

# 油田采出水中油滴的聚结技术与设备

张敏霞, 刘 涛, 安明明, 尤启明

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**[摘要]** 油田采出水中细小分散相油滴的去除是含油污水有效处理的关键, 而分散相油滴的去除效果又有赖于油滴聚结技术的发展。从目前国内外研究和应用的情况来看, 聚结技术主要分为材料聚结技术和水力聚结技术, 其中材料聚结又可分为润湿聚结和碰撞聚结。首先对材料聚结和水力聚结的机理进行了总结, 并从原理角度分析了影响聚结除油效果的主要因素——聚结材料性质和聚结反应器结构。然后从提高除油效果和改善出水水质的角度分析综述了基于 2 种机理发展的技术与设备的研究与应用。从应用情况来看, 材料聚结技术与设备聚结性能和除油效果的好坏取决于聚结材料表面的物理化学特性、流体特性和操作条件。水力聚结技术与设备聚结性能和除油效果的好坏关键在于如何控制操作条件和优化设备结构。无论是材料聚结技术, 还是水力聚结技术, 要想达到较好的除油效果, 聚结后的油水高效分离是一个重要因素。最后, 总结出聚结材料的改性、设备结构的优化和 2 种技术的有机结合将是聚结技术发展的方向。

**[关键词]** 采出水; 聚结机理; 材料聚结; 水力聚结

**[中图分类号]** X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)03-0033-08

## Coalescence technology and equipment of oil droplets in oil field produced water

ZHANG Minxia, LIU Tao, AN Mingming, YOU Qiming

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The key of effective treatment oilfield produced water is the removal of fine dispersed phase oil droplets which depends on the development of oil droplet coalescence technology. From current domestic and foreign research and application situation, coalescence technology can be divided into material coalescence technology and hydraulic coalescence technology, and the former can be divided into wetting coalescence technology and collision coalescence technology. First, the mechanism of material coalescence and hydraulic coalescence was summarized. The main factors including the properties of coalescing materials and the structure of coalescing reactors affecting the oil removal efficiency of coalescence were discussed. Then, from the perspective of improving oil removal efficiency and effluent water quality, the development of research and application of technologies and equipment based on the two mechanisms was analyzed and summarized. From the perspective of application, the performance and oil removal efficiency of the material coalescence technology and equipment depended on the physical and chemical properties of the surface of the coalesced material, fluid properties and operating conditions. The performance and oil removal efficiency of hydraulic coalescence technology and equipment lied in the control of operating conditions and the optimization of equipment structure. Whether material coalescence technology or hydraulic coalescence technology, in order to achieve a better oil removal efficiency, the efficient separation of oil and water after coalescence was an important factor. Finally, the development direction of coalescence technology had been summarized, mainly including the modification of coalescence materials, the optimization of equipment structure and the organic combination of the two technologies.

**[基金项目]** 中海油基金课题(2018OT-GC20)

**Key words:** produced water; coalescence mechanism; material coalescence; hydraulic coalescence

油田开采过程往往伴随着大量采出水的产生<sup>[1]</sup>,海上油田的开采更是如此<sup>[2]</sup>。采出水主要为油水混合物,其含水量大,油水乳化严重。为使采出水达标处理,除油是关键<sup>[3]</sup>。通常,采出水中的油主要以浮油、分散油、乳化油、溶解油等几种形式存在<sup>[4]</sup>。根据 Stocks 公式,对于油滴粒径较大的浮油,往往通过重力沉降就可以达到较好的去除效果;对于溶解油,往往需要通过化学或者生物法进行去除,物理的分离几乎没有任何作用;而对于分散油和乳化油而言,要想有较好的去除效果,则往往需要先增大粒径,再利用重力或者旋流分离技术进行去除。这种增大粒径的方法叫做粗粒化,又称聚结法<sup>[5-8]</sup>。聚结技术是一种物理化学的方法,它不需要外加任何的化学试剂,不会改变污水中的含油量,油滴的化学组成也不会发生变化,而仅仅是使油滴粒径分布发生改变,小粒径的油滴聚结成大粒径油滴<sup>[9]</sup>,从而提高重力或者离心力场的分离除油效果<sup>[10]</sup>。

20 世纪 30 年代聚结技术首先在美国应用于污水除油,并逐步应用到油中水的去除<sup>[11]</sup>。20 世纪末该技术在國內也得到了应用,并获得了较好的效果,处理后的水中含油质量浓度能控制在 30 mg/L 以下<sup>[12]</sup>。在应用过程中发现,影响聚结除油效果的主要因素为聚结材料和聚结反应器。笔者首先对聚结除油的机理进行了总结,在此基础上综述了聚结技术与设备的研究和应用现状,并对聚结技术未来的发展方向进行了展望。

## 1 聚结机理

### 1.1 材料聚结机理

根据聚结材料对油亲和力的不同,可将材料聚结除油机理分为润湿聚结和碰撞聚结<sup>[6-7,13-14]</sup>。润湿聚结往往发生在疏水亲油材料的表面<sup>[15]</sup>,如图 1(a)所示,细小分散相油滴首先在亲油的聚结材料表面进行吸附,再在材料表面进行润湿,并与其他润湿的油滴在范德华力作用下进行结合聚结<sup>[16]</sup>,然后在水流剪切的作用下与表面脱离,并通过浮力上浮于污水表面。碰撞聚结一般被认为更易发生在亲水疏油材料的表面,因为早期的碰撞聚结理论认为,在疏油材料的表面油滴不能吸附润湿。如图 1(b)所示,细

