



《力学与实践》网络首发论文

题目： 被动式轴向旋流除气装置性能研究
作者： 张彦欢，刘硕，杨猛，许晶禹
收稿日期： 2022-05-07
网络首发日期： 2022-06-23
引用格式： 张彦欢，刘硕，杨猛，许晶禹. 被动式轴向旋流除气装置性能研究[J/OL]. 力学与实践. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.O3.20220622.0917.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

被动式轴向旋流除气装置性能研究¹⁾

张彦欢^{*,+} 刘硕^{*} 杨猛^{*,**} 许晶禹^{*,**,2)}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

⁺(中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

^{**}(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 针对海上油田低含气率采出液除气作业需求, 本文提出了一种被动式轴向旋流除气装置。据此设计了原理样机, 接入自循环流动系统中开展了除气特性测试工作。重点考察内部流场气相分布, 考察分流比、除气率、处理后液体含气率和压降之间的关系。研究表明, 通过合理调整分流比, 该装置可将液体含气率降低至 0.1%。同时, 入口-溢流口相对压降与分流比之间存在线性关系。研究成果有利于进一步降低管式分离系统的空间和重量需求。

关键词 旋流除气, 分流比, 除气率, 压降比

中图分类号: O359 文献标志码: A

PERFORMANCE RESEARCH ON PASSIVE AXIAL SWIRL DEGASSING DEVICE¹⁾

ZHANG Yanhuan^{*,+} LIU Shuo^{*} YANG Meng^{*,**} XU Jingyu^{*,**,2)}

^{*}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

⁺(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

^{**}(School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In consideration of degassing demands of produced fluids with relatively low gas content in offshore oil production, this work proposed a passive axial swirling degassing device. Based on this, the principle prototype was designed, and the degassing characteristic test was carried out in the self-circulating flow system. The test focused on the gas phase distribution inside the equipment, and investigated the relationship among the split ratio, degassing ratio, gas content of the liquid after treatment, and the pressure drop. Studies have shown that by adjusting the split ratio reasonably, this device can reduce the liquid gas content to 0.1%. At the same time, there is a linear relationship between the inlet-overflow port relative pressure drop and the split ratio. The research results help to further reduce the space and weight demand of the tubular separation system.

Key words Cyclone degassing, Split ratio, Degassing ratio, Pressure drop ratio

2022-05-07 收到第 1 稿, 2022-05-30 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金青年基金项目, 磁强化旋流场内功能化磁性纳米粒子对液滴群演化的调控机制 (No.12102436), 2022/01-2024/12.

2) 许晶禹, 博士, 研究员, 主要研究方向为多相流体动力学、油气储运工程。Email: xujingyu@imech.ac.cn

引用格式: 张彦欢, 刘硕, 杨猛等. 被动式轴向旋流除气装置性能研究. 力学与实践, 2022

Zhang yanhuan, Liu Shuo, Yang Meng, et al. Performance Research on Passive Axial Swirl Degassing Device. *Mechanics in Engineering*, 2022

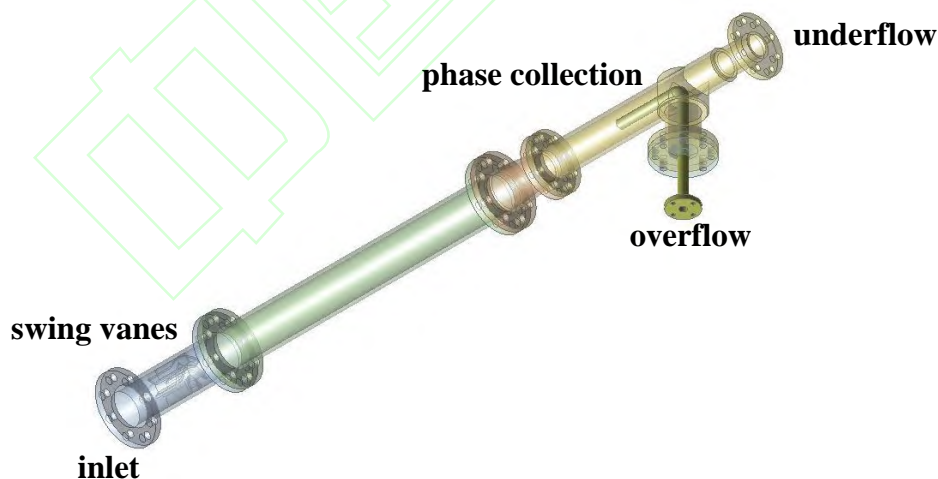
石油开发领域，油井采出液中的伴生气不可避免^[1]。分离出伴生气是采出液预处理工艺流程中的第一步。当采出液中含较高比例的伴生气时，往常采用重力式分离工艺。随着石油开采逐渐走向深海，重力式分离工艺由于空间需求大和耐压性差的弱点逐渐被管道式分离工艺替代^[2]。对中高含气率采出液，管式分离系统采用分支型管道进行预处理，获得较为理想的气液分离效果^[3-5]。但是在应用于低含气率采出液油井时，进一步压缩管式分离系统的空间和重量，对海洋石油生产具有重要的经济价值。

