

船用低硫燃油的实验研究

陈孟伟

上海海事大学商船学院, 上海
Email: chenmengwei93@163.com

收稿日期: 2021年2月25日; 录用日期: 2021年5月6日; 发布日期: 2021年5月13日

摘要

针对限硫法规及船用低硫燃料油, 分析了船用低硫油没有国际竞争力、燃油质量监管机制缺失、造成主机燃烧系统损坏及推高了船舶营运成本, 比较了船舶安装脱硫塔与选择低硫油的利弊, 直炼低硫油比调和低硫油有显著优点, 进行了高低硫燃油的低速机ME台架对比试验, 结果表明, ME不同运行工况下废气排放的成分有差异, 中负荷以下低硫油比高硫油排放的NO_x、CO₂和CO较高, 中负荷以上低硫油比高硫油排放的NO_x、CO₂和CO较低, 因此, 低硫燃油从根源上减少了SO_x排放, 选择低硫燃油是船舶应对限硫最有效的措施。

关键词

船舶, 节能减排, 限硫法规, 低硫燃油

Implement Research of Marine Low Sulphur Fuel Oil

Mengwei Chen

Marine Merchant College, Shanghai Maritime University, Shanghai
Email: chenmengwei93@163.com

Received: Feb. 25th, 2021; accepted: May 6th, 2021; published: May 13th, 2021

Abstract

According to the sulfur limit regulations and marine low sulfur fuel oil (LSFO), this paper analyzes that LSFO has no international competitiveness due to lack of fuel quality supervision, causes the main engine (ME) combustion system damage and increases operation cost of ship. The comparison between installation of desulfurization tower and selection of LSFO is analyzed, direct refining LSFO has advantages over blending LSFO, a comparative test of high sulfur fuel oil (HSFO) and

LSFO was carried out on a low speed ME. The results show that there are significant differences in exhaust emission composition of ME under variable operating conditions, the emissions of NO_x, CO₂ and CO from LSFO below medium load are higher than those from HSFO, while the emissions of NO_x, CO₂ and CO from LSFO above medium load are lower than those from HSFO. Therefore, LSFO reduces SO_x emissions, using LSFO is the most effective method for ships to meet the sulfur emission limitation.

Keywords

Ship, Energy-Saving and Emission-Reduction, Sulfur Limitation Regulations, Low Sulphur Fuel Oil (LSFO)

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

船舶是石油消费的重点领域，船舶废气污染占整个大气污染的(5~10)%，部分港口高达 40%。船舶 SO_x 年排放量占全球排放总量的 13% (2014 年 IMO 统计数据)，中国 SO_x 排放量约 170 Mt (2013 年)。MEPC70 (2016)通过了 2020-1/1 实施全球海域船用燃油硫含量 ≤ 0.5%的限硫公约，排放控制区(ECA)仍执行船用燃油硫含量 ≤ 0.1%标准，并扩大到所有成员国 12 海里领海范围内，因此，航运绿色环保、船舶节能减排已成为国际社会的共同责任！航运面临全球变暖的气候变化趋势及环保法规推动的低碳经济、低硫燃油催生新的商业模式、行业竞争和成本控制。美国能源信息署(EIA)数据显示，全球航运业燃料消耗量约 3.2 亿吨/年，占全球石油消费量的 4%，高硫燃油在整个市场份额中占将近 70%。IMO 全面实施限硫法规对船舶废气排放具有强制性和巨大的推动力，极大影响了航运业，迫使船舶运营商选择新燃料、废气清洗系统或低硫燃油，促使石油炼化业提高船用低硫燃油的产量，将深刻地改变航运业能源结构[1]。

世界各大航运公司对限硫政策的态度表明，马士基航运意向低硫燃油，把脱硫过程放在炼油厂为最好方案，但合规责任在于航运业而不是炼油行业；太平洋航运认为应完全禁止高硫燃油供应，法国达飞 22000TEU 船舶使用 LNG 动力推进，地中海航运则是废气脱硫装置的支持者，丹麦油船 Torm、挪威船东 Hunter Group、丹麦散货 Star Bulk 等均有大量废气脱硫装置订单，马士基航运选择性尝试脱硫装置的主要原因是限硫时间紧迫。根据瑞银集团(UBS)对航运业界调查，68%的受访者选择低硫油方案，21%的选择废气脱硫装置，9%的选择淘汰不满足要求的旧船，仅 6%的选择 LNG 等替代燃料方案。船用低硫燃油可从根源上减少 SO_x 排放，是缓解船舶废气污染压力、应对限硫最有效措施的必然选择之一。

