

The Study of Reasonable Section Coal Pillar Size of Men Keqing Mechanized Longwall Mining Face

Zhenxiong Yan¹, Lang Bai¹, Hongjiao Li², Jiayi Ji¹, Hongwu Zhang¹

¹Resource and Safety Engineering School, China Mining University, Beijing

²Mining Oils Branch Institute, Coal Science and Technology Research Institute Co. Ltd., Beijing

Email: 373738314@qq.com

Received: Mar. 15th, 2015; accepted: Mar. 26th, 2015; published: Apr. 2nd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the shallow coal resources exploitation exhausts, coal mining gradually changes into the deep mining. In view of the principle of safe and efficient production and resource recovery, the reasonable width of section coal pillar has become more important. On the engineering background of coal pillars of 31201 working face of Menkeqing Mine, by using load estimation method and plastic theory, the paper calculates the pillar width and obtains that the coal pillar widths are 36.03 m and 18.59. By using the method of theoretical calculation and numerical simulation, the plastic zones of roadway affected by the one-time mining and its abutment pressure distribution in the condition of 15 m, 25 m, 35 m and 40 m coal pillar widths are studied. The results show that the roadway has minimal damage when coal pillar widths are 35 m and 40 m. The reasonable size of the section coal pillar should be 35 - 40 m.

Keywords

Section Coal Pillar, Numerical Simulation, The Plastic Zone

门克庆矿综采工作面区段煤柱合理尺寸研究

闫振雄¹, 白浪¹, 李洪蛟², 吉家驿¹, 张红武¹

¹中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京

²煤炭科学技术研究院有限公司，矿用油品分院，北京
Email: 373738314@qq.com

收稿日期：2015年3月15日；录用日期：2015年3月26日；发布日期：2015年4月2日

摘要

随着浅部煤炭资源的日益枯竭，开采活动逐渐转入深部，鉴于安全高效生产和资源回收的原则，区段煤柱留设的合理宽度变得尤为重要。本文以门克庆矿31201工作面区段煤柱留设为工程背景，利用载荷估算法和塑性理论进行了煤柱宽度的初步计算，分别得出煤柱宽度为36.03 m和18.59 m。并利用数值模拟计算的方法分别对15 m、25 m、35 m、40 m煤柱宽度条件下，回采巷道在一次采动影响下的塑性区和支承压力分布情况进行了研究，结果显示，煤柱宽度为35 m、40 m时，巷道的塑性区破坏最小，综合分析认为，区段煤柱的合理尺寸应为35~40 m。

关键词

区段煤柱，数值模拟，塑性区

1. 引言

关于区段煤柱尺寸留设理论，国内外学者开展了大量的研究工作，但对合理煤柱宽度的设计至今没有统一认识[1]。回采巷道的护巷煤柱用于隔离采空区和维护巷道，其形状一般为矩形或正方形。由于煤柱是起支撑作用的，所以煤柱的破坏对顶板岩层的控制有很大影响。研究表明，煤柱尺寸的大小影响回采巷道受动压的破坏程度，是影响回采巷道稳定性的主要因素之一[2] [3]。

谢和平等人[4] [5]认为煤柱的破坏失稳是一个非线性的过程；侯朝炯等人[6] [7]发展并完善了 K.A.阿尔拉麦夫和 E.C.科诺年科提出的极限平衡理论，并提出用沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理指导综放沿空掘巷的实践及用弹塑性力学、数值模拟方法研究煤柱的尺寸留设。本文以门克庆矿 31201 工作面开采为工程背景，采用理论计算和数值模拟分析的方法对工作面区段煤柱留设的合理尺寸进行了研究，本研究成果对保证安全生产和提高资源回收率具有重要意义。

