

凝析气藏水平气井倾斜段油 - 气 - 水三相携液规律研究

李 晨, 王 懿, 吴 杰

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年9月3日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月10日

摘 要

凝析气藏在开发过程中, 随着地层压力的降低, 会出现凝析油, 这使得井筒中的油气水三相的相态变化与流动规律变得更加复杂, 增大气井携液难度。为了深入理解该过程中的相态变化规律, 本文采用VOF耦合水平井模型对水平气井倾斜段中油气水三相流动进行数值模拟, 研究了不同倾斜角、流速、含气率下油 - 气 - 水三相在水平气井倾斜段中的流动特性, 并分析这些参数对于油气水三相流体在倾斜段中分布、流动形态及相互作用的影响。模拟结果表明: 随着流速的增大, 出现的泡状流向分层流转变, 随着含气率的增大, 出现泡状流 - 分层流 - 段塞流转变, 随着倾斜角的增大, 流型由波状流 - 段塞流 - 分层流的连续转变。值得注意的是, 通过模拟还发现, 当倾斜角大于 45° 时, 油相趋向在管道底部聚集, 这一现象有可能会增加油相沉积的风险。

关键词

凝析气藏, 油气水三相, 数值模拟

The Study on the Liquid-Carrying Behavior of Oil-Gas-Water Three-Phase Flow in the Inclined Section of a Horizontal Gas Well in a Condensate Gas Reservoir

Chen Li, Yi Wang, Jie Wu

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Sep. 3rd, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 10th, 2024

文章引用: 李晨, 王懿, 吴杰. 凝析气藏水平气井倾斜段油-气-水三相携液规律研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(4): 361-371. DOI: 10.12677/jogt.2024.464045

Abstract

In the development of condensate gas reservoirs, as the formation pressure decreases, condensate oil appears, which complicates the phase changes and flow patterns of the oil-gas-water three-phase system in the wellbore, increasing the difficulty of liquid carrying in gas wells. To gain a deeper understanding of these phase changes, this paper uses a VOF-coupled horizontal well model for numerical simulation of the oil-gas-water three-phase flow in the inclined section of a horizontal gas well. The study examines the flow characteristics of the oil-gas-water three-phase under different inclination angles, flow rates, and gas contents, and analyzes the impact of these parameters on the distribution, flow patterns, and interactions of the three-phase fluids in the inclined section. Simulation results indicate that with increasing flow rate, the flow pattern transitions from bubbly flow to stratified flow; with increasing gas content, the transition is from bubbly flow to stratified flow to plug flow; with increasing inclination angle, the flow pattern changes continuously from wavy flow to plug flow to stratified flow. Notably, the simulation also reveals that when the inclination angle exceeds 45° , the oil phase tends to accumulate at the bottom of the pipe, which may increase the risk of oil phase deposition.

Keywords

Condensate Gas Reservoir, Oil-Gas-Water Three-Phase, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在天然气开采领域,水平气井作为提高采收率(EOR)和开发难采储层的重要手段,其生产效率和安全性一直备受关注。然而,水平气井的倾斜段,作为连接垂直井段与水平井段的关键部分,其携液能力对整体生产性能具有重要影响。已有研究表明倾斜段是最难携液的,由于倾斜段内气液两相流的复杂流动特性,使得携液过程充满了挑战。当气液流速、流体性质、井筒倾斜角等多种因素发生变化时,携液能力也会随之波动,进而影响井筒内的积液情况,甚至可能导致生产中断。

国内外学者对于油气水三相的研究主要还是将油相作为液相的一种,将油气水多相流简化为特殊的气液两相流,Hewitt [1]等人采用“混合程度系数”来计算油水混合物的有效粘度,Mewes [2]认为在油水混合物性质明确的前提下,根据连续相性质选择流体物性参数。但是均未能考虑到油、气、水三相之间的复杂的相互作用,例如出现乳液、泡沫等现象。这些情况无法在两相流中得到恰当的描述。因此,为了更加准确地研究油气水三相的流动特性,学者们参考油水两相流动规律,建立了油气水三相的流动规律。Shean [3]对内径为 19 mm 的垂直上升管内油气水三相流进行了深入研究,得到了关于泡状流和弹状流的有用结论。G. S. Woods [4]建立了内径为 26 mm 的垂直上升管内油气水三相流流型图,并研究了流型与压力降等之间的关系;P. L. Spedding [5]首次研究了微倾斜(倾角 86.5°)上升管内油气水三相流流型,并与垂直上升管内的流型进行了对比。

本文研究凝析气井倾斜段井筒的油气水三相流动特性。采用 fluent 进行数值模拟[6],深入探究水平气井倾斜段在不同倾斜角下的携液能力变化规律。分析倾斜角、流速、含气率等因素对倾斜段携液能力

