

文章编号:1673-1689(2008)04-0112-04

电导率监测在啤酒发酵过程中的应用

窦少华^{1,2}, 王伟², 赵长新^{*2}

(1. 大连大学生物工程学院, 辽宁大连 116622; 2. 大连轻工业学院生物与食品工程学院, 辽宁大连 116034)

摘要: 采用电导率测量的方法对啤酒发酵过程进行了研究, 通过计算机的辅助实现了发酵过程中电导率的在线监测。结果表明: 在啤酒发酵过程中电导率的变化遵循一定的规律性, 并且将电导率与还原糖、酵母数等过程参数进行数学建模, 同时将麦汁浓度、酵母代数对电导率的影响进行了比较。

关键词: 在线监测; 电导率; 啤酒发酵

中图分类号: Q 815

文献标识码: A

Application of Conductivity on-line Monitoring during Beer Fermentation

DOU Shao-hua^{1,2}, Wang wei², Zhao Chang-xin^{*2}

(1. College of Biological Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. College of Biology and Food Technology, Dalian Institute of Light Industry, Dalian 116034, China)

Abstract: In this study, the process of beer fermentation was investigated by measuring conductivity. Moreover, online monitoring of conductivity was achieved through computer support during beer fermentation. The results illustrated that the regularity of variation of conductivity was demonstrated for the worts of different. Mathematical models were developed to describe the relationship of on conductivity between reducing sugar and yeast counts. Furthermore, the effect of wort concentration and yeast generation on conductivity was also studied.

Key words: on-line monitoring; conductivity; beer fermentation

人类认识微生物及其发酵过程已经历了数千年的历史, 由于影响发酵过程的因素太多, 如人为因素、环境因素等, 所以要准确地把握其过程参数非常困难。目前啤酒发酵过程检测可以分为两种。一种是离线检测(off-line), 这种检测是发酵检测最主要的方法, 发酵过程主要参数都是用这类方法来

完成的。它的最大缺陷就是检测的滞后性, 并耗费大量的财力、资金和人力使之会失去对发酵过程进行调控的最佳时机; 另一种是实时在线监测(on-line), 即用计算机对在发酵液中的传感器所采集到的各种工艺参数进行实时显示与分析, 经过处理后进行修正及实时控制。这种方法最大的优点就在

收稿日期: 2006-10-25.

基金项目: 辽宁省教育厅高校科研基金资助项目(2020701093).

作者简介: 窦少华(1979-), 男, 内蒙古四子王旗人, 工学硕士.

* 通讯作者: 赵长新(1955-), 男, 河北保定人, 教授, 主要从事微生物代谢机理研究. Email: zhaochangxin@126.com

于实时数据采集、实时数据分析与处理,这对发酵过程的优化是十分重要的。目前,科研工作者也在尝试研制相关的生物传感器,用于葡萄糖测量的酶电极技术已日趋成熟,但酶电极非常容易损坏,很难应用于大规模生产^[1]。对于发酵过程参数的在线监测,目前可以利用 CO₂ 释放速率只能建立 CO₂ 积累量、麦汁密度、可发酵糖以及乙醇体积分数之间关系^[2-3],对于发酵过程中其他参数如 α-氨基氮、酵母数等则无法关联。

作者以 100 L 发酵罐为研究对象进行相关的中试试验,以期对啤酒工业化生产的大规模应用奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

麦汁:由哈尔滨啤酒有限公司提供;啤酒酵母:由哈尔滨啤酒有限公司提供。

1.2 实验仪器及设备

光电分析天平:湖南仪器厂生产;XB-K-25 血球计数板:上海医用光学仪器厂产品;100L 发酵罐:德国 FAM 公司产品;Cond7100 型电导率仪:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司生产;InPro7000 型电导电极:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司生产;显微镜:重庆仪器厂产品。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵方法 糖化车间取糖化后麦汁,加热沸腾后经回旋沉淀槽回旋沉淀 30 min,薄板换热器凉酒至 100 L 发酵罐。酵母添加体积分数 6%。麦汁充氧为 8 mg/kg,主酵温度为 10 ℃。

