研究论文

DOI：10.11949/0438-1157.

海上绿色甲醇合成气液分离器抗晃荡性能及影响机制分析

顾华典，余纪辉，张崇，樊鑫博，刘博，韩鑫，杨强

（华东理工大学机械与动力工程学院，上海 200237）

摘要： 海上浮式绿色甲醇合成装置长期受风浪载荷和平台运动影响，气液分离器内部两相流场易发生非定常晃荡，导致旋流强度波动、液滴夹带增强和分离效率衰减，制约合成系统在海上工况下的连续稳定运行。针对海上绿色甲醇合成过程对紧凑高效气液分离装备的需求，本文构建六自由度运动平台模拟晃荡环境，以旋流-聚结复合气液分离器为研究对象，考察晃荡幅度、晃荡频率、气液比和液滴尺寸对分离性能的影响规律。结果表明，在晃荡幅度3°-9°、晃荡频率0.1-0.5 Hz、气液比100∶1-180∶1的试验范围内，分离效率均保持在99.7%以上，表明旋流惯性分离与纤维聚结耦合结构具有较好的抗晃荡稳定性。随着晃荡幅度增大、晃荡频率升高和气液比提高，分离效率呈下降趋势。液滴尺寸对分离性能具有显著影响，大尺寸液滴（80-120 μm）的分离效率及抗晃荡稳定性均优于小尺寸液滴（10-30 μm）。随着晃荡扰动增强，小尺寸液滴更易随气流逃逸，导致分离效率衰减更为显著。研究结果揭示了多因素耦合晃荡条件下旋流-聚结气液分离器的性能演化规律，可为海上浮式绿色甲醇合成装置气液分离装备的结构优化、参数设计和工程放大提供依据。

关键词： 绿色甲醇；气液分离；惯性分离；纤维聚结；晃荡工况

中图分类号： TQ 051.8　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-10

Performance and impact mechanisms of the gas-liquid separator for offshore green methanol synthesis under swaying conditions

GU Huadian, YU Jihui, ZHANG Chong, FAN Xinbo, LIU Bo, HAN Xin, YANG Qiang

(*School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237)

Abstract: Offshore floating green methanol synthesis units are continuously subjected to wind and wave loads and platform motion, which easily induces unsteady swaying of the two-phase flow field inside the gas-liquid separator. This phenomenon causes fluctuations in swirling flow intensity, increases entrainment of liquid droplets, and attenuates separation efficiency, thereby restricting the continuous and stable operation of the synthesis system under offshore working conditions. To address the demand for compact and high-efficiency gas-liquid separation equipment in the offshore green methanol synthesis process, this study constructs a six-degree-of-freedom motion platform to simulate the swaying environment, and takes the swirling-coalescence composite gas-liquid separator as the research object to investigate the effects of swaying amplitude, swaying frequency, gas-liquid ratio and droplet size on separation performance. The results show that within the test ranges of swaying amplitude 3°-9°, swaying frequency 0.1-0.5 Hz and gas-liquid ratio 100:1-180:1, the separation efficiency remains above 99.7%, indicating

收稿日期： 2026-07-17　　**修回日期：** 2026-09-11

通信作者： 韩鑫(1992—)，男，博士，副教授，hanx@ecust.edu.cn

第一作者： 顾华典(2003—)，男，硕士研究生，ecust_guhd@163.com

引用本文： 顾华典, 余纪辉, 张崇, 樊鑫博, 刘博, 韩鑫, 杨强. 海上绿色甲醇合成气液分离器抗晃荡性能及影响机制分析[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-10

Citation: GU Huadian, YU Jihui, ZHANG Chong, FAN Xinbo, LIU Bo, HAN Xin, YANG Qiang. Performance and impact mechanisms of the gas-liquid separator for offshore green methanol synthesis under swaying conditions[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-10

that the coupled structure of swirling inertial separation and fiber coalescence has excellent stability under swaying conditions. Increasing swaying amplitude, frequency and gas-liquid ratio leads to decreased separation efficiency. Droplet size has a significant effect on separation performance: both the separation efficiency and stability under swaying conditions of large-sized droplets (80-120 μm) are superior to those of small-sized droplets (10-30 μm). With increasing swaying disturbance, small droplets were more susceptible to entrainment by the airflow, resulting in a more pronounced reduction in separation efficiency. The research results reveal the performance evolution characteristics of the swirling-coalescence gas-liquid separator under multi-factor coupled swaying conditions, which can provide a basis for structural optimization, parameter design and engineering scale-up of gas-liquid separation equipment for offshore floating green methanol synthesis units.

Keywords: green methanol; gas-liquid separation; inertial separation; fiber coalescence; swaying conditions

引 言

随着全球能源低碳转型持续推进,海上可再生能源开发与海上化工过程耦合利用逐渐成为绿色能源体系建设的重要方向。我国海域资源丰富,具备发展海上风电制氢、二氧化碳资源化利用及浮式绿色甲醇合成系统的良好基础[1]。甲醇兼具清洁燃料和基础化工原料属性,具有含硫量低、燃烧过程中硫氧化物排放少、储运便利和产业链成熟等特点,在航运燃料、能源储运和低碳化工领域具有广泛应用前景[2]。将可再生氢与捕集二氧化碳转化为绿色甲醇,并与海上浮式平台相结合,有助于提升海上可再生能源就地消纳能力和碳资源转化效率。因此,发展适用于海洋环境的浮式绿色甲醇合成系统,对拓展甲醇产业应用场景和推动海上低碳化工装备发展具有重要意义[3]。

