

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202004010



# 管式电化消毒反应器的流动特性 及其参数模拟优化

杨昕昊<sup>1,2</sup>, 张峰<sup>1,2</sup>, 王朝旭<sup>1,2</sup>, 崔佳丽<sup>1</sup>, 李红艳<sup>1,2</sup>, 崔建国<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
2. 太原理工大学 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为了提高电化消毒反应器的传质效率,开发一种带有湍流增强组件的管式电化消毒反应器.建立反应器物理模型,使用计算流体力学(CFD)研究添加湍流增强组件前、后反应器内部流场的变化,分析主要参数对阳极表面湍流强度的影响,考虑湍流增强对反应器压力损失的影响.结果表明:湍流增强组件通过其叶片的导流作用使流体产生螺旋流动,增大反应器内流体的湍流程度,促进传质效率;在反应器主要设计参数中,湍流增强组件的导流叶个数、导流叶扭转角度和导流叶至电极的距离对阳极表面湍流强度有显著影响;当参数组合为导流叶个数 7 个,扭转角度 30°,导流叶至电极距离 90 mm 时,阳极表面湍流强度为 12.68%,相比无导流叶条件下提高了 44%,但也使反应器的压力损失有所增加.

**关键词:** 电化反应器;湍流增强组件;数值模拟;参数优化

**中图分类号:** TQ 151; TU 991.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)01-0070-08

## Flow Characteristics and Parameter Simulation Optimization of Tubular Electrochemical Disinfection Reactor

YANG Xinhao<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, WANG Chaoxu<sup>1,2</sup>,  
CUI Jiali<sup>1</sup>, LI Hongyan<sup>1,2</sup>, CUI Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. College of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Shanxi Municipal Innovation Center of Graduate Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to improve the mass transfer efficiency, a tubular electrochemical disinfection reactor with spiral flow turbulence enhancement component was developed. The physical model of the reactor was established, and the changes of the flow field inside the reactor before and after the addition of turbulence enhancement component were studied using computational fluid dynamics (CFD). The influence of the reactor main parameters on the turbulence intensity of anode surface was analyzed, and the influence of turbulence intensity on the pressure loss of the reactor was also considered. The result shows that, the turbulence enhancement component makes the fluid produce spiral flow through its vanes, increases the turbulence degree, and promotes the mass transfer efficiency. Among the main parameters of the reactor, the number of guide vanes, the torsion angle of guide vanes and the distance between guide vanes and electrodes have significant effects on the

**收稿日期:** 2020-04-03

**通信作者:** 张峰(1981-),男,副教授,博士,主要从事水和废水电化学处理理论与技术的研究. E-mail: zhangfeng@tyut.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(51408397);山西省自然科学基金资助项目(201801D121275);山西省研究生联合培养基地人才资助项目(2017JD13)

turbulence intensity of anode surface. When the number of guide vanes was 7, the torsional angle was  $30^{\circ}$ , and the distance was 90 mm, the turbulence intensity on the anode surface was 12.68%, which was 44% higher than the condition of no vanes. However, the pressure loss of the reactor increased at the same time.

**Keywords:** electrochemical reactor; turbulence promoter; numerical simulation; parameter optimization

电化学消毒法作为一种高效、清洁的水处理技术,常被用于小型水处理工程中<sup>[1-3]</sup>,而管式反应器因其结构简单、安装方便等优点在该类工程中使用较多<sup>[4-6]</sup>.在电化学消毒过程中,电化学反应的反应速率不仅受到电流密度、溶液导电性的影响,还受到传质效率的影响<sup>[4,7]</sup>.反应器内的传质方式主要由对流传质主导,内部流场的分布和湍流程度极大影响着反应器的传质效率<sup>[8]</sup>.传统的实验方法难以实现对反应器内部流场的分析,并获得湍流程度的解析解,因此,许多学者利用计算流体力学(CFD)对电化学反应器的流场及湍流程度进行模拟优化. Ibrahim 等<sup>[5]</sup>和 Wang 等<sup>[9]</sup>采用 CFD 方法,模拟不同形式的网状电极对反应器流场的影响,均发现网状电极可增强湍动,提高反应器的传质.文献[10-12]在反应器内部添加电驱动搅拌装置以促进传质,提高反应器效率.然而,网状电极和电搅拌装置在一定程度上增加了制作成本和反应器能耗.

