

高温高压环境下化工工艺管道的腐蚀与防护技术研究

温钦光（新疆信达宏义技术服务有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘要：立足经济科技飞速发展背景，对能源的需求日益增加，进而对化工工艺管道运输安全性和稳定性提出更高的要求，尤其是天然气及石油行业的长输管道。然而，工艺管理经常工作在高温高压等复杂的工作环境，面临严重的腐蚀风险。本文通过探讨化工工艺管道的应用范围，分析做好腐蚀防护的必要性，进而提出详细的应对策略，显著降低工艺管道在高温高压环境下的腐蚀速度，显著提高管道使用寿命，以期为相关行业防腐设计提供借鉴。

关键词：高温高压；化工工艺管道；腐蚀防护；技术探讨

中图分类号：TQ050.9 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)022-0139-03

Research on Corrosion and Protection Technologies of Chemical Process Pipelines under High Temperature and High Pressure Conditions

Wen Qinguang (Xinjiang Xinda Hongyi Technical Service Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830000, China)

Abstract: In the context of rapid economic and technological development, the demand for energy is increasing, leading to higher requirements for the safety and stability of chemical process pipeline transportation, especially for long-distance pipelines in the natural gas and oil industries. However, process management often operates in complex environments such as high temperature and high pressure, facing severe corrosion risks. This paper explores the application scope of chemical process pipelines, analyzes the necessity of corrosion protection, and proposes detailed countermeasures to significantly reduce the corrosion rate of process pipelines under high temperature and high pressure conditions, thereby significantly extending their service life, aiming to provide references for anti-corrosion design in related industries.

Keywords: high temperature and high pressure; chemical process pipelines; corrosion protection; technical discussion

1 研究背景

1.1 化工工艺管道概述

化工工艺管道担负着输送各种气体和液体等物质的任务，是整个化学行业的“血管”。它的材料种类繁多，从碳钢、不锈钢等金属到聚四氟乙烯等非金属材料。管道的尺寸根据不同的制造要求而不同，从数毫米到数米不等，工作气压从常压跨越到几百兆帕，工作温度从极低到极高，甚至到1000℃左右。在复杂的化工过程中，多条管道相连，构成巨大而精确的运输网络，将原料、中间产物和成品运输到各反应设备和存储设备，是保证化学工业持续和稳定的关键环节，其可靠性和安全性关系到企业的经济和社会效益。

1.2 腐蚀与防护技术必要性

化工工艺管道的腐蚀已成为困扰化学行业的重要课题。在高温高压的条件下，材料的腐蚀问题更加严重。腐蚀不仅造成管道壁厚减薄、穿孔等实体损伤，而且可能引起火灾、爆炸、有毒、危险化学品等重大安全事故。根据有关资料，我国每年由于石油和天然气输送管道的腐蚀所引起的巨大的经济损失数以百亿元计的。另外，由于管道的磨损，造成产量的降低，同时也加大设备的维护与更新费用。因此，相关行业必须采取相应的防护措施，以保证管道的正常输送。采

取适当的防护技术，可以大幅度地改善管道的防腐能力，使管道的工作寿命明显增加，维护与替换的数量也显著减少，进而达到节约制造费用、增加企业效益的目的。另外，良好的保护措施，也能有效地预防由于管道的腐蚀而引起的各种安全事件，对人身和周围的环境都起到保护作用。

2 高温高压环境下化工工艺管道的腐蚀与防护技术探讨

2.1 涂层防护，构建坚固的物理屏障

复合涂层防护技术，是指在管道外表涂敷多种功能性涂料，从而达到改善管道防腐效果的保护措施。基于高温高压工作条件，该技术的应用具备显著的优势。在基层涂料中，常用的是具有抗热性能的陶瓷涂料，比如氧化铝。该涂料在使用过程中，可以防止与管道表面的高温介质发生直接接触，从而提高管道的耐高温、耐腐蚀性。其涂层厚度达到0.5–1mm，能耐高温达到1200℃。

