华東理工大學学报 自然科学版 Natural Science Edition
JOURNAL OF EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

重质油气化工艺中油水环状流输送稳定性研究

杨牧坤 韩洋 梁钦锋 许建良 代正华 王辅臣

Stability Analysis of Oil-Water Annular Flow Transportation in Heavy Oil Gasification Systems

YANG Mukun, HAN Yang, LIANG Qinfeng, XU Jianliang, DAI Zhenghua, WANG Fuchen

在线阅读 View online: http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20250324001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质气流床气化可行性分析与减碳效应

Feasibility Analysis and Carbon Reduction Effect of Biomass Entrained Flow Gasification

华东理工大学学报（自然科学版）. 2024, 50(3): 328-334 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20230417002

pH响应油水分离共聚物膜的合成及分离应用

Synthesis of pH-Responsive Polymer Film and Its Application for Oil/Water Separation

华东理工大学学报（自然科学版）. 2020, 46(1): 16-23 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20181214002

三七真空冷冻干燥工艺优化及对活性成分影响的研究

Optimization of Vacuum Freeze-Drying Process of *Panax notoginseng* and Its Effect on Active Ingredients

华东理工大学学报（自然科学版）. 2020, 46(4): 517-525 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20190427001

神府煤掺石油焦气流床气化细渣的CO_2气化反应特性

CO_2 Gasification Reaction Characteristics of Fine Slag from Entrained-Flow Gasification of Shenfu Coal Mixed with Petroleum Coke

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(4): 414-419 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20200331002

脱油沥青进料的气化炉火管废锅中动态灰分沉积与传热特性的数值模拟

Numerical Simulation of Dynamic Ash Deposition and Heat Transfer Characteristics in Gasification Firetube Waste Boiler Fed with Deoiled Asphalt

华东理工大学学报（自然科学版）. 2025, 51(2): 175-186 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20240313001

基于CVCS的浮法玻璃冷端机械手堆垛系统调度问题

Float Glass Cold-End Manipulator Stacking System Scheduling Based on CVCS

华东理工大学学报（自然科学版）. 2024, 50(5): 708-719 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20230719001

扫码关注公众号，获取更多信息！

文章编号：1006-3080(2026)01-0045-10 DOI：10.14135/j.cnki.1006-3080.20250324001

重质油气化工艺中油水环状流输送稳定性研究

杨牧坤[1,2,3]， 韩 洋[1,2,3]， 梁钦锋[1,2,3]， 许建良[1,2,3]， 代正华[1,2,3,4]， 王辅臣[1,2,3]

（1. 华东理工大学洁净煤技术研究所，上海 200237； 2. 煤液化气化及高效低碳利用全国重点实验室，上海 200237； 3. 上海煤气化工程技术研究中心，上海 200237； 4. 新疆大学化工学院，乌鲁木齐 830046）

摘要：为利用环状流输送技术解决重质油气化工艺中油水混合输送的难题，本研究采用水平管道环状流实验与基于VOF(Volume of Fluid)多相流模型的三维数值模拟相结合的方法，从单因素分析与Box-Behnken响应面实验设计两个角度，系统探究了油相密度(880 ~ 990 kg/m^3)、水相表观流速(0.04 ~ 0.14 m/s)及油相表观流速(0.35 ~ 0.95 m/s)对15 mm内径水平管道内的输油效率、环状流稳定维持长度及油芯偏心率的影响规律以及多因素耦合作用。研究结果表明：当油相密度大于950 kg/m^{3}时，控制水相表观流速为0.10~0.12 m/s、油相表观流速为0.6~0.8 m/s，可实现油芯偏心率小于15%、环状流稳定维持长度大于0.9 m的稳定环状流结构。本研究为重质油气化的高效低耗油水混合输送工艺的优化设计提供数据和理论支撑。

关键词：重质油气化；油水核心环状流；多相流模拟；响应面分析；减阻输送

中图分类号：TQ546 **文献标志码：**A

石油炼化行业在社会发展、国防建设等方面发挥着巨大作用，石油是宝贵的不可再生资源，目前原油的重质化趋势加重[1]，且炼油过程中产生的大量废油具有较高的热值，可直接作为燃料油[2]。对于用作气化原料的重质油(脱油沥青、催化油浆、加氢尾油等)，其较高的黏度不利于管道输送[3]，给重质油工业化应用带来了技术上的挑战[4-6]。高黏度油相通常需要消耗大量能量来克服输送管道沿程摩擦阻力，而传统的热力降黏[7-8]输送能耗大，且存在管材热应力损伤风险[9]。重质油气化需要补充大量水蒸气作为辅助气化剂，而炼化企业有大量的有机废水需要处理，这部分废水可代替大量水蒸气用于重质油气化，同时还可以通过重质油-有机废水混合输送降低重质油输送阻力。

油水核心环状流(CAF)输送技术可以通过特殊合流装置——水环发生器来实现[10]，即在重质油中注入一定比例的有机废水，构成“油芯-水膜”环状流流型。高黏度油相被水相包裹，能够有效减少油相与管壁的摩擦阻力，从而实现常温下高黏度重质油的减阻输送[11]。Charles等[12]在直径25 mm的水平管道中使用黏度分别为0.006、0.017、0.065 Pa·s的油品进行研究，发现不同黏度的原油在相同条件下均能形成结构相似的环状流流型，证明了环状流结构的成型在很大程度上与原油黏度无关。

重质油是指相对密度介于900 ~ 998 kg/m^{3}的油品，当油水环状流在管道中长距离输送时，油芯会因密度小于水相而逐渐偏离管道中心，形成偏心环状流结构，当偏心距超过临界值时，上层水膜因局部厚度不足发生破裂，油相直接接触管壁并引发黏壁，最终导致环状流失稳。近年来，众多学者对环状流稳定性的影响因素进行了研究，发现油相密度与油水表观流速[13-14]是影响环状流稳定性的3个关键因素。Ayuba等[15]在对9种不同油品的研究中发现，具有高黏度-密度值的油品更易形成稳定的核心环状

收稿日期：2025-03-24

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFB4103800)；新疆自治区自然科学基金重点项目(2023D01D02)；上海市2021年科技创新行动计划课题(21DZ1209003)

作者简介：杨牧坤(2000—)，男，山东滕州人，硕士生，研究方向为重质油气化。E-mail: y82220150@mail.ecust.edu.cn

通信联系人：代正华，E-mail: chinadai@ecust.edu.cn

引用本文：杨牧坤，韩 洋，梁钦锋，等. 重质油气化工艺中油水环状流输送稳定性研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版)，2026，52(1)：45-54.

Citation: YANG Mukun, HAN Yang, LIANG Qinfeng, *et al*. Stability Analysis of Oil-Water Annular Flow Transportation in Heavy Oil Gasification Systems[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2026, 52(1): 45-54.

