

丙烯酸基煤层抑尘剂抑尘特性研究

叶穹穹, 陆伟*

安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年5月1日; 发布日期: 2026年5月13日

摘要

为克服煤层注水技术中水分保持性不佳, 开采时粉尘抑制效率不理想的局限, 综合采用文献调研与实验验证相结合的方法, 研究制备了一种以丙烯酸为关键基质材料的煤层原位抑尘剂, 并通过保水率、产尘率、比表面积及孔径及扫描电镜测试, 对制备得到的丙烯酸基煤层抑尘剂进行抑尘性能测试与微观结构表征。结果表明: 经该抑尘剂处理后的煤样, 保水时间为水处理煤样的3.17倍; 开始产尘时间为第34 h, 产尘率仅为0.29%。完全干燥后的平均产尘率为2.10%, 较原煤降低约55.22%; 该抑尘剂可牢固附着在煤体表面, 并渗入煤体内部的裂隙与孔隙当中, 形成稳定的凝胶结构, 实现对煤体由内至外的有效包覆与胶结, 可有效抑制煤体产尘。

关键词

煤层抑尘剂, 保水率, 产尘率, 抑尘效果, 微观结构表征

Research on Dust Suppression Characteristics of Acrylic Acid-Based Coal Seam Dust Suppression Agent

Qiongqiong Ye, Wei Lu*

School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: March 27, 2026; accepted: May 1, 2026; published: May 13, 2026

Abstract

To overcome the limitations of poor water retention and unsatisfactory dust suppression efficiency during coal seam water injection technology, a method combining literature research and experimental verification was adopted to develop an in-situ dust suppressant for coal seams using acrylic

*通讯作者。

acid as the key matrix material. The prepared acrylic-based coal seam dust suppressant was tested for its dust suppression performance and microstructure characterization through water retention rate, dust production rate, specific surface area, pore size, and scanning electron microscope tests. The results showed that the coal samples treated with this dust suppressant had a water retention time 3.17 times longer than that of the water-treated coal samples; the start of dust production occurred at the 34th hour, with a dust production rate of only 0.29%. The average dust production rate after complete drying was 2.10%, approximately 55.22% lower than that of the original coal; this dust suppressant could firmly adhere to the coal surface and penetrate into the cracks and pores within the coal body, forming a stable gel structure, achieving effective internal and external encapsulation and cementation of the coal body, and effectively suppressing coal dust production.

Keywords

Coal Seam Dust Suppressant, Water Retention Rate, Dust Production Rate, Dust Suppression Effect, Microstructure Characterization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 煤炭在我国能源结构中的占比持续下降, 但它作为支柱能源的角色并未改变。随着采掘技术不断朝着机械化方向迭代升级, 工作面粉尘污染状况也变得更加突出[1]。井下粉尘的有效治理, 一直是煤炭开采安全作业中的一个关键难题。高浓度的煤尘积累可能引发爆炸事故, 严重威胁矿工的人身安全与设备的可靠运行; 此外, 劳动者若长期在高浓度粉尘环境下工作, 呼吸系统会遭受严重损害, 患上尘肺病等职业性疾病的风险也会明显上升[2]。

据统计, 2024 年全国共报告各类职业病新病例 11,289 例, 其中职业性尘肺病及其他呼吸系统疾病 7312 例(其中职业性尘肺病 7251 例) [3], 以煤工尘肺最为常见[4]。因此, 采取有效的防尘措施提升井下粉尘防控水平, 对推动煤炭行业实现持续健康发展具有重要意义。

目前, 随着煤矿粉尘防控技术的持续发展, 已逐步构建起煤矿减尘、抑尘、除尘的三位一体综合防尘技术体系, 三者形成协同互补的防尘技术闭环[5]。其中, 源头减尘以煤层注水为核心技术路径, 旨在从产尘源头减少粉尘生成量。现有研究为克服水对煤体的自然润湿效果不佳这一问题, 以在注水过程中添加表面活性剂作为重要的技术增强手段, 对煤层注水的抑尘效果展开研究, 取得了较多成果。LIN 等[6]进一步合成一种双酰胺基阳离子表面活性剂, 将其与氯化钾溶液在酸性条件下复配为压裂液, 实验结果显示其可有效强化煤层注水过程中的润湿性能; 林明磊等[7]研究表明, 采用质量分数为 1%的 TX-100 与 DSS 复配溶液进行注水后, 综掘巷道降尘效率可达 71.04%, 相较于仅添加 0.05% TX-100 溶液提升 43.45%, 证实高浓度复合表面活性剂对疏水煤体可产生明显的协同润湿作用; 罗瑞冬等[8]基于改性大豆蛋白, 引入十二烷基苯磺酸钠等组分, 成功研制出一种适用于煤层的高效抑尘剂。上述研究成果证实, 润湿剂的引入可显著提升煤体的润湿程度与水分渗透效率, 优化煤层注水过程。除在煤层注水环节常规添加抑尘剂以提升煤体润湿效能外, 行业内亦通过提高注水压力的技术手段扩大煤层注水后的润湿范围, 最终达成强化抑尘效果的目标; 张智渊[9]针对不同注水工艺与注水参数下的煤层注水效果进行了系统分析, 揭示了毛细管力及注水压力对各类煤层注水效果的调控规律。前述学者分别围绕煤体润湿性调控与

注水压力优化两大核心维度,开展煤层注水抑尘效果的相关研究并取得了较为理想的成果。然而,此类技术措施在实际应用中仍存在明显局限,具体表现为注入水分易发生流失,导致开采作业阶段的注水抑尘效能欠佳[10]。