近年来，旋流分离技术已应用于采出液预处理和生产污水处理中^[6]。借助被分离相间密度差和强旋流场，混合介质可在短距离内快速分离。目前，轴向启旋被动式旋流分离装置已被应用于气液分离领域，先后出现了气泡分离器、旋流除湿装置等不同的气液分离装置，适用于熔盐反应堆中的微量气体分离和气体除水^[7,8]。相似背景的研究工作表明该种气液分离理念具有较为广泛的适应性，可结合不同来流气液比进行优化，获得较为理想的分离效果^[7-9]。在石油生产领域，针对较低含气率的采出液，本文提出了一种被动式轴向旋流除气装置。通过原尺度物理模型装置进行了气液分离特性测试，探究其除气性能及分离效果，并研究其操控特性等。

1 除气装置设计方案

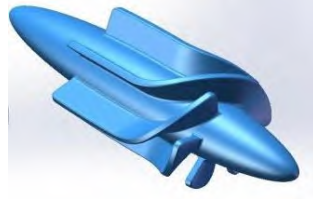
1.1 除气装置结构描述

被动式轴向旋流除气装置为一种基于旋流分离原理的管道式分离结构，如图 1 (a) 所示。该装置由主体管道、启旋导流片、相收集管道等组成。通过入口引入待处理混合流体，通过溢流口排出高含气流体，通过底流口排出处理后的液体。测试采用的原型机入口管径为 $D_{inlet}=100$ mm，底流口内径为 $D_{underflow}=65$ mm，溢流口内径为 $D_{overflow}=25$ mm，主管总长 $L_{total}=2.2$ m，支管总长 $L_{elbow}=0.6$ m，支管在主管下游 $L_t=2$ m 处布置。启旋导流片为固定式，如图 1 (b) 所示包含主轴和六个固定叶片，无动力部件。主轴长度 $l_h=250$ mm，叶片长度 $l_b=110$ mm，叶片周向旋转角度 $\alpha_1=60^\circ$ ，轴向旋转角度 $\alpha_2=45^\circ$ ，厚度为 $t=5$ mm。为便于观测装置内部相分布，整个装置采用有机玻璃加工，部件间采用法兰形式连接。



(a) 旋流除气装置设计图

(a) Design drawing of swirl degassing device



(b) 启旋导流片

(b) Swing vanes

图 1 被动式轴向旋流除气装置结构示意图

Fig.1 The structural diagram of passive axial swirl degassing device

1.2 量纲分析

被动式轴向旋流除气装置的输入操作参数主要为气相入口流速 v_g 、液相入口流速 v_l 、气相密度 ρ_g 、液相入口流速 ρ_l 、溢流口分流比 γ ，如式 (1) 定义

$$\gamma = \frac{Q_{m-\text{overflow}}}{Q_{m-\text{inlet}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， $Q_{m-\text{overflow}}$ 和 $Q_{m-\text{inlet}}$ 为溢流口和入口的混合流量。关注的输出量为入口-溢流口压降 $P_{\text{inlet}}-P_{\text{overflow}}$ 、入口-底流口压降 $P_{\text{inlet}}-P_{\text{underflow}}$ 及分离效果即溢流口含气率及携带液体量，按照式 (2) 定义

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{g-\text{underflow}}}{C_{g-\text{inlet}}} \right) \times \frac{Q_{l-\text{underflow}}}{Q_{l-\text{inlet}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $C_{g-\text{underflow}}$ 和 $C_{g-\text{inlet}}$ 为底流口和入口的含气率， $Q_{l-\text{underflow}}$ 为底流口液相流量， $Q_{l-\text{inlet}}$ 为底流口入口流量。综合考虑几何尺寸，量纲分析如下：

