

# 船舶柴油主机长期大幅减负荷运行提高经济性措施

浙江交通职业技术学院海运学院 朱永强

**内容提要:**分析主机长期低负荷运转引发故障原因和机理,建议进一步提高经济性和防止故障的措施。

**关键词:**船舶柴油主机 长期低负荷运行 经济性 故障 应对措施

## 1 船舶柴油主机长期大幅降负荷运行

船龄较大的船舶,柴油主机(以下简称主机)大多降负荷运行。随着油价的上涨,目前燃油成本已经占运输成本的40%~50%,主机降低负荷运行已成为航运公司降低成本的最重要手段。

降负荷运行主机(本文讨论直接带动定距桨的主机,降负荷就是降转速),大部分低于额定负荷的50%(低于额定转速的80%),有的甚至只有额定负荷的20%(额定转速的60%),大都船龄较大,可大致分为两种情况。

一种是主机不能发出更大功率。例如老龄散货船A轮,船龄33年,主机SULZER 5RND68,额定功率5 520 kW,额定转速137 r/min,营运转速只能维持在89 r/min,相应功率1 500 kW,只相当于额定功率的27%。

另一种是为了适应航线需要。例如老龄常规客船B轮,主机型号B&W-6K45GF,额定功率3 886 kW,额定转速227 r/min,定压增压,在省际航线航行多年,总航程仅有110海里,离港至到港时间13小时。曾以主机120 r/min航行,航程中途抛锚3小时,负荷580 kW,只有额定负荷的15%。近来,在市场竞争和燃油提价的压力下,为进一步降低成本,取消抛锚时间,主机以接近最低稳定转速(80 r/min)的90 r/min运行,功率仅250 kW,相当于额定功率的6.4%。

但据了解,或者根本就没有意识到,或者没有或不愿投入资金,主机长期低负荷运行的船舶,大部分没有采取适当的应对措施,后果是:

- 船舶航速慢影响营运,例如前述A轮。
- 燃油燃烧条件恶劣,缸套、活塞环和环槽过度磨损,增加修理和备件费用。例如前述老龄常规客船B轮,航行30个航次后,发现扫气箱油污严重,活塞环和环槽以及No<sub>2</sub>、No<sub>4</sub>、No<sub>5</sub>等缸套,磨损率远大于说明书的数据。
- 燃烧条件恶劣,燃油利用率低。例如前述老龄常规客船B轮,主机以90 r/min运行与120 r/min运行相比,燃油消耗单航次仅少了500 kg。

• 扫气箱严重脏污增加油渣处理费用且增加油污染风险,冒黑烟污染大气。

需要特别指出,上述后果中,“燃油利用率低”一

条,降低成本的空间还相当大。

## 2 低负荷运行技术分析

主机低负荷工况,缸内零件过度磨损,扫气箱脏污等,皆因燃油燃烧不良,需分析低转速对燃烧诸因素的影响。

### 2.1 影响燃烧诸因素分析

#### (1)空气

燃油燃烧,需要足够的空气,还需要空气剧烈扰动,以利于其与燃油的混合。

• 低负荷运转,排气能量少,增压器转速也大幅降低,尤其是定压增压方式(例如前述老龄常规客船B轮)扫气压力下降更多,扫气空气数量不足。

• 扫气压力下降,扫气不充分,缸内废气排不干净,进一步减少空气数量。

• 扫气压力下降,扫气空气动能不足,扰动不够剧烈,与燃油混合不充分,延长滞燃期,燃烧滞后。

#### (2)压缩压力

低转速运行时空气数量不足,若几何压缩比不变,压缩终点压力和温度低,延长滞燃期,燃烧滞后。

#### (3)燃油喷射

燃油喷射,需考虑喷射时机和雾化质量,包括喷射始点(喷油提前角)和喷射持续时间。

低转速运行时凸轮轴转速低,高压油泵柱塞运动减缓,可能降低燃油压力:

• 若燃油压力仍可保持针阀开启,喷射压力降低可能影响雾化质量;

