

文章编号:2095-6134(2017)02-0265-08

# 起伏管道空管投油气液两相流动的数值模拟\*

张欣雨<sup>1</sup>, 谢静<sup>2</sup>, 宇波<sup>3†</sup>

(1 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 100029; 2 中国石油工程设计有限公司华北分公司, 河北 任丘 062550;  
3 北京石油化工学院, 北京 102617)  
(2016年4月18日收稿; 2016年6月13日收修改稿)

Zhang X Y, Xie J, Yu B. Numerical simulation on the gas-liquid two-phase flow in the direct commissioning process of a hilly pipeline[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(2):265-272.

**摘要** 输油管道的空管投油是复杂的气液两相管流过程。在地形起伏较为剧烈的地区,管道内复杂的流动状况对投产安全造成威胁,研究其水力规律具有重要意义。采用数值模拟方法,建立起伏管道模型对起伏管道的气液两相流进行模拟,并用软件对管段流场进行实时监控,研究不同类型管道中气液两相流动规律及其影响因素。

**关键词** 起伏管道; 气液两相流; 数值模拟

中图分类号:TE83 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2017.02.022

## Numerical simulation on the gas-liquid two-phase flow in the direct commissioning process of a hilly pipeline

ZHANG Xinyu<sup>1</sup>, XIE Jing<sup>2</sup>, YU Bo<sup>3</sup>

(1 Sinopec International Petroleum Exploration and Production Corporation, Beijing 100029, China;  
2 China Petroleum Engineering Corporation Huabei Branch, Renqiu 062550, Hebei, China;  
3 Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract** Direct commissioning of oil pipeline is a complex gas-liquid two-phase flow process. In the highly hilly area, the complex flow status in the pipeline poses great threat to the safety of pipeline. Numerical approach is adopted in this work to study the gas-liquid two-phase flow in the hilly pipe. Physical models are established and commercial software is utilized to monitor the flow field. Characteristics and influencing factors for varied types of pipes are studied.

**Keywords** hilly pipeline; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation

管道投产是管道由建设施工转入生产运行的关键阶段<sup>[1]</sup>,空管投油<sup>[2]</sup>是指管道建成后直接进行投油试生产的投产方式,进入管道的液体可能历经分层流、波浪流、气泡流、气团流或段塞流等两相流的流型变化。在实际生产中,长距离输油管道受地形条件的限制而呈现出复杂多变的起伏

管路,造成内部呈现气液两相流,且流动参数剧烈波动,不利于投产的安全进行<sup>[3]</sup>。

目前直接针对起伏管道空管投油的研究较少,但前人在相近领域的研究可为本研究提供参考。宫敬和严大凡<sup>[4]</sup>基于流体力学原理,分析高程变化较大的管道中,当有不满流存在时管内液

\* 国家自然科学基金(51325603,51134006)资助

† 通信作者, E-mail: yubobox@vip.163.com

流的流动特性。但是,其使用的数学模型只求解了分层流区域的平均持液率,对管道内的流态变化考虑不足,得到结果的应用范围有限。Zhang 和 Vairavamorthy<sup>[5-6]</sup>提出一种针对含气囊管道快速充水瞬变流动过程进行数值求解的数学模型。但该模型只能处理一个气囊的情况,不适用于投产中经常遇到的多气囊问题。针对投油过程中下倾管段常见的滞止气囊,Ha-Ngoc 和 Fabre<sup>[7]</sup>提出一种基于边界元法的长气泡形状计算方法,但该方法物理意义不够清晰,并且在编程上难度较大,难以有效地运用到工程实际中。

总体来说,目前对于起伏管道空管投油气液两相流动水力过程的研究还不够充分,对其开展数值模拟研究可为相关研究和工程实践提供一定参考。

## 1 起伏管道的气液两相流数学模型

在投产过程中,地形起伏是影响其水力过程的主要因素。前期使用商业软件 FLUENT 对局部管段进行的充水过程模拟结果显示,当水头流经处于不同地形的管道时,其流动形态表现出不同的规律。为了对起伏管道内的流场进行实时监测,有效追踪气液两相间的自由界面和捕捉各参数的变化规律,本文基于 VOF 方法<sup>[8]</sup>进行数值模拟。下面分别介绍几何模型、数学模型、边界条件和数值方法。