与陆基甲醇合成装置相比,海上浮式甲醇合成系统长期处于风、浪、流等复杂海洋环境中,平台会产生横摇、纵摇、升沉等多自由度运动,会诱发分离设备内部气液界面波动、液滴夹带和流场周期性扰动,进而降低气液分离效率和运行可靠性[4]。气液分离器作为甲醇合成系统中实现气相循环、液相产物脱除的关键单元,其在晃荡工况下的分离稳定性直接关系到浮式合成系统的连续运行能力[5]。旋流分离器具有结构紧凑、处理能力强、无运动部件和易于工程放大的特点,适用于空间受限、连续运行要求高的海上过程装备[6];纤维聚结则能够促进细小液滴碰撞、黏附和长大,强化小尺寸液滴的脱除效率[7~8]。将旋流惯性分离与纤维聚结过程耦合,可在较小设备尺度内实现气液两相的高效分离,具有应用于海上浮式绿色甲醇合成系统的潜力。然而,从浮式平台长期连续运行角度审视,即使分离效率维持在较高的分离区间内,但在分离过程中微小的气相液滴夹带衰减仍不可忽视,一方面,微量夹带会在数百小时连续运行中持续累积,不仅造成甲醇产物损耗、降低碳氢原料利用经济性,还可能诱发压缩机液击、反应器催化剂液淹等设备故障,大幅提升海上平台运维成本;另一方面,微量甲醇雾沫逃逸存在VOCs超标、可燃蒸汽积聚等环保与安全隐患[9~10]。

因此为了有效防控上述工程风险,深入研究晃荡条件下分离器内部多相流场变化规律及分离性能衰减机理是必要的。然而,现有气液分离器相关研究多在静止或稳态条件下开展,主要集中于结构优化、旋流强化、聚结材料性能及分离效率预测等方面,对单体旋流-聚结气液分离设备内部两相流动行为及分离性能衰减规律的关注仍显不足[11]。近年来,虽有学者开始关注晃荡工况下的分离问题,如郑晓鹏等[12]研究了防晃板及内构件对海上三相重力分离器晃荡的抑制作用,指出合理构件间距和开孔结构能够降低界面共振与液面波动。滕岳虎等[13]基于CFD建立开孔通海船舱段模型,分析了横摇工况下开孔水流量的周期性特征及其相位滞后规律。但总体来看,现有关于晃荡工况下气液分离行为的研究多集中于单一晃荡参数或单一结构因素对分离性能的影响,对晃荡幅度、晃荡频率、气液比和液滴尺寸等多因素耦合作用下分离性能演化规律的认识仍不充分,此外现有研究对高分离效率区间内微小衰减所蕴含的流场扰动信息也缺乏足够关注,尤其是旋流-聚结复合分离技术作为适用于海上晃荡工况的紧凑型高效气液分离方法,其在非定常运动条件下的流场稳定性、液滴迁移特征及分离效率衰减机制尚缺乏系统研究。

基于此,本文面向海上浮式绿色甲醇合成系统

对紧凑高效气液分离装备的需求，依托六自由度运动平台构建海上晃荡模拟环境，以旋流-聚结气液分离器为研究对象，重点考察高分离效率区间内晃荡幅度、晃荡频率、气液比和液滴尺寸对分离效率微小衰减的影响规律，并结合液滴Stokes数揭示不同尺寸液滴在非定常旋流场中的惯性迁移特征与流场扰动机制，阐明多因素耦合条件下旋流-聚结结构的性能演化规律与液滴惯性迁移机理。旨在明确旋流-聚结气液分离器在晃荡工况下的性能边界与液滴迁移机制，为海上浮式平台气液分离设备的结构优化、参数设计及工程放大提供参考。

1 试验装置与方法

试验系统主要由六自由度运动平台、旋流-聚结气液分离器、流量计、泵等组成，装置流程如图1所示。

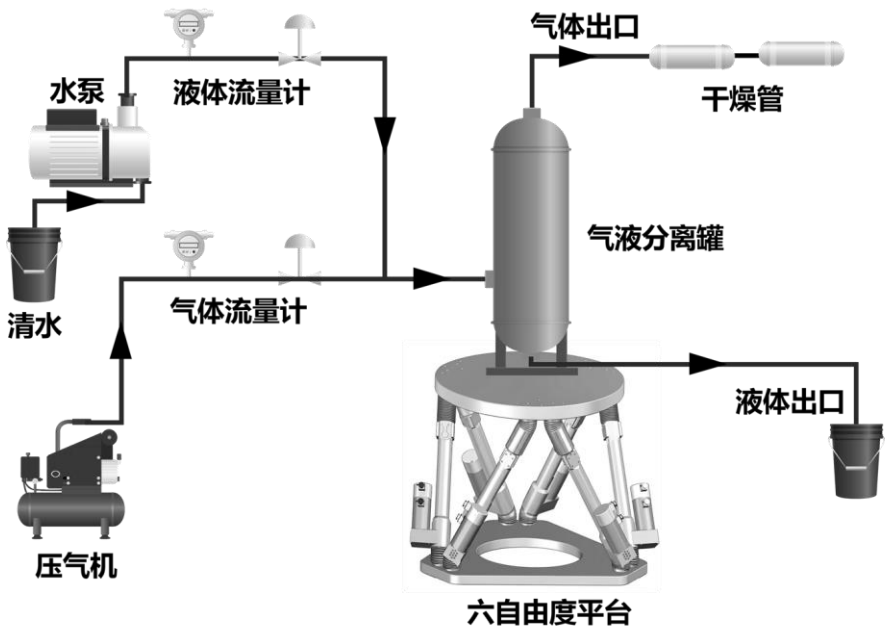


图1 试验装置流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

1.1 试验系统与运动模拟

试验通过计算机输出控制信号，驱动六自由度平台上的电动缸协同运动，使安装于平台上方的气液分离装置产生周期性晃荡响应。该六自由度平台可模拟海上浮式平台在风浪载荷作用下的升沉、纵荡、横荡、纵摇、横摇和平摇等多自由度耦合运动[14]。气液分离器固定于六自由度平台后的运动示意如图2所示。