的影响机制。研究结果将为水平气井的设计、生产管理和优化提供理论支持和实践指导，有助于提升生产效率 and 安全性，降低运营成本。

2. 数值模拟研究

2.1. 几何模型的建立与网格划分

构建不同倾斜角的倾斜段井筒模型，管径选择 52 mm，倾斜段长度 3000 mm，水平段长度 1000 mm，分别建立 30°、45°、60°、75°这四个角度下的井筒模型。物理模型如图 1 所示。网格的划分采用扫掠方法，对生成的网格进行评价，如图 2、图 3 所示，由图 3 可以看出单元指标主要集中在 0.75~1 之间，可以判断本次生成的网格质量是符合模拟要求的。将水平段右端设置为气液两相的速度入口，将倾斜段上端设置成压力出口。

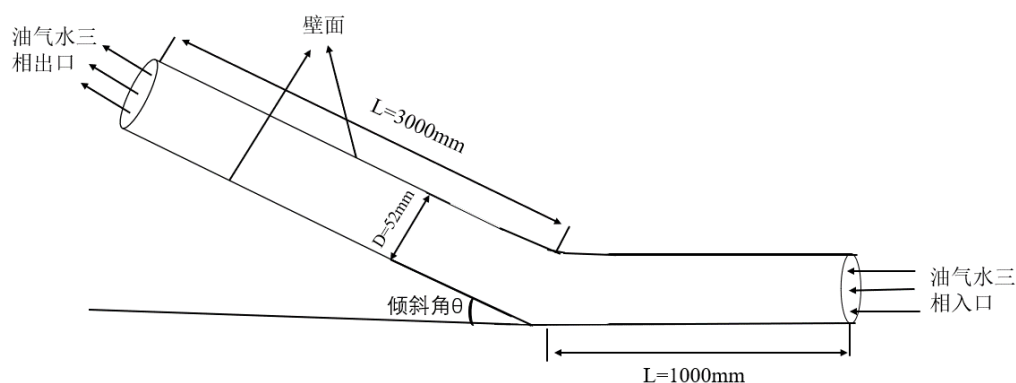


Figure 1. Schematic diagram of the physical model for the inclined section

图 1. 倾斜段物理模型示意图

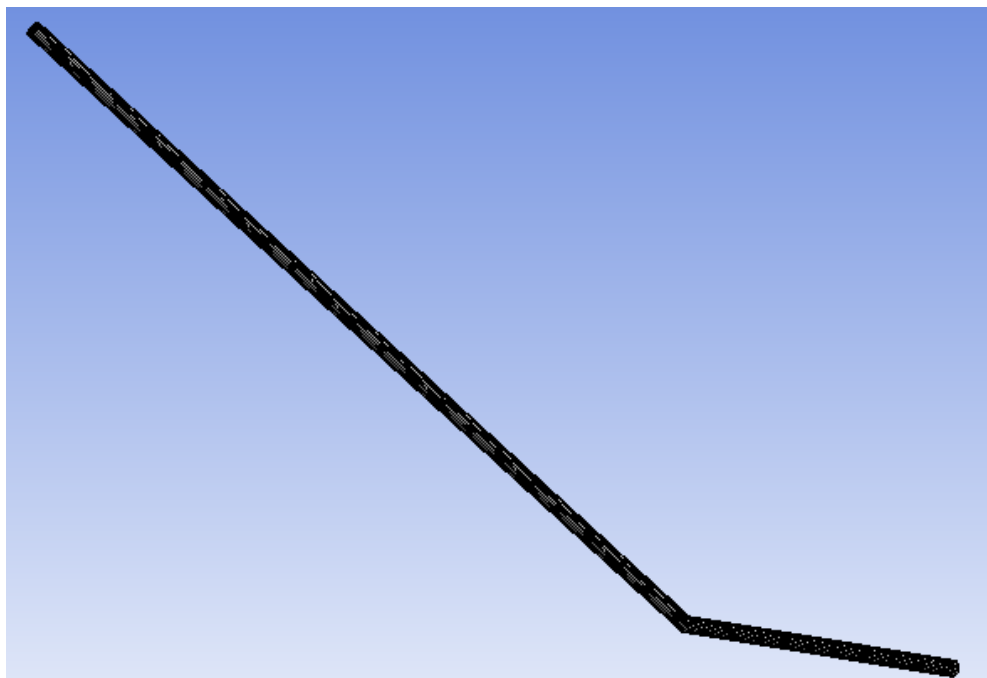


Figure 2. Grid division results

图 2. 网格划分结果

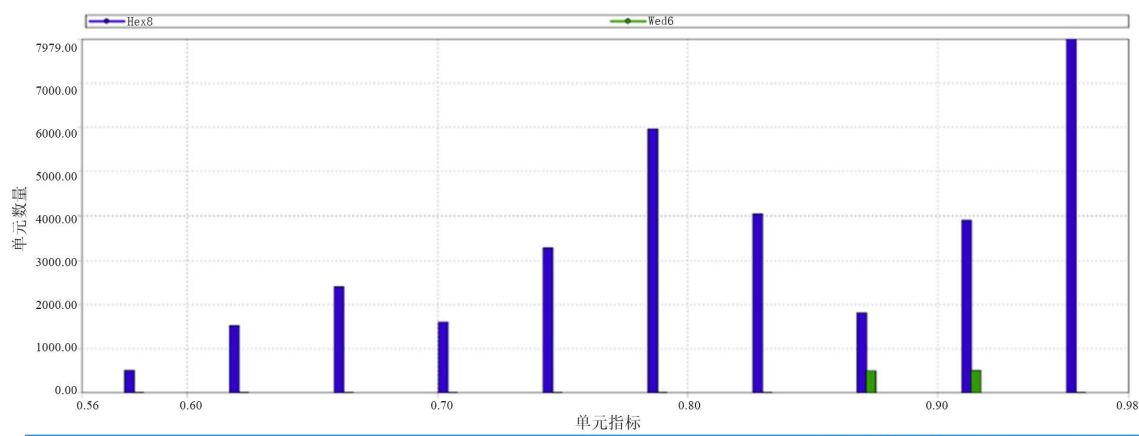


Figure 3. Mesh cell quality check
图 3. 单元网格质量检验

2.2. 求解器设置

本次研究的对象为油气水多相流，为了更好地捕捉多相流复杂的界面以及简化模型，因此多相流模型选择 VOF 耦合水平集模型。VOF 模型通过计算每个计算单元内液相的体积分数来描述两种相之间的相互作用[7]，但是在处理一些复杂界面形变时可能存在精度不足的问题。采用 VOF 模型与水平集耦合的方法使得处理多相流问题变得更加方便，该方法通过同时跟踪多种流体的体积分数和界面位置，可以更准确地模拟多相流之间的相互作用和界面动态变化，有助于理解相界面的行为及其对整体流动的影响。湍流模型选择使用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型，给定“湍流强度”与“水力直径”。采用压力速度耦合隐式体积力的方法对本次流动现象进行模拟，空间离散由梯度、压力动量、体积分数、湍流动能、湍流耗散率共同确定。具体的求解参数见表 1。

Table 1. Imulation solution methods
表 1. 模拟求解方法

压力速度耦合模型		Coupled
瞬时		First Order Implicit
时间步长		0.001 s
时间步数		5000
最大迭代次数		20
空间离散	梯度	Least Square Cell Based
	压力	PRESTO!
	动量	Second Order Upwind
	体积分数	Geo-Reconstruct
	湍流动能	Second Order Upwind
	湍流耗散率	Second Order Upwind

2.3. 流体参数设置

在本次模拟中，做出以下假设：(1) 气体为分散相，流体为连续相；(2) 模型中所有的流体全部设置为不可压缩的流体；(3) 忽略温度和压力变化带来的影响。对于油气水三相的参数设置采用的是 fluent 本身自带的数据库中的材料物性参数，针对部分参数做了修正。使得更加符合现场实际，三相的物性参数

