

化工管道腐蚀机理与防护技术研究

杨晓武 胡孙达 林 浩 (温州市特种设备检测科学研究院, 浙江 温州 325000)

摘 要: 化工管道是化工生产原料与成品输送的核心设施, 长期处于酸碱、腐蚀性气体等复杂环境, 易发生化学、电化学及土壤腐蚀, 导致管道失效, 引发经济损失与安全事故。当前, 针对腐蚀机理的研究已明确不同腐蚀类型的作用规律, 防护技术也形成多元体系。因此, 本文从腐蚀给国民经济带来的影响出发, 通过分析常见的化工管道腐蚀机理, 提出了电化学防护技术要点和优化策略。

关键词: 化工管道; 腐蚀机理; 防护技术

中图分类号: TQ050.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0159-03

Research on Corrosion Mechanisms and Protection Technologies for Chemical Pipelines

Yang Xiaowu, Hu Sunda, Lin Hao (Wenzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Wenzhou Zhejiang 325000, China)

Abstract: Chemical pipelines are core facilities for transporting raw materials and finished products in chemical production. Long-term exposure to complex environments such as acids, alkalis, and corrosive gases makes them susceptible to chemical, electrochemical, and soil corrosion, leading to pipeline failures, economic losses, and safety incidents. Current research on corrosion mechanisms has clarified the principles of different corrosion types, and protection technologies have formed a diversified system. Therefore, starting from the impact of corrosion on the national economy, this paper analyzes common corrosion mechanisms of chemical pipelines and proposes key points and optimization strategies for electrochemical protection technologies.

Keywords: chemical pipelines; corrosion mechanisms; protection technologies

化工产业作为国民经济的支柱产业, 在能源转化、材料合成及民生产品生产等领域发挥着不可替代的作用, 而化工管道作为连接各生产单元的“血管”, 承担着输送各类腐蚀性介质的重要任务。近年来, 随着化工生产规模的扩大与工艺复杂度的提升, 管道所面临的腐蚀环境愈发恶劣, 进一步加剧了腐蚀风险。

1 腐蚀给国民经济带来的影响

材料由于外部环境影响出现性能劣变, 导致组织结构破坏的现象就是腐蚀。根据作用机理不同, 可以归纳为化学腐蚀和电化学腐蚀。对于受到腐蚀较为严重的一些石油化工行业来说, 油气管道系统安全运行以及经济成本的有效控制就显得尤为重要。油气管道是输送能源物质的重要平台和基础设施, 但当管道遭到腐蚀破坏, 不但资源会遭到浪费, 还会导致设备维修更换、停产损失、环境污染等一系列损失。^[1]

表 1 一部分国家的年腐蚀造成的经济损失

国家名称	年份	年腐蚀造成的经济损失	占国民生产总值 / %
英国	1959—1969 年	6 亿 ~ 135 亿英镑	3.5
美国	1998 年	2757 亿美元	4.9
日本	1974—1976 年	25509 亿日元	2~3
德国	1968—1969 年	190 亿马克	3~3.5
中国 (大陆)	2020 年	5019 亿元人民币	6~7

由表 1 可知, 全世界钢铁因腐蚀而报废的速度非常之快, 平均每分钟有一吨钢铁因为腐蚀而失去了功能, 每六分钟就有四吨钢铁转化成铁锈, 这都会损耗原材料, 降低设备使用寿命, 导致生产成本提高。此外, 腐蚀造成的经济损失并非仅局限于材料报废、设备维修等直接支出, 其间接损失往往远超直接损失, 例如因设备腐蚀故障会导致生产流程中断, 订单流失; 因腐蚀引发的安全事故还可能造成人员伤亡与企业信誉受损, 这些间接损失对企业经营与行业发展的冲击更为深远。

