

啤酒发酵液冷却过程的流体动力学模拟

王丽萍¹ 刘相东¹ 徐尧润²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 宁波乐惠食品设备制造有限公司, 浙江 宁波 315153)

摘要 为研究啤酒发酵罐内发酵液的动量和热量分布,应用传递过程原理和计算流体动力学(CFD)方法,建立了啤酒发酵后期冷却阶段发酵液动量和热量传递的CFD模型,并进行数值模拟,结果表明:啤酒发酵后期冷却阶段发酵液温度分层严重;流体在发酵罐中产生了分层对流现象,这与一般认为的发酵罐内流体做整体环形对流运动不同。利用CFD方法可以较好地模拟发酵后期冷却阶段发酵液动量和热量的变化过程,所得结果可作为研究啤酒发酵温度控制的基础资料。

关键词 啤酒发酵;冷却;CFD;模拟

中图分类号 Q 66

文章编号 1007-4333(2006)05-0113-04

文献标识码 A

Modeling and simulation of cooling process for fermenting beer

Wang Liping¹, Liu Xiangdong¹, Xu Yaorun²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Ningbo Lehui Food Machinery CO.Ltd., Ningbo 315153, China)

Abstract A cooling process for fermenting liquor was modeled and simulated using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The calculated results for temperature field of the fermentation liquor were compared with those from the measuring values during a practical production process. The simulation results revealed the hydrodynamic and energy conditions inside a fermentation jar, which provided a solid fundamental for temperature control of a fermenting liquor during beer brewery.

Key words beer fermentation; cooling process; Computational Fluid Dynamics; simulation

啤酒发酵后期的温度控制是影响啤酒质量的关键,研究发酵液温度及速度分布对啤酒生产具有重要意义。发达国家从20世纪70年代就开始了啤酒生产工艺参数的实验优化。Larson等对一罐法发酵工艺中的2个冷却过程进行实验及分析^[1],Bracq等采用数学模拟的方法对啤酒发酵过程的控温方法进行研究,确定了大型发酵罐和储存罐冷却过程中的技术参数^[2],Corrieu等采用神经网络系统和发酵动力学模型对啤酒发酵过程进行模拟^[3]。但是,这些模拟的重点都在啤酒的主发酵前期,而对主发酵后期冷却阶段发酵液的动量及热量变化研究甚少。我国多采用自动化数控对啤酒发酵后期冷却阶段进行温度控制,常用方法主要有:基于STD工业控制计算机所开发的啤酒发酵STD总线系统控制、模糊

控制、神经网络控制、仿人智能控制,全系数自适应控制,模型预估控制,以及多变量时滞系统仿真控制等^[4-10]。这些方法都是基于温度计在发酵罐内啤酒液上、中、下3段中的固定点测得的温度,但三点温度并不能准确反映发酵罐内热量和动量的分布情况。计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟是指通过计算机数值计算和图像显示,对包含流体流动和热传导等物理现象在内的系统作出模拟与分析的研究方法。目前,该方法已成功应用于水利、航运、海洋、环境、食品、流体机械与流体工程等各种技术科学领域^[11]。

本研究拟采用CFD方法对啤酒发酵后期冷却阶段的动量和能量分布进行模拟,研究发酵罐内的瞬态温度分布和发酵过程中罐内液体的速度、温度

收稿日期:2006-04-25

作者简介:王丽萍,硕士研究生;刘相东,教授,博士生导师,主要从事各种干燥技术的研究,E-mail:xldliu@cau.edu.cn

的分布状况,以期为改进啤酒发酵冷却过程的温度控制策略提供理论依据。

1 发酵液冷却过程 CFD 模型的建立

啤酒发酵罐系统的冷源是罐外夹套内的液氮,罐内液体通过液氮的蒸发降低温度。发酵液在罐内为自然对流,循环速度较低,经粗略计算可知其流动速度不超过 5 m/s;雷诺数 $Re = \frac{l u}{\mu}$,其中: l 为流场的几何特征尺寸,这里为发酵罐高度, $l = 20$ m; u 为发酵液流动速度, $u = 5$ m/s; ρ 为啤酒发酵液密度, $\rho = 1.012 \times 10^3$ kg/m³; μ 为啤酒发酵液动力黏度, $\mu = 1.533$ Pa·s。计算得 $Re = 66.014 < 2000$,因此可确定为层流。发酵罐是中心轴对称的圆柱形结构,可视为二维系统。