2. 工程背景

门克庆井田属高原沙漠地貌特征，地表全部被第四系风积沙所覆盖，多为新月形或波状沙丘，没有基岩出露。井田内植被稀疏，为半荒漠地区。井田内没有常年地表径流，雨水多通过风积沙渗入地下。门克庆井田隶属于鄂尔多斯煤田，其构造形态总体为一向西倾斜的单斜构造，倾向 270°左右，地层倾角 1°~3°。井田含煤地层为侏罗系中统延安组(J_{2y})，其沉积基底为三叠系上统延长组(T_{3y})。井田内含煤 9~24 层，一般含煤 16 层。层位相对稳定、可对比的可采煤层有 9 层，即 2-1、2-2 中、3-1、4-1、4-2 中、5-1、5-2、6-2 上、6-2 中煤层。从各可采煤层底板等高线上看，等高线形态在浅部(井田的东部)有一定的变化，但变化不大，沿煤层走向方向大致呈“S”形，但起伏角很小。在井田东部发育的次一级的波状起伏，其波峰、波谷宽缓。井田内未发现断层和陷落柱构造，亦无岩浆岩侵入，井田构造属于简单类型。其中 3-1 煤层为首采煤层，煤层埋深 720 m，工作面长度 260 m，推进长度 5000 m。3#煤层结构简单，一般不含夹矸，局部含 1~2 层夹矸。层位稳定，厚度在井田内变化不大。3-1 煤二盘区煤层可采厚度为 4.4~5.5 m，平均 4.57 m。煤层倾角 0°~3°；顶板岩性以中粒砂岩为主，其次为砂质泥岩、粉砂岩；底板岩性多为中砂

岩及粉砂岩。工作面采用双巷布置，如图 1 所示。

3. 煤柱宽度的理论计算

3.1. 煤柱宽度的载荷估算法

目前国内外研究都认为，护巷煤柱的载荷，是由煤柱上覆岩层重量及煤柱一侧或两侧采空区暴露岩层转移到煤柱上的部分重量所引起的。

如图 2 所示，一单位长度煤柱上的总载荷 P 为：

$$P = \left[(B + D) \times H - \frac{D^2 \cot \delta}{4} \right] \gamma \quad (2-1)$$

式中： B ——煤柱宽度，m； D ——采空区宽度，270.8 m； H ——巷道埋深，720 m； δ ——采空区上覆岩层跨落角，45°； γ ——上覆岩层平均体积力，20 KN/m³。

确定了煤柱上覆载荷，则煤柱单位面积的平均载荷即平均应力：

$$\sigma = \frac{P}{B} = \frac{\left[(B + D) \times H - \frac{D^2 \cot \delta}{4} \right]}{B} \times \gamma \quad (2-2)$$

煤柱的宽度必须保证煤柱的极限载荷 σ 不超过它的极限强度 R ，极限强度 R 计算公式为：

$$R = R_c \left(0.778 + 0.222 \frac{B}{h} \right) \quad (2-3)$$

式中： R ——煤柱极限强度，MPa； R_c ——煤的单轴抗压强度，25 MPa； h ——为煤柱高度，4.5 m。当煤柱两侧工作面都采完后，煤柱的宽度 B 必须满足：

$$\frac{\gamma}{B} \left[(B + D) \times H - 0.25 D^2 \cot \delta \right] \leq R_c \left(0.778 + 0.222 \frac{B}{h} \right) \quad (2-4)$$

将各参数代入计算得， $B \geq 51.78$ m。

当煤柱两侧只采一个工作面时，煤柱的宽度 B 必须满足：

$$\frac{\gamma}{B} \left[\left(B + \frac{D}{2} \right) \times H - 0.125 D^2 \cot \delta \right] \leq R_c \left(0.778 + 0.222 \frac{B}{h} \right) \quad (2-5)$$

将各参数代入计算得， $B \geq 36.03$ m。

3.2. 煤柱宽度的塑性理论计算

护巷煤柱一侧为回采空间，一侧为采准巷道。回采空间和采准巷道在护巷煤柱两侧形成各自的塑性变形区，塑性区的宽度分别为 x_0 、 x_1 ，如图 3 所示。

护巷煤柱保持稳定的基本条件是：煤柱两侧产生塑性变形后，在煤柱中央存在一定宽度的弹性核，弹性核的宽度应不小于煤柱高度的 2 倍。因此，即使在煤柱内开掘一条非常窄的巷道，也会引起煤柱应力重新分布，造成有效支承面积减少，煤柱承载能力急剧下降。

