

汽车绿色制造背景下流化床反应器升流区与降流区面积比对流场的影响

张毅

南充职业技术学院, 四川 南充 637000

DOI: 10.61369/SSSD.2026070036

摘 要 : 本研究围绕汽车绿色制造背景下四边形折流式膜生物流化床反应器中升流区与降流区面积比 (Ad/Ar) 对流场特性的影响展开。实验采用 PIV (粒子图像测速) 技术, 结合不同曝气强度 ($0.4 - 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$) 和固定进出水流量 (7.965 L/h) 条件, 对反应器上部、中部和下部区域进行流场可视化分析。结果表明, 随着 Ad/Ar 比值的减小, 升流区液速整体呈下降趋势, 而降流区液速则呈现先升后降的变化趋势。在高曝气强度 ($1.2 - 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$) 下, $Ad/Ar=1/2$ 时升流区液速最大, 气泡附壁效应减弱, 气液混合更均匀。此外, $Ad/Ar=1/2$ 时反应器内部形成较多小尺度涡, 有利于填料流化和传质效率提升。综合分析认为, $Ad/Ar=1/2$ 为该类反应器的最佳结构参数, 可有效提高循环速率、降低膜污染并增强系统抗冲击能力。

关 键 词 : 生物流化床; PIV; 汽车绿色制造; 流场

Effect of Upflow to Downflow Zone Area Ratio on Flow Field in a Fluidized-Bed Reactor Under the Background of Green Automotive Manufacturing

Zhang Yi

Nanchong Vocational Technology College, Nanchong, Sichuan 637000

Abstract : This study focuses on the influence of the upflow-to-downflow zone area ratio (Ad/Ar) on flow field characteristics in a quadrilateral baffled membrane bio-fluidized bed reactor under the context of green automotive manufacturing. Experiments employed particle image velocimetry (PIV) technology to visualize the flow fields in the upper, middle, and lower regions of the reactor under varying aeration intensities ($0.4 - 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$) and a fixed influent/effluent flow rate (7.965 L/h). The results indicate that as the Ad/Ar ratio decreases, the liquid velocity in the upflow zone generally declines, while that in the downflow zone initially increases and subsequently decreases. Under high aeration intensities ($1.2 - 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$), the upflow zone exhibits the highest liquid velocity at $Ad/Ar = 1/2$, accompanied by diminished bubble wall attachment effects and enhanced gas-liquid mixing uniformity. Additionally, at $Ad/Ar = 1/2$, the reactor generates more small-scale vortices, which facilitate carrier fluidization and improve mass transfer efficiency. Comprehensive analysis confirms that $Ad/Ar = 1/2$ is the optimal structural parameter for such reactors, effectively increasing circulation rates, reducing membrane fouling, and strengthening system shock resistance.

Keywords : bio-fluidized bed; PIV; green automotive manufacturing; flow field

随着环保要求的不断提高和绿色制造理念的深入发展^[1], 流化床反应器在污水处理中的应用日益广泛^[2]。特别是在膜生物流化床 (MBFB) 系统中, 其独特的结构设计和流场特性对处理效率和能耗具有重要影响^[3-4]。本文围绕汽车绿色制造背景下膜生物流化床反应器升流区与降流区面积比 (Ad/Ar) 对流场分布的影响展开研究, 旨在优化反应器结构, 实现传质过程强化、能耗最小化及系统稳定性提升。

在传统流化床设计中, 升流区与降流区的面积比例直接影响气液固三相流的流动状态和混合特性^[5]。通过调节曝气强度与反应器结构参数, 可以有效控制气泡的分布与流动路径, 从而改善反应器内部的流场结构^[6]。本研究基于 PIV (粒子图像测速) 技术, 对不同 Ad/Ar 比值下的流场进行可视化分析, 揭示其对气泡附壁效应、液流速度分布及湍动能的影响机制。

通过对实验数据的系统分析, 本文进一步探讨了不同 Ad/Ar 比值下流化床内部流场的演化规律, 为后续优化反应器结构提供理论依据。研究结果表明, 合理的升流区与降流区面积比可有效提升反应器的流化性能和传质效率, 为实现高效、节能的绿色制造工艺提供支持。

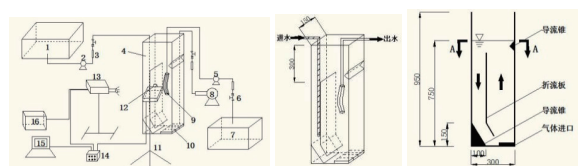
项目信息: 南充市科技局项目 (19YFZJ0008); 四川省科技创新苗子工程 (2929131)

