

# 船舶低硫油的应用及管理对策

邵德强<sup>1</sup>, 刘新建<sup>2</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459; 2. 山东交通学院, 山东 威海 264210)

**摘要:** 介绍了低硫油的特性以及对柴油机性能的影响, 在此基础上, 结合船舶低硫油管理实践, 提出了低硫油及相关设备的一些管理措施和建议, 为低硫油的合理、安全使用提供参考。

**关键词:** 低硫油; 特性; 管理

**中图分类号:** TK428.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2020)05-0011-03

## Application and Management Countermeasures of Marine Low Sulphur Fuels

Shao Deqiang<sup>1</sup>, Liu Xinjian<sup>2</sup>

(1. China Oilfield Services Ltd., Tianjin 300459; 2. Shandong Jiaotong University, Shandong Weihai 264210)

**Abstract:** The characteristics of low sulphur fuel and its influence on diesel engine performance are introduced. Based on management experiences of marine low sulphur fuels, the management measures of low sulphur fuels and relevant equipments are suggested, which offers references for reasonable and safe usage of low sulphur fuels.

**Key words:** low sulphur fuel; characteristic; management

## 0 引言

自2020年1月1日起, 在全球除排放控制区(ECA)外其它海域航行的船舶, 禁止使用 $w(S) > 0.5\%$ 的燃油。我国交通运输部发布的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》要求, 自2020年1月1日起, 海船进入内河控制区(长江干线、西江干线), 应使用 $w(S) < 0.1\%$ 的船用燃油。这些法规对减少硫氧化物( $SO_x$ )、颗粒物(PM)排放, 改善大气环境, 保障人类健康和促进航运与经济协调发展有积极推动作用。为符合船舶 $SO_x$ 排放法规, 现有的几种主要措施为: 使用液化天然气(LNG)替代燃料; 加装废气脱硫装置; 使用合规低硫燃油。使用LNG燃料涉及到船舶改造、主机选型及加装设备, 且使用要求具有一定的特殊性, 使用范围局限较大, 因此距大规模推广使用还有较大的距离。而废气脱硫装置改造周期较长、投资成本较大, 但其在大型船舶上应用经济性较好。据

DNV GL船级社统计, 截至2020年3月, 约有4 000艘船舶已经安装或即将安装脱硫塔<sup>[2]</sup>。目前来看, 使用合规低硫油仍是绝大多数船舶的选择。

## 1 船舶低硫油类型和特性

### 1.1 船舶低硫油类型

ISO 8217(2017)标准将船用燃油分为DM级(船用轻质馏分油, Marine Distillate Fuel)和RM级(船用重油, Marine Residual Fuel)两大等级<sup>[3]</sup>。随着炼化技术的发展, 石油炼化水平不断提高, 符合IMO2020硫含量限值标准的船舶燃油主要有以下三种类型:

(1)  $w(S) < 0.1\%$ 的DM级油。DM级油主要通过原油蒸馏等工艺生产, 有七种规格; 相比ISO 8217(2010)标准, 又增加了具有良好润滑性的DFA、DFZ、DFB三种规格的生物燃油, 且规定添加的脂肪酸甲酯(FAME)的体积分数不得超过7%<sup>[4]</sup>。

(2)  $w(S) < 0.5\%$ 的RM级油。RM级油通过添

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-04

作者简介: 邵德强(1984—), 轮机长, 主要研究方向为船舶运行安全与管理, sdq-2006@163.com。

加添加剂及调和等工艺进行降硫处理得到,其硫含量差异较大,主要用于辅助锅炉和中、低速柴油机。

(3)  $w(S) < 0.1\%$  和  $w(S) < 0.5\%$  的“调和”低硫油。该级油采用轻质馏分油和高硫重油调和等工艺生产,在含硫量、稳定性、兼容性、闪点等方面满足标准要求。

## 1.2 船舶低硫油特性及对柴油机性能的影响

### 1.2.1 安全性

DM 级燃油闪点低(不低于 SOLAS 规定标准),挥发性强。某些船舶在低纬度航行时,机器所处环境温度可达到  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,相对于高硫重油更容易造成爆燃甚至船舶火灾,尤其是在燃油锅炉发生点火失败时导致爆炸的危险系数增大。由于低硫油的种类多,参数差异大,须根据其温度特性及时调整加热设定值,否则极易造成燃油流动性和雾化效果变差,或者管路、油泵等部位发生泄漏,继而引发船舶污染或火灾事故。燃油转换时的不当操作还会造成柴油机高压油泵柱塞偶件咬死,从而引发主机降速或停车的风险。另外,使用生物燃油或由其混兑的“调和油”时,由于生物燃油的加工技术尚不完善,容易受到水分、杂质等污染,可能导致燃油酸度增加、过滤器堵塞、析蜡、发动机沉积物增加等问题<sup>[5]</sup>。总之,低硫油的使用涉及到船舶油舱布置和燃油设备的选用。和高硫油相比,其加装、储存、驳运等过程中的要求更高,操作难度增大。

