

中文引用格式:林汉毅,江丙友,王一凡,等. 螯合剂和表面活性剂注液工艺对煤体润湿性能的影响[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 169–177.

英文引用格式:LIN Hanyi, JIANG Bingyou, WANG Yifan, et al. Influence of chelating agent and surfactant processing on wettability properties of coal [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 169–177.

螯合剂和表面活性剂注液工艺对煤体润湿性能的影响^{*}

林汉毅^{1,2}, 江丙友^{**1,2}教授, 王一凡^{1,2}, 王浩宇^{1,2}, 余昌飞^{1,2}

(1 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2 安徽理工大学
工业粉尘防控与职业安全健康教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

中图分类号: X936; X964

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1287

基金项目: 国家自然科学基金资助(52074012); 十四五国家重点研发计划项目((2022YFC2503200, 2022YFC2503201); 安徽省自然科学基金资助(2308085J19)。

【摘要】 为解决煤体中的混杂重金属物质阻碍抑尘溶液渗入煤体孔裂隙导致煤体润湿效果减弱的问题, 试验研究螯合剂和表面活性剂的协同作用对煤体润湿性能的影响。首先, 基于注水试验平台和截割产尘模拟试验平台设计6种注液方式, 试验确定表面活性剂和螯合剂之间的拮抗作用; 然后, 通过截割试验和表面润湿性分析研究6种注液方式对煤样产尘特性及增润效果的影响; 最后, 利用喷雾降尘测试不同注液方式增润煤粉的被沉降效率。结果表明: 先注入螯合剂后再注入表面活性剂处理的煤样, 截割产尘质量浓度相对最低, 仅为170.93 mg/m³, 较之纯水组的截割产尘质量浓度(481.33 mg/m³)降低了64.49%; 同时, 先注入螯合剂后注入表面活性剂的注液方式对煤体润湿性能的提升效果相对最好, 浸润沉降煤粉速度相对最快; 此外, 经该方式处理的煤样喷雾抑尘试验的降尘效率为91.2%。先注入螯合剂溶液分解煤裂隙中的重金属, 可以提高溶液在煤体中的流动性, 随后注入表面活性剂溶液会进一步提升煤的润湿性能。

【关键词】 螯合剂; 表面活性剂; 注液工艺; 润湿性能; 煤层注水; 降尘

Influence of chelating agent and surfactant processing on wettability properties of coal

LIN Hanyi^{1,2}, JIANG Bingyou^{1,2}, WANG Yifan^{1,2}, WANG Haoyu^{1,2}, YU Changfei^{1,2}

(1 School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2 Key Laboratory of Industrial Dust Prevention and Control & Occupational Safety and Health, Ministry of Education, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to solve the problem of mixed heavy metal substances in coal hindering the infiltration of dust suppression solution into coal pores and cracks, resulting in a weakened wetting effect of coal, experiments were conducted to explore the synergistic effect of chelating agents and surfactants on

^{*} 文章编号: 1003-3033(2025)05-0169-09; 收稿日期: 2025-01-15; 修稿日期: 2025-03-24

^{**} 通信作者: 江丙友(1987—), 男, 安徽利辛人, 博士, 教授, 主要从事工业粉尘防控方面的研究。E-mail: cumtjiangby@163.com。

coal wettability. Firstly, based on the water injection test platform and the dust cutting simulation test platform, six injection methods were designed to experimentally determine the antagonistic effect between surfactants and chelating agents. Then, the effects of six injection methods on the dust production characteristics and wetting effect of coal samples were studied through cutting tests and surface wettability analysis. Finally, spray dust suppression was conducted to test the settling efficiency of pulverized coal enhanced by different injection methods. The results show that the coal sample treated by first injecting the chelating agent followed by the surfactant exhibits the lowest dust production concentration, at only 170.93 mg/m³, which is 64.49% lower than the 481.33 mg/m³ in the pure water group. Furthermore, the sequential injection protocol employing prior a chelating agent infusion followed by a surfactant delivery exhibits the most significant improvement in coal wettability, with the fastest rate of wetting-induced sedimentation of coal dust. In addition, the coal samples treated by the above method achieve a dust suppression efficiency of 91.2% in in spray dust suppression tests. Through molecular simulation and theoretical analysis, injecting a chelating agent solution to decompose heavy metals in coal fractures can improve the fluidity of the solution in coal. Subsequently, injecting a surfactant solution further enhances the wettability of coal.

Keywords: chelating agent; surfactant; liquid injection process; wettability; coal seam water injection; dust reduction

0 引言

煤层注水是一种被广泛应用的预处理煤体防尘措施^[1-2],然而,煤层的结构和组分较为复杂,疏水性能差异较大,以水为单一介质的传统注水形式难以获得理想的减尘效果^[3-4]。如果作业环境中长时间存在浓度过高的粉尘,不仅容易引发粉尘爆炸事故,还会危害煤矿工人的呼吸系统^[5],进而诱发尘肺病。因此,提升被注水煤体的亲水性,成了减少采煤过程中产尘率和降尘率的热门课题。

在煤体增渗方面,XIE Hongchao^[6]和 NI Guanhua^[7]等研究了 SDS 表面活性剂对复合溶液酸化煤的孔隙分形特征的影响,发现该方法可降低煤体强度、增大孔隙度并减少压裂液滞留。HAN Weibo^[8]、WANG Cunmin^[9]等研究煤被酸化后的物理化学特性,发现煤在酸化后的平均孔径和孔隙率均有提升,并在酸性条件下合成一种用于煤层压裂的盐酸-表面活性剂混合溶液。YAN Song 等^[10]研究发现,微乳液可以增加煤的裂缝和孔隙数量,从而提高煤的渗透性。在煤层注水介质方面,KAURIN^[11]、GLUHAR^[12]等评估了传统螯合剂乙二胺四乙酸(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid, EDTA)和不同生物可降解螯合剂的性能,研究了螯合剂降低重金属的能力。CHEN Shuya 等^[13]通过引入复合酸制备增润抑尘螯合剂,该螯合剂可有效分解煤层中的重金属离子,提高液体渗入煤裂隙的效果。NI

