

低孔隙率难注水煤层机械造穴增透注水 防尘技术研究

Research on Mechanical Cavity Formation to Enhance Permeability and Water Injection for
Dust Prevention in Low Permeability Coal Seams

杨乐¹, 徐慧刚²

(1. 山西潞安矿业(集团)有限责任公司古城煤矿, 山西 长治 046108;

2. 山西新元煤炭有限责任公司, 山西 晋中 045400)

摘要:本文主要针对山西新元煤炭有限公司下属矿井煤层孔隙率低、难注水的特点,采用机械造穴的方法对煤层进行增透,进而实现注水防尘的目的。首先,结合现场条件,通过PFC2D5.00软件进行造穴钻孔数值模拟,研究表明,在500 mm直径钻孔孔径下,裂隙初期均匀分布,随后向垂直方向扩散;在弹性区域内,水平方向孔隙率呈现增长趋势,垂直方向则呈现减小趋势。其次,结合现场环境以及相关法规,选取合适的钻孔间距、造穴间距与造穴长度。最后,根据经验公式算出合适的注水压力、注水量以及注水时间。经对煤层经机械造穴增透后的注水效果进行分析,结果表明:普通注水后平均增加煤体水分1.53%~2.35%,平均增加0.23%~1.05%;实施机械造穴后平均测定煤体水分4.83%~7.02%,平均增加3.53%~5.75%。通过比较可得,机械造穴增透使得煤体的含水率明显提升,煤体润湿越充分,水分增量越大,煤样水分平均增加越大。

关键词:机械造穴;煤层注水;煤尘防治

中图分类号:TD821

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2025)01-0013-07

Abstract: This paper primarily addresses the characteristics of low permeability and difficulty in water injection in coal seams of the mines under Shanxi Xinyuan Coal Industry Co., Ltd. By employing the method of mechanical cavity formation, the permeability of the coal seams is enhanced to achieve the purpose of water injection for dust prevention. Firstly, based on the field conditions, numerical simulations of cavity formation drilling were conducted using the PFC2D5.00 software. The study found that under a 500 mm diameter drilling hole, the fractures initially distribute uniformly and then spread in the vertical direction. Within the elastic region, the porosity in the horizontal direction shows an increasing trend, while in the vertical direction, it shows a decreasing trend. Secondly, considering the field environment and relevant regulations, appropriate drilling intervals, cavity formation intervals, and cavity lengths were selected. Finally, suitable water injection pressure, water volume, and injection time were calculated based on empirical formulas. By analyzing the water injection effect of the coal seams after mechanical cavity formation, the results indicate that after ordinary water injection, the average increase in coal body moisture is 1.53% to 2.35%, with an average increase of 0.23% to 1.05%. After implementing mechanical cavity formation, the average coal body moisture measured is 4.83% to 7.02%, with an average increase of 3.53% to 5.75%. Through comparison, it can be seen that mechanical cavity formation significantly increases the moisture content of the coal body. The more thoroughly the coal body is moistened, the greater the increase in moisture, and the larger the average increase in coal sample moisture.

Key words: mechanical cavity formation; coal seam water injection; coal dust prevention and control

1 前言

矿井粉尘作为煤矿五大灾害之一,对煤矿安全

生产构成了严重威胁,同时也是煤矿“一通三防”技术体系的关键环节^[1-3]。粉尘的危害是多方面的,它不仅会严重影响矿工的身体健康,还直接关系到矿井的安全生产状况,是制约煤矿生产发展的一大重大难题^[4]。当矿井粉尘浓度过高时,会产生诸多不良后果。一方面,它会导致采掘机等机械设备的磨损加剧,从而造成巨大的经济损失;另一方面,高

[作者简介] 杨乐(1986—),男,工程师,毕业于华北科技学院,主要研究方向为采矿工程。

[引用格式] 杨乐,徐慧刚.低孔隙率难注水煤层机械造穴增透注水防尘技术研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):13-19.

