

膜集成技术在浓缩果汁中的应用研究进展

薛淑静², 程薇^{2*}, 关健², 熊光权² (1. 湖北农业科技创新中心农产品加工与核农技术分中心, 湖北武汉 430064; 2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要 集成膜技术是一个膜分离系统, 它可以克服单一膜的缺点, 节约成本, 提高产品质量。面向膜的集成化应用, 着重概述了超滤、反渗透、渗透蒸馏、渗透蒸发的特征以及膜集成技术在浓缩苹果汁、柑桔汁及猕猴桃汁中的应用研究进展。

关键词 集成膜; 浓缩苹果汁; 浓缩柑桔汁; 浓缩猕猴桃汁

中图分类号 TS255.44 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)30-13384-04

Research Progress in the Application of Integrated Membrane Process in Concentrated Juice

XUE Shujing et al (Institute of Farm Products and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Innovation Center of Agricultural Technology and Science, Wuhan, Hubei 430064)

Abstract Integrated membrane technology is a membrane separation system, which can overcome the disadvantage of single membrane, save the cost and improve the product quality. Several major membrane processes such as ultrafiltration, reverse osmosis, osmotic distillation and pervaporation were summarized. Research progresses in the application of integrated membrane technology in concentrated apple juice, orange juice and kiwi juice were introduced, which were the three main concentrated juices in the world.

Key words Integrated membrane; Concentrated apple juice; Concentrated orange juice; Concentrated kiwi juice

水果加工业是附加值很高的产业, 从初级产品到深加工产品, 增值潜力高达几十倍甚至几百倍。有关资料显示, 我国水果业的深加工和市场开发每年都能带来几十亿元的收入。近年来, 我国水果产量增长很快, 但由于加工技术和产业化滞后, 每年约有30%的水果因缺乏贮藏及加工手段而腐烂^[1]。果汁浓缩后更利于贮藏, 而果汁浓缩传统应用的是多级真空蒸发和冷冻浓缩, 前者易造成大部分芳香物质损失, 并且长时间的加热还会产生“蒸煮味”; 后者虽然可以使挥发性物质得到保持, 但是冷冻浓缩需要消耗相当大的能量, 可浓缩程度也小于热浓缩, 这就限制了冷冻浓缩的工业化应用^[2-4]。

为了提高产品品质和降低能耗, 近几十年来, 人们一直致力于研究用膜分离技术替代传统的浓缩法。膜分离技术是指利用高分子半透膜的选择性使溶剂与溶质或溶液中不同组分加以分离的一种方法。膜过程具有节约能源、降低损耗、可在常温下连续操作、过程简单、高效、而且没有相变、分离系数较大等优点。20世纪60年代初, Loeb和Sourirajan发明了非对称性膜后, 超滤和反渗透技术在乳制品和果蔬汁饮料工业中开始得到广泛的应用。美国南卡罗莱纳州农业试验站利用金属膜直接超滤苹果浆; 意大利于1984年建立了世界上第1条反渗透浓缩番茄汁生产线; 美国Du Pont公司在20世纪80年代末开始出售反渗透浓缩橘子汁的分离装置;