小油滴在碰撞到亲水材料表面时,会经过反弹或者在材料表面与其他油滴发生碰撞结合成较大油滴,从而实现油滴的聚结过程<sup>[17-19]</sup>。在实际过程中,往往 2 种作用同时存在,对于亲油材料而言,主要以润湿聚结为主;而对于疏油材料而言,主要以碰撞聚结为主<sup>[20]</sup>。

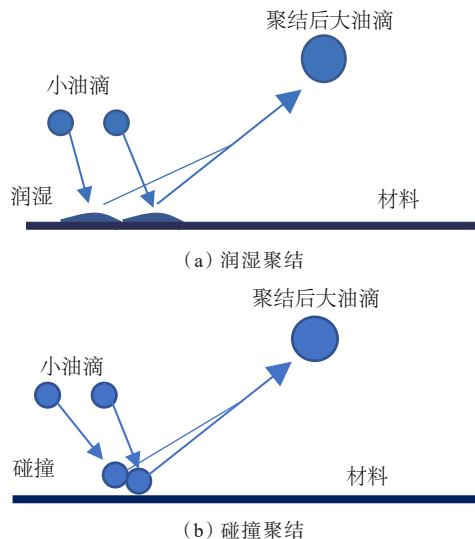


图 1 材料聚结机理示意

Fig. 1 Schematic diagram of material coalescence mechanism

### 1.2 水力聚结机理

水力聚结是在微湍流情况下,细小油滴在湍流脉动运动状态时冲破液膜界面膜阻力发生碰撞聚结的一种油滴聚结长大行为<sup>[21-24]</sup>,其机理如图 2 所示。在污水中,当 2 个或多个液滴在同一方向的相对运动速度不为零时,液滴之间就会发生碰撞。碰撞过程会产生 3 种不同的结果<sup>[25-26]</sup>: (1) 碰撞后反弹或分离; (2) 碰撞后聚并; (3) 碰撞后破碎。在除油的过程中,碰撞聚并是研究者所期望的,这种作用往往会在油滴动能与表面能之比(即韦伯数)在一定范围内时才存在。因此,虽然在分散相液滴存在的流体介质中普遍存在着碰撞过程,但往往仅有少数的碰撞发生了有效的聚并。

## 2 聚结除油技术与设备

### 2.1 基于材料聚结机理的除油技术与设备

材料聚结除油技术通常是在设备内部填装聚结材料,如聚结板或填料等,从而实现细小油滴的聚结

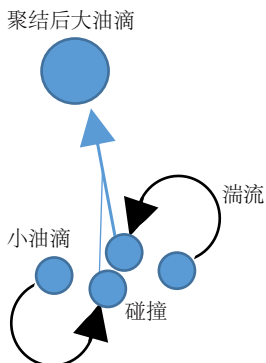


图2 水力碰撞聚结机理示意

Fig. 2 Schematic diagram of hydraulic collision coalescence mechanism.

长大,提高除油效率,改善出水水质。

### 2.1.1 板式聚结技术与设备

20世纪70年代,英国Fram公司首先开发了板式聚结除油器(coalescing plate separator)<sup>[27]</sup>,该设备中的聚结元件是一叠V型板,聚结板的材质为玻璃纤维,聚结板上开有允许聚结油滴通过的排液孔。现场应用效果表明,该设备具有良好的除油效果。

美国C-E Natco公司于20世纪80年代开发了Performax板式聚结除油器,它是一种错流式沉降设备<sup>[28]</sup>。聚结元件是利用浅池沉降原理设计而成的多层斜板,聚结材料主要为亲油疏水材质,如聚丙烯板等,油滴可以在聚结板上润湿聚结后长大,从而提高除油效果。在处理能力相同的条件下,该技术成为除油设备向高效、小型化发展的关键技术。

为了增加流道面积和改变流体中分散相油滴的运动方向而增大碰撞聚结机率,往往将聚结板设计成波纹形状,形成波纹板聚结器<sup>[29]</sup>。波纹板聚结器一般具有结构较为简单、能耗低、除油效率较高等优点<sup>[19]</sup>。

### 2.1.2 填料式聚结技术与设备

为了增大润湿和碰撞机会,提高细小油滴的去除效果,研究者在除油器内填装聚结填料形成填料式聚结分离器<sup>[30-31]</sup>。分散相油滴通过聚结填料床层,油滴粒径变大,最后进入油水分离装置,进行油水分离<sup>[32]</sup>。应用了亲油疏水材质的Performax板式聚结器也是一种最初的填料式聚结设备,随后Natco公司又研发了一种双流式聚结分离器,它是将2台Performax聚结器一体化并联,应用的原理是材料聚结和浅池沉降原理。之后Natco公司又将Porta-

