

# 基于 FLUENT 积液气井流动规律及测井资料解释方法

秦昊<sup>1</sup>, 陈文安<sup>2</sup>, 秦民君<sup>1</sup>, 王青川<sup>2</sup>, 王燕<sup>2</sup>, 付艳双<sup>2</sup>

1. 中国石油集团测井有限公司地质研究院 陕西西安 710077

2. 中国石油集团青海油田勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202

通讯作者: Email: 416803226@qq.com

项目支持: 中国石油集团测井有限公司科学研究与技术开发项目“老油田挖潜稳产测井综合评价技术研究”(CNLC2022-8B04)

引用: 秦昊, 陈文安, 秦民君, 等. 基于 FLUENT 积液气井流动规律及测井资料解释方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(5): 42-50.

Cite: QIN Hao, CHEN Wenan, QIN Minjun, et al. Flow patterns and well logging interpretation methods for liquid-accumulated gas wells based on FLUENT[J]. Well Testing, 2024, 33(5): 42-50.

**摘要** 常规气液两相流动规律及产出剖面测井资料解释模型难以精确评价积液气井井下流体生产动态。结合数值模拟及实验,研究了积液高度、入口气量及气液对比对气液两相流体流动特征的影响规律,分析了单相气及气-液两相流动特征参数之间关系,建立了积液气井气相速度预测模型,并结合物理实验进行验证。研究表明,积液高度小于10 m,气量小于200 m<sup>3</sup>/d时积液段混合流体流型为泡状流;单相气井在积液段持气率受含气量影响,积液高度影响并不明显,持气率可计算气相表观速度;积液段气液两相漂流模型相分布系数受入口流量和持水率影响,入口流量越低,相分布系数越小,定系数漂流模型不能准确预测各相流体速度,必须结合实际生产特征对模型进行优化。该研究为低产积液气井产液剖面测井资料解释方法研究提供了技术支撑。

**关键词** 产出剖面; 积液气井; 测井资料; 数值模拟; 气相速度; 解释模型; 持率; 实验研究

中图分类号: TE37

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.05.007

## Flow patterns and well logging interpretation methods for liquid-accumulated gas wells based on FLUENT

QIN Hao<sup>1</sup>, CHEN Wenan<sup>2</sup>, QIN Minjun<sup>1</sup>, WANG Qingchuan<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, FU Yanshuang<sup>2</sup>

1. Geological Research Institute of CNLC, Xi'an, Shaanxi 710077, China

2. Research Institute of Exploration & Development of Qinghai Oilfield, Dunhuang, Gansu 736202, China

**Abstract:** Conventional gas-liquid two-phase flow patterns and production profile logging interpretation models are insufficient for accurately evaluating the production dynamics of liquid-accumulated gas wells. By integrating numerical simulations and experiments, the influence of liquid accumulation height, gas inflow rate, and gas-liquid ratio on the flow characteristics of two-phase fluids were investigated. Furthermore, the relationship between the characteristic parameters of single-phase gas flow and gas-liquid two-phase flow were analyzed. A prediction model for gas phase velocity in liquid-accumulated gas wells was established, which was validated through physical experiments. The research show that when the liquid accumulation height is less than 10 m and the gas inflow rate is less than 200 m<sup>3</sup>/d, the flow regime of the mixed fluid in the liquid-accumulated section is bubbly flow; in single-phase gas wells, the gas content influences the gas holdup, which can be used to calculate the apparent velocity of the gas phase, in the liquid-accumulated section, while the liquid accumulation height has little effect; in gas-liquid two-phase flow, the drift flow model's phase distribution coefficient is affected by inflow rate and water holdup—the lower the inflow rate, the smaller the phase distribution coefficient, and fixed-coefficient drift flow model cannot accurately predict the velocity of each phase and must be optimized based on actual production characteristics. This research provides technical support for developing production profile logging interpretation methods for low-production, liquid-accumulated gas wells.

**Keywords:** production profile; liquid-accumulated gas well; well logging; numerical simulation; gas phase velocity; interpretation model; holdup; experimental research

气井开发初期为无水采气阶段,井筒内为气相的单相流动。随着气井开发时间的增加,地层水侵

入至井底,气相不足以将地层水带出井筒,气流中的液滴逐渐滑落到井底形成井底积液<sup>[1-3]</sup>。不断上

升的静水柱会降低储层与井筒间的生产压差,气井出现频繁水淹,严重影响了气井连续稳定生产,甚至会导致气井严重减产、停产。因此,有必要对积液气井的生产动态进行评价。

产出剖面测井是了解油气田生产动态,调整和优化油气田开发方案和提高油田的整体开发水平的重要手段<sup>[4]</sup>。垂直气井的七参数生产动态测井仪通过获取井下流体实时参数(相持率、混合平均速度、温度、压力等)来反演气井的生产动态。与传统的气-液两相流动不同,具有积液的气井中流体流动存在以下几点特征:(1)沿井筒剖面,井筒上部和下部的流体流动特征差异明显<sup>[5-6]</sup>。液相的循环扰动使用于监测井下混合流体平均速度的涡轮流量计失稳,测量数据有很大的误差,难以用于定量评价气井的产出动态;(2)积液气井的流动特征为井底存在积液,产层又只产出单相气或者低流量的气-水两相。

