

冷凝水对燃气输送管道腐蚀的影响与治理措施

辛凯¹ 张腾²

1. 山东嘉航燃气能源有限公司; 2. 潍坊滨海金捷能源技术开发有限公司

摘要: 燃气输送管道的腐蚀问题一直是工业领域关注的重点, 尤其是在工业燃气输送过程中, 冷凝水作为常见的副产品, 其化学成分对管道腐蚀的影响尤为显著。本文通过分析冷凝水的化学性质, 探讨了冷凝水中二氧化碳、硫化氢等成分对工业燃气输送管道腐蚀的影响机理, 进而评估了腐蚀速率与冷凝水化学成分之间的关系。结合实际腐蚀案例分析, 提出了针对工业管道的腐蚀治理措施。通过化学处理、管道设计优化以及选择合适的耐腐蚀材料, 可以有效降低腐蚀速率, 延长管道的使用寿命。

关键词: 工业燃气输送管道; 化学成分; 腐蚀治理; 管道设计

工业燃气输送管道作为现代能源传输的重要组成部分, 其安全性和稳定性直接关系到能源供应的可靠性。尤其是在长期运行过程中, 燃气管道内积聚的冷凝水问题, 始终是工业燃气输送系统中的一个重要挑战。冷凝水是燃气输送过程中常见的副产品, 其化学成分对管道腐蚀的加剧起到了关键作用。在工业燃气输送管道的运行环境中, 冷凝水中的二氧化碳、硫化氢等酸性气体溶解成酸性物质, 如碳酸、硫酸, 进而导致管道内壁形成腐蚀性环境。冷凝水与管道材料发生电化学反应, 显著加速了管道腐蚀的进程。本文旨在通过分析冷凝水对工业燃气输送管道腐蚀的影响及其治理策略, 提出有效的治理措施, 进而延长管道的使用寿命。

1 冷凝水的化学性质

1.1 冷凝水的产生与组成

冷凝水是气体在温度降低至露点以下时, 由气体中的水蒸气冷却凝结而成的液态水。在燃气输送过程中, 气体在管道内的温度降至一定值时, 水蒸气会凝结成冷凝水。这些冷凝水

的组成主要包括水分子及溶解其中的气体成分, 如二氧化碳、硫化氢、氨气等。冷凝水的 pH 值通常偏酸性, 尤其是在燃气输送系统中, 由于气体中的二氧化碳和硫化氢会溶解形成酸性物质 (如碳酸、硫酸), 使冷凝水呈现腐蚀性。冷凝水中的其他溶解物, 如氧气、氯化物等, 也会对管道表面产生一定影响。冷凝水的化学组成和气体成分密切相关, 且与环境温湿度变化具有一定关系。

1.2 冷凝水对管道腐蚀的影响

冷凝水的腐蚀性主要来源于其酸性成分以及与管道表面金属的反应。当冷凝水中的二氧化碳与水反应生成碳酸时, 碳酸会降低冷凝水的 pH 值, 增加其酸性, 使得管道表面金属 (如钢铁、铝合金等) 更容易发生酸性腐蚀。冷凝水中的硫化氢若存在, 也会形成硫酸等腐蚀性化学物质, 加速管道的腐蚀进程。冷凝水中的溶解氧和氯化物同样会对管道造成腐蚀, 尤其在高温高湿环境下, 腐蚀速度更加显著^[1]。长期积聚的冷凝水可能导致管道内壁腐蚀加剧, 形成腐蚀孔洞或表面损伤,

最终影响管道的安全性和使用寿命。对冷凝水的有效治理对于管道的长效运行至关重要。

2 管道腐蚀的机理与检测

2.1 腐蚀的基本机理

管道腐蚀通常是由于金属与环境中的介质 (如水、气体、酸性物质等) 发生电化学反应。电化学腐蚀是最常见的腐蚀类型, 发生在金属表面与腐蚀介质的接触过程中。在这一过程中, 金属失去电子, 生成金属离子, 而腐蚀介质中的氧气或氢离子则还原, 导致金属的腐蚀。腐蚀的速率和程度受到许多因素的影响, 包括环境的 pH 值、温度、腐蚀性气体的浓度等^[2]。腐蚀的电化学反应通常可以分为阳极反应和阴极反应。在阳极反应中, 金属表面发生氧化反应, 金属原子失去电子生成金属离子; 在阴极反应中, 环境中的氧气或氢离子接受电子进行还原反应。腐蚀的速度由金属的电位差、金属表面的状态以及周围环境的腐蚀性决定。

