

提高发酵过程乙醇分离效率的新型反应器

刘 振, 张立峰, 曾爱武, 袁希钢

(天津大学化工学院 化学工程联合国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:设计了一种新型的带侧臂循环的气升式反应器, 该反应器可以有效地把真空闪蒸发酵和汽提发酵 2 项技术结合起来。实验结果表明, 与单独的汽提和闪蒸过程相比, 利用此反应器进行同步汽提闪蒸操作, 大大提高了乙醇的移出效率, 从而进一步提高了发酵强度。

关键词:气升式反应器; 乙醇发酵; 汽提; 真空闪蒸

中图分类号: TQ052

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2005)02-0054-03

A novel bioreactor for improving separation efficiency of ethanol in fermentation process

LIU Zhen, ZHANG Li-feng, ZENG Ai-wu, YUAN Xi-gang

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel air-lift bioreactor with a side arm loop is designed, which combines vacuum flash fermentation with gas stripping fermentation. The structure and the process of the bioreactor are introduced. Compared with the steam stripping or the flash fermentation, the gas stripping-flash coupling process with the bioreactor can improve the ethanol productivity with the ethanol removal increased greatly, and furthermore the fermentation intensity enhanced.

Key words: air-lift bioreactors; ethanol fermentation; gas stripping; vacuum flash

发酵技术及相应的反应器设计是生化工程研究的重点。近年来, 由于能源危机和环保等方面的压力, 乙醇作为未来替代能源之一受到各国的重视。

乙醇发酵过程是典型的产物抑制过程, 如何提高其生产效率成为研究的热点。为此, 各国学者提出了真空发酵^[1-2]、汽提发酵^[3-4]、萃取发酵^[5-6]、渗透气法^[7-8]等方法, 在发酵的过程中同时分离乙醇, 通过减少产物抑制来提高发酵强度。

人们对真空发酵研究的比较早, 发酵强度高是它的优势, 但是由于维持真空的能耗很高, 而且发酵过程需要向发酵罐不断补充氧气, 以满足细胞生长的需要, 因而不利于大规模生产。

闪蒸发酵过程是将发酵醪液在发酵罐与闪蒸罐之间循环, 它既满足了常压下发酵的条件, 又可以使乙醇在闪蒸罐中不断移出。

汽提发酵由于和闪蒸发酵一样具有操作简单、对发酵醪液影响小的优点, 并且汽提发酵能够利用发酵的副产物 CO₂, 也被认为具有很好的工业应用前景。但汽提发酵乙醇的移出效率较低, 并受空气压缩机能力的制约。对于具有典型的产物抑制效应的乙醇发酵过程, 其发酵强度除了受到菌种自身发

酵能力的影响外, 还受乙醇移出效率的影响。乙醇的移出效率高, 可以更有效地减少产物抑制, 保持较高的发酵强度。笔者设计了一种带侧臂循环的气升式反应器, 该反应器把汽提发酵和闪蒸发酵结合起来, 既保持了二者的优点, 又进一步提高了乙醇的移出效率。

1 反应器结构

目前, 发酵罐主要分为搅拌式和气升式两大类。乙醇发酵主要使用前者, 后者目前被用于汽提发酵的研究。直接把普通的气升式反应器与闪蒸罐串连起来, 进行同步汽提和闪蒸, 会出现气体短路现象, 大量 CO₂ 会进入闪蒸罐, 使得耦合过程不能顺利进行, 乙醇的移出效率反而下降。

笔者设计的带侧臂的气升式反应器是在普通气升式反应器的基础上增加了 1 个侧臂: 一方面促进了液体的循环, 有利于传质; 另一方面可起到脱气的作用。气泡虽然会随液体循环从上方进入侧臂, 但因受到浮力作用会立即上升。由于液体向下循环, 在侧臂的下口处会产生动压力, 气泡也不容易逆流进入侧臂, 这样将液体从侧臂引入闪蒸罐, 就避免出

收稿日期: 2004-10-20; 修回日期: 2004-11-19

作者简介: 刘振(1977-), 男, 博士生, 从事化工与生化工程的研究; 曾爱武(1967-), 男, 博士, 副教授, 从事精馏过程及计算流体力学的研究, 通讯联系人, awzeng@tju.edu.cn。

现气体短路的问题。另外液体沿侧臂循环,有利于提高溶氧能力,这对于保持细胞活性很重要。但侧臂并非越长越好,如果变成完全的环流反应器,虽然能解决脱气问题,但会出现液体混合不均、菌体容易在侧臂循环积累而出现死角及不易清洗等现象。笔者设计的气升式反应器侧臂长度为主体高度的一半,在实验的工况条件下脱气效果良好,结构如图1所示。

