老旧垃圾填埋场封场后甲烷氧化覆盖层效能提升的生态工程调控

张红芬
（中兰环保科技股份有限公司）
DOI：10.65285/GCJSYGL.V2I5.005

摘　要：国内早期建设的生活垃圾填埋场已大批量进入封场运维阶段，这类老旧场地受建设标准偏低、配套设施简陋、长期自然老化等因素影响，普遍存在堆体沉降不均、防渗结构破损、填埋气疏导不畅等问题。垃圾有机质的厌氧降解过程具备数十年滞后性，封场覆土完成后依旧持续释放甲烷等温室气体。传统黏土与防渗膜组合覆盖体系以防渗止水、控制渗滤液为核心设计目标，并未适配甲烷原位净化需求，存在透气性差、微生物生境恶劣、长效降解能力不足等问题，导致甲烷无组织逸散频发。甲烷不仅温室效应强度极高，局部积聚还会引发燃爆风险与异味污染，是老旧填埋场安全运维与生态提质的核心难题。本研究结合生态工程低成本、长效化、绿色适配的技术优势，依托实际工程场景，剖析填埋场覆盖层甲烷生物氧化机制，梳理制约氧化效能的多重关键因素。通过土壤基质改良、功能微生物强化、乡土植被适配、水气环境精细调控四维技术路径，搭建适配老旧填埋场复杂工况的生态调控体系。工程实证结果表明，优化后的复合生态覆盖层可大幅提升甲烷原位氧化效率，显著削减温室气体无组织排放，同步修复场地退化生态，实现安全防控、污染治理与生态恢复的多重协同效益。研究成果可为存量老旧填埋场封场改造、低碳运维与土地资源化利用提供实践参考[1]。
关键词：老旧垃圾填埋场；封场修复；甲烷原位氧化；生态覆盖层；生态工程；效能优化

Ecological Engineering Regulation for Enhancing Methane Oxidation Cover Performance in Closed Old Landfills

Hongfen Zhang
GAD Environmental Technology co., Ltd

Abstract: A large number of early domestic municipal solid waste landfills have entered the post-closure operation and maintenance stage. Affected by low construction standards, simple supporting facilities and long-term natural aging, these old sites generally suffer from uneven waste mass settlement, damaged anti-seepage structures and poor landfill gas collection. The anaerobic degradation of organic waste has a lag period of several decades, so methane and other greenhouse gases continue to be released after capping. Traditional composite capping systems composed of clay and geomembrane are designed mainly for water blocking and leachate control, which cannot adapt to the demand of in-situ methane purification. Such systems have poor gas permeability, unfavorable microbial habitats and inadequate long-term degradation capacity, thus causing frequent fugitive methane emissions. Methane features strong greenhouse effect. Its local accumulation may trigger explosion risks and odor pollution, which constitutes a key problem for safe operation and ecological improvement of old landfills. Combining the low-cost, long-acting and eco-friendly advantages of ecological engineering, this study analyzes the biological oxidation mechanism of methane in landfill covers on the basis of actual engineering cases, and sorts out multiple key factors restricting oxidation performance. An ecological regulation system suitable for complex working conditions of old landfills is constructed through four technical paths: soil matrix improvement, functional microbial augmentation, native vegetation matching and fine water-gas regulation. Engineering verification shows that the optimized composite ecological cover can greatly improve the efficiency of in-situ methane oxidation, substantially cut fugitive greenhouse gas emissions, and restore degraded site ecosystems at the same time. It realizes coordinated benefits of safety risk control, pollution treatment and ecological restoration. The research results can offer practical references for post-closure reconstruction, low-carbon operation and land resource utilization of stock old landfills [1].
Keywords: old landfills; post-closure remediation; in-situ methane oxidation; ecological cover; ecological engineering; performance optimization

