



文章编号:1671-251X(2020)06-0065-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019100051

# 煤矿综放工作面硫化氢动态运移规律研究

金永飞<sup>1,2</sup>, 许亚奇<sup>1,2</sup>, 刘荫<sup>1,2</sup>, 张典<sup>3</sup>, 郭军<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,  
陕西 西安 710054; 3. 陕西正通煤业有限责任公司, 陕西 咸阳 712000)



扫码移动阅读

**摘要:**针对目前煤矿综放工作面的硫化氢( $H_2S$ )浓度分布规律研究多采用单一手段、难以验证研究结果的可靠性等问题,以陕西某煤矿工作面为研究背景,运用 Fluent 软件构建数值模拟模型,研究了该工作面  $H_2S$  浓度分布及动态运移规律;在工作面进行测点布置,采用  $CD_4$  型气体检测仪对工作面空间内的  $H_2S$  浓度进行现场测定。数值模拟和现场测定结果均表明:在垂直方向,随着距底板高度增加, $H_2S$  浓度先增大后减小;在水平方向,随着与工作面煤壁距离增加, $H_2S$  浓度逐渐减小;在风流方向,随着与采煤机距离增加, $H_2S$  浓度逐渐减小。数值模拟结果与现场监测结果一致,验证了数值模拟方法的可行性,可为现场  $H_2S$  运移规律研究提供参考。

**关键词:**综放工作面;硫化氢动态运移规律;硫化氢浓度分布规律;硫化氢治理

中图分类号:TD711 文献标志码:A

## Research on dynamic movement law of hydrogen sulfide on fully mechanized caving face of coal mine

JIN Yongfei<sup>1,2</sup>, XU Yaqi<sup>1,2</sup>, LIU Yin<sup>1,2</sup>, ZHANG Dian<sup>3</sup>, GUO Jun<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and 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; 3. Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

**Abstract:** In view of problems such as difficulty in verifying reliability of research results, the single method is often used to study distribution law of hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) concentration on fully mechanized caving face of coal mine, taking a coal mine working face in Shaanxi as research background,  $H_2S$  concentration distribution and dynamic movement law of the working face is studied using Fluent software to build a numerical simulation model. Measurement points are arranged on the working face, and  $H_2S$  concentration on the working face is measured on site with a  $CD_4$  gas detector. Both numerical simulation and field measurement results show that in the vertical direction, as the height from the floor increases, the  $H_2S$  concentration first increases and then decreases; in the horizontal direction, as the distance from the coal wall of the working face increases, the  $H_2S$  concentration gradually decreases; in the wind flow

收稿日期:2019-10-24;修回日期:2020-05-28;责任编辑:胡娟。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0808201);中国博士后科学基金项目(2017M623209);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5080);陕西省重点研发计划项目(2017ZDCXL-GY-01-02-03)。

作者简介:金永飞(1975—),男,新疆米泉人,教授,博士,主要从事矿山安全与应急救援方面的教学与科研工作,E-mail:jinyongfei@xust.edu.cn。

引用格式:金永飞,许亚奇,刘荫,等.煤矿综放工作面硫化氢动态运移规律研究[J].工矿自动化,2020,46(6):65-71.

JIN Yongfei, XU Yaqi, LIU Yin, et al. Research on dynamic movement law of hydrogen sulfide on fully mechanized caving face of coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 65-71.

direction, as the distance from the shearer increases, the  $H_2S$  concentration gradually decreases. The numerical simulation results are consistent with the field monitoring results, verifying feasibility of the numerical simulation method and providing reference for the field  $H_2S$  movement law research.

**Key words:** fully mechanized caving face;  $H_2S$  dynamic movement law;  $H_2S$  concentration distribution law;  $H_2S$  treatment

## 0 引言

我国煤炭赋存较为丰富,长期以来,煤炭一直是我国的主要能源,且未来很长一段时间内依然如此<sup>[1-4]</sup>。随着煤炭开采工艺不断革新,原煤产量快速增长,开采深度不断增大,矿井硫化氢( $H_2S$ )危害也逐渐突出<sup>[5-6]</sup>。若处在  $H_2S$  浓度较低的空间中,人短时间内就会出现乏力、咽喉疼痛、头晕、意识不清晰等症状,时间过长则可能导致植物神经功能紊乱;若处在  $H_2S$  浓度较高的环境中,人短时间内就会出现脑水肿、肺水肿等症状<sup>[7]</sup>;若空间中  $H_2S$  浓度超过  $1\text{ g/m}^3$ ,会使人快速失去意识,严重威胁矿工的生命安全<sup>[8]</sup>。

