

油水乳化的影响及控制技术

张华^{1,2} 刘光全^{1,2} 李婷^{1,2} 张瑞成^{1,2} 隋建红³

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室;

3. 山东省煤田地质规划勘察研究院)

摘要 原油多为油包水型(W/O)乳化体系,重质原油乳化程度更高。在油气开采行业,除了原油在管线乳化外,原油经由深井、柱塞、阀门与泵时均会产生乳化。原油乳化不仅降低原油品质,增加原油加工成本,还导致工艺废水污染负荷增加,乳化程度高且处理难度大,严重冲击污水处理系统。文章重点分析了原油乳化及电脱盐过程对含油乳化废水产排的影响,为石油石化企业采取控制措施解决原油乳化及后续影响问题提供参考。

关键词 含油乳化废液; 电脱盐废水; 破乳; 石油炼制

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2022.05.007

文章编号:1005-3158(2022)05-0033-06

Effects of Oily Emulsions and Its Demulsification Technologies

Zhang Hua^{1,2} Liu Guangquan^{1,2} Li Ting^{1,2} Zhang Ruicheng^{1,2} Sui Jianhong³

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology;

2. State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control;

3. Exploration Research Institute of Shandong Coal Field Geology Bureau)

ABSTRACT Crude oil is a kind of water/oil emulsion, and worse emulsion often occurs for heavy oil. In the oil industry, pipeline emulsification flow is a very common occurrence, as well as agitation through downhole wellbore, surface chokes, valves, and pumps will cause emulsions to form. The presence of emulsions in the crude oil reduces the quality of the oil itself, and increases the operating cost. Emulsions also result in the escape of large concentrations of oil into the water phase. The high emulsification of oily wastewater poses great adverse effects on the efficiency of wastewater treatment processes. This review paper is aimed to understand the formation of crude oil emulsification, its negative effects, and the corresponding demulsification problems, which would be useful for oil and refining industry to take preventive measures to solve the emulsion problems.

KEYWORDS oily emulsified wastewater; electric desalter wastewater; demulsification; oil refining

0 引言

随着世界经济对石油产品的持续依赖,超深水油、油砂、超重油等非常规原油的开发力度将不断加大^[1-3]。据探测,重油和超重油储藏大部分位于美国和委内瑞拉,沥青砂(Tar Sand)主要位于加拿大^[4-5]。不同于常规原油,重油的黏度高(API重力偏低),开采难度更大,通常需要热力驱动。重油在形成和迁移

过程中由于微生物降解和外界的变化,其中的轻质烃类被消解,C、S和金属元素含量偏高^[4-5]。研究者对全世界范围的82种原油和21种固体沥青采样分析,发现其中大部分重质原油的API比重均高于17.4°,且沥青质含量高于15.5%^[6]。原油中含有多类碳氢化合物,能被微生物选择性降解,当原油中的轻质组分被优先去除后,导致剩余原油重质化,且重质的杂

基金项目:中国石油研究与技术开发项目“绿色油气田污染防治及生态保护研究”(2021DJ6604)。

第一作者:张华,2008年毕业于中国科学院生态环境研究中心环境工程专业,博士,高级工程师,现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事污水处理与回用技术研究工作。通信地址:北京市昌平区黄河北街1号院1号楼,102206。E-mail:zhang-hua@cnpc.com.cn。

通讯作者:李婷,2006年毕业于济南大学环境工程专业,硕士,现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事污水处理与回用技术研究工作。通信地址:北京市昌平区黄河北街1号院1号楼,102206。E-mail:li-ting@cnpc.com.cn。

原子化合物(NSO)特别是含S化合物比例显著升高^[6]。

国内炼油厂越来越多依赖进口价格较低的劣质重油以维持生产规模与竞争力,但这类原油的特殊性质增加了石油炼制的难度^[7-8]。电脱盐是石油炼制的首道工序,由于含有胶质、沥青质等,原油在电脱盐罐中乳化程度高;劣质原油中含有的大量可过滤性固体,粒径小,难以从电脱盐罐中分离去除,这些颗粒物有助于形成乳化层;原油中的金属元素含量高,增加了原油电导率,导致电脱盐装置运行时电压与电场强度降低。此外,金属元素含量高,使得电脱盐罐中的乳化层稳定性增强。以上诸多因素,均导致电脱盐罐运行效率低,脱盐效果差。

