

Material selection and performance analysis in the manufacturing process of chemical containers

Quanpei Leng Yuanyuan Yang

Henan Xinlianxin Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Xinxiang, Henan, 453731, China

Abstract

The material selection and performance analysis of chemical containers directly affect the safety, reliability, and service life of equipment. This article systematically explores the material classification, selection principles, and common material characteristics in the manufacturing of chemical containers, with a focus on analyzing key indicators such as corrosion resistance, mechanical properties, and thermal properties of materials. Through practical cases, the application effects of different materials in chemical containers were compared, and corresponding countermeasures were proposed for the challenges in material selection and performance optimization. Research has shown that scientific and rational material selection requires comprehensive consideration of medium characteristics, working conditions, and economic factors, while the optimization of material performance needs to be achieved through multiple approaches such as composition design, process improvement, and surface treatment, providing guarantees for the safe operation and long-term service of chemical containers.

Keywords

chemical containers; Material selection; performance analysis

化工容器制造过程中的材料选择与性能分析

冷全佩 杨园园

河南心连心智能装备科技有限公司, 中国·河南新乡 453731

摘要

化工容器的材料选择与性能分析直接影响设备的安全性、可靠性和使用寿命。本文系统探讨了化工容器制造中的材料分类、选择原则及常见材料特性,重点分析了材料的腐蚀性能、机械性能和热性能等关键指标。通过实际案例,对比了不同材料在化工容器中的应用效果,并针对材料选择与性能优化过程中的挑战提出了相应对策。研究表明,科学合理的材料选择需综合考虑介质特性、工况条件及经济因素,而材料性能的优化则需要通过成分设计、工艺改进和表面处理等多途径实现,为化工容器的安全运行和长周期服役提供保障。

关键词

化工容器; 材料选择; 性能分析

1 引言

化工容器作为承压设备,其材料选择与性能直接影响生产安全与经济效益。随着化工行业向高温、高压、强腐蚀等极端工况发展,传统材料已难以满足新需求。本文基于化工容器典型失效案例,系统分析材料选择的关键因素及性能评价方法,旨在为设计、制造和使用环节提供理论依据。通过剖析材料性能与容器失效模式的关系,探索材料优化方向,并结合实际应用案例,验证不同材料在特定工况下的适用性,以推动化工容器材料的科学选型与性能提升。

【作者简介】冷全佩(1987-),中国河南新乡人,本科,助理工程师,从事压力容器制造研究。

2 化工容器制造过程中的材料选择

2.1 材料分类及特性

化工容器材料根据其化学成分和使用特性可分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。金属材料主要包括碳钢、低合金钢、不锈钢、镍基合金、钛及钛合金等,具有优异的机械强度和加工性能,是化工容器制造的主流选择。非金属材料玻璃钢、陶瓷、石墨等,在特定腐蚀环境下展现出独特优势,但机械性能相对较弱。复合材料则通过不同材料的组合,兼具金属材料的强度和非金属材料的耐腐蚀性,玻璃钢衬里容器、金属基复合材料等^[1]。各类材料在耐腐蚀性、机械性能、热稳定性、加工工艺性等方面表现出显著差异,需要根据具体使用环境进行针对性选择。随着新材料技术的发展,新型高性能材料双相不锈钢、哈氏合金、锆合金等在极端工况下的应用日益广泛。

2.2 材料选择原则

化工容器材料选择需要遵循安全性、适用性和经济性三大基本原则。安全性原则要求材料必须满足设计压力、温度等基本强度要求，具有足够的韧性储备和良好的焊接性能。适用性原则强调材料必须与介质特性相匹配，重点考虑材料的耐腐蚀性能、耐高温性能和抗氢脆性能等。经济性原则要求在满足安全和性能要求的前提下，综合考虑材料成本、制造费用和维护成本，实现全生命周期成本最优化。在实际选材过程中，还需考虑材料的可获取性、加工工艺性和标准化程度等因素。对于特殊工况，低温环境、核辐射环境等，还需额外考虑材料的低温韧性、抗辐照性能等特殊要求。科学的选材流程应当基于详尽的工况分析，通过多方案比较和风险评估确定最优选择。

2.3 常见化工容器材料介绍

碳钢和低合金钢因其良好的机械性能和较低的成本，广泛应用于中低压、非强腐蚀性介质的化工容器^[2]。Q345R、16MnDR等压力容器用钢具有良好的焊接性和中温强度，是化工容器的常用材料。奥氏体不锈钢304、316L凭借优异的耐腐蚀性，成为处理腐蚀性介质的首选材料。双相不锈钢2205兼具奥氏体和铁素体的优点，在耐氯化物应力腐蚀方面表现突出。镍基合金如哈氏合金C-276在强酸、强碱等极端腐蚀环境下具有不可替代的作用^[3]。钛及钛合金因其卓越的耐海水和氯化物腐蚀性能，在海洋工程和氯碱工业中广泛应用。非金属材料中，玻璃钢因其轻质、耐腐蚀的特点，在储罐和管道系统中占据重要地位。近年来，复合材料不锈钢衬里容器、爆炸复合板等在兼顾强度与耐蚀性方面展现出独特优势，成为化工容器材料发展的重要方向。