Guanhua^[14]、REN Bo^[15]、SHI Guoqing^[16]、ZHAO Zidong^[17]和 LIU Zhen^[18]等发明了多种复合抑尘剂,总结了其内在增强机制。ZOU Quanle 等^[19]提出一种通过水基 SiO₂ 纳米流体解决煤层润湿性差、注水易流失等方法的问题。在螯合剂与表面活性剂协同增润抑尘方面,WANG Xiaohan 等^[20]等研究发现,螯合剂与极个别表面活性剂之间存在协同关系,但与大多数表面活性剂存在拮抗作用。SHI Guoqing 等^[21]研究证明:螯合剂与表面活性剂间的拮抗作用会降低螯合剂扩孔性能和表面活性剂的润湿性能。

由上可知:螯合剂和表面活性剂分别在改善煤体渗透和润湿性能方面发挥着重要作用,然而,二者混合时普遍伴随的拮抗作用却极大地限制了添加剂的选择范围,难以针对不同煤层灵活选用最优单体配方。为解决该问题,笔者在传统的直接混合注液工艺(简称一步法)基础上,提出在不同时刻依次注入螯合剂或表面活性剂的注液工艺(简称两步法),即基于煤层注水试验平台和截割产尘模拟试验平台,对比分析螯合剂和表面活性剂在一步法和两步法中的控尘效果,以期阐明螯合剂扩孔增渗和表面活性剂的增润机制,为改善煤层注水的抑尘效果提供新的思路。

1 注液工艺影响煤体润湿性能测试

1.1 不同注液工艺影响煤体润湿性能试验流程

随机选取甘肃省新庄煤矿生产的不粘煤为研究

对象,其煤质具有低灰、低硫和高热值等特点。参考已有的研究数据^[20],选用市面上常见且在润湿性能试验中呈现明显拮抗作用的螯合剂和表面活性剂:亚

氨基二琥珀酸四钠 (Tetrasodium Iminidissuccinate, IDS) 和 仲 烷 基 磺 酸 钠 (Sodium Alkylbenzene Sulfonate, SAS60),具体试验顺序如图 1 所示。

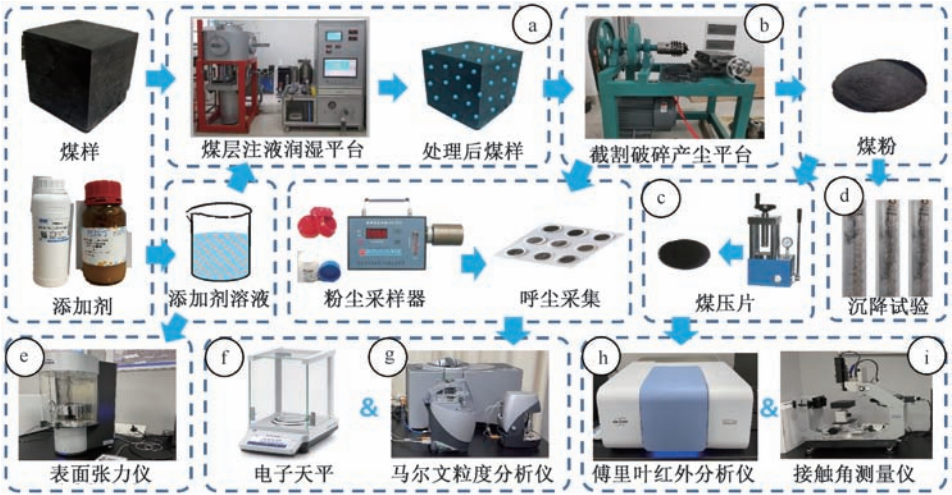


图 1 试验流程

Fig.1 Process of experiment

基于不同注液工艺设计 6 个试验组:一步法 (纯水 H₂O、IDS 溶液 (试验组 A)、SAS60 溶液 (试验组 B) 和 IDS+SAS60 的混合溶液 (试验组 Mix))、两步法 (先注入 IDS 溶液,后注入 SAS60 溶液 (试验组 AB)) 和倒序两步法 (先注入 SAS60 溶液,后注入 IDS 溶液 (试验组 BA)),其中试验组 Mix 溶液的混合比例为 1 : 1。此外,文中选用截割破碎、喷雾降尘、固液接触角、傅里叶红外光谱、表面张力和沉降试验等多种煤体润湿性能测试手段相互验证。

1.2 煤体注液工艺流程

使用真三轴注水试验系统预处理润湿立方体煤样 (图 1a),具体润湿过程如图 2 所示。

步骤 1:以边长为 200 mm 的正方体煤块为样品,用研磨机将煤样的 6 个表面打磨光滑,随后在煤样的上表面中心位置钻孔 (孔径为 8 mm,深为 105 mm),将打好孔的样品放入真三轴装置的高压腔,以 0.01 MPa/s 的加载速率将三轴应力加载到预先确定的应力值,开启注水泵以恒定流量将添加剂溶液注入煤体,注入过程持续 8 min。

