DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.030

厚煤层综放双巷工作面巷间煤柱尺寸研究

王 琦[1, 2]，樊运平[1, 2]，李 刚[1, 2]，郭文孝[2]，闫殿华[2]，张立平[2]

（1. 中国煤炭科工集团太原研究院，山西 太原 030006；2. 山西天地煤机装备有限公司，山西 太原 030006）

摘 要：为解决厚煤层综放双巷布置工作面巷间煤柱的留设问题，以某矿四盘区 4301 工作面运输顺槽与辅助运输顺槽之间的煤柱为工程背景，首先对巷间煤柱进行理论分析：一次采动影响后将巷间煤柱沿倾向划分为采动影响区、相对稳定区和锚杆支护区，应用极限平衡理论分析得出了一次采动影响区的宽度为 2.82 m，进而得出巷间煤柱的宽度为 7.83 m。其次，应用数值模拟的方法系统地分析了宽度分别为 4、6、8、10、12、15、20 m 时，在两次采动影响下巷间煤柱的应力演化、破坏、巷道围岩变形规律；一次采动影响后，随着煤柱宽度增大，高应力由实体煤向煤柱内转移；给出了最大临界尺寸、最小临界尺寸的定义，并指出巷间窄煤柱宽度应小于最大临界尺寸。综合分析数值模拟研究结果，同时结合理论分析结果及煤柱留设原则，最终确定巷间煤柱宽度为 8 m。最后，通过现场工程实践验证了所确定的巷间煤柱宽度的合理性。研究结果对类似条件下综放双巷布置工作面巷间煤柱宽度的确定具有参考意义。

关 键 词：巷间煤柱；厚煤层；综放工作面；双巷布置

中图分类号：TD 35 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2017) 10－3009－08

Determination of coal pillar width between roadways of fully mechanised caving face with double roadways layout in a thick coal seam

WANG Qi[1, 2], FAN Yun-ping[1, 2], LI Gang[1, 2], GUO Wen-xiao[2], YAN Dian-hua[2], ZHANG Li-ping[2]

（1. Taiyuan Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan, Shanxi 030006, China;
2. Shanxi Tiandi Coal Machinery Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China）

Abstract: This study is to determine the width of coal pillar between roadways of the fully mechanised caving face with double roadways layout in a thick coal seam. The coal pillar between haulage gate and auxiliary haulage gate of the 4301 working face in the fourth panel was selected as a case study. Firstly, based on theoretical analysis, the pillar between roadways was along tendency divided into mining influence area, relative stability area and bolt supporting area after the first mining. The width of first mining influence area was 2.82 m determined by using the limit equilibrium theory, and the width of pillar between roadways was subsequently obtained as 7.83 m. Then, a numerical method was conducted to systematically simulate the laws of stress evolution, failure, and roadways deformation of pillars with the widths of 4, 6, 8, 10, 12, 15 and 20 m under the secondary mining influence. It is found that after the first mining, the high stress transfers from the coal wall to the pillar with the increase of pillar width. Besides, the definitions of the maximum and the minimum critical sizes are given. It is pointed out that the width of the narrow pillar should be less than the maximum critical size. By synthesising numerical results, theoretical results and principles of the pillar, the most favourable width of the pillar between roadways is suggested as 8 m. Finally, the rationality of the pillar width is verified by engineering practice. The results can provide a reference for the determination of narrow pillar between roadways of fully mechanised caving face with similar mining conditions.

Keywords: pillar between roadways; thick coal seam; fully mechanised caving face; double roadways layout

1 引 言

我国西部及北部地区有大量的厚煤层综放工作面，其回采巷道采用双巷布置的方式，即在工作面一侧布置回风顺槽，另一侧布置运输顺槽及辅助运输顺槽，运输顺槽和辅运顺槽双巷掘进，当上区段工作面回采结束后，辅助运输顺槽可作为下区段工作面的回风顺槽继续使用。该种布置方式具有巷道

收稿日期：2015-11-27
基金项目：山西省煤基重点科技攻关项目(No. MJ2014-03，No. MJ2014-07)。
This work was supported by the Shanxi Key Coal Base Science and Technology Project (MJ2014-03, MJ2014-07).
第一作者简介：王琦，男，1989 年生，硕士，主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail: 18534573068@163.com

掘进速度快、通风简单、适应性强、有利于工作面实现高产高效等优点，因而被国内许多矿区广泛应用，双巷掘进后，两顺槽之间的煤柱即为巷间煤柱[1−5]。在实际生产过程中，由于未对巷间煤柱进行系统研究，在留设煤柱时，只能借助经验或采用工程类比等方法，所确定的煤柱尺寸往往会很大，造成了煤炭资源的大量损失。因此，用科学的方法对巷间煤柱合理尺寸进行研究，在原有的巷道布置条件下使用窄煤柱护巷，具有重要的意义。