目前针对载水气井的研究较少,李强等<sup>[7]</sup>利用浮力射流理论提出了井筒中局部积液段气-液两相流动的概化模式,该预测方法的经验参数较多,计算过程复杂。周波等<sup>[8]</sup>结合载水气井的流体流动方式,再结物理实验的基础上,推荐三段式计算方法,但该方法并没有考虑积液气井中的流体真实流动特征,漂流模型的适用性有待进一步的验证。彭真等<sup>[9]</sup>根据积液气井井筒中流体特征将井下流体分为上、中、下三段,提出分别利用单相气模型、气体临界携液速度计算模型和漂流模型对井筒气相流量进行计算。邱小雪等<sup>[10]</sup>根据物理实验得到的持气率数据,分析了持气率与气相速度之间的关系,然而基于有限试验资料所建立的解释方法具有很强的局限性。气-水两相流动规律是研究气-水流动规律是气井产出剖面测井资料解释方法研究的基础。FLUENT 数值模拟可以不受实验装备的限制,通过对模拟结论的分析,可以得到流管不同位置处的流体流动信息,如持率、速度和压力分布等参数,进而可以细致的刻画流体流动规律<sup>[11-13]</sup>。

本文基于 FLUENT 模拟软件,建立长 10 m,内径为 0.124 m 垂直气井二维几何模型,在网格无关性和物理模型验证的基础上,采用 VOF 多相流模型模拟研究了不同积液高度和入口气量对载水气井井下流体流动特征的影响规律,系统地分析了不同流动特征参数之间的关系,并结合物理实验和数值模拟实验,建立了低产积液气井两相气相速度预测模型。

## 1 数值模型及验证

多相流动数值模拟建模及模型验证是保证模拟研究结论正确的基础,采用 FLUENT 软件建立垂直管二维结构化网格模拟模型,在网格无关性验证的基础上,采用气液两相管流实验数据对模拟模型进行验证。

### 1.1 模拟模型

结合生产井实际井眼参数,建立内径为 0.124 m、高为 10 m 的垂直管几何模型。垂直井筒为轴对称图形,二维结构几何模型可以代替三维结构。垂直管二维结构图形结构化网格相较于非结构网格具有运算精读高,容易收敛,且需要计算资源很少的特点,利用 ICEM 软件采用四边形结构化网格设置对模型计算域进行网格划分<sup>[14]</sup>。研究对象为流量和含水对速度剖面的宏观影响,网格划分过程中通过不同的网格尺寸对整体的模型进行网格加密,并未对边界层进行加密处理,如图 1a 及图 1b 所示。

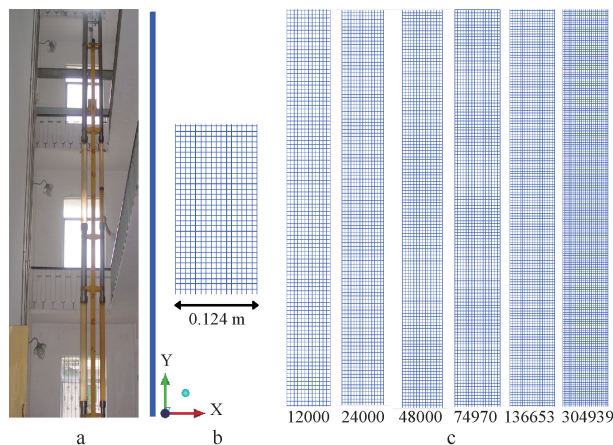


图1 多相流动实验装置及数值模拟模型网格示意图

Fig.1 Schematic diagram of the multiphase flow experimental apparatus and numerical simulation model

选择空气和液态水为实验流体。标准情况下,空气密度为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 、黏度  $1.789 \times 10^{-2} \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,水的密度为  $998.2 \text{ kg/m}^3$ 、黏度  $1.003 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,气-水界面张力  $0.072 \text{ N/m}$ 。设置入口为速度入口,作入口速度为混合流体平均速度,方向垂直于入口截面;出口和边界分别为压力出口和无滑移边界。入口流量分别为 30、50、80、100、150 和  $200 \text{ m}^3/\text{d}$ ,积液高度为 2、3、4、5、7 和 10 m。

VOF 模型是在欧拉网格的基础上建立的界面追踪方法,主要用于求解两种或多种相界面互不相溶的多相流动问题,一般应用于分层流、段塞流、大气泡流动和自由表面流动等。其通过共用一套动

量方程来确定各相流体在单元计算域内的体积分数,进而追踪两相或多相不可溶的流体的流动状态。本文研究对象为低雷诺数下的气-水两相管流运动,需要精确捕捉气-水两相流动界面,因此采用VOF模型模拟气-水两相流动。

## 1.2 模型验证

FLUENT模拟模型的模拟结论与网格参数密切相关,网格尺寸越小,精度越高,但迭代次数过高将导致工作效率过负;网格尺寸越大,运行效率高,但导致迭代发散不收敛,有必要选择合理的网格参数对几何模型网格独立性和有效性进行验证。设置气-水两相混合流体入口速度为 $0.478\ 3\ \text{m/s}$  ( $500\ \text{m}^3/\text{d}$ ),入口含水率为60%的工况,网格总数为12 000,24 000,48 000,74 970,136 653,304 939共6种大小网格案例条件下对不同网格数量的案例进行网格无关性验证,如图1c。设置工况条件下的流体流型为段塞流动,故选择完全发展(出口处)的气弹长度和气弹速度作为对比参数。图2是六种网格案例条件下出口处典型“泰勒气泡”长度和速度对比图。

