

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.3021

长壁工作面巷顶沿空掘巷围岩应力分析

王朋飞¹, 冯国瑞¹, 赵景礼², Yoginder P. Chugh³, 王志强²

(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. 美国发明家学会, 坦帕 美国)

摘 要: 镇城底矿工作面的回采巷道一条沿顶板掘进, 一条沿底板掘进, 相邻两工作面在端头搭接, 沿底板掘进的巷道形成巷顶沿空掘巷。通过理论分析、相似模拟、数值模拟及现场实测对巷顶沿空掘巷围岩结构及应力环境进行了研究。得到如下结论: 该巷道不受超前和固定支承压力影响, 大结构下方的矸石垫层可起到能量和应力耗散的作用, 避免了动载和冲击影响, 应力低且稳定; 岩层移动形成的垮落角对采空区应力大小和分布(尤其采空区边缘)有重要影响; 垮落角越小, 采空区应力越小, 该巷道围岩应力越小, 采空区恢复至原岩应力的距离越大; 垮落角对岩体塑性区发育方向起控制和导向作用; 该巷道围岩应力大幅低于原岩应力, 卸压程度大; 实测该巷道竖向和横向位移均比非沿空巷道小, 即顶底板和两帮应力环境均得到改善。研究对维护具有冲击倾向的高应力巷道具有一定意义。

关 键 词: 错层位; 沿空掘巷; 双屈服; 采空区; 冲击倾向; 高应力

中图分类号: TD 322

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)09-3395-11

Investigation of stress of surrounding rock mass of gob-side entry under gob of a longwall panel

WANG Peng-fei¹, FENG Guo-rui¹, ZHAO Jing-li², Yoginder P. Chugh³, WANG Zhi-qiang²

(1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. National Academy of Inventors, Tampa, USA)

Abstract: The gateroads on the sides of a longwall panel at Zhenchengdi Coal Mine are driven along the roof and floor, respectively, and thus the gateroad along the floor becomes the gob-side entry under a longwall gob. In this paper, theoretical analysis, physical modelling, numerical modelling and field observation are conducted to investigate structures and stress of surrounding rock mass of this gob-side gateroad. It is found that the gob-side entry is independent of the side and front abutment pressures. The caved rock cushion under the masonry beam structure can dissipate energy and stress for the gob-side entry, which prevents from dynamic and impact loads, providing the stable stress environment much lower than pre-mining stress. The angle of break developed due to strata movement has a significant effect on stress and distribution (especially on gob edge). The lower the angle of break is, the smaller the gob pressure and stress are around the entry, and the larger distance between the gob edge to the location where pre-mining pressure occurs. The angle of break has a dictating and guiding function for the plastic zone development. The stress of surrounding rock mass of gob-side entry is significantly lower than premining stress with the high destress degree. Both the roof to floor and rib to rib convergences are smaller than that of non-gob-side entry, which demonstrates that overall stress environment is improved. The study is of certain drawing significance for highly stressed burst-prone gateroads.

Keywords: split-level; gob-side gateroad driving; double yield; gob; burst-prone; high stress

1 引 言

煤层采后应力重新分布, 长壁采空区应力一般

低于原岩应力, 相邻未采区段产生支承应力, 根据应力大小, 围岩破坏将实体煤分为 4 个区: I 为破裂区, II 为塑性区, III 为弹性区应力升高部分, IV

收稿日期: 2016-12-31

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (No.51422404); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No.51404270); 国家留学基金委资助项目 (No.201506430011)。

This work was supported by the Excellent Young Scientists Fund for National Natural Science Foundation of China (51422404), the Young Foundation of National Natural Science of China (51404270) and the Funding Project of China Scholarship Council (201506430011).

第一作者简介: 王朋飞, 男, 1988 年生, 博士, 讲师, 主要从事矿山压力、岩石力学等方面的研究。E-mail: 18801448768@163.com

为原始应力区^[1]。常规长壁放顶煤区段之间常留设宽煤柱以保证下一区段与采空区临近的巷道避开峰值应力区。多数区段巷道不得不布置在Ⅲ区或Ⅳ区,煤损严重。为此许多学者提出沿空掘巷^[2-15],沿采空区边缘掘进巷道,利用煤体边缘的Ⅰ区,即卸压区布置巷道,避开Ⅱ区和Ⅲ区的高应力环境并保证采出率。因此,采空区与煤柱的交互作用对沿空巷道的安全和稳定具有决定性作用。

Yan 等^[6]指出卸压区在实体煤 0~7 m 内。李磊等^[7]得出窄煤柱稳定性和承载特性取决于顶板岩层的物理力学参数、煤层埋深、区段几何结构等参数。Li 等^[8]使用数值模拟和相似条件对比研究,确定塔山矿沿空护巷煤柱为 6 m。Zhang 等^[9]针对高瓦斯多区段巷道综放开采提出高水快硬材料浇筑巷旁充填体(RBB)。Yang 等^[10]分析了沿空巷道顶板岩体破坏特征及破坏机制,并根据煤层赋存特征讨论了其支护技术,指出传统双“U”型沿空巷道经历多次动载影响,维护困难,煤损严重。Tan 等^[11]提出一种坚硬顶板来压和下沉剧烈条件下沿空留巷“柔—硬”结合的支护技术并在薄煤层中进行了试验。张农等^[12]总结出“三位一体”及墙体快速构筑等沿空留巷围岩控制关键技术。Shabanimashcool 等^[13]指出,区段煤柱在其服务期限内经历多次复杂动载影响,沿空巷道常规支护方法难以保证巷道稳定性,附加支护,如钢筋梯、锚索槽钢、注浆加固、对拉锚杆、管棚等,却又大幅提高生产成本。Yan 等^[6]进一步指出,窄煤柱的承载能力会因其两侧损伤断裂而下降;随采面推进,经历超前支承压力的影响,变形和破坏更加严重;由于老顶再度破裂造成围岩变形加剧,巷道维护困难。

结合前述分析及当前开采实践,沿空巷道维护困难是因为在其服务期限内窄煤柱依然承受来自顶板的压力,破断老顶仍直接作用于窄煤柱,造成直接顶、老顶和煤柱相互接触部位挤压破坏。为此很多学者提出护巷方法,如提高煤柱承载能力、修建人工构筑墙体以提高承载、抵抗变形或增加自身变形和卸压的能力,也有众多学者提出附加支护措施,如锚索槽钢、钢筋梯、对拉锚杆等^[6,9,11-12,14],但成本较高。

鉴于常规放顶煤存在的问题,赵景礼等^[15-17]提出错层位开采技术。其核心是在已稳定采空区下(两侧为实体煤)掘进巷顶沿空巷道(不同于巷旁沿空),借鉴了分层开采下分层内错式巷道布置经验。王鹏飞^[18-19]、Feng^[20-21]、张俊文^[22]等对其进行了研究。然而一直以来采空区,尤其采空区边缘的