1.3.2 分析与测定方法

1) 电导率值的测定:采用 Cond7100 型电导率仪作为在线数据采集传感器进行电导率的测量^[4]。

2) 还原糖的测定:采用菲林试剂热滴定法进行测定^[5]。

3) α-氨基氮的测定 参见参考文献^[5]。

2 结果与讨论

利用采集系统每 30 s 采集一个数据点,对数据进行平均处理^[6]每 20 min 取一点。检测系统的硬件部分由两部分组成:(1)传感器:包括:温度传感器(热电阻 Pt100)、温度变送器、电导仪。(2)数据传输模块:Nudam6017 和 RS232-485 控制系统的硬件部分由一台上位机、一个通讯模块(Rs232/485)、一个数据采集模块(Nudam6017)、一个温度变送模块、恒压直流电源、温度传感器、电导率仪组成。软

件部分用 Windows98 操作系统及 Visual Basic 可视化开发平台。

系统结构图如图 4 所示。整个系统的功能的实现都是由上位机与通讯模块(RS232-485)的连接,通过数据采集模块(Nudam6017)采集数据远传给计算机,通过算法实现对数据进行实时处理。

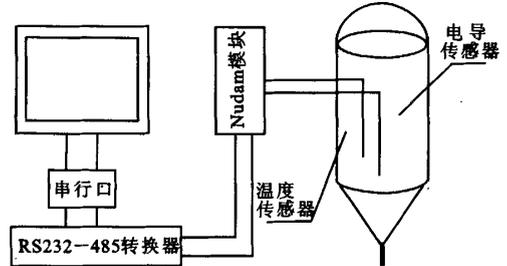


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 The structure of system

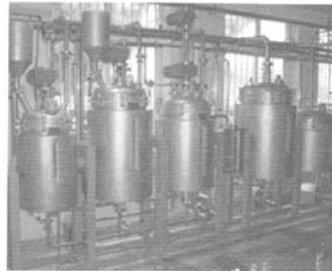


图 2 中试实验所用发酵设备

Fig. 2 Fermentation equipments of the experiment

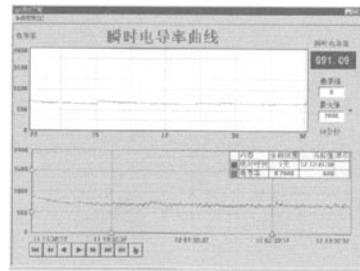


图 3 电导率在线监测界面

Fig. 3 Chart of conductivity on-line monitoring

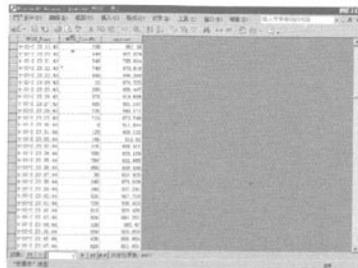


图 4 发酵过程电导率在线 Access 数据库

Fig. 4 Access data of conductivity

由图5、6、7、8可知,10、11、12、14度麦汁发酵过程中电导率有着非常相似的变化:开始阶段,随着酵母的加入经历一段迟滞期,电导率几乎没有什么变化,之后进入对数生长期,电导率迅速下降,之后是平衡期,电导率几乎呈线性变化趋势。而且从发酵开始到结束,电导率的变化范围为400~500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

