

# 煤炭运输抑尘技术研究现状与发展展望

王丰毓 王卫江 张永锋

内蒙古工业大学 化工学院 呼和浩特 010051

内蒙古工业大学 资源循环自治区高等学校重点实验室 内蒙古呼和浩特 010051

**摘要：**在国家能源安全战略推进与“双碳”目标实施的双重背景下，煤炭作为我国基础能源的核心地位依旧稳固，大规模的生产与运输活动背后，粉尘污染成为制约煤炭行业绿色高质量发展的关键瓶颈。煤炭运输各环节产生的粉尘不仅造成资源损耗，更引发严重的大气污染与人体健康危害。本文系统梳理了物理、化学、生物三大类煤炭运输抑尘技术的研究现状、作用机理与应用局限，重点阐述化学抑尘剂从宏观性能优化到微观分子设计的技术突破，以及生物矿化抑尘技术的创新发展路径。结合行业需求，总结出抑尘技术向工况定制化、功能复合化、原料环保化发展的趋势，并针对极端环境适应性、智能化调控、生物工艺工程化等关键问题提出未来研发方向，为实现煤炭全生命周期清洁运输、推动行业绿色转型提供理论参考与技术支撑。

**关键词：**煤炭运输；粉尘防治；物理抑尘；化学抑尘剂；生物矿化；绿色抑尘技术

## 一、煤炭运输粉尘污染现状及危害

煤炭是我国能源体系的支柱，在电力、钢铁、化工等领域具有不可替代的作用。相关数据显示，截至2022年年末，我国煤炭探明储量达2070.12亿吨，2021-2022年原煤产量分别为41.3亿吨和44.96亿吨，同期进口煤炭量分别为3.095亿吨和2.9亿吨。大规模的煤炭资源需通过铁路、公路、港口等物流方式转运，在装卸、运输、存储等环节，煤炭颗粒受风力、振动、碰撞等影响，极易产生粉尘并散逸，形成严重的粉尘污染。

煤尘是大气颗粒物污染的重要来源，涵盖PM10、PM2.5等可吸入细微颗粒物，具有扩散广、滞留久、治理难的特点。其危害体现在多方面：一是破坏生态环境，煤尘沉降会导致土壤板结、植被枯萎，进入水体后易造成水质污染，甚至诱发褐煤水综合症，破坏水生生态平衡；二是威胁人体健康，可吸入颗粒物通过呼吸道进入人体，沉积在呼吸器官部位，增加咽喉炎、支气管炎等疾病患病概率，长期接触还可能诱发尘肺病等致命性疾病，严重影响运输沿线居民与作业人员的身体健康；三是造成资源与经济损失，长途运输中的煤尘损耗不仅浪费能源资源，还降低了煤炭运输的经济效益。

因此，研发高效、环保、经济的煤炭运输抑尘技术，实施针对性的粉尘控制措施，是改善区域大气环境、保障民众健康的迫切需求，更是推动煤炭行业绿色低碳发展、实现能源高效利用的重要举措，对维护生态平衡、促进经济社会可持续发展具有重要现实与长远意义。

## 二、煤炭运输抑尘技术研究现状

煤炭运输抑尘技术围绕“抑制粉尘产生、捕捉悬浮粉尘、固结煤炭颗粒”核心目标发展，现已形成以物理抑尘为基础、化学抑尘为核心、生物抑尘为新兴

方向的技术体系。各类技术依据作用原理与应用场景的不同，展现出不同的技术特点与优势，也存在相应局限性，实际应用中需结合工况合理选择与组合。

### 2.1 物理抑尘技术

物理抑尘技术是煤炭运输粉尘防控的初始防护手段，通过物理隔离、机械喷淋、风力削弱等方式，从源头抑制粉尘产生或捕捉沉降悬浮粉尘，具有操作简单、成本较低、即时性强等特点，广泛应用于移动运输环节与固定场站，主要分为车厢封闭、挡风抑尘墙、机械喷淋三类技术。

车厢封闭技术主要解决铁路与公路长途运输的“煤尘损耗”问题。传统篷布遮盖技术虽能隔绝部分气流冲击，但存在维护成本高、作业效率低、密封性差、安全隐患大等问题，仍会有细微粉尘散逸。近年来，集装箱全封闭运输成为发展新方向，通过物理隔离实现煤炭与外部环境完全隔绝，从根本上杜绝尘逸，实现“零损耗”。尽管初始设备投入较大，但在远距离运输中，其在降碳、提升环境效益与经济效益方面优势显著，已在大型煤炭企业长途运输中逐步推广。

