

甘蔗糖蜜酒精高产酵母菌株 MF1001 的高浓发酵生产试验*

High Gravity Alcoholic Fermentation from Sugarcane Molasses by a High-yield *Saccharomyces cerevisiae* Strain MF1001 in Industrial Scale

陈东^{1,2}, 陆琦¹, 张穗生¹, 陈英¹, 黄日波¹

CHEN Dong^{1,2}, LU Qi¹, ZHANG Sui-sheng¹, CHEN Ying¹, HUANG Ri-bo¹

(1. 广西科学院非粮生物质酶解国家重点实验室, 国家非粮生物质能源工程技术研究中心, 广西生物炼制重点实验室, 广西南宁, 530007; 2. 广西大学生命科学与技术学院, 广西南宁, 530004)

(1. State Key Laboratory of Non-food Biomass Enzyme Technology, National Engineering Research Center for Non-food Biorefinery, Guangxi Key Laboratory of Biorefinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Life Science and Technology College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:以甘蔗糖蜜酒精高产菌株 MF1001 为生产菌株, 采用双流加酸性连续发酵工艺进行工业化高浓度甘蔗糖蜜酒精发酵生产试验, 连续发酵 15d。发酵生产线共 9 个发酵罐, 发酵温度由 1~4 号罐的内置式盘管循环水控制, 依次为 30~32℃(1 号罐)、34~36℃(2 号、3 号罐)、30~32℃(4 号罐)、(33~35)℃(5 号、6 号罐)、(34~36)℃(7~9 号罐), 物料流量由计量泵控制为 68m³/h。低、高浓料的 pH 值分别控制在 3.6~3.8 和 3.8~4.0, 糖蜜锤度分别控制为 20°Bx 和 40~47°Bx。结果表明, 发酵 49.5h 的成熟醪酒精班产浓度最高达到 14.1% (V/V), 日产平均浓度最高达到 13.8% (V/V), 发酵效率按糖蜜可发酵糖含量计算最高达到理论值的 98.89%, 平均为 97.72%, 每生产 1t 酒精(95%, m/V) 的发酵废液排放量最低为 7.57t, 平均为 8.17t, 各项工艺指标均显著优于国内目前的发酵水平。

关键词:酿酒酵母 菌株 MF1001 甘蔗糖蜜 酒精 发酵生产

中图分类号: Q951, TQ926 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2011)04-0385-07

Abstract: A high-yield *Saccharomyces cerevisiae* strain MF1001 was used for high gravity alcoholic fermentation of sugarcane molasses in industrial scale. The fermentation system was composed of 9 fermentors (No. 1~No. 9), of which the No. 1 was used for cultivating the strain with low gravity of molasses medium, the No. 2 was used for initiating the fermentation by mixing the low- and high-gravity molasses medium, and the No. 3~No. 9 fermentors were used for continuing the fermentation. The fermentation temperature, controlled by water cycle pipe system equipped within No. 1~4 fermentors, was 30~32℃ (No. 1), 34~36℃ (No. 2 and No. 3), 30~32℃ (No. 4), 33~35℃ (No. 5 and No. 6), 34~36℃ (No. 7~No. 9). The medium flow was controlled to 64m³/h by quantity pumps. The pH value was adjusted at 3.6~3.8 for low gravity medium and at 3.8~4.0 for high gravity medium respectively. The gravity was controlled about 20°Bx for low gravity medium and 40~47°Bx for high gravity medium. The results from 15-day continuing production showed that, after 49.5h fermentation, the maximum average alcoholic concentration in broth was 14.1% (V/V) for shift production and 13.8% (V/V) for day pro-

收稿日期: 2011-10-07

作者简介: 陈东(1962-), 副研究员, 主要从事甘蔗糖蜜酒精发酵等生物质能源方面研究。

* 科技部科技人员服务企业行动项目(2009GJE10002), 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 10100019-21, 1140010-15, 桂科攻 1099071, 桂科转 10123005-17), 广西科学院科技攻关项目(桂科院研 0708), 广西科学院基本科研业务费项目(10YJ25SW15)资助。

duction, respectively. Based on fermentable sugar content in medium, the fermentation efficiency of whole production period was calculated, and the average was 97.72% with the maximum reached to 98.89% of theoretic value. The wastewater effluent for production of 1 ton alcohol (95%, m/V) was decreased to 7.57 tons at lowest and 8.17 tons at average. The fermentation level reflected from production parameters was significant better than that of current production in China.