2 常见腐蚀机理的分析

2.1 化学腐蚀的机理

化学腐蚀是金属与一定环境中的介质发生化学作用后引起金属自身的结构破坏或者性能降低的一种腐蚀方式。在工业生产和设施的日常运行中, 金属设备都暴露在各种环境中, 其中潮湿环境就是一种容易导致化学腐蚀产生的典型情况。金属表面由于受到潮湿度的影响而不断地从空气中吸附水分子, 并在表面形成一层水膜, 这层水膜作为金属产生进一步腐蚀的物质媒介。在金属的内部一般存在不同电位的金属, 在水膜的作用之下, 这些金属本身就会转变为原电池结构的负极。与此同时, 水膜中含有的氢离子、氧离子等各类离子会获取电子, 发生还原反应。这两个反应

表 2 — 化学腐蚀的机

水膜条件	酸性介质	弱酸性或中性介质
负极反应	$M - ne \rightarrow M^{n+}$	$M - ne \rightarrow M^{n+}$
正极反应	$H^{+} + ne \rightarrow H_2 \uparrow$	$4O_2 + 2H_2O + ne \rightarrow nOH^{-}$

过程同步进行，共同推动腐蚀反应不断向金属材料内部延伸，使得材料表面的损坏范围逐步扩大，详见表2。^[2]

根据表 2 的数据可以看出，不论与金属反应的是哪一种物质，每次参与反应的都是金属极，也就是始终是金属进行氧化反应，当金属材料中原子不断地形成离子而脱离出金属表面的时候，材料的质量越来越少，内部也逐渐出现一些缺损，金属的力学性能也会随之降低，如强度和韧性等。这种金属自身持续消耗的过程，正是化学腐蚀作用于金属材料的核心机理，也是金属材料在潮湿环境中出现锈蚀、剥落等腐蚀现象的根本原因。

2.2 电化学腐蚀的机理

所谓电化学腐蚀是指：在环境介质的影响和外加电流的作用下，由金属材料间电位差差异所产生的局部微电池作用下的金属损耗和破坏的现象。如果金属埋在潮湿或含有腐蚀性物质的土壤中，或者接触到含酸性物质较多的电解质溶液，在这样的情况下外来的微电流能够使电解质溶液与金属体形成电解池体系，构成电化学腐蚀的充分条件。图 1 是一个典型的组成电化学腐蚀的电解池体系内发生的电极反应过程，在其中金属可以受到外加微电流驱动释放出电子发生氧化反应的同时，溶液里的一小部分阳离子和其他一些物质同时获得电子发生还原反应，而这样的两个相反的过程同时并行的推进了电化学腐蚀的进行，其主要包括两个步骤。^[3]

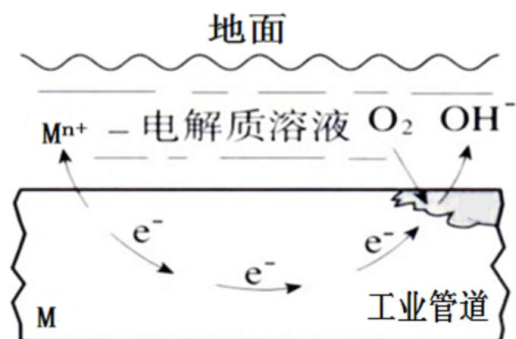


图 1 — 电化学腐蚀示意图

第一步是阳极反应，金属原子化合价上升、发生氧化反应，同时释放出自由电子，反应方程式表示为 $Me \rightarrow Me^{n+} + ne$ ；从阳极释放的自由电子顺着金属材料本身流向阴极，就是电子定向移动的过程。如果上述

电子传递过程受阻，那么下一步反应就无法进行下去。第二步是阴极反应，电解质溶液中存在的一些物质或者离子，吸附从阳极传输来的电子发生还原反应，从而使到达的电子及时消失掉，防止电子聚集在阳极处使阳极反应受到电子堆积影响不能继续，保证整个腐蚀过程可以持续不断地运行。