目前，在护巷煤柱问题的研究中，煤柱保持稳定状态的宽度一般表示为：

$$B = x_0 + 2m + x_1 \quad (2-6)$$

式中： B ——煤柱宽度，m； x_0 ——为采空区在护巷煤柱一侧形成的塑性区宽度，m； m ——为采高，m； x_1 ——为巷道在护巷煤柱另一侧形成的塑性区宽度，m。

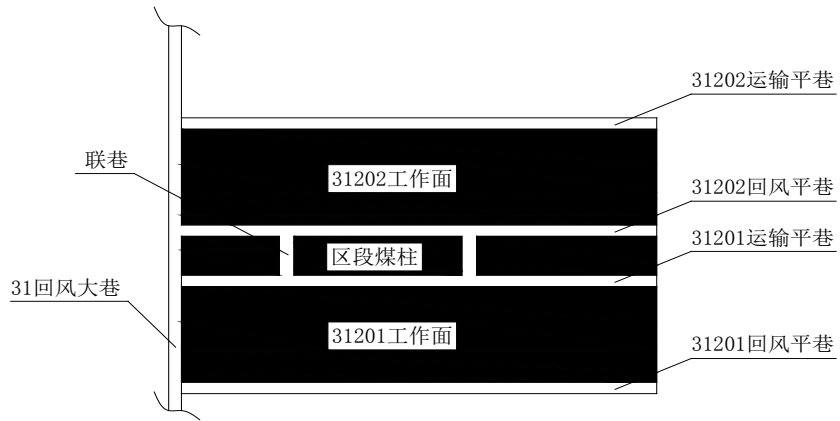


Figure 1. The assign diagrammatic sketch of 31201 working face
图 1. 31201 工作面布置示意图

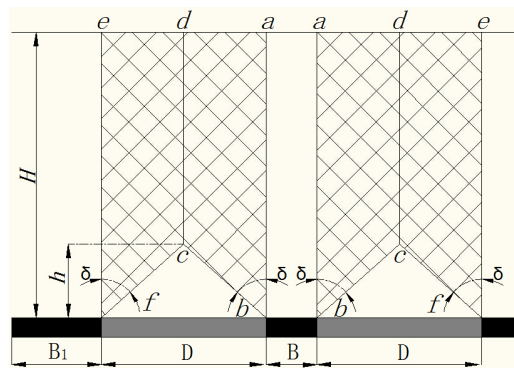


Figure 2. The count diagrammatic sketch of coal load
图 2. 计算煤层载荷示意图

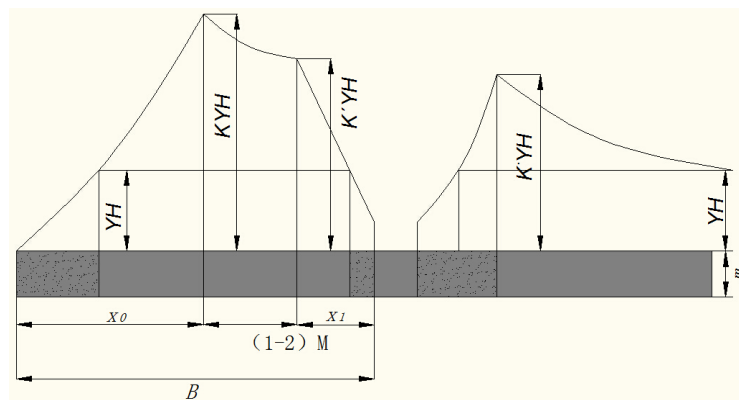


Figure 3. Elasticity and plasticity deformation of section coal pillar and stress distribution
图 3. 煤柱的弹塑性变形区及应力分布

根据岩体极限平衡理论，采空区形成的塑性区宽度，即支承压力峰值与煤体(煤柱)边缘之间的距离 x_0 的公式为：

$$x_0 = \frac{m}{2\xi f} \ln \frac{K\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{\xi (P_1 + C \operatorname{ctg} \varphi)} \quad (2-7)$$

式中： K 为应力集中系数，取值4.0； P_1 为支架对煤帮的阻力，取值0.1 MPa； m 为采高，取值4.5 m； C 为煤体的粘聚力，取值3.4 MPa； φ 为煤体的内摩擦角 34° ； f 为煤层与顶底板接触面的摩擦系数， $f = \tan \varphi / 4$ ； ξ 为三轴应力系数， $\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ 。

