文章编号:0253-9993(2013)11-1912-05

复杂结构薄煤层工作面煤壁破坏规律及应用

蒋金泉代 进李洪曲 华

(山东科技大学 矿山灾害预防与控制重点实验室 山东 泰安 271002)

摘 要:含结核及夹矸薄煤层综采设备研制及开采工艺设计需依据矿山压力规律。采用理论分析、 数值模拟、井下实测等方法 研究了薄煤层支承压力与煤壁破坏规律、支架阻力与煤壁破坏的关系, 提出了利用矿山压力作用的合理截深与支护强度。研究表明:薄煤层工作面煤壁非弹性区宽度小, 支承压力峰值位置距煤壁近 煤壁破坏深度仅0.5~0.6 m;深度0.6 m 处的煤体抗压入强度是0.2 m 处1.5倍;利用矿山压力降低截割难度的小截深为0.4~0.6 m;支架阻力对煤壁破坏深度有明 显影响 利用矿山压力破煤的合理工作阻力为2600 kN。通过应用实现了结核及夹矸的有效截割 或剥落。

关键词: 薄煤层; 煤壁破坏; 结核; 截深; 支架阻力 中图分类号: TD823. 25 文献标志码: A

Failure law and application of complex structure thin coal seam mining face

JIANG Jin-quan ,DAI Jin ,LI Hong ,QU Hua

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control Shandong University of Science and Technology ,Tai' an 271002 ,China)

Abstract: Fully mechanized equipment development and mining process design about the thin coal seam with nodules and parting should be based on law of mine pressure. By the means of the theoretical analysis ,numerical simulation , underground observation methods ,authors studied on supporting pressure and the law of coal wall failure about the thin coal seam ,and the relationship between support resistance and the coal wall failure ,put forward the reasonable cutting depth and supporting strength with the usage of mine pressure effect. Research show that the coal wall inelastic zone width of thin seam mining face is small ,the distance between supporting pressure peak position and the coal wall is small ,coal wall damage depth is only 0.5 - 0.6 m; depth of 0.6 m is 1.5 times as big as depth of 0.2 m in resistance indentation strength; the small depth-web is 0.4 - 0.6 m on the usage of mine pressure to reduce the difficulty of cutting; support resistance has obvious effect on coal wall damage depth ,the reasonable working resistance of breaking coal is $2\ 600$ kN on the usage of mine pressure. Through the application we have realized the effectively cut of nodules and parting.

Key words: thin coal seam; coal wall failure; nodules; depth-web; support resistance

我国薄煤层分布广泛,储量丰富,探明可采储量 占总可采储量的 19% 左右^[1-3],薄煤层产量仅占煤 炭总产量的 10.4%。华东、华南、西南等地区煤炭资 源紧缺,薄煤层可采储量比重大。兖州矿区薄煤层地 质储量达 7.02 亿 t,可采储量达 1.53 亿 t,占总可采 储量的 21.79%,薄煤层结构复杂,普遍含黄铁矿结 核和夹矸。尽管薄煤层综采成套装备及开采技术取 得了重大进展^[4-9],但含结核薄煤层实现机械化落煤 的难度大。 薄煤层采高小,煤壁应力集中程度低,破坏深度 小;结核和夹矸的硬度高,截割荷载大^[10];工作面空 间狭小,采煤机截割能力有限,截割或者剥落结核必 须充分利用矿山压力压酥煤壁,小截深割煤,降低截 割难度。针对复杂结构薄煤层炮采落煤的实 际^[11-14],解决含结核薄煤层的破煤难题,采用理论分 析、数值模拟、井下实测等方法,研究了薄煤层工作面 支承压力与煤壁破坏规律、支架阻力与煤壁破坏的关 系,提出了含结核薄煤层利用矿山压力作用的合理截

×

收稿日期: 2013-01-04 责任编辑: 常 琛

作者简介:蒋金泉(1961—) ,男 江苏如东人 教授 .博士生导师。Tel:0538 – 3076266 E – mail: jjqsd@163. com

深与支架阻力,为装备研制及开采工艺设计提供依据。

1 复杂结构薄煤层地质条件

兖州矿区薄煤层主要是石炭系太原群 16_上和 17 层煤 杨村煤矿 16_上层煤厚度 0.6~1.6 m ,17 层煤厚 度 0.50~1.39 m ,两个煤层的厚度 0.5~1.6 m ,平均 0.95 m。赋存稳定,以亮煤为主,条带状结构,层状构 造,内生裂隙发育,煤层倾角 5°~14°,单向抗压强度 分别为 5.18 *5*.23 MPa,抗拉强度分别为 0.60 ,0.66 MPa。17 层煤直接顶大多为石灰岩,厚度0~1.26
m 局部相变为泥质粉砂岩、砂质泥岩;直接底为铝质
泥岩 厚度1.7~2.8 m 遇水易泥化、膨胀。

