

# 啤酒发酵液低温冷却过程的 CFD 模拟

袁越锦<sup>1,2</sup>, 王丽萍<sup>2</sup>, 徐英英<sup>1</sup>, 刘相东<sup>2</sup>, 徐尧润<sup>3</sup>

(1. 陕西科技大学, 陕西 西安 710021; 2. 中国农业大学, 北京 100083;

3. 宁波乐惠食品设备制造有限公司, 浙江 宁波 315153)

**摘要:** 应用传递过程原理和计算流体力学(CFD)知识,建立了啤酒发酵后期冷却阶段发酵液热量与动量传递的CFD模型,并进行了数值模拟,得到了啤酒发酵罐内发酵液的热量和动量分布。模拟结果表明,啤酒发酵后期冷却过程中发酵液温度上高下低,轴向分层明显,而径向温度梯度很小,发酵液的运动复杂,局部小环流众多,严重影响其温度分布,这对于改进传统的啤酒发酵后期冷却温控策略有较重要的理论与实践意义。

**关键词:** 啤酒发酵; 冷却; CFD; 模拟; 分层

中图分类号: TS262.5; TS261.4; Q66 文献标识码: A 文章编号: 1001-9286(2008)04-0025-04

## CFD Model of Low-temperature Cooling Process of Beer Fermenting Liquid

YUAN Yue-jin<sup>1,2</sup>, WANG Li-ping<sup>2</sup>, XU Ying-ying Xu<sup>1</sup>, LIU Xiang-dong<sup>2</sup> and XU Yao-run<sup>3</sup>

(1. Shanxi University of Science & Technology, Xi'an, Shanxi 710021; 2. China Agricultural University, Beijing, 100083;

3. Ningbo Lehui Food Machinery CO.Ltd., Ningbo, Zhejiang 315153, China)

**Abstract:** A CFD model of heat and momenta transferring of beer fermenting liquid in late fermentation stage and in cooling process was set up by computational fluid dynamics (CFD) technique and transport processing principle. The heat and momenta distribution of fermenting liquid in beer fermentation tower was analyzed through numerical simulation. The results suggested that the temperature delamination was distinct in direction of the tower axis; while the temperature gradient was un conspicuous along the radial direction; and the fermenting liquid in the tower showed a very complicated movement including numerous small local circumfluences which seriously influenced temperature distribution. The establishment of such model was significant practically and theoretically in improving temperature control in late beer fermentation state.

**Key words:** beer fermentation; cooling; CFD; simulation; delamination

啤酒发酵是一个复杂的过程,通常在3个水平上进行,即:菌体遗传特性的分子水平、细胞代谢特性的细胞水平和质量、热量、动量传递特性的工程水平。这3个水平互为因果,一旦某一水平问题成为限制因素,就会影响整个发酵过程<sup>[1]</sup>。目前,已有许多学者对其进行了模拟与仿真研究,如:Corrieu<sup>[2]</sup>等提出了采用神经网络系统和发酵动力学两种预测模型对啤酒发酵过程进行模拟;Felipe<sup>[3]</sup>等研究了生长于含有K2抑制蛋白培养底物中的酿酒酵母的分批发酵动力学模型等。对发酵过程的控制一般通过控制发酵温度来实现,所采用的控制方法主要有:现场总线控制<sup>[4]</sup>、以专家系统为代表的智能控制<sup>[5]</sup>、模型预估控制<sup>[6]</sup>、集散系统结合PID的复合控制<sup>[7-8]</sup>等,这些温控方法的一个共同点是都基于现场温度计测量的发酵液温度作为主要调节参数,没有深究引起温度变化的本质原因,区分不出发酵过程中“3个不同水平”的问题,这使得啤酒发酵过程控制还只停留在经验研究的层次上,大大影响了控制精度与稳定性的进一步提高,特别是啤酒发酵后期的温度控制,它是影响啤酒质量的

