

瓦斯抽采孔口降尘剂的制备与性能评价

任妮¹, 韩子辰¹, 张杰^{1,2}, 蔡记华^{1*}, 杨现禹^{1*}, 杨琴³

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文针对深部煤矿瓦斯抽采钻孔过程中孔口煤尘危害严重且传统除尘技术效率低的问题, 旨在研发一种具有协同抑尘机制的高效环保降尘剂。以海藻酸钠、聚乙烯醇和丙烯酰胺为原料, 通过接枝共聚法制备了接枝共聚物PSA, 并复配表面活性剂APG0810, 制备出新型复合降尘剂PSAA。采用红外光谱、热重分析表征PSA的结构与热稳定性, 并通过沉降实验、接触角测试、抗蒸发与抗风蚀实验对PSAA的抑尘性能进行评价。结果表明, PSA热稳定性良好; PSAA溶液与煤样的接触角低至24°, 较清水降低61.9%, 润湿性优异; 在50℃环境下保水效果良好; 在9 m/s强风侵蚀下, 抗风蚀率仍达81.73%。扫描电镜证实, PSAA能在煤尘表面形成致密固化层, 实现“润湿-黏结-固化”协同抑尘。该降尘剂制备简单、性能优良, 为瓦斯抽采孔口煤尘的高效控制提供了新的技术思路与解决方案。

关键词: 复合降尘剂; 瓦斯抽采孔; 煤尘控制; 接枝共聚; 润湿性能; 抗风蚀; 协同机理

中图分类号: TD714; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0091-08

Preparation and performance evaluation of dust suppressant for gas drainage borehole orifice

REN Ni¹, HAN Zichen¹, ZHANG Jie^{1,2}, CAI Jihua^{1*}, YANG Xianyu^{1*}, YANG Qin³

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Addressing the severe coal dust hazard at the orifice of gas drainage boreholes in deep coal mines and the low efficiency of conventional dust control technologies, this study aims to develop a high-efficiency, eco-friendly composite dust suppressant with a synergistic dust suppression mechanism. A graft copolymer (PSA) was synthesized via graft copolymerization using sodium alginate, polyvinyl alcohol, and acrylamide as raw materials. A novel composite dust suppressant (PSAA) was then formulated by compounding PSA with the surfactant APG0810. The structure and thermal stability of PSA were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Thermogravimetric Analysis (TGA). The dust suppression performance of PSAA was evaluated through a series of experiments, including sedimentation experiments, contact angle measurement, and anti-evaporation and wind erosion resistance tests. The results indicate that PSA possesses excellent thermal stability. The PSAA solution demonstrated outstanding wettability, exhibiting a contact angle as low as 24° with the coal sample, a 61.9% reduction compared to that of water. It also showed significant moisture retention at 50 °C and a wind erosion resistance rate of 81.73% even under strong wind conditions of 9 m/s. Scanning Electron Microscopy (SEM) confirmed that PSAA forms a dense,

收稿日期: 2025-07-01; 修回日期: 2025-08-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.014

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题“耐高温钻井液与堵漏关键技术研发”(2024ZD1000905)

第一作者: 任妮, 女, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为瓦斯抽采孔口防尘除尘, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, renni@cug.edu.cn。

通信作者: 蔡记华, 男, 汉族, 1978年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 从事钻井液、工程浆液和完井液等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, caijh@cug.edu.cn。

杨现禹, 男, 汉族, 1992年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 从事冲洗液、离散元流体动力学、流体机器学习等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, yxy@cug.edu.cn。

引用格式: 任妮, 韩子辰, 张杰, 等. 瓦斯抽采孔口降尘剂的制备与性能评价[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 91-98.

REN Ni, HAN Zichen, ZHANG Jie, et al. Preparation and performance evaluation of dust suppressant for gas drainage borehole orifice [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 91-98.

consolidated layer on the coal dust surface, achieving a synergistic "wetting-bonding-curing" dust suppression effect. This novel dust suppressant is characterized by a simple preparation process and superior performance, offering a new technical approach and solution for the effective control of coal dust at the orifice of gas drainage boreholes.

Key words: composite dust suppressant; gas drainage borehole; coal dust control; graft copolymerization; wettability; wind erosion resistance; synergistic mechanism

0 引言

煤炭资源是保障国家能源安全和推动经济发展的关键支柱^[1-2],随着我国煤矿开采逐渐向深部延伸,煤层瓦斯含量和压力显著升高,对安全生产造成严重威胁。目前钻孔瓦斯抽采技术是防治高瓦斯危害的核心手段^[3-5]。然而在井下实施本煤层、穿层位或高位定向钻孔过程中^[6-10],钻头破碎煤岩时,孔口区域因高速气流携带和钻具回转作用,会持续喷涌大量细微煤尘,尤其在干式钻进或除尘措施不足时,孔口常形成高浓度煤尘云^[11]。这不仅会严重污染井下作业环境,易诱发尘肺病等职业病,还会降低设备能见度、加速机械磨损,甚至引发煤尘爆炸事故,严重威胁钻探作业安全^[12]。因此,迫切需要对瓦斯抽采孔钻进过程中产生的煤尘进行有效控制。