步骤 2:待围压达到固定值后,保持围压 18 h,然后按照步骤 1 的过程注入新的溶液,注入完成后继续保持 18 h。

1.3 煤体截割产尘特性测试

将经过注液处理后的煤样放入截割产尘试验平台 (图 1b),以研究截割破碎和产尘情况,并通过截割齿与煤块的高速碰撞还原截割过程。截割产尘试

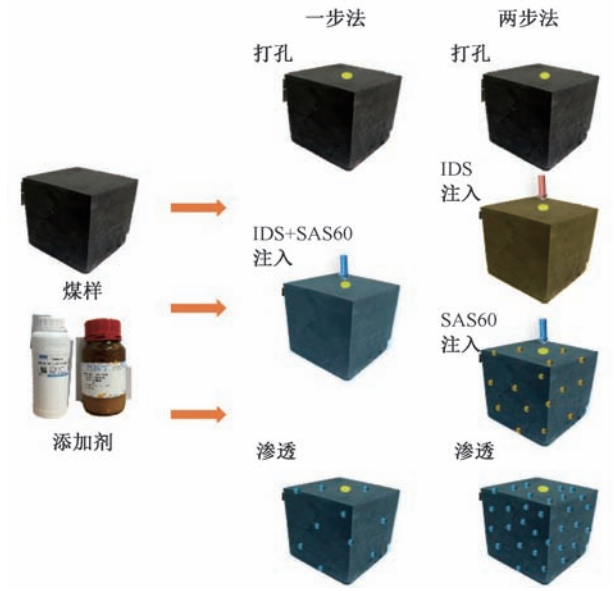


图 2 注液抑尘方法流程

Fig.2 Process of injection dust suppression method

验平台包括安装底座、单自由度旋转截割模块、煤样夹具和移动滑块。在截割过程中,使用粉尘采样器搭配全尘采样头收集粉尘样本。试验结束后,取出采样头中的滤膜并对其进行称重,计算截割过程中总粉尘的质量浓度,并使用激光粒度分析仪测试总粉尘的粒度分布。粉尘质量浓度计算公式如下:

$$\rho = 10^6 \times (m_2 - m_1) / (q_v t) \tag{1}$$

式中: ρ 为所测粉尘的质量浓度,mg/m³; m_1 和 m_2 为采样前后滤膜的质量,g; q_v 为采样流速,L/min; t 为采样时间,min。

1.4 煤表面润湿特性测定

为测得不同注液添加工艺处理后的煤表面润湿性能,对截割后的煤粉进行接触角、红外光谱和沉降试验,试验所用设备如图 1d、图 1h、图 1i 所示。先使用压片机在 25 MPa 的压力下持续加压煤粉 10 min 将其制成煤片,再用接触角测量仪捕捉与煤片接触的纯水滴图像以得到接触角数据。使用上述相同压力和时间将煤粉和溴化钾按 1 : 99 的比例均匀研磨混合并制成煤片,将压制好的煤片置入傅里叶变换红外光谱仪中进行测试。称量质量为 (0.1 ± 0.005) g 的煤粉并用比色管均匀地将其投放在水面上,最后使用秒表记录样品的沉降时间。

1.5 降尘性能测定

使用喷雾降尘试验平台测定喷雾降尘性能,如图 3 所示。该平台与现场实际巷道的尺寸相似比为 1 : 2,内部设有截割装置、喷雾装置、压入式通风管道、控制台、轴流风机和含尘气流净化装置等。粉尘采样器设置在截割装置前方 0.5 和 2.5 m 处(分别模拟截割部后方和掘进机司机位置),与通风管道口平行,喷淋覆盖范围位于采样器及截割装置粉尘源头中心位置。根据粉尘采样器的结果计算喷雾降尘效率。

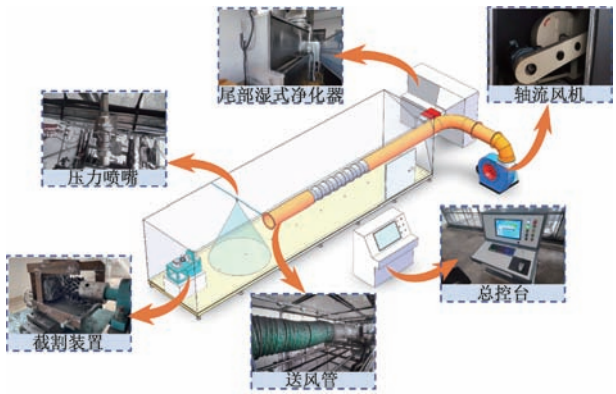


图 3 喷雾降尘试验平台

Fig. 3 Experimental system for spraying dust removal

2 不同注液工艺对煤体润湿性能的影响分析

2.1 螯合剂与表面活性剂混合作用拮抗验证

文中选用的表面活性剂和螯合剂已被证明在单独作用时能够分别提高煤的润湿性和渗透性^[21],而二者的混合溶液在提高煤体性能方面呈现明显的拮抗作用。为验证上述观点,分别测定了 IDS、SAS60、IDS+SAS60 混合溶液的表面张力,结果如图 4 所示。分析可知:混合溶液的表面张力低于 IDS 的表面

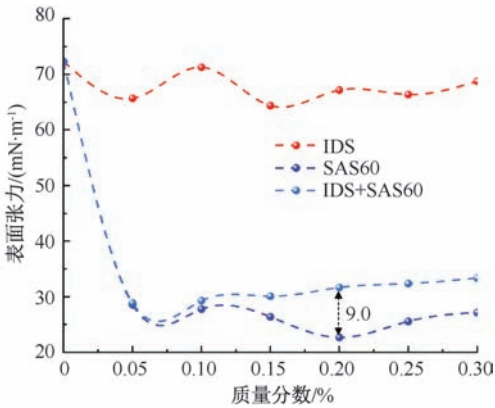


图 4 表面张力

Fig. 4 Surface tension

张力,但高于 SAS60 的表面张力,当质量分数为 0.20% 时达到最大差值 9.0 mN/m,上浮比例 28.4%。

此外,测试上述 3 种溶液与煤样的固液接触角以及相同质量煤样分别在 3 种溶液中的沉降时间,结果如图 5 所示。此处溶液配比质量浓度为 0.20%,即 IDS+SAS60 混合溶液与 SAS60 溶液的表面张力差值最大的质量浓度。结果表明:IDS + SAS60 混合溶液组的固液接触角降低率为 28.2%,低于 SAS60 溶液的 29.07%,高于 IDS 溶液的 27.63%,验证了 IDS 和 SAS60 混合溶液在提高煤尘润湿性方面有拮抗作用。

