

使用维修

浅谈船用主机使用低硫燃油面临的挑战与应对措施

徐 峥, 胡晓和, 杨 城

(中船海洋动力技术服务有限公司, 上海 200136)

摘 要: 介绍了低硫燃油和传统的船用高硫燃油在化学成分和物理特性方面存在的诸多不同;指出:IMO2020 限硫令对船舶运营带来了很大的挑战。基于两大主机制造商的相关文件和实际服务经验,归纳总结了船用主机使用低硫燃油运营时应注意的事项及应对措施,为船舶安全稳定运营提供参考。

关键词: 船用主机;低硫燃油;运营

中图分类号:TK428.9 文献标识码:B 文章编号:1001-4357(2020)06-0059-05

Discussion on Challenges and Countermeasures of Marine Diesel Engines Running With Low Sulfur Fuel

Xu Zheng, Hu Xiaohe, Yang Cheng

(CSSC Marine Service Co., Ltd., Shanghai 200136)

Abstract: Due to the differences in chemical composition and physical characteristics between low sulfur fuel and traditional high sulfur marine fuel, the IMO 2020 regulation of low sulfur fuel is a big challenge for shipping industry. Based on the the relevant documents from the two major marine main engine makers and service experiences, the key issues and the solutions are concluded for marine main engines using low sulfur fuels. Which offers references for safe and reliable operation of ships.

Key words: marine main engine, low sulfur fuel; operation

0 引言

IMO 规定:自 2015 年 1 月 1 日起船舶在排放控制区(ECA),须使用 $w(S) \leq 0.1\%$ 的超低硫燃油(ULSFO),自 2020 年 1 月 1 日起船舶在全球海域须使用 $w(S) \leq 0.5\%$ 的低硫燃油(VLSFO),具体见图 1 所示。与此同时,许多国家也对本国海域提出了类似的法规要求,如中国交通运输部 2018 年 12 月印发的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》要求:从 2019 年 1 月 1 日起海船进入我国沿海排放控制区须使 $w(S) \leq 0.5\%$ 的低硫燃油,从 2020 年 1 月 1 日起海船进入我国内河区域须使用 $w(S) \leq 0.1\%$ 的超低硫燃油,从 2022 年 1

月 1 日起海船进入我国排放控制区海南水域须使用 $w(S) \leq 0.1\%$ 的超低硫燃油^[1]。

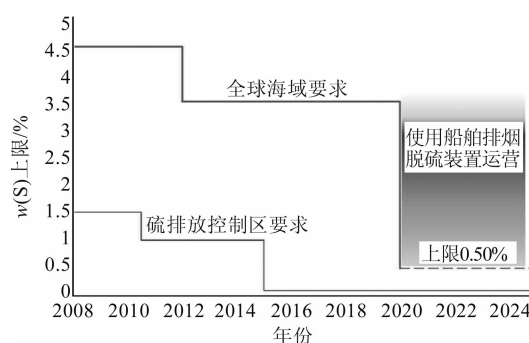


图 1 IMO 确定的硫排放控制计划

虽然 IMO 允许使用船舶排烟脱硫装置作为低

收稿日期:2020-08-20;修回日期:2020-09-30

作者简介:徐峥(1981—),工程师,主要研究方向为船用二冲程柴油机运行服务, xuzheng3101@163.com。

硫燃油的替代措施,但考虑到政策的不确定性以及脱硫装置产能等诸多因素,因此,2020年1月1日以来,全球大多数海船还是选择使用低硫燃油来满足IMO的要求。由于低硫燃油和传统的船用高硫燃油($w(S) < 3.5\%$)相比,在化学成分和物理特性方面都存在较大差异,因此使用低硫燃油给船用主机的正常运行带来了很大的挑战。各大主机厂、油料供应商等也就此纷纷发布相关文件,对船舶运营者进行相关指导,以期降低主机使用低硫燃油运行可能带来的风险。

