

文章编号:0253-9993(2011)03-0371-06

极近距离煤层合层综放技术

杨胜利,刘颢颢,李 杨,郑立永

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083)

摘 要:为研究极近距离煤层合层夹矸的冒放性和顶煤采出率,以山西新柳煤矿极近距离煤层综放开采为工程背景,通过点荷载试验测试夹矸强度,分析夹矸对顶煤冒放性的影响;应用实验室相似模拟和 PFC 数值计算研究不同夹矸厚度的顶煤冒放性,确定了夹矸最大可放厚度;并应用顶煤跟踪系统,实现新柳煤矿顶煤采出率的现场测试。研究表明,夹矸强度、厚度、裂隙发育特征影响放煤效果显著;新柳煤矿 10 号、11 号近距离煤层最大可放夹矸厚度不宜超过 1.0 m;顶煤跟踪系统现场测试顶煤采出率达 83.3%。

关键词:极近距离煤层;合层综放技术;夹矸强度;PFC 数值计算;顶煤跟踪系统

中图分类号:TD823.2 **文献标志码:**A

The technology on full mechanized caving with combine-layers in very contiguous seams

YANG Sheng-li, LIU Hao-hao, LI Yang, ZHENG Li-yong

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To study the caving property of the rock parting and the recovery ratio of the top-coal in full-mechanized caving with combine-layers in very contiguous seams, based on the full mechanized caving in very contiguous seams in Xinliu Coal Mine and adopted the method of testing the strength of the parting with point loading test to analyze the influence of rock parting on top coal caving property. The largest caving thickness of rock parting was determined by means of similar simulation and PFC numerical calculation in the laboratory, the top-coal tracking system was used for practical surveying the recovery ratio of the top-coal. The results indicate that the caving effectiveness is concerned with the strength of the parting, the thickness of the parting and the features of relaxed crack, the largest caving thickness of rock parting between the very contiguous seams of No. 10 and No. 11 should not surpass 1.0 m in Xinliu Coal Mine, and the recovery tested by the top-coal tracking system reaches 83.3%.

Key words: very contiguous seams; full mechanized caving with combine-layers; strength of the parting; numerical calculation by PFC; top-coal tracking system

综合机械化放顶煤开采自引入我国以来,因其具有一次采出厚度大、效率高、巷道掘进率低等诸多优点,已经成为我国厚煤层的主要采煤方法之一^[1-3]。许多学者在顶煤的冒放性、顶煤运移规律以及提高采出率措施方面作了大量的研究工作,相关成果成功指导了生产^[4-7]。对于极近距离煤层群,综放开采是实现合层一次采全厚的重要手段。极近距离煤层顶煤

移动与放出规律又不同于单一厚煤层综放开采,夹矸厚度、岩性、裂隙发育特征以及所处层位关系等均对顶煤的冒放性有较大的影响^[8-11]。以往对极近距离煤层合层综放的研究手段多是数值模拟或相似模拟等单一手段。针对上述问题,以新柳煤矿极近距离煤层合层综放开采为工程背景,研究夹矸的冒放性,通过对不同夹矸厚度的顶煤进行实验室散体放煤试验,

