

基于仿真模拟的天然气管道氮气置换优化研究

王 鹏（杭州市能源集团工程科技有限公司，浙江 杭州 310008）

摘 要：基于仿真模拟技术，研究了天然气管道中氮气置换过程的优化方法。研究建立天然气管道的流体力学模型，分析了氮气与天然气的混合过程以及影响置换效率的关键因素。采用数值仿真方法，对不同操作参数、管道配置及氮气注入速率等进行了系统研究，探索了优化氮气置换效率的可行方案。研究结果表明，合理的氮气注入速率和管道流量配合能显著提高置换效率，减少能源消耗，并且优化后的仿真结果在实际应用中具有较高的可靠性和可行性。

关键词：天然气管道；氮气置换；仿真模拟；优化研究；数值仿真

0 引言

在管道维护或修复过程中，氮气置换技术被广泛应用于管道中的气体更替，确保安全性与系统稳定性。然而，氮气置换过程的效率和经济性一直是技术研究的难点之一。随着计算机仿真技术的发展，基于仿真模拟的优化方法为提高置换效率提供了新的解决途径。仿真模拟不仅能够实时预测置换过程中的气体流动特性，还能通过调整操作参数进行优化，进而减少能源消耗和提升作业效率。因此，开展基于仿真模拟的天然气管道氮气置换优化研究具有重要的学术价值和应用意义。

1 氮气置换原理与技术概述

氮气置换是通过氮气注入管道，逐步替换管道内的天然气或其他气体的一种技术手段。在天然气管道的检修、清管或气体更替过程中，氮气置换能够有效地保证管道气体的安全性及设备的完整性。其原理基于氮气与天然气的不同物理化学特性，利用氮气的惰性、低密度和不易燃性，可以将管道中的天然气替换为氮气，从而降低爆炸风险并优化管道的气体流动性^[1]。置换过程中，气体的流动状态、温度、压力等参数对置换效率有显著影响，合理的操作方式可以提高氮气的置换效率，降低操作成本。当前，随着管道运输系统规模的扩大和技术要求的提升，氮气置换技术逐渐向更高效、更安全的方向发展，并在多种场合中得到了广泛应用。

2 仿真模拟方法与建模技术

仿真模拟技术为氮气置换过程的研究提供了理论支持和实践指导。通过建立数学模型和数值计算方法，可以模拟气体在管道中的流动、混合和传输特性，从而预测置换过程中的气体分布情况。常见的仿真方法包括基于流体力学的 CFD（计算流体动力学）模拟和

基于物质传递方程的数值解法。这些方法能够考虑管道内气流的非稳态流动、温度变化以及多组分气体的混合与分离。仿真过程中，模型的准确性和参数的合理设定至关重要，通常需要对流速、压力、管道几何形状等进行细致的设定，确保仿真结果与实际情况相符。

3 基于仿真模拟的天然气管道氮气置换优化研究

3.1 构建仿真模型与设定参数

3.1.1 模型构建的基本思路

在氮气置换过程中，建立精确的仿真模型是确保置换效果和优化操作的基础。模型构建的基本思路是通过流体力学理论，结合气体流动的物理特性，构建一个能够真实模拟氮气与天然气混合和置换过程的数学模型。

首先，选择适合的流动模型非常关键。通常情况下，考虑到管道内气流的复杂性，采用多组分气体流动模型，通过解决 Navier-Stokes 方程，模拟气体在管道中的流动和湍流现象。

其次，模型中需要考虑气体的物理性质变化，如氮气和天然气的密度、黏度、热导率等，这些参数在不同操作条件下会发生变化，直接影响气体混合效率和置换效果。为了更好地反映氮气置换的实际过程，还需要加入适当的边界条件和初始条件，例如管道入口的气体流速、氮气注入速率以及管道出口的压力和流量等。通过对这些条件的综合考虑，构建一个符合实际工况的流体动力学模型，为后续的数值模拟和优化研究提供了基础框架。

