

生物环保型抑尘剂在煤尘治理中的研究进展

刘海洋^{1*}, 潘多伟^{2,3}, 郭隆鑫^{2,3,4}

- (1. 国能蒙西煤化工股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;
2. 煤科通安(北京)智控科技有限公司, 北京 100013;
3. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要:综述了近年来国内外生物环保型抑尘剂在煤尘治理中的研究进展。根据作用方式,主要分为湿润型、凝聚型和黏结型,目前多以3类机制协同的环保复合抑尘剂为主。系统总结了天然生物基抑尘剂,包括生物表面活性剂、多糖类、蛋白质基和多酚类抑尘剂,以及天然废弃物基和微生物基抑尘剂的制备方法与应用效果。最后,结合绿色、低碳和可持续发展需求,分析了生物有机抑尘剂存在的问题,并提出发展建议,为后续设计、优化和工程应用提供参考。

关键词:煤尘治理;抑尘机理;生物基材料

中图分类号:TQ520.9;TQ536;X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)07-0061-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.012

Research progress of bio-based environmentally friendly dust suppressants for coal dust control

LIU Hai-yang^{1*}, PAN Duo-wei^{2,3}, GUO Long-xin^{2,3,4}

- (1. CHN Energy Mengxi Coal Chemical Industry Co., Ltd., Ordos 017000, China;
2. CCRI Tong'an (Beijing) Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
3. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;
4. Beijing Coal Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper reviews recent research progress on bio-based and environmentally friendly dust suppressants for coal dust control worldwide. According to their action mechanisms, these suppressants can be mainly classified into wetting, agglomerating, and bonding types, while current applications increasingly rely on environmentally friendly composite dust suppressants that integrate these mechanisms. The preparation methods and application performance of natural bio-based dust suppressants, including biosurfactants, polysaccharide-based, protein-based, and polyphenol-based suppressants, as well as natural waste-derived and microbial dust suppressants, are summarized. Finally, driven by the concepts of green, low-carbon, and sustainable development, existing problems of bio-organic dust suppressants are analyzed, and future development suggestions are proposed to provide references for their design, optimization, and engineering application.

Key words: coal dust control; dust suppression mechanism; bio-based materials

煤炭在发电、钢铁等领域仍占据重要地位,其开采、运输和利用过程中会产生大量煤尘,进而威胁矿工健康、作业安全和生态环境。煤尘污染控制已成为煤炭清洁生产中的重要问题,因此亟需开发高效、环保的抑尘技术^[1]。煤尘治理主要包括物理与化学方法。煤层注水、喷雾等物理法虽操作简便、成本较低,但存在持效性差、抗风蚀能力弱和耗水量大等不足;相比之下,化学抑尘剂可通过增强润湿、凝聚和固结作用提高抑尘效果,但传统药剂仍存

在黏附性差、腐蚀性强或环境风险等问题,限制了其绿色应用^[2]。

近年来,生物基及废弃物衍生材料被用于绿色抑尘剂开发,经合成、复配提升润湿、黏结等性能,但其类型、机理、效果及瓶颈仍缺乏系统综述。为此,本研究聚焦近10年来的创新成果,系统梳理生物基抑尘剂的分类、作用机制及其在煤尘治理中的应用,并对未来发展方向进行展望,以期煤炭绿色高效除尘提供理论参考。

收稿日期:2025-09-15;修回日期:2026-05-04

基金项目:煤科院新产品新工艺开发项目(2024CG-TA-04)

作者简介:刘海洋(1981-),男,硕士,工程师,研究方向为煤矿生产技术,通讯联系人,qaxplm1833@163.com。

1 环保抑尘剂的主要作用类型

煤尘抑制的核心在于抑制粉尘扩散,关键在于其优良的黏结和润湿等性能,能在提升水分利用效率的同时形成物理屏障。其中,保湿性、黏度及渗透性强化了煤炭粉尘治理过程,而稳定性、持久性与耐候性则保障效果的可靠与长效。因此,环保型抑尘剂的研发需围绕上述性能协同展开^[3]。

1.1 湿润型抑尘剂

湿润型抑尘剂依靠表面活性剂两亲结构,降低水表面张力和液-固接触角,促进煤尘润湿与渗透[图1(a)]。基于商用十二烷基苯磺酸钠润湿性强,但刺激性、腐蚀性和难降解问题突出,常通过复配降低环境影响并提升性能。Nie等^[4]的研究表明,鼠李糖脂复合抑尘剂可使表面张力由25.9 mN/m降至23.95 mN/m,接触角降至25°。添加无机盐也被证明可进一步改善润湿性能并增强保水效果。Wang等^[5]以微藻油提取物为原料制备了微藻油基煤尘抑制剂,其60 s时动态接触角降至13.41°,明显低于SDBS处理组的26.78°,表明该生物基药剂具有优异的煤尘润湿增强效果。