流；Cavicchio等[16]研究发现，随着水相速度增加，水环的剪切作用增强，油水环状流的油芯更加稳定；Jia等[17]通过实验和理论分析发现，油相速度的增加会导致油水界面的剪切应力增大，从而破坏环状流的稳定性。影响油水环状流稳定性的各因素之间呈现非线性关系，而传统单因素实验难以分析各因素间的关联[18]。Box-Behnken响应面设计是一种通过实验设计、数学建模来预测最优工艺参数的实验规划方法[19]，可用于研究多个因素对环状流稳定性的影响及交互作用。

本文针对内径为15 mm的水平管道内的油水环状流，采用水平管道环路实验与计算流体力学(CFD)数值模拟相结合的方法，通过单因素模拟，分析油相密度与油水两相表观流速对输油效率、环状流稳定维持长度及油芯偏心率的影响规律；使用Box-Behnken响应面设计方法，以油芯偏心率为响应值，研究油相密度与油水两相表观流速对环状流稳定性的耦合作用，为重质油气化工艺中油水混合输送过程的优化设计提供理论依据。

1 实验装置和流程

1.1 实验装置及材料

为验证数值模拟模型及计算方法的可靠性，自主设计加工并搭建了油水水平管道环路实验系统，如图1所示。实验装置由油相管路系统、水相管路系统、混合管路系统，以及储存装置、测量装置和动力装置构成。水环发生器如图2所示，壳层为内径15 mm的四分管，管层输油管道外径为13 mm，水环发生器间隙宽度1 mm[20]，水环发生器末端与油水合流管路相连。由于研究处于对重质油气化以及有机废水处理相关技术的初步探索阶段，而燃油易燃易爆且不易清理，故选用无色无味且易于处理回收的工业白油作为环道实验的模拟油，经比重瓶法测定，该白油在20 ℃下密度为882.0 kg/m^3，黏度为1.2 Pa·s[21]。

1.2 实验流程

实验前将储油罐与储水罐加注至额定容量，开启压力传感器、流量计等仪表的供电系统，确认实验管路各连接部位密封良好，并确保阀门处于关闭状态。首先开启水相回路入口阀门，通过变频器调控离心泵运行参数，逐步建立稳定水相流动，待管路完全充满水后持续运行3～5 min，以排除管路内气体并形成管壁预润湿层。随后开启油相回路控制阀门，调节变频器驱动齿轮泵，油相通过水环发生器与水相合流后进入前缓冲段。

实验过程中通过调节变频器输出频率，以及输油管路、输水管路上的球阀开度，实现对两相流量的独立控制。固定水泵变频器基准频率与球阀开度后，调整油泵变频器频率参数并按照实验方案系统调节球阀开度，采用摄像系统捕捉测试段流型演变过程，同时记录流量计、压力表等设备的实时数据。待两相流型稳定5～10 s后，同步采集流型图像与压力数据。每组工况测试前需将重力分相后的油水两相回注至对应储罐；实验过程中需实时检测储罐液位，防止泵体空转；每组实验结束后，采用高流速水相冲洗实验管路，确保无残留油相后方可进行后续工况实验。

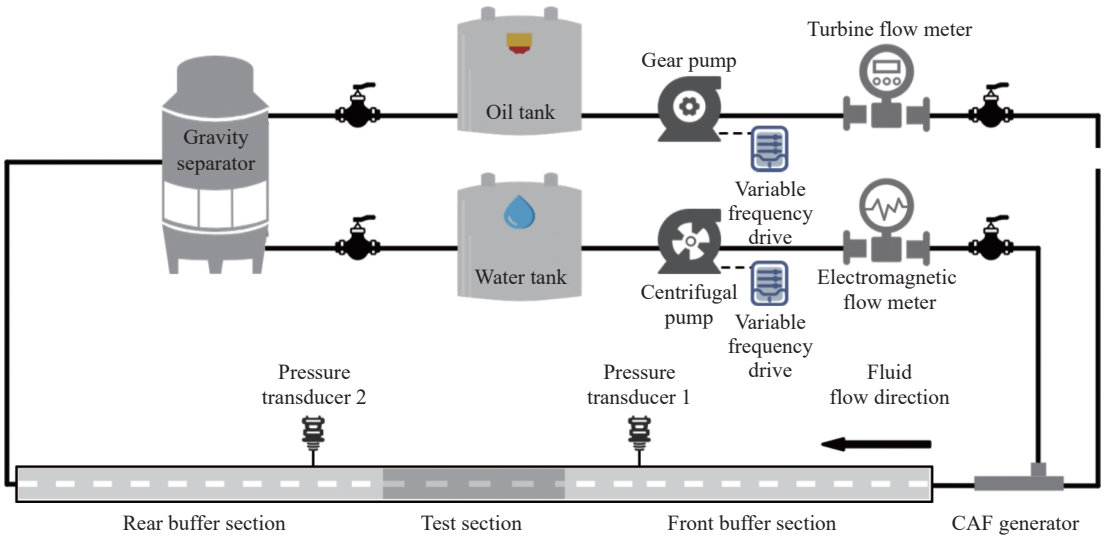
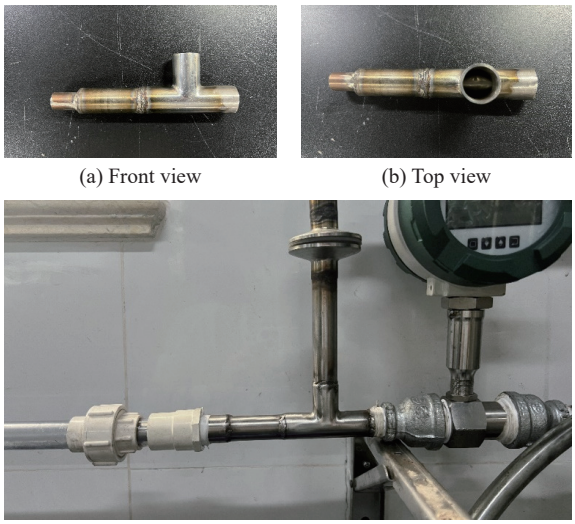


图1 油水水平管道环路实验流程图

Fig. 1 Oil-water horizontal loop experimental flowchart



(a) Front view　　(b) Top view

(c) Apparatus connection diagram

图 2　水环发生器实物图

Fig. 2　Physical map of water annulus generator

2　CFD 数值模拟

2.1　模型建立

2.1.1　物理模型　油水两相为互不相溶的流体, 为充分反映流体界面特性, 选用 VOF(Volume of Fluid)多相流模型[22], 并设置密度较小的油相为主相, 同时选用 CSF (Continuum Surface Force)连续表面张力模型更精确地计算表面张力对两相界面变化的影响[23-24]。由于油水两相的黏度差异, 在水平管环状流输送过程中, 油芯黏度较高, 通常为层流, 而水环层保持湍流, 因此选用 Standard k-ε 湍流模型[25-26], 同时选用增强壁面函数(Enhanced Wall Treatment, EWF)模型, 增强近壁区域计算的精确度。