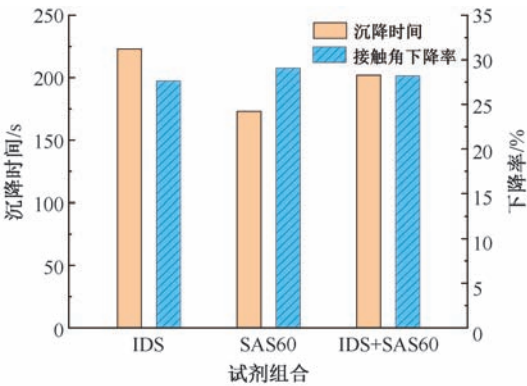


图 5 润湿性表征试验

Fig. 5 Tests for wettability

2.2 不同注液工艺下煤的产尘特性

粉尘质量浓度是衡量采煤工作面粉尘污染的一个重要因素,6 个截割试验组的测试结果如图 6 所示。其中 AB 组产生粉尘的质量浓度仅为 176 mg/m^3 ,远低于 A、B、 H_2O 组;与 Mix 组(274 mg/m^3)和 BA 组(272.67 mg/m^3)相比,粉尘质量浓度分别降低了 35.76% 和 35.45%。粉尘质量浓度排序为 $\text{AB} < \text{A} < \text{Mix} < \text{BA} < \text{B} < \text{H}_2\text{O}$ 。结果表明:AB 组处理的煤样显著减少截割产生的粉尘量,有效降低污染水平。

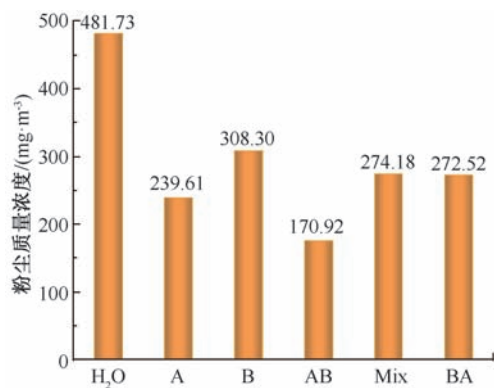


图 6 截割产生的总粉尘质量浓度

Fig. 6 Mass concentration of total dust from cutting

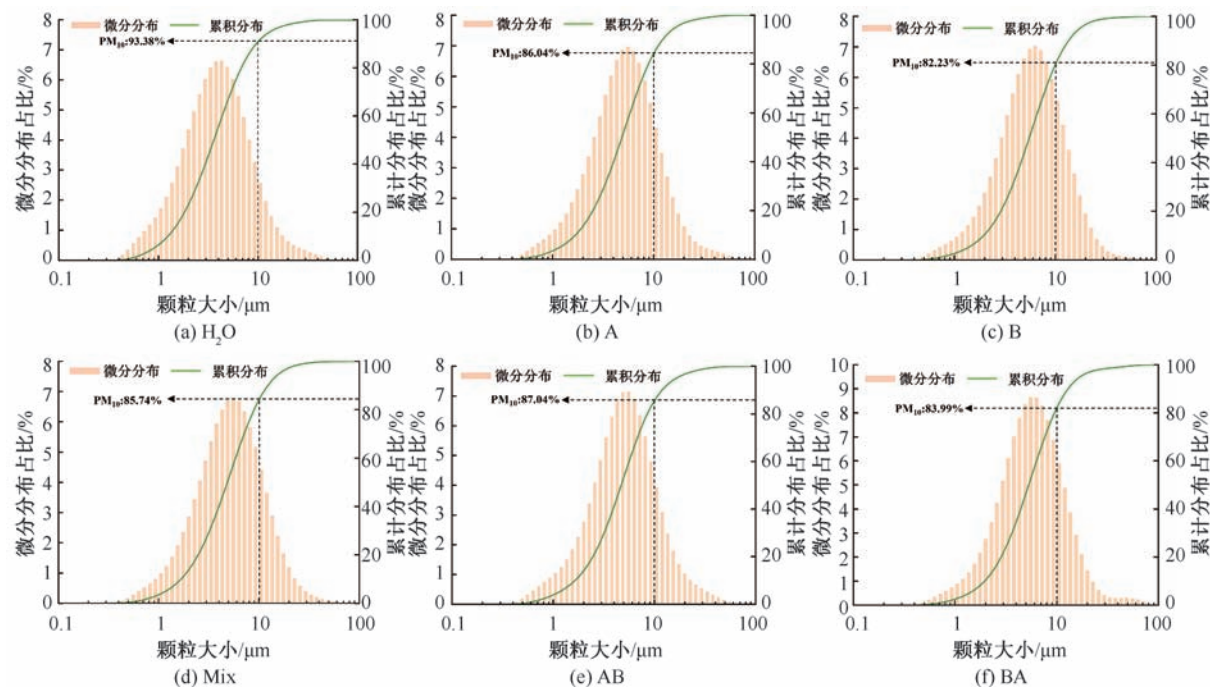


图 7 截割产尘粒度分布

Fig. 7 Cut-off particle size distribution of dust generation

煤样可显著降低截割产尘时的 PM_{10} 粒径质量浓度,减少呼吸性粉尘诱发疾病的概率。 PM_{10} 的粒径质量浓度顺序为 $\text{AB} < \text{A} < \text{Mix} < \text{B} < \text{BA} < \text{H}_2\text{O}$ 。此外,BA 组的总粉尘质量浓度低于 B 组,但 PM_{10} 的粒径质量浓度却高于 B 组,由此可知:粒径质量浓度分布可有效反映不同粒径粉尘的分布情况,可作为总粉尘质量浓度评价粉尘污染的补充。

2.3 不同注液工艺下的煤表面润湿性能

固液接触角和煤粉沉降速度是评价煤与液体间润湿性的两项重要指标,接触角的下降速率与煤的润湿性呈正相关^[20],沉降时间越短的煤样润湿性越好^[10],具体结果如图 9 和图 10 所示。因纯水处理