3.1.2 选择与设定关键参数

首先，氮气注入速率是影响置换效率的一个重要参数，过高或过低的注入速率都会对气体混合效果产生影响。在设定注入速率时，需要根据管道的直径、

长度以及气流的动力学特性进行合理的计算, 保证氮气能够有效替代管道中的天然气, 同时避免因过快的注入速率导致的气流紊乱, 影响置换效果。

其次, 管道的几何参数, 如管道的直径、长度、弯头数量及管道的粗糙度等, 也会影响气体流动特性^[2]。在建模时, 必须根据实际管道的尺寸及结构设定这些参数, 确保仿真结果与实际情况相符。此外, 气体的物理性质, 尤其是氮气与天然气的热力学参数(如比热容、粘度、密度等), 在温度和压力变化下会发生动态变化, 在设定这些参数时需要考虑流动状态下的气体物性, 确保气体的状态方程能够准确反映气体的性质。

3.2 氮气置换过程的动态仿真分析

3.2.1 氮气与天然气混合过程的仿真

氮气与天然气的混合属于流体动力学中的多组分气体混合问题, 通常使用控制体积法和数值模拟方法求解。通过流体力学方程, 特别是扩散方程和连续性方程, 能够描述氮气与天然气的浓度分布和流动状态。在这种仿真过程中, 假设管道内气体混合为理想气体, 且气体流动遵循雷诺平均的 Navier-Stokes 方程。对于多组分气体的流动, 物质传输方程可以描述气体成分的变化, 特别是氮气和天然气在管道内的浓度分布。物质传输方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} C_i) = \nabla \cdot (D_i \nabla C_i) + S_i$$

其中, C_i 为气体组分 i 的浓度, \mathbf{v} 为气体的速度场, D_i 为组分的扩散系数, S_i 为源项, 表示氮气或天然气的生成或消耗。通过求解该方程, 能够得到氮气与天然气在管道内的浓度分布, 进一步揭示两者的混合过程及置换效率。在仿真过程中, 模型还需要考虑温度、压力等外部因素对气体混合的影响, 这些因素会通过影响扩散系数和气体的黏度, 进而影响气体的混合速度和均匀度。

3.2.2 氮气置换效率的动态变化分析

氮气置换效率的动态变化分析是评价氮气置换过程优化效果的关键。氮气置换效率反映了单位时间内氮气替代天然气的程度, 通常通过计算置换过程中氮气和天然气的浓度变化获得数据结果。氮气置换效率的数学描述可以通过以下公式给出:

$$\eta(t) = \frac{C_{N_2}(t)}{C_{N_2}(t=0)} \times 100$$

其中, $\eta(t)$ 表示在时间 t 时的氮气置换效率, $C_{N_2}(t)$

是时刻 t 管道内氮气的浓度, $C_{N_2}(t=0)$ 为置换前管道内氮气的初始浓度。随着时间的推移, 氮气和天然气的混合效率会受到流速、注入氮气的流量以及管道的几何结构等因素的影响。通过对该公式的动态求解, 可以追踪氮气置换效率随时间的变化, 并进一步分析在不同操作条件下, 氮气置换过程的优化空间。

3.3 优化与验证仿真结果

3.3.1 分析与修正仿真结果误差

在基于仿真模拟的天然气管道氮气置换过程中, 由于仿真模型与实际工况之间可能存在差异, 仿真结果通常会产生一定的误差。这些误差可能来源于多个方面, 例如初始条件设定的偏差、物理属性参数的不准确、模型简化假设的不足等。常见的误差包括氮气注入速率、管道内流体动力学变化、气体物性变化等因素。为了修正这些误差, 首先应对仿真模型进行验证, 通过与实验数据或实际操作结果的对比, 评估模型的准确性^[3]。例如, 基于实际实验条件的氮气置换过程数据, 可以通过比较仿真结果和实际实验数据的偏差, 发现模型中的不合理之处。修正措施通常包括调整气体物性参数(如温度、密度、黏度等)、优化流动模型(如考虑湍流效应)以及调整边界条件(如入口流速、出口压力等)。

此外, 还可以通过敏感性分析, 研究不同操作条件下模型输出的变化, 进一步优化模型的精度和提高模型的稳定性。表 1 为仿真结果误差分析数据表, 对比不同条件下的仿真结果与实验数据, 可以量化修正误差的效果。

