

采油废水回注处理技术的现状及展望

董良飞, 张志杰

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 阐述了目前采油废水回注处理的技术及工艺现状, 重点探讨了膜分离技术在采油废水回注处理中的研究及应用情况, 分析了目前各技术存在的问题, 并展望了采油废水回注处理技术的发展趋势。

关键词: 采油废水; 回注; 现状; 展望

中图分类号: TU357.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7569(2003)01-0043-06

Present situation and prospect on refilling treatment technology of oil extraction wastewater

DONG Liang-fei, ZHANG Zhi-jie

(College of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The Present situation of technology on reinjection of oil extraction wastewater, especially the technology of membrane separation is summarized, the disadvantages of these technologies are analyzed, and the development tendency on refilling of oil extraction wastewater is looked forward.

Key words: oil extraction wastewater; reinjection; present situation; prospect

目前,我国大部分油田已进入石油开发的中期和后期,采出油中的含水量为70%~80%,有的油田甚至已高达90%,日产含油污水量非常大。如果不经处理直接排放,不仅会造成土壤、水源的污染,有时甚至会引起油污着火事故,威胁人民的生命安全,造成国家的经济损失,同时也会危害油田自身的利益;反之,如果对采油废水进行处理,并用于回注,则不仅可满足油田开采过程中注水量日益增长的要求,同时也可以节省水资源、减少环境污染,为油田带来经济效益,有利于油田的可持续发展。

1 采油废水的性质及回注要求

1.1 采油废水

采油废水又称油田采出水,是油田在采油的过程中随原油一同采出的地层水。由于地层不同、采油过程不同,采出水的成分十分复杂,一般不能直接排放或回注。采出原油经脱水处理后,水中一般含有一定量的油、硫化物、有机酚、氰、细菌、固体颗粒以及所投加的破乳剂、絮凝剂和杀菌剂等

化学药剂,给采油废水的处理带来极大困难。

尽管各油田采出水水质各异,但总体看来一般都具有以下特点^[1]:富含有机物,化学需氧量高;高矿化度加速了腐蚀速度,同时也给废水生化处理造成困难;含油量高,远大于各种出路所要求的水质标准;含大量微生物,细菌大量繁殖不仅腐蚀管线,而且还造成地层严重堵塞;含有大量结垢离子,采出水中含有 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Cr^{3+} 等结垢离子;悬浮物含量高,颗粒细小,容易造成地层堵塞。

1.2 回注要求及注水指标

从20世纪60年代末我国第一座含油污水处理回注站投产至今,各油田污水处理站都已具相当规模。但是,随着采出原油含水率的不断提高,注水量成倍增长,同时,对注水的水质要求更加严格。1995年1月18日中国石油天然气总公司颁布新的行业标准^[2],并于同年7月1日实施,其水质基本要求如下(推荐注水水质主要控制指标见表1):(1)水质稳定,与油层水相混不产生沉淀;(2)水注入油层后不使粘土矿物产生水化膨胀或悬浊;(3)水中不得携带大量悬浮物,以防堵塞

收稿日期: 2002-07-06

作者简介: 董良飞(1972-),男,江苏沛县人,长安大学讲师,西安建筑科技大学博士生,从事环境工程科学研究。

表1 推荐注水水质主要控制指标

注入层平均空气渗透率/ μm^2		<0.10			0.10~0.60			>0.60		
标准分级		A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
控制 指 标	悬浮固体含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<1.0	<2.0	<3.0	<3.0	<4.0	<5.0	<5.0	<7.0	<10.0
	悬浮物颗粒直径中值/ μm	<1.0	<1.5	<2.0	<2.0	<2.5	<3.0	<3.0	<3.5	<4.0
	含油量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<5.0	<6.0	<8.0	<8.0	<10.0	<15.0	<15.0	<20.0	<30.0
	平均腐蚀率/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	<0.076								
	SRB菌/个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	0	<10	<25	0	<10	<25	0	<10	<25
	铁细菌/个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	$n\times 10^2$			$n\times 10^3$			$n\times 10^4$		
	腐生菌/个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	$n\times 10^2$			$n\times 10^3$			$n\times 10^4$		

