

油气储运设施腐蚀防护技术与材料研究进展

吕君栋¹ 姚 滨²

1. 国家管网集团储运技术发展有限公司沈阳分公司 辽宁 沈阳 110179

2. 国家管网集团北方管道有限责任公司郑州输油气分公司 河南 郑州 450000

摘 要: 随着油气资源的开发与利用日益增加, 油气储运设施的腐蚀防护问题已成为确保能源安全输送的关键。近年来, 腐蚀防护技术与材料研究取得了显著进展。科研人员不断探索新型防腐涂层、耐腐蚀材料以及高效腐蚀监测技术, 旨在提高油气储运设施的耐久性和安全性。这些技术与材料的应用, 不仅延长了设施使用寿命, 还降低了维护成本, 为油气行业的可持续发展提供了有力支撑。

关键词: 油气储运设施; 腐蚀防护技术; 材料研究进展

引言: 在能源领域中, 油气储运设施的安全与稳定至关重要。然而, 腐蚀问题一直是影响设施寿命和运行安全的重要因素。随着油气资源需求的不断增长, 如何有效防护油气储运设施的腐蚀成为亟待解决的问题。近年来, 科研人员不断探索新的腐蚀防护技术和材料, 以期提高设施的耐久性, 减少安全事故的发生。本文综述了油气储运设施腐蚀防护技术与材料的最新研究进展, 为相关领域的发展提供了参考和借鉴。

1 油气储运设施腐蚀的机理与分类

1.1 腐蚀的机理

(1) 电化学腐蚀: 这是指金属表面与离子导电的介质(电解质)发生电化学反应而引起的破坏。在油气储运设施中, 由于管道内常含有水分、盐分等电解质, 金属管道与这些介质接触时, 会发生电化学腐蚀。这种腐蚀的特点是在作用过程中有电流产生, 是最普通也最为常见的腐蚀形式。(2) 化学腐蚀: 化学腐蚀是因金属表面与非电解质直接发生纯化学作用而引起的破坏或变质。其特点是在作用过程中没有电流产生。在油气储运设施中, 金属管道在干燥或高温气体中(如氧气切割和焊接时产生的氧化皮)或在非电解质溶液(如某些有机液体)中, 都可能发生化学腐蚀。(3) 微生物腐蚀: 微生物通过中间介质或直接与金属间发生电子传递, 从而引发腐蚀。微生物腐蚀在油气储运设施中也不容忽视, 特别是在土壤和海水等环境中, 微生物的活动可能导致金属管道的加速腐蚀。

1.2 腐蚀的分类

(1) 按腐蚀环境分类: 根据金属材料所处的周围环境, 腐蚀可分为自然环境下的腐蚀和工业介质中的腐蚀。自然环境下的腐蚀包括大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等; 工业介质中的腐蚀则包括酸、碱、盐及有机溶

液中的腐蚀, 以及高温高压水中的腐蚀等。(2) 按腐蚀形态分类: 腐蚀形态主要分为全面腐蚀和局部腐蚀。全面腐蚀是指腐蚀分布在整個金属表面上, 可以是均匀的, 也可以是不均匀的。而局部腐蚀则是指腐蚀作用仅局限在一定的区域, 如点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀等。局部腐蚀虽然面积小, 但往往由于腐蚀深度大、发展速度快, 因此其危害性往往更大。

2 油气储运设施腐蚀监测与评估技术

2.1 腐蚀监测技术

(1) 视觉检测: 这是最直接、最基础的检测方法。它依赖于检测人员的经验和专业知识, 通过观察金属表面的颜色和形态变化来识别腐蚀迹象。然而, 这种方法受限于人的主观判断, 难以发现潜在的或微小的腐蚀缺陷。(2) 超声波检测: 超声波检测利用超声波在金属中的传播特性, 通过测量反射波、透射波或散射波的变化来检测材料的内部缺陷和腐蚀程度。这种方法具有非破坏性、检测范围广、灵敏度高等优点, 但需要专业的设备和操作人员。(3) 磁粉检测: 磁粉检测适用于铁磁性材料的表面和近表面缺陷检测。当材料被磁化时, 缺陷处会形成漏磁场, 吸引磁粉形成磁痕, 从而揭示缺陷的位置和形状。但该方法对材料类型有限制, 且无法检测非铁磁性材料。(4) 涡流检测: 涡流检测利用电磁感应原理, 通过测量涡流的变化来检测材料的电导率、磁导率和几何形状的变化, 从而间接评估腐蚀程度。这种方法适用于金属管道和容器的检测, 但易受材料属性、检测频率和探头与材料之间距离等因素的影响^[1]。

2.2 腐蚀评估与监测系统

(1) 传感器的应用: 各种传感器, 如温度传感器、湿度传感器、pH值传感器等, 被用于实时监测油气储运设施的环境条件, 为腐蚀评估提供数据支持。(2) 数

据采集与处理设备：这些设备负责收集传感器数据，并进行初步处理和分析，以便及时发现腐蚀迹象。（3）智能化监测系统的发展：随着人工智能和大数据技术的兴起，智能化监测系统能够自动分析数据、预测腐蚀趋势，并提供维护建议。这大大提高了腐蚀管理的效率和准确性。