近年来，许多专家和学者对厚煤层综放工作面窄煤柱尺寸的确定进行了大量研究，如谢广祥等[6−7]通过数值模拟研究了煤柱宽度对综放覆岩应力分布规律的影响，并从理论上分析了采空区侧向支撑应力峰值大小及位置；柏建彪等[8−10]研究了综放沿空掘巷覆岩运移、煤柱宽度与煤柱稳定性及支护方式之间的关系，为综放工作面区段煤柱的确定提供了基础；刘金海等[11−12]通过现场实测和理论分析的方法给出了深部厚煤层综放工作面采空区侧向支撑应力分布规律，确定了厚煤层综放沿空巷道的布置位置和煤柱的宽度；李磊等[13]应用理论分析的方法给出了沿空掘巷围岩力学模型，推导出了覆岩空间内应力场的表达式，并确定了沿空巷道的合理位置及支护方式；王德超等[14]利用现场应力观测和数值模拟相结合的方法确定了厚煤层综放沿空掘巷窄煤柱的合理宽度，并用相似模拟试验和工程实践进行了验证性研究。上述研究主要针对综放工作面沿空掘巷区段窄煤柱的留设，即在上区段工作面回采结束待采空区侧上覆岩层运移稳定后，在沿空一定区域范围内掘进回采巷道，将煤柱及巷道布置于采空区侧向低应力区域内。沿空掘巷留设窄煤柱研究成果在我国一些矿区得到了广泛的应用，但沿空巷道须待上一工作面覆岩运移稳定后才能掘进，且在掘巷阶段巷道围岩变形量大，巷道维护困难，在一定程度上延缓了巷道整体掘进速度，因而国内许多矿区仍在使用双巷掘进的方法布置回采巷道。为有效解决该问题，本文以某矿 4 盘区厚煤层综放工作面巷间煤柱为研究背景，在理论分析的基础上，应用数值模拟系统地研究了巷间煤柱在不同采动阶段的应力演化、破坏、巷道围岩变形规律，最终确定了巷间窄煤柱的合理宽度，并用工程实践验证了所确定的煤柱宽度的合理性。为该矿巷间煤柱的留设奠定了基础，并为类似条件下煤柱的留设提供了参考。

2 研究工作面概况

四盘区所采煤层平均埋藏深度为 536 m，厚为 7.81～13.04 m，平均厚度为 11.02 m，煤层倾角为 0°～5°，平均值为 2°，煤层赋存稳定，结构较为复杂，中部夹有 0～0.45 m 的碳质泥岩。4301 工作面为四盘区首采工作面，工作面宽为 220 m，推进长度为 1 843 m，4302 工作面为备采面，工作面割煤高度为 3.8 m，放煤高度为 7.2 m，机头 6 架及机尾 7 架不放煤，盘区巷道布置如图 1 所示。盘区工作面基本顶为浅灰色细砂岩，含泥土质，平均厚度为 11.62 m；直接顶为灰黑色砂质泥岩或泥岩，含少量植物化石，平均厚度为 18.13 m；工作面直接底为灰黑色泥岩，平均厚度为 2.23 m；基本底为均厚 20.84 m 的灰黑色砂质泥岩。

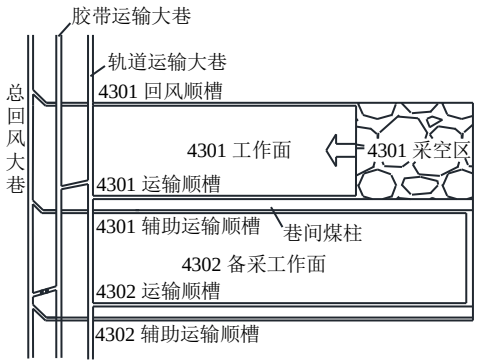


图 1 盘区巷道布置图

Fig.1 Schematic of the roadway layout

3 巷间煤柱宽度理论分析

在工作面回采前，运输顺槽及辅助运输顺槽进行双巷掘进，整个过程中巷间煤柱会经历掘进影响阶段、掘进影响稳定阶段、一次采动影响阶段、一次采动影响稳定阶段及二次采动影响阶段，其中两次采动对巷间煤柱的影响最为突出。因此，在确定煤柱尺寸时应遵循以下原则：①一次采动影响稳定后煤柱中部应具有一定宽度的稳定区域，以隔离采空区有害气体；②二次采动期间确保回采巷道的有效支护，使煤柱的稳定性及巷道变形量满足安全生产要求；③提高煤炭采出率，避免次生灾害发生。

一次采动影响后巷间煤柱一侧为上区段工作面采空区，另一侧为工作面辅助运输顺槽，作为下一工作面回风顺槽继续使用，当使用窄煤柱护巷时，整个煤柱沿倾向可以分为以下 3 个区：A 区（采动影响区）：受上区段工作面回采的影响，该区域煤柱发生了严重的塑性破坏，基本无承载能力，宽度为 L_0；B 区（相对稳定区）：位于煤柱中部，该区域煤柱结构可保持相对稳定，具有一定的承载能力，处

