

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.018

# 新型三维电极反应器及内部流场分析

安超凡, 陈 晔, 程 松, 于亚菲

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:**常规三维电极反应器易堵塞,流场不稳定、不规律导致传质效果极差,使反应器效率降低。设计了一种携带新型串束式泡沫镍三维电极粒子的电催化反应器,可有效降解有机废水,并保证内部流场的稳定性。为得到复杂内部结构下反应器流场特征,采用数值模拟法对反应器的流场进行模拟计算,以研究反应器流场分布情况。结果表明:电催化反应区域(粒子电极区域)流场稳定均匀;反应器内部结构对流场分布的影响明显,槽体中央的棒状阳极周围流场速度小,流动不规则容易产生流场死区;提高转速有利于使反应区流场的均匀化,不利于棒状阳极周围流体的传质。

**关 键 词:**废水处理;三维电极反应器;泡沫镍;串束式粒子电极;流场分析

中图分类号:X505;TB126 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)06-0082-05

## Analysis of Internal Flow Field of Novel Three Dimensional Electrode Reactor

AN Chaofan, CHEN Ye, CHENG Song, YU Yafei

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** The conventional three dimensional electrode reactor is easy to be blocked, and the unsteady flow field leads to poor mass transfer efficiency. A catalytic reactor that carrying new bunches of nickel foam three-dimensional electrode particles was designed, which could degrade organic wastewater effectively, and could guarantee the stability of the internal flow field. In order to obtain the characteristics of the flow field in the complex internal structure, the numerical simulation method was used to simulate the flow field of the reactor. The results show that the electro-catalytic reaction region (the particle electrode area) flow field is stable and uniform. The internal structure of the reactor has obvious impact on the distribution of flow field. The velocity field around the rod anode in the center of the tank is small, and the irregular flow is prone to produce flow dead zone. Improving the speed of the reaction zone is good to uniform flow distribution, but not good to the transfer of the fluid around the anode rod.

**Keywords:** wastewater treatment; three-dimensional electrode reactor; nickel foam; bunch type particle electrode; flow analysis

由于人口的急剧膨胀和对化工产品需求的增长,我国可利用的水资源越来越匮乏,面对的环保压力越来越大<sup>[1]</sup>。随着废水中存在的有机物的种类不断增加,有机物种类变得愈加复杂,使有机废水的可降解性不断下降,常规的有机废水降解方法难以满足环保指标,因此需要将高级氧化技术应用到废水处理当中<sup>[2]</sup>。三维电极反应器下的电化学氧化技术相对于其他技术具有设备小,氧化条件温和和无二次污染等优势<sup>[3]</sup>。但是在常规的三维电极反应器中,三维电极粒

子往往无序地堆积在反应槽内或以流动状态存在于硫化床中,在处理有机废水的应用中容易出现浓差极化现象,粒子电极通道堵塞而造成传质效果大大降低,粒子电极寿命低等问题<sup>[4]</sup>。

本课题组着力于开发出一套新型三维电解装置,内部粒子电极采用有序排列的泡沫金属镍。泡沫镍具有较好的机械强度,极大的化学稳定性和较好的催化脱氢、氧化能力,还具有很大的表面积<sup>[5]</sup>。把泡沫镍作为三维电极,极大地提高了反应器的电极表面积,可

收稿日期:2017-03-26;修回日期:2017-05-16

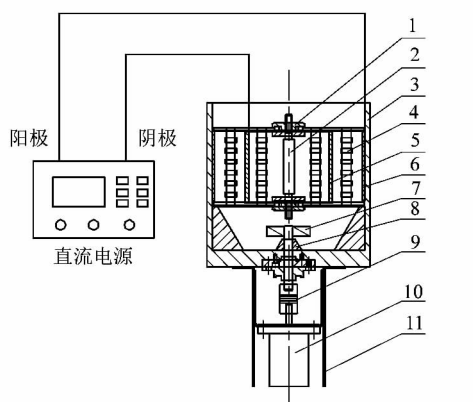
第一作者简介:安超凡(1990),男,河北新乐人,硕士,主要研究方向为环保设备开发与应用。E-mail:18260030131@163.com

