

油田钻井废水的物化组合处理技术

李秀金* Goran Nasser 康佳丽 李荣平

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 对化学混凝-膜分离、化学混凝-活性炭吸附组合工艺处理油田钻井废水进行了试验研究。通过对4种混凝剂混凝对比试验,确定最佳混凝剂为聚合氯化铁(PFC)。在 $\text{pH} = 8.1$,助凝剂聚丙烯酰胺(PAM,质量分数0.5%)投加量 $w(\text{PAM})$ 为 10 mL L^{-1} ,PFC(质量分数10%)投加量 $w(\text{KC-87})$ 为 10 mL L^{-1} 的条件下,化学需氧量(COD)去除率达95.3%。混凝出水经膜分离深度处理后,没有达到排放要求。混凝出水经活性炭深度处理获得了较好的效果。在选取的4种活性炭中,KC-87粉末状果壳活性炭的吸附效果最好,在吸附时间为1 h、投加量 $w(\text{KC-87})$ 为 3 g L^{-1} 的条件下,可使混凝出水中COD的去除率达75.3%。经PFC化学混凝和KC-87活性炭吸附组合工艺处理后,废水COD总去除率达到97.4%,其他污染物也得到了明显的去除,使得最终出水达到了国家废水综合排放标准一级水平。

关键词: 钻井废水; 混凝; 膜分离; 吸附; 活性炭

中图分类号: X788

引言

钻井废水是在钻井过程中,由于起、下钻作业时泥浆的返排流失、泥浆循环系统的渗漏、冲洗设备油污和清洗平台等环节产生的废水。每钻一口井所排泄的钻井废水可达几百立方米。目前,一部分钻井废水不经处理直接排入邻近水体,对农作物、地表和地下水造成了严重危害;未排放的钻井废水大多排入储水池中暂存,由于没有合适的技术进行处理,有些储水池储存的钻井废水已达30年之久,对周围环境产生了持久的危害。此外,由于钻井分布很广,大量废水储池呈“点”状分布在广大的油田区域内,从而形成了由“点源”(废水储池)引起的大面积的“面源”污染,尤其在雨季,废水漫过储池流入临近农田和水域,污染危害面更大^[1]。

钻井废水由固体、液体和胶体悬浮物组成,属多级分散体系,含有的污染物主要有有机物、悬浮物、重金属、油类等。钻井废水组成成分非常复杂,并且随钻井泥浆的种类和油田地质条件变化很大;它的无机物含量高,稳定性强、可生化性差,是难以处理的废水之一。一般的生物处理方法或单一的处理方

法都很难解决问题^[2-4]。本研究根据油田钻井废水的特点,把化学混凝与膜分离、化学混凝与活性炭吸附结合起来,进行了组合处理工艺的试验研究。化学混凝主要去除水中的大量悬浮物、具有胶体性质的大分子物质;膜分离和活性炭吸附作为深度处理,主要去除小分子物质。两种处理方法结合在一起,可对钻井废水中不同性质的污染物进行有效的去除,使钻井废水达到相关排放要求。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 钻井废水 试验钻井废水取自某油田,其外观呈黑褐色,主要污染物指标见表1。

1.1.2 混凝剂与助凝剂 试验中混凝剂与助凝剂的投加量以 mL/L 表征。4种混凝剂分别是聚合氯化铁(PFC,质量分数10%);聚合氯化铝(PAC,质量分数10%);聚合氯化铝铁(PFAC,质量分数11%);氯化铁(FeCl_3 ,质量分数38.7%)。助凝剂为聚丙烯酰胺(PAM,质量分数0.5%)。

1.1.3 膜 本校膜工程技术研究中心自制的醋酸纤维素膜。

1.1.4 活性炭 试验选择了4种活性炭,它们是KC-50木质炭(粉末状)、KC-87果壳炭(粉末状)、KC-16A果壳炭(颗粒状)、KC-40煤质炭(柱状)。

收稿日期: 2004-11-04

第一作者: 男,1965年生,博士,教授,博士生导师

*通讯联系人

E-mail: xjli@mail.buct.edu.cn

表 1 钻井废水主要污染物指标(为质量浓度)

