

上海市船舶与海洋工程学会 2019 年学术年会轮机专场论文专栏

低硫燃油在船用中速柴油机上的应用

浦卫华^{1,2}, 黄立^{1,2}, 王昌庆^{1,2}, 郭立君^{1,2}, 张文正^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 针对 2020 年 IMO 全球船舶限硫令生效, 以及国内排放控制区升级, 介绍了现行船用燃油的标准和理化特性; 使用低硫燃油对发动机的影响及应对措施。开展了低硫燃油和高硫重油的燃油系统平台试验, 发现: 燃用低硫燃油偶件泄漏量增大, 导致高压燃油系统效率下降。基于一船用中速柴油机开展了低硫燃油和高硫重油的发动机台架性能试验, 结果显示: 燃用低硫燃油较高硫重油在全负荷范围燃油喷射压力降低; 高负荷时排温、最高燃烧压力相当, 但中低负荷时最高燃烧压力降低, 排温和油耗率升高。还介绍了低硫燃油的生产与市场供给、政府监管和油品企业的最新动态。指出远洋船舶中低速柴油机使用低硫油 + SCR 将成为解决排放问题的优选技术路线之一。

关键词: 船用中速柴油机; 法规; 低硫油; 试验

中图分类号: TK421⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2020)03-0001-05

Application of Low-Sulphur Fuel in Marine Medium-Speed Diesel Engines

Pu Weihua^{1,2}, Huang Li^{1,2}, Wang Changqing^{1,2}, Guo Lijun^{1,2}, Zhang Wenzheng^{1,2}

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: As the IMO SO_x cap has come into force in 2020, and the ECA in China has upgraded, the current standard and the physicochemical characteristics of marine fuel is introduced, as well as the influence of low-sulphur fuel on engines and its solutions. Platform test on the fuel system of both low-sulphur fuel and high-sulphur heavy fuel were carried out. It was found out that the leakage increase of couplings could result in efficiency decrease of high-pressure fuel system when using low-sulphur fuel. Based on a marine medium-speed diesel engine, engine performance platform test was carried out with low-sulphur fuel and high-sulphur heavy fuel. The test results show that using low-sulphur fuel results in lower fuel injection pressure compared to using high-sulphur heavy fuel under full load, and the exhaust temperature and maximum combustion pressure are equal under high load. However, when under medium and low load, the maximum combustion pressure of low-sulphur fuel decreases, exhaust temperature and fuel consumption increases. The production and market supply of low-sulphur fuel is introduced, as well as the recent news about supervision of governments and oil manufacturers. It is pointed out that for ocean going ships using medium and low speed diesel engines, low-sulphur + SCR is the optimal technical solution for emission issues.

Key words: marine medium speed diesel engine; regulation; low-sulphur fuel; test

0 引言

随着柴油机排放法规日益严格, 全球对硫排放

的限制也越来越严格。2015 年起 IMO 在排放控制区内执行燃油硫含量质量分数不超过 0.1% (以下没特别说明硫含量均指质量分数) 的排放法规;

收稿日期: 2019-09-25

作者简介: 浦卫华(1985—), 高级工程师, 主要研究方向为船用柴油机燃料供给系统, puweihua@csic711.com。

2020 年 1 月 1 日起在全球范围内控制燃油硫含量不超过 0.5%。船舶燃用低硫油已成为必然趋势。

据全球能源和金属行业权威咨询机构 (Wood Mackenzie) 预计: 到 2020 年底, 全球船队中 2% 的船舶将安装废气脱硫装置; 0.4% 的船舶采用 LNG 等清洁能源燃料; 近 97% 的船舶将选用合规低硫燃油来应对限硫新规。

国内的排放控制区从 DECA 1.0 升级至 DECA 2.0。原 DECA 1.0 未包含沿海主要港口 (吞吐量超过两亿吨); 未包含主要污染物种类 (如 NO_x), 并且无法达到减排要求。升级后的 DECA 2.0 针对 DECA 1.0 有如下改动: (1) 原珠三角、长三角、环渤海湾地区扩展至所有沿海海域, 包括海南海域; (2) 撤销原沿海城市内河水域; (3) 增加长江、西江两处内河控制区。随着排放法规越来越严格, SO_x 排放下降, 空气质量得到改善。

