

引用格式:李天赐,赵秋月,朱帅,等. 新型管式搅拌反应器的气液传质特性[J]. 中国有色冶金, 2024(1):105-111.

LI Tianci, ZHAO Qiuyue, ZHU Shuai, et al. Gas-liquid mass transfer characteristics of a new tubular stirred reactor[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024(1):105-111.

新型管式搅拌反应器的气液传质特性

李天赐^{1,2}, 赵秋月^{1,2}, 朱帅^{1,2}, 郑明昭^{1,2}, 张延安^{1,2,3}

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 中铝东南材料院(福建)科技有限公司, 福建 福州 350015)

[摘要] 多相体系的混合与传质性能直接影响多相反应过程,团队开发了从搅拌桨叶端出气的新管式搅拌反应器。采用稳态亚硫酸盐法(FSM)研究反应器的气液传质性能,考察了通气流量 Q 、搅拌弗劳德数 Fr 和液含量 ε 对体积传质系数 $k_L a$ 的影响。结果表明:增大 Q 和 Fr 可以有效提高 $k_L a$;新型搅拌桨从桨叶端进气方式可以增强 $k_L a$,相较传统反应器最大增强约2倍。反应器的气液传质性能在 $\varepsilon = 0.5$ 、 $Fr = 0.054$ 、 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时最高,此时 $k_L a = 0.0324 \text{ s}^{-1}$ 。依据试验数据建立了关于 $k_L a$ 的无量纲关联式,误差基本在25%以内,对后续反应器的改进和应用具有参考意义。

[关键词] 多相反应器; 曝气; 弗劳德数; 气液系统; 气液传质; 冶金设备

[中图分类号] TF351 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)01-0105-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.01.013

多相反应器广泛应用于生物、化工、冶金、环境等过程工业^[1-4]。用于增强多相体系混合与传质的多相反应器类型多样,包括搅拌反应器、微通道反应器、旋转填充床、高剪切混合器等^[5]。其中,搅拌反应器因其应用性能优良、结构简单、组装方便等特点得到普遍应用。

在涉及气液两相参与的多相反应中,搅拌影响气液均质化程度、混合质量、功耗和传质,进而影响实际的反应进程^[6]。在上述各因素中气液传质速率是限制反应速率的主要因素^[7]。体积传质系数 $k_L a$ 的增强可以通过增加气液传质系数项(k_L)和增加气液界面面积项(a)来实现。 k_L 值受多种因素影响,如气体扩散率、液体介质的密度和黏度以及气液亲和力等^[8-10],受实际反应过程影

响,上述参数难以改变,增加气液界面面积成为增强 $k_L a$ 的高效手段^[11]。研究人员常通过引入添加剂和优化反应器结构的方式,增大气液接触面积提高 $k_L a$ ^[12]。但实际的反应体系总是伴随着各类的化学反应,没有一种通用的添加剂可以适用于各个体系。

潘勤敏等^[13]通过对管式搅拌反应器的气液传质特性进行研究,发现管式搅拌反应器进行传质所需的搅拌转速低于立式搅拌釜,且管式反应器的气液传质面积及其分布均匀度较立式搅拌釜有明显提高,实测结果发现在相同的功率下,管式搅拌反应器的传质系数比立式搅拌釜的高出约一个数量级。叶新权等^[15]、白伟民等^[16]在关于管式搅拌反应器的研究中对搅拌桨型进行改进,分别使用了多层平直叶桨和新型宽叶搅拌桨优化反应器,强化了管式搅拌反应器的气液传质效果,研究发现液含量 $\varepsilon = 0.5$ 为最佳操作条件。周天达等^[17]指出采用管式搅拌反应器的Innovene工艺生产丙烯聚合物,产品的综合性能好。

基于以上,张延安等^[18]开发了新型管式搅拌反应器。该管式反应器创新性地将微小的进气孔

[收稿日期] 2023-08-22

[第一作者] 李天赐(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为冶金反应器。

[通信作者] 赵秋月,教授,博士生导师,主要研究方向为冶金反应器。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“低阶煤多相解离与界面重构资源化利用基础研究”(U21A20321)。

(0.15 mm)均匀分布在搅拌桨叶上,参与反应的气体通过中空的搅拌轴与桨叶连接杆,随着桨叶的旋转均匀分布在整个反应器内,相较于固定位置的曝气孔,这种曝气方式使得进气孔能够覆盖更多的空间位置,同时搅拌桨旋转进一步破碎细化气泡,增大气液接触面积,提高气液传质速率。郑明昭^[19]使用该反应器进行湿法锈蚀试验,数据显示传统釜式反应器需要反应4 h才可去除还原钛铁矿中83%的金属铁,而新型管式反应器在2.5 h内即可去除89%的金属铁。