1 船用主机使用低硫燃油的挑战

1.1 低硫燃油分类和特点

目前市场上的低硫燃油主要有馏分油(DM)、残渣油(RM)以及二者混合而成的混合油(IFO)三大类。馏分油是原油经蒸馏精炼分离而成,其特性类似于传统的船用柴油,密度和黏度均较低,但生产成本较高;残渣油的成分包含3%~10%的沥青质,特性类似于传统的船用重油,密度和黏度均较高;混合油由馏分油和残渣油混合而成,因配比不同其密度和黏度变化范围广。再加上各油料供应商的生产工艺不尽相同,因此,市场上低硫燃油产品种类繁多,其密度、黏度等性能参数差异很大。

另外,由于低硫燃油本身硫含量极低的固有特点,以及低硫燃油生产过程中为强制脱硫而添加的催化剂的残留,也可能给主机运行带来不利影响。

1.2 主机使用低硫燃油的挑战

根据低硫燃油的特点,结合船用主机的运行机理,并参考两大船用主机制造商MAN和WinGD的相关文件,分析使用低硫燃油对船用主机运行的影响,如表1所示。

表1 使用低硫燃油对船用主机运行的影响

低硫燃油特性	使用影响	可能后果
低硫含量	缸套腐蚀量不够,气缸油附着力下降	活塞环拉缸
	须要中和的硫酸根减少	活塞头积炭
低黏度	燃油柱塞润滑效果变差	柱塞磨损加速
	燃油喷射压力不足	起动或低负荷操作困难
低密度	燃油喷射量不足	主机加速性能变差
残留催化剂	进入燃烧室,对活塞环和气缸套造成磨粒磨损	损坏活塞环和气缸套
互不兼容性	不同油品混合后产生油渣和杂质	阻塞滤器、高压油泵等

注:低密度、低黏度特性主要针对的是低硫馏分油;高密度、高黏度特性主要针对的是低硫残渣油。

1.2.1 低硫含量的影响

当主机使用高硫燃油时,燃油中的硫分在燃烧过程中形成的 SO_x 会与缸套上附着的冷凝水结合形成硫酸,并对缸套内壁形成冷腐蚀。冷腐蚀如果不能得到有效控制,会使气缸套磨损过快,寿命大幅缩短;但适量的腐蚀,则能使缸套内壁产生大量敞开式的石墨薄层(见图2a)),该薄层有利于气缸套油膜的建立,进而提高气缸套/活塞环运行质量。因此,主机使用高硫燃油时,其缸套运行管理策略为控制腐蚀,即通过各种措施将缸套腐蚀控制在期望的水平。但当主机使用低硫燃油时,燃油中的硫分水平不足以形成硫酸,此时气缸套运行的主要风险为活塞环运行摩擦产生的镜面抛光现象。该现象会使缸套内壁形成封闭式石墨结构(见图2b)),而该结构会大大降低气缸油的附着力,使缸套因缺乏润滑而产生拉缸风险;如果活塞头积炭,则会使拉缸风险进一步加大。因此主机使用低硫燃油时,应注意控制积炭,即通过对气缸套/活塞运行状态的持续监控,防止活塞头积炭,减小拉缸风险。

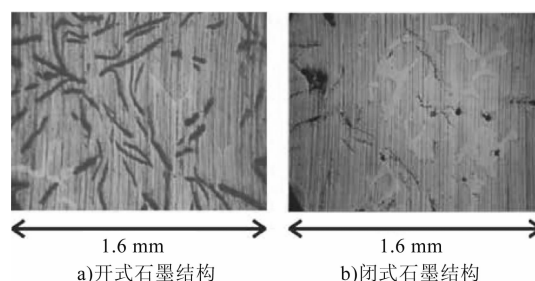


图2 显微镜下的缸套内壁

气缸油的主要作用包括中和硫酸根、润滑、清洁、冷却等。当主机使用低硫燃油运行时,因须要中和的硫酸根大幅减少,所以可换用碱值(Base Number, BN)较低的气缸油,WinGD给出的建议见图3。但BN较低的气缸油往往清洁效果也较差,所以长期使用会导致活塞头易积炭,从而加剧拉缸风险。因此主机使用低硫燃油时,气缸油的选用应在中和硫酸根和清洁活塞之间寻求最佳平衡。