并应用离散元计算软件 PFC 对不同夹矸厚度的顶煤采出率和混矸率进行研究,在现场通过应用顶煤运移跟踪系统进行顶煤采出率现场测试,确定了合理可放夹矸厚度。

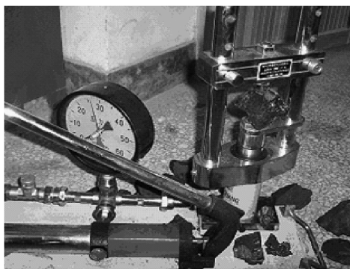
1 夹矸力学参数测试

1.1 工程概况

新柳煤矿主采 9 号、10 号和 11 号煤,其中 9 号煤受小煤窑破坏严重。10 号煤厚度 0.40 ~ 5.70 m,平均厚度 1.76 m,煤层顶板为深灰色砂质泥岩或泥岩,底板为灰色泥岩;10 号煤下距 11 号煤 0.07 ~ 23.00 m,平均 2.66 m。11 号煤层为太原组最底部主要可采煤层,煤层厚 0 ~ 8.95 m,平均厚 4.70 m,属稳定厚煤层。11 号煤层顶板为 10 号煤层底板,底板为深灰色泥岩,含铝质,团块状,遇水后变软膨胀,在煤矿巷道中易发生底臃,对生产有一定影响;采高 2.5 m,循环进度 0.6 m。在井田范围内,10 号和 11 号煤层夹矸厚度逐渐变化,在夹矸厚的地段采取分层开采,而在夹矸薄的地段进行煤层合层综放一次采全高。

1.2 夹矸强度点荷载测试

10、11 号煤层间夹矸厚度和强度是影响煤层可放性的重要因素。在 241103 工作面两巷取样进行点荷载强度测定。实验所用的主要仪器为携带式点荷载仪和 101FA-2 型电热鼓风干燥箱,如图 1 所示。



(a) 携带式点荷载仪



(b) 电热鼓风干燥箱

图 1 实验主要仪器设备

Fig. 1 Main equipments in experiment

试验原理是将煤样置于上下两个球端圆台状加荷器之间,对试样施加集中荷载,直至试样破坏,通过

计算求得试样的点荷载强度。点荷载强度指数 I_s 按下式计算

$$I_s = \frac{1}{4D^2} \pi p d^2 \quad (1)$$

式中, p 、 d 和 D 分别为压力表读数 (MPa), 液压缸直径 (mm) 和加载点之间的距离 (mm)。

为了便于比较,获得一致性的点荷载强度指数,必须进行尺寸修正。以试样厚度 $D=50$ mm 为标准,进行点荷载强度指数的修正,修正后所得的标准点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 的计算公式为

$$I_{s(50)} = k I_s(D) \quad (2)$$

式中, $I_{s(50)}$ 和 k 分别是修正后的标准点荷载强度指数和修正系数。

当 $D \leq 55$ mm 时, $k = 0.2717 + 0.01457D$; 当 $D > 55$ mm 时, $k = 0.7540 + 0.0058D$ 。

1.3 实验结果分析

将夹矸岩石试样分成 A、B 两组,每组各 16 个岩石试样, A 组岩石试样修正的标准点荷载强度指数如图 2(a) 所示,平均值为 2.71 MPa; B 组岩石试样做饱水状态下的抗压强度,平均值为 1.237 MPa,如图 2(b) 所示。

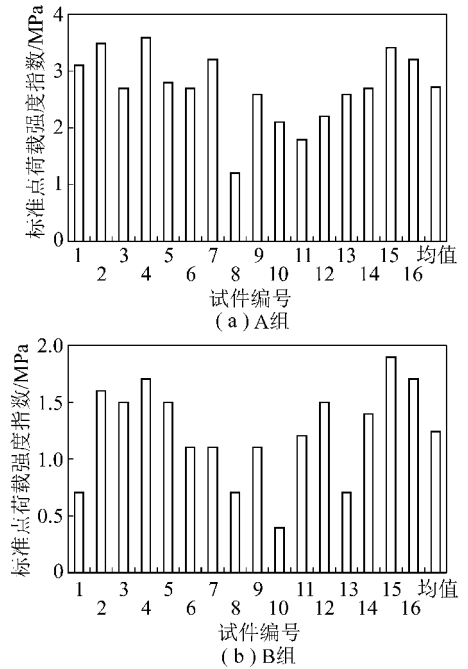


图 2 两组试样 $I_{s(50)}$ 值分布情况

Fig. 2 $I_{s(50)}$ distribution of the samples in two groups

得出 A 组岩石试样的抗压强度 σ_c 值、抗拉强度 σ_t 值和抗剪强度 τ_s 值,即

$$\sigma_c = 18 I_{s(50)} = 48.94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = 0.9 I_{s(50)} = 2.44 \text{ MPa}$$

$$\tau_s = \sigma_c \sigma_t / [2 \sqrt{\sigma_c (\sigma_c - 3 \sigma_t)}] = 5.92 \text{ MPa}$$

