

# FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式研究

吴奇林 肖凯伦 刘磊 郭恒 苗建

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054

**摘要:** 大多数浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)原油发电机排出尾气后,余热和废烟均未回收利用,直接排放后引起环境污染。通过对大多数FPSO现状和烟气净化需求分析,设计了一种原油发电机废烟热利用及净化新模式,回收原油发电机的中温烟气余热为热介质系统提供热量,同时将烟气引入惰气系统用作油舱惰封气体,剩余烟气净化处理后排放到大气中。以海洋石油118 FPSO为例,进行了新模式的模拟应用和热值理论分析,模拟应用中新模式完全满足生产实际需要,同时创造的经济环保效益可观,说明FPSO原油发电机废烟热利用及净化新模式具有极大的应用价值和良好的推广性。

**关键词:** 发电机尾气;余热回收;惰气;烟气净化;新模式

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.02.019

## Study on a new mode of waste heat utilization and purification of FPSO crude oil generator flue gas

WU Qilin, XIAO Kailun, LIU Lei, GUO Heng, MIAO Jian

CNOOC China Ltd., Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong, 518054, China

**Abstract:** For most FPSO (Floating Production Storage and Offloading) crude oil generators, the waste heat and flue gas are not recycled and reused, and will cause environmental pollution after the flue gas is discharged directly. Based on the analysis of the status and demand of most FPSOs in China, a new mode of waste heat utilization and purification of flue gas from crude oil generator is designed. In this new mode, the waste heat of the crude oil generator medium temperature flue gas is recovered to provide heat for the heating medium system. Then the flue gas is introduced into inert gas system as inert seal gas in the oil tanks, and the remaining flue gas is discharged into the atmosphere after purification. This paper takes HYSY 118 FPSO as an example to carry out simulation application and theoretical analysis of the calorific value. The new mode in the simulation application has a good effect, and the economic and environmental

收稿日期:2021-09-03

基金项目:四川省科技厅应用基础研究“地热完井结构与井下换热器协同强化换热机理研究”(2021YJ0389)

作者简介:吴奇林(1977-),男,湖南株洲人,高级工程师,学士,长期从事海上油气水处理工艺研究。E-mail:epfpsoscjd@

cnooc.com.cn

通信作者:肖凯伦(1993-),男,四川绵阳人,工程师,学士,长期从事海上油气水处理工艺研究。E-mail:389012411@qq.com

benefits created for FPSO are very considerable, indicating that the new mode of waste heat utilization and purification of FPSO crude oil generator flue gas is completely feasible in theory and practice, and has great value for application and promotion.

**Keywords:** Generator flue gas; Waste heat recovery; Inert gas; Flue gas purification; New mode

## 0 前言

2020 年 9 月,中国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标。“双碳”目标是系统性的能源革命,作为所属油田的油气处理中心和电力供应中心的浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)成为海洋油气开发进一步节能减排的主要挖潜目标。目前中国大多数油田天然气产量不足, FPSO 电站多使用原油发电机<sup>[1]</sup>,其产生的大量中温烟气是空气污染和热污染的主要来源。研究烟气回收利用的新技术和新模式,充分回收烟气中的余热资源和惰性气体,不仅能够创造大量能源利用的经济效益和环保效益,还能促进节能减排,助力“双碳”目标尽早实现<sup>[2-3]</sup>。

目前,中国海洋石油行业的海洋石油 112 FPSO<sup>[4]</sup>、海洋石油 115 FPSO<sup>[5]</sup>原油发电机排烟管上加装了余热回收装置,回收的大量余热用以加热热介质系统的热介质油,部分取代了热介质锅炉加热,但没有对烟气进行净化处理,直接排放到大气中造成污染。对于烟气的回收利用,主要体现在将 FPSO 热介质锅炉的烟气用于惰气系统。海洋石油 118 FPSO 将热介质锅炉燃烧产生的烟气经过处理后用作油舱惰封气体<sup>[6]</sup>,但为保证烟气流量满足要求,往往需要提高热介质锅炉的热负荷生产,此举虽然实现了烟气利用,但增加了能源消耗,且造成原油发电机烟气余热和烟气的浪费。此外,陆丰 13-2 DPP 在原油发电机烟管设立海水喷淋系统对烟气进行抑制、除尘和冷却<sup>[7-8]</sup>,海洋石油 115 FPSO、海洋石油 118 FPSO 原油发电机的烟气直接放空,氮氧化物、硫化物和灰分极大地污染了大气环境。

