



移动扫码阅读

张明建,李 锋,杨 柳.大厚度变异系数煤层综放开采合理采放比研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8): 8-15.  
ZHANG Mingjian,LI Feng,YANG Liu.Study on reasonable mining and caving ratio in fully-mechanized top-coal caving mining of coal seam with large thickness variation coefficient[J].Coal Science and Technology,2022,50(8): 8-15.

# 大厚度变异系数煤层综放开采合理采放比研究

张明建<sup>1</sup>,李 锋<sup>1</sup>,杨 柳<sup>2,3</sup>

(1.河南焦煤能源有限公司九里山矿,河南 焦作 450046;2.中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院,北京 100083;  
3.放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083)

**摘 要:**基于九里山矿综放试验面在走向和倾向上煤层厚度变异性大,中间厚两边薄的特点,取煤层一走向变坡处进行了 2 组数值模拟试验,提出了合理的采放比,并利用现场试验进行了验证。研究表明:采高恒定组的采高增加时顶煤丢煤颗粒数目维持在恒定数值范围,采高变化对顶煤采出率影响不大。采放比恒定组随着采放比的增加,丢煤颗粒先多后少,顶煤放出率先降后升,采放比对顶煤采出率影响较大。2 组试验进行对比结果表明:在煤厚逐渐升高的过程中,结合采出率,同时存在一个采出率较高的采放比区间 0.9~1.1;煤炭采出率都受到煤厚的非线性影响,对于具体煤厚需要具体分析。顶煤运移跟踪仪对试验面顶煤采出率的现场测试结果表明,测试结果现场实施 1:1 采放比条件下,放出率为 85.7%。现场顶煤破碎程度高,中部及下端头煤较薄且破碎导致下位顶煤采出率高,下端头顶煤较厚且块度较大导致中上位顶煤采出率较低,部分较薄破碎顶煤在煤壁漏冒。工程实践表明:采用了 1:1 采放比后,在回采过程中,参数优化最大程度减少了工艺煤损,综放工艺对顶煤厚度连续变化具有较强的适应性,综放工作面采出率达到 90%,多采出顶煤约 0.81 万 t,实现了安全高效、科学精准回采。

**关键词:**综放开采;煤厚变异性;采放比;顶煤运移跟踪仪;煤炭采出率

中图分类号:TD823 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)08-0008-08

## Study on reasonable mining and caving ratio in fully-mechanized top-coal caving mining of coal seam with large thickness variation coefficient

ZHANG Mingjian<sup>1</sup>,LI Feng<sup>1</sup>,YANG Liu<sup>2,3</sup>

(1.Jiulishan Mine,Henan Coking Coal Energy Co.,Ltd.,Jiaozuo 450046,China; 2.College of Energy and Mining,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China;3.Top-coal Caving Mining Research of Coal Mining Industry,Beijing 100083,China)

**Abstract:**Based on the characteristics of large variation of coal seam thickness on strike and dip of the fully mechanized caving test surface of Jiulishan Mine,and the thickness in the middle is thick and thin on both sides,two groups of numerical simulation tests were carried out at a typical slope changing position of coal seam,two sets of numerical simulation tests were carried out on the coal seam where the coal seam changed from one direction to the other,and a reasonable mining and caving ratio was proposed and verified by field tests. The experimental research results show when the mining height of the constant mining height group increases,the number of top-coal dropped coal particles remains in a constant value range,and the change of mining height has little effect on the recovery ratio of top-coal. With the increase of mining-caving ratio,the number of discarded coal particles first increased and then decreased,and the top-coal discharge first decreased and then increased,and the change of mining and mining and caving ratio has great influence on the recovery ratio of top-coal. The comparison results between the two groups of tests shows that;in the process of coal thickness increasing gradually,combined with the recovery ratio of mechanical mining,there is a high mining and mining and caving ratio intervals range of 0.9-1.1; Linear influence requires specific analysis for specific coal thickness. The field test results of the top-coal recovery rate on the test surface by the top-coal

收稿日期:2021-12-08 责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1152  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51934008,51904305)  
作者简介:张明建(1983—),男,河南商丘人,高级工程师。E-mail:zmj0410@126.com  
通讯作者:杨 柳(1993—),男,安徽淮南人,博士研究生。Tel:010-62331837,E-mail:yangliu0493@163.com

migration tracker show that the recovery ratio is 85.7% under the condition of 1 : 1 mining and mining and caving ratio. The top-coal on site has a high degree of fragmentation. The middle and lower head coals are thin and broken, resulting in a high recovery rate of the lower top-coal. Top-coal leaks from the coal wall. The engineering practice shows that after adopting 1 : 1 mining and caving ratio, the parameters optimization can reduce the process coal loss to the greatest extent, and the fully-mechanized top-coal caving process has strong adaptability to the continuous change of top-coal thickness. The recovery ratio of fully mechanized caving face reaches 90%, and the recovery of more top-coal is about 8 100 tons. It has realized safe, efficient, scientific and accurate mining recovery, and laid a theoretical and practical foundation for the transformation of mining methods and the popularization of fully-mechanized top-coal caving technology.