近年来,学者们对煤矿  $H_2S$  的研究主要集中在成因<sup>[9-11]</sup>与防治<sup>[12-13]</sup>方面。工作面的  $H_2S$  动态分布和运移特征直接影响着  $H_2S$  治理的工艺参数和治理效率,这方面也有学者进行了相关研究,如刘奎<sup>[14]</sup>采用现场观测方法得到了  $H_2S$  在沿程方向及下风流断面上的分布规律;贾牛骏等<sup>[15]</sup>采用 COMSOL Multiphysics 软件分析了  $H_2S$  在不同风筒位置处的分布规律;蒋新军<sup>[16]</sup>通过现场观测并结合数值模拟,得到某煤矿工作面在下风流沿程方向的  $H_2S$  浓度分布规律。目前,对  $H_2S$  浓度分布规律的研究多采用单一手段,多手段结合的研究方法较少,难以验证研究结果的可靠性,充分体现其现场应用价值。

针对上述问题,本文以陕西某煤矿为研究背景,采用数值模拟方法研究综放工作面  $H_2S$  浓度分布及运移规律,并对现场观测数据与模拟结果进行相互验证,为  $H_2S$  高效治理提供理论依据和数据支持。

## 1 工作面概况

陕西某煤矿所处井田内共有 2 个煤层可以开采或局部可采,资源储量为 973.57 Mt,可采储量为 468.52 Mt,矿井可服务年限为 62.5 a。该矿 202 工作面对应地表主要为梁塬地形,地势西高东低。地面标高为 1 029.9~1 118.6 m。工作面底板标高为 +82.3~+160.4 m,回采长度为 1 138 m,宽度为 150 m,面积约为 170 700  $\text{m}^2$ ;开采延安组 4 煤层,

煤厚为 1.5~13.5 m(切眼终采线附近煤厚约为 3.0 m,终采线以外煤厚小于 3.0 m),均厚 10.4 m;倾角为 3~6°,平均倾角为 5°,预计可采储量为 114 万 t。在开采过程中,该工作面出现  $H_2S$  浓度过高现象,且随着工作面的动态采掘,工作空间中  $H_2S$  动态涌出,影响现场  $H_2S$  治理,威胁煤炭安全开采。

## 2 数值模拟研究

### 2.1 多孔介质设定

当多孔介质中有流体通过时,介质会对流体产生拦阻作用,产生动量消耗。通过 Fluent 软件模拟多孔介质中的流体流动时,动量消耗被称为源项。动量源项分为 2 个部分,一个为惯性阻力,另一个为黏性阻力。多孔介质的动量方程为

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (1)$$

式中: $S_i$  为  $x, y$  或  $z$  方向动量方程的源项,  $i=x, y, z$ ;  $D_{ij}, C_{ij}$  分别为黏性阻力项和惯性阻力项中给定的损失系数矩阵;  $\mu$  为采空区混合气体的动力黏度;  $j=1, 2, 3$ , 分别表示  $x, y, z$  方向,  $v_j$  为 3 个方向的速度分量;  $\rho$  为流体密度。

有些多孔介质结构均匀,组成简单,对于这类介质中的流体流动,其损失方程可简化为

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{e} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (2)$$

式中: $e$  为渗透率;  $C_2$  为内部阻力因子。

渗透率  $e$  一般通过卡尔曼公式来计算:

$$e = \frac{D_p^2 n^3}{180(1-n)^2} \quad (3)$$

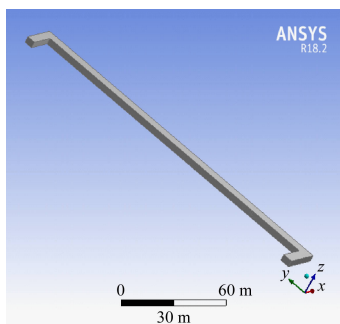
式中: $D_p$  为平均颗粒直径;  $n$  为介质孔隙率。

在进行数值模拟时,黏性阻力系数、惯性阻力系数及渗透率是计算多孔介质中流体流动问题的关键。渗透率可通过卡尔曼公式计算。工作面空间内气体的流动是一个稳态过程,流动形式呈层流流态,因此,工作面空间可表示为层流空间,孔隙率可设置为 1,黏性阻力系数和惯性阻力系数可忽略不计,设置为 0。

