

Study on Fluid Dynamics Characteristics in Pipeline Transportation and Its Influence on Energy Efficiency

Bing Zheng

Mengxi Engineering Management Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132000, China

Abstract

As a crucial method for modern energy and material transportation, pipeline transport efficiency is profoundly influenced by fluid dynamics characteristics. The motion state of fluids within pipelines, their physical properties, and interactions with structural conditions directly determine system pressure loss, energy consumption levels, and operational stability. By analyzing the differences in flow patterns between laminar and turbulent flows, defining Reynolds numbers, studying boundary layer effects, and examining how viscosity, density, and temperature regulate flow behavior, we can reveal the underlying mechanisms of energy loss. Additionally, parameters such as pipe diameter, component structures, and surface roughness play critical roles in flow resistance formation and energy transfer. Combining control strategies with numerical simulation optimization techniques enables effective enhancement of transport efficiency and energy consumption control, providing theoretical support and technical pathways for efficient energy system operation.

Keywords

Fluid dynamics characteristics; Pipeline transportation; Energy efficiency analysis; Flow state; Structural parameters

管道运输中的流体力学特性及其对能效的影响研究

郑冰

吉林梦溪工程管理有限公司, 中国·吉林 吉林 132000

摘要

管道运输作为现代能源与物料传输的重要方式, 其运行效率受到流体力学特性的深刻影响。流体在管道内的运动状态、物理属性及与结构条件的相互作用, 直接决定了系统的压损程度、能耗水平及运行稳定性。通过分析层流与湍流的流态差异、雷诺数界定、边界层效应以及粘度、密度、温度等因素对流动行为的调节作用, 可揭示能效损耗的内在机制。同时, 管道直径、构件结构与表面粗糙度等参数在流阻形成与能量传递中扮演关键角色。结合控制策略与数值模拟优化手段, 可有效实现输送效率提升与能耗控制的目标, 为能源系统的高效运行提供理论支持与技术路径。

关键词

流体力学特性; 管道运输; 能效分析; 流动状态; 结构参数

1 引言

随着能源基础设施的不断升级, 管道运输在油气、水资源和化工物料等大宗流体的远距离输送中发挥着不可替代的作用。相比其他运输方式, 管道系统具有连续性强、自动化程度高、运行成本低等优势, 但其能效水平却受到流体力学行为的显著影响。流体在管道中的运动并非理想状态, 而是受到流速、粘性、湍流发展、构件干扰等多重因素的调制, 进而导致压损增加和能源浪费。与此同时, 管道系统的结构设计、运行工况与流体属性之间存在复杂耦合, 优化这些变量之间的关系成为提升运输效率的关键。本文从流体力学视角出发, 系统探讨管道运输中的流动特性与能耗之间的

联系, 并提出具有针对性的能效优化路径, 以期对相关工程提供技术依据。

2 管道运输中流体运动状态的基本特征

2.1 层流与湍流条件下的流速与压力分布规律

在管道内进行流体输送时, 流体的流动状态对速度分布和压力梯度的影响极为关键。层流状态下流速呈抛物线分布, 中心流速最大, 靠近壁面的速度趋于零, 压降主要由黏性摩擦引起。湍流状态下速度分布趋于扁平化, 流体颗粒间动能交换频繁, 导致沿程压损显著增加。流速的波动性与压力变化在湍流中更加剧烈, 使得流场特征复杂化。管道断面上不同位置的速度梯度与流体黏性形成剪切应力, 对能量损耗造成直接影响。

2.2 雷诺数临界值对流态变化的判定机制

雷诺数是判断管道内流体流态的重要参数, 其定义为

【作者简介】郑冰(1990-), 男, 中国辽宁沈阳人, 本科, 工程师, 从事地面建设和油气储运研究。

惯性力与黏性力的比值，数值大小直接决定流动状态的转变。当雷诺数低于约 2000 时，流体维持稳定层流状态，流线平行无扰动；超过 4000 后，流动呈现明显的湍流特征，能量交换强烈，压损剧增。临界值区间之间的过渡状态对系统运行稳定性提出挑战，微小扰动可能触发流动失稳。雷诺数受流速、管径和流体黏度共同影响，在实际工程中通过控制这些变量可延缓湍流的产生。对雷诺数与压损、流速分布等物理量的函数关系进行分析，有助于预测系统能耗变化趋势，指导参数优化，提升运行效率^[1]。

3 管道系统结构对流体行为的调控作用

3.1 管径与输送流量的数学关系建模

管道直径是决定流体输送能力的核心参数，与流量之间存在显著的非线性关系。在层流状态下，根据哈根-泊肃叶定律，体积流量与管径的四次方成正比，管径变化对输送能力影响显著。在湍流状态中，尽管流量受管径控制仍较为明显，但还需考虑流态不稳定带来的附加损耗。增大管径虽能降低流速和摩阻系数，但也增加建设成本与占地面积。因此，需结合伯努利方程、连续性方程及能量损失模型进行综合建模，求解在不同输送需求和管道长度条件下的最优管径。通过参数优化分析，可在保障输送效率的前提下降低泵送能耗，实现系统经济性与运行能效的平衡。

