

油气储运过程中管道腐蚀防护新材料的研究

王琛琛 林会芳 林海天（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

摘要：随着油气资源需求的不断增长，油气储运管道的安全运行至关重要。管道腐蚀问题一直是威胁储运系统可靠性的关键因素，传统防护材料在长期复杂工况下逐渐暴露出局限性。本文聚焦于油气储运过程中管道腐蚀防护新材料，综合分析了管道腐蚀的机理，详细探讨了多种新型金属材料、高分子材料及复合材料的特性、制备方法及其在管道防护中的应用效果。通过对比研究，揭示这些新材料相较于传统材料的优势，展望其未来发展方向，旨在为提高油气储运管道的腐蚀防护水平、保障能源输送安全提供理论与技术支持。

关键词：油气储运；管道腐蚀；防护新材料；金属材料；高分子材料

0 引言

油气作为全球主要的能源形式，其储运过程依赖于庞大的管道网络。在经济发展的强劲驱动下，油气的开采与输送规模日益扩大，管道铺设里程不断增长，穿越的地域环境愈发复杂多样。从酷热干旱的沙漠腹地，到寒冷潮湿的极地地区；从人口密集的城市周边，到深邃莫测的海洋深处，油气管道无处不在。然而，管道在服役期间面临着诸多恶劣环境因素，如土壤酸碱度、湿度变化、微生物侵蚀以及介质中的腐蚀性成分等，极易引发腐蚀现象。腐蚀不仅导致管道壁厚减薄、强度下降，引发泄漏事故，造成巨大的经济损失，还对生态环境构成严重威胁。据统计，全球每年因油气管道腐蚀导致的经济损失高达数十亿美元，同时引发的环境污染事件也屡见不鲜。传统的管道腐蚀防护材料，如涂层类的环氧涂料、镀锌层等，虽在一定程度上能延缓腐蚀进程，但随着油气开发向深海、高含硫等极端工况拓展，已难以满足日益严苛的防护需求。例如，在深海高压低温且富含腐蚀性离子的环境中，传统涂层易出现起泡、剥落现象，无法有效阻挡海水对管道的侵蚀；高含硫油气环境下，普通金属材料会迅速遭受硫化物应力腐蚀开裂，严重威胁管道安全。因此，研发和应用具有卓越性能的管道腐蚀防护新材料成为当前油气储运领域的紧迫任务。

1 油气管道腐蚀机理分析

1.1 化学腐蚀

油气介质中含有的硫化氢、二氧化碳等酸性气体，在有水存在的条件下，会与金属管道表面发生化学反应，生成相应的金属硫化物、碳酸盐等腐蚀产物。例如，硫化氢与铁反应生成硫化亚铁，其过程伴随着铁原子的不断溶解，削弱管道结构完整性。在高含硫油气田开采输送过程中，硫化氢浓度可高达数十甚至上

百 ppm，与管道内壁的铁持续反应，使得管道内壁逐渐被腐蚀产物覆盖，不仅减小了管道的有效流通截面积，还为进一步腐蚀创造了条件。而且，这些腐蚀产物往往较为疏松，无法对金属基体起到良好的保护作用，反而容易吸附更多的腐蚀性介质，加速腐蚀进程。

1.2 电化学腐蚀

由于管道材质的不均匀性或不同部位所处环境的电位差，构成了电化学腐蚀电池。在阳极区，金属失去电子发生氧化反应溶解进入介质；阴极区则发生还原反应，如水中溶解氧的还原。这种微电池作用持续进行，加速管道腐蚀，尤其在潮湿土壤或电解质溶液丰富的环境中更为显著。以埋地管道为例，土壤的透气性、含水量、盐分含量等差异会导致管道不同部位形成电位差。在透气性好、含水量低的部位，氧气容易到达，成为阴极区，发生氧还原反应；而在含水量高、透气性差的部位，如低洼积水处，金属容易失去电子成为阳极区，遭受腐蚀。此外，管道在制造、安装过程中产生的残余应力、焊接接头处的组织不均匀性等，也会加剧电化学腐蚀的发生，使得管道在服役初期就埋下安全隐患。

