



文章编号: 1671-251X(2023)03-0001-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18077

基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和 煤尘爆炸感知方法研究

孙继平¹, 余星辰¹, 王云泉², 李小伟¹

(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: 分析了煤矿瓦斯和煤尘爆炸特征: 气体浓度发生突变; 环境温度迅速升高; 空气压力突然升高; 产生火球和烟尘; 产生较强的红外和紫外辐射; 产生爆炸冲击波和火焰波; 产生爆炸音。基于爆炸声音感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸具有以下优点: ① 爆炸冲击波和火焰波衰减快, 传播距离近; 声波衰减慢, 传播距离远。远离爆源的矿用拾音设备可用于煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知。② 与基于气体浓度和温度等传感器的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比, 具有响应速度快的优点。③ 与基于视频图像的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比, 具有不受粉尘、光照、遮挡等影响的优点。④ 矿用拾音设备成本低、易安装。⑤ 声音传播距离远, 受巷道和分支影响小。⑥ 声音处理速度快, 可在短时间内从各种声音信号中快速识别瓦斯和煤尘爆炸声音。提出了基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法: 利用麦克风阵列拾音器采集监测区域的声音信号, 经过归一化、分帧、添加类别标签等预处理后, 提取声音信号特征, 将特征输入到统计分类器中进行训练, 建立煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型; 实时采集监测区域的声音信号, 将提取的声音信号特征输入训练完成的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型中, 判断是否为煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音, 若是则进行报警。

关键词: 瓦斯和煤尘爆炸; 灾害监测与报警; 声音识别; 特征提取; 麦克风阵列

中图分类号: TD76

文献标志码: A

Research on perception method of coal mine gas and coal dust explosion based on
explosion sound recognition

SUN Jiping¹, YU Xingchen¹, WANG Yunquan², LI Xiaowei¹

(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 characteristics of coal mine gas and coal dust explosion are analyzed. The gas concentration changes suddenly. The ambient temperature rises rapidly. The air pressure rises suddenly. It produces fireballs and smoke. It produces strong infrared and ultraviolet radiation. It generates explosion shock waves and flame waves.

收稿日期: 2023-02-12; 修回日期: 2023-03-13; 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38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, 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.



扫码移动阅读

It produces explosive sound. The coal mine gas and coal dust explosion perception based on explosion sound has the following advantages. ① Explosion shock waves and flame waves attenuate quickly and travel close distances. Sound waves attenuate slowly and travel over long distances. The mine sound pickup equipment far away from the explosion source can be used for the perception of coal mine gas and coal dust explosion. ② Compared with the coal mine gas and coal dust explosion perception method based on gas concentration and temperature sensors, the proposed method has the advantage of fast response. ③ Compared with the coal mine gas and coal dust explosion perception method based on video images, the proposed method has the advantages of not being affected by dust, light, shelter, etc. ④ Mine sound pickup equipment has low cost and is easy to install. ⑤ The sound travels over a long distance and it is less affected by roadways and branches. ⑥ The sound processing speed is fast. The gas and coal dust explosion sound can be quickly recognized from various sound signals in a short time. A perception method of coal mine gas and coal dust explosion based on explosion sound recognition is proposed. The sound signals in the monitoring area are collected using microphone array pickups. After preprocessing such as normalization, framing, and adding category labels, the sound signal features are extracted. The features are input into a statistical classifier for training. The sound recognition model for coal mine gas and coal dust explosion is established. The sound signal of the monitoring area is collected in real-time. The extracted sound signal features are input into the trained coal mine gas and coal dust explosion sound recognition model. Whether it is the coal mine gas and coal dust explosion sound can be determined. If so, an alarm will be given.

Key words: gas and coal dust explosion; disaster monitoring and alarm; sound recognition; feature extraction; microphone array

0 引言

瓦斯和煤尘爆炸是煤矿重特大事故之一,一旦发生会造成大量人员伤亡和财产损失^[1-6]。尽早发现瓦斯和煤尘爆炸,及时应急救援,是减少事故人员伤亡和财产损失的有效措施。煤矿安全监控系统主要监测 CH₄、CO、CO₂、O₂、环境温度、环境湿度、风速、风压、风向、烟雾、粉尘、设备开停、主要通风机状态、局部通风机状态等,具有超限报警和断电等功能^[7-11],但不能感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸事故。目前,煤矿瓦斯和煤尘爆炸事故主要通过人工发现并电话上报,存在上报不及时、若事故现场人员全部遇难则无人上报等问题^[12-17]。因此,研究煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知与报警方法,具有重要的理论意义和实用价值。

