

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.03.18

旺格维利采煤法采空区煤柱-顶板受力 模型与数值模拟

杨 逾, 王国鑫

(辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 本文以榆神矿区常家梁煤矿为研究背景,对旺格维利采煤法的煤柱-顶板受力机理进行研究。通过建立力学结构模型和数值模拟的方式,分析顶板和煤柱在简化的力学模型中的内力情况和在数值模拟中的应力分布和塑性区分布情况。煤柱-顶板力学模型计算得出顶板的弯矩图、剪力图和煤柱的应力,假设煤柱受力均匀,煤柱承受的平均应力为8.7 MPa;数值模拟结果得出应力和塑性区分布图,可以看出此种开采方案下,刀间煤柱进入塑性区,失去承载能力,巷间煤柱处于稳定状态,顶板荷载主要由巷间煤柱承担;数值模拟结果验证了力学模型的合理性,并且通过对比分析得出理论计算的巷间煤柱应力比模拟结果大,这是因为理论模型将刀间煤柱的约束作用和部分承载能力进行了简化。

关键词: 旺格维利采煤法;力学模型;煤柱稳定性;数值模拟;竖向应力;塑性区

中图分类号: TD32

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)03-0117-07

Mechanics analysis and numerical simulation of coal pillar and stiff roof in Wongawilli goaf

YANG Yu, WANG Guoxin

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical
University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: This paper mainly studies the stress mechanism of coal pillar and stiff roof by Wongawilli mining method, in the background of Yushen mining area Changjialiang coal mine. Through establishing the model of mechanical structure and the numerical simulation, we analyze the internal force of roof and coal pillar in simplified mechanical model, study stress distribution and plastic zone distribution in numerical simulation. The mechanical model of coal pillar and stiff roof can conclude the bending moment diagram, shear diagram and the stress of coal pillar, assuming that the coal pillar suffered uniform power, the average stress of coal pillar is 8.7 MPa. The numerical simulation shows the stress and plastic zone distribution, we can conclude that in this mining method, coal pillars between the cuttings will turn into plasticity and lose the bearing capacity, the coal pillars along the tunnel is in a stable state, the loading of roof is mainly borne by the coal pillars along the tunnel; The numerical simulation results prove the validity of the mechanical model. The comparison between theoretical calculation and numerical simulation supports that the coal pillars along the tunnel stress given by theoretical calculation is larger than the numerical simulation, because in theoretical calculation, the constraint function and load capacity of the coal pillar between the cuttings are simplified.

收稿日期: 2016-09-20; 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274111)

第一作者: 杨 逾(1973-),男,甘肃张掖人,双博士后,教授,博士生导师,主要从事采矿损害与控制工程工作。E-mail:975033193@qq.com

Keywords: Wongawilli mining method; mechanical model; stability of coal pillar; numerical simulation; vertical stress; plastic zone

0 引言

榆神矿区位于我国陕北榆林市境内,本矿区的煤层赋存特征为煤层埋深浅、地表松散层厚、基岩薄,旺格维利采煤法在此矿区得到广泛应用。旺格维利采煤法具有设备投资少、出煤快、设备运转灵活、工作面搬迁灵活、全员效率较高等优势。并且对于不规则块段、煤柱回收、残采区、“三下”压煤等有很大的优势^[1]。

