

选用合规低硫船用燃油面临的挑战及其应对措施

郑庆国¹, 杨 兰²

(1. 中波轮船股份公司, 上海 200002; 2. 上海工艺美术职业学院, 上海 201808)

摘 要: 针对全球船舶燃油限硫新规即将生效, 基于船东的视角, 分析了船舶加装合规低硫燃油面临的挑战, 在此基础上给出了具体的应对措施。指出: 作为船东和船舶管理公司, 应提前做好应对计划, 科学安排, 才能有效减少船舶额外营运费用, 确保船舶航行安全。

关键词: 船舶; 硫排放; 低硫燃油; 措施

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)04-0013-05

Challenges and Countermeasures of Selecting Compliant Low-Sulphur Marine Fuels

Zheng Qingguo¹, Yang Lan²

(1. Chinese-Polish Joint Stock Shipping Company, Shanghai 200002;

2. Shanghai Art & Design Academy, Shanghai 201808)

Abstract: With the entry into force of the new regulation for sulfur emission control, from the perspective of the shipowners, the various challenges that shipowners should be clear before selecting compliant low-sulfur fuels were elaborated and specific countermeasures were given. For shipowners or ship management company, the coping strategy and reasonable arrangement in advance can effectively reduce the additional operating costs of ships and ensure safe operation of ships.

Key words: ship; sulfur emission; low-sulfur fuel; measure

0 引 言

国际海事组织 (IMO) 针对全球航行船舶的燃油限硫新规要求: 从 2020 年 1 月 1 日起船用燃油硫含量不应超过 0.50% (此前为 3.50%, 为质量分数, 下文同)^[1]。目前, 海上环境保护委员会 (MEPC) 认可三种可供船舶选择用于应对硫氧化物排放公约要求的方案, 即采用符合要求的低硫含量燃料油; 使用经权威机构批准的船舶废气脱硫系统 (Scrubber); 采用如液化天然气 (LNG) 等清洁能源作为替代燃料。

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。

国际海事组织海上环境保护委员会第 73 届会议于 2018 年 10 月 22 日至 26 日在英国伦敦召开, 委员会审议通过了 MARPOL 公约附则 VI 的另外一份修正案 (MEPC. 305 (73) 决议), 进一步禁止船舶携带不合规燃油, 除非船舶采用其他等效措施。该修正案将于 2019 年 9 月 1 日视为默认接受, 2020 年 3 月 1 日生效。这意味着选择合规低硫燃油的船舶, 必须在 2020 年 1 月 1 日以后改用合规低硫燃油, 并且在 2020 年 3 月 1 日前, 将船上剩余的不合规燃油合法移除^[2]。

1 合规低硫船用燃油

2020 年 1 月 1 日生效的船舶限硫新规要求：船舶燃油的含硫量由 3.5% 下降至 0.5%。航运业关注的合规低硫燃油就是指含硫量小于 0.5% 的燃油。目前，合规低硫燃油主要有三种生产加工方式。

(1) 通过加工低硫原油生产合规低硫重质燃料油

重质燃料油（HFO）俗称重质燃油或重油，油品指标相对较差。利用低硫原油生产的低硫渣油调和出的 HFO，能够满足 IMO 的低硫要求。但这种低硫 HFO 的产量很低，远远满足不了全球远洋船舶的需求。

(2) 调和加工合规低硫燃油

调和加工燃油是传统船用燃料油市场的主要来源。低硫调和油（Blending）的生成过程即我们通常所说的油品调和，是将低硫含量原料和高硫含量原料按规定的比例进行混合、调制，生产出满足 IMO 要求的合规低硫燃油。

低硫调和油一方面要保证硫含量低于 0.5%，另一方面还要保证燃油指标等满足国际标准组织（ISO）8217 标准的要求，以确保船舶使用安全。但是，2020 年船舶限硫新规中的合规低硫燃油标准，在现行 8217 标准中没有明确要求，这给船东使用过程带来了很大的不确定性和安全隐患。

(3) 直炼合规低硫燃油

直炼合规低硫燃油须石油加工企业增加生产、加工环节。根据采用技术的不同可分为：重油加氢脱硫和生物脱硫。

重油加氢脱硫是在原油炼化过程中的加氢预处理阶段对重油进行脱硫，一般由渣油催化裂化配套装置完成。重油加氢一方面可以处理高硫、高残碳、高金属的劣质渣油，另一方面可以提高液收率和液体产物的质量^[3]。在加氢处理过程中，仅仅使用一种催化剂难以有效地脱除渣油中的各类杂质。国内外的渣油处理催化剂多种多样，可适应不同的原料状况和产品要求。

