文章编号:1672-5050(2021)02-0070-04 DOI:10.3969/j.issn.1672-5050.2021.02.014

* 厚煤层工作面区段煤柱留设尺寸的合理确定

冯凡丁
(太原理工大学 矿业工程学院,太原 030024)

摘 要:根据雄山煤矿 15303 工作面煤层的埋藏特征、煤体强度等工程地质条件,运用极限平衡理论得出巷道一侧煤柱塑性区的宽度为 4.37 m,采空区一侧煤柱塑性区宽度为 4.68 m,弹性核宽度为 2 倍的煤柱高度 7.74 m,15303 工作面煤柱的合理宽度为 16.79 m;运用辅助面积理论计算出 15303 工作面煤柱合理的宽度为 14.56 m。综合考虑围岩的受力状态、巷道顶底板变形量、安全状况以及资源回收率等客观因素,确定雄山煤矿 15303 工作面区段煤柱合理宽度为 17 m。

关键词:厚煤层;区段煤柱;留设尺寸;极限平衡理论;辅助面积理论
中图分类号:TD32 **文献标识码**:A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Determination of Rational Size of Section Coal Pillars on Thick Coal Seam Mining Face

FENG Fanding
(*College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: According to the conditionsof the 15303 working face in Xiongshan Mine, such as burial characteristics and coal strength, the plastic zone width on the side of roadway and goaf is 4.37 m and 4.68 m, respectively, the elastic core width 7.74 m, twice the coal pillar height, and the reasonable width of the coal pillar 16.79 m by the limit equilibrium theory. The reasonable width of the coal pillar is 14.56 m by the auxiliary area theory. Therefore, it is determined that the rational width of the coal pillar in the 15303 working face should be 17 m based on various objective factors, including the surrounding rock force, roof and floor deformation, safety status, and resource recovery rate.

Key words: thick coal seam; section coal pillar; coal pillar size; limit equilibrium theory; auxiliary area theory

区段煤柱的主要作用是隔离上区段采空区和维护该区段回采巷道稳定,隔离采空区并且防止周边工作面的积水瓦斯进入本工作面[1]。若区段煤柱留设得过宽,虽然安全性得以保证,但会造成煤炭资源的严重浪费;若区段煤柱留设过窄,虽然可以提高回采率,但是会导致煤柱附近形成一段塑性区域,使煤柱缺少必要的承载能力,稳定性得不到保证[2-3]。所以区段煤柱尺寸的合理确定,既可以提高巷道围岩的稳定性,又能够最大限度地开发煤炭资源。

国内外学者对于区段煤柱进行过大量研究,归结起来主要有如下几种方法:现场实测及统计推理;利用矿压规律归纳总结经验公式;对煤柱支承压力分布的理论分析;通过数值模拟寻求煤柱合理尺寸。国外的研究情况为:Gaddy 等人提出了 Holland-Gaddy 煤柱强度公式;Poulsen 提出煤柱经验公式,证实煤柱强度与其宽度和高度的比值相关;Hsiung 通过有限元法分析出煤柱与顶板的关系;科诺年科和阿尔拉麦夫提出了极限平衡理论。国内研究情况

* 收稿日期:2021-04-17
作者简介:冯凡丁(1999—),男,山西运城人,在读本科,研究方向为矿山压力及其岩层控制,E-mail:2672649405@qq.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为：谢和平等人通过理论试验分析，提出煤柱的破坏过程是非线性的；余忠林等人分析出了大采高工作面窄煤柱沿空掘巷条件下的煤柱分布规律；柏建彪等人通过 FLAC^{3D}数值模拟分析出了沿空掘巷后巷道围岩的变形破坏规律及合理尺寸等[4-5]。

由此可见，区段煤柱尺寸的留设与多方面因素有关，包括煤层埋深、顶底板稳定性、采动影响、围岩物理力学参数、采煤方法和巷道支护形式等。单独采用某一种研究方法并不能够全面地考虑各种因素，因此本文拟结合雄山煤矿 15303 工作面的具体情况，利用极限平衡理论、辅助面积理论对该工作面区段煤柱的合理尺寸进行研究[6-7]。

1　工程背景

雄山煤矿井田全区可进行开采的煤层为 3 号、9 号和 15 号，目前开采煤层为 15 号。15 号煤层厚度 1.55～4.86 m，平均 3.87 m，视密度 1.41 t/m^3，结构简单，煤层大多数夹矸情况为 1 层，偶尔不夹或夹 2 层，属全区稳定可采煤层。直接顶板为泥岩或石灰岩，底板大多为泥岩和砂质泥岩。雄山煤矿 15303 工作面埋藏深度为 235.9 m，预测回采工作面相对瓦斯涌出量 4.34 m^3/t，掘进工作面绝对瓦斯涌出量 1.45 m^3/min，为低瓦斯矿井。15303 工作面长度为 150 m，煤层倾角为 3°～5°。15303 回采工作面布置如图 1 所示。