1.2 凝聚型抑尘剂

凝聚型抑尘剂通过自身的吸附、凝聚等作用,将细小的粉尘凝聚在一起,形成大颗粒沉降在煤层表面[图1(b)]。传统的凝聚剂采用高吸水树脂和无机盐(CaCl_2 、 Na_2SiO_3)等,具有优异吸湿性及抗风蚀能力,但存在强腐蚀性和污染性。Zhang等^[6]利用海藻酸钠和羧甲基纤维素钠制备的抑尘剂,在12 m/s强风下抗侵蚀能力达99%。Zhou等^[7]开发的改性羧甲基纤维素钠抑尘剂,接触角为38°,在10 m/s风速下抗风蚀率为96.75%。这些研究表明,药剂的定向改性与复配可显著提升抗风蚀性能。

1.3 黏结型抑尘剂

黏结型抑尘剂通过在煤尘表面形成高强度覆盖层,有效阻止粉尘在风力作用下扩散[图1(c)]。传统抑尘剂多依赖重油、沥青等石油馏分,虽有一定效果,但污染严重,当前研究集中于环保替代材料。Shao等^[8]利用木质素-银纳米粒子、丙烯酸及烷基多糖苷聚合制备出一种环境友好型黏结型抑尘剂,质量损失率仅6%,显著低于聚丙烯酸处理组的27%,且固结层残余应力强度达1 mPa,远高于后者的0.017 mPa。乔凤等^[9]以餐厨废油为原料制备的抑尘剂,黏度达81.5 mPa·s,接触角低至19.4°~42.0°,固化层厚15 mm。这些研究表明,黏结型抑

尘剂主要通过高分子成膜、黏附与交联固化形成硬壳或柔性膜,从而实现高效抑尘。

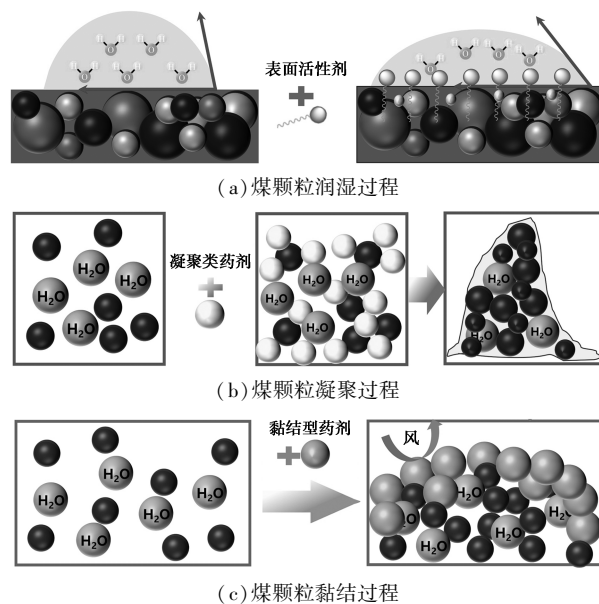


图1 环保抑尘剂的主要作用类型

2 环保抑尘剂的材料分类

2.1 天然生物基抑尘剂

2.1.1 生物表面活性剂基抑尘剂

生物表面活性剂因优良的环保性、润湿与渗透性能,成为替代传统抑尘剂的重要选择。Nie等^[10]以槐豆胶为黏结剂,辅以脂肪醇聚氧乙烯醚和甘油,所制备的复合药剂降尘率达92.3%。Niu等^[1]研制出鼠李糖脂复合润湿剂,具备23.95 mN/m的超低表面张力及651.03 J/mol的高结合能,可实现煤尘的深度润湿与牢固吸附,性能显著优于常规抑尘剂。因此,生物表面活性剂以绿色高效特性,正推动抑尘剂向多样化和高性能方向发展。

2.1.2 多糖类抑尘剂

多糖基抑尘剂因天然可降解且官能团丰富,成为粉尘防治研究热点。其中,壳聚糖作为天然阳离子多糖,含大量羟基和氨基活性位点,是优良抑尘载体。通过季铵化改性或接枝2-丙烯酰胺-2-甲基丙烷磺酸,可提高体系黏度和吸水率,显著增强抑尘性能^[11]。瓜尔胶具有高支化甘露糖主链和半乳糖侧链的柔性链结构,展现出超高的增稠效率和水合能力。Zhang等^[2]通过天然高分子瓜尔胶与环氧丙烷发生亲核取代反应合成了新型高黏度抑尘剂,并在煤尘抑制方面表现出较好的保水性和黏结性。同样,Wang等^[12]通过接枝引入了大量含氧官能团($-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$),在抑尘剂中主要通过氢键作用

黏附在矿物颗粒表面,抑制其扩散。

同样,淀粉廉价易得,可经氧化、醚化、接枝提升吸水性,并与表面活性剂复配制备低黏度、高发泡、快润湿泡沫抑尘剂^[13]。纤维素结晶度高、氢键网络

致密,结壳持久;羧甲基化后仍具高模量,12 m/s 下抑尘率达 99.56%^[14]。多糖基抑尘剂主要依靠物理吸附、氢键和热凝胶化作用,但受 pH、温度及离子强度影响,仍需改性提升保湿、黏附和长效稳定性(图 2)。

