



文章编号:1671-251X(2019)04-0001-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17416

矿井水灾感知与水源判定方法研究

孙继平, 靳春海

(中国矿业大学(北京), 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:在分析水质监测法、涌水量监测法、水温监测法、气温监测法、湿度监测法、水位监测法、电阻率监测法、应力监测法、微震监测法、水文钻孔法等矿井水灾感知方法原理和特点的基础上,提出了基于图像监测的矿井水灾感知方法和基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法,得出以下结论:①水质监测法不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,该方法感知地表水和老空水引发的矿井水灾准确率较高。②基于时间的涌水量监测法具有准确率高的优点,但部署复杂、实时性差;基于流速的涌水量监测法具有操作简单、实时性好等优点,但测量误差较大。③水温监测法不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,但不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。④气温监测法具有简单、方便等优点,但受煤炭自燃等矿井火灾、瓦斯与煤尘爆炸、地面气温、矿井通风量、井下设备开停、井下作业人员数量等影响,不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。⑤湿度监测法具有简单、方便等优点,但受地面空气湿度和温度、矿井通风量、煤炭自燃等矿井火灾等影响。⑥通过水位监测法可及时掌握地表水和地下水水源变化,但需探明老空水位置等。⑦电阻率监测法具有响应快、灵敏度高等优点,但准确率受采掘环境影响大,电极布置困难。⑧应力监测法和微震监测法具有实时性好的优点,但受煤与瓦斯突出、冲击地压等影响,需与其他矿井水灾感知方法配合使用。⑨水文钻孔法具有信息量大的优点,但需与其他矿井水灾感知方法配合使用。⑩基于图像监测的矿井水灾感知方法具有非接触、实时快速、监测范围广、部署与安装简单、成本低、使用维护方便等优点。⑪基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法同时监测矿井水、导水通道和水源,不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,具有可靠性高的优点。

关键词:矿井水灾;水灾感知;水源判定;图像识别;大数据;人工智能

中图分类号:TD745

文献标志码:A

Research on methods of mine flood perception and water source determination

SUN Jiping, JIN Chunhai

(China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract:Based on analysis of principle and characteristics of mine flood perception methods such as water quality monitoring method, water inflow monitoring method, water temperature monitoring

收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-03-23;责任编辑:盛男。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(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)信息工程研究所所长;获国家科技进步二等奖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 and 安全生产行业标准28项;主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”;作为第1作者或独立完成著作12部;被SCI和EI检索的第1作者或独立完成论文80余篇;作为第1发明人获国家授权发明专利60余项;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,靳春海. 矿井水灾感知与水源判定方法研究[J]. 工矿自动化,2019,45(4):1-5.

SUN Jiping, JIN Chunhai. Research on methods of mine flood perception and water source determination[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 1-5.

method, temperature monitoring method, humidity monitoring method, water level monitoring method, resistivity monitoring method, stress monitoring method, microseismic monitoring method and hydrological drilling method, mine flood perception method based on image monitoring and image-based big data mine flood perception and water source determination method were proposed. Conclusions were got as following: ① The water quality monitoring method can not only perceive flood, but also determine water source that causes flood, which has high perception accuracy of mine flood caused by surface water and goaf water. ② Time-based water inflow monitoring method has high accuracy, but complex deployment and poor real-time performance. The water inflow monitoring method based on flow velocity has advantages of simple operation and good real-time performance, but large measurement error. ③ The water temperature monitoring method can not only perceive mine flood, but also determine water source that causes flood, but it is not applicable to the flood perception that difference between mine flood water source temperature and normal mine water inflow temperature is small. ④ The temperature monitoring method has advantages of simplicity and convenience, but it is affected by mine fire such as coal spontaneous combustion, explosion of gas and coal dust, surface air temperature, mine ventilation quantity, underground equipments starting and stopping, and number of underground workers. The temperature monitoring method is not applicable to the flood perception that difference between mine flood water source temperature and normal mine water inflow temperature is small. ⑤ The humidity monitoring method has advantages of simplicity and convenience, but it is affected by humidity and temperature of surface air, mine ventilation quantity, and mine fire such as coal spontaneous combustion. ⑥ Change of surface water and groundwater source can be timely grasped by the water level monitoring method, but location of goaf water needs to be proved. ⑦ The resistivity monitoring method has advantages of fast response and high sensitivity, but accuracy is greatly affected by mining environment, and electrode arrangement is difficult. ⑧ The stress monitoring method and the microseismic monitoring method have advantages of good real-time performance, but due to impact of coal and gas outburst and rock burst pressure, the methods need to be used together with other mine flood perception methods. ⑨ The hydrological drilling method has advantage of large amount of information, but it needs to be used together with other mine flood perception methods. ⑩ The mine flood perception method based on image monitoring has advantages of non-contact, real-time and rapid, wide monitoring range, simple deployment and installation, low cost and convenient use and maintenance. ⑪ Image-based big data mine flood perception and water source determination method simultaneously monitors mine water, water conducted channel and water source, which can not only perceive mine flood, but also determine water source that causes flood, and has advantage of high reliability.