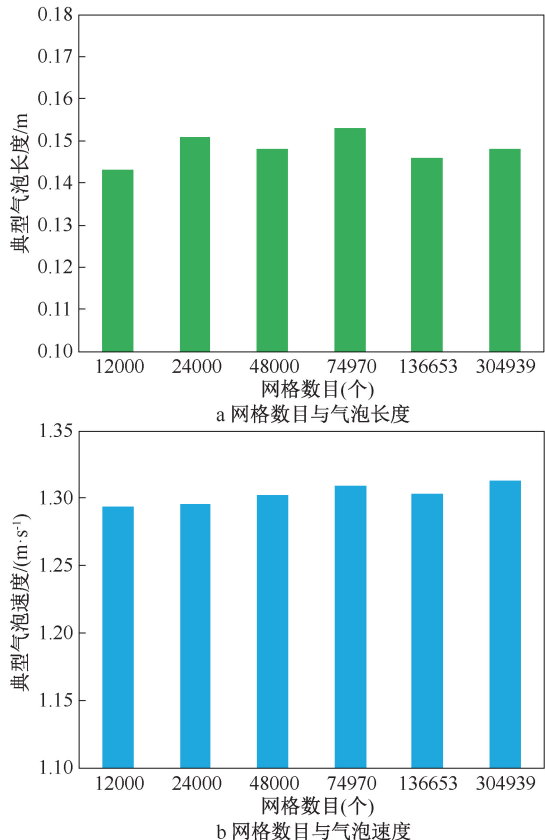
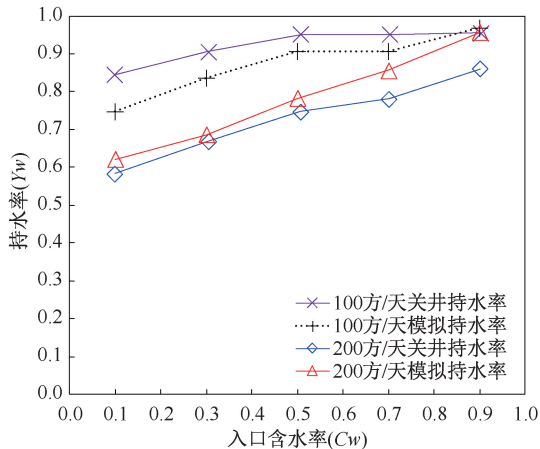


图2 不同网格参数下典型泰勒泡长度和速度对比

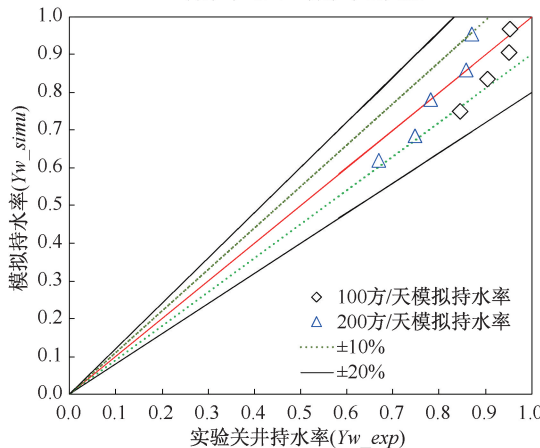
Fig. 2 Comparison of typical Taylor bubble length and velocity under different grid parameters

图2中当网格数量在48 000以上时,各气弹长度和气弹速度受网格数目的影响很小。气泡长度相对误差都在5%以下,而气泡运动速度的误差小于1%。但是当网格数目继续变大时,不会引起井筒内“泰勒泡”长度和速度显著变化,反而会增加计算的时间,因此选用既能保证运动的“泰勒泡”长度和速度受网格数目影响最小、计算时间较短的48 000网格。

选择与模拟几何模型相同的物理实验资料用以验证数值模拟模型的准确性。物理实验资料选择赵宏敏<sup>[15]</sup>研究论文中的内径为125 mm垂直井气-水两相流动实验的关井持水率资料。物理实验是通过设置不同入口流量和气-水配比,利用快速关闭技术所获得模拟流管中的“关井持水率”。文章通过设置与物理实验相同环境参数和模拟流体参数,对比并分析在实验总流量分别为100和200  $\text{m}^3/\text{d}$ 时,入口含水率分别为10%、30%、50%、70%、90%的条件下,数值模拟得到的关井持水率和物理实验关井持水率之间的关系,分别绘制持水率对比图和误差分布图,见图3。



a. 持水率与入口含水率的关系



b. 模拟持水率与实验关井持水率的关系

图3 模拟关井持水率与实验关井持水率

Fig. 3 Simulated and experimental shut-up water holdup



图 3a 和图 3b 分别是在气-水总流量为 100 和 200 m<sup>3</sup>/d 时,入口含水率分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 条件下的模拟关井持水率与实验关井持水率的对比图和误差分布图。图 3b 中在 100 m<sup>3</sup>/d 模拟条件下在入口含水率为 0.5 和 0.7 时,由于实验获得的关井持水率相同,故在图 3 中只有四个点。从图 3 可以看出,模拟结果与实验结果非常吻合,几乎等于实验关井持水率,在 100 m<sup>3</sup>/d 和 200 m<sup>3</sup>/d 条件下,平均误差分别为-5.6%和-5.4%,图 3 表明建立的数值模拟模型具有良好的可行性和准确性。

## 2 模拟数据分析及讨论

低产积液气井分为积液单相气及积液气液两相流,采用 FLUENT 软件模拟,对积液单相气及积液气液两相流在不同流动环境中的流型及持水率开展分析,结合多项流动模拟实验进行验证,明确不同流动环境中的气液两相流动特征。

### 2.1 单相气流动特征

#### 2.1.1 流型

流型是多相流动的重要参数,对研究流动压降、持率分布及解释模型的选择具有重要的实际应用意义。通过对模拟工况的实时气相体积分布制作气相体积分布云图,以此来分析入口流量和积液高度对模拟流管两相流型的影响。

据朱绍武<sup>[16]</sup>研究,气相流量越大时,流型的变化越为明显,因此对最大入口气量条件的模型流型开展分析。图 4a~图 4f 是入口气相流量为 200 m<sup>3</sup>/d,积液高度分别为 2、3、4、5、7 和 10 m 时气-液两相流体各相流体的相分布云图。图 4 中在流管入口处,不同流体流动状态及各相流体分布比较均匀,气相都以小气泡的形式在液柱中逐渐向上运动,流体在流管内的流动形态呈典型的泡状流动,在出口附近(动液面)才表现出液体的翻滚和回落。从图 4 可知,在较低积液高度条件下(积液高度  $h \leq 5$  m),混合流体流型并未发生明显的改变,都以稳定的泡状流动向上运动。而当  $h \geq 7$  m 时,首先在具有积液特征的流管中表现出“气举”的特征,即气相将流管中的液相推出管外,并且随着积液高度和流动距离的增加,在流管上部位置处的气泡间开始聚集,在纵向上分别呈具有高度离散性质的帽状和段塞流动状态。虽然在流动过程中气相会呈现出帽状和塞状流动特征,但是整体上气泡流在整个流动过程中呈主导地位,因此在所有的模拟工况条件下流体

