

基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩研究

葛 晟 陈 东 刘际洲 曹 旭

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300457)

摘要: [目的] 针对热敏料液冰点浓缩过程中存在溶质损耗等问题, 设计并制作一种基于吸收式膜蒸馏的近冰点浓缩装置, 并以橙汁为研究对象验证装置可行性。 [方法] 建立了装置的数学模型, 以橙汁为料液、溴化锂溶液为吸收液, 计算分析了浓缩速率和浓缩能耗比随膜孔直径、膜管壁厚、吸收液质量浓度、吸收液温度、料液质量浓度、料液温度及环境温度等因素的变化规律。 [结果] 当料液质量浓度为 10% (固形物质量百分比为 10%)、环境温度为 25 °C 时, 较佳的参数组合为膜孔直径 0.2 μm 、膜管壁厚 0.000 2 m、吸收液质量浓度 40%、吸收液温度 1 °C、料液温度 0 °C, 此时装置的浓缩速率可达 0.599 kg/h、浓缩能耗比为 3.88 kg/(kW·h)。 [结论] 该技术可为橙汁等热敏料液的高品质浓缩提供一种新的方案。

关键词: 吸收式膜蒸馏; 橙汁; 近冰点浓缩; 浓缩速率; 浓缩能耗比

Near-freezing point concentration of orange juice based on absorption membrane distillation

GE Sheng CHEN Dong LIU Jizhou CAO Xu

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the issues such as solute loss during the freeze-point concentration of heat-sensitive liquid materials, a near-freezing point concentration device based on absorption membrane distillation is designed and fabricated. The feasibility of the device is verified using orange juice as the research subject. [Methods] A mathematical model of the device is established. Using orange juice as the feed liquid and lithium bromide solution as the absorption solution, this paper calculates and analyzes the variation laws of the concentration rate and energy consumption ratio of concentration with factors such as membrane pore diameter, membrane tube wall thickness, mass concentration of absorption solution, absorption solution temperature, mass concentration of feed liquid, feed liquid temperature, and ambient temperature. [Results] When the mass concentration of the feed liquid is 10% (the mass percentage of solids is 10%) and the ambient temperature is 25 °C, the optimal parameter combination is a membrane pore diameter of 0.2 μm , a membrane tube wall thickness of 0.000 2 m, a mass concentration of absorption solution of 40%, an absorption solution temperature of 1 °C, and a feed liquid temperature of 0 °C. At this point, the concentration rate of the device can reach 0.599 kg/h, and the energy consumption ratio for concentration is 3.88 kg/(kW·h). [Conclusion] This technique can provide a new solution for high-quality concentration of thermal liquids such as orange juice.

Keywords: absorption membrane distillation; orange juice; near-freezing point concentration; concentration rate; energy consumption ratio for concentration

近冰点浓缩可以最大限度地保留橙汁等料液中的热敏成分而获得高品质浓缩产品, 目前可用的近冰点浓缩方法主要为冷冻浓缩^[1-4], 但冷冻浓缩在实际应用中存在

不易处理中高浓度料液、会造成料液中溶质夹带损耗等问题^[5-6]。Ding 等^[7]利用冷冻浓缩方法处理果汁, 果汁中维生素 C 和芳香族物质的保留率均 > 90%, 但最高可达到

通信作者: 陈东 (1968—), 男, 天津科技大学教授, 博士。E-mail: chendong@tust.edu.cn

收稿日期: 2025-04-27 改回日期: 2025-11-17

引用格式: 葛晟, 陈东, 刘际洲, 等. 基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 88-93.

Citation: GE Sheng, CHEN Dong, LIU Jizhou, et al. Near-freezing point concentration of orange juice based on absorption membrane distillation[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 88-93.