2.1.2　几何模型　按照与实物相同的尺寸建立水环发生器三维几何模型, 如图 3 所示。其中进水口内径为 20 mm, 进油口管道外径为 13 mm, 主管道内径为 15 mm, 水环发生器管道间隙宽度为 1 mm。为提高运算效率, 将几何模型简化为相同间隙宽度的主管道三维模型, 管长 1 500 mm, 设管道入口处 z = 0, 油水两相沿 z 轴正方向流动, 重力条件设置为沿 y 轴负方向。

2.2　边界条件与初始参数设置

使用 Fluent 2023 R1 进行数值模拟, 采用双精度三维瞬态计算。油水两相入口边界条件设置为速度入口, 管道出口边界条件设置为 0.1 MPa 的压力出口。油相(下标 o)和水相(下标 w)的密度和黏度初始值分别设置为: ρ_o=882 kg/m^3, μ_o=1.2 Pa·s; ρ_w=998.2 kg/m^3, μ_w=0.001 Pa·s, 油水界面张力设置为 0.029 N/m[27]。选用 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)格式求解压力-速度耦合问题, 通过迭代矫正压力和速度场, 以满足质量守恒和动量守恒, 空间离散方法的选用如表 1 所示。收敛误差设置为 1×10^{-5}, 时间步长设置为 0.002 s, 全局初始化水相体积分数设置为 1。

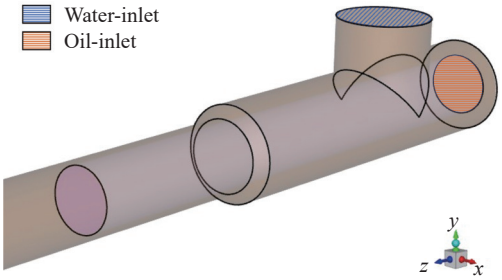


图 3　水环发生器模型结构示意图

Fig. 3　Structure diagram of water annulus generator model

表 1　空间离散方法

Table 1　Spatial discretization method

Parameter	Method
Gradient	Least squares cell based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second order upwind
Volume fraction	Geo-reconstruct
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Turbulent dissipation rate	Second order upwind

2.3　网格划分及无关性检验

使用 Fluent Meshing 对管道模型进行网格划分, 为减少体积单元数量, 提高计算收敛速度, 采用多面体结构化网格, 同时对边界层进行加密, 以便更准确地模拟近壁面流动状况, 计算域网格划分如图 4 所示。

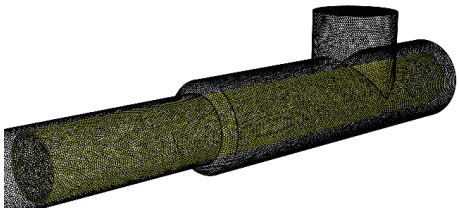


图 4　水环发生器网格划分

Fig. 4　Grid generation of water annulus generator

为检验模型的网格无关性, 通过改变最大尺寸条件划分 5 组数量不同的网格, 网格数量分别为 587 050、778 792、1 086 277、1 551 934 和 2 412 088。在水相表观速度(U_{sw})为 0.12 m/s, 油相表观速度(U_{so})为 0.6 m/s 的条件下, 对环状流的单位长度压降与距入口 0.5 m 截面处的油相体积分数进行计算分析, 网格无关性

检验如图5所示。由图5可知,当网格数量由1 086 277继续增加时,环状流压降与油相体积分数的变化都很小,因此选定1 086 277网格模型进行后续计算。

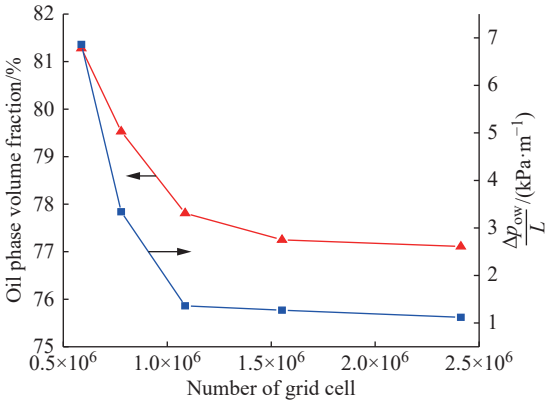


图5 网格无关性检验

Fig. 5 Grid independence test

3 评价指标

3.1 输油效率

在环状流输送过程中加入水相,可以在显著减少流动壁面摩擦阻力的同时,也对管道输油量产生影响。为了衡量不同条件对环状流输油效果的影响,引入输油效率[28-29],定义为单位压降下的输油量,计算式如式(1)所示。

$$\eta = \frac{Q_o}{\Delta p_{ow}/L} \tag{1}$$

式中:η为输油效率,m⁴/(s·kPa);Q_o为油相流量,m³/s;L为测试段总长度0.5 m;$\Delta p_{ow}/L$为环状流输送管道单位长度压降,kPa/m。

3.2 环状流稳定维持长度

为直观地反映不同操作条件下环状流流型的稳定程度,取合流管道入口至油相初始结垢点之间的长度为环状流稳定维持长度(l_c),如图6所示。

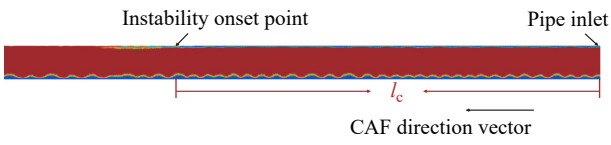


图6 环状流稳定维持长度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of annular flow stability persistence length

3.3 油芯偏心率

油水两相间的密度差异($\rho_o<\rho_w$)对水平管道内环状流的长距离维持具有显著影响。在水平管道输送过程中,油芯因密度较小逐渐偏离管道中心轴而上浮,形成如图7所示的偏心水环输送结构。当偏心距超过临界值时,上层水膜因局部厚度不足发生破裂,油相直接接触管壁导致环状流失稳,同时管内压降急剧增加。引入油芯偏心率评价环状流在水平管道中的输送稳定程度[28],计算式如式(2)所示。

$$E_o = \frac{h}{R_2 - R_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中,E_o为环状流油芯偏心率,%;h为油芯偏心距,mm;R_1、R_2分别为油芯半径与管道半径,mm。

