

成品油输送管道中颗粒沉积对管道质量的影响分析

张桐 李淇（大港油田第三采油厂修井管理中心，河北 沧州 061000）

孙诗昶（大港油田第三采油厂第一采油作业区，河北 沧州 061000）

摘要：成品油输送管道在长期运行过程中，颗粒沉积现象普遍存在，严重影响管道的运行效率，已成为当前管道完整性管理的关注方向。本文系统分析了成品油管道中颗粒沉积的来源与特性，阐述沉积形成的驱动力与抑制因素，进一步探讨了颗粒沉积对管道质量的直接影响，针对现有检测技术，本文梳理了传统检测方法与新兴技术应用的发展趋势，提出了成品油管道颗粒沉积的防控策略，提升管道安全管理水平。

关键词：成品油管道；颗粒沉积；腐蚀；管道质量

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)025-0100-03

Analysis of the influence of particle deposition in refined oil transmission pipelines on pipeline quality

Zhang Tong, Li Qi (Workover Management Center, No. 3 Oil Production Plant of Dagang Oilfield, Cangzhou Hebei 061000, China)

Sun Shichang (No.1 Oil Production Area, No.3 Oil Production Plant, Dagang Oilfield, Cangzhou Hebei 061000, China)

Abstract: In the long-term operation of refined oil pipelines, the phenomenon of particle deposition is widespread, which seriously affects the operation efficiency of pipelines, and has become the focus of current pipeline integrity management. This paper systematically analyzes the sources and characteristics of particle deposition in refined oil pipelines, expounds the driving force and inhibitory factors of deposition formation, and further discusses the direct impact of particle deposition on pipeline quality.

Keywords: refined oil pipelines; particle deposition; Corrode; Pipe quality

成品油管道作为我国能源输送的重要基础设施，承担着大规模、高效率的油品远距离输送任务。随着管道运行时间的延长，颗粒沉积问题日益突出，已成为影响管道安全性、经济性及运行效率的重要因素之一。颗粒沉积不仅导致管道内壁局部腐蚀加速，还会引起输送阻力增大、能耗上升、清管维护难度增加，严重时甚至可能引发管道穿孔事故，造成重大环境污染与经济损失。

1 成品油管道沉积颗粒来源与特性分析

成品油输送管道在长期运行过程中不可避免地受到颗粒沉积影响，这些颗粒的来源及特性直接决定了沉积过程的复杂性及其对管道质量的潜在危害。从颗粒来源来看，首先是原油或成品油本身所含的固有杂质，包括铁锈、泥沙、催化剂残渣、硫化物等。这些杂质可能在炼油工艺过程中未被完全去除，随成品油进入输送系统，在长期输送过程中逐渐沉积于管道内壁。其次，外部侵入颗粒也是重要来源之一，主要包括施工阶段遗留的颗粒杂质、环境中渗入的粉尘颗粒、管道老化过程中剥落的腐蚀产物，以及微生物代谢产生的生物膜碎片等。这些颗粒通过法兰、接口微漏、维护作业等环节进入管道，尤其在长期运行管道中，

外部颗粒源的累积效应不可忽视。颗粒的物理化学性质对沉积行为具有决定性影响。粒径是首要因素，粒径越小，随流体悬浮能力越强，但过小颗粒易在油—管壁界面形成致密沉积层；大粒径颗粒易于快速沉降，导致局部沉积物堆积。颗粒密度越大，受重力驱动沉降趋势增强，易在低流速区域形成稳定沉积。颗粒表面电荷影响其在油相中的分散稳定性及与管壁的相互作用，电荷不平衡会促使颗粒相互聚集或附着于管壁。

2 成品油管道沉积驱动力与抑制因素

2.1 流体力学因素

管内流速的波动直接改变流体对颗粒的拖曳力，较高流速有助于颗粒保持悬浮状态，降低沉积风险，而流速下降则易导致颗粒沉降。湍流强度越大，颗粒在流体中的搅拌作用增强，可抑制沉积；反之，在层流或弱湍流区，颗粒沉积更为明显。雷诺数作为表征流动状态的重要参数，对颗粒与管壁碰撞频率具有直接影响，低雷诺数下沉积趋于稳定堆积。

2.2 物理化学因素

油—颗粒界面张力决定了颗粒在油相中的分散性，界面张力高时颗粒更易聚集沉降。管壁润湿性（亲油性或亲水性）影响颗粒与管壁的吸附能力，亲油性强

的管壁更易吸附油相中的颗粒。静电吸附作用在高压输送环境中尤为突出，电荷积聚导致颗粒被管壁静电力吸引，形成致密沉积层。

2.3 环境因素

温度变化是沉积过程中的关键变量，低温环境易引发蜡沉积，进而促进颗粒嵌入蜡层，形成复合沉积物。输送压力的波动则影响油品的流动状态及颗粒携带能力，频繁的压力波动可破坏原有沉积层的稳定性，导致沉积物的二次迁移或堆积加剧。