然而，合规的船用低硫燃料油保供难度大，其不含税的价格过低及高额税负致使企业难以平衡生产成本，影响中石化、中石油等主流炼厂生产积极性，低硫重质船用燃料油由社会民营企业调和供应，产品标准不一、市场较为混乱。重质船用燃料油调合组分的不同，硫含量在 0.5%~2.5%范围不等。民营调油商会添加非石油基组分(多采用页岩油、煤基、塑料组分等原料)来降低调和油成本，这些硫含量低的组分与渣油调和出的 180cst 虽满足 0.5%硫含量要求，但忽视了燃油的其他性能指标，发生了燃油系统磨损与腐蚀、堵塞滤器、卡阻高压油泵等导致燃烧系统故障。因此，针对船舶低硫燃油实施过程出现的问题深入研究，中石化与上海海事大学率先进行了直炼重质低硫燃油台架实验，解决了调和低硫油问题，具有重要的社会效益和市场推广价值。

2. 船用低硫燃油问题

2.1. 船用燃料油税收政策及监管机制问题

因炼油企业直接生产船用燃料油需交纳高额消费税、增值税、城建及附加税，残渣燃料油税价高达约 45%。国内主要炼油企业以高硫原油为主，生产低硫重质燃油必须采用渣油加氢工艺，氢气耗量大成本高[2]。调和船用燃油监管缺失，调油企业逃避税费和降低成本供应的船用燃油占据市场很大份额，销售来路不明、质量低劣，扰乱船用燃油市场。国内关税政策不支持炼油企业将进口原油用于生产保税油，供应保税油需缴纳港口使用费、商检费、代理费等税费，导致我国保税油价格高，挂靠我国港口的远洋船舶多选择在新加坡、韩国、日本等境外加油，对我国保税油市场带来不利影响。

调油企业将各种基础原料组分按特定比例注入油罐进行搅拌，待完全均匀后即完成了燃料油调和过程。为了降低调油成本，使用无消费税的劣质污染原料，如煤焦油系列产品、乙烯焦油、废旧轮胎炼油产物、植物沥青、化工剩余物甚至各种废机油等进行油品调和，违反了船级社规范[3]和《船用燃料油》国标“燃料油应是由石油获取的烃类均匀混合物”的要求。船舶使用劣质污染原料调和制成的燃油致使尾气排放超标、主机故障。因尚未对油品调和行为及其质量进行监管，缺少相应的法规或标准，船用燃料油在生产、流通和使用环节上缺失燃油质量管控链条。

2.2. 船用低硫燃油导致的运营成本

岸电供电尚未统一，岸电设施成本高、经济效益差、港船电三方互动不足等导致岸电使用率低。LNG 加注站少且建设难度大等是 LNG 推广应用难的主要原因。船舶尾气处理装置成本高、周期长、改造空间受限、洗涤水排放标准严格、船员工作强度大是尾气后处理装置不被航运企业认可的重要原因；尤其是世界上部分国家或地区已经出台法规限制脱硫洗涤水的排放。因此，船舶运营商最现实最高效的履约方式普遍选择低硫调和油为主，其价格比高硫船用燃料油高 40%以上。船用燃料油市场的垄断性因素，未来低硫燃油价格还会升高，导致更高的船舶运营成本，故马士基、达飞、地中海航运和 ONE 航运公司已开始征收燃油附加费，为遵守限硫新规而转嫁额外的成本支出。

