

浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采强来压原理分析

张书敬, 张 亮, 解兴智

(天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

[摘 要] 针对浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采期容易出现大面积悬顶、基本顶初次来压时矿压显现异常剧烈问题, 以神府矿区石窑店煤矿为工程背景, 采用岩石力学实验、钻孔窥视对顶板岩层结构进行分析, 在此基础上应用数值模拟和理论分析对该类顶板初采期的致灾机理进行研究。结果表明: 直接顶整体性强、强度大, 其初次垮落步距大且呈大面积垮落特征, 这是初采期间容易出现飓风灾害的原因; 由于上位基本顶承担大部分上覆岩层载荷, 其破断距只承担自身载荷的下位基本顶破断距, 导致砂岩基本顶同时破断, 破断后形成的厚岩块三铰拱结构稳定性差, 当工作面回采到岩梁前端断裂线位置时即发生滑落失稳, 给工作面支架带来巨大冲击, 这是导致浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采期容易产生灾害的原因。

[关键词] 浅埋厚基岩; 坚硬顶板; 致灾机理; 初采强来压

[中图分类号] TD322.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2014) 06-0098-05

Analysis of Strong Weighting in Initial Mining Shallow-buried Coal-seam under Thick Basement and Hard Roof

ZHANG Shu-jin, ZHANG Liang, XIE Xing-zhi

(Coal Mining & Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A large area of hanging roof and strong underground pressure behavior easily occurred in the initial period of mining shallow-buried coal-seam under thick basement and hard roof. Applying rock mechanics experiment, bore-hole imaging to analyzing roof strata structure, roof disaster mechanism in initial mining was researched by numerical simulation and theoretical analysis. Results were showed as follows. Immediate roof had high integrality and strength and its first caving pace was large, and this was the cause of typhoon disaster easily occurring in initial mining. Most of overlying strata load was bear by upper-basic roof and broken pace of lower-basic roof resulted into sandstone basic roof simultaneously breaking. Stability of three-hinged arch structure after breaking was bad. When mining face reached the location of front breaking line, sliding instability occurred and brought large impact on powered support, which was the cause of roof disaster in initial mining shallow-buried coal-seam under thick basement and hard roof.

Keywords: shallow-buried thick basement; hard roof; disaster mechanism; strong weight in initial mining

国内学者将浅埋煤层划分为2种: 典型浅埋深煤层和非典型浅埋煤层。其中典型浅埋煤层是基岩比较薄、松散层厚度较大的浅埋煤层, 其顶板破断为整体切落形式, 易出现台阶下沉; 非典型浅埋煤层是基岩厚度比较大、松散载荷层厚度较小的浅埋煤层, 其矿压显现规律介于普通工作面与浅埋煤层工作面之间, 表现为2组关键层, 存在轻微的台阶下沉现象^[1-4]。

浅埋煤层主要分布在神府、东胜矿区, 近几年随着神府东胜矿区开采强度的增大, 开采“厚基岩薄松散层”型浅埋煤层矿井逐渐增多, 新问题也随即出现: 初采期间顶板大面积悬顶、基本顶初次来压期间矿压显现异常剧烈, 其灾害表现形式为

飓风伤人、大面积压架事故。

由于国内外学者对浅埋深厚基岩坚硬顶板研究很少, 对该类顶板致灾机理不明确, 而神府、东胜矿区矿井对该类顶板的处理办法仍然是参照一般采深特坚硬顶板矿井的经验, 而没有针对性的初采期顶板控制技术, 致使该条件下初采期悬顶大面积垮落导致的顶板事故时有发生。

鉴于以上情况, 本文以石窑店煤矿为工程背景, 对浅埋厚基岩坚硬顶板初采期致灾机理进行研究, 采用钻孔窥视、岩石力学实验分析顶板岩层结构特征, 利用3dec离散元数值模拟软件分析初采期顶板破断垮落规律, 并结合关键层理论研究该类浅埋煤层初采期顶板致灾机理。