1 低硫燃油定义

1.1 现行燃油标准

船用柴油机根据转速不同, 分为低速柴油机、中速柴油机和高速柴油机。一般而言, 船用低速柴油机主要用作远洋货轮的主机, 燃料主要为 ISO8217 规定的 HFO、MDO、MGO; 船用高速柴油机一般用作公务船、巡逻艇的主机或发电机组, 燃料主要为 GB252 普通柴油或 GB19147 车用柴油; 船用中速柴油机一般用作远洋船舶的辅机、江海直达船及内河船舶的主机, 燃料须同时满足 ISO8217 规定的 HFO、MDO、MGO 以及 GB252 普通柴油或 GB19147 车用柴油的使用要求。

现行船用燃油的标准如下:

(1) GB252-2015 普通柴油 (2019 年 1 月 1 日已废止): 硫含量不大于 10 mg/kg (2018 年 1 月 1 日开始执行), 即 0.001%, 属低硫油;

(2) GB19147-2016 车用柴油: 硫含量不大于 10 mg/kg, 即 0.001%, 属低硫油;

(3) GB17411-2015 船用燃料油: DMX、DMA、DMZ 硫含量不大于 1%, DMB 硫含量不大于 1.5%, 属高硫油; RMA ~ RMK 硫含量不大于 3.5%, 属高硫油;

(4) ISO8217-2015 船用燃料油: DMX 硫含量不大于 1%, DMA 硫含量不大于 1.5%, DMB、DMC 硫含量不大于 2%, 属高硫油; RMA ~ RMK 硫含量不大于 3.5% ~ 4.5%, 属高硫油。

中国船级社 2013 年 7 月发布的《船舶使用低硫燃油指南》对低硫燃油的定义: 低硫燃油 (Low

Sulphur Fuel Oil, LSFO) 系指除硫含量质量分数不超过 0.1%, 其他各项指标均符合 ISO 8217: 2010 标准规定的馏分油。

MAN 公司等二冲程低速机制造商定义的低硫柴油/重油的硫含量不超过 0.5%。

1.2 低硫油理化指标特点

(1) 黏度低。传统柴油机推荐燃油的运动黏度为 $10 \sim 15 \text{ mm}^2/\text{s}$, 而低硫燃油运动黏度大部分在 $2 \sim 4 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。过低的燃油黏度会导致燃油在燃油系统内的泄漏量增大, 造成热机小油量起动困难。

(2) 密度低。密度低会造成供给柴油机的燃油质量流量减小, 使柴油机无法达到全功率。

(3) 闪点低。当前市场上部分低硫燃油的闪点可能低于 SOLAS 公约要求 (即低于 60°C);

(4) 润滑性差。燃油中的硫分有润滑作用, 低硫燃油硫含量非常低, 导致润滑性能差, 无法满足高压油泵和低压输送泵的泵送黏度要求, 会引起精密运动偶件的磨损和卡死。

1.3 低硫油对发动机的影响

(1) 低硫油对燃油系统的影响

黏度低、润滑性差可导致驳运泵、燃油阀等运动部件加快磨损, 甚至发生咬死等故障, 使用低硫燃油前须进行确认。当前船舶燃油驳运系统多采用齿轮泵设计, 与螺杆泵相比, 齿轮泵存在容积效率低、齿轮易磨损、压力不稳定、流量脉动大、振动噪声大等不足; 同时黏度低也会导致泵流量大幅降低。因此, 齿轮泵设计不适宜输送低硫燃油, 推荐采用螺杆泵替代齿轮泵。

过低的黏度会导致机带燃油系统的泄漏量增大, 造成热机小油量起动困难; 同时由于供给柴油机的燃油流量相应减小, 使柴油机无法达到全功率; 过低的黏度无法满足高压油泵和低压输送泵的泵送黏度要求, 引起精密运动偶件磨损和卡死。

