

文章编号:1674-2869(2014)010-0037-05

# 油-水-气三相旋流器分离验证及气-液腔结构优化

郑小涛<sup>1</sup>, 龚程<sup>1</sup>, 徐红波<sup>2</sup>, 喻九阳<sup>1</sup>, 林伟<sup>1</sup>, 徐成<sup>1</sup>

1. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205;

2. 广州民航职业技术学院飞机维修工程学院, 广东 广州 510470

**摘要:**采用 Fluent 软件数值模拟了新型油-水-气三相旋流器的分离性能, 并以分离效率为目标函数对气-液分离腔主要尺寸进行了优化设计。结果表明, 该型油-水-气三相旋流器在油滴与气泡直径为  $50\ \mu\text{m}$  时具有最优的分离效率, 且其气泡迁移效率较油滴迁移效率高。当气泡直径为  $50\ \mu\text{m}$  时, 气-液分离效率达到 99% 以上; 当气泡直径小于  $40\ \mu\text{m}$  时, 气-液分离效率随直径的减小显著下降; 当气泡直径小于  $10\ \mu\text{m}$  时, 气-液分离效率趋近于零。经对比分析建立了溢流口直径与分流比的线性关系式, 且得到优选后气-液分离腔最优主要结构尺寸: 分离腔长度 203 mm, 分离腔直径 60 mm, 溢流口插入长度 20 mm。

**关键词:**油水气分离; 数值模拟; 优化设计

**中图分类号:** TE991.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.10.08

## 0 引言

油-水-气三相旋流分离与水力旋流分离器的原理相同, 都是利用高速旋转流体产生的离心力使存在密度差互不相容的两相产生分离。油-水-气三相旋流分离技术主要涉及到气-液旋流分离技术和液-液旋流分离技术。常用的气-液旋流分离器主要有管柱式气-液分离旋流器<sup>[1]</sup>、旋流板式气-液分离旋流器<sup>[2]</sup>、轴流式气-液分离旋流器<sup>[3]</sup>、内锥式气-液旋流分离器<sup>[4]</sup>以及螺旋片导流式气-液分离旋流器<sup>[5]</sup>。液-液旋流分离技术前人已经有较深入的研究, 笔者依据气-液旋流分离理论和液-液旋流分离的理论, 将两种分离技术相结合, 设计出一种油-水-气三相旋流分离器<sup>[6]</sup>。采用 CFD 技术, 能够对新型油水旋流分离器进行分离验证及优化设计。

## 1 建立模型

图 1 为油-水-气三相旋流分离器的模型图, 其设计的基本原理在于油-水-气三相混合液体由油-水-气三相旋流分离器入口以一定的速度切向进入气-液分离腔, 混合流体在旋流腔内部做高速旋流运动, 旋流运动所产生的离心力使比油和水密度小得多的气体聚集在气-液分离器腔内部的锥体壁面处, 由于径向压力的挤压和锥角向上的推力, 使得气体向气相出口溢出, 完成气-液分离过程。完成

气-液分离的油水混合物, 由于气-液分离腔的底部的截面积变小, 仍保持较高的速度由螺旋导管进入液-液旋流分离腔, 其分离原理和文献[7]研究的油-水分离原理相同。

