

# L-赖氨酸发酵罐搅拌器的改造

洪厚胜<sup>1</sup>, 骆巍<sup>1</sup>, 郭翠<sup>2</sup>, 李冬冬<sup>2</sup>, 张庆文<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏南京 210009;  
2. 安徽丰原生物化学股份有限公司, 安徽蚌埠 233010)

**摘要:**针对 300 m<sup>3</sup> L-赖氨酸发酵罐搅拌器不能满足发酵工艺传质混合要求的实际情况, 提出改造方案, 并采用 CFD 软件对改造前后搅拌效果进行了数值模拟, 模拟结果显示改造后的搅拌器强化了混合效果, 改善了气液传质。改造后经过 46 批发酵实验, L-赖氨酸的糖酸转化率相比未改造发酵罐高 2%, 且产量更稳定。最后提出搅拌器继续改造的方向。

**关键词:** L-赖氨酸; 搅拌器; 发酵; 改造; 混合; 传质; 溶氧

中图分类号: TQ051.72; Q815

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)09-0083-03

## Innovation of stirrer in L-lysine fermentor

HONG Hou-sheng<sup>1</sup>, LUO Wei<sup>1</sup>, GUO Cui<sup>2</sup>, LI Dong-dong<sup>2</sup>, ZHANG Qing-wen<sup>1</sup>

(1. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Anhui BBCA Biochemical Co., Ltd., Bengbu 233010, China)

**Abstract:** In consideration of the unsatisfactory mass transfer and mixing effect of the stirrer in L-lysine fermentor with capacity of 300 m<sup>3</sup>, the renovation program is put forward and CFD software is used for simulating the stirring effect, the simulation results show that after renovation, the mixing effect is enhanced, the gas-liquid mass transfer is improved. And the 46 batch fermentation results after renovation show L-lysine acid conversion rate of sugar is 2% higher than that of before, and the yield is more stable. Finally, the next renovation direction of the stirrer is put forward.

**Key words:** L-lysine; stirrer; fermentation; renovation; mixing; mass transfer; dissolved oxygen

发酵罐是 L-赖氨酸生产的关键设备, 其搅拌器传质混合性能的好坏直接影响到 L-赖氨酸的产酸率和糖酸转化率。L-赖氨酸发酵属于好氧发酵, 赖氨酸生产要求有较高的溶解氧和快速的物料混合, 这些均要靠高效的搅拌器来完成<sup>[1]</sup>。发酵罐中搅拌器主要起气液分散与液液混合的作用, 气液分散加快了空气中氧在发酵液中的溶解速率; 液液混合加快了溶解氧和营养物质向细胞表面输送, 并有助于代谢产物的快速排出和扩散。不同类型搅拌器产生的混合效果不同, 目前 L-赖氨酸发酵罐搅拌器多采用径向搅拌器和轴向搅拌器相结合的组合搅拌器, 其特点为: 混合效果好, 气液传质速率高, 且比以往采用的径向组合搅拌器更节能。本文中就对安徽丰原生物化学股份有限公司(简称安徽丰原生化) L-赖氨酸发酵罐所存在的问题进行分析, 并且对其搅拌器进行改造, 取得了较好的效果。

## 1 发酵罐基本情况及改造的原因

安徽丰原生化赖氨酸生产能力为 6 万 t/a, 发酵罐为高径比大于 3:1、容积 300 m<sup>3</sup> 的机械搅拌罐, 封头为椭圆封头, 底部装有环型气体分布器, 搅拌电机额定功率 250 kW, 可通过变频器调转速, 在发酵的不同阶段根据溶氧水平对搅拌转速进行调整, 平均

转速在 120 r/min 左右, 搅拌电流 340A, 罐内装有循环水冷却盘管兼作挡板, 采用的 4 档搅拌器见图 1。

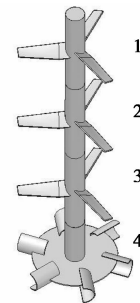


图 1 改造前搅拌器示意图

改造前所采用的搅拌桨为比较常见的搅拌桨组合, 该组合优点为搅拌产生的整体流动性好, 液相混合效率较高, 能耗较少(远小于电机额定功率 250 kW)。但是生产数据表明, 采用此发酵罐进行发酵, 存在着发酵产量不稳定, 且容易出现缺氧现象。下面就改造前的搅拌桨组合所存在的问题进行分析:

(1) 在 4 档搅拌桨中, 仅有第 4 档搅拌具有比较强的气液分散能力, 1~3 档搅拌均属于轴流桨, 径向作用弱, 局部湍动程度小, 气液相间传质系数低。这样的布局可能造成罐体上部气泡直径大, 体积传质系数小, 在发酵过程中表现为溶氧不足。

(2) 发酵罐的高径比大, 气泡上升路径长, 气泡

在上升过程中出现聚并的可能性大,且位于上部的1、2档轴流桨的剪切作用有限,无法破碎气泡,从而影响气液相界面面积 $a$ ,使体积传质系数 $k_L a$ 比较小;且三窄叶轴流桨泵液量有限,无法延长气泡在液体中的停留时间。

所以从整体上看,改造前罐内混合不够强烈,气相传质速率较低,在发酵过程中无法满足好氧菌对氧的需求;且全罐溶氧分布不均匀,从而影响溶氧电极对全罐溶氧的监测,造成对溶氧的反馈调节不够准确,影响赖氨酸的产量和稳定。

## 2 改造方案

### 2.1 搅拌器改造及理由分析

针对改造前搅拌器存在的混合强度不够、气液相间传质慢等问题,且电机功率有较多余量,作如下改造,改造后搅拌器结构如图2所示。

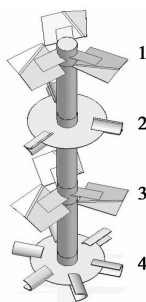


图2 改造后搅拌器示意图

替换1、3档三窄叶轴流桨为三宽折叶轴流桨,加强液体泵送能力,延长气泡在液体中停留时间,增加剪切作用。替换第2档的三窄叶轴流桨为三箭叶圆盘涡轮,大幅度增加其附近剪切速率,破碎上浮过程中聚并的气泡,加快发酵罐上部的溶氧速率,且搅拌器加工成直径可调桨,为后续搅拌器直径优化工作留有余地。

### 2.2 搅拌器改造前后气液两相流动的数值模拟

为了预测此方案搅拌器的混合性能、功率消耗等,采用CFD(计算流体力学)软件ANSYS CFX 10.0对改造前后气液两相流动进行了数值模拟,以便对搅拌器的混合性能有更好的考察。

#### 2.2.1 数值模拟主要参数设置

尾涡现象是机械搅拌反应器气液两相流模拟的1个显著特征,它影响到搅拌桨对气体的俘获与扩散<sup>[2]</sup>,本文中采用多重参考系法解决搅拌器旋转与尾涡的问题<sup>[3]</sup>;湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,虽然这种模型在非严格的各向同性的涡流中有局限性<sup>[4]</sup>,但尚无研究表明其他湍流模型模拟结果更

好。在模拟开始前,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。

数值模拟中的参数设置尽量与生产中的相同。改造前搅拌转速为120 r/min,1~3档搅拌器直径均为1600 mm,第4档搅拌器直径为1450 mm。改造后搅拌转速设置为112 r/min,1、3档搅拌器直径为1550 mm,2、4档搅拌器直径为1500 mm,表通气量为40 m<sup>3</sup>/min。

