

油气混输管道流态特性及压降计算模型优化研究

刘英杰 刘裕萍

北京东方华智石油工程有限公司, 天津市, 300000;

摘要: 油气混输管道是油气田集输系统关键设施, 其内部气液两相流态复杂, 压降计算精准性影响管道输送系统运行效率、安全及经济性。气液两相流态演化规律及压降计算是研究热点与难点。本文梳理了典型流态分类标准与识别方法, 分析关键因素对流态演化的影响机制; 梳理经典压降计算模型原理、适用场景及特征, 剖析其在复杂工况下的局限性; 结合现状指出流态识别精准性提升等未来研究方向, 为相关研究与工程应用提供理论与技术参考。

关键词: 油气混输管道; 气液两相流; 流态特性

DOI: 10.69979/3029-2727.26.01.056

引言

油气混输技术是主流集输方式之一。与单相流体输送不同, 油气混输管道内是典型气液两相流动, 流态具多态性、不稳定性及强耦合性。流态影响管道摩擦阻力等, 压降计算精度关系关键工程环节及安全。随着油气田开发向复杂领域拓展, 传统流态识别与压降计算方法局限性凸显。国内外学者开展相关研究, 提出一系列技术与模型, 但适用范围差异大, 对复杂工况流动机理揭示不足。基于此, 本文梳理研究进展, 剖析不足, 明确未来方向, 为后续研究与工程实践提供支撑。

1 油气混输管道流态特性研究进展

1.1 典型流态分类与特征研究

油气混输管道内气液两相流态受气液流速、含气率、介质物性及管道敷设方式等多因素影响。目前, 水平油气混输管道流态主流分类有泡状流、弹状流、段塞流、环状流四种, 不同流态特征与影响差异显著。

泡状流是低含气率典型流态, 气体以小气泡分散于液相, 气泡多为球形或椭圆形, 流动稳定、压降波动小, 常见于油气田开发初期或低产气井。早期用高速摄影观察, 如今先进设备可精准捕捉气泡运动与分布, 为定量描述提供数据。

弹状流由气弹与液塞交替组成, 是低-中含气率过渡流态, 流动稳定性介于泡状流与段塞流之间, 气弹与壁面、液塞相互作用致压降波动。实验建立了气弹长度、液塞厚度与气液流速关联, 用于流态预测与控制。

段塞流是常见且不稳定流态, 多在中-高含气率出现, 表现为气团与液团交替流动, 压降与界面波动大,

威胁管道安全。研究分析其形成临界条件, 提出预测模型, 探讨管道内件抑制效果。

环状流是高含气率典型流态, 液体成液膜附于内壁, 气体在中心成气相核心, 部分液体成液滴被携带。压降由气相摩擦阻力主导, 液膜厚度等是影响因素。研究建立液膜厚度关联式, 考虑液膜波动影响, 提升流态描述精准性。

1.2 流态识别方法研究

流态识别是流态特性研究与压降计算前提, 核心是捕捉流态特征参数以区分不同流态。精准区分。现有流态识别方法依识别原理分实验观测法、压降信号分析法、图像处理法及智能识别法四类。实验观测法是基础方法, 早期靠透明管道可视化结合高速摄影直观记录气液分布, 操作简便但主观性强, 难实时识别动态流态。随测试技术发展, 压降信号分析法出现, 通过监测压降、压力信号波动特征, 提取均值等参数建立对应关系实现定量识别, 不过在流态过渡区易有误差。图像处理法基于流态图像, 经预处理等技术分析气液分布与形态特征实现识别, 能精准捕捉空间信息、精度高, 但受图像质量和算法复杂度影响大, 高含气率或复杂工况适用性待提升。智能识别法近年兴起, 将传感器获取的特征参数输入, 用机器学习等算法构建模型自动识别, 具有速度快、精度高、适应性强等优势, 能解决过渡区识别难题。