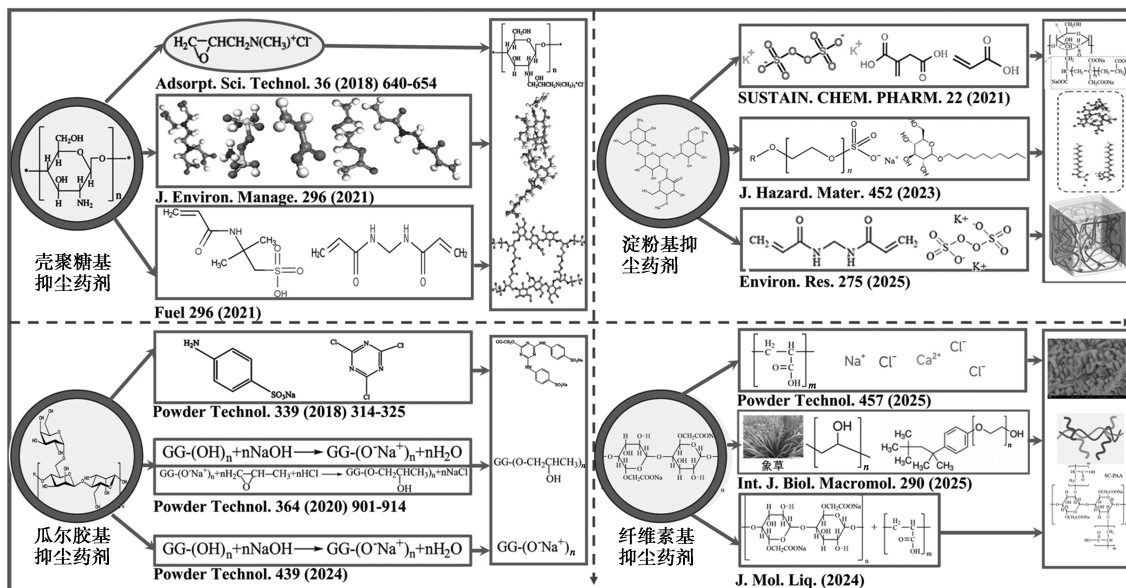


图 2 壳聚糖、瓜尔胶、淀粉、纤维素基抑尘剂的主要制备方式

与前 4 种多糖不同,果胶、海藻酸钠、黄原胶依赖离子交联(果胶/海藻酸钠)或超分子刚性结构(黄原胶),具备快速物理交联能力,抗干扰性极强(图 3)。Shi 等^[15]以天然材料果胶为基质,通过接枝改性制备抑尘剂,改性果胶液滴在烟煤片上的接触角为 55.21°,相比纯水滴和未改性果胶滴分别降

低了 21.66°和 18.50°。Liu 等^[16]从海带中提取海藻酸钠,并与聚乙烯醇和聚丙烯酰胺交联。随后添加磺化蓖麻油生成三维网络水凝胶抑尘剂,在强风(12 m/s)下抑尘效率>98%,且经过 8 次循环(56 d)后降解率为 37%。表现出良好的润湿、抑尘、降解性能(表 1)。