Key words: mine flood; flood perception; water source determination; image recognition; big data; artificial intelligence

0 引言

水灾是煤矿重特大事故之一^[1-2]。因此,感知矿井水灾,及时发现水灾事故,撤出井下作业人员,开展有效应急救援,对减少事故伤亡和财产损失具有重要意义^[3-6]。

水源、导水通道和异常涌水量是引发矿井水灾的 3 个条件^[7]。引发矿井水灾的水源主要有地表水和地下水两大类;引发矿井水灾的地表水包括江、河、湖、水库、山洪等地球表面的水;引发矿井水灾的

地下水包括老空水、含水层水、岩溶水、裂隙水等,其中老空水是引发矿井水灾的主要水源。导水通道包括煤岩体裂隙、陷落柱、断层、钻孔、巷道等。水源和导水通道决定了涌水量大小。矿井水灾感知应包括水源、导水通道和矿井水(含涌水量等)监测 3 个方面。笔者介绍了水质、涌水量、水温、气温、湿度、水位、电阻率、应力、微震、水文钻孔等矿井水灾感知方法,分析了各方法的原理和特点,提出了基于图像监测的矿井水灾感知方法和基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法。

1 水质、涌水量、水温、气温、湿度和水位监测法

水质、涌水量、水温、气温、湿度和水位监测法主要用于矿井水监测,其中水质、水温和水位监测法还可用于水源监测。

1.1 水质监测法

矿井水灾伴随着水的突出和流动、煤岩的破坏和震动等,泥沙、岩石中所含铁、硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐等多种矿物质会进入水中,导致水质如水的颜色、浑浊度、离子浓度、pH 值、导电率等改变。地表水和老空水与煤矿井下正常涌水的水质差异较大,因此,监测矿井水质不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源^[8]。水质监测法感知地表水和老空水引发的矿井水灾准确率较高。

1.2 涌水量监测法

涌水量是指单位时间内地表水、老空水、含水层水、岩溶水、裂隙水等涌入矿井内的全部水量。涌水量监测法可分为基于时间和基于流速 2 种监测方法。基于时间的涌水量监测法通过监测已知容器的水位降低后恢复时间、容器流满时间或水位上升时间,然后用水的体积变化量除以所用时间,得到涌水量。基于时间的涌水量监测法具有准确率高的优点,但部署复杂、实时性差。基于流速的涌水量监测法通过测量水的流速,然后乘以流体截面,得到涌水量^[9]。基于流速的涌水量监测法具有操作简单、实时性好等优点,但测量误差较大。

1.3 水温监测法

地表水与地下水的温度不同;不同深度的地下水的温度也不同;动水与静水的温度也存在差异,快速流动的水的分子间发生激烈碰撞和摩擦,水温增高。因此,监测水温不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源^[10]。矿井水和地表水的水温可通过温度传感器监测,含水层水的水温可通过水文钻孔监测。水温监测法不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。

