

气升式内循环反应器结构优化及应用

张雷¹, 韩严和^{1*}, 王敬贤², 张晓飞³

(1.北京石油化工学院环境工程系,北京 102617; 2.北京农学院植物科学技术学院,北京 102206;
3.中国石油安全环保技术研究院,北京 102206)

摘要:通过对新型反应器的研究成果进行总结,深入了解气升式内循环反应器在各领域的发展情况,为新型反应器在今后的应用提供了方向。在反应器结构优化过程中,通过对前人所采用的结构优化方法进行总结,发现采用CFD研究方式明显多于实验研究方式,并且模拟研究中多以欧拉-欧拉两相流为主。模拟研究结果显示,各个结构存在1个最佳取值范围:高径比在7附近,环隙比在1附近,底隙高度约等于下降区狭缝长,气体分布器一般是根据实际情况进行选择。虽然不同的研究中结构参数存在差异,但是其主要的结构参数取值范围大致相同。

关键词:气升式反应器;研究进展;应用;气含率;传质

中图分类号:TH703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)04-0173-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.04.040

Structural optimization of airlift internal loop reactors and applications

ZHANG Lei¹, HAN Yan-he^{1*}, WANG Jing-xian², ZHANG Xiao-fei³

(1.Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;
2.Plant Science and Technology College, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 3.Research Institute of Safety & Environment Technology, China National Petroleum Corporation, Beijing 102206, China)

Abstract: The application situation of airlift internal loop reactors in various fields is deeply analyzed and introduced through reviewing the research progress of novel reactors, which provides referential directions for the application of novel reactors in the future. It is found via summarizing the structural optimization methods used by the predecessors that the CFD method has been used more frequently than the experimental research method in structural optimization to reactors. In addition, the Euler-Euler two-phase flow model is the main model for simulation research. The results of simulation study show that there is an optimal range for each structure; the ratio of height to diameter is around 7, the ratio of ring to gap is around 1, the bottom clearance height is approximately equal to the down-comer zone length, and the gas distributor is generally selected based on the actual situation. Although the structural parameters are different in different studies, the range of the main structural parameters is approximately the same.

Key words: airlift reactor; research progress; application; gas hold-up; mass transfer

气升式内循环反应器(internal loop airlift reactors, ILAR)是在鼓泡反应器基础上发展起来的1种气-液、气-固、气-液-固的多相环流反应器。主要原理是通过向上升筒中通入气体,使得上升筒中气液混合密度降低而引起上升筒与下降筒产生压力差,反应器靠自身压力差而形成内部循环流动,改善了鼓泡反应器中液体流动存在的流动死区,增强了流动,与鼓泡反应器相比混合物实现完全悬浮所需更小的气速^[1]。与依靠机械搅拌提供动力的搅拌反应器相比气升式反应器具有结构简单、能耗低、运行成本低、造价低等优点,在相似的溶氧传质系数 $K_L\alpha$ 操作条件下节能约40%^[2]。气升式内循环反应器改善了机械搅拌反应器和鼓泡反应器的问题,同时增强流体的流动均匀性与混合效果、强化气液传质传热效率。总结起来,气升式内循环反应器在结构、造价、能耗、性能上都具有诸多优势,使得其

广泛应用于石油化工、化学工业、生物工程、冶金化工及环境工程等多个领域^[3-4]。虽然气升式内循环反应器结构简单,但是反应器内部流体流场十分复杂。在理论研究上,虽然已经存在许多经验和半经验关系式预测其流体力学参数,反应器流动与传质行为上还有不足,但是可靠性有所提高。这些问题使得气升式反应器在工业应用与设计放大中存在很大问题。因此,对结构参数进行优化,获得更为准确的流动与传质信息,设计出操作弹性范围更广的反应器具有重要意义。

1 结构原理

1.1 基本结构

气升式内循环反应器结构主要包括上升区、下降区、气体分布器和布水器等,结构如图1所示。在不同领域中,气升式内循环反应器为满足不同领域

收稿日期:2017-09-01;修回日期:2018-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(21677018)

作者简介:张雷(1993-),男,硕士生;韩严和(1976-),男,博士,副教授,主要从事电化学在环境工程中的应用研究,通讯联系人,010-81292291, hanyanhe@bipt.edu.cn。