2.3 监测技术的优缺点分析

在精度与可靠性方面，各种监测技术都有其独特的优势，但也存在一定的局限性。例如，视觉检测虽然直观，但受限于人的主观性和检测范围；超声波检测虽然灵敏度高，但对操作人员的技术要求较高。在操作复杂度与成本方面，一些高端技术如智能化监测系统虽然能够提供全面的腐蚀评估，但其建设和维护成本也相对较高。因此，在选择监测技术时，需要根据油气储运设施的具体情况、检测需求和成本预算进行综合考虑。

3 油气储运设施腐蚀防护技术

3.1 传统腐蚀防护技术

（1）防腐涂层技术。防腐涂层技术是油气储运设施最常用的防腐手段。通过在设施表面涂覆一层或多层防腐涂料，形成致密的隔离层，阻止腐蚀介质与金属的直接接触。常见的防腐涂料有环氧涂料和聚氨酯涂料等。环氧涂料具有优异的附着力和耐化学品性，适用于多种环境条件下的防腐保护。聚氨酯涂料则以其良好的耐候性和耐磨性，特别适用于户外设施和需要承受一定机械应力的部位。然而，涂层技术也存在老化、剥落等潜在问题，需要定期检查和维护。（2）防腐材料的应用。选择具有优良耐腐蚀性的材料是从源头上解决腐蚀问题的关键。不锈钢和镍基合金因其优异的抗腐蚀性能，在油气储运设施中得到广泛应用。不锈钢以其高强度、良好的塑性和焊接性，成为许多关键部件的首选材料。镍基合金则因其极高的耐腐蚀性、高温强度和良好的机械性能，在极端腐蚀环境下表现尤为出色。然而，这些高性能材料通常成本较高，限制了其在部分项目中的应用^[2]。

（3）电化学防护技术。电化学防护技术利用电化学原理，通过改变金属的电位来抑制腐蚀。阴极保护和阳极保护是两种常见的电化学防护方法。阴极保护通过向被保护金属施加阴极电流，使其电位负于腐蚀电位，从而减缓腐蚀速率。阳极保护则是将被保护金属作为阳极进行极化，使其表面形成一层致密的钝化膜，阻止腐蚀的进一步发展。电化学防护技术具有效果好、维护简单的优点，但需要定期检测电位和电流，以确保系统的正常运行。

3.2 新型腐蚀防护技术

（1）纳米技术在防腐中的应用。纳米技术通过将纳

米粒子添加到涂层材料中，提高涂层的致密性和耐腐蚀性。纳米粒子的引入可以填补涂层中的微孔和缺陷，形成更加致密的保护层。同时，纳米粒子还能与腐蚀介质发生化学反应，生成具有保护作用的化合物，进一步延缓腐蚀过程。然而，纳米粒子的分散性和稳定性仍需进一步优化，以确保涂层性能的长期稳定。（2）智能防腐技术。智能防腐技术将传感器、执行器和控制系统相结合，实现了对腐蚀过程的实时监测和自动修复。自修复材料是一种典型的智能防腐材料，它能够在腐蚀损伤发生后自动释放修复剂，填补损伤部位，恢复材料的完整性和防腐性能。智能传感器则能够实时监测腐蚀介质的浓度、温度和压力等参数，为腐蚀评估和维护提供数据支持。然而，智能防腐技术的成本较高，且技术成熟度有待提高。（3）绿色环保防腐技术。随着环保意识的增强，绿色环保防腐技术逐渐受到重视。生物和植物提取物防腐材料以其天然、可再生和无污染的特点，成为替代传统化学防腐剂的潜力候选。这些天然提取物中的活性成分能够与金属离子结合，形成保护层，阻止腐蚀的进一步发展。同时，它们还可以与腐蚀介质发生反应，降低腐蚀速率。然而，天然提取物的防腐性能往往不如化学防腐剂稳定，且其提取和纯化过程也可能产生一定的环境影响^[3]。

3.3 防护技术的对比分析

（1）防护效果与持久性。在防护效果与持久性方面，传统腐蚀防护技术和新型腐蚀防护技术各有优势。传统技术如防腐涂层和电化学防护已经经过了长时间的应用考验，具有成熟的技术基础和广泛的应用经验。它们能够在一定程度上减缓金属的腐蚀速率，延长设施的使用寿命。新型技术如纳米防腐和智能防腐则在防护效果和持久性方面展现出更大的潜力，特别是纳米技术的引入显著提高了涂层的致密性和耐腐蚀性，使得涂层能够在更恶劣的环境下保持长时间的防护效果。智能防腐技术则通过实时监测和自动修复功能，进一步降低了因腐蚀导致的设施故障风险。（2）环境友好性与经济性。在环境友好性与经济性方面，新型腐蚀防护技术尤其是绿色环保防腐技术具有明显的优势。它们通过使用天然、可再生且无害的防腐材料，显著降低了对环境的污染和破坏。然而，这些新技术目前仍面临一些挑战，如性能稳定性、生产成本以及材料筛选等。相比之下，传统技术在经济性方面更具优势，但也需要不断优化和创新以适应日益严格的环保要求。