Test Revolution<sup>TM</sup>旋流入口组件技术与Performax<sup>®</sup>填料技术相结合,形成聚结分离一体化卧式三相分离器,如图3(a)所示。由于Performax<sup>®</sup>填料技术的引入,使得三相分离器体积可以极大地缩小,从而有利于海洋平台的使用。由于油容易在聚结材料上黏附,造成材料孔隙堵塞,从而降低聚结除油效果,之后又有研究者开发出了一种卧式再生聚结分离器,如图3(b)所示。由于卧式分离器占地面积大,因此有研究者开发出了立式聚结分离器,它是一种内部装有高孔隙亲油聚结滤料的油水分离设备,如图3(c)所示。当含油污水经过聚结滤料时,污水中的油浸润在聚结滤料的表面而从污水中分离出来,同时在滤料内小油滴逐渐聚结成较大的油滴。聚结长大后的油滴在容器的分离室内通过重力作用而被分离出去。这种固定滤料聚结器容易堵塞,需要进行反冲洗。

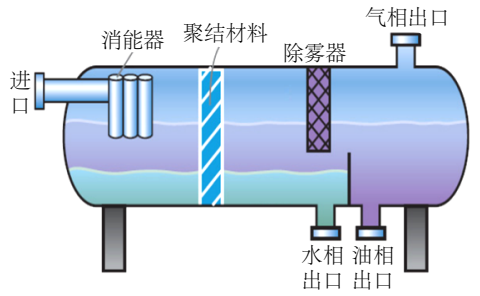
为了进一步缩小聚结分离器的占地面积,英国Opus公司开发了Mare's Tail管式聚结器。这种聚结器是将聚结和分离过程分开,分离技术使用了分离效率较高的水力旋流器,如图3(d)所示。

Mare's Tail聚结设备的作用是将采出水中分散的小油滴进行聚结使之长大,为下游水力旋流器提供更好的分离条件,从而提高水力旋流器的效率<sup>[33]</sup>。Mare's Tail聚结技术是利用油滴颗粒和纤维介质之间的表面张力、分散和偶极效应、内聚吸引力、阻力、油滴和纤维之间的动力和重力等多种力的共同作用将小油滴凝聚成较大的油滴。通过利用该技术可以大大提高排放到海洋中的采出水的质量。

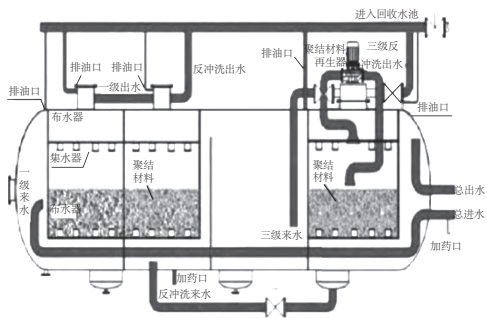
实际应用发现,Mare's Tail技术可处理含油质量浓度为100~1 000 mg/L,油滴颗粒为10~20  $\mu\text{m}$ 的含油污水。经过Mare's Tail聚结和水力旋流器分离后,出水中的分散油质量浓度<25 mg/L,聚结器可使油滴粒径增大400%~500%,旋流分离器分离效率可提高40%。Mare's Tail技术已被证明适合FPSO或者离岸平台含油污水的处理,具体应用情况如表1所示。

### 2.1.3 滤芯式聚结技术与设备

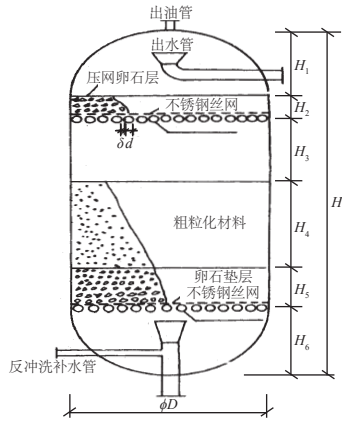
滤芯式聚结技术是利用聚结材料和支撑结构形成具有过滤功能的聚结元件。聚结材料有微孔结构材料和纤维等布状材料,可以是亲水疏油材料或疏水亲油材料,也可以是两者的混合材料。当含油污