总粉尘中的小粒径颗粒,如 PM_{10} (粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物)是导致工业尘肺病的主要因素^[22]。对此,分析注液处理后的煤样截割产生粉尘的粒度分布,结果如图 7 所示。由于粉尘的粒径占比很难准确评估污染情况,因此,用各粒径粉尘颗粒质量浓度来表征粉尘颗粒的污染程度,粒径质量浓度 = 粒径分布占比 $\times$ 粉尘质量浓度。

截割产生的粉尘中 PM_{10} 颗粒的质量浓度如图 8 所示。虽然 AB 组的 PM_{10} 的粒径累积分布占比比较高,但其粒径质量浓度最低,为 153.19 mg/m^3 ,较之 Mix 组 (234.56 mg/m^3) 和 BA 组 (231.92 mg/m^3) 分别降低了 34.69% 和 33.95%。结果表明:AB 组的

的煤样的润湿性测试结果表现极差,在此不作对比。

在固液接触角试验中,研究记录固液接触 0.5 (为使液滴弹性形变趋于稳定,避免影响试验结果)、1.0、1.5 和 2.0 s 时,注液处理的煤样与纯水液滴之间的接触角变化。使用固液接触面投影圆的大小和颜色描述接触角变化:投影圆的直径表示接触角数值;投影圆的颜色深浅表示接触角的下降率。

对比分析可知:图 9d 中 AB 组接触角的下降率 54.17%、下降角度 37.7° 均相对最大,对纯水的吸收效果相对最好,较之吸收效果最差的 B 组接触角下降率 (12.01%) 提升 351.04%,下降角度 10.5° 提升 259.05%。而 A、Mix、BA 等 3 个试验组的接触角下

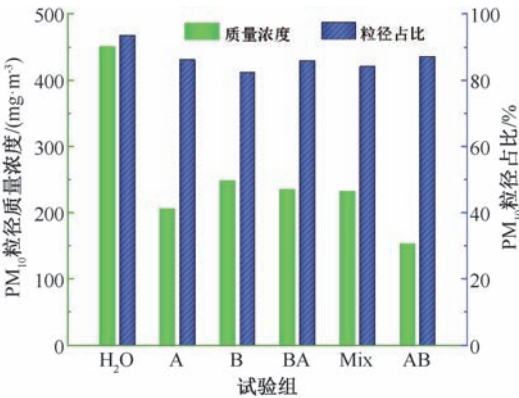


图 8 PM₁₀ 粒径质量浓度

Fig. 8 Mass concentration of PM₁₀

降率分别为 28.65%、23.75% 和 17.56%，下降角度分别为 19.0°、14.7° 和 13.1°，二者的结果排序相同：AB>A>Mix>BA>B。

煤尘沉降试验记录煤粉释放到全部浸润液体的时间。对比分析可知：AB 组煤样沉降效果显著，沉降时间为 148 s，比 BA 组（202 s）和 Mix 组（228 s）的煤样沉降时间分别缩短 26.73% 和 35.09%，沉降时间依次为 AB<A<BA<B<Mix。

上述 2 项试验结果表明：科学使用两步法可以提升煤对水的吸收性能，使煤粉更容易被润湿。为进一步验证煤润湿性的提升效果，引入了傅里叶红外光谱分析试验处理后的煤样官能团分布如图 11 所示。5 种处理后煤样的吸收峰带与 H₂O 处理的煤样吸收峰带相比没有明显偏移，但含氧官能团和羟基官能团区域的面积发生了显著变化，表明煤的润湿性发生了改变。

为进一步分析不同试验组煤样的官能团含量占比，使用峰值拟合软件 PeakFit 计算各吸收峰区面积，将结果拟合成曲线，如图 12 所示。将官能团结果被划分为 4 个吸收区域：①芳香族官能团，波数范围 900~700 cm⁻¹；②含氧官能团，波数范围 1 800~1 000 cm⁻¹；③脂肪族官能团，波数范围 3 000~2 800 cm⁻¹；④羟基官能团，波数范围 3 600~3 000 cm⁻¹。

芳香族和脂肪族官能团影响疏水性，而羟基和含氧官能团影响亲水性，具体占比见表 1。

表 1 煤样红外光谱的拟合峰面积比例

spectra of coal samples				%
波段区域	I	II	III	IV
H ₂ O	6.08	50.29	5.74	37.89
A	2.05	55.92	3.04	38.99
B	2.54	51.06	3.32	40.08