高分子类抑尘剂因保水、成膜、胶结能力突出,已成为煤层抑尘领域的研究热点。从原料来源来看,淀粉、纤维素、壳聚糖等天然高分子抑尘剂,不仅原料获取方便,还具备良好的生物降解性,不过这类抑尘剂也存在较为突出的短板。具体而言,其锁水持续时间有限,遇水后容易流失,且形成的膜层强度往往达不到实际应用的要求,这就导致在井下潮湿环境与机械扰动并存的复杂条件下,难以实现长时间的稳定抑尘。与天然高分子抑尘剂不同,聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、聚氨酯等人造合成高分子抑尘剂,在胶结性能和成膜质量上表现更优,能够在煤体表面形成稳固的固结层。但实际应用中发现,多数这类合成产品存在黏度偏高的问题,进而导致渗透能力不足,很难深入到煤体内部的微孔隙与裂隙当中,只能对煤体表面进行抑尘处理,无法从根本上遏制粉尘的产生[11]。为改善上述问题,部分高分子抑尘剂经过了改性处理,通过接枝聚合、交联反应等技术手段优化了自身性能,但即便如此,仍存在诸多局限。比如制备工艺相对复杂,井下原位成胶的可控性较差,与煤体界面的结合力也不够充足,这些因素都在一定程度上限制了其实际工程应用[12]。值得注意的是,聚丙烯酸类高分子具有自身独特的优势,其亲水性强、交联成胶性能优良,且渗透阻力较低,能够在煤体内部原位形成三维凝胶网络,既能实现深度渗透,又能达到长效保水的效果。但目前,将这类高分子材料应用于煤层原位抑尘,并系统开展保水、产尘与微观孔隙结构耦合作用机理的相关研究,仍较为匮乏[13]。

为此,本研究提出研发一种丙烯酸基煤层抑尘剂。并对制备的抑尘剂进行抑尘性能测试和微观结构表征,通过宏观产尘特性和微观表征手段,深入阐释其多组分间的协同抑尘机理,为从根源上提升粉尘抑制效能提供创新性思路支撑与实践参考。

2. 抑尘剂实验材料与制备过程

2.1. 实验煤样及抑尘剂原材料

取东滩煤矿的煤样作为实验初始原料,严格依照《煤样的制备方法》(GB474-2008)对其进行破碎、筛分、清洗、烘干,获得初始粒度为2~5目的煤块,完全干燥之后置于实验室中,以备后续实验使用。该煤样的工业分析结果见表1。制备抑尘剂所需原料包括:丙烯酸(AA)、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)、过硫酸铵(APS)、亚硫酸氢钠(NaHSO₃)和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)。

Table 1. Industrial analysis of coal

表 1. 煤的工业分析

煤样	水分	灰分	挥发分	固定碳
烟煤	2.68	7.82	33.78	55.66

2.2. 实验过程

1) 丙烯酸基胶体类煤层抑尘剂的配置:取一个装有100 ml水的烧杯,加入质量分数为0.1%的SDBS作为表面活性剂。随后,通过四因素四水平的正交实验确定抑尘剂的最佳配比:9wt% AA + 0.08wt% MBA + 0.64wt% APS + 0.16wt% NaHSO₃ + 0.1wt% SDBS。

2) 保水和产尘率测试:选取烟煤作为研究对象,将其破碎筛分得到粒径在2~5目的煤块。每组称取50 g,分为三种处理:原煤、经水浸泡48 h的煤样,以及经抑尘剂溶液浸泡48 h的煤样。浸泡结束后,将煤样过滤,置于50℃恒温干燥箱中干燥。从干燥开始时起,每隔2 h测定一次各组的保水率

与产尘率。

3) 微观抑尘表征: 为探究丙烯酸基胶体类煤层抑尘剂对煤体的抑尘效果和作用机制, 对原煤、水处理和抑尘剂处理的煤样进行比表面积及孔径测试和扫描电镜测试。在此基础上, 结合宏观产尘特性, 阐释其协同抑尘机制。

