

发酵罐中新型轴向流搅拌桨的冷模试验

阮文权 陈 坚 傅为民 祁汝峰 伦世仪

(无锡轻工大学生物工程学院, 无锡 214036)

摘要 研究设计了两种轴向流搅拌桨, 在小型发酵罐中, 通过水和 CMC 介质, 对两种轴向流搅拌桨进行冷模实验, 研究了两者的混合传质、与功率消耗的性能, 并与径向流桨进行了比较。结果表明: 轴向流搅拌桨较之径向流桨, 在各介质中的混合性能、传质效果和功率消耗等方面均有明显的改善。

关键词 搅拌性能; 轴向流搅拌桨; 搅拌生物反应器

分类号 TQ920.5

0 前 言

近 20 年来, 各种新型、高效的生物反应器不断被开发, 在某些应用领域取代了一部分传统的机械搅拌式发酵罐, 但由于机械搅拌式发酵罐的灵活性、操作方式的多样性, 尤其是在高粘度非牛顿剪切稀化发酵液中应用所表现出的一些独特优点, 使得机械搅拌式发酵罐至今仍在生物技术实验室及工业发酵领域占据着主导地位^[1]。

制造简单的圆盘透平桨(涡轮桨)在搅拌式发酵罐中被广泛地应用, 但这种径向流搅拌桨对全罐混合不好, 剪切影响大, 功率因数高, 影响了机械搅拌罐的应用效果, 尤其是在高粘度的发酵系统中。因此, 一些更有利于通风发酵过程的搅拌桨被开发出来, 轴向流搅拌桨就是其中最具有前途的一种。轴向流搅拌桨转动时可使发酵罐中流体的流型完全不同于径向流搅拌桨, 可达到提高混合效果、减小剪切变化影响和降低功率消耗等目的。

在设计制作了各种不同类型的轴向流桨后, 在冷模条件下对这些轴向流桨的性能进行了比较, 实验采用水和 CMC 溶液介质, 分别在 2 L 和 30 L 的发酵罐中进行考察, 最后确定了适合不同发酵介质体系的轴向流搅拌桨类型。

1 实验方法

1.1 实验装置

实验在罐径为 142 mm 和 250 mm 的 2 L 和 30 L 的两个不同容积的搅拌罐中进行, 研究用实验介质为水溶液和 CMC 的水溶液。

在 2 L 罐中, 研究 3 种情况:

收稿日期: 1998-03-21

第一作者: 阮文权, 男, 1966 年 5 月生, 工学硕士, 讲师

1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- 1)原有的两档径向流桨 (桨径 d 和罐径 D 之比 0.38);
- 2)一档轴向桨 ($d/D=0.46$);
- 3)组合桨形式 (下为径向流桨,上为轴向流桨)

采用两档桨时,下桨距罐底 $h=0.2D$,桨间距 $r=0.35D$;采用单桨时桨距罐底 $h=0.3D$.

在 30 L 罐中,所用桨叶型式有: 原有径向流桨 双轮毂轴向流桨。两桨单一组合,下桨距罐底 $h=0.25D$,桨间距 $r=0.7D$.

1.2 实验测试方法

- 1.2.1 混合时间 酸碱中和法^[2,3];
- 1.2.2 传质系数 水系统中用亚硫酸盐法^[4];
- 1.2.3 轴功率 扭矩法^[2]。

2 结果与讨论

2.1 混合性能

2.1.1 2 L 发酵罐中的混合时间测定 从图 1 中可以看出,在一定转速和通气量下,各种桨在清水和 CMC 溶液中的混合情况类同,其中组合桨的混合时间最少,其次是单只轴向流桨;在绝大部分条件下,径向流桨的混合情况最差,甚至低于单只轴向流桨的混合效率。体系粘度增加不利于混合,因此在 CMC 溶液中各桨作用下的混合时间均比清水中高。在清水介质中,低转速下 3 种桨型的混合情况有很大的差别;随着转速的提高,尤其在 600 r/min 以上,混合时间差异进一步缩小,相差不到 1 s。在 CMC 溶液中,混合情况则不同,各种转速下径向流桨与轴向流桨的混合时间一直有明显的差别,可见轴向流桨对提高高粘度发酵液的混合效果更佳。在清水介质中,采用轴向流桨后平均混合效率可提高 25% 左右,而在 CMC 溶液介质 (约 300~400 cPa) 中提高的幅度更大,约 50% 左右,单只轴向流桨的提高程度没有组合桨明显。可见,轴向流搅拌桨可以提高混合效果,尤其在高粘度流体中,其提高混合效率的效果更为明显。