注:① $1 < n < 10$;②清水水质指标中去掉油含量。

注水井渗滤端面及渗流孔道;(4)对注水设施腐蚀性小;(5)当采用两种水源进行混合注水时,应首先进行室内实验,证实两种水的配伍性好,对油层无伤害才可注入。

从表1可以看出,回注用水的主要控制指标为油、悬浮物及悬浮物的粒径。废水中的悬浮物和油是采油废水回注中导致注水井和油层堵塞的两个重要因素,而在除油处理工艺中往往伴随着悬浮物的去除,因此,除油问题就成为采油废水回注处理的一个重要研究课题^[3]。含油废水中油的存在状态一般将其分为3类,即游离油、分散油和乳状油。对于游离油,目前采用简单的隔油池等物理方法分离回收的较多;分散油和乳状油在动力学上具有一定稳定性,所以较难处理^[4]。国内外对采油废水回注处理技术的研究也主要围绕着除油这一问题进行。

2 目前国内外已应用的采油废水处理方法与技术

2.1 物理法

(1)重力分离技术

利用油水密度差和油水不相溶性进行油水分离。包括自然除油法、斜板除油法、浮上分离法、机械分离法、离心分离法、水力旋流法。该技术可除去采出水中的浮油、分散油和油-湿固体,效果稳定、运行费用低且管理方便,但设备占地面积大。

(2)粗粒化技术

含油污水通过装有粗粒化材料的装置,在润湿聚结、碰撞聚结、截流、附着作用下油珠由小变大的过程。该法用于处理分散油、乳化油,设备小、

操作简单但滤料易堵塞,有表面活性剂时效果较差。

(3)过滤技术

一般作为采油污水的二级处理或深度处理,除去水中分散油和乳化油。常见的颗粒介质过滤技术有多层滤料过滤技术、双向过滤技术、移动床过滤技术等。该技术出水水质好、设备投资小、操作方便但反冲洗操作要求高。

2.2 化学法

借助混凝剂对胶体粒子的静电中和、吸附架桥等作用使胶体粒子脱稳,发生絮凝沉降等作用除去污水中的悬浮物和可溶性污染物质。常见的方法有混凝沉降法、混凝浮选法、分级混凝处理法、二次混凝处理法、稀释处理法、中和混凝处理法以及酸碱处理法,其中混凝剂的选择是关键。

2.3 物理化学法

(1)气浮分离技术

含油污水中的油珠和悬浮物质粘附在气泡上上浮,与水分离而除去。气浮技术主要用于处理油田采油污水和含油类及各种机械杂质的钻井污水,效果好,但气浮药剂贵。

(2)电泳法

水包油型乳液中的乳状油滴带负电位,在外加电压作用下移向正极,从而分离出油滴,该法不加化学药剂,除去采出水中的乳化油有利于消除排放处理水对环境的影响。

(3)电解法

此法去除乳化油效果良好,且没有二次污染。电解法主要有电解气浮法和电解絮凝法。前者利用电解水产生的氧气和氢气形成微气泡,进行气浮。由于气泡微小,能够去除较小的油珠和悬浮粒

子,废水处理后可用于回注.后者则采用消耗性电极,外加电压使电极氧化而释放出金属离子.释放出的金属离子的水解产物具有混凝作用,要求被处理的废水有足够的导电性,以使电解池能进行正常工作,并防止电极钝化.

(4) 吸附法

利用亲油性材料来吸附水中的油.活性炭是常用的吸附材料,此外,煤炭、吸油毡、陶粒、石英砂、木屑、硼泥等也可作为吸附剂.

2.4 生化处理技术^[4]

(1) 生物降解技术

通过生物体的代谢作用降解、转化污水中的油.可采用活性泥法、滴滤法、曝气法或接触氧化法、水生植物法、水生植物-化学絮凝法、地层渗透法等生化方法.

(2) 微生物絮凝技术

利用生物有机高分子絮凝物质替代化学絮凝剂处理含油污水,适于油气田勘探开发流动作业.

