

开采技术与装备

文家坡煤矿区段煤柱合理留设宽度研究

王建辉, 武谋达

(彬长矿业集团 文家坡煤矿, 陕西 彬长 713504)

[摘 要] 根据文家坡矿埋深大、顺序接替的生产条件, 对区段煤柱留设尺寸进行了优化研究。通过实测分析工作面回采期间侧向支撑应力分布规律, 并结合 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟, 认为现行 44.5m 区段煤柱可以减小至 35m, 在保证安全生产的前提下提高了煤炭采出率。

[关键词] 区段煤柱; 留设宽度; 煤柱应力; 现场实测; 数值模拟; 理论分析

[中图分类号] TD822.3 [文献标识码] B [文章编号] 1006-6225 (2018) 04-0029-04

Study of Rational Layout Width of Sectional Coal Pillar of Wenjiapo Coal Mine

长期以来, 留设区段煤柱一直是我国煤矿井工开采中隔离采空区和维护下区段巷道的主要方式^[1]。从国内外研究发展趋势来看, 区段煤柱的留设方式主要有两种: 一种为宽煤柱方式, 把巷道布置在压力峰值以外, 从而减少对巷道的破坏; 另一种为窄煤柱或无煤柱护巷方式, 缩小煤柱尺寸, 减少资源浪费^[2]。两种护巷方式的研究与发展水平也各具特色, 在不同条件下都有较广泛的应用。但实际生产却一直被合适的煤柱宽度所困扰, 特别是现在提倡科学开采的情况下, 对煤柱宽度的确定提出了更高的要求。

1 工作面侧向应力实测分析

文家坡矿 41 盘区平均埋深 650~700m, 4102 工作面长 240m, 平均采高 3.5m, 4102 与 4103 工作面区段煤柱留设宽度 44.5m。利用钻孔应力计对 4102 工作面回采期间面间煤柱内的应力分布进行实测分析。由于煤柱尺寸大, 水平小直径深孔施工困难, 因此采取两侧对等布置方式, 即 4102 回风巷和 4103 运输巷两帮均布置测站, 钻孔深度分别为 3m, 6m, 9m, 12m, 15m, 18m 和 21m, 孔间距 1m, 如图 1 所示。

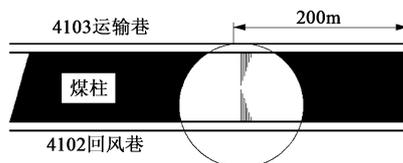


图 1 钻孔应力计监测测站示意

对实测数据进行增量处理并绘制曲线, 得到煤柱内侧向支撑压力分布情况, 如图 2 所示。

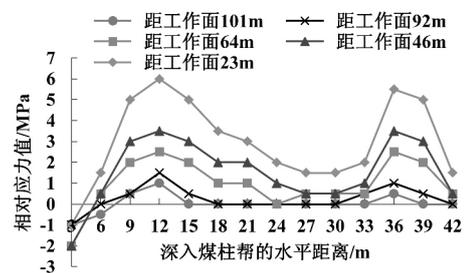


图 2 煤柱帮侧向支撑压力增量分布

由图 2 可以看出: 随着工作面推进, 在采动影响下区段煤柱内侧向支撑压力不断增加; 煤柱内的应力分布呈现“双峰一谷”形态, 双峰位置大约在煤柱内 12m 与 36m 处, 宽 24m, 峰值增量分别为 7MPa, 6.5MPa, 应力曲线“谷”的范围大致在 17~34m。在此 17m 宽度的范围内, 煤柱支撑压力处于平缓且较低的水平上, 应力值变化不大, 可以看作是煤柱内一定宽度的弹性区, 具有较强的承载能力。分析可得: 可以适当缩减煤柱宽度, 使煤柱应力分布的“双峰”向“谷”靠拢, 缩减“谷”的宽度, 但仍使其具有足够的弹性区来发挥承载作用^[3]。

