



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180102

数字出版日期: 2018-09-19; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20180919.1629.008.html>

套管式冷冻浓缩装置的研制及其实验研究

李银星, 陈东, 尹龙升, 谢继红
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 研制一种新型结构的冷冻浓缩装置, 可克服传统界面渐进冷冻浓缩溶质夹带率较高的缺点, 且装置的料液处理量适应性好、参数调控方便、无易磨损件。建立了套管式冷冻浓缩装置的数学模型, 通过控制温度、流速, 对不同工况下结冰速度随料液温度、载能液温度和冰层厚度的变化规律进行了计算分析。研制了 R134a 套管式冷冻浓缩实验装置, 对其工作特性进行了实验研究。结果表明: 通过控制料液浓度、料液流速和冰层厚度, 可降低溶质夹带率。

关键词: 冷冻浓缩; 界面渐进; 套管式; 溶质夹带

中图分类号: TQ051.8

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2018)06-0053-05

Development and Experiment of the Casing Freezing Concentrator

LI Yinxing, CHEN Dong, YIN Longsheng, XIE Jihong

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A new type of refrigerating concentrator was developed, which has the advantages of good adaptability, convenient parameter regulation and no easy wear. The mathematical model of the casing freezing concentrator was established. Under different working conditions, the changes of the freezing velocity with the temperature of the feed liquid, the temperature of the carrier fluid and the thickness of the ice layer were calculated and analyzed by controlling the temperature and the flow rate. The R134a casing freezing experimental device was established, and its working characteristics were studied. The results showed that the rate of solute entrainment could be reduced by controlling the liquid concentration, the liquid flow rate and the thickness of the ice.

Key words: freezing concentration; interface progression; casing type; solute entrainment

冷冻浓缩是在低温条件下对料液进行浓缩的, 具有能耗小、产品品质好的特点, 根据结冰形式的不同可将其分为悬浮结晶冷冻浓缩和界面渐进冷冻浓缩^[1-2]。界面渐进冷冻浓缩成本较低、块状冰易分离; 但溶质夹带较高, 影响该技术的应用推广^[3]。原因是: 夹带机理较复杂, 包括化学夹带和物理夹带, 物理夹带又包括表面附着夹带和包埋夹带等; 影响夹带的因素较多, 如料液温度、料液浓度、料液当量流速和结冰速度等。刘凌^[4]用降膜式冷冻浓缩装置处理番茄汁, 浓缩终点的维生素 C 保存率较高, 达 40.8%; 刘冬雪^[5]、胡涛^[6]用转筒式冷冻浓缩装置处理海水, 研究了制冷剂蒸发温度、海水初始温度和结冰厚度等对结冰速率的影响; 饶建平^[7]研制了改进和扩大的转

筒式冷冻浓缩装置, 解决了装置运行时易卡刀的问题, 强化了传热; Nakornsri 等^[8]研究证实了基于管冰机原理的冷冻浓缩装置具有节能效果好、制冷效率高等优点。目前界面渐进冷冻浓缩技术存在的主要问题有: 采用刮刀将冰从金属表面剥离, 使用一段时间后, 刮刀等部件易出现磨损; 料液在结冰表面的流速较小, 冰水界面处的浓溶液难以及时与主体料液混合, 易造成结冰中溶质夹带, 缺乏控制溶质夹带的简便方法。为此, 开发不采用刮刀等机械方式除冰, 且结冰表面流速调节范围大的冷冻浓缩装置, 对冷冻浓缩技术的研究和推广均有重要价值。

本文研制了一种新型结构的界面渐进冷冻浓缩装置, 即套管式冷冻浓缩装置, 对其构成、原理和特

收稿日期: 2018-04-04; 修回日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576004)

作者简介: 李银星(1993—), 女, 内蒙古人, 硕士研究生; 通信作者: 陈东, 教授, chendong@tust.edu.cn

性进行了理论和实验研究. 该装置为周期性半连续工作, 具有溶质夹带较少、料液处理量适应性较好、参数调控方便、无易磨损件等优点.