2020 年生效的限硫令 ECA 以外 2.5 亿吨/年的燃油被低硫燃油取代，低硫油比含硫 3.5%的重质燃油贵 150~250 \$/t，推动全球每 TEU 平均价格上涨约 80~120 \$，达到约 10%水平。郝伯罗特通过燃油成本和航行里程确定燃油附件费，当燃油价格 400 \$/t 时，燃油附加费 196 \$/TEU；当燃油价格 650 \$/t 时，燃油附加费 288 \$/TEU。但全球炼化低硫燃油产能不足，使航运业燃油成本增加 500~1000 亿美元/年。

Alphatanker 分析，每当高硫油和低硫油价差增加 50 \$/t 时，一艘安装洗涤塔的 VLCC 使用高硫油可节省 3000 \$/天，行驶于中东 - 日本 TC1 航线的一艘安装洗涤器的装载 70 万桶成品油 LR2 型船，可节省 1900 \$/天。2020 年低硫油 705 \$/t，高硫油价格进一步下降，则一艘安装洗涤器的 VLCC 比同等情况下未安装的船舶节省 4 万\$/天；2020 年两种燃油价差达 370 \$/t 时，同等情况下安装了洗涤器的船壳节省 1.5 万\$/天。因此，Alphatanker 预测安装洗涤塔船舶的期租租金将大幅上升。

2.3. 船用低硫燃油存在的风险

美国环境保护署利用 CAS NO.599644 检测、红外光谱检测、相容性和总沉淀物等检测手段，发现符合 ISO8217 相关标准的低硫燃油中掺有非炼油过程中出现的苯乙烯、酚类化合物及其他与塑料相关的化工副产品，且含量很高，而这些化学物质此前不要求被检测。另一方面，燃料油均是复杂的混合物，各个批次的油份千差万别，供应燃料的来源非常广泛，各种污染的来源难以判断。有害废弃物检测难且无统一标准，针对不同的化学废弃物，需要不同的化学分析手段，也缺乏燃油中的化学废弃物对燃烧设备产生影响的数据。船用燃料油质量问题是全球性的，现行的 ISO8217 燃油标准不能满足目前低硫燃油品

质检测要求,包括污染、高钠、高沉降、高硅、高酚等等的燃油风险范畴非常大,不再局限于任何特定港口,2018年有19个国家发生了46起燃油质量报警。

综上所述,船用燃油税费政策及监管现状抑制了企业生产、调和优质船用燃油的动力,推高了船用燃油生产、流通、使用环节的企业成本;调和油过程缺乏相关标准规范及监管空白,船用燃料油市场竞争环境恶化,亟需政府监管部门监管互认、信息互通、发现问题能及时追溯追责。《船用燃油供应保障与流通市场联合监管调研方案》正在按船用燃油的生产、流通、使用环节同步推进。

3. 选择船用低硫燃油的最佳方案

马士基等国际大型航运公司针对船舶限硫政策的表态看,2020年采用低硫燃油为首选,中远海集团使用低硫燃油作为满足船舶限硫排放要求的基本对策。废气清洗系统解决方案的产能有限且涉及大量额外投资,洗涤塔带来额外能源消耗并向海洋中排放废水;改装船舶或新建船舶使用LNG的成本更高,要多花费2500~3000万美元,收回投资周期长达4~7年,且只有少数港口和少量LNG供气船。目前,全球绝大多数船队除改用低硫燃油外别无最佳选择。

船舶使用低硫燃油的主要优点是对船舶改动小,燃油设备及系统变化小,初始投入费用少,安全与可靠性高,无政策和管控风险;主要缺点是调和低硫燃油的质量差且价格高。使用低硫燃油最大好处是几乎不会给船公司运营带来任何影响,不需因此额外投资,唯一的劣势是增加运营成本,且在兼容性、稳定性和安全性存在的问题在2019年内得到解决。从经济角度分析,若低硫燃油和高硫燃油的差价维持在当前的250美元/吨的水平,安装洗涤塔是最好的解决方案,但行业预测5年后低硫燃油的价格将与高硫燃油相当。长期预测的低硫燃油供应充足而价格下降,高硫油除安装脱硫塔的船舶选用外会导致其产量下降,高硫油价格将升高。Intertanko认为脱硫塔的效果持续性将不会超过10年,因为具有强酸性的洗涤水对设备性能及环境影响不容忽视。