2.2 腐蚀检测方法

管道腐蚀检测是确保管道安全运

行的重要手段,选择合适的检测方法可以准确评估腐蚀情况并采取相应的防治措施。常见的检测方法包括电化学法、超声波检测、磁粉检测和涡流检测等,每种方法有其特定的适用范围和优缺点^[3]。电化学方法适用于大规模管道,能够进行在线监测,但设备要求较高;超声波检测具有高精度和无损检测的优势,适用于裂纹和腐蚀的检查,但检测深度有限;磁粉检测适用于表面裂纹检测,成本低廉但只能检测表面缺陷;涡流检测可以用于金属腐蚀的检测,但对深层腐蚀的检测有限。选择合适的检测方法需根据管道的实际情况和检测要求来决定。

3 冷凝水对管道腐蚀的影响

3.1 化学成分与腐蚀速率

冷凝水的化学成分对管道腐蚀速率有重要影响。冷凝水的酸性成分,尤其是二氧化碳和硫化氢的溶解,会显著降低冷凝水的pH值,使其呈酸性环境。这种酸性环境是引发管道金属腐蚀的主要因素之一^[4]。二氧化碳溶解在水中形成碳酸(H_2CO_3),进一步解离生成碳酸根离子(CO_3^{2-})和氢离子(H^+),增加溶液的酸性,使金属表面发生电化学反应,导致腐蚀。而硫化氢(H_2S)与水反应形成硫化氢酸($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_3$)和硫酸(H_2SO_4),进一步加剧了管道的腐蚀。冷凝水中的溶解氧也是腐蚀的推动因素之一,尤其是在低温环境下,氧气更容易溶解于水中,从而加速金属的氧化过程。氯化物(如氯离子)也可能存在于冷凝水中,这些氯离子与金属反应生成金属氯化物,这些化合物能够破坏金属表面钝化膜,进一步加剧腐蚀速率。冷凝水的化学成分直接决定了腐蚀速率,酸性和氧化性物质越多,腐蚀速率越高。

3.2 冷凝水的腐蚀案例分析

在Y公司管道腐蚀案例分析中,冷凝水的积聚和未及时排放导致了管

道严重腐蚀。图1展示了冷凝水管道腐蚀前后的实际情况。在图1a中,未进行修复的管道表面由于冷凝水长期积聚,出现了明显的锈蚀和腐蚀损坏,管道表面形成了大面积的锈斑,严重影响了管道的结构强度和运行安全^[5]。由于冷凝水中含有酸性成分,特别是二氧化碳和硫化氢,这些腐蚀性物质与管道金属发生电化学反应,导致管道的腐蚀速率加快。根据公式:

$$CR = \frac{K \cdot W}{A \cdot T}$$

在这种情况下,冷凝水的酸性成分加速了金属的氧化反应,导致质量损失(W)增加,进而提升了腐蚀速率(CR)。管道弯头和焊缝部位的腐蚀尤为严重,因为这些地方易积聚冷凝水,形成长期的腐蚀环境。

图1b展示了管道进行修复后的效果。经过优化冷凝水排放设计、改进防腐涂层及管道材料的选择,管道表面得到了有效修复,腐蚀问题大幅度缓解。修复后的管道表面不再出现明显的锈蚀痕迹,管道壁厚得到了恢复,腐蚀速率显著下降,管道的结构强度也得到提升。根据公式:

$$V_{\text{corrosion}} = \frac{W \cdot M}{\rho \cdot A}$$

通过使用更耐腐蚀的材料和加强涂层,金属的质量损失减少,体积腐蚀速率($V_{\text{corrosion}}$)显著降低,从而延长了管道的使用寿命,减缓了腐蚀对管