[收稿日期] 2014-07-08

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目(51304118)

[作者简介] 张书敬(1973-), 男, 山东鱼台人, 工学博士, 副研究员, 从事矿山压力研究和煤矿生产管理工作。

[引用格式] 张书敬, 张 亮, 解兴智. 浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采强来压原理分析[J]. 煤矿开采, 2014, 19(6): 98-102.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2014.06.026

1 石窑店 5⁻²煤层顶板及来压特征

1.1 顶板特征

1.1.1 顶板岩石力学实验

根据钻孔综合柱状图，5⁻²煤层上覆基岩层厚度为 60m，黄土层厚度为 9m，属于“厚基岩薄松散层型”浅埋煤层，其伪顶为 0.4m 的炭质泥岩，再往上依次为 3.2m 的粉砂岩（泥质胶结）、4.2m 的细砂岩、2.4m 的中砂岩、12.2m 的粗粒砂岩，砂岩层厚度大。为获取各岩层层位具体参数，采取顶板钻孔取芯，对各层位岩芯分别进行岩石力学实验，其结果如表 1 所示。

表 1 顶板岩样力学参数测试结果

组号	单向抗压强度 /MPa	单向抗拉强度 /MPa	视密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	岩层范围 /m
1 号	70.53	4.49	2642.09	31.01	0.28	0~3
2 号	89.68	7.05	2614.43	32.68	0.24	3~7
3 号	88.07	6.79	2663.03	36.80	0.21	7~10
4 号	76.43	5.98	2562.35	26.79	0.23	10~15
平均值	81.18	6.08	2620.48	31.82	0.24	-

从岩石力学实验结果来看，石窑店 5⁻²煤层顶板特征如下：

(1) 顶板岩石单向抗压、抗拉强度均较高，抗压强度平均为 81.18MPa，抗拉强度平均为 6.08MPa，属于坚硬顶板；其中顶板 3~10m 层位的中砂岩和细砂岩最坚硬，其平均抗压强度为 88.88MPa，抗拉强度达到 6.92MPa。

(2) 岩石弹性模量高，平均为 31.82GPa，由于岩石有较高的弹性模量，因此顶板岩石在破坏前变形量很小，达到极限强度后容易突发脆性破坏。

2.1.2 顶板裂隙发育情况

顶板裂隙发育情况是影响顶板稳定性的关键因素，为确定石窑店煤矿 5⁻²煤层顶板裂隙情况，采用钻孔窥视方法观测切眼顶板上 10m 范围内的裂隙数目，其结果见图 1 及表 2。

表 2 顶板 10m 范围内横向裂隙发育情况

顶板范围 /m	观测孔			
	1	2	3	4
0~3	0	2	1	1
3~6	2	1	1	1
6~10	0	0	0	0

钻孔窥视结论：切眼处顶板 0~6m 范围内裂隙不发育，6~10m 范围内裂隙极不发育，其中裂隙以横向裂隙为主，顶板 10m 范围内不含明显的破碎带，整体性很强。顶板裂隙发育情况往往决定顶板垮落特征，当顶板裂隙不发育时，悬顶达到极限跨距时呈瞬时一次冒落特征，采空区空气被迅速