1.3 微生物腐蚀

土壤、海水等介质中栖息着各类微生物，像硫酸盐还原菌，它们在代谢过程中会产生硫化物等代谢产物，改变管道表面局部环境的酸碱度与化学组成，促进金属腐蚀，并且微生物附着形成的生物膜还会阻碍防护涂层与金属基体的有效接触，进一步恶化腐蚀状况。在一些富含有机质的土壤中，硫酸盐还原菌大量繁殖，它们利用土壤中的硫酸盐作为电子受体，将有机物氧化，同时产生硫化氢。硫化氢不仅直接腐蚀金属，还会与金属表面的氧化物反应，破坏钝化膜，使得金属基体暴露在腐蚀介质中。而且，生物膜的存在

使得防护涂层与金属之间形成了一个缺氧、富含微生物代谢产物的微环境，加速了涂层的老化与剥落，为腐蚀的发生提供了便利条件。

2 新型金属防护材料

2.1 耐蚀合金

以镍基、钛基合金为代表，镍基合金通过添加铬、钼等元素，优化合金组织结构，提高其在酸性、高温高压含硫油气环境下的耐蚀性能。例如 Inconel 系列合金，铬含量可达 15% – 30%，形成致密的氧化铬钝化膜，阻挡腐蚀介质侵蚀。在酸性油气环境中，高浓度的氢离子会不断侵蚀金属表面，但 Inconel 合金表面的钝化膜能够有效阻止氢离子的渗透，维持金属的稳定性。

同时，钼元素的加入进一步增强了合金对氯离子等卤素离子的耐受性，防止点蚀的发生。钛基合金凭借自身优异的化学稳定性，在海水及含氯介质中表现出极低的腐蚀速率，重量轻、强度高，适用于海洋油气管道的关键部件，如立管、海底管道连接部位等。在海洋环境中，海水的高盐度、强腐蚀性以及海浪冲刷、海洋生物附着等因素对管道构成巨大挑战。钛基合金不仅能够抵御海水的化学腐蚀，其高强度还能承受海浪冲击和海洋生物生长带来的机械应力，确保海洋油气管道的长期安全运行。

2.2 金属基复合材料

将陶瓷颗粒、碳纤维等增强相均匀分散于金属基体（如铝、镁基）中，制备出兼具金属韧性与增强相耐磨、耐蚀特性的复合材料。如碳化硅颗粒增强铝基复合材料，碳化硅的高硬度与化学惰性提升材料整体耐磨性，抑制冲刷腐蚀，同时铝基体保证一定的加工成型性，在油气输送泵阀部件、管道弯头处有良好应用前景，有效应对高速流体冲击与腐蚀协同作用工况。在油气输送过程中，泵阀部件频繁开闭，高速流体携带的砂粒等固体颗粒会对部件表面造成严重的冲刷磨损，同时介质中的腐蚀性成分也在侵蚀金属。碳化硅颗粒增强铝基复合材料的表面硬度远高于普通铝合金，能够有效抵抗砂粒的冲刷，减少材料损失。而且，即使表面部分区域受到磨损，铝基体的韧性又能防止裂纹的快速扩展，维持部件的整体结构完整性，延长其使用寿命。

