

化工管道材料选择及其耐腐蚀性能研究

陈明黎 耳帖帖 林 浩 (温州市特种设备检测科学研究院, 浙江 温州 325000)

摘 要: 文章聚焦化工管道材料选择及其耐腐蚀性能这一关键主题展开深入研究, 首先概述了常见的化工管道材料, 涵盖金属、非金属及复合材料等不同类型, 接着详细阐述了化工管道材料耐腐蚀性能的原理, 探讨了基于介质性质、工作温度与压力、成本及其他特殊要求的材料选择依据, 并介绍了提升耐腐蚀性能的多种策略, 旨在为化工行业管道材料应用提供科学的参考依据。

关键词: 化工管道; 材料选择; 耐腐蚀性能; 介质性质; 管道维护

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 031-0153-03

Research on Material Selection and Corrosion Resistance of Chemical Pipelines

Chen Mingli, Er Tietie, Lin Hao (Wenzhou Special Equipment Detection Science Research Institute, Wenzhou Zhejiang 325000, China)

Abstract: This paper focuses on the critical topic of material selection and corrosion resistance for chemical pipelines. It begins by summarizing common chemical pipeline materials, covering different types such as metals, non-metals, and composites. Subsequently, it elaborates on the principles of corrosion resistance in chemical pipeline materials and discusses the basis for material selection, including medium properties, working temperature and pressure, cost, and other specific requirements. Furthermore, it introduces various strategies to enhance corrosion resistance. The aim is to provide a scientific reference for the application of pipeline materials in the chemical industry.

Keywords: chemical pipelines; material selection; corrosion resistance; medium properties; pipeline maintenance

化工行业在国民经济中占据着重要地位, 在复杂且多样的化工工况下, 不同介质、温度、压力等条件对管道材料有着严苛要求, 一旦出现错误的材料选择情况, 可能致使管道发生腐蚀泄露, 进而引发安全事故、造成环境污染以及带来巨大的经济损失, 所以深入研究化工管道材料选择及其耐腐蚀性能是有着重要的现实意义的, 其不仅有助于优化管道系统设计, 而且能够提高化工生产整体质量, 还可减少潜在风险, 从而为化工行业的稳健发展筑牢基础。

1 化工管道材料概述

化工管道材料主要可划分为金属、非金属以及复合材料这几大类, 其中金属管道材料常见的包含不锈钢、碳钢以及铜合金, 不锈钢有着耐腐蚀性强且强度较高的特点, 适用于多种腐蚀性介质环境, 碳钢虽成本较低但容易生锈, 常用于对耐腐蚀性要求并非特别高的场合, 铜合金具备良好的导热、导电性, 在一些特定的化工流程中得以应用^[1]。

非金属管道材料涵盖聚丙烯 (PP)、聚四氟乙烯 (PTFE) 以及玻璃钢, 聚丙烯 (PP) 材质化学稳定性良好且质地较轻, 常用于输送一般腐蚀性介质, 聚四氟乙烯 (PTFE) 有着近乎能耐受所有化学物质的极佳耐腐蚀性, 只是成本相对偏高, 玻璃钢兼备了耐腐蚀与一定的机械强度, 应用较为广泛。复合材料管道比如内衬非金属的金属复合管, 它将金属的强度与非金属的耐腐蚀性有机结合起来, 能够更好地满足复杂化

工工况的需求^[2]。

2 化工管道材料耐腐蚀性能原理

化工管道材料耐腐蚀性能原理主要涉及化学腐蚀、电化学腐蚀以及应力腐蚀开裂这几方面, 其中化学腐蚀是指材料与周围介质直接发生化学反应, 无论是金属管道在强酸、强碱等腐蚀性介质中, 其表面原子会与介质成分发生反应进而导致材料损耗, 还是非金属材料同样会因与特定化学物质发生反应而出现被腐蚀的情况^[3]。

