

文章编号: 1671-251X(2023)05-0001-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18106

基于掩埋图像特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法

孙继平¹, 程继杰¹, 王云泉²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国中煤能源集团有限公司, 北京 100011)

摘要: 分析了冲击地压和煤与瓦斯突出时抛出大量黑色煤岩的掩埋图像特征: 监视区域内颜色及其对应图形面积变化、颜色及其对应图形数量变化、颜色及其对应图形形状变化、掩埋位置异常等。根据灾害发生时会造成监视区域内非黑色区域面积减少, 且减少的速度和加速度较大的特征, 提出了基于颜色及其对应图形面积变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法。根据灾害发生时会造成监视区域内非黑色区域数量减少, 且减少的速度和加速度较大的特征, 提出了基于颜色及其对应图形数量变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法。根据灾害发生时会造成监视区域内非黑色图形的圆弧度、矩形度和面积周长比减少, 且减少的速度和加速度较大的特征, 提出了基于颜色及其对应图形形状变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法。根据灾害发生时会导致煤矿井下人员、液压支架顶部及靠近顶部等位置被煤岩掩埋的特征, 提出了基于掩埋位置异常特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法。上述基于掩埋图像特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法具有响应速度快、非接触、监测范围广、成本低和使用维护方便等优点。

关键词: 冲击地压; 煤与瓦斯突出; 图像识别; 灾害感知; 掩埋图像特征

中图分类号: TD324/712.7

文献标志码: A

A perception alarm method for coal mine rock burst and coal and gas outburst based on burial image features

SUN Jiping¹, CHENG Jijie¹, WANG Yunquan²

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. China National Coal Group Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: The burial image features of a large amount of black coal rock thrown out during rock burst and coal and gas outburst are analyzed. The features include changes in the area of the monitoring area's color and corresponding graphics, changes in the number of colors and corresponding graphics, changes in the shape of colors and corresponding graphics, and anomalies in burial positions. When a disaster occurs, it will result in a reduction in the area of non-black areas within the monitoring area, with a significant reduction in speed and acceleration. Based on the above feature, a perception alarm method for rock burst and coal and gas outburst is

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-05-05; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801800)。

作者简介: 孙继平(1958—), 男, 山西翼城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 中国矿业大学(北京)原副校长; 获国家科技进步奖和技术发明奖二等奖4项(第1完成人3项); 作为第1完成人获省部级科技进步特等奖和一等奖8项; 作为第1完成人主持制定中华人民共和国煤炭行业、安全生产行业和能源行业标准40项; 作为第1发明人获国家授权发明专利100余件; 主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”; 被SCI和EI检索的第1作者或独立完成论文100余篇; 作为第1作者或独立完成著作12部; 作为国务院煤矿事故调查专家组组长参加了10起煤矿特别重大事故调查工作; E-mail: sjp@cumt.edu.cn。

引用格式: 孙继平, 程继杰, 王云泉. 基于掩埋图像特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 1-6, 21.

SUN Jiping, CHENG Jijie, WANG Yunquan. A perception alarm method for coal mine rock burst and coal and gas outburst based on burial image features[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 1-6, 21.



扫码移动阅读

proposed based on the features of color and its corresponding graphic area changes. When a disaster occurs, it will result in a reduction in the number of non-black areas within the monitoring area, with a significant reduction in speed and acceleration. Based on the above feature, a perception alarm method for rock burst and coal and gas outburst is proposed based on the features of colour and its corresponding graphic number changes. When a disaster occurs, it will cause a decrease in the circularity, rectangularity, and area-to-perimeter ratio of non-black graphics within the monitoring area, with a significant reduction in speed and acceleration. Based on the above feature, a perception alarm method for rock burst and coal and gas outburst is proposed based on the features of color and its corresponding graphic shape changes. When a disaster occurs, it can lead to underground coal mine personnel, hydraulic support at the top and near the top being buried by coal and rock. Based on the above feature, a perception alarm method for rock burst and coal and gas outburst is proposed based on the features of abnormal burial position. The above perception alarm method for rock burst and coal and gas outburst based on burial image features has the advantages of fast response speed, non-contact, wide monitoring range, low cost, and convenient use and maintenance.