日本电气工业薄膜事业部利用膜技术改进葡萄酒的品质: 土耳其用聚醚砜/聚乙烯吡咯烷酮(PES/PVP)复合膜澄清果汁, 在膜澄清果汁过程还脱除了30%的多酚氧化物和31%的色素, 果汁的稳定性显著提高^[5-6]。但单一膜浓缩技术的应用存在很多问题, 如用单一的反渗透膜浓缩果汁时, 其浓缩倍数取决于果汁的渗透压, 为了使膜分离过程具有较高的效率, 膜分离的使用压力通常为数倍原果汁的渗透压, 但由于当前分离设备承压能力的限制, 不能将操作压力无限增加。如果采用二级浓缩, 即第一级先用对糖截留率高的膜浓缩至2~3倍。第二级再用糖截留率低的膜, 最终可以浓缩到4~5倍, 这样虽能实现高倍率的浓缩, 但经济成本高。因此, 一般反渗透膜浓缩果汁的浓缩限度为25~30°Brix, 纤维素类膜和新发展的聚酰胺膜均能获得较高的透水速率以及果汁组分的保持率, 同样由于高渗透压的限制很难以一级方式把果汁浓缩到蒸发法所达到的浓度, 此外单一膜浓缩的不可逆污染严重, 这些问题的存在都限制了单一膜浓缩的工业化应用。在解决某一具体分离目标时, 往往要综合利用几个膜过程, 使之各尽所长, 这种过程称之为集成膜过程(Integrated Membrane Process)。利用集成膜技术可克服单一膜的缺点, 不仅能解决浓缩倍数的限制, 而且节约成本。笔者面向膜的集成化应用, 着重概述了UF、RO、OD、PV的特征以及膜集成技术在浓缩苹果汁、柑桔汁及猕猴桃汁中的应用研究进展。

表1 主要膜分离技术及应用范围^[7]

Table 1 Main membrane separation technologies and their application range

膜分离技术 Membrane separation technology	传质推动力 Mass transfer driving force	透过物 Filtrate	应用范围 Application range
超滤(UF)	压差(0.1~1 MPa)	水, 溶剂, 水分子	蛋白质, 多肽、多糖的回收与浓缩, 果汁的澄清
反渗透(RO)	压差(0.1~10 MPa)	水, 溶剂	盐、氨基酸, 糖的浓缩, 淡水的制造
渗透蒸馏(OD)	水蒸汽差	易渗透的溶剂	果汁的浓缩
渗透蒸发(PV)	压差、温差	易渗透的溶剂或溶质	有机溶剂与水的分离, 共沸物的分离

1 主要膜技术的特征

主要的膜分离过程及其传质推动力和应用范围如表1所示。

超滤(Ultrafiltration, UF)是20世纪60年代初发展起来的

基金项目 湖北省农业科技创新项目资助(2008102)。
作者简介 薛淑静(1980-), 女, 河南孟州人, 助理研究员, 从事食品科学方面的研究工作。* 通讯作者。
收稿日期 2008-09-01

新型膜分离技术,它是在常温下以膜两侧的压力差为驱动力对溶质和溶剂进行分离、浓缩和纯化的。超滤膜的孔径在1.0~2.5 nm,工作压力为0.05~0.50 MPa,膜通量为 $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,用于分离分子量在 $5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6$ 范围内的高分子物质。工业用的超滤膜具有不对称的微孔结构,膜的材料有醋酸纤维素、聚酰亚胺、聚丙烯腈、丙烯酸盐与氯乙烯共聚体、聚醋酸乙烯、两性离子交换膜和芳香族高聚物等。超滤在我国首先于电泳回收中应用成功,很快扩大到各种酶、蛋白、硅溶胶等的浓缩、多种废水的处理、饮料和食品加工以及生物工程技术等方面^[8]。果汁超滤主要目的是除去易引起果汁发生浑浊沉淀的大分子物质如果胶、蛋白质、多酚等。

反渗透(Reverse Osmosis, RO)是利用反渗透膜只能选择性透过溶剂(通常是水)的性质,对溶液施加压力以克服溶剂的渗透压,使溶剂通过反渗透膜而从溶液中分离出来的过程。反渗过程是一个与自然渗透现象相反的渗透过程,是以压力差为推动力的膜分离技术。该过程为了克服高渗透压穿过薄膜,需要 $3.43 \times 10^6 \sim 9.80 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的高压。反渗透或称为极度过滤,它是薄膜分离中复杂的技术,又被认为是脱水浓缩技术,它几乎能阻止所有不溶解的溶质,如盐、糖和比 $2.5 \times 10^{-22} \text{ g}$ 大的离子,只允许溶解质或水通过。它的应用范围主要有脱盐和浓缩两个方面。比如进行海水和苦咸水的淡化、纯水的制备、污水处理和低分子溶液的浓缩等应用。