1 装置的工作原理

套管式冷冻浓缩装置的工作原理如图 1 所示. 由图 1 可知, 套管式冷冻浓缩装置主要由制冷机组单

元、料液循环单元和冰水循环单元组成. 制冷机组单元包括压缩机、辅冷器、冷凝器、节流阀和蒸发器; 料液循环单元包括料液罐、料液泵、料液阀和冷冻浓缩器; 冰水循环单元包括融冰水罐、融冰水泵、融冰水阀和融冰器. 通过控制组合阀门的开闭和变换生产台工位, 实现装置冷冻模式和融冰模式的转换; 通过调控料液、载能液、融冰水侧的温度和流速, 可实现装置在最佳工况下运行.

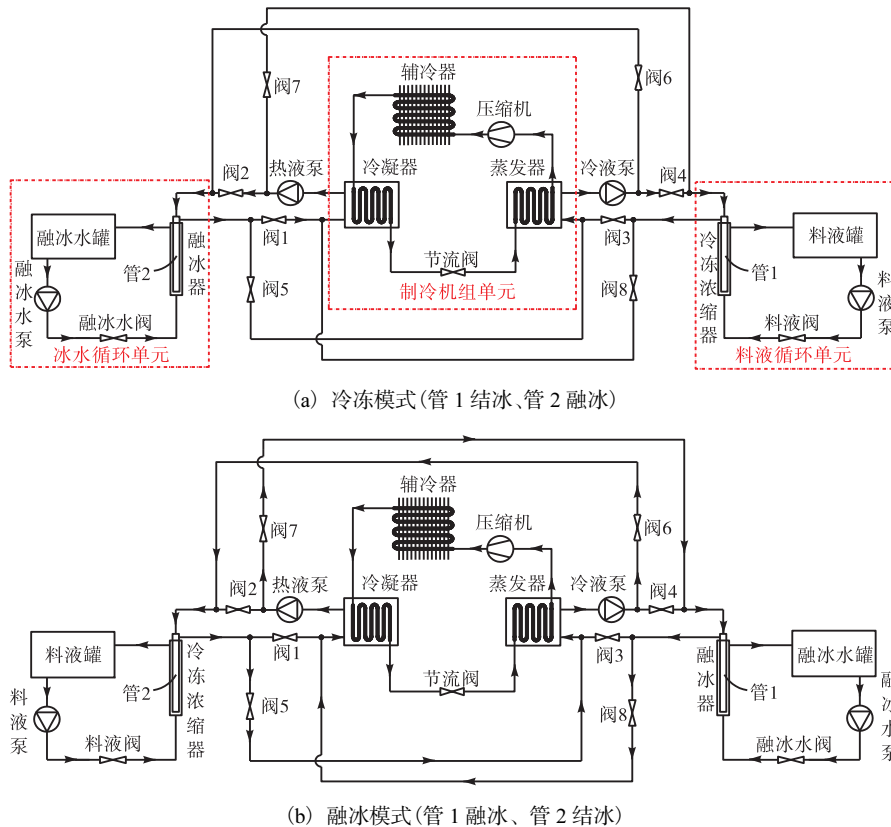


图 1 套管式冷冻浓缩装置的工作原理

Fig. 1 Working principle diagram of the casing freezing concentrator

冷冻模式下, 阀 1—4 打开、阀 5—8 关闭, 管 1 位于冷冻浓缩器内、管 2 位于融冰器内. 工作时, 低温载能液使管 1 冷却, 料液中的水沿管 1 外壁结冰, 料液被浓缩; 高温载能液则不断对管 2 外壁的冰层放热, 使冰层逐渐融化.

当管 1 外侧冰层达到规定厚度时, 制冷机组停机, 关闭阀 1—4, 提升生产台并旋转 180°, 将管 1 插入融冰器内, 管 2 插入冷冻浓缩器内, 进入融冰模式.