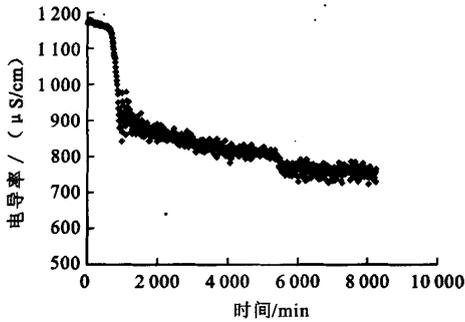


图5 10度麦汁发酵过程中电导率曲线

Fig. 5 Curve of conductivity of 10° Bx wort during fermentation

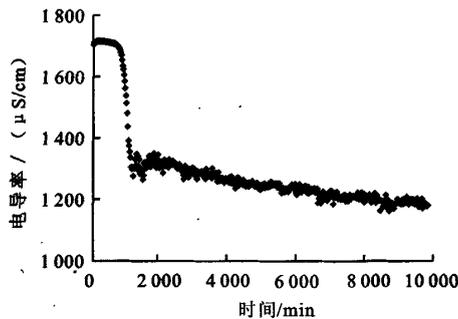


图6 11度麦汁发酵过程中电导率曲线

Fig. 6 Curve of conductivity of 11° Bx wort during fermentation

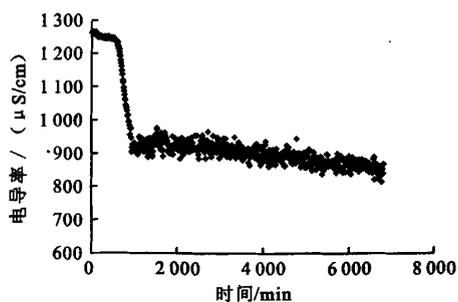


图7 12度麦汁发酵过程中电导率曲线

Fig. 7 Curve of conductivity of 12° Bx wort during fermentation

2.1 电导率与还原糖的模型建立

作者已经对11度麦汁进行了电导率与其他反应参数(如还原糖等)的数学建模的研究,并且得到了比较理想的效果。根据最小二乘法原理进行曲

万方数据

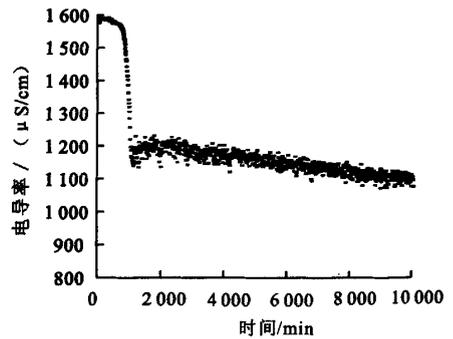


图8 14度麦汁发酵过程中电导率曲线

Fig. 8 Curve of conductivity of 14° Bx wort during fermentation

线拟合,设 $Y = a / (1 + e^{(b+cx)})$, 其中 Y 为还原糖, X 为电导率。根据所得实验数据编程计算得到下列解 $a = 9.1902, b = 30.6444, c = -0.024449$, 从而得到方程 $Y = 9.1902 / (1 + e^{(30.6444 - 0.024449X)})$ ($R^2 = 0.9888$)。[7]。

2.2 电导率与酵母数的数学建模

采用泰勒公式并结合数学软件 Mathematica4.0 编程[8]得到电导率与酵母数之间的关系式(其中 Y 为酵母数, x 为电导率值)(所用麦汁为11度)。

$$Y = 4.52053 \times 10^{-14} x - 3.15933 \times 10^{-19} x^2 - 3.62035 \times 10^{-15} x^3 - 1.97127 \times 10^{-12} x^4 - 6.72988 \times 10^{-10} x^5 + 1.45287 \times 10^{-12} x^6 - 1.03315 \times 10^{-15} x^7 + 2.41905 \times 10^{-19} x^8$$

表1 酵母数实验值与模型值的比较

Tab. 1 Contrast of yeast counting between experiment value and model value

时间/h	电导率值/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	酵母数/ ($10^7/\text{mL}$)	酵母数 (模型值)/ ($10^7/\text{mL}$)	相对 误差/ %
4	1 713.31	1.280	1.482	-15.84
16	1 359.22	1.880	2.378	-26.5
28	1 358.73	2.960	2.407	18.67
40	1 309.79	3.800	4.270	-12.37
52	1 304.71	4.300	4.344	-1.02
64	1 265.15	4.250	4.224	0.62
76	1 257.63	4.320	4.073	5.73
88	1 248.64	4.020	3.843	4.4
100	1 238.68	3.860	3.531	8.53
112	1 234.45	3.100	3.381	-9.05
124	1 218.17	2.600	2.713	-4.34

