

# 管道式气液旋流器分离特性研究

刘硕<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>, 王黎松<sup>1,2</sup>, 侯林彤<sup>1,2</sup>, 许晶禹<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 100190, 北京

2. 中国科学院大学工程科学学院, 100049, 北京, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

**摘要:** 随着油田采出液高含水逐年升高, 管道式气液分离设备越发凸显出优势。本文结合实验和数值模拟对气液在管道式气液旋流器中的相分布和分离性能进行了研究。通过研究发现, 管式分离设备可以在较大的分流比范围内保持接近 100% 的分离效率; 出口和入口液相雷诺数比值与分流比呈现近似线性关系。在实验研究的基础上对管式分离设备进行了数值模拟验证, 并通过数值模拟揭示了不同位置气芯形状及相分布规律等。这些成果为管道式导流片型分离设备的设计和應用提供了重要参考。

**关键词:** 气液流动; 管道式分离; 流动特性; 分离效率

## 1 引言

目前, 油田传统的采出液处理工艺分为三个步骤: 第一级气液分离脱气; 第二级通过重力沉降进行油水预分离得到含水率低于 30% 的原油和污水; 第三级含水低于 30% 的原油进行高压静电脱水, 而含油低于 100mg/L 的污水进入水处理系统进行深度净化。重力沉降分离系统由大型沉降罐和相应的管道、阀门、控制系统等组成, 占地面积大、处理效果不高、处理深度不够。海上油气生产中, 如果能够减小油气水处理装备的体积和质量, 将极大节省经济成本。为此, 海上油田一直寻求重量轻、占地面积小的分离设备作为替代产品, 以适应海洋平台的空间和重量要求, 进而实现海上油气、特别是深海油气的经济开采<sup>[1]</sup>。

为了促进管道式旋流分离技术(特别是导流片型旋流分离技术)在油田的应用, 促进中后期高含水油田的高效开发, 本文依据气泡及气相在旋流场中行为特性的研究成果, 设计了导流片型管道式气液分离设备, 并采用数值模拟的方式对分离效率进行预测, 详细研究不同入口条件和分流比下分离设备的分离性能, 探究各个操作参数间的关系, 为实际应用提供参考。

## 2 实验装置及流程

本文实验工作在中国科学院力学研究所的多相流实验平台完成。该平台可实现气-液-液管流的实验模拟。前期,通过对气泡/气芯在导流片型旋流场中行为特性的研究,掌握了泡状流中气泡的粒径分布及旋流场中气相分布规律,同时根据气液两相旋流场旋流强度规律确定了气液分离设备中相收集装置的放置区间,在此基础上设计了导流片型气液分离设备,如图1所示<sup>[2,3]</sup>。管道式气液分离设备由主管道、导流片启旋装置和相收集装置三部分组成,旋流场中相收集设备布置在导流片后12D处,通过垂直向下的管道引出<sup>[2]</sup>。导流片型分离设备在使用过程中,涉及到压力、分流比、流量等多种操作参数,为了简化操作,提高分离效率,需要详细研究不同操作参数之间的关系。