1 煤矿瓦斯和煤尘爆炸特征及感知方法

煤矿瓦斯和煤尘爆炸会瞬间释放大量热量,产生高温和高压,形成高压冲击波和高温火焰波;会产生大量有毒有害气体,造成大量人员伤亡和财产损失^[12]。煤矿瓦斯和煤尘爆炸的主要特征:① 气体浓度发生突变。爆炸瞬间消耗大量 O₂,并产生大量 CO、CO₂ 等有害气体,导致爆源附近环境中 O₂ 浓度迅速降低,CO、CO₂ 等有害气体浓度迅速上升^[12-14]。② 环境温度迅速升高。爆炸瞬间释放大量热量,导

致爆源附近环境温度急速升高^[12]。③ 空气压力突然升高。爆炸产生高压,使周围空气压力突然升高,风流反向^[12]。④ 产生火球和烟尘^[12]。⑤ 产生较强的红外和紫外辐射^[12]。⑥ 产生爆炸冲击波和火焰波。剧烈的放热和气体膨胀导致爆源附近产生巨大的空气压力差和温度差,产生爆炸冲击波和火焰波^[12,18];爆炸冲击波和火焰波随着传播距离的增加快速衰减,传播距离较近^[19-20]。⑦ 产生爆炸音。爆炸音随着传播距离的增加逐渐衰减,但传播距离较远^[12,21]。

煤矿瓦斯和煤尘爆炸会使环境中 O₂ 浓度迅速降低,CO、CO₂ 等有害气体浓度迅速上升,环境温度迅速升高,空气压力突然升高,风流反向和产生烟尘。因此,可通过 O₂ 浓度降低、CO 和 CO₂ 浓度升高、温度升高、空气压力升高、风流反向和烟尘等,感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸。但煤与瓦斯突出、冲击地压、矿井火灾、矿井水灾、顶板大面积冒落、通风系统故障等也会导致 O₂ 浓度降低、CO 和 CO₂ 浓度升高、温度升高、空气压力升高、风流反向和产生烟尘等,影响煤矿瓦斯和煤尘爆炸正确辨识。

煤矿瓦斯和煤尘爆炸会产生火球、烟尘、较强的红外和紫外辐射等。因此,可通过可见光、红外、紫外视频监控与分析,感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸。但视频监控与分析受粉尘、遮挡、矿灯、巷道照明灯、信号灯等干扰,影响煤矿瓦斯和煤尘爆炸正确辨识。

煤矿瓦斯和煤尘爆炸会产生爆炸音,爆炸音随着传播距离的增加逐渐衰减,但传播距离较远。煤矿瓦斯和煤尘爆炸产生的爆炸音与煤矿井下其他声音特征不同,可通过矿用防爆拾音设备和系统实时监测声音,通过声音智能分析和声音特征参数分析,感知瓦斯和煤尘爆炸。虽然爆炸早期冲击波和火焰波传播速度大于声波,但爆炸冲击波和火焰波的传播距离远小于爆炸声波的传播距离,不在爆源附近的大量矿用拾音器会保存下来,用于煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别。

2 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法

本文提出了基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法,该方法具有以下优点:①爆炸冲击波和火焰波衰减快,传播距离近;声波衰减慢,传播距离远^[12,21]。爆源处矿用拾音设备会被爆炸冲击波和高温损毁,但远离爆源的矿用拾音设备会保存下来,用于煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知。②与基于气体

浓度和温度等传感器的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比,基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法具有响应速度快的优点。③与基于视频图像的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比,基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法具有不受粉尘、光照、遮挡等影响的优点。④矿用拾音设备成本低、易安装。⑤声音传播距离远,受巷道和分支影响小。⑥声音处理速度快,可在短时间内从各种声音信号中快速识别瓦斯和煤尘爆炸声音并报警。

基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法原理如图1所示。采集监测区域的声音信号,经过归一化、分帧、添加类别标签等预处理后,提取声音信号特征,将特征输入统计分类器中进行训练,建立煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型;实时采集监测区域的声音信号,将提取的声音信号特征输入训练完成的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型中,判断是否为煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音,若是则进行报警。

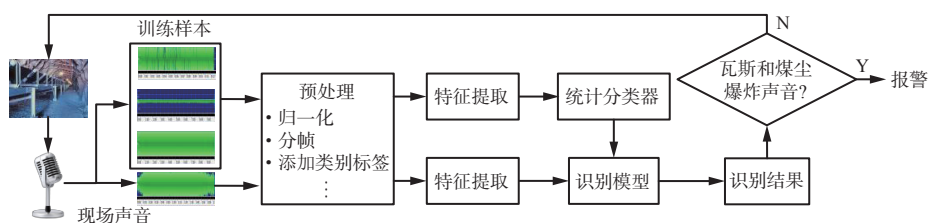


图1 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法原理

Fig. 1 Principle of coal mine gas and coal dust explosion perception method based on explosion sound recognition