具体的实验流程图见图 1 所示。

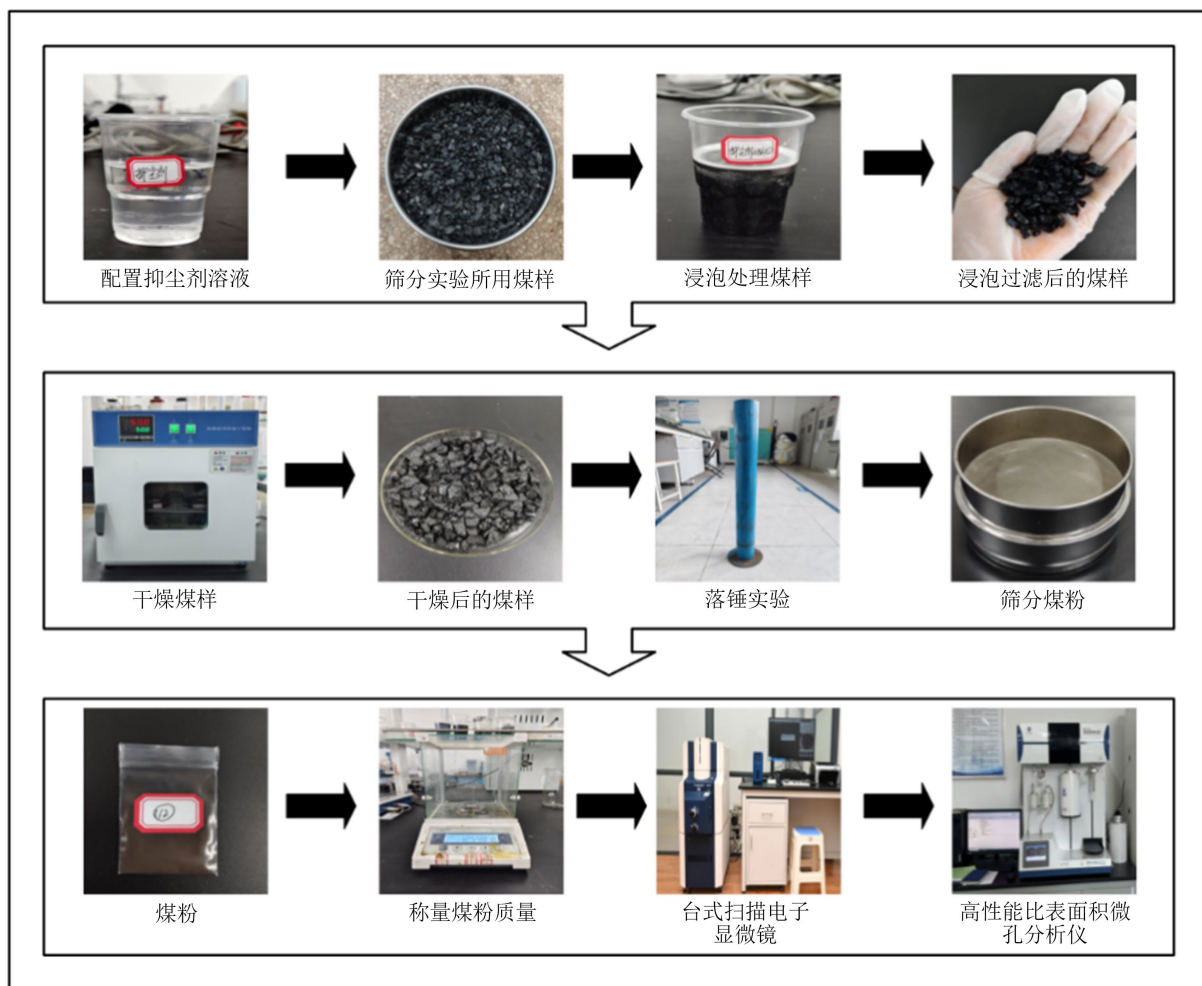


Figure 1. Experimental procedure

图 1. 实验流程

2.3. 实验方法

1) 保水率测试

通过测定原始煤样、经抑尘剂浸泡并过滤的煤样以及干燥后煤样的质量, 利用所得质量差分别求得处理煤样的水分含量 M 和干燥煤样的水分含量 m 。进而, 将 m 与 M 的比值定义为保水率 R , 具体计算公式参见公式(1)。保水率数值越高, 表明保水作用越明显, 其水分保持性能也越优良。

$$R = \frac{m}{M} * 100\% \quad (1)$$

公式(1)中, R 表示经过处理后的煤样保水率; M 对应于干燥前煤样所含水分质量, 等于浸泡过滤后

煤的质量 - 原煤质量; m 则代表干燥后煤样中剩余水分质量, 等于烘干后煤的质量 - 原煤质量。

2) 产生率测试

借助自重 3 kg 的落锤设备, 在 0.6 m 高度处对经浸泡与烘干处理后的煤样实施冲击破碎, 对单一样品进行 10 次落锤操作, 每完成 5 次冲击后采用 200 目标筛对试样进行筛分, 累计完成两次筛分作业, 对筛下所得粉尘进行称量, 得到粉尘生成质量 w , 将初始煤样质量记作 W , 通过二者比值计算得到产生率 Y , 计算方式如公式(2)所示。产生率数值越低, 说明试样的抑尘成效越显著, 对应的抑尘特性越出色。

$$Y = \frac{w}{W} * 100\% \quad (2)$$

3) 比表面积及孔径测试

实验选用贝士德仪器科技(北京)有限公司制造的高性能比表面微孔分析仪对多组煤样实施低温液氮等温吸附测试。

具体测试步骤如下: 取 0.1 g 煤样置于样品管中, 在 105℃ 下真空脱气 12 小时。待脱气处理完成后, 将装有待测样品的试管安放至测试位置, 在 101.3 kPa、77 K 条件下测试比表面积与孔径分布。

4) 扫描电镜测试

实验过程中选用日本日立(HITACHI)公司制造的 FlexSEM1000 型台式扫描电子显微镜, 对多组煤样开展微观表征测试。先把制备完成的样品借助导电胶粘附于试样台, 再使用气吹工具清理样品表面, 将试样台固定并进行 300 秒喷金处理, 以此提升煤样品的导电性。分别打开插座按钮、电脑主机、扫描主机右侧机器按钮和 FlexSEM 1000 软件, 在进气完成后, 打开样品仓并放入样品台。点击软件中 Specimen exchange 和 Stub size, 选择 80 mm。再推入样品台, 在推紧之后, 点击电脑上的 EVAC。在滴的一声之后, 点击 Start, 屏幕出现图像, 开始测试。测试过程中, 选取合适的放大倍率, 观察并记录煤样表面的微观形态与组织结构。

3. 实验结果与讨论

3.1. 抑尘剂的配置与分析

通过前期实验和相关文献资料的研究, 确定正交实验的四个因素和水平。四个因素分别为: AA 的量、MBA 的量、APS 和 NaHSO₃ 的总量、APS 和 NaHSO₃ 的比例。各因素的不同水平值如表 2 所示。

借助 SPSS 软件制定正交设计表, 如表 3 所示。开展共计 16 组试验研究, 每组试验均重复进行 3 次以保障数据可靠性。

依据正交实验方案开展相关试验操作, 完成测试后把表 3 所对应的实验数据录入 SPSS 软件中, 借助方差分析方法进行数据处理, 最终得到的正交实验分析结果见表 4。

Table 2. Values of each factor at different levels

表 2. 各因素不同水平值

序号	A AA 的量(g)	B MBA 的量(g)	C APS 和 NaHSO ₃ 的总量(g)	D APS 和 NaHSO ₃ 的比例
1	9	0.07	0.7	4:1
2	12	0.08	0.8	3:2
3	15	0.09	0.9	1:1
4	18	0.10	1.0	2:3

Table 3. Orthogonal experimental design table**表 3.** 正交实验设计表

序号	A AA 的量(g)	B MBA 的量(g)	C APS 和 NaHSO ₃ 的总量(g)	D APS 和 NaHSO ₃ 的比例	综合实 验条件	成胶 时间(h)
1	1 (9)	1 (0.07)	1 (0.7)	1 (4:1)	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	5.25
2	1 (9)	2 (0.08)	2 (0.8)	2 (3:2)	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	4.1
3	1 (9)	3 (0.09)	3 (0.9)	3 (1:1)	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	3
4	1 (9)	4 (0.10)	4 (1.0)	4 (2:3)	A ₁ B ₄ C ₄ D ₄	2.15
5	2 (12)	1 (0.07)	2 (0.8)	3 (1:1)	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	1
6	2 (12)	2 (0.08)	1 (0.7)	4 (2:3)	A ₂ B ₂ C ₁ D ₄	1
7	2 (12)	3 (0.09)	4 (1.0)	1 (4:1)	A ₂ B ₃ C ₄ D ₁	1.8
8	2 (12)	4 (0.10)	3 (0.9)	2 (3:2)	A ₂ B ₄ C ₃ D ₂	0.83
9	3 (15)	1 (0.07)	3 (0.9)	4 (2:3)	A ₃ B ₁ C ₃ D ₄	0.5
10	3 (15)	2 (0.08)	4 (1.0)	3 (1:1)	A ₃ B ₂ C ₄ D ₃	0.5
11	3 (15)	3 (0.09)	1 (0.7)	2 (3:2)	A ₃ B ₃ C ₁ D ₂	1.17
12	3 (15)	4 (0.10)	2 (0.8)	1 (4:1)	A ₃ B ₄ C ₂ D ₁	1.77
13	4 (18)	1 (0.07)	4 (1.0)	2 (3:2)	A ₄ B ₁ C ₄ D ₂	0.66
14	4 (18)	2 (0.08)	3 (0.9)	1 (4:1)	A ₄ B ₂ C ₃ D ₁	2.5
15	4 (18)	3 (0.09)	2 (0.8)	4 (2:3)	A ₄ B ₃ C ₂ D ₄	0.5
16	4 (18)	4 (0.10)	1 (0.7)	3 (1:1)	A ₄ B ₄ C ₁ D ₃	0.83