(3) 高效生物降解技术

利用生物技术培育出对石油具有特殊降解能力的优势菌种,用细胞固定技术将其固定在合适的载体上,吃掉采油污水中的烃.该技术能避免二次污染,降低处理费用,净化效果比化学处理好.

2.5 膜分离技术

膜分离技术就是利用膜的选择透过性进行分离和提纯的技术.近年来,越来越多的膜分离技术开始用于油田采出水处理.当废水中油粒子粒径为 μm 量级时,可用机械方法进行前处理.膜法处理可根据废水中油粒子的大小,合理地确定膜截留分子量,且处理过程中一般无相的变化,常温下操作,有高效、节能、污染小的特点,但也存在投资大、膜污染后难清洗、运行费用高等缺点.

3 目前国内外采油废水回注处理的设备及工艺

国内外油田采出水处理采用的构筑物主要有沉沙池、API隔油池、CPI隔油池、自然除油罐、混凝除油罐、粗粒化罐、压力沉降罐、浮选池(柱)、压力滤罐、单阀滤罐、组合式处理装置、水力旋流分离器和精滤器等多种.采用的附属设施有各种缓冲罐(池)、回收水罐(池)、反冲洗水罐(池)、污油罐、药剂投配系统、各种水泵和油水计量设施等.一般根据采油废水及净化水的水质要求,由上述各种构筑物与附属设施可以组成若干种采油废水处理工艺流程.如自然除油—混凝除油—压力过滤流程、粗粒化—混凝除油—单阀滤罐过滤流程和自然除油—粗粒化—压力除油—压力过滤流程等.在低渗透油藏水处理技术研究中,国外目前采用常规采油污水处理流程辅以精细过滤技术,使处理后的采出水达到低渗透油藏要求.在运用精细过滤技术中使用的过滤器有预滤器和精滤器两种.目前国外使用较好的预滤器有美国PWT公司和Hydromation公司生产的核桃壳过滤器(目前唯一能将滤料清洗干净的过滤器)、美国C-E Natco公司设计制造的双高速过滤器(国外精细过滤中最常用的预滤器)和美国Serck Baker公司制造的双滤料过滤器(由于采用较厚的滤料,是目前过滤效果最好的过滤器).在污水处理流程中,精滤器安装在预滤器的后面,可进一步提高水质.目前国外使用的较有代表性的精滤器有两种: Pall中心过滤装置和Pall Flood Goand高压筒式过滤器^[5].我国油田回注水处理设备种类很多,其中应用较普遍的有自然沉降罐、粗粒化罐、重力沉降罐(包括斜板)、气浮池、水力旋流器、过滤罐与精细过滤装置等,主要用于去除水中的油及悬浮物.