Key words: *Saccharomyces cerevisiae*, strains MF1001, sugarcane molasses, alcoholic, fermentation, production scale

糖蜜(丙蜜)是蔗糖生产的副产物,我国每年的形成量约 3.8×10^6 t,因其中尚含有大量的糖分,一直都是我国广西、云南和广东等蔗糖主要产区发酵生产酒精的主要原料。不过,我国用甘蔗糖蜜发酵生产酒精尚存在醪液酒精含量较低,对环境污染严重等问题。成熟醪液的酒精浓度一般为 10% (V/V) 左右^[1,2],每生产 1 容积的酒精约产生 12~14 容积含 COD₈~12 万 (mg/L)、BOD₅ 4~6 万 (mg/L) 的蒸馏废液^[3,4],严重污染环境。对甘蔗糖蜜酒精的发酵废液,目前尚无可行的处理方法^[3]。提高发酵醪液的酒精浓度不仅可以提高设备的生产效率和劳动生产率,而且可以降低能耗和减少废液排放,显著提高酒精生产的经济效益,具有重要意义^[5],一直是酒精发酵产业技术研究的重点。Ingeldew 等曾提出高浓度酒精发酵技术,并把该技术用于啤酒,进而用于燃料乙醇的生产^[6,7]。但我国在甘蔗糖蜜酒精生产实现高浓发酵尚存在技术瓶颈,发酵菌种的性能不足为主要原因。我们从生产蔗糖的废弃物中选育得到 1 株甘蔗糖蜜酒精高产酵母菌株^[8],在小试^[9]和中试研究的基础上,于 2010 年 10 月 17~31 日将该菌株用于规模生产试验,发现该菌株显著提高了甘蔗糖蜜酒精发酵的水平。

1 材料和方法

1.1 试验地点和设备

在广西凭祥市丰浩酒精有限公司进行甘蔗糖蜜酒精发酵试验。

发酵设备为年产 5 万吨的甘蔗糖蜜酒精连续发酵生产线,1 号罐为低浓料罐;2 号罐为低、高浓料混合罐,将低、高浓料混合,启动连续发酵生产;3~9 号罐为发酵流程罐,用于连续发酵(图 1)。发酵罐的罐容率为 80%~85%,各罐的使用容积分别为 30m³ (种子罐),200m³ (配料罐,图中未列),540m³ (1 号和 2 号发酵罐)和 425m³ (3~9 号发酵罐)。发酵从 2 号罐开始至 9 号罐结束,时间为 49.5h。通过 1~4 号发酵罐的内置式盘管循环水控制发酵温度,夏天生产时,用冷冻机冷却循环水,1 号罐 30~32℃,2 号、3 号

罐 34~36℃,4 号罐 30~32℃,5 号、6 号罐 33~35℃,7~9 号罐为自然温度,生产期间为 34~36℃。种子罐、1 号和 2 号罐的罐内底部配备充气分配管,采用空压机充气。

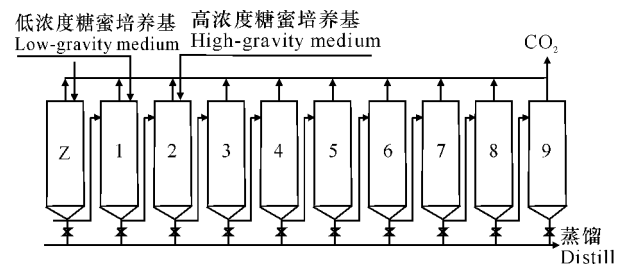


图 1 发酵生产线

Fig. 1 Fermentation line

Z. 种子罐。Z. Seeding tank.

1.2 酵母菌种

菌株 MF1001,从甘蔗糖厂的陈年废弃物中分离得到,经 ITS 序列比对确认为酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*)^[8],保存于广西科学院广西工业生物技术研究中心。

1.3 甘蔗糖蜜

由广西凭祥市丰浩酒精有限公司提供,来自广西丰浩才源制糖有限公司、广西龙州第一和第二糖厂等三家糖厂。

1.4 发酵生产

1.4.1 糖蜜培养基

采用低浓度(低浓料)和高浓度(高浓料)两种糖蜜培养基。低浓料锤度为 20°Bx 左右,用硫酸调 pH 值至 3.6~3.8,添加 0.15% (m/m) 的尿素和 0.015% (m/m) 的 85% 磷酸 (m/m)。高浓料锤度按成熟醪液酒精浓度对可发酵糖分的需求控制,为 40~47°Bx,用硫酸调 pH 值至 3.8~4.0。采用 pH 计测定 pH 值,校正为 25℃ 的 pH 值。在配料罐配制培养基,配成后立即使用。

1.4.2 生产菌种液的培养

菌种首先于 YPD 培养基,30℃,180r/min 培养过夜活化两次,然后于 20°Bx 糖蜜培养基逐级放大培养,接种量 0.4%~1.0%,最后接种相同培养基于种子罐,32~34℃,80r/min 搅拌,0.002m³/(m³·min)

