

综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究

彭 亚, 蒋仲安, 付恩琦, 韩 硕, 兰 桂
(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要:为解决煤矿综采工作面粉尘浓度高的问题,以改善作业环境,以邢东矿1128综采工作面为研究背景,研究煤层注水防尘技术在综采工作面防尘方面的应用。基于煤体物理化学特性,分别测定纯水和质量分数为0.05%的润湿剂溶液与该工作面煤样的接触角及其自然饱和吸湿曲线,并对注水孔间距、注水压力以及封孔长度等工艺参数进行优化。对优化注水前后的煤体进行钻孔采样,采用Cline-Renka算法进行插值绘制全水分分布图,并考察割煤、移架工序降尘效率。研究表明:煤层注水中添加润湿剂可以有效降低煤水接触角,减少煤体达到饱和吸湿的时间,并增加煤体饱和吸水量,提高煤体润湿效果;优化注水后,两注水孔中间区域煤体平均全水分较原注水方案增加2.23%,润湿半径增加3.5 m;割煤工序中,全尘和呼吸性粉尘的平均降尘效率分别提高25.42%和26.39%;液压支架移架工序中,全尘和呼吸性粉尘的平均降尘效率分别提高23.39%和25.30%。

关键词:工作面防尘;煤层注水;润湿半径;降尘效率

中图分类号:TD714.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0224-07

Study on seam water injection and dust control optimization and effect of fully-mechanized coal mining face

PENG Ya, JIANG Zhong'an, FU Enqi, HAN Shuo, LAN Gui

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the high dust density problem of the fully-mechanized coal mining face in the underground mine and to improve the operation environment, based on No. 1128 fully-mechanized coal mining face in Xingdong Mine as the study background, a study was conducted on the application of the seam water injection technology to the dust prevention of the fully-mechanized coal mining face. Based on the physical and chemical characteristics of the coal, a contact angle and the natural saturation moisture absorption curve between the wetting agent solution with the pure water and quality fraction as 0.05% were individually measured. And an optimization was conducted on the space between the water injection boreholes, water injection pressure, borehole sealing length and other technical parameters. Before and after the optimized water injection conducted, coal samplings were conducted from the boreholes. Cline-Renka algorithm was applied to the interpolation drawing of the total moisture distribution diagram and the dust control efficiency of the coal cutting and powered support pushing forward procedure were investigated. The study showed that the seam water injection with the wetting agent could effectively reduce the coal and water contact angle, could reduce the saturation moisture absorption time of the coal, could increase the saturation water adsorption volume and could improve the wetting effect of the coal. After the optimized coal injection, the average full moisture content of the coal between the two water injection boreholes would be 2.23% higher than the previous water injection plan, and the wetting radius would be increased by 3.5 m. In the coal cutting processing, the average dust control efficiency of the total dust and respirable dust were individually improved by 25.42% and 26.39%. During the process of the powered support pushing forward, the average dust control efficiency of the total dust and respirable dust were individually improved by 23.39% and 25.30%.

Key words: dust proof in coal mining face; seam water injection; wetting radius; dust control efficiency

收稿日期:2017-08-11;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.01.032

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801702);国家自然科学基金资助项目(51574016)

作者简介:彭 亚(1990—),女,湖南湘潭人,博士研究生。通讯作者:蒋仲安,教授,博士生导师,Tel:010-62313972,E-mail:jza1963@263.net

引用格式:彭 亚,蒋仲安,付恩琦,等.综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):224-230.

PENG Ya, JIANG Zhong'an, FU Enqi, et al. Study on seam water injection and dust control optimization and effect of fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 224-230.