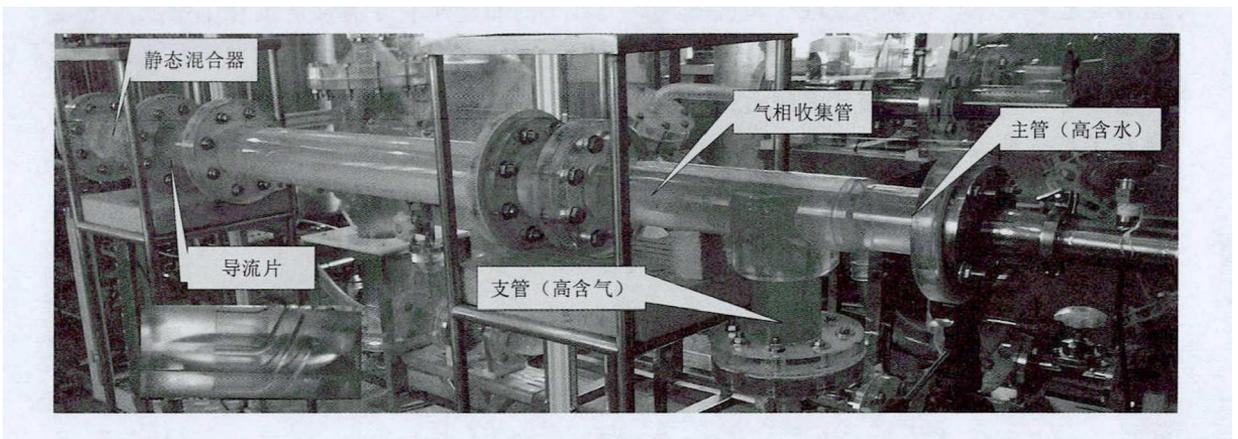


图 1 实验流程照片 (导流片型气液分离装置分离性能研究)

## 3 结果和讨论

### 3.1 控制参数与分离效率

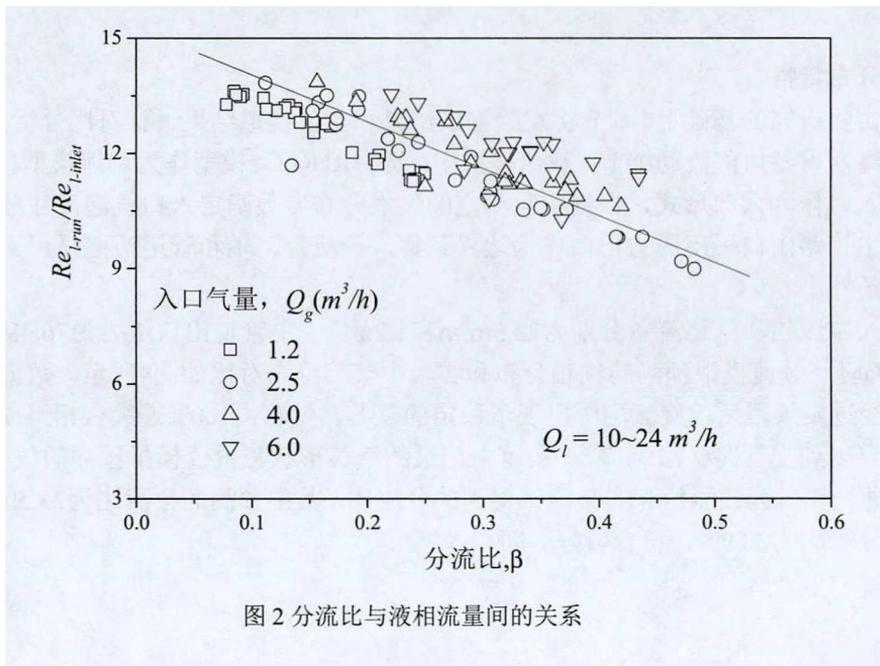
对入口和主流口(主管道出液口)流量进行无量纲化,得到入口液相雷诺数 $Re_{l-inlet}$ 和主流口液相雷诺数 $Re_{l-run}$ ,绘制出 $Re_{l-run}/Re_{l-inlet}$ 随分流比的变化关系,如图2所示。这里 $Re_{l-inlet}$ 定义如式(1)所示, $Re_{l-run}$ 定义如式(2)所示。式中 $w$ 角标代表液相参数, $Q_{l-inlet}$ 和 $Q_{l-run}$ 分别为入口和主流口液相流量, $D_{inlet}$ 和 $D_{run}$ 分别为入口和主流口直径。图中入口气量包含了 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、 $4.0\text{m}^3/\text{h}$ 和 $6.0\text{m}^3/\text{h}$ 四种工况,入口液量包含了 $13.4\text{m}^3/\text{h}$ 、 $16.2\text{m}^3/\text{h}$ 、 $20.2\text{m}^3/\text{h}$ 和 $23.2\text{m}^3/\text{h}$ 四种工况,每种气液组合下有多个分流比操作工况。将所有实验工况测得的数据汇总到一起,可以看到在直角坐标系下,各个工况对应的点较为集中,成线性带状分布。在实验数据基础上拟合直线,实验数据点均匀分布在直线两侧。可以看到 $Re_{l-run}/Re_{l-inlet}$ 与分