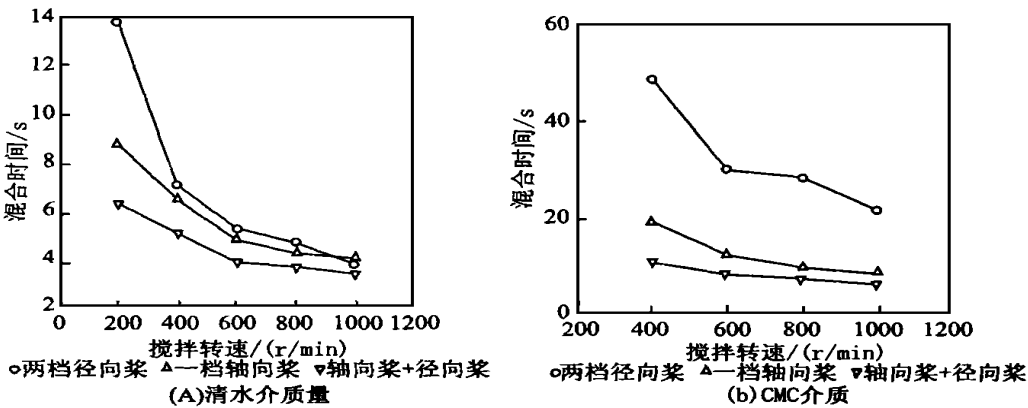


图 1 2 L 发酵罐中不同桨叶的混合时间图 (通气量 1 L/(L·min))

2.1.2 30 L 发酵罐中混合时间的测定 与 2 L 发酵罐类似, 30 L 发酵罐中各桨在高粘度

介质中作用的混合时间远大于在清水中的作用时间,两者相差一倍多(图 2) 清水介质中,两种轴向流搅拌桨作用达到完全混合的时间仅是径向流桨的 50% 不到,随着搅拌转速的提高,混合所需的时间差别变小;同样,在 CMC 溶液介质中轴向流桨的混合情况明显好于径向流桨,但径向流桨作用下的混合时间变化幅度远大于轴向流桨,在两种介质中均达 50%;轴向流桨作用下的混合时间随转速的变化仅为 20% 左右。这主要是由于使用了轴向流桨后罐中流体产生了纵向大循环,而径向流桨则存在多个混合区域,由此整个混合时间轴向流桨要明显小于径向流桨。从图中还可看出,双轮毂桨的混合情况要稍差于单轮毂桨,可能是双轮毂桨的桨叶盘面比小于单轮毂桨,影响了对流体的推动作用。

从上述分析可知,由于轴向流搅拌桨能够在全罐中形成轴向的主体循环,减少了罐中流体的局部化现象(这一点在高粘度发酵液中较为明显),输送效率比径向流桨高,因此轴向流桨在提高全罐的混合方面具有比径向流桨明显好的效果,尤其是在高粘度发酵液中。

