

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.09.001

盐穴储气库地面设施 腐蚀防护技术及维护周期研究

李敬江

港华储气有限公司

摘 要：随着天然气储运体系的不断完善，地下储气库在能源供应保障中的作用日益突出。盐穴储气库因其密封性好、调峰能力强、注采转换灵活而被广泛应用，但其地面设施面临严重的腐蚀问题，影响储气库的安全性和运行寿命。针对盐穴储气库地面设施，剖析其主要腐蚀机理及关键影响因素，探究常用腐蚀防护技术（涵盖涂层防护、阴极保护、缓蚀剂投加等），并结合腐蚀监测数据与设备服役状态，提出科学合理的维护周期优化策略。研究表明，结合智能监测技术、数据驱动的预测性维护模式以及高效的防护措施，可有效降低设施腐蚀速率，延长设备使用寿命，提高储气库运行的安全性和经济性。

关 键 词：盐穴储气库；腐蚀防护技术；阴极保护；缓蚀剂；维护周期优化

1 引言

随着天然气工业的快速发展，我国正全面推进天然气产供储销体系和储气基础设施建设，地下储气库在季节性调峰、应急保供及能源战略储备等方面发挥着至关重要的作用。盐穴储气库作为一种高效、安全的地下储气方式，因其良好的密封性和较低的环境影响，在国内外得到了广泛应用。然而，盐穴储气库地面设施长期暴露于复杂的工况环境（包括高湿度、高盐分以及腐蚀性气体如 CO_2 、 H_2S 等），导致管道、阀门、储罐及其他关键设备面临严重的腐蚀风险，进而影响储气库的长期安全性和运行稳定性。因此，研究盐穴储气库地面设施的腐蚀机理，优化防护技术，制定科学合理的维护周期，对于延长设施使用寿命、降低运行成本、保障储气库安全运行具有重要的现实意义。

本文通过分析盐穴储气库的腐蚀影响因素，探讨适用于其地面设施的防腐措施，并提出维护周期优化策略，以期盐穴储气库的安全高效运行提供理论依据和实践指导。

2 盐穴储气库地面设施腐蚀概述

盐穴储气库地面设施，包括集输管道、阀门、储罐、压缩机和脱水设备等，在长期使用过程中不可避免地受到腐蚀的影响。这些腐蚀不仅降低了使用寿命，还可能导致泄漏、爆炸等严重安全问题，从而影响整个储气库的正常运行。因此，了解腐蚀类型及其成因对于提高储气库的安全性和经济性至关重要。腐蚀类型主要包括均匀腐蚀、局部腐蚀和电化学腐蚀。

（1）均匀腐蚀：均匀腐蚀指金属表面均匀地受

[第一作者简介] 李敬江，总经理，高级工程师，擅长燃气工程建设及管理工作。

到腐蚀介质的作用,导致材料厚度逐渐减少。常见于盐穴储气库的管道、储罐及暴露在大气或腐蚀性气体的设备中。虽然均匀腐蚀的腐蚀速率较为稳定,但长期无防护会使设备设施的壁厚逐渐减小、强度降低,最终可能导致破裂。

(2) 局部腐蚀:局部腐蚀表现为腐蚀集中在某些区域,造成穿孔或裂缝,其危害性较均匀腐蚀更为严重。局部腐蚀包括点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂等。点蚀通常发生在湿气环境中的金属管道,尤其是在溶液中 Cl^- 浓度较高时,容易破坏金属表面的保护膜。缝隙腐蚀则常见于连接处,如螺栓和法兰接头,腐蚀介质在这些难以流通的区域积聚,加剧腐蚀。应力腐蚀开裂是在拉应力和特定腐蚀介质的共同作用下,金属发生开裂的现象。这种腐蚀类型具有隐蔽性强、危害性大的特点,一旦发生,可能会导致设施的突然失效,引发严重的安全事故。

