

化工装置中衬里管道的工程设计要点

刘爱云¹ 李新华² 张文英¹

(1. 山东大地盐化集团有限公司, 山东 潍坊 262700)

(2. 山东同成医药股份有限公司, 山东 潍坊 262700)

摘要: 化工装置中的衬里管道因其优异的耐腐蚀性能和较长的使用寿命而被广泛应用。衬里管道的工程设计是保证其安全、高效运行的关键。本文从材料选择、结构设计、连接设计以及施工与质量控制四个方面, 系统阐述了化工装置衬里管道的工程设计要点。通过分析不同工况下衬里管道材料的优选方法、结构参数优化、连接方式的适用条件以及施工质量控制的各个环节, 总结了衬里管道设计与施工的关键因素和创新案例, 为今后化工装置衬里管道的工程设计提供参考。

关键词: 化工装置; 衬里管道; 材料选择; 结构设计

中图分类号: TQ055 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 014-0148-03

Key points of engineering design for lined pipelines in chemical plants

Liu Aiyun¹, Li Xinhua², Zhang Wenying¹

(1. Shandong Dadi Salt Chemical Group Co., Ltd., Weifang Shandong 262700, China)

(2. Shandong Tongcheng Pharmaceutical Co., Ltd., Weifang Shandong 262700, China)

Abstract: Lined pipelines in chemical plants are widely used due to their excellent corrosion resistance and long service life. The engineering design of lined pipelines is the key to ensuring their safe and efficient operation. This article systematically elaborates on the engineering design points of chemical plant lining pipelines from four aspects: material selection, structural design, connection design, and construction and quality control. By analyzing the optimization methods of lining pipeline materials, structural parameter optimization, applicable conditions of connection methods, and key links of construction quality control under different working conditions, the key factors and innovative cases of lining pipeline design and construction are summarized, providing reference for the engineering design of lining pipelines in chemical plants in the future.

Keywords: Chemical plant; Lined pipeline; Material selection; Structure Design

化工装置是现代工业的重要基础设施, 其生产过程涉及大量高温、高压、腐蚀性介质的输送, 对管道材料和结构提出了极高的要求。衬里管道凭借其优异的耐腐蚀性能和较长的使用寿命, 在化工装置中得到了广泛应用。然而, 衬里管道的工程设计涉及材料选择、结构设计、连接设计、施工质量控制等多个环节, 如何在兼顾安全性、经济性、可靠性的前提下进行最优设计与施工, 是化工工程领域的重要课题。

1 化工装置衬里管道材料选择

1.1 常用衬里管道材料类型及特点

化工装置衬里管道材料的选择是保证管道系统安全、高效运行的关键。常见衬里管道材料包括不锈钢、合金钢、塑料和复合材料等, 各有特点。不锈钢衬里管道耐腐蚀性强、强度高、加工性能好, 适用于多种腐蚀性介质; 合金钢衬里管道可满足高温高压工况要求; 塑料衬里管道轻质耐腐蚀, 适合低温低压环境; 复合材料衬里管道兼具金属的高强度和非金属的耐腐蚀性, 可定制化设计^[1]。选择衬里管道材料需全面考

虑工艺条件、性能要求、经济性等因素, 以确保管道系统的可靠性和经济性。

1.2 衬里管道材料选择的关键因素

选择化工装置衬里管道材料需综合考虑多个关键因素。①因素是工艺条件, 如介质种类、温度、压力等, 不同工况对材料性能有不同要求。②是材料兼容性, 需确保衬里材料与管道基体、介质等的良好兼容, 避免材料劣化失效。③材料加工性能如可焊接性、可检测性等也是重点评估因素。④需兼顾材料成本、加工成本、维护成本等经济性因素, 在满足性能要求的前提下, 优化系统全生命周期成本。因此, 衬里管道材料选择需全面权衡各关键因素, 以实现性能、可靠性、经济性的最佳平衡。

1.3 不同工况下衬里管道材料的优选方法

针对化工装置复杂多变的工况, 优选衬里管道材料需采用科学评估方法。一种有效方法是建立材料性能数据库, 收集分析各材料在不同条件下的性能数据, 形成选材知识库和规则库。在此基础上, 采用定性与

定量相结合的综合评估方式。定性评估依据专家经验和历史案例，对材料关键性能进行类比分析；定量评估则通过加权评分、层次分析等数学方法，对材料性能指标进行量化计算比较。同时，利用计算机仿真技术模拟不同材料在特定工况下的受力、腐蚀等行为，预测实际使用性能。

1.4 衬里管道材料选择的创新案例分析

化工装置衬里管道材料选择领域不断涌现创新案例和实践。如某炼油厂在高温高硫环境下采用新型镍基合金衬里材料，有效解决了传统不锈钢衬里管道腐蚀失效问题，大幅提升了系统可靠性和使用寿命。又如某乙烯装置在低温脆性环境下采用特种聚乙烯内衬不锈钢复合管，既保证了耐腐蚀性能，又克服了低温金属材料脆性风险。还有项目采用智能化材料选择系统，通过大数据分析和机器学习算法，自动优选最佳衬里管道材料组合，大幅提高设计效率和质量。