前言：

老旧填埋场封场后，受限于早期建设标准，结构破损与厌氧产气长期并存，甲烷逃逸及安全隐患突出。传统覆盖层侧重阻隔，忽视气体传输与生物降解，致氧化效率不

足 35%。生态工程技术跳脱高能耗干预模式，依托自然调节与协同代谢能力，通过结构优化与生境重建实现长效调控。本文构建一体化生态工程体系，经现场应用验证其效能，旨在为低碳封场治理提供可行技术路径。

一、甲烷氧化覆盖层作用机理及效能制约因素

（一）核心作用机理

甲烷氧化覆盖层的核心功能是依托表层覆土中的特异性甲烷氧化菌，通过生物酶促反应实现填埋甲烷无害化降解。有氧环境下，甲烷氧化菌以甲烷为唯一碳源和能量来源，将其分解为二氧化碳与水，核心反应方程式为 CHA4+2OA2 → COA2+2HA2O+ 代谢能量。甲烷原位消减分为物理传输与生物氧化两个耦合阶段，二者的协同匹配度直接决定覆盖层整体效能。

物理传输阶段，填埋堆体产生的甲烷依托浓度梯度，通过土体孔隙向上扩散进入覆盖层；生物氧化阶段，扩散的甲烷在温湿度、氧气适宜的环境下被微生物快速降解。生态改良后的复合覆盖层突破了传统防渗结构的单一功能局限，形成了气体疏导、氧气补给、微生物富集、植被协同的复合功能体系。改良多孔介质可保障气体双向均匀交换，优化后的基质为微生物提供附着载体与养分，乡土植被通过根系作用进一步强化生化反应条件，多重机制协同下，覆盖层甲烷氧化效能可较传统黏土结构提升近一倍。

（二）关键效能制约因素

结合场地踏勘与样本检测结果，老旧填埋场覆盖层甲烷氧化效能偏低，主要受物理、基质、生物、生态四类因素制约，各类问题相互叠加，形成系统性功能缺陷。

土体物理结构缺陷是首要制约条件。长期垃圾降解引发的不均匀沉降，让传统黏土覆盖层产生大量裂缝、塌陷与脱空区域，形成甲烷优先逃逸通道，气体快速穿透覆土无法参与氧化反应。同时黏土压实度高、原生孔隙率低，氧气渗透深度仅 20 ~ 30cm，有效氧化土层极薄。加之南北区域干湿交替、雨水冲刷的气候影响，表层土壤反复板结，孔隙持续堵塞，气体交换效率逐年衰减。

土壤基质理化性状适配性不足进一步限制菌群活性。老旧填埋场原状覆土多为工程素土，有机质含量普遍低于 1%，远低于甲烷氧化菌代谢所需的 3% 最低标准，氮磷养分匮乏、保水保肥能力薄弱。渗滤液毛细上返带来的盐分与酸碱物质，造成土壤酸碱失衡、盐分累积，持续胁迫功能微生物生存，导致菌群代谢活性大幅下降，难以形成规模化降解能力。

微生物群落结构失衡是核心生物短板。自然覆土中甲烷氧化菌占比不足 5%，普通杂菌长期竞争生存资源，进一步抑制功能菌群增殖。老旧场地缺乏人工驯化条件，土著甲烷氧化菌对低浓度、持续性的甲烷逸散环境适配性差，繁殖缓慢、抗逆性弱，遇温湿度波动、土壤贫瘠等扰动极易失活，无法维持稳定的甲烷降解效率。

植被 – 微生物生态协同机制缺失是长效短板。传统封场多采用裸土覆盖，无配套植被体系，表层土壤易受极端天气破坏，高温干旱易引发土层干裂、微生物脱水，暴雨则造成养分流失、结构破损。少量简易种植的植被多为外来物种，乡土适配性差、根系浅薄，无法通过根系改良土体、疏导气体、分泌活性物质激活菌群，难以构建稳定的生态协同氧化体系 [2]。

二、生态工程调控体系构建

针对老旧填埋场覆盖层的多重功能短板，本文构建基质改良、微生物强化、植被适配、水气调控四位一体的生态工程调控体系，以人工适度干预优化生境，依托自然生态规律维持长效功能，全方位提升甲烷氧化效能。