关键环节之一,而这一阶段温控的难点是准确预测发酵罐内的温度变化,防止产生过大超调。实际上啤酒发酵后期,由于发酵液本身产生的热量很少,这一阶段在很大程度上,质量、热量、动量传递特性已成为影响发酵过程的主导因素,属于“工程水平”的问题。因此,本文拟采用计算流体力学(CFD)方法对啤酒发酵后期冷却阶段的动量和热量分布进行模拟,研究发酵罐内液体的温度与速度分布状况,以期对冷却过程建立精确的温控依据。

### 1 啤酒发酵罐装置

本文模拟的啤酒发酵罐装置见图1,其高度22m,直径7.2m,容积600m<sup>3</sup>。罐体与罐底上均匀安装5个蜂窝状冷却夹套和温度计,温度计深入发酵罐内0.3m。以液氨为冷媒进行冷却,冷却夹套的面积共(计5条)268m<sup>2</sup>,其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2.4×10<sup>5</sup>Pa。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50676104);陕西科技大学科研启动基金资助项目(BJ07-06)。

收稿日期:2007-12-27

作者简介:袁越锦(1975-),男,湖南汉寿人,博士,讲师,主要从事干燥技术与设备、传递过程的研究。

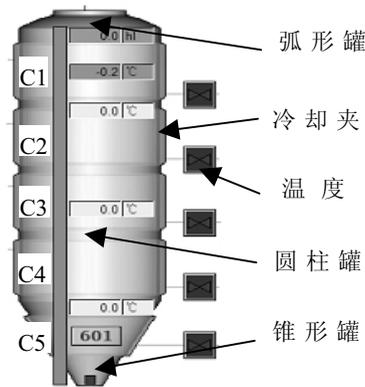


图1 锥形啤酒发酵罐示意图

## 2 啤酒发酵液冷却过程的 CFD 模型

### 2.1 物理描述

#### 2.1.1 发酵热

采用一罐法低温啤酒发酵工艺。在主发酵阶段(12~11),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。在后发酵冷却阶段(<10),酵母每消耗1摩尔葡萄糖只产生约 $1.0 \times 10^5$  J的热量,与主发酵阶段的 $1.21 \times 10^6$  J/mol相比,发酵液产生的热量远远低于主发酵阶段,这些热量对发酵液的温度的影响很小。由于本模拟过程主要涉及10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,即认为发酵液内无化学反应,不考虑罐内杂质等因素的影响。

#### 2.1.2 泡沫生成量

啤酒发酵过程中,泡沫含量的多少是判断发酵成熟度的重要参数,是否考虑发泡问题,则决定研究过程是采用腾涌模型还是其他的流体动力学模型。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 $\text{CO}_2$ 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, $\text{CO}_2$ 主要产生在前4个时期,在泡盖形成期发酵液产生的 $\text{CO}_2$ 量较前4个时期大幅度减少, $\text{CO}_2$ 对冷却过程中发酵液的运动不产生影响<sup>[9]</sup>。因此,在模拟过程中本研究认为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。

#### 2.1.3 发酵液流动状态

啤酒发酵罐系统的冷源是罐外夹套内的液氨,罐内液体通过液氨的蒸发降低温度,发酵液在罐内为自然对流。经粗略估计可知其流动速度不超过5 m/s,计算其雷诺系数得 $Re = 66.014 < 2000$ ,因此可确定为层流流动。

### 2.2 数学模型

发酵罐为旋转中心轴对称的结构,可视为二维系统。以发酵罐顶部中心为原点,垂直向下方向为x轴,沿发酵罐径向为y轴建立坐标系。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。

#### 2.2.1 连续方程

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

式中: $u_x, u_y$ 为发酵液流速在x和y方向的分速度, m/s;  
 $\rho$ 为发酵液密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