Key words: rock burst; coal and gas outburst; image recognition; disaster perception; burial image features

0 引言

我国煤矿以井工开采为主,采掘作业时破坏煤岩原有平衡,极易发生冲击地压和煤与瓦斯突出等事故^[1-4]。目前冲击地压和煤与瓦斯突出监测方法主要有钻屑法、微震法、声发射法、电磁辐射法和应力监测法等^[5-11]。但我国煤矿地质条件复杂多样,冲击地压和煤与瓦斯突出事故仍时有发生。尽早感知冲击地压和煤与瓦斯突出事故并报警,是降低人员伤亡与财产损失的有效措施^[1,3-4]。目前有基于传感器、声音、图像的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法^[12-19],但未见有利用掩埋图像特征来进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警的研究。本文提出了一种基于掩埋图像特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法,具有响应速度快、非接触、监测范围广、成本低和使用维护方便等优点。

1 冲击地压和煤与瓦斯突出图像特征

冲击地压和煤与瓦斯突出均是由于巷道开拓和采掘等扰动,破坏了巷道围岩原有的力学平衡,突破了煤岩的应力极限,致使破碎煤岩抛向巷道和采掘工作面的煤岩动力灾害,严重威胁煤矿安全生产。冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,瞬间向巷道和采掘工作面喷出大量的破碎煤岩,大量破碎煤岩堆积在巷道和采掘工作面,掩埋设备和人员,摧毁巷道设施,毁坏通风系统,堵塞巷道,造成人员窒息和人员被埋,还会引发瓦斯和煤尘爆炸等次生灾害。

冲击地压和煤与瓦斯突出灾害发生时,除具有温度异常^[18,23]、速度异常^[18-23]、颜色异常等特征外^[19,23],还具有掩埋异常特征。

1.1 温度异常特征

煤矿井下煤岩温度随深度的增加而升高,正常

工况下巷道和采掘工作面环境温度相对较低。已暴露的煤岩温度会随暴露时间的增加而接近环境温度。未暴露的煤岩温度与巷道和采掘工作面环境温度及已暴露煤岩温度有明显差异,未暴露的煤岩温度相对较高。因此,冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,有抛出煤岩温度大于巷道和采掘工作面环境温度和已暴露煤岩温度的异常特征^[18,23]。

1.2 速度异常特征

冲击地压和煤与瓦斯突出均为煤矿动力灾害,灾害发生时大量煤岩急剧猛烈抛向巷道和采掘工作面,且灾害发生时抛出煤岩速度较正常工况下巷道和采掘工作面物体移动速度快。因此,冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,有抛出煤岩速度大于正常工况下巷道和采掘工作面物体移动速度的异常特征^[18-23]。

1.3 颜色异常特征

冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,大量黑色的破碎煤岩抛向巷道和采掘工作面,与煤矿井下设备颜色差异明显。因此,在非黑色煤矿井下设备的背景下,冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,有不同于正常工况下巷道和采掘工作面颜色的异常特征^[19,23]。

1.4 掩埋异常特征

冲击地压和煤与瓦斯突出发生时,大量黑色的破碎煤岩抛向巷道和采掘工作面,遮挡和掩埋设备、人员和巷道等,与事故前巷道和采掘工作面有明显的颜色、面积和形状差异。因此,可根据事故前后巷道和采掘工作面颜色、面积、形状等变化,使用彩色摄像机识别冲击地压和煤与瓦斯突出。掩埋异常特征包括监视区域内颜色及其对应图形面积变化、变化速度和加速度异常,颜色及其对应图形数量变化、变化速度和加速度异常,颜色及其对应图形形状变化、变化速度和加速度异常,掩埋位置异常等。