(2) 低硫油对润滑系统的影响

传统重油含硫量高, 产生酸性硫化物较多, 控制、中和润滑油碱性的作用较强。如采用低硫燃油, 则酸性变弱, 若原润滑油碱性不变, 则二者中和后会成碱性, 使缸套表面形成镜面, 油膜难以附着, 增加缸套磨损, 也会导致活塞及活塞环严重结炭。因此, 须选择合适的低碱值润滑油来对应低硫燃油。

(3) 低硫油对安全性的影响

闪点低使得低硫燃油易燃易爆, 对船舶加油、驳运、尤其是储存产生重要影响。在燃料油舱的布

置中,低硫燃油和重油等各类油品要设置独立油舱。由于重油储存舱通常维持在 $40 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,重油日用舱在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而低硫燃油闪点低,仅略高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此,在油舱布置时,原则上应注意低硫燃油舱不能与重油日用舱相邻,并尽可能避免直接与重油储存舱相邻。

(4) 低硫油对柴油机运行的影响

使用低硫燃油的船舶通常备有 3 种燃油:①低硫燃油,用于硫排放控制区 (SECA);②轻质柴油,用于内河、近海等航区;③重油,主要用于深海航区。燃油间切换应注意温度的控制。由于重油须加热至较高温度 ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右),而低硫燃油不须加热,在进行重油及低硫燃油切换时,较大温差燃油混合引起的黏度波动会导致柴油机高压油泵、喷油器等设备拉伤、卡死。MAN 及 Wartsila 的柴油机均要求:在燃油切换时,温度的变化要控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内。

考虑到管路中燃油的置换和冲洗,在重油切换至低硫燃油前,可先切换至轻质柴油,即切换程序为重油→轻质柴油→低硫燃油。这样,重油与轻质柴油属于传统的燃油切换,而轻质柴油与低硫燃油由于温差很小,也可以实现直接、简单的手动切换。实施手动切换时主机功率应尽可能设置在 $25\% \sim 40\%$ MCR,通过延长切换时间,保证切换过程的平稳、可控。为了实现主机高负荷下重油和低硫燃油间的快速切换,推荐使用温度传感器自动控制切换阀,以满足温度变化控制要求。

1.4 使用低硫油的应对措施

(1) 低硫油密度低会造成燃油质量流量降低,柴油机无法达到全功率。相应的可以通过安装低硫油冷却器降低进油温度,达到提高燃油密度的目的。

(2) 低硫油黏度低,易从高压油泵柱塞偶件处泄漏,污染滑油,并造成油泵供油量不足,热启动困难;黏度低还会造成燃油系统偶件、气阀阀座、活塞气缸套异常磨损等。可以通过安装低硫油冷却器提高燃油进机黏度,实现低硫油进机黏度大于 2 cSt 的要求。

(3) 低润滑性的低硫油喷射到气缸壁上,会使活塞环与气缸套间的润滑变差,造成活塞环运动异常、缸套磨损、排气阀漏气等,部分燃烧产物会使气缸套表面产生“漆化”现象,造成运动件磨损加剧和燃油耗增加,并影响发动机运行可靠性。因此须优化设计活塞环、活塞、排气阀等,以解决柴油机燃烧低硫燃油所带来的磨损、腐蚀、润滑不良、积炭等问题。同时,可通过添加燃油添加剂来

提高低硫燃油的润滑性。

(4) 柴油机燃用低硫油时应根据硫含量选择对应碱值的滑油。根据 CIMAC 2013 发布的低硫油指南推荐:使用重油时,滑油碱值 TBN 为 $30 \sim 50$;使用低硫油时,滑油碱值 TBN 为 15。

(5) 严格执行低硫油与重油的切换操作流程。关注低硫油与重油的相容性;设置混合油桶,用于不同温度燃油的均匀混合,以避免燃油温度剧烈变化对机器设备及燃油系统造成热冲击;切换过程中的温度梯度不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,发动机负荷控制在 $25\% \sim 40\%$ 。

2 船用中速柴油机燃用低硫燃油的试验研究

2.1 燃油喷射系统平台性能试验研究

试验对象:某船用中速柴油机泵-管-嘴机械式燃油喷射系统。

试验用油:(1)与 0#柴油流动特性近似的 ISO4113 校泵油(黏度 3 cSt);(2)与进机重油流动特性近似的 10 号航空液压油(黏度 10 cSt)。