所需的条件,在结构间存在着一定区别,但是基本原理不变。以气-液两相为例,循环区分为导流筒内的上升区和导流筒外的下降区,导流筒上部至液面为气液分离区,导流筒下部至反应器底部为气液混合区,导流筒下方设有曝气口。液体经布水器进入反应器,气体作为分散相经曝气口进入导流筒,使得上升区气含率增加,密度降低,下降区液体循环流入上升区,在气液分离区,气体一部分被分离反应器,一部分进入到下降区;液体一部分作为产品排出,另一部分参与循环。

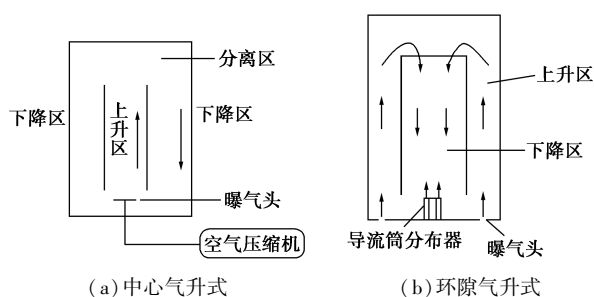


图 1 气升式内循环反应器

1.2 反应器的应用及类型

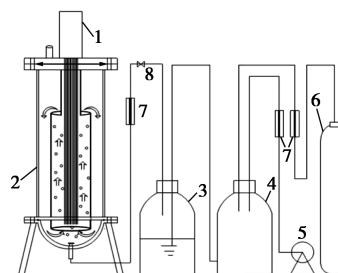
由于气升式反应器是以压力差来实现水的循环流动,无需引用机械转动装置,不仅结构简单、能耗低,而且具有很高的传质传热效果,因此气升式反应器在各领域广泛应用。由于各领域技术差异与设备自身的限制,对于各领域中不同技术与气升式反应器相结合来实现高效率气升式反应器,正是未来的研究方向。如今,在生物化学、声化学、电化学等领域

域已有研究。

(1) 气升式内循环生物反应器

气升式内循环反应器在生物化工、生物制药应用十分广泛,技术相对成熟,研究远比声化学、光化学深入。在污水处理中,利用反应器与活性污泥、生物膜相结合的生物反应器具有很好的处理污水能力。韩越梅等^[5]在气升式内环流反应器中进行了半硝化-厌氧氨氧化同步联合废水脱氮工艺,在运行 120 d 以后实现了总氮去除率达到 75%,同时单位质量污泥平均除氮性能为 $2.16 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^3)$ 。

利用此生物反应器进行藻类细胞工程育苗,如图 2 所示^[6]。与普通气升式内循环反应器不同的是,气升式内循环光生物反应器主要用于培养利用光能的微生物,所以在反应器材质上采用透光好的钢化玻璃,在反应器内增加加热装置以及反应器内或反应器外增加光源为微生物提供合适的温度及光



1—LED 光源;2—光生物反应器;3—溶气装置;4—混气装置;
5—空气泵;6—二氧化碳钢瓶;7—流量计;8—止回阀

图 2 气升式光生物反应器

(上接第 172 页)

表 2 两阶抽真空工艺与单阶抽真空工艺脱附气流量波动情况对比表

项目	抽气能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	初期		末期		初期 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	末期 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	初期 流量/ 末期 流量
		压力/ kPa	压力/ kPa	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)			
两阶抽真空工艺								
一阶真空系统	6000	30	10	1800	600			3.46
二阶真空系统	9000	10	2	900	180			
合计	15000			2700	780			
一阶抽真空工艺								
	15000	30	2	4500	300			15.00

