DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2017.06.013

连续微通氧浓醪乙醇发酵研究

刘光鹏[1]， 王 娟[2]， 伍时华[3]， 赵 岩[1]， 和法涛[1]， 葛邦国[1]， 朱凤涛[*1]

（1. 中华全国供销总社 济南果品研究院，山东 济南，250014；2. 山东英才学院，山东 济南 250104；3. 广西科技大学 生物与化学工程学院，广西 柳州 545006）

摘要： 为了提高浓醪酒精发酵效率，以高浓度木薯粉浆液化滤液为原料，对微通氧浓醪酒精发酵过程进行了研究。在搅拌式 5 L 发酵罐中，通过对连续通风速率分别为 0、0.04、0.08、0.16、0.24、0.35 L/min 的高浓度液化滤液酒精分批发酵过程分析表明，最佳通风策略为：以通风速率 0.08 L/min 进行酒精发酵，酵母细胞密度达到 5.40×10^8 个/mL，发酵效率为 90.00%，与未通风发酵相比分别提高了 56.52%和 2.45%。总之，在浓醪酒精发酵过程中微通氧能够提高酵母细胞活性，进而提高发酵效率。

关键词： 浓醪酒精发酵；微通氧；发酵效率；细胞活性

中图分类号：TS 201.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673—1689(2017)06—0649—08

Preliminary Study on Ethanol Fermentation with Very High Gravity and Micro-Aeration Technologies

LIU Guangpeng[1]， *WANG Juan*[2]， *WU Shihua*[3]， *ZHAO Yan*[1]，
HE Fatao[1]， *GE Bangguo*[1]， *ZHU Fengtao*[*1]

（1. Ji'nan Fruit Research Institute，All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives，Ji'nan 250014，China；2. Shandong Yingcai University，Ji'nan 250104，China；3. School of Biological and Chemical Engineering，Guangxi University of Technology，Liuzhou 545006，China）

Abstract： Ethanol is widely used in renewable fuels，chemical engineering，medicine and food industry. In developed countries there is a growing trend towards employing modern technologies and ef?cient bio-energy conversion using a range of biofuels. In order to improve Very High Gravity（VHG）ethanol fermentation efficiency the optimization process of VHG ethanol fermentation from liquefied VHG cassava mash filtrate with micro-aeration were investigated in this thesis. Changes of fermentation parameters during the ethanol fermentation from VHG liquefied starch filtrate with aeration rate （0，0.04，0.08，0.16，0.24，0.35 L/min）by *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 under batch condition in a 5-L bioreactor were studied. The optimum condition for ethanol fermentation was shown as a continuous aeration rate of 0.08 L/min. The verification experiments under the optimum condition clearly indicated that the aeration strategies improved ethanol production. The

收稿日期： 2015-07-21

基金项目： 广西省科技厅项目(桂科攻 0782003-2)；柳州市科技局项目(2007021102)。

* **通信作者：** 朱凤涛(1962—)，男，山东烟台人，工学硕士，研究员，主要从事果蔬采后加工技术方面的研究。E-mail：ftzhu@yahoo.com.cn

引用本文： 刘光鹏，王娟，伍时华，等. 连续微通氧浓醪乙醇发酵研究[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(06)：649-656.

biomass and fermentation efficiency were 5.40×10^8 cells/mL and 90.00%, respectively, representing about 56.52% and 2.45% increase compared to anaeration fermentation. In conclusion, micro-aeration can improve VHG ethanol fermentation efficiency because it can enhance cell viability.

Keywords: VHG ethanol fermentation, micro-aeration, fermentation efficiency, cell viability

自 20 世纪 70 年代中期,受 4 次较大规模“石油危机”的影响,石油供应安全正面临着严峻的挑战[1-2]。因此,许多国家开始调整和制定能源政策,把寻找可替代化石产品的“绿色可再生资源”摆在了重要的位置[3-4]。乙醇是来自生物质能的可再生替代能源,当前,国内外都在对其有效的生产方法做深入的研究[5]。但目前大量的研究都是在厌氧发酵的基础上围绕着培养基的改善、酵母固定化发酵技术、连续乙醇发酵技术和酵母分离回用技术等方面开展的[6-9],发酵液中酵母细胞数低、发酵后期酵母死亡率高、发酵时间长等问题没有得到根本解决。有关研究表明,在乙醇发酵过程中维持发酵液中适当的溶氧水平可以提高菌体浓度和酵母细胞活性,为实现高乙醇转化率提供保障[10-13]。虽然已有浓醪乙醇发酵前期溶氧的实际应用和木薯浓醪乙醇发酵的相关研究[14-15],但连续微通氧木薯浓醪乙醇发酵的研究还未曾有报道。作者以高浓度木薯粉浆液化醪过滤液(以下简称液化滤液)为发酵碳源,通过控制发酵过程中的通风速率,研究乙醇发酵过程中酵母生长、总糖消耗、pH 值变化及乙醇生成规律,旨在为微通氧木薯浓醪乙醇发酵的实际生产提供理论参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 实验菌种 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)GJSF16,由广西科技大学发酵工程研究所保藏。

