

外环流式发酵罐用于玉米生料酒精发酵的研究

石贵阳^{a,b}, 马文超^a, 张 梁^a, 章克昌^{a,b}

(江南大学 a. 生物工程学院 生物资源研究室; b. 工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214036)

[摘 要] 对玉米粉悬浮液沉降情况的研究表明, 沉降界面初始沉降速度随初始浓度的增加而减小。对外环流式发酵罐用于玉米生料酒精发酵进行研究, 结果表明, 起始阶段, 玉米粉悬浮液要在外环流式发酵罐中完成强制回流循环, 必然存在一个最小回流量 Q ; 通过恒流泵强制发酵醪循环可以显著缓解原料沉淀造成的不利影响, 有利于发酵罐中的传质; 发酵 20 h, 强制循环发酵液中酵母细胞出芽率较自然发酵提高 84.8%, 死亡率降低 100%, 发酵 70 h 时酒精度提高 11.5%; 采用外环流式发酵罐进行玉米生料发酵酒精时, 较大的高径比对发酵有利。

[关键词] 玉米生料; 酒精发酵; 强制循环; 外环流式发酵罐

[中图分类号] TS262.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)11-0073-05

生料酒精发酵采用边糖化边发酵的工艺, 由于原料不经蒸煮和预先糖化, 直接在 30℃ 发酵, 不需要蒸煮设备、糖化设备以及相关的附属配套设备, 大大节约了基建和设备投资, 在整个生产过程中省去了蒸煮和糖化, 节约了动力、人力、水和维修等方面的消耗, 极大的降低了生产成本。因此, 生料酒精发酵一直受到广泛关注。但其存在的一大难题是发酵初期原料沉积造成罐内死层。若以玉米粉为原料进行生料发酵酒精, 在发酵开始阶段, 发酵罐内由水、糖化酶、酵母、玉米粉构成了一个庞杂的悬浮液体系, 在 30℃ 发酵温度下, 玉米粉和水的亲和性极差, 玉米粉颗粒吸水后开始沉降, 发酵醪明显分层, 上部为溶解有糖化酶的清液, 下部为玉米粉颗粒, 将不利于糖化的进行, 从而不能为酵母提供充足的营养, 使主发酵期迟滞。其结果是生料发酵酒精染菌的危险性进一步加大, 严重影响发酵效率。针对这一情况, 若在发酵罐内安装搅拌设备, 一方面搅拌的能耗极大, 另一方面, 酒精发酵采用的是大罐发酵, 而在大型发酵罐内通过搅拌来实现原料的混合, 在技术上有很大难度。

若采用外环流式发酵罐, 通过恒流泵强制发酵醪完成循环, 其优点是: 发酵开始时糖化酶与玉米粉颗粒接触比较充分, 保证糖化顺利进行, 缩短了静止期; 进入主发酵期后, 液体的湍动增大, 促使 CO_2 气泡及时脱离细胞表面, 加速酒精向发酵醪主流的扩

散以及葡萄糖向细胞的扩散, 延缓细胞衰老, 保持较强的发酵能力, 同时减轻糖化酶的抑制作用。另外, 还可以对发酵罐方便的采用罐外冷却^[1,2]。因此, 本研究对玉米粉和水构成悬浮液的沉降情况进行测定, 对外环流式发酵罐用于生料发酵酒精的可能性进行了探讨, 并初步验证了外环流式发酵罐用于生料发酵酒精的真实效果, 以为外环流式发酵罐用于玉米生料酒精发酵提供了理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

过 0.95 mm 筛的玉米粉, 由江苏无锡中盛饲料有限公司提供; 120 000 U/g 糖化酶, 由日本 Nagase chemtex 株式会社生产; BT00-300M 型恒流泵, 河北保定兰格恒流泵公司生产; 玻璃转子流量计, 河南郑州现代测控技术有限公司制造; JL-1166 型激光粒度分布测定仪, 四川成都精新粉体测试设备有限公司生产; NDJ-1 旋转粘度计, 上海天平仪器厂生产。