实际使用结果发现，在较高温度下，使用氧化铝陶瓷涂料对管道进行表面涂层，可以使管道锈蚀速度下降40%左右。而在过渡层涂料方面，选择抗腐蚀性较强的有机涂料，比如环氧树脂涂料。结果发现，涂料与基层陶瓷涂料具有良好的黏结性能，有效防止

腐蚀性介质的渗入。其具有 0.3–0.5mm 的厚度，能很好地抵御各种化学物质的侵蚀。根据高温高压含酸性介质环境下进行模拟，环氧树脂涂料能有效地减少近 30% 的腐蚀速度。最外面的涂层通常是聚四氟乙烯等抗磨损保护涂料，该涂料既有很好的抗磨损能力，又对输送等造成的损害起到良好的保护作用。聚四氟乙烯涂料具有良好的耐腐蚀性能，能在较低的温度和压力下保持较好的耐磨性能，并能保证涂层的整体性能。利用多层涂层的协同效应，实现化工工艺管道在高温高压条件下的腐蚀速度下降 70% 左右，大幅提升管道的防腐能力与使用寿命。

以某化工企业为例，对高温高压下蒸汽输送管道（工作温度在 350℃、压力在 10MPa）进行陶瓷涂层防护处理。管道在使用过程中，首先对其进行喷砂除锈，使管道表面粗糙度达 Ra6.3–12.5um，以提高管道与涂层之间的黏结强度。再利用等离子喷涂技术对氧化铝陶瓷粉体进行高温高压喷雾，在管道内壁上形成 0.3–0.5mm 的涂层。结果发现，该涂层的表面硬度达到 HV1200–1500，粘接强度超过 50MPa。经过 3 年后试验，发现该涂层基本完好，基质腐蚀速度由 0.2mm/a 下降到 0.02mm/a，具有明显的防护作用。

2.2 缓蚀剂应用，精准调控腐蚀反应

缓蚀剂作为有效、低成本的防腐技术，已成为工业行业普遍关注的热点技术。该技术可通过特殊的物化机理，在金属表层生成保护膜或改变其电化学性质，进而实现对腐蚀反应进行精确控制和控制。尤其是在高温高压和高度腐蚀的工作条件下，使用缓蚀剂具有重要意义。

以高温高压酸性介质输送化工工艺管道系统为例，行业多数选择咪唑类缓蚀剂，因其优良的抗腐蚀能力和广阔的应用前景，从而被工业领域所青睐。该类缓蚀剂既可在材料表面生成紧密的保护层，还可以将腐蚀性介质阻挡在外，又可利用其独特的分子结构，参与调控材料的电化学行为，从而大幅减缓其腐蚀速度。通过对极端环境（高浓度硫化氢和二氧化碳的酸性介质）的模拟实验发现，在高温达到 150℃，压力 8MPa 时，加入 0.5% 的咪唑啉缓蚀剂后，碳钢样品的耐蚀性能由原来的 $1.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 大幅降低到 $0.05\text{mA}/\text{cm}^2$ ，显示出良好的抗腐蚀性。

但缓蚀剂的使用不能“一加就灵”，必须结合具体工作条件，对其进行精细调节。在使用时，需要从化学组成、温度、压力、流速等方面进行全面的分析，并结合专用的仿真软件和现场试验，准确地确定合适的缓蚀剂用量。例如：针对油气田的集输管道系统，面临较为复杂且极端的介质环境，如硫化氢和二氧化

碳，管道输送温度必须保持 120℃，压力控制在 6MPa 的工况下，相关人员提前采用高精度的防腐预报程序，针对油气田开展详细的模拟实验。结果发现，在缓蚀剂的用量为 0.35% 时，缓蚀性能良好。通过本项目的研究，实现管道两年的平稳运行，将管道的腐蚀速度由 $0.18\text{mm}/\text{a}$ 大幅下降到 $0.03\text{mm}/\text{a}$ ，明显提高管道的服务年限，也为石油开采的安全和效率提供有力的保障。

