

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.06.013

## 高含气井下气液混合输送技术研究\*

王信鹏<sup>1,2</sup>, 邢树宾<sup>2,3,4</sup>, 马志涛<sup>1,2</sup>, 许晶禹<sup>2,3</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 青岛 266590, E-mail: xinpeng15@126.com;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

4. 中国石油化工股份有限公司 石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:** 为了确保油田开采过程中电潜泵在高含气油井的正常运行, 结合气液分离技术和引射技术, 该文运用 CFD 模拟软件 FLUENT 研究了一种高含气井下气液混合输送技术。该技术通过建立气体及液体分采通道, 利用引射原理将增压后的高压动力液携带富气流举升至地面, 以实现利用生产井自身流体实现自我举升。研究表明: 经过对比分析发现, 对于不同入口气体含量的工况, 由于射流泵引射装置的引射比影响, 入口气体体积含量 40% 是一拐点, 当入口气体含量超过 40% 时, 引管内的气相含量以及流速基本达到一定值; 对于不同入口流量, 随着流量的增加, 气液分离效果亦逐渐变佳, 取气管内的气相含量基本稳定在一定的范围, 而取气管内的流速则随着流量的增加而增大。该研究结果对提高电潜泵在油田开采高含气油井中的应用范围具有重要意义。

**关键词:** 高含气混合液; 电潜泵; 数值模拟; 气液分离

**中图分类号:** O359<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

## Study on downhole gas-liquid conveying technology with high gas fraction

WANG Xin-peng<sup>1,2</sup>, XING Shu-bin<sup>2,3,4</sup>, MA Zhi-tao<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>2,3</sup>

(1. School of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

\* 收稿日期: 2018-04-09(2018-09-03 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779243)和山东科技大学研究生科技创新项目(SDKDYC180308)

作者简介: 王信鹏(1993-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生.

通讯作者: 许晶禹, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

Received: April 9, 2018 (Revised September 3, 2018)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51779243) and Graduate Science and Technology Innovation Program of Shandong University of Science and Technology (SDKDYC180308)

Biography: WANG Xin-peng (1993-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: XU Jing-yu, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**Abstract:** In order to ensure normal operation of the electric submersible pump in wells with high gas fraction during oil field exploitation, combined with gas-liquid separation and ejection technologies, CFD simulation software FLUENT is used to study a new kind of downhole gas-liquid conveying technology with high gas fraction. Through the establishment of the gas and liquid separation channel, the pressurized high pressure fluid is lifted to the ground with a rich gas flow using the principle of ejection in order to realize self lifting by using the fluid of the production well. The results show that, through comparative analysis, for different inlet gas content conditions, the inlet gas volume fraction of 40% is an inflection point due to the ejection ratio of ejectors. When the inlet gas content is over 40%, the gas content and flow rate of the inlet pipe basically reach some certain values. Furthermore, for different inlet flow rates, the gas-liquid separation efficiency is getting better with the increase of flow rate, and the gas content in the branch tube is basically stable in a certain range, while the flow rate in the tube increases with the increase of flow rate. This study is of great significance to improve the application range of the electric submersible pump in the high gas fraction oil field.

**Key words:** high gas fraction; electric submersible pump; numerical simulation; gas-liquid separation

## 引言

电动潜油离心泵是油田采出液的主要举升设备,其优点为排量范围广、举升能力强、占地面积少且易于管理,但是由于其是通过离心作用对井液进行加压,故对井液中的游离气比较敏感<sup>[1]</sup>。随着油田深入开发,尤其是注水滞后单元和高油气比区块,地层能量降低且油层脱气,高含气油井将不断增多<sup>[2]</sup>。油田井下地层油液中所含有的气体会使潜油离心泵的工作性能下降,严重时会产生气锁,造成泵的排量中断。为保证常规潜油电泵的正常运转,泵挂深度处吸入口气液比应小于30%<sup>[1,3]</sup>。