1.2 试验流程与试验方法

1.2.1 外环流式发酵装置 本试验采用的外环流式装置如图 1 所示。发酵罐柱体高 50 cm, 直径 8 cm, 倾角 120°, 由有机玻璃制成, 透明, 便于对实验过程进行观察。在发酵罐的一侧等距离分布着若干取样口, 可用来检测轴向的浓度。

[收稿日期] 2005-07-01

[基金项目] 国家科技部“十五”攻关项目(2001BA501A01)

[作者简介] 石贵阳(1963—), 男, 浙江新昌人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事再生资源生物转化工程及酶技术研究。
E-mail: gyshi@sytu.edu.cn

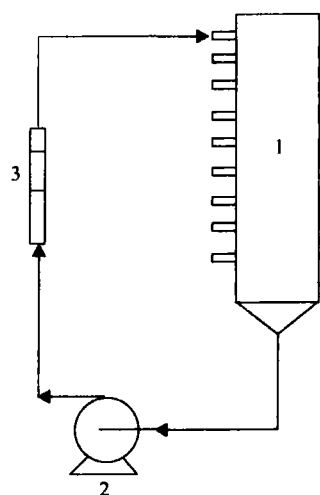


图 1 强制发酵液循环的外环流式发酵装置图
1. 2. 1. 发酵罐; 2. 恒流泵; 3. 转子流量计

Fig. 1 Equipment for compulsory circulation of fermented broth

1. 2. 1. Fermentator; 2. Pump; 3. Rotor flowmeter

1. 2. 2 玉米粉悬浮液沉降界面初始沉降速度的测定 在发酵开始时充分搅拌,使发酵罐中玉米粉悬

浮液的浓度上下一致,然后绘出玉米粉悬浮液沉降界面高度与时间的变化曲线,由该曲线求出沉降界面初始沉降速度^[3,4]。

1. 2. 3 外环流式发酵罐酒精发酵实验流程与方法

外环流式发酵罐酒精发酵的具体流程为:发酵醪由罐底抽出,经恒流泵送至罐上部再返回罐内,达到发酵醪强制循环的目的。玉米粉经调浆,糖化酶添加量 100 U/g,活性干酵母接种量 0.3% (质量分数), 30 °C 下进行如下发酵试验:①发酵醪处于自然沉降状态,无循环;②以 0.5, 10, 15, 20 mL/min 等循环量强制发酵醪循环到发酵结束。

2 结果与分析

2. 1 过 0.95 mm 筛玉米粉颗粒粒度的分布

固体颗粒的大小是影响悬浮液中颗粒沉降速度的重要因素。从图 2 可以看出,过 0.95 mm 筛的玉米粉颗粒直径分布跨度较大,为 0~2 000 μm,但以 10~100 和 210~400 μm 两个区段分布较多,占颗粒体积总数的 50% 以上。