### 1.1 基本假设

实际起伏管道空管投油过程非常复杂,本文基于以下基本假设,对其水力过程进行简化:

1) 不考虑管道横截面形状对水力过程的影响,以二维槽道流动模型模拟实际的三维圆管流动;

2) 管道内的流动介质为水;

3) 不考虑气相与液相之间的物质交换;

4) 气相可压缩,液相不可压缩。

### 1.2 几何模型

建立合理的管道几何模型<sup>[9]</sup>是进行起伏管道两相流模拟的关键,而模型的尺寸需要结合工程实际情况来确定。本文建立了多种几何模型,这里以 V 型管道为例,如图 1 所示。

下倾管段和上倾管段的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,管径为  $D$ ,倾斜管道与水平线之间的夹角用  $\theta$  来表示。网格划分采用四边形网格,网格长宽比不超过 5。壁面附近速度梯度较大,采用网格加密

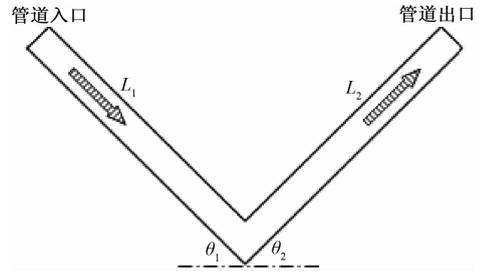


图 1 起伏管道的几何模型示意图

Fig. 1 Schematic of geometric model of hilly pipeline

技术,以准确模拟气液两相流特性。

### 1.3 控制方程

选用 VOF 模型和 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型,建立求解起伏管道气液两相流问题的数学模型,假设空气为可压缩气体,水为不可压缩液体,气液两相之间不存在质量传递,其控制方程如下。

1) 体积分数的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (2)$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1. \quad (3)$$

2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}. \quad (4)$$

3) 能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h, \quad (5)$$

在整个计算域内,通过求解各相流体的体积分数连续方程,可以追踪气液两相间的界面位置和各相流体所占的体积。对气液两相求解同一套动量方程和能量方程,得到的速度场被气液两相共用,然后根据各相流体体积分数分别求得气液各相的速度等参数值。

4) 湍流方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_{ik} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_{\varepsilon k} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon G_k}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

以上连续性方程、动量方程、能量方程和湍流

方程共同构成起伏管道空管投油气液两相流问题的控制方程。

## 1.4 模型参数的确定

### 1) 物性参数

在气液两相流中,研究对象空气和水的物性参数均与温度、压力有关。本文模拟的温度为 298.15 K,工作压力为 101 325 Pa,根据相关资料<sup>[10]</sup>查得该状态下空气和水的物性参数如表 1 所示。

表 1 空气和水的物性参数

Table 1 Property parameters of air and water

参数名	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	比热/ (J/(kg·K))	动力黏度/ (Pa·s)	导热系数/ (W/(m·K))
空气(不可压)	1.185	1 005	$1.86 \times 10^{-5}$	0.026 7
空气(可压)	—	1 005	$1.86 \times 10^{-5}$	0.026 7
水	997.0	4 179	$9.028 \times 10^{-4}$	0.608 5

### 2) 湍流参数

在 FLUENT 软件中,流场的进口和出口边界上需要定义流场的湍流参数。不同的湍流模型中需要设定的湍流参数不同。本文选用的湍流模型为  $k-\varepsilon$  模型,可以固定湍流动能和湍流耗散率的值。可通过给定水力直径或湍流特征长、湍流强度、湍流动能、湍流耗散率等在边界上的值来定义流场边界上的湍流。

### 3) 其他参数

纯水在不同温度下的表面张力系数不同,其数值随温度的升高而减小。根据温度和表面张力系数的线性关系可得,298.15 K 时的表面张力系数为  $7.20 \times 10^{-2}$  N/m。

## 1.5 数值计算方法

### 1) 控制方程的离散及求解方法

本文选用非稳态、隐式的分离求解算法,求解的控制方程为满足质量守恒、动量守恒、能量守恒的连续性方程、动量方程、能量方程和考虑湍流性质的湍流方程。采用有限容积法对控制方程进行离散,同时选择合适的离散格式。压力插值格式选择彻体力加权格式;密度、动量、湍流动能、湍流耗散率和能量的插值格式选择一阶迎风格式,稳定性高、计算速度快;体积分数插值格式选择几何重构格式,压力-速度耦合算法选择 PISO 算法。