为了探究新型管式搅拌反应器的气液传质特性,本研究以管式搅拌反应器为分析对象,探讨其气液传质性能,得到不同操作参数下的试验数据,建立 $k_1 a$ 的无量纲关联式,为新型反应器的优化与应用提供参考。

1 试验

1.1 试验材料

无水亚硫酸钠(相对分子质量126,溶液浓度 $1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$,国药集团化学试剂有限公司产),七水合硫酸钴(相对分子质量281,溶液浓度 $10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$,国药集团化学试剂有限公司产)。试验用水为自来水,通入气体为空气。

1.2 试验设备

试验设备连接示意如图1所示,主要由6部分

组成,分别是进气系统、动力系统、反应器主体、控制系统、取样系统和气液传质测量系统。本试验采用取样法进行测量,通过取样口将液体用蠕动泵送入取样管,测量完成后,该部分液体受挤压返回反应器。图2为新型管式搅拌反应器主体结构尺寸图。试验体系及操作参数如表1所示。

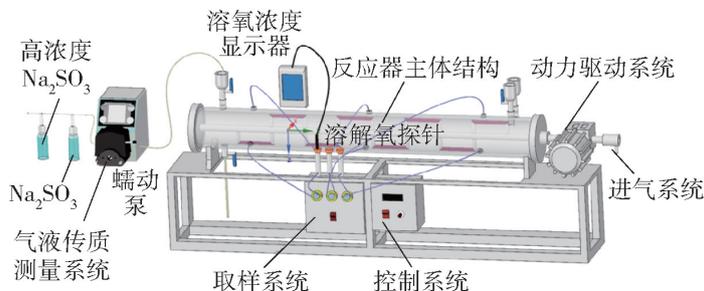


图1 管式搅拌反应器及气液传质测量系统

Fig. 1 Tubular stirred reactor and gas-liquid mass transfer measurement system

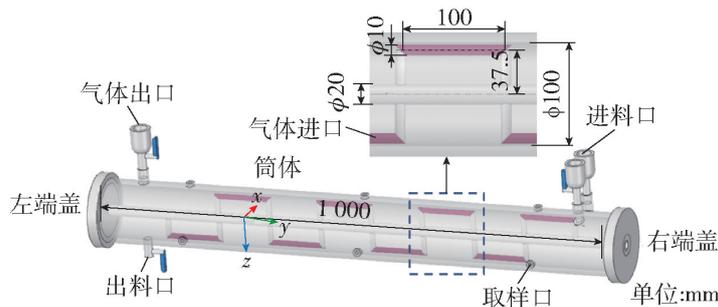


图2 管式反应器主体示意图(单位:mm)

Fig. 2 Main body diagram of tubular reactor

表1 试验体系及操作参数

Table 1 Experimental system and operating parameters

名称		参数					
物理性质	液体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	998					
	气体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.205					
	NaSO_3 浓度/($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)	1×10^{-4}					
	NaSO_3 滴加速率/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.67×10^{-7}					
操作参数	搅拌弗劳德数	0.006	0.024	0.054	0.096	0.15	0.22
	通气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.8		1.2		1.6	
	液含量	0.5		0.61		0.74	

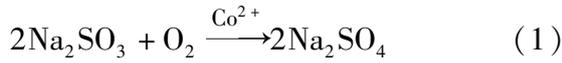
1.3 分析测试仪器

便携式溶氧仪($0 \sim 6.25 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$),JPBJ-609L型,上海仪电科学仪器有限公司产;溶解氧电极,雷磁DO-958-L型,上海仪电科学仪器有限公司产;气体流量计($0.25 \sim 2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$),LZB15,苏州化工仪表公司产;蠕动泵,BT100L型,保定雷弗流体科技有限公司产;电子天平(精度为

1 mg),JA2103N型,上海佑科仪器仪表有限公司产。

1.4 试验方法

采用稳态亚硫酸盐法测定体积传质系数^[7]。该方法主要发生液体中的化学反应。化学反应是在液体中以 Co^{2+} 为催化剂,亚硫酸钠加入体系后立即被溶解氧氧化成硫酸钠,化学反应见式(1)。