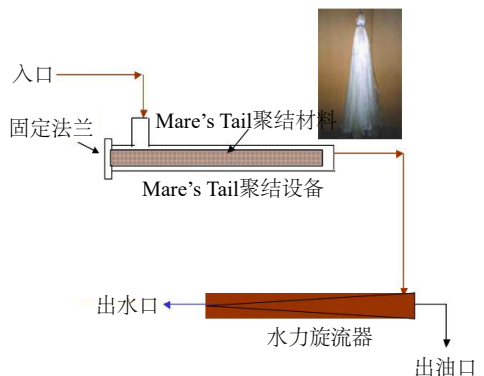
(a) 聚结分离一体化卧式三相分离器



(b) 再生式填料聚结分离器



(c) 立式固定滤料聚结器



(d) Opus Plus 公司 Mare's Tail 聚结设备和流程示意

图 3 填料式聚结技术与设备

Fig. 3 Sealed coalescence technology and equipment

表 1 Mare's Tail 系列产品海上应用情况

公司名称	设备尺寸/型号	使用终端
壳牌	15.2、25.4、45.7 cm Mare's Tail 装置	Haewener Brim FPSO
斯伦贝谢	2×25.4 cm Mare's Tail 装置	巴西近海
埃克森美孚国际公司	10.2 cm Mare's Tail 装置	NSO 平台
赫斯	2×53.3 cm Mare's Tail 装置	Triton FPSO
英国石油美国公司	35.6 cm Mare's Tail 装置	Na Kika 平台
英国北海鲁尔天然气公司	15.2 cm Mare's Tail 装置	Ravenspurn 北部平台
墨菲沙捞越石油有限公司	15.2 cm Mare's Tail 装置	Patricia 西部平台
伦丁英国有限公司	50.8 cm Mare's Tail 装置	Heather 平台
喀麦隆合计	2×50.8 cm Mare's Tail 装置	BAP 和 ESP1 平台

水通过滤芯材料时,分散相油滴在材料表面润湿聚结或者在材料空隙中进行碰撞聚结,通过微孔后形成较大油滴,从而有利于油水分离,达到良好的除油效果。滤芯式聚结设备的除油效果好坏主要依赖于聚结滤芯性能的优劣,滤芯中填充聚结材料密度和厚度较大时,聚结效果较好,但是更容易堵塞。因此,在实际应用过程中,需要根据处理进水的水质特点和出水的水质要求进行针对性设计。滤芯式聚结器可以与不同的分离方式进行一体化设计,可分为聚结重力分离一体化设备和聚结过滤分离一体化设备 2 种形式。首先出现的是聚结重力分离一体化设备,如图 4(a)所示,聚结变大的油滴在设备内进行重力分离。由于是利用重力在设备内部进行分离,因此设备需要为重力分离留有足够的空间,以便聚结的油滴能实现有效分离。20 世纪 90 年代,美国的 Pall 公司推出了聚结过滤分离一体化设备<sup>[34]</sup>,如图 4(b)所示。含油污水去除杂质固体颗粒后,进入聚结滤芯,分散相油滴在通过滤芯的过程中长大成较大油滴,达到细小油滴聚结的目的;聚结滤芯可以与分离滤芯配合形成一体化的聚结分离设备,分离滤芯一般使用特殊的材料制造,使其具有选择性透过特性,即连续相通过而分散相不过,从而进一步提高了除油效率。该聚结过滤分离一体化设备可以根据场地条件设计成卧式和立式结构,其中卧式适用于高度有限的情况,而立式适用于占地有限的情况。

为了能够更有效地去除细小油滴,ProSep 公司开发了一种集过滤-聚结-重力分离于一体的组合除油技术,称为 TORR™ 除油技术,其原理和工艺流



程如图4(c)所示。TORR™除油技术主要是通过一种可再生的聚氨酯类材料作为吸附聚结介质。TORR™聚结系统由一个分离容器和径向流的聚结元件组成,在实现细小油滴聚结的同时进行油水有效分离,可去除 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以上的分散相油滴。

TORR™碳氢化合物聚结技术占地面积小,能够替代效率较低的除油设备。采用TORR™系统在北海FPSO船上进行了现场试验。海上试验为期7 d,分为3个试验点。

第1试验点是在水力旋流器1(HC-1)下游进行测试,采出水的温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,原油API°密度为42.2。上游注入的化学物质包括破乳剂、阻垢剂、缓蚀剂和少量消泡剂。通过该工艺装置的平均流速为 $1.36\text{ m/h}$ ,入口水中平均含油质量浓度为 $98.2\text{ mg/L}$ ,出口水中平均含油质量浓度为 $2.9\text{ mg/L}$ 。

第2试验点是在水力旋流器2(HC-2)下游进行测试,采出水的温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,原油API°密度为31.8。该生产线上游注入的化学物质包括破乳剂、阻垢剂、缓蚀剂、消泡剂和聚合物。通过该工艺装置的平均流速为 $1.21\text{ m/h}$ ,入口水中平均含油质量浓度为 $313.4\text{ mg/L}$ ,出口水中平均含油质量浓度为 $4.2\text{ mg/L}$ 。

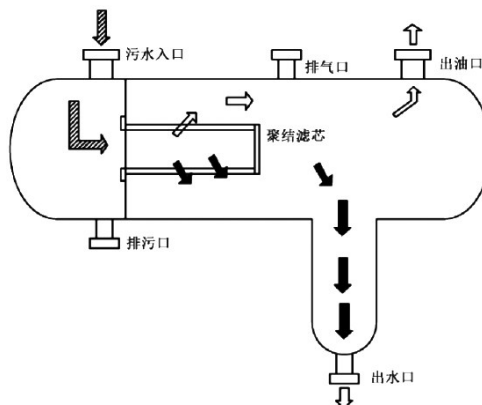
第3试验点是在脱气装置下游进行测试,采出水的温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过该工艺装置的平均流速为 $1.54\text{ m/h}$ ,入口水中含油质量浓度稳定在 $44\text{ mg/L}$ 左右,出口水中平均含油质量浓度为 $2.6\text{ mg/L}$ 。