### 2) 边界条件和初始条件

本文模拟的气液两相流中,假设气体是可压缩的,液体不可压缩,可压缩流体的密度随压力降低而减小,体积增大,但质量流量保持不变,因此

进口边界条件设为质量入口边界,取值在各算例中说明。出口设为压力出口边界,取值为标准大气压。在边界条件里还可以设定湍流模型的参数,其中的湍流定义方法选择用水力直径和湍流强度,由相关公式求得。VOF 方法的计算流程中,还要设置气液界面间的接触角度大小,本文中取为  $60^\circ$ 。

初始温度取为 298.15 K,压力、速度的初场均设为 0,湍流动能和湍流耗散率的初值要根据入口质量流量的大小去计算。在初始化面板中,将水的体积分数设为 0,在界面上点击 Init(初始化)按钮开始流场的初始化;然后在修补(Patch)面板中对水的初始体积分数进行局部修补,以实现管内初始积液高度的设置。

### 3) 收敛标准

本文中连续项的残差设为  $1.0 \times 10^{-3}$ ,速度项的残差为  $1.0 \times 10^{-5}$ ,能量项的残差为  $1.0 \times 10^{-6}$ ,湍动能和湍流耗散率项的残差均为  $1.0 \times 10^{-3}$ 。

## 2 模拟结果及分析

起伏管道有多种组合方式,这里分别模拟 V 型管道和复杂管道空管投油的气液两相瞬态流动。

### 2.1 起伏管道的气泡静止条件

#### 2.1.1 气泡静止现象

现阶段关于两相流的很多实验及理论模型都是在小管径条件下提出的。本文先选取不同入口流速的小管径短管充水算例,借助 V 字型管道模拟起伏管道气液两相流动过程中的气泡静止现象。下倾管和上倾管的长度各为 0.5 m,直径为 50 mm,管道与水平线之间夹角为  $45^\circ$ 。入口流速分别为 2.0、1.2 和 0.5 m/s 时不同时刻的流动状态如图 2 所示。

观察图 2 可见,当入口流速为 2.0 m/s 和 1.2 m/s 时,在下倾管段中水流可以持续将气体推向下游,不存在局部存气现象;当入口流速降低到 0.5 m/s 时,部分气体滞留在下倾管段,形成一个气泡。因此,存在一个能否顺利充水的临界速度。当水流速度大于或等于该临界值时,气体全部流向下游;否则,气体将在下倾管内聚集成气团并处于相对静止的状态,这时只能靠卷吸与输移作用渐渐将气泡排出,用“气泡静止现象”来描述。Kent 用“清管临界流速”来定义该速度<sup>[11]</sup>,公式

