

化工管道材料选择及其耐腐蚀性能研究

尹传博 耿 帅 (威海市特种设备检验研究院, 山东 威海 264400)

摘 要: 化工生产过程输送介质的高温、高压和强腐蚀环境对管道安全性提出了极大的挑战, 材料腐蚀会导致设备失效或安全事故, 从而造成巨大的经济损失和环境影响。管道材料的耐腐蚀性能直接影响整个生产系统的稳定运行与人身安全。因此, 管道材料在化工设计中起着重要作用, 尤其是随着化工工艺向更苛刻条件下发展, 对于耐蚀性、经济性和可靠性的要求更高, 材料的选择是化工装置设计的重要问题之一。

关键词: 化工管道; 材料选择; 耐腐蚀性能

中图分类号: TQ050.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 032-0127-03

Research on Material Selection and Corrosion Resistance of Chemical Pipelines

Yin Chuanbo, Geng Shuai (Weihai Special Equipment Inspection and Research Institute, Weihai Shandong 264400, China)

Abstract: The high temperature, high pressure, and highly corrosive environments of transported media in chemical production pose significant challenges to pipeline safety. Material corrosion can lead to equipment failure or safety incidents, resulting in substantial economic losses and environmental impacts. The corrosion resistance of pipeline materials directly affects the stable operation of the entire production system and personnel safety. Therefore, pipeline materials play a crucial role in chemical engineering design, especially as chemical processes increasingly operate under more severe conditions. Higher demands are placed on corrosion resistance, cost effectiveness, and reliability, making material selection one of the key issues in the design of chemical plants.

Keywords: chemical pipelines; material selection; corrosion resistance

化工管道作为工业生产的动脉, 其材料选择直接关系到整个生产系统的安全稳定与长周期运行。选用耐腐蚀性能优异的材料, 不仅能有效避免介质泄漏、设备失效等安全事故, 更能显著延长管道使用寿命, 减少非计划停车带来的巨大经济损失。科学的材料选型是实现化工装置本质安全、节能降耗和可持续发展的关键技术基础, 对提升企业经济效益与核心竞争力具有重要现实意义。

1 常见化工管道材料类型

金属材料是应用最广泛的一类。碳钢由于强度高、价格便宜, 一般用于输送水、蒸汽、空气和各种油品等非腐蚀性不高的流体, 如遇有一定腐蚀性的介质, 就要选择不锈钢。304 不锈钢具有较好的通用耐腐蚀性, 316 不锈钢含钼元素, 抗氯化物腐蚀能力强。如要耐强酸腐蚀, 就必须选用特殊的合金, 例如耐盐酸和硫酸的哈氏合金, 可以在氢氟酸环境中工作的蒙乃尔合金。其他合金, 如双相钢既有较高的强度, 也有良好的抗应力腐蚀开裂的能力, 金属钛对氯化物和氧化性酸液有极好的抗蚀能力。这类金属都可用于各种反应器和塔、罐设备壳体内壁的衬里或直接制造主体。非金属材料同样具有重要的作用, 特别是在化工生产中耐化学腐蚀更为突出。聚丙烯材料性价比高, 耐多种有机溶剂和一定腐蚀的溶液, 适用于许多场合, 其制品在常温下很安全。聚偏氟乙烯则可用于更热的工

作环境, 也更耐腐蚀。玻璃钢即纤维增强塑料, 重量轻, 强度高, 不易被化学品腐蚀。聚四氟乙烯有“塑料王”之美誉, 几乎没有一种化学品可损伤它。常作为内衬或密封件用作反应釜和管件等设备的连接密封结构。

转变传统的组合方式。复合即是多种物质的结合, 比如复合金属即是金属之间互相结合成一种新材料, 最常见的一种复合材料是钢衬塑管道, 管体最内层是聚丙烯、聚四氟乙烯等可以抗腐蚀的塑料薄膜层, 再外侧由碳钢制造, 兼顾了钢和塑料的优点, 耐腐蚀且经济适用。