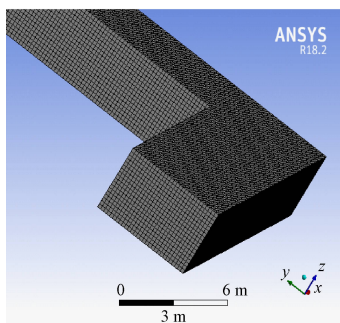
### 2.2 几何建模与网格划分

根据现场采煤机割煤空间条件、相关生产条件及  $H_2S$  涌出浓度等,建立  $H_2S$  扩散规律分析数值模型。模拟工作面长 150 m,宽 4 m,高 4 m;工作面

进风巷长 10 m,宽 6.1 m,高 4 m;回风巷道长 10 m,宽 5 m,高 4 m;采煤机滚筒直径为 1.7 m;将入口设置为速度入口(velocity inlet),风流方向为  $x$  轴方向,速度设为 1.3 m/s;计算得到气流水力直径为 4.8 m,气流温度根据工作面实际温度设置为 24 °C,湍流强度为 3.58。滚筒中心相对于采煤机中心垂直方向偏移 1.4 m,水平方向无偏移。 $H_2S$  从滚筒周围及其下方落煤区域产生(滚筒靠近顶板位置,直径为 1.7 m,遗煤位于靠近工作面底板处 3.4 m×1.5 m 的范围内)。进行模拟计算时,将煤体及滚筒周围位置看作稳定的  $H_2S$  气体产生源,取  $H_2S$  原始质量浓度为 516 mg/m<sup>3</sup>,出口边界设置为自由出流(outflow)。模型网格采用非结构化网格,网格边长设为 0.2 m。工作面模型及其网格划分如图 1 所示。



(a) 工作面模型



(b) 网格划分

图 1 工作面模型及其网格划分

Fig. 1 Working face model and its meshing

### 2.3 监测点布置

在采煤机割煤下风流断面、沿程方向及回风巷沿程的不同高度分别布置测点,测试各测点的  $H_2S$  浓度。在采煤机下风侧距离工作面 1,2,3 m 处分别布置  $A_1—A_4, B_1—B_4, C_1—C_4$  三组测点,同一类型测点间距为 5 m;在回风巷中心截面布置一组测点  $D_1—D_3$ ,各测点间距为 5 m。采煤机割煤时的测点布置如图 2 所示。

### 2.4 模拟结果分析

#### 2.4.1 工作面 $H_2S$ 浓度分布规律

通过数值模拟计算,得到煤层采动期间工作面的

$H_2S$  运移规律,其体积分数分布云图如图 3 所示。

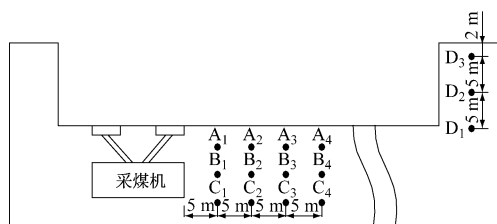


图 2 模拟工作面测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points on simulated working face

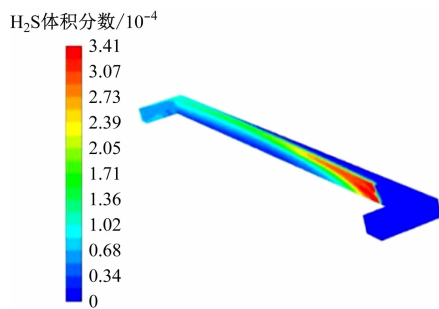


图 3 工作面  $H_2S$  体积分数分布云图

Fig. 3 Cloud chart of  $H_2S$  volume fraction distribution on working face

从图 3 可以看出,在采动落煤以后,由于风流浮力作用, $H_2S$  随巷道风流向巷道下风侧移动。随着与采煤机的距离增加,因  $H_2S$  气体比空气重,同一断面的  $H_2S$  体积分数呈现出由顶板向底板逐渐增加的分佈规律, $H_2S$  气体呈现出垂直向下积聚的规律,在回风巷和回风隅角出现紊乱并形成一定积聚。

采煤机采煤期间,下风流沿程方向的  $H_2S$  体积分数分布情况如图 4 所示,其中  $X$  表示在  $x$  方向上测点与进风巷进风口的垂直距离。下风流 5,10,15,20 m 横截面上的  $H_2S$  体积分数分布情况如图 5 所示,其中  $Y$  表示在  $y$  方向上测点与进风巷外侧煤壁的垂直距离。由图 4、图 5 可知:在下风流沿程方向,随着与采煤机距离的增加, $H_2S$  体积分数逐渐减小;随着沿程距离的增加,靠近煤壁侧的  $H_2S$  体积分数越来越小,同时远离煤壁的巷道截面处  $H_2S$  体积分数逐渐增加;受工作面风流扰动影响,采煤机

