

# 碟式陶瓷膜浓缩大豆蛋白及膜污染清洗研究

陈柏义\*, 李贵祥, 曾冬清, 姚 萌, 洪昱斌

(三达膜科技(厦门)有限公司, 厦门 361022)

**摘要:** 针对现有膜技术浓缩大豆蛋白的浓缩倍数低, 无法满足后续干燥进料要求, 造成后续干燥能耗高的问题, 本研究采用碟式陶瓷膜和管式陶瓷膜进行大豆蛋白浓缩, 进一步探讨了碟式陶瓷膜孔径、跨膜压差和转速对浓缩大豆蛋白的影响, 并研究了不同清洗方法对膜通量恢复的影响。结果表明: 管式陶瓷膜可以浓缩2倍左右, 碟式陶瓷膜可以浓缩4倍左右, 管式陶瓷膜浓缩液固形物含量最高达到9.4%, 碟式陶瓷膜浓缩液固形物含量最高可达19.2%, 碟式陶瓷膜浓缩液可达到后续干燥进料要求。当采用100 nm孔径、0.2 MPa跨膜压差和300 r/min以上转速的操作条件时, 碟式陶瓷膜运行通量大, 效率高。且在糖类和蛋白质共同污染情况下, 采用物理和化学方法去除底物, 降低碱洗温度和缩短碱洗时间可抑制美拉德反应晚期时类黑素的生成, 实现了碟式陶瓷膜的清洗恢复。该研究可为食品、饮料、医药、酶制剂、发酵和植物提取等领域的非牛顿流体类型物料提供一种绿色高效的高倍数浓缩路径, 同时可为蛋白质和糖类共同污染的情况提供清洗方法指导。

**关键词:** 碟式陶瓷膜; 大豆蛋白; 非牛顿流体; 膜污染; 美拉德反应

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)06-0148-07

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.06.016

目前国内外已有将膜技术应用于大豆蛋白的分离和浓缩过程中的研究报道, 通常为采用微滤或超滤技术(有机膜和陶瓷膜)浓缩大豆蛋白到一定浓度后再进入喷雾干燥器中<sup>[1-3]</sup>。喷雾干燥对大豆蛋白的最佳进料浓度要求在13%~15%(质量分数)之间, 低浓度的大豆蛋白喷雾干燥热能损失大、热效率低、能耗高<sup>[4-5]</sup>。与其他浓缩技术(如冷冻干燥或蒸发)相比, 膜分离过程消耗的能量更少, 因此需要尽可能用膜技术将大豆蛋白液浓度提高, 使之满足干燥器的最佳进料浓度要求。但现有膜技术受料液固形物含量的制约, 大豆蛋白浓缩液固形物含量通常只能达到6%~9%<sup>[3]</sup>, 无法满足后续干燥进料的

固形物含量要求。现有膜技术基本采用传统的过滤方式, 其限制因素不是来自被截留的大分子物质的渗透压, 而是由于高浓度大分子导致的低传质速率, 以及溶液的高黏度使得浓缩液的泵输送困难造成膜浓缩困难<sup>[6]</sup>。

传统的过滤方式是死端过滤和错流过滤, 不可避免地产生浓差极化现象和膜表面上滤饼层的形成, 于是改进传统的错流过滤技术, 发展形成了动态过滤技术, 有效削减浓差极化和滤饼层的形成, 有效提高抗污染能力和延缓膜通量衰减, 适用于高固形物含量和高污染的物料领域中<sup>[7-8]</sup>。目前已有报道将动态过滤技术应用在环境保护<sup>[9-10]</sup>、生物发酵<sup>[11]</sup>、

收稿日期: 2025-05-07; 修改稿收到日期: 2025-06-23

基金项目: 2024年厦门市重大科技计划项目(3502Z2024QY014)

第一作者简介: 陈柏义(1992-), 男, 福建漳平人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为膜组件与应用开发。\* 通讯作者, E-mail: chenby@suntar.com

引用本文: 陈柏义, 李贵祥, 曾冬清, 等. 碟式陶瓷膜浓缩大豆蛋白及膜污染清洗研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(6): 148-154.