从表1中可以看出该模型的相对误差较大,最大相

对误差达到 26.5%,建模的效果不是很好,与实验的最大预期误差 10%相差较大。这是因为酵母数的人工检测本身存在一定的困难及误差。相信随着酵母数离线检测手段的提高,只要解决了这方面的问题,模型的精度就会有很大提高。

2.3 酵母代数对发酵过程电导率的影响

为了考察酵母代数对发酵过程中电导率的影响,作者做了不同代数酵母发酵实验。(所用麦汁为 12 度,酵母初始添加体积分数约为 0.6%,主酵温度 10℃。结果发现:1 代酵母要比 0 代酵母提前约 50 min 出现第一个拐点,即结束迟滞期,提前 3 h 出现第二个拐点,即结束对数生长期。但电导率的下降幅度几乎是一样的。其原因是:1 代酵母的活力要好于 0 代酵母,其繁殖速度要高于后者,从以上两图也可看出:对数生长期后,两者的差别非常的小^[1]。

3 结 语

通过对发酵过程中的电导率进行在线监测,

100 L 发酵罐中试实验表明:(1)随着啤酒发酵的进行,对于不同浓度的麦汁,电导率表现出相似的变化规律。(2)电导率与还原糖的数学模型相关性较高,而电导率与酵母数的数学模型其最大相对误差为 26.5%,与实验的预期误差相差较大。今后应该在这方面作更进一步的研究。(3)酵母代数对电导率的下降幅度影响不大,但 1 代酵母要比 0 代酵母提前约 50 min 出现第一个拐点,即结束迟滞期,提前 3 h 结束对数生长期。

随着计算机工程技术的发展,今后的啤酒发酵工业必将从传统的酿造检测向现代在线监测方向发展。而将电导率检测应用到发酵过程无疑是一种有益的尝试,通过相关参数间的模型化,实现电导率与其它参数的一一对应关系。今后我们还会增加其它方面的研究,如染菌、溶解氧、压力等对电导率的影响,通过对相关模型的不断校正,该系统也会得到不断完善。而且也将被赋予新的功能,如计算机的自我诊断及预测功能,以便更好地为啤酒发酵工业服务。

参考文献(References):

- [1] 窦少华,赵长新,董亮,等.不同麦汁浓度及酵母代数的电导率在线监测[J].中国酿造,2005(11):20-22.
DOU Shao-hua, ZHAO Chang-xin, DONG Liang, et al. On-line monitoring of different wort concentration and yeast generation by conductivity[J]. *China Brewine*, 2005(11):20-22(in Chinese)
- [2] Georges Corrieu, Trelea I G, Perret B. On-line estimation and prediction of density and ethanol evolution in the brewery [J]. *MBAA Technical Quarterly*, 2000, 27(2):173-181.
- [3] Ioan Cristian Trelea. Predictive modeling of brewing fermentation: from knowledge-based to black-box models[J]. *Math Comput Simul*, 2001, 56:405-424.
- [4] 南开大学化学系.仪器分析[M].北京:人民教育出版社,1978.
- [5] 天津轻工业学院,大连轻工业学院.工业发酵分析[M].北京:中国轻工业出版社,1980.
- [6] 马明建,周长城.数据采集与处理技术[M].西安:西安交通大学出版社,1998.
- [7] 赵涤飞,赵长新,窦少华,等.啤酒发酵过程电导率在线检测的初步研究[J].酿酒,2004, 31(5):57-59.
ZHAO Di-fei, ZHAO Chang-xin, DOU Shao-hua, et al. Preliminary research on the online monitoring of conductivity during beer fermentation[J]. *Liquor Making*, 2004, 31(5):57-59. (in Chinese)
- [8] 丁大正. Mathematica 4 教程[M].北京:电子工业出版社,2002.

(责任编辑:杨萌)