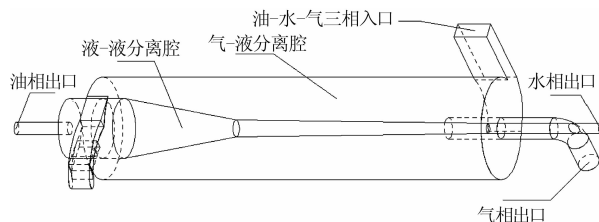


图 1 油-水-气三相旋流分离器模型图

Fig. 1 The model of oil-water-gas three phase cyclone

图 2 为将油-水-气三相旋流分离器气-液分离腔与液-液分离腔的拆分图, 其中液-液旋流分离腔采用双锥液-液旋流分离器, 其初始计算尺寸如表 1 所示。

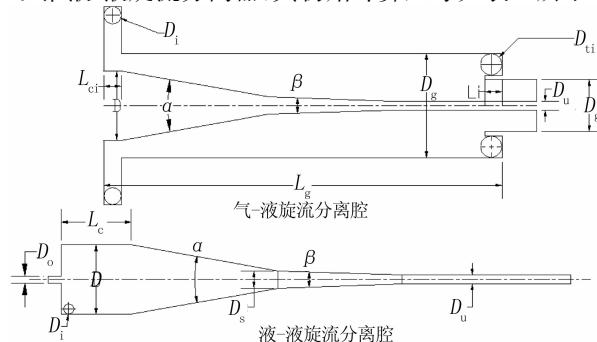


图 2 气-液分离腔与液-液分离腔计算模型图

Fig. 2 The model of gas-liquid separation chamber and liquid-liquid separation chamber

收稿日期: 2014-06-11

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2012FFB04707); 武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2013080); 武汉工程大学科学研究基金项目(K201414)

作者简介: 郑小涛(1982-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士。研究方向: 设备及材料的结构完整性、流体设备以及传热与传质。

表 1 油-水-气三相旋流分离初始尺寸表

Table 1 The parameters of oil-water-gas three phase cyclone

符号	尺寸	符号	尺寸
$L_g/\text{mm}$	230	$L_c/\text{mm}$	40
$D_g/\text{mm}$	60	$D/\text{mm}$	40
$D_{g0}/\text{mm}$	30	$\alpha/(\text{mm})$	20
$L_i/\text{mm}$	10	$\beta/(\text{mm})$	4
$D_{ii}$		$D_s/\text{mm}$	10
$D_i$		$D_u/\text{mm}$	5
$D_{ii}/\text{mm}$	7	$L_{ci}/\text{mm}$	10

2 油-水-气三相分离验证

油-水-气三相物理性质如表 2 所示,为验证三相旋流分离器分离的可行性,油相和气相均采用适中粒径 50  $\mu\text{m}$ .

表 2 油-水-气三相物理性质

Table 2 The properties of oil water and gas

项目	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粘度 $/\text{cP}$	粒径 $/\mu\text{m}$	体积比 $/\%$	入口速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
油	850	3.32	50	5	10
水	998.2	1.003	—	75	10
气	0.669 7	0.010 87	50	20	10

采用数值模拟方法,将模型导入 Fluent 软件中,设置相关边界条件<sup>[8]</sup>和介质物理性质,验证此油-水-气三相旋流分离器气-液分离的可行性.液-液分离腔的入口初始条件为气-液分离腔出口条件,其速度和含油浓度与气-液分离器出口相一致.

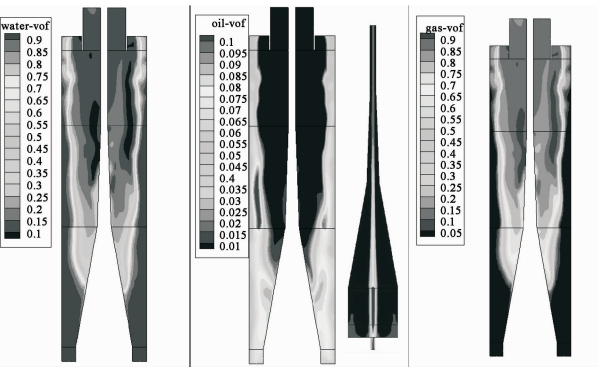


图 3 油-水-气三相体积分数分布云图

Fig. 3 The volume fraction contour of oil water and gas

图 3 为三相介质的体积分数分布云图,由图 3 可知水相进入气-液分离腔后沿着壁面向下聚集,气-液分离腔中圆筒壁面附近和底部的水相浓度为 90% 以上,证明 90% 以上的水-油混合液经底流口

排除;油相的体积分数分布云图与水相一致,几乎全部由液相底流口排除,油滴进入液-液分离腔后,与水进行油水两相分离,分离过程与普通油水旋流分离器相一致.而气相的分布与油相和水相相反,气体进入气-液分离腔后向中心聚集,其中气相溢流口浓度最高,并沿着锥角向上聚集.油-水-气三相的体积分布说明了气-液旋流腔中的气液分离成功,其中油和水由底流口排除,而气体由溢流口排除,实现了气-液分离,同时也验证了新型油-水-气三相旋流分离器的可行性.