充气培养 12h 至菌数达 2×10^8 /ml, 将菌液与低浓度糖蜜培养基同时流加到 1 号罐, 菌液的流加量为总流量的 25%~30% (即接种量), 充气培养 12~14h, 温度 30~32℃, 充气流量 $0.002 \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{min})$, 菌数达 2×10^8 /ml 以上时将菌液泵送到 2 号罐, 与等量高浓料混合, 开始连续发酵生产。

1.4.3 连续发酵

采用目前工业上普遍采用的双流加酸性, 低、高浓料等量混合连续发酵工艺, 将 1 号罐的物料以 $34 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量流加至 2 号罐, 与等流量的高浓料等量混合。发酵物料总流量 $68 \text{ m}^3/\text{h}$ 。物料流至 9 号罐的总发酵时间为 49.5h。生产过程 1 号、2 号罐持续充气, 气量为 $0.002 \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 。

1.5 工艺参数测定

1.5.1 发酵培养基锤度测定

参照国家轻工行业标准^[10]的密度法, 称取糖蜜 200g, 加水稀释 2 倍, 用锤度计测定培养基锤度, 查表校正为 20℃ 的锤度值。

1.5.2 总糖含量测定

参照国家轻工行业标准^[10]的方法进行。

1.5.3 非发酵性还原物测定

干酵母发酵法: 取糖蜜 10g, 加 60ml 水溶解, 用 10% 的硫酸调 pH 值至 4.0, 加入 1g 活性干酵母 (安琪公司生产), 32℃ 静置发酵 48h, 取发酵醪液测定残留总糖含量, 用百分含量 (% , m/V) 表示。

1.5.4 发酵糖份测定

用总糖减去非发酵还原物求得。

1.5.5 挥发酸测定

蒸馏发酵醪液 200ml, 取馏出酒液 10ml, 用 0.1mol/L 的 NaOH 标准溶液滴定, 计算酒液的挥发酸含量, 以 10ml 发酵醪液消耗 0.1mol/L NaOH 标准溶液的 ml 数表示。

1.5.6 酸度测定

酸碱滴定法: 用 10ml 发酵醪液消耗 0.1mol/L NaOH 标准溶液的 ml 数表示发酵醪液的酸度。

1.5.7 菌数计数

将发酵醪液稀释 40 倍, 用血球计数板计数。

1.5.8 酒精含量测定

蒸馏法: 参照国标^[11]的方法进行测定, 蒸馏时取发酵醪液 200ml, 加水 200ml, 收集蒸出液 200ml。

1.5.9 发酵废液排放量

采用安装在废液排放管上的流量计计量发酵废液排放量。

生产时, 1 号、2 号罐每 4h, 9 号罐每 8h 抽样检测 1 次工艺指标, 发酵废液每 8h 计量 1 次。

1.6 发酵效率计算及统计分析

发酵效率以酒精产量所能达到理论值的百分数表示。统计分析采用 Original 7.5 软件进行。

2 结果与分析

2.1 醪液锤度变化

生产试验的第 1~第 10d, 由于低浓料配制所使用糖蜜的含糖量较高, 投料锤度较低, 只有 16~17°Bx, 第 11d 后糖蜜的含糖量相对较低, 投料锤度为 21~22°Bx。高浓料的投料锤度为 40~47°Bx。另外, 由于菌株生长和酒精发酵对糖分的消耗, 1 号、2 号罐的醪液锤度均显著低于投料锤度, 两条曲线几乎呈平行变化 (图 2)。表明菌株对糖分的消耗受投料锤度的影响很小, 这与小试结果完全一致^[9]。

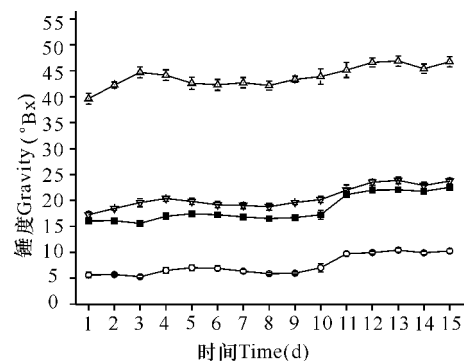


图 2 发酵过程 1 号和 2 号罐的醪液锤度

Fig. 2 Gravity change of broth during production

—△—: 高浓料锤度; —▽—: 2 号罐醪液锤度; —■—: 低浓料锤度; —○—: 1 号罐醪液锤度。
—△—: Gravity of high-gravity medium; —▽—: Broth gravity in No. 2 fermentor; —■—: Gravity of low-gravity medium; —○—: Broth gravity in No. 1 fermentor.