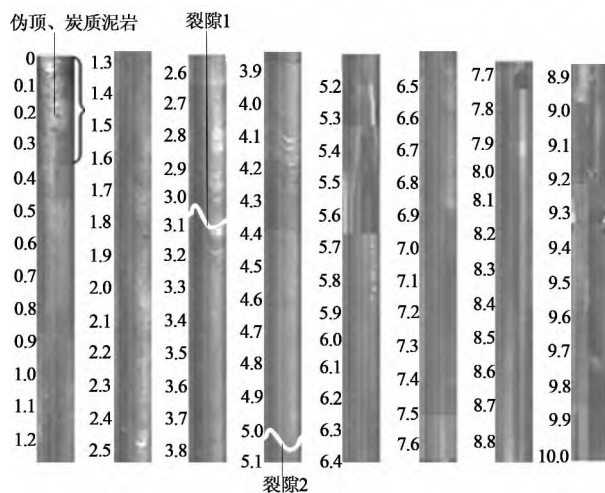


图 1 观测孔 1 顶板钻孔窥视

挤出产生强大冲击，给井下人员和设备带来巨大危害，这是浅埋厚基岩坚硬顶板煤层回采过程中容易出现飓风的一个重要原因。

1.2 顶板来压特征

石窑店 215204 工作面初采期间大面积悬顶垮落形成飓风，且基本顶初次来压时，因来压强度大造成液压支架安全阀大量损坏，现通过采集工作面电液控系统压力记录模块的矿压数据，分析 215204 工作面顶板来压步距、来压强度，其结果见图 2 及表 3，表 4。

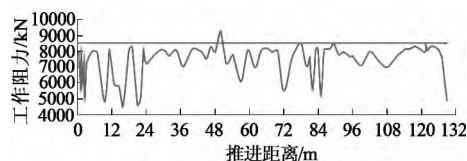


图2 215204 工作面 60 号支架来压判断曲线

表 3 来压步距统计

支架号	初次来压	同期来压		
		1	2	3
20 号	53.6	20.6	16.7	25.2
60 号	50.2	26.3	19.6	20.4
80 号	46.5	19.8	15.5	23.5
100 号	49.9	21.4	18.5	21.3
120 号	53.0	19.8	14.9	23.6
140 号	58.5	24.3	15.2	24.2
平均	52.0		20.6	

从表 3，表 4 可以看出，215204 工作面基本顶初次来压步距大，约为 52.0m，初次来压期间动载系数为 1.73，支架受到的冲击载荷大；且根据该工作面初采情况得知，顶板垮落时在胶带巷形成飓风，基本顶初次来压期间支架安全阀大量损坏，因此必须对该类厚基岩型浅埋煤层初采期顶板致灾机理进行深层次研究，为避免强来压提供理论基础。