于弹性状态，宽度为 L_1；C 区（锚杆支护区）：该区域受一次采动影响小，由于受到巷帮锚杆的支护作用，可保持稳定状态，宽度为 L_2。一次采动影响后，C 区与 B 区共同维持着煤柱结构的稳定，为下一工作面回采服务。

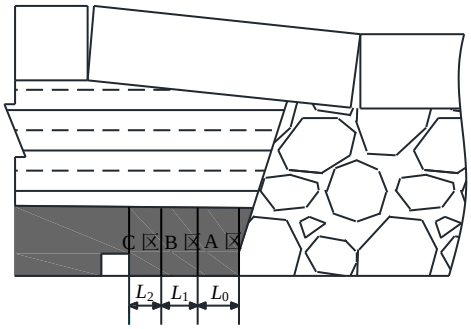


图 2　巷间煤柱分区示意图

Fig.2　Division schematic of pillar between roadways

上区段工作面开采完毕待上位岩层趋于稳定后，煤柱内 A 区与 B 区的交界位置处于极限平衡状态，可用极限平衡理论分析，建立如图 3 所示的力学模型[15]。

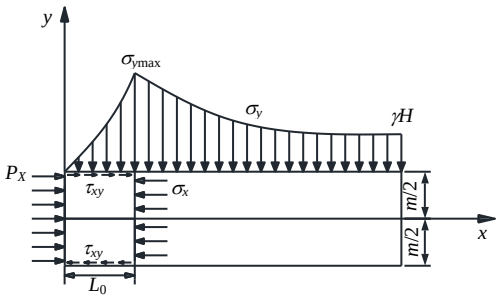


图 3　窄煤柱力学模型

Fig.3　Mechanical model of narrow coal pillar

窄煤柱内 A 区与 B 区交界的位置为极限平衡条件下的边界，在该界面满足如下应力平衡方程：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+f_x=0\\&\frac{\partial\sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+f_y=0\\&\tau_{xy}=-(\sigma_y\tan\varphi_0+c_0)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

经计算，一次采动影响区的极限宽度为

$$L_0=\frac{m\lambda}{2\tan\varphi_0}\ln\frac{K\gamma H+\dfrac{c_0}{\tan\varphi_0}}{\dfrac{c}{\tan\varphi_0}+\dfrac{p_x}{\lambda}}\tag{2}$$

式中：m 为煤层采高，由于端头不放煤，取 m =3.8 m；λ 为侧压系数，$\lambda=\mu/(1-\mu)$，μ 为泊松比，μ = 0.25；K 为应力集中系数，取 K=2；γ 为覆岩重度，取 25 kN/m^3；H 为巷道埋藏深度，取 H=536 m；c_0 为煤层界面凝聚力，取 c_0=1.06 MPa；φ_0 为煤层界面内摩擦角，取 φ_0 =28.1 °；p_x 为支架对巷道的侧向压力，取 p_x =0.2 MPa。

将各参数代入式（2）中可得 L_0 =2.82 m。

一次采动影响后，相对稳定区宽度 L_1 可按照下式计算：

$$L_1=k(L_0+L_2)\tag{3}$$

式中：k 为稳定性系数，取 k =0.5。4301 辅助运输顺槽煤柱侧帮锚杆有效支护长度为 2.4 m。

通过计算，巷间煤柱的宽度为 7.83 m。

4　数值模拟研究

4.1　计算模型

结合四盘区实际地质情况及工作面巷道的布置形式，应用 FLAC^{3D} 数值模拟软件建立三维数值计算模型，模型长×宽×高尺寸为 600 m×400 m×60 m，模拟深度为 536 m，模型底部限制垂直移动，前后及两端限制水平移动，部分覆岩重度以均布载荷代替，模拟煤层厚度为 11 m，其中采 3.8 m，放 7.2 m，端头不放煤，为与实际相符，所模拟的盘区各工作面宽为 220 m，推进长度为 400 m，沿 Y 轴正方向推进；模拟运输顺槽尺寸为 5.4 m×3.8 m，辅助运输顺槽尺寸为 5.0 m×3.5 m，各煤岩层力学参数见表 1。整个模拟过程为：建模→平衡→掘进 4301 回风顺槽→双巷掘进 4301 运输顺槽及辅助运输顺槽→回采 4301 工作面→回采 4302 工作面。

依据实际情况，结合理论分析结果，本次模拟宽度分别为 4、6、8、10、12、15、20 m 时，在不同采动影响下巷间煤柱的应力演化、破坏、巷道围岩变形规律，通过对模拟结果进行分析，最终确定合理的窄煤柱尺寸。

表 1　岩层物理力学参数表

Table 1　Physical and mechanical parameters of strata

岩石名称	重度 /(kN/m^3)	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	单轴抗拉强度/MPa	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
上覆岩层	2.50	1.41	31.1	0.96	6.43	5.22
基本顶	2.52	2.46	32.5	1.63	10.04	9.08
直接顶	2.46	1.12	30.6	0.85	4.53	3.78
煤层	1.34	1.06	28.1	0.72	1.72	1.03
底板	2.46	1.32	31.3	0.91	5.10	4.36