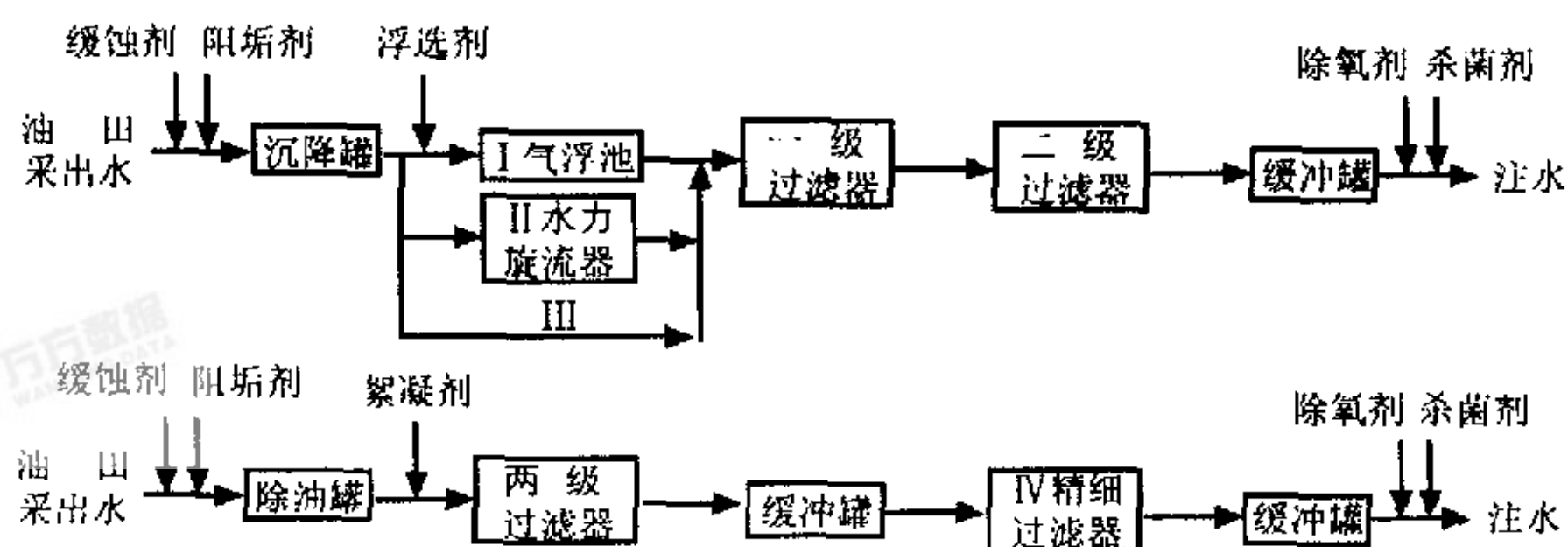


图1 目前常用的采出水回注处理工艺

由文献[2],采出水如果回注,主要控制指标为油、悬浮物及悬浮物粒径.综合现有国内外的资料及调研结果,采出水回注处理工艺主要有4种^[6](图1).其中,流程Ⅰ主要适用于油水密度差小、悬浮物粒径小的油田或区块;流程Ⅱ则适合于油水密度差大,且油水比较容易分离的情况.这两种流程在我国油田水处理站应用比较普遍.流程Ⅲ一般用于注水要求不高,采出水的水质比较好的油田或区块;流程Ⅳ是4种流程中对悬浮物的去除效果最好的一种工艺,其中的精细过滤器能很好地控制采出水中的悬浮物粒径,适用于注水水质要求比较高的低渗透油田.

从以上介绍可看出,油田采出水回注工艺一般采用二级或三级处理,对低渗透油层再加一级深度处理.前段处理一般采用自然除油、混凝沉降、水力旋流、浮选.当水中油、悬浮物和水密度差大于 0.05 g/cm^3 时,可以根据投资及占地情况选用任意工艺;当油水密度差小于等于 0.05 g/cm^3 时,采用水力旋流、自然除油效果均不好,对于这种水采用浮选是最有效的处理方法^[7].在选用沉降除油时,为了使处理效果更好,有时可在前面增加粗粒化设施.采出水经过沉降、水力旋流或气浮等前处理后,大部分悬浮物及油已被去除,但还有部分小分子油以及悬浮物没有去除,不满足注水指标.其中悬浮物的指标远高于回注指标,而悬浮物正是注水时地层堵塞的主要因素,因此采出水须根据不同要求加一级过滤或二级过滤,过滤对控制水中含油量和悬浮物颗粒粒径很有效.一般对高渗透油层,前段处理任意选用两级处理,后续一级过滤即可达到注水水质要求;对低渗透油层,一般采用两级过滤,甚至三级过滤,其过滤级数与油层的渗透率相适应.过滤技术是整个油田采出水处理工艺的关键技术,从其出现至今,已取得了很大的进展.油田采出水所用的过滤器有压力式和重力式两种.压力式过滤器滤速高,适用范围广,目前我国油田普遍采用的有:石英砂过滤器、核桃壳过滤器、双层滤料过滤器、多层滤料过滤器^[8]以及双向过滤器^[9]等.重力式过滤器由于效果差,目前基本已不再使用.石英砂、核桃壳过滤器是目前我国油田水处理站中应用最广、处理效果较好的两种形式,尤其是核桃壳过滤器,由于滤料亲油性能好、截污能力大、质轻、反冲洗能耗小等优点被得到广泛应用.但是,上述两种过滤器由于滤料粒度小,反冲洗易流失,尤其