Drewry近日对所有类型船东调查发现,66%的船东表示,在目前情况下使用低硫燃油是现有船队最主要的选择方案,13%的船东选择安装Sox洗涤器,8%的船东选择使用LNG燃料。新造船方面,37%船东选择低硫燃油,低硫燃油再次成为船东首选,24%的船东选择LNG燃料,21%的船东选择安装脱硫塔。另一方面,根据船型尺寸大小不同,安装洗涤塔预计需花费300~500万美元,且监管法规、技术风险和供应/定价风险等对船东影响很大。阳明海运认为使用低硫燃油是应对限硫措施的最佳解决方案。Jefferies相信2020年后低硫燃料将成为市场的主要选择,届时发动机技术将更适应低硫燃油,整个供应量也将更加完善,尤其是多用途船安装洗涤塔的翻新工程浩大,且资金条件并不允许,多用途船更倾向于选择价格更高的低硫燃油。因此,船舶选择低硫燃油是限硫措施的最佳实践。

4. 船用低硫燃油的台架实验

4.1. ME 主机高硫/低硫燃油对比实验

中石化与上海海事大学船舶综合机舱实验室联合进行了渣油加氢直炼重质低硫燃油实验,应用于ME船用柴油机的操纵性能、推进特性和排放特性测试,评估油品质量能否满足船用燃料油要求。ME参数如表1所示,直炼低硫油试验过程中,实时采集柴油机运行的功率、转速、各缸排气温度、冷却水温度、燃油消耗量、SFOC、滑油温度、环境温度、湿度等关键参数,以每10秒一次的频率记录在数据库内。在线实时检测每个缸的燃烧状态,包括各缸的 P_i 、 P_{com} 、 P_{max} 、 $P_{(comp)}/P_{(scav)}$ 等参数,并实时显示相应的功率、扫气压力、功率百分比及各缸 $P-\phi$ 图。柴油机尾气采集与分析设备包括AVL AMA i60 RIC气体排放THC、 NO_x 、CO、 CO_2 、 O_2 五组分析仪、Dekati® ELPI®+颗粒物连续分析仪和MRU VARIO SOX连续分析仪。

Table 1. Parameters of marine diesel engine on test lab**表 1.** 试验台架 ME 船用柴油机参数

柴油机型号	额定功率	额定转速	缸数	SFOC
6S35ME-B	3570 kW	142 r/min	6	174.36 g/kWh

4.2. 实验结果分析

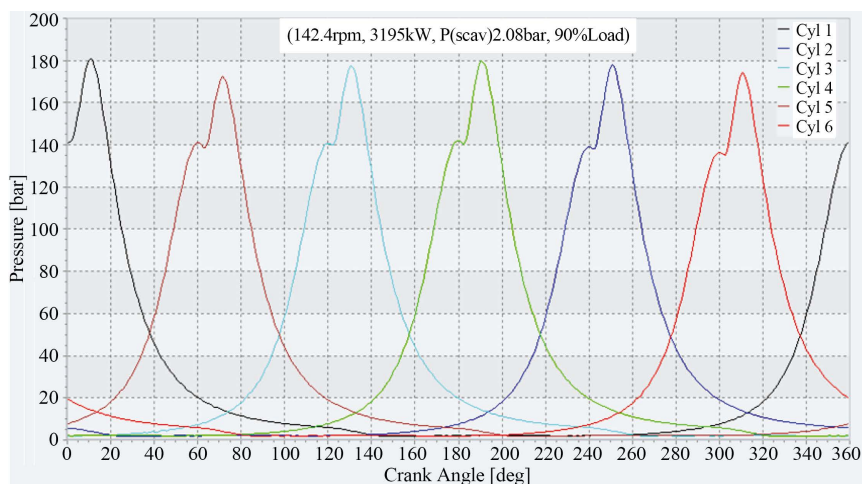
燃油中含硫有助于润滑[4]，但燃烧后生成的 SO_2 和 SO_3 又产生腐蚀。船用燃料油中的硫主要为噻吩类有机硫($\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$)形式存在[5]，加氢脱硫后生成硫化氢，炼厂尾气再集中经克劳斯工艺转化为硫磺。渣油加氢脱硫温度约 390°C ，油中烷基侧链断裂，分子变小，造成粘度降低[2]，因此，低硫油的粘度和硫含量控制都是难点。