图 4 为入口速度为 10 m/s 时的气-液旋流分离的气体迁移效率图,也就是不同粒径气泡的分离效率.由图 4 可知气-液分离相对液-液分离来说更为简单.当气泡粒径为 50  $\mu\text{m}$  时,分离效率就能达到 99% 以上,当气泡粒径小于 40  $\mu\text{m}$  时,分离效率开始下降,小于 30  $\mu\text{m}$  时急剧下降,当气泡粒径小于 10  $\mu\text{m}$  时,分离效率几乎为零.气体的迁移效率不仅能够反映出旋流分离器对气体的分离能力,而且能够对数值模拟研究和实验研究气泡粒径的选择有一定的指导意义.

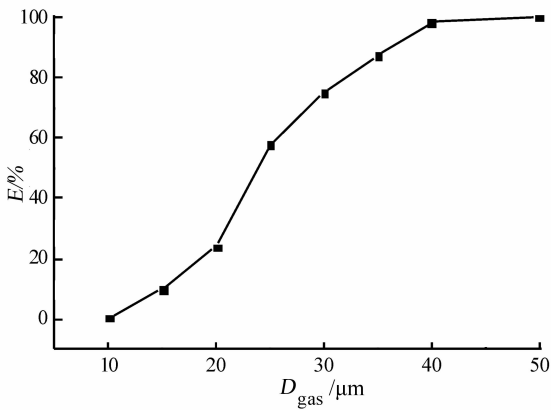


图 4 气体迁移效率分布图

Fig. 4 The migration efficiency of gas

注: —■— gas

3 气-液分离腔优化设计

油-水-气三相旋流分离器涉及气-液分离和液-液分离两个过程,而液-液旋流分离器众多学者已经对其进行了充分的研究与优化设计<sup>[7]</sup>.本文将采用 CFD 技术对新型油-水-气三相旋流分离器中的气-液分离腔进行优化设计,以达到提高分离性能的目的.

图 5 为不同气-液旋流腔长度下气-液分离的迁移效率对比图,由图 5 可知,旋流腔长度对气泡的分离效率有一定的影响,其中特别在粒径区间为 20~40  $\mu\text{m}$  之间.在此区间,随着旋流腔长

度的增加,分离效率逐渐增大,当  $L_g=203\text{ mm}$  时分离效率最高,这是由于随着旋流腔长度的增加,气泡停留时间增加,气相在中心聚集的浓度增加,因此分离效率也提高;当旋流腔长度进一步增大时,分离效率降低,当  $L_g=230\text{ mm}$  分离效率最低,这是由于旋流器长度的增加,切向速度减小,并且较长的旋流器会导致大量的循环涡流存在,影响气泡的分离,降低分离效率。

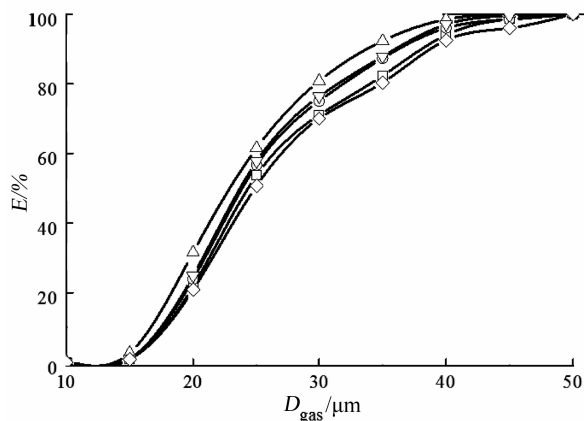


图 5 不同气-液旋流分离腔长度下迁移效率对比图

Fig. 5 The migration efficiency of different gas-liquid cyclone separation chamber lengths

—□—  $L_g=176\text{ mm}$   
—○—  $L_g=190\text{ mm}$   
注:—△—  $L_g=203\text{ mm}$   
—▽—  $L_g=216\text{ mm}$   
—◇—  $L_g=230\text{ mm}$