4.2 回采巷道支护参数

采动期间回采巷道的支护形式及锚杆支护参数对巷间煤柱结构稳定性具有重要影响，本文采用系统分析的方法确定 4301 运输顺槽、辅助运输顺槽的支护参数，其过程如图 4 所示[13, 16]：

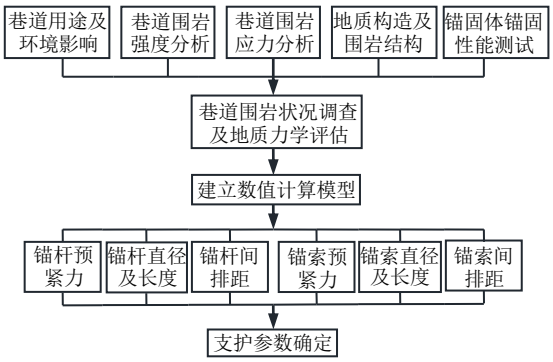


图 4 锚杆支护设计流程

Fig.4 Flow chart of the bolt supporting design

4301 运输顺槽：顶板采用 ϕ18 mm×3 100 mm 的无纵筋全螺纹钢树脂锚杆支护，每排布置 6 根，间排距为 900 mm×800 mm，锚索 ϕ17.8 mm×7 500 mm，间排距为 1 800 mm×2 500 mm，锚固力不低于 100 kN；两帮采用为 ϕ18 mm×2 200 mm 的无纵筋全螺纹钢树脂锚杆支护，间排距为 700 mm×600 mm。

4301 辅助运输顺槽：顶板每排布置 6 根 ϕ18 mm×3 100 mm 的无纵筋全螺纹钢树脂锚杆，间排距 900 mm×800 mm，单根锚杆锚固力不低于 100 kN，锚索为 ϕ17.8 mm×7 500 mm，间排距为 1 800 mm×2 500 mm，每排布置 2 根；煤柱侧巷帮采用为 ϕ18 mm×2 400 mm 的无纵筋全螺纹钢树脂锚杆支护，间排距为 700 mm×600 mm，锚固力高于 100 kN；实体煤侧巷帮采用规格为 ϕ18 mm×2 200 mm 的无纵筋全螺纹钢树脂锚杆支护，锚杆间排距为 700 mm×600 mm。

4.3 采动影响下巷间煤柱应力演化规律

图 5 为 4301 工作面回采结束后不同煤柱宽度条件下辅助运输顺槽两侧煤柱帮及实体煤帮所受垂直应力分布曲线。由图可知，一次采动影响后，随着尺寸的增大，煤柱所受应力呈先增大后减小的趋势，高应力范围呈逐渐增大的趋势，但实体煤所受高应力总体呈缓慢减小的趋势：当宽度为 4～8 m 时，煤柱所受应力较小，基本无应力集中区；当宽度为 10 m 时，煤柱内垂应力直突然大幅度增大，最大应力值由 9.4 MPa 增大至 19.5 MPa；当宽度增大至 12 m 时，煤柱所受应力呈进一步增大趋势；当宽度为 15 m 时，高应力区域范围大幅度增大，应力峰值继续增大，实体煤侧所受应力缓慢减小；当宽度增大到 20 m 时，应力峰值区由一个变为两个，煤柱应力曲线由缓丘状变为不对称的类梯形状，但高应力值有较大幅度的减小。