实验油样 IFO180 低硫油含硫量 0.481% (m/m)、粘度 149.8 cst、密度 970.9 kg/m^3 ，常规 IFO180 高硫油含硫量 2.26% (m/m)、粘度 136.9 cst、密度 976.6 kg/m^3 用于对比实验。实验过程中储存柜燃油保温 55°C ，分油机净化温度 90°C ，日用柜燃油温度 85°C ，柴油机供油单元出口进主机粘度范围 12~16 cst，温度变化范围 103°C ~ 107°C 。主机运行 25% (89 rpm/893 kw)、50% (113 rpm/1785 kw)、75% (129 rpm/2678 kw)、100% (142 rpm/3570 kw) 四种实验工况，每种工况持续时间为 2 h 且平均采样至少 4 次，实验结果如图 1~9 所示。

图 1 和图 2 所示 90% 负荷运行的低硫油与高硫油的各缸 P- ϕ 图相同，表明指示功率相等[6]。直炼的低硫燃油几乎没有水[2]，直炼也脱除了 C-O 键和 H-O 键，这对净热值有利，但其密度变小，导致质量热值变小。实验的低硫油样热值为 41.8 MJ/kg，常规高硫油样热值为 44.64，两者做功性能无差异。

图 3 所示的 SFOC 曲线：低硫油 SFOC 比高硫油 SFOC 全工况下的都低，表明低硫油的热效率高，SFOC 低经济性好[7]。图 4 所示的 SO_x 排放曲线：负荷高时循环喷油量， SO_x 排放多[8]。

图 5 所示的 NO_x 排放曲线：60% 负荷以下，低硫油 NO_x 排放比高硫油的 NO_x 排放高；60% 负荷以上，低硫油 NO_x 排放比高硫油的 NO_x 排放低。泽尔多维奇机理描述 NO_x 形成过程，其主要成分为 NO 、 NO_2 及微量 N_2O ，其中 NO 占多数。低负荷时，富燃油低温燃烧生成瞬发 NO ；高负荷时，高温富氧燃烧环境形成的热力 NO 最多[9]。船舶推进主机多工作在 80% 负荷以上，高负荷时使用低硫油比高硫油排放的 NO_x 少，表明高负荷时低硫油的滞燃期短和预混合燃烧比例减少会使 NO_x 少。