(3) 电化学腐蚀:电化学腐蚀是盐穴储气库中最常见的腐蚀类型,发生在金属和电解质溶液之间的氧化还原反应。 CO_2 溶解在水中形成 H_2CO_3 ,导致管道内壁发生酸性腐蚀; H_2S 腐蚀则形成 FeS 沉积物,加速设备损坏。

3 地面设施腐蚀影响因素分析

3.1 气体成分

盐穴储气库地面设施的腐蚀程度受气体成分特别是酸性气体影响较大,天然气中酸性介质能加速金属的电化学反应,生成 FeCO_3 腐蚀产物。虽然 FeCO_3 能在一定条件下起到保护作用,但在高流速或压力波动下,保护膜容易被破坏,导致腐蚀加剧。 H_2S 则引发硫化物应力腐蚀及 FeS 沉积腐蚀, FeS 的沉积可在初期起到一定保护,但随其沉积增厚,可能脱落,造成腐蚀周期性加重。同时,高温高压环境下, H_2S 可能引发氢致开裂和应力腐蚀开裂,对设备稳定性构成威胁。

3.2 环境条件

温度、湿度和压力是影响腐蚀的重要环境因素。高温可加快腐蚀反应并影响保护层的稳定性,从而加速腐蚀过程。在 $60^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 范围内, FeCO_3 和 FeS 可以形成稳定的保护层,减少腐蚀。湿度增加时,金属表面易形成吸附水膜,这不仅促进电化学反应,还增

强二氧化碳和硫化氢的溶解性,加剧腐蚀。高压环境中,腐蚀性气体的分压和溶解度增大,导致腐蚀加速,尤其在气体压力变化时,可能引发应力腐蚀开裂。

3.3 流体流速

盐穴储气库地面设施中的流体流速是影响腐蚀行为的重要物理因素,其影响机理涉及腐蚀产物膜的稳定性、腐蚀介质的补充速率以及流动冲刷效应。在低流速条件下,金属表面可能形成较为稳定的腐蚀产物层,在一定程度上减缓腐蚀过程。然而,当流速增加至临界值以上时,湍流会破坏这些腐蚀产物膜,使未参与反应的腐蚀介质不断接触金属基体,从而加速腐蚀反应。

3.4 管壁材料

管壁材料的耐腐蚀性直接决定了其对腐蚀介质的适应能力,高合金材料(如含 Cr 、 Ni 的不锈钢)能够有效提高抗腐蚀能力,而普通碳钢在高分压环境下则容易发生严重腐蚀。

4 盐穴储气库地面设施的腐蚀防护技术

4.1 涂层防护技术

盐穴储气库地面设施的腐蚀防护主要通过有机和无机涂层实现。有机涂层如环氧树脂和聚氨酯等,因附着力强、柔韧性好且施工便捷,广泛应用于管道和储罐的防护。但在长期高温或紫外线辐射下,这类涂层易老化和粉化,导致防护性能下降。无机涂层,如热喷涂铝和锌涂层,耐高温、耐磨且化学稳定性好,适用于暴露在高温和腐蚀性介质的设备,缺点是施工复杂且成本较高。结合两者使用可提高防护效果,如在埋地管道使用环氧煤沥青底漆和聚氨酯面漆,或在高温阀门表面使用热喷涂铝涂层和有机硅耐热涂料。

4.2 阴极保护技术

阴极保护技术的两种主要方法为牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法通过金属阳极的溶解保护结构,适用于小型储罐和短距离管道,且无需外部电源,但需定期更换阳极。外加电流法通过整流器提供反向电流,适用于大型储气库和长距离管道,其优点是电流输出可调节以应对环境变化,但需要高精度的设备支持,且可能受到杂散电流干扰。针对复杂地质条件,可采用区域性阴极保护系统,通过智能监控平台进行联合保护。