• 若燃油压力不能维持针阀开启,则会出现针阀连续启闭,燃油多次喷射,而每次喷射的燃油都需要滞燃期,故燃烧过程增长,后燃严重。

低转速运行时燃烧滞后,若喷油提前角不变,燃油来不及完全燃烧,甚至排气阶段还在继续燃烧。

#### (4)排气阀开启时刻

低转速运行,每次喷入缸内燃油量少,燃烧压力低,废气能量低。若不提前开启排气阀,增压压力低,压缩终点的压力和温度低,且扫气质量差,燃烧不良。

### 2.2 气缸油注油率

气缸油能够减少缸套和活塞环的腐蚀磨损。

低速运转,一般需加大气缸油注油量:

- 气缸油过少,短时间内就会导致拉缸或咬缸。

- 气缸油过多,被燃气烧焦、烤焦,生成硬质油渣,加剧缸套、活塞环和环槽的磨料磨损。

但是,较快就会发生的拉缸或咬缸属于事故,要追究责任;而缸套、活塞环和环槽的过度磨损要较长时间才能被发现,而且不属于事故,不追究责任。

船员担心缺油导致拉缸或咬缸事故被追究责任,还有人认为气缸油越多越好,往往过多地加大气缸油注油量。

## 2.3 后果

长期低速运转时,以上两方面原因,导致后果如下。

### (1) 扫气箱积油、积炭严重

例如前述常规客船 B 轮,缸套外部扫气口以上到扫气箱顶部积炭很厚,每月每缸扫气箱都清出近 10 kg 油污和炭渣。

- 扫气箱积油、积炭,一部分是未完全燃烧物。低速运转增压压力低,活塞下行打开扫气口时,缸内燃气压力高于扫气压力,未完全燃烧的混合气吹向扫气箱。上例常规客船 B 轮,扫气压力仅有 0.017 MPa,把扫气箱端盖临时改为带观察孔的盖板,可以见到扫气箱内有火星飘落。

- 扫气箱积油、积炭,另一部分是气缸油。如上一段所述,船员往往过多地加大气缸油注油量。活塞环刮下过量气缸油以及部分烧焦或烤焦形成的颗粒,也被未完全燃烧的混合气吹向扫气箱。

- 扫气箱积油、积炭,流动性差,基本不能通过泄放排出,一旦遇有严重的燃气倒奔还可能被引燃而发生火情。

### (2) 活塞环、环槽及缸套过度磨损

缸套、活塞环和环槽异常磨损的原因,大致有四。

- 燃烧不良,燃油中催化剂颗粒(在显微镜下可以看到,从缸套内壁取下的贴片嵌满了硅、铝等催化剂微粒)以及各种金属和非金属杂质,在气缸内烧结,颗粒变大,且硬度很大,进入缸套与活塞环、环与环槽之间,产生磨料磨损。

- 过量气缸油,烧焦或烤焦,落入缸套与活塞环、环与环槽之间,产生磨料磨损。

- 扫气箱内的炭渣,随扫气二次进入气缸,落入缸套、活塞环、环槽之间,增加磨料,加剧磨损。

- 低负荷运行时缸内压力较低,活塞环特别是下面几道环上方受到的燃气压力也低,环可能在槽内上下跳动损坏环槽。

### (3) 污染大气

- 燃烧不良,未燃烧的碳等排至大气。

- 机动操纵时排烟速度慢、温度低,排气中的未及燃烧油滴附着于排气道,主机定速后排烟速度加快、温度提高,附着于排气道的油滴燃烧并随排气排出,形成

排烟有火星,严重时像放焰花一样。

### (4) 浪费能源

燃烧滞后,爆炸压力低,燃油能量利用率低。

虽然低速运转降低了燃油耗量,应对措施得当则可以提高燃油能量利用率,进一步降低燃油消耗。

## 3 应对措施

为了安全和减少污染,也为了进一步降低燃油消耗,根据以上分析,主机长期低速运行,需要采取下列措施。

### 3.1 增加进气量

增加进气量的几种方法,都需要计算和比较之后再确定参数。

#### 3.1.1 改造增压器

增加进气量的根本方法,是改造增压器,提高增压压力。

(1) 可以选用新型号的增压器,例如前述 A 轮,扫气压力从 0.005 MPa 提高到 0.022 MPa。这需要:

- ① 按营运需要,确定船舶航速即主机转速。

- ② 请设计机构计算设计,确定增压压力,从而确定增压器型号:

- 降低喷嘴环通道面积,节流各缸排气,提高各缸排气能量(压力和温度),增大排气焓降;