流型均为泡状流动。

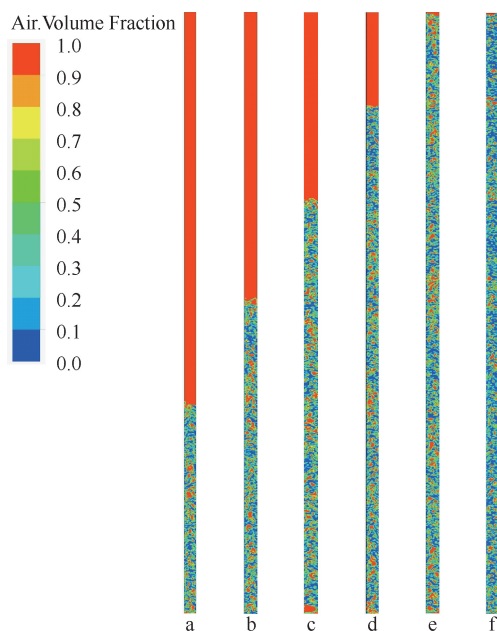


图 4 入口气流量为 200 m<sup>3</sup>/d 不同积液高度条件下气-水相分布图

Fig. 4 Gas distribution under different liquid accumulation heights with an input flow rate of 200 m<sup>3</sup>/d

#### 2.1.2 持率

持率是流型判别、压降预测和各相流体速度预测的关键参数。在物理实验中,关井持率是通过瞬时关闭技术测量的各相流体体积分数。流体流动状态稳定之后,瞬时并且同时关闭流管的入口和出口,然后等到混合流体重力分异结束后,分别测量各相流体所占的体积分数,在与整个流管体积作比值,从而得到各相流体的关井持率。在模拟过程中,采用相同的原理对个模拟工况下流管中的流体持率进行监测。

图 5 是在不同积液高度条件下入口气量与持气率关系。图 5 中持气率与入口含气量呈正相关关系,即在相同积液高度下,入口气量越大,持气率值越大;积液高度对持气率的影响并不明显,呈现出随着积液高度的增加,持气率值有微弱的减小。这是由于在流管底部入口附近气相首先以分散相呈小气泡的形式并以初始的表观速度在液柱中向上运动,随着流动的距离增加,气相之间相互聚集形成更大的气泡或者段塞,大气泡或者段塞受浮力的影响更加显著,向上运动的速度越大,从而气相从流管中逃逸的速度就会越快,使流管顶部处的气相体积相对减少。当气相速度越大时,气相的体积分数就会相应的减小,从而导致流动距离越远,气相体积分数就越小。



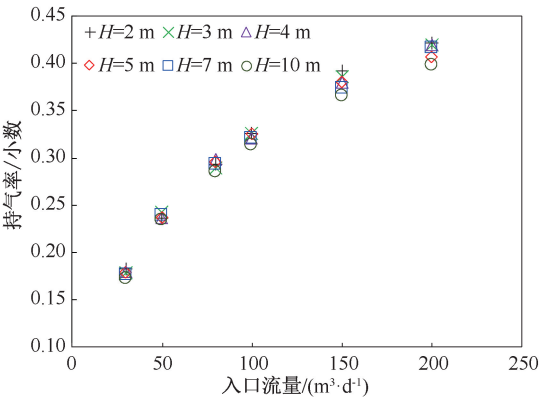
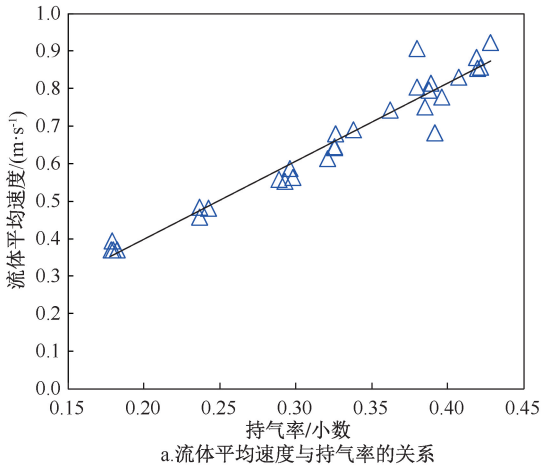


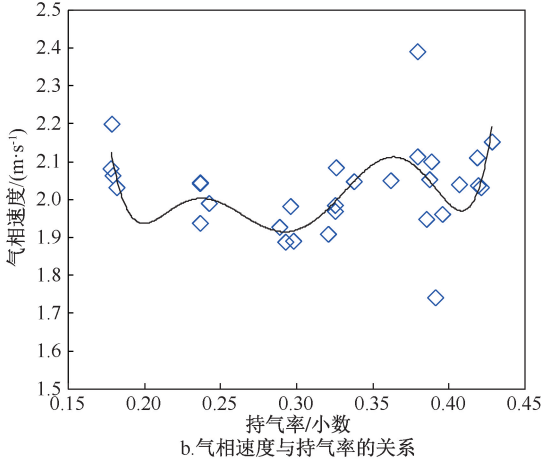
图 5 不同积液高度条件下入口气量与持气率关系  
Fig. 5 Relationship between input gas volume and gas holdup under different liquid accumulation heights

