

石油管道中聚碳酸酯反应器气象线堵塞机理 与预防技术研究

修少伟 (中海壳牌石油化工有限公司, 广东 惠州 516000)

摘要: 石油管道是能源运输的重要基础设施,但在聚碳酸酯反应器运行过程中,气象线区域常因温差与副产物沉积而发生堵塞,严重威胁管道安全与效率。本文基于流体动力学、热力学及化学反应动力学,对气象线堵塞的形成机理进行研究,分析了物理作用与化学反应的耦合过程,并揭示了沉积物从初始生成到加速扩展直至完全堵塞的演化规律。在此基础上,提出运行参数优化、材料与添加剂应用、在线监测与智能预警及清堵维护等综合性防控措施。研究结果表明,理论分析与工程实践相结合能够有效降低堵塞风险,延长管道寿命,对保障石油管道稳定高效运行具有重要意义。

关键词: 石油管道; 聚碳酸酯反应器; 气象线堵塞; 预防技术

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0085-03

Study on the mechanism and prevention technology of meteorological line blockage in polycarbonate reactor in petroleum pipeline

Xiu Shaowei (CNOOC Shell Petrochemicals Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516000, China)

Abstract: As critical infrastructure for energy transportation, oil pipelines face significant operational challenges. During the operation of polycarbonate reactors, the weather line zone frequently experiences blockages caused by temperature fluctuations and byproduct deposition, posing serious threats to pipeline safety and efficiency. This study investigates the formation mechanism of weather line blockage through fluid dynamics, thermodynamics, and chemical reaction kinetics. It analyzes the coupled processes of physical effects and chemical reactions, revealing the evolutionary patterns from initial sediment formation to accelerated expansion and ultimate complete blockage. Building on this foundation, we propose comprehensive prevention and control measures including operational parameter optimization, material and additive application, online monitoring with intelligent early warning systems, and pipeline cleaning maintenance. Research findings demonstrate that integrating theoretical analysis with engineering practices can effectively reduce blockage risks, extend pipeline lifespan, and play a crucial role in ensuring stable and efficient operation of oil pipelines.

Key words: petroleum pipeline; polycarbonate reactor; meteorological line blockage; prevention technology

石油管道作为一类传输能量庞大且传输距离远、有效的方式,在保证能源稳定性上有着举足轻重的作用。因石油传输具有气体—液体界面特性以及副产物释放等特点,使得气象线区域常常有沉积物沉淀堵塞和结块等现象出现。这些结块现象使得传输速度慢,传输效率较低,严重的会造成设备故障和事故发生。目前关于堵塞造成的问题多为常规管路堵塞和沉淀,对于聚碳酸酯反应器气象线的堵塞机理与防控欠缺深入的研究。因此,有必要从管道运行机制的角度对气象线堵塞进行分析,并结合实际应用角度提出堵塞治理措施,提高石油管道运行的安全效益。

1 石油管道输送与聚碳酸酯反应过程的理论基础

1.1 石油管道输送系统运行特点

石油管道是长距离输送的关键设施,运行中存在温度下降、压力波动和流态转变等现象。聚碳酸酯反应物在高压下进入管道,随距离增加逐渐产生压降和

温降,改变流体黏度与相态。多相流条件下,液体、气体和颗粒并存,流动不均,局部区域易形成沉积。流速直接影响沉积。高流速可削弱颗粒附着,但能耗和磨损增加。低流速下,管壁边界层厚度增加,停滞区成为沉积集中点。温差在管道中明显,气象线尤为突出,上层气相温度高,下层液相温度低,界面温差造成副产物溶解度下降并析出。压力波动导致相态突变,副产物迅速形成固体颗粒并在低速区聚集。输送系统具有流速敏感、温差显著和压力不稳特性,这些特性叠加使气象线成为堵塞高风险点。

1.2 聚碳酸酯反应机理及副产物特性

聚碳酸酯多通过界面缩聚或熔融缩聚制备,反应生成目标产物,同时伴随低聚物、未反应单体、溶剂残留和聚合物碎片等副产物。这些副产物在管道输送中随流体迁移,受温度和压力条件影响逐渐沉积。低聚物在温度降低时失去溶解稳定性,析出为固体颗粒

并附着管壁。具有黏性的聚合物碎片在压力波动下形成胶状或膜状沉积，增强堵塞趋势。部分单体在温度梯度和剪切力作用下发生二次聚合，生成不溶性物质。副产物具有易析出、强黏附和再聚合特性，在管道运行条件下表现出明显的成垢倾向。副产物与管道的流速、温差和压力波动叠加，直接推动沉积层的形成，为气象线堵塞提供物质基础。

1.3 气象线堵塞的理论支撑

气象线为气液两相交界面区域，温差大、扰动频繁、流态复杂，是沉积物集中区。流体力学理论指出，界面扰动使速度分布不均，低速区和涡流区成为颗粒物滞留点，导致沉积层逐渐累积。热力学研究表明，界面温度骤变引起溶解度降低，副产物过饱和析出并黏附管壁。化学动力学解释了副产物在此区域发生聚集与二次反应，生成高黏性沉积物，加快堵塞速度。工程经验显示，管道堵塞往往最先出现在气象线位置。多种作用共同叠加，使该区域成为管道运行风险的关键环节。动力学、热力学和化学反应理论为解释气象线堵塞提供支撑，也是开展预防研究的重要依据。