原油乳化严重导致电脱盐罐中油水分离效果差、脱盐效率低,部分企业为保证脱盐后原油的品质,往往将电脱盐罐中的乳化层大量排入废水处理系统。电脱盐废水通常与其他废水混合进行集中处理,常规工艺流程包括隔油、气浮、生化处理、过滤等。由于电脱盐废水中特殊的污染物质组成与特性,往往导致后续污水处理系统出现一系列问题^[9],甚至引起生化系统崩溃。

随着原油劣质、重质化,不管是上游原油生产还是下游原油炼制,乳化一直是困扰生产企业的难题,不仅使原油运输、储存、炼制成本增加,还严重影响石油炼制产品的质量。目前,石油石化行业对原油乳化研究较多,而对原油乳化对石油炼制的研究较少,但由于乳化形成与破解机制存在共性特点,因此本文将从油包水(W/O)乳化中探索对水包油(O/W)乳化的理论认识,为石油炼制行业针对性地改善原油乳化影响、处理含油含盐乳化废水提供参考。

1 油水乳化的产生与破乳处理

乳化主要有三种形式,油包水型(W/O)、水包油型(O/W)及混合型^[10]。石油石化行业从原油开采到石油炼制等生产链上存在多种乳化体系,原油主要为W/O型乳化。

1.1 W/O乳化的产生过程

从原油开采到油井生命周期结束,原油和采出水经由深井、柱塞、阀门、泵与管道时发生的湍流、混合、扰动等均会导致油相与水相之间乳化^[10]。而原油中的沥青质、胶质、环烷酸、蜡质和固体颗粒物作为天然的乳化剂使得原油乳化体系更加稳定,特别是胶质和沥青质,由于具有极性官能团、芳香结构和脂肪链等,乳化作用尤其显著^[11]。在原油W/O乳化体系中,胶

质、沥青质等聚集于分散相水滴表面形成了稳定的界面层,从而阻止了水滴的凝结^[12]。Fingas等^[13]认为沥青质是原油W/O乳化体系中最主要的稳定剂,而胶质则是溶解沥青质的必要成分。早在20世纪90年代,部分学者就提出了原油乳化的形成条件^[10,14]:1)油、水两种不互溶液体进行接触;2)存在乳化剂等表面活性物质,通常为沥青质和胶质;3)充分的湍流与混合使得一种液体以液滴形式悬浮于另一种连续液体中。除了天然乳化剂,石油生产过程中为增加产量、便于运输还会加入其他化学药剂,包括为降低采出液黏度、提高输送管线压力、促进乳化形成的聚合物、表面活性剂、分散剂等^[1],这些物质进一步增强了原油的乳化程度。

W/O乳化液的稳定性通常指分散相水滴的抗聚结性^[15],影响乳化液稳定性的因素涉及沥青质与胶质含量、芳香类物质含量、弹性模量与黏性模量、乳化液稳定时间等^[10]。Fingas和Fieldhouse^[16]分析了300多种原油,将W/O型乳化液分为4类:稳定型(Stable)、不稳定型(Unstable)、半稳定型(Meso-stable)和中间型(Entrained)。其中,稳定型含水最高,通常可达80%,该乳化体系至少可稳定30d;不稳定型含水量不高于10%;半稳定型性质介于稳定型与不稳定型之间,含水量约60%;中间型并非真正的乳化体系,是处于油相中的水滴中间层,含水量约45%。高含水W/O乳化液可类比石油炼制行业中高含水的油泥、高含油含固的废水等,其体系稳定性的产生机制具有同源性。

当油与水乳化时,油相性质发生很大改变^[17]。首先,乳化体系的体积与密度增加。通常,稳定的乳化液含水60%~80%,因此,形成乳化体系后,油相体积较原体积增长了2~5倍,其密度也由0.80 g/mL增至1.03 g/mL。此外,油相黏度也显著增加,通常由几百增至100 000 mPa·s。因此,在形成乳化体系后,油相明显成为了较重的半固相形态。