电化学腐蚀的原理为金属管道处于电解质溶液环境里时, 不同部位电极电位存在差异, 由此形成微电池, 进而发生氧化还原反应, 使得金属不断溶解被腐蚀, 就像碳钢在潮湿且含电解质的环境中便容易出现这种被腐蚀的状况。应力腐蚀开裂是在拉伸应力与腐蚀介质共同作用下产生的, 往往管道局部应力集中部位更易出现该情况, 最终致使材料开裂, 例如不锈钢在含氯离子且存在应力的情况下就可能发生此类致使材料开裂的现象^[4]。

3 化工管道材料选择依据

化工管道材料的选择要依据化工介质的酸碱性、氧化性、腐蚀性离子含量等介质性质情况进行挑选, 例如在面对强酸性介质时, 就不宜选用那些容易被酸腐蚀的材料。工作温度与压力同样至关重要, 不同材料在高温、低温以及高压等不同环境下的性能各有差异, 像处于高温环境下时, 部分塑料管道会出现变软

变形的情况,此时就需要选用耐高温的金属或者特种塑料管道。成本因素也是不容忽视的,既要材料采购成本加以考虑,又要权衡安装成本、维护成本以及使用寿命等诸多方面,从而在满足使用要求的基础上努力实现经济性的最优。此外,诸如管道的柔韧性、耐磨性、卫生要求等其他因素同样会对材料选择产生影响,例如在食品化工行业,其对管道卫生要求较高,需要选用符合食品级标准的材料^[5]。

4 化工管道材料选择与耐腐蚀性能提升策略

4.1 化工管道材料选择策略

在化工生产中,管道材料的选择需全面权衡各方面因素,既要考虑介质特性,例如强酸性介质(像浓硫酸、盐酸等)需优先选择如哈氏合金(含耐腐蚀元素能形成钝化膜)、聚四氟乙烯(化学稳定性强可抵御强酸腐蚀)这类耐酸性好的材料,碱性介质(如氢氧化钠溶液)在普通情况下碳钢较稳定、不锈钢也可行,但若是含氧化性物质的碱性介质则镍基合金等更耐氧化和碱腐蚀,对于含腐蚀性离子(如氯离子、硫离子)的介质要避免普通不锈钢,双相不锈钢或内衬耐蚀非金属材料的复合管更合适(因双相不锈钢的两相结构使其耐氯离子腐蚀)。也要顾及工作温度与压力条件,像高温环境下(如石油炼制中输送高温油气)普通塑料管道(如聚乙烯管)会软化,就得选用耐高温金属材料(如铬钼合金钢)或特种工程塑料(如聚苯硫醚),低温环境中碳钢易脆断,液化天然气输送管道常采用奥氏体不锈钢或铝合金等低温韧性好的材料,高压环境要求材料强度足够,一般碳钢和低合金钢在一定壁厚下可承受部分高压,超高压情况(如高压加氢装置的管道)需用高强度合金钢并精确算壁厚保障耐压安全。

同时成本因素不容忽视,不仅要考虑材料采购成本,还要综合考量安装、维护成本及使用寿命等,像钛合金虽耐腐蚀性好但采购成本高应用受限,而玻璃钢管道采购成本低、安装方便,在对耐腐蚀性要求不特别高的化工场合,综合其长寿命和低维护成本是实惠之选,且要注重长期效益,不能只图初期材料价格低,若耐腐蚀性差、寿命短,后续频繁更换带来的损失可能远超选高品质耐蚀材料的投入。

此外,还需兼顾其他特殊要求,如有柔韧性需求(像管道需频繁弯曲变形的流程)可选用橡胶软管、塑料软管等,存在物料冲刷、磨损情况(如矿浆输送管道)选耐磨性好的陶瓷内衬复合管为宜,在食品、医药等对卫生要求严格的化工行业,要用符合食品级、药品级要求的不锈钢管(如316L不锈钢,它无毒、易清洁、耐腐蚀,能保障产品质量与介质不受污染),