4.3 缓蚀剂防护技术

缓蚀剂通过吸附、成膜或中和反应抑制腐蚀过程。常见的缓蚀剂类型包括阳极型、阴极型和有机缓蚀剂。阳极型缓蚀剂通过氧化膜保护金属表面，适用于强酸环境；阴极型缓蚀剂通过阻碍阴极反应保护金属表面，适用于中性或碱性环境。有机缓蚀剂通过极性基团在金属表面形成疏水屏障。现代缓蚀剂的使用通常结合在线腐蚀监测系统，通过实时数据调整投加量，优化投加策略，以减少药剂消耗并避免过量导致的环境污染。主要腐蚀防护技术对比见表1。

5 盐穴储气库地面设施维护周期研究

5.1 维护周期确定

盐穴储气库地面设施的维护周期的确定是基于多因素综合评估的结果，包括但不限于腐蚀监测数据、设备运行环境特征、材料耐久性以及经济成本等关键要素。由于盐穴储气库地面设施暴露于腐蚀性气体以及变动的温湿度环境中，设施的腐蚀速率受到气体浓度、流体流速等多个因素的交互作用。因此，建立科学的腐蚀监测机制是确定合理维护周期的关键。

为了确保设备能够持续稳定运行，当前行业内普遍采用一系列先进的腐蚀监测技术，包括腐蚀挂片监测、电子探针监测、超声波检测、智能传感器等，这些技术可实时监测设施的腐蚀状态，帮助工作人员准确判断设施的剩余使用寿命。同时，结合历史腐蚀数据，通过建立腐蚀预测模型，能够对盐穴储气库设施的未來腐蚀发展趋势进行预测，进而科学规划维护周期。不同的防护技术对设备的维护周期影响显著。例如，采用缓蚀剂的管道系统，其维护周期应当依据缓蚀剂的消耗速度以及其抑制腐蚀的效果进行调整；而对于使用阴极保护或高性能涂层的设备，维护周期则应

结合保护层的完整性和有效性进行定期检查和评估。

同时，维护周期的确定还应平衡设备的安全性和经济性。频繁的维护虽然能提高安全性，但却可能大幅增加运营成本，而过长的维护周期则可能增加腐蚀失效的风险，导致设备故障的发生。因此，基于数据驱动的定量分析以及设备的实际运行状态，合理规划盐穴储气库地面设施的维护周期，是保障其长期安全稳定运行的关键。

5.2 维护模式分析

盐穴储气库地面设施的维护模式根据不同设备的特性和维护需求，可分为定期维护、状态监测维护和预测性维护3种方式，每种方式都有其适用范围和优势。

定期维护模式是最为传统的维护方式，基于固定的时间间隔对设施进行检查、维修或更换部件。此模式适用于腐蚀速率相对稳定且运行环境较为可控的设施，如压力容器、阀门和压缩机等。在这种模式下，设备的维护周期是预先设定的，通常根据设备的设计寿命和经验数据进行安排。然而，定期维护模式也存在一定的局限性。例如，它可能在设备尚未出现故障时就进行检修，造成不必要的停机，或在设备已出现腐蚀时仍未及时维修，埋下潜在风险。因此，定期维护模式的不足之处在于未能有效依据设备的实际状态进行动态调整。

状态监测维护模式则通过实时监测技术，如腐蚀探针、挂片监测、超声波测厚等，持续评估设备的腐蚀情况，并根据数据结果判断是否需要维修。该模式能够避免不必要的停机检修，提高维修的针对性和经济性，尤其适用于腐蚀环境较复杂、腐蚀速率动态变化较大的设施，如长输管道和关键阀门系统。该模式通过动态调整维护策略，确保设备运行不受维护过度或不足的影响。