2 聚碳酸酯反应器气象线堵塞机理

2.1 气象线运行特点与形成条件

石油管道在输送过程中，气象线是气液两相交界的特殊区域，位置随温度、压力及流量波动而变化。该区域流体相态差异明显，气相和液相之间的物理性质差距导致速度分布和传热传质行为发生突变。气象线附近温度梯度显著，上层气相温度较高，下层液相温度较低，界面温差使部分副产物溶解度迅速下降并开始析出。形成气象线的条件通常包括温度降低、压力变化以及管道流体中杂质含量升高。当流体由高温高压段流向低温低压段时，能量损失加剧，相平衡被打破，局部形成不稳定状态。此时，聚碳酸酯反应副产物及颗粒物在气液界面聚集，逐渐黏附管壁。由于气象线位置处于管道换热和相变最活跃的地带，沉积物极易富集，从而成为管道运行中最易堵塞的部位。

2.2 堵塞的物理作用机理

石油管道中的流体在输送过程中受到流速、压力和温度共同影响，这些物理因素直接决定沉积物的形成速度和堵塞趋势。低流速条件下，边界层厚度增加，靠近管壁的颗粒运动减弱，副产物更易停留并累积。高速流动虽然能减轻沉积，但会在气象线区域产生湍流与涡流，导致局部压力和温度波动加剧，反而诱发副产物析出。压力变化是另一个关键因素。管道运行中常出现周期性压力波动，使流体处于相对不稳定状态。压力降低时，副产物溶解度下降，易形成气泡和固体颗粒，快速附着在管壁。温度变化同样不可忽视，

尤其在气象线位置，温度突降使沉积物在短时间内迅速析出，黏附性增强。物理作用机理表明，流速分布不均、温度梯度和压力波动三者叠加，是石油管道气象线形成沉积和堵塞的核心驱动因素。

2.3 堵塞的化学反应机理

聚碳酸酯反应过程中产生的副产物在管道内不仅以物理颗粒形式存在，还会发生化学反应，进一步加剧沉积。未反应完全的单体在温度和剪切力作用下可能继续聚合，形成高分子物质，溶解度极低，极易在气象线区域沉积。部分低聚物在温度降低和压力波动环境下发生缩合或交联反应，生成高黏性凝胶状物质，这些沉积物紧密附着管壁，难以被流体冲刷。溶剂残留和杂质成分也可能与副产物发生副反应，生成复杂的不溶性沉积层。化学反应机理说明，堵塞并非单纯的物理沉积，而是化学变化与物理因素共同作用的结果。石油管道中的温度梯度、反应副产物性质和流体扰动，构成了促进二次反应和沉积的条件。这种化学机理导致堵塞过程不可逆，并使气象线区域成为沉积层加速形成的敏感点。

2.4 堵塞演化规律与风险分析

气象线堵塞在石油管道中呈现明显的阶段性规律。初期阶段，副产物颗粒或薄膜状沉积在管壁，厚度较小，对输送影响有限。发展阶段，沉积层逐渐增厚，管道通径缩小，流速分布恶化，涡流区和停滞区扩大，沉积速率明显加快。加速阶段，沉积层导致有效流通面积显著减小，压降升高，局部甚至出现停流，堵塞速度呈指数增长。最终阶段，沉积物封闭管道截面，输送完全受阻，存在设备损坏和安全风险。风险分析表明，温度梯度过大、流速不足、副产物浓度升高和压力不稳是决定堵塞速度的关键因素。当压降超过设定阈值、沉积层厚度超过临界值时，管道进入高风险运行状态。演化规律与风险因素说明，气象线堵塞是一个渐进并逐步加速的过程，对石油管道运行安全构成持续威胁。

3 石油管道气象线堵塞的预防与治理技术

3.1 管道运行参数优化

石油管道的运行状态是决定气象线区域是否有沉淀物形成的关键因素。堵塞问题与气温、压力及流速密切相关，有效控制参数即可减缓沉淀物的形成。至于温度的影响，管道中降温和固体的沉淀都是重要的因素，由于析出了副产物，而合适的保温措施及对远距离传输热损失的有效控制，均有利于气象线的稳定。降低副产物过饱和析出概率。在低温环境或冬季的时候需要利用加热器维持适宜温度，确保输送介质保持在适宜区间。

