文章编号:1000-8608(2020)04-0358-07

直叶片离心喷雾气液反应器分离性能

张婉婷1,许晓波2,邓列征2,陈文武2,金玉奇2,胡大鹏*1

(1.大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国科学院 大连化学物理研究所 化学激光研究室, 辽宁 大连 116023)

摘要:为了解决目前单重态氧发生器存在的气体处理量小、气液反应面积小和气液分离 不彻底的问题,设计了一种雾化技术与离心技术相结合的两级排液式直叶片离心喷雾气液反 应器.首先采用 CFD 方法,对该反应器建立了计算模型,研究了反应器中连续相流场、离散相 颗粒的运动特性,系统分析了粒径及转速对反应器分离性能的影响,获得了分离特性曲线.然 后通过实验研究,分析了反应器在真实工况下的分离性能.综合研究表明,CFD 模拟结果与 实验结果比较吻合,CFD 模型可用于该实验研究.反应器在 5 mol/s 的气体流量下对于粒径 大于 90 µm 的液滴在 3 000 r/min 转速下分离效率 100%,为单重态氧发生器的发展提供了 参考.

关键词:单重态氧发生器;离心喷雾气液反应器;分离性能;数值模拟;实验研究 **中图分类号:**TQ019 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb202004004

0 引 言

单重态氧发生器(singlet oxygen generator, 简称 SOG)是氧碘化学激光器(chemical oxygen iodine laser,简称 COIL)的重要组成部分,而氧碘 化学激光器作为继 HF/DF 激光器出现之后的第 二代化学激光器,由于有着大气传输性能好、储能 高、效率高、光纤传输效率高等诸多优点,在军事、 医疗、工业等许多领域都有潜在的应用^[1-5].

尽管目前存在多种制备单重态氧的方法^[6-7], 但是氯气与碱性过氧化氢溶液(简称 BHP)的反 应是目前唯一应用于实际生产的工艺方法^[8].气 体和液体在反应器发生反应产生 O₂(¹Δ)的化学 反应是典型的气液两相反应,而目前国内传统射 流式单重态氧发生器^[9-12]气液接触方式主要为气 体与液柱的接触,存在气液接触面积小导致气液 化学反应效率低的问题.喷雾式发生器为气体与 液滴的接触,反应效率高,但存在气体处理量小、 气流中挟带大量水汽导致气液分离效率低的问 题.所以,开发满足气液接触面积大、气体处理量 大、分离效率高的新型反应器尤为重要.

因离心喷雾式分离器具有分离颗粒小、分离 效率高、设备占地面积小、操作灵活、运行稳定及 维护方便等优点,是应用最为广泛的气液分离 器[13],同时喷雾式反应器气液接触方式为气体与 液滴的接触,极大提高了接触表面积,Spalek 等 研究的离心喷雾式反应器就是很好的例子[14].本 文离心喷雾气液反应器采用的是喷雾与离心技术 相结合的方式,其原理是气相在高速旋转的叶片 下产生离心力场,液相通过喷嘴产生液滴,与气相 发生反应,然后迅速分离.离心分离利用气液相之 间的密度差,在液相随气相旋转的过程中,通过离 心力的作用将液滴甩到边壁,然后再通过排液口 排出.该反应器建立在研究喷雾式单重态氧发生 器[15]的基础之上,根据目前所需的激光功率反推 得出气体处理量,对设备进行改进以满足气体处 理量增大的反应条件,改进主体排液结构以缓解 传统喷雾反应器的液滴挟带问题.本文采用数值 模拟和实验研究的方法研究该反应器的分离性 能,得到该反应器性能曲线.

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-05-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21473194,21573231).

作者简介:张婉婷(1994-),女,硕士生,E-mail;zhangwant@mail.dlut.edu.cn;胡大鹏*(1963-),男,教授,E-mail;hudp@dlut.edu.cn.

