

鳀鱼蒸煮液陶瓷膜微滤浓缩的研究

张建友, 林龙, 王斌, 丁玉庭

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要: 本文研究了压力、温度、陶瓷膜孔径、蒸煮液浓度和投料方式对微滤浓缩鳀鱼蒸煮液膜通量的影响。微滤浓缩时, 0.45 μm 和 0.14 μm 陶瓷膜对蛋白质的浓缩效率相同, 但选用 0.14 μm 陶瓷膜使整体膜浓缩效率提高; 升高温度、压力等均能提高陶瓷膜通量; 降低蒸煮液的浓度虽能增大陶瓷膜通量, 但降低了蛋白质的浓缩效率。45 $^{\circ}\text{C}$ 浓缩时陶瓷膜通量较高, 并且浓缩液的菌落总数、挥发性盐基氮 (TVB-N) 相对于浓缩因子的增长率最小, 丙二醛 (TBARS) 的增长率与 35 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 相近。因此在温度 45 $^{\circ}\text{C}$ 、压力 0.3 MPa 和选用 0.14 μm 陶瓷膜的条件下, 采用间歇的投料方式作为陶瓷膜浓缩鳀鱼蒸煮液较优的操作条件。陶瓷膜清洗方面, 复合清洗剂 (1% NaOH+0.05% SDS) 在 45 $^{\circ}\text{C}$ 的清洗条件下, 清洗 40 min 可使膜通量回复率达到 98.99%, 比单一清洗剂 (1% NaOH) 提高 22.85%。

关键词: 鳀鱼蒸煮液; 微滤; 浓缩; 陶瓷膜; 品质变化

文章编号: 1673-9078(2013)12-2958-2963

Concentration of *Engraulis japonicus* Soup by Ceramic Membrane

ZHANG Jian-you, LIN Long, WANG Bin, DING Yu-ting

(College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Microfiltration is a promising technology for concentrating *Engraulis japonicus* soup by ceramic membrane. Effects of membrane pore size, pressure, temperature, initial concentration and addition modes on permeate flux were examined during microfiltration. There was no difference of the protein concentration efficiency between 0.14 μm and 0.45 μm ceramic membrane, and the integral concentration efficiency was much higher when using 0.14 μm ceramic membrane; the permeate flux increased with temperature and pressure increased; and decreasing soup concentration could increase the permeate flux but reduced the protein concentration efficiency either. At 45 $^{\circ}\text{C}$, the permeate flux was higher, and the growth rate of total bacterial count and total volatile base nitrogen (TVB-N) value was minimum compared to 25 $^{\circ}\text{C}$ and 35 $^{\circ}\text{C}$, while the growth rate of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value had little effect with temperature. Consequently, the optimal concentrate process was obtained under the conditions of 0.14 μm ceramic membrane, 0.3 MPa, 45 $^{\circ}\text{C}$ and intermittent feeding. The most effective cleaning method was 40 min at 45 $^{\circ}\text{C}$ with solution containing 1% (m/V) NaOH and 0.05% (m/V) SDS. The flux recovery ratio of the most effective method was 98.99%, which was 22.85% higher than that of solution only with 1% NaOH.

Key words: *Engraulis japonicus* soup; microfiltration; concentration; ceramic membrane; quality changes

鳀鱼 (*Engraulis japonicus*) 为集体性小型上层鱼类, 蛋白质、脂肪含量较高, 内源性酶活强, 捕捞后易酶解变质, 离水后须立刻加工处理。为保证原料鲜度, 解决鳀鱼不易保存运输的问题, 浙江华盛公司采用“捕捞加工一体化”的海上移动加工模式, 生产鳀鱼干制品。鳀鱼干制品生产过程中会产生大量富含氨基酸、核苷酸、蛋白质等营养成分和风味物质的蒸煮液, 该蒸煮液是生产调味品、蛋白营养强化剂等食品的优良原料。但是, 由于海上加工技术和空间的限制, 蒸煮液大都未经处理便直接排放, 不仅浪费资源, 而且由于其高 COD 和 BOD 严重污染环境, 造成近海水

收稿日期: 2013-08-09

基金项目: 浙江省科技厅重大科技专项 (2012C03009-5)

作者简介: 张建友 (1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究水产品加工

通讯作者: 丁玉庭 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究水产品加工

域富营养化, 以至引发赤潮。

为实现蒸煮液的综合利用, 解决加工船上冷库储藏空间不足的问题, 首先须对蒸煮液进行浓缩, 浓缩后的蒸煮液再运至岸上进行深加工。传统的浓缩工艺一般以热法浓缩为主, 主要有真空浓缩和蒸发浓缩。蒸发浓缩方法简单, 但由于蒸发温度高, 沸点随浓度的升高而升高, 能耗较大; 而且多种成分容易在高温条件下氧化、焦化、分解, 芳香物质损失严重, 使产品质量下降。真空浓缩是在较低温度下蒸发浓缩, 可以减少营养成分和风味物质的损失, 但设备占用空间大、浓缩时间长、能耗大, 也不利于在加工船上应用。