综上所述,中国 FPSO 废热废烟回收利用的现状是,回收原油发电机的中温烟气余热时却未回收利用烟气,回收热介质锅炉低温烟气时造成了额外的能源消耗,且大多数烟气未经过净化处理。因此,本文针对上述现状,设计了一种 FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式,回收原油发电机的中温烟气余热为热介质系统提供热量,同时将烟气引入惰气系统用作油舱惰封气体,其余烟气净化处理后排放到大气中。

## 1 FPSO 烟气综合回收利用思路

目前,中国烟气余热利用的总体原则是“按质用能、

梯级利用”。FPSO 原油发电机排烟温度通常为 250 ~ 400 ℃<sup>[9]</sup>,属于中温烟气,是 FPSO 热介质系统的理想热源,见表 1。FPSO 作为油田电力供应中心,发电量大,除了中温烟气可回收利用余热较多外,烟气体积同样可观。因此,设计了 FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式,在回收利用原油发电机中温烟气余热的同时,还可将大量烟气通过惰气系统用作油舱惰封气体。回收余热后,在部分或完全替代了热介质锅炉的同时,也解决了惰气系统烟气来源问题。

表 1 工业部门常见的工艺烟气温度表

Tab. 1 Common flue gas temperatures in industrial sectors

| 高温烟气    |               | 中低温烟气  |           |
|---------|---------------|--------|-----------|
| 设备      | 排烟温度 /℃       | 设备     | 排烟温度 /℃   |
| 氧气顶吹转炉  | 1 650 ~ 1 900 | 锅炉     | 100 ~ 300 |
| 炼铜反射炉   | 1 100 ~ 1 300 | 燃气轮机   | 400 ~ 500 |
| 镍精炼炉    | 1 400 ~ 1 600 | 内燃机    | 300 ~ 600 |
| 炼锌炉     | 1 000 ~ 1 100 | 增压内燃机  | 250 ~ 400 |
| 常规轧钢加热炉 | 900 ~ 1 200   | 热处理炉   | 400 ~ 600 |
| 干法水泥炉   | 600 ~ 800     | 干燥炉和烘炉 | 250 ~ 600 |
| 玻璃炉窑    | 650 ~ 900     | 换热器    | 300 ~ 450 |

### 1.1 原油发电机废烟热利用及净化新模式

针对中国 FPSO 原油发电机废烟热利用及净化方面的缺陷和不足,本文将现阶段中国成熟的余热回收技术和烟气利用技术进行了优化整合,并首次提出对废烟进行净化处理,设计出一种可同时实现“余热回收、烟气利用、烟气净化”的 FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式,其流程见图 1。

按惰气来源方式分类,惰气发生装置可分为烟气模式惰气发生装置、燃烧模式惰气发生装置以及同时包含两种模式的多功能惰气发生装置<sup>[10]</sup>。多功能惰气发生装置的工作方式是,当烟气含氧量低于 5% 时,烟气由风机抽出,经预水洗塔冷却并除尘后,由风机打入各货油舱;当含氧量超过 5% 时,烟气和柴油二次燃烧,烟气含氧量进一步降低后由风机打入各货油舱。多功能惰气发生装置流程<sup>[11]</sup>见图 2。