为了减小井液中气体对电潜泵的影响,保证电潜泵能够在高含气油井中正常运行,需要在井液进入泵组之前对其进行预处理,使其含气量降低至泵组可以处理的程度,以保证潜油电泵系统运行的可靠性。刘永辉等<sup>[4]</sup>针对目前潜油电泵井下气液分离器处理气体能力有限的问题,对气液分离过程中气液分离器内部两相流流场开展了数值模拟,同时对气液分离器入口含气率进行了敏感性分析。张白茹等<sup>[1]</sup>采用数值模拟方法对新型高气液比混合器的携气机理进行了研究,模拟分析了混合器内气泡的直径及流场压力和含气率的分布。赵焕卿等<sup>[2]</sup>为改善高含气井中井下多相混抽泵或电潜泵机组效率低下的问题,对井下水力旋流油气分离器内的两相流场进行了数值模拟,并将数值计算结果与同结构的样机的室内模拟试验结果进行了对比。王青华等<sup>[3]</sup>以潜油电泵用涡流气液分离器为原型,构建了两级涡流串联结构,并进行了相关数值模拟研究。Cai等<sup>[5]</sup>对轴流导流片气液旋流器的工作原理与分离效率进行了研究,论证了导流片分离器对分散在流体中微小气泡分离的可行性,并在实验的基础上对流场分布和结构优化进行了数值模拟。饶永超等<sup>[6]</sup>对以

叶轮起旋的水平管内气液两相螺旋流的摩擦阻力压降特性进行了实验研究,对比分析了气液两相非旋流与气液两相螺旋流的压降特点。王树立等<sup>[7]</sup>对以纽带为起旋装置下的水平管内气液两相螺旋流的流型进行了研究,并着重讨论了纽带的扭率对流型转换边界和流动压降的影响。

目前针对高含气油井,尤其是气体含量高于60%的油井,尚无较为理想的举升技术。为了克服现有技术中的不足,拓宽常规电潜泵在高含气油井中的应用范围,本文对一种高含气井下气液混合输送技术开展了研究,建立了数值模型,并借助数值模拟软件对其开展了计算分析。

## 1 数值模型

高含气井下气液混合输送技术以常规的电潜泵采油技术为基础,并结合气液旋流分离技术<sup>[8]</sup>及引射技术<sup>[9]</sup>,以实现电潜泵在高气液比油井中的稳定运行,其结构形式如图1(a)所示。气液混合液经导流片型气液分离器分离后,油管轴线处产生的气芯由取气管引出,剩余富液流经电泵增压后作为射流泵引射装置的高压动力液将取气管内的富气流引射至井口,实现利用生产井自身的流体自我举升的过程。其简化后的数值计算模型如图1(b)所示,截面A-A位置为取气管入口,截面B-B位置为电潜泵吸入口处。模型入口管径为DN70 mm,出口管径为DN50 mm,取气管管径为DN30 mm,模型总长1 665 mm。