Citation: Chen B Y, Li G X, Zeng D Q, et al. Study on soybean protein concentration using disk ceramic membrane and membrane cleaning[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(6): 148-154.

食品饮料加工<sup>[12-13]</sup>、植物提取<sup>[14-15]</sup>等各个领域。动态过滤技术主要有振动圆盘膜、旋转圆盘膜和固定圆盘膜旋转转子三种产品类型<sup>[16]</sup>,碟式陶瓷膜是旋转圆盘膜产品类型的一种。

本研究采用管式陶瓷膜和碟式陶瓷膜进行对比,探索碟式陶瓷膜应用在浓缩大豆蛋白上的可行性,确定碟式陶瓷膜的浓缩效果,优化碟式陶瓷膜的运行参数和清洗方法,为其工业化应用提供技术基础。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与试剂

管式陶瓷膜(型号 CM19/35/250,100 nm)由三达膜科技(厦门)有限公司自制。

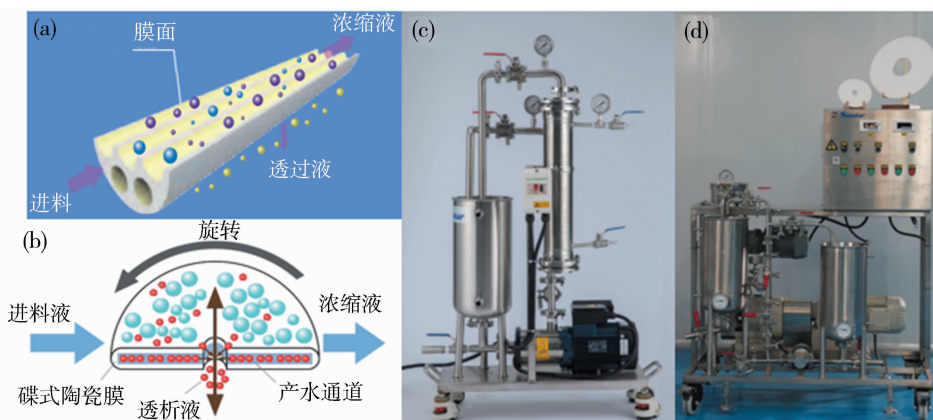
碟式陶瓷膜(型号  $\varphi 152 \times 4.5, 100 \text{ nm}/50 \text{ nm}$ )

由三达膜科技(厦门)有限公司自制。

5%(质量分数)大豆蛋白实验料液:取 0.6 kg 经过烘干的大豆分离蛋白(安阳倍佳食品有限公司),用剪切机将其溶解于 12 L 的纯水中,剪切 30 min 以上,充分分散。大豆分离蛋白是低温豆粕经过提取、浓缩、分离、精制等工艺制得,符合 GB/T 20371—2016《食品加工用植物蛋白》标准。

### 1.2 试验设备与仪器

管式陶瓷膜实验设备(型号 SPPM-C-10,膜面积  $0.104 \text{ m}^2$ )和碟式陶瓷膜实验设备(型号 MFM-C-10,膜面积  $0.108 \text{ m}^2$ )均由三达膜科技(厦门)有限公司自制。数显黏度计(型号 NDJ-9S),邦西仪器科技(上海)有限公司。干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司。陶瓷膜过滤原理及装置如图 1 所示。



