

超重力反应器强化气液传质过程的数值模拟

王建国

山东理工大学 山东淄博

【摘要】超重力反应器是一种强化气液传质过程的有效设备，它通过提供更高的重力加速度，显著提升气液两相之间的相互作用力，从而提高反应效率。本文基于数值模拟方法，对超重力反应器中的气液传质过程进行了详细研究，重点分析了超重力条件下气液界面行为、流体流动特性及传质过程的影响因素。超重力反应器能有效加速气液传质过程，尤其是在高重力条件下，气泡尺寸的减小和液相流动的强化极大提高了反应效率。模拟结果为优化超重力反应器的设计和操作提供了重要的理论依据。

【关键词】超重力反应器；气液传质；数值模拟；气液界面；流体动力学

【收稿日期】2025 年 7 月 16 日

【出刊日期】2025 年 8 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250381

Numerical simulation of gas-liquid mass transfer process intensified by a rotating packed bed reactor

Jianguo Wang

Shandong University of technology, Zibo, Shandong

【Abstract】A rotating packed bed (RPB) reactor is an effective device for intensifying the gas-liquid mass transfer process. By providing a higher gravitational acceleration, it significantly enhances the interaction force between the gas and liquid phases, thereby improving the reaction efficiency. Based on numerical simulation methods, this paper conducts a detailed study on the gas-liquid mass transfer process in the rotating packed bed reactor, with a focus on analyzing the gas-liquid interface behavior, fluid flow characteristics, and influencing factors of the mass transfer process under high-gravity conditions. The rotating packed bed reactor can effectively accelerate the gas-liquid mass transfer process; especially under high-gravity conditions, the reduction of bubble size and the intensification of liquid-phase flow greatly improve the reaction efficiency. The simulation results provide an important theoretical basis for optimizing the design and operation of rotating packed bed reactors.

【Keywords】Rotating packed bed reactor; Gas-liquid mass transfer; Numerical simulation; Gas-liquid interface; Fluid dynamics

引言

在化学工程领域，气液传质过程广泛应用于多种反应和分离过程，影响着反应器的设计和效率。传统的气液反应器由于受限于气液接触效率，往往无法达到最佳的反应效果。超重力反应器因其能够在较短时间内提高气液传质速率而成为研究热点。超重力条件下，气泡的尺寸变小，液相流动速度加快，这使得气液两相的接触面积增大，从而显著提高了气液传质效率。为了深入理解超重力反应器在不同操作条件下的表现，数值模拟成为一种有效的研究手段，它能够揭示复杂流动和传质现象的微观机理。本文将基于数值模拟技术，研究超重力反应器中的气液传质过程，为优化反应器设计和操作提供理论支持。

1 超重力反应器中气液传质过程的物理模型与数值模拟方法

超重力反应器利用高重力场来加速气液传质过程，其独特的工作原理促使其在许多化学工程领域中表现出色。在这一过程中，气液相的相互作用、流动特性和传质机制是研究的核心^[1]。为了精确描述超重力反应器中的气液传质行为，物理模型的建立至关重要。传统的传质模型多基于气液界面的接触面积、气泡尺寸以及流体流动等因素。超重力条件下，重力场对气液界面的影响使得气泡变小，液相流速加快，二者的接触面积增大，从而显著提升了气液传质速率。在这些基础上，结合流体动力学和传质理论，构建了适用于超重力反应器的数学模型。

数值模拟技术为这一复杂过程的研究提供了有效的工具。基于有限差分法、有限元法和 CFD (计算流体力学) 方法, 研究者们能够精确模拟超重力反应器中的流场和传质过程。通过对气泡流动和气液界面行为的细致建模, 可以揭示在不同重力场条件下气液传质速率的变化规律。在数值模拟过程中, 计算机程序需要处理复杂的流体动力学方程, 并考虑气泡破裂、合并等非线性效应。这些模拟结果为超重力反应器的优化设计和运行提供了理论支持^[2]。随着数值模拟技术的发展, 越来越多的研究者采用多物理场耦合的方式进行模拟, 考虑温度、压力、流体粘度等多种因素的综合影响。这些高级数值模型不仅提高了模拟的精度, 还能够更好地反映实际操作中的复杂情况。在超重力反应器的研究中, 数值模拟已成为一种不可或缺的工具, 它能够帮助工程师深入理解气液传质过程的微观机制, 并为反应器设计的优化提供重要的理论依据。

