

信息技术应用

CFD 数值模拟在柠檬酸发酵罐搅拌系统设计过程中的应用

张庆文¹, 骆巍², 刘永奎¹, 曾宇¹, 陶慧², 洪厚胜^{1,2}

(1. 南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏南京 210009;

2. 南京汇科生物工程设备有限公司, 江苏南京 210009)

摘要:采用 CFD (computational fluid dynamics) 数值模拟对 600 m³ 柠檬酸发酵罐搅拌系统设计方案进行分析, 结合柠檬酸发酵工艺, 综合考虑搅拌轴功率、流型、传质混合能力, 提出了 2 种设计方案, 并对其进行了数值模拟及传质混合能力分析, 通过对比确定最优方案。

关键词:柠檬酸; 发酵罐; 搅拌系统; 传质混合; CFD

中图分类号: TQ051.72; Q815

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)07-0086-03

CFD numerical simulation was used in design the stirring system of 600 m³ citric acid fermentor

ZHANG Qing-wen¹, LUO Wei², LIU Yong-lei¹, ZENG Yu¹, TAO Hui², HONG Hou-sheng^{1,2}

(1. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Nanjing Highke Bioengineering Equipment Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical simulation was used in analysing the design schemes of 600 m³ citric acid fermentor stirring system, combined with citric acid fermentation process and consider the shaft power, flow pattern, mass transfer mixing ability of the schemes, two design schemes were proposed, and analyzed the mass transfer mixing ability of the schemes by CFD. finally, choosed a optimal decision.

Key words: citric acid; fermentor; string system; mass transfer and mixing; CFD

柠檬酸 (citri acid), 又称枸橼酸, 广泛用作食品添加剂、药物添加剂、化妆品和洗涤用品添加剂^[1], 是发酵行业的重要商业产品。目前国内外以淀粉质原料发酵生产柠檬酸的微生物主要是黑曲霉^[2], 主要发酵原料为玉米淀粉或木薯淀粉, 本项目为木薯淀粉。

在大型好氧发酵罐的设计中, 搅拌系统和气体分布器的气液传质混合能力通常被认为是最重要的影响因素^[3]。柠檬酸发酵过程是一个耗氧生物发酵过程, 在整个发酵过程中, 发酵液中溶解氧的含量和均匀度是关系到微生物是否具有高活性和正常产酸的一个重要指标。所以本设计针对 600 m³ 柠檬酸发酵罐, 重点是如何保证罐内流动无死区, 传质混合性能好, 同时兼顾能耗, 即在满足发酵工艺需求的同时, 做到搅拌系统的高效节能。

1 方案设计

1.1 设计方案的提出

发酵罐主要尺寸及参数: 罐体内径 $\Phi 6.3$ m, 高

度 19 m, 罐内有 8 组换热列管兼作挡板, 电机额定功率 250 kW, 采用皮带轮传动。

本文提出两种设计方案, 均为 4 层搅拌器, 顺时针旋转。方案一如图 1(a), 最底层搅拌器位于导流筒内, 罐底采用新型喷环式气体分布器; 方案二如图 1(b), 罐底采用环管气体分布器。

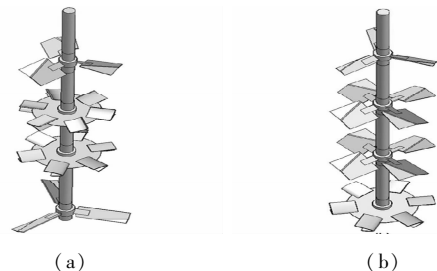


图 1 两种方案搅拌系统几何结构图

1.2 两种方案的设计思路

1.2.1 方案一

(1) 采用新型喷环式气体分布器进行气液分散, 经喷射管口喷出气液夹带混合物, 气泡直径极小, 能强化气液传质; 且喷射流在导流筒内旋转方向

与搅拌器相同,在一定程度上起到节能作用,导流筒在罐底起导流作用,保证了罐底发酵液的循环流动,避免出现死区。

(2)第2,3层搅拌器分别为YJ6(六箭叶圆盘涡轮)、PT6(六抛物线圆盘涡轮),都为剪切能力较强的径向涡轮,能很好破碎上浮气泡,特别是针对聚并产生的大气泡,且液相混合能力较强,使罐体中上部气液传质混合效果较好。

1.2.2 方案二

(1)第4层PT6(六抛物线圆盘涡轮)有很好的气液分散效果,保证罐体底部气液分散效果。

(2)第2,3层搅拌器位置采用KK4(四宽叶轴流搅拌器),叶片面积大,能有效阻挡上浮气泡,且轴流向下泵送量大,能有效延长气泡在发酵液中停留时间,有助于提高气液传质效果。