同理,测出 B 组试样饱水状态下的抗压强度值 $\sigma'_c = 22.27$ MPa、抗拉强度 $\sigma'_t = 1.11$ MPa 和抗剪强度 $\tau'_s = 2.69$ MPa。岩石试样的软化系数为

$$K_R = \frac{\sigma'_c}{\sigma_c} = \frac{22.27}{48.94} = 0.455$$

通过分析点荷载实验的数据,发现夹矸岩层的抗拉强度和抗剪强度比较低,比较容易受到拉破坏和剪切破坏;而且岩石在浸水后,强度下降的幅度很大。由于岩石的软化系数(0.455)小于 0.75,夹矸岩层认定为软化性强和工程地质性质较差的岩层。另外,10、11 号煤夹矸裂隙较发育,在支承压力的作用下,有较好的冒放性。

2 顶煤放出规律实验室模拟

为了研究 10、11 号煤层合并层放顶煤一次开采的夹矸厚度,以及夹矸对顶煤采出率的影响,通过室内散体相似模拟实验对不同夹矸厚度进行放煤研究。

2.1 散体顶煤放出实验方案

根据 10、11 号煤层顶、底板的资料,相似材料模拟实验在 1.6 m 模型架上进行,试验模型的几何比例常数采用 1:20,试验支架高度为 12.5 cm,放煤步距为 3.0 cm。10 号煤厚 8.8 cm,11 号煤厚 23.5 cm,中间夹矸厚 3 或 5 cm。模拟材料采用砂子、石膏、石灰、巴厘石配制,采煤机所采煤采用砂子、石膏、石灰按照 6:1:1.5 配制,10、11 煤层顶煤采用粒径为 1 cm 的棕黑色巴厘石模拟,夹矸采用平均粒径为 2 cm 的红褐色巴厘石模拟,10 号顶板破碎岩石用平均粒径为 2 cm 的白色巴厘石模拟。为了更加精确地测量放煤过程中顶煤的运移情况,在模型中的不同层位布设了染色并标号的平均粒径为 1.5 cm 的莲子作为标志点。放煤时本着见白色巴厘石关门的原则,模拟研究不同层位顶煤的采出率和不同层位顶煤移动与放出的轨迹及规律。散体介质流模拟实验中标志点的安放位置见表 1。

表 1 标志点的安放位置

Table 1 The position of landmarks

| 项目 | 层位 | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 距底板高度/cm | 15.5 | 18.5 | 22.0 | 26.5 | 30.0 |
| 列间距/cm | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 标志点个数 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

2.2 不同夹矸厚度放煤效果分析

试验过程用数码相机记录放煤过程,并分别称量顶煤以及夹矸质量,标志点通过放出记录和统计,通

过上述 3 个指标的综合,得出顶煤采出率,以及顶煤移动曲线。放煤过程如图 3 所示。

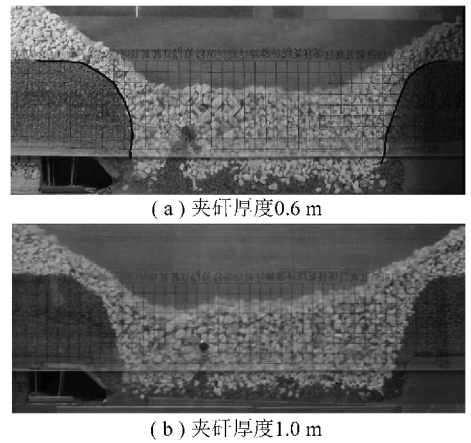


图 3 散体介质流模拟试验中结束放煤时的煤岩边界

Fig. 3 Boundary of coal and rock in the simulation experiment of the loose medium flow

