

文章编号: 1671-251X(2024)09-0066-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024070058

混合煤矸放落态势特征研究

单鹏飞^{1,2}, 杨通¹, 孙浩强¹, 郝博佳¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 传统的基于图像检测技术的放顶煤过程中煤流动态特性研究多侧重于某一特定阶段的图像分析, 未结合全阶段的动态特性进行综合分析; 现有研究较少将放顶煤过程中上覆岩层的松散区变化与放煤过程中的煤矸分离和煤流特性相结合, 缺乏对放煤过程的全局性系统分析。针对上述问题, 对放顶煤过程中的煤流动态特性、煤矸分离效果及上覆岩层松散区凹陷变化进行了系统研究。首先, 提出了一种基于双光流网络的放顶煤过程动态分析方法。实验结果表明: 不同放煤方案下, 放煤速度不随放煤形式和规律的变化而改变, 平均检测准确率随着放煤口数量的增多而提高, 尤其在放煤步距阶段呈明显线性增长; 顶煤放出率与平均检测准确率呈正相关关系, 验证了该方法在放顶煤过程监测中的有效性。其次, 利用 OpenCV 技术对上覆岩层松散区凹陷面积进行实验分析。结果表明, 初始放煤阶段松散区凹陷面积急剧增长, 随后随时间推移逐渐趋于稳定; 通过凹陷面积的动态变化趋势, 可有效判断顶煤的放出过程, 实现透明化放煤监测。最后, 结合称重实验数据, 分析了放煤量、放出率与含矸率之间的关系。结果表明, 初始放煤阶段纯煤放出量最大, 周期放煤阶段纯煤放出量趋于稳定, 含矸率则随着放煤口数量的增多而减少。该结果进一步揭示了放煤方式对煤矸分离和顶煤放出率的影响。

关键词: 放顶煤; 顶煤放出率; 初始放煤阶段; 周期放煤阶段; 松散区凹陷; 煤流动态特性; 煤矸分离; 双光流网络; OpenCV

中图分类号: TD853.34

文献标志码: A

Research on the characteristics of the falling behavior of mixed coal and gangue

SHAN Pengfei^{1,2}, YANG Tong¹, SUN Haoqiang¹, XI Bojia¹

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Traditional studies on the dynamic characteristics of coal flow during the top coal caving process, based on image detection technology, have primarily focused on specific-stage image analysis, lacking a comprehensive analysis of dynamic characteristics across all stages. Existing research has rarely integrated the changes in the loose zone of the overlying strata with coal and gangue separation and coal flow characteristics during top coal caving, resulting in a lack of systematic and holistic analysis of the entire coal caving process. In response to these issues, this study systematically investigated coal flow dynamics, coal and gangue separation effectiveness, and the subsidence of the loose zone in the overlying strata during the top coal caving. First, this paper proposed a dynamic analysis method for the top coal caving process based on a dual optical flow network. The results indicated that the coal caving speed was not affected by the caving method and pattern, and that

收稿日期: 2024-07-16; 修回日期: 2024-10-10; 责任编辑: 盛男, 王晖。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274138, 52394191); 榆林高新区科技计划项目 (ZD-2021-01)。

作者简介: 单鹏飞 (1987—), 男, 安徽淮北人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能综放开采理论与技术, E-mail: shanpengfei@xust.edu.cn。

引用格式: 单鹏飞, 杨通, 孙浩强, 等. 混合煤矸放落态势特征研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(9): 66-74.

SHAN Pengfei, YANG Tong, SUN Haoqiang, et al. Research on the characteristics of the falling behavior of mixed coal and gangue[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(9): 66-74.



扫码移动阅读

average detection accuracy increased with the number of caving openings, exhibiting a notably linear increase during the periodic caving stage. The release rate of top coal showed a positive correlation with average detection accuracy, validating the effectiveness of the method in the top coal caving process monitoring. Second, OpenCV technology was used to conduct experimental analysis on the subsidence area of the loose zone in the overlying strata. Results demonstrated that the subsidence area grew sharply during the initial caving stage and gradually stabilized over time. The dynamic changes in the subsidence area effectively indicated the progression of top coal release, enabling transparent monitoring of release process. Finally, based on data from weighing experiments, the relationships among caving amount, release rate, and gangue content were analyzed. Results showed that the amount of pure coal release was the highest in the initial caving stage and stabilized in the periodic caving stage, while gangue content decreased as the number of caving openings increased. These findings further reveal the influence of caving methods on coal and gangue separation and the release rate of top coal.