基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法流程如图2所示。具体步骤:在煤矿井下重点监测区域设置矿用拾音器,采集所在区域的声音信号;提取声音信号特征,输入到统计分类器,若是爆炸音,则进入预警状态;间隔时间 T_1 ,再次采集所在区域的声音信号;提取声音信号特征,输入到统计分类器,若是爆炸音,则进入报警状态,否则退出报警状态,继续采集声音信号。

2.1 声音采集

麦克风阵列拾音与单麦克风拾音相比,具有下列优点:①可以解决单麦克风远距离拾音困难的问题。②可以弥补单麦克风在噪声抑制、声音提取和声音分离等方面的不足。③可以解决单麦克风拾音声音信号失真的问题。因此,本文采用麦克风阵列拾音器采集声音^[12]。麦克风阵列拾音器采集声音具有性能稳定、失真小、功耗低、体积小、成本低、易安装维护等优点。但矿用拾音器会受到高温、高压、冲击波和火焰波等损坏。为了弥补该缺点,本文

采用矿用拾音设备多点布置或利用已有的矿用摄像机的拾音器作为补充。

2.2 预处理

采集的煤矿井下声音信号样本很长,无法直接提取其特征。为了方便进行信号分析和特征提取,需对声音信号进行预处理,预处理步骤包括归一化、分帧、添加类别标签等。

1) 归一化。归一化是把需要处理的声音数据通过某算法处理后,将数据限制在特定范围内,便于后续数据处理,保证程序运行时收敛速度加快。为减少样本数据的波动,提升算法的收敛速度,快速寻找全局最小值,本文采用均值法对声音信号进行归一化处理,将声音信号归一化到平均值左右。

2) 分帧。声音信号的特点是短时平稳。因此,要对声音信号进行分析和处理,需要采用短时分析,将声音信号分成一帧一帧,来分析其特征参数。本文采用汉明窗对声音信号进行分帧操作,帧与帧的非重叠部分为帧移。这样分帧有2个作用:可以减

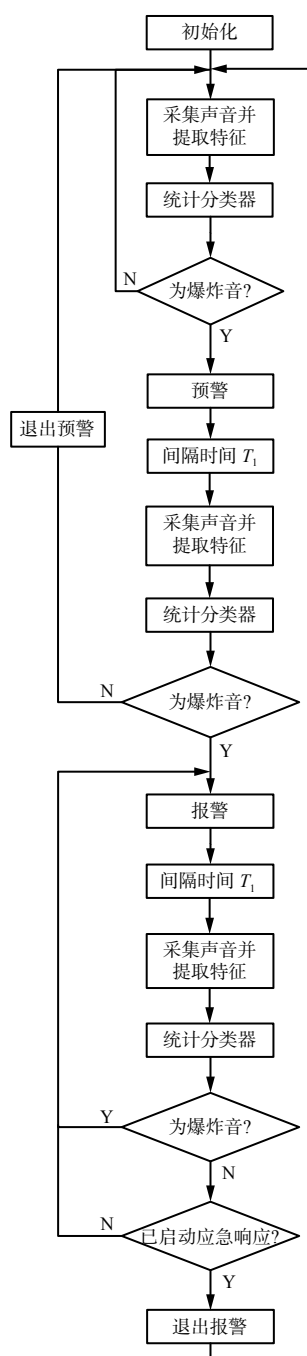


图 2 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法流程

Fig. 2 Flow of coal mine gas and coal dust explosion perception method based on explosion sound recognition

少静音音频的干扰;可以减少音频后期处理的难度,简化计算,提高运算速度和识别效率。

3) 添加类别标签。为训练煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型,需给不同声音赋予不同的类别标签。

2.3 特征提取

煤矿井下声音信号繁杂,仅从时域和频域实现对声音信号的判别与分类效果较差。因此,需要对采集的煤矿井下声音提取特征,实现声音信号的识别与分类。

声音信号的特征主要包括时域特征、统计特征、

频域特征、声音特征等。其中,时域特征包括频率、过零率等;统计特征包括方差、峰值、波形指数等;频域特征包括频谱质心、频谱平坦度等;声音特征包括梅尔频率倒谱系数、线性预测倒谱系数等。