W/O型乳化液中液滴的自然沉降分离很慢,且盐含量高,在实际生产中会引起很多问题,如图1所示。原油开采过程中产生了W/O型乳液,在石油储存、运输、炼制等过程中容易引起管道、泵、生产装置腐蚀,同时伴随着乳化液黏度增加导致的系列问题。Fingas和Fieldhouse^[16]认为含水量越高,原油乳化液更趋于稳定,特别是沥青质、胶质含量偏高的劣质重油,黏度会随停留时间而增加。原油黏度增加,导致开采时管道压力显著降低,输送泵的功率相应增加^[1]。此外,在开采与运输中,通常需要通过加热、添

加稀释剂以形成 O/W 乳化液等方法降低采出液的黏度,但却加大了开采与运输成本。比如,委内瑞拉重油通常掺加石脑油便于运输及原油炼制,其石脑油的比

例甚至达到 30%^[18]。此外,原油乳化严重,含水量高,盐含量随之增加,使得石油炼制行业脱盐脱水困难,不仅影响生产装置正常运行,还对产品质量产生影响。

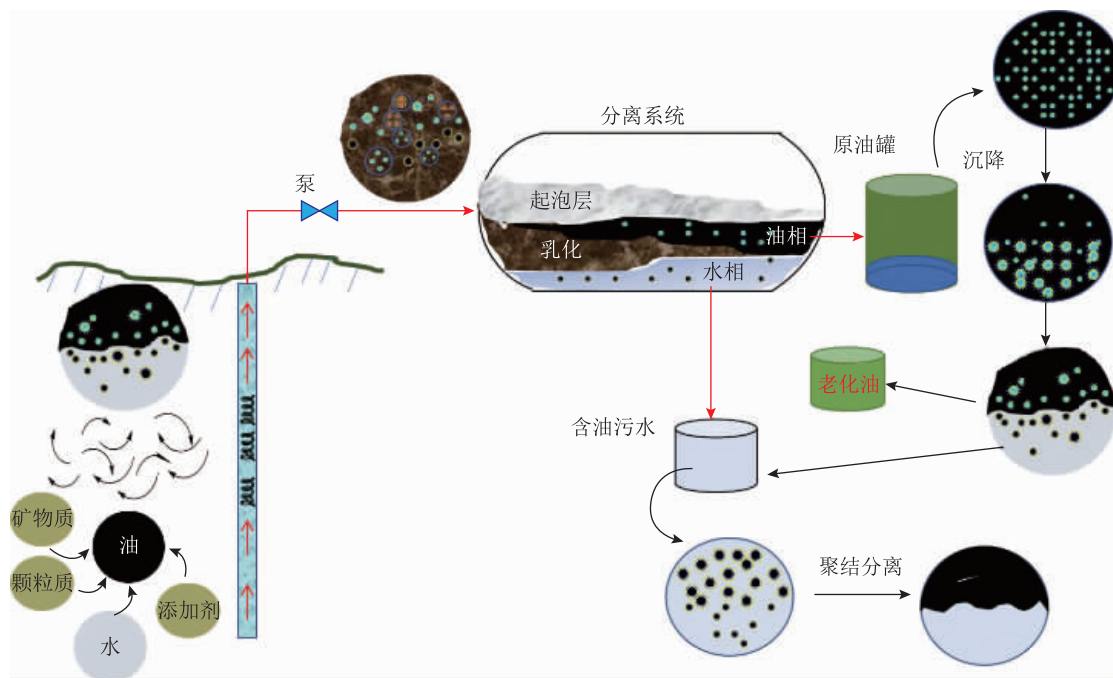


图 1 原油乳化与分离

1.2 W/O 乳化体系的破乳

鉴于 W/O 型乳化的诸多问题,研究者多年来一直致力于低成本、高效破乳的技术研发与优化。通常,破乳技术包括化学破乳、重力或离心分离、pH 值调节、过滤、热处理、膜分离、电场破乳等^[19]。每种技术都具有不同的特点和适应性。化学破乳剂可以通过改变油水界面性质促进水滴聚结成更大的液滴,但面临着如何去除残留在水相和油相中破乳剂的问题^[20]。pH 值调节通常用于分离 O/W 型乳化液,而对 W/O 型破乳效果并不显著。离心可有效分离某些乳化液,但运行成本很高,而且离心过程中剪切与混合作用可能会导致乳化液的再乳化,从而趋于更加稳定。热处理能够降低油相的黏度,增加油与水的密度差,使得水滴更容易快速通过油相沉降分离,并提高水蒸气的挥发量。但热处理和化学破乳的成本相对较高。

