

# T 型分岔管道内气液两相的流动规律和分离特性

吴奇霖<sup>1</sup>, 张健<sup>2</sup>, 刘硕<sup>2</sup>, 侯林彤<sup>2</sup>, 王黎松<sup>2</sup>, 许晶禹<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳, 518067; 2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100190;  
E-mail: xujingyu@imech.ac.cn)

**摘要:** 气-液两相混合液在 T 型分岔管道内流动时, 会产生流量、相含率和相分布重新分配的现象, 通过合理的流动参数控制, 可实现气-液两相的分离, 应用于油气资源开采等领域。采用数值模拟, 对 T 型管道气-液两相的流动规律和分离特性进行研究。通过实验测试结果的对比验证, 相比较于 Euler 模型, Mixture 多相流模型具有更高的计算速度和精度。因此, 后续研究中均采用 Mixture 多相流模型进行, 且综合考虑气-液混合液的流速、分散相粒径等流动参数, 以及分流比等操作参数对 T 型管道内两相流动规律和分离效率进行分析。结果表明, 对于结构参数固定的 T 型管道, 具有极限的混合流速, 随着 T 型管入口混合液流速的增加, 上出口的体积含液率和下出口的体积含气率均逐渐增加; 随着分散相气泡直径的增加, T 型管内气-液两相的分离越来越差; T 型分岔管路在应用于气-液两相分离时, 需根据分离后气相和液相的指标要求, 调节至合适的分流比。

**关键词:** T 型管; 气-液两相流; 两相流模拟; 气-液分离

## 1 引言

在石油工业中, 利用管路系统输送油、气资源是当代能源运输最主要的方式之一。由主管道和分支管道相交构成的分岔管路是油气输送管网系统的重要组成部分, 根据主管道和分支管道之间夹角的不同, 可分为 Y 形分岔管路和 T 形分岔管路。当多相介质(如原油和水、天然气和凝析液或者油气水三相混合物)通过这些分岔管路时, 在主管道下游和分支管道内不仅会产生流量分配不均匀的现象, 而且各管路内的相含率和相分布等也会重新分配, 有学者提出利用这种相分配不均现象可达到多相分离的目的。由单个或多个分岔管路组成的管式分离器, 具有结构简单、体积小、质量小、压降损失小等优点, 特别适用于对设备体积和质量有严格要求的海洋平台。

目前, 对 T 型分支管路道分离技术的研究主要分为 3 个方向: 第一个方向是以实验研

究为主,通过大量的实验结果来总结实验规律或者通过分析拟合实验数据得到经验关系式,其中实验规律主要包括结构参数和操作参数对相分离结果的影响,这个方向是目前 T 型分支管路的主要研究方向;第二个方向是在对流动规律有一定了解的基础上,通过适当的理论分析以及合理的假设来建立表观模型,用于预测相分离结果或者压降等物理参数;第三个方向是数值模拟研究,这方面的研究在 T 型分支管路研究初期出现的较少,近几年随着数值模拟理论以及计算机硬件的发展,同时商业软件也越来越普及,通过数值模拟对 T 型分支管路内流动规律的研究逐渐增多。对于 T 型分岔管道内的两相流动规律,国内外开展了大量的研究工作,但是由于两相流动的复杂性,相间的动量和质量交换频繁,仍没有建立起完善的两相流体运动模型,限制了其在工业等生产中的应用。本文采用已有的多相流模型,对 T 型管道内气液两相的流动规律和分离特性进行系统的分析,验证已有模型的适应性和精度,并给出了实际应用中多相流模型的局限性。

## 2 数值模拟方法

多相流数值模拟方法主要分为欧拉-拉格朗日和欧拉-欧拉两类。在欧拉-拉格朗日方法中,流体相被处理为连续相,通过直接求解时均 N-S 方程得到速度场和压力场,而离散相是通过计算流场中大量粒子的运动得到的,该模型的基本假设是:离散相(第二相)体积分数很低,通常低于 10%,可忽略其对连续相的影响,而当第二相体积分数大于 10%,一般采用欧拉-欧拉方法。