2 化工装置衬里管道结构设计

2.1 衬里管道结构设计的基本原则

衬里管道结构设计是确保化工装置管道系统安全可靠运行的关键环节，需遵循一系列基本原则。首要原则是确保结构强度和稳定性，管道结构必须能够承受工况条件下的内压、外力、温度应力等复杂载荷，并保持足够的安全裕度。其二是兼顾结构的灵活性和适应性，合理设置管道的支撑、导向、补偿等措施，以适应管道热胀冷缩、振动位移等工况变化。再者，结构设计还需考虑检测、清洗、维修等运维需求，提供必要的检测口、清扫口、伸缩节等设施，方便管道全生命周期管理。

2.2 衬里管道结构参数的优化方法

衬里管道结构参数的优化是结构设计的重要内容，直接影响管道系统的安全性、可靠性和经济性。优化设计需要综合考虑工艺、材料、强度、振动、支撑等多重因素，采用系统化的分析方法。一种行之有效的方法是基于数值模拟技术，建立衬里管道结构的三维有限元模型，模拟管道在不同工况下的应力应变、振动位移等响应，识别薄弱部位，优化关键参数^[2]。同时，采用多目标优化算法，如遗传算法、粒子群算法等，在满足强度、刚度等约束条件下，寻求管道结构尺寸、支撑布置等的最优组合，兼顾安全性和成本效益。

2.3 衬里管道结构强度与稳定性分析

衬里管道结构的强度和稳定性直接关系到管道系统的安全性和完整性，需要开展严谨细致的分析和评估工作。强度分析的重点是评估管道在设计工况下的应力水平，判断是否满足相关标准规范的要求。除了考虑内压、外力、自重等基本载荷外，还需要分析温

度应力、风载荷、地震载荷等特殊工况的影响。稳定性分析则着眼于评估管道在压力、温度、流体等因素作用下的屈曲、失稳风险，尤其是对于长距离、高温高压的管道而言。分析过程中，需要综合运用理论计算、数值模拟、实验测试等手段，准确表征衬里管道结构的受力特性。

2.4 衬里管道结构设计的创新案例分析

在衬里管道结构设计领域，不断涌现出许多创新性的案例，为化工装置的优化提供了有益的启示。例如，某合成氨装置采用了新型内压平衡补偿器，有效解决了高压衬里管道的热应力问题，实现了管道与塔器的柔性连接，降低了泄漏风险。又如，某煤化工项目采用了模块化设计理念，将衬里管道与设备、支撑等集成为一体化模块，大幅提高了施工效率和质量，缩短了建设周期。还有一些项目探索了智能化设计技术，开发了衬里管道结构设计专家系统，集成了设计规范、经验知识、算例库等，辅助设计人员快速优化管道结构，提高设计质量和效率。

3 化工装置衬里管道连接设计

3.1 衬里管道连接方式的类型与特点

化工装置衬里管道的连接设计是确保管道系统安全性、可靠性和灵活性的关键环节，不同连接方式各具特点和优势。常用的连接方式主要包括法兰连接、对焊连接、卡箍连接等。法兰连接具有安装方便、拆卸灵活的优点，但存在一定的泄漏风险；对焊连接强度高、密封性好，但施工难度较大，灵活性较差；卡箍连接安装快捷、密封可靠，但适用范围有限。此外，还有一些特殊的连接方式，如螺纹连接、粘合连接等，适用于特定工况条件^[3]。选择合适的连接方式需要综合考虑工艺条件、材料特性、施工环境等因素，兼顾可靠性、经济性和维护性。

3.2 衬里管道连接设计的关键因素

衬里管道连接设计需要考虑多个关键因素，以确保连接的可靠性和耐久性。①是连接处的材料兼容性，需要选择与衬里材料和管道基体相容的连接材料，避免发生电化学腐蚀、应力腐蚀等问题。②是连接处的应力分布，需要合理设计连接结构和尺寸，避免应力集中、应力畸变等导致连接失效。③连接处的密封性能也是关键考量因素，需要选择适当的密封材料和密封结构，确保在各种工况条件下的密封可靠性。④连接处的施工质量控制也至关重要，需要严格遵循规范要求和操作规程，确保连接的一致性和可靠性。

3.3 不同连接方式的适用条件与局限性

不同的衬里管道连接方式具有不同的适用条件和局限性，需要根据具体工况和要求进行合理选用。法

兰连接适用于低温低压、频繁拆装的场合，但在高温高压、振动大的工况下容易发生泄漏。对焊连接适用于高温高压、长周期运行的场合，但施工难度大，对设备布置和检修带来不便。卡箍连接适用于中低温中低压、管径较小的场合，具有安装便捷、密封可靠的优势，但在高温高压、大管径场合适用性受限。螺纹连接和粘合连接分别适用于小口径低压力管道和特殊材料低压力场合，但前者在振动大、疲劳载荷高时易松动失效，后者的长期可靠性有待验证。

