

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.02.018

15°倾斜输油管道内油水两相流流动特性研究

赵可杰, 翁光远

(西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为揭示原油含水率和原油初始流速对倾斜管内油水两相流流型的影响, 以油水两相介质流体为研究对象, 采用有限元仿真 Workbench 软件及流体仿真模拟 FLUENT 模块, 建立了 15° 倾斜输油管有限元计算模型, 分析不同原油含水率和不同原油初始流速条件下的模拟计算结果, 以及管内介质流体压力和流速的分布及流型的变化特点。结果表明: 当介质流体初始流速一定时, 随着原油含水率的增大, 管内压降增大; 当介质流体含水率一定时, 随着原油初始流速的增大, 管内压降增大。原油含水率和初始流速均显著影响管内压降和流型, 是研究油水两相流动特性的重要参数。

关键词: 15° 倾斜输油管; 油水两相流; 含水率; 流速; 压降

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0134-05

Flow Characteristics Analysis of Oil-water Two-phase Flow in 15° Inclined Oil Pipeline

ZHAO Kejie, WENG Guangyuan

(Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: In order to reveal the effects of water cut and initial flow rate of crude oil on the flow pattern of oil-water two-phase flow in inclined pipe, a finite element calculation model of 15° inclined pipeline was established by finite element simulation software and fluid simulation module, and the simulation results under different water cut and initial flow rate of crude oil were analyzed. The distribution of fluid pressure and velocity and the change of flow pattern in the tube are summarized. The results show that when the initial flow rate of medium fluid is constant, the pressure drop increases with the increase of water cut. When the water content of the medium fluid is constant, the pressure drop in the pipe increases with the increase of the initial flow rate of crude oil. The water content and initial velocity of crude oil significantly affect the pressure drop and flow pattern in the pipe, which are important parameters for studying the characteristics of oil-water two-phase flow.

Keywords: 15° inclined oil pipe; oil-water two-phase flow; moisture content; flow velocity; pressure drop

油水两相流动现象作为多相流领域的重要分支, 存在于石油工业的各个环节之中。在油水两相介质流体输送过程中, 需要在管道系统中设置不同角度的倾斜管段来适应复杂地形, 以达到输送油水介质流体的目的。截至目前, 国内外学者在油水两相流流动特性研究方向上取得的科研成果主要集中在两个基础的管道几何构型(垂直管道与水平管

道)上, 对于倾斜式或更复杂不规则的管道几何构型而言, 由于受到多物理场耦合作用, 其中包括重力作用、惯性力与离心力的作用、管内介质流体间的相互作用、流固耦合、流体与管壁间摩擦作用等因素, 这些因素使得倾斜式的管道内油水两相介质流体流动特性研究比较困难且复杂, 并且, 在实际工程输送中, 这些复杂因素使得倾斜输油管内介质流体呈现

收稿日期: 2024-11-20

修稿日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174061)

作者简介: 赵可杰(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输油管内流体流动特性研究。E-mail: zkj0224@163.com

通讯作者: 翁光远(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事管道结构健康监测等方面研究工作。E-mail: weng_guangyuan@163.com

的不确定性和不稳定性,加大了在介质流体在输送过程中对倾斜管内关键节点造成的运输安全隐患。

国内外学者针对管内介质的流型开展了大量的理论分析和试验研究:从流型的理论研究方面,Brauner^[1]总结了液液两相试验、模型、流型划分准则以及压降计算方法等。Ismail等^[2]考虑了实际生产过程中原油和矿物油的差异以及管道倾角的不同,对油水两相管流试验、流型、持液率、压降和反相进行了详细的论述。陈杰等^[3]总结了国内外有关油水两相流动的研究成果,并对油水两相流研究方向提出了看法。从试验研究方面,杜萌等^[4]采用多尺度排列熵算法研究了垂直油水两相流水包油流型的多尺度动力学特性。张亚辉等^[5]开展不同入口速度及不同管径的水平圆管油水两相流流型数值模拟试验。张落玲等^[6]利用水平小管径试验模拟井装置,研究了水平井中测井仪器通道内油水两相流流动特性。许明等^[7]研究了水平条件下 20 mm 管径油水两相流的流动特性对抗式含水率计测量的影响。从数值计算模拟仿真方面,金宁德等^[8]建立了垂直上升管中油水两相流运动波传播方程,计算得到了管内无仪器插入体情况下油水两相流运动波传播速度特性曲线,并进行了管内流型辨识。Zhai等^[9]采用微型电导探针研究各种流动条件下的油水水平管流流型结构。孙皓等^[10]采用 VOF 在不同含水率和混合流速条件下对不同角度的倾斜管内的油水两相流进行数值模拟。宗艳波等^[11]对水为连续相的倾斜油水两相流流型进行了吸引子形态周界测度分析,发现吸引子面积增长率是描述吸引子形态的不变特征量。

