及模型材料配比等。限于篇幅,不再赘述。

以该矿错层位开采实际为原型进行试验。模型尺寸为1620 mm(长)×160 mm(宽)×1300 mm(高),顶底板安设了应变片监测应力,应变片10 cm一个,对应原型10 m一个。试验结果如图6所示。可看出,采空区下部岩块排列较杂乱,上部较整齐。岩层垮落后的断裂线和断裂角。右侧缓坡段采空区压实程度比左侧大,且右侧采空区空隙率比左侧小,工作面形态对覆岩运移影响显著。另外发现,工作面宽度一定,断裂角越大,某标高岩层暴露跨距越大,越易断裂垮落,采空区压力越大,反之亦然。运用摄影测量法得到工作面两侧断裂角:左侧59.6°,右侧62.7°。

底板压力监测结果显示左侧支承压力比右侧大,横坐标为135的坐标点应力较大,此点正处于缓坡段

表 1 各岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

岩性	厚度/m	埋深/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	c/MPa	$\varphi/^\circ$	抗压强度/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
顶	20.0	142.1	2600	8.5	44.2	34.4	21.4	14.5
泥岩	5.4	162.1	2550	3.6	33.9	18.6	10.4	9.7
泥质砂岩	3.6	167.5	2550	4.8	35.7	19.3	11.6	10.5
粉砂岩	9.2	171.1	2540	8.2	43.9	32.3	19.8	13.4
细砂岩	5.7	180.3	2550	8.4	44.5	35.1	22.2	14.8
砂质泥岩	8.2	186.0	2550	5.5	36.7	20.5	12.0	11.3
细砂岩	4.9	194.2	2550	8.4	44.5	35.1	22.2	14.8
泥岩	5.4	199.1	2550	3.6	33.9	18.6	10.4	9.7
砂质泥岩	6.4	204.5	2550	5.5	36.7	20.5	12.0	11.3
粉砂岩	5.8	210.9	2540	8.2	43.9	32.3	19.8	13.4
中砂岩	3.2	216.7	2550	6.9	41.2	30.2	17.8	11.2
煤	1.5	219.9	1400	1.2	27.1	4.7	6.9	4.2
砂质泥岩	6.4	221.4	2550	5.5	36.7	20.5	12.0	11.3
细砂岩	2.2	227.8	2550	8.4	44.5	35.1	22.2	14.8
#2~#4 煤	5.0	230.0	1400	1.2	27.1	4.7	6.9	4.2
泥质砂岩	3.1	235.0	2550	4.8	35.7	19.3	11.6	10.5
粉砂岩	4.2	238.1	2540	8.2	43.9	32.3	19.8	13.4
泥质砂岩	4.8	242.3	2550	4.8	35.7	19.3	11.6	10.5
泥岩	5.0	247.1	2550	3.6	33.9	18.6	10.4	9.7
底	20.0	252.1	2600	8.5	44.2	34.4	21.4	14.5

处, 可见错层位斜坡处采空区承载比非缓坡段侧大。且该侧采空区压力增加造成了支承压力的降低。

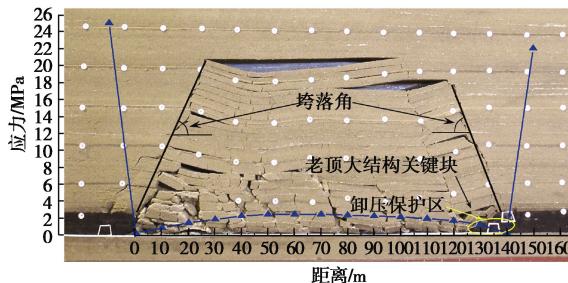


图 6 相似模拟结果

Fig. 6 Results from physical modelling

### 3.3 数值模拟

重点在于采空区模拟。采空区研石在逐渐压实过程中强度和模量逐渐增大<sup>[15]</sup>, 双屈服本构模型适用于模拟压应力引起体积永久缩减的低胶结粒状散体岩土材料<sup>[34]</sup>, 符合采空区材料的力学行为。