近年来,由于旺格维利采煤法的广泛应用,我国很多学者对于旺格维利采煤法开采工作面进行了一系列的研究。郭文兵等^[2-3]以数值模拟的方式研究了条带式旺格维利采煤法的位移、应力和塑性区分布特征。周爱平^[4]以神东煤炭公司大海则煤矿,分析了顶板弯曲变形对巷道的影 响,优化了巷道断面的支护参数。李瑞群等^[5-6]建立了煤柱-顶板力学结构模型,得出了煤柱应力分布规律。关欣^[7]以王台铺煤矿为例,对旺格维利充填开采进行模拟研究,得出了煤柱应力变化规律及超前支撑应力分布规律。国内已经有学者对旺格维利采煤法煤柱-顶板力学机理进行相关研究,但是由于旺格维利采煤法在实际开采中形式多样,留设煤柱较多,因此旺格维利采煤法开采条件下煤柱的应力分布特点及其工作机理仍然没有形成体系。本文在这些研究的基础上,以常家梁煤矿 3 号煤层开采为工程背景,在前期现场调查、现场原岩应力测定、室内力学试验及岩体力学参数工程处理的研究基础上,通过建立力学模型和 Flac3D 数值模拟技术,研究旺格维利采煤法开采条件下,采空区的应力和塑性区分布特点并进行力学分析,研究结果对指导工程实践和确定刀间煤柱和巷间煤柱的工作机理提供依据。

1 工程概况

1.1 工作面概况

常家梁煤矿 3 号煤层工作面平均埋深 120 m,底板标高 1 015 m 左右,厚度稳定在 4 m 左右,属厚煤层,煤层倾角小于 1°,为近水平煤层。本煤矿覆岩平均厚度 102.83 m,表土层平均厚度 37.93 m,直接顶为细粒砂岩,厚度为 3.28 m,基本顶为中粒砂岩,厚度为 8.26 m,直接底为粉砂岩,厚度为 11.38 m。

1.2 岩层参数

根据实验室测得各岩石的物理力学指标,得出本煤矿各岩层的物理力学参数。各岩层的物理力学性质见表 1。

表 1 煤岩层的力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock strata

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	单轴抗拉强度/MPa	密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
表土层	2	1.5	0.05	32	0	1.54
粉砂岩	3.8	2.6	2.34	39.12	1.11	2.04
细粒砂岩	4.9	3.4	2.56	40.92	1.31	2.02
粗粒砂岩	5.5	2.7	2.12	40.11	0.59	1.98
砂质泥岩	1.6	1.1	0.73	38.60	0.58	2.03
中粒砂岩	5.1	3.4	2.64	41.47	1.16	2.70
煤	1.0	0.7	0.73	28.81	0.58	1.12

1.3 旺格维利开采方案

该煤层的巷道布置采用的双翼对拉旺格维利布置方式,即在两条主巷两边开采支巷,支巷宽度 5.2 m,支巷长度 58.5 m,在支巷掘进到位后进行留煤柱的后退式回采,在两侧 45°斜切进刀,宽为 4.5 m,长为 11 m,每刀之间留设 3 m 宽的刀间煤柱,每个支巷单元留设最窄处为 3 m 宽的巷间煤柱,在支巷回采完以后,对主巷煤柱进行回采。该采煤方式根据常家梁煤矿周边煤矿的开采经验,当煤矿采出率在 50% 以下时,地表移动变形不会对上部建筑物造成影响,因此本煤矿在实际开采过程中的采出率在 45% 左右。图 1 为旺格维利开采工作面布置。

2 旺格维利采煤法留设煤柱理论计算

2.1 力学模型假设

根据煤柱的分布情况(图 2a),在形成采空区以后,随着顶板的下沉,刀间煤柱承载的压力将逐渐增大,使刀间煤柱进入塑性区,失去承载能力,而对顶板起支撑作用的是巷间煤柱。因此在建立力学模型时,不考虑刀间煤柱的承载能力,无论是 1-1 截面还是 2-2 截面(图 2a)均仅考虑巷间煤柱的核心区域的支撑能力,简化后的煤柱-顶板模型见图 2b。采空区顶板视为一种梁结构^[8-9],巷间煤柱核心区域宽度较窄,可视为一系列可动铰支座来支撑上覆岩梁,煤柱承受的作用力为上覆岩层对岩梁产生的均布荷载,即整个采空区形成一种沿走向方向的连续梁结构模型。简化的力学模型见图 2 c。