1.3 流态影响因素研究

现有研究显示, 油气混输管道流态演化受介质物性、输送参数、管道结构及敷设方式等因素影响, 各因素作用机制与影响规律已较系统探讨。介质物性上, 气液密

度、黏度、表面张力是核心因素，气相密度增大、液相黏度减小促进气相连续化，推动向环状流转化；表面张力增大利于泡状流维持，高压工况流态演化规律与低压不同，是深海等管道流态研究重点。输送参数中，气相流速与含气率是关键，气相流速增大使流态从泡状流向环状流演化，液相流速增大抑制气泡聚合；含气率升高推动流态向高含气率方向演化，相关研究建立临界判据，揭示定量影响规律。管道结构及敷设方式对流传态演化具有显著调控作用：管道直径增大，气泡聚合空间扩大，更易形成段塞流或环状流；管道内壁粗糙度增大，会增加气液两相摩擦阻力、改变界面稳定性，使流态转化临界参数偏移。敷设方式上，垂直管道流态受重力影响大，与水平管道流态分类有别，常见泡状流、弹状流、环状流等；倾斜管道流态介于水平与垂直管道之间，倾斜角度增大，重力对气液分离作用增强，流态演化规律更复杂。现有研究针对不同敷设方式下的流态特性开展大量实验与模拟，为不同场景管道设计提供依据。

2 油气混输管道压降计算模型研究进展

2.1 经典压降计算模型分类与原理

压降计算是油气混输管道设计与运行优化核心，本质是求解气液两相流动量方程。现有经典压降计算模型分均相流、分相流、漂移流三类，核心思想与计算逻辑差异显著。

均相流模型是最早的两相流压降计算模型，假设气液混合成均匀单相流体，忽略相对运动，用混合密度与黏度替代单相流体参数，用单相流体压降公式求解。该模型形式简单、计算便捷，早期用于气液混合均匀流态计算，但在高含气率流态下误差大，难满足工程需求。

分相流模型针对均相流模型不足，假设气液各自为连续相流动，考虑相对速度，分别算气相与液相的摩擦、加速及重力压降后叠加得总压降。经典分相流模型引入特征参数表征气液单独流动压降比，实验关联得两相摩擦压降倍数算总压降。此模型考虑相对运动，精度优于均相流模型，适用于多种流态，但对相间作用描述简化，关键参数实验关联式适用范围有限，复杂工况下精度难保障。

漂移流模型在分相流模型基础上，引入漂移速度描述气相相对气液混合流体的运动速度，建立含气率与漂移速度关联式反映气液分布状态。核心是准确算截面含气率，公式通过气相、液相表观流速与漂移速度耦合关系建立。该模型综合考虑相对运动与相分布不均匀性，

精度高于前两者，适用于多种流态。但漂移速度关联式受流态影响大，不同流态用不同关联式，增加计算复杂度，复杂工况下漂移速度预测精度待提升。

2.2 各类模型的适用范围与局限性

现有经典压降计算模型在不同工况下适用范围与精度差异显著，明确各模型适用场景与局限性是工程选型关键。均相流模型计算简便、易工程应用，但忽略气液相对运动，仅适用于气液混合均匀、相对速度小的流态（如泡状流）及低含气率、低流速工况适用。高含气率、高流速工况下，气液相对运动加剧，该模型计算误差增大，无法反映实际压降规律，在复杂工程场景应用受限。

分相流模型考虑气液相对运动，适用范围比均相流模型广，适用于弹状流、段塞流等中-高含气率流态及中-低压力工况。但存在两大局限：一是对相间作用描述简化，将相间作用系数视为经验定值，无法反映不同流态、工况下相间作用机制变化；二是关键参数实验关联式基于低压、低含气率、小口径管道实验数据建立，在高压、高含气率、大口径管道等复杂工况下，关联式不适用，计算精度下降。

漂移流模型计算精度最高、适用流态范围最广，能适应中-高含气率、中-高压力工况。但计算复杂度高，需根据不同流态选漂移速度关联式，增加工程应用难度。且在极端工况（如超高压、超大口径管道）下，现有漂移速度关联式预测精度不足，未充分考虑气体可压缩性、流态分布不均匀等因素，计算误差增大。

2.3 模型优化与改进研究进展

针对经典模型在复杂工况下的局限，国内外学者开展大量模型优化与改进研究，核心优化方向有相间作用系数动态化、复杂工况修正、流态识别与模型耦合等。

相间作用系数是影响压降计算精度的关键参数，传统模型用经验定值，无法反映不同流态相间作用机制差异。相关研究通过实验获取不同工况下相间作用系数数据，用多元线性回归、神经网络等方法，建立相间作用系数与气液流速、含气率、介质物性的动态关联式，实现动态计算，提升模型在不同流态下的计算精度。