1.4 气温监测法

当矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较大时,会引起煤矿井下空气温度变化。气温监测法具有简单、方便等优点。但煤炭自燃等矿井火灾、瓦斯与煤尘爆炸、煤与瓦斯突出、地面气温、矿井通风量、井下设备开停、井下作业人员数量等,均会影响煤矿井下空气温度。气温监测法不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。

1.5 湿度监测法

矿井涌(突)水有一个渗流的过程,水渗透岩石

和煤层,在煤岩壁表面形成水珠,甚至形成巷道积水,煤岩壁水珠和巷道积水蒸发,增加了矿井湿度。湿度监测法具有简单、方便等优点。但地面空气湿度和温度、矿井通风量、煤炭自燃等矿井火灾等,均会影响煤矿井下空气湿度。

1.6 水位监测法

一年四季不同的降雨量、地下水流流动等,会造成地表水、老空水、含水层水等水源的水量和水位变化。地表水和老空水的水位达到一定高度时,就会溃入矿井内。矿井含水层水的水位增高,会破坏顶底板,造成矿井水灾。地表水和老空水的水位可直接用水位传感器测量,含水层水的水位可通过水文钻孔观测。通过水位监测可及时掌握地表水和地下水水源变化,但在传感器布置前需探明老空水位置等,限制了水位监测法的应用。

2 电阻率、应力和微震监测法

电阻率、应力和微震监测法主要用于导水通道监测,其中电阻率监测法还可用于水源监测。

2.1 电阻率监测法

煤和岩石的结构、成分及含水量不同,其电阻率也不同。在矿井突水过程中,伴随着煤和岩石的破坏及导水通道的形成,煤岩裂隙和地下水必然导致煤和岩石导电性的改变。因此,通过监测电阻率变化可监测矿井水灾的导水通道和水源。电阻率监测法感知矿井水灾具有响应快、灵敏度高等优点,但准确率受采掘环境影响大,在采掘工作面不断推进的条件下,布置监测电极十分困难。

电阻率监测法所测得的电阻率是电极之间整体的电阻率,没有位置参数,当电阻率变化时,无法判定变化位置。为解决该问题,人们研究了高密度电阻率法和电阻率反演成像。高密度电阻率法是将几十甚至几百个阵列电极同时测得的电阻率数值记录下来,用来研究物体剖面的导电性质^[11]。电阻率反演成像是将整个剖面的电阻率反演成像,进而捕捉突水前兆信息。目前,一维、二维电阻率反演成像技术已较为成熟,其中垂直断面、水平剖面的二维电阻率反演成像技术已用于地球物理监测。二维电阻率反演成像仅仅是对 1 个单剖面(断面)解析,而实际煤和岩石是三维的,所以二维电阻率反演成像仅仅是一种近似解释。三维电阻率反演成像可对地下结构进行综合性解释,对矿井水灾异常位置、范围等进行较准确判断,具有精度高、还原度高等优点。但三维电阻率反演成像仍处于研究探索阶段,反演成像的多解、效率低、计算复杂等问题需要解决^[12-13]。

2.2 应力监测法

矿井水灾发生时,顶板、底板、断层岩层、缝隙岩层和工作面煤层等必然承受因导水通道形成所带来的应力和应变。应力监测法就是通过监测顶板、底板、岩层等处应力和应变,感知矿井水灾。应力监测法具有实时性好的优点,但受煤与瓦斯突出、冲击地压等影响,需与其他矿井水灾感知方法配合使用。

2.3 微震监测法

采掘活动会造成煤岩破坏,形成导水通道,产生微震信号。微震监测法通过监测导水通道感知水灾^[14]。但如果没有与导水通道贯通的水源,即使形成导水通道,也不会发生水灾;另外,受煤与瓦斯突出、冲击地压等影响,微震监测法需与其他矿井水灾感知方法配合使用。微震监测法判别指标主要有微震频度(单位时间内微震次数)、微震总能量(单位时间内微震能量总和)、微震能量最大值和微震震源等。根据布置在不同位置的传感器接收到的微震信号到达时间和强度不同等,可对微震震源进行定位,监测导水通道形成和发展等^[15]。

