

条带开采应力关系分析

陕西省煤炭科学研究所 王云虎 张少春

摘要 对条带开采的采宽与工作面矿压之间及柱宽与煤柱应力之间关系进行了探讨, 提出选择合理采留比的新思路。

关键词 周期来压步距 煤柱应力 应力迭加

前言

矿山压力是岩体产生移动和变形的根源, 在以往的岩层和地表移动中, 通常只着重于移动和变形规律研究, 很少与矿山压力结合起来进行。为了揭示岩层与地表移动的力学本质, 在蒲白矿务局马村矿条带开采(以下简称“条采”)研究中, 在地表建立网状观测站进行观测的同时, 还在井下对条采的矿压与煤柱应力进行观测, 从观测资料分析中, 发现条采的采宽与工作面矿压之间、煤柱宽与煤柱应力之间有着极为密切的关系, 结合矿山压力理论, 对条采覆岩和地表下沉机理给以合理解释, 从而为合理选择采留宽度提出新的思路。

1 研究区概况

条采研究区在马矿过渡采区, 开采上石炭统太原群5*煤层, 覆岩从下向上依次为下二迭统山西组, 下石盒子组, 第四系黄土

层; 岩层以砂岩、砂质页岩为主。研究分两个阶段进行; 第一阶段为采区上山段, 第二阶段为采区下山段。工作面布置见图1, 条采中主要地质采矿参数见表1。

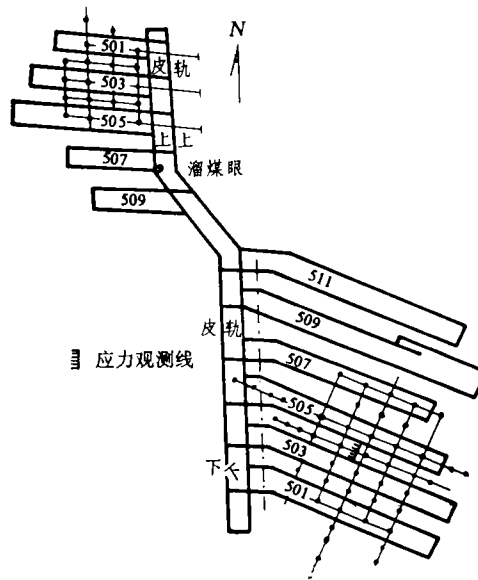


图1 条采平面与地表观测网布置示意图

同样可求得煤柱一侧破坏区的长度

$$x_1 = \frac{m\sigma_1}{2\sigma_0 \operatorname{tg}\phi} \ln \frac{\bar{S}_1}{\sigma_0(1 + \sigma_1/\sigma_0)} \quad (18)$$

当 $x_1 \leq \frac{a}{2}$ 时,

$$\text{即 } a \geq \frac{m\sigma_1}{\sigma_0 \operatorname{tg}\phi} \ln \frac{\bar{S}_1}{\sigma_0(1 + \sigma_1/\sigma_0)} \text{ 时,}$$

煤柱将保持稳定。

同样可以得出保持充填条带煤柱稳定, 煤柱尺寸及开采宽度所满足的关系式, 即

$$m(a + C_0 b) \operatorname{ctg}\phi (\sigma_1 + \sigma_0) \left[\exp \left(\frac{a\sigma_0 \operatorname{tg}\phi}{m\sigma_1} \right) - 1 \right] \geq a(a + b)\gamma H \quad (19)$$

(责任编辑 徐振亚)

表 1 地质采矿技术参数表

区段	煤层厚/m	倾角/°	开采深度/m			采留宽度/m		走向长/m	采高/m	回采率/%	掘进率/m·万t ⁻¹
			H ₁	H ₂	H ₀	b	a				
上山段	2.0	8~10	134.8	109.7	122.2	28.9	25.2	91~181	1.95	53.4	363.6
下山段	3.8	10~12	253.0	176.9	214.9	35.0	25.0	270~342	2.00	58.3	290.9