设置具体见表2。同时由于本次研究的气井为凝析气井，在开采后期会有凝析油的出现，为了更加符合现场实际的生产情况，因此在模拟初期主要为气水两相流，在生产一定的时间之后，再将油相添加进来，进行油气水三相模拟。

Table 2. Parameter properties at 20°C and 1 atm

表 2. 20°C, 1 atm 下的参数性质

参数名称	水	气	油
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^3$	1000	1.225	790
界面张力 $\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.03 (油水)	0.0728 (气水)	0.03 (油气)
动力粘度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.001	0.000018	0.00164

2.4. 边界条件

边界条件用于定义流场中各个边界的物理性质和流动特征。在 fluent 多相流模拟中主要设置壁面、入口速度、压力出口这三个变量。速度入口处设置混合相的入口速度、湍流参数和每个相的体积分数。管道的入口速度范围采用相似性准则，参考松南气田凝析气井数据，通过笔者开发的气井数据折算软件进行折算处理；在整个管道中，所有相的体积分数总和为 1，设气相流体的体积分数为 α_g 、液相流体的体积分数为 α_L 和油相流体的体积分数为 α_o ，即 $\alpha_g + \alpha_L + \alpha_o = 1$ ；湍流动能 k 和扩散方程 ε 计算方式如 1、2、3、4 所示，油气水三相参数具体的设置见表 3。

K 方程：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

ε 方程：

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}, U^* \equiv \sqrt{S_{i,j} S_{i,j} + \tilde{\Omega}_{i,j} \tilde{\Omega}_{i,j}} \quad (4)$$

式中： ρ 为流体密度， Kg/m^3 ； k 为湍流动能， J/kg ； μ_t 为均速度， m/s ； σ_k 与 σ_ε 分别为 k 方程和 ε 方程的湍流 *Prandtl* 数； G_k 为由于层流速度梯度而产生的湍流动能； G_b 为浮力引起的湍动能； Y_M 为可压缩湍流中所有扩散速度的扩散损耗； ε 为湍流耗散率， W/m^2 ； μ_t 为湍流黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； t 为时间， s ； X_i 和 X_j 为空间坐标； $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_{3\varepsilon} = 1$ ，均为经验常数，也可在粘性模型面板中进行修改， S_k 和 S_ε 由用户自定义。