2 材料耐腐蚀性能对比研究

2.1 全面腐蚀与局部腐蚀性能的对比

材料的耐腐蚀性能要从性能、性价比、适应性等三个方面去考察材料, 对比各类材料的耐腐蚀性能。第一要区分全面腐蚀和局部腐蚀。全面腐蚀是整个材料表面上以相对平均速率减少材料的厚度, 在与介质之间长时间挂片试验测取平均腐蚀速率即对其可评价优劣, 比较简单。而在化工环境下更多的还是局部腐蚀, 并对生产运行造成难以预料且难以监测的危害性。需要在对耐腐蚀性能的对比方面重点关注点蚀, 考察材料能否在含氯离子环境下出现点蚀坑以及发展的坑的深度与腐蚀速率; 其次是缝隙腐蚀, 对比材料在停滞区域是否出现如垫片下法兰上的缝隙腐蚀; 最关键是要了解应力腐蚀开裂的敏感性, 必须研究材料能否

在同时有拉应力和特殊介质作用下出现脆性断裂和破裂的发生倾向或敏感度。这也是对不同材料进行对比时必须进行的研究领域。局部腐蚀性能往往是决定材料筛选的最核心的因素。

2.2 不同环境介质中的腐蚀行为对比

材料的耐腐蚀性能取决于它所处的环境,进行材料耐腐蚀性能的对比必须是在同一种或两种介质环境下。对酸而言,在不同浓度和温度硫酸、盐酸、硝酸中对比这些材料的耐蚀性能。例如,碳钢的全面腐蚀极其严重,在酸性的液体中不能抵挡住酸性液的腐蚀。不锈钢能够抵抗氧化性酸中的腐蚀,但是不能抵挡还原性的酸(例如盐酸、氢氟酸等)。然而像锆、钽这样的金属则可以承受沸腾的浓酸。碱也与酸类似:有无机碱,例如,苛性钠等;还有高硅氧玻璃,石墨等等,这些都是被碱敏感的材料,比如不锈钢的碱脆问题。还有含氯离子环境:是指在酸的液体中掺杂了一些氯离子,抗点蚀(Icorr)、SCC 比较好的材料将在此环境下得到突出表现,普通 304 不锈钢在这种环境下很容易失效,但是像 316 不锈钢、双相不锈钢、镍合金能抵抗这种环境。还有一些特定环境里材料性能的对比,比如有机溶剂、高温水蒸气等等。

2.3 经济性与可靠性综合评估对比

对材料的最终选择不能仅仅按照技术性能来决定,必须做经济性和可靠性之间的对比和权衡。碳钢初始成本最低,但如果腐蚀速度高则需要经常更换并且有停产的风险,综合寿命总成本可能会最高;不锈钢初期成本居中,在各种温和的至中等腐蚀环境中都具备较好的可靠性,是折衷的选择,既能保证经济性又能兼顾材料自身的可靠性。高性能合金和非金属材料通常投资费用高,但是在苛刻的腐蚀环境下其非常长的使用寿命周期与几乎无需维修的可靠性也具备良好的竞争条件,材料生命周期内可能具有很低的总成本;另外还需考虑材料的可获得性、加工和焊接难度、维修维护成本等综合对比结果,最后做一个全面考量作出最好的判断。

3 化工管道材料选型原则与方法

3.1 安全可靠是首要核心原则

对所选用的材料首先并唯一的要求是安全性。也就是说材料本身一定要有可靠的耐压力、温度和所有预期载荷,而且必须与输送的工艺介质相适配。应该彻底了解用于输送各种管道的所有组成、浓度、温度以及可能存在的微量杂质等等成分,并充分意识到这些成分可以改变材料的腐蚀性能以及与金属的不同作用方式,进而导致腐蚀的发生和发展速率的变化。必须要规避的是可能导致灾难的失效模式,例如,应力