另一方面,煤尘表面因存在大量疏水性官能团而呈现疏水性^[13-14],导致煤矿现行除尘技术(如煤层注水、喷雾除尘)效率低下。此外,过量水雾会恶化井下作业环境,降低瓦斯抽采效率。为此,业界开始开发化学降尘剂并取得一系列进展^[15-17]。王和堂等^[18]利用枯草芽孢杆菌发酵合成生物降尘剂BDS,低浓度条件下(30 mg/L)即可将水的表面张力降低至27 mN/m,与煤尘的接触角只有11.19°,润湿性能优异。Huang等^[19]以聚丙烯酸钠、碳酸钠、聚乙二醇和烷基多糖苷为原料,开发了一种用于铜矿运输道路粉尘的环保型高效复合化学降尘剂,实验室中整体粉尘的除尘效率为96.89%,可吸入粉尘的除尘效率为86.24%,具有良好的除尘效果。Jiang等^[20]以改性果胶为黏合剂,以无毒的表面活性剂为润湿剂,制备了一种具有黏合和润湿效果的环保型降尘剂,与喷雾相比,抑尘率平均提高了40.51%,有效降低了粉尘浓度。尽管前人在降尘剂研究方面取得了一定成果,但仍存在不足,如部分降尘剂在实验室表现出良好性能,但生产周期长,功能单一,缺乏协同抑尘机制等,限制了其大规模推广使用。因此,研发一种生产过程简单、生产周期短且具有协同抑尘机制的高效降尘剂成为大势所趋。

海藻酸钠(SA)是一种从褐藻中提取的天然多糖,因其良好的黏结性、成膜性和环保性,常用于制备环保型降尘剂,适用于建筑工地、矿山、道路等易产生粉尘的场所^[21-22]。聚乙烯醇(PVA)是一种水溶性高分子聚合物,无毒且可被微生物降解,具备良好的水溶性、成膜性、黏结性和热稳定性^[23],随着可持续发展需求日益迫切,成为传统材料的理想替代品。本文结合PVA、SA和丙烯酰胺(AM)的优点,加入适量的表面活性剂辛癸基葡糖苷(APG0810),制备了一种新型高效复合型降尘剂。实验结果表明,降尘剂生产周期短,具有协同抑尘机制,性能优良,可为瓦斯抽采孔施工过程中孔口煤尘治理提供新的技术思路和解决方案,实现更好的环境效益。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料与仪器

实验材料:1799型PVA,含量 $\geq 99.0\%$;SA,化学纯(CP);AM,含量 $\geq 99.0\%$,分析纯(AR);N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA),AR;过硫酸钾(KPS),含量 $\geq 99.5\%$,AR;APG0810,含量50%;十二烷基二甲基甜菜碱(BS-12),含量30%;月桂酰胺丙基氧化胺(LAO-30),含量30%;椰油酰胺丙基甜菜碱(CAB-35),含量35%。

实验仪器:电子天平、DF-101S型集热式恒温加热磁力搅拌器、恒温加热水浴锅、电热鼓风干燥箱、JC2000DM型接触角测量仪、TA DISCOVERY 5500型热重分析仪、美国Thermo Fisher Scientific Nicolet iS20型傅里叶红外光谱仪、Apreo S场发射扫描电镜、Leica ACE600镀膜仪、小型喷雾器、小型风洞装置、风速测量仪。

1.2 接枝共聚物PSA的制备

将含有350 mL去离子水的烧杯置于95℃恒温水浴锅中,将6.25 g PVA缓慢均匀地分散至水中,恒温搅拌1 h。待PVA完全溶解后,将水浴锅温度降至60℃,加入1.5 g SA分散均匀,搅拌至呈均相溶液后加入一定量引发剂KPS,搅拌20 min,最后加入适量

AM。在高温及引发剂条件下,PVA和AM中的羟基和酰胺基团分别发生断裂并相互连接,基体SA中的羟基发生断裂产生对应醇氧自由基,引发单体AM在PVA/SA骨架上的接枝共聚反应。进一步加入MBA作为交联剂,使接枝链之间形成三维网络结构。水浴搅拌1 h后,得到均匀分散、无色透明的稳定液态接枝共聚物PSA。制备过程如图1所示。

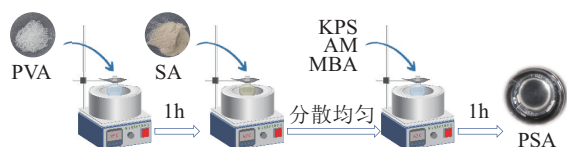


图1 PSA制备流程

Fig.1 Flowchart for the synthesis of PSA

1.3 接枝共聚物PSA的结构表征

1.3.1 红外光谱(FTIR)测试

将接枝共聚物PSA溶液烘干、磨碎,研磨后过200目筛网得到粉末。取少量的PSA粉末与适量的溴化钾粉末混合,放入研钵中充分研磨。将研磨后的混合物放入压片机,压成透明薄片。使用红外光谱仪采集样品的红外光谱,研究反应过程中官能团的变化。

1.3.2 热重(TG)测试

取10 mg PSA粉末,置于热重分析仪中。在空气氛围下,从室温升至800℃,升温速率设定为10℃/min,测试得到热重分析曲线,由此分析接枝共聚物的热稳定性和热分解性。