浓度粉尘还可能引发粉尘爆炸等严重事故,给矿井安全带来灾难性的后果。矿井粉尘对矿工健康的危害尤为突出,它会引发尘肺病等职业性疾病。据有关统计数据显示,每年尘肺病死亡人数高达4 000人,远超煤矿生产安全事故直接死亡人数^[5-7]。因此,从职业卫生的角度来看,加强对煤矿粉尘危害的防治工作,无疑是煤矿职业卫生工作的重中之重,具有极其重要的意义。

目前,煤炭开采主要以井工开采方式为主。在这种开采模式下,井下开采空间相对狭小,工作地点分布多变,这给通风除尘工作带来了诸多困难,导致通风除尘效果往往不够理想。同时,随着煤炭开采技术的不断发展,大截深、大功率、大运输量的机械化采掘设备在煤矿中的使用日益增多。这些设备虽然提高了开采效率,但也使得产尘量大幅增加。此外,随着采区的持续拓展、巷道运输距离的不断延长以及转载点数量的逐步增多,采煤、掘进、转载、运输等一系列作业流程均不可避免地伴随着大量粉尘的产生^[8-9]。这些因素相互叠加,不仅导致了煤尘污染的加剧,同时也使得爆炸风险显著提高,给矿井安全带来了更大的挑战。

在众多防尘技术措施中,煤层注水被广泛认为是一种从根本上减少粉尘产生量的有效方法^[10-11]。该技术的核心原理是将水注入煤层内部的裂隙与孔隙之中,以此实现对煤体的充分湿润。当煤体经过湿润处理后,其物理性质会发生显著变化,具体表现为煤体的强度与脆性相应降低,而塑性则相应增强。在后续的煤炭开采过程中,煤体孔隙和裂隙内所储存的水分能够发挥重要作用,促使大量煤尘颗粒相互聚集、结团,从而形成体积较大的尘粒,有效减少了粉尘在开采过程中的扩散与飞扬,对于降低矿井粉尘浓度、改善作业环境具有重要意义。在后续的开采过程中,煤体孔隙和裂隙内的水能够促使大量

煤尘结团,形成较大的尘粒。由于这些尘粒的体积增大,其悬浮能力会大幅降低,从而有效减少了粉尘的产生量,对降低粉尘危害起到了关键作用。然而,对于一些低孔隙率、难渗透的煤层,普通的煤层注水方法往往难以达到预期的防尘效果。以新元煤矿为例,其所属的3[#]与9[#]煤层均为低渗透率难注水煤层。以往的开采过程中,该煤层并未开展过增透注水技术的研究。为了确保新元煤矿能够实现高效、安全的采掘作业,开展针对新元矿井低孔隙率难注水煤层的机械造穴增透注水防尘技术研究工作显得尤为必要。通过这项研究,有望找到一种有效的解决方案,突破低渗透率煤层注水的难题,从而为新元煤矿的安全生产提供有力的技术支撑,同时也为其他类似条件的煤矿提供可借鉴的经验,进而推动煤矿行业的粉尘防治技术进步,为矿工的生命健康和矿井的安全生产提供有效保障。

2 矿井概况

山西新元煤炭有限责任公司所属煤田位于沁水煤田西北部,所处地理坐标为东经112°58′51″~113°09′33″,北纬37°49′54″~37°55′09″,行政区划属山西省晋中市寿阳县。

新元公司3404、31001工作面,采3[#]煤层,工作面煤层高度1.8 m左右。3[#]煤层赋存较为稳定,结构简单,煤质属中灰、低硫的优质贫瘦煤,煤层以亮煤为主,内生裂隙发育,煤层中含1~2层泥质夹矸,厚度一般为0.02~0.10 m。煤层局部顶板或底板受古河床冲蚀,存在煤层变薄现象。3[#]与9[#]煤层均为低渗透率难注水煤层。目前,3404与31001综采工作面采用煤层注水、采煤机辅助外喷雾、架间喷雾等措施预防粉尘和减少瓦斯突出问题。3[#]煤层工作面如图1所示。