（一）土壤基质生态改良

基质是气体传输与微生物生存的核心载体，也是效能提升的基础环节。本研究摒弃单一黏土覆土模式，采用生物炭、腐熟园林废弃物、秸秆碎屑复合改性方案，重构土体结构、优化土壤理化性状。生物炭多孔、高比表面积的特性，可有效提升土壤透气性与保肥能力，为微生物提供稳定附着位点，减少菌群流失；腐熟农林废弃物可快速补充土壤有机质与营养元素，调节土壤 pH 至 6.5~8.0 的适宜区间；秸秆碎屑可优化大孔隙结构，缓解土壤板结问题。

工程采用分层差异化铺设工艺，底层改良黏土压实防渗，阻断雨水下渗与渗滤液上返；中层为核心氧化层，采用 70% 原状土 +25% 腐熟堆肥 +5% 生物炭的配比，铺设厚度 50 ~ 80cm，保障菌群富集与甲烷降解；表层铺设 5 ~ 10cm 腐殖土，为植被定植提供基础条件。该分层结构兼顾防渗基础功能与甲烷氧化核心功能，彻底解决传统覆土透气差、养分不足、结构不稳的问题。

（二）功能微生物定向强化

为解决土著功能菌群数量少、活性低的问题，采用“本土菌种筛选 – 梯度驯化 – 固定保活”的强化工艺。菌种取自填埋场周边成熟生态覆盖土与市政厌氧污泥，筛选适配场地工况的甲基单胞菌、甲基杆菌等优势菌株，制备复合菌剂。相较于商用菌剂，本土菌株对场地低浓度甲烷、土壤波动环境的耐受能力更强，定植存活率更高。

菌剂喷施完成后，通过阶段性低浓度甲烷通气驯化，诱导微生物适配场地环境，提升抗胁迫能力。依托生物炭吸附特性实现菌群固定化，降低雨水冲刷与土体扰动造成的菌群流失。同时精准补充氮、磷及微量营养元素，定向保障功能菌群代谢需求，抑制杂菌过度繁殖，让甲烷氧化菌形成群落优势，菌群丰度可提升 5~8 倍，长效维持高活性降解状态 [3]。

（三）乡土植被体系适配构建

结合老旧填埋场土壤贫瘠、盐碱度偏高、温差波动大的场地特征，摒弃高养护外来物种，选用狗牙根、黑麦草、紫花苜蓿、荆条等耐贫瘠、抗盐碱、须根系发达的乡土植被，构建草本 – 灌木混植体系。须根系可穿透表层土壤，形成细微透气孔隙，优化气体交换通道，扩大微生物有效氧化土层范围。

植被根系分泌的有机酸、可溶性糖类可持续为微生物

提供活性底物，激活菌群代谢；枯落物分解后持续补充土壤有机质，实现基质肥力自我维持。全域植被覆盖可抵御暴雨冲刷、高温干旱等外界扰动，防止土壤开裂板结，稳定覆盖层结构。实测数据显示，完善的植被 – 微生物协同体系可让甲烷氧化效率提升 30%~40%，实现生态修复与减排增效双向统一。

三、工程应用与效能分析

（一）工程概况

本次实证工程为一处服役 18 年的老旧生活垃圾填埋场，总封场面积 2.2 万 m^2，场地建设标准低，封场初期仅做简易黏土覆土处理，无生态修复与气体调控设施。长期运行后覆盖层板结开裂严重，植被覆盖率不足 20%，甲烷无组织逸散问题突出，局部点位浓度超标，存在显著安全与环境隐患。本次改造全面应用上述四维生态调控技术，完成覆盖层翻新、菌群强化、植被构建与水气系统优化，实现场地综合治理升级。