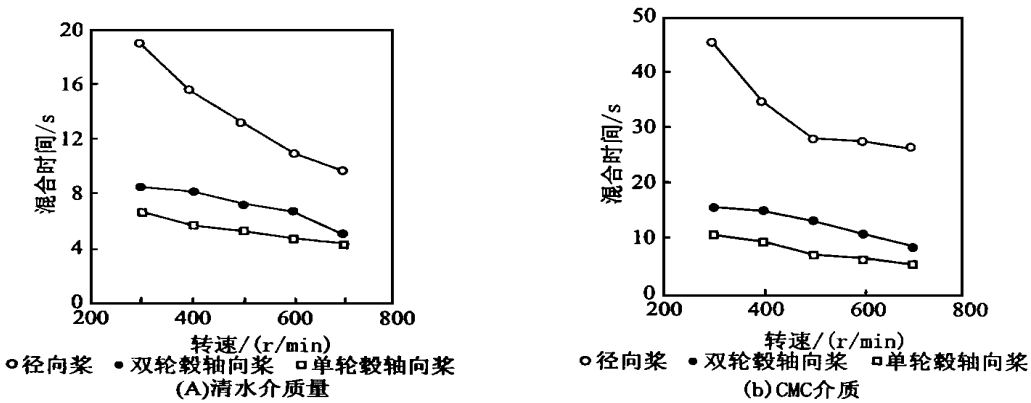


图 2 30 L 发酵罐中不同桨叶的混合时间图 (通气量 1 L / (L^o min))

2.2 传质性能

图 3 中 (a)、(b) 分别是各种桨在 2 L 罐和 30 L 罐中,以清水为介质时的情况分析。从图 3(a) 中可以看出, 2L 发酵罐中,组合桨的体积传氧系数明显高于两档径桨 (提高 15% ~

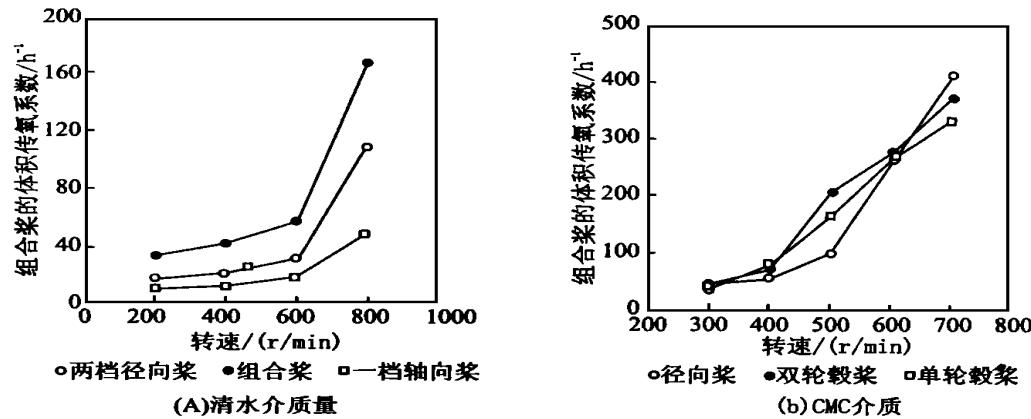


图 3 不同桨叶在 2 L 及 30 L 发酵罐中的传质系数情况 (通气量 1 L / (L^o min))

20%)和单只轴向流桨(高出 28%~ 40%)。图 3(b)为 30 L 发酵罐中的传氧情况,从图中可以看出,在中低转速下(低于 600 r/min),轴向流桨的传质情况均好于径向流桨(比径向流桨高出 15% 左右);转速提高到一定程度,径向流桨的传质系数高于轴向流桨的,这是由于高转速下径向流桨粉碎气泡的潜力进一步得以发挥的缘故,在实际的生产应用中可以考虑采用组合桨的搅拌形式以充分利用这一特性。

2.3 功率准数及性能比较

相同效果下,发酵罐的功率消耗大小是衡量发酵系统优劣的一个重要标准,而功率准数可反映功率消耗的情况。功率准数定义为 $N_p = \frac{P_0}{\rho N^3 d^5}$,表示机械搅拌所施于单位体积被搅拌液体的外力与单位体积被搅拌液体的惯性力之比。 N_p 越小,相同直径和转速的桨叶其功率消耗就越少,或在功率不变的情况下其转速和搅拌桨直径可提高,更利于提高搅拌的效率。图 4 是 3 种桨叶的功率准数图,从图中可看出,径向流桨的功率准数最大($N_p = 5.4$),其次为双轮毅轴向流桨($N_p = 1.6$),最小的是单轮毅轴向流桨($N_p = 1.1$)。可见轴向流桨的功率准数明显小于径向流桨。故在相同搅拌功率下,轴向流桨的直径可放大,搅拌转速可提高。在本研究中,原有径向流桨与罐体的直径之比是 0.4,在设计轴向流桨时桨径放大至与罐径之比为 0.5。桨叶直径的变大对减少罐中液体混合时间和提高传质有相当大的好处。