瓦斯和煤尘爆炸也会导致巷道和采掘工作面出现掩埋异常特征,并伴随异常高亮特征。但冲击地压和煤与瓦斯突出并不会产生异常高亮特征,因此可根据图像平均亮度来排除瓦斯和煤尘爆炸对冲击地压和煤与瓦斯突出感知的干扰^[19,23]。

2 基于颜色及其对应图形面积变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法

冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非黑色区域面积减少,减少的速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色区域面积减少,但减少的速度和加速度较小。根据上述特征,提出了基于颜色及其对应图形面积变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法,流程如图1所示,具体步骤如下。

1) 在煤矿井下掘进巷道顶板或巷帮靠近顶板、回采工作面液压支架顶部或靠近顶部等位置设置带有补光灯的彩色摄像机,以与黑色煤岩有明显颜色差异的煤矿井下设备为背景,实时采集巷道和采掘工作面彩色图像,并采用甲烷传感器监测监视区域内的甲烷浓度。

2) 监测识别监视区域彩色图像中非黑色面积变化。

3) 如果彩色图像中非黑色区域减少的面积大于设定的面积阈值,则进行非黑色面积的减少速度和减少加速度识别,否则继续监测识别彩色图像中非黑色面积变化。

4) 如果非黑色面积减少速度大于设定的速度阈值,或非黑色面积减少加速度大于设定的加速度阈值,则进行图像平均亮度识别,否则继续监测识别彩色图像中非黑色面积变化。

5) 如果图像平均亮度小于设定的亮度阈值,则采集甲烷浓度,否则进行瓦斯和煤尘爆炸报警。

6) 如果甲烷浓度迅速升高或达到报警值,则进行煤与瓦斯突出报警,否则进行冲击地压报警。

3 基于颜色及其对应图形数量变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法

冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非黑色区域数量减少,减少的速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色区域数量减少,但减少的速度和加速度较小。根据上述特征,提出了基于颜色及其对应图形数量变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法,流程如图2所示,具体步骤如下。

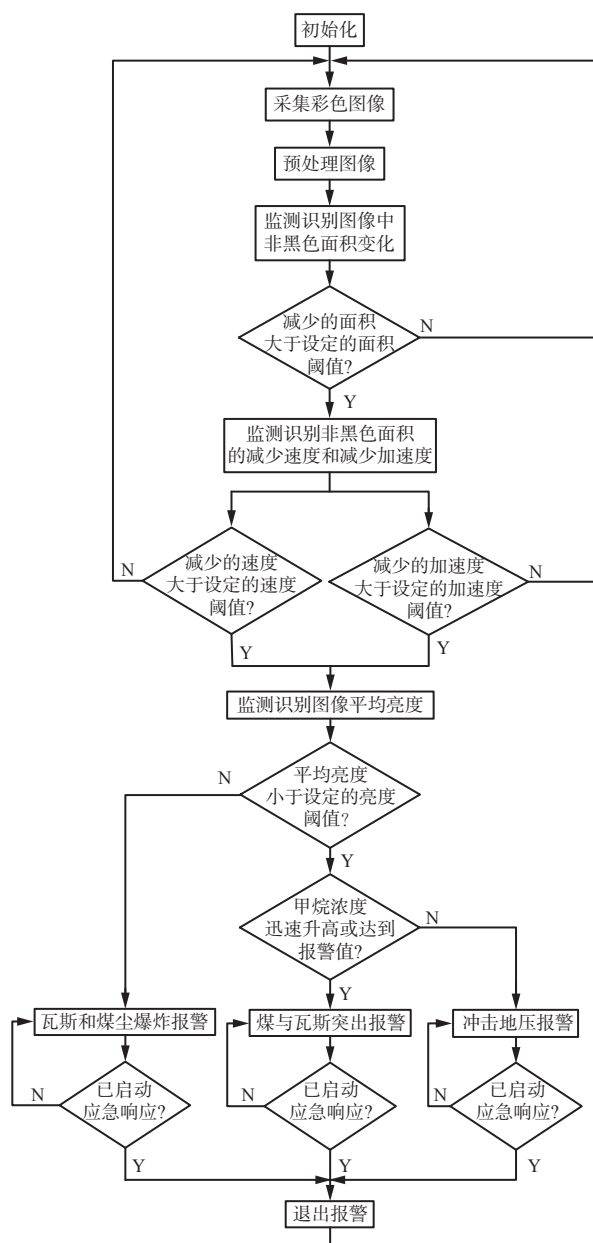


图1 基于颜色及其对应图形面积变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法流程

Fig. 1 Flow of rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on color and its graphic area change features