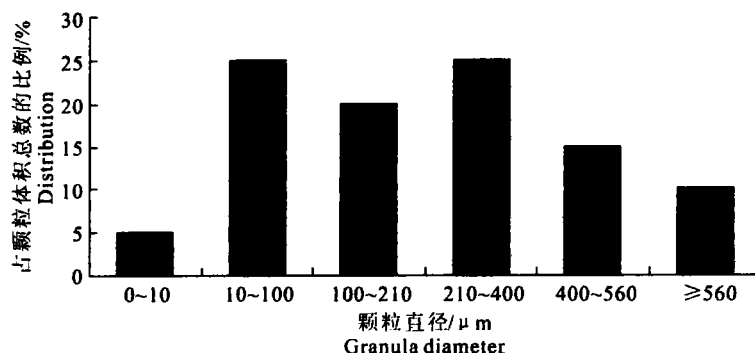


图 2 过 0.95 mm 筛玉米粉颗粒粒度的分布

Fig. 2 Particle size distribution of corn flour granule

2. 2 玉米粉悬浮液黏度与其质量浓度的关系

黏度是影响悬浮液输送和悬浮液中固体颗粒沉降的重要因素。由图 3 可见,在 30 °C 条件下,随着玉米粉质量浓度的增加,悬浮液的黏度逐渐升高,当玉米粉添加量达到 530 g/L 以上时,即玉米粉和水的质量比为 1:1.2 以上时,黏度迅速上升,悬浮液流动性丧失而成饼状。表明在玉米粉添加量达到 530 g/L 后,玉米粉沉降占主流,使得整个系统的平衡状态被破坏。

2. 3 玉米粉悬浮液沉降界面的初始沉降速度

在生料发酵生产酒精的初始阶段,若不采取搅拌措施,玉米粉颗粒将沉降堆积在罐底,发酵液明显

分为两层。因此,本试验不涉及单个玉米粉颗粒的沉降速度(颗粒相对于流体的速度),而侧重于悬浮液中固体颗粒整体的宏观沉降速度,即悬浮液界面相对于筒体的移动速度(也称为颗粒的表观沉降速度)。在图 4 中,曲线 1 表示玉米粉和水混和均匀后直接进行沉降试验;曲线 2 表示玉米粉经过 2 h 以上的较长时间浸泡,充分润胀后进行沉降试验。由图 4 可以看出,悬浮液沉降界面的初始沉降速度都随初始浓度的增加而减小,经过充分润胀的玉米粉颗粒的表观沉降速度显著减小。这是因为玉米粉充分吸水后,体积进一步膨胀增大,在沉降过程中受到的浮力也相应增大,故沉降速度减小。因此,在生料发

醇酒精时,若原料用水充分浸泡,对减缓悬浮液的分层分离,提高传质作用有很大帮助。

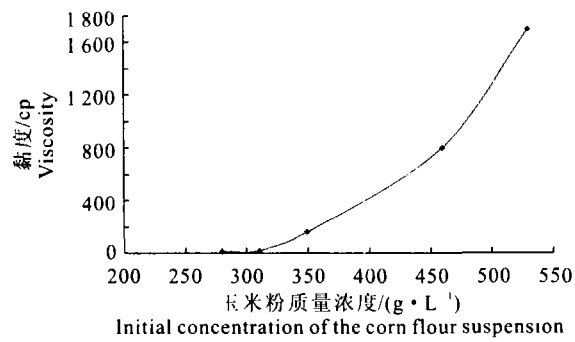


图 3 30 °C 时玉米粉悬浮液黏度与其质量浓度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between viscosity and initial concentration of the corn flour suspension at 30 °C

2.4 外环流式发酵罐的最小回流量 Q

在图 1 所示强制发酵醪全回流试验装置中,玉米粉和 30 °C 水以不同比例混和,充分搅拌均匀后,倒入发酵罐,并使罐温恒定在 30 °C,然后开动恒流泵强制悬浮液进行全回流,通过调节泵的转速,使悬浮液以不同流量进行循环。可以发现,无论玉米粉和水以多大比例混和,都会存在一个临界流量 Q,当流量低于 Q 回流时,回流管会被玉米粉堵塞,不能完成循环,而高于 Q 时循环能顺利进行。而且临界流量 Q 随悬浮液体积以及玉米粉含量的变化而变化。

用恒流泵强制玉米粉悬浮液回流循环近似于一个连续沉降过程,可以把发酵罐底的浓液重新回流到顶部。当经过一定时间运行,整个系统达到稳定平衡状态时,悬浮液明显分为增浓区和沉积区。循环周期越短,即恒流泵的流量越大,玉米粉与水的混和越均匀,罐底的沉积层越薄,沉积层的平均浓度也越小。罐底回流量减小意味着沉积的玉米粉颗粒在罐底滞留的时间更长,将有足够的时间用来压实,这样沉积层最底部的浓度将逐渐增大。由图 3 可知,当悬浮液中玉米粉质量浓度接近或达到某一临界值 C_0 时,由于黏度过大,悬浮液就失去了流动性。因此,当回流量继续减小,使沉积层最底部质量浓度达到 C_0 时,回流循环将被终止。