试验结果如图 1~图 5 所示:燃油黏度和密度随压力的变化特性影响燃油的可压缩性和高压油管内容速;黏度的不同可能带来喷油压力波形态的变化,进而影响喷油率。从图 5 的喷油率曲线对比可知:高黏度油的喷油率曲线在喷射前期斜率较大,最高喷油率也高于低黏度油,喷油结束更干脆。结合喷油压力峰值和泄漏量的测试结果对比,表明:燃油喷射系统使用高黏度油时油泵供油效率提高,喷射时加压快、泄漏少、喷射压力高;喷射结束时泄压也快。

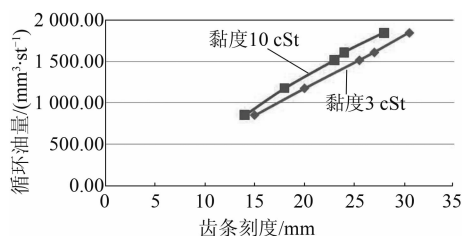


图1 循环油量随齿条位置的变化

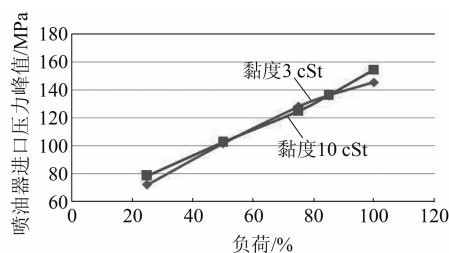


图2 喷油器进口压力随负荷的变化

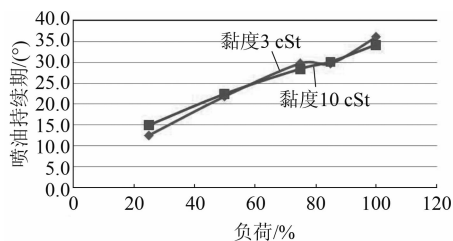


图3 喷油持续期随负荷的变化

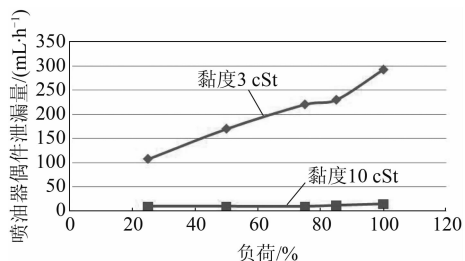


图4 喷油器偶件泄漏量随负荷的变化

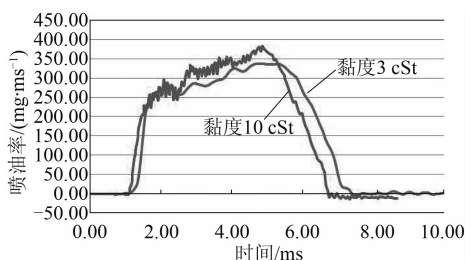


图5 高、低硫燃油喷油率曲线

通过上述试验可见燃用低硫、低黏度油对燃油喷射系统造成的影响：偶件泄漏量增大，导致高压喷射系统效率下降；系统效率下降和燃油可压缩性差异导致喷射压力下降、喷油持续期延长；喷油率上升沿和下降沿同时变缓，最大喷油率减小。

2.2 低硫油与高硫重油对柴油机性能影响的试验研究

基于一台船用中速柴油机开展发动机台架试验。该发动机主要技术参数如表1所示。

表1 发动机主要技术参数

型式	四冲程、废气涡轮增压
缸径/mm	160
行程/mm	250
缸数	6
气缸工作容积/L	5.02
压缩比	16.8
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 200
标定功率/kW	660/570
额定点平均有效压力/MPa	2.19/2.27
最高燃烧压力/MPa	20
燃油消耗率/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	208.5
燃油系统	机械燃油系统
最高燃油喷射压力/MPa	140

整机性能试验结果（图6~图9）表明，不同油品对燃油系统喷射特性和柴油机性能有较大影响，具体如下。

(1) 由低硫燃油（LFO）切换至高硫重油（HFO）时，喷射压力约升高8%~10%（且负荷越高，燃油喷射压力增大越大）。可见，油品对喷射压力变化的影响较大，与平台试验结果的变化趋势一致。

