

关于综放开采的岩层运动和 矿山压力控制问题

赵经彻 陶廷云

(兖州矿业集团 兖州 273500)

刘先贵 孙晓明

(山东矿业学院 泰安 271019)

提要 应用内外应力场理论,根据鲍店煤矿的生产实践,结合实验室相似材料模拟研究,对分层开采,网下综放,全厚综放三种不同开采条件下的冒落岩层厚度、导水裂隙带高度、地表沉陷特征以及支承压压力大小及分布特点进行了分析和探讨,并建立了相应的计算模型,为现场综放回采工作面、回采巷道矿压控制以及综采放顶煤完全开采提供了理论依据。

关键词 综采放顶煤,岩层运动,矿山压力控制

1 引言

兖州矿业集团 1996 年产煤 1 824 万吨,综放出煤 1 151 万吨,兴隆庄、鲍店、东滩、南屯各矿综放工作面平均年产都在 200 万吨以上。其中东滩矿整层(全厚)综放年产达 261 万吨,鲍店网下综放工作面年产超过 230 万吨,都创造了国产综采的最高水平,进入了世界高产工作面的行列。各矿综放工作面的技术经济指标如表 1 所示。实践说明厚煤层综放开采适应我国的开采技术条件,能够达到大幅度增产、高产高效的目的。然而对于厚煤层综放开采所涉及的煤矿安全开采和环境控制等若干重大问题的优劣评价认识还很不统一,例如由于采高增加,影响防水煤柱留设的裂隙高度是否比分层开采扩大?地表沉陷是否会增加?瓦斯突出、冲击地压、底板突水的危险性是否会更大?等等,这些都有待进一步在生产 and 深入研究中解决。本文根据“以岩层运动为中心”的矿山压力理论,结合兖州矿工程实践对综放开采的岩层运动和矿山压力控制问题作出初步的分析和探讨。

表 1 各矿综放工作面的技术经济指标

Table 1 The technical and economic targets of fully mechanized mining

矿名	最高单产(万 t/月)	回采率(%)	效率(t/工)
兴隆庄	22.6	84.2	121.6
鲍店	22.3	84.4	108.0
东滩	34.9	85.9	175.6
南屯	30.0	87.2	166.2

2 综放开采的冒落岩层及厚度

回采工作面推进冒落的岩层厚度是回采工作面和巷道矿压(显现)控制设计的基础,也是决定上覆裂隙带高度和地表沉陷大小的重要参数。为此我们针对鲍店矿三层煤(煤层柱状图见图 1)采用理论推导和模拟研究相结合的方法,就会层开采、网下综放、全厚综放 3 种情况的冒落岩层总厚度进行对比研究。其中根据岩层运动规律,推断的采场结构状态如图 2 所示。显然,按几何条件不难导出 3 种情况下冒落的岩层总厚度分别为:

分层开采方案假设各分层厚度相同,即 $h = h_e$, 则

开采第一分层时:

$$m_e = \frac{h_e - S_A}{k_A - 1} \quad (1)$$

开采第 n 分层时:

$$m_{zn} = \frac{h_e - S_A}{k_A - 1} + m_{n-1} \left(1 - \frac{k_A - k_c}{k_A - 1}\right) \quad (2)$$

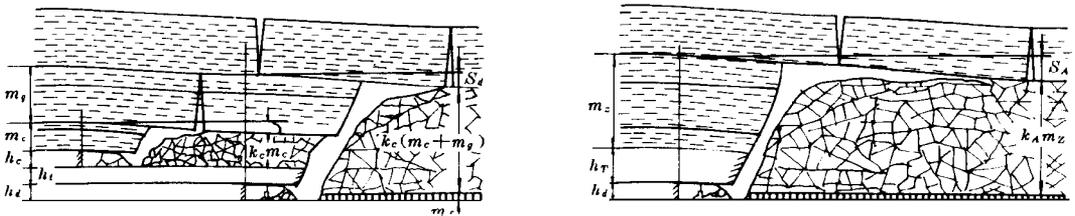
式(1)及(2)中, h_e 为分层采高; S_A 为老顶第一岩梁的沉降值; k_A 及 k_c 分别为冒落岩层压实前后的碎胀系数。

显然,如果下分层开采在上分层开采冒落岩层基本压实后进行,即 $k_c = 1$, 则开采第 n 分层时冒落岩层总厚度将接近开采第一分层时的冒高,即 $m_{zn} = m_e$ 。