Table 3. Parameter settings for oil-gas-water three-phase flow

表 3. 油气水三相的参数设置

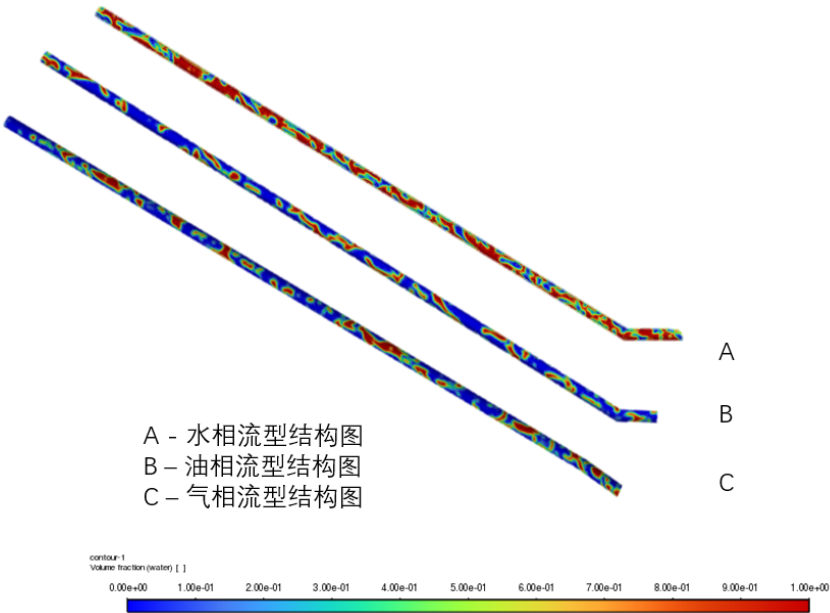
参数名称	水	气	油
速度 m/s	1.5~2.5	1.5~2.5	1.5~2.5
体积分数(小数)	0.2~0.65	0.2, 0.3, 0.4, 0.5	0.15, 0.2, 0.3

3. 油气水三相携液能力分析

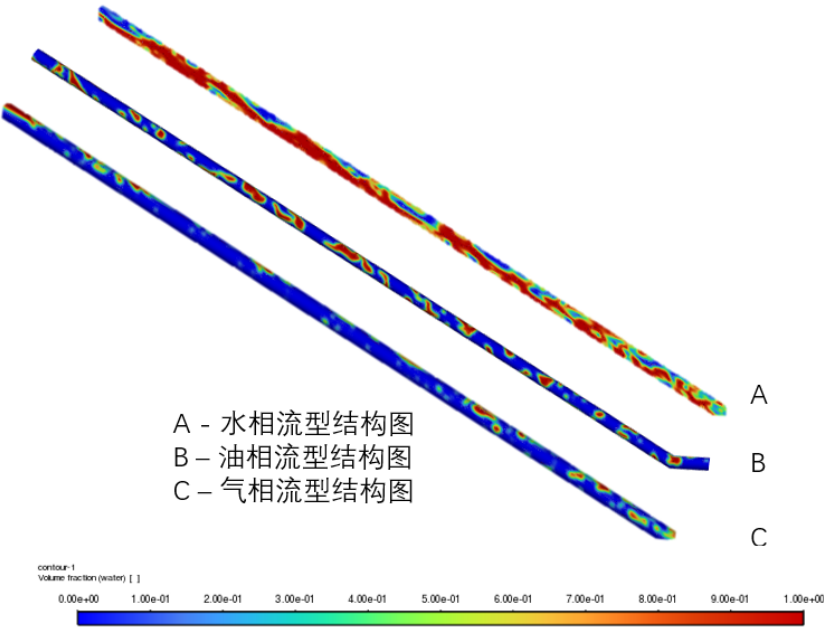
在管径为 52 mm，倾斜段长度为 3000 mm， $\theta = 30^\circ \sim 75^\circ$ 以 30 度为间隔，流速 $v = 1.5 \sim 2.5$ m/s 间隔为 0.5 m/s 的条件下，通过含气率、倾斜角和流速的变化，分析水平井倾斜段流型和分布情况。

3.1. 流速的影响

在倾斜角 30° ，气体体积分数 20%，油的体积分数 5% 的条件下，探究流速对倾斜段流型的影响，流速分别设置为 1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s，其模拟结果如图 4 所示。