Key words: top coal caving; top coal release rate; initial caving stage; periodic caving stage; loose zone subsidence; dynamic characteristics of coal flow; coal and gangue separation; dual optical flow network; OpenCV

0 引言

顶煤开采是煤矿生产中常见且重要的采煤方式之一^[1-4],在厚煤层中得到了广泛应用。然而,放顶煤过程中,煤与矸石的分离及控制具有复杂的非线性特点,导致顶煤采出率和煤矸分离效率较低,直接影响到生产效率和经济效益^[5-8]。因此,如何提高顶煤采出率并减少矸石混入,成为放顶煤研究中的重要课题。随着图像分析技术的发展,基于图像的动态检测技术为顶煤开采过程中的煤矸分离和煤量控制提供了新的研究方法和手段。

针对放顶煤过程中煤流的动态特性,传统研究多采用物理实验方法,通过称重和观察记录不同放煤方式下的煤流量和含矸率。刘国方等^[9]通过实验数据,揭示了不同放煤方式对煤流采出率的影响,但这种基于物理实验的研究手段存在一定局限性,即难以实时监测煤流的动态变化,且数据采集的时效性较差。为突破这些局限性,图像检测技术逐渐引入到放顶煤过程研究中。单海超等^[10]利用高帧率摄像技术对煤流下落过程进行了动态捕捉,并通过图像处理算法定量分析了不同放煤阶段的煤矸分离效果。然而,该类研究多侧重于某一特定阶段的图像分析,未能结合全阶段的动态特性进行综合分析,导致研究结果的系统性不足。视频流检测技术在采矿行业中的应用大多集中在开采后输送带的监测^[11-13],放顶煤状态下的视频流监测相对较少,导致该环节的动态特性缺乏实时的监测和分析。

此外,现有研究较少将放顶煤过程中上覆岩层的松散区变化与放煤过程中的煤矸分离和煤流特性相结合,缺乏对放煤过程全局性的系统分析。已有研究多通过数值模拟和理论分析来研究岩层的凹陷

特征^[14-18]。刘闯等^[19]采用FLAC3D模拟了不同放煤方式对上覆岩层松散区凹陷的影响,研究表明,岩层的松散面积与煤流量及放煤方式密切相关。尽管数值模拟能够较为准确地预测岩层的变形和凹陷情况,但模拟研究在一定程度上受模型假设的影响,难以与实际生产条件完全一致。为了更好地结合实验数据,图像处理技术被应用于松散区的研究中。张锦旺等^[20]通过视频监控松散区的表面积变化,结合图像分析算法定量计算松散区的凹陷面积。然而,图像检测技术多用于松散区静态图像分析,无法动态捕捉松散区的变化过程,无法反映松散区的实时变化趋势。

针对上述问题,本文采用基于双光流网络与OpenCV(Open Source Computer Vision Library)算法的图像检测方法,对煤矸放落过程中的动态特性和煤矸分离效果进行全面分析,并探讨上覆岩层松散区的变化特征。双光流网络通过捕捉放煤过程中的运动轨迹,监测煤流在不同阶段的速度、方向及稳定性,进而分析煤矸分离状态的动态变化。OpenCV算法用于精确量化松散区凹陷面积的变化,提供实时的定量分析。该方法不仅突破了传统物理实验在实时监测中的局限性,还能够提升对煤矸放落态势和分离效果的综合分析能力。

1 实验设备与实验方案

1.1 实验设备

针对散体顶煤放出的物理相似模拟实验,本文使用了多功能顶煤破碎放出实验平台,如图1所示。该实验平台分为2个部分:放煤口上部分模拟煤层,是一个2.0 m×0.5 m×0.5 m的立方体装置;放煤口下部分装置称为暗盒装置,总体是一个全封闭梯

形体,底面为 $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的矩形,顶面为 $2\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的矩形,高度为 1.5 m 。

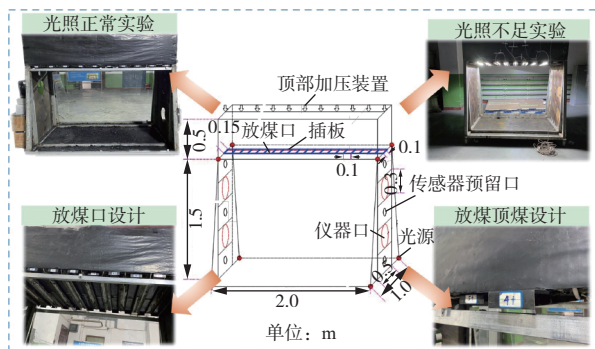


图 1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

1.2 试样制备

实验材料为碎煤块和矸石,用不同尺寸的锤子将其敲碎、筛选,得到不同尺寸的试样。根据放煤口的尺寸,通过几何相似比换算,选取粒径为 $10 \sim 100\text{ mm}$ 的碎煤块模拟煤层中破碎的顶煤,选取粒径为 $30 \sim 100\text{ mm}$ 的碎矸石块模拟煤层中破碎的夹矸。煤矸破碎后的粒径制作过程如图 2 所示。测量得到散体顶煤密度为 $1\,117.041\text{ kg/m}^3$,散体矸石密度为 $1\,574.899\text{ kg/m}^3$,因此,最终选取碎煤块 150 kg 和碎矸石块 150 kg 作为分类对象^[21]。