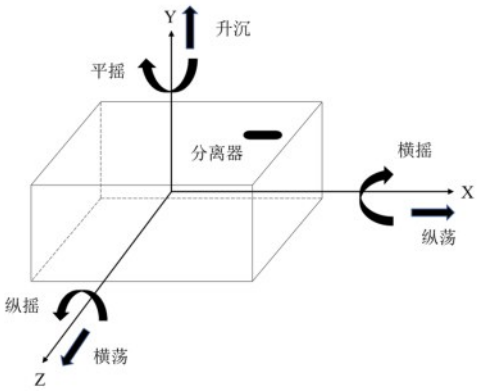


图2 六自由度平台运动示意图[14]

Fig. 2 Schematic diagram of six-degree-of-freedom platform motion[14]

在平台输出信号稳定后，本文以纵摇为主要扰动形式，其简谐运动规律可表示为：

$$\alpha(t) = \theta^* \cos\left(2^*pi^*f^*t\right) \tag{1}$$

式中，$\alpha(t)$为任意时刻的纵摇角位移；θ为晃荡幅度，单位为°；f为晃荡频率，单位为Hz；t为时间，单位为s；ω为角频率($\omega=2\pi f$)，单位为rad/s。

1.2 旋流-聚结分离器

聚结纤维是实现气相与微细液滴深度脱除的主流技术手段，目前众多学者围绕聚结纤维本身及其与旋流设备耦合体系开展了大量试验与数值研究，其中Chaolei W等[15]针对多层疏水玻纤聚结元件

开展试验发现，分离效率随层数增加逐步提升并在5层左右趋于稳定，且气相流速越高对应的最优滤层层数越少，此外纤维表面生成的液膜可扩大液滴有效拦截面积，对分离效率的提升有显著性效果；Starnoni M[16]系统梳理纤维聚结多相流模拟研究后指出，纤维依靠惯性撞击、拦截、布朗扩散三种机制捕获微液滴，且指出传统单纤维效率模型在高气速、高饱和工况下预测精度较差的情况；陈锋等[17]进一步针对玻纤滤材自身聚结特性展开细化试验，研究表明过渡润湿玻纤滤材不会出现明显压降突跳通道阶段，液体黏度下降会显著降低滤材综合聚结性能，浸渍涂层疏油改性可将滤材稳态压降降低并优化分离效率，为旋流内嵌玻纤聚结元件的材质选型、表面优化提供基础试验依据。

本研究中采用旋流-聚结耦合强化分离器开展气液分离实验，其结构示意图如图3所示。旋流筒体总高度为0.15 m，筒体直径为0.05 m；切向入口宽度为0.015 m，入口高度为0.025 m；溢流口位置内嵌玻纤聚结纤维组件，聚结纤维层高度为0.06 m，径向厚度为0.005 m。分离器整体由切向旋流粗分离区、内嵌式纤维聚结精分单元、底流排液口、溢流气相出口四部分构成。

实验过程中经雾化喷嘴的气液两相由切向入口进入筒体后形成强旋流场，在离心力场作用下，大尺寸液滴向筒壁迁移富集，沿壁面液膜向下流动，由底流口排出，完成粗分离过程，该步骤能够大幅降低后续聚结纤维的液相负荷，避免纤维过早发生堵塞现象。经过旋流粗分之后，未被脱除的微细液滴随内旋流向上运动，进入溢流口内嵌的玻纤聚结层；微细液滴依靠惯性撞击与气流冲刷被纤维捕获，在纤维表面铺展形成连续液膜，小液滴不断聚结并生长为大液滴；聚结生成的大液滴在重力与气流剪切共同作用下脱离纤维层，一部分回落至旋流筒体，随壁面液膜从底流排出，最终经精分离后的气相从溢流口流出，实现旋流离心与纤维聚结的协同分离。与之相比，传统单一旋流分离器对*St*较小的微细液滴分离能力不足，微小液滴易随内旋流发生夹带作用，从溢流口逃逸；而单纯纤维聚结装置在高液相负荷下极易出现液泛效应导致压降急剧升高等问题。因此本耦合结构将聚结单元内嵌布置于溢流口内部，无需额外增设壳体，设备结构紧凑；而且旋流前置粗分承担大部分液相处理量，保护聚结纤维，延缓液泛发生；聚结单元捕获旋流无法处理的微细雾滴，弥补旋流对小液滴分离性能短板，有效提高气液分离效率。

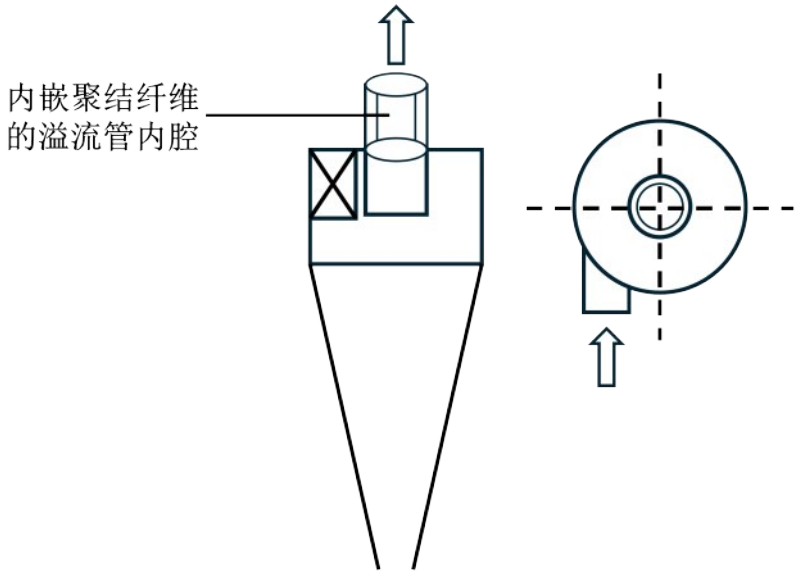


图3　聚结-旋流分离器结构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the coalescence-swirl separator structure