(a) 流速为 1.5 m/s



(b) 流速为 2.0 m/s

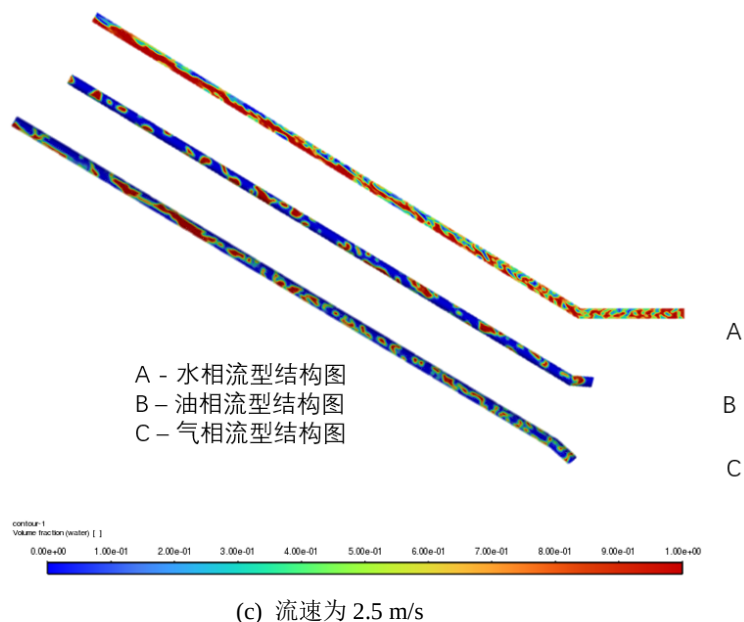


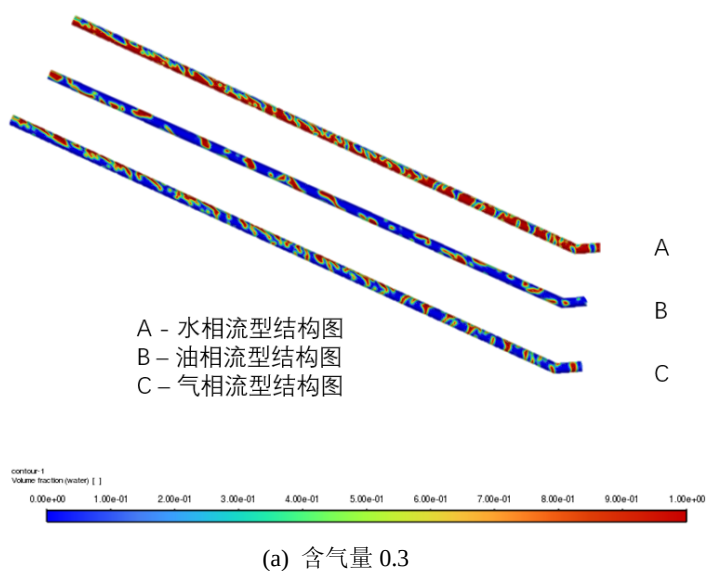
Figure 4. Flow pattern diagrams at different flow rates for a water-oil-gas ratio of 7.5:2:0.5

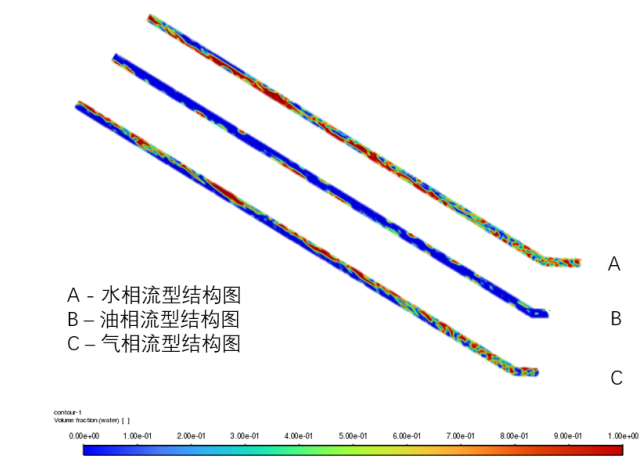
图 4. 水 - 油 - 气比 = 7.5:2:0.5 时不同流速下流型结构图

由图 4(a)~(c)可以看出,在低流速条件下,由于油相与气相体积分数相对较小,油气水三相在管壁中的分布呈现不规则分布,由于含水率较高,水相成为管道中的主要流动介质,占据了管道的大部分空间。而气相,由于密度远小于水相和油相,受到重力的作用较小,因此主要以气泡的形式存在于管道中。这些气泡在管道中流动时,会受到浮力的作用而倾向于浮于管道的上层区域。在图 4(a)~(c)中能观察到明显的泡状流。