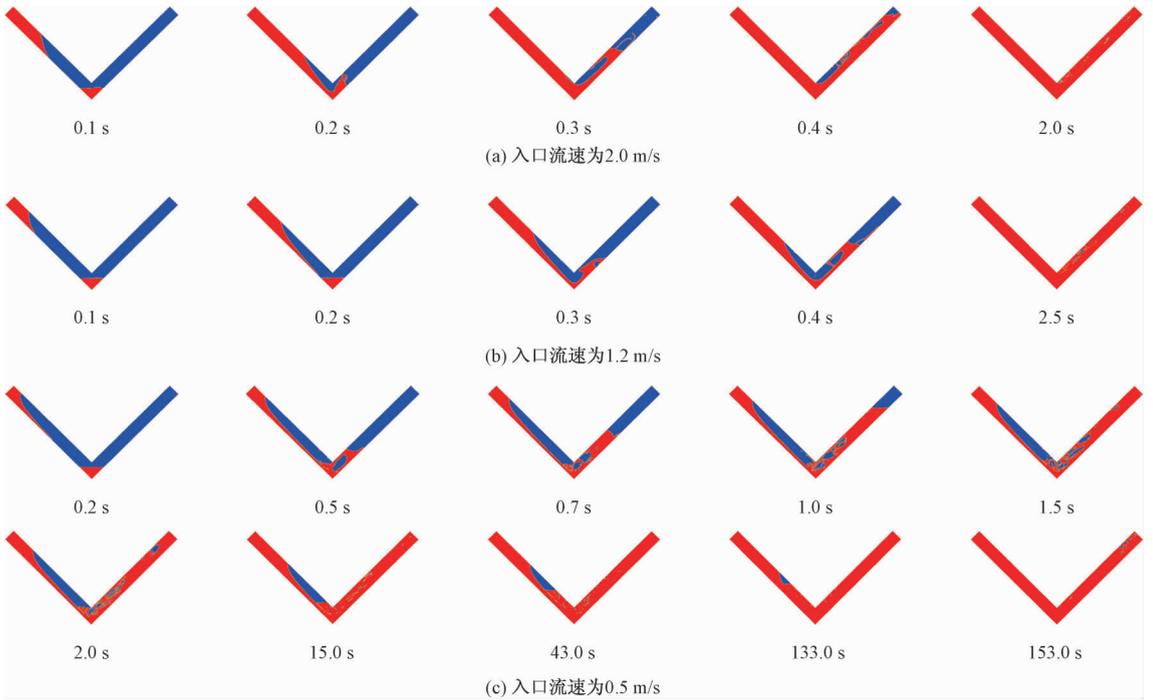


图 2 不同入口流速下的流动状态

Fig. 2 Flow statuses with varied inlet velocities

(系数  $C_0 = 1.53$ ) 为

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = C_0^{1/2} \sqrt{\sin\theta}. \quad (8)$$

### 2.1.2 清管临界流速

为探究工程实际中起伏管道的投产规律是否符合 Kent 公式,下面分别从管径和倾角的角度,研究气泡静止现象和发生气泡相对静止的临界速度大小。

#### 1) 管径的影响

设定管长为 20 m、倾角为  $45^\circ$ 、初始液位高度为 0.5 m、入口流速为 1.2 m/s,分别模拟 4 种不同管径情况下 V 型管道内的气液两相瞬态流动情况。管径 0.394、0.594、0.791 和 0.981 m 时的流动状态如图 3 所示。

观察图 3 可见:在 1.5 s 时刻,管径越大,水流流到管道底部激起的水花越明显,这是由于在同样的入口流速下,入口流量随管道横截面积的增加而增大;在 8.0 s 时刻,管径越大,下倾管段末端尚没有水流流至的部分越短;在 15.0 s 和 50.0 s 时刻,管径越大,下倾管段内气团的体积越大。不同管径的起伏管道充水过程中气体体积分数随时间的变化曲线如图 4 所示。

在以上 4 种管径条件下,维持管长 20 m、倾角  $45^\circ$ 、初始液位高度 0.5 m 不变,入口流速以 0.2 m/s 为间隔,选取表 2 所示 9 个速度值,记录其气泡运动情况,其中  $V_A$  为本文模拟得到的临界流速,  $V_C$  为 Kent 公式结果。

表 2 不同管径下的气泡运动情况

Table 2 Moving statuses of the bubbles at varied pipeline diameters

管径/m	入口流速/(m/s)									临界流速/(m/s)	
	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	$V_A$	$V_C$
0.394	静止	静止	静止	静止	流动	流动	流动	流动	流动	2.0	2.0
0.594	静止	静止	静止	静止	静止	流动	流动	流动	流动	2.2	2.5
0.791	静止	静止	静止	静止	静止	静止	流动	流动	流动	2.4	2.9
0.981	静止	静止	静止	静止	静止	静止	静止	流动	流动	2.6	3.2

由表 2 可见,临界流速与管径大小正相关。管径越大,其水流临界速度  $V_A$  值越大。这与 Kent 计算公式的规律相吻合,但临界速度  $V_A$  与  $V_C$  的取