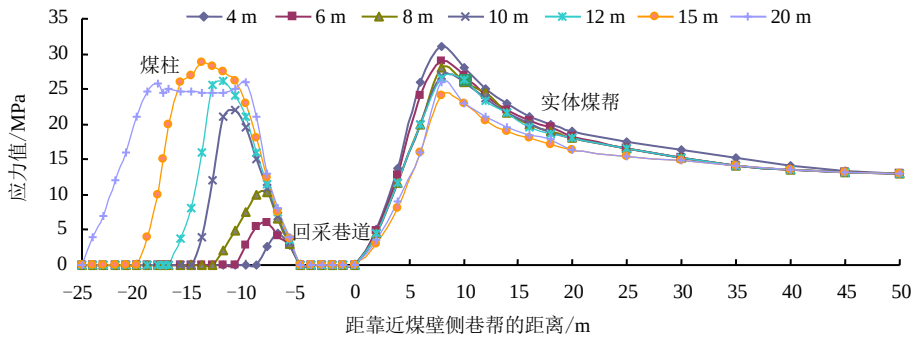


图 5 不同煤柱宽度下巷帮实体煤及煤柱垂直应力分布曲线

Fig.5 Vertical stress curves of coal pillars with different pillar widths

进一步分析可知，当煤柱宽度发生改变时，位于巷道两侧的煤柱及实体煤所受应力也随之发生变化：煤柱宽度较小时（宽度在 8 m 及以内），高应力主要集中于实体煤内；随着宽度的增大，高应力逐步由实体煤向煤柱内转移；在煤柱宽度为 10 m 的情况下，位于巷道两侧的煤柱及实体煤上均承载着较高的集中应力，表明此时高应力正由实体煤向煤柱内转移，巷道两侧均承载着较高的集中应力，高应力正处于应力重新分布的过渡阶段，巷道围岩稳定性差；在一定尺寸范围内，当煤柱宽度大于该尺寸时（12、15 m），煤柱承载着较高的垂直应力，且高应力区域几乎占据整个煤柱，结构稳定性较差；随着煤柱尺寸的进一步增大（20 m），高应力区域范围有所增大，但应力峰值有所降低，煤柱结构由不稳定又逐渐趋于稳定。

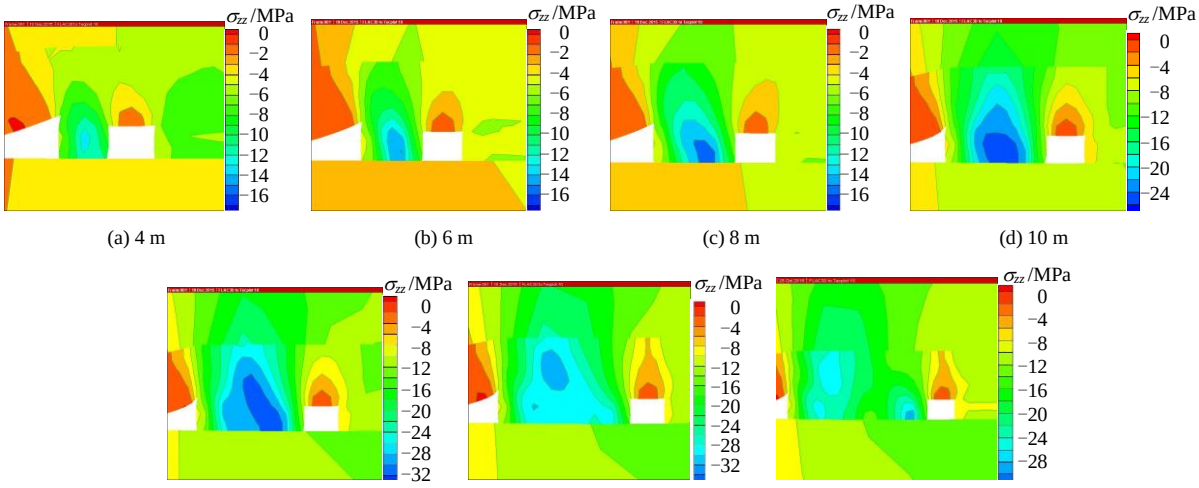
综上所述，可以作出如下定义：一次采动影响后，将高应力由实体煤向煤柱内转移时巷间煤柱的尺寸称为（窄煤柱）最大临界尺寸。一次采动影响

后，当煤柱应力峰值由增大向减小突变，且应力峰值区由一个变为两个时巷间煤柱的宽度称为（宽煤柱）最小临界尺寸。

当煤柱宽度位于最大、最小临界尺寸之间时，煤柱将承载较高的集中应力，且高应力区范围大幅度增大，在该范围内增大煤柱尺寸对其稳定性的增强作用效果不大。因此，若考虑留设窄煤柱时，从有效避开高应力分布及采动影响的角度考虑，巷间窄煤柱的宽度应小于最大临界尺寸；当留设宽煤柱时，从煤柱结构稳定性的角度考虑，煤柱宽度应大于最小临界尺寸。根据分析结果，四盘区综放工作面巷间窄煤柱的宽度应在 10 m 以内。

图 6 为二次采动期间当工作面推进 200 m 时，工作面附近不同宽度煤柱所受垂直应力 σ_{zz} 等直线图，由图可知，受二次采动影响煤柱所受应力较一次采动影响后均有所增大：当宽度在 8 m 及以内时，煤柱内应力峰值在 13～17 MPa 之间，在该尺寸范围内高应力值增幅较小；当宽度为 10、12 m 时，煤柱内高应力区域范围大幅度增大，最大垂直应力分别为 26、32 MPa，煤柱承载着较高的集中应力，结构稳定性有减弱趋势；当煤柱尺寸为 15 m 时，最大垂直应力增至 34 MPa，位于煤柱中部上方，煤柱内绝大部分区域所承载的应力值在 30 MPa 以上，结构稳定性进一步减弱；当宽度增大至 20 m 时，煤柱所受最大应力降低至 30 MPa，应力峰值增至两个，且峰值区域由中部向两侧转移，稳定性开始逐渐增强。

由上述分析可知，二次采动期间当宽度在 10～15 m 范围内时，煤柱所受应力峰值高，应力集中程度大幅度增大，在该尺寸范围内煤柱受采动影响大，结构不稳定，不利于工作面安全生产，因此，窄煤柱宽度不宜在该尺寸范围内。