(3)3轴+1径搅拌器组合使全罐发酵液流动呈现一个大循环,有助于减少罐中死区和缩短混合时间。

两种方案参数见表1。

表1 两种设计方案搅拌器类型及桨径

方案一	直径/ mm	方案二	直径/ mm
三窄叶轴流搅拌器 ZX3	DJ1650	三窄叶轴流搅拌器 ZX3	DJ1700
六箭叶圆盘涡轮 YJ6	DJ1500	四宽叶轴流搅拌器 KK4	DJ1650
六抛物线圆盘涡轮 PT6	DJ1550	四宽叶轴流搅拌器 KK4	DJ1650
三窄叶轴流搅拌器 ZX3	DJ2100	六抛物线圆盘涡轮 PT6	DJ1600

2 两种设计方案的数值模拟

2.1 数值模拟主要参数设置

本文采用多重参考系法解决搅拌器旋转问题,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,虽然这种模型在非严格各向同性的涡流中有局限性^[4],但尚无研究表明

其他湍流模型模拟结果更好。在开始模拟前,确保网格的无关性,对网格进行加密直到网格的疏密程度对计算结果没有影响。

数值模拟中参数设置尽可能采用生产中操作条件,发酵罐装液量为77%(液面高约15.6 m),搅拌系统设计转速90 r/min,发酵通气量85 m³/min。

2.2 数值模拟结果及分析

2.2.1 流型分布

如图2所示,两种方案所产生的流动顺畅,无明显死区。图2(a)中形成上下两个循环,下循环由3,4层搅拌器驱动,导流筒导流而形成;上循环由1,2层搅拌器驱动形成。图2(b)中流型总体上看为一个循环,流体由上3层轴流桨沿轴泵送至圆盘涡轮桨上部,然后经圆盘涡轮径向泵送到罐壁,再沿罐壁向上流动形成循环。方案一中第2,3层搅拌器附近湍动剧烈,径向作用明显,能够影响到更大半径的范围。方案二中第4层搅拌器径向作用明显,上部因采用轴流搅拌器径向作用较弱。

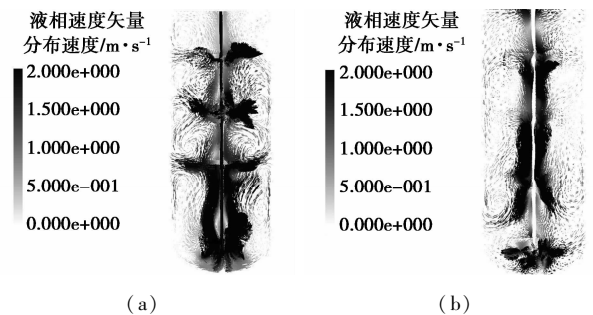


图2 中心竖直平面上液相流速矢量图

2.2.2 气含率分布

图3所示为气含率分布图,方案一中导流筒上部和第3层搅拌器附近气含率高,主要是第4层轴流向上作用和第3层搅拌器径向流作用所致;方案二中罐底气含率较高,主要是第4层圆盘涡轮的分散。

(上接第85页)

4 结论

本文通过利用工艺模拟软件,建立了分离植物油抽提溶剂和苯产品的常规两塔萃取精馏以及隔壁塔模型,通过模拟,确定了主塔合适的理论塔板数为30、侧线塔塔板数为10、剂油比为1.1(体积比)、侧线采出位置为第27块板等工艺参数。通过与常规

两塔精馏能耗的比较,认为隔壁塔用于生产植物油抽提溶剂产品是可行的。

参考文献

- [1] 朱登磊. 隔壁塔萃取精馏制取无水异丙醇的模拟研究[J]. 化工生产与技术, 2009, 16(6): 9-10.
- [2] 史志刚, 匡国柱. 用分割壁精馏塔对苯类混合物分离的工艺分析[J]. 炼油与化工, 2008, 19(4): 17-20. ■

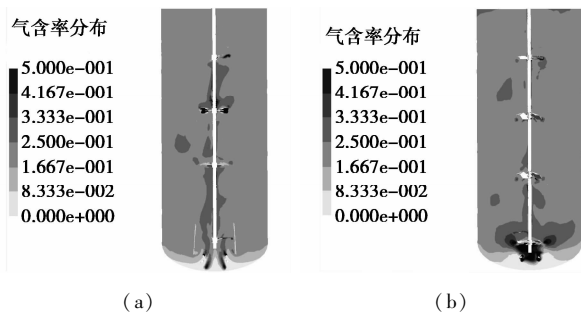


图 3 中心竖直平面上气含率分布图

由于模拟所采用气泡直径为定值,无法完全模拟喷环式气体分布器喷出的气液混合物,所以方案一中罐底气液混合效果的真实情况应好于模拟。

2.2.3 剪应变分布

图 4 所示为中心竖直平面上液相剪应变速率分布图,流体剪应变大小是衡量搅拌器剪切能力的指标之一,也是衡量此处气泡大小的指标之一。图 4 (a) 中导流筒内、第 1 层搅拌器下部、第 2、3 层搅拌器周围剪应变较大;图 4 (b) 中罐底、搅拌轴周围区域剪应变较大。图 5 与图 4 所反映的结果一致,方案一在罐体中上部剪应变大于方案二,方案二在罐体下部剪应变大于方案一。