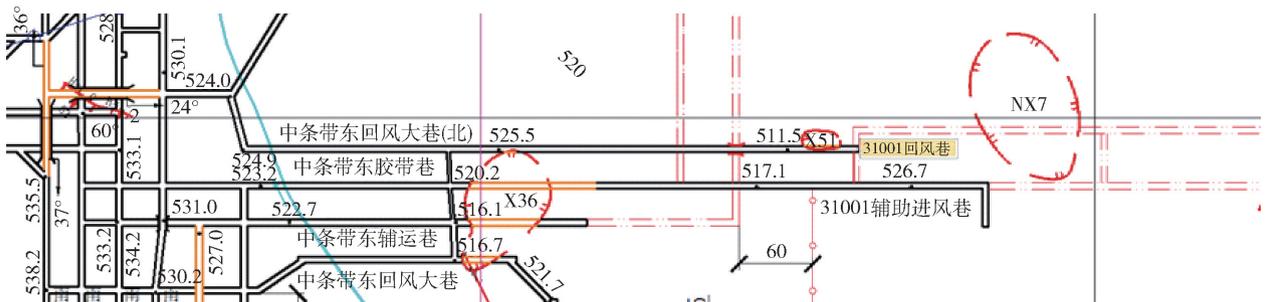


图1 3[#]煤层工作面示意图

3 机械造穴增透原理与煤层注水降尘优点

煤体可被等效视为一种包含丰富孔隙基质与裂隙的立方体模型。煤层注水的难易程度主要受到渗透率的制约,而层内卸压增透则是提升渗透率的关键手段。造穴增透技术通过运用特殊设备对钻孔煤层段进行二次造穴扩孔操作,从而在煤层中形成多个直径超过 300 mm 的洞穴。随着距离钻孔中心的增加,煤体的切向应力与径向应力逐渐增大,导致钻孔周围应力集中,进而使得渗透率降低,形成所谓的“瓶颈效应”,这一效应严重阻碍了瓦斯的渗透。然而,造穴操作能够显著增大煤层段煤体的暴露面积以及钻孔周围煤体的卸压圈范围,进而扩大瓦斯流动场的影响范围,增加抽采影响半径,从而有效突破“瓶颈效应”,实现煤层渗透性的显著提升,为煤层注水以及瓦斯抽采等作业提供了更为有利的条件。煤层注水降尘技术是有效实用的煤矿井下降尘手段,工作面推进前向煤体打注水钻孔注水,使水均匀侵入裂隙孔隙,降低浮游煤尘产生,还可预防煤与瓦斯突出及冲击地压,集降尘除尘、治瓦斯、防冲卸压、软化煤岩等多功能于一身,具有应用对象多样、防治机理复杂特点。

3.1 机械造穴增透效果影响因素

机械造穴增透主要是煤体孔穴周围受载强度大于煤体自身强度,而使煤体发生塑性破坏。从而孔穴周围参数大量裂隙,达到增透目的。效果影响主要受到以下因素影响。

1) 煤岩强度

当煤体强度越低时,其更容易进入塑性强化阶段。以至于更加容易产生裂隙破坏。而在塑性区附近的弹性形变区,同时会发生孔隙率增大的现象。煤体强度大小对增透效果有着较大的影响。

2) 造穴半径

在煤体进行钻孔施工,不同孔径会对周围煤体产生不同强度的扰动作用。当孔径增大时,煤体破碎区、塑性范围会扩大。

3) 应力分布状态

煤层的应力状态对机械造穴增透效果影响较大。当应力越大时,煤体受到的载荷越容易达到自身强度,从而更容易进入塑性强化阶段并发生破坏。而且煤层应力往往是非均匀状态。当垂直应力与水平应力比值不同时,煤体的破碎范围往往也不同。

3.2 煤层注水效果影响因素

煤层注水难易程度即煤体湿润难易程度,核心在于水能否顺利进入煤体裂隙、孔隙,以及是否会从部分裂隙泄露流失。影响因素如下:

1) 煤层裂隙、孔隙的发育程度

煤层裂隙与孔隙的发育程度与煤层的成因类型、煤岩类型、变质程度以及所受动力作用存在着密切的关联性。通过对现场的细致观测,可初步对裂隙的发育程度进行判断,进而依据此判断结果对煤层注水的难易程度进行较为合理的估测。