Table 1 Characteristics of the drilling wastewater

	pH	(COD) / (mg L ⁻¹)	(SS) / (mg L ⁻¹)	(TS) / (mg L ⁻¹)	(DS) / (mg L ⁻¹)	(NH ₃ ⁺ N) / (mg L ⁻¹)	浊度 / NTU	色度 (稀释倍数)
原水	8.7	4 300	3 260	13 238	9 978	7.6	4 230	450

注: COD 为化学需氧量; TS 为总固体; SS 为悬浮物; DS 为可溶性固体。

1.2 试验方法

1.2.1 混凝试验 在室温下,取 100 mL 钻井废水于 250 mL 烧杯中。把烧杯置于四联磁力搅拌器上,以 300 r/min 的速度搅拌溶液,同时加入混凝剂,搅拌 30 s 后加入一定量的聚丙烯酰胺,继续搅拌 30 s。之后,把搅拌速度降至 60 r/min,搅拌 3 min 后停止,静置 2 h 后取上清液测定 COD 的质量浓度 (COD) 等。

1.2.2 膜分离试验 把膜贴附于过滤器的底部,把一定量的废水置于过滤器中,过滤器与氮气瓶相连,通过调压阀调节试验压力。

1.2.3 活性炭吸附试验 钻井废水先经化学混凝处理,然后取 100 mL 混凝出水上清液置于 250 mL 的烧杯中,加入一定量的活性炭,在四联磁力搅拌器上以 300 r/min 的速度搅拌一定时间,然后停止搅拌,静置后,用滤纸滤出活性炭,取上清液测定 (COD) 等水质指标。

2 结果与讨论

2.1 混凝试验结果与分析

2.1.1 混凝剂种类和投加量的影响 分别对 1.1.2 中的 4 种混凝剂进行了试验,并以聚丙烯酰胺为助凝剂,在不同试剂投加量条件下,对 COD 的去除效果进行了研究(图 1)。

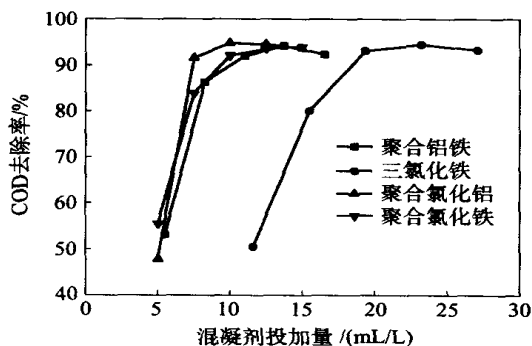


图 1 混凝剂种类和投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 1 Effect of coagulant types on COD removal

对 4 种混凝剂,在一定范围内,COD 去除率随试剂投加量的增加而提高,但超过一定范围后,增加

投加量对 COD 的去除影响不大,甚至有降低的趋势。4 种混凝剂都获得了较高的 COD 去除率,其中聚合氯化铁的混凝效果最好,去除率最高达到 94.8%,并且,达最大 COD 去除率时的投加量也最少。试验过程中发现,聚合氯化铁混凝形成的絮体颗粒较大,沉降速度快,所需沉降时间也最短(约 30 min),聚合氯化铝和聚合氯化铝铁混凝形成的絮体沉降时间相对较长。三氯化铁混凝形成的絮体沉降时间虽然不长,但相对于其它 3 种混凝剂,在相同 COD 去除率时,试剂投加量高出很多;此外,三氯化铁较易水解产生 HCl,Fe³⁺ 又具有氧化性,有可能会对铁制容器及管道产生腐蚀。从 COD 去除效果、药剂投加量、沉降时间等方面考虑,可认为聚合氯化铁 (PFC,质量分数 10%) 是相对较好的混凝剂,其最适投加量 w (PFC) 为 10 mL L⁻¹。因此,在后续试验中,皆以 PFC 为混凝剂作一级处理。