核桃壳滤料具有亲油性,反洗时必须采用清洗剂,增加了反洗水的处理负担.纤维球过滤器是我国近几年发展起来的深床高精度过滤器,在食品、制药、酿造等工业领域应用较多.其滤料纤维细密,过滤时可以形成上大下小的理想滤料空隙分布,纳污能力大,去除悬浮物的效果高过石英砂、核桃壳滤料,而且反洗时不会出现滤料流失的现象.目前,在某些低渗透油田已有应用.但是由于滤料的亲油性,反洗时仍需采用清洗剂.滤芯过滤器的出现及应用,开辟了油田采出水处理回注的新领域.目前精细过滤中滤芯过滤器在我国油田已应用,过滤精度虽高,但是对悬浮物粒径的控制却仍有一定限度.而且过滤组件的清洗不能彻底解决,使得组件的拆装及更换等长期投资费用过大,从而限制了该技术的推广应用;而膜技术可以从根本上控制悬浮物的粒径,虽然存在投资大、膜污染后清洗难、运行费用高等缺点,但它的技术潜力仍使得它已成为油田采出水处理研究的一个方向.

近年来,处于环保和经济两方面的考虑,国外许多大的石油公司开发研究了诸多高效油水分离设备以减少过高成本和处理采出水费用,如加拿大工程研究中心(C-FER)开发研究出井下油水分离系统(DOWS);将水力旋流分离器与经过改进的多流井下泵送系统配套使用,完成产油、油水分离及实现采出水同井回注^[10],另外开发了一些新设备如新型密闭式浮选箱、各种组合式油水分离器等,这些装置的成功开发对提高采油废水的处理效果、改进设备的处理效能,以及实现处理设备功能的一体化都大有裨益^[4].

4 目前国内外膜法处理采油废水用于回注的研究情况

目前膜分离法处理含油废水正从实验室研究走向实际应用阶段,它具有不需加入其它试剂、不产生含油污泥、浓缩液可燃烧处理、处理后的水质可达到最严格的排放标准及低渗透油田注水标准、设备费用低等优点.存在的问题是需对废水进行严格的预处理,且膜的清洗也较麻烦.

膜分离法是对含油污水深度处理,尤其是去除乳化油可行而有效的方法,是近年来研究的热点.Chen(1991)^[11]及Humphery等人(1989)采用Membralox陶瓷膜进行了陆上和海上采油平台

的采出水处理研究,经过适当的预处理后取得了较好的结果;王怀林等人(1998)采用 $0.8\ \mu\text{m}$ 氧化铝膜和 $0.2\ \mu\text{m}$ 氧化锆膜对江苏石油勘探局真武油田二站三相分离器口水进行了处理,并将国产膜与 Membralox (U. S. Filter) 的 $0.2\ \mu\text{m}$ 氧化铝膜进行了比较,认为两种国产膜的长期稳定运行通量高于 U. S. Filter 公司的膜. Simms 等人(1995)采用了高分子膜和 Membralox 陶瓷膜对加拿大西部的重油采出水进行了处理,其通量相对较小. 李发永等人在国内最早采用膜技术处理采油污水,1995 年报道了用外管式聚砜(PS)超滤膜装置处理采油污水的研究报告^[12];之后,他采用磺化聚砜(SPS)平板式和外管式超滤膜再次处理含石油类污水试验^[13],研究认为,SPS 膜通量随磺化度的增加而提高,且优于 PS 膜,通过液基本上达到了国家排放标准及低渗透油田注水标准;张裕卿等人研制出聚砜- Al_2O_3 复合膜超滤处理含油废水^[14],超滤后水中油含量小于 $0.5\ \text{mg/L}$,油的截留率皆在 99% 以上,且复合膜清洗后水通量恢复率较高;樊栓狮等采用自制膜分离器研究了自制陶瓷膜的乳化油分离特性^[15],考察了膜内外压差、料液流速和料液浓度等因素对乳化油渗透通量和膜截留率的影响规律. 结果表明,陶瓷膜具有较佳的分离效率,渗透率为 $0.11 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-4}\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,截留率达 95% 以上. 无机超滤膜的可清洗性能优于有机超滤膜,膜性能可通过清洗来提高.