圆管螺旋流是一种多维流动,多应用于水力输沙、管内混合等领域<sup>[13-14]</sup>.如果在管式电化学反应器的前端添加带有扭转角度的导流叶片,使反应器内部产生螺旋流流场,就可以低成本地增强反应器内部流体的湍流程度,提高传质,优化反应器的性能.基于此,本文建立以螺旋流导流叶片为湍流增强组件的管式电化学反应器模型,利用 CFD 软件,通过与无导流叶时的反应器对比,模拟分析反应器内部流场的变化规律;以阳极表面湍流强度为评价指标,利用单因素分析的方法,对反应器的参数进行优化,并对反应器压力损失情况进行分析.

# 1 数值模拟

## 1.1 物理模型的建立

管式反应器的内径为 50 mm,入口与导流叶的距离为 50 mm,电极末端与出口距离为 50 mm.电极前端的导流叶片为矩形长板,短边长度为管内壁半径,由内壁沿半径方向指向管轴,长边一侧始终与内壁的切线垂直并固定于内壁,在叶片尾部通过施加扭转力使之产生一定角度,避免流体进入反应器时与叶片形成夹角而造成能量损失<sup>[15]</sup>.阳极采用市售常规板式金刚石(BDD)电极,尺寸(长×宽×高)为 50 mm×25 mm×2 mm,4 块阳极围成矩形,中间碳棒电极为阴极,直径为 5 mm,长度为 50 mm.作为对比,同时构建无湍流增强组件的反应器模型,除湍流组件外,其余参数均与上述一致.三维模型均使用 Solidworks 软件构建,管式电化学反应器结构示意图,如图 1 所示.图 1 中: $\alpha$  为导流叶扭转角度; $L$  为导流叶扭转段长度; $D$  为管式反应器周长; $B$  为导流叶片至电极的距离.

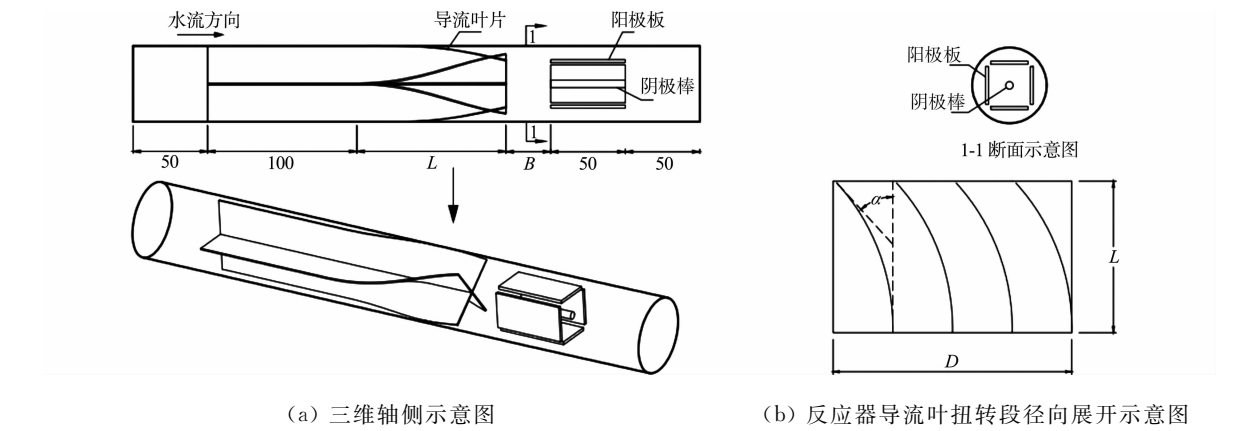


图 1 管式电化学反应器结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of tubular electrochemical reactor (unit: mm)

## 1.2 网格划分和边界条件

将三维模型导入 ICEM CFD 软件中进行网格划分.通过网格独立性检验,最终确定反应器的网格

数约为 122 万个. 使用 Fluent 求解器对模型进行计算, 湍流模型采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型, 同时选用加强壁面函数. 相关参数设置如下: 入口方式采用速度入口; 出口方式采用压强出口; 压力-速度耦合采用稳态 SIMPLE 算法; 梯度离散使用 Least Squares Cell Based 算法; 压力、动量、湍动能、湍流耗散率使用二阶迎风格式进行离散.

1.3 控制方程

使用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型, 模拟流体在反应器内的流动, 流体介质为水, 由于流动为不可压缩流动, 其控制方程如下.