对常规放顶煤和错层位开采分别进行了模拟。模型尺寸均为 400 m (长) × 300 m (宽) × 90 m (高)。179.1 m × 0.027 MN/m<sup>3</sup> = 4.84 MPa 的竖直向下的压力加载于模型顶部模拟未建覆岩重量。模型底部约束横向和纵向位移, 前后左右约束横向位移, 错层位模型如图 7。确定采空区材料模拟参数是数值模拟的关键所在。

根据 22202 穿层钻孔, 煤层上方垮落带平均高 16.9 m, 达到 5.8 m 厚的粉砂岩, 由式 (4) 得  $b = 1.3$ , 再由式 (3) 得  $\varepsilon_m = 0.23$  m/m, 根据文献[4, 15]的研究取平均  $\sigma_c = 30$  MPa, 则再根据式 (2) 得  $E_0 = 48.9$  MPa。综上得冒盖应力/应变<sup>[34]</sup>如表 2 所示, 表达式为

$$\sigma = \frac{48.9\varepsilon}{1 - 4.38\varepsilon} \quad (8)$$

建立尺寸为 1 m (长) × 1 m (宽) × 2 m (高) 的两单元模型, 顶部自由移动, 底部固支, 其他 4 个面约束横向位移, 在表面施加竖向速率模拟加载过程。体积模量、剪切模量、剪胀角和摩擦角通过迭代匹配确定<sup>[4, 7, 27]</sup>, 经反复试验, 采空区最终参数如表 3 所示, 注意, 采空区参数组合不唯一。数值模拟与 Salamon 公式匹配结果如图 8 所示。

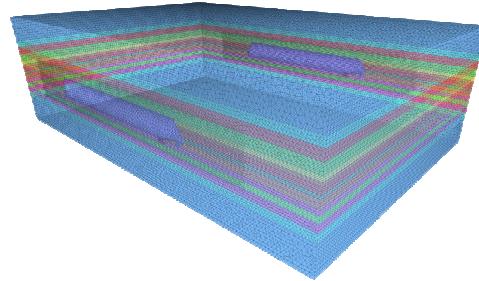


图 7 数值模型

Fig. 7 Numerical model

表 2 双屈服模型冒盖压力

Table 2 Cap pressures of double-yield model

应变/(m·m <sup>-1</sup> )	应力/MPa	应变/(m·m <sup>-1</sup> )	应力/MPa
0.01	0.51	0.12	12.36
0.02	1.07	0.13	14.76
0.03	1.69	0.14	17.69
0.04	2.37	0.15	21.37
0.05	3.13	0.16	26.14
0.06	3.98	0.17	32.53
0.07	4.93	0.18	41.56
0.08	6.02	0.19	55.34
0.09	7.26	0.20	78.83
0.10	8.70	0.21	128.00
0.11	10.37	0.22	295.40

表3 采空区材料参数

Table 3 Parameters for gob materials

密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	剪胀角 ( $^{\circ}$ )	摩擦角 ( $^{\circ}$ )
1700	90	78	8	3

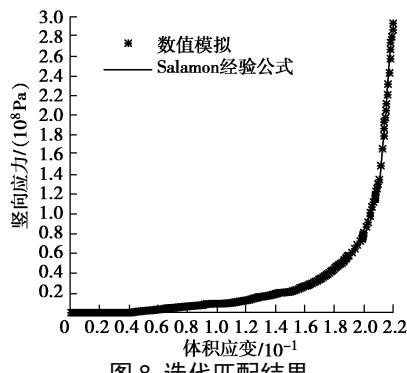


Fig. 8 Iteratively fitted results

图9为常规放顶煤结果。图9(a)中出现近似竖条状的应力集中带,位于采空区两侧煤层上部实体煤岩中,上部岩层应力集中程度比煤层的大。应力最集中区并非当今多数模拟结论认为的位于煤层中的结论。图9(b)显示采空区应力从采空区边缘向采空区中部逐渐增加,且两侧应力对称分布。垮落带采空区上方岩层沿着与断裂线大体一致的方向出现拉伸和剪切破坏,中部出现拉伸破坏(图9(c)红色椭圆范围),并在断裂附近产生相应低应力带(图9(a)蓝色椭圆所示);底板破坏也沿与断裂线一致的方向发展,而煤体塑性区宽度自煤层顶面向底面逐渐增加(图9(c)),