- 提高涡轮膨胀比,充分利用排气焓降;

- 提高压气机效率。

(2) 可以利用原增压器,请设计机构计算,确定喷嘴环尺寸,选定新型号喷嘴环或新制作喷嘴环:

- 外形尺寸与原喷嘴环基本相同,

- 适当减少通道面积,

- 叶片,形状及安装角度不变,适当增加叶片数并分布均匀,以利转子动平衡。

改造增压器喷嘴环,也是彻底清洁检修整台增压器的好机会。

#### 3.1.2 提前开启排气阀

提前开启排气阀,增加排气能量,可以提高增压压力。方法很简单,只要将排气凸轮向凸轮轴的正车方向转一个角度,但每次调整的度数宜小。至于调整几度最好,可不经计算而由实验确定。

为提高增压压力而改造增压器,也需提前开启排气阀,增大排气能量,也为了排气彻底,使下一循环混合气中氧气多,利于燃烧。

当然,提前开启排气阀会使燃料能量损失大,即油耗增加;但是可提高空气过量系数,改进燃烧,有利于节约燃油。

#### 3.1.3 开启应急鼓风机

增加进气量最简单的方法,就是低负荷运行开启应急鼓风机并保持连续运转。虽然应急鼓风机耗电,但

与增加气缸进气量相比,利大于弊,然而效果有限。

例如前述B轮,扫气箱内有单向阀板,应急鼓风机与增压器串联工作,不开应急鼓风机时,增压空气经过中冷器后顶开单向阀板直接进入扫气箱。实际使用中发现在90 r/min时开启鼓风机,扫气压力从0.017 MPa增加至0.05 MPa,同时减少了增压器的喘振声。

### 3.2 提高压缩压力

#### (1)提高几何压缩比

调整存气间隙,减少压缩容积,可提高压缩比。这种方法只增加船员工作量,不需要任何资金投入。

减少存气间隙提高几何压缩比的数值:

- 若改造增压器,可一并委托设计机构计算;
- 若不改造增压器,可由少到多逐步加大,通过试验确定。

减少存气间隙提高几何压缩比后,若再增加主机负荷,压缩压力可能过高。因此,若可能提高负荷,调整时必须留有余地,保留适应较高负荷工况的能力。

例如前述常规客船B轮,主机缸盖及缸套安装时都不用垫片,只能调整活塞连杆机构。缸套摩擦面上边缘是第一道活塞环上沿的上止点,活塞环厚10 mm。考虑活塞环承受的的气体压力产生的扭曲,存气间隙最多可减少3 mm,也就是说在“十字头”销和连杆的结合处最多可增加3 mm的钢制垫片。

#### (2)运动件密封

运动件密封不良,会降低压缩比,影响因素主要是活塞环与环槽,以及活塞环与缸套。

要坚持预防检修,定期测量,防止漏气:

- 缸套,保持圆度和不柱度等在规定范围;
- 活塞环,保持弹性、搭口间隙和天地间隙在规定范围,更新后一定要低速“磨合”;
- 活塞环槽,保持上下环面平整,若镀铬尽量保持铬层。环槽过大,活塞应送专业厂修补,恢复环槽原尺寸和镀铬层。

#### (3)排气阀关闭时刻

排气阀关闭早,可提高压缩终点压力和温度,但留存废气多也会延长燃烧过程。

所以,排气阀关闭时刻,需综合考虑“提高压缩终点压力和温度”与“延长燃烧过程”两方面。

若改造增压器,排气阀开启和关闭时刻需经计算和论证,然后再决定是否和如何改造排气凸轮。

若不改造排气凸轮,则不必特地改变排气阀关闭时刻,而仅按第2.1.2节的“排气阀提前开启”相应提前关闭。这样虽然延长燃烧过程,却也提高压缩比和压缩终点温度,大致可以持平。

### 3.3 改进燃油喷射

#### 3.3.1 调整供油定时

低负荷运行,压缩终点压力和温度低,滞燃期长。

为应对滞燃期延长,需适当加大喷油提前角,使燃烧始点前移,减少后燃,提高爆压,提高循环热效率。

例如前述常规客船B轮,可增加套筒上方垫片加大喷油提前角。但增加垫片后,应保证柱塞在“鸡心”凸轮基圆时柱塞上沿时不会盖住套筒上的回油孔;应保证各缸柱塞的有效行程相等(柱塞上缘盖住回油孔上沿时到柱塞行程上止点的距离),以求各缸供油均等。说明书要求,垫片每片0.5 mm,每增加一片可以增加爆压0.1 MPa,单缸垫片数不能多于14片。