连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0.$$

(1)

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + \rho g_i.$$

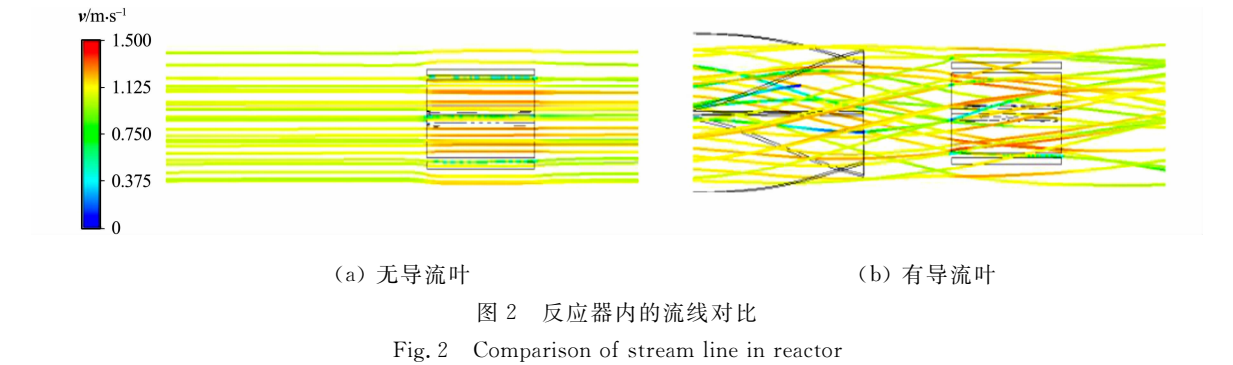
(2)

式(1),(2)中:  $u_i, u_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的速度分量;  $x_i, x_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的坐标分量;  $\rho$  为水的密度;  $p$  为压力;  $\mu$  为水的动力粘度;  $t$  为时间;  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  为湍流应力;  $g_i$  为  $i$  方向的重力分量.

2 添加湍流增强组件前、后的反应器流场分析

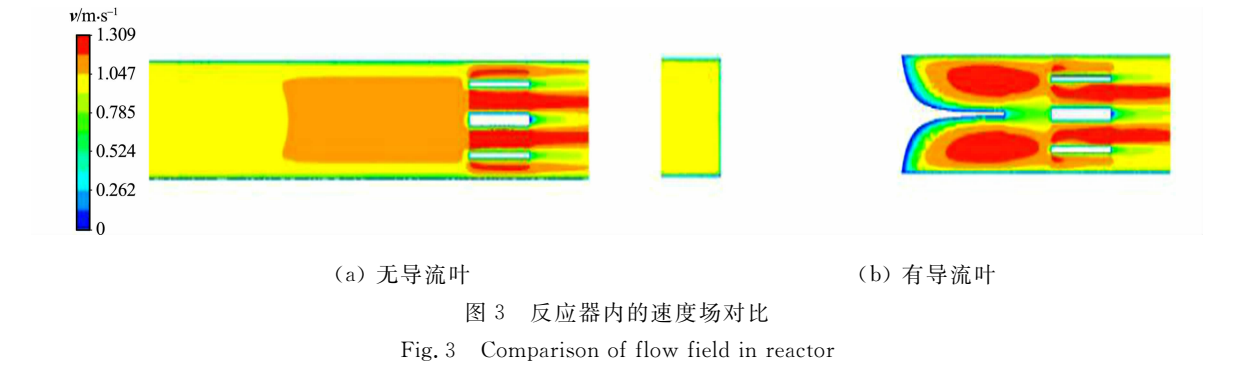
2.1 流动状态

有、无导流叶时, 反应器内的流线对比, 如图 2 所示. 图 2 中:  $v$  为流体速度. 由图 2 可知: 当反应器内无导流叶时, 流体从入口流入反应器, 其流线处于平直状态, 流经电极时, 流线只有轻微的扰动, 随后恢复平稳流动, 此时, 反应器内的流动大致呈直线流动; 在反应器前端添加导流叶片后, 导流叶对流体的轴向流动产生一定阻碍, 打破了流体在管内的平稳流动状态, 由叶片从管壁处开始扭转, 管壁附近的流体受到导流叶片的反作用力, 向管内侧方向挤压, 使流体的轴向速度变快, 同时, 产生了径向和切向的速度, 流体逐渐演变为螺旋流, 流体的紊动状态加剧.