2) 煤层的埋藏深度与地压的集中程度

煤层埋藏深度及地压集中程度影响裂隙严密程度与微孔隙容积压缩程度,是影响注水难易的主要因素之一。

3) 煤层的物理力学性质

煤层的物理力学特性,包括硬度、强度、韧性、脆性等,均会对煤层注水产生影响。若煤层的坚固性系数较低,则其注水较为容易;反之,坚固性系数较高时,注水难度则会增大。在裂隙和孔隙较为发达的煤层中,摩氏硬度系数对注水的影响相对较小;而在致密块状结构的煤层中,硬度对注水的影响则较为显著,煤体硬度越大,所需的注水压力也就越高。对于质地较为松软且容易破碎的煤层,尽管其坚固性系数和硬度系数较小,但注水过程往往较为困难,原因在于煤泥可能会堵塞孔壁,从而阻碍注水的顺利进行,此时需要采取相应的清洗措施来解决堵塞问题。

4) 煤层内的瓦斯压力

煤层内瓦斯压力是注水附加阻力,瓦斯压力大时,为获相同注水流量需提高注水压力,增加注水困难。低瓦斯矿井瓦斯压力影响可忽略,高瓦斯矿井瓦斯压力是主要影响因素之一,透气性差、瓦斯压力大的煤层常需中、高压注水。

4 机械造穴数值模拟与工艺参数研究

4.1 现场煤层煤岩物理参数

通过对新元煤矿井下煤样进行测试,并对测试数据进行整理、综合和分析,得出如下结论。

1) 宏观特性

在宏观层面,煤岩通常以亮煤为主要组成部分,镜煤和暗煤次之,而丝炭较为罕见。从宏观煤岩类型来看,以光亮型和半亮型煤占据主导地位,暗淡型和半暗型煤则相对较少。在结构方面,条带状和线

理状结构较为常见,均一状结构相对较少,而在构造上,层状构造为主要形式,块状构造则处于次要地位。

2) 物理特性

煤岩孔隙率为 3.12%,抗压强度为 27.4 MPa。原有水分为 1.24% ~ 1.43%、吸水率为 2.80% ~ 4.42%、坚固性系数为 0.56 ~ 0.67。

3) 地应力状态

3号煤层埋深约为 564.7 m,最大水平主应力为 16.03 MPa、最小水平主应力为 8.19 MPa、垂直主应力为 14.12 MPa。

4.2 机械造穴数值模拟计算

1) 建立模型

运用 PFC2D5.00 软件对机械造穴钻孔进行建模,对相应地应力条件下钻孔对煤层破坏增透情况分析,最后对模拟结果进行讨论。构建煤层的几何模型,模型长 × 高 = 6 m × 3 m,造穴孔径为 500 mm,水平地应力为 16.03 MPa,垂直应力为 14.12 MPa。所构建的三维几何模型如图 2 所示。

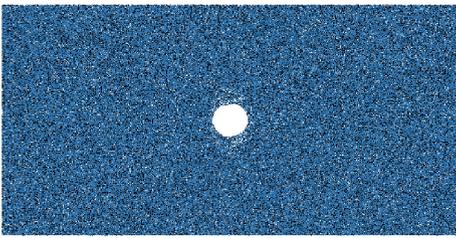


图 2 几何模型建模图

2) 模拟结果研究

① 钻孔受力分布与位移特性

机械造穴钻孔会对煤层起到卸压作用,但从模拟结果可知,应力以钻孔上部与下部为主导。而钻孔周围变形破坏也以钻孔上部与下部为主导。图 3 与图 4 所示分别为造穴钻孔对煤层破坏后的力链图与位移云图。