渗透蒸馏(Osmotic Distillation OD)是基于渗透与蒸馏概念而开发的一种渗透过程与蒸馏过程耦合的新型膜分离技术;其传递过程为:待浓缩产品流中的水传递到疏水表面并汽化成水蒸气,水蒸汽渗透通过疏水膜,水蒸汽在疏水膜的下游表面冷凝并扩散进入盐水流中。渗透蒸馏的推动力是膜上游的产品流和膜下流盐水流的渗透压差所引起的蒸汽压梯度^[9]。被处理物料中易挥发组分选择性的透过疏水性的膜,在膜的另一侧被脱除剂吸收,在通常情况下,被处理物料与脱除剂均为水溶液,渗透蒸馏过程能够顺利进行是由于被处理物料中的易挥发组分在疏水膜的两侧存在渗透活动差。对于像果汁浓缩、生化医药产品的浓缩这样的实际工业过程,被处理物料中的溶质一般是糖类、多糖类、蛋白质、氨基酸、有机酸盐类等分子量较大的物质^[10]。由于溶质的分子量较大,随着渗透蒸馏过程的不断进行,尽管浓缩后溶质质量浓度很高,但其摩尔浓度并不大,这样被处理物料中水的渗透活动尽管有所减少,但仍然接近于纯水的渗透活度;由于无机盐的水解度可以很大,从而使脱除剂中水的渗透活度降到很小,在被处理物料和脱除剂中水的渗透活动仍有推动力,这样可以保证整个渗透蒸馏过程顺利进行。渗透蒸馏具有一般膜分离技术投资省、能耗低的优点,同时又能在常温常压下使被处理物料实现高倍浓缩,克服常规分离技术所引起的被处理物料的热损失与机械损失,特别适合处理热敏性物料及对剪应力敏感性物料,从而使渗透蒸馏在食品、医药及生化领域展示出广阔的应用前景^[11]。

渗透蒸发(Pervaporation, PV)是一种选择性膜分离技术,它利用分子间吸附、扩散特性存在差异而导致膜渗透速率不同的原理,分离纯化液体物料中的目标组分。在渗透蒸发过程中膜与液体料液接触的一侧称为上流侧(upstream side),

而膜的另一侧与膜渗透组分接触称为下流侧(downstream side)。料液中的挥发性组分从上流侧进入并溶解在膜中,以扩散方式穿过膜,在膜的下流侧进行冷凝浓缩回收,膜的上流侧将是液体残留物。可见,渗透蒸发中存在着液态到气态的相变过程。其机制可用溶解扩散理论解释,被分离物质膜渗透传质过程可分为3个连续步骤:第一步,料液中的组分吸附在膜的上流侧,并进入膜质材料,膜材料的吸附选择性决定了渗透蒸发分离过程的选择性;第二步,被吸附组分在膜质材料中向膜下流侧扩散(可用Fick定律描述)扩散行为与被吸附组分的物理化学性质、操作工艺条件以及膜的类型决定,是影响渗透蒸发传质速率的关键步骤;第三步,被吸附组分从膜下流侧脱附以气相形式释放,并被冷凝转化为液体。挥发性组分的膜渗透是全渗透蒸发分离的主要特点。被分离组分在料液中与透过膜后存在的化学势差(也称为活度差或蒸汽分压压差)是挥发性组分膜渗透过程的驱动力。通过在膜下流侧减压、加热使料液的温度高于下流侧或用惰性气体吹扫下流侧这3种途径使组分在下流侧的分压较低,从而驱动被分离组分渗透过膜完成^[12]。与蒸馏、萃取、吸附等技术相比,其在水相体系中富集挥发性有机化合物、有机体系脱水、沸点相近或可形成共沸物组分间的分离等方面的应用具有更强的优势。1982年建立了第一家应用渗透蒸发生产无水乙醇的工厂^[12]。1996年建立了第一家应用全蒸发从废水中回收挥发性有机污染物的工厂^[13]。