从以上研究成果可以看出,国内外学者针对油水两相流流型问题的研究已取得了显著成果,但对倾斜管内油水两相流流型的研究相对匮乏。因此,针对倾斜管内油水两相流流型的研究有着重要意义。本文以油水混合介质流体为研究对象,建立三维 15°倾斜输油管道的有限元计算模型,研究不同含水率及不同初始流速条件下对油水两相流流动特性的影响,特别是对两相流流型与管内压降变化的影响,以期为实际的倾斜输油管道安全运输提供技术支持。

1 理论分析与仿真模拟

1.1 流型的分类

输油管道内,油水两相流的流动状态十分复杂,

呈现显著的非线性分布特征。不同管道几何构型下的介质流体流动的流型、压力梯度分布和速度场分布特点有很大的差异。区别于基础的输油管道几何构型(垂直管和水平管)中的流型特征,倾斜的输油管道内流型特征可以分为两种典型的相态结构:①水为连续相的流型,②油为连续相的流型。

当水为连续相时,即水包油(O/W)型,流动相分布呈现梯度分层特点:油相分散且水相有局部逆向滑移的 D O/W CT 流型、油相分散且水相拟段塞特征的 D O/W PS 流型、油相分散且水相同向流动的 D O/W CC 流型、油相以油滴形式分散在水相中的 VFD O/W 流型及油相与水相过渡的 TF 流型,倾斜管内流型示意图如图 1 所示。当油为连续相时,即油包水(W/O)型,包括水相以液滴形式离散分布的 D W/O 流型和水相均匀分布的 VFD W/O 流型。相较于基础的管道几何构型,倾斜管道内介质流体因受到重力和离心力的耦合作用影响,其油水两相分布呈现各向异性的特点。

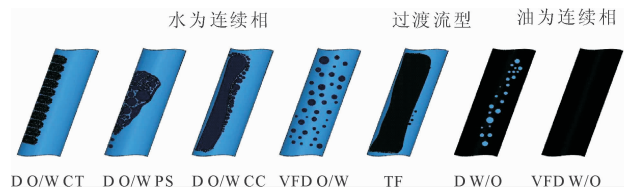


图 1 倾斜管流型图

1.2 两相流基本方程

管内流体的流动遵循物理学经典定律,其运动特征需要满足基本的流体控制方程。

1.2.1 流体控制方程

连续性方程又称为质量守恒方程,其满足控制体内流体总质量的增量与流入控制体的流体质量相等的等量关系。连续性方程(质量守恒方程)的一般形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流体速度。

对于不可压缩的定常流动,密度 ρ 为常数, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ 则:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程的矢量形式在三个方向上的公式表达有相似性,将其统一归纳为如下式所示:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (3)$$

稳定流动时不可压缩的流体的动量守恒方程如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: v_i 为三个矢量方向上的速度; v_j 为速度矢量在 j 方向上的速度分量; p 为对外界的压力; τ_{ij} 为不同方向上表面剪切应力分量; f_i 为体积力。

1.2.2 湍流模型

湍流流动是一种具有不规则、多尺度、复杂结构的流动,具有很大的耗散和扩散的特性^[12]。对于湍流模型的选择在油水两相流模拟中极其重要,k-epsilon模型包含了很多变量和不可测量的因子,FLUENT中的标准k-epsilon模型由于其良好的收敛速度和相对较低的存储器要求,在石油化工行业广泛应用,湍流模型方程如下^[13]:

标准的湍流动能的方程(k 方程),如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

标准的湍流动能耗散率的方程(ε 方程),如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式(5)、式(6)中: k 为湍流动能; u_i 为速度分量第 i 分量; μ 为动粘度; μ_t 为湍流粘度; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为浮力产生的湍动能; ε 为湍流能耗率; Y_M 为波动膨胀对耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; σ_k 与 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数; S_k 和 S_ε 是实际使用中的设定值。

