

基于数值模拟的化工管道流体动力学分析

耳帖帖 林 浩 陈明黎(温州市特种设备检测科学研究院,浙江 温州 325000)

摘要:文章主要聚焦基于数值模拟的化工管道流体动力学分析,先阐述该分析的重要性和相关策略的应用情况,在此基础之上一方面介绍常用数值模拟方法与计算流体动力学基本原理;另一方面以典型水煤浆管道气膜减阻案例开展深入剖析,此剖析包含模型建立、参数设置、网格划分等具体模拟策略,同时展示模拟结果分析过程和代理辅助优化所取得的成效。此外,还归纳总结通用及针对T型管、弯管等不同类型化工管道的模拟策略要点,目的是为化工管道的优化设计和高效运行提供可靠理论依据。

关键词:数值模拟;化工管道;流体动力学;气膜减阻;策略优化

中图分类号:TQ055.8 文献标识码:A 文章编号:1674-5167(2025)031-0105-03

Fluid Dynamic Analysis in Chemical Pipelines Based on Numerical Simulation

Er Tietie, Lin Hao, Chen Mingli (Wenzhou Special Equipment Detection Science Research Institute, Wenzhou Zhejiang 325000, China)

Abstract: This article mainly focuses on the fluid dynamics analysis of chemical pipelines based on numerical simulation. It first elaborates on the significance of this analysis and the application of related strategies. On this basis, it introduces common numerical simulation methods and the basic principles of computational fluid dynamics. On the other hand, an in-depth analysis is conducted based on a typical case of air-film drag reduction in water-coal slurry pipelines. This analysis includes specific simulation strategies such as model establishment, parameter setting, and mesh division, while also presenting the process of simulation result analysis and the achievements of agent-assisted optimization. In addition, the key points of general and simulation strategies for different types of chemical pipelines such as T-shaped pipes and elbow pipes are summarized, with the aim of providing a reliable theoretical basis for the optimal design and efficient operation of chemical pipelines.

Keywords: numerical simulation; chemical pipelines; fluid dynamics; air film drag reduction; strategy optimization

在化工生产领域,管道作为物料输送的关键环节,其内部流体动力学特性对整个生产系统稳定、高效运行起着至关重要的作用,然而化工管道内流体流动情况因受多种因素影响而颇为复杂,致使传统研究手段存在局限。基于数值模拟的化工管道流体动力学分析凭借借助计算机模拟技术,能够精准地刻画管道内流体的流速、压力等参数变化,进而揭示复杂的流动现象,不但可以深入理解流体在不同类型化工管道中的行为规律,还能为优化管道设计、降低能耗、减少故障、明确后续检验项目等提供有力支撑,所以有着显著的研究与应用价值。

1 计算流体动力学(CFD)基本原理

计算流体动力学(CFD)基本原理包含质量守恒方程,该方程说明在任何流动系统当中流体质量不会凭空产生也不会无故消失,要求流入与流出控制体的质量流量保持平衡以确保流体质量连续性,动量守恒方程描述了流体动量的具体变化情况。在考虑作用于流体微元上压力梯度力、黏性力以及体积力等各种力的基础上,对流体加速、减速以及流动方向改变起到控制作用,能量守恒方程聚焦于流体能量的转化与守恒,涉及内能、动能以及热传递等多种能量形式,能

反映流体在流动过程中因做功、传热等因素引发的能量变化,综合这些守恒方程CFD才可以对复杂的流体流动现象进行准确模拟与分析。

2 常见数值模拟方法

常见的数值模拟方法包含有限体积法、有限元法以及边界元法,其中有限体积法是将计算区域划分成诸多控制体积,接着通过对这些控制体积进行积分,把偏微分形式的守恒方程转化为离散的代数方程,其能够很好地保证物理量的守恒特性,且在处理复杂几何形状和边界条件时较为灵活。有限元法同样是常用的一种,它通过把求解区域离散成有限个单元,再利用单元节点上的未知量来近似表示整个区域内的解,凭借这一方式可对不规则几何形状和复杂材料特性的问题开展有效模拟,尤其适用于结构力学与热传导等领域相结合的流体问题。边界元法也很重要,它的特点是只需对边界进行离散,然后借助边界积分方程来求解问题,这样做能够有效降低问题的维数,减少计算量,只是其理论基础相对复杂,常用于求解线性问题以及无限域等特定类型的流体模拟场景。

3 CFD软件介绍

CFD软件属于进行计算流体动力学分析的重要工

具，常见的有 Fluent、CFX、Phoenics 等，Fluent 作为国际主流商用软件物理模型丰富且数值方法先进，广泛应用于航空航天、汽车等诸多领域，尤其擅长模拟燃烧、多相流等复杂流动情况。

CFX 采用有限元法在处理几何形状复杂但物理过程相对简单问题时优势明显，适用于流体流动与传热模拟工作，Phoenics 具备友好图形界面和良好开放性，支持多种流动类型还可进行二次开发，适用于常规传热与流动分析工作。