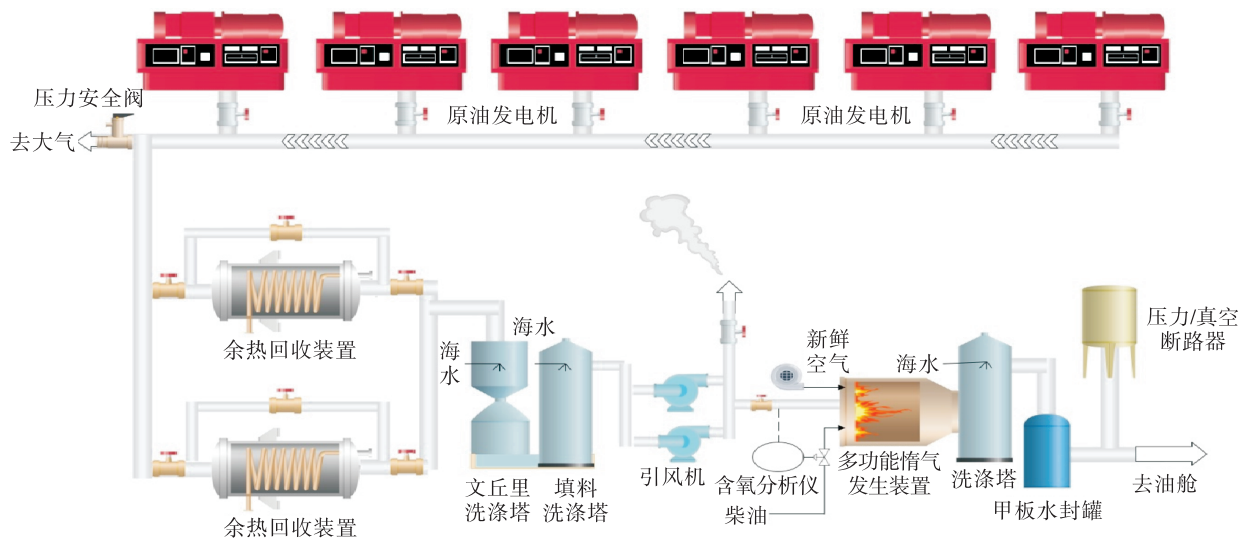


图 1 FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式流程图

Fig. 1 Flowchart of a new model of waste heat utilization and purification of FPSO crude oil generator flue gas

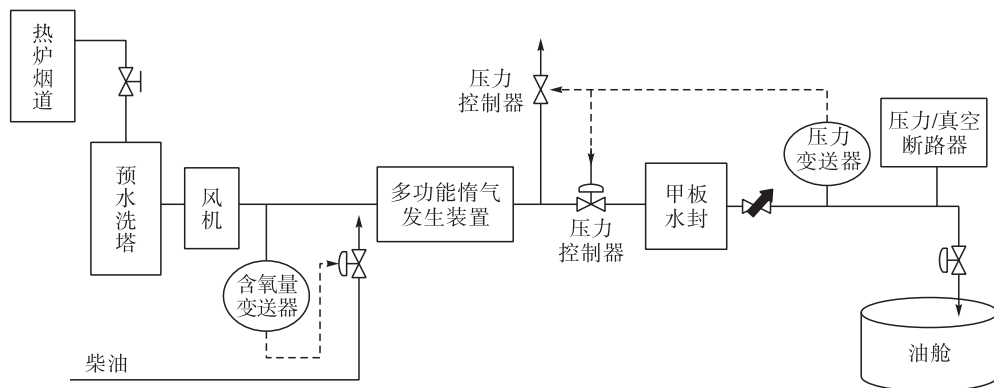


图 2 多功能惰气发生装置流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multifunctional inert gas system

通常 FPSO 只需要在货油外输和洗舱驱气时才使用惰气,此时需要投用多功能惰气发生装置;其他时间多功能惰气发生装置无需启动。

#### 1.1.1 工况 1:未投用多功能惰气发生装置

在无需投用多功能惰气发生装置时,原油发电机的中温烟气首先进入烟气换热器中,与热介质油充分换热后的低温烟气进入洗涤塔清洁除尘,净化后的洁净烟气通过风机直接排放到大气中。