地层	柱状 1:500	层厚 m	累厚 m	岩性
二 叠 西 系		0.87	29.57	煤2
		1.95	28.70	深灰—灰色泥岩
		9.34	26.75	浅灰色泥质粉砂岩
		5.82	17.41	深灰色粗粉砂岩
		7.91	11.59	灰色细砂岩
		3.68	3.68	黑色粉砂岩
		8.5		煤3

图 1 煤层柱状图

Fig 1 Geological column of coal seam



(a) 分层综放

(b) 全厚综放

图 2 采场结构状态图

Fig 2 Structure state figure for coal face

全厚综放: 采高 $h = h_d + h_r$, 则

$$m_z = \frac{(h_d + h_r) - (S_A + m_f)}{k_A - 1} \tag{3}$$

网下综放: 采高 $h = h_d + h_r$, 则

$$m_z = \frac{(h_d + h_r) - (S_A + m_f)}{k_A - 1} + m_c(1 - \frac{k_A - k_c}{k_A - 1}) \tag{4}$$

式(3)及(4)中, h_d 及 h_r 分别为综放截煤及放煤高度; m_z 为冒落岩层厚度; m_f 为老顶残留浮煤厚度。

显然, 综放采空区残留浮煤愈多(即回收率愈低), 则冒落的岩层厚度将愈小。

三层煤厚 8.7~9 m, 如果老顶岩梁沉降值相同(按 1.5 m 考虑), 角矸点处碎胀系数取 1.3, 假设分层开采方案的下部分层开采和网下综采都在冒落岩层压实后进行, 综放采空区丢煤按 15% 计算, 则按理论公式推断出 3 种开采方案的冒落岩层厚度值如表 2 所示。3 种开采方案模拟实验研究结果则如表 3 所示。显然两者十分相近。

表 2 理论推断不同开采方案的冒落岩层厚度值

Table 2 Thickness of collapsed strata in theory under 3 conditions

开采方案	采高/m	冒高/m	冒高/采高
分层综采	3	5	1.8
网下综放	6	12	2.0
整层综放	9	20.5	2.2

表 3 三种开采方案冒落岩层厚度模拟研究结果

Table 3 Thickness of collapsed strata in simulation test under 3 conditions

开采方案	采高/m	冒高/m	冒高/采高
分层综采	2.5	4.55	1.8
网下综放	6	13	2.1
整层综放	9	17	1.9

通过上述研究, 可以初步得出结论: 如果工作面支护强度足够(支架按高位态工作)回收率保证在 85% 左右, 放顶煤综采的冒落岩层总厚度将按采高成倍数比例增加。这一结果将对裂隙带高度和地表沉陷值产生重要影响。

3 综放开采的导水裂隙带高度

鲍店煤矿采用现场实测配合实验室模拟方法研究了综放导水裂隙带的高度, 并与分层开采方案进行了对比。表 4 列出了 3 种开采方案裂隙带发展高度的模拟实验结果。与此同时, 该矿创造性地采用了双端充水堵水孔井下钻孔观测方法, 进行了实测研究。通过 7 个钻孔的细致测量和分析, 得到综放条件下的导水裂隙带发育高度为 66 m, 最大不超过 71 m, 与模拟研究结果十分相近。

表 4 不同开采方案裂隙带发育高度的模拟实验结果

Table 4 Height of cracked strata in simulation test under 3 conditions

开采方案	采高/m	冒高/m	初次来压/m	裂隙带高度/m
分层开采顶分层	2.5~3	4.55	43~45	44
网下综放	6	13	41~43	70
全厚综放	9	17	46~50	78

上述研究说明 9 m 厚煤层综放裂隙带高度在 80 m 左右, 不超过单分层(采高 3 m 左右)开采裂高 44 m 的两倍, 远比原来按采高成线性比例扩展的预计值 120 m 小得多。究其原因是综放一次全厚开采条件下的冒落岩层总厚度, 要比三分层开采累计冒落的岩层总厚度大得多。显然, 在采出的煤层厚度相同的条件下, 冒落岩层的厚度愈大, 在其压实前的膨胀充填效应将愈明显, 其上部岩层的沉降及由此产生的拉伸裂隙愈将受到控制。这个关系可由下列定性研究给出。

假设图 3 所示采场中接近拱顶部位的岩梁(m_n) 实现了第一次(裂断)运动, 步距以 C_0 表示。如果其下部有 z 个岩层冒落, 总厚度 $m_z = \sum_{i=1}^z m_i$, 平均碎胀系数为 k_A , 上覆裂隙梁的总厚度为 $m_F = \sum_{i=z+1}^n m_i$, 其平均裂胀系数为 k_B , 则该岩梁的沉降值 S_{An} 可由下式表示出:

$$S_{An} = h - \left[\sum_{i=1}^z m_i(k_A - 1) + \sum_{i=z+1}^n m_i(k_B - 1) \right] = h - [m_z(k_A - 1) + m_E(k_B - 1)] \quad (5)$$