2 矿压观测

期来压步距、增载系数，列于表2。

2.1 观测资料整理

(2) 条采与长壁开采异同点比较

(2) 观测情况与数据整理 条带工作面顶板管理采用冒落法，依据工作面支柱载重量和活柱下缩量综合分析求得老顶初次、周

来压观测求得的技术参数与采矿地质条件相同的长壁工作面（马矿 12503 面）相比，其异同点说明如表3。

表 2 老顶初次和周期来压步距及增载系数表

工作面编号	初次来压步距/m	P	周 期 来 压						平均步距/m	P
			1		2		3			
			步距/m	P	步距/m	P	步距/m	P		
上503	22.0	3.52	10.8	1.73	9.6	3.05	9.6	3.10	10.0	2.63
下505	22.4	2.46	10.5	2.16	12.6	2.28	7.9	2.98	10.3	2.47

表 3 条采与长壁开采矿压特征比较表

工作面编号	工作面长度L/m	直接顶初次垮落步距/m	老顶初次来压步距/m	周期来压步距L _周 /m	$\frac{L}{L_{周}}$	老顶初次来压强度	周期来压强度
长壁12503	95	6.5-9.7	16-17	7.8	11.9		1.57
条上503	30	8.0-11.0	22	10.0	3.0	3.52	2.67
条下505	35	11.4	22.4	10.3	3.4	2.42	2.47

2.2 矿压观测分析

2.2.1 老顶周期来压步距大小主要决定于工作面的长短

周期来压步距大小受多种因素影响，在地质条件基本相同时主要决定于工作面长短，研究结果证明：长壁工作面的老顶岩梁与条采老顶板块破断跨距之间关系近似表达为：

$$L_1 = \frac{L \cdot L_2}{L - L_2} \quad (1)$$

式中 L₁——条采面老顶周期来压步距；
L₂——长壁面老顶周期来压步距；
L——工作面长。

若以L为自变量，L₁为因变量绘制成曲线图，如图2。

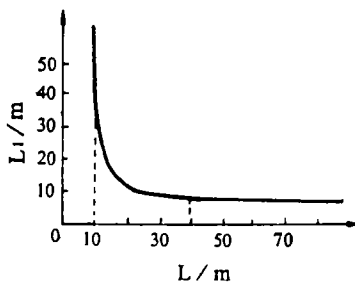


图 2 采宽与周期来压步距关系曲线图

由图2分析可知：(1) 当L>10m，则L₁>35.5m，随着采面缩短，周期来压步距急剧增大，当工作面长度小于长壁开采周期来压步距时，采面实际相当于宽度较大的巷道，工作面不会有周期来压；(2) 当10m<L<40m，则35.5m>L₁>10.5m，随着采面长度增大，周期来压步距逐渐减少；(3)

$L > 40\text{m}$, 则 $L_1 < 9.7\text{m}$ 。随着工作面长度增大, 周期来压步距缓慢减小。当工作面长度增大至某一数值, 周期来压步距将近似为常数。从表 3 实测求得的数据与上述分析完全一致。

2.2.2 条采顶板冒裂形式的划分

从老顶周期来压步距的大小与工作面长度关系分析中明显看出, 工作面是否有老顶周期来压及其来压步距的大小, 决定了采空区覆岩的移动和破坏形式, 现初步将其归纳为四种情况:

(1) 当 $L_{初} + L_{周} < b < 40\text{m}$ 时, 老顶周期来压断面线应平行于工作面, 矿压显现规律与长壁开采基本相同, 在采空区上方形成冒、裂、弯三带。与长壁工作面不同点, 其一, 冒、裂带呈拱形, 其高度小于长壁开采; 其二, 周期来压步距大于长壁开采。