建议煤柱的优化可以缩减“谷”的宽度, 其宽度可以由 44.5m 缩小 10~15m, 减为 30~35m。

2 煤柱应力分布理论分析

2.1 工作面回采后煤柱内应力分布

当回采巷道一侧工作面回采结束后, 煤体内应力分布如图 3 所示。图中 $F(\varepsilon)$ 表示工作面回采对右侧实体煤内应力的影响, 其中 $f_1(\varepsilon)$ 为对塑性区内煤体应力的影响, 塑性区 (侧向支撑压力

[收稿日期] 2018-05-23

[作者简介] 王建辉 (1983-), 男, 陕西周至人, 采矿工程师, 采掘副总工程师, 研究方向为煤矿安全生产。

[引用格式] 王建辉, 武谋达. 文家坡煤矿区段煤柱合理留设宽度研究 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (4): 29-32.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.04.007

峰值内) 煤柱内应力的垂直应力处于极限平衡状态; $f_2(\varepsilon)$ 为对弹性区煤体应力的影响^[4]。

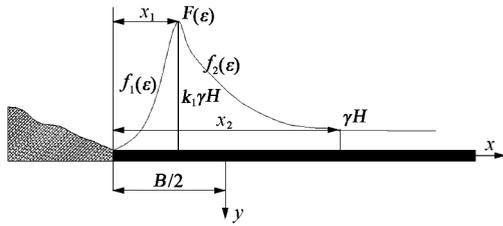


图 3 工作面回采后煤体内应力分布

$$f_1(\varepsilon) = \left(\frac{C_0}{\tan\varphi} + \frac{P_i}{\lambda_1} \right) e^{\frac{2\tan\varphi}{m\lambda_1}(\varepsilon+B/2)} - \frac{C_0}{\tan\varphi}, \varepsilon \in [-B/2, x_1 - B/2] \quad (1)$$

式中, C_0 为煤层界面黏聚力, 6.62MPa; φ 为煤层界面内摩擦角, 28.81°; P_i 为锚杆支护强度, 0.2MPa; λ_1 为工作面附近煤柱内应力侧压系数, 取 1; m 为巷道高度, 3.8m; B 为煤柱宽度, 44.5m; x_1 为工作面回采后塑性区范围, m。

塑性区范围由式 (2) 计算。

$$x_1 = \frac{m\lambda_1}{2\tan\varphi} \ln \left[\left(k_1\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi} \right) / \left(\frac{C_0}{\tan\varphi} + \frac{P_i}{\lambda_1} \right) \right] \quad (2)$$

式中, k_1 为工作面回采对煤柱内应力的增高系数, γ 为容重, 2.5kN/m³; H 为巷道埋深, 650m。

塑性区以外煤柱内应力满足 Weibull 分布, Weibull 分布函数表达式为:

$$w(x) = e^{-\frac{x}{x_w}} e^{-\frac{x}{x_w}} \quad (3)$$

式中, x 为随机变量, 即距离巷道壁距离; x_w 为比例参数。

根据式 (2), 结合塑性区外煤柱内应力的分布规律, 代入相关参数, 得 $f_2(\varepsilon)$ 。

$$f_2(\varepsilon) = (k_1 - 1)\gamma H s e^{1-s} + \gamma H, \varepsilon \in [x_1 - B/2, +\infty) \quad (4)$$

