

# 生物反应器内搅拌器的优化设计

舒安庆<sup>1,2</sup>, 刘 凯<sup>1</sup>, 马长春<sup>3</sup>, 魏化中<sup>1,2</sup>, 龚 哲<sup>4</sup>, 董厚生<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉市压力容器压力管道安全技术研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 中国通用机械工程总公司, 北京 100050; 4. 湖南智河化工技术设备有限公司, 湖南 岳阳 414000)

**摘 要:**简述了生物搅拌器的桨叶型式, 利用计算流体力学软件对发酵罐内的流场进行了数值模拟. 针对某抗  
菌素厂发酵罐, 直径  $D=3\ 800\ \text{mm}$ , 液位高度  $H=8\ 600\ \text{mm}$ , 均布 4 块挡板, 转速  $n=110\ \text{r/min}$ , 上层搅拌器  
为三层 A315 搅拌器, 原底桨使用 Rushton 涡轮搅拌器, 现改用六叶涡轮搅拌器, 对其流场进行了模拟分析比  
较, 结果显示后者有利于罐内发酵液的物质交换, 搅拌效果得到改善.

**关键词:**生物反应器; 发酵罐; 搅拌器; 数值模拟

**中图分类号:** TQ027.2

**文献标识码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.11.017

## 0 引 言

搅拌效果好、能耗小是搅拌设备追求的目标. 如何准确地得到搅拌罐内的流场、选用何种型式的叶轮从而降低能耗是搅拌设备设计的关键. 生物发酵搅拌过程中的流场是非常复杂的, 往往难以达到预期的设计效果, 因此如何准确模拟和描述发酵罐中的流动情况和混合过程, 是生物反应器设计的难点<sup>[1-3]</sup>. 借助计算流体力学软件 (CFD), 可以为搅拌器的结构设计提供参考, 弥补经验设计方法的不足, 有助于生物反应器的技术创新.

在生物发酵行业中, 搅拌器的桨叶型式主要有径向流搅拌器和轴向流搅拌器. 径向流搅拌器的特点是气体分散能力强, 结构简单, 但功耗较大, 作用范围有限, 例如 Rushton 涡轮 (见图 1); 而轴向流搅拌器对发酵过程中的混合性能较好、功耗低, 但不足之处是对气体的分散能力较差, 其代表有 LIGHTNIN 公司的 A315 搅拌器 (见图 2)<sup>[4-5]</sup>.

由于现代发酵罐的规模不断扩大, 光靠单层桨叶或桨叶型式已经不能满足工业生产的需要, 结合两种流型的多级、多种组合方式搅拌器孕育而生. 当发酵罐底部通入气体时, 安装在底部的径向流搅拌器使气体打散成小气泡, 增加气液两相的接触面积; 利用轴向流搅拌器混合性能好的特

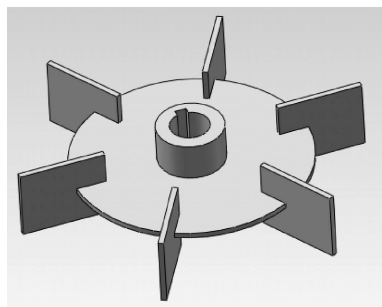


图 1 Rushton 涡轮搅拌器

Fig. 1 Rushton turbine agitator

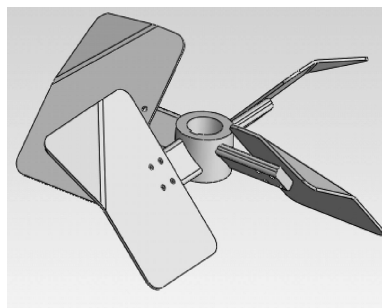


图 2 A315 搅拌器

Fig. 2 A315 turbine agitator

点, 使全部液体成周期循环, 大范围的实现气液混合. 充分利用两种搅拌器的优势, 取长补短, 采用多级、多种组合方式是今后大型发酵罐设计的发展方向.