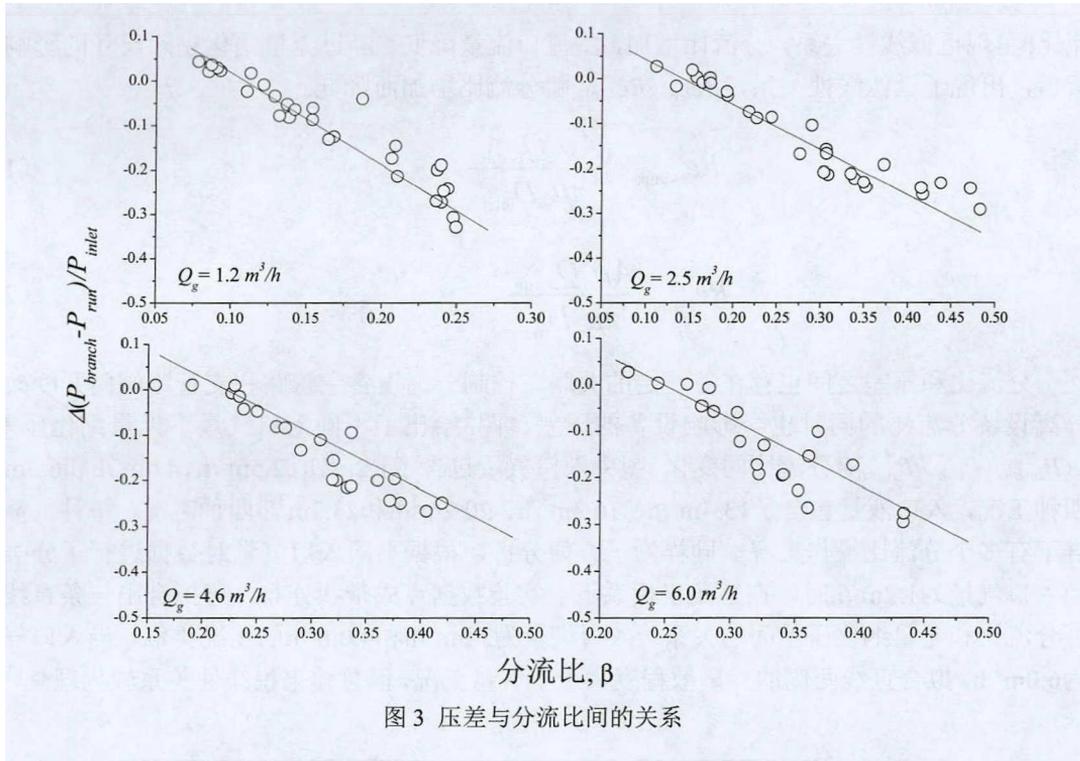
流比 $\beta$ 呈现近似线性关系,分流比增加,主流口流量降低,经过无量纲化剔除尺寸的影响因素后,出现了近似线性关系, $Re_{l-run}/Re_{l-inlet}$ 随分流比增加而降低。

