

酱油膜澄清过滤污染机理研究

Study of membrane fouling mechanism in soy sauce clarification

孙 晔^{1,2,3} 姚 磊^{1,2,3} 赵黎明^{1,2,3}

SUN Ye^{1,2,3} YAO Lei^{1,2,3} ZHAO Li-ming^{1,2,3}

(1. 华东理工大学生物工程学院, 上海 200237; 2. 华东理工大学发酵工业分离提取技术研发中心, 上海 200237; 3. 华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237)

(1. School of Biotechnology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. R&D Center of Separation and Extraction Technology in Fermentation Industry, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

摘要:膜过滤技术正越来越多地应用到酱油等传统发酵制品的澄清过程中,但酱油原料成分复杂,膜污染较为严重,并且目前酱油澄清过滤中膜污染机理尚不清晰。该研究通过通量曲线对 Hermia 理论模型的线性拟合,探究酱油微滤过程中完全堵塞、中间堵塞、标准堵塞和滤饼层堵塞 4 种污染机制对膜污染的影响程度。结果显示酱油过滤初期较短时间内膜污染是由多种机制(完全堵塞、中间堵塞)联合控制,在此后较长时间滤饼层污染是造成通量下降的主要机制。在此基础上,进一步探究了跨膜压差、膜面流速、操作温度对滤饼层污染的影响,结果显示膜面流速从 0.06 m/s 上升至 0.30 m/s,滤饼层模型参数 K_{gt} 值从 6.03×10^8 s/m² 下降至 6.28×10^7 s/m²,滤饼层污染显著降低。该研究可为酱油澄清过滤过程中膜污染的控制及清洗滤膜提供理论依据。

关键词: 酱油; 微滤; 膜污染; Hermia 模型

Abstract: Microfiltration is a popular technology in soy sauce and other brewing products clarification proceducer. As the complex components and the strict requirements in nutrition and flavor, membrane fouling is an intractable problem and the fouling mechanism hasn't been clarified. In this work, membrane fouling mechanisms was systematically investigated by fitting the flux curve to Hermia model. Results: At the initial stage of soy sauce clarification, the fouling mechanisms was dominated by multi-mechanism, for the complete pore blocking, intermidate pore blocking, and cake layer formation model. During the following process cake layer formation

predominated the membrane fouling. The influences of operating conditions to membrane fouling were further studied Results showed that when crossflow velocity increase from 0.06 m/s to 0.30 m/s, the value cake layer formation mechanism constant decreased from 6.03×10^8 s/m² to 6.28×10^7 s/m². This research provided theoretical basis in reducing membrane fouling and optimize membrane cleaning procedure.

Keywords: Soy sauce; Microfiltraion; Membrane fouling; Hermia model

酱油作为传统发酵制品,味道鲜美,风味独特,是亚洲人饮食中不可缺少的调味品^[1]。经过发酵后的生酱油含有丰富的氨基酸、还原糖等物质,及未完全水解蛋白、多肽、多糖、淀粉颗粒、糊精等^[2]。在存储放置过程中大分子物质容易聚合、絮凝、沉降,影响酱油产品的稳定性。

膜技术在酱油及传统调味品澄清过滤中有广阔的应用前景^[3],但复杂的物料体系所造成的膜污染问题一直制约着该技术的发展。目前关于酱油膜污染的研究主要是研究污染物的组成成分^[2,4],很少关注膜污染过程中污染颗粒对膜的堵塞,膜污染机理尚不清晰。通量下降是膜污染最直接的表现,因此,通常使用通量下降程度来判断膜污程度^[5]。目前对通量曲线的研究大部分是经验模型拟合,这类模型可以很好地预测通量的变化规律。由于其模型参数不具备物理意义,此类模型在解释膜分离过程中污染机理方面有所欠缺^[5-6]。1982 年, Hermia^[7] 基于膜过滤过程中颗粒对膜孔的堵塞位置和堵塞程度建立了关于膜污染机理的理论模型,并认为不同过滤过程中,污染物粒径范围及其与膜孔径之间的差异会造成不同的膜污染现象。在恒压过滤过程中 Hermia^[7] 还推导出 4 种理想堵塞模型分别为饼层堵塞模型、标准堵塞模型、中间堵塞模型、完全堵塞模型。

基金项目: 国家自然科学基金(编号:31371725); 国家“863”计划项目(编号:SS2014AA021202)