电场应用于 W/O 型乳化液的破乳处理已有上百年的历史^[21]。电场破乳时,分散相液滴发生极化,这些极化粒子间相互作用形成与电场平行的液滴链,随之聚结成粒径更大的液滴,最终沉降、分离。Parthasarathy 和 Klingenberg^[22]认为这些液滴在电场中形成的纤维状聚集体导致体系结构发生变化,黏度增加,反应

快速,电场消失后体系又可恢复。电场改变分散相和连续相的作用主要包括:电极化、电极间循环运动、双电层叠加、连续相(如水)架桥作用等^[22]。其中,极化也有多种成因,涉及电子、原子、偶极化、游离或者迁移(界面)极化;直流电场中,粒子在电极间快速往复运动,导致能量散失,且体系黏度增加,当电场频率足够大时,这种现象会减弱。

过去很长一段时期,交流(AC)电场在 W/O 型乳化液破乳方面的应用广泛,频率通常为 50 Hz 或 60 Hz。1981 年,才引入配置绝缘电极的脉冲直流(DC)电场^[20],并逐渐成为电聚结技术的主流。当 W/O 型乳化液中水相体积较大时,利用脉冲电场更有利于阻止电极间的短流。电场破乳与热处理、化学破乳、离心破乳等技术相比,处理效率与运行成本方面优势更为明显^[19]。

2 含油乳化废液的产生及污染特性

原油经由储库运至炼油厂时,含水量、含盐量并不低,且呈现稳定的乳化状态。由于原油中的水分、盐会导致生产装置腐蚀、催化剂中毒、在热交换器内沉积等不良影响,所以原油在炼制前,必须进行脱盐脱水处理^[23]。目前,石油炼制行业基本应用高压电场进行破乳脱盐脱水,但原油乳化严重,对电脱盐工

艺运行及污染产排影响显著。

2.1 O/W 乳化废液的产生环节

原油预热到一定温度后,与注水混合进入电脱盐装置,如图 2 所示^[23]。在高压电场中,水滴发生极化,并在感应电场力的作用下相互靠近,最终聚结成大的聚集体而沉降,油相从上部分离,废水由下部收集。原油电脱盐罐中应用的高压电场通常有直流电场、交流电场和交直流混合电场。直流电场效率高,但电腐蚀严重,通常用于含盐量低的原油脱盐;交流电场能够承受含水含盐高的原油,但效率低于直流电场。因此,近年来,综合了直流电场与交流优势的交直流电场逐渐成为电脱盐罐的主流工艺。

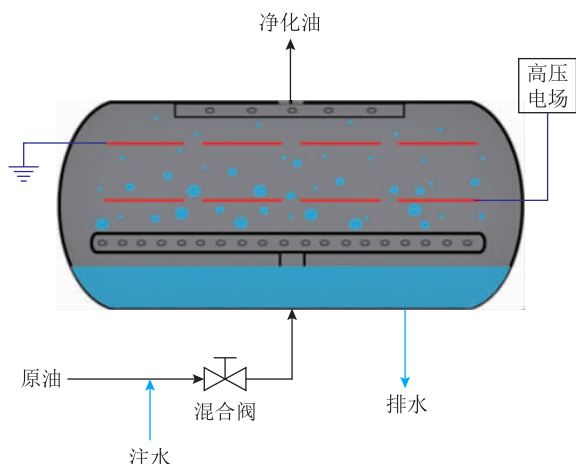


图 2 电脱盐装置示意

电脱盐装置处理指标要求见表 1^[7]。

表 1 电脱盐装置运行指标要求

设计指标	轻质原油	重质原油
脱盐率/%	单级电脱盐, >90 两级电脱盐, >95	单级电脱盐, >90 两级电脱盐, >95
脱后原油含盐量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<2	<2
脱后原油含水量/ %(体积比)	<0.3	<0.7
脱盐废水含油量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<200	<1 000

由表 1 可以看出,与轻质原油相比,重质原油在电脱盐后,原油中的剩余盐含量与脱盐废水中的油含量的设计值均偏高,这与重质原油偏高的乳化程度密切相关:一方面,重油中沥青质与胶质含量高,乳化严重,API 比重低,电脱盐罐脱盐脱水效率相对较低;另一方面,虽然重油在进入原油管线前已经脱盐脱水,