1.1.2 木薯粉浆液化滤液 将木薯粉浆液化醪过滤除渣后所得滤液,总糖质量浓度为 269.3 g/L,将滤液分装并于-20 ℃保存备用。

1.2 试剂与仪器

1.2.1 主要试剂 标准葡萄糖溶液:山东科学院生物研究所;糖化酶(酶活性 100 000 U/mL):山东隆大酶制剂厂;乙醇:色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;尿素、七水硫酸镁、硫酸、酵母浸膏、细菌学蛋白胨、琼脂粉、磷酸二氢钾、二水合柠檬酸三钠等:国产分析纯试剂。

1.2.2 主要仪器 Biostat B.5 L 自控发酵罐:德国 Braun;GC-7890-Ⅱ气相色谱仪:上海天美科学仪器有限公司;LRH-250-Ⅱ微电脑控制生化培养箱:广东省医疗器械厂;SW-CJ-TB 标准净化工作台:苏州安泰空气技术有限公司;DMB5 Motic 数码生物显微镜:麦克迪奥实业集团有限公司;HWY-2112 全温度恒温调速摇床柜:上海智城分析仪器制造有限公司;14 000 u/min 台式冷冻离心机:德国 HETTICH;XW-80A 旋涡混合器:上海医大仪器厂;SBA-40C 生物传感分析仪:山东科学院生物研究所;TM-930 毛细管色谱柱:上海天美科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 一级种子培养 将 4 ℃保藏的斜面菌种放在 33 ℃的生化培养箱中活化 12 h,取一环活化后的酵母菌种接入装有 10 mL 液体种子培养基的试管中,在旋转式摇床上于 33 ℃、120 r/min 培养 8 h。

1.3.2 二级种子培养 以 1%的接种体积分数将培养 8 h 后的一级种子转接至两瓶各装有 175 mL 二级种子培养液的 500 mL 摇瓶中,在旋转式摇床上 33 ℃、120 r/min 条件下培养 8 h。

1.3.3 乙醇发酵 以 10%的接种体积分数将培养 8 h 后的二级种子 350 mL(两瓶各 175 mL)接种于装有 3 150 mL 发酵培养基的 5 L 自控发酵罐中。以每毫升液化滤液所需 53 U 糖化酶的量加入糖化酶,并自动添加浓度为 2 mol/L 的硫酸将 pH 值保持为 4.5。发酵过程中,发酵温度 32 ℃,保持搅拌转速 200 r/min 进行未通风和通风培养发酵。每隔 4 小时记录发酵液中 pH 值的变化,测定发酵过程中总糖、乙醇度、酵母细胞数及存活率的相关变化,并对不同发酵条件下终发酵液的残葡萄糖进行分析。

1.4 分析方法

酵母细胞数、死亡数的测定:采用血球计数板

法[16];酵母细胞死亡率的测定:亚甲基蓝染色法[17];发酵过程总糖的测定:斐林试剂法[18];发酵过程中乙醇含量的测定:采用装备 FID 检测器的气相色谱仪和 T2100P 色谱工作站,用面积外标法。色谱条件为气化室温度 220 ℃, 柱温 80 ℃,FID 检测器温度 220 ℃,以 N_2 为载气,总载气流量 92 mL/min,分流比 45:1;发酵液中葡萄糖含量的测定:发酵液中的葡萄糖质量浓度采用生物传感分析仪进行分析测定。

