第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

生活垃圾填埋场渗滤液导排层修复施工技术探讨

邓华超
深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿
DOI:10.32629/jpm.v7i10.9085
[摘　要] 为解决我国存量生活垃圾填埋场普遍存在的渗滤液导排层堵塞失效问题，本文首先系统分析导排层物理、化学、生物三重堵塞机理与导排层失效的主要影响因素，随后重点阐述了高压水射流疏通、垂直注浆强化、土工复合排水网替代三类修复施工技术，明确了各工艺的关键参数控制要点，最后以某中型填埋场修复工程为实例验证修复效果，旨在为同类老旧填埋场导排系统修复工程提供技术参考。
[关键词] 生活垃圾填埋场；渗滤液导排层；修复技术

Discussion on Repair Construction Techniques for Leachate Drainage Layers in Municipal Solid Waste Landfills

Deng Huachao
Fankou Lead-Zinc Mine, Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonferrous Metals Co., Ltd.
[Abstract] To address the widespread issue of clogging and failure of the leachate drainage layer in existing municipal solid waste landfills in China, this paper first provides a systematic analysis of the triple clogging mechanism—physically, chemically, and biologically—and the primary factors influencing the failure of the drainage layer. It then focuses on three restoration construction techniques: high-pressure water jet cleaning, vertical grouting reinforcement, and the use of geosynthetic composite drainage networks as a substitute; it further clarifies the key parameter control requirements for each technique. Finally, the restoration effectiveness is validated through a case study of a medium-sized landfill restoration project, with the aim of providing technical guidance for the restoration of drainage systems in similar aging landfills.
[Key words] municipal solid waste landfill; leachate drainage layer; remediation technologies

引言：

生活垃圾卫生填埋是我国固废处置体系的重要组成部分，渗滤液导排层是填埋场防渗系统的关键配套设施，承担着及时排出堆体内渗滤液、降低防渗膜上水头压力、防范渗漏污染的核心功能。然而受我国生活垃圾高有机质、高含水率、组分复杂的特性影响，多数填埋场运行 5～8 年后即出现不同程度的导排层堵塞问题，不仅加剧防渗层破损渗漏的环境风险，还会增大堆体失稳隐患。常规的清挖换填方案需揭开上部垃圾堆体，不仅工程量大、造价高昂，且施工过程中易造成二次污染与臭气扩散。因此，探索高效、低扰动、低成本的原位修复施工技术，已成为存量填埋场安全运行与生态化改造领域亟待解决的现实问题。

1 渗滤液导排层失效机理与修复难点

1.1 导排层堵塞的形成机制

渗滤液导排层堵塞是物理沉积、化学结垢与生物膜增生三者协同作用的结果。①物理堵塞主要源于渗滤液中悬浮固体颗粒在砾石孔隙与土工布孔隙中的沉积截留，我国生活垃圾渗滤液中悬浮物浓度通常在 300～1200mg/L 范围内，粒径小于 0.1 mm 的细颗粒占比超过 60%，极易在导排层表层形成致密滤饼层，并逐步深入内部堵塞孔隙。

②化学结垢是导致导排系统永久性失效的关键因素。渗滤液中富含钙离子、镁离子与碳酸根离子，在微生物代谢产碱作用下，溶液 pH 值升高促使碳酸钙、碳酸镁等难溶盐结晶析出，附着于砾石表面与管道内壁，形成质地坚硬的垢层。③生物堵塞则由微生物在填料表面附着生长形成生物膜所致——渗滤液中丰富的有机质为微生物提供了充足营养，生物膜持续增厚并粘连悬浮颗粒，进一步缩小过水断面。三类堵塞机制相互促进，生物代谢产生的胞外聚合物会黏附固体颗粒加速物理堵