**Figure 1.** P- ϕ chart of IFO 180 low sulfur oil**图 1.** IFO 180 低硫油 P- ϕ 图

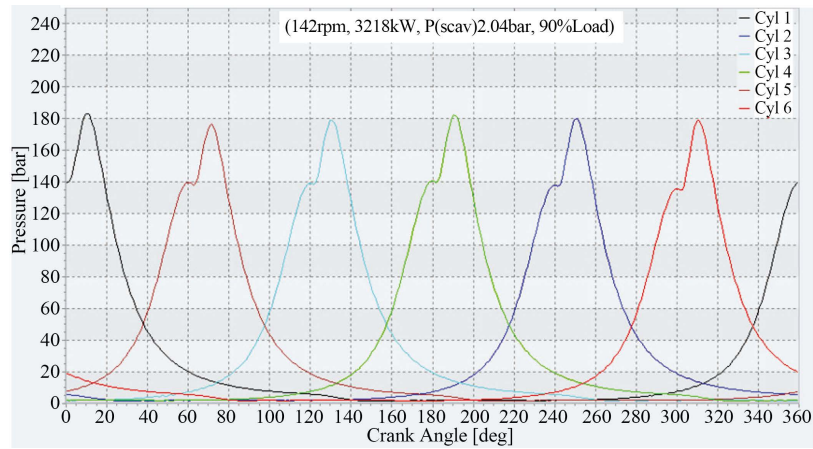


Figure 2. P-φ chart of IFO 180 high sulfur oil

图 2. IFO 180 高硫油 P-φ 图

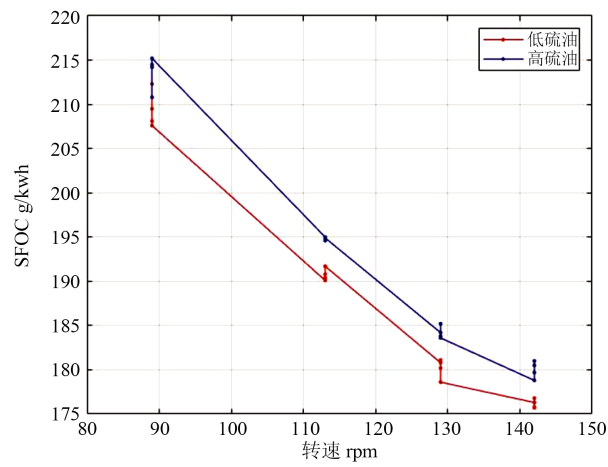


Figure 3. SFOC comparison between low sulfur oil and high sulfur oil

图 3. 低硫油和高硫油的 SFOC 比较

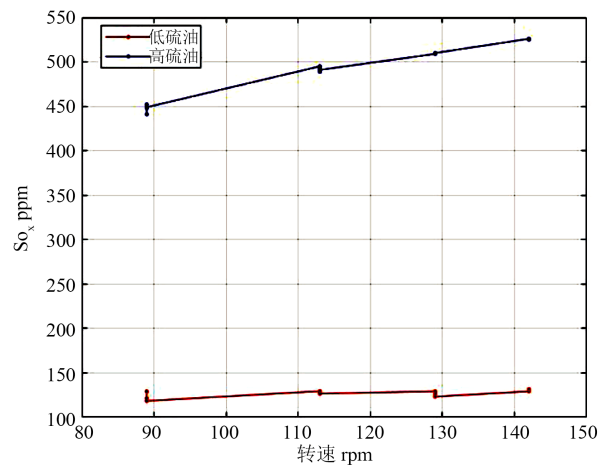


Figure 4. Comparison of SO_x emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 4. 低硫油和高硫油的 SO_x 排放比较

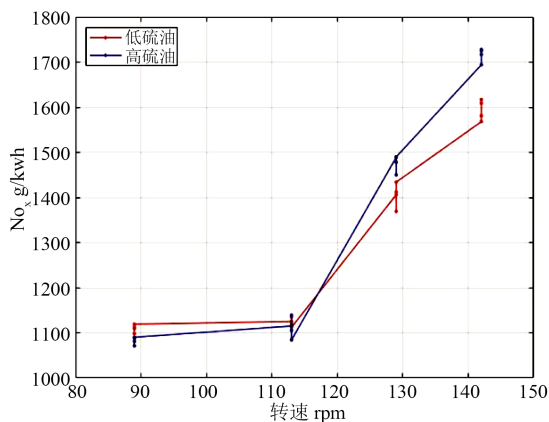


Figure 5. Comparison of NO_x emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 5. 低硫油和高硫油的 NO_x 排放比较

图 6 所示的低硫油-高硫油的 HC 排放曲线：燃烧低硫油的 HC 排放比燃烧高硫油的低很多。HC 因缸内混合气过浓、过稀或局部混合不均引起的不完全燃烧产物，HC 与燃烧混合气的质量、发动机的运行条件、燃烧室结构参数及点火与配气正时有关，HC 低表明低硫油的燃烧特性好[10]。

图 7 所示的低硫油 - 高硫油的 CO₂ 排放曲线：CO₂ 排放与氧气即过量空气系数有关，75% 负荷以下，燃烧低硫油排放的 CO₂ 高；75% 负荷以上，燃烧高硫油排放的 CO₂ 高。CO₂ 排放多，表明能效低，即 EEOI 低[11]。

图 8 所示的低硫油 - 高硫油的 O₂ 排放曲线：50% 负荷以下，燃烧高硫油排放的 O₂ 高；50% 负荷以上，燃烧低硫油排放的 O₂ 高；O₂ 排放量与 CO₂ 排放量具有负相关特性。