1.4 抑尘性能评价

1.4.1 煤尘沉降实验

为了增强PSA对煤尘的润湿性能,选取不同种类与浓度的表面活性剂与PSA进行复配。采取沉降法对加入表面活性剂复配后的溶液的润湿性能进行测定,具体操作流程为:准备0.1 g煤尘,取50 mL待测溶液装入烧杯中,从煤尘倒入杯中开始计时,煤尘整体沉降到杯底时停止计时。观测相同质量煤尘沉降到杯底所需时间,时间越短,溶液的润湿性越强^[24]。沉降实验重复测量3次取平均值,保证实验数据的可靠性。

1.4.2 接触角测试

接触角是衡量材料表面亲疏水性的一个重要物理参数。溶液对煤样的润湿能力与接触角存在密切联系,溶液与煤样的接触角越小,溶液的润湿性能越佳。选择表面平整、大小均匀的破碎煤块,

利用砂纸将煤样表面打磨抛光。将待测煤样放在JC2000DM型接触角测量仪的载物台上,调节载物台至合适高度。旋调加样器直到图像中出现圆形液滴,调节载物台高度,在载物台上升触碰到液滴的瞬间保存图像,通过量角法测出接触角的大小。实验中在煤岩表面上测量3次取平均值,保证实验数据的准确可靠。

1.4.3 抗蒸发性能测试

抗蒸发性能是反映降尘剂保水性能的实验指标,关系到抑尘效果的优劣。取30 g干燥后的煤尘置于直径为120 mm的培养皿中,取质量为 w_j 的降尘剂溶液均匀喷洒在煤尘表面,待溶液完全润湿煤尘表面后,称量煤尘与降尘剂的质量 w_0 。将样品置于50℃的恒温干燥箱中,每隔1 h从恒温干燥箱中取出并称重,烘干 i h后的质量记为 w_i ,抗蒸发实验重复测量3次取平均值,保证实验数据的可靠性。第 i h降尘剂的蒸发率^[25]:

$$E_i = \frac{w_0 - w_i}{w_j} \times 100\% \quad (1)$$

1.4.4 抗风蚀性能测试

在煤矿井下瓦斯抽采孔钻进过程中,孔口附近因钻具破碎煤岩产生的高浓度煤尘,极易受到孔内气流以及局部通风气流的影响而飞扬扩散,严重污染作业环境并危害人员健康。因此抗风蚀性能是评价降尘剂性能的重要指标。称取干燥后的煤尘 m ,自然堆积成为煤堆,将制得的降尘剂溶液均匀喷洒在煤堆表面,使煤堆表面充分润湿,将样品置于50℃恒温干燥箱内,待样品完全烘干后称量 m_1 。使用小型风洞装置吹扫煤堆30 min,吹扫结束后称取煤堆剩余质量 m_2 。重复测量3次取平均值,保证实验数据的可靠性。实验中对每个样品的风速分别设定为3、6和9 m/s。喷洒降尘剂吹扫30 min后的抗风蚀率^[26]:

$$\alpha = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m} \right) \times 100\% \quad (2)$$

1.4.5 扫描电子显微镜(SEM)测试

将由清水、表面活性剂APG0810溶液、复合降尘剂溶液处理过的煤尘放入60℃的真空干燥箱中烘干,然后放入研钵中研磨,过200目筛网。使用导电胶分别将样品粘在样品台上,使用Leica ACE600镀膜仪对样品表面喷金,再放入Apreo S场发射扫描电镜,在高真空环境下对样品表面的微观形貌进行观察并拍照。

2 结构表征与分析

2.1 红外光谱分析

PVA与SA、AM的接枝共聚产物PSA的红外光谱如图2所示。在 3425.67 cm^{-1} 处出现的宽而弱的吸收峰为羟基-OH的伸缩振动吸收峰,主要源于SA分子链上丰富的羟基与PVA羟基间形成的分子间氢键作用。同时,相较于纯组分中羟基峰位的偏移(SA约 3440 cm^{-1} ,PVA约 3410 cm^{-1}),该吸收峰的红移现象印证了2种聚合物间通过氢键网络实现了分子层面的相互作用。图谱中 2939.23 cm^{-1} 处峰位对应于PVA骨架中 $-\text{CH}_2-$ 基团的反对称和对称伸缩振动, 1093.85 cm^{-1} 处的强吸收带则源于醚键C-O-C的伸缩振动,这2个特征峰的出现证实了PVA分子链在共聚体系中完整保留。 1654.4 cm^{-1} 处为AM的特征吸收峰酰胺-I带C=O键伸缩振动峰,同时未观察到酰胺-II带N-H面内弯曲振动(约 1600 cm^{-1})的明显信号,表明AM已通过聚合反应形成共价连接而非物理共混。 1437.71 cm^{-1} 处的吸收峰为C-H弯曲振动和SA羧酸根离子($-\text{COO}^-$)的对称伸缩振动2种振动模式的叠加。 877.39 cm^{-1} 处为-CH的面外弯曲振动吸收峰,与SA中糖环结构的-CH弯曲振动存在关联,表明SA骨架在交联体系中保持稳定。PSA的红外光谱结果表明,AM已成功接枝到SA链上,且PVA通过羟基与SA-AM共聚体系形成氢键及交联作用,稳定存在于PSA中。交联反应使产物结构更加复杂,增强了其稳定性和化学性能,从而有效抑尘。

