

使用维修

WinGD 6RT-Flex50D 主机使用合规 低硫燃油拉缸实例分析

郑庆国

(中波轮船股份公司, 上海 200002)

摘要: IMO 的全球船舶限硫新规已生效, 选择燃用合规低硫燃油来应对法规要求的船舶正面临着新型燃油带来的诸多挑战。针对某在航船舶首次使用合规低硫燃油时出现的主机严重拉缸问题, 经全面分析拉缸的可能原因, 最终确认系所用的某批次合规低硫燃油带入了一定的污染物, 致使燃油发火性能变差, 最终导致主机拉缸。为了保证船舶继续安全航行, 对该问题燃油的使用提出了相应方案。实际应用表明: 该方案行之有效, 为其它船舶安全使用合规低硫燃油提供了参考。

关键词: 船用主机; 低硫燃油; 拉缸; 智能燃烧控制 (ICC)

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)04-0052-06

Case Study on Cylinder Scuffing of a WinGD 6RT-Flex50D Engine Using IMO Compliant Low-Sulfur Fuel Oil

Zheng Qingguo

(Chinese-Polish Joint Stock Shipping Company, Shanghai 200002)

Abstract: The latest IMO sulfur limit has come into effect. Ships adopting low-sulfur fuels to meet the regulations of IMO sulfur oxides emissions face lots of challenges. The possible causes of serious cylinder scuffing on a WinGD 6RT-Flex50D marine main engine, which used low-sulfur fuel oil for the first time, was discussed comprehensively. It was found that the scuffing was caused by contaminants in the low-sulfur fuel oil, which led to bad ignition performance of the fuel. To ensure the safe navigation of the ship, the countermeasures are proposed with regard to this batch of fuel. The application results show that this solution is effective, providing reference for ships using IMO compliant low-sulfur fuel oil.

Key words: marine main engine; low-sulfur fuel oil; cylinder scuffing; intelligent combustion control

0 引言

国际海事组织 (IMO) 对全球航行船舶的硫氧化物排放限制新规已于 2020 年 1 月 1 日正式生效。法规要求所有全球航行船舶使用的燃油硫含量的质量分数不超过 0.50% (合规低硫燃油, 以下没有特别说明硫含量均以质量分数表达)^[1]。根据海上环境保护委员会 (MEPC) 认可的可供船舶选择的三种用于符合新法规要求的方案: 除液化天然气 (LNG) 动力船外, 没有加装废气脱硫系统

(Scrubber) 的船舶, 均须更换使用合规低硫燃油。于 2018 年 10 月 22 日至 26 日在英国伦敦召开的 IMO 海上环境保护委员会第 73 届会议, 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, 要求选择使用合规低硫燃油的船舶, 在 2020 年 1 月 1 日以前改用合规低硫燃油的同时, 于 2020 年 3 月 1 日前, 将船上剩余的不合规燃油合法移除^[2]。

在这样的背景下, 本文所述案例的船舶主机在

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-04-23

作者简介: 郑庆国 (1978—), 远洋轮机长, 主要研究方向为轮机管理, zhengqg@chipollbrok.com.cn。

首次更换使用合规低硫燃油时,主机所有的气缸在短短几天时间里出现不同程度的拉缸现象,其中3个缸套磨损超标,不得已更换。以下对此次故障进行分析并提出合理应对措施。

1 主机拉缸故障描述

该船于2020年1月1日之前已用尽了所有的高硫燃油,并按照规范要求及时更换使用合规低硫燃油。新航程为在中国北方某港口装满货,横跨太平洋,经巴拿马运河到美国东海岸某港口卸货。此时船舶主机已经改用合规低硫燃油两天。船即将远航,加上首次使用合规低硫燃油,开航前必须再次确认主机缸内情况。

该船是一条4年船龄的新船,装配的是WinGD 6RT-Flex50D 共轨电喷主机。船员在主机更换合规低硫燃油之前,检查过主机气缸内的情况,各缸均在正常使用状态。这次在使用两天合规低硫燃油后,打开主机扫气箱检查发现:6个缸的最上面一道活塞环均出现了轻度拉伤痕迹,活塞头上有

轻微红色结垢。轮机长将各缸的气缸油注油率从 $0.95 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 加大到 $1.05 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,并安排对主机扫气箱做彻底清洁。检查主机其它部位无异常现象后,船正常开航。