1) 在煤矿井下掘进巷道顶板或巷帮靠近顶板、回采工作面液压支架顶部或靠近顶部等位置设置带有补光灯的彩色摄像机,以与黑色煤岩有明显颜色差异的煤矿井下设备为背景,实时采集巷道和采掘工作面彩色图像,并采用甲烷传感器监测监视区域内的甲烷浓度。

2) 监测识别监视区域彩色图像中非黑色图形数量变化。

3) 如果彩色图像中非黑色图形减少的数量大于设定的数量阈值,则进行非黑色图形数量减少速度和减少加速度识别,否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形数量变化。

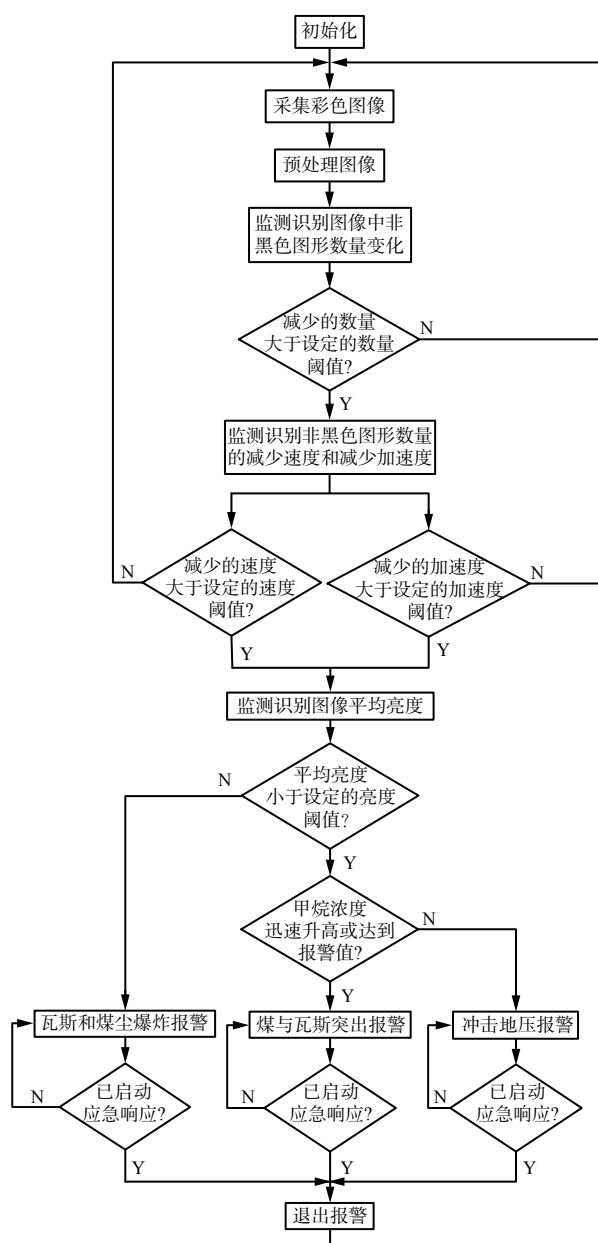


图 2 基于颜色及其对应图形数量变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法流程

Fig. 2 Flow of rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on color and its graphic number change features

4) 如果非黑色图形数量减少速度大于设定的速度阈值, 或非黑色图形数量减少加速度大于设定的加速度阈值, 则进行图像平均亮度识别, 否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形数量变化。