#### 2.2.2 运动方程

轴向(x):

$$\rho \frac{Du_x}{Dt} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

径向(y):

$$\rho \frac{Du_y}{Dt} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中: $F_i$  ( $i=x$ 或 $y$ )为i方向上所受的体积力之和, N;

$p$ 为静压强, Pa。

#### 2.2.3 能量方程

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

式中:T为发酵液的温度, ;

$\phi$ 为耗散函数;

U为热力学能, J;

k为发酵液导热系数,  $k=100 \text{ w}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

#### 2.2.4 补充方程

以上(1)、(2)、(3)、(4)式组成的方程组中有5个未知量( $\rho, u_x, u_y, p, T$ ),方程组不封闭,需补充方程。

在后发酵冷却阶段,罐内发酵液密度受温度的影响很大,随着温度的降低,发酵液体积减小,密度增大。当温度降低至约3时密度达最大值,继续降温则密度值下降。发酵液在20时,密度为 $1006.22 \text{ kg/m}^3$ ,从97降至5时,体积收缩4%,从3降至-3时,本文仿照水在标准大气压下的平均密度缩减速率来进行计算,最后得到发酵液在-3~20间的密度变化规律如下:

$$\rho = 0.001T^4 - 0.0133T^3 - 0.0164T^2 + 0.2822T + 1013 \quad (5)$$

#### 2.2.5 冷却夹套内液氨蒸发换热过程

本文把夹套内的换热看作是竖管内的沸腾传热类型。沸腾传热过程中,传热系数是影响传热效率的关键。该系数可由下式估算。

$$\frac{C_p t}{r Pr S} = C_{ve} \left[ \frac{q}{\mu r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} \quad (6)$$

式中: $C_p$ 为饱和氨液的定压比热;

t为壁面过热度(平均);

r为蒸发潜热;

Pr为饱和氨液的普朗德数;

S为系数,对液氨取 $S=1.7$ ;

$C_{ve}$ 为一取决于“加热表面-液体”组合情况的经验常数,对于氨-不锈钢系统,  $C_{ve}=0.006$ ;

q为热通量;

$\mu$ 为饱和氨液的动力黏度;

$\rho_l, \rho_v$ 分别为饱和氨液密度与蒸汽密度;

$\sigma$ 为饱和氨液界面表面张力;

g为重力加速度。

以上各参数, 本文取值见表 1。

表1 式(6)中的参数取值

$C_p / J(kg \cdot K)$	$\lambda t / (^\circ C)$	$r(J/kg)$	Pr	S
4551.3	13.5	1291019.6	1.74	1.7
$C_v$	$M(Pa \cdot s)$	$\rho_l (kg/m^3)$	$\rho_v (kg/m^3)$	$\nu (N/m)$
0.006	$2.06 \times 10^{-4}$	652	2.39	$353.1 \times 10^{-4}$

## 2.2.6 模拟中用到的其他发酵液物性参数值(见表 2)

表2 发酵液的物性参数值

项目	指数
比热 $C_f / J/(kg \cdot K)$	4000
黏度 $\mu(Pa \cdot s)$	$1.533 \times 10^{-3}$
导热系数 $k(W/m \cdot K)$	0.6
热膨胀系数 $\beta_1(T \geq 3^\circ C)$	$6.7827 \times 10^{-5}$
热膨胀系数 $\beta_2(T < 3^\circ C)$	$-6.7827 \times 10^{-5}$

## 3 模拟与实测结果分析

### 3.1 工艺设定与实测温度的比较

图 2 为发酵罐内 3 点的实测温度值与工艺要求所给定温度值的比较。整体而言, 目前采用的温控方法基本上能满足工艺要求, 但从图 2 中明显可看出, 在第一冷却阶段时间约为 30 h 时, 两者偏差较大, 这说明传统的温控方法还不能满足高精度要求。