的浓度受料液黏度限制不能超过 50 °Brix。宋金柱^[8]对果汁冷冻浓缩过程中的溶质夹带损耗规律进行了研究,发现溶质夹带损耗率一般>5%。Safiei 等^[9]利用渐进式冷冻浓缩装置浓缩葡萄汁,自动化程度高,操作 20 min 后,总酚含量可达 37.49%,有效分配常数仅为 0.26,但结构较复杂。

膜蒸馏是基于疏水微孔膜只允许水蒸气通过而不允许其他物质通过的特性,可实现橙汁等料液的常压、无溶质损耗浓缩^[10-12],但目前运用膜蒸馏浓缩果汁的料液温度远>0 °C。Jia 等^[13]利用膜蒸馏在 40 °C 左右浓缩果汁,可将果汁浓缩 3.65 倍。Quist-Jensen 等^[14]利用膜蒸馏在 24 °C 左右浓缩橙汁,可将橙汁由 9.5 °Brix 浓缩至

65 °Brix。张芃悦^[15]利用膜蒸馏在 20 °C 左右浓缩橙汁,膜通量可达 0.13 g/(m²·s)。Jalil Aripin 等^[16]利用吸收式膜蒸馏在 46.5 °C 下对果汁进行浓缩,所得浓缩液中维生素 C 含量为 126.8 mg/100 mL,总酚含量为 45.7 mg/100 mL,营养完整性较高。李晨吉等^[17]研究了基于吸收式膜蒸馏的胡萝卜汁快速浓缩装置,胡萝卜汁的倍浓时间(料液浓度提高 1 倍所需时间)可达数十秒。研究拟设计一种基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩装置,旨在为橙汁等热敏料液的高品质浓缩提供一种新的方案。

1 装置工作原理

基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩装置工作原理如图 1 所示。

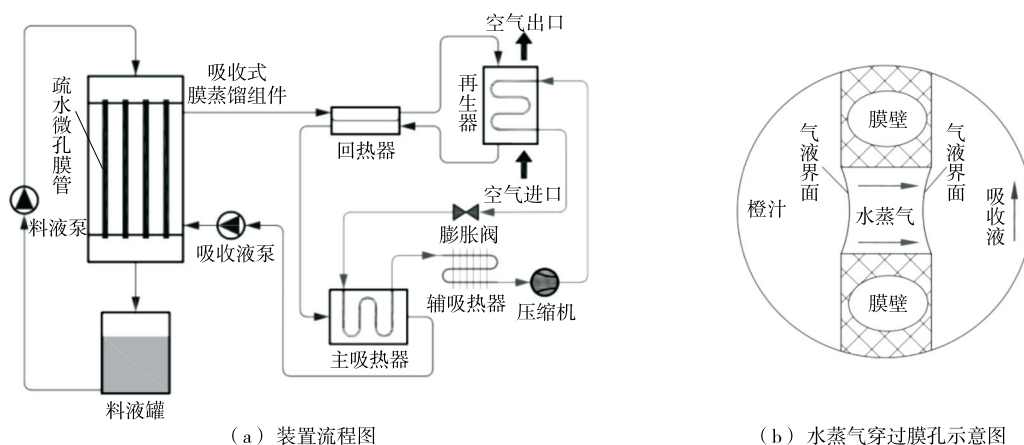


图 1 近冰点浓缩装置工作原理

Figure 1 Working principle of near-freezing point concentration device

由图 1 可知,基于吸收式膜蒸馏的近冰点浓缩装置包含料液循环单元、吸收液循环单元和热泵单元 3 个单元。其中,料液循环单元由料液罐、料液泵和膜蒸馏组件构成;吸收液循环单元由吸收液泵、膜蒸馏组件、回热器、再生器和主吸热器构成;热泵单元由主吸热器、辅吸热器、压缩机、再生器和膨胀阀构成,热泵工质在其中循环运行。