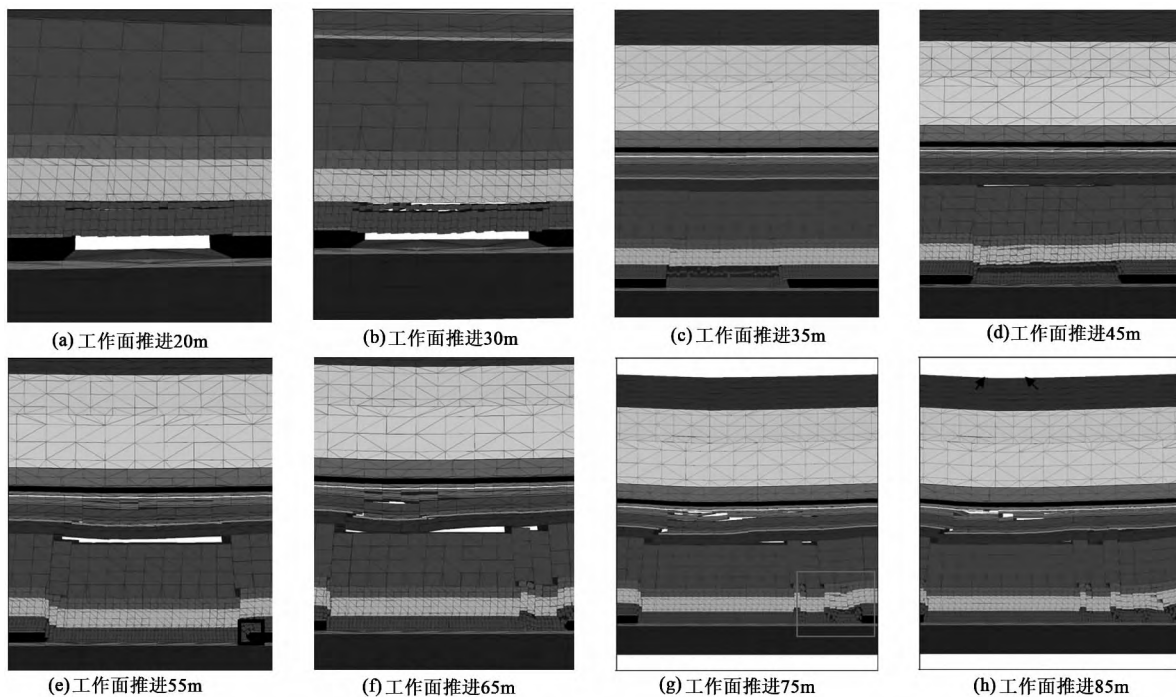
表 4 动载系数统计

支架号	初次来压	同期来压		
		1	2	3
20 号	1.42	1.26	1.29	1.12
60 号	1.74	1.30	1.15	1.04
80 号	1.81	1.32	1.35	1.12
100 号	1.91	1.38	1.29	1.24
120 号	1.86	1.43	1.22	1.48
140 号	1.63	1.45	1.25	1.39
平均	1.73		1.28	

2 致灾机理研究

2.1 顶板破断垮落规律

本节通过 3dec 离散元软件^[5-6]对石窑店

图 3 石窑店 5[#]煤层顶板初采破断过程

作面推进到 35m 时, 3.2m 的粉砂岩全部垮落, 且呈大面积一次性垮落特征, 其上 12.2m 厚的粗砂岩处开始出现离层; 工作面推进到 45m 时, 粗砂岩顶端离层明显增大; 工作面推进到 55m 时, 粉砂岩上的 4.2m 厚的中砂岩、2.4m 厚的细砂岩和 12.2m 厚的粗砂岩同步垮落, 工作面顶板处虽然施加 1.2MPa 支撑载荷但仍然被完全压垮; 工作面推进到 65m 时, 粗砂岩上方岩层开始发生离层并发生断裂, 形成裂缝带。

工作面推进到 75m 时, 裂缝带高度继续增加, 12.2m 厚的粗砂岩发生第 2 次垮落, 工作面出现第 1 次周期来压, 来压步距约为 20m; 工作面推进到 85m 时, 裂缝带高度不再增加, 上部岩层出现明显弯曲下沉, 地表已出现轻微下沉。

215206 工作面初采期顶板破断过程及垮落情况进行模拟, 包括煤层上覆所有的 19 层岩层及 2 层底板, 模型尺寸长 160m, 宽 10m, 高 75m; 计算模型参数根据实验室试验和经验选取; 模型边界条件采取薄层方法对前、后、左、右、底面进行速度为 0 的固定; 为得到可以接受的运算速度将模型中煤层上覆的 3 层岩层切割得较密, 上覆基岩切割较疏, 其开挖过程见图 3 (a) ~ 图 3 (h)。

当工作面推进到 20m 时, 煤层上覆的 3.2m 粉砂岩内部开始出现离层, 其上岩层没有明显变化; 当工作面推进到 30m 时, 粉砂岩内部离层进一步增大, 且粉砂岩与其上岩层也出现明显离层; 当工

2.2 顶板破断力学分析

2.2.1 各岩层破断距

由于 5[#]煤层顶板依次为粉砂岩、细砂岩、中砂岩、粗砂岩, 各岩层厚度和强度差异不明显, 不能直观判断直接顶和基本顶, 因此现通过组合梁原理判断顶板岩层之间的相互影响, 并理论计算顶板破断距, 顶板各岩层力学参数见表 5。

根据组合梁原理进行计算, 结果如下^[7]:

第 1 层粉砂岩本身的载荷为:

$$q_1 = \gamma_1 h_1 = 26.4 \times 3.2 = 84.48 (\text{kPa})$$

考虑第 2 层对第 1 层的作用, 则

$$(q_2)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3} = 57.47 (\text{kPa}) < q_1$$

由此可知, 第 2 层中砂岩本身强度大、岩层

表 5 煤层上方主要岩层力学物理参数

岩层 序号	岩性	容重 $\gamma_i /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	层厚 h_i / m	弹性 模量/ E_i / GPa	抗拉 强度 R_i / MPa	岩性描述
0	炭质泥岩	—	0.4	—	—	硬度差
1	粉砂岩	26.4	3.2	31.0	4.49	泥质胶结
2	中砂岩	26.1	4.2	32.6	7.00	石英、长石
3	细砂岩	26.6	2.4	36.8	6.79	块状结构
4	粗粒砂岩	25.6	12.2	26.0	5.98	长石、石英
5	粉砂岩	26.4	2.6	31.0	4.49	泥质胶结

厚，对第 1 层不施加载荷，第 1 层粉砂岩只承担自身重量，可按固支梁计算第 1 层的破断距：

$$L_1 = h_1 \sqrt{\frac{2R_1}{q_1}} = 32.99(\text{m})$$

第 2 层中砂岩本身的载荷 q_2 为：

$$q_2 = \gamma_2 h_2 = 26.1 \times 4.2 = 109.62(\text{kPa})$$

计算到第 3 层时，第 2 层受到的载荷：

$$(q_3)_2 = \frac{E_2 h_2^3 (\gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3)}{E_2 h_2^3 + E_3 h_3^3} = 143.27(\text{kPa})$$

计算到第 4 层时，第 2 层受到的载荷：

$$(q_4)_2 < (q_3)_2$$

因此可知，由于第 4 层岩层为 12.2m 厚的粗砂岩，本身强度大，对其下岩层不施加载荷，第 2 层岩层与第 3 层岩性和强度均相似，可将其看为组合梁，按固支梁计算其破断距：

$$L_2 = (h_2 + h_3) \sqrt{\frac{2R_2}{(q_3)_2}} = 65.24(\text{m})$$

第 4 层中砂岩本身的载荷为 q_4 为：

$$q_4 = \gamma_4 h_4 = 25.6 \times 12.2 = 312.32(\text{kPa})$$

计算到第 5 层时，第 4 层受到的载荷：

$$(q_5)_4 = \frac{E_4 h_4^3 (\gamma_4 h_4 + \gamma_5 h_5)}{E_4 h_4^3 + E_5 h_5^3} = 376.61(\text{kPa})$$

同理可得， $(q_5)_4 < (q_6)_4 < \dots < (q_{15})_4 = 657.4(\text{kPa})$

计算到第 16 层时，第 4 层受到的载荷：

$$(q_{16})_4 = 643.4(\text{kPa}) < (q_{15})_4$$

因此可知，由于第 16 层顶板岩层为 12.2m 厚的粉砂岩，本身强度大，其自重及上岩层载荷均由自己承担，对下部岩层不起作用，按照固支梁计算第 4 层破断距：

$$L_4 = h_4 \sqrt{\frac{2R_4}{(q_4)_{15}}} = 52.1(\text{m})$$

利用组合梁原理对煤层上覆岩层相互影响分析可知，第 1 层粉砂岩只承受自身重量，第 2 层中砂岩只承受第 2 层和第 3 层自身重量，而第 4 层粗砂岩厚度为 12.2m，承载能力大，顶板 4~15 岩层载

荷均由其承担，第 16 层 12.2m 厚的粉砂岩承担自身及上覆岩层载荷。

通过固支梁理论计算顶板上第 1 层粉砂岩破断距约为 33m，且通过矿压观测结果可知，形成稳定的周期来压后该粉砂岩可随采随冒，因此可将 3.2m 厚的粉砂岩看作直接顶；根据关键层复合破断理论，顶板第 4 层岩层承担 4~15 岩层载荷，其破断距为 52.1m，小于 2、3 岩层破断距，该层破断后必然导致 2、3 岩层同步破断，可将第 4 层岩层看作上位基本顶，2、3 岩层看作下位基本顶，初次来压步距为 52.1m。