将各参数代入计算得 $x_0 = 4.69$ m。

同样地，运用极限平衡理论，巷道形成的塑性区宽度 x_1 为：

$$x_1 = \frac{M(1-3\alpha)}{2f(1+3\alpha)} \ln \frac{K\gamma H + C \cot \varphi}{\frac{(1+3\alpha)}{(1-3\alpha)} P + \frac{2k}{1-3\alpha} + C \cot \varphi} \quad (2-8)$$

式中， a 、 k 为广义Mises准则系数，其中 $a = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3+\sin^2 \varphi}}$ ， $k = \frac{\sqrt{3}C \cos \varphi}{\sqrt{3+\sin^2 \varphi}}$ 。

将各参数代入计算得 $x_1 = 4.9$ m。

将计算的 x_0 、 x_1 和采高 m 代入式 $B = x_0 + 2m + x_1$ ，计算得：

$$B = 4.69 + 9 + 4.9 = 18.59 \text{ m}$$

综上所述，载荷估算法计算得煤柱尺寸为36.03 m，塑性区计算得煤柱尺寸为18.59 m。

4. 煤柱宽度的数值模拟计算

4.1. 模型的建立

数值模拟研究选择在3-1煤31202回风顺槽。模型长330.8 m，宽10 m，高74.5 m。本数值模拟共设计4种方案，煤柱尺寸为15 m、25 m、35 m和40 m分别模拟一次采动条件下的巷道围岩塑性区范围和支承压力变化规律。煤层顶底板岩性及厚度如图4，各岩层力学参数见表1。

4.2. 塑性破坏范围变化规律

1) 15 m 煤柱时巷道围岩塑性破坏

图5为31201工作面回采后(即31202回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩塑性区分布图，31202回风顺槽煤柱帮塑性区范围为3.5 m，煤壁帮塑性区范围为3 m，顶板塑性区范围为3.5 m，靠近煤壁帮处顶板塑性破坏范围较大。

2) 25 m 煤柱时巷道围岩塑性破坏

图6为31201工作面回采后(即31202回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩塑性区分布图，31202回风顺槽煤柱帮塑性区范围为2.5 m，煤壁帮塑性区范围为3 m，顶板塑性区范围为3 m，靠近煤壁帮处顶板塑性破坏范围较大。

3) 35 m 煤柱时巷道围岩塑性破坏

图7为31201工作面回采后(即31202回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩塑性区分布图，31202回风顺槽煤柱帮塑性区范围为2 m，煤壁帮塑性区范围为2 m，顶板塑性区范围为2.5 m，靠近煤壁帮处顶板塑性破坏范围较大。

4) 40 m 煤柱时巷道围岩塑性破坏

图8为31201工作面回采后(即31202回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩塑性区分布图，31202回风顺槽煤柱帮塑性区范围为1.5 m，煤壁帮塑性区范围为2 m，顶板塑性区范围为2.5 m，靠近煤壁帮处顶板塑性破坏范围较大。

综上所述，不同煤柱宽度条件下，塑性破坏范围各不相同，分析表明，受一次采动后，随着煤柱宽

Table 1. The mechanics parameter of rock formation
表 1. 岩层力学参数

岩性	密度 Kg/m ³	单向抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/°
3-1 煤	1317	0.56	2.85	2.13	4.1	37
中粒砂岩	2510	3.74	9.67	6.65	7.5	42
粉砂岩	2500	6.79	15.2	10.1	9.5	38

岩石名称	岩性描述	柱状	层厚/m
粉砂岩	灰色，夹薄层砂质泥岩及细粒砂岩，见有水平层理，硬度弱。		6
中砂岩	灰白色，中粒，以石英长石为主，含少量云母及暗色矿物，钙质胶结，以块状层理为主，夹薄层砂质泥岩及粉砂岩。		22
3-1煤	煤黑色，坚硬		4.5
中砂岩	灰白色，中粒，以石英长石为主，含少量云母及暗色矿物，钙质胶结，以块状层理为主，夹薄层砂质泥岩及粉砂岩。		5.4
中砂岩	灰白色，中粒，以石英长石为主，含少量云母及暗色矿物，钙质胶结，以块状层理为主，夹薄层砂质泥岩及粉砂岩。		6
粉砂岩	灰色，夹多层、薄层灰白色细粒砂岩，细粒砂岩，与粉砂岩常成互层，见有滑面。		15