2.2 酵母菌体生长情况

生产过程, 1 号罐的菌数在 2.0×10^8 /ml~ 2.6×10^8 /ml 内波动, 酵母出芽率保持在 8%~10%。2 号罐的菌数和出芽率均略低于 1 号罐, 分别为 1.8×10^8 /ml~ 2.0×10^8 /ml 和 6%~9% (图 3)。按生产流量 $68 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算, 醪液在 1 号、2 号罐的停留时间均为 7.8h, 合计为 15.6h。根据小试结果, 菌株 MF1001 培养 24h 的菌数达到最大值^[9]。因此, 理论上 2 号罐的菌数和出芽率应高于 1 号罐。实际结果显示 2 号罐的菌数和出芽率低于 1 号罐 (图 3), 原因主要是 2 号罐的流加稀释度较大。

目前, 国内甘蔗糖蜜酒精发酵一般采用固定化酵母或活性干酵母两类菌种。本文根据菌株 MF1001 的特性^[9], 采用游离酵母进行发酵, 从 1 号罐的菌数和出芽率的稳定性可见, 工艺完全可行。

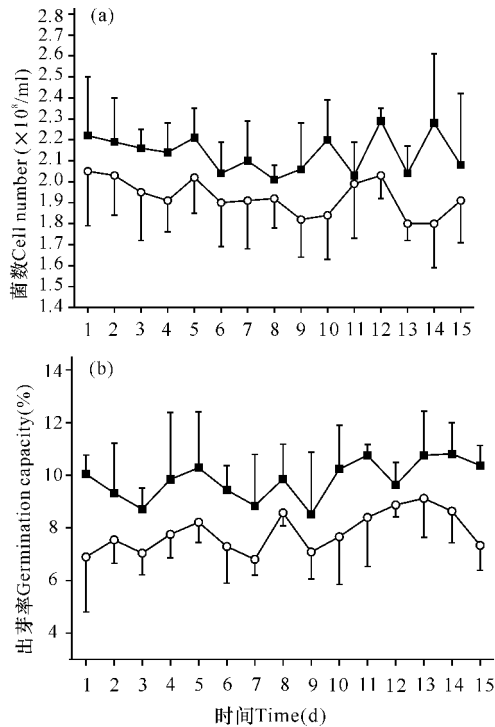


图3 发酵过程菌体生长情况

Fig. 3 Yeast growth during production

—■—:1号罐; —○—:2号罐。
—■—:No.1 fermentor; —○—:No.2 fermentor.

2.3 挥发酸变化

用挥发酸含量监测生产过程杂细菌污染的情况。第4~9d 醪液的挥发酸含量显著偏高,2号罐的挥发酸含量显著高于1号罐,第10d后醪液的挥发酸含量基本恢复正常(图4)。这主要是由于糖蜜本身含有一定的挥发酸所致。此外。除第4~第6d和第9d外,9号罐的挥发酸含量均低于2号罐,对此原因尚未清楚,但菌株 MF1001 的此特性对发酵过程中防止杂细菌的污染极为有利。

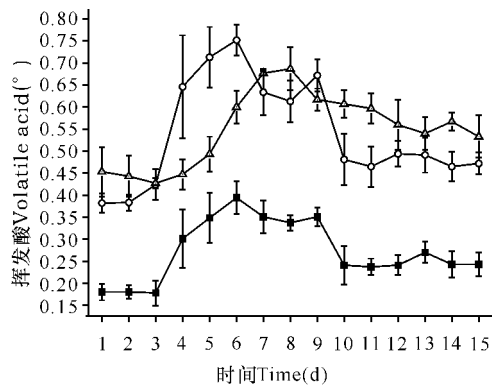


图4 发酵过程挥发酸含量的变化

Fig. 4 Volatile acid contents of broth during production

—■—:1号罐; —○—:2号罐; —△—:9号罐。
—■—:No.1 fermentor; —○—:No.2 fermentor; —△—:No.9 fermentor.