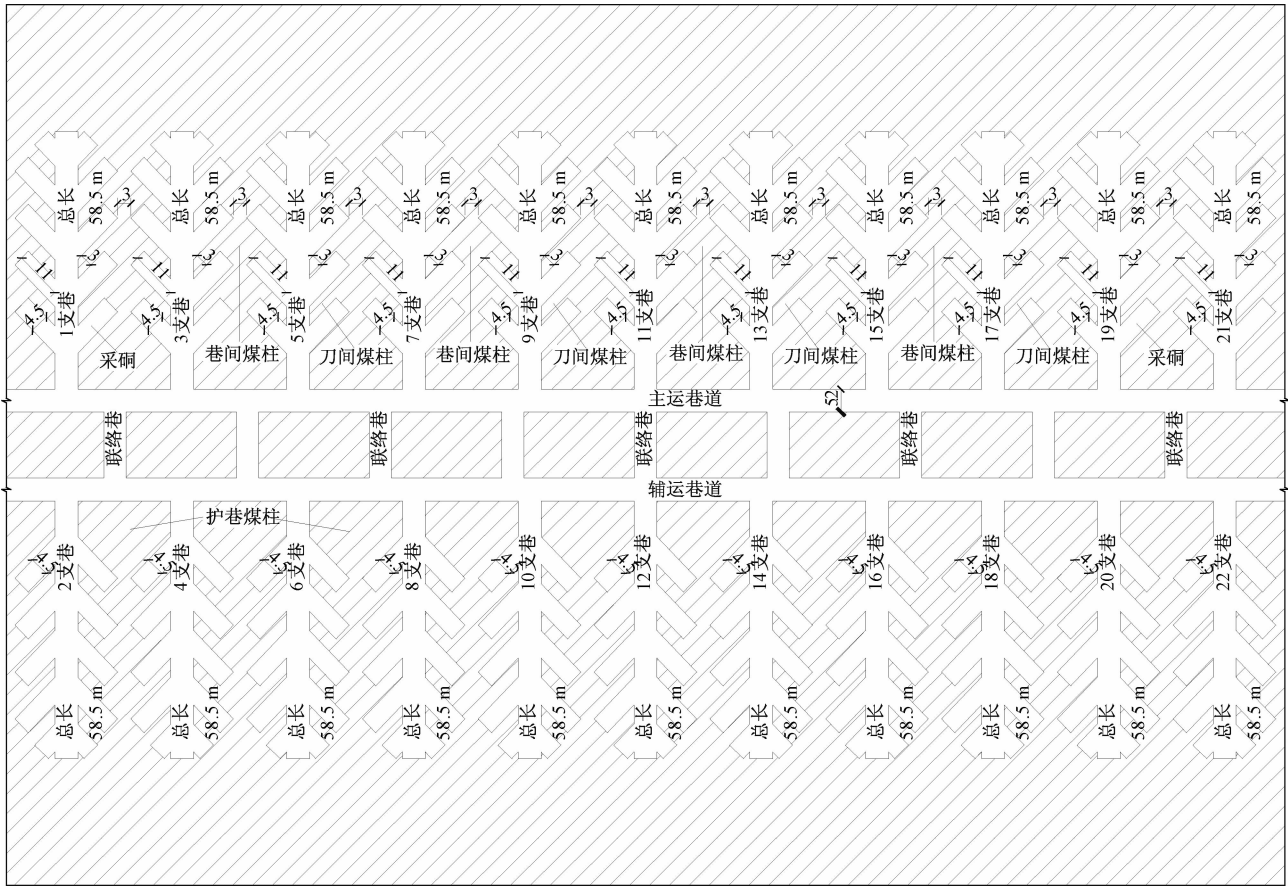
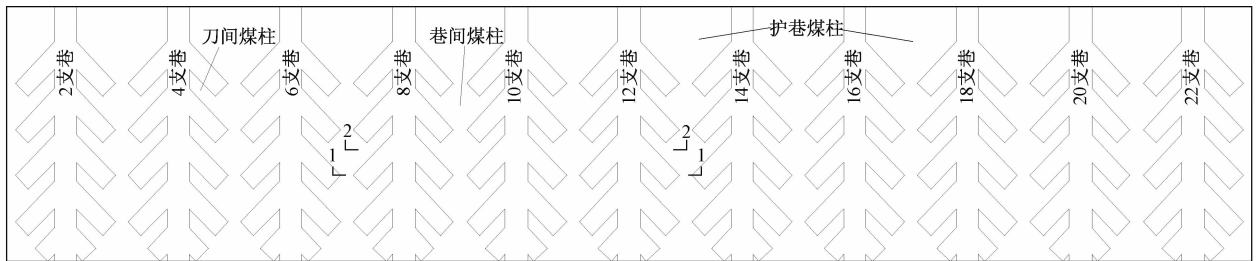
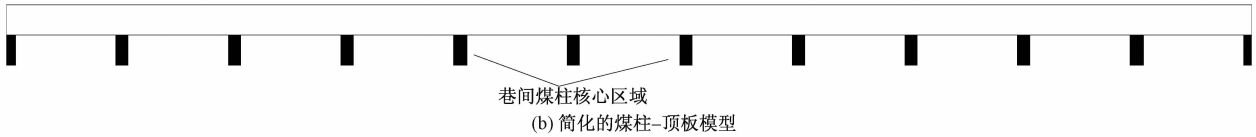