挡风抑尘墙与机械喷淋技术是煤炭集运站、港口堆场等固定场站的核心防控手段。挡风抑尘墙基于空气动力学设计，通过特定开孔结构削弱来风动能，在煤堆背风侧形成低风速、弱紊流区域，当孔隙率为30%时抑尘效果最佳，可使堆体表面风速降低超50%，将风速控制在煤尘起动临界值以下，且使用寿命长、运行成本低，是固定场站的基础防控设施。

机械喷淋技术已从传统洒水发展为微米级干雾抑尘技术，雾滴尺寸是影响抑尘效果的核心因素，当水雾粒径优化至0-120 μm时，与粉尘颗粒的碰撞捕获几率显著提高，既提升抑尘效率，又克服了传统喷淋耗水量大、易导致煤中水分超标的问题。该技术的应用效果与喷淋参数调控密切相关，需结合实时风况、

粉尘浓度动态调整喷淋压力、雾滴粒径等，且智能化改造成为趋势，通过传感器与自动控制系统实现喷淋作业的自动化、精准化，减少资源浪费。

## 2.2 化学抑尘技术

随着环保标准不断提高，传统物理抑尘技术对细微粉尘的捕获能力有限，且存在作用时间短、受环境因素影响大等问题，如低温环境下水分易冻结、水分挥发快等。在此背景下，高效、绿色、多功能的化学抑尘技术成为研究重点，通过研发各类抑尘剂改善煤炭颗粒表面特性，实现粉尘长效抑制。根据作用原理，化学抑尘剂可分为润湿型、粘结型、凝聚型及复合型四大类。

润湿型抑尘剂的核心是通过表面活性剂降低液体表面张力，改善煤尘疏水特性，促进液体铺展与渗透。表面活性剂为双亲分子，疏水端与煤体结合，亲水端与水分子相连，在煤尘表面形成水合层实现抑尘。煤尘的润湿性取决于其表面化学组成与微观结构，亲水性基团含量越高亲水性越强，脂肪碳链则呈疏水特性，因此研发时需注重表面活性剂与煤表面结构的适配性。分子动力学模拟与密度泛函理论为探索吸附微观机制提供了支撑，研究发现短烷基链表面活性剂吸附效果更优，新型氟碳表面活性剂（OBS）能有效约束水分子，显著增强润湿效果。同时，基于废弃物资源化利用的环保型润湿材料成为研发热点，如浒苔多糖、腐殖酸改性材料，既提升润湿性能，又解决传统试剂的环保问题，且表面活性剂的引入能优化雾化特性，助力细微粉尘吸附。

粘结型抑尘剂通过物理粘附和化学键合，将松散粉尘团聚成大颗粒，并在煤尘表面形成固化壳层，实现长效固结，主要分为无机与有机两类，目前研发朝着构建高强度网络、开发天然高分子改性材料、实现多功能集成方向推进。天然生物质基材料因来源广、生物相容性好成为重点，如大豆分离蛋白、海藻酸钠改性材料，能在煤尘表面形成致密保护膜，抑制粉尘扩散。纳米材料增强技术的应用进一步提升了固化层性能，如纳米纤维素改性抑尘材料形成的“网状构造”，能抵抗 20 m/s 强风与 50℃ 高温，克服了传统粘结剂在严苛气候中易开裂、失效的缺陷。

凝聚型抑尘剂以无机盐、树脂等为原料，凭借强吸湿能力引导细微粉尘团聚沉降，主要针对 PM10、PM2.5 等细微颗粒物，当前研究重心已转向环境友好型天然生物质改性材料。高分子链接枝改性是提升絮凝性能的关键，如机械活化固相反应改性的淀粉基聚合物，能显著增强对分散性颗粒的捕获能力；针对细微颗粒物的三元共聚物，可形成“微型捕捉网”，实现悬浮粉尘的絮凝沉降且生物可降解。吸湿性能优化是长效抑尘的核心，高吸水性树脂能形成水合团聚保护层，维持湿润条件，避免团聚体破碎；针对重型运输道路的专用抑尘剂，通过调控吸湿组分实现“微湿凝聚”，兼顾扬尘抑制与路面防滑，平衡了凝聚效果