(2) 由LFO切换至HFO时，供油正时不变，滞燃期加大，缸内最高燃烧压力增大（上升0.5 MPa），燃烧重心后移，燃烧持续期延长；由于HFO黏度大，嘴端压力上升，喷雾贯穿距增大，平均索特直径减小，燃油雾化质量改善，缸内燃烧温度降低，燃油消耗率也有所降低，约降低2 g/(kW·h)。

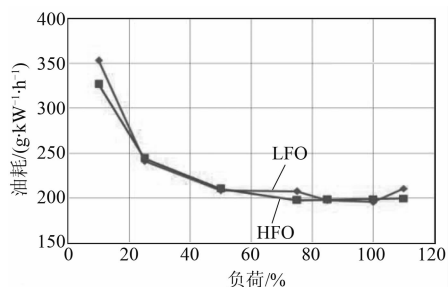


图6 油耗随负荷变化

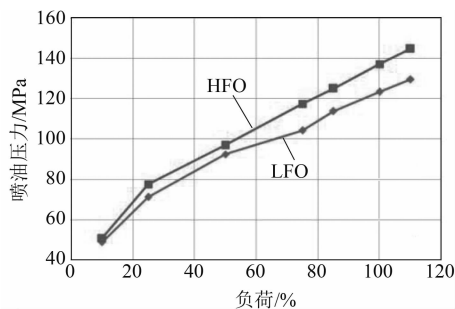


图7 喷油压力随负荷变化

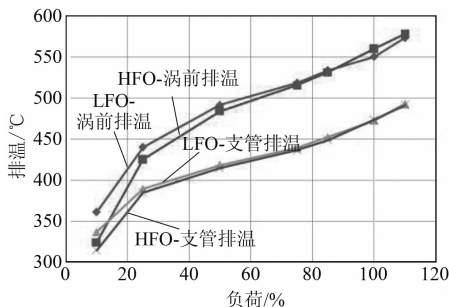


图8 排温随负荷变化

柴油机燃用高、低硫油对比试验结果表明：在转速、功率、扭矩保持一致的情况下，燃用低硫燃油较高硫重油在全负荷范围内燃油喷射压力降低；高负荷时的排温及最高燃烧压力相当；但中低负荷

时的最高燃烧压力降低,排温和油耗率升高。

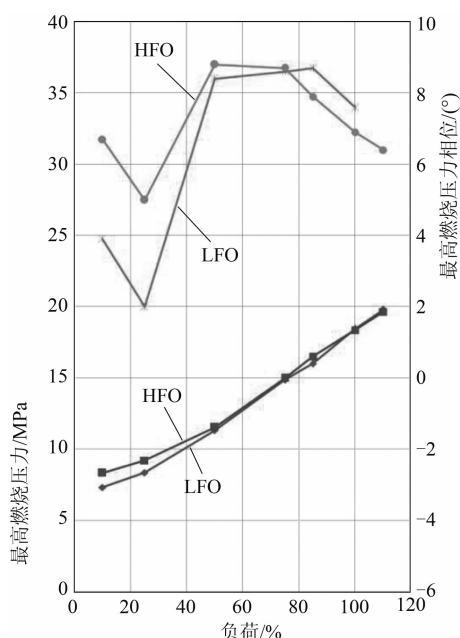


图9 最高燃烧压力及最高燃烧压力相位随负荷变化

3 低硫燃油的生产与市场供给

2016 年,全球船用燃料油消费量在 2 亿吨左右,其中馏分型船用燃料和残渣型船用燃料的比例约为 15:85。预测“十三五、十四五”期间全球船用燃料消费量年增速为 1% 左右,预计到 2020 年全球船用燃料总需求量约为 2.5 亿吨。全球船用燃料主要消费区域有亚洲、欧洲、北美、中东等国家和地区,预计到 2020 年亚太地区消费量将占全球消费总量的 40% 以上。可见亚洲市场前景广阔,未来低硫船用燃料消费量巨大,船用燃料低硫化既是挑战也是机遇。