(a) 管式陶瓷膜过滤原理; (b) 碟式陶瓷膜过滤原理; (c) 管式陶瓷膜实验装置; (d) 碟式陶瓷膜实验装置

图 1 陶瓷膜过滤原理及装置

Fig. 1 Ceramic membrane systems and filtration process

### 1.3 测试与表征

#### 1.3.1 料液测试

测试过程中采用批次性实验,每批次采用 12 L 5%(质量分数)的大豆蛋白料液,实验设备夹套料罐与恒温槽连接控制料液始终恒温,在实验过程中(除特殊说明外)采用 100 nm 孔径陶瓷膜,温度始终控制  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,跨膜压差  $0.2 \text{ MPa}$ ,转速  $450 \text{ r/min}$ 。碟式陶瓷膜在料液浓缩过程不反洗,在清洗时有纯水反洗步骤,化学清洗同样间隔 10 min 启动反洗操作,反洗压力不超过  $0.2 \text{ MPa}$ 。

碟式陶瓷膜通量根据式(1)计算:

$$J = Q / (St) \quad (1)$$

式中: $J$  为渗透通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $Q$  为透析液渗透体积,  $\text{L}$ ;  $S$  为膜面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为渗透时间,  $\text{h}$ 。

#### 1.3.2 料液表征

采用干燥称重法测试大豆蛋白料液固形物含量,采用 NDJ-9S 数显黏度计测试大豆蛋白料液的黏度。

#### 1.3.3 膜清洗效果表征

膜清洗后通量的恢复程度采用膜通量恢复率(water flux recovery, WFR)来表征,其定义为:

$$\text{WFR} = \frac{J_w - J_{fw}}{J_0 - J_{fw}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $J_0$  为污染前膜的纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $J_{fw}$  为污染后膜的纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $J_w$  为清洗后膜的纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

纯水通量采用反渗透膜纯化水测试,温度  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、跨膜压差  $0.1 \text{ MPa}$ 、转速  $450 \text{ r/min}$  条件下

测得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同陶瓷膜类型对通量及浓缩效果的影响

由图 2(a)可以看出,随着过滤的进行,浓差极化和膜污染加重,通量衰减是必然的。管式陶瓷膜整体通量下降显著,碟式陶瓷膜通量下降平缓,在过滤时间前 5 min,管式陶瓷膜运行通量高于碟式陶瓷膜,5 min 后管式陶瓷膜通量急剧下降,碟式陶瓷膜通量高于管式陶瓷膜。这是因为初始料液的浓度和黏度比较低,管式陶瓷膜的错流过滤抗污染效果和渗透路径会优于碟式陶瓷膜,碟式陶瓷膜会因渗透路径限制导致通量较低。在过滤时间 5 min 后,管式陶瓷膜通量急剧下降,出现堵流道现象,原因在于大豆蛋白料液在低浓度情况下表现为牛顿流体,在高浓度情况下表现为非牛顿流体<sup>[17]</sup>。在浓缩过程中,料液浓度增大会使其黏度快速增大。对于泵送流量,黏度的增大会使离心泵的性能急剧下降,造成实际输送流量远低于设计流量。对于管路输送过程,非牛顿流体压降会受料液黏度和管径影响,管式陶瓷膜通道直径小和料液黏度的明显增大会造成

物料在管式陶瓷膜通道流动过程中压降变大,在输送的过程中,无法克服通道压降,在黏度不超过 400 mPa·s 时流道便会被料液堵塞。碟式陶瓷膜膜层在外表面,纳污空间大,料液输送过程中黏度增大不会出现明显的压降,有效保证错流流量。转速 450 r/min 可以提供剪切力,延缓膜污染,且非牛顿流体在剪切作用下会出现黏度降低的剪切变稀现象。因此碟式陶瓷膜料液输送和旋转剪切方式有助于高黏度物料过滤。

由图 2(b)可以看出,管式陶瓷膜与碟式陶瓷膜相比浓缩液黏度增长较小,碟式陶瓷膜在浓缩过程中,随着物料浓度的增大,大豆蛋白黏度出现指数型增大。这一结果表明碟式陶瓷膜更适用于浓缩过程中黏度变化大的非牛顿流体物料,管式陶瓷膜不适用该种类物料,会出现堵流道现象。