- 入口管径， D_{inlet} [L];
- 底流口内径， $D_{\text{underflow}}$ [L];
- 溢流口内径， D_{overflow} [L];
- 主管总长， L_{total} [L];
- 支管总长， L_{elbow} [L];
- 支管在下游的位置， L_1 [L];
- 主轴长度， l_h [L];
- 叶片长度， l_b [L];
- 叶片周向旋转角， α_1 [-];
- 叶片轴向旋转角， α_2 [-];
- 叶片厚度， t [L];
- 液相入口折算速度， v_l [L.T⁻¹];
- 液相密度， ρ_l [M.L⁻³];
- 液相粘度， μ_l [M.L⁻¹.T⁻¹];
- 气相入口折算速度， v_g [L.T⁻¹];
- 气相密度， ρ_g [M.L⁻³];
- 气相粘度，液相粘度， μ_g [M.L⁻¹.T⁻¹];
- 溢流口分流比， γ [-];
- 入口-溢流口压降， $P_{\text{inlet}}-P_{\text{overflow}}$ [M.L⁻¹.T⁻²];
- 入口-底流口压降， $P_{\text{inlet}}-P_{\text{underflow}}$ [M.L⁻¹.T⁻²];

• 分流效率, η [-]。

$$\begin{aligned} & (P_{\text{inlet}} - P_{\text{overflow}}, P_{\text{inlet}} - P_{\text{underflow}}, \eta) \\ & = f(D_{\text{inlet}}, D_{\text{underflow}}, D_{\text{overflow}}, L_{\text{total}}, L_{\text{elbow}}, L_t, l_h, l_b, \alpha_1, \alpha_2, t, v_1, v_g, \rho_1, \rho_g, \mu_1, \mu_g, \gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

以入口表观流速、入口管径和液相密度对上式进行无量纲化, 有

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_{\text{inlet}} - P_{\text{overflow}}}{1/2\rho_1 v_1^2}, \frac{P_{\text{inlet}} - P_{\text{underflow}}}{1/2\rho_1 v_1^2}, \eta \right) \\ & = f \left(\frac{D_{\text{underflow}}}{D_{\text{inlet}}}, \frac{D_{\text{overflow}}}{D_{\text{inlet}}}, \frac{L_{\text{total}}}{D_{\text{inlet}}}, \frac{L_{\text{elbow}}}{D_{\text{inlet}}}, \frac{L_t}{D_{\text{inlet}}}, \frac{l_h}{D_{\text{inlet}}}, \frac{l_b}{D_{\text{inlet}}}, \alpha_1, \alpha_2, \frac{t}{D_{\text{inlet}}}, \frac{\rho_g}{\rho_1}, \frac{\mu_1}{\rho_1 v_1 D_{\text{inlet}}}, \frac{\mu_g}{\rho_g v_g D_{\text{inlet}}}, \gamma \right) \end{aligned} \quad (4)$$

由于测试中储气装置结构形式给定, 且测试中采用的介质(空气-水)给定, 因此上式可简化为

$$\left(\frac{P_{\text{inlet}} - P_{\text{overflow}}}{1/2\rho_1 v_1^2}, \frac{P_{\text{inlet}} - P_{\text{underflow}}}{1/2\rho_1 v_1^2}, \eta \right) = f \left(\frac{\mu_1}{\rho_1 v_1 D_{\text{inlet}}}, \frac{\mu_g}{\rho_g v_g D_{\text{inlet}}}, \gamma \right) \quad (5)$$

也即

$$(Eu_{\text{inlet-overflow}}, Eu_{\text{inlet-underflow}}, \eta) = f(Re_1, Re_g, \gamma) \quad (6)$$

式中, Re_1 为液相雷诺数, Re_g 为气相雷诺数, $Eu_{\text{inlet-overflow}}$ 为入口-溢流口压降欧拉数, $Eu_{\text{inlet-underflow}}$ 为入口-底流口压降欧拉数。进一步将两个欧拉数做比值, 定义为 ψ 以探讨出口压力间的关系, 得到

$$(\psi, \eta) = f(Re_1, Re_g, \gamma) \quad (7)$$

因此, 需探讨入口 Re_1 、 Re_g , 改变出口溢流口分流比 γ 对分离效果 η 及操作参数 ψ 的影响。通过试验测试改变这些因素, 探索除气装置性能, 并将测试结果基于关键无量纲数推广。