基于吸收式膜蒸馏的近冰点浓缩装置工作过程为:料液循环单元中,料液罐中 0 °C 左右的橙汁由料液泵输送至吸收式膜蒸馏组件,橙汁在膜蒸馏组件内流动时,橙汁表面的水蒸气压力高于吸收液表面的水蒸气压力,橙汁中的水分在膜管内侧汽化成水蒸气穿过膜孔,并在膜管外侧被流动的吸收液带走,出膜管的橙汁浓缩液返回料液罐继续进行循环,直至其浓度达到规定要求。膜管外流动的吸收液具有温度高于橙汁、表面水蒸气压力极低等特点,在吸收带走穿膜孔排出的水蒸气的同时,向膜管内流动的橙汁传递热量,为橙汁中水分的汽化提供所需

的热能。

热泵单元中的热泵工质经压缩机升压升温后变为高温高压状态进入再生器,释放热量给吸收液,出再生器的热泵工质经膨胀阀变为低温低压液体状态进入主吸热器和辅吸热器,吸收低温热能变为低温气体状态进入压缩机开始下一次循环。

吸收液循环单元中,出膜蒸馏组件的吸收液含有较多水分,经回热器预热和再生器加热后变为温度较高的状态,其表面的水蒸气压力高于环境空气中的水蒸气压力,吸收液中的水分汽化为水蒸气排出给环境空气,从而实现吸收液的再生;从再生器流出的高温吸收液,经回热器预冷后进入主吸热器,被热泵工质进一步冷却达到适宜温度后进入膜蒸馏组件,吸收橙汁中穿膜孔排出的水蒸气。

基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩装置具有以下特点:

(1) 橙汁中的水分在 0 °C 左右以水蒸气形式通过膜

孔排出,能够有效保护橙汁中的热敏性有益成分和风味成分,确保浓缩产品的高品质。

(2) 橙汁中的其他物质难以穿过膜孔而得以保留,能有效避免浓缩过程中橙汁中有益成分的损耗。

(3) 橙汁浓缩过程在常压下进行,装置中除热泵单元外的其他部件均可采用低成本的高分子材料,可降低装置的初投资。

(4) 装置通过热泵实现热量在不同部件之间的高效转移,可实现橙汁浓缩的低能耗。

(5) 吸收式膜蒸馏的膜通量较大,可使膜组件的体积比较紧凑,且膜管内外均不承受压力,可采用价格较低的聚丙烯疏水微孔膜管,膜组件成本较低。

2 吸收式膜蒸馏近冰点浓缩试验验证

为验证吸收式膜蒸馏近冰点浓缩技术可行性,制作了试验装置。膜蒸馏组件中基本参数及典型运行数据见表 1,验证了试验技术的可行性且具有较好的性能。

表 1 膜组件参数及典型运行数据

Table 1 Membrane component parameters and typical operation data

参数	单位	数值
膜管材料		聚丙烯
膜组件壳体内直径	mm	43
膜管内直径	mm	1.0
膜管长度		1.0
膜孔直径	μm	0.12
膜孔隙率	%	68
膜管总根数		50
橙汁浓度	%	10
橙汁流量	g/s	4.71
橙汁进膜管温度	℃	4.2
橙汁出膜管温度	℃	0
吸收液(溴化锂溶液)温度	℃	-6.5
膜组件膜通量	g/(m ² ·s)	0.045
装置浓缩速率	kg/h	0.050

3 近冰点浓缩装置数学模型

膜蒸馏组件特性方程:

$$J_m = \frac{p_f - p_a}{R_{KM}}, \tag{1}$$

$$R_{KM} = \frac{\tau \delta_m \sqrt{2\pi M_{wa} R T_{am}}}{48 \epsilon r_m} + \frac{\tau \delta_m R T_{am} (p_o - p_m)}{18 \epsilon p_o D_{wa}}, \tag{2}$$

$$J_m r_w = k_m \Delta T_m, \tag{3}$$

式中:

J_m ——水蒸气穿过疏水微孔膜的膜通量, g/(m²·s);
 p_f ——料液侧膜表面水蒸气压力, Pa;
 p_a ——吸收液侧膜表面水蒸气压力, Pa;
 R_{KM} ——水蒸气穿膜阻力, (m²·s·Pa)/g;
 τ ——膜孔的弯曲因子;
 δ_m ——膜管壁厚, m;
 M_{wa} ——水蒸气的摩尔质量, kg/mol;
 R ——气体常数, J/(mol·K);
 T_{am} ——吸收液与膜管壁面的平均温度, K;
 ϵ ——膜壁孔隙率;
 r_m ——膜孔半径, m;
 p_o ——膜孔内气体压力, Pa;
 p_m ——膜孔内水蒸气压力, Pa;
 D_{wa} ——水蒸气在空气中的扩散系数, m²/s;
 r_w ——料液中水分的汽化潜热, J/g;
 k_m ——膜两侧吸收液与料液的传热系数, W/(m²·K);
 ΔT_m ——膜两侧吸收液与料液的传热温差, K。

热泵特性方程:

$$Q_h = J_m A_m r_w, \tag{4}$$

$$COP = \frac{C_{hp} T_{rc}}{T_{rc} - T_{re}}, \tag{5}$$

$$P = \frac{Q_h}{COP}, \tag{6}$$

式中:

Q_h ——热泵热负荷, W;
 A_m ——疏水微孔膜管表面积, m²;
 COP ——热泵制热系数;
 C_{hp} ——热力学完善度系数;
 T_{rc} ——热泵工质冷凝温度, K;
 T_{re} ——热泵工质蒸发温度, K;
 P ——热泵压缩机功率, W。

装置总体性能方程:

$$M_w = 3.6 J_m A_m, \tag{7}$$

$$C_m = \frac{3\,600 M_w}{P}, \tag{8}$$

式中:

M_w ——装置浓缩速率(单位时间内从料液中排出的水分质量), kg/h;

C_m ——装置浓缩能耗比(热泵压缩机消耗 1 kW·h 电能从料液中除去的水分质量), kg/(kW·h)。

4 近冰点浓缩装置性能分析

4.1 吸收式膜蒸馏组件概要设计

吸收式膜蒸馏组件的设计背景为:料液(橙汁)质量浓度为 10%、温度为 0℃,吸收液(溴化锂溶液)质量浓度

为40%、温度为1℃,处理量(浓缩速率)为0.4 kg/h,上述工况下,根据式(9)求得膜蒸馏过程的膜通量为0.039 4 g/(m²·s)。

$$J_m = R_m(p_f - p_a), \quad (9)$$

式中:

R_m ——水蒸气穿膜阻力系数, g/(m²·s·Pa)。

根据式(10)求得所需膜面积为2.82 m²。

$$A_m = \frac{M_w}{3.6J_m} \quad (10)$$

膜蒸馏组件的膜材料采用聚丙烯,疏水微孔膜管内直径为0.001 m,膜管长度为1.8 m时,根据式(11)求得膜管根数为500。

$$N = \frac{A_m}{\pi DL}, \quad (11)$$

式中:

N ——膜管根数;

D ——膜管内直径,m;

L ——膜管长度,m。

4.2 近冰点浓缩装置性能变化规律

基于近冰点浓缩装置数学模型,对装置的浓缩速率和浓缩能耗比随膜孔直径、膜管壁厚、吸收液质量浓度、吸收液温度、料液质量浓度、料液温度及环境温度等因素的变化规律进行计算分析,结果如图2~图3所示。计算基准参数:料液质量浓度为10%、温度为0℃,吸收液质量浓度为40%、温度为1℃,环境空气温度为25℃,膜组件的膜材料采用聚丙烯,膜管长度为1.8 m,膜管内直径为0.001 m,膜管壁厚为0.000 3 m,膜孔直径为0.2 μm,膜管根数为