$$Re_{l-inlet} = \frac{4\rho_w Q_{l-inlet}}{\pi\mu_w D_{inlet}} \quad (1)$$

$$Re_{l-run} = \frac{4\rho_w Q_{l-run}}{\pi\mu_w D_{run}} \quad (2)$$

分流比和压差之间也存在着一定的关联,控制分离设备主管路和支管路阀门开度改变分离设备分流比的同时也会影响设备的压差。图3给出了不同入口气量下无量纲化压差 $\Delta(P_{branch}-P_{run})/P_{inlet}$ 随分流比的变化。图中入口气量包含了 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、 $4.0\text{m}^3/\text{h}$ 和 $6.0\text{m}^3/\text{h}$ 四种工况,入口液量包含了 $13.4\text{m}^3/\text{h}$ 、 $16.2\text{m}^3/\text{h}$ 、 $20.2\text{m}^3/\text{h}$ 和 $23.2\text{m}^3/\text{h}$ 四种工况,每种气液组合下有多个分流比操作工况。同样为了方便分析,根据不同入口气量对数据进行了分类。当入口气量为 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ 时,在直角坐标系下,实验数据点成带状分布,可拟合出一条直线表征分流比和无量纲化压差间的关系。入口气量为 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 和 $4.0\text{m}^3/\text{h}$ 的工况类似。当入口气量为 $6.0\text{m}^3/\text{h}$ ,拟合直线两侧的点离散程度大于小气量工况,但总体来说线性关系较为理想<sup>[4,5]</sup>。

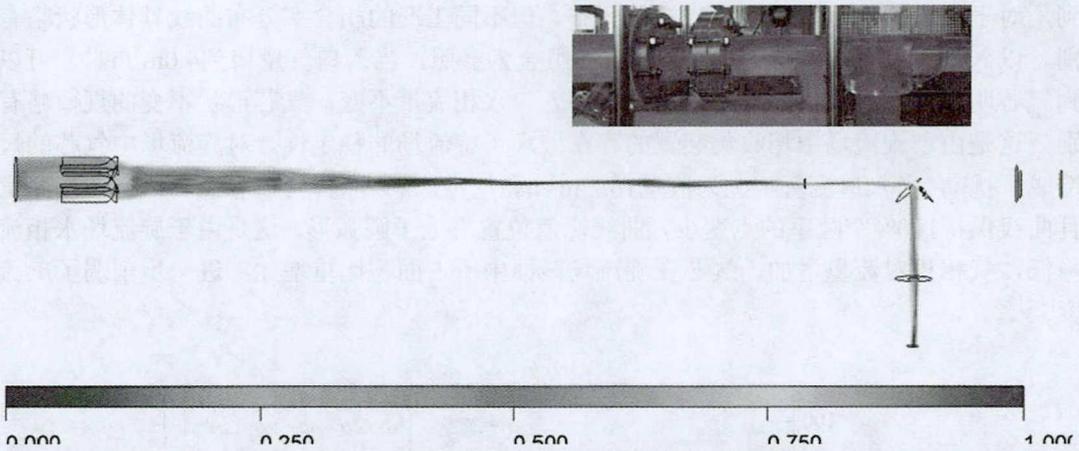




### 3.2 相分布特性

在实验研究的基础上,本节将实验测试结果和数值模拟结果进行对比分析和相互验证,得出分离器设备内部流动细节。数值模拟中,选择RNG k- $\epsilon$ 模型作为湍流模型。边界条件选择速度入口作为入口形式,根据实验测定的气泡分布参数确定入口气泡尺寸分布,支管路出口和主管路出口采用压力出口作为边界条件,导流片、轴和管道边壁采用无滑移固定壁面边界条件。

当入口液相和气相流量分别为 $23.3\text{m}^3/\text{h}$ 和 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ,主管道出口压力为 $76.48\text{kPa}$ ,压差为 $13.06\text{kPa}$ 时,数值模拟预测的气芯分布和实验中气芯分布对比如图4所示。数值模拟中可以看到,经过发展段后,旋流场中出现了稳定的气芯,气芯由100%连续气相组成,经过相收集装置导出到支管路(溢流口)。实验中记录的气芯形状与数值模拟预测的气芯形状相似。同时,进一步研究预测值和实验测试得到的分流比,其中预测的分流比为23.5%,实验测试得到的分流比为20.9%,符合较好。