其中, $s = (\varepsilon + x_f + B/2 - x_1) / x_f$ 。

式中, x_f 为调节函数缓急程度的参数。

式 (4) 中, $f_2(\varepsilon)$ 为单峰函数, 当 $\varepsilon = x_1 - B/2$ 时, 峰值 $f_2(\varepsilon) = k_1\gamma H$ 。 k_1 大则应力峰值大, 故可通过改变 k_1 去调节应力峰值的大小, 以此来反映工作面开采对煤柱中心支承压力峰值的影响程度。通过增大或减小 x_f 来调节在 $\varepsilon \rightarrow +\infty$ 的过程中, $f_2(\varepsilon)$ 下降过程中的缓、急程度。随着向煤体深处发展, $f_2(\varepsilon)$ 逐渐减小至原岩应力。根据上述分析可知, 工作面回采对煤柱中心应力的影响情况为:

$$F(\varepsilon) = \begin{cases} \left(\frac{C_0}{\tan\varphi} + \frac{P_i}{\lambda_1} \right) e^{\frac{2\tan\varphi}{m\lambda_1}(\varepsilon+B/2)} - \frac{C_0}{\tan\varphi}, \varepsilon \in [-B/2, x_1 - B/2] \\ (k_1 - 1)\gamma H s e^{1-s} + \gamma H, \varepsilon \in [x_1 - B/2, +\infty) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 留设煤柱合理宽度确定

根据文家坡矿生产地质条件及相关测试结果, 结合数值模拟结果, 取计算参数如下: 巷道平均埋深 $H=637\text{m}$, 岩层密度 $\rho=2.5\times 10^3\text{kg/m}^3$, 煤层厚度 $m=3.93\text{m}$, 锚杆支护强度 $P_i=0.2\text{MPa}$, 煤层黏聚力 $C_0=6.62\text{MPa}$, 煤层内摩擦角为 $\varphi=28.81^\circ$, 工作面回采后实体煤帮支承应力增高系数 1.5, 塑性区内侧压系数为 1.0; 巷道开挖后煤体一侧支承压力增高系数 1.3, 塑性区内侧压系数为 1.0。

护巷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, 该弹性核宽度不小于煤柱高度的 2 倍^[5]。因此, 4102 工作面回风巷侧区段煤柱合理宽度为

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

$$x_0 = \frac{m\lambda_1}{2\tan\varphi} \ln \left[\left(k_1\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi} \right) / \left(\frac{C_0}{\tan\varphi} + \frac{P_i}{\lambda_1} \right) \right] \quad (7)$$

式中, x_0 为煤柱左侧塑性区宽度; x_1 为煤柱右侧塑性区宽度; λ_1 为回采后实体煤帮支承应力增高系数, 取 1.5; k_1 为塑性区内侧压系数, 取 1.0; λ_2 为巷道开挖后煤体一侧支承压力增高系数, 取 1.3; k_2 为塑性区内侧压系数, 取 1.0。

$$x_1 = \frac{m\lambda_2}{2\tan\varphi} \ln \left[\left(k_2\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi} \right) / \left(\frac{C_0}{\tan\varphi} + \frac{P_i}{\lambda_2} \right) \right] \quad (8)$$

由于煤柱宽度不同, 相应的煤柱塑性区内宽度也不同, 代入参数求解式 (6)、(7)、(8), 得 $2m=7.86\text{m}$, 且求得 $x_0=11.2\text{m}$, $x_1=8.9\text{m}$, 则 $B>28.96\text{m}$ 。同时考虑给 4102 回风巷支护保留一定的安全系数 1.2, 则煤柱宽度应大于 34.75m, 确定煤柱宽度为 35m。

3 煤柱应力分布数值模拟分析

应用 FLAC^{3D} 软件, 在 4102 工作面侧回采、4103 巷道已形成并受到 4102 采空区采动影响的情况下, 通过对煤柱宽度方向上应力分布状态以及两区段回采巷道的变形与破坏过程进行模拟分析, 由此来为煤柱宽度的合理确定提供指导。

3.1 模型建立与参数选取

根据文家坡矿生产地质条件, 建立 FLAC^{3D} 数值计算模型。模型包括 4 号煤及其上下部岩层共计 28 层, 模型总厚度 91m, 宽度 206m, 沿巷道轴向方向 150m, 即模型尺寸为 206m×150m×91m。两侧边界及前后边界均施加水平位移约束, 底部边界施加垂直位移约束, 上部边界施加均布载荷, 均布载荷的大小根据上覆岩层自重计算。上覆岩层密度