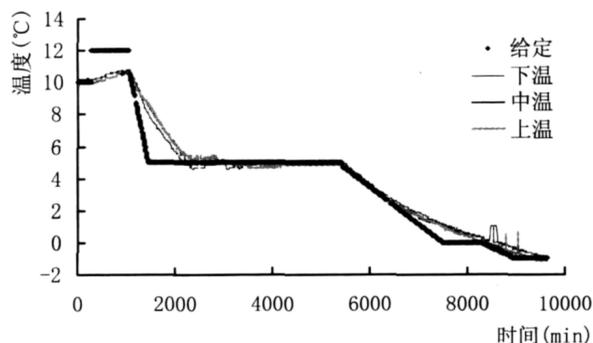


图 2 发酵罐内 3 点实测温度与发酵工艺给定温度比较

### 3.2 模拟与实测温度的比较

对发酵罐内 3 点的实测温度与模拟计算得到的发酵液温度进行比较, 结果见图 3。从图 3 中可以看出, 相应各点的实测与模拟温度曲线一致性很好, 这表明本文建立的数学模型是可行的。在冷却进行 115 h 后, 出现模拟温度比实测温度值略偏低的现象, 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。

### 3.3 冷却过程中发酵液的温度分布

图 4 为啤酒发酵冷却过程中罐内流体的温度分布情况, 颜色表示其数值大小, 由红至蓝依次减小。(a)为冷却 22 h 后的温度分布情况, 罐顶部发酵液温度最高, 为 10, 底部温度最低, 为 7.6, 罐内最大温差为 2.4, 发酵液温度在轴向呈现出鲜明的层次性; (b)为冷却 28 h 后的温度分布情况, 此时罐内发酵液温度整体下降, 特别是罐底部温度已为 4, 与(a)相比降幅

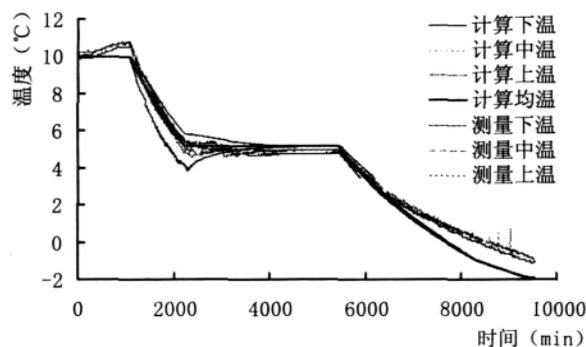


图 3 发酵罐内 3 点实测温度与模拟温度比较

达 3.6, 而罐顶部温度降幅仅为 1.2; (c)为冷却 34 h 后的温度分布情况, 此时罐内发酵液温度进一步下降, 罐内最大温差为 5。

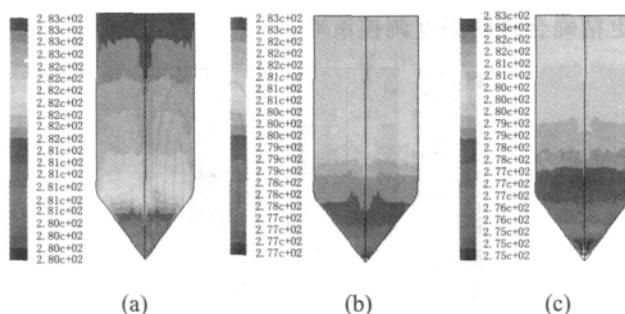


图 4 发酵冷却(a)22 h、(b)28 h 与(c)34 h 后罐内流体的温度分布图

从图 4 可以看出, 冷却过程中罐内发酵液温度轴向分层明显, 而径向温度梯度很小。这与我们通常认为的情形差异较大, 其原因: 一方面可能是设备的热传导系数受到酵母及其他沉积物的影响, 另一方面更重要的是, 温度受发酵液流动状态影响显著。此外, 图 4 中还反映出罐内发酵液温度上高下低, 锥形罐底的降温速度要快很多。这表明锥段冷却夹套的冷却效果更好。