但进入炼厂的重油仍含有较高比例的含盐水。原油中盐含量越高,电导率也越高,导致电脱盐罐电压降低,电场强度减弱,从而使得油水分离效率低;而且金属含量越高,W/O 乳化液也越稳定^[7-8]。

电脱盐工艺相对成熟,但目前电脱盐工艺运行效率并不高,因为电脱盐罐内上层油相和下层水相间分界并非清晰,而是一定厚度的乳化层,主要由小粒径水滴、油、悬浮固体物等组成^[7]。该中间乳化层越厚,油水分离效果越差,使得更多的水分进入原油,同时也增加了废水的含油量。一方面,原油中残留的水分易导致蒸馏塔顶喷塔,较高的含盐量易造成生产设施腐蚀;另一方面,外排废水中高浓度的含油量增加了污水处理系统极性油及 COD 的处理负荷。

为优化原油电脱盐/脱水工艺、改善处理效果,生产企业采取了投加破乳剂、调节 pH 值、超声协同破乳等措施^[24],研究者也开始尝试通过模型来模拟该作用过程。Meidanshahi 等^[23]基于双变量种群平衡方程建立了模拟交流电场电脱盐装置中水滴尺寸与盐浓度分布的数学模型,以此预测不同操作条件下的脱盐脱水效率,该模型考虑了原油中分散相与连续相密度、黏度、水含量、盐含量等因素。Basu^[7]则通过电脱盐实验装置模拟了实际原油的脱盐脱水过程,认为不同破乳剂的电脱盐效率存在差异,需要对破乳剂进行筛选优化。

2.2 含油乳化废液对污水处理系统的冲击

乳化严重的劣质原油通常还含有大量的固体颗粒物,其与油相的相互作用降低了原油在电脱盐罐中的脱水脱盐效率。虽然部分固体颗粒物在电脱盐过程时沉降于罐底,但大量的细微颗粒物仍聚集于电脱盐罐的中间乳化层,部分被原油携带至下游生产装置,部分则随废水排出^[25]。即使沉积于罐底的颗粒物,也会随着电脱盐罐的定期反冲洗排入含油含盐废水系统^[7]。

原油中其他成分也会在电脱盐罐中沉积并随反冲洗废水排入废水收集与处理系统。Hu 等^[26]研究发现原油中重质组分较轻质组分更容易随固体颗粒沉积。沥青质和胶质是原油中的重组分,密度大、沸点高。Hemmati 等^[27]认为沥青质与胶质结合而悬浮于原油中,其沉淀是不可逆过程。Santos 等^[28]利用近红外光谱技术研究了不同电脱盐条件下沥青质在罐底的沉积,发现沥青质的稳定性并不受温度与压力影响,但在稳定型原油中沥青质与其他物质之间的化学作用使其更加稳定,难以沉降分离。但当炼厂原油中掺混相容性较差的污油时,沥青质稳定性降低,更

容易沉降,从而增加电脱盐废水中沥青质的含量^[28]。

电脱盐是原油的净化过程,其中的杂质及部分乳化油都排入了废水处理系统,除了石油烃类、酚类等^[29],还包括固体颗粒物、胶质与沥青质、环烷酸类、表面活性剂等,使得电脱盐废水呈现组成复杂的 O/W 型乳化态。而电脱盐废水通常与其他废水混合进行集中处理,常规工艺流程包括隔油、气浮、生化处理、过滤等,因此电脱盐废水特别是反冲洗废水中的多种污染物加大了污水处理系统的负荷^[8]。劣质原油中的细小颗粒物进入废水,总悬浮物浓度升高,易在管道和处理设施中沉积,导致废水处理量与停留时间降低^[8]。电脱盐废水中的胶质、沥青质及环烷酸进入生化系统,难以被生物降解,且生物毒性强,往往导致生化系统崩溃,生化池还会产生严重的泡沫问题^[9]。此外,劣质原油开采时,为降低 H_2S 影响而添加胺类物质,这类物质随之进入原油,在电脱盐罐油水分离过程中又有部分进入水相,排入废水处理系统,加大了处理系统 COD 与氮的污染负荷。