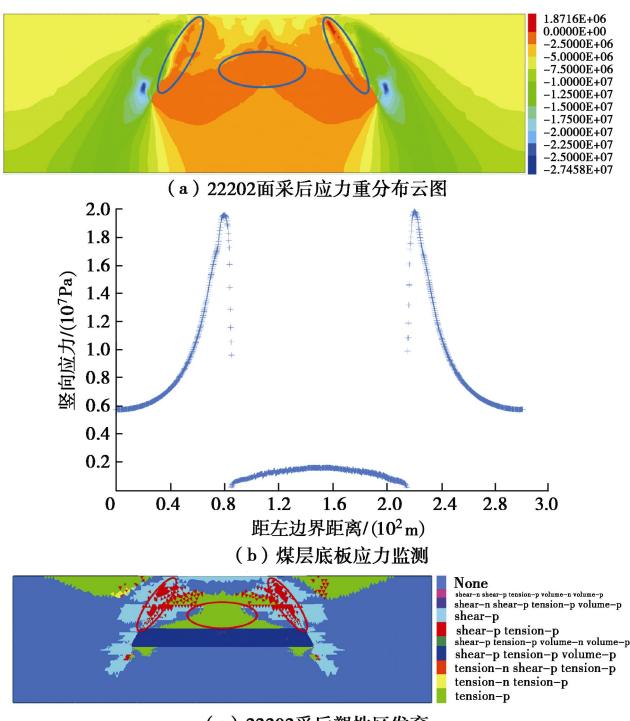


图9 常规放顶煤模拟结果

Fig. 9 Numerical results of conventional longwall mining

可见煤柱塑性区宽度会随着煤柱某层面在煤柱内所处高度的变化而变化。该变化的物理机制需进一步研究。

为对比说明采空区对煤岩应力分布的影响,对不考虑采空区的情况进行了模拟(图10)。结果显示,计算在 $5 \times 10^{-4}$ 左右时便不再继续收敛,无法达到软件默认的 $1 \times 10^{-5}$ ,平衡状态不理想;130 m开挖煤层上方顶板岩层出现下沉,但仍悬空,造成采空区顶底板应力(开挖部分上侧红色最深区域)最小,直接顶岩层显示应力处于拉应力状态,这与实际不符,实际中垮落岩层与采空区矸石接触必然表现为压应力,岩层断裂或挠曲为拉应力,因此拉压应力并存;应力集中主要出现在煤层及其上方两层岩层,与考虑采空区的模拟结果相比,高应力区(两侧深蓝色区域)下移,且高应力区的高度降低,应力集中程度偏大,应力集中系数偏高,煤层处于应力集中带内;其次发现,采空区不起作用情况下的塑性区破坏范围较大;模型上表面下沉量较大,变形明显,若进行地面沉陷方面的研究,必然造成较大偏差;底板应力监测结果(图10(c))显示,采空区底板应力为零,这更不符实际;且由于采空区应力为零,固定支承压力比常规放顶煤开采方法大,图10(c)中最大应力超过22 MPa,而图9不超过20 MPa。证明采空区对采动煤岩应力的影响显著。