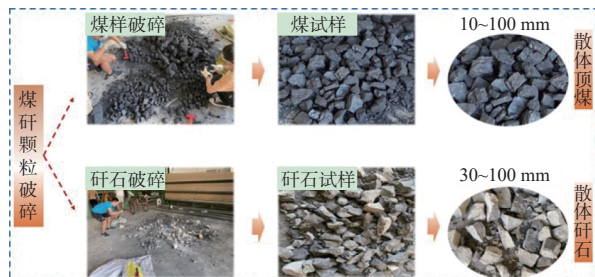


图 2 煤矸破碎试样制备

Fig. 2 Preparation of coal and gangue crushing sample

1.3 实验方案

在实验平台的一侧安装好钢板并标记岩层分层,在另一侧调节钢板安装高度,准备进行材料铺设。选取 $10 \sim 30\text{ mm}$ (主要集中于 30 mm) 的碎煤块置于最下部,作为小块度顶煤。选取 $40 \sim 60\text{ mm}$ (主要集中于 50 mm) 的碎煤块,置于中部,作为中块度顶煤。称重 $70 \sim 100\text{ mm}$ (主要集中于 70 mm) 的碎煤块置于煤层上部,作为大块度顶煤。选取粒径为 $30 \sim 100\text{ mm}$ 的破碎矸石,模拟采空区的矸石。在实验过程中,根据不同组合(具体为一组一放、二组一放、三组一放和五组一放 4 种实验方案)进行重复实验,对煤和矸石重新铺设,以确保实验结果的可靠性。

2 顶煤放出过程与松散区变化分析

2.1 基于双光流网络的放煤过程动态分析

双光流网络 FlowNet-SD 模型结构如图 3 所示。首先输入沿通道堆叠的 2 幅影像帧,然后输出 x 方向和 y 方向的光流场。FlowNet-SD 的收缩阶段由 7 组卷积层构成:第 1 组有 1 个卷积核为 3×3 的卷积层,步距为 2;其余 6 组分别包含 2 个卷积层,卷积核都为 3×3 ,并且每组中第 2 个卷积层的步距为 2。每经过 1 组卷积层,特征都将变小为原来的 $1/2$ 。扩张阶段包含 4 个转置卷积层,每个转置卷积层的输入由前面的输出、收缩阶段同样尺寸的特征及根据上一层特征估计的光流场构成,在输入特征图与光流场之间增加 1 个卷积操作,其目的是使光流场更加平滑。

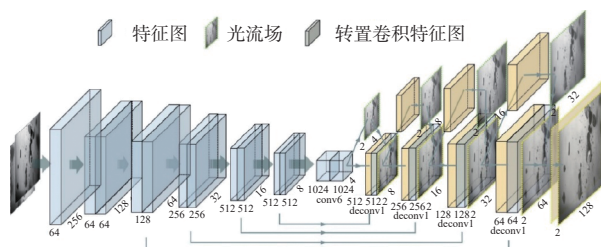


图 3 FlowNet-SD 模型结构

Fig. 3 FlowNet-SD model framework

根据上述 4 种实验方案,分别进行了不同角度的标定,如图 4 所示。可看出放煤口数量越多,监测效果越好。但根据拍摄效果来看,组合放煤越多,拍摄时间越短,不同放煤周期,无论初始放煤阶段,还是周期放煤阶段,放出量基本稳定,相差不大。放煤组合越少,放煤监测效果越好。

采用 FlowNet-SD 对 4 种不放煤方案的放煤监测视频进行分析,计算初始放煤阶段及不同放煤步距阶段的统计结果,见表 1 (平均准确率是指正确识别煤或矸石的平均比例,平均漏矸率是指未能正确识别煤或矸石的平均比例,平均监测速率是指每秒处理影像帧数的平均速度)。

从表 1 可看出,方案 1—方案 4 对顶煤放出过程的监测速率不会随着放煤规律的变化而变化,变化范围维持在 $26 \sim 28$ 帧/s,说明动态化监测方式适用于放顶煤过程的监测。对于方案 1: ① 初始放煤阶段的监测时间为 18.55 s ,不同放煤步距阶段的监测时间基本稳定,平均时间为 11.12 s 。② 初始放煤阶段的平均准确率为 72.15% ,不同放煤步距阶段的平均准确率均高于初始放煤阶段,平均值为 77.32% ,这是由于初始放煤阶段,支架后方的顶煤被大量放出,放煤口放煤量过大,影响监测过程,导致初始放煤阶