3 颗粒沉积对管道质量的直接影响

3.1 管道内腐蚀加速

颗粒沉积对成品油管道内壁腐蚀具有明显的加速作用。沉积层往往形成复杂的“微电池”环境，导致电化学腐蚀过程加剧。其中，垢下腐蚀是较为典型的现象。由于沉积层覆盖管壁，局部区域形成氧浓差电池，阴极区供氧充足而阳极区贫氧，导致局部电位差加大，从而加剧金属溶解。缝隙腐蚀同样频发，沉积物与管壁之间形成微小缝隙，油品和水分渗入后在缝隙内滞留，形成酸性或含盐腐蚀环境，进一步腐蚀管壁。颗粒本身成分亦是腐蚀加速的重要因素。含硫化合物、氯离子、催化剂残渣等颗粒成分与油品中的微量水分或其他腐蚀性物质发生协同作用，生成具强腐蚀性的腐蚀产物。

3.2 输送效率下降与能耗增加

颗粒沉积直接导致成品油管道输送效率下降。沉积层附着在管道内壁，造成有效管径减小，流体沿程阻力显著增大。摩阻系数随着沉积层厚度的增加而上升，导致泵送压力需求增加，输送功耗显著提高。研究表明，当沉积层厚度达到管径的5%–10%时，摩阻系数可提升20%以上，泵能耗增长10%–15%，对系统整体能效产生负面影响。沉积厚度与流速、输送量之间存在定量关系。低流速段（如启动、停输频繁段）易形成初期沉积，沉积增长速率与流速成反比。当管道运行在低雷诺数状态时，颗粒更易沉积并稳定堆积，进一步加剧流量衰减。长期运行过程中，流量衰减表现出非线性趋势，沉积层的局部堆积可能引起流态紊乱，降低输送均匀性，甚至导致波动性压力脉动现象，增加运行风险。

3.3 设备与附属设施损伤

颗粒沉积对成品油输送系统中的泵、阀门、流量计等附属设备同样存在不容忽视的磨损与冲蚀风险。高速运行的油品夹带颗粒不断冲刷设备内部表面，导致冲蚀腐蚀并产生微裂纹，降低设备使用寿命。泵体叶轮、阀芯、阀座、流量计的敏感元件均属于高风险区域，颗粒粒径较大或硬度较高时，冲蚀损伤尤为严

重，长期运行下易导致设备性能下降、计量精度降低或故障停机。管道结构中弯头、变径段、分支接口等局部区域因流态变化导致颗粒堆积风险增大。局部沉积层形成后，不仅影响局部流态稳定性，还易诱发局部堵塞隐患，尤其在低流速或倒坡段最为明显。一旦形成严重堵塞，将引发系统停输或需进行高强度清管作业，带来较大维护压力。颗粒沉积物若长期未清理，常与油品中蜡、沥青质等物质共同形成致密、坚硬的结垢层。清管球在通过此类区域时易出现卡堵风险，特别是在结垢层硬化严重、局部管径明显收缩时，清管操作难度大幅增加，清管周期需适当缩短且需采用更高规格设备，导致维护成本上升。

4 颗粒沉积的检测与评估技术

4.1 传统检测方法

成品油输送管道中颗粒沉积的检测，传统方法仍占据重要地位，尤其在长期运行管道的风险评估与维护策略制定中具有实际指导意义。当前，内检测技术是监测沉积层的主要手段之一。漏磁检测作为一种成熟的内检测方法，主要通过检测磁通泄漏信号来识别管道内壁的金属损伤及局部沉积引起的壁厚变化。尽管MFL对非金属沉积的直接识别能力有限，但通过对壁厚异常区域与运行参数，可间接推断沉积情况。超声波检测则可通过超声波回波时差对沉积层厚度进行较高精度测量，尤其在检测局部堆积沉积层时具有较好适应性。

外检测技术方面，土壤电阻率法能够通过监测管道周围土壤电性变化，间接判断因沉积导致的局部腐蚀活动。红外热成像技术则利用管道表面温度分布异常，辅助判断内部沉积层对热传导特性的影响，具备非接触、快速评估的优势，尤其适用于地上段或浅埋段管道初步筛查。

4.2 新兴技术应用

随着传感技术与数据分析技术的快速发展，新兴检测技术在颗粒沉积监测领域正展现出强大的应用前景。在线监测技术是近年来研究和应用的重点方向。光纤传感器具备高灵敏度和实时性，能够实现管道内部沉积层厚度的动态监测。通过分布式光纤布设于管道外壁或内衬，可实时捕捉沉积导致的局部应变变化，进而推算沉积层演化过程。

声发射技术则通过监测管道内壁颗粒碰撞或剥落产生的声波信号，辅助判断沉积活性区域。该技术对检测早期沉积趋势及局部异常具有良好效果，尤其适用于输送条件波动频繁的管段。声发射传感器布设灵活，且可与光纤监测系统协同应用，提升整体监测精度。数值模拟预测是新兴评估手段的重要补充。利用

计算流体力学仿真技术，可模拟颗粒在油品中的运动轨迹及沉积分布特征，为沉积风险区域识别与防控设计提供理论依据。通过不断优化仿真模型，可实现与实际运行数据的高精度匹配，构建智能预测模型，为运维管理提供前瞻性决策支持。