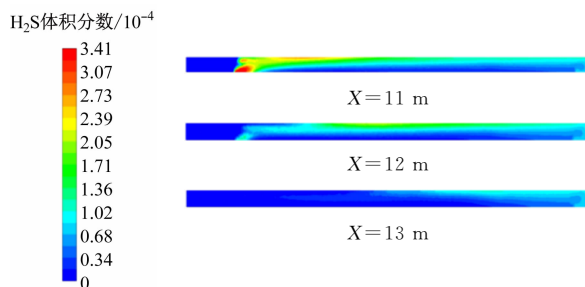


图 4 工作面不同距离处  $H_2S$  体积分数分布云图

Fig. 4 Cloud chart of  $H_2S$  volume fraction distribution in different distance of working face

滚筒割煤处产生的 H<sub>2</sub>S 在下风流断面上呈现出逐渐向人行道侧扩散的规律。

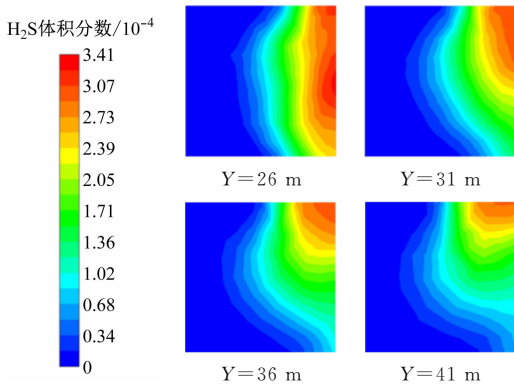
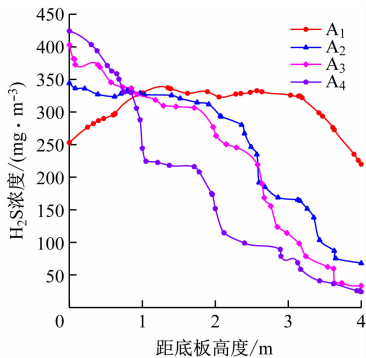


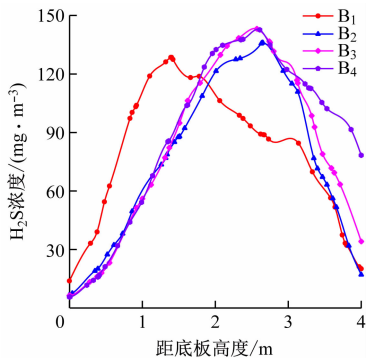
图 5 工作面不同截面处 H<sub>2</sub>S 体积分数分布云图

Fig. 5 Cloud chart of H<sub>2</sub>S volume fraction distribution in different sections of working face

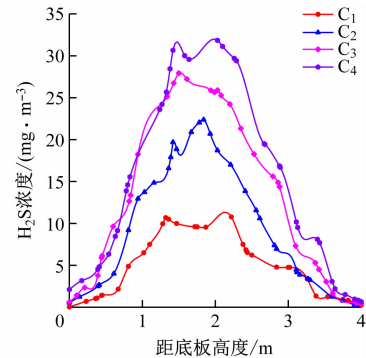
对模拟数据进行处理,得到采煤机下风侧距工作面煤壁不同距离处 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律,如图 6 所示。



(a) 距工作面煤壁 1 m



(b) 距工作面煤壁 2 m



(c) 距工作面煤壁 3 m

图 6 与工作面煤壁不同距离处各测点 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律  
Fig. 6 Distribution law of H<sub>2</sub>S at each measuring point at different distances from coal wall of working face

由图 6(a)可看出 A 组测点的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律:随着距底板高度增加,A<sub>1</sub> 测点的 H<sub>2</sub>S 浓度呈现出先增加后保持稳定再减小的趋势;A<sub>2</sub>—A<sub>4</sub> 测点的 H<sub>2</sub>S 浓度变化规律具有相似特点,即随着距底板高度增加,H<sub>2</sub>S 浓度逐渐减小,且与采煤机距离越小,H<sub>2</sub>S 浓度越高,最高点距底板处。