1.5 计算公式

$$总糖消耗速率(g/(L\cdot h))=\frac{总糖减少量(g/L)}{取样间隔时间(h)}$$

$$乙醇生成速率(g/(L\cdot h))=\frac{发酵液中乙醇的增加量(g/L)}{取样间隔时间(h)}$$

$$总糖利用率(g/(L\cdot h))=\frac{初总糖质量浓度(g/L)-残总糖质量浓度(g/L)}{初总糖质量浓度(g/L)}$$

$$发酵效率(\%)=\frac{(发酵最终乙醇体积分数(mL/L)-发酵初始乙醇体积分数(mL/L))\times 0.789}{初始总糖质量浓度(g/L)\times 0.511}$$

$$对耗糖发酵效率(\%)=\frac{(发酵最终乙醇体积分数(mL/L)-发酵初始乙醇体积分数(mL/L))\times 0.789}{(初始总糖质量浓度(g/L)-残总糖质量浓度(g/L))\times 0.511}$$

$$葡萄糖质量浓度(g/L)=c\times 0.01\times 稀释倍数$$

式中,c 为生物传感分析仪读数 (mg/dL);0.01 为单位换算系数。

$$酵母存活率(\%)=\frac{活酵母细胞数}{酵母细胞总数}$$

2 结果与分析

2.1 不同通风速率条件下酵母细胞生长及细胞存活率的变化

在浓醪乙醇发酵过程中,酵母细胞受发酵初期高浓度发酵底物(如葡萄糖、蔗糖、麦芽糖等)和发酵后期高浓度乙醇的胁迫和毒害作用[19]。酿酒酵母在厌氧或者微溶氧环境中的代谢产物主要是乙醇,乙醇的生成与酵母细胞的生长紧密相连。因此,乙醇的发酵状况在酵母细胞生长情况和存活率上能够得以体现。图 1–2 为不同通风速率条件下酵母细胞生长及细胞存活率的变化图。

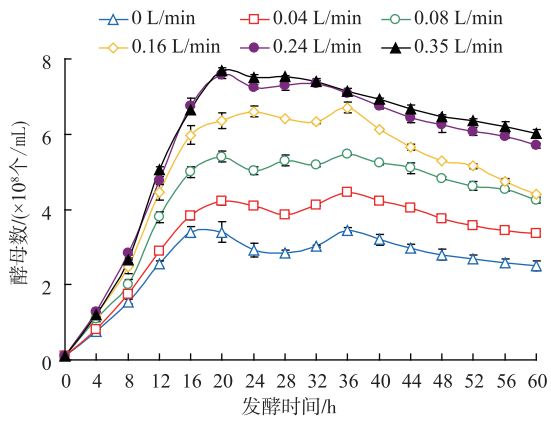


图 1 不同通风速率下浓醪乙醇发酵过程中酵母的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

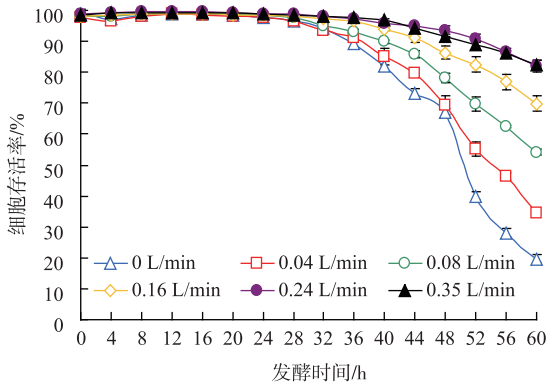


图 2 不同通风速率下浓醪乙醇发酵过程中酵母细胞存活率

Fig. 2 Cell viability of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

由图 1–2 可以看出,通风速率对乙醇发酵过程中酵母细胞的生成量和细胞存活率有很大影响。在连续微通氧条件下,随着通风速率的增加,发酵液中酵母细胞密度和发酵后期酵母细胞存活率都随之增加,例如发酵液中最大细胞密度随着通风速率的增加由 3.4×10^8 个/mL 增加至 7.7×10^8 个/mL,终发酵液的酵母细胞存活率由 19.71% 增加至 82.56%,表明发酵液中的溶氧能够促进酵母细胞生长速率加快和提高发酵后期酵母细胞活性;通风速率为 0.24 L/min 和 0.35 L/min 时, 发酵液中酵母细胞密度和发酵后期酵母活细胞率非常接近,表明发

酵液中溶氧达到一定值后,发酵液中的酵母细胞密度和细胞存活率不会伴随着通风速率的增大而增加。

2.2 不同通风速率对酿酒酵母乙醇发酵的影响

在连续微通氧浓醪乙醇发酵过程中,通过改变通风速率来考察溶氧对浓醪乙醇发酵的影响。由图3-4可知,通风速率为0~0.08 L/min时,发酵终乙醇体积分数和最大乙醇生成速率均随着通风速率的增加而增大。通风速率为0.08~0.35 L/min时,发酵终乙醇体积分数随着通风速率的增加而明显减小,通风速率为0.35 L/min时发酵终乙醇体积分数最低。