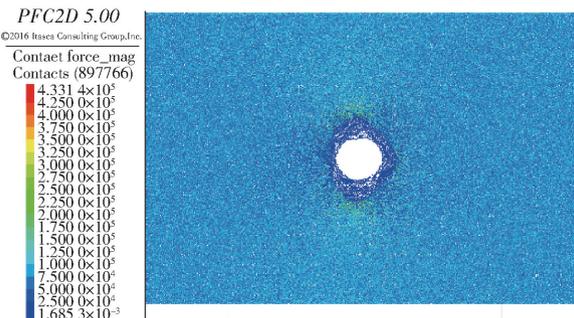


图 3 钻孔周围力链图

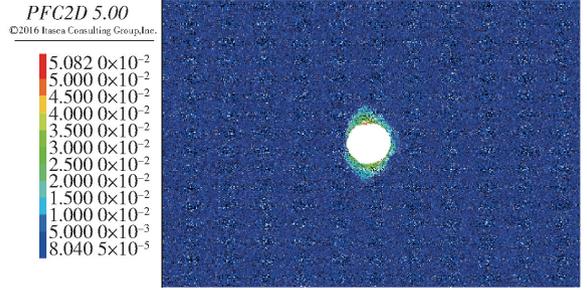


图 4 钻孔周围位移云图

② 钻孔周围裂隙分布

运用 PFC2D5.00 软件模拟在地应力状态下,孔穴对煤体破坏情况分析。在施加 16.03 MPa 的水平应力与 14.12 MPa 的垂直应力条件下,对煤层中部开挖 500 mm 直径的孔穴。煤体破坏情况如图 5 所示。

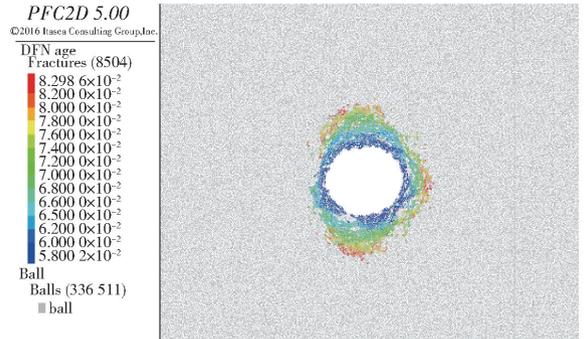


图 5 钻孔周围裂隙分布

由图 5 可知,煤体在 500 mm 孔径钻孔周围产生大量裂隙。且在裂隙发展前期,裂隙在钻孔周围均匀分布,随后裂隙产生主要以垂直方向为主。垂直方向裂隙最远处距孔心 500 mm,水平方向裂隙最远处距孔心 300 mm。

③ 孔隙率变化

在钻孔水平与垂直方向距钻孔距离 1 m 范围内布置 10 个测点,记录煤体周围孔隙率增量,具体如图 6 所示。具体数据见表 1,机械造穴钻孔对距孔心 500 mm 范围内煤体孔隙率产生一定影响,但此范围以外则影响较小。并且在弹性区域,水平方向

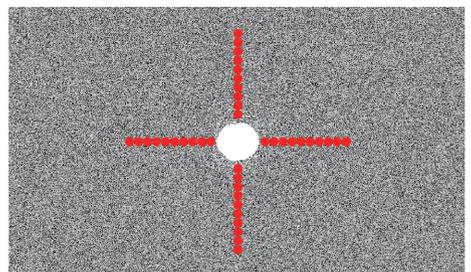


图 6 测点分布图

孔隙率增长,但垂直方向出现减小现象。

表1 钻孔附近测点孔隙率增量

据孔心距 离/mm	钻孔左侧 增量/%	钻孔右侧 增量/%	钻孔上侧 增量/%	钻孔下侧 增量/%
300	3.10	8.8	11.77	10.36
400	0.1	1.06	5.75	4.28
500	0.16	0.03	-0.07	0.09
600	0.12	0.04	-0.04	0.10
700	0.04	0.06	-0.05	-0.02
800	0.01	0.05	-0.01	-0.01
900	0.09	0.01	0	-0.01
1000	0.05	0.03	-0.02	-0.01
1100	0.06	0.02	-0.02	-0.04
1200	0	0.02	0.01	0

4.3 造穴钻孔工艺参数选择

1) 钻孔间距

通过数值模拟结果,并结合工作面实际情况。实际在矿上开展实验时,并采用的是“一孔多用”节省经济成本的方式。而掘进工作面的高度为3.2 m,宽度为5.2 m,故在掘进工作面采用单钻孔布局。