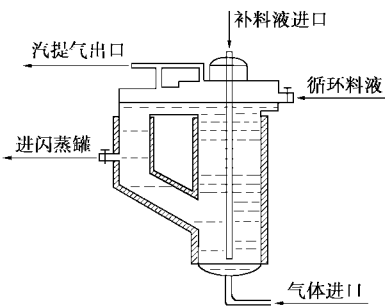
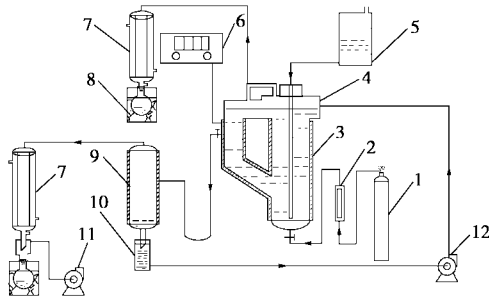


图1 带侧臂循环的气升式反应器结构

2 实验方法及结果分析

2.1 实验方法

为考察带侧臂循环的气升式反应器应用前景,笔者利用乙醇-水系统,比较了同步闪蒸汽提耦合过程与单独闪蒸、单独汽提过程乙醇移出效率的差异,实验装置流程见图2。



1—CO₂气瓶;2—转子流量计;3—保温加热带;4—发酵罐;
5—补料罐;6—控温仪表;7—冷凝器;8—冰水浴;9—闪蒸罐;
10—缓冲罐;11—真空泵;12—电子蠕动泵

图2 实验流程示意图

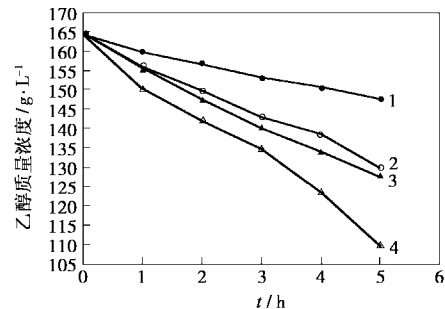
反应器有效体积为2.2 L,液体从侧臂出口进入闪蒸罐,气相作为产品收集,液相通过蠕动泵返回反应器。为防止实验过程由于产物移出造成发酵罐中液体减少,通过补水来保持液面高度。反应器及闪蒸罐外部均缠有加热带,并利用热电偶智能控温仪控温,保持温度恒定。汽提气量通过转子流量计控制。汽提和闪蒸产品经冷却后收集,冷凝液温度在

-10℃左右。闪蒸罐压力维持在6.4 kPa左右,进口流速为20.1 mL/min。每小时取样检测反应器及汽提、闪蒸产品的浓度,并称量产品质量。乙醇浓度用HP4890D气相色谱仪测量。

2.2 结果分析

2.2.1 汽提闪蒸耦合过程与单独汽提过程的比较

关闭反应器进入闪蒸罐的液体出口阀,同步汽提闪蒸耦合过程就变成单独的汽提过程。图3比较了温度为30℃时,同步汽提闪蒸耦合过程与单独汽提过程反应器中乙醇浓度随时间的变化情况。



1—0.2 m³/h, 无闪蒸;2—0.2 m³/h, 同步闪蒸;
3—0.6 m³/h, 无闪蒸;4—0.6 m³/h, 同步闪蒸

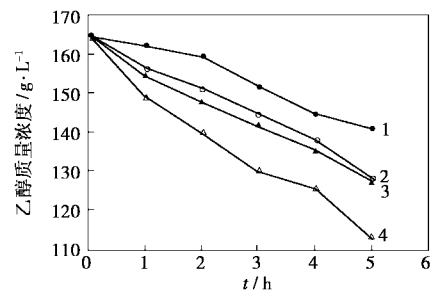
图3 同步汽提闪蒸耦合过程与单独汽提过程比较

由图3可以明显看出,在相同的汽提量下,同步汽提闪蒸耦合过程乙醇的移出速率大大高于单独的汽提过程(高1倍以上)。

2.2.2 汽提闪蒸耦合过程与单独闪蒸过程的比较

闪蒸过程乙醇移出能力与温度和闪蒸压力有关。当通气量为零时,同步汽提闪蒸耦合过程就成为单独的闪蒸过程。

从图4可以看出,在相同的闪蒸操作条件下,同步汽提闪蒸耦合过程明显比单独的闪蒸过程乙醇的移出速率要快。

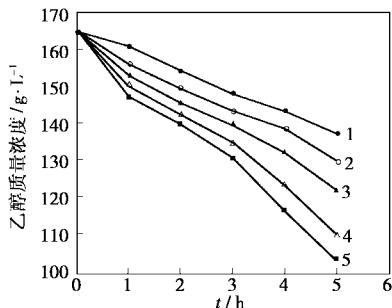


1—通气量为零, 30℃;2—通气量为零, 40℃;3—0.4 m³/h, 30℃;
4—0.4 m³/h, 40℃

图4 不同温度下同步汽提闪蒸耦合过程与单独闪蒸过程比较

图3和图4也说明耦合过程提高了乙醇的移出

效率。图 4、图 5 比较了不同的实验条件下,同步汽提闪蒸耦合过程与单独的闪蒸过程乙醇浓度随时间的变化情况。从图 5 看到,耦合过程乙醇移出效率随着汽提量的增加而增加。



