

柴油存储区域围堤设计及防渗措施优化研究

王庶人（国家能源投资集团国能准能物资供应中心，内蒙古自治区 鄂尔多斯 010300）

摘要：柴油存储设施作为能源供应链的关键节点，其安全性与环境保护要求日益严格。围堤系统作为防止柴油泄漏扩散的最后屏障，其设计合理性直接关系到环境安全和经济效益。传统围堤设计往往存在防渗性能不足、结构稳定性欠佳等问题，难以满足现代储存要求。通过深入分析柴油存储区域的地质条件、环境因素和工程特性，本研究构建了围堤设计的多层次防护体系，提出了基于材料特性匹配的防渗技术路径。研究重点探讨了围堤几何构型对防渗效果的影响机制，建立了渗透路径控制模型，为柴油存储区域围堤的优化设计提供了理论依据和技术支撑。

关键词：柴油存储；围堤设计；防渗措施；渗透控制；结构优化

中图分类号：TE8 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)031-0126-03

Research on the Design of the Embankment for Diesel Storage Area and Optimization of Anti-seepage Measures

Wang Shuren (National Energy Investment Group Guoneng Zhuneng Materials Supply Center, Ordos Inner Mongolia 010300, China)

Abstract: As a key node in the energy supply chain, diesel storage facilities have increasingly strict requirements for safety and environmental protection. The design rationality of the embankment system, as the last line of defense against diesel leakage and spread, is directly related to environmental safety and economic benefits. Traditional embankment designs often have problems such as insufficient anti-seepage performance and poor structural stability, making it difficult to meet modern storage requirements. Through in-depth analysis of the geological conditions, environmental factors and engineering characteristics of the diesel storage area, this study constructed a multi-level protection system for the embankment design and proposed a seepage prevention technology path based on material property matching. The research focused on exploring the influence mechanism of the geometric configuration of the embankment on the anti-seepage effect, established a seepage path control model, and provided theoretical basis and technical support for the optimal design of the embankment in the diesel storage area.

Key words: Diesel storage; Embankment design; Anti-seepage measures; Osmotic control; Structural optimization

柴油燃料在各行业中的需求量持续增长，柴油存储区域安全问题是环境保护和工业安全领域的重要课题，围堤是柴油存储区域的重要安全设施，承担着阻断泄漏液体向外扩散的关键作用。当前围堤设计仍存在一些问题，导致实际防护效果与预期目标存在较大差距。深入研究柴油存储区域围堤的设计原理和防渗机制，对提升存储设施的整体安全水平具有重要意义。

1 围堤结构设计关键技术

1.1 围堤几何构型优化分析

围堤断面形状是影响围堤结构受力以及防渗能力的重要因素，合理的断面形状是围堤功能实现的保障。围堤的坡度要根据基础土质条件、围堤荷载、围堤长期稳定等因素确定，围堤坡度不可过陡，否则易引起局部应力过大的问题；坡度不可过大，围堤工程量较大，且占地面积增加；围堤的顶宽要求既要满足围堤结构稳定设计要求，便于围堤结构施工；又要为后期维护提供一定的操作空间。围堤高度的选取与储罐的容积大小、储罐泄漏量风险分析以及场内地形条件等

有关，既要考虑围堤能容纳最大可能泄露量的要求，又要尽量避免围堤的过量设计和浪费现象。

1.2 围堤基础处理技术要点

围堤基础稳定是围堤防护系统可靠性安全的基础，围堤基础处理质量关系到长期稳定使用。需要通过勘察了解影响地基承载力的主要因素，主要注意软弱地层的位置、地下水位、土层压缩性；对围堤基础开挖深度要考虑冻土层影响、地下水位影响、基础埋深的要求，围堤基础底部应放在稳定土层之上；对基础垫层进行选择与设计，满足要求的材料配比，选择合适的垫层如级配砂石或混凝土垫层，使其能有足够均匀的支承面；对围堤基础排水系统的设计，防止地下水流影响围堤稳定，选择合适的排水盲沟布置防止孔隙水压力的影响，提高土体抗剪强度^[1]。