3 新型高分子防护材料

3.1 高性能聚脲涂层

聚脲具有快速固化、无溶剂挥发、高弹性等特点，

喷涂成型后能紧密附着于管道表面，形成连续致密的防护层。其独特的化学结构使其耐候性强，能抵御紫外线、温度变化，在沙漠、极地等极端气候地区的油气管道防护中表现突出；对盐雾、化学介质渗透有良好阻隔能力，阻止氯离子等侵蚀性离子接触金属管道，延长管道使用寿命。在沙漠地区，昼夜温差极大，白天高温可达五六十摄氏度，夜晚又可能骤降至零下十几度，普通涂层在这种频繁的温度变化下容易出现开裂、剥落现象。而聚脲涂层凭借其优异的弹性和耐温性能，能够随管道的热胀冷缩而伸缩自如，保持涂层的完整性。在极地地区，长期的低温环境以及强风携带的冰粒冲刷对管道防护提出了严苛要求，聚脲涂层的耐寒性和抗冲击性能使其能够有效抵御这些恶劣条件，为油气管道提供可靠保护。

3.2 氟碳聚合物涂层

氟碳键的强极性赋予氟碳聚合物极低的表面能与卓越的化学稳定性，如聚四氟乙烯（PTFE）及其改性产品。该涂层具有出色的耐酸碱、耐有机溶剂性能，适用于输送高腐蚀性化工原料的油气管道支线；低摩擦系数特性还可降低介质输送阻力，节能降耗，并且在长期使用中能保持良好外观，便于管道巡检维护，发现潜在腐蚀隐患。当油气管道用于输送含有强腐蚀性酸、碱或有机溶剂的化工原料时，普通涂层很快就会被腐蚀溶解，失去防护作用。氟碳聚合物涂层却能在这些恶劣化学环境中长期稳定存在，确保管道的安全运行。而且，其低摩擦系数使得介质在管道内流动更加顺畅，减少了泵送能量消耗，降低了运营成本。同时，涂层表面光滑平整，在日常巡检中，工作人员能够更容易发现涂层表面的微小缺陷、变色等异常情况，及时采取修复措施，预防腐蚀事故的发生。

4 新型复合防护材料

4.1 石墨烯复合涂层

将石墨烯纳米片与环氧树脂、聚氨酯等常规涂层材料复合，石墨烯的二维片层结构可有效填充涂层孔隙，构建迷宫式扩散通道延缓腐蚀介质渗透；其优异的导电性可通过静电屏蔽效应抑制电化学腐蚀反应发生。研究表明，添加少量石墨烯（< 5wt%）的复合涂层耐蚀寿命相比纯有机涂层可延长 2 – 3 倍，在城市燃气管道、油田集输管网等复杂环境下展现出巨大应用潜力。城市燃气管道穿梭于城市地下复杂的管网系统中，面临着土壤腐蚀、杂散电流干扰等多种问题。石墨烯复合涂层一方面利用其致密的结构阻挡土壤中

的水分、盐分等腐蚀介质向金属管道渗透，另一方面通过静电屏蔽效应将杂散电流导离管道表面，避免电化学腐蚀的加剧。在油田集输管网中，原油中含有的各种腐蚀性成分以及微生物等对管道腐蚀严重，石墨烯复合涂层能够有效提高管道的抗腐蚀能力，保障原油的安全输送。

4.2 纤维增强陶瓷基复合材料

以碳纤维、石英纤维等增强陶瓷基体，制备出耐高温、耐磨损、耐强酸碱腐蚀的复合材料。在高温油气开采与输送环节，如地热蒸汽管道、稠油热采注汽管道，材料能承受数百度高温且保持力学性能稳定，陶瓷基体的致密结构阻挡腐蚀介质侵入，纤维增强相提高材料韧性防止热震开裂，确保管道长期安全运行。在地热蒸汽管道中，高温高压的地热蒸汽含有大量的溶解性矿物质和腐蚀性气体，对管道材料的耐高温、耐蚀性能要求极高。纤维增强陶瓷基复合材料不仅能够抵御蒸汽的化学腐蚀，在频繁的温度变化和压力波动下，纤维的增韧作用有效防止了材料因热震而产生裂纹，保证了管道的可靠性。在稠油热采注汽管道中，同样面临着高温、强腐蚀以及蒸汽冲刷等问题，该复合材料的优异性能使其成为理想的管道防护材料。