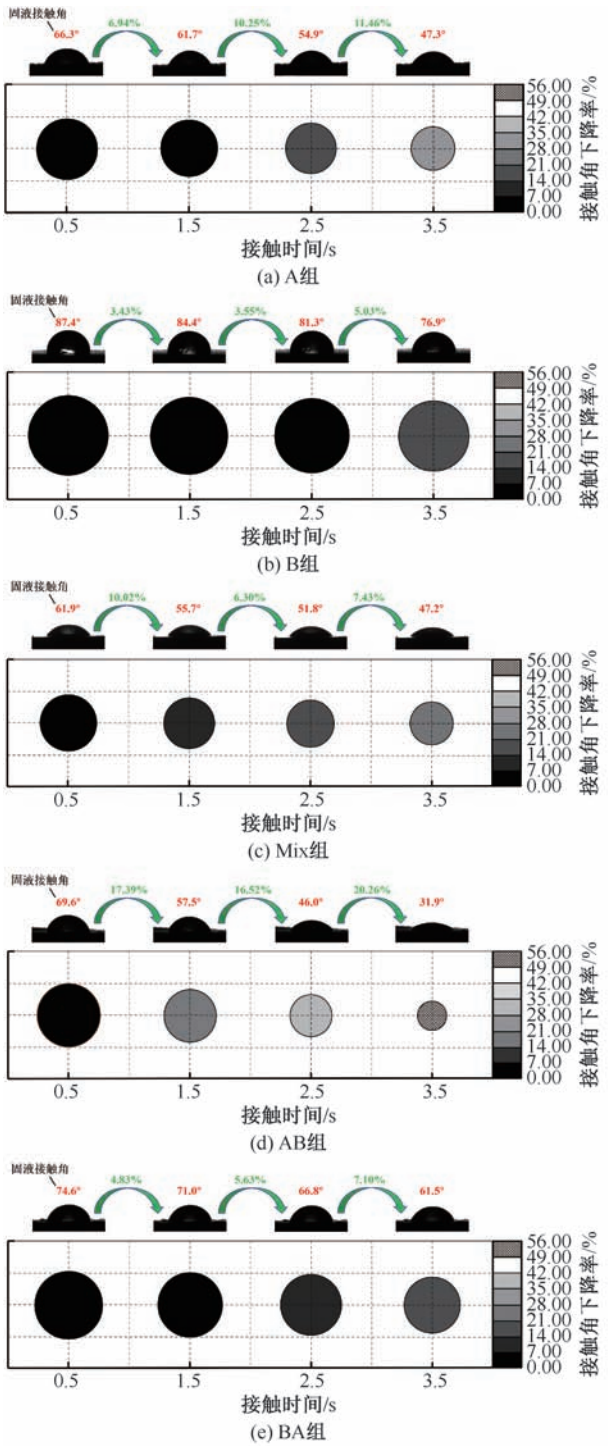


图 9 煤压片固液接触角变化

Fig. 9 Changes in soild-liquid contact angle of coal compacts

续表 1

波段区域	I	II	III	IV
Mix	5.56	63.26	5.07	26.11
AB	1.92	68.63	2.55	26.90
BA	2.85	47.23	3.09	46.83

结果表明：H₂O 组煤样的含量官能团和羟基占

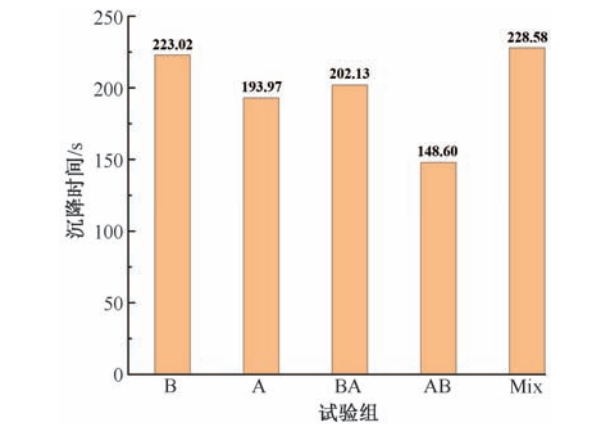


图 10 煤粉沉降试验

Fig. 10 Experiments on the settlement of coal dust

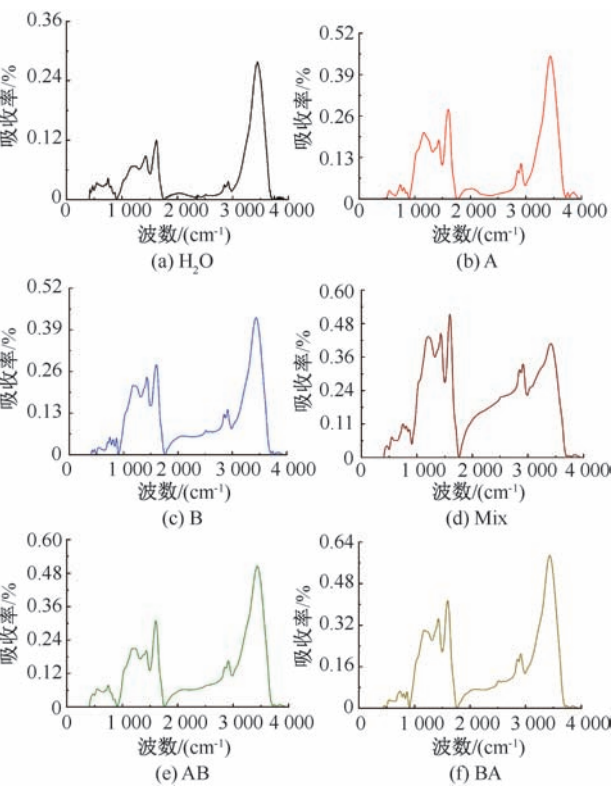


图 11 不同方式处理后煤样的 FTIR 光谱

Fig. 11 FTIR spectra of coal samples with different treatments

比分别为 50.29%和 37.89%,亲水官能团占比等于上述二者之和 87.58%。对比其他 5 个试验组,AB 组煤样的亲水官能团占比(95.53%)最高,较之纯水处理煤样提升 9.08%。而其余试验组的占比提升相对较小,分别为 A 组(94.91%)提升 8.37%、B 组(91.14%)提升 4.06%、Mix 组(89.37%)提升 2.04%、BA 组(94.06%)提升 7.40%。分析发现,Mix 组的亲水官能团占比提升相对最小,验证了螯合剂和表面活性剂对煤体润湿性能提升存在拮抗作