1 离心喷雾式气液反应器数值模拟

1.1 反应器主要参数设计

根据离心沉降理论,确定了反应器结构参数. 利用三维绘图软件在物理模型的基础上建立新型 离心喷雾气液反应器(简称反应器)的三维流场模 型.为了减少计算量,对模型进行取舍.图1为反 应器模型流体域及直叶片流体域示意图,反应器 模型流体域由反应器导流器区、转子叶片区、排液 管通道区及喷嘴区构成.反应器采用两级排液方 式,该简化模型可用于研究旋转流场分布特性,监 测液体颗粒分离效率.



图 1 反应器模型流体域和直叶片流体域示意图 Fig. 1 Schematic of reactor model fluid region and straight blade fluid region

1.2 网格划分及计算模型

由于直叶片离心喷雾气液反应器的内部结构 复杂,存在转动区域,在划分网格前,将转动区域 单独划分出来,并设置分割截面为 interface,以确 保转动区域与非转动区域内流体的联通性,并在 转动区域切割出喷嘴区域用于 DPM 中设置喷射 液滴.划分网格时,98%区域使用六面体网格,既 减少网格数量又减少计算量;其余部分使用四面 体网格,同时对导流叶片区域做网格加密处理.本 文为了在保证计算精度的同时节省计算资源,采用 593 561、749 227、935 962、1 158 361、1 228 662、 1 301 408 共 6 种不同网格数量划分做无关性验证,如表 1 所示,593 561、749 227、935 962 网格数量下分离效率与其他 3 种情况有明显偏差, 1 158 361、1 228 662、1 301 408 的 3 种网格分离 效率间相对误差小于 0.1%,考虑到计算精度及 时间,采用 1 158 361 的划分方法.模型网格如图 2 所示.

表 1 网格无关性验证 Tab.1 Grid-independent validation

网格数	入口静压/Pa	压降/Pa	分离效率/%	
593 561	-85	507	67.00	
749 227	-92	498	61.21	
935 962	-99	478	58.32	
$1\ 158\ 361$	-113	413	55.01	
$1\ 228\ 662$	-114	409	54.90	
1 301 408	-112	408	55.08	



图 2 模型网格 Fig. 2 Mesh of model

计算采用 RNG k-ε 模型、MRF 多重参考系 模型和 DPM 离散相模型相结合的计算流体力学 方法,将气体入口边界条件设置为速度入口 (velocity-inlet),将气体出口边界条件设置为压 力出口(pressure-outlet),反应器动静区域的运转 使用 MRF 模型,设定转子转速,同时将叶片壁面 设置为旋转壁面(rotational wall),跟随流体域转 动,壁面设置为光滑壁面,标准壁面函数.

1.3 反应器模拟结果分析

1.3.1 转速对反应器性能的影响 在 5 mol/s 气体流量下,改变反应器的叶片转速.反应器连续 相流场在不同转速下的切向速度分布如图 3 所 示,从云图中可以看出切向速度分布随着转速的 提升显著增大,呈近似线性关系.同时随着叶片转 速的增加,反应器内部流场湍流和耗散也随之增 加,由图 4 可以看出叶片转速为 4 000 r/min 时尾 部速度波动较大,表明高转速下反应器尾部湍流 耗散严重.所以,考虑到高转速下反应器内部流场 不稳定会影响分离效果,叶片转速应控制在不高 于 3 000 r/min 的范围内.

















图 4 轴向不同位置的切向速度分布



1.3.2 反应器连续相流场分析 通过 FLUENT 软件进行数值模拟,计算结果如图 5 所示.以 3 000 r/min 为例,图 5(a)为反应器静态压力分 布云图,从云图可以看出,反应器内静压流场较均 匀,压降较小,压力呈现中间低壁面高的状态,表 明径向压力场所产生的径向力指向轴心.图 5(b) 为反应器动态压力分布云图,从图中可以看出,反 应器内动态压力分布较为稳定.图 5(c)为反应器 速度分布云图,从图中可以看出速度分布与动态 压力分布基本一致,体现出压力能与动能的转化 使叶片旋转进而气流旋转产生离心力场.切向加 速度产生的离心力方向指向器壁.高速流场的存 在使得微小液滴更加容易被甩向壁面,从而实现 分离.