值有所不同。显然不能用来预测大管径的临界流速,Kent 公式是在小管径实验条件下得到的,要用后面的公式来修正。

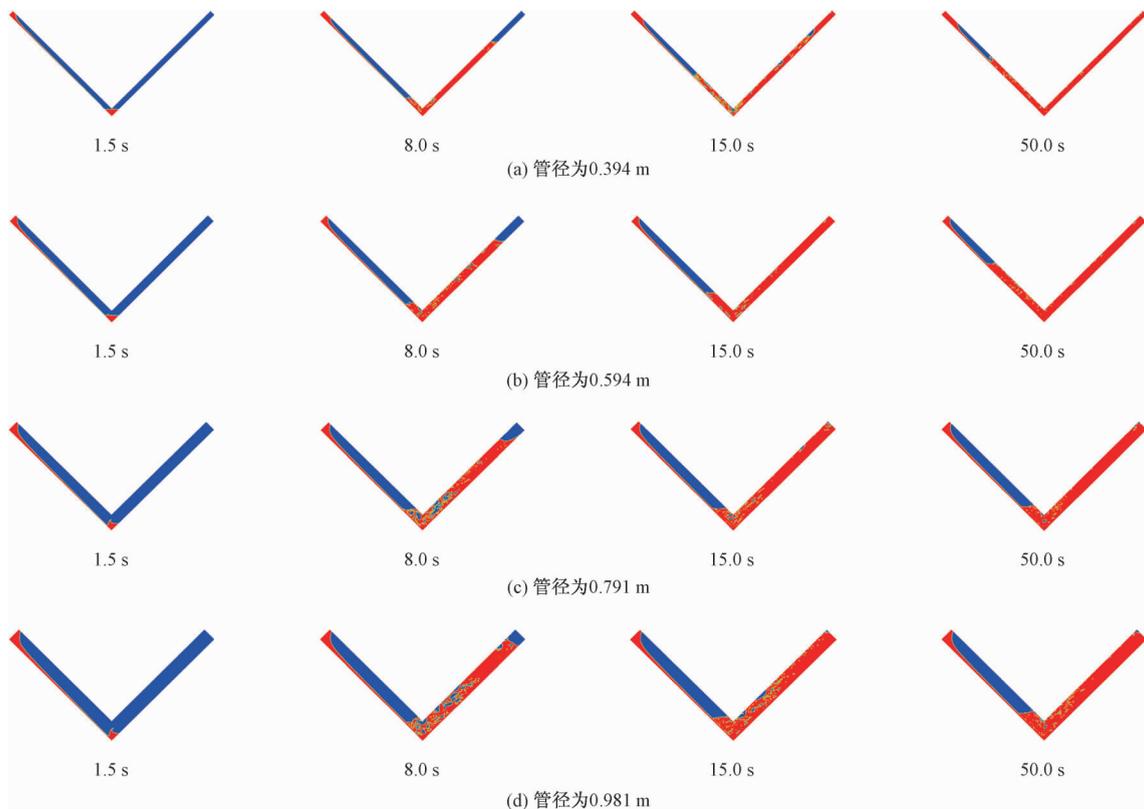


图 3 不同管径下的流动状态  
Fig. 3 Flow statuses at varied pipe diameters

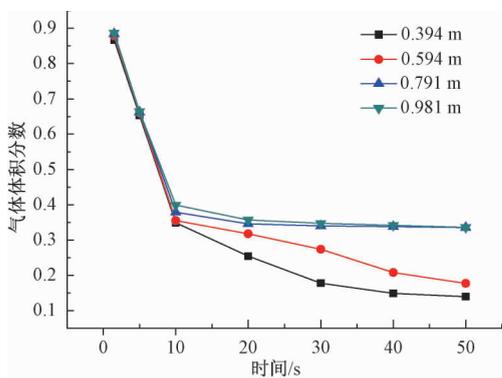


图 4 不同管径下管内气体体积分数变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of volume fraction of gas with time at varied pipeline diameters

### 2) 倾角的影响

选取管长为 20 m, 管径为 0.791 m, 初始液位高度为 0.5 m, 入口流速分别为 1.2、1.4、1.6 和 1.8 m/s, 空气的速度为 0, 依次将其在 20.0 s 时刻管内相分布图记录下来。15°、30°和 45°这 3 种倾角下的流动状态如图 5 所示。

由此发现, 以上算例都会在下倾管内出现气泡静止现象, 不能顺利完成正常的管道充水过程。倾角越大的下倾管内产生气泡的体积也越大。

5°、10°、15°、30°和 45°等 5 种倾角条件下的气体体积分数变化曲线如图 6 所示。

在以上 5 种倾角条件下, 维持管长 20 m、直径 0.791 m、初始液位高度 0.5 m 参数值不变, 入口流速以 0.1 m/s 为间隔, 取表 3 所示 10 个速度值, 分别记录气泡运动情况。