3.2 局部构件引发的流动阻力与压损变化

在实际管道系统中，弯头、三通、阀门等局部构件不可避免地会对流体产生附加阻力。这些构件改变了流线方向与速度分布，使局部区域出现漩涡、回流和湍动现象，导致能量损失集中。局部阻力通常用阻力系数表征，其数值受构件几何形状、流体状态与安装方式影响较大。例如直角弯头较大曲率弯头的阻力系数更高，压降也更显著。不同构件的组合方式对系统总阻力贡献不同，通过布置优化与形状改进可在不影响功能的基础上减少局部能耗。研究这些构件的流动干扰特征及其与主流相互作用规律，有助于在系统设计阶段进行有效调控，提高整体输送效率与运行经济性。

3.3 内壁粗糙度对摩阻系数与能耗的影响

管道内壁的粗糙度对流体运动形成直接干扰，尤其在湍流状态下，其作用更为显著。粗糙表面会增加边界层扰动强度，形成小尺度漩涡结构，导致流体动能向热能转化加剧，引发能耗升高。摩阻系数作为衡量壁面摩擦效应的参数，随粗糙度提升而增大，并在临界雷诺数后呈非线性增长趋势。工程中常采用内衬材料、喷涂涂层或抛光处理等方法降低粗糙度，减小摩擦力损失。不同材料与处理方式对流阻的抑制效果存在差异，应结合实际工况进行比选。通过实验测定与数值模拟手段对粗糙度与摩阻变化规律进行量化建模，有助于提升输送系统的能效表现与使用寿命。

4 流体物理性质对运输能效的作用机理

4.1 粘度参数对压力损失和泵功的耦合效应

流体的粘度直接影响其在管道中的流动状态和所需的能量输入。高粘度流体在流动过程中产生的剪切阻力显著增强，使得沿程压降明显加大，从而要求泵机提供更大的驱动力以维持预定流速。此过程中的能量转化效率会受到粘性耗散的持续削弱，导致整体泵功需求急剧上升。不同粘度条件下的摩阻特性变化不仅改变了管道内的速度分布形态，也对系统压损模型的适用性提出挑战。在实际工况中，流体粘度往往与温度相关，呈现出非线性变化趋势，因此需要在控制系统中嵌入动态调节功能以适应粘度波动对流动特性的影响。在层流状态下粘度占主导作用，能耗主要集中于内摩擦力所致的压降；而在湍流状态中，虽然惯性力主导流场，但粘度依然通过影响临界雷诺数及边界层行为间接控制能量损耗。因此在系统设计与运行管理中，应准确测定并动态跟踪流体粘度参数，通过模型化耦合分析粘度变化与泵功需求之间的定量关系，实现输送功耗的最优调配^[2]。

4.2 密度波动对流动惯性与动能传递的影响

密度作为衡量流体单位体积质量的基本参数，在管道运输中对惯性特征及动能传递效率起到关键控制作用。密度增大会显著提升流体在单位体积内所蕴含的动能，同时也提高了流体在加速、减速及方向改变时的惯性阻力，对输送系统中的流动调节机制构成挑战。密度变化还将影响管内压强梯度与静压力分布规律，进而作用于泵机的负载响应。对于多相混输或存在温度梯度的系统，密度分布呈现非均匀状态，在垂直管段中尤为显著，常引发分层流、回流及不稳定区的形成，从而造成能耗激增。密度波动还对声速传播速度、压缩性响应和压力波动特征构成干扰，使系统更易发生振荡和共振现象，降低流动效率与结构安全性。因此在设计和运行管道系统时，应将密度波动纳入输送模型中，对流体动能的空间传递路径进行细化解析，借助惯量控制、质量守恒方程与能量守恒关系实现对密度变化带来的能效波动进行动态调节，以稳定运输状态与降低能源消耗。

4.3 温度对体积流量与黏滞力的双重调节

温度作为影响流体物性的重要变量，其在管道输送中的变化会同时作用于流量规模与阻力大小。温度升高通常会降低流体的动态粘度，削弱分子间作用力，使流体更容易克服摩擦力，从而降低压降并减少所需泵功。然而，温度变化还会引起体积膨胀或压缩，从而影响流量恒定性。对于液体而言，高温可导致体积膨胀率上升，增加输送体积流量；对于气体，温度提升对体积变化的敏感性更强，流量波动幅度更大，需通过流量计与调控阀实现精细调节。温度变化还影响流动状态转变的临界条件，使层流与湍流之间的临界雷诺数发生偏移，引发流动不稳定，进而增加系统的能耗与控