1.3　试验工况与气液分离效率计算

试验在常温、常压条件下进行，工质为清水和空气，通过清水-空气体系在晃荡工况下的气液分离行为，分析海上甲醇合成系统气液分离过程的主要变化特征。试验采用余弦简谐运动作为外部激励，通过设置不同运动频率和幅度模拟海洋纵摇扰动。本研究选取的晃荡幅度为3°-9°，晃荡频率为0.1-0.5 Hz。已有研究表明，浮式平台卧式三相分离

器内液相的一阶晃荡固有频率通常为0.2–0.3 Hz[18]，因此本文试验频率范围与工程实际工况具有一定对应关系。

由于出口气相中夹带液滴质量较小，直接测量难度较高，本文采用干燥管增重的间接转化方法计算气液分离效率（η），其表达式为：

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中，m_1为试验有效时间内经雾化喷嘴进入分离装置的液体总质量；m_2为同一时间内干燥管的增重质量，代表未被分离器捕集而随气相进入干燥管的液体质量。

在进行气液分离计算过程中，每组工况稳定运行5 min，且至少重复3次并取平均值，以降低随机误差。每组试验结束后，系统静置不少于15 min，待上一组工况残余气液混合物充分沉降后再开展下一组试验，从而减少残留液体对后续测量结果的影响。

效率下降率（η_r）是用于衡量晃荡工况相对于无晃荡工况的分离效率衰减程度，可表征外部扰动对分离性能的削弱幅度，其表达式为：

$$\eta_r = \frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中，η_0为无晃荡工况下的气液分离效率；η为指定晃荡工况下的气液分离效率。η_r越小，表明分离器抗晃荡能力越强、性能稳定性越好；η_r越大，则说明晃荡扰动对分离效率的削弱作用越显著。

2 结果与讨论

2.1 Stokes数分析

本研究以气液比、液滴尺寸、晃荡幅度和晃荡频率为主要影响因素，通过多因素试验分析晃荡条件下气液分离效率的变化规律，并结合Stokes数和效率下降率等无量纲指标，量化不同因素对分离性能的影响程度。Stokes数（*St*）用于表征液滴惯性响应时间与旋流场特征时间的相对关系，可反映液滴惯性力与气相黏性阻力之间的竞争关系，其表达式为：

$$St = \frac{\rho_l d_p^{\,2} u_l}{18\mu_g R} \times 10^{-12} \tag{4}$$

式中，ρ_l为液相密度，水取998 kg/m^3；d_p为液滴尺寸，单位为μm；u_l为旋流切向速度，单位为m/s；μ_g为空气动力黏度，空气取1.8×10^{-5} Pa·s；R为旋流器筒体半径，单位为m[19–20]。

Khani Aminjan K等[21]基于Suyari和Lefebvre的液膜厚度公式，指出随着喷嘴直径的增大液膜的厚度也将随之增大，而液膜增厚将致使破碎后液滴直径增大；曹博文等[22]通过相关实验对1.5、2.0和2.4 mm孔径喷嘴的实测结果进一步证实了这一规律。本文将0.5、1.5和2.5 mm喷嘴分别对应10–30、40–70和80–120 μm液滴，其孔径/粒径比例系数（16.7–50.0）处于压力旋流喷嘴的典型工程经验区间（10–100）内，且与上述的孔径–粒径正相关规律一致，因此该数据在物理机制和实验趋势均具有一定的合理性。现根据上述有效数据以及试验装置参数对其*St*进行相关估算，其中实验采用的小型旋流分离器的切向速度由导管的横截面积1.13×10^{-4} m^{2}与气相流量10–18 L/min经相关计算得其速度大小约为1.47–2.65 m/s；试验用旋流器筒体直径约为0.05 m。不同喷嘴孔径对应的液滴尺寸范围及*St*估算结果见下表1。

表1 不同喷嘴孔径对应的液滴尺寸与*St*估算值

Table 1 Droplet sizes corresponding to different nozzle diameters and *St* estimates

喷嘴孔径/mm	液滴尺寸d_p/μm	*St*
2.5	80–120	1.16–4.70
1.5	40–70	0.29–1.60
0.5	10–30	0.02–0.29

通常可将*St*=1作为液滴惯性分离与随流运动的临界判据，当*St*<1时，液滴惯性响应时间小于流场特征时间，液滴更易随气相流线运动，难以脱离气流并迁移至壁面，分离效率较低；当*St*>1时，液滴运动受惯性主导，可突破气相流线并向壁面迁移，惯性捕集作用增强[23]。图4给出了无晃荡工况及气液比100:1条件下*St*与气液分离效率的关系，结果表明0.5 mm喷嘴对应的跟随区液滴分离效率低于1.5 mm和2.5 mm喷嘴对应的惯性分离区液滴，然而*St*并非越大越有利；当液滴撞击壁面的速度过高时，可能诱发二次雾化和液膜飞溅，使已分离液相重新夹带进入气相[24]。因此，工程设计中应在液滴惯性捕集能力与壁面液膜稳定性之间进行平衡。

2.2 晃荡频率与液滴尺寸对分离效率及效率下降率的影响

图5给出了不同气液比下晃荡频率与液滴尺寸对气液分离效率及效率下降率的影响结果图，试验固定晃荡幅度为3°，分别在无晃荡及0.1、0.3以及0.5 Hz三种晃荡频率下，考察不同晃荡频率与液滴

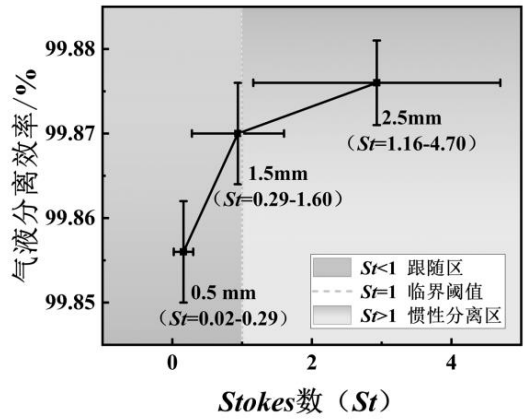


图4　无晃荡工况及气液比100:1条件下*St*与气液分离效率的关系

Fig. 4　Relationship between *St* and gas-liquid separation efficiency under no-oscillation and gas-liquid ratio conditions of 100:1