由此表明,适当的通风速率对于整个乙醇发酵过程是极为重要的,它既要有利于酵母细胞的生长,又要有利于发酵中后期较高乙醇度下的乙醇体积分数的进一步提高。例如,乙醇的积累能够对酵母细胞产生毒害,不饱和脂肪酸有助于提高酵母细胞耐乙醇的能力,而发酵液中的溶氧有助于不饱和脂肪酸的合成[13,20]。通风速率低,酵母细胞密度较低,相同的发酵时间下最终的乙醇体积分数较低;通风速率过高,菌体密度高,乙醇体积分数不高,其原因可以归结为乙醇发酵主要是厌氧发酵过程,通风速率过高时细胞耗氧耗糖速率增加,尽管可以提高菌体密度,但它对于乙醇的生成是不利的。

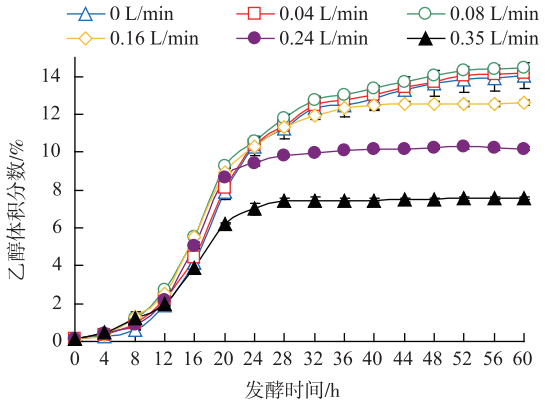


图3 不同通风速率下浓醪乙醇发酵过程中乙醇生成曲线

Fig. 3 Ethanol concentration during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions by *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

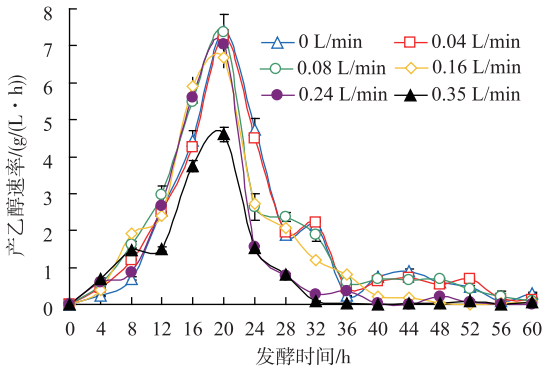


图4 不同通风速率下浓醪乙醇发酵过程中乙醇的生成速率

Fig. 4 Ethanol productivity during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions by *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

2.3 不同通风速率条件下酿酒酵母对总糖的利用

不同通风速率条件下浓醪乙醇发酵过程中总糖变化曲线和消耗速率曲线见图5-6。由总糖变化曲线(图5)和总糖消耗速率曲线(图6)可以看出,在微通氧条件下酿酒酵母对总糖的利用速率要高于未通风条件下对总糖的利用速率,且通风速率越高,糖消耗速率越快;在微通氧发酵的条件下,28 h即可消耗掉发酵液中的大部分总糖;而在未通风发酵的情况下,消耗掉发酵液中的大部分总糖至少需要32 h。在乙醇发酵过程中,影响总糖消耗速率的因素很多(发酵后期降糖缓慢是影响乙醇发酵效率的重要因素),发酵液中活酵母数是影响总糖消耗速率的关键因素,发酵液中微量的溶氧可以提高酵母细胞的密度和发酵后期酵母细胞的活率。在本实验中,用亚甲基蓝染色法测得的酵母细胞死亡率为依据对不同通风速率下酵母细胞的活性变化进行了考察,得出发酵液中总糖的消耗速率与活细胞数成正比。

2.4 通风速率对乙醇发酵过程中pH值变化的影响

pH值是乙醇发酵过程中的一个综合指标,它与酵母细胞的生长繁殖和乙醇代谢的积累密切相关。由图7可知,乙醇发酵过程中通风速率对pH值的变化具有显著影响。在0~12 h期间,不同通风速率下发酵液中的pH值均呈减小趋势;当发酵进行至12 h后,通风速率为0.04~0.35 L/min发酵液中的pH值开始回升,但未通风和通风速率0.04 L/min发酵液中的pH值继续下降,分别在20 h和24 h开

始回升。分析其原因可能为,乙醇发酵过程中产生的有机酸以及 CO_2,特别是发酵中前期 CO_2 的大量释放,使其发酵液中的 pH 值不断下降。乙醇发酵过程中通风能够减少发酵液中有机酸的产生和 CO_2 在发酵液中的溶解[21],使得乙醇发酵后期醪液中的 pH 和通风量的大小成正比。