作者简介: 孙晔,女,华东理工大学在读硕士研究生。

通信作者: 赵黎明(1977—),男,华东理工大学教授,博士。

E-mail: zhaoliming@ ecust.edu.cn

收稿日期: 2017—03—01

目前 Hermia 模型在果汁、乳制品、废水等物料体系的膜污染机制研究中均有应用^[8-11]。研究^[11]表明,百香果果汁澄清过程滤饼层堵塞及中间堵塞是主要污染机制。血橙汁超滤过程膜污染受流速影响显著,低流速下膜污染主要由中间堵塞控制,高流速状态(湍流)下主要是由完全堵塞控制^[12]。进一步研究^[8]表明,膜过滤过程中膜堵塞情况也会随操作时间改变,通过不同时间段通量曲线对 Hermia 4 种模型的线性拟合分析,可以判断过滤过程中污染物对膜的堵塞行为。Abbasil 等^[8,13]利用该方法探究了废水、海水等体系澄清过程中的膜污染情况。

本试验拟利用 Hermia 模型,研究酱油澄清过滤过程中的膜污染机理及控制手段,旨在为膜技术使用过程中膜污染的控制及膜再生策略的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

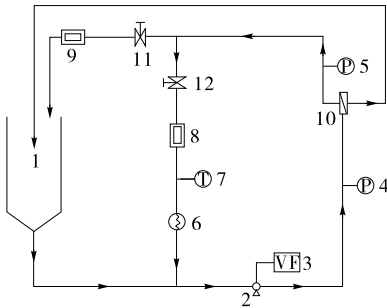
酱油原液:山东欣和食品有限公司,原料由高盐稀态发酵法生产后经巴氏杀菌后进行自然沉降,上清液分装成 30 L 每桶常温储存;

甲醛、葡萄糖、氢氧化钠、硝酸等试剂:均为分析纯;

有机微滤膜:0.1 μm,中科瑞阳膜技术(北京)有限公司。

1.1.2 主要仪器与设备

试验用膜过滤设备(见图 1):山东高仕过滤有限公司;



1. 进料桶 2. 离心泵 3. 变频器 4、5. 压力表 6. 换热器 7. 温度表 8、9. 流量计 10. 膜元件 11、12. 阀门

图 1 膜过滤设备设计图

Figure 1 Membrane filtration unit schematic

pH 计:FE20 型,瑞士梅特勒-托利多有限公司;

浊度计:WGZ-2 型,上海昕瑞仪器仪表有限公司;

Cl⁻ 电极:PX SJ-216F 型,上海越磁电子科技有限公司;

糖度计:PAL-LOOP 型,日本爱拓有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 酱油膜澄清过滤试验在全循环模式下进行。

(1) 在膜面流速 0.30 m/s,操作温度 50 ℃ 条件下,探究跨膜压差 0.06,0.10,0.12,0.15,0.20 MPa 下的膜污染状况。

(2) 在跨膜压差 0.12 MPa,操作温度 50 ℃ 条件下,探究膜面流速 0.06,0.11,0.21,0.30,0.39,0.47 m/s 下的膜污染状况。

(3) 在跨膜压差 0.12 MPa,膜面流速 0.30 m/s 条件下,探究操作温度 40,45,50,55,60 ℃ 下的膜污染状况。

每次试验前在设备中加入 30 L 纯水测量其纯水通量。试验时加入 30 L 酱油料液。调节操作条件,并且记录试验过程膜通量数据。试验完毕后排出料液,先用纯水清洗至通量不再上升,再采用化学清洗法,进行酸碱交替清洗,直至通量恢复至初始通量后用纯水冲洗至中性。

1.2.2 测定项目及方法

(1) 还原糖:按 GB 5009.7—2016《食品中还原糖的测定》执行。

(2) 氨基酸态氮:按 GB/T 5009.39—2003《酱油卫生标准的分析方法》执行。

(3) 菌落总数:按 GB 4789.2—2010《食品微生物学检验菌落总数测定》执行。

(4) pH:用 pH 计进行测定。

(5) 浊度:用浊度计进行测定,采用三点校正法分别对 0,10,100 NTU 进行校正后测量。

(6) NaCl 含量:Cl⁻ 电极测定^[14]。

(7) 固形物含量:采用手持式折光仪^[12]。

(8) 膜通量:按式(1)计算。

$$J_v = \frac{V}{A \times t}, \tag{1}$$

式中:

J_v ——单位时间单位膜面积渗透液体积,L/(m²·h);

t ——过滤时间,s;

V ——滤液体积,L;

A ——膜面积,m²。

1.3 理论模型

Hermia 等^[7,15]基于污染物粒径范围与膜孔径之间的差异归纳总结出 4 种污染模型,并推导出不同污染情况下通量曲线公式。这 4 种模型基于恒压过滤定律见式(2),不同的参数 n 对应于不同的污染机理^[15],具体每种污染机理下颗粒对膜的污染见图 2。

$$\frac{d^2t}{dv^2} = k \times \left(\frac{dt}{dv}\right)^n, \tag{2}$$

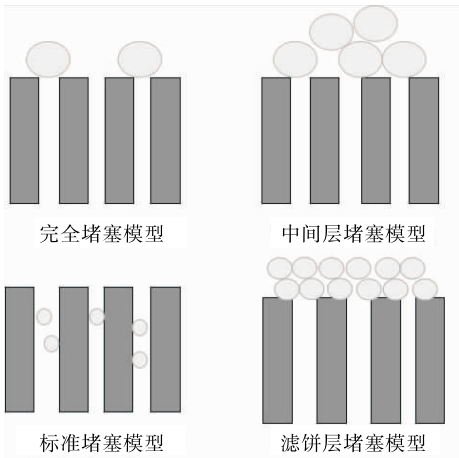


图 2 各污染机制下膜污染状况示意图

Figure 2 Illustration of the fouling mechanisms considered by Hermia's model

式中：
 k ——模型参数,单位取决于 n ；
 n ——决定膜污染类型的模型常数。

当 $n=2$ 时,式(3)为膜污染状况符合完全堵塞模型时通量时间曲线所满足的关系式。

$$\ln(J_v) = \ln J_0 - K_c t,$$

(3)

$$K_c = K_A \times J_o,$$

(4)

式中：
 J_0 ——初始通量,L/(m²·h)；
 K_C ——完全堵塞模型参数,s⁻¹；
 K_A ——单位体积物料通过膜造成的膜孔堵塞程度,m⁻¹。

当 $n=1$ 时,式(5)为膜污染状况符合中间堵塞模型时通量时间曲线所满足的关系式。

$$\frac{1}{J_v} = \frac{1}{J_o} + K_i t,$$

(5)

$$K_i = K_A,$$

(6)

式中：
 K_i, K_A ——单位体积物料通过膜造成的膜孔堵塞程度,m⁻¹。

当 $n=1.5$ 时,式(7)为膜污染状况符合标准堵塞模型时通量时间曲线满足的关系式。

$$\frac{1}{J_v^{1/2}} = \frac{1}{J_o^{1/2}} + K_s t,$$

(7)

$$K_s = 2 \times \frac{K_B}{A_o} \times A \times J_0^{1/2},$$

(8)

式中：
 K_s ——标准堵塞模型参数,m^{-1/2}·s^{-1/2}；
 K_B ——透过单位体积料液膜孔堵塞程度,m⁻¹；
 A_0 ——膜孔面积,m²。

当 $n=0.5$ 时,式(9)为膜污染状况符合滤饼层堵塞模型时通量时间曲线满足的关系式。

$$\frac{1}{J_v^2} = \frac{1}{J_o^2} + K_{gl} \times t,$$

(9)

$$K_{gl} = \frac{2 \times R_g \times K_D}{J_o \times R_m},$$

(10)

式中：
 R_g ——滤饼层膜阻,m⁻¹；
 R_m ——膜自身阻力,m⁻¹；
 K_D ——过滤单位体积物料会形成的滤饼层阻力,m⁻¹；
 K_{gl} ——滤饼层模型参数,s/m²。

1.4 数据分析

用 Origin 8.6 绘制试验中通量图,用 Origin 8.6、Matlab 2014a 软件进行数据拟合。

2 结果与分析

2.1 过膜前后酱油品质分析

表 1 为过膜前后酱油原液与过滤液的性质比较。由表 1 可知,过滤后酱油产品浊度由 53.48 NTU 下降至 0.36 NTU,并且室温储藏半年无二次沉淀现象。酱油产品理化指标如氨基酸态氮、氯化钠、还原糖等与过膜前酱油原液无明显差异。氨基酸态氮和总固形物含量远高于 GB 18186—2000《酿造标准》中关于高盐稀态酿造酱油的特级标准。过膜后菌落总数小于 1 CFU/mL 符合 GB 2717—81《酱油卫生标准》。说明本试验处理的酱油产品不仅具有良好的澄清度,而且滤液中的主要营养物质质量指标与酱油原液无显著差异,远高于国家特级酿造酱油标准。

2.2 操作条件对通量的影响

由图 3 可知,不同操作条件下通量曲线下降趋势类似,均可分为 3 个阶段。以操作条件(50℃、0.30 m/s、0.12 MPa)为例进行分析,第一阶段(0~5 min)膜通量下降迅速,下降量为初始通量的 25%。第二阶段(6~50 min)通量下降相对平缓,下降约 16.3%。第三阶段(50~180 min)膜通量达到准稳态阶段,通量基本不发生变化。酱油澄清过滤中的这一膜通量下降趋势是过滤过程中膜污染状况的直接体现。图 3 中膜通量变化趋势与果汁等体系过滤时趋势基本保持一致,但具体阶段的通量下降程度不同^[10]。这与物料体系中污染颗粒浓度、粒径以及采用膜的种类有关。

图 3(a)显示了酱油微滤过程中跨膜压差对通量的影响。当跨膜压差从 0.06 MPa 升高至 0.12 MPa,膜初始通量从 34.8 L/(m²·h)显著升高至 58.2 L/(m²·h)。稳态通量从 14.8 L/(m²·h)上升至 27.1 L/(m²·h)。当跨膜压差从 0.12 MPa 上升至 0.20 MPa,初始通量从 58.2 L/(m²·h)上升至 81 L/(m²·h),但高跨膜压差(0.20 MPa)下,膜污染速度加快,通量迅速下降至稳态通量 27.5 L/(m²·h),与 0.12 MPa 下稳态膜通量 27.1 L/(m²·h)相近。所以酱油澄清过滤体系中阈值压力为 0.12 MPa。

图 3(b)显示了不同膜面流速下膜通量下降趋势。不同膜面流速下初始膜通量基本一致为(58.1±2.2) L/(m²·h)。随着膜面流速的升高,膜通量下降趋势逐渐减缓。当膜面流速从 0.06 m/s 上升至 0.30 m/s 时,第一阶段(0~5 min)膜通

表 1 原料及过滤液性质比较

Table 1 The properties of the feedsoy sauce and permeate soy sauce

样品	pH	总固形物含量/ (10 ⁻² g·mL ⁻¹)	浊度/ NTU	氨基酸态氮/ (10 ⁻² g·mL ⁻¹)	还原糖/ (10 ⁻² g·mL ⁻¹)	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)	氯化钠/ (10 ⁻² g·mL ⁻¹)	半年内 产生沉淀
进料液	5.09±0.01	39.54±0.06	52.48±10.81	1.27±0.01	4.56±0.07	580±100	14.70±0.01	是
过滤液	5.08±0.01	37.62±0.06	0.36±0.04	1.26±0.01	4.46±0.06	<1	14.67±0.06	否

量下降程度减缓,从 48.4%下降至 27.6%;稳态通量从 10.3 L/(m²·h)提高至 29.8 L/(m²·h)。当膜面流速由 0.30 m/s 上升至 0.47 m/s 时,稳态通量从 27.1 L/(m²·h) 上升至 29.8 L/(m²·h),上升不显著。因此膜面流速为 0.30 m/s 时流体湍流产生的剪切力足以破坏膜表面滤饼层污染。

由图 3(c)可知随着操作温度的上升,膜初始通量及稳态通量均提高。当操作温度从 40 ℃ 上升至 60 ℃,初始通量从 42.5 L/(m²·h) 上升至 75.5 L/(m²·h),稳态膜通量从 17.88 L/(m²·h) 上升至 37.7 L/(m²·h)。但一般酱油生产企业灌装环节温度要求料液温度低于 50 ℃,因此采用 50 ℃。

综上所述,最合适的操作条件为跨膜压差 0.12 MPa,膜面流速 0.30 m/s,操作温度 50 ℃。在此基础上进一步利用 Hermia 模型,对膜污染过程及其主导污染机制进行分析。

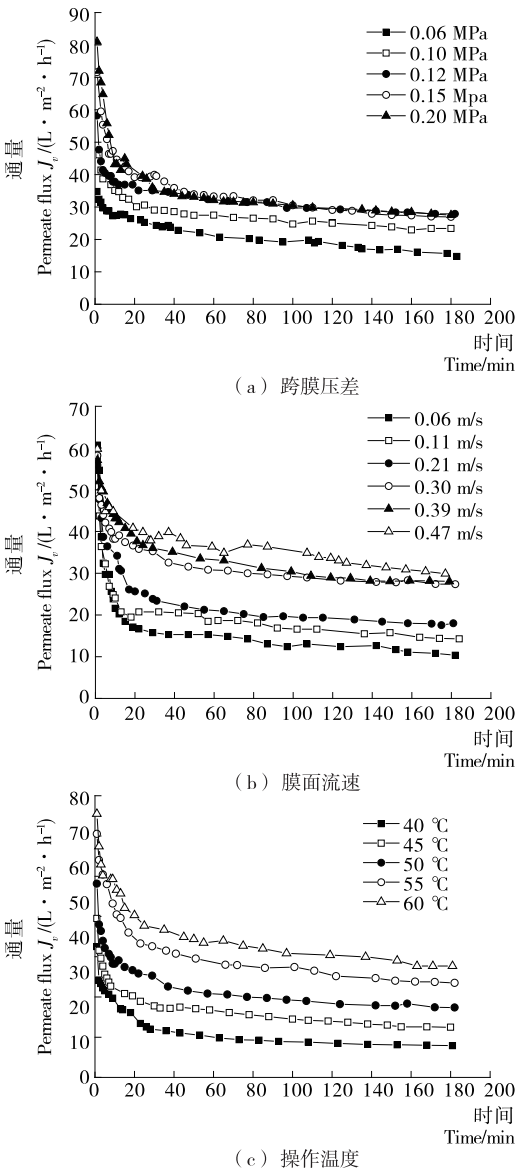


图 3 不同操作条件对膜通量的影响

Figure 3 Influence of operating parameters to permeate flux

2.3 酱油澄清过程膜污染机制分析

在最适操作条件 50 ℃、0.30 m/s、0.12 MPa 下进行 Hermia 模型拟合(图 4)。通过比较通量曲线与 Hermia 模

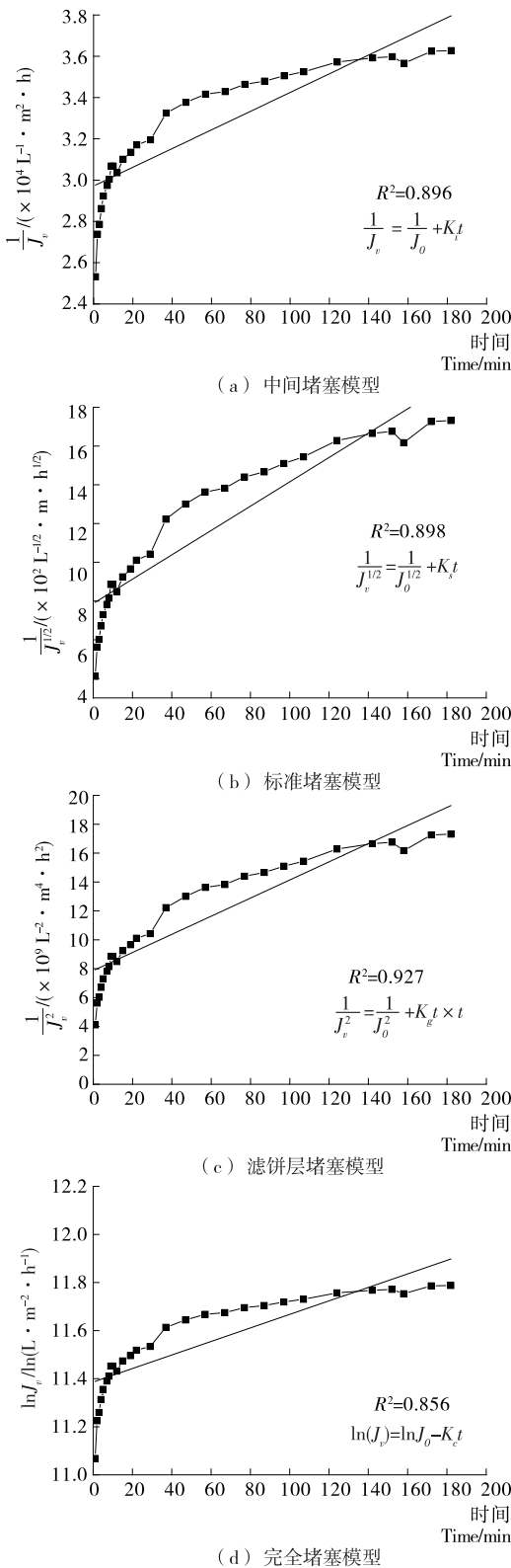


图 4 最适操作条件下通量曲线对 Hermia 4 种模型的线性拟合

Figure 4 Filtration curve under operating condition(0.12 MPa, 0.30 m/s, 50 ℃) fitting to the Hermia's model

型中完全堵塞、中间堵塞、标准堵塞和滤饼层堵塞的契合程度来反应过滤过程主导污染机制。具体拟合结果见表 2,在各跨膜压差条件下,拟合结果按契合程度排序均为:滤饼层堵塞模型>标准堵塞模型>中间堵塞模型>完全堵塞模型。表明滤饼层污染是酱油过滤过程中膜污染主导污染机制。由此反映酱油澄清过程膜污染主要是由于污染颗粒对膜孔的覆盖及在膜外表面的积累造成的。同时酱油体系中,大分子蛋白、淀粉颗粒、糊精等大小形状不一的物质可能会堵塞在膜孔内,造成标准堵塞机制下的膜污染。由表 2 可知,通量曲线对滤饼堵塞模型拟合的 R^2 值为 0.927(不足 0.98 契合度较低),说明与滤饼层堵塞模型所描述的理论状态有差异。因此推测在同一单元操作中不仅是单一污染机制下的粒子堵塞行为,更有可能是多种堵塞行为同时发生^[8,13]。

表 2 为操作过程中不同时间段通量曲线对 Hermia 模型的拟合,结果显示在初始前 5 min 拟合结果为:滤饼层堵塞>中间堵塞>标准堵塞>完全堵塞。在 6~50 min 时拟合结果为:完全堵塞>标准堵塞>中间堵塞>滤饼层堵塞。在此后 50~180 min:滤饼层堵塞>中间堵塞>标准堵塞>完全堵塞。由此结果推测过滤初期(0~5 min)膜污染机制为渗透液夹带大小不一的污染颗粒沉积在膜表面形成滤饼层及中间堵塞,导致有效过滤面积不断减小,此时膜通量下降迅速。6~50 min 内更多膜孔被完全覆盖形成完全堵塞。此外,一方面物料中粒径较小污染物堵塞在膜孔内部,形成标准堵塞机制下的膜污染,另一方面由于膜孔分布的不均匀性,膜表面存在部分尺寸较大的膜孔,容易被污染物堵塞^[15]。此后 50~180 min 在膜孔被覆盖的基础上污染物质层累积形成滤饼层,并且在膜面流速的冲刷作用下疏松滤饼层中的大颗粒物逐渐被小颗粒物取代形成更加致密的滤饼层膜污染^[16]。

根据膜污染过程分析可知,在清洗过程中主要是对附着在膜表面的滤饼层进行冲刷,因此可以采用高流速纯水冲洗结合反冲洗的手段迅速去除膜表面附着的滤饼层的污染物,少量堵塞在膜孔内的小颗粒物可采用化学方法清洗。

2.4 膜滤饼层污染控制

通过 2.2 可知,酱油澄清过滤初期膜的污染是由多种机制(完全堵塞、中间堵塞)联合控制,此后滤饼层污染占主导作用,并且整个过滤过程滤饼层污染是膜污染主导机制。

表 2 过滤过程中不同时间通量曲线对 Hermia 模型拟合结果 R^2

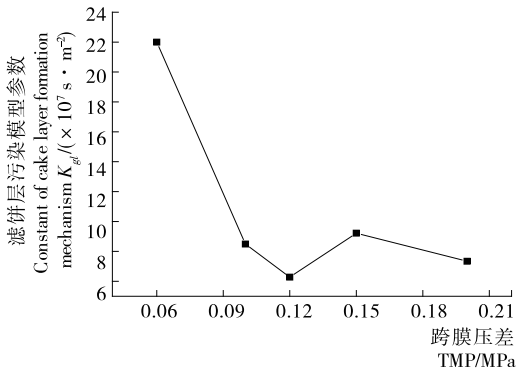
Table 2 The value of R^2 obtained from the permeate flux curve during the filtration procedure fitting the Hermia's model

模型	0~180 min	0~5 min	6~10 min	10~50 min	50~180 min
标准堵塞	0.898	0.990	0.851	0.971	0.955
中间堵塞	0.878	0.993	0.849	0.969	0.957
滤饼层堵塞	0.927	0.997	0.843	0.964	0.962
完全堵塞	0.858	0.987	0.853	0.973	0.953

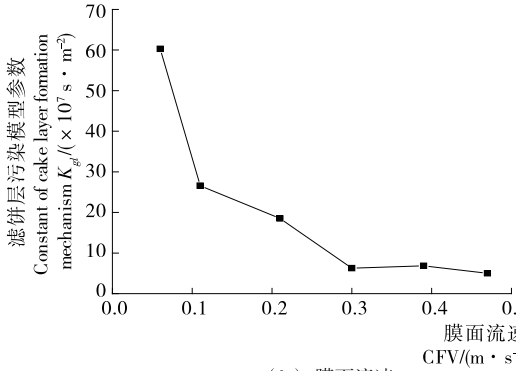
K_{gl} 为滤饼层污染参数,其数值越高,滤饼层污染越严重^[13]。因此,本研究通过 K_{gl} 数值及变化趋势探究滤饼层污染受操作条件的影响,从而通过调节操作条件减轻滤饼层污染。

比较图 5(a)不同跨膜压差(TMP)下 K_{gl} 值可知,低跨膜压差(0.06 MPa)下 K_{gl} 数值为 $22.0 \times 10^7 \text{ s/m}^2$,滤饼层污染相对严重。当跨膜压差升高时, K_{gl} 值之间 ($6.28 \times 10^7 \sim 9.22 \times 10^7 \text{ s/m}^2$) 差异不大,膜污染现象相对减弱。

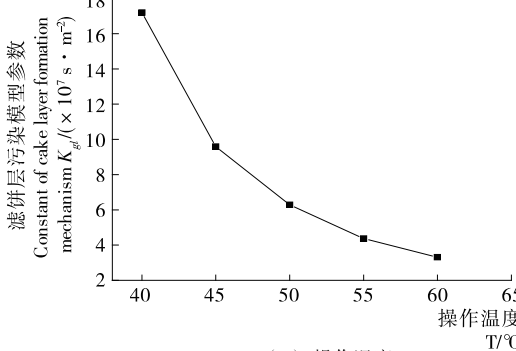
由图 5(b)可知,膜面流速(CFV)对 K_{gl} 影响显著,低膜面流速(0.06 m/s)下, K_{gl} 值达 $60.3 \times 10^7 \text{ s/m}^2$ 滤饼层污染严重,这是由于此时流体呈层流状态,污染物在膜表面不断堆积,滤饼层污染严重。当膜面流速上升至 0.30 m/s, K_{gl} 下降至 $6.28 \times 10^7 \text{ s/m}^2$,雷诺数从 3 261 改变至 26 653,对应的流动状态从层流变为湍流。湍流产生的与滤饼层沉积方向相切的剪切应力使得膜面沉积物被打破,显著降低了滤饼层污



(a) 跨膜压差



(b) 膜面流速



(c) 操作温度

图 5 不同操作条件下滤饼层污染参数 K_{gl}
Figure 5 K_{gl} constant of cake layer formation mechanisms under different operating parameters

染程度。当膜面流速从 0.30 m/s 上升至 0.47 m/s 时, K_{gl} 值没有显著变化, 可能是酱油体系中, 大部分的沉积颗粒为蛋白、多肽、多糖以及蛋白多糖等形成的聚合物, 这些聚合物大多是长链状, 在高剪切力下易被打碎, 破碎的片段堵塞了疏松的滤饼层结构使滤饼层更加致密^[17]。

图 5(c) 比较了不同操作温度(T)下 K_{gl} 值, 温度升高时 K_{gl} 值不断下降。由于温度升高酱油黏度下降导致流体雷诺数、传质系数增大从而减轻了滤饼层的污染^[18]。

通过调节操作条件(跨膜压差、膜面流速、操作温度)可以减轻酱油澄清过滤中膜污染程度, 其中膜面流速对其影响显著。当膜面流速从 0.06 m/s 上升至 0.30 m/s, 滤饼层污染显著降低。跨膜压差在操作条件 0.10~0.20 MPa 滤饼层污染有所减轻。温度升高可以有效减轻膜污染, 但高温对膜元件及酱油品质的影响需要进一步探究。

3 结论

酱油由于其复杂的物料组成成分, 在过滤澄清过程中膜污染严重, 通量下降迅速。利用 Hermia 模型为工具, 通过对过滤过程通量曲线的分析, 推导出在过滤初期膜的污染是由多种机制(完全堵塞、中间堵塞)联合控制; 此后滤饼层污染占主导作用, 并且整个过滤过程滤饼层污染是膜污染主导机制。通过调节操作条件(跨膜压差、膜面流速、操作温度)可以减轻膜污染程度, 其中膜面流速对其影响显著。当膜面流速从 0.06 m/s 上升至 0.30 m/s, 流体流动状态从层流转变至湍流, 膜面剪切力增大, 相应地 K_{gl} 值从 60.3×10^7 s/m² 下降至 6.28×10^7 s/m², 滤饼层污染显著降低。本研究系统探究了酱油膜澄清过滤中膜污染机制, 为膜技术在酱油澄清过滤中的应用提供了理论指导。

参考文献

[1] 王远亮, 王传花, 马霉, 等. 酱油发酵前期微生物变化及其主要香味物质分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(4): 31-34.

[2] 孙鹏飞, 高献礼, 闫爽, 等. 酱油二次沉淀蛋白质的分离、鉴定及氨基酸分析[J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 87-90.

[3] 蒋雪薇, 周尚庭, 叶菁, 等. 成品变质酱油中微生物的分离鉴定及变质原因分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 46-50.

[4] 孙元宾. 酱油二次沉淀的控制方法研究[J]. 吉林工商学院学报, 2012, 28(5): 90-91.

[5] VLADISAVLJEVIC G T, VUKOSAVLJEVIC P, BUKVIC B. Permeate flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(3): 241-248.

[6] SOLERCABEZAS J L, TOR G M, VINVENTVELA M C, et al. Ultrafiltration of municipal wastewater: study on fouling models and fouling mechanisms [J]. Desalination & Water Treatment, 2015, 56(13): 3 427-3 437.

[7] HERMIA J. Constant Pressure Blocking Filtration Law Application to Powder-Law Non-Newtonian Fluid[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1982, 60(3): 183-187.

[8] 马敬环, 项军, 李娟. 陶瓷膜错流微滤海水的污染机理[J]. 膜科

学与技术, 2010, 30 (3): 87-92.

[9] BARUKCIC I, BOŽANIC R, KULOZIK U. Effect of pore size and process temperature on flux, microbial reduction and fouling mechanisms during sweet whey cross-flow microfiltration by ceramic membranes[J]. International Dairy Journal, 2014, 39(1): 8-15.

[10] CASSANO A, MECCHIA A, DRIOLI E. Analyses of hydrodynamic resistances and operating parameters in the ultrafiltration of grape must[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89 (2): 171-177.

[11] 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.

[12] CASSANO A, MARCHIO M, DRIOLI E. Clarification of blood orange juice by ultrafiltration: analyses of operating parameters, membrane fouling and juice quality[J]. Desalination, 2007, 212(1): 15-27.

[13] ABBASI M, MOWLA D. Analysis of membrane pore-blocking models applied to the MF of real oily wastewaters treatment using mullite and mullite-alumina ceramic membranes[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52 (13/14/15): 2 481-2 493.

[14] LUO Jian-quan, DING Lu-hui, CHEN Xiang-rong, et al. Desalination of soy sauce by nanofiltration[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 66(3): 429-437.

[15] VELA M C V, BLANCO S Á, GARCIA J L, et al. Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 62 (3): 489-498.

[16] LU Wei-ming, JU Shang-chuang. Selective particle deposition in crossflow filtration[J]. Separation and Purification Technology, 1989, 24(7/8): 517-540.

[17] LI Mei-sheng, ZHAO Yi-jiang, ZHOU Shou-yong, et al. Resistance analysis for ceramic membrane microfiltration of raw soy sauce[J], Journal of Membrane Science, 2007, 299 (1/2): 122-129.

[18] 赵黎明. 膜分离技术在食品发酵工业中的应用[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011: 88-89.