2.2 热重分析

PSA的质量百分比(TG)及质量变化速率(DTG)曲线如图3所示。由TG曲线可以看出,

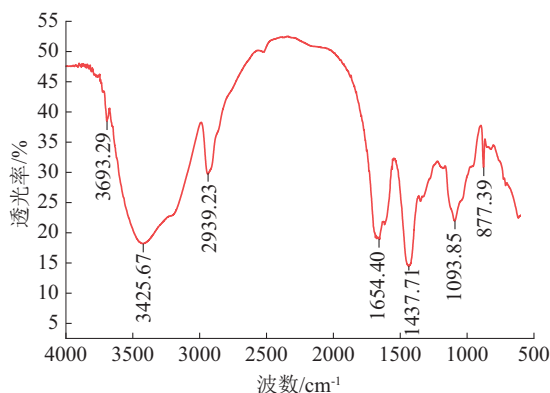


图2 PSA的红外光谱曲线

Fig.2 Infrared spectral curve of PSA

PSA的热分解过程包括失水干燥、低速热分解和高速热分解3个阶段。当温度处于 $30\sim 240.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内时,质量损失率为 11.24% ,此阶段处于失水干燥阶段,质量损失主要是由于接枝产物中含有大量亲水基团,加热过程中自由水和结晶水蒸发;由于PSA样品中SA提供的多糖分子断裂、PVA的空间结构破坏及AM所提供的酰胺基团分解,在 $240.4\sim 309.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内处于低速热分解阶段,TG曲线下速度增快,质量损失率为 16.94% 。 $309.6\sim 539.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围处于高速热分解阶段,质量损失率为 62.44% ,PSA聚合物分子主体发生分解,共聚结构崩溃。随着温度继续升高,质量损失也加快。在 $539.7\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围,持续发生少量质量损失。温度达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,仍有 7.12% 的样品残存。

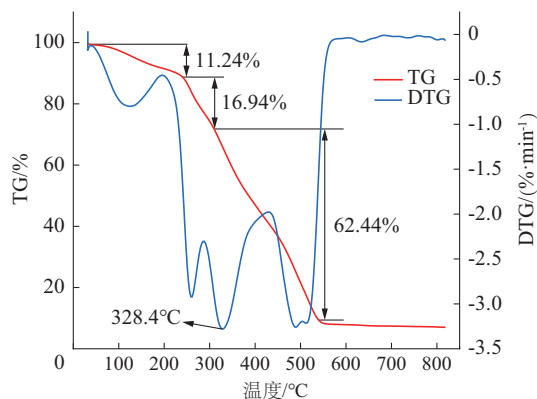


图3 PSA的TG/DTG曲线

Fig.3 TG/DTG curves of PSA

接枝产物PSA的DTG峰值点温度(即最大热解速率)为 $328.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时热解速率为 $3.28\%/min$,且只有当温度超过 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,材料质量才会出现明显变化。该共聚物体系热稳定性较高。由于瓦斯抽采孔钻进的正常工况下无法达到聚合物的热分解温度,因此PSA的热稳定性能满足实际施工需求。

3 润湿剂的优选

添加表面活性剂可有效增加溶液的润湿性,选取APG0810、BS-12、LAO-30、CAB-35四种表面活性剂与接枝共聚物PSA进行复配,研究不同种类与浓度表面活性剂对溶液润湿性的改善情况。润湿剂种类、浓度与沉降时间的关系见表1。

煤尘的沉降时间反映了表面活性剂溶液对煤

表 1 煤尘在不同种类及浓度表面活性剂中的沉降时间
Table1 Settling time of coal dust in different types and concentrations of surfactants

表面活性剂质量分数/%	APG0810 中的沉降时间/s	BS-12 中的沉降时间/s	LAO-30 中的沉降时间/s	CAB-35 中的沉降时间/s
0	>1000	>1000	>1000	>1000
0.2	>1000	>1000	>1000	>1000
0.4	189	>1000	>1000	>1000
0.6	106	>1000	>1000	>1000
0.8	85	>1000	>1000	>1000
1	94	>1000	672	>1000

尘样本的润湿能力,沉降时间越短,抑尘效果越好。由表 1 可知,4 种表面活性剂中,煤尘在 APG0810 中的沉降时间显著缩短,随着表面活性剂浓度的增加,煤尘在溶液中的沉降时间逐渐缩短,APG0810 质量分数 0.8% 时对 PSA 润湿性改善效果最好,煤尘的沉降时间最短,仅需 85 s。LAO-30 质量分数 1% 时,煤尘沉降时间为 672 s,相较于加入 APG0810,润湿性改善不明显。另外三种表面活性剂对 PSA 润湿性的改善效果不明显,随着质量分数增加,沉降时间缩短幅度不大,仍然大于 1000 s,润湿性较差。表面活性剂 APG0810 的加入显著提升润湿效果。考虑应用效果与经济性,选用质量分数 0.8% 的 APG0810 作为润湿剂,与接枝共聚物 PSA 共同组成复合降尘剂 PSAA。