5 结论

(1) 化工品和轻质油品装船油气回收是近年码头油气回收的热点和难点,受到广泛关注。

(2) 吸附法工艺是应对化工品和轻质油品装船油气回收的合理工艺。

(3) 该新型油气回收工艺回收效率接近全回收。

(4) 新型油气回收工艺采用吸附法工艺,采用复合吸附床、低抽真空压力、多床同时吸附及二阶抽真空工艺,与传统吸附法工艺相比有显著提升。

参考文献

- [1] 潘海涛. 油气回收技术在港口油品码头中的应用[C]. 中国土木工程学会港口工程分会技术交流文集, 2009.
- [2] 鲁东青. 老旧石油化工码头油气回收治理初探与展望[J]. 中国水运, 2017, 38(7): 57-59.
- [3] 宫中昊, 于辉, 张卫华. 码头油气回收系统解析[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 910-914.
- [4] 李艺颖, 王媿. 码头油气回收系统设计探讨[J]. 当代化工, 2016, 45(4): 805-808. ■

照。Soman 等^[7]利用 CFD 对气升式光生物反应器进行研究,将其性能与传统气升式光生物反应器 (APBR) 进行比较,新型反应器具有高出传统反应器 7% 的表面积,并且具有优秀的液体循环性能和可选择性的明暗处理。

另一点不同的是在此装置中采用 CO_2 进行曝气,一方面起到为系统提供循环动力的作用,另一方面也为反应器中微生物提供碳源的作用。因此有学者^[8]将工业废气利用其中,既达到了节约能源的目的,又可以利用废气中的碳源、氮源等资源,达到了以废治废。

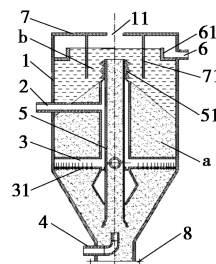
(2) 超声波气升式内循环反应器

近年来关于超声波与气升式内循环反应器相结合的反应器越来越成熟,利用空化效应增强气泡破碎率,增加传质面积,促进流体湍动与返混,强化传质使得声化学在污水处理领域的应用越来越多。在理论研究中汤立新等^[9]一直致力于研究超声波气升式内循环反应器的流体力学性能和传质性能的研究,得出超声的存在可以促进反应传质,并且对混合时间有着复杂的影响,实验证明存在 1 个最佳超声功率,并提出反应器流体力学的关联式。Wang 等^[10]在矩形气升式内循环反应器中对四环素降解实验中发现,超声波结合催化剂进行臭氧氧化可以将其降解,降解速度随功率及 pH 增加而增大。通过对超声波气升式内循环反应器的研究,发现反应器在理论与实践都有着一定程度的研究结果,这些成果为气升式内循环反应器在不同领域中的研究奠定了一定的基础。

(3) 气升式内循环铁炭微电解反应器

由于化学法治理废水需投加大量化学药品,使得成本增大,同时药品对废水易造成二次污染。生物处理污水技术仅限于处理污水中可生化降解的物质,因而只能有限地降低废水中的色度及 COD。铁炭微电解技术一般不添加化学药品,设备体积小占地少,操作简便,主要以“以废治废”的思想对污水进行处理,处理后负面影响小,发展十分迅速。但是,电极材料的钝化问题一直以来是阻碍电化学进一步发展的重要原因。目前的解决办法主要是采用曝气式固定床反应器或采用机械搅拌方式进行解决,这些方法普遍存在着填料板结钝化没有有效解决或大幅增加工程成本等问题。因此,如今亟需寻求 1 种更优异的装置来解决填料板结钝化的问题。本课题组^[11]研发了一种内循环式铁炭微电解反应器,如图 3,此反应器利用微电解技术的高效氧化还

原能力,与内循环反应器的高效传质传热性能相结合,一方面解决了电极材料板结钝化的问题,另一方面大大提高了在污水处理方面的能力。此装置对实际的染料污水进行预净化处理后,COD 的去除率可达到 73.5%,色度去除率可达到 98.5%, BOD_5/COD 的比值提高了 23 倍。



1—筒体;2—进水管;3—布水器;4—进气管;5—内循环管;
6—出水口;7—稳流盖;8—法兰;11—出气口;31—布水器;
51—搓洗器;61—出水堰;71—隔板;a—填料

图3 气升式内循环铁炭微电解反应器

气升式内循环反应器很好地应用于各个领域,并且取得了不错的处理效果。正如前文所说,反应器结构简单但流场复杂,影响因素(操作参数、物性参数、结构参数)较多,并没有很完整的理论支撑,研究相对困难。本文将对已有的反应器结构优化进行研究,探究各结构因素对反应器性能的影响规律,为反应器结构设计提供一定的指导。