图 1 旺格维利工作面布置示意图

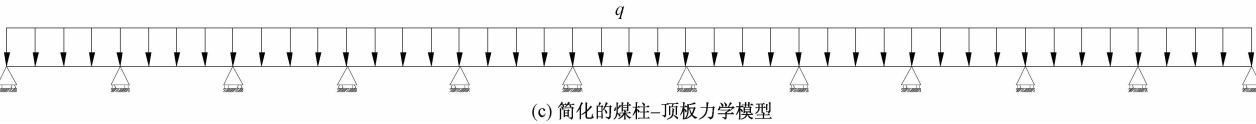
Fig. 1 Schematic diagram of wongawilli working surface



(a) 实际煤柱-采空区分布



(b) 简化的煤柱-顶板模型



(c) 简化的煤柱-顶板力学模型

图 2 煤柱-顶板简化的力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model of coal pillar and roof

2.2 顶板荷载计算

顶板荷载的计算采用组合岩梁模型^[10],将直接顶作为关键层,取岩梁的宽度 $b = 1 \text{ m}$,由于岩层的曲率半径较大,且岩体层面的抗剪强度较小,因此,岩层中每层的曲率大致相同,从而导致各岩层的弯矩重新分配,因此得出 n 层岩层对第一层所形成的荷载 $(q_n)_1$ 。

$$(q_n)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \cdots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \cdots + E_n h_n^3} \quad (1)$$

式中: E —岩层的弹性模量/Pa;

h —岩层的厚度/m;

γ —岩层的重度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$);

q —作用在岩层上的荷载/Pa。

通过对本煤矿上覆岩层荷载的计算,将煤层以上的 5 层不同的岩组作为一个组合岩梁,第 6 层为厚度较大岩性较好的粉砂岩,可以作为关键层支撑第 6 层以上的上覆岩层所产生的荷载。因此计算得出岩梁上的荷载 $(q_5)_1 = 1.7 \text{ MPa}$ 。

2.3 顶板煤柱应力计算

在图 2 所示的力学模型中,在上覆岩层荷载 q 的作用下,通过结构力学中连续梁的求解计算,得出顶板的弯矩图、剪力图和煤柱承担的竖向力(图 3)。

由计算结果可知,煤层顶板的最大弯矩为 $108\,796 \text{ kN} \cdot \text{m}$,发生在边缘煤柱支撑处的顶板上,中间部分煤柱支撑处的顶板上弯矩在 $85\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 左右,并且每跨煤柱支撑处顶板的弯矩要大于每跨跨中的弯矩,两者差别在两倍左右。从剪力图中可以看出,顶板剪力除了边缘煤柱支撑处剪力较大外,中间部分每跨煤柱的最大剪力在 $19\,500 \text{ kN}$ 左右。