融冰模式下, 阀 5—8 打开、阀 1—4 关闭. 工作时, 高温载能液不断对冷冻模式下管 1 壁表面形成的冰层放热, 使冰层逐渐融化; 低温载能液则使管 2 冷却, 料液中的水沿管 2 外壁结冰, 料液被进一步浓缩. 待管 2 外侧冰层达到规定厚度要求时, 装置进入

下一循环的冷冻模式.

套管式冷冻浓缩装置为周期性半连续工作; 通过调控料液、载能液侧的温度和流速, 可降低冰中溶质夹带; 装置对料液适应性较好 (最少 100 mL 左右即可工作); 将套管式装置改为平板式或圆筒式装置, 可实现装置扩大化并用于工业生产; 装置无刮刀、裁冰刀等部件, 维护简单, 使用寿命较长.

2 套管式冷冻浓缩装置的特性分析

2.1 套管式冷冻浓缩装置的特性方程

对套管式冷冻浓缩装置的特性进行计算分析所需的料液、载能液、融冰水的通用计算方程为

$$D_E = \frac{4A}{U}$$

$$Re = \frac{uD_E}{\gamma}$$

$$\alpha = 1.86 \frac{\lambda}{D_E} \left(\frac{D_E Re Pr}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_F}{\mu_W} \right)^{0.14}$$

式中: D_E 为当量直径, m; A 为管内流体流过的截面积, m^2 ; U 为湿周, m; Re 为雷诺数; u 为流速, m/s; γ 为运动黏度, m^2/s ; α 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; Pr 为普朗特数; L 为特征尺寸, m; μ_F 为动力黏度, Pa·s; μ_W 为管壁壁面温度下流体的动力黏度, Pa·s.

(1) 冷冻过程的计算式为

$$Q_{M1} = \frac{T_{S1} - T_C}{R_{TC} + R_{TI}}$$

$$Q_{N1} = \alpha_F (T_F - T_{S1})$$

$$u_1 = \frac{Q_{M1} - Q_{N1}}{h_F \rho_1}$$

式中: Q_{M1} 为载能液的吸热量, W; T_{S1} 为料液冰点温度, $^\circ C$; T_C 为载能液温度, $^\circ C$; R_{TC} 为载能液与管壁间导热热阻, $^\circ C/W$; R_{TI} 为冰层导热热阻, $^\circ C/W$; Q_{N1} 为料液的放热量, W; α_F 为料液与冰水界面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_F 为料液温度, $^\circ C$; u_1 为结冰速度, m/s; h_F 为冰的凝固潜热, J/kg; ρ_1 为冰的密度, kg/m^3 .

(2) 融冰过程的计算式为

$$Q_{M2} = \frac{T_H - T_{S2}}{R_{TH} + R_{TG}}$$

$$Q_{N2} = \alpha_T (T_T - T_{S2})$$

$$u_{IG} = \frac{Q_{M2}}{h_T \rho_1}$$

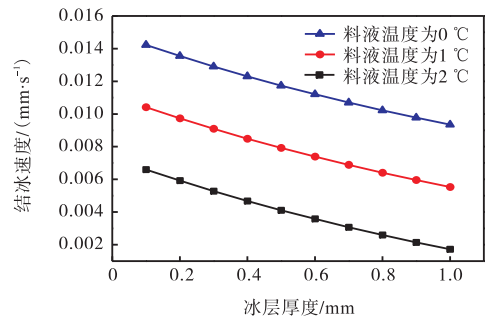
$$u_{IT} = \frac{Q_{N2}}{h_T \rho_1}$$

式中: Q_{M2} 为载能液的放热量, W; T_H 为载能液温度, $^\circ C$; T_{S2} 为融冰水的冰点温度, $^\circ C$; R_{TH} 为载能液与管壁间的导热热阻, $^\circ C/W$; R_{TG} 为水隙导热热阻, $^\circ C/W$; Q_{N2} 为融冰水的放热量, W; α_T 为融冰水与冰水界面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_T 为融冰水温度, $^\circ C$; u_{IG} 为冰层内表面融冰速度, m/s; u_{IT} 为冰层外表面融冰速度, m/s; h_T 为冰的融化潜热, J/kg.