试验过程中,首先向体系内通入空气,当溶解氧达到饱和时氧气浓度为 C_{Ai} ,将亚硫酸钠溶液加入水中,溶解氧开始减少。当体系内氧浓度不随时间变化时,则假定此时为稳态氧气浓度 (C_{As})。在稳定状态下,氧气消耗率由反应决定,等于内部相氧转移率。试验过程体系内溶氧浓度变化如图3所示。

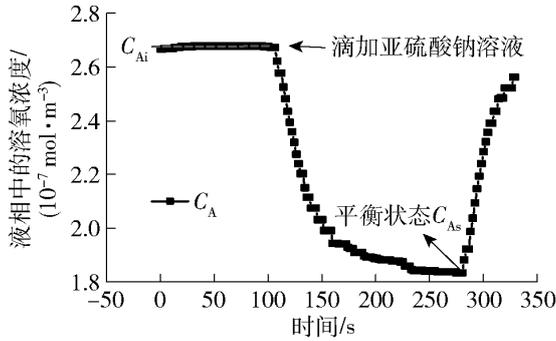


图3 试验过程体系内溶氧浓度变化

Fig. 3 The change of dissolved oxygen concentration in the experimental process system

测量方法见公式(2)。

$$dC_{\text{A}}/dt = k_{\text{L}}a(C_{\text{Ai}} - C_{\text{As}}) - r \quad (2)$$

式中: $k_{\text{L}}a$ 为体积传质系数, s^{-1} ; C_{Ai} 为饱和溶解氧浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{As} 为溶氧平衡浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; r 为耗氧率, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

耗氧率的计算公式见式(3)。

$$r = Q_{\text{F}}C_{\text{BF}}/2V_{\text{L}} \quad (3)$$

式中: Q_{F} 为亚硫酸钠溶液的进料速率, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; C_{BF} 为亚硫酸钠溶液的浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; 2 为反应中的化学计量比; V_{L} 为液体体积, m^3 。

在稳定状态下,溶解氧浓度 C_{A} 恒定,这导致 dC_{A}/dt 变为零。传质系数计算公式见式(4)。

$$k_{\text{L}}a = \frac{Q_{\text{F}}C_{\text{BF}}}{2V_{\text{L}}C_{\text{Ai}} \left(1 - \frac{C_{\text{As}}}{C_{\text{Ai}}}\right)} \quad (4)$$

试验结果重现性好,重复2次或3次后平均相对误差小于10%。

2 结果与讨论

2.1 通气流量 Q 与搅拌弗劳德数 Fr 对 $k_{\text{L}}a$ 的影响

根据文献[13]对管式搅拌反应器气液传质特性的研究,搅拌弗劳德数 $Fr = \frac{dN^2}{g}$ 控制体系内的气

液体积传质系数 $k_{\text{L}}a$ 。本研究考察了在3种通气流量时 Fr 与 $k_{\text{L}}a$ 的关系,如图4所示。

图4中,不论是改变液含量 ε 的值,还是通过调节搅拌转速 N 改变 Fr 的大小,管式搅拌反应器的 $k_{\text{L}}a$ 均随着 Q 及 Fr 的升高整体呈现增大趋势。

图4(a)展示了 $\varepsilon = 0.5$ 时 $k_{\text{L}}a$ 随 Fr 的变化曲线,文献[15]中传统管式搅拌反应器采用六叶平直搅拌桨,传统反应器利用搅拌桨旋转时产生的空穴,将气体带入液体中进行传质。新型管式搅拌反应器采用从桨叶端进气的新搅拌桨,使用微小的气体进口细化气泡尺寸,增大气液接触面积,同时气体随着搅拌桨旋转覆盖更多的空间位置。该变化曲线显示,新型搅拌桨可以有效提升体系内的气液传质速率^[15],当 $Fr = 0.024$ 时, $k_{\text{L}}a$ 提升了约2倍,当 $Fr = 0.22$, $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,体系内的体积传质系数最高,在 $\varepsilon = 0.74$ 时达到最高,为 0.0324 s^{-1} 。

图4显示, $Fr = 0.054$ 时, $k_{\text{L}}a$ 随着 Fr 变化的曲线出现拐点,在该点之后, $k_{\text{L}}a$ 增速变缓(图4(b)~(c)),在图4(a)中 $k_{\text{L}}a$ 在 Fr 变化期间有下降情形。