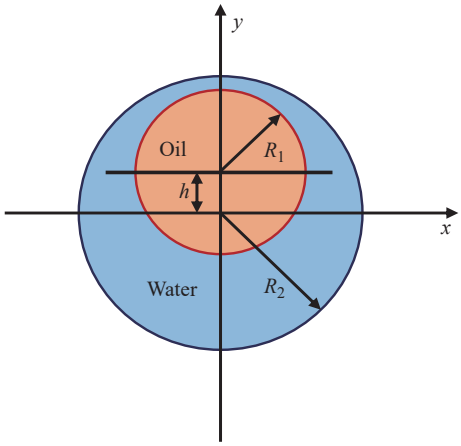


图7 偏心水环输送示意图

Fig. 7 Schematic diagram of eccentric water annulus transportation

4 模型验证

油相与水相的密度和黏度参见2.2节进行设置。控制U_{so}=0.7 m/s,调节U_{sw}为0.12~0.28 m/s,在保证实验与数值模拟初始条件相同的情况下,比较二者的油水环状流输油效率和油水环状流稳定维持长度,对比结果如图8所示。可以看出,模拟结果与实验结果变化趋势基本一致,且在相同流速条件下,环状流输油效率和稳定维持长度的模拟值相较于实验值的平均误差分别为8.32%、8.7%,平均误差值在多相流模拟的合理范围内,说明本文构建的油水两相流CFD模型的可靠性。

5 结果与讨论

5.1 单因素分析

5.1.1 *油相密度的影响* 在固定U_{so}=0.71 m/s和U_{sw}=0.12 m/s的条件下,通过调节ρ_o为880~990 kg/m³,得到管道z轴方向0.6 m截面处的两相体积分数分布云图,如图9所示。当ρ_o较低(如图9(a))时,油芯偏心黏壁环状流失稳;随着ρ_o增大,油芯的偏心程度减

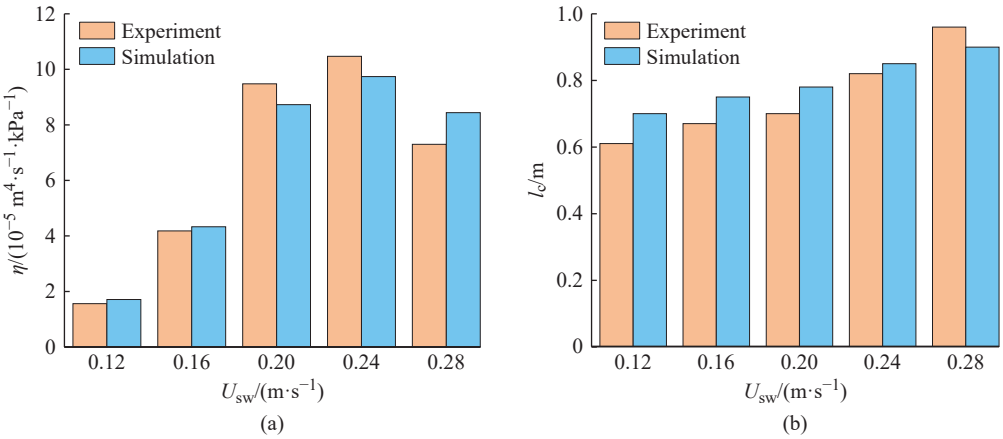


图 8　油水环状流实验与数值模拟结果

Fig. 8　Oil-water annular flow experiments and numerical simulations results

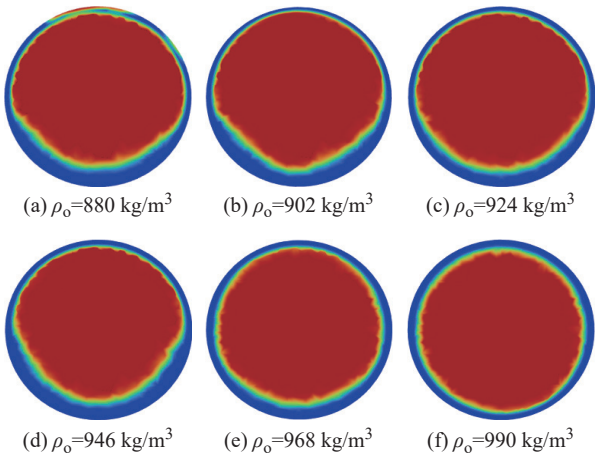


图 9　不同 ρ_o 下管道横截面处两相体积分数云图

Fig. 9　Contour chart of two-phase volume fraction at pipe cross-section under different ρ_o

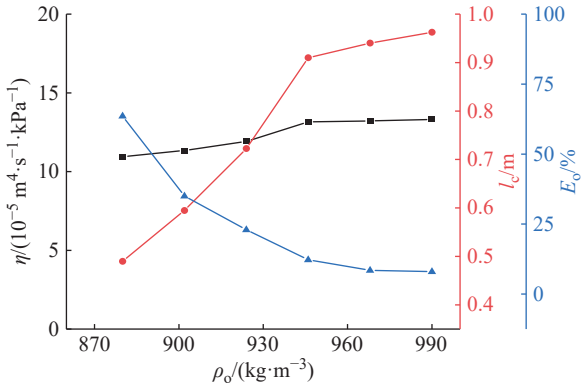


图 10　不同 ρ_o 下输油效率及环状流稳定性参数曲线

Fig. 10　Parametric curves of oil transporting efficiency and annular flow stability with different ρ_o

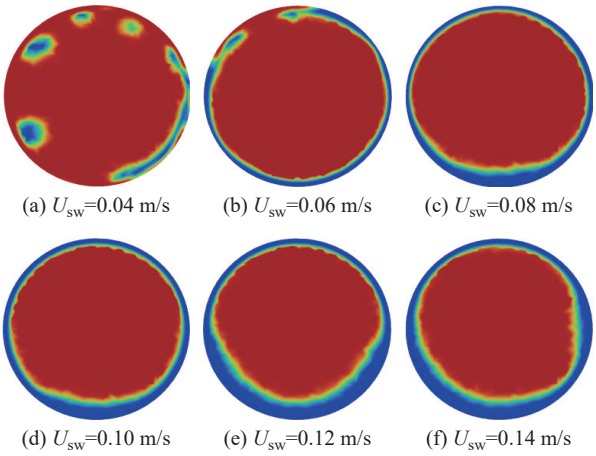


图 11　不同 U_{sw} 下管道横截面处两相体积分数分布云图

Fig. 11　Contour chart of two-phase volume fraction at pipe cross-section under different U_{sw}

弱, 环状流稳定性显著提升, 如图 9(b)~(f)所示。

图 10 示出了不同 ρ_o 条件下, η、l_c 及 E_o 的变化规律。η 与 ρ_o 呈正相关, 当 ρ_o>950 kg/m^3 时, η 稳定在 1.3×10^{-4} m^4/(s·kPa) 左右, 相同条件下纯油的 η_o=1.9×10^{-6} m^4/(s·kPa), 前者约为后者的 68 倍; 随着 ρ_o 增大, l_c 增加, E_o 减小, 当 ρ_o>950 kg/m^{3}时, E_o 趋近于 10% 左右且 l_c>0.9 m, 管道中形成上下层水膜厚度基本一致的稳定环状流结构, 如图 9(e)所示。分析图 10 可知, ρ_o 的改变对 η 的影响并不显著, 但对环状流的稳定性存在显著的调控作用, 在给定油/水表观流速条件下, 当 ρ_o>950 kg/m^3 时, η 较高且环状流稳定性较好。