重油生物脱硫技术是由微生物脱硫技术发展而来，它是利用细菌酶催化特定反应，释放出硫，留下碳氢化合物，也就是酶的生存和繁衍不依靠重油中的烃做碳源。重油生物脱硫可以使重油中的硫、氮、重金属含量降低 20% ~ 50%，同时使重油组分发生变化。但其硫含量下降有一定局限性，脱硫效果可能达不到预期效果，并且生物酶必须在水溶液中才能存活，脱硫后的油品还要进行脱水处理。

2 船东选用合规低硫燃油面临的挑战

2020 年，全球近 97% 的商船将选择使用合规低硫燃油，但由于合规低硫燃油存在众多不确定因素，船东面临着巨大挑战。如何时改加合规低硫燃油；如何清洁油舱，防止油舱残留高硫油影响加油后的含硫量；如何降低换用低硫燃油后对柴油机的影响等问题，须船东提前做好应对准备，减少由此带来的影响。

2.1 燃油舱换油后含硫量超标问题

这次的限硫新规对含硫量的调整幅度比较大。原来的高硫燃油油舱如果不做任何处理直接加装合规低硫燃油，残留的高硫燃油融入新加装的低硫燃油后，最终的燃油含硫量将可能超过限硫新规的上限，而使用超标燃油将面临港口国的巨额罚款。

首先计算安全的最小混油比例。假定油舱剩余高硫燃油含硫量为 3.0%，新加装合规低硫燃油含硫量为 0.45%，设油舱剩余油量 X t，新加装油量为 Y t，以硫含量列等式如下：

$$3.0\% X + 0.45\% Y = (X + Y) \times 0.5\% \quad (1)$$

得： $\frac{Y}{X} = 50$

也即，当加油量和剩余油量比超过 50 时，混合后的燃油的含硫量才不会高于限硫令的上限。由于各地加装的燃油含硫量不同，并且相差很大，所以必须根据实际情况进行计算。以一条 30 000 t 多用途油舱为例，分析换油的稀释比例。表 1 中最小残油量是留存在油舱里不能泵出的可测量到的油量，并且是在首尾吃水差为较大的 2.5 m 时的值。油泥量是分散在油舱各个角落、平台水平加强板上不能流动的油泥量。深舱油舱的水平截面面积较小，油泥量较小；双层底油舱的水平截面面积较大，并且内部框架结构较多，所以油泥量较大。双层底油舱和一半深舱油舱最大混油比均不超过 50，如果不对油舱进行清洁或做其它有效处理，直接加装合规低硫燃油，加油后的燃油含硫量超标的可能性是非常大的。

2.2 对燃油驳运、净化、供给系统的影响

合规低硫燃油与高硫燃油物理特性有很大不同，更换燃料以后对船舶原来的驳运、净化、供给系统有较大的影响。

(1) 油泥（Sludge）、杂质变多会引起燃油驳运、净化系统的滤器严重堵塞。合规低硫燃油含有较多轻质馏分，密度比高硫燃油要小，所以很容易将高硫燃油油舱里的残油和油泥溶解，同时出现不兼容的

风险，由此导致油泥和杂质的产生。图 1 所示为加装合规低硫燃油后油舱内产生大量颗粒状油泥。



图 1 加装合规低硫燃油后油舱内产生大量颗粒状油泥

(2) 温度较低时会导致石蜡结晶，堵塞滤器和管路。合规低硫燃油中石蜡的含量较高，在温度低于浊点（Cloud Point）时，石蜡就会结晶；在温度低于冷滤点（Cold Filter Plugging Point）时，燃油将不能正常通过过滤器。ISO 8217 限制了船用燃油的倾点（Pour Point），但是由于燃油中石蜡的大量存在，而倾点温度小于冷滤点温度，小于浊点温度，所以合规低硫燃油在温度高于倾点，低于浊点时会产生石蜡结晶，导致无法驳运的现象。图 2 是