2.2 速度场

有、无导流叶时, 反应器内的速度场对比, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 导流叶片的存在使反应器内流场发生了很大改变; 当无导流叶时, 流体整体流动平稳, 仅在流经电极时由于水力截面面积减小, 流速变



大,且电极内部区域流速大于外部流速,电极附近流速差异较大;添加导流叶后,反应器内整体的流速增加,且速度分布更均匀。

有、无导流叶时,电极前截面速度矢量分布对比,如图 4 所示。由图 4 可知:当无导流叶时,电极迎水面的阻挡作用使流体速度矢量向两边发散,且速度分布比较混乱;添加导流叶后,周向及径向的速度矢量增大,使电极附近的流体与离电极较远的流体充分对流,大大增加了传质速率。

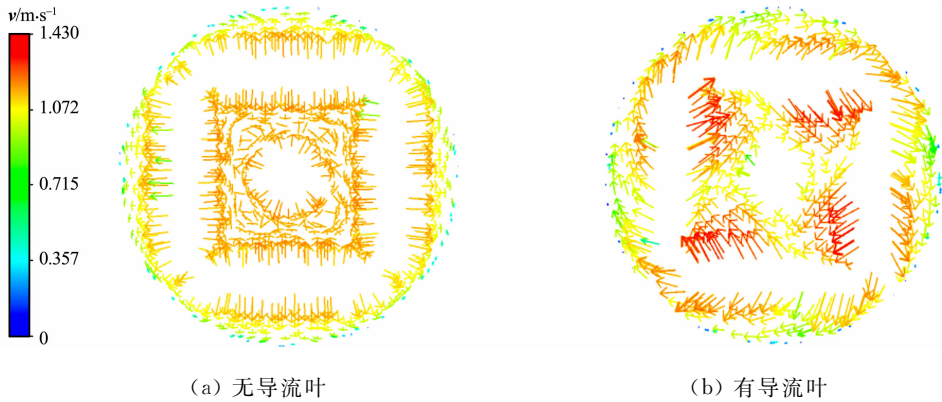


图 4 电极前截面速度矢量分布对比

Fig. 4 Comparison of velocity vector distribution of front section of electrodes

2.3 湍流强度分布

有、无导流叶时,反应器内的湍流强度( $I$ )分布对比,如图 5 所示。由图 5 可知:没有导流叶时,反应器内仅在流体冲刷电极后产生一定程度的湍流,电极前端湍流效应很弱;在添加导流叶后,反应器内的流场湍流程度加强,且在叶片后的整个流场湍流程度分布较均匀,这有利于传质的提高。

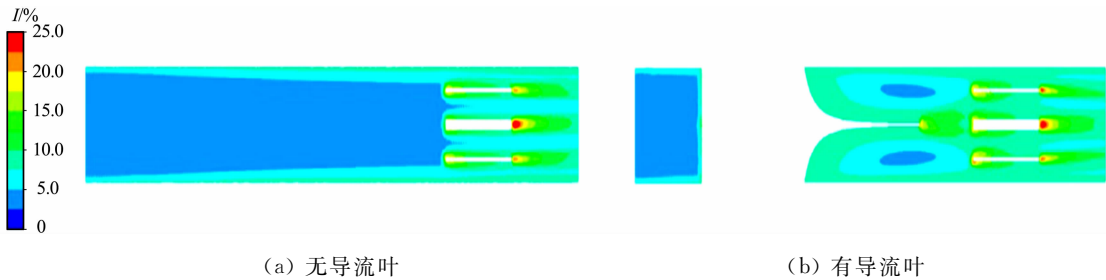


图 5 反应器内的湍流强度分布对比

Fig. 5 Comparison of turbulence intensity in distribution reactor

有、无导流叶时,电极前端截面湍流强度分布对比,如图 6 所示。由图 6 可知:当没有导流叶时,流体流经电极处时湍流程度较弱,且湍流强度分布不均匀,阳极围成的区域内侧湍流强度小于外侧,电极周围的湍流强度仅为 4.2%~6.6%;安装导流叶片后,截面整体的湍流强度提高,且湍流强度分布更均匀,截面大部分的湍流强度达到 8.4%~12.5%。湍流造成的流体扰动也使水中的病原微生物接触电极

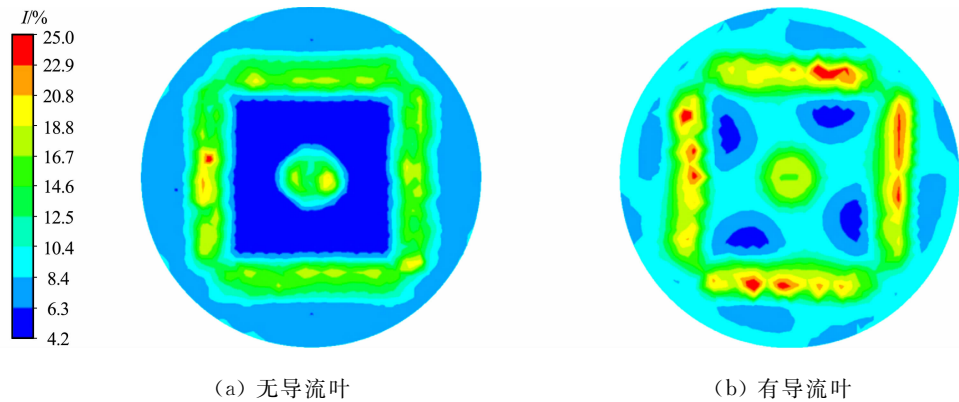


图 6 电极前端截面湍流强度分布对比

Fig. 6 Comparison of turbulence intensity distribution at front section of electrodes

表面的概率大大增加,有利于反应效率的提高<sup>[16]</sup>.