图 6 为不同气-液旋流腔长度下的压降对比图,由图 6 可知底流口压力降随着旋流腔长度增加而增加,这是由于当旋流腔长度增大后,流体在气-液旋流腔的停留时间增加,导致底流口排除的流体能量损失过多,压力降增大,而溢流口的压力降随着气-液旋流腔的长度增加而减小,并且减小的梯度与溢流口增加的梯度相接近。综合分离效率和压降分析,气-液旋流腔长度  $L_w$  选择为  $203\text{ mm}$ 。

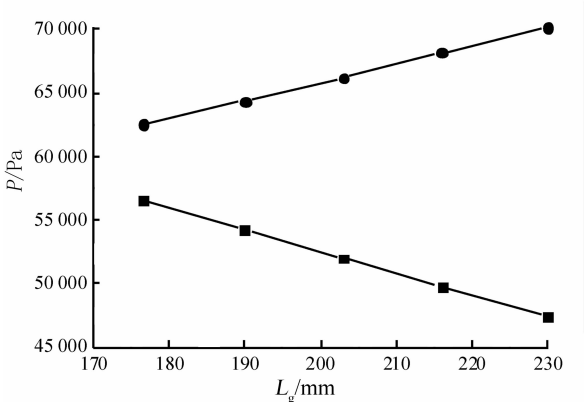


图 6 不同气-液旋流分离腔长度下压降对比图

Fig. 6 The pressure drop of different gas-liquid cyclone separation chamber lengths

注: —□— Pressure drop of overflow  
—○— Pressure drop of underflow

图 7 为不同气-液旋流分离腔直径下的气相迁移效率对比图,由图 7 可知,  $D_g$  对分离效率有一定的影响,其中  $D_g$  为  $60\text{ mm}$  时分离效率最高,并随着分离腔直径的增大而降低。在气泡粒径为  $25\text{ }\mu\text{m}$  至  $40\text{ }\mu\text{m}$  区间,分离腔直径每增大  $10\text{ mm}$ ,分离效率评价下降  $10\%$  左右。因此直径较小的气-液旋流分离腔有助于小粒径的气泡分离。

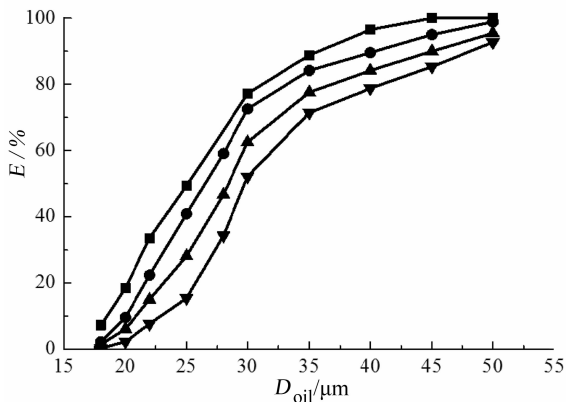


图 7 不同气-液旋流分离腔直径下迁移效率对比图

Fig. 7 The migration efficiency of different gas-liquid cyclone separation chamber diameters

—□—  $D_g=60\text{ mm}$   
—●—  $D_g=70\text{ mm}$   
注:—△—  $D_g=80\text{ mm}$   
—▽—  $D_g=90\text{ mm}$

图 8 为不同气-液旋流分离器直径下压降对比图,由图 8 可知随着分离腔直径的增大,底流口和溢流口的压力降都降低。由于当旋流腔直径增大后,流体切向速度减小,造成湍动能耗散率减小,从而导致分离效率降低和压力降降低。综合分析,将选择气-液旋流分离腔直径  $D_g$  为  $60\text{ mm}$ 。