(2) 当 $L_{初} < b < (L_{初} + L_{周})$ 时, 老顶周期来压断面线一般应位于采空区中间且垂直于条采工作面, 每次来压相当于老顶初次来压, 在采空区上方形成冒、裂、弯三带, 一般情况下, 弯曲带能够发展到地表引起地表微量下沉。由于条采面是逐步推进, 直接顶冒落的充填程度随距工作面距离增大而增大。因此, 老顶来压强度在靠工作面一端要大些, 这对条采面的维护是不利的。

(3) 当 $L_{周} < b < L_{初}$ 时, 只有直接顶冒落, 在一般情况下老顶不会来压。因此, 在采空区上方只有冒落带, 在冒落拱圈周围有裂隙或高度较小的裂隙带。一般情况下没有弯曲带, 地表不下沉或下沉量极小。

(4) 当 $b < L_{周}$ 时, 直接顶不冒落或只有局部冒落, 采空区没有被充填, 没有形成三带。此时工作面只相当于大宽度的巷道。故地表不会产生下沉。

3 煤柱应力观测

3.1 应力观测与资料整理

在进行条采煤柱应力观测之前, 测定煤

柱的原岩应力值为: 垂直原岩应力 $\sigma_H = 447.1\text{kg/cm}^2$, 水平原岩应力 $\sigma_2 = 35.07\text{kg/cm}^2$ 。

煤柱应力观测线设在下山 503 与 505 两工作面间的煤柱横川里, 平面布置见图 3。

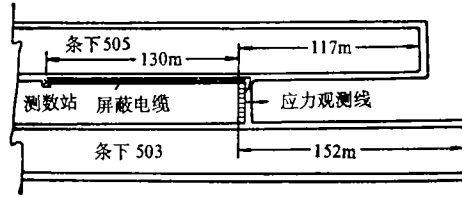


图 3 煤柱应力观测站布置图

在 503 与 505 工作面回采过程中, 每天对探头量测应力, 将量测的应力值经过整理并绘制成工作面推进方向应力变化曲线图 (图 4a、b)。图中规定: 横坐标为 503 或 505 工作面推进度 L , 纵坐标为煤柱应力值, 亦是应力观测线位置, 应力超前距为正值, 滞后为负值。