0 引言

煤矿粉尘不仅威胁矿井的安全生产,还严重危及煤矿工人的身心健康。综采工作面作为煤矿井下的最大产尘面,在无防尘措施条件下,其粉尘质量浓度可达到 $2\ 500\sim 3\ 000\text{ mg/m}^3$,即使采取除尘措施,一些工作面作业时的粉尘质量浓度也可达到 $1\ 000\text{ mg/m}^3$ 以上,远超过相关国家标准^[1-3]。而煤层注水作为井下防治煤尘的最有效措施,能够从根本上减少粉尘的产生。自20世纪50年代以来,德国、英国、苏联、美国和比利时等几个主要产煤国家对煤层注水做了大量的理论和试验研究,并在矿井进行了推广。近几十年来,随着采掘机械化程度的提高以及对煤矿粉尘治理的日益关注,我国煤层注水理论与技术得到了较好的发展。

在煤层注水机理上,主要在用分子热力学和表面物理化学理论研究煤水界面^[4]、煤孔隙分布与其吸水性能关系^[5-6]、水在煤体中的动力分析^[7]、煤层注水对煤体孔隙结构及应力的影响^[8]等方面取得了一定的研究成果。在煤层注水技术及应用上,现有研究主要通过使用粘尘棒^[9]、磁化水^[10]、添加润湿剂^[11]等方法来提高注水效果。此外,针对不同地质赋存条件和不同注水工艺也开展了设计与应用^[12],尤其对低渗透煤层、松软煤层等特殊条件煤层的注水方法进行了探索与实践。对煤层注水效果的评价,有学者引入可拓学理论与信息熵来探讨各评价指标对煤层注水效果优化的影响^[13]。此外,随着计算机技术的发展,一些学者^[14]通过建立煤层注水数值模型,对煤体裂隙、渗透率、注水压力、润湿半径等进行数值模拟,以指导注水实践。

虽然前人在煤层注水的相关研究上已经取得了丰硕的成果,但由于井下环境所限,煤体润湿参数与现场注水应用难以很好地结合起来,对注水后煤体的水分增量也难以全面考察。笔者基于煤体的物理化学性质,结合综采工作面现场注水实际,采用提高煤体润湿性与改进注水工艺相结合的方法,优化煤层注水,并从煤体全水分分布及降尘效果两方面对煤层注水优化效果进行考察。

1 煤层注水机理分析

1.1 煤层注水防尘的实质

综采工作面的煤尘按其产生的方式可分为原生煤尘和生产煤尘。原生煤尘是指煤层孔隙中本来就

存在着的煤尘;生产煤尘是指在生产的过程中,由于煤体的破碎而产生的煤尘。煤层注水技术能够从根本上减少原生煤尘和生产煤尘的产生,净化综采工作面环境。压力水进入煤体后:一方面,将煤层中的原生煤尘湿润,粘结成较大的煤尘颗粒,使其在开采的过程中无法飞扬到空气中,消除尘源;另一方面,可以降低煤体的强度和脆性,增强其塑性,当煤体开采时可由脆性破碎变为塑性变形,减少煤尘的产生,同时由于煤体的含水率比较高,湿润破碎时产生的煤尘,使其无法飞扬,从源头上减少了煤尘的产生。

1.2 水在煤层中的运动机理

水进入煤体以后,首先沿较大的裂隙以较快的流速,逐渐包围被裂隙所分割的煤体;然后再以较低的流速进入各种细微孔隙之中。该过程可认为是一个从非饱和到饱和的渗流过程,是压力渗流、毛细和扩散3种运动共同作用的结果。其中压力渗流与注水压力密切相关,而毛细和扩散作用与液体和孔隙的性质有关,与裂隙中的水压关系不大。煤层注水时水的有效运动动力可表示为

$$\Delta h = P_z + P_m + P_w \quad (1)$$

式中: Δh 为煤层有效注水压力,kPa; P_z 为注水孔口压力,kPa; P_m 为孔隙的毛细作用力,kPa; P_w 为孔隙内的瓦斯压力,kPa。

1.3 煤层注水效果影响因素

煤层注水的效果受到多方面因素的影响。不同的煤层在相同注水条件下,最终的注水效果各有不同。煤层裂隙、孔隙的发育程度以及液体对煤的润湿性均会影响煤层注水的效果,但除此之外,注水效果也会受到上覆岩层压力、瓦斯压力以及注水压力、注水间距等注水参数的影响,仅测定煤样的孔隙率以及润湿性参数并不能全面反映煤层的注水效果。因此,为更全面地了解邢东矿1128综采工作面煤层注水效果,研究注水后煤层内水分分布规律,本研究中对工作面按优化方案注水后进行钻孔采样,绘制全水分分布图。