2.4 酸度变化

1号、2号和9号罐的酸度均随生产时间的延长而升高(图5),这主要是由于生产开始时所使用的甘

蔗糖蜜酸度较低,第10d后所用糖蜜的酸度较高所致。另外,9号罐的酸度普遍低于2号罐,这可能是醪液 pH 值随发酵时间升高所致^[9]。检测发现,2号罐醪液的有机酸最高含量为0.95%(以柠檬酸计,第12d),表明菌株 MF1001 酒精发酵的副产物很少。

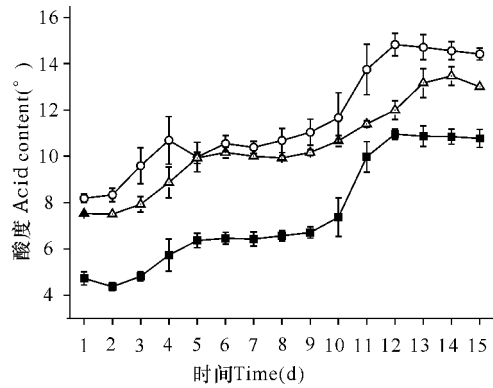


图5 发酵过程酸度的变化

Fig. 6 Acid content changes of broth during production

—■—:1号罐; —○—:2号罐; —△—:9号罐。
—■—:No.1 fermentor; —○—:No.2 fermentor; —△—:No.9 fermentor.

2.5 酒精含量变化

1号、2号罐醪液的酒精含量基本相同,均在6.8%~7.1%内波动。从2号罐开始,醪液酒精含量随发酵罐而上升。其中,5号和6号罐的波动较大(图6),这可能是这两个罐的温度波动较大所致。另外,从图6可见,菌株 MF1001 的后续发酵能力较强,至8号罐仍进行发酵,这与该菌株的小试结果^[9]完全一致。

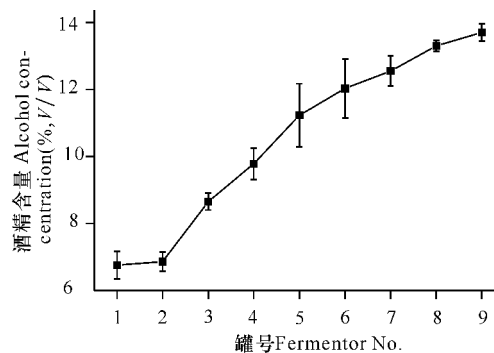


图6 发酵过程酸液酒精含量曲线

Fig. 6 Alcohol concentration curve during production

生产期间对1号、2号和9号罐醪液的酒精浓度的检测结果如图7。9号罐醪液的酒精浓度日平均最高达到13.8%(V/V,第4d),第1~第11d醪液的酒精日平均含量均在13%(V/V)以上,班浓度最高达到了14.1%(V/V,第4d),显著高于目前我国甘蔗糖蜜酒精发酵成熟醪酒精含量10%(V/V)左右的水平。

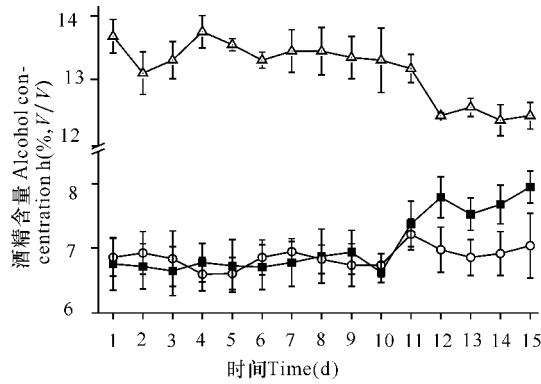


图7 发酵过程醪液酒精含量的变化

Fig. 7 Alcohol concentration in broth during production

—■—:1号罐; —○—:2号罐; —△—:9号罐。
 —■—:No.1 fermentor; —○—:No.2 fermentor; —△—:No.9 fermentor.

2.6 残糖含量变化

由于不同生产时间使用的原料糖蜜的非发酵糖分的含量不同,1号、2号和9号发酵罐醪液的残总糖浓度和可发酵残糖浓度并不呈平行变化。9号罐的可发酵残糖含量在0~0.7%内波动,15d生产的平均值为(0.25±0.21)% (图8),表明菌株MF1001在生产条件下具有较强的利用糖蜜中糖分的能力。比较图7和图8可见,1号、2号罐的可发酵残糖含量与成熟醪的酒精含量(9号罐)具有相同的变化趋势,而这两个罐的醪液残总糖含量与成熟醪的酒精含量并没有显示出这种相同的变化,说明可发酵残糖更能反映酒精发酵情况。