由此可知, 入口临界流速与倾角大小成正相关, 但速度  $V_A$  与  $V_C$  取值不同。综合表 2 和表 3 的各项数据, 得到临界流速修正式

$$V_A = \sqrt{A_o \cdot \sin\theta \cdot gD + 2.8} \quad (9)$$

此公式中的系数  $A_o = 0.55$ , 其他物理量的含义与式(8)相同。

值得说明的是, 为减小计算量、提高模拟效率, 以上对于起伏管道的模拟, 均是在二维模型的基础上进行的。我们还针对典型算例进行了三维模拟, 得到管道内不同时刻的体积分数计算结果, 与二维模拟结果相似。因此, 在本文算例条件下, 采用二维模型对该问题进行模拟是可行的。

## 2.2 复杂管道瞬态水力计算

### 1) 流速的影响

选取长输管道的常用管径 0.791 m、管道总

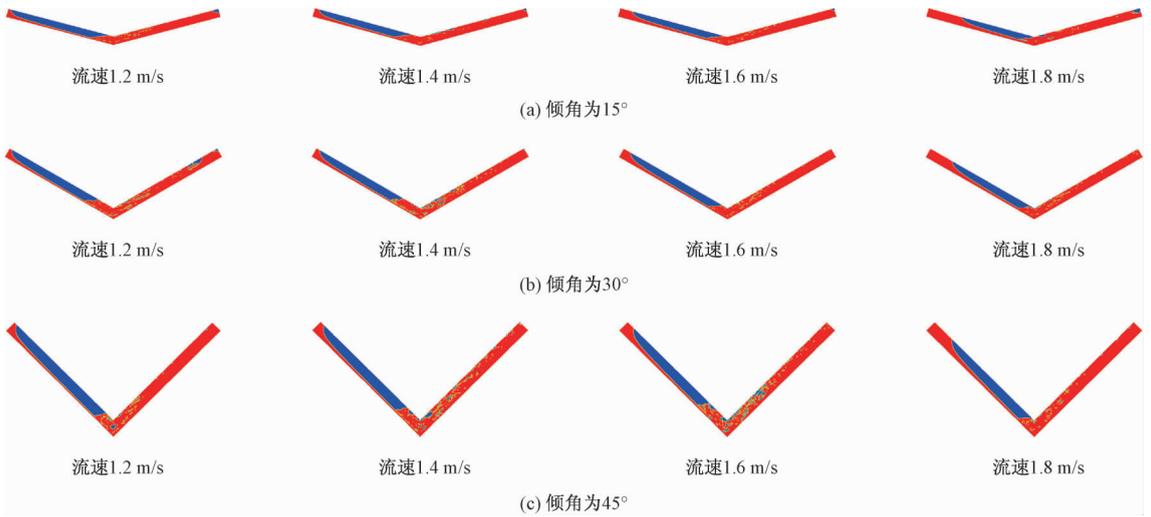


图 5 不同倾角下的流动状态

Fig. 5 Flow statuses at varied pipe inclinations

表 3 不同倾角条件下的气泡运动情况

Table 3 Moving statuses of the bubbles at varied pipeline inclinations

倾角/(°)	入口水速度/(m/s)										临界流速/(m/s)	
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	$V_A$	$V_C$
5	静止	静止	流动	1.8	1.0							
10	静止	静止	静止	流动	1.9	1.4						
15	静止	静止	静止	静止	流动	流动	流动	流动	流动	流动	2.0	1.8
30	静止	静止	静止	静止	静止	静止	流动	流动	流动	流动	2.2	2.4
45	静止	静止	静止	静止	静止	静止	静止	静止	流动	流动	2.4	2.9

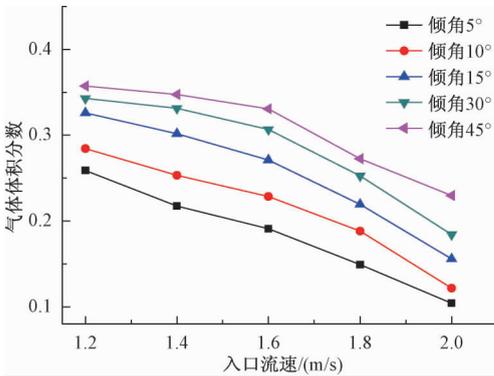


图 6 不同倾角情况下的整管气体体积分数变化曲线

Fig. 6 Variation curves of volume fraction of gas with inlet velocity at varied pipeline inclinations

