

研究论文

葡萄酒胶发酵中的内热源和传热特性

刘 彬, 童明伟, 徐永松

(重庆大学动力工程学院, 重庆 400030)

摘要: 葡萄酒发酵过程放热量大, 控温发酵是高品质葡萄酒酿造中的一项主要技术措施。对葡萄酒发酵过程的放热特性进行了实验研究, 首先在没有加入温控的情况下, 进行红葡萄酒胶的自然发酵实验, 得到其产生热量的变化关系, 即确定发酵过程中变化的内热源项。然后进行控温发酵实验, 考虑其发酵内热源项, 进行了非稳态传热分析, 获得了发酵过程中温度分布的表达式, 并对发酵过程中温度分布进行了数值计算, 与实验结果吻合较好。

关键词: 发酵; 内热源; 非稳态传热

中图分类号: TS 621.4

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 11-2733-05

Inner heat source and heat transfer in wine fermentation

LIU Bin, TONG Mingwei, XU Yongsong

(School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Wine fermentation has a large amount of heat release in the fermentation course. One of the most important measures is to control the temperature effectively to get high quality wine. In this study, an experimental study of the heat characteristics in wine fermentation was made. Firstly, wild fermentation without temperature control was observed, and the heat release of wine fermentation was investigated. This heat release was defined as the inner heat source of wine fermentation. Then, the experiment with temperature control was made. With the consideration of the inner heat source investigated formerly, the unsteady heat transfer was analyzed, and the expression of temperature distributions for wine fermentation was obtained. The results from computer calculation agreed with the experimental results.

Key words: fermentation; inner heat source; unsteady heat transfer

引 言

微生物发酵是有机物生长和化学反应的复杂过程, 在这个过程中热量产生以及温度分布的分析非常困难, 从微生物发酵过程的传热过程分析的研究现状可以看出, 对于有生物内热源存在下的微生物发酵的传热过程缺乏机理的研究, 只有对少数微生物种类的传热过程和温度分布的研究^[1-7]。

葡萄酒发酵生产过程是在酵母菌的作用下, 将糖转化为酒精的过程, 这个过程释放大量的热, 使发酵介质温度升高, 而低温发酵是生产高品质葡萄酒的关键^[8]。国外曾有学者进行过葡萄酒发酵过程的传热研究, 大多忽略导热而只考虑了对流换热^[9]。本文建立了一个可视化发酵实验装置, 发酵时将消毒后的葡萄进行破碎, 然后将葡萄皮、籽等一起放入发酵箱内进行发酵, 根据观察, 发酵介质

主要为胶状物,流动性较差,在这种情况下综合考虑导热与对流的影响进行红葡萄酒的发酵实验分析,确定其产生热量的变化关系,进而确定发酵过程中变化的内热源项,由此建立发酵条件下的非稳态传热模型。

1 葡萄酒发酵过程发热量的确定

为了得到葡萄酒发酵过程的产热量,本文采用了一个小型的 300 mm×300 mm×300 mm 的正方体发酵箱,正面开有可视化窗口,从其侧面正中心位置导入一根不锈钢水管通冷、热水作为控温用冷、热源,外部采用良好的绝热,内部布置铠装热电偶测量发酵过程中的温度。假设发酵箱中的葡萄酒发酵介质分布均匀,在箱体长度方向中间位置取一切面作为热电偶的布置面,热电偶呈十字形分布在布置面上,如图 1 所示。本文进行的是红葡萄酒的发酵酿制,自然发酵过程实验进行了 12 d,记录了在发酵过程中各个时刻各个测点温度 T 值,如图 2 所示。