当玉米粉悬浮液进行全回流,达到某一稳定状态时固相颗粒的实际流速为:

$$U = U_b + U_0, U_b = Q/A. \tag{1}$$

对于固体颗粒而言,其流道截面积为 S (S = A

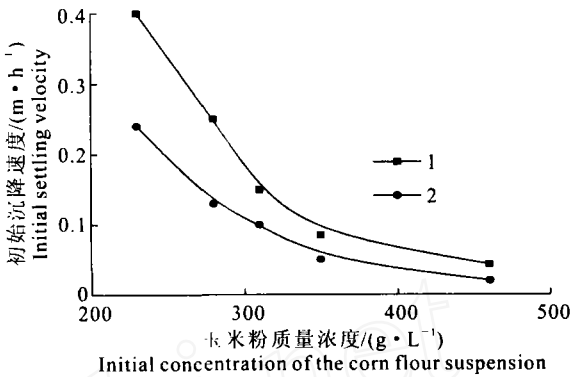


图 4 悬浮液界面初始沉降速度与初始浓度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between Initial settling velocity and initial concentration of the corn flour suspension

• e)。因此,固体颗粒的物料衡算方程为^[5,6]

$$(U_b + U_0) \cdot A \cdot e = Q \cdot C_0. \tag{2}$$

式中, A 为发酵罐柱体的横截面积 (m²); U 为增浓区某一截面 S 上颗粒向下的流速 (m/s); e 为截面 S 上颗粒的体积分数, m³/m³; U₀ 为截面 S 上悬浮液浓度为 e 时颗粒的表观沉降速度 (m/s); U_b 为截面 S 处悬浮液向下的平均流速 (m/s); Q 为悬浮液回流的最小临界流量 (m³/s); C₀ 为沉积层最底部固体颗粒临界浓度 (此时,悬浮液失去流动性), m³/m³。

由式(1)、(2)联立得

$$Q = U_0 \cdot A \cdot e / (C_0 - e). \tag{3}$$

从理论上讲,通过图 3 求出 C₀,通过间歇沉降试验求出 U₀ 与 e 的关系,然后由(3)式估算强制回流循环时的最小临界流量 Q。

需要说明的是,其临界流量 Q 仅仅是根据流体力学原理推导出来的,它是指玉米粉悬浮液这一混和体系,不管是否接入酵母进行酒精发酵,要顺利实现强制回流循环而不堵塞管道,开始时恒流泵必须满足的最小回流量。至于用这种外环流式发酵罐进行酒精发酵时恒流泵以多大的流量回流,要取决于多种因素。首先要考虑节能,其次要考虑进入主发酵期的产热情况,最后根据发酵程度来决定,这些都有待进一步深入研究。

2.5 发酵醪循环量对酒精发酵的影响

在 2 L 发酵罐中,料水比为 1 : 2 条件下,发酵醪以不同循环量强制回流,发酵结果见图 5。

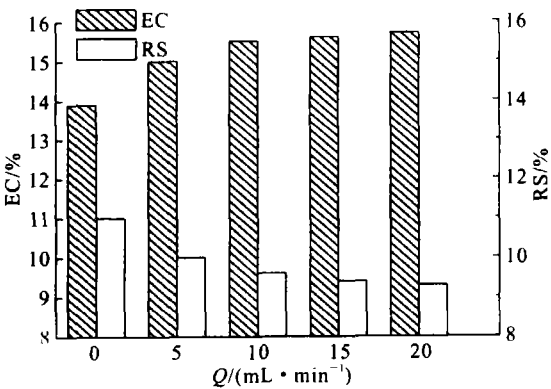


图 5 不同发酵醪循环量对酒精发酵的影响
EC, 发酵 70 h 的酒精度; RS, 发酵 24 h 醪液中总糖含量

Fig. 5 Effect of the different circulation quantity on alcoholic fermentation
EC, Ethanol concentration; RS, Residual sugar