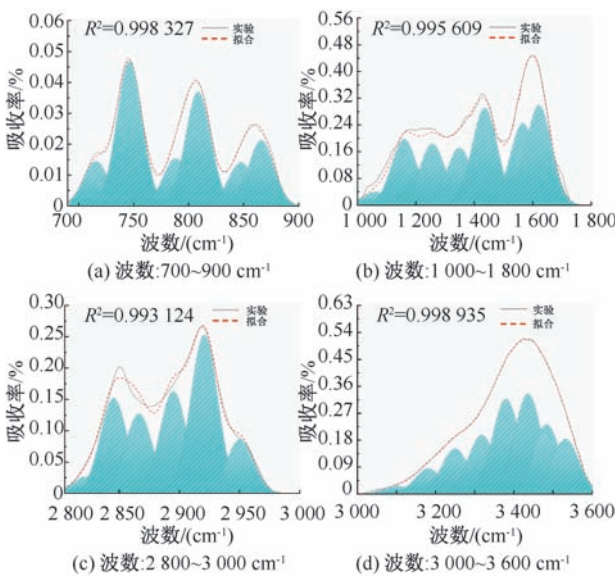


图 12 傅里叶变换红外的分峰光谱

Fig. 12 Split-peak spectra of the Fourier transform infrared

用。这种拮抗作用导致煤样中亲水基团的数量减少。所有试验组亲水基团占比排序:AB>A>BA>B>Mix>H₂O,该结果进一步验证了科学使用两步法对提高煤的润湿性影响最大,效果远优于一步法。

2.4 不同注液工艺下的喷雾降尘效率

分析不同试验组截割产生的喷雾降尘效果,见表 2。与纯水组的降尘效率(48.41%)相比,其他试验组的喷雾降尘效率均超过 70%。所有试验组降尘效率排序为 AB>A>BA>Mix>B>H₂O。其中,AB 处理煤样的粉尘质量浓度从 170.93 mg/m³ 降至 15.04 mg/m³,降尘效率达到 91.20%,远高于其他煤样。

表 2 喷雾降尘试验结果

Table 2 Results of spray dust reduction experiments			
试验组	喷雾前质量浓度/ (mg · m ⁻³)	喷雾后质量浓度/ (mg · m ⁻³)	降尘效率/%
H ₂ O	475.42	245.26	48.41
A	231.36	41.58	82.03
B	303.82	82.73	72.77
Mix	268.05	71.00	73.51
AB	170.93	15.04	91.20
BA	267.40	53.12	80.78

3 两步法注液工艺润湿煤体作用机制

根据上述试验结果可知:先注入螯合剂后注入表面活性剂(两步法)的添加工艺,在抑制煤体产尘和增润煤尘表面提升降尘效率等方面均优于其他工

艺,具体增润机制如图 13 所示。

图 13a 为两步法的第 1 步:将 IDS 溶液注入煤样。IDS 阴离子与煤的金属离子(如 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Fe^{2+})反应,将煤的固态金属沉淀物转化为可溶性螯合物并将其溶解^[23]。随着金属沉淀物的溶解,一方面,煤孔隙数量和体积增加,改善了流动性,增大了表面活性剂在煤内部的接触面积。另一方面,金属离子被螯合溶解排出,避免了表面活性剂注入时产生化学沉淀堵塞孔隙。

图 13b 展示了两步法的第 2 步:将 SAS60 溶液注入煤样。SAS60 分子中的疏水基团与煤的碳氢链和芳香族苯环形成的疏水位点结合,而亲水基团则暴露在外,增强了煤炭内部的亲水性^[24]。由于第 1 步中 IDS 的螯合作用扩展了孔隙,增加了孔隙的面积,因此随后注入煤样的 SAS60 溶液能更充分地

在煤样内部流动。由于更多的 SAS60 分子附着在孔隙上,使得亲水基团数量大大增加,从而有效改善了煤的润湿性。然而,若先注 SAS60 溶液,再注入 IDS 溶液,将导致螯合剂在 SAS60 润湿后的孔隙表面重新生成新的疏水孔,甚至导致注液后煤的润湿性弱于单体溶液试验组。对于一步法,当螯合剂和表面活性剂的混合溶液一次性注入煤中,SAS60 分子会与煤中的金属离子反应形成沉淀,从而阻碍 IDS 溶液流动,二者间的拮抗作用导致煤的润湿性能甚至较之单体溶液试验组显著降低。

总之,两步法弱化甚至几乎消除了混合溶液间的拮抗作用,第 1 步注入的螯合剂 IDS 溶液通过扩大内部孔隙结构,大大改善了第 2 步注入的表面活性剂 SAS60 溶液对煤的内部孔裂隙之间相互作用的影响,从而提高了煤的润湿性。

4 结 论

1) 在理化特性表征试验中,两步法煤样的沉降时间 148 s 和接触角下降率 54.17% 均为试验组最优;且傅里叶变换红外光谱结果表明:两步法煤样的亲水官能团占比达到了 95.53%,比纯水处理煤样的亲水官能团占比提升 9.08%,润湿性能显著提升。

2) 在截割产生和喷雾降尘测试中,两步法煤样的总粉尘量 176 mg/m^3 和 PM_{10} 粒径质量浓度 153.19 mg/m^3 均为测试组最低,且截割所产粉尘的被除降效率 91.20% 为测试组最高,证明两步法具有良好的工程应用前景。

3) 两步法将螯合剂和表面活性剂分开依次注入煤中,充分发挥了二者在增渗和增润方面的效能,弱化了二者混合时因拮抗作用导致的负面激励,较大程度提高了煤的润湿性。

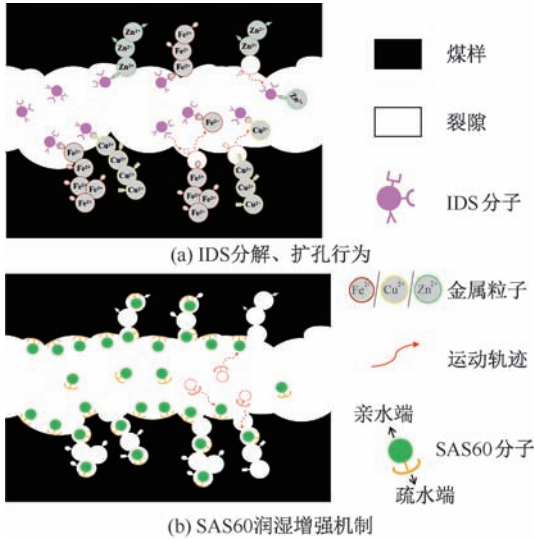


图 13 两步法增渗增润作用机制

Fig. 13 Mechanism of enhanced wettability in two-step water injection

参 考 文 献

[1] 周宏伟,刘泽霖,孙晓彤,等.深部煤体注水过程中渗流通道演化特征[J].煤炭学报,2021,46(3):867-875.
ZHOU Hongwei, LIU Zelin, SUN Xiaotong, et al. Evolution characteristics of seepage channel during water infusion in deep coal samples[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 867-875.

