

基于精密超滤法的废切削液处理与回用研究

杨振生^{1,2*}, 冯立建^{1,2}, 赵 改^{1,2}

(1. 河北工业大学化工学院, 天津 300130;

2. 化工节能过程集成与资源利用国家地方联合工程实验室, 天津 300130)

摘要:采用自制截留分子质量为 3 000 Da 的 PES/TiO₂ 杂化精密超滤膜处理废切削液, 用油滴粒径分布与红外光谱分析比较了废切削液处理前后的变化, 探讨回配切削液中渗透液所占体积分数对理化性能和稳定性的影响, 依据渗透通量、化学需氧量(COD)变化、纯水通量恢复率选择了较优的操作参数和膜清洗剂配方。实验结果表明, 该超滤膜对 0.02 μm 以上的乳化油滴、胶体、高分子质量物质截留, 低分子质量的有效成分聚乙二醇滤过。由切削原液(10%)、渗透液(10%~50%)和蒸馏水配制的回配切削液具有优秀的理化性能和稳定性。确定了较优的操作条件: 压差为 0.4 MPa、料液流速为 1.0 m/s, 此时渗透通量达 69 L/(m²·h), COD 去除率达 89.7%; 十二烷基磺酸钠+异戊醇、盐酸两步清洗超滤膜, 纯水通量恢复率达 94.5%; 此条件下废切削液的回收率达 85.71%。

关键词:超滤; 废切削液; 处理; 回用; 膜污染; 清洗

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)11-0158-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.11.034

Treatment and reuse of waste cutting fluid based on tight ultrafiltration method

YANG Zhen-sheng^{1,2*}, FENG Li-jian^{1,2}, ZHAO Gai^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory for Energy Conservation of Chemical Process Integration and Resources Utilization, Tianjin 300130, China)

Abstract: Waste cutting fluid is treated with a self-made PES/TiO₂ hybridized tight ultrafiltration membrane that presents a molecular weight cut-off of 3 000 Da. The change of waste cutting fluids before and after the treatment is analyzed by the oil droplet size distribution method and Fourier transform infrared spectrum. The influence of the volume fraction of permeation fluid in recycled cutting fluid on physical and chemical properties, and stability of recycled cutting fluid is discussed. Optimal operation parameters and membrane cleaning agent formulations are selected according to the permeability flux, chemical oxygen demand (COD) changes and pure water flux recovery rate, respectively. Results show that the tight PES/TiO₂ hybridized ultrafiltration membrane can effectively intercept the emulsified oil droplets with a size over 0.02 μm, colloids and polymer mass substances in waste cutting fluids. The low molecular weight active ingredient polyethylene glycol can permeate through membrane. The recycled cutting fluid formed by 10% of original cutting fluid, 10%~50% of permeation and distilled water exhibits excellent physicochemical properties and stability, which can be used in machine cutting. The permeate flux of waste cutting fluid can reach 69 L/(m²·h) and COD removal rate can reach 89.7% under the optimal operating parameters such as pressure at 0.4 MPa and feed speed at 1.0 m·s⁻¹. After being cleaned by sodium dodecyl sulfate/isoprene and hydrochloric acid in two steps, the permeate flux of the membrane can recover by 94.5%. Under the optimal conditions, the reuse rate of waste cutting fluids reaches 85.71%.

Key words: ultra-filtration; waste cutting fluid; treatment; reuse; membrane fouling; cleaning

废切削液中有污染油脂、固体颗粒、胶体和高分子质量物质, 但是废切削液中有 80% 的有效成分并没有变质, 如低分子质量的表面活性剂、防腐剂、杀菌剂等^[1-2], 如果能够将小分子形式存在的有效成分回配新切削液, 较之排放更为恰当。

传统技术难以处理油滴粒径小于 20 μm 的废切削液, 在施加电场或添加化学物质使乳化液破乳时, 通常涉及能量消耗和二次污染^[3-4], 而超滤技术

具有更高的效率和更低的能耗, 在废切削液处理中的应用越来越广泛^[5-7]。

Hilal 等^[8]以截留分子质量 100 kDa 的聚偏氟乙烯超滤膜过滤含油 5% 的切削液, 结果发现渗透液中较高的油含量影响回配切削液的稳定性。因此, 需要更小截留分子质量的膜来过滤切削液。Chen 等^[9]用截留分子质量 67 kDa 的聚醚砜超滤膜过滤平均油滴粒径为 2.1 μm 的废切削液, 发现膜