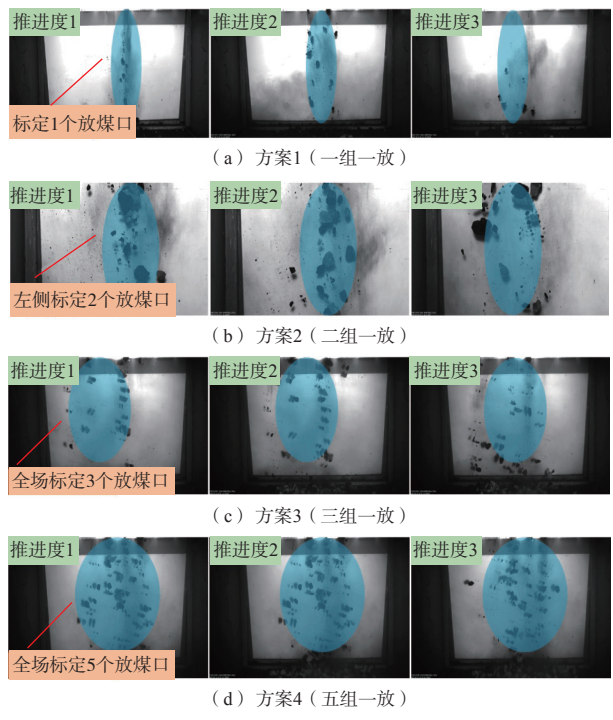


图4 不同放煤方案顶煤放落监测情况

Fig. 4 Monitoring of top coal falling under different coal discharge schemes

段的监测过程略逊于不同放煤步距阶段,但平均准确率与顶煤放出率变化呈现正相关。③初始放煤阶段的平均漏检率为8.17%,不同放煤步距阶段平均值为11.69%。④初始放煤阶段的平均监测速率为28帧/s左右,不同放煤步距阶段平均值为27.85帧/s。对于方案2:①初始放煤阶段的监测时间为16.19 s,不同放煤步距阶段的平均监测时间为9.75 s。②初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均准确率分别为78.02%,79.98%。③初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均漏检率分别为8.22%,10.82%。④初始放煤阶段的平均监测速率为28帧/s左右,不同放煤步距阶段平均值为27.63帧/s。对于方案3:①初始放煤阶段的监测时间为13.67 s,不同放煤步距阶段的监测时间平均值为8.81 s。②初始放煤阶段的平均准确率为79.93%,不同放煤步距阶段平均值为80.77%。③初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均漏检率分别为8.35%,10.70%。④初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均监测速率稳定,平均值为27.84帧/s。对于方案4:①初始放煤阶段的监测

表1 4种放煤方案结果统计

Table 1 Statistics of results for four coal discharge plans

放煤方案	统计类别	初始放煤阶段	不同放煤步距阶段				
			1	2	3	4	5
方案1(一组一放)	顶煤放出率/%	449.92	35.06	46.39	51.52	50.56	49.81
	含矸率/%	0.63	6.86	5.01	4.84	5.55	5.37
	监测时间/s	18.55	12.83	10.92	10.85	9.96	11.05
	平均准确率/%	72.15	78.56	76.90	76.37	77.28	77.51
	平均漏检率/%	8.17	12.79	11.43	10.68	11.89	11.65
	平均监测速率/(帧·s ⁻¹)	28.55	28.34	27.69	28.05	26.96	27.49
方案2(二组一放)	顶煤放出率/%	325.75	31.77	49.45	50.09	48.17	
	含矸率/%	0.69	6.39	4.28	4.31	4.36	
	监测时间/s	16.19	10.03	9.75	9.42	9.78	
	平均准确率/%	78.02	79.95	79.73	80.06	80.19	
	平均漏检率/%	8.22	12.16	10.21	10.34	10.58	
	平均监测速率/(帧·s ⁻¹)	26.90	27.32	27.55	28.04	28.35	
方案3(三组一放)	顶煤放出率/%	247.28	32.35	41.92	48.97		
	含矸率/%	0.74	5.65	4.22	3.72		
	监测时间/s	13.67	8.54	9.03	8.87		
	平均准确率/%	79.93	80.29	80.94	81.09		
	平均漏检率/%	8.35	12.06	10.15	9.88		
	平均监测速率/(帧·s ⁻¹)	28.35	28.17	26.52	28.30		
方案4(五组一放)	顶煤放出率/%	203.76	37.15	49.32			
	含矸率/%	0.64	2.93	2.27			
	监测时间/s	8.23	5.59	5.72			
	平均准确率/%	81.26	81.68	82.56			
	平均漏检率/%	8.19	9.29	8.89			
	平均监测速率/(帧·s ⁻¹)	27.66	27.92	28.13			

时间为 8.23 s, 不同放煤步距阶段平均值为 5.66 s。
 ② 初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均准确率分别为 81.26%, 82.12%。
 ③ 初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均漏检率分别为 8.19%, 9.09%。
 ④ 初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均监测速率稳定, 平均值为 27.9 帧/s。

从上述数据中可看出, 不同的放煤方案对放煤过程的监测速率不随放煤形式及规律的改变而变化。在初始放煤阶段和不同放煤步距阶段, 随着放煤口数量的增加, 平均准确率均出现线性增加, 最大分别达到方案 4 中的 81.26%, 82.12%。这是由于放煤量基本保持一致的前提下, 随着放煤口数量的增加, 多层叠加的煤层放落情况减少, 影响了顶煤放出过程的监测精度。初始放煤阶段, 平均漏检率基本保持一致, 这是由于初始放煤过程中, 大量顶煤放出, 伴随有少量矸石放出, 对漏检率影响不大。不同放煤步距阶段, 随着放煤口数量的增加, 平均漏检率随着含矸率的减少而下降。

为了探究顶煤放出率和平均准确率之间的关系, 对各个放煤方案的初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均准确率进行计算, 并与方案 1 的顶煤放出率进行相关性分析, 结果如图 5 所示。可看出顶煤放出率虽然出现不稳定情况, 但总体呈现增长的趋势; 平均准确率在各种放煤形式下, 均出现增长趋势; 放煤过程中平均准确率与顶煤放出率呈正相关关系, 尤其在推进度 2—5 阶段表现更为显著。因此, 顶煤放出率和平均准确率呈正相关关系。