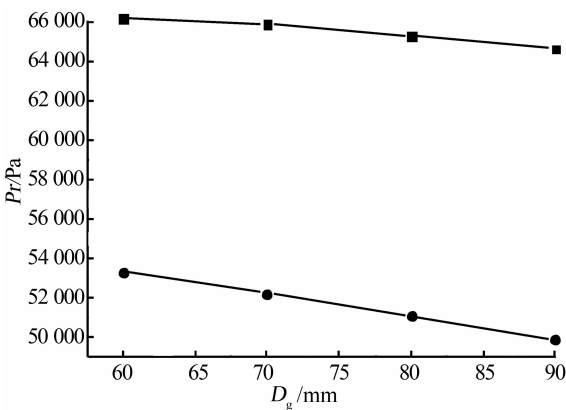


图 8 不同气-液旋流分离腔直径下压降对比图

Fig. 8 The pressure drop of different gas-liquid cyclone separation chamber diameters

注: —□— Pressure drop of underflow  
—●— Pressure drop of overflow

图 9 为溢流口直径和分流比关系,其中  $F_o$  为溢流口分流比.由图 9 可知,分流比与溢流口直径呈线性关系,最小分流比为 16%,最大为 25%.分流比的确定对入口含气浓度和分离效率有着重要的影响.本文中初始条件入口含气体积分数为 20%,因此选择分流比为 20%的溢流口直径 30 mm.

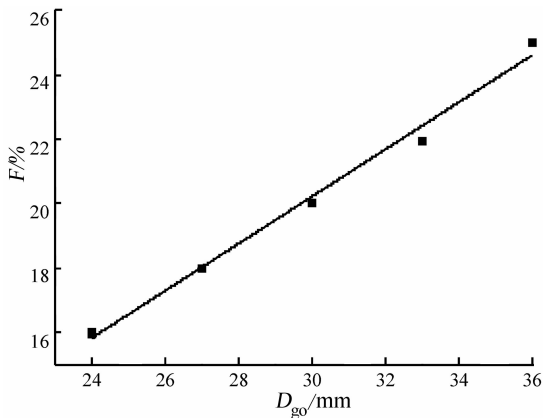


图 9 溢流口直径与分流比关系

Fig. 9 The relationship between the overflow diameter and the split ratio

图 10 为不同溢流口插入长度  $L_{ci}$  下的迁移效率对比图,由于  $L_{ci}$  对分离效率的影响很小,在大尺度气泡粒径下分离效率影响不明显,因此选择粒径为 18~28  $\mu m$  区间进行分析.由对比图可知,当  $L_{ci}$  为 20 mm 时分离效率最高, $L_{ci}$  为 30 mm 时分离效率最低.

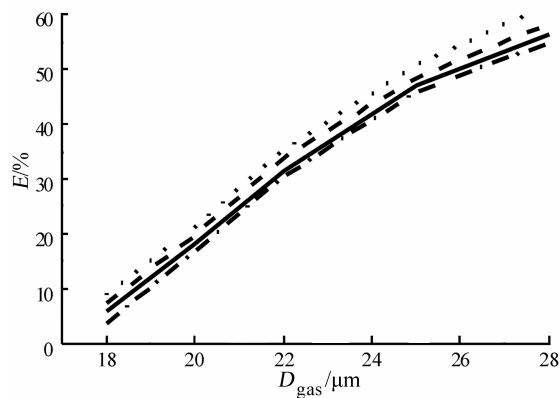


图 10 不同溢流口插入长度下迁移效率对比图

Fig. 10 The migration efficiency of different overflow insert depths

## 4 结 语

设计了新型的油-水-气三相旋流分离器,并进行了可行性验证和优化设计,得到以下结论:

a. 通过数值模拟计算方法,证明了油-水-气

三相旋流分离器分离的可行性,并且得到了其气体的迁移效率.当气泡粒径为 50  $\mu m$  时,分离效率就能够达到 99% 以上,当气泡粒径小于 40  $\mu m$  时,分离效率开始下降,并当气泡粒径小于 10  $\mu m$  时,分离效率几乎为零.

b. 对气-液分离腔的相关关键尺寸进行优选设计,得到其最佳气液旋流腔长度为 203 mm,最佳气-液旋流分离腔直径为 60 mm,最佳溢流口插入长度为 20 mm;并且得到了溢流口直径与分流比之间的关系式.

