

气液柱型旋流器内分离特性研究

杨乐乐^{1,2}, 张健^{1,2}, 张栋^{1,2}, 许晶禹^{1,2}

(¹中国科学院力学研究所流固耦合实验室, 北京, 100190,

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

摘要:为了更好地将气液柱型旋流器应用于工业现场, 本研究通过实验测试与理论分析相结合的研究手段分析了气液柱型旋流器内的分离特性, 并创造性地提出了压力控制逻辑。通过对气液柱型旋流器内液滴在气相连续流场中的受力分析, 建立了液滴迁移模型, 并通过 Malvern 在线粒度仪测定了入口以及环状液膜萃取器后的液滴粒径分布, 模型预测结果与实验结果基本一致, 验证了理论模型的正确性, 证明该模型能够用于指导气液柱型旋流器的应用设计。

关键词: 气液分离; 旋流; 迁移模型; 压力控制

1 前言

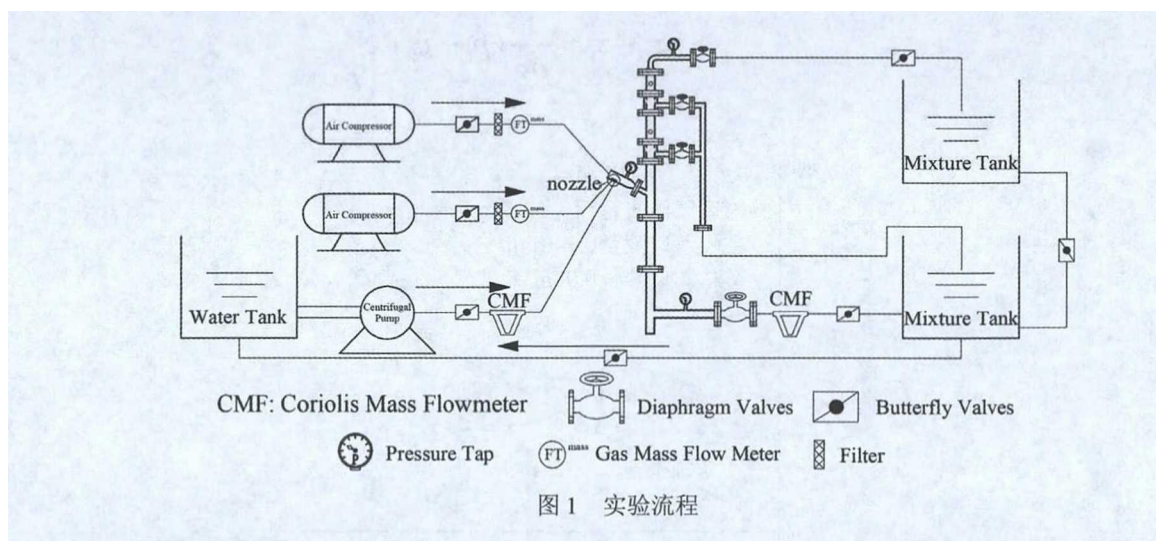
随着油气开采向深海迈进, 相应地带来了深水平台、深海海底及油气井井下气液分离的技术难题, 传统的依靠重力沉降而设计重力式分离器因为存在体积和质量庞大, 分离时间长, 分离效率低等缺点, 已经不能满足应用需求, 急需研制占用面积小、重量轻的分离技术以最大限度降低油气开采成本。其中管道式分离技术是一种有效的手段, 能够在流动过程中实现气液高效、经济、低能耗分离。

对于高含液混合液可使用 T 型多分支管道进行气液分离, 并通过压力控制其分离效果^[1-2], 目前已在海上油田得到了成功应用。对于高含气混合液, 可采用超音速旋流分离器、旋风分离器以及气液柱型旋流器进行离心分离, 但是由于旋流器内部流动特性非常复杂, 分散相的碰撞、团聚和扩散机理受很多参数的影响, 因此难以预测它的分离性能^[3]。而且来液的流量以及气液比变化很快, 而流量阀响应时间一般为 6s, 且常见的气液两相流量计计量精度很低, 很难通过控制流量使分离器处于最佳操作工况。基于这些原因, 目前气液旋流器没有得到广泛的应用。