2 反应器结构优化

通常,在实验和模拟中多采用气含率和循环流速来评价气升式内循环反应器传质效率,传质效果反映了相间物质和能量传递的能力,对反应器设计放大与提升性能具有很大的影响。在对反应器结构进行优化过程中,虽然实验结果更加直观,但是优化设计所需条件在实验装置上实现则会产生巨大成本。近年来随着流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的发展,利用计算流体力学软件对气升式内循环反应器结构进行模拟优化已经十分成熟,能够有效降低成本,同时模拟结果也受到广泛的认可^[12-14]。本文中综述了国内外学者在反应器结构方面的优化的研究,内容主要包括反应器高径比、环隙比、气体分布器等,研究这些结构参数对反应器传质效果的影响。

2.1 高径比

高径比(H/D)是气升式环流反应器的导流筒高度与反应器直径的比值。它是通过影响相间传质、流动效率来影响反应器处理性能。在操作气速

一定的条件下,适当增加高径比可以增大循环流速,提高传质效率。范景福等^[15]利用双流体模型描述气液两相流动过程中,通过改变导流管高径比,随着高径比的变大,反应器循环流速变大,但超过一定范围时并不利于提高反应器效率。存在 1 个最优化的高径比。刘其松等^[16]对气升式内循环反应器高径比、环隙比底隙高度做了全面的研究。同样发现,随着高径比增大,气升式内循环反应器底部静压差 ΔP 增大,在合适范围内可以有效提高气含率和循环流速。田小峰等^[12]利用欧拉-欧拉多相流模型模拟高径比取值在 6~11 范围内反应器气含率和循环流速的变化规律得出:气含率最高时高径比为 8,循环流速最高时高径比为 7,但是在高径比为 8 时反应器流场已经产生偏流,并且在成本上考虑,随着反应器高度的增加成本也会增加,确定高径比为 7 时为最优。因此,在反应器结构优化方面高径比的选择要全面考虑,寻找最优区间十分重要,如果选择不佳不仅会影响相间传质传热性能,而且会增加工程成本。

2.2 环隙比

合理的环隙比可以有效提高气含率,强化相间传质。杨志方等^[17]研究 78.5 L 内循环反应器内部件对流体性能影响中,发现内外筒直径比值存在 1 个最佳的区间,得出最佳比值为 0.73~0.77。多名学者^[12,18]利用 CFD 研究环隙比对反应器性能参数的影响中发现环隙比为 1 时,液体循环流量最大,反应器具有最优流化状态。杜峰等^[19]对导流筒直径对反应器流动的影响和放大进行研究,结果表明, D_i/D_o 增大,上升筒气含率持续增加,下降筒气含率先增加后减小,整体气含率先增加后保持不变;整体环流速度先增加后减小。并且得出,当 D_i/D_o 为 0.70 时,反应器性能达到最佳。可以发现,环隙比对流体力学参数具有重要的影响,并且环隙比存在 1 个最优区间,在区间内环隙比对提高反应器性能十分有利,但是比值高出或低于此区间将会对反应器性能产生不利影响,所以在结构优化过程中选择合适的环隙比对提高反应器性能具有重要意义。

2.3 底隙高度

底隙高度是导流筒下端到反应器底部曝气口的距离,是反应器设计的关键参数之一。练以诚等^[20]采用双流体模型考察了内循环反应器表观气速、导流筒结构对流体力学参数的影响。如果底隙高度过小,反应器底部易产生死区,过大气体易进入下降区,影响反应器整体气液循环,因此底隙高度对反应器内气液流动有着重要的影响,对导流筒结构优化

可以有效减少死区,改善气液流动,提高传质传热效率,最终提高气升式内循环反应器的效率。Chen 等^[14]考察了底隙高度与气液分离区高度比值(H_B/H_A),随着比值的增大,总循环阻力出现先增加,然后趋于稳定,最后略有下降的趋势,在一定范围内引流管轴向位置高度对反应器循环驱动产生了影响,并且具有喇叭口的导流筒可以有效提高反应器顶部气液分离。朱家亮等^[21]利用欧拉-欧拉模型构建 CFD 模型,考察了结构因素与操作因素对反应器液体循环速度和气含率的影响,底隙高度对流化床底部污泥区的影响较大,研究发现,底隙高度约等于下降区缝隙长度,反应器具有良好性能。