道的损害。

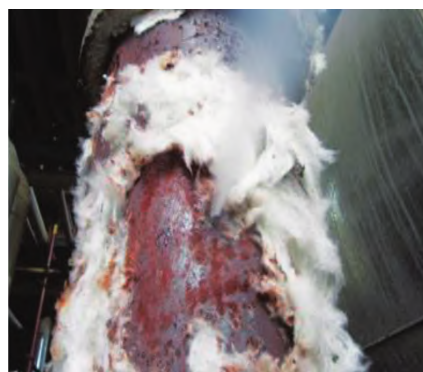
通过这种修复,Y公司不仅延长了管道的使用寿命,还为未来的管道维护和管理提供了有力的技术支持。这一案例表明,针对冷凝水腐蚀问题,采取及时有效的修复措施至关重要,可以显著提高管道系统的运行稳定性和安全性。通过上述公式的应用,我们可以定量地评估修复措施对管道腐蚀速率和体积损失的影响,进一步证明其有效性。

在实际运行中,管道设备故障常见于弯头和焊缝附近。这些部位由于无法进行工艺切割和检修,一旦发生穿孔,将直接影响装置的正常运行。对于这些易发生故障的关键部位,及时检查和维护显得尤为重要,以防止意外损坏对整体系统造成不良影响。

4 腐蚀治理措施

4.1 化学处理与保护措施

冷凝水是燃气输送过程中常见的副产品,其酸性成分对管道腐蚀的影响不可忽视。为了有效治理冷凝水引起的管道腐蚀,Y公司采取了一系列优化方案。优化了冷凝水的排放设计,确保冷凝水能够及时排出,避免积聚在管道内。通过调整管道的坡度和增加排水口,冷凝水得以顺利排出,减少了与管道表面接触的时间,从而降低了腐蚀的风险。针对管道腐蚀的严重性,公司选择了更具耐腐蚀性的材



(a) 管道泄漏



(b) 管道修补后

图1 冷凝水管线主管泄漏

料，并在管道表面进行了涂层处理。通过选择合金钢和不锈钢等耐腐蚀材料，结合环氧树脂等防腐涂层，增强了管道的抗腐蚀能力，尤其是在弯头和焊缝等易腐蚀部位，防腐效果更为显著^[6]。为了进一步提高防腐效果，Y公司引入了管道监测系统，通过实时监控管道内部的腐蚀状况，及时发现潜在问题。通过监测数据，公司能够预判管道腐蚀发展趋势，并采取相应的措施，避免腐蚀对管道的进一步破坏。图2展示了冷凝水管道腐蚀治理优化方案前后的效果对比，具体说明了修复和优化后管道腐蚀速率和表面腐蚀面积的变化。

通过优化冷凝水排放设计，冷凝水积聚时间大幅减少，管道内积水量显著降低，进一步减缓了腐蚀速率。这表明优化排放设计对管道腐蚀控制具有重要作用。

4.2 管道设计与材料选择

针对已发生腐蚀的管道，Y公司制定了一套完善的修复与防护措施。在修复方案的制定上，公司进行了详细的腐蚀检测，明确了腐蚀的部位和程度。对于已经出现穿孔或严重腐蚀的管道，采用补焊和填充材料进行修复，确保管道的结构完整性。通过这种方式，有效恢复了管道的密封性和承压能力，防止了进一步的泄漏或破裂。在防护措施方面，公司采用了多种手段进行长期管道防护。除了常规的涂层防护外，还在管道内壁增加了防腐衬里，尤其是在腐蚀高发区域，如管道弯头、焊缝等关键部位，采用了厚度更高、耐腐蚀性更强的衬里材料。为了提高管道系统的运行可靠性，Y公司定期进行管道检查和维护，采用先进的检测技术如超声波检测和磁粉检测，及时发现和修复可能出现的隐患。