3个试验点的实验表明,TORR™技术在采出水聚结除油方面展现出了优异性能,处理后污水中的油质量浓度在 $5\text{ mg/L}$ 以下。

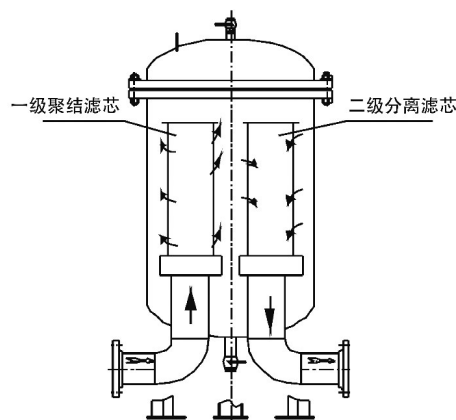
## 2.2 基于水力聚结机理的除油技术与设备

水力聚结除油技术通常是使流体在设备内部形成微湍流状态,不同液滴之间存在着相对运动,在惯性力作用下发生碰撞,从而实现细小油滴的聚结长大,提高除油效率,改善出水水质<sup>[10,12]</sup>。

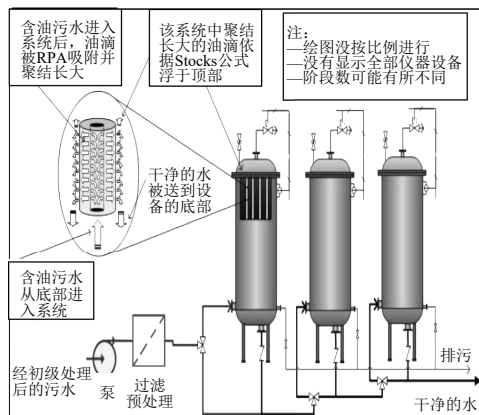
水力聚结技术的典型代表是旋流聚结技术,即在旋流设备中由于分散相油滴存在着轴向、径向和切向等多种运动,并且流体在旋流器中的流动往往会存在着湍流状态,当条件合适时,分散相油滴就会聚结成较大油滴<sup>[35]</sup>。国内有研究者在20世纪90年代提出了旋流聚结的概念<sup>[36]</sup>,认为在旋流场内油滴之间存在一定的速度差,这种速度差必然引起分散相油滴的碰撞发生,实现聚结。要想在旋流器内实



(a) 聚结重力分离一体化设备



(b) 聚结过滤分离一体化设备



(c) TORR™油气聚结技术的结构原理及工艺流程示意

图4 滤芯式聚结技术与设备

Fig. 4 Filter-type coalescence equipment and equipment

现聚结需要对设备进行有效设计和运行条件控制,将湍流程度控制在一定范围内,太大会使聚结油滴发生剪切而进一步分散;太小又不能冲破表面能发生有效聚结。东北石油大学设计了一种旋流聚结设备,采用低增压设备来创造聚结条件,同时探索了聚

结元件对聚结效果的影响。研究表明,蛇形管式聚结元件具有较高的聚结效果<sup>[37]</sup>。另有研究者设计了一种将旋流聚结和旋流离心分离一体化的设备,如图5所示。该设备是在分离之前增加了旋流聚结器,从而提高了旋流分离效果<sup>[24]</sup>。华东理工大学汪华林课题组将材料聚结技术和水力聚结技术相结合应用于含酸废液的处理,取得了良好的处理效果<sup>[38-39]</sup>。

上述几种聚结技术的优缺点和适用条件总结如表2所示。

由表2可以看出,板式聚结技术适用于处理油滴粒径 $>60\ \mu\text{m}$ 的含油污水,出水含油质量浓度可达 $50\ \text{mg/L}$ 以下,处理效果较好,且不易堵塞。填料式聚结技术适用于处理油滴粒径 $>10\ \mu\text{m}$ 的含油污水,出水含油质量浓度可达 $5\ \text{mg/L}$ 以下,除油效果好,但容易堵塞,需要反冲洗。滤芯式聚结技术适用于处理油滴粒径 $>2\ \mu\text{m}$ 的含油污水,出水含油质量浓度可达 $5\ \text{mg/L}$ 以下,除油效果好,设备占地面积小,但

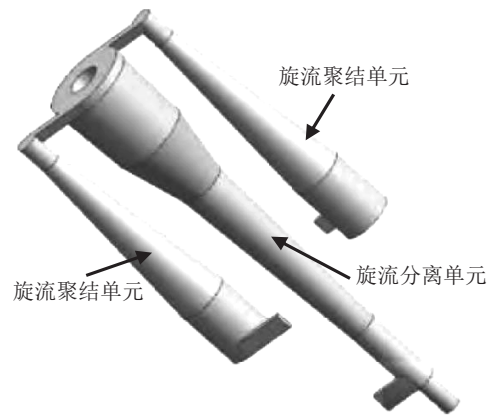


图5 旋流聚结-分离装置

Fig. 5 Cyclone coalescence-separation device

容易堵塞,需要经常反冲洗。因此,对于较小的油滴适合采用滤芯式聚结技术。旋流聚结技术适用于处理油滴粒径在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 的含油污水,且不易堵塞,设备体积小。