2.4 气体分布器结构

气体分布器的结构主要包括孔径大小和布水口数量,不同的结构对反应器性能具有很大的影响。在对分布器结构优化过程中,选择最佳优化结果,可以有效消除旋涡,改善物料流动及混合^[22]。常常采用体积传质系数($K_L\alpha$)来表示相间传质^[23], K_L 表示液相一侧的传质系数, α 表示气-液相间比表面积,所以影响传质主要从这 2 方面进行。对于气-液相间比表面积,气泡尺寸和气含率是影响相界面面积的直接因素,通过对气体分布器优化可以增大气泡比表面积,分布器孔径和分布密度可以有助于获得较高气含率^[24],从而提高体积传质系数($K_L\alpha$),最终获得高性能的反应器。Tirunehe 等^[25]对气体分布器材料进行研究,采用管式高分子膜材质的分布器和多孔平板分布器进行比较,发现高分子膜具有更密集细小的孔隙,可以获得更大比表面积的气泡,提高传质系数。同时吴兵^[26]也证明了新型膜材料可以产生更多、更小的气泡,增加气液接触面积,获得更高的传质效果,所以材料的选择对气体分布器的优化具有重要的参考意义。沈荣春等^[27]模拟了单环、三环、五环(孔数依次增加)的气体分布器,发现环数越多,气含率越大,但是也有研究发现,并非孔数越多越好,Luo 等^[28]通过实验方法对单喷嘴、二喷嘴、四喷嘴和 O 形分布器这 4 种结构分布器进行研究,发现当使用四喷嘴时气含率和循环流速最大,O 形分布器次之,二喷嘴最小。在此研究中 O 形分布器虽然具有更多的孔数但是由于孔数增加导致气泡聚并概率增加,气泡尺寸增大,最终导致气含率并不理想。由于气体分布器直接影响着物质循环流动、传质传热,所以在对于气体分布器优化中,材料、孔径及分布密度等相关参数的选择十分重要。

3 结论与展望

气升式反应器结构简单,具有良好的传质传热特性,使得反应器在近年来成为广大学者研究的热门。对国内外研究趋势进行总结发现,目前主要集中在2方面的研究:①对气升式内循环反应器流动与传质性能提高方面的研究。②气升式内循环反应器工业应用及创新。通过这2方面研究中可以看出在反应器设计放大中存在的问题,从发展前景来看,反应器在各领域工程应用中具有很大的发展潜力。因此,对气升式内循环反应器进行深入的研究,探索各参数对反应器性能的影响规律,获得性能高、操作弹性大、工程成本低的反应器具有重要意义。如今,反应器的应用还处于初始阶段,实际工程案例较少,虽然已有与不同领域技术相结合的新型ILAR反应器,但大多数反应器并不能做到经济与效益同时满足。因此,在今后的研究中主要注重ILAR反应器结构优化设计与各领域工艺条件相结合,做到既创新又节能,生产出高效节能的新型气升式内循环反应器,发挥反应器在各领域应用中最大的潜力。

