

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210156

气扫式预热型热泵膜蒸馏装置的设计及其性能分析

张芃悦, 陈 东, 谢继红, 程晋军, 胡胜威, 张 旭
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘 要: 设计一种可在常压下实现热敏料液低能耗浓缩的气扫式预热型热泵膜蒸馏装置, 介绍了装置的工作原理和主要特点, 给出装置的特性方程, 计算分析膜蒸馏组件热效率、热泵制热系数、装置浓缩速率、装置节能倍率随料液进膜蒸馏组件温度和吹扫气出冷却器温度的变化规律, 研究结果表明该装置具有较好的节能效果. 在基准参数工况下, 其能耗约为单效蒸发的 1/5.

关键词: 热敏料液; 低温浓缩; 气扫式膜蒸馏; 热泵; 节能

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2022)01-0023-05

Design and Performance Analysis of Sweeping Gas Preheating Heat Pump Membrane Distillation Device

ZHANG Pengyue, CHEN Dong, XIE Jihong, CHENG Jinjun, HU Shengwei, ZHANG Xu
(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In our study we designed a sweeping gas preheating heat pump membrane distillation device for low energy consumption and concentration of thermal sensitive liquid under normal pressure. In this article we first introduce the working principle and main characteristics of the device. Then we provide the characteristic equation of the device, followed by our calculations and analysis of the changes in thermal efficiency of the membrane distillation module, coefficient of performance (COP) of the heating pump, concentration rate and the energy saving ratio (ESR) of the device with the changes of temperature of the feed liquid into the membrane distillation module and the temperature of the air out of the cooler. Our study shows that the device has relatively high energy saving ratio. Under basic working conditions, its energy consumption can be about 1/5 of single-effect evaporator.

Key words: heat sensitive liquid; low temperature concentration; sweeping gas membrane distillation; heat pump; energy saving

在食品、生物、制药等领域有多种热敏料液需要进行低温浓缩, 如菠萝汁、黄秋葵汁、乳清蛋白溶液、丹酚酸 B 溶液等, 其浓缩温度通常在 30~45 °C^[1-5]. 常用的料液低温浓缩方法有真空沸腾蒸发浓缩、冷冻浓缩、膜蒸馏浓缩等^[6]. 真空沸腾蒸发浓缩的特点是料液蒸发强度高, 但需要真空设备, 对装置的耐压要求高^[7]. 冷冻浓缩的特点是料液处理温度低于冰点, 挥发性成分保存率较高, 但料液浓度较高时冰晶中溶质夹带较多^[8-9]. 膜蒸馏可在常压下对料液实现低温

浓缩, 易于处理中、高浓度料液, 用于热敏料液浓缩有较好的优势^[10].

膜蒸馏可分为直接接触式、真空式、气隙式和气扫式等类型^[11]. 气扫式膜蒸馏具有较高的热效率和膜通量, 且吹扫气对膜的干燥作用可使膜有较长的使用寿命, 便于产业化应用^[12-13].

气扫式膜蒸馏的性能指标主要有膜通量、能耗等. 膜通量可通过改变吹扫气流速进行调节^[14], 而能耗的影响因素比较复杂. Tan 等^[15]将电热热泵与气扫

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576004)

作者简介: 张芃悦(1996—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生; 通信作者: 陈 东, 教授, chendong@tust.edu.cn

式膜蒸馏耦合,利用电热泵回收吹扫气余热,但电热泵的制热系数较低,料液浓缩能耗仍较高.杨丹等^[16]采用多效膜蒸馏方法,用出膜蒸馏组件的吹扫气余热对进膜蒸馏组件料液进行预热,该方法在处理耐高温料液时具有较好的效果,处理热敏料液时受到一定限制.

本文设计了一种可对热敏料液在常压下进行低温浓缩且能耗较低的气扫式预热型热泵膜蒸馏装置,并对其原理、特性方程及性能进行比较系统的研究.