综上,反应器内部压力分布比较对称,叶片区 流体旋转运动强烈,具有良好的分离效果.

1.3.3 反应器离散相流动模拟分析 离心喷雾 气液反应器主要针对单重态氧和 BHP 的分离, 为了得到分离效率,利用数值模型对反应器的分 离过程进行 DPM 分析,通过对模型内颗粒的轨 迹追踪,了解气液分离过程,预测设备性能.在离 心喷雾气液反应器内气液流动过程中,由于设计 工况下气相体积远大于液相体积,气相是主动流、 连续相,液相是从动流、离散相.用前文研究的气 相流场作为离散相研究设备内液滴流场的基础. 分离效率定义为气液分离程度,衡量标准为捕集 颗粒数与注入颗粒总数的比值,即 η=(捕集颗粒 数/注入颗粒总数)×100%.

对设备模型进行 DPM 模拟,捕捉条件在气体入口处设置为 reflect,来保证液体颗粒的注入; 在气体出口处设置为 escape,表示液体未被分离状态下气体带出;在反应器壁面处、液体出口处设 为 trap,即认为液滴颗粒在分离过程中打到壁面、





融入液膜并随之甩向液体出口后均被捕集.于模型喷雾区内分别注入 100、90、80、70、60、50、40、 30、20、10 µm 的颗粒来模拟粒径对反应器的影响,并且在同等颗粒直径下追踪3 000、2 000、 1 000 r/min不同转速下颗粒的分离效率.分离效率汇总结果如图 6 所示,由图可以分析出反应器 的分离效率随着转速的提高而增大,并且对于粒 径小于 90 µm 的颗粒,其分离效率对于转速的敏 感性更高,而对于粒径大于 90 µm 的颗粒,分离 效率几乎不因转速的增加而变化,转速对分离的 影响无法体现.

第4期



图 6 不同粒径及不同转速下反应器内的分 离效率

Fig. 6 Separation efficiency under different rotating speed and particle diameter in reactor

为了验证两级排液对分离更有效,模拟完成 了在 5 mol/s 气体流量下不同排液方式的分离状况.由图 7 可见,改进后的两级排液方式较之前一 级排液方式的气液分离效率整体提高39.46%.

综上,模拟结果预测该反应器在 3 000 r/min



图 7 改进后与改进前结构的分离效率对比

Fig. 7 Comparison of improved structure and former structure separation efficiency

下能将 90 µm 以上粒径的液滴实现 100%分离,同时对大于 60 µm 小于 90 µm 的液滴也有较高分离效率,可分离的粒径小,气液反应接触面积大,分离迅速.

2 反应器性能实验验证

2.1 实验装置及分析仪器

本文所搭建的实验装置与 CFD 模拟模型尺 寸完全一致.实验前利用相位激光多普勒测速 (PDPA)及粒径仪对喷嘴喷出的液滴粒径及速度 进行测试,获得喷嘴前压力与粒径、流量关系曲 线.实验过程中采用水循环以及冷却油循环系统 来保证实验运行的持续性,实验流程图如图 8 所 示.在实验设备中进行实验的转速和粒径与模拟 中的参数一致.

实验中对于液滴粒径及反应器主轴转速的控制方式如下:(1)通过控制喷嘴前入流压力的方法 控制喷射液滴粒径的大小及流量.(2)通过改变变





图 8 实验流程图 Fig. 8 Flow chart of the experiment

频器频率控制旋转主轴转速变化.(3)压缩机供 气,安装气体流量计、压力表及阀门进行气体压力 监控及流量控制.(4)采用热线风速仪进行气体入 口速度的测定.实验装置如图 9 所示.