3 水文钻孔法

水文钻孔法主要用于含水层水源监测,通过水文钻孔监测和分析地下含水层水位、水温、水质、水流量、地质结构等水文地质特征^[16]。水文钻孔按用途可分为抽水试验孔、长期水文观测孔、底板含水层延伸孔、采样孔等。通过抽水试验孔监测抽水流量和水位降深关系,从而测算含水层渗透系数、储水系数等参数;长期水文观测孔用来监测地下水位、水温、水质等参数,实时监测地下水动态变化;底板含水层延伸孔用来揭示煤层、岩层、断层、裂隙发育程度等结构隔水性,在掘进过程中监测含水层的富水性;采样孔主要用来采集岩土样本、研究地质岩层结构等。水文钻孔法具有信息量大的优点,但需与其他矿井水灾感知方法配合使用。

4 基于图像的矿井水灾感知与水源判定方法

随着神经网络、机器学习和深度学习等算法的快速发展,CPU 和 GPU 等硬件的不断提升,促进了图像识别处理技术的发展和應用。为提高矿井水灾感知的准确性,笔者提出了基于图像监测的矿井水灾感知方法、基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法。

4.1 基于图像监测的矿井水灾感知方法

基于图像监测的矿井水灾感知方法具有非接触、实时快速、监测范围广、部署与安装简单、成本低、使用维护方便等优点。该方法包括图像采集和

图像识别两大方面。图像采集可使用矿用本质安全型或隔爆型防爆摄像机。由于水是一种透明、无色、无味、无固定形状的物质,水灾图像识别十分困难,是矿井水灾感知的技术关键和技术难题。

4.1.1 水灾图像特征

矿井突水时,突水点会有水的喷射现象,产生大量水花;快速流动的水在流动冲击过程中,也会产生大量水花。水花具有白色的颜色特征,同煤、岩石、设备等周围环境相比亮度大。水花的纹理与煤、岩石、设备等周围环境相比,具有梯度大、边缘性强等特点。流动的水其表面会产生波纹,水波纹的图像特征是方向一致,且呈弧形。

4.1.2 水灾图像识别

水灾图像识别是一个图像分割、特征提取、分类的过程。矿井突水产生的水花,具有白色、亮度大(灰度值高)、边缘性强等特点,可通过灰度阈值分割、边缘算子检测等方法进行图像分割。通过视频前后帧差分,可分割出水灾发生区域。水灾图像中的水具有区别于矿井其他物体的灰度特征和纹理特征。水灾图像中包括水、煤、岩石、设备等类别,其中水为正样本,其他为负样本,根据水灾图像特征进行训练,根据训练结果进行图像识别。

4.1.3 水灾视频动态监测

矿井水灾发生是从无到有、从小到大的过程。视频由多帧序列图像组成,通过分析前后帧图像、统计前后帧图像信息,可达到动态、连续监测水灾的目的。水灾图像中水的像素点灰度值(亮度)不同于煤、岩石、设备等,水的像素点数随突水量的增大而增加。统计前后多帧图像的像素点灰度值大于设定阈值的像素点数,当大于设定阈值的像素点数呈上升趋势时,发出水灾报警信号。在水灾图像识别的基础上,对每帧被判定为水灾图像的像素信息、边缘信息、水灾分割区域信息进行综合分析,可估算水灾面积和突水量等。

4.2 基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法

基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法同时监测矿井水、导水通道和水源,融合图像、水质、涌水量、水温、气温、湿度、水位、电阻率、应力、微震、水文等多种信息,利用大数据、人工智能等,提取水灾发生前、发生时和发生后信息特征,感知矿井水灾,并判定引发水灾的水源,具有可靠性高的优点。

5 结论

(1) 水质监测法不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,该方法感知地表水和老空水引

发的矿井水灾准确率较高。基于时间的涌水量监测法具有准确率高的优点,但部署复杂、实时性差。基于流速的涌水量监测法具有操作简单、实时性好等优点,但测量误差较大。水温监测法不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,但不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。气温监测法具有简单、方便等优点,但受煤炭自燃等矿井火灾、瓦斯与煤尘爆炸、地面气温、矿井通风量、井下设备开停、井下作业人员数量等影响,不适用于矿井水灾水源温度与正常矿井涌水温度差异较小的水灾感知。湿度监测法具有简单、方便等优点,但受地面空气湿度和温度、矿井通风量、煤炭自燃等矿井火灾等影响。通过水位监测法可及时掌握地表水和地下水水源变化,但在传感器布置前,需探明老空水位置等,限制了水位监测法的应用。