在生物发酵行业中, 搅拌器的结构设计主要依靠经验. 但工程实例说明, 由经验设计出的搅拌

**收稿日期:** 2011-10-26

**作者简介:** 舒安庆 (1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 硕士. 研究方向: 流体机械和搅拌设备的研究开发、新型高效过程装备及仿真技术和压力容器压力管道.

器往往难以处于最佳工作状态. 例如选用的电机功率过大,搅拌效果不佳等,因此对搅拌器的优化设计需要更可靠的设计准则. 计算流体力学(CFD)方法被引入搅拌器设计行业,其优势在于可以应用数值模拟软件描述搅拌过程,实现搅拌器的设计与优化.

# 1 生物反应器的基本参数和模拟方法

## 1.1 模拟的基本参数

某抗菌素厂的老式发酵罐,罐体及搅拌器主要参数为:发酵罐直径  $D=3\ 800\text{ mm}$ ,液位高度  $H=8\ 600\text{ mm}$ ,搅拌器为三层 A315 搅拌器和 Rushton 涡轮(底桨),均布 4 块挡板,转速  $n=110\text{ r/min}$ ,工作介质为发酵液(因发酵液粘度参数与水相近,模拟过程以水作为工作介质),使用 CFD 软件 Fluent 进行数值模拟. 图 3 为三维模型示意图.

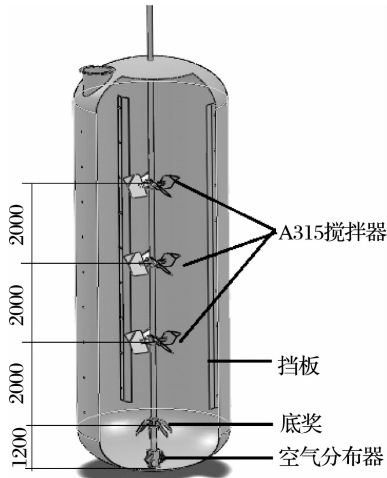


图 3 组合式搅拌器

Fig. 3 Schematic diagram of the bioreactor

## 1.2 网格的划分

选取整个发酵罐的流体作为计算域,利用 Gambit 生成网格. 由于发酵罐所选用的搅拌桨和挡板结构不规则,故整体网格划分采用非结构化网格,并对桨叶区的网格进行了加密处理,以增加计算的精度,总的网格节点数为 1 231 702 个.

## 1.3 模拟方法

发酵罐内的流场是非常复杂的,在对搅拌反应过程进行数值模拟时,面对的难题是流体、罐体壁面、挡板和搅拌桨所围成的区域的形状与流动是随时间周期性变化的. 为了解决运动的桨叶和静止的挡板之间的相互作用,许多学者提出了不同的处理方法,有“黑箱”模型法、内外迭代法、多重参考系法(MRF)、滑移网格法和大涡模拟法等.

MRF 方法是基于稳态流场的计算方法,它是采用旋转坐标系和静止坐标系两个参考系分别进行计算,由于两个参考系没有重叠的区域,故不需要进行内外迭代,从而减少了计算成本. 因此本文选用 MRF 方法进行模拟,将计算区域分为两个区域,桨叶及其附近流体区采用旋转坐标系(动区域),其他区域采用静止坐标系(静区域). 搅拌桨处于运动流体区域,与桨叶四周的流体以同样的转速进行运动,因此相对于该区域内的流体是静止的,为此做了如下边界定义:桨叶壁面定义为动边界,边界类型为壁面边界,挡板壁面和罐体壁面定义为静止壁面边界条件. 湍流模型选用标准  $k-\epsilon$  模型,图 4 为网格示意图.