图 9 所示的低硫油 - 高硫油的 CO 排放曲线：CO 为燃油燃烧过程的中间产物，燃油分子高温燃烧生成的，其取决于局部温度、压力和燃空当量比；60% 负荷以下，低硫油燃烧排放的 CO 高；60% 负荷以上，高硫油燃烧排放的 CO 高。高负荷时低硫油的燃烧性能好，降低了 CO 排放[12]。

图 10 所示的低硫油 - 高硫油的 PM 排放曲线：低硫油燃烧产生的 PM 微粒高。微粒 PM 为缺氧情况下燃油不完全燃烧生成的，多为碳烟粒子，碳烟生成的同时伴随着氧化。高温燃烧区，燃油分子理解概率远远大于其聚合概率而形成碳烟微粒[13]。

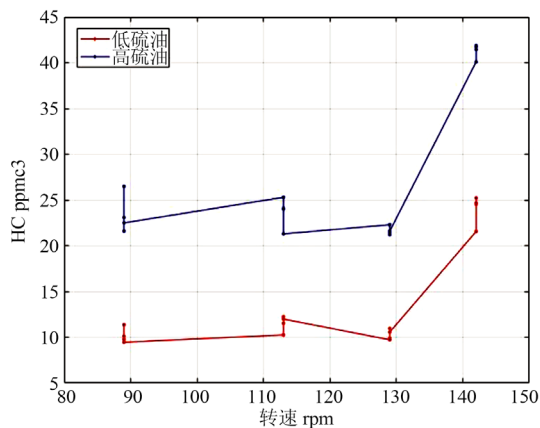


Figure 6. Comparison of HC emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 6. 低硫油和高硫油的 HC 排放比较

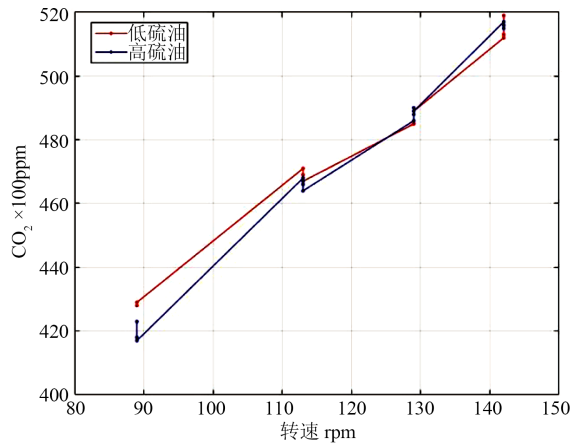


Figure 7. Comparison of CO₂ emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 7. 低硫油和高硫油的 CO₂ 排放比较

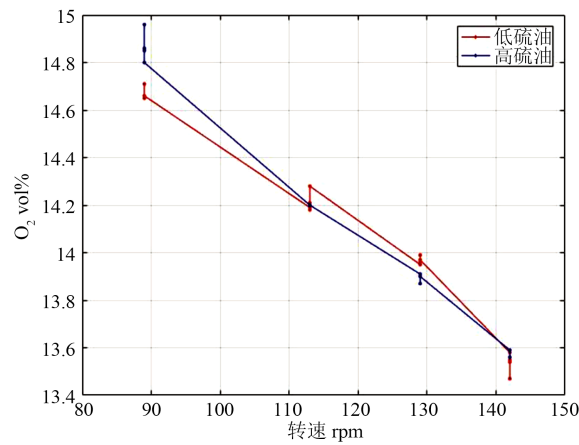


Figure 8. Comparison of O₂ emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 8. 低硫油和高硫油的 O₂ 排放比较

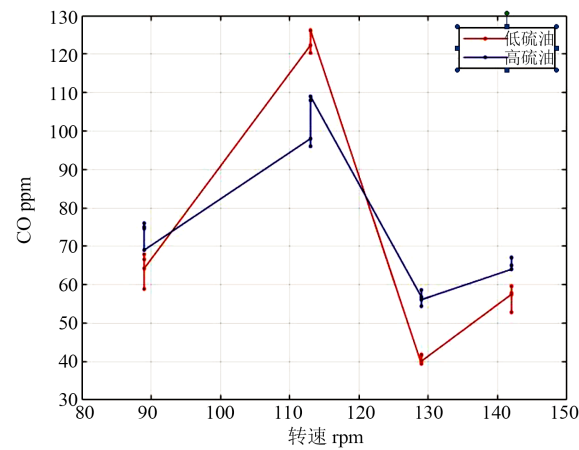


Figure 9. Comparison of CO emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 9. 低硫油和高硫油的 CO 排放比较

