

船用柴油机废气脱硫技术和经济性分析

王娜¹, 沈海涛²

(1.浙江天地环保科技股份有限公司, 浙江 杭州 311100; 2.浙江浙能迈领环境科技有限公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 国际海事组织全球限硫令 2020 年 1 月 1 日起生效实施, 船舶废气脱硫系统是被认可的履约技术之一, 其技术可行性和经济性是船东关心的重要因素. 本文对比分析了主流的船用柴油机废气脱硫技术, 认为混合式脱硫系统具有较好的技术适用性. 进一步运用全生命周期费用分析法进行了经济性研究, 重点分析了高低硫油价差对镁基混合式废气脱硫系统投资回收期 and 净现值的影响. 结果表明, 船舶脱硫系统在当前油价处于历史低位时仍有较好的经济性, 随着油价回升, 船舶脱硫系统将具有巨大的市场潜力.

关键词: 船舶脱硫; 混合式; 废气清洗系统; 全生命周期费用; 船用柴油机

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 05-0117-04

近年来, 船舶排放污染物对大气环境和海洋环境造成的污染和危害日趋严重. 2014 年国际海事组织(IMO)统计数据显示, 船舶柴油机排放尾气中的 SO_2 约占全球排放总量的 13%^[1]. 为了减少船舶对大气环境的影响, 国际海事组织决定, 自 2020 年 1 月 1 日起在全球实行“限硫令”, 即船用燃油硫应不超过 0.5% m/m ^[2].

船舶发动机废气脱硫系统是 IMO 认可的应对硫排放要求的三种措施之一, 具有脱硫效率高、设备适应性强、运行和维护费用较低、操作灵活等一系列优点^[3]. 自 2018 年下半年全球掀起了一股加装脱硫系统的热潮, 到 2020 年 3 月, 大约有 4014 艘船舶进行了脱硫装置运营或订购.

早在“限硫令”之前, 孙化栋^[4]、吴斌等^[5]、梁培生等^[6]已对船舶脱硫进行了研究, 但直到目前船舶脱硫装置的真正交付使用, 船舶脱硫技术、市场、运营和监管等方面才逐渐趋于完善. 周松^[7]、郭琳^[8]等虽对脱硫装置经济性进行了研究, 但未对最重要的影响因素——油价差进行动态分析, 该因素在近年来国际油价波动巨大的背景下显得尤为重要. 本文重点对具有良好技术适用性和经济性的镁基混合式脱硫进行技术和经济性分析.

1 船舶脱硫系统技术分析

目前比较成熟且已经实船商用的船舶废气脱硫技术主要有海水法、碱法、混合法等. 海水法利用海水含有大量可溶性盐, 具有天然的酸碱缓冲能力及吸收 SO_2 的能力, 达到烟气净化的效果. 碱法以淡水+NaOH 或者海水+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 作为脱硫剂, 当吸收液的 pH 值下降时只需继续加入 NaOH 或 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 具有脱硫效率高、能耗低、废水量少的优势. 混合法根据海水法和碱法各自的特点开发形成一套混合式脱硫系统, 提供灵活的海水洗涤与碱液洗涤模式切换, 以便更好地适应船舶实际需求. 在排放控制区, 为了达到较高的脱硫效率切换至碱法, 排放控制区之外, 为了降低运行成本切换至海水法, 镁基混合式工艺流程如图 1 所示. 在开式模式下, 循环泵直接将海水打入洗涤塔中, 对废气进行洗涤, 反应后的废水经检测合格后直接排放至海中. 在闭式模式下, 循环泵将循环仓内的洗涤液打入洗涤塔中与废气进行反应, 反应后的洗涤液回到循环仓. 当循环仓内的洗涤水 pH 值降低到下限值时, 通过碱泵将 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 药剂自动添加到循环仓内, 增加洗涤液的碱度, 提高中和反应

能力. 当循环仓内的洗涤液密度达到上限值时, 洗涤液自动排放废水至废水处理系统, 处理后的废水指标(pH、PAH 和浊度)符合要求后排放至大海.

