葡萄酒微氧熟化装置及扩散器参数的研究*

高　畅, 李　华, 高树贤, 魏冬梅, 张艳芳, 来疆文, 张予林
(西北农林科技大学 葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘　要]　介绍了葡萄酒微氧熟化装置的结构、工作原理, 在对系统压力分析研究的基础上, 确定了氧气输送系统最小压力应高于液体静压力、贮罐内上方充入惰性气体的压力、管道及管件等各种阻力产生的压力损失以及由气体扩散器产生的阻力之和; 从动力学、运动学、传质学方面分析了气泡的受力、运动及扩散, 确定了气泡直径变化范围小于 1.4 mm, 得出了气泡直径与扩散器出流小孔直径的理论关系。

[关键词]　葡萄酒; 微氧装置; 扩散器; 酿造容器
[中图分类号]　TS261.3　　[文献标识码]　A　　[文章编号]　1671-9387(2004)08-0103-04

葡萄酒自然陈酿需在橡木桶中进行。橡木中丰富的单宁和多种芳香成分溶解于葡萄酒中, 改善了葡萄酒的香气和口感。另外葡萄酒陈酿还需要氧的参与。葡萄酒在氧的作用下发生一系列缓慢而连续的变化, 改善色素的稳定性, 使单宁软化, 酒体变得柔和、圆润、醇厚, 具有结构感, 风格也变得雅致。

传统观念认为, 在橡木桶中陈酿葡萄酒所需的氧气是空气中的氧通过桶板的髓管及板缝隙进入橡木桶。也有观点认为, 氧本身不会通过湿的桶板进入酒中。因此可以认为, 橡木桶中陈酿葡萄酒所需的氧气是自然的而不是人为地添加于葡萄酒中。工艺上要求制桶橡木应该含有足够的对葡萄酒和白兰地有益的单宁芳香物质, 能够满足此要求的橡木需要 80～100 年以上的树龄。加之制桶对板材的挑选非常严格, 板材利用率达不到原木的 20%, 因此, 橡木桶的价格是非常昂贵的[1～3]。大规模生产葡萄酒仅陈酿用橡木桶的一次性投资就非常大。用法国产橡木制造的 225 L 橡木桶价格约 600 美元, 陈酿 1 t 葡萄酒或白兰地所用橡木桶的投资为 2 400 美元。在陈酿中与酒接触的橡木表面对葡萄酒有益的单宁、色素和芳香物质的有益成分逐渐贫乏, 橡木作用不再明显, 一个橡木桶至多只能使用 5～6 年。橡木桶容积较小, 难以满足工业化大规模生产的需要。因此, 自然陈酿受橡木资源匮乏、利用率低、木桶价格高、使用年限、容积小以及陈酿时间长等因素影响, 限制了橡木桶自然陈酿的推广、普及应用。

基于以上原因, 人们提出了葡萄酒微氧熟化工艺。微氧熟化工艺是模拟自然陈酿环境, 以不锈钢罐作为贮酒容器, 将经过处理的橡木片与葡萄酒以一定比例的接触面积加入不锈钢贮罐。但不锈钢容器不像橡木那样具有通透性, 氧气不能通过壁面自然进入葡萄酒中, 不能自然实现微氧状态。而且葡萄酒中的溶解氧有一最佳值, 超过这个值就会过度氧化使葡萄酒质量受影响。

为解决向葡萄酒通入氧气的问题, 本研究设计了葡萄酒微氧熟化装置, 以期为葡萄酒酿造容器的改进提供理论依据。

1　微氧熟化装置结构设计及工作原理

1.1　结构设计

在微氧熟化装置结构设计中确定整个系统由气源系统、气体通入管道及扩散系统、贮酒容器等组成。气源系统由氧气瓶、压力表、压力调节阀等组成; 气体通入管道及扩散系统由输送管路、氧气扩散器、流量调节阀、流量计及管路管件等组成(图 1)。