从而确保既满足生产要求,又兼顾成本与效益等多方面情况。

4.2 化工管道材料耐腐蚀性能提升策略

在提升化工管道耐腐蚀性能方面,一方面通过改进材料的化学成分和微观结构来达成,比如研发新型的不锈钢合金配方并添加适量的钼、镍、氮等元素以增强不锈钢在特定腐蚀环境下的耐蚀能力,对于塑料管道材料可运用共聚、交联等改性手段优化分子链结构使其更致密,进而提高对腐蚀性介质的阻隔能力。同时采用先进的制造工艺确保材料质量均匀、无缺陷,像在铸造金属管道时严格控制熔炼温度、浇铸速度等参数,避免出现气孔、夹渣等缺陷,以此减少腐蚀起始点,提高整体耐腐蚀性。

另一方面要运用表面防护技术,表面涂层是常用方法之一,诸如在金属管道表面涂覆环氧漆、聚氨酯漆等有机涂层,或者热镀锌、镀铬等金属涂层来形成隔离层,阻止腐蚀性介质与管道基体接触,对于非金属管道也可通过等离子喷涂等技术在表面形成陶瓷涂层增强其耐磨、耐蚀性能,此外还可采用化学转化膜技术,比如对铝合金管道进行阳极氧化处理使其表面生成一层致密的氧化膜以提高其在特定环境下的耐蚀性,对碳钢管道进行磷化处理形成磷化膜起到一定的防锈蚀作用。

还要合理添加缓蚀剂,根据不同的腐蚀介质和管道材料选择合适的缓蚀剂,例如在含有酸性介质的水循环系统中添加有机膦酸盐类缓蚀剂,让其吸附在金属管道表面抑制金属的阳极溶解反应从而减缓腐蚀速度,在油气输送管道中使用咪唑啉类缓蚀剂有效防止管道内壁因油气中的酸性成分、水分等引起的腐蚀。而且缓蚀剂的添加量和使用方式也很关键,要依据介质流量、温度、浓度等因素精确控制,确保缓蚀效果的同时避免因过量添加造成成本增加或其他不良影响。

此外还需优化管道系统设计与维护,在管道设计阶段合理规划管道布局,避免出现死区、积液区等容易造成腐蚀的部位,尽量减少管道的弯头、变径等结构降低流体冲刷、应力集中带来的腐蚀风险,同时保证管道有良好的支撑和固定,防止因振动、位移等产生额外的应力腐蚀问题,定期对管道进行检测维护,采用无损检测技术(如超声检测、射线检测等)及时发现管道内部的腐蚀、裂纹等缺陷,对于发现的轻微腐蚀问题可通过修复涂层、补焊等方式进行处理,对于严重腐蚀、老化的管道则要及时进行更换,以此确保整个管道系统的安全可靠运行,持续保障化工生产的正常进行。

5 化工管道材料耐腐蚀性能案例分析

5.1 案例介绍

某制药企业在原料药生产中需输送丙酮溶剂,起初使用 PVC 管,6 个月后管道出现明显膨胀,影响生产。经分析,PVC 管不耐丙酮溶胀,无法满足使用要求。随后,企业选用江苏润和 β 晶型 PPH 管替代 PVC 管。 β 晶型 PPH 管通过分子链抗溶胀设计,能适应醇类、酮类等极性溶剂环境。该企业连续 3 年使用此管输送丙酮溶剂,经检测,管道尺寸变化率 $<0.5\%$,展现出良好的抗溶胀性,保证了生产的稳定运行。

5.2 耐腐蚀性能分析

β 晶型 PPH 管凭借引入 β 晶型成核剂,在熔融态下形成属于六方晶系且分子链排列致密、规整度高的均匀细腻的 β 晶型结构,这种致密结构使得腐蚀性介质难以渗透进管道内部,进而有效抵御了丙酮等有机溶剂的溶胀作用,成为其在输送丙酮溶剂时能保持良好尺寸稳定性的关键所在。而且该管化学稳定性良好,可在 pH0-14 的极端环境中长期使用,丙酮作为极性有机溶剂化学性质相对活泼,而 β 晶型 PPH 管的分子链与丙酮分子间相互作用力较弱,使得丙酮难以对其分子链结构造成破坏,不易发生溶胀、变形等现象,能够长时间维持管道的完整性和使用性能。同时其抗溶胀设计也很合理,通过分子链抗溶胀设计专门针对醇类、酮类等极性溶剂环境进行优化,在输送丙酮溶剂时,其分子链能够抵抗丙酮分子的侵入和扩散,有效降低介质对管道内壁的溶胀侵蚀,以致管道在连续 3 年输送丙酮溶剂的情况下,尺寸变化率 $<0.5\%$,远优于 PVC 管。