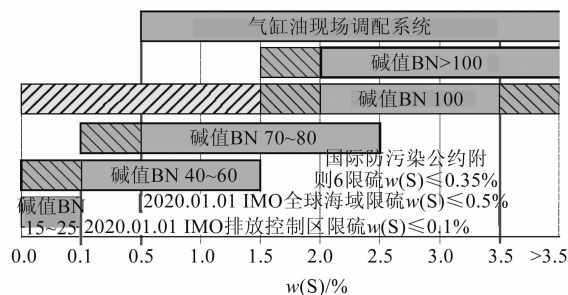


图3 WinGD对气缸油BN的选用推荐^[2]

1.2.2 低黏度的影响

低硫馏分油其特性与柴油相似，相同温度下其黏度远低于传统船用重油；低硫残渣油的黏度则与传统船用重油相似。若使用的燃油黏度过低，主要影响有两点：一是高压燃油部件（如高压燃油泵、ICU 等）内漏严重，导致燃油喷射压力不足，进而引发主机起动或低负荷操作困难等故障；二是燃油润滑性变差，导致燃油泵柱塞等运动偶件加速磨损，进而加剧内漏现象。因此，使用低硫燃油时须对燃油温度进行调节，确保燃油进机黏度控制在主机要求范围内。

1.2.3 低密度的影响

与低黏度相似，低密度也主要出现在低硫馏分油中。若燃油密度过低，会导致喷射同样体积的燃油时质量过低，喷射的燃油能量不足，从而引发主机加速性能变差等问题。

1.2.4 残留催化剂的影响

为了使燃油的含硫量更低，在生产过程中不可避免会使用更多的催化剂进行强制脱硫，从而导致更多的催化剂残留。大量燃油油品取样分析的结果也验证了含硫量越低催化剂残留量越高这一基本趋势（见图 4）。残留催化剂主要是一些 Al + Si 的化合物，其形式为细小的硬质颗粒。它们一旦进入燃烧室，就可能会对活塞环和气缸套造成严重的磨料磨损，大幅缩短部件寿命。因此 MAN 和 WinGD 都建议：燃油进机时其 Al + Si 的质量分数越低越好，至少应低于 10×10^{-6} ；但根据船用燃油标准 ISO 8217—2017：Al + Si 的质量分数低于 60×10^{-6} 即符合要求。因此，正确高效地使用分油机将燃油中的 Al + Si 去除显得至关重要。

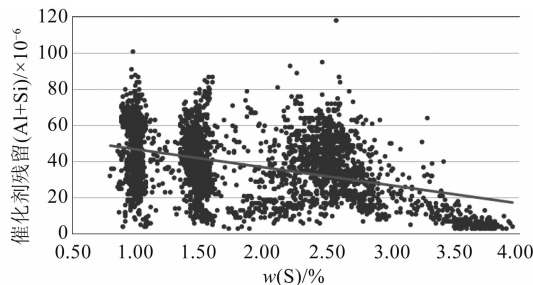


图 4 不同硫含量燃油的 Al + Si 含量统计

1.2.5 兼容性的影响

燃油兼容性是指不同燃油在混合时产生沉淀的趋势。单一批次的低硫燃油虽达到 ISO 稳定性标准，但与其他批次或不同产地的低硫燃油混合，很可能会变得不稳定，而导致不兼容。根据目前的经验来看：由于各地区低硫燃油的成分差异较大，因

此油品不兼容的问题出现概率变大。燃油不兼容会导致沥青质沉淀而形成油泥和油渣，导致过滤器、分油机堵塞，在极端情况下，甚至还会堵塞燃油管道，进而引发船舶主机停车。

1.2.6 其它影响

除了上述影响因素，对于某些低硫燃油还有一些其它特性须要注意，比如：①低温流动性。馏分物含量高的低硫燃油，由于其分子结构关系，在较低的温度下更容易形成蜡状，从而引发滤器堵塞或喷油器粘滞卡阻的风险。②酸值。从动植物中提取出来的低硫燃油内含有脂肪酸，因此可能显示出高酸性，而高酸值燃油可能造成燃烧室部件加速损坏。

