船舶主机燃用低质燃油和长期低负荷运转之对策

台湾海洋大学 田文国

O C C L 哈子铭

近年来,国际航运市场持续火红。但新造船舶快速加入市场,运力趋向过剩;并且油价升高,全球油价走势见表1。

表1 全球油价走势 资料来源:Lloyd's shipping economic Dec/2007

油品	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		
	1月	7月	12月												
MDO	240	245	200	200	300	300	330	355	370	502	602	622	612	632	807
IF180	113	108	105	104	156	158	149	171	196	267	337	342	338	335	477
IF380	110	105	100	100	150	150	145	160	188	257	330	335	330	325	468

为降低营运成本,提升竞争优势,航运企业纷纷采取两种对策:

- 燃用低质燃油,和/或
- 降低主机负荷。

本文分别讨论驱动定距桨的船舶柴油主机燃用低质燃油和长期低负荷(即低转速)运转困难的后果及防范事项,供轮机员参考。

1 船舶主机燃用低质燃油

低质船用燃油,指“中间燃料油”(Intermediate Fuel,缩写IF),和黏度更高的“重质燃料油”(俗称重油)。低质燃油价格相对较低,不仅降低船舶营运成本,而且合理使用石油资源,是船用柴油机普遍采用的一项重要技术。

1.1 低质燃油的特点

- 密度大,0.97~1.01 g/cm³,燃油净化和喷射雾化困难,油滴初燃烧时易热裂,导致机件结炭增多。
- 黏度高,150~700 mm²/s(cst,50℃),燃油储存、输送、净化和雾化困难。
- 发火性差,十六烷(Centane Number)值25~35,滞燃期长,后燃期长,排气温度偏高,燃烧不完全,有效油耗率 b_e 上升,排烟浓度增加。
- 成分复杂,含有较多水分、灰分、硫、钒、钠、硅、残炭等杂质,加剧柴油机燃烧室部件和喷油设备元件的腐蚀和磨损。表2是国际内燃机学会(CIMAC)发表的K55燃料油的品质要求。

表2 K55燃料油的品质要求

黏度 mm ² /s	密度 g/cm ³	残炭 %	硫分 %	灰分 %	水分 %	钒 ×10 ⁻⁶	铝 ×10 ⁻⁶
700	1.010	22	5	0.2	1	600	80

船舶燃用低质燃油,可能导致不良后果。

(1) 燃烧恶化

低质燃油雾化困难、自燃性差,后燃严重,因而:

• 最高爆发压力降低,排气温度增高,排气烟度增加,缸内结炭严重。

• 后燃严重,增加喷油设备的机械负荷和热负荷,加剧喷油设备精密偶件的磨损、腐蚀,加剧喷孔结炭和变形。

(2) 磨损

低质燃油中的灰分、机械杂质以及炼油使用的含硅和镁、铝等金属的催化剂等,都会使气缸(套)、活塞、高压油泵和喷油器异

常磨损。

(3) 腐蚀

• 低质燃油高硫分产生的低温腐蚀,和高钠、高钒产生的高温腐蚀,损坏气缸体(套)、排气阀及阀座、涡轮增压机及其轴承等;

• 含氧化物的燃气漏入曲轴箱,可能使滑油迅速变质并腐蚀有关轴承,等。

此外,若两种燃油相混且亲合性不良,则混合油中悬浮的沥青成份凝聚,可能产生大量油泥,使得净油机油泥过多、供油管路堵塞、喷油设备胶着、排气冒黑烟等,影响柴油机正常工作。

1.2 船舶主机燃用低质燃油的对策

目前低质燃油,不但用于低速柴油主机,而且已经用于中速柴油主机和副机。随着石油炼制技术的发展,低质燃油的品质正在逐年下降,使用越来越困难,需改善船上燃油使用的各环节。

1.2.1 接收和储存

鉴于两种燃油相混,悬浮的沥青成份可能凝聚产生大量油泥物,需要:

- 避免混舱,即避免同一舱柜混装不同性质或相同性质但不同港口的燃油,以防两种燃油的混合油中悬浮的沥青成份凝聚而生成油泥沉淀物;
- 加强对低质燃油品质的检查(如加油时取样与送检等)。

1.2.2 低质燃油的预处理

预处理,指为满足柴油机工作需要,低质燃油进入喷油泵前的贮存、驳运等环节,改善使用性能的技术措施,如预热、净化、添加有关添加剂等。

(1) 预热

为保证低质燃油在输送、净化和雾化等环节的不同使用要求,采用分级预热。

预热温度,以满足黏度要求为准。不同黏度的低质

燃油,预热温度不同。表3示出燃油系统各部位的预热温度,例如:

- 为顺利泵送,重油储存柜预热温度 30~38℃;
- 为保证雾化,需保持喷油泵燃油黏度 12~25mm²/s,可从燃油的黏温曲线上查出相应的预热温度值。目前船用主机使用的低质燃油,雾化温度上限 150℃。

表3 预热温度推荐值

位置	预热温度 ℃	
	180 mm ² /s (IF 180)	400 mm ² /s (IF 380)
重油储存柜	30	38
重油沉淀柜	60~80	60~80
重油日用柜	80~90	85~95
净油机加热器	95	95~98
雾化加热器	100~120	120~135

按造船规范要求:

- 为防加热器中焦炭析出和沉淀,燃油预热应使用饱和蒸汽,压力不高于 0.8 MPa。
- 为防预热温度过高导致燃油气化而中断供油,燃油系统应为加压式,燃油输送压力 1.2~1.5 MPa。

(2) 净化处理

燃油的净化包括沉淀、过滤和离心分离净化。

- 沉淀,沉淀柜中沉淀 12 h 并定期从柜底排污,初步净化。

• 过滤,是燃油净化的重要环节,包括分佈在燃油系统中的粗、细滤器,和喷油器入口处的高压式细滤器最后过滤。

• 离心分离净化,是最主要、最有效的净化手段。净化低质燃油应两台净油机串联使用(第一级分水,第二级分杂质),并正确选择比重环、净油预热温度、排渣时间以及最佳净油量(30%~50% 额定净油量)等参数。使用燃油净化系统分离密度大于 991 kg/m³ 的劣质燃油需格外小心。

(3) 添加剂

低质燃油中加入各种添加剂,可以改善低质燃油的有关性能,如表4所示。

表4 低质燃油使用的添加剂

种类	成分	作用
助燃剂	铜、铁、铝的金属盐 钼的有机化合物 磷系化合物	助燃并中和硫化物,减轻烟度,剥离炭渣
分散剂	高分子化合物	分散油中的炭渣和沥青
	各种介面活化剂	防止油中的海水氧化油水介面
抗蚀剂	氢氧化镁 Mg(OH) ₂	防止硫酸的低温腐蚀
	碱土金属盐,氧化镁 MgO	防止钠、钒的高温腐蚀
十六烷值增长剂	亚硝酸戊脂	提高燃油的十六烷值
	过氧化丙酮	
降凝剂	烷基萘、高分子化合物	降低凝点

(4) 乳化处理

燃油中掺水并使之成为油包水的乳化液,可改善低质燃油的燃烧性能,减少缸内结炭。

使用均质器,可细化和均质化油中的水和杂质颗粒,改善燃烧并减轻磨损,但也可在燃烧中聚合各种杂质颗粒而加速磨损,至今未能广泛使用。

2 船舶主机长期低负荷运转

Sulzer 主机,最低负荷可以低至 20% 额定负荷;MAN B&W 主机也限定最低负荷 30%,但厂家建议最好是维持在 50% 负荷以上。

船舶主机长期低负荷运转,目的在于尽可能多地降低主机燃油耗量并尽可能少地降低航速。故主机大多选用 80~82% 额定转速,相应 50~55% 额定功率,即船舶航速仅降低 20%,而主机燃油耗量降低近 50%。当然还要考虑营运需要。