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-09-18

作者简介: 杨振生(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为膜科学与技术、环境化学工程, 通讯联系人, zsyangford@163.com。

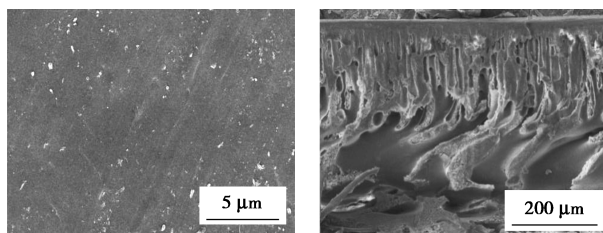
对油的截留率达 100%。Chakrabarty 等^[7]用更小截留分子质量 30 kDa 聚砜超滤膜过滤平均油滴粒径为 0.34 μm 的废切削液,发现膜对油截留率达 90%,且透过水中的油的质量浓度低于 10 mg/L。然而,Chakrabarty 等^[6]用截留分子质量 30 kDa 聚砜超滤膜过滤油滴平均粒径为 0.1 μm 的废切削液,油截留率低于 80%。说明要想更有效地分离油滴粒径小于 0.1 μm 的废乳化切削液,需要使用截留分子质量更小的超滤膜。因此,孔径为 2~10 nm (截留分子质量在 1~15 kDa) 的精密超滤膜更适合截留粒径小于 0.1 μm 的乳化油滴^[10-11],以有效降低渗透水中的油含量,并将混于油滴中的污染物一并去除。但未见精密超滤膜处理废切削液的研究报道。为此,用自制的精密 PES/TiO₂ 杂化超滤膜处理废切削液,以期有效去除粒径小于 0.1 μm 的油滴及变质的切削液功能成分,为废切削液处理与回用提供一种新途径。

1 实验材料和方法

1.1 材料

PRIME7104-I 微乳化铝加工原液,天津普罗米化工有限公司生产;切削机床运行半年左右的待处理废微乳化铝加工液(COD 为 96 873 mg/L);聚醚砜微孔膜,平均孔径为 0.22 μm ,海盐县新东方塑化科技有限公司生产。

PES/TiO₂ 杂化超滤膜表面和断面的电镜图如图 1 所示。对不同分子质量聚乙二醇的截留性能如图 2 所示。膜对聚乙二醇 3 000 Da 的截留率为



(a) 表面电镜图

(b) 断面电镜图

图 1 PES/TiO₂ 杂化超滤膜结构

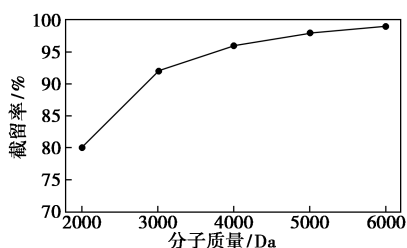


图 2 对不同分子质量聚乙二醇的截留性能

92%,则截留分子质量为 3 kDa (当量直径为 3 nm),过膜压差为 0.4 MPa 下纯水通量为 226.9 L/(m²·h),属于精密超滤膜。

1.2 分析测试仪器

纳米粒度及电位分析仪, Nano-ZS90 型,英国马尔文仪器有限公司生产;傅里叶红外光谱仪 (FT-IR), VECTOR22 型,德国 Bruker 公司生产;化学需氧量 (COD) 快速测定仪, 5B-3C (V8) 型,兰州莲花科技有限公司生产;扫描电子显微镜 (SEM), S-4800 型, HITACHI 公司生产。

1.3 废切削液处理前后油滴粒径分析与红外表征

(1) 用微滤膜对废切削液进行预处理,除去其中的金属颗粒、灰尘等物质。在过膜压差为 0.4 MPa、料液流速 1.0 m/s 的条件下,用精密 PES/TiO₂ 杂化超滤膜对预处理后的废切削液进行过滤操作(膜有效面积为 13.14 cm²,原液槽外配循环冷却水以保持温度恒定),如图 3 所示。对处理前、后的废切削液进行油滴粒径分析。