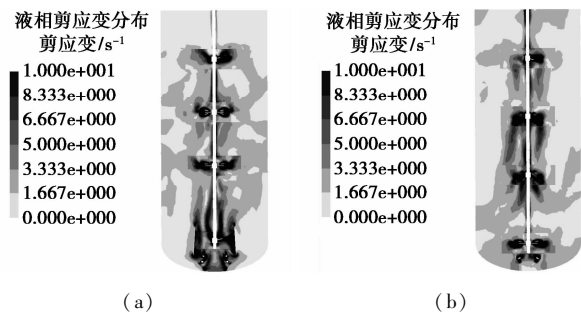


图 4 中心竖直平面上液相剪应变分布图

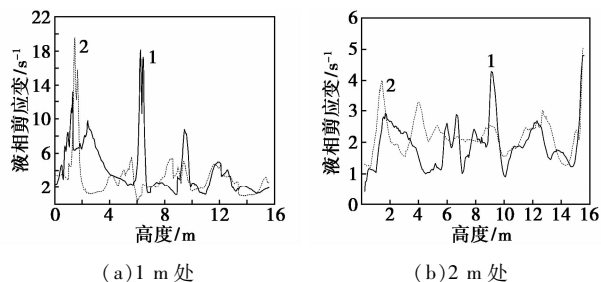


图 5 半径为 1、2 m 处不同水平高度液相剪应变速率分布曲线

2.2.4 液相湍动能分布

如图 6 所示,在半径为 1、2 m 处方案二湍动能明显大于方案一。主要原因是方案二中有 3 个轴流搅拌器,方案一中只有 2 个轴流搅拌器,在输入功率

相当的情况下轴流桨泵液量大于径向涡轮,且其流型更规律,湍动能耗散更慢。这说明方案二中整体流动更好,流体动能衰减更慢;方案一中产生的无序湍动更大,更利于气泡的破碎。

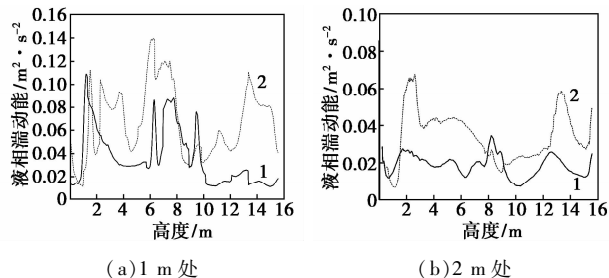


图 6 半径为 1、2 m 处不同水平高度液相湍动能分布曲线

3 两种方案传质混合能力分析

采用 CFX 软件 Function calculator 工具计算两种方案全罐平均气含率,方案一为 0.2290,方案二为 0.2176,方案一气含率略高;通过每层搅拌器上扭矩求搅拌轴功率,方案一在转速为 90 r/min 时轴功率为 150.97 kW,方案二为 153.52 kW,两种方案输入轴功率相当,CFD 模拟只考虑净消耗的轴功率,未将轴承、电机、皮带轮上损耗考虑在内,因此计算功率略小于实际功耗。工程上主要通过提高气液相界面面积 a 来提高气液相体积传质系数 $K_L a$,而气液相界面面积 a 是由气含率和气泡直径共同决定,气液分散系中比界面 a 与 d_B 和 Φ 之间有如下关系^[5]:

$$a = 6\Phi/d_B \tag{1}$$

式中, a 为气液分散系中的比界面面积, m^2/m^3 ; Φ 为气含率; d_B 为气泡平均直径, m 。

表 2 两种方案的平均气含率与轴功率

方案	平均气含率	轴功率/kW
1	0.2290	150.97
2	0.2176	153.52

根据分析,方案一气含率高于方案二,且方案一多采用气液分散能力强的径向桨,剪应变略大于方案二,方案一中喷环式气体分布器混合强度大于方案二环管式气体分布器,由此判定方案一中全罐气泡平均直径不比方案二大,全罐气液相界面面积 a 更大,溶氧更好。液相混合方面,根据湍动能分析方案二在整体流动上更好,但是方案一全罐基本无死区,

(下转第 90 页)

