

文章编号:1671-251X(2020)09-0033-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020040016

煤矿瓦斯抽采管网系统自更新检漏技术研究

熊伟^{1,2}

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037;

2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037)



扫码移动阅读

摘要:煤矿井下工作环境恶劣,瓦斯抽采管道易受到碰撞、落煤坠砸等损伤而造成漏气,当巷道内空气大量进入管网系统后,管网内瓦斯抽采浓度可能远低于钻孔孔口浓度。针对该问题,提出了一种基于多元高斯声束模型的煤矿瓦斯抽采管网系统自更新检漏技术。采用多元高斯声束模型对漏气点声音进行加强处理,并分析煤矿井下抽采管网系统的主要漏气类型和噪声来源,建立漏气模型和噪声模型;将采集的声音样本与预存模型进行比对,判断是否存在漏气现象,并将使用环境中出现频率超过30%的声音样本自动存储为漏气模型,实现模型的自动更新,提高检漏准确性;基于自更新检漏技术研发了YJL40检漏仪,其主要部件包括探测头、金属软管、主机和报警器。利用自更新检漏技术及相应产品对高家庄煤矿的高、低负压抽采系统共计7585 m管道进行检漏,将检测出的漏气点进行有效封孔后,抽采终端瓦斯体积分数分别提高了37.1%和28%,验证了自更新检漏技术的有效性。

关键词:瓦斯抽采管网;瓦斯抽采浓度;自更新检漏技术;多元高斯声束模型;漏气模型;噪声模型;检漏仪

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Research on self-renewing leakage detection technology of coal mine
gas drainage pipe network system

XIONG Wei^{1,2}

(1. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China; 2. State Key Laboratory of the
Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China)

Abstract: Working environment in underground coal mine is harsh, and gas drainage pipelines are vulnerable to collision, coal falling and other injuries, resulting in gas leakage. When a large amount of air in tunnel enters pipe network system, the concentration of gas drainage in pipe network may be much lower than the concentration at the drilling hole. For the above problems, a self-renewing leakage detection technology of coal mine gas drainage pipe network system based on multi-Gaussian beam model was proposed. Multi-Gaussian beam model is adopted to strengthen the processing of the sound of the leakage points, main leakage types and noise sources of underground gas drainage pipe network system are analyzed, and leakage model and noise model are established. The collected sound samples are compared with pre-stored models to determine whether there is gas leakage, and the sound samples that occur more

收稿日期:2020-04-06;修回日期:2020-08-21;责任编辑:胡娴。

基金项目:“十三五”科技重大专项项目(2016ZX05067004-004,2016ZX05043005-003);中煤科工集团企业科技创新创业资金专项项目(2018QN005,2019-TD-QN038)。

作者简介:熊伟(1986—),男,四川自贡人,副研究员,硕士,主要从事煤层气开发方面的研究工作,E-mail:xiongwei_sczg@163.com。

引用格式:熊伟.煤矿瓦斯抽采管网系统自更新检漏技术研究[J].工矿自动化,2020,46(9):33-37.

XIONG Wei. Research on self-renewing leakage detection technology of coal mine gas drainage pipe network system[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 33-37.

than 30% in the use environmen are automatically stored as gas leakage models to realize automatic model update and improve leakage detection accuracy. YJL40 leakage detector is developed based on self-renewing leakage detection technology, its main components include probe, metal hose, host and alarm. Self-renewing leakage detection technology and corresponding products are applied in high and low negative pressure drainage system in Gaojiazhuang Coal Mine for leakage detection of totals 7 585 m of pipelines, after the detected leakage points are effectively sealed, the gas volume fraction in drainage terminal is increased by 37.1% and 28% respectively, verifying the effectiveness of the self-renewing leakage detection technology.