由表 1 可知,管式陶瓷膜可以浓缩 2 倍左右,碟式陶瓷膜可以浓缩 4 倍左右,碟式陶瓷膜浓缩液黏度远高于管式陶瓷膜浓缩液,固形物含量最高可达到 19.2%,可以达到甚至超过喷雾干燥的进料固形物含量要求,通过碟式陶瓷膜浓缩后可以节约后续干燥成本。

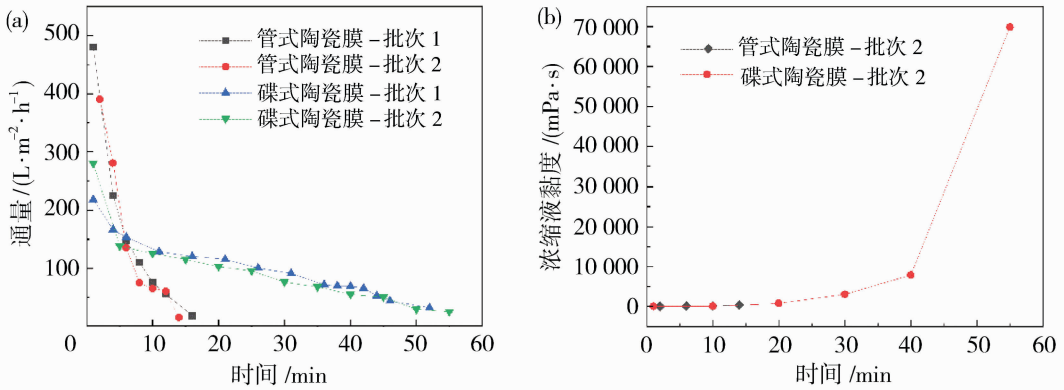


图 2 不同陶瓷膜类型下的运行通量(a)及黏度(b)

Fig. 2 Flux (a) and viscosity (b) of different ceramic membranes

表 1 不同陶瓷膜类型浓缩效果

Table 1 Concentration performance of different ceramic membranes

| 批次         | 进料量/L | 透出货量/L | 浓缩倍数 | 进料黏度/mPa·s | 浓缩液黏度/mPa·s | 浓缩液固形物含量/% |
|------------|-------|--------|------|------------|-------------|------------|
| 管式陶瓷膜-批次 1 | 12    | 5.8    | 1.9  | 35.6       | 286.7       | 9.40       |
| 管式陶瓷膜-批次 2 | 12    | 5.6    | 1.9  | 37.2       | 361.3       | 9.10       |
| 碟式陶瓷膜-批次 1 | 12    | 9.0    | 4.0  | 34.3       | 72 300      | 18.90      |
| 碟式陶瓷膜-批次 2 | 12    | 9.1    | 4.1  | 35.7       | 69 900      | 19.20      |

注:采用 100 nm 孔径。

### 2.2 操作参数优化

与管式陶瓷膜相比,碟式陶瓷膜更适用于高浓

度和高黏度的大豆蛋白料液,因此考察碟式陶瓷膜的孔径、操作压力和转速对大豆蛋白浓缩的影响,优

化设备操作参数。

### 2.2.1 不同孔径的影响

已有文献表明微滤和超滤对大豆蛋白有较高的截留率<sup>[3,18]</sup>,本研究采用 100 nm 和 50 nm 的碟式陶瓷膜进行测试。由图 3 可知,100 nm 膜通量在前期高于 50 nm,主要是因为孔径大,渗透阻力更小,通量更大。但在后期 100 nm 膜会比 50 nm 通量小,原因在于后期相同时间下,100 nm 膜累积产生了更多的透析液,此时 100 nm 膜的浓缩倍数更高,膜污染更重,造成通量的急剧下降;50 nm 膜累积产生的透析液总量更少,相同时间下浓缩倍数更低,污染较轻,通量会更高。由表 2 可知,100 nm 膜和 50 nm 膜均可浓缩 4 倍左右,可以达到同等浓缩效果,且由图 3 可知,100 nm 膜的浓缩时间更短,平均通量更大,效率更高。100 nm 膜和 50 nm 膜的浓缩液实际固形物含量基本在 19% 左右,与理论固形物含量