尺寸对应的分离效率和效率下降率的变化规律。

由图5左侧分离效率曲线可知，在不同的液滴尺寸下，随着晃荡频率的不断升高其分离效率呈单调下降趋势，即η(无晃荡)>η(0.1 Hz)>η(0.3 Hz)>η(0.5 Hz)；此外，在同一晃荡频率下，较大尺寸的液滴对应的分离效率均高于小尺寸液滴的分离效率，即η(80-120 μm)>η(40-70 μm)>η(10-30 μm)。在0.1 Hz低频晃荡条件下，分离装置运动周期较长，流体惯性滞后效应较弱，气液界面和旋流结构能够保持相对稳定，液滴离心迁移过程受外部扰动影响较小，因此其分离效率最接近无晃荡工况。当频率升高至0.3 Hz和0.5 Hz时，晃荡周期缩短，流体难以及时跟随分离器运动，内部周期性扰动增强，旋流场非定常性加剧；液滴有效离心迁移时间缩短，细微液滴更易随中心气流由排气口逃逸[25]，因此分离效率下降明显。在同一频率下，大尺寸液滴的*St*较

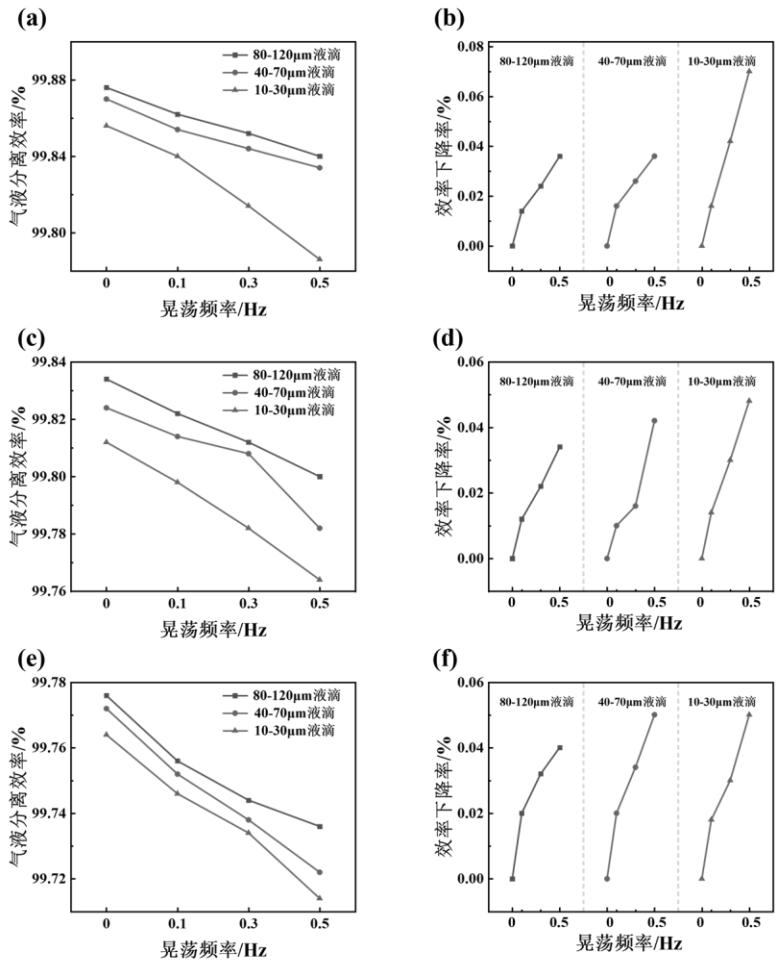


图5　不同尺寸液滴下晃荡频率对气液分离效率及效率下降率的影响图

Fig. 5　Effect of oscillation frequency on gas-liquid separation efficiency and efficiency reduction rate under droplets of different sizes

注：(a)和(b)气液比100:1；(c)和(d)气液比140:1；(e)和(f)气液比180:1

大，惯性响应时间长于流场特征时间，液滴迁移主要受初始动量和离心惯性控制，晃荡引起的流场偏置难以显著改变其向壁面迁移的趋势，故气相夹带量较低、分离效率较高；相反，小孔径喷嘴雾化产生的大量细微液滴 St 较小，运动更易受气相速度场约束，晃荡导致的流场偏置、回流增强和液膜波动会不断重置其迁移路径，使其更易被紊乱气流携带并从排气口逃逸，导致分离效率下降相对显著[23]。

由图5右侧效率下降率曲线可知，不同液滴尺寸下，效率下降率均随晃荡频率升高而增大。0.1 Hz低频晃荡时，曲线斜率整体平缓，效率下降率处于较低水平，此时晃荡周期远大于流场固有特征时间尺度，内部旋流场仍可维持准定常状态。当晃荡频率增大至0.3 Hz时，效率下降率出现明显上升，表明当晃荡周期与流场特征时间尺度趋于一致时，流体惯性滞后效应与液滴迁移路径的动态重构取代界面波动，成为主导流场演化的核心影响因素。当频率进一步增大至0.5 Hz时，效率下降率达到本次测试工况中的最高水平，高频晃荡大幅压缩了液滴完成径向离心迁移的有效时间，同时强化了相间曳力与短路流的耦合作用，进一步阻碍液滴向壁面运移聚结。同时由右侧曲线可知，在同一晃荡频率下，液滴尺寸越小，效率下降率通常越大，且随频率升高其斜率更陡，原因在于小尺寸液滴惯性弱、随流性强，高频晃荡下更易被中心气流携带逃逸；而大液滴凭借较大惯性维持向壁面迁移趋势，抗晃荡稳定性更好。