**Key words:** fully-mechanized top-coal caving mining; variation of coal thickness; mining and caving ratio; top-coal migration tracker; recovery of coal

## 0 引 言

综采放顶煤工艺因其单产高,成本低,适应性好的特点,广泛应用于厚煤层开采<sup>[1]</sup>。厚煤层在适宜的条件下,应当优先考虑放顶煤开采方法<sup>[2]</sup>。我国的放顶煤开采技术处于国际领先地位,王家臣等<sup>[3-4]</sup>建立了统一研究煤岩分界面、顶煤放出体、顶煤采出率和含矸率四要素的 BBR 研究体系。在放顶煤领域,杨胜利等<sup>[5-6]</sup>的支架-围岩关系研究,揭示了散体顶煤在支架-围岩关系中缓冲作用,其煤壁柔性加固技术,提出了一种主被动结合的防片帮支护模式,因其材料成本低效果好而广泛应用;潘卫东<sup>[7]</sup>提出以射频识别(RFID)为技术核心的基于顶煤运移跟踪仪的自动化放煤技术解决了智能化综放开采放煤过程的自动化控制难题;文献[8-9]进行了顶煤冒放性及破碎机理研究,提出由于主应力方向的旋转效应,可以将顶煤划分为原岩应力区、微裂隙加密区、剪切破坏区、拉剪混合破坏区和散体冒落区;张锦旺等<sup>[10-12]</sup>在散体颗粒方面的研究,揭示了顶煤块度级配对顶煤流动规律的影响;吕华永等<sup>[13-15]</sup>为实现 20 m 以上特厚煤层的开采,对特厚煤层进行中部卸压,实现了厚煤层的安全开采,魏炜杰等<sup>[16-17]</sup>在水平分段开采技术基础上,提出了巷道的合理位置,放煤顺序的优化,从而提高了采出率;文献[18-20]基于图像识别的智能煤矸识别技术解决了煤矿低照度环境下的煤矸识别问题,为煤矿智能综放技术提供了技术保障。

以上研究都是基于煤层厚度较为均匀的条件,因此在煤厚变化大的情况下,如何应用好上述研究理论以及确定适宜本矿井的工艺参数是试验面临的难题。焦作矿区的九里山矿在 20 世纪率先引入炮采放顶煤工艺,并成功应用于其他煤矿<sup>[21-22]</sup>。由于发展要求,九里山矿在焦作矿区再次率先引进了综采放顶煤工艺。该工艺的使用,需要对煤层的合理采放比进行确定,合理的采放比是放顶煤实施的核心。然而待开采 15081 工作面山西组 2 1 煤层厚度 2~7 m,煤厚变异系数大,煤层开采难度增加。

要求有合理的采放比能够在实现高资源采出率的同时实现安全稳定回采。笔者通过数值模拟进行了恒定采高、恒定采放比对照试验,得到了合理采放比。

## 1 煤层概况

煤层东西部煤厚差异大,最厚处 7 m,由东向西逐渐变薄,直至开切眼以西煤层出现尖灭现象(工作面推进方向由西向东)。南北煤厚差异明显,运输巷煤厚(南)比回风巷(北)煤厚均厚 2 m。煤层整体呈现中间厚,两边薄的特点,且由西向东逐渐增厚,增厚范围也向南北(两巷)方向拓展。根据煤层钻探数据,利用 surfer 绘图软件得 15081 面煤层厚度变化,如图 1 所示。煤层综合柱状如图 2 所示。

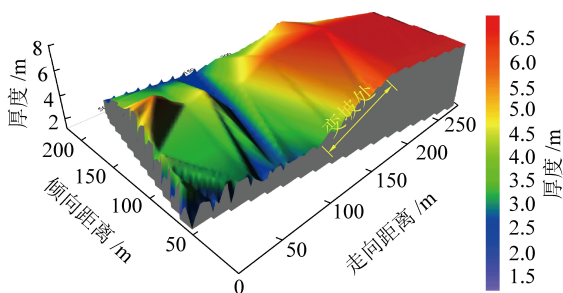


图 1 15081 工作面煤层厚度变化

Fig.1 Contour of coal seam thickness variation of  
No.15081 working face








岩性	层厚/m	柱状	累厚/m
细粒砂岩	4.17		399.67
粉砂岩	13.90		413.57
泥岩	0.41		413.98
粉砂岩	2.87		416.85
二 <sub>1</sub> 煤	5.30		422.15
粉砂岩	5.35		427.50
中细砂岩互层	0.97		428.47