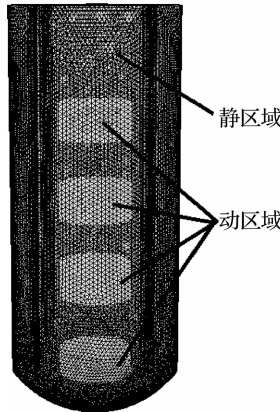


图 4 网格示意图

Fig. 4 Grid in the bioreactor

# 2 Rushton 涡轮搅拌器的模拟结果及分析

Rushton 涡轮搅拌器是典型的径向流搅拌器,通过模拟计算得到了图 5、图 6 的流场.

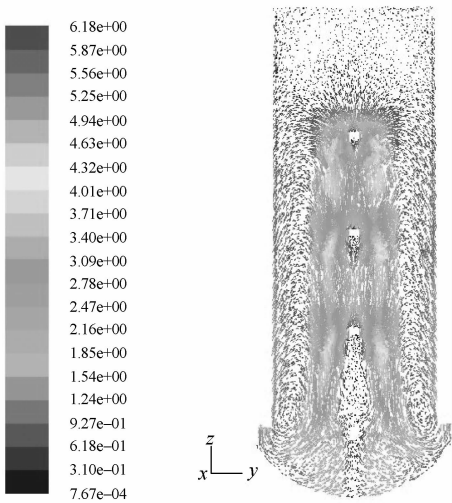


图 5 垂直面液相流场

Fig. 5 Vector plot of velocity in vertical plane

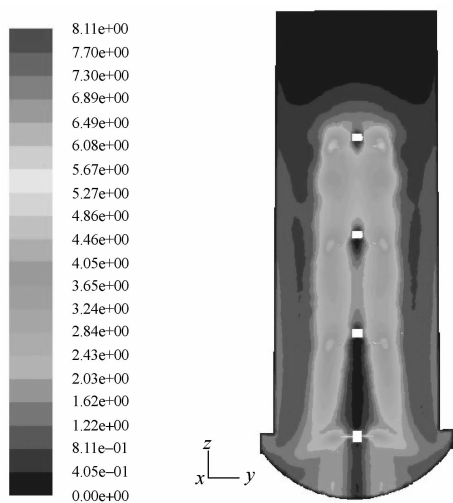


图 6 垂直面液相速度云图

Fig. 6 Contours plot of velocity in vertical plane

Rushton 涡轮在结构设计上设置了圆盘,其目的是为了 防止气体未经分散直接从轴周围溢出液面,由图 5、6 可以看出,圆盘阻碍了上层发酵液与下层发酵液 的物质交换,桨叶处又分别形成了上下两个自循环区,也不利于物质交换。

另外,相关研究发现,Rushton 涡轮搅拌器的桨叶背面会出现高速转动的漩涡,漩涡内负压较大,从空气分布器出来的气体立即被吸入漩涡内,从而形成气穴现象,增大了搅拌器的搅拌阻力。

3 六叶涡轮搅拌器的模拟结果及分析

现将发酵罐原 Rushton 涡轮底桨改用六叶涡轮搅拌器,该搅拌器属开启涡轮式搅拌器中的一种,结构如图 7 所示.以相同的参数进行数值模拟.六叶涡轮搅拌器以径向流为主,没有 Rushton 涡轮中的圆盘,有利于上下发酵液的物质交换,独特的桨叶形式又可以避免气穴的形成<sup>[6-7]</sup>。

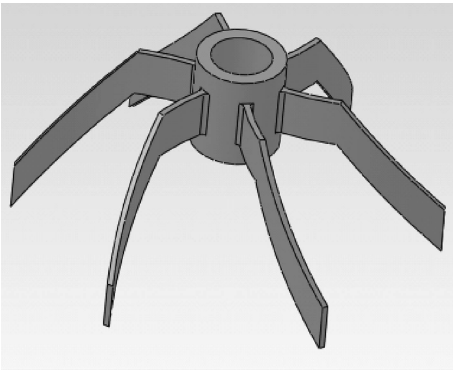


图 7 六叶涡轮(底桨)