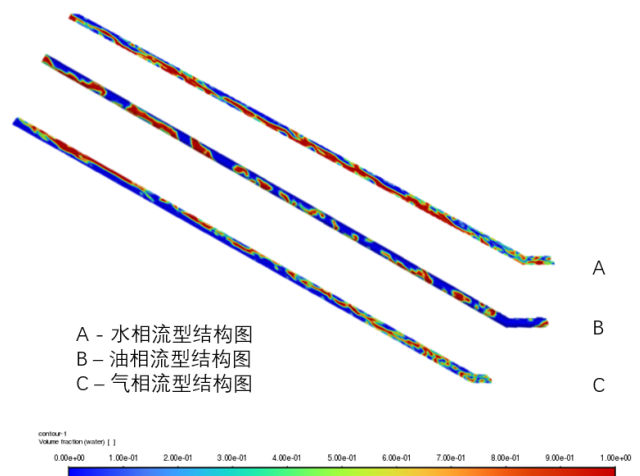
3.2. 含气率的影响

在倾斜角 30° , 流速为 2.5 m/s, 油的体积分数 5% 的条件下, 探究气体体积分数的变化对倾斜段流型的影响, 将含气体积分别为 30%、40%、50%、60%, 数值模拟结果如图 5 所示。

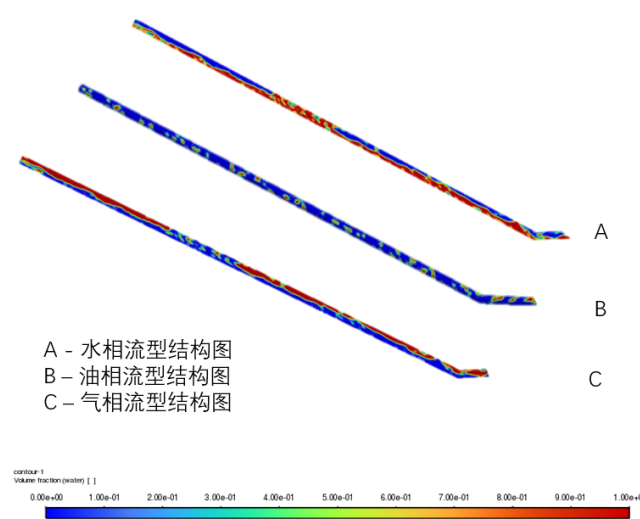




(b) 含气量 0.4



(c) 含气量 0.5



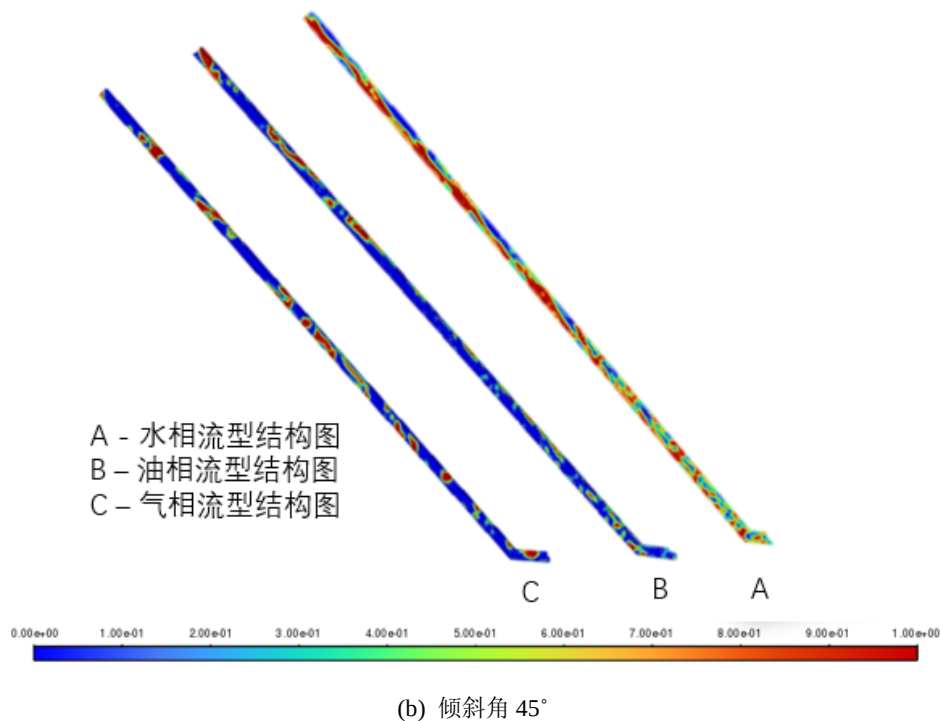
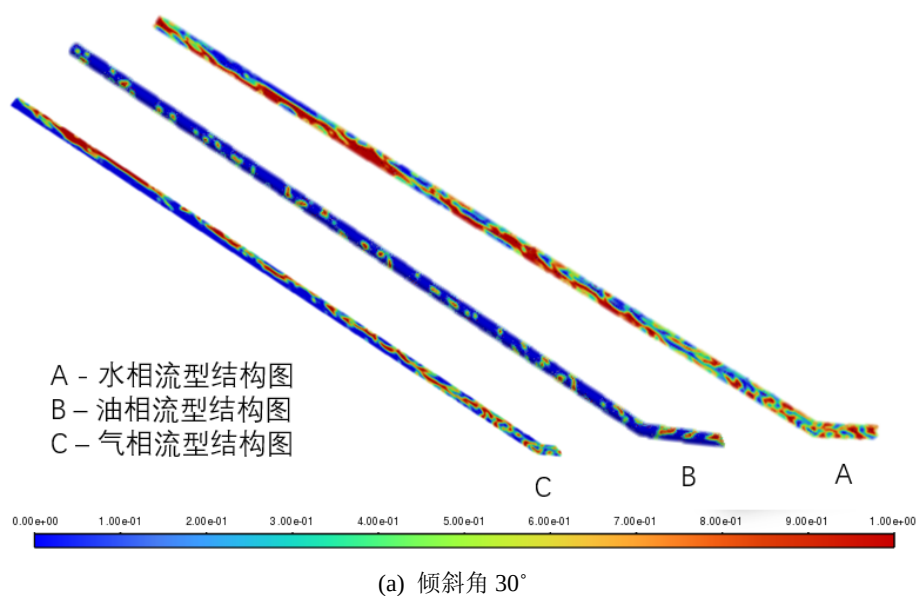
(d) 含气量 0.6