2.3 选材优化，从源头提升抗蚀能力

近年来，材料研究取得突破性进展，为化工工艺管道在高温高压等恶劣条件下的防腐蚀问题提供新的解决方案。比如碳化硅陶瓷材料在高温下表现出优良的抗腐蚀性。其具有较高的硬度和耐磨性，可以减少在较高温度和压力下对颗粒的冲击和磨损。碳化硅陶瓷在强酸条件下的腐蚀速度非常慢，只有常规材料的 $1/100$ 。另外，碳化硅陶瓷还具备较高的耐热性能，在快速的温差下不容易出现热裂纹。

利用碳化硅陶瓷作为管道或在管材上加衬，可以有效地改善管道的防腐效果，延长其使用寿命。实践中，某家化工企业已将该工艺用于高温高压、强酸的管道，3 年来的使用表明，管道没有发生严重的腐蚀与磨蚀。另外，耐高温耐腐蚀涂层也有很大的发展潜力。其中，以纳米二氧化钛为主要填充物，可以改善涂层的附着力、耐热性和耐蚀性。比如采用纳米二氧化钛作为防护涂层，可使管道在高温高压下具有较大的硬度、耐磨性能，并可有效抵御腐蚀性物质的侵蚀。在室内模拟高温高压含氯离子介质实验条件下，采用以上的涂层材料，可以减少管道的腐蚀速度约 60%。这种新型材料的应用，将为化工工艺管道在高温高压条件下的抗腐蚀性提供更多的技术支持，以此提高管道的使用年限。

以某海水淡化企业为例，由于使用的是常规的不锈钢管道，其在使用过程中易出现点蚀和应力腐蚀裂纹。采用新型 2205 型双相不锈钢，其铬、钼、氮等元素的最佳配比，使其耐点蚀等效（PREN）达到 40–45，其腐蚀速度小于 $0.1–0.2\text{mm}/\text{a}$ ，显著提高管道的使用稳定性。

2.4 阴极保护，提供电化学防护盾

阴极保护是指在被保护的金属管道上，加用电流或是可以连接牺牲阳极，以达到防止其腐蚀的目的。面对日益严峻的工作条件，必须对管道进行改进与革新。外加电流型阴极保护，利用直流电对管道进行外加电流的方式，从而对管道进行保护。

为了保证阴极安全可靠地工作，必须选用适当的阳极材料及电解液。比如使用含缓蚀剂的石墨负极材料及电解液，可在高温、高压、咸水等条件下，对管

道的腐蚀速度进行控制。通过对阳极外形及排列进行适当的优化，能够达到对管道进行均一的防护。结果发现，通过对该体系进行的改进，可以将管道的腐蚀速度减少 50% 左右。

采用牺牲阳极阴极技术，主要采用与被防护介质相比具有较高反应活性的材料，对管道进行阴极保护。在使用过程中，必须选用合适的阳极材料，如镁合金阳极、锌合金负极等。镁合金阳极在高温条件下，其极压高，载流能力大，可为管道输送强大的防护电流。实际使用发现，锌合金阳极具有很好的耐腐蚀性能，特别是在含有 H₂S 和其他腐蚀介质的情况下。适当选取牺牲阳极的尺寸及数目，可以对管道起到良好的防护作用。实践发现，在含有 H₂S 的高温高压的介质中，牺牲阳极的阴极防护效果显著，可提高管道的使用寿命达 30%。

以温度 80℃、压力在 7MPa 的长输高压天然气管道为例，通常需要使用牺牲阳极进行阴极保护。选择具有 -1.1V 的锌合金阳极（以硫酸铜为基准），其理论电容超过 820A · h/kg。根据管道长度和土壤电阻率等相关因素，提出合理的设计方案。在某条 10km 的管道上，土层的电阻率为 10Ω · m。经计算该管道的阳极间隔为 50m，埋置后管道的沿程电压保持在 -0.85V--1.2V，满足阴极保护的需要，对管道的外壁进行防腐处理，经检测发现，管道外壁腐蚀速度由 0.15mm/a 下降到可以忽略的程度。