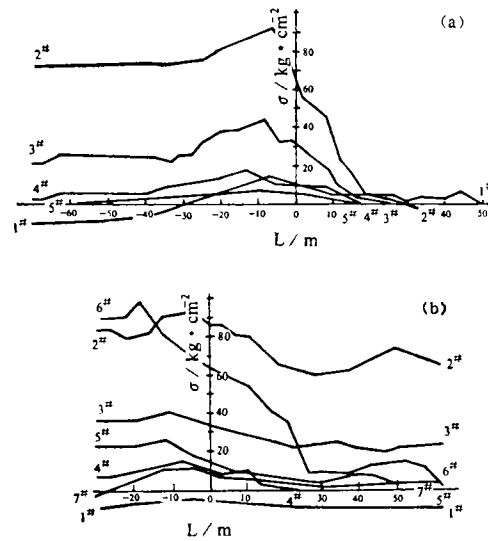


图 4 沿工作面推进方向煤柱应力变化曲线
a) 开采 503 工作面; b) 开采 505 工作面

为了更直观全面的反映应力观测线在回采过程中煤柱应力分布情况, 又将观测数据绘制成煤柱应力等值线展开图 (图 5a、b)。

3.2 对煤柱应力分析

3.2.1 回采 503 工作面的应力分析

在回采 503 工作面时尚未形成煤柱, 采

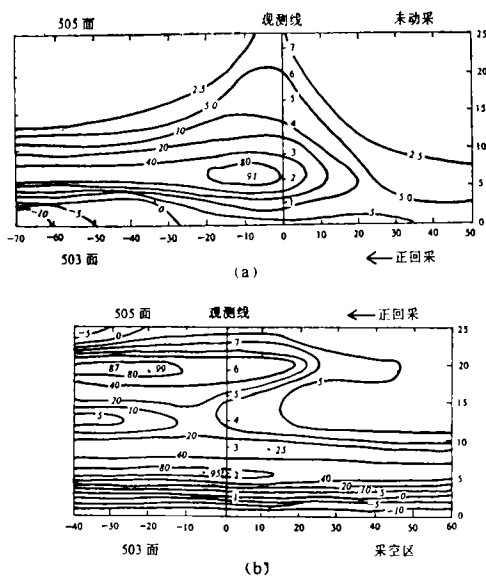


图 5 开采应力观测线平面展开等值线

a) 开采503工作面; b) 开采505工作面

采空区一侧煤体的应力分布有以下特点:(以测定的原岩垂直应力值5%作为应力影响边界)

(1)在503面推进过程中,各应力点的超前距随着进入煤体的深度增大而减小,其变化范围为63.6~1.5m;各应力点滞后距随着进入煤体深度增大而增大,其变化范围为66.0~74.0m。

(2)煤体内各观测点的最大应力值均滞后于回采工作面,滞后距变化范围为6.4~12.9m,其中最大应力值位于煤体垂深5.5m,滞后工作面6.4m。

(3)当工作面位置超过各应力点的滞后距,条采面的推进不再对各应力点的应力产生影响,这时观测到的应力值是岩体内的残余应力,其数值基本上是常数,称之为应力稳定值。

(4)靠近煤体边缘的应力点(1*点),在滞后距大于31m以后,量测到应力值均为负数;此时,煤体边缘成为减压区,上覆岩层的压应力已向煤体深部转移。

3.2.2 回采505工作面的应力分析

505工作面动采后,随着工作面向前推进逐渐形成煤柱,各应力点的应力分布有如

下特点:

(1)从505工作面开采至结束,靠近503工作面一侧煤柱应力基本保持503面回采时的应力稳定值不变,只是在靠近应力观测线前后有微小变化。

(2)煤柱在靠近505面一侧,在505面回采过程中,应力变化规律与503面一侧相似。各应力点超前距变化范围为109.0~18.0m,比503面开采时大得多,这是因为在503面开采时煤柱被松动使应力影响提前,故超前距增大;滞后距为29.0~31.5m,比503面开采时小得多。同样,这是因煤柱被松动使煤柱提前趋于稳定,故滞后距减小。

(3)各应力点的最大应力值同样滞后于505工作面位置,滞后距范围为3.6~18.5m。

(4)靠近505面一侧煤柱7*应力点,在滞后505面27m后,其应力观测值均为负数,说明煤柱边缘已成减压区。

将503面和505面开采时,煤柱应力特征点应力值列入表4。

3.3 煤柱应力区划分与煤柱稳定性分析

3.3.1 煤柱应力区划分

以回采505工作面各观测点最大应力值和稳定值与原岩垂直应力相加,绘制成煤柱垂直应力断面图(图6)。

图中abcd为最大应力值曲线,ABCD为稳定值应力曲线。根据应力稳定值(或最大值)的大小将煤柱划分为两个区:(1)屈服区 γ -从煤柱边界至煤柱应力峰值。在屈服区内包含小于原岩垂直应力的衰减区 γ_0 ;(2)煤柱核区 a_0 -应力两峰值之间的煤柱。从图6看出,柱核区中部应力值接近于垂直原岩应力,说明煤柱中部承受采空区覆岩的压应力很小。