（二）应用成效分析

连续 6 个月定点监测数据显示，改造前场地平均甲烷排放通量为 18.6g/(m^2 · d)，原位氧化效率仅 28.3%；改造后排放通量降至 7.2g/(m^2 · d)，氧化效率提升至 68.7%，无组织甲烷排放量整体削减 61.3%，彻底消除局部气体积聚隐患，安全防控能力大幅提升。

改造后土壤理化性状得到显著优化，有机质含量由 0.8% 提升至 4.2%，土壤孔隙度由 28.5% 提升至 46.3%，pH 值稳定在 7.0~7.6 的中性最优区间，土壤板结、盐碱化问题彻底解决，土体结构稳定性显著增强。高通量测序结果表明，甲烷氧化优势菌群占比由 4.2% 提升至 32.6%，群落结构更稳定，抗环境扰动能力显著提升，极端天气下仍可维持高效降解活性。

场地植被覆盖率提升至 92%，全域生态覆盖有效抑制扬尘与异味扩散，遏制水土流失，形成“土壤改良 – 菌群富集 – 植被生长”的正向生态循环，场地自我修复能力与生态景观质量大幅提升，为后续土地资源化利用奠定基础。

（三）技术经济性优势

相较于传统填埋气燃烧、防渗膜全覆盖等技术，本套生态调控体系优势显著。技术全程采用农林固废、生物炭等绿色材料，无化学投入与二次污染，契合低碳发展理念；依托生态自我维持机制，可实现数十年长效稳定运行，规避传统工程设施老化失效问题；建设与运维成本仅为传统工艺的 40% 左右，适配老旧填埋场低成本改造需求；同时兼顾减排、安全、生态、水土保持多重效益，综合应用价值更高 [4]。

四、问题与展望

结合工程长期运行监测，该体系仍存在小幅优化空间。极端高温、暴雨、严寒等特殊天气会短暂抑制菌群与植被活性，造成效能小幅波动；现有参数配比针对性较强，跨区域不同土质、气候、垃圾组分场地的通用适配性有待提升；土壤有机质长期消耗后的长效补给机制仍需完善。

后续研究可聚焦区域适配性优化，针对南北不同气候特征微调基质配比与植被选型；搭建物联网智能化监测调控体系，实现参数动态精准调控；探索园林废弃物、市政污泥等固废协同资源化利用模式，完善长效运维机制，推进技术标准化、规模化推广，为老旧填埋场低碳化、生态化治理提供更完善的技术支撑。

结语：

老旧填埋场封场甲烷逃逸问题，本质是传统防渗覆盖层存在物理结构、基质生境、生物群落、生态协同的多重先天缺陷。本文构建的四维生态工程调控体系，通过人工适度干预与自然修复相结合的方式，精准补齐传统覆盖层效能短板。工程实证表明，该体系可显著提升甲烷原位氧化效率，大幅削减温室气体无组织排放，消除场地安全隐患，同步修复退化场地生态，实现多重治理效益协同增效。该技术绿色低碳、运维简便、经济性突出，适配各类老旧填埋场改造场景，具备广阔的工程推广前景，可为城市固废处置场地生态提质与双碳目标落地提供有力支撑。

参考文献：

[1] 王勇 . 垃圾填埋场生态型土质覆盖层甲烷减排性能测试与分析 [D]. 浙江大学 ,2023.

[2] 陈芊 , 张垒 . 生活垃圾填埋场存量垃圾原位封场与异地转运环境影响分析 [J]. 四川环境 ,2020,39(1):87−93.

[3] 马花花 , 刘日新 , 赵明辉 , 等 . 二氧化碳捕集及其原位甲烷化技术研究进展 [J]. 热力发电 ,2025,54(6):1−16.

[4] 詹良通 , 丰田 , 冯嵩 , 等 . 固废基土质覆盖层水气响应与隔氧性能：从土柱试验到现场示范 [J]. 岩土工程学报 ,2026,48(3):447−455.

作者简介：张红芬（1990 年 12 月 −）、女、汉、湖北省武汉市、硕士、工程师、研究方向：生态环境工程。