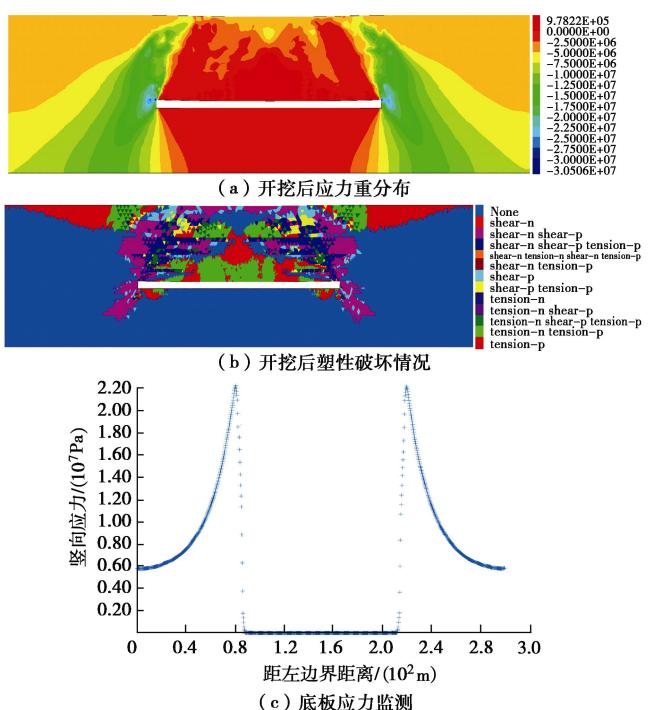
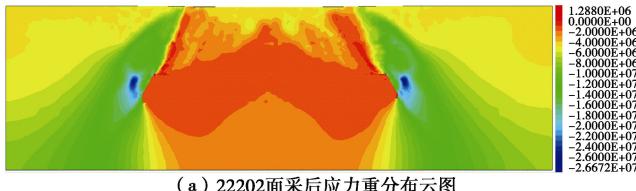


图10 不考虑采空区常规放顶煤

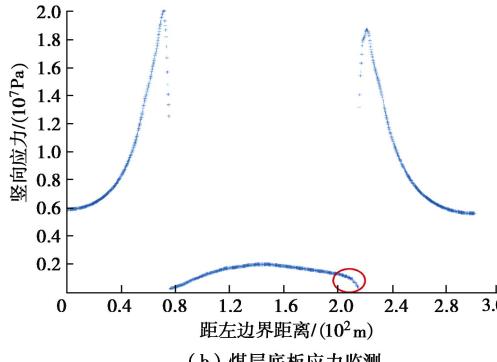
Fig. 10 Numerical results without taking gob effect into account

错层位模拟(图11)显示,同样在采空区两侧煤层上部实体煤岩层中出现应力集中带,应力最集中

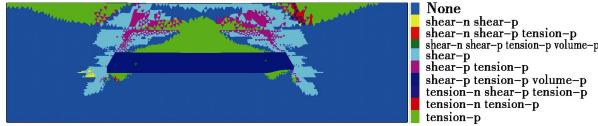
区亦不位于煤层中。底板应力监测结果(图11(c))显示左侧采空区应力增长较快,而右侧采空区应力增长较慢,证明缓坡段采空区承载较多的覆岩重量,而相应导致支承压力降低,右侧支承压力约18 MPa,而左侧为20 MPa。岩体破坏与图9类似。但缓坡段为断裂角下的低应力保护区,塑性破坏范围小,煤体较完整。在此处布置巷道矿压显现缓和,矿压问题可得到缓解。根据应用实际,镇城底矿从未发生冲击地压事故。