#### 1.1.2 工况 2:投用多功能惰气发生装置

当需要启用多功能惰气发生装置时,打开风机至多功能惰气发生装置隔离阀,关闭烟气放空阀,洁净烟气通过风机增压后进入多功能惰气发生装置,此时又可分为三种情况。

1) 当烟气含氧量低于 5% 时,多功能惰气发生装置无需启动,惰气直接经过第二次净化处理后进入油舱惰封系统。

2) 当烟气含氧量高于 5% 时,多功能惰气发生装置启动,烟气与柴油混合二次燃烧后形成含氧量低于 5%

的合格惰气,合格惰气经过第二次净化处理后进入油舱惰封系统。

3) 当上游流程故障,无法使用原油发电机烟气时,多功能惰气发生装置可以利用新鲜空气助燃柴油制造惰气,合格惰气经过第二次净化处理后进入油舱惰封系统。

### 1.2 新模式技术难点和解决方案

#### 1.2.1 低温腐蚀问题

在烟气余热利用技术中,换热材料的低温腐蚀问题最为突出。当烟气温度低于硫酸蒸汽的酸露点时,受热面金属会发生较严重的腐蚀<sup>[12]</sup>。工程实际应用上根据适用的公式计算酸露点,再根据酸露点设定换热器的出口温度。此外,换热部位可应用各类含氟聚合物材料,避免传统金属材料的腐蚀问题<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.2 换热管积灰问题

在换热器中,烟气中的酸性组分和冷凝水混合后会附着在换热管表面,轻则降低传热效率,重则增加烟气流动阻力并堵塞烟道。对此,业内一般采用适当提高烟

速、优选盘管间距、定期吹灰等措施解决积灰问题<sup>[14]</sup>。

### 1.2.3 烟气含氧量不合格问题

原油发电机的烟气含氧量一般为 10% ~ 15%<sup>[15]</sup>, 原油发电机负荷不同、工况变化均会导致烟气含氧量发生变化, 原油发电机烟气排放口烟气组分参数见表 2。由于油船油舱惰气要求含氧量低于 5%<sup>[16]</sup>, 因此不能直接将原油发电机烟气用作惰封气体, 除了对烟气进行降温除尘处理外, 还需进一步降低烟气含氧量。因此, 在新模式中应用了多功能惰气发生装置。

表 2 原油发电机烟气排放口烟气组分参数表

Tab. 2 Component parameters of crude oil generator flue gas

| 组分   | 体积分数    |
|------|---------|
| 氮气   | 77.930% |
| 氧气   | 13.670% |
| 二氧化碳 | 8.290%  |
| 氮氧化物 | 0.110%  |
| 一氧化碳 | 0.005%  |

## 2 案例分析

本文选取海洋石油 118 FPSO 作为实例研究对象, 分析该设施应用原油发电机废烟热利用及净化新模式的可行性, 同时对其经济效益和环保效益进行量化评价。

海洋石油 118 FPSO 布置有 6 台美国卡特彼勒公司 8 000 kW 原油 / 柴油双燃料往复复式原油发电机, 为全油田供电。在正常生产情况下, 6 台原油发电机 3 用 3 备。热介质系统由 3 台 10 000 kW 的热介质锅炉、4 台热介质循环泵和 1 个热介质膨胀罐组成, 为各个工艺环节提供热量。海洋石油 118 FPSO 还布置了 1 套烟气模式惰气发生装置, 烟气来源为热介质锅炉; 1 套燃烧模式惰气发生装置, 装置燃料为柴油。

### 2.1 可行性分析

#### 2.1.1 热值理论计算

正常生产情况下, 海洋石油 118 FPSO 的 3 台原油发电机运行, 分配负荷为 65%, 美国卡特彼勒公司提供的原油发电机负荷与排烟温度和排烟流量的关系见图 3。65% 负荷下单台原油发电机排烟流量为 44 000 kg/h, 总排烟流量共计 132 000 kg/h, 原油发电机排烟温度为 400 °C (实测)。烟气定压比热容为 1.2 kJ/(kg·K), 设定余热回收装置烟气出口温度为 150 °C (经典理论和技术经济分析认为, 排烟温度在 120 ~ 140 °C 内为宜<sup>[17]</sup>, 为保持足够的安全余量, 这里采用换热器烟气出口温度为 150 °C 进行核算), 余热回收装置效率暂取 0.9, 热功率为 9 900 kW。