图5从反应器左端拍摄的气泡形态图可以解释拐点出现的原因:图5(a)中, $Fr = 0.006$ 时,搅拌桨进入液相后,气体从桨叶上的微小气孔进入体系内,气泡尺寸较小,有利于气液间的传质;随着 Fr 升高至0.054,搅拌桨后方有气穴生成,气穴形状如红色区域所示,气穴的出现不利于气液传质的进行;随着 Fr 进一步升高,气穴进一步增大,气液接触面积降低,导致 $k_{\text{L}}a$ 增速变缓或下降。

图5(b)中液含量 ε 从0.5增加到0.74,气穴的尺寸显著减小。图4中,在通气量 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下, Fr 从0.054增大至0.096的过程中, $k_{\text{L}}a$ 由 $\varepsilon = 0.5$ 时减小转变为 $\varepsilon = 0.74$ 时增大,原因是气穴尺寸减小,对气液传质的影响也降低,因此当 $\varepsilon = 0.74$ 时,增大 Fr 和 Q 均能够显著增大 $k_{\text{L}}a$ 。

2.2 液含量 ε 对 $k_{\text{L}}a$ 的影响

由于反应器运行过程中持续有气体通入,液含量过高会导致试验过程中发生喷溅现象,预试验发现液含量 $\varepsilon = 0.74$ 时,不会发生喷溅现象,同时根据前人试验结果发现,在 $\varepsilon = 0.5$ 时气液传质效率最高^[15]。因此试验所选液含量参数定为0.5、0.61、0.74。2.1节的研究发现 Q 的大小对 Fr 随 $k_{\text{L}}a$ 的变化曲线影响很小,因此图6只显示 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时 $k_{\text{L}}a$ 随 ε 的变化曲线。