20% 差距不大,表明 100 nm 和 50 nm 膜均能截留大部分大豆蛋白,可能是大豆蛋白存在聚集行为形成稳定聚集物大颗粒,粒径可达 1 μm 以上<sup>[19]</sup>。

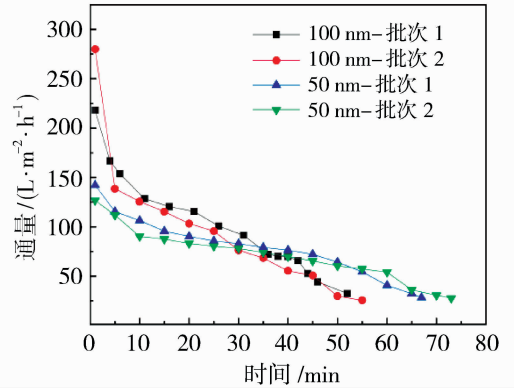


图 3 不同孔径下碟式陶瓷膜的通量  
Fig. 3 Flux of disk ceramic membrane under different pore sizes

表 2 不同孔径下浓缩效果

Table 2 Concentration performance under different pore sizes

| 批次          | 进料量/L | 透出货量/L | 浓缩倍数 | 进料黏度/mPa·s | 浓缩液黏度/mPa·s | 浓缩液固形物含量/% |
|-------------|-------|--------|------|------------|-------------|------------|
| 100 nm-批次 1 | 12.0  | 9.0    | 4.0  | 34.3       | 72 300      | 18.90      |
| 100 nm-批次 2 | 12.0  | 9.1    | 4.1  | 35.7       | 69 900      | 19.20      |
| 50 nm-批次 1  | 12.0  | 9.0    | 4.0  | 35.9       | 68 035      | 19.28      |
| 50 nm-批次 2  | 12.0  | 9.0    | 4.0  | 33.9       | 71 210      | 19.10      |

注:采用碟式陶瓷膜。

### 2.2.2 不同跨膜压差的影响

图 4 显示采用 100 nm 膜浓缩 4 倍时,不同跨膜压差对通量的影响。整体上看,0.2 MPa 运行的通量比 0.3 MPa 和 0.1 MPa 通量高,运行时间短,效率高。0.3 MPa 下初始通量高,后迅速下降,原因在于操作压力大导致错流流量小,无法将碟式陶