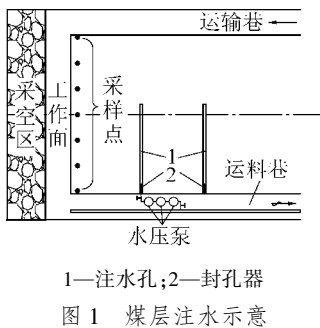
2 煤体参数测定

2.1 工作面概况

邢东矿1128综采工作面走向长683 m,倾斜长62 m,平均倾角 9° 。煤种属于气肥煤。煤层瓦斯含量不大,在 $0.11\sim 6.67\text{ m}^3/\text{t}$,属于低沼气矿井。煤层的厚度为 $3.5\sim 4.2\text{ m}$,平均厚度3.9 m。

该工作面原有注水方式为单向钻孔静压注水,

注水压力 2.5 MPa,注水孔深度 35 m,孔径 50 mm,封孔长度 4 m,相邻注水孔之间的距离为 20 m。煤层注水如图 1 所示。采用该方案注水后,煤体平均全水分分为 3.12%,综采工作面全尘平均降尘效率为 31.7%,降尘效果不理想。



1—注水孔;2—封孔器
图 1 煤层注水示意

Fig. 1 Schematic diagram of coal seam water infusion

2.2 煤体原始含水率

按照国家标准 GB/T 211—2007《煤中全水分的测定方法》,注水前在 1128 综采工作面每隔 10 m 采样(图 1),采用空气干燥法测定煤样全水分,每个样品平行测定 3 组数据求取算术平均值,测得的结果见表 1。可知,该综采工作面煤层平均全水分分为 2.22%,水分含量并不高,需要进行煤层注水,使煤体进一步湿润,以降低开采时粉尘质量浓度,改善井下的工作环境。

表 1 1128 综采工作面煤体原始全水分测定
Table 1 Originaltotal moisture of No.1128
fully-mechanized coal face

采样点	平均全水分/%	采样点	平均全水分/%
1 号	2.10	4 号	2.19
2 号	2.31	5 号	2.24
3 号	2.17	6 号	2.30

2.3 孔隙率

在煤层注水过程中,煤体湿润过程也就是注入煤层中的水逐渐进入煤体孔隙并储存于其中的过程。依据国家标准 GB/T 23561.4—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法第 4 部分:煤和岩石孔隙率计算方法》测定该工作面的煤样的真密度为 1.464 g/cm³,干块密度为 1.383 g/cm³;根据式(2)计算得总孔隙率为 5.54%。可知,1128 综采工作面煤层属于可注水煤层,但因孔隙较少,注水效果不会特别理想。因此,除了根据现场的实际情况,本研究在对注水工艺参数进行优化的基础上,采用添加润湿剂来增强注水效果。

$$n = \left(1 - \frac{ARD}{TRD}\right) \times 100\%$$
 (2)

式中: n 为煤的总孔隙率; ARD 为煤的视相对密度; TRD 为煤的真相对密度。

2.4 普氏系数

煤的普氏系数是衡量煤抵抗外界破坏的能力,是由煤的自身物理力学性质决定的,也是煤层是否可以注水的一个重要指标。根据国家标准 GB/T 23561.12—2010《煤和岩石物理力学性质测定方法第 12 部分:煤的普氏系数测定方法》,采用落锤法测定邢东矿 1128 综采工作面煤的普氏系数为 1.2,可知,该综采工作面属于硬煤层。

2.5 自然吸水率

按国家标准 GB/T 23561.5—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法第 5 部分:煤和岩石吸水性测定方法》,测定该综采工作面煤样的自然饱和吸水率为 2.83%。结合上文测得的数据,煤样测试结果同时满足全水分 $W \leq 4\%$ 、总孔隙率 $n \geq 4\%$ 、自然饱和吸水率 $\delta \geq 1\%$ 和普氏系数 $f \geq 0.4$ 四个条件,可判定该煤层为可注水煤层。因此在 1128 综采工作面应用煤层注水技术是可行的。

3 煤层注水优化

3.1 添加润湿剂

该综采工作面煤样自然饱和吸水率较低、孔隙率较小,因此采用添加润湿剂溶液进行优化注水,并试验测定了纯水与质量分数为 0.05% 的润湿剂溶液对煤样的接触角以及自然吸湿曲线。