合规低硫燃油在高于倾点（0℃）的 18℃ 时出现的燃油滤器石蜡结晶现象。

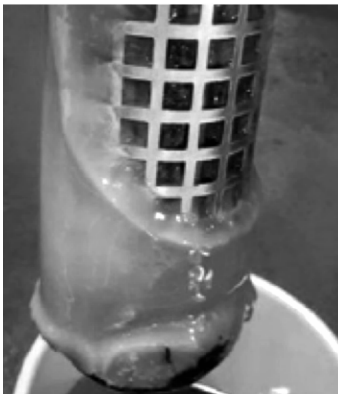


图 2 合规低硫燃油在 18℃ 时石蜡结晶堵塞滤器

(3) 较高的硅、铝含量带来的影响。低硫燃油在催化裂解过程中会带入硅铝成分，并随着燃油脱硫工序的增加，带入的硅、铝含量不断增加，这对燃油的净化、供给系统是一个巨大的挑战。当燃油泵、高压油泵、燃油喷油控制单元（ICU）、喷油器等精密偶件进入坚硬的硅铝氧化物颗粒后，磨损加剧。图 3 是用高倍显微镜在高压油泵套筒表面看到的硅、铝氧化物颗粒切割金属表面的情形^[4]。

表 1 30 000 t 多用途船燃油舱混油比

序号	油舱名	油舱位置	舱容/ m ³	90% 舱容/ m ³	最小残油量/ m ³	油泥量/ m ³	总残油量/ m ³	最大混油比 Y/X
1	No. 1	双层底仓	471.8	424.6	8.8	15	23.8	16.8
2	No. 2 左	深舱	311.1	279.9	4.2	2	6.2	44.1
3	No. 2 右	深舱	446.3	401.7	4.0	2	6.2	63.8
4	No. 3 左	深舱	365.1	328.6	4.7	2	6.7	48.0
5	No. 3 右	深舱	524.0	471.6	6.1	2	8.1	57.2
6	No. 4 左	双层底仓	678.8	610.9	3.5	20	23.5	25.0
7	No. 4 右	双层底仓	829.7	746.7	5.8	20	25.8	27.9

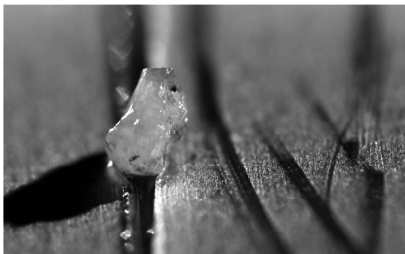


图 3 燃油催化剂颗粒切割金属表面

(4) 燃油黏度范围大产生的影响。合规低硫燃油的黏度范围很大，不同产地的燃油黏度的差别很大。表 2 为三个不同产地的合规低硫燃油的黏度比较^[5]。这就要求在使用时，随时关注燃油的温度控制，确保在净化、供给中将燃油的黏度控制在柴油机正常使用范围内。一旦黏度过低，会对系统

中的偶件产生较大影响。特别是 WinGD 的 RT-Flex 电喷主机中的喷油控制单元，在燃油黏度低于一定值时，将会由于内部泄漏导致燃油喷油压力过低，使主机失去动力。

表 2 合规低硫燃油粘度比较（含硫量 0.24% ~ 0.50%）

		中国	巴西	阿根廷
粘度/ cSt (50℃)	平均值	154	353	343
	最大值	179	406	411
	最小值	92	260	96

2.3 对柴油机燃烧室的影响

换用低硫燃油后，柴油机气缸油必须更换为碱值与之匹配的气缸油。如气缸油碱值偏高，气缸油中的碱值中和酸值后，剩下的碱值物质（其主要

成分为氢氧化钙)与燃气中的二氧化碳在高温作用下生成碳酸钙(即石灰石),并聚结在活塞顶与第一道活塞环之间,象磨刀石一样很快地将缸套内表面的珩磨纹磨掉,并形成磨料,导致缸套及活塞环发生不正常磨损,活塞环的搭口间隙增大,引起燃气下窜,导致油膜破膜,更加剧磨损,乃至拉缸或缸套裂纹产生。而当气缸油碱值较低或油量少,不足以完全中和掉燃烧产物中的硫氧化物,将会产生气缸低温腐蚀的危险。

3 应对措施

3.1 科学更换合规低硫燃油

科学地安排首次加装合规低硫燃油,做好加装前的准备工作非常重要。须针对具体船舶对油舱的舱容、油舱的数量、船舶航线、换油时间节点油舱剩余油量等信息进行综合考虑。为了确保首次加油后含硫量不超标,有三种操作方案可选择:人工清洁油舱;提前使用有效的燃油添加剂;用超低低硫轻油稀释油舱残油^[6]。

(1) 人工清洁油舱

人工清洁油舱是最直接、最简单、最彻底的方法,能彻底清除油舱中残留的高硫燃油和油泥,保证新加装的合规低硫燃油不被污染。人工清洁油舱须根据船舶的营运计划合理安排时间。如果在2019年年底,船舶有厂修计划,则在修船厂安排人工清洁油舱,最为合适。如果船舶油舱较多,可以提前清洁部分油舱做好准备;也可以安排在航修中清洁油舱,但要考虑停航时间,人员安排是否方便,清洁出来的油泥是否能得到港口接收等因素。人工清洁油舱存在工程量较大、占用船期、损失残油、施工成本较高等问题。另外,如果清洁油舱的时间节点过早,再遇上不能及时加到合规低硫燃油,将面临再次加装高硫燃油的问题。