图 2 15081 开切眼中部煤层柱状

Fig.2 Coal seam columnar section in middle of cut-hole

煤层直接顶厚 3.2 m,为砂岩、泥岩互层,可随采随冒,基本顶厚 14 m,为粉砂岩,内含多层软弱夹层。

在煤层推进过程中,厚度变化的顶煤增加了顶板安全管理难度,并且由于部分煤厚不满足放顶煤要求,需要对放煤工作进行区域划分。放顶煤工作区域如图 3 所示。

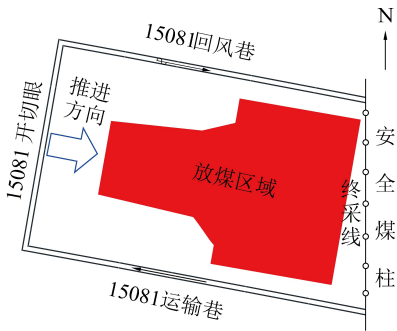


图 3 放煤区域划分范围示意

Fig.3 Schematic diagram of coal caving area division

局部放煤段,放煤支架为 43~75 号支架,沿工作面倾向 67~117 m,工作面走向 30~125 m;全面放煤段,放煤支架为 15~90 号支架,沿工作面倾向 23~140 m,工作面走向 125 m 至终采线。

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

为了研究工作面煤厚变化条件下采放比对综放开采散体顶煤放出规律的影响,提高工作面煤炭采出率,利用颗粒流软件(PFC)建立沿工作面推进方向的综放开采离散元数值二维计算模型,分析不同采高,不同采放比条件下煤岩分界面演化特征和顶煤放出体发育过程。模型初始状态如图 4 所示。

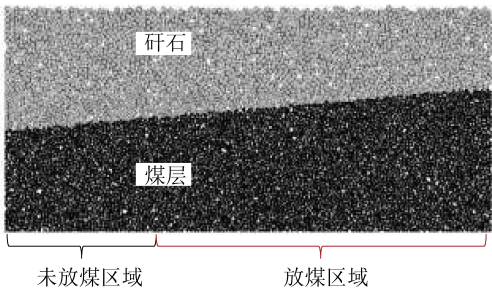


图 4 PFC 模型初始状态

Fig.4 Initial state of PFC model

图 4 中上部灰色的颗粒为破碎直接顶,模型长度 24 m,高度 11 m,颗粒与支架尺寸均按照比例 1:1 计算。下部黑色颗粒为煤,左边界煤厚 5 m,右边界煤厚 7 m,观察煤体的流动状态和特征,利用反

演算法计算顶煤采出率和放出形态。煤炭颗粒和矽石颗粒的物理力学参数见表 1。

表 1 煤矽物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	半径/ m	法向刚度/ ( $\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	剪切刚度/ ( $\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	摩擦 因数
煤	1 300	0.05~0.10	0.2	0.2	0.4
矽石	2 500	0.10~0.15	0.4	0.4	0.4

矽石厚度对于研究煤矽分界面与放出率影响不大,为方便程序计算,取 4~6 m,矽石和煤颗粒的大小根据现场调查的粒径进行简化拟合。矽石自下而上粒径由 0.1 m 逐渐变大至 0.15 m。

综放支架由 PFC 中的墙(wall)单元来模拟,通过 fish 语言控制支架放煤口的开或关,计算中采用“见矽关门”的原则来进行放煤和移架。模型共设置 14 次移架,起始放煤位置左起 11.5 m,对应煤厚 5.96 m,结束放煤位置左起 19.9 m,对应煤厚 6.66 m。采用一刀一放,步距 0.6 m,支架的几何尺寸及物理力学参数如下:

法向刚度 $k_n/(\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0
剪切刚度 $k_s/(\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0
掩护梁角度/ $(^\circ)$	60
摩擦因数	0.1

模拟边界条件:颗粒四周以及顶底部墙体作为模型的外边界,其速度和加速度固定为 0;初始条件:颗粒初始速度为 0,只受重力作用, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ,墙体速度与加速度为 0。

为了简化建模和运算过程,本次模拟将模拟 2 种开采条件下的资源回收:A 组为采高恒定,B 组为采放比恒定。由于煤厚和支架高度限制,所列采高为可实施开采的上下限,见表 2、表 3。模型计算时,放出体可正常发育,经验算边界效应不明显可忽略。