由图 6(b)可看出 B 组测点的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律:各测点的 H<sub>2</sub>S 浓度变化规律具有相似特点,随着离底板高度增加,呈现出先增加后减小的趋势;B<sub>1</sub> 测点的 H<sub>2</sub>S 浓度峰值在距底板约 1.4 m 处;B<sub>2</sub>—B<sub>4</sub> 测点的峰值在距底板约 2.5 m 处,且在达到峰值前,3 组测点的 H<sub>2</sub>S 浓度变化规律基本一致,达到峰值后,距采煤机越远的测点处 H<sub>2</sub>S 浓度越高。

由图 6(c)可看出 C 组测点的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律:各测点在变化规律上具有一致性,随着离底板高度增加,H<sub>2</sub>S 浓度表现出先升高后降低的趋势;H<sub>2</sub>S 浓度峰值基本保持在高度为 1.8 m 的位置,说明在工作面采动过程中,H<sub>2</sub>S 气体逐渐向巷道行人侧扩散。

### 2.4.2 回风巷 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律

通过在回风巷布置的 D 组测点分析 H<sub>2</sub>S 气体在回风隅角和回风巷中的运移规律,模拟结果及各测点 H<sub>2</sub>S 浓度变化规律如图 7、图 8 所示。

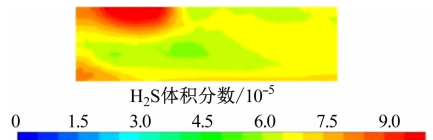


图 7 回风巷中截面 H<sub>2</sub>S 体积分数分布云图

Fig. 7 Cloud chart of H<sub>2</sub>S volume fraction distribution in cross section of return air roadway

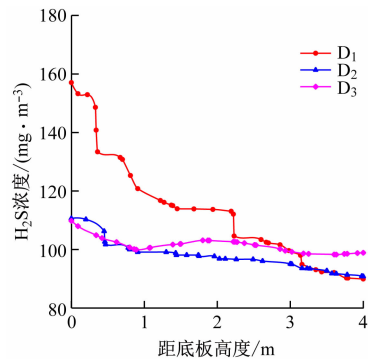


图 8 回风巷各测点 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律

Fig. 8 H<sub>2</sub>S concentration distribution law of each measuring point in return air roadway

从图 7、图 8 可看出,在工作面回风隅角处(D<sub>1</sub> 测点)形成了 H<sub>2</sub>S 气体积聚层,H<sub>2</sub>S 浓度随着高度的增加而逐渐减小,回风巷中(D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> 测点)H<sub>2</sub>S 体积分数随高度增加而略微减小,基本保持恒定。

### 3 现场监测分析

#### 3.1 现场监测点布置

在采煤过程中,采用 CD<sub>4</sub> 型气体检测仪对工作面空间内的 H<sub>2</sub>S 浓度进行测定。气体检测仪如图 9 所示,其基本参数见表 1,其中 LEL 指爆炸下限。

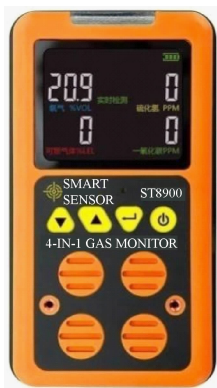


图 9 CD<sub>4</sub> 型气体检测仪

Fig. 9 CD<sub>4</sub> gas detector

表 1 CD<sub>4</sub> 型气体检测仪基本参数

Table 1 Basic parameters of CD<sub>4</sub> gas detector

项目	技术参数
检测种类	CO, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, LEL
测量范围	CO: 0~1 500 mg/m <sup>3</sup>
	O <sub>2</sub> : 0~30%
	H <sub>2</sub> S: 0~750 mg/m <sup>3</sup>
	LEL: 100%
分辨率	CO: 1.5 mg/m <sup>3</sup>
	O <sub>2</sub> : 0.1%
	H <sub>2</sub> S: 1.5 mg/m <sup>3</sup>
	LEL: 1%
工作电源	DC3.6 V, 1 800 mA·h 镍锌电池组
防爆型式	Exibd I
工作湿度	15%~95% RH
工作温度	-10~50 °C

测点布置情况如下:

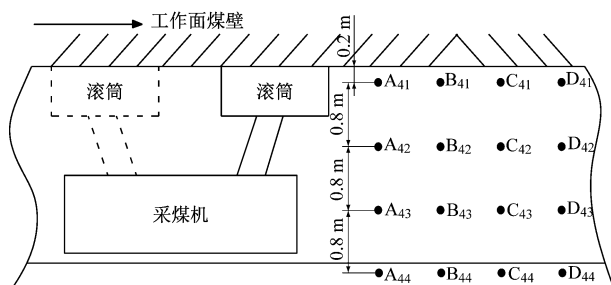
(1) 采煤机采煤时, H<sub>2</sub>S 涌出, 随着风流的流动, H<sub>2</sub>S 逐渐运移扩散。在风流方向, 与割煤机的距离不同, H<sub>2</sub>S 浓度也不相同, 故在采煤机下风流方向 5, 10, 15, 20 m 等位置设置测站, 编号为 A, B, C, D。

(2) 因为 H<sub>2</sub>S 气体比空气重, 同一断面不同高度处 H<sub>2</sub>S 浓度不同, 故从距离底板 1 m 处开始每隔 0.7 m 布置测点。

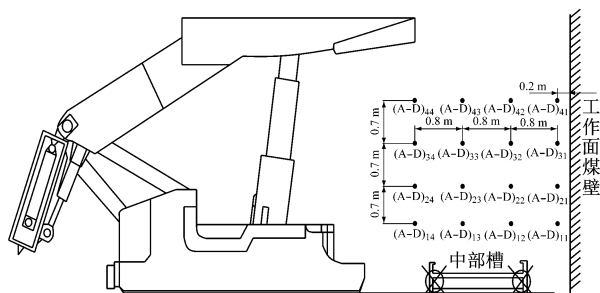
(3) 采煤机采煤时, 煤体释放出其中的 H<sub>2</sub>S, 受扩散因素影响, 在水平方向的煤壁与支架之间 H<sub>2</sub>S

浓度有所不同, 故从距离煤壁 1 m 处开始每隔 0.8 m 布置测点。

工作面 H<sub>2</sub>S 浓度测点布置如图 10 所示<sup>[14]</sup>。



(a) 风流沿程方向测点布置



(b) 采煤机割煤时测点布置

图 10 工作面 H<sub>2</sub>S 浓度测点布置

Fig. 10 Layout of H<sub>2</sub>S concentration measuring points on working face

为了使测点的空间位置更加明确, 借助三视图方法对测点布置进行说明, 以从支架处观察为主视图, 从进风方向观察为左视图, 从顶板处观察为俯视图, 测点的空间位置如图 11 所示。

#### 3.2 测定结果分析

对测定结果进行统计分析, 得到风流方向(即距采煤机 5, 10, 15, 20 m 处)、工作面水平方向(即距工作面煤壁 1, 1.8, 2.6, 3.4 m 处)及工作面垂直方向(即距底板 1, 1.7, 2.4, 3.1 m 处)的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律。结合现场测定结果及文献<sup>[14]</sup>可知, 在顺风割煤和逆风割煤 2 种情况下, 仅 H<sub>2</sub>S 浓度不同, 但浓度分布规律相同, 故只选取顺风割煤情况下的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律进行研究, 如图 12 所示。

由图 12 可看出: 在距离工作面煤壁 1 m 处, 随着距底板高度增加, 由于 H<sub>2</sub>S 气体比空气重, 出现沉降现象, H<sub>2</sub>S 浓度呈现出减小的趋势; 随着与工作面煤壁的距离增加, 由于前部中部槽运煤射流及风流浮力等作用, 并结合沉降因素, H<sub>2</sub>S 浓度呈现出先增大再减小的趋势; 工作面空间中的 H<sub>2</sub>S 主要是由于采煤机割煤导致煤体破碎后释放的, 经过工作面空间的扩散, 随着与工作面煤壁距离的增加, H<sub>2</sub>S 浓度逐渐减小; 在采煤机下风流方向, H<sub>2</sub>S 随风流逐渐扩散, 故 H<sub>2</sub>S 浓度随着与采煤机距离的增加而逐渐减小。现场测定结果与数值模拟结果相