以发酵后期冷却阶段的啤酒发酵液为研究对象,建立其数学模型的控制方程。

1) 连续方程^[12]。

$$\frac{\partial}{\partial t} + u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} + \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

其中: u_x 和 u_y 分别为发酵液流速在 x 和 y 方向的分速度。

2) 运动方程。对于二维轴对称几何立体结构,轴向(x)和径向(y)的动量守恒方程分别为:

$$\frac{D u_x}{D t} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{D u_y}{D t} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

其中: F_i 为 i (x 或 y) 方向上所受的力之和; p 为静压强。

3) 能量方程。在发酵后期冷却阶段发酵液无化学反应,其能量方程为:

$$\frac{1}{k} \nabla^2 T = \frac{D U}{D t} + p \frac{D}{D t} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \phi \quad (4)$$

其中: T 为发酵液温度; ϕ 为耗散函数; U 为热力学能; k 为发酵液导热系数。

4) 初始边界条件。发酵液初始温度为 283.15 K,罐壁外环型蜂窝夹套内循环液氮蒸发相变换热。冷却夹套内液氮压强恒定,为 3.13×10^5 Pa,饱和温度 265.15 K,液氮吸收了发酵液的热量,产生沸腾

运动,使发酵液温度降低。

初始条件: $u(x, y, 0) = 0$, $T(x, y, 0) = 283.15$ K;

边界条件: $u_{(x,y)} = 0$, $h(T - T_c) = -k \frac{\partial T}{\partial k} \Big|_{(x,y)}$, $T_c = 10$ K, 为发酵罐壁边界域。

2 影响模型参数的因素

1) 发酵热。本实验使用锥形发酵罐,采用一罐法低温发酵工艺,发酵液自然升温至 12℃ 熟成^[13]。在主发酵阶段(12~11 h)酵母进行有氧呼吸,产生大量发酵热,其中一部分用于酵母自身生长,另一部分则以热量的形式使发酵液升温。在后发酵阶段(< 10 h),酵母每消耗 1 mol 葡萄糖只产生约 1.0×10^5 J 的热量,远远低于主发酵阶段的 1.21×10^6 J/mol,这些热量对发酵液温度的影响很小。由于本模拟过程主要涉及 10 h 以下后发酵冷却降温阶段,发酵液本身产生的热量予以忽略。

2) 泡沫生成量。啤酒发酵过程中,泡沫含量是判断发酵成熟度的重要参数。啤酒主发酵期经历了酵母繁殖期、起泡期、高泡期、落泡期以及泡盖形成期。在前 4 个时期,发酵液上部出现二氧化碳气泡形成的白色、乳脂状泡沫,泡沫逐渐增厚,最终在泡盖形成期形成褐色苦味泡盖,覆于液面。由此可见,二氧化碳主要产生在前 4 个时期。本研究中,在泡盖形成期发酵液产生的二氧化碳量较前 4 个时期大幅度减少,泡沫回缩,二氧化碳对冷却过程中发酵液的运动不产生影响^[14],此时发酵液的运动不是腾涌,而是由于密度不均匀产生的对流运动。

3) 密度。主发酵后期,罐内各部分初始发酵液温度大致相同。随着冷却的进行,不同部位的发酵液温度发生变化,密度也随之变化。由于密度不均匀,发酵液产生对流。初始发酵液是麦芽汁,经过主发酵前期的发酵,麦芽汁转变成了嫩啤酒,但其密度变化不大。含糖量为 12% 的麦芽汁在 20℃ 时的密度为 1.0484×10^3 kg/m³,而相对应的嫩啤酒在 20℃ 时的密度为 1.012×10^3 kg/m³。随着温度的降低,发酵液体积减小,密度增大。当温度降低至 3℃ 左右时密度达最大值,继续降温则密度值下降^[15]。在 10~ - 1℃ 之间,发酵液密度呈抛物线变化。