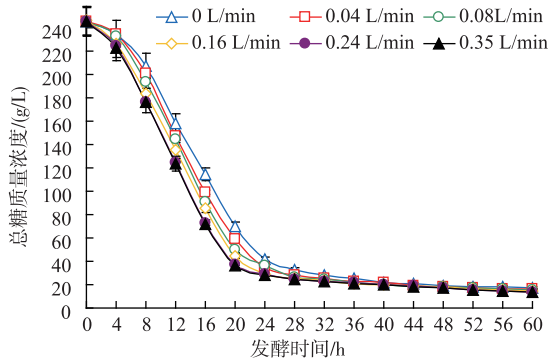


图 5　不同通风速率条件下浓醪乙醇发酵过程中总糖的变化

Fig. 5　Changes of total sugar during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions by *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

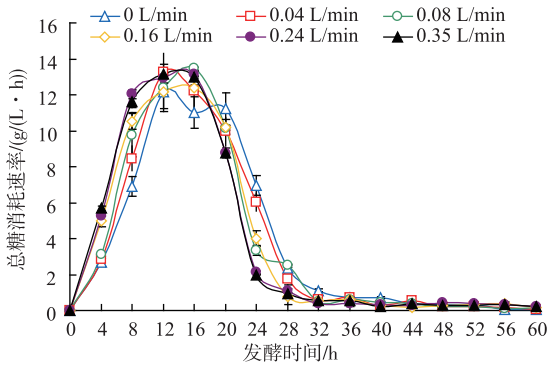


图 6　不同通风速率条件下浓醪乙醇发酵过程中总糖的消耗速率

Fig. 6　Total sugar consumption rate of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

2.5　浓醪乙醇发酵过程中酵母生长、总糖变化和乙醇生成的关系

乙醇发酵过程中,酵母菌在厌氧或微含氧的条件下通过 EMP 途径将葡萄糖转化为乙醇。在不同通风速率乙醇发酵过程中,掌握酵母生长、总糖消耗、乙醇生成情况,对于更深入的研究微通氧对浓醪乙醇发酵的影响具有重要的意义。

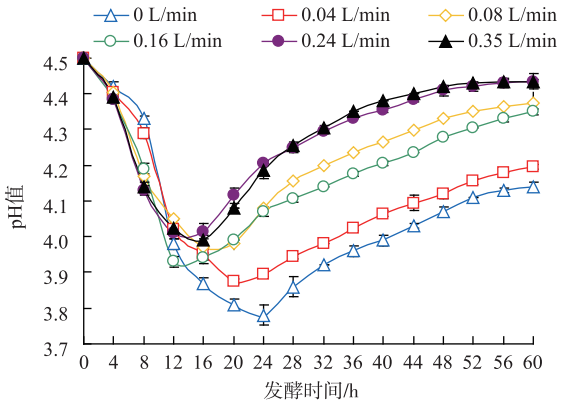


图 7　不同通风速率条件下浓醪乙醇发酵过程中 pH 值的变化

Fig. 7　Changes of pH during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions by *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16 at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

图 8 为未通风乙醇发酵过程中酵母生长、总糖消耗和乙醇生成曲线的情况图。由图 8 可知,0~16 h 发酵液中酵母细胞密度快速增大;在 16~36 h 发酵液中酵母细胞密度出现先下降而后又升高的现象。分析原因可能是随着发酵的进行,发酵液中溶氧水平逐渐降低,乙醇体积分数不断增大,酵母细胞受到较高体积分数乙醇的毒害而导致部分细胞的裂解死亡,经过一段时间的生理代谢调整,提高了细胞高浓度乙醇的耐受性,因此细胞密度又有升高的现象。当发酵进行至 36 h 后,酵母细胞进入衰亡期。在 0~8 h 期间,发酵液中总糖减小趋势逐渐加快,乙醇体积分数增加缓慢,生成速率缓慢增大;在 8~28 h 时,发酵液中总糖质量浓度快速降低,乙醇体积分数迅速升高;当发酵进行至 28 h 后,总糖消耗速率与乙醇生成速率均比较缓慢且不断减小直至发酵结束。

由图 9 可得,在通风速率为 0.08 L/min 的浓醪乙醇发酵过程中,0~16 h 发酵液中酵母细胞密度快速增加;在 16~40 h 期间,发酵液中酵母细胞密度维持相对稳定的状态;在发酵进行至 40 h 后,酵母细胞开始进入衰亡期,发酵液中的酵母细胞密度逐渐减小。在 0~4 h 时,发酵液中总糖质量浓度减小和乙醇体积分数升高较为缓慢,8~20 h 发酵液中的总糖质量浓度急剧降低,乙醇体积分数快速升高,20~32 h 期间酵母细胞对总糖的消耗速率和乙醇的生成速率逐渐减小,当发酵进行至 32 h 后,发酵液中的总