腐蚀裂纹、氢诱导开裂或者快速局部或点腐蚀的失效方式,它们最终常常会造成泄漏事故甚至爆炸的恶果,造成难以补救的重大危险。安全性第一原则意味着对于每一项选择都应该预先有足够的余量确保它确实符合各种腐蚀数据库和已知的数据,绝不能因为节省造价等缘故牺牲了可靠性的标准。

3.2 系统化的选型方法与流程

正确的化工管道材料选型遵循着循序渐进的步骤流程,第一步必须弄清楚化工生产工艺条件的要求,精确把握介质情况、操作温度和压力范围(正常及波动值)、流速以及管道使用寿命等条件;第二步要根据化工管道所使用的介质情况,查阅相关权威的腐蚀数据手册和工程腐蚀数据库等相关腐蚀信息,从中查找出若干种能抵抗这一化工工艺要求材料耐腐蚀效果不错的候选耐腐材料;第三步则要考虑综合各种候选耐腐蚀材料的实际耐腐蚀性能全面展开比较,包括其是否有可能出现全面或局部腐蚀,不同选择方案下管道工程建设时的初始费用,加工制造困难程度、使用中可能出现维修周期、运行维护费用等各方面的因素,进行全面的经济分析评价;第四步如果材料选用场所处于十分苛刻或者要求特别高的话,则必须通过相应的腐蚀测试方法进行腐蚀试验研究或实验室挂片试验测试来获取更直观可靠的腐蚀测试参数信息资料,为第五步实际应用中作出最好最优的化工管道材料选择提供更加坚实的参考资料和依据。

3.3 全生命周期成本综合权衡

全生命周期的成本。材料选型要依据全部的使用成本来选择,这是“全生命周期”概念的核心:不要仅仅比较初始费用,而是需要考察材料在整套管道设计使用期限的总成本。这包括材料采购、制造加工和安装时的各种成本和费用;在服役过程中管道运行维护时的各种维护与检修和更换所需的各种耗费;以及整个生产过程系统因为停机维修造成的损失。例如一种初投资廉价的碳钢管道如果暴露在腐蚀环境中,可能在不长时间内就损坏失效,而需要经常进行更换,在服役期间可能会产生比初始材料价格高昂得多的损失;甚至停机维修给生产线带来无法挽回的巨大生产成本等。因此选型必须是基于项目全生命周期的全面的考虑。从科学的总成本分析中找出最经济合理的安全耐用方案,最终使选型在保证技术和安全保障的前提下达到最佳经济效益和技术性能的平衡。

4 防腐技术与应用展望

4.1 高性能新材料与复合技术的深度开发

重点攻关高效节能防腐材料,开发新一代高性能新材料和复合技术。金属材料重点攻关性价比更高、

应用前景更优的高端合金。调控微观组织,优化合金元素,研发能在极端苛刻环境长期耐高温高湿强酸强碱应力腐蚀开裂的超级不锈钢、高熵合金和新型镍基合金等材料;开展非金属材料的开发和升级,研发能突破耐温、耐压极限、耐腐蚀强的新型改性聚四氟乙烯、增强型聚偏氟乙烯等多种工程塑料、耐腐蚀纤维增强热塑性复合材料、碳纤维增强树脂基复合材料等材料。开发攻克低温应力腐蚀、热氢鼓胀开裂等材料失效难题的新一代防腐涂装材料及涂层修补材料,发展高效绿色施工的新型防腐材料,创新工艺新装备。研究以扩散焊接、激光熔覆等先进复合技术、多层结构工艺开发高性能金属-衬层复合材料技术,将两种及以上不同性质的防腐镀层进行复合或冶金结合,形成腐蚀形式新、比热膨胀系数更小(-10°C),各种力学强度、冲击性能等多项指标比单一材料更好的多层复合结构材料。