2 应对措施

针对上述挑战，建议采取以下应对措施（表 2）。另外，根据中船服务公司近期遇到的案例，由于 MAN 与 WinGD 的主机在设计上有所不同，所以其面临的挑战和应对措施也有所差异。下文将对此做介绍。

表 2 船用主机使用低硫燃油的应对措施

低硫燃油特性	主要应对措施
低硫含量	采用陶瓷活塞环
	合理调整气缸油碱值和注油率，ACOM/ACOS
低黏度	控制燃油温度，保证其进机黏度（2 ~ 20 cSt）
	更换燃油柱塞、喷油器针阀等零部件
低密度	不影响主机排放前提下适当调整扭矩限制
残留催化剂	监测、控制进机燃油清洁度
互不兼容性	尽量避免不同品种低硫燃油混合

注：ACOM 为气缸油自动混合系统；ACOS 为气缸油自动切换系统。

2.1 低硫含量的应对措施

2.1.1 缸套运行管理

如前所述，主机使用低硫燃油后，缸套运行的主要风险由冷腐蚀转变为拉缸。在 2019 年底船东大规模换用低硫燃油后，中船服务公司陆续收到了一批主机拉缸的实船案例，其中尤以 MAN 的大缸径主机居多。这是因为 MAN 主机普遍采用铸铁活塞环，其材质与缸套材质相近，因此在缺乏气缸油润滑的情况下活塞环和缸套直接摩擦发热并产生金属间的微焊接，进而造成拉缸。而 WinGD 从 2005 年开始，就将具有铬基陶瓷涂层的活塞环作为其主机的标准配置。因陶瓷涂层硬度高且与缸套材质相差较大，所以其抵御粘着磨损的能力较强，在短时间缺乏润滑的情况下，安全裕度也较大。

因此针对 MAN 主机，在使用低硫燃油运行时

其缸套运行管理策略建议如下^[3]（后两点措施对 WinGD 主机也同样适用）：

（1）尽早换用陶瓷镀层活塞环；

（2）关闭 LDCL（Load Dependent Cylinder Liner）系统，将缸套冷却水出口温度维持在 85℃ 左右；

（3）每次到港停机后，通过扫气口检查活塞积炭情况，必要时对气缸油使用策略作调整；

（4）每月检查扫气箱泄放油中的铁含量和 BN 水平，若铁含量过高则意味着缸套可能存在拉缸现象，须及时调整气缸油使用策略，必要时应尽早吊缸检修，甚至重新珩磨缸套。

2.1.2 气缸油使用策略

如前所述，主机使用低硫燃油时，气缸油使用策略转变为在中和硫酸根和清洁活塞之间寻求平衡。因此除了根据燃油 $w(S)$ 选择合适 BN 的气缸油外，还须调整优化气缸油的注油率，具体过程如下（图 5）：

（1）换用新 BN 气缸油并沿用之前的注油率，运行一段时间（不超过 300 h）后，从扫气口检查活塞积炭情况，检查扫气箱泄放油的铁含量和 BN 水平，若情况不理想，则将注油率调高 0.2 g/(kW·h)。