Key words: gas drainage pipe network; concentration of gas drainage; self-renewing leakage detection technology; multi-Gaussian beam model; gas leakage model; noise model; leakage detector

0 引言

我国煤矿瓦斯灾害十分严重,且随着开采深度和强度的增加,瓦斯防治难度日益加大,给煤矿安全生产带来新的挑战^[1-2]。利用抽采泵组提供负压动力,将煤层中的瓦斯通过管网系统输送至地面进行排空或有效利用,是我国进行瓦斯治理的主要手段^[3]。同时,瓦斯是一种高效、清洁的绿色能源,对其进行合理利用,能够优化我国能源结构,缓解环境压力^[4]。但目前瓦斯抽采效果并不理想,抽采系统内瓦斯体积分数普遍低于 30%^[5],有的甚至处于 5%~16% 的爆炸范围内,不仅增大了瓦斯利用成本,还存在很大的安全隐患。研究人员对如何提高瓦斯抽采浓度展开了大量研究,形成了包括密集钻孔、预裂爆破、水力增透等提高煤层透气性的技术措施,有效提高了煤层透气性^[6-7];研发了“两堵一注”封孔工艺和装备^[8-9],提高了钻孔孔口瓦斯抽采浓度。

煤矿井下瓦斯抽采管路沿巷道敷设,由 3~5 m 的管道连接为总长 10 km 左右的管网系统,管道之间主要用法兰盘连接。由于井下工作环境恶劣,抽采管道易受到碰撞、落煤坠砸等损伤而造成漏气,当巷道内空气大量进入管网系统后,管网内瓦斯抽采浓度可能远低于钻孔孔口浓度。因此,开展高效、精准的瓦斯抽采管网检漏技术研究,对管网进行准确堵漏和维护,是瓦斯利用和矿井安全生产的技术保障,具有重要意义。

目前我国仅有少数科研人员对抽采管路检漏技术进行了探索性研究^[10],但在煤矿井下特殊工作条件下,由于有限空间内不同声波相互叠加、抵消等影响,导致目标声波获取困难,加之检测技术相对单一,检漏准确率无法得到有效保证。高斯声束模型建立在近轴近似的理论基础上,能够准确描述外近半场区和远场的声场分布。多元高斯声束模型由若干单个高斯声束叠加而成,以满足声场边界条件。本文将多元高斯声束模型应用到瓦斯抽采管路检漏中,利用多元高斯模型对漏气点声音进行提取和加强处理,降低有限空间内同时传播的多种声源的干

扰,得到准确的声音样本;将声音样本与预存模型比对,判断是否漏气;将实际应用中出现频率高的声音模型自动加入噪声模型库,实现模型的自更新,使检漏技术具有更强的适用性和准确性。

1 瓦斯抽采管网检漏原理及模型

1.1 瓦斯抽采管网检漏原理

瓦斯抽采时,若管网某处存在漏气点,则巷道内空气在负压作用下进入管道中。因为漏气孔尺寸远小于管道及巷道的尺寸,且管道内外压差较大,所以漏气点附近流体出现旋涡、脉动等不稳定流动现象,而因此产生的部分能量以热量形式耗散在流体介质中,其余能量转化为声波形式在巷道中传播。漏气检测过程如下:气体扰动→声波产生→在空气中传播→进入检测设备→判断是否漏气,如图 1 所示。

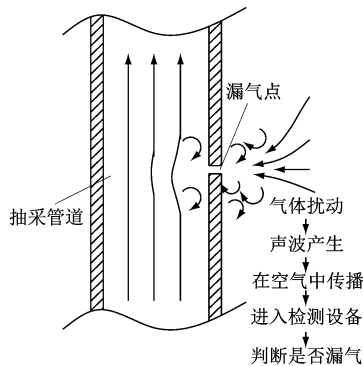


图 1 瓦斯抽采管网漏气检测过程

Fig. 1 Gas leakage detection process of gas drainage pipe network

1.2 漏气模型

瓦斯抽采时,需将钻孔用封孔管连接到汇流装置,为了监测抽采参数变化情况,在钻孔与汇流装置之间会加装导流管。这一部分管道连接主要采用扩口对接方式,即连接处一端的管道外径基本等于另一端管道的内径,将 2 段管道插入后用胶水或铁丝等捆绑固定。汇流装置另一端与抽采支管连接,抽采支管再通过法兰盘与抽采主管连接,形成瓦斯抽采管网系统。瓦斯抽采管道连接方式及主要漏气点如图 2 所示。