从表 1 中可以看出, 经过模型修正后, 氮气浓度的仿真值与实验值的误差显著减小, 尤其在初期的置换阶段(如 10 秒和 20 秒), 修正后的结果更加接近实验数据。这说明, 通过对气体物性和流动模型的优化, 仿真结果的准确性得到了有效提升。

3.3.2 优化后的仿真结果验证与应用效果

在对仿真模型进行误差修正后, 下一步是验证优化后的仿真结果的可靠性, 并分析其在实际应用中的效果。优化后的仿真结果需要通过实验数据或实际操作条件进行验证, 确保改进后的模型能够准确预测氮气置换过程中的气体流动、混合以及置换效率的变化。验证优化后的仿真结果通常包括几个方面:

首先是对氮气浓度、气体流速、压力等参数的动态变化进行对比分析; 其次是通过与实际管道操作条件下的数据对比, 验证仿真结果的可行性。通过这些

表 1 仿真结果与实验数据的误差分析

时间 (s)	仿真氮气浓度 (mol/m³)	实验氮气浓度 (mol/m³)	仿真结果误差 (%)	调整后氮气浓度 (mol/m³)
10	0.85	0.80	6.25	0.82
20	1.20	1.10	9.09	1.15
30	1.50	1.40	7.14	1.45
40	1.80	1.75	2.86	1.78
50	2.05	2.00	2.50	2.02

表 2 优化后的仿真结果与实际应用对比

时间 (s)	原始仿真置换效率 (%)	优化后仿真置换效率 (%)	实际置换效率 (%)	改善幅度 (%)	总置换效率 (%)
10	40	45	43	5	42
20	60	65	62	5	63
30	70	75	72	5	74
40	80	85	83	5	84
50	90	92	91	2	91.6

验证步骤，可以确保优化后的模型在多种工况下均能提供准确的预测。

其次，在应用效果方面，优化后的仿真模型不仅能够提高氮气置换效率，还能帮助工程师优化操作参数，减少能源消耗，提高经济效益^[4]。例如，通过对注入氮气速率、管道直径、流速等参数的优化，仿真模型可以帮助找到最佳的置换策略，显著提高置换效率并减少时间和能源成本。表 2 为优化后的仿真结果与实际应用对比的数据表，展示了优化后氮气置换效率的提升情况。

从表 2 中的数据可以看出，优化后的仿真结果相比原始仿真结果显示氮气置换效率的显著提高，尤其是在初期阶段（10 秒、20 秒），优化后的效率提升幅度明显。此外，优化后的仿真结果与实际置换效率接近，验证了优化模型的有效性。总体来看，优化后的仿真模型不仅提高了氮气置换效率，也为实际操作提供了更加科学的参数设置，进一步提高了经济效益和操作的可行性。

4 结语

本研究通过基于仿真模拟的天然气管道氮气置换优化研究，揭示了氮气置换过程中的气体混合与流动特性，并提出了优化仿真模型和操作参数的有效策略。研究表明，合理的氮气注入速率、管道配置及流速对

提高置换效率具有重要作用，同时，优化后的仿真模型能够有效减小误差，提升置换效果。与先前研究相比，本研究在仿真精度和应用可行性方面有所创新，尤其是在多物理场耦合仿真和动态分析方面的探索。此外，研究也发现，在极端操作条件下，某些非理想因素仍然影响置换效率。未来的研究可以进一步深化对管道复杂工况下氮气置换过程的建模，探索更多优化方案，提高该技术在实际中的适应性与效益。

参考文献：

[1] 荣广新 .LNG-FSRU 储罐投产过程动态模拟及方案优化 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2023.

[2] 方磊，白道然，侯鹏坤，等. 长输天然气管道投产氮气运移规律研究 [J]. 油气田地地面工程,2022,41(10):85-89.

[3] 李建永，洪龙飞，许军，等. 基于海洋工程中氮气置换混合气体分析研究 [J]. 中国新技术新产品，2022(19):104-106.

[4] 任丽，韩广剑. 浅谈氮气置换在天然气管道中的应用 [J]. 汽车世界,2019(19):1.

作者简介：

王鹏（1998- ），男，汉族，山东济南人，本科，助理工程师，研究方向：燃气工程，施工管理。