Fig. 7 six-leaves turbine agitator

由图 8、图 9 可以看出,在罐体上方的三层 A315 搅拌器属于轴向流搅拌器,桨叶推动流体,

流体的流动方向平行于搅拌轴,流体向下流动,冲击到罐体底部时流体开始向上翻转,再经罐体壁循环回到液体表面,形成上下循环流.罐体底部的六叶涡轮属于径向流搅拌器,桨叶产生推动流体产生径向流,径向流在流动过程中推动周围流体,流体撞击到壁面挡板时,流体被分为两部分,一部分沿挡板向上流动,一部分向下流向罐体底部.由这两张图可看出整个罐体流程分布呈循环流形式,若考虑实际生产过程中罐体底部空气分布器产生的气体经六叶涡轮破碎后再向上扩散,上层液体也会得到很好的循环与物质交换。

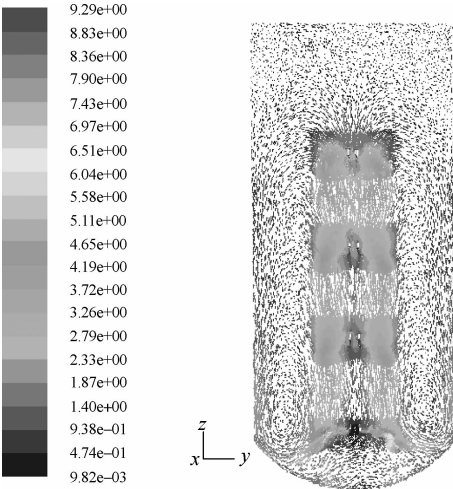


图 8 垂直面液相流场

Fig. 8 Vector plot of velocity in vertical plane

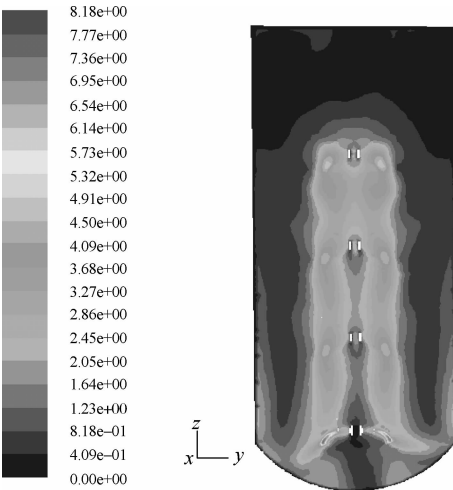


图 9 垂直面液相速度云图

Fig. 9 Contours plot of velocity in vertical plane

图 10、11 是垂直于搅拌轴横截面上的搅拌流场的速度矢量图,截面位置选取在距离罐体底部 Z=1 100 mm 和 Z=3 200 mm(六叶涡轮和底层 A315 搅拌器)的位置处.图 10 和图 11 的对比,能够很好的看出六叶涡轮在推动流体向四周流动的能力和作用范围远远大于 A315 搅拌器。

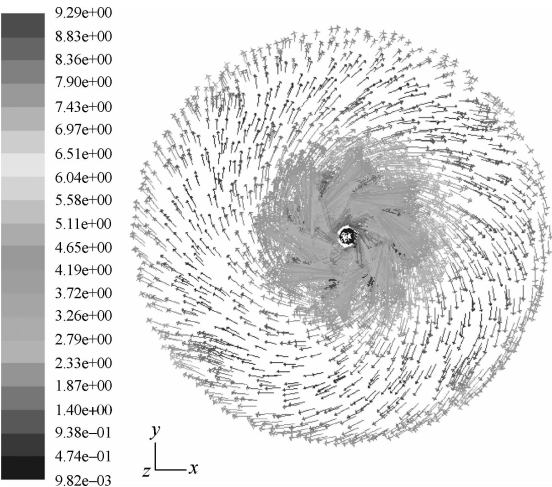


图 10 Z=1 100 mm 液相流场

Fig. 10 Vector plot of velocity (Z=1 100 mm)