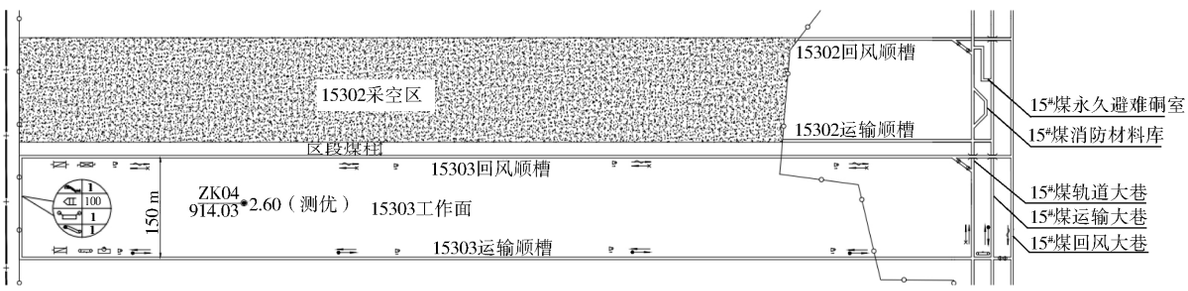


图 1　15303 回采工作面布置图

Fig. 1　Layout of 15303 working face

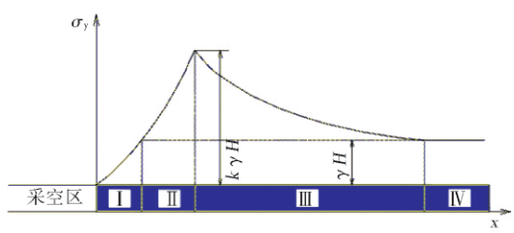
区段煤柱的布置方式可以分为留较大煤柱护巷、沿空掘巷（完全沿空掘巷和留窄小煤柱沿空掘巷）和沿空留巷。虽然沿空掘巷和沿空留巷可以最大限度地提高资源回采率，但是这两种布置方式会给巷道支护带来很大困难。再结合雄山煤矿的现状、开采条件、地质条件等情况，决定采用留较大煤柱护巷，在上方采空区和下区段回风平巷之间留一定尺寸的煤柱，使下区段的巷道可以错开应力高峰区。

2　基于极限平衡理论确定煤柱尺寸

2.1　区段煤柱稳定的条件

当一侧的煤层被采出后，原始围岩的应力平衡状态被打破，采空区上覆岩层重量会向周围巷道及工作面进行转移，使得周围岩石的应力重新分布。当一侧煤层采空后，周围煤体的弹塑性区以及铅直应力分布如图 2 所示。

在一侧煤层采空后，尚未开采区域的煤体会因为采空区上覆岩层重量的转移，从采空处边缘到深部依次出现破裂区Ⅰ、塑性区Ⅱ（靠采空区一侧应力低于原岩应力 γH 的部分称为破裂区Ⅰ）、弹性区Ⅲ及原岩应力区Ⅳ。从图 2 中可以看出，离采空区边



Ⅰ—破裂区；Ⅱ—塑性区；
Ⅲ—弹性区；Ⅳ—原始应力区

图 2　煤体的弹塑性区及铅直应力分布

Fig. 2　Elastic-plastic zone and vertical stress distribution of coal body

缘越远，煤柱的承载能力越高。当巷道开挖或工作面进行回采时，巷道周边的围岩应力会因采动影响而重新分布，巷道两侧的煤体首先遭到破坏，并且延伸至弹性区边界处。由于顶底板岩石的泊松比（μ）与煤层之间的粘聚力（C_0）和内摩擦角（φ_0）均小于煤体内部，所以随着开采进行，煤体会从顶底板岩石中挤出，并且伴随有剪应力（τ_{yx}）产生。在距离煤体边缘一定的宽度内，煤柱的承载能力和支承压力处于一种极限平衡状态。