与工程实用性。

复合型抑尘剂通过组合或修饰润湿、粘结、凝聚等功能组分，实现“协同增效”，弥补单一组分不足，是化学抑尘技术的重要发展方向。其研究重点包括复配协同机制、生物质接枝改性、固结层耐候性增强等。润湿剂与凝聚剂复配可构建“湿润-保湿”机制，解决疏水性煤尘再次扬尘问题，无机盐的加入还能改善表面活性剂胶束行为，提升体系稳定性。以天然生物质为基础的接枝改性，能开发出多功能复合抑尘剂，如红豆胶、黄原胶改性材料，实现快速润湿与牢固固结。同时，通过仿生设计、分子交联等手段增强固结层耐候性，如贻贝粘附蛋白启发的改性材料抗冻融性优异，大豆分离蛋白改性材料的固化层抗压强度达 218.6 kPa，耐雨水侵蚀，避免二次污染。目前，复合型抑尘剂的研发已从物理共混转向分子层面的精细设计，为扬尘系统治理提供了坚实材料支撑。

## 2.3 生物抑尘技术

生物抑尘技术是近年来新兴的绿色技术，依托生物矿化作用，利用酶或微生物诱导的矿物晶体固结粉尘，具有环境友好、资源节约、效果持久等特点，避免了传统化学抑尘剂的二次污染问题，以酶诱导碳酸盐沉淀（EICP）和微生物诱导矿化（MICP）技术为代表。

EICP 技术利用脲酶催化尿素分解生成碳酸根离子，与钙离子结合形成方解石晶体，将煤粉颗粒固结为整体。采用大豆提取的低成本脲酶替代商业脲酶，大幅降低了技术成本，提升了推广价值。针对 EICP 溶液在疏水性煤尘表面难渗透的问题，“生物酶-表面活性剂”复合系统通过添加烷基糖苷降低接触角，促使矿化溶液渗入煤堆深层，经处理后的煤粉抗风蚀性能提升 86.69%，实现了浸润与矿化双重强化。

MICP 技术通过巴氏芽孢杆菌等微生物直接诱导碳酸钙沉淀，利用方解石晶体固结粉尘，但效果受煤质特性影响，煤粉表面特性会干扰微生物附着与矿化产物生成。研究发现，优化菌液与胶结液喷洒比例可使矿化产物生成率最高达 81.11%，晶体在粉尘颗粒间形成“微桥接”结构，显著降低细颗粒物再悬浮风险。目前，生物抑尘技术仍处于实验室研究与小范围试验阶段，在微生物与酶制剂量产成本、现场效能维持、复杂工况适应性等方面仍存在技术瓶颈，亟待深入研究。

## 三、煤炭运输抑尘技术发展趋势

在环保要求不断提高与煤炭行业绿色转型的背景下，各类抑尘技术的创新与融合，推动煤炭运输抑尘技术从传统被动物理覆盖向主动“化学-生物”协同调控转型，从单一性能向多功能复合转型，从粗放式作业向精准化、智能化作业转型，整体呈现出工况定制化、功能复合化、原料环保化三大显著趋势。

工况定制化成为重要发展动向。不同煤化程度的煤炭在表面构造、亲疏水性等方面差异显著，通用型技术难以适配；同时，长途运输、港口存储、运输道

路等不同场景对抑尘技术的要求各不相同，如道路需抗压防滑、储煤场需防风长效。因此，抑尘技术正朝着结合煤炭特性与作业环境“因地制宜”设计个性化方案的方向发展，通过精准分析煤种特性与粉尘产生规律，研发定制化配方与技术看案，实现精准适配，提升防控效果。

功能复合化是核心发展趋势。单一技术难以满足复杂工况的综合需求，如物理喷淋仅能即时降尘，单一润湿剂无法实现长效固结。一方面，各类抑尘技术深度融合，如物理喷淋与化学抑尘剂结合，实现物理捕捉与化学固结的协同；另一方面，抑尘剂向多功能集成发展，通过分子设计与组分复配，开发兼具润湿、粘结、凝聚、耐候等功能的复合型抑尘剂，实现粉尘“快速捕捉-长效固结-持续抑制”的全流程控制。

原料环保化是发展必然要求。在“双碳”战略与绿色发展理念指引下，抑尘技术的环境相容性成为关键考量，传统化学抑尘剂的毒性、难降解性问题受到关注。目前，抑尘剂原料正逐步转向农作物残余、浒苔、腐殖酸等农业废弃物与生物副产品，通过资源化利用实现“以废治尘”，既降低制备成本，又避免次生污染。同时，生物抑尘技术的研发与推广，进一步推动抑尘技术向绿色、可持续方向发展。