表2 不同聚结技术的优缺点和适用条件

Table 2 The advantages and disadvantages and applicable conditions of different coalescence technologies				
聚结技术类型	技术	优缺点	适用条件	参考文献
基于材料聚结机理的除油技术	板式聚结技术	相对于常规隔油技术来说,其优点是油水分离效果好,停留时间短(一般不超过 $30\ \text{min}$ ),占地面积小	该设备可分离大于 $60\ \mu\text{m}$ 的油珠,适于处理含油质量浓度在 $200\sim 1\ 000\ \text{mg/L}$ 的污水,出口水中含油质量浓度在 $50\ \text{mg/L}$ 左右	[9]
	填料式聚结技术	除油效果好,但容易堵塞,需要反冲洗,可缩小反应器体积	纤维聚结滤床可去除粒径 $>10\ \mu\text{m}$ 的油滴,进口水中含油质量浓度在 $20\sim 1\ 000\ \text{mg/L}$ 内变化时,出水含油质量浓度最低可以达到 $4.6\ \text{mg/L}$	[40]
	滤芯式聚结技术	聚结除油方面展现出了优异性能,占地面积小,但易堵塞,需要经常反冲洗	油水能够有效分离,可有效去除 $2\ \mu\text{m}$ 以上的分散相油滴,出水含油质量浓度最低可以达到 $4.2\ \text{mg/L}$ 以下	[41-42]
基于水力聚结机理的除油技术	旋流聚结技术	不易堵塞,设备体积小,占地小	入口油滴粒径分布在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 时,除油效果可以达到 $97\%$ 以上	[43]

### 3 聚结除油的发展趋势

(1) 材料聚结技术与设备聚结性能和除油效果的好坏取决于聚结材料表面的物理化学特性、流体特性和操作条件等。因此,对材料进行改性处理、改善流体性能以及优化设备结构和操作条件,以进一步提高材料聚结技术和设备运行的高效性、长期运行的稳定性,是材料聚结技术未来研究的重点。

(2) 水力聚结技术与设备聚结性能和除油效果的好坏关键在于如何控制操作条件和优化设备结构。但由于需要控制的条件比较苛刻,将现有材料聚结技术与水力聚结技术进行有机融合,从而同时克服材料聚结技术和水力聚结技术的缺点及不足,将是未来聚结技术发展的关键。

### 参考文献

- [1] 李莹,陆斌,魏玉莲,等. 大港油田采出水除油处理技术[J]. 油气田地面工程,2004,23(10):22-23.  
LI Ying, LU Bin, WEI Yulian, et al. Oil removal treatment technology of produced water in Dagang Oilfield[J]. Surface Engineering of Oil and Gas Field,2004,23(10):22-23.
- [2] 赵宇,马骏,白健华,等. 陶瓷基功能膜处理海上油田采出水的影响因素研究[J]. 工业用水与废水,2020,51(3):22-26.  
ZHAO Yu, MA Jun, BAI Jianhua, et al. Influencing factors of treatment of produced water from offshore oilfield by ceramic based functional membrane[J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(3):22-26.
- [3] 蔡明初. 废水聚结除油(文献综述)[J]. 炼油工业环境保护, 1979,1(4):17-33.  
CAI Mingchu. Wastewater coalescence and degreasing(a literature