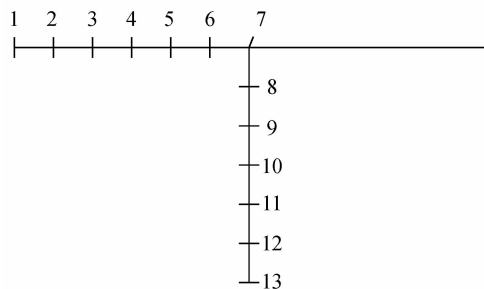


图 1 中间截面热电偶分布

Fig. 1 Disposal map of thermoelectric pair

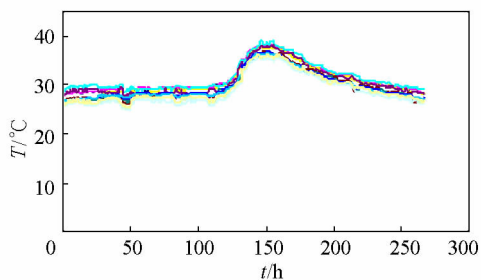


图 2 各测点温度-时间图

Fig. 2 Temperature-time chart of all measured points

由于发酵过程为放热过程,发酵箱中的介质吸收热量后温度逐渐升高,当其温度升高到一定值以后,由于超过了发酵的温度范围,发酵可能会停滞,此时温度就不再升高。

在实验进行到 152 h 左右时,发酵箱中各点的温度都大致到达最高值,因为发酵的程度直接受到温度的影响,理论上如果发酵一直在进行,那么温度就会升高,因此可以认为在发酵箱中各个测点温度到达最高值时,发酵已经停止,温度不再继续升高,因此取实验中的前段(前 152 h)做进一步分析。

根据发热量的计算式,可以得到单位体积发酵介质的温度升高所需要的热量

$$Q = \rho c \Delta T \quad (1)$$

式中 Q 为发热量, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 为发酵介质密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为发酵介质比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ 和 c 均由实验测定。在发酵时取样(未经过滤的原发酵胶),用量筒取一定体积的试样,电子秤称重。经过多次测量,得到密度平均值为 $1.0087 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。发酵介质比热容 c 由 DSC(差示扫描量热法)确定,发酵试样的比热容随温度产生变化,其数值曲线在 $19 \sim 39^\circ\text{C}$ 范围内波动较小,在实验误差允许范围内为常数值。根据 3 次的比热容测试范围的数据显示,比热容几乎在 $1.30 \sim 1.48$ 之间波动,取比热容值为 $c = 1.41 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

根据内热源的定义(单位时间、单位体积中的生成热),最终可得到要求取的内热源表达式为

$$\dot{\phi} = Q / \Delta t \quad (2)$$

式中 Δt 为温升 ΔT 的时间, s; Q 为单位体积发热量, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

因为各个测点在自然发酵时变化规律相同,以中心测点为分析对象,可以得到不同温度下的 $\dot{\phi}$ 值,故得出不同温度下的内热源大小趋势,如图 3 所示。根据文献 [10],红葡萄酒酿造的理想温度是 $26 \sim 30^\circ\text{C}$,白或桃红葡萄酒在 $18 \sim 20^\circ\text{C}$ 左右。本文采用的是红葡萄酒的发酵,可以看出在 $25 \sim 29^\circ\text{C}$ 之间内热源逐渐减小,证明酵母活力随着温度升高逐渐减弱,因为内热源即生物反应自身的产热量,反映了生物反应的剧烈程度,可以看出 $25 \sim 27^\circ\text{C}$ 红葡萄酒发酵最为剧烈,当温度高于 38°C 时,内热源几乎消失,证明发酵已经接近停止。

由图 3 可见,测得的数据是一条对多项式曲线,试用最小二乘法原理,结合 Origin 软件数据处理得到它的拟合多项式

$$\dot{\phi} = aT^2 - bT + c \quad (25^\circ\text{C} \leq T \leq 29^\circ\text{C}, R^2 = 0.9158) \quad (3)$$

表 1 系数取值
Table 1 Value of constant coefficients

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
0.067109 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻²	3.8751 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻¹	55.941 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹	0.4076 × 10 ⁻³ kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻⁴
<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
5.51 × 10 ⁻² kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻³	2.7749 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻²	61.696 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹ · K ⁻¹	511.069 kJ · m ⁻³ · s ⁻¹

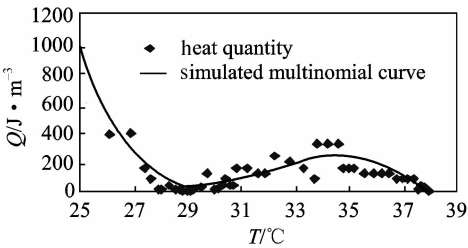


图 3 中心测点 7 发热量-温度趋势

Fig. 3 Heat quantity-temperature trend of center measured point 7

$$\dot{\phi} = dT^4 - eT^3 + fT^2 - gT + h$$

(29℃ < T ≤ 38℃, R² = 0.6636) (4)

$$\dot{\phi} = 0$$

(T > 38℃) (5)