### 1.1 多相流控制方程

在本文中,数值模拟中采用Mixture模型进行模拟研究,与VOF模型相同,混合模型使用单流体方法。混合模型的连续方程为

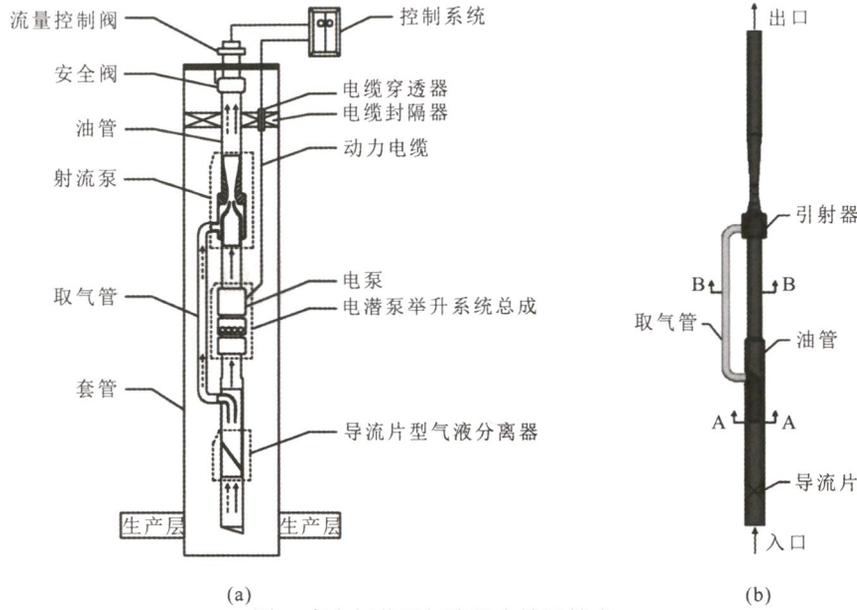


图 1 高含气井下气液混合输送技术  
Fig.1 Downhole gas-liquid conveying technology with high gas fraction

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$  为质量平均速度,  $\rho_m =$

$\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$  为混合密度,  $\alpha_k$  为第  $k$  相的体积分数,  $\dot{m}$  描述由于气穴或用户定义的质量源的质量传递。

在整个计算区域内, 气-液相的雷诺时间平均动量方程和能量方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = & \\ -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + & \\ \nabla \cdot (-\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} & \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = & \\ \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + \nabla \cdot (-\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{E}'}) + S_h & \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $\mathbf{F}$  为体积力,  $p$  为压力,  $\mathbf{E}$  为能量,  $T$  为温度,  $k_{\text{eff}}$  为有效流体传热系数,  $S_h$  为黏性耗散项。

考虑到旋转分离器的流场特性, 结合计算成本和精确度, 湍流模型选用带旋流修正的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行数值分析。

RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型运输方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + & \\ G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon & \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $G_k$  为速度梯度导致的湍动能生成率,  $G_b$  为浮力导致的湍动能生成率,  $Y_M$  为可压缩湍流中脉动膨胀导致的耗散能量占整体耗散能的比例,  $\alpha_k$  和  $\alpha_\varepsilon$  分别为湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特数的倒数,  $S_K$  和  $S_\varepsilon$  为用户定义的源项。

### 1.2 网格无关性验证

采用 ICEM 进行网格划分, 流域网格采用四面体非结构网格, 考虑到相对尺寸问题, 对导流片的壁厚予以忽略。在数值研究之前进行了网格无关性研究, 共划分了三种不同密度的网格: 相对较粗糙的网格 (网格数量 516 938)、相对中等网格密度 (网格数量 1 038 240) 和相对细化的网格 (网格数量 1 496 639); 采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型, 入口速度 1.444 m/s, 将面平均静压和速度大小作为研究准则。图 2 描述

了不同网格密度下模型对应截面的面平均静压和总速度的轴向分布。综合对速度和压力分布的分析,中等网格密度满足网格独立性要求,故本文采用相对中等网格密度(网格数量1 038 240)进行计算分析。

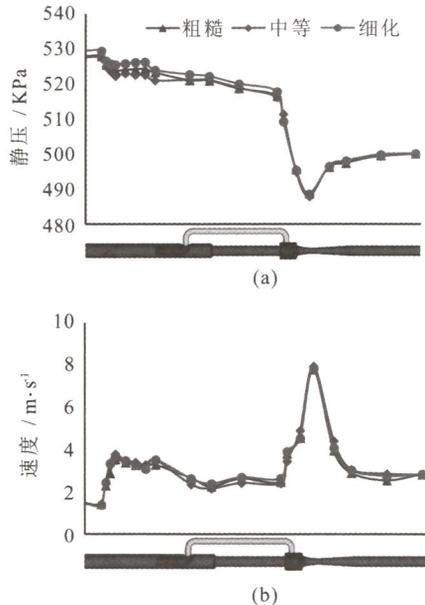


图2 不同网格密度下的速度和静压分布比较

Fig.2 Comparison of velocities and static pressure distributions under different grid densities

### 1.3 数值计算

数值模型利用基于控制体积法的CFD软件FLUENT分析计算。由于流体在导流片、射流泵附近的强瞬态效应,在稳态求解方法下模拟很难收敛,故采用4 ms的时间步长进行瞬态求解,由于分离区内的流场对入口区的瞬态效应影响不大,其随时间变化不大,因此从瞬态区的分离过程仍可以看作是一种稳定的状态。