1.3 除气特性测试方案

根据量纲分析结果开展测试, 以水模拟液相, 以空气模拟气相。图 2 给出了测试循环流程, 水罐中的水在离心泵驱动下经过涡轮流量计进入循环系统。空气自空压机储气罐流出, 经过过滤器和浮子流量计进入主管路, 与水相汇合。后经过静态混合器掺混进入测试样机。样机入口设置压力表, 样机的两个出口分别设置阀门以调节各自的流量。同时, 两个出口设置了差压传感器测试压差。此外, 底流口设置了科式流量计测试流体的混合密度, 进而获得底流口含气率。两个出口的流体进入回收罐, 其中的水相最终回到水罐, 完成循环。

测试方法方面, 通过涡轮流量计 (KEWill FE20) 和浮子流量计 (LZM-6T) 测试入口的液相和气相流量; 采用压力表 (ROSEMONT 3051) 测试入口压力; 采用差压传感器 (ROSEMONT 3051) 测试溢流口和底流口压差; 采用科式流量计 (MicroMotion F050) 测试底流口含气率; 通过高速摄像机观测流场内部气相分布变化。误差精度方面, 涡轮流量计系误差精度为 0.1%, 浮子流量计误差精度为 2.5%, 差压传感器误差精度为 0.1%, 科氏质量流量计最大和最小相对误差分别为 16.83% 和 -13.42%, 平均相对误差为 0.82%^[11]。

工况设置上, 通过变频器调控离心泵设置入口液相雷诺数 Re_1 介于 50000~81000, 通过调控空压机储气罐出口阀门使入口气相雷诺数 Re_g 介于 300~600, 使得入口含气率介于 5%~16%; 给定入口条件下, 调整样机溢流口和底流口阀门开度, 以控制溢流口分流比介于 10%~45%。

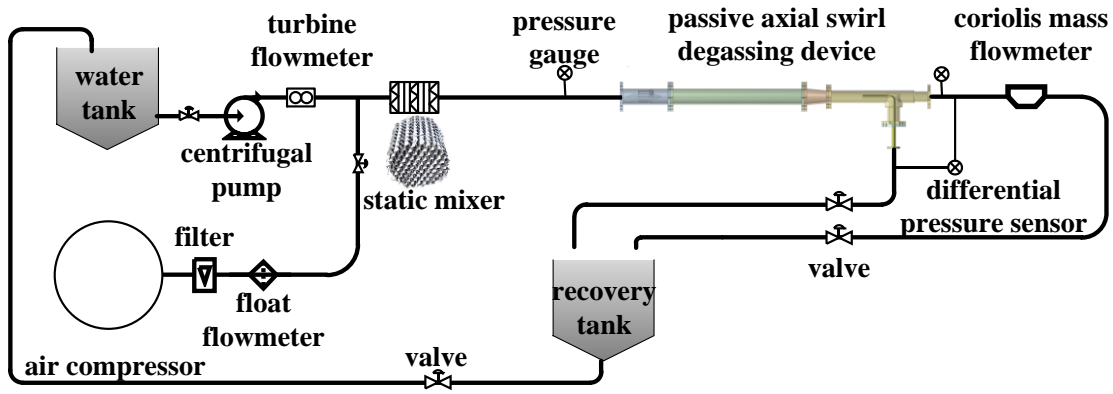


图 2 旋流除气装置性能测试流程图

Fig.2 The performance test process of passive axial swirl degassing device

2 测试结果分析

2.1 流场气相分布

除气装置内的相收集是液体除气的先决条件，研究中首先观测装置内流场气相分布。通过图 3 可以看到旋流场内形成了稳定的气芯，气芯连通至下游相收集管内，通过相收集管引出，从而完成除气任务。从图 3 中还可以发现，当入口条件固定时，逐渐增加分流比，气芯逐渐压缩变细。从最初与相收集管道直径接近，缩小至原尺寸的 1/4。这是由于随着分流比增加，更多比例的混合流体从溢流口流出。这种情况下，溢流口压力逐渐降低，底流口压力增加，更多液相跟随气体从底流口流出。由于液相密度远大于气相，液相挤压导致气芯变细，因此出现了图 3 中的现象。

当分流比和入口气相雷诺数固定时，图 4 给出了装置内部气芯尺寸随入口液相雷诺数的变化。从图中可以看到，当入口液相雷诺数从 46634 逐渐增加到 82670 时，气芯尺寸同样出现了明显减小。在该种条件下，流场中的唯一变量为液相速度。在我们以往的研究工作中，气液两相旋流场中的压力受液相入口速度影响^[10]。当入口液相雷诺数增加时，旋流场径向近壁面和近中心的压差更大。在更大的压力梯度下，由于气体密度远小于液体，相交界面向旋流场中心移动，导致气芯尺寸减小，因此出现了图 4 中的现象。