2.3 含油乳化废液破乳技术进展

常规混凝破乳实质上是将微乳化物聚结为可分离的液滴,分离出含水、油、固的含油污泥。这种本质上的浓缩过程,无法实现乳化物的充分破乳与分离。而且,电脱盐废水具有较低的 Zeta 电位绝对值,常规混凝的压缩双电层或电中和机理并不适用,在混凝处理过程中通常为活性铁或铝氢氧化物的吸附、共沉淀作用,而非乳化膜破裂、内相油聚结,因此导致药剂投加大,排出高含水泥、渣^[30]。研究发现,炼厂电脱盐排泥中有机液体和无机固体的质量比例平均为 15% 和 45%,固体颗粒导致的严重乳化难以通过混凝实现破乳与分离,含油乳化物只是转移至固相,造成污泥脱水困难^[30]。

除了混絮凝处理外,部分企业还采用有机破乳剂处理电脱盐废水,通过改变油水乳化液的类型和界面性质而破乳。破乳剂能够全部或部分替代乳化物稳定界面膜的活性物质,这种替代可降低膜黏度或弹性,有助于脱稳,但这种简单的替换如果过量,又会产生更加稳定的乳化物^[15]。某石化公司于 2016 年建设了电脱盐废水的化学破乳预处理系统,运行结果表明出水石油类与 COD 波动较大,石油类最高可达 325 mg/L,仍然对后续污水处理系统造成较大冲击,且药剂处理成本仍高达 10 元/t 废水。

因此,对于高效破乳剂的研发,必须充分考虑油水分分配系数、表面竞争吸附、水相传质能力等因素,研发具有特定官能团的破乳剂,提升其界面膜破裂、内

相聚结的性能,实现含油废液深度破乳与分离,为石油石化行业减污降碳提供技术支撑。

3 结 论

随着原油劣质、重质化,原油乳化程度越来越严重,不仅影响石油炼制产品的质量,还导致废水处理更加困难。

1)一是重质原油中的沥青质、胶质、蜡质、固体颗粒物等天然乳化剂使得原油乳化体系更稳定;二是石油生产过程中为增产添加的聚合物、表面活性剂、分散剂等,进一步增强了原油的乳化程度。原油破乳应聚焦各类表面活性剂导致的乳化问题。

2)原油电脱盐过程中,由于原油乳化程度高,导致电脱盐罐内乳化层厚,油水分离效果差,产排废水中含油量高。特别是劣质原油中细小颗粒物、胶质、沥青质、环烷酸及胺类添加剂等进入废水处理系统,极大增加了污水处理系统的负荷,严重时可能导致处理系统崩溃。

3)石油石化企业应基于原油乳化成因及影响开展污染防治工艺优化,一是从源头解决原油乳化及含油乳化废液的处理难题;二是基于含油废液深度破乳与分离目标,研发低成本、高效的绿色破乳剂。

参 考 文 献

- [1] HUSIN H, AZIZI A, HUSNA A. An overview of viscosity reducers in heavy crude oil production: CHEMECA [C]. Perth: Chemeca, 2014: 838.
- [2] VOUDOURIS V, STASINOPOULOS D, RIGBY R, et al. The ACEGES laboratory for energy policy: exploring the production of crude oil [J]. Energy policy, 2011, 39(9): 5480-5489.
- [3] MATSUMOTO K, VOUDOURIS V, STASINOPOULOS D, et al. Exploring crude oil production and export capacity of the OPEC Middle East countries [J]. Energy policy, 2012, 48(C): 820-828.
- [4] SPEIGHT J G. The desulfurization of heavy oils and residua, 2nd Edition By James G. Speight [M]. New York: American Chemical Society, 2000: 1-480.
- [5] SPEIGHT J G. Chapter 1-refining heavy oil and extra-heavy oil, in heavy and extra-heavy oil upgrading technologies [M]. Boston: Gulf professional publishing, 2013: 1-13.
- [6] MEYER R F. Exploration for heavy crude oil and natural bitumen [J]. American association of petroleum geologists, 1987, 25: 537-547.
- [7] BASU S. Impact of opportunity crudes on refinery desalter and wastewater treatment performance-Part 1 [J]. Hydrocarbon processing, 2018, 97(8): 85-89.

