

运动粘度对原油管道输送过程的影响

王 颖 王 珊 (中国检验认证集团河北有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 本文系统分析了原油运动粘度对管道输送过程的影响。首先介绍了温度、压力和原油成分对运动粘度的影响。接着分析了运动粘度对管道输送效率的影响机理。随后, 文章通过设计实验, 研究不同温度、流速下运动粘度对原油管道输送过程的具体影响。最后提出: 在管道输送设计与运行过程中, 需要通过温度调控、降黏技术及优化输送参数等手段合理控制运动粘度, 以提升输送效率, 降低运行成本。

关键词: 运动粘度; 原油管道; 输送效率; 流动阻力; 温度控制

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 022-0079-03

Influence of Kinematic Viscosity on Crude Oil Pipeline Transportation Process

Wang Ying, Wang Shan (China Certification & Inspection Group Hebei Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: This paper systematically analyzes the impact of crude oil kinematic viscosity on the pipeline transportation process. First, it introduces the effects of temperature, pressure, and crude oil composition on kinematic viscosity. Then, it examines the mechanism by which kinematic viscosity affects pipeline transportation efficiency. Subsequently, through experimental design, the study investigates the specific impact of kinematic viscosity on crude oil pipeline transportation under different temperatures and flow rates. Finally, it proposes that in pipeline transportation design and operation, kinematic viscosity should be properly controlled through temperature regulation, viscosity reduction technologies, and optimization of transportation parameters to improve efficiency and reduce operating costs.

Keywords: Kinematic viscosity; Crude oil pipeline; Transportation efficiency; Flow resistance; Temperature control

与铁路、公路和水路运输相比, 管道运输具有运输量大、成本低、安全性高和环境友好等优势。其主要靠泵站加压, 将原油从一个地点输送到另一个地点。然而, 原油的流动状态受粘度、流速及管道直径等因素影响, 尤其是高粘度原油在输送过程中易出现流动阻力增大甚至管道堵塞的问题。因此, 研究运动粘度对原油管道输送过程的影响具有重要的现实意义, 有助于优化输送工艺, 提高输送效率和稳定性。

1 运动粘度的测量方法

运动粘度是流体在重力作用下内摩擦力的量度, 直接决定了原油在管道中的流动特性。其计算式为动力粘度与同温度下该流体的密度之比:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

其中, ν 为动力粘度 (m^2/s), η 为动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), ρ 为流体密度 (kg/m^3)。运动粘度越大, 流体流动性越差, 管道输送时的阻力越大。一般用毛细管法、旋转黏度计法和落球法来测量运动粘度。其中, 乌氏黏度计是常用的毛细管法测量工具, 基于牛顿流体在毛细管中的流动时间来计算运动粘度。旋转黏度计法适用于高粘度原油, 能在不同剪切速率下测量其粘度变化特性。落球法则利用液体中球体下落的速度, 根据斯托克斯定律推算运动粘度, 适用于实验室测量特定条件下的原油粘度。

2 影响运动粘度的主要因素

原油运动粘度受温度、压力、原油成分等因素的影响。

2.1 温度对运动粘度的影响

温度对原油运动粘度的影响较大。一般来说, 随着温度的升高, 原油分子间的内聚力逐渐减弱, 使得粘滞性下降, 从而导致运动粘度明显降低, 原油流动性增强。这种现象在高凝点原油中尤为突出, 一些高凝油在低温环境下几乎呈现固态或极低流动性, 但当其加热至一定温度后, 粘度迅速下降, 恢复液态流动状态, 便于输送。在寒冷运行环境中, 为了保障原油输送的连续性和安全性, 管道可采用伴热、蒸汽加热或电加热等技术手段, 以维持油温处于合理范围, 防止因粘度升高而引起的输送困难甚至堵塞。但是温度控制也需把握尺度, 过高的加热温度会导致原油中的轻质组分挥发, 不仅损失油品资源, 还可能带来安全隐患。

2.2 压力对运动粘度的影响

压力相对于温度来说, 对原油运动粘度的影响相对较小。一般常压条件下压力变化对原油粘度的影响不明显, 但当压力升高至一定程度, 特别是在高压或超高压环境中, 原油中的沥青质、胶质等高分子量组分会因压缩效应发生聚集或结构变化, 从而使原油的粘度增加。这种效应在深海油气开采及海底管道输送

过程中尤为明显。在深海输送环境中,由于外部水压高达数十兆帕,原油处于持续高压状态,导致其流变特性显著不同于地面常规输送条件。如在接近或超过超临界压力的状态下,原油会呈现出非牛顿流体特性,其粘度随压力变化呈现非线性甚至突变性增加,给流动性控制和输送效率带来挑战。此外,高压环境还可能引起气液组分比例变化,进一步影响流动状态。