3 化工容器制造过程中的性能分析

3.1 腐蚀性能分析

化工容器的腐蚀性能直接决定了设备在恶劣化学环境中的使用寿命和安全性。腐蚀分析需要全面考察材料在特定介质中的均匀腐蚀速率、点蚀倾向、缝隙腐蚀敏感性以及应力腐蚀开裂风险等关键指标。在实际工况中，温度、压力、流速等参数都会显著影响腐蚀行为，高温会加速腐蚀速率，而流动介质可能导致冲刷腐蚀。针对不同腐蚀类型，需采取相应的防护措施，选用耐蚀材料、设计合理的腐蚀裕量、采用阴极保护或表面涂层技术等。特别值得注意的是，多组分介质可能产生协同腐蚀效应，这要求工程师不仅要了解单一介质下的材料表现，更要掌握复杂化学环境中的腐蚀规律。通过实验室加速腐蚀试验与现场挂片试验相结合的方式，可以更准确地预测材料在实际服役条件下的腐蚀行为，为选材决策提供可靠依据。

3.2 机械性能分析

化工容器的机械性能分析是确保设备结构完整性的关键环节，主要包括强度、韧性、疲劳性能和蠕变性能等方面

的评估。强度分析需要考虑材料在常温及工作温度下的屈服强度、抗拉强度和持久强度，确保容器在各种载荷条件下都具有足够的安全裕度。韧性评估则重点关注材料在低温或冲击载荷下的抗断裂能力，防止脆性断裂事故的发生。对于承受循环载荷的容器，疲劳性能分析尤为重要，需要计算在设计寿命内的累积损伤程度。高温工况下还需考虑材料的蠕变性能和应力松弛行为，预测长期服役后的尺寸稳定性和强度衰减情况。现代分析技术有限元模拟可以更精确地预测复杂应力状态下的机械响应，而断裂力学方法则为评估含缺陷容器的安全性能提供了科学依据。机械性能分析必须结合具体工况和失效模式，才能得出准确可靠的分析结论^[4]。

3.3 热性能分析

化工容器的热性能分析涉及材料的热传导、热膨胀和高温强度等多个方面，对设备的热力耦合行为和温度应力分布具有决定性影响。热传导性能决定了容器的温度梯度分布，直接影响传热效率和热应力水平，在高温换热设备中尤为重要。热膨胀系数则关系到容器在温度变化时的尺寸稳定性，不同材料间的热膨胀差异可能导致连接部位的应力集中。高温强度分析需要考察材料的抗氧化性、高温蠕变抗力和组织稳定性，确保设备在长期高温服役过程中保持足够的机械性能。对于经历周期性温度变化的容器，还需评估材料的热疲劳性能，预测在反复热循环下的损伤累积情况^[5]。热分析通常需要结合计算流体力学和热应力分析，模拟实际工况下的温度场和应力场分布。通过优化材料选择和结构设计，可以显著改善容器的热性能，提高设备在极端温度条件下的可靠性和使用寿命。

4 案例分析

4.1 化工容器制造企业的材料选择策略与实践

大型化工装备制造集团在承接海外氯碱工程项目时，针对高温湿氯气腐蚀环境制定了系统的材料选择策略。项目团队首先对介质成分、操作参数和预期寿命等关键因素进行详细分析，确定耐氯化物腐蚀和抗应力腐蚀开裂为主要选材标准。通过建立多维度评价体系，对候选材料进行技术经济性比较，最终确定采用双相不锈钢作为主体材料，关键部位选用镍基合金衬里结构。在实施过程中，企业创新性地采用了材料生命周期成本分析方法，不仅考虑初始采购成本，更评估了维护费用和预期使用寿命带来的综合效益。同时，针对材料加工难点，专门开发了配套焊接工艺和热处理方案，确保材料性能得到充分发挥。该项目实施后，设备使用寿命较传统材料方案提升显著，验证了科学选材策略的重要性^[6]。这一案例表明，成功的材料选择需要建立在对工况条件的深入理解基础上，通过系统化的评估方法和创新的工艺解决方案，才能实现技术可行性与经济合理性的最佳平衡。