1—通气量为零;2—0.2 m³/h;3—0.4 m³/h;
4—0.6 m³/h;5—0.8 m³/h

图 5 不同汽提量下同步汽提闪蒸耦合过程与单独闪蒸过程的比较

在 35℃ 下,单独的闪蒸过程乙醇的平均移出速率为 5.312 g/(L·h)。当同步通气量为 0.2 m³/h 时,乙醇的平均移出速率增加至 6.863 g/(L·h)。当通气量达到 0.8 m³/h 时,乙醇的平均移出速率达 12.163 g/(L·h)。文献[3]在对汽提发酵的研究中,提出汽提因子 β 的概念,汽提效果由 β 描述:

$$\beta = \frac{CHK_C a}{G + VK_C a}$$

式中: G 为气体体积流量, m³/s; H 为气液平衡常数; K_C 为气相传质系数, m³/(m²·s); V 为液相体积, m³; a 为单位体积液体的传质面积, m²/m³。研究得出,随着 β 的增加,乙醇的发酵强度增大。通过增大通气量、改善混合、增加气液传质面积,会增强汽提效果,从而进一步提高反应器乙醇的移出效率。

以上实验表明,与单独的汽提和闪蒸过程相比,

利用带侧臂循环的气升式反应器进行同步汽提和闪蒸操作,乙醇的移出效率显著增加,并可以进一步提高发酵强度。

另外,从实验得到的汽提和闪蒸产品——乙醇的质量分数都在 40% 以上,大大高于发酵醪的酒精浓度,并可以降低蒸馏能耗,这也是该过程应用到实际生产的优势。但在本实验的冷凝条件下,产品有 10% 左右的损失。而且损失量随着汽提量的增大而略有增加。实际生产中,闪蒸的气相可以直接进入精馏塔。对于汽提产品,如何更经济地回收乙醇也是汽提过程本身需要研究的问题。

3 结语

笔者设计的带侧臂循环的气升式反应器,可以有效地把闪蒸发酵和汽提发酵技术结合起来,集合二者的优点,并强化发酵过程乙醇的移出能力,更有效地解除产物抑制,从而提高发酵强度。加强对同步汽提闪蒸耦合发酵过程研究,进一步优化反应器的结构,必将推动乙醇工业的发展。

参考文献

- [1] Cysewski G R, Wilke C R. [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1977, 19(8): 1125 - 1143.
- [2] 王泽云, 朱浩甲, 张君, 等. [J]. *酿酒*, 2003, 30(2): 65 - 68.
- [3] Liu H S, Hsu H W. [J]. *Chem Eng Sci*, 1990, 45(5): 1289 - 1299.
- [4] 沈文豪, 肖希和, 杭建忠, 等. [J]. *高校化学工程学报*, 2003, 17(2): 166 - 172.
- [5] Christen P, Minier M, Renon H. [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1990, 36(2): 116 - 123.
- [6] 张团伟, 刘秀凤, 朱慧铭, 等. [J]. *现代化工*, 2004, 24(3): 11 - 15.
- [7] Nomura M, Bin T, Nakao S. [J]. *Separation and Purification Technology*, 2002, 27(1): 59 - 66.
- [8] Silva F L H D, Rodrigues M I, Maugeri F. [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 1999, 74(2): 176 - 182. ■

《全国粉体加工设备购销指南》(第二版)征订

粉体工业是一个跨行业的领域,涉及化工、医药、冶金、矿山、建材、精细陶瓷、农业等多个行业,其加工过程涉及到的设备种类很多。为了给粉体加工企业购买设备和设备选型提供便利,中国化工信息中心《现代化工》编辑部和中国粉体工业信息网于 2001 年联合编辑出版了第一版《全国粉体加工设备购销指南》。

第二版《全国粉体加工设备购销指南》于 2003 年底出版,在第一版的基础上进行了核实更新,收录企业由原来的 1041 家增加到 1651 家,同时收录了 100 多家日本相关企业的产品信息,涉及的粉体加工设备包括粉碎、筛分、研磨、分级、固液分离、混合、选料、过滤、乳化、包覆、干

燥、成型、烧结、供料、送料、输送、收尘、包装、环保及其他辅助设备。企业按照地区划分编排次序,并附有产品索引。每本定价 100 元人民币。

户名:北京中化信深达信息技术有限责任公司

账号:230101040001610

开户行:农行亚运村支行营业室

联系人:杨瑞影

单位:中国化工信息中心《现代化工》编辑部

地址:北京安外小关街 53 号(100029)

电话:010-64444095、64444090 转分机 842

传真:010-64437104