模拟采用空气和水作为气液两相,假设气液两相均为不可压缩流体<sup>[10]</sup>。参考FLUENT用户手册,可压缩流动可根据马赫数的取值来判别, $M \equiv u/c$ ,  $c = \sqrt{\gamma RT}$  为气体中的声速, $\gamma$  为比热比( $c_p/c_v$ ),当马赫数远小于1.0时( $M < 0.1$ ),可压缩性影响可以忽略,在模拟中气体密度随压力的变化可以忽略。综合本文中所有工况,速度最大值在入口流量40 m<sup>3</sup>/h时的取气管入口处,速度大小为30.3 m/s,其马赫数远小于1.0;同时,通过对单相气体计算分析,可压缩和不可压缩两种情况下的流场速度分布差别不大(图3),故在本文中假设气液两相均不可压。对于原油中溶解气,本文通过改变液相密度实现,不考虑压力对相变的影响。

入口边界条件设置为速度入口,根据井下的环境特点和工况要求,分别设计研究了几种不同的来液条件。计算边界的出口设置为压力出口0.5 MPa,

管内壁采用静止无滑移壁面边界。具体入口来液工况设计如表1所示。

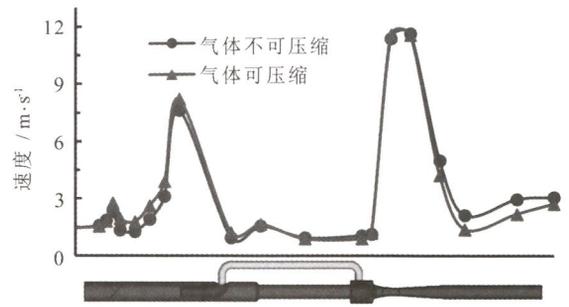


图3 气体可压缩和不可压缩两种情况下的流速对比  
Fig.3 Gas velocity comparison in both compressible and incompressible cases

表1 入口工况

Table 1. Inlet conditions

工况	入口流量/(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	入口气体体积份数/(%)
不同入口含气量	20	10
		30
		40
		50
		60
不同入口流量	10	50
	20	
	30	
	40	

## 2 模拟结果

### 2.1 不同入口含气量

设定入口流量20 m<sup>3</sup>/h,研究当入口气体体积份数分别为10%、30%、40%、50%、60%和70%情况时的管内气相分布情况。

图4给出了不同入口气相含率时气相在管输方向的剖面、取气管入口(截面A-A)以及泵吸入口(截面B-B)处的体积含率分布。气液两相经导流片起旋后,由于离心作用,密度较大的液相向油管管壁集中,而密度相对较小的气相向油管轴线位置集中形成气芯。随着入口气体体积份数的增加,截面A-A处的气芯逐渐增大。经取气管将气芯引出后,截面B-B油管内的气相含率显著下降。当入口气体体积份数在50%以下时,位于取气管与泵吸入口之间的油管管道内的气相含率分布大致相同,气体体积份数都在30%以下,同时由于取气管的非对称布置所致油管内有少量涡流,导致截面B-B油管内有少量气核出现。当入口气体体积份数达到60%时,气液分离效果较入口气体体积份数在50%以下时稍差,涡流区域明显增多,但大部分区域的气相体积含率仍在30%以下。而当入口气体体积份数达到70%时,油管内气相涡流更为严重,涡流区域气相体积