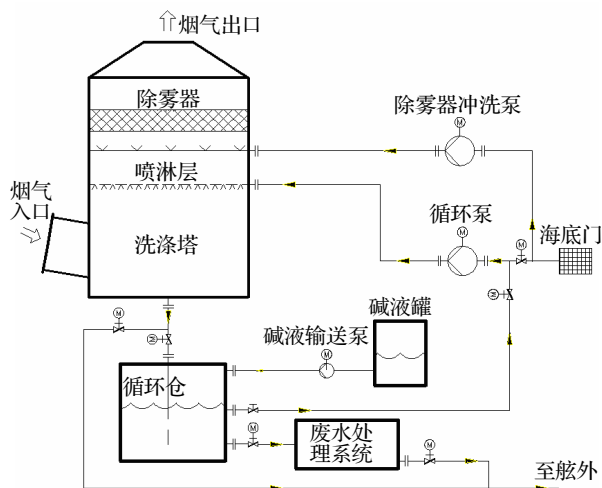


图1 混合式脱硫系统工艺流程

该系统较好地利用了海水法和碱法的技术优势, 公用一套循环泵组, 通过循环泵前和洗涤塔废水排放后 4 个自动阀门的开关控制达到开闭式切换的目的, 能够使船舶适应不同航行环境, 特别适合远洋航线的大型船舶, 减少船舶碱液存储量与二次环境污染, 但该类系统的结构、操作等更为复杂, 初始投资成本更高.

船舶全时段使用闭式系统运行费用较高, 因此船舶很少单独安装闭式系统. 开式系统是直接引入海水参与反应后排回大海, 对应用海域有较高要求. 截至 2020 年 2 月, 已有新加坡、中国、比利时、德国、法国、葡萄牙、西班牙、爱尔兰、挪威等 20 多个国家和地区的港口宣布禁止在一定范围内使用开式脱硫系统, 进入这些区域前需要先切换到闭式系统模式或使用低硫燃油. 越来越多的船东选择了混合式脱硫系统以应对全球的限硫令及各港口国的本地规定, 因此本文着重对混合式脱硫系统的技术经济性进行分析.

2 混合式脱硫系统经济性分析

自 2020 年 1 月 1 日限硫令实施近 1 年后, 船舶脱硫系统的建造成本和运行情况已基本稳定, 此时的经济性分析更真实, 更具有实际指导意义.

2.1 全寿命周期费用分析法

把一定时期内所有的主要费用(包括支出和收

益)都考虑在内, 并把不同时间发生的费用以现值表示, 才能对方案作出合理的经济比较, 从而实现资源的合理配置, 实现经济效益的最大化, 称为寿命周期费用分析法^[9]. 全寿命周期成本最优要求人们从项目全寿命出发, 不仅要考虑项目的初始投资, 更要考虑项目在整个全寿命周期内的支持成本, 包括运行、维修、更新直至报废的全过程.

2.2 全寿命周期费用分析实例

以一艘营运远洋集装箱船为例, 主机实际最大运行功率为 37 100 kW, 4 台辅机最大运行功率均为 2 400 kW, 历史记录统计该船舶日平均耗油 120 t, 正常每年航行按 300 d 计, 50 d 运行在排放控制区内, 使用碱法系统, 250 d 航行在排放控制区外, 使用海水法系统. 该船混合式脱硫系统于 2019 年在中国安装, 改造周期约 70 d, 设定系统的全寿命周期为 10 a, 美元兑人民币汇率以 6.9 计. 全寿命周期各项费用如下:

(1)燃油节省费. 如果不安装脱硫系统, 则船舶在公海航行时须燃烧 0.5% S 的 HFO, 排放限制区内航行须燃烧 0.1% S 的 MGO, 而安装脱硫系统后, 则可以一直燃烧高硫重油 HFO380. 2020 年 HFO380 平均价格约为 280 美元·t⁻¹, 0.1% S 的 MGO 平均价格约为 400 美元·t⁻¹, 0.5% S 的 HFO380 平均价格约为 340 美元·t⁻¹, 高低硫油价差分别为 120 美元·t⁻¹和 60 美元·t⁻¹. 燃油节省=燃油价差×排放区域内油耗, 则一年的燃油节省费用为 1 739 万元.

(2)设备及船舶改装费. 混合式船舶脱硫系统的一次性设备购置费为 1 380 万元, 船舶改造及安装费为 966 万元.

(3)停工损失费. 因船舶安装该脱硫装置需停运 70 d 进行改造, 据船东统计数据显示, 停工期间该船舶的平均盈利损失共约 1 093 万元.