以为溶液中提供源源不断的强氧化性物质羟基( $\cdot\text{OH}$ ),使得反应器既可以作为普通的三维电极反应器也可以和芬顿技术联用组成电芬顿反应器<sup>[6]</sup>。反应器底部加上搅拌器,使反应器内部形成均匀的流场,这样既能提高有机物于电极表面的接触效率,又能把参加过电解反应的有机物带离电极板,避免产生电极表面的浓差极化现象。加入金属泡沫粒子电极后,反应器内部变得复杂,所以本文的关键点是在复杂的内部结构下保证有效的均匀流场,这对于三维电极反应器技术的发展有极大的工程意义。

文中采用计算流体力学(CFD)的方法对反应器内部流场进行数值模拟计算。随着计算机硬件和软件技术的进步,CFD方法对复杂流场的模拟更为准确快速,越来越受到流体研究者的重视<sup>[7]</sup>。笔者在FLUNET软件中对搅拌器转速大小和支架对反应器槽内的流场的影响进行了详细的研究。

## 1 新型电催化反应器

三维电极反应器按三维电极粒子使用情况可分为三维复极性电极反应器和三维单极性反应器。单极性三维电解反应器携带阻抗较低的三维电极粒子,在电解过程中不仅可以在三维粒子之间形成微电场,还可以联通电极成为主电极的扩展电极,增大电极表面积。课题组所设计的新型三维电极反应器结构如图1所示。



1—支架;2—圆柱棒状阳极;3—槽体;4—泡沫镍三维粒子电极;5—泡沫镍阴极板;6—圆筒状阳极;7—叶轮;8—密封圈;9—联轴器;10—电机;11—电机支座。

图1 新型单极性三维电极反应器

Figure 1 New type of unipolar three-dimensional electrode reactor

本反应器的设计思路是采用单极性三维电极的方法电解氧化有机物废水。反应器槽体形状为圆柱形,槽体内部含有2个阳极主电极和1个阴极主电极,阴

极主电极夹在2个阳极主电极中间,粒子电极和阴极联通有序分布在阴阳主电极中间。其中粒子电极材料和阴极主电极材料一致为泡沫镍,粒子电极是 $\text{Ø}4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱体,粒子间的间距5 mm,每列粒子串含有6个粒子电极,槽体的外径为 $\text{Ø}150\text{ mm}$ ,高度为150 mm,有效容积为1.3 L。反应器的三维效果图如图2所示。

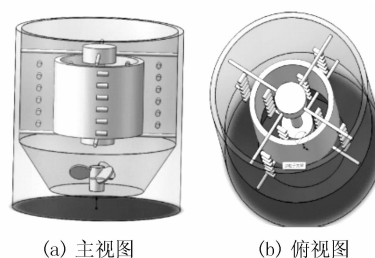


图2 三维效果图

Figure 2 Three-dimensional renderings

## 2 数值模拟

### 2.1 模型的建立

由于所需的流体模型比较复杂,常规的CFD前处理软件(ICEM Gambit)很难绘制该模型,因此笔者借助SolidWorks对流体模型进行建模然后以\*.x\_t的格式保存模型,最后导入到ICEM前处理软件中进行处理,绘制流体模型网格。反应器的主要结构的建模过程如下:

#### 1) 槽体模型

槽体底部有40 mm高度的导流槽,可以把叶轮旋转造成的径向流转变为沿槽壁向上的轴向流,结构尺寸和流体模型如图3所示。

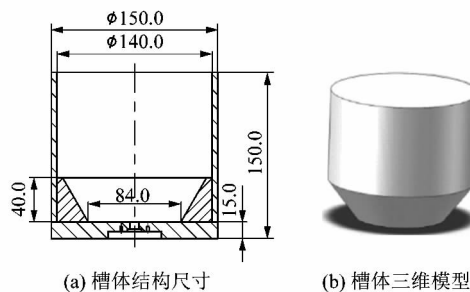


图3 槽体模型

Figure 3 Tank model

#### 2) 支架模型

槽体内部的支架有2个主要的作用:一是加紧固定泡沫镍板电极,二是悬挂固定泡沫镍粒子电极。支架的两端夹具可以任意添加铁棍的数量从而实现调节

粒子电极的数量以及分布;夹具的材质为绝缘材料,可以防止棒状阳极和阴极间的短路发生。图4是支架两端分别添加4个铁棍的尺寸结构图和三维简化模型图。

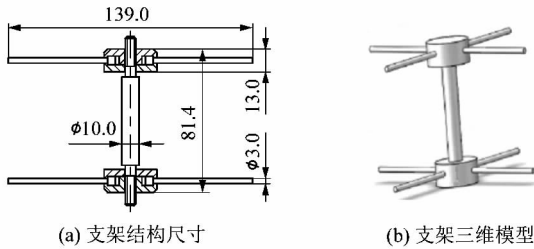


图4 支架模型

Figure 4 Stent model

### 3) 阴极板模型

阴极电极板采用的是泡沫镍弯制成的圆筒状电极,其借助支架固定于槽体中央,介于圆筒状阳极和棒状阳极之间。其结构尺寸和三维模型图如图5所示。

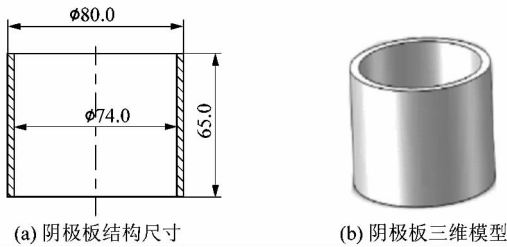


图5 阴极板模型

Figure 5 Cathode plate model

### 4) 叶轮模型

由于搅拌叶轮结构参数和结构形式对流体流场的影响因素不是本课题的研究重点,而且尺寸比较小的搅拌叶轮定制难度比较大,因此本次实验采用的叶轮是直接采购的符合实验装置尺寸要求的轴流式叶轮。叶轮的尺寸图和三维模型图如图6所示。

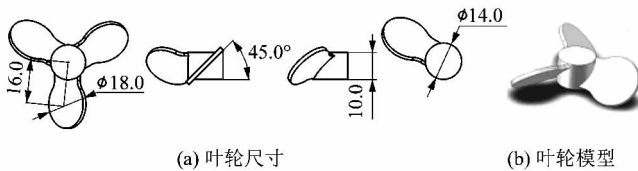


图6 叶轮模型

Figure 6 Impeller model

### 5) 粒子电极模型

反应器的单极性三维粒子电极,是由泡沫镍加工成 $\varnothing 4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的柱状,焊接在金属导线上,由导线使其串联。粒子电极规律地分布在阴阳极板之间。其结构尺寸如图7所示。