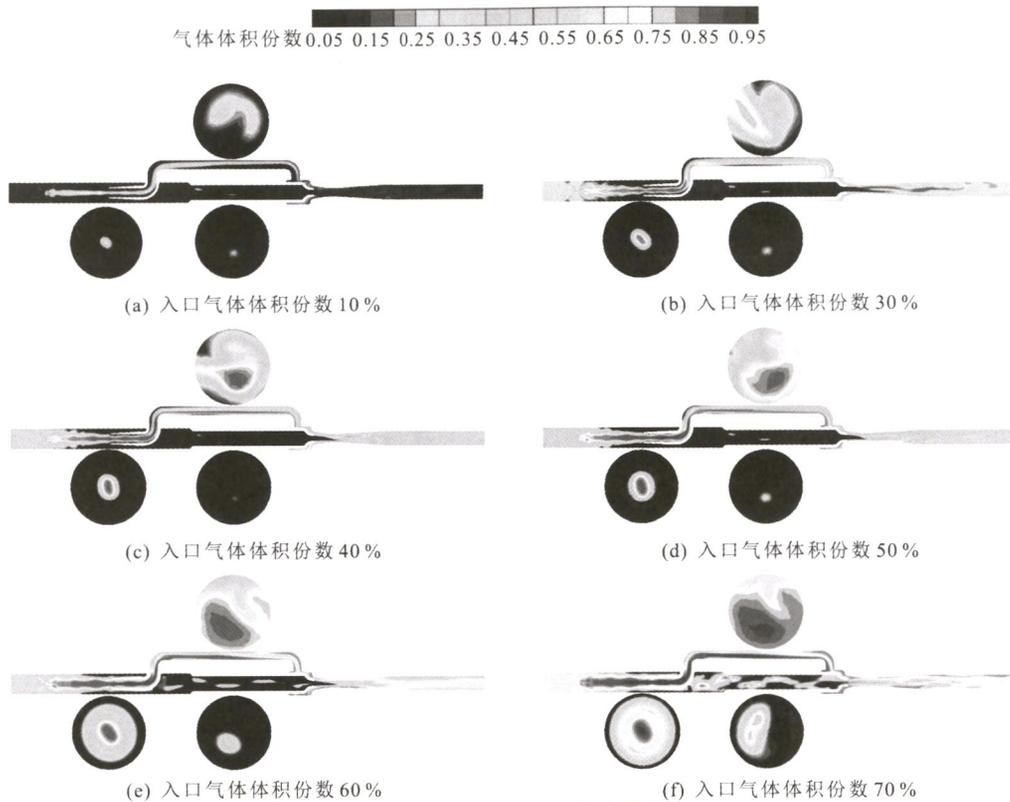


图4 不同入口气体含量下管内气相分布

Fig.4 Gas distributions at different inlet gas volume fractions

含率大部分在50%左右, 部分最大值可达85%。本文中并未考虑电潜泵对吸入口气相分布的影响, 若将之考虑在内, 则可认为所设计的高含气井下气液混合输送结构能够适用于气体含量70%的油井。

## 2.2 不同入口流量

设定入口气体体积分数为50%, 研究当入口流量分别为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的管内气相分布情况。

不同入口流量下气相在管输方向、截面A-A及截面BB处的分布云图如图5所示。由图中可知, 流体流动速度逐渐增大, 经导流片起旋后所产生的离心力也更大, 气液分离的效果亦更为理想, 气芯更为明显。在入口流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 由于入口流量较小, 导致流体经导流片后起旋效果不佳, 无法产生足够的离心力对气液进行分离, 致使该工况下可以产生气芯, 但气液分离效果较其他几种工况稍差, 气芯由取气管引出后仍有部分气体残余, 不过从图中可得, 此时电潜泵机吸入口(截面B-B)处油管内的气体体积份数大部分仍在30%以下。当入口流量超过 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 经取气管将气芯引出后的油管中的气相含率很小, 几乎可以忽略。与不同入口气体含率时相似, 电潜泵机吸入口(截面B-B)处取气管内的气相随着流量的增大, 其含率逐渐增大。

## 2.3 不同工况下电潜泵吸入口(截面B-B)处压力和速度的变化

对于不同入口流量和不同入口气体含量的工况, 分别提取了电潜泵吸入口(截面B-B)处油管内气相含量的最大值及取气管内气相含量和速度的最大值, 并且将其整理成了曲线图(图6和图7)。