图 9 实验装置 Fig. 9 Experimental device

2.2 实验结果与分析

实验检测了 5 mol/s 气体流量下,反应器转 速和液滴粒径对反应器分离性能的影响.实验研 究中发现,反应器分离效率随液滴粒径的降低而 降低,随反应器转轴转速(≪3 000 r/min)的提高 而增大,如图 10 所示.实验条件下的分离效率和 模拟结果对比如图 11 所示,由对比可以看出实验 结果与模拟结果比较一致,1 000 r/min 转速下平 均误差为 8.1%,2 000 r/min 转速下平均误差为 3.07%,3 000 r/min 转速下平均误差为 1.5%.但 由于在实验过程中发现转速大于 3 000 r/min 后 提高转速时气体出口有液滴聚合造成的粒径较大 的液滴出现,严重影响分离效率,表明高转速下气











液分离过程中出现了液滴的碰撞聚合现象^[16],导 致分离效率下降.所以,在此反应条件下反应器转 速不宜超过3000 r/min,考虑到使反应器分离效 率达到最高,生产过程中将采用3000 r/min 的转速.

转速为3000 r/min 时,模拟情况下与实验情况下气液分离效率对比如图 12所示,实验在3000 r/min条件下,对直径90 μ m以上液滴分离效率达到100%,气液分离彻底.同时实验研究发现反应器对大于60 μ m小于90 μ m的液滴也有较高分离效率.



图 12 3 000 r/min 下实验与模拟分离效率 Fig. 12 Experimental and simulated separation efficiency under 3 000 r/min

综上,实验结果显示该反应器在 3 000 r/min 下能将 90 μm 以上粒径的液滴实现 100%分离, 可分离的粒径小,气液反应接触面积大,气液分离 效率高.同时,该 CFD 模型也有一定局限性,对于 小于 60 μm 的小粒径液滴及大于 3 000 r/min 的 高转速下模拟结果与实验的误差较大.误差的产 生是由于反应器内部是一个复杂的旋流场,模拟 条件下无法完全还原实际流体运动情况,模拟过 程中,由于气体流量大,流体内液滴受气动力、剪 切力和湍流脉动作用较大,喷雾液滴喷出以后,液 滴之间发生碰撞、聚合、破碎,导致模拟与实验结 果有一定误差.解决液滴碰撞聚合问题将有效提 升气液接触表面积,达到更高反应及分离效率.

3 结 论

(1)反应器分离性能随着反应器转速的增大, 有明显提高. 气液接触表面积大,气液分离效率高. 考虑到转速增大时湍流耗散及液滴碰撞聚合 的出现,严重影响气液分离效率,叶轮转速控制在 3 000 r/min 为宜. 同时反应器的两级排液结构能 够有效阻挡气流中的液体,使液体分离更加彻底, 在 5 mol/s 气体处理量下对直径大于 90 µm 的液 滴有 100%的分离效率. (2)3 000 r/min 转速下模拟结果与实验结果 性能曲线趋势基本一致,CFD 对该反应器在大气体 处理量下有较好预测性,90 μm 以上液滴分离效 率的模拟结果与实验结果一致,60 μm 以上液滴 分离效率的模拟结果与实验结果误差在 0.3%以 内,即该模型适用于 60 μm 以上液滴模拟研究.

参考文献:

- [1] 张亦卓. 美国机载激光武器研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(7): 91-94,100.
 ZHANG Yizhuo. Progress in airborne lasers weapon research [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 91-94,100. (in Chinese)
- [2] TAKEHISA K. Anti-satellite capability of a chemical oxygen-iodine laser in a high-altitude airship [J]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2019, 11162 (1): 1116201.
- [3] 金玉奇,桑凤亭.化学激光的发展现状与趋势[C]// 第十届全国光电技术学术交流会论文集.北京:中 国宇航学会,2012.
 JIN Yuqi, SANG Fengting. Development status and trend of chemical laser [C] // Proceedings of the 10th National Academic Exchange Conference on Optoelectronic Technology. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [4] 石文波,李庆伟,耿自才,等. 载气密闭循环氧碘化 学激光技术模拟实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 121002.
 SHI Wenbo, LI Qingwei, GENG Zicai, et al. Simulation experiment study on closed diluted gas cycle chemical oxygen iodine laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 121002. (in Chinese)
- [5] 朱 枫,韩晓明,何小九.助推段反导作战发展现状综述 [J].飞航导弹,2017(1):29-33. ZHU Feng, HAN Xiaoming, HE Xiaojiu. A summary of the development of anti-missile combat in booster section [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(1):29-33. (in Chinese)
- [6] 韩晓宇. 气体放电产生单重态氧的模拟研究 [D]. 大连:大连理工大学,2017.
 HAN Xiaoyu. The numerical simulation of singlet oxygen generated by RF discharge of He-O₂ [D].
 Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 张 杰.脉冲放电激励氧碘化学激光的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2015.
 ZHANG Jie. The numerical simulation of chemical oxygen-iodine laser by pulse discharge [D]. Dalian:

Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

- [8] 郭汝海.化学氧碘激光器(COIL)的研究进展[J]. 光机电信息,2010,27(5):22-28.
 GUO Ruhai. Development review of chemical oxygen-iodine lasers (COIL) [J]. OME Information, 2010,27(5):22-28. (in Chinese)
- [9] 刘振东,陈文武,许晓波,等. 喷射型单重态氧发生器性能研究 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1087-1090.
 LIU Zhendong, CHEN Wenwu, XU Xiaobo, *et al.* Performance study of jet type single state oxygen generator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1087-1090. (in Chinese)
- [10] 苏 华. 射流式单重态氧发生器的气液两相模型研究 [D]. 北京:中国工程物理研究院,2007.
 SU Hua. Two-phase modeling of JSOG [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2007. (in Chinese)
- [11] WATANABE G, SUGIMOTO D, VYSKUBENKO O, et al. Modeling of crossflow jet-type singlet oxygen generator [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(11): 114905.
- [12] BRAGINSKIY O V, VASILIEVA A N, KOVALEV A S, et al. Singlet oxygen generation

in O₂ flow excited by RF discharge: II.
Inhomogeneous discharge mode: Plasma jet [J].
Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(19): 3626-3634.

- [13] 任相军,王振波,金有海. 气液分离技术设备进展[J]. 过滤与分离,2008,18(3):43-47.
 REN Xiangjun, WANG Zhenbo, JIN Youhai.
 Progress of gas-liquid separation technology [J].
 Journal of Filtration and Separation, 2008, 18(3):43-47. (in Chinese)
- [14] SPALEK O, HRUBY J, JIRÁSEK V, et al. Advanced spray generator of singlet oxygen [J].
 Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2006, 6346(1): 62611C.
- [15] 孙士丹. 旋转喷雾式气液反应器分离性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
 SUN Shidan. Research on the separation performance of the rotary spray gas-liquid reactor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 曹建明. 液体喷雾学 [M]. 北京:北京大学出版 社,2013:184-185.
 CAO Jianming. Liquid Atomology [M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 184-185. (in Chinese)

Separation performance of straight blade centrifugal atomized gas-liquid reactor

ZHANG Wanting¹, XU Xiaobo², DENG Liezheng², CHEN Wenwu², JIN Yuqi², HU Dapeng^{* 1}

- (1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 - 2. Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to solve the problems of small gas handling capacity, small gas-liquid reaction area and low separation efficiency in singlet oxygen generator, a two-stage liquid-discharge straight blade centrifugal atomized gas-liquid reactor combined with atomization technology and centrifugal technology is designed. Firstly, the calculation model of the reactor is established by CFD method, and the motion characteristics of the continuous phase flow field and discrete phase particles in the reactor are studied. The influence of particle size and speed on the separation performance of the reactor is systematically analyzed, and the separation characteristic curve is obtained. Secondly, through the experimental research, the separation performance of the reactor under real working conditions is analyzed. Comprehensive research shows that CFD simulation results are in good agreement with experimental results, CFD model can be used in this experimental study. The efficiency of the reactor at 5 mol/s gas flow rate is 100% for droplets with particle size greater than 90 μ m at 3 000 r/min speed, which provides reference for the development of singlet oxygen generator.

Key words: singlet oxygen generator (SOG); centrifugal atomized gas-liquid reactor; separation performance; numerical simulation; experimental study