2 实验系统

本研究选取水和空气作为实验介质, 图 1 为实验流程图, 离心泵提供的高压液体与其

中一台空气压缩机提供的压缩空气在喷嘴处充分混合，向管道内喷射出雾化液滴，另一台空气压缩机提供的压缩空气将雾化液滴快速携带进入气液柱型旋流器实现气液分离。入口的压缩空气经过过滤后由热式气体质量流量计计量流量，入口以及液体出口的液体流量通过科氏质量流量计计量，气体出口以及环状液膜萃取器（AFE）的液体流量通过计时测量体积的方法计量。入口、液体出口以及气体出口的压力通过罗斯蒙特压力变送器测量，测量仪器数据通过 NI 数据采集卡采集。气液柱型旋流器主体直径 50mm，入口直径 25mm，液体出口直径 50mm，气体出口直径 25mm，入口向下倾斜 27°，并与柱型旋流器主体相切，主体高 1986mm，环状液膜萃取器距离入口中心线 410mm，环状液膜萃取器距离入口中心线 305mm。入口以及环状液膜萃取器后的液滴粒径通过 Malvern 在线粒度仪测量，并由 RTSizer 系统实时显示粒径数据。



3 结果和讨论

液位对气液柱型旋流器的分离效果起着至关重要的作用，当液位位于入口下方时，大部分液体会通过液体出口流走，气体出口携液量很少，而当液位位于入口上方时，高速气流会携带大量液体从气体出口流走，严重影响分离效果，因此需要将液位控制在入口下方。传统的液位控制是通过控制液体出口流量来实现的，但是因为存在前言中所提及的若干问题使得液位控制难以达到理想的效果。因压力测量较为容易且测量精度较高，所以本研究提出通过控制上下出口差压对液位实现较为精准地控制。如图 2 所示，随着上下出口差压的增加，液位呈现升高趋势，这可以通过有限大流束的伯努利方程来解释。实验过程中发现，液位保持在入口下方，液体出口上方时，随着上下出口差压的增加，液体出口的液量不会有明显的变化，即 U_1 、 U_2 不变且近似相等，但是 p_1 - p_2 增加，因此 z_2 - z_1 会增加，即液

位升高。当液位升高至入口上方时，随着上下出口差压的增加，液体更易从上出口流走，导致液位开始急剧升高。实际应用中可根据式（2）设定合理的差压控制气液柱型旋流器中的液位，使其取得最佳分离效果。

有限大流束的伯努利方程可表示为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} \quad (1)$$

式中， z_1 为底流口高度， z_2 为液位高度， p_1-p_2 近似为上下出口差压， U_1 为底流口液体流速， U_2 为液面处液体流速。

由 $U_1 \approx U_2$ 推导可得到：

$$z_2 - z_1 = \frac{1}{\rho g} (p_1 - p_2) \quad (2)$$

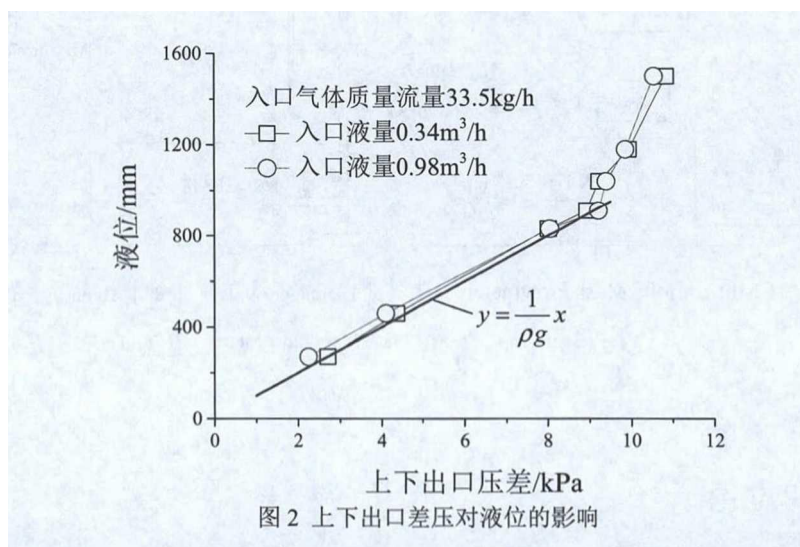


图2 上下出口差压对液位的影响

图3显示了液位对环状液膜萃取器后特征粒径参数的影响，从图3中可以看到，液位保持在入口下方，液体出口上方时，环状液膜萃取器后的粒径分布基本没有变化，但是当液位高于入口时（入口中心线处液位为910mm）特征粒径参数普遍增大。这是因为当液位在入口下方，液体出口上方时，对于气体而言，气液柱型旋流器入口下方近似是一个“死区”，液面阻止了气体向下流动，因此气体基本都是从入口直接进入气液柱型旋流器上部，因此液位的变化并没有影响气液柱型旋流器上部的流场分布，相应地对液滴的迁移运动也几乎没有影响，因此环状液膜萃取器后的粒径分布基本没有变化。当液位高于入口时，高速气流对液体的强剪切作用会形成粒径较大的液滴，这部分液滴会随高速气流向上运动，因此环状液膜萃取器后的特征粒径参数普遍增大。