糖质量浓度缓慢降低，乙醇体积分数缓慢增加,且总糖消耗速率和乙醇生成速率逐渐趋于最小直至发酵结束。

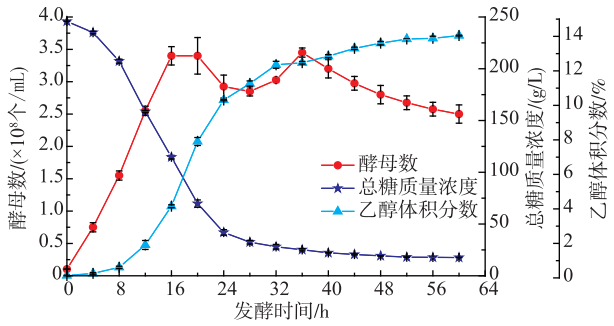


图 8　未通风乙醇发酵过程中酵母生长、总糖变化和乙醇生成曲线

Fig. 8　Cell density of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16, total sugar and ethanol concentration during the ethanol fermentation with a non aeration condition at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

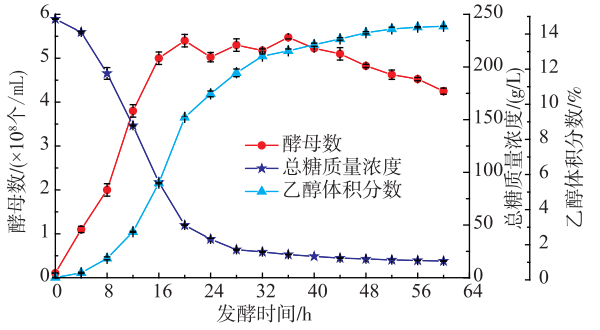


图 9　通风速率为 0.08 L/min 乙醇发酵过程中酵母生长、总糖变化和乙醇生成曲线

Fig. 9　Cell density of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16, total sugar and ethanol concentration during the ethanol fermentation with a constant aeration rate of 0.08 L/min at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

图 10 为通风速率 0.24 L/min 乙醇发酵过程中酵母生长、总糖消耗和乙醇生成曲线的情况。在 0~16 h 期间,发酵液中酵母细胞密度快速增加,16~32 h 时酵母细胞密度增加缓慢并进入稳定期,20 h 时发酵液中酵母细胞密度达到最大，为 7.58×10^8 个/mL,20~36 h 时发酵液中的总糖消耗速率和乙醇生成速率逐渐降低,在发酵进行至 36 h 后,发酵液中的总糖质量浓度继续缓慢降低,乙醇体积分数基本不再变化。

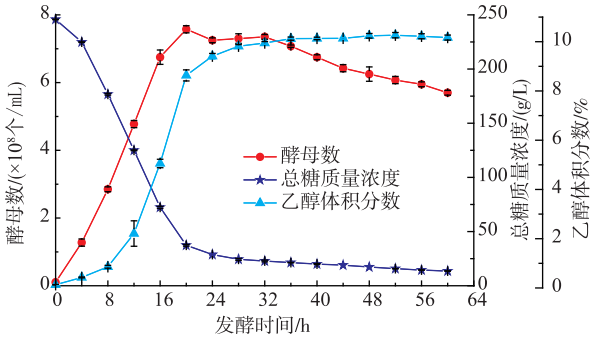


图 10　通风速率为 0.24 L/min 乙醇发酵过程中酵母生长、总糖变化和乙醇生成曲线

Fig. 10　Cell density of *Saccharomyces cerevisiae* GGSF16, total sugar and ethanol concentration during the ethanol fermentation with a constant aeration rate of 0.24 L/min at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