1.3 几何模型

1.3.1 有限元模型建立

建立内径 760 mm,壁厚 14.5 mm 的有限元计算模型,如图 2 所示。该管道由 3 部分组成,分别为倾斜段、弯曲段及水平段。其中倾斜段和水平段的长度均为 8 m,倾斜管段与水平面的夹角为 15°。

利用有限元仿真软件建立倾斜输油管道的三维模型,并对该模型进行网格划分,生成的网格为四面体结构网格。

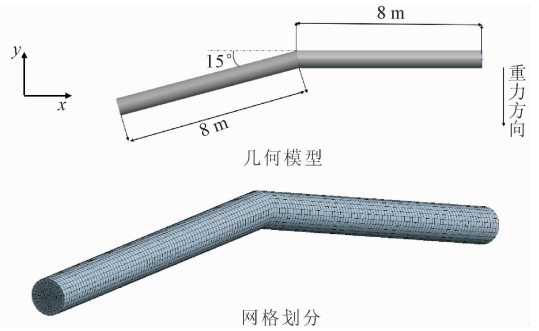


图 2 15°倾斜输油管有限元计算模型

1.3.2 计算设置与参数取值

本文以油水混合两相流为研究对象,设置重力加速度 9.81 m/s²,选用标准的 k-epsilon 模型和多相流中的 VOF 模型计算管内流体,管内主相为原油,次相为液态水。设置原油密度为 889 kg/m³,动力粘度 0.603 mPa·s;水相密度 998.2 kg/m³,动力粘度 1.003 mPa·s。进口采用速度入口,方向垂直于上升管截面,出口自由流出,壁面设置为标准壁面函数且为无滑移壁面。为了使收敛比较平稳,保证模拟数据的可靠性,时间步长设置为 0.02 s,设置步长为 1 500 步,以确保流体能充分的流经管道并保持稳定出流状态。

根据某工程实际,分别模拟了五种计算工况,开展不同原油含水率,不同原油流速的模拟计算研究,各工况参数取值如表 1 所示。

表 1 参数取值

工况	原油含水率/%	原油流速/(m·s ⁻¹)
工况 1	10	2.0
工况 2	10	1.2
工况 3	10	1.6
工况 4	30	2.0
工况 5	50	2.0

2 计算结果分析

2.1 沿管道纵向压力和速度的分布云图

通过对 15°倾斜输油管内油水两相流体流动特性进行有限元仿真模拟,计算了表 1 中五种工况下的压力和流速,结果表明,五种工况下的压力和流速云图分布特点具有相似性,仅仅是数值的差异。以工况 1 为例进行具体分析,提取的工况 1 条件下压力和流速分布云图,如图 3 所示。

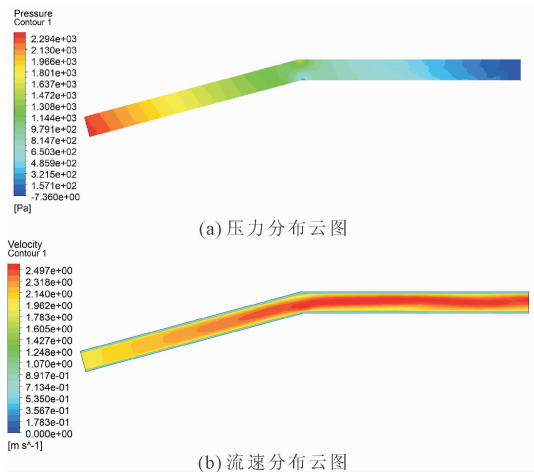


图 3 15° 倾斜管纵向压力和流速分布云图(工况 1)

从图 3 可知,油水介质流体从倾斜管入口流至弯管前端,管内压力沿流体流动方向呈阶梯式逐渐减小,介质流体在水平段流动时介质流体压力分布也有此特点。当介质流体流经弯管处时,介质流体压力呈现内侧区域较小,外侧区域压力较大的分布特点。究其原因,流体在弯管进口处,由于受到惯性和离心力的作用,使得流体向曲率半径较大的外侧区域附近移动,导致流体推挤外侧壁面,从而外侧区域压力增大,内侧区域压力减小^[14]。并且,倾斜管内介质流体由于受到重力和倾角的双重影响以及考虑流体与管道壁的沿程损失,同一水平位置下,上下壁面的压力大小也存在一定的差异,上侧区域的压力小于下侧区域的压力。