Figure 4. The lithologic diagrammatic sketch of coal roof and baseboard
图 4. 煤层顶底板岩性示意图

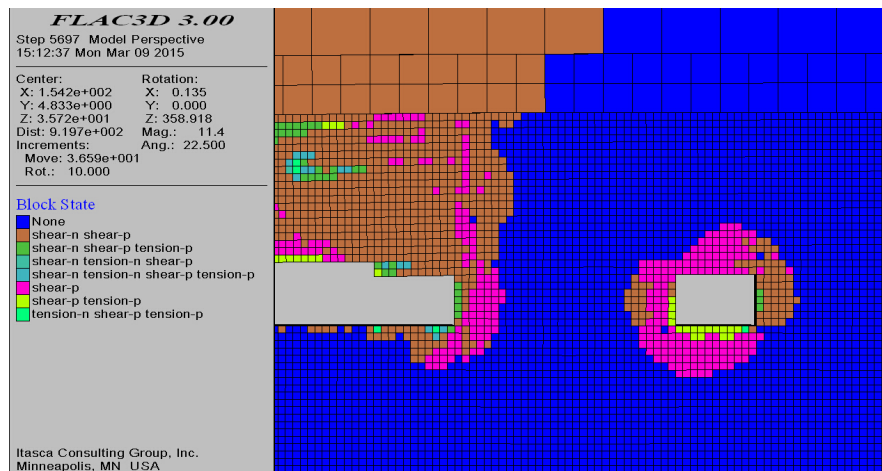


Figure 5. The tunnel wall rock plasticity deformation after first mining of pillar width of 15 m
图 5. 15 m 煤柱一次采动后巷道围岩塑性破坏图

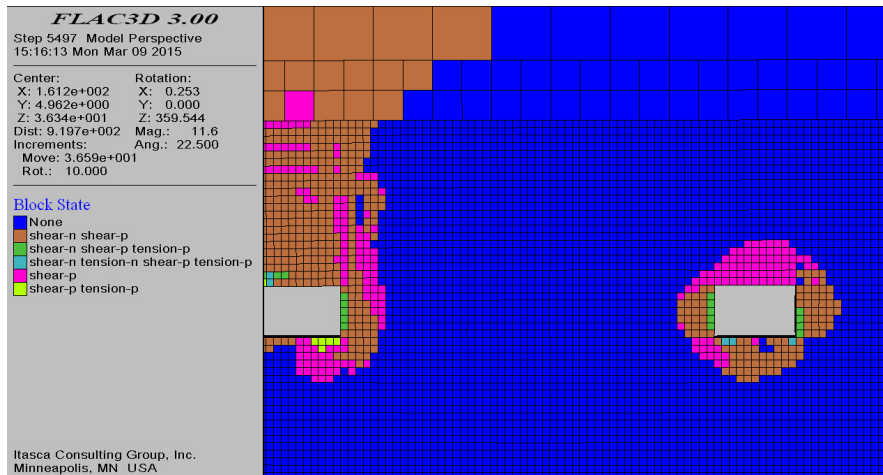


Figure 6. The tunnel wall rock plasticity deformation after first mining of pillar width of 25 m
图 6. 25 m 煤柱一次采动后巷道围岩塑性破坏图