制复杂度。温度场不均所造成的热对流与密度差驱动现象也可能在特定管段内形成局部流动扰动,干扰主流路径的稳定性。因此在热敏感型流体输送系统中,应将温度参数纳入实时监控与调节环节,通过保温材料、热交换设备与在线调温技术维持温度稳定,在保障体积流量充足的同时有效抑制因黏滞力波动带来的能耗不确定性。

5 提升管道运输能效的流体力学控制策略

5.1 通过变频控制实现压力与流速的动态匹配

管道运输中的能效提升不仅依赖于静态结构优化,还需要动态控制手段以适应工况波动。变频控制作为泵机运行管理的重要方式,可通过调整电机频率实现泵速与输送需求的同步变化,从而优化压力与流速之间的耦合关系。在高流量低阻力时,变频控制能有效降低泵转速,避免过度输送导致的能量浪费;在高阻力状态下,系统可自动提升频率以维持目标流速,提升响应效率。该策略适用于昼夜负荷差异显著或物料粘度随时间变化的工况,尤其在长距离输送与多级加压系统中表现出较强的节能潜力。通过构建压力传感反馈回路与控制逻辑函数,实现对变频参数的实时调整,使流速控制具备前馈预测与反馈修正功能,从而提升系统整体流动稳定性与能效水平^[1]。与传统定速控制相比,变频控制减少了泵的空载运行时间,延长了设备使用寿命,并使系统具备更高的柔性调度能力,是构建高效输送系统不可或缺的流体力学控制手段。

5.2 优化管网布设以降低能量损耗与回流干扰

管道网络的布局对整体输送能效具有决定性影响。合理的布设方式能够减少流动路径中的弯折、分支和高落差区域,从而有效降低沿程压降和局部能量损耗。在多点供输场景中,通过环状管网结构提升流动均衡性,避免单侧压力集中带来的震荡现象。分支节点的数量与角度应精确控制,以减少回流干扰与流向反复改变引发的能耗上升。高低落差段的设计需结合重力势能进行优化布置,利用高位势流体下泄驱动低位输送,实现自然流动与机械输送的能量协同。管道长度、内径与转角的匹配也需在设计阶段进行数值模拟分析,以判定在不同流量条件下的最小阻力路径。通过网络简化与路径优化方法压缩不必要的管段长度,可有效降低总阻力与泵机负荷,提升单位能耗下的输送效率。将布设优化策

略与现场运行数据联动,可实现动态调整与局部修正,提升复杂网络系统下的整体能效水平。

5.3 利用计算模拟强化系统级流动效率管理

随着数值仿真与多物理场建模技术的发展,基于计算流体力学的模拟手段已成为管道运输能效管理的重要工具。通过建立涵盖管径、流速、压力、温度等参数的三维耦合模型,可在设计阶段对系统进行虚拟测试与能量分析,预测不同运行方案下的能耗指标及流场演化趋势。模拟结果可用于识别高压损区域、流场紊乱位置与局部能耗集中点,进而指导结构调整与运行策略优化。在实际运行过程中,可结合实际监测数据与仿真模型进行联合分析,构建数字孪生平台,实现对能效变化的前瞻性判断与主动响应。对多种流体类型、复杂工况与多源动力协同系统进行模拟比对,可提升参数匹配的精度与调整速度^[4]。通过迭代优化算法与能效目标函数的耦合计算,使系统调控由经验驱动转向数据驱动,提升能效管理的科学性与可执行性。模拟辅助决策为提升管道输送系统运行效率、降低能耗成本提供了可量化、可验证的支撑路径。

6 结语

管道运输系统的能效水平深受流体力学特性的制约,流动状态、物性参数与结构配置之间的耦合关系决定了能耗表现的优劣。通过系统分析层流与湍流规律、雷诺数判定机制、边界层影响,以及粘度、密度、温度等因素的作用机理,可为能效优化提供理论基础。结合变频调控、管网优化与计算模拟等控制策略,能够在保障输送稳定性的同时实现能源使用效率的最大化。今后应持续深化对流体行为的多维建模与动态响应机制研究,推动管道运输系统向节能、高效、智能方向发展。

参考文献

- [1] 陈利琼,熊珍宝,赵翔,张开.轻烃管道泄漏扩散规律研究[J].流体机械,2025,53(04):93-101+109.
- [2] 黄尊地,谭梦成,许振国,常宁,符澄.低真空管道列车激波特性风洞试验研究[J].交通运输工程学报,2025,25(02):108-117.
- [3] 马云龙,饶丹骄.化工配管布局管道材料选择与耐腐蚀性能研究[J].化学工程与装备,2025,(04):120-122.
- [4] 文孝贵,段单峰.计算流体力学在充填料浆管道输送模拟分析的应用及研究发展方向[J].矿业研究与开发,2022,42(12):18-23.