### 1.2.2 稳定性和兼容性

稳定性是单一类型燃油所呈现的性质,取决于其抗沥青质沉淀的能力、热应力和老化应力等因素。添加剂、催化剂及“调和”工艺会对合规低硫油的稳定性产生影响。某些情况下,与高硫油相比,低硫油存储或环境状态的改变更容易影响其稳定性。

兼容性指的是两种或多种燃油混合在一起而不会出现物质分离的能力。各地区合规低硫油组分差异较大,混合油即使以某一特定比例混合时兼容,但以其他比例混合时也可能不兼容。

低硫油的稳定性差和不兼容性都会引起沥青质沉淀,造成滤器、离心分离机、加热器和管路堵塞,以及分油机频繁排渣等问题,严重时甚至可能导致船舶失去动力。

### 1.2.3 黏度及润滑性

低硫油黏度较低,无法保证在燃油系统部件表面形成完整油膜,因此润滑性较差,有可能导致燃油系统运动部件的异常磨损或内部泄漏;严重时

会导致喷油器针阀、高压油泵柱塞等偶件卡死,甚至断裂。

### 1.2.4 低温流动性

除了通常使用的重油须要加热以保证其流动性外,DM 级燃油与“调和油”对低温流动性更为敏感。如使用轻油(MGO)的某支持船驶入北极巴伦支海进行守护作业,因未采取有效措施保证燃油温度,造成燃油温度降低至冷滤点,大量析蜡堵塞滤网,燃油流量不足、压力下降,柴油机多次起停后,不得不返港修理。但高温又可能导致低硫油成分分化、黏度进一步降低,所以须科学控制其使用温度。

### 1.2.5 催化剂颗粒

催化剂颗粒主要成分是硅、铝、钒、钠等,当其混入燃油时,平均颗粒已经非常微小。低硫油中催化剂颗粒含量较高,而且硅、铝等颗粒难以有效分离。这些催化剂颗粒极易造成柴油机缸套、活塞环及环槽异常磨损,高压油泵柱塞、喷油器针阀磨损或卡死,进而可导致主机转速不稳、起动困难甚至无法起动;发电机无法稳定运行、并车,造成逆功率或跳闸,最终导致全船失电。

### 1.2.6 密度

低硫油密度小,相比高硫重油,在相同工作循环中总热值低,进而会影响柴油机输出功率、排气温度、最大油门限制等。通过式(1)可以得出:在额定工况下,密度减小将导致燃油消耗量  $G_e$  增加。

$$G_e = \frac{g_e P_e}{\rho} \quad (1)$$

式中:  $G_e$  为燃油消耗量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $g_e$  为燃油消耗率,  $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $P_e$  为额定输出功率,  $\text{kW}$ ;  $\rho$  为燃油密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2.7 对柴油机性能的影响

燃油的品质是保证氧化催化剂(DOC)法、 $\text{NO}_x$  选择催化还原法(SCR)、 $\text{NO}_x$  吸附还原催化法(LNT)和微粒捕集器(DPF)等柴油机排放后处理措施取得理想效果的基础条件<sup>[6]</sup>。低硫油可使  $\text{SO}_x$  排放减少,酸值降低。船用大型低速二冲程主机在使用低硫油时,如仍使用高硫油所对应总碱值(TBN)的气缸油或系统滑油,则过剩的碱性物质燃烧后,会导致活塞头和活塞环处出现大量的碳酸钙等沉积物,缸套内发生颗粒磨损,活塞环卡阻甚至断裂,损坏气阀、增压器喷嘴、涡轮等部件。四冲程柴油机系统润滑油中的过剩碱值也会在缸套上形成镜面,边界润滑效果变差,造成碱性腐蚀。除上述低硫油特性引发的船舶柴油机故障外,还会因高压油泵、喷油器等

漏影响柴油机起动和低负荷时的操作性以及柴油机的加速性能和最大功率输出<sup>[7]</sup>。

## 2 低硫油管理对策研究

### 2.1 低硫油的操作与管理

(1) 制定相关操作规程, 加强安全教育培训, 评估低硫油在安全及设备管理方面的潜在风险, 做好加装、储存、驳运等过程中的监管监控, 消除人为隐患。

(2) 优化低硫油管理。尽量避免不同批次及品质的低硫油掺混, 可以通过另设驳运泵低位吸口管路尽量排空燃油舱、沉淀柜和日用柜, 以减少混油风险。当船上有多批次的低硫油时, 应按照“先加先用”的原则, 避免在船储存时间过长而产生大量水分或沉淀物。定期清洁燃油舱/柜及燃油滤器, 尤其是燃油舱/柜的吸口管路, 防止油泥、石蜡等物质造成堵塞。如果有条件, 可以使用“石墨纸烘干法”现场测定燃油状态。添加诸如沥青质分散剂来改善燃油的不相容性。