预测性维护模式结合大数据分析、人工智能和历

表1 主要腐蚀防护技术对比一览表

技术类型	适用范围	优点	缺点
涂层防护	适用于各种管道、容器、阀门等	初始投资低，施工简单	防护效果和使用寿命相对有限，维护成本较高
阴极保护	适用于管道及大型金属结构的储罐等，与涂层防护有机结合	保护期长且有效性强，能够进一步增强涂层防护的效果	初始投资较高，施工过程复杂，运行维护成本高
缓蚀剂防护	适用于储存介质，主要针对大面积及结构复杂的金属部件	经济性好，防腐效果好，实施简单方便	保护效果有限，需特定使用条件

史监测数据，通过数值模拟和机器学习技术预测设备未来的腐蚀趋势，并在设备故障发生前采取预防措施。该模式不仅能够最大限度地降低设备故障风险，还能显著降低维护成本，提升设施的整体运行效率。目前，部分盐穴储气库已经引入了智能维护管理系统，基于实时监测数据和机器学习算法优化维护周期，实现更高效的设施管理。

5.3 维护优化实践

(1) 依据状态监测维护模式，应用声发射传感器及机器学习监测储气库裂缝的扩展并应对处理

某盐穴储气库位于地震活跃带，长期受到地质应力的影响，盐岩层存在微小裂缝扩展的风险。为了确保设施的长期稳定性和安全性，必须实时监控裂缝的扩展情况。该储气库内部部署了声发射传感器阵列，能够实时捕捉盐岩破裂时释放的声波信号。这些数据被传输至后台系统，结合机器学习模型（如随机森林算法）进行分析，识别裂缝的位置、尺寸及其发展趋势。系统能够预测裂缝的扩展方向，及时发出预警，帮助维护团队制定针对性的应对措施。该系统成功预测了3次潜在裂缝扩展事件，提前30天发出预警，避免了气体泄漏事故。维护团队随后进行了针对性注浆加固，盐穴的密封性提升了40%，并延长了设备使用寿命8年。通过AI算法的辅助，声发射信号的误报率从15%降至3%，大大提升了监测的精准度和可靠性。

(2) 应用预测性维护模式，提高盐穴储气库的维护效率和安全可靠性

①数字孪生技术优化储气库维护决策

欧洲某大型盐穴储气库面临复杂的工况环境，频繁注采气导致压力波动，传统的维护计划已难以适应动态需求，亟需新型的维护决策优化方法。该库引入了数字孪生技术，通过创建一个实时同步的储气库物理状态模型（包括压力、温度、腐蚀数据等），实现了对设施状态的全面监控。通过模型，可以模拟不同维护策略的效果。例如，模拟“延迟维护1个月”对管道腐蚀速率的影响，结果显示风险可控，因此节省了15%的年度维护成本。通过结合历史数据，使用LSTM神经网络预测未来6个月的设备健康趋势。数字孪生技术优化后的维护决策显著降低了维护成本（减少22%），同时减少了停机时间（缩短35%）。借助这一技术，储气库的年运营效率提升了18%。数字孪

生系统不仅增强了维护决策的科学性，还提高了盐穴储气库整体的运维效率 and 安全性。

②多传感器融合与边缘计算在管道腐蚀管理中的应用

中东某盐穴储气库，由于其所在高温和高湿的环境，管道的腐蚀速率远超行业平均水平，传统的腐蚀监测方法已无法满足实际需求。该盐穴储气库在管道关键节点部署了多传感器网络（包括电化学噪声传感器、pH传感器、温度传感器等），并利用边缘计算网关对数据进行实时处理，只有关键结果上传至云端。算法采用自适应阈值法，动态调整腐蚀报警阈值。例如，湿度超过80%时，触发高灵敏度的腐蚀监测。维护团队根据边缘计算生成的腐蚀热力图，优先处理高风险区域，极大提升了响应速度和维护效率。该系统显著减少了数据带宽占用（降低60%），并将响应速度提升至秒级。针对高风险区域的维护周期由原来的6个月缩短至1个月，整体腐蚀损失下降45%。通过这种多传感器融合和边缘计算的智能监控，盐穴储气库的管道维护效率和效果得到了显著提升，降低了设备的腐蚀风险，延长了设施的使用寿命。