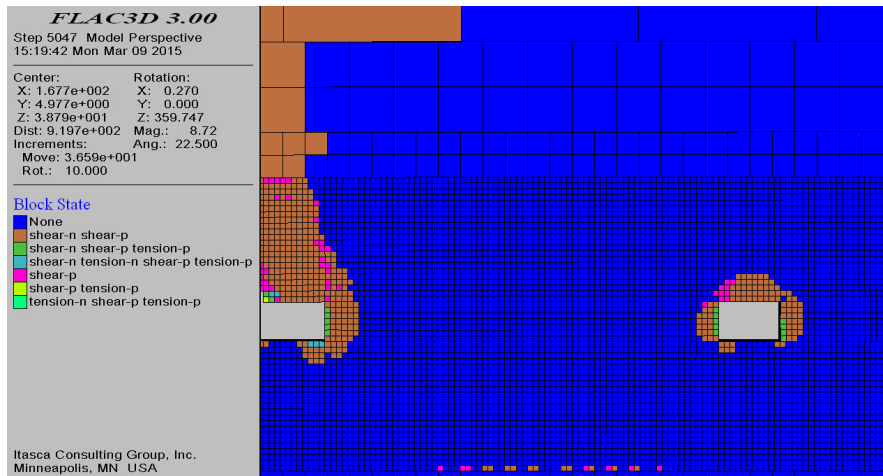


Figure 7. The tunnel wall rock plasticity deformation after first mining of pillar width of 35 m
图 7. 35 m 煤柱一次采动后巷道围岩塑性破坏图

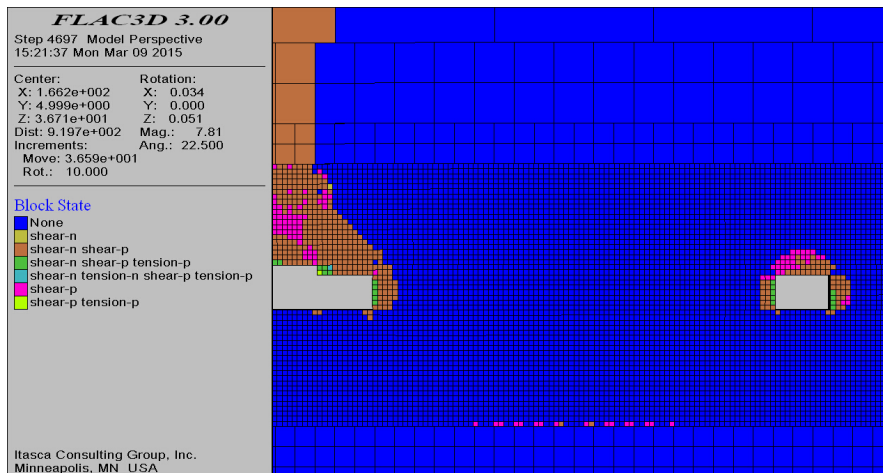


Figure 8. The tunnel wall rock plasticity deformation after first mining of pillar width of 40 m
图 8. 40 m 煤柱一次采动后巷道围岩塑性破坏图

度的减小, 31202 回风顺槽顶板和两帮的塑性破坏范围而增加。通过对比, 可以看出 15 m、25 m 煤柱围岩塑性破坏范围大, 35 m 煤柱与 40 m 煤柱围岩塑性破坏范围小, 并且相差不大。

4.3. 围岩应力变化规律

1) 15 m 煤柱应力变化规律

图 9 为 31201 工作面回采后(即 31202 回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩垂直应力分布图, 31202 回风顺槽煤柱帮 0~1 m 范围为破裂区, 1~4 m 范围为塑性区, 最大应力为 60 Mpa; 煤壁帮 0~0.5 m 范围为破裂区, 0.5~4 m 范围为塑性区, 最大应力为 50 Mpa。

2) 25 m 煤柱应力变化规律

图 10 为 31201 工作面回采后(即 31202 回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩垂直应力分布图, 31202 回风顺槽煤柱帮 0~0.5 m 范围为破裂区, 0.5~3.5 m 范围为塑性区, 最大应力为 50 Mpa; 煤壁帮 0~1 m 范围为破裂区, 1~3.5 m 范围为塑性区, 最大应力为 50 Mpa。

3) 35 m 煤柱应力变化规律

图 11 为 31201 工作面回采后(即 31202 回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩垂直应力分布图, 31202 回风顺槽煤柱帮无破裂区, 0~3 m 范围为塑性区, 最大应力为 30 Mpa; 煤壁帮 0~0.5 m 范围为破裂区, 0.5~3.5 m 范围为塑性区, 最大应力为 30 Mpa。

4) 40 m 煤柱应力变化规律

图 12 为 31201 工作面回采后(即 31202 回风顺槽受一次采动影响)巷道围岩垂直应力分布图, 31202 回风顺槽煤柱帮无破裂区, 0~3 m 范围为塑性区, 最大应力为 25 Mpa; 煤壁帮 0~0.5 m 范围为破裂区, 0.5~3 m 范围为塑性区, 最大应力为 25 Mpa。