2 集成膜集成技术

2.1 集成膜技术简介 各种膜过程均有各自的优点和局限性,而且实际的工业生产受到各种复杂因素的制约。为了使整个生产过程达到优化,采用任何单一膜过程都不能解决复杂的生产问题,需要把各种不同的膜过程合理地集成在一个生产循环中,这样在生产过程中采用的不是一个简单的膜分离步骤,而是一个膜分离系统。该系统可以包括不同的膜过程,也可包括非膜过程,称其为“集成膜过程”^[14]。

2.2 在浓缩苹果汁中的应用 膜集成技术生产苹果浓缩汁工艺如图1^[15-16]所示。新鲜的苹果汁经过脱胶处理后,进行UF处理。大量的研究表明,经过UF处理后苹果汁的澄清度提高、褐变程度小,且对Vc含量和pH值的影响不大。用聚砜(PS)、磺化聚砜(SPS)、聚砜-磺化聚砜共混膜(PS-SPS)、聚丙烯腈(PAN)、羧基化改性的PAN板式膜、中空纤维PAN膜6种国产膜对苹果汁进行UF澄清,截留分子量(MWCO)为3万的PS-SPS共混膜澄清苹果汁的效果最好^[17]。果汁经澄清后还需进行浓缩。RO浓缩果汁具有较好地保存果汁风味和营养成分、降低能耗和操作简单等优点。在实际生产中,用醋酸纤维(CA)膜管式RO装置浓缩的苹果汁可达25°Brix,其Vc、氨基酸及香气成分也有很好保留效果。用型号为NTR的高脱除率和低脱除率的2种卷式RO膜组件组成的多级RO流程,可以制取40~45°Brix的苹果浓缩汁,且操作压力为4.5 MPa时浓缩效果最好。膜的清洗采用NaOCl(0.3%)和商品型号U10(0.5%)为清洗剂,每次清洗时间1.0~1.5 h,RO膜的渗透通量能基本得到恢复^[18]。

RO能很好地浓缩苹果汁,但其浓缩汁的浓度尚远低于目标浓缩汁的浓度,因此还需蒸发浓缩。为了回收采用减压

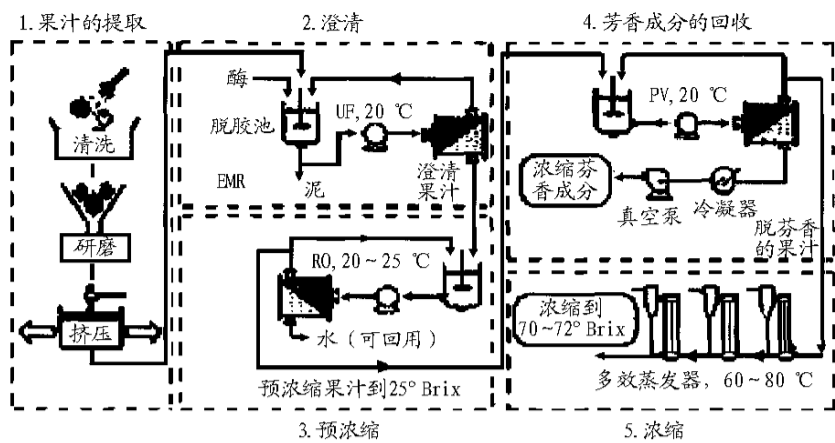


图1 膜集成技术生产苹果浓缩汁工艺示意

Fig.1 Scheme of the proposed integrated membrane process for the production of concentrated apple juice

蒸发过程被蒸除的苹果汁中的芳香物,设计在蒸发浓缩前采用PV膜回收芳香物工艺。然后将苹果汁进行蒸发浓缩直到苹果汁浓度达 $72^{\circ}\text{Brix}^{[19]}$ 。聚二甲基硅氧烷PT1100(PDMS-PT1100)、聚辛基甲基硅氧烷聚醚酰亚胺(PDMS-PEI)、聚辛基甲基硅氧烷聚偏氟乙稀(PDMS-PVDF)3种复合膜都能很好地用于PV法回收芳香成分,浓缩过程PV的渗透通量受料液浓度、料液流速和操作温度的影响。所以当采用多级PV工艺时,不但可以获得感官质量良好的苹果汁,还可提高PV渗透通量和浓缩汁中总可溶性固体的含量,较好地保留 $V_c^{[16]}$ 。