(2) 电阻率监测法具有响应快、灵敏度高等优点,但准确率受采掘环境影响大,电极布置困难。应力监测法具有实时性好的优点,但受煤与瓦斯突出、冲击地压等影响,需与其他矿井水灾感知方法配合使用。微震监测法具有实时性好的优点,但受煤与瓦斯突出、冲击地压等影响,需与其他矿井水灾感知方法配合使用。

(3) 水文钻孔法具有信息量大的优点,但需与其他矿井水灾感知方法配合使用。

(4) 基于图像监测的矿井水灾感知方法具有非接触、实时快速、监测范围广、部署与安装简单、成本低、使用维护方便等优点。

(5) 基于图像的大数据矿井水灾感知与水源判定方法同时监测矿井水、导水通道和水源,不但可感知矿井水灾,还可判定引发水灾的水源,具有可靠性高的优点。

参考文献(References):

[1] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1925-1929.
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(11):1925-1929.

[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. 煤矿安全生产理念研究[J]. 煤炭学报,2011,36(2):313-316.
SUN Jiping. Research on coal-mine safe production conception[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):313-316.

[5] 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.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):112-116.

[6] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展[J]. 煤炭科学技术,2016,44(1):19-23.
SUN Jiping. New technology and development of mine informatization and automation[J]. Coal Science and Technology,2016,44(1):19-23.

[7] 武强,赵苏启,董书宁,等. 煤矿防治水手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013.

[8] 周健,史秀志,王怀勇. 矿井突水水源识别的距离判别分析模型[J]. 煤炭学报,2010,35(2):278-282.
ZHOU Jian, SHI Xiuzhi, WANG Huaiyong. Water-bursting source determination of mine based on distance discriminant analysis model[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(2):278-282.

[9] 朱雷. 矿井涌水量观测的几种简单方法[J]. 煤炭技术,2007,26(1):86-87.
ZHU Lei. Several simple methods of observing quantity of water gush[J]. Coal Technology,2007,26(1):86-87.

[10] 马雷,钱家忠,赵卫东. 基于 GIS 和水质水温的矿井突水水源快速判别[J]. 煤田地质与勘探,2014,42(2):49-53.
MA Lei, QIAN Jiazhong, ZHAO Weidong. An approach for quickly identifying water-inrush source of mine based on GIS and groundwater chemistry and temperature[J]. Coal Geology & Exploration,2014,42(2):49-53.

[11] 刘飞. 高密度电阻率法正反演数值模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.

[12] 刘斌,李术才,聂利超,等. 矿井突水灾变过程电阻率约束反演成像实时监测模拟研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1722-1731.
LIU Bin, LI Shucai, NIE Lichao, et al. Research on simulation of mine water inrush real-time monitoring of using electrical resistivity constrained inversion imaging method[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(10):1722-1731.

[13] 鲁晶津. 煤矿井下含/导水构造三维电阻率反演成像技术[J]. 煤炭学报,2016,41(3):687-695.
LU Jingjin. 3D electrical resistivity inversion and

- imaging technology for coal mine water-containing/
water-conductive structures[J]. Journal of China Coal
Society, 2016, 41(3): 687-695.
- [14] 孙建, 王连国. 基于微震信号突变分析的底板断层突
水预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1404-1410.
SUN Jian, WANG Lianguo. Floor fault water-inrush
prediction based on catastrophe analysis of micro-
seismic signals [J]. Journal of China Coal Society,
2013, 38(8): 1404-1410.
- [15] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤
矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增
刊 1): 83-96.
- LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic
monitoring technique and its applications at coal
mines: present status and future prospects [J].
Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83-96.
- [16] 王斌. 中国地质钻孔数据库建设及其在地质矿产勘查
中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.