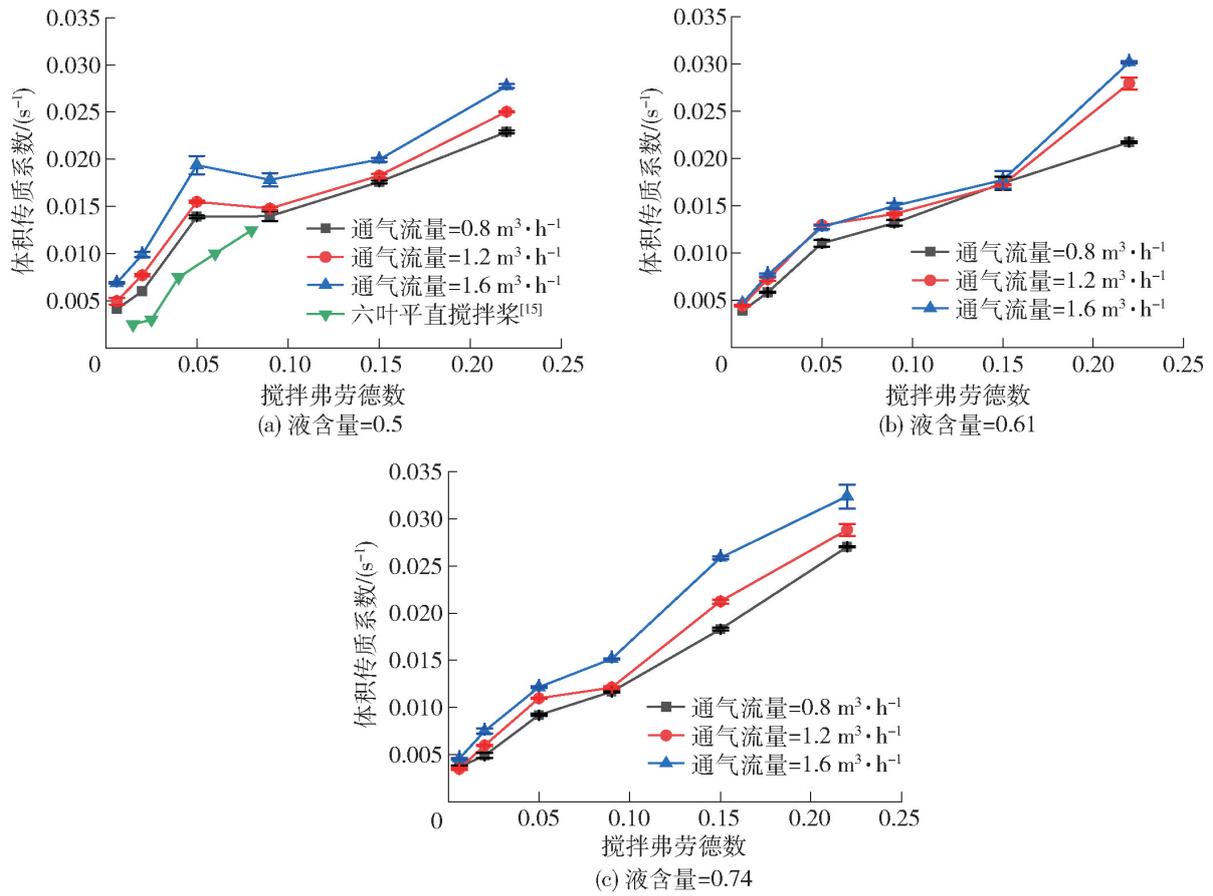


图 4 不同流量下 $k_L a$ 与 Fr 的关系

Fig. 4 The relationship between $k_L a$ and Fr under different flow rates

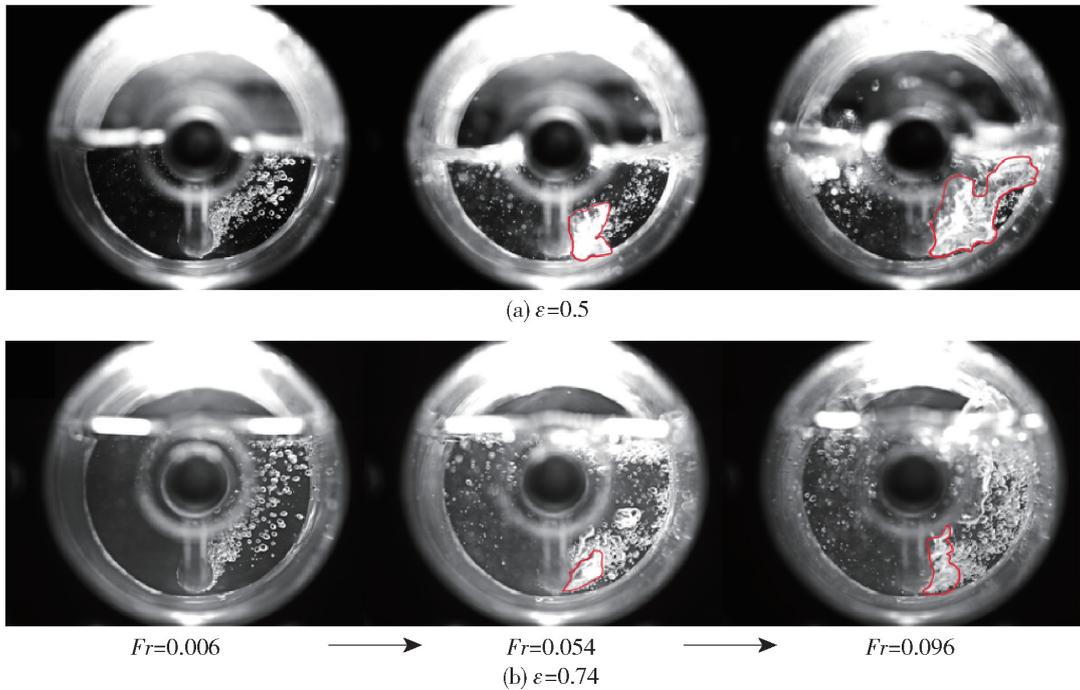
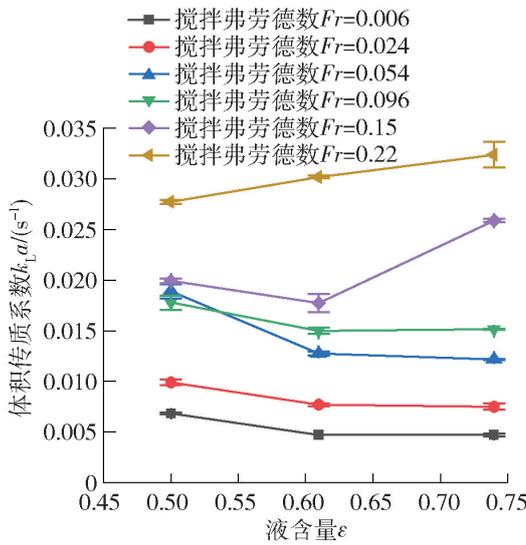


图 5 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 气泡形态图

Fig. 5 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ bubble shape diagram

从图 6 中可以看出,在 $Fr \leq 0.096$ 时,体系内的 $k_L a$ 随着液含量 ε 的升高而降低,这与叶新权等^[15]、白伟民等^[16]的试验结果相吻合:在 Fr 较低时,体系