船离开港口,开始了长距离航行。船员加强了对主机运行工况的关注,发现:4、5、6缸的扫气温度和排烟温度不断升高,其中6缸最高。3天后的早晨,主机6缸扫气箱高温报警,显示 82°C ,高出正常时(55°C 左右)近 30°C 。停机,打开扫气箱发现:6缸活塞环已经严重磨损,缸套内壁也有明显拉缸痕迹,同时表面发红;4、5缸情况类似;1、2、3缸仅第一道活塞环有磨损痕迹;活塞头表面红色结垢现象加剧。

图1清晰记录了主机第6缸在三次检查中的状态:2019年12月19日使用高硫燃油时的正常状态;2020年1月4日使用两天合规低硫燃油后检查时的状态;2020年1月10日扫气箱高温报警时的状态。从中能清晰看出:缸套内表面的拉伤趋势、活塞环磨损情况以及活塞头表面结垢颜色变化。

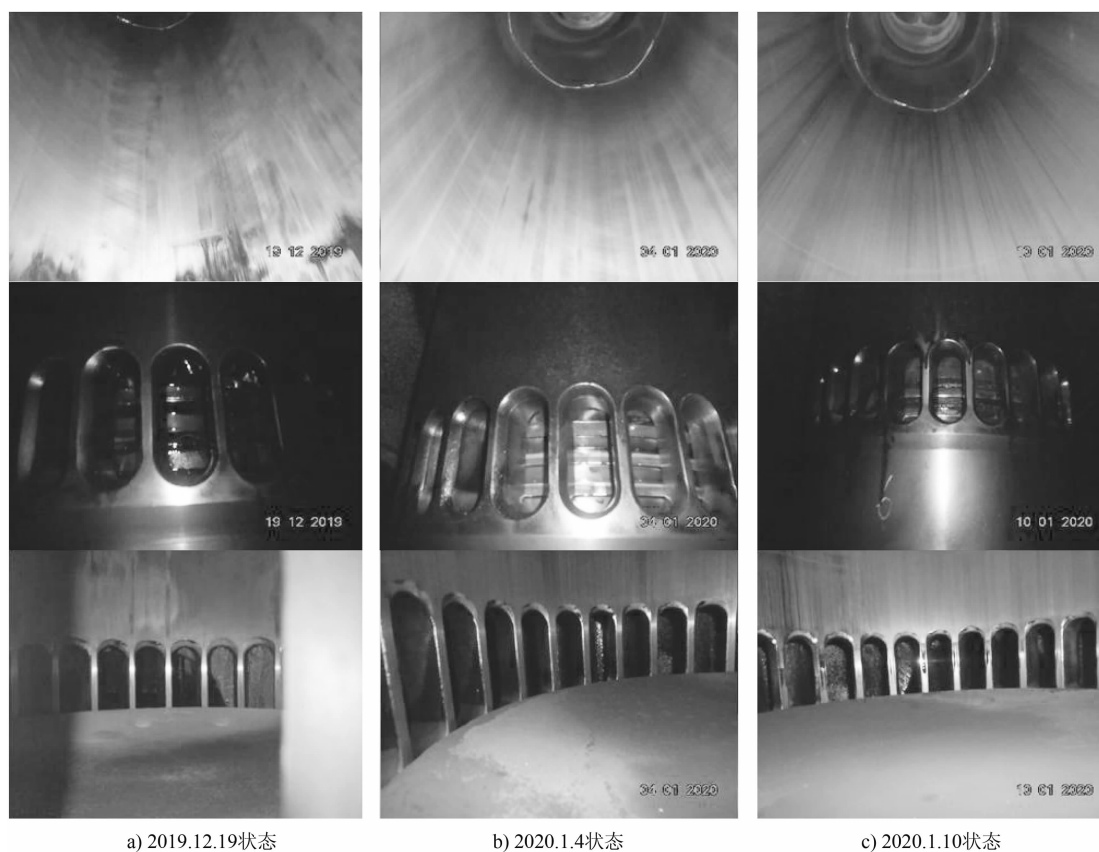


图1 第6缸缸内状态变化对比

2 柴油机拉缸原因分析

柴油机拉缸现象是指活塞环与气缸套,或活塞

(常为活塞裙部)与气缸套之间,两个相对运动的表面相互作用造成的表面损伤。根据表面拉伤的程度不同,可以将拉伤划分为划伤、拉缸和咬缸,统

称拉缸^[3]。造成拉缸的原因非常复杂,有设计制造、材料选配、相对间隙、安装精度、气缸润滑和燃烧不良等多种因素。拉缸损伤的机理大多是由于活塞环和缸套内壁之间的油膜遭到破坏,此时两个相对运动的表面突出部位发生金属接触,在高温下出现微小“熔着”现象,在不停地运动中“熔着”又被撕裂。在这一过程中,金属表面形成硬化层,当情况进一步恶化时,硬化层发生脱落,脱落的金属颗粒将成为磨料,加剧磨损。若是柴油机设计、制造、安装中的问题导致拉缸,将会在主机投入使用初期就暴露出来。而该主机已正常使用 4 年,此时发生拉缸应该是运行管理方面的原因导致,可从以下几个方面进行分析。

2.1 磨合不充分

当柴油机首次使用或更换新的缸套、活塞环时,均须完成良好的磨合才能正常使用,否则会有拉缸风险。每台船用柴油机的操作说明书中都有气缸磨合时间表:从磨合开始,调大气缸油注油率,低转速小负荷运行一定时间;再逐级调低气缸油注油率,提高转速,加大负荷,逐步完成磨合期。低负荷长时间磨合,或急于上高负荷运行都会引起拉缸。

此次主机出现拉缸时,各缸均已超出上次吊缸检修磨合期很长时间,可以排除磨合不充分的原因。

2.2 缸套冷却不良