时域特征是以时间为变量,描绘出信号的波形。统计特征是根据信号波形的统计结果。煤矿井下工作环境复杂多变,对声音信号的时域特征和统计特征有很大影响,特征稳定性不够。原始信号可直接作为特征,但由于其在时域上具有较大的冗余度,会增加训练难度,不利于识别。因此,选择合适的声音信号特征,将有利于瓦斯和煤尘爆炸声音识别模型的建立与识别,提高训练和识别效率。

2.4 统计分类器

将提取的特征输入统计分类器中,实现声音信号特征的识别、分类与定位。声音识别分类器有高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)、隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)、矢量量化(Vector Quantization, VQ)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、k近邻分类器(K-Nearest Neighbor Classifier, KNN)和卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)等^[12]。

2.5 识别与定位

为了实现瓦斯和煤尘爆炸的智能感知,应实时采集现场声音信号,并提取声音的特征参数,若判定为瓦斯和煤尘爆炸声音,则发出报警信号。同时可通过监测和分析不同监测地点的声音强度特征、监测到的瓦斯和煤尘爆炸声音的先后关系和矿用防爆拾音设备损坏的先后关系等判定爆源位置。

3 结论

1) 煤矿瓦斯和煤尘爆炸会使环境中 O_2 浓度迅速降低, CO 、 CO_2 等有害气体浓度迅速上升,环境温度迅速升高,空气压力突然升高,风流反向和产生烟尘。因此,可通过 O_2 浓度降低、 CO 和 CO_2 浓度升高、温度升高、空气压力升高、风流反向和烟尘等,感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸。但煤与瓦斯突出、冲击地压、矿井火灾、矿井水灾、顶板大面积冒落、通风系统故障等也会导致 O_2 浓度降低、 CO 和 CO_2 浓度升高、温度升高、空气压力升高、风流反向和产生烟尘等,影响煤矿瓦斯和煤尘爆炸正确辨识。

2) 煤矿瓦斯和煤尘爆炸会产生火球、烟尘、较强的红外和紫外辐射等。因此,可通过视频监控与分析来感知煤矿瓦斯和煤尘爆炸。但视频监控与分析受粉尘、遮挡、矿灯、巷道照明灯、信号灯等干扰,影响煤矿瓦斯和煤尘爆炸正确辨识。

3) 煤矿瓦斯和煤尘爆炸会产生爆炸音, 爆炸音随着传播距离的增加逐渐衰减, 但传播距离较远。煤矿瓦斯和煤尘爆炸产生的爆炸音与煤矿井下其他声音的特征不同, 可通过矿用防爆拾音设备和系统实时监测声音, 通过声音智能分析和声音特征参数分析, 感知瓦斯和煤尘爆炸。虽然爆炸早期冲击波和火焰波传播速度大于声波, 但爆炸冲击波和火焰波的传播距离远小于爆炸声波的传播距离, 不在爆源附近的大量矿用拾音器会保存下来, 用于煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别。

4) 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法具有以下优点: ① 爆炸冲击波和火焰波衰减快, 传播距离近; 声波衰减慢, 传播距离远。爆源处矿用拾音设备会被爆炸冲击波和高温损毁, 但远离爆源的矿用拾音设备会保存下来, 用于煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别。② 与基于气体和温度等传感器的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比, 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法具有响应速度快的优点。③ 与基于视频图像的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法相比, 基于爆炸声音识别的煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知方法具有不受粉尘、光照、遮挡等影响的优点。④ 矿用拾音设备成本低、易安装。⑤ 声音传播距离远, 受巷道和分支影响小。⑥ 声音处理速度快, 可以在短时间内, 从各种声音信号中快速识别瓦斯和煤尘爆炸声音并报警。