3.1.1 接触角测定

煤的润湿是煤体界面气相被液相取代的过程。根据 T.Young 利用力学平衡条件推出的杨氏润湿方程:

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cos \theta$$
 (3)

式中: θ 为接触角; σ_{sg} 、 σ_{sl} 、 σ_{lg} 分别为固气、固液、液气界面张力。

本研究中使用接触角来判断液体对煤的润湿性能。接触角越小,表明煤体润湿性好,有利于煤层注水。试验采用成型煤粉法制备煤样,使用座滴法分别测定纯水、质量分数为 0.05% 润湿剂溶液与煤样的接触角。经测定,液滴接触煤样表面后,纯水与煤样的平均初始接触角为 66.3°,如图 2a 所示,5 s 后接触角变化不大。由于 1128 工作面煤样与水接触角大于 40°,说明其润湿性较差。而 0.05% 润湿剂溶

液与煤样的平均初始接触角为 28.9° (图 2b), 并在 5 s 内完全铺平, 表明添加润湿剂可以提高煤的润湿性, 降低煤表面与液体间的界面张力, 减小接触角。因此 1128 综采工作面的煤层在进行煤层注水时添加润湿剂, 可以增强煤层润湿性。

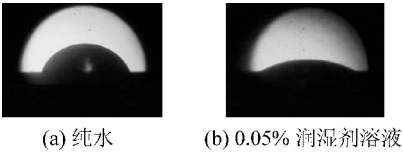


图 2 纯水和 0.05% 的润湿剂溶液对煤样的初始接触角
Fig. 2 Initial contact angles of water and 0.05% surfactant solution on coal surface

3.1.2 自然吸湿曲线

煤层注水时, 随着时间的变化, 煤层吸水的速率也会逐渐变化, 当煤体的含水率达到一定的饱和程度之后, 煤层的含水率基本上不再变化。由于现场环境复杂多变, 难以在工作面现场对煤层的吸水情况进行持续测定, 因此采集煤样测定其自然吸湿曲线。煤块分别在质量分数 0.05% 的润湿剂溶液与在纯水中的平均吸水率变化曲线如图 3 所示。

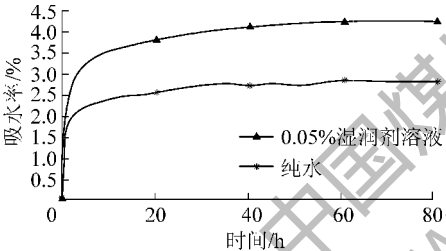


图 3 煤块自然吸湿曲线
Fig. 3 Moisture absorption rate of coal samples

由图 3 可知, 自然吸湿试验开始的前 20 h 内, 煤块吸水增长速率很快, 但是随着时间增长, 煤块的吸水能力逐渐下降; 40 h 后, 煤块的吸水量变化不大, 增长缓慢。经计算, 煤块的吸水率与时间的对数有明显的线性关系 (图 4), 拟合得到的自然吸湿方程分别为:

0.05% 润湿剂溶液中:

$$\omega = 1.0349 \lg t + 0.6025, R^2 = 0.9791$$

纯水中:

$$\omega = 0.5855 \lg t + 0.7438, R^2 = 0.9845$$

式中: ω 为煤样吸水率, %; t 为时间, h; R 为线性相关系数。

由此可知, 煤块吸水率随着时间的延长而减小, 时间越长, 吸水量逐渐达到饱和。这是因为在注水过程中, 渗流、毛细和扩散运动是同时存在的, 但在不

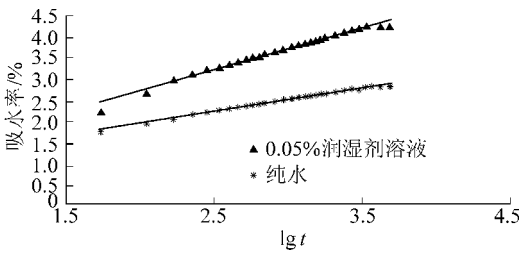


图 4 煤块吸水率-时间对数线性拟合关系
Fig. 4 Linear fitting for moisture absorption rate and logarithm of time