3.3.2 煤柱稳定性分析

条采留设煤柱的要求:煤柱既要承受足够的采空区覆岩的压应力又保证煤柱有永久的稳定性。从煤柱断面应力曲线图6进一步分析可看出图6的煤柱留设偏大。因此,可

表 4 应力观测线特征值及其位置一览表

工作面	点号	初始 $\sigma_{初}$ /kg·cm ⁻²	应力超 前距/m	突变 $\sigma_{突}$ /kg·cm ⁻²	应力超 前距/m	应力 $\sigma_{峰}$ /kg·cm ⁻²	峰值滞 后距/m	稳定应力* $\sigma_{稳}$ /kg·cm ⁻²	滞后距 m	柱边减压 滞后距/m
503 面	1*	4.7	63.6	8.1	19.0	15.0	-6.4	-9.0	-66.0	-31.0
	2*	3.2	49.0	19.0	15.0	91.0	-6.4	70.0	-66.0	/
	3*	3.4	19.0	6.5	14.0	45.0	-7.8	20.0	-69.0	/
	4*	1.2	19.0	6.6	12.4	17.8	-12.5	0.0	-74.0	/
	5*	4.2	8.4	5.1	8.3	9.1	-10.0	0.0	-74.0	/
	6*	1.9	1.5	/	/	5.6	-6.4	0.0	-74.0	/
	7*	2.8	1.5	/	/	4.3	-6.4	0.0	-74.0	/
505 面	1*	/	/	/	/	10.6	3.6	-9.0	/	/
	2*	/	/	80.0**	11.0	95.0	5.0	83.0	/	/
	3*	/	/	28.5**	11.0	41.5	12.0	34.5	/	/
	4*	1.2	18.0	6.2	12.5	14.8	8.0	4.0	-29.0	/
	5*	3.0	84.0	7.0	12.5	28.0	12.0	22.5	-29.0	/
	6*	10.4	94.0	25.0	23.5	99.0	18.5	87.0	-31.5	/
	7*	2.4	109.0	/	/	10.6	5.0	-9.0	31.5	-27.0

* 因故，05面仅观测到滞后距31m，各应力点稳定值及其滞后距是近似的。

** 因03面开采时煤柱残余应力比较大，故突变应力显得大些。

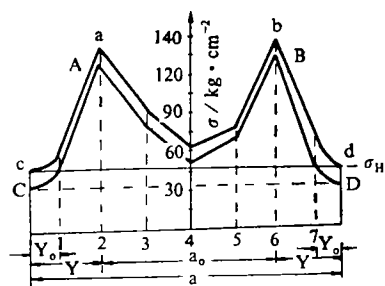


图 6 煤柱断面应力曲线

以用缩小煤柱的方法来确定合理的煤柱宽度。具体做法如下：

以 503 面回采煤柱应力稳定值曲线和最大应力值曲线（代表 505 面开采时最大应力值曲线）为基础迭加绘制出来的应力曲线，非常接近 505 面回采时最大应力值曲线。因此，采用应力迭加的方法来选择煤柱的合理采宽是可行的。以马矿条采为例，选择煤柱宽度分别为 23m、21m、19m、17m、15m 进行迭加，迭加后绘制成图 7。

由图可知：当煤柱宽度缩小，煤柱中间的压应力逐渐增大，也逐渐趋近于煤柱垂直应力的极限值，煤柱逐渐趋于不稳定状态。故可以取煤柱应力峰值和煤柱中点应力值的

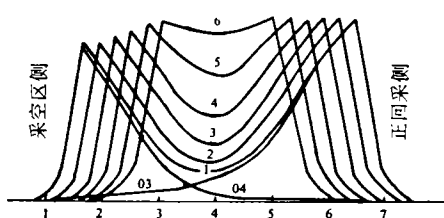


图 7 不同柱宽应力曲线

比值 K 来衡量煤柱的稳定性。比值 K 与煤柱安全系数 n 相比，其作用是一样的，它们之间的关系推导如下：

煤柱不同宽度迭加的应力曲线与横坐标所构成的面积，即为煤柱不同宽度的实际承受的最大载荷 P_1 ；煤柱不同宽度的极限载荷为 P_2 ， P_2 选用长煤柱计算公式：