3 反应器参数的优化

考察湍流组件的构造参数对流场的影响,进一步优化反应器设计参数,提升反应器的性能.

3.1 评价指标

电化学消毒的原理是利用阳极表面产生的活性物质(如·OH、活性氯等)与水中病原微生物结合使其失活<sup>[17]</sup>.由于这些活性物质存在时间短<sup>[3,18]</sup>,反应被认为只在阳极表面发生.传质系数作为影响电化学反应的重要因素,一般与反应器的结构、流场特性有关,其关联式为

$$Sh=aRe^bSc^\theta.$$
(3)

式(3)中:Sh为施伍德数;a,b为常数,与反应器的结构和电解质有关,且a>0,b>0;Re为雷诺数;Sc为施密特数;Mizushina等<sup>[19]</sup>研究发现,施伍德数与施密特数的1/3次方成正比,因此,θ取值1/3.

对于Sh和Sc,又有

$$Sh=\frac{k_md_e}{D_i},$$
(4)

$$Sc=\frac{\mu}{\rho D_i}.$$
(5)

式(4),(5)中:k<sub>m</sub>是传质系数;D<sub>i</sub>是流体的扩散系数;d<sub>e</sub>是反应器的特性尺寸;μ和ρ分别是流体的动力粘度和密度.

联立式(3)~(5),可得

$$k_m=\frac{aRe^b\mu^{\frac{1}{3}}D_i^{\frac{2}{3}}}{\rho^{\frac{1}{3}}d_e}.$$
(6)

对于湍流强度I<sup>[9]</sup>,有

$$I=0.16Re^{\frac{1}{8}}.$$
(7)

由式(6),(7),可得

$$k_m=\frac{25^{8b}aI^{8b}\mu^{\frac{1}{3}}D_i^{\frac{2}{3}}}{4^{8b}\rho^{\frac{1}{3}}d_e}.$$
(8)

在式(8)中,由于各参数均大于0,可得k<sub>m</sub>与I成正比关系,即反应器的传质系数随着湍流强度的增大而增加.湍流强度可间接表达反应器的传质性能.因此,将阳极表面的湍流强度作为本反应器参数优化的评价指标.

3.2 实验因素的选择

反应器中影响反应器性能的主要参数有导流叶个数(n)、导流叶扭转角度(α)、导流叶扭转段长度(L)、导流叶片至电极的距离(B)、导流叶厚度(h)等.采用Design Expert 10.0软件进行Plackett Burman实验设计<sup>[20]</sup>,分析以上5个因素对阳极表面湍流强度的影响程度.每个因素选取两水平,实验共12组.Plackett Burman实验各因素的水平及参数影响的显著性分析,如表1所示.由表1可知:导流叶个数、导流叶扭转角度、导流叶至电极的距离对评价指标的影响显著.

表1 Plackett Burman实验各因素的水平及参数影响的显著性分析

Tab.1 Level of factors in Plackett Burman experiment and significance analysis of parameter influence

方差来源	因素水平		平方和	自由度	效应值	F	P	显著性
	1	2						
主效应	—	—	27.734 440	5	5.546 888	18.942 310	0.001 296	* *
n/个	2	7	22.550 210	1	22.550 210	77.007 700	0.000 121	* *
α/(°)	20	40	2.125 208	1	2.125 208	7.257 468	0.035 863	*
L/mm	10	50	2.227 408	1	2.227 408	7.606 475	0.032 942	*
B/mm	50	100	0.106 408	1	0.106 408	0.363 379	0.568 704	—
h/mm	1	3	0.725 208	1	0.725 208	2.476 546	0.166 620	—

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 单因素分析

根据 Plackett Burman 实验的结果, 对影响显著的因素分别进行单因素分析.