长 45.1 m 和各管倾角均为 45°, 初始液高为 0 m, 入口流速分别为 2.0、4.0 和 6.0 m/s, 模拟结果如图 7 所示。

由图 7 可知: 入口流速为 2.0 m/s 时, 不能顺利完成复杂管道的充水过程; 液体流速为 4.0 和 6.0 m/s 时, 水流能顺利充满管道。不同入口流速下, 各时刻复杂管道内气体体积分数值如图 8 所示。

由此可见: 复杂管道入口流速为 2.0 m/s 时,

管内气体体积分数值只能降低到 0.3 左右; 而入口流速为 4.0 和 6.0 m/s 时, 管内气体体积分数值可以近似降低到 0。

### 2) 初始条件的影响

为进一步分析复杂管道的充水过程, 除入口流速外, 还应考虑不同初始条件的影响。定性地说, 该复杂管道有 4 种不同初始条件: (a) 空管; (b) 右边有水、左边无水; (c) 左边有水、右边无水; (d) 左右两边都有水。设定积液高度为 2.0 m, 如图 9 所示。

设定复杂管道的管径为 0.791 m, 管道总长度为 45.1 m, 各管道倾角均为 45°, 水流的入口速度为 4.0 m/s, 在管道直径、管道总长、倾角和水流速度这 4 个物理量相等的基础上, 分别选择如图 9 所示的 4 种初始条件, 得到不同时刻液体体积分数值图, 如图 10 所示。

由图 10 可见, 复杂管道内的两相流与初始条件有很大关系, 4 种初始条件下液体充满整个管道所用的时间也不尽相同: 空管条件下, 在 20.0 s 时刻管内气体体积分数值为 0.048; 左边没水、右边

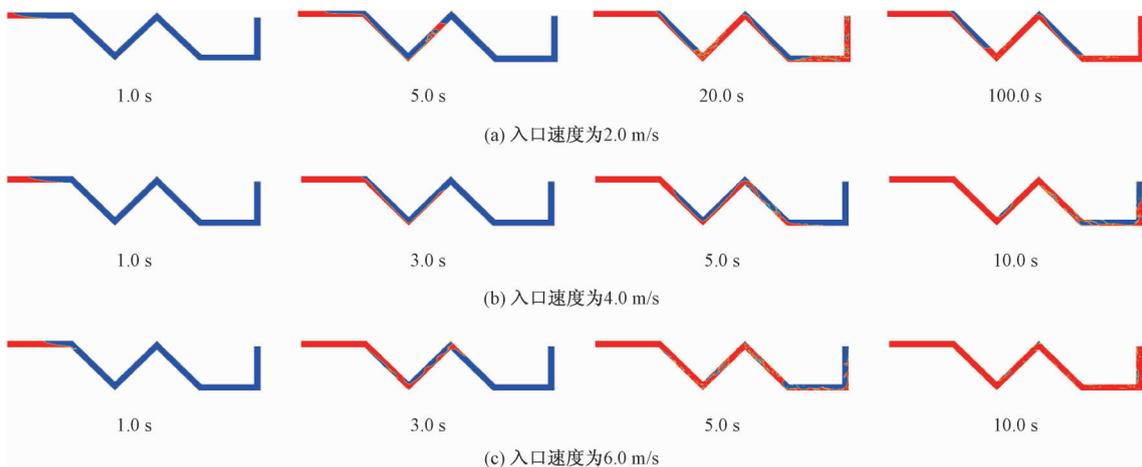


图 7 不同入口速度下的流动状态  
Fig. 7 Flow statuses at varied inlet velocities

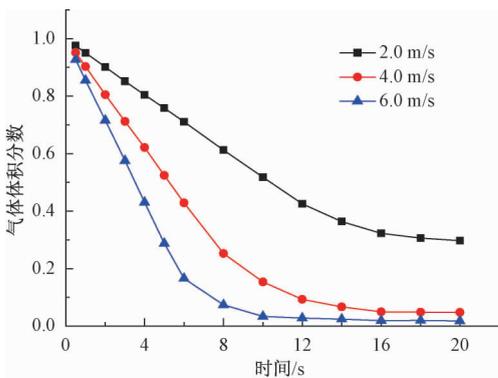


图 8 不同入口流速情况在不同时刻的气体体积分数  
Fig. 8 Variation curves of volume fraction of gas with time at varied inlet velocities