2 重力场对气液界面行为及气泡动力学的影响

在超重力反应器中, 重力场的作用对气液界面行为和气泡动力学产生了显著的影响。传统反应器中, 气泡与液体的接触面积较小, 这限制了气液传质的效率。而在超重力条件下, 由于重力加速度的增强, 气泡在液体中的运动状态发生了显著变化。气泡的尺寸变小, 形态变得更加规则, 气泡之间的相互作用和液体的流动特性也随之发生变化。随着气泡尺寸的缩小, 气液两相之间的接触面积显著增大, 从而提高了传质效率。

在超重力环境下, 气泡的体积明显减小, 同时其运动方式变得更加复杂。由于超重力场的作用, 气泡的升力受到增强, 导致其上升速度和轨迹与常规反应器中的气泡行为截然不同。气泡在超重力场中不仅面临较大的外部压力, 还会经历频繁的碰撞、合并和分裂过程, 这些过程显著改变了气泡的尺寸和分布, 进而影响气液界面的动态行为^[3-6]。气泡的这些变化大幅度提升了气液之间的相互作用力, 从而显著提高了气液传质效率。通过数值模拟研究, 研究人员进一步发现, 气泡的运动模式和气泡间的相互作用在超重力反应器中发生了深刻变化, 极大促进了传质过程的加速。

气泡动力学的复杂性不仅体现在气泡的运动规律上, 还体现在气泡与液相之间的相互作用力上。在超重力场中, 气泡的动力学特性受到更多因素的影响, 如重力、液体的粘度和气泡的形态等。气泡的行为不仅与反应器内部的流体动力学条件密切相关, 还与液相的性质以及反应过程的进展密切相关。通过对气泡动力学的深入研究, 可以为优化超重力反应器的操作条件提

供重要指导, 从而在实践中实现更高效的气液传质过程。

3 超重力反应器内流体流动特性的数值分析

超重力反应器中的流体流动特性直接影响气液传质过程的效率, 因此对其进行深入的数值分析至关重要。在超重力反应器中, 流体的流动状态比传统反应器更为复杂。由于重力场的引入, 液体流动的速度、方向和剪切力等因素都会发生变化, 影响气泡的分布、运动以及气液接触的效率。通过数值模拟方法, 研究人员能够精确地描述和分析流体流动的细节, 为反应器的设计和优化提供有力支持。

在超重力条件下, 流体的速度分布和剪切力的分布与传统反应器明显不同。重力加速度的作用加速了液体流速, 特别是在反应器内部流动较为复杂的情况下, 液体的湍流特性变得更加突出。在传统反应器中, 液体的流动通常是层流或低度湍流, 而在超重力反应器中, 由于重力场的影响, 液体流动出现更强烈的湍流现象, 流速和流动路径的变化也更为剧烈。这种变化不仅加速了液体的传质过程, 还增加了气泡与液体之间的碰撞频率, 从而提升了气液界面区域的传质速率^[7]。重力场对液体流态的影响使得液相的流动与气泡的运动产生了复杂的相互作用, 形成了不同于常规反应器的流动结构。数值模拟可以准确捕捉这些流动特性, 通过计算速度场、压力场和湍流强度等关键参数, 揭示出重力场对流体流动特性和传质过程的深远影响。通过这些数值模拟数据, 研究人员能够进一步优化超重力反应器的设计和操作条件。

流体流动的数值分析不仅帮助我们深入理解超重力反应器中流动现象的复杂性, 还为反应器的设计和优化提供了宝贵的理论依据。通过模拟结果, 工程师可以准确确定反应器内部流场的分布情况, 识别出流动死区、气泡滞留区以及流体流动不均匀的区域。这些不利区域可能会导致传质效率的降低, 优化这些区域的流动路径成为关键。通过数值模拟, 研究人员能够调整反应器的几何形状、进气方式和流体流速等参数, 从而改善流场分布, 减少气泡滞留, 提升气液接触效率。这些研究成果为提高超重力反应器设计精度提供了坚实的理论基础, 有助于在工业应用中实现更高效的气液传质过程。