4.2 智能监测与预测性维护的深度融合

智能监测和预测性维护是腐蚀控制革命的方向和趋势,也是材料管理领域的未来。借助物联网,在管道内壁或外壁安装微型高精度的、实时感测传感器,随时采集存储或传输影响材料腐蚀的特征数据如:内壁减薄变化情况、输送介质 pH 值、腐蚀电流密度、温度压力和环境工况变化、氧分压等物理和电化学反应因素变量变化的情况等;用无线技术实现传感器数据向云端的海量多源的数据,汇集进入云端进行大数据分析和处理后,获得一系列关于物理变量和电化学反应与剩余生命周期关联规律性的认知;再通过云计算为每一个“关键部件”定义一套具有智慧功能的、高精度的预测和寿命估计的算法,并能够学习其“智慧”,在估计材料或部件寿命(准确地说,是剩余使用寿命)的同时评估发生预期可能腐蚀失效和破坏的可能性及其概率的风险。最终转向预测性的基于状态预测的状态下的智能化预防和计划式的维修检修。让系统提前几毫秒,在材料“生病”的前一秒发出信号,在合适的时间里创造最有利条件,提供最有利检修建议,降低不必要的停产和修理费用,防范意想不到的意外事故,从被动对腐蚀防护发展到积极主动对缺陷、性能退化和风险的预测和有智慧的聪明管理。

4.3 绿色与可持续防腐技术的创新应用

绿色发展是防腐的主要方向,创新的绿色可持续发展。做环保的表面处理,放弃有污染的涂装和电镀。使用无铬的钝化剂、低 VOC 的水性环保涂料,它们将取代含有重金属或者有毒物质的各种化学镀技术和喷涂技术。可以研发一些从植物、微生物中提炼的天然缓蚀剂,阻止部分化学合成的化学药剂进入大自然,

这样做也大大的减少污染源对自然的破坏。把服务期延长也是可持续发展的途径之一,创新先进的表面修复技术和再制造技术,大大地提高旧设备的价值和使用年限,并为其创造一个新的生命周期,这种发展方式使资源得到充分的利用。不要让宝贵的能源随着垃圾被带走,不要浪费有价值的原材料,这是人们应该学会的行为准则。由于这种绿色创新的模式可有效地节约原材料和自然资源,最大限度上避免固体废弃物、废气和废水的产生与排放,在为社会带来了巨大经济效益的同时也可促进绿色发展的生态效益,也把防护由单纯的保护变成本身就是一项发展的产业,是经济发展的一部分。

5 结束语

化工管道材料的选择是一项系统性工程,其核心在于精准把握介质特性与材料耐腐蚀性能的匹配。本研究系统梳理了选材原则、性能对比及未来趋势,强调安全可靠性与全生命周期成本综合权衡的重要性。随着新材料技术、智能监测系统和绿色防腐工艺的持续突破,化工管道防腐管理正朝着本质安全化、智能预警化和环境友好化的方向演进。这些发展将为化工行业提升本质安全水平、实现可持续发展提供至关重要的技术支撑,推动行业向更高质量、更有效率、更可持续的方向迈进。

参考文献:

- [1] 徐凌. 化工检测技术在工业用水管道材料腐蚀分析中的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(14): 60-62.
- [2] 管杰文. 化工管道材料选择与腐蚀防护研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(11): 23-25.
- [3] 马云龙, 饶丹骄. 化工配管布局管道材料选择与耐腐蚀性能研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (04): 120-122.
- [4] 卞学吉. 化工工程中设备及管道布置技术研究[J]. 石化技术, 2024, 31(04): 147-148+71.
- [5] 雷青青. 化工设计过程中管道材料的选用分析[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(11): 43-45.
- [6] 李文箐. 浅谈化工工艺管道耐腐蚀材质的选择[J]. 科学技术创新, 2011(11): 55-55.
- [7] 张雷, 廖永力, 周晖, 等. 基于物联网与大数据技术的埋地管道腐蚀智能监测研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2023, 35(1): 78-85.
- [8] 季鹏飞, 李文杰, 张腾腾. 工艺管道系统设计中的材料选择与耐腐蚀性研究[J]. 产品可靠性报告, 2025(3): 99-100.
- [9] 付俊明. 化工行业中的新型耐腐蚀管道材料研究[J]. 石油化工建设, 2024, 46(11): 45-47.