图 9 初始条件示意图  
Fig. 9 Schematic of initial conditions

有水条件下,在 20.0 s 时刻管内气体体积分数为 0.032;左边有水、右边没水条件下,在 20.0 s 时刻管内的气体体积分数为 0.021;两边都有水条件下,在 20.0 s 时刻管内的气体体积分数为 0.024,此时水流已几乎充满管道。

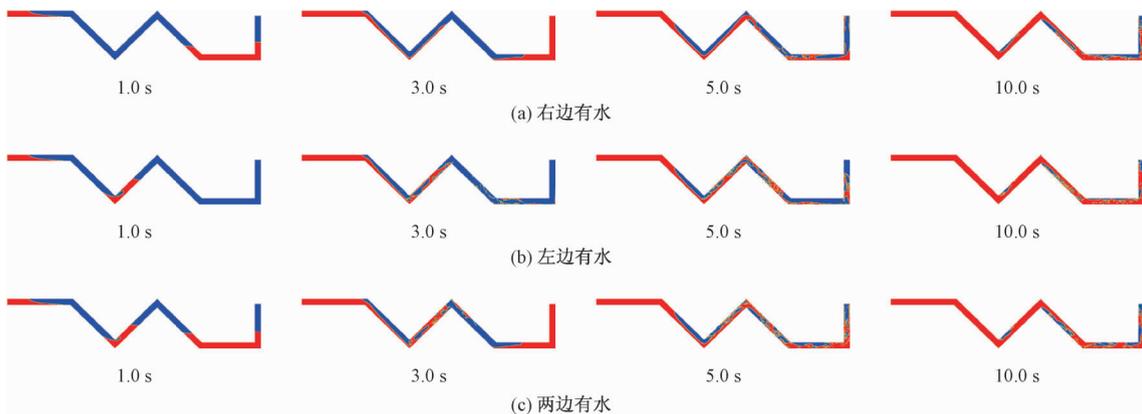


图 10 不同初始条件下的流动状态  
Fig. 10 Flow statuses under varied initial conditions

### 3 结论

1)通过对 V 字型管道的模拟,发现产生气泡静止现象的临界流速,其值与管道直径和倾角的大小成正相关,与 Kent 公式的规律相符合,但模

拟得到的临界流速  $V_A$  与 Kent 公式结果  $V_C$  存在偏差。因此实际起伏管道投产过程的顺利与否,可用 Kent 公式的修正公式来判断,建议投油速度大于临界流速的值。

2)水平管道的入口流速减小到一定程度时,

管内体积最终不能完全被液相所占据。初始液位高度的增加会加剧气液两相间作用,管道内依次出现的流动型态为分层流、泡状流和塞状流等,液体充满管道所用的时间也随之减少。

3)复杂管道下倾管段内气体的运动方式由入口流速决定。在管道初始液高不为零的情况下,选择不同初始条件会产生不同的两相流现象,管道体积完全被液相占据所需时间也有所不同。

### 参考文献

- [ 1 ] 崔岩. 原油长输管线投产运行参数控制与判断[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(8):53-54.
- [ 2 ] 张楠, 宫敬, 闵希华, 等. 大落差对西部成品油管道投产的影响[J]. 油气储运, 2008, 27(1):5-8.
- [ 3 ] 邱姝娟, 宫敬, 闵希华. 西部原油成品油管道的投产方式[J]. 石油工程建设, 2011, 37(3):35-38.
- [ 4 ] 宫敬, 严大凡. 大落差管道下坡段不满流流动特性分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(6): 65-72.
- [ 5 ] Zhang Y L, Vairavamoorthy K. Transient flow in rapidly filling air-entrapped pipelines with moving boundaries [J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(3): 313-323.
- [ 6 ] Zhang Y L, Vairavamoorthy K. Application of method-of-lines to charging-up process in pipelines with entrapped air [J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(3): 324-331.
- [ 7 ] Ha-Ngoc H, Fabre J. A boundary element method for calculating the shape and velocity of two-dimensional long bubble in stagnant and flowing liquid [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2006, 30(7): 539-552.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 韩炜. 管道气液两相流动技术研究 [D]. 南充:西南石油学院, 2004.
- [ 10 ] 沈复, 李阳初. 石油加工单元过程原理(上册) [M]. 北京:中国石化出版社, 1996:65-67.
- [ 11 ] 袁文麒, 刘遂庆. 管道充水工况下气液两相流瞬态数值模拟 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 709-715.