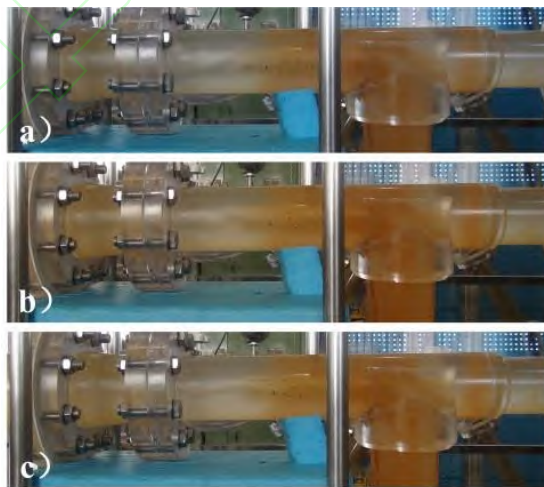


图 3 给定入口条件 ($Re_l=57233$, $Re_g=306$) 下气柱尺寸随分流比变化

(a. $\gamma=11.0\%$, b. $\gamma=13.7\%$, $\gamma=21.0\%$)

Fig.3 The size of gas column varies with split ratio under given inlet conditions ($Re_l=57233$, $Re_g=306$)

(a. $\gamma=11.0\%$, b. $\gamma=13.7\%$, $\gamma=21.0\%$)

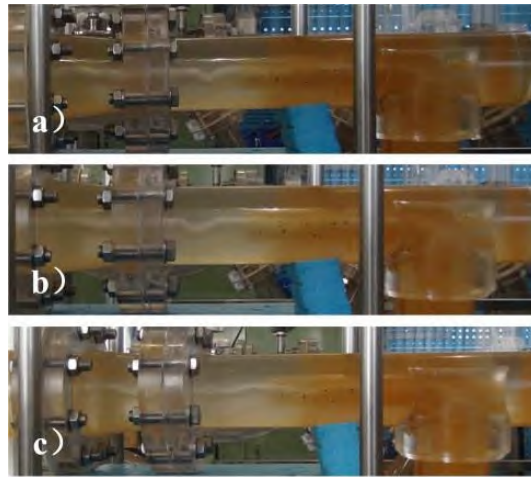


图 4 给定分流比 ($\gamma=31.0\%$) 和入口气相雷诺数 ($Re_g=638$) 下气柱尺寸随入口液相雷诺数变化
(a. $Re_l=46634$, b. $Re_l=57869$, $Re_l=82670$)

Fig.4 The size of gas column varies with inlet liquid Reynolds number under given split ratio ($\gamma=31.0\%$) and inlet gas Reynolds number ($Re_g=638$)
(a. $Re_l=46634$, b. $Re_l=57869$, $Re_l=82670$)

2.2 底流口含气率变化

底流口含气率是考察除气装置效果的一个重要指标。图 5 给出了两种不同入口气相雷诺数(306 和 638)条件下底流口含水率的变化。由于不同分流比获得的底流口含气率可能会有较大差距,因此图 5 中的纵坐标采用对数坐标系。从图中可以看到,给定 Re_l ,随着分流比增加,底流口含气率逐渐减小。由 2.1 节分析可知,随着分流比增加,气芯逐渐变细,因此绕过相收集管道入口而进入底流口的气相越来越少。随着分流比增加,底流口含气率越来越小。当分流比超过某一临界值时,气芯尺寸小于相收集管,大部分气芯经过溢流口流出,因此底流口含气率基本趋于 0。从图 5 中可以看到,在各种入口条件下,5~16%含气率的混合液经过除气装置处理后,含气率可以低于 1%。同时当 Re_l 不同时,相同分流比得到的底流口含气率略有不同。 Re_l 越大,整体来说底流口含气率越小,与 2.1 节中的分析相符。这是因为 Re_l 越大,旋流场径向压差越大,气芯尺寸越小,遗留在流场中的气相经底流口流出的量越少,因此底流口含气率越低。对比图 5 (a) 和图 5 (b) 可以看到,当 Re_g 较小时,使出口含气率低于 0.1% 所需的分流比更小。由于给定 Re_l ,旋流场径向压差接近。当 Re_g 较大时,入口含气率较高,气芯更粗,更多的残余气体经过底流口流出,需更大分流比减小气芯尺寸,因此达到相同底流口含气率所需的分流比更大。