由图 5 可知,强制循环发酵醪的酒精度高于无循环自然流动状态下的发酵。同时,酒精度随发酵醪循环量增加而增大,当循环量达到某一定值后,再增大循环量对酒精度的提高影响不显著。这是因为循环量达到某一定值后,流体的湍动扩散阻力已不是控制整个发酵过程的重要因素。同时由图 5 还可以看出,在发酵初始阶段,强制循环发酵醪促进了糖化酶对玉米粉颗粒的作用,使糖化作用加快,发酵 24 h 后,醪液中总糖含量明显低于自然流动状态下的总糖含量。而且还可以观察到,在发酵罐中,自然流动状况下发酵 8 h 才会明显有 CO₂ 气泡产生,而在强制循环状态下,仅 5 h 就产生大量的 CO₂ 气泡,使发酵醪形成明显的对流,有利于发酵罐中的传质和传热。在实际应用中一般要求发酵过程起酵快(表现为 24 h 时发酵醪总糖含量低)、发酵结束时酒精度

高、能耗低。综合考虑这 3 个方面因素,结合图 5 数据认为,在本试验条件下,适宜的循环量为 10 mL/min,发酵醪体积为 1 800 mL 时,循环周期约为 3 h。

2.6 发酵罐高径比对生料发酵酒精的影响

在料水比 1 : 2 的固定条件下,改变发酵醪的体积,使发酵醪液面在发酵罐中处于不同的高度,通过调节恒流泵流量使循环周期恒定为 3 h,研究发酵罐高径比对发酵效果的影响,结果如表 1 所示。

表 1 高径比对生料酒精发酵的影响

Table 1 Effect of the ratio of the height vs diameter of fermentor on alcoholic fermentation

高径比 Height vs diameter	淀粉利用率/% Utility ratio of starch
1.5 : 1	87.0
2 : 1	87.2
3 : 1	87.4
4 : 1	87.5

由表 1 可见,高径比对淀粉利用率虽有一定影响,但不十分明显,随着高径比的提高,淀粉利用率有提高的趋势。进入主发酵期后,提高高径比可以增加 CO₂ 气泡的路程,从而增强发酵液的湍流程度。尤其是生料发酵酒精起始阶段,在罐底有大量玉米粉沉积,这对生料发酵显然是有利的。一般而言,酒精发酵罐高径比为 1.5 : 1~6.0 : 1 时,均可取得良好效果。因此本研究认为,生料发酵酒精在综合考虑技术、运行成本的前提下,可以适当提高发酵罐的高径比。

2.7 强制循环发酵醪对酵母细胞生长的影响

为了解强制循环发酵醪对酵母细胞生长状况的影响,对强制循环发酵醪和无循环自然流动两种发酵状况下酵母细胞的生长状况进行了比较试验,结果见表 2。

表 2 强制循环发酵液对酵母细胞的影响

Table 2 Effect of compulsory circulation fermented broth on cell

发酵时间/h Fermentation time	细胞数/(亿·mL ⁻¹) Cell amount		出芽率/% Multiplication rate		死亡率/% Death rate	
	强制循环 Compulsory circulation	自然状态 No circulation	强制循环 Compulsory circulation	自然状态 No circulation	强制循环 Compulsory circulation	自然状态 No circulation
10	1.41	1.21	16.0	14.5	0.3	0.5
15	1.71	1.45	13.5	9.0	0.2	0.7
20	1.78	1.42	14.6	7.9	0.4	0.8
25	1.69	1.31	8.9	3.2	0.9	1.3
55	1.28	1.0	2.0	0	5.0	7.4

注:试验中拌料料水比为 1 : 2。 Note: Material vs water in the experimentation = 1 : 2.