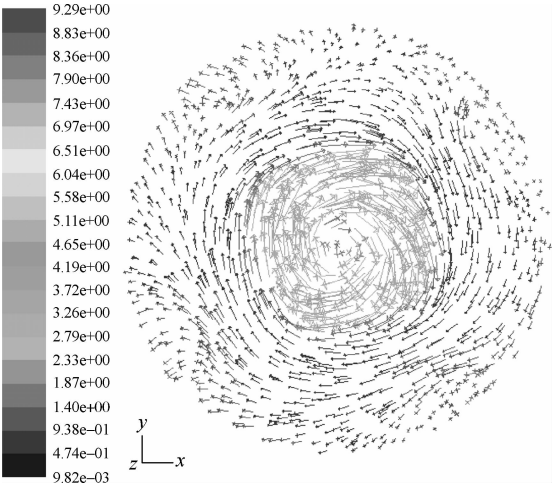


图 11 Z=3 200 mm 液相流场

Fig. 11 Vector plot of velocity (Z=2 300 mm)

4 结 语

通过 CFD 计算模拟实验分析,可以看出:上层为 A315 搅拌器,底层为六叶涡轮搅拌器比 Rushton 涡轮搅拌器的组合方式更适用于通气情况下的搅拌操作. 计算流体力学模拟分析可以为搅拌器的桨叶选型提供参考,指导生物搅拌反应器的设计开发和优化. 对于实际生物发酵过程,还需考虑通气流量和温度等因素的影响,还有待于进一步的深入研究.

参考文献:

[1] 刘玉华,喻九阳,郑小涛,等. 气-气混合器的三维流场数值模拟[J]. 武汉工程大学学报,2008,30(2):108-110.

[2] 黄志坚,虞培清,苏扬,等. 发酵罐用搅拌器的工业应用进展[J]. 医药工程设计,2004,25(1):1-4.

[3] 吴学风,姜绍通,张旻,等. 机械搅拌生物反应器的 CFD 模拟及其在发酵生产乳酸中的应用[J]. 食品科学,2010,31(7):186-189.

[4] 王凯,虞军. 搅拌设备[M]. 北京:化学工业出版社,2003.

[5] 刘敏珊,张丽娜,董其伍. 圆盘涡轮式搅拌槽的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版,2007,28(1):122-128.

[6] 侯拴弟,钟孝湘,王英琛,等. 斜叶涡轮搅拌槽流动场数值研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,1999,26(4):1-4.

[7] 黄雄斌,闫宪斌,施力田,等. 固-液搅拌槽内液相速度的分布[J]. 化工学报,2002,53(7):717-722.

Optimization design of stirrer in bioreactor

SHU An-qing<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, MA Chang-chun<sup>3</sup>, WEI Hua-zhong<sup>1,2</sup>, GONG Zhe<sup>4</sup>, DONG Hou-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Wuhan Research Center of Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering, Wuhan 430074, China;  
3. China National General Machinery Engineering Corp., Beijing 100050, China;  
4. Hunan Chi River Chemical Equipment Co., Ltd., Yueyang 414000, China)

**Abstract:** The forms of agitator blades were outlined. The flow field in the fermentation tank was simulated by using computational fluid dynamics software. There was a fermenter, diameter  $D=3\ 800$  mm, liquid height  $H=8\ 600$  mm, Speed  $n=110$  r/min. A315 turbine agitator was used as up impeller & Rushton turbine agitator was used as down impeller. The simulated data shows that the six-leaves turbine stirrer effect is more excellent than Rushton turbine agitator, and much more conducive to the exchange of substances.

**Key words:** bioreactor; fermenter; agitator; computational fluid dynamic (CFD)

本文编辑:陈小平