3.4 衬里管道连接设计的创新案例分析

衬里管道连接设计领域涌现出许多创新性的案例和实践，为提高化工装置的安全性和可靠性提供了新思路。例如，某乙烯装置采用新型网套对焊连接技术，在衬里管道对焊时引入金属网套，既保证了连接强度和韧性，又降低了施工难度和应力集中风险，延长了管道使用寿命。又如，某炼油装置采用高压锥密封连接技术，通过锥形密封面和特制紧固件实现高压下的可靠密封，避免了法兰连接的泄漏风险，提高了系统本质安全性^[4]。此外，还有项目探索智能连接技术，通过在连接处嵌入无线传感器，实时监测连接应力、温度等参数，及早发现和预警连接异常，实现连接状态的在线诊断和预测性维护。

4 化工装置衬里管道施工与质量控制

4.1 衬里管道施工工艺流程与要点

化工装置衬里管道施工是一项复杂的系统工程，需要严格遵循规范的工艺流程和操作要点，以确保施工质量和安全。衬里管道施工的主要工艺流程包括管道组对、衬里安装、无损检测、管道固定等环节。在施工过程中，要着重把控几个关键要点：①做好施工准备，包括材料验收、设备检查、人员培训等；②严格执行安装程序，确保管道组对准确、衬里安装到位；③加强无损检测，及时发现和消除焊接缺陷、衬里脱落等质量隐患；④规范管道固定，避免应力集中、疲劳损伤等问题。通过严格执行规范的施工工艺和关键控制点管理，确保衬里管道施工的高质量、高效率、高安全性。

4.2 衬里管道施工质量控制的关键环节

质量控制的关键环节包括原材料控制、工艺控制、检验控制等。原材料控制要重点把关衬里材料和管道材料的质量，确保材料符合设计要求和相关标准。工艺控制要严格执行规范的施工工艺和操作规程，特别是衬里安装、焊接等关键工序，要由经过培训和考核的专业人员实施。检验控制要贯穿施工全过程，对衬里安装质量、焊缝质量等关键项目实施全面检测，确保检测方法符合标准要求，检测结果满足质量标准^[5]。

只有在原材料、工艺、检验等关键环节实施全方位质量控制，才能最大程度地消除质量隐患，保证衬里管道的施工质量。

4.3 衬里管道施工常见质量问题与防治措施

常见的质量问题包括衬里层脱落、衬里层褶皱、衬里层损伤、焊接变形、焊缝气孔、焊缝夹渣等。这些问题主要源于原材料缺陷、施工工艺不当、操作不规范、检验把关不严等原因。为了防止和解决这些质量问题，需要采取系统的防治措施。①加强原材料质量控制，严把材料采购和验收关；②优化施工工艺，编制详细的施工方案和作业指导书；③强化操作人员技能培训和考核，提高作业水平和自觉性；④完善检验检测制度，加大关键项目检验频次和覆盖率。

4.4 衬里管道施工与质量控制的创新案例分析

衬里管道施工与质量控制领域不断涌现出创新性的案例和实践，为提高施工效率和质量提供了新思路新方法。例如，某石化企业引入了数字化衬里管道施工管理系统，通过 RFID 标签、移动终端等设备，实现了管道材料、衬里安装、焊接检测等关键数据的实时采集和追溯，提高了施工过程的可视化和智能化水平。

5 结束语

化工装置衬里管道的工程设计是一项复杂的系统工程，涉及材料选择、结构设计、连接设计以及施工质量控制等多个环节。设计人员需要根据工况要求，综合考虑安全性、经济性、可靠性等因素，选择最优的材料型号和结构参数。同时，还要注重连接方式的合理选用，优化施工工艺，加强质量控制，最大限度地发挥衬里管道的优越性能。只有在设计、施工、管理等各个环节严格把关，才能确保化工装置衬里管道安全、高效、长周期运行，为化工行业的可持续发展提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 王清春, 田佳佳, 黄宗瑛. 石油化工装置中衬里管道的工程设计要点 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(03): 144-146.
- [2] 蒙福祥. 新型耐火衬里结构在大型化工装置中的运用 [J]. 当代化工研究, 2024, (21): 125-127.
- [3] 崔芳. 石油化工装置大口径衬里管道设计 [J]. 化工管理, 2020, (07): 166-167.
- [4] 韩强, 王唯先, 丛丰. 石油化工装置中衬里管道的工程设计要点 [J]. 化工设计, 2019, 29(03): 18-21+28+1.
- [5] 柏其亚. 浅谈精细化工车间中衬里管道的工程设计 [J]. 石化技术, 2019, 26(03): 250.