瓷膜组件内料液和料罐料液进行及时交换,造成组件内料液局部过浓,且在高压作用下会形成更为致密的滤饼层,造成通量快速下降。

### 2.2.3 不同转速的影响

图 5 显示采用 100 nm 膜浓缩 4 倍时,不同转速对通量的影响。在浓缩过程中通量整体呈现下降

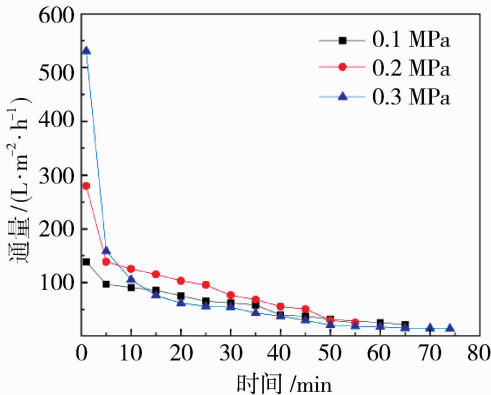


图 4 不同跨膜压差下碟式陶瓷膜的通量

Fig. 4 Flux of disk ceramic membrane under different transmembrane pressures

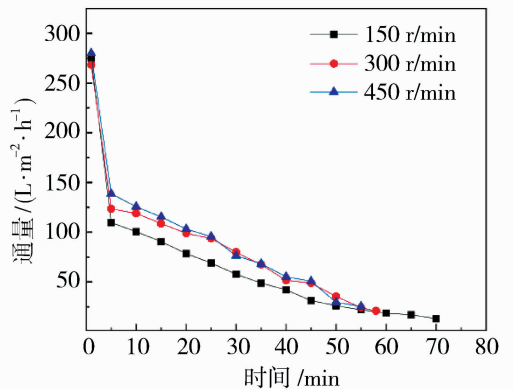


图 5 不同转速下碟式陶瓷膜的通量

Fig. 5 Flux of disk ceramic membrane under different rotation speeds

趋势,450 r/min 和 300 r/min 运行通量比 150 r/min 大,浓缩时间更短,效率更高。一般情况下转速越高,碟式陶瓷膜的剪切力更大,滤饼层更薄,有利于渗透。但 450 r/min 和 300 r/min 运行通量差距不明显,可能是因为料液会跟随碟式陶瓷膜的旋转而发生旋流,料液和碟式陶瓷膜的相对剪切速率没有明显提高,无法有效提高抗污染性能。在浓缩后期,通量趋于一致,原因在于浓缩倍数大,高转速无法延缓膜污染。

### 2.3 膜污染与清洗

大豆蛋白膜分离中膜污染主要是蛋白质、糖类、脂质和无机盐在膜面的吸附和沉淀引起的,可以采用物理和化学方法去除膜污染,恢复膜通量<sup>[2,20]</sup>。采用碟式陶瓷膜对大豆蛋白进行高倍数浓缩,物料黏附在膜片表面,污染重,影响陶瓷膜过滤性能,需进行清洗恢复(如表 3 所示)。首先采用常规管式陶瓷膜清洗方法(方法 1)<sup>[21]</sup>进行清洗,只进行正冲和碱洗无法有效恢复,陶瓷膜表面发黑严重,后采用方法 2 和方法 3 均无法完全恢复,碟式陶瓷膜表面同

样出现发黑现象。实验过程中发现随着碱洗时间增加颜色不断加深,一旦出现发黑现象,后续采用多种药剂进行清洗无法有效恢复,猜测是强碱和高温促进蛋白质和糖类发生了美拉德反应生成了棕色或黑色的 大分子物质类黑精<sup>[22-24]</sup>,形成的类黑精分子量 大,结构复杂,溶解性和疏水性能发生改变导致被膜截留,造成膜表面发黑的现象。抑制美拉德反应可以采用降低温度、降低 pH,减少铁和亚铁离子等方法<sup>[25]</sup>。后续方法 4、5 和 6 采用反洗、酸洗和酶洗减少蛋白质、糖类和铁离子等底物浓度,再降低碱洗温度和缩短碱洗时间,抑制美拉德反应晚期时类黑精的生成。清洗后的膜表面未出现明显的黑色,接近碟式陶瓷膜原色,通量基本恢复。

大豆蛋白膜污染清洗现象和清洗方法揭示了陶瓷膜在蛋白质和糖类同时污染下,采用常规的陶瓷膜清洗方法可能会发生美拉德反应造成陶瓷膜通量恢复困难的问题。在食品、饮料、医药、发酵、酶制剂、植物提取等领域同时存在蛋白质和糖类污染情况下,方法 4、5 和 6 可以提供清洗方法指导。