(3) 精准控制低硫油的操作温度。为确保低硫油在航行区域的流动性, 一般油舱温度应保持在高于燃油倾点 10 ℃ 以上, 燃油使用温度至少高于浊点 3 ~ 5 ℃。燃油在不同操作时所需温度的确定, 可通过燃油黏温曲线判断, 或根据燃油黏度与温度关系计算, 见式 2。视情开启或关闭加热设备, 避免低硫馏分油被不当加热。RM 级低硫油也应控制加热温度, 避免温度过高形成油泥。

$$\log(v + a) = b - m \log T \quad (2)$$

式中:  $v$  为运动黏度, cSt;  $T$  为绝对温度, K;  $a$ 、 $b$ 、 $m$  为燃油常数。

(4) 完善换油操作。在船舶驶入或驶离 ECA 时往往须要进行换油操作, 在这过程中应做好燃油温度、柴油机负荷、转换时间等参数的监测, 温度变化梯度控制在 2 ℃/min, 以减少温度对柴油机性能的影响。某些柴油机回油管接至日用柜, 换油后须视情转换轻、重油日用柜的柴油机回油阀, 避免不同硫含量的燃油交叉污染, 导致硫含量超标。现代船舶越来越多地使用自动换油程序或独立系统来进行此项操作。

### 2.2 设备管理

不同性能与质量的燃油对船用柴油机燃烧和排放性能有很大的影响, 对燃油净化设备也提出了不同的要求, 须要在管理实践中加以总结, 有针对性地采取预防及管控措施。

#### 2.2.1 柴油机管理

定期做好柴油机系统滑油的油液检测工作。通过测定滑油总碱值 (TBN), 分析系统油的剩余清净分散能力, 判断更换周期。循环伏安法是一种操作简单、快速、准确、有效的现场测定方法<sup>[8]</sup>。

调整柴油机冷却水温度、选用适当总碱值的气缸油及系统润滑油。在使用高硫油时, 一些船舶采取提高冷却水温度的方法来降低柴油机缸套低温腐蚀风险, 换用低硫油后应及时调低冷却水水温至合适值; 二冲程柴油机应选择与低硫油匹配的低碱值气缸油, 防止柴油机燃烧室内出现大量沉积物, 但应确保气缸油具备足够的清洁性能。MAN B&W 公司服务通函 SL2020-694/JUSV 指出: 根据柴油机运行状态选择气缸油 BN40 ~ 100 匹配  $w(S) \leq 0.5\%$  的燃油。四冲程柴油机如长时间使用低硫油, 则要根据厂家的建议更换合适的 TBN 系统润滑油。根据罗罗公司一份针对柴油机润滑剂的指南: 使用  $w(S) \leq 0.5\%$  的燃油, 应选用 TBN7 ~ 12 的系统润滑油。

长期使用低黏度燃油, 应关注并视情更换高压油泵及喷油器偶件, 以减少内部泄漏情况, 保证柴油机额定功率的输出。如不可行, 须调节起动油门、最大油门限制, 以抵消内漏量。轻油十六烷值高, 发火性能好, 滞燃期短; 重油则可通过式 (3) 中碳芳香指数 (C. C. A. I.) 来评定其发火性能:

$$C. C. A. I. = D - 140.7 \lg(V + 0.85) - 80.6 \quad (3)$$

式中:  $D$  为重油 15 ℃ 时的密度, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V$  为重油 50 ℃ 时的黏度。

低硫重油密度小, 为使柴油机获得较好的发火性能, 保证燃烧稳定性, 应适当调整喷油定时。

总之, 在日常管理中应做好相关数据统计, 监测柴油机工况, 及时对柴油机相关部件进行调整或更换。另外, 还须做好柴油机排气处理设备的管理。如, SCR 系统操作温度过高或过低; 逃逸的氨与生成的  $\text{SO}_3$  反应形成硫酸氢铵 (ABS), 可能导致催化剂结垢, 影响其活性, 高温时又会因为氨氧化和不可逆的催化剂热失活对  $\text{NO}_x$  还原效率产生负面影响。