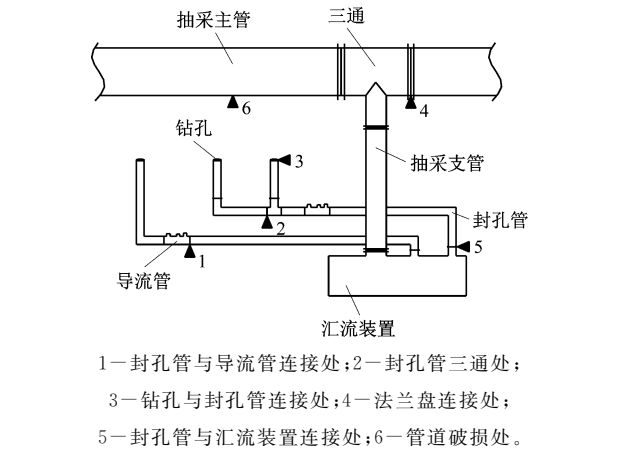


图2 瓦斯抽采管道连接方式及主要漏气点

Fig. 2 Connection mode of gas drainage pipeline and main gas leakage points

瓦斯抽采管网系统中主要存在如图2所示的6种漏气点。其中封孔管与导流管连接处、封孔管三通处、钻孔与封孔管连接处、封孔管与汇流装置连接处的连接方式都是插入式管道连接,漏气通道主要存在于小管道的外壁和大管道内壁之间,因此,这些位置漏气产生的声波基本相同,可划分为同类漏气模型。而长达几千米甚至十几千米的抽采主管、支管大多采用法兰盘连接,由于煤矿井下工作环境复杂,管道易受到击穿等损害,形成孔眼,造成漏气。因此,瓦斯抽采管网系统的主要漏气现象可分为管路插接漏气、法兰盘漏气和管道破损漏气,建立这3种漏气模型进行预存储。

1.3 主要噪声模型

瓦斯抽采管网系统敷设在巷道中,而巷道中还要开展运输、通风、采掘等工作,因此,井下声音来源种类较多。各种声音在狭小空间内同时传播并互相扰动,会对检漏准确性造成影响。因此,需对井下主要噪声进行分析和处理,降低对检漏结果的不利影响,井下巷道中存在的主要噪声如下。

(1) 人声噪声。在同一时间,大多矿井的井下工作人员在200人以上,进行检漏工作时,检测设备不可避免地会采集到工作人员声音,甚至检测人员自身也会发出声音,影响瓦斯抽采管网系统检漏的准确性。因此,人声是井下常见的一种噪声。

(2) 设备机械噪声。煤矿井下安装有采煤机、局部通风机、带式输送机、钻机等大功率机械设备,这些设备都处于长时间持续工作状态,噪声等级均较高。以局部通风机为例,其噪声一般为90~120 dB(A)^[11],随着功率和使用时间增加,噪声等级会进一步增高。局部通风机使用1 a后,噪声升高约10~15 dB(A);使用时间超过5 a后,噪声可达120~140 dB(A);若未及时维护、保养,导致局部通

风机变形,则噪声等级会更高^[12]。

(3) 金属碰撞噪声。煤矿井下运输系统产生的金属碰撞噪声最多。刮板输送机和胶带运输系统的噪声一般为90~106 dB(A)^[13],尤其是空载时,由于链条、刮板、胶带滚轮等部件质量分布不均匀及中部槽结合不平整,在运行速度相对较快的情况下,噪声会显著增大。井下矿车运行时与轨道连接处碰撞所产生的噪声也十分明显。

(4) 气体动力噪声。煤矿井下巷道中持续不断地存在空气流动,由于巷道断面十分粗糙,尤其是在巷道交叉点和某些通风构造物位置处,气流波动可能产生明显的空气动力性噪声。部分矿井在掘进工作中采用炸药爆破,虽然放炮时间短,但其产生的巨大冲击波传播距离远,噪声等级也较高。

2 自更新检漏技术及装备

2.1 自更新检漏技术

通过检测设备采集井下声音,用多元高斯声束对原始声音进行加强处理后形成清晰的声音模型,采用声波分频等技术进行处理,得到多个声音样本。将所得声音样本分别与预存的漏气模型和噪声模型进行比对,若与漏气模型匹配即可判断为漏气,发出声光报警信号,提示该检测点漏气。如果声音样本与漏气模型和噪声模型均不匹配,则存储该样本,并将出现频率超过30%的声音样本自动存储为噪声模型,以保证检漏技术在不同矿井环境下均有很高的准确率。自更新检漏技术流程如图3所示。