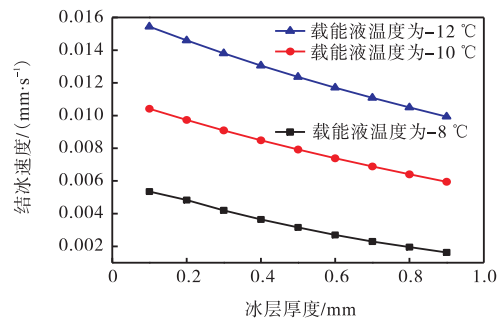
2.2 套管式冷冻浓缩装置的特性规律

2.2.1 冷冻过程的特性规律

处理质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液, 当料液、载能液流速均为 0.5 m/s 时, 结冰速度随冰层厚度的变化规律如图 2 所示.



(a) 料液温度不同



(b) 载能液温度不同

图 2 结冰速度随冰层厚度的变化

Fig. 2 Relationship between icing rate and ice thickness

由图 2 可知: 结冰速度随冰层厚度的增大而减小, 这是由于冰层越厚, 冰导热热阻越大, 阻碍传热, 故结冰速度减小. 当冰层厚度相同时, 料液温度越接近冰点温度 (约为 $-1.79^\circ C$), 结冰速度越快; 载能液温度越低, 传热推动力越大, 结冰速度越快.

2.2.2 融冰过程的特性规律

融冰水温度为 $5^\circ C$, 流速为 0.5 m/s; 载能液温度为 $10^\circ C$, 流速为 0.5 m/s 时, 融冰速度随冰层厚度的变化规律如图 3 所示.

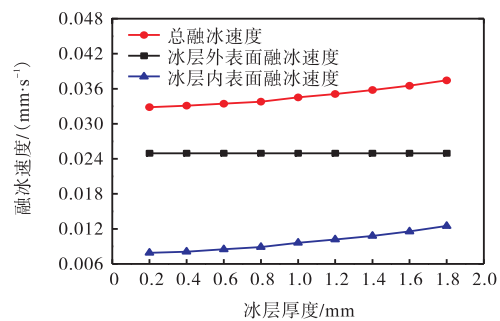


图 3 融冰速度随冰层厚度的变化

Fig. 3 Relationship between melting rate and ice thickness

由图 3 可知: 冰层内表面融冰速度和总融冰速度随冰层厚度的增大而增大; 外表面融冰速度则不随冰层厚度变化. 这是由于内侧冰吸收载能液的热量逐

渐融化,而载能液的热量不能透过冰层使外侧冰融化,外侧冰融化所需的热量来源于融冰水.

可参考以上规律调控套管式冷冻浓缩装置运行时料液、载能液和融冰水侧相应参数,从而提高传热、降低溶质夹带.

3 实验

3.1 实验装置

套管式冷冻浓缩实验装置实物见图 4. 实验装置的主要部件和测量仪表及其功能见表 1.

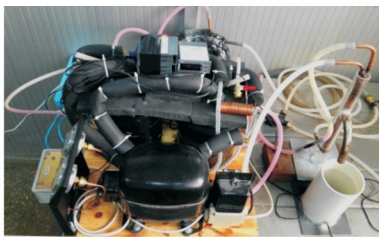


图 4 套管式冷冻浓缩实验装置

Fig. 4 Casing freezing experimental concentrator

表 1 实验装置的主要部件和测量仪表及其功能

Tab. 1 The main parts and measuring instruments of the experimental apparatus and their functions

