

煤层气管路除垢与缓蚀工艺研究及产生的经济效益分析

郭剑卫（山西蓝焰煤层气集团有限责任公司，山西 晋城 048000）

摘要：本文深入探讨了煤层气管路的除垢与缓蚀工艺，详细阐述了煤层气管除垢与缓蚀的重要意义，系统分析了煤层气除垢工艺的基本特点及应用路径，涵盖化学除垢法、物理除垢法和机械除垢法等多种方式。同时，对煤层气管缓蚀工艺的实现方式及产生的经济效益进行分析。旨在为煤层气行业在管路维护方面提供理论支持与实践指导。

关键词：煤气层；管路除垢；缓蚀工艺；经济效益；应用路径

0 前言

煤层气作为一种重要的非常规天然气资源，在能源领域的地位日益凸显。在煤层气的开采和输送过程中，煤层气管路的正常运行至关重要。由于煤层气中含有多种杂质，以及输送环境的复杂性，管路极易出现结垢和腐蚀问题。这些问题影响管道的使用寿命，还对气体运输质量产生不利影响，甚至引发安全隐患。因此，深入研究煤层气管路的除垢与缓蚀工艺具有重要的现实意义。

1 煤层气管除垢与缓蚀的重要性

1.1 延长管道使用寿命

煤层气成分复杂，含有甲烷、氮气、二氧化碳等多种物质，同时还含有少量的硫化氢、水蒸气以及其他杂质。这些成分在特定条件下会诱发管道出现结垢和腐蚀等质量问题。例如，当煤层气中的硫化氢与管道内壁的金属发生化学反应，会形成硫化物腐蚀产物，逐渐破坏管道的金属结构；而水蒸气在一定温度和压カ条件下，会与其他杂质结合，加速结垢过程。煤层气管道长期处于复杂的工作环境中，结垢和腐蚀会不断侵蚀管道内壁。

垢层的积累会导致管道内径减小，增加流体阻力，使管道承受更大的压力。以实际案例来看，某煤层气田的部分管道因结垢严重，在运行两年后，管道内径缩小了约 15%，流体阻力增加了 30%，不仅使得输送泵的能耗大幅上升，还导致管道连接处出现了泄漏隐患。

同时，腐蚀会削弱管道的壁厚，降低管道的强度。相关研究表明，腐蚀严重的管道，其壁厚每年会减薄 0.1mm–0.5 mm，这大大缩短了管道的安全使用周期。通过有效的除垢与缓蚀措施，可以减少垢层和腐蚀对管道的损害，延长管道的使用寿命，减少结构性故障发生概率，降低管道更换和维护成本。

1.2 保证企业经济收益

有效的除垢措施能够显著降低管道内的流体阻力。当管道内的垢层被清除后，煤层气在管道中的流动更加顺畅，输送效率得以提高。例如，经过除垢处理的管道，其输送能力可提高 10%–20%。这意味着企业在不增加新管道投资的情况下，能够输送更多的煤层气，增加销售收入。假设企业每年的煤层气产量 1000 万立方米，市场价格为每立方米 2 元，在除垢后输送能力提高 15%，每年可多销售 150 万立方米的煤层气，增加收入 300 万元。缓蚀措施同样对企业经济效益有着重要影响。

通过缓蚀技术，可有效降低管道的腐蚀速度，减少因腐蚀泄漏而导致的煤层气泄漏损失。煤层气泄漏不仅造成资源浪费，还可能引发安全事故和环境污染问题，带来巨大的经济赔偿风险。据统计，一次严重的煤层气泄漏事故，经济损失可达数百万元甚至上千万元，采用缓蚀措施后，可将管道腐蚀泄漏的概率降低 80% 以上，大大减少了潜在的经济损失。同时，由于缓蚀措施延长了管道的使用寿命，减少了频繁更换管道对生产的影响，保证了生产的连续性，进一步稳定了企业的经济收益。

2 煤层气管除垢工艺应用路径

2.1 化学除垢法的应用

化学除垢法是利用化学试剂与垢层发生化学反应，将垢层溶解或转化为可溶物质后去除。常见的化学除垢剂有酸类、碱类和螯合剂等。以盐酸为例，在处理以碳酸钙为主的垢层时，一般使用浓度为 5%–15% 的盐酸溶液较为合适。其反应原理是盐酸 (HCl) 与碳酸钙 (CaCO₃) 发生反应，生成可溶性的氯化钙 (CaCl₂)、二氧化碳 (CO₂) 和水 (H₂O)，化学方程式为：CaCO₃+ 2HCl = CaCl₂ + H₂O + CO₂ ↑。

在实际应用中，首先需要对垢层成分进行分析，

通过光谱分析、X射线衍射等技术确定垢层的主要成分，以此为依据选择合适的化学除垢剂。确定除垢剂后，工作人员要根据管道材质、垢层厚度等因素精确控制除垢剂的浓度和反应时间。例如，对于碳钢材质的管道，若使用盐酸除垢，当垢层较薄（小于1mm）时，可采用5%~8%的盐酸溶液，反应时间控制在3~6小时；若垢层较厚（大于1mm），盐酸浓度可适当提高至10%~15%，反应时间延长至6~12小时。