4.2 不同材料化工容器的性能对比分析

在炼化企业加氢反应器的选材过程中，工程师对

2.25Cr-1Mo 钢、321 不锈钢和 625 合金三种候选材料进行了全面的性能对比分析。在腐蚀性能方面,模拟实际含硫介质环境下的测试表明,625 合金表现出最优异的抗硫化物应力腐蚀性能,而 2.25Cr-1Mo 钢则需要依赖表面堆焊保护层。机械性能对比显示,2.25Cr-1Mo 钢在高温强度方面具有明显优势,但在低温韧性上不及奥氏体不锈钢。热性能分析则发现 321 不锈钢的热膨胀系数显著高于其他两种材料^[7],在温度波动工况下可能产生更大的热应力。通过建立包含安全系数、预期寿命和维护成本在内的综合评价模型,项目团队最终确定了基体采用 2.25Cr-1Mo 钢、内壁堆焊 625 合金的复合结构方案。这一对比分析过程突显了化工容器选材的复杂性,说明单一性能指标的优越性并不能直接转化为材料选择的决定因素,必须通过多参数系统评估,才能找到最适合特定工况的解决方案。此类对比分析为化工容器的科学选材提供了有价值的参考框架。

5 化工容器制造过程中的材料选择与性能优化的挑战与对策

5.1 材料选择与性能优化的挑战

化工容器材料选择与性能优化面临多方面的现实挑战。极端工况条件的日益严苛使得传统材料的适用性不断受到挑战,深冷环境下的脆性断裂风险、高温高压下的蠕变损伤等问题亟待解决。新材料研发周期长、成本高,且缺乏长期服役数据支撑,导致工程应用存在不确定性。多组分复杂介质环境下的腐蚀机理研究尚不充分,难以准确预测材料的长期腐蚀行为。材料性能优化过程中,强度与韧性、耐蚀性与可焊性等性能指标往往存在此消彼长的矛盾关系,平衡各项性能指标成为技术难点。此外,材料标准体系更新滞后于技术发展,部分高性能材料缺乏统一的技术规范和评价方法。在全球化供应链背景下,关键材料的可获得性和质量稳定性也成为制约因素,特别是一些特种合金材料受地缘政治影响存在供应风险。全生命周期成本控制要求与高性能材料的高成本之间的矛盾,使得材料选择决策变得更为复杂。

5.2 对策与建议

针对材料选择与性能优化的挑战,建议采取系统性的解决方案。建立基于大数据的材料性能数据库,整合实验室测试数据、现场服役经验和失效案例,为材料选择提供数据支撑。推动产学研协同创新,加速新材料的工程化应用,通过试点项目积累实践经验。完善材料评价体系,发展加速试

验方法,建立更精确的寿命预测模型^[8]。在性能优化方面,采用材料基因组工程方法,通过计算模拟指导合金设计,实现性能的精准调控。发展复合材料和表面工程技术,通过材料组合和表面改性实现性能互补。推动材料标准化建设,及时将新材料、新工艺纳入标准体系。建立多元化的供应链体系,确保关键材料的稳定供应。在成本控制方面,推广全生命周期成本分析方法,综合考虑采购、制造、维护和报废处理各环节费用。加强工程技术人员培训,提升材料选择与应用的系统思维能力。通过建立跨学科的技术团队,整合材料科学、腐蚀工程、力学分析和制造工艺等多领域专业知识,形成更科学的材料决策机制。

6 结论

化工容器的材料选择与性能优化是保障设备长周期安全运行的关键。研究表明,不锈钢、镍基合金及复合材料等在耐腐蚀性、机械强度和热稳定性方面各具优势,需根据具体工况合理选用。未来,随着新材料开发和表面处理技术的进步,化工容器的材料性能将进一步提升。同时,建立材料数据库和寿命预测模型,推动标准化选材流程,将是行业发展的重要方向。通过材料科学与制造技术的深度融合,化工容器的可靠性和经济性将得到显著提高,为化工行业的安全高效发展奠定基础。

参考文献

- [1] 弋楠,晁静. 研究化工机械高压容器筒体的制造工艺 [J]. 粘接, 2020, 43 (09): 133-136.
- [2] 陶彦文,朵元才,杜金涛,等. 焦炭气化甲醇装置钛材换热器研制 [J]. 中国化工装备, 2020, 22 (04): 29-35.
- [3] 张超. 压力容器制造质量管理控制要点分析 [J]. 化工设计通讯, 2020, 46 (06): 128+149.
- [4] 白翠翠,张红岩. 化工压力容器设计选材问题解析 [J]. 石化技术, 2020, 27 (05): 91+7.
- [5] 康聪聪,王秋利. S22053双相不锈钢压力容器的制造工艺 [J]. 甘肃科技, 2020, 36 (09): 52-54.
- [6] 袁承春. 承压设备接管锻件圆钢无损检测问题研究 [J]. 化工设备与管道, 2020, 57 (01): 25-28.
- [7] 宋义鹏,张振涛. 纯碱厂蒸吸的化工过程及设备的研究 [J]. 化工管理, 2020, (05): 146-147.
- [8] 徐冠元,王宇,程倩倩. 化工机械高压容器筒体的制造分析 [J]. 化工管理, 2019, (24): 131-132.