1 装置原理与特点

气扫式预热型热泵膜蒸馏装置的流程如图 1 所示.由图 1 可见,该装置包括料液循环单元、吹扫气循环单元以及热泵单元 3 部分.料液循环单元由料液泵、膜蒸馏组件、加热器组成,其循环介质为热敏料液;吹扫气循环单元由风机、热管式预热器(也可选用板式换热器等,但热管式预热器安装布置较方便)、冷却器、膜蒸馏组件组成,其循环介质为吹扫气(通常为空气,当热敏料液中含有对氧气敏感的成分时,也可采用氮气等);热泵单元由压缩机、加热器、膨胀阀和冷却器组成,其循环介质是热泵工质.

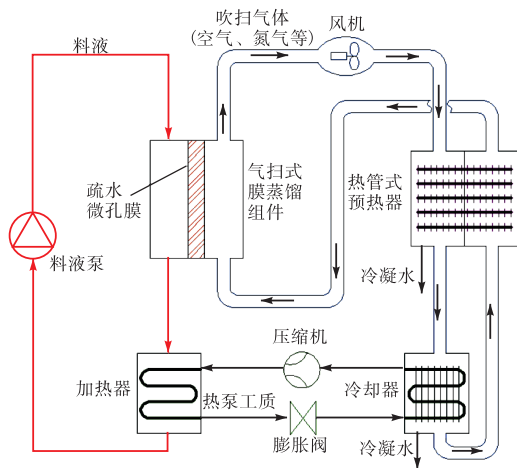


图 1 装置流程图
Fig. 1 Flow chart of the device

气扫式预热型热泵膜蒸馏装置的工作过程为(热敏料液以果汁为例):热泵单元中,压缩机排出的高温高压热泵工质在加热器中放热给料液,出加热器的高压液态热泵工质经膨胀阀,产生低温低压热泵工质液体,该液体进入冷却器吸收吹扫气热能,出冷却器的低温低压热泵工质气体,再回到压缩机,开始下一个循环.

料液循环单元中,在加热器中被加热到设定温度的料液,在料液泵的驱动下,进入膜蒸馏组件;料液在膜表面流动过程中,料液中的水分在膜表面汽化为水蒸气,水蒸气穿过膜孔到达吹扫气侧;料液中水分在膜表面汽化时需要消耗热能,因此随着料液在膜蒸馏组件内流动,料液的温度降低、水分含量逐渐减少,出膜蒸馏组件时变为温度降低、浓度升高的状态,再进入加热器,开始下一个循环.

吹扫气循环单元中,出膜蒸馏组件的温度较高、水蒸气含量较高的热湿吹扫气携带跨膜过来的水蒸气,在风机的驱动下,进入热管式预热器的放热侧(左侧),加热进膜蒸馏组件前的低温吹扫气;出热管式预热器的吹扫气再进入冷却器,被冷却器内的低温热泵工质冷却至设定温度,并使其中的水蒸气凝结为冷凝水;出冷却器的冷干吹扫气,再进入热管式预热器吸热侧(右侧),被升温至设定温度后,返回膜蒸馏组件,进入下一个循环.

装置运行时,料液中水分能够穿膜是由于膜表面水蒸气压力高于吹扫气中水蒸气压力,因此,料液膜蒸馏浓缩可在常压低温下实现.膜蒸馏过程中消耗的热能主要用于料液中水分在膜表面汽化和吹扫气吸热升温,前者为有效热负荷,后者为无效热负荷.由于进膜组件的吹扫气已被热管预热器加热至较高温度,吹扫气在膜组件中升温耗热很少,因此膜蒸馏过程可具有很高的热效率.料液在膜蒸馏过程中消耗的热能主要来自热泵工质回收吹扫气中所含的余热,压缩机仅消耗少量能量驱动热泵工质在热泵单元中循环.通过料液单元、吹扫气单元和热泵单元的协调运行,装置可实现热敏料液的常压、低温、低能耗浓缩.

2 装置特性方程

装置浓缩速率(即膜蒸馏组件中水蒸气穿膜速率)方程为

$$M_w = \frac{A_M (p_{FW} - p_{AW})}{(R_{MK} + R_{SG})} \quad (1)$$

式中: M_w 为装置浓缩速率, kg/s; A_M 为膜蒸馏组件中膜面积, m^2 ; p_{FW} 为料液侧膜表面水蒸气压力, Pa; p_{AW} 为吹扫气内水蒸气压力, Pa; R_{MK} 为水蒸气穿膜阻力系数, $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/kg$; R_{SG} 为水蒸气向吹扫气中传质阻力系数, $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/kg$.