式中 *a*、*b*、*c*、*d*、*e*、*f*、*g*、*h* 为常数，如表 1 所示。

拟合公式的精确度可以通过相关系数 *R* 来判断。一般要求 *R*² > 0.8 时，观察经验公式和原曲线的拟合效果比较真实。拟合的关系式将作为非稳态传热模型中随温度变化的内热源项。

2 非稳态传热模型的建立与求解

2.1 非稳态传热模型的建立

当自然发酵时，发酵介质处于均匀状态，各个测点的温度变化趋势一致，但是当通入控温用冷、热源后，温度不但随时间变化，也会随空间位置变化。

取垂直于中心冷热水管的一个截面作为研究对象，如图 4 所示。

将问题考虑为二维状况，并根据理论计算和实验观察做出假设：① 发酵介质物性基本均匀；② 忽略辐射导热；③ 实验前期（0~65 h）和后期（111~150 h）忽略对流换热，主要考虑导热；④ 实验中期（66~110 h），在导热基础上综合考虑 CO₂ 气泡扰动下的对流换热。

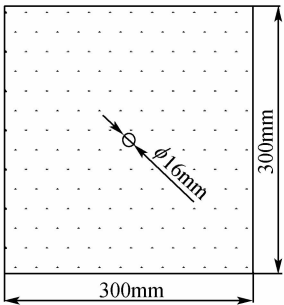


图 4 发酵物理模型

Fig. 4 Physics model of fermentation

建立非稳态传热方程^[11]

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \rho \frac{\partial (vT)}{\partial y} = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{\phi} \quad (6)$$

内热源 $\dot{\phi}$ 由式（3）~式（5）表示。热导率的测定较为困难，它与发酵介质的成分、温度和含水率等因素相关，考虑浓度为 40% 的乙醇在 20℃ 时热导率为 0.388 W · m⁻¹ · K⁻¹，以及文献 [12-14]，选取发酵介质的近似热导率 λ = 0.35 W · m⁻¹ · K⁻¹。

初始条件：T = 25℃，t < 0；初始时刻，没有通入热源，发酵介质温度均匀。

边界条件：x = 0， $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ （壁面绝热）；x = 2L， $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ （壁面绝热）；y = 0， $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ （壁面绝热）；y = 2L， $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ （壁面绝热）；x = L，y = L，T = -0.0338t + 29.5（中心控温水管通入的温水随时间的变化规律），L = 150 mm。

2.2 数值计算及结果比较

采用 Fluent 软件对模型进行计算。为了验证计算结果，进行葡萄酒的控温发酵实验，在中心控温水管通入控温热水，记录各个测点温度变化，并与计算结果比较。图 5~图 8 是测点 1~7 在 5、52、100、150 h 时计算值与实验测量值的比较。