4 抑尘性能测试

4.1 接触角分析

测试清水和 APG0810、PSA、PSAA 溶液与煤样之间的接触角,如图 4 所示。由图 4 可知,清水与煤样之间的接触角为 63°,亲水性较差,仅靠喷洒清水难以润湿煤样,抑尘效果差。加入表面活性剂 APG0810 后,清水的表面张力降低,溶液与煤样的接触角降低为 55°,润湿性有轻微改善。PSA 与煤样的接触角为 48°,由于接枝共聚物中含有大量极性亲水基团,相较于清水和 APG0810,PSA 具有较好的润湿性,能够通过喷洒溶液较快地润湿空气中漂浮的煤尘,抑尘效果较好。复合降尘剂 PSAA 溶液与煤样的接触角为 24°,与水、单独的表面活性剂 APG0810 和 PSA 相比,接触角分别降低了 61.9%、56.4% 和 50%,具有良好的润湿性。在表面活性剂

和接枝共聚物 PSA 的协同作用下,水的表面张力降低,降尘剂 PSAA 能够显著润湿煤样表面逐渐渗入内部,抑制煤尘飞扬,达到抑尘效果。

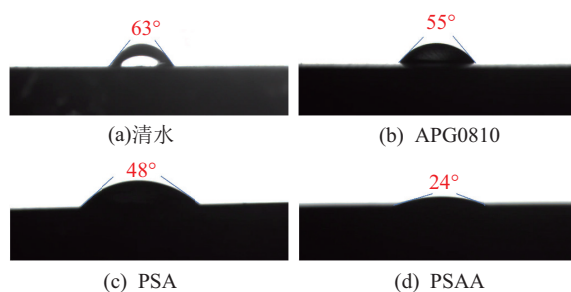


图 4 不同溶液与煤样的接触角测试

Fig.4 Contact angle test of different solutions with coal samples

4.2 抗蒸发性分析

分别经过清水、SA 复配表面活性剂 APG0810 溶液、PVA 复配表面活性剂 APG0810 溶液、降尘剂 PSAA 处理的煤样的蒸发率曲线如图 5 所示。由图可知,随着干燥时间的增加,溶液的蒸发率均逐渐增大。干燥 1 h 后,清水和 SA 复配表面活性剂 APG0810 溶液蒸发较快。PVA 复配表面活性剂 APG0810 溶液和降尘剂 PSAA 蒸发速度接近,较前两种溶液蒸发速度慢。随着时间的增加,蒸发率的差距逐渐增加。干燥 3 h 后,样品蒸发率分别为 87.62%、85.62%、83.38% 和 73.19%。干燥 4 h 后,样品蒸发率分别为 100%、98.27%、97.26% 和 90.96%,此时经过清水处理的煤样已完全干燥,SA 复配表面活性剂 APG0810 溶液、PVA 复配表面活性剂 APG0810 溶液处理的煤尘接近干燥状态。干燥 5 h 后,经过清水、SA 复配表面活性剂 APG0810 溶液、PVA 复配表面活性剂 APG0810 溶液处理的煤样均已干燥,降尘剂 PSAA 处理的煤样仍未蒸发完全。直至 6 h,所有样品完全干燥。由此可以看出,经处理的煤样的保水率大小为:PSAA>PVA-APG0810 溶液>SA-APG0810 溶液>清水。

由于降尘剂 PSAA 接枝了羟基、羧基、酰胺基等大量极性亲水基团,具有较高的活性,能够与水分子形成氢键,从而形成一层厚而紧密的水化膜,这层水化膜能够有效地阻止水分子的蒸发,从而减少溶液的蒸发。因此该降尘剂具有良好的保水性。

4.3 抗风蚀性分析

抗风蚀实验可有效评价降尘剂在模拟井下恶

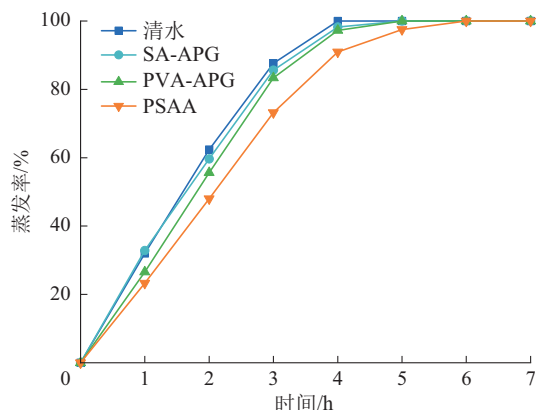


图5 降尘剂的蒸发率曲线

Fig.5 Evaporation rate curve of dust suppressant

劣气流环境中对孔口煤尘的抑制能力及其抗风蚀性能,利用风速计精确调节风速并施加不同强度的模拟气流,分别经清水、SA-APG溶液、PVA-APG溶液和降尘剂PSAA溶液处理的煤尘堆,在9 m/s的风速下吹扫30 min后的状态如图6(a)~(d)所示。由图可知,在9 m/s的风速吹扫下,经清水处理的煤尘几乎全部损失,SA-APG溶液处理的煤尘堆形态也被大部分破坏,PVA-APG溶液处理的煤尘形态被部分破坏,但仍保留大部分煤尘,而经降尘剂PSAA处理后的煤尘基本被完全保留,煤尘堆形态基本未被破坏,受风力侵蚀很小。