雄山煤矿 15303 工作面区段煤柱上侧是 15302 工作面采空区，下侧为 15303 工作面的区段回风平

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

巷及回采工作面，区段煤柱此时会同时受到采空区和巷道两处支承压力的作用，各自形成两个应力极限平衡区。当15303工作面进行回采时，因采动和顶板运动影响巷道周围的围岩应力再次重新分布。当煤柱处于临界危险状态时，两侧会产生宽度为 x_0 和 x_1 的塑形变形区（x_0 为巷道一侧煤柱塑性区的宽度，x_1 为采空区一侧煤柱塑性区宽度），在塑性变形区内煤柱的承载能力直线下降，为避免煤柱体两侧的塑性区贯通导致煤柱塌陷，在煤柱中央应该留有具有一定宽度的弹性核，该弹性核的宽度 l 一般不小于煤柱高度 h 的2倍。因此，为了煤柱的稳定，煤柱最小宽度 b 应为

$$b = x_0 + l + x_1 \geqslant x_0 + 2h + x_1 \quad . \tag{1}$$

2.2 塑性区宽度的理论计算

2.2.1 基本假设

为了较好地利用库仑准则推导塑性区宽度，结合雄山煤矿15303工作面具体情况，提出以下假设：

1）煤柱是连续、均质、各向同性的弹性体；

2）塑性区被剪切力破坏，破坏面沿着煤层面；

3）煤柱只受上覆岩层重力影响，不考虑水平构造应力；

4）忽略煤体的体积力；

5）该煤层为近水平煤层，按煤层水平建立模型，不考虑煤层倾角的影响。

2.2.2 基本方程

基于基本假设建立的煤柱支承压力力学模型如图3所示。

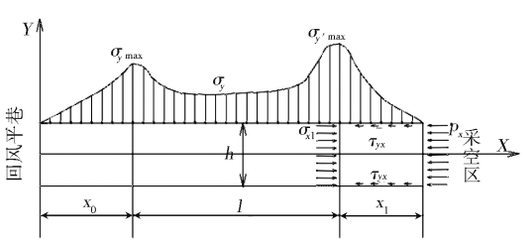


图3 煤柱支承压力力学模型

Fig. 3 Mechanical model of coal pillar abutment pressure

煤层埋深为 H，m；上覆岩层容重为 γ，kN/m³；弹性核与其交界面上的应力集中系数为 k 和 k'；下区段工作面巷道塑性区与弹性核交界处煤柱的极限强度 $\sigma_{y\max}=k\gamma H$，MPa；采空区巷道塑性区与弹性核交界处煤柱的极限强度 $\sigma_{y'\max}=k'\gamma H$，MPa；岩石、支护设施等侧向约束力为 p_x，MPa；塑性区与弹性核区交界面的侧压系数为 β。

以采空区作为研究对象，根据极限平衡条件，可列出如下3个方程：

$$\begin{cases} \tau_{yx} = -(\sigma_{y'\max}\tan\varphi_0 + C_0) \\ \dfrac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \dfrac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} = 0 \\ \dfrac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \dfrac{\partial\sigma_y}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad . \tag{2}$$

当煤沿着煤层与顶底板交界面被挤出时，为保持应力极限平衡条件，得出如下两个应力边界条件，在 $x=x_0+l$ 处：

$$\begin{cases} \sigma_y = k'\gamma H \\ \sigma_x = \beta\sigma_y = \beta k'\gamma H \end{cases} \quad . \tag{3}$$

联立式(2)和式(3)得：

$$-\frac{\partial\sigma_y}{\partial x}\tan\varphi_0 + \frac{\partial\sigma_y}{\partial y} = 0 \quad . \tag{4}$$

设置构造函数进行求解（A 为待定常数）：

$$\sigma_y = \mathrm{u}(x)\mathrm{v}(x) + A \quad . \tag{5}$$

最终求得：

$$x_1 = \frac{h\beta}{2\tan\varphi_0}\ln\left[\frac{2C_0 + \beta k'\gamma H\tan\varphi_0}{2\beta C_0 + 2p_x\tan\varphi_0}\right] \quad . \tag{6}$$

同理可得：

$$x_0 = \frac{h\beta}{2\tan\varphi_0}\ln\left[\frac{2C_0 + \beta k\gamma H\tan\varphi_0}{2\beta C_0 + 2p_x\tan\varphi_0}\right] \quad . \tag{7}$$

2.3 区段煤柱尺寸的确定

雄山煤矿15号煤物理力学参数如表1所示。结合式(1)、式(6)、式(7)可得煤柱最小的宽度 $b=x_0+l+x_1\geqslant 4.37+2\times 3.87+4.68\geqslant 16.79$ m。

表1 雄山煤矿15303工作面力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of Xiongshan Mine

参数	h/m	k	k'	γ/(kN/m³)	H/m	p_x/MPa	C_0/MPa	φ_0/(°)	β
数值	3.87	2.5	3.0	25	235.9	0.1	0.7	18	0.45

3 基于辅助面积理论确定煤柱尺寸

辅助面积理论认为，煤柱会均匀地支撑起上覆岩层和两侧巷道宽度一半范围的岩层。采用该理论计算煤柱尺寸时，用平面问题替代了空间问题，用均匀分布的煤柱载荷替代了复杂岩层，不考虑煤柱边缘产生的应力集中以及因煤柱边缘部分破坏导致的应力深部转移等情况。该理论认为平均应力是判断煤柱载荷的重要参数，目前为止是确定区段煤柱尺寸的最常见且简单的一种方法。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