内的气液传质速率在 $\varepsilon = 0.5$ 时达到最高点,之后随着液含量的上升而下降。而在 Fr 大于 0.15 时, $k_L a$ 随着 ε 的升高而增大,与前人试验结果有所不同。

图6 $k_L a$ 与 ε 的关系Fig. 6 The relationship between $k_L a$ and ε

分析原因:向体系内通入气体使得体系内气体量增加, Fr 增大使得体系内湍流的加剧, 气液接触面的更新速度加快, 有利于气液传质, 进而使 $k_L a$ 增大。在 $\varepsilon = 0.5$ 条件下, $Fr = 0.054$ 时体系内的 $k_L a$ 与 $Fr = 0.15$ 时相当, 展现了在该 Fr 下新型搅拌桨的优越性。

2.3 体积传质系数经验公式

对体积传质系数 $k_L a$ 造成影响的主要因素有:

①转搅拌速 N ; ②搅拌桨直径 d ; ③通气流量 Q ; ④流体的密度 ρ ; ⑤流体的黏度 μ ; ⑥流体的表面张力系数 σ ; ⑦重力加速度 g ; ⑧管式反应器的内径 D ; ⑨液含量 ε 。

对这些变量进行因次分析, 可得到其一般函数关系式, 见式(5)。

$$f(k_L a, N, d, Q, \rho, \mu, \sigma, g, D, \varepsilon) = 0 \quad (5)$$

各个变量与量纲建立因次表, 见表2。表中, M 代表质量量纲, L 代表长度量纲, t 代表时间量纲。

表2 变量及因次表

Table 2 Variables and dimension table

变量	$k_L a$	N	d	Q	ρ	μ	σ	g	D	ε
M	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
L	0	0	1	3	-3	-1	0	1	1	0
t	-1	-1	0	-1	0	-1	-2	-2	0	0

选择 N, d, ρ 作为独立变量, 根据计算可得这3个物理量的量纲指数行列式不等于0, 所以这3个物理量可以选做基本量纲。根据 Π 定理的内容, 本

试验中总的变量数10, 在选取3个独立变量数的情况下, 可以列出7个无因次的组合式。计算后可得式(6)。

$$f_1 \left(\frac{k_L a}{N}, \frac{Q}{d^3 N}, \frac{D}{d}, \frac{1}{Re}, \frac{1}{We}, \frac{1}{Fr}, \varepsilon \right) = 0 \quad (6)$$

在本试验内容中雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 分别为搅拌雷诺数和搅拌弗劳德数。另外, 搅拌桨直径 d 与管式反应器内径 D 根据管式搅拌反应器的结构设计得出, 在本试验中为定量, 且 $\frac{1}{Fr} = \frac{g}{dN^2}$,

$\frac{1}{We} = \frac{\sigma}{\rho d^3 N^2}$, 在本试验中比值为常数值, 拟合函数关系式可以简化为式(7)。

$$\frac{k_L a}{N} = f_2 \left(\frac{Q}{d^3 N}, Re, Fr, \varepsilon \right) \quad (7)$$

将试验数据代入式(7)中, 对试验数据进行多元线性回归分析拟合, 得到式(8)。

$$\frac{k_L a}{N} = \left(\frac{Q}{d^3 N} \right)^{0.376} Re^{-0.392} Fr^{0.374} \varepsilon^{-0.357} \quad (8)$$

式(8)适用条件如下: Fr 为 0.006 ~ 0.22、通气流量为 0.8 ~ 1.6 m³/h、液含量为 0.5 ~ 0.74 之间的新型管式搅拌反应器。拟合结果中的 R^2 即为决定系数 (coefficient of determination, COD), R^2 与修正 R^2 的值极为接近, 且均接近于1, 拟合程度良好。回归统计表见表3。

表3 回归统计表

Table 3 Regression statistical table

参数	数值
R^2	0.999
修正 R^2	0.999

通过计算拟合的体积传质系数与试验值进行比较, 得到图7。由图7可以发现, 相对误差基本控制在25%以内, 认为计算所得的拟合公式与试验值的吻合度较高^[20]。本研究结论为新型管式搅拌反应器在实际中的应用提供参考。

3 结论

本研究采用稳态亚硫酸盐法研究新型管式搅拌反应器气液传质性能, 考察了不同搅拌弗劳德数 Fr 、通气流量 Q 和液含量 ε 的条件下体积传质系数 $k_L a$ 的变化, 并在试验结果的基础上得到以下结论。