显然, 在 $k_A \gg k_B$ 的条件下, m_z 愈大, 则 S_{An} 将愈小。

如果以岩梁沉降后的轴线张裂量 $\Delta l = \int_0^m \Delta l_i$ 表达该岩层裂隙的发育程度。在假设该岩梁沉降过程中不出现压缩和挤碎的情况, 用图 4 所示模型可求得

$$\Delta l = l - C_0 = 2 \left[\int_0^{x_0} \sqrt{1 + y^2} dx - x_0 \right] = 2 \left[\int_0^{x_0} \left(1 + \frac{1}{2} y^2 \right) dx - x_0 \right] \quad (6)$$

式中 l 为沉降伸张后的梁轴线的长; C_0 为该岩梁第一次来压步距, $x_0 = C_0/2$; y 为沉降后的梁轴挠曲方程, 即

$$y = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

取边界条件

$$\begin{cases} y|_{x=0} = 0 \\ y'|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} y|_{x=x_0} = S_A \\ y'|_{x=x_0} = x_0 \end{cases}$$

则可得

$$y = - \frac{2S_A}{x_0^3} x^3 + \frac{3S_A}{x_0^2} x^2$$

代入式(6)整理得

$$\Delta l = 5S_A^2/C_0 \quad (7)$$

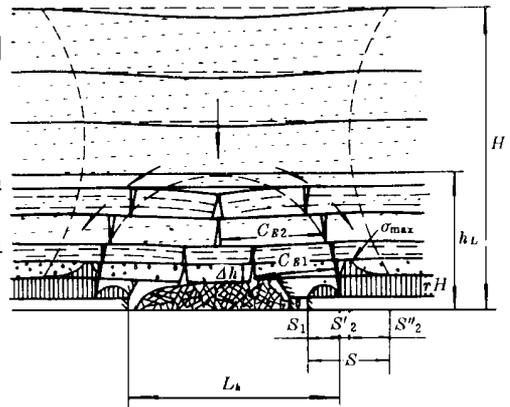


图 3 支承压力分布和覆岩运动状态关系图

Fig. 3 The relation between abutment pressure and strata movement state

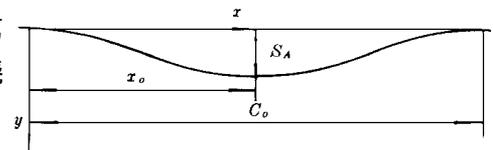


图 4 岩梁沉降计算模型

Fig. 4 The calculation model of strata subsidence

由式(7)可知, 该岩梁的裂隙与其沉降量 S_{An} 的平方成正比。可见综放开采由于冒落岩层总厚度增加带来的膨胀充填作用是十分明显的。

4 综放开采的地表沉陷特征

鲍店矿采用实验室模拟方法研究不同采高 (h) 条件下地表沉陷量 S_d 的沉陷系数 $C_s = S_d/h$ 。在未达到充分开采之前, 两种采高的对比如表 5 所示。

表 5 不同采动条件下沉陷系数对比

Table 5 The development of subsidence ratio with the advance of workface

采动条件	分层开采(采高 4.5 m)						放顶煤开采(采高 8.7 m)					
测点	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
沉降量/m	0.82	0.93	0.68	0.63	0.55	0.50	1.00	1.18	0.88	0.75	0.68	0.50
沉陷系数	0.18	0.21	0.15	0.14	0.12	0.11	0.11	0.14	0.10	0.09	0.08	0.06
平均值	0.15						0.10					

由表可知三层煤综放 ($h = 8.7 m$) 地表的沉陷值比分两次开采 ($h = 4.5 m$) 有所增加, 但下沉系数却明显减少, 也就是说综放地表的总沉陷值要比分层开采小得多。究其原因, 同样是综放冒落岩层总厚度大幅度增加膨胀充填作用的结果。如果不考虑开采后沉降的各岩层间的空隙, 地表任何点的沉陷值及沉陷系数可分别由式(8)及式(9)求出:

$$S_d = h - [m_z(k_z - 1) + m_E(k_E - 1) + m_d(k_d - 1)] \tag{8}$$

$$C_s = \frac{S_d}{h} = 1 - \frac{m_z(k_z - 1) + m_E(k_E - 1) + m_d(k_d - 1)}{h} \tag{9}$$