主机都采用废气涡轮增压。长期低速运转的主要问题在于,低转速仍需要一定的扫气压力,而船舶主机功率(与转速的三次方成正比)下降比转速下降多得多,增压器获得的能量大幅下降,提供的增压空气量和增压压力大幅下降,由此导致:

① 过量空气系数和扫气压力低,燃烧恶化;

② 燃烧恶化,扫(排)气孔、排气阀、增压器污染加速,过量空气系数和扫气压力更低,燃烧进一步恶化。

如此恶性循环,不仅增加柴油机的有效油耗率 b_e ,而且导致活塞环严重旁吹(Blow-by)、活塞烧损、缸套龟裂、排气管著火、增压器损坏等,可靠性降低,还可能最终导致柴油机损坏。

为改善低负荷运转时的柴油机性能,需采取优化调整措施。

2.1 空气供给

2.1.1 辅助鼓风机

柴油主机低负荷运转,排气能量减少,增压器提供空气量不足,定压增压方式者尤甚。活塞行程加长的直流扫气(Uni-flow scavenging)主机,原本扫气效率较差,低负荷时更易因扫气不足导致燃烧不完全。

对策之一是启用辅助鼓风机。

新型定压增压方式主机(例如 Sulzer 各型),皆配备 2 部以上辅助鼓风机,应并列运转。

倘若主机长期低于 50% 额定负荷运转,则:

- 辅助鼓风机应手动控制保持常开,并定时检查排气总管;

- 若原来只有一部辅助鼓风机,可考虑再加装一部,以提高空气量和扫气压力。

2.1.2 增压器

(1) 采用冲动式增压的主机,切断一台增压器

冲动式增压主机,例如 MAN B&W、Sulzer 等机型,

多配备二部或三部增压器。

长期低负荷运转,屏蔽其中一部(即排气经过其他增压器而不经这一部),可提高排气总管压力,提高在用其他增压器效率,从而提高扫气压力和压缩压力,改善燃烧状况,提高最高燃烧压力,相当有效。

使用此方法,必须:

- 取出所屏蔽增压器的转子,以免其过热变形;
- 装设增压器超速报警(增压器转速与 P_{max} 有关)。

(2)改造增压器

若长期低于 50%额定负荷运转,为提高扫气压力从而提高气缸最高压力和减低燃油消耗,可考虑下述改造增压器措施。

- 改小废气喷嘴环流通面积;
- 更换增压器转子,选用适合低负荷的小容量压气机叶轮,等。

例如 8RND105 主机, BBC-VTR631 型增压器, 低于 60%额定负荷运转, 喷嘴环流通面积减小, 压气机原 G7 型改为 Z8 型, 燃油消耗率可降低 $2.72 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 。

注意, 采取这些措施需要适当调整排气阀定时; 最好装设转子超速报警装置; 恢复原常用负荷运转前必须换回原增压器转子(含叶轮)及喷嘴环。

2.1.3 扫气温度

低负荷运转, 扫气压力以及扫气温度必然降低。

若海水温度低, 扫气可能在空气冷却器产生凝结水。为防凝结水, 必须保证扫气不过冷。

扫气温度最好保持在较高值, 例如 Sulzer RND 为 $40\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$, RTA 为 $65\text{ }^\circ\text{C}$, MAN B&W 最大值为 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 但需注意对排气温度的影响。

调节扫气温度最理想的方法, 是调节海水温度。

空气冷却器的冷却海水:

- 入口温度, 至少比扫气的露点高 $5\text{ }^\circ\text{C}$; 和
- 出入口温差不可太大, MAN B&W 规定出口温度不超过 $55\text{ }^\circ\text{C}$, Sulzer 规定不超过 $48\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1.4 进、排气道维护

柴油机长期低负荷运转, 燃烧不完全且渐进劣化, 进、排气道污染严重, 需加强维护:

- 废气涡轮燃气入口网栅及空冷器, 必须视脏污程度缩短检查清洁周期(比厂家规定提早);
- 定期清洁扫气室、活塞下部空间、压气机空气滤器等;
- 航行中定期水洗增压器涡轮和压气机。

2.2 提高压缩比

长期低负荷运转, 尤其是长期低于 50%额定负荷运转, 为保证压缩终点的压力和温度, 提高气缸最高压力, 应考虑适当提高压缩比, 例如在连杆大端处加调整垫片等。

2.3 燃油

长期低负荷运转, 多使用 C 重油(实际不可能按厂家建议使用 A 油), 可能需采取如下措施:

- 净油机净油温度保持上限值(通常 $90\sim 98\text{ }^\circ\text{C}$, 视燃油黏度而定), 净油率降到最低。
- 雾化加热器加热温度保持在高限, 保持燃油管路蒸汽伴行加热管之加热蒸汽流通, 维持进入燃油阀之燃油黏度在 $10\sim 15 \text{ cst}$ 。
- 保持燃油阀冷却水温度在上限($85\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$)。

2.4 燃油喷射

(1)长期较低负荷运转

若有 P_{max} 低下、排气高温、冒黑烟等燃烧不良, 可加大喷油提前角:

- 调解高压油泵(或其驱动凸轮); 或
- 调解可变喷油定时装置 (Variable Injection Timing, 缩写 VIT, 若装有)。

(2)长期低于 50%额定负荷运转

低负荷运转, 高压油泵之喷射压力减低, 燃油喷雾粒径大, 油粒所能到达的距离短, 燃烧不良。

建议改用总流通面积小(多孔数、小孔径)的节能型喷嘴(或喷油器), 提高燃油雾化品质。例如, Sulzer 主机, $25\sim 60\%$ 额定转速, 采用 Slow nozzle, 燃油消耗率比使用标准喷嘴减少 $13.6 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$; MAN B&W 主机, 采用低速用小口径(0.1 mm)喷嘴, 可有效防止燃油喷雾劣化, 节省燃油。

(3)冷却

适当提高冷却液温度, 保持喷油器冷却正常, 运行中加强监视, 及时发现和纠正异常。

2.5 气缸油

(1)确定气缸油注油量

气缸油的作用, 一是形成油膜润滑气缸(套)、活塞环和环槽; 二是中和燃油燃烧产生的酸性物质减少酸性腐蚀。

气缸油注油器的注油量与转速成正比, 而柴油机的负荷与转速的三次方成正比:

- 柴油机转速较低时, 气缸油注油量随主机转速成正比减少却少于功率的减少, 若不减少注油量, 则每一循环注油量相对过多, 不但浪费, 且易污染活塞环、扫(排)气孔、排气阀及其系统, 残留于排烟管内还可能引发火灾。此时应适当减少气缸油注油量, 避免浪费, 并降低缸内积炭和结焦。

• 柴油机转速更低时, 气缸油注油量随主机转速大幅降低, 难以形成润滑油膜。若不加大注油量, 则每一循环注油量相对过少, 可能导致气缸(套)、活塞环和环槽严重磨耗或刮伤。此时应适当增加气缸油注油量。

所以, 理论上, 气缸油注油率, 应该:

- 与负荷成正比;但是
- 不得低于 MCR 时气缸油注油率的 50%。

例如,某主机 MCR,115 r/min,负荷指示(L.I)7.3,注油率 1.306 g/kW·h:

• 主机转速减至 95 r/min 时,L.I=5.2,按上述方法计算,注油率应减至 $1.306 \times (5.2/7.3) = 0.930$ g/kW·h;

• 当注油率降至 0.653 g/kW·h 后,主机转速再降低,气缸油注油率不再降低。

以上为理论值,实际机器长期低负荷运转,尚需根据主机气缸的新旧(磨耗)、气缸(套)与活塞环实际润滑状况等,斟酌修正注油量。

Sulzer 及 MAN B&W 主机,多已配备负荷追踪式注油量增减装置,注油量能随负荷大小而增减,例如额定功率注油率 1.36 g/kW·h,而 25~60% 额定负荷注油率可能降至 0.544~0.816 g/kW·h。