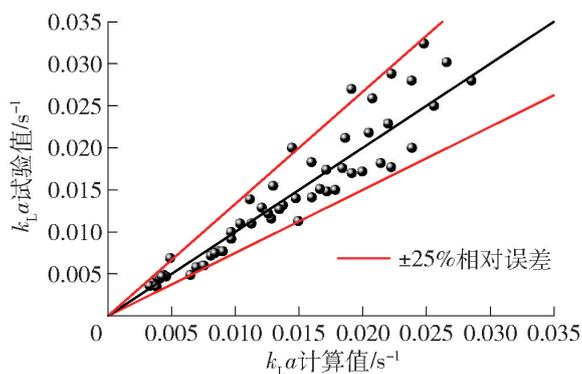


图7 $k_L a$ 计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of calculated and experimental $k_L a$ values

1) 从搅拌桨叶上通入气体,可有效增强 $k_L a$, 新型管式搅拌反应器在 $Fr \leq 0.054$ 时 $k_L a$ 大于传统管式反应器的值(最大提升约2倍)。

2) 在试验条件下,当新型管式搅拌反应器的 $Fr \leq 0.096$ 时, $\varepsilon = 0.5$ 气液传质速率最高;在 $Fr \geq 0.15$ 时, $\varepsilon = 0.74$ 气液传质效果最好;反应器在 $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\varepsilon = 0.74$ 、 $Fr = 0.22$ 时, $k_L a$ 最大为 0.0324 s^{-1} ;随着反应器 Fr 升高至 0.054 ,搅拌桨后方有气穴生成,使得气液接触面积降低, $k_L a$ 增速变缓或下降。

3) 对试验条件下反应器内的 ε 、 Fr 、 Q 与 $k_L a$ 的关系进行分析,得到新型管式反应器 $k_L a$ 的无量纲关联式(符号说明同前文),且与试验值拟合结果良好。

$$\frac{k_L a}{N} = \left(\frac{Q}{d^3 N} \right)^{0.376} Re^{-0.392} Fr^{0.374} \varepsilon^{-0.357}$$

[参考文献]

- [1] HUKKANEN E J, BARTON B E, PATTON J T, et al. A novel continuous multiphase reactor for chemically processing polymer fibers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(18): 6123–6130.
- [2] LUO P C, WU J, PAN X, et al. Gas-liquid mass transfer behavior in a surface-aerated vessel stirred by a novel long-short blades agitator[J]. Aiche Journal, 2016, 62(4): 1322–1330.
- [3] RAMEZANI M, LEGG M J, HAGHIGHAT A, et al. Experimental investigation of the effect of ethyl alcohol surfactant on oxygen mass transfer and bubble size distribution in an air-water multiphase Taylor-Couette vortex bioreactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 319: 288–296.
- [4] KONG X L, GONG D W, KE W, et al. Investigation of mass transfer characteristics of SO_2 absorption into NaOH in a multichannel ceramic membrane contactor [J]. Industrial

Engineering Chemistry Research, 2020, 59(23): 11054–11062.

- [5] 姚心,王淑婵,吕东,等.基于CPFD的流化床反应器的数值模拟[J].有色设备,2019,33(2):31–35.
YAO Xin, WANG Shuchan, LYU Dong, et al. Numerical simulation of fluidized bed reactor based on CPFD [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2019, 33(2): 31–35.
- [6] MIRYAHYAEI S, OLINGA K, AYUB M S, et al. Rheological measurements as indicators for hydrolysis rate, organic matter removal, and dewaterability of digestate in anaerobic digesters[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(4): 103970.
- [7] PAN A, XIE M, XIA J, et al. Gas-liquid mass transfer studies: The influence of single- and double-impeller configurations in stirred tanks[J]. The Korean Journal of Chemical Engineering, 2018, 35(1): 61–72.
- [8] PAINMANAKUL P, WACHIRASAK J, JAMNONGWONG M, et al. Theoretical prediction of volumetric mass transfer coefficient ($k_L a$) for designing an aeration tank[J]. Engineering Journal, 2009, 13(3): 13–28.
- [9] ZEDNIKOVA M, ORVLHO S, MFIALOVA M, et al. Measurement of volumetric mass transfer coefficient in bubble columns[J]. Chem Engineering, 2018, 2(2): 19.
- [10] VERSTEEG G F, BLAUWHOFF P M M, VAN SWAAIJ W P M. The effect of diffusivity on gas-liquid mass transfer in stirred vessels. Experiments at atmospheric and elevated pressures[J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42(5): 1103–1119.
- [11] AKITA K, YOSHIDA F. Bubble Size, interfacial area, and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design, 1974, 13(1): 84–91.
- [12] HO D, KIM K, EARMME T, et al. Enhancing gas-liquid volumetric mass transfer coefficient [J]. Journal of Industrial Engineering Chemistry, 2020, 87: 1–17.
- [13] 潘勤敏,唐福瑞,顾培韵,等.卧式搅拌反应器气液传质特性的研究(I)[J].化工学报,1987(1):76–84.
PAN Qinmin, TANG Furui, GU Peiyun, et al. Study on gas-liquid mass transfer characteristics of horizontal stirred tank (I) [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering China, 1987(1): 76–84.
- [14] 潘勤敏,唐福瑞,顾培韵,等.卧式搅拌反应器气液传质特性的研究(II)[J].化工学报,1987(2):194–202.
PAN Qinmin, TANG Furui, GU Peiyun, et al. Study on gas-liquid mass transfer characteristics of horizontal stirred tank (II) [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering China, 1987(2): 194–202.
- [15] 叶新权,包永忠,黄志明,等.卧式搅拌釜气液传质性能研究[J].化学工程,2005(1):28–31.
YE Xinquan, BAO Yongzhong, HUANG Zhiming, et al. Study on gas-liquid mass transfer performance of horizontal stirred