6 结论

本研究围绕盐穴储气库地面设施的腐蚀防护与维护周期优化展开分析，系统探讨了腐蚀机理、影响因素、防护技术及维护策略。研究表明，盐穴储气库地面设施的腐蚀主要受气体成分、环境条件（温度、湿度、压力）及流体流速等因素的影响，其中局部腐蚀、电化学腐蚀对设施安全性构成较大威胁。通过科学的腐蚀监测手段，如腐蚀挂片、电子探针及智能传感系统，可实时评估腐蚀速率，为维护周期的优化提供数据支持。

在维护模式方面，传统的定期维护模式存在一定局限性，而状态监测维护和预测性维护能够基于设备实际腐蚀状况动态调整维护方案，提高维护的经济性和可靠性。结合智能监测技术、数据分析与新型防腐技术，可有效延长维护周期，降低设施运行风险。未来，盐穴储气库维护管理应向数字化、智能化方向发展，以实现更加精准、高效的腐蚀防护与设施管理，确保盐穴储气库长期安全稳定运行。

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.09.002

城镇燃气热值管理控制技术研究

王 曦¹, 王红莲², 鄢良广¹, 宋 嘉³, 王健宁³

1.绵阳兴绵燃气有限责任公司; 2.北京市煤气热力工程设计院有限公司;

3.北京市燃气集团有限责任公司

摘 要: 随着城镇燃气行业的快速发展,热值管理控制技术的重要性日益凸显。合理的热值管理不仅可以提高燃气使用的安全性,还能优化资源利用效率,降低运行成本。本文围绕城镇燃气热值管理控制技术展开研究,分析其关键技术要点、安全风险及政策实施路径。

关 键 词: 城镇燃气; 热值管理; 技术控制; 安全管理; 政策风险

1 引言

随着我国经济与技术的飞速发展,城镇燃气用量同步快速增长,燃气种类涵盖天然气、页岩气、煤层气及液化石油气等^[1];气源既包括国内自产,也包括国外进口。丰富的燃气来源在保障国内燃气供应平稳的同时,不同气源的热值也存在差异。燃气热值的差异不仅会对用户产生直接经济影响,其差异若超出燃

烧设备的适配范围,还会导致脱火或回火现象,进而引发重大燃气事故。

2 我国城镇燃气现状

2.1 城镇燃气组成及热值情况

我国城镇燃气气源组成多元化,用气结构和能源结构持续优化。陆上建成四川、鄂尔多斯和塔里木

参考文献

- [1]张智,邓皓匀,向世林.储气库井在CO₂腐蚀作用下的环空带压安全管控[J].中国安全生产科学技术,2024,20(09):120-127.
- [2]毕彩霞,刘德生,刘文远.H₂S/CO₂酸性条件下储气库管道腐蚀特性实验研究[J].中国设备工程,2024,(S2):295-298.
- [3]于瑶如.盐穴储气库注采管柱内腐蚀速率预测研究[D].西安建筑科技大学,2024.
- [4]黄剑华,赵春,赵建国.油气藏型储气库CO₂腐蚀防护技术研究[J].油气田地面工程,2024,43(03):76-81.

- [5]徐高,谢芳毅,曹振瑞,等.压缩空气储能盐穴储气库技术及其智能建造工艺技术研究[J].热力发电,2024,53(09):48-59.
- [6]赵庆森.大庆油田储气库老井处置技术与应用[J].化学工程与装备,2023,(10):109-112.
- [7]骆正山,于瑶如,骆济豪,等.基于IAOA-KELM的储气库注采管柱内腐蚀速率预测[J].安全与环境学报,2024,24(03):971-977.
- [8]马泽林.双六储气库油套管CO₂腐蚀-力学一体化设计方法研究[D].中国石油大学(北京),2023.

[第一作者简介]王曦,高级工程师,从事城市燃气工程设计及建设管理工作。