5 新材料应用效果对比分析

5.1 耐蚀性能对比

通过实验室模拟油气腐蚀环境，采用失重法、电化学阻抗谱等测试手段，新型耐蚀合金如 Inconel 625 在高含硫油气中的腐蚀速率较传统碳钢降低 90% 以上；石墨烯复合涂层使金属试片在盐雾试验中的腐蚀面积减小 80%，相较于普通环氧涂层，防护效果显著提升，展现出对多种腐蚀介质更强的抵御能力。在模拟高含硫油气田下环境的试验中，将 Inconel 625 合金试片与传统碳钢试片同时浸泡在含硫油气介质中，经过一定时间后，碳钢试片表面出现大量腐蚀坑，腐蚀产物堆积严重，重量损失明显；而 Inconel 625 合金试片表面仅出现轻微变色，腐蚀速率极低，几乎可以忽略不计。在盐雾试验中，普通环氧涂层防护的金属试片在短时间内就出现大面积锈蚀，而石墨烯复合涂层防护的试片锈蚀区域极小，涂层依然保持较好的完整性，有效阻挡了盐雾的侵蚀。

5.2 服役寿命预估

依据现场实际工况数据与加速腐蚀试验结果推算，采用高性能聚脲涂层的油气管道，在常规土壤环境下服役寿命可达 30 – 50 年，相比传统油性涂料防

护的管道（15 – 20 年）延长近一倍；金属基复合材料泵阀部件在高流速含砂油气工况下，使用寿命较普通金属部件提升约 2 – 3 年，有效减少设备维修更换频次，保障油气连续输送。某油气田的管道在使用高性能聚脲涂层后，经过多年的现场监测，管道壁厚减薄速率明显低于使用传统油性涂料的同期管道，根据腐蚀模型推算，其服役寿命有望达到 40 年以上。在一个大型油气输送泵站，采用金属基复合材料制造的泵阀部件，在运行了 3 年后，磨损和腐蚀程度远低于传统金属部件，预计其使用寿命可达到 5 – 6 年，减少了因设备频繁维修更换带来的停产时间，提高了油气输送效率。

6 结论与展望

6.1 研究总结

本研究深入探讨油气储运管道腐蚀防护新材料，涵盖新型金属、高分子及复合材料领域。这些新材料依据不同腐蚀机理针对性设计，从耐蚀性能、服役寿命到经济性多方面展现出相较于传统防护材料的显著优势，为解决复杂工况下油气管道腐蚀难题提供有效途径。通过对各种新材料的特性、制备方法及应用效果的详细分析，明确了它们在油气储运行业中的巨大潜力，为管道腐蚀防护技术的发展注入了新的活力。

6.2 发展展望

未来，随着材料科学技术持续进步，管道腐蚀防护新材料将朝着智能化、多功能化方向发展。一方面，研发具备自修复、自监测功能的智能材料，如含微胶囊修复剂的涂层，在管道受损初期自动修复；嵌入传感器的复合材料实时监测腐蚀状态。想象一下，当管道涂层出现微小裂纹时，微胶囊破裂释放修复剂，迅速填充裂纹，阻止腐蚀进一步扩大；传感器实时将管道的腐蚀速率、温度、压力等数据传输到监控中心，工作人员能够及时掌握管道健康状况，提前采取维护措施。

参考文献：

- [1] 寇杰, 梁法春, 陈婧. 油气管道腐蚀与防护 [M]. 中国石化出版社有限公司, 2020.
- [2] 周和荣, 赵晓栋, 王国庆. 耐蚀合金在油气工业中的应用现状与展望 [J]. 材料工程, 2021, 49(11):1-13.
- [3] 刘春宇. 高性能聚脲涂层在管道防护中的应用研究 [D]. 东北石油大学, 2020.
- [4] 杨景辉, 李美栓, 杨超. 石墨烯复合涂层的制备及腐蚀防护性能研究 [J]. 表面技术, 2020, 49(12):175-183.