膜分离技术是发展迅速的新兴技术领域,而膜分离理论则由于膜分离的传质机理各异,情况复杂至今仍是学派林立,众说纷纭. 但基本共识是膜分离是一个以处理料组分选择性透过膜的物理-化学过程,过程的推动力主要是膜两侧的压差,膜的孔径虽然是膜的基本性质,但膜和分离组分的物理-化学性质,如亲水性以及荷电情况都直接影响分离过程和结果,即膜从溶液中分离溶解的成分是依据尺寸、荷电、形状以及溶质和膜表面间的分子相互作用而决定的^[16]. 用于油水分离的膜通常是反渗透、超滤和微滤膜,它们的作用是截留乳化油和溶解油. 简单的情况是乳化油基于油滴尺寸被膜阻止,而溶解油的被阻止则是基于膜和溶质的分子间的相互作用,膜的亲水性越强,阻止游离油透过的能力越强,水通量越高. 含油污水中油的存在状态是选择膜的首要依据. 若油水体系中的油是以浮油和分散油为主,则一般选择孔径

在 $10 \sim 100\ \mu\text{m}$ 之间的微孔膜;若水体中的油是因有表面活性剂等使油滴乳化成稳定的乳化油和溶解油,油珠之间难以相互黏结,则须采用亲水或亲油的超滤膜分离,一则是因为超滤膜孔径远小于 $10\ \mu\text{m}$,二则是超细的膜孔有利于破乳或有利于油滴聚结^[17~18]. 超滤膜所用的聚合物很多,如醋酸纤维素酯、聚偏氟二乙烯,特别是聚砜. RO 和 UF 膜的材料都可以做微滤膜,例如聚碳酸酯、聚丙烯、聚乙烯以及 PTFE,无机的陶瓷膜是以氧化铝等为基料,与聚砜的化学阻力相当,但抗热性更好^[19~20]. 基于传统和普遍使用的过滤技术是使大量流体通过过滤介质,将相对量少的物质截留在介质面上,所以对体系中油的含量相对较少的油水体系,是在压力下使大量的水透过膜而将油截留在膜面上,这和一般的膜分离应用相似,对反渗透、超滤和微滤用膜最好是亲水的,这样可以得到高的水通量和降低膜污染. 亲水膜有纤维素酯、聚砜、聚醚砜、聚砜/聚醚砜(PSF/FES)、聚酰亚胺/聚醚酰亚胺(PI/PEI)、聚脂肪酰胺(PA)、聚炳烯腈等具有亲水基团的高分子聚合物,以及如 Al_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2 等陶瓷膜. 亲水性和疏水性并非是完全孤立或绝对的,因为纯粹的亲水膜机械强度很弱,而纯粹的疏水膜阻塞污染情况严重,选择适宜的油水分离膜应该合理地平衡膜的这两种性质,原则上既要满足膜的强度要求,又应符合膜的选择分离特性,尽量减小膜表面污染. 膜表面改性是达到这一目的的有效途径. 如聚砜膜亲水性差,但其压密性和抗氧化性良好,用 1,2-二氯乙烷及氯磺酸磺化后,在保持了其原有物化性质的同时极大地改善了透水性. 有时同时使用亲水和疏水膜,即所谓双极膜,除油效果会更加明显. 亲水的膜表面可在极大程度上抑制凝胶层的生成和增厚,疏水的膜表面利于微细油滴在膜孔中透过并在表面聚集粗化. 亲水膜和疏水膜分别处理 W/O 及 O/W 乳化液时,有时会产生良好的破乳效果,如 Mark Hiavacek 利用聚丙烯膜处理铝业 O/W 废水,可使平均粒度为 $1.7\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ 的乳滴全部透过膜,且生长到 $100\ \mu\text{m}$ 左右,能够自动聚结. 研究还指出孔径越小,破乳效果越佳^[18].