通过剪力图计算出支座处的竖向力在 $39\,300 \text{ kN}$ 左右,由于巷间煤柱宽度不均,巷间煤柱最宽处为 9 m ,最窄处为 3 m ,考虑到煤柱可能发生的片帮及增加一定的安全系数,取巷间煤柱的平均宽度为 4.5 m 时,假设煤柱受力均匀,煤柱承受的平均应力为 8.7 MPa 。

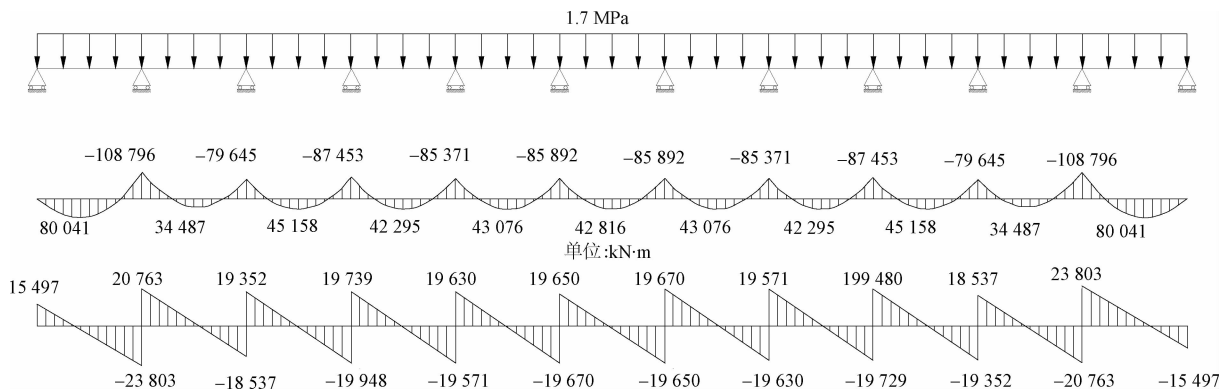


图 3 力学模型的弯矩图和剪力图(单位:kN)

Fig. 3 Bending moment diagram and shear diagram of mechanical model

3 数值模型的建立

本次数值模拟按照图 2 所示的开采方案进行,由于开采方案中模型较复杂,因此在 Ansys 中进行建模,采用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟计算。FLAC^{3D} 软件对采矿工程中的弹塑性变形问题具有良好的处理能力,而本煤矿的旺格维利采煤法,采用的是煤柱支撑法管理顶板,当煤柱在合理宽度时,大部分煤柱仍然处于弹塑性状态,因此本文选择采用 FLAC^{3D} 进行数值模拟。

本次模拟的模型尺寸为长 289.2 m ,宽 200 m ,高 140.76 m ,模型的建立及网格划分均在 Ansys 中进行,然后导入 Flac3D 中进行后处理运算。网格

划分采用 Ansys 中映射网格划分工具,限制单元尺寸小于 4,为更好的显示煤柱应力分布特征,将直接顶、煤层和直接底网格进行加密,限制单元尺寸小于 1.5,模型网格总数为 638 020 个,结点总数为 726 350 个。模型底边界垂直固定,四周边界水平方向固定,上边界为自由边界。模型直接施加重力荷载,产生初始应力场,然后采用动态模拟过程,按照实际开采状态进行模拟开挖,充分考虑煤柱受支巷开挖顺序的影响。煤层开挖采用空模型,沿走向方向设置两条主巷道,两条主巷两边各设置 11 条支巷单元。动态模拟计算的过程为:采用重力场施加初始应力,开挖主巷道,按实际顺序开挖支巷 1~支巷 22。模型见图 4。