名称	参数	功能
制冷剂	R134a	制冷机组循环介质
专用制冷机组	600 W	为冷冻浓缩器提供冷源
冷冻浓缩器	Φ16 mm × 200 mm	冷冻结冰
料液容器	Φ100 mm × 140 mm	盛放料液
ETC-100 测温仪	精度为 0.1 °C	测量温度
ATC-10 盐度计	精度为 0.1‰	测量料液及融冰水浓度

3.2 实验数据处理

冰中溶质夹带率的计算式为

$$\gamma_1 = \frac{m_{1S}}{m_1} \times 100\%$$

式中: γ_1 为溶质夹带率, % ; m_{1S} 为冰中夹带的溶质质量, kg; m_1 为结冰量, kg.

3.3 实验结果及分析

对质量分数为 1%、2%、3% 和 4% 的 NaCl 水溶液进行冷冻浓缩,溶质夹带率随料液质量分数的变化如图 5 所示(实验中料液流速约为 0.244 m/s). 由图 5 可知,料液浓度越高时,溶质夹带率越大. 质量分数为 1%、2%、3% 和 4% 的 NaCl 水溶液的平均溶质夹带率约为 0.44%.

对质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液进行冷冻浓缩,则溶质夹带率随料液流速的变化如图 6 所示. 由

图 6 可知:溶质夹带率随料液流速的增大先减小后缓慢增大. 料液流速约为 0.075 m/s 时,溶质夹带率最小,约为 0.25%;料液流速达到 0.15 m/s 以上时,溶质夹带率基本保持在 0.5% 左右(当料液的质量分数为 1%、2% 和 4% 时,溶质夹带率随料液流速的变化规律与 3% 时相似).

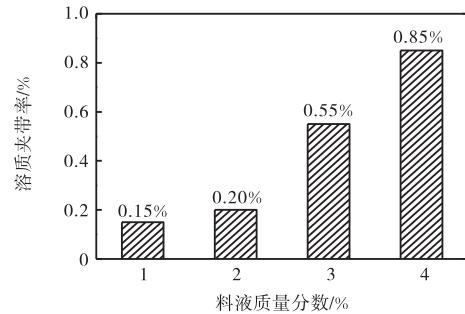


图 5 溶质夹带率随料液质量分数的变化

Fig. 5 Relationship between solute entrainment rate and liquid concentration

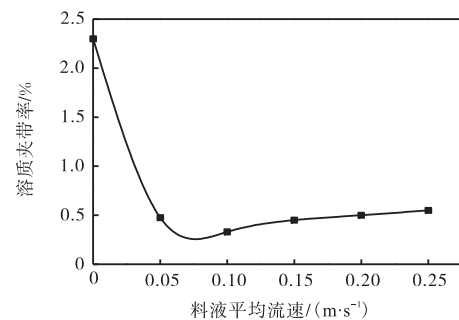


图 6 溶质夹带率随料液流速的变化

Fig. 6 Relationship between solute entrainment rate and liquid velocity

分别对质量分数为 3% 和 4% 的 NaCl 水溶液进行冷冻浓缩,结冰 5.5 min 后,溶质夹带率随冰层厚度的变化如图 7 所示(料液质量分数为 1% 和 2% 时,溶质夹带率随冰层厚度的变化规律与 3% 时相似).