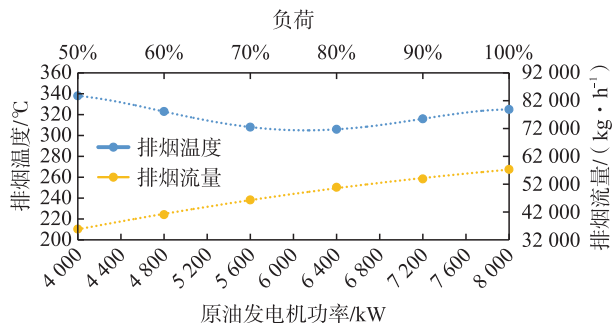


图 3 原油发电机负荷与排烟温度和排烟流量的关系图

Fig. 3 Relationship between load of crude oil generator and flue gas temperature and flue gas flow rate

余热回收装置功率和典型年份热负荷需求对比见图 4。

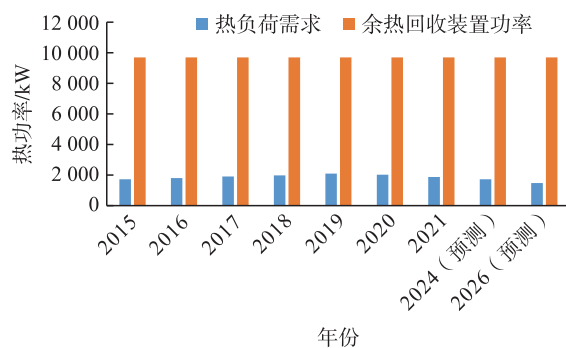


图 4 余热回收装置功率和典型年份热负荷需求对比图

Fig. 4 Comparison of power of waste heat recovery device and thermal load requirements in typical years

2019 年海洋石油 118 FPSO 热负荷为 2 140 kW, 为历年最高。当 3 台原油发电机以高于 65% 负荷运行、烟气出口温度低于 150 °C 时, 余热回收装置可提供的功率至少为 9 900 kW, 大于 FPSO 热介质系统实际最高热负荷需求 2 140 kW; 所以, 加装余热回收装置能够充分满足热介质系统对热量的需求, 可以部分或全部取代热介质锅炉, 即使当后续油田产量高于预期, 热负荷高于预测, 余热回收装置也是热站热源的有力补充。

#### 2.1.2 烟气量计算

海洋石油 118 FPSO 正常生产时原油发电机组总排烟流量为 13 200 kg/h, 烟气实测密度为 0.684 kg/m³, 故烟气体积流量为 19 298 m³/h, 充分满足 FPSO 日常洗舱作业惰气需求。此外, 惰气系统设计能力还应是外输速率的 1.25 倍<sup>[18]</sup>。在外输工况下, 海洋石油 118 FPSO 4 台原油发电机并联运行, 分配负荷为 55%, 单台原油发电机排烟流量为 38 500 kg/h, 总排烟流量可达 154 000 kg/h, 折算体积流量为 225 146 m³/h, 而正常外输速率为 4 200 m³/h, 烟气需求量仅为 5 250 m³/h, 原油发电机组总烟量完全满足外输惰气需求。

## 2.2 经济效益评价

### 2.2.1 运行成本效益

海洋石油 118 FPSO 热负荷需求按最高 2 140 kW 计算,按年生产时率 330 d 计,FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式下每年可节约能耗 2 083 t 标准煤。将原油发电机烟气用作油舱惰气,按约 10 d/次的外输频率计,可节约柴油约 450 t/a。

### 2.2.2 投资成本效益

由于工艺改造涉及面宽,影响较大,本文不考虑将现 FPSO 改造为原油发电机废烟热利用及净化新模式,只考虑新造 FPSO 时采用新模式相对于旧模式的投资成本效益。在海洋石油 118 FPSO,3 台额定热功率 10 000 kW 的导热油加热炉总投资成本约 240 万元,而在新模式中,2 台额定热功率为 10 000 kW 的余热回收装置即可满足工艺要求,根据市场均价 2 台余热回收装置的投资成本仅 50 万元。因此,新模式相较旧模式投资成本可节省约 190 万元。此外,新模式的其他工艺设备在现 FPSO 中均有布置,不再核算其他设备的投资成本效益。