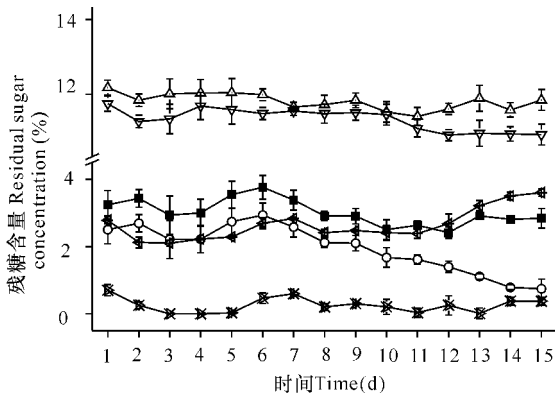


图8 发酵过程醪液残糖含量的变化

Fig. 8 Residual sugar changes of broth during production

—■—:1号罐残总糖; —○—:1号罐可发酵残糖; —△—:2号罐残总糖;
 —▽—:2号罐可发酵残糖; —□—:9号罐残总糖; —×—:9号罐可发酵残糖。
 —■—:Total residual sugar of No.1 fermentor; —○—:Residual fermentable sugar of No.1 fermentor; —△—:Total residual sugar of No.2 fermentor; —▽—:Residual fermentable sugar of No.2 fermentor; —□—:Total residual sugar of No.9 fermentor; —×—:Residual fermentable sugar of No.9 fermentor.

2.7 发酵效率

按糖蜜可发酵糖含量计算,菌株MF1001的发酵效率达到理论值的96.22%~98.89%,平均(97.72±0.94)% (图9),较现有的生产水平(理论值的广西科学 2011年11月 第18卷第4期

92%)^[12]提高了6.2%,一般而言,酿酒酵母的酒精发酵效率随醪液酒精含量的升高而下降。但比较图7和图9可以发现,发酵效率并不随9号罐成熟醪酒精浓度的升高而变化,在成熟醪酒精浓度达到13.77% (V/V, 第4d)时,发酵效率仍达到98.85%,表明菌株MF1001具有优良的利用甘蔗糖蜜的糖分发酵生产酒精的性能。不过,按糖蜜总含糖量计算时,发酵效率明显下降,平均只有(91.33±3.45)%。这主要是由于糖蜜中含有一定量的不能被酿酒酵母用于酒精发酵的非发酵糖分所致。

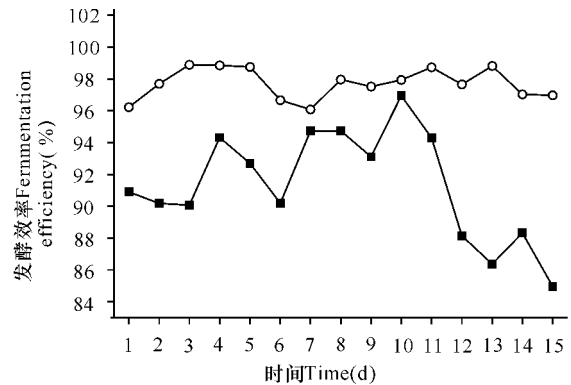


图9 酒精生产的发酵效率(理论值)

Fig. 9 Efficiency of alcohol fermentation during production(Theoretical value)

—■—:按总糖计算; —○—:按可发酵糖计算。
 —■—:Calculation based on total sugar; —○—:Calculation based on fermentable sugar.

2.8 发酵废液排放量

计量各生产日的发酵废液排放量见图10,生产期间每生产1t 95% (m/V) 酒精的废液排放量最低为7.57t [第4d, 9号罐醪液酒精浓度13.8% (V/V)],平均8.17t。目前,我国用甘蔗糖蜜每生产1t酒精排放约12t发酵废液^[4],与之相比,本文利用菌株MF1001进行甘蔗糖蜜酒精生产的废液排放量减少了31.92%,减排效果显著。

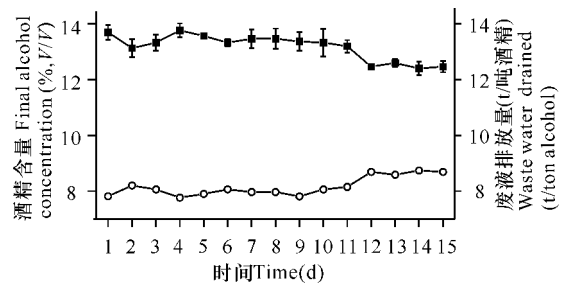


图10 发酵过程醪液酒精发酵废液排放量

Fig. 10 Drained amount of fermentation waste water during production

—■—:酒精; —○—:废液。
 —■—:Alcohol; —○—:Waste water.