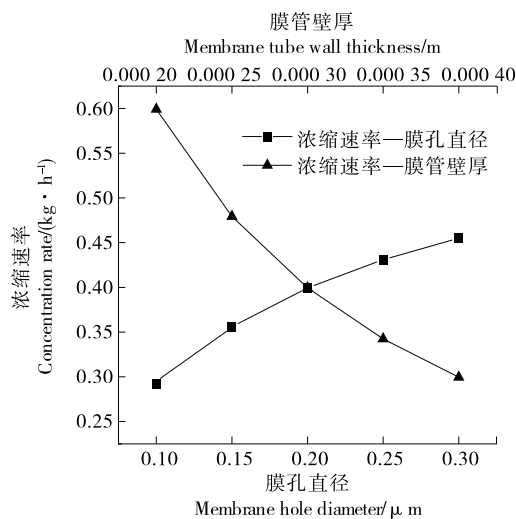


图2 膜孔直径和膜管壁厚对浓缩速率的影响

Figure 2 Influence of membrane pore diameter and membrane tube wall thickness on the concentration rate

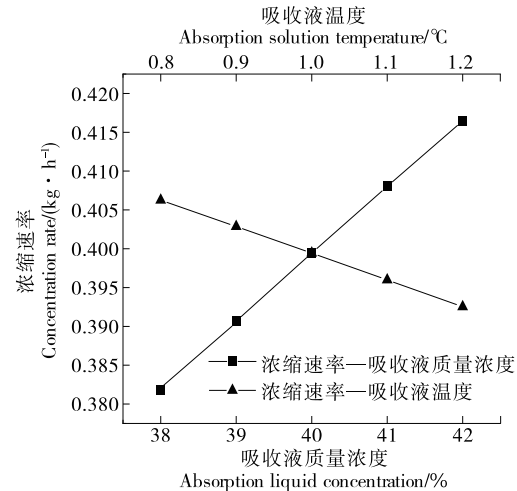


图3 吸收液质量浓度和温度对浓缩速率的影响

Figure 3 Influence of mass concentration and temperature of the absorption solution on the concentration rate

500根。

由图2可知,浓缩速率随膜孔直径的增加而增加,随膜管壁厚的增加而降低。当膜孔直径由0.1 μm增加至0.3 μm时,水蒸气穿过膜壁的通道尺寸增加,浓缩速率由0.292 kg/h增加至0.455 kg/h,约增加了55.6%。当膜管壁厚由0.000 2 m增加至0.000 4 m时,水蒸气流过膜孔的通道长度增加,浓缩速率由0.599 kg/h下降至0.299 kg/h,约降低了50.0%。

由图3可知,浓缩速率随吸收液质量浓度的增加而增加,随吸收液温度的升高而降低。当吸收液质量浓度由38%增加至42%时,由于高浓度吸收液侧的水蒸气压力较低,增大了膜两侧的水蒸气压力差,提高了传质驱动力,浓缩速率由0.382 kg/h增加至0.416 kg/h,约增加了9.08%。当吸收液温度由0.8℃升高至1.2℃时,吸收液侧的水蒸气压力升高,膜两侧的水蒸气压力差降低,浓缩速率由0.406 kg/h下降至0.393 kg/h,约降低了3.38%。

由图4可知,浓缩速率随料液质量浓度的增加而降低,随料液温度的升高而增加。当料液质量浓度由8%增加至12%时,由于高浓度的料液表面的水蒸气压力较低,降低了膜两侧的水蒸气压差,浓缩速率由0.406 kg/h下降至0.393 kg/h,约降低了3.03%。当料液温度由-0.2℃升高至0.2℃时,料液表面的水蒸气压力增加,水蒸气的穿膜速率增大,装置浓缩速率由0.387 kg/h增加至0.412 kg/h,约增加了6.39%。

