

气液两相流强化卷式纳滤膜分离酵母/MgSO₄ 混合溶液

蒋婉莹, 王 枢*, 王 毅, 韦美华

(西南交通大学生命科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:考察了气液两相流在 DK2540F 卷式纳滤(NF)膜组件中对酵母/MgSO₄ 混合物的强化分离效果。研究了不同条件下对卷式纳滤膜渗透通量、截留率和渗透通量增加率的影响。结果表明,两相流能够明显提高酵母/MgSO₄ 混合物在卷式 NF 膜中的分离效果。在跨膜压力较高、气液比较大的条件下,酵母悬浮液的通量明显增强,通量增加率可达 15.2%。同时,在分离酵母/MgSO₄ 混合物时,跨膜压力越低,气液比越高,增强效果越好,渗透通量的增长率能够达到 40% 以上。另外,气液两相流几乎不影响 MgSO₄ 的截留率,且 MgSO₄ 的截留率几乎维持在 90%~94% 之间。

关键词:卷式纳滤膜;气液两相流;气液比;通量增加率;酵母/MgSO₄ 混合液

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)11-0148-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.11.032

Separation of yeast/MgSO₄ mixture by spiral nanofiltration membrane enhanced by gas-liquid two-phase flow

JIANG Wan-ying, WANG Shu*, WANG Yi, WEI Mei-hua

(School of Life Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The enhancement separation efficiency of yeast/MgSO₄ mixtures via gas-liquid two-phase flow is evaluated in a DK2540F spiral nanofiltration membrane module. Investigation is performed to determine the effects of different conditions on permeate flux, rejection and permeate flux increase rate of the spiral nanofiltration membrane. The experimental results indicate that two-phase flow can obviously enhance the separation effect of yeast/MgSO₄ mixture in spiral nanofiltration membranes. The permeate flux of yeast suspension is obviously enhanced by higher trans-membrane pressure and larger gas-liquid ratio, with a growth of 15.2%. Meanwhile, better enhancement effect for separating yeast-MgSO₄ mixture can be achieved under lower trans-membrane pressure and higher gas-liquid ratio, and permeate flux can lift by 40% or more. Additionally, gas-liquid two-phase flow affect scarcely the rejection of MgSO₄ that remains mostly between 90% and 94%.

Key words: spiral nanofiltration membrane; gas-liquid two-phase flow; gas/liquid ratio; growth rate of permeate flux; yeast/MgSO₄ mixture

纳滤(NF)膜技术是一种压力驱动膜的新型分离技术^[1-6],由于NF膜具有相对稳定和高效的分离性能,广泛应用于化学、制药、环境保护和食品生产等多个领域^[7-10]。在工业应用中,因卷式NF膜模块的致密性而被广泛应用。另外,单位体积的有效膜过滤面积越大,其湍流情况就越好^[11]。而卷式膜组件因其狭窄的通道导致膜界面上的浓差极化现象严重,不易清洗,严重影响其分离性能^[12-14],因此,卷式膜的发展被其内在结构缺陷所限制。在这种情况下,气液两相流能够有效促进系统中的湍流情况,显著提高膜表面的剪切力,有效地控制膜污染且明显提高膜水通量,因此被应用于解决以上问

题^[15-17]。Wibisono等^[18]确定了在水的分离和纯化过程中应用两相流的关键因素。柳琦杰等^[19]报道了卷式NF膜组件通过气-液两相流强化分离MgSO₄水溶液。结果表明,两相流动可以提高卷式NF膜的性能,明显增加无机盐溶液的渗透通量和截留率,通量增加率可达46.68%。

在气液两相流中试设备中分离无机/有机混合物的文献研究很少。笔者采用DK2540F卷式NF膜组件在中试设备上研究了气液两相流对酵母悬浮液和酵母-MgSO₄混合液的分离效果,并系统分析了各种影响因素对气体分离性能的影响,为两相流工艺的工业应用提供参考。

收稿日期:2018-03-12;修回日期:2018-09-17

基金项目:四川省科技厅项目(2015NZ0097)

作者简介:蒋婉莹(1991-),女,硕士研究生,研究方向为膜分离技术,jiangwanying951@163.com;王枢(1972-),男,博士,副教授,研究方向为膜分离,通讯联系人,wone_su@163.com。

1 实验

1.1 材料和设备

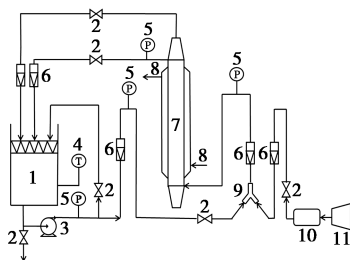
卷式纳滤膜 DK2540F, 美国通用电气公司生产; 七水合硫酸镁, 成都孟德尔科技公司生产; 酵母, 质量分数约为 99.5%, 安琪酵母股份有限公司生产。电子称, TCS-60 kg, 精度为 0.1 g, 上海万众衡器有限公司生产; 秒表, 精度为 0.1 s, 上海秒表厂生产; 电导仪, DDS-307, 上海雷磁仪器有限公司生产; 空气压缩机, V-0.2/12.5, 泉州恒德集团有限公司生产。

1.2 无机和有机试剂的选择

由于 NF 膜有效截留二价离子的特性, 工业测试的标准为硫酸镁溶液截留率的检测。因此, 本研究中选择硫酸镁作为无机测试溶液。酵母是一种重要的生物制品原料, 由平均直径为 4.2 μm 的球形颗粒组成, 不仅可以很好地表征其颗粒特征, 而且去离子水中的酵母颗粒也可均匀分布。更重要的是酵母已广泛应用于各种行业, 如烘焙、酿造、葡萄酒、生物乙醇和制药蛋白制品^[20], 因此选择酵母悬浮液作为有机测试溶液。该实验中使用的无机/有机混合物是七水合硫酸镁溶液和酵母悬浮液。

1.3 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验设备由空气压缩机和空气接收系统、DK2540F 卷式 NF 膜组件、气液分离系统、进料罐、离心泵和其他测量及监测仪器组成。空气连续性进入仪器。空压机系统运行如下: 空压机将 1 MPa 的压缩空气送入空压机储气罐。实验中使用蒸汽分离器和调节器进行除湿, 并将空气压力控制在所需值 (0.4~0.7 MPa)。通过气体流量计将空气速度控制在所需的流速。然后将气体和液体在气液混合点处混合至适当的气液比。在实验过程中, 换热器系统调节并保持工作温度。调整



1—进料罐; 2—阀; 3—离心泵; 4—温度计; 5—压力表;
6—转子流量计; 7—膜组件; 8—换热器; 9—气液混合点;
10—蒸汽分离器和调节器; 11—空气压缩机和接收器

图 1 实验装置

进料流体流速和跨膜压力至所需条件。气液分离系统被设计在进料液回流到进料罐之前自动分离气体/液体混合物, 同时, 防止气泡影响气液比。DK2540F 膜芯的性能参数如表 1 所示。

表 1 DK2540F 膜芯的性能参数

型号	类型	出水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	脱盐率/ %	标准操作 压力/ (kg·cm ⁻²)	最高温 度公差/ ℃	有效 面积/ m ²
DK2540F	NF	2.60	98	4.83~27.54	50	2.2

注: 在 25℃ 和 0.4 MPa 条件下, 对 MgSO₄ 溶液的截留率为 98%。

1.4 实验方法

本实验分为 2 部分, 通过卷式膜组件分别分离酵母悬浮液和酵母/MgSO₄ 混合物。第 1 部分: 将 40 L 一定浓度的酵母悬浮液加入进料罐, 然后运行实验设备。将各实验所需的跨膜压力和温度调整到所需条件, 并将进料流体的流速控制在 1.0 m/s。运行 30 min 后系统处于稳定状态时, 测量随跨膜压力变化的渗透通量。最后在不同气体速度条件下 (1.0~3.5 m/s) 再次测量渗透通量。所有渗透通量均是 3 组数据的平均值。在实验过程中, 料液总是循环运行, 因此酵母悬浮液均匀分布。第二部分: 将 40 L 酵母和一定浓度的 MgSO₄ 混合溶液加入到进料罐中。然后执行与第 1 阶段相同的步骤。此外, 还需测量渗滤液和料液的电导率以计算 MgSO₄ 的截留率。以上所有实验均需将设备运行 30 min 达到稳定后方可进行^[10]。

1.5 纳滤膜截留率和通量增加率的测试

膜截留率用于评价膜分离效果。通过比较通入气体前后膜截留率的变化, 分析气液两相流对膜截留率的强化效果。测量渗滤液和料液的电导率以通过电导率-离子浓度的标准曲线计算溶液的离子浓度。通量增加率 IR 可评估气液两相流对渗透通量的强化效果。截留率 R 和通量增加率 IR 的计算式分别为:

$$R = (1 - C_{out}/C_{in}) \times 100\% \quad (1)$$

$$IR = (J_{gw}/J_w - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_{out} 为渗滤液质量浓度, g/L; C_{in} 为进料质量浓度, g/L; J_w 和 J_{gw} 分别为曝气前后的渗透通量, L/(m²·h)。

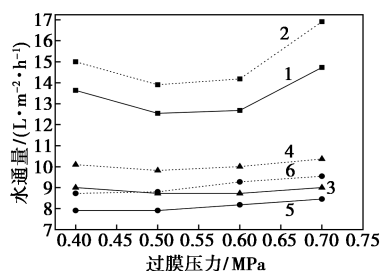
由于酵母的大小远大于约 1~2 nm 的 NF 膜孔径, 则卷式 NF 膜中酵母悬液的截留率为 100%。因此, 在实验第 1 部分, 仅考虑由式 (2) 计算的通量增加率 IR 。在第 2 部分, MgSO₄ 的截留率 R 需要通过

式(1)计算。

2 结果与讨论

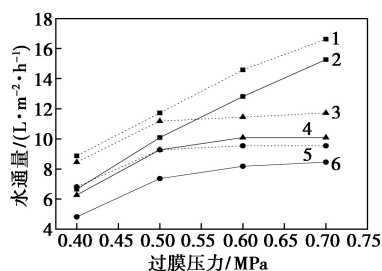
2.1 两相流对膜通量的影响

在进料流体流速为 1.0 m/s、空气流速为 3.5 m/s 的条件下,卷式 NF 膜分离不同质量分数的酵母悬浮液及其混合物的结果如图 2、图 3 所示。由图 2、图 3 可以看出,无论是酵母悬浮液还是混合物,在曝气后渗透通量在任何质量分数下都明显提高。气液两相流对渗透通量有明显的增强作用。这是因为气泡沿平行膜表面移动形成的剪切力会降低膜表面的离子浓度,从而削弱浓差极化层,因此,渗透通量显著增加。然而,通量的绝对值不能准确地表明随着跨膜压力和气液比的变化气液两相流的增强效应,所以后期实验用相对值来分析增强效果。



1—1 wt%, no air; 2—1 wt%, air velocity=3.5 m/s;
3—2 wt%, no air; 4—2 wt%, air velocity=3.5 m/s;
5—3 wt%, no air; 6—3 wt%, air velocity=3.5 m/s

图 2 卷式 NF 膜分离不同质量分数的酵母悬浮液结果(质量分数分别为 1%、2%、3%的酵母悬浮液)



1—1 wt%, no air; 2—1 wt%, air velocity=3.5 m/s;
3—2 wt%, no air; 4—2 wt%, air velocity=3.5 m/s;
5—3 wt%, no air; 6—3 wt%, air velocity=3.5 m/s

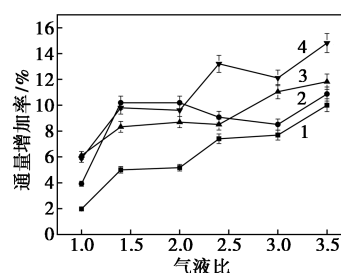
图 3 卷式 NF 膜分离混合物结果

(30 g·L⁻¹ MgSO₄±1%、2%、3%酵母悬浮液)

2.2 气液两相流卷式纳滤膜分离酵母悬浮液

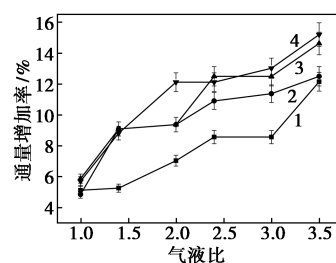
气液比反映气泡在膜组件中的流动形态,气泡的不同流动形态决定了剪切力的大小和取向,可以有效地影响气液两相流的增强效果。实验中跨膜压

力为 0.4、0.5、0.6 MPa 和 0.7 MPa,气液比为 1.0~3.5,料液温度为 34℃。酵母悬浮液的质量分数分别为 1%、2%、3%及混合溶液时,气液比对膜通量的影响分别如图 4~图 6 所示。由图 4~图 6 可以看出,随着跨膜压力的增大,膜通量明显增加。气液比越大,气液两相流增强效果越好。这是由于气液比越大,气泡越多,更有效地削弱浓差极化层。此外,与无空气相比,在相同的气液比条件下,特别是气液比大于 3 时,压力越大,渗透通量增加率越大,增强效果越明显。随着酵母悬浮液质量分数的增加,通量增加率趋于稳定,且在气液比为 3.5,跨膜压为



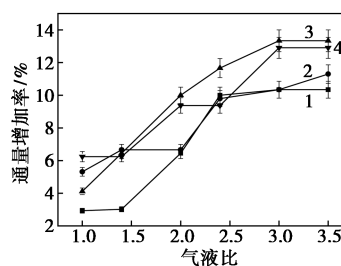
1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

图 4 气液比对膜通量的影响
(酵母悬浮液的质量分数为 1%)



1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

图 5 气液比对膜通量的影响
(酵母悬浮液的质量分数为 2%)



1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

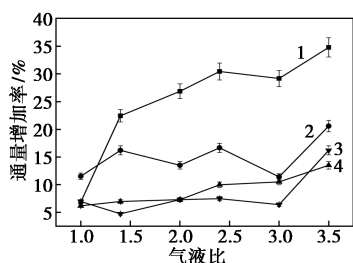
图 6 气液比对膜通量的影响
(酵母悬浮液的质量分数为 3%)

0.7 MPa 条件下, 通量增加率超过 15%。结果表明, 气液两相流可有效提高卷式 NF 膜的分离性能。气液比越高, 跨膜压越大, 增强效果越好。由于分离酵母悬浮液中跨膜压力的增加, 浓差极化不能阻止通量增加率的增加。因为气泡表面的剪切力减少气液两相流过程中的浓差极化层, 膜污染将得到有效控制。酵母是一种较大的颗粒, 因此由酵母组成的浓差极化层更容易被气泡削弱, 防止严重的膜污染。在分离酵母悬浮液的过程中, 在通入气体条件下, 渗透通量随着跨膜压力的增加而增加。结果与 wibisono 等^[9]的研究结果一致。因此, 在更高的跨膜压力和更高的气液比条件下更易分离酵母悬浮液。

2.3 气液两相流卷式纳滤膜分离酵母—MgSO₄混合液

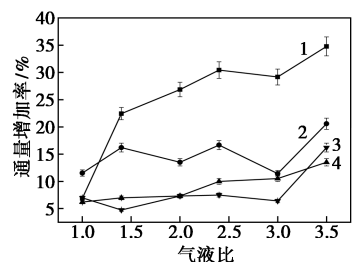
2.3.1 气液两相流对通量增加率的影响

在料液温度为 34℃, 混合溶液中硫酸镁质量浓度为 30 g/L, 酵母悬浮液质量分数分别为 1%、2% 和 3%, 跨膜压力为 0.4 ~ 0.7 MPa 时。气液比对 MgSO₄ 和酵母组成的混合溶液膜能量的影响分别如图 7~图 9 所示。气液比对通量增加率的影响如图 10 所示。由图 7~图 9 可以看出, 跨膜压力越高, 通量增加率越低, 该结果与酵母悬浮液正好相反。这



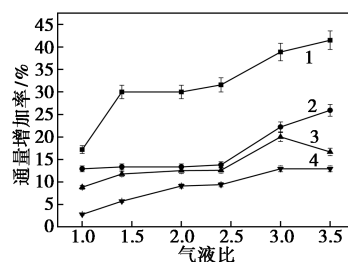
1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

图 7 气液比对膜通量的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 1% 的酵母悬浮液)



1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

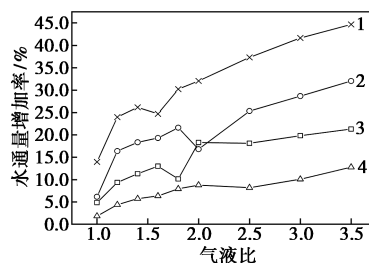
图 8 气液比对膜通量的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 2% 的酵母悬浮液)



1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

图 9 气液比对膜通量的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 3% 的酵母悬浮液)

是因为靠近膜的离子会随着跨膜压力的增加而变得更紧密, 导致膜表面上的浓差极化层变厚而膜污染增加。且气泡表面的剪切力不能减小浓差极化层, 导致通量增加率随着跨膜压力的增加而降低。但随着气液比的增加, 通量的增加率总体上提高。在通入气体的情况下, 渗透通量显著增加, 而气液比越高, 增强效果越好。因此, 对于酵母/MgSO₄ 混合物, 在跨膜压力较低和气体速度较高的情况下, 气液两相流的增强效果会更好。由图 9 可以看出, 跨膜压力为 0.4 MPa、气液比为 3.5 时, 通量增加率超过 40%。另外, 将图 10 与图 4~图 6 和图 7~图 9 相比, 气液比对 MgSO₄ 溶液通量增加率有显著影响。因此, 随着气液比的增加, 通量增加率增加。在 TMP 为 0.4 MPa、气液比为 3.5 时, 通量增加率最大, 达 46.68%。但对酵母悬浮液, 渗透通量的最大增加率仅为 14%~15%。对于混合物, 在跨膜压力为 0.4 MPa 和气液比为 3.5 时, 通量增加率可超过 40%。因此, 在通入气体条件下, 气液比大于 3 时, 由于通量增加率的影响, 起主要作用的是 MgSO₄ 溶液, 而不是酵母悬浮液。



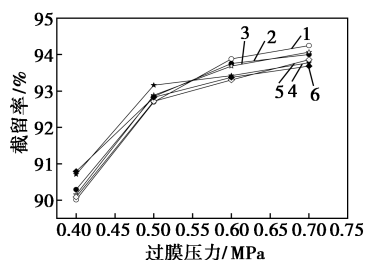
1—TMP=0.4 MPa; 2—TMP=0.5 MPa; 3—TMP=0.6 MPa;
4—TMP=0.7 MPa

图 10 气液比对通量增加率的影响
(MgSO₄ 的浓度为 30 g/L)

2.3.2 过膜压力对 MgSO₄ 截留率的影响

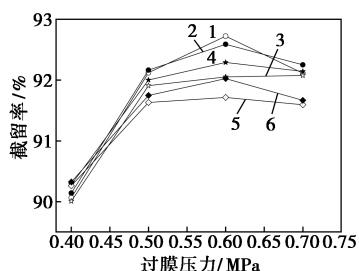
在混合溶液中 MgSO₄ 质量浓度为 30 g/L, 酵母

悬浮液质量分数分别为 1%、2% 和 3% 时,过膜压力对截留率的影响分别如图 11~图 13 所示。从图 11~图 13 可以看出,无论是否通入气体,在确定的跨膜压力下膜的截留率都是稳定的。此外,随着跨膜压力的增加,截留率先上升后下降。这是因为跨膜压力高使渗透液中 H₂O 分子数量增加,导致渗透离子浓度降低而截留率增加。但当跨膜压力达到一定程度时,膜的浓差极化会更严重,会堵塞膜孔,导致



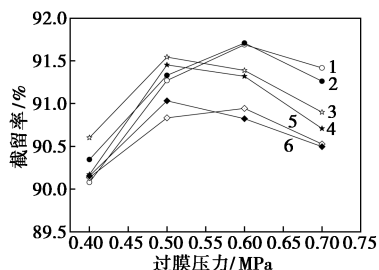
1—no air, air velocity = 1.0 m/s; 2—air, air velocity = 1.0 m/s;
3—no air, air velocity = 2.0 m/s; 4—air, air velocity = 2.0 m/s;
5—no air, air velocity = 3.0 m/s; 6—air, air velocity = 3.0 m/s

图 11 过膜压力对截留率的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 1% 酵母悬浮液)



1—no air, air velocity = 1.0 m/s; 2—air, air velocity = 1.0 m/s;
3—no air, air velocity = 2.0 m/s; 4—air, air velocity = 2.0 m/s;
5—no air, air velocity = 3.0 m/s; 6—air, air velocity = 3.0 m/s

图 12 过膜压力对截留率的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 2% 的酵母悬浮液)



1—no air, air velocity = 1.0 m/s; 2—air, air velocity = 1.0 m/s;
3—no air, air velocity = 2.0 m/s; 4—air, air velocity = 2.0 m/s;
5—no air, air velocity = 3.0 m/s; 6—air, air velocity = 3.0 m/s

图 13 过膜压力对截留率的影响
(30 g/L MgSO₄ 和 3% 的酵母悬浮液)

渗透物中 H₂O 分子数量减少从而降低截留率。本次实验中的截留率从 90.01% 提高到 94.25%。

3 结论

在不同的跨膜压力和气液比条件下,通过气液两相流动过程将不同质量分数的酵母悬浮液在卷式 NF 膜系统中分离出来。气液两相流可明显提高渗透通量。当 TMP 为 0.7 MPa、气液比为 3.5、酵母悬浮液质量分数为 2% 时,通量增加率可达 15.2%。在较高的跨膜压力和气液比条件下,渗透通量的增加更为明显。因此,酵母悬浮液在更高的跨膜压力和更大的气液比下更易被分离。

气液两相流在不同质量分数、跨膜压力和气液比条件下有效地提高了酵母/MgSO₄ 混合物的渗透通量。通入气体后可明显提高卷式 NF 膜的渗透通量。在较低的跨膜压力和较高的气液比下,通量的增强更为显著。在跨膜压力为 0.4 MPa、气液比为 3.5 时,通量增加率可达 41.5%。此外,在通入气体条件下,气液比大于 3 时,对通量增加率影响起主要作用是 MgSO₄ 溶液,而不是混合物中的酵母悬浮液。在分离混合物期间,MgSO₄ 的截留率均保持在 90% 以上。膜的截留率随跨膜压力的增加先上升后下降。因此,跨膜压力会显著影响膜的截留率。

气液两相流能有效提高卷式 NF 膜的渗透通量,有效分离有机和无机/有机混合物。在任何情况下,气液比越高,渗透通量的强化效果越好。在使用气体喷射条件下,卷式 NF 膜的截留率保持稳定。

参考文献

- [1] Eriksson P. Water and salt transport through two types of polyamide composite membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1988, 36: 297-313.
- [2] In-Chul Kim, Kew-Ho Lee, Tae-Moon Tak. Preparation and characterization of integrally skinned uncharged polyetherimide asymmetric nanofiltration membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2001, 183(2): 235-247.
- [3] Petersen R J. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1993, 83(1): 81-150.
- [4] Raman L P, Cheryna M, Rajagopalan N. Consider nanofiltration for membrane separations[J]. Chemical Engineering Progress; (United States), 1994, 90; 3(3): 68-74.
- [5] Seungkwan Hong, Menachem Elimelech. Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1997, 132(2): 159-181.

(下转第 154 页)

实验中将油和水按体积比 1:19 进行配制,可根据需要加入表面活性剂或电解质等。用搅拌桨于 3 000 r/min 下搅拌 10 min,静置 150 min。静置后,乳状液会分成 2 层,抽去浮在上部的油层,将下部乳状液层取出装入电破乳装置中进行破乳实验。其中,下部乳液层的含油体积分数为 0.45% 左右,含油质量浓度为 3 000 mg/L 左右,粒径小于 12 μm ,可长时间保持稳定,因此满足本实验的要求。

1.3 实验装置和实验方法

破乳实验装置是一个尺寸为 110 mm×51 mm×60 mm 的有机玻璃方槽,内部固定矩形平板钛电极,其中阴极为纯钛,阳极表面镀铱,极板间距为 50 mm。将制备好的乳状液倾入装置中,液面高度为 100 mm。通电后,记录各分层的高度位置和电流变化情况。破乳前后乳状液中油滴的尺寸分布通过显微镜进行观察。破乳后的含油质量浓度通过紫外分光光度法测量。

2 实验结果和讨论

2.1 O/W 型乳状液在直流电场中破乳过程

利用去离子水和液压油配置 O/W 型乳状液。

(上接第 152 页)

- [6] Wang Xiaolin, Toshinori Tsuru, Shin-ichi Nakao, *et al.* The electrostatic and steric-hindrance model for the transport of charged solutes through nanofiltration membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 1997, 135(97): 19-32.
- [7] Hilal N, Al-Zoubi H, Darwish N A, *et al.* A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy[J]. *Desalination*, 2004, 170(3): 281-308.
- [8] Zhao J, Du R. Properties of poly(*N,N*-dimethylaminoethyl methacrylate)/polysulfone positively charged composite nanofiltration membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 239(2): 183-188.
- [9] Song Y, Liu F, Sun B. Preparation, Characterization, and application of Thin film composite nanofiltration membranes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 95(5): 1251-1261.
- [10] Zhang Z, Wang S, Chen H, *et al.* Preparation of polyamide membranes with improved chlorine resistance by bis-2,6-*N,N*-(2-hydroxyethyl) diaminotoluene and trimesoyl chloride[J]. *Desalination*, 2013, 331(24): 16-25.
- [11] Vrouwenvelder J S, Da Graf, Kruijthof J C, *et al.* Biofouling of spiral wound nanofiltration and reverse osmosis membranes: A feed spacer problem[J]. *Water Research*, 2009, 43(3): 583-594.
- [12] Xu Y, Peng X, Tang C Y, *et al.* Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module[J]. *Journal of Mem-*

brane Science, 2010, 348(1-2): 298-309.

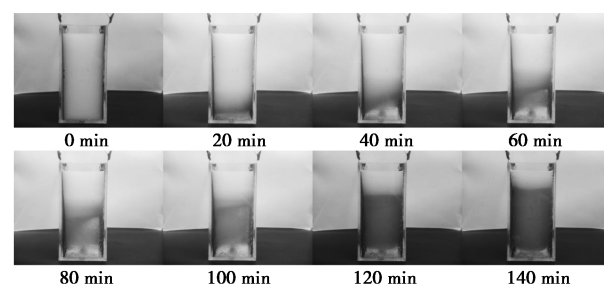


图 1 10 V 电压下 O/W 型乳状液的电破乳过程

从图 1 可以看出,施加电压后,乳状液会分为 3 层。底部为透亮水层,其中阳极一侧的清液层高度大于阴极侧。中间为过渡层,上层为浓乳状液层,中间层与上层的浓度差随时间的增加而增大。在 80 min 时,中间层阴极侧的油滴因浓度差作用向清液层阳极侧横向扩散,清液层逐渐消失。上乳液层的厚度不断地减小,并最终稳定不变。实验结果表明,完整的低浓度水包油型乳状液的电破乳过程可分为 3 个阶段:清液层阶段、横向扩散阶段和上升-稳定阶段。

- [13] McCutcheon J R, Elimelech M. Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 284: 237-247.
- [14] Cornelissen E R, Rebour L, Kooij D V D, *et al.* Optimization of air/water cleaning (AWC) in spiral wound elements[J]. *Desalination*, 2009, 236(1-3): 266-272.
- [15] Cui Z F, Wright K I T. Gas liquid two phase cross-flow ultrafiltration of BSA and dextran solutions[J]. *Journal of Membrane Science*, 1994, 90(94): 183-189.
- [16] Chang I S, Sj J. Domestic wastewater treatment by a submerged MBR (membrane bio-reactor) with enhanced air sparging[J]. *Water Science & Technology*, 2003, 47(12): 149-154.
- [17] Wibisono Y, Kemperman A J B, Meer W G J V D, *et al.* Two-phase flow in membrane processes: A technology with a future[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 453(3): 566-602.
- [18] Wibisono Y, Kemperman A J B, Meer W G J V D, *et al.* Two-phase flow in membrane processes: A technology with a future[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 453(3): 566-602.
- [19] Liu Q, Wang S, Guo Z, *et al.* Enhancement of spiral nanofiltration membranes using gas sparging: Application to MgSO_4 solution[J]. *Ciesc Journal*, 2012, 63(12): 438-1157.
- [20] Zaky A S, Tucker G A, Daw Z Y, *et al.* Marine yeast isolation and industrial application[J]. *Fems Yeast Research*, 2015, 14(6): 813-825. ■