#### 2.2.2 速度等值线分布图

桨叶改造前后竖直平面上速度等值线分布图如图3所示。

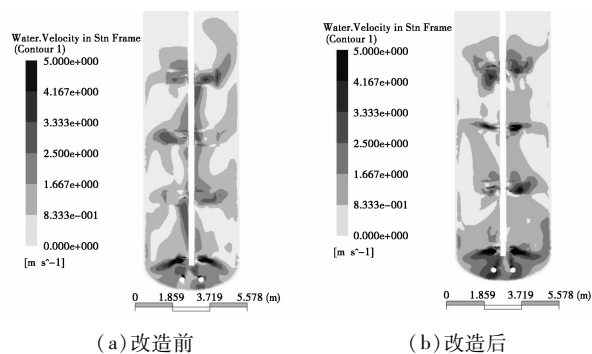


图3 竖直平面上速度等值线分布图

由图3可知,从整体上看改造前后流速差别不大,仅在局部有差别,图3(b)中第1至2档搅拌器间流动稍差,这是因为第2档搅拌器改为箭叶后加强了径向流动与剪切作用,减小了轴向流动,从而减小了循环流动的规律性;图3(b)中显示出改造后罐底流动更快,这是桨径增大的结果。

#### 2.2.3 剪应变速率分布图

图4中(a)和(b)分别为桨叶改造前后液体剪应变速率分布图。

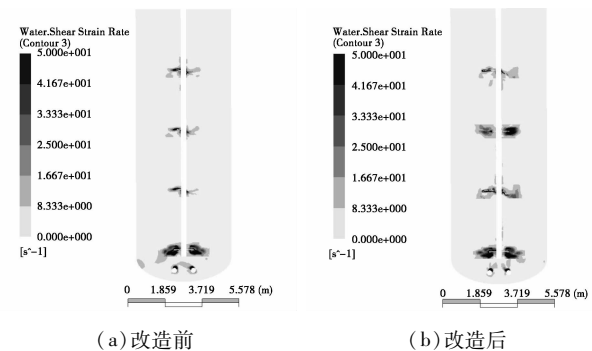


图4 竖直平面上剪应变速率分布图

图4能反映出搅拌器对液体的剪切能力大小,而剪应变速率是影响气泡直径的重要因素。从图4中可以看出,改造后第1、3档搅拌的剪切效果有所加强,第2档搅拌剪切效果明显加强,第4档搅拌

变化不大,这和预想的效果比较吻合,所以可以推断改造后罐体内气泡平均直径更小。

2.2.4 气含率分布图

图5为桨叶改造前后气含率的分布图。

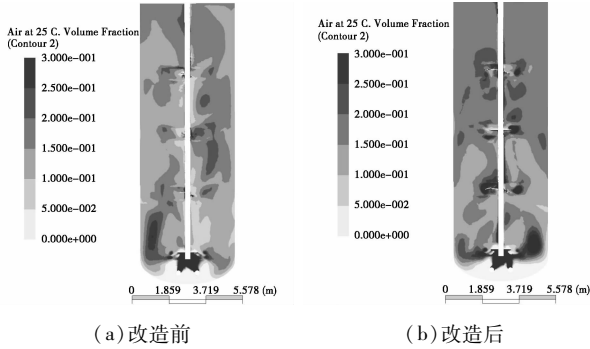


图5 竖直平面上气含率分布图

通过图5(a)、(b)的颜色深浅对比,可以看出改造后气含率更高、更均匀,特别是改善了罐体上部的气含率水平。通过CFD计算改造前全罐平均气含率为14.49%,改造后的平均气含率为16.22%,提高约12%。气含率和气泡大小是表征搅拌罐内气液分散特性的2个重要参数,它们决定了体系的相界面面积<sup>[5]</sup>。根据模拟结果,改造后气含率更高,气泡直径更小,其相界面面积*a*一定增大,所以根据模拟结果来看,改造后的效果比较好。

2.2.5 搅拌功率

表1为改造前后搅拌功率的相关数据。

表1 通过数值模拟得到的改造前后搅拌功率的相关数据

搅拌器序号 (由上至下)	直径/ mm	扭矩/ N·m	功耗/ kW	功率百 分比/%	功率 准数
改造前					
1	1600	1229.80	15.45	8.62	0.22
2	1600	1253.95	15.75	8.79	0.23
3	1600	1175.79	14.77	8.24	0.21
4	1450	10605.89	133.21	74.35	3.28
总和	—	14265.43	179.17	100.00	—
改造后					
1	1550	1528.43	17.92	8.05	0.39
2	1500	5040.66	59.09	26.54	1.53
3	1550	1584.35	18.57	8.34	0.42
4	1500	10566.80	123.87	55.64	3.34
总和	—	18990.24	222.62	100.00	—