当固定入口流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 随着入口气体体积份数的增加, 取气管内的气相含量也逐渐增加。当入口气体体积份数达到40%以后, 取气管内的气相含量趋于稳定, 而油管内的气相含量则基本呈线性趋势逐渐增大, 入口气体体积份数40%为一拐点。这是由于射流泵存在一定的引射比, 由图6中取气管内的速度曲线变化可以看出, 当入口气体体积份数超过40%后, 取气管内的速度曲线变化不大, 基本趋于稳定, 同时射流泵达到最大引射比。

当固定入口气体体积份数50%时, 随着入口流量的增加, 流体流速增大, 气液分离效果亦逐渐变佳。从曲线变化可以看出, 取气管内的气相含量在不同流速下的变化基本趋于稳定, 而取气管内的流速则逐渐增加。虽然图5中的云图中显示 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时较其他工况分离效果较差, 但如图7的曲线所示, 电潜泵泵吸入口处油管内的气体体积份数的最大值为34.13%, 若考虑泵组的影响, 则气相体积份数可降到30%以下, 即本文所介绍的结构能够适用 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的工况, 可以起到良好的气液分离效果。

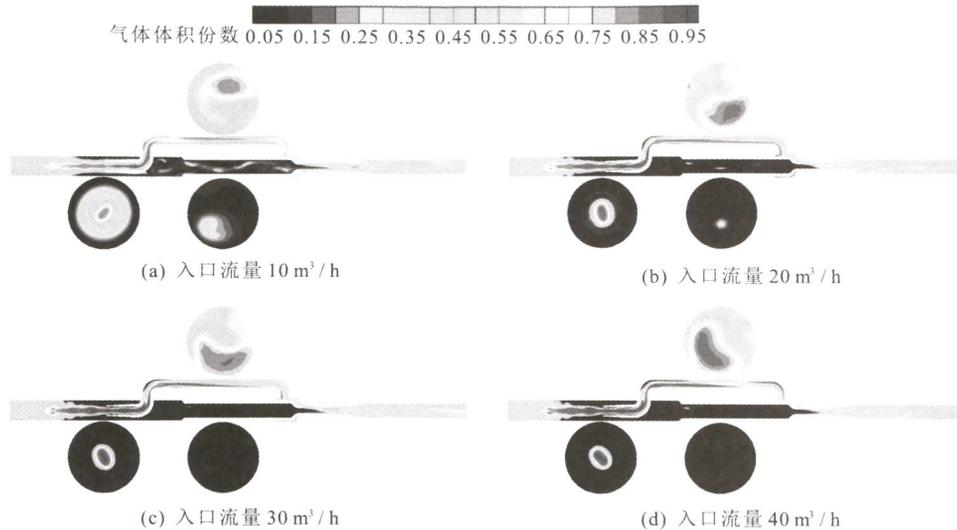


图5 不同入口流量下的气相分布

Fig.5 Gas distributions at different inlet flow rates

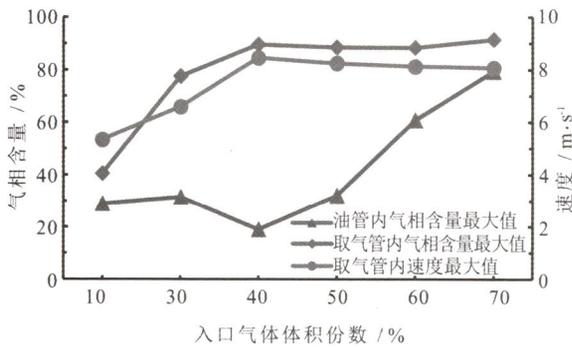


图6 不同入口气体含量下, 截面B-B处的气体含率和速度最大值

Fig.6 The maximum of gas volume fractions and velocities at section B-B with different inlet gas volume fraction

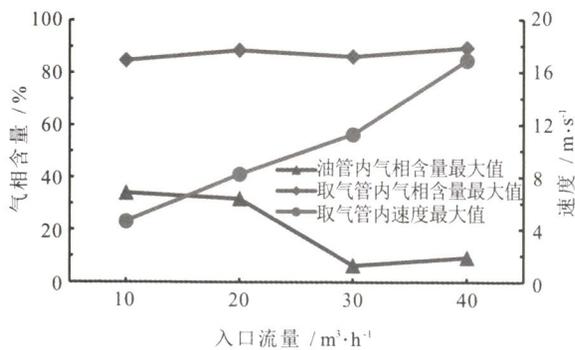


图7 不同入口流量下, 截面B-B处的气体含量和速度最大值

Fig.7 The maximum of gas volume fractions and velocities at section B-B with different inlet flow rates