膜蒸馏组件有效热负荷(料液中水分汽化耗热量)方程为

$$Q_{M1} = M_w r_w \quad (2)$$

式中: Q_{M1} 为膜蒸馏组件的有效热负荷, W; r_w 为料液中水分汽化潜热, J/kg.

膜蒸馏组件无效热负荷(吹扫气在膜蒸馏组件中的升温吸热量)为

$$Q_{M2} = \frac{T_{FW} - T_{AM}}{\frac{1}{\alpha_F A_M} + \frac{\delta_M}{\lambda_M A_M} + \frac{1}{\alpha_A A_M}} \quad (3)$$

式中: Q_{M2} 为膜蒸馏组件的无效热负荷, W; T_{FW} 为料液在膜蒸馏组件中的平均温度, °C; T_{AM} 为吹扫气在膜蒸馏组件中的平均温度, °C; α_F 为料液侧膜表面对流换热系数, W/(m²·°C); δ_M 为膜壁厚, m; λ_M 为膜壁热导率, W/(m·°C); α_A 为吹扫气侧膜表面对流换热系数, W/(m²·°C).

膜蒸馏组件热效率方程为

$$\eta_M = \frac{Q_{M1}}{Q_{M1} + Q_{M2}} \quad (4)$$

式中: η_M 为膜蒸馏组件热效率, 无因次.

预热器热回收率方程为

$$\eta_E = \frac{H_{AMI} - H_{ACO}}{H_{AMO} - H_{ACI}} \quad (5)$$

式中: η_E 为预热器热回收率, 无因次; H_{AMI} 为进膜组件吹扫气的焓, J/kg; H_{ACO} 为出冷却器吹扫气的焓, J/kg; H_{AMO} 为出膜组件吹扫气的焓, J/kg; H_{ACI} 为进冷却器吹扫气的焓, J/kg.

热泵制热系数(加热器对料液提供的热量与压缩机能耗之比)和压缩机功率方程为

$$COP_{HP} = \frac{C_{HP} T_{RH}}{T_{RH} - T_{RC}} \quad (6)$$

$$P_{COM} = \frac{Q_{M1} + Q_{M2}}{COP_{HP}} \quad (7)$$

式中: COP_{HP} 为热泵制热系数, 无因次; C_{HP} 为热泵热力学完善度系数, 无因次; T_{RH} 为热泵工质冷凝温度, $T_{RH} = T_{FM} + \Delta T_H$, T_{FM} 和 ΔT_H 分别为加热器中料液平均温度以及加热器传热温差, °C; T_{RC} 为热泵工质蒸发温度, $T_{RC} = T_{AC} - \Delta T_C$, T_{AC} 和 ΔT_C 分别为冷却器中吹扫气平均温度以及冷却器传热温差, °C; P_{COM} 为热泵压缩机功率, W.

装置节能倍率(相对于单效蒸发的节能倍数, 约等于多效蒸发的效数; 装置中料液泵与风机的能耗通常不超过压缩机能耗的 5%, 因此计算节能倍率时主要考虑压缩机能耗)方程为

$$ESR = \frac{Q_{M1}}{P_{COM}} \quad (8)$$

式中: ESR 为装置节能倍率, 无因次.

装置吨水能耗(该指标与装置节能倍率可一一对应, 但装置节能倍率通用性更好)方程为

$$E_{CPT} = \frac{P_{COM}}{3600 M_w} \quad (9)$$

式中: E_{CPT} 是装置吨水能耗, kW·h/t.

3 装置性能分析

热泵膜蒸馏装置的主要性能指标为膜蒸馏组件热效率、热泵制热系数、装置节能倍率、装置浓缩速率(即膜蒸馏组件中水蒸气穿膜速率), 影响上述性能指标的主要因素为料液进膜蒸馏组件温度和吹扫气出冷却器温度.