为进一步提升其耐腐蚀性能,继续深入研究分子链结构与耐腐蚀性能的关系,添加特殊的添加剂或采用新型成核剂来优化 β 晶型 PPH 管的分子结构,提高分子链的规整度和交联度,增强对更多种类腐蚀性介质的抵抗能力,像研发更高效的 β 晶型成核剂使分子链排列更紧密,减少分子间空隙,降低腐蚀性介质的渗透路径。还可运用表面改性技术,采用表面涂层技术在 β 晶型 PPH 管表面涂覆如聚四氟乙烯(PTFE)这类具有极其优异的化学稳定性和耐腐蚀性、几乎不与任何化学物质发生反应的薄膜,为管道提供额外防护层,以提高耐腐蚀性能。

此外也能借助等离子体处理等方法对管道表面进行改性,改变表面化学组成和结构,提升表面抗腐蚀能力,也可以开发多层复合结构的管道,将 β 晶型 PPH 管与其他高性能耐腐蚀材料复合使用,例如采用内衬 β 晶型 PPH 管、外层包裹高强度纤维增强材料的复合结构,既能充分发挥 β 晶型 PPH 管的耐腐蚀

性能,又能利用外层材料提高管道的机械强度和抗冲击性能,使其适用于更复杂、苛刻的化工工况。

同时合理添加抗氧剂 1010 和光稳定剂 770 等抗氧剂、光稳定剂等功能性助剂,有效抑制腐蚀性介质对管道的氧化攻击,提高管道在长期使用过程中的耐腐蚀性能,延长使用寿命。另外要精确控制 β 晶型 PPH 管的生产工艺参数,像熔融温度、冷却速度、成型压力等,确保管道形成均匀、致密的晶体结构,减少因生产工艺不当导致的内部缺陷,从而提高管道整体的耐腐蚀性能,例如通过精确控制冷却速度促进 β 晶型的均匀形成,避免出现晶体缺陷和应力集中,增强管道耐腐蚀能力,并且要依据具体的化工工况,如介质浓度、温度、压力等,合理选择 β 晶型 PPH 管的规格和型号,对于腐蚀性较强、温度和压力较高的工况,选择壁厚较大、等级较高的管道,以此提高管道的耐腐蚀性能和耐压性能,确保管道在长期运行过程中的安全性和稳定性。最后还要建立完善的管道检测与维护制度,定期对 β 晶型 PPH 管进行外观检查、尺寸测量、壁厚检测等,及时发现管道可能出现的腐蚀、磨损等问题并采取相应的修复或更换措施,同时对输送的介质进行监测,保证介质的成分和性质符合管道使用要求,避免因介质成分变化致使管道耐腐蚀性能下降。

6 总结

化工管道材料选择及其耐腐蚀性能是化工生产中不容忽视的关键环节,一方面要深入了解各类管道材料的特性,并依据介质、工况等多方面因素来进行科学选材,另一方面还需深入掌握耐腐蚀性能原理,且运用诸如优化材料结构、采用表面防护技术、合理添加缓蚀剂以及做好管道系统设计与维护等多种提升策略,这样才能有效增强管道的耐腐蚀性,进而延长其使用寿命,以此保障化工生产得以安全、高效地开展。

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] 金时理, 郑建军, 杨思依, 等. 化工管道中耐腐蚀蝶阀的材料应用与技术进展[J]. 阀门, 2025, (07): 804-808.
- [3] 李鹏. 石油化工管道安装工程中的质量问题及对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(12): 19-21.
- [4] 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.
- [5] 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.