### 2.1 多相流模型

常用的欧拉-欧拉多相流模型,包括 VOF、Euler 和 Mixture 模型。VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面追踪方法,通过求解各相的动量方程,处理穿过区域的体积含率来模拟不能混合的流体,常应用于层流、自由面流动等有明显界面的流动。Euler 模型可以模拟多相流动及相间的相互作用,处理中混合液中至少有一相被指定为颗粒相,分别求解每一相的控制方程,具有较高的计算精度,但对于复杂的多相流动,解会受到收敛性的限制。Mixture 模型是一种简化的多相流模型,忽略相间相互作用,求解混合相控制方程,以及第二相的体积分数和相对速度方程,可用于模拟各相具有不同速度的流动。

对 T 型分岔管路内的气-液两相流动,初始设置中,气-液两相以均匀混合状态存在,但随着流动时间的进行,分散相气泡产生聚并,并在重力作用下聚集形成气-液分层流动,期间存在气-液两相间的穿插,以及界面的消失和再形成等过程。因此,初步选用 Euler 和 Mixture 多相流模型对 T 型管内的气-液两相流动进行分析。

### 2.2 T 型分岔管道数值模型

研究中, T 型分岔管道的结构如图 1 所示,其中下水平分支管路的内径为 100mm, 倾斜立管和上水平分支管路的内径  $d$  均为 50mm, 倾斜立管的角度  $\alpha$  为  $60^\circ$ 、间距  $L$  为 400mm、

垂直高度  $H$  为 250mm, 倾斜立管的数量为 5 根, T 型分岔管路整体的长度为 2400mm。图 2 给出了建立的三维模型, 以及 T 型分岔管路整体网格的划分情况

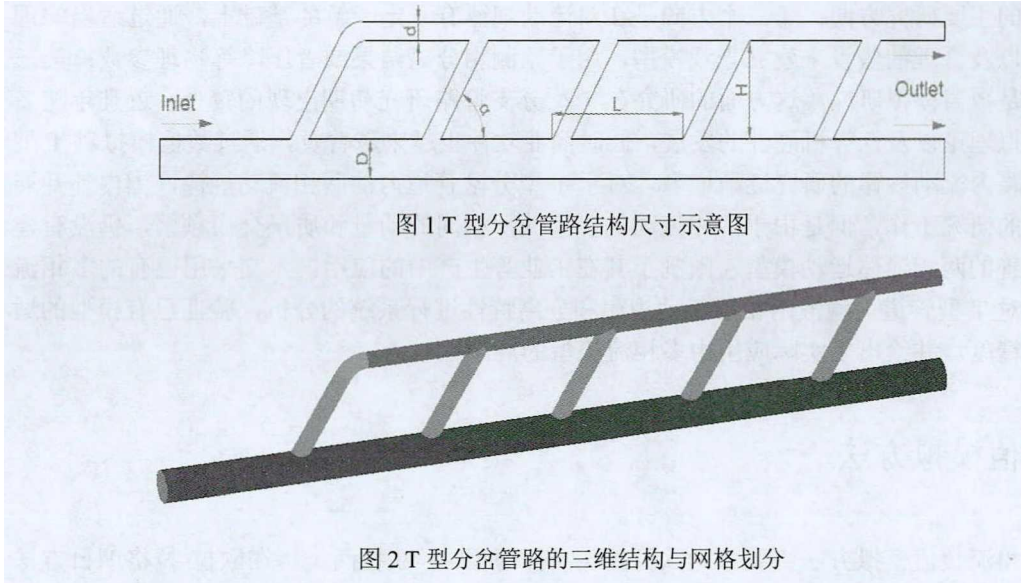


图 1 T 型分岔管路结构尺寸示意图

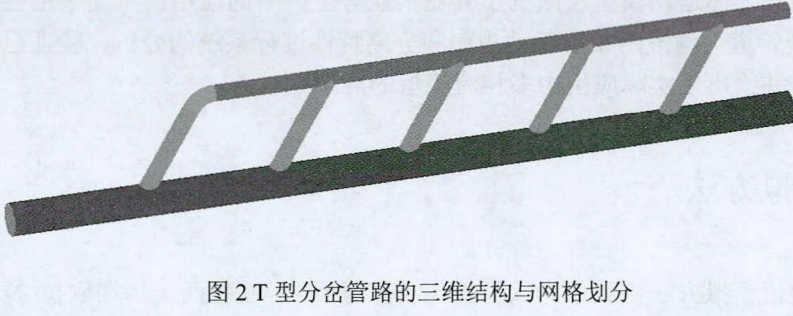


图 2 T 型分岔管路的三维结构与网格划分

### 2.3 多相流模型验证和分析

本文分别选用 Euler 和 Mixture 多相流模型, 对 T 型分岔管路内气液两相的流动规律和分离特性进行分析。同时, 采用实验验证的方法, 对两种多相流模型数值计算得到的结果进行对比, 筛选给出更适应于 T 型分岔管路内气液两相流动模拟的数值模型。数值计算中气相为空气, 液相选用与实验测试的相同的原油, 各相的物性参数如表 1 所示。