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. 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 孙继平. 基于物联网的煤矿瓦斯爆炸事故防范措施及典型事故分析[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(7): 1172-1176.
SUN Jiping. The accident prevention measure and analysis based on Internet of things in the gas explosion of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1172-1176.
- [6] 孙继平. 屯兰煤矿“2·22”特别重大瓦斯爆炸事故原因及教训[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 72-75.
SUN Jiping. The causes and lessons of "2·22" gas explosion disaster at Tunlan Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 72-75.
- [7] 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.
- [8] 孙继平. 煤矿井下安全避险“六大系统”的作用和配置方案[J]. *工矿自动化*, 2010, 36(11): 1-4.
SUN Jiping. Effect and configuration of "Six Systems" for safe act of rescue of coal mine underground[J]. *Industry and Mine Automation*, 2010, 36(11): 1-4.
- [9] 孙继平. 煤矿信息化与自动化发展趋势[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(4): 1-5.
SUN Jiping. Development trend of coal mine informatization and automation[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(4): 1-5.
- [10] 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(1): 1-5.
SUN Jiping. New technologies and new equipments of coal mine monitoring[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(1): 1-5.
- [11] 孙继平. 煤矿信息化与智能化要求与关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(9): 22-25, 71.
SUN Jiping. Requirement and key technology on mine informatization and intelligent technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(9): 22-25, 71.
- [12] 孙继平. 煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知报警与爆源判定方法研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(6): 1-5, 11.
SUN Jiping. Research on method of coal mine gas and coal dust explosion perception alarm and explosion source judgment[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(6): 1-5, 11.
- [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, 范伟强. 基于视频图像的瓦斯和煤尘爆炸感知报警及爆源判定方法[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(7): 1-4, 48.
SUN Jiping, FAN Weiqiang. Gas and coal dust explosion perception alarm and explosion source judgment method based on video image[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(7): 1-4, 48.

(下转第 114 页)

- [14] 王超, 杜英, 苟全峰, 等. 煤矿供电系统中越级跳闸问题研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 312-314.
WANG Chao, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Study on override trip problem in coal mine power supply system[J]. Coal Technology, 2018, 37(10): 312-314.
- [15] 王钺, 秦文萍, 杨世坤, 等. 光纤级联纵差保护在井下防越级跳闸的应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(7): 75-78.
WANG Tan, QIN Wenping, YANG Shikun, et al. Application of fiber cascaded differential protection in override trip prevention for coal mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(7): 75-78.
- [16] 刘波. 电力监控及防短路越级跳闸系统在煤矿的应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(12): 66-69.
LIU Bo. Application of power monitoring and override trip prevention system in coal mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(12): 66-69.
- [17] 卢喜山, 张祖涛, 李卫涛. 煤矿供电系统基于纵联差动保护原理的防越级跳闸技术研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(4): 71-73.
LU Xishan, ZHANG Zutao, LI Weitao. Research on avoiding override trip based on principle of longitudinal differential protection in mine power supply system[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(4): 71-73.
- [18] 李建冬, 侯炜, 陈俊, 等. 基于GOOSE的煤矿供电防越级速断保护原理研究及应用[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 182-185.
LI Jiandong, HOU Wei, CHEN Jun, et al. Research and application of anti-override instantaneous protection principle for coal mine power supply system based on GOOSE[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 182-185.
- [19] 张保会, 尹项银. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
ZHANG Baohui, YIN Xiangyin. Power system relay protection[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [20] 顾永辉. 煤矿电工手册: 第二分册 矿井供电(上)[M]. 3版. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.
GU Yonghui. Coal mine electrical manual: part II mine power supply (volume 1) [M]. 3rd ed. Beijing: China Coal Industry Press, 2015.
- [21] 陈仁明. 煤矿供电设计与继电保护整定计算示例[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
CHEN Renming. Example of coal mine power supply design and relay protection setting calculation[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013.
- ~~~~~
- (上接第 5 页)
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 余星辰, 王云泉. 基于小波包能量的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 131-139.
YU Xingchen, WANG Yunquan. Coal mine gas and coal dust explosion sound recognition method based on wavelet packet energy[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 131-139.
- [18] 周心权, 吴兵, 徐景德. 煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性[J]. 中国煤炭, 2002, 28(9): 8-11, 4.
ZHOU Xinquan, WU Bing, XU Jingde. Basic characters of gas explosion in underground coal mines[J]. China Coal, 2002, 28(9): 8-11, 4.
- [19] 景国勋, 彭乐, 班涛, 等. 甲烷煤尘耦合爆炸传播特性及伤害研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 72-78.
JING Guoxun, PENG Le, BAN Tao, et al. Research on pressure propagation and injury of methane and coal dust coupled explosion[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 72-78.
- [20] 江丙友, 林柏泉, 陈健, 等. 瓦斯爆燃防爆安全距离及传播特征的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 139-145.
JIANG Bingyou, LIN Baiquan, CHEN Jian, et al. Numerical simulation of explosion-proof safety distance and propagation characteristics of gas deflagration[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 139-145.
- [21] 彭佑多, 谢伟华, 郭迎福, 等. 矿井掘进工作面粉尘对机器噪声衰减的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 23-29.
PENG Youduo, XIE Weihua, GUO Yingfu, et al. Studies on the spread and attenuation of machine noise influenced by the heading face of mine roadway dust[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 27(1): 23-29.