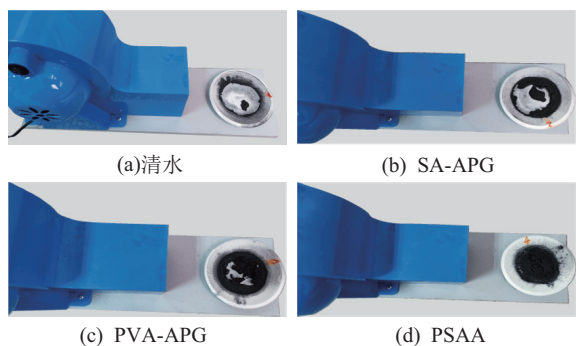


图6 抗风蚀测试

Fig.6 Wind erosion resistance test

不同风速下,经不同溶液处理后样品的抗风蚀率如图7所示。由图可知,在3、6 m/s的风速吹扫下,各溶液处理后的煤堆抗风蚀率差距不大,抗风蚀率均高于90%,PSAA处理的煤堆抗风蚀率接近100%。加大风速至9 m/s后,各溶液处理后的煤堆抗风蚀率差距变大。经清水、SA-APG溶液、PVA-APG溶液、降尘剂PSAA溶液处理后的煤堆抗风蚀

率分别为3.53%、31.93%、52.47%和81.73%。

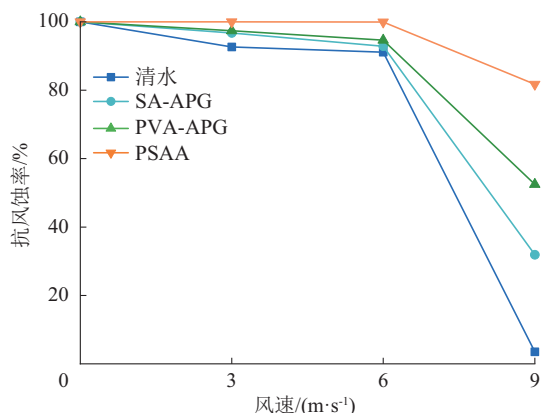


图7 不同风速下降尘剂抗风蚀率变化

Fig.7 Variations of wind erosion resistance of dust suppressant with different wind speeds

由于清水的表面张力较大,只能轻微润湿煤尘堆表面的煤尘,且干燥后的煤尘没有黏结性,极易被风破坏吹扫。SA-APG溶液较清水的润湿性和黏结性有所改善,但仍不足以抵抗风蚀。PVA-APG溶液具有一定的润湿性和黏结性,能够润湿煤尘并在粉煤尘颗粒表面形成一层薄膜,阻止其飞扬,抗风蚀率增强。复合降尘剂PSAA喷洒到煤尘表面后,由于表面活性剂APG0810具有良好的表面活性,可增大溶液对煤尘的吸附能力,与煤尘接触时润湿并捕获煤尘。同时,由于SA和PVA的成膜性,煤尘表面形成一层液态的薄膜。随着PSAA逐渐渗透到煤尘中,PSAA中的官能团(如SA中的羧基和AM中的酰胺基)与煤尘颗粒表面的化学基团相互作用,将煤尘黏结在一起,使微小尘粒凝聚为较大颗粒,增强了粉尘的固化作用。一段时间后薄膜凝固,形成坚硬的固化层,实现“润湿-黏结-固化”多机制协同抑尘。

4.4 扫描电子显微镜分析

对分别喷洒清水、APG0810溶液和降尘剂PSAA处理后的煤进行扫描电镜测试,煤尘的微观形貌如图8所示。图8(a)为煤尘经过清水处理后,放大1000和2000倍的微观形貌,喷洒清水的煤样在水分蒸发后,煤粒之间存在较大的空隙,为“颗粒接触”状态,颗粒之间没有黏结在一起,结构松散,导致煤尘在风力的作用下易克服重力扬起,形成二次扬尘。图8(b)为煤尘经过APG0810溶液处理后,放大1000和2000倍后的微观形貌,经表面活性

剂处理的煤尘微观形貌与清水处理后的相似,煤尘颗粒之间存在很大空隙,煤粒分布松散。表面活性剂降低了水的表面张力,易润湿煤尘,但其黏结作用较弱,处理后随着含水率的降低,颗粒之间变得松散,失去抑尘效果。煤尘经过降尘剂 PSAA 处理后,放大 1000 和 2000 倍的微观形貌如图 8(c) 所示,喷洒降尘剂的煤样在水分蒸发之后,煤尘颗粒相互黏结,由“颗粒接触”状态转变为“颗粒黏结”状态,有明显团聚现象。由于降尘剂的交联黏结作用,喷洒在煤尘颗粒表面后,润湿煤尘并将其黏结在一起,干燥后形成一层致密的固化层,具有良好的抵抗风力侵蚀的能力,从而实现良好的固化抑尘效果。