2.3 在浓缩柑桔汁中的应用 膜集成技术澄清和浓缩柑桔汁的加工工艺如图2所示^[12,20]。图2中UF澄清果汁、RO预浓缩果汁、PV回收芳香成分、渗透蒸馏(OD)进一步浓缩果汁。这种工艺可将果汁浓缩到 $63\sim 65^{\circ}\text{Brix}$,还能很好地保留柑桔的芳香成分。

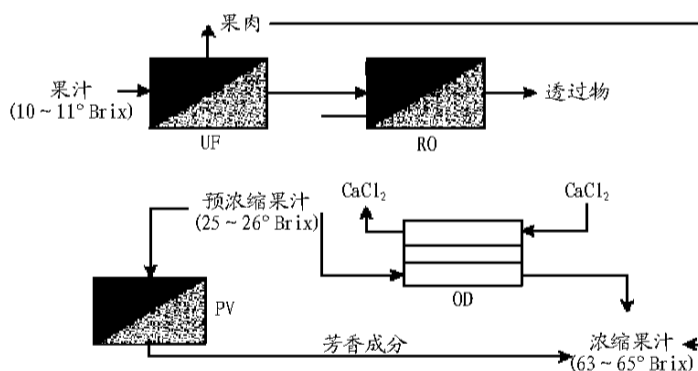


图2 膜集成技术生产浓缩柑桔汁工艺流程示意

Fig.2 Scheme of the proposed integrated membrane process for the production of concentrated citrus fruit

膜技术在柑桔汁加工中的应用主要有UF澄清、RO浓缩和脱苦等过程。膜材料为PVDF的UF膜澄清柑桔汁的效果最为理想^[21]。当操作压力为 0.2 MPa 、温度 40°C 、流速 1 m/s 时,柑桔汁经UF分离后柑桔汁的透过率为 82.04% ,其中总糖、总酸、 V_c 的透过率分别达 98.65% 、 95.06% 和 88.50% 。UF结束后,选用 $0.1\%\text{ NaOH}$ 和 0.5% 的 U10 溶液清洗UF膜,膜的清洗效果较好。柑桔类水果在加工过程中会出现明显苦味,柑桔苦味的成分主要是苦味类黄酮和柠檬碱等柠檬苦素两大类,尽管它们是有益成分,但是影响口感和风味,并有可能不为消费者所接受,因此柑桔类果汁的加工过程脱苦是一个重要环节。采用UF和二乙烯基聚苯乙烯树脂吸附的联合工艺对柑桔类果汁脱苦,结果表明^[22],UF去除了一些苦味前体物质和易被树脂吸附的大分子物质以及悬浮颗粒,同时也除去了柚皮苷和柠檬碱,明显改善了果汁的脱苦效率,提高了果汁的风味。溶解—扩散型的膜能将浓度极化现象降至

最低,且具有很强的抗污染能力,还能在营养成分的损失不超过 5% 的情况下将溶液中的柠檬苦素从 55 ng/kg 降至 11 ng/kg (或从 40 ng/kg 降至 8 ng/kg)。

柑桔汁富含有机酸、糖、维生素及多种微量元素等,因此选择对这些物质截留率高的RO膜是十分重要的。基于这种考虑,选用RO1(丹麦DDS公司生产,型号HR98,脱盐率 98%)膜来浓缩柑桔汁,效果较好。在操作压力为 4.5 MPa 、温度 40°C 、流速 1 m/s 时,RO浓缩的柑桔汁可达 23°Brix 。当膜通量衰减 40% 后,需要进行清洗。在清洗液流速 1 m/s 、压力 1.4 MPa 、温度 40°C 的条件下,先后用 NaOCl (0.3%)和 U10 (0.5%)溶液分别对RO膜清洗 90 min 和 60 min ,膜通量能完全恢复^[23]。采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)中空纤维膜的PV工艺可以有效地回收柑桔汁芳香成分。结果显示,PV工艺能将液体中芳香成分浓缩到渗透蒸气的 $8\%^{[6]}$ 。