2.9 1号罐工艺指标与9号罐成熟醪酒精浓度的相关性

对1号罐的酵母菌数、酵母出芽率、锤度、酒精含量、残总糖和可发酵残糖等工艺指标与9号罐成熟醪酒精浓度的相关性进行统计分析。结果表明,酵母菌数、酒精含量、可发酵残糖含量与成熟醪的酒精浓度具有一定的相关性。其中,将1号罐的酵母菌数对9号罐的成熟醪酒精浓度作图得到一条钟形曲线(图11)。酵母菌数为 $2.10 \times 10^8/\text{ml} \sim 2.15 \times 10^8/\text{ml}$ 时成熟醪的酒精浓度最高,达到13.5%(V/V)以上。

1号罐的醪液酒精浓度与9号罐成熟醪的酒精浓度具有负相关的线性关系 $Y = -0.8815X + 19.3977$,相关系数 $R = 0.8856$ 具有统计学显著意义($P < 0.001$,图12)。而1号罐的可发酵残糖含量与9号罐成熟醪的酒精浓度具有正相关的线性关系 $Y = 0.5341X + 12.1278$,相关系数 $R = 0.8182$ 同样具有统计学显著意义($P < 0.001$,图13)。这主要是菌株MF1001具有很强的后续发酵能力(图6),1号罐过高的酒精浓度和较低的可发酵残糖含量将使菌株过早进入纯发酵阶段,导致后续发酵能力不足。由此可见,利用菌

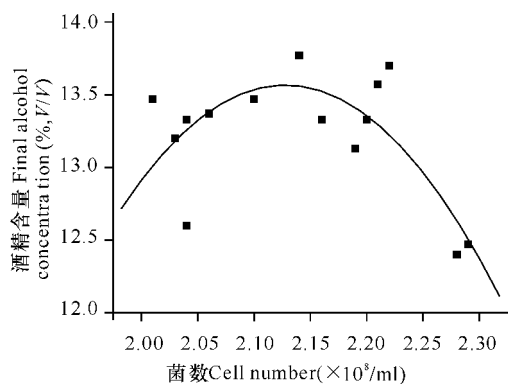


图11 1号罐菌数与9号罐成熟醪酒精浓度的关系

Fig. 11 The correlation curve between cell number of No. 1 fermentor and alcohol concentration of No. 9 fermentor

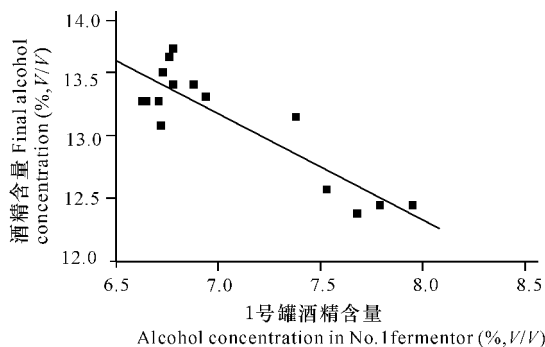


图12 1号罐的酒精含量与9号罐成熟醪酒精含量的线性关系

Fig. 12 Negative linear correlation between alcohol concentrations in No. 1 fermentor and of No. 9 fermentor

株MF1001进行糖蜜酒精发酵生产时,确保菌株在1号罐具有较强的活力,以确保后续发酵强劲,是获得高发酵酒度的关键之一。

2.10 2号罐工艺指标与9号罐成熟醪酒精浓度的相关性

进一步分析2号发酵罐的酵母菌数、酵母出芽率、投料锤度、醪液锤度、酒精含量、残总糖、可发酵残糖等工艺指标与9号罐成熟醪酒精浓度的相关性。结果只有可发酵残糖含量与成熟醪的酒精浓度具有正相关的线性关系 $Y = 0.4988X + 8.1906$,相关系数 $R = 0.9558$ 具有统计学极显著意义($P < 0.001$,图14)。这与1号罐指标与9号罐成熟醪酒精浓度的相关性完全一致。

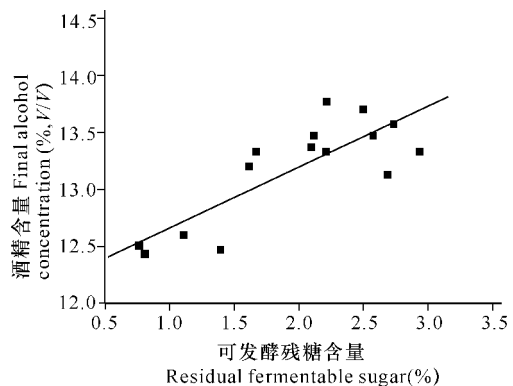


图13 1号罐可发酵残糖与9号罐成熟醪酒精浓度的线性关系

Fig. 13 Linear correlation between residual fermentable sugar content in No. 1 fermentor and alcohol concentration in broth of No. 9 fermentor