(a) 22202面采后应力重分布云图



(b) 煤层底板应力监测

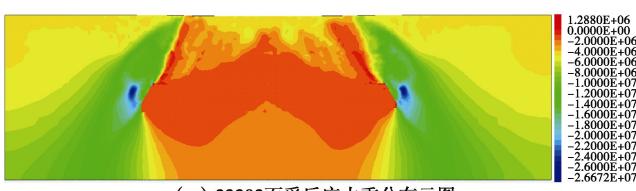


(c) 22202采后塑性区发育

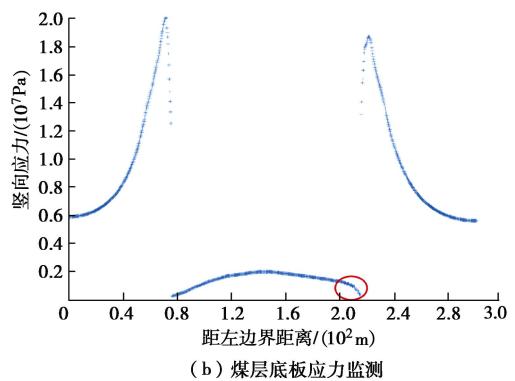
图11 错层位模拟结果

Fig. 11 Numerical results of split-level longwall mining

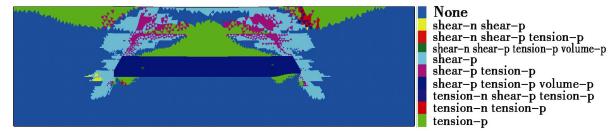
为了对比说明断裂角影响,对断裂角为90°的情况也进行了模拟,如图12所示。断裂角为90°,则覆岩悬露跨度较大,由底板应力监测曲线图(图12(b))可以看出,采空区应力比图9(b)和图11(b)的采空区应力大,且采空区去边缘应离大的多,与相似模拟结论一致,即断裂角对采空区应力具有重要影响的,断裂角越小,可为采空区边缘提供更低的应力环境。其次塑性破坏区沿垮落线破坏的规律不如图11(c)显著。



(a) 22202面采后应力重分布云图



(b) 煤层底板应力监测



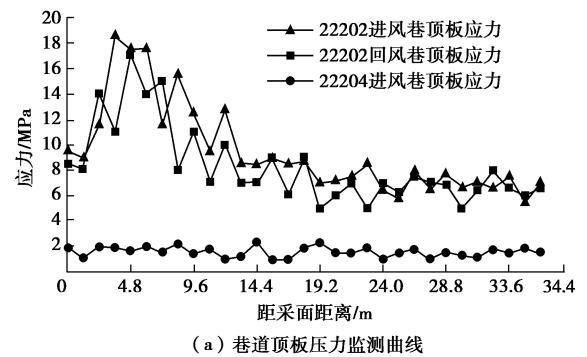
(c) 22202采后塑性区发育

图12 断裂角为90°时模拟结果

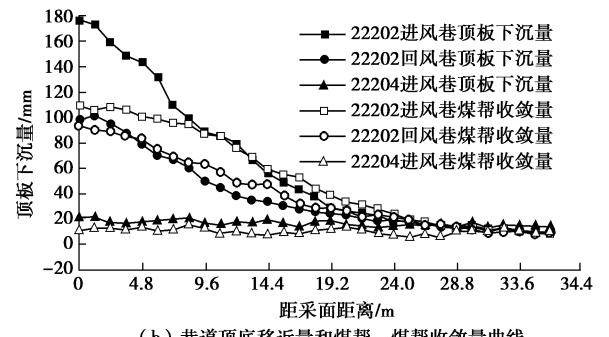
Fig. 12 Numerical results when angle of break is 90°

#### 4 现场实测

在22204面推进至300 m左右时对采面前方进风巷顶板压力和巷道变形进行观测。同样在22202面开采期间也进行了的观测。如图13所示。



(a) 巷道顶板压力监测曲线



(b) 巷道顶板移近量和煤帮收量曲线

图13 巷道矿压与变形量监测

Fig. 13 Field observation of pressure and deformation of gateroads

图13(a)显示22202回风巷顶板应力低于进风巷,证明缓坡段处的采高较小,采空区承载较大,造成22202面缓坡段侧支承应力低于无缓坡段侧。其次,22204进风巷顶板应力为1 MPa左右,远低于其它两

巷, 且曲线几乎呈水平直线, 可见 22204 进风巷位于 22202 工作面采空区下方边缘整个回采系统应力最低区, 既不受固定支承压力影响, 也不受超前支承压力影响, 与理论分析、相似模拟和数值模拟分析一致。