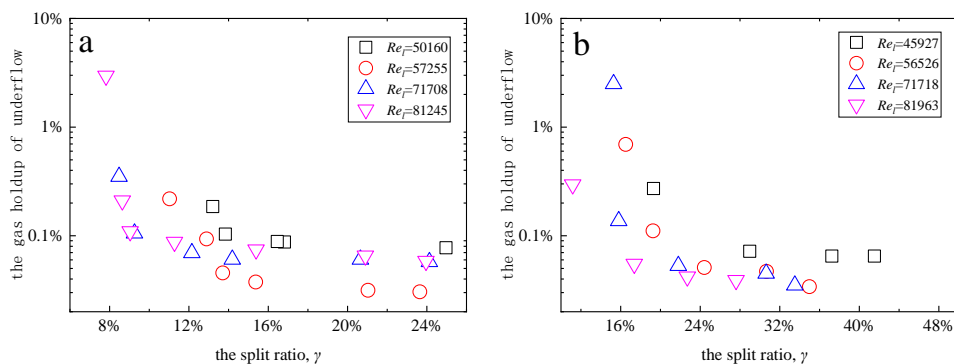


图 5 底流口含气率随分流比变化 (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

Fig.5 The gas holdup of underflow varies with the split ratio (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

2.3 除气效率分析

通过上文分析可知，尽管气芯尺寸随分流比增加而减小，更有利于除气，但当分流比过大时，除气效果不再继续改善，且会损失更多液体。为此，本文定义的除气效率（式 2）综合考虑了除气比例和液体存留比例。图 6 给出了两种不同 Re_g 条件下除气效率随分流比的变化。可见随着分流比增加，除气率出现一个最大值，后随着分流比继续增加，除气率逐渐减小。出现这种趋势与除气率的定义有关。当分流比逐渐提高时，底流口含气率逐渐降低，同时经过溢流口损失的液体也逐渐增加，两者综合作用使得除气率提高。当分流比超过临界值继续增加，底流口含气率保持极低不变，而溢流口损失的液体继续增加，除气率将因溢流口损失的液体增加而逐渐降低。因此，给定入口条件，存在分流比临界值，使得底流口含气率较低，同时溢流口损失液体最少，使得除气效率达到 95%。当超过临界分流比时，除气率随分流比增加线性下降。

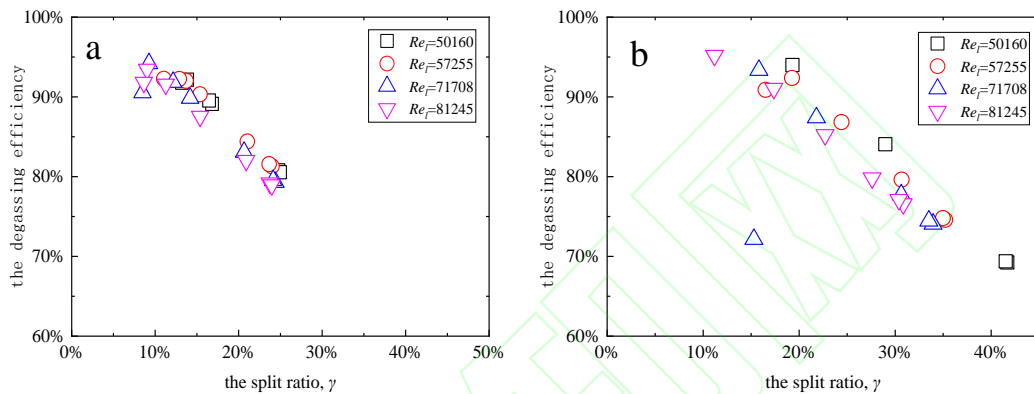


图 6 除气效率随分流比变化 (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

Fig.6 The degassing efficiency varies with the split ratio (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

图 7 进一步对比了两种 Re_g 条件下除气率下降段的关系。整体来说，给定 Re_g 除气率下降段线性关系较为明显。这是由于分流比定义为溢流口混合流量与入口流量的比值，在测试中由于液相为连续相，且含液率较高。当分流比超过临界值后，底流口含气率接近零，降低百分比基本保持不变。此时继续增加分流比，溢流口损失的液相基本成比例增加，在旋流强度足够的前提下与入口液相雷诺数 Re_l 关联较小，因此线性化趋势明显。当对比两个 Re_g 除气率下降段数据时，发现两组线性化数据斜率相同， Re_g 较大对应的截距较大。这是由于 Re_g 较大，入口含气率较高，气芯尺寸比较大，需要更高的分流比才能将气芯削减至相收集管尺寸，实现较优的除气效果。