式中, m_d 为表土厚度; k_d 为沉陷系数。

显然, 当表土厚度 m_d 不变时, 冒落岩层总厚度 m_z 增加, 则裂隙带总厚度 m_E 减小。由于冒落岩层破碎膨胀系数 k_z 值比裂隙带膨胀系数大得多, 因此, 综放条件下的地表沉陷值及沉陷系数都要比分层开采小得多。

5 综放开采的支承压力大小及分布特点

鲍店开采三层煤综放支承压力的实验研究得到如下结果:

(1) 随采场推进和覆岩破坏成拱的发展, 支承压力分布范围及最大应力值逐渐增加, 其发展变化规律如图 5(a)、(b)、(c) 所示。

(2) 工作面推进至采深的 1.5 倍 ($C = 1.5H$) 达最大值。此时, 支承压力分布的形态如图 3 所示。其中由运动的岩层作用力决定的内应力场范围 (S_1), 主要由拱外移动岩层作用的外应力场范围 (S_2) 可分别由式(10)及(11)表达:

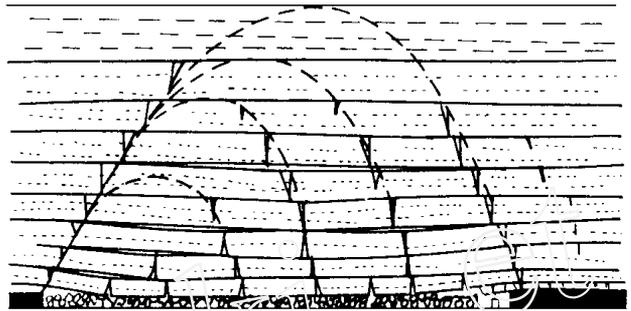
$$S_1 = \xi(h_d + h_r)(1 - \alpha_k) \quad (10)$$

$$\alpha_k = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_c}{k_{max} \mathcal{M}H} \leq 1$$

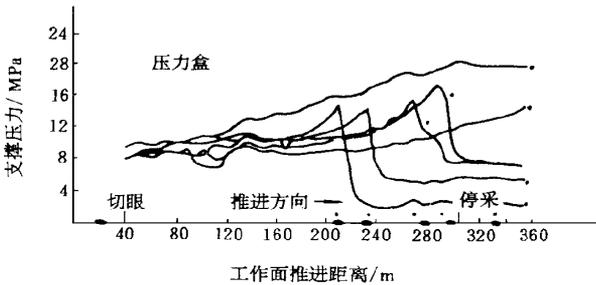
$$S_2 = 0.74 \frac{\mathcal{M}^2}{\sigma_{max}} 0.74 \frac{H}{k_{max}} \quad (11)$$

式中, H_d 及 H_r 分别为推采高度和放煤高度, σ_c 为煤层单向抗压强度, k_{max} 为应力集中系数。显然, k_{max} 愈大则 S_1 及 S_2 将愈小。

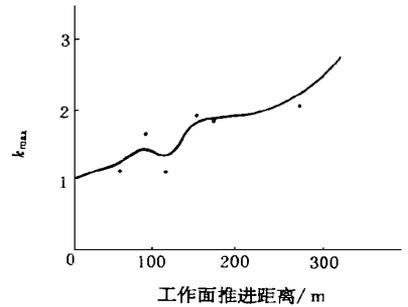
(3) 放顶煤开采支承压力分布范围明显扩大, 但应力集中系数并没有明显增加。表 6 中括号内外的两个数字分别是两次实验研究的结果。



(a) 覆岩成拱破坏发展图



(b) 支承压力发展变化图



(c) 应力集中系数变化图

图 5 随采场推进支承压力发展变化规律

Fig 5 The variation law of abutment pressure with advance of workface

表 6 随工作面推进应力集中系数变化值

Table 6 The variation of stress concentration ratio with the advance of workface

工作面 推进距离/m	应力集中系数 k_{max}		
	开采顶分层	网下综放	全厚综放
90	1.5(1.15)	1.4	1.2
100	2.0(1.4)	1.86	1.6
150	2.42(1.8)	2.11	1.7
200	(2.0)		2.2
250	(2.3)		2.5
300	2.8		3.2