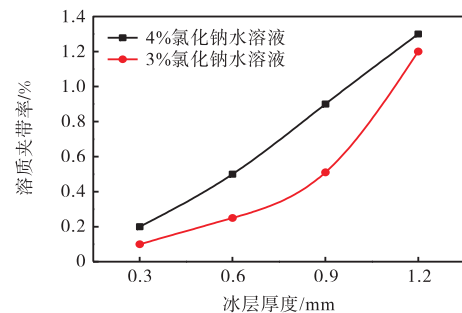


图 7 溶质夹带率随冰层厚度的变化

Fig. 7 Relationship between solute entrainment rate and ice thickness

由图7可知:溶质夹带率随冰层厚度的增大而增大;当冰层厚度相同时,料液浓度越高,溶质夹带率越大。

4 结 语

本文研制了套管式冷冻浓缩实验装置,利用装置数学模型对结冰速度随冰层厚度、料液和载能液温度,融冰速度随冰层厚度的变化规律进行了计算分析,最后进行了实验研究。结果表明:冰层厚度对冷冻和融冰过程均有重要影响,其厚度宜控制在0.5~1.0 mm;通过调控料液浓度、料液流速、冰层厚度,可降低夹带损失,改善产品品质;处理质量分数3%的NaCl水溶液,料液流速为0.1 m/s、冰层厚度为0.6 mm时,溶质夹带率可控制在0.3%以内。

套管式冷冻浓缩装置对料液处理量适应性好,易实现装置扩大化,温度、流速控制灵活,无易磨损件。进一步需研发相关在线显微探测设备,可对冰晶的微观特性开展研究。

参考文献:

[1] Sahasrabudhe A B, Desai R R, Jabade S K. Modeling

and simulation of a freeze concentration technique for sugarcane juice concentration[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 110-116: 2768-2773.

[2] 李亚,孙潇,孙卫东. 冷冻浓缩技术的应用及研究进展[J]. *广西轻工业*, 2008(3): 9-10.

[3] Miyawaki O, Liu L, Nakamura K. Effective partition constant of solute between ice and liquid phases in progressive freeze-concentration[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(5): 756-758.

[4] 刘凌. 果蔬汁常压低温浓缩新技术:界面渐进冷冻浓缩[J]. *饮料工业*, 2001, 4(6): 35-38.

[5] 刘冬雪. 冷冻浓缩装置的参数优化与控制研究[D]. 天津:天津科技大学, 2008.

[6] 胡涛. 转筒式冷冻浓缩装置的结构与调控研究[D]. 天津:天津科技大学, 2009.

[7] 饶建平. 冷冻浓缩装置的改进与扩大研究[D]. 福州:福建农林大学, 2012.

[8] Nakornsri S, Suntivalakorn R, Thanutwutthigorn K. Performance improvement of tubular-ice making machine by reducing the feed water temperature with shell and tube heat exchanger[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 564: 298-303.

责任编辑:常涛

(上接第52页)

[6] 刘艳杰,潘高峰,王桂英,等. 萃取精馏分离乙酸甲酯-甲醇共沸物的模拟[J]. *青岛科技大学学报:自然科学版*, 2015, 36(6): 635-639.

[7] 凌乾,高文斌,吴廷凯. 变压精馏分离醚后 C₄ 中甲醇组分模拟研究[J]. *现代化工*, 2015, 35(12): 147-150.

[8] 纪智玲,王志恒,廖丽华,等. 具有最低共沸点难分离物系变压精馏分离[J]. *化工进展*, 2014, 33(增刊1): 85-88.

[9] Lee J, Cho J, Kim D M, et al. Separation of tetrahydrofuran and water using pressure swing distillation: Modeling and optimization [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(2): 591-596.

[10] 钟世安,李宇萍,李勃,等. 减压膜蒸馏处理茶多酚-乙醇-水溶液[J]. *膜科学与技术*, 2003, 23(1): 21-24.

[11] 陆超,张薇. 渗透汽化膜分离法制备含水0.1%的无水乙醇[J]. *石油和化工设备*, 2009(8): 23-25.

[12] 刘家棋. 分离过程[M]. 北京:化学工业出版社, 2001.

[13] 陈新志,蔡振云,胡望明,等. 化工热力学[M]. 3版. 北京:化学工业出版社, 2010.

[14] 秦海洋,黄雪莉,李永霞. 萃取精馏过程中萃取剂选择及萃取条件研究[J]. *化学工业与工程*, 2009, 26(4): 342-346.

[15] 魏奇业,张德胜,王葳,等. 八碳烯分离过程的脱水研究[J]. *现代化工*, 2005, 25(10): 54-56.

责任编辑:周建军