

# 重芳烃载运船舶洗舱水处理与综合利用工程实例

李卫 彭晓宇

(连云港鹏辰特种新材料有限公司 江苏连云港 222006)

**摘要:** 货物水运难以避免产生大量船舶污水, 若不合理处置将会污染水体环境, 加剧海洋环境恶化。针对江苏某石化企业船舶洗舱水亟待处理的问题, 设计了一套高效低能耗含油污水处理系统, 实际运行中出水 COD 浓度 $<500\text{mg/L}$ , 后续经厂区污水处理站处理后石油类 $<3\text{mg/L}$ , 远低于园区污水处理站接管要求 ( $\leq 20\text{mg/L}$ ), 运行稳定可长期使用, 与此同时实现了废油的回收利用。

**关键词:** 重芳烃; 洗舱水; 含油废水; 回收利用

## 引言

根据《船舶载运危险货物安全监督管理规定》与《船舶水污染防治技术政策》要求, 涉及载运危险货物的船舶在离开卸货港前应洗舱, 产生的洗舱水需送至岸上, 且必须经过处理后按国家法律法规要求排放。船舶洗舱水包括含油污水与含毒液体废水两类<sup>[1]</sup>, 应根据所清洗的化学品属性按照危险废物或其他固体废物实施管理。结合交通运输部办公厅、生态环境部办公厅、住房和城乡建设部办公厅联合颁发的《关于建立完善船舶水污染物转移处置联合监管制度的指导意见》: “能够经过物理处理、化学处理、物理化学处理和生物处理等废水处理工艺处理后, 可以满足向环境水体排放的相关法规和排放标准要求的化学品洗舱水按照废水实施管理”。此意见为企业处理船舶洗舱水提供了政策支持, 指出了新的出路, 即企业可按需自行配备船舶洗舱水处理设施, 不仅利于企业持续、绿色稳定发展, 更降低了污水危害环境的可能性。

## 1 项目概况

江苏某石化企业芳烃分离项目以 C10 重芳烃为原料, 通过船舶水运, 产生船舶洗舱水为含轻质油废水, COD 与石油类指标浓度较高, 若直接接入厂区现有污水处理站处理, 将不满足园区污水处理厂接管标准值, 因此项目实施前洗舱含油废水委托仓储公司暂存。介于贮存压力与委外处理可能造成较大的油品损失, 在政策支持下, 企业在不突破现有厂区污水处理站处理能力的前提下, 扩建了一座含油废水处理设施, 用于洗舱含油废水的前处理, 以此促进洗舱含油废水转移、处置科学、绿色、合理、合规, 解决仓储公司的转移、处置困境, 实现油品资源回收利用。

## 2 现有洗舱水处理工艺概述

船舶含油污水包括机舱舱底水、船舶压载水以及洗舱水, 其中洗舱水属于含油量较高的一类含油废水, 具体成分根据实际载运物质的不同而有所差异。含油废水中的油粒根据粒径差异分为上浮油、

分散油、乳化油、溶解油<sup>[2]</sup>, 其中乳化油为洗舱含油废水的主要成分, 具有粒径小、能稳定存在于水相中的特点, 因此较其他油粒更难去除。当前用于处理洗舱含油废水的工艺方法可分为物理处理、化学处理、生物处理以及联合处理。

物理方法有利用油水密度差异的重力分离法, 但是具有局限性, 在水油密度差异较大的情况下效果显著, 通常用于预处理或一级处理, 对于处理乳化油效果较差<sup>[3]</sup>。此外物理方法还包括旋流器混凝分离法与过滤法。化学处理包括混凝/絮凝法, 通过投加化学药剂将油粒聚集去除; 吸附法可以同时达到降低化学需氧量和除臭脱色的效果; 化学氧化法通过将有机物分解达到降低废水 COD 的目的。常见的生物处理方法包括活性污泥法与生物膜法, 后者因操作简单分离效果好而受到更多关注。由于含油废水成分复杂以及处理要求的差异, 通常采用联合处理方法以满足不同处理需求。