2.6　发酵效果分析

表 1 为不同通风速率下乙醇发酵各项参数的计算结果。由表 1 可知,在不同的通风速率下,糖醇转化率有较大的差异。在试验范围内,通风速率为 0~0.08 L/min 时，发酵液中的终乙醇体积分数和乙醇发酵效率逐步提高,残总糖和残葡萄糖得以逐步减少;在通风速率为 0.08 L/min 时,终发酵乙醇体积分数和乙醇发酵效率达到了最大值,分别为 14.44% 和 90%;通风速率 0.08~0.35 L/min 对乙醇发酵效率影响很大,随着通风速率的增大,发酵液中的残总糖和残葡萄糖继续降低,但发酵液的乙醇体积分数明显减小。其原因是发酵液中溶氧水平的高低受其不同通风速率的影响,而发酵液中溶氧对酿酒酵母乙醇生产而言有利也有弊:一方面微量的溶氧可以提高酵母细胞在乙醇中的耐受性和营养缺乏情况下的活性[10],而另一方面如果溶氧水平过高则会抑制酿酒酵母 EMP 途径的活性[10],使得乙醛不再成为电子受体,从而减少乙醇合成的前体物质,生成大量的菌体,营养物质大量浪费,降低了发酵效率。因此,综合乙醇发酵效率、最终乙醇体积分数和残糖,得出控制通风速率在 0.08 L/min 对乙醇发酵是非常有利的。

表 1　不同通风速率下浓醪乙醇发酵结果

Table 1　Performance of *Saccharomyces cerevisiae* strain GGSF16 during the VHG ethanol fermentation with different aeration conditions at 32 ℃ under batch condition in the 5 L bioreactor

通风速率/(L/min)	初总糖质量浓度/(g/L)	残总糖质量浓度/(g/L)	残葡萄糖质量浓度/(g/L)	初乙醇体积分数/%	终乙醇体积分数/%	发酵效率/%	对耗糖发酵效率/%
未通风	245.75	17.63	6.75	0.14	14.05	87.55	94.15
0.04	245.75	15.94	4.00	0.13	14.17	88.21	94.33
0.08	245.50	15.75	2.75	0.13	14.44	90.00	96.17
0.16	245.94	14.69	2.13	0.14	12.61	78.29	83.26
0.24	245.81	13.56	2.00	0.13	10.17	63.07	66.75
0.35	245.31	13.63	1.88	0.13	7.57	46.83	49.58

3 结　语

发酵效率通常与发酵液中酵母细胞的密度有很关系,因此研究如何提高乙醇发酵发酵液中的酵母细胞密度是首要任务,以便能够提高生产效率和设备利用率、减少污水排放、降低乙醇蒸馏能耗,从而降低生产成本及设备投资,使生产的乙醇产生良好的成本效益[22]。在乙醇发酵过程中,发酵液中溶氧水平的高低是影响酵母细胞生长的重要因素,溶氧水平过高或过低都会影响到酵母细胞的密度,进而影响到乙醇代谢。因此控制通风速率来实现发酵液中溶氧水平的控制,是实现浓醪乙醇发酵过程中高乙醇转化率的重要途径。

作者通过控制不同的通风速率来进行浓醪乙醇发酵,对通风速率为 0、0.04、0.08、0.16、0.24、0.35 L/min 的发酵效果进行分析,得到通风速率为 0.08 L/min 时,酵母细胞密度最高达 5.40×10^8 个/mL,乙醇发酵效率为 90.00%,乙醇体积分数为 14.44%,残总糖质量浓度为 15.75 g/L,残葡萄糖质量浓度为 2.75 g/L。酵母细胞细胞密度和发酵效率比传统发酵分别提高了 56.52%和 2.45%。在通风速率大于 0.16 L/min 的情况下,虽然能够进一步提高酵母细胞密度、减少残总糖和残葡萄糖的剩余量,但发酵效率却迅速降低。而未通风发酵时,酵母细胞在发酵中后期的死亡率大幅增加,酵母活性降低导致发酵中后期发酵速率缓慢。

研究表明,浓醪乙醇发酵过程中,发酵液中适当的溶氧能够提高酵母细胞密度和活性,对提高乙醇发酵效率是必要的,这对长时间连续乙醇发酵有重要意义。

参考文献:

[1] GNANSOUNOU E,DAURIAT A,WYMAN C E. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar:economic trade-offs in the context of North China[J]. **Bioresource Technology**,2005,96(9):985-1002.

[2] TAO F,MIAO J Y,SHI G Y,et al. Ethanol fermentation by an acid-tolerant *Zymomonas mobilis* under non-sterilized condition[J]. **Process Biochemistry**,2005,40(1):183-187.

[3] SONG Andong,ZHANG Jiancheng,WU Yunhan,et al. Fuel ethanol production by distiller biomass fermentation[J]. **Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering**,2003,19(4):278-281.(in chinese)

[4] NAJAFPOUR G,YOUNESI H,SYAHIDAH Ku Ismail K. Ethanol fermentation in an immobilized cell reactor using *Saccharomyces cerevisiae*[J]. **Bioresource Technology**,2004,92(3):251-260.