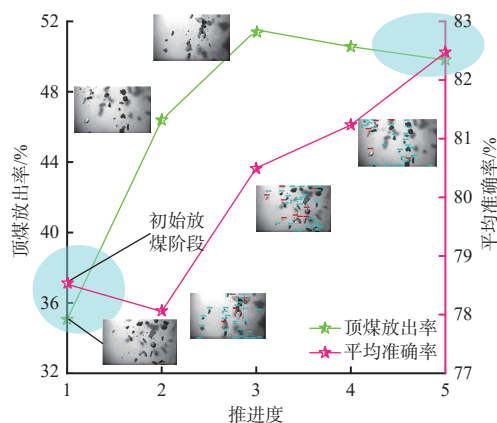


图 5 顶煤放出率与平均准确率关系

Fig. 5 Relationship between top coal release rate and average accuracy

2.2 基于 OpenCV 的松散区凹陷表面积分析

2.2.1 基于 OpenCV 的顶煤放出监测原理

OpenCV 是一个开源的计算机视觉和机器学习软件库, 广泛应用于图像处理、计算机视觉和深度学习领域。本文采用 OpenCV 计算每个阶段的瞬态面积, 即利用顶煤层松散区面积变化瞬态图像中已知

实际尺寸的物体成像面积计算出每个像素所代表的实际尺寸, 进而计算出其他未知的物体大小。该方法的核心包括相机成像的几何校准、参照物体尺寸的确定及像素级的分析技术。

1) 相机捕捉到的图像是由像素矩阵组成的二维图像, 每个像素代表了物体在相机视野中的投影。为了确保像素与实际世界中尺寸的精确映射, 需进行相机几何校准。通过标定相机的内参和外参, 确保像素坐标与实际尺寸之间的准确对应关系。

2) 通过分析参照物体在图像中的成像面积, 建立像素尺寸与实际尺寸之间的比例关系。参照物体在煤堆图像中的布置, 考虑煤堆不同区域的尺寸变化, 并计算其平均值, 以获得更准确的实际尺寸参考值。

3) 在图像处理阶段, 将煤堆图像中标注的凹陷区域置为高亮。然后, 通过像素级的计数方法, 计算出凹陷区域的像素个数。这种方法有效地处理了凹陷区域的不规则形状, 通过像素计数技术实现了对复杂形状区域的面积估算。

2.2.2 松散区图像检测

初始放煤阶段, 随着支架后方顶煤的大量放出, 上覆岩层的松散区会立即出现椭圆状的凹陷面, 随着周期放煤的不断进行, 凹陷面增大。为了研究顶煤放出时序与凹陷面的变化趋势, 在拍摄凹陷瞬态变化的视频中, 选取 10 张图像来分析不同阶段的松散趋势。选取方案 2 的放煤过程作为研究对象, 结果如图 6 所示。在推进度 1 阶段, 顶煤放出率较低, 这主要是由于煤层与矸石层的分界较明显, 导致煤矸分离不完全。而随着推进度的增加, 分界影响逐渐减弱, 顶煤放出率呈上升趋势, 含矸率逐渐下降。这一现象表明在初始放煤阶段可能会存在不稳定性, 但在后续阶段顶煤放出率和含矸率的关系更加稳定。

本文中, 由于实际拍摄的煤堆没有完全位于同一平面, 且拍摄角度没有保持水平, 所以不同区域的图像像素所代表的实际尺寸不同, 靠近镜头的煤和矸石所占像素较多, 而较远处的物体所占像素较少。因此, 采用在凹陷区域布置 6 个参照物的方式计算出参照物的平均值, 将参照物的平均值作为实际尺寸, 从而近似计算出凹陷区域的面积。

设参照物的实际宽度为 w_{real} , 其计算公式为

$$w_{\text{real}} = (w_{\text{real}1} + w_{\text{real}2} + w_{\text{real}3} + w_{\text{real}4} + w_{\text{real}5} + w_{\text{real}6}) / 6 \quad (1)$$

式中 $w_{\text{real}1} \sim w_{\text{real}6}$ 分别为 6 个参照物的实际宽度。

参照物在图像中所占的像素宽度为 w_{pixel} , 每个像素所代表的实际尺寸为 $l_{\text{pixel_size}}$, 则

$$l_{\text{pixel_size}} = w_{\text{real}} / w_{\text{pixel}} \quad (2)$$



图6 不同阶段顶煤松散区凹陷面

Fig. 6 Surface area of the top coal in the loose state at different stages

在放顶煤图像中标注出凹陷区域,并将该区域的灰度值置为 255,通过计算该区域的像素个数得出凹陷区域的实际面积。由于实际标注的凹陷区域为不规则形状,难以通过算法直接计算。本文通过循环遍历每一个像素的灰度值,计算出凹陷区域所占的像素数量 $b_{\text{pixel_count}}$,最终得到凹陷区域的面积 $S_{\text{depressed_area}}$

$$S_{\text{depressed_area}} = b_{\text{pixel_count}} (w_{\text{real}} / w_{\text{pixel}})^2 \tag{3}$$