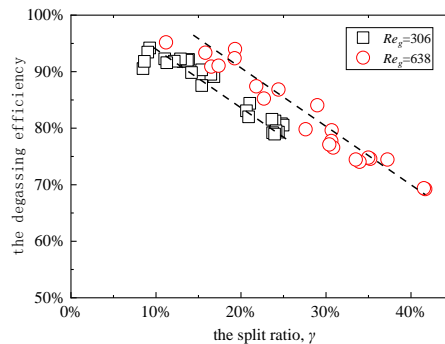


图 7 入口气相雷诺数对除气效率的影响

Fig.7 Effect of inlet gas Reynolds number on degassing efficiency

2.4 压降特性分析

旋流器压降特性表征能量损失，也与操作方案设定有关。本文通过定义无量纲压降系数（式 3）表征压降特性。该系数可定量表征入口-溢流口压降与入口-底流口压降的比值。图 8 给出了不同 Re_g 条件下压降比 Ψ 与分流比 γ 之间的变化关系。不难发现， Ψ 与 γ 存在着线性关系。随分流比增加，压降比线性增加，即入口-溢流口的压降相对入口-底流口压降成比例增加。造成这种现象是由于随着 Ψ 增加，溢流口相对底流口压力降低，流体更易于向溢流口流动，因此分流比 γ 增加。由于测试中的入口含气率介于 5%~16%，液相为主导相，结合除气装置内部流场特征，因此压降比整体随分流比线性增加，即给定 Re_g ，压降比随分流比线性增加。

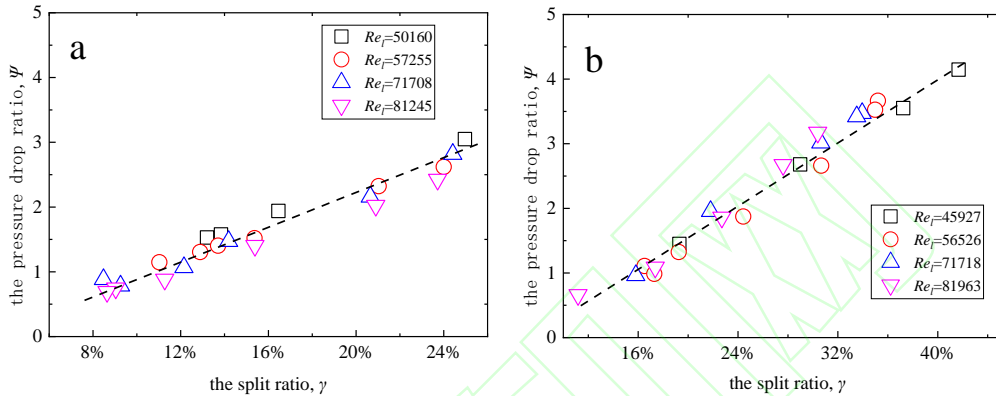


图 8 压降比随分流比变化 (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

Fig.8 The pressure drop ratio varies with the split ratio (a. $Re_g=306$, b. $Re_g=638$)

图 9 给出了不同 Re_g 条件下，压降比随分流比的变化。与 2.3 节分析类似，对给出的两组 Re_g 工况，压降比-分流比线性关系的斜率相似，截距不同。当 Re_g 较大时，压降比-分流比线性关系的截距较小。相同分流比条件下， Re_g 较大，压降比较小，即较高的入口含气率对应的入口-溢流口相对压降较小。这是由于给定分流比条件下，随着入口含气率增加，气芯尺寸增加，溢流口含气率提高。由于气体密度远小于液体，当含气率高时，混合液流动产生的压降更小。因此给定分流比， Re_g 较大时压降比更小。因此，通过构建分流比与压降之间的关系，可构建压降与除气效果间的关系，为除气装置操作方案设计提供理论基础。