2.1.3 流动参数

图 6a 和图 6b 分别为所有模拟工况条件下,持气率分别于混合流体平均速度和气相真实速度的关系。入口气相体积流量和积液高度条件下模拟持气率、混合流体速度数据。



a. 流体平均速度与持气率的关系



b. 气相速度与持气率的关系

图 6 平均流速和气相真实速度与持气率关系  
Fig. 6 Relationship between average flow velocity, gas phase real velocity and gas holdup

图 6a 中,可见混合流体速度与持气率有较强的正相关关系,然而,随着持气率的增大,混合流体速度与持气率之间的关系变得十分复杂,特别是在较高持气率条件下,关系比较离散。这是由于在低持气率情况下,虽然流体流动状态还未达到稳定,但是混合流体流动较为平缓,特别是在出口附近的混合流体的速度分布较为均匀。而在高持气率时,高速气流的冲击使得动液面处的混合流体翻滚剧烈,导致流体速度分布急剧变化,从而在高持气率时,混合流体速度与持气率之间的关系相关性较差。同理,流体速度分布急剧变化也会导致气相真实速度与持气率之间的相关性极差,如图 6b 所示。而图 7 则明显的表现出在不同的积液高度下,持气率的大小主要与入口含气量具有很好的正相关关系,即不受积液高度和入口气量的影响。因为气相表观速度只与气相入口流量及流管管径常数相关,与流体流动状态无关。结合流体流型特征及持率特征可知,在载水气井中,气相表观速度与持气率之间呈现出很强的正相关性,并且不受入口气量和积液高度的影响。

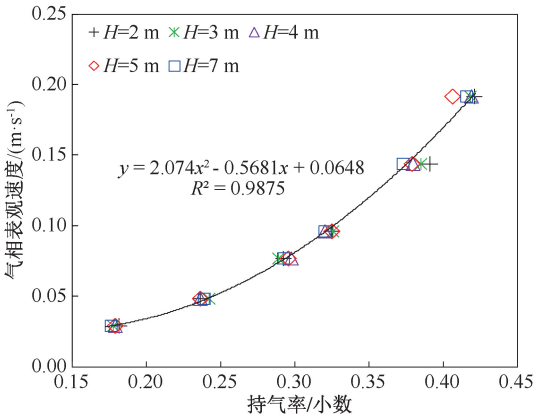


图 7 气相表观速度与持气率关系  
Fig. 7 Relationship between gas phase superficial velocity and gas holdup

2.1.4 实验研究

为了验证模拟研究结论的可行性,采用多相流动模拟实验装置对数值模拟得到的持气率和气相表观速度的关系进行验证。实验在多相流动模拟实验装置进行,模拟井筒由透明有机玻璃制成,模拟井外径为 139.7 mm。实验采用空气和自来水作为实验流体,详细的实验参数及模拟结论如表 1 所示。实验中通过设置不同的入口含气量和积液高度组合,测量不同实验条件下的关井持水率值。与此同时,通过设计与物理实验参数相同的数值模拟研究,对比实验结论与模拟结论。

表 1 实验设置参数及实验结论

Table 1 Experimental parameters and conclusions

液柱高度/m	入口流量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	实际入口速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	测量 持气率	模拟 持气率
2.73	112.849	0.108	0.342	0.381
2.73	143.603	0.138	0.357	0.410
2.73	165.086	0.158	0.372	0.431
2.73	177.858	0.170	0.393	0.448
2.73	200.099	0.192	0.403	0.469
2.73	222.291	0.213	0.435	0.485
4.70	54.533	0.052	0.248	0.171
4.72	77.487	0.074	0.287	0.242
4.76	88.537	0.085	0.297	0.256
5.20	32.501	0.031	0.191	0.070

图 8 则是在相同设置参数下,实验和模拟气相表观速度与持气率关系。在图中,虽然在一定程度上,实验持气率和模拟持气率值具有一定的差异,即模拟的持气率值在较低持气率范围(< 0.3)模拟持气率大于实验持气率,当持气率大于 0.3 时,模拟持气率小于实验持气率,这是因为在实验中由于液体的涨落的影响,导致实际的动液面难以计量,而造成关井持气率的计量误差;而在模拟中又没有考虑管壁的摩擦阻力,但是实验的气相表观速度和模拟的表观速度与持气率之间也具有很强的二次关系,进一步验证了数值模拟所得结论具有一定的实际意义。

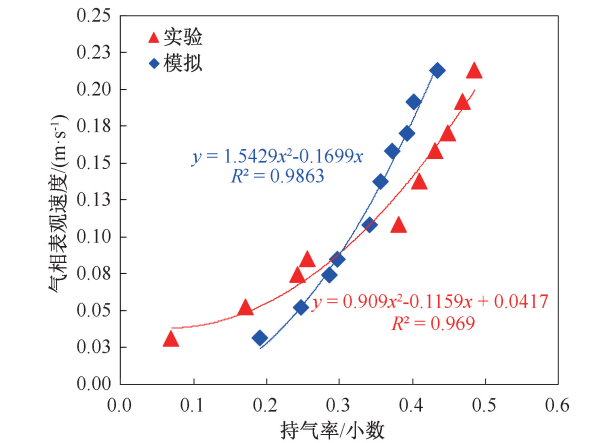


图 8 实验和模拟气相表观速度与持气率关系  
Fig. 8 Relationship between experimental and simulated gas superficial velocity and gas holdup