由图5可知,浓缩能耗比随吸收液温度的升高而增加,随环境温度的升高而降低。当吸收液温度由0.8℃升高至1.2℃时,热泵蒸发温度上升,导致热泵制热系数增加,装置

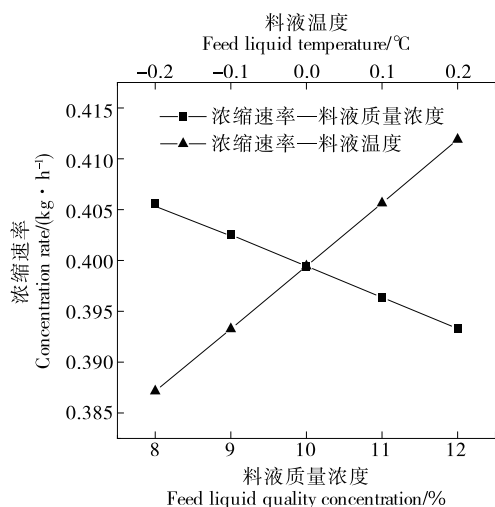


图4 料液质量浓度和温度对浓缩速率的影响

Figure 4 Influence of the mass concentration and temperature the feed liquid on the concentration rate

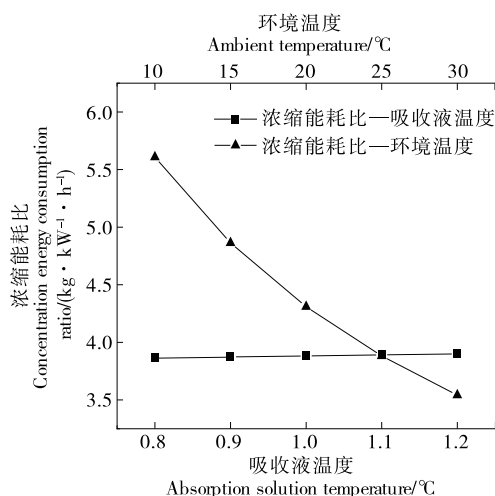


图5 吸收液温度和环境温度对浓缩能耗比的影响

Figure 5 Influence of the absorption solution temperature and the ambient temperature on the energy consumption ratio for concentration

浓缩能耗比由 3.86 kg/(kW·h) 增加至 3.90 kg/(kW·h), 约增加了 0.91%。当环境温度由 10 °C 升高至 30 °C 时, 吸收液再生所需的温度上升, 热泵工质冷凝温度上升, 热泵制热系数下降, 装置浓缩能耗比由 5.61 kg/(kW·h) 下降至 3.54 kg/(kW·h), 约降低了 36.85%。

基于不同运行参数时的装置运行性能, 当料液质量浓度为 10%、环境温度为 25 °C 时, 较佳的参数组合为: 膜孔直径 0.2 μm、膜管壁厚 0.000 2 m、吸收液质量浓度 40%、吸收液温度 1 °C、料液温度 0 °C, 此时装置的浓缩速率可达 0.599 kg/h、浓缩能耗比为 3.88 kg/(kW·h)。

5 结论

针对橙汁等热敏料液冰点浓缩时采用冷冻浓缩方法存在溶质损耗等问题, 设计了一种基于吸收式膜蒸馏的橙汁近冰点浓缩装置, 具有常压 0 °C 左右运行、低能耗、低成本等特点。

(1) 利用制作的近冰点浓缩试验装置验证了基于吸收式膜蒸馏的近冰点浓缩技术具有较好的可行性; 且增大膜孔直径、降低膜管壁厚、提高吸收液质量浓度、降低吸收液温度、降低料液质量浓度、提高料液温度可以提高装置的浓缩速率; 较高的吸收液温度、较低的环境温度可以提高装置的浓缩能耗比。

(2) 当料液质量浓度为 10%、环境温度为 25 °C 时, 较佳的参数组合为: 膜孔直径 0.2 μm、膜管壁厚 0.000 2 m、吸收液质量浓度 40%、吸收液温度 1 °C、料液温度 0 °C, 装置的浓缩速率可达 0.599 kg/h、浓缩能耗比为 3.88 kg/(kW·h)。

(3) 基于吸收式膜蒸馏的近冰点浓缩技术为橙汁等热敏料液的高品质浓缩提供了一种新的方案, 进一步可综合考虑膜蒸馏组件结构、装置成本等进行更全面的分析和优化, 推动该技术的产业化应用和推广。