Table 4. Test of inter-subject effects on gel formation time**表 4.** 成胶时间主体间效应检验

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	31.793 ^a	12	2.649	31.131	0.008
截距	53.619	1	53.619	630.024	0.0001
AA 的量	17.38	3	5.793	68.072	0.003
MBA 的量	0.335	3	0.112	1.311	0.415
APS 和 NaHSO ₃ 的总量	2.289	3	0.763	8.967	0.052
APS 和 NaHSO ₃ 的比例	11.789	3	3.93	46.173	0.005
误差	0.255	3	0.085		
总计	85.667	16			
修正后总计	32.048	15			

a. R 方= 0.992 (调整后 R 方 = 0.960)。

通过表 4 的方差分析可知, 修正模型的显著性 p 值为 0.008 ($p < 0.05$), 表明所建立的统计模型整体上具有统计学意义, 即所考察的实验因素对成胶时间存在显著影响。而模型确定系数 $R^2 = 0.992$, 调整后 $R^2 = 0.960$, 这一数据表明, 该模型能够对成胶时间 99.2% 的变化情况做出合理的解释, 实验数据与模型之间具有高度一致性, 模型拟合效果较好。

其中, AA 的量的 p 值为 0.003 ($p < 0.01$), APS 和 NaHSO_3 的比例的 p 值为 0.005 ($p < 0.05$), 说明这两个变量在聚丙烯酸凝胶的合成过程中, 均对凝胶时间产生了显著效应。APS 和 NaHSO_3 的总量的影响次之, 而 MBA 的量的 p 值最大, 意味着它对凝胶时间的作用相对较弱。因此, 按对凝胶时间影响的强度从大到小排序, 依次是: AA 的量、APS 和 NaHSO_3 的比例、APS 和 NaHSO_3 的总量、MBA 的量。

借助 SPSS 软件对四种变量的估算边际平均值进行计算。该值表征在控制其余三个变量效应的条件下, 通过对相关数据进行均值处理, 进而预测得出各变量在不同水平条件时抑尘剂的成胶时间数值。该数值在一定范围内有助于评估不同变量对成胶时间的影响强度。由于在该研究中成胶时间数值越大代表性能越优, 故以边际平均值中的最大值所对应的变量水平确定为最佳条件。依据 SPSS 软件输出的估算边际平均值结果, 分别绘制出四个变量的估算边际平均值趋势图, 如图 2 所示。