2.3 顶煤采出率实测结果分析

实验过程中分别采用称重法和标志点法统计顶煤的采出率及含矸率。试验结果见表 2。

表 2 相似模拟试验结果

Table 2 Results of similar simulating experiment

| 夹矸厚度/m | 顶煤采出率/% | | 顶煤含矸率/% |
|--------|---------|------|---------|
| | 称重法 | 标志点法 | |
| 0.6 | 80.3 | 79.5 | 30.9 |
| 1.0 | 74.5 | 77.2 | 26.5 |

取称重法和标志点法计算的顶煤采出率的平均值,得出:0.6 m 夹矸厚度时顶煤的采出率为 79.9%,1.0 m 夹矸厚度时顶煤的采出率为 75.85%。

2.4 不同层位顶煤采出率比较

在散体介质流相似模拟试验中,不同层位顶煤放出的标志点的数量见表 3。

表 3 0.6 m 及 1.0 m 夹矸时不同层位放出标志点的数量

Table 3 The number of the different layers' landmarks in 0.6 m and 1.0 m parting thickness

| 夹矸厚度/m | 项目 | 层位 | | | | | 总计 |
|--------|----------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 0.6 | 标志点位置/cm | 15.5 | 19.5 | 23.5 | 32.5 | 36.5 | |
| | 标志点个数 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 210 |
| | 试验放出个数 | 37 | 38 | 35 | 34 | 23 | 167 |
| | 放出百分比/% | 88.1 | 90.5 | 83.3 | 81.0 | 54.8 | 79.5 |
| 1.0 | 标志点位置/cm | 15.5 | 19.5 | 23.5 | 30.5 | 34.5 | |
| | 标志点个数 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 180 |
| | 试验放出个数 | 33 | 31 | 32 | 25 | 18 | 139 |
| | 放出百分比/% | 91.6 | 86.1 | 88.9 | 69.4 | 50.0 | 77.2 |

上述结果表明,放煤过程中,破碎的顶煤和岩石会以阻力最小的路径逐渐向放煤口移动,形成散体介质的流动场,由于 10、11 号煤层之间有 3 或 5 cm 的夹矸,放煤时需要将夹矸层放出来,见到白色巴厘石关闭放煤口,这样使得 11 号煤层不同层位的采出率都比较高。按几何比例常数将夹矸的厚度换算成实际距离。当夹矸厚度为 0.6 m 时,各层位的顶煤采出率分别为 88.1%、90.5%、83.3%,平均采出率为 87.3%。10 号煤层靠近底板的采出率为 81.0%,靠近顶板由于受到矸石窜入放煤口及见矸关门原则的影响采出率明显低于其它部分,为 54.8%,平均放出率为 67.9%。10、11 号煤层的顶煤平均采出率为 79.5%。当夹矸厚度为 1.0 m 时,各层位的顶煤采出率分别为 91.6%、86.1%、88.9%,平均放出率为 88.9%。10 号煤层靠近底板的放出率为 69.4%,靠近顶板由于受到矸石窜入放煤口及见矸关门原则的影响采出率明显低于其它部分,为 50.0%,平均采出率为 59.7%。10、11 号煤层的顶煤平均采出率为 77.2%。

3 夹矸可放性 PFC 数值计算

通过离散元 PFC 程序,模拟不同夹矸厚度顶煤的冒放性以及顶煤的采出率情况。PFC 颗粒流方法是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用,它采用数值方法将岩层分为有代表性的多组颗粒单元,通过颗粒间的相互作用来表达整个宏观物体的应力响应,从而利用局部的模拟结果来研究边值问题连续的本构模型。根据本试验的实际情况,模拟的实际距离为 18 ~ 20 m,能够基本反映流动与放出规律,建立如图 4 所示的计算模型。