同的注水阶段, 各自作用大小不同。在注水开始, 渗流起主导作用, 水首先充满沟通大裂隙和孔隙; 随着时间的增长, 裂隙和孔隙的阻力作用, 压差运动无法很快地向更远距离和较深范围渗透, 毛细和扩散运动逐渐占据主导地位。

此外, 将图 4 中的 2 条吸湿曲线进行对比, 可发现煤样在润湿剂溶液中的吸湿速率比在纯水中明显更大, 整体吸水量也更多; 煤块在润湿剂溶液中的达到饱和和吸湿的时间约为 40 h, 饱和吸水率为 4.25%, 而在纯水中分别为约 30 h 和 2.83%。这是因为润湿剂可以降低水的表面张力, 使煤块中孔隙的毛细管力增大, 所以水逐渐渗入被大裂隙包围的小煤块中的更小孔隙, 增加煤体的水分。而在纯水中由于毛细管力较小, 无法克服内部阻力, 水不能很好地深入小孔隙中, 水分增量不大。因此, 煤层注水时添加润湿剂可以有效改善煤层的润湿效果。

3.2 注水孔间距优化

1128 综采工作面原有注水方案中, 注水孔的间距为 20 m。但现场采样测得在距离注水孔 5 m 范围内煤体的全水分基本在 3%~5%, 而距离 5~10 m 的范围内注水效果较差, 全水分低于 3%。因此, 为了增强注水的效果, 且考虑到润湿剂的使用, 将注水孔的间距由 20 m 缩短至 15 m, 并进行双向钻孔注水。

3.3 注水压力优化

该综采工作面煤层藏深可达到 1 000 m 左右, 工作面前方正常地应力可达 20.5 MPa。开采深度与注水压力的经验公式:

$$P_0 = 15.6 - 7.8 / (0.001H + 0.5) = 10.4 \quad (4)$$

其中: P_0 为煤层注水的最小压力, MPa; H 为开采深度, m。

由式 (4) 可知, 理论上注水最小压力为 10.4 MPa, 且最大不能超过上覆岩层压力。而原注水方案中注水压力为 2.5 MPa, 远没有达到理论的数值,

这也是原方案注水效果比较差的原因之一。因此,新增加压泵,将原有的静压注水方式变为动压注水方式。考虑到煤体裂隙的不均匀性,水压逐级上调,并保持注水压力在 10~12 MPa。

3.4 封孔长度优化

1128 综采工作面注水采用的封孔器为高压胶管封孔器,原有长度 4 m。在注水中期的时候,注水现场的煤壁上有少许的水流渗出,达到注水后期,水渗流现场更加严重,大约有 40% 的注水量都会从煤壁上较大的裂隙中流出,造成注水效果下降。其主要原因是封孔器的长度太短,没有超出煤体的松动带,造成在注水的过程中水流顺着煤体松动带中的较大孔隙渗流出来。因此,为了保证注水的效果,需要增加封孔器的长度。根据钻屑量法测得综采工作面煤层松动带影响范围为 8.9 m。据此,将封孔器的长度由 4 m 增加至 10 m,使其能够超过煤体中的松动带长度。

4 现场煤层注水效果考察

煤层注水效果的好坏,一方面体现为煤体含水率的变化,另一方面则体现在工作面粉尘质量浓度的变化。为了考察优化前后的煤层注水效果,对邢东矿 1128 综采工作面煤层全水分分布及粉尘质量浓度进行了测定、分析。

4.1 润湿效果考察

根据自然吸湿试验测定结果,优化注水 2 d 后即煤层尽量达到饱和润湿后,在该工作面运料巷煤层相邻注水孔之间及一侧等距钻取 8 个采样孔(图 5),采样孔深度为 16 m,在采样孔上每隔 2 m 设置 1 个采样点。