2.3 晃荡幅度与气液比对分离效率及效率下降率的影响

图6给出了不同液滴尺寸下气液比与晃荡幅度对气液分离效率及效率下降率的影响结果图，试验固定晃荡频率为0.1 Hz，分别在无晃荡及3°、6°以及9°三种晃荡幅度下，考察不同晃荡幅度与气液比对应的分离效率与效率下降率的变化规律。

由图6左侧分离效率曲线可知，不同尺寸的液滴在不同气液比下的分离效率均随晃荡幅度增大而下降，即 η(无晃荡)>η(3°)>η(6°)>η(9°)。在无晃荡条件下，旋流分离器内部流场近似轴对称，气液界面相对平稳，液滴在离心力作用下沿径向稳定迁移至壁面并聚结，分离效率最高，在施加3°晃荡后，分离器周期性倾斜使旋流场产生偏置，对称性受到轻微破坏，湍流脉动和二次夹带有所增强[26]，部分液滴偏离理想离心迁移路径，分离效率出现小幅下降。随着晃荡幅度进一步提升至6°和9°时，晃荡运动带来的附加惯性作用力、气液界面倾斜角度同步显著增大，分离器内部回流区稳定结构被破坏，局部涡流扰动持续强化，筒壁附着液膜产生剧烈起伏震荡，已聚结的液相介质被重新剥离并卷入主流气相；同时，剧烈扰动诱发二次雾化，进一步加剧气相夹带损失，因此分离效率随晃荡幅度提升呈现持续下降趋势。

在本气液分离实验中，气液比（Gas-Liquid Ratio，GLR）是从流量角度定义的，其为气相体积流量与液相体积流量的比值，且需在相同的温度和压力条件下计算：

$$GLR = \frac{Q_g}{Q_l} \tag{5}$$

其中 Q_g 为气相体积流量，Q_l 为液相体积流量，实验中气相流量采用的单位为L/min，液相流量的单位为mL/min。实验中三种不同气液比对应的气相流量与液相流量大小如表2所示。

表2 不同气液比对应的气相流量与液相流量

Table 2 Gas flow rate and liquid flow rate corresponding to different gas-liquid ratios

	100:1	140:1	180:1
气相流量(L/min)	10	14	18
液相流量(mL/min)	100	100	100

同时由左侧分离效率曲线可知，在同一晃荡幅度下，低气液比的分离效率始终大于高气液比，即 η(100:1)>η(140:1)>η(180:1)。气液比增大意味着气相流量增大，在相同流通截面积下气相流速随之增大[27]，旋流腔内切向速度和Reynolds数也相应增大，湍流强度增强，高气速下液滴所受气相阻力增大，离心迁移被抑制。同时，高气液比下气液两相在分离器内的停留时间缩短，使液滴离心迁移和聚结过程不充分；此外，高速气流还可能撕裂壁面液膜并诱发二次雾化，从而进一步降低分离效率[28-29]。

由图6右侧效率下降率曲线可知，各尺寸液滴的效率下降率均随晃荡幅度增大而上升。在3°小幅晃荡区间内，外部附加惯性力整体偏弱，旋流流场仅存在轻微空间偏置，气液界面倾斜幅度有限，效率下降率处于较低水平。当晃荡幅度提升至6°时，下降率曲线斜率出现明显陡增，表明随着附加惯性力与气液界面倾斜效应耦合增强，旋流器内部回流区稳定结构被大幅破坏，筒壁液膜波动程度加剧，两相夹带损失显著放大。当晃荡幅度持续提升

至9°时，如前所述，液膜剧烈波动与二次雾化在峰值状态下使两相分离损耗被放大至较高水平，对应效率下降率也达到各组工况中的最大值。

同时由右侧效率下降率曲线可知，气液比对小尺寸液滴效率下降率的影响呈现非单调特征。在气液比100:1条件下，小尺寸液滴的效率下降率较高，主要原因是低气速下旋流场刚性不足，难以抵抗容器倾斜扰动，小液滴更易偏离迁移路径而逃逸。当气液比增至140:1后，适度增强的切向速度提高了旋流场稳定性，对晃荡扰动产生一定阻尼作用，因此小尺寸液滴的效率下降率有所回落。当气液比进一步增至180:1时，高气速带来的气相阻力增大、停留时间缩短和液膜二次雾化效应重新占据主导，负面影响超过流场稳定性提升作用，效率下降率将再次上升[30]。