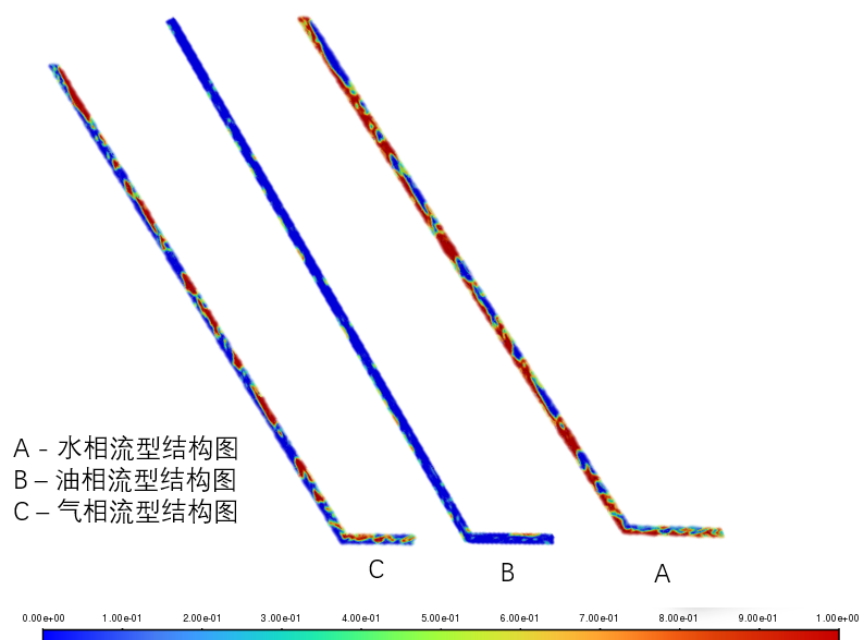
Figure 5. Flow pattern diagrams at a velocity of 2.5 m/s for different gas volume fractions
图 5. 流速为 2.5 m/s 下不同气体体积分数流型结构图

从图 5 (a)~(d)中可以看出,当气体体积分数较小时,气体以离散的小气泡形式存在于液相(油和水)中,形成泡状流。随着气体体积分数的增加,小气泡开始合并成较大的气泡,这些大气泡被液相段分隔开,形成弹状流。在弹状流中,气相和液相之间存在明显的分界面,气相以大气泡(或称为 Taylor 气泡)的形式在管道中流动,而液相则填充在气泡之间的空隙中。