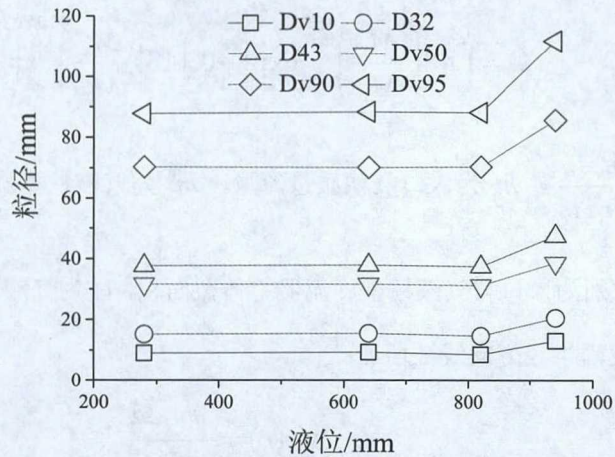


图3 液位对环状液膜萃取器后特征粒径参数的影响

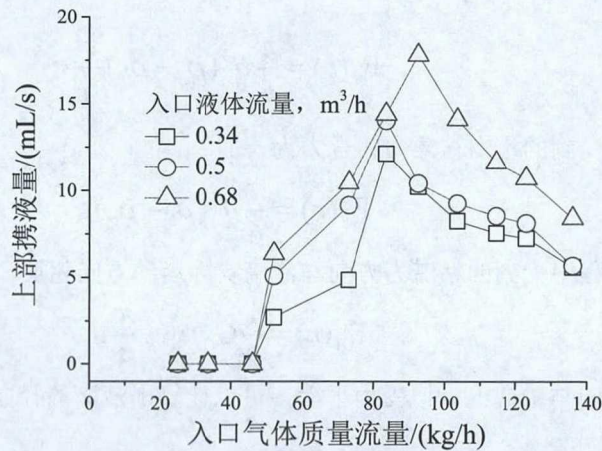


图4 入口工况对上部携液量的影响

上部携液量定义为从环状液膜萃取器去除的液体以及从气体出口流走的液体流量的总和，图4显示了液位为700mm时入口工况对上部携液量的影响，从图4中可以看到，当入口气体质量流量较小时，上部携液量为0，即液体完全从液体出口流走，随着入口气体质量流量的增加，上部携液量呈现先增加后减小的趋势，即对于固定的入口液体流量，入口气体质量流量存在一个区间使得上部携液量最大，这种情况下分离效果较差，在实际应用中应尽可能避免这个工作区间。此外，从图4还可发现入口气体质量一定的情况下，入口液体流量越大，上部携液量也随之增大。

为了更好地预测气液柱型旋流器内的分离效果，指导气液柱型旋流器的具体设计，根据实验现象以及液滴受力分析，本研究建立了液滴迁移模型。

旋流强度采用如下关系式^[4]:

$$\Omega = 1.48 \left(\frac{M_t}{M_T} \right)^{0.93} \exp \left[-0.113 \left(\frac{M_t}{M_T} \right)^{0.35} \left(\frac{z}{D} \right)^{0.7} \right] \quad (3)$$

其中 $\frac{M_t}{M_T} = \frac{\dot{m}_t A_D}{\dot{m}_T A_d}$, \dot{m}_t 为入口气体质量流量, \dot{m}_T 为气液柱型旋流器主体内气体质量

流量, A_d 与 A_D 分别为入口与气液柱型旋流器主体截面积, D 为气液柱型旋流器主体直径。

假设切向速度沿半径方向线性增加:

$$v_{ct}(r) = \frac{3rv_{sg}\Omega}{D} \quad (4)$$

液滴在径向所受到的离心力与向心浮力的合力为

$$F_{cr}(r) = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_l - \rho_g) \frac{v_{ct}^2}{r} \quad (5)$$

液滴在轴向所受到的重力与浮力的合力为

$$F_{cz}(r) = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_l - \rho_g) g \quad (6)$$