作者简介: 张毅 (1973—), 男, 四川南充人, 主要研究方向为汽车绿色制造,

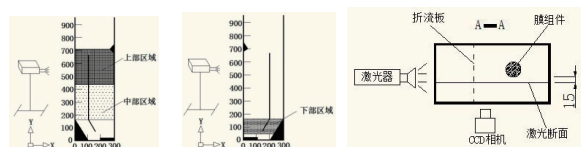
一、实验装置系统和方法

(一) 实验系统介绍

图1(a)给出了实验测试系统的流程图,主要由四边形折流式膜生物流化床反应器、PIV测试系统与曝气系统构成。流化床反应器为长方体透明玻璃容器,长、宽、高的尺寸分别是300、150、950 mm,有效容积是42.75 L。图1(b)给出了折流板低缝高度是72 mm,导流锥倾斜角度是35°。膜组件采用聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维超滤膜,平均孔径是0.1~0.2 μm,几何尺寸是40 mm×300 mm。曝气系统由内径5.8 mm的曝气管组成,单个曝气单元尺寸是100 mm×20 mm×23 mm,三个单元沿反应器底部均匀分布。为稳定实验条件,曝气单元固定于流化床底部正对膜组件的轴向位置,并通过自制T型微支架实现膜组件的轴向对中。该支架对液相流场的扰动可忽略。



(a) PIV测试系统流程图 (b) 流化床三维构造简图 (c) 流化床二维构造简图



(d) 上部和中部分区 (e) 下部拍摄分区 (f) 激光断面分布图

1. 进水箱 2. 进水泵 3. 流量计 4. 四边形折流式膜生物流化床 5. 蠕动泵 6. 阀门 7. 出水箱
8. 空气压缩机 9. 膜组件 10. 曝气单元 11. 三脚支架 12. CCD相机 13. 激光器 14. 同步器
15. 图像分析处理系统 16. 激光器电源

图1 流化床PIV实验测试系统流程图

(二) PIV测试系统与拍摄分区

PIV测量系统与文献^[7]所述配置一致。实验中,沿流化床轴向依次对上、中、下三个测量截面进行瞬态速度场拍摄,确保固液界面动态行为的多层级高分辨率表征。由于下部测量截面受导流锥遮挡导致激光片光无法有效穿透,且气泡在上部与中部测量截面的流态高度非稳态,为避免光学干扰与数据混叠,PIV实验采用分区拍摄策略:首次与第二次采样分别针对上部与中部测量截面,如图1(d)~(e),第三次独立采集下部测量截面数据如图1(f),确保各区域速度场的物理独立性与测量保真度。实验中,激光片光由流化床左侧水平入射,CCD相机正对观测,其光轴与激光片光平面严格垂直,构成二维测量平面。受限于相机视场范围,为保障空间分辨率,沿流化床轴向设置三个测量截面:上部(300 mm×275 mm)、中部(300 mm×273 mm)与下部(300 mm×115 mm),分别对应图1(d)~(e)所示采样区域。激光片光断面定位在距膜表面15 mm处,与下部测量截面空间重合,如图1(f)所示,确保固液界面附近流场的高精度捕捉。

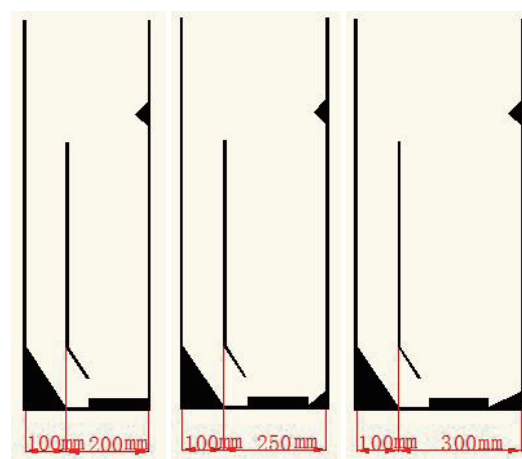
(三) PIV实验介质及三相流可视化实验

实验介质为自来水,填料采用净水级椰壳活性炭,粒径分布为0.4~2.8 mm,堆积密度为604 kg·m⁻³。PIV测量误差主要源

于激光折射、气泡光学扰动、示踪粒子响应特性、系统标定偏差及操作一致性等因素^[8-9]。选用PMMA-Rhodamine B-Particles作为示踪粒子,粒径20~50 μm,质量浓度控制在100 mg·L⁻¹,确保对液相流场的高跟随性,且对流体黏度与速度场无显著扰动。基于前期PIV粒子阻挡概率实验^[3]及本实验尺度,设定填料填充率为0.4%,以平衡流场均匀性与光学穿透性。为抑制活性炭对示踪粒子的吸附效应,每2 h更换一次填料,维持示踪浓度稳定性。