(4)运行成本. 包括物耗、能耗、人工费、维修费和废物处理费, 使用海水法和碱法下的平均物耗及能耗见表 1. (a)物耗费: 海水法的主要原料为海水, 直接从大海中抽取, 故不计其物耗费; 碱法的主要原材料为 Mg(OH)₂, 其耗量为 560 kg·h⁻¹, 现单价约为 4 000 元·t⁻¹, 故 Mg(OH)₂ 年购置费用约为 269 万元. (b)能耗费: 海水法的电耗为 510 kWh·h⁻¹, 碱法的电耗为 520 kWh·h⁻¹. 根据船用发电机的效率计算出电价约为 0.43 元·(kWh)⁻¹, 该脱硫系统的

年耗电为 158 万元。(c)人工费:因该脱硫设备的自动化程度较高,只需船员进行简单的开启和常规检查工作,不需要增加额外的人工费,故人工费不计取。(d)维护费:按设备费的 5% 计取,即第 i 年的维护费=设备费 $\times 5\% \times (1+y)^{i-1}$, y 为生产价格指数的增长率,按平均值 2% 计取。(e)废弃物处理费:该混合式船舶脱硫系统产生的主要废弃物为灰颗粒及带盐的普通固溶物,不属于危废范畴,其产生量为 $12\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,目前该固废物的处理费用约为 $3\,000\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,则每年产生的固废物处理费约为 4 万元。

表 1 海水法和碱法脱硫系统的平均物耗及能耗

脱硫方法	Mg(OH) ₂ 耗量/(kg·h ⁻¹)	能耗/(kWh·h ⁻¹)	废弃物量/(kg·h ⁻¹)
海水法	0	510	0
碱法	560	520	12

表 2 给出了该船安装脱硫系统全寿命周期的经济性评价^[10]。可以看出,在全年仅 50 d 运行在排放控制区且油价差仅 $60\text{ 美元}\cdot\text{t}^{-1}$,油价处于历史低位的情况下,该混合式脱硫系统的静态回收期为 2.8 a,并且运营 10 a 后,净现值高达 8 879 万元。行业基准收益率按 12% 考虑,该脱硫系统的动态投资回收期为 3.1 a,折现后的净现值为 4 366 万元,且随着后期油价差的上涨,其收益将进一步增加。

2.3 影响因素分析

从表 2 中可以看到,针对具体的一艘营运船舶,其营运日均油耗、脱硫系统的开闭式使用时间、电

耗和物耗等相对稳定,在脱硫系统设备费和安装费趋于稳定的情况下,高低硫油价差将成为脱硫系统经济性的最大影响因素。从 2018 年至今的高低硫油价历史数据来看,HFO380 高硫油与 0.5% S 的低硫油平均价差约 $250\text{ 美元}\cdot\text{t}^{-1}$,2020 年 1 月曾最高达 $350\text{ 美元}\cdot\text{t}^{-1}$ 。目前仅为之前平均价差的 1/4,从长期来看,随着世界经济的逐步正常化,油价差上涨的空间较大。

因此,本文进一步分析了高硫油与 0.5% S 低硫油价差波动(区间为 45~140 美元)对该集装箱船脱硫系统的静态、动态投资回收期 and 折现前、折现后净现值的影响(高硫油与 MGO 油价差按高、低硫油价差的 2 倍考虑),如图 2 所示。

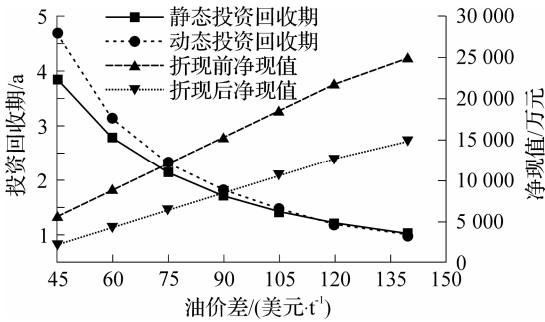


图 2 高低硫油价差对回收期和净现值的影响

可以看到,净现值随着高低硫油价差的增大而增加,基本成正相关的线性关系。回收期随着油价差的增大而减小,成负相关关系。当 HFO380 高硫燃油与 0.5% S 低硫燃油价差在 45~90 美元 $\cdot\text{t}^{-1}$ 之

表 2 混合式脱硫系统经济性评价

寿命 周期/ a	燃油节省/万元			现金流出/万元											折现前 净现值/ 万元	折现后 净现值/ 万元
	HFO 0.5% S	MGO 0.1% S	合计	设备 费	船体改造 及安装费	停工 损失	Mg(OH) ₂ 物耗	海水法 电耗	碱法 电耗	电耗 合计	人工 费	维修 费	废物处 理费	合计		
1	1 242	497	1 739	1 380	966	1 093	269	131	27	158	0	69	4	3 939	-2 201	-2 201
2	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	70	4	502	1 237	1 105
3	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	72	4	503	1 236	985
4	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	73	4	505	1 234	879
5	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	75	4	506	1 233	783
6	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	76	4	508	1 231	699
7	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	78	4	509	1 230	623
8	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	79	4	511	1 228	556
9	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	81	4	512	1 226	495
10	1 242	497	1 739	0	0	0	269	131	27	158	0	82	4	514	1 225	442
合计	12 420	4 968	17 388	1 380	966	1 093	2 688	1 314	268	1 582	0	756	44	8 509	8 879	4 366