相对传统的热浓缩, 膜浓缩分离由于其操作简单、能耗低、无二次污染、热敏性成分得以保护等优点, 已广泛应用于食品、制药等领域^[1-4]。在已探索的浓缩工艺中, 主要采用微滤和纳滤两种浓缩技术, 首先将

鳀鱼蒸煮液进行微滤浓缩，微滤产生的透过液再进行纳滤浓缩，最后得到两种不同的微滤浓缩液和纳滤浓缩液。其中，本试验以陶瓷膜微滤浓缩鳀鱼蒸煮液为主，研究压力、温度、膜孔径、蒸煮液浓度和投料方式对陶瓷膜通量的影响，以及在不同浓缩温度条件下浓缩液品质的变化，确定较优的陶瓷膜浓缩条件和膜清洗方式。

1 材料与方法

1.1 原料

鳀鱼蒸煮液：浙江瑞安市华盛水产有限公司提供，-18℃冷冻保藏，试验前流水解冻。

1.2 试验设备

752N 紫外可见分光光度计，PHS-3C 型数显酸度计（上海精科）；CR21G II 高速冷冻离心机（日本日立）；LNG-CM-101 实验室小型陶瓷膜设备，LNG-NF-101 实验室小型纳滤膜设备（上海朗极）。

陶瓷膜（管）：高纯度 $Al_2O_3/TiO_2/ZrO_2$ 混合材料，膜面积为 $0.04 m^2$ ，膜孔径 $0.45 \mu m$ 和 $0.14 \mu m$ 。纳滤膜：聚醚砜/聚砜复合材料，膜面积 $0.32 m^2$ ，截留分子量 $360 Da$ 。

1.3 试验方法

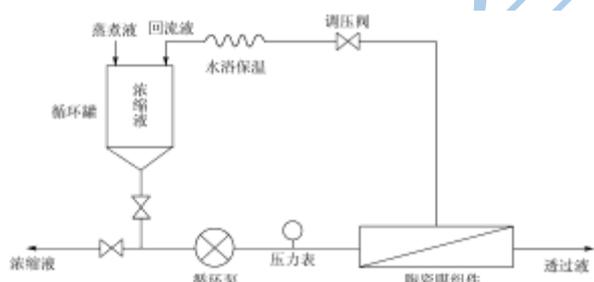


图1 试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipments

1.3.1 浓缩压力、温度和陶瓷膜孔径的选择

选用 $0.45 \mu m$ 和 $0.14 \mu m$ 两种孔径的陶瓷膜，在压力 $0.25 MPa$ 、 $0.3 MPa$ 和温度 $25^\circ C$ 、 $35^\circ C$ 、 $45^\circ C$ 的各种操作条件下对 $3 L$ 蒸煮液进行微滤浓缩处理（试验装置如图1），比较各种条件下通量、可溶性蛋白浓缩倍数的变化，确定陶瓷膜浓缩的压力、温度和膜孔径等参数。

1.3.2 浓缩温度对浓缩液品质变化的影响

在选用 $0.14 \mu m$ 陶瓷膜、 $0.3 MPa$ 条件下，研究温度对陶瓷膜通量影响的同时，考察不同温度（ $25^\circ C$ 、 $35^\circ C$ 、 $45^\circ C$ ）对浓缩过程中浓缩液菌落总数、

TVB-N、TBARS 含量变化的影响。

1.3.3 蒸煮液浓度对陶瓷膜通量的影响

加水稀释蒸煮液使浓度分别下降 10% 、 20% 、 30% 和 40% 后，选用 $0.14 \mu m$ 陶瓷膜，试验前循环罐中加入 $3 L$ 蒸煮液，在 $45^\circ C$ 、 $0.3 MPa$ 条件下开始浓缩，测定 $40 min$ 内膜通量的变化情况，考察蒸煮液的浓度对膜通量的影响。

1.3.4 投料方式对陶瓷膜通量的影响

选用 $0.14 \mu m$ 陶瓷膜，试验前循环罐中加入 $1.5 L$ 蒸煮液，在 $45^\circ C$ 、 $0.3 MPa$ 条件下开始浓缩。每当透过液体积累积至 $0.75 L$ （或 $0.5 L$ 、 $0.4 L$ ）时，则往循环罐中添加相同体积的蒸煮液，共添加 2 次（或 3 次、 4 次），测定 $40 min$ 内膜通量的变化情况，考察间歇投料对膜通量的影响。