3 发酵罐降温实验

1) 实验装置。大型锥形发酵罐(图 1(a)),高 22

m, 直径 7.2 m, 容积 600 m³。发酵罐锥部及罐体的上、中、下 3 部分装备蜂窝状冷却夹套, 其剖面见图 1(b), 以液氨为冷媒进行冷却。罐体上、中、下各部分冷却夹套下方分别安装温度计, 使之深入发酵罐 300 mm。冷却夹套上设进氨及回氨管道, 通过自动控制系统以中温为依据对管道阀门进行开关控制。回氨压力设定为 3.13×10^5 Pa, 对应的饱和温度为 265.15 K。

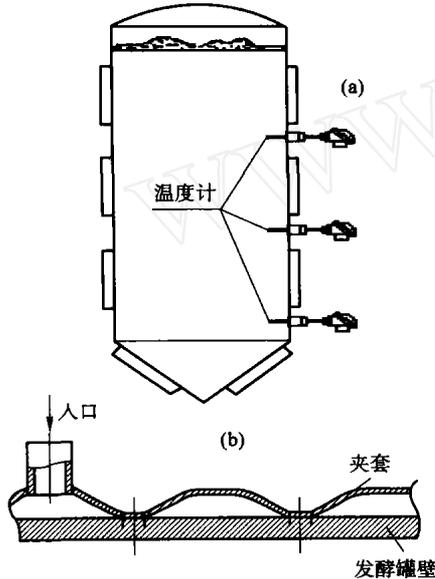


图 1 发酵罐结构 (a) 及蜂窝状冷却夹套剖面 (b) 示意图
Fig. 1 Beer fermentor structure and honeycomb cooling jacket section plan

2) 温度测量。设置在罐内上、中、下部位的温度计, 每 1 h 记录 1 次, 根据中部温度计算机自动控制进氨阀门的开关, 进而控制发酵液的冷却速度, 整个冷却过程共经历 146 h。

4 实验结果分析

4.1 平均温度

对发酵罐内实测平均温度 (3 点实测温度的平均值) 与模拟计算得的发酵液平均温度进行比较, 结果表明: 发酵液实测平均温度与模拟值数值相差很小, 特别是第 1 冷却阶段, 2 条曲线完全重合 (图 2)。这表明在此阶段, 发酵液实际总输出热量值与模拟值相等。而在保温段 (20 ~ 65 h), 模拟值比实测值略高, 这是因为, 模拟过程假设罐内非冷却部位均绝热, 而实际过程则不可能完全绝热。在 115 h 后, 出现模拟值比实测值低的现象, 这可能与罐底少量发酵残渣不能完全排净, 导致传热效率降低有关。

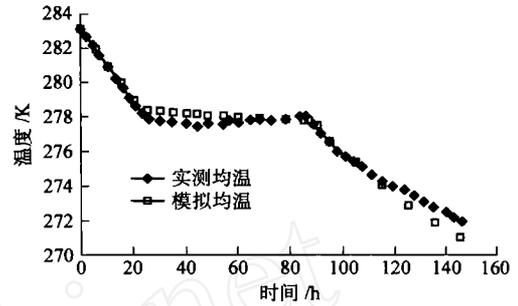


图 2 发酵罐内的实测及模拟平均温度
Fig. 2 Comparison of temperatures from calculations and measurements

4.2 三点温度

对啤酒发酵罐上、中、下 3 点实测温度与模拟温度进行对比 (图 3), 结果表明: 模拟降温过程中, 特别是第 1 降温阶段 (0 ~ 20 h), 发酵液温度分层现象较实际情况严重, 这可能是因为实际生产中设备的热传导系数受酵母及其他沉积物的影响, 使发酵罐传热系数降低, 从而导致实测温度高于模拟温度。

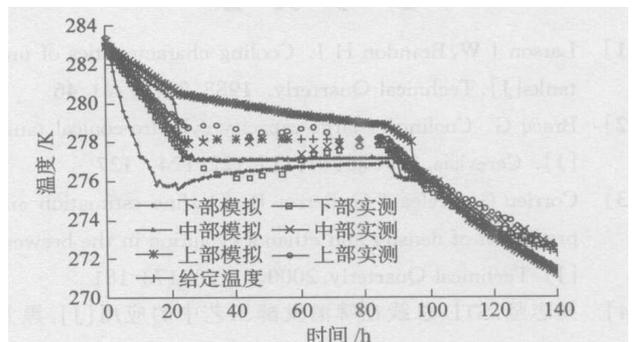


图 3 发酵罐内 3 点的实测温度与模拟温度
Fig. 3 Average temperatures at three positions from actual measurements and simulations