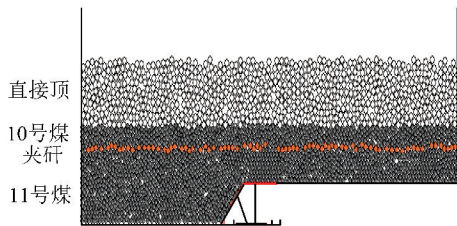


图 4 低位支架放顶煤计算模型

Fig. 4 Calculation model of low support caving

模拟夹矸厚度 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 m 时的夹矸冒放性及顶煤采出率情况,部分模拟结果如图 5 所示。

夹矸厚度不仅影响顶煤的采出率,还会影响放出顶煤的含矸率。从图 5 可以看出,随着夹矸厚度的增大,顶煤移动最终曲线有变陡趋势,说明夹矸厚度的增大影响顶煤的放出。从图 6 可以看出,随着夹矸厚

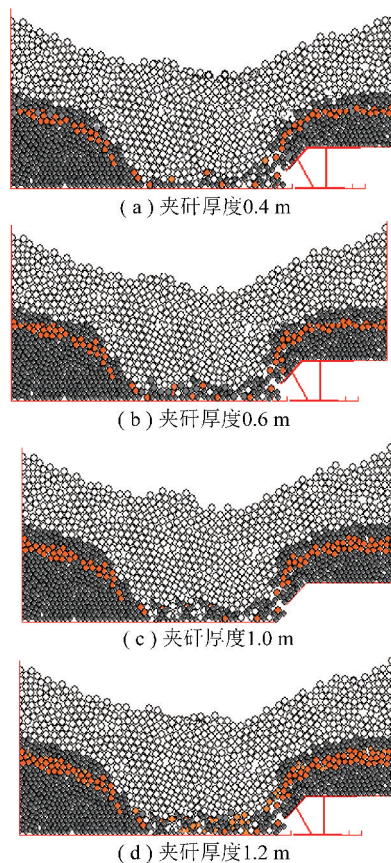


图 5 不同夹矸厚度顶煤冒放性及采出率
Fig. 5 Top coal caving characteristics and recovery ratio by different thickness of ton stein layer

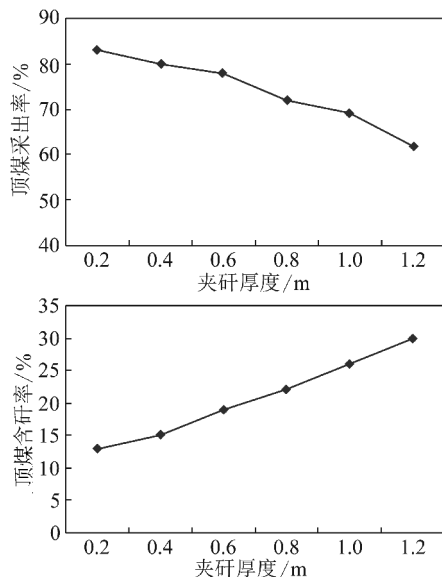


图 6 夹矸厚度与顶煤采出率及顶煤含矸率的关系曲线
Fig. 6 Relationship between ton stein layer thickness and recovery ratio, refuse ratio

度的增大,顶煤的采出率逐渐减少;相反顶煤含矸率则逐渐增加。当夹矸厚度增大到 1.2 m 时,顶煤采出率降低到 62%,含矸率增加到 30%,相应的原煤洗选

成本会显著增加。无论是从相似模拟还是数值计算均可以看出,要保证顶煤有较高的采出率和低的含矸率,夹矸的厚度不宜超过 1.0 m,如果夹矸过厚,采用分层开采更为合理。

4 顶煤跟踪仪现场测试

为了观测不同层位顶煤的采出率,在新柳煤矿 241105 工作面运用顶煤运移跟踪仪进行顶煤采出率的现场实测。

4.1 顶煤跟踪仪原理

图 7 为顶煤运移跟踪仪的系统组成。该仪器主要由稳压电源、信号接收仪(基站)、RF 射频标签(Marker)和射频标签编码器(标签参数设定仪和标签数据采集仪)组成^[12]。