（2）若注油率已调高至 1.0 g/(kW·h) 以上，但情况仍不理想，则换用 BN 更高的气缸油，以加强清洁效果。

（3）当换用 BN 更高的气缸油达到理想的清洁效果后，则可用类似步骤 1 的方法再逐步降低注油率，直至达到清洁效果可接受且气缸油消耗也较少的最佳平衡。

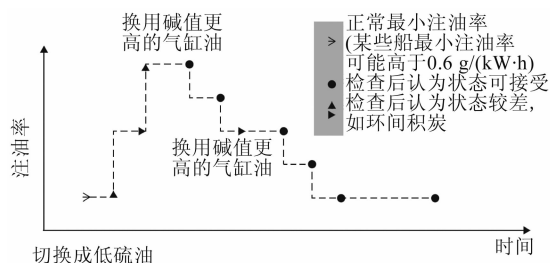


图5 气缸油 BN 及注油率调整示意图

若按上述步骤仍无法确定合适的气缸油 BN 和注油率，MAN 推荐：船上同时配备高 BN 和低 BN 两种气缸油，并交替使用（各使用一周）；或使用气缸油自动混合系统（Automated Cylinder Oil Mixing, ACOM），以同时保证气缸油的性能和清洁效果^[3]。

2.2 低黏度应对措施

燃油黏度低引发主机起动/低负荷操作困难的实船案例中船服务公司近期也时有接到。其中尤以

WinGD 中小缸径主机居多。这是因为 MAN 主机采用的是每缸单独一个高压燃油泵，且 ME 型主机的燃油泵柱塞为液压驱动，与主机转速无关；且泄漏路径长，因此内漏量较少。而 WinGD 主机采用燃油共轨设计，由机带燃油泵建立共轨压力，主机起动时转速本来就很低，一旦某缸 ICU 有较严重的内漏就会导致共轨内压力无法建立，进而导致主机起动困难。

针对燃油低黏度的影响，主要应对措施建议如下：

（1）通过调节燃油进机温度控制燃油进机黏度，进机黏度至少应保持在 2~20 cSt，以 5~15 cSt 为宜。对于某些黏度过低的 MGO，甚至须要在燃油供给系统中加装冷却器降温。

（2）加强对高压燃油部件的检查维护，对于磨损较大的部件如燃油泵柱塞或 ICU 等，须及时换新。另外，WinGD 部分机型在设计阶段已减小上述燃油部件的配合间隙，以尽可能减少内漏^[2]。

（3）针对 WinGD 中小缸径主机普遍存在起动困难的现象，中船服务公司开发了一种燃油共轨增压解决方案。该方案采用一套单独的电动泵在主机起动前对燃油共轨进行预增压，以保证主机起动时燃油共轨内的压力正常。其原理类似于中高速柴油机的燃油或滑油预供泵。该方案在解决主机起动困难的同时，还能减小 ICU 等昂贵燃油部件内漏产生的不利影响，从而降低主机生命周期内燃油部件的维护费用。

2.3 低密度应对措施

针对燃油密度过低导致燃油喷射量不足，继而引发主机加速性能不佳的问题，可在不影响主机排放的前提下，通过在主机控制系统中适当调整扭矩限制加以解决。但如果对该扭矩限制放宽太多可能会对主机运行带来风险，因此须在主机制造商的指导下进行调整。

2.4 残留催化剂应对措施

2019 年 9 月，ISO 发布的新的燃油标准“Publicly Available Specification (PAS) 23263”仅更新了燃油含硫量的要求（ $w(S) \leq 0.5\%$ ），而其他各项技术指标，包括 Al + Si 含量限值均未改变。因此船东只能依靠自身的操作来应对残留催化剂带来的风险，主要应对措施建议如下：

（1）正确有效地使用燃油分油机。分油机运行时应使运行温度尽可能高且通过流量尽可能小，以获得最佳的分离效果。对于低硫馏分油一般推荐分离温度为 40~50℃，对于低硫残渣油一般推荐