此法合成金刚烷的副产物也可以作为石油化工行业的原料,因此在经济和资源利用方面均优于传统合成方法。

新型绿色合成工艺是采用固体酸催化剂催化脂环族饱和碳氢化合物异构化的一种方法。在 2008 年已经使用本技术合成了 300 t 金刚烷,首次在上实现了工业化。

2 文部科学省授予奖

2011 年文部科学省授予奖授予日本电气株式会社(NEC 公司)绿色创新研究所, Nakahara Kentarou、Iwasa Shigeyuki、Hiroshi Masashi、Western Christian virtue、Yang Yasui Motoe。他们研究开发出绿色有机自由基电池。

最近,随着电动汽车、可再生能源利用技术、绿色循环可持续社会的发展,存储电能技术备受人们的青睐。可充电电池和锂离子电池,是一类便携式多次储能设备,可以使高密度电能不受损失。

日本电气株式会社(NEC 公司)绿色创新研究所的研究团队注意到有机自由基比未成对电子的性质更加稳定,合成了具有很高活性的聚合物分子。

通过进一步提高这种聚合物材料的电化学活性,开发了碳纤维复合材料电极,在世界上第一个成功示范了有机自由基的累积效应。研究小组随后发展了以锂离子二次电池为模型基础的装置电极制作技术,铅、锰二次电池则由塑料材料代替(如钴氧化物、重金属),由此诞生了性能优越的绿色二次电池——有机自由基电池。

开发的有机自由基电池,工作电压为 3.6 V,工作环境为非水系,每个电极活性物质的能量密度为 178 Wh/kg,同样初步估计其功率密度为 18 kW/kg。电池充放电 1000 次后电池容量维持在初始容量的 89% 左右,同时充电时间实现了高效性(1 min 内充电 97%),使家庭和个人电脑使用的小型应急电源、高性能 IC 卡、未来的可穿戴式装置内薄软电池取得新的进展,商业化应用比以往任何时候商业化程度都高。特别是厚度为 1 mm 的有机自由基电池价格为 500 日元,2 W 的高输出性和超过 1 万次的脉冲放电循环稳定性已经达到使用要求,例如用于 LED 闪光灯(需要高预期输出功率的电子设备)。

本研究结果,帮助解决了二次电池领域的能源问题,已引起广泛关注,因为它开辟了一个全新概念

(上接第 88 页)

局部湍动程度剧烈,足以满足发酵过程中菌体对糖和各种营养物质传递的需求。

4 结论及展望

4.1 结论

方案一采用喷环式气体分布器、导流筒的组合方式不但有助于节能,且在导流筒内其气液传质速率大,导流筒产生的循环能保证罐底及导流筒外部及时补充溶氧,安装于中上部的 PT6、YJ6 圆盘涡轮能有效保证罐体中上部溶氧混合。

综合考虑搅拌功率、气液传质混合效果、柠檬酸发酵的相关文献[6-7],方案一为较优方案。方案一中搅拌器直径可调,在发酵实验中可根据功率和发酵工艺需要对各层桨径进行优化。

4.2 展望

在大型发酵罐的设计中,针对不同发酵工艺、菌种,如何实现全罐传质混合强度保持在适合水平是其难点,CFD 技术为实现这种精确设计提供了可能。如果将来通过数值模拟能准确得到全罐或局部的溶氧、剪切强度、流动状况,将有助于开发出比目前更高效、节能的搅拌系统。

随着 CFD 技术的不断发展,CFD 已经越来越多地用于流体机械的研究和设计之中,采用 CFD 技术辅助流体机械设计有着其他方法没有的优势,但 CFD 技术还处于发展中,还有很多不足,例如准确度有待提高、模型理论上需要突破等。相信在不久的将来,CFD 技术会成熟地应用于化工、发酵、食品等各个领域。

参考文献

- [1] 姜成林,徐丽华. 微生物资源开发利用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001.
- [2] Pallares J, Rodríguez S, Sanromán A. Citric acid production in submerged and solid state culture of *Aspergillus niger*[J]. *Bioprocess Engineering*, 1996, 15(1): 31-33.
- [3] Enhanced in situ dynamic method for measuring $K_L a$ in fermentation media[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 47: 48-54.
- [4] 洪厚胜,骆巍,郭翠,等. L-赖氨酸发酵罐搅拌器的改造[J]. *现代化工*, 2010, 30(9): 83-85.
- [5] 王凯,虞军. 搅拌设备[M]. 北京:化学工业出版社,2003: 120-121.
- [6] 方明庠,薛才利,何德员. 喷环式好氧发酵罐在柠檬酸生产中的开发与应用[J]. *浙江化工*, 2000, 31(1): 4-6.
- [7] 葛建武. 160 m³ 柠檬酸发酵罐节能改造实验研究[J]. *石河子科技*, 2007, (2): 6-7. ■