同时，为了防止盐酸对管道的腐蚀，通常会在盐酸溶液中添加缓蚀剂，缓蚀剂的添加量一般为0.5%~1%。在除垢过程中，可采用循环清洗的方式，通过泵将除垢剂溶液在管道内循环流动，使除垢剂与垢层充分接触反应，提高除垢效率。化学除垢后，必须对管道进行充分的冲洗，一般先用清水冲洗至排出水的pH值接近中性，然后再用含有0.1%~0.3%氢氧化钠（NaOH）的碱性溶液进行中和冲洗，以确保残留的酸性除垢剂被彻底清除，最后再用清水冲洗干净。

2.2 物理除垢法的应用

在物理除垢法应用过程中，工作人员主要借助超声波除垢、高压水射流除垢等工艺，进行除垢活动。具体来看，超声波除垢是利用超声波的高频振动作用，使垢层从管道内壁脱落。一般来说，用于煤层气管道除垢的超声波频率在20kHz~100kHz之间。当超声波在液体中传播时会产生空化效应，形成微小的气泡，这些气泡在破裂时会产生强大的冲击力，破坏垢层与管道内壁的结合力。

在实际操作中，将超声波发生器安装在管道外部，通过换能器将电能转换为超声波能量，并传递到管道内部的液体介质中。根据管道的直径和垢层的情况，调节超声波的功率和作用时间。对于直径为100mm~300mm的管道，当垢层较薄时，可采用功率为500W~1000W的超声波发生器，作用时间为30~60分钟；若垢层较厚，可适当提高功率至1000W~2000W，作用时间延长至60~120分钟。高压水射流除垢则是通过高压泵将水加压后，通过喷嘴形成高速水射流，冲击管道内壁的垢层，将其剥离去。高压水射流的压力通常在10MPa~50MPa之间，流量在30L/min~100L/min。

在应用时，根据管道的材质、直径和垢层的硬度来选择合适的压力和流量，喷嘴的形状和喷射角度也会根据管道的形状和垢层分布进行优化设计，以确保水射流能够均匀地冲击到管道内壁的各个部位，达到

良好的除垢效果。

2.3 机械除垢法的应用

清管器是一种常用的机械除垢设备，它可以在管道内随流体流动，通过自身的刮削、刷洗等作用去除垢层。直板清管器适用于直径为50mm~200mm的管道，其刮削板的硬度一般在HRC50~HRC60之间，能够有效刮除较硬的垢层。皮碗清管器则适用于直径为100mm~500mm的管道，皮碗的材质通常为聚氨酯或丁腈橡胶，具有良好的柔韧性和密封性，能够适应不同管径的变化，同时对管道内壁的软垢和黏性垢有较好的清除效果。在使用清管器除垢时，工作人员要根据管道的直径、形状和垢层的特点选择合适类型和尺寸的清管器。

将清管器放入发球装置中，通过煤层气或其他推动介质将清管器推送至管道内。在清管过程中，要实时监测清管器的运行状态，可通过安装在管道沿线的压力传感器、信号发射装置等设备来获取清管器的位置和运行情况。刮刀类机械工具一般适用于管径较大且垢层较厚的局部区域。

刮刀的材质通常为高强度合金钢，刀刃的硬度在HRC55~HRC65之间。在使用刮刀除垢时，需要操作人员将刮刀通过特殊的操作工具送至管道内的垢层部位，然后手动或通过机械装置控制刮刀对垢层进行刮削。操作过程中要注意控制刮刀的力度和角度，避免对管道内壁造成过度损伤。

3 煤层气管缓蚀工艺实现方式

3.1 涂层工艺的实现

涂层工艺是在煤层气管道内壁涂覆一层防护涂层，以隔离管道金属与腐蚀性介质的接触。常见的涂层材料有有机涂层和无机涂层。有机涂层方面，环氧涂层较为常用。在涂覆环氧涂层时，一般先对管道内壁进行严格的预处理，通过喷砂处理使管道内壁的粗糙度达到Ra 3.2~6.3 μm，这样能增强涂层与管道的附着力。环氧涂料的固体含量通常在60%~80%之间，涂覆时采用无气喷涂或有气喷涂的方式，涂层厚度一般控制在200~300 μm。

经过这样的处理，环氧涂层能够在管道内壁形成致密的保护膜，有效阻挡煤层气中的腐蚀性介质。无机涂层中的陶瓷涂层，通过高温热喷涂技术进行涂覆。例如，采用等离子喷涂氧化铝陶瓷涂层时，氧化铝粉末的粒度一般在50~150 μm。在喷涂过程中，等离子弧的温度高达10000~20000 °C，喷涂距离控制在