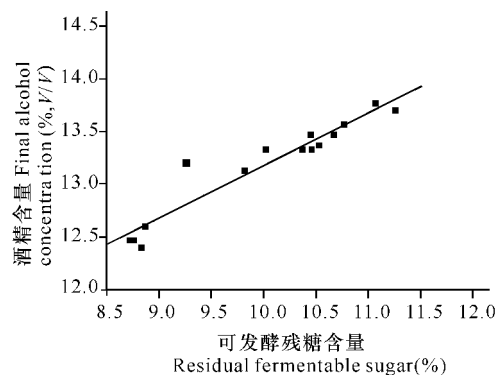


图14 2号罐可发酵残糖与9号罐成熟醪酒精浓度的线性关系

Fig. 14 Linear correlation between residual fermentable sugar content in No. 2 fermentor and alcohol concentration in broth of No. 9 fermentor

3 结论

本次生产试验得到如下结论:(1)酿酒酵母菌株MF1001完全可以利用现有的国内甘蔗糖蜜酒精发

酵生产线实现高浓度酒精发酵。采用现普遍使用的双流加酸性连续发酵工艺,发酵 49.5h 醪液酒精的班产平均浓度最高达到 14.1% (V/V),日产平均浓度最高达到 13.8% (V/V)。平均发酵效率达到理论值的 91.33% (按甘蔗糖蜜总糖含量计算)和 97.72% (按糖蜜可发酵糖含量计算)。每生产 1t 酒精排放的发酵废液平均为 8.17t。(2)对生产过程中各指标进行统计分析的结果表明,1 号罐的酵母菌数、酒精含量、可发酵糖分含量以及 2 号罐的可发酵残糖含量与 9 号罐成熟醪的酒精浓度具有显著的相关关系。生产上应对这些指标进行控制,以实现甘蔗糖蜜的高浓度酒精发酵。

参考文献:

- [1] 熊子书. 甘蔗糖蜜酒精酵母菌的筛选与应用[J]. 酿酒科技, 1996, 73(1): 11-13.
- [2] 熊子书. 中国酿酒酵母菌的研究——不同酒类酵母筛选与应用纪实(上)[J]. 酿酒科技, 2002, 112(4): 23-27.
- [3] 陆浩焱, 朱涤荃, 谢文化. 高浓度糖蜜发酵酒精废液浓缩焚烧技术[J]. 甘蔗糖业, 2007, 4: 47-51.
- [4] 周桂, 邓光辉, 何子平. 糖蜜酒精废液综合利用进展[J]. 广西民族学院学报: 自然科学版, 2000, 6(2): 111-114.
- [5] 侯保朝, 杜风光, 郭永豪, 等. 高浓度酒精发酵[J]. 酿酒科技, 2005, 130(4): 93-96.
- [6] Mc Caig R, Mc Kee J, Pifisterer E A et al. Very high gravity brewing-laboratory and pilot plant trials[J]. J Am Soc Brew Chem, 1992, 50: 18-26.
- [7] Casey G P, Magnus C A, Ingledew W M. High gravity brewing: nutrient enhanced production of high concentration of ethanol by brewing yeast[J]. Biotechnol Lett, 1983, 5: 429-434.
- [8] 陆琦, 张穗生, 吴仁智, 等. 三株甘蔗糖蜜酒精发酵高产酵母菌株的筛选[J]. 广西科学, 2010, 17(4): 368-372, 376.
- [9] 张穗生, 陆琦, 陈东, 等. 甘蔗糖蜜酒精高产酵母的发酵特性研究[J]. 广西科学, 2010, 17(4): 363-367.
- [10] 蚁细苗, 郭剑雄, 梁达, 等. QB/T 2684—2005 甘蔗糖蜜[S]//中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国轻工行业标准, 2005.
- [11] 国家技术监督局. GB/T 394.2—94 中华人民共和国国家标准, 酒精通用试验方法[S]. 1994.
- [12] 尚红岩. 糖蜜发酵酒精生产中残糖的控制[J]. 甘蔗糖业, 2007, 2: 45-47.

(责任编辑: 陈小玲)

(上接第 384 页 Continue from page 384)

- [12] 蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 渤海近 20a 来营养盐变化趋势研究[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(6): 61-67.
- [13] 张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域营养盐特征及富营养化程度评价[J]. 海洋通报, 2008, 27(5): 65-72.
- [14] 石海明, 尹翠玲, 张秋丰, 等. 近年来渤海湾赤潮监控区营养盐变化及其结构特征分析[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 246-249.
- [15] 蓝文陆, 彭小燕. 茅尾海富营养化程度及其对浮游植物生物量的影响[J]. 广西科学院学报, 2011, 27(2): 109-112, 116.
- [16] 蓝文陆. 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响[J]. 生态学报, 2011, 34(20): 5970-5976.
- [17] 蓝文陆, 王晓辉, 黎明民. 应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3360-3368.

(责任编辑: 尹 闯)