针对高压、大口径等复杂工况影响，学者引入修正项优化现有模型。高压工况下，引入气体压缩性修正系数，优化混合密度与摩擦系数计算方法；大口径管道工况下，引入管道直径修正系数，修正摩擦阻力计算模型。此外，考虑介质中杂质对气液界面特性的影响，引入杂

质修正项,提升模型在实际含杂质介质输送工况下的适用性。

流态识别与模型耦合是近年来模型改进的重要方向,该方法通过流态识别技术确定管道内当前流态类针对不同流态选取对应压降计算子模型或调整模型参数,实现流态与模型动态匹配。相关研究构建流态识别模型精准识别典型流态,再针对不同流态采用对应相间作用系数关联式与压降计算方法,建立耦合流态识别的改进型压降计算模型,该模型在多种流态下计算精度优于传统模型。

3 现有研究存在的问题与不足

尽管国内外学者围绕油气混输管道流态特性与压降计算模型开展大量研究并取得丰富成果,但结合当前油气田开发复杂工况需求,仍存在诸多问题,主要体现在以下方面:

一是流态识别精准性与实时性待提升。现有流态识别方法在理想实验条件下精度较高,但在实际工程中,受管道振动等因素影响,精度显著下降。且现有智能识别方法多依赖离线数据训练,难实现动态流态实时识别,无法满足管道在线监测与控制需求。

二是复杂工况下流动机理揭示不充分。现有研究多基于理想工况,对高压、高含气率等复杂工况下的流态演化机理揭示不足,如高压下气体可压缩性影响等尚未形成系统理论认知,导致现有模型在复杂工况适配性差。

三是压降计算模型工程适用性不足。现有优化模型虽提升了计算精度,但仍有缺陷,部分模型计算复杂度高,部分适用范围狭窄,多数未考虑多场耦合作用对压降的影响,无法适应实际管道复杂运行环境。

四是实验数据与现场数据支撑不足。现有模型验证多依赖实验室小尺度实验数据,缺乏实际管道现场测试数据支撑,因实验室与实际工况差异大,模型工程应用精度难保障,限制了推广应用。

4 未来研究方向展望

结合现有研究不足与油气田开发需求,未来油气混输管道流态特性与压降计算模型研究可重点关注以下方向:发展高精度实时流态识别技术。依托先进技术构建基于多传感器融合的流态识别系统,整合多维度信号,

提升识别精度;开发轻量化智能识别算法,实现实时在线识别,为管道监测与控制提供支撑。同时结合数值模拟,揭示流态演化机理,为模型优化提供理论依据。深化复杂工况下的流动机理研究。开展复杂工况系统实验,精准捕捉气液两相参数规律;结合 CFD 模拟建立多场耦合数值模型,分析作用机制,为模型优化提供数据与理论支撑。构建高精度、广适性压降计算模型。基于流动机理研究成果优化相间作用系数关联式,引入多场耦合修正项,简化模型结构,提升工程适用性。开展现场测试,获取数据验证优化模型,提升应用价值。推动流态控制与压降优化的协同研究。结合流态特性成果开发新型内件与输送工艺优化方法,主动调控流态,减少不稳定流态影响;建立协同模型,实现管道高效、安全、节能运行,为油气田集输系统优化设计提供技术支持。

5 结论

本文系统梳理了油气混输管道流态特性与压降计算模型的研究进展,梳理了典型流态的分类特征、识别方法与影响因素,总结了均相流、分相流、漂移流等经典压降计算模型的核心原理、适用范围与局限性,剖析了现有研究存在的问题,明确了未来研究方向。研究表明,现有流态特性研究已形成较为完善的流态分类体系,智能识别方法的应用显著提升了流态识别精度;经典压降计算模型各有优劣,优化模型通过相间作用系数动态化、复杂工况修正等方式,有效提升了计算精度。但现有研究在复杂工况下流动机理揭示、流态识别实时性、模型工程适用性等方面仍存在不足。未来需重点发展高精度实时流态识别技术,深化复杂工况下流动机理研究,构建高精度、广适性压降计算模型,推动流态控制与压降优化协同研究,为油气混输管道技术的发展提供支撑。

参考文献

- [1] 刘晓燕,张艳,刘立君,等. 特高含水期油气水混输管道压降计算方法研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 4. DOI: 10.3321/j.issn:0253-231X. 2006. 04. 024.
- [2] 动力工程及工程热物理. 水平油气混输管道中段塞流流动特性研究[D]. 西安交通大学, 2001. DOI: 10.7666/d. Y452453.