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

塞，同时微生物活动改变溶液 pH 值又会诱发化学结垢，形成恶性循环[1]。

1.2 导排层失效的主要影响因素

导排层堵塞速率与垃圾组分、渗滤液水质、导排材料特性及水力条件密切相关。垃圾中易降解有机质含量越高，渗滤液 COD 与挥发性脂肪酸浓度越大，生物与化学堵塞进程越快。当渗滤液 COD 浓度超过 20000mg/L 时，导排层完全堵塞的时间较中低浓度工况缩短 40%以上。钙离子浓度是化学结垢的主控因子，当渗滤液中 Ca^{2+} 质量浓度高于 800mg/L 时，碳酸钙结垢量呈指数级增长。另外，导排材料的粒径级配与孔隙结构直接决定抗堵性能。单一粒径砾石的抗堵能力优于连续级配，但初始孔隙率过大又易造成细颗粒深度穿透，形成内部堵塞。土工布作为反滤层，其等效孔径与渗透系数的匹配性至关重要，孔径过大无法有效截留悬浮物，孔径过小则易发生表面堵塞。此外，导排层坡度不足、渗滤液水位长期偏高会加剧泥沙淤积，保持 2%以上的纵向坡度可显著降低堵塞速率。

2 渗滤液导排层修复施工关键技术

2.1 高压水射流原位疏通技术

高压水射流疏通是针对轻度至中度堵塞导排层的常用原位修复技术，其原理是通过预先布设的竖向井孔将高压射流装置送入导排层内部，利用高速水流的冲击剪切作用击碎垢层、冲散淤积物，携带悬浮物的污水经收集井抽排至渗滤液处理系统。该技术无需大规模开挖，对堆体扰动小，适用于堵塞主要发生在导排层上部、下部结构仍基本完好的工况[2]。

施工关键参数需根据堵塞程度精准控制。工作压力通常设定在 15～35MPa 之间，轻度堵塞采用低压慢扫模式，压力控制在 15～20MPa，移动速度 0.5m/min；重度结垢工况提升至 25～35MPa，配合旋转喷头进行往复冲刷。喷嘴直径选用 2.0～3.0 mm，射流入射角保持在 30° ～45° ，以获得最佳的冲蚀效果。为防止冲刷下来的颗粒造成二次淤积，采用边冲边抽的作业方式，每段疏通长度控制在 5～8 m，完成后立即开启抽排泵将污水导出。该技术的局限性在于有效作业半径有限，单井横向疏通范围约 8～12 m，对于大面积导排层需加密布置作业井。同时对坚硬的碳酸钙结垢疏通效果有限，通常需配合化学清洗剂使用，常用的柠檬酸溶液浓度控制在 5%至 8%，循环浸泡 4～6 小时后再进行水射流冲刷，结垢清除率可提升 30%以上。

2.2 垂直注浆强化导排技术

垂直注浆强化技术适用于导排层大面积失效、且无法进行水平开挖换填的场景。在填埋场表面按一定间距钻孔穿透垃圾堆体直达导排层位置，注入高渗透性的多孔注浆材料，在原有堵塞导排层中形成竖向与水平向交织的排水通道，构建新的渗滤液导排网络。该技术无需清除原有堵塞材料，施工全部从堆体表面作业，对填埋场正常运行干扰小。注浆材料选用是技术核心，需同时具备高渗透性、高强度与抗堵塞特性。工程中多采用级配砾石浆搭配惰性填充浆料的组合体系，砾石浆构建主排水通道，填充浆料规整孔隙并形成次级渗流路径。砾石粒径控制在 5～15 mm，水灰比 0.45～0.55，注浆压力严格控制在 0.1～0.2MPa 低压区间，严禁采用 0.3MPa 以上高压注浆，防止膜体受压破损[3]。