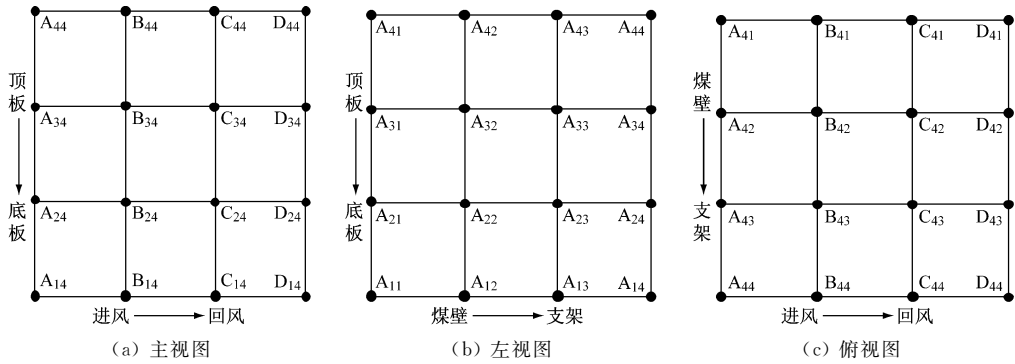


图 11 测点的空间位置

Fig. 11 Spatial positions of measuring points

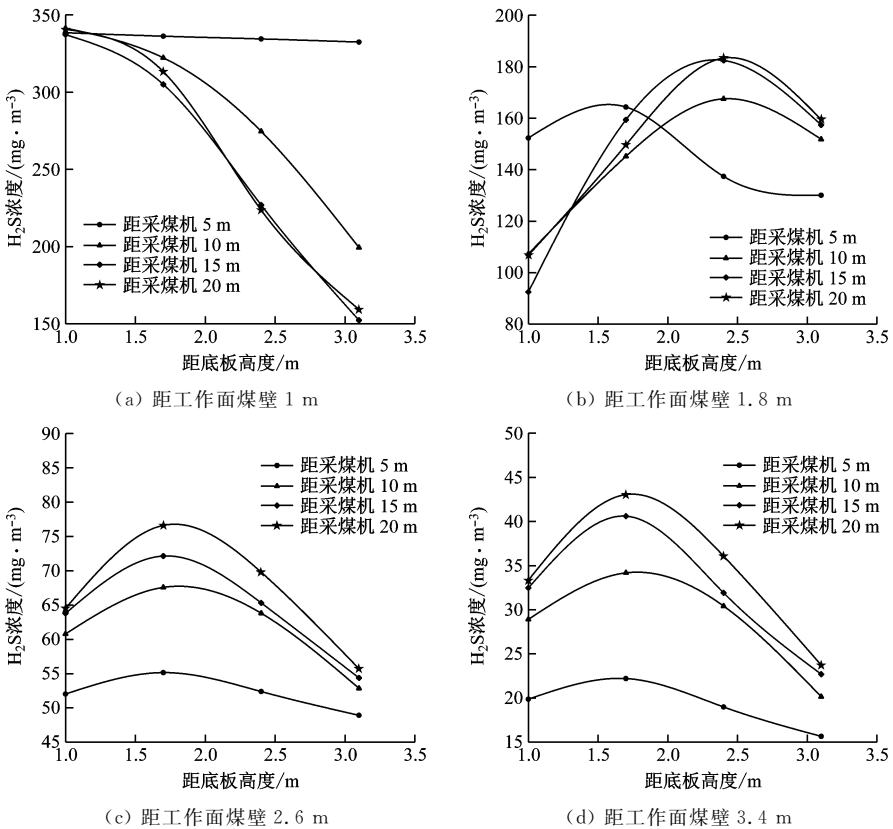


图 12 顺风割煤情况下的 H<sub>2</sub>S 浓度分布规律

Fig. 12 H<sub>2</sub>S concentration distribution law in the case of cutting coal downwind

近, H<sub>2</sub>S 动态运移规律一致, 验证了数值模拟结果的可靠性。

### 4 结论

(1) 以陕西某煤矿为研究背景, 根据现场情况构建几何模型、划分网格、设定参数, 运用 Fluent 模拟软件研究了煤矿综放工作面 H<sub>2</sub>S 动态运移规律。

(2) 通过数值模拟和现场测定, 得到了综放工作面 H<sub>2</sub>S 动态运移规律: 在垂直方向, 随着距底板高度增加, H<sub>2</sub>S 浓度先增大后减小; 在水平方向, 随着与工作面煤壁距离增加, H<sub>2</sub>S 浓度逐渐减小; 在风流方向, 随着与采煤机距离增加, H<sub>2</sub>S 浓度逐渐减小。

(3) 数值模拟结果与现场监测结果一致, 验证了数值模拟模型、参数设置的合理性和数值模拟方法的可行性, 可为现场 H<sub>2</sub>S 运移规律研究提供参考。

### 参考文献 (References):

[1] 金永飞, 郭军, 文虎, 等. 煤自燃高温贫氧化燃烧特性参数的实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 596-602.

JIN Yongfei, GUO Jun, WEN Hu, et al. Experimental study on the high temperature lean oxygen oxidation combustion characteristic parameters of coal spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 596-602.