## 3 项目洗舱水处理工艺与设计

### 3.1 洗舱水处理工艺流程

现有污水处理站工艺流程为: 污水→隔油池→气浮池→MBBR→沉淀池→出水池→接管至园区污水厂。由于运载原料单一, 船舶洗舱含油废水主要成分为 C10 重芳烃, 污染物指标为 COD 与石油类物质, 不新增污染物。因此在现有处理流程的前端新增洗舱水处理站, 主要用于油水分离, 具体工艺采用“调节池+隔油池+气浮装置+油水分离器”, 流程为: 含油废水→储存调节池→隔油池→提升泵+气浮装置→提升泵+油水分离器→厂区污水处理站。前后端联合处理实现了洗舱含油废水的三级处理工艺流程。

### 3.2 总工艺流程概述

有研究发现斜板隔油池与混凝气浮结合能同时发挥两者优势, 有效减少含油量降低后续处理负荷, 并且在絮凝剂聚合氯化铝 (PAC) 基础上投加聚丙烯酰胺 (PAM) 后混凝效果增强<sup>[4]</sup>。因此本项目采用了此种组合工艺, 具体流程为: 船舶含油废水管接至储存调节池进

行调质、均匀后,首先经过斜管沉淀隔油池进行预处理,可基本去除悬浮物及分层油。隔出的部分油品经桶装收集后可作原料回用,剩余废水提升至气浮装置处理。在气浮装置处投加少量絮凝剂(PAC和PAM),废水中的浮油通过释放溶于水中的细小而分散的微气泡聚集为漂浮物,从而形成含油污泥从污水中分离,经此过程去除污水中大部分含油杂质,达到净水目的。含有剩余少量油品的废水泵送至粗粒化油污水分离装置,利用高分子材料粗粒化元件捕捉凝聚水中的剩余油粒,达到油、水分离目的,与此同时进一步回收油品。

含油废水处理后的尾水进入中间水箱,经泵打入厂区污水处理厂,与全厂其他生产废水一同进入隔油池进行水量和水质的均化处理,为后续处理构筑物创造稳定运行的进水水质条件,降低对处理系统的冲击负荷。同时去除浮于表面的油类物质,而剩余废水则进入气浮池,在破乳纳米气浮工艺下去除颗粒物质。气浮出水则进入MBBR(移动床生物膜反应器)处理以大幅降低有机物浓度。MBBR通过结合生物膜法与活性污泥,提升反应池处理能力的同时也增强了系统耐冲击负荷的能力,利于微生物生长富集使得处理更加稳定<sup>[5]</sup>。MBBR出水进入沉淀池中通过重力作用进行沉淀去除。直至废水处理达到接管标准后排入园区污水处理厂。

### 3.3 主要工艺设计

#### 3.3.1 洗舱水处理站工艺设计

洗舱水处理站起到含油废水预处理作用。根据进水水质成份石油类与COD浓度高,乳化油难去除的特点,应选用处理分离效果好、效率高,且能将油品尽量回收的设备及工艺。本项目工程采用高效节能材料以及先进技术手段,尽可能实现自动化管理,合理布置以降低运行费用。设计处理水量为3m<sup>3</sup>/h,设计出水水质达到COD≤500mg/L。

(1) 组合储油箱。包含水箱、油箱以及油水混合体箱三部分,箱体采用碳钢防腐全封闭结构,设计尺寸为5m×2m×2m。其中混合体箱接收储存调节池、斜管隔油池、溶气气浮装置以及油污水分离装置上层油水,进一步分层分离水油。水箱废水与混合体箱废水通过泵提升重回储存调节池处理,油箱油品经油提升泵回收利用。

(2) 储存调节池。调节池箱体采用碳钢防腐全封闭结构,常压下工作,设计尺寸为6m×3m×3m。用于污水的均质处理,初步收集上层油品。

(3) 斜管隔油池。采用碳钢防腐全封闭结构,设计尺寸为2m×3m×3m。用于水量调节,进行含油废水预处理,浮油进入储油箱,含水率在8%左右。

(4) 浮气气浮装置。气浮设备采用碳钢防腐材质,常温工作,

设计处理能力为3m<sup>3</sup>/h,设计尺寸为5m×2.3m×2m。主要包含加药装置两套(PAC和PAM),刮渣机一套。去除大部分油分的同时产生含油污泥。