2.1.2 pH 值的影响 水的 pH 值对混凝的影响程度依混凝剂的种类而不同。对某种混凝剂而言,都有一个相对较佳的 pH 值,在此 pH 值下,混凝反应速度快、絮体溶解度小、混凝效果好。通过改变钻井废水的 pH 值,可以获得 PFC 的最佳 pH 值。试验皆用 PFC 最适投加量 w (PFC) 为 10 mL L⁻¹。

COD 去除率随 pH 值的增大而缓慢增加,超过一定值后,去除效果明显降低,最佳 pH 值在 7.5 ~ 8.5 之间(图 2)。pH 过低,COD 的去除率低,可能是由于当 pH 过低时,反应产物主要以高电荷、低聚合度的络合物占主导作用,吸附架桥作用未能充分发挥,COD 去除率偏低。当 pH 偏高时,生成产物偏重于低电荷、高聚合度物质,吸附架桥作用较强,但电中和脱稳作用较弱,综合效果也不是很好。钻井废水实测 pH 值为 8.1,正好在最佳 pH 范围内,因此,确定不调整原水的 pH 值,直接进行混凝处理。

2.1.3 PAM 投加量的影响 聚丙烯酰胺 (PAM) 分子呈链状,对溶液中的杂质颗粒有吸附、架桥作用,常作为助凝剂与其他混凝剂一起使用。本试验中,先在钻井废水中投加 PFC 产生絮体,再利用 PAM 的吸附架桥作用,使絮体颗粒变大,以改善絮

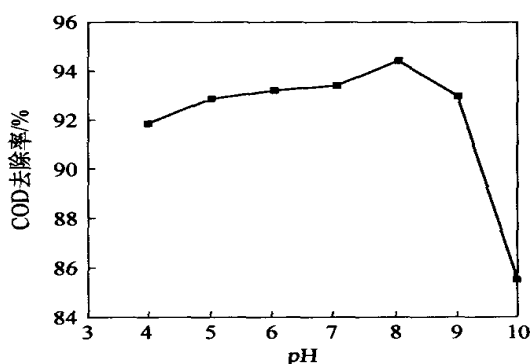


图 2 pH 值对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effect of pH on COD removal

凝效果和提高絮体的沉降性能。在 $w(\text{PFC})$ 为 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,改变 PAM 的加入量,以研究添加 $w(\text{PAM})$ 对 COD 去除率的影响。可以看出(图 3),初始时,COD 去除率随 $w(\text{PAM})$ 的增加而提高,当 $w(\text{PAM})$ 增加到 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,COD 去除率达最大值;继续增大 $w(\text{PAM})$ 时,COD 去除率变化不大。所以,确定最适 $w(\text{PAM})$ 为 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

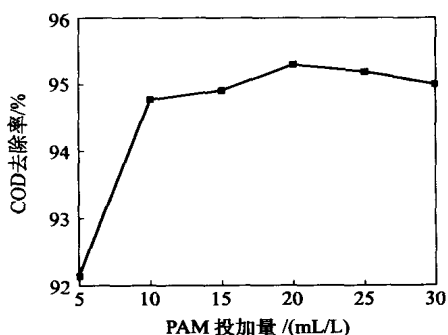


图 3 PAM 投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 3 Effect of PAM addition on COD removal

结果表明,化学混凝的最佳处理参数为:以 PFC 为混凝剂, $w(\text{PFC})$ 为 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$,以 PAM 为助凝剂, $w(\text{PAM})$ 为 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 值无需调节。在此条件下,经混凝处理后,钻井废水的 (COD) 从 $4300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $202 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达 95.3%。

2.2 膜分离试验结果与分析

2.2.1 压力的影响 钻井废水经 PFC 混凝处理后,尚不能达到排放要求,为此,需要进行二次深度处理。深度处理的方法有多种,首先选择膜分离作为深度处理的方法。

在室温下,取最佳条件下经一次混凝处理后获得的上清液,在不同的压力下进行试验。使用的压力分别为 19.8、39.6、59.4 和 79.2 kPa。记录每个

压力下,滤出 40 mL 滤液时所需要的时间,计算出相应的膜通量,同时测定滤出液的 (COD) 值。可以看见,随着压力的加大,膜通量随之增大,COD 去除率则先提高而后基本保持不变。在压力增加到 60 kPa 后,再增加压力,COD 去除率已无明显改变(图 4)。基于此,选定 60 kPa 压力进行下一步试验。