孔位布置采用梅花形布孔，孔间距根据设计导排能力确定，通常为 3～6 m。钻孔采用跟管钻进工艺，全程下套管防止孔壁坍塌，钻至导排层以上 0.5 m 时换用低压慢钻模式，精准控制钻进深度，孔底预留缓冲保护层，确保穿透堵塞层但不触及防渗膜。注浆采用分段上行式工艺，自下而上逐段提升注浆管，每段注浆高度 1.0～1.5 m，待浆液初凝后再进行上一段注浆。完工后通过钻孔注水试验检测渗透系数，达标后方可封孔。

2.3 土工复合排水网替代修复技术

对于堵塞极为严重、原有砾石导排层基本失效的区域，采用土工复合排水网进行替代修复是经济高效的技术方案。土工复合排水网由三维土工网芯双面复合土工布构成，平面导水能力是同厚度砾石层的 3～5 倍，且网芯结构不易发生堵塞，长期性能稳定。该技术通常结合封场改造或分区开挖同步实施，适用于填埋场即将封场或可腾空作业的库区。

施工前需先将作业区域上部垃圾堆体分层开挖清运，开挖坡度控制在 1:2.0 以内，确保边坡稳定。彻底清除原有堵塞砾石层及反滤土工布，全面检查 HDPE 防渗膜完整性，破损部位修补完成后，经真空检漏试验合格方可进入下道工序。排水网遵循从低处向高处铺设，纵向、横向搭接宽度均不小于 20 cm，搭接位置采用专用卡扣或热熔连接，保证整体强度。排水网铺设完成后，其上铺设 200 g/m^2 土工滤网作为反滤层，再回填 30 cm 厚级配碎石保护层；碎石粒径遵循反滤原则，由下至上逐步变小，形成完整反滤体系。边坡区域排水网采用锚钉固定，竖向、横向间距均为 2.0 m，防止回填时滑移[4]。该工艺施工效率高、导排性能稳定，且材料厚度小，可有效减少库容占用。

3 工程应用与效果分析

3.1 工程概况

某生活垃圾填埋场始建于 2010 年，设计总库容 180 万 m^3，占地面积 12.6 万 m^2，设计日处理能力 300t。库区底部原设计 30cm 厚碎石导排层，粒径 20～60 mm，下设 1.5 mm 厚 HDPE 防渗膜。截至 2022 年启动修复时，该场已累计填埋垃圾约 145 万 m^3，堆体平均高度 22m。运行监测数据显示，库区中部渗滤液水位持续偏高，防渗膜上最大水头达 4.2 m，远超规范 0.3 m 的限值，导排系统收集量较设计值下降 70%以上，经探查确认导排层已发生严重堵塞，亟需进行修复。结合场地条件与封场

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

规划，项目采用分区修复方案，西区采用高压水射流疏通+局部注浆强化工艺，东区结合堆体整形采用土工复合排水网全面替换方案。施工周期 6 个月，修复总面积约 7.8 万 m^2，工程总投资 1280 万元。

3.2 修复材料性能参数对比

为优选修复材料，项目组对三类常用导排材料开展室内性能测试，测试内容涵盖初始渗透系数、抗压强度、抗堵塞性能及单位造价等指标，测试结果如表 1 所示。

表 1　不同导排材料性能参数对比

材料类型	初始渗透系数（cm/s）	200kPa 下压缩率（%）	堵塞后渗透系数保留率（%）	单位面积造价（元/m^2）	适用场景
级配碎石（20-60mm）	1.2×10^{-2}	4.7	12.3	185	新建及大面积换填
三肋土工复合排水网（6mm）	3.5×10^{-2}	8.2	41.6	260	修复及边坡导排
砾石注浆体	4.8×10^{-3}	2.1	27.9	320	原位注浆强化

由表 1 可知，土工复合排水网初始导排能力最优，抗堵塞性能显著优于传统碎石材料，长期运行稳定性更好；级配碎石造价最低但抗堵能力最差，适合作为保护层与辅助导排层；砾石注浆体强度最高，适合在原位修复中构建竖向排水通道。工程最终采用组合方案，充分发挥各材料优势。