应用式(1)~式(8), 可计算分析料液进膜蒸馏组件温度和吹扫气出冷却器温度对膜蒸馏组件热效率、热泵制热系数、装置节能倍率、装置浓缩速率的影响规律. 基准计算参数: 料液在膜蒸馏组件中温度降幅为 5 °C, 空气进膜蒸馏组件质量流量为 0.05 kg/s, 空气进膜蒸馏组件温度等于料液出膜蒸馏组件温度, 空气出膜蒸馏组件温度比料液进膜蒸馏组件温度低 2 °C, 空气出膜蒸馏组件相对湿度 85%, 料液进膜蒸馏组件温度为 46 °C, 吹扫气出冷却器温度为 15 °C, 出冷却器相对湿度为 100%.

其他参数取基准参数时, 4 个性能指标随料液进膜蒸馏组件温度的变化规律如图 2、图 3 所示.

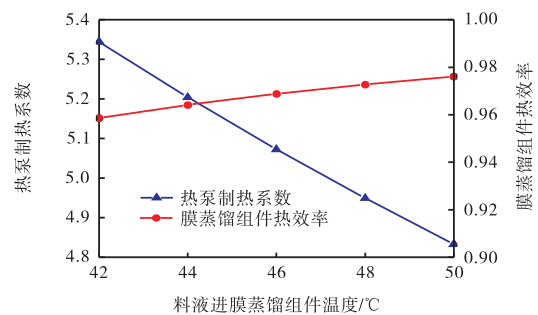


图 2 热泵制热系数和膜蒸馏组件热效率随料液进膜蒸馏组件温度的变化规律

Fig. 2 Variations of coefficient of performance and thermal efficiency of the membrane distillation with temperature of feed liquid into the membrane distillation

由图 2 和图 3 可知, 随着料液进膜蒸馏组件温度的升高, 膜蒸馏组件热效率和装置浓缩速率增加, 而热泵制热系数和装置节能倍率减小. 这是由于: 料液进膜蒸馏组件温度升高时, 料液侧膜表面水蒸气压力

显著增加,水蒸气穿膜速率增加,因而装置浓缩速率增加;水蒸气穿膜速率增加会使膜蒸馏组件的有效热负荷增加,从而使膜蒸馏组件热效率增加,热效率最高可达 0.976;但料液进膜蒸馏组件温度升高时,会使热泵工质的冷凝温度上升,导致热泵工质冷凝压力与蒸发压力之差增大,使热泵制热系数下降、热泵压缩机功率增加,从而使装置节能倍率下降。

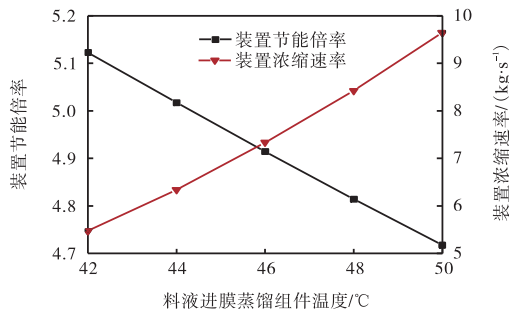


图3 装置节能倍率和装置浓缩速率随料液进膜蒸馏组件温度的变化规律

Fig. 3 Variations of energy saving ratio and concentration rate of the device with temperature of feed liquid into the membrane distillation

其他参数取基准参数时,4个性能指标随空气出冷却器温度的变化规律如图4、图5所示。

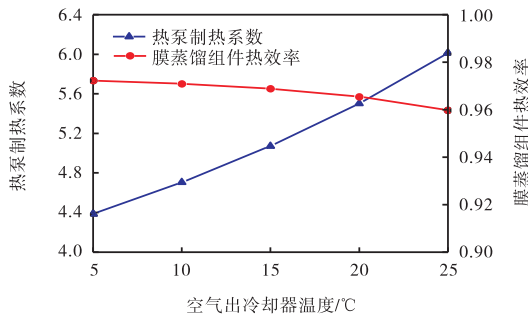


图4 热泵制热系数和膜蒸馏组件热效率随空气出冷却器温度的变化规律

Fig. 4 Variations of coefficient of performance and thermal efficiency of the membrane distillation with temperature of air out of the cooler