## 2.3 环保效益评价

当前燃油工业烟气中平均烟尘浓度为 445.7 mg/m<sup>3</sup>,氮氧化物平均排放浓度为 429 mg/kg,二氧化硫平均排放浓度为 48 mg/kg<sup>[19]</sup>。根据海洋石油 118 FPSO 正常生产时原油发电机组总排烟流量 13 200 kg/h(19 298 m<sup>3</sup>/h)计算,新模式下,按年生产时率 330 d、烟气净化效率 80% 计算,海洋石油 118 FPSO 可减少烟尘排放 54.5 t/a,减少氮氧化物排放 35.84 t/a,减少二氧化硫排放 4.01 t/a,环保效益显著。

## 3 结论

1) 余热回收装置能够充分满足热介质系统对热量的需求,多功能惰气发生装置也能解决原油发电机烟气含氧量不合格问题。两种装置引入后,FPSO 原油发电机废烟热利用及净化新模式完全满足生产实际需要,后续油田产量高于预期,热负荷高于预测,余热回收装置也是热站热源的有力补充。

2) 原油发电机组日常负荷下,排烟流量充分满足 FPSO 日常洗舱作业惰气需求。外输工况下,烟气需求量增加,但原油发电机组负荷增加,排烟流量同样增加,充分满足原油外输工况下的惰气需求。

3) 运用新模式后,每年节约采油 450 t,直接经济效益可观。

4) 新模式可减少 FPSO 烟尘排放 54.5 t/a,减少氮氧化物排放 35.84 t/a,减少二氧化硫排放 4.01 t/a,环保效益显著。

参考文献:

- [1] 陈希,姬晓东,周斌,等.海上油田主电站选型浅析[J].中国造船,2010(A02):597-601.  
CHEN Xi, JI Xiaodong, ZHOU Bin, et al. Main generator set in offshore platform [J]. Shipbuilding of China, 2010 (A02): 597-601.
- [2] 廖强,王立,刘开琪,等.工业含尘废气余热回收技术基础研究进展[J].中国基础科学,2019,21(5):20-30.  
LIAO Qiang, WANG Li, LIU Kaiqi, et al. Progress of basic research on waste heat recovery technology of industrial flue gases [J]. China Basic Science, 2019, 21 (5): 20-30.
- [3] 田宇.锅炉烟气余热利用系统研究[C]//中国节能协会热电产业联盟.燃煤电厂超低排放形势 SCR 脱硝系统运行管理及氨逃逸监测、空预器堵塞与低温省煤器改造技术交流研讨会论文集.南京:中国节能协会热电产业联盟,2016:266-270.  
TIAN Yu. Research on waste Heat utilization system of boiler flue gas [C]//Thermal Power Industry Alliance of China Energy Conservation Association Proceedings of the Symposium on operation management and ammonia escape monitoring of SCR denitration System in ultra-low emission situation of coal-fired power plants, Air preheater blockage and low temperature economizer Transformation. Nanjing: Thermal Power Industry Alliance of China Energy Conservation Association, 2016: 266-270.
- [4] 陈明庆.发电机组烟气余热回收系统应用研究[J].工艺技术,2016,36(18):125-128.  
CHEN Mingqing. Application research of flue gas waste heat recovery system of generator set [J]. Process Technology, 2016, 36 (18): 125-128.
- [5] 程博.浮式生产储油轮主机尾气余热利用项目改造措施和效果[J].石油石化节能,2020,10(8):44-46.  
CHENG Bo. Improvement measures and effects of waste heat utilization project of main engine exhaust gas of floating production and storage tankers [J]. Energy Conservation of Petroleum and Petrochemical Industry, 2020, 10 (8): 44-46.
- [6] 吴奇林,张冬冬.烟气模式惰气发生器在海洋石油 118 上的应用[J].石化技术,2015,22(6):71-72.  
WU Qilin, ZHANG Dongdong. Application of IGS in FPSO HYSY 118 [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015, 22 (6): 71-72.
- [7] 衣华磊,周晓红,刘飞,等.海上平台原油发电机布置位置影响研究[J].石油工程建设,2012,38(2):16-18.