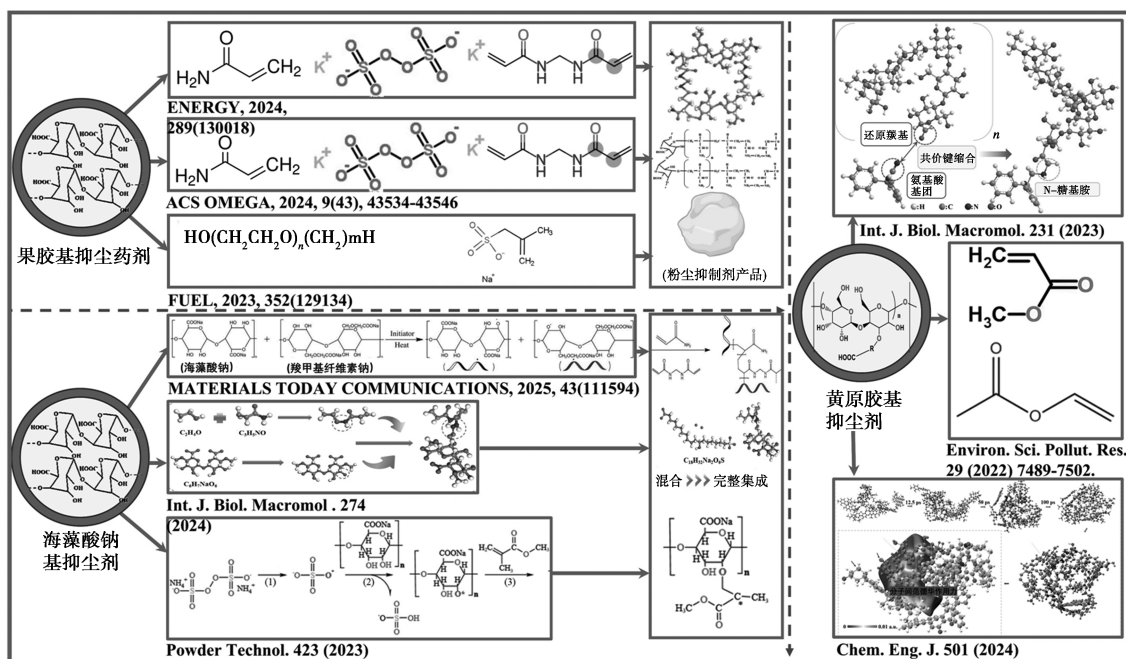


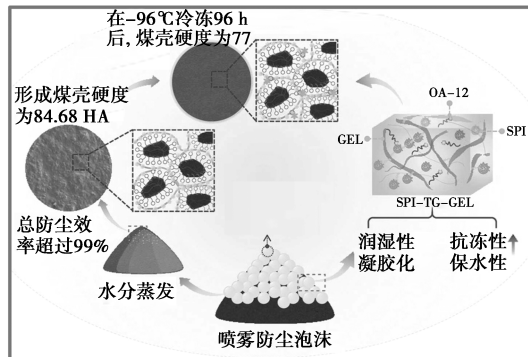
图 3 果胶、海藻酸钠、黄原胶基抑尘剂的主要制备方式

表 1 不同多糖类抑尘剂功能特性

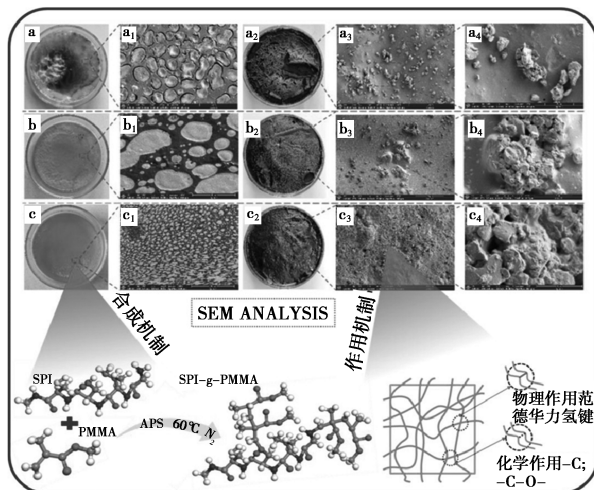
选择载体	功能需求	原因
海藻酸钠、果胶	快速固结	Ca^{2+} 交联瞬时成胶
纤维素衍生物、壳聚糖	高强度结壳	刚性链提供高模量
淀粉、瓜尔胶	低成本增稠	来源广泛,增稠效率高
黄原胶、改性壳聚糖	耐盐/硬水环境	抗离子干扰性强
壳聚糖	长效抑菌	天然抗菌性
阳离子壳聚糖、阴离子果胶/海藻酸钠	高黏附性	静电吸引/金属螯合
黄原胶、纤维素醚	极端环境适应性	耐温/耐 pH/耐剪切

2.1.3 蛋白质基抑尘剂

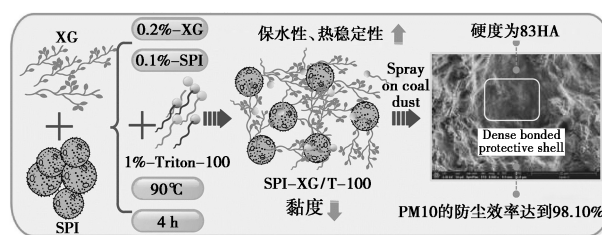
蛋白质类抑尘剂含亲水基团($-\text{COOH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$)和疏水结构,兼具黏结、保水与生物相容性,可协同结合粉尘和水分子。但天然蛋白质存在结构致密、环境敏感、功能单一和成本较高等不足,因此常通过改性、复配或混合提升抑尘性能。Dong 等^[17]利用酶交联明胶分子对大豆分离蛋白进行改性,制备的环保型复合抑尘剂对煤壳的保水效果比



(a) 大豆分离蛋白改性-防冻抑尘剂



(b) 蛋白改性-接枝



(c) 蛋白改性-糖基化

图 4 蛋白质基抑尘剂的主要制备方式和作用机理

单独喷水高 45.45%, 冻结 96 h 后仍能保持 77.58 HA 的硬度,且在 15 m/s 的风速下,60 d 的抑尘效果达 97% 以上[图 4(a)]。另外,也有研究者利用环保型大豆分离蛋白与甲基丙烯酸甲酯接枝共聚的抑尘剂合成方法,合成的新型抑尘剂在风速为 6.5 m/s 时抗风性超过 90%。当大豆分离蛋白经过黄原胶糖基化制备新型环保抑尘剂,抑尘效率可达 98.10%,保水性比水高 44.44%,热稳定性得到改善[图 4(b)、(c)]。这些研究表明生物基凝胶有助于提高抑尘剂的凝聚性能,进一步增强了抑尘效果^[18]。