1.2　工作原理

贮存于氧气瓶中的纯氧经调压阀调节使压力降到一定值, 通过气体输送管道从贮酒罐下部通入与之相连的、安装在罐内的气体扩散器, 使氧气能够以微小的气泡溶解于酒中。

1.3　进气系统压力的确定

1.3.1　系统压力分析　系统气体压力需要高于液体静压力、贮罐内上方充入惰性气体的压力、气体输送系统沿程阻力及局部阻力产生的压力损失以及气

*　[收稿日期]　2003-11-26
[基金项目]　陕西省科技攻关项目(2002K08-G12)
[作者简介]　高　畅(1957-　), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 主要从事葡萄酒工程方面的教学及科研工作。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

体扩散器产生的阻力之和, 才能够把气体输送到葡萄酒中。

1) 液体静压力。气体从贮罐下部通入, 需要克服液体的静压力

$$p_L = \rho_L g h,$$

式中, p_L 为液体的静压力; ρ_L 为葡萄酒的密度; h 为贮酒容器中葡萄酒的液位高度。

2) 贮罐内上方充入惰性气体的压力。为避免葡萄酒氧化, 贮罐内上方充入惰性气体(N_2 或 CO_2)用以隔绝氧气, 葡萄酒工艺要求一般充气压力为[4] $p_{N_2(CO_2)} = 5 \sim 10$ kPa。

3) 气体输送系统沿程阻力及局部阻力产生的压力损失。流体流动系统总阻力产生的压力损失

$$\Delta p = \sum h_i/\rho_{O_2} = \sum (\lambda L_i/d + \zeta_j) u^2/2\rho_{O_2}。$$

式中, Δp 为流体流动系统总阻力产生的压力损失; $\sum h_i$ 为气体输送系统总的流动阻力; ζ_j 为输送系统中流体流过各管件、阀门的局部阻力系数; λ_i 为各段直管流动的摩擦系数; d 为管路直径; L_i 为气体在输送系统中各段直管长度; u 为气体在管路中流速; ρ_{O_2} 为氧气密度。

4) 气体扩散器产生的阻力。气体扩散器选择微孔陶瓷材料。微孔陶瓷具有无数孔径微小的孔(μm 数量级), 这些小孔相当于直径非常小的管道, 而来自气源的气体输送管道直径(mm 数量级)与之相比远远大于微孔陶瓷材料的小孔。因此, 可以把从进气管进入扩散器时流体流动视为从大容器进入直径突然缩小的孔口的出流问题; 而气体从扩散器流出, 进入葡萄酒与上述情况相反, 是流体从小孔进入大容器, 流体通道突然扩大问题。

气体扩散器产生的阻力可根据直径突然缩小和直径突然扩大的出流问题分别计算。进气管进入扩散器时直径突然缩小的孔口出流的压力降为 p_s, 气体从扩散器流出, 进入葡萄酒突然扩大产生的压力降为 p_k。

1.3.2 进气系统临界压力 进气系统临界进气压力为:

$$p_{min} = p_L + \Delta p + p_{N_2} + p_s + p_k = \rho_L g h + p_{N_2} + \sum (\lambda L_i/d + \zeta_j) u^2/2\rho_{O_2} + p_s + p_k。$$

式中, p_{min} 为进气系统最小进气压力; p_s 为气体从主管路进入扩散器的压力损失; p_k 为气体从扩散器小孔进入液体, 截面积突然扩大引起的压力损失。

只有进气系统压力大于最小压力 p_{min}, 氧气才能顺利进入葡萄酒中。

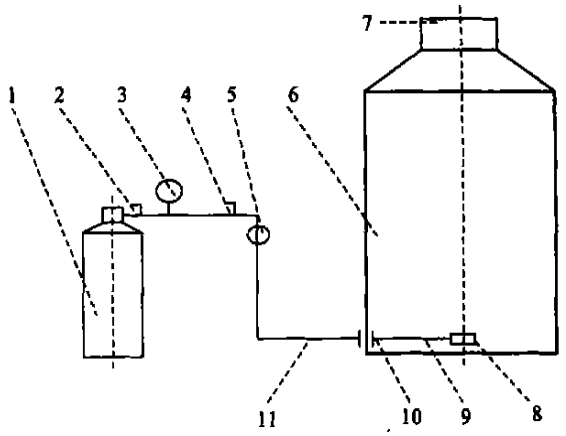

图 1 葡萄酒微氧熟化装置系统示意图

1. 氧气瓶; 2. 调压阀; 3. 压力表; 4. 流量调节阀; 5. 流量计; 6. 贮酒罐; 7. 密封盖; 8. 气体扩散器; 9. 罐内气体管路; 10. 管接头; 11. 进气管路