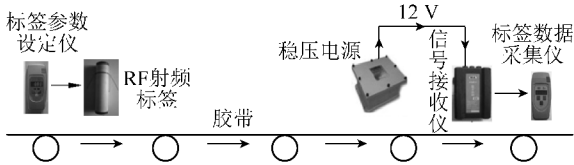


图 7 顶煤跟踪识别系统组成

Fig. 7 The composition of the top-coal tracking system

基本原理就是将 RF 射频标签埋入顶煤中的不同位置,随着顶煤放出而放出,将信号接收仪(基站)放置在工作面运输巷的运输胶带上方,自动记录放出射频标签的数量和先后顺序,到地面进行数据处理,可以获得放出的射频标签的数量和顺序,以此进行顶煤采出率的计算。

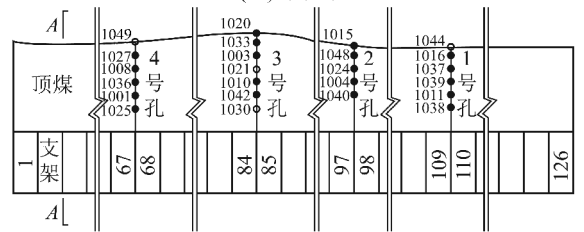
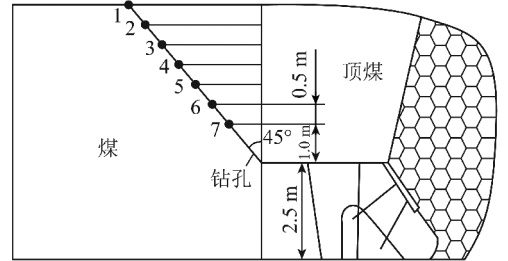
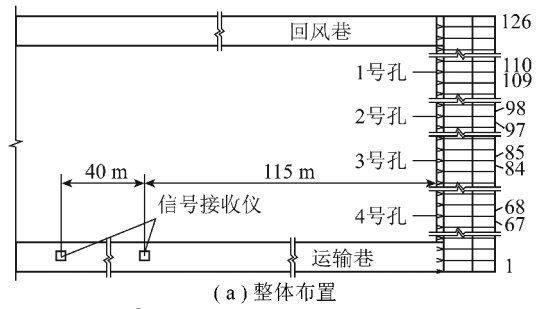
4.2 工作面观测过程

在工作面煤壁中间位置,煤壁完整无片帮的区域,选取距底板 2.5 m 处(即架间)斜向上钻孔,共 4 个且在同一平面内。孔所在的平面和煤壁成 45°角,孔间间距为 30 m,孔深均为 5.66 m,终孔点距煤壁垂距 4.0 m。试验布置如图 8 所示。

4.3 实验数据处理

随工作面的推进,顶煤跟踪仪和顶煤一起移动和冒落,在放煤口放到后刮板输送机运出工作面,经转载机到运输巷胶带,被安装在运输巷胶带上距煤壁 115 和 155 m 处的两个信号接收仪接收,且两个信号接收仪的接收数据一致,均为 20 个,具体编号见表 4。

现场观测分别在垂直方向距离顶煤 3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、≥6.0 m 处分别安装 3、4、4、4、4、5 个顶煤运移跟踪仪,总计安装 24 个,分别接收到 2、4、4、3、4、3 个,总计接收 20 个,不同层位的采出率分别为 66.7%、100%、100%、75%、100%、60%,试验区



(c) 钻孔布置俯视图

图 8 试验布置

Fig. 8 The layout of the test

顶煤平均采出率约为 83.3%。由于试验区域内的夹矸厚度仅为 0.2 m,且煤体裂隙发育程度较高,再结合相似模拟试验可以得出,新柳煤矿 241105 工作面在试验区域内顶煤采出率为 83.3% 可信。