#### 四、煤炭运输抑尘技术未来展望

我国煤炭运输抑尘技术虽取得显著进展，但面对严格的环保标准、复杂的作业工况与行业绿色转型需求，在极端环境适应性、智能化调控、生物工艺工程化等方面仍存在亟待突破的问题。为实现煤炭全生命周期清洁运输，推动行业绿色高质量发展，未来抑尘技术的研发与应用应聚焦以下关键方向。

一是提升极端环境适应性，研发特种抑尘材料。我国煤炭运输线路跨度大，低温、干旱、强紫外线等极端环境易导致现有抑尘剂冻结、蒸发、老化，抑尘效果大幅下降。未来需重点研发具有耐冻融、防蒸发、抗紫外线、自我修复特性的新型凝胶类抑尘材料，通过分子结构设计与材料改性，提升抑尘材料在极端环境下的稳定性与长效性，保障抑尘覆盖层在长途运输、露天存储中的稳固性，解决极端环境下的粉尘防控难题。

二是构建智能动态调控体系，实现精准抑尘。当前抑尘作业多为粗放式模式，缺乏对环境参数与粉尘浓度的实时监测，易造成资源浪费，抑尘效果难以保证。随着物联网、传感器技术的发展，未来应融合物联网监测手段，在运输沿线、固定场站布设多参数传感器，实现粉尘浓度、风速、湿度等数据的实时监测；基于监测数据开发智能响应系统，自主调整喷淋强度、抑尘剂喷洒量等参数，实现抑尘作业的自动化、精准化调控，提升抑尘效率与经济效益。

三是推进生物工艺工程化应用，突破产业化瓶颈。生物抑尘技术作为绿色环保的新型技术，发展前景广阔，但目前受量产成本、现场效能维持等因素限制，

难以大规模应用。未来需重点开展产业化关键技术研究，优化微生物培养与酶制剂提取工艺，降低量产成本，提升制剂稳定性；深入研发生物矿化微观机制，结合煤尘特性优化矿化溶液配方，提升矿化效率；开发适配的现场喷洒设备，解决生物制剂现场效能维持问题，推动生物抑尘技术从实验室向工程实践转化，实现大规模产业化应用。

四是加强多技术融合创新，构建全流程粉尘防控体系。煤炭运输粉尘污染是全流程、多环节问题，单一技术难以实现高效防控。未来应加强物理、化学、生物抑尘技术的融合创新，结合装卸、运输、存储各环节的粉尘产生特性，构建“源头抑制-过程捕捉-末端固结”的全流程防控体系。例如，装卸环节采用机械喷淋与复合型抑尘剂结合，实现快速降尘；长途运输推广集装箱封闭与环保粘结剂结合，从源头杜绝尘逸；存储环节结合挡风抑尘墙、智能喷淋与生物抑尘技术，实现长效防控。通过多技术的融合与系统集成，实现煤炭运输全流程的粉尘高效控制，推动煤炭绿色物流体系构建。

#### 五、结语

煤炭运输粉尘污染是制约煤炭行业绿色发展的重要瓶颈，做好粉尘防控工作，既是改善大气环境、保障民众健康的民生工程，也是推动行业绿色转型、实现能源高效利用的重要举措。经过多年发展，我国已形成物理、化学、生物相结合的煤炭运输抑尘技术体系，各类技术均取得显著突破，尤其是化学抑尘剂的微观分子设计与生物矿化技术的创新，为粉尘防控提供了丰富的技术选择。

当前，煤炭运输抑尘技术正朝着工况定制化、功能复合化、原料环保化方向发展，面对极端环境适应性、智能化调控等关键问题，未来需进一步加强基础研究与技术看新，重点研发特种抑尘材料、构建智能调控体系、推进生物工艺工程化、加强多技术融合，构建全流程粉尘防控体系。通过技术创新与工程化应用，持续提升煤炭运输粉尘防控效率与水平，实现煤炭全生命周期的清洁运输，为我国能源安全保障与生态环境保护协同发展提供有力支撑，推动煤炭行业向绿色、低碳、高质量方向持续发展

#### 参考文献

- [1] 王兵, 何基源, 孙倩, 等. 全链条视角下我国煤炭安全评估与对策 [J]. 绿色矿山, 2025, 3(4): 95-103.
- [2] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考 [J]. 煤炭科学技术, 2023.
- [3] 邓迎澳. 铁路货车篷布超服役期受载状态特征指标预测 [D]. 长沙: 中南大学, 2025.
- [4] 张琦. 黄原胶基环保型复合抑尘剂的制备及性能研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [5] 唐姣. 基于响应面法的抑尘剂多组分配比优化及应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2025.