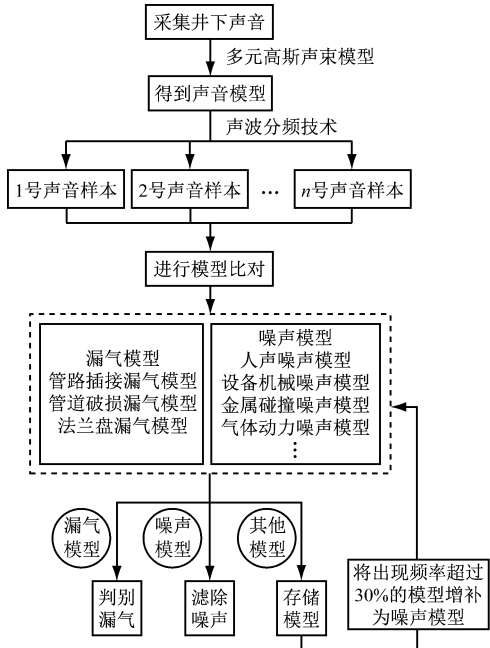


图3 自更新检漏技术流程

Fig. 3 Process of self-renewing leakage detection technology

2.2 多元高斯声束模型

J. Wen 等^[14]在近轴近似的理论基础上,基于赫姆霍兹波动方程提出了多元高斯声束模型的概念,即采用多个高斯声束叠加的方法近似一个圆盘声源辐射声场,并且仅用 10 个 Wen and Breazeale 系数就可获得较好的近似效果。文献[15]将 Wen and Breazeale 系数增加到 15 个,进一步提高了模拟结果的准确性。

由于瓦斯抽采管网系统漏气点尺寸相对较小,难以发现,可用 circ 二元函数描述声波在无穷大不透明屏上半径为 1 的圆孔中的透过率。管道破损形成的漏气点可简化成圆盘声源,其不可分离变量的 circ 二元函数为

$$\text{circ}(\rho^2/r^2) = \sum_{n=1}^{15} A_n \exp(-B_n \rho^2/r^2) \quad (1)$$

式中: ρ 为传播介质密度, kg/m^3 ; r 为圆盘声源的半径, m ; A_n, B_n 为圆盘声源的 Wen and Breazeale 系数,具体取值见表 1,其中 i 表示虚部。

表 1 Wen and Breazeale 系数

Table 1 Wen and Breazeale factors

n	A_n	B_n
1	$-2.971\,6+8.618\,7i$	$4.186\,9-5.516\,0i$
2	$-3.481\,1+0.968\,7i$	$3.839\,8-10.800\,4i$
3	$-1.398\,2-0.812\,8i$	$3.435\,5-16.352\,8i$
4	$0.077\,3-0.330\,3i$	$2.461\,8-27.713\,4i$
5	$2.879\,8+1.610\,9i$	$5.469\,9+28.631\,9i$
6	$0.125\,9-0.095\,7i$	$1.983\,3-33.288\,5i$
7	$-0.264\,1-0.672\,3i$	$2.933\,5-22.015\,1i$
8	$18.019\,0+7.829\,1i$	$6.303\,6+36.777\,2i$
9	$0.051\,8+0.018\,2i$	$1.304\,6-38.465\,0i$
10	$-16.943\,8-9.938\,4i$	$6.588\,9+37.068\,0i$
11	$0.370\,8+5.452\,2i$	$5.551\,8+22.425\,5i$
12	$-6.692\,9+4.072\,2i$	$5.401\,3+16.732\,6i$
13	$-9.363\,8-4.999\,8i$	$5.149\,8+11.124\,9i$
14	$1.587\,2-15.421\,2i$	$4.966\,5+5.685\,5i$
15	$19.002\,4+3.685\,0i$	$4.629\,6+0.305\,5i$

管件插接、法兰盘对接等位置密封不严形成的漏气点可用矩形声源模型进行描述,其 circ 二元函数为

$$\text{circ}(x_1^2/a^2)\text{circ}(y_1^2/b^2) = \sum_{n=1}^{15} \sum_{q=1}^{15} A_n A_q \exp[-B_n x_1^2/a^2 - B_q y_1^2/b^2] \quad (2)$$

式中: x_1 和 y_1 分别为探头中心位置在 x, y 坐标轴(分别平行于矩形声源的长边和短边)上的坐标(图 4); $m; a$ 和 b 为矩形探头长和宽的 $1/2, \text{m}$; $A_q,$