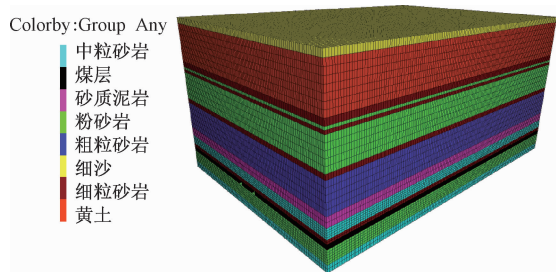


图4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

4 数值模拟结果分析

4.1 应力场分析

图5为整个煤层工作面开采后的应力分布图,从图中可知,煤柱最大应力为7 MPa,分布在刀间煤柱与巷间煤柱交界处;刀间煤柱的竖向应力只有3~4 MPa,因为刀间煤柱已经失去部分承载能力,应力发生重分布,由刀间煤柱逐渐向巷间煤柱转移。巷间煤柱整体应力都在6~7 MPa,可以看出支撑顶板起主要作用的是巷间煤柱,这与理论力学模型中的假设是一致的。

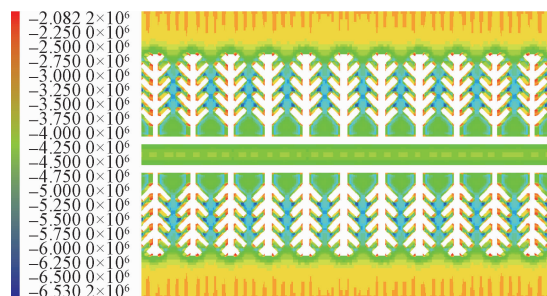


图5 留设煤柱应力分布图

Fig. 5 Stress distribution of coal pillar

为更好的研究煤柱应力的分布特征,根据开采工作面的对称性和煤柱分布特点,选取截面1-1和截面2-2(图2a中截面位置)作为煤柱-顶板竖向应力分布的典型截面进行分析,截面1-1见图6,截面2-2见图7。从图6中可以看出1-1截面处巷间煤柱最窄,和刀间煤柱的宽度相同,但刀间煤柱在开采完成后,失去部分承载能力,应力转移到了巷间煤柱,虽然1-1截面处的巷间煤柱较窄,但是由于两侧受到较宽刀间煤柱的约束,仍然可以作为支撑顶板的主要受力结构。从图7中可以看出,2-2截面巷间煤柱的应力在边缘处最小为3.5 MPa,距边缘约1/3处应力最大为6.7 MPa,煤柱中间应力有所下降为6 MPa,因此,从外到

内,煤柱的应力出现先增加后减小的“马鞍形”^[11]分布,说明煤柱的中间并没有达到峰值,煤柱能承受上覆岩层的重量而不发生破坏,因此该煤柱处于稳定状态^[12]。

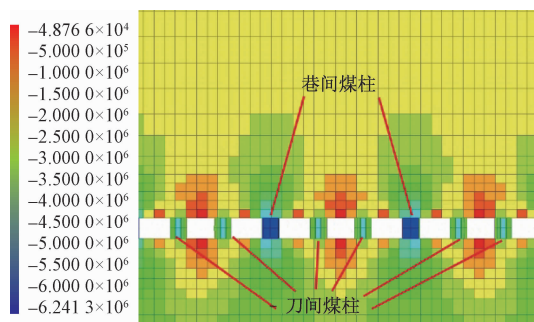


图6 1-1截面处煤柱和顶板应力分布

Fig. 6 Stress distribution of coal pillar and roof in 1-1 section

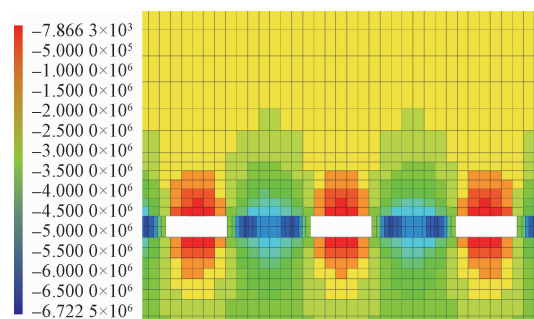


图7 2-2截面处煤柱顶板应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of coal pillar roof at 2-2 section