5.1.2　水相表观流速的影响　在固定 ρ_o=946 kg/m^3 和 U_{so}=0.71 m/s 的条件下, 通过调节 U_{sw} 为 0.04~0.14 m/s, 得到管道 z 轴方向 0.6 m 截面处的两相体积分数分布云图, 如图 11 所示。当 U_{sw} 较低(如图 11(a)~(b))时, 油芯偏心黏壁环状流失稳; 随着 U_{sw} 增大, 油芯上下层水膜厚度增加, 环状流稳定性显著提升, 如图 11(c)~(f)所示。

图 12 示出了不同 U_{sw} 下, η、l_c 及 E_o 的变化规律。η 随 U_{sw} 增大呈现先升后降的趋势, 在 U_{sw}=0.10 m/s 时, η 达到峰值 (1.53×10^{-4} m^4/(s·kPa)); 相同条件下, η_o=1.9×10^{-6} m^4/(s·kPa), 前者约为后者的 81 倍; 随着

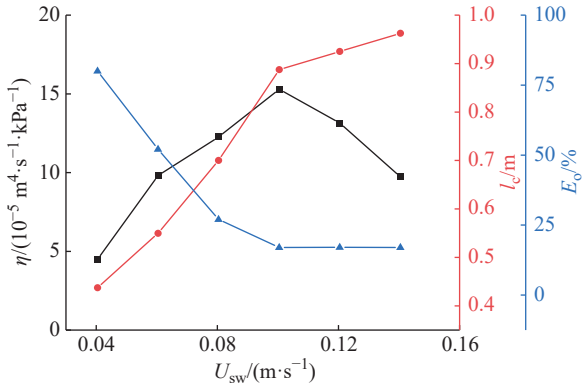


图 12 不同 U_{sw} 下输油效率及环状流稳定性参数曲线

Fig. 12 Parametric curves of oil transporting efficiency and annular flow stability with different U_{sw}

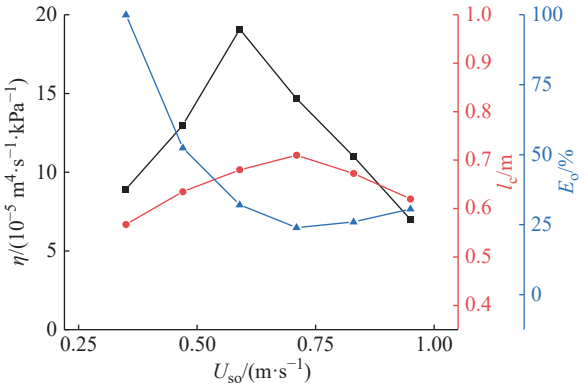
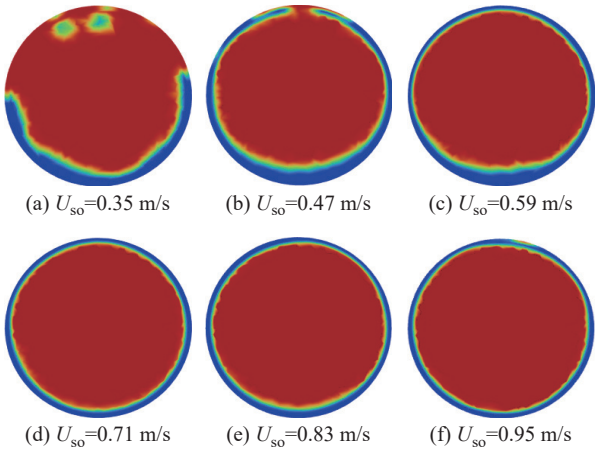


图 14 不同 U_{so} 下输油效率及环状流稳定性参数曲线

Fig. 14 Parametric curves of oil transporting efficiency and annular flow stability with different U_{so}

U_{sw} 增大，l_c 增加，E_o 减小，当 U_{sw}>0.1 m/s 时，E_o 稳定在 17% 左右且 l_c>0.9 m，管道中形成油芯上下层水膜均较厚的稳定环状流结构，如图 11(d)所示。分析图 12 可知，U_{sw} 过低或过高，均会导致 η 降低。在给定条件下，控制 0.08 m/s≤U_{sw}≤0.12 m/s，η 较高且环状流稳定性较好。

5.1.3 油相表观流速的影响 在固定 ρ_o=946 kg/m³ 和 U_{sw}=0.08 m/s 的条件下，通过调节 U_{so} 为 0.35 ~ 0.95 m/s，得到管道 z 轴方向 0.6 m 截面处的两相体积分数分布云图，结果如图 13 所示。当 U_{so} 较低时，油相因动量不足被水相挤压至管壁附近，引发环状流油芯偏心与水膜破裂，形成油水分层流，如图 13(a)所示；随着 U_{so} 的增大，油芯外围水膜厚度变得均匀，如图 13(d)所示；U_{so} 继续增加，油相流量过大挤压管道中水相，导致油芯上层水膜破裂，环状流失稳，如图 13(f)所示。



(a) U_{so}=0.35 m/s (b) U_{so}=0.47 m/s (c) U_{so}=0.59 m/s

(d) U_{so}=0.71 m/s (e) U_{so}=0.83 m/s (f) U_{so}=0.95 m/s

图 13 不同 U_{so} 下管道横截面处两相体积分数分布云图

Fig. 13 Contour chart of two-phase volume fraction at pipe cross-section under different U_{so}

图 14 示出了不同 U_{so} 下，η、l_c 及 E_o 的变化规律。η 随 U_{so} 增大呈现先升后降的趋势，在 U_{so}=0.59 m/s 时，η 达到峰值 (1.91×10⁻⁴ m⁴/(s·kPa))；随着 U_{so} 增大，l_c 先增后减，E_o 先减后增，在 U_{so}=0.71 m/s 时，l_c 和 E_o 分别取得最大值 (0.71 m) 与最小值 (24.07%)，此时 η = 1.47×10⁻⁴ m⁴/(s·kPa)，相同条件下 η_o=1.9×10⁻⁶ m⁴/(s·kPa)，前者约是后者的 77 倍。分析图 14 可知，U_{so} 对 l_c 的影响并不显著，且随着 U_{so} 的改变，η、l_c 与 E_o 均存在最值。在给定条件下，控制 0.59 m/s≤U_{so}≤0.83 m/s，输油效率高但环状流稳定性一般。

5.2 三因素对偏心率的响应面分析

单因素分析结果表明，E_o 与 l_c 呈现显著的反向变化趋势且关键转折点一致，故 E_o 可作为环状流稳定性的有效表征参数。基于上述相关性，本研究采用 Box-Behnken 响应面实验设计方法，建立以 E_o 为响应值的三因素三水平响应面模型。自变量包括：A(油相密度 ρ_o)、B(水相表观流速 U_{sw})、C(油相表观流速 U_{so})，各变量按照表 2 所示数值设定为三水平编码(−1、0、1)，系统考察多参数协同作用对环状流稳定性的影响规律。