2) 造穴间距与造穴长度

造穴间距的确定是保证机械造穴增透效果的关键,间距过大则无法有效增透,过小则会影响施工进度,甚至导致孔穴垮塌。因此,在井下现场实验了3 m、5 m、7 m的造穴间距以及0.5 m、1.0 m、1.5、2.0 m的造穴长度,通过施工时间与增透效果,确定造穴间距为5 m、造穴长度为1 m为宜。

造穴钻孔设计深度120 m,保留23 m的安全抵抗线距,23 m至孔底每间隔5 m造穴一次,造穴直径0.5 m,造穴段长度1 m,共造17个穴,具体如图7所示。清水泵站泵压4~6 MPa,造穴煤量0.7 t/m³以上。

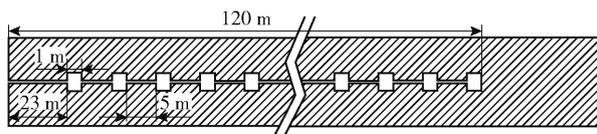


图7 机械造穴钻孔设计图

5 煤层注水工艺及参数研究

5.1 注水孔封孔工艺

矿用封孔器是利用膨胀胶管作为密封部件的封孔装置。使用前把封孔器伸入态下把封孔器煤层注水或气体抽放管接入钻孔煤层注水系统或气体抽放

系统中,实现对煤层注水防尘及煤层有毒有害气体设定位置,利用封孔器的封孔供水管提供的压力水使橡胶封孔器膨胀封孔,并利用封孔器供水系统中截止阀关闭供水,保持橡胶封孔器膨胀状态。在此状抽放功能。待煤层注水及气体抽放作业完成时,在保证钻孔内外无压差条件下,打开封孔器封孔供水管路截止阀卸压,使橡胶封孔器恢复到初始状态,拔出封孔器并整理好系统已备下次使用,具体如图8所示。

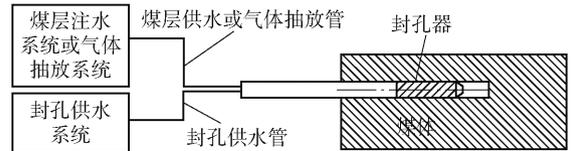


图8 封孔器系统连接示意图

5.2 注水压力的确定

煤层注水时的主要工艺参数包括单孔注水量、注水压力、注水孔的数目和注水时间等。合理的煤层注水参数的应使该参数注水条件下的煤层尽均匀湿润。考虑到煤层厚度和工作面推进速度及泵站流量,以及掘进工作面实际情况,采用单个孔注水的方式。煤层注水注水压力以不压裂煤层为前提,其被压裂的压力与上覆岩层的厚度有关。

根据经验公式计算注水压力,可按下式计算:

$$P_G \leq P_Z \leq P_R \quad (1)$$

$$P_R = 9.8 \times 10^{-3} H \gamma \quad (2)$$

式中: P_G —煤层中的瓦斯压力,MPa;

P_R —上覆岩层压力,MPa;

H —上覆岩层的平均厚度,m;

γ —上覆岩层的平均密度,t/m³,取2.5。

根据新元煤矿公司井下实际情况, H 取564.7 m。

计算得出: $2.928 \sim 3.66 \leq P_Z \leq 14.7$,

得最大注水压力 $P_Z = 14.12$ MPa。

5.3 注水量及注水时间的确定

1) 最大单孔注水量的确定

钻孔的单孔注水量可通过下式进行计算:

$$Q = K \times n \times V_C \times 10^3 \quad (3)$$

$$V_C = L \times M \quad (4)$$

式中: Q —单个钻孔注水量,m³;

K —漏水系数,取1.2;

n —湿润系数,取2%~2.5%;

V_C —湿润体积,m³;

L —钻孔长度与钻孔之间距,m;