(2) 提前使用有效的燃油添加剂

提前使用有效的燃油添加剂消除油舱里的不流动油泥。在IMO文件 Preparatory and transitional issues: ship implementation planning for 2020(编号:ISWG-AP 1/2/11)中也提到了这个方案,这是基于2015年限硫令实施过程中积累的经验。燃油添加剂可以有效地将沉淀在油舱底部、舱壁、水平框架结构上的油泥溶解到燃油中,不但可以减少油舱的油泥量,还可以使这部分燃油重新得到使用。根据具体不同的油舱和添加剂的使用效果来计算油舱总的残油量。如表1中,除1号燃油舱外,其它油舱在使用添加剂消除60%以上油泥后,直接加装

合规低硫燃油,燃油的硫含量不会超标。图4是马士基的一条船在2014年油舱更换加装低硫轻油前,使用燃油添加剂前后的油舱情况。可见科学地使用添加剂能够明显减少油舱油泥量。但在使用添加剂期间,须密切关注燃油系统的滤器和分油机的运行情况,防止溶解下来的油渣堵塞油路。

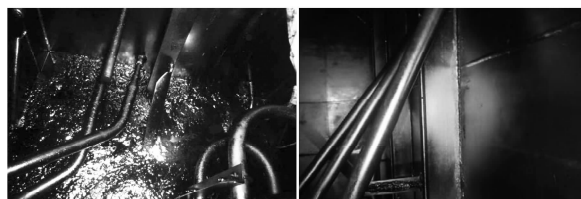


图4 使用燃油添加剂前后油舱内的油泥情况对比

(3) 用超低低硫轻油稀释油舱残油

高硫油舱中的残油也可以用含硫量为0.1%的轻油进行稀释。计算好稀释比例,将低硫轻油泵入高硫油舱,用泵打循环来稀释清洗油舱。按照2.1节中的计算方法,可得出稀释比为15:2。可见:用总残油量7.5倍以上的超低低硫燃油就可以将油舱里的燃油稀释到合规含硫量的范围。

轻油稀释清洁油舱的方法在使用中须特别注意,因为轻油在短时间内将油泥溶解下来,大量的油渣夹杂在燃油中,有可能造成管路上阀件、滤器等严重堵塞。此外,使用超低低硫轻油稀释清洁油舱还须考虑燃油差价带来的额外成本。

3.2 加强燃油离心分离

使用离心分离来净化燃油是常用的有效方法。离心分离是利用重力分离原理,根据颗粒密度比燃油密度大的特点,当燃油通过离心机时,重力沉降的速度从 $9.8(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 增加至几千倍,从而使颗粒分离出来。著名的斯托克斯方程描述了决定颗粒沉降速度的因素:

$$V_{\text{settling}} = \frac{d^2(\rho_p - \rho_l)}{18\mu}a \quad (2)$$

式中: d 为颗粒直径, ρ_p 为颗粒密度, ρ_l 为液体密度, μ 为液体黏度, a 为重力或离心加速度。

离心力作用在颗粒上,将其向四周移动,而燃油流推动颗粒向油箱中心移动。当燃油流达到一定速率,催化剂残留颗粒将与燃油一起漏出,未被从燃油中分离出来。即分离机分离效率在额定流量范围之内,随着流量的减小分离效率逐渐提高。为了保持较高、合理的分离效率,应使通过离心机的流量尽量较低且保持稳定。可通过以下两种方式控制流速:

(1) 固定流量控制。在离心机前安装一个流

量调节阀, 节流时, 压力超过弹簧阀规定的压力值, 阀打开, 燃油送回沉淀柜。这个方案很简单, 但不能获得最大能源效率。

(2) 流量调节。使用变频驱动系统 (VFD) 控制输出泵电机的转速, 使进料匹配实际发动机负荷。与固定流量控制节流不同, 使用变速流可以降低输油泵和离心机的能源需求。

另一个可以提高分离效率的可改参数是燃油黏度。随着燃油温度的上升, 燃油的黏度下降。据权威机构研究, 如果燃油分离温度从 98 °C 降至 90 °C, 流量必须降至额定流量的 72%, 才能维持原来的分离效率; 85 °C 时, 流量需要降低至 50%。船用分离机是按照开放大气系统设计的, 98 °C 是温度限值。所以, 可以通过提高和保持燃油的分离温度, 来提高燃油的分离效率。