由图中可以知道，实验开始阶段控温水温度高

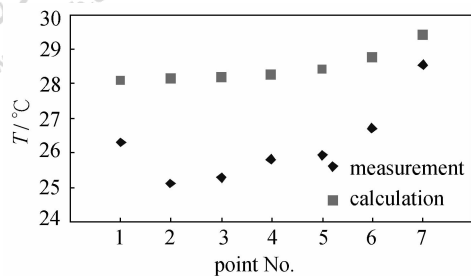


图 5 5 h 时测量值与计算值比较

Fig. 5 Comparison of measurements and calculations in 5 h

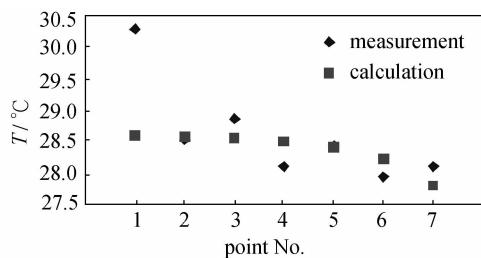


图 6 52 h 时测量值与计算值比较

Fig. 6 Comparison of measurements and calculations in 52 h

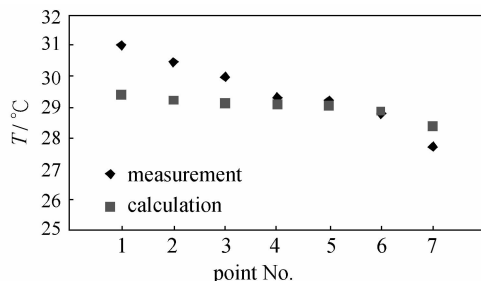


图 7 100 h 时测量值与计算值比较

Fig. 7 Comparison of measurements and calculations in 100 h

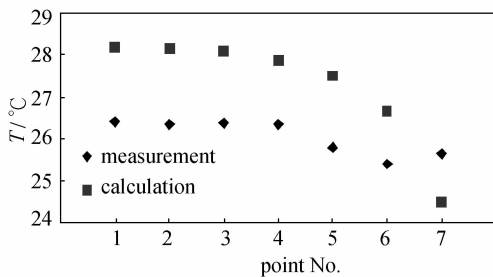


图 8 150 h 时测量值与计算值比较

Fig. 8 Comparison of measurements and calculations in 150 h

分布不均匀。发酵进行到 50 h 左右, 发酵到达旺盛阶段, 介质温度高于控温水温度, 开始向控水管传递热量, 温度分布沿径向方向从四周到中心逐渐降低。

图 9~图 11 是测点 1、3 和 5 在发酵过程中的前期、中期和后期计算值与测量值的比较。观察图 9 可以看到因为计算时采用了简化的初始条件, 即假定初始时刻发酵箱内介质温度分布均匀, 实际上初始时刻温度分布不是严格满足均匀的要求, 因而对计算结果产生影响, 导致发酵开始时段内计算结果与测量值有一定的误差。

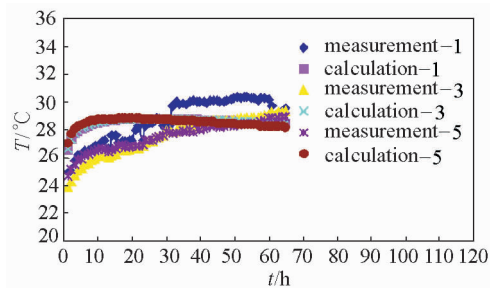


图 9 各测点发酵前期测量值与计算值比较

Fig. 9 Comparison of measurements and calculations of points in front part of fermentation

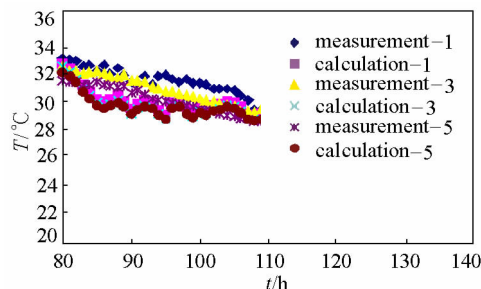


图 10 各测点发酵中期测量值与计算值比较

Fig. 10 Comparison of measurements and calculations of points in middle part of fermentation

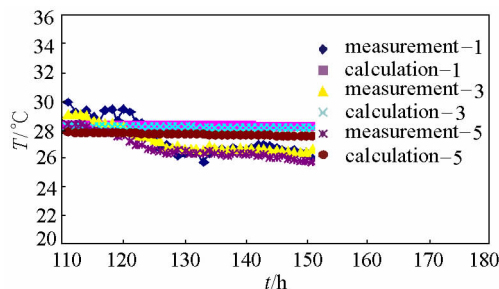


图 11 各测点发酵后期测量值与计算值比较

Fig. 11 Comparison of measurements and calculations of points in end part of fermentation

于发酵箱内介质温度, 热量沿径向向箱内四周传导, 温度沿径向方向从中心到四周温度应该逐渐降低, 图 5 中的测点 1 温度过高是由于初始时刻温度

发酵过程进行到中期(65~110 h), 通过从观察窗口观察发现, 发酵介质逐渐分层, 皮渣逐渐上升, 下层则为浑浊的液体, 在 65~80 h 区段, 皮渣包裹控温水管并淹没测点 1~7, 造成导热恶化, 而对流还没有达到此处因而导致温度上升, 故计算时忽略该段。从 80 h 开始分析, 如图 10 所示, 此时有 CO₂ 气泡的产生和扰动, 需要综合考虑对流与导热情况对换热产生的影响。根据观察, CO₂ 气泡生成量不大, 又考虑到 CO₂ 气泡产生的极不稳定和极不均匀的情况, 因此假设 CO₂ 气泡从浑浊液体中均匀产生, 其平均直径为 2 mm, 产气量为 4.5 L · m⁻³ · h⁻¹, 采用 Fluent 软件计算 CO₂ 气泡扰动下的对流换热影响。因为实际上物性参数的不确定性, 计算结果与实验测量值有一定的差异, 但数值计算结果基本上表达了温度变化的趋势。