5) 如果图像平均亮度小于设定的亮度阈值, 则采集甲烷浓度, 否则进行瓦斯和煤尘爆炸报警。

6) 如果甲烷浓度迅速升高或达到报警值, 则进行煤与瓦斯突出报警, 否则进行冲击地压报警。

4 基于颜色及其对应图形形状变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法

冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非

黑色图形形状发生变化, 包括非黑色图形的圆形度、矩形度和面积周长比减少, 减少的速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色图形形状发生变化, 但变化的速度和加速度较小。根据上述特征, 提出了基于颜色及其对应图形形状变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法, 流程如图 3 所示, 具体步骤如下。

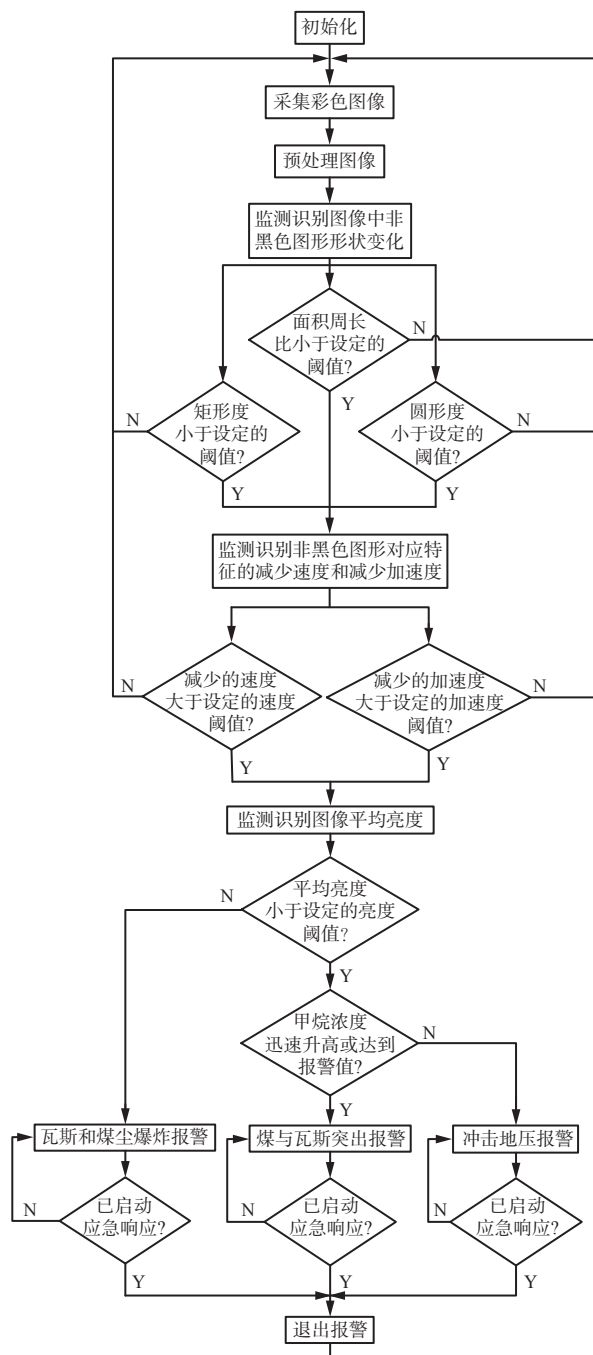


图 3 基于颜色及其对应图形形状变化特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法流程

Fig. 3 Flow of rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on color and its graphic shape change features