1.3.5 陶瓷膜清洗方式

微滤结束后，先将料液排空，用水冲洗陶瓷膜设备 $5 min$ ；然后用化学清洗剂循环清洗 $20 min$ 后（流速 $3.5 m/s$ ， $1.1 MPa$ ），再用水冲洗 $5 min$ 除去残留的清洗剂，考察清洗 $20 min$ 后膜通量恢复情况；接着使用上述清洗剂继续循环清洗 $20 min$ 后，采用同样的方法考察膜通量恢复情况，当通量完全恢复时停止清洗，否则继续清洗直至通量完全恢复。

1.3.6 膜通量的计算公式

$$F = V / AT$$

注：F 为膜通量， $L/m^2 \cdot h$ ；V 为透过液体积，L；A 为膜的有效过滤面积， m^2 ；T 为获取 V 体积透过液所需的时间，h。

1.3.7 浓缩因子的计算公式

$$F_C = V_0 / (V_0 - V_t)$$

注： F_C 为浓缩因子； V_0 为蒸煮液原始体积，mL； V_t 为透过液体积，mL。

1.3.8 测定方法

可溶性蛋白含量：双缩脲比色法；氨基酸态氮含量：参照 GB/T 5009.39-2003；TBARS 值：参照 GB/T 5009.181-2003；菌落总数：参照 GB 4789.2-2010 方法；TVB-N：参照 SC/T 3032-2007 方法。

2 结果与讨论

2.1 浓缩压力、温度和陶瓷膜孔径对膜通量的影响

2.1.1 压力

操作压力是膜浓缩的动力来源，对膜通量变化具有重大影响。从图 2a 和图 2b 可知，在相同的温度条件下，分别使用 $0.45 \mu m$ 和 $0.14 \mu m$ 两种陶瓷膜浓缩

时, 0.3 MPa 的初始膜通量比 0.25 MPa 高, 而且平均通量高出 9~11% 左右。说明当微滤浓缩处在压力控制区时, 膜通量随压力的升高而增大。Barredo 等^[5-6]研究表明当压力升高而脱离控制区时, 对提高膜通量的作用不大, 这主要是由于压力增大使溶质对膜表面的碰撞效应增大, 冲刷效应降低, 导致膜孔阻塞现象严重, 加速滤饼层的形成, 此时膜通量不再随压力的升高而增加, 故陶瓷膜浓缩的压力为 0.3 MPa。

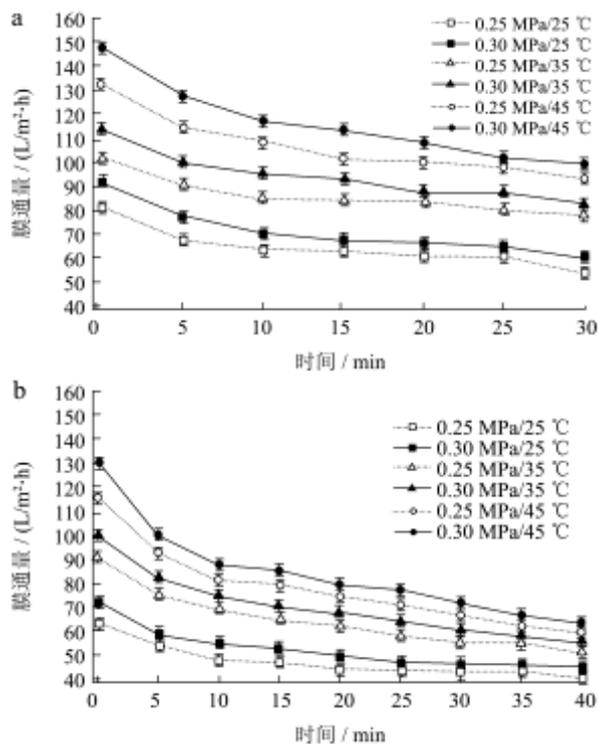


图2 操作条件对膜通量影响

Fig.2 Effect of operating conditions on membrane flux

注: a: 0.45 μm; b: 0.14 μm。

2.1.2 温度

微滤过程中, 温度对陶瓷膜通量影响的试验结果如图 2a 和图 2b 所示, 料液温度越高, 膜通量越大。当压力为 0.3 MPa, 使用 0.45 μm 陶瓷膜时, 45 °C 和 35 °C 的初始膜通量分别比 25 °C 提高 61.11% 和 23.66%; 而使用 0.14 μm 陶瓷膜时, 45 °C 和 35 °C 的初始膜通量分别比 25 °C 提高 79.65% 和 36.94%。表明 35 °C 升温至 45 °C 的初始膜通量增幅大于 25 °C 升温至 35 °C 的初始膜通量增幅。同时, 两种陶瓷膜的平均通量 45 °C > 35 °C > 25 °C。其原因在于浓缩温度升高使蒸煮液粘度下降、扩散系数增大, 减轻浓差极化和凝胶层的形成, 提高浓缩效率^[7-9]。因此, 陶瓷膜浓缩温度为 45 °C 较为合适。