5 颗粒沉积的防控策略

5.1 减少颗粒产生

在成品油输送管道的颗粒沉积防控中，源头控制是首要环节，通过减少颗粒物的产生与进入管道，可大幅降低后续沉积风险。采用高效过滤技术，如旋流分离器和静电聚结技术，能够有效去除油品中的悬浮颗粒和水分，显著提高油品纯净度。旋流分离器利用离心力去除大粒径杂质，静电聚结技术则通过电场作用促使微小颗粒聚合沉降，二者结合应用可实现对颗粒的深度清除。

管道施工管理需严格规范，杜绝施工残留物对后续运行的影响。施工过程中应加强清管作业，彻底清除焊渣、粉尘等杂质。同时，采用内壁涂层技术可有效降低管壁表面粗糙度，减少颗粒附着倾向，延缓沉积形成。合理设置管道运行流速，避免形成低流速区，有助于维持颗粒在油品中的悬浮状态，减少沉积。研究表明，当管道流速低于某一临界值时，颗粒沉积速率明显增加。维持适宜的输送温度，防止温度过低引起蜡或沥青质析出，也是控制复合型沉积形成的有效措施。

5.2 延缓沉积积累

在成品油管道运行过程中，过程抑制措施对于延缓颗粒沉积积累、延长清管周期具有重要作用。化学药剂的应用是主流抑制手段之一，阻垢剂通过在管壁表面形成保护膜，降低颗粒与管壁的吸附能力，抑制沉积物的形成。分散剂则能增强颗粒在油品中的分散稳定性，减少颗粒间聚集，降低沉积速率。针对不同工况，合理优化药剂种类与投加量，可有效提升抑制效果。

在管道周围布设磁场或电场，调控颗粒表面的电荷分布，减少颗粒间静电吸引力，降低其与管壁的碰撞概率。该技术对细粒径颗粒的沉积抑制效果尤为明显，且具备绿色环保、无残留的优势，适合作为化学抑制手段的补充。机械清管（如采用钢刷清管球）能有效去除早期形成的松散沉积层，防止其演变为致密难清除的结垢。对于难溶性沉积物，可辅以化学清洗（如酸洗除垢），实现深度清洁。

5.3 全生命周期管理

实现颗粒沉积防控的系统化、长效化，需从全生命周期管理角度出发，建立科学的管理体系。建设颗

粒沉积数据库，借助长期积累各阶段检测数据（如沉积厚度、成分、分布特征），结合工艺参数，建立动态数据库，可支持沉积发展趋势的精准预测，为防控措施优化提供依据。

借助物联网（IoT）技术，可实现管道运行状态、沉积动态的实时监测。通过传感器网络实时采集沉积相关参数，结合智能评估模型，形成监测-评估-干预的闭环管理体系，提升沉积风险响应的及时性和准确性。例如，当系统监测到沉积厚度接近预警阈值时，可自动触发清管计划或调整运行参数，降低突发风险。综合评估不同防控措施的实施成本与管道寿命延长带来的效益，建立科学的成本效益平衡模型，有助于企业优化资源配置，制定高性价比的防控策略。

6 结语

综上所述，成品油输送管道中的颗粒沉积问题贯穿管道全生命周期，对管道质量与运行安全具有长期且深远的影响。通过系统分析颗粒来源、沉积机理及影响机制，可以为科学制定防控措施提供依据。传统检测技术与新兴智能化手段的结合，为沉积监测与评估提供了更加精准、高效的技术支撑。源头控制、过程抑制及全生命周期管理策略的实施，有助于显著降低沉积风险，延长管道服役寿命，提升整体经济效益。随着物联网、大数据与人工智能技术的深入应用，成品油管道颗粒沉积管理将实现更高水平的智能化与动态化，促进管道行业高质量发展。

参考文献：

- [1] 黄希.含硫天然气集输过程颗粒沉积机理与控制[J].内蒙古石油化工,2024,50(02):50-53.
- [2] 李强,邱姝娟,伍奕,等.管输航煤固体颗粒物污染发展规律研究[J].石油科学通报,2023,8(06):853-862.
- [3] 程垚,张子之,栾学新,等.输油管道内腐蚀分析及影响因素[J].化工管理,2023,(06):118-121.
- [4] 王琳,范玉然,何金昆.某输油管道腐蚀穿孔失效原因分析[J].焊管,2022,45(03):50-56.
- [5] 李卫东,王文达,张宇凡,等.成品油管道顺序输送中柴油蜡沉积研究进展[J].油气储运,2022,41(01):29-33+62.
- [6] 徐哲轶.固体杂质对输油管道弯头的冲刷腐蚀仿真研究[J].中国设备工程,2019,(12):144-145.
- [7] 支树洁,崔秀国,张玉蛟,等.成品油管道高质量输送关键技术与应用[Z].中国石油天然气股份有限公司管道分公司,2020.
- [8] 张江.成品油输送管道中颗粒沉积对腐蚀的影响研究[J].当代化工,2022,51(6):1316-1319.