- review) [J]. Environmental Protection of Oil Refining Industry, 1979, 1(4): 17-33.
- [4] 陈雷, 祁佩时, 王鹤立. 聚结除油性能及机理的探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 17-20.  
CHEN Lei, QI Peishi, WANG Heli. Discussion on coalescence degreasing performance and mechanism [J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 17-20.
- [5] 侯士兵, 王亚林, 贾金平. 一种新聚结除油材料对含油废水的预处理[J]. 上海环境科学, 2003, 22(12): 979-982.  
HOU Shibing, WANG Yalin, JIA Jinping. Pretreatment of oily wastewater by a new coalescing degreasing material [J]. Shanghai Environmental Science, 2003, 22(12): 979-982.
- [6] 孔德钰, 刘敏, 卢大艳, 等. 新型聚结除油技术在海上平台应用先导试验[J]. 化学工程与装备, 2020(10): 140-142.  
KONG Deyu, LIU Min, LU Dayan, et al. Pilot test of application of new coalescing deoiling technology on offshore platforms [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2020(10): 140-142.
- [7] 李秋红, 娄世松, 李萍, 等. 聚氯乙烯聚结处理含油废水研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2009, 29(1): 4-6.  
LI Qiuhong, LOU Shisong, LI Ping, et al. Research on the treatment of oily wastewater by polyvinyl chloride coalescence [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2009, 29(1): 4-6.
- [8] 孙怡坤, 李少萍. PTFE表面枝接纳米SiO<sub>2</sub>制备高效除油的超疏水材料[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(8): 104-110.  
SUN Yikun, LI Shaoping. PTFE surface grafted with nano-SiO<sub>2</sub> to prepare superhydrophobic material with high efficiency for oil removal [J]. Petroleum Refining and Chemical Industry, 2020, 51(8): 104-110.
- [9] 杨玉洁, 陈雯雯, 张倩, 等. 聚结技术及其乳化油水分离性能[J]. 化工进展, 2019, 38(S1): 10-18.  
YANG Yujie, CHEN Wenwen, ZHANG Qian, et al. Coalescence technology and its emulsified oil-water separation performance [J]. Chemical Industry Progress, 2019, 38(S1): 10-18.
- [10] 赵崇卫, 王春刚, 龚建, 等. 聚结耦合水力旋流组合设备的研制[J]. 石油机械, 2018, 46(1): 83-87.  
ZHAO Chongwei, WANG Chungang, GONG Jian, et al. Development of coalescing coupling hydrocyclone combined equipment [J]. Petroleum Machinery, 2018, 46(1): 83-87.
- [11] 邢雷. 旋流场内离散相油滴聚结机理及分离特性研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.  
XING Lei. Research on the coalescence mechanism and separation characteristics of discrete phase oil droplets in a swirling field [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [12] 张斌. 聚结除油设备研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
ZHANG Bin. Research on coalescing degreasing equipment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [13] ZHAO Hongliang, LI Guoyi. Application of fibrous coalescer in the treatment of oily wastewater [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(Part A): 158-162.
- [14] 董博, 郭思婷. 聚结除油设备在渤海油田污水处理流程中的应用[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(12): 93.  
DONG Bo, GUO Siting. Application of coalescing and degreasing equipment in the water treatment process of Bohai Oilfield [J]. Chemical Design Communications, 2018, 44(12): 93.
- [15] SUN Dezhi, CHUNG J S, DUAN Xiaodong, et al. Demulsification of water-in-oil emulsion by wetting coalescence materials in stirred- and packed-columns [J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 1999, 150(1/2/3): 69-75.
- [16] 刘立新, 赵晓非, 陈美岚, 等. 树脂表面润湿性对污水聚结除油效果的影响分析[J]. 钦州学院学报, 2018, 33(8): 14-19.  
LIU Lixin, ZHAO Xiaofei, CHEN Meilan, et al. Analysis of the influence of resin surface wettability on the degreasing effect of sewage coalescence [J]. Journal of Qinzhou University, 2018, 33(8): 14-19.
- [17] GUNDERSON C G, PENG Zhuoyu, ZHANG Bo. Collision and coalescence of single attoliter oil droplets on a pipet nanopore [J]. Langmuir, 2018, 34(8): 2699-2707.
- [18] SHEN Chaoqun, CHEN Yingying, YU Cheng, et al. Numerical study on the liquid-liquid interface evolution during droplet coalescence [J]. Microgravity Science and Technology, 2020, 32: 737-748.
- [19] 刘安源. 考虑油滴碰撞聚结的斜板除油过程模拟[J]. 化工环保, 2009, 29(5): 406-410.  
LIU Anyuan. Simulation of sloping plate degreasing process considering the collision and coalescence of oil droplets [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, 29(5): 406-410.
- [20] 桑义敏, 云昊, 韩严和, 等. 污水中油滴聚结机理与材料聚结技术研究进展[J]. 工业水处理, 2016, 36(10): 6-10.  
SANG Yimin, YUN Hao, HAN Yanhe, et al. Research progress on coalescence mechanism and material coalescence technology of oil droplets in sewage [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(10): 6-10.
- [21] NOROOZI S, HASHEMABADI S H, CHAMKHA A J. Numerical analysis of drops coalescence and breakage effects on de-oiling hydrocyclone performance [J]. Separation Science & Technology, 2013, 48(7): 991-1002.
- [22] 蒋明虎, 侯平涛, 王震, 等. 螺旋管聚结机理及数值模拟分析[J]. 石油机械, 2012, 40(4): 104-107.  
JIANG Minghu, HOU Pingtao, WANG Zhen, et al. Cohesion mechanism and numerical simulation analysis of spiral pipe [J]. Petroleum Machinery, 2012, 40(4): 104-107.
- [23] 张津铭, 赵立新, 包娜, 等. 结构形式对聚结器性能影响的数值分析[J]. 化工机械, 2019, 46(3): 294-299.  
ZHANG Jinming, ZHAO Lixin, BAO Na, et al. Numerical analysis of the influence of structure on the performance of coalescer [J]. Chemical Machinery, 2019, 46(3): 294-299.
- [24] 赵文君, 赵立新, 徐保蕊, 等. 聚结-旋流分离装置流场特性的