压力方面,应避免剧烈波动。运行中若出现频繁启停或快速调节阀门,易引起瞬时压降,使副产物迅速析出。通过保持输送压力稳定、优化泵站间距和压力控制策略,可减小波动幅度,降低沉积物形成速率。流速同样关键,低流速下边界层厚度增加,颗粒物停滞严重,高流速虽能降低沉积比例,但增加能耗。实践证明,维持流速在临界携带速度以上,能够平衡能耗与防堵效果。此外,还可通过间歇冲洗方式改善流动状态。在特定周期内适当提高流速,使已沉积的颗粒受到冲刷并随流体排出。参数优化需要结合不同工况和管道特点进行动态调整,而不是单一设定。通过精细化运行管理,可在源头上降低堵塞发生概率。

3.2 材料与添加剂防控措施

单纯依靠运行参数调整往往难以从根本上消除堵塞风险,因此需要借助材料改进与添加剂技术。管道内壁材料特性对副产物附着有重要影响。传统碳钢或合金钢表面粗糙度较大,副产物易在微小凹陷处沉积。采用内壁涂层是常用方法之一,聚四氟乙烯、环氧树脂或其他低表面能涂层可显著降低附着力,使颗粒更容易随流体携带排出。对于长期输送聚碳酸酯反应物的管道,还可考虑耐化学腐蚀和耐高温的复合材料管道,提高防护效果。

采用添加剂也是应对策略之一,添加剂能够改变化学结构从而避免形成沉淀以及减慢其速度。而螯合剂可以和杂质进行化学反应,从而降低无溶解度的沉淀生成物,抑制结垢剂在粒子的表面形成保护膜,从而达到阻止后面结晶和粘着效果。

3.3 在线监测与智能预警技术

传统管道堵塞问题往往需要人员巡查和后期维修,反应不够迅速。随着传感器技术、信息技术的发展,网络监控和智能化报警已经成为提高管道运行安全的重要手段。在管道重要部位配置压力、流量传感器可实时检测管道状态,当检测到部分压力损失或流量降低时,可以对管道部位进行定位,利用声学监测、超声测量方法测量管道内沉积厚度。通过比对不同时间的声音信号变化可预测沉积厚度增长速度。而光纤传感系统可以在长距离管道内进行整体的温度、变形监测,并且可提供堵塞部位的精确位置。

随着数据采集系统完善,众多操作数据能够被载入到智能计算模型中,并依照既往数据模式预测未来的发展。预警系统不仅能实现实时报警,也可以被管道管理系统所运用,并进行自我调控运行参数,减少人为因素的干扰。实践中,一些管道企业已经尝试实施基于大数据、人工智能的预测模型,并且精度也在稳步增强。

3.4 清堵与维护策略

尽管采取多种预防措施,管道运行过程中仍可能发生不同程度的沉积,所以必须定期清堵与维护。常用方法包括机械清理、化学清洗和综合维护策略。机械清理是使用管道疏通设备,将能够刮擦和刷洗的物品投入管道中,清除黏附于管壁表面的沉淀物。该方法效率高、操作简便,适合定期维护,但对顽固胶状沉积效果有限。化学清洗是通过将特定的溶剂或清洗液注入管道中,将沉淀物溶解或分散,随水流一起排出。常用的溶剂形式为碱性或无机溶剂,并可根据聚碳酸酯废料种类确定配置比例,以此提高其清洗效果。不过在采用化学法时,由于需要合理控制药剂浓度及反应时间,以避免对管体腐蚀,因此操作需格外注意。

制定系统化的维护策略,包括定期观察淤积情况,并制定合理的清淤频率;出现淤积迹象的前兆马上清理;结合运行数据建立维护档案,优化下一阶段运行方案。通过机械、化学与制度化维护结合,管道在运行中始终保持清洁和通畅,堵塞风险显著降低。

4 结语

石油管道在输送聚碳酸酯反应物过程中,气象线区域因温差、压力波动和副产物特性极易形成沉积并演化为堵塞,威胁输送安全。机理分析表明,物理和化学作用叠加是堵塞加速的根本原因,过程具有渐进性和不可逆性。防控实践证明,稳定运行参数能减缓沉积,改进材料和添加剂可降低附着,监测与预警有助于提前识别风险,清堵与维护确保管道长期通畅。堵塞问题虽复杂,但通过多手段协同治理可得到有效控制。未来应在智能监测、绿色防控和全寿命管理方面继续深化,以实现管道运行的高效与可持续。

参考文献:

- [1] 张文琴. 聚碳酸酯的研究进展及市场分析 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2022(003):020.
- [2] 佚名. 科思创新的聚碳酸酯共聚物生产工厂落成 [J]. 橡塑智造与节能环保, 2024(4):35-35.
- [3] 刘振翼, 万嵩, 李明智, 等. 输油管道清管工艺中硫化氢气提及放散安全性研究 [J]. 安全与环境学报, 2021(005):021.
- [4] 贾慧灵, 杜鹏飞, 孙亮. 面外弯矩下输油管道三通极限承载能力研究 [J]. 计算机与应用化学, 2022(5).
- [5] 孙智新. 输油管道应急物资供应现状及优化措施 [J]. 石油石化物资采购, 2022(14).

作者简介:

修少伟(1993—),男,汉族,河北深州人,本科学历,高级技术操作员,研究方向为聚碳酸酯生产。