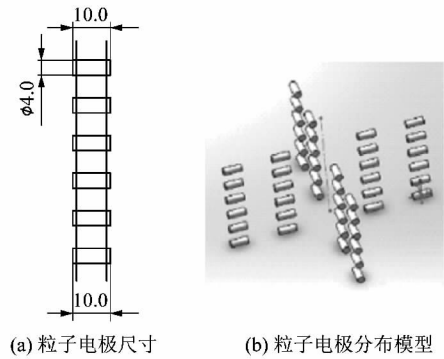


图7 三维粒子模型

Figure 7 Three-dimensional particle model

## 2.2 网格生成

将 SolidWorks 中建立的零件图采用“插入零件”和“组合-删减”功能,使以上所有零件组合成所需的流体模型,结合后的模型如图8所示。

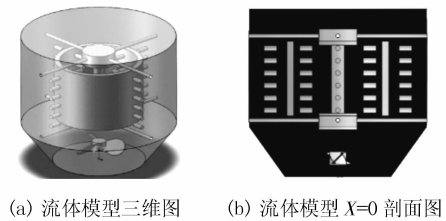


图8 流体模型

Figure 8 Fluid model

网格总数为3 590 740,自由液面的边界条件设置为 symmetry,动静区域的交界面 dong 在导入到 FLUNET 计算软件后会自动识别为 dong 和 dong001 两个面<sup>[8]</sup>,因此将交界面边界类型设置为 interface,其他边界条件默认,输出网格,导入到 FLUNET 计算软件中。对流体模型的数值计算采用的是多重参考系 (MRF) 计算模型,流体为单相介质水,计算模型采用标准  $\kappa\text{-}\varepsilon$  标准方程,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,各方程的计算残差定义为  $10^{-3}$  收敛<sup>[9]</sup>。

## 3 结果分析

### 1) 不同搅拌转速下的流场变化

当搅拌器叶轮的转速  $n$  分别为 200, 400, 600 和 800 r/min 时,分别截取计算结果模型中  $X = 0\text{ mm}$  的截面的速度云图和流场迹线图,观察叶轮转速的变化对槽体内流体流场的影响情况。

由各个转速下  $X = 0\text{ mm}$  截面的速度云图如图9所示。从图中可以看出,叶轮的搅拌转速变化时流场的涡流状态变化不大,旋涡位置和旋涡大小基本没有变化。但是,随着叶轮搅拌转速的增大,旋涡中心的速度在逐渐变大;同时靠近槽体中心的粒子电极周围流

体的速度也随之增大。

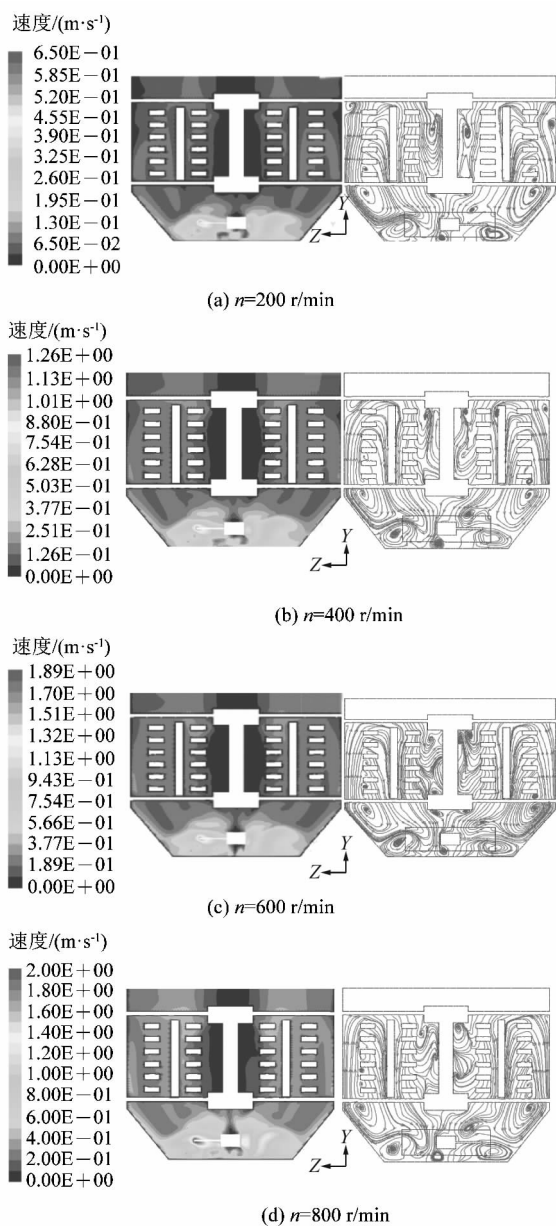


图9 不同转速时  $X=0\text{ mm}$  截面速度云图和迹线图

Figure 9 Velocity nephogram and trace of  $X=0\text{ mm}$  section at different speeds