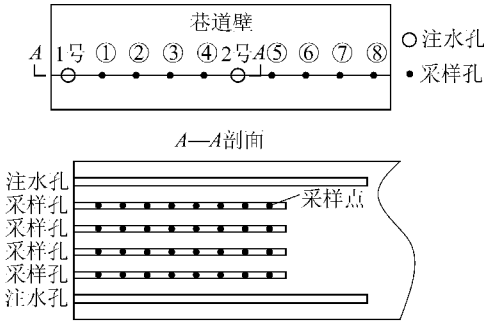


图5 优化注水采样点布置

Fig. 5 Sampling-distribution with optimized water infusion

依据相关国家标准进行煤样全水分测定,测得的全水分数据见表 2。由于该数据为非均匀分布,采用 Cline-Renka 二维三角剖分算法进行插值处

理,并绘制全水分分布(图 6)。由图 6 可知,优化注水后,煤层内水分分布并不均匀。横向走向上,越靠近注水孔的位置,含水率越高,之后随着与注水孔距离的增加,注水效果逐渐降低,在距离注水孔 8 m 左右的位置,煤体的含水率变化减慢。这是由于随着距离的变远,水流动力减小,而需要克服的煤体内部阻力逐渐变大,且受注水压力的影响越小,受煤层孔隙、裂隙发育程度的影响变大。在纵向深度上,虽然封孔深度为 10 m,但是水分也通过封孔器周围煤体的孔隙、裂隙向靠近巷道壁的煤层方向渗透。且由于在巷道掘进和打锚杆过程中,靠近巷道的煤体受到扰动,结构上产生破坏,煤体孔隙、裂隙率增加,水在煤体中的流动阻力相对较小,有利于水对煤的润湿。在煤层内也会出现局部全水分偏低或者偏高的情况,这是因为煤体孔隙、裂隙的发育程度以及煤组分不均匀,直接影响水在煤层中的毛细及扩散作用。

表 2 优化注水全水分测定

Table 2 Total moisture measurement with optimized water infusion

采样孔 编号	至 1 号注水孔 距离/m	不同采样孔深的全水分/%						
		4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m	16 m
①	3	4.46	6.54	6.89	6.26	6.65	6.33	6.04
②	6	3.93	4.76	5.29	5.01	5.54	5.64	4.70
③	9	3.29	3.45	4.06	5.35	4.43	4.19	4.18
④	12	4.32	6.27	6.08	6.33	6.72	6.22	6.88
⑤	18	4.56	6.30	6.12	6.45	6.86	6.43	6.21
⑥	21	3.43	4.26	4.79	4.51	4.70	6.32	5.76
⑦	24	2.38	3.58	3.81	3.87	3.38	6.19	3.31
⑧	27	3.17	2.74	3.67	3.48	3.39	3.62	3.73

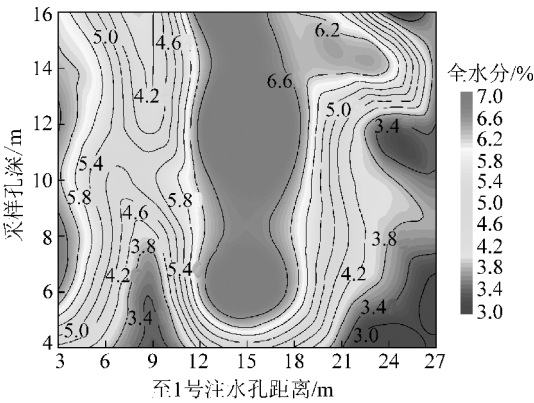


图6 优化注水润湿效果

Fig. 6 Moisturizing effect with optimized water infusion

此外,按照原方案注水后,两注水孔之间煤体的平均全水分为 3.12%,润湿半径约 4.5 m。而按照优

化方案注水后,①—④号采样孔之间的煤体平均全水分达 5.35%,比原注水方案增加了 2.23%;润湿半径约 8 m,比原注水方案增加了 3.5 m。因此,优化注水后,煤层注水润湿效果得到了明显提升。

4.2 降尘效果考察

煤层注水的最终目的是减少工作面中煤尘的产生,针对煤层注水方案优化前后,对 1128 综采工作面割煤、移架工序分别进行粉尘质量浓度的测定,测定结果如图 7 和图 8 所示。