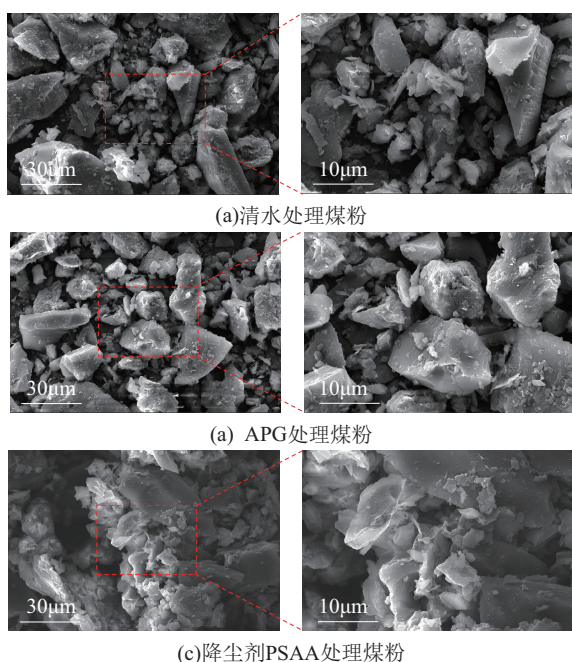


图8 喷洒清水和 APG0810、PSAA 溶液后煤样的扫描电镜图

Fig.8 SEM images of coal samples sprayed with water, APG0810, PSAA

5 结论

(1)以 SA 为接枝主链,AM 为单体,PVA 为改性组分,KPS 为引发剂,MBA 为交联剂,APG0810 为润湿剂,通过接枝共聚及复配制备出一种兼具润湿、黏结效果的复合型降尘剂 PSAA,可用于瓦斯抽采孔口降尘。

(2)在 KPS 和 MBA 的共同作用下生成的接枝产物 PSA,其 DTG 峰值点温度(即最大热解速率)为 328.4℃,温度达到 800℃时,仍有 7.12% 的样品

残存,热稳定性较高。

(3)降尘剂 PSAA 与煤样的接触角为 24°,与水相比降低了 61.9%,具有良好的润湿性;在 50℃环境下,喷洒降尘剂的煤样保水性良好;在强风(9 m/s)侵蚀下,喷洒复合型降尘剂尘样的抗风蚀率仍达 81.73%;利用扫描电镜观察经降尘剂处理后的煤尘表面,降尘剂在煤样表面形成一层致密的固化层,具有良好的抵抗风力侵蚀的能力,从而起到良好的固化抑尘效果。降尘剂 PSAA 具有良好的抗风蚀性和固尘效果。

(4)在后续研究中,还要加强表面活性剂的优化研究,增加表面活性剂种类与用量范围;同时深入研究该降尘剂对不同润湿特性的煤尘的作用,并根据不同的煤种调整制定相应的配方,开展现场试验。

参考文献(References):

- [1] 何玉云,曹学斌,熊正强,等.宁夏中卫深井煤炭勘探区钻探工程冬季施工技术[J].钻探工程,2024,51(S1):299-302.
HE Yuyun, CAO Xuebin, XIONG Zhengqiang, et al. Winter drilling construction technology in Shenjing coal exploration area, Zhongwei City, Ningxia[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):299-302.
- [2] 庞振忠,曾一凡,韩柯尧,等.基于地层承载力约束的“煤-水”协调开采理论与工程实践[J].煤田地质与勘探,2025,53(7):1-11.
PANG Zhenzhong, ZENG Yifan, HAN Keyao, et al. Theory and engineering practice of coal-water coordinated mining based on constraints of formation bearing capacity[J]. Coal Geology & Exploration, 2025,53(7):1-11.
- [3] 杨宽才,孟燕杰,许权威,等.松散破碎地层钻进高吸水树脂堵漏剂合成与评价[J].钻探工程,2024,51(6):39-47.
YANG Kuancai, MENG Yanjie, XU Quanwei, et al. Synthesis and evaluation of highly absorbent resin plugging agent for drilling in loose broken formation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):39-47.
- [4] 舒龙勇,张元龙,宋鑫,等.单一特厚煤层采动覆岩低位动态裂隙区卸压瓦斯抽采关键技术[J].煤炭科学技术,2025,53(7):116-133.
SHU Longyong, ZHANG Yuanlong, SONG Xin, et al. Key technology of pressure-relief gas extraction in low dynamic fracture zone of mining overburden in single ultra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025,53(7):116-133.
- [5] 曹小军.复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J].钻探工程,2023,50(2):150-154.
CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):150-154.
- [6] 贾秉义,李树刚,陈冬冬,等.碎软煤层顶板长钻孔定向压裂瓦斯超前治理工程实践[J].煤田地质与勘探,2025,53(3):34-43.
JIA Bingyi, LI Shugang, CHEN Dongdong, et al. Engineering