M —煤层平均厚度, m。

计算得最大单孔注水量为 $Q = 27.08 \text{ m}^3$ 。

2) 单孔注水流量的确定

注水泵的流量 q 为 315 L/min , 即 $0.315 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3) 单孔注水时间的确定

$$t = \frac{Q}{q} \quad (5)$$

式中: t —单孔注水时间, min;

q —单孔注水流量, L/min。

计算可得: $t = 85.7 \text{ min}$, 即 1.429 h 。

6 机械造穴增透煤层注水效果分析

6.1 煤层润湿效果分析

通过对 3404、31001 工作面实施机械造穴增透煤层注水前后煤样水分含量进行测定, 比较注水前以及普通注水煤体周围含水率变化情况, 具体测点情况如图 9 所示。考察注水润湿效果, 具体测定结果见表 2、表 3。

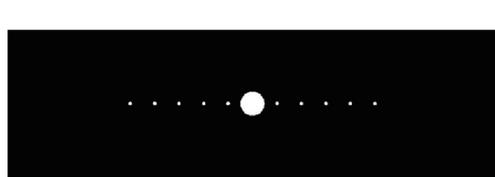
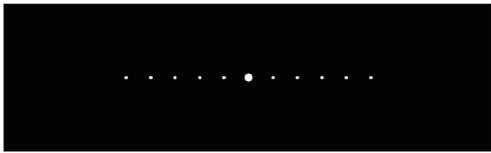


图 9 普通注水孔与机械造穴注水孔测点示意图

表 2 普通钻孔注水后煤样全水分含量记录结果(单位: %)

据孔心距离/ m	试样 1/ %	试样 2/ %	试样 3/ %	平均值/ %
0.5	2.13	2.61	2.31	2.35
1.0	1.90	2.21	1.82	2.01
1.5	1.78	1.83	1.79	1.80
2.0	1.70	1.70	1.73	1.71
2.5	1.61	1.73	1.70	1.68
3.0	1.45	1.60	1.54	1.53

由表 2、3 以及图 10 可以看出: 注水后, 普通注水后新增煤体水分平均为 $1.53\% \sim 2.35\%$, 新增水分平均为 $0.23\% \sim 1.05\%$, 在实施机械造穴后测得的煤体水分平均为 $4.83\% \sim 7.02\%$, 新增水分平均

为 $3.53\% \sim 5.75\%$ 。

表 3 机械造穴后注水后煤样全水分含量记录结果

据孔心距离/ m	试样 1/ %	试样 2/ %	试样 3/ %	平均值/ %
0.5	6.81	7.22	7.03	7.02
1.0	6.24	6.39	6.87	6.50
1.5	5.98	6.00	6.43	6.13
2.0	5.31	5.54	5.99	5.61
2.5	4.98	5.31	5.62	5.30
3.0	4.51	4.86	5.13	4.83

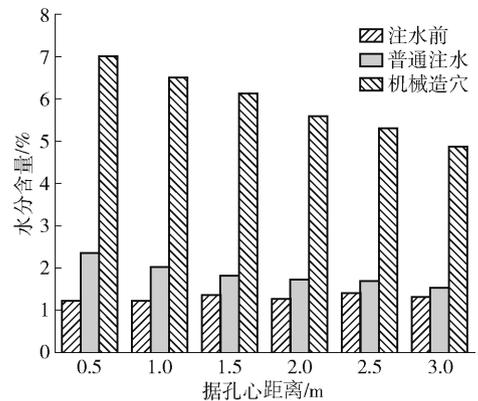


图 10 注水前后及机械造穴后注水煤样含水率

根据煤层注水规范, 注水后煤体水分含量增量需为 $1\% \sim 2\%$ 的合格标准来看, 注水润湿效果较好。通过比较可得, 机械造穴增透使得煤体的含水率明显提升, 煤体润湿越充分, 水分增量越大, 煤样水分平均增加越大。

6.2 注水后工作面粉尘浓度测试

在未注水前对工作面各工序处的粉尘浓度进行了测定, 针对掘进工作面的产尘特点, 主要测定了掘进工作面掘进机司机、掘进机后方 5 m 处与掘进机后方 10 m 处的粉尘浓度。粉尘浓度对比如图 11 所示。