综上所述, 不同煤柱宽度条件下, 通过围岩垂直应力可知围岩塑性破坏范围, 垂直应力随着煤柱尺寸的增大而减小, 通过对比确定 35~40 m 为合理煤柱尺寸。

5. 结论

论文通过载荷估算法和塑性理论计算得出煤柱宽度分别为 36.03 m 和 18.59 m。利用数值模拟计算得出 31202 回风平巷围岩塑性破坏范围及垂直应力随着煤柱尺寸的增大而减小, 煤柱宽度为 35~40 m 时,

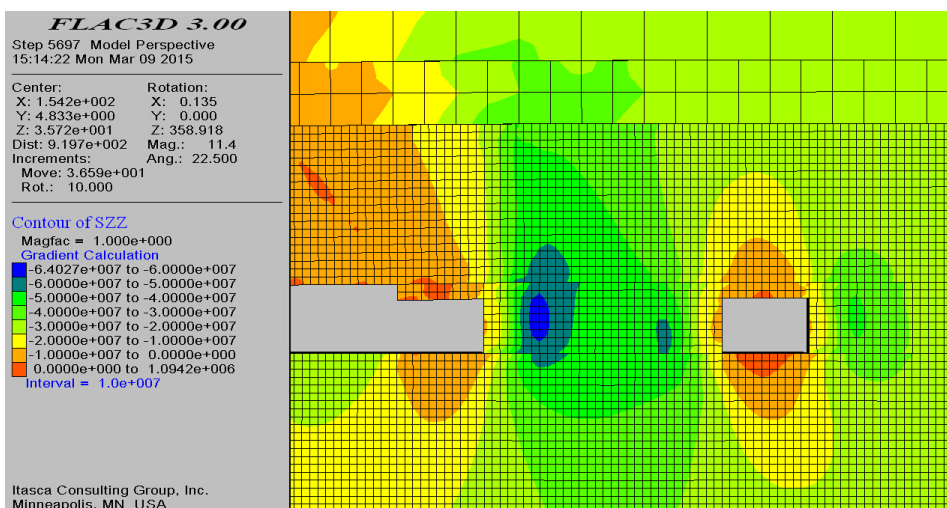


Figure 9. The tunnel vertical stress distribution after first mining of pillar width of 15 m

图 9. 15 m 煤柱一次采动后巷道垂直应力分布图

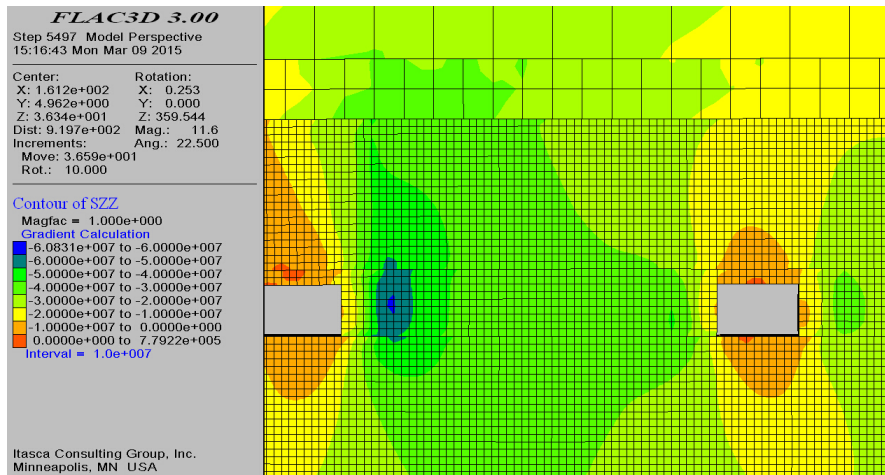


Figure 10. The tunnel vertical stress distribution after first mining of pillar width of 25 m
图 10. 25 m 煤柱一次采动后巷道垂直应力分布图