2.2.3 松散区变化趋势分析

对不同瞬态的松散区凹陷面积计算结果如图 7 所示。

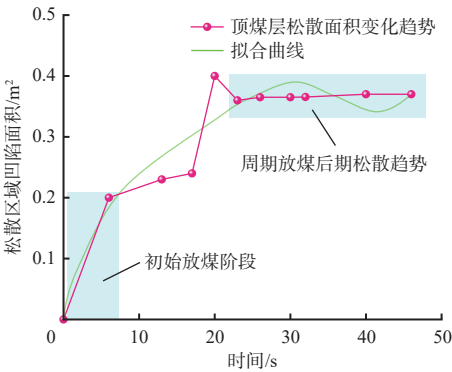


图7 松散区凹陷面积变化趋势及拟合曲线

Fig. 7 Trend and fitting curve of depression surface area in loose area

从图 7 可看出,由于初始阶段顶煤被大量放出,导致松散区凹陷面积增长较大,所以在较短时间内凹陷面积达 0.2 m²; 10~20 s 松散区位置不稳定,但面积总体呈现上升趋势,这是由于初始放煤阶段放煤量过大,导致松散区自然垮落;在周期放煤阶段后段松散区位置逐渐稳定,面积缓慢增长。因此,根据松散区凹陷面积的变化趋势,可以与监测时间进行协同分析,有效判断顶煤放出过程,实现透明化放煤。

2.3 放煤量、放出率与含矸率分析

不同放煤方案在不同放煤步距下的煤矸放出量

见表 2(不同放煤方案下每个放煤步距顶煤含量分别为 4 460.89, 6 893.56, 8 376.23, 11 273.81 g)。

表 2 不同放煤方案在不同放煤步距下的煤矸放出量

Table 2 The amount of coal gangue released under different coal discharge methods and different coal discharge steps

放煤方案	统计类别	初始放煤阶段	不同放煤步距阶段				
			1	2	3	4	5
方案1 (一组一放)	纯煤质量/g	20 070	1 563	2 069.4	2 298.25	2 255.43	2 221.97
	矸石质量/g	126.4	115.08	109.23	114.76	132.5	119.21
	放出率/%	449.92	35.06	46.39	51.52	50.56	49.81
	含矸率%	0.63	6.86	5.01	4.84	5.55	5.37
方案2 (二组一放)	纯煤质量/g	22 456	2 190.8	3 408.7	3 452.98	3 320.63	
	矸石质量/g	156.7	149.44	152.29	155.37	151.34	
	放出率/%	325.75	31.77	49.45	50.09	48.17	
	含矸率%	0.69	6.39	4.28	4.31	4.36	
方案3 (三组一放)	纯煤质量/g	23 185	2 709.7	3 511.32	4 101.84		
	矸石质量/g	173.65	162.33	154.78	158.36		
	放出率/%	247.28	32.35	41.92	48.97		
	含矸率%	0.74	5.65	4.22	3.72		
方案4 (五组一放)	纯煤质量/g	22 971.14	4 188.2	5 560.2			
	矸石质量/g	146.82	126.33	128.90			
	放出率/%	203.76	37.15	49.32			
	含矸率%	0.64	2.93	2.27			

由于放顶煤模拟实验无法精准实现“见矸闭合”,总会伴随少量的矸石放出,所以对放出的矸石量进行统计,并计算含矸率。将不同方案在不同放煤步距下放出的纯煤量、矸石量及顶煤放出率和含矸率进行了对比,如图 8 所示。

从图 8 可看出,由于支架后方的顶煤被大量放出,初始放煤阶段纯煤放出量最大,分别为各自条件下每个放煤步距顶煤储量的 4.50 倍、3.26 倍、2.77 倍和 2.04 倍,同时分别是不同放煤步距阶段放煤量均值的 9.64 倍、7.26 倍、6.74 倍和 2.36 倍。不同放煤步距阶段第 1 个放煤步距受到初始放煤阶段