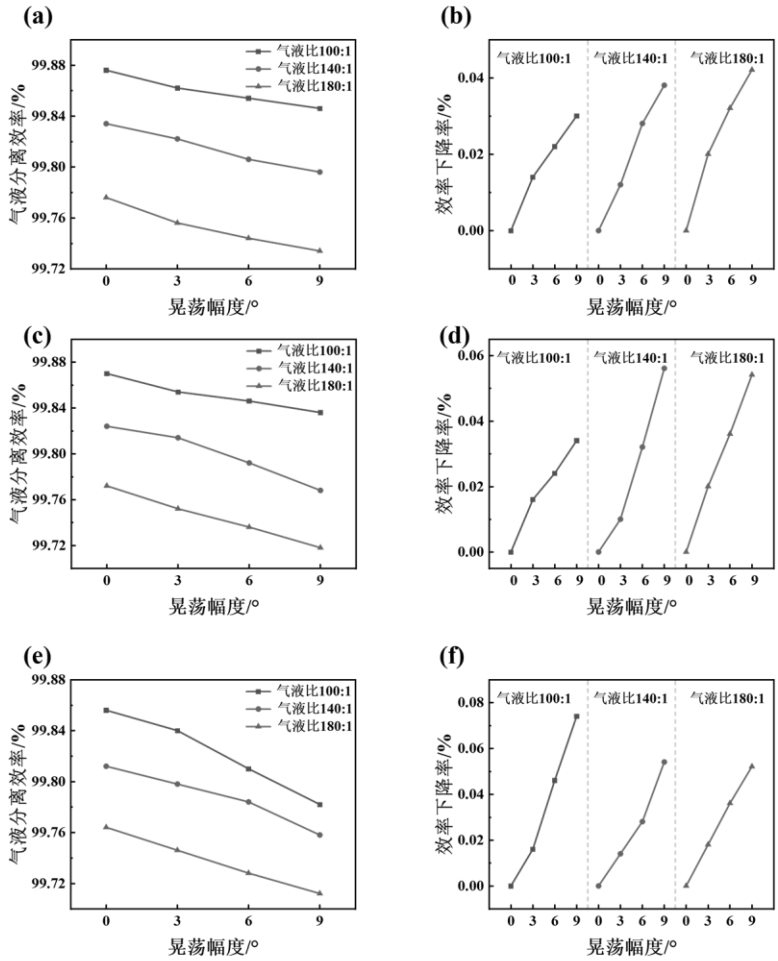


图6　不同气液比下晃荡幅度下的气液分离效率及效率下降率的影响图

Fig. 6　Effect diagram of gas-liquid separation efficiency and efficiency reduction rate under different sway amplitudes under gas-liquid ratios

注:(a)和(b)80-120 μm液滴;(c)和(d)40-70 μm液滴;(e)和(f)10-30 μm液滴

3　结论

(1)旋流-聚结耦合结构在测试工况范围内分离效率均保持在99.7%以上，验证了该紧凑构型对海上晃荡环境的适用性；但晃荡扰动仍会通过强化流场非定常性导致效率出现规律性微小衰减，其衰减幅度受多因素耦合控制。

(2)晃荡幅度与频率通过破坏旋流场轴对称结构、诱发壁面液膜波动及二次雾化削弱分离稳定性；气液比通过改变旋流场刚性与气液停留时间影响液滴迁移充分性，且对小尺寸液滴呈现非单调影响特性；液滴尺寸通过*St*决定其惯性响应特性，*St*>1时液滴以惯性迁移为主导，抗晃荡能力显著增强。

（3）综合各影响因素可知，晃荡幅度增大、晃荡频率升高、气液比提高和液滴尺寸减小均会削弱旋流-聚结气液分离器的分离性能。研究结果可为分离器结构优化、操作工况边界选取以及海上成套装备稳定化设计提供直接判据，还可以为建立高分离区间性能衰减预测模型、制定海上晃荡工况下分离设备运行控制策略以及工程放大准则提供理论支撑，对降低浮式平台液击故障风险、减少甲醇产物损耗、保障绿色甲醇合成系统长期安全经济运行具有重要工程价值。

符号说明

d_p——液滴尺寸，μm
f——晃荡频率，Hz
m_1——试验有效时间内经雾化喷嘴进入分离装置的液体总质量，g
m_2——同一时间内干燥管的增重质量，即代表未被分离器捕集而随气相进入干燥管的液体质量，g
Q_g——气相体积流量，L/min
Q_l——液相体积流量，mL/min
R——旋流器筒体半径，m
St——Stokes数，无量纲
t——六自由度平台工作时间，s
u_l——旋流切向速度，m/s
$\alpha(t)$——任意时刻的纵摇角位移，rad
θ——晃荡幅度，°
μ_g——空气动力黏度，Pa·s；空气取1.8×10^{-5} Pa·s
η——晃荡工况下的气液分离效率，%
η_0——无晃荡工况下的气液分离效率，%
η_r——效率下降率，%
ω——角频率，rad/s
ρ_l——液相密度，kg/m^3；液相为水取998 kg/m^3

参考文献

[1] 张广伟. 海洋晃动平台全喷射逆流塔盘的水力学性能实验与模拟研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
Zhang G W. Experimental and simulation study on the hydrodynamic performance of full-jet countercurrent trays on a marine shaking platform [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023.

[2] Prussi M. Applying the international maritime organisation life cycle assessment guidelines to pyrolysis oil-derived blends: a sustainable option for marine fuels[J]. Energies, 2024, **17**(21): 1-16.

[3] Crivellari A, Cozzani V, Dincer I. Design and energy analyses of alternative methanol production processes driven by hybrid renewable power at the offshore Thebaud platform[J]. Energy Conversion and Management, 2019, **187**: 148-166.

[4] 李茹茹, 王超. 浮式平台三相分离器液相晃荡特性分析及优化设计[J]. 中国机械, 2025(12): 39-42.
Li R R, Wang C. Analysis and optimization design of liquid sloshing characteristics of floating platform three-phase separator [J]. Machine China, 2025(12): 39-42.

[5] 刘生. 基于CFD的甲醇合成中气液分离的模拟与优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
Liu S. Study on simulation and optimization of separation of gas/liquid during methanol synthesis based on the CFD[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.

[6] 罗佳琪, 宋扬, 张洪政, 等. FPSO油-水旋流分离器模拟分析及应用研究[J]. 石油石化节能与计量, 2023, **13**(12): 1-6.
Luo J Q, Song Y, Zhang H Z, et al. Research on the simulation analysis and application of FPSO oil-water swirl separator[J]. Energy Conservation and Measurement in Petroleum & Petrochemical Industry, 2023, **13**(12): 1-6.

[7] Singh C J, Mukhopadhyay S, Rengasamy R S. Fibrous coalescence filtration in treating oily wastewater: a review[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, **51**(3_suppl): 3648S-3682S.

[8] Lu H, Yang Q, Liu S, et al. Effect of fibrous coalescer redispersion on W/O emulsion separation[J]. Separation and Purification Technology, 2016, **159**: 50-56.