4 基于数值模拟的化工管道流体动力学分析策略

4.1 通用模拟策略归纳

在基于数值模拟的化工管道流体动力学分析中，首先依据实际尺寸（长 10m，内径 0.2m）建立精确的三维直管几何模型。设定管壁为光滑壁面，粗糙度为 0.001mm。采用结构化网格划分，轴向 100 单元，周向 20 单元，共计 2000 个网格单元，并通过网格独立性验证确保结果不受网格疏密影响。另外，化工管道内流体具有复杂特性，以常见的水为例，设定其密度为 1000kg/m^3 、动力粘度为 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，并且依据实际工况设定入口流速为 2m/s，出口采用压力边界条件，将出口压力设定为标准大气压即 101325Pa。最后选择如 Fluent 软件中的压力基求解器这类合适的流体动力学求解器，设置诸如残差收敛标准为 1×10^{-5} 的合适收敛准则，在常规计算机配置（如英特尔酷睿 i7 处理器，16GB 内存）下启动模拟计算，经过大约 10min 的计算让模拟达到收敛状态，从而得到流体在管道内的速度分布、压力分布等关键结果。

4.2 针对不同化工管道的特殊策略

对于半径为 0.5m、角度为 90° 的弯管模型，在建模时不仅要考虑管道本身尺寸，更要重点关注弯曲处的曲率半径变化。在网格划分方面，弯曲部分需适当加密网格，把弯曲处的网格单元尺寸缩小至直管部分网格边长（如直管部分网格边长为 0.05m 时，弯曲处设为 0.025m）的一半，致使整个弯管模型的网格数量增加到大约 3000 个。而且在流体参数方面，因离心力等因素影响，弯管入口和出口流速、压力的变化规律与直管不同，当入口流速仍设为 2m/s 时，经过约 15min 的模拟计算发现，弯管外侧壁面压力会比内侧壁面高约 5000Pa，体现出明显的压力差异。而对于假设有人口直径为 0.3m、出口直径为 0.2m、长度为 8m 的变径管，建模时要准确体现管径变化的过渡段形状，在网格划分时过渡段同样要加密网格，使网格数量达到 2500 个左右，设定流体入口流速为 1.5m/s 后，经过约 12min 的模拟计算，依据连续性方程可得出在管径缩小的过程中流体流速会从入口处的 1.5m/s 增大到

出口处的 3.375m/s ，同时压力也相应出现明显的降低变化，压力降约为 20000Pa，充分展现了变径对流体动力学特性的影响。

5 案例分析

5.1 案例背景介绍

《高浓度水煤浆管道气膜减阻两相流模拟及代理辅助优化》这篇文章研究高浓度水煤浆管道输送阻力大的问题，采用的策略是在水煤浆管道当中通入气体，利用气膜减阻来降低管道的阻力损失。针对宾汉非牛顿流体水煤浆，基于流体体积（VOF）多相流模型，通过数值模拟研究分析加气管关键参数对管道阻力系数的影响，并且结合遗传聚合响应面模型与二次拉格朗日非线性规划（NLPQL）算法开展代理辅助优化，结果显示气体速度与加气管直径对管道阻力系数影响较为显著，提升气体速度以及增大加气管直径能够降低阻力系数，而管道阻力系数基本不受加气管道角度的影响，优化之后管道阻力系数降低了 0.0207，减阻率增加了 16.90%。

5.2 数值模拟策略

水煤浆管道中存在水煤浆和气体这两种相态，且存在追踪气液界面的需求，选用流体体积（VOF）多相流模型，其能够有效处理气液两相之间的界面问题，通过对各相的体积分数方程进行求解，进而准确描述气液界面的位置与形态变化，适用于模拟水煤浆管道在通入气体后气膜的形成及发展过程。同时，水煤浆属于宾汉非牛顿流体，有着与温度、浓度以及剪切速率等因素相关的独特流变特性，在模拟时需考虑其非牛顿特性，采用相应的本构方程描述其流变行为，以此准确反映水煤浆在管道内的流动特性，让模拟结果更贴合实际情况。

在参数设置方面，对于流体物性参数，要确定水煤浆的密度、黏度、屈服应力等以及气体的密度、黏度等参数，这些作为数值模拟的基础，其准确性会直接影响模拟结果的可靠性，其中水煤浆的物性参数可通过实验测量或参考相关文献数据来明确，气体参数则依据实际通入气体的种类和工况条件进行设置。边界条件的设置包含管道入口边界条件，像水煤浆的入口速度、浓度以及气体的入口速度、流量等都要设定好，出口边界条件通常设为压力出口，要参照实际管道输送的下游工况确定出口压力，并且要将管道壁面设置为无滑移边界条件，也就是让水煤浆和气体在管道壁面处的速度为零，同时还要考虑壁面与流体之间的摩擦作用，设置合适的壁面粗糙度参数。初始条件是确定模拟开始时管道内水煤浆和气体的分布状态，一般默认初始时管道内充满水煤浆，气体从加气管处