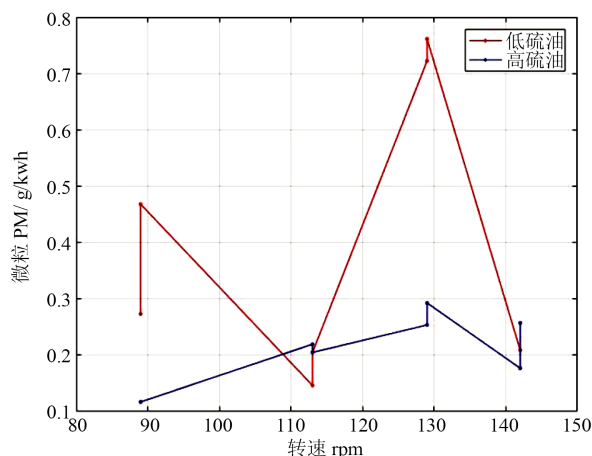


Figure 10. Comparison of PM emissions between low sulfur oil and high sulfur oil

图 10. 低硫油和高硫油的 PM 排放比较

5. 结论

IMO 限硫令促进了低硫燃油市场和脱硫技术发展, 必将消除调和低硫油的不合规问题。船舶安装脱硫塔将带来船期损失、高昂的设备采购及安装费用。低硫燃油从根源上减少了 SO_x 排放, 当低燃油需求及产能大幅上升后, 高低硫燃油价格差异缩减, 使船东燃油收益不可预期。高低硫燃油在 ME 机上台架试验表明, 低硫油比高硫油排放的 NO_x 、 CO_2 和 CO 都显著降低, 因此, 船舶选择低硫燃油是应对限硫的最佳实践。

基金项目

本项目获得国家自然科学基金(51779136)资助。

参考文献

- [1] 田玉军, 郝伟健, 彭传圣, 等. 珠江口湾区靠港船舶转用低硫油的成本与环境效益[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1322-1328.
- [2] 赵宁. 渣油加氢生成油中含硫化合物分部研究[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(5): 39-42.
- [3] 中国船级社. 船舶使用低硫馏分油指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [4] 李进, 刘多强, 都长飞, 等. 超低硫燃料润滑性与柴油机油泵台架试验相关性研究[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(6): 1230-1236.
- [5] 任绪金, 祝馨怡, 李颖, 等. 深度加氢柴油中苯并噻吩类化合物的测定[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(1): 167-174.
- [6] 尹自斌, 李祝清, 孙培廷, 等. 示工图法在柴油机功率实船测试中的应用[J]. 大连海事大学学报, 2005, 31(3): 5-8.
- [7] 李可顺, 刘伊凡, 孙培廷. 船舶能效营运指数仿真建模[J]. 中国航海, 2014, 37(2): 105-108+121.
- [8] 高俊华. 燃油品质对重型柴油机排放特性影响的试验与研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013: 9-11.
- [9] 韩文赫. 基于多谱协同分析方法的 D/INTP 降低柴油机有害排放机理研究[D]: [博士学位论文]. 苏州: 江苏大学, 2014: 1-2.
- [10] 邢辉. 船舶废气排放量量化问题研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017: 75-76.
- [11] 王忠诚, 刘晓宇, 周培林, 等. 基于碱法机理减少船舶 CO_2 排放研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(3): 241-246.
- [12] 韩永强, 刘佳会, 刘忠长, 等. 双阶段燃烧低温阶段 HC 及 CO 排放的优化路径[J]. 内燃机学报, 2017, 35(4):

313-319.

- [13] 施蕴曦, 蔡忆昔, 王静, 等. NTP 技术降低柴油机 PM 排放及低温再生 DPF 的研究[J]. 内燃机工程, 2018, 39(6): 67-78.