表 2 Box-Behnken 设计因素水平及编码

Table 2 Factors and coding of the Box-Behnken design

Level	Factor		
	A	B	C
−1	0.08	0.6	924
0	0.10	0.7	946
1	0.12	0.8	968

按照 Box-Behnken 实验设计准则，构建包含 17 组实验点(包含 5 组中心点重复实验)的响应面分析体系。通过数值模拟计算获取各工况下 E_o 的定量数据，如表 3 所示。利用 Design Experts 13 统计学软件对三因素进行多元非线性回归分析。经三次多项式模型拟合与数据中心化处理，建立 E_o 的三因素响

表 3　Box-Behnken 设计方案及响应值

Table 3　Box-Behnken design and data of response

Run	A	B	C	E_o/%
1	968	0.10	0.8	15.11
2	946	0.08	0.8	31.70
3	946	0.12	0.6	17.55
4	924	0.10	0.6	37.91
5	968	0.10	0.6	16.54
6	946	0.10	0.7	14.24
7	924	0.12	0.7	37.34
8	946	0.10	0.7	15.01
9	946	0.12	0.8	23.94
10	946	0.10	0.7	16.11
11	924	0.10	0.8	39.76
12	946	0.08	0.6	32.09
13	968	0.12	0.7	8.48
14	924	0.08	0.7	48.39
15	946	0.10	0.7	14.81
16	946	0.10	0.7	15.37
17	968	0.08	0.7	22.94

应面回归模型, 如式(3)所示。

$$E_o = 15\,010.17 - 30.25A - 3\,591.47B - 639.67C + 0.02A^2 + 16\,463.41B^2 + 462.64C^2 \quad (3)$$

回归模型方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)如表 4 所示, 本次模拟构建的三因素响应面模型中 F = 107.88, P<0.000 1, 对 E_o 具有高度显著性, 各项 P 值小于 0.05 即为显著项, 分析可知该回归模型各项显著性良好。通过模型与响应变量预测值之间的相关系数(R^2)进一步检验拟合公式, 多参数回归模型的调整 R^2(R^2 Adjusted)为 0.975 7, 根据该模型计算得到变异系数为 7.56%, 小于 10%, 表明模型可信度、精确度高且适用于参数优化。

对单因素模拟结果进行综合分析, 当 E_o<15% 时, 管道内油水环状流稳定性好(l_c>0.9 m)。图 15 是当 U_{so}=0.71 m/s 时, U_{sw} 与 ρ_0 对 E_o 的 3D 响应面与等值线图。分析图 15 可知, 沿 A 方向上的等值线密度大于 B 方向, 说明 ρ_0 对 E_o 的影响比 U_{sw} 更显著。

图 16 是当 ρ_o=946 kg/m^3 时, 油水两相表观流速对 E_o 的 3D 响应面与等值线图。分析图 16 可知, 沿 B 轴方向上的等值线密度明显大于 C 轴方向, 说明 U_{sw} 对 E_o 的影响更显著。较低水相速度区间的等值线密度大于较高水相速度区间, 说明 U_{sw} 的提高对 E_o 的影响明显减弱。在此 ρ_0 下, 为使环状流稳定输送, U_{sw} 应处于 0.10 ~ 0.12 m/s 之间, U_{so} 应处于 0.64 ~ 0.74 m/s 之间。

图 17 是当 U_{sw}=0.10 m/s 时, U_{so} 与 ρ_0 对 E_o 的 3D 响应面与等值线图。分析图 17 可知, 沿 C 轴方向上的等值线密度远大于 B 轴方向, 说明 ρ_o 对 E_o 的影响更显著。低油相密度区间的等值线密度大于高油相密度区间, 说明 ρ_o 的提高对 E_o 的影响明显减弱。在该 U_{sw} 下, 为使环状流稳定输送, ρ_o 应大于 950 kg/m^3。

综合分析可知, 三因素对于 E_o 的敏感性排序为: ρ_o>U_{sw}>U_{so}, 控制 ρ_o>950 kg/m^3, 调节 U_{sw} 在 0.10 ~

表 4　E_o 回归模型方差分析

Table 4　ANOVA of E_o regression model

Source	Sum of square	DF	Mean square	F	P
Model	2 121.89	6	353.65	107.88	<0.000 1
A	1 258.14	1	1 258.14	383.80	<0.000 1
B	285.68	1	285.68	87.15	<0.000 1
C	5.15	1	5.15	1.57	0.238 7
A^2	242.78	1	242.78	74.06	<0.000 1
B^2	182.60	1	182.60	55.70	<0.000 1
C^2	90.12	1	90.12	27.49	0.000 4
Residual	32.78	10	3.28		
Lack of fit	30.86	6	5.14	10.69	0.019 1
Pure error	1.92	4	0.48		