2.2.2 初次来压顶板结构稳定性分析

基本顶断裂后暂时形成铰接平衡结构^[8-9]（见图 4），这是顶板断裂和顶板来压不同步的原因。随着工作面的继续推进，块体 1 和块体 2 的回转角增大，两块体的接触点 B 下降同时两块体端头压力 T 增大来继续保持铰接拱的平衡。根据砌体梁理论可知，在块体回转过程中若 A 点摩擦力小于块体受到的上覆载荷，则会发生滑落失稳；若 B 点的挤压力大于块体挤压强度则会发生回转失稳。

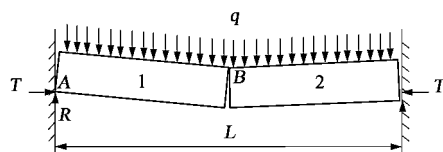


图 4 基本顶初次来压结构

由材料力学可得保持三铰拱平衡的水平推力为：

$$T = \frac{qL^2}{8h} \quad (1)$$

$$R = \frac{qL}{2} \quad (2)$$

式中， q 为梁的载荷集度， kN/m ； L 为初次来压步距， m ； h 为基本顶岩层厚度， m ； R 为梁两端摩擦剪力， kN 。

此结构不产生滑落失稳，必须满足：

$$R \leq T \tan \varphi \quad (3)$$

式中， φ 为岩块间的摩擦角，约为 $38^\circ \sim 45^\circ$ 。

将式 (1)、式 (2) 代入式 (3)：

$$h \leq 1/4 \tan \varphi \quad (4)$$

代入石窑店相关资料： $h = 18.8\text{m}$ ， $L = 52.1\text{m}$ ，则：

$$h/L = 0.36 > 0.2 = 1/4 \tan \varphi \quad (5)$$

根据上述分析可知，砂岩基本顶在断裂后暂时形成三铰拱结构，但由于岩块高长比大，三铰拱抗滑落失稳能力弱，当工作面回采到岩梁前端断裂线

位置时很快发生滑落失稳,导致工作面发生台阶下沉,并伴随强烈矿压显现,这是浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采期间容易发生大面积来压的原因。

3 结论

(1) 直接顶强度大、整体性强、垮落步距大,且垮落时呈大面积垮落特征,这是浅埋厚基岩坚硬顶板初采期容易形成大面积悬顶,并引发飓风灾害的原因。

(2) 18.8m 的砂岩基本顶初次来压步距约为 52.1m,顶板破断后形成三铰拱结构,但由于铰接岩块的高长比大,铰接结构的抗滑落失稳能力弱,当工作面回采到岩梁前端断裂线处易发生滑落失稳,这是浅埋厚基岩坚硬顶板初采期工作面容易出现台阶下沉并伴随强烈矿压显现的原因。

[参考文献]

- [1] 张李节. 厚砂层下薄基岩长壁工作面矿压显现规律 [D]. 西安: 西安科技大学, 1994.
- [2] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [3] 黄庆享, 石平五. 印度浅埋煤层支护论证报告 [R]. 西安: 西安矿业学院, 1998.
- [4] 赵宏珠. 印度综采长壁工作面浅部开采实践 [J]. 中国煤炭,

- 1998, 24 (12): 49-51.
- [5] 康立军, 齐庆新, 史元伟. 顶板断裂机理的离散元数值方法研究 [J]. 煤矿开采, 1995 (1): 33-37.
- [6] 潘俊锋, 齐庆新, 史元伟. 综放开采顶板岩层垮断特征的 3DEC 模拟研究 [J]. 煤矿开采, 2007 (2): 4-7.
- [7] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [8] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰. 砌体梁的“S-R”稳定及其应用 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1994 (3).
- [9] 曹胜根, 缪协兴, 钱鸣高. “砌体梁”结构的稳定性及其应用 [J]. 东北煤炭技术, 1998 (5).
- [10] 王彪谋, 周国际. 王家塔煤矿大采高液压支架合理工作阻力研究 [J]. 煤矿开采, 2010, 15 (5): 64-65, 81.
- [11] 侯树宏, 柴敬, 吕兆海. 近浅埋煤层软岩条件下综采工作面顶板破断规律 [J]. 煤炭技术, 2008 (10): 46-48.
- [12] 常进海. 浅析浅埋煤层工作面初次来压机理 [J]. 黑龙江科技信息, 2011 (1): 59, 200.
- [13] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (8): 1174-1177.
- [14] 张沛. 浅埋煤层长壁开采顶板动态结构研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [15] 鹿志发. 浅埋深煤层顶板力学结构与支架适应性研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007.
- [16] 鹿志发, 刘俊峰. 浅埋深煤层长壁开采液压支架选型初步研究 [A]. 采矿工程学新论——北京开采所研究生论文集 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.

[责任编辑: 潘俊锋]

(上接 89 页)

渐增大,但整体增幅较小,最大增量 27kN (最大受力 50kN),远小于锚杆的屈服强度;支巷两端头的锚杆受力较支巷中部受到邻近支巷开采影响时更为敏感。

(2) 支巷顶板在开采初期不会出现离层,随着工作面的开采和空巷时间的增长,顶板岩层缓慢移动并逐渐积聚能量,最终导致顶板离层的出现;支巷端头的离层值远小于中部的离层值,离层值的大小规律符合两端头固定的铰支梁模型;支巷中部深部最大离层值为 132mm,浅部最大离层值 63mm。

(3) 工作面支巷采出后,顶板压力转移至两侧的煤柱上,产生了较大的应力集中系数,邻近巷道的采动会导致煤柱受力的急剧增加并发生塑性屈服,煤柱受力最大增量为 13.0MPa;随着支巷的充填,充填体逐渐承载以及煤柱受力状态的改变,使得煤柱承载能力增大,表现为增大—减小—增大的承载过程。充填体和煤柱联合承载,能够达到支撑覆岩的作用。

(4) 支巷出现了一定程度的顶底板移近和两

帮移近,但总体变形量较小,不影响巷道的正常使用,支巷中部顶板所受弯矩最大,因此顶板下沉和两帮移近大于端头;监测期间顶板最大下沉量为 25mm,最大两帮移近量为 50mm,最大底鼓量 20mm。

(5) 试验区工作面开采期间,没有出现大面积来压现象,顶板以轻微下沉为主,未出现断裂或破断,充填法管理顶板可以大大减轻开采期间的矿压显现。

[参考文献]

- [1] 贺安民. 神东矿区旺采采空区失稳危险分级方法研究 [J]. 煤矿开采, 2013, 18 (1): 70-72.
- [2] 汪华君. 大柳塔矿旺采工艺参数优化及矿压规律研究 [J]. 煤炭工程, 2013 (6): 69-72.
- [3] 刘鹏亮. 邢东矿充填巷式开采数值模拟与现场实测研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007: 15-16.
- [4] 胡炳南, 李宏艳. 煤矿充填体作用数值模拟研究及其机理分析 [J]. 煤炭科学技术, 2010 (4): 13-16.
- [5] 李瑞群, 张镇. 旺格维利采煤法煤柱—顶板力学结构研究 [J]. 煤矿开采, 2010, 15 (3): 22-26.
- [6] 李文, 胡智. 薄基岩浅埋旺采工作面覆岩运移特征研究 [J]. 煤炭工程, 2013 (2): 62-68. [责任编辑: 于健浩]