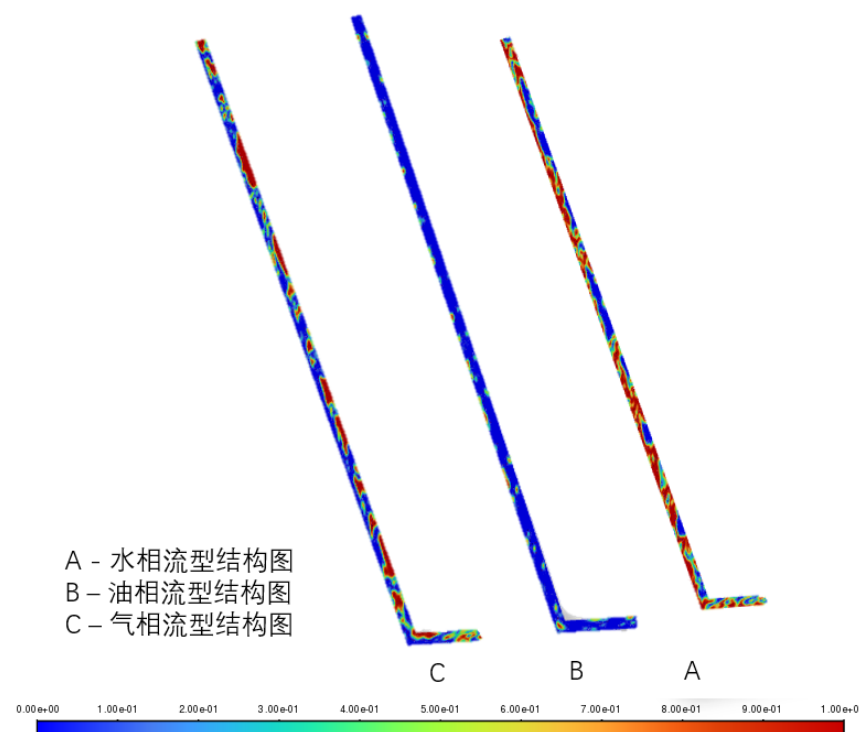
3.3. 倾斜角的影响

在流速为 2.5 m/s,油的体积分数 5%,气体体积分数为 50%的条件下,探究倾斜段倾斜角的变化对倾斜段流型的影响,倾斜角分别为 30°、45°、60°、75°,数值模拟结果如图 6 所示。





(c) 倾斜角 60°



(d) 倾斜角 75°

Figure 6. Three-Phase flow pattern diagrams for oil-gas-water at different inclination angles
图 6. 不同倾斜角下油气水三相流型图

在倾斜角较小时，井筒中的流型主要以波状流为主，液相(油和水)由于受到重力的作用，主要聚集在管道底部，由于气相的流动，可以观察到局部有油气水三相混合的情况，同时能观察到小油滴分布在管

道内。然而,随着倾斜角的增大,液相(油和水)的积聚变得不稳定,当液相(油和水)积聚到一定程度时,它可能会因为气相的剪切或扰动而突然释放,形成较大的液团或段塞,能观察到分层流向段塞流的转变的情况[8]。当角度大于 60° 后,重力沿管道方向的分量也随之增加,导致液相(油和水)主要在管道底部积聚,气相由于密度低于液相,会在管道顶部或液相上方流动,因此分层流现象较为明显。通过模拟还发现,当倾斜角大于 45° 之后,分层流变得不再稳定,导致油相在重力作用下更容易向管道底部(即管壁一侧)移动,最终出现油相的分布主要集中在管道底部的现象。

4. 结论

本文针对凝析气藏的水平气井倾斜段油气水三相流动携液规律进行深入研究,采用 fluent 中的 VOF 耦合水平集模型进行数值模拟,研究结果表明:(1) 水平井倾斜段的油气水三相流动复杂,流型可随流速、含气率、井筒倾斜角等因素的变化而转换,出现泡状流、分层流、段塞流等流型。(2) 随着倾角的增加,积液在重力作用下的积聚趋势增强,携液能力显著降低。在设计和优化水平井时,需合理控制井筒倾角,以提高携液效率和气井产能。(3) 倾斜角增大,会导致油相集中分布在管道底部,增加沉积的潜在风险。

参考文献

- [1] Pan, L., Tayanti, S. and Hewitt, G.F. (1995) Flow Pattern, Phase Inversion and Pressure Gradient in Air-Oil-Water Flow in a Horizontal Pipe. *Proceeding of the 2nd International Conference on Multiphase Flow*, Kyoto, 3-7 April 1995, Paper FT2-1.
- [2] Nadler, M. and Mewes, D. (1995) The Pressure Drop of the Three-Phase of Oil, Water, and Gas in Horizontal Pipes. *Proceeding of the 2nd International Conference on Multiphase Flow*, Kyoto, 3-7 April 1995, Paper FT2-9.
- [3] Shean, A.P. (1976) Pressure Drop and Phase Fraction in Oil-Water-Air Vertical Pipe Flow. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 23, 591-598.
- [4] Woods, G.S., Spedding, P.L., Watterson, J.K. and Raghunathan, R.S. (1998) Three-Phase Oil/Water/Air Vertical Flow. *Chemical Engineering Research and Design*, **76**, 571-584. <https://doi.org/10.1205/026387698525252>
- [5] Spedding, P.L., Woods, G.S., Raghunathan, R.S. and Watterson, J.K. (2000) Flow Pattern, Holdup and Pressure Drop in Vertical and near Vertical Two- and Three-Phase Up-Flow. *Chemical Engineering Research and Design*, **78**, 404-418. <https://doi.org/10.1205/026387600527301>
- [6] Walvekar, R.G., Choong, T.S.Y., Hussain, S.A., Khalid, M. and Chuah, T.G. (2009) Numerical Study of Dispersed Oil-water Turbulent Flow in Horizontal Tube. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **65**, 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2008.12.019>
- [7] Babakhani Dehkordi, P., Azdarpour, A. and Mohammadian, E. (2018) The Hydrodynamic Behavior of High Viscous Oil-Water Flow through Horizontal Pipe Undergoing Sudden Expansion—CFD Study and Experimental Validation. *Chemical Engineering Research and Design*, **139**, 144-161. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.026>
- [8] Hanafizadeh, P., Shahani, A., Ghanavati, A. and Akhavan-Behabadi, M.A. (2017) Experimental Investigation of Air-water-Oil Three-Phase Flow Patterns in Inclined Pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **84**, 286-298. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.02.009>