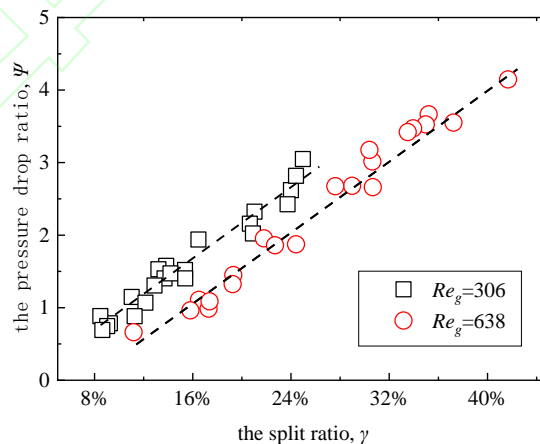


图 9 入口气相雷诺数对压降比的影响

Fig.9 Effect of inlet gas Reynolds number on pressure drop ratio

3 结论

针对海上油田低含气率采出液油井中的除气作业需求,本文提出了一种被动式轴向旋流除气装置,并在多相流循环测试系统上对该种除气装置气液分离特性开展了系统的测试工作。获得结论如下:

- (1) 通过调整分流比,该种除气装置可将液体含气率控制在 0.1% 以内;
- (2) 应合理调整分流比,使得降低含采出液含气率的同时不致损失过多采出液;
- (3) 基于测试中压降比与分流比的线性关系,可通过压力控制的方式调整分流比,进而改变除气效果。

上述研究成果为进一步推广管式气液分离技术在海洋平台上的应用及设计提供了帮助。

参考文献

- 1 侯辰光, 郑路, 吴磊等. 渤海某新建项目伴生气液烃回收方案应用. 中外能源, 2021, 26(8): 84-89
Hou Chenguang, Zheng Lu, Wu Lei, et al. Scheme application of liquid hydrocarbon recovery from associated gas in a new project of Bohai Sea. *SINO-GLOBAL ENERGY*, 2021, 26(8): 84-89 (in Chinese)
- 2 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术. 力学进展, 2015, 45: 179-216
Wu Yingxiang, Xu Jingyu. Oil and water separation technology. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 179-216 (in Chinese)
- 3 吴奇霖, 张健, 刘硕等. T 型分岔管道内气液两相的流动规律和分离特性. 第三十一届全国水动力学研讨会论文集, 厦门, 中国, 2020
Wu Qiling, Zhang Jian, Liu Shuo, et al. Investigation on the gas-liquid two-phase separation phenomenon in the T-junction. Proceedings of the 31st National Conference on Hydrodynamics, Xiamen, China, 2020 (in Chinese)
- 4 黄锬腾, 陈健勇, 陈颖等. 气液分离技术的研究现状. 化工学报, 2021, 72(S1): 30-41
Huang Kunteng, Chen Jianyong, Chen Ying, et al. Research status of vapor-liquid separation technology. *CIESC Journal*, 2021, 72(S1): 30-41 (in Chinese)
- 5 王溢维, 温家铭, 洪祥议等. T 形管内气液相分离特性数值模拟. 管道技术与设备, 2015(5): 1-8
Wang Yiwei, Wen jiaming, Hong Xiangyi, et al. Numerical simulation of gas-liquid separation characteristics inside T-junction. *Pipeline Technique and Equipment*, 2015(5): 1-8 (in Chinese)
- 6 马粤. 新型水力旋流器生水处理效果数值模拟分析. 管道技术与设备, 2018(1): 51-54
Ma Yue. Numerical simulation analysis of production water treatment effect of new hydrocyclone. *Pipeline Technique and Equipment*, 2018(1): 51-54 (in Chinese)
- 7 YIN JL, QIAN YL, MA YF, et al. Experimental study on the bubble trajectory in an axial gas-liquid separator applied for tritium removal for molten salt reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 320: 133-140
- 8 YUE T, CHEN JY, SONG JF, et al. Experimental and numerical study of upper swirling liquid film (USLF) among gas-liquid cylindrical cyclones (GLCC). *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358: 806-820
- 9 HUANG L, DENG SS, CHEN Z, et al. Numerical analysis of a novel gas-liquid pre-separation cyclone. *Separation and Purification Technology*, 2018, 194: 470-479
- 10 LIU S, YANG LL, ZHANG D, et al. Separation characteristics of the gas and liquid phases in a vane-type swirling flow field. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 107: 131-145
- 11 陈小平. 稠油混输流动规律及流变学特性研究. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2016
Chen Xiaoping. Investigation on the flow characteristics and rheological properties of heavy crude oil for pipeline transportation. [PhD Thesis]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016 (in Chinese)