#### 3.3.2 柱塞套筒直径

前面“1.1 影响燃烧诸因素分析”之“(3)燃油喷射”分析到,低转速运行,凸轮轴转速低,高压油泵柱塞运动速度慢,喷射压力降低,可能影响雾化质量;若主机负荷降低较多,不能维持针阀开启,则会出现针阀连续启闭、燃油多次喷射,且每次都需要有滞燃期,增长燃烧过程,后燃更严重。

改变这种情况,可有三种选择:

- 提高主机负荷,直到燃油多次喷射消失,并以此转速为主机常用转速;
- 改变燃油凸轮线形;
- 更换直径较大的高压油泵柱塞套筒偶件。

显然,更换直径较大的高压油泵柱塞套筒偶件是最佳选择。

### 3.4 气缸油注油率

如1.2节“气缸油注油率”分析,过多地加大气缸油注油量,主要原因是船员“担心缺油导致拉缸或咬缸事故被追究责任”,和“有人认为气缸油越多越好”。

相应对策,一是加强培训,纠正“越多越好”的错误认识;二是建立激励机制,追究缺油导致拉缸或咬缸事故责任,也追究缸套、活塞环和环槽超常磨损的责任,同时奖励节约气缸油。

特别强调,调整气缸油注油率,必须:

- 参考说明书;
- 多次逐步减少,做好记录,每次减少后检查(例如通过扫气箱)气缸和活塞环状况,一般以第一道环半干半湿、缸壁油膜均匀为准。

最好多次试验定出主机几档不同转速的注油量标准,张贴在机舱操纵室,供当值人员调整参考。

### 3.5 扫气箱清洁

扫气箱积炭流动性差,较难泄放排出,这就要求:

- 扫气箱油污排放,航行中坚持每班至少一次;
- 扫气箱清洗,每运转300小时左右一次;
- 泄放管路包括节流小孔,定期冲洗保持畅通。

## 4 应对措施评价

燃油价格,目前已经很高了,而且趋势还是上涨,

建议航运公司认清节约燃油费用的重大经济效益和社会效益,及时改变过度偏重收入运费只求维持船舶开航的现状,对长期低负荷运行主机采取相应措施,改善燃油燃烧提高能量利用率,防止故障减少维修费用,同时兼顾安全防止污染。

这样做的最大障碍是资金投入。其实,上述的各项主机长期低负荷运行应对措施中,大部分是只增加船员工作量基本不需要任何资金投入的维护和调整,只有更换高压油泵柱塞套筒偶件和改造增压器需要资金投入。

更换较大直径高压油泵柱塞套筒偶件,船员即可完成,只需要备件购置费,数额不大。况且高压油泵柱塞套筒偶件磨损超过极限总要更换,增大直径并不增加开支。

改造增压器,节省的燃油费用的“产出”远大于改造费用的“投入”。例如前述散货船 A 轮改造增压器后,每年按 14 航次计算可节约燃油 246 吨,工程总费用只有 17 万人民币,且更新增压器后主机转速从 89 r/min

提高到 110 r/min,船舶航速从 8 kn 提高到 11.5 kn,营运能力大幅提升。<sup>[4]</sup>

当然公司还应考虑:

船舶拟使用年限(报废或出售);

运输市场急需运力或不久将扩大运力需求;

公司财务状况,等。

一般认为,运输市场急需运力或不久(譬如两年)将急需运力,节省的燃油费用大(尤其油价高企且还在不断上涨)而改造支出不是很高,公司财务状况允许的情况,短期(譬如两年)不会报废或出售的船舶应该及早确定选用新型号的增压器还是改造增压器喷嘴环,并及早实施。

#### 参考文献

- 1 吴恒. 轮机长业务[M]. 大连海事大学出版社,2000
- 2 何文山. 船舶柴油机[M]. 人民交通出版社,1998
- 3 满一新. 轮机维护与修理[M]. 大连海事大学出版社,1999
- 4 牟安利. 更换增压器 改善老龄主机工况[J]. 航海技术,2005(4)

•  
•  
•