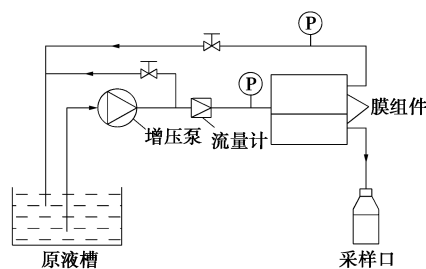


图 3 超滤操作装置示意图

(2) 将新切削液(切削原液加蒸馏水配成质量分数为 10% 的切削液)、废切削液、超滤渗透液各 10 mL 样品于 105℃ 烘箱中烘干,后利用 FT-IR 对干燥好的样品进行分析检测。

1.4 切削液的回配及性能测定

将切削原液、渗透液和蒸馏水按不同的体积比混合配制成 6 组切削液,按照 GB/T 6144—2010《合成切削液》的技术要求,检测透明度、pH、消泡性、对机床油漆的适应性、腐蚀性、防锈性和稳定性,同时检测切削液的油珠粒径分布。

1.5 较优操作参数的确定

微滤预处理后的废切削液仍含有高 COD 的变质功能成分(油性剂、防锈剂、表面活性剂等)^[12],以 COD 去除率表达超滤膜对上述杂质的截留能力。恒温下,超滤装置运行 15 min 后,测定不同料液流速、过膜压差下的渗透通量及渗透液 COD 值,确定出较优的料液流速与过膜压差。

1.6 清洗剂选择与废切削液回收率测定

(1) 从强碱、强酸、螯合剂、表面活性剂 4 种类型的清洗剂中分别选出 1 种, 即氢氧化钠、盐酸、柠檬酸各配置成 1% 的水溶液, 十二烷基磺酸钠配置成 1% 的异戊醇溶液, 将上述 4 种清洗剂两两组合成 6 种清洗剂组合。将膜倒置, 进行反清洗操作 30 min, 根据纯水通量恢复率筛选出较优的清洗剂组合。

(2) 依据上述确定的较优操作参数, 对原液槽中 1 000 mL 预处理的废切削液进行过滤操作, 当渗透通量减少至 10%~15% (时间约为 0.5 h) 时停止过滤, 用较优清洗剂组合对膜反清洗 0.5 h, 过滤操作和反清洗操作交叉进行, 直到渗透通量小于 10 L/(m²·h) 时停止超滤过程, 记录渗透液总体积 (V₂), 废切削液回收率计算式为:

$$\eta = (V_2/V_1) \times 100\% \quad (1)$$

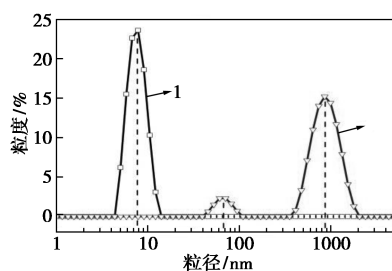
式中: η 为废水的回收率, %; V₁ 为切削废水的体积, L; V₂ 为超滤渗透液的体积, L。

2 实验结果与讨论

2.1 废切削液处理前后油滴粒径分析与红外表征

2.1.1 油滴粒径分析

油滴粒径分布如图 4 所示。由图 4 可以看出, 废切削液的油滴粒径主要分布在 400~3 000 nm 范围内, 呈微米级分布; 超滤渗透液的油滴粒径分布在 4~20 nm, 呈纳米级分布, 属热力学稳定体系^[6]。说明渗透液中的油污质量分数明显低于废切削液, PES/TiO₂ 杂化超滤膜起到了脱除大部分油污的作用。