2.1.4 多酚类抑尘剂

木质素具酚类特性,是潜在绿色黏合剂。经磺化形成水溶性木质素磺酸盐后,可依靠羟基和磺酸基结合粉尘并形成硬化层,实现抑尘。Fan 等^[19]将木质素磺酸钠与丙烯酰胺交联制备高分子抑尘剂,发现木质素与丙烯酰胺的质量比为 2:7,所制备的大分子产品能使煤尘颗粒发生团聚过程,但润湿效果略低,加入了 0.15% 的十二烷基二甲基甜菜碱能有效提高对煤的抑尘作用。Li 等^[20]的研究采用了木质素磺酸钠与丙烯酸进行接枝共聚,且在改性产物中添加了氯化钙、四硼酸钠及甲基硅酸钠,显著提高煤尘的抑制效果。然而,木质素磺酸盐对金属设备可能存在腐蚀风险,并对水生生态环境具有一定危害。因此,当前研究侧重于通过改性和复合手段,在维持高效抑尘性能的同时,降低腐蚀性和环境毒性。

2.2 天然废弃物基抑尘剂

基于天然生物基抑尘剂优势,研究者利用具有纤维素、木质素、壳聚糖组分的天然废弃物改性制备环保抑尘剂,实现以废制废的目的(表 2)。Zhou 等^[21]用预处理的甘蔗渣与聚乙烯醇和聚丙烯酰胺接枝共聚,制备的抑尘剂在 10 m/s 风速下抗尘效率为 90%,吸附的固结层强度达 42.3 kPa。Zhou 等^[23]以废虾壳为原料提取壳聚糖,与丙烯酸和聚乙烯醇-1788 进行接枝聚合制备新型抑尘剂,该药剂

对粉尘具有良好的附着力,固化层硬度可达 98 HA, 风速 15~18 m/s 时固尘率为 92.67%。Wang 等^[25] 用海滩浒苔与丙烯酸、二甲基二烯丙基氯化铵和聚 乙烯醇-1788 聚合复配,制备的药剂抑尘效率达 89%~94%。这些研究将天然高分子抑尘剂用农作物 秸秆等生物固废替代,通过复合接枝亲水性基团, 提高抑尘效率的同时,大幅降低了抑尘剂的成本,实 现能源的循环利用和低碳减排。

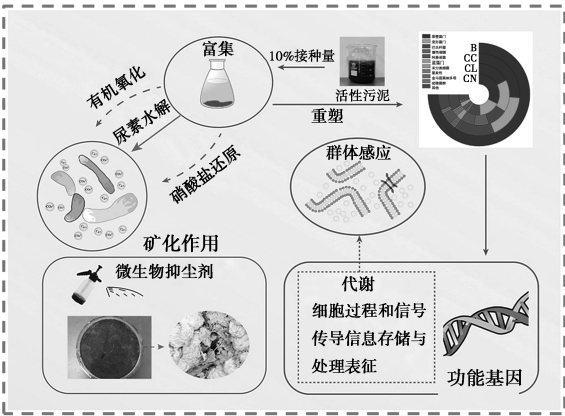
表 2 从天然产物中制备抑尘剂

天然废弃 物来源	改性/复配组分	合成 工艺	抑尘效果
甘蔗渣 ^[21]	聚乙烯醇和 聚丙烯酰胺	接枝 共聚	抗风速 10 m/s (90%); 固结层 强度 42.3 kPa
花生壳 ^[22]	丙烯酸和二 甲基二烯丙基 氯化铵	接枝 共聚	抗风速 10 m/s (95%); 吸附层 26 μm; 吸水性 325 倍
废虾壳 ^[23]	丙烯酸和聚 乙烯醇-1788	接枝 聚合	抗风速 15~18 m/s (92.67%); 固化层硬度 98 HA
玉米秆 ^[24]	聚乙烯醇/ 过硫酸钾/氢 氧化铝	接枝 聚合	黏度、成膜能力、热稳定性、抗 压性、温度适应性和抗风蚀性
浒苔 ^[25]	聚丙烯酰胺	混合	抗风速 10 m/s (97.06%); 表 面张力 27.05 mN/m; 抑尘效率 89%~94%