表 2 A 组恒定采高

Table 2 Constant mining height of Group A

编号	采高/m	对应采放比
1	2.3	1.17~2.04
2	2.5	1.00~1.80
3	2.7	0.85~1.59
4	2.9	0.72~1.41
5	3.1	0.61~1.26
6	3.3	0.52~1.12
7	3.5	0.43~1.00



表 3 B 组恒定采放比

Table 3 Constant mining and caving ratio of Group B

编号	采放比	对应初始 采高/m	15 次移架 后采高/m
1	0.92	3.098	3.462
2	1.00	2.979	3.329
3	1.08	2.860	3.196
4	1.17	2.740	3.063
5	1.27	2.622	2.930

2.2 放煤反演模型运算

对 A 组进行放煤反演,如图 5 所示,可以看出,在采高不断增加的情况下,第 1~7 次移架后,丢煤量较多,且较为集中,如图 5 中红色矩形框所示。之后移架丢煤量逐渐稳定变少。

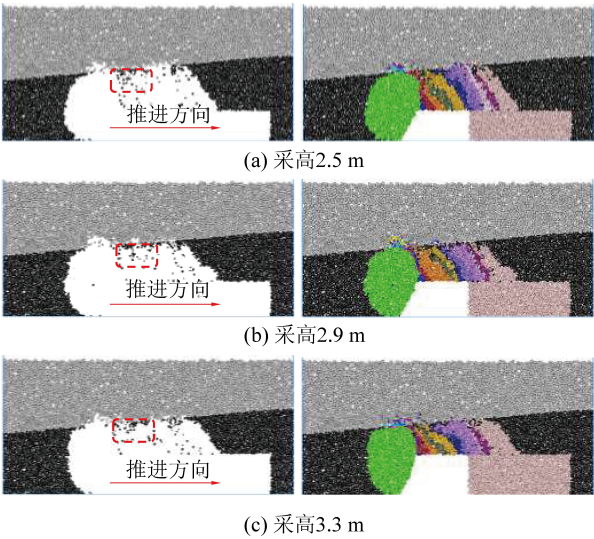


图 5 A 组放煤反演

Fig.5 Inversion of top-coal caving of Group A

由于采高的不断增加,导致机采部分的颗粒增加,故统计移架后的顶煤丢煤量,如图 6 所示。

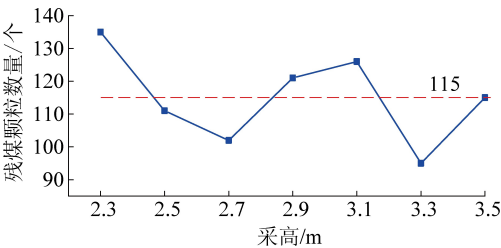


图 6 顶煤丢煤统计

Fig.6 Statistical of top-coal loss

由图 6 可知,顶煤的丢煤量具有起伏性,基本维持在在 115 个颗粒上下浮动,顶煤丢煤量在采高逐渐增加的过程中,没有出现线性增加或者减少的现象,可见,采高在 2.3~3.5 m,移架放煤阶段的前期丢煤量较多,后期放煤阶段,放煤逐渐稳定,丢煤量变化不大。可见,随着采高的增加(2.3~3.5 m)

顶煤放出率具有起伏性,基本维持在一定数值上下起伏,但变化量不大。

对 B 组进行放煤反演,如图 7 所示,由图 7 可直观看到支架上方丢煤量的变化,随着采放比的增大丢煤量有逐渐增大的趋势。对顶煤残留颗粒进行统计,如图 8 所示。