2.4 在猕猴桃浓缩汁中的应用 膜集成技术澄清和浓缩猕猴桃汁的加工工艺如图3^[26]所示,超滤采用美国管状膜(Koch Series-CrTMHF251, polyvinylidene fluoride, 15 KDa , 0.23 m^2)。A.Cassara等分析了温度对通量的影响^[24]。当温度从 20°C 升到 30°C 时,稳态的通量升高了 95% ;而随着流速的增加,通量也随之增加。为了优化UF处理条件和生产近似于新鲜果汁的具有优良风味和高营养的果汁,选择 25°C 作为操作温度,TMP和流速分别设置为 90 kPa 和 700 L/h 进行研究。结果显示VRF(初喂料体积与渗透滞留物体积比)升高,随时间延长,由于浓差极化和胶质层的形成,渗透通量逐渐降低。当VRF达到 3.75 时,渗透通量由 $10.4\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 降到了 $7.5\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,膜通量逐渐达到稳定期。

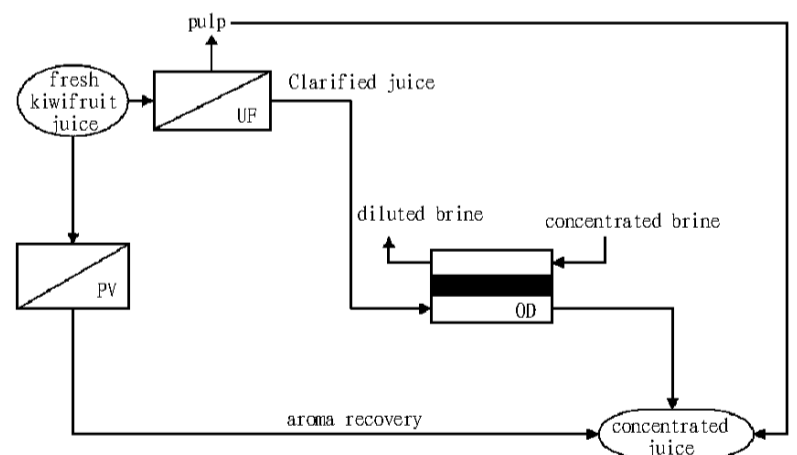


图3 膜集成技术生产猕猴桃浓缩汁工艺示意

Fig.6 Scheme of the proposed integrated membrane process for the production of concentrated kiwi juice

通过UF可以把新鲜果汁中的悬浮物全部去除,得到的澄清果汁拥有较低的黏度和可以忽略的浊度。相比于新鲜果汁,渗透液中TAA(可溶性固形物)只有轻微降低,维生素C大约降低 0.5% ,在 61.4°B 的浓缩汁中,TAA比UF渗透液中降低 8% 。UF膜的疏水性对酯类物质如甲基丁酸酯、丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、苯甲酸酯具有较高的拒绝率($80\%\sim 90\%$),然而对具有较高极性的物质比如醇类具有较低的拒绝率,比如 3-己烯-1-醇 、 $反-2\text{-己烯-1-醇}$ 和 $己醇$ 。

虽然膜处理技术具有许多优点,但不可避免会存在膜污染问题,这也是阻碍膜技术发展应用的重要原因。在对猕猴桃脱胶果汁超滤后进行的清洗和阻力分析显示,在总阻力中,膜阻力占 68.3% ,滤饼层阻力和膜污染阻力总共占

31.6%，其中可逆的污染阻力占总阻力的29.4%，而不可逆污染阻力只占2.75%，这暗示着脱胶果汁中仍存在非常小的颗粒，这些小颗粒造成了超滤过程中的不可逆污染阻力。滤饼层阻力只占总阻力的2.23%。果汁处理后，膜的透水率降低了32%，碱和酸清洗剂处理后，膜的透水率得到了很好的恢复(大约是初水平的96%)。