$X=0\text{ mm}$  section at different speeds

从图9可以看出:随着叶轮搅拌转速的增大,槽体的反应区粒子间的流场迹线分布越来越规律,粒子间流体流动的发散性越来越小;随着搅拌转速的增大,槽体中央的圆柱状电极周围的流体越来越紊乱,这是因为搅拌转速的增大,流体的整体径向速度变大,槽体中间位置的速度场变小而导致该位置流场紊乱。

### 2) 各截面的速度云图和矢量图

为方便分析反应器内部流场的分布形式,在  $n=400\text{ r/min}$  时从计算模型上截取  $X=0\text{ mm}$ ,  $X=10\text{ mm}$

2个截面。从图10可以看出叶轮的转动带动反应器水槽内的流体转动,速度的分布比较均匀,反应器的上部(电解反应区)流场比较稳定。但是也发现在反应器中间的棒状电极区域速度场明显较小,这是由于支架底座遮挡住搅拌叶轮带来的轴向流使流体改变方向,致使该区域的流场较小。负极电极板和粒子电极的流体速度场较为理想,有利于阴极的电催化反应。

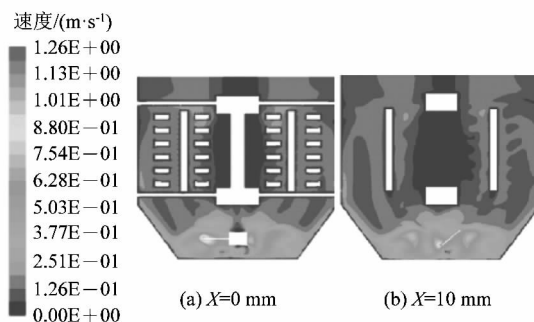


图10  $X=0\text{ mm}$  和  $X=10\text{ mm}$  截面速度云图

Figure 10 Velocity nephogram of  $X=0\text{ mm}$  and  $X=10\text{ mm}$  section

从图11可以看到反应器内流场主要为2个大旋流组成,叶轮转动引起的径向流在底部与导流壁发生碰撞后形成沿壁面向上的轴向流,该轴向流在阴极筒状阴极板上端与叶轮造成的轴向流汇合后向下回流。由速度矢量线可见粒子电极间的速度较为理想,能保证粒子间的传质,符合实验要求。

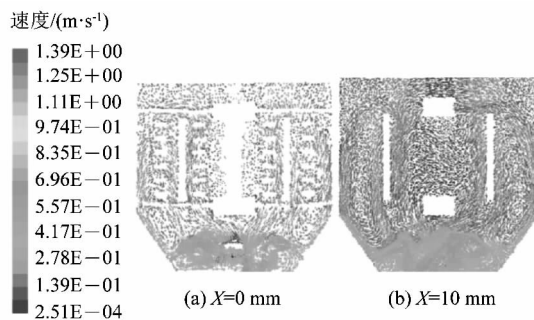


图11  $X=0\text{ mm}$  和  $X=10\text{ mm}$  截面速度矢量图

Figure 11 Velocity vector graph of  $X=0\text{ mm}$  and  $X=10\text{ mm}$  section

流体搅拌的流动趋势主要是流体在槽内的周向运动,笔者截取模型的  $Y$  为 2, 10, 30, 40, 60 和 80 mm 的水平截面速度矢量图和速度云图来观察速度变化情况。从图13可以看出随着  $Y$  值变大,流体的速度场越来越稳定,而且结合图12可以发现,槽体壁面和负极板筒壁面的速度要高于两壁面之间的流场速度。结合图11可知,这是因为流体是贴着槽体壁面上行,贴着

筒状电极壁面下行形成漩涡,是旋涡速度场较高的位置,而两壁面之间的旋涡中心地带,流速相对较小。电极壁面的流体有较快速度利于电催化反应的传质,也能降低浓差极化现象发生的概率。