100—200mm，涂层厚度通常0.3—0.8mm。陶瓷涂层硬度高、化学稳定性好，能有效抵抗煤层气中酸性成分的腐蚀。

3.2 缓蚀剂的添加应用

缓蚀剂是一种能够抑制金属腐蚀的化学物质。在煤层气管道中添加缓蚀剂，可以在管道内壁形成一层保护膜，阻止腐蚀性介质与金属的接触。工作人员连续注入缓蚀剂时，对于硫化氢含量较高（如体积分数在0.5%—2%）的煤层气管道，咪唑啉类缓蚀剂的注入量一般为50—100mg/L。缓蚀剂通过专门的注入泵连续注入管道，注入压力要略高于管道内压力，通常高于管道压力0.5—1MPa，以确保缓蚀剂能顺利进入管道并均匀分布。间歇注入缓蚀剂适用于腐蚀速率相对较低的情况。

以某煤层气田为例，当管道腐蚀速率在0.05—0.1mm/a时，采用季铵盐类缓蚀剂，每15—30天注入一次，每次注入量根据管道容积和腐蚀情况确定，一般为每立方米管道容积注入200—500mg缓蚀剂。注入时可通过管道上的预留注剂口进行操作，注入后要确保缓蚀剂在管道内充分扩散。在除垢过程中，工作人员可采用循环清洗的方式，通过泵将除垢剂溶液在管道内循环流动，使除垢剂与垢层充分接触反应，提高除垢效率。

化学除垢后，必须对管道进行充分的冲洗，一般先用清水冲洗至排出水的pH值接近中性，然后再用含有0.1%—0.3%氢氧化钠（NaOH）的碱性溶液进行中和冲洗，以确保残留的酸性除垢剂被彻底清除，最后再用清水冲洗干净。

3.3 电化学保护的实现

电化学保护包括牺牲阳极保护法和外加电流阴极保护法。牺牲阳极保护法中，对于埋地煤层气管道，若采用镁合金牺牲阳极，镁合金的电位一般在—1.5—1.7V（相对于饱和硫酸铜参比电极）。根据管道的长度、管径以及土壤的腐蚀性等因素确定牺牲阳极的数量和间距。一般在土壤腐蚀性较弱的地区，阳极间距可为30—50m；在土壤腐蚀性较强的地区，阳极间距缩短至10—20m。每个牺牲阳极的质量根据具体情况在5—20kg之间。外加电流阴极保护法，通过外部直流电源为管道提供保护电流。

对于长距离、大口径的煤层气管道，一般选用高硅铸铁阳极作为辅助阳极。保护电流密度根据管道的材质、涂层状况以及周围环境确定，在有良好涂层的情况下，保护电流密度一般为5—10mA/m²；若涂层状况较差，保护电流密度需提高至20—50mA/m²。电源设备的输出电压根据管道的实际情况调整，一般在1—10V之间。同时，要通过参比电极实时监测管道的电位，确保管道电位处于—0.85—1.2V的保护电位范围内，以达到最佳的保护效果。

4 结语

煤层气管路的除垢与缓蚀工艺对于保障煤层气的安全、高效输送具有重要意义。通过深入研究和合理应用各种除垢与缓蚀工艺，可以有效延长管道使用寿命，提升经济效益，压缩成本支出。在实际应用中，需要根据煤层气的成分、管道的运行条件等因素，综合选择合适的除垢与缓蚀方法，并不断优化工艺参数，以实现最佳的维护效果。

参考文献：

- [1] 刘杰, 张海云, 杨斌等. 煤矿瓦斯抽放管路自动放水远控系统设计与研究 [J]. 中国高新科技, 2024(14):16-17.
- [2] 唐文哲, 张群, 陈玉涛等. 低浓度煤层气输送阻火器设计参数优化分析 [J]. 矿业安全与环保, 2024(1): 109-113.
- [3] 刘廿竹, 吴书成. 燃气管路智能化加臭系统应用实例 [J]. 铁法科技, 2023(2):310-313.
- [4] 苏现波, 黄津, 王乾等. CO₂ 强化煤层气产出与其同步封存实验研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2023(1):176-184.
- [5] 毕延森, 高德利, 鲜保安. 煤层气水平井筛管密集分段径向射流增透方法 [J]. 石油钻采工艺, 2024(1): 119-129.
- [6] 贾亚宁, 任晓娟, 樊欣欣. 煤层气井缓蚀阻垢剂筛选及复配实验研究 [J]. 石油化工应用, 2016, 35(11):3.
- [7] 张浩亮, 顾根堂, 薛志亮, 等. 煤层气集输管网积液在线监测及处理技术 [J]. 中国煤层气, 2023, 20(06):22-25.
- [8] 程超, 陶占盛, 郝建, 等. 沁水盆地煤层气地面集输系统现状及其优化展望 [J]. 能源与节能, 2021(11):126-127+149.

作者简介：

郭剑卫（1986-），男，汉族，籍贯：山西省晋城市，山西蓝焰煤层气集团有限责任公司，工程师，本科，研究方向：煤层气开发与利用。