2 防渗系统构建与材料选择

2.1 复合防渗屏障构建技术

多层防渗复合阻隔系统指的是利用不同防渗材料形成的渗透阻隔系统，设计时综合考虑防渗目标达到

最理想的防渗效果。在复合防渗系统中，防渗膜为最主要的阻隔防渗层，其选材应考虑柴油特性及使用环境因素，而 HDPE 膜具有较高的抗化学腐蚀能力、抗拉强度及抗冲击强度等物理性能，被广泛应用于防渗层的选材。在防渗膜的铺设工艺方面，要综合考虑接缝、锚固形式以及设置保护层，它们要严格遵循铺膜设计，采用人工或机械进行铺设，铺膜材料不能存在任何洞孔，铺设之后对铺设层进行检验，以防止出现误铺设现象。

2.2 新型防渗材料应用研究

新材料的防渗技术为储油罐周围的防渗工作提供了新的可能。膨润土防渗毯利用自身独特的自修复能力，可以对裂缝较为微小的部位进行自动封闭，在可能产生较大变性的围堤方面有较好的适应性。纳米防渗材料利用自身微观密实的特性，不仅可以提供超低的渗透系数，而且具备良好的柔韧性，可为防渗新材料的技术发展提供更多思路和改进空间。生物防渗材料可利用微生物代谢物形成的生物膜为结构，待环境达到特定条件的情况下可以自我维护，起到生物防渗的作用。智能型材料利用自身可以对环境有所感应的功能，对环境温度、湿度以及化学性质的变化情况进行实时反应，从而调节自身的防渗系数，为实现其间的防渗动态控制奠定技术基础^[2]。

3 柴油存储区域围堤设计及防渗措施优化策略

3.1 基于渗透路径控制的分层防渗设计

渗透控制的本质在于建立有效的阻隔屏障，阻断液体介质的扩散路径。传统的单一防渗措施往往在面对复杂的地质条件和长期的环境作用下显得力不从心，而分层防渗设计通过构建多重防护体系，为柴油存储区域的安全防护提供了更加可靠的技术保障。

采用复合保护垫技术，其中的防渗漏设计就是分层防渗，通过选择渗透性差异较大的材料结合使用，形成分层结构。在采用分层设计时，最重要的防渗层主要起到防水隔离柴油的作用，决定了该工程防渗成败的关键性，因此其重要材料应用和施工应保证合格。因此，主要运用 HDPE 膜，具有较强防腐蚀性能且渗透系数很小，即为 2.5mm 厚，但同时还具有较强的抗机械应力，以保证其渗水性能不至于破坏。在膜下所使用的材料也是黏土层，层厚为 600mm，压实系数大于 95%，渗透系数要小于 5×10^{-11} cm/s。这就可以使得阻水性能得以更加充分的保障，即使出现局部渗透现象，也不会导致难以治理的污染。

此外，排水控制系统的设置遵循了“引排结合”的工程思想，用合理布置的排水沟将可能的渗水及时引出，避免静水压力的长期作用破坏防渗层；排水层采用

级配良好的砂砾料，渗透系数不小于 1×10^{-3} cm/s，厚度 300mm。排水盲沟沿围堤底部边线铺设，宽 400mm，深 600mm，内填透水性较好的碎石料，外包土工布防止细粒土进入。监测井用于掌握系统运行的状态，并深为防渗层底部之下 2m，井径 150mm，通过水位的变化与水质分析可及时掌握是否存在渗漏隐患。这样设计，既保证了防渗，也为日后管理维护提供方便，是现代设计理念中预防思想和可持续发展的一种表现^[3]。

3.2 围堤结构与地质条件耦合优化方法

地质的复杂性与不可控制性，是围堤设计难易的客观原因，也是衡量工程师智力与经验高低的标准。一块土地只有自己的特点，没有别人的特点，也就成为围堤设计的独特性体现，是结构参数与地质条件完美结合的前提和条件。