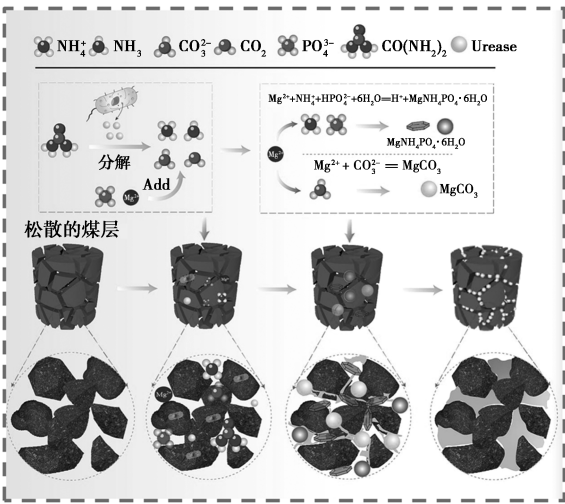
2.3 微生物基抑尘剂

微生物抑尘剂是新兴生物环保技术,主要利用 产脲酶微生物诱导碳酸钙沉淀,将细小煤尘黏结为 较大聚集体,从而抑制扬尘。其中,尿素水解因反应 易控、碳酸根生成速率快而成为常用途径(图 5)。 Wu 等^[26] 研究者发现,当脲酶与 CaCl₂-尿素溶液的 体积比为 1:3 时,抑尘效果达到最佳。Hu 等^[27] 则从 海水中富集了产脲酶微生物群落,系统分析了环境 因子对脲酶活性及矿化能力的影响,结果表明微生物 群落比纯菌种表现出更强的环境适应性和结构稳定 性。

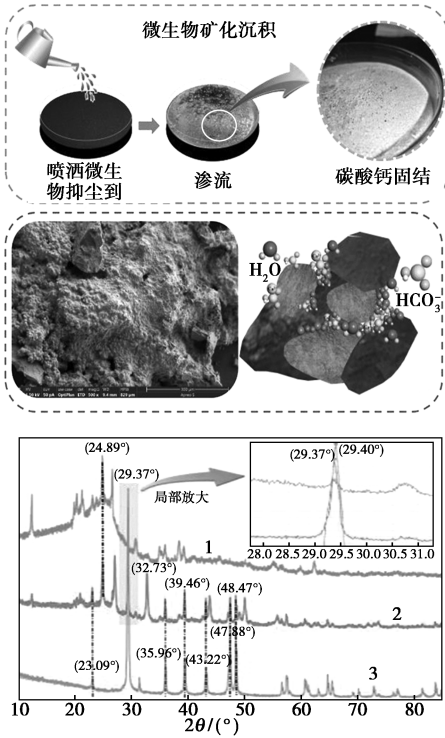
针对微生物抑尘剂的时效性,Geng 等^[28] 发现 其固结性能随矿化时间呈初期、高峰和衰减变化,固 结层硬度、厚度及憎水性是影响耐风雨腐蚀能力的 关键因素。另有研究表明,枯草芽孢杆菌发酵液纯 化产物作为生物表面活性剂,对煤尘润湿性能优于 脂肪醇聚乙醚,并具有良好的界面稳定性和环境 兼容性^[29]。但仍存在菌剂储存难、成本高和工艺复 杂等问题,未来可通过与绿色药剂复配提升抑尘效 率、经济性和工程适用性。



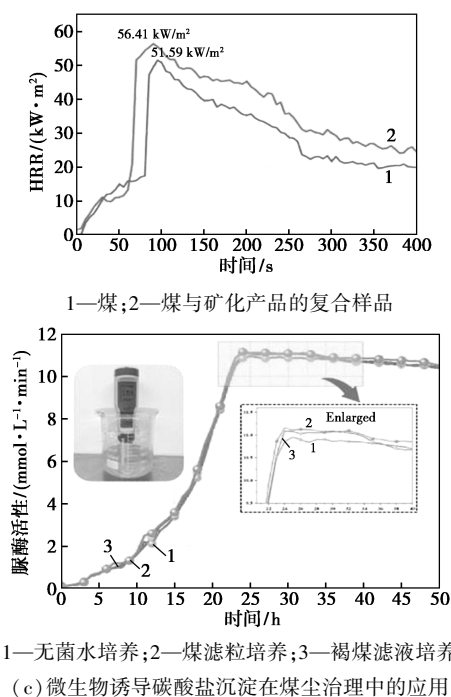
(a) 微生物诱导碳酸盐沉淀机理



(b) 微生物诱导碳酸盐沉淀优化工艺(固氮)



1—煤;2—煤与矿化产品;3—矿化产品



1—煤;2—煤与矿化产品的复合样品
(c)微生物诱导碳酸盐沉淀在煤尘治理中的应用

图5 微生物基抑尘剂的主要制备方式和作用机理

3 结论与展望

围绕传统抑尘剂存在的环境风险、持效性不足和适应性有限等问题,系统总结了生物环保型抑尘剂在煤尘治理中的替代潜力、作用机制、材料类型及发展方向,可为绿色抑尘剂的设计、开发与工程应用提供参考。

(1)生物环保型抑尘剂主要通过湿润、凝聚和黏结3种机制发挥作用:湿润型降低水表面张力并促进煤尘渗透;凝聚型通过吸附架桥促进细尘团聚沉降;黏结型形成稳定覆盖层以阻隔粉尘扩散。3类抑尘剂在提升抑尘性能的同时,兼具较好的环保性、稳定性和抗干扰能力。