4.1.1 导流叶个数 当  $\alpha=30^\circ, B=50\text{ mm}$  时, 导流叶个数对电极表面湍流强度的影响, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 随着导流叶个数的增加, 阳极表面的湍流强度不断增加, 这是由于导流叶个数增加时, 叶片对水的作用面积增加, 施加了更多的扭转作用力, 使螺旋流形成得更充分, 湍流强度更高. 同时, 叶片对水作用面积的持续增加使反应器叶片的过流断面面积越来越小, 使流体湍流程度持续增强. 无论叶片数量多少, 螺旋流经过充分发展后, 湍流程度都会逐渐衰减, 但叶片数量过多会影响流体的横向扩散, 可能对流体局部区域的病原微生物与电极的接触产生影响<sup>[15]</sup>, 因此, 研究叶片个数的上限为 7 个.

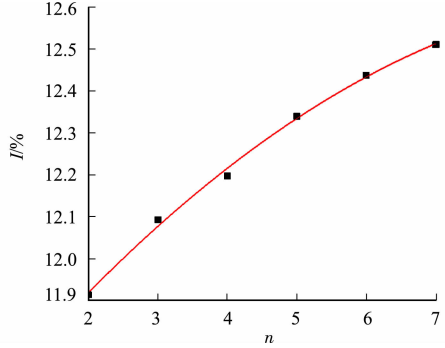


图 7 导流叶个数对电极表面湍流强度的影响  
Fig. 7 Effect of number of guide vanes on turbulence intensity of electrode surface

4.1.2 导流叶扭转角度 当  $n=3$  个,  $B=50\text{ mm}$  时, 导流叶扭转角度对电极表面湍流强度的影响, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 随着导流叶扭转角度的增大, 阳极表面的湍流强度呈现先增大后减小的趋势; 当  $10^\circ<\alpha<30^\circ$  时, 湍流强度随着角度的增加而增大, 这是由于扭转角度增加, 叶片对流体产生扭转的作用面积增加, 扭转作用力变大, 流体的湍流程度加强, 使阳极表面的湍流强度增大; 而当  $\alpha>30^\circ$  时, 扭转角度过大, 使叶片对流体轴向流动产生阻碍, 且当角度增加产生的阻碍作用逐渐大于湍流促进作用后, 流体的湍流程度下降, 阳极表面湍流强度逐渐减小.

4.1.3 导流叶片至电极的距离 当  $n=3$  个,  $\alpha=30^\circ$  时, 导流叶片至电极的距离对电极表面湍流强度的影响, 如图 9 所示. 由图 9 可知: 阳极表面的湍流强度随着电极至叶片距离的加大呈现先增后减的趋势; 当  $B=90\text{ mm}$  时, 电极表面的湍流强度达到最大. 这是因为流体一开始由层流状态流经导流叶后, 还没有完全发展成螺旋流, 需要一段距离充分发展, 在此期间, 流体的湍流程度不断增强, 阳极表面的湍流强度也不断增加, 随着流体的充分发展, 湍流作用逐渐减弱, 电极表面的湍流强度也逐渐降低.

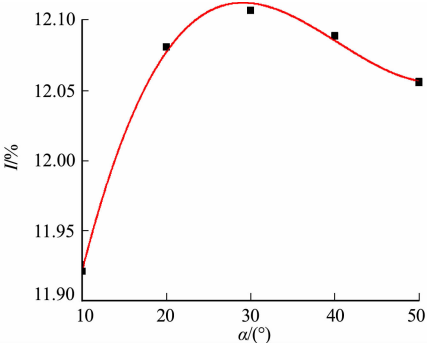


图 8 导流叶扭转角度对电极表面湍流强度的影响  
Fig. 8 Effect of vane torsion angle on turbulence intensity of electrode surface

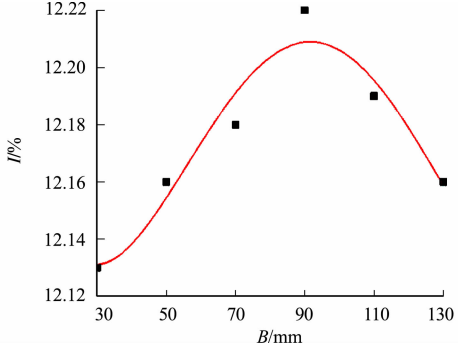


图 9 叶片至电极的距离对电极表面湍流强度的影响  
Fig. 9 Effect of distance between vanes and electrodes on turbulence intensity of electrode surface

### 4.2 优化参数的预测及验证

根据单因素的分析结果, 选取各因素对阳极表面湍流强度影响的极值作为优化后的参数组合, 即导流叶个数为 7 个, 导流叶扭转角度为  $30^\circ$ , 导流叶至电极的距离为  $90\text{ mm}$ . 在此参数组合下进行模拟, 得到阳极表面的湍流强度为  $12.68\%$ . 与无导流叶时反应器电极表面湍流强度 ( $8.7\%$ ) 对比, 有导流叶时反应器的湍流强度增加了  $44\%$ . 这说明优化后的反应器湍流强度显著提高, 阳极表面的传质能力也随之增强.