由图 3 可知,油水混合介质流体在倾斜管内流动过程中,处于管道中心位置的介质流体从管道入口处不断增大直至靠近弯管转弯处,流速达到最大为 2.49 m/s。并且,由于受到管壁摩擦的影响,介质流体在管道中心区域流速较大,流速的大小向两侧管壁逐渐减小。

2.2 不同原油含水率下的相分布图

为探究不同原油含水率对介质流体流型变化的影响,以工作条件为 0.1 MPa,介质流体初始流速为 2 m/s,通过仿真模拟了工况 1、工况 4 和工况 5 条件下的介质流体在 15° 倾斜输油管内的流动情况,得到不同原油含水率下水油两相流流型图,如图 4 所示。

由图 4 可知,介质流体在输油管倾斜段流动,当含水率为 10% 时,介质流体呈现一段高密度的油水混合物相与一段油相交替形式流动的流动状况。当含水率增大时,倾斜段油水两相交替流动的越紧凑,

当含水率达到 50% 时,介质流体呈现复杂的无规则的流动状态。介质流体在输油管水平段流动,当含水率为 10% 时,水以大小不同的液滴分散在介质流体中。随着含水率的增大,各个离散相间的距离随含水率的增大而减小,在倾斜输油管道下壁面附近产生离散水相的汇聚成块的现象,形成具有复杂特征的流动形式,并且附着于管壁下表面,流型转变为间歇流或水环流。可见,由于含水率的增加,对于倾斜输油管道内油水两相流流型有显著的影响。

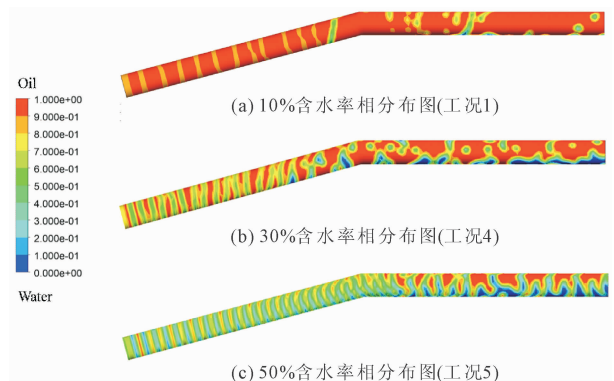


图 4 15° 不同含水率下水油两相流流型图

2.3 不同原油初始流速的相分布图

为探究不同原油初速度对介质流体流型变化的影响,以工作条件为 0.1 MPa,介质流体含水率为 10%,通过仿真模拟工况 1、工况 2 和工况 3 条件下的介质流体在 15° 倾斜输油管内的流动情况,得到不同初速度下水油两相流流型图,如图 5 所示。

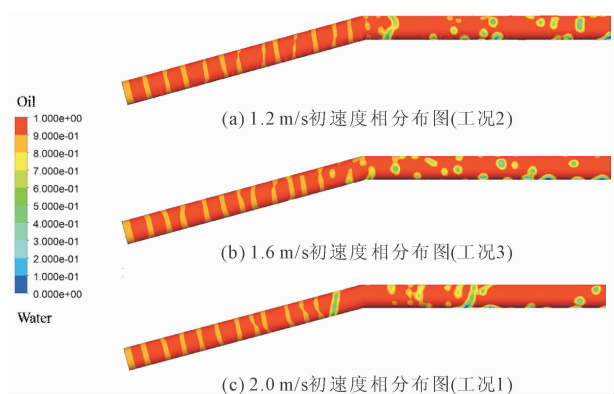


图 5 15° 不同初始流速下水油两相流流型图

由图 5 可知,介质流体在输油管倾斜段流动,其流动特点在不同的初速度下具有相似性,介质流体均呈现一段高密度的油水混合物相与一段油相交替形式流动的流动状况。当介质流体流速初速度增大时,两相同相之间的距离减小。介质流体在输油管水平段流动,不同介质流体初始流速的流型均为水

泡流,随着初始流速的增大,各个聚集的小液滴变得越发散,呈无规则分布形式,并且随着初始流速的增大,水平段的管内壁面出现了液滴集中。

2.4 流型变化对油水两相流压降的影响

为探究流型变化对油水两相流压降的影响,模拟了油水两相流不同原油含水率和不同原油初始流速条件下的流动,计算得到了工况 1—工况 5 的压降数值,归纳绘制不同初始条件下两相流压降示意图,如图 6 所示。