表 3 清洗后纯水通量及恢复率

Table 3 Pure water flux and recovery after membrane cleaning

| 清洗方法 | 物理和化学清洗 |       |       |       |       | 恢复率/% | 备注   |                             |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----------------------------|
|      | 正冲      | 反洗    | 酸洗    | 酶洗    | 碱洗    |       |      |                             |
| 方法 1 | 45.9    | —     | —     | —     | 209.5 | —     | 42.7 | 碱洗 60℃ 1 h                  |
| 方法 2 | 51.2    | —     | —     | 91.3  | 289.6 | —     | 63.2 | 酶洗 40℃ 1 h,碱洗 60℃ 1 h       |
| 方法 3 | 31.6    | 78.9  | —     | —     | 358.4 | —     | 82.3 | 碱洗 60℃ 1 h                  |
| 方法 4 | 41.3    | 86.7  | —     | —     | 376.6 | 410.8 | 95.4 | 碱洗两次,每次 40℃ 40 min          |
| 方法 5 | 43.6    | 110.3 | 172.3 | —     | 400.9 | —     | 92.8 | 酸洗 40℃ 45 min,碱洗 40℃ 40 min |
| 方法 6 | 36.8    | 90.4  | —     | 272.3 | 421.3 | —     | 98.1 | 酶洗 40℃ 1 h,碱洗 40℃ 40 min    |

注:采用 100 nm 碟式陶瓷膜,新膜纯水通量 428.6 L/(m<sup>2</sup>·h),酸洗代表 1%(质量分数)柠檬酸,酶洗代表 0.5%(质量分数)碱性蛋白酶,碱洗代表 2%(质量分数)氢氧化钠+0.5%(质量分数)次氯酸钠,“—”代表未执行该步骤,清洗步骤由左至右,未注明单位为 L/(m<sup>2</sup>·h)。

### 3 结论

本研究采用碟式陶瓷膜和管式陶瓷膜进行大豆蛋白浓缩,并进一步优化了碟式陶瓷膜操作参数和清洗方法。研究表明,碟式陶瓷膜浓缩液可以达到后续干燥的进料要求。碟式陶瓷膜可以达到更高的浓缩倍数、物料黏度和固形物含量,适用于浓缩过程中黏度变化大的非牛顿流体类型物料,可节约后续的干燥成本。通过对比实验,在 100 nm 孔径、0.2 MPa 跨膜压差和 300 r/min 以上的转速条件下,碟式陶瓷膜运行时间短、效率高,优化后的操作参数能有效提高碟式陶瓷膜运行效率,为工业化应用提供

关键参数依据。碟式陶瓷膜在蛋白质和糖类共同污染下,采用常规的陶瓷膜清洗方法可能会发生美拉德反应生成类黑精,造成陶瓷膜通量恢复困难的问题,采用物理和化学方法去除底物,降低碱洗温度和缩短碱洗时间抑制美拉德反应晚期时类黑精的生成,可以实现碟式陶瓷膜的清洗恢复。这一清洗现象和清洗方法可为同时存在蛋白质和糖类污染的情况提供清洗方法指导。

### 参考文献:

[1] 江连洲, 吴海波, 王秋京. 酶解改性大豆蛋白的膜过滤制备技术研究[J]. 中国油脂, 2010, 35(11): 23-27.