B_q 为矩形声源的 Wen and Breazeale 系数,其值分别与 A_n, B_n 相同。

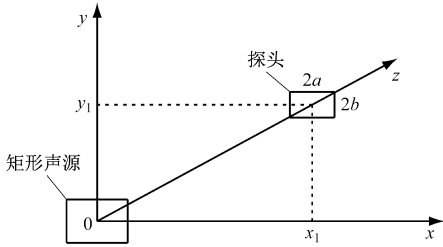


图 4 声源与探头位置

Fig. 4 Location of sound source and probe

将 circ 二元函数代入沿 z 方向(由声源中心点指向探头中心点)的传播波动方程,得到声压近轴近似的波动方程:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + 2i \cdot k \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中: P 为声压, Pa ; k 为传播常数。

求解式(3)可得声压的高斯声束形式:

$$P = P(z) \exp\left(\frac{i \cdot \omega}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{M}(z) \mathbf{X}\right), \mathbf{X} = [x, y]^T \quad (4)$$

式中: $P(z)$ 为复数标量; ω 为角频率, rad/s ; $\mathbf{M}(z)$ 为 2×2 阶的复数对称矩阵。

通过多元高斯声束模型对声音进行修复加强,可提高声音识别准确度。

2.3 YJL40 检漏仪

YJL40 检漏仪是基于自更新检漏技术研发的一种本安型设备,主要部件包括探测头、金属软管、主机和报警器,如图 5 所示。连接探测头与主机的金属软管可以任意弯曲、拉伸,满足不同空间条件下的抽采管网系统检测需求;而由红色显示灯与蜂鸣器组成的报警系统,确保了操作人员能够及时发现漏气点位置并进行堵漏处理。YJL40 检漏仪具有携带方便、操作简单、准确率高、适用范围广等特点。

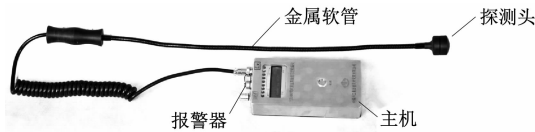


图 5 YJL40 检漏仪

Fig. 5 YJL40 leakage detector

3 现场应用

山西省中阳荣欣焦化有限公司高家庄煤矿生产能力为 3.0 Mt/a , 目前主采 2 号煤层, 瓦斯含量为 $10.76 \text{ m}^3/\text{t}$, 相对瓦斯涌出量最大值为 $29.04 \text{ m}^3/\text{t}$, 属于高瓦斯矿井。该煤矿目前有高负压抽采系统和低负压抽采系统各 1 套, 2 套系统独立运行, 系统的主管、支管均由直径为 $325 \sim 820 \text{ mm}$ 的无缝钢管组

成,主管和支管总长度为 7 585 m。该煤矿存在明显的抽采钻孔孔口瓦斯浓度高、抽采终端浓度低的情况:高负压抽采系统孔口平均瓦斯体积分数达到 45%,而抽采终端瓦斯体积分数仅为 14%左右;低负压抽采系统孔口平均瓦斯体积分数为 26%左右,而抽采终端瓦斯体积分数降至 5%。可见,在抽采管网系统输送过程中,瓦斯抽采浓度存在明显衰减。

对高家庄煤矿抽采管网系统进行巡检,并对检测出的漏气点实施封堵处理。在钻孔与封孔管连接处、导流管连接处、法兰盘连接处及回风桥等位置检测出漏气点共 52 处,漏气点分布如图 6 所示。在抽采管网不同位置检测出漏气点,表明自更新检漏技术适用范围广。

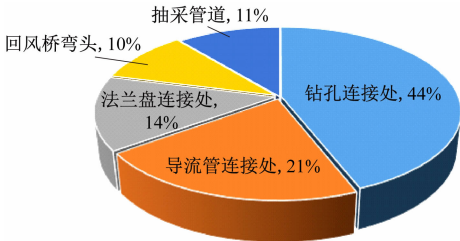


图 6 漏气点分布

Fig. 6 Distribution of gas leakage points

为进一步考察自更新检漏技术的应用效果,当检漏堵漏工作完成并待抽采系统稳定后,对高家庄煤矿抽采管网瓦斯浓度进行监测,结果如图 7 所示。在钻孔孔口平均瓦斯浓度保持基本不变的情况下,高负压抽采系统终端处瓦斯抽采体积分数提高到 19.2%,提高比例为 37.1%;低负压抽采系统终端处瓦斯抽采体积分数升高至 6.4%,提高比例为 28%,高、低负压抽采系统内的瓦斯抽采浓度均明显升高。