R^2(Adjusted) = 0.975 7; DF—Degree of freedom

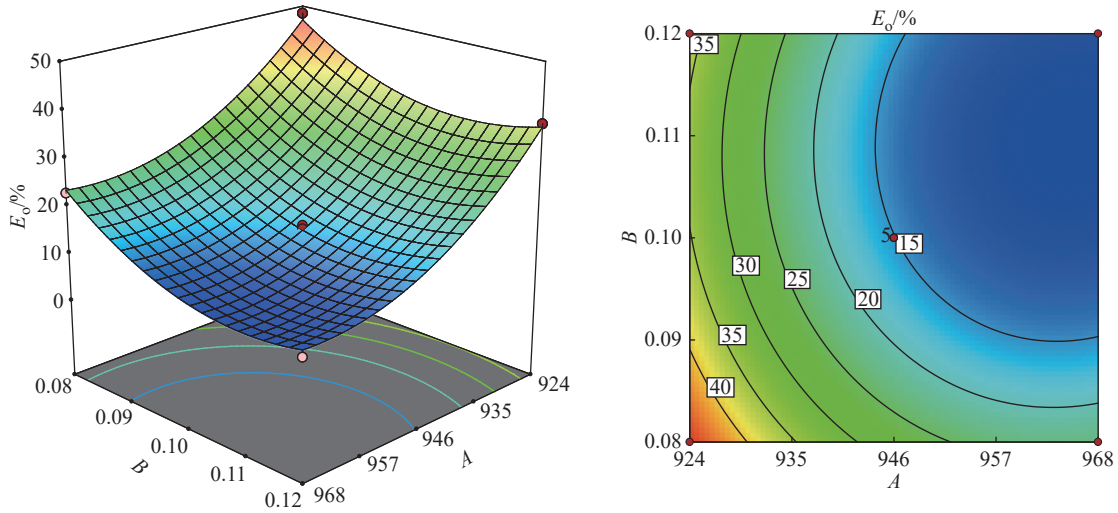


图 15 油相密度与水相表观流速对油芯偏心率的响应面 3D 图和等值线图

Fig. 15 3D response surface and contour plots of ρ_o and U_{sw} effects on E_o

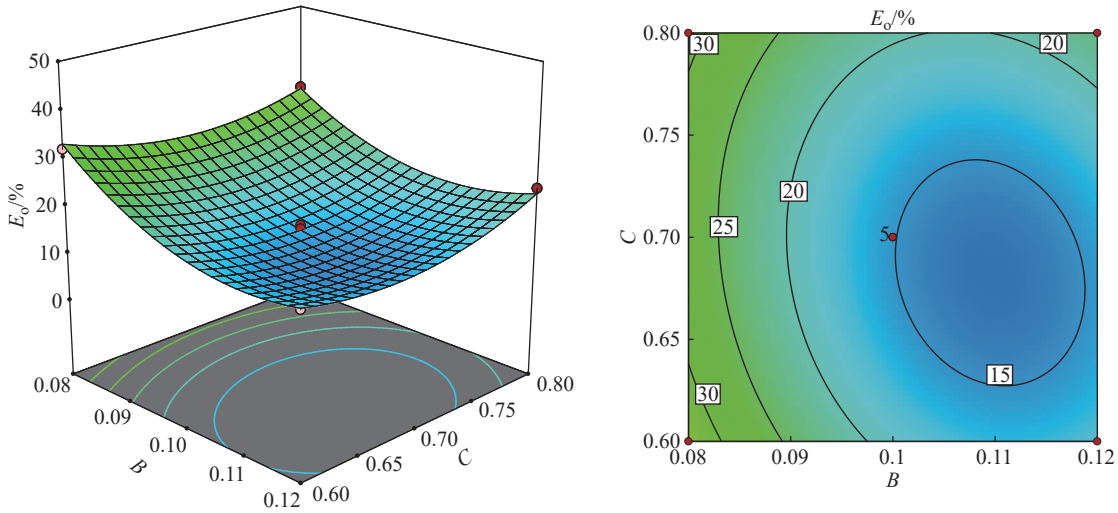


图 16 油水两相表观流速对油芯偏心率的响应面 3D 图和等值线图

Fig. 16 3D response surface and contour plots of U_{so} and U_{sw} effects on E_o

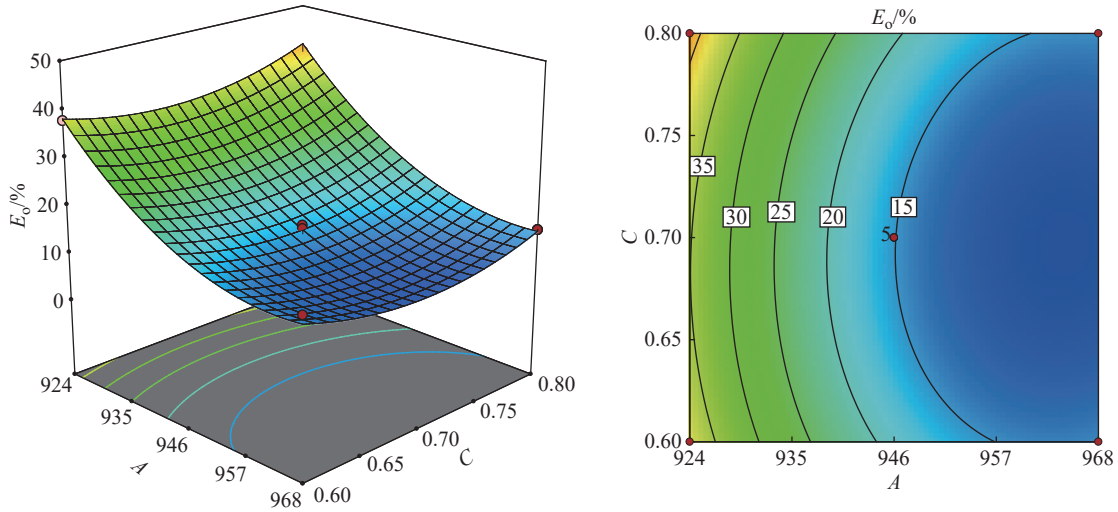


图 17 油相密度与油相表观流速对油芯偏心率的响应面 3D 图和等值线图

Fig. 17 3D response surface and contour plots of ρ_o and U_{so} effects on E_o

0.12 m/s 范围内, U_{so} 在较大的范围区域(0.6 ~ 0.8 m/s)均能实现环状流的稳定输送(E_o<15%)。为实现重质油(ρ_o 为 900 ~ 998 kg/m^3)的高效低耗输送, 应保证较高的输油效率, 即采用较低表观流速的水相与较高表观流速的高密度油相进行油水环状流输送, 取参数条件 ρ_o=964 kg/m^3, U_{sw}=0.1 m/s, U_{so}=0.8 m/s进行验证, 得到 E_o<10%, l_c>1.0 m, η>1.5×10^{-4} m^4/(s·kPa), 环状流稳定且输油效率高。

6　结　论

本文对重质油气化工艺中油水环状流减阻输送技术开展研究, 采用水平管道环路实验与 CFD 数值模拟相结合的方法, 从单因素和响应面分析两个角度探究了油相密度 ρ_o、水相表观流速 U_{sw} 与油相表观流速 U_{so} 这 3 个因素对 15 mm 内径水平管道内油水环状流的输油效率 η、稳定维持长度 l_c 及油芯偏心率 E_o 的影响规律与耦合作用, 主要结论如下:

(1)ρ_o 对 η 的影响不显著, 但高的 ρ_o 有助于维持油水环状流的稳定性, 当 ρ_o>950 kg/m^3 时, η 能够稳定在 1.3×10^{-4} m^4/(s·kPa) 左右, E_o 趋近于 10% 且 l_c> 0.9 m, 管道中形成上下层水膜厚度基本一致的稳定环状流结构。

(2)提高 U_{sw} 有助于增强环状流结构的稳定性, 但 U_{sw} 过小或过大都会导致 η 降低。当 U_{sw}= 0.10 m/s 时, η 存在最大值 (1.53×10^{-4} m^4/(s·kPa)), 且 E_o 维持在最小水平(17% 左右); U_{so} 过小或过大都会导致环状流失稳。当 U_{so}=0.71 m/s 时, η = 1.47×10^{-4} m^4/(s·kPa), 处于较高水平, 此时, E_o 有最小值 24.07%。

(3)基于 Box-Behnken 响应面设计的 E_o 三次多项式响应面模型表明, E_o 受三因素非线性影响, 三因素的显著性排序为: ρ_o>U_{sw}>U_{so}。当 ρ_o>950 kg/m^3 时, 控制 U_{sw} 范围在 0.10 ~ 0.12 m/s、U_{so} 范围在 0.6 ~ 0.8 m/s, 能实现环状流的稳定输送(E_o<15%、l_c>0.9 m)与较高的输油效率(η>1.5×10^{-4} m^4/(s·kPa))的平衡。

参考文献:

[1] ORE O T, ADEBIYI F M. A review on current trends and prospects in the pyrolysis of heavy oils[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021, 11(3): 1521-1530.