2.3 原油成分对运动粘度的影响

原油的蜡含量、沥青质和胶质等高分子组分对其运动粘度影响显著。含蜡原油在低温条件下容易析出大量蜡晶,这些蜡晶在油中逐渐聚集,形成三维空间网络结构,从而极大地限制原油分子的自由运动,导致粘度急剧上升,或引发输送过程中的凝堵现象。为了应对蜡含量高带来的流动性问题,可采用添加降凝剂、提高输送温度、或利用乳化输送技术来改善原油的低温流动性。另一方面,沥青质和胶质作为原油中的高分子芳香族组分,常以胶束或溶解状态分布于油中,其含量越高,原油的分子间相互作用越强,从而使运动粘度和流动阻力显著上升。在高温高压环境下,这些沥青质会因热力学不稳定而发生聚集沉降,进一步影响原油的稳定输送。

3 运动粘度对原油管道输送过程的影响机理

原油运动粘度会影响管道输送的效率。运动粘度越高,原油的流动性越差,分子间的内摩擦力增强,从而导致管道内流体阻力增大。在这种情况下,为维持既定的输送流量,必须提升管道压力或增加泵站功率,这会引引起系统能耗上升、输送效率下降,并可能加剧设备磨损。而当运动粘度较低时,尽管原油流动性良好,有助于降低流动阻力和能耗,但也会因轻质组分挥发增加或油品组分分离,造成原油稳定性下降,影响最终输送质量及加工性能。

另外,从流体力学角度来看,运动粘度还直接影响原油在管道中的流动状态。当粘度较大时,原油在管道内通常表现为层流特征,即流体分子在沿管道轴向有序滑动,速度分布呈抛物线状,中心速度高而近壁速度低。这种状态下,流体速度梯度小,但由于摩擦力集中在边界层,单位长度管道的能量损失较高,导致输送效率降低。相反,当运动粘度较小时,原油更容易进入湍流状态,流体呈现不规则的涡流运动,有利于流速提升与阻力分散,从而在一定条件下可提高输送效率。然而,湍流也带来加强管壁冲刷、引起管道内腐蚀速率上升等附加问题,影响油品的物理稳定性。

基于以上的分析,在原油管道输送时,须根据输送距离、管径、地理气候条件以及原油性质,来调控

管道的运行参数,确保原油运动粘度控制在适宜范围内,以实现安全、高效、经济的输送目标。同时,也应考虑采用加热、降凝、添加剂等辅助技术手段,优化原油流变特性,减少因粘度变化带来的输送风险。

对于原油运动粘度对管道输送的具体影响,可以通过设计一个实验来验证。

4 实验设计:运动粘度对原油管道输送过程的影响

4.1 实验目的

本实验旨在研究运动粘度对原油管道输送过程中流动压力损失、流速变化以及能耗等方面的影响,并探索降粘优化措施,为实际工程提供数据支持。

4.2 实验设备准备

选取可调温、控压的透明输油管,长度 10m,直径 50mm。配套压力传感器、流量计和温控加热系统。旋转黏度计用于测量不同温度、剪切速率下的运动粘度。选择低粘度、中粘度、高粘度不同组分的原油样品进行试验。压力传感器用于测量管道内不同位置的压损失。分别安装在管道入口、中段和出口位置,以测量不同位置的压损失情况。流量计用于监测不同条件下的流速变化。另外,还需要变频输油泵,可调节输送压力和流量,以测定能耗情况。温控系统可以调节原油温度,模拟不同环境条件下的输送情况。实验过程中精确控制原油温度在 20℃~60℃ 范围内。

4.3 原油样品制备与测量

选取低粘度、中粘度和高粘度三种不同粘度等级的原油作为研究对象,测定其在常温(25℃)下的初始运动粘度。在实验开始前,对各个样品进行密封存储,确保成分不发生变化。采用高精度旋转黏度计,对三种原油样品在 20℃、40℃、60℃ 温度条件下的运动粘度进行测定。

实验时,先将原油样品在恒温水浴中加热/冷却至设定温度,并持续搅拌以保证温度均匀。然后,将适量原油置于旋转黏度计的测量杯中,通过设定不同剪切速率,记录样品的粘度值,并确保测量过程中温度保持稳定。随着温度的升高,原油的运动粘度普遍下降,这主要是由于温度上升降低了分子间的内摩擦力,从而提高了流动性。

为进一步确定原油在管道输送过程中的流动状态,需要测量其密度并计算雷诺数。实验采用高精度密度计测量三种原油样品的密度值,并结合输送管道的直径和流速,计算雷诺数,其公式为:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$$

其中, ρ 为原油密度, v 为流速, D 为管道内

径， μ 为动力粘度。根据计算结果，若雷诺数小于 2000，则表明原油在管道内呈层流流动状态，流动阻力主要受粘性作用控制；当雷诺数在 2000~4000 之间时，流动状态为过渡区，会出现不稳定的流动模式；若雷诺数大于 4000，则为湍流区，流体运动受惯性力主导，压力损失显著增加。分析这些数据，可以评估不同原油在实际输送过程中的流动稳定性，并为优化输送参数提供参考依据。