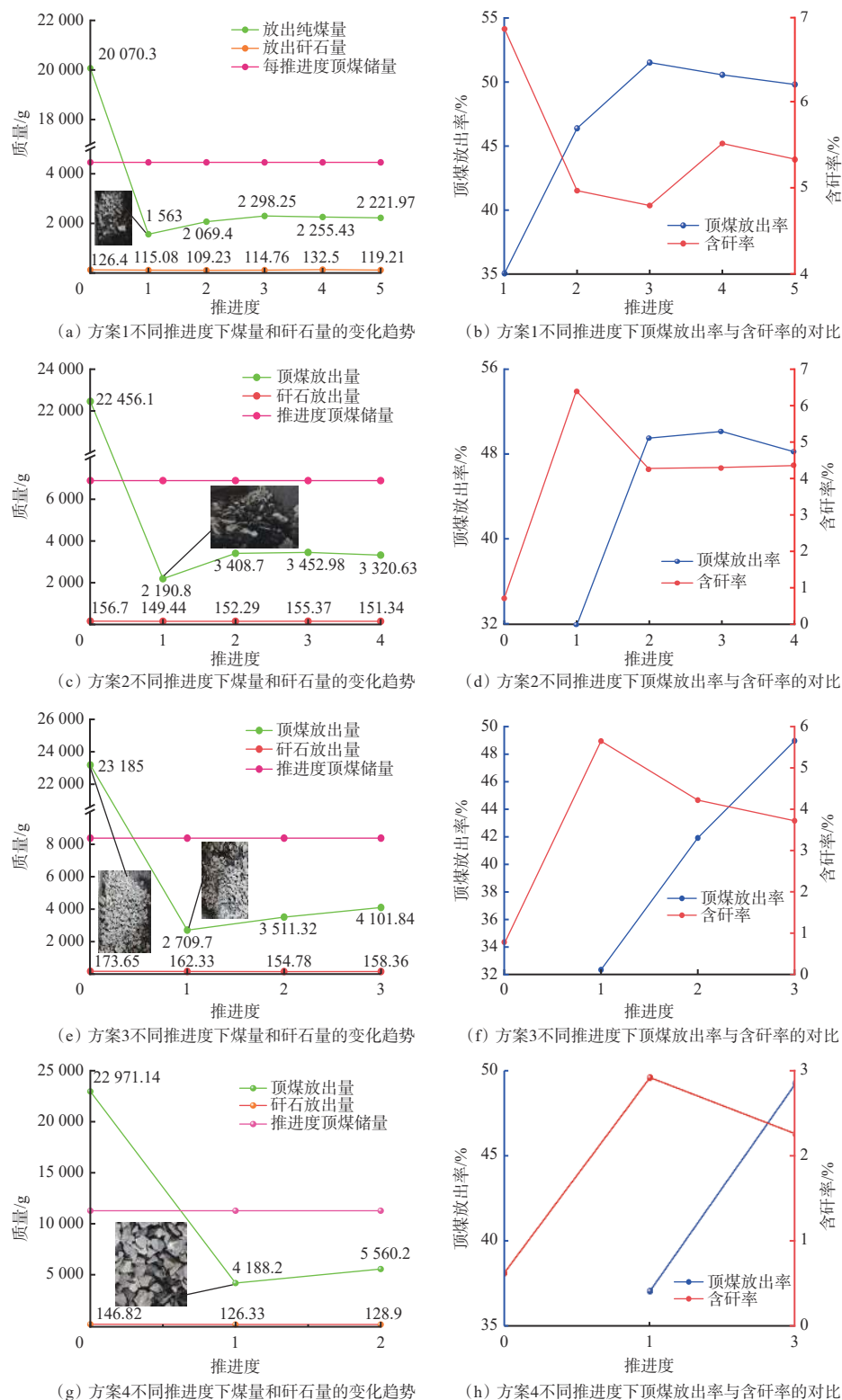


图 8 不同方案在不同放煤步距下放出的纯煤量、矸石量、顶煤放出率及含矸率对比

Fig. 8 Variation characteristics of the amount of pure coal released, the amount of gangue, the top coal release rate and the gangue content at different advancement degrees

煤层和矸石层分界的影响,放煤量急剧减小至最低,此后由于煤矸分界线大致相同且趋于稳定,放出的纯煤量趋于稳定,放出率稳定在 50% 左右。每个放煤步距放出的含矸率稳定维持在 2%~7%,说明对矸石的放出控制较好。

顶煤放出率和含矸率是放顶煤开采效果评价的 2 个重要指标,初始放煤阶段的放出量较大,因此在此不讨论初始阶段的放出率。由图 7 可知,以“见矸关闭”为放煤停止的标志,不同放煤步距阶段顶煤整体放出率较低。第 1 个放煤步距均受到初始阶段煤

层和矸石层分界的影响,放出率最低,稳定在某一范围之内。随着方案的改变,放煤口的增多,含矸率逐渐减小,而顶煤放出率无明显变化规律。

3 结论

1) 基于双光流网络成功捕捉了放顶煤过程中不同阶段的煤流动态特性。实验结果表明,放煤过程中,顶煤放出率与平均准确率呈正相关关系。初始放煤阶段和不同放煤步距阶段的平均准确率均随放煤口数量的增加而线性上升,最大可达81.26%和82.12%。表明在放煤量稳定的条件下,随着放煤口数量的增加,煤层下落叠加的影响减小,从而提高了检测精度和煤矸分离的效果。

2) 利用OpenCV对上覆岩层的松散区进行了动态监测,结果表明松散区的凹陷面积随时间的推移呈现出逐渐增加的趋势,尤其在初始放煤阶段,凹陷面积的增长幅度较大。松散区凹陷面积的变化与放煤过程中顶煤的放出量密切相关,并且在周期放煤阶段趋于稳定。该结果为上覆岩层松散区的透明化监测提供了有效手段。