液滴在迁移过程中受到的粘滞力方向与液滴实际运动方向相反, 表达式为

$$F_{cd}(r) = \frac{1}{2} C_D \rho_g v_d^2 \frac{\pi}{4} d^2 \quad (7)$$

通过液滴在径向与轴向上近似受力平衡, 可以计算出液滴的径向滑移速度与轴向滑移速度:

$$v_{dr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{v_{ct}^2}{r} \frac{d}{C_D} \frac{1}{v_d} \quad (8)$$

$$v_{dz}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) g \frac{d}{C_D} \frac{1}{v_d} \quad (9)$$

其中液滴滑移速度为 $v_d(r) = \sqrt{v_{dr}^2(r) + v_{dz}^2(r)}$, 拖曳力系数采用如下典型关系式^[5]

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687}) / Re & Re < 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $Re = \frac{\rho_g v_d(r) d}{\mu_g}$ 。

沿径向积分可得到液滴轴向迁移距离：

$$\Delta z_d = \int \frac{v_{sg} - v_{dz}(r)}{v_{dr}(r)} dr \quad (11)$$

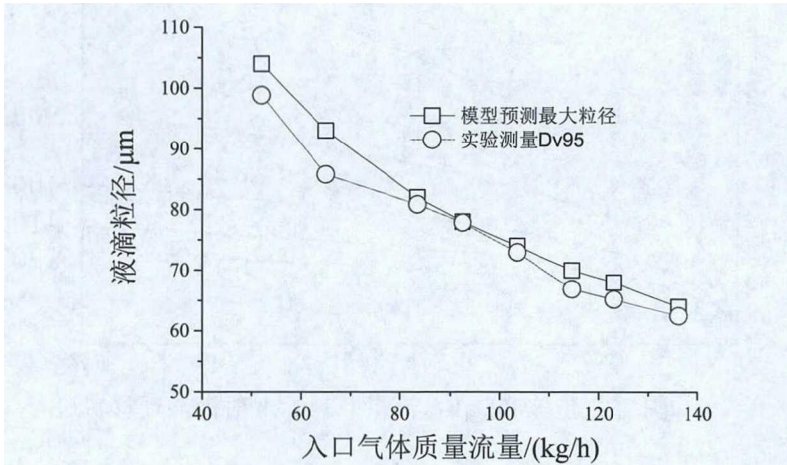


图 5 液滴粒径的模型预测与实验测量结果对比

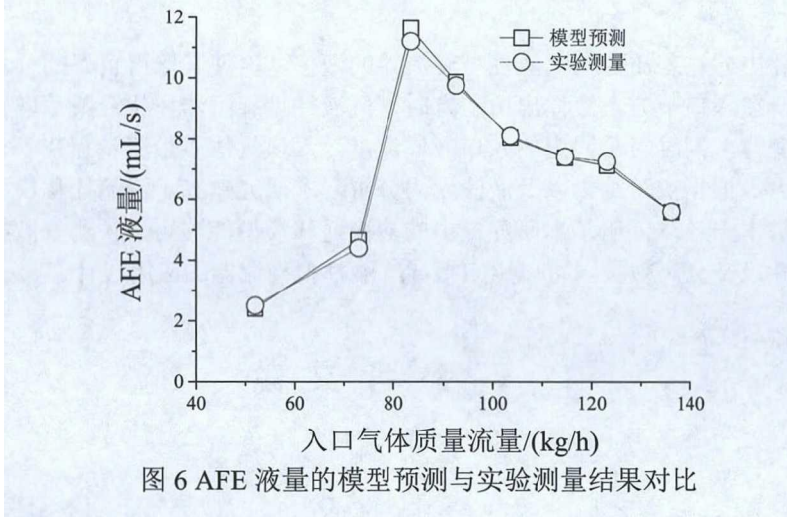
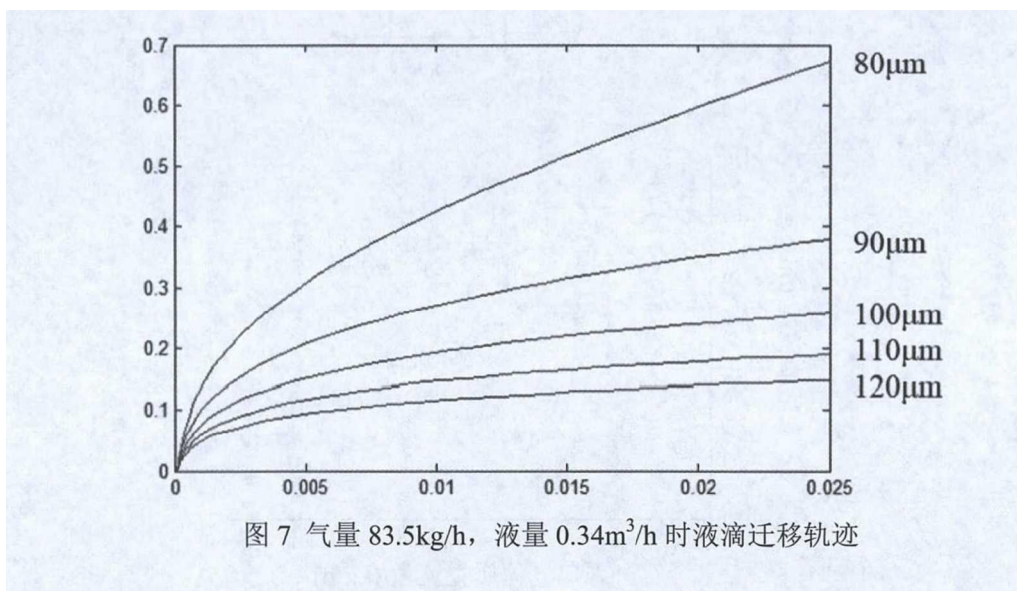