(a) 4 m　(b) 6 m　(c) 8 m　(d) 10 m

(e) 12 m　(f) 15 m　(g) 20 m

图 6　不同宽度煤柱垂直应力等值线图

Fig.6　Contours of vertical stress for different pillar widths

4.4　煤柱破坏规律

表 2 为两次采动影响下工作面不同位置煤柱弹性特征统计表。由表可知：

表 2　采动影响下煤柱弹性特征统计表

Table 2　Elastic characteristics of pillars under mining influence

煤柱宽度	一次采动	二次采动			
/m	后方 50 m	前方 30 m	前方 15 m	前方 5 m	工作面附近
4	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
6	0.5/8.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
8	2.6/32.6	2.3/28.8	1.5/18.7	0.5/6.3	0.0/0.0
10	3.0/30.0	2.9/29.0	1.9/19.0	0.9/0.9	0.0/0.0
12	3.5/29.2	3.4/28.3	2.5/20.8	1.2/10.0	0.5/4.2
15	4.7/31.3	4.4/29.3	3.1/20.7	1.6/10.7	0.6/4.0
20	8.7/43.5	8.4/42.0	7.2/35.5	4.9/23.0	3.6/15.0

注：斜线前为弹性区域宽度（m），斜线后为弹性区宽度所占比率（%）。

（1）一次采动影响后，当宽度较小（4 m）时，整个煤柱都位于塑性区域内，受到严重的破坏；当煤柱宽度增大到 8 m 时，煤柱中部出现宽度约为 2.6 m 的弹性稳定区，稳定区所占整个煤柱宽度比率为 0.326；当煤柱宽度为 10～15 m 时，中部稳定区域增大，但弹性区域所占百分比有所降低；当宽度变为 20 m 时，弹性区域宽度及比率均大幅度增大，一次采动影响后煤柱中部弹性区宽度增至 8.7 m，所占比率达 43.5%，煤柱结构稳定性增强。

（2）二次采动期间，当宽度为 4～6 m 时，在工作面前方煤柱均已发生破坏，当宽度为 8～10 m 时，在工作面前方 5 m 以外煤柱中部存在一定宽度稳定区，只有在临近工作面时才完全发生塑性破坏；

当煤柱宽度为 10～15 m 时，在工作前方存在较小的弹性稳定区；宽度增大至 20 m 后工作面前方煤柱中部稳定区域宽度进一步增大。

（3）二次采动期间，在工作面前方 15 m 范围内随着工作面的临近，煤柱中部弹性区域宽度大幅度减小，表明在该范围内煤柱受采动影响较大，应对回采巷道进行加强支护。

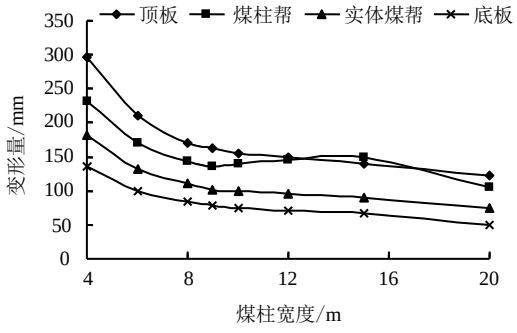
4.5 巷道围岩变形规律

图 7(a)、7(b)分别为一次采动及二次采动影响下 4301 辅助运输顺槽巷道围岩变形曲线，分析可知：

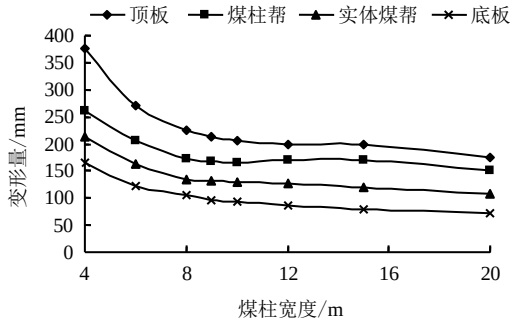
（1）两次采动影响下巷道围岩变形均以两帮为主，且煤柱侧巷帮变形量大于实体煤帮，顶板下沉量次之，底板变形量较小。

（2）一次采动影响下当宽度为 10～15 m 时，巷道煤柱侧帮变形量有增大趋势，结合图 5、6 分析可知，在该尺寸范围内煤柱承载着较高的集中应力，煤柱结构稳定性有减弱趋势，从而导致巷道变形量增大。