取 $2500\text{kg}/\text{m}^3$, 4 号煤层埋深确定为 678m, 确定模型上部施加 16.95MPa 的均布载荷, 模拟上覆岩层自重, 侧压系数取 1。

根据文家坡矿煤岩体力学参数实测结果, 确定模型煤岩体力学参数, 见表 1。

表 1 模型煤岩参数

| 岩性 | 抗拉强度 /MPa | 黏聚力 /MPa | 内摩擦角 / (°) | 体积模量 K/MPa | 切变模量 G/MPa |
|-----|-----------|----------|------------|------------|------------|
| 泥岩 | 1.25 | 1.70 | 26.44 | 0.82 | 0.49 |
| 砂岩 | 1.51 | 1.47 | 23.16 | 0.70 | 0.46 |
| 粉砂岩 | 1.43 | 3.14 | 35.85 | 1.07 | 0.77 |
| 煤 | 0.72 | 1.99 | 26.81 | 0.35 | 0.14 |

数值计算模型与初始应力平衡如图 4 所示。

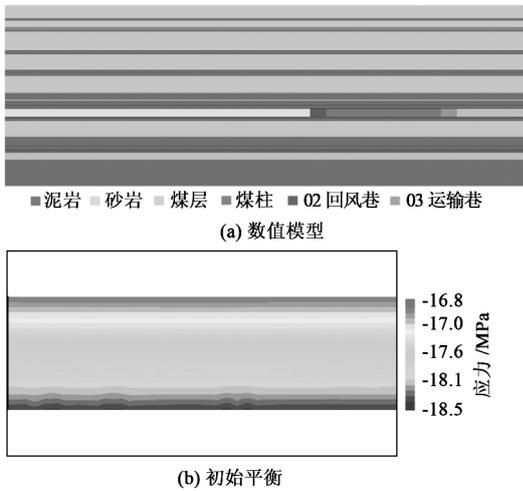


图 4 FLAC^{3D} 数值模型建立

3.2 模型求解

模拟计算 4102 工作面分别推进 0m (4102 和 4103 回风巷掘进结束), 40m, 80m, 120m 时面间煤柱内的应力分布情况, 得到的煤柱内的应力分布情况如图 5 所示。将数值模拟得到的应力分布数据绘制成曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出: 随工作面推进, 在采动影响下煤柱内的支承压力不断增加; 面间煤柱内应力分布曲线呈现“双峰一谷”的形态, 各曲线双峰位