结合物理实验数据和数值模拟数据,建立气相表观速度与持气率关系(图 9),可以得到具有积液特征的低产单相气井气相表观速度预测方法

$$V_{sg} = 2.224Y_g^2 - 0.6387Y_g + 0.0727 \quad (1)$$

式中:  $V_{sg}$  为气相表观速度, m/s;  $Y_g$  为持气率, 无量纲。

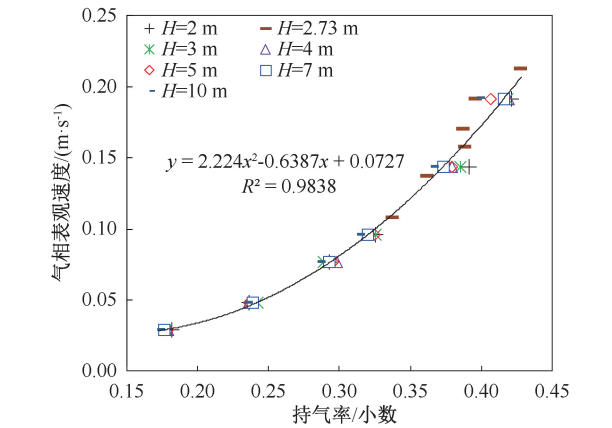


图 9 模拟数据气相表观速度与持气率关系  
Fig. 9 Relationship between experimental gas superficial velocity and gas holdup

2.2 气液两相流动特征

2.2.1 流型

图 10 是入口流量分别为 50、100 和 200 m<sup>3</sup>/d 时,不同入口含水率条件下的气-水两相流体各相相分布云图。图 10a,b 和 c 中序号 1~9 分别代表含水率以 10% 间隔递增时,入口含水率从 10% 到 90% 条件下的各相流体相分布体积云图。在图 10 中可以看出,在流管入口处,流体流动状态及各相流体分布比较均匀,气相以分散相呈小气泡的形式在液柱中向上运动,流体流动形态呈典型的泡状流动,随着流动距离的增加,气泡间开始聚集,气相逐渐聚合成大气泡的形式向上流动,在纵向上分别呈帽状流和段塞流的流动状态。最后在流管上部部位(>7 m),混合流体流动达到稳定状态,流体流型不在发生变化。图 10a,图 10b 和图 10c 中,在相同的入口流量情况下,气泡在流管内的分布密度随着入口含气率的增加而增加,并且气泡的大小随着入口含气率的增大而增大,直至形成气体段塞,并且气体的段塞长度和频率与入口含气率呈正相关关系,入口含气率越大,气塞的长度越长,频率越大。然而在 50 m<sup>3</sup>/d 流动条件下,入口的气量不足以使气泡形成大气泡或者气体段塞,混合流体流动状态全部呈泡状流动。在相同入口含水率条件下,随着入口流量的增加,混合流体的流动形态逐渐地从分散的泡状流动向帽状流动和段塞流动过渡,这是由于随入口流量的增加,相对地入口含气量的增加,气泡出现的频率越大,受浮力的地影响,气相向上的运动速度远大于液相向上的流动速度,小气泡追赶大气泡,然后气泡之间相互聚集,逐渐过渡为段塞流动。

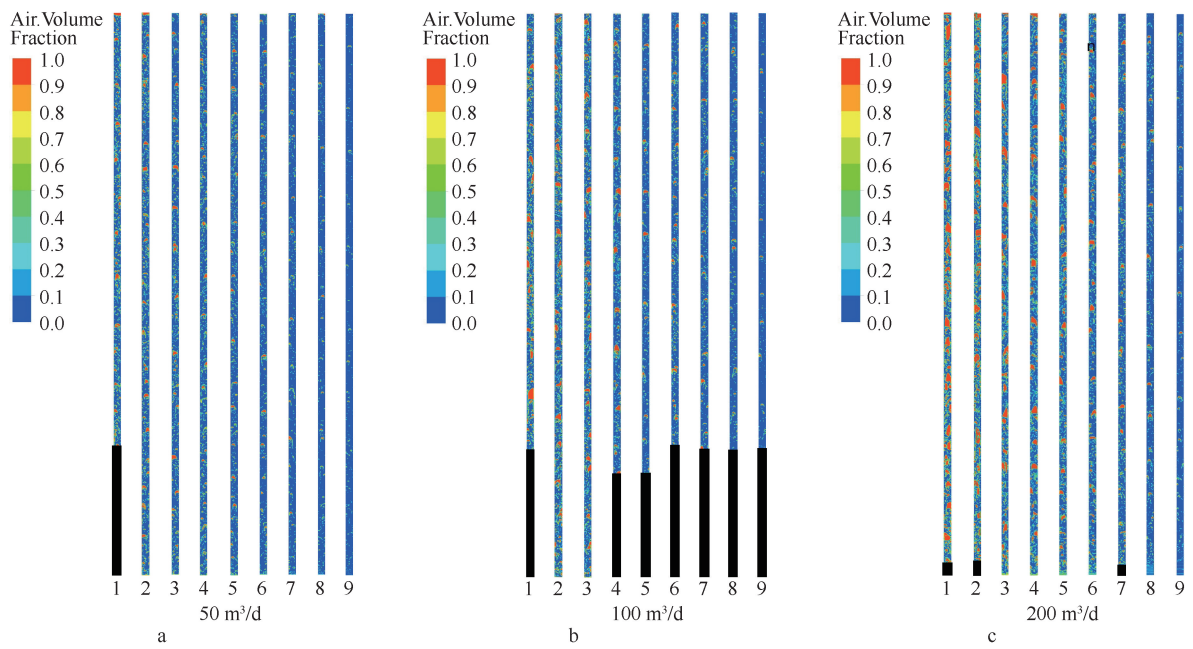


图 10 不同入口流量和含水条件下气-水两相流型图

Fig. 10 Flow patterns under different input flowrates and water content conditions

2. 2. 2 持率特征

图 11 是积液高度为 10 m,入口流量分别为 10~200 m<sup>3</sup>/d,入口含水率分别为 10%~90%条件下含水率与持水率的关系。图 11 中在低流量条件下,随着总流量的增加,当入口含水率不变时,气-水之间的滑脱特征逐渐减小,滑脱造成的含水差异随着输入含水率值的增加而减小。当入口含水率超过 0.8 时,不同流量下的持水率没有发生明显变化。图 11 表明气相和水相的滑脱特征与流量和入口含水率密切相关。具体而言,较低的流速下滑脱更严重。此外,当入口总流量小于 10 m<sup>3</sup>/d 时,水相和气相之间的滑脱随入口流量和入口含水率的变化几乎不发生改变。