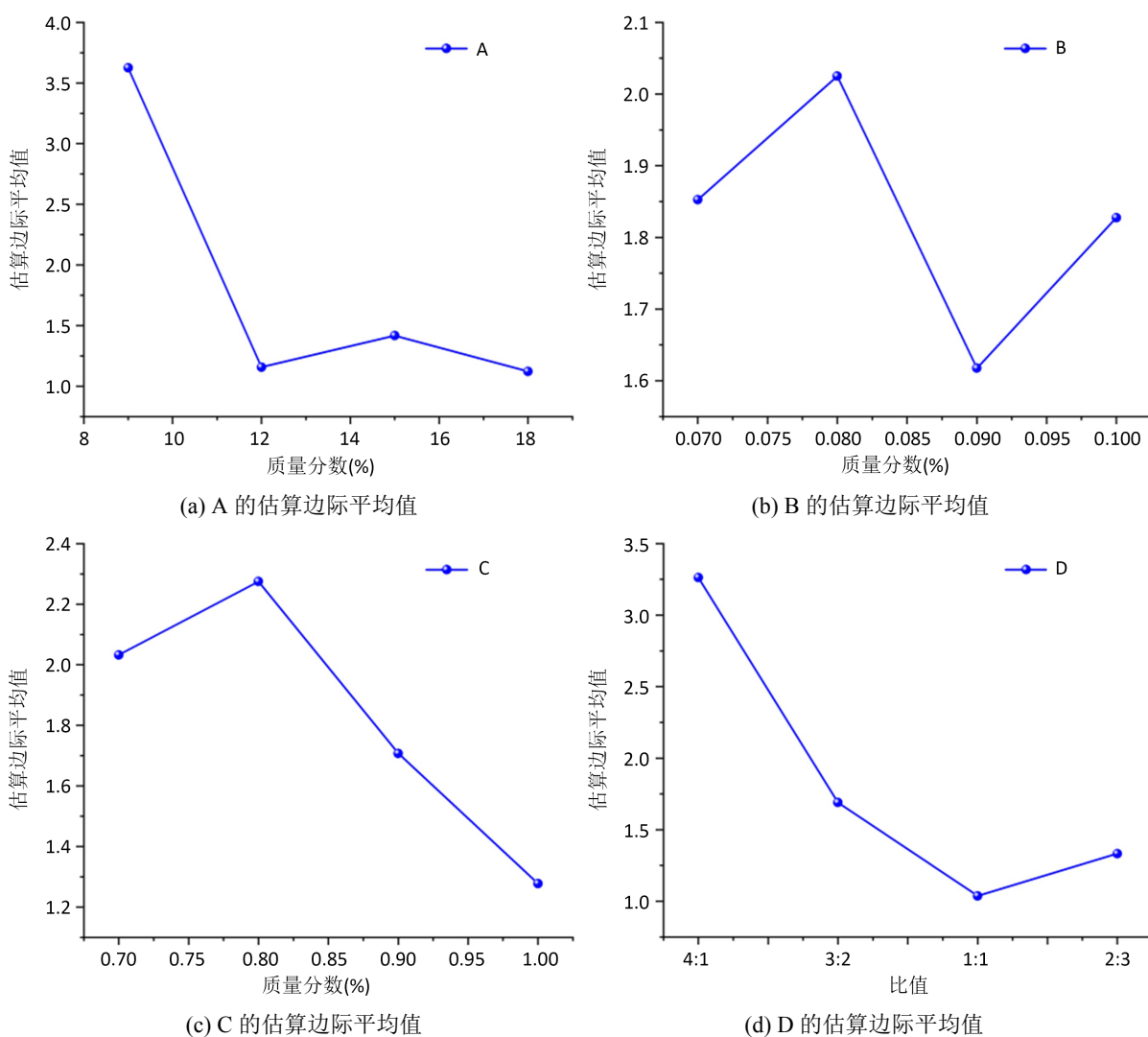


Figure 2. Estimated marginal average values of four variables

图 2. 四种变量的估算边际平均值

由图 2 可见, 四个变量分别在水平一、二、二、一时估算边际平均值达到最高值, 故最优水平组合确定为 $A_1B_2C_2D_1$, 对应的正交试验最优配比为 9wt% AA + 0.08wt% MBA + 0.64wt% APS + 0.16wt% NaHSO_3 + 0.1wt% SDBS。

3.2. 正交实验结果验证

根据优选抑尘剂配方配置抑尘剂溶液, 对其成胶时间进行测定, 所得数据列于表 5。

Table 5. Test results of gelation time of dust suppressant

表 5. 抑尘剂成胶时间测试结果

AA/g	MBA/g	APS/g	NaHSO ₃ /g	SDBS/g	成胶时间/h
9	0.08	0.64	0.16	0.1	6

将抑尘剂相关测试指标: 成胶时间与前文正交试验所得成胶时间数值进行对比后可知, 此优化配比在这一指标上表现优于其余配比方案, 该比较结果证实了正交实验结论的准确性。基于上述验证结果, 经正交实验优化后确定该抑尘剂的最优配方组成为: 9wt% AA + 0.08wt% MBA + 0.64wt% APS + 0.16wt% NaHSO₃ + 0.1wt% SDBS。

4. 抑尘剂的抑尘效果

4.1. 原煤及水处理煤的产尘特性研究

实验初期, 对选取的多份质量均为 50 g、粒径介于 2~5 目的煤样开展 48 h 浸泡实验后, 对试样进行过滤处理, 并置于 50℃ 恒温干燥箱内进行干燥。在干燥阶段, 每隔 2 h 测定一次煤样的水分含量变化与产尘量, 并据此计算保水率与产尘率。在维持实验条件一致的情况下, 将未经处理的原始煤样同时放入干燥箱内进行干燥, 每 2 h 测定一次产尘率。原煤的产尘率随干燥时长的变化情况和经水处理煤样的产尘率、保水率随干燥时长的变化情况见图 3。

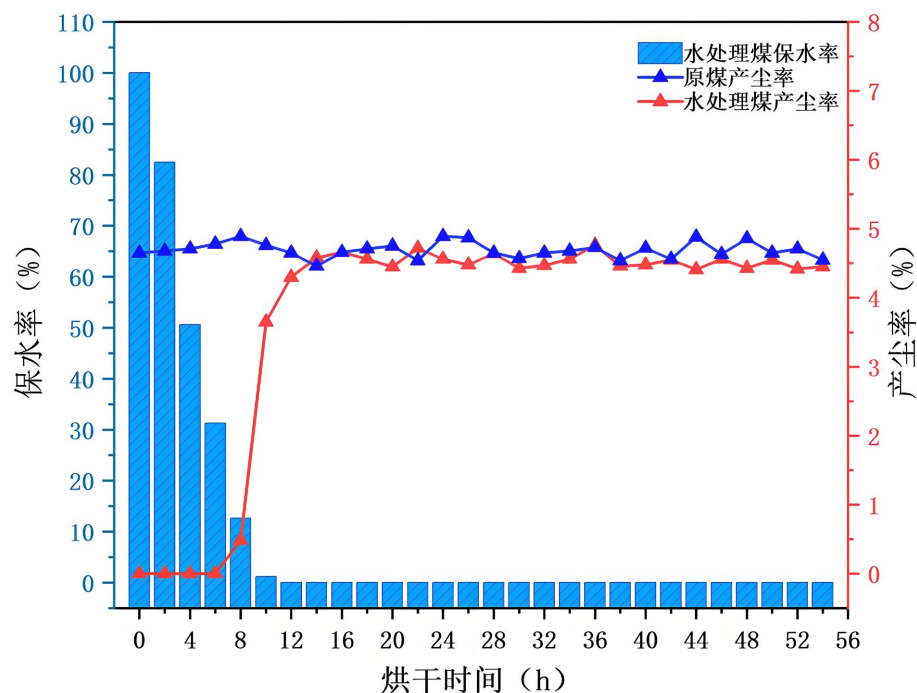


Figure 3. Dust generation and water retention rates of raw coal and water-treated coal samples

图 3. 原煤及水处理煤样的产尘和保水率

由图 3 可知, 随着烘干时间的延长, 水处理煤保水率呈现快速下降后趋于平缓的趋势。在 0 到 10 小

时的干燥阶段, 保水率由 100% 降至 1.13%, 煤中水分几乎完全流失。干燥 12 h 小时后, 保水率已降至零并保持稳定状态。

对比不同干燥时长下的产尘情况, 水处理煤样与原煤存在显著差异。原煤在整个过程中始终保持着较高的产尘水平, 波动幅度不大, 平均产尘率为 4.70%; 水处理煤样在干燥时长为 0 到 6 小时内, 产尘率一直为零, 表现出完全的粉尘抑制效果。直到 8 小时时, 产尘率才上升到 3.65%, 之后进入稳定区间, 平均产尘率为 4.52%, 在完全干燥后的平均产尘率较原煤降低约 2.80%。

综上分析可知, 通过向煤层注水进行粉尘抑制, 煤体内部与表面可吸附较多水分, 初期可在表面形成较好的湿润层。但随着时间推移, 水分易发生快速散失, 进而造成降尘效果显著降低[14] [15]。为此, 有必要在注水工艺中复合使用其他类型抑尘剂, 以此提升体系对煤体的持水能力与整体降尘效能。

4.2. 抑尘剂的抑尘效果研究

根据正交试验优化后确定的抑尘剂的最优配方, 分别选用水、9wt%PAA 和抑尘剂对煤样开展浸泡和干燥处理。不同试样处理后, 煤样的产尘率、保水率随干燥时长的变化情况见图 4 和图 5。