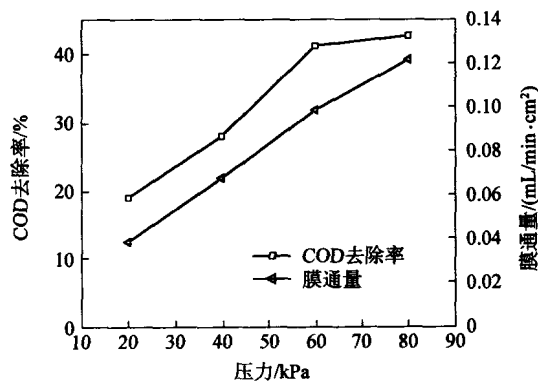


图 4 压力对膜通量和 COD 除率的影响

Fig. 4 Effect of pressure on permeate and COD removal

2.2.2 时间的影响 保持试验压力在 60 kPa 下不变,就膜分离时间对 COD 去除率和膜使用寿命的影响进行了研究。在此压力下进行连续过滤,从第 50 min 开始取样测定滤出液的 (COD)。连续试验至 COD 去除率明显下降时为止。可以看出,随着时间的推移,悬浮颗粒逐渐被分离并聚集在膜的表面,膜孔逐渐被堵塞,导致膜通量减小。但膜孔的减小却有利于更细小颗粒的分离,使得 COD 去除率逐渐升高。在第 80 min 时,达到最大 COD 去除率 48.7%,之后,COD 去除率明显降低。这说明膜的分离性能已开始明显下降,并逐渐失去效能(图 5)。继续试验,约在 3 h 后,试验用膜完全失效。

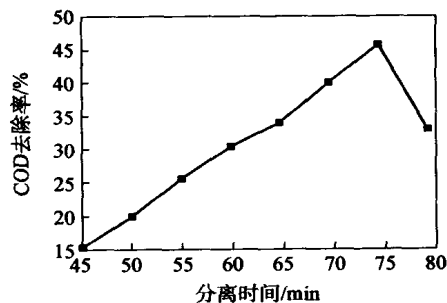


图 5 分离时间对 COD 去除率的影响

Fig. 5 Effect of separation time on COD removal

膜分离可有效去除水中悬浮颗粒 SS,但去除水中可溶性小分子物质的能力有限。SS 在一次处理时大多已被去除掉,所以,使用膜分离进行二次处理

时,处理效果并不很理想,其出水的最低 (COD) 为 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,没有达到排放要求,此外,膜的使用寿命较短,也会限制其在实际中的使用。因此,还需要研究其他方法进行深度处理。

2.3 活性炭吸附试验结果与分析

2.3.1 活性炭类型的选择 2.2 中的研究说明,由于废水中含有较多的可溶性小分子物质,膜分离方法无法达到要求。活性炭具有较强的吸附性能,对去除水中溶解性物质有较好的效果^[5],因此,选择活性炭吸附作为第二种深度处理方法。选择了 4 种活性炭,研究并确定何种活性炭以及在什么条件下污染物去除效果最好。首先进行了初步试验,确定活性炭的投加量 w (活性炭) 为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 混凝出水 (下同),然后,进行吸附试验。

由表 2 可以看出,粉末状活性炭 (KC-87 和 KC-50) 的 COD 去除率分别达 63.3 % 和 54.0 %,明显高于柱状和颗粒状活性炭 (KC-40 和 KC-16A) 的去除率。粉末状活性炭颗粒细小、吸附表面积相对较大,具有较强的吸附能力及较快的吸附速率。因此,选择 KC-87 和 KC-50 作为吸附剂进行后续试验。