- [2] 戴海平, 孙方, 李泓, 等. 超滤浓缩大豆蛋白工艺中的膜污染清洗方法研究[J]. 天津轻工业学院学报, 2003, 18(4): 8-10.
- [3] Vishwanathan K H, Govindaraju K, Singh V, *et al.* Production of okara and soy protein concentrates using membrane technology[J]. J Food Sci, 2011, 76(1): 158-164.
- [4] 郑志雄. 大豆分离蛋白喷雾干燥过程中的热变性及其抑制机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [5] 郭庆强, 焦锋, 郭天骏, 等. 一种生产大豆分离蛋白的喷雾干燥工艺:201910040940.6[P]. 2019-04-05.
- [6] Shallo H E, Rao A, Ericson A P, *et al.* Preparation of soy protein concentrate by ultrafiltration[J]. J Food Sci, 2001, 66(2): 242-246.
- [7] Jaffrin M Y. Dynamic filtration with rotating disks, and rotating and vibrating membranes: an update [J]. Curr Opin Chem Eng, 2012, 1(2): 171-177.
- [8] Ding L, Jaffrin M Y, Luo J. Chapter two — dynamic filtration with rotating disks, and rotating or vibrating membranes [M]// Progress in Filtration and Separation, Academic Press, 2015: 27-59.
- [9] 白玲, 蓝伟光, 万金保. 双轴旋转膜组件应用于浸没式厌氧膜生物反应器的研究[J]. 南昌大学学报(科版), 2010, 32(3): 218-222.
- [10] 刘光华, 常启兵, 何世斌, 等. 高性能碟式陶瓷膜在油水乳液分离中的研究[J]. 膜科学与技术, 2022, 42(2): 72-77.
- [11] 刘彬彬, 李敬, 苏仪, 等. 旋转超滤膜组件澄清乳酸发酵液膜污染研究[C]//第四届中国膜科学与技术报告会, 2010.
- [12] Schäfer J, Bast R, Atamer Z, *et al.* Concentration of skim milk by means of dynamic filtration using overlapping rotating ceramic membrane disks[J]. Int Dairy J, 2018, 78: 11-19.
- [13] Rayess Y E, Manon Y, Jitariouk N, *et al.* Wine clarification with rotating and vibrating filtration (RVF): Investigation of the impact of membrane material, wine composition and operating conditions [J]. J Membr Sci, 2016, 513: 47-57.
- [14] Zhang W, Ding L, Grimi N, *et al.* Application of UF-RDM (ultrafiltration rotating disk membrane) module for separation and concentration of leaf protein from alfalfa juice: optimization of operation conditions[J]. Sep Purif Technol, 2017, 175: 365-375.
- [15] 裴少芬, 王晓霞, 钟亮, 等. 旋转圆盘型陶瓷膜过滤绿茶浸提液的研究[J]. 中国茶叶加工, 2015(4): 46-49.
- [16] 徐舟. 旋转圆盘动态膜过滤系统的计算流体力学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [17] 田少君, 雷继鹏, 孙阿鑫. 大豆蛋白的流变特性及其黏度的数学模型研究[J]. 中国粮油学报, 2005(2): 53-56.
- [18] 汪勇, 唐书泽, 张志森, 等. 无机陶瓷膜超滤法制备大豆分离蛋白的研究[J]. 中国油脂, 2003, 28(12): 19-22.
- [19] 曲家妮. 大豆蛋白分级分离工艺的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [20] 杨国龙, 赵谋明, 杨晓泉, 等. 大豆蛋白超滤过程中膜清洗方法的研究[J]. 食品工业科技, 2005(6): 92-95.
- [21] 朱传柳, 赵士明, 章小同, 等. 新型孔径陶瓷膜澄清棒酸发酵液的研究[J]. 中国抗生素杂志, 2019, 44(8): 924-929.
- [22] 薛远, 宋春丽, 任健. 美拉德反应调控大豆蛋白功能性质的研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(9): 4-8.
- [23] 丁欣悦, 张国文. 湿法美拉德反应与转谷氨酰胺酶交联对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2017, 41(5): 464-469.
- [24] 王鲁慧, 肖军霞, 徐同成, 等. 湿热条件下大豆分离蛋白与葡萄糖、麦芽糖的美拉德反应[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 19-26.
- [25] 李林, 卢家炯. 美拉德反应的抑制及消除方法[J]. 广西轻工业, 2000(4): 16-18.

## Study on soybean protein concentration using disk ceramic membrane and membrane cleaning

CHEN Boyi, LI Guixiang, ZENG Dongqing, YAO Meng, HONG Yubin  
(Suntar Membrane Technology (Xiamen) Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

**Abstract:** A critical challenge of conventional membrane technologies in concentrating soybean protein