间时,静态回收期下降幅度明显(3.9 a 降至 1.7 a);而油价差在 90~140 美元·t⁻¹之间时,静态回收期下降相对平缓(1.7 a 降至 1 a)。油价差处于中高位后,脱硫系统节省的燃油费用会明显增加,投资回收速度加快,当油价差大于 140 美元·t⁻¹时,至多运行 1 a,燃油费用节省即可回收该脱硫系统运行 10 a 的全部投资和运行成本,且经计算,运行 10 a 的折现前净现值高达 3 亿元,投资回报率非常高。

虽然船舶航运市场具有周期性的波动,但整体而言,世界远洋船舶数量一直呈增长趋势,而高低硫油价差越大,船舶日均油耗越大,脱硫装置的经济性越好,因此大型远洋船舶混合式脱硫系统具有巨大的市场潜力。

3 结论及展望

(1)混合式脱硫系统综合了开式和闭式系统的优点,可满足远洋船舶在不同国家、不同海域航行时废气中 SO₂ 的达标排放,在技术上优势明显。

(2)运用全寿命周期费用分析方法,更加科学、全面地对大型船舶脱硫系统进行经济性评价,可以得到不同航线、不同载重吨位、不同油价下船舶脱硫系统的静态回收期 and 净现值,为船东应对“限硫令”的选择提供依据。

(3)从长远考虑,大型远洋船舶安装混合式脱硫系统具有很好的经济性,且随着高低硫油价差的回升,混合式脱硫系统将展现巨大的市场潜力。

参考文献:

- [1] 常敬州,朱国金. 船舶尾气脱硫脱硝应用技术研究与发展趋势[J]. 航海, 2016, 23(5):38-41.
- [2] IMO Resolution MEPC. 259(68)-2015. Guidelines for exhaust gas cleaning systems[S].
- [3] 张弛. 船舶脱硫装置: IMO 限硫法规下的应急之策[J]. 中国水运, 2019(3):16-17.
- [4] 孙化栋. 船舶硫氧化物的排放控制[J]. 世界海运, 2012, 35(8):51-54.
- [5] 吴斌,李欣,王怡. 船舶废气脱硫技术的应用[J]. 船海工程, 2019, 48(2):48-50.
- [6] 梁培生,张国政. 船舶尾气脱硫治理技术现状与应用[J]. 科技创新与应用, 2018(30):155-156; 160.
- [7] 周松,李琤,沈飞翔. 船舶废气洗涤脱硫技术现状及发展趋势[J]. 柴油机, 2014, 36(5):1-6.
- [8] 郭琳,邵福霞,辛启凤,等. 镁基—海水法船舶废气脱硫技术经济性分析[J]. 绿色科技, 2014(10):169-173.
- [9] Reynolds K J. Exhaust gas cleaning system selection guide[R]. Washington DC: The Glosten Associates, 2011.
- [10] 国家发展和改革委员会,建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3 版. 北京: 中国计划出版社, 2006.

Technical and economic analysis of exhaust gas desulfurization for marine diesel engine

WANG Na¹, SHEN Haitao²

(1.Zhejiang Tiandi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2.Zhejiang Zheneng Marine Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: The International Maritime Organization's global sulfur restriction order came into effect on January 1st, 2020. The exhaust gas cleaning system (EGCS) is one of the approved performance technologies, and its technical feasibility and economy are important factors that ship owners care about. In this paper, the mainstream EGCSs are compared and analyzed. The hybrid EGCS is identified to have good technical applicability. Furthermore, an economic research by the life cycle cost analysis was carried out and the impact of the price difference between high and low sulfur oil on the investment payback period and net present value of the magnesium-based hybrid EGCS was analyzed. The results show that even if the oil price is at a historical low level, the EGCS still has good economics. With the recovery of oil prices, the EGCS will have huge market potential.

Key words: marine desulfurization; hybrid; exhaust gas cleaning system; life cycle cost; marine diesel engine

(责任编辑 韩超)