表 2 活性炭种类对 COD 去除率的影响

Table 2 Effect of activated carbon types on COD removal

活性炭类型	进水 (COD) / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出水 (COD) / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD 去除 率/ %
KC-40 煤质炭 (柱状)	202	178	11.9
KC-16A 果壳炭 (颗粒状)	202	171.4	15.1
KC-87 果壳炭 (粉末状)	202	74.1	63.3
KC-50 木质炭 (粉末状)	202	93	54

2.3.2 吸附时间的确定 钻井废水经 PFC 混凝处理后,出水用 KC-87 和 KC-50 进行深度吸附处理 (图 6)。随着吸附时间的增加,两种活性炭对 COD 的去除率都呈增加趋势,但达到一定时间后即趋于平衡。KC-50 木质炭在 0.5 h 后达到吸附平衡状态, KC-87 果壳炭吸附时间较长,在约 1 h 后达到吸附平衡。虽然 KC-50 吸附速度快,但在相同投加量下, KC-87 对 COD 的去除效率明显高于 KC-50。

2.3.3 投加量的确定 在已确定的吸附平衡时间下 (1 h, 0.5 min), 分别对 KC-87 和 KC-50 的投加量进行了研究 (图 7)。随着 2 种活性炭投加量的增加, COD 去除率基本呈增加趋势, 但超过一定量后, 去除效果的增加已不明显。从投加量和处理效果两方面综合考虑, 可以认为 KC-87 果壳炭以 w (KC-87) 为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为宜, KC-50 木质炭以 w (KC-50) 为 2

$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为宜。在这 2 种投加量下, KC-87 和 KC-50 对混凝出水 COD 的去除率分别达到了 73.5 % 和 62.1 %, 相应出水的 (COD) 分别为 $53.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $76.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相对而言, KC-87 果壳炭的 COD 去除效果要好于 KC-50。

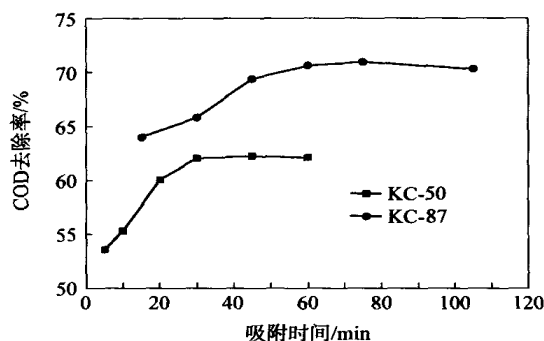


图 6 吸附时间对 COD 去除率的影响

Fig. 6 Effect of adsorption time on COD removal

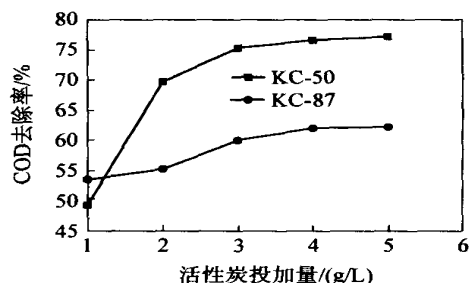


图 7 活性炭投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 7 Effect of activated carbon amount on COD removal

从图 7 的试验曲线还可看出, 在 w (KC-87) 为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水 (COD) 即已降到 $81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于国家排放标准的要求 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下)。因此, 为减少处理成本, 也可根据具体情况, 把 KC-87 的投加量减少一半。此外, 通过活性炭的再生利用也可进一步降低处理成本。

2.3.4 pH 值的影响 在废水的吸附处理过程中, pH 值控制着某些化合物的离解度和溶解度, 影响吸附质在废水中的存在形式 (分子、离子、络合物), 进而影响吸附效果。在相对较多的情况下, 呈酸性的废水对提高吸附效果有促进作用^[6]。调节混凝出水的 pH 值, 在如下条件下进行吸附试验: 对 KC-87 果壳炭, w (KC-87) 为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附时间为 1 h; 对 KC-50 木质炭, w (KC-50) 为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附时间为 0.5 h (图 8)。