由图4和图5可知,随着吹扫气出冷却器温度的升高,膜蒸馏组件热效率和装置浓缩速率降低,热泵制热系数和装置节能倍率增加。这是由于:当吹扫气出冷却器温度上升时(相对湿度 100%),进入膜蒸馏组件的吹扫气中水蒸气含量增加,使吹扫气在膜蒸馏组件中吸收水蒸气的能力下降,导致料液中水蒸气穿膜速率下降,从而使装置浓缩速率降低;料液中水蒸气穿膜速率下降使膜蒸馏组件的有效热负荷降低,从而使膜蒸馏组件的热效率降低,但热效率最低值高于

0.95;出冷却器的吹扫气温度升高时,热泵工质的蒸发温度升高,热泵工质的冷凝压力与蒸发压力之差减小,热泵制热系数上升,进而导致热泵压缩机功率降低,使装置节能倍率增加。

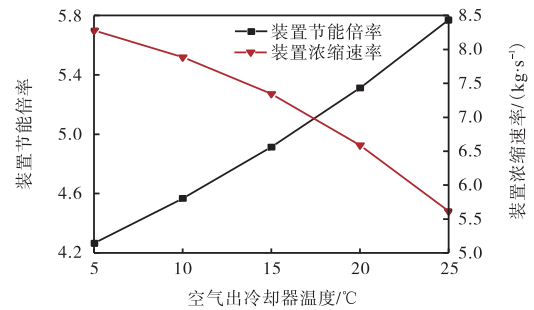


图5 装置节能倍率和装置浓缩速率随空气出冷却器温度的变化规律

Fig. 5 Variations of energy saving ratio and concentration rate of the device with temperature of air out of the cooler

由上述计算分析可知,气扫式预热型热泵膜蒸馏装置具有较高的节能倍率;以基准参数工况为例,装置的节能倍率可达 4.9,装置能耗约为真空单效蒸发浓缩的 1/5。

4 结 语

本文设计的气扫式预热型热泵膜蒸馏装置可在常压下实现热敏料液的低温、低能耗浓缩,通过预热器对进入膜蒸馏组件的吹扫气进行预热,可使膜蒸馏组件的热效率达 0.95 以上。对装置性能指标的分析计算表明,热泵制热系数和装置节能倍率随料液进膜蒸馏组件温度的升高而减小,随着吹扫气出冷却器温度的升高而增大。膜蒸馏组件热效率和装置浓缩速率随料液进膜组件温度的升高而增加,随吹扫气出冷却器温度的升高而降低。在基准参数工况下,装置节能倍率可达 4.9,约为真空单效蒸发浓缩的 1/5。

参考文献:

[1] 池璐. 菠萝汁在热力浓缩过程中芳香成分的变化[J]. 广东化工, 2018, 45(15): 124-126.
 [2] 李佳美,刘昱迪,王坤华,等. 黄秋葵浓缩汁加工过程中的品质变化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 246-257.
 [3] 房天琪. 液态浓缩乳清蛋白的制备与功能特性修饰及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
 [4] QUEVEDO M, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Influence of thermomechanical treatment and pH on the dena-