2.3 其他腐蚀的机理

其他腐蚀还包括土壤腐蚀等。比如管道在地下埋设时，由于土壤的复杂体系，组成动态变化，导致腐蚀环境不稳定，进而加剧管道损伤。土壤中的化肥残留、工业污水等，这些物质会增强土壤的导电性，加速管道表面的电化学腐蚀反应。土壤孔隙中的氧气、二氧化碳，还微生物代谢产生硫化氢气体，硫化氢会与管道金属反应生成硫化物，导致腐蚀速率大幅提升。综合上述因素，结合管道本身结构及材质不均等问题，加上外界温度、应力、杂散电流等影响后，最终引发腐蚀破坏。^[4]

3 电化学防护技术的理论分析

3.1 阴极保护法

阴极保护法是基于电化学腐蚀机理开发的核心防护技术，其设计逻辑源于电化学腐蚀过程中电极的不同反应状态。在电化学腐蚀作用下，阳极的金属会因电位特性发生腐蚀逐渐损坏，而阴极部分则能保持结构完好。基于这一规律，阴极保护法通过外部技术手段调整金属材料的电极电位，使被保护的金属材料在与外部环境接触时呈现负电位，从而成为电路中的阴极得到保护。同时，让另一部分金属（通常选用废旧金属）作为阳极，连接相应电极后发生氧化反应被腐蚀，以此实现对目标金属的防护。阴极保护法主要包含强制电流阴极保护法与牺牲阳极阴极保护法两类，二者在技术实现方式上存在差异，但核心目标均为通过调整电极电位保护金属材料。

3.1.1 强制电流阴极保护法

强制电流阴极保护亦称外加电流阴极保护，该方法主要是采用适当的仪器设备，在待保护结构物外加一直流电源，组成保护电路，其原理是将直流电源正极与辅助阳极相连，负极接需被保护的管道，如图 2 所示。通过这种电路设计，被保护的管段就成为阴极，不会发生氧化腐蚀；而作为阳极接入电源正极的辅助

阳极多采用废旧金属,经过电流的作用作为阳极被氧化腐蚀,从而牺牲了自己,达到保护管段的目的。

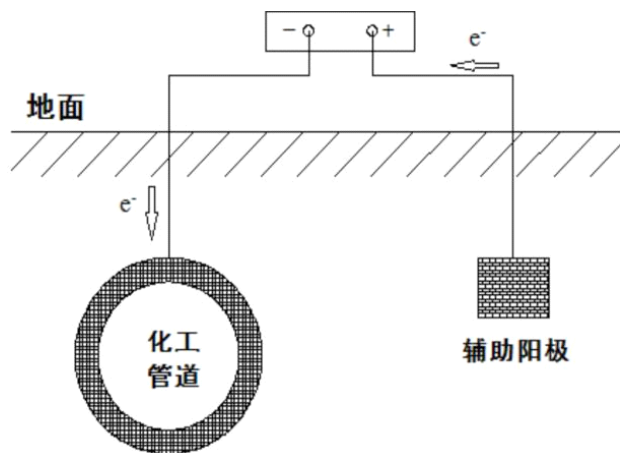


图 2- 外加电流阴极保护原理示意图

3.1.2 牺牲阳极阴极保护法

牺牲阳极阴极保护主要是利用材料间的电极电位差计达到材料防腐的目的,其基本原理是选用一种比要保护的金属或合金更活泼、更容易发生氧化反应的金属做阳极,牺牲掉作为原电池负极的材料(这个材料就是牺牲阳极)。具体做法是将这种外加材料与要保护的金属相连,并且通常是采用锌、镁或铝等较活泼金属。如图 3 所示,此结构的电极电位低于被保护的管件材质电位,具有容易发生氧化反应的特点,将作为牺牲阳极,而被保护管件材料处于阴极区,并没有失去电子发生氧化反应,从而得到保护。^[5]