试验中渗透蒸馏采用a Liqui-Cell-Extra Flow 2.5×8in, 聚丙烯中空纤维膜。60%的CaCl₂溶液作为脱除剂, 最初的蒸馏通量为1 kg/(m²·h)。在随后的0~380 min内, 由于萃取溶液的稀澄清果汁的可溶性固形物从9.4 Brix 浓缩到66.6 Brix, 温度控制在(25±1)。蒸馏通量逐渐降低。果汁的黏度几乎保持不变。在380 min时, 重新装置60%的CaCl₂溶液, 在水的传输驱动力下, 蒸馏通量达到0.66 kg/(m²·h)。黏度开始升高, 致使蒸馏通量开始下降。在380~480 min 蒸馏通量从0.66 kg/(m²·h) 降到0.47 kg/(m²·h), 而相应的萃取液的浓度也从60%降到48.3%; 在480~550 min, 主要是果汁黏度和浓缩度的增加。低TSS时, 通量与萃取液的浓度息息相关, 较高TSS时, 通量主要与果汁的黏度相关。和热浓缩比较, Vc和抗氧化活性都能得到和好的保持, 而热浓缩的抗氧化活性只是50%^[2]。

在20℃时, 通过PV分别回收新鲜、澄清、浓缩果汁中的芳香物质的富集指数。发现对于醇类的富集指数要低于丁酸甲酯、丁酸乙酯这些酯类的富集指数。在检测的大部分芳香物质中除了3-己烯1-醇和反-2-己烯1-醇, 新鲜果汁的富集指数要分别高于澄清果汁和浓缩果汁。这个结果也说明了在任何的浓缩加工之前, 可以利用PV操作, 转移富集新鲜果汁中的芳香物质。UF处理残留的纤维相经过稳定化处理(巴氏杀菌, 高压处理、电加热), 加入最终的OD浓缩液中, 可以制备富含纤维素的饮料。

通过UF/OD加工的猕猴桃澄清和浓缩汁澄清时间降低、澄清过程简化、澄清果汁的容积增大、室温操作可以很好的保持果汁新鲜度、芳香和营养价值, 最终产品和加工产品质量的提高。将PV添加到集成膜中, 可以在UF和OD操作之前, 将芳香物质移走, 回收的芳香物质添加到最终的浓缩果汁中, 从而生产高营养价值的饮料^[26-27]。

3 结语

各种膜技术具有各自的特点及其运营成本也不同, 比如, OD和传统的蒸发、UF或RO等分离方法相比, 浓缩水的混合物成本高。OD的优点在于它能选择性地除去水而不是其他低分子量的物质(无论有无挥发性), 因此, 能生产高质量的浓缩物, OD法也能生产比RO法浓缩程度更高的产品。当然RO也能在相对较低压力下运行, 利用它从低溶质浓度的物料中除去水是一种经济的方法。对于大多数液体食品, 只要浓缩物浓度不超过30%, 就可以用RO法很便宜地生产。所以, 对于主要溶质能由RO膜分离的物料选用RO/OD联用可能是最为经济的选择。另外, 首先用UF法除去悬浮固体和胶体也是必要的, 这样可尽可能减少RO或OD分离器被阻塞或污染。当然, 对于只含有大分子量或中等分子量的物料(如生物样品或药品溶液), 可以不用RO步骤, 只经UF预浓缩, 然后进行OD操作即可。

膜集成技术可以根据各种膜自身的特点, 利用集成的协同作用, 突破单一膜的局限性, 达到优化、高效、低成本、低能耗及无污染的要求。应用于果汁行业, 可以突破传统加工营养损耗大, 能耗大等瓶颈问题, 从而达到提高产品质量, 简化生产工艺, 降低能耗等。但是膜集成技术并不能脱离单一的膜技术, 在进行不同的膜集成技术及针对不同果汁的研究之外, 膜的污染和膜的损耗仍然是不可忽视的问题, 加强膜污染及膜材料的开发研究, 降低运营成本, 能够可持续的稳定进行加工。随着膜技术, 尤其是集成膜技术商品化应用的推广, 集成膜浓缩果汁的前景是非常广阔。