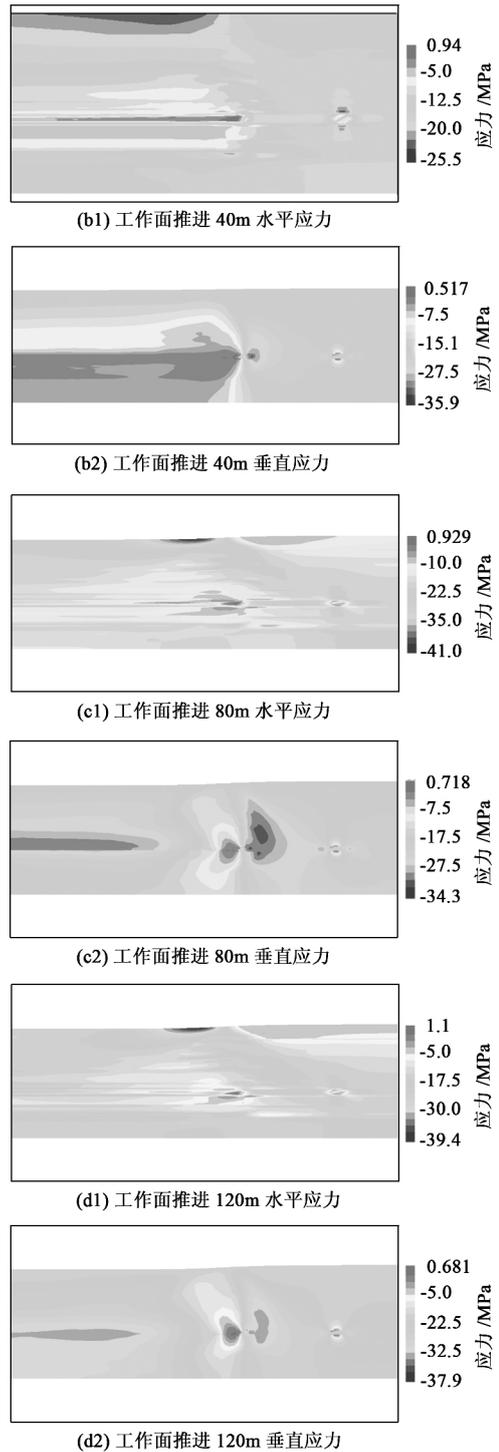
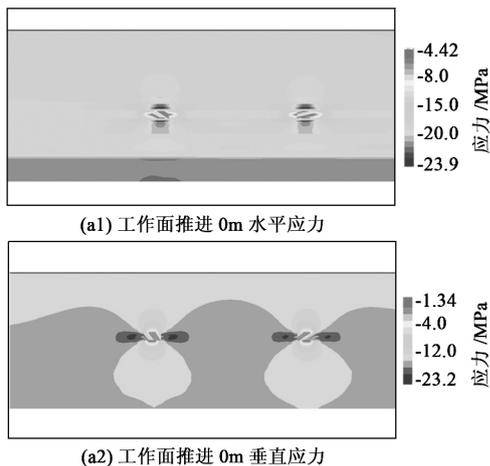


图 5 4102 工作面推进过程中煤柱应力云图

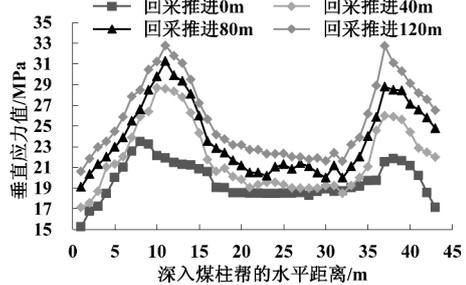


图 6 4102 工作面推进过程中煤柱垂直应力分布曲线

置大约分别在面间煤柱内 11m, 37m 处, 曲线图“谷”的范围大致在 17~36m 范围内。在“谷”19m 宽度的范围内, 工作面间区段煤柱支撑压力处于平缓且较低的水平上, 应力峰值变化很小, 可以看作是煤柱内的一定宽度的弹性区, 具有较强的承载力^[6]; 煤柱内其他范围的煤体则已发生塑性屈服, 只具有一定的承载力, 可以适当减少图 6 中“谷”区间的宽度。

3.3 煤柱留设宽度确定

根据煤柱留设原理, 煤柱的宽度是由中部的弹性核宽度和两侧的塑性区宽度组成的, 当弹性核宽度大于等于 2 倍的煤层采高时, 煤柱就能够保持稳定^[7]。

综上所述, 建议煤柱留设宽度为 35m, 其中部存在宽度大于 2 倍的煤层采高 (3.93m) 7.8m 的弹性核, 并留有一定的富余量。

4 结 论

(1) 由实测数据可知, 区段煤柱的侧向支承压力随工作面推进不断增加, 其分布呈现“双峰一谷”的形态; 理论分析得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区; 数值

模拟分析得出与实测数据近似的规律 (“双峰一谷”)。因此, 4102 工作面回风侧煤柱可以适当减小。

(2) 对煤柱内应力分布规律通过理论计算、数值模拟与现场实测分析, 综合考虑煤炭回收的高效性、煤柱留设承载的安全性、现场施工的便利性, 建议留设煤柱宽度为 35m。