### 3 结论

本文介绍了一种高含气井下气液混合输送技术, 并建立了其数值模拟模型, 同时对该模型予以计算分析, 模拟了管内气液两相在不同入口含气量

和入口流量下的变化规律, 得出了以下主要结论:

(1) 本文所介绍的高含气输送技术能够较好地解决油气开采过程中的高含气井输送问题, 实现了常规电泵在高气液比油井中的应用, 拓宽了常规电泵在高含气量油井井况中的应用范围。

(2) 经过对比分析发现, 对于不同入口气体含量的工况, 由于射流泵的引射比影响, 入口气体体积含量40%是一拐点, 当入口气体含量超过40%时, 引管内的气相含量以及流速基本达到一定值。

(3) 对于不同入口流量, 随着流量的增加, 气液分离效果亦逐渐变佳, 取管内的气相含量基本稳定在一定的范围, 而取管内的流速则随着流量的增加而增大。

### 参 考 文 献:

[1] 张白茹, 颜廷俊, 李杰, 等. 新型高气液比混合器携气机理研究[J]. 石油机械, 2016, 44(9): 52-57.  
ZHANG Bai-ru, YAN Ting-jun, LI Jie, et al. Theoretical research on gas holding of a new kind mixer with high gas-liquid ratio[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(9): 52-57.

[2] 赵焕卿, 李增亮, 孙浩玉. 井下旋流油气分离器流场数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(4): 94-97.  
ZHAO Huan-qing, LI Zeng-liang, SUN Hao-yu. Numerical simulation of flow field in downhole hydro cyclone oil-gas separator[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(4): 94-97.

[3] 王青华, 刘永辉, 张楠, 等. 电潜泵用两级涡流气液分离器串联数值模拟研究[J]. 辽宁石油化工大学学

- 报, 2018, 38(1): 1-4.
- WANG Qing-hua, LIU Yong-hui, ZHANAG Nan, et al. Numerical simulation study of two-stage series vortex gas-liquid separator for electric submersible pump[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2018, 38(1): 1-4.
- [4] 刘永辉, 史智慧, 王青华, 等. 潜油电泵井下气液分离器数值模拟[J]. 钻采工艺, 2016, 39(5): 48-51.
- LIU Yong-hui, SHI Zhi-hui, WANG Qing-hua, et al. Numerical simulation of downhole gas liquid separator of ESP[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5): 48-51.
- [5] CAI B W, WANG J J, SUN L C, et al. Experimental study and numerical optimization on a vane-type separator for bubble separation in TMSR[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 74(Supplement C): 1-13.
- [6] 饶永超, 梁俊, 王树立, 等. 以叶轮起旋的气液两相螺旋流摩擦阻力特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2017, 32(1): 88-95.
- RAO Yong-chao, LIANG Jun, WANG Shu-li, et al. Experimental study on the frictional resistance of gas-liquid two-phase spiral flow generated by vane[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(1): 88-95.
- [7] 王树立, 饶永超, 武玉宪, 等. 以纽带起旋的气液螺旋流实验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(1): 105-110.
- WANG Shu-li, RAO Yong-chao, WU Yu-xian, et al. Experimental study on gas-liquid spiral flow generated by twist tape[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1): 105-110.
- [8] LIU S, ZHANG D, YANG L, et al. Breakup and coalescence regularity of non-dilute oil drops in a vane-type swirling flow field[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 129(Supplement C): 35-54.
- [9] KIM M I, KIM O S, LEE D H, et al. Numerical and experimental investigations of gas-liquid dispersion in an ejector[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(24): 7133-7139.
- [10] NEWTON C H, BEHNIA M. Numerical calculation of turbulent stratified gas-liquid pipe flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(2): 327-337.