1) 在煤矿井下掘进巷道顶板或巷帮靠近顶板、回采工作面液压支架顶部或靠近顶部等位置设置带

有补光灯的彩色摄像机, 以与黑色煤岩有明显颜色差异的煤矿井下设备为背景, 实时采集巷道和采掘工作面彩色图像, 并采用甲烷传感器监测监视区域内的甲烷浓度。

2) 监测识别监视区域彩色图像中非黑色图形形状变化。

3) 如果彩色图像中非黑色图形的圆形度小于设定的圆形度阈值, 则进行非黑色图形圆形度减少速度和减少加速度识别, 否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形形状变化; 如果彩色图像中非黑色图形的矩形度小于设定的矩形度阈值, 则进行非黑色图形矩形度减少速度和减少加速度识别, 否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形形状变化; 如果彩色图像中非黑色图形的面积周长比小于设定的面积周长比阈值, 则进行非黑色图形面积周长比减少速度和减少加速度识别, 否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形形状变化。

4) 如果监测识别到彩色图像中非黑色图形圆形度、矩形度、面积周长比等的减少速度大于设定的速度阈值, 或非黑色图形圆形度、矩形度、面积周长比的减少加速度大于设定的加速度阈值, 则进行图像平均亮度识别, 否则继续监测识别彩色图像中非黑色图形形状变化。

5) 如果图像平均亮度小于设定的亮度阈值, 则采集甲烷浓度, 否则进行瓦斯和煤尘爆炸报警。

6) 如果甲烷浓度迅速升高或达到报警值, 则进行煤与瓦斯突出报警, 否则进行冲击地压报警。

5 基于掩埋位置异常特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法

冲击地压和煤与瓦斯突出发生时, 大量黑色的破碎煤岩抛向巷道和采掘工作面, 遮挡和掩埋设备、人员和巷道等, 与事故前巷道和采掘工作面有明显的掩埋位置差别。根据上述特征, 提出了基于掩埋位置异常特征的冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法。正常工况下, 煤矿井下人员、液压支架顶部及靠近顶部等位置不会被煤岩掩埋。当出现煤矿井下人员、液压支架顶部及靠近顶部等位置被煤岩掩埋的掩埋位置异常特征, 同时监视区域图像异常高亮, 则进行瓦斯和煤尘爆炸报警。当出现煤矿井下人员、液压支架顶部及靠近顶部等位置被煤岩掩埋的掩埋位置异常特征, 同时监视区域图像亮度正常, 甲烷浓度迅速升高或达到报警值, 则进行煤与瓦斯突出报警, 否则进行冲击地压报警。

6 结论

1) 冲击地压和煤与瓦斯突出发生时, 大量黑色的破碎煤岩抛向巷道和采掘工作面, 遮挡和掩埋设备、人员和巷道等, 与事故前巷道和采掘工作面有明显的颜色、面积和形状差别。因此, 可根据事故前后巷道和采掘工作面颜色、面积、形状等变化, 使用彩色摄像机识别冲击地压和煤与瓦斯突出。

2) 冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非黑色区域面积减少, 减少速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色区域面积减少, 但减少的速度和加速度较小。因此, 可基于颜色及其对应图形面积变化特征进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警。

3) 冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非黑色区域数量减少, 减少速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色区域数量减少, 但减少的速度和加速度较小。因此, 可基于颜色及其对应图形数量变化特征进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警。

4) 冲击地压和煤与瓦斯突出会造成监视区域内非黑色图形形状变化, 包括非黑色图形的圆形度、矩形度和面积周长比减少, 减少的速度和加速度较大。行人和行车等也会造成监视区域内非黑色图形形状变化, 但变化的速度和加速度较小。因此, 可基于颜色及其对应图形形状变化特征进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警。

5) 冲击地压和煤与瓦斯突出会造成煤矿井下人员、液压支架顶部及靠近顶部等位置被煤岩掩埋。因此, 可基于掩埋位置异常特征进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警。

参考文献(References):

- [1] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 1-5.
SUN Jiping. Accident analysis and big data and Internet of things in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 1-5.
- [2] 孙继平, 钱晓红. 2004—2015年全国煤矿事故分析[J]. 工矿自动化, 2016, 42(11): 1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11): 1-5.
- [3] 孙继平, 钱晓红. 煤矿事故与应急救援技术装备[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Coal mine accident and emergency rescue technology and equipment[J].