### 4.3 反应器的压力损失

湍流增强组件使反应器内流体的湍流强度增大, 同时, 也使反应器的压力损失增加. 对于本反应器



而言,压力损失分为 3 部分,分别是湍流增强组件、电极部分的局部损失和反应器内部的沿程损失. 反应器总压力损失  $\Delta P$  表示为

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + C. \quad (9)$$

式(9)中: $\Delta P_1$  为湍流增强组件部分的压力损失; $\Delta P_2$  为电极部分的压力损失; $\Delta P_3$  为湍流组件前端、湍流组件与电极间及电极后 3 部分的沿程损失; $C$  为常数.

$$\Delta P_1 = \epsilon_1 \frac{\rho v_1^2}{2}, \quad (10)$$

$$\Delta P_2 = \epsilon_2 \frac{\rho v_2^2}{2}, \quad (11)$$

$$\Delta P_3 = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\rho \bar{v}^2}{2}. \quad (12)$$

式(10)~(12)中: $\epsilon_1, \epsilon_2$  分别为湍流增强组件和电极部分的局部阻力系数; $v_1, v_2$  分别为流体流经湍流增强组件和电极时的平均速度; $\bar{v}$  为反应器内流体的平均速度; $\lambda$  为反应器内沿程阻力系数,当  $\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 > 0$  且  $2\,000 < Re < 10^5$  时,  $\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} > 0, v_1 A_1 = \frac{\pi d^2}{4} \bar{v} = v_1 A_2, A_1, A_2$  分别为湍流增强组件和电极处的过流断面面积, $d$  为截面直径; $l$  为沿程损失部分的距离,  $l = 50 + 50 + B$ . 则式(9)可写成

$$\Delta P = \left( \frac{\epsilon_1 \rho \pi^2 d_e^4}{32 A_1^2} + \frac{\epsilon_2 \rho \pi^2 d_e^4}{32 A_2^2} \right) \bar{v}^2 + \frac{0.316 l \mu^{\frac{1}{4}} \rho^{\frac{3}{4}}}{d_e^{\frac{1}{4}}} \bar{v}^{\frac{7}{4}} + C. \quad (13)$$

可得出  $\Delta P \propto \bar{v}$ , 即反应器的总压力损失随着速度的增加而增大. 又  $I \propto Re \propto \bar{v}$ , 因此,  $\Delta P \propto I$ , 即压力损失随着湍流强度的增加而增大. 对于节 4.2 中采用优化参数组合的反应器,其总压力损失为 489 Pa, 与无湍流增强组件时反应器压力损失 352 Pa 相比,增加了 39%(相当于 0.014 m 水头). 压力损失的增加一定程度上使反应器的运行成本增加,因此,当应用于对出水余压有要求的场合时,在提升反应器传质性能的同时,应兼顾压力损失的变化,合理提供进水压力.

与现有的一些湍流产生器相比,同等水力条件下,6 个单元组件造成的压力损失高达 8 851.6 Pa<sup>[21]</sup>,可见利用螺旋流原理的湍流增强组件造成的压力损失较低. 与其他研究中通过网状电极<sup>[4-5,9]</sup>提升反应器流场湍流强度相比,文中开发的湍流增强组件在增大反应器湍流强度、提高传质效率的同时,减少了复杂样式电极制作或能耗的成本,为优化管式反应器流场提供了另一种思路,可为其他反应器的设计提供借鉴.

## 5 结论

开发一种带有湍流增强组件的管式电化学消毒反应器,通过 CFD 模拟分析,得出以下 3 点结论.

- 1) 湍流增强组件的添加改变了反应器内部的流场,使流体产生螺旋流动,提高了流体径向和周向的速度,从而增强了电极表面与流体的对流作用,提高了反应器的传质效率.
- 2) 导流叶个数、导流叶扭转角度和叶片至电极的距离对阳极表面湍流强度有显著影响. 当叶片个数增加,湍流强度持续增加;而当叶片扭转角度增加或叶片至电极距离增加时,阳极表面湍流强度呈现先增加后减小的趋势.
- 3) 优化后的参数组合为导流叶个数 7 个,叶片扭转角度  $30^\circ$ ,叶片至电极的距离 90 mm. 此时,阳极表面湍流强度为 12.68%,相比无湍流增强组件时增大了 44%,反应器的性能得到提升,但同时使压力损失有所提高.