表 1 气液各相的物性参数 ( $T=30^{\circ}\text{C}$ ,  $P=0.1\text{MPa}$ )

	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	黏度 ( $\text{M}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	表面张力 ( $\text{N}/\text{m}$ )
空气	1.225	0.018	--
原油	920.0	126.0	0.032

多相流模型对比分析中, 针对 T 型分岔管道内气-液两相的流动情况, 设置相同的流动参数, 其中: 入口混合液流速  $v_m$  为 1.0m/s; 入口体积含气率  $\beta$  为 0.30; 分散相气体的粒径  $d_d$  为 0.5mm; 上出口的分流比  $\lambda$  设置为 0.3。分流比的定义为:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{up}}}{Q_{\text{in}}} \quad (14)$$

式中,  $Q_{\text{up}}$  为 T 型管上出口的流量;  $Q_{\text{in}}$  为 T 型管入口的流量。

图 3 给出了数值计算中, 分别采用 Mixture 模型和 Euler 模型得到的 T 型分岔管道内气液两相的相分布情况。从图中可以看出, 采用 Mixture 和 Euler 多相流模型, 均能够对 T 型管道内气-液两相的流动分离情况进行较精确的分析。但是, 通过对比可以得出, 采用 Euler 多相流模型计算得到的结果, 气-液两相分离的速度更快, 且分离的效果更好。图 4 给出了采用上述两种模型, 在同样工况下, 计算得到 T 型分岔管路上出口和下出口的含气率, 其

中图 4 (a) 和 (c) 为采用 Mixtur 多相流模型计算得到的上出口和下出口的含气率, 分别为 0.88 和 0.04; 图 4 (b) 和 (d) 为采用 Euler 多相流模型计算得到的上出口和下出口的含气率, 分别为 0.91 和 0.02。为了验证 Mixtur 和 Euler 多相流模型计算得到的结果, 本文采用实验数据的对比进行分析。从原油开采现场安装的 T 型分岔管道式分离装置对应的上出口和下出口流动物质取样的结果可以看出, 上出口中含有一定量的油沫, 下出口中含有一定量的气泡, 因此, 相比较于 Euler 模型, Mixture 多相流模型计算的结果更接近于实验值。

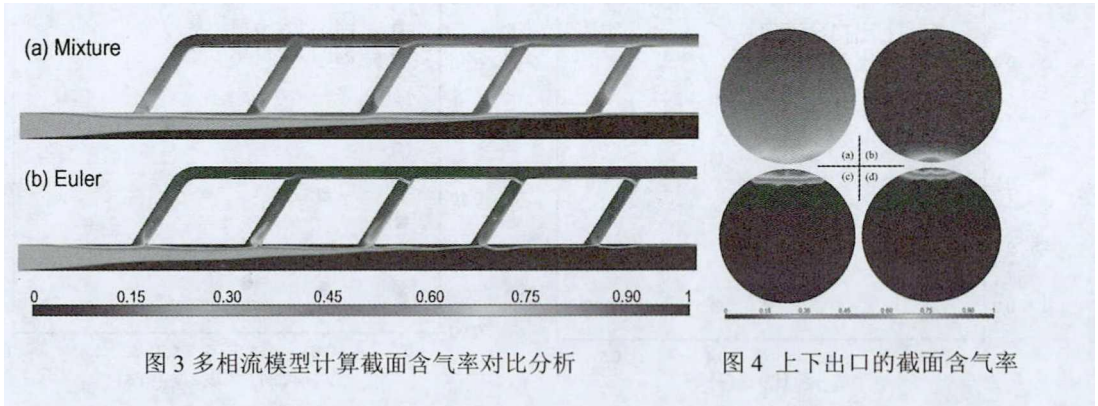


图 3 多相流模型计算截面含气率对比分析

图 4 上下出口的截面含气率

### 3 结果讨论和分析

#### 3.1 分流比对气-液相分布和分离特性的影响

T 型管应用于气-液两相的分离时, 分流比是其可操作的参数之一。通过改变出口的流量来控制各个出口的含气率, 实现气-液两相的最佳分离。研究中, 选取入口混合流速为 1.0m/s、体积含气率为 0.3 的来流工况, 调节 T 型管的分流比, 计算分析气相出口和液相出口的体积相含率情况。