(2)天然生物基抑尘剂主要包括生物表面活性剂、多糖、蛋白质/多酚及废弃物/微生物衍生材料等类型。其中,生物表面活性剂侧重深度润湿,多糖材料有利于形成抗风蚀结壳或凝胶,蛋白质/多酚材料具有良好的保水与黏结性能,废弃物和微生物材料则可实现资源化利用与长效抑尘。

(3)未来应针对生物有机抑尘剂作用机理不清、改性工艺复杂、成本较高和复杂工况适应性不足等问题,开展分子作用机制与多组分协同机制研究,开发适用于高寒、缺水、易自燃等环境的功能化抑尘剂,并构建低成本绿色制备工艺和标准化评价体系,推动规模化应用。

参考文献

- [1] Niu W, Nie W, Bao Q, *et al.* Development and characterization of a high efficiency bio-based rhamnolipid compound dust suppressant for coal dust pollution control[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 330: 121792.
- [2] Zhang H, Nie W, Yan J, *et al.* Preparation and performance study of a novel polymeric spraying dust suppression agent with enhanced wetting and coagulation properties for coal mine[J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 901–914.
- [3] 张建华, 杨芳慧, 才庆祥, 等. 露天煤矿粉尘防治用吸水保水性材料研究现状[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(S2): 120–126.
- [4] Nie W, Tian Q, Niu W, *et al.* Synergistic effect of binary mixture of anionic nonionic surfactant on inhibiting coal dust pollution: Experiment and simulation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 110099.
- [5] Wang H, Cheng S, Wang H, *et al.* Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction[J]. *Fuel*, 2023, 338: 127273.
- [6] Zhang F, Lu Y, Wang Y, *et al.* Study on synthesis of environmentally-friendly polymer dust suppressant based on graft modification[J]. *Powder Technology*, 2023, 423: 118436.
- [7] Zhou G, Lv Y, Wei Z, *et al.* Preparation of composite microbial dust suppressant using PVA as spore carrier and modified carboxymethyl cellulose sodium as wall material[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(1): 117255.
- [8] Shao Z, Dong H, Cheng W, *et al.* Preparation of mussel-inspired stable-bonding dust binders for fugitive dust control[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(8): 5341–5354.
- [9] 乔凤, 罗帆, 袁红. 餐厨废油基复合型煤炭抑尘剂的制备与性能分析[J]. *中国煤炭*, 2025, 51(2): 185–198.
- [10] Nie W, Yuan M, Bao Q, *et al.* Experimental and molecular dynamics simulation research on compound dust suppressant based on locust bean gum[J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 33: 103485.
- [11] Liu Z, Zhou G, Duan J, *et al.* Preparation of composite high-efficiency dust suppressant and relevant molecular dynamics simulation for wetting coal surface[J]. *Fuel*, 2021, 296: 120579.
- [12] Wang X, Chen H, Shi Y, *et al.* Development of an eco-friendly dust suppressant based on modified guar gum: Performance and mechanism analysis[J]. *Powder Technology*, 2024, 439: 119681.
- [13] Bao Q, Nie W, Li F, *et al.* Microscopic characterization and mesoscopic simulation of the interaction between chemically grafted copolymer and coal dust in an open-pit coal mining environment[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2021, 22: 100470.
- [14] Wang J, Wei Z, Zhao Q, *et al.* Preparation and performance study of carboxymethylated Napier grass (*Pennisetum purpureum*) cellulose dust suppressant[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 290: 139981.
- [15] Shi S, Wang X, Jiang B, *et al.* Preparation of consolidated dust suppression materials based on pectin: Graft modification experiment and reaction mechanism[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(43): 43534–43546.
- [16] Liu Y, Du C, Yi F, *et al.* Modified sodium alginate-based three-dimensional network hydrogel dust suppressant: Preparation, characterization, and performance[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 274: 133408.

(下转第72页)