图4  $Q_w=23.3\text{m}^3/\text{h}$ 、 $Q_g=1.2\text{m}^3/\text{h}$  数值模拟与实验对照

在确定数值模拟可靠性的基础上，通过数值模拟方式对导流片型气液分离设备上气相收集管中的含率进行了进一步研究（图5）。以导流区入口为坐标零点，三个截面的轴向位置分别为0.8m、1.7m和1.87m。其中，0.8m的位置代表旋流场，1.7m位置代表相收集装置也就是气芯开始进入相收集装置的截面，1.87m为支管纵剖面。当入口流量组合为入口液量 $23.3\text{ m}^3/\text{h}$  和气量 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ 时，可以看到，0.8m的位置已经出现气芯。在1.7m位置，进入相收集装置时，气芯明显缩小，尺寸小于相收集管，证明气相已经完全进入相收集设备。从相收集设备纵剖面可以看到，气相不是一直呈连续相形式存在，这是由于弯头回转半径较小，流速和压力剧烈变化，造成气相不连续，但是对分离效果没有影响。

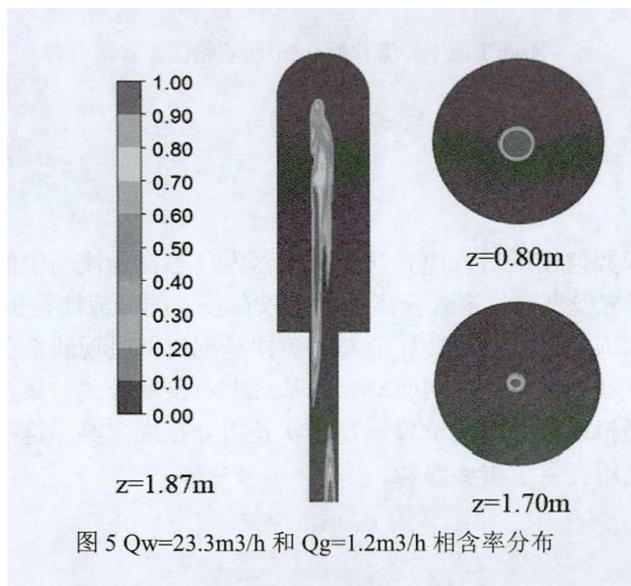
图5  $Q_w=23.3\text{m}^3/\text{h}$  和  $Q_g=1.2\text{m}^3/\text{h}$  相含率分布

图6进一步给出了0.8m位置不同入口流量组合下载面空隙率的径向分布。从图中可以看到,对于所有的工况,曲线均成钟形分布。但不同工况的相含率分布曲线具体形状略有区别。以入口液量 $23.3\text{ m}^3/\text{h}$ 和气量 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$ 组合为参照,当入口气量增到 $4.0\text{ m}^3/\text{h}$ 时,可以看到气芯明显变宽,且曲线坡度变缓。保持入口水相流量不变,气芯形状不变的规律略有区别。这是由于旋流场中相收集装置的存在破坏了旋流场的稳定性,对旋流场中气芯的尺寸造成了扰动。当入口流量工况为液量 $16.2\text{ m}^3/\text{h}$ 和气量 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$ 时,可以看到曲线进一步变宽,且曲线保持100%空隙率的点变少,曲线峰值位置形成了圆弧形。这是由于旋流场水相流量降低,气相相对流量增加,气芯在旋流场截面中所占面积比重增加,进一步削弱了旋流强度<sup>[4,5]</sup>。