表 4 信号接收仪接收的数据

Table 4 Datas in the equipment of signal receiver

| 接收到的顶煤跟踪仪编号 | | | | | | 未接收到的编号 |
|-------------|------|------|------|------|------|---------|
| 1016 | 1037 | 1039 | 1011 | 1038 | 1021 | |
| 1015 | 1048 | 1024 | 1004 | 1040 | 1030 | |
| 1020 | 1033 | 1003 | 1010 | 1042 | 1049 | |
| 1027 | 1008 | 1036 | 1001 | 1025 | 1044 | |

5 结 论

(1) 通过测试夹矸点荷载,以及夹矸冒放性相似模拟和数值计算研究,综合考虑顶煤采出率和含矸率,认为新柳煤矿极近距离煤层分层综放工作面进行顶煤采出率现场观测,采出率为 83.3%。与实验室相似模拟结果

(2) 应用顶煤运移跟踪仪,对新柳煤矿 10 和 11 号极近距离煤层分层综放工作面进行顶煤采出率现场观测,采出率为 83.3%。与实验室相似模拟结果

相吻合,其结果是可信的。

参考文献:

- [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.
Wang Jiachen. The theory and technique on the thick coal seam mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [2] 黄炳香,刘长友,程庆迎. 低位综放开采顶煤采出率与含矸率的关系[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 789-793.
Huang Bingxiang, Liu Changyou, Cheng Qingying. Relation between top-coal drawing ratio and refuse content for fully mechanized top coal carving[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 789-793.
- [3] Wang Jiachen, Yin Zhangzhu. The basic mechanics problems and the development of long wall top-coal caving technique in China[A]. An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering [C]. Melbourne Australia, 2000.
- [4] 王家臣,富 强. 低位综放开采顶煤放出的散体介质流理论与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 337-341.
Wang Jiachen, Fu Qiang. Low top coal caving off the loose medium flow theory and application[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 337-341.
- [5] 王家臣,李志刚,陈亚军. 综放开采顶煤放出散体介质流理论的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 260-263.
Wang Jiachen, Li Zhigang, Chen Yajun. Top coal caving let loose medium expert-mental study of flow theory[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 260-263.
- [6] Fu Qiang, Wu Jian, Wang Jiachen. Study on the application of Distinct Element Method in long wall top-coal caving mining[A]. Proceedings of the 99 International Workshop on Underground Thick-seam Mining[C]. Beijing, 1999.
- [7] Liu Changyou. Features of support-surrounding rock inter-action in fully mechanized caving face with high-production and high-efficiency[A]. 13th International Conference on Coal Research [C]. Shanghai, 2004.
- [8] 朱 涛,张百胜,冯国瑞,等. 极近距离煤层下层煤采场顶板结构与控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 190-193.
Zhu Tao, Zhang Baisheng, Feng Guorui, et al. Roof structure and control in the lower seam mining field in the ultra-close multiple seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 190-193.
- [9] 刘金海,冯 涛,王卫军,等. 急倾斜煤层顶煤可放性识别的距离判别方法及应用[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 606-609.
Liu Jinhai, Feng Tao, Wang Weijun, et al. Distance discriminate analysis method for distinguishing the difficulty[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 606-609.
- [10] 朱川曲,缪协兴. 急倾斜煤层顶煤可放性评价模型及应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 134-137.
Zhu Chuanqu, Miao Xiexing. Model and its application on the evaluation of degree of difficulty of top coal caving in steep seam[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 134-137.
- [11] 夏小刚,黄庆享. 层次分析法在确定顶煤可放性各因素权重中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(10): 120-124.
Xia Xiaogang, Huang Qingxiang. Application of AHP in determining weight of factors of capability of top coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 120-124.
- [12] 王家臣,杨建立,刘颢颢,等. 顶煤放出散体介质流理论的现场观测研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 353-356.
Wang Jiachen, Yang Jianli, Liu Haohao, et al. The practical observation research on loose medium flow field theory on the top-coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 353-356.