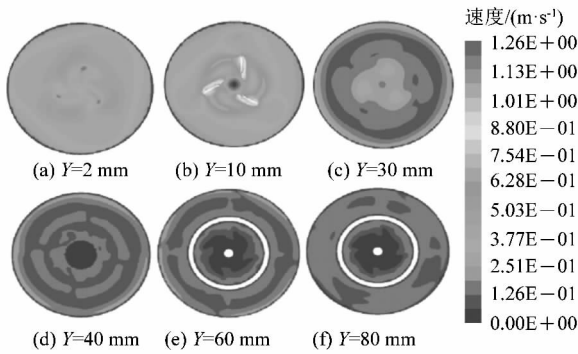


图 12 Y轴各截面速度云图  
Figure 12 Velocity nephogram of Y axis section

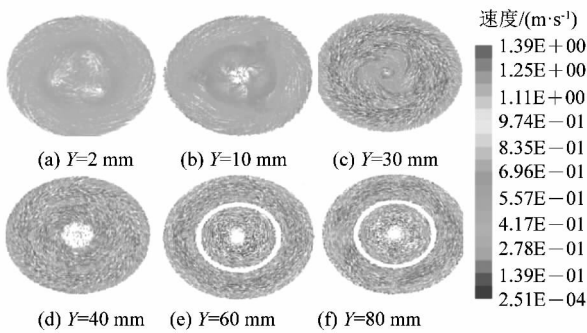


图 13 Y轴各截面速度矢量图  
Figure 13 Velocity vector graph of Y axis section

#### 4 结语

该装置作为电催化反应器可以保证反应器上部的

反应区流场的稳定,在粒子电极反应区没有出现流场死区,其周围流场稳定有序,粒子电极在流场中有较好的传质条件。

搅拌叶轮转速的大小对流场分布形式的影响很小,但流速的增加能减少流场死区的数量,改善粒子电极间流场分布情况。

反应器支架上下夹具对流场的影响较大,下端夹具阻碍轴向流,使轴向流产生逆流,在上端夹具部位产生旋涡,造成流场的局部死区,因此在工程实践中要对支架的夹具进行重点优化。其次反应器底部流场不稳定,有局部小旋涡的产生,需要对叶轮的安装高度、底部槽体的导流壁面、叶轮型号进行进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] 尚秀丽,陈淑芬,甘黎明,等.电芬顿氧化法处理染料废水的研究进展[J].毛纺科技,2015,43(11):35-38.
- [2] 孙晓君,冯玉杰,蔡伟民,等.废水中难降解有机物的高级氧化技术[J].化工环保,2001,21(5):264-269.
- [3] 李雪,冯岩,于衍真.三维电极体系在废水处理中的应用[J].中国资源综合利用 2016,34(4):29-33.
- [4] 宋均轲,刘朋阳,钱斌.三维电极电解法在水处理中的应用[J].广州化工,2011,39(15):53-54.
- [5] 古振澳,柴一荻,杨乐,等.以泡沫镍为阴极的电芬顿法对苯酚的降解[J].环境工程学报,2015,9(12):5843-5848.
- [6] 肖凯军,王新,银玉容.三维电极-电 Fenton 耦合法讲解硝基苯废水[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(8):131-135.
- [7] 牟童,郑源,郑建坤,等.T型搅拌器数值模拟研究[J].南水北调与水利科技,2014(3):89-94.
- [8] 梁家勇,周勇军,卢源,等.双层侧进式搅拌槽固液流动研究[J].轻工机械,2015,33(4):35-38.
- [9] 白晓莉,唐克伦,李辉,等.基于 FLUENT 的搅拌器三维流场数值模拟及其实验研究[J].机械工程师,2015(4):17-20.



www.QCtester.com  
因为专业,所以权威  
因为用心,所以收获更多



扫一扫 加入我们