图3展示了冷凝水排放设计优化前后的对比，明确优化后的管道运行

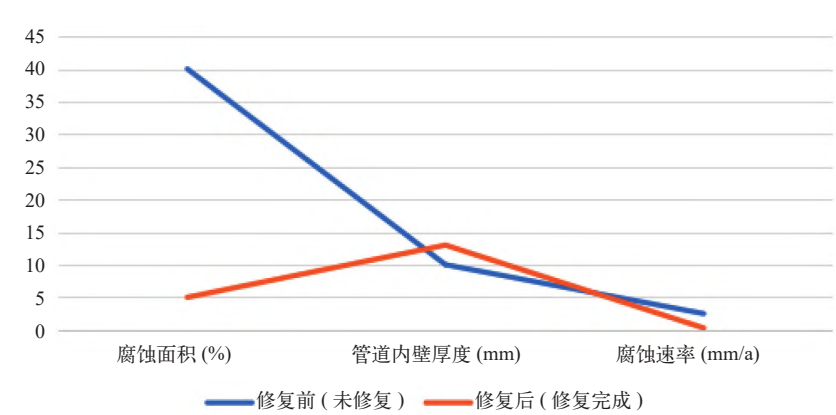


图2 冷凝水管道腐蚀治理前后的对比

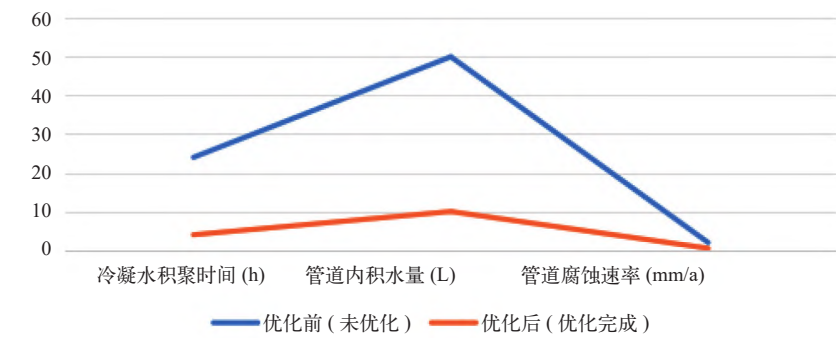


图3 冷凝水排放设计优化前后

效率、积水量和腐蚀速率的改善情况。

5 结语

本文研究了燃气输送管道中冷凝水的化学成分对管道腐蚀的影响，探讨了冷凝水中的二氧化碳、硫化氢等成分对腐蚀速率的影响机理，并通过案例分析展示了冷凝水造成的腐蚀问题。针对冷凝水引起的腐蚀，提出了化学处理与管道设计优化等治理措施，强调了缓蚀剂的应用和材料选择的重要性。通过合理的管道设计、材料选择以及有效的化学防护措施，可以有效延缓腐蚀进程，提高管道的使用寿命。随着管道输送系统规模的不断扩大，未来应加强冷凝水腐蚀治理技术的研究，特别是在恶劣环境下的管道腐蚀防控，为燃气输送管道的安全、经济运行提供保障。

参考文献：

[1] 赵杰, 徐广旭, 张映玮, 等. X80掺氢

天然气管道的氢脆与腐蚀耦合作用研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45 (02): 407-415.

[2] 杨小乐, 万宇飞, 吴景健, 等. 含腐蚀凹坑海底管道剩余强度评价方法分析[J]. 船海工程, 2025, 54 (01): 171-174+180.

[3] 彭程, 龙红明, 汪磊. 钢厂煤气管道新型涂料的制备及其防腐蚀防结垢机理[J]. 涂料工业, 2025, (03): 1-7.

[4] 骆正山, 王良雨, 高懿琼, 等. 改进SSA-HKELM模型在海洋弯管剩余寿命预测中的应用[J]. 安全与环境学报, 2025, (01): 1-11.

[5] 刘阳舟. 油气管道运输中的腐蚀与防护[J]. 流程工业, 2025, (01): 71-73.

[6] 李新宏, 张宇航, 郭孟孟, 等. 基于数字孪生的腐蚀海底管道安全管理方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21 (01): 118-123.