2.1.3 膜孔径

由图 2 可以看出, 相同的压力、温度条件下, 0.45 μm 陶瓷膜通量比 0.14 μm 陶瓷膜通量高。在 0.3 MPa、

45 °C 条件下, 0.45 μm 陶瓷膜的初始通量比 0.14 μm 陶瓷膜高出 12.21%; 浓缩因子达到相同时 (如图 3), 0.14 μm 陶瓷膜通量衰减 51.30%, 而 0.45 μm 陶瓷膜通量只衰减 33.05%。这是由于小孔陶瓷膜固有的过滤阻力比大孔陶瓷膜大, 并且小孔膜对粒子或溶质的截留率高而更容易使膜孔堵塞, 导致膜污染严重, 通量衰减较快^[4,10], 与 0.2 μm、0.05 μm 陶瓷膜微滤浓缩乳清蛋白^[11]的实验现象一致。

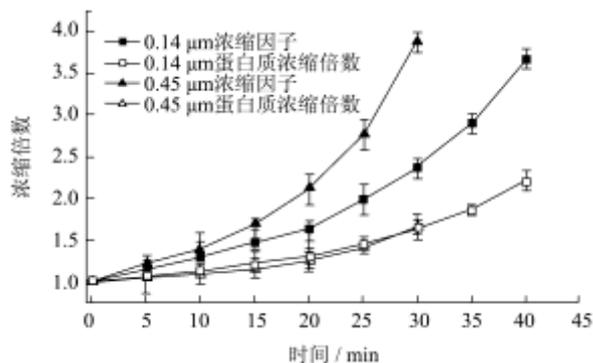


图3 在 45 °C 和 0.3 MPa 条件下微滤过程中浓缩因子和可溶性蛋白浓缩倍数的变化

Fig.3 The changes of concentration factor and protein concentration factor during microfiltration under 45 °C and 0.3 MPa

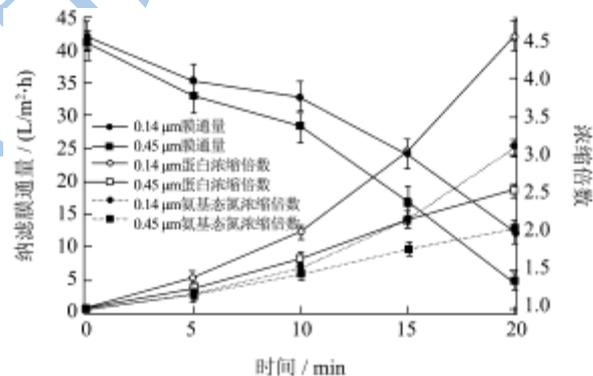


图4 纳滤过程中膜通量、蛋白浓缩倍数和氨基态氮浓缩倍数的变化

Fig.4 The changes of membrane flux, protein concentration factor and amino nitrogen concentration factor during nanofiltration

在蒸煮液的微滤浓缩过程中, 0.45 μm 陶瓷膜的通量较高, 但截留率较低, 使其对蛋白质的浓缩效率与 0.14 μm 陶瓷膜相同, 如图 3。同时试验表明两种透过液的蛋白质含量相差较大, 0.45 μm 陶瓷膜透过液的蛋白质含量为 560 mg/100 mL, 而 0.14 μm 陶瓷膜透过液的蛋白质含量为 400 mg/100 mL。在蒸煮液的整体膜浓缩工艺中, 陶瓷膜透过液还需进一步纳滤浓缩。图 4 比较了上述两种透过液在压力 1 MPa, 温度 45 °C 条件下纳滤浓缩的效率, 表明 0.14 μm 陶瓷膜透

过液的纳滤通量高于 0.45 μm 陶瓷膜透过液，而且在蛋白质和氨基态氮浓缩倍数方面都是前者优于后者。因此综合考虑选用 0.14 μm 陶瓷膜使整体膜浓缩工艺的效率提高。

综上所述，在陶瓷膜微滤浓缩蒸煮液的过程中，压力、温度和膜孔径是影响膜浓缩效率的重要因素，试验结果表明较优的陶瓷膜浓缩条件为压力 0.3 MPa、温度 45 °C 和选用 0.14 μm 陶瓷膜。