- 数值模拟分析研究[J]. 流体机械, 2015, 43(7): 22-26.
- ZHAO Wenjun, ZHAO Lixin, XU Baorui, et al. Numerical simulation analysis of flow field characteristics of coalescence-cyclone separator[J]. Fluid Machinery, 2015, 43(7): 22-26.
- [25] 李枫, 熊峰, 刘彩玉, 等. 油滴聚并破碎行为对水力旋流器分离性能的影响[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 73-78.
- LI Feng, XIONG Feng, LIU Caiyu, et al. The influence of oil droplet aggregation and breaking behavior on the separation performance of hydrocyclones[J]. Petroleum Machinery, 2019, 47(6): 73-78.
- [26] 张敏, 袁惠新. 旋流聚结的机理及应用[J]. 流体机械, 2003, 31(5): 29.
- ZHANG Min, YUAN Huixin. The mechanism and application of swirl coalescence[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(5): 29.
- [27] CASTELLI J. Coalescing plate for fluid mixture plate separator: US, 3847813A[P]. 1974-12-27.
- [28] 袁淑霞, 樊玉光, 林红先. PERFORMAX 聚结板油水分离性能数值模拟[J]. 石油化工, 2018, 47(2): 145-152.
- YUAN Shuxia, FAN Yuguang, LIN Hongxian. Numerical simulation of oil-water separation performance of PERFORMAX coalescing plate[J]. Petrochemical Industry, 2018, 47(2): 145-152.
- [29] 王敏. 一种波纹板聚结油水分离器的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- WANG Min. Development of a corrugated plate coalescing oil-water separator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [30] URMITOVA N, ABITOV R, NIZAMOVA A, et al. Oil-containing wastewater treatment by means of using coarse-grained coalescing filtering materials[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 890(1): 1-6.
- [31] 孙盖南, 刘懿谦, 卢浩, 等. 新型纤维聚结污水除油技术实验及应用研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(9): 110-114.
- SUN Gainan, LIU Yiqian, LU Hao, et al. Experimental and application research on new fiber coalesced sewage degreasing technology[J]. Water Treatment Technology, 2019, 45(9): 110-114.
- [32] 倪玲英, 曲险峰, 刘晓成, 等. 一种新型聚结填料的流动特性模拟[J]. 化工进展, 2009, 28(S2): 307-311.
- NI Lingying, QU Xianfeng, LIU Xiaocheng, et al. Simulation of flow characteristics of a new type of coalescing filler[J]. Chemical Industry Progress, 2009, 28(S2): 307-311.
- [33] BOYSEN B, HENTHORNE L, JOHNSON H, et al. New water-treatment technologies tackle offshore produced-water challenges in EOR[J]. Oil & Gas Facilities, 2013, 2(3): 17-23.
- [34] Williamson K M, Whitney S A, Rausch A R. Corrosive liquid coalesce: US, 5480547A[P]. 1996-01-02.
- [35] SHUO Liu, DONG Zhang, YANG Lele, et al. Breakup and coalescence regularity of non-dilute oil drops in a vane-type swirling flow field[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 129: 35-54.
- [36] 余大民. 旋流聚结技术初探[J]. 油田地面工程, 1996, 15(5): 22-60.
- YU Damin. A preliminary study on swirl coalescence technology[J]. Oilfield Surface Engineering, 1996, 15(5): 22-60.
- [37] 刘晓敏, 蒋明虎, 李枫, 等. 聚结装置的研制与增压方式的优选试验[J]. 石油矿场机械, 2004, 33(4): 35-38.
- LIU Xiaomin, JIANG Minghu, LI Feng, et al. Development of coalescing device and optimization test of pressurization method[J]. Petroleum Field Machinery, 2004, 33(4): 35-38.
- [38] 周萍, 白志山, 汪华林. 环己烷氧化液的废碱分离实验研究[J]. 化工机械, 2008, 35(1): 14-16.
- ZHOU Ping, BAI Zhishan, WANG Hualin. Experimental study on the separation of spent caustic from cyclohexane oxidation solution[J]. Chemical Machinery, 2008, 35(1): 14-16.
- [39] 周萍, 白志山, 汪华林, 等. 环己酮装置废碱液分离技术的工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2008, 39(6): 18-21.
- ZHOU Ping, BAI Zhishan, WANG Hualin, et al. Industrial application of waste lye separation technology from cyclohexanone plant[J]. Petroleum Refining and Chemical Industry, 2008, 39(6): 18-21.
- [40] 丰兰, 康勇, 安春燕. 基于新型改性纤维填料的油水分离过程研究[J]. 流体机械, 2007, 35(12): 5-8.
- FENG Lan, KANG Yong, AN Chunyan. Research on oil-water separation process based on new modified fiber filler[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(12): 5-8.
- [41] 常程, 姬忠礼, 刘佳霖. 亲油型聚结滤芯饱和度预测模型研究[J]. 化工学报, 2020, 71(12): 5610-5619.
- CHANG Cheng, JI Zhongli, LIU Jialin. Research on saturation prediction model of lipophilic coalescing filter element[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12): 5610-5619.
- [42] 郝思远, 何建设, 王奎升, 等. 三种不同材料滤芯聚结处理含油污水的实验研究[J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 174-178.
- HAO Siyuan, HE Jianshe, WANG Kuisheng, et al. Experimental study on coalescing of three different material filter elements to treat oily wastewater[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 174-178.
- [43] 邢雷, 蒋明虎, 张勇, 等. 入口形式对旋流器内油滴聚结特性影响研究[J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(6): 1322-1331.
- XING Lei, JIANG Minghu, ZHANG Yong, et al. Study on the influence of inlet form on coalescence characteristics of oil droplets in cyclone[J]. Journal of Chemical Engineering of Universities, 2018, 32(6): 1322-1331.

[作者简介] 张敏霞(1981—), 硕士研究生, 高级工程师. E-mail: zhangmx9@enooc.com.cn.

[收稿日期] 2021-12-13(修改稿)