（3）当煤柱宽度为 8 m 时，巷道围岩变形基本处于稳定状态，且变形量较小，表明在该尺寸下煤柱稳定性较强，有利于巷道维护。



(a) 一次采动



(b) 二次采动

图 7 不同宽度煤柱巷道围岩变形曲线

Fig.7 Roadway deformation curves for different coal pillar widths

4.6 巷间煤柱合理尺寸确定

综合分析数值模拟结果，当宽度为 4～6 m 时，煤柱承载着较小的垂直应力，但在一次采动影响后发生了严重的塑性破坏，煤柱结构稳定差，不利于隔离采空区有害气体，且二次采动期间巷道围岩变形量大，巷道维护困难；当宽度为 10～15 m 时，该尺寸范围位于窄煤柱最大临界尺寸与宽煤柱最小临界尺寸之间，煤柱承载着较高的集中应力，巷道围岩变形量增大，结构稳定性有减弱的趋势；当宽度为 8 m 时，煤柱所受应力较小，一次采动影响后煤柱中部存在一定范围的弹性稳定区，巷道围岩变形趋于稳定且变形量相对较小。结合理论分析结果及窄煤柱留设原则，可将巷间煤柱的合理宽度确定为 8 m。

5 工程实践

4301 工作面运输顺槽与辅助运输顺槽之间煤柱实际宽度为 8 m，按照本文所确定的锚杆支护参数，同时使用尺寸为 6 200 mm×1 000 mm 的塑编网和尺寸为 5 800 mm×80 mm 多孔异形钢带联合支护。工作面回采期间运输顺槽顶板最大下沉量为 320 mm，巷道两侧煤柱帮和实体煤帮最大变形量分别为 246、180 mm；一次采动影响稳定后，辅助运输顺槽顶板最大下沉量为 210 mm，煤柱帮及实体煤帮最大水平变形量分别为 160、85 mm。

4302 工作面回采之前对回风顺槽进行二次支护，支护断面如图 8 所示。回采期间工作面附近顺槽顶板最大下沉量为 536 mm，煤柱帮及实体煤帮最大变形量分别为 450、260 mm。两次采动期间巷道围岩均得到了有效控制，围岩稳定性较好，表明所确定的煤柱宽度及支护参数能满足安全生产要求。

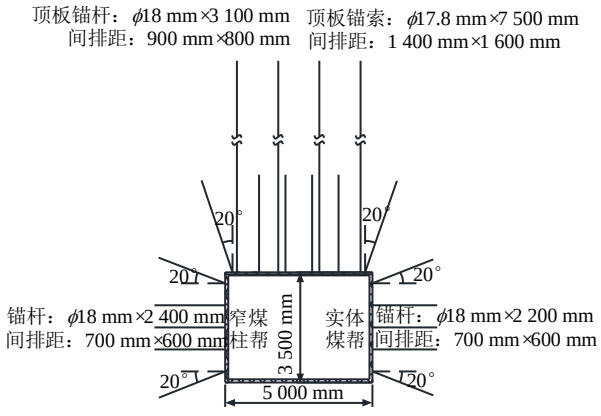


图 8 锚杆支护断面

Fig.8 Cross-section diagram of bolting support

6 结　论

（1）巷间窄煤柱留设时，应确保两次采动期间工作面的安全生产、巷道围岩变形的有效控制，同时最大限度提高煤炭采出率。

（2）一次采动影响后，将煤柱沿倾向方向分为一次采动影响区、相对稳定区、锚杆支护区，在此基础上应用极限平衡理论分析得出四盘区厚煤层综放工作面巷间窄煤柱一次采动影响区宽度为 2.82 m，进而得出煤柱的宽度为 7.83 m。

（3）数值模拟研究表明，一次采动影响后，巷道围岩高应力区域随煤柱宽度的改变而发生变化，当煤柱宽度较小时，高应力主要集中于实体煤上，随着煤柱宽度的增大，高应力逐渐由煤壁向煤柱转移，并给出了最大临界尺寸、最小临界尺寸的定义，指出窄煤柱宽度应小于最大临界尺寸。二次采动期间宽度在 10～15 m 范围内煤柱受到剧烈的采动影响，结构稳定性差，窄煤柱宽度应小于该尺寸范围；当煤柱宽度为 8～10 m 时，一次采动后煤柱中部存在 2.6～3 m 的弹性稳定区，两次采动期间巷道围岩变形量趋于稳定，且相对较小。结合理论分析结果及煤柱留设原则综合分析，最终确定巷间窄煤柱的宽度为 8 m。

（4）现场实践表明，四盘区目前所留设宽度为 8 m 的巷间煤柱能满足实际生产要求，不仅保证了在原有双巷布置方式下回采巷道的整体掘进速度，同时减小了煤炭资源的损失，提高了矿井的技术经济效益。

本文采用理论分析、数值模拟和工程实践相结合的方法对厚煤层综放双巷布置工作面巷间煤柱进行了系统分析论证，最终给出了巷间窄煤柱的合理尺寸，得出了一些对实际生产有益的结论。研究结果可为类似地质条件下巷间煤柱的留设提供基础，也可以对国内现有的大量综放双巷布置工作面煤柱的留设提供参考。

参 考 文 献

[1] 杜计平, 孟宪锐. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
DU Ji-ping, MENG Xian-rui. Mining science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009.

[2] 司鑫炎, 王文庆, 邵文岗. 沿空双巷合理煤柱宽度的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 215－219.
SI Xin-yan, WANG Wen-qing, SHAO Wen-gang. Numerical research on reasonable width of coal pillar in the double gob-side entries[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2012, 29(2): 215－219.