- 118977.
- [8] Tseka T, Finkbeiner P, Phiri Z, *et al.* Comparative evaluation of ion-exchange resins for natural organic matter removal from power plant source waters[J]. *Journal of Water process Engineering*, 2025, 78; 108829.
- [9] Liu B C, Chen J C, You Y Y, *et al.* Cyclic removal and destruction of per- and polyfluoroalkyl substances from water using ion exchange, resin regeneration, and UV/sulfite reduction[J]. *Water Research*, 2025, 272; 122915.
- [10] Boschian L, Culetic A, Liu S Y, *et al.* Phosphate removal from hydrogen peroxide solutions using the ion exchange resin IRA-400[J]. *Journal of Chromatography A*, 2025, 1743; 465690.
- [11] Jasim A Q, Ajjam S K. Removal of heavy metal ions from wastewater using ion exchange resin in a batch process with kinetic isotherm[J]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2024, 49; 43–54.
- [12] Tabtimtong N, Padungwat A, Lertna N, *et al.* Sucrose conversion to 5-hydroxymethylfurfural over commercial ion-exchange resin[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 199; 107940.
- [13] Zuo M, Zheng X Y, Che W R, *et al.* Insight into 5-hydroxymethylfurfural synthesis and separation from the aqueous solvent with ion exchange resin catalysts, mechanisms, and theoretical calculations[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 362; 131904.
- [14] Zhang T Y, Zhang S M, Wu F, *et al.* Preparation of berberine hydrochloride ion-exchange resin complex by β -cyclodextrin inclusion[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2025, 104; 106472.
- [15] Dong Z L, Jiang T, Xu B, *et al.* Adsorption behaviors and mechanisms of gold recovery from thiosulfate solution by ion exchange resin[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34; 3372–3385.
- [16] Tian C Z, Xu Z Y, Zou W J, *et al.* Investigating the efficacy of D301 ion exchange resin in the recovery of Nb(V) via adsorption experiments and theoretical calculations[J]. *Surface and Interfaces*, 2026, 80(1); 108262.
- [17] Atkinson C M, Robshaw T J, Walker G D, *et al.* Optioneering in nuclear ion exchange resin disposal[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2025, 185; 105719.
- [18] Li B Y, Chen M Q. A comprehensive review on treatment technologies of spent ion exchange resins in nuclear power plants[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12; 114116.
- [19] El-sayed Y S, Eskander S B, Bayoumi T A, *et al.* Incorporation of spent ion exchange resin simulate into cement composites[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2024, 210; 111357.
- [20] Cheng H, Sun C, Xu X G, *et al.* Cementation of spent radioactive ion-exchange resin using sulphoaluminate cement with fiber and SCMs: Mechanical properties, durability, and irradiation resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 479; 141514.
- [21] Crivelli F, Cao S, Corrado M, *et al.* Development of a new process for the radioactive ion exchange resins conditioning-HYPEX®[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2025, 180; 105639.
- [22] Castro H A, Rodriguez R A, Bianchi H L. Thermal treatment and high performance plasma treatment applied to spent ion exchange resins; Study of solid product embedding with ordinary Portland cement[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2026, 448(3); 114714.
- [23] Hita M J D, Torres E, Geddes D A, *et al.* Immobilisation of simulant nuclear-grade spent ion-exchange resins in alkali-activated cement; Fresh state properties of the cement matrix[J]. *Journal of Nuclear materials*, 2025, 617(11); 156169.
- [24] Kim J, Singh B K, Um W. Effect of ion exchange resin particle size on homogeneity and leachability of Cs and Co in polymer waste form[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(5); 2729–2732.
- [25] Zhang N, Liu F, Li D, *et al.* Synergistic strengthening of ion-exchange resins by post-crosslinking and selective sulfonation for PGMEA purification[J]. *Industrial Chemistry & Materials*, 2025, 3(5); 631–642. ■

(上接第66页)

- [17] Dong H, Yu H, Xu R, *et al.* Research on application effect and mechanism of degradable multifunctional dust suppression foam in coal mines[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3); 112694.
- [18] Jin H, Zhang Y, Wu G, *et al.* Optimization via response surface methodology of the synthesis of a dust suppressant and its performance characterization for use in open cut coal mines[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 121; 211–223.
- [19] Fan T, Zhou G, Wang J. Preparation and characterization of a wetting-agglomeration-based hybrid coal dust suppressant[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113; 282–291.
- [20] Li K, Yang L, Jiang F, *et al.* Preparation and research on a coal dust suppressant from modified lignosulfonates[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(1); 66–69.
- [21] Zhou G, Xu Y, Wang Q, *et al.* Wetting-consolidation type dust suppressant based on sugarcane bagasse as an environmental material: Preparation, characterization and dust suppression mechanism[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330; 117097.
- [22] Ren B, Yuan L, Zhou G, *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.
- [23] Zhou G, Wang C, Li S, *et al.* Preparation and characteristics analysis of an ecoenvironmental protection cyclic solidification dust-fixing agent extracted from waste shrimp shells to suppress dust in coal resource-based cities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296; 113224.
- [24] Wang H, Nie W, Zhang H, *et al.* A synthesis of a dust suppressant using the cellulose extracted from maize straw[J]. *Starch-Stärke*, 2020, 72(3/4); 1900187.
- [25] Wang Q, Zhao Z, Zhao Y, *et al.* Performance optimization and mechanism analysis of applied Enteromorpha-based composite dust suppressant[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(7); 4897–4913.
- [26] Wu M, Hu X, Zhang Q, *et al.* Preparation and performance evaluation of environment-friendly biological dust suppressant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273; 123162.
- [27] Hu X, Liu J, Feng Y, *et al.* Application of urease-producing microbial community in seawater to dust suppression in desert[J]. *Environmental Research*, 2023, 219; 115121.
- [28] Geng Z, Feng Y, Zhao Y, *et al.* Study on the timeliness and maintenance mechanism of dust suppression performance of microbial dust suppressant[J]. *Powder Technology*, 2023, 426; 118618.
- [29] Wang H, He S, Zhang Q, *et al.* Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2021, 46(2); 477–488. ■