结构设计在处理地质条件方面对地质有了深入认识，通过对地质勘探和室内试验来建场地地质模型，确保结构设计计算参数准确。对于软土区段地基进行了较大的处理方式，将围堤底宽从标准底宽按照设计宽的 1.5 倍进行宽垫，以分散荷载来降低地基的应力，台阶形断面设计，不仅结构稳定而且运用分级荷载方式来进行应力扩散，能够更加适应软土的变形特性。地基处理采取深度范围在 3~5m 之间的水泥土搅拌桩加固方式，桩径 600mm，桩距 1.2m，28 天无侧限抗压强度达到 1.5MPa 以上；岩石区段地基结构完全利用了岩石承载力高的特点，选用较为紧贴的断面尺寸形式，在基础宽度上将底宽缩小到标准底宽 0.8 倍的方式，将结构与基岩相链接，采用预应力的锚杆，锚杆长度为 8~12m，预应力的锚杆的预压力为 200~300kN^[4]。

此外，运用数值模拟技术为结构优化提供手段，基于数值模拟建立三维有限元模型模拟不同工况下结构的应力分布和变形特征；坡比通过稳定性分析优化，软土地基段采用 1: 2.5 缓坡，岩石地基段取 1: 1.5 的相对较陡坡比；顶宽综合施工便易性和结构稳定条件控制在 3.5~5.0m 的范围；采取截水帷幕 + 降水井系统排水措施体现系统化思维，截水帷幕埋深 15~20m，截断侧向地下水补给，帷幕渗透系小控制在 1×10^{-7} cm/s 以下；降水井系统采用轻型井点降水，井深 12~15m，井距 20~25m，在施工期间地下水应降水至基础底面以下至少 1.5m；沉降控制措施采取预防性的工程措施，采取分段施工和分段预沉降处理方法，最大限度减少由不均匀沉降带来的不利影响。

3.3 防渗材料界面处理与接缝密封技术

每条“带缝”意味着整个防渗体系的成功与否，它是不可忽视的小环节，却潜藏着巨大的安全风险。每一个角、每一个接头都可能是渗漏通道，因而，良

好的“带缝”处理技术标志着工程设计与施工技术的过硬和负责。

新型界面粘接技术的精髓在于材料与技术实践的良好衔接，传统的机械连接技术难以满足柴油储存环境的要求。HDPE 膜与下部基层的粘接采用开发的环氧改性聚氨酯粘结剂，胶粘剂具有较强的柴油溶蚀能力及在温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围的粘结强度稳定性。其粘结方法精细要求基层粗糙度为 $0.5\text{~}1.0\text{mm}$ ，即用机械打磨形成均匀毛面的粗糙度，以增加黏接力的接触面积。使用齿形刮板涂胶厚度为 $1.5 \pm 0.2\text{mm}$ ，固化 24h 以上，最终界面粘接拉断力达到 15N/cm 以上。对界面的质量检测进行拉伸试验，确保黏结强度大于膜材拉伸强度的 85% 这一严苛的标准，保证界面前期连接质量的长期可靠性^[5]。

另外，热熔对接焊接工艺的引入体现了现代连接工艺的精细度，每一条焊缝都承担着防渗系统完整性的重要义务。双卡式热熔对接焊机温度控制精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，焊接温度受环境影响在 $280\text{~}320^{\circ}\text{C}$ 调整，焊接线速控制 $1.5\text{~}2.5\text{m/min}$ ，焊缝宽度 12mm ，搭接宽度 100mm 以上，焊缝中线距离膜边 50mm 以上。焊接质量检测方式是充压检测，检测压力 $0.15\text{~}0.20\text{MPa}$ ，检测时间 5min 以上，压力衰减 $\leq 5\%$ 。焊缝破坏性拉伸试验要求焊缝的剪切强度 $\geq 13\text{N/mm}$ 、焊缝的撕裂强度 $\geq 120\text{N}$ ，这些严谨的技术参数保证了接缝部位的可靠性能经受长期服役的要求。

3.4 渗漏监测与预警系统集成设计

监测预警系统相当于围堤防渗体系中万千条神经，实时感知围堤防渗体系的变化，传感器是围堤防渗体系中的神经末梢，在柴油储罐区默默维护柴油储存的安全，让工程师们可以看清围堤防渗体系的“健康状况”，使得工程师们从消极等待变为主动防护。