σ_c 为煤柱单轴抗压强度,取 13 MPa;a 和 b 为常数($a=0.678$,$b=0.322$);l 为煤柱宽度,m;k 为采动应力的集中系数,当 $\sigma_c \leqslant 25$ MPa 时,采动系数 k 取 2.5;巷道宽度为 d,取区段回风巷宽度 4 m。区段煤柱设计时,要满足安全系数 F 的要求,一般为 1.3～2.0,这里取 $F=1.5$。根据公式:

$$F=\frac{\sigma}{\sigma_p} \quad . \tag{8}$$

σ 为煤柱强度。根据研究得,煤柱的强度与煤块试样的强度成正比,而且随煤柱宽高比的增大而增加,可用经验公式 Obert-Dwvall/wang 得出:

$$\sigma=\sigma_c\left(a+\frac{bl}{h}\right) \quad . \tag{9}$$

σ_p 为煤柱平均应力。在假设煤柱载荷均匀分布的条件下,计算公式为:

$$\sigma_p=\frac{p}{l}=\frac{(kl+d)\gamma H}{l} \quad . \tag{10}$$

p 为煤柱支撑载荷。巷道开挖以后产生的载荷为:

$$p=(l+d)\gamma H \quad . \tag{11}$$

将各个参数代入式(8)—式(11)后,求解得:

$$1.08l^2-13.3l-35.4=0 \quad . \tag{12}$$

所以,根据辅助面积理论,15303 工作面区段巷道煤柱为 $l=14.56$ m。

4　结论

1)采用极限平衡理论分析方法,结合雄山煤矿 15303 工作面的工程地质条件,计算出巷道一侧煤柱塑性区的宽度 x_0 为 4.37 m,采空区一侧煤柱塑性区宽度 x_1 为 4.68 m,弹性核宽度为 2 倍的煤柱高度 7.74 m,即煤柱的最小宽度为 16.79 m。

2)采用辅助面积理论分析方法,结合雄山煤矿 15303 工作面的工程地质条件,计算出区段煤柱为 14.56 m。

3)区段煤柱理论计算的最大值为 16.79 m,因此最终确定雄山煤矿 15303 工作面区段煤柱的合理宽度为 17 m。该工作面煤柱尺寸的合理确定对其余工作面区段煤柱的留设具有借鉴意义。

参考文献:

[1] 李忠群. 综放面区段小煤柱合理尺寸确定研究[J]. 中州煤炭,2016(10):72-77.
LI Z Q. Study on determination of reasonable width of small sectional coal pillar on fully-mechanized top coal caving face[J]. Zhongzhou Coal,2016(10):72-77.

[2] 苏超,鲁健,郭萌. 高瓦斯综放工作面区段煤柱合理尺寸确定[J]. 矿业安全与环保,2018,45(4):89-92,97.
SU C,LU J,GUO M. Determination of reasonable size of coal pillar in high-gas fully mechanized caving face[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2018,45(4):89-92,97.

[3] 王荣刚. 两渡煤矿区段煤柱合理尺寸确定[J]. 神华科技,2018,16(2):36-38.
WANG R G. Determination of rational size of coal pillar in Liangdu Coal Mine [J]. Shenhua Science and Technology,2018,16(2):36-38.

[4] 霍永钊. 官地矿 3 号煤层区段煤柱合理留设研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2017.
HUO Y Z. Reasonable retention of coal pillar in No. 3 coal seam section of Guandi Mine [D]. Handan:Hebei University of Engineering,2017.

[5] 王琦. 亭南矿大采高工作面区段煤柱尺寸优化研究[D]. 西安:西安科技大学,2015.
WANG Q. Study on optimization of coal pillar size in ting nan mine with large mining high face [D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2015.

[6] 雷成祥,陈苗虎,邓润义,等. 色连二矿区段煤柱留设理论分析及应用[J]. 煤炭与化工,2017,40(8):1-5.
LEI C X,CHEN M H,DENG R Y,et al. Theoretical analysis and application of coal pillar preservein Selian second coal mine [J]. Coal and Chemical Industry,2017,40(8):1-5.

[7] 赵志龙. 峁底煤矿 10104 工作面区段煤柱合理尺寸研究[J]. 山西煤炭,2020,40(3):19-24.
ZHAO Z L. Reasonable size of sectional coal pillar in 10104 working face of Maodi Coal Mine[J]. Shanxi Coal,2020,40(3):19-24.

(编辑:樊　敏)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net