(5) 油污水分离装置。壳体采用碳钢防腐结构,滤芯为PP聚丙烯材质,设计处理能力为3m<sup>3</sup>/h,设计压力0.25MPa,设计尺寸为2.2m×1.2m×2m。配备电加热器一只。在内部二级高分子纤维材料粗粒化组合元件捕捉聚合作用下,最终分离油珠与水,保证出水含油量低于10mg/L。设备现场如图3-1所示。



图 3-1 含油废水处理设施现场图

#### 3.3.2 污水处理站工艺设计

(1) 中间水罐。采用碳钢防腐结构,设计尺寸为3m×2m×2.6m。暂存洗舱水处理站出水,随后泵入厂区污水处理厂。

(2) 隔油调节设备。采用碳钢防腐结构,设计处理量4.2t/h,设计尺寸为12m×3.0m×3.14m。主要配备搅拌机、隔油沉淀池以及刮油机,用于隔油,匀质匀量。

(3) 成套处理装置。包含PAC与PAM加药装置各一套,破乳纳米气浮装置一套(设计尺寸3.5m×1.0m×1.9m),TY-MBBR处理装置一台(设计尺寸3m×2.5m×3.0m,有效停留时间4.5h,配置加热器可保证冬季正常运行),二沉池(设计尺寸2m×2m×3.0m)与监测池(设计尺寸1m×2m×3.0m)。

### 4 洗舱水处理站实际处理效果分析

洗舱水处理站装置安装并正常运行期间负荷为100%,截取实际运行中洗舱水处理站进出水中COD的浓度变化并计算去除效率,同时列出厂区污水处理厂污水总出口COD浓度及石油类含量,数据如表4-1所示。结果表明,实际运行中进水水质COD浓度在2500mg/L上下浮动,洗舱水站能实现出水COD浓度低于500mg/L,平均去除效率高于80%。结合后续厂区污水总出口水质中COD及石油类浓度可知,洗舱水站尾水混合后污水总出口COD及石油类浓度指标仍能达到园区接管标准(石油类≤20mg/L,COD≤500mg/L)。与此同时,

在洗舱水处理站试运行期间, 厂区污水处理厂污水总出口 COD 浓度及性状等指标有明确要求。回收油品监测报告与标准对比结果如表 5-1 所示。结合油品检测结果, 洗舱水处理站回收的油品能满足《工业用碳十粗芳烃》(SH/T 1804-2016) 中的要求, 可回用。油品回用后预计可减少外购量 286 吨/年, 减少油品损失的同时实现资源回收利用。

表 4-1 洗舱水站实际运行原始数据 (mg/L)

| 洗舱水进水 | 洗舱水出水 | 去除效率/% | 污水总出口石油类 | 水总出口 COD | 平均去除效率/% |
|-------|-------|--------|----------|----------|----------|
| 2512  | 486   | 80.7   | 1.017    | 85.5     | 80.2     |
| 2280  | 459   | 79.9   | 0.111    | 56.4     |          |
| 2376  | 468   | 80.3   | 1.83     | 33.6     |          |
| 2478  | 473   | 80.9   | 1.55     | 27.5     |          |
| 2398  | 489   | 79.6   | 2.09     | 23.8     |          |
| 2347  | 469   | 80.0   | 0.102    | 22.6     |          |

### 5 回收油品成分分析

《工业用碳十粗芳烃》(SH/T 1804-2016) 中对工业用 C10 成分及性状等指标有明确要求。回收油品监测报告与标准对比结果如表 5-1 所示。结合油品检测结果, 洗舱水处理站回收的油品能满足《工业用碳十粗芳烃》(SH/T 1804-2016) 中的要求, 可回用。油品回用后预计可减少外购量 286 吨/年, 减少油品损失的同时实现资源回收利用。