2.5 智能监测与维护技术在腐蚀防护中的集成应用

化工工艺管道在高温高压条件下，其腐蚀呈现出动态演变的特点。综合运用智能化监控和维修方法，对管道进行实时检测和维修非常必要。管道内装有多种传感器，实现对管道温度、压力、管壁厚度、腐蚀速度等信息的在线监控。比如利用超声测量管壁厚度的传感器，实现了对管壁厚度的实时监控。如果壁厚小于规定的安全数值，则可产生报警信号，提示维修人员及时检修。

还可以结合管道腐蚀速度、温度等传感技术，实现对管道的锈蚀状态监测与预报。根据现场实测结果，对管道的残余寿命进行预测，为管道的维修与更新奠定基础。对于维修，通过对监控信息的分析，实现了维修方案的自动生成。比如在检测到管道的某个位置出现快速的锈蚀，该系统就会向用户建议进行焊缝或者镀层等部分修补技术。

还可以通过采用智能化维修方法，实现维修的实时监测，保证维修的质量和安全性。以某大型化工企业为例，其应用智能监控与维修一体化体系，实现对管道进行在线监控与智能化维修，以降低管道腐蚀速

度，从而达到降低管道腐蚀事故的发生，确保管道的安全可靠运行。智能监测技术的应用，可为化工工艺管道在高温高压条件下的防腐保护问题开辟崭新的途径，具有广泛的应用前景，不仅保证管道的安全性和可靠性，也可明显降低维护费用和生产中断的损失，为同类化工行业的管道防腐处理提供技术指导。

3 结语

综上，化工工艺管道长时间处于高温高压条件下，面临严峻的腐蚀风险，这便需要行业从多方面开展防腐处理，从而保障管道的正确使用。文章提出从涂层防护、阴极防护技术入手，推荐使用阻蚀剂以及优化材料，再结合智能化的检测技术应用，各种防护技术结合，充分发挥其独特的优势，致力于构建完整的保护系统，能够从多个层面实现对管道材料的协同抑制，从而大幅提高其防护效能。未来，随着化工行业朝着更加高效和环保的方向发展，工艺管道所面临的环境问题也会越来越复杂，需要不断进行防护方法的探讨，同时注重多个学科的交叉，通过结合材料科学、电化学、表面工程等学科的最新研究成果，进一步提高防护水平，从而保障化工工艺管道的安全性和可靠性，旨在促进化工行业的高质量、可持续发展。

参考文献：

- [1] 孔繁刚 . 化工工艺管道安装过程中的质量控制措施 [J]. 设备管理与维修 ,2024(16):4-6.
- [2] 熊伟 . 石油化工工艺管道的腐蚀及防护技术分析 [J]. 中国设备工程 ,2024(16):107-109.
- [3] 樊兴 . 石油化工工艺管道的腐蚀及防护技术应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2024,44(10):157-159.
- [4] 雷建联 . 石油化工工艺管道安装工程施工管理 中的常见问题研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2023,43(01):75-77.
- [5] 张建川 , 范诗刚 . 石油化工工艺管道的腐蚀及防护 技术应用 [J]. 化工管理 ,2022(26):129-131.
- [6] 王建军 , 李强 , 张华 . 高温高压环境下金属材料的 腐蚀行为与防护技术研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护 技术 ,2023,35(2):145-152.
- [7] 赵明远 , 等 . 超疏水涂层在高温高压管道防腐中 的应用研究 [J]. 表面技术 ,2023,52(6):1-10.
- [8] 赵健 , 孙明先 , 李晓刚 . 高温高压环境下化工管道腐 蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报 ,2023,41(3):289-296.
- [9] 董泽华 , 郭兴蓬 . 阴极保护技术在化工管道中的优 化设计与实践 [J]. 材料保护 ,2024,54(3):89-95.

作者简介：

温钦光 (1994-) , 男 , 汉族 , 新疆乌苏人 , 本科 , 中级工程师 , 研究方向 : 化工。