(四) 实验方案

PIV实验在6组梯度曝气强度工况下系统开展,分别为0.4、0.6、0.8、1.0、1.2和1.4 m³·h⁻¹,进水与出水流量恒定为7.965 L·h⁻¹。实验装置有效容积是33.75 L,对应有水深750 mm,确保流化床内流场空间结构稳定,满足轴向测量截面的边界条件一致性要求。图2展示了Ad/Ar分别为1/2、2/5和1/3的四边形折流式膜生物流化床结构简图。其中,Ad/Ar=2/5的底部右侧导流锥尺寸为长45 mm×宽40 mm,Ad/Ar=1/3的底部右侧导流锥尺寸为长80 mm×宽40 mm。



(a) $A_d/A_r=1/2$ (b) $A_d/A_r=2/5$ (c) $A_d/A_r=1/3$

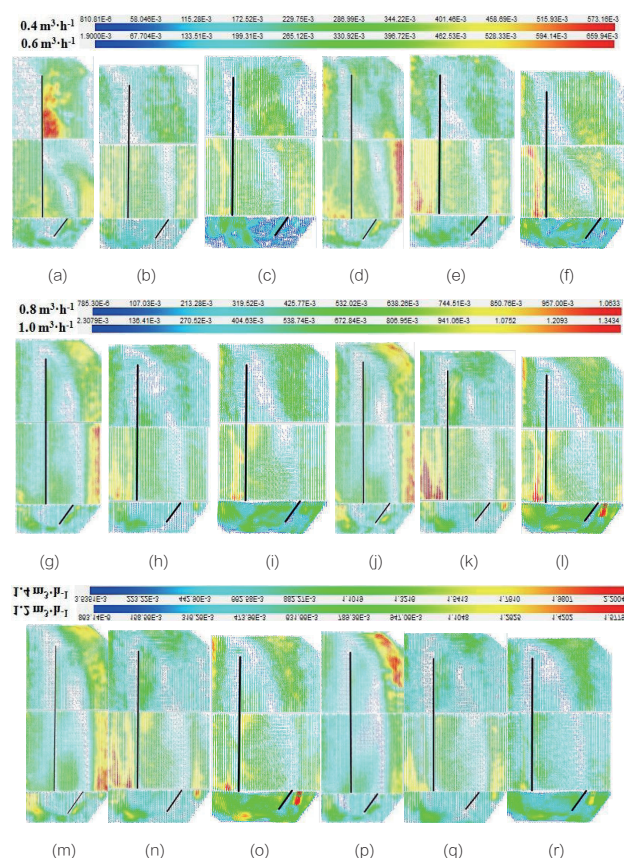
图2 不同降流区面积与升流区面积比的流化床结构图

二、实验结果分析

图3给出了不同Ad/Ar的流化床速度矢量图。从图3可以看出,曝气强度为0.4~1.4 m³·h⁻¹时,流化床升流区由于受到降流区的冲击,中部区域气泡流态向右附壁,接近上部区域之后,气泡受到环流的影响,开始向左附壁;升流区液速整体随Ad/Ar的减小而降低,降低幅度较小,Ad/Ar=1/2流化床升流区整体液速最大;降流区液速整体随Ad/Ar的减小而升高,升高幅度较小。曝气强度为1.2~1.4 m³·h⁻¹时,升流区液速整体随Ad/Ar的减小而降低,Ad/Ar=1/2流化床升流区整体液速最大;降流区液速整体随Ad/Ar的减小呈先升高后下降趋势。曝气强度为1.2~1.4 m³·h⁻¹时,Ad/Ar=2/5和1/3流化床的上部区域气泡羽流向左倾斜角度大于Ad/Ar=1/2流化床,可推论气泡附壁效应随着Ad/Ar的降低而降低。