 16_{\perp} 、17 层煤结构复杂,含硫化铁结核和夹矸,结 核坚固性系数分别为8.9和8.4,块度大;炭质砂岩 夹矸1~2 层,坚固性系数4.1~7.7。结核、夹矸的 统计表明^[15],在煤壁的暴露密度0.14个/m,在煤层 的分布密度0.88个/m²。在巷道煤帮的暴露长度50 ~600 mm,平均247.9 mm;厚度20~150 mm,平均 53.9 mm,如图1所示。





2 薄煤层工作面支承压力分布

2.1 薄煤层工作面支承压力的力学分析

工作面开采后,采空区上覆岩层载荷向煤壁前方 转移,在煤壁前方形成支承压力,煤壁一定深度内煤 体进入塑性或破裂状态,通常把煤壁前方支承压力分 为非弹性区和弹性区两个区域^[16]。根据极限平衡条 件,非弹性区支承压力分布为

$$\sigma_{y} = R_{c}^{*} e^{\frac{\omega_{x}}{\hbar}x}$$
(1)

式中 ρ_y 为支承压力; R_c^* 为煤壁残余强度; f为层面摩 擦因数 $f = \tan \varphi_1$,其中 φ_1 为顶底板与煤层的摩擦角; h 为采高; $\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$,其中 φ 为煤的 内摩擦角。

弹性区支承压力分布为负指数曲线[17] 即

$$\sigma_{y} = \gamma H \left[1 + \Delta k e^{-\delta(x-x_{0})} \right]$$
 (2)

$$x_0 = \frac{h}{2f\xi} \ln\left(\frac{k\gamma H}{R_c^*}\right) \tag{3}$$

式中 γ 为岩层容重; *H* 为开采深度; Δk 为最大集中 应力增量系数 $\Delta k = k - 1; \delta$ 为支承压力衰减系数; x_0 为非弹性区宽度; *x* 为距离煤壁的距离。

根据 17 层煤 2708 工作面条件 ,H = 200 m ,h = 1.02 m , $R_c^* = 2.45 \text{ MPa}$, $\gamma = 0.027 \text{ MN/m}^3$,k = 2.6 , $\varphi_1 = 8.5^\circ \varphi = 20^\circ$,代入式(1) 得到非弹性区支承压 力分布:

$$\sigma_x = 2.45 e^{0.5977x}$$
(4)

把 γ H k 及 x_0 = 2.921 等参数代入式(2) 取煤

壁前方 30 m 处支承压力恢复到 1.05γH,得 δ = 0.128 则弹性区支承压力分布:

 $\sigma_{\gamma} = 5.4 [1 + 1.6 e^{-0.128(x-2.921)}]$ (5)

可见,非弹性区宽度 x₀ 与煤层厚度 h 成正比,薄 煤层工作面非弹性区宽度小。2708 工作面支承压力 分布如图 2 所示,非弹性区宽度 2.9 m,应力降低范 围 1.7 m。



图 2 薄煤层工作面支承压力分布



2.2 薄煤层工作面支承压力的数值模拟

根据 2708 工作面地质条件,建立 UDEC 离散元 计算模型 模型 130 m(长) ×70 m(高),以煤层底板 上方 50 m 处为上边界,底板以下 20 m 为下边界,采 空区长度 70 m,煤层埋深 200 m,上边界加载 3.75 MPa。计算分析采用摩尔 - 库仑强度准则。为反映 两柱式液压支架的支护作用,模拟支护阻力的分布比 例为:工作面后部为1,中部为1/2,前部1/6;初撑力 2 182 kN,工作阻力 2 600 kN,允许最小高度 650 mm。 模拟分析得到:结核对薄煤层支承压力分布的影响很小;煤壁前方 2.86 m 范围为应力降低区 煤壁前 方 2.86~40.00 m 为应力升高区 ,煤壁前方 3.50~ 10.23 m 为峰值区域 ,最大应力集中系数为 2.35。有 关监测也表明^[18] ,薄煤层工作面煤壁应力峰值位置 距离煤壁较近。