### 3.4 冷却过程中发酵液的速度分布

图 5 为啤酒发酵冷却过程中罐内流体的速度分布, 采用流量函数的形式表示(kg/s)。颜色表示其数值大小, 由红至蓝依次减小。(a)为冷却 22 h 后的速度分布情况, 罐中心轴线部位发酵液速度较大, 靠近壁面处速度较小, 不过在罐底锥面上的发酵液速度仍然较大; (b)、(c)依次为冷却 28 h、34 h 后的速度分布情况, 罐内发酵液速度逐渐下降。

从图 5 可以看出, 冷却过程中罐内发酵液的流动状态保持稳定, 变化不大, 流量函数分布形状属于同一类型, 没有观察到罐内沿中心轴与壁面路线而形成的整体大循环流(见图 6)。这一传统类型的出现, 说明传统认识与罐内发酵液实际运动情况有较大差别。另一方面, 从空间角度来看, 罐内发酵液的运动却非常复杂, 局部小环流众多, 这不可避免地会影响到罐内发酵液的热量传递, 进而影响其温度分布。因此, 传统的仅依据现场温度计测量罐内某部位发酵液温度(如常用的“中温”)作

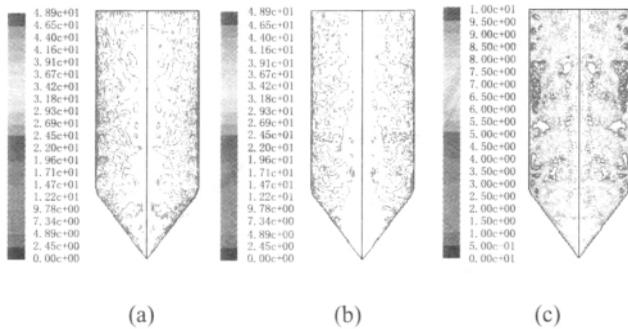


图5 发酵冷却(a)22 h、(b) 28 h与(c)34 h后罐内流体的速度分布图

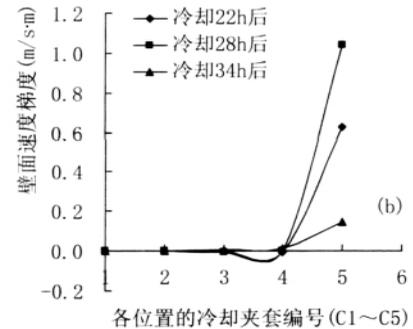
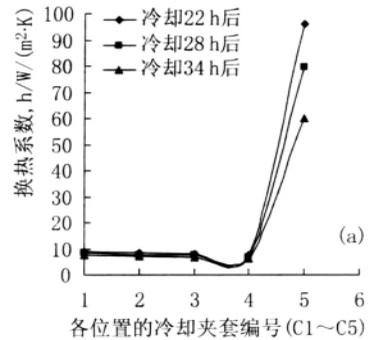


图7 靠近各冷却夹套罐壁附近发酵液的热(a)与运动参数(b)值  
了解罐内流体速度、温度分布的基础上制定控制策略,这样才能有效地保证啤酒质量,挖掘发酵设备的潜力,达到最佳冷却效果。

为主要调节参数来进行温度控制的方法是不全面的。运用 CFD 模拟,深入研究冷却过程中发酵液的热量、动量传递状况,得到其温度与速度分布等,从而可以制定出更精确合理的温度调控策略。