[2] 翁安琦,袁树杰,王晓楠,等.煤层注水降尘中表面活性剂复配应用研究[J].中国安全科学学报,2020,30(10):90-95.
WENG Anqi, YUAN Shujie, WANG Xiaonan, et al. Study on application of surfactant compound in coal seamwater injection for dust reduction[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 90-95.

[3] 高建良,关孟瑶,张琛,等.高阶煤润湿过程中水分运移的低场核磁共振试验[J].中国安全科学学报,2023,33(10):46-52.
GAO Jianliang, GUAN Mengyao, ZHANG Chen, et al. Low-field nuclear magnetic resonance tests characterizing moisture transport during wetting of high-rank coal[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10): 46-52.

[4] 李懿,陆伟,李金亮,等.煤层注射成胶型抑尘剂影响因素及抑尘效果研究[J].中国安全科学学报,2024,34(3):171-178.

- LI Yi, LU Wei, LI Jinliang, et al. Study on influencing factors and dust suppression effect of coal seam injection gum-forming dust suppressant[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 171–178.
- [5] YU Changfei, JIANG Bingyou, YUAN Liang, et al. Inhibiting effect investigation of ammonium dihydrogen phosphate on oxidative pyrolysis characteristics of bituminous coal[J]. Fuel, 2023, 333: DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126352.
- [6] XIE Hongchao, NI Guanhua, LI Shang, et al. The influence of surfactant on pore fractal characteristics of composite acidized coal[J]. Fuel, 2019, 253: 741–753.
- [7] NI Guanhua, XIE Hongchao, LI Shang, et al. The effect of anionic surfactant (SDS) on pore-fracture evolution of acidified coal and its significance for coalbed methane extraction[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(5): 940–951.
- [8] HAN Weibo, ZHOU Gang, ZHANG Qingtao, et al. Experimental study on modification of physicochemical characteristics of acidified coal by surfactants and ionic liquids[J]. Fuel, 2020, 266: DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116966.
- [9] WANG Cunmin, ZHOU Gang, JIANG Wenjing, et al. Preparation and performance analysis of bisamido-based cationic surfactant fracturing fluid for coal seam water injection[J]. Journal of Molecular Liquids 2021, 332: DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115806.
- [10] YAN Song, HUANG Qiming, QIN Cunli, et al. Experimental study of wetting-seepage effect of microemulsion for the coal seam water injection[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 336: DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116361.
- [11] KAURIN A, GLUHAR S, TILIKJ N, et al. Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: effect on soil properties and plant growth[J]. Chemosphere, 2020, 260: DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127673.
- [12] GLUHAR S, KAURIN A, LESTAN D. Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: technological feasibility, remediation efficiency and environmental sustainability[J]. Chemosphere, 2020, 257: DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127226.
- [13] CHEN Shuya, XIE Kunzhi, SHI Yanping, et al. Chelating agent-introduced unconventional compound acid for enhancing coal permeability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 199: DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108270.
- [14] NI Guanhua, SUN Qian, XUN Meng, et al. Effect of NaCl-SDS compound solution on the wettability and functional groups of coal[J]. Fuel, 2019, 257: DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116077.
- [15] REN Bo, YUAN Liang, ZHOU Gang, et al. Effectiveness of coal mine dust control: a new technique for preparation and efficacy of self-adaptive microcapsule suppressant[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(6): 1181–1196.
- [16] SHI Guoqing, HAN Cong, WANG Yanming, et al. Experimental study on synergistic wetting of a coal dust with dust suppressant compounded with noncationic surfactants and its mechanism analysis[J]. Powder Technology, 2019, 356: 1077–1086.
- [17] ZHAO Zidong, CHANG Ping, XU Guang, et al. Comparison of the coal dust suppression performance of surfactants using static test and dynamic test[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129633.
- [18] LIU Zhen, ZHU Muyao, YANG He, et al. Study on the influence of new compound reagents on the functional groups and wettability of coal[J]. Fuel, 2021, 302: DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121113.
- [19] ZOU Quanle, ZHANG Tiancheng, MA Tengfei, et al. Effect of water-based SiO₂ nanofluid on surface wettability of raw coal[J]. Energy, 2022, 254: DOI: 10.1016/j.energy.2022.124228.
- [20] WANG Xiaohan, JIANG Bingyou, YUAN Liang, et al. Study on coupling chelating agent and surfactant to enhance coal wettability: experimental and theoretical discussion[J]. Fuel, 2023, 342: DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127861.
- [21] SHI Guoqing, QI Jiamin, WANG Yanming, et al. Synergistic influence of noncationic surfactants on the wettability and functional groups of coal[J]. Powder Technology, 2021, 385: 92–105.
- [22] RAMIREZ-LEAL R, CRUZ-CAMPAS M, ESTUARDO-MORENO H. Characterization of PM₁₀ particles by SEM-EDS[J]. Microscopy and Microanalysis, 2018, 24(S1): 1070–1071.
- [23] XU Lianman, WEI Hao, KANG Xinyue, et al. Study on the change law of physical and mechanical properties and wetting mechanism of coal body under the synergistic effect of chelation-adsorption[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(2): 4481–4493.
- [24] ANGARA F, SASAKI K, SUGAI Y. Mineral dissolution/precipitation during CO₂ injection into coal reservoir: a laboratory study[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 6722–6729.



作者简介: 林汉毅 (1998—),男,海南万宁人,博士研究生,研究方向为工业粉尘防控技术及理论。E-mail:hnlhanyi@163.com。