6 关于综放开采的其它问题

6.1 关于综放回采工作面矿压控制

如前所述,综放采场在保证回收率(采空区少丢浮煤)的前提下,冒落的岩层厚度要比分层开采按采高成倍数的比例增加。为保证回收率和防止架前漏顶,支架必须尽可能保持在高位态(最终采场顶板下沉量)状况下工作。因此,综放采场要求的支护强度及支架工作阻力都应比分层开采大得多。一些采场出现综放实测支护阻力低于分层综放工作面的情况是不正常的,是采空区大量丢失浮煤和支架在低位态工作的结果。

6.2 关于综放工作面回采巷道矿压控制

由于综放采场冒落岩层厚度增加和“内应力场”范围的扩大,有利于实现在“内应力场”中开掘和维护巷道(即采用“无煤柱”开采),以此可以避免比分层开采更大的护巷煤柱损失,防止出现冲击地压。采用这一方案的关键是正确选择巷道开掘的时间。必须尽可能保证在覆岩沉降接近完成即应力场基本稳定后掘巷,否则将造成大的维护工作量。采用锚网喷等简单支护方式维护巷道往往难于实现。

实现在稳定的“内应力场”中开掘维护巷道的关键是尽量增长工作面推进长度。采用采掘工作面同向推进,前后上山分别出煤的开掘布置方案。

在稳定“内应力场”中掘巷时,可以考虑推广锚网喷联合支护,必要时可以采用超前注浆固化等措施,防止掘进冒顶事故。

6.3 关于综放开采的安全问题

放顶煤开采只要放顶煤高度超过采煤高度,除非倾角很大,否则重大冒顶事故是很难发生的。综放条件下由于支架高的阻力和稳定性,顶板事故的控制要比分层综采好得多。

由于综放支承压力的分布范围比分层开采大,应力集中系数不高。因此,有利于实现在稳定的“内应力场”掘巷。因此,更有利于控制掘进瓦斯和煤层突出、冲击地压等重大事故的发生。同样由于压力高峰深入煤壁前方,工作面冲击事故也更容易避免。

由于综放应力集中系数并没有明显增加,因此认为底板突水可能性增加的看法也是不正确的。

综放比较重要的安全问题是火灾,在煤层较软的情况下更要特别注意。在这个问题上很多矿井已经取得了丰富的经验,主要措施包括减少采空区采丢煤,注浆、注氮封闭采空区,喷注浆体封闭巷道周边等。实践证明,保证掘进和回采工作面高速推进是综放开采防火的关键。

7 结论

根据以上研究及分析,可以得出以下几点结论:

(1) 在综采放顶煤开采过程中,冒落岩层总厚度将按采高成倍数比例增加。由于冒落

岩层的充填作用, 尽管导水裂隙带高度随采高而增大, 但其比值(裂隙带高度/采高)将随采高而减小, 地表沉陷及沉陷系数也将会比分层开采完整的煤层小得多。

(2) 综采放顶煤开采使得“内应力场”范围扩大, 从而有利于实现在“内应力场”中开掘和维护巷道, 选择合适的时间和合理的位置将会有利于减少煤层及瓦斯突出事故。这一点已在开滦范各庄等矿得到证实。

参 考 文 献

- 1 宋振骐 实用矿山压力控制 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988
- 2 宋振骐, 赵经彻, 陈立良 关于综采放顶煤安全开采问题的认识 煤炭学报, 1995, 20: (4): 256~ 360
- 3 宋振骐, 赵经彻, 陈立良 中国回采巷道矿山压力控制研究现状及方向 见: 三峡库区地质环境暨第二届中日地层环境力学国际学术讨论会论文集, 北京: 煤炭科学出版社, 1996, 164~ 176

ON MOVEMENT OF STRATA AND STRATA PRESSURE CONTROL IN THE FULLY MECHANIZED MINING WITH SUBLEVEL CAVING

Zhao Jingche¹ Tao Tingyun¹ Liu Xiangu² Shun Xiaoming²

(¹ Yanzhou Coal Administration, Yanzhou 273500)

(² Shandong Inst. of Min. & Tech., Tai'an 271019)

Abstract Based on the two stress field theory, the production practice of Baodian colliery and the material simulation test in lab, the thickness of the collapsed strata, the height of the cracked strata and the characteristics of the surface subsidence are discussed under 3 conditions: fully mechanized mining with sublevel caving, fully mechanized with subsidence caving under net and layer mining. The quantity and feather of abument pressure distribution are analysed and the respective calculation models are established. The theory foundation is offered for the strata pressure control in workface and roadway of fully mechanized mining with sublevel caving.

Key words fully mechanized mining with sublevel caving, movement of strata, strata pressure control