图 13 (b) 显示 3 条巷道顶板移近量均随距工作面距离的增大逐渐降低, 但 22204 进风巷减小趋势不明显。22202 进风巷顶板移近量最大, 因为该巷道与常规放顶煤开采顶板条件相同, 即顶板均为煤层。而 22202 工作面回风巷顶板移近量较小, 原因是该巷道沿顶板布置, 顶板为强度较大稳定性较高的岩层而非煤层, 其次则亦是因为采空区影响, 即该侧缓坡段采高小, 采空区承载大, 造成巷道内前方支承应力降低, 因此顶板变形量小。根据矿井记录, 22202 面开采期间, 回风巷未发生冒顶事故。22204 面进风巷移近量最小, 原因是该巷道处于采空区边缘压力最小的区域, 由于不受支承压力影响, 顶板变形只源于金属网假顶在重力作用下产生的变形, 该巷道顶板管理与分层开采中上分层采空区下布置的下分层巷道的顶板管理类似, 只需注意假顶漏矸即可。现场应用表明, 金属梯形棚支护金属网假顶满足该巷道安全生产需要, 生产期间未发生顶板事故。22202 进风巷煤帮收敛量大于回风巷, 22204 进风巷收敛量最小。其中 22202 进风巷和回风巷随距采面距离的增大明显减小。22204 进风巷未表现出随距采面距离变化而变化的规律, 即该巷道游离于超前及侧向支承压力影响范围, 与理论及模拟分析一致, 该巷道应力环境对巷道维护非常有利。

现场应用表明错层位开采实现了高产高效。镇城底矿错层位应用获得煤炭工业一等奖。

## 5 结 论

(1) 采空区承载越大, 实体围岩受载则越低, 反之亦然。

(2) 不同开采方式下采动煤岩应力分布和矿压显现规律不同。常规放顶煤工作面关于中心线对称, 两侧支承压力及采空区压力分布也对称; 错层位工作面关于中心线不对称, 应力分布亦不对称, 缓坡段侧支承压力较小, 采空区应力较大。

(3) 错层位接续面巷顶沿空巷道布置于免压区, 既不受固定支承压力影响也不受超前支承压力影响。

(4) 采空区—老顶大结构—煤岩(柱)体协同体系支配着沿空巷道矿压显现规律。得到基于采空区影响的老顶回转下沉量计算方法, 错层位缓坡段矸石垫层可避免老顶动态调整对沿空巷道的动载影响。

(5) 断裂角对采动煤岩应力分布有重要影响, 断裂角越大, 采空区承载越多, 反之, 断裂角越小, 采

空区承载越小, 尤其采空区边缘应力越小。

(6) 考虑采空区响应, 应力最集中区位于煤层上方岩层中; 煤柱塑性区宽度与煤柱某层面在煤柱内所处高度有关, 自煤层顶面至煤层底面煤柱塑性区宽度增大。不考虑采空区影响会造成支承压力较大, 破坏范围较大, 应力集中区位置降低至煤层内。

## 参 考 文 献:

- [1] PENG S S. Longwall mining[M]. 2nd ed. Morgantown: West Virginia University, 2006.
- [2] 钱明高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu, XU Jia-lin. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 张俊英, 蔡美峰, 张 青. 采空区地表新增荷载后地基应力的分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1096 – 1100. (ZHANG Jun-ying, CAI Mei-feng, ZHANG Qing. Distribution laws of ground stress after newly increased load on surface above mined-out areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1096 – 1100. (in Chinese))
- [4] YAVUZ H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41: 193 – 205.
- [5] 徐 光, 许家林, 吕维赟, 等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界预测及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 724 – 730. (XU Guang, XU Jia-lin, LU Wei-yun, et al. Lateral boundary prediction of water conducting fracture formed in roof and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 724 – 730. (in Chinese))
- [6] 万 虹. 地下空区稳定性的相似模拟研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 74 – 77. (WAN Hong. Similar imitation research on ground empty stope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 74 – 77. (in Chinese))
- [7] 王朋飞, 赵景礼, 王志强, 等. 非充分采动采空区与煤岩柱(体)耦合作用机制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1185 – 1200. (WANG Peng-fei, ZHAO Jing-li, WANG Zhi-jiang. Mechanism of gob-pillar interaction for subcritical panels and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1185 – 1200. (in Chinese))

- [8] 来兴平, 蔡美峰, 任奋华. 河下开采扰动诱发采空区动态失稳定量预计与综合评价[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1421 - 1424. (LAI Xing-ping, CAI Mei-feng, REN Fen-hua. Quantitative prediction and comprehensive evaluation on dynamic destabilization of LSMA due to excavation disturbance underneath river[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1421 - 1424. (in Chinese))
- [9] 张清峰, 王东权. 强夯法加固煤矸石地基动应力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1142 - 1147. (ZHANG Qing-feng, WANG Dong-quan. Model tests on dynamic stress in colliery wastes improved by dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1142 - 1147. (in Chinese))
- [10] 方勇, 姚志刚, 符亚鹏, 等. 上覆水平煤层采空区衬砌受荷模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1513 - 1521. (FANG Yong, YAO Zhi-gang, FU Ya-peng, et al. Model tests on loading characteristics of linings in overlying horizontal coal mined-out area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1513 - 1521. (in Chinese))
- [11] 蔡美峰, 来兴平. 岩石基复合材料支护采空区动力失稳声发射特征统计分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 51 - 54. (CAI Mei-feng, LAI Xing-ping. Statistical analysis of the character of acoustic emission for nonlinear dynamical damage in mined out areas supported by composite rock materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 51 - 54. (in Chinese))
- [12] 缪协兴, 茅献彪, 胡光伟, 等. 岩石(煤)的碎胀与压实特性研究[J]. 实验力学, 1997, 12(3): 394 - 400. (MIAO Xie-xing, MAO Xian-biao, HU Guang-wei, et al. Bulking and compaction characteristics of rock (coal)[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(3): 394 - 400. (in Chinese))
- [13] 臧亚君, 刘东燕, 彭文轩, 等. 重庆矿区矸石山体特性现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 558 - 563. (ZANG Ya-jun, LIU Dong-yan, PENG Wen-xuan, et al. Field tests on coal wastes in Chongqing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 558 - 563. (in Chinese))
- [14] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 505 - 510. (LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 505 - 510. (in Chinese))
- [15] PAPPAS D M, MARK C. Behavior of simulated longwall gob material[M]. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993.
- [16] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067 - 1074. (XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067 - 1074. (in Chinese))
- [17] 余伟健, 王卫军, 文国华, 等. 深井复合顶板煤巷变形机理及控制对策[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1501 - 1508. (YU Wei-jian, WANG Wei-jun, WEN Guo-hua, et al. Deformation mechanism and control technology of coal roadway under deep well and compound roof[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1501 - 1508. (in Chinese))
- [18] WANG P F, ZHAO J L, CHUGH Y P, et al. A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits[J]. Minerals, 2017, 7(4): 60.
- [19] FENG G R, WANG P F, CHUGH Y P, et al. A new gob-side entry layout for longwall top coal caving[J]. Energies, 2018, 11(5): 1292.
- [20] 赵景礼, 吴健. 厚煤层错层位巷道布置采全厚采煤法: 中国, ZL98100544.6[P]. 1998-08-09. (ZHAO Jing-li. Whole seam longwall mining with split-level gate roads (LMSG) in thick coal seams: China, ZL98100544.6[P]. 1998-08-09. (in Chinese))
- [21] 赵景礼. 厚煤层全高开采的三段式回采工艺: 中国, 2004100395750[P]. 2004-10-03. (ZHAO Jing-li. Triple sections mining technology (TSMT) in LMSG in thick coal seams: China, 2004100395750[P]. 2004-10-03. (in Chinese))
- [22] 赵景礼. 厚煤层错层位巷道布置采全厚采煤法的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 142 - 145. (ZHAO Jing-li. Study on whole seam longwall mining with split-level gateroad[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(02): 142 - 145. (in Chinese))
- [23] 张俊文, 赵景礼, 王志强. 近距残煤综放复采顶煤损伤与冒放性控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1854 - 1858. (ZHANG Jun-wen, ZHAO Jing-li, WANG Zhi-qiang. Top coal damage and caving characterizes control of residual coal repeated mining adopted longwall top-coal caving in contiguous seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1854 - 1858. (in Chinese))
- [24] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649 - 664. (KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. Case studies of

- rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649 – 664. (in Chinese))
- [25] 白兰永. 冒落研石自行充填沿空巷道矿压显现规律研究[J]. 金属矿山, 2011(6): 63 – 66. (BAI Lan-yong. Research on the underground pressure behavior laws of reserving space for lane along the tunnel by self-filling with breakage wastes[J]. Metal Mine, 2011(6): 63 – 66. (in Chinese))
- [26] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 无煤柱自成巷聚能切缝技术及其对围岩应力演化的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1314 – 1325. (HE Man-chao, GAO Yu-bing, YANG Jun, et al. The energy-gathered roof cutting technique in non-pillar mining and its impact on stress evolution of surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1314 – 1325. (in Chinese))
- [27] ESTERHUIZEN G S, KARACAN C Ö. A methodology for determining gob permeability distributions and its application to reservoir modeling of coal mine longwalls[C]// SME 2007 Annual Meeting. 2007: 07 – 078.
- [28] TAN Y L, YU F H, NING J G, et al. Design and construction of entry retaining wall along a gob side under hard roof stratum[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 115 – 121.
- [29] YANG H, CAO S, LI Y, et al. Soft roof failure mechanism and supporting method for gob-side entry retaining[J]. Minerals, 2015(10): 707 – 722.
- [30] SHABANIMASHCOOL M, LI CC. Numerical modelling of longwall mining and stability analysis of the gates in a coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 51: 24 – 34.
- [31] QIAO Jian-yong. Julia sets and complex singularities of free energies[J]. Memoirs of the American Mathematical Society, 2014, 234(1102): 1.
- [32] QIAO J Y. On the preimages of parabolic periodic points[J]. Nonlinearity, 2000, 13(3): 813 – 818.
- [33] 蒋金泉. 采场围岩应力与运动[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993: 15 – 75. (JIANG Jin-quan. Stress and movement of surrounding rock around the stope[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993: 15 – 75. (in Chinese))
- [34] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimension, version 5.0 user's guide[M]. Minnesota: Minneapolis, 2012.

## 第十届全国土动力学学术会议二号通知

2018年11月2日—4日

**主办单位:** 中国振动工程学会土动力学专业委员会; 中国地震学会岩土工程防震减灾委员会; 恢先地震工程学基金会(中国)。

**承办单位:** 南京工业大学。

第十届全国土动力学学术会议将于2018年11月2日~4日在六朝古都南京召开。本次会议是继1980年12月6~12日在合肥召开“土的动力特性学术讨论会”后有着近四十年历史的第十次学术盛会, 在汶川特大地震10周年之际的2018年召开“第十届全国土动力学学术会议”, 将是一次具有历史意义的学术盛会。

**会议主题与内容:** 围绕“一带一路”倡议、“建设海洋强国”和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范, 本次会议重点研讨防灾减灾救灾工作“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的前沿科学与关键技术问题, 具体征文专题如下: ①土的动力特性与本构关系; ②土与结构动力相互作用; ③土动力学数值与物理模拟研究; ④土动力学室内试验方法与技术; ⑤原位动力测试与表征技术; ⑥砂土液化评价与防治; ⑦强地震动与场地非线性效应; ⑧近海工程的特殊土动力

学问题; ⑨工程场地地震损失评估与灾害保险; ⑩桩基动力测试技术。

**大会秘书处:** 联系人: 庄海洋13584050564, 吴志坚13919182444, 陈炜昀13770620150, 赵凯13951863149, 王盛年15077865785, 通讯地址: 南京工业大学虹桥校区实验楼400-1室, 鼓楼区中山北路200号, 邮编: 210009, 论文提交邮箱: 王盛年myresort@126.com, 赵凯 zhaokai@njtech.edu.cn。

**重要时间:** 论文全文截止: 2018年5月30日, 修改稿截止: 2018年7月30日, 论文录用通知: 2018年8月30日。

**会议论文征集:** 会议论文应为未经正式发表过的最新成果, 学术委员会将组织专家对提交论文进行审查, 通过审查的论文将在《地震工程学报》专刊、《防灾减灾工程学报》和《地震工程与工程振动》正刊发表, 论文版面费自理。

**会议、住所地点:** 会议酒店: 南京国际青年会议酒店, 地址: 南京建邺区金沙江西街9号(南京保利大剧院旁), 电话: 025-86538888, 大会统一安排住宿, 费用自理。

**会议费用:** 正式代表1600元/人, 学生代表800元/人随从人员600元/人(自行安排食宿除外)。

(大会组委会 供稿)