Fig. 1 The wine processing installation system diagram of thin oxygen

1. Oxygen cylinder; 2. Voltage regulation valve; 3. Manometer; 4. Flow volume regulation valve; 5. Flowmeter; 6. Storage tank; 7. Airtight lid; 8. Gas proliferation equipment; 9. Gas pipeline inside the tank; 10. Pipe joint calipers; 11. Pipeline for getting in the gas

2 气体扩散器研究

气体扩散器研究包括结构型式的确定及主要参数的选择。

2.1 气体扩散器结构型式的确定

扩散器根据其工作过程是否运动有动态和静态之分。在陈酿过程中由氧和酒组成的扩散体系中葡萄酒是连续相、静止相, 氧气是分散相、流动相, 氧气在呆滞组元——静止葡萄酒中扩散, 故应选择静态扩散器。

经过减压的氧气进入扩散器的小孔是气体的节流过程。当从扩散器小孔流出的气体进入葡萄酒时扩散开始, 扩散器周围的葡萄酒中氧浓度高于罐内其他部位葡萄酒主体的氧浓度, 形成浓度梯度, 具备了扩散的条件。推动气液混合及传质主要的推动力是扩散器处酒高的氧浓度与主体酒较低的氧浓度之间的氧浓度差。在此浓度差作用下, 溶解于葡萄酒中的氧气分子在酒主体中扩散, 并与酒发生一系列化学变化, 直到陈酿结束。

2.2 扩散器材料的选择

由于葡萄酒中含有机酸及金属盐、SO_2 等物质,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且扩散器与酒直接接触, 扩散器材料应具有耐腐蚀、抗氧化、强度好、化学稳定性好、不溶胀、易于清洗, 具有环境及生物相容性等特点。微孔陶瓷具有极优良的耐腐蚀特性, 气孔分布均匀, 机械强度高, 在流体压力作用下不会引起开口气孔变化和微孔变形, 使用寿命长。从加工制造方便性及成本等因素考虑, 微孔陶瓷体内有大量微小气孔, 陶瓷的孔径分布均匀, 陶瓷孔径一般为微米级或亚微米级。故扩散器材料选择微孔陶瓷[5]。

2.3　气泡动力学和运动学分析

2.3.1　气泡受力分析　单个气泡在液体中运动, 处在任一位置受到的作用力有重力 W、液体黏性运动阻力 F_Z (方向向下)、液体的浮力 F_f (方向向上)、表面张力 σ, 分别为:

$$W = m_{O_2}\rho_{O_2}g = \pi d_B^3\rho_{O_2}g/6,$$

$$F_Z = \zeta_\varsigma(\pi d_B^2/4)\rho_L u^2/2,$$

$$F_f = m_L g = \pi d_B^3\rho_L g/6。$$

式中, m_{O_2} 为单个氧气气泡质量; d_B 为气泡直径; u 为气泡速度; ζ_ς 为气泡在酒中运动时的阻力系数, 是气泡运动时雷诺准数 R_e 的函数, 即 $\zeta_\varsigma = f(R_e)$。

气泡静止时各个方向表面张力的合力平衡, 本设计中气泡的运动速度极小, 可视为准静态, 有 $\sigma \approx 0$。

在垂直方向有平衡方程:

$$W + F_Z - F_f = m_{O_2}a。$$

气泡做缓慢匀速上升, $a = 0$, 气泡受到的重力、液体对气泡的浮力与运动阻力平衡,

$$F_Z + W = F_f,$$

即 $\zeta_\varsigma(\pi d_B^2/4)\rho_L u^2/2 + \pi d_B^3\rho_{O_2}g/6 = \pi d_B^3\rho_L g/6$。