[3] 许国安, 靖洪文, 丁书学, 等. 沿空双巷窄煤柱应力与位移演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 160－165.
XU Guo-an, JING Hong-wen, DING Shu-xue, et al. Evolution rules of stress and displacement for narrow coal pillars between double gob-side entries[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2010, 27(2): 160－165.

[4] 余学义, 王琦, 赵兵超, 等. 大采高双巷布置工作面巷间煤柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3328－3336.
YU Xue-yi, WANG Qi, ZHAO Bing-chao, et al. Study on reasonable width of pillar between roadways in large mining height face with double roadways layout[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 3328－3336.

[5] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu, XU Jia-lin. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.

[6] 谢广祥, 杨科, 常聚才. 煤柱宽度对综放面围岩应力分布规律影响[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11): 1005－1008.
XIE Guang-xiang, YANG Ke, CHANG Ju-cai. Effect of coal pillar width on the stress distribution law of surrounding rocks in fully mechanized top-coal caving mining face[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2006, 28(11): 1005－1008.

[7] 杨科, 谢广祥. 窄煤柱综放巷道围岩应力特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 311－315.
YANG Ke, XIE Guang-xiang. Stress field of surrounding rocks of fully mechanized top-coal caving gateway with small pillars[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(3): 311－315.

[8] 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, 23(20): 3475－3479.
BAI Jian-biao, HOU Chao-jiong, HUANG Han-fu. Numerical simulation study on stability of narrow coal pillar[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3475－3479.

[9] 柏建彪, 王卫军, 侯朝炯, 等. 综放沿空掘巷围岩控制机制及支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 478－481.
BAI Jian-biao, WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong, et al. Control mechanism and support technique about gateway driven along goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2000, 25(5): 478－481.

[10] 彭林军, 张东峰, 郭志飚, 等. 特厚煤层小煤柱沿空掘巷数值分析及应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3609－3616.
PENG Lin-jun, ZHANG Dong-feng, GUO Zhi-biao, et al. Numerical analysis of thick coal seam small pillar along gob roadway and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3609－3616.

[11] 刘金海, 姜福兴, 王乃国, 等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 921－927.
LIU Jin-hai, JIANG Fu-xing, WANG Nai-guo, et al. Research on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(5): 921－927.

[12] 许磊, 魏海霞, 肖祯雁, 等. 煤柱下底板偏应力区域特征及案例[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 561－568.
XU Lei, WEI Hai-xia, XIAO Zhen-yan, et al. Engineering cases and characteristics of deviatoric stress under coal pillar in regional floor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 561－568.

[13] 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 alone next goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(9): 1564－1569.

[14] 王德超, 李术才, 王琦, 等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 539－548.
WANG De-chao, LI Shu-cai, WANG Qi, et al. Experimental study of reasonable coal pillar width in fully mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 593－548.

[15] 张广超, 何富连. 大断面综放沿空巷道煤柱合理宽度与岩层控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1721－1728.
ZHANG Guang-chao, HE Fu-lian. Pillar width determination and surrounding rocks control of gob-side entry with large cross-section and fully-mechanized mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1721－1728.

[16] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1809－1814.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. Study and applications of roadways support techniques for coal mines[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(11): 1809－1814.

塑料套管混凝土桩技术及应用（第 2 版）

著者：陈永辉，陈龙，陈庚，王新泉，小 16 开，平膜勒口，326 页，定价：50 元，出版单位：中国建筑工业出版社，版次：第 2 版，出版时间：2017-08，标准书号：ISBN 978-7-112-20649-0，征订号：30307。

内容简介：本书第 1 版问世后，塑料套管混凝土桩（简称 TC 桩）技术得到了快速发展，在国内高速公路和市政道路工程中应用也越来越广，为此在原版基础上结合近几年 TC 桩技术的研究成果和应用情况进行了系统总结。

目次：第 1 章 绪论；第 2 章 塑料套管混凝土桩技术开发及应用；第 3 章 塑料套管混凝土桩塑料套管分析及计算；第 4 章 塑料套管混凝土桩模型试验研究；第 5 章 塑料套管混凝土桩低应变瞬态波传播特性研究；第 6 章 塑料套管混凝土桩挤土效应现场试验研究；第 7 章 塑料套管混凝土桩单桩承载性能实验研究；第 8 章 路堤荷载下塑料套管混凝土桩现场试验研究；第 9 章 塑料套管混凝土桩承载时效理论研究；第 10 章 塑料套管混凝土桩成桩机理和屈曲变形的透明土模型试验研究；第 11 章 细长桩屈曲理论分析及试验研究；第 12 章 塑料套管混凝土桩设计计算方法；第 13 章 塑料套管混凝土桩技术经济分析；第 14 章 结论。

读者对象：本书适合从事地基处理的岩土工程技术人员使用，也可供相关专业的科研、教学及施工技术人员参考。

（摘自 中国建筑书店）