[9] 吴桂良, 杨向东, 王洪昌, 等. LNG接收站BOG压缩机平稳运行的工艺优化[J]. 低碳化学与化工, 2023, **48**(6): 177-182.
Wu G L, Yang X D, Wang H C, et al. Process optimization for stable operation of BOG compressor in LNG terminal[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, **48**(6): 177-182.

[10] Burmana A D, Taslim, Maisarah S, et al. The reduction of exhaust gases from the distillation column using two condensers to assessment of the carbon footprint of the biodiesel plant[J]. Sustainable Chemistry for Climate Action, 2026, **9**: 100222.

[11] 杨帆. 晃荡条件下LNG系统中气液分离器分离特性模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Yang F. Numerical simulation for gas-liquid separator distribution characteristics in LNG systems in rolling conditions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[12] 郑晓鹏, 张明, 雷俊勇, 等. 海上三相重力分离器晃荡试验研究[J]. 石油机械, 2024, **52**(12): 53-61.
Zheng X P, Zhang M, Lei J Y, et al. Experimental study on sloshing of offshore three-phase gravity separator[J]. China Petroleum Machinery, 2024, **52**(12): 53-61.

[13] 滕岳虎, 李超凡, 徐敏, 等. 基于CFD的通海船舱晃荡与流体交换研究[J]. 中国舰船研究, 2025, **20**(3): 53-62.
Teng Y H, Li C F, Xu M, et al. Numerical study on sloshing and water exchange of free-flooding tank based on CFD[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, **20**(3): 53-62.

[14] 范叔玮. 深远海浮式平台分离器晃荡特性与抑制的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
Fan S W. Study on sloshing characteristics and mitigation of separators for deep sea floating platform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.

[15] Chaolei W, Zhiqian S, Zhenbo W, et al. Experimental study on the optimum number of layers of fiber mats for gas-liquid coalescer [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, **2707**(1): 012152.

[16] Starnoni M. Multiphase flow and coalescence filtration in fibrous

filters: a review of numerical and machine learning approaches[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, **64**(47): 22515-22539.

[17] 陈锋, 姬忠礼, 巴其鑫, 等. 空气过滤用玻璃纤维滤材的油雾聚结性能及改性优化[J]. 高校化学工程学报, 2022, **36**(1): 101-109.
Chen F, Ji Z L, Ba Q X, et al. Oil-mist coalescence performance and optimization of filters for air filtration[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2022, **36**(1): 101-109.

[18] 岑康. 浮式平台用油气水分离器液相晃荡特性及其抑制研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
Cen K. Liquid sloshing characteristics and suppression methods for 3-phase separators installed on floating production unit[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

[19] Chen J H, Yang B, Jiang Z A, et al. Effect of external cyclone diameter on performance of a two-stage cyclone separator[J]. ACS Omega, 2019, **4**(8): 13603-13616.

[20] Mikheev N, Saushin I, Paereliy A, et al. Cyclone separator for gas-liquid mixture with high flux density[J]. Powder Technology, 2018, **339**: 326-333.

[21] Khani Aminjan K, Ghodrat M, Escobedo-diaz J P, et al. Study on inlet pressure and Reynolds number in pressure-swirl atomizer with spiral path[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, **137**: 106231.

[22] 曹博文, 钱付平, 黄小萍, 等. 转炉一次除尘新OG系统高效喷淋塔喷嘴雾化效果的实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, **36**(3): 278-282.
Cao B W, Qian F P, Huang X P, et al. Experimental study of atomization characteristics in high efficient spraying tower nozzle for new OG system of converter′s primary dedusting[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2019, **36**(3): 278-282.

[23] Vermande Paganel T, Fabrice Alban E, Cyrille M A, et al. CFD simulation of an industrial dust cyclone separator: a comparison with empirical models: the influence of the inlet velocity and the particle size on performance factors *in situ* ation of high concentration of particles[J]. Journal of Engineering, 2024, **2024**: 5590437.

[24] 徐德辉, 顾汉洋, 刘莉, 等. 新型锥形式旋叶汽水分离器热态试验与数值研究[J]. 上海交通大学学报, 2021, **55**(9): 1087-1094.
Xu D H, Gu H Y, Liu L, et al. Thermal experimental and numerical study on performance of a novel conical swirl-vane steam separator[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, **55**(9): 1087-1094.

[25] 林琳, 吴家俊, 徐胜文, 等. 附加阻尼板的气液分离器液位抑制[J]. 中国海洋平台, 2025, **40**(3): 35-42.
Lin L, Wu J J, Xu S W, et al. Liquid level suppression of gas-liquid separators with additional damping plates[J]. China Offshore Platform, 2025, **40**(3): 35-42.

[26] Zhang X G, Yu F, Jin Y, et al. Study on flow field characteristics of gas-liquid hydrocyclone separation under vibration conditions [J]. PLoS One, 2024, **19**(7): e0307110.

[27] Jiang L Y, Liu P K, Zhang Y K, et al. The effect of inlet velocity on the separation performance of a two-stage hydrocyclone[J]. Minerals, 2019, **9**(4): 209.

[28] Li Y X, Wang Y C, Xie X D, et al. Numerical investigation of separation characteristics for a volute-type multichannel gas - liquid cyclone separator[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2026, **65**(11): 6164-6180.

[29] 邢雷, 关帅, 蒋明虎, 等. 高气液比井下气液旋流分离器结构设计与性能分析[J]. 化工学报, 2024, **75**(3): 900-913.
Xing L, Guan S, Jiang M H, et al. Study on structure optimization and performance of downhole gas-liquid hydrocyclone under high gas-liquid ratio[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(3): 900-913.

[30] 李彦熹, 王晔春, 谢向东, 等. 蜗壳式多通道气液旋流分离器结构优化及分离特性研究[J]. 化工学报, 2024, **75**(8): 2875-2885.
Li Y X, Wang Y C, Xie X D, et al. Study on separation characteristics and structure optimization of a volute type multi-channel gas-liquid cyclone separator[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(8): 2875-2885.