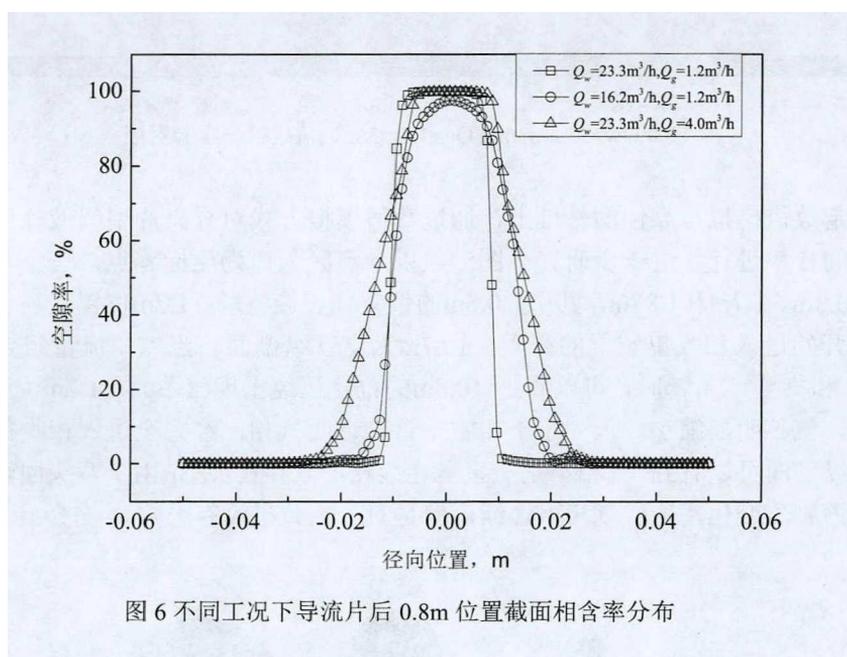


图6 不同工况下导流片后0.8m位置截面相含率分布

#### 4 主要结论

本文结合实验和数值模拟对管道式气液旋流器内气芯在旋流场中的相分布和分离性能进行了研究。通过研究发现,管道式分离设备可以在较大的分流比范围内保持接近100%的分离效率;主流口和入口液相雷诺数比值与分流比呈现近似线性关系;无量纲化后的压差与分流比呈近似线性关系。在实验研究的基础上对整套管式分离设备进行了数值模拟验证,并通过数值模拟揭示了不同位置气芯形状及相分布规律等。这些研究成果为管道式分离设备的设计和应用提供了重要参考。

## 参考文献

- 1 吴应湘,许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展,2015,45:179-216.
- 2 刘硕. 离散相油滴/气泡在旋流场中的行为特性研究[D]. 北京. 中国科学院大学, 2018.
- 3 顾成曦,刘硕,侯林彤,许晶禹. 导流片型旋流场内油滴聚并影响因素研究[J]. 水动力学研究与进展,2020,35(4):420-427.
- 4 Liu S,Yang LL,Zhang D,Xu J J. Separation characteristics of the gas and liquid phases in a vane-type swirling flow field[J]. International Journal of Multiphase Flow,2018,107:131-145.
- 5Liu S,Zhang J,Wang LS,Xu J Y. Separation mechanism and influential factor study on vane-type-associated petroleum gas separator [J]. Separation and Purification Technology,2020,250:117274.

### Research on separation characteristics of pipeline gas-liquid cyclone

LIU Shuo<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG Li-song<sup>1,2</sup>, HOU Lin-tong<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup>Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

Email: xujingyu@imech.ac.cn)

**Abstract:** As the high water content of oilfield produced fluids is increasing year by year, the pipeline gas-liquid separation equipment has become more and more prominent. This work combines experiments and numerical simulations to investigate the phase distribution and separation performance of gas-liquid in a pipeline gas-liquid cyclone. The results show that the separation equipment may be kept close to 100% separation efficiency over a wide range of split ratio; the ratio of the liquid phase Reynolds number at the outlet and inlet and the split ratio show an approximately linear relationship. On the basis of experimental research, the separation behavior was verified by numerical simulation, and the shape of air core and phase distribution law at different positions were revealed through numerical simulation. These results provide an important reference for the design and application of pipeline-type guide vane separation equipment.

**Key words:** Gas-liquid flow; pipeline separation; flow characteristics; separation efficiency