2.2 浓缩温度对浓缩液品质变化的影响

2.2.1 菌落总数

图 5a 为蒸煮液在不同浓缩温度下菌落总数的变化，从图中可以看出，随着时间的延长，浓缩液中菌落总数不断增加。一般菌落总数增长是由微生物的生长繁殖引起，而另一方面是由于陶瓷膜对微生物的截留作用引起^[12]。从浓缩因子与菌落总数增长倍数的关系（图 5b）中发现，浓缩温度 35 °C 和 25 °C 的菌落增长倍数大于其浓缩因子，35 °C 菌落总数的增长速率最快。相反，45 °C 条件下菌落增长倍数小于其浓缩因子，这是由于泵的剪切作用、在膜管中运动产生的摩擦和剪切作用使微生物死亡^[13-14]；同时，相对于适宜微生物生长的温度 35 °C 和 25 °C，45 °C 对微生物的生长具有较好的抑制作用。

2.2.2 TVB-N

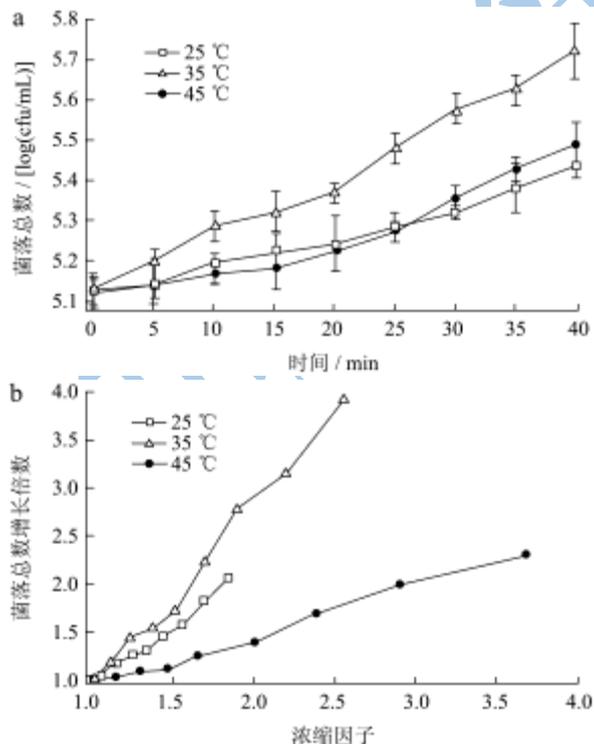


图 5 浓缩温度对浓缩液菌落总数的影响

Fig.5 Effect of concentration temperature on total bacterial count of concentrate solution

挥发性盐基氮 (TVB-N) 是由于自身酶或腐败微生物的分解胞外酶作用而产生的氨以及碱性的含氮物质。经过高温加工生产的蒸煮液，其自身含有的酶已失活，所以浓缩过程中 TVB-N 的变化主要是由微生物的作用和陶瓷膜的截留作用引起。

图 6a 中 35 °C 条件下浓缩液的 TVB-N 变化最大，25 °C 最小。图 6b 表明浓缩液的 TVB-N 的增长倍数皆小于其浓缩因子，但变化趋势与图 5b 中微生物的变化趋势基本一致，说明浓缩时微生物生长与 TVB-N 呈正相关性^[15]。其中，45 °C 温度条件下 TVB-N 相对于浓缩因子的增长速率最小，表明在 45 °C 条件下浓缩蒸煮液有利于保证蒸煮液的品质。