4 优化超重力反应器设计的建议与实验验证

为了更好地发挥超重力反应器在气液传质过程中的优势, 优化其设计成为亟待解决的问题。基于数值模拟的研究结果, 可以提出一系列优化设计的建议。这些

建议不仅涉及反应器结构的改进,还包括操作条件的优化。通过调整反应器内部的流体流速、重力加速度等参数,可以显著提升气液传质效率。在一些超重力反应器中,流体流速过低或过高都可能影响气泡的生成和运动,进而影响气液界面的传质能力。通过优化流速和重力加速度的控制,不仅可以提高气泡的均匀性,还能优化液体的流动状态,从而提升传质速率。反应器的形状、气液分布方式和气泡生成装置等也需要根据实际应用情况进行优化设计。在某些工业应用中,反应器的形状设计可能会影响气液接触的均匀性,进而影响传质效率。合理的结构设计对于提升超重力反应器的性能至关重要。

实验验证是优化设计方案的关键环节。通过实验验证,研究人员可以对数值模拟结果进行校准,并检验优化设计的实际效果。在实验中,可以通过测量气泡尺寸、气液界面面积、反应速率等参数,评估超重力反应器在不同操作条件下的性能表现。通过这些实验数据,可以确定不同设计参数对反应器性能的影响,为进一步优化提供数据支持。实验中可能发现气泡尺寸和气液界面的接触面积对于传质速率有显著影响。通过多次实验验证,优化设计方案可以得到有效的调整与改进。实验验证也有助于检测设备在实际操作中的稳定性与可操作性,确保其在工业应用中的可行性。实验验证不仅是对设计方案的验证,还为后续的设计改进提供了关键依据。

实践中的优化设计不仅关注反应器的物理结构,还需要考虑成本、操作安全性和可维护性等因素。优化设计方案不仅需要理论研究的支持,还要结合工程实践中的具体需求。在一些情况下,过于复杂的结构可能导致设备的维护成本过高,甚至在实际操作中存在安全隐患^[8]。通过合理设计反应器的构造,能够降低生产和维护成本,提升其长期运行的经济效益。设计过程中需要充分考虑反应器的操作安全性,特别是在高重力环境下,可能产生的不稳定流动和气泡行为对设备安全的影响。通过合理设计流动路径、减小压力波动等,可以增强设备的操作稳定性。最终,通过理论与实验相结合,不仅能够提升设备的性能,还能实现更加安全、高效、经济的应用。

5 结语

超重力反应器在强化气液传质过程中的潜力巨大,通过数值模拟和实验验证的结合,可以为反应器设计和优化提供重要的理论和实践依据。深入研究重力场对流体流动、气泡动力学及气液界面行为的影响,有助于提升传质效率,推动超重力反应器在化学工程中的广泛应用。随着技术的不断发展和优化,超重力反应器将在提高反应速度、节约能源和降低成本方面发挥更为重要的作用,推动工业生产向更高效、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 张威,陈昊,黄柯,等.面向碳捕集的超重力反应器流体流动与传质特性研究进展[J].油气储运,2025,44(08):850-861.
- [2] 张威,张伟文,李欣洋,等.超重力反应器天然气脱碳过程反应传质智能预测[J].低碳化学与化工,2024,49(12):96-102.
- [3] 尹龙天,李秀金,张良,等.超重力反应器内 MEA-乙醇溶液用于沼气脱碳的优化传质模型[J].中国沼气,2022,40(02):39-46.
- [4] 张威,张伟文,李欣洋,等.超重力反应器天然气脱碳过程反应传质智能预测[J].低碳化学与化工,2024,49(12):96-102.
- [5] 江澜,罗勇,邹海魁,等.超重力多相催化反应器的研究进展[J].化工学报,2021,72(06):3194-3201.
- [6] 蔡子琦,王锐婷,包雨云,等.单气泡气液传质系数测量实验系统开发[J].实验室研究与探索,2024,43(08):1-4.
- [7] 邵磊,肖浩,方夕宏,等.利用超重力机内滞液现象提高气-液反应过程效率初探[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(06):8-13.
- [8] 黄斌,丰生杰,傅程,等.超重力技术应用进展[J].当代化工,2022,51(12):2941-2946.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