模拟降温过程第 1 和第 2 阶段发酵液对流速度分布见图 4。冷却 22.5 h 时, 罐下部流体速度大、对

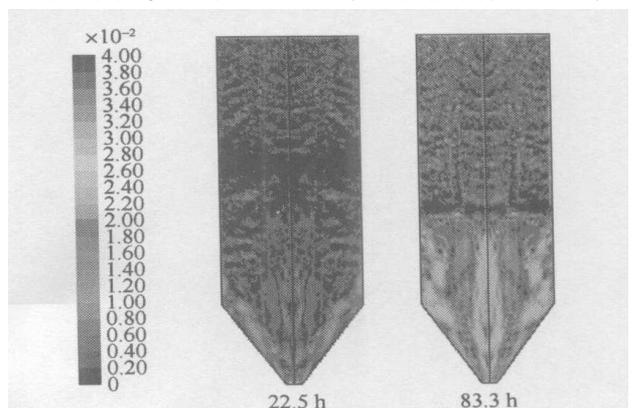


图 4 冷却 22.5 和 83.3 h 后发酵罐内流体速度分布
Fig. 4 Beer speed distributions in fermentor after cooling 22.5 h and 83.3 h, respectively

流强烈,局部对流换热速率和换热量较高,导致明显的局部低温。冷却 83.3 h 时,罐内各部分液体流动速度较大,分布较均匀,且各部分换热量相差较小,罐内液体温度分布较均匀,温度分层现象不明显。

5 结 论

1) 计算流体力学方法可准确地模拟啤酒的低温冷却发酵过程。

2) 发酵罐内温度在冷却过程中有分层现象,模拟温度比实测温度分层更为严重。

3) CFD 模拟结果表明,啤酒发酵冷却过程的温度控制不能仅依据罐内某个部位的温度,如常用的“中温”。

进一步的研究方向是,应根据罐内流体速度、温度分布状况制定适合的温度控制策略,从而有效地发掘发酵设备的潜力,提高产品质量。

参 考 文 献

- [1] Larson J W, Brandon H J. Cooling characteristics of unitanks[J]. Technical Quarterly, 1988, 25(2): 41-46
- [2] Bracq G. Cooling of large-capacity cylindro-conical tanks[J]. Cerevisia, 1996, 5(4): 117-122, 124-127
- [3] Corrieu G, Trelea I C, Perret B. On-line estimation and prediction of density and ethanol evolution in the brewery[J]. Technical Quarterly, 2000, 37(2): 173-181
- [4] 杨志坚. STD 总线在啤酒发酵工艺中的应用[J]. 黑龙江电子技术, 1997, 4: 3-5, 14
- [5] 王畅. 发酵过程温度控制 PIDP 参数的模糊自校正[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 1999, 17(3): 14-21
- [6] 杜立强, 韩兵欣, 刘利贤. 啤酒发酵过程的单神经元自适应 PID 控制[J]. 河北建筑科技学院学报, 2001, 18(2): 40-43
- [7] 胡士强, 张小英, 王该名. 微型发酵温度的智能控制[J]. 河北工业科技, 2000, 17(4): 4-6
- [8] 钟国民, 李志民, 燕育民. 啤酒发酵全系数自适应控制[J]. 自动化学报, 1987, 13(6): 441-444
- [9] Trelea I C, Titica M. Predictive modeling of brewing fermentation: from knowledge based to black box models[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 56: 405-424
- [10] 薛福珍, 庞国仲, 林盛荣. 啤酒发酵过程的建模仿真与控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(4): 502-508
- [11] 王福军. 计算流体力学分析- CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-4
- [12] 王运生, 骆广生, 刘谦. 传递过程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 28-58
- [13] 张志强. 啤酒酿造技术概要[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1995: 561
- [14] 顾国贤. 酿造酒工艺学[M]. 第 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 1996: 193-194
- [15] 路德维希·纳尔蔡斯. 啤酒厂麦芽汁制备工艺技术[M]. 孙明波, 译. 北京: 轻工业出版社, 1991: 139-140