目前,油品供应商、航运企业甚至国家层面都为此在做努力。壳牌、埃克森美孚、英国 BP、中国石化等石油巨头都宣称,为 2020 年的船舶限硫令做好了充分的准备,并将按时在各大港口供应船用低硫油。各大航运企业也为及时获得低硫油进行了提前布局,如马士基与孚宝集团建立合作关系,孚宝集团使用其在鹿特丹的含硫量为 0.5% 的燃油供给设施,满足马士基约 20% 的燃油需求,约 230 万吨。中远海运则正在筹备在舟山建立东北亚保税燃料油供应中心。

3.1 燃料油市场现状及存在的问题

(1) 现行税收政策及监管机制是影响船用燃油可获得性的主要原因。首先,炼油企业直接生产船用燃料油须缴纳高额的消费税、增值税及城建和附加税;其次国内主要炼油企业以加工高硫原油为

主,加工成本高;再次,船用燃料油调和监管缺失,调油企业通过逃避税费和降低成本的方式供应的船用燃料油有较大的价格优势,占据了大部分市场份额。

(2) 油品调和监管缺失是影响船用燃油质量的主要原因。目前国内船用燃料油主要通过调油企业调和制成。调油企业按照用户不同的燃料油品需求,将各基础原料组分按特定比例注入油罐,然后进行搅拌,待完全均匀后,即完成了燃料油调和。调和过程缺乏相关标准规范,调和的合法性尚未明确,监管部门不明确,存在监管空白地带。

3.2 中国政府举措

(1) 完善船用燃油税收管理制度。严格税控措施,打击船用燃油供应过程中的逃税漏税现象,建立公平的船用燃油供应市场环境;调整关税政策。向国内炼油企业开放保税油生产供应市场,允许国内炼油企业向供油企业供应保税油,解决炼厂产能过剩问题,提高炼厂生产船用燃油积极性,拓宽保税船用燃油供应渠道。

(2) 调整船用燃油生产和流通环节的管理模式。允许供油跨区经营,加大力度打击非法供油行为;进一步明确船用燃油生产、销售和使用等环节的监管职责。

(3) 实施船用燃油上下游联合监管。推行船舶燃油全链监管;开展部门联合执法,提升现场监管能力;建立海关、海事、港务、边检、检验检疫等部门联网服务保障,提高监管服务效率,保障高品质燃油供给。

(4) 完善配套保障措施。修订完善船用燃油技术标准。建立供油计量制度。建立船用低硫燃油“产销用”主体信用制度。

3.3 中国油品企业相应措施

(1) 中石化开展低硫重质燃料油的高标准研发。2015 年进行低硫船用燃料的相关调研,并形成了调研报告;2017 年对低硫船用燃料组分油资源及炼厂生产、储运条件进行调研,通过组分油性研究及优化,对燃油的调和特性、调和配方进行设计研究,优选经济配方。

(2) 2019 年 6 月 5 日,中石化在浙江舟山召开新闻发布会,宣布 2020 年低硫重质清洁船用燃料产能将达到 1000 万吨,2023 年这一产能将超过 1500 万吨;同时完善全球销售网络,2020 年 1 月 1 日前,在舟山等国内主要港口实现全面供应,在新加坡等 50 多个海外重点港口具备供应能力。

(下转第 10 页)

于 910 r/min, 旁通打开; 转速在 910 ~ 930 r/min 旁通阀状态保持。基于优化的旁通阀控制策略进行试验验证, 验证工况为 903 r/min (1TC 切换 2TC 的切换点工况), 试验结果如图 14 所示。