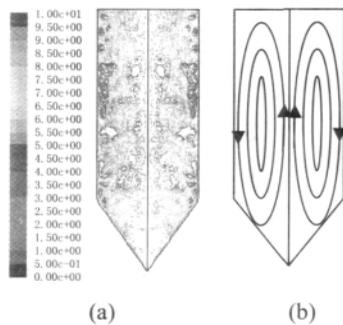


图6 发酵冷却过程中罐内流体的速度分布类型:  
(a)模拟与 (b)传统认为的情况比较

### 3.5 冷却过程中靠近各冷却夹套罐壁附近发酵液的热交换与运动参数值分析

图7为靠近各冷却夹套罐壁附近发酵液的换热系数与速度梯度值。图7中X轴为冷却夹套位置编号,详见图1中的C1~C5标识;换热系数由式(6)求得,速度梯度(与壁面平行方向)为 $dv_x/dx$ ,即单位长度上的速度变化值。

从图7中可以看出,冷却过程中锥段夹套(编号C5)处的发酵液换热系数比其他夹套的要大得多,平均约为10倍。相应地,该处发酵液的速度梯度值比较起来也大很多。这意味着锥段冷却夹套将具有更大的换热通量,自然其冷却效果更好,这与前文分析的结果是一致的。

## 4 结论

4.1 计算流体力学(CFD)方法可准确地模拟啤酒的低温冷却发酵过程;研究发现,冷却过程中罐内温度上高下低,轴向分层明显,而径向温度梯度很小。锥形罐底的降温速度很快,锥段冷却夹套的冷却效果更好。

4.2 模拟结果表明,啤酒发酵冷却过程中罐内发酵液的运动复杂,局部小环流众多,严重影响其温度分布。因此,温度控制不应仅依据罐内某点的温度,而应在详细

## 参考文献:

- [1] 周青峰,林纬铁,姚汝华. 发酵过程的计算机优化控制[J]. 酿酒,1997,(2): 18- 20.
- [2] 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.
- [3] Felipe Ramon-Portugal, Marie-Line Delia-Dupuy, Herve Pingaud, et al. Kinetic study and mathematical modeling of the growth of *S. cerevisiae* 522D in presence of K2 killer protein [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1997, 68(2): 195- 201.
- [4] Shuchuan Gan, Chenghua Fu. The application of CAN field bus technology in the beer fermentation process[A]. 2002 Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation[C] Shanghai: IEEE,2002,3109- 3112.
- [5] Pang Guozhong, Xue Fuzhen, Zhang Yubin Computer integrated control for fermentatirn workshop [A]. 2000 Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Hefei: IEEE, 2000,3614- 3617.
- [6] Trlea 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.
- [7] Chris Pratt, Mark Brean. Distributed ferment control with central supervision and data collection[J]. Computing & Control Engineering Journal, 1990, 9: 224- 230.

(下转第31页)

是产生葡萄酒口感差异的重要因素。

### 2.3.2 2001 年不同产地葡萄酒中的中性酚与酸性酚

2001 年 6 个产地的葡萄酒的中性酚和酸性酚分别见表 5 和表 6。

表 5 2001 年不同产地葡萄原酒中中性酚的含量

产地	(mg/L)			
	儿茶素	芦丁	槲皮素	$\Sigma$ 中性酚
1	29.63	3.13	0.779	34.539
2	34.15	3.63	0.623	38.403
3	28.08	3.28	0.930	32.290
4	30.10	4.33	0.239	34.669
5	31.09	3.48	0.861	35.431
6	25.95	3.61	0.724	31.084

表 6 2001 年不同产地葡萄原酒中酸性酚含量

项目	(mg/L)					
	产地					
	1	2	3	4	5	6
没食子酸	24.23	27.64	25.84	26.36	28.38	23.42
原儿茶酸	1.350	1.106	1.227	0.787	1.302	0.876
绿原酸	1.167	1.459	1.063	1.330	1.381	1.045
咖啡酸	2.005	2.241	1.663	1.514	1.011	0.921
p-香豆酸	0.378	0.475	0.757	0.525	0.535	0.817
阿魏酸	0.357	0.363	0.341	0.389	0.327	0.334
o-香豆酸	0.0353	0.0314	0.0564	0.0608	0.0347	0.0449
丁香酸	0.668	0.606	0.562	0.550	0.755	0.711
$\Sigma$ 酸性酚	30.19	33.92	31.51	31.52	33.72	28.17