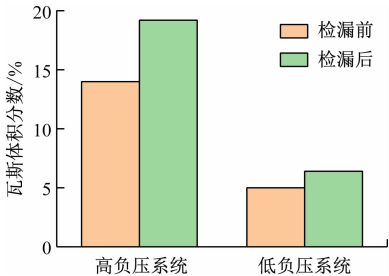


图 7 检漏前后瓦斯抽采体积分数对比

Fig. 7 Comparison of gas drainage volume fraction before and after leakage detection

4 结论

(1) 采用高斯声束模型对瓦斯抽采管网系统检漏设备所采集的声音进行处理,降低了巷道复杂环境中多种声音同时传播所产生的扰动对检漏结果的影响。

(2) 分析了煤矿井下抽采管网主要漏气原因并

建立了漏气模型,将井下声音样本与预存模型进行比对,将出现频率超过 30%的声音样本补充为该矿井的噪声模型,实现模型的自更新,以提高检漏准确性。

(3) 基于自更新检漏技术研发了 YJL40 检漏仪,对高家庄煤矿高、低负压抽采系统进行检漏,在封堵漏气点后,抽采终端瓦斯体积分数分别提高了 37.1%和 28%,验证了基于多元高斯声束模型的瓦斯抽采管网系统自更新检漏技术的有效性。

参考文献(References):

[1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.

[2] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.

[3] 林柏泉.矿井瓦斯防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.
LIN Baiquan. Theory and technology of mine gas prevention and control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.

[4] 刘桂凤,皮希宇,王栓林,等.瓦斯抽采与利用技术的现状分析[J].煤炭与化工,2015,38(3):5-8.
LIU Guifeng, PI Xiyu, WANG Shuanlin, et al. Status analysis of gas extraction and utilization technology [J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(3): 5-8.

[5] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J].煤炭学报,2014,39(8):1391-1397.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.

[6] 袁亮.松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M].北京:煤炭工业出版社,2004.
YUAN Liang. Theory and technology of gas drainage in soft and low permeability coal seams[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.

[7] 张永将,黄振飞,李成成.高压水射流环切割缝自卸压

- 机制与应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3016-3022.
ZHANG Yongjiang, HUANG Zhenfei, LI Chengcheng. Investigation and application of high pressure water jet annularity slotting self pressure release mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3016-3022.
- [8] 刘延保,熊伟. 顺层瓦斯抽采钻孔封孔提浓技术及应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 63-66.
LIU Yanbao, XIONG Wei. Hole-sealing and gas concentrating technique for bedding gas extraction drilling hole and its application[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 63-66.
- [9] 陈学习,刘志强,庾雪娜. 煤层瓦斯抽采封孔技术现状分析[J]. 华北科技学院学报, 2016, 13(3): 1-6.
CHEN Xuexi, LIU Zhiqiang, TUO Xuena. Analysis of the present situation of hole sealing technology for coal seam gas drainage[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2016, 13(3): 1-6.
- [10] 刘延保. 煤矿瓦斯负压抽采管网检漏技术及现场应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(5): 156-159.
LIU Yanbao. Leakage detector technology of coal mine gas drainage pipeline and field application[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(5): 156-159.
- [11] 刘卫东,彩虹,崔玉芳,等. 某煤矿井下噪声危害现状调查[J]. 职业卫生与病伤, 2008, 23(6): 342-344.
LIU Weidong, DUO Caihong, CUI Yufang, et al. Investigation on current status of noise hazard in a coal mine [J]. Journal of Occupational Health and Damage, 2008, 23(6): 342-344.
- [12] 刘洋,于江勇. 浅谈降低井下局部扇风机噪音的方法[J]. 煤炭技术, 2001, 20(3): 54.
LIU Yang, YU Jiangyong. Talking about the method of dropping the noise of local fan underground [J]. Coal Technology, 2001, 20(3): 54.
- [13] 刘照鹏. 煤矿综采工作面噪声的分析[J]. 煤矿安全, 2004, 35(2): 30-33.
LIU Zhaopeng. Analysis for noise of fully-mechanized mining faces in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2004, 35(2): 30-33.
- [14] WEN J, BREAZEALE M. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1988, 83(5): 1752-1756.
- [15] SONG S, KIM C. Simulation of 3-D radiation beam patterns propagated through a planar interface from ultrasonic phased array transducers[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1/2/3/4/5/6/7/8): 519-524.