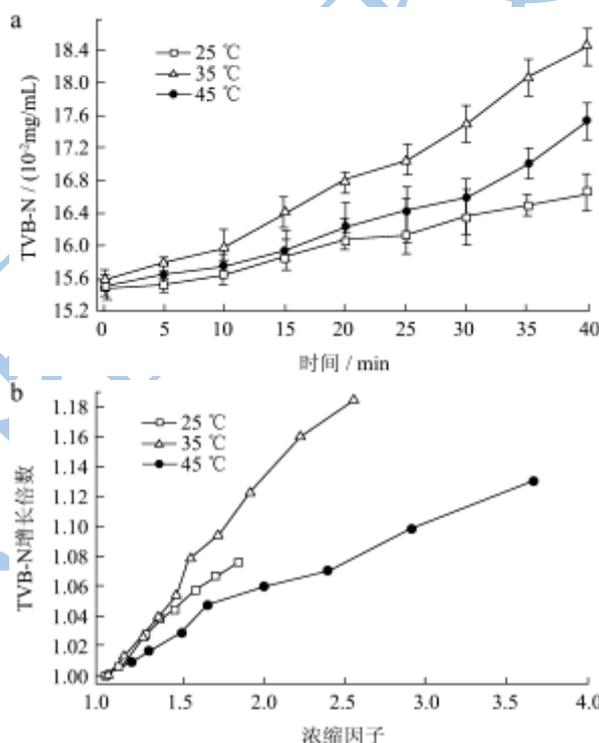


图 6 浓缩温度对浓缩液 TVB-N 的影响

Fig.6 Effect of concentration temperature on TVB-N of concentrate solution

2.2.3 TBARS

TBARS 含量的高低表明脂肪二级氧化产物含量

的高低，TBARS 值越高代表脂肪氧化程度越高，图 7a 表明，TBARS 值随微滤浓缩时间的延长逐渐上升，45 °C 条件下上升幅度和速率最快。一般认为温度升高，脂肪氧化加速，TBARS 值增大，但是 45 °C 的 TBARS 增长倍数相对于浓缩因子的增长趋势与 35 °C、25 °C 相近（图 7b），表明温度升高不是引起浓缩液中 TBARS 值增大的主要原因，其主要原因是陶瓷膜的截留作用引起的。

综上所述，45 °C 陶瓷膜浓缩时浓缩液的菌落总

数、TVB-N 相对于浓缩因子的增长率最小,其 TBARS 的增长率与 35 °C、25 °C 相近,因此 45 °C 浓缩蒸煮液不仅陶瓷膜通量较高,而且有利于保证蒸煮液的品质。

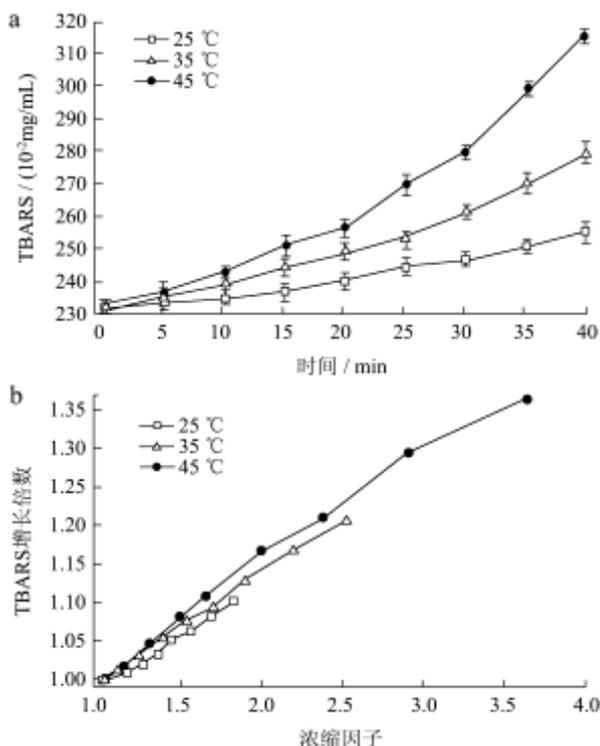


图 7 浓缩温度对浓缩液 TBARS 的影响

Fig.7 Effect of concentration temperature on TBARS of concentrate solution

2.3 蒸煮液浓度对膜通量的影响

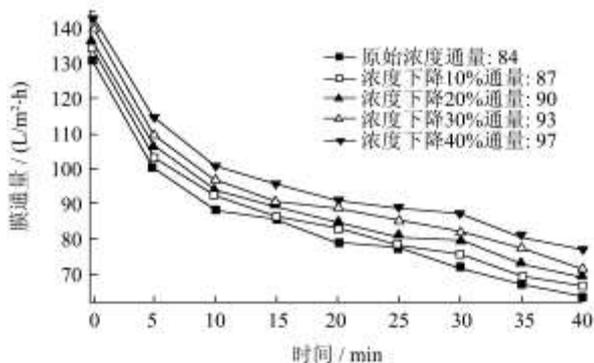


图 8 初始浓度对膜通量的影响

Fig.8 Effect of initial concentration on membrane flux

在膜处理过程中,浓度也是影响膜通量的一个重要因数,低浓度溶液形成膜污染的速度较慢,故通量高,如图 8 所示蒸煮液浓度与膜通量呈反比关系。当蒸煮液浓度下降 10%、20%、30% 和 40% 时,污染物的数量虽减少,但种类不变,致使膜通量相对于原始浓度小幅度提高,依次提高 3.57%、7.14%、10.71% 和 15.48%,膜通量的增长幅度远小于浓度下降幅度。