参考文献

- [1] Heijnen J J, Hols J, van der Lans R G J M, *et al.* A simple hydrodynamic model for the liquid circulation velocity in a full-scale two- and three-phase internal airlift reactor operating in the gas recirculation regime[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(15): 2527-2540.
- [2] 朱海东,周晓云.内循环泵反应器溶氧传质性能研究[J].*湖北农业科学*, 2017, (5): 966-968.
- [3] Ammar S H, Akbar A S. Oilfield produced water treatment in internal-loop airlift reactor using electrocoagulation/flotation technique[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, doi: org/10.1016/j.cjche.2017.07.020.
- [4] Lebrero R, Ángeles R, Pérez R, *et al.* Toluene biodegradation in an algal-bacterial airlift photobioreactor: Influence of the biomass concentration and of the presence of an organic phase[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(3): 585-593.
- [5] 韩越梅,刘志军,许晓飞,等.气升式生物反应器用于废水脱氮的组合工艺研究[J].*现代化工*, 2016, 36(1): 160-163.
- [6] 周集体,桂冰,李昂,等.气升式光生物反应器中 *Chlorella sp.* 优化培养与能量计算[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(6): 94-98.
- [7] Soman A, Shastri Y. Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics[J]. *Applied Energy*, 2015, 140: 246-255.
- [8] Zimmerman W B, Zandi M, Hemaka Bandulasena H C, *et al.* Design of an airlift loop bioreactor and pilot scales studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella salina*[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10): 3357-3369.
- [9] 汤立新,韩萍芳,吕效平.超声波气升式内循环反应器流体力学性能研究[J].*南京工业大学学报: 自科版*, 2003, 25(1): 41-45.
- [10] Wang Y, Zhang H, Chen L. Ultrasound enhanced catalytic ozonation of tetracycline in a rectangular air-lift reactor[J]. *Catalysis Today*, 2011, 175(1): 283-292.
- [11] 韩严和,李菡,武梦雨,等.一种内循环式铁碳微电解反应器: CN, 105036261A[P]. 2015-09-01.
- [12] 田小峰,张建成,刘献玲,等.CFD在气升式环流反应器结构优化上的应用[J].*现代化工*, 2013, 33(7): 121-124.
- [13] Lestinsky P, Vayrynen P, Vecer M, *et al.* Hydrodynamics of airlift reactor with internal circulation loop: Experiment vs. CFD simulation[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 42: 892-907.
- [14] Chen L, Bai Z. CFD simulation of the hydrodynamics in an industrial scale cyclohexane oxidation airlift loop reactor[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 119, doi: 10.1016/j.cherd.2017.01.008.
- [15] 范景福,刘献玲,蔡文.CFX软件模拟气升式环流反应器的研究[J].*炼油技术与工程*, 2010, 40(7): 18-22.
- [16] 刘其松,徐波,孙茹.计算流体力学在气升式生物反应器研究中的应用[A]. 2014年全国天然气学术年会论文集[C]. 贵阳: 全国天然气学术年会, 2014: 425-438.
- [17] 杨志方,杜峰,于清江,等.78.5升气升式环流反应器内构件优化[J].*化工进展*, 2015, 34(3): 659-663.
- [18] 鄢思远,高飞,俞旭峰,等.导流筒结构对环流反应器内流体力学的影响[J].*化学工程*, 2015, 43(6): 42-45.
- [19] 杜峰,杨志方.导流筒直径对气升式环流反应器流动的影响和放大研究[J].*石油学报: 石油加工*, 2016, 32(4): 725-733.
- [20] 练以诚,靳海波.气升式内循环反应器的数值模拟和结构参数[J].*过程工程学报*, 2012, (4): 541-549.
- [21] 朱家亮,张涛,韦朝海.基于结构参数响应的内循环流化床流体特性优化数值模拟[J].*环境科学学报*, 2012, 32(11): 2732-2740.
- [22] 吴迪.多相UV-Fenton反应器的数值模拟与结构优化[D].南昌: 南昌大学, 2015.
- [23] 何广湘,杨索和,靳海波.气升式环流反应器的研究进展[J].*化学工业与工程*, 2008, 25(1): 65-71.
- [24] 黄卫星,胡培根,岑斌,等.气体分布器对内循环三相生物流化床反应器动力学性能的影响[J].*四川大学学报: 工程科学版*, 2015, 47(3): 174-179.
- [25] Tirunehe G, Norddahl B. The influence of polymeric membrane gas spargers on hydrodynamics and mass transfer in bubble column bioreactors[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2016, 39(4): 613-626.
- [26] 吴兵.新型膜布气环流反应器流动与传质研究[D].南京: 南京工业大学, 2015.
- [27] 沈荣春,束忠明,黄发瑞.气体分布器结构对气升式环流反应器内气液两相流动的影响[J].*化学反应工程与工艺*, 2007, 23(5): 422-429.
- [28] Luo L, Liu F, Xu Y, *et al.* Hydrodynamics and mass transfer characteristics in an internal loop airlift reactor with different spargers[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 175(1): 494-504. ■