从图 4 可见, 不同处理方式下煤样的保水率变化规律存在显著差异, 整体表现为水处理 < 9wt%PAA 处理 < 抑尘剂处理。水处理煤样在 12 h 时, 保水率就降为 0; 9wt%PAA 处理煤样保水率在 12 h 时, 保水率仍维持在 42.37%, 干燥时间为 24 h 时保水率才降为 0, 其保水时间为水处理的 2 倍; 抑尘剂处理煤样在 12 h 时保水率仍高达 89.29%, 干燥时间为 38 h 时保水率才降为 0, 其保水时间为水处理的 3.17 倍, 为 9wt%PAA 处理煤样的 1.58 倍。且抑尘剂处理煤样在干燥初期水分散失速率显著放缓, 优于前两者。这一结果证实, 该抑尘剂能够显著阻滞水分的散失, 展现出优异的保水能力。

从图 5 可见, 在整个干燥过程中, 原煤的产尘率波动幅度较小, 平均产尘率为 4.70%; 经水处理的煤

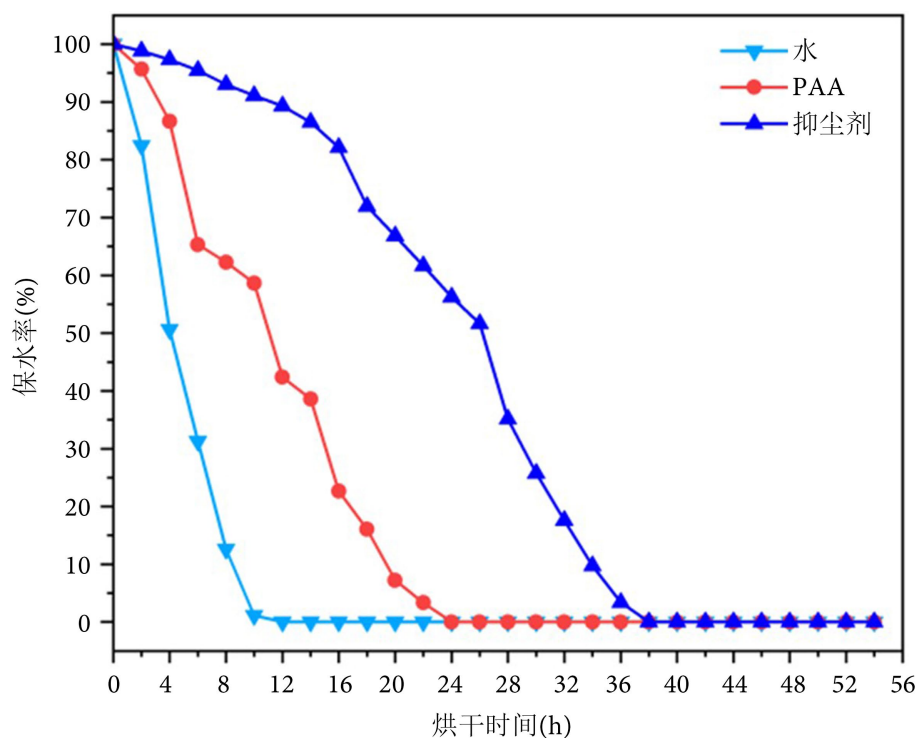


Figure 4. Variation of water retention rate of coal samples treated with different materials with drying time

图 4. 不同材料处理煤样保水率随干燥时间的变化

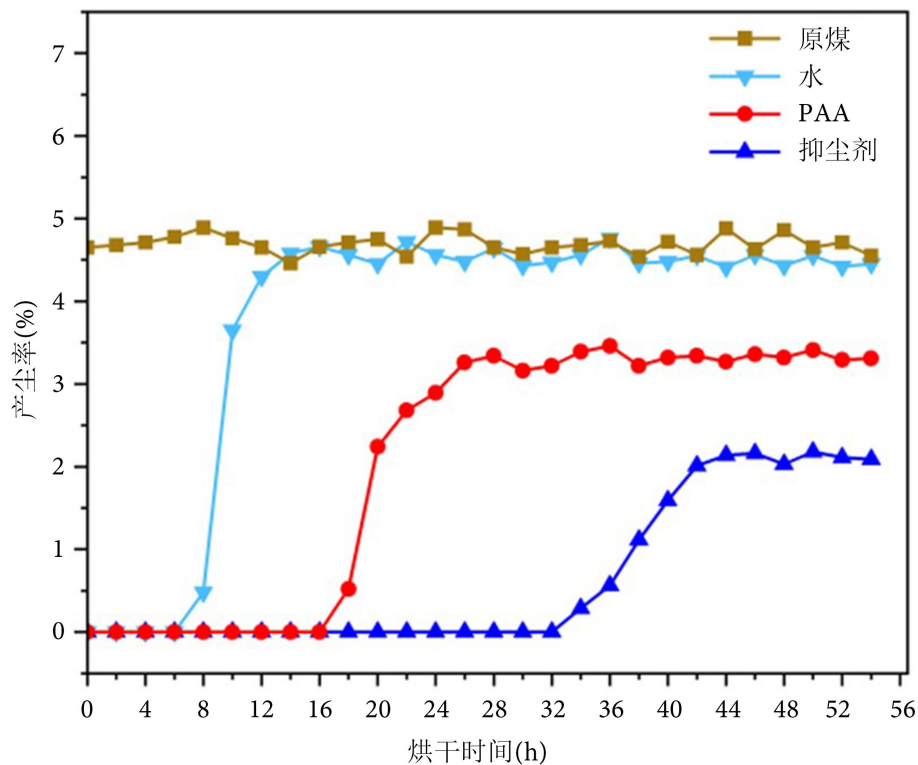


Figure 5. Variation of dust generation rate of coal samples treated with different materials over time of drying