[5] DEMIRBAS A. Progress and recent trends in biofuels[J]. **Progress in Energy and Combustion Science**,2007,33(1):1-18.

[6] DEESUTH O,LAOPAIBOON P,JAISIL P,et al. Optimization of nitrogen and metal ions supplementation for very high gravity bioethanol fermentation from sweet sorghum juice using an orthogonal array design[J]. **Energies**,2012,5(9):3178-3197.

[7] PLESSAS S,BEKATOROU A,KOUTINAS A A,et al. Use of *Saccharomyces cerevisiae* cells immobilized on orange peel as biocatalyst for alcoholic fermentation[J]. **Bioresource Technology**,2007,98(4):860-865.

[8] BAI F. Process oscillations in continuous ethanol fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[D]. **Canda:University of Waterloo**,2007.

[9] CHAABANE F B,ALDIGUIER A S,ALFENORE S,et al. Very high ethanol productivity in an innovative continuous two-stage

bioreactor with cell recycle[J]. **Bioprocess and Biosystems Engineering**,2006,29(1):49-57.
[10] ALFENORE S,CAMELEYRE X,BENBADIS L,et al. Aeration strategy:a need for very high ethanol performance in *Saccharomyces cerevisiae* fed-batch process[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**,2004,63(5):537-542.
[11] LI Xueyan. The way to realize high efficient fermentation of alcohol[J]. **Brewing**,2002,29(2):66-67.(in Chinese)
[12] SALMON J. Interactions between yeast,oxygen and polyphenols during alcoholic fermentations:practical implications[J]. **LWT-Food Science and Technology**,2006,39(9):959-965.
[13] COT M,LORET M O,FRANCOIS J,et al. Physiological behaviour of *Saccharomyces cerevisiae* in aerated fed-batch fermentation for high level production of bioethanol[J]. **FEMS Yeast Research**,2007,7(1):22-32.
[14] LIU Shuhai,YAN Mingyi,DU Jinbao,et al. Study on the fermentation technology of cassava alcohol[J]. **Light Industry Science and Technology**,2012(1):7-8.(in Chinese)
[15] RONG Yuanping,YE Yun,WU Shihua, et al. Hign-gravity fermentation technology of ethanol from mixture containing cassava and hydrolysate of cassava steep liquor[J]. **China Brewing**,2010,29(12):72-74.(in Chinese)
[16] 诸葛健,王正祥. 工业微生物实验技术手册[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994.
[17] ALFENORE S,MOLINA J C,GUILLOUET S,et al. Improving ethanol production and viability of *Saccharomyces cerevisiae* by a vitamin feeding strategy during fed-batch process[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**,2002,60(1-2):67-72.
[18] 王福荣. 酿酒分析与检测[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
[19] DEVANTIER R,SCHEITHAUER B,VILLAS B S G,et al. Metabolite profiling for analysis of yeast stress response during very high gravity ethanol fermentations[J]. **Biotechnology and Bioengineering**,2005,90(6):703-714.
[20] VALERO E,MILLAN C,ORTEGA J. Influence of oxygen addition during growth phase on the biosynthesis of lipids in *Saccharomyces cerevisiae*(M 330-9) in enological fermentations[J]. **Journal of Bioscience and Bioengineering**,2001,92(1):33-38.
[21] YU Y,WANG Y,CHU J,et al. The influence of controlling redox potential on ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. **Chinese Journal of Biotechnology**,2007,23(5):878-884.
[22] LU Y,KNOL J C,LINSKENS M H,et al. Cultivation of immobilized *Dictyostelium discoideum* for the production of soluble human fas ligand[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**,2004,65(5):547-552.

会　议　消　息

会议名称(中文):中国细胞生物学学会 2017 全国学术大会

所属学科:细胞生物学,遗传与发育生物学
开始日期:2017-09-26　　结束日期:2017-09-29
所在城市:福建省　厦门市
具体地点:厦门国际会展中心
主办单位:中国细胞生物学学会
协办单位:福建省科学技术协会
承办单位:厦门大学、上海博生会展有限公司
会议主席:陈晔光
摘要截稿日期:2017-06-30
联系电话:021-54922856/54922891
E-MAIL:meeting@cscb.org.cn
会议网站:http://www.cscb.org.cn/news/20170930/2414.html

会议背景介绍:为促进我国细胞生物学领域研究人员的交流与合作,推动中国细胞生物学学科的发展,"中国细胞生物学学会 2017 年全国学术大会·厦门"将于 2017 年 9 月 26-29 日在福建厦门举行。