由表 2 可知,强制循环发酵醪改善了酵母细胞的生长状况,细胞数、细胞出芽率、细胞死亡率 3 个指标均优于自然流动发酵,酵母细胞生长的旺盛期延长,具有更强的发酵能力,这是强制循环发酵醪使

发酵效率提高的一个重要原因。

总之,前述实验结果表明,采用外环流式发酵罐进行生料发酵酒精,能有效缓解发酵起始阶段原料沉淀造成的不利影响,提高发酵效率。因此,外环流式发酵罐用于玉米生料发酵酒精是可行的。

3 讨 论

本研究首次考察了外环流式发酵罐应用于生料酒精发酵的可行性,通过恒流泵强制发酵液完成循环,使糖化酶与玉米粉颗粒较充分接触,糖化顺利进行,缩短了静止期;主发酵期后,增大液体的湍动,促使 CO_2 气泡及时脱离细胞表面,加速酒精向发酵液主流的扩散以及葡萄糖向酵母细胞的扩散;发酵过程中,提高酵母活力,缩短发酵时间。结果表明:

(1)玉米粉悬浮液沉降界面初始沉降速度都随悬浮液初始浓度的增加而减小,经过充分润胀的玉米粉颗粒的表观沉降速度显著减小。

(2)玉米粉悬浮液要在外环流式发酵罐中完成强制循环必然存在一个最小回流量 Q 。

(3)采用外环流式发酵罐进行酒精发酵,强制发酵循环,有利于发酵罐中的传质,改善了酵母细胞的生长状况(20 h 时发酵液中酵母细胞出芽率较自然发酵提高 84.8%,死亡率降低 100%),提高了发酵效率(发酵 70 h 时酒精度提高 11.5%),外环流式发酵罐用于玉米生料发酵酒精是可行的。

(4)采用外环流式发酵罐进行生料发酵酒精,适当提高发酵罐的高径比有利于发酵。

[参考文献]

- [1] 冯学愚. 强制循环发酵液的酒精发酵研究[J]. 四川轻化工学院学报, 1994, 7(3): 8-10.
- [2] 杨 瑞, 冯学愚. 强制循环发酵液罐外冷却的酒精发酵[J]. 四川轻化工学院学报, 1995, 8(1): 8-11.
- [3] 康 勇. 化学絮凝及凝聚浆体沉降-沉积特性的研究[J]. 矿山冶金, 1995, 4(2): 23-29.
- [4] 赵亮富, 赵玉龙. 宽粒度分布的细颗粒沉降[J]. 化学反应工程与工艺, 1997, 13(3): 304-308.
- [5] 卢寿慈. 工业悬浮液[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 将维钧, 戴猷元, 顾惠君. 化工原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Study on alcoholic fermentation with uncooked corn flour in external circumfluent fermentor

SHI Gui-yang^{a,b}, MA Wen-chao^a, ZHANG Liang^a, ZHANG Ke-chang^{a,b}

(^a Lab of Biomass Resources, School of Biotechnology, ^b The Key Laboratory of Industry Biotechnology,
Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214036, China)

Abstract: In the alcoholic fermentation with external circumfluent fermentor, the sediment of raw corn flour was studied. The results indicated that the initial settling velocity decreased with the increase of initial concentration. It also proved that a smallest circulation flux existed for corn flour suspension to fulfill compulsory circulation. Compulsory circulating fermentation promoted the process of transferring mass, the multiplication rate of the yeast cell was increased by 84.8%, the death rate of that was decreased by 100% after 20 hours' fermentation, and the ethanol concentration at 70 h was increased by 11.5% compared with none circulating fermentation. Additionally, the fermentor with the bigger ratio of height to diameter contributed to alcoholic fermentation with uncooked corn flour.

Key words: uncooked corn flour; alcoholic fermentation; compulsory circulation; external circumfluent fermentor