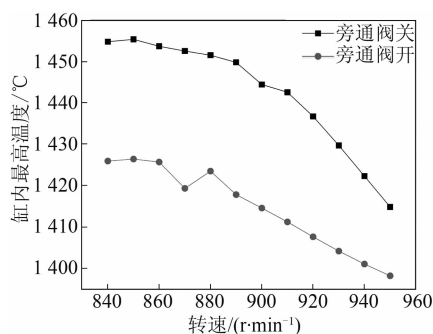


图 13 缸内最高温度对比

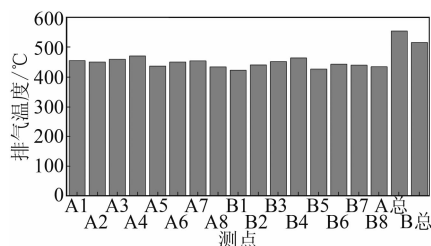


图 14 切换点工况排温的实船试验数据

试验结果表明: 基于优化后的旁通策略, 在切换点工况, 旁通阀处于打开状态, A、B 列排气总

管平均温度为 535 °C, 远低于限制值, 比原控制策略低 35 °C 以上; 各缸排温平均为 445 °C。表明: 优化后的旁通阀控制策略能够有效改善切换点工况排温高的问题。

4 结论

本文采用仿真分析的方法对 16PA6-280STC 柴油机进行了旁通阀控制策略优化设计, 并进行了试验验证, 得到如下结论:

(1) 相继增压柴油机在 2TC 状态下进行进排气旁通可有效提升增压器的喘振裕度; 旁通阀打开可增加增压器转速、进气压力、排气压力和最高燃烧压力; 可大幅度降低排气总管温度, 各缸排温、油耗略有上升。

(2) 根据船舶的运行特性, 通过调整进排气旁通控制策略可实现柴油机与船舶的良好匹配。

参考文献

- [1] 王银燕, 高维成, 赵建平, 等. 应用 MPC-相继增压系统改善船用柴油机低负荷性能的研究 [J]. 内燃机学报, 1999 (1): 13-17.
- [2] 黄建华, 王银燕, 王贺春. 船用 V 型高速柴油机相继增压计算分析 [J]. 柴油机, 2004 (Z1): 92-96.

(上接第 5 页)

(3) 中石化提前于 2017 年开始低硫重质清洁船用燃料的生产研发准备工作。生产方面, 布局镇海炼化等 10 家临近沿海的炼油企业开展资源生产, 其中上海石化、金陵石化、海南炼化等 3 家企业已生产出符合法规要求的产品供应市场。网络建设方面, 目前在上海和浙江区域港口已经具备了低硫重质清洁船用燃料的供应能力, 2020 年 1 月 1 日前, 将在国内主要港口全面供应合规、稳定的低硫重质清洁船用燃料。

由于当前低硫油的市场价格、炼化企业产能、船东对初始成本和运行成本的关注度等均存在不确定性, 因此现阶段呈现低硫油、HFO + EGC、LNG 百花齐放、百家争鸣的状态。

4 结论

(1) 从长久来看, 燃油低硫化是大趋势, 在炼化企业解决价格和产能的情况下, 中低速柴油机对脱硫塔的需求会逐步降低。当前须重点关注低硫燃油品质差异对发动机可靠性的影响。

(2) 柴油机燃用高、低硫油的对比试验表明:

在转速、功率、扭矩保持一致的情况下, 燃用重油全负荷范围内燃油喷射压力增大; 高负荷时排温、最高燃烧压力相当; 但中低负荷时排温、最高燃烧压力降低, 油耗率也有所降低。

(3) 远洋船舶的中低速主机使用低硫油 + SCR 将成为应对排放法规的优选技术路线之一。

参考文献

- [1] 郑庆国, 杨兰. 选用合规低硫船用燃油面临的挑战及其应对措施 [J]. 柴油机, 2019, 41 (4): 13-17.
- [2] 刘双红, 黄燕民. 超低硫柴油的润滑性研究与性能评定 [J]. 石油炼制与化工, 2007, 38 (6): 47-51.
- [3] 陈强, 邱岸墩. 柴油机换用低硫燃油的实例探析 [J]. 船海工程, 2012, 41 (6): 65-67.
- [4] 秦建国, 衣正尧. 船舶低硫燃油系统的应用分析 [J]. 船海工程, 2012, 41 (3): 67-70.
- [5] 杨文猛. 船舶低硫燃油系统介绍 [J]. 江苏船舶, 2010, 27 (4): 24-25.
- [6] 崔向东, 辛春安. 船舶低速主机低硫燃油使用问题和防范措施 [J]. 世界海运, 2006, 29 (5): 12-14.