其中各个桨的扭矩*M*通过软件中功能计算器求出,然后通过公式(1)计算搅拌功率,进而通过式(2)求得各个桨的功率准数,其中流体密度*ρ*为通气状态下流体的密度,也是通过软件计算得出。

$$P = 2\pi \cdot N \cdot M \tag{1}$$

$$N_p = \frac{P}{N^3 D^5 \rho} \tag{2}$$

式(1)和式(2)中:*P*为搅拌功率(kW);*N*为搅拌转速(r/s);*M*为扭矩(N·m);*N<sub>p</sub>*为功率准数;*D*为搅拌器直径(m);*ρ*为搅拌器周围流体密度(kg/m<sup>3</sup>)。

通过表1中数据可知,在改造后功率消耗有较大提高,但仍小于250kW,增加的功耗主要来自三箭叶圆盘涡轮。改造前第4档搅拌功耗占总功耗的74.35%,所占比例过高,而造成罐体下部的湍动强烈,而罐体上部所接收到的功率不足,改造后增加功率向罐体上部液体的分配,使功率分配更合理。从功率准数上看,模拟的精度较高,同种搅拌器在不同转速、不同直径条件下求得的功率准数相差不大。

3 改造后发酵结果与讨论

3.1 改造后发酵生产结果

搅拌器改造后,经过近4个月的发酵生产实验,共得到46批数据。对发酵数据进行分析,改造后的平均酸度和单罐产量略高于其他罐,糖酸转化率较其他罐高近2个百分点。从发酵过程来看,改造后的发酵罐溶氧一直较好,而其他罐发酵过程中都不同程度有溶氧较低的现象,这对发酵后期氮和糖的利用都有较大的影响,这也是其他罐转化率低的主要原因。经过计算改造后L-赖氨酸生产成本较未改造的发酵罐低90元/t左右,具有一定优势。

3.2 改造前后搅拌器功率

改造后转速为112 r/min左右,搅拌功率约为215kW,小于250kW的额定功率,这与前面通过CFD数值模拟求得的功率222kW比较吻合,相对误差为3.5%,说明CFD数值模拟在功率模拟方面比较可靠,而且可以得到总功率在各个桨上的分配情况,从而计算出各个桨的功率准数,为下一步通过功率准数优化桨径提供了相对可靠的数据。

4 结语

在相同工艺条件下,经过改造后的发酵罐转化率比同期其他罐高,证明改造后的搅拌系统确实改善了罐内容氧,加强了混合效果,而其他罐的转化率也有提升的空间。改造后发酵罐产量稳定,说明改造后罐内液液混合与气液传质效果好,特别是全罐局部差异较小,这样溶氧电极与其他数据采样点能更准确地反映真实值,使得反馈调节更有效,发酵水平更稳定。此外,溶氧的改善使罐中溶氧相对远离赖氨酸的临界溶氧,减少了因缺氧而造成的损失。

(下转第87页)

生产的助剂和清洗剂;甲基氯仿:主要用作清洗剂;甲基溴:主要在农业种植、粮食仓储或商品检疫中用作杀虫剂;含氢氯氟烃:主要用作制冷剂、清洗剂和发泡剂。其臭氧消耗潜能(ODP)值和全球变暖潜能(GWP)值如表1所示。

表1 福建省生产和消费的受控 ODS 清单

ODS	分子式	ODP 值 <sup>[9]</sup>	GWP 值(100年) <sup>[10]</sup>
CFC-11	CFCl <sub>3</sub>	1.000	4000
CFC-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1.000	8500
CFC-113	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	0.800	5000
哈龙 1211	CF <sub>2</sub> BrCl	3.000	1300
哈龙 1301	CF <sub>3</sub> Br	10.000	5600
CFC-13	CF <sub>3</sub> Cl	1.000	11700
四氯化碳(CTC)	CCl <sub>4</sub>	1.100	1400
1,1,1-三氯乙烷 (甲基氯仿、TCA)	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	0.100	140
HCFC-22	CHF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0.055	1700
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CFCl <sub>2</sub>	0.110	630
甲基溴	CH <sub>3</sub> Br	0.120	