对 KC-50 木质炭, 随 pH 值的增加, COD 去除率呈现先增大、后减少的变化趋势, 并在 $\text{pH} = 7$ 时

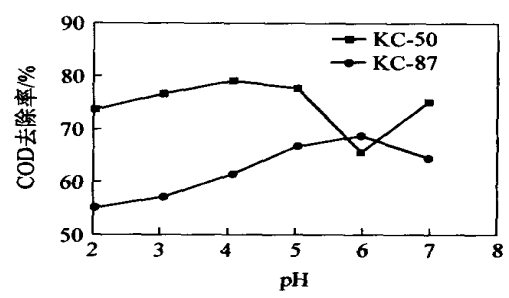


图 8 pH 值对 COD 去除率的影响
Fig. 8 Effect of pH on COD removal

获得最大去除率 66.7 %;对 KC-87 果壳炭,随着 pH 值的增大,COD 去除率呈现先升后降、再上升的趋势,并在 pH = 5.5 左右获得最大去除率 75.3 %,此时,(COD)由混凝出水的 202 mg L⁻¹降到了 49.8 mg L⁻¹。

相对于未作 pH 调整时的情况,pH 值调至最佳值时,两种活性炭的 COD 去除率也只分别提高了 1.8 %和 4.6 %,可见,调节 pH 值对增加 COD 的去除效果是有限的。由于 KC-87 的 COD 去除率明显

高于 KC-50,因此,选择 KC-87 果壳炭作为最终吸附材料。作此选择的另一个好处是,PFC 混凝出水的 pH 值为 6.0,非常接近 KC-87 果壳炭的最适 pH 值 5.5,此时,在进行活性炭吸附时,就无需进行 pH 值调整了,这样有利于减少设备投入和运行成本。

通过上述对活性炭种类、吸附时间、投加量以及 pH 值影响的试验研究,最终选定 KC-87 粉末状果壳炭作吸附材料,用于对化学混凝出水进行深度处理,并确定其最佳吸附参数为:混凝出水 pH 值不变、吸附时间为 1 h,w (KC-87)为 3 g L⁻¹。

2.4 PFC 混凝-活性炭 KC-87 吸附组合处理试验结果

在最佳 PFC 混凝和 KC-87 活性炭吸附条件下,对混凝出水和最终出水的主要水质指标进行了比较详细的分析,结果见表 3。可以看出,经 PFC 化学混凝和 KC-87 活性炭吸附组合处理后,除了 COD 得到明显去除外,其他主要污染物如悬浮固体(SS)、总固体(TS)、溶解性固体(DS)、氨氮(NH₃)等也都得到了有效的去除,使得最终出水的水质达到了国家污水综合排放标准中的一级水平,达到了预期的要求。

表 3 PFC 混凝和 KC-87 活性炭吸附组合处理试验结果

Table 3 Experimental results from the treatment processes combining PFC coagulant with KC-87 activated carbon

	pH	COD		SS		TS		DS		NH ₃ -N		浊度	浊度	色度
		去除率		去除		去除		去除		去除		去除率	去除率	去除
		/mg L ⁻¹	/ %	/mg L ⁻¹	率/ %	/mg L ⁻¹	率/ %	/mg L ⁻¹	率/ %	/mg L ⁻¹	率/ %	/NTU	/ %	稀释倍数
原水	8.7	4300		3260		13238		9978		7.6		4230		450
PFC 混凝处理后出水	7.0	202	95.3	90	97.2	5748	56.6	5658	43.3	5.7	25	26	99.4	25
KC-87 活性炭吸附后出水	8.4	49.8	98.8	85	97.4	5152	61.1	5067	49.2	8.9	35.5	0.5	100.0	13
国家排放标准 [*] (一级)	6~9	100		70						15		50		

*国家废水综合排放标准 (GB 8978—1996)。

3 结 论

1)对化学混凝-物理处理组合工艺用于油田钻井废水的处理进行了试验研究,结果发现,化学混凝与膜分离组合工艺没能达到预期的效果;以化学混凝为预处理、活性炭吸附作为深度处理的组合工艺处理效果较好,所处理钻井废水的主要水质指标可以达到国家污水综合排放标准一级水平。