#### 2.2.2 净化设备管理

在使用催化剂颗粒含量较多的低硫油时, 可以将两台分油机串联使用, 以提高分离净化效果。根据低硫油密度, 对分油机比重环、分离温度、净油流量和排渣间隔等做出相应调整, 确保分离效果。在不影响燃油进机的前提下, 串联滤器或换用高精度滤器, 加装自动反冲洗装置可以提高进机燃油的清洁度。

(下转第 20 页)

- (29): 3044-3048.
- [4] 赵建辉, 周勇, 石勇, 等. 共轨喷油器高速电磁阀动态响应试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (1): 74-79.
- [5] 卢伟, 吕毅. 电磁阀电流对单缸电控柴油机性能的影响 [J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36 (5): 46-50.
- [6] 姜盼龙, 张欢仁, 杨明. 船用低速柴油机电控喷油器电磁阀仿真研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2018, 41 (1): 41-44.
- [7] 任志胜, 路波, 郑智剑. 基于 Weibull 分布参数估计法的气动电磁阀可靠性对比分析 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (19): 188-191.
- [8] 程帆, 张波. 高压气动电磁阀可靠性改进设计 [J]. 火箭推进, 2017, 43 (1): 50-54; 84.
- [9] 周佩. 气动先导电磁阀可靠性试验测量不确定度评定与可靠性分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [10] 金江善, 方文超. 船用柴油机电控喷油器高速电磁阀耐久性研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (9): 91-95.
- [11] 李冬贺, 亓迎川. 某燃油系统长寿命电磁阀可靠性试验研究 [J]. 空军预警学院学报, 2015 (6): 423-425; 432.
- [12] 张倩茹. 冲击频率对低应力多冲碰撞塑性变形的影响研究及建模 [D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [13] 李孟. 喷油控制用电磁阀的试验与优化研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [14] 卢华强. 多碰载荷下 45 钢的分层塑性响应及机理分析 [D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [15] 卢磊磊, 石成霞, 王静. 45 号钢在往复冲击载荷作用下的塑性变形 [J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33 (3): 70-75.
- [16] 陈静. 液压元件间隙的泄漏量及其控制研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.

(上接第 13 页)

综上, 基于低硫油和相关设备的使用, 提出以下几点建议: 针对燃油日用柜和沉淀柜净化或驳运吸口较高, 导致剩余油量较多的情况, 加装低吸口管路, 将燃油驳运至一个舱柜中使用, 能有效减少混油风险。二冲程柴油机采用陶瓷活塞环, 可提高颗粒的清洁能力, 降低磨损和咬死的风险。大部分船舶一般采用齿轮泵作为输送泵, 但齿轮泵脉动大, 运行中极易造成低硫油温度升高, 而螺杆泵, 如 SPX 公司的 Triro 泵, 则可以降低泵扰动对超低硫油的影响。长期使用轻油的船舶应安装低硫油冷却器或冷媒单元 (Chiller Unit), 以满足柴油机燃油使用温度的要求。

### 3 结语

燃油硫含量会影响柴油机  $\text{SO}_x$ 、烟度和 PM 排放浓度。低硫油与高硫油特性不同, 在实际应用中应引起充分重视, 采取有效的预防管控措施, 切实做好燃油和相关设备的管理, 防止故障发生。

### 参考文献

- [1] 交通运输部. 交通运输部关于印发船舶大气污染物排

放控制区实施方案的通知 [EB/OL]. (2018-12-20) [2019-12-20]. [http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/haishi/201812/t20181220\\_3146515.html](http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/haishi/201812/t20181220_3146515.html).

- [2] 龙 de 船人. 已有 4000 艘船确定安装脱硫塔 [DB/OL]. (2020-04-14) [2019-12-20]. <https://www.imarine.cn/thread-720143-1-1.html>.
- [3] ISO. Petroleum products-fuels (class F) -specifications of marine fuels; ISO 8217: 2017 [S/OL]. [2019-12-20]. <https://www.iso.org/standard/80579.html>.
- [4] 刘军朴. 低硫油风险与控制 [J]. 中国船检, 2019 (2): 28-32.
- [5] KOLWZAN K, NAREWSKI M. Alternative fuels for marine applications [J]. Latvian Journal of Chemistry, 2012, 51 (4): 398-406.
- [6] 张伟刚, 程晓夏, 佟佳洋, 等. 柴油硫含量对柴油机使用的影响 [J]. 船舶与海洋工程, 2015, 31 (2): 48-51.
- [7] 周兰喜. 船舶低硫燃油的使用对船舶设计的影响及对策 [J]. 江苏船舶, 2011, 28 (4): 31-35.
- [8] 史永刚, 马彦, 李子存, 等. 润滑油总碱值的循环伏安法测定技术 [J]. 石油与天然气化工, 2004, 33 (1): 56-58, 79.