4 油气储运设施腐蚀防护材料研究进展

4.1 传统防腐材料

(1) 涂料类防腐材料。涂料类防腐材料因其施工简便、成本低廉和适应性广而被广泛应用。这些材料通常包括环氧树脂、聚氨酯、酚醛树脂等,它们具有良好的附着力和耐化学品性能。例如,环氧树脂涂料因其高强度、优异的耐磨性和耐化学品性,在储罐、管道等设备的内壁和外壁防腐中得到了广泛应用。此外,随着环保意识的增强,水性涂料和粉末涂料等环保型涂料也逐渐成为涂料类防腐材料的新趋势。(2) 耐腐蚀塑料与金属耐腐蚀材料。耐腐蚀塑料如聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)和聚乙烯(PE)等,因其轻质、耐腐蚀、易加工等特性,在油气储运设施中被用作储罐、管道、阀门等部件的材料。这些塑料材料能够抵御多种化学介质的侵蚀,从而延长设施的使用寿命。金属耐腐蚀材料如不锈钢、镍基合金和钛合金等,则因其高强度、优异的耐腐蚀性,在极端腐蚀环境下表现出色。这些金属材料常用于制作关键设备,如高温高压容器、耐腐蚀泵和阀门等。

4.2 新型防腐材料

(1) 高分子复合材料。高分子复合材料结合了高分子材料的柔韧性和增强材料的强度,具有优异的力学性能和耐腐蚀性。这些材料通常由树脂基体和增强纤维(如玻璃纤维、碳纤维)组成,能够抵御多种化学介质的侵蚀,同时具有良好的耐磨损性。在油气储运设施中,高分子复合材料常被用作储罐、管道和阀门的内衬或涂层,以提高设施的耐腐蚀性能。(2) 纳米复合材料。纳米复合材料通过将纳米粒子嵌入到高分子基体中,显著提高了材料的力学性能和耐腐蚀性。纳米粒子的引入可以细化材料的微观结构,增加材料的致密度和强度,从而提高其抗腐蚀性能。例如,纳米二氧化硅增强的环氧树脂涂料在油气储运设施中具有优异的耐化学品性和耐磨性^[4]。(3) 生物基防腐材料。生物基防腐材料利用可再生生物资源制备而成,具有环保、可再生和生物相容性等特性。这些材料通常来源于天然植物、动物或微生物,通过特定的化学或生物过程转化而成。例如,利用天然植物提取物制备的防腐涂料,具有无毒、无害和可降解等特性,符合环保要求。

4.3 材料的制备与应用

(1) 材料的合成与改性方法。材料的合成与改性方

法是提高防腐材料性能的关键。通过优化合成工艺和改性方法,可以调整材料的微观结构和性能,以满足不同应用场景的需求。例如,通过共混、交联和填充等改性方法,可以提高高分子复合材料的力学性能和耐腐蚀性;通过表面处理和纳米粒子的引入,可以改善材料的附着力和耐磨损性。(2) 材料在油气储运设施中的应用案例。在油气储运设施中,新型防腐材料的应用已经取得了显著成果。例如,高分子复合材料在储罐和管道中的应用,已经成功解决了传统材料在腐蚀性介质中的耐久性问题。纳米复合材料在涂层和密封材料中的应用,显著提高了设施的防腐能力和密封性能。生物基防腐材料在涂料和润滑剂中的应用,不仅减少了环境污染,还提高了设施的环保性能。具体来说,高分子复合材料储罐在储存腐蚀性介质时,能够保持良好的耐腐蚀性和机械强度,有效延长了设施的使用寿命。纳米复合材料涂层在管道内壁的应用,能够有效防止介质的腐蚀和渗透,提高了管道的可靠性和安全性。生物基涂料在储罐外壁的应用,不仅具有优异的防腐性能,还能减少涂料对环境的污染。

结束语

综上所述,油气储运设施的腐蚀防护技术与材料研究已经取得了令人瞩目的进展。从传统的防腐涂层、耐腐蚀材料到新型的纳米复合材料和智能防腐技术,科研人员不断探索创新,为提高设施的耐腐蚀性提供了多种选择。未来,随着科技的进一步发展,相信会有更高效、环保的腐蚀防护技术和材料涌现,为油气储运设施的安全运行保驾护航。我们期待这些技术和材料在实际应用中发挥更大的作用,为能源行业的发展贡献更多力量。

参考文献

- [1]徐焕焕.浅析油气储运中管道防腐工艺[J].中国石油和化工标准与质量,2023,(16):179-180.
- [2]刘晴,赵得强,李京.油气储运管道的腐蚀机理与防腐技术研究[J].全面腐蚀控制,2023,(12):123-124.
- [3]徐舒.油气储运中的管道腐蚀成因与防治对策[J].化工管理,2023,(10):104-105.
- [4]张建岭.油气储运管道腐蚀防护技术的创新应用与发展趋势[J].建筑技术科学,2025,(03):33-34.