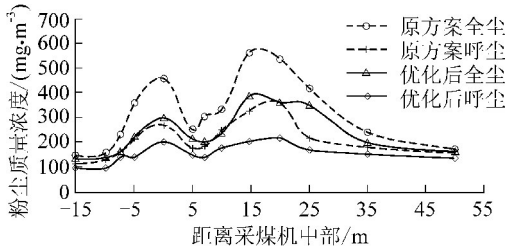


图 7 顺风割煤工序降尘效果

Fig. 7 Dust control effect of coal cutting process

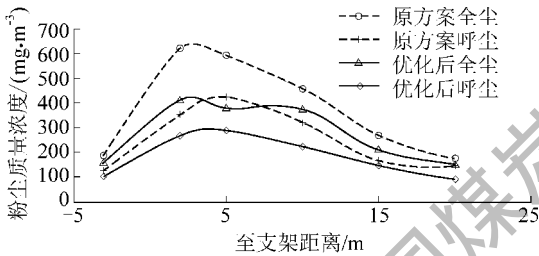


图 8 移架工序降尘效果

Fig. 8 Dust control effect of frame moving process

由图 7 和图 8 可知,与原注水方案相比,使用优化方案进行煤层注水后,顺风割煤和移架过程中的产尘量均有所减少。其中,机组顺风割煤时工作面的最大全尘质量浓度由原来的 562.3 mg/m^3 降低到 389.4 mg/m^3 ,全尘平均降尘效率提高 25.42%,呼吸性粉尘平均降尘效率提高 26.39%;液压支架移架工序中,最大全尘质量浓度由原来的 622.4 mg/m^3 降低到 411.9 mg/m^3 ,全尘平均降尘效率提高 23.39%,呼吸性粉尘平均降尘效率提高 25.30%。由此可见,该综采工作面煤层注水实施优化方案后,取得了更好的降尘效果,改善了工作面环境。

5 结 论

1) 通过润湿性试验测定,质量分数为 0.05% 润湿剂溶液和纯水对煤的接触角分别为 28.9° 和 66.3° ,达到自然饱和吸湿的时间分别约为 40 h 和 30 h,平均饱和吸水率分别为 4.25% 和 2.83%,说明

添加润湿剂可以降低煤表面与液体间的界面张力,提高煤样吸湿速率,增加饱和吸水量,有利于改善煤层注水润湿效果。

2) 采用添加质量分数为 0.05% 润湿剂溶液,且注水孔间距、注水压力和封孔长度分别为 15 m、10~12 MPa、10 m,进行优化注水后,钻孔采样并采用 Cline-Renka 插值法绘制全水分分布图,得到两注水孔中间区域煤体平均全水分增加 2.23%,润湿半径增加 3.5 m,显著提高了煤体的润湿效果。

3) 优化注水与原方案注水相比,顺风割煤工序中,全尘平均降尘效率提高 25.42%,呼吸性粉尘平均降尘效率提高 26.39%;液压支架移架工序中,全尘平均降尘效率提高 23.39%,呼吸性粉尘平均降尘效率提高 25.30%。实测数据表明优化后的煤层注水方案取得了更好的防尘效果,改善了井下作业环境,有利于保障矿工的健康与安全。

参考文献 (References):

- [1] 谭 聪,蒋仲安,陈举师,等.综采割煤粉尘运移影响因素的数值模拟[J].北京科技大学学报,2014,36(6):716-721.
TAN Cong,JIANG Zhong'an,CHEN Jushi,et al.Numerical simulation of influencing factors on dust movement during coal cutting at fully mechanized working faces [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2014,36(6):716-721.
- [2] 王晓珍,蒋仲安,王善文,等.煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J].煤炭学报,2007,32(4):386-390.
WANG Xiaozhen,JIANG Zhong'an,WANG Shanwen,et al.Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration during the ventilation process of coal roadway driving [J].Journal of China Coal Society,2007,32(4):386-390.
- [3] 王晓珍.煤巷掘进过程中粉尘浓度影响因素分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):75-79.
WANG Xiaozhen.Analysis of dust concentration influence factor in coal roadway driving [J]. Journal of Safety Science and Technology,2011,7(4):75-79.
- [4] 聂百胜,何学秋,王恩元,等.煤吸附水的微观机理[J].中国矿业大学学报,2004,33(4):379-383.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Micro - mechanism of coal adsorbing water [J].Journal of China University of Mining & Technology,2004,33(4):379-383.
- [5] 秦文贵,张延松.煤孔隙分布与煤层注水增量的关系[J].煤炭学报,2000,25(5):514-517.
QIN Wengui,ZHANG Yansong.Relation of pore distribution of coal with water infusion increment in seams [J].Journal of China Coal Society,2000,25(5):514-517.
- [6] 秦跃平,傅 贵.煤孔隙分形特性及其吸水性能的研究[J].煤炭学报,2000,25(1):55-59.
QIN Yueping,FU Gui.Study on fractal characteristic of pore in coal