可见,降低蒸煮液浓度虽使膜通量增大,却降低了蛋白质的浓缩效率,同时也降低了透过液的浓度,不利于蒸煮液的浓缩。为了兼顾透过液浓度、蛋白质的浓缩倍数和膜通量,可以采用絮凝的方法,先高效回收部分高分子可溶性蛋白质以降低蒸煮液的浓度,减少膜污染,提高膜通量^[6]。

2.4 投料方式对膜通量的影响

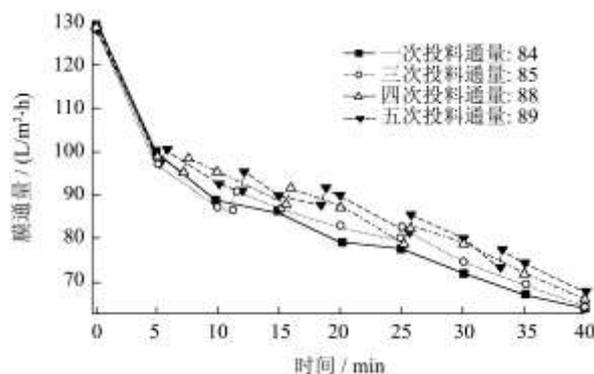


图 9 不同投料方式对膜通量的影响(同上图)

Fig.9 Effect of addition modes on membrane flux

从图 9 可知,在浓缩过程中,循环罐中添加一定体积的蒸煮液后,使膜通量小幅度升高,升高幅度在 3.45~5.20% 左右。这是由于添加的蒸煮液使浓缩液的浓度降低,同时减弱浓差极化的作用,使膜通量升高。可见,间歇投料的平均膜通量高于一次投料,五次投料、四次投料和三次投料的平均通量比一次投料分别高出 6.01%、4.70% 和 1.48%。但是增加投料次数不能大幅度增加平均通量,五次投料的平均通量比四次投料增加了 1.33%,低于四次投料相对于三次投料 3.12% 的增幅。这是因为陶瓷膜通量变化是由膜孔的吸附阻塞、膜表面的浓差极化和滤饼层的形成引起,其中膜孔阻塞占主导^[17-18]。间歇投料可以减弱浓差极化的作用,但是不能阻止污染物阻塞陶瓷膜孔。

2.5 清洗方式对膜通量恢复的影响

由于蒸煮液富含了蛋白质、脂类等营养物质,在微滤浓缩的过程中,产生的膜污染物主要以上述两类物质为主。针对这两类有机污染物,清水清洗难以使膜通量较好的恢复,而碱液的清洗效果较好^[11]。图 10 可知,清洗 0.14 μm 陶瓷膜的效果,清洗温度 45 °C > 35 °C > 25 °C,清洗温度对陶瓷膜通量的恢复影响较大,温度高有利于膜通量的恢复。另一方面,复合 1% NaOH+0.05% SDS (十二烷基硫酸钠) 清洗剂的清洗效果比单一 1% NaOH 清洗剂好。在 45 °C 的清洗条件下,清洗 20 min 时,复合清洗剂清洗效果比单一清洗剂提高 14.68%;清洗 40 min 时,复合清洗

剂使膜通量恢复率达到 98.99%，通量基本恢复，比单一清洗剂（1% NaOH）提高 22.85%。这是由于 SDS 是一种阴离子表面活性剂，降低溶液的表面张力，提高膜的亲水性，使沉积在膜表面及膜孔中的污染物的溶解性增加，容易被清洗剂带走。

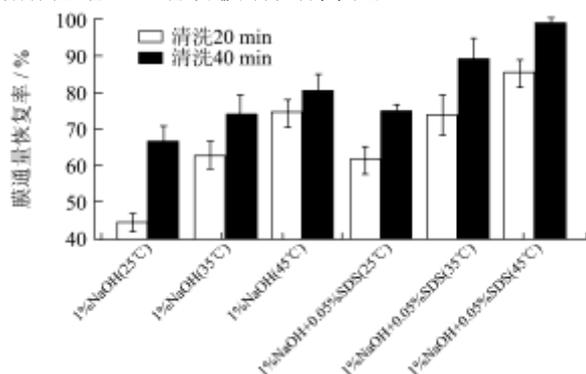


图 10 不同清洗方式对膜通量恢复的影响

Fig.10 Recovery of membrane flux using different cleaning methods

3 结论

3.1 陶瓷膜微滤浓缩鳃鱼蒸煮液时，0.45 μm 和 0.14 μm 陶瓷膜对蛋白质的浓缩效率相同，但选用 0.14 μm 陶瓷膜有利于提高整体膜浓缩工艺的效率；升高压力和温度能增大陶瓷膜初始通量和平均通量，在 0.3 MPa 和 45 $^{\circ}\text{C}$ 条件下膜通量较大。同时，45 $^{\circ}\text{C}$ 浓缩时浓缩液的菌落总数、TVB-N 值相对于浓缩因子的增长率最小，TBARS 的增长率与 35 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 相近，45 $^{\circ}\text{C}$ 浓缩蒸煮液有利于保证蒸煮液的品质。