分析其原因,随着Ad/Ar=1/2的减小,曝气盘的边壁距离逐渐增大,如图3所示,由气泡附壁效应相关研究可知,气泡附壁

效应受边壁距离和曝气强度的影响,边壁距离越远着气泡附壁效应越低,因此曝气强度为 $1.2\sim 1.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时, $A_d/A_r=2/5$ 和 $1/3$ 流化床的上部区域气泡羽流向左倾斜角度大于 $A_d/A_r=1/2$ 流化床。以上分析结果表明,若曝气器尺寸不变的情况下,随着 $A_d/A_r=1/2$ 的减小,升流区气泡附壁效应将显著降低,促使气相分布更趋均匀,并且增加了气泡浮射流的湍流掺混强度。



(a) 曝气强度 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (b) 曝气强度 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (c) 曝气强度 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$
(d) 曝气强度 $0.6\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (e) 曝气强度 $0.6\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (f) 曝气强度 $0.6\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$
(g) 曝气强度 $0.8\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (h) 曝气强度 $0.8\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (i) 曝气强度 $0.8\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$
(j) 曝气强度 $1.0\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (k) 曝气强度 $1.0\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (l) 曝气强度 $1.0\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$
(m) 曝气强度 $1.2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (n) 曝气强度 $1.2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (o) 曝气强度 $1.2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$
(p) 曝气强度 $1.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/2$; (q) 曝气强度 $1.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=2/5$; (r) 曝气强度 $1.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $A_d/A_r=1/3$

图3 在不同 A_d/A_r 下的流化床速度矢量图

综上分析可推论,从结构优化的角度出发,当流化床 $A_d/A_r=1/2$ 时,液速整体最快,有利于降低膜污染,提高流化床的循环时间和循环速率,降低污水混合时间,使反应器抗冲击能力进一步加强。在四边形折流式膜生物流化床中,降流区与升流区的湍动能水平最低,将有效抑制局部强剪切对生物膜结构的破坏,促进新旧菌体的稳定更替,同时降低填料-填料及填料-器壁间

的摩擦耗散,为生物膜的稳定附着与成熟提供低扰动微环境。场内高频小尺度涡旋主导局部混合,而降流区与升流区交界面处因速度梯度突变形成大尺度回流涡,其能量级联效应显著增强填料的三维流化动力,抑制沉降与堆积,并有效扰动死区区域,实现填料全床层动态再悬浮。该流态结构在提升气液传质效率的同时,降低系统能耗。基于流场结构稳定性与传质-流化协同优化目标,最佳 A_d/A_r 为 $1:2$ 。

三、结论

本研究通过实验与分析,系统探讨了 A_d/A_r 对四边形折流式膜生物流化床内部流场特性的影响。结果表明, $A_d/A_r=1/2$ 时,反应器内部流场分布最优,升流区液速最大,气泡附壁效应减弱,气液混合更均匀,有利于提高传质效率和反应器稳定性。该结构有助于减少填料沉积、增强生物膜更新速率,并降低能耗,具有良好的工程应用前景。因此,在汽车绿色制造背景下,优化流化床结构参数,合理设置 A_d/A_r 比值,对提升污水处理效率和实现绿色制造具有重要意义。

参考文献

- [1] 杜然, 刘柯, 方齐云. 绿色制造与企业 ESG 表现——基于绿色工厂评定的证据 [J]. 工业技术经济, 2025, 44(5): 53-61.
- [2] 王荣. 生物流化床工艺在工业废水处理中的应用 [J]. 山西化工, 2025, 45(5): 212-213, 242.
- [3] 董亮, 曾涛, 刘少北, 等. 四边形外循环膜生物流化床内液相结构特性 [J]. 化工进展, 2018, 37(3): 893-90.
- [4] 郭杨. 膜生物流化床处理城市污水的微生物特征 [J]. 净水技术, 2019, 38(4): 87-93, 105.
- [5] 韦朝海, 朱家亮, 张涛. 新型流化床内流体重构的流体力学特性变化及其数值模拟 [J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3062-3069.
- [6] 董亮, 张毅, 沈恒宇, 等. 底隙高度对生物流化床内流场和氧传质特性的影响 [J]. 环境工程, 2023, 41(6): 109-116.
- [7] 董亮, 曾涛, 刘少北, 等. 四边形折流式膜生物流化床内填料浓度及液相流场特性研究 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4139-4149.
- [8] 岳廷瑞, 张逊, 刘垒, 等. PIV 系统测量误差的评价方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 255-259.
- [9] 曹永飞, 顾盛松, 程克明. 垂直于流向的截面中2D-PIV 测量误差分析 [J]. 实验流体力学, 2014, 28(6): 66-72.