2.6 气缸(套)及活塞冷却

气缸(套)冷却水和活塞冷却液,应尽可能保持在其上限值。

理由是,主机负荷降低,则气缸(套)冷却水及活塞冷却液温度随之下降:

- 影响扫气温度和压缩温度,从而影响燃油的点火和燃烧;
- 产生低温腐蚀。

2.7 振动

往复式主机的振动,包括轴系扭振、轴系纵振动、船体振动、凸轮和排气阀引起的振动、旁撑桿(Tie rod)止动螺栓松动引起的横向振动、管路内部液体压力变化引起的振动等,不可避免,关键是不发生共振。船体结构、主机安装、负荷状况等,都可能引起共振。

(1)轴系扭振

设计保证主机常用转速范围内没有临界转速。

(2)轴系纵振动

设计保证:

- 全负荷附近不会有临界转速区域;
- 全负荷至 50% 负荷间没有临界转速区域;
- 40% MCR 负荷或以下,可能存在临界转速区域。

试航时,会实测验证曲轴纵振动,并记录临界转速范围。

九缸以上主机,减速运转可能出现轴系共振并引起住舱振动,但不会超过曲轴应力允许值,在曲轴前端装设纵振动衰减器(Damper)效果良好。

操车时,应避免在临界转速范围运转,并尽快通过临界转速范围。

(3)船体振动

在临界转速转会致船体振动。一般而言振动较弱,只需稍为改变转速即可回避。

为避免共振,主机低负荷运转应:

- 及时调节,避开临界转速;
- 留意可能发生的扭振和共振。

2.8 辅助锅炉(Aux. Boiler)之使用

主机减速运转,尤其是采用切断一台增压器时,废气锅炉(或节热器)蒸汽产量势必不足,必须点燃辅助以供航行所需之蒸汽消耗。故辅助锅炉最好加装全自动控制之小容量喷嘴。

2.9 维护

主机长期低负荷运转,应酌情缩短某些维护保养的周期(周期短于厂家的建议,视情而定),例如:

- 吊缸(含排气阀);
- 进、排气道和增压器内部检查清洁;
- 扫气箱和活塞下部空间检查清洁;
- 高压油泵、喷油器和喷油嘴保养检查,等。

长期低于 50% 额定负荷运转,建议最初 1000 小时拆检排气阀,确认情况良好后再逐步延长检查间隔。

2.10 恢复原常用负荷的准备

恢复原常用负荷运转前,需做好下列准备。

(1)喷油器和喷油嘴

若曾换用节能型喷油器(喷嘴),必须恢复至原装备,以防喷油泵压力过高。

(2)增压器、排气道和进气道

增压器长期低负荷运转,过量气缸油和未完全燃烧的燃油残留在排气管内,一旦主机恢复至高负荷,排烟温度增高,排气管可能着火,会使增压器转转子超速、轴承损坏,甚至膨胀接头爆裂引起机舱或机器火灾,故应:

- 解体检查增压器。若曾改造增压器,换用喷嘴环和转子,必须恢复至原装备,以防增压器转子超速。
- 检查排气管,检查扫气室内油泥聚集情况,并彻底清洁,以免发生火灾。

- 检查清洁空气冷却器、空气滤网等。

(3)气缸套和活塞环

- 从扫气箱检查气缸套和活塞环;
- 至少抽吊检查一个缸,并测量其磨耗。

(4)气缸油注油器

检查注油器;

调整恢复气缸油正常注油量。

2.11 主机恢复原常用负荷的磨合

主机恢复原常用负荷,必须从使用的低转速逐步增加负荷至原常用转速,而且必须有一个磨合过程。

• 磨合时间的长短,依气缸(套)内壁磨耗和活塞环磨耗以及吊缸检查的其他结果而定;

- 磨合期间略微增加气缸油量注油量;
- 磨合期间小心缓慢增加主机转速。