数值模拟得到的刀间煤柱的最大应力比理论计算得到刀间煤柱的平均应力小,因为在理论计算时,假设条件将刀间煤柱的约束作用和部分承载能力进行简化,应力全部由巷间煤柱核心区域承受。

4.2 塑性区分析

图8为煤层开采完成后塑性区的分布情况,由图可知,刀间煤柱全部进入塑性区,巷间煤柱的中间

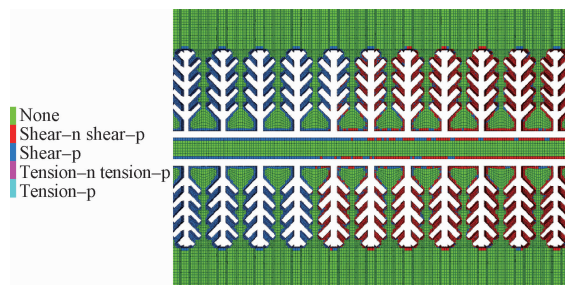


图8 煤柱塑性区分布图

Fig. 8 Plastic zone distribution of coal pillar

区域仍然处于弹性状态,巷间煤柱在较宽煤柱的边缘进入塑性区,这可以说明刀间煤柱虽然已经进入塑性区,但是刀间煤柱对巷间煤柱起到了保护作用,尤其是巷间煤柱较窄区域。这同样可以证明巷间煤柱的核心区域作为主要受力结构承受上部荷载^[13],进一步验证了将煤柱核心区域简化为支座的合理性。

5 结论

(1)建立旺格维利采煤法中煤柱-顶板力学结构模型,得出每跨煤柱支撑处顶板的弯矩要大于每跨跨中的弯矩,两者差别在两倍左右,每跨的最大剪力相差不大,计算得出煤柱平均应力约为 8.7 MPa。

(2)刀间煤柱已经失去部分承载能力,应力发生重分布,由刀间煤柱逐渐向巷间煤柱转移,采空区应力主要集中在巷间煤柱,巷间煤柱组成煤柱群承受上覆岩层的荷载。

(3)刀间煤柱全部进入塑性区,巷间煤柱边缘部分进入塑性区,刀间煤柱虽然进入塑性区,失去部分承载能力,但是可以对巷间煤柱的弹性核区起到约束作用,发挥巷间煤柱的承载能力。

(4)通过数值模拟中应力分析和塑性区分析得出,理论计算的巷间煤柱应力比模拟结果大,并进一步验证了力学模型中假设刀间煤柱没有支撑能力,顶板荷载主要由巷间煤柱来支撑的合理性。

参考文献:

- [1] Fahad Gahtani. Diagenetic controls on evolution of porosity in the Permian Illawarra Coal Measures, Southern Sydney Basin, Australia [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12): 5473–5494.
- [2] 郭文兵,侯泉林,邹友峰. 建(构)筑物下条带式旺格维利采煤技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 4(4): 8–12.
GUO Wenbing, HOU Quanlin, ZOU Youfeng. Study on strip type wongawilli coal mining technology under buildings [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 4(4): 8–12.
- [3] GUO Wenbing, XU Feiya. Numerical simulation of overburden and surface movements for Wongawilli strip pillar mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(1): 71–76.
- [4] 周爱平. 旺格维利采煤法顶板控制技术[J]. *煤炭科学技术*, 2006, 7(7): 46–49.