为将膜应用于实际的油水分离过程,必须设计一套合理的膜组件,并确定与之相应的操作方式. 膜器设计可以有多种形式^[19~21],一般均根据两种膜构型——平板式和管式来设计. 板框膜器和卷式膜器使用平板膜,管式、中空纤维膜器及毛

细管膜器使用管式膜,多个单元膜器构成膜组件.操作方式一般分为死端(Dead Flow)操作和错流(Cross Flow)操作,其中死端操作是传统方式,油水乳液被强制通过膜,随着被截留物(如油)在膜表面上的堆积,渗透物(如水)流量下降,必须定时清除膜表面的油,以便持续作业,错流操作是近20 a才应用到实际过程中的新方式,油水乳液以一定流速平行于膜表面流动,在一定程度上克服了死端操作的弊病,但膜表面的凝胶层并不能被有效抑制,尽管如此,错流操作还是主宰了实际工业应用的大部分比例.

综上所述,膜分离技术用于采油废水处理,主要有两个方面的问题.一是膜的选择,包括膜材料、膜组件的选型;二是膜工艺,即确定合适的操作条件强化传质过程及维持膜通量的长时间稳定性,并寻找合适的膜污染清洗及再生方法.基于上述两个方面,目前的研究也主要围绕这两个问题进行.随着材料科学及合成、加工工艺的不断发展,国内外近年来均研制出了一些新型的用于油水分离的膜组件,但目前这些膜组件尚处于采油废水处理的工业性试验阶段,难以大规模的工业应用.原因在于:一是成本问题,必须降低装置的一次性投资,并通过工艺条件优化设计,强化传质过程,降低操作成本;二是膜的清洗再生方法,由于各油田的水质情况差别很大,必须针对具体对象开发合适的清洗方法;三是如何能长时间维持膜通量的稳定性,减少清洗次数.

5 采油废水回注处理技术的发展趋势

随着我国对污染治理力度的加大,及人们对油田采出水经处理后作为采油注水的一系列优点的认可,油田污水经深度处理后回注已愈来愈受到人们的重视.由于各油田所处环境不同,油田地层渗透率差别较大,对回注水水质要求不同,目前各油田多数采用隔油除油—混凝或沉淀(或气浮)—过滤三段处理工艺,再辅以阻垢、缓蚀、杀菌、膜处理或生化法处理等.但由于技术、经济等多种原因,如隔油池只能去除大粒径的油珠,不能去除水中乳化油和溶解油;气浮法要加破乳剂,且油不易回收;活性炭吸附法成本高,活性炭不易再生等,致使目前大多数油田采出水处理后无法回

注而只能外排.由于各油田的油品性质不尽相同,要开发出普遍适用的技术和设备难度很大,但可以根据各自油田的特点开发自己的工艺和设备,许多原先用于废水回用的技术也被用在了采出水的处理上^[4].

针对目前的研究现状及存在问题,以后的研究趋势如下:

(1)化学法.开发高效无污染水处理剂或用已有的药剂复配出性能优越的增效复配药剂.

(2)物理法.重点是旋流法,改进水力旋流器结构,解决旋流分离效率低、处理量小的问题,开发各种高效旋流器,进行动态旋流器、多相分离旋流器以及低剪切增压技术的研究.过滤法,进行过滤材料的表面改性及抗油污染方面的研究,如纤维球过滤器、纤维束过滤器及其他精密过滤器的应用研究.

(3)生化处理法.开发复合菌种,在同一生化反应器中可同时降解污水中的各种有机物.研制高效生化反应器如固定床生化反应器、流化床生化反应器及复合床生化反应器.

(4)膜分离法.开发具有抗污染、破乳特性的膜材料及相关功能膜,降低膜成本,加强陶瓷膜等无机膜的应用研究,研制高效、动态、抗污染膜组件.

