

有色综述

引文格式:薛志潇,刘杰,李倩婷,等.影响乳状液膜稳定的关键因素与微观机理研究进展[J].中国有色冶金,2025,54(6):52-68.

XUE Zhixiao, LIU Jie, LI Qianting, et al. Review on key factors and microscopic mechanisms affecting the stability of emulsion liquid membrane[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(6): 52-68.

影响乳状液膜稳定的关键因素与微观机理研究进展

薛志潇, 刘杰, 李倩婷, 王志荣, 王松雪

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520)

[摘要] 乳状液膜因具有接触面积大、反应速率快以及能够同步实现萃取和反萃取等优点,被广泛应用于目标物质的提取分离。然而,在乳状液膜分离富集目标物质的过程中,常因液膜聚结、溶胀或泄漏等现象发生,导致液膜不稳定,阻碍了其在工业上的应用。本文系统综述了影响乳状液膜稳定性的关键因素及其微观作用机理,并提出未来研究方向。运载流体浓度存在明确的作用阈值,低浓度时促进金属-载体复合物形成以增强传质,高浓度则因膜相黏度剧增引发液滴聚并和渗透溶胀(水分子向膜内迁移稀释内相),导致稳定性与分离效率双降。表面活性剂体系中,Span 80 通过强界面吸附构建弹性单分子膜; β -环糊精聚合物形成高机械强度界面层抵抗聚结;复配体系(如 Span 80/Tween 80)则利用 HLB 值协同效应提升稳定性;但表面活性剂浓度超过临界胶束浓度(CMC)会因胶束增黏和传质阻力增大而削弱稳定效果。膜相添加剂(如异辛醇、两亲高分子 P(LM-AA)、聚合物 HPAM)通过调节 HLB 值、空间位阻效应及形成黏性网络显著强化界面膜。操作参数的失稳机制表现为:乳化过程存在临界能量阈值,过度乳化导致液滴过小与膜变薄;萃取时间延长加剧渗透溶胀,内相渗透压累积致膜破裂;温度升高则降低膜相黏度及界面膜强度,加速液滴聚结。微观机理研究揭示了稳定性本质源于动态界面行为:扩张流变特性中弹性模量(Span 80 饱和吸附形成高模量膜)直接表征抗形变能力,其与 D_2 EHPA 复配时因磷酸基团亲水性增强降低膜刚性;剪切流变行为揭示高界面黏度通过剪切变稀效应耗散外力抑制液滴破裂。未来研究亟需聚焦两方面突破:一是开发绿色高效稳定剂,设计兼具高界面强度、低环境负荷及低传质阻力的新型材料;二是深入探究乳状液膜稳定性的微观机制,从原位界面处分子层面彻底弄清其微观机理,从根本上提高乳状液膜的稳定性,为专用稳定剂的定向设计提供理论依据。本综述为解决乳状液膜失稳难题、推动工业应用提供重要参考。

[关键词] 乳状液膜;稳定性;微观机理;影响因素;界面张力;扩张流变;剪切流变

[中图分类号] TF01 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)06-0052-17

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/lf.2025.06.005

[收稿日期] 2025-04-16

[第一作者] 薛志潇(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染废水处理与资源化。

[通信作者] 刘杰(1980—),女,博士,教授,主要研究方向为重金属污染废水处理与资源化。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52174336);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021MB051)。

0 引言

将一种液体分散在另外一种液体中,形成稳定的分散体系,再将其分散在第三相中形成乳状液膜^[1]。该体系通常包含膜溶剂、运载流体、表面活性剂、界面稳定剂、膜相增强剂和改性剂等成分,集合了萃取与渗透的特点,传质速率快,处理量大,膜厚度约 1~10 μm ,接触面积约为 60 m^2/L ,在工业分

离与废水处理领域有着广泛的应用^[1,2]。乳状液膜主要分为两种类型:W/O/W(水包油包水)型与O/W/O(油包水包油)型。一般情况下,W/O/W(水包油包水)型主要用于分离水溶性离子化合物,O/W/O型用于分离油溶性物质。然而,在乳状液膜分离过程中,常出现内水相泄漏、外水相混入、溶胀及乳状液膜破裂等现象,这些现象的产生主要源于乳状液膜的不稳定性,限制了该技术在工业上的规模化应用^[3-5]。为提高乳状液膜的稳定性,研究人员深入探究了影响乳状液膜稳定性的关键因素,主要包括运载流体浓度、表面活性剂(种类与浓度)、膜相添加剂、乳化方法、萃取时间及温度等^[6-14]。近年来,随着研究的深入,探究了影响乳状液膜稳定性的微观机理,发现较低的界面张力和较大的界面膜强度对于维持乳状液膜稳定至关重要^[15,16]。界面流变是表征界面膜受到外力作用时流动与形变行为的一种方法。根据形变方式的不同,可将其分为界面扩张流变和界面剪切流变。扩张流变通过弹性模量、黏性模量、扩张模量和相角等参数,剪切流变通过剪切应力、剪切速率以及黏性与弹性参数,共同揭示界面膜对形变的响应。这些关键参数能够动态反映界面膜抵抗形变能力,对乳状液膜的稳定性具有重要影响^[17]。这些流变参数的精确测定有助于深入理解乳状液膜的稳定机制,为提升其性能奠定科学基础。

本文主要综述影响乳状液稳定的关键因素(主要包括运载流体浓度、表面活性剂种类、表面活性剂浓度、膜相增强剂、乳化方法、萃取时间及温度等)及微观机理(包括表界面张力、扩张流变及剪切流变等),并对其未来发展趋势进行了展望,为乳状液膜分离技术的进一步发展提供了理论支持。

1 影响乳状液膜稳定的关键因素

1.1 运载流体浓度

运载流体不仅是液膜的传输介质,还具有“能量泵”的功能,能够促进特定溶质或离子持续迁移至高浓度区域。在适宜的载体浓度下,运载流体可将分离效率提高数十甚至上百倍,显著提高特定溶质或离子的渗透性和选择性^[18]。然而,载体浓度控制不当会对液膜稳定性产生负面影响。目前,科研工作者主要探究了运载流体浓度对W/O/W型乳状液膜的影响。Zhu等^[19]以M5640作为运载流体、

Span 80作为表面活性剂、煤油作为溶剂,构建了W/O/W型乳状液膜体系,用于从氨/氯化铵溶液中选择性分离Cu(II)和Ni(II)。研究发现,随着载体浓度增加,膜相黏度增大,膜稳定性降低,增加了金属离子从外相向内相迁移的阻力,降低了萃取效率。Shamkhia等^[20]以双-2-乙基己基磷酸(D₂EHPA)为运载流体、煤油为稀释剂、Span 80为表面活性剂、H₂SO₄为内相试剂,制备W/O/W型乳状液膜,用于从水溶液中提取铅、铜和镉,结果如图1所示。将D₂EHPA与煤油的体积比从2%升至4%,液膜破损率从3.2%降至1.8%,表明稳定性提高;然而,进一步提高体积比,破损率反而增加。Othman等^[21]研究了以D₂EHPA和氰氧化物302作为运载流体、棕榈油作为稀释剂、Span 80作为表面活性剂、Tween 80作为共表面活性剂的W/O/W型乳状液膜系统,铁(III)氧化物(Fe₂O₃)作为纳米颗粒稳定剂用于研究水包油包水(W/O/W)乳液在乳状液膜中的稳定性,当载流体浓度从0.01 mol·L⁻¹增至0.03 mol·L⁻¹时,锌提取效率从90%提升到100%,表明载流体浓度的增加有助于形成更多Zn-载流体复合物,增强了锌由外相到内相的传输;然而,当载流体浓度进一步增至0.05 mol·L⁻¹时,提取效率降至75%。

综上所述,运载流体浓度对乳状液膜稳定性的影响具有双重性。适度增加运载流体浓度能够有效提升膜的稳定性,这是因为运载流体在膜相中的含量增加,有助于形成更多的金属-载流体复合物,这些复合物能够加强膜相与金属离子之间的相互作用,从而增强膜的整体稳定性,并促进金属离子的高效传输,提高分离效率。然而,当运载流体浓度过高时,其负面影响逐渐显现,过高的浓度会导致膜相黏度显著增大,促使液滴聚并增大,破坏乳状液微观结

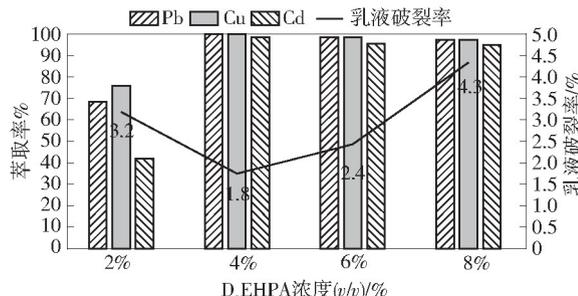


图1 运载流体浓度对萃取率和液膜稳定性的影响^[20]

Fig. 1 Effect of extractant concentration on the extraction efficiency and membrane breakage^[20]

构,降低稳定性;同时,高浓度载体加剧乳液溶胀,稀释内水相,增大传质阻力,最终导致分离效率下降。因此,在实际应用中,精准调控运载流体浓度至关重要,必须根据具体的分离体系和目标物质,找到一个平衡点,以实现乳状液膜的最佳稳定性和分离效率。

1.2 表面活性剂种类

在乳状液膜中,内水相通常以微滴形式分散于连续相油膜相中,这些微滴的直径可小至 10^{-4} cm (即 $1\ \mu\text{m}$)。其中连续相(油膜)的厚度可以非常薄,甚至达到双分子膜的厚度,即十几到几十个纳米。此时膜的厚度即是排列吸附在膜两侧的表面活性剂碳氢链的长度,这些分子链的长度决定了膜的临界厚度或双分子膜厚度。表面活性剂分子间的相互作用力决定膜强度,不同表面活性剂具有不同的分子链长,液膜中分子间吸引力和空间阻碍力也不同,从而使膜强度出现差异^[22]。因此,表面活性剂的种类对膜的稳定性起着至关重要的作用。常用的表面活性剂主要有 Span 80、吐温、环糊精,以及一些新型表面活性剂与复配剂等。

1.2.1 Span 80

Span 80(失水山梨醇单油酸酯)作为一种非离子油溶性表面活性剂,具有极高的界面活性。文献数据显示,Span 80 在癸烷中的临界胶束浓度为 $1.8 \times 10^{-5}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,标准吸附自由能变 $\Delta G_{\text{ad}}^0 = -35.5\ \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,表明其具备强大的界面吸附能力^[23]。因此,常用于乳状液的制备,以增强液膜的稳定性。Shokri 等^[24]利用 Span 80 作为表面活性剂制备乳状液膜,以提取溶液中甲基紫 2B (MV) 染料。图 2 展示了 Span 80 浓度对乳液稳定性(稳定时间)和破乳率的影响,结果表明,随着 Span 80 质量比从 1% 增加到 3%,乳液的稳定时间由 74 min 增加到 116 min;但当质量比超过 3% 时,稳定性时间开始下降。Span 80 质量比高于 3% 时,溶胀加剧导致乳液耐久性降低,破损率上升;相反,Span 80 质量比过低 ($<3\%$),表面活性剂不足以有效包覆内相液滴,导致乳状液稳定性差,破乳率升高。Noah 等^[25]采用乳状液膜技术去除工业废水中的铬,并探讨了表面活性剂 Span 80 的浓度、均化速度等因素对乳液稳定性和萃取效率的影响。结果表明,当 Span 80 的浓度由 $10\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $30\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,W/O 乳液形成更小直径的液滴(图 3),使得乳液的破乳率由 20% 下降到 10%,从而提高了液膜稳定性。这

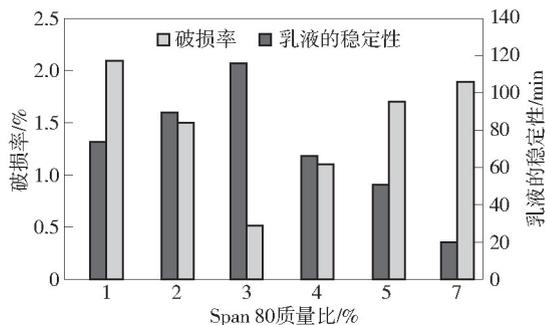


图 2 Span 80 质量比对乳液液稳定性(min)和乳液破损率(%)的影响^[24]

Fig. 2 Effect of span 80 on the stability of emulsion (min) and breakage of GELM^[24]

是因为增加 Span 80 浓度使更多的表面活性剂分子吸附在膜相和内相界面上,增强了界面强度,提升了膜的稳定性。León 等^[26]以 Span 80 为表面活性剂制备乳液液膜,并研究了通过乳状液膜去除水溶液中的 Cu(II)。研究发现,表面活性剂浓度的增加通常会降低相间的界面张力,有利于形成更小的乳状液滴,从而增加了传质表面积;然而,当表面活性剂

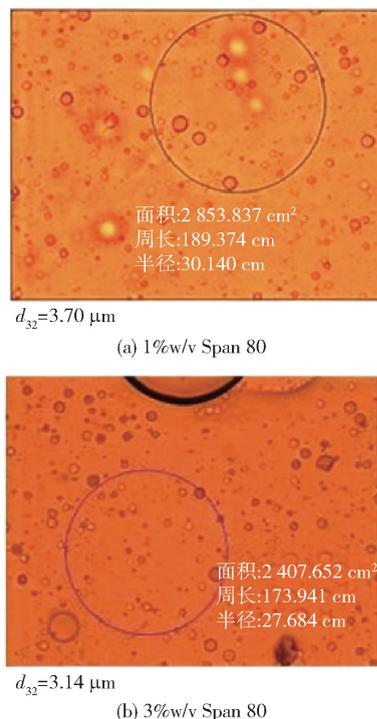


图 3 在显微镜下观察不同浓度表面活性剂的 W/O 乳液^[25]

Fig. 3 W/O emulsion at $400\times$ magnification under microscope at various surfactant concentration^[25]

浓度的进一步增加时,由于乳液黏度增加,乳液液滴尺寸增加,传质表面积减少,并增加了乳液液滴中的液膜厚度,从而导致 $\text{Cu}(\text{II})$ 传质阻力增加,使得 $\text{Cu}(\text{II})$ 通过膜的传输速率略有下降。

1.2.2 吐温

吐温 (Tween, 聚山梨醇酯) 是一种非离子型表面活性剂,由聚氧乙烯去水山梨醇的部分脂肪酸酯组成,这类化合物因其卓越的乳化和增溶能力被广泛应用于增强油类物质的稳定性。Bhowal 等^[27] 尝试在乳状液膜中使用由阳离子和非离子表面活性剂组成的混合反胶束,以提高脂肪酶的提取和纯化倍率。实验结果表明,添加非离子表面活性剂 (如 Tween 80) 后,反胶束尺寸增大,含水量增加,这在一定程度上可以增加回收率和纯化倍数;然而,当添加过量的 Tween 80 时,表面活性剂分子在液膜表面积聚,导致液膜膨胀,乳液稳定性下降,进而降低了回收率和纯化倍数。Anarakdim 等^[28] 采用两种亲水性乳化剂 (Tween 20 和 Tween 80) 以及两种亲脂性乳化剂 (聚甘油聚蓖麻油酸酯 (PGPR) 和 Span 80) 制备不同的乳状液膜,并考察了其稳定性和 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的提取能力。结果表明,加入亲水乳化剂 (Tween 20 和 Tween 80) 可以提高萃取效率;由 PGPR-Tween 80 和 PGPR-Tween 20 稳定的乳剂具有较高的稳定性及更高的 $\text{Cr}(\text{VI})$ 萃取率。Khadivi 等^[29] 以石蜡油为原料、Aquat 336 作为膜相载体、Tween 80 作为分散型非离子表面活性剂,制备乳状液膜,回收水溶液中铅离子。研究发现,当 Tween 80 的加入量从 $3 \mu\text{L}$ 提高到 $10 \mu\text{L}$,萃取率相应提高了约 10% 左右。Tween 80 的加入既提高了乳状液的稳定性,也提升了铅离子的萃取效率。

1.2.3 β -环糊精

环糊精是一种由酶改性淀粉产生的寡糖,通常每个环糊精分子含有 6 至 12 个 D-(+)-葡萄糖单元,具有特定尺寸的疏水腔和亲水性外表面。根据所含葡萄糖单元的数量,环糊精分子的空间大小也会有所差异^[30-31]。在乳状液膜技术领域, α -环糊精、 β -环糊精和 γ -环糊精这三种天然常见的环糊精因其无毒、可降解等环境友好特性,展现出广阔的应用前景^[32-34]。Laza-Knoerr 等^[35] 利用 β -环糊精形成包合物,提高了角鲨烯/水界面的稳定性,并对其界面流变特性进行了详细表征。与大分子类似, β -环糊精聚合物在界面上被吸附并形成具有黏弹性的

界面;该界面展现出高弹性模量,能有效抵抗应变,如图 4 所示。流变学数据清晰地揭示了弹性界面的形成,有效阻止了液滴的聚结,表明由 β -环糊精聚合物制备的乳液具有更好的稳定性。Cheong 等^[36] 对红麻种子水包油纳米乳液在不同乳化条件和工艺参数下的稳定性进行了测试。结果表明,在作为外层的初级乳液中添加 β -环糊精可以显著提高红麻种子水包油纳米乳液的稳定性。Gao 等^[37] 研究了 β -环糊精/煤油 Pickering 乳状液在某低品位石墨矿浮选中的应用。研究发现,在氢键驱动下, β -环糊精与煤油形成的包合物能够自组装成亲水性囊泡,并覆盖在油滴表面起到稳定作用。

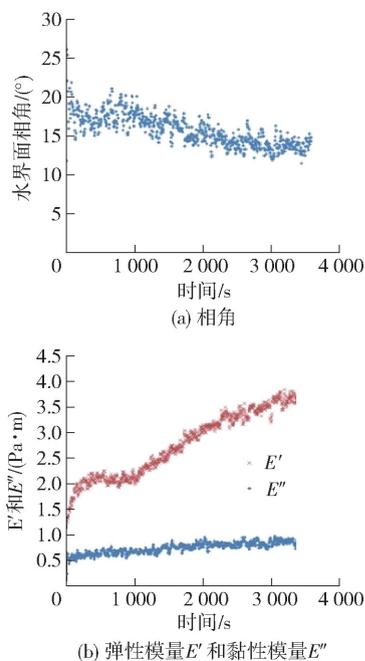


图 4 角鲨烯/水界面的相角及弹性模量 E' 和黏性模量 E''

(水相中聚 β -CD 聚合物浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 实验时间: 1 h)^[35]

Fig. 4 Phase angle and elastic modulus E' and viscous modulus E'' for a Squalene/water interface (poly- β -CD polymers at $100 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ in the aqueous phase. Time experiment: 1 h)^[35]

1.2.4 新型表面活性剂

为了提高乳状液膜的稳定性,科研工作者探索了使用聚合物和果胶作为新型表面活性剂的可能性^[38]。Skelland 等^[39] 首次提出采用黏弹性聚合物 (如聚丁二烯 (PBD)、聚异丁烯 (PIB)、丁二烯橡胶

(SBR)和聚苯乙烯(PS)作为表面活性剂以增强膜的稳定性。Mortaheb 等^[40]合成了一种新型聚胺型表面活性剂用于稳定乳液相,并研究了其在废水中去除苯酚的效果。结果表明,使用该表面活性剂制备的乳液在分离过程中展现出更优的稳定性和分离效率,相较于传统的 Span 80 乳液表现更佳。Kang 等^[41]研究了聚合物(部分水解聚丙烯酰胺,平均分子量为 1.2×10^7 ,水解度约为 30%)和表面活性剂稳定 W/O 型原油乳状液的作用机制,并采用悬滴法测量其界面流变性。研究发现,表面活性剂能够降低油水界面张力,而聚合物的加入则增强了油水界面的弹性。因此,在稳定乳状液方面,添加聚合物的效果优于添加表面活性剂。Gülseren 等^[42]采用滴形张力法探究了油包水乳液中两种果胶(高甲氧基果胶(HMP)和甜菜果胶(SBP))与疏水乳化剂聚甘油-蓖麻油酸酯(PGPR)之间的相互作用。结果显示,在 PGPR 存在时,SBP 或 HMP 可形成具有较低弹性的界面膜,有助于提高界面活性并改变黏弹性能。含有 PGPR(2%~6%)的油包水乳液在含有 SBP 或 HMP(0.1%)时相对更稳定。

1.2.5 复配表面活性剂

表面活性剂间常存在协同效应,即两种或多种复配,其物理化学性质会显著改变。这种混合体系的表面活性剂展现出更强的乳化能力和更高的稳定性,从而实现良好经济效益^[9]。Smita 等^[43]以双-2-乙基己基磷酸(D_2EHPA)、三辛基胺(TOA)、三正丁基磷酸(TBP)为载体, H_2SO_4 或 HCl 或 HNO_3 为内相,以两种表面活性剂 Span 20(HLB = 8.6)和 Span 80(HLB = 4.3)制成乳状液膜,用于萃取双氯芬酸,并考察了 HLB 值对乳液稳定性的影响。研究发现,乳状液膜的稳定性存在临界 HLB 值(约为 6)。当 HLB 值小于 6 时,随着 HLB 值的增加,液滴尺寸减小,乳状液膜的强度增加,稳定性提高,乳液可稳定长达 30 min;当 HLB 值超过 6 时,W/O 乳化液开始向 O/W 型乳化液转化,液滴尺寸增大,乳液逐渐失稳。Rosly 等^[44]以棕榈油与煤油(按照 7:3 的比例混合)作为稀释剂、Span 80 和 Tween 80 为表面活性剂、离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑双三氟甲基磺酰亚胺作为稳定剂、氢氧化钠(NaOH)作为脱除剂,制备乳状液膜,并用于去除苯酚(图 5)。结果表明,在乳状液膜中加入表面活性剂及离子液体后,乳化液的稳定性和苯酚的萃取效率显著提高。

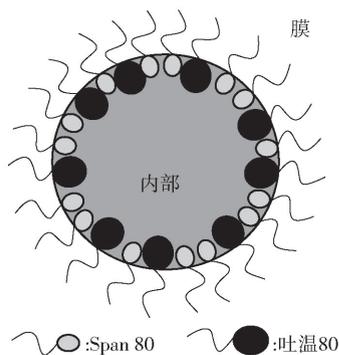


图 5 含 Span 80 和吐温 80 的 W/O 乳液的示意图^[44]

Fig. 5 Schematic illustration of W/O emulsion containing Span 80 and Tween 80^[44]

由此可见,为了增强乳状液膜的稳定性,在乳状液膜制备过程中通常会添加一定量的表面活性剂或聚合物。添加量必须控制在适宜的范围内,一般与界面的临界胶束浓度(CMC)相关。与单一表面活性剂相比,复配表面活性剂展现出更优的增稳效果,这主要是两种或者多种稳定剂之间能够产生协同效应。表 1 总结了一些常用的表面活性剂或者聚合物的优缺点。

1.3 表面活性剂浓度

表面活性剂浓度在乳状液膜的形成和稳定过程中起着至关重要的作用。将一种不相溶液体分散到另一连续相中时,界面面积的增加会导致体系在热力学上的不稳定。表面活性剂的加入可显著降低体系不稳定性,因为其分子内含有亲水基和疏水基,能够在油-水界面处形成吸附层,降低界面能,有效抑制液滴因碰撞而聚并。表面活性剂在界面处形成的双电层通过电荷斥力进一步稳定液滴,使原本热力学上不稳定的体系能够保持稳定状态^[56]。Liu 等^[12]研究了十二烷基聚环氧丙烷硫酸钠($C_{12}P_mS$, $m=4,8$ 和 12)与十二烷基聚环氧丙烷-聚环氧乙烷硫酸钠($C_{12}P_8E_2S$)这两种表面活性剂的表面张力、界面张力和乳化作用。结果表明,随着表面活性剂浓度增加,界面张力降低,液膜稳定性增强。Davoodi-Nasab 等^[57]采用 D_2EHPA 作为载体、Span 80 作为乳化剂、煤油作为稀释剂、硝酸作为反萃相,制备了乳状液膜,并系统研究了其从酸性溶液中萃取钆(III)的能力。当表面活性剂浓度增加到 1.5% (v/v) 时,不仅提高了乳状液膜的稳定性,而且增大了

表 1 乳状液膜(ELM)常用表面活性剂

Table 1 Stabilizer for emulsion liquid membrane (ELM)

表面活性剂/聚合物添加剂	优点	缺点	参考文献
聚丁二烯(PBD)、聚异丁烯(PIB)、丁二烯橡胶(SBR)和聚苯乙烯(PS)、聚丁二烯苯乙烯橡胶(PBSR)或聚丁二烯橡胶(PBR)	提高萃取率、减少乳液聚结、乳液黏度高、稳定性好	生物降解性差、污染环境	Skelland ^[39] 、Park ^[45] 、Guo ^[46]
聚胺型表面活性剂	提高乳液稳定性、油/水界面膜弹性显著提高	合成复杂,制备成本高、与提取物发生相互作用,影响提取物的纯度	Mortaheb 等 ^[40] 、Kang ^[41] 、方洪波等 ^[47]
PGPR/Tween 80 PGPR/Tween 20	提高萃取效率、改善乳液稳定性	在特定条件下导致乳液不稳定、容易发生水解反应或氧化反应导致降解	Anarakdim 等 ^[28] 、Katia 等 ^[48] 、Tamnak 等 ^[49]
HPAM/CTAB	明显增加界面黏度,形成更稳定的黏弹性膜、提高乳液稳定性	乳液黏度高,影响乳液的流动性和加工性能	Zhang 等 ^[50] 、王新平等 ^[51]
吐温/卵磷脂	提高乳液稳定性、增强乳化效果	卵磷脂易氧化,影响乳液长期稳定性、不易生物降解,对环境造成污染	Riehm 等 ^[52] 、Kaur 等 ^[53]
Span 80/Tween 80	增强乳液的稳定性、促进分散程度、提高萃取率	在高浓度下导致界面张力增加,影响乳液稳定性	Rosly 等 ^[9] 、Björkregren 等 ^[54] 、Jusoh 等 ^[55]

钒(III)的萃取率。然而,当表面活性剂浓度增加到 2.5% (v/v) 时,有机相黏度升高阻碍了金属络合物在膜相中的传质,同时液膜稳定性下降。Benderrag 等^[58] 采用乳化液膜从水溶液中提取染料刚果红,探究了操作参数对于乳液稳定性和萃取行为的影响。实验结果表明,表面活性剂浓度低于 4% (w/w) 时,因包覆内水相液滴不充分,乳液易破损;当表面活性剂浓度高于 4% (w/w) 时,两相间界面张力降低,有利于形成体积更小的液滴并产生更稳定的乳化液;然而,过高的表面活性剂浓度会增加界面传质阻力、降低传质效率并损害稳定性。因此,表面活性剂的适宜浓度范围是 $\leq 4\%$ (w/w)。Zereshki 等^[59] 以食用石蜡油 + 正庚烷作为膜相,Span 80 作为表面活性剂、NaOH 作为内相,制备乳状液膜,并通过实验考察了乳状液膜萃取分离水溶液中染料以及乳状液膜的稳定性。研究发现,表面活性剂浓度是影响乳状液稳定性的重要参数,具体如图 6 所示。表面活性剂的浓度低于 3% 时,由于表面活性剂的量不足以完全包围整个内水相,乳液容易破裂。表面活性剂浓度达到 5% 时,乳状液膜的稳定性提高。因此,必须优化膜相中表面活性剂的用量,以获得稳定的乳液。另一方面,增加表面活性剂的浓度会导致 W/O 乳液的黏度增加,从而降低传质速率。

由此可见,向膜相中加入适量的表面活性剂确

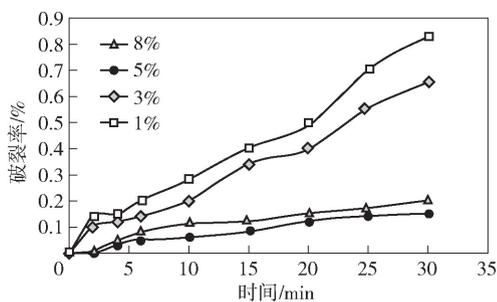


图 6 表面活性剂浓度对 W/O 乳状液稳定性的影响^[59]

Fig. 6 Effect of surfactant concentration on the W/O emulsion stability^[59]

实能够增强液膜的稳定性,但是必须控制在适宜的浓度范围内。这是因为随着表面活性剂浓度的增加,其在油水界面的吸附量也随之增加,从而使液膜更加稳定,提升分离效率,直至达到临界胶束浓度;一旦超过临界胶束浓度,油水界面的黏度会增加,导致膜相的黏度上升,传质阻力增大,进而降低分离效率。因此,表面活性剂的浓度在乳状液膜的形成和稳定过程中起着至关重要的作用。

1.4 膜相添加剂

为了提高乳状液膜的稳定性,科研工作者发现在膜相中添加两亲高分子、聚合物或异辛醇等助剂

能取得显著效果。段正超等^[60]合成了一种两亲高分子 P(LM-AA), 并将其作为膜添加剂加入到 Span 80、环己烷和水组成的 W/O 型乳液中, 发现液膜的稳定性显著提高, 这是因为两亲高分子的羧基亲水端附在膜的表面, 起着类似“锚定”的作用, 而长链烷基的亲油端则伸展于油相中。当液膜微粒相互接近时, 高分子链相互排斥, 形成保护网, 这种大分子链空间排斥作用显著降低了液膜的破裂度。康万利等^[61]通过静态法和离心法研究了聚合物 (HPAM) 对 O/W 型及 W/O 型两种乳液稳定性的影响, 并采用单滴法探讨了聚合物影响乳状液及其液膜稳定性的微观机理。结果表明, 聚合物显著地增强 O/W 型乳状液及水膜的稳定性, 对 W/O 型乳状液及油膜稳定性影响较小。对于 O/W 型乳状液, 由于 HPAM 为水溶性高分子, 能在油珠外围形成黏性膜, 阻碍油滴间液膜排液变薄; 同时, HPAM 分子具有较强的空间阻力, 因此具有优异的稳定作用。而对于 W/O 型乳状液, 由于水是分散相, HPAM 无法形成黏性保护膜。徐志峰等^[62]发现添加异辛醇作助溶剂, 所制乳液的稳定性远高于添加 TBP, 且异辛醇用量的增加显著提高了膜的稳定性。当异辛醇用量由 0% 增至 10% 时, 膜破损率从 47.33% 降至 1.98%, 效果显著。

1.5 乳化方法

目前, 制备稳定乳状液的方法主要有机械搅拌和超声波法。机械搅拌通过在表面活性剂、水相和油相之间产生更大剪切力, 破坏分散相与连续相之间的界面张力, 从而将大液滴分解为较小液滴, 形成乳状液。超声波法以其能量消耗低、表面活性剂用量少、乳液形成速度快以及制备出的乳液稳定性高而受到青睐^[63, 64]。

1.5.1 机械搅拌法

机械搅拌是制备乳液的常用方法, 通常使用均

质器、搅拌器等设备。根据搅拌速度的不同, 机械搅拌可以分为高速剪切搅拌和低速剪切搅拌^[65]。Chiha 等^[66]探究了搅拌强度对乳液稳定性的影响, 发现随着搅拌强度的增加, 比表面积增大, 乳液破损率降低, 稳定性增强, 同时萃取率也得到提升。实验结果显示, 当转速为 5 000 r/min 时, 乳化液滴直径约为 1~10 μm , 破碎率仅为 0.2%, 表明液膜稳定性良好。Salman 等^[67]以 D₂EHPA 为载体、H₂SO₄ 为内相、煤油为稀释剂, 制备乳状液膜, 研究了存在 Fe₂O₃ 时乳状液膜的稳定性及对铅 (Pb) 的萃取能力, 结果如图 7 所示。图 7 显示, 液滴大小与转速密切相关。当转速为 12 700 r/min 时, 乳状液膜的稳定性较高, 而转速的增加或减少都会导致乳液破裂率增加。在 5 800 r/min 时, 乳状液膜的破损率为 3.7%。这是因为反萃相进入油相的乳化速率低, 导致油滴数量少。当均质机转速增加到 19 700 r/min 时, 破碎率达到 23.7%。这是因为形成的液滴过小, 使得液膜变薄, 更易破裂。Wan 等^[68]指出, 增加搅拌速度可以提高传质速率, 但同时也会增加剪切能量, 导致膜的破损率上升。体系存在一个“临界搅拌速度”, 超过该速度会导致水进入乳液的速率增加, 乳液迅速膨胀, 并显著提高膜的破裂率, 降低了膜的稳定性。此外, 乳液体系的“临界搅拌速度”随所使用表面活性剂不同而异, 顺序为: LMA (由作者实验室合成的平均数分子量为 9150 的聚胺型表面活性剂) > 表面活性剂 ENJ-3029 > 表面活性剂 Lan 113A > 表面活性剂 Span 80; 表面活性剂导致渗透溶胀速率越高, 其对应的临界搅拌速度越低。形成稳定乳液能力的表面活性剂可能需要较高的临界搅拌速度。Guo 等^[69]以丁二烯苯乙烯橡胶乳化剂代替表面活性剂 Span 80, 分别以乙酸和煤油为载体和稀释溶液, 制备乳液, 并采用乳状液膜体系对桔花根 (APR) 中 dl-苦楝碱的提取进行了实验研究。研

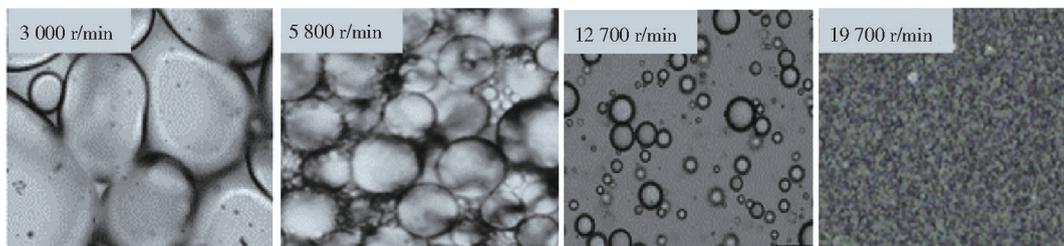


图 7 在不同搅拌速度下形成乳化液滴的图像^[67]

Fig. 7 Images of emulsion droplets formed under different stirring speed^[67]

究发现,在一定搅拌速度下,乳液稳定性随时间延长先增大后减小;乳化时间为3 min时,乳状液液滴达到最佳尺寸,从而产生良好的稳定性和高传质率。这是因为乳化时间的延长使乳化液滴在较高的内剪切力作用下变得越来越小,不利于分散,因此,过长的乳化时间会抑制 dl-苦楝碱的传质。

1.5.2 超声波法

Wood 和 Loomis 率先系统研究了超声乳化现象,发现超声波装置能够产生声空化效应,在超声乳化过程中,气泡在系统中不断形成和破裂,气泡破裂促进了自由基的释放,进而促进化学反应^[70]。超声波法制备乳化液主要利用了超声空化效应,在乳液聚合过程中,结合了物理与化学效应,超声两步法制备乳液的示意图如8所示^[71]。研究还发现,声空化气泡的振荡和破裂会引发多种物理效应,例如高速液体射流、局部高温、冲击波、湍流以及极端物理剪切等^[72]。Djenouhat 等^[14]利用超声法制备 W/O 型乳液,并研究了其对阳离子和阴离子染料的去除效果。结果表明超声法制备的 W/O 型乳液展现出良好的稳定性。Chiha 等^[73]研究了超声功率对乳状液

稳定性的影响,发现在低能级(5~15 W)时,声场无法提供足够的能量以实现膜相中水滴的有效分散,随着超声功率的增加,破碎比例降低。当能级超过20 W时,尽管液滴的比表面积增大,但乳液稳定性却下降,液滴聚并现象更为严重。因此,15~20 W被认为是理想能级。Kiani 等^[74]通过超声法制备乳状液膜,并利用其从溶液中回收砷(V)离子。研究发现,超声波处理减小了内相液滴的尺寸,增加了传质面积,提高了砷的萃取率。当超声处理时间延长至4 min时,内部液滴尺寸进一步减小,萃取率提高。然而,进一步延长超声处理时间会导致部分乳状液膜失稳并破裂,萃取率降低。

1.6 萃取时间

萃取时间是指从外相中提取出最大量溶质所需的混合时间,是乳状液膜萃取过程中一个重要限制因素。乳化液的稳定性与萃取过程中的接触时间密切相关。Raji 等^[11]以煤油为稀释剂、D₂EHPA 为载体、Span 80 和 Span 85 为表面活性剂、硝酸为内相制备乳状液膜,通过乳液液膜技术从硝酸介质中萃取镉(Dy)。研究发现,乳状液膜的稳定性和其与料

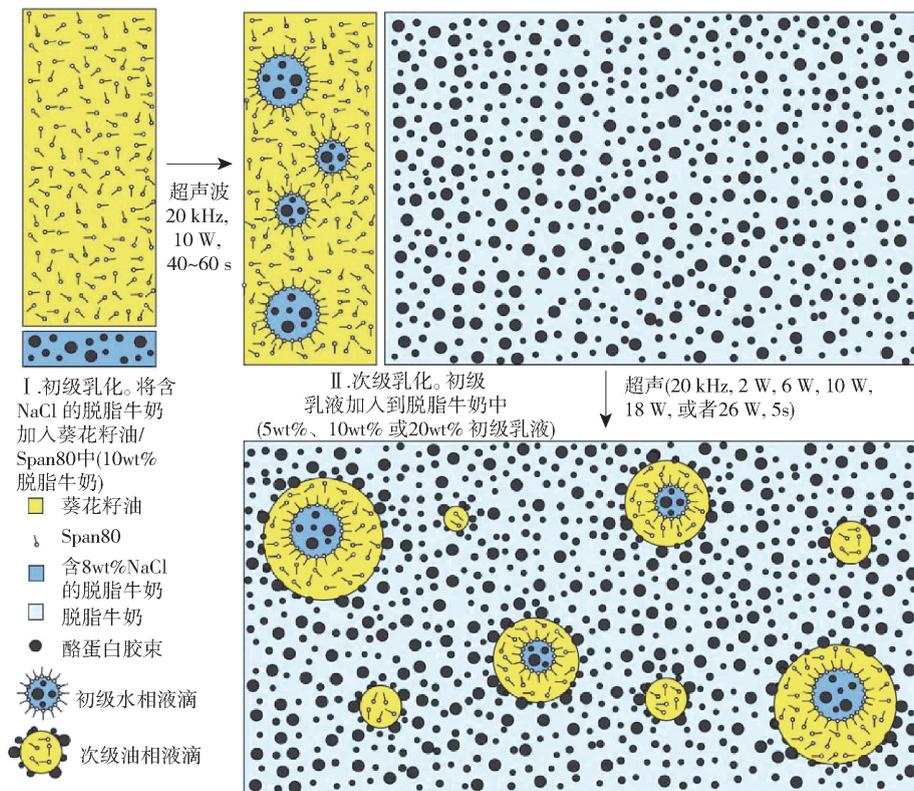


图8 用超声波分两步生产 W/O/W 双乳液的示意图^[71]

Fig. 8 Schematic of using ultrasound to produce W/O/W double emulsion in two-steps^[71]

液的接触时间密切相关。虽然萃取率随萃取时间的延长而升高,但过长的萃取时间会导致膜稳定性降低,最终液膜溶胀甚至破裂,反而使萃取率下降。Mohammed 等^[75]以煤油为溶剂、Span80 以及疏水离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑双三氟甲基磺酰基亚胺为表面活性剂、NaOH 为内相制作乳状液膜,研究了乳状液膜萃取水溶液中苯甲酸的效果。实验结果表明,在料液混合速度为 300 r/min 的条件下,2 min 内苯甲酸去除率可超过 90%,5 min 内苯甲酸去除率可达 99.7%。然而,进一步延长萃取时间会导致更多的水被转移到内相,引起液膜膨胀,最终导致乳状液膜破裂,使溶质从内相转移到外相,导致萃取率下降。Rouhani 等^[76]以 Cyanex 272 为载体、span 80 为表面活性剂、氟化铵(NH₄F)为反萃剂、煤油为稀释剂制备乳状液膜,考察了其选择性萃取钼(Mo)的效果。图 9 为接触时间对金属离子传递速率、断裂和膨胀的影响结果。如图 9 所示,在 25 min 之前,Mo 离子的萃取率随着接触时间的延长先增加后减小。萃取开始后,乳状液发生破裂和膨胀,且随着萃取时间的延长,破裂和膨胀加剧。在 25 min 时,乳状液的破裂和溶胀达到极限值,导致萃取率降低。继续延长萃取时间,萃取率持续下降,乳液的溶胀加剧直至破裂,液膜失稳。

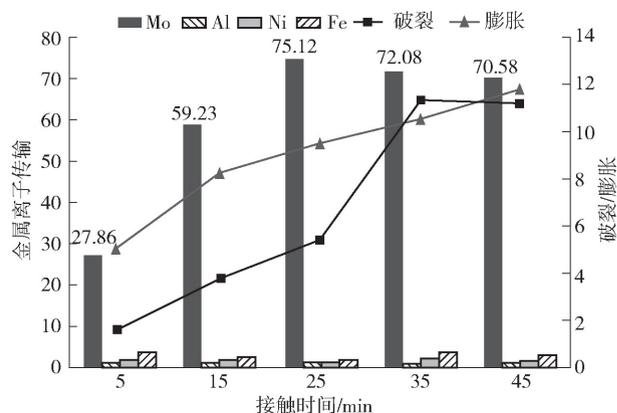


图 9 接触时间对金属离子传递速率、断裂和膨胀的影响^[76]

Fig. 9 Effect of contact time on metal ion transfer rate, breakage, and swelling^[76]

1.7 温度

温度对乳状液膜的稳定性具有显著影响。Mahbooneh 等^[8]研究了温度对乳状液膜的影响,发现当操作温度由 25 ℃ 升高到 45 ℃ 时,萃取效率由

89.74% 降至 71.7%, 乳化溶胀率由 0.2% 增至 4.2%, 导致萃取率下降和液膜稳定性变差。这一现象归因于温度升高导致乳液的黏度降低,加剧了渗透膨胀和乳液破裂,因此,25 ℃ 被认为是最佳的操作温度。Kumar 等^[77]采用乳化液膜提取 Cr(VI), 并考察了温度(25 ~ 45 ℃)对萃取率和膜稳定性的影响。研究发现,Cr(VI)的萃取率在 25 ~ 30 ℃ 随着温度升高而增加,这是由于内外膜相黏度降低有助于减少相间界面传质阻力,从而提高了初始传质速率。然而,在达到最佳温度(30 ~ 35 ℃)之后,随着温度继续升高,膜相黏度显著下降,导致试剂泄漏至连续相中,并最终减少了相间传质驱动力。Anarakdim 等^[78]研究了乳状液膜分离工艺中加热破乳处理对不同浓度六价铬的回收效果,其中乳状液膜以葵花籽油为植物溶剂、PGPR 和 Tween 80 为表面活性剂,结果如图 10 所示,加热对乳状液失稳具有积极影响,因为 TSI(可用于估计分散体稳定性参数)随着温度的升高而增加。当温度由 30 ℃ 上升到 50 ℃,在监测的 10 h 内没有观察到显著不稳定,但是在 60 ~ 90 ℃ 开始的 2 h 内 TSI 急剧增加,表明样品出现不稳定。80 ℃ 时达到最高的 TSI 值。温度越高,乳液稳定性越差,导致分散相相聚。因此,选择合适的温度对于保持乳液系统稳定性非常重要。

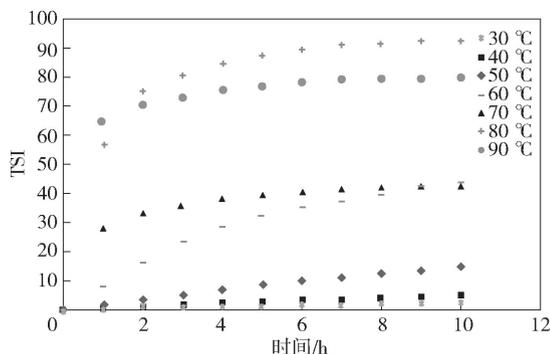


图 10 温度对失稳动力学的影响^[78]

Fig. 10 Effect of the temperature on the destabilization kinetics^[78]

综上所述,乳状液膜的稳定性受到多种因素的影响,包括运载流体浓度、表面活性剂类型和浓度、膜相添加剂、乳化方法、萃取时间及温度等。适当增加运载流体和表面活性剂浓度能够增强液膜的稳定性,但应避免超过临界胶束浓度。在机械搅拌制备乳状液膜的过程中也存在一个临界搅拌速度,适当

提高搅拌速度有利于提高液膜稳定性,但若搅拌强度过大,则可能导致液膜破损,从而降低膜稳定性。萃取时间对乳状液膜的稳定性也有显著影响,时间过长可能导致液膜溶胀,这不仅会降低液膜的稳定性,还可能减少收率和降低产品纯度。此外,过高的温度通常会降低液膜的黏度和膜强度,使得液膜无法抵抗外部形变力,因此,必须根据乳状液膜的具体组成选取合适的反应温度。

2 乳状液膜稳定的微观机理

乳状液膜的稳定性是界面科学领域的核心研究议题。为提升液膜稳定性,研究者从界面作用机制出发,系统探究了乳状液膜失稳的微观机理,主要通过分析测定液膜的界面张力、表面压和界面膜强度等参数的变化规律来揭示乳液的稳定微观机理^[79]。

2.1 表界面张力

普遍认为,较低的界面张力和较高的界面膜强度是乳液稳定的基本条件^[15, 16]。Wagdare 等^[80]研究了高孔隙率微工程膜的乳化过程,重点探讨了表面活性剂对连续相和分散相的影响,以及分散相、连续相与膜表面之间的相互作用。研究发现,在油相中使用 Span 80 并在水中使用时 Tween 20 时,油水界面张力显著降低,实现高通量乳化。贾明辉^[7]通过表界面张力仪探究了表面活性剂 Span 80 浓度对表界面张力的影响。结果表明,随着有机相中表面活性剂浓度的增加,有机相表面张力逐渐增大,油水界面张力逐渐减小,膜的稳定性增强。李明等^[81]利用震荡液滴技术,通过小幅低频震荡和界面张力弛豫,系统考察了聚氧乙烯失水山梨醇脂肪酸酯系列非离子表面活性剂的疏水基团结构与其扩张流变性质之间的关系。研究发现,Span 80 与 Tween 80 在油相共吸附形成的界面膜,其界面张力随着 Tween 80 占比的增加而降低,从而降低了体系的界面能,增强了乳状液膜的稳定性。Endo 等^[82]采用动态表面张力和弹性测量方法,研究了磺酸钠聚氧乙烯醚硫酸盐和 N,N-二甲基十二胺氧化物(AES/DDAO)混合胶束溶液的动态乳化过程。研究表明,在等物质的量比下,AES/DDAO 降低了静态界面张力的增加速率,可能导致自发乳化。此外,当增加胶束数量时,静电斥力减小,从而说明动态界面张力下降速率的增加会降低界面弹性。研究还证实了较低的界面弹性能更好地抑制 Marangoni 效应和自发乳化。Ush-

ikubo 等^[83]研究了由两种不同油(大豆油和十六烷)和三种乳化剂(PGPR、Span 80 和卵磷脂)构成的乳状液膜在不同体系下的稳定机理。结果显示,当添加乳化剂时,两种体系的界面张力都随着时间的推移而减小,所有乳状液膜的界面张力降低,稳定性增强,具体如图 11 所示。

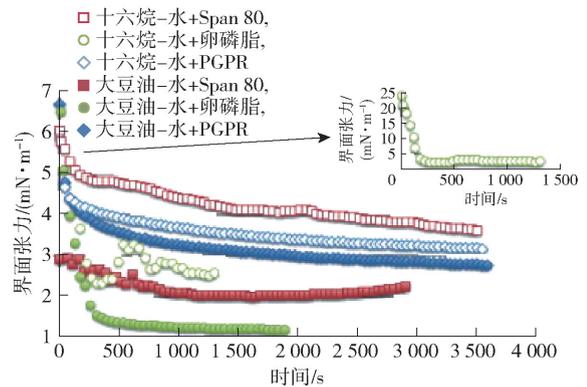


图 11 大豆油/十六烷-水与多种表面活性剂(PGPR, Span 80、卵磷脂)体系的动态界面张力随时间变化曲线^[83]

Fig. 11 Dynamic interfacial tension evolution over time for soybean oil/hexadecane-water systems with surfactants (PGPR, Span 80, lecithin)^[83]

2.2 扩张流变

扩张流变是表征界面膜特性的重要指标。界面膜的机械强度,即膜的黏弹性,是决定乳状液稳定性的关键因素之一。界面扩张流变学能够反映界面张力的变化及其相关的微观松弛过程,对于探究流体界面松弛过程具有重要意义^[84, 85]。普遍认为,与界面张力相比,扩张特性能更准确地反映界面膜的状态^[86]。Santini 等^[87]采用振荡悬滴法研究了 Span 80-液体石蜡-水乳液体系的界面流变特性,并考察了界面膜的黏弹性与扰动频率及 Span 80 浓度之间的关系。研究结果显示,在一定 Span 80 浓度下,扰动频率越高,界面膜的弹性越大。此外,乳液稳定性随 Span 80 浓度的增加而提高;其中部分原因是界面膜在高频扰动下表现出较高的弹性模量。然而,当浓度过高时,需要考虑大量反胶束对乳液稳定性的影响。蒋其辉^[88]则利用小幅周期振荡法研究了两种乳化液膜体系:Span 80/正庚烷/水相和 OP-4/正庚烷/水相的界面扩张黏弹性。研究发现,在酸性运载流体 P204[二(2-乙基己基磷酸酯)]中加入

Span 80 后,界面吸附层中 Span 80 的浓度增加,在癸烷/水界面上形成了 Span 80/P204 混合界面膜,导致界面膜分子排列更紧密、相互作用更强,从而提高了界面膜的刚性和强度,并使扩张弹性增大。乳液中较大的扩张弹性有助于防止液滴间的聚并现象,从而提高乳液稳定性。由于 Span 80 分子中羟基带有的负电荷比 P204 分子更为显著,因此吸附在界面膜上的 P204 分子进入水相的趋势较小,增强了该界面膜对亲油物质的亲和力。因此,添加 Span 80 可以提高 P204 乳化液膜体系的稳定性。宋超前^[6]采用 LB 膜分析仪研究了有机相中 P507 浓度变化对界面扩张流变性的影响。研究表明,随着 P507 浓度的增加,P507 单分子膜的弹性模量及黏性模量均逐渐增加。随着 P507 浓度的增加,界面处吸附的分子量逐渐增加,分子间相互作用力增强,形成了强弹性膜;黏性模量增大反映分子重排弛豫过程增强,说明界面膜的刚性增强,抵抗形变能力增加。姚盛宇等^[89]研究发现,在 Span 80-正癸烷-水体系中,当 Span 80 在癸烷/水界面达到饱和吸附时形成单分子膜(图 12(a)),然而,在该体系中加入 D₂EHPA 后,D₂EHPA 与 Span 80 共同形成了混合膜(图 12(b))。由于 D₂EHPA 分子中的磷酸基团比 Span 80 分子中羟基具有更强的亲水性,在界面上吸附的 D₂EHPA 分子更容易进入水相,从而减小了界面膜对油相物质的亲和力;此外,D₂EHPA 嵌入也减少了 Span 80 分子之间紧密程度。这导致界面膜刚性减小、弹性降低以及柔软度增加。

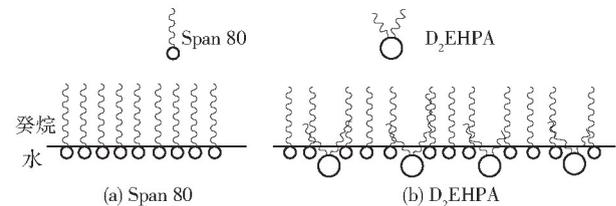


图 12 Span 80 和 D₂EHPA 在癸烷/水界面的吸附状态^[89]

Fig. 12 Adsorption state of Span 80 and D₂EHPA at decane/water interface^[89]

2.3 剪切流变

界面剪切流变关注的是在施加外力时界面形状的改变,而不影响其表面积的情况下,剪切应力响应变化情况。这种方法能够提供有关界面层结构和机

械强度信息,并且与生产实践更紧密相关,能够直接反映界面膜的机械强度^[13]。界面黏度是油水界面膜的重要性质之一,其大小与成膜分子排列的紧密程度、分子间的相互作用力以及是否存在结构形成有关。通常认为,较高的界面黏度有利于提高乳状液的稳定性^[51]。Niu 等^[90]研究了乳状液的不稳定机理,结果表明,在搅拌剪切过程中,乳液的稳定性与油滴界面的静电斥力及空间位阻密切相关,如图 13 所示。Jiun 等^[91]考察了沥青质在空气-水和油水界面上的界面流变特性。结果显示,这些界面均表现出明显的剪切变稀特征,且癸烷-水界面上沥青质的剪切变稀程度较空气-水界面要低。Zhang 等^[92]使用 Haake RS6000 流变仪和实验室规模的流动回路研究了乳液的流变行为及其流动表征,合成乳液中油体积分数为 0.1 ~ 1.0 L/L 时的流变性能结果如图 14 所示,大多数乳液表现出剪切变稀行为,尤其是中等含油体积分数的油水乳液表现出较强的剪切变稀行为。此外,研究发现表观黏度随油体积分数的增加而急剧增加,达到最大值后逐渐降低,最终趋于油相黏度;当油相体积分数处于 0.5 ~ 0.7 L/L 时,由于油和水作为连续相或分散相共存,乳状液变得非常不稳定;在此过程中,两个连续相之间的相互作用最强。Guo 等^[46]采用聚丁二烯苯乙烯橡胶(PBSR)或聚丁二烯橡胶(PBR)作为聚合添加剂,制备了 W/O 乳液,并对其稳定性和流变行为进行了考察。结果显示,由高分子聚合物制备的 W/O 乳液在低搅拌速度(低于 450 r/min)下能够均匀分散于连续水溶液中,并表现出非牛顿性质;从低

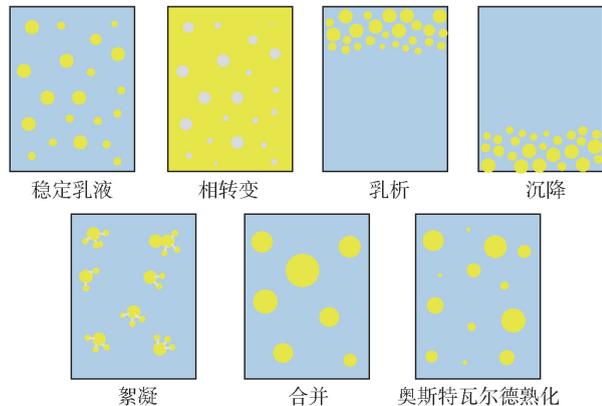


图 13 O/W 乳液的不稳定现象^[90]

Fig. 13 The instability phenomena of O/W emulsion^[90]

转速到高转速时,乳液呈现显著剪切增稠行为(黏度随剪切速率增加而上升)。

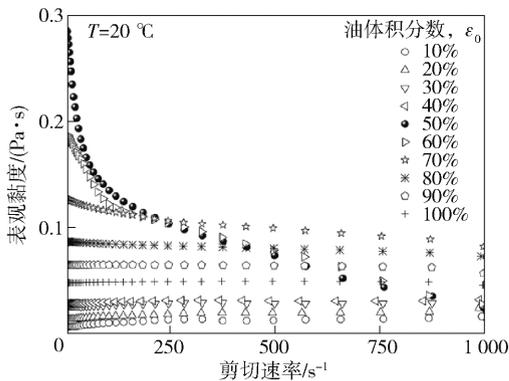


图14 不同油量分数乳剂的流变图^[92]

Fig. 14 Rheograms of the emulsions with different oil volume fractions^[92]

综上所述,通过表征界面张力、扩张流变和剪切流变特性,可以在一定程度上揭示影响乳状液膜稳定性的微观机理。在乳状液膜的形成过程中,由于热力学原因,液膜的界面张力会发生变化,进而导致界面扩张和剪切流变特性液随之改变。当界面受力失衡时,液膜便会失稳现象。

3 结论及展望

乳化液膜法是一种结构简单、操作便捷、效率高且环境友好的新技术,具有广阔的应用前景。然而,乳状液膜技术的高效传质能力受液膜失稳现象(聚结/溶胀/泄漏)严重制约。运载流体浓度存在阈值效应——低浓度促进金属-载体复合物定向迁移,高浓度则因膜相黏度剧增触发液滴聚并及水分子渗透溶胀双重失稳;表面活性剂体系中,Span 80 通过疏水链缔合构建致密单分子膜,β-环糊精聚合物形成高机械强度屏障,复配体系利用 HLB 协同优化界面结构,但超临界胶束浓度会削弱稳定性;膜相添加剂通过空间位阻与黏弹网络强化界面完整性;操作参数中,乳化能量超限导致液滴异常,时间累积引发渗透压破裂,温度升高弱化界面结合能。微观层面揭示稳定性源于扩张流变弹性模量(抗形变)与剪切流变黏性耗能(抗破裂)的力学协同。研究对于推动乳状液膜技术的发展具有重要的科学意义。

此外,随着经济的快速发展,对分离技术的要求日益提高,乳状液膜技术要在工程实践中得到广泛应用,必须在以下几个方面突破瓶颈。

1) 研发绿色高效的表面活性剂。现有的表面活性剂虽然对液膜稳定性有一定的作用,但效果仍不理想,亟需开发专用于乳状液膜的新型表面活性剂。其能有效提高液膜稳定性,同时不影响甚至提升其提取效果。

2) 深入探究乳状液膜稳定性的微观机制。尽管科研工作者已从多个角度对影响乳状液膜稳定性的机理进行了大量研究,但对液-液界面原位动态的研究仍不够深入,必须从原位界面处分子层面彻底探究其微观机理,从根本上提高乳状液膜的稳定性,为专用稳定剂的定向设计提供理论依据。

[参考文献]

- [1] WAKLE M, KHUNTIA S. Developments and studies in bio-emulsion liquid membranes (Bio-ELM) synthesis, parameters studies, characterizations, and applications[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023,56: 104300.
- [2] HO T M, RAZZAGHI A, RAMACHANDRAN A, et al. Emulsion characterization via microfluidic devices: A review on interfacial tension and stability to coalescence[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022,299: 102541.
- [3] K. A H, A. M A. A comprehensive review of emulsion liquid membrane for toxic contaminants removal: An overview on emulsion stability and extraction efficiency [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023,11(3): 109936.
- [4] MA H, WATERS K E, WANG H. A review of copper and nickel extraction from wastewater by emulsion liquid membrane (ELM) [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023,40(1): 13-39.
- [5] ZHANG W, GE W, LI M, et al. Short review on liquid membrane technology and their applications in biochemical engineering[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022,49: 21-33.
- [6] 宋超前. P507-N235 体系萃取稀土过程溶解行为及调控机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
SONG C. Research on the dissolution behavior and regulation mechanism of rare earth extraction process in the P507-N235 system[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [7] 贾明辉. P507-Span 80 体系萃取稀土过程界面分子相互作用机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
JIA M. Study on the interfacial molecular interaction mechanism of rare earth extraction process in P507-Span 80 system [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [8] MAHBOONEH N, ALI K, MANSOOREH S. Pertraction of vanadium(V) from dilute acidic media by an emulsion liquid membrane containing a commercial extractant [J]. Chemical Engineering & Technology, 2022,45(4): 572-584.
- [9] ROSLY M B, JUSOH N, OTHMAN N, et al. Stability of emulsion liquid membrane using bifunctional diluent and blended nonionic surfactant for phenol removal[J]. Chemical Engineering

- and Processing-Process Intensification, 2020,148: 107790.
- [10] SEIFOLLAHI Z, RAHBAR-KELISHAMI A. Amoxicillin extraction from aqueous solution by emulsion liquid membranes using response surface methodology[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2019,42(1): 156–166.
- [11] RAJI M, ABOLGHASEMI H, SAFDARI J, et al. Pertraction of dysprosium from nitrate medium by emulsion liquid membrane containing mixed surfactant system[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2017,120: 184–194.
- [12] LIU X, ZHAO Y, LI Q, et al. Surface tension, interfacial tension and emulsification of sodium dodecyl sulfate extended surfactant[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016,494(5): 201–208.
- [13] DERKACH S R, KRÄGEL J, MILLER R. Methods of measuring rheological properties of interfacial layers (experimental methods of 2D rheology)[J]. *Colloid Journal*, 2009,71(1): 1–17.
- [14] DJENOUHAT M, HAMDAOUI O, CHIHA M, et al. Ultrasonication-assisted preparation of water-in-oil emulsions and application to the removal of cationic dyes from water by emulsion liquid membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008,62(3): 636–641.
- [15] DANIELA G, VÉRONIQUE S, FERNANDO L, et al. On the possible role of surface elasticity in emulsion stability. [J]. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, 2009,25(10): 5565–5573.
- [16] JIAO J, RHODES D G, BURGESS D J. Multiple emulsion stability: pressure balance and interfacial film strength [J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2002,250(2): 444–450.
- [17] MALDONADO-VALDERRAMA J, PATINO J M R. Interfacial rheology of protein-surfactant mixtures[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2009,15(4): 271–282.
- [18] 李青松, 李可彬, 李飞. 乳液液膜分离技术的研究进展[J]. *当代化工*, 2009,38(1): 75–77.
- LI Q, LI K, LI F. Research progress on emulsion liquid membrane separation technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 38(1): 75–77.
- [19] ZHU G, WANG Y, HUANG Q, et al. Emulsion liquid membrane for simultaneous extraction and separation of copper from nickel in ammoniacal solutions[J]. *Minerals Engineering*, 2022,188: 107849.
- [20] A. SHAMKHIA H, D. Z. ALBDIRIA A. Simultaneous extraction of lead, copper, and cadmium from aqueous solution using emulsion liquid membrane technique [J]. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 2020,13(3): 183–188.
- [21] OTHMAN N, KAHAR I N S, LONG S S, et al. Prediction of zinc extraction from aqueous solution using iron oxide nanoparticles embedded formulation for tuning emulsion liquid membrane stability [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024,204: 572–584.
- [22] PERLES C E, VOLPE P L O, BOMBARD A J F. Study of the cation and salinity effect on electrocoalescence of water/crude oil emulsions[J]. *Energy & Fuels*, 2012,26(11): 6914–6924.
- [23] HUSSEIN M A, MOHAMMED A A, ATIYA M A. Application of emulsion and Pickering emulsion liquid membrane technique for wastewater treatment: an overview [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(36): 36184–36204.
- [24] SHOKRI A, DARAEI P, ZERESHKI S. Water decolorization using waste cooking oil: An optimized green emulsion liquid membrane by RSM[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020,33: 101021.
- [25] NOAH N F M, JUSOH N, OTHMAN N, et al. Development of stable green emulsion liquid membrane process via liquid-liquid extraction to treat real chromium from rinse electroplating wastewater[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018,66(25): 231–241.
- [26] LEÓN L, LEÓN G, SENENT J, et al. Optimization of copper removal from aqueous solutions using emulsion liquid membranes with benzoylacetone as a carrier[J]. *Metals*, 2017,7(1): 19.
- [27] BHOWAL S, PRIYANKA B S, RASTOGI N K. Mixed reverse micelles facilitated downstream processing of lipase involving water-oil-water liquid emulsion membrane [J]. *Biotechnology Progress*, 2014,30(5): 1084–1092.
- [28] ANARAKDIM K, GUTIÉRREZ G, CAMBIELLA Á, et al. The effect of emulsifiers on the emulsion stability and extraction efficiency of Cr(VI) using emulsion liquid membranes (ELMs) formulated with a green solvent[J]. *Membranes*, 2020,10(4): 76.
- [29] KHADIVI M, JAVANBAKHT V. Emulsion ionic liquid membrane using edible paraffin oil for lead removal from aqueous solutions[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020,319(1): 114137.
- [30] KANG W, ZHANG H, LU Y, et al. Study on the enhanced viscosity mechanism of the cyclodextrin polymer and betaine-type amphiphilic polymer inclusion complex[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019,296(15): 111792.
- [31] NG H S, TAN C P, CHEN S K, et al. Primary capture of cyclodextrin glycosyltransferase derived from *Bacillus cereus* by aqueous two phase system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011,81(3): 318–324.
- [32] CRINI G, FRENCH A D, KAINUMA K, et al. Contributions of Dexter French (1918–1981) to cycloamylose/cyclodextrin and starch science [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021,257(1): 117620.
- [33] A. P M, GOKHAN Y, REMZI B C. Natural cyclodextrins and their derivatives for polymer synthesis [J]. *POLYMER CHEMISTRY*, 2020,11(48): 7582–7602.
- [34] LI X, SUN J, WANG W, et al. Site-saturation mutagenesis of proline 176 in cyclodextrin glucosyltransferase from *Bacillus sp.* Y112 effects product specificity and enzymatic properties [J].

- Process Biochemistry, 2020,94: 180 – 189.
- [35] LAZA-KNOERR A, HUANG N, GROSSIORD J, et al. Interfacial rheology as a tool to study the potential of cyclodextrin polymers to stabilize oil-water interfaces[J]. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 2011,69(3): 475 – 479.
- [36] CHEONG A M, NYAM K L. Improvement of physical stability of kenaf seed oil-in-water nanoemulsions by addition of β -cyclodextrin to primary emulsion containing sodium caseinate and Tween 20[J]. Journal of Food Engineering, 2016,183: 24 – 31.
- [37] GAO J, BU X, ZHOU S, et al. Graphite flotation by β -cyclodextrin/kerosene Pickering emulsion as a novel collector [J]. Minerals Engineering, 2022,178(15): 107412.
- [38] AHMAD A L, KUSUMASTUTI A, DEREK C J C, et al. Emulsion liquid membrane for heavy metal removal: An overview on emulsion stabilization and destabilization [J]. Chemical Engineering Journal, 2011,171(3): 870 – 882.
- [39] SKELLAND A H P, MICHAEL MENG X. Non-newtonian conversion solves problems of stability, permeability, and swelling in emulsion liquid membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1999,158(1–2): 1 – 15.
- [40] MORTAHEB H R, AMINI M H, SADEGHIAN F, et al. Study on a new surfactant for removal of phenol from wastewater by emulsion liquid membrane[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,160(2–3): 582 – 588.
- [41] KANG W, XU B, WANG Y, et al. Stability mechanism of W/O crude oil emulsion stabilized by polymer and surfactant [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011,384(1–3): 555 – 560.
- [42] GÜLSEREN İ, CORREDIG M. Interactions between polyglycerol polyricinoleate (PGPR) and pectins at the oil-water interface and their influence on the stability of water-in-oil emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2014,34: 154 – 160.
- [43] SMITA G, B. K P, MOUSUMI C. Application of emulsion liquid membrane for the extraction of diclofenac and relationship with the stability of water-in-Oil emulsions [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2020,41(3): 393 – 401.
- [44] ROSLY M B, JUSOH N, OTHMAN N, et al. Effect and optimization parameters of phenol removal in emulsion liquid membrane process via fractional-factorial design [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019,145: 268 – 278.
- [45] PARK Y, SKELLAND A H P, FORNEY L J, et al. Removal of phenol and substituted phenols by newly developed emulsion liquid membrane process[J]. Water Research, 2006,40(9): 1763 – 1772.
- [46] GUO Z, DONG J, SU H, et al. Stability and performance study of newly developed emulsion prepared with polymeric rubber emulsifier and using the emulsion for nicotine extraction [J]. Separation and Purification Technology, 2015,156(17): 617 – 624.
- [47] 方洪波, 罗澜, 张路, 等. 界面张力弛豫方法研究复合驱油水界面膜的扩张性质[J]. 石油勘探与开发, 2004(S1): 26 – 29.
- FANG H, LUO L, ZHANG L, et al. Study on the expansion properties of composite water-drive oil film at the interface by interfacial tension relaxation method[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004(S1): 26 – 29.
- [48] KATIA A, GEMMA G, ÁNGEL C, et al. Green emulsified liquid membrane for hexavalent chromium extraction; formulation and process optimization [J]. Chemical Engineering & Technology, 2021,44(6): 988 – 996.
- [49] TAMNAK S, MIRHOSSEINI H, TAN C P, et al. Encapsulation properties, release behavior and physicochemical characteristics of water-in-oil-in-water (W/O/W) emulsion stabilized with pectin-pea protein isolate conjugate and Tween 80 [J]. Food Hydrocolloids, 2016,61: 599 – 608.
- [50] ZHANG H, XU G, WU D, et al. Aggregation of cetyltrimethylammonium bromide with hydrolyzed polyacrylamide at the paraffin oil/water interface; Interfacial rheological behavior study [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008,317(1–3): 289 – 296.
- [51] 王新平, 张嘉云, 唐季安, 等. 表面活性剂与聚丙烯酰胺在油水界面的流变性[J]. 物理化学学报, 1998,14(1): 88 – 92.
- WANG X, ZHANG J, TANG J, et al. Interfacial rheology investigation of polyacrylamide-surfactant interactions [J]. Acta Phys. -Chim. Sin. 1998, 14(1): 88 – 92.
- [52] RIEHM D A, ROKKE D J, PAUL P G, et al. Dispersion of oil into water using lecithin-Tween 80 blends; The role of spontaneous emulsification[J]. Journal of Colloid And Interface Science, 2017,487(1): 52 – 59.
- [53] KAUR K, BHATIA N K, MEHTA S K. Formation of cyclodextrin-stabilized nanoemulsions and microemulsions and exploitation of their solubilization behavior[J]. RSC Advances, 2012,22: 8467 – 8477.
- [54] BJÖRKEGREN S, KARIMI R, MARTINELLI A, et al. A new emulsion liquid membrane based on a palm oil for the extraction of heavy metals[J]. Membranes, 2015,5(2): 168 – 179.
- [55] JUSOH N, NOAH N F M, OTHMAN N. Extraction and recovery optimization of succinic acid using green emulsion liquid membrane containing palm oil as the diluent[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2018,38(3): 1 – 9.
- [56] 胡钟琴, 王晗. 乳状液膜的稳定性讨论[J]. 内蒙古石油化工, 2009,35(9): 4 – 7.
- HU Z, WANG H. Discussion on the stability of emulsion liquid membrane[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 35(9): 4 – 7.
- [57] DAVOODI-NASAB P, RAHBAR-KELISHAMI A, SAFDARI J, et al. Evaluation of the emulsion liquid membrane performance on

- the removal of gadolinium from acidic solutions[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 262(15): 97-103.
- [58] BENDERRAG A, HADDOU B, DAAOU M, et al. Experimental and modeling studies on Cd (II) ions extraction by emulsion liquid membrane using Triton X-100 as biodegradable surfactant [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(3): 103166.
- [59] ZERESHKI S, DARAEI P, SHOKRI A. Application of edible paraffin oil for cationic dye removal from water using emulsion liquid membrane[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 356(15): 1-8.
- [60] 段正超, 田大昕, 谭志伟, 等. 两亲高分子对液膜分离体系的稳定作用[J]. *湖北化工*, 2001(1): 30-31.
DUAN Z, TIAN D, TAN Z, et al. The stabilizing effect of amphiphilic polymers on liquid membrane separation systems [J]. *Hubei Chemical Industry*, 2001(1): 30-31.
- [61] 康万利, 岳湘安, 胡靖邦. 聚合物对乳状液及液膜的稳定性[J]. *石油学报*, 1997(4): 122-125.
KANG W, YUE X, HU J. The stability of polymers on emulsions and liquid membranes [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997(4): 122-125.
- [62] 徐志峰, 邓佐国, 徐廷华. 极性溶剂对乳状液膜性能影响的研究[J]. *南方冶金学院学报*, 2000(1): 51-54.
XU Z, DENG Z, XU T. Study on the influence of polar solvents on the performance of emulsion liquid membranes[J]. *Journal of Southern Metallurgical Institute*, 2000(1): 51-54.
- [63] LEONG T S H, WOOSTER T J, KENTISH S E, et al. Minimising oil droplet size using ultrasonic emulsification [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2009, 16(6): 721-727.
- [64] HIGGINS D M, SKAUEN D M. Influence of Power on Quality of Emulsions Prepared by Ultrasound[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1972, 61(10): 1567-1570.
- [65] MOHAMMED A A, SELMAN H M, ABUKHANAFAER G. Liquid surfactant membrane for lead separation from aqueous solution: studies on emulsion stability and extraction efficiency [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(6): 6923-6930.
- [66] CHIHA M, SAMAR M H, HAMD AOUI O. Extraction of chromium (VI) from sulphuric acid aqueous solutions by a liquid surfactant membrane (LSM) [J]. *Desalination*, 2006, 194(1-3): 69-80.
- [67] SALMAN H M, MOHAMMED A A. Extraction of lead ions from aqueous solution by co-stabilization mechanisms of magnetic Fe₂O₃ particles and nonionic surfactants in emulsion liquid membrane[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 568(5): 301-310.
- [68] WAN Y, ZHANG X. Swelling determination of W/O/W emulsion liquid membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 196(2): 185-201.
- [69] GUO Z, SU H, CAI R, et al. Extraction of DL-anabasine from alangium platanifolium root using an emulsion liquid membrane [J]. *Analytical Methods*, 2015, 7(5): 1860-1865.
- [70] G. F. S. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1928, 205(1): 151-153.
- [71] LEONG T S H, ZHOU M, KUKAN N, et al. Preparation of water-in-oil-in-water emulsions by low frequency ultrasound using skim milk and sunflower oil [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 685-695.
- [72] ASHOKKUMAR M. The characterization of acoustic cavitation bubbles-an overview [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 864-872.
- [73] CHIHA M, HAMD AOUI O, AHMEDCHEKKAT F, et al. Study on ultrasonically assisted emulsification and recovery of copper (II) from wastewater using an emulsion liquid membrane process [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(2): 318-325.
- [74] KIANI S, MOUSAVI S M. Ultrasound assisted preparation of water in oil emulsions and their application in arsenic (V) removal from water in an emulsion liquid membrane process [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2013, 20(1): 373-377.
- [75] MOHAMMED S A M. Investigating the performance of ELM systems in separating organic pollutants from industrial wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, 13: 79-87.
- [76] ROUHANI S H R, DAVARKHAH R, ZAHERI P, et al. Separation of molybdenum from spent HDS catalysts using emulsion liquid membrane system [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 153: 107958.
- [77] KUMAR A, THAKUR A, PANESAR P S. Extraction of hexavalent chromium by environmentally benign green emulsion liquid membrane using tridodecylamine as an extractant [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 70(25): 394-401.
- [78] ANARAKDIM K, MATOS M, CAMBIELLA A, et al. Effect of temperature on the heat treatment to recover green solvent from emulsion liquid membranes used in the extraction of Cr(VI) [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 158: 108178.
- [79] WANGQI H, PAPAPOPOULOS K D. Stability of water-in-oil-in-water type globules [J]. *Chemical Engineering Science*, 1996, 51(22): 5043-5051.
- [80] WAGDARE N A, MARCELIS A T M, HO O B, et al. High throughput vegetable oil-in-water emulsification with a high porosity micro-engineered membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 347(1): 1-7.
- [81] 李明. 农药乳液剂型界面膜扩张粘弹性性质研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
LI M. Study on the expansion viscoelasticity of interface membrane in pesticide emulsion formulation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [82] ENDO C, ITO Y, AKABANE C, et al. Spontaneous

- emulsification of triolein induced by mixed micellar solutions of sodium polyoxyethylene alkyl ether sulfate and dodecyltrimethyl amine oxide[J]. *Journal of Oleo Science*, 2015,64(9): 953 – 962.
- [83] USHIKUBO F Y, CUNHA R L. Stability mechanisms of liquid water-in-oil emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 34: 145 – 153.
- [84] MILLER R, FERRI J K, JAVADI A, et al. Rheology of interfacial layers [J]. *Colloid and polymer science*, 2010,288(9): 937 – 950.
- [85] KOTSMAR C, PRADINES V, ALAHVERDJIEVA V S, et al. Thermodynamics, adsorption kinetics and rheology of mixed protein-surfactant interfacial layers[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009,150(1): 41 – 54.
- [86] MA B D, GAO B Y, ZHANG L, et al. Influence of polymer on dynamic interfacial tensions of EOR surfactant solutions [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014,131(15): 40562.
- [87] SANTINI E, LIGGIERI L, SACCA L, et al. Interfacial rheology of span 80 adsorbed layers at paraffin oil-water interface and correlation with the corresponding emulsion properties [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007,309(1 – 3): 270 – 279.
- [88] 蒋其辉. 两种乳化液膜体系界面粘弹性研究及破乳剂合成初探[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- JIANG Q. Study on the interfacial viscoelasticity of two emulsion liquid membrane systems and preliminary exploration of demulsifier synthesis[D]. Guangxi: Guangxi University, 2014.
- [89] 姚盛宇, 蒋其辉, 龚福忠, 等. Span 80-癸烷-D₂EHPA-H₂O 液膜体系的界面膜扩张黏弹性研究[J]. *中国科技论文*, 2016,11(6): 619 – 623.
- YAO S, JIANG Q, GONG F, et al. Study on the dilation rheology of interfacial membrane in span 80-Nonyl-D₂EHPA-H₂O liquid membrane system[J]. *Science Paper Online*, 2016, 11(6): 619 – 623.
- [90] NIU H, WANG W, DOU Z, et al. Multiscale combined techniques for evaluating emulsion stability: a critical review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023,311: 102813.
- [91] JIUN L Y, SOURAV B, PENG H, et al. Combined interfacial shear rheology and microstructure visualization of asphaltenes at air-water and oil-water interfaces [J]. *Journal of Rheology*, 2018,62(1): 1 – 10.
- [92] ZHANG J, XU J Y. Rheological behaviour of oil and water emulsions and their flow characterization in horizontal pipes[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016,94(2): 324 – 331.

Review on key factors and microscopic mechanisms affecting the stability of emulsion liquid membrane

XUE Zhixiao, LIU Jie, LI Qianting, WANG Zhirong, WANG Songxue

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Emulsion liquid membranes (ELMs) are extensively utilized for the extraction and separation of target substances due to their large contact area, rapid reaction kinetics, and capacity for simultaneous extraction and stripping. However, industrial implementation is hindered by membrane instability resulting from phenomena such as coalescence, swelling, or leakage during separation and enrichment processes. This review systematically examines the critical factors influencing ELM stability, their microscopic mechanisms, and future research directions. Carrier concentration exhibits a distinct threshold; low concentrations promote metal-carrier complex formation to enhance mass transfer, while high concentrations induce a sharp increase in membrane-phase viscosity, triggering droplet coalescence and osmotic swelling (water migration into the membrane diluting the internal phase), thereby reducing both stability and separation efficiency. In surfactant systems, Span 80 forms elastic monomolecular films via robust interfacial adsorption; β -cyclodextrin polymers establish high-mechanical-strength interfacial barriers against coalescence; and blended systems (e. g. , Span 80/Tween 80) improve stability through HLB synergy. Surfactant concentrations exceeding the critical micelle concentration (CMC) compromise stability due to increased micellar viscosity and mass transfer resistance. Membrane additives (e. g. , iso-octanol, amphiphilic polymer P(LM-AA), polymer HPAM) significantly reinforce interfacial films by adjusting HLB values, providing steric hindrance, and forming viscous networks. Destabilization mechanisms in operational parameters manifest as follows: emulsification beyond critical energy thresholds causes excessively small droplets and membrane thinning; prolonged extraction exacerbates osmotic swelling, leading to internal phase osmotic

pressure accumulation and rupture; elevated temperatures reduce membrane-phase viscosity and interfacial film strength, accelerating coalescence. Microscopic analyses reveal stability originates from dynamic interfacial behavior; dilatational rheology shows the elastic modulus directly characterizing deformation resistance (high-modulus films formed by Span 80 saturation, with D₂EHPA blending reducing rigidity via enhanced hydrophilicity of phosphate groups); shear rheology demonstrates that high interfacial viscosity suppresses droplet rupture through shear-thinning energy dissipation. Future research must focus on two advances: developing green, efficient stabilizers combining high interfacial strength, low environmental impact, and minimal mass transfer resistance; and fundamentally elucidating microscopic mechanisms through in situ molecular-level interfacial characterization to enable rational design of specialized stabilizers. This review provides critical insights for addressing ELM instability and advancing industrial applications.

Key words: emulsion liquid membrane; stability; microscopic mechanism; influence factor; interfacial tension; dilatational rheology; shear rheology

中铝集团与智利国家铜业深化合作

11月24日,中国铝业集团有限公司(以下简称“中铝集团”)董事长段向东在中铜大厦会见智利国家铜业董事长帕切科,双方就深化合作进行深入交流。中铝集团副总经理田永忠、智利国家铜业首席财务官桑韦萨参加会谈。

段向东对帕切科一行的到来表示欢迎,并介绍了中铝集团相关情况。他表示,中铝集团产业链涉及铝、铜、铅、锌、镓、锗等20余种有色金属元素,主营的氧化铝、电解铝、精细氧化铝、高纯铝、铝用阳极产能全球领先,铜综合实力位列国内第一梯队,铅、锌综合实力国内领先,锗、镓金属产量位居国内第一,形成铝、铜、高端制造、工程技术、矿产开发、资产经营、智能科技等有色金属领域多元化发展格局。智利国家铜业是全球最大的铜生产企业之一,资源储备和技术实力突出,中铝集团与智利国家铜业在贸易等方面拥有良好的合作基础,希望双方进一步深化友谊和互信,拓展合作领域,探索合作机遇,实现更高质量更高水平互利共赢。

帕切科对中铝集团优异的发展业绩表示祝贺,对所属企业的自动化水平、绿色环保、生产秩序以及员工精神面貌给予赞赏。他表示,智利国家铜业拥有悠久的发展历史,主要生产铜矿和锂矿,并专注于人工智能应用,致力于为全球能源转型作出积极贡献。双方在发展方向上有很多契合点,希望持续加强互动交流,增进战略互信,强强联合、优势互补,在更多领域开展务实合作,携手实现新发展新突破。

帕切科一行还参观了西南铜业、驰宏锌锗相关厂区。中国铜业相关负责人参加上述活动。

(资料来源:中国有色金属报)