- Industry and Mine Automation, 2016, 42(10): 1-5.
- [4] 孙继平, 钱晓红. 煤矿重特重大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 112-116, 153.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 112-116, 153.
- [5] GB/T 25217.6—2019 冲击地压测定、监测与防治方法第6部分: 钻屑监测方法[S].
GB/T 25217.6-2019 Methods for test, monitoring and prevention of rock burst-Part 6: Monitoring method of drilling bits[S].
- [6] MT/T 839—1999 石门揭穿煤层煤与瓦斯突出危险性的测定方法[S].
MT/T 839-1999 Measuring method of coal and outburst risk while a cross-cut passing through a seam[S].
- [7] GB/T 25217.4—2019 冲击地压测定、监测与防治方法第4部分: 微震监测方法[S].
GB/T 25217.4-2019 Methods for test, monitoring and prevention of rock burst-Part 4: Monitoring method of microseismicity[S].
- [8] GB/T 25217.5—2019 冲击地压测定、监测与防治方法第5部分: 地音监测方法[S].
GB/T 25217.5-2019 Methods for test, monitoring and prevention of rock burst-Part 5: Monitoring method of earth-sound[S].
- [9] GB/T 25217.8—2021 冲击地压测定、监测与防治方法第8部分: 电磁辐射监测方法[S].
GB/T 25217.8-2021 Methods for test, monitoring and prevention of rock burst-Part 8: Monitoring method of electromagnetic radiation[S].
- [10] GB/T 25217.7—2019 冲击地压测定、监测与防治方法第7部分: 采动应力监测方法[S].
GB/T 25217.7-2019 Methods for test, monitoring and prevention of rock burst-Part 7: Monitoring method of mining-induced stress[S].
- [11] 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
State Administration of Coal Mine Safety. Rules of coal and gas outburst prevention[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2019.
- [12] 孙继平. 煤与瓦斯突出报警方法[J]. 工矿自动化, 2014, 40(11): 1-5.
SUN Jiping. Alarm methods of coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(11): 1-5.
- [13] 孙继平, 余星辰. 基于声音识别的煤矿重特重大事故报警方法研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(2): 1-5, 44.
SUN Jiping, YU Xingchen. Research on alarm method of coal mine extraordinary accidents based on sound recognition[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 1-5, 44.
- [14] 孙继平, 余星辰, 王云泉, 等. 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 1-5, 114.
SUN Jiping, YU Xingchen, WANG Yunquan, et al. Research on perception method of coal mine gas and coal dust explosion based on explosion sound recognition[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 1-5, 114.
- [15] 孙继平, 余星辰, 王云泉. 基于声谱图和SVM的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 366-376.
SUN Jiping, YU Xingchen, WANG Yunquan. Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound spectrogram and SVM[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 366-376.
- [16] 孙继平, 余星辰. 基于CEEMD分量样本熵与SVM分类的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1061-1070.
SUN Jiping, YU Xingchen. Sound recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on CEEMD component sample entropy and SVM classification[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1061-1070.
- [17] 孙继平, 余星辰. 基于声音特征的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1096-1105.
SUN Jiping, YU Xingchen. Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1096-1105.
- [18] 孙继平, 程继杰. 煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(1): 1-6.
SUN Jiping, CHENG Jijie. Study on the perception and alarm method of coal mine rock burst and coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(1): 1-6.
- [19] 孙继平, 程继杰, 王云泉. 基于彩色图像的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 1-5.
SUN Jiping, CHENG Jijie, WANG Yunquan. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on color image[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 1-5.
- [20] 聂百胜, 马延崑, 孟筠青, 等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1218-1225.
NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, et al. Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1218-1225.
- [21] 袁瑞甫, 李怀珍. 含瓦斯煤动态破坏模拟实验设备的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊1): 117-123.
YUAN Ruifu, LI Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 117-123.