图 5 给出了 T 型管不同分流比操作工况下, 上部气相出口的体积含液率与下部液相出口的体积含气率的变化规律。从图中可以看出, 随着上出口分流比的增大, 下出口的体积含气率逐渐减小, 上出口的体积含液率逐渐增大, 即随着上出口分流比的增加, 分离出来的液相中含气率逐渐减低, 但气相中的体积含液率逐渐增加。因此, T 型分岔管路在应用于气液两相分离时, 需根据分离后气相和液相的指标要求, 调节至合适的分流比。

#### 3.2 混合速度对气-液相分布和分离特性的影响

直观上来讲, T 型管入口的混合液速度直接影响气液两相的分离效果, 流速过快, 气液两相在流动中不能够实现两相的完全分离, 也就是说, T 型管应用于气液两相分离时存在最大的混合速度。

研究中, 设置入口混合液的体积含气率为 0.3, 固定 T 型管上出口的分流比为 0.3, 分

别计算分析入口混合速度分别为 0.6m/s、0.8m/s、1.0m/s、1.2m/s 和 1.5m/s 时，气-液两相的分离情况。图 6 给出了各个不同入口混合液流速条件下，T 型管气相出口和液相出口的体积相含率情况。从图中可以看出，随着 T 型管入口混合液流速的增加，上出口的体积含液率和下出口的体积含气率均逐渐增加，当入口混合速度为 1.5m/s 时，上出口的体积含液率约为 23%，对应的下出口的体积含气率约为 7.5%，气-液两相的分离效果较差。因此，T 型管应用于气-液两相分离中，入口的混合液速度将是结构设计的主要因素。

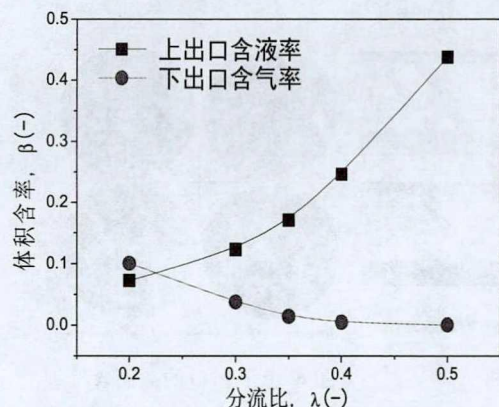


图 5 T 型管的分流比对气液分离的影响

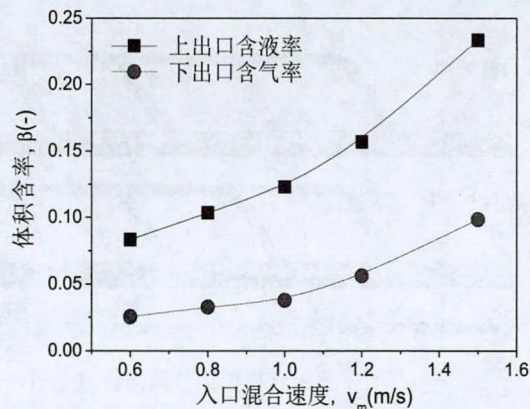


图 6 T 型管入口混合速度对分离效果的影响

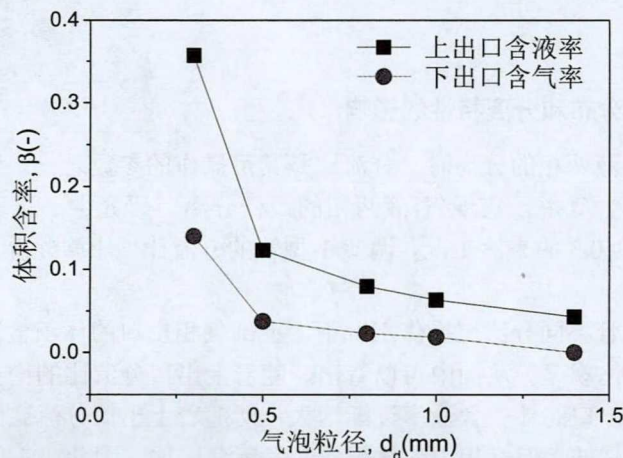


图 7 来液气泡粒径对气液两相分离特性的影响

### 3.3 分散相粒径对气-液相分布和分离特性的影响

T 型分岔管路实现对气-液两相的分离，主要是基于重力条件下，气-液两相流动中的动态沉降理论来实现，而气泡粒径的大小将会影响气泡的上浮速度，进而影响气-液两相的分离。因此，研究中将固定 T 型管的来液条件和分流比等参数，对来液不同气泡粒径条件下 T 型管内气-液两相的分离效果进行分析。计算分析中，T 型管入口混合流速为 1.0m/s、体