3.3 级配碎石层施工参数设计

东区换填区域的碎石导排层采用连续级配设计，以兼顾初始渗透性与长期抗堵性。通过颗粒级配试验确定各粒径区间的质量占比，具体参数如表 2 所示。

表 2　导排层级配碎石粒径设计参数

粒径区间（mm）	质量百分含量(%)	功能定位
40-60	35	主骨架，提供大孔隙通道
20-40	30	填充骨架空隙，保持渗透性
10-20	20	过渡级配，防止细颗粒穿透
5-10	15	表层反滤过渡

施工中严格控制级配均匀性，采用分层摊铺法，每层虚铺厚度 20cm，仅人工整平，禁止机械振捣压实，避免孔隙率损失影响导排效果。每层铺设完成后进行现场渗透系数检测，确保不低于 1×10^{-3}cm/s。碎石材料碳酸钙含量严格控制在 5%以内，降低长期化学结垢风险。

3.4 修复效果监测与分析

修复工程完工后，布设 12 个监测点开展为期 12 个月的跟踪监测，主要监测指标包括渗滤液水位、导排流量及导排层渗透系数。修复前后核心指标对比如表 3 所示。

表 3　修复前后导排系统性能对比

监测指标	修复前	修复后	提升幅度
导排层平均渗透系数（cm/s）	3.2×10^{-7}	1.8×10^{-3}	提升约 5600 倍
防渗膜上最大水头（m）	4.2	0.28	下降 93.3%
日均渗滤液收集量（m^3/d）	28.7	134.2	提升 367.6%
单井导排效率（m^3/d·井）	1.2	5.6	提升 366.7%
雨季水位回升高度（m）	1.8	0.21	下降 88.3%

监测数据表明，修复后导排系统性能得到根本性改善，渗透系数提升四个数量级以上，完全满足规范要求的 1×10^{-3}cm/s 以上的设计标准。防渗膜上水头稳定控制在 30cm 以内，满足规范限值要求，大幅降低了防渗层渗漏风险。雨季强降雨后水位回升幅度小、消退快，导排系统响应速度显著提升。运行 12 个月后复测，渗透系数仍保持在 1.5×10^{-3}cm/s，衰减率不足 17%，显示出良好的长期稳定性。

结束语：

渗滤液导排层堵塞是老旧生活垃圾填埋场普遍面临的共性问题，直接关系到填埋场的运行安全与环境风险防控水平。高压水射流疏通、垂直注浆强化与土工复合排水网替代三类技术分别适用于不同堵塞程度与场地条件，工程实践中应根据失效程度、施工条件与投资预算进行组合优化。工程案例验证表明，采用复合修复方案可使导排层渗透系数提升四个数量级以上，防渗膜上水头稳定控制在规范限值内，修复效果显著且长期性能稳定。未来应进一步发展无损检测技术，实现导排层堵塞程度的精准探查与量化评估，为修复方案制定提供更科学的依据，并研发长效抗堵的新型导排材料与生物调控技术，从源头延缓堵塞进程，延长导排系统使用寿命，不断提升我国存量填埋场的安全运行水平。

[参考文献]

[1]詹良通,谢海建,陈成,等.我国生活垃圾填埋场水平衬里结构及全寿命服役性能分析[J].环境卫生工程,2024,32(S01):49-58.

[2]赵海龙,吕泽峰,马勤学.生活垃圾填埋场渗滤液地下水风险评估及防渗工程可靠度研究[J].环境与发展,2026,38(1):82-87.

[3]杨旭元,彭欣悦,郭堤,等.垃圾填埋场渗滤液/填埋气导排收集系统设计[J].当代化工研究,2024(10):56-58.

[4]许志伟,张志忠,陈昕,等.生活垃圾电厂垃圾仓渗滤液导流堵塞原因及解决方法[J].能源与环境,2025(4):108-112.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.