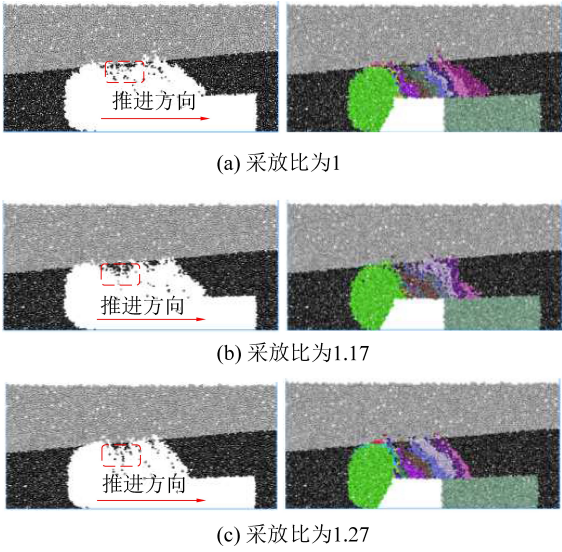


图 7 B 组放煤反演

Fig.7 Inversion of top-coal caving of Group B

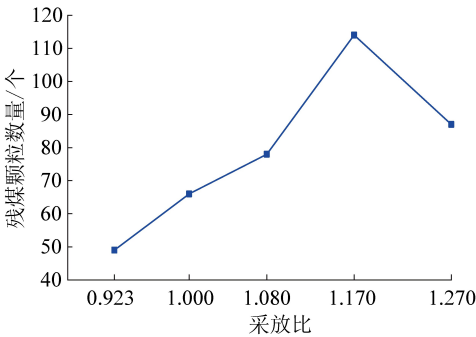


图 8 顶煤残煤统计

Fig.8 Statistical of top-coal and residual coal

可知在采放比恒定条件下,随着采放比的增加,顶煤残留量呈现逐渐增加的趋势,随后下降。受支架采高限制,煤厚 5 m 最高采放比为 1.27 时,达到支架最低支撑高度 2.2 m。在采放比为 1.17 时达到最高丢煤量。在丢煤量较高时,初放时期的丢煤量仍占较大比例,如图 7 中红框所示。图 8 与图 6 对比,可以看出,恒定采放比组丢煤量水平明显低于恒定采高组。

2.3 结果分析

恒定采高组(A)与恒定采放比组(B)每次移架放煤的放煤量不同,导致放煤不均衡,为了更好地观察每次移架后,放煤量与采高和采放比的关系,对每



次移架后的放煤量进行统计,如图 9 所示。

由图 9 可得,A 组与 B 组的前 3 次移架的放煤量较低,且稳定维持在较低水平,3 次移架后放煤不均衡性凸显,每次移架后放煤量差异较大,在大幅度

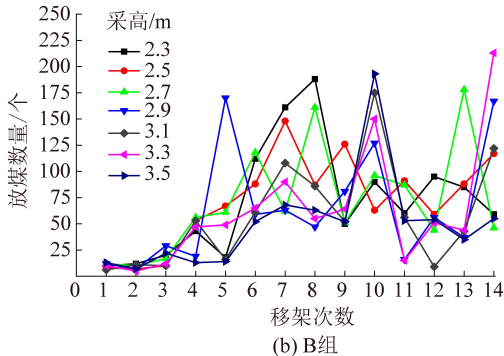
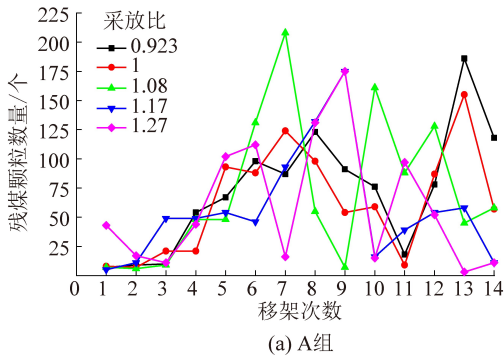


图 9 移架放煤情况

Fig.9 Condition of support moving and top-coal caving

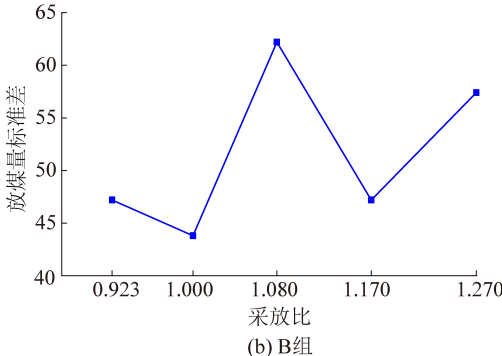
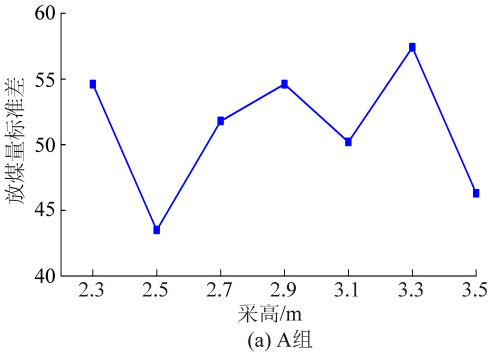


图 10 标准差情况

Fig.10 Standard deviation

B 组数据,随着恒定采放比的增加,工作面采出量呈现减小的趋势。在 5.96~6.66 m,在采放比为 1.27 时工作面采出量达到最低。采放比 0.923~1.08,工作面采出量较高。

结合 A、B 两组模拟情况,2 组模拟结论相同,可见 15081 工作面的最佳采放比在 0.9~1.1。

3 顶煤采出率测试

3.1 测试设备

顶煤采出率测试设备布置方式、测试结果如图

增加的峰值出现后会出现大幅度减小的谷值,且每相隔 1~3 次移架峰值与谷值交替出现,为了显示这 2 组情况下移架后放煤量的波动性,观察放煤量标准差情况,如图 10 所示。