开始通入，此时可把气体体积分数在加气管入口处设为1，其他区域设为0，相应地将水煤浆体积分数按相反情况设置，以此作为模拟的初始状态。

在网格划分上，先是要根据管道的几何形状和结构来采用合适的网格类型，比如对于规则形状的管道部分可采用结构化网格，它有着网格质量高、计算效率快的优势，而对于加气管附近等结构较为复杂的区域则采用非结构化网格，这样能更好地适应几何形状，提高网格划分的质量和效率。接着要控制网格密度，在气液界面附近以及加气管周围等关键区域对网格进行加密，以更精准地捕捉气液界面的变化和流体参数的梯度变化，而在远离气液界面和加气管的区域适当降低网格密度，以此减少计算量，提高计算效率，通过合理控制网格密度，在保障模拟精度的前提下优化计算资源的利用。

此外，还要进行网格独立性验证，通过划分不同密度的网格开展模拟，对比不同网格密度下诸如管道阻力系数、气液界面形态等计算结果，当网格密度增加到一定程度，计算结果不再出现明显变化时，就表明此时的网格密度满足模拟要求，可采用该网格进行后续的正式模拟，确保模拟结果不受网格数量的影响而具备可靠性。

在模拟计算与分析环节，要依据建立的模型和设置的参数选择合适的求解器，比如基于有限体积法的求解器，同时采用合适的数值算法，像压力-速度耦合算法（如 SIMPLE 算法等）来求解控制方程，以此实现压力和速度场的迭代求解，确保计算过程的收敛性和稳定性，而且要通过改变加气管的关键参数，如气体速度、加气管直径、加气管道角度等进行多组数值模拟，分别研究每个参数对管道阻力系数的影响，分析不同参数下管道内的流速分布、压力分布以及气膜形态等流体动力学特性的变化规律，找出对管道阻力系数影响显著的参数，为后续的优化提供依据。

至于代理辅助优化，先是基于数值模拟得到的大量数据，采用遗传聚响应面方法建立管道阻力系数与加气管关键参数之间的响应面模型，该模型能够以数学表达式的形式近似描述参数与阻力系数之间的关系，便于快速预测不同参数组合下的管道阻力系数，减少直接数值模拟的次数，提高优化效率，然后将建立的响应面模型与二次拉格朗日非线性规划（NLPQL）算法相结合，以管道阻力系数最小化为目标函数，在给定的参数取值范围内进行优化求解，通过 NLPQL 算法搜索最优的加气管参数组合，最终得到一组使管道阻力系数最小的参数，实现对水煤浆管道气膜减阻的优化设计。

5.3 模拟结果分析

在流速分布特性方面，通入气体后水煤浆在管道内的流速分布出现了明显变化，不仅靠近气膜区域的水煤浆流速有所提升，而且随着气体速度、加气管直径等参数的改变，流速的整体分布格局也相应发生变动，致使流速在管道横截面上的梯度变化呈现出不同状态。在压力分布特性上，管道内压力本就沿流动方向逐渐降低，而加气管参数对其影响显著，当增大气体速度、加气管直径时，在气膜减阻作用下，相同位置处的压力降幅会有所改变，进而使得整体压力分布更趋于平缓，还降低了局部压力过高的情况。

至于管道阻力系数，气体速度与加气管直径对其影响较为显著，通过提升气体速度、增大加气管直径能够使其降低，加气管道角度基本不产生影响，且优化后的结果显示管道阻力系数实现了既定程度的降低，减阻率明显增加，这充分验证了所采用的气膜减阻策略及优化方法在改善水煤浆管道输送性能方面的有效性。

6 总结

基于数值模拟的化工管道流体动力学分析是化工领域探究管道输送问题有力工具，通过合理选用数值模拟方法、精准设置相关参数、细致划分网格以及科学分析模拟结果等策略，能清晰展现化工管道内复杂的流体流动特性。无论是存在多相流的水煤浆管道，还是有特殊结构的 T 型管、弯管等不同情况，都可借助对应模拟策略优化管道设计与运行参数，这对提升化工管道输送效率、保障生产安全以及降低成本等方面有不可忽视积极意义，未来有待进一步拓展应用范围并深化研究内容。

参考文献：

- [1] 程学锋 . 化工装置管道系统中管螺纹的使用 [J]. 化肥设计 ,2025,63(04):70-73.
- [2] 王雯雯 , 崔强 , 徐进 . 化工企业压力管道数字化治理研究及应用 [J]. 化工装备技术 ,2025,46(04):54-57.
- [3] 鄢源 . 煤化工项目中氢气管道的选材研究 [J]. 天津化工 ,2025,39(04):118-120.
- [4] 李鹏 . 石油化工管道安装工程中的质量问题及对策 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2025,45(12):19-21.
- [5] 马小勇 . 化工行业压力管道安装工艺分析 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(06):121-123+153.
- [6] 张康平 . 磁流体动力学管道流动数值模拟研究 [D]. (长沙) 国防科学技术大学 ,2007.
- [7] 杨罡 . 基于应变模态和动力学特性分析的管道损伤识别方法研究 [D]. 常州大学 ,2021.