分离温度不低于 98 ℃。

(2) 定期检查燃油分油机前/后以及燃油进机前的 Al + Si 含量, 持续监测燃油分油机运行效果。

(3) MAN 推荐在燃油进机前增加一套过滤精度为 10 μm 的自清滤器 (见图 6), 以进一步提升燃油进机时的洁净度^[3]。

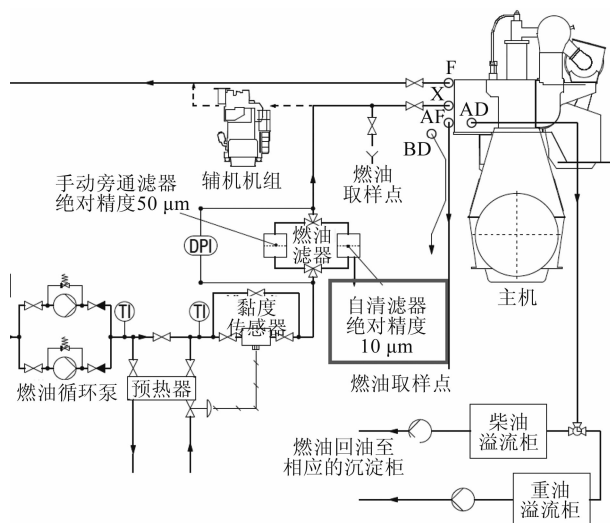


图 6 MAN ME 型主机燃油系统图

2.5 燃油兼容性应对措施

目前能确保燃油可混合使用的唯一方法是对油样进行兼容性测试。船上可用的简单易行的测试法是美国材料试验协会的斑点测试法 (ASTM D4740)。这种测试法主要用于评价石油化工领域油品的稳定性, 也可用于评价油品掺混互溶安定性情况。选取试验的两种样品, 按照 1:1 比例加热混合并搅拌均匀, 然后取一滴混合油样滴在预热的试纸上, 再将试纸放入烤箱中加热到 100 ℃, 1 h 后观察试纸油点的情况。图 7 中 1~5 依次体现了两种油品从兼容/稳定到不兼容/不稳定的测量结果表征, 其中, 只有结果 1 代表可以混用。

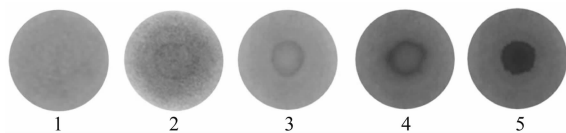


图 7 斑点测试法 (ASTM D4740) 结果示例

但对于船东来说, 每次加注燃油前进行兼容性试验, 并拒绝采用不兼容的燃油并不现实。因此实际可行的方法就是尽量避免不同品种的低硫燃油混合。从操作层面上来说应注意以下三点:

(1) 船上须同时存储两种低硫燃油时, 应分别存储在不同的油舱, 并避免在燃油澄清舱/日用舱/溢流柜处发生混合。

(2) 换油时应尽量将油舱内剩余的油品清理干净, 实船操作时可使用燃油清洗剂。但因为油舱内附着的油泥、油渣中的残留催化剂含量非常高, 所以清舱时务必将溶解后的油、泥、水泄放干净, 以降低残留催化剂混入新加燃油进入主机的风险。

(3) 当不同品种燃油混合无法避免时, 应尽可能减少混油比例和混油存放时间; 同时, 应优先考虑对黏度、密度、倾点相近的油品进行混合; 最好再通过斑点测试法对混合油品的稳定性进行检查评估, 以尽可能降低油品不兼容的风险。

2.6 其它应对措施

对于低硫燃油的其它特性, 比如低温流动性、高酸值等问题, 暂无明确的针对性应对措施。但总体来说, 还是应密切关注主机和燃油系统的工作状态, 并根据主机说明书做定期检查维护。

3 结论

船舶主机采用低硫燃油运行时, 可能会产生一些不良后果, 操作人员对此应有充分的认识, 并针对各种可能的后果, 采取相应措施, 确保发动机安全稳定运行。相关方应充分沟通, 互通有无, 共同为低硫燃油在船舶主机上的应用提供完整的解决方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 船舶大气污染物排放控制区实施方案 [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2018.
- [2] WinGD. Operation guidance to the global sulphur cap 2020: Technical Bulletin RT-229 [R]. Winterthur: WinGD, 2019.
- [3] MAN Energy Solutions. Operation on fuels with maximum 0.50% sulphur fuels: Service Letter SL2019-670 [R]. Copenhagen: MAN, 2019.