- and moisture-absorbing property of coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(1): 55-59.
- [7] 王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2004, 4(1): 70-73.
- WANG Qingsong, JIN Longzhe, SUN Jinhua. Research on coal seam water infusion course and coalbody wetness mechanism [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(1): 70-73.
- [8] 郭明涛, 唐跃刚, 苏雪峰, 等. 高压注水对煤孔隙结构影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(3): 133-140.
- GUO Mingtao, TANG Yuegang, SU Xuefeng, et al. Experimental study on influence of high pressure water injection on coal pore structure [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(3): 133-140.
- [9] 金龙哲, 欧盛南. 煤层注水中粘尘棒溶液对接触角的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2005, 27(3): 264-267.
- JIN Longzhe, OU Shengnan. Effect of dust-sticking bar's solution on the contact angle of coal seam in infusion [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(3): 264-267.
- [10] 聂百胜, 何学秋, 冯志华, 等. 磁化水在煤层注水中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2007, 26(1): 1-3.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, FENG Zhihua, et al. Application of magnetized water in coal seam water infusion [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2007, 26(1): 1-3.
- [11] 程燕, 蒋仲安, 陈仲秋, 等. 煤层注水中添加表面活性剂的研究[J]. *煤矿安全*, 2006, 37(3): 9-12.
- CHENG Yan, JIANG Zhong'an, CHEN Zhongqiu, et al. Study of adding surfactant to seam water injection [J]. *Safety in Coal Mines*, 2006, 37(3): 9-12.
- [12] 徐厚学. 低渗透煤层顺层孔割缝增透注水抑尘技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(9): 110-114.
- XU Houxue. Study on bedding drilling slotting permeability improvement, water injection and dust control technology of low permeability seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9): 110-114.
- [13] 董伟, 张晓明, 陈绍杰, 等. 可拓论与信息熵在煤层注水效果优化中的应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(10): 121-126.
- DONG Wei, ZHANG Xiaoming, CHEN Shaojie, et al. Application of extenics theory and information entropy to optimization of water infusion in coal seam [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(10): 121-126.
- [14] 刘令生, 林梦露, 蒋仲安, 等. 掘进工作面煤层注水湿润半径的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(1): 28-31.
- LIU Lingsheng, LIN Menglu, JIANG Zhong'an, et al. Numerical simulation of coal seam water injection wetting radius in driving face [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(1): 28-31.
- (上接第166页)
- mining [J]. *Geophysics*, 1962, 28(5): 701-714.
- [18] 吴海. 基于ARM技术的矿井自记式地震仪[J]. *煤田地质与勘探*, 2013, 41(4): 81-84.
- WU Hai. Development of self-recording seismograph based on ARM technique [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2013, 41(4): 81-84.
- [19] 吴海. 防爆无缆遥测地震仪在煤矿槽波勘探中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(8): 86-89.
- WU Hai. Application of explosion-proof telemetry seismograph used in channel wave exploration [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(8): 86-89.
- [20] LU W K, YIN F F. Adaptive algebraic reconstruction technique [J]. *Medical Physics*, 2004, 31(12): 3222-3230.
- [21] TRAMPERT J, LEVEQUE J J. Simultaneous iterative reconstruction technique: physical interpretation based on the generalized least squares solution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(8): 12553-12559.
- [22] 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 等. 井下槽波地震勘探: 预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(1): 0439-0451.
- HU Guoze, TENG Jiwen, PI Jiaolong, et al. In-seam seismic exploration techniques—a geophysical method predicting coal-mine disaster [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(1): 0439-0451.