- [8] BASU S. Impact of opportunity crudes on refinery desalter and wastewater treatment performance-Part 2[J]. Hydrocarbon processing, 2018, 97(9):97-100.
- [9] JENKINS D, RICHARD M G, DAIGGER G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming 2ed[M]. Lodos ativados, 2017:1-164.
- [10] WONG S F, LIM J S, DOL S S. Crude oil emulsion: A review on formation, classification and stability of water-in-oil emulsions[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2015, 135:498-504.
- [11] HIPPMANN S, AHMED S S, FROHLICH P, et al. Demulsification of water/crude oil emulsion using natural rock Alginite[J]. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 2018, 553:71-79.
- [12] NOUR A H, HASSAN M A, YUNUS R M. Characterization and demulsification of water-in-crude oil emulsions[J]. Journal of applied sciences, 2007, 7(10):1437-1441.
- [13] FINGAS M F. Water-in-oil eEmulsions: formation and prediction[J]. Journal of petroleum science research, 2014, 3(1):38-49.
- [14] WALSTRA P. Principles of emulsion formation [J]. Chemical engineering science, 1993, 48(2):333-349.
- [15] CHEN G, TAO D. An experimental study of stability of oil-water emulsion[J]. Fuel processing technology, 2005, 86(5):499-508.
- [16] FINGAS M, FIELDHOUSE B. Studies on crude oil and petroleum product emulsions: Water resolution and rheology[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2009, 333(1-3):67-81.
- [17] FINGAS M, FIELDHOUSE B. Studies of the formation process of water-in-oil emulsions [J]. Marine pollution bulletin, 2003, 47(9-12):369-396.
- [18] Venezuela oil & gas report - Q1 2020[M]. London: fitch solutions group limited, 2020:1-50.
- [19] ZOLFAGHARI R, RAZI A, ABDULLAH L C, et al. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry[J]. Separation and purification technology, 2016, 170:377-407.
- [20] EOW J S, GHADIRI M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology[J]. Chemical engineering journal, 2002, 85(2-3):357-368.
- [21] ZHANG H, BUKOSKY S C, RISTENPART W D. Low-voltage electrical demulsification of oily wastewater[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2018, 57(24):8341-8347.
- [22] PARTHASARATHY M, KLINGENBERG D J. Electrorheology: mechanisms and models [J]. Materials science and engineering: R: reports, 1996, 17(2):57-103.
- [23] MEIDANSHAH V, JAHANMIRI A, RAHIMPOUR M R. Modeling and optimization of two stage AC electrostatic desalter [J]. Separation science and technology, 2012, 47(1):30-42.
- [24] CARDOSO R. Aqueous chemistry principles applied to refinery processes[J]. Hydrocarbon processing, 2018, 4:55-61.
- [25] LONGTIN H, HOFFMAN G. Manage the impacts of high-solids crude oil more effectively[J/OL]. (2014-11-10)[2022-01-04]. https://www.researchgate.net/publication/287924910_Manage_the_impacts_of_high-solids_crude_oil_more_effectively.
- [26] HU G, LI J, ZENG G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review [J]. Journal of hazardous materials, 2013, 261:470-490.
- [27] HEMMATI S A, AMELI F, DABIR B, et al. On the evaluation of asphaltene precipitation titration data: Modeling and data assessment [J]. Fluid phase equilibria, 2016, 415:88-100.
- [28] SANTOS D, FILHO E B M, DOURADO R S, et al. Study of asphaltene precipitation in crude oils at desalter conditions by near-infrared spectroscopy[J]. Energy & fuels, 2017, 31(5):5031-5036.
- [29] DADARI S, RAHIMI M, ZINADINI S. Crude oil desalter effluent treatment using high flux synthetic nanocomposite NF membrane-optimization by response surface methodology[J]. Desalination, 2016, 377:34-46.
- [30] U.S. EPA HPV challenge program category assessment document for acids and caustics from petroleum refining category[R/OL]. (2009-07-06)[2022-01-04]. <https://petroleumhvp.org/petroleum-substances-and-categories/~media/5CD6B52E8159415FABC84B45644A7B45.ashx>.

(收稿日期 2022-01-07)

(编辑 王薇)

环境保护

从我做起