## 参考文献:

- [1] JIN Yanchao, SHI Yijun, CHEN Riyao, *et al.* Electrochemical disinfection using a modified reticulated vitreous carbon cathode for drinking water treatment[J]. *Chemosphere*, 2018, 215: 380-387. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.057.
- [2] KRAFT A. Electrochemical water disinfection: A short review[J]. *Platinum Metals Review*, 2008, 52(3): 177-185. DOI: 10.1595/147106708X329273.

- [3] MASCIA M, VACCA A, PALMAS S. Fixed bed reactors with three dimensional electrodes for electrochemical treatment of waters for disinfection[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 211/212: 479-487. DOI: 10. 1016/j. cej. 2012. 09. 091.
- [4] SU Jing, LU Haiyan, XU Hong, *et al.* Mass transfer enhancement for mesh electrode in a tubular electro-chemical reactor using experimental and numerical simulation method[J]. Russian Journal of Electrochemistry, 2011, 47(11): 1293-1298. DOI: 10. 1134/S1023193511110140.
- [5] IBRAHIM D S, VEERABAHU C, PALANI R, *et al.* Flow dynamics and mass transfer studies in a tubularelectro-chemical reactor with a mesh electrode[J]. Computers and Fluids, 2013, 73: 97-103. DOI: 10. 1016/j. comp-fluid. 2012. 12. 001.
- [6] KORBAHTI B K. Finite element modeling of continuous flow tubular electrochemical reactor for industrial and domestic wastewater treatment[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(8): E3225-E3234. DOI: 10. 1149/2. 025408jes.
- [7] COLLI A N, TOELZER R, BERGMANN M E H, *et al.* Mass-transfer studies in an electrochemical reactor with a small interelectrode gap[J]. Electrochimica Acta, 2013, 100: 78-84. DOI: 10. 1016/j. electacta. 2013. 03. 134.
- [8] BANNARI A, CIRTU C, KERDOUSS F, *et al.* Turbulence intensity in an electrochemical cell: Effect on reactor performance[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45(6): 471-480. DOI: 10. 1016/j. cep. 2005. 11. 007.
- [9] WANG Jiade, LI Tingting, ZHOU Mingming, *et al.* Characterization of hydrodynamics and mass transfer in two types of tubular electrochemical reactors[J]. Electrochimica Acta, 2015, 173: 698-704. DOI: 10. 1016/j. electacta. 2015. 05. 135.
- [10] CAO Xiaochang, ZHANG Tingan, ZHAO Qiuyue. Computational simulation of fluid dynamics in a tubular stirred reactor[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(2): 489-495. DOI: 10. 1016/S1003-6326(08)60301-5.
- [11] 徐俏. 一种双螺旋搅拌电化学水处理反应器: 207498185U[P]. 2018-06-15.
- [12] YANEZ J A, MENDOZA V X, ALONZO A G, *et al.* CFD and experimental validation of an electrochemical reactor electrode design for Cr(VI) removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 349: 119-128. DOI: 10. 1016/j. cej. 2018. 05. 067.
- [13] 田艳, 张根广, 秦子鹏. 螺旋流排沙管三维数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 131-134, 139. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2014. 09. 034.
- [14] 李国威, 孙冠男, 孔繁利, 等. 螺旋流混合器内部流动及换热分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 86-88.
- [15] 何盼, 张峰, 崔建国, 等. 用于供水管网二次加氯后混合管件的数值优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 210-214. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2017. 09. 046.
- [16] GUO Xiaotao, YOU Shijie. Characterization of hydrodynamics and electrochemical treatment of dye wastewater in two types of tubular electrochemical reactors[J]. Iop Conference, 2017, 81(1): 012008. DOI: 10. 1088/1755-1315/81/1/012008.
- [17] 赵树理, 庞宇辰, 席劲瑛, 等. 电化学消毒法对水中大肠杆菌的灭活特性[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 544-549. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2015. 0508.
- [18] 刁惠芳, 白玮, 李晓岩, 等. 电化学消毒中羟基自由基的测定[J]. 给水排水, 2004(9): 59-62. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2004. 09. 016.
- [19] MIZUSHINA T, OGINO F, OKA Y, *et al.* Turbulent heat and mass transfer between wall and fluid streams of large Prandtl and Schmidt numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1971, 14(10): 1705-1716. DOI: 10. 1016/0017-9310(71)90078-0.
- [20] 许昶雯, 王国英, 刘吉明, 等. 响应面法优化焙烧 Mg/Al 水滑石同时吸附水中  $F^-$  和硬度[J]. 工业水处理, 2018, 38(12): 24-27.
- [21] 刘涛. SK 型静态混合器与喷射混合器的 CFD 模拟研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)