图 5. 不同材料处理煤样产尘率随干燥时间的变化

样, 在干燥 8 小时后开始产生粉尘, 完全干燥后平均产尘率为 4.52%, 相较于原煤下降了 3.62%; 经 9wt%PAA 处理的煤样, 直到干燥 18 小时之后才开始产生, 完全干燥后平均产尘率为 3.31%, 相较于原煤下降了 29.42%。这主要是因为 PAA 在煤样表面形成了聚合物吸附层, 延缓了水分蒸发, 并增强了颗粒间的粘结, 有效延长了抑尘周期; 使用抑尘剂处理的煤样, 在干燥开始后的 32 小时内, 产尘率始终保持为 0。直到第 34 小时, 才开始出现少量粉尘, 此时的产尘率也仅为 0.29%。待煤样完全干燥后, 平均产尘率为 2.10%, 较原煤降低 55.22%, 较 9wt%PAA 处理煤样降低 36.56%。这一现象与该抑尘剂本身的胶体特性有关: 其初始黏度较低, 能充分进入煤体内部的细微孔隙。随时间推移, 在煤体内部发生自由基聚合, 并在 MBA 的交联作用下形成三维聚丙烯酸水凝胶网络, 对煤体从内到外进行有效的包裹和粘结, 增强煤体的韧性, 显著抑制水分的散失, 实现长效抑尘。

5. 微观结构表征与分析

5.1. 比表面积及孔径分析

煤作为一类具备发达孔隙构造与较高比表面积的混合物[16], 其内部比表面积远超外表面积。若抑尘剂能够渗入煤孔隙当中并在内表面形成凝胶结构, 将更有助于提升煤的润湿性能与保水能力, 并优化煤的结构韧性, 降低脆性, 进而从源头遏制粉尘生成。煤体内部的孔隙特征, 是影响其界面吸附行为与粉尘析出规律的关键微观指标。采用 BET 计算方法分别对原煤、9wt% PAA 溶液处理和抑尘剂处理的煤样比表面积、孔容积和平均孔直径进行定量分析, 所得数据如表 6 所示。

分析表 6 的数据可知, 与原煤样品相比, 经过水处理的煤样, 其比表面积仅下降至 $20.616 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 孔容积也只有轻微降低, 数值为 $0.0311 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 两者的下降幅度分别为 12.38%与 1.89%。水对煤体所产

Table 6. Data on specific surface area and pore structure of coal before and after different material treatments
表 6. 不同材料处理前后煤的比表面积和孔隙结构数据

煤样	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容积/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔直径/nm
原煤	23.5149	0.0317	5.3923
水处理煤	20.616	0.0311	6.0341
9wt% PAA 处理煤	19.1526	0.026	5.4301
抑尘剂处理煤	3.1656	0.0112	14.1521

生的作用, 主要局限在物理润湿的范畴之内, 水分子仅依靠毛细作用填充在煤体的大孔缝隙当中, 无法对煤体内部的微孔及介孔形成有效的堵塞效果, 所以煤体的孔径分布并未出现明显变化, 平均孔直径仅小幅上升至 6.0341 nm; 在进一步采用 9wt% PAA 溶液对煤样进行处理后, 其比表面积与孔容积均出现了较为明显的下降趋势, 分别降至 $19.1526 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 与 $0.026 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 与原煤相比, 下降幅度分别达到 18.55% 和 17.98%。这一现象证实了高分子吸附填充机制的存在: PAA 长链可借由氢键等分子间作用力附着于煤颗粒表面, 并对部分微小孔隙产生物理填充作用, 进而使煤体的比表面积有所降低。然而, 本实验中 PAA 处理后的平均孔径与原煤接近, 说明 PAA 作为一种聚合物, 黏度较大, 不能很好地进入到煤体内部细微孔隙中, 并未显著改变孔隙的尺寸分布, 其对粉尘的长期控制效果仍受限于对孔隙结构改造的不足; 经抑尘剂处理后的煤样, 比表面积急剧下降至 $3.1656 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 仅为原煤样品的 13.46%, 与原煤相比, 下降幅度高达 86.54%。此外, 其孔容积缩减至 $0.0112 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 降幅高达 64.67%。且其平均孔直径上升至 14.1521 nm, 增幅高达 162.45%。综合上述实验数据表明, 抑尘剂具备更优异的渗透与流动性能, 能顺利渗透到煤体内部细微的孔隙当中, 在孔隙内表面反应生成凝胶, 提升煤的塑性及保水能力, 从源头上更有效地抑制开采过程中粉尘的产生。

综上, 三种处理方式对煤体孔隙结构的影响程度呈现出清晰的梯度差异: 水处理 < 9wt% PAA 处理 < 抑尘剂处理。抑尘剂处理从根本上改变了煤样的孔隙形貌, 这是其抑尘性能显著优于水处理与单一 PAA 处理的核心微观机制。

5.2. 扫描电镜分析

为深入探究抑尘剂的作用成效与内在机制, 利用扫描电子显微镜对原煤、9wt% PAA 溶液处理和抑尘剂处理的煤样进行观测, 考察各类材料的抑尘性能, 其表面微观形貌见图 6。

从图 6 中能够观察到: 原煤的表面整体来看平整顺滑, 边缘破损处薄且不规整, 受外力撞击后易二次碎裂, 生成粉尘; 经 9wt% PAA 处理后, 煤样表面变得粗糙多孔。在观测区域内, 能看到许多不规则、互相交联的团簇或絮状物聚集, 形成了错综复杂的孔隙网络。这一现象说明, PAA 能够在煤体表面形成一层包覆层, 有助于减缓内部水分的散失; 经抑尘剂处理的煤样表层, 会形成一层连续且有一定厚度的覆盖层。该覆盖层呈现出不规则的片状或膜状结构, 各部分相互交织、搭接在一起, 构成了密度较高的网状体系。在局部观测区域内, 这种网状结构还堆积并连接着煤表面的细小颗粒, 表现出明显的团聚特性。这种结构增强了抑尘剂与煤体的粘结强度, 有效填充煤体原有的部分裂缝和孔隙, 改善煤体本身的脆性, 最终达到有效抑制粉尘产生的效果。

5.3. 抑尘剂抑尘机理分析

丙烯酸基煤层抑尘剂的原料组成为: AA、MBA、APS、 NaHSO_3 和 SDBS。SDBS 作为表面活性剂, 能大幅减小溶液的表面张力, 从而确保抑尘剂溶液充分浸润并渗入煤层微观孔隙。而渗入的丙烯酸单体在氧化-还原引发体系(APS-NaHSO_3)作用下于煤体内部发生自由基聚合, 并在 MBA 的交联作用下形成