由图 10 中 A、B 两组标准差数值可以看出,放煤量的波动情况。两组试验的对比都显示移架放煤过程中,放煤存在不均衡性,且不均衡性较大。采高逐渐升高的过程中,放煤量的不均衡性呈现一定的波动情况。采放比在升高的过程中,放煤量的不均衡性也呈现一定的波动情况。相比较而言,在提高采高时候,放煤不均衡的情况波动性比提高采放比的放煤不均衡性更稳定。

对于整个工作面而言,顶煤的采出率最高不能代表工作面的产煤量最高,故统计机采割煤与顶煤放出量的总采出量,从而确定最佳采高与采放比,如图 11 所示。可见随着采高的增加,工作面的整体煤炭采出量呈现增加的趋势,可能是由于煤厚的呈线渐厚现象导致煤炭采出量没有呈现线性增加。在煤厚 5.96~6.66 m,割煤高度 3.3 m 达到工作面最大煤炭采出量。虽然割煤高度在 2.3 m 时初始放煤量最高,但整体而言,随着割煤高度的增加,煤炭采出量是逐渐增大的,随后在 3.3 m 后下降。所以 15081 工作面在煤厚 5.96~6.66 m 时,割煤高度在 3.1~3.5 m 较为合适,此时采放比为 0.92~1.14 与 0.9~1.148。

12、图 13 所示。

3.2 工作面不同位置的顶煤采出率

将实测得到的各个钻孔的顶煤采出率沿煤层倾斜方向统计分析,得到沿煤层倾斜方向工作面不同位置的顶煤采出率分布情况,如图 13 所示。从图 13 可以看出,工作面下端头顶煤采出率较低,这是由于倾斜煤层不利于下端头顶煤的放出,且下端头侧顶煤较厚造成的;而工作面中部及上部的顶煤基本全部放出,这是因为工作面中上部顶煤较薄,且由于注水等原因使得顶煤特别破碎,顶煤放出效果好,