3) 不同放煤方案的实验结果表明,在初始放煤阶段放煤量最大,放出率较高,表现出较大波动;在不同放煤步距阶段,放煤量趋于稳定,放出率在一定范围内波动。图像检测与物理实验结果表明,含矸率随着放煤口数量的增加逐渐降低,而放出率与放煤口数量没有明显的相关性。初始放煤阶段,含矸率较高,随着放煤的继续进行,含矸率逐步减小。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 庞义辉, 关书方, 姜志刚, 等. 综放工作面围岩控制与智能化放煤技术现状及展望[J/OL]. 工矿自动化: 1-8 [2024-10-07]. <https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.18211>.
PANG Yihui, GUAN Shufang, JIANG Zhigang, et al. Current situation and prospect of surrounding rock control and intelligent coal discharge technology in fully mechanized working face[J/OL]. Journal of Mine Automation: 1-8 [2024-10-07]. <https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.18211>.
- [3] 姜恩宏. 煤矿综合机械化放顶煤开采工艺的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(18): 163-165.
JIANG Enhong. Research on the application of comprehensive mechanised top coal mining technology in coal mines[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(18): 163-165.
- [4] 庞成龙. 综采放顶煤工艺研究与应用[J]. 山西化工, 2024, 44(7): 203-204, 207.
PANG Chenglong. Research and application of fully mechanised top coal caving technology[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(7): 203-204, 207.
- [5] 周世宇. 潘津矿极近距离特厚煤层覆岩破坏与顶煤冒放规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
ZHOU Shiyu. Study on overburden failure and caving law of top coal in extremely short distance thick coal seam in Panjin Mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [6] 王爱国. 综放开采顶煤成拱机理及控制技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(8): 214-216, 220.
WANG Aiguo. Top-coal arching mechanism and control technology in fully-mechanized caving mining[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(8): 214-216, 220.
- [7] 王家臣, 杨胜利, 李良晖, 等. 智能放煤理论与技术研究进展[J/OL]. 工矿自动化: 1-14 [2024-10-10]. <https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.18213>.
WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Lianghui, et al. Research progress on theory and technology of intelligent coal drawing[J/OL]. Journal of Mine Automation: 1-14 [2024-10-10]. <https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.18213>.
- [8] 韩立国. 综合放顶煤开采煤矸识别关键技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
HAN Ligu. Research on key technology of coal gangue identification in comprehensive caving coal mining[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [9] 刘国方, 宋选民, 李昊城, 等. 综放开采顶煤破碎放煤工艺参数优化研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 90-97.
LIU Guofang, SONG Xuanmin, LI Haocheng, et al. Research on optimization of top coal caving technology parameters in fully mechanized top coal caving[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 90-97.
- [10] 单海超, 邓高鹏. 基于AI智能摄像监测的煤流系统异物识别控制技术研究与应用[J]. 河南科技, 2021, 40(22): 16-18.
SHAN Haichao, DENG Gaopeng. Research and application of foreign matter identification and control technology in coal flow system based on AI intelligent camera monitoring[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2021, 40(22): 16-18.
- [11] 段雍. 基于图像的煤矸识别和定位方法研究与实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
DUAN Yong. Research and realization identification and positioning method of coal and gangue based on

- image[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [12] 凌铃. 基于深度学习的煤矸激光散斑图像识别方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
LING Ling. Research on coal and gangue laser speckle image recognition method based on deep learning[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [13] 沈宁, 窦东阳, 杨程, 等. 基于机器视觉的煤矸石多工况识别研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(1): 120-125.
SHEN Ning, DOU Dongyang, YANG Cheng, et al. Research on multi-condition identification of coal and gangue based on machine vision[J]. Coal Engineering, 2019, 51(1): 120-125.
- [14] 张蕴韬, 杨志全, 李壮, 等. 基于三维精细化建模有限差分计算的露天矿边坡稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(4): 64-69.
ZHANG Yuntao, YANG Zhiquan, LI Zhuang, et al. Evaluation of slope stability of open pit mine based on 3D refined modeling with finite difference calculation[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2023, 75(4): 64-69.
- [15] 陈曦. 安太堡边帮开采区 9504~9508 工作面地表移动与地表水防治措施研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
CHEN Xi. Study on surface movement and surface water prevention and control measures for working faces of 9504-9508 in Antaibao Mining Area[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2019.
- [16] 王家臣, 魏立科, 张锦旺, 等. 综放开采顶煤放出规律三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1905-1911.
WANG Jiachen, WEI Like, ZHANG Jinwang, et al. 3-D numerical simulation on the top-coal movement law under caving mining technique[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1905-1911.
- [17] 乔明. 地表沉陷与上覆岩层移动规律数值研究[J]. 价值工程, 2024, 43(28): 63-66.
QIAO Ming. Numerical study of surface subsidence and overlying strata movement[J]. Value Engineering, 2024, 43(28): 63-66.
- [18] 张建, 元佳利, 李长青. 厚煤层开采上覆岩层移动与应力分布特征研究[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(6): 139-143, 154.
ZHANG Jian, QI Jiali, LI Changqing. Research on movement and stress distribution characteristics of overlying strata in thick coal seam mining[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2024, 42(6): 139-143, 154.
- [19] 刘闯, 李化敏, 周英, 等. 综放工作面多放煤口协同放煤方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2632-2640.
LIU Chuang, LI Huamin, ZHOU Ying, et al. Method of synergetic multi-windows caving in longwall top coal caving working face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2632-2640.
- [20] 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.
- [21] 张新战, 张帅, 崔峰. 急倾斜大段高综放开采煤矸混合流动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(增刊 2): 16-25.
ZHANG Xinzhan, ZHANG Shuai, CUI Feng. Similarity simulation study on mixed flow law of coal gangue in steep section and high fully mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 16-25.