(5)新工艺研究.针对不同油田的特点,对处理后水质要求的不同,对各单元过程进行性能匹配和优化研究,开发出多种组合工艺及多功能集成的一体化设备.集高效、经济、简单易用等特点于一体的小型采油废水处理装置将在区块采油开发中发挥重要作用,是今后一段时间的研究热点.

参考文献:

- [1] 王振波,李发永.油田采出水处理技术现状及展望[J].油气田环境保护,2001,11(1):40-41.
- [2] SY/T 5329-94.碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法[S].
- [3] 黄廷林,杨利伟.采油废水回注处理技术[J].工业用水与废水,2000,31(4):1-3.
- [4] 魏平方,邓皓.含油污水处理技术与发展趋势[J].油气田环境保护,2000,10(1):34-36.
- [5] 同健勇,陈进富.国外采油废水处理技术的新进展[J].油气田环境保护,2000,10(2):19-20.
- [6] 杨云霞,张晓健.我国油田采出水处理回注的现状及技术发展[J].给水排水,2000,26(7):32-35.

(下转第64页)

- Engng. Design, 1984, 80(2): 233-246.
- [2] 沈真. 损伤力学及其在复合材料中的应用[J]. 力学进展, 1985, 15(2): 147-161.
- [3] 郝松林, 陈铸曾. 损伤及损伤力学[J]. 国防科技大学学报, 1984, 15(2): 16-36.
- [4] Tai W H. Crack initiation condition in the specimens of ductile materials[J]. Engng. Fract. Mech., 1995, 5(16): 1 035-1 039.
- [5] Janson J. Dugdale-crack in a material with continuous damage evolution[J]. Engng. Fract. Mech., 1977, 9(10): 891-899.
- [6] Tai W H. Plastic damage and ductile fracture in mild steels[J]. Engng. Fract. Mech., 1990, 37(4): 853-880.
- [7] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1960, 8(2): 100-108.
- [8] Muskhelishvili N I. Some basic problems in the mathematical theory of elasticity[M]. Nordhoff; The Netherlands, 1954.
- [9] Hutchinson J W. Plastic stress and strain fields at a crack tip[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1968, 16(1): 1-12.
- (上接第 48 页)
- [7] 邓秀英. 油田采出水处理技术探讨[J]. 油气田环境保护, 2000, 10(1): 31-33.
- [8] 刘德绪. 多层滤料过滤技术在油田污水处理中的应用[J]. 油田地面工程, 1994, 13(3): 23-25.
- [9] 任彦中. 高效双向过滤器[J]. 油田地面工程, 1995, 14(1): 44-45.
- [10] 李海金. 井下油水分离技术的发展现状与应用前景[J]. 国外石油机械, 1999, 9(5): 50-59.
- [11] Chen ASC, Flynn JT, Casaday AL. Removal of oil, grease, and suspended solids from produced water with ceramic crossmic microfiltration[J]. SPE Production Engineering, 1991, (6): 131-135.
- [12] 李发永. 含油污水的超滤法处理[J]. 水处理技术, 1995, 21(3): 145-148.
- [13] 李发永. 磺化聚砜膜超滤处理含油污水的试验[J]. 水处理技术, 2000, 26(5): 285-288.
- [14] 张裕卿. 聚砜-Al₂O₃ 复合膜处理油田含油污水[J]. 工业水处理, 2000, 20(2): 20-22.
- [15] 樊栓狮, 王金渠. 无机膜处理含油废水[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 61-63.
- [16] 李海波. 含油废水的膜处理技术[J]. 过滤与分离, 2000, 10(4): 10-14.
- [17] 吴秋林. 用膜分相从水中除去油珠的研究[J]. 环境科学, 1986, 4(6): 1-5.
- [18] 孙勇. 一种新型膜法破乳技术[J]. 现代化工, 2000, 20(3): 16-18.
- [19] Marcel Mulder. 膜技术基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [20] 刘莱娥. 膜分离技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 1998.
- [21] 国家环境保护局. 膜法分离技术及其应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.