可见,薄煤层采高小,支承压力峰值位置更靠近 煤壁,支承压力影响范围小。现场煤壁片帮不明显, 巷道变形程度较小。

3 薄煤层工作面煤壁破坏特征

3.1 煤壁破坏特征的数值模拟

采用 UDEC 模拟分析了煤壁塑性区及顶底板移 近量,如图3所示,薄煤层综采工作面煤壁塑性破坏 区深度为0.5 m,顶底板移近量为192 mm。



图 3 煤壁塑性区分布

Fig. 3 Plastic zone distribution of coal wall

当煤层厚度分别为 1.0,1.5,2.0,2.5 m 时,煤壁 塑性破坏深度分别为 0.5,1.2,1.52,2.10 m,可见, 薄煤层工作面煤壁破坏深度小。 3.2 煤壁破坏的实测分析

为掌握薄煤层工作面的煤壁破坏特征,在2706 对拉工作面的上面进行了煤壁钻孔煤粉量实测、声波 监测^[19]、钻孔裂隙实测和煤壁抗压入强度实测。

施工煤壁钻孔煤粉量钻孔 8 个,对钻孔煤粉量分 布曲线分析可以得到,煤壁明显破坏区深度 0.46~ 1.00 m,平均 0.65 m。施工煤壁声波监测钻孔 6 个, 由声波传播时间与孔深的关系曲线分析表明,大多数 钻孔的超声波传播时间在孔深 1.05~1.25 m 明显缩 短,考虑打钻前用镐去掉 100~200 mm,煤壁松动范 围为 1.25~1.45 m,平均 1.33 m;孔深 0.25~0.45 m 内超声波传播时间明显较长,表明煤壁破坏范围为 0.4~0.6 m。采用钻孔窥视仪对 6 个钻孔的孔壁进 行照相,其中 2 个钻孔的拍摄图像如图 4 所示。可 见,靠近煤壁附近的钻孔孔壁(深度 0.3 0.5 m)有明 显的裂纹和破裂现象,煤壁破坏深度在 0.5~ 0.6 m。

在 2706 对拉面的中巷进行煤壁抗压入强度测试 在距工作面煤壁 5 m 处的煤帮,沿顶板掏出长 1 m、高 0.5 m、深 0.7 m 的矩形空间,用液压加载装置 对空间的底煤进行缓慢加载,直至完全破坏。两个加载测试点距煤壁 0.2 0.6 m 测试结果见表 1。可见, 距煤壁 0.2 m 处的煤体抗压入强度 19.53 MPa,残余 抗压入强度 5.86 MPa;距煤壁 0.6 m 处的抗压入强度 29.29 MPa,残余抗压入强度 12.69 MPa;按照线性 变化,在煤壁处的煤体抗压入强度 14.65 MPa,残余 抗压入强度 2.45 MPa。距煤壁 0.6 m 处的煤体抗压 入强度是距煤壁 0.2 m 处的 1.5 倍,因此,支承压力 对煤壁浅部的压酥作用明显,距煤壁的深度不同,结核包裹体强度有着很大的差异。



图 4 钻孔 1 5 孔壁裂纹情况 Fig. 4 Crack situation at drilling wall of the Drillings 1 5

1915

表1 煤壁抗压入及残余抗压入强度试验数据

Table 1 Strength test data of the face resistance indentation and residual resistance indentation

参数	浅部加载点					
	轻微破坏	破坏	残余强度	轻微破坏	破坏	残余强度
加载压力/kN	98.10	58.86	29.43	147.15	186. 39	63.77
抗压入强度/MPa	19.53	11.72	5.86	29.29	37.10	12.69

4 支架阻力与煤壁破坏的关系

模拟研究薄煤层支架工作阻力变化对煤壁变形破 坏的影响,见表2。由表2可知 随支架阻力的增大,煤 壁塑性区深度逐渐减小,支架阻力1800kN时塑性区 深度0.65m2600kN时为0.48m3400kN时减小到 0.2m。可见,支架阻力对薄煤层工作面煤壁破坏范围 影响明显,支架阻力相对较低,可有利于割煤。随支架 阻力增大 顶底板下沉量和煤壁压缩量微小降低; 支承 压力集中系数有所降低 峰值区域基本没有变化 改变 支架阻力对支承压力分布的影响很小。

因此,减小支架工作阻力,有利于利用矿山压力 破煤。根据支护设计,合理支护强度0.3937 MPa,支 架工作阻力为2573 kN/架。根据数值模拟,支架工 作阻力2600 kN以下有利于煤壁压酥,确定利用矿 山压力破煤的支架工作阻力为2600 kN。

表 2 不同支架工作阻力的煤壁破坏区参数 Table 2 Coal wall failure district parameters under different support resistance