4.4 运动粘度对输送压力损失的影响实验

选取一种原油样品，并在 20℃、40℃、60℃ 温度下进行管道输送试验，以分析温度变化导致的运动粘度变化对压力损失的影响。实验前，确保输油系统稳定运行，并对管道各测点的压力传感器进行校准，以提高测量精度。实验过程中，首先启动变频输油泵，将泵送压力调节至 0.5MPa，并稳定流量至 1.0m/s。在该条件下，测量管道不同位置的压力，并记录压力损失。随后，将泵送压力依次提高至 1.0MPa 和 2.0MPa，保持相同流量，重复实验并记录各测点的压力变化情况，以观察不同输送压力下的压力损失特征。

另外还可以分析流速对压力损失的影响，调整流速至 0.5m/s 和 2.0m/s，分别进行测试，并记录不同运动粘度条件下的压力损失情况。实验数据的计算基于达西 - 魏斯巴赫方程：

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

其中， ΔP 为压力损失， f 为摩擦系数， L 为管道长度， D 为管道直径， ρ 为原油密度， v 为流速。计算不同运动粘度条件下的压力损失值，可以直观分析粘度变化对输送阻力的影响。

4.5 运动粘度对流动稳定性的影响实验

模拟低温环境，将高粘度原油（含蜡原油）在 20℃ 下输送，观察管壁蜡沉积情况，并记录流动阻滞时间。升温至 40℃ 和 60℃，观察流动状态变化，并测量管道出口压力，判断是否存在流动恢复现象。改变流速，分别采用 0.5m/s 和 2.0m/s 流速输送相同原油，比较不同剪切速率下的流动特性，分析是否出现剪切变稀效应。

4.6 运动粘度对能耗的影响实验

选择相同原油，在 20℃、40℃、60℃ 三种温度下，以相同流速（1.0m/s）进行管道输送。监测输油泵的输入功率，计算不同温度（粘度）下的单位输送能耗（kWh/m³）。调整流速至 0.5m/s 和 2.0m/s，重复实验，分析流速对能耗的影响，计算泵送效率变化情况。

4.7 数据分析与总结

对中等粘度的高蜡含量原油试验的数据如表 1：

表 1

温度 (°C)	运动粘度 (mm ² /s)	流速 (m/s)	泵送压力 (MPa)	压力损失 ΔP (kPa/m)	输送能耗 (kW)
20	150	0.5	0.5	18.2	22.5
20	150	1.0	0.5	32.5	41.2
20	150	2.0	0.5	61.2	78.6
40	90	0.5	0.5	12.4	18.3
40	90	1.0	0.5	25.6	36.9
40	90	2.0	0.5	47.3	69.4
60	50	0.5	0.5	7.8	12.7
60	50	1.0	0.5	18.3	28.4
60	50	2.0	0.5	35.6	54.2

根据实验数据可以得出：温度升高时，原油的运动粘度显著降低，这直接改善了其流动性，减少了管道输送过程中的阻力。输送能耗也随着温度升高而降低，因为泵送功率与管道压力损失直接相关，粘度降低意味着更小的流动阻力，从而减少输送过程中的能量消耗。另一方面，在相同温度下，提高流速会导致压力损失上升，特别是在湍流条件下，流速与压力损失呈非线性增长。实验结果还显示，在较高温度下，不同流速的压力损失增幅较低，说明高温能够缓解流速增加带来的压力损失上升趋势。因此，在实际原油管道输送中，可通过适当提高温度以降低粘度，从而减少压力损失和输送能耗，同时结合优化流速的方式，在保证输送能力的前提下，降低能源消耗，提高整体输送效率。对于高粘度原油，可以采用加热输送或降粘剂辅助措施，以进一步优化流动特性，确保管道运行的稳定及经济性。

5 结语

综上，为提高原油管道输送的效率，需要合理控制流体的运动粘度。通过温度调控、降黏措施以及输送参数优化，可以有效减少因运动粘度变化带来的不利影响，提高原油管道的整体经济性和安全性。未来研究可进一步探索智能控制技术在运动粘度调控中的应用，以实现更高效、更节能的管道输送方案。

参考文献：

[1] 彭瑜洲, 黄燕梅, 朱立业, 等. 石油产品粘度测定影响因素及建议 [J]. 石化技术, 2024, 31(06): 63-64.

[2] 祖明栋. 探析成品油管道输送面临的问题及发展方向 [J]. 石化技术, 2024, 31(11): 327-328+323.

[3] 刘颖, 李孟尧, 唐梓钧. 影响原油运动粘度分析准确性的因素及对策 [J]. 质量与认证, 2023(07): 51-53.

[4] 李纯, 寇志超, 常志浩. 原油长输管道安全输送防护技术 [J]. 化工管理, 2022(09): 98-100.

[5] 孙思彤. 石油产品运动粘度分析准确性的影响因素及对策 [J]. 齐鲁石油化工, 2022, 50(01): 77-80.

作者简介：

王颖（1990-），女，河北唐山人，本科，工程师，研究方向：石油化工检验。