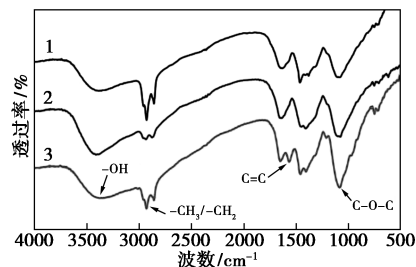


1—超滤渗透液; 2—废切削液

图 4 油滴粒径分布

2.1.2 红外光谱分析

废切削液、渗透液、新切削液的红外光谱如图 5 所示。



1—废切削液; 2—渗透液; 3—新切削液

图 5 废切削液、渗透液、新切削液的红外光谱

由图 5 谱线 3 与谱线 1 的对比可知, 谱线 1 在 2 928 cm⁻¹ 和 2 857 cm⁻¹ 处的 —CH₂、—CH₃ 键伸缩振动峰强增加, 1 563 cm⁻¹ 处 C=C 及 1 073 cm⁻¹ 处 C—O—C 的伸缩振动峰强都相应减弱, 说明新切削液中的有效成分经过复杂切削环境生成了高分子质量饱和烷烃类物质。由图 5 谱线 1 与谱线 2 的对比可知, 在 2 928 cm⁻¹ 和 2 857 cm⁻¹ 处 —CH₂ 和 —CH₃ 键伸缩振动峰强减弱, 说明经过精密超滤膜过滤, 生成的高分子质量饱和烷烃类物质被有效截留。图 5 中谱线 2 在 3 367 cm⁻¹ 处宽而强的谱带 —OH 键伸缩振动, 说明渗透液中含有醇类物质, 为新切削液的低分子质量有效成分润滑剂聚乙二醇, 回用时起润滑作用。

2.2 切削液的回配及性能测定

2.2.1 回配切削液的理化性能

回配切削液的理化性能如表 1 所示。由表 1 可知, 随着回配切削液中渗透液体积分数的增加, 回配切削液的透明度和 pH 逐渐减小, 油珠粒径和 COD 逐渐增大, 这是由于回配切削液中的油质量分数和有机物质量分数增加所致。渗透液体积分数在 0~50% 时, 回配切削液的消泡性仍在标准范围, 但当渗透液体积分数超过 70% 时, 消泡性不符合 GB/T 6144—2010《合成切削液》的要求, 这是由于回配切削液中渗透液的体积分数升高, 表面活性剂的质量分数增多, 导致消泡性减弱。因此, 渗透液的体积分数为 10%~50% 时符合切削液性能指标。

表 1 切削液的理化性能

切削液	V(切削原液):V(渗透液):V(蒸馏水)						质量指标
	1:0:9	1:1:8	1:3:6	1:5:4	1:7:2	1:9:0	
透明度	透明	透明	透明	透明	半透明	半透明	透明/半透明
pH	9.05	9.03	8.94	8.84	8.76	8.68	8.0~10.0
消泡性/(mL·10 min ⁻¹)	<2	<2	<2	<2	3	4	<2

续表

切削液	V(切削原液):V(渗透液):V(蒸馏水)						质量指标
	1:0:9	1:1:8	1:3:6	1:5:4	1:7:2	1:9:0	
对机油油漆的适应性	合格	合格	合格	合格	合格	合格	允许轻微失光和变色,但不允许油漆起泡、开裂和脱落
油珠平均粒径 $d/\mu\text{m}$	0.106	0.110	0.121	0.134	0.152	0.173	0.1~0.3
COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	48825	51135	53502	55623	57306	59450	—
防锈实验[(35 ± 2) $^{\circ}\text{C}$]							
铸铁,单片,24 h	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	五滴全无锈
铸铁,叠片,8 h	合格	合格	合格	合格	合格	合格	无锈蚀或明显叠印
腐蚀实验[(55 ± 2) $^{\circ}\text{C}$]							
铸铁,24 h	合格	合格	合格	合格	合格	合格	无锈,光泽如新
紫铜,8 h	合格	合格	合格	合格	合格	合格	无锈,光泽如新
LY12 铝	合格	合格	合格	合格	合格	合格	无锈,光泽如新

2.2.2 稳定性

切削液稳定性实验结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,回配切削液中渗透液体积分数在 10%~50%时,回配切削液无析油和析皂,用 5 V 钨丝灯泡照射瓶底,从上可观察到回配切削液的外观为透明或半透明状态;当切削原液:渗透液:蒸馏水的体积比为 1:9:0 时,切削液会出现浑浊、分层的现象。这是因为回配切削液中缺少蒸馏水,导致渗透液中的水不足以达到正常需求范围,同时切削原液中乳化剂相对于总体积减少,使油滴容易聚集。结果表明,渗透液体积分数在 10%~50%时达到质量要求,具有良好的稳定性。



图 6 切削液稳定性实验结果

2.3 较优操作参数的确定

2.3.1 操作压差对渗透通量和 COD 的影响

操作压差对渗透通量和 COD 值的影响如图 7 所示。

由图 7 可以看出,随着操作压差的增加,渗透通量先增加后趋于平稳,这是因为渗透通量正比于操作压差,但同时边界层阻力也增加,继续提高的压力主要来克服边界层阻力。随着操作压差的升高,

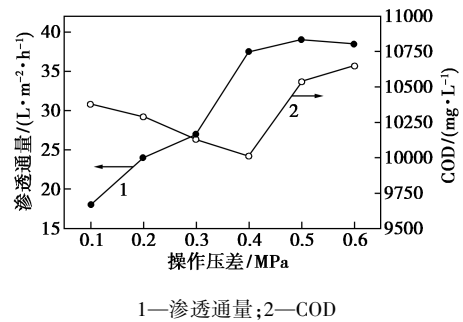


图 7 操作压力对渗透通量和 COD 值的影响

COD 值先减小后增大。先减小是由于凝胶层的生成,后增大是由于部分油粒被挤压变形而进入膜孔甚至透过膜造成的。

2.3.2 料液流速对渗透通量和 COD 的影响

料液流速对渗透通量和 COD 值的影响如图 8 所示。

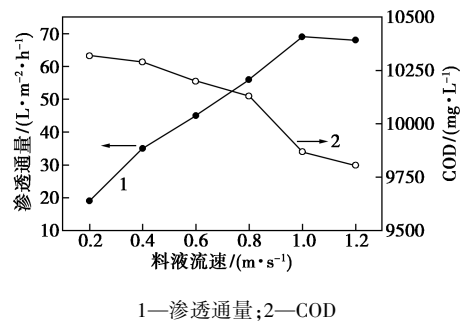


图 8 料液流速对渗透通量和 COD 值的影响

由图 8 可以看出,随着料液流速的增大,渗透通量迅速增大,因为高的料液流速有效减轻了膜表面附近的浓差极化。随着料液流速增大,COD 值减小,这是因为膜表面的扰动增大,污染物在膜表面的吸

附和沉积减弱,带来了渗透液中污染物含量的减少。

在操作压差为 0.4 MPa 和料液流速为 1.0 m/s 的最佳条件下,渗透通量达 $69 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, COD 去除率达 89.7%。

2.4 清洗剂选择与废切削液回收率测定

2.4.1 较优清洗剂的筛选

不同清洗方式的纯水通量恢复率如表 2 所示。由表 2 可以看出,十二烷基磺酸钠+异戊醇和盐酸对污染膜进行清洗后,污染膜的纯水通量恢复率最高,达 95.2%。清洗前后污染膜的 SEM 图如图 9 所示。由图 9 可以看出,清洗后膜表面和膜孔内吸附和沉积的污染物减少,这是由于十二烷基磺酸钠表面活性剂将膜表面和膜孔内较大的油粒细化成较小的油粒,从而被水带走,异戊醇(可以与油粒发生皂化反应)再次使恢复率提高,最后盐酸与酯类发生反应,生成易溶于水的醇类和有机酸,因此十二烷基磺酸钠+异戊醇和盐酸组合可有效清除膜表面及膜孔内的污染物。

表 2 不同清洗方式的纯水通量恢复率

清洗方式	纯水通量恢复率/%
十二烷基磺酸钠、异戊醇、盐酸	95.2
十二烷基磺酸钠、异戊醇、柠檬酸	92.5
氢氧化钠、盐酸	92.4
氢氧化钠、柠檬酸	91.2
氢氧化钠、十二烷基磺酸钠、异戊醇	90.1
盐酸、柠檬酸	79.5

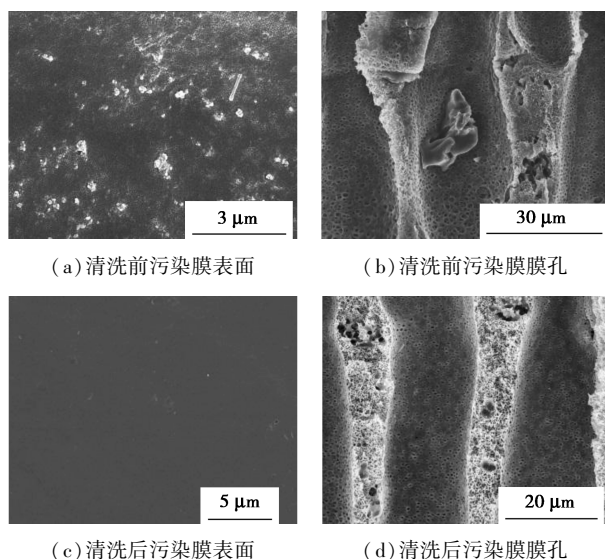


图 9 清洗前后污染膜的 SEM 图

2.4.2 废切削液回收率测定

渗透通量随时间的变化情况如图 10 所示。

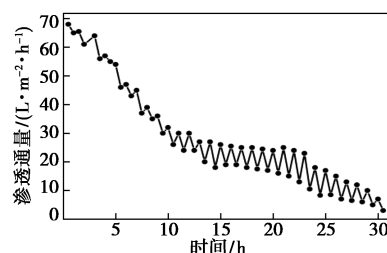


图 10 渗透通量随时间的变化

由图 10 可以看出,随着操作时间的延长,渗透通量逐渐降低,这是因为随着过滤过程的进行,膜表面侧料液浓度逐渐增大,导致浓差极化影响加剧;同时,随着料液黏度的逐渐升高,膜污染频率增加,最终导致膜的渗透通量降低。当操作到第 29 h 时,膜的渗透通量为 $8.33 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 低于 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 由于通量过小,选择停止操作,共得到 875.12 mL 渗透液,由此计算得废切削液的回收率为 87.51%。

3 结论

(1) 利用截留分子质量为 3 000 Da 的精细 PES/TiO₂ 杂化超滤膜可有效截留废切削液中油脂和其他变质的有效成分,同时废切削液中的低分子质量有效成分(如聚乙二醇)透过了膜,在渗透液回用时起到润滑的作用。

(2) 由切削原液(10%)、渗透液(10%~50%)和蒸馏水配制的回配切削液具有良好的理化性能和稳定性,符合 GB/T 6144—2010《合成切削液》的技术要求。

(3) 由渗透通量和 COD 值确定最优操作参数为:操作压差为 0.4 MPa,料液流速为 1.0 m/s。由纯水通量恢复率确定最佳清洗剂组合为十二烷基磺酸钠+异戊醇和盐酸,在上述操作条件下,1 000 mL 废切削液的回收率达 87.51%。

参考文献

- [1] 陆晓千,余志荣,陆斌.超滤法处理切削乳化液废水的研究与应用[J].工业水处理,1999,(5):28-29.
- [2] 废金属切削液中有效成分的提取[D].长春:长春工业大学,2015.
- [3] Zhu Y, Dong W, Lei J, et al. Recent progress in developing advanced membranes for emulsified oil | [sol] | water separation [J].Npg Asia Materials,2014,6(5):e101.
- [4] Kobya M, Giftci C, Bayramoglu M, et al. Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation [J]. Separation & Purification Technology, 2008, 60(3): 285-291.

(下转第 167 页)

- Organic Process Research & Development, 2016, 20(9): 1647–1653.
- [3] Onoe T, Iwamoto S, Inoue M. Synthesis and activity of the Pt catalyst supported on CNT [J]. Catalysis Communications, 2007, 8(4): 701–706.
- [4] Yamamoto T, Shimada A, Ohmoto T, *et al.* Olfactory study on optically active citronellyl derivatives [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2004, 19(2): 121–133.
- [5] Chapuis C, Barthe M, Laumer J Y D. Synthesis of citronellal by RhI-catalysed asymmetric isomerization of *N,N*-diethyl-substituted geranyl- and nerylamines or geraniol and nerol in the presence of chiral diphosphino ligands, under homogeneous and supported conditions [J]. Helvetica Chimica Acta, 2001, 84(1): 230–242.
- [6] Tani K, Yamagata T, Tatsumo Y, *et al.* Bis[(*R*)-(+) -binap] rhodium (I) perchlorate, a highly efficient catalyst for the asymmetric isomerization of allylamines [J]. Chemischer Informationsdienst, 1985, 24(3): 217–219.
- [7] Tani K, Yamagata T, Akutagawa S, *et al.* Metal-assisted terpenoid synthesis. 7. Highly enantioselective isomerization of prochiral allylamines catalyzed by chiral diphosphine rhodium (I) complexes. Preparation of optically active enamines [J]. Journal of America Chemistry Society, 1984, 106(18): 5208–5217.
- [8] Gao K, Yu C B, Wang D S, *et al.* Iridium-catalyzed asymmetric hydrogenation of 3-substituted 2H-1, 4-benzoxazines [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2012, 354(2–3): 483–488.
- [9] Clavier H, Pellissier H. Recent developments in enantioselective metal-catalyzed domino reactions [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2012, 354(18): 3347–3403.
- [10] Van der Boon L J P, Fukuen S, Sloopweg J C, *et al.* Toward asymmetric synthesis of pentaorganosilicates [J]. Topics in Catalysis, 2018, 61(7–8): 674–684.
- [11] Shen Z M, Dornan P K, Khan H A, *et al.* Mechanistic insights into the Rhodium-catalyzed intramolecular ketone hydroacylation [J]. Journal of America Chemistry Society, 2009, 131(3): 1077–1091.
- [12] Yang H F, Lu W, Liu L, *et al.* Synthesis, crystal structure and hydrogenation catalysis of a CF₃-BINAP(O)-Rh-COD complex [J]. Chinese Journal of Structural Chemistry, 2012, 31(11): 1669–1675.
- [13] Tang S H, Liu B C, Liang Q, *et al.* Study on drug resistance of Mycobacterium tuberculosis in different age group [J]. Chinese Chemical Letters, 2001, 24(2): 83–86.
- [14] Ovejero G, Sotelo J L, Romero M D, *et al.* Multiwalled carbon nanotubes for liquid-phase oxidation. Functionalization, characterization, and catalytic activity [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(7): 2206–2212.
- [15] Singh P, Kulkarni M V, Gokhale S P, *et al.* Enhancing the hydrogen storage capacity of Pd-functionalized multi-walled carbon nanotubes [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(8): 3405–3409.
- [16] Costa J B, Lima M J, Sampaio M J, *et al.* Enhanced biocatalytic sustainability of laccase by immobilization on functionalized carbon nanotubes/polysulfone membranes [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 355: 974–985.
- [17] Yoon B and Wai C M. Microemulsion-templated synthesis of carbon nanotube-supported Pd and Rh nanoparticles for catalytic applications [J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(49): 17174–17175.
- [18] Makhado E, Pandey S, Nomngongo P N, *et al.* Preparation and characterization of xanthan gum-cl-poly (acrylic acid)/o-MWCNTs hydrogel nanocomposite as highly effective re-usable adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 513: 700–714.
- [19] Wang T, Yuan L, Xiong K, *et al.* Chiral BINAP-based hierarchical porous polymers as platforms for efficient heterogeneous asymmetric catalysis [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2017, 38(5): 890–897. ■

(上接第 162 页)

- [5] Hu X, Bekassy-Molnar E, Vatai G. Study of ultrafiltration behaviour of emulsified metalworking fluids [J]. Desalination, 2002, 149(6): 191–197.
- [6] Chakrabarty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Cross-flow ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion using polysulfone membranes [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165(2): 447–456.
- [7] Chakrabarty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(1): 427–437.
- [8] Hilal N, Busca G, Hankins N, *et al.* The use of ultrafiltration and nanofiltration membranes in the treatment of metal-working fluids [J]. Desalination, 2004, 167(1): 227–238.
- [9] Chen WJ, Peng JM, Su YL, *et al.* Separation of oil/water emulsion using Pluronic F127 modified polyethersulfone ultrafiltration membranes [J]. Separation & Purification Technology, 2009, 66(3): 591–597.
- [10] Han G, Feng Y, Chung TS, *et al.* Phase inversion directly induced tight ultrafiltration (UF) hollow fiber membranes for effective removal of textile dyes [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(24): 14254–14261.
- [11] Lin Y, Cai Y, Qiu M, *et al.* Environment-benign preparation of Ag toughening TiO₂/Ti tight ultrafiltration membrane via aqueous sol-gel route [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(15): 5307–5317.
- [12] Belkacem M, Bahlouli M, Mraoui A, *et al.* Treatment of oil-water emulsion by ultrafiltration: A numerical approach [J]. Desalination, 2007, 206(1–3): 433–439. ■