工作阻力/kN	煤壁塑性区深度/m	支承压力集中系数	支承压力峰值区/m	煤壁压缩量/mm	顶底板移近量/mm
1 800	0.65	2.40	3. 28 ~ 10. 15	29.6	198.6
2 200	0.56	2. 38	3. 36 ~ 10. 18	27.4	192. 3
2 600	0.48	2.35	3. 50 ~ 10. 23	25.8	186. 5
3 000	0.26	2.29	3. 62 ~ 10. 31	25.1	182. 1
3 400	0.20	2.26	3.67~10.35	24. 2	178.5
3 400	0. 20	2.26	3. 67 ~ 10. 35	24. 2	178.5

5 合理截深及其应用实践

5.1 合理截割深度分析

薄煤层工作面采高小、煤壁破坏深度小。煤层中存在坚硬结核及夹矸时,由于采煤机截割能力的限制,应充分利用矿山压力对煤壁浅部的压酥作用,采 用小截深割煤,降低截割和落核的难度。

根据煤壁钻粉量及声波实测,煤壁明显破坏深度 0.5~0.6 m; 根据数值模拟,煤壁塑性破坏区深度 0.5 m; 根据煤体抗压入强度实测,距煤壁深度不同, 结核包裹体强度有很大差异。因此,在支承压力作用 下,薄煤层工作面煤壁浅部0.5~0.6 m 有明显的压 酥效应,结核包裹体的强度显著降低,可降低结核截 割及剥落的难度。对于复杂结构薄煤层,滚筒切割遇 到结核及夹矸时,需要进行直接截割或剥落,为有利 于煤壁的压酥作用,降低结核剥落难度,采煤机合理 截割深度为0.4~0.6 m。在工作面初采阶段的截深 为0.4~0.5 m,正常阶段为0.6 m。

5.2 应用实践

在杨村 2708、4701 和南屯 2601 等工作面投入 4 套设备 实现了复杂结构薄煤层综采。采用 MG110/ 250 - BW 采煤机、ZY2600/6.5/16 两柱掩护式支架, 初采阶段截深 0.45 m,正常阶段截深 0.60 m 采煤机 分段遥控、记忆割煤,分组分段综合作业方式。小截 深工艺,对煤层中的结核、夹矸及厚度小于 0.3 m 的 顶底板岩石能实施有效截割或剥落,如图 5 所示。支 架的控顶效果良好,未出现台阶下沉现象。



图 5 工作面煤壁结核截割状况 Fig. 5 Nodules cutting condition of working face wall

6 结 论

(1) 非弹性区宽度与煤层厚度成正比,薄煤层工

作面采高小,支承压力的峰值位置靠近煤壁,非弹性 区宽度小。杨村17层煤工作面非弹性区宽度为 2.92 m,应力降低区1.7 m。

(2)根据数值模拟 煤壁塑性破坏深度为 0.5 m; 根据实测研究 煤壁松动范围平均 1.33 m 煤壁明显 破坏深度为 0.5~0.6 m ,距煤壁 0.6 m 处的煤体抗 压入强度是 0.2 m 处的 1.5 倍。薄煤层煤壁破坏深 度小 ,支承压力对煤壁浅部的压酥作用明显。

(3)距煤壁深度不同,煤体强度和结核剥落难度 有很大的差异,薄煤层采煤机截割能力有限,应充分 利用煤壁浅部的压酥效应,采用小截深割煤,降低切 割和落核的难度,滚筒合理截割深度为0.4~0.6 m。

(4)支架阻力对工作面煤壁破坏深度影响明显, 降低支架阻力有利于矿山压力破煤,17煤层合理支 护强度为0.3937 MPa,合理工作阻力为2600 kN。

(5) 基于薄煤层工作面煤壁破坏规律,提出的合 理截深与支架工作阻力,通过实践实现了结核及夹矸 的截割或剥落。

参考文献:

- [1] 申宝宏, 郭玉辉. 我国综合机械化采煤技术装备发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术 2012 40(2):1-3
 Shen Baohong ,Guo Yuhui. Development status and tendency of technology and equipment for fully mechanized coal mining in China
 [J]. Coal Science and Technology 2012 40(2):1-3.
- [2] 温庆华.薄煤层开采现状及发展趋势[J].煤炭工程 2009(3):
 60-61.

Wen Qinghua. Mining situation and development trend of thin seam coal[J]. Coal Engineering 2009(3):60-61.