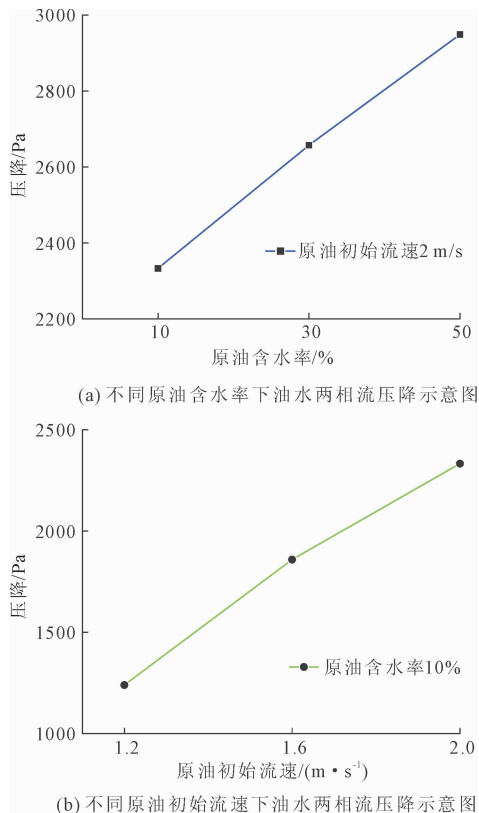


图 6 不同初始条件下两相流压降示意图

由图 6 可知,当倾斜输油管倾角为 15° 且管内介质流体初始流速保持 2 m/s 恒定的条件下,随着原油含水率由 10% 增大到 50% 的过程中,管内压降的数值从 2333 Pa 增大到 2948 Pa ,当含水率达到 50% 时,管内压降达到最大。在控制单一变量的前提下,倾斜管管内压降大小,随原油含水率的增大而增大。究其原因,随着含水率的增大,水滴间的相互作用和水滴“聚集体”的存在,使得混合液的非牛顿流体性质增强,其压降值也迅速增大^[15]。当倾斜管内压降增大时,管内增大的剪切力破坏已有的流型结构,并促使流型向更不稳定的、更复杂的形态转变。

同样的,当倾斜输油管倾角为 15° 且管内介质

流体含水率保持为 10% 恒定的条件下,随着原油初始流速由 1.2 m/s 增大到 2 m/s 的过程中,管内压降的数值从 1240 Pa 增大到 2333 Pa ,当初始流速增大到 2 m/s 时,管内压降达到最大。在控制单一变量的前提下,倾斜管管内压降大小,随原油初始流速的增大而增大。由于初始流速的增加,倾斜管内出现了不完全和完全液环,并且管壁附近出现了液滴集中,因此压降随初始流速的增大而增大。

3 结 论

本文研究了倾斜管内油水两相流流型和流型对压降的影响,考虑了不同原油含水率和不同原油初始流速条件下,管内介质流体流型的分布特点及压降的变化特点,得到以下结论:

(1) 15° 倾斜管内介质流体压力和流速的分布具有一定特点。介质流体压力沿纵向逐渐梯度式递减,但在弯管处上侧区域有较大的压力分布,下侧区域有较小的压力分布的特点。介质流体在管内中心区域流速较大,流速向两侧管壁递减。

(2) 15° 倾斜管内油水两相流的流型随含水率和初始流速的改变发生一定的变化。当含水率增大时,液滴间的距离迅速减小,形成聚集。当初始流速增大时,各个聚集的小液滴变得越发散,呈无规则分布形式。

(3) 控制模拟过程中仅发生单一条件的改变,得到了倾斜管内压降大小与不同的原油含水率和不同的初始流速之间的特点:当倾斜管倾角和原油初始流速一定的条件下,随着原油含水率的增大,管内压降增大。当倾斜管倾角和原油含水率一定的条件下,随着原油初始流速的增大,管内压降增大。

参考文献:

- [1] Brauner N. Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems[J]. Springer Vienna, 2003, 450:221-279.
- [2] Ismail A S I, Ismail I, Zoveidavianpoor M. Review of oil-water through pipes[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45:357-374.
- [3] 陈杰,章龙江,严大凡. 油-水两相流流型研究[J]. 油气田地面工程, 2000(1):6-9, 2.
- [4] 杜萌,金宁德,高忠科,等. 油水两相流水包油流型多尺度排列熵分析[J]. 物理学报, 2012, 61(23):113-121.
- [5] 张亚辉,米智楠,吴仁智,等. 管径大小对水平圆管油水两相流的影响[J]. 流体传动与控制, 2017(2):18-21.