## 致 谢

本文研究工作得到了湖北省自然科学基金项目(2012FFB04707)、武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2013080)和武汉工程大学科学研究基金项目资助,在此一并表示衷心感谢.

## 参考文献:

- [1] 曹学文,林宗虎,黄庆宣,等.新型管柱式气液旋流分离器[J].天然气工业,2002,22(2):71-75.  
CAO Xue-wen, LIN Zong-hu, HUANG Qing-xuan, et al. A new string type gas-liquid cyclone separator [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(2): 71-75. (in Chinese)
- [2] 王政威,刘国荣,魏玉垒,等.旋流板式气液分离器减阻杆实验研究[J].环境工程学报,2010,4(11):2571-2574.  
WANG Zheng-wei, LIU Guo-rong, WEI Yu-lei, et al. Vortex board type gas-liquid separator drag rod experimental research [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(11): 2571-2574. (in Chinese)
- [3] 刘伟.轴流式气液分离器试验研究[D].西安:中国石油大学,2007.  
LIU Wei. Experimental study on the axial gas liquid separator [D]. Xian:China University of Petroleum, 2007. (in Chinese)
- [4] 尤佳丽.内锥式柱状气液旋流分离器结构设计及优化[D].大庆:东北石油大学,2012.  
YOU Jia-li. Columnar inner cone type gas-liquid cyclone separator structure design and optimization [D]. Daqing:Northeast Petroleum University, 2012. (in Chinese)
- [5] 周幅彦,凌祥,涂善东,等.螺旋片导流式分离器分离性能的数值模拟与试验研究[J].化工学报,2004,55(11):1821-1824.  
ZHOU Jin-yan, LING Xiang, TU San-dong, et al. The numerical simulation and experimental research of Spiral diversion separator's separation perform-

ance [J]. CIESC Journal, 2004, 55 (11): 1821-1824. (in Chinese)

[6] 武汉工程大学. 一种油-水-气三相旋流分离器:中国, 203355909U[P]. 2013-04-15.  
Wuhan Institute of Technology. A kind of oil and gas three-phase hydrocyclone separator: china, 203355909U[P]2013-04-15. (in Chinese)

[7] 郑小涛,徐成,喻九阳,等. 液-液旋流分离器分离特性数值模拟[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(3):48-52.  
ZHENG Xiao-tao, XU Cheng, YU Jiu-yang, et al. The numerical simulation of liquid-liquid hydrocy-

clone separator separation characteristics [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(3): 48-52. (in Chinese)

[8] 王海刚,刘石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. 热能动力工程,2003,18(4):337-342.  
WANG Hai-gang, LIU Shi. The application and comparison of the numerical simulation of different turbulence models in the cyclone separator[J]. Thermal Power Engineering, 2003, 18(4): 337-342. (in Chinese)

## Verification of separation performance of oil-water-gas cyclone and optimization of structure of liquid-gas separation chamber

ZHENG Xiao-tao<sup>1</sup>, GONG Cheng<sup>1</sup>, XU Hong-bo<sup>2</sup>, YU Jiu-yang<sup>1</sup>, LIN Wei<sup>1</sup>, XU Cheng<sup>1</sup>

1. Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety  
(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China
2. Department of Aircraft Maintenance and Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510470, China

**Abstract:** The Fluent was adopted to simulate the separation performance of the new oil-water-gas cyclone, and the separation efficiency was regarded as a objective function to optimally design the main sizes of the gas-liquid separation chamber. The results show that the separation performance of the oil-gas-water cyclone is best when the diameters of oil droplets and bubbles are 50um, and the migration efficiency of bubbles is better than that of oil droplets. The gas-liquid separation efficiency is over 99% when the bubble size is 50um; the gas-liquid separation efficiency decreases obviously with the bubble diameters reducing when the bubble size is less than 40um; the gas-liquid separation efficiency approaches to zero when the bubble size is less than 10um. Through the comparative analysis, the linear relation between the diameter of overflow and the split ratio was established, and the optimum sizes of the main structure of the gas-liquid separation chamber are 203mm of length, 60mm of diameter and 20mm of insert length.

**Key words:** oil-water-gas separation; numerical simulation; optimization design

本文编辑:陈小平