根据《议定书》与我国《消耗臭氧层物质逐步淘汰国家方案》制定的淘汰计划,不同行业淘汰 ODS 的时间也各不相同。因此,根据不同年份调研不同行业 ODS 生产或消费量。其中,福建省相关行业生产或消费 ODS 的数据如表2所示。

表2 福建省 ODS 生产或消费量<sup>①</sup>

行业	ODS 名称	生产或消费量/t	ODP 值/t	年份
消防	哈龙 1211	150.00	450.000	2000
化工	CFC-11、CFC-12	1159.40	1159.400	2005
汽车空调	HCFC-22	1600.00	88.000	2005

(上接第85页)

为了加强罐内混合强度、加快气液相间传质,改造中多采用了高泵液量、高剪切搅拌器,虽然改善了全罐溶氧水平,发酵产酸量和糖酸转化率得到提高,但是搅拌桨的功率准数增大较多,功耗增加较大。下一步的工作为搅拌器的优化:在保持现有传质混合效果的同时尽可能减小搅拌功率;调节搅拌直径使电机功率在各个桨上的分配为最佳。

## 参考文献

[1] 龙万凯. 我国赖氨酸工业技术新进展[J]. 化学工程, 2003, 31

清洗	CFC-113	146.40	117.120	2005
	TCA	111.80	11.180	2005
泡沫	HCFC-141b	1500.00	165.000	2005
烟草	CFC-11	91.90	91.900	2005
制冷	HCFC-22	294.00	16.170	2005
	HFC-134a	16.00	0	2005
四氯化碳生产及 化工助剂	CTC	57.98	63.778	2005
气雾剂	CFC-12	1220.00	1220.000	2005
ODS 销售	HCFC-22	20.00	1.100	2005
	HCFC-141b	10.00	1.100	2005
合计		6377.48	3384.748	

注:①数据来源于福建省消耗臭氧层物质 ODS 生产与使用现状调研报告。

## 2 排放及其对温室效应的贡献

GWP 从分子角度评价温室气体,包括分子吸收与保持热量的能力,以及能在自然环境中存在多久而不被破坏或分解,因此,在衡量温室气体作用强弱的许多方法中,GWP 值最具参考价值。由表1可知,CFC 类物质的 GWP 值均在 4 000 以上,其他类 ODS 物质也都有很高的 GWP 值。考虑到它们对温室气体效应的重要作用,淘汰 ODS 实际也是在削减温室气体排放。

为具体评价 ODS 排放及其对温室气体效应的贡献,按各行业 ODS 的消费和排放特点,估算所排放的 ODS 量及其所带来的 GWP 值<sup>[11]</sup>。对于制冷、哈龙行业由于 ODS 释放比较缓慢,充分考虑了 2000 年以来的各物质的消费数据。其中,假设用于清洗剂的 ODS、化工行业生产和消费的 ODS、烟草行业消费的 ODS 都是在消费的当年完全释放到大气中;

(5):74-78.

- [2] 李波,张庆文,洪厚胜,等. 搅拌反应器中计算流体力学数值模拟的影响因素研究进展[J]. 化工进展,2009,12(1):7-12.
- [3] Wechsler K, Breuer M, Durst F. Steady and unsteady computations of turbulent flows induced by a 4/45° pitched-blade impeller[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1999, 121(2):318-329.
- [4] Wu H, Patterson G K, Doorn M. Distribution of turbulence energy dissipation rates in a rushton turbine stirred mixer[J]. Experiments in Fluids, 1989, 8(3/4):153-160.
- [5] 王凯,虞军,等. 搅拌设备[M]. 北京:化学工业出版社,2003:121.
- [6] 张谦,许志美. 化学反应器分析[M]. 上海:华东理工大学出版社,2005:66. ■