$$P_2 = 4r_H(a - 4.92MH \times 10^{-3}) \quad (2)$$

式中 r_H ——原岩应力，t·m⁻²；

a ——煤柱宽度，m；

M ——开采厚度，m；

H ——开采深度，m。

将计算结果列入表 5。

将表 5 中 a 、 K 、 n 值绘成曲线，如图 8。

以图 8 为依据，结合条采的成功经验，

划定煤柱稳定程度的宽度 a 与 k 、 n 之间的关系如图8所示，将图中数值列入表6。

表 5 煤柱不同宽度压力比 K 和安全系数 n 计算表

煤柱宽/m 序号	25	23	21	19	17	15
$\sigma_{max}/kg \cdot cm^{-2}$	99	100	102	104	107	113
$\sigma_{min}/kg \cdot cm^{-2}$	18	25	37	55	80	110
k	5.50	4.00	2.76	1.89	1.34	1.03
$p_1/t \cdot m^{-2}$	23691	26361	23571	23511	23451	23391
$p_2/t \cdot m^{-2}$	43399	39607	35814	32021	28229	24436
n	1.83	1.68	1.52	1.36	1.20	1.04

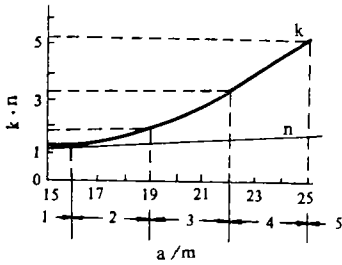


图 8 柱宽 a 和 k 、 n 曲线

表 6 煤柱稳定程度 a 、 k 、 n 关系表

代号 稳定 程度	1	2	3	4	5
稳定程度	稳定性差	较稳定	总 定	稳定性强	煤 柱 偏 大
a/m	<16	16~19	19~22	22~25	>25
k	<1.2	1.2~1.	1.9~2.3	3.3~5.5	>5.5
n	<1.2	1.2~1.	1.4~1.6	1.6~1.8	>1.8

4 结 论

(1) 条带开采依据地质采矿条件不同，有老顶周期来压，也可能没有老顶周期来压；有周期来压时，其来压步距必然大于同等地质条件下的长壁开采。

(2) 条带开采采空老顶的断裂面方向有两种情况： a 、当采宽较大时，断裂面一般平行于工作面； b 、当采宽较小时，断裂面可能垂直于工作面，或者没有明显的断裂面（即没老顶周期来压）。

(3) 在马矿过渡采区地质采矿条件下，条采一侧煤体应力超前距最大为 63.6m，形成煤柱后应力超前距最大值为 109.0m；条采一侧煤体应力滞后距最大值为 74.0m，形成煤柱后应力滞后距最大值为 31.5m。

(4) 条采煤柱划分为屈服区和柱核区，在屈服区内包含着减压区。采空区上覆岩层的压应力主要由柱核区支撑。

(5) 条采煤柱应力比 k 具有与条采煤柱安全系数 n 相同的作用。因此，在计算和选择合理的采留宽度时，也可用应力比 K 来进行验算。

(责任编辑 邹正立)

本刊报道

煤炭开采新技术研讨及技术交易会暨情报站年会，于一九九四年十月十二日在四川都江堰市召开，会议代表 77 人。

会议第一项内容为学术报告，共有 11 人做了 15 篇大会发言。

会议第二项内容为新产品、新技术交流与 技术洽谈。会上介绍了气垛支架、组合锚

杆支护、单体液压支柱的改进、轻型放顶煤支架快速移架系统、煤层加固等。代表们就高产高效工作面的现场经验，特别是综采放顶煤开采中的煤尘、瓦斯、防灭火、回收率以及矿压显现规律等问题进行了热烈讨论和交流。

会议还为代表印发了“煤炭开采新技术论文集”一册，约 12 万字。

会议于二十日结束。代表们一致认为，此次会议开得十分成功。