- [2] GUO Jun, WEN Hu, ZHENG Xuezhao, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 126: 223-231.
- [3] 郑学召, 回顾, 文虎, 等. 矿井火灾孕灾机制及防控技术研究进展[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(10): 148-151.  
ZHENG Xuezhao, HUI Shuo, WEN Hu, et al. Research progress on preventing and controlling technology and disaster-forming mechanism of mine fire[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(10): 148-151.
- [4] 文虎, 郭军, 金永飞, 等. 我国矿井热动力灾害评价研究进展及趋势[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(3): 172-174.  
WEN Hu, GUO Jun, JIN Yongfei, et al. Progress and trend of evaluation study on coal mine thermodynamic disasters in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(3): 172-174.
- [5] 郭军, 岳宁芳, 金永飞, 等. 矿井热动力灾害救援安全性评价指标体系[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(7): 253-256.  
GUO Jun, YUE Ningfang, JIN Yongfei, et al. Evaluation index system for rescue safety of mine thermodynamic disasters[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(7): 253-256.
- [6] 林海飞, 张静非, 李树刚, 等. 煤矿硫化氢异常富集主控因素的广义灰色关联分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(6): 27-33.  
LIN Haifei, ZHANG Jingfei, LI Shugang, et al. Generalized grey relational analysis on main controlling factors for abnormal enrichment of hydrogen sulfide in coal mine[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(6): 27-33.
- [7] 孙维吉, 袁欣鹏, 梁冰, 等. 煤层注  $\text{NaHCO}_3$  溶液防治  $\text{H}_2\text{S}$  方法及效果研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(1): 104-108.  
SUN Weiji, YUAN Xinpeng, LIANG Bing, et al. Injecting  $\text{NaHCO}_3$  solution into coal seam to control hydrogen sulfide: method and effects [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(1): 104-108.
- [8] 蔡坤, 宋远成, 张晓贤, 崔庄煤矿硫化氢综合治理技术研究及应用[J]. *煤矿现代化*, 2016(2): 43-45.  
CAI Kun, SONG Yuancheng, ZHANG Xiaoxian. Research and application of comprehensive treatment technology of hydrogen sulfide in Cuizhuang Coal Mine[J]. *Coal Mine Modernization*, 2016(2): 43-45.
- [9] 邓奇根, 刘明举, 崔学锋, 等. 准噶尔盆地东南缘煤矿硫化氢成因研究[J]. *地学前缘*, 2017, 24(5): 395-401.  
DENG Qigen, LIU Mingju, CUI Xuefeng, et al. A study of hydrogen sulfide genesis in coal mine of southeastern margin of Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(5): 395-401.
- [10] LIU Mingju, DENG Qigen, ZHAO Fajun, et al. Origin of hydrogen sulfide in coal seams in China[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 668-673.
- [11] 刘明举, 李国旗, HANIM, 等. 煤矿硫化氢气体成因类型探讨[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(6): 978-983.  
LIU Mingju, LI Guoqi, HANIM, et al. Genesis modes discussion of  $\text{H}_2\text{S}$  gas in coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(6): 978-983.
- [12] ZHANG Chao, CHENG Renhui, LI Shugang, et al. Controls on hydrogen sulfide formation and techniques for its treatment in the Binchang Xiaozhuang Coal Mine, China[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(1): 266-275.
- [13] JIN Shuqing, DING Yongming, YAN Aihua, et al.  $\text{H}_2\text{S}$  management in 15 coal seam of Fenghuangshan Coal Mines [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1490-1494.
- [14] 刘奎. 综放工作面硫化氢分布规律及治理技术研究[J]. *矿业安全与环保*, 2016, 43(2): 13-18.  
LIU Kui. Study on distribution law and control technology of  $\text{H}_2\text{S}$  gas in fully mechanized caving face[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2016, 43(2): 13-18.
- [15] 贾牛骏, 贾宝山, 王洪达, 等. 综掘工作面硫化氢分布规律及其防治技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(12): 158-163.  
JIA Niujun, JIA Baoshan, WANG Hongda, et al. Study on distribution law and prevent and control technology of hydrogen sulfide in fully-mechanized driving face[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(12): 158-163.
- [16] 蒋新军. 急倾斜厚煤层采动时硫化氢涌出运移特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(增刊1): 139-142.  
JIANG Xinjun. Research on movement characteristics of hydrogen sulfide during mining in steeply inclined thick coal seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(S1): 139-142.