多传感器数据融合，形成多维度监测体系，实现不同类型传感器的监控共同作用于渗漏风险全感知。渗漏监测层由导电网格构造，导电网格间距为 $2 \times 2\text{m}$ ，导线材料选取耐腐蚀的镀锡铜线，导线截面 1.5mm^2 ，导线电阻值在 $0.1\Omega/\text{m}$ 以内。渗漏柴油接触导电网格后网格电阻产生较大变化，系统在 30s 内可判定渗漏点位置，定位误差 $\pm 0.5\text{m}$ 。采用光纤传感技术进一步为多类型传感器提高了精度的实时监控，分布式光纤传感传感器沿围堤周边连续布设，分布式光纤传感精度可实现温度变化 0.1°C ，应变变化 $1\mu\epsilon$ 。光纤传感器具备良好抗电磁干扰能力和长期稳定性，非常适用对于恶劣条件下的监测，使用寿命超过 25 年。

其次，监测网络搭建意味着物联网技术在工程安全检测中的进一步扩大应用，每一个监测点都具有一

定的数据采集作用。孔隙水压力计埋设在防渗层的底部，采用的量程为 $0 \sim 200\text{kPa}$ ，精度为 $\pm 0.25\%\text{F.S}$ ，采样速率为 1Hz ，可以对地下水位波动对防渗的冲击有所感应。采用振弦式的土压力计，埋设深度依据围堤高度而定，量程为 $0 \sim 500\text{kPa}$ ，补偿温度范围为 $-20 \sim +80^{\circ}\text{C}$ ，长期稳定性小于 $0.1\%\text{F.S}/\text{年}$ 。位移采用自动全站仪系统进行监测，精度亚毫米级，每 50m 设置一个监测点在围堤的顶部，通过位移三维坐标的变化反应出围堤的变形趋势。数据通讯采用的是 LoRaWAN 无线通信方式，采用该通信技术的距离可达 10km ，平均功耗小于 10mA ，从而保障监测系统运行的稳定与灵活。同时，与智能预警算法相结合的大数据分析及机器学习技术，让监测系统具有一定的思考与判断能力。风险预测建立以历史监测数据为基础建立风险预测模型，结合神经网络分析渗漏预兆信号的特征模式，对渗漏的预测准确率达 90% 以上。对各预警水平划分蓝色、黄色、橙色、红色四个等级，蓝色预警的启动条件是监测数据在正常范围发生 10% 变化时触发。当在正常范围内发生 20% 的变化时触发黄色预警，当在正常范围内发生 40% 的变化时触发橙色预警，而当超过监测数据正常范围变化 60% 时触发红色预警。

4 结语

库区储存用油围堤防渗优化设计是一个综合技术问题，在考虑围堤设计物理意义和工程性状的基础上，进行科学的设计和运用新型技术手段。对围堤几何形状精细化、复合防渗合理构造和新型材料科学配置可实现库区储油围堤安全防护功能优化。本文四条技术优化建议为围堤防渗技术设计提供实用的技术路径，促进相关技术标准和工程优化。围堤防渗技术随着材料科学和测控手段发展，其必将呈现出智能化、精细化发展趋势，促进能源储存安全。

参考文献：

- [1] 熊力, 陈勇. 铜基 SCR 氮存储特性及其对柴油车 NO_x 排放的影响研究 [J]. 专用汽车, 2025(03):77-80.
- [2] 王宗传, 钱承君, 缪明励. 当前港口柴油存储的安全措施研究 [J]. 水上安全, 2023(08):139-141.
- [3] 黄锋. 柴油发动机启动噪声优化方法、装置、存储介质及设备 [R]. 南昌: 江铃汽车股份有限公司, 2023-04-07.
- [4] 文泽东. 航煤与汽柴油存储区别分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(19):139-140.
- [5] 李泽政. 长沙县黄兴镇: 一村民私自存储销售柴油被处罚金 5 万元 [J]. 湖南安全与防灾, 2019(04):57.