3.2 降低蒸煮液的浓度可以提高微滤浓缩的膜通量，稀释使浓度下降 40% 时，平均通量只提高了 15.48%，远小于蒸煮液浓度下降的幅度，使蛋白质的浓缩效率降低。同时，通过采用间歇投料可以提高膜通量。因此，选用 0.14 μm 陶瓷膜，在 45 $^{\circ}\text{C}$ 、0.3 MPa 的温度和压力条件下，采用间歇的投料方式浓缩鳃鱼蒸煮液为较优的陶瓷膜浓缩操作条件。

3.3 在陶瓷膜清洗方面，复合清洗剂（1% NaOH+0.05% SDS）的清洗效果较好，在 45 $^{\circ}\text{C}$ 的清洗条件下，清洗 40 min 使膜通量回复率达到 98.99%，比单一清洗剂（1% NaOH）提高 22.85%。

参考文献

[1] Gulrajani M L, Purwar R, Prasad R K, et al. Studies on structural and functional properties of sericin recovered from silk degumming liquor by membrane technology [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(5): 2796-2804

[2] Capar G. Separation of silkworm proteins in cocoon cooking

wastewaters via nanofiltration: Effect of solution pH on enrichment of sericin [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 389(1): 509-521

- [3] Mondor M, Ali F, Ippesiel D, et al. Impact of ultrafiltration/diafiltration sequence on the production of soy protein isolate by membrane technologies [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(3): 491-497
- [4] Li M, Zhao Y, Zhou S, et al. Clarification of raw rice wine by ceramic microfiltration membranes and membrane fouling analysis [J]. Desalination, 2010, 256(1-3): 166-173
- [5] Barredo-Damas S, Alcaina-Miranda M I, Iborra-Clar M I, et al. Application of tubular ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of integrated textile wastewaters [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 192(1): 211-218
- [6] Sripui J, Pradistsuwana C, Kerr W L, et al. Effects of particle size and its distribution on specific cake resistance during rice wine microfiltration [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(1): 73-78
- [7] Benítez F J, Acero J L, Leal A I. Application of microfiltration and ultrafiltration processes to cork processing wastewaters and assessment of the membrane fouling [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 50(3): 354-364
- [8] Jinguan Z, Xianfeng D. Purifying sasanqua saponins with ceramic membrane [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(7): 89-92, 97
- [9] Madaeni S S, Ahmadi Monfared H, Vatanpour V, et al. Coke removal from petrochemical oily wastewater using $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ based ceramic microfiltration membrane [J]. Desalination, 2012, 293(1): 87-93
- [10] Saha N K, Balakrishnan M, Ulbricht M. Sugarcane juice ultrafiltration: FTIR and SEM analysis of polysaccharide fouling [J]. Journal of Membrane Science, 2007, 306(1-2): 287-297
- [11] Popović S, Milanović S, Iličić M, et al. Flux recovery of tubular ceramic membranes fouled with whey proteins [J]. Desalination, 2009, 249(1): 293-300
- [12] Kong F, Liu L, Zhang S, et al. Microfiltration of ceramic membrane for improving UHT milk quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 268-274
- [13] Elwell M W, Barbano D M. Use of Microfiltration to Improve Fluid Milk Quality [J]. Journal of Dairy Science,

- 2006, 89, Supplement: E20-E30
- [14] Lu L, Han Y, Xiong Q, et al. Concentrating of *Lactobacillus* spp. from Liquid Broth by Microfiltration Ceramic Membrane [J]. Food and Fermentation Industries, 2006, 32(9): 64-66, 71
- [15] Shulai L, Shasha Z, Fei L, et al. Combined effect of CO₂ and cold seawater maintain quality of Pacific White Shrimp [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 158-164
- [16] Wickramasinghe S R, Wu Y, Han B. Enhanced microfiltration of yeast by flocculation [J]. Desalination, 2002, 147(1-3): 25-30
- [17] De Oliveira R C, Docê R C, de Barros S T D. Clarification of passion fruit juice by microfiltration: Analyses of operating parameters, study of membrane fouling and juice quality [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 432-439
- [18] Mourouzidis-Mourouzis S A, Karabelas A J. Whey protein fouling of large pore-size ceramic microfiltration membranes at small cross-flow velocity [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 323(1): 17-27

现代食品科技