由于对模型以及初始条件和边界条件的简化, 对计算结果必定造成一定的影响, 但是计算结果与实验测量结果得到了较好的吻合, 证明在本文实验条件下自然发酵实验得到的内热源公式基本上能表明发酵过程中微生物化学反应的产热量与温度之间的变化关系。

3 结 论

发酵过程属于生物反应过程, 在生物反应过程中的传热问题因为生物内热源的存在, 即生物反应自身产生热量的存在, 而变得复杂。生物反应自身产热量大小受到反应过程中各个因素的制约, 而温度正是这些制约因素中重要的因素之一。对发酵温度的有效控制是生产高品质葡萄酒的关键, 如果能得到发酵反应自身产热量规律(即其内热源变化规律)就能使温度控制更加精确和有效。本文进行了葡萄酒发酵过程的实验研究, 取得了葡萄酒发酵过程中的内热源与温度的变化关系, 并对代入内热源关系式的传热模型进行了计算, 与控温发酵实验中的实验结果比较得到了较好的吻合, 能够为发酵生产过程中的温度控制提供有效的依据。

References

- [1] Mitchell David A, Tongta A, Stuart D M, Krieger N. The potential for establishment of axial temperature profiles during solid-state fermentation in rotating drum bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 2002, **80** (1): 114-122
- [2] Lian Guoping, Parry Andrew, Moore Steve, Thiru A. CFD simulation of heat transfer and polyphenol oxidation during tea fermentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, **34** (1/2/3): 145-158
- [3] Sangsurasak P, Mitchell D A. Investigation of transient multidimensional heat transfer in solid state fermentation. *Chemical Engineering Journal and Biochemical Engineering Journal*, 1995, **60** (1/2/3): 199-204
- [4] Khanahmadi Morteza, Roostaazad Reza, Safekordi Aliakbar, Bozorgmehri Ramin, Mitchell David A. Investigating the use of cooling surfaces in solid-state fermentation tray bioreactors: modelling and experimentation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004, **79** (11): 1228-1242
- [5] Luong J H T, Volesky B. Determination of the heat of some aerobic fermentations. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1980, **58** (4): 497-504
- [6] Turker Mustafa. Measurement of metabolic heat in a production-scale bioreactor by continuous and dynamic calorimetry. *Chemical Engineering Communications*, 2003, **190** (5/6/7/8): 573-598
- [7] Wang Yu, Xu Ke, Li Bingfeng, Zhang Gandao. Research on temperature field in heat pipe bioreactors. *Modern Chemical Industry*, 2003, **23** (1): 24-28
- [8] Gao Haisheng (高海生), Zhang Jiancai (张建材). The fermentation technology of temperature control in wine-making. *Science and Technology of Food Industry* (食品工业科技), 2005, **2**: 194-195
- [9] Sophie Colombié, Sophie Malherbe. Modeling of heat transfer in tanks during wine-making fermentation. *Food Control*, 2006, **20**: 1-8
- [10] Zhang Jianhua (张建华). The discuss of the factors influence the wine fermentation. *Jiangsu Food and Fermentation* (江苏食品与发酵), 2002, **4**: 31-32
- [11] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). Heat Transfer (传热学). 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 71-80
- [12] Liu Jin (刘静), Wang Cuncheng (王存诚). Biology Heat Transfer (生物传热学). Beijing: Science Press, 1997: 243-244
- [13] Seher Kumcuoglu, Sebnem Tavman, Paul Nesvadba, Ismail Hakki Tavman. Thermal conductivity measurements of a traditional fermented dough in the frozen state. *Journal of Food Engineering*, 2007, **78** (3): 1079-1082
- [14] Njie D N, Rumsey T R, Singh R P. Thermal properties of cassava, yam and plantain. *Journal of Food Engineering*, 1998, **37** (1): 63-76