- [3] 乔红兵,吴 森,胡登高. 薄煤层综合机械化技术现状及发展
 [J].煤炭科学技术 2006 34(2):1-5.
 Qiao Hongbing, Wu Miao, Hu Denggao. Present status and development of fully mechanized mining technology for thin seam [J]. Coal Science and Technology 2006 34(2):1-5.
- [4] 王国法. 薄煤层安全高效开采成套装备研发及应用[J]. 煤炭科 学技术 2009 37(9):86-89.

Wang Guofa. Development and application of completed set equipment for safety and high efficient mining in thin coal seam [J]. Coal Science and Technology 2009 37(9):86-89.

[5] 王巨光. 薄煤层综采数字化无人工作面技术研究与应用[J]. 煤 炭科学技术 2012 40(7):72-80.

Wang Juguang. Research and application of fully mechanized and digitalized unmanned coal mining face in thin seam [J]. Coal Science and Technology 2012 40(7):72-80.

[6] 刘锦荣.大同矿区薄煤层综采设备配套与开采实践[J].煤炭科 学技术 2011 39(11):40-43.

Liu Jinrong. Practices on fully mechanized coal mining equipment matched and mining in thin seam of Datong mining area [J]. Coal Science and Technology 2011 39(11):40-43.

[7] 盛国军,孙启生,宋华岭.薄煤层综采的综合创新技术[J].煤炭

学报 2007 32(3):230-234.

Sheng Guojun Sun Qisheng Song Hualing. The innovational mining technology of fully mechanized mining on thin coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2007 32(3):230-234.

- [8] Wang Guofa. New development of longwall mining equipment based on automation and intelligent technology for thin seam coal [J]. Journal of Coal Science & Engineering(China) 2013 ,19(1):97-103.
- [9] Wang Guimei ,Jiao Shanlin ,Cheng Guangxing. Fully mechanized coal mining technology for thin coal seam under complicated geological conditions [J]. Energy Exploration & Exploitation ,2011 ,29 (2):169-178.
- [10] 赵丽娟,董萌萌. 含硫化铁结核薄煤层采煤机工作机构载荷问题[J]. 煤炭学报 2009 34(6):840-844.
 Zhao Lijuan ,Dong Mengmeng. Load problems of working mechanism of the shearer in containing pyrites and thin coal seam[J].
 Journal of China Coal Society 2009 34(6):840-844.
- [11] 吕建为,严民杰.兖州矿区含硬夹矸薄煤层安全高效开采工艺 技术实践[J].中国煤炭 2007 33(10):39-41.

Lu Jianwei ,Yan Minjie. Technology practice of safe and efficient mining of thin seam containing rigid parting in Yanzhou mining area [J]. China Coal 2007 33(10):39-41.

[12] 高振伟. 含硬夹矸薄煤层机械化回采工艺技术探讨[J]. 煤矿 开采 2005 31(2): 35-36.

Gao Zhenwei. Discussions on mechanized mining technology of the thin seam which with rigid parting [J]. Coal Mining Technology , 2005 31(2): 35 – 36.

[13] 蒲宝山 徐亚军 ,王国法. 含硬夹矸薄煤层高产高效工作面爆破 参数研究[J]. 煤矿开采 2005 31(1):50-52.

Pu Baoshan ,Xu Yajun ,Wang Guofa. Studies on blasting parameter of thin coal seam contained Fe_2S nodules high production & high efficiency mining face [J]. Coal Mining Technology 2005 31(1): 50 – 52.

[14] 蒋建中. 兖州矿区薄煤层机械化破煤(岩)方式的研究[J]. 煤 矿现代化,1995,4(4):22-25.

> Jiang Jianzhong. Study on mechanized mining thin coal seam mechanically in Yanzhou mining area [J]. Coal Mine Modernization , 1995 4(4):22-25.

[15] 蒋金泉,曲天智,代 进,等.薄煤层硫化铁结核剥落的数值试验研究[J].煤炭学报 2009 34(4):472-477.

Jiang Jinquan ,Qu Tianzhi ,Dai Jin ,et al. Numerical test and research on spelling of iron sulfide concretions in thin seam [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(4):472-477.

- [16] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大 学出版社 2003.
- [17] 蒋金泉.采场围岩应力与运动[M].北京:煤炭工业出版社, 1993.
- [18] 何 江,窦林名,陆菜平.薄煤层冲击矿压特征及防治研究
 [J].煤炭学报 2012 37(7):1094-1098.
 He Jiang ,Dou Linming ,Lu Caiping. Characteristic and prevention research on rock burst of thin coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2012 37(7):1094-1098.
- [19] 蒋金泉,谭云亮,潘立友,等.矿山压力监测及预报[M].北京: 煤炭工业出版社,1996.