[2] HAN Y, TIAN Z, XU J, *et al*. Study on the micro-explosion mechanism and influencing factors of oil water mixed fuel[J]. Energy, 2024, 313: 133784.

[3] GAO R, HUANG B, HUANG J, *et al*. Process modelling of two-stage entrained-bed gasification composed of rapid pyrolysis and gasification processes[J]. Fuel, 2020, 262: 116531.

[4] XU J, LIANG Q, DAI Z, *et al*. Robust online temperature estimation of a membrane-wall gasifier[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(2): 556-565.

[5] CHEN J, LANG X, WANG Y, *et al*. Comparative evaluation of different non-condensable gases on thermal behaviors, kinetics, high pressure properties, and product characteristics of heavy oil[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 162: 13-25.

[6] ZHOU X, YUAN Q, PENG X, *et al*. A critical review of the CO_2 huff 'n' puff process for enhanced heavy oil recovery[J]. Fuel, 2018, 215: 813-824.

[7] MUÑOZ J A D, ANCHEYTA J. Techno-economic analysis of heating techniques for transportation of heavy crude oils by land pipeline[J]. Fuel, 2023, 331: 125640.

[8] MUÑOZ J A D, ANCHEYTA J, CASTAÑEDA L C. Required viscosity values to ensure proper transportation of crude oil by pipeline[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(11): 8850-8854.

[9] 冯庆善. 关于长输管道统一定义与范围界定的讨论 [J]. 油气储运, 2020, 39(5): 492-499.

[10] ISAACS J D, SPEED J B. Method of piping fluids: US759374[P]. 1904-11-15.

[11] 吴君强, 蒋文明, 杜仕林, 等. 水平管路水环输送稠油减阻模拟实验 [J]. 化工学报, 2019, 70(5): 1734-1741.

[12] CHARLES M E, GOVIER G W, HODGSON G W. The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015, 39(1): 27-36.

[13] 敬加强, 尹晓云, MASTOBAEV N, 等. 水平管内水环输送模拟稠油减阻特性 [J]. 化工进展, 2021, 40(2): 635-641.

[14] 郭雨莹, 敬加强, 黄婉妮, 等. 稠油管道水润滑减阻及压降预测模型修正 [J]. 化工学报, 2023, 74(7): 2898-2907.

[15] AYUBA N, de BORBA BUHLER R, da SILVA L S, *et al*. Application of density-viscosity in predicting oil-water flow profile in horizontal pipe[J]. Experimental and Computational Multiphase Flow, 2022, 4(1): 52-70.

[16] CAVICCHIO C A M, BIAZUSSI J L, CASTRO M S D, *et al*. Experimental study of viscosity effects on heavy crude oil-water core-annular flow pattern[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2018, 92: 270-285.

[17] JIA S, ZHANG C. Overview of oil-water two-phase flow pressure drop theory[J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 6(1): 8440.

[18] XIE L, MAO G, WANG K, *et al*. Computational fluid dynamics simulation of oil-water batch transport in a pumpless virtual flow loop[J]. SPE Production & Operations, 2023, 38: 1-15.

[19] 蒋佳丽, 刘婷, 李宇浩, 等. 基于 AHP-EWM 结合

Box-Behnken 响应面法优化黄芩多指标成分的微波提取工艺 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2024, 50(5): 678-686.

[20] 蒋文明, 杜仕林, 吴君强, 等. 稠油水环发生器结构优化 [J]. 油气储运, 2019, 38(8): 937-943.

[21] 敬佩瑜, 朱宇, 孙杰, 等. 水平管内高黏油水环输送减阻特性分析 [J]. 化工进展, 2024, 43(6): 2996-3006.

[22] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.

[23] INGEN HOUSZ E M R M, OOMS G, HENKES R A W M, *et al*. A comparison between numerical predictions and experimental results for horizontal core-annular flow with a turbulent annulus[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 95: 271-282.

[24] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.

[25] JIANG F, WANG Y, OU J, *et al*. Numerical simulation on oil-water annular flow through the Π bend[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(19): 8235-8244.

[26] GHOSH S, DAS G, DAS P K. Simulation of core annular in return bends—A comprehensive CFD study[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(11): 2244-2253.

[27] 杜仕林. 稠油水环输送过程数值模拟及实验研究 [D]. 山东青岛: 中国石油大学 (华东), 2018.

[28] WU J, JIANG W, LIU Y, *et al*. Study on hydrodynamic characteristics of oil-water annular flow in 90° elbow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 153: 443-451.

[29] SUN J, JING J, WU C, *et al*. Pipeline transport of heavy crudes as stable foamy oil[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 44: 126-135.

Stability Analysis of Oil-Water Annular Flow Transportation in Heavy Oil Gasification Systems

YANG Mukun[1,2,3], HAN Yang[1,2,3], LIANG Qinfeng[1,2,3], XU Jianliang[1,2,3], DAI Zhenghua[1,2,3,4], WANG Fuchen[1,2,3]

(1. Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Laboratory of Coal Liquification, Gasification and Utilization with High Efficiency and Low Carbon Technology, Shanghai 200237, China; 3. Shanghai Coal Gasification Engineering Technology Research Center, Shanghai 200237, China; 4. School of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to solve the problem of oil-water mixing transport in heavy oil gasification process by using annular flow transport technology, this study adopted a combined method of horizontal pipe annular flow experiments and three-dimensional numerical simulations based on the Volume of Fluid (VOF) multiphase flow model. From the perspectives of single-factor analysis and Box-Behnken response surface experimental design, the study systematically investigated the influence laws and multi-factor coupling effects of oil-phase density (880—990 kg/m^3), water-phase superficial velocity (0.04—0.14 m/s), and oil-phase superficial velocity (0.35—0.95 m/s) on oil transportation efficiency, annular flow stable maintenance length, and oil core eccentricity in a horizontal pipe with an inner diameter of 15 mm. The results show that when the oil-phase density is greater than 950 kg/m^3, a stable annular flow structure with an oil core eccentricity of less than 15% and an annular flow stable maintenance length of more than 0.9 m can be achieved by controlling the water-phase superficial velocity within the range of 0.10—0.12 m/s and the oil-phase superficial velocity within 0.6—0.8 m/s. This study provides data and theoretical support for the optimal design of efficient and low-consumption oil-water mixed transportation processes in heavy oil gasification.

Key words: heavy-oil gasification; oil-water core-annular flow; multiphase flow simulation; response surface analysis; drag-reduction transportation

（责任编辑：张欣）