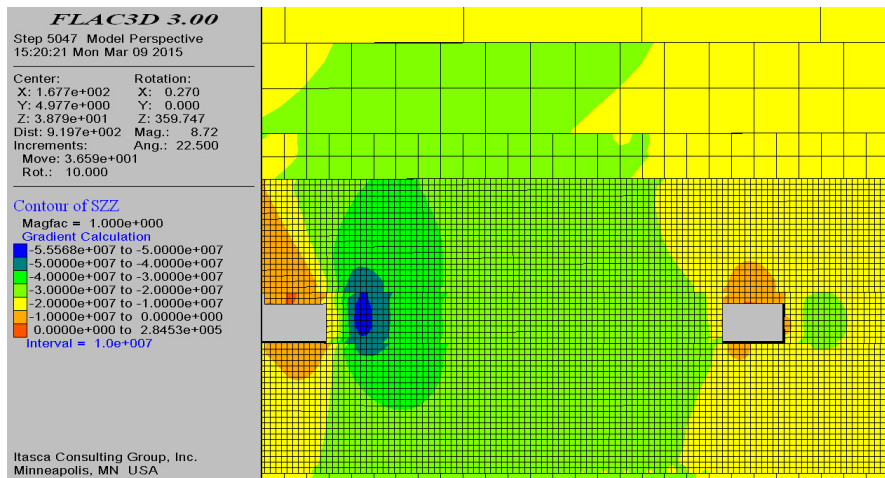


Figure 11. The tunnel vertical stress distribution after first mining of pillar width of 35 m
图 11. 35 m 煤柱一次采动后巷道垂直应力分布图

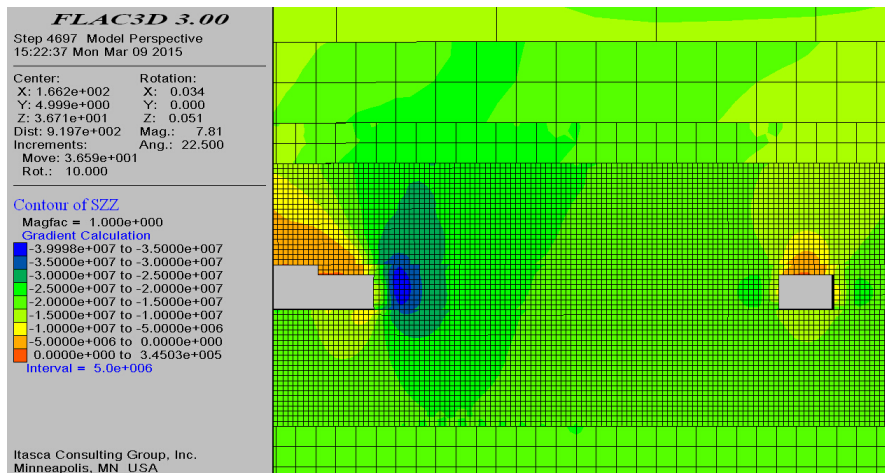


Figure 12. The tunnel vertical stress distribution after first mining of pillar width of 40 m
图 12. 40 m 煤柱一次采动后巷道垂直应力分布图

塑性区范围最小。综合理论计算和数值模拟结果，门克庆矿工作面区段煤柱的合理尺寸应为 35~40 m。

参考文献 (References)

- [1] 史元伟, 张声涛, 尹世奎等 (2009) 国内外煤矿深部开采岩层控制技术. 煤炭工业出版社, 北京.
- [2] 奚家米, 毛久海, 杨更社, 王进锋 (2008) 回采巷道合理煤柱宽度确定方法研究与应用. *采矿与安全工程学报*, **4**, 400-403.
- [3] 高长富 (2012) 论深井巷道保护煤柱留设宽度计算方法. *中国新技术新产品*, **10**, 161-162.
- [4] 赵国旭, 谢和平, 马伟民 (2004) 宽厚煤柱的稳定性研究. *辽宁工程技术大学学报*, **1**, 38-40.
- [5] 谢和平, 段法兵, 周宏伟, 赵国旭 (1998) 条带煤柱稳定性理论与分析方法研究进展. *中国矿业*, **5**, 37-41.
- [6] 柏建彪, 侯朝炯, 黄汉富 (2004) 沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究. *岩石力学与工程学报*, **20**, 3475-3479.
- [7] 王卫军, 侯朝炯 (2003) 回采巷道煤柱与底板稳定性分析. *岩土力学*, **1**, 75-78.