经过计算可得, 机械造穴增透煤层注水之后的呼吸性粉尘与全尘浓度的降尘率约为 75.4% 和 78.1% 。相比采用普通注水, 呼吸性粉尘与全尘浓度进一步降低约 64.1% 和 70.4% 。

7 结论

运用机械造穴技术以优化煤层注水工艺, 能够一次性攻克掘进工作面 120 m 进尺范围内高浓度粉尘这一难题, 显著降低后续防尘作业的劳动强度与

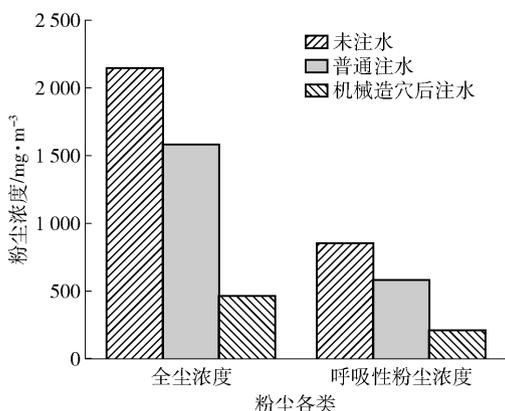


图 11 注水后粉尘浓度对比图

工作量。此外,该技术可从源头上有效抑制掘进工作面粉尘的产生量,进而大幅削减工作面粉尘浓度。在设备层面,可显著降低工作面设备因粉尘侵蚀而产生的磨损程度,延长设备使用寿命;从人员健康角度而言,能有效降低工作面人员罹患尘肺病的概率,保障矿工的生命健康安全。综合来看,该技术的应用可带来可观的经济效益与深远的社会效益。

[参考文献]

[1] 张延松. 综采放顶煤工作面粉尘防治及效果[J]. 煤炭工程师, 1995, (02): 2-6+20+47.

- [2] 菅光涛. 浅谈矿井粉尘危害及防治[J]. 山东煤炭科技, 2016, (11): 68-70+73.
- [3] 张茂宇, 贾福音. 煤矿井下粉尘监测、防治技术的现状与趋势[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(12): 188-191.
- [4] 刘祥. 矿井粉尘危险性可拓综合评价研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [5] 孟崇喜. 煤矿综掘工作面粉尘综合治理的探讨[J]. 科技视界, 2015, (21): 264-265.
- [6] 高雯, 袁聚祥, 范红敏. 煤炭企业粉尘职业危害现状及防治进展[J]. 中国煤炭工业医学杂志, 2008, 11(12): 1903-1904.
- [7] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(06): 1-7+13.
- [8] 王群星. 掘进工作面泡沫除尘及关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [9] 吴代安. 煤层干式打钻孔口除尘装置研究与设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
- [10] 徐恒恒. 新桥矿憎水煤层注水降尘关键技术与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [11] 张劲松, 武腾飞. 综采工作面煤层注水降尘技术试验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 173-175.

(上接第 12 页)

- [2] 张杰, 邱贤阳, 田志刚, 等. 地下矿山上向扇形中深孔爆破爆堆控制技术[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(10): 58-64.
- [3] 刘博, 苟永刚, 叶明珠, 等. 高寒区冻融环境下岩体爆破漏斗试验研究[J]. 爆破, 2024, 41(03): 60-68+110.
- [4] 蒋复量, 周科平, 邓红卫, 等. 地下矿山深孔崩矿爆破漏斗试验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(02): 10-13.
- [5] 文兴, 赵亮, 朱青凌, 等. 基于爆破漏斗试验的采场凿岩爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(07): 28-31.

- [6] 张兵, 杨世兴, 龚武田, 等. 基于爆破漏斗试验的中深孔爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(05): 25-30.
- [7] 彭锦浩, 付玉华, 陈元利, 等. 基于爆破漏斗试验的巷道爆破参数优化及应用[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(09): 23-26.
- [8] LIVINGSTON C W. Fundamental concepts of rock failure[J]. Quarterly of the Colorado School of Mines, 1956, 51(3): 1-11.
- [9] 张志呈. 爆破中量纲分析及相似原理[J]. 四川建材学院学报, 1992, (02): 63-69.