表 5-1 回收油品监测结果与标准对比

| 项目                              | 指标         |      | 检测结果  |       |       |
|---------------------------------|------------|------|-------|-------|-------|
|                                 | I 型        | II 型 |       |       |       |
| 外观                              | 无机械杂质、无游离水 |      | 澄清、透明 |       |       |
| 密度 (20℃) / (kg/m <sup>3</sup> ) | ≥          | 880  | 880   | 949.6 |       |
| 总芳烃 w/%                         | ≥          | 99   | 99    | 99.8* |       |
| 三甲苯 w/%                         |            | 报告   | 报告    | 4.23  |       |
| 四甲苯 w/%                         |            | 报告   | 报告    | 14.73 |       |
| 1, 2, 4, 5-四甲苯 w/%              |            | 报告   | 报告    | 5.97  |       |
| 萘 w/%                           |            | 报告   | 报告    | 8.55  |       |
| 甲基萘 w/%                         |            | 报告   | 报告    | 12.39 |       |
| 硫/(mg/kg)                       | ≤          | 20   | 60    | 2.8   |       |
| 馏程                              | 初馏点/℃      | ≥    | 160   | 175   | 189.4 |
| 210℃回收体积/mL                     | ≥          | 40   | 30    | > 30  |       |
| 50%回收温度/℃                       |            | 报告   | 报告    | 219.1 |       |
| 90%回收温度/℃                       |            | 报告   | 报告    | 308.7 |       |

\*注: 剩余 0.02% 主要为水或杂质。

### 6 效益分析

洗舱水处理站建成试运行期间, 日均处理含油废水量为 30 吨/天。含油废水处理成本包含电费、水费、药剂费用以及污泥处置费

接管标准值。因此洗舱水站的扩建能稳定处理洗舱含油污水, 同时保障进入污水处理站水质的稳定性。

用, 折算结果如下: ①电费: 2.19 元/吨; ②水费: 29.78 元/吨; ③药剂费: 1.39 元/吨; ④(污泥委外处置总费用/总废水量): 19.44 元/吨。因此含油废水总处理成本为: 2.19+29.78+1.39+19.44=52.80 元/吨。因此洗舱水站处理每吨水实际产生收益为 556.11-52.80=503.31 元/吨。与委外处理花费相比产生了正效益。

通过洗舱水处理站的建设运行, 可以有效处理洗舱产生的含油废水, 结合已有污水处理厂工艺能达到较优的处理效果。首先使得洗舱水能达标接管园区污水处理厂, 减少运输废水对环境的水污染; 其次缓解了贮存企业的存储压力, 促进了洗舱水的合理处置, 实现了油品的资源回收利用, 有助于企业的持续绿色发展。

### 结论

通过对现有污水处理系统的扩建, 实现了洗舱含油废水的自行处理与油品回收。不仅能有效缓解企业自身压力, 带来正向经济效益。与此同时, 企业积极响应政策做出有利行动, 促进洗舱水合理、绿色处置, 保护了水资源环境, 为经济可持续发展贡献了自身力量。

### 参考文献

- [1] 陈荣昌, 刘晨, 陈俊峰. 内河船舶洗舱水污染防治现状和对策建议[J]. 中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 2022: 95-99.
- [2] 代洪亮, 古李娜, 赵芷晴, 等. 船舶油污水处理技术研究与应用进展[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版). 2022.36(3): 99-108.
- [3] Han M, Zhang J, Chu W, et al. Prospects of Marine Oily Wastewater Treatment: A Review[J]. Water. 2019.11: 2517.
- [4] 龚帆, 刘霞, 顾人吉. 一种组合工艺的船舶油污水处理技术[J]. 上海船舶运输科学研究所学报. 2019.42(3): 80-84.
- [5] 张申旺, 杨硕, 张向阳, 等. 某污水处理厂 MSBR 工艺升级改造为 MBBR 工艺的工程应用[J]. 净水技术. 2023.42(10): 173-178.