3.3 加装高效率燃油过滤器

燃油进机前的过滤器是最终的一道安全保护, 有效的燃油过滤才能确保柴油机的安全运转。船用柴油机厂家一般推荐燃油进机的颗粒直径限值为 10 ~ 34 μm 。为了能够进一步减少硅、铝氧化物颗粒进入柴油机燃油系统和燃烧室, 最好加装一个 10 μm 的自清洗滤器, 如图 5 所示。

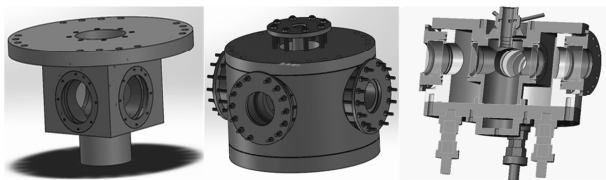


图 5 燃油自清洗滤器

自清洗滤器滤芯的质量非常重要, 随着使用时间和手动清洗次数的增加, 滤芯的过滤精度会降低。使用 5 年以上的滤芯最好换新, 新滤芯最好采购原厂家标准产品。

在换用合规低硫燃油后会出现燃油滤器反冲次数增加, 甚至完全堵塞等现象。须备好充足的备用滤芯, 确保及时、快速更换, 以不影响柴油机连续供油。这里特别须指出的是: 船用双联自清洗滤器中的手动滤器, 过滤级别一般都比较低, 精度多为 60 μm , 不能长时间使用, 仅在更换自动滤器滤芯时应急使用。

3.4 燃油进机前改用黏度控制

合规低硫燃油的黏度范围比较宽, 并且不同区域加装的燃油黏度差别很大。如果按照习惯做法, 用温度来控制燃油进机黏度, 会带来很大的不确定性。在燃油温度设定值, 燃油的黏度有可能偏高, 有可能偏低。当黏度偏低时, 燃油在柱塞和套筒偶

件间失去密封性和润滑性, 导致柴油机燃油喷油系统失去压力, 柴油机停止运转; 同时会导致柱塞、套筒偶件卡死或磨损。当黏度偏高时, 柱塞、套筒偶件会卡住咬死。这个现象在 WinGD 的 RT-Flex 电喷主机上的燃油喷油控制单元 (ICU) 中表现的特别明显。

一些老龄船上只有燃油温度控制, 最好能够增加黏度控制装置, 以保证进机燃油的黏度在要求范围内。对船上供油单元配有黏度控制功能的, 要检查该项功能是否在正常工作状态。多数的燃油黏度传感器经常会由于表面沉淀油泥导致测量偏差较大, 须及时拆洗。

3.5 及时更换碱值相匹配的气缸油

更换合规低硫燃油后必须及时更换与之相匹配的气缸油。目前, 船舶一般都在使用两种不同规格的燃油和与之相匹配的气缸油, 2020 年以后仍然是使用两种不同规格的燃油。一般船上都配有高、低碱值的气缸油油柜, 在换用合规低硫燃油时, 高碱值气缸油柜内也须同时更换为较低碱值的气缸油。这在气缸油加装方面须提前计划好, 避免高、低碱值气缸油混油。

4 结语

面对 2020 年全球限硫新规, 船东须做好充分准备, 在确定选择合规低硫燃油后, 做出换油具体计划, 并相应地根据船舶具体情况做出具体应对预案。科学合理地计划安排, 严肃认真地落实, 不但能顺利、安全地实现换用合规低硫燃油, 还能规避不确定因素带来的安全隐患, 减少船舶产生额外营运费用。

参考文献

- [1] 中国船级社. 中国船级社技术通告. 第 7 号总第 255 号 [M]. 2017.
- [2] 中国船级社. IMO 海上环境保护委员会第 73 届会议 (MEPC73) 要点快报 [R]. 2018. 11. 7.
- [3] 修金柱. 重油高压加氢裂化技术的特点及发展趋势 [J]. 炼油与化工, 2007 (1): 5-7.
- [4] Alfa Laval. Technical reference booklet. The Alfa Laval Adaptive Fuel Line Bluebook [R]. 2018.
- [5] Lloyd's Register. Guidance for shipowners and operators on MARPOL Annex VI Sulphur Regulation [R]. 2018.
- [6] International Maritime Organization (IMO). Development of draft guidelines for consistent implementation of regulation 14.1.3 of MARPOL Annex VI [R]. 2018.