2)化学混凝与活性炭吸附组合工艺的最佳处理参数为:对化学混凝处理,最佳混凝剂为聚合氯化铁 PFC,w (PFC)为 10 mL L⁻¹ (质量分数 10 %),以 PAM 为助凝剂,w (PAM)为 10 mL L⁻¹ (质量分数 0.5 %),pH 值无需调节;对活性炭吸附,选择 KC-87 粉末状果壳活性炭作吸附材料,吸附时间为 1 h,

w (KC-87)为 3 g L⁻¹。

参 考 文 献

[1] 邹启贤,陆正禹. 油田废水处理综述[J]. 工业水处理, 2001,21(8):1 - 4
[2] 李瑜,夏素兰,张剑鸣,等. 混凝离心处理钻井废水的实验研究[J]. 油田化学,2003,20(3):277 - 284
[3] 李凡修,肖遥. 含油污泥混凝处理试验研究[J]. 石油与天然气化工,2000,29(4):211 - 213
[4] 王蓉莎,李凡修,马克纯. 钻井污水絮凝处理实验研究[J]. 石油与天然气化工,2000,29(6):323 - 326
[5] 刘成波. 活性炭吸附法降低造纸废水中 COD 的研究[J]. 造纸科学与艺术,2002,21(6):64 - 66
[6] 高廷耀,顾国维. 水污染控制工程(下册)[M]. 第二版. 北京:高等教育出版社,2000,225 - 228

(下转第 28 页)

- ta, 2005, 50(3): 801 - 803
- [12] Angus S, Armstrong B, Reuck K M. IUPAC international thermodynamic tables of the fluid state carbon dioxide [M]. Oxford: Pergamon Press, 1976, 266 - 359
- [13] Reid R C, Praustnitz J M, Poling B E. The Properties of Gases and Liquids [M]. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 1987, 55 - 68
- [14] 童景山. 流体的热物理性质 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1996, 347
- [13] Reid R C, Praustnitz J M, Poling B E. The Properties of

Study on solubility of propyl *p*-hydroxybenzoate in supercritical CO₂ with cosolvent

J IN Jun-su XU Jing-nian ZHANG Ze-ting LI Ying

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The solubility of propyl *p*-hydroxybenzoate was measured in the supercritical CO₂ at temperature 308.15 K and pressures from 8.0 to 23.0 MPa by using a flow-type phase equilibrium apparatus with pure and mixed cosolvents, such as acetone and cyclohexane + acetone (molar ratio 1:1) at the mole fractions of 0.01 ~ 0.04. The cosolvent effect was analyzed. The measured solubilities in SC-CO₂ with cosolvents were correlated by the expanded liquid model. And the result indicates that the estimated value is well fitted with the observed and the average absolute relative deviation is 3.01 %.

Key words: propyl *p*-hydroxybenzoate; solubility; supercritical CO₂; cosolvent; expanded liquid model

(责任编辑 云志学)

(上接第 23 页)

Treatment of drilling wastewater from oil field by coagulation combining with membrane separation and activated carbon adsorption

LI Xiu-jin GORAN Nasser KANG Jia-li LI Rong-ping

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The drilling wastewater from oil field was treated through chemical coagulation combining with membrane separation and activated carbon adsorption. Four kinds of coagulants, one membrane and four types of activated carbons were investigated. Poly ferric chloride (PFC) was found to be the best one among the four coagulants, and the COD removal efficiency was 95.3 % when PFC of 100 mL L⁻¹ and PAM of 10 mL L⁻¹ were added without pH adjustment. The wastewater pretreated by PFC was further treated by a membrane and activated carbons, respectively. It was found that the activated carbon as the second treatment process achieved an expected result, while the membrane separation did not. The activated carbon powder KC-87 reached maximum COD removal efficiency of 75.3 % when KC-87 of 3 g was added to 1 L wastewater after 1 h adsorption. With the combined treatment by PFC coagulation and KC-87 adsorption at the optimal conditions, the total COD removal efficiency reached 97.4 %, and the treated wastewater reached the first-class level of the Integrated Wastewater Discharge Standard.

Key words: drilling wastewater; coagulation; membrane separation; adsorption; activated carbon

(责任编辑 云志学)