- ZHOU Aiping. Roof control technology for Wongawilli coal mining method [J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 7(7): 46–49.
- [5] 李瑞群,张镇. 旺格维利采煤法煤柱-顶板力学结构研究[J]. *煤矿开采*, 2010, 6(3): 22–26.
LI Ruiqun, ZHANG Zhen. Pillar-roof mechanics structure of wongawilli mining method [J]. *Coal mining Technology*, 2010, 6(3): 22–26.
- [6] WANG Shuili, HAO Shengpeng. Numerical investigation of coal pillar failure under simultaneous static and dynamic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 84: 59–68.
- [7] 关欣. 旺格维利充填开采工作面应力分布模拟研究[J]. *能源与节能*, 2015, 9(9): 10–11.
GUAN Xin. Simulation studies on stress distribution of Wongawilli filling mining working face [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2015, 9(9): 10–11.
- [8] 李祥,李成伟,张舜尧. 构造介质对采煤沉陷影响的数值模拟分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(3): 91–94.
LI Xiang, LI Chengwei, ZHANG Shunyao. Analysis of medium hardness on mining subsidence based on numerical simulation [J]. *Journal of Geological Hazards and Prevention of China*, 2015, 26(3): 91–94.
- [9] 李瑞群. 旺格维利采煤法煤柱尺寸优化研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2008.
LI Ruiqun. Optimization study of Pillars in Wangeving mining method [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2008.
- [10] 周小科. 基于蠕变理论的房柱式开采留设煤柱长期稳定性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
ZHOU Xiaoke. Study on the long-term pillar stability of room and pillar based on creep theory [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.
- [11] 杨永杰,姜福兴,宁建国,等. 综放锚网支护沿空顺槽合理小煤柱尺寸确定方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(4): 81–84+97.
YANG Yongjie, JIANG Fuxing, NING Jianguo, et al. Method of determining rational width of small coal pillar protecting roadways driving along next goaf supported by bolting and meshing of fully mechanized sub-level face [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2001, 12(4): 81–84+97.
- [12] 柏建彪,侯朝炯,黄汉富. 沿空掘巷窄煤柱稳定性

- 数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 10 (20): 3475 - 3479.
- BAI Jianbiao, HOU Chaojiang, HUANG Hanfu. Numerical simulation study on stability of narrow coal pillar of roadway driving along goaf [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 10 (20): 3475 - 3479.
- [13] 朱志洁, 张宏伟, 陈莹, 等. 综放面合理护巷煤柱宽度确定与回采巷道支护方案设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23 (4): 69 - 75.
- ZHU Zhijie, ZHANG Hongwei, CHEN Ying, et al. Confirmation of reasonable chain pillar width and supporting scheme design of mining gateway in fully mechanized caving face [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23 (4): 69 - 75.
-
- (上接第 100 页)
- [15] Cruden. D. M, Varnes D. J. Landslide types and processes [A]//. Landslides: Investigation and Mitigation [C]. Sp. Pep. 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D. C. 1996: 36 - 75.
- [16] 李霍. 抗滑桩健康诊断指标体系及结构安全评估系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- LI Huo. The study of health diagnostic index system and evaluation system of structural safety with slide-resisitant piles [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [17] 王震, 毛朝辉, 赵春风. 采用光顺样条反算基坑围护结构弯矩[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3 (3): 434 - 438.
- WANG Zhen, MAO Zhaohui, ZHAO Chunfeng. The bending moment analysis of bracing structure of foundation pit with smoothing spline [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (3): 434 - 438.
- [18] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 基于测斜数据的抗滑桩工作状态评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增2): 3591 - 3594.
- SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Evaluation of state of anti-slide piles based on inclinometer data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S2): 3591 - 3594.
- [19] 夏元友, 朱瑞赓. 不稳定边坡治理方案的多层次模糊综合群决策[J]. 自然灾害学报, 1998, 7 (1): 60 - 65.
- XIA Yuanyou, ZHU Ruigeng. Multiperson multilayer fuzzy comprehensive decision making for control plans of unstable slopes [J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7 (1): 60 - 65.
- [20] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏, 等. 滑坡防治工程效果的模糊综合后评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 10 (1): 1224 - 1229.
- ZHANG Mingxin, YIN Zongze, WU Jimin, et al. Post-fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 10 (1): 1224 - 1229.