架间损失较小。1~10 号钻孔的现场回收测试结果,

如图 13 所示。

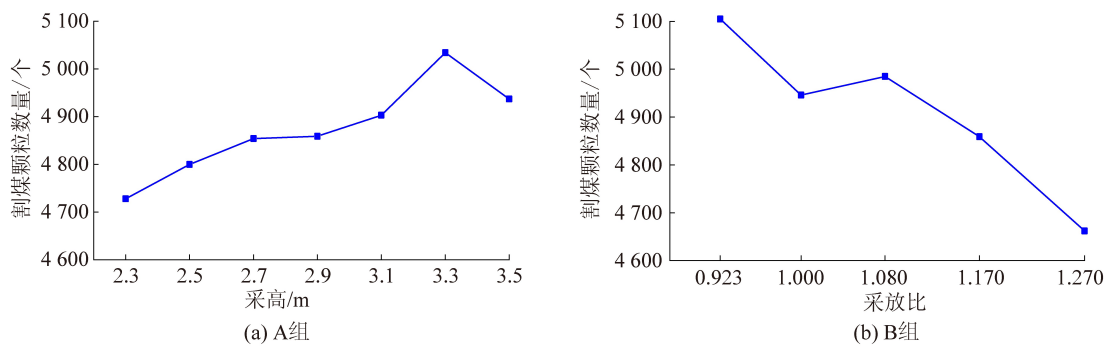


图 11 工作面采出量  
Fig.11 Recovery of working face

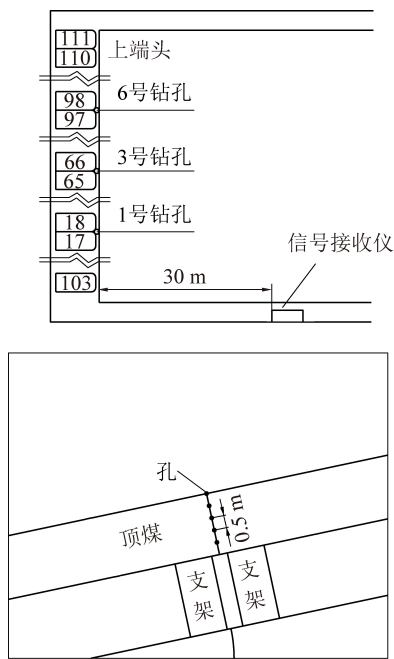


图 12 单孔布置方案  
Fig.12 Layout plan of single hole

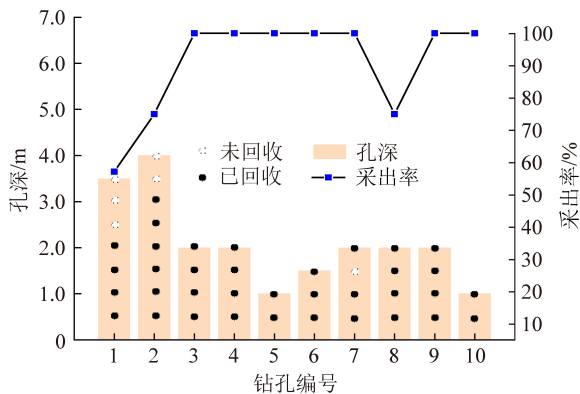


图 13 测试结果  
Fig.13 Testing result

九里山 15081 工作面下位顶煤放出率特别高,这主要是由于工作面顶煤破碎程度高,煤壁稳定性

差,使得部分顶煤从工作面煤壁冒顶而出,增大了下位顶煤采出率。中上位及上位顶煤多位于两相邻放出体之间的三角残煤处,且因矿山压力和裂隙影响破碎块度较大,容易在放煤口处形成拱结构,顶煤采出率较低。以上分析说明在目前的生产条件下需要采取一些技术手段改进放煤工艺来提高 4.6 m 以上顶煤采出率,同时保证较少的混矸率。

运用顶煤运移跟踪仪对 15081 工作面顶煤采出率进行现场测试。观测中从工作面向顶煤中打 10 个测试钻孔,每个钻孔中安装 2~8 个射频标签,在不同层位共计安装了 42 个射频标签,信号接收仪共接收到了 36 个不同层位放出的射频标签,可得到顶煤放出率约为  $(36 \div 42) \times 100\% = 85.7\%$ ,工作面割煤的采出率按 95% 计算,则放顶煤工作面的采出率为 90.4%。根据测试结果,对河南焦煤能源有限公司九里山矿 15081 综放工作面放煤工艺技术进行了针对性优化,采用新工艺后,顶煤采出率提高了 6%,15081 工作面多采出顶煤约 0.81 万 t。

## 4 结 论

1) 针对 15081 面煤层厚度起伏变化大的情况,取一典型块段进行模拟分析,最终确定采放比范围为 0.9~1.1。

2) 利用第 2 代的顶煤回收跟踪仪进行采出率测试,与煤矿的传统计算所得总采出率相比,较为接近。测定顶煤采出率不仅能对放出率指标进行考核,还能对顶煤不同水平层位,不同倾向位置以及夹矸上下层的放出率情况进行分析。

3) 初放丢煤量随着采高的增加,逐渐增大。恒定采放比与恒定采高的方案下最终的煤炭采出率都受到煤厚的非线性影响,对于具体煤厚需要具体分析。

4) 顶煤层位的中下位、下位、中上位、上位的顶煤采出率依次减少。与以往测试结果不同的是,九里山15081工作面下位顶煤放出率特别高,是由于工作面顶煤破碎程度高,煤壁稳定性差,使得部分顶煤从工作面煤壁冒顶而出,增大了下位顶煤采出率。

# 参考文献 (References):

- [1] 王家臣.厚煤层开采理论与技术[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [2] 王家臣.我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J].煤炭学报,2018,43(1):43-51.  
WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 43-51.
- [3] 王家臣,张锦旺.综放开采顶煤放出规律的BBR研究[J].煤炭学报,2015,40(3):487-493.  
WANG Jiachen, ZHANG Jinwang. BBR study of top-coal drawing law in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 487-493.
- [4] 王家臣,张锦旺,陈 伟.基于BBR体系的提高综放开采顶煤采出率工艺研究[J].矿业科学学报,2016,1(1):38-48.  
WANG Jiachen, ZHANG Jinwang, CHEN Wei. Research on technology of improving top-coal recovery in longwall top-coal caving mining based on BBR system[J]. Journal of mining science and technology, 2016, 1(1): 38-48.
- [5] 杨胜利,李兆欣,魏炜杰,等.综放开采散体顶煤对支架与围岩关系影响的实验研究[J].煤炭学报,2017,42(10):2511-2517.  
YANG Shengli, LI Zhaoxin, WEI Weijie, et al. Influence of loose top-coal on support and surrounding rock relationship in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2511-2517.
- [6] 杨胜利,杨 毅.煤壁柔性加固工艺参数优化试验研究[J].煤炭学报,2019,44(9):2622-2631.  
YANG Shengli, YANG Yi. Experimental study on optimizing parameters of flexible reinforcement technology of coal wall[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2622-2631.
- [7] 潘卫东,李新源,员明涛,等.基于顶煤运移跟踪仪的自动化放煤技术原理及现场应用[J].煤炭学报,2020,45(S1):23-30.  
PAN Weidong, LI Xinyuan, YUAN Mingtao, et al. Technology principle and field application of automatic coal drawing based on the top-coal tracker[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 23-30.
- [8] 王兆会,王家臣,王 凯.综放开采顶煤冒放性预测模型的构建与应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(1):49-62.  
WANG Zhaohui, WANG Jiachen, WANG kai. A model for top-coal cavability assessment and its application in longwall top-coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 49-62.
- [9] 王家臣,王兆会.综放开采顶煤裂隙扩展的应力驱动机制[J].煤炭学报,2018,43(9):2376-2388.  
WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Propagating mechanism of top-coal