2.3.2　气泡运动分析　气泡运动状态决定了气体传递的性能。气体扩散器通入的微小气泡在液体中上升时, 气泡受到的静压力逐渐减小, 气泡将膨胀变大, 同时发生凝聚使气泡变大。

气泡运动速度与葡萄酒耗氧速度之间存在最佳匹配问题。葡萄酒耗氧速度涉及化学反应动力学和葡萄酒工艺学, 而目前葡萄酒工艺学方面的研究还难以确定耗氧速度。在理想情况下, 当通氧量根据工艺要求确定后, 气泡在葡萄酒中的上升速率应该低于葡萄酒耗氧速率, 极限情况为从罐底部扩散器排出的气泡运动到罐顶自由液面时恰好被氧化底物消耗, 即不允许有氧气逸出液面。因此, 从运动学角度要求气泡做缓慢的匀速上升, 结合气泡受力分析, 得到气泡上升速度与气泡直径关系符合 Stokes 公式[6]:

$$u = \{4(\rho_L - \rho_G)d_B g/3\zeta_\varsigma\rho_L\}^{1/2}。$$

3　扩散器小孔直径的确定

扩散器小孔直径是扩散器的主要参数之一。研究扩散器小孔直径与气泡直径之间的关系是确定小孔直径的前提。

3.1　影响气泡直径的因素

气泡大小是决定氧气通入效果的主要指标, 影响气泡直径大小的因素有: (1) 结构参数, 如气体流出孔口直径; (2) 状态参数, 如出口处气体流量、流速及进气压力; (3) 液体的性质, 如表面张力、粘度、密度。对于葡萄酒这类特定的液体, 在常规储藏条件下, 以上各因素中影响气泡直径的主要因素是气体流出孔口直径、出口处气体流量、流速及进气压力等参数。

3.2　气泡直径范围的确定

气泡直径直接影响气体扩散的程度, 从提高传质速率考虑, 要求气泡直径较小, 以提供大的气液传质表面积。气泡形状、大小、直径与气泡运动有关系[7]: 当 $d_B < 0.7$ mm 时, 气泡为球形, 气泡在液相中做直线上升; 当 $0.7\ \text{mm} < d_B < 1.4$ mm 时, 上升速度加快; 当 $1.4\ \text{mm} < d_B < 6$ mm 时, 气泡为近似椭圆形, 在液体中以螺旋状轨迹上升, 并形成涡流。

考虑到贮罐的容积一般为数十吨到百余吨, 直径及高度尺寸均比较大, 扩散器的体积及外形尺寸 (直径为数 cm) 与贮罐相比几乎可以忽略。理想情况要求扩散器形成的气泡形状为球形, 根据上述规律, 结合葡萄酒的特性, 确定气泡直径 $d_B < 0.7$ mm 可使扩散器形成的气泡形状为球形, 考虑工程实现的可能性, 本研究设计气泡直径 $d_B < 1.4$ mm。

3.3　气泡直径与小孔直径的关系

微氧熟化氧的需求量是非常低的, 酒与氧气的化学反应也是非常缓慢的, 理想情况要求扩散器排出的气体为分散、均匀的单个小气泡形态。

气泡直径与扩散器小孔直径之间存在着一定的关系, 小孔直径是气泡直径的主要限制因素之一。前人以空气—水作为研究体系, 实验结果表明[7], 扩散器排出的气体为单一气泡时, 单一气泡的直径可按气体孔口出流处雷诺数 R_e 的大小分为 3 个区域。

在区域 Ⅰ 气速很慢, R_e 很小, $R_e < 200$, 生成的气泡按其原样大小上升, 气泡之间无合并及分裂。此时气泡为球形, 气泡直径 d_B 与扩散器孔口直径 d_0 的关系为