- Engineering, 2022, 41(12): 1928-1935.
- [80] 赵建勋, 杨文娟, 张旭辉, 等. 悬臂式掘进机井下精确定位方法及其视觉测量技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 192-201.
- ZHAO Jianxun, YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, et al. Study on accurate positioning method and its visual measurement technology of cantilever roadheader underground[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 192-201.
- [81] 张超, 张旭辉, 杜昱阳, 等. 基于双目视觉的悬臂式掘进机位姿测量技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 225-235.
- ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, DU Yuyang, et al. Measuring technique of cantilever roadheader position based on binocular stereo vision[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 225-235.
- [82] 张旭辉, 赵建勋, 张超, 等. 悬臂式掘进机视觉伺服截割控制系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 263-270.
- ZHANG Xuhui, ZHAO Jianxun, ZHANG Chao, et al. Study on visual servo control system for cutting of cantilever roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 263-270.
- [83] 柳学猛, 张凯, 马跃. 基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量系统[J]. 中国矿业, 2022, 31(9): 89-94.
- LIU Xueming, ZHANG Kai, MA Yue. Application status and trend of roadheader pose detection based on machine vision[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 89-94.
- [84] 张旭辉, 周创, 张超, 等. 基于视觉测量的快速掘进机器人纠偏控制研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 21-26.
- ZHANG Xuhui, ZHOU Chuang, ZHANG Chao, et al. Research on deviation correction control of rapid tunneling robot based on vision measurement[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 21-26.
- [85] 王昱栋, 代伟, 马小平. 基于机器视觉的非接触式锚杆异常快速检测方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 13-18.
- WANG Yudong, DAI Wei, MA Xiaoping. Rapid detection method of bolt abnormality based on machine vision[J]. Industrial and Mining Automation, 2021, 47(4): 13-18.
- [86] 李萍, 任安祥. 基于机器视觉的带送煤炭体积测量方法研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(4): 24-29.
- LI Ping, REN Anxiang. Research on volume measurement method of coal on belt conveying based on machine vision[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(4): 24-29.
- [87] 胡而已. 融合激光扫描与机器视觉的煤流量测量研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 146-151.
- HU Eryi. Coal flow measurement based on laser scanning and machine vision[J]. Coal Engineering, 2021, 53(11): 146-151.
- [88] 杨春雨, 顾振, 张鑫, 等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 164-174.
- YANG Chunyu, GU Zhen, ZHANG Xin, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 164-174.
- [89] QIU Zhaoyu, DOU Dongyang, ZHOU Deyang, et al. On-line prediction of clean coal ash content based on image analysis[J]. Measurement, 2021, 173: 108663.
- [90] ZHANG Zelin, YANG Jianguo, WANG Yuling, et al. Ash content prediction of coarse coal by image analysis and GA-SVM[J]. Powder Technology, 2014, 268: 429-435.
- [91] ZHANG Zelin, LIU Yang, HU Qi, et al. Multi-information online detection of coal quality based on machine vision[J]. Powder Technology, 2020, 374: 250-262.
- [92] 吴智峰, 柴鑫, 王亚波, 等. 基于机器视觉非接触测量外螺纹尺寸系统[J]. 煤矿机械, 2018, 39(8): 171-172.
- WU Zhifeng, CHAI Xin, WANG Yabo, et al. Measurement of external thread size system based on machine vision non-contact[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(8): 171-172.
- [93] GAO Yuan, QIAO Tiezhu, ZHANG Haitao, et al. A contact-less measuring speed system of belt conveyor based on machine vision and machine learning[J]. Measurement, 2019, 139: 127-133.
- [94] 田原. 浅谈机器视觉技术在煤矿中的应用前景[J]. 工矿自动化, 2010, 36(5): 30-32.
- TIAN Yuan. Brief discussion of application prospect of technology of machine vision in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(5): 30-32.
- [23] 张延松, 王德明, 朱红青. 煤矿爆炸、火灾及其防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- ZHANG Yansong, WANG Deming, ZHU Hongqing. Coal mine explosion, fire and its prevention technology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.

(上接第 6 页)

- [22] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.
- State Administration of Work Safety. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2022.