[参考文献]

[1] 祝凌甫, 闫少宏. 大采高综放开采顶煤运移规律的数值模拟研究 [J]. 煤矿开采, 2011, 16 (1): 11-13, 40.
 [2] 白志飞. 大采高综放采场矿压显现规律及围岩控制技术研究报告 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
 [3] 李东升, 李德海, 宋常胜; 条带煤柱设计中极限平衡理论的修正应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 7-9.
 [4] 贾光胜, 康立军. 综放开采采准巷道护巷煤柱稳定性研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (1): 7-10.
 [5] 翟所业, 张开智. 煤柱中部弹性区的临界宽度 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20 (4): 14-16.
 [6] 刘增辉, 康天合. 综放煤巷合理煤柱尺寸的物理模拟研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22 (1): 24-26.
 [7] 邹友峰, 柴华彬. 我国条带煤柱稳定性研究现状及存在问题 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23 (2): 141-145.

[责任编辑: 施虹霞]

(上接 96 页)

过水化学元素类比法、piper 三线图及 Schoeller 图进行综合分析, 研究采空区积水与已知含水层及水体水化学特征规律, 可有效判断采空区积水补给水源。

(2) 瞬变电磁法对采空区积水探测具有良好效果, 能有效探明采空区积水分布范围, 并对强水力通道具有良好反映, 为进一步开展导水通道封堵、水害治理工作提供依据。

(3) 矿井受强水力补给采空积水区威胁时, 通过瞬变电磁法探测、水化学分析法分析、水文地质模型分析等综合判定技术能快速判别补给水源与通道, 对消除采空区水害隐患具有重要指导意义。

[参考文献]

[1] 刘剑民, 王继仁, 刘银朋, 等. 基于水化学分析的煤矿矿井突水水源判别 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15 (1): 31-35.
 [2] 李 燕, 徐志敏, 刘 勇. 矿井突水水源判别方法概述 [J]. 煤炭技术, 2010, 29 (11): 87-89.
 [3] 黎 灵. 矿井异常涌水水源综合判定技术 [J]. 煤矿开采, 2017, 22 (4): 100-105.

[4] 李再兴, 张凤鸣, 庞 良, 等. 有关矿井突水水源判别方法的探讨 [J]. 地下水, 2009, 31 (9): 16-20.
 [5] 刘剑民, 王继仁, 何治良. 基于多元混合模型的煤矿矿井突水水源分析 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23 (12): 95-100.
 [6] 张俊英, 王翰锋, 张 彬, 等. 煤矿采空区勘查与安全隐患综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (10): 76-80.
 [7] 牟 义, 李 文, 黎 灵, 等. 矿井瞬变电磁法在工作面顶板富水性探测中的应用 [J]. 煤矿安全, 2011, 42 (1): 104-109.
 [8] 李宏杰. 瞬变电磁探测技术在煤矿防治水中的应用 [J]. 煤矿安全, 2013, 44 (4): 159-161.
 [9] 王 粤, 龚育龄. 瞬变电磁法在探测煤矿采空积水区中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9 (1): 71-74.
 [10] 李 文, 牟 义, 张俊英, 等. 煤矿采空区地面探测技术与方法优化 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (1): 102-106.
 [11] 牟 义. 典型地质异常体电磁法响应特征研究 [J]. 煤矿开采, 2017, 22 (4): 4-9.
 [12] 李宏杰. 浅层地震和瞬变电磁法在采空区探测中的应用研究 [J]. 煤矿开采, 2013, 18 (1): 17-20.
 [13] 尹尚先, 武 强, 王尚旭. 北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (1): 77-82.
 [14] 丁 赛, 陶月赞. ArcGIS 构造三维水文地质模型探讨 [J]. 地理空间信息, 2011, 9 (3): 123-125.

[责任编辑: 张玉军]