参考文献

- [1] 周新, 徐鹏, 吴苏炜, 等. 关于悬浮式冷冻浓缩工艺参数的研究[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(5): 21-24.
ZHOU X, XU P, WU S W, et al. Study on technological parameters of suspension freezing concentration[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(5): 21-24.
- [2] MASTELLO R B, JANZANTTI N S, MONTEIRO M. Volatile and odoriferous compounds changes during frozen concentrated orange juice processing[J]. Food Research International, 2015, 77: 591-598.
- [3] DA SILVA HAAS I C, SANTOS DE ESPINDOLA J, DE LIZ G R, et al. Gravitational assisted three-stage block freeze concentration process for producing enriched concentrated orange juice (*Citrus sinensis* L.): multi-elemental profiling and polyphenolic bioactives[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 315: 110802.
- [4] 何靖柳, 张秋霞, 刘杨, 等. 浓缩果汁浓缩方法的研究现状及展望[J]. 南方农机, 2021, 52(24): 20-22.
HE J L, ZHANG Q X, LIU Y, et al. Research status and prospect of concentrated juice concentration method[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(24): 20-22.
- [5] 尹子迎, 关军锋, 刘金龙. 浓缩果汁及其发酵酒的研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 225-231.
YIN Z Y, GUAN J F, LIU J L. Research progress of concentrated fruit juice and its fermented wine[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 225-231.

- [6] BREDUN M A, PRESTES A A, PANCERI C P, et al. Bioactive compounds recovery by freeze concentration process from winemaking by-product[J]. Food Research International, 2023, 173: 113220.
- [7] DING Z X, QIN F G F, YUAN J J, et al. Concentration of apple juice with an intelligent freeze concentrator[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 256: 61-72.
- [8] 宋金柱. 界面渐进冷冻浓缩过程的溶质夹带规律研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020: 43-46.
- SONG J Z. Research on solute entrainment in the process of interface progressive freeze concentration[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020: 43-46.
- [9] SAFIEI N Z, NGADI N, JOHARI A, et al. Grape juice concentration by progressive freeze concentrator sequence system[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(1): e12910.
- [10] 于佳男, 陈东, 曹莹莹, 等. 液隙式膜蒸馏常压低温浓缩果汁研究[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(4): 1-4.
- YU J N, CHEN D, CAO Y Y, et al. Research on low temperature concentration of juice at normal pressure based on liquid gap membrane distillation[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(4): 1-4.
- [11] 杨茜. 冷冻浓缩与膜蒸馏集成装置的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023: 15.
- YANG X. Study on the integrated device of freeze concentration and membrane distillation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023: 15.
- [12] 陈雨, 陈东, 刘明权, 等. 基于气扫式膜蒸馏的果汁快速浓缩研究[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(2): 88-92.
- CHEN Y, CHEN D, LIU M Q, et al. Study on rapid concentration of juice based on sweeping gas membrane distillation[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(2): 88-92.
- [13] JIA F T, CAO X H, GE L, et al. Sustainable apple juice concentration: a fusion of pasteurization and membrane distillation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 208: 753-764.
- [14] QUIST-JENSEN C A, MACEDONIO F, CONIDI C, et al. Direct contact membrane distillation for the concentration of clarified orange juice[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 187: 37-43.
- [15] 张芑悦. 热敏料液专用气扫式膜蒸馏装置的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 93-95.
- ZHANG P Y. Study on sweeping gas membrane distillation device for heat sensitive liquid[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022: 93-95.
- [16] JALIL ARIPI N M N, THORIQ M U, JULIAN H, et al. Enhancing the nutritional quality and concentration of noni, pineapple, and dragon fruit juice mixture using osmotic membrane distillation[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 21: 101823.
- [17] 李晨吉, 谢继红, 文鑫. 吸收式膜蒸馏胡萝卜汁快速浓缩装置[J]. 轻工机械, 2025, 43(2): 84-90.
- LI C J, XIE J H, WEN X. Absorption membrane distillation carrot juice rapid concentration device[J]. Light Industry Machinery, 2025, 43(2): 84-90.