由表 5 和表 6 可看出, 2001 年度的葡萄酒中的中性酚和酸性酚的总量除个别外均在同一个数量级上, 均比 2000 年有所提高。

### 3 结论

从葡萄酒中多酚物质含量的分析比较可以看出, 酒的差异性特别是较小的差异性都与葡萄酒的组成变化有关, 单从多酚含量来看, 不能说多了就好, 或者少了就差, 主要看是否有一个适合该酒特征性的合理的比例。

#### 参考文献:

- [1] 赵光鳌, 等译. 葡萄酒酿造学——原理及应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [2] 李华. 葡萄酒酿造与质量控制[M]. 西安: 天则出版社, 1990.
- [3] 秦含章. 葡萄酒分析化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1991.
- [4] 杜金华, 夏秀梅. 酚类物质在红葡萄酒中的作用[J]. 中外葡萄酒与葡萄酒, 2001, (2): 48-51.
- [5] Cedri Sauier, Guy Bourgeois, Christiane Vitry. Characterization

of (+)-catechin-acetaldehyde polymers: A model for colloidal state of wine polyphenols[J]. J. Agric. Food Chem, 1997, 45: 1045-1059.

- [6] DAVID M, GOLDBERG, ERIC NG, ALEX DARUMANCHIRI et al. Resveratrol glucosides are important components of commercial wines[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1996, 47(4): 415.
- [7] M. ADRIAN, P. JEANDET, A. C. BREUIL, et al. Assay of resveratrol and derivative stilbenes in wines by direct injection high performance liquid chromatography[J]. Am. J. Enol. Vitic., 2000, 51(1): 37-41.
- [8] F. Bonilla, M. Mayen, et al. Extraction of phenolic compounds from red grape marc for use as food lipid antioxidants[J]. Food Chemistry 1999, 66(209-215).
- [9] David M., Goldberg, Alex Karumanchiri et al. Catechin and Epicatechin concentrations of red wines: Regional and cultivar-related differences[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1998, 49(1): ? .
- [10] R. Gimenez Martinez, H. Lopez Garcia De La Serrana, et al. Influence of wood heat treatment, temperature and maceration time on vanillin, syringaldehyde and gallic acid contents in oak wood and wine spirit mixtures[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1996, 47(4): ? .
- [11] V. Mazzolfni, P. Caldentey and A. Silva. Phenolic compounds in cork used for production of wine stoppers as affected by storage and boiling of cork slabs[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1998, 49(1): ? .
- [12] F. Sauvageot and F. Feuillat. The Influence of oak wood (Quercus robur L., Q. Petraea Liebl) on the flavor of Burgundy Pinot noir. An examination of variation among individual trees[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1999, (4): 50.
- [13] Juliet Bergqvist, Nick Dokoozlian and Nona Ebi Suda. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California[J]. Am. J. Enol. Vitic., 2001, (1): 52.
- [14] R. Pezet and Ph. Cuenat. Resveratrol in wine: extraction from skin during fermentation and post-fermentation standing of must from Gamay grapes[J]. Am. J. Enol. Vitic., 1996, (3): 47.
- [15] 朱宝镛, 赵光鳌, 张继民, 刘吉泉. 葡萄酒科学与工艺[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1992.
- [16] 王恭堂, 孙雪梅, 张葆春. 葡萄酒的酿造与欣赏[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000.

Control[C]. Mexico city: IEEE, 2001, 391-396.

- [9] Ludwig Narziss. Die Technologie der W ürzereitigung[M]. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1985.

(上接第 28 页)

- [8] Carrillo U reta G E, Roberts PD, Becerra V M. Genetic algorithms for optimal control of beer fermentation[A] Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent