基于超声破乳的油水分离技术研究进展

张 奎,殷 进*,邓奥文,贾宝龙,陆玲钰
(扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:在分析了超声波破乳原理的基础上,讨论了超声波频率、功率、作用时间、乳状液温度、破乳剂、含水率等因素对破乳的影响,并进一步探讨了超声与其他技术联用破乳以实现油水分离的特点和效果,以期对基于超声破乳的油水分离技术发展应用提供参考。

关键词:乳状液废水;超声波;破乳;油水分离;超声联用
中图分类号:X703;TQ028 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0025-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.005

Research progress in oil-water separation technology based on ultrasonic demulsification

ZHANG Kui, *YIN Jin**, *DENG Ao-wen*, *JIA Bao-long*, *LU Ling-yu*
(College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Based on an analysis of the principles of ultrasonic demulsification, this paper discusses the effects of factors including ultrasonic frequency, power, treatment duration, emulsion temperature, demulsifier, and water content on the demulsification process. Furthermore, it explores the characteristics and effectiveness of combining ultrasound with other technologies for demulsification and oil-water separation, aiming to provide insights for the development and application of oil-water separation technology based on ultrasonic demulsification.

Key words: oily wastewater; ultrasonic wave; demulsification; oil-water separation; combined ultrasound usage

石油化工、金属加工与机械制造、食品加工、化妆品及制药等行业产生大量的含油废水[1],常以油包水或者水包油的形式存在,亦被统称为乳状液。对于乳状液废水,处理不当不仅会破坏环境危害人体健康还会造成资源的浪费[2]。因此对其进行破乳,实现高效油水分离是解决乳状液废水引起的环境风险和资源浪费问题的关键。乳状液废水种类多、成分和物理化学性质复杂,因此处理难度大。常见的处理方法主要包括物理法(重力分离、离心、气浮、吸附等)、化学法(化学破乳剂、混凝、盐析等)[3]和生物法等。随着科技进步和环保的高要求,一些新型技术如膜技术、微波技术、电破乳技术、超声波破乳技术等正逐渐应用于乳状液废水的处理,其中超声波破乳因适用范围广、成本低、无污染,且处理过程中无副产物的形成,不改变分离后水相的化学组成,对环境影响小等优点,在废水处理及资源回收利用等方面有良好的应用前景[4]。

1 超声破乳工作原理

物理学中将频率超过20 kHz的声波定义为超声波,当超声波在介质中传播时,会产生机械、空化和热3种作用,在其协同作用下可实现乳状液废水破乳。

乳状液废水中存在的蜡、树脂和一些化学物质等高分子化合物充当着乳化剂的作用会增强油水界面膜的稳定性,而界面膜是影响此类废水稳定的重要因素之一,若界面膜中吸附分子的排列比较紧密,则界面膜具有一定的强度和吸附性,此时的乳状液很稳定[5-6],超声的空化作用会在乳状液废水中形成微小气泡,在超声波的正压和负压作用下,气泡不断压缩和膨胀直至气泡破裂,并瞬时产生高达5 000℃高温和50 MPa的高压,废水的温度随之提高,并伴有微射流和冲击波,在空化和热的双重作用下,一方面废水中的高分子乳化剂会被分解从而降低界面膜的强度[7],另一方面空化作用产生的微射流、冲击波和温度上升亦可直接破坏界面膜的稳定性,乳状液因失稳而发生破乳[8]。超声波传播过程中产生的机械作用可使乳状液内部粒子获得一定的能量,其运动速度最大可达1.44×10^4 m/s^2[9],由于破乳后的油粒子和水粒子存在属性差异,在机械

收稿日期:2026-01-09;**修回日期**:2026-08-27
基金项目:国家自然科学基金(51108401);江苏省自然科学基金(BK20151313)
作者简介:张奎(1999-),男,硕士生;殷进(1976-),男,博士,副教授,研究方向为过程污染与控制,通讯联系人,yinjin@yzu.edu.cn。

作用下会呈现出不同的运动规律,相同性质的粒子运动方向相同,并在运动过程中相互碰撞、汇集,形成较大的粒子团,最终在重力作用下实现油水分离[10]。

乳状液废水在超声的 3 种作用下可实现破乳和油水分离,但其中的破乳过程条件较为严苛,比如功率要控制在特定的空化阈之下,声强超过阈值,过强的空化作用就会将大粒子团击碎成更小的粒子,导致二次乳化。此外,超声频率、作用时间、作用温度等都会对超声破乳效果产生影响。因此,掌握不同因素对超声破乳的影响范围和效能,是进一步运用和推广超声破乳技术的关键。

2 超声破乳影响因素

含油废水在超声作用下发生破乳或乳化受多因素影响,且对于不同的乳状液,即使工艺条件相同,超声破乳效果也会有所不同。国内外众多学者对于超声波破乳的影响因素做了大量的实验研究,主要聚焦在超声波的功率、频率、作用时间、作用温度、乳状液组成等方面。

2.1 超声波的功率

声波的功率是影响破乳效果的一个重要参数,功率的大小影响空化效应的剧烈程度,当功率过低,能量不足,无法有效破坏界面膜强度,液滴的振动不足以使液滴发生有效的碰撞和聚集,破乳效率差。当功率过高,过度的空化效应会产生强剪切力,使已聚集的大液滴重新打碎为更小的液滴,形成二次乳化[11],破乳效率差。最佳功率时,空化产生足够的能量破坏界面膜和促进小液滴聚集成大液滴后分离。Lü 等[4]通过实验证明功率与破乳效率之间存在着密切的关系,当功率减小到一定阈值时,水滴缺少足够移动到波结的驱动力,而声强过高,会导致分离后的油水又重新乳化。在声强为 0.4 W/cm^2,分离效率达 83.5%。原因是高功率时,空化程度较高,有助于破坏油水界面的稳定性。

最佳功率值不是一个固定的数值,需考虑乳状液的性质(黏度、界面张力、液滴大小与分布等)和声波的频率。

2.2 超声频率

频率的大小决定了空化效应的强度,影响着粒子向波腹或者波节的位移距离,因此对于稳定的乳状液废水,合适的超声波频率能够降低破乳的难度。研究发现,频率的提高会带来更高的能量强度和更强的空化效应,油水分离的效率也会提高[12]。Luo 等[11]认为低频率超声的破乳效率要高于高频率超声,通过实验得出频率为 25.8、39.4 kHz 时的破乳效率明显高于 90.0、126.4 kHz 时的破乳效率,在低频超声的条件下,不同大小的液滴在超声波的机械作用下互相碰撞凝聚从油相中分离出来,但是高频率超声的过度空化作用使分离后的油水重新聚集在一起,导致破乳效率降低。

对于超声波破乳,并不存在固定的最佳频率,而是与乳状液的性质有着很大的关系,低频超声适用于高黏度、高界面强度的乳状液,主要通过机械震动降低了界面强度从而促进液滴的碰撞和聚并,而高频超声既可加速液滴的迁移也可增加大液滴的数量,缩短了液滴的迁移距离,更适用于分散低浓度且液滴尺寸小的乳状液[11]。因此在实际应用前,应先分析乳状液性质和工艺要求,再决定采用相应频率的声波。未来的研究可采用双频超声,或者交替使用不同频率的声波进行破乳以突破单频超声的限制。

2.3 超声作用时间与温度

当超声波作用于乳状液废水时,在机械作用下小液滴相互碰撞并聚结,逐步形成大液滴,最后在重力的作用下实现油相与水相的分离,该过程需要一定的时间。破乳率一般随着超声作用时间的延长而提高,但是超过一定的限值,已经分离的油水又会被重新乳化。不同类型的乳状液最佳作用时间也有一定的差异。Romanova 等[13]发现,随着时间的延长,破乳效率呈现出先升高后降低的现象,且在作用时间为 2 min 时效率最高为(61.3±1.5)%。作用时间达到临界点后,聚并后的大液滴被重新打散成更小的液滴,导致重新乳化。

温度对于乳状液的油水分离也有着较大的影响。事实上,超声作用时间增加,体系温度也会随之升高,体系温度的升高一方面会降低乳状液的黏度,油水之间的密度差增大,加快油水分离效率,另一方面温度的升高会促进液滴的布朗运动,液滴运动程度加剧,增加了液滴之间的碰撞和聚集机会[14]。

2.4 其他因素

影响超声波破乳的因素除了上述的主要因素,还有一些次要因素,如油相的性质、化学破乳剂的添加量、含油废水的含水量、驻波的数量等[8]。

Chen 等[15]在相同的实验条件下对重质油和轻质油进行了同样的超声处理,发现重质原油中的水滴聚结度要明显低于轻质原油。主要原因在于重质油的黏度高于轻质油。

陆洋[16]在其他条件相同的情况下,仅改变破乳剂的浓度,设置 50、100、150、200 mg/L 4 个浓度梯度。通过对比实验发现在 100 mg/L 的条件下脱水效率最高,随着浓度升高,脱水率先增大后减小。随着破乳剂浓度升高可以将油水界面膜上的天然乳化剂吸附甚至置换,从而导致乳状液失稳,当破乳剂的浓度升高到一定值时,破乳剂的吸附浓度达到了最大。若是破乳剂的浓度继续升高,则表面活性剂分子之间会形成胶束,使得油水界面膜变得稳定,导致油和水重新乳化[17]。

Nadirova 等[18]通过改变乳状液中的含水量来研究乳状液中的水分对乳状液破乳的影响,发现,含水量高的乳状液比含水量低的乳状液的油水分离率高。当乳状液中的水含量增加时,则水滴的直径也会增加,模型研究表明,若水含量增加了 3.43 倍,则水滴的平均直径会增加 1.34 倍,液滴体积会增加 2.43 倍。含水量增加,则相同体积的乳状液中的水含量增加,超声波作用下,液滴碰撞的机率增加,提高了液滴聚并的可能性。

Kou 等[19]通过研究发现,在相同条件下双频驻波超声的最佳作用时间为 11 min,而单频驻波场的最佳辐射时间为 15 min。在乳状液破乳脱水方面,低频率的双频超声驻波场比单频超声驻波场更有优势。

对于乳状液的油水分离,超声波的频率、功率、超声作用时间和温度占主导作用,而上述其他因素更多的是起到辅助作用。随着现代工业的发展,产生的含油废水日趋复杂,一方面,含油废水除油、水两相外,还存在多种表面活性剂及稳定剂,使得界面膜的稳定性远高于仅有油水两相存在形成的界面膜;另一方面含油废水从简单的油包水(W/O)或水包油(O/W)型,演变为更稳定的多重乳状液废水(W/O/W 或 O/W/O)。面对复杂且稳定的乳状液体系,超声破乳则需要更高的声强、功率和更长的作用时间,导致能耗显著增加。因此单独使用超声破乳很难实现产业化应用,而与其他破乳技术的联用正成为研究的热点。

3　超声破乳联用技术

超声破乳联用技术根据原理的不同通常分为 3 类:化学破乳剂、物理场以及物理化学组合。

3.1　化学破乳剂联用

联用最多且应用范围最广的就是将超声与各种化学破乳剂协同使用,其中主要的化学破乳剂有聚醚类、天然类、星型和纳米颗粒破乳剂 4 种。Telmadarreie 等[20]测试了 14 种破乳剂,设置了破乳剂单独使用、超声单独作用和两者协同作用 3 种工况。通过对比实验发现,无超声作用时,14 种破乳剂均需达到特定的浓度才可实现有效破乳,单独超声需 60 min 或更长时间才可实现有效破乳,而两者结合,只需超声 15 min,14 种破乳剂均可在低于或远低于特定值条件下即可实现有效破乳,最高可达 100%。在联合作用下,一方面破乳剂受声波机械作用可更快更均匀地扩散至油水界面膜表面从而加速了高表面活性破乳剂替换界面膜上表面活性物质的速度,更快地降低界面张力和界面膜的强度[21],缩短了破乳时间,另一方面超声本身的空化作用可直接降低界面膜的强度,从而减少了破乳剂的使用量,而破乳剂的加入也缩短了超声的作用时间。

超声与化学破乳剂的协同使用突破了 2 种技术单独使用的局限性,不仅适用于性质更为复杂、界面膜更为牢固的乳状液废水,还可降低成本。但化学破乳剂的存在仍然会增加后续处理的难度并存在环境风险,因此天然、无危害、成本低的破乳剂替代是该领域的重点发展方向。

3.2　物理联用技术

超声破乳本身是一种物理性技术,受此启发,许多学者尝试将其他的物理技术(加热、离心、磁场、电场和纳米吸附剂等)与超声联用处理不同性质的乳状液以实现油水高效分离。

Ronchi 等[22]研究超声对乳状液废水在不同材质容器中的破乳率的差异,选择玻璃拉希环、有机材料、钢和铜等不同材质容器进行了实验,发现超声频率为 35 kHz,作用 20 min,无机高密度多孔介质金属材料优于非金属有机材料,其中铜材料可实现油水分离效率达 80%,而玻璃拉希环有 76.4%,但其成本低,耐腐蚀,可重复利用的特性优于金属材料。究其原因主要是材料之间的空隙度不同,声波在空隙度小的材料中传播时声速和能量衰减得少,有足够的能量进入乳状液废水后实现破乳。

Liang 等[23]为了处理性质更复杂、更稳定的页岩油乳状液,尝试将超声波与磁场和电场耦合一起,并与 3 种物理场单独使用进行了对比分析,发现多种物理场耦合的效果优于任意某一单独物理场作用,使得页岩油的含水率降至 0.5%。与超声相同,在磁场或电场作用下液滴也会迁移、碰撞和聚并,而在三场共作用下,液滴的运动轨迹更复杂,使得

液滴接触和聚并的可能性显著增加,克服了任一单场的缺点。

利用吸附剂处理乳状液废水是一种传统的物理技术,但吸附效率高的一般是有机聚合材料,存在非生物降解性和不可重复等缺点,因此天然有机吸附剂越来越受欢迎,为了进一步提高天然吸附剂的吸附容量、增加重复利用次数和降低成本,Akpomie 等[24]将超声和负载银离子的天然复合材料联合用于乳状液废水的破乳及油水分离,发现超声可显著提高其固油量(4.97 g/g 提升至 6.11 g/g),归因于超声可增强溶液中油粒子和吸附剂气孔之间的相互作用,从而提高吸附量,并且材料可重复使用。

纳米颗粒作为一种新型的破乳方法仍然处在研究阶段,纳米颗粒在超声的作用下能更快、更均匀迁移至油水界面破坏界面膜的完整性,吸附液滴在其表面后与连续相分开[8],且纳米颗粒还可通过表面修饰,制备出具有特殊湿润性的纳米颗粒,以应对不同类型的乳状液。

膜分离法是最有效且环保的方法之一,具有分离效率高和能耗低的优点,但膜表面的浓差极化现象会使得油粒吸附在膜孔内形成凝胶层,降低分离效率,乳状液废水中油相浓度越高,极化现象越严重。为了解决这一问题,Fazullin 等[25]将超声引入膜分离的过程,当膜组件持续受到频率为 35 kHz 的超声作用,微滤膜的比产率提高了 30%,超滤膜比产率提高了 45%,可有效防止油粒聚集和凝胶层的形成,显著延长了膜的连续运行周期。

与物理技术联用时,一般不会产生副产物,对环境的影响小,但处理条件根据乳状液性质变化而变化且要求较高,各个物理技术的最佳参数条件很难精准确定,导致成本较高。

3.3 物化组合工艺

在实际应用时,对于性质和组分十分复杂的乳状液如老化油、钻井乳状液废水等,需将多种物理和化学工艺组合起来进行处理。一般而言,乳状液废水在除去悬浮物后经硫酸或者氢氧化钠调节至适当 pH,再经过超声、热处理、芬顿技术、化学破乳等技术联合进行破乳,破乳完成后可结合离心等各类物理分离技术实现油水分离[26]。近 5 年内部分超声联用技术应用于油水分离如表 1 所示。

表 1 近 5 年内典型超声联用技术案列分析

联合技术	最佳条件	处理效果	优点	缺点
化学破乳剂[20]	连续模式:超声频率 40 kHz,超声功率 100 W,超声时间 15 min,破乳剂添加量 0.015 g/L	油水分离率 95%	效率高、成本低、应用范围广	化学破乳剂难降解
新型破乳剂、加热[27]	连续模式:超声功率 0.97 W/cm^2,作用时间 120 min,破乳剂用量 800 mg/L,沉淀时间 1 h	油水分离率 83.3%		
玻璃拉希环[22]	连续模式:乳状液放置在玻璃拉希环中,超声功率:23.3 W/dm^3,频率 35 kHz,超声时间 20 min	油水分离率:76.4%	成本低、操作简单、应用范围广	效率低
纳米氮化铝[8]	间歇模式:超声频率 22 kHz,超声功率 1 kW,超声时间 3 min,纳米颗粒量体积分数 8% 的 2 mg/mL 纳米氮化铝丙酮溶液	油水分离率:99%	效率高、应用范围广;操作简单;可循环利用	成本高、回收不完全存在安全隐患
负载纳米银离子吸附剂、加热[24]	连续模式:295 K 超声波浴,超声时间 15 min,负载纳米颗粒吸附剂,温度 325 K	吸附剂固油量:4.97 g/g 提升至 6.11 g/g		
膜分离[25]	连续模式:过滤过程中膜组件一直处于频率为 35 kHz 的超声震动下	比产率:微滤膜提高 30%,超滤膜提高 40%	效率高、可重复利用、操作简单、应用范围广	成本高、滤膜截留能力降低约 3%
电场、磁场、加热[23]	连续模式:电场强度 150 kV/M,电场频率 5 kHz,作用时间 60 min,磁场强度 210 mT,作用时间 10 min;超声强度 0.35 W/m^2,时间 20 min;操作温度 70℃。油水分离率 95%	油水分离率 95%	效率高、适用更复杂的乳状液废水	成本高、操作困难
电场[28]	连续模式:超声频率 28 kHz,超声功率 0.5 W/cm^2,电场功率 2 kV/cm,电场频率 1000 kHz,共同作用时间 10 min	油水分离率 93%		

续表

联合技术	最佳条件	处理效果	优点	缺点
加热、化学破乳剂、搅拌、离心[26]	加热温度 50℃,pH 5,AR-2 破乳剂 25 mg/L,搅拌速度 200 r/min,搅拌时间 40 min,超声频率 25 kHz,超声功率 30 W,超声时间 25 min 离心时间 20 min,离心速度 2800 r/min,阳离子聚丙烯酰胺 35 mg/L,絮凝搅拌速度 180 r/min,絮凝时间 20 min	油水分离率 83%左右,废水降解率 95%左右	适用范围广、技术相对成熟	成本高、需因地制宜
加热、离心、芬顿[29]	连续模式:超声频率 25 kHz,超声功率 40 W,超声时间 25 min,pH 3~4,$FeSO_4$ 160 mg/L,双氧水 0.11%,加热搅拌时间 40 min,离子度 50 的 PAM 35 mg/L,离心速度 3200 r/min,离心时间 20 min	油水分离率 94.6%		

超声与物理、化学工艺联合对促进复杂乳状液中的油水分离效果明显,与传统技术相比,效率更高、适用范围更广、更安全、性价比更高等。尽管在实验室走向工业化过程中仍存在一些问题,但随着反应器、智能控制及新材料等领域的不断突破,超声联用技术会有着更广阔的应用前景。

4　结语

作为一种新型的物理破乳法,超声破乳具有破乳效率高、无污染、适用范围广、操作简单等优势,且易与其他技术协同使用。对于乳状液及其他含油污水,超声波破乳主要依靠空化作用破坏乳状液的界面平衡,以及热效应降低乳状液黏度促进液滴的迁移和聚结,最终在机械作用下聚结成较大液滴,实现油水分离。超声破乳效果受超声频率、功率、作用时间、温度等参数的影响,上述参数亦是与其他技术协同作用时进行优化设计的重点。

因此,未来基于超声破乳的油水分离技术发展应重点关注 3 个方面:超声协同破乳方法研究,如与膜分离破乳、生物破乳、离心破乳、纳米颗粒破乳等技术的协同作用,进一步提升分离效率;高效、智能化超声破乳设备的研发,开发模块化装置,降低设备的成本、能耗和噪声影响必然是进一步推广基于超声破乳的油水分离技术的关键;环保与经济效益的提升,减少化学药剂的使用,研发低能耗换能器,结合可再生能源供电,降低碳足迹。

参考文献

[1] Hamedi H,Zendehboudi S,Rezaei N,*et al*.Application of functionalized Fe_3O_4 magnetic nanoparticles using CTAB and SDS for oil separation from oil-in-water nanoemulsions[J].Langmuir,2023,39(23):7995-8007.

[2] Tian Y,Zhou J,He C,*et al*.The formation,stabilization and separation of oil-water emulsions:A review[J].Processes,2022,10(4):738.

[3] 陈明功,周鑫,赵彬彬,等.油水分离技术的研究进展[J].现代化工,2024,44(1):63-67.

[4] Lü Y,Zhu S,Lin G,*et al*.Research on ultrasonic demulsification characteristics and parameter optimization of condensate oil emulsion[J].Chemical Engineering and Processing-Process Intensification,2025,209:110185.

[5] Ravera F,Dziza K,Santini E,*et al*.Emulsification and emulsion stability:The role of the interfacial properties[J].Advances in Colloid and Interface Science,2021,288:102344.

[6] 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.

[7] Adeyemi I,Meribout M,Khezzar L.Recent developments,challenges,and prospects of ultrasound-assisted oil technologies[J].Ultrasonics Sonochemistry,2022,82:105902.

[8] Romanova Y N,Maryutina T A,Musina N S,*et al*.Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2022,209:109977.

[9] 张肖肖.超声处理对重质油组成和性质的影响[D].青岛:中国石油大学(华东),2021:3-5.

[10] Sadatshojaie A,Wood D A,Jokar S M,*et al*.Applying ultrasonic fields to separate water contained in medium-gravity crude oil emulsions and determining crude oil adhesion coefficients[J].Ultrasonics Sonochemistry,2021,70:105303.

[11] Luo X,Gong H,Yin H,*et al*.Optimization of acoustic parameters for ultrasonic separation of emulsions with different physical properties[J].Ultrasonics Sonochemistry,2020,68:105221.

[12] Parvasi P,Kamali F,Talaghat M R.An experimental study on low-content crude oil in water emulsion using low-frequency ultrasonic waves[J].Brazilian Journal of Chemical Engineering,2022,39(1):197-205.

[13] Romanova Y N,Koroleva M Y,Musina N S,*et al*.Ultrasonic demulsification of water-in-crude oil emulsions:Influence of rheological properties[J].Chemical Engineering and Processing-Process Intensification,2025,211:110242.

[14] Wang Z, Gu S, Zhou L. Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 1014-1020.
[15] Chen W S, Chen Z Y, Chang J Y, *et al*. Ultrasound-assisted desalination of crude oil: The influence of mixing extent, crude oil species, chemical demulsifier and operation variables[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 83: 105947.
[16] 陆洋. 油水乳状液微波与超声波破乳研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
[17] Mettu S, Yao S, Sun Q, *et al*. Effect of bulk viscosity and emulsion droplet size on the separation efficiency of model mineral oil-in-water (O/W) emulsions under ultrasonic standing wave fields: A theoretical and experimental investigation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(16): 7901-7912.
[18] Nadirova Z K, Ivakhnenko O P, Zhantasov M K, *et al*. Ultrasound-assisted dewatering of crude oil from Kumkol oilfield[J]. Chemical Bulletin of Kazakh National University, 2021, 101(2): 4-10.
[19] Kou J, Huang K, Li Z. Study on demulsification characteristics of crude oil based on orthogonal dual frequency ultrasonic standing wave field[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 695: 134280.
[20] Telmadarreie T, Berton P, Bryant S L. Synergy between solvents and acoustic energy destabilizes SAGD emulsions[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 243: 213269.
[21] 崔涛, 王天宇, 赵赫. 工业乳化废液破乳剂研究趋势与进展[J]. 现代化工, 2023, 43(1): 51-56.
[22] Ronchi R P, Negris L, Melo B N, *et al*. Removal of oil from synthetic heavy crude oil-in-water emulsions by the association of glass raschig rings and ultrasound[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2021, 43(1): 22-32.
[23] Liang Y, Huang Q, Li Q, *et al*. Multi-physical field intensification process for shale oil emulsion dehydration: Parameter optimization and mechanisms exploration[J]. Processes, 2025, 13(7): 2167.
[24] Akpomie K G, Conradie J. Ultrasonic aided sorption of oil from oil-in-water emulsion onto oleophilic natural organic-silver nanocomposite[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 165: 12-24.
[25] Fazullin D D, Mavrin G V, Fazullina L I. Intensification of the process of separation of oil emulsions by exposure to ultrasonic radiation[J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2022, 56(3): 301-307.
[26] Zhang W, Zhang L, Jin Y, *et al*. Integrated chemical-emulsification, ultrasonic-centrifugal, and oxidation-flocculation treatment of oilfield drilling wastewater[J]. Desalination and Water Treatment, 2025: 101322.
[27] Özdoğan N, Albahnasawi A M, Ağır H, *et al*. Demulsifying of waste oils in a port reception facility by ultrasound with a new coagulant: Techno-economic evaluation[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2025, 47(1): 9841-9855.
[28] 薄家欣. 超声与电场联合作用下原油乳化液脱水特性及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
[29] Zhang L, Hu J, Yan L, *et al*. Study on the technology of ultrasonic, chemical and mechanical combined treatment of oilfield aging oil[J]. Nature Environment & Pollution Technology, 2024, 23(2): 345-356.■

(上接第 24 页)

[16] Hess C. Nanostructured vanadium oxide model catalysts for selective oxidation reactions[J]. ChemPhysChem, 2009, 10(2): 319-326.
[17] Faizan M, Zhang R, Liu R. Vanadium phosphorus oxide catalyst: Progress, development and applications[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 110: 27-67.
[18] Védrine J C, Hutchings G J, Kiely C J. Molybdenum oxide model catalysts and vanadium phosphates as actual catalysts for understanding heterogeneous catalytic partial oxidation reactions: A contribution by Jean-Claude Volta[J]. Catalysis Today, 2013, 217: 57-64.
[19] Hashim B, Khan W U, Hantoko D, *et al*. n-butane oxidation to maleic anhydride: Reaction mechanism and kinetics over VPO catalyst[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(14): 5987-6002.
[20] Hutchings G J. Heterogeneous catalysts—discovery and design[J]. J Mater Chem, 2009, 19(9): 1222-1235.
[21] Xie Z, Zhu S, Wang X, *et al*. Microwave synthesis of vanadium phosphorus oxide catalysts for n-butane selective oxidation[J]. Particuology, 2025, 96: 97-105.
[22] Zhang X, Wang H, Gou L, *et al*. Synthesis of an efficient VPO catalyst for the selective oxidation of n-butane to the MA product: Mechanism of crystal transformation[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 274: 118708.
[23] Faizan M, Li Y, Zhang R, *et al*. Progress of vanadium phosphorous oxide catalyst for n-butane selective oxidation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 43: 297-315.
[24] Zhang X, Tang Y, Qu S, *et al*. H_2S-selective catalytic oxidation: Catalysts and processes[J]. ACS Catalysis, 2015, 5(2): 1053-1067.
[25] Reyes-Carmona Á, Soriano M D, López Nieto J M, *et al*. Iron-containing SBA-15 as catalyst for partial oxidation of hydrogen sulfide[J]. Catalysis Today, 2013, 210: 117-123.
[26] Lee H S, Yang J H. Enhancing catalytic activity of V_2O_5/TiO_2 in H_2S selective oxidation by modulating oxygen adsorption conditions[J]. Canadian Journal of Chemistry, 2023, 101(5): 306-315.
[27] Barba D, Vaiano V, Palma V. Selective catalytic oxidation of lean-H_2S gas stream to elemental sulfur at lower temperature[J]. Catalysts, 2021, 11(6): 746.
[28] Zhan Y, Zhong C, Bi M, *et al*. Unveiling the catalytic active sites of iron-vanadium catalysts for the selective oxidation of methanol to formaldehyde[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2025, 72: 334-343.
[29] Efendi A, Magerramova L, Aliyeva A, *et al*. Feature of catalysis on bimetallic alloys Zr with V, Mo, and Fe in the reaction of methanol oxidation[J]. Turkish Journal of Chemistry, 2021, 45(4): 1070-1085.
[30] Litvintseva K A, Chesalov Y A, Selivanova A V, *et al*. Mechanistic study of selective oxidation of methanol over a monolayer V_2O_5/CeO_2 catalyst[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2024, 128(8): 3193-3203.■