参考文献

- [1] 望丽玲. 几种膜分离技术在果汁浓缩中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2005(2): 94-99.
- [2] CASSANA A, DRICCI E. Concentration of clarified kiwifruit juice by osmotic distillation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1397-1404.
- [3] BARBE A M, BARTLEY J, JACOBS A L. Retention of volatile organic flavour/fragrance components in the concentration of liquid foods by osmotic distillation[J]. Journal Membrane Science, 1998, 145: 67-75.
- [4] JAREL O, REYNES M, COUREL M P. Comparison of some fruit juice concentration techniques[J]. Fruits, 1996, 51(6): 437-450.
- [5] 冯文婕, 蔡邦肖. 果汁生产中膜技术的应用[J]. 食品科技, 2006(10): 14-18.
- [6] ANDREW SHEPHERD, ALBERTO CLAUDIO HABERT, CRISTIANO P BORGES. Hollow fibre modules for orange juice aroma recovery using pervaporation[J]. Desalination, 2002, 148: 111-141.
- [7] 孙彦. 生物分离工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [8] 王学松. 膜分离现状及发展趋向[J]. 化学进展, 1994, 6(4): 321-335.
- [9] 陈欢林, 朱长乐. 膜蒸馏与渗透蒸馏[J]. 水处理技术, 1990, 16(6): 409-413.
- [10] 戴海平, 王建臣, 林刚. 渗透蒸馏的传递过程及应用[J]. 水处理技术, 1995, 2(1): 7-10.
- [11] 任保增, 彭果胜, 李伟然, 等. 渗透蒸馏技术及其应用[J]. 河南化工, 2002(8): 1-2.
- [12] 余敏, 谢建春, 孙宝国. 全蒸发技术及其在食品香味分离中的应用[J]. 食品科学, 2004, 25(10): 357-360.
- [13] 吴庸烈. 膜蒸馏技术及其应用进展[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(4): 67-72.
- [14] JIAO B, CASSANO A, DRICCI E. Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63: 303-324.
- [15] ALVAREZ S, RIERA F A, ALVAREZ R. A new integrated membrane process for producing clarified apple juice and apple juice aroma concentrate[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46: 109-125.
- [16] 葛毅强, 刘文力, 倪元颖, 等. 6种国产膜在苹果汁加工中的应用比较[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(2): 91-96.
- [17] 刘荣娥. 膜分离技术应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 373-374.
- [18] VALLANT F, JEANTON E, DORNER M. Concentration of passion fruit juice on an industrial pilot scale using osmotic evaporation[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47: 195-202.
- [19] CASSANO A, DRICCI E, GALAVARNA G. Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 57: 153-163.
- [20] 钟海雁, 袁列江, 李忠海, 等. 温州蜜柑汁的超滤分离工艺研究[J]. 食品科技, 2003(6): 42-45.
- [21] 张晨, 刘志伟. 柑桔类果汁的脱苦[J]. 江苏食品与发酵, 2000(1): 26-28.
- [22] 钟海雁, 袁列江, 李忠海, 等. 柑桔汁反渗透浓缩的研究[J]. 食品科技, 2002(9): 52-54.
- [23] CASSANO A, DONATO L, DRICCI E. Ultrafiltration of kiwifruit juice: Operating parameters juice quality and membrane fouling[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79: 613-621.
- [24] CASSANO A, DRICCI E. Concentration of clarified kiwifruit juice by osmotic distillation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1397-1404.
- [25] CASSANO A, HGOI A, TAGARELLI A, et al. Integrated membrane process for the production of highly nutritional kiwifruit juice[J]. Desalination, 2006, 189(3): 21-30.
- [26] CASSANO A, JIAO B, DRICCI E. Production of concentrated kiwifruit juice by integrated membrane process[J]. Food Research International, 2004, 37: 139-148.