- coal fracture in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2376-2388.
- [10] 张锦旺,王家臣,魏炜杰,等.块度级配对散体顶煤流动特性影响的试验研究[J].煤炭学报,2019,44(4):985-994.  
ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie, et al. Experimental investigation on the effect of size distribution on the flow characteristics of loose top-coal[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 985-994.
- [11] 张锦旺,王家臣,魏炜杰.工作面倾角对综放开采散体顶煤放出规律的影响[J].中国矿业大学学报,2018,47(4):805-814.  
ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie. Effect of face dip angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 805-814.
- [12] 张锦旺,王家臣,魏炜杰.工作面倾角对综放开采散体顶煤放出规律的影响[J].中国矿业大学学报,2018,47(4):805-814.  
ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie. Effect of face dip angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 805-814.
- [13] 吕华永,王兆会,唐岳松,等.特厚煤层卸压综放开采顶煤破碎及运移规律实验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(3):476-486.  
LYU Huayong, WANG Zhaohui, TANG Yuesong. Experimental study on top-coal breaking and moving rules during fully mechanized top-coal caving mining in extremely thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 476-486.
- [14] 吕华永,刘 飞,李良晖,等.顶煤预裂裂隙定向水力压裂研究[J].矿业科学学报,2018,3(6):553-560.  
LYU Huayong, LIU Fei, LI Lianghui, et al. Study on directional hydraulic fracturing of prefabricated fissures in top-coal[J]. Journal of mining science and technology. 2018, 3(6): 553-560.
- [15] 吕华永.特厚煤层卸压开采顶煤破碎机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2019.  
LYU Huayong. Study on broken mechanism of fully mechanized top-coal caving mining after extracting the middle slice in extremely thick coal seam[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing. 2019.
- [16] 魏炜杰,杨胜利,李良晖,等.急倾斜煤层水平分段综放开采合理巷道位置确定[J].煤炭工程,2017,49(10):16-19.  
WEI Weijie, YANG Shengli, LI Lianghui, et al. Reasonable roadway position determination in steeply-inclined horizontal sub-level top-coal caving mining[J]. Coal Engineering, 2017, 49(10): 16-19.
- [17] 魏炜杰,陈 伟,张锦旺,等.水平分段综放开采放煤方式优化研究[J].煤矿安全,2016,47(11):57-60.  
WEI Weijie, CHEN Yi, ZHANG Jinwang, et al. Optimization study for drawing mode of horizontal subsection full-mechanized top-coal caving[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(11): 57-60.
- [18] 李良晖.基于差异照度图像的综放开采煤矸混合度识别研究



[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.

LI Lianghui.Research on different illuminant image recognition of coal and gangue minxing ratio in longwall top-coal caving face [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing,2019.

[19] 王家臣,李良晖,杨胜利.不同照度下煤矸图像灰度及纹理特征提取的实验研究[J].煤炭学报,2018,43(11):3051-3061.

WANG Jiachen,LI Lianghui,YANG Shengli.Experimental study on gray and texture features extraction of coal and gangue image under different illuminance[J].Journal of China Coal Society, 2018,43(11):3051-3061.

[20] 李良晖.放顶煤工作面煤矸混合度自动识别研究进展[J].煤炭工程,2017,49(10):30-34.

LI Lianghui.Research progress of automatic recognition of coal-gangue mixedness in longwall top-coal caving face[J].Coal Engineering,2017,49(10):30-34.

[21] 贾明魁.炮采放顶煤面矿压显现规律研究[J].矿山压力与顶板管理,1999(S1):3-5.

JIA Mingkui.The behavior of ground pressure of top caving in 1402 face at Jiulishan coal mine[J].Ground Pressure and Strata Control,1999(S1):3-5.

[22] 王良金,李卫平,许克鸣,等.焦作九里山矿单体支柱放顶煤工作面顶煤运动放出规律浅析[J].焦作工学院学报,1999(5):3-5.

WANG Liangjin,LI Weiping,XU Keming,*et al.*Analysis of caving coal movement drawing law at the single body breaker prop sub-level caving coal face in Jiulishan coal mine of Jiaozuo[J]Journal of Jiaozuo Institute of Technology,1999(5):3-5.