2. 2. 3 特征参数表征

气液两相流各相流体速度预测的模型为 Zuber 漂流模型<sup>[17]</sup>,在泡状流动中,Zuber 漂流模型的基本形式表征方式为

$$\frac{V_{sg}}{Y_g(1 - Y_g)^k} = C_0 \frac{V_m}{(1 - Y_g)^k} + V_d \quad (2)$$

式中: $V_{sg}$  为气相表观速度, m/s;  $Y_g$  为持气率, 无量纲;  $k$  为泡径指数, 无量纲;  $C_0$  为相分布系数, 无量纲;  $V_m$  为混合流体平均速度, m/s;  $V_d$  为静液柱中的气泡上升速度, m/s。

Harmathy<sup>[18]</sup>通过大量的物理实验研究得出,在气-液两相流动中,泡径指数  $k$  为 0,并且在泡状流动中,相分布系数  $C_0$  为 1.2,因此在气-液两相泡状流中,漂流模型为

$$V_{sg} = Y_g(1.2V_m + V_d) \quad (3)$$

在低产积液气井中,结合漂流模型基本表征方式,如式(3)所示,令  $V_{sg}/Y_g$  为纵坐标,  $V_m$  为横坐标,通过最小二乘法可以得到相应流动环境中的各相流体速度。

图 12 分别为 Zuber 模型计算速度与持率分段计算速度与理论表观速度对比图。纵坐标是根据流动参数,采用漂流模型计算的气相表观速度。对比计算和理论表观速度,整体上计算气相表观速度大于理论的气相表观速度,因为在极低流量下,混合流体的流型均为较为均质的泡状流动,此时气相的流动速度趋于气泡上升速度,此时相分布系数和

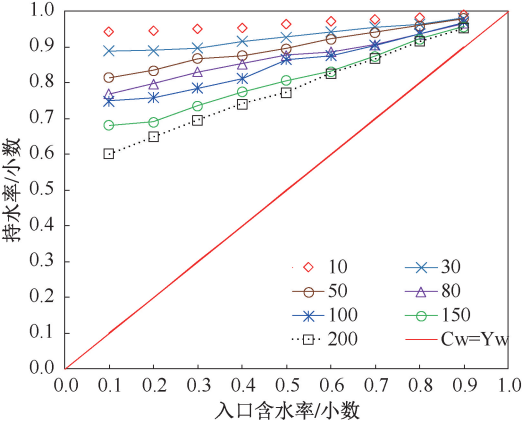


图 11 不同入口流量下含水率与持水率关系

Fig. 11 The relationship between water content and water holdup under different input flowrates



流体平均速度对气相表观速度的贡献趋于 0,特别是当持水率大于 0.9 后,气相的流动速度趋于气泡上升速度,当流速越低、气液相间的滑脱越明显时,流体相分布系数逐渐变小,如式(4)所示。因此在极低流量的气液两相流动中,常规漂流模型不能准确的预测各相流体速度,必须结合实际生产的流体性质对模型进行优化。

$$V_{sg} = 0.928\ 4V_m + 0.8023 \quad Y_g < 0.9$$
$$V_{sg} = 0.608\ 5V_m + 0.782\ 2 \quad Y_g > 0.9 \quad (4)$$

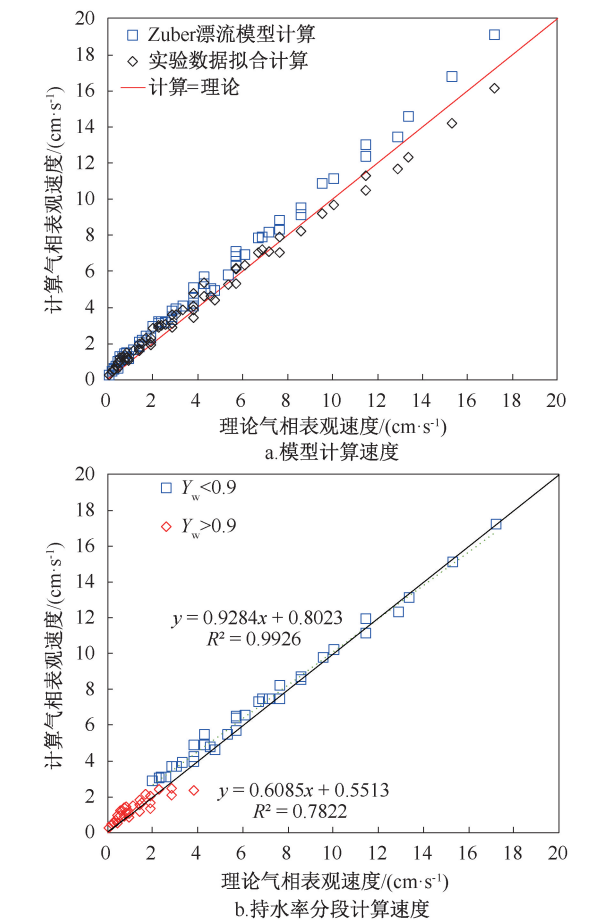


图 12 Zuber 模型计算速度与持水率分段计算速度与理论表观速度对比

Fig. 12 Comparison between the calculated velocity and water holding capacity of the Zuber model and the theoretical apparent velocity