积含气率为 0.3，上出口的分流比为 0.3，设置的气泡粒径分别为 0.3mm、0.5mm、0.8mm、1.0mm 和 1.4mm 五种。

图 7 给出了不同气泡直径，T 型管内气-液两相分离的规律。从图中可以看出，随着来液中气相粒径的逐渐减小，T 型管道上出口的体积含液率和下出口的体积含气率均逐渐增加，即随着分散相气泡直径的增加，T 型管内气-液两相的分离越来越差，当入口气泡直径为 0.3mm，此时经 T 型管分离后，上出口的体积含液率约为 36%，下出口的体积含气率约为 14%，气-液两相的分离效果较差。

## 4 结论

本文对 T 型管道内气-液两相的流动规律和分离特性进行研究。通过实验测试结果的对比如验证，相比较于 Euler 模型，Mixture 多相流模型具有更高的计算速度和精度。研究中采用 Mixture 多相流模型进行，且综合考虑气-液混合液的流速、含气率、分散相粒径等流动参数，以及分流比等操作参数，对 T 型管道内两相流动规律和分离效率进行分析。结果表明，对于结构参数固定的 T 型分岔管道，具有极限的混合流速，随着 T 型管入口混合液流速的增加，上出口的体积含液率和下出口的体积含气率均逐渐增加，T 型管应用于气液两相分离中，入口的混合液速度将是结构设计的主要因素，同时，随着分散相气泡直径的增加，T 型管内气液两相的分离越来越差。另一方面，T 型分岔管路在应用于气液两相的分离时，需根据分离后气相和液相的指标要求，调节至合适的分流比。

## 参考文献

- 1 Buel J R, Soliman H M, Sims G E. Two-phase pressure drop and phase distribution of a horizontal tee junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, 24: 775-792.
- 2 Pandey S, Gupta A, Chakrabarti D P, et al. Liquid-liquid two phase flow through a horizontal T-junction[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2006, 84(A10): 895-904.
- 3 Azzopardi B J, Colman D A, Nicholson D. Plant application of a T junction as a partial phase separator[J]. *Trans IChemE*, 2002, 80(A): 87-96.
- 4 Wren E, Azzopardi B J. The phase separation capabilities of two T-junctions placed in series[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2004, 82(A3): 64-371.
- 5 王立洋, 郭军, 张军, 等. T 型多分岔管路中的油水两相流动实验研究[C], 第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议文集. 北京: 海洋出版社, 2008: 582-588.

## Investigation on the gas-liquid two-phase separation phenomenon in the T-junction

WU Qi-ling<sup>1</sup>, ZAHNG Jian<sup>2</sup>, LIU Shuo<sup>2</sup>, HOU Lin-tong<sup>2</sup>, WANG Li-song<sup>2</sup>, XU Jing-yu<sup>2</sup>

(1. CNOOC China Ltd. Shenzhen, Shenzhen, 518067, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China. Email: xujingyu@imech.ac.cn)

**Abstract:** The redistributions of the flow rate and phase volume fraction will be happened when the gas-liquid two-phase flow through T-junction. So it can be used as a gas-liquid two-phase separator in the gas and petroleum industry. In this work, the gas-liquid two-phase separation characteristics in multiple inclined T-junction were investigated by through a series of numerical simulations in order to obtain an applicative T-junction separator. The influences of inlet flow velocity, inlet bubble diameter and the split ratio of two outlets are researched by using the Mixture model which is better for this study. In results, there is a best flow split ratio when the gas-liquid two-phase separation increased to the best consequence. And, the best flow split ratio is different for the different separation demands of gas or liquid. The separation efficiency keeps decreasing as the increased inlet velocity, so we should reduce the inlet mixture velocity to improve the gas-liquid two-phase separation. Moreover, the separation efficiency keeps increasing as the increased inlet bubble diameter.

**Key words:** T-junction, gas-liquid two-phase flow, Two-phase flow simulation, gas-liquid separation