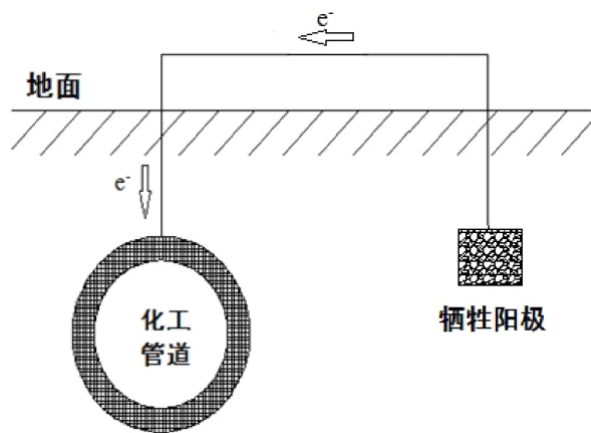


图 3- 牺牲阳极阴极保护原理示意图

3.2 阳极保护法

基于金属阳极钝化原理的阳极保护法是以金属材料具有可钝化的特性和外加电流对金属阳极作用不同为技术核心。在外加电流的作用下,大部分金属很容易遭到破坏,而对于可以钝化的金属,在达到一定程度的外加电流作用下,可以使金属表面钝化,而起到保护效果。阳极保护法就是利用这种特殊的电化学性质,在调控外部环境下让金属处于比较容易腐蚀的活

化状态转变为不容易被腐蚀的稳定钝化状态,阻止或者减缓腐蚀的进行,为金属设备提供长期有效的防护。

4 腐蚀防护技术的优化改进

4.1 阴极保护与涂层联合保护

阴极保护和涂层联合保护是当前腐蚀防护技术优化改进的重要手段,以两者的相互协调作为核心技术优势,可以提升整个防腐体系效能。涂层是一种常见于金属外层的一种起到隔离保护作用的防腐蚀措施,主要是利用物理隔离的方式防止腐蚀介质与金属基体的接触,但后期因使用造成的磨损等问题会导致一些气孔和空隙或者是发生漏涂的现象,因此就需要用到阴极保护的方法来防止腐蚀介质对金属的侵蚀。

4.2 腐蚀检测技术

腐蚀监测技术作为腐蚀防护技术优化改进体系衔接防腐措施和应急处置的技术之一,发挥着至关重要的作用。管道及其他金属设备出现腐蚀现象之前,要靠此前的预防措施来避免,若腐蚀已经产生,对腐蚀情况进行精确的检测与监测就可以准确判断腐蚀发展的态势,只有这样才能对设备的安全运转起到有效地防护,避免造成事故。最简单的检测方式,主要是现场观察、挂片及警戒孔检测等方式,比如以肉眼观测设备腐蚀状况、依据挂片样本腐蚀结果或者警戒孔腐蚀状况进行检测的方式获取设备腐蚀的基底信息,并以此来对设备腐蚀情况进行初步判定。或是以设备—介质之间电位变化、电化学阻抗为依据的电化学法实现对腐蚀过程的特性进行识别。

5 结语

化工管道主要面临化学、电化学及土壤腐蚀,且常叠加作用加速失效。现有防护技术中,阴极与阳极保护可针对性抑制电化学腐蚀,二者与涂层联合能弥补单一技术缺陷,监测技术则实现风险预警。未来需推动多技术协同,结合新材料与智能化手段,进一步提升管道防护水平,保障化工生产安全。

参考文献:

- [1] 江国华,李华萍,关超,等.化工压力管道腐蚀损伤的无损检测方法研究与应用[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(03):89-91.
- [2] 张蒲根.化工装置用消防管道腐蚀特点及快速评估防治[J].全面腐蚀控制,2023,37(01):105-107.
- [3] 徐艳丽.某化工装置管道腐蚀及防腐分析[J].化工设计通讯,2022,48(06):84-85.
- [4] 任鹏.石油化工企业工艺管道腐蚀及防护[J].中国石油和化工标准与质量,2022,38(15):155-156.
- [5] 张成伟.化工生产管道腐蚀的对策分析[J].化工设计通讯,2022,43(08):42.