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$d_B = 1.7\left[\frac{\sigma_W d_0}{(\rho_W - \rho_G)g}\right]^{\frac{1}{3}},$$

式中, d_0 为扩散器孔口直径; ρ_W 为水的密度; ρ_G 为空气密度; σ_W 为水的表面张力。

区域Ⅱ的雷诺数 $200 < R_e < 2\ 100$, 为中等流速区域。随着气流速度增加, 前后气泡相互影响, 此时气泡不再是一个一个单独运动, 而是以连珠泡状向上运动。

区域Ⅲ的 $R_e > 4\ 000$, 为大流速区域。在此区域内气泡不稳定, 其平均直径随 R_e 的增加而下降。区域Ⅱ, Ⅲ与本研究关系不大, 不再讨论。

对非纯水聚结体系的气泡直径, 是在以空气—水作为研究体系实验结果的基础上进行修正, 其计算式:

$$d_B = 0.006\ 1(u_S d_0)^{0.1} d_0^{0.08}\left[\frac{\sigma}{\sigma_W}\right]^{0.38},$$

式中, u_S 为气体表观速度, 当液体静止时气体的表观速度 u_S = 气泡的运动速度 u; σ 为非纯水聚结体系的张力, 在本研究中为葡萄酒的表面张力。

溶液的表面张力与溶液的温度、压力以及溶质的种类、浓度有关。溶液的表面张力随组成变化规律有 3 种类型[8], 其中醇类在稀溶液中能够较显著降低水溶液的表面张力。

在葡萄酒贮藏条件下, 可以认为葡萄酒温度、压力以及主要溶质酒精、酒精浓度均为常量, 因此表面张力也是一个常量。

4 结 论

(1) 氧气输送系统最小进气压力为:

$$p_{min} = \rho_L gh + p_{N_2} + \sum(\lambda_i + \zeta_i)(u^2/2) + p_s + p_k。$$

(2) 确定气泡直径 变化范围小于 1.4 mm;

(3) 气泡直径与小孔直径的理论关系为

$$d_B = 1.7\left[\frac{\sigma_W d_0}{(\rho_W - \rho_G)g}\right]^{\frac{1}{3}}。$$

[参考文献]

[1] 王 霞. 橡木与橡木桶[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2001, (5): 15- 16.

[2] 乔 春. 浅谈橡木桶对白兰地的陈酿作用[J]. 葡萄栽培与酿酒, 1994, (5): 38.

[3] 胡一东, 梅文英. 用液相色谱仪研究白兰地在橡木桶陈酿过程中的变化[J]. 葡萄栽培与酿酒, 1990, (3): 79- 84.

[4] 李 华. 葡萄酒工艺学[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000. 183.

[5] 翟素文, 吴朝晖. 新型环保材料——微孔陶瓷[J]. 山东陶瓷, 2001, 24(2): 23- 25.

[6] 陈再新, 费黎明, 范 镇, 等. 气液环流反应器中基于大、小两类气泡的气相返混模型和气液传质特性[J]. 化学反应工程与工艺, 1997, 13(1): 58- 64.

[7] 戚以政. 生化反应器与反应动力学[M]. 第 2 版. 北京: 化学出版社, 1999. 347- 351.

[8] 董元彦, 李宝华, 路福绥. 物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 152- 157.

Micro-oxygen device and its diffuser of wine aging

GAO Chang, LI Hua, GAO Shu-xian, WEI Dong-mei, ZHANG Yan-fang, LAI Jiang-wen, ZHANG Yu-lin

(*College of Enology, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Shaanxi, Yangling 712100, China*)

Abstract: The paper has introduced the structure and working principle of micro-oxygen device, and the pressure of oxygen conveying system. It also discussed the structure and material of the oxygen diffuser, which is the key part of the micro-oxygen device. Based on kinematics, dynamics and mass transfering, the force given to bubbles, bubbles' movement and disperse were analyzed and the range of bubbles' diameter was defined. This article also discussed the relationship between bubbles' diameter and the hole's diameter of diffuser.

Key words: wine; micro-oxygen device; diffuser; storage device

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net