应力分布规律及其对该方法中沿空巷道稳定性的影响认识尚不清晰,且该方法中沿空巷道围岩应力场的本质特征研究不透彻。以镇城底矿为背景对错层巷顶沿空掘巷应力环境进行了理论分析、相似模拟和数值模拟分析,并结合现场实测进行了验证,本文亦客观介绍了该方法局限和适用条件。

2 工程背景

镇城底矿属于山西省西山矿区,研究工作面为 18111 和 18111-1 工作面。该矿主要地质构造为简单单斜构造,区段走向为 600 m,倾向为 120 m,平均煤厚 5 m,平均埋深为 200 m,倾角为 8°。岩层柱状见图 1。机采 2.3 m,放煤 2.7 m,采放比为 1:1.174。矿井设计初期,最优区段煤柱留设宽度难以确定。根据相邻矿井经验,为提高回采率,留设煤柱宽度较小时巷道动压事故频发等。留设煤柱太大,造成回采率下降,一直难以平衡。原工作面设计如图 2 所示。

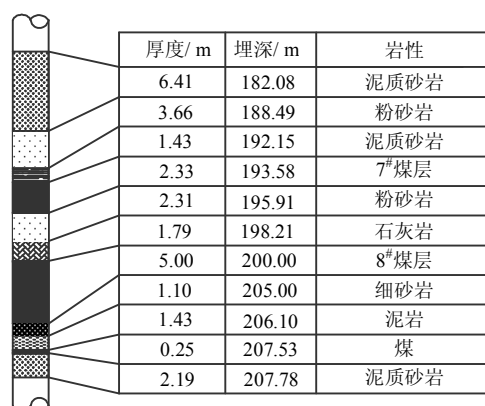


图 1 岩层柱状图

Fig.1 Stratigraphic column

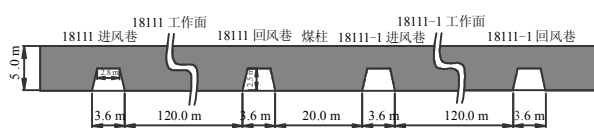


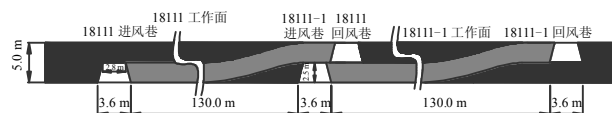
图 2 工作面设计

Fig.2 Panel design

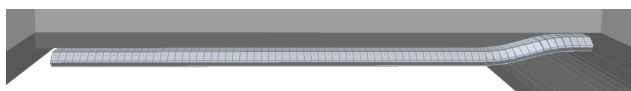
3 错层巷顶沿空掘巷

镇城底矿错层巷顶沿空掘巷如图 3 所示。该技术省去了确定窄煤柱合理尺寸的繁琐步骤,无需构筑人工墙。工作面两端的区段巷道位于煤层的不同高度,即 18111 面进风巷沿底板、回风巷沿顶板掘进,在工作面右端形成一缓升区,下文统称缓坡段。这部分通过调整每副支架和溜槽等设备来实现。图 3(b)为单个工作面三维视图,液压支架每架调整约 3°,

过渡缓和。现场实践证明,该方法能满足高效生产,生产中未出现采煤机械事故。对于相邻 18111-1 面进风巷,即巷顶沿空掘巷,则沿底板掘进,与 18111 面回风内错布置,位于 18111 采空区边缘下。与 18111 面回风巷相似,18111-1 面回风巷也沿顶板掘进。这样,18111 面与 18111-1 面具有相同的工作面结构。两工作面顺序开采,先采 18111 面,后采 18111-1 面。



(a) 断面图



(b) 三维视图

图3 新沿空巷道留设技术

Fig.3 New gob-side entry layout and design

由于错层位工作面形态有所改变,矿压分布亦有别于常规方法,如图4所示。众所周知,覆岩垮落会产生垮落角,垮落边缘会形成一定的悬臂^[1],采空区边缘一定距离内不存在垮落矸石。与传统方法相比,图4实体煤多出两区:Ⅴ为免压区,即无垮落矸石或只有少量矸石作用于其上;Ⅵ为低压区,即处于采空区边缘低应力区。以上两区得益于采场边缘的保护结构。该思想与地震中一个房间最安全的地方为角落一样,房屋倒塌时易在角落形成保护结构。

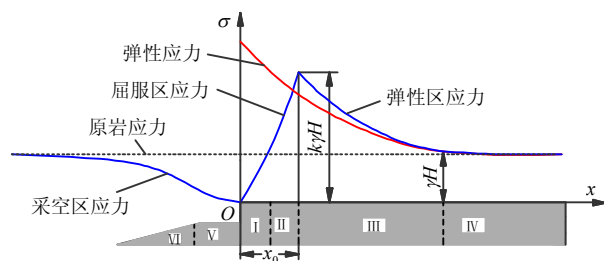


图4 错层位工作面采后围岩应力分布

Fig.4 Stress distribution after extraction of LMSG panel

文献[6]所述沿空巷道维护难题在巷顶沿空掘巷技术中得到缓解。根据采场矿压分布规律^[23],理论推演得到的 18111-1 工作面推采中的矿压分布情况如图5所示。由于 18111-1 面进风巷位于 18111 面采空区边缘下方卸压处,固定支承压力始终“越

过”沿空巷道而位于 18111-1 面实体煤侧,固定和侧向支承压力 T 型交汇峰值则也始终位于 18111-1 面实体煤侧,进风巷既不受固定支承压力也不受超前支承压力影响。

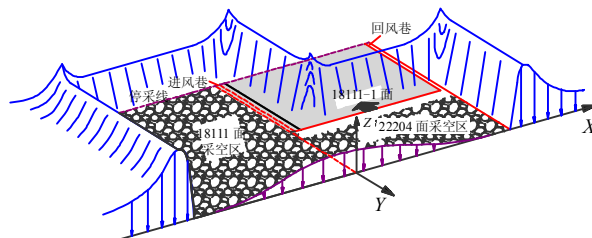


图5 18111-1 面开采期间矿压分布规律

Fig.5 Stress distribution during extraction of 18111-1 panel

其次,错层位工作面右端的缓坡段顶板矸石可垮落高度较低。Esterhuizen 等^[24]指出,随矸石垮落高度降低,岩石碎胀或孔隙率降低,垮落矸石更易压实,则此段采空区矸石较常规方法承载更多覆岩压力^[25]。与常规方法相比,图4错层位缓坡段应力增加较快,传递到围岩体中的应力则较缓,峰值较小。图6中红色线条所示沿空巷道侧固定支承压力较蓝色线条所示常规固定支承压力缓和。

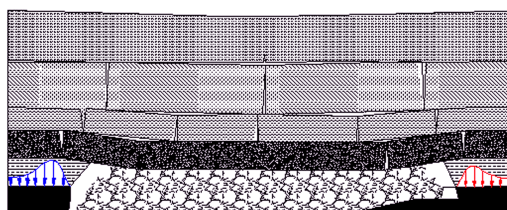


图6 错层位工作面两侧支承压力分布

Fig.6 Stress distribution on two sides of LMSG panel

若区段足够宽或埋深浅,满足充分或超充分采动,则采空区承担更多覆岩重量。然而,我国大部分矿井区段宽度均未达到充分采动宽度,且随着采深增加,实现充分或超充分采动更加困难,覆岩形成较接,压力均转移至围岩。采用巷顶沿空掘巷取消了常规矩形煤柱,多工作面上部覆岩垮落运移相连,相当于增加采宽,若干(至少两个)错层位区段体现出超长工作面的特点^[18, 21],多个区段形成的采空区由于实现充分采动能够被压实,承担更多覆岩重量,减少了转移到两侧煤岩体的压力,为新区段营造了较低的应力环境。

开采 18111 面时的顶板破断运移模型如图7所示。常规沿空掘巷的护巷窄煤柱与直接顶、直接顶

与老顶岩层直接接触,无缓冲和退让空间。当老顶断裂、回转及垮落时不可避免地造成接触部位挤压变形,窄煤柱相应变形和损坏,导致沿空巷道矿压显现剧烈,维护困难,同时聚集在窄煤柱上的能量易引发矿震、岩爆等动压灾害,尤其深部高应力和有冲击危险的环境下。而从图 7 可看出,18111 回风巷右侧煤柱和垮落矸石支撑块体 B 两端,18111-1 进风巷左右两侧均没有煤柱与顶板直接接触,而是留出缓冲退让空间,顶板再度回转和下沉,矸石垫层可进行能量和应力耗散,为沿空巷道提供了稳定的低应力保护环境。其次,煤柱内应力场现位于 18111 面回风巷右侧实体煤侧,消除了常规方法沿空巷道护巷窄煤柱承受的内应力场环境。此部位应力释放程度最大,应力最低。

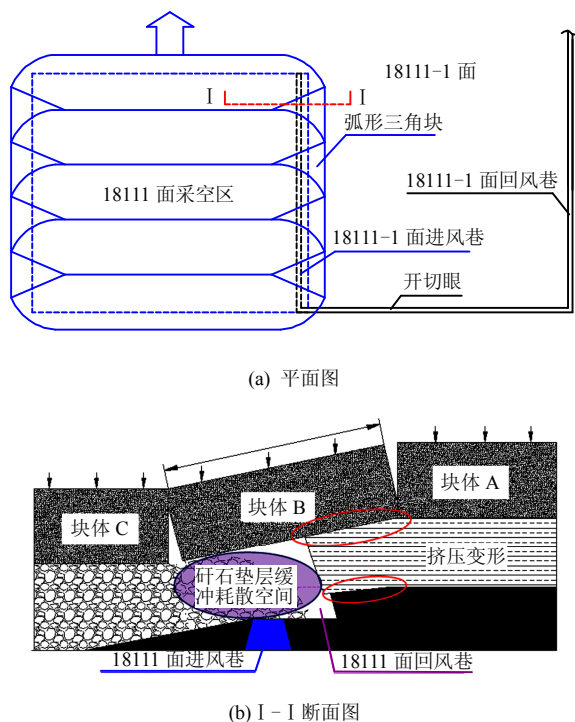


图 7 18111 面开采时顶板断裂结构模型
Fig.7 Main roof fracturing model for 18111 panel

Pappas 等^[25]指出块体 B 水平跨度 L_b 与老顶周期来压步距 L_p 以及区段宽度 L 有关,其表达式为

$$L_b = \frac{2L_p}{17} \left(\sqrt{\left(10 \frac{L_p}{L} \right)^2 + 102} - 10 \frac{L_p}{L} \right) \quad (1)$$

18111-1 面开采期间顶板破断运移如图 8 所示。II-II 断面与 I-I 断面图相同,皆是一面采空,一面为实体煤。而 III-III 断面图则显示当 18111-1 面推采后,采空区与 18111 面采空区连为一体。

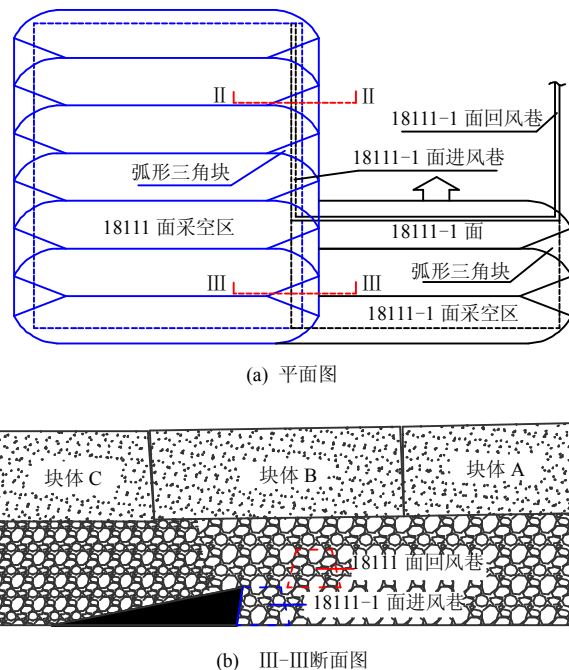
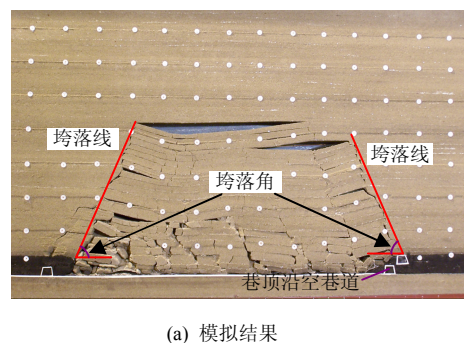


图 8 18111-1 面开采时顶板断裂结构模型
Fig.8 Main roof fracturing model for 18111-1 panel

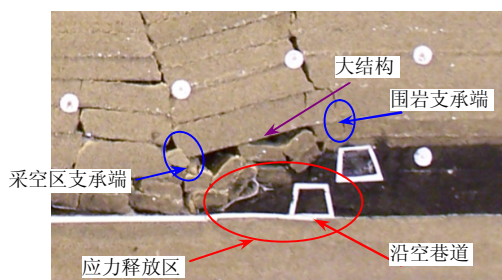
4 模拟研究

4.1 相似模拟

建立了平面-应变模型,尺寸为 1 620 mm (长) × 160 mm (宽) × 1 300 mm (高)。几何相似比 $C_L = 1:100$, 密度常数相似比 $C_\rho = 1:1.5$ ^[26-28], 限于篇幅细节不再赘述。关键图像如图 9 所示。图 9(a)显示覆岩垮落形成垮落角和垮落线。对于开采宽度一定



(a) 模拟结果



(b) 沿空巷道附近局部放大

图 9 相似模拟和结果
Fig.9 Physical model and modelling results

的工作面,垮落角越大,则某标高的岩层悬露跨距越大,该岩层越易断裂垮落,应力传递至采空区;反之,则跨度越小,越不易断裂垮落,且越多的应力转移至四周围岩中。垮落角对覆岩断裂和垮落发展影响显著,进而影响应力分布,必将对数值模拟结果影响很大。运用摄影测量法对垮落角进行了观测,得到工作面两侧垮落角分别为:左侧为 66.6° ;右侧为 68.1° 。忽略微小差距且为了降低后文数值模拟建模难度,两侧均取 67° 。图9(b)显示大结构一端为围岩支承端,一端为采空区支承端,沿空巷道恰处于大结构之下,为该巷道提供了低应力环境。

4.2 数值模拟

国内外若干学者对沿空巷道的数值模拟研究涉及采空区响应^[6,9],目前采空区模拟研究甚少,且均未考虑垮落角影响。FLAC^{3D}软件内置的双屈服本构模型符合应变/硬化关系,可模拟压应力引起体积永久缩减的低胶结粒状散体材料,适合模拟采空区^[28]。模拟分3组:①将相似模拟所得垮落角考虑进去;②将数值模拟中垮落角简单地定为 90° ;③不考虑采空区。考虑垮落角的模型见图10,尺寸为 300 m (长) $\times 300\text{ m}$ (宽) $\times 87\text{ m}$ (高)。 $153.85\text{ m}\times 0.027\text{ MN/m}^3=4.15\text{ MPa}$ 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,4个侧面约束纵向位移。采空区以外选用摩尔-库仑破坏准则。岩体物理力学参数如表1所示。难点在于确定采空区参数。

Pappas等^[25]试验得出Salamon^[29]经验公式可很好地描述采空区矸石压缩的应力-应变行为。本模拟则亦根据该公式获取采空区参数,表达式为^[29]

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon / \varepsilon_m} \quad (2)$$

式中: σ 为加载于材料上的轴向压力(MPa); ε 为在该压力下的应变; ε_m 为最大可能应变,且 $\varepsilon_m = (b-1)/b$; b 为碎胀系数,且 $b = (H_c + m)/H_c$; H_c 为垮落带高度(m); E_0 为初始切线模量,且 $E_0 =$

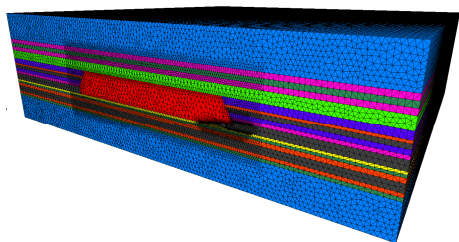


图10 数值模型
Fig.10 Numerical model

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters for rock and coal mass

岩性	厚度 /m	埋深 /m	密度 /(kg/m ³)	体积 模量 /GPa	剪切 模量 /GPa	黏聚 力 /MPa	抗拉 强度 /MPa	摩擦 角 /($^{\circ}$)
顶部	20.00	153.85	2 600	7.6	5.9	1.6	0.6	28
石灰岩	2.20	173.85	2 500	9.0	7.7	2.3	0.8	31
泥岩	3.03	176.05	2 550	6.2	4.5	1.3	0.6	27
石灰岩	3.00	179.08	2 500	9.0	7.7	2.3	0.8	31
砂质泥岩	6.41	182.08	2 550	8.2	6.5	1.7	0.7	30
粉砂岩	3.66	188.49	2 540	10.7	7.4	2.5	0.9	32
砂质泥岩	1.43	192.15	2 550	8.2	6.5	1.7	0.7	30
煤	2.33	193.58	1 400	1.7	1.1	0.5	0.2	18
粉砂岩	2.30	195.91	2 540	10.7	7.4	2.5	0.9	32
石灰岩	1.79	198.21	2 500	9.0	7.7	2.3	0.8	31
8 [#] 煤层	5.00	200.00	1 400	1.7	1.1	0.5	0.2	18
细砂岩	1.10	205.00	2 550	11.5	8.5	3.0	1.0	32
泥岩	1.43	206.10	2 550	6.2	4.5	1.3	0.6	27
煤	0.25	207.53	1 400	1.7	1.1	0.5	0.2	18
砂质泥岩	2.19	207.78	2 550	8.2	6.5	1.7	0.7	30
煤	4.00	209.97	1 400	1.7	1.1	0.5	0.2	18
砂质泥岩	1.80	213.97	2 550	8.2	6.5	1.7	0.7	30
泥岩	2.00	215.77	2 550	6.2	4.5	1.3	0.6	27
底部	20.00	217.77	2 600	7.6	5.9	1.6	0.6	28

$10.39\sigma_c^{1.042}/b^{7.7}$ (MPa); σ_c 为竖向原岩应力。

根据镇城底实测技术资料,计算得煤层上方垮落带高 11.51 m ,则 $b=1.43$, $\varepsilon_m=0.30$, $E_0=22.36\text{ MPa}$ 。冒盖压力、应变值^[28]如表2所示,表达式为

$$\sigma = \frac{22.36\varepsilon}{1 - 3.3\varepsilon} \quad (3)$$

表2 双屈服模型冒盖压力

Table 2 Cap pressure for double-yield model

应变 ε	应力/MPa	应变 ε	应力/MPa
0.01	0.23	0.16	7.58
0.02	0.48	0.17	8.66
0.03	0.74	0.18	9.92
0.04	1.03	0.19	11.40
0.05	1.34	0.20	13.17
0.06	1.67	0.21	15.31
0.07	2.04	0.22	17.98
0.08	2.43	0.23	21.38
0.09	2.86	0.24	25.86
0.10	3.34	0.25	32.03
0.11	3.86	0.26	41.08
0.12	4.44	0.27	55.65
0.13	5.09	0.28	82.98
0.14	5.82	0.29	152.84
0.15	6.64	0.30	713.50

建立了仅有两个单元的模型(单个单元无法显示云图),尺寸为 1 m (长) $\times 1\text{ m}$ (宽) $\times 2\text{ m}$ (高),底部固支,4个侧面约束横向位移。在表面施加竖向速率模拟加载过程,通过迭代匹配确定参数。经过一系列试错迭代,得参数如表3所示。图11为确

表 3 采空区材料参数
Table 3 Parameters for gob material

密度 /(kg/m ³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	剪胀角 /(°)	摩擦角 /(°)
1 700	75	55	8.5	1.0

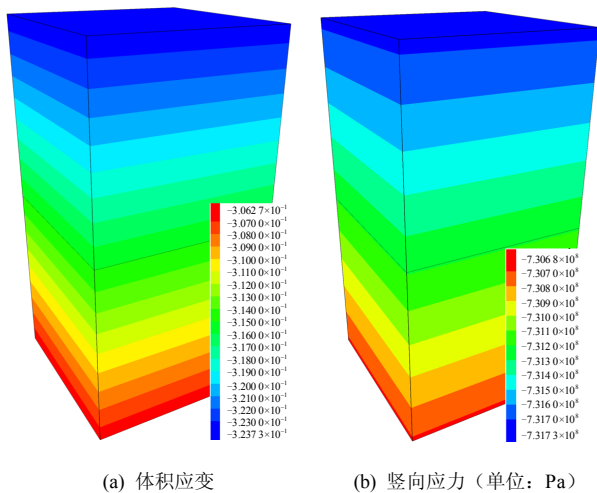


图 11 获得合理参数后的加载结果

Fig.11 Loading results using reasonable parameters

定参数后的加载结果。图 12 为匹配曲线，匹配结果理想。采空区与围岩交界处设置接触面实现断裂，参数为：法向刚度为 1.0×10^9 Pa；剪切刚度为 1.0×10^9 Pa；黏聚力为 100 kPa；摩擦角为 20° ；剪切黏结强度是法向黏结强度的 100.0 倍^[29-31]。图 13 所示为垮落角为 67° 时 18111 面采空后竖向应力等值线图。由工程背景可知，原岩应力为 $200 \text{ m} \times 0.025 \text{ MPa/m} = 5 \text{ MPa}$ 。采空区应力最高值约为 4.62 MPa，则应力恢复至 92%，认为达到原岩应力，采空区边缘距应力恢复至原岩应力处 53 m，与 Wilson^[32] 的观测和研究一致，即应力在距采空区边

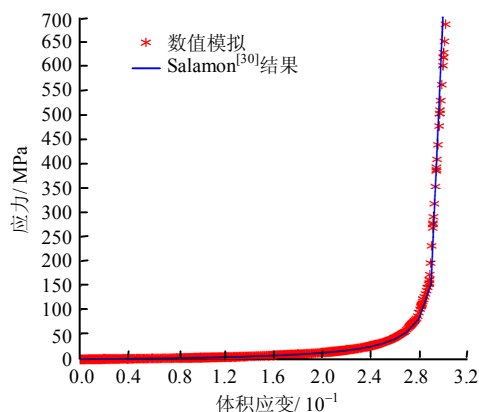


图 12 数值模拟与 Salamon 公式匹配

Fig.12 Matching of numerical modelling and Salamon's model

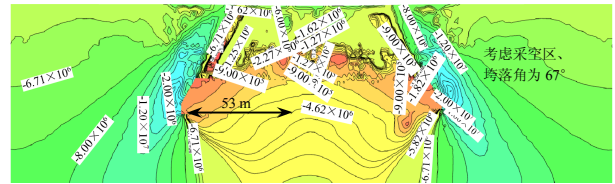


图 13 竖向应力等值线图

Fig.13 Isogram of vertical stress

缘 0.2~0.3 倍埋深处恢复至原岩应力。该面埋深 200 m，则恢复至原岩应力的范围为 40~60 m。53 m 为较可信的结果，也验证了所得采空区参数的合理性。采空区两侧边缘应力均大幅低于原岩应力。

塑性区发育情况如图 14 所示。受垮落角影响覆岩呈“八”字形破坏，表现为拉伸和剪切破坏，并在断裂附近产生相应低应力带（图 13）；覆岩中部表现为拉破坏，模型顶部为压破坏，模型高位远处变形为拉破坏，这与地表沉陷发育规律一致，验证了模拟的合理性，而底板向下方塑性区的发育表现为剪切破坏。

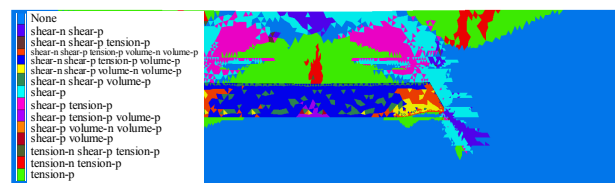


图 14 塑性区发育状况（考虑采空区与垮落角 67° ）

Fig.14 Plastic zone development (considering gob and the angle of break is 67°)

监测 18111-1 巷顶沿空掘巷顶底板及两帮中点处围岩应力得到图 15。巷顶沿空掘巷顶板中点应力为 1.04 MPa，集中系数为 0.210；底板中点应力为 1.24 MPa，集中系数为 0.250；左右两帮应力甚至表现出拉应力（仍需将来进一步研究），左帮中点应力为 0.16 MPa，集中系数为 0.031；右帮中点的应力

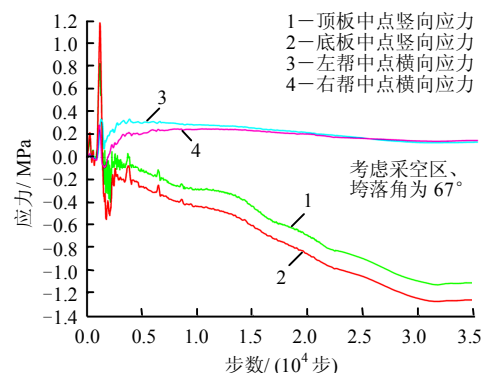


图 15 沿空巷道围岩应力

Fig.15 Stress on surrounding rock mass of gateroad

为 0.17 MPa, 集中系数为 0.034; 可见卸压效果非常显著。

图 16 所示为垮落角为 90° 时 18111 面采后竖向应力等值线图。由于垮落角为 90° , 覆岩暴露跨度较大, 采空区应力最高约 4.86 MPa, 应力恢复至 97.2%, 采空区边缘距应力恢复至原岩应力处 48 m。可见垮落角对采空区应力影响显著。其次, 采空区边缘应力亦比垮落角为 67° 时大。塑性区发育情况如图 17 所示。图 17 显示覆岩“八”字形破坏规律不如垮落角为 67° 时明显, 破坏大致竖直向下延伸。图 18 显示由于垮落角为 90° , 覆岩暴露跨度较大, 采空区应力较大; 沿空巷道顶底板应力均比图 15 所示的大, 顶板最大达到 1.54 MPa (比 1.04 MPa 大幅增加), 底板应力最大达到 1.74 MPa (比

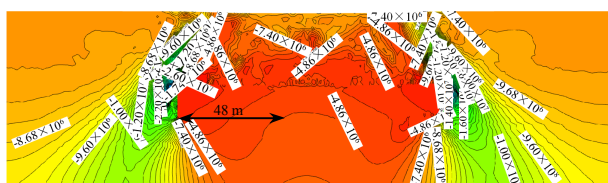


图 16 竖向应力等值线图 (考虑采空区、垮落角 90°)
Fig.16 Vertical stress level isoline (considering gob and the angle of break is 90°)

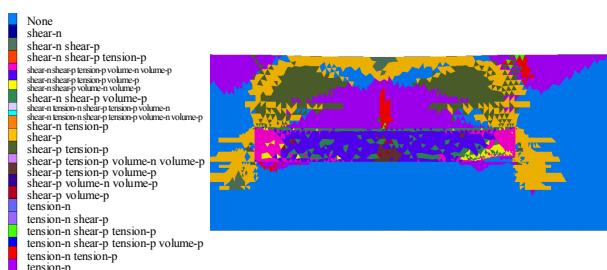


图 17 塑性区发育状况 (考虑采空区、垮落角 90°)

Fig.17 Plastic zone development (considering gob and the angle of break is 90°)

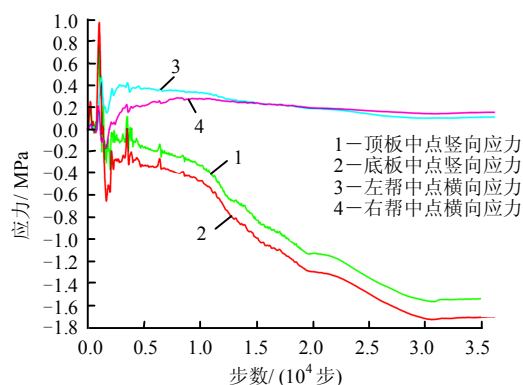


图 18 沿空巷道围岩应力监测 (考虑采空区、垮落角 90°)

Fig.18 Stress on surrounding rock mass of gateroad (considering gob and the angle of break is 90°)

1.24 MPa 大幅增加), 证明垮落角对采空区应力大小影响较大, 垮落角越小, 采空区边缘应力越小。两帮应力与图 15 相比差距不大, 说明垮落角对起坡段沿空巷道水平应力影响不大。

图 19 所示为不考虑采空区作用时 18111 面采后竖向应力等值线图。不考虑采空区时, 开采空间范围内及其上方岩层悬空, 顶底板大范围应力显示为 0, 违背了实际。开采边界附近煤层应力集中, 而考虑采空区的情况下应力集中却位于垮落线两侧岩体, 证明采空区对采煤岩应力分布影响显著。

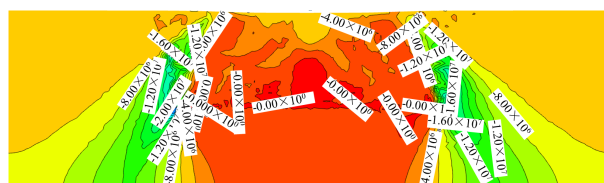


图 19 18111 面采后竖向应力等值线图 (不考虑采空区)
Fig.19 Vertical stress level isoline after extraction of 18111 panel (without considering gob)

图 20 显示由于采空区空间无任何矸石作用, 覆岩破坏范围比考虑采空区时大。综合图 14 和图 17 并比较分析可发现, 垮落角对岩体塑性区发育方向具有控制和引导作用。如图 21 所示, 不考虑采空区时, 沿空巷道顶, 底板应力接近于 0, 而两帮所受的拉应力却比考虑采空区的情况大, 分析认为一定的采空区矸石压力有助于拟制起坡段边界围岩的拉

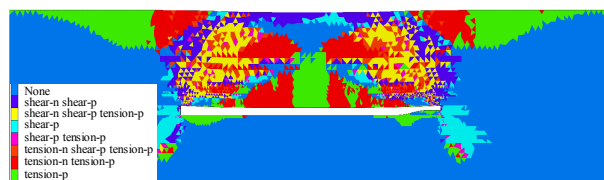


图 20 塑性区发育状况 (不考虑采空区)

Fig.20 Plastic zone development (without considering gob)

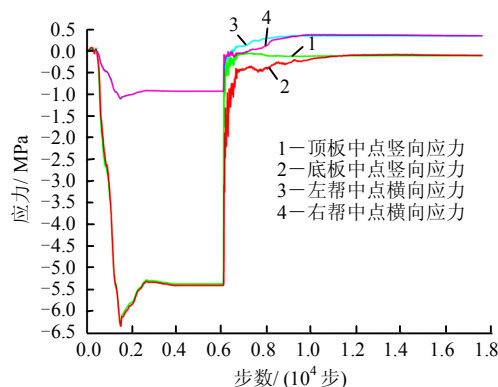


图 21 沿空巷道围岩应力监测 (不考虑采空区)

Fig.21 Stress on surrounding rock mass of gateroad (without considering gob)

伸变形,此方面的机制仍需进一步研究,也是笔者下一步的关注重点。

3 组模拟显示巷顶沿空掘巷所处的缓坡段围岩均较完整,为该巷提供了低应力、完整性高的围岩环境。

5 现场实测

现场对 18111-1 工作面矿压进行了观测。自沿空巷道侧至回风巷侧数第 5、30、59 以及缓坡段第 76 架液压支架每架安装了压力自动监测记录仪监测支架阻力。每天支护循环约 6~8 次,每次循环采面进尺为 0.6 m。由于数据量巨大,取其中 292 次数据循环进行分析。 P_0 为支架初撑力, P_m 为末阻力, P_t 为时间加权平均阻力 (TWAR) (同一支架的两不

同循环立柱的末阻力可能相近或相等,但在循环内支架立柱的受力状态差别却很大,时间加权平均阻力可反映出不同这一差别)以及 P'_m 与循环数之间的关系如图 22 所示,且有

$$P_t = \frac{\frac{1}{2}(P_0 + P_1)t_1 + \frac{1}{2}(P_1 + P_2)t_2 + \cdots + \frac{1}{2}(P_{n-1} + P_n)t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \quad (4)$$

$$P'_m = \bar{P}_m + \sigma_{P_m} \quad (5)$$

式中: \bar{P}_m 为实测阻力平均值; σ_{P_m} 为均方差; P_1 、 $P_2 \cdots P_n$ 分别为时间 $t_1, t_2 \cdots t_n$ 所对应的支护阻力,见图 23。

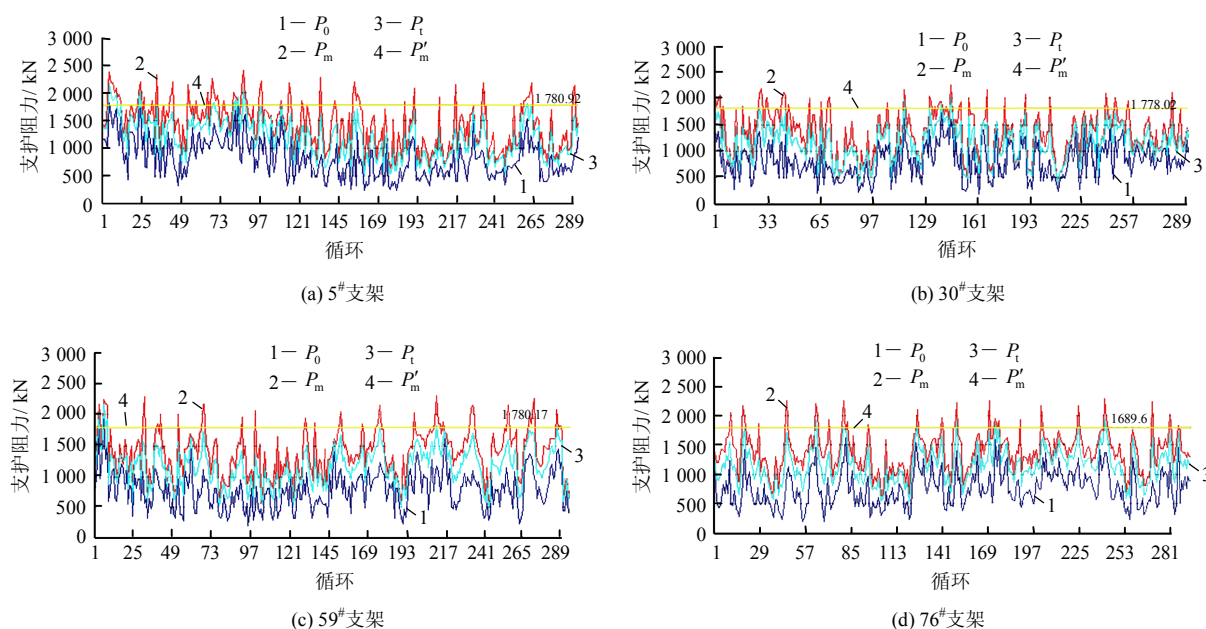


图 22 支架阻力曲线

Fig.22 Resistances curves of shields

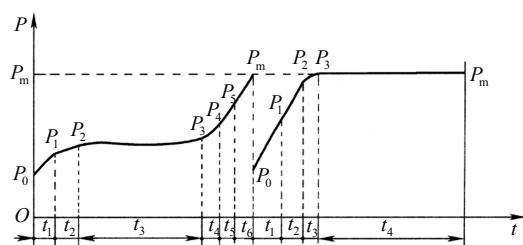


图 23 不同循环的 $P-t$ 曲线

Fig.23 $P-t$ curves of different cycles

取大于 P'_m 的峰值为反应周期来压的标志,得每 15~20 次循环有一次来压,则周期来压步距约为 9~12 m,根据式 (1) 得: $L_{b\min} = 9.99$ m; $L_{b\max} = 13.01$ m。

块体 B 长 9.99~13.01 m,为巷顶沿空巷道提供了低应力环境,其下方的矸石为能量和应力耗散垫层,可缓冲块体 B 的动态调整。

现场对 18111-1 面沿空巷道的顶板压力和巷道变形进行了观测。该巷道采用梯形棚配以三段式回采工艺^[16]的顶网形成的支护系统。工程应用表明,此系统满足生产和安全需要,开采期间未发生事故,保证了高效生产。在沿空巷道侧每隔一定距离安装自动应力记录仪。采用巷道变形十字观测法使用钢尺收敛仪测定巷道的收敛量监测巷道变形,如图 24 所示。AB 指示煤帮-煤帮变形,CD 指示顶板-底板变形。为了与非沿空巷道对比,同时对 18111-1 面回风巷进行了观测。结果如图 25 和图 26 所示。

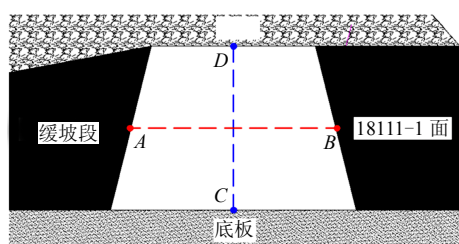


图 24 巷道变形十字观测法

Fig.24 Cross monitoring method for deformation of gateroad

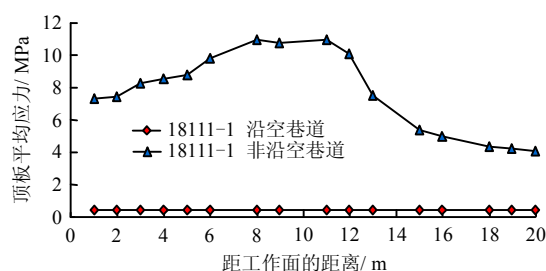
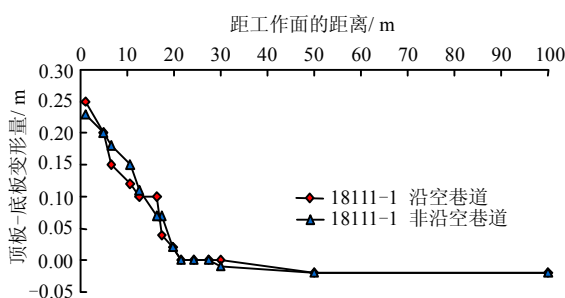
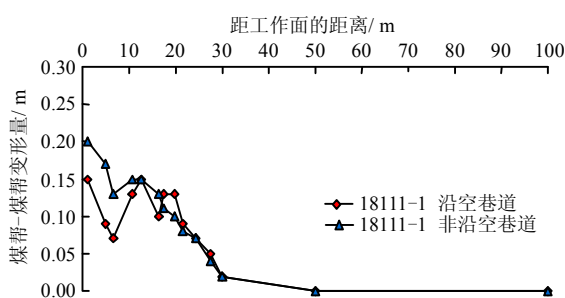


图 25 顶板压力曲线

Fig.25 Roof pressure curves



(a) 顶板-底板变形量图



(b) 煤帮-煤帮曲线图

图 26 18111-1 面巷道变形曲线

Fig.26 Deformation curves of gateroad of 18111-1 panel

图 25 显示沿空巷道支架上顶板压力明显低于非沿空巷道, 支架顶部所受平均应力接近 0.43 MPa, 应力集中系数仅 0.10 左右, 与数值模拟结果较接近。但观测数据比数值模拟结果小, 分析认为是现场垮落角及顶板岩层悬臂长度影响, 并非

全部顶梁上方的直接顶岩层重量作用于顶梁, 顶梁所受应力小于数值模拟结果, 这对沿空巷道支护更加有利, 再次印证错层位沿空巷道应力环境优越。其次, 沿空巷道顶板压力维持在 0.42 MPa 左右, 无明显浮动, 表明该巷道不受侧向和超前支承应力影响, 这与前述理论分析中图 5 所述应力分析一致, 理论与现场相互印证。

图 26 显示 18111-1 沿空巷道和非沿空巷道顶板-底板收敛量相近, 距工作面较远处沿空巷道变形略小; 而煤帮-煤帮变形数据显示, 沿空巷道明显比非沿空巷道收敛量小, 这间接显示沿空巷道横向应力也较非沿空巷道侧缓和。综上所述可见, 沿空巷道的整个应力环境均得到改善, 邻近矿井曾出现的动压事故得到缓解, 为降低巷道维护成本和提高安全奠定了基础。

使用该沿空掘巷技术, 矿井增加煤炭采出量为 2.6×10^4 t, 按吨煤售价 300 元计算, 可多收 800 余万元, 工作面回收率提高了 21.1%, 支护费降低 21%^[33]。

6 结 论

(1) 巷顶沿空掘巷免受固定和超前支承压力影响, 大结构保护下的矸石垫层可为该巷道耗散能量和应力, 避免了动载影响, 应力低且稳定。

(2) 垮落角影响覆岩垮落和采空区发育, 间接对巷顶沿空掘巷围岩应力影响显著, 该巷道处于整个回采系统应力释放程度最高区, 卸压效果显著; 垮落角对采空区应力大小和分布均影响显著, 尤其采空区边缘, 垮落角越小, 采空区应力越小, 该巷道围岩应力越小; 垮落角对岩体塑性区发育方向起控制和导向作用。

(3) 实测周期来压步距为 9~12 m, 关键块长 9.99~13.01 m; 沿空巷道比非沿空巷道顶板压力明显减小且稳定, 无论是竖向还是横向位移均略小, 顶底板和两帮应力环境均得到改善。

理论分析、相似模拟、数值模拟分析及现场实测结论统一, 证明该技术的科学性。研究对具有冲击倾向的高围岩应力巷道具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2003.

- [2] 王卫军, 侯朝炯, 柏建彪. 综放沿空巷道底板受力变形分析及底鼓力学原理[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 319—322.
- WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong, BAI Jian-biao. Mechanical deformation analysis and principle of floor heave of roadway driving gob in fully mechanized sub-level caving face[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 319—322.
- [3] 张自政, 柏建彪, 陈勇, 等. 沿空留巷不均承载特征探讨与应用分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2665—2673.
- ZHANG Zi-zheng, BAI Jian-biao, CHEN Yong, et al. Investigation and application analysis of unbalanced bearing characteristics of gob-side entry retaining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2665—2673.
- [4] 陈勇, 柏建彪, 朱涛垒, 等. 沿空留巷巷旁支护体作用机制及工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1427—1432.
- CHEN Yong, BAI Jian-biao, ZHU Tao-lei, et al. Mechanisms of roadside support in gob-side entry retaining and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1427—1432.
- [5] 韩昌良, 张农, 姚亚虎, 等. 沿空留巷厚层复合顶板传递承载机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 318—323.
- HAN Chang-liang, ZHANG Nong, YAO Ya-hu, et al. Transfer bearing mechanism of thick composite roof in gob-side entry retaining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 318—323.
- [6] YAN S, BAI J, WANG X, et al. An innovative approach for gateroad layout in highly gassy longwall top coal caving[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 59: 33—41.
- [7] 李磊, 柏建彪, 王襄禹. 综放沿空掘巷合理位置及控制技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1564—1569.
- LI Lei, BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu. Rational position and control technique of roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(9): 1564—1569.
- [8] LI HUAMIN, PENG SYD S, LI HUIGUI, et al. Trial of small gateroad pillar in top coal caving longwall mining of large mining height[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2016, 26(1): 139—147.
- [9] ZHANG Z, BAI J, CHEN Y, et al. An innovative approach for gob-side entry retaining in highly gassy fully-mechanized longwall top-coal caving[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 80: 1—11.
- [10] YANG H, CAO S, LI Y, et al. Soft roof failure mechanism and supporting method for gob-side entry retaining[J]. **Minerals**, 2015, 5(4): 707—722.
- [11] 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.
- [12] 张农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1635—1641.
- ZHANG Nong, HAN Chang-liang, KAN Jia-guang, et al. Theory and practice of surrounding rock control for pillarless gob-side entry retaining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 1635—1641.
- [13] SHABANIMASHCOOL M, LI C C. 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.
- [14] 张东升, 马立强, 冯光明, 等. 综放巷内充填原位沿空留巷技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1164—1168.
- ZHANG Dong-sheng, MA Li-qiang, FENG Guang-ming, et al. The technique of gob-side entry retaining with entry-in packing on its original position in fully-mechanized coalface with top-coal caving[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1164—1168.
- [15] 赵景礼, 吴健. 厚煤层错层位巷道布置采全厚采煤法[P]. 中国专利: ZL98100544.6, 1998-08-19.
- ZHAO Jing-li. Whole seam longwall mining with split-level gate roads (LMSG) in thick coal seams[P]. China Patent: ZL98100544.6, 1998-08-19.
- [16] 赵景礼. 厚煤层全高开采的三段式回采工艺[P]. 中国

- 专利: 2004100395750, 2004-12-29.
- ZHAO Jing-li. Triple sections mining technology (TSMT) in LMSG in thick coal seams[P]. China Patent: 2004100395750, 2004-12-29.
- [17] 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(2): 142—145.
- [18] WANG PENGFEI, ZHAO JINGLI, FENG GUORUI. Improving stress environment in development entries through an alternate longwall mining layout[J]. **Arab Journal of Geosciences**, 2018, 11(2): 44.
- [19] 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-qiang, et al. Mechanism of gob-pillar interaction for subcritical panels and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(5): 1185—1200.
- [20] FENG GUORUI, WANG PENGFEI, YOGINDER P CHUGH, et al. A new gob-side entry layout for longwall top coal caving[J]. **Energies**, 2018, 11(5): 1292.
- [21] FENG GUORUI, WANG PENGFEI, YOGINDER P CHUGH, et al. A coal burst mitigation strategy for tailate during deep mining inclined longwall panels at Huafeng coal mine[J]. **Shock and Vibration**, 2018: doi.org/10.1155/2018/5929785.
- [22] 张俊文, 赵景礼, 王志强. 近距残煤综放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.
- [23] BRADY B H, BROWN E T. Rock mechanics: for underground mining, third edition[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2004: 442.
- [24] 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 Annual Meeting. Denver: [s.n.], 2007.
- [25] PAPPAS D M, MARK C. Behavior of simulated longwall gob material[R]. Washington D. C.: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993.
- [26] 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.
- [27] GHABRAIE B, REN G, ZHANG X, et al. Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2015, 140: 71—83.
- [28] WEISHEN Z, YONG L, SHUCAI L, et al. Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(2): 199—209.
- [29] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimension, Version 5.0, User's Guide[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2012.
- [30] SALAMON M D G. Mechanism of caving in longwall coal mining[C]//Rock Mechanics Contributions and Challenges: Proceedings of the 31st US Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1990: 161—168.
- [31] QIAO J JULIA. Sets and complex singularities of free energies[J]. **Memoirs of the American Mathematical Society**, 2014, 234(1102): 1—85.
- [32] WILSON A H. Stress and stability in coal ribsides and pillars[C]//Proceedings of the First International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown: West Virginia University, 1981: 1—12.
- [33] 康淑云, 梁子荣. 以人为本, 科技创新, 建设安全高效矿井——访西山煤电股份有限公司镇城底矿矿长范新民[J]. 中国煤炭, 2010, (2): 115—117.
- KANG Shu-yun, LIANG Zi-tong. People-oriented, technological innovation, construct mine with safety and high efficiency—An interview with Fan Xin-min, the Zhenchengdi mine's leader of Xishan Coal and Electricity Power Co., Ltd.[J]. **China Coal**, 2010, (2): 115—117.