- turation kinetics of highly concentrated whey protein isolate[J]. *Journal of food engineering*, 2021, 292: 110294.
- [5] 晋迎申. 丹酚酸 B 热稳定性研究[J]. *上海医药*, 2014, 35(21): 78-80.
- [6] 雷文芳, 谢继红, 陈东, 等. 基于膜蒸馏的热敏料液常压低温浓缩装置性能模拟[J]. *天津科技大学学报*, 2020, 35(6): 25-28.
- [7] SERDAL S, MUTLU C, OMER C, et al. Quality characteristics of pomegranate juice concentrates produced by ohmic heating assisted vacuum evaporation[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2019, 99(5): 2589-2595.
- [8] 王文成, 陈梅英, 陈锦权. 金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺优化[J]. *食品与机械*, 2016, 32(5): 168-172.
- [9] 秦贯丰, 丁中祥, 原姣姣, 等. 苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 102-109.
- [10] BAGCI P O. Potential of membrane distillation for production of high quality fruit juice concentrate[J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2015, 55(8): 1098-1113.
- [11] 金程, 陈东, 彭跃莲, 等. 套管型气隙式膜蒸馏组件性能模拟及优化[J]. *天津科技大学学报*, 2019, 34(5): 51-56.
- [12] ALKHUHDHIRI A, DARWISH N, HILAL N. Membrane distillation: a comprehensive review[J]. *Desalination*, 2012, 287: 2-18.
- [13] LOUSSIF N, ORFI J. Comparative study of air gap, direct contact and sweeping gas membrane distillation configurations[J]. *Membrane water treatment*, 2016, 7(1): 71-86.
- [14] 陈华艳, 李欢, 吕晓龙. 气扫式膜蒸馏传质传热过程[J]. *化工学报*, 2009, 60(2): 304-309.
- [15] TAN Y Z, HAN L, CHEW N G P, et al. Membrane distillation hybridized with a thermoelectric heat pump for energy-efficient water treatment and space cooling[J]. *Applied energy*, 2018, 231: 1079-1088.
- [16] 杨丹, 高启君, 吕晓龙, 等. 气扫式多效膜蒸馏过程数学模型研究[J]. *膜科学与技术*, 2014, 34(5): 58-64.

责任编辑: 周建军

(上接第 17 页)

- 2020, 39(9): 2015-2025.
- [33] 刘洪艳, 王珊. 异化铁还原细菌 *Klebsiella* sp. KB52 还原重金属 Cr(VI) [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(5): 1113-1118.
- [34] DEREVEN'KOV I A, HANNIBAL L, MAKAROV S V, et al. Catalytic effect of riboflavin on electron transfer from NADH to aquacobalamin[J]. *JBIC Journal of biological inorganic chemistry*, 2020, 25(97): 125-133.
- [35] ZHOU C, WANG H, SI Y, et al. Electron shuttles enhance the degradation of sulfamethoxazole coupled with Fe(III) reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1[J]. *Environmental toxicology and pharmacology*, 2018, 62: 156-163.
- [36] YARLAGADDA V N, GUPTA A, DODGE C J, et al. Effect of exogenous electron shuttles on growth and fermentative metabolism in *Clostridium* sp. BC1[J]. *Bioresource technology*, 2012, 108: 295-299.
- [37] LIST C, HOSSEINI Z, MEIBOM K L, et al. Impact of iron reduction on the metabolism of *Clostridium acetobutylicum* [J]. *Environmental microbiology*, 2019, 21(10): 3548-3563.

责任编辑: 郎婧

(上接第 22 页)

- [17] MOHAMMED J K, MAHDI A A, AHMED M I, et al. Preparation, deproteinization, characterization, and antioxidant activity of polysaccharide from *Medemia argun* fruit[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2020, 155: 919-926.
- [18] 秦卫东, 马利华, 陈学红, 等. 生姜多糖的提取及脱蛋白研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(4): 218-220.
- [19] 赵师师, 高旭红, 常君, 等. 石榴皮多糖的三氯乙酸法脱蛋白工艺研究[J]. *广州化工*, 2015, 43(17): 64-66.
- [20] 董英, 张艳芳, 孙艳辉. 水飞蓟粗多糖脱蛋白方法的比较[J]. *食品科学*, 2007, 28(12): 82-84.
- [21] YANG H H, WU Y J, GAN C J, et al. Characterization and antioxidant activity of a novel polysaccharide from *Pholidota chinensis* Lindl. [J]. *Carbohydrate polymers*, 2016, 138: 327-334.
- [22] 李月, 何杰, 王昀, 等. 云南野生玛卡多糖脱蛋白工艺研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018(9): 149-157.
- [23] 曹红阳, 徐海洋, 陈云美. 多糖去蛋白技术概况[J]. *生物技术世界*, 2013(5): 8.
- [24] 张发宇, 余金卫, 张浏, 等. 巢湖蓝藻藻蓝蛋白纯化过程中紫外-可见吸收光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 806-810.

责任编辑: 周建军