图 6 AFE 液量的模型预测与实验测量结果对比

从图 5 可以看到液滴粒径的模型预测与实验测量结果基本一致，随着入口气体质量流量的增加，环状液膜萃取器后的最大液滴粒径逐渐减小。根据入口液滴粒径分布以及模型

预测的能够进入环状液膜萃取器的最小液滴，可以推导得到进入环状液膜萃取器液体的流量，从图 6 可以看到环状液膜萃取器液量的模型预测与实验测量结果也基本一致。图 7 为气量 83.5kg/h ，液量 $0.34\text{m}^3/\text{h}$ 时该模型预测的不同粒径液滴的迁移轨迹，可以看到粒径越大的液滴轴向迁移距离越短，也就更容易与气体分离。



4 结论

本研究提出通过差压控制气液柱型旋流器的液位，以使其取得良好的分离效果。实验发现液位保持在入口下方，液体出口上方时，气液柱型旋流器环状液膜萃取器后的粒径分布基本没有变化，同时对于固定的入口液体流量，入口气体质量流量存在一个区间使得上部携液量最大。根据实验结果以及液滴受力分析，本研究建立了液滴迁移模型，模型预测结果与实验基本一致，证明了本研究提出的液滴迁移模型能够用于预测气液柱型旋流器内部的流动特性以及分离效果，可以用来指导气液柱型旋流器的应用设计。

参考文献

- 1 Yang LL, Xu JY. An experimental study on gas and liquid separation at Y-junction tubes by pressure control. *Separation Science and Technology*, 2017, 52(8): 1496-1503.
- 2 Yang LL, Liu S, Li H, Zhang J, et al.. Gas-liquid flow splitting in T-junction with inclined lateral arm. *Journal*

of Hydrodynamics, 2018, 30(01): 173-176.

- 3 Movafaghian S, Jaua-Marturet J A, Mohan R S, et al. The effects of geometry, fluid properties and pressure on the hydrodynamics of gas-liquid cylindrical cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(6): 999-1018.
- 4 Chang F, Dhir V K. Turbulent Flow Field in Tangentially Injected Swirl Flows in Tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1994, 15(5): 346-356.
- 5 Schiller L Z. Nauman. A drag coefficient correlation. *Vdi Zeitung*, 1935, 77: 318-320.

An investigation on separation characteristics in gas-liquid cylindrical cyclone

YANG Le-le, ZHANG Jian, ZHANG Dong, XU Jing-yu

¹LMFS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.

² School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Email: xujingyu@imech.ac.cn

Abstract: In order to utilize gas-liquid cylindrical cyclone better in industry, the flow characteristics in gas-liquid cylindrical cyclone was investigated by both theory analysis and experiment. The pressure control scheme has been creatively proposed. Furthermore, a droplet migration model has been developed based on an analysis of the forces acted on droplets in the continuous flow field. The droplet diameter distributions at the entrance and after the annular liquid film extractor were measured by Malvern Insithec. The predicted values were in accordance with the experimental results, which validated the validity of the theoretical model. Thus, the model suggested might be helpful for practical applications in industry, especially for the design of gas-liquid cylindrical cyclone.

Key words: gas-liquid separation; cyclone; migration model; pressure control