3 结论

(1)低产积液气井积液段的混合流体主要以泡状流向上流动,流体流动形态并未达到稳定发展,常规测井资料解释模型难以对产出状况进行评价。

(2)单相气积液段持气率入口含气量影响,气相表观速度与持气率之间呈现出很强的正相关性,产出剖面测井资料解释可以根据持气率的大小来

定量评价井下气体生产动态。

(3)气-水两相积液段流动参数之间的关系与单相气积液段的关系差异极大,入口流量越低,气-水两相间滑脱越明显,气-水两相漂流模型中相分布系数受入口流量和持水率影响,入口流量越低,相分布系数逐渐从 1.2 向 0 变化,常规漂流模型不能准确预测低产积液气井各相流体速度,必须结合实际生产的流体流动特征对模型进行优化。

致谢:感谢青海油田勘探开发研究院等在论文素材、方法研究方面做出的贡献。

参考文献

[1] G YUAN, E PEREYRA, C SARICA, et al. An experimental study on liquid loading of vertical and deviated gas wells [C]//SPE Production and Operations Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, USA, 23-26 March, 2013.

[2] 赵哲军, 刘通, 许剑, 等. 气井稳定携液之我见[J]. 天然气工业, 2015, 35(6): 59-63.

ZHAO Zhejun, LIU Tong, XU Jian, et al. Stable fluid-carrying capacity of gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6): 59-63.

[3] 张烈辉, 罗程程, 刘永辉, 等. 气井积液预测研究进展[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 63-69.

ZHANG Liehui, LUO Chengcheng, LIU Yonghui, et al. Research progress in liquid loading prediction of gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 63-69.

[4] 宋红伟, 郭海敏, 郭帅, 等. 水平井油水两相分层流相流量测量方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 573-582.

SONG Hongwei, GUO Haimin, GUO Shuai, et al. Partial phase flow rate measurements for stratified oil-water flow in horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 573-582.

[5] 赵宏敏. 携液气井生产测井资料解释方法初探[J]. 石油天然气学报, 2002, 24(3): 33-35.

ZHAO Hongmin. Preliminary Exploration of Interpretation Methods for Production Logging Data of Liquid Gas Wells [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(3): 33-35.

[6] 穆林, 王丽丽, 温艳军. 气井积液动态分布研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(增刊 2): 144-146.

MU Lin, WANG Lili, WEN Yanjun. Research on dynamic distribution of gas well liquid accumulation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(Suppl. 2): 144-146.

[7] 李强, 姚绪钢, 黄社华, 等. 井下有积液气井的产气剖面解释方法研究[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 371-373.

LI Qiang, YAO Xugang, HUANG Shehua, et al. An Interpretation Method for Gas Production Profile of Gas Wells

- with Standing Liquid[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(4): 371-373.
- [8] 周波,戴家才,秦民军,等. 载水气井产出剖面测井解释方法[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(9): 84-87.
- ZHOU Bo, DAI Jiakai, QIN Minjun, et al. Interpretation method for production logging of water carrying gas wells [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(9): 84-87.
- [9] 彭真,李健伟,白彬彬. 大牛地低产气井产气剖面测井资料解释方法探讨[J]. 物探与化探, 2017, 41(5): 928-932.
- PENG Zhen, LI Jianwei, BAI Binyan. A discussion on the interpretation method of gas production profile logging data in the Daniudi low yield gas well [J]. Geophysical and Geochemical Exploration. 2017, 41(5): 928-932.
- [10] 邱小雪,戴家才,陈猛,等. 基于 VOF 对低产积液气井流动特征的数值模拟[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 619-623.
- QIU Xiaoxue, DAI Jiakai, CHEN Meng, et al. Numerical simulation of the flow characteristics in low-yield and liquid loading gas well based on VOF[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(5): 619-623.
- [11] SORGUN M, OSGOUEI R E, OZBAYOGLU M E, et al. Gas-liquid flow through horizontal eccentric annuli: CFD and experiments compared [C]//Proceedings of ASME-JSME-KSME joint fluids engineering conference, hamamatsu, Shizuoka, JAPAN, July 24-29, 2011.
- [12] DABIRIAN R, MANSOURI A, MOHAN R, et al. CFD Simulation of turbulent flow structure in stratified gas/liquid flow and validation with experimental data [C]//SPE Technical Conference & Exhibition. Houston, Texas, USA, 28-30 September, SPE-174964-MS, 2015.
- [13] PAULA P D, VALDES J P, RATKOVICH N, et al. Analysis of the drift flux in two-phase gas-liquid slug-flow along horizontal and inclined pipelines through experimental (non) - newtonian and cfd newtonian approaches [J]. Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, 2018, 5: 53-70.
- [14] DEENDARLIANTO, ANDRIANTO M, WIDYAPARAGA A, et al. CFD studies on the gas-liquid plug two-phase flow in a horizontal pipe [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 147: 779-787.
- [15] 赵宏敏. 水平井生产动态监测解释方法实验研究[D]. 武汉:中国地质大学博士学位论文, 2005.
- ZHAO Hongmin. Experimental study on the interpretation method for dynamic monitoring of horizontal well production [D]. Wuhan: Doctoral Dissertation of China University of Geosciences, 2005.
- [16] 朱绍武. 低产气井气水两相流动数值模拟研究[D]. 成都:西南石油大学硕士学位论文, 2019.
- ZHU Shaowu. Numerical simulation study on gas-water two-phase flow in low production gas wells [D]. Chengdu: Master's thesis of Southwest Petroleum University, 2019.
- [17] ZUBER N, FINDLAY J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems [J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87: 453-468.
- [18] HARMATHY T Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent [J]. AIChE Journal, 1960, 6(2): 281-288.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**秦昊,男,1990 年出生,博士,工程师,毕业于西南石油大学地质资源与地质工程专业,现主要从事油气井测井方法、资料解释方法研究及应用工作。电话:18244245581;Email:416803226@qq.com。通信地址:陕西省西安市高新区锦业二路丈八五路 50 号中国石油集团测井有限公司,邮政编码:710077。