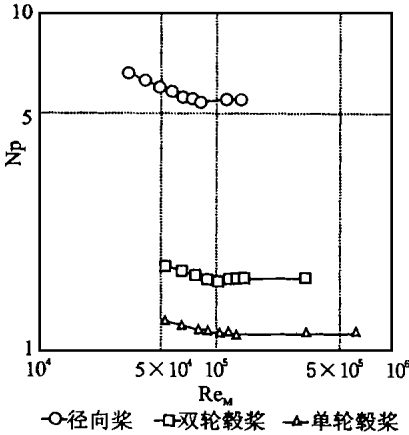


图 4 30 L 发酵罐中各桨叶的 $N_p - Re_M$

表 1 是相同转速和相同功耗下各桨的混合时间和传质情况。可见在相同转速下: 轴向流桨的混合时间大大少于径向流桨,减少混合时间近 2/3,单轮毅桨少于双轮毅桨;轴向流桨的传质效果明显好于径向流桨,分别提高了 70% 和 120%,双轮毅桨好于单轮毅桨;轴向流桨的功耗比径向流桨少近一半,双轮毅桨大于单轮毅桨。在相同功耗下: 轴向流桨的转速可高于径向流桨,单轮毅桨高于双轮毅桨;轴向流桨的混合时间仅是径向流桨的 2/5~ 1/5,单轮毅桨少于双轮毅桨;轴向流桨的传质明显好于径向流桨,前者是后者的 3 倍,单轮毅桨好于双轮毅桨。

表 1 相同转速和相同功耗下各桨的混合时间和传质情况

桨 型	500 r/min 相同转速			200 W 相同功耗		
	混合时间 /s	传质 /h ⁻¹	能耗 /W	混合时间 /s	传质 /h ⁻¹	转速 /(r/min)
径向流桨	28	100	40	40	50	350
双轮毅桨	14	220	28	15	130	440
单轮毅桨	8	170	20	8	170	500

3 结 论

分析 2 L 和 30 L 发酵罐的冷模实验结果可知,新型轴向流桨比传统的径向流桨在增强全罐的混合效果,提高传质和减少能耗等方面具有明显的优越性,这三者也是微生物通风发

酵过程中的关键性因素,用轴向流搅拌桨替代径向流桨后,可提高微生物发酵水平、减少能量消耗,给工厂带来较大的经济效益。

参 考 文 献

- 1 Nienow A W. Agitators for Mycelial Fermentations. *Biotechnol*, 1990(8): 61~ 71
- 2 肖作兵. 新型翼型轴流桨的搅拌性能研究. *化学工程师*, 1994(5): 4~ 8
- 3 Kubii K, Nienow A W. Intervortex Mixing Rates in High-Viscosity Liquids Agitators by High-Speed Dual Impellers. *Chem Eng Sci*, 1986, 41(1): 123~ 134
- 4 伦世仪主编. *生化工程*. 北京: 中国轻工业出版社, 1993. 66~ 68

Study on Agitation Characteristics of Axial Impellers in Fermentors

Ruan Wenquan Chen Jian Fu Weiming Qi Rufeng Lun Shiyi

(School of Biotechnology, Wuxi University of Light Industry, Wuxi, 214036)

Abstract Two novel axial impellers have been designed in our lab. With them in fermentors, the characteristics of mixing and mass transfer in water and CMC solution have been studied and compared with that of Rushton turbine impellers. The results show that axial impellers have better mixing performance, higher volumetric mass transfer coefficient and less energy consumption than traditional Rushton turbine impellers.

Key words agitation characteristics; axial impellers; stirred-tand bioreactor

(责任编辑: 秦和平)