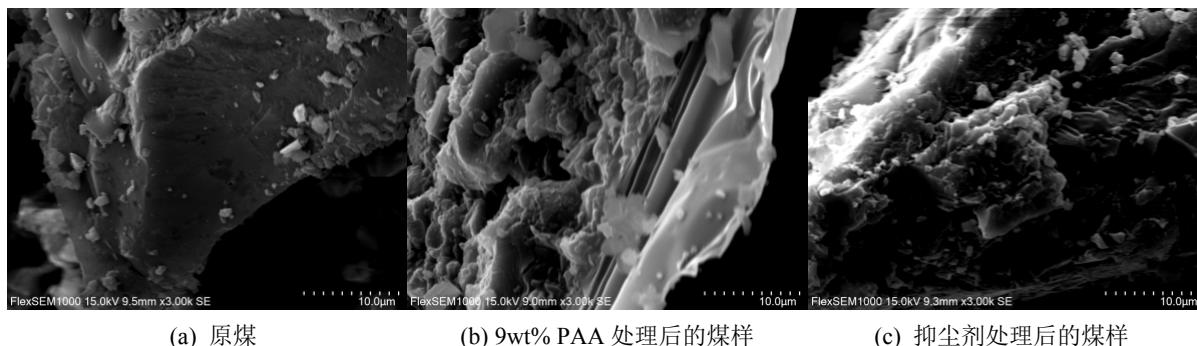


Figure 6. SEM image

图 6. SEM 图像

三维聚丙烯酸水凝胶网络,这种网络结构可实现对煤体从内到外有效的包裹和粘结,增强了煤体的韧性。此外,聚丙烯酸分子链上分布着众多亲水性的羧基,这些官能团可通过氢键作用吸附水分子,且交联形成的空间网络能锁闭大量自由水,从而保证抑尘剂具有优异的保水性能。上述两种作用相互协同,显著提升了煤体的保水和抑尘效能,最终达成从源头控制粉尘产生的目的。

6. 实际应用挑战

丙烯酸基煤层抑尘剂在实验室环境下展现出优异的保水及抑尘效能,但将其应用于井下规模化作业时,仍存在多方面亟待解决的挑战。

1) 经济成本较高

丙烯酸、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺、过硫酸铵、亚硫酸氢钠等精细化工原料的价格显著高于传统润湿剂,若在井下进行大规模加注,会直接导致吨煤防尘成本上升。此外,现场作业所需的配套搅拌、计量及加注设备,还会进一步增加整体综合投入。

2) 环境影响

聚丙烯酸凝胶的降解周期相对较长,长期向井下注入后,容易在煤体内部及矿井水环境中发生累积,存在潜在的生态风险。同时,凝胶残留会使矿井废水的化学需氧量升高,进而增加废水处理的负荷。

3) 对煤质与开采的影响

抑尘剂中的有机组分有可能对煤的灰分、挥发分含量及精煤回收率产生轻微影响。另外,凝胶会对煤层孔隙形成封堵作用,导致煤层透气性下降,这对瓦斯抽采工作会产生不利影响。

7. 结论

1) 丙烯酸基煤层抑尘剂的组成为: 9wt% AA + 0.08wt% MBA + 0.64wt% APS + 0.16wt% NaHSO₃ + 0.1wt% SDBS。

2) 抑尘剂处理煤样干燥 38 h 时保水率才降为 0,其保水时间为水处理煤样的 3.17 倍,为 9wt% PAA 处理煤样的 1.58 倍。且干燥初期水分散失速率显著放缓,显著优于水处理和 9wt% PAA 处理煤样;采用抑尘剂处理的煤样,直到第 34 小时,才开始产生尘,且产尘率仅为 0.29%。完全干燥后的平均产尘率为 2.10%,较原煤降低约 55.22%,较 9wt% PAA 处理煤样降低 36.56%。

3) 微观层面的检测分析表明,该抑尘剂可牢固附着在煤体表面,并可渗入煤体内部的细小裂隙与孔隙当中。随时间推移,其能在煤体内部及表面形成稳定的三维网状凝胶结构,实现对煤体由内至外的有效包覆与胶结,抑制水分散失,实现长效抑尘。

参考文献

- [1] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
- [2] 陈浩, 张超, 王星龙, 等. 煤层复配润湿剂研制及降尘效果[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(3): 495-504.
- [3] <https://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/c100133/202512/flc3a3c617484a27a1a26a468afbaeee.shtml>, 2025-12-02.
- [4] Pawar, S., Padding, J., Deen, N., Jongsma, A., Innings, F. and Kuipers, J.A.M. (2015) Numerical and Experimental Investigation of Induced Flow and Droplet—Droplet Interactions in a Liquid Spray. *Chemical Engineering Science*, **138**, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.07.048>
- [5] 袁亮, 薛生, 郑晓亮, 等. 煤矿井下空气质量革命技术现状与展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 32-40.
- [6] Lin, X., Liu, Z., Geng, N., Hu, P. and Gu, Q. (2023) Optimization and Application of Water Injection Process in Gas-Bearing Coal Seam. *Processes*, **11**, Article 3003. <https://doi.org/10.3390/pr11103003>
- [7] 林明磊, 刘建国, 金龙哲, 等. 复合表面活性剂对疏水煤体协同润湿效应研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(4): 1-10.
- [8] 罗瑞冬, 林木松, 罗运柏. 新型煤尘抑尘剂的制备及特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(22): 454-459.
- [9] 张智渊. 煤孔隙内毛细管力演化规律及对煤层注水的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [10] 王自亮. 煤和岩石的产尘特性及其实验室测定[J]. 工业安全与防尘, 1995, 4(7): 18-19.
- [11] 杨树莹, 周磊, 杨林军, 等. 高分子抑尘剂对褐煤矿场细颗粒物的抑制特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 528-535.
- [12] 田敏, 李治刚, 郭红光, 等. 煤尘抑尘剂在不同作业场所的应用与发展前景[J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 168-172, 183.
- [13] 刘晓莉, 柳鹏, 张福强, 等. 露天煤炭堆场抑尘剂的性能与现场应用[J]. 中国煤炭, 2019, 45(6): 77-81, 119.
- [14] 冯京波. 添加表面活性剂提高煤层注水效果试验研究[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(10): 90-92, 128.
- [15] Lu, H., Li, J., Lu, W., Xu, Z., Li, J. and He, Q. (2023) Variation Laws of CO₂/CO and Influence of Key Active Groups on It during Low-Temperature Oxidation of Coal. *Fuel*, **339**, Article ID: 127415. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127415>
- [16] 周伟奇. 高效煤层注水润湿剂改性研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都大学, 2022.