- YI Hualei, ZHOU Xiaohong, LIU Fei, et al. Research on the Influence of oil generator location on offshore platform [J]. Petroleum Engineering Construction, 2012, 38 (2): 16-18.
- [8] 贺相军,王涛,王磊. LF13-2 油田开发项目原油主机排烟系统设计[J]. 中国海洋平台, 2013, 28(3): 6-9.
- HE Xiangjun, WANG Tao, WANG Lei. The host exhaust system design of LF13-2 oilfield development project [J]. China Offshore Platform, 2013, 28 (3): 6-9.
- [9] 孟嘉. 工业烟气余热回收利用方案优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- MENG Jia. Optimization of recovery and utilization scheme of waste heat from industrial flue gas [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [10] 中国船舶工业总公司. 船舶设计实用手册(轮机分册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- China State Shipbuilding Corporation. Ship design practical manual (turbine volume) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [11] 杜佳. 节能型浮式生产储油装置惰气系统[J]. 节能技术, 2015, 33(4): 372-376.
- DU Jia. Energy conservation type FPSO inert gas system [J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33 (4): 372-376.
- [12] 周武, 向朝晟, 李键. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术[J]. 东方电气评论, 2012, 26(101): 46-50.
- ZHOU Wu, XIANG Chaosheng, LI Jian. Heat recovery technology of boiler flue gas of thermal power plant [J]. Dongfang Electric Review, 2012, 26 (1): 46-50.
- [13] 周彬, 宗仰炜, 葛红花. 某电厂余热锅炉烟气侧低温受热面的腐蚀积垢原因[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42 (2): 60-69.
- ZHOU Bin, ZONG Yangwei, GE Honghua. Corrosion and scaling causes of low temperature heating surface on flue gas side of waste heat boiler in a power plant [J]. Corrosion and Protection, 2021, 42 (2): 60-69.
- [14] 赵之军, 冯伟忠, 张玲. 电站锅炉排烟余热回收的理论分析与工程实践[J]. 动力工程, 2009, 29(11): 994-1012.
- ZHAO Zhijun, FENG Weizhong, ZHANG Ling. Theoretical analysis and engineering practice of waste heat recovery from exhaust gas of power boilers [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2009, 29 (11): 994-1012.
- [15] 周伟, 朱海山, 张明, 等. 海上平台原油发电机排烟管布置对直升机起降的影响研究[J]. 中国造船, 2013, 54 (2): 501-506.
- ZHOU Wei, ZHU Haishan, ZHANG Ming, et al. Research on the influence of oil generator exhaust pipe layout on helicopter take-off and landing [J]. Shipbuilding of China, 2013, 54 (2): 501-506.
- [16] 李工. 油船安全管理知识(七)[J]. 石油管理与安全, 1998, 7(5): 37-39.
- LI Gong. Oil tanker safety management knowledge (7) [J]. Petroleum Management and Safety, 1998, 7 (5): 37-39.
- [17] 樊泉桂, 阎维平. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- FAN Quanguai, YAN Weiping. Principle of boiler [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [18] 罗辉, 李建明, 王伟勇, 等. 油船惰性气体系统技术条件: CB/T 4434—2019[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2019.
- LUO Yun, LI Jianming, WANG Weiyong, et al. Specification for oil tanker inert gas system: CB/T 4434—2019 [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2019.
- [19] 唐黔, 卢先德, 王树海, 等. 工业炉窑烟气污染及其治理[J]. 工业炉, 1995, 4(78): 42-58.
- TANG Qian, LU Xiande, WANG Shuhai, et al. Industrial furnace smoke pollution and its treatment [J]. Industrial Furnace, 1995, 4 (78): 42-58.