- practice of advance gas control for crushed soft coal seams through directional fracturing using a long borehole in the coal seam roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 34-43.
- [7] 李笔文,叶嗣暄.复杂地层顺层定向钻孔轨迹设计方法优化[J]. *钻探工程*, 2024, 51(2): 47-52.
- LI Biwen, YE Sixuan. Optimization of directional drilling path design method in complex formation[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(2): 47-52.
- [8] Zhou A T, Du C A, Wang K, et al. Research on intelligent control theory and strategy of gas drainage pipe network based on graph theory[J]. *Fuel*, 2024, 357(Part B): 129867.
- [9] Rahimdel M J, Javanshir Giv M, Bahonar M R. Selecting the optimal borehole drilling pattern for methane drainage in underground coal mining: a case study in Iran[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, 42(4): 2641-2655.
- [10] 薛曼,侯继武,李智,等.多分支水平井岩屑运移模型与实验研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(1): 31-39.
- XUE Man, HOU Jiwu, LI Zhi, et al. Model and experimental research of cuttings transport in multi-branch horizontal wells[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(1): 31-39.
- [11] 苑春苗,孙凯文,李刚,等.瓦斯煤尘及其混合物着火爆炸特性研究进展[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(6): 42-53.
- YUAN Chunmiao, SUN Kaiwen, LI Gang, et al. Research progress on ignition and explosion characteristics of gas and coal dust and their mixtures[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(6): 42-53.
- [12] Nyabire Akanyange S, Nie W, Ilele Mwabaima F, et al. A systematic review of the physiological and environmental impacts of coal dust and its control technologies[J]. *Fuel*, 2024, 371(Part A): 131876.
- [13] 王梦园,薛曼,梁梦佳,等.改性柚子皮降滤失剂的合成与评价研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(3): 84-93.
- WANG Mengyuan, XUE Man, LIANG Mengjia, et al. Synthesis and evaluation of modified pomelo peel fluid loss additives[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(3): 84-93.
- [14] 乔治忠,胡金良,丁志刚.煤尘润湿机理及其影响因素[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S1): 499-504.
- QIAO Zhizhong, HU Jinliang, DING Zhigang. Wetting mechanism and influencing factors of coal dust[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S1): 499-504.
- [15] 张迎新,高江帆,杨康,等.烟煤抑尘剂的制备及分子动力学模拟[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(7): 2656-2665.
- ZHANG Yingxin, GAO Jiangfan, YANG Kang, et al. Preparation and molecular dynamics simulation of dust suppressant for bituminous coal[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(7): 2656-2665.
- [16] 薛彦平.环保型防冻抑尘剂的制备及性能研究[J]. *应用化工*, 2025, 54(2): 310-314.
- XUE Yanping. Preparation and performance study of environmentally friendly antifreeze dust suppressants[J]. *Applied Chemical Industry*, 2025, 54(2): 310-314.
- [17] Huang Z A, Ling Z W, Hu Z D, et al. Properties and mechanism analysis of a novel construction dust suppressant based on polymer blending[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 192: 115-128.
- [18] 王和堂,贺胜,章琦,等.微生物发酵法合成生物抑尘剂的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 477-488.
- WANG Hetang, HE Sheng, ZHANG Qi, et al. Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 477-488.
- [19] Huang Z A, Zhao W, Yang Z J, et al. Preparation and characterization of an environmentally friendly compound chemical agent for road dust suppression in a copper mine[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(1): e13532.
- [20] Jiang B Y, Liu Z, Zhao Y, et al. Development of an eco-friendly dust suppressant based on modified pectin: experimental and theoretical investigations[J]. *Energy*, 2024, 289: 130018.
- [21] 孔二伟,王利锋,韩子辰,等.裂缝型漏失地层钻井液防漏堵漏数值模拟研究[J]. *钻探工程*, 2025, 52(4): 46-53.
- KONG Erwei, WANG Lifeng, HAN Zichen, et al. Numerical simulation study on leakage prevention and sealing of fractured formation drilling fluids[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(4): 46-53.
- [22] 王知乐,田雨,周伟,等.壳聚糖联合EICP对露天矿排土场边坡抗侵蚀性影响机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(12): 4713-4727.
- WANG Zhile, TIAN Yu, ZHOU Wei, et al. Mechanism of the effect of chitosan combined with EICP on the erosion resistance of slopes in open-pit mine dump[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(12): 4713-4727.
- [23] 陈增杰,王立杰,魏建凤.环保型双网络水凝胶抑尘剂的性能研究[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(10): 43-49.
- CHEN Zengjie, WANG Lijie, WEI Jianfeng. Study on performance of environment-friendly double network hydrogel dust suppressant[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(10): 43-49.
- [24] 郑春山,李灿灿,江丙友,等.基于氟碳表面活性剂增效的复合抑尘剂润湿抑尘特性研究[J]. *煤矿安全*, 2025, 56(2): 47-57.
- ZHENG Chunshan, LI Cancan, JIANG Bingyou, et al. Study on wetting and dust suppression characteristics of composite dust suppressant based on enhancement effect of fluorocarbon surfactant[J]. *Safety in Coal Mines*, 2025, 56(2): 47-57.
- [25] 金永飞,刘仁飞,郭军,等.新型矿用EMI降尘剂对煤尘的润湿特性研究[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(2): 10-17.
- JIN Yongfei, LIU Renfei, GUO Jun, et al. Research on wetting characteristics of new-type EMI on coal dust[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(2): 10-17.
- [26] 边素素,胡相明,贺正龙,等.基于纳米纤维素的接枝共聚型高分子抑尘剂制备与性能研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(5): 32-39.
- BIAN Susu, HU Xiangming, HE Zhenglong, et al. Preparation and performance of grafted copolymerized polymer dust suppressant based on nanocellulose[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(5): 32-39.

(编辑 王跃伟)