- reactor[J]. Chemical Engineering (China), 2005(1): 28-31.
- [16] 白伟民, 曹贵平, 粟小理, 等. 卧式聚合釜中新型宽叶板式搅拌桨的气液传质特性[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2008(2): 154-158.
- BAI Weimin, CAO Guiping, LI Xiaoli, et al. Gas-liquid mass transfer characteristics of new wide-blade plate impeller in horizontal polymerizer[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2008(2): 154-158.
- [17] 周天达, 谢昕, 马文辉, 等. Innovene 聚丙烯工艺技术开发进展[J]. 广州化工, 2022, 50(16): 10-13.
- ZHOU Tianda, XIE Xin, MA Wenhui, et al. Development progress of Innovene polypropylene technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(16): 10-13.
- [18] 张延安, 赵秋月, 张子木, 等. 一种气液固多相管式搅拌反应器; CN110193333B[P]. 2021-08-17.
- ZHANG Tingan, ZHAO Qiuyue, ZHANG Zimu, et al. A gas-liquid-solid multiphase tubular stirred reactor; CN110193333B[P]. 2021-08-17.
- [19] 郑明昭. 基于锈蚀反应的多相搅拌反应器模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021. 74-75.
- ZHENG Mingzhao. Simulation of multiphase stirred reactor based on corrosion reaction[D]. Shenyang: School of Metallurgy, Northeast University, 2021. 74-75.
- [20] FUKUDA T, IDOGAWA K, IKEDA K, et al. Volumetric gas-phase mass transfer coefficient in baffled horizontal stirred vessels[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1980. DOI: 10.1252/jcej.13.298.

Gas-liquid mass transfer characteristics of a new tubular stirred reactor

LI Tianci^{1,2}, ZHAO Qiuyue^{1,2}, ZHU Shuai^{1,2}, ZHENG Mingzhao^{1,2}, ZHANG Tingan^{1,2,3}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Polymetallic Symbiotic Ores of Ministry of Education, Shenyang 110819, China;

3. Chinalco Southeast Materials Institute (Fujian) Technology Co., Ltd., Fuzhou 350015, China)

Abstract: The mixing and mass transfer performance of the multiphase system directly affects the multiphase reaction process. The team developed a new type of tubular stirred reactor that discharges gas from the impeller end. The steady-state sulfite method (FSM) was used to study the gas-liquid mass transfer performance of the reactor. The effects of ventilation flow rate Q , stirring Froude number Fr and liquid content on the volumetric mass transfer coefficient $k_L a$ were investigated. The results show that increasing Q and Fr can effectively improve $k_L a$. The new inlet mode can enhance $k_L a$, which is about 2 times higher than that of the traditional reactor. The gas-liquid mass transfer performance of the reactor is highest at $\varepsilon = 0.5$, $Fr = 0.054$, $Q = 1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, with $k_L a = 0.0324 \text{ s}^{-1}$. Based on the experimental data, a dimensionless correlation for $k_L a$ was established, and the error was basically within 25%, which has reference significance for improvement and application of the subsequent reactor.

Key words: multiphase reactor; aeration; Froude number; gas-liquid system; gas-liquid mass transfer; metallurgical equipment