柴油机运行中,由于冷却水的原因,造成气缸套冷却不良,缸壁内表面高温,气缸油油膜被破坏,将导致拉缸。而缸套水冷却系统中,冷却水泵排出压力低,供水不足或中断;缸套冷却水腔锈蚀或脏污;水中含有气泡,积存在缸套冷却水腔中不能排除;低温冷却水系统出现问题等都将引起缸套冷却水温度升高。

检查该主机运行工况记录,主机缸套水冷却系统一直处于正常状态,泵的排出压力正常,各缸缸套冷却水出口温度均保持在设定值 85℃。可以排除缸套冷却不良的原因。

2.3 活塞环断裂

柴油机活塞环断裂,碎片落入活塞和缸套之间,将引起拉缸甚至咬缸。断裂后的活塞环不能有效密封高压燃气,泄漏的高温燃气将破坏缸套内壁的油膜,导致拉缸。活塞环在环槽中的搭口间隙、天地间隙过小;环槽积炭,导致活塞环粘住,失去弹性;由于磨损严重使得搭口间隙太大和活塞环变薄等原因都有可能造成活塞环断裂,最终导致

拉缸。

本案例中,磨损较为严重的 4、5、6 缸,虽然没有活塞环断裂,但是环槽积炭比较严重,第一道活塞环快速磨损,促使了拉缸的发生。

2.4 气缸润滑不良

活塞环和缸套内壁间的润滑油膜遭破坏,或润滑油量不足、断供,不能形成完整油膜,是导致拉缸的直接原因。导致气缸油油膜遭破坏的原因有很多,包括上面提到缸套冷却不良和活塞环断裂,还有缸内燃烧不良等。而气缸油油量不足或断供则属于气缸油系统的问题,可能的原因有气缸油系统管路、阀件、滤器脏堵;气缸油供油单元故障;气缸油进机前管路泄漏及注油器堵塞等。

2.5 缸内燃烧不良

燃油在气缸内燃烧不充分会产生燃烧残渣,形成细小的碳化颗粒。这些颗粒附着在缸套内壁的油膜上,形成类似磨料磨损。在柴油机扫气系统或排烟系统脏污情况下,气缸内燃烧循环中的新鲜空气量不足,将会导致燃烧不充分。

柴油机出现后燃会导致排烟温度升高。在高负荷运行时,活塞下行速度较快,缸套内壁上部暴露在滞后燃烧的高温废气中,气缸油油膜遭破坏,将导致拉缸。而油头喷油定时滞后;油头密封不好,滴油;燃油中含有发火性能较差的芳香烃等因素均会导致后燃现象。

3 故障排查及解决

停船位置在距离日本东京 400 海里的太平洋上,此时海上风平浪静。轮机长向公司汇报了情况并申请岸基支持。公司同意立即进行吊缸,先完成 6 缸的拆检。与此同时,公司技术人员开始全方位分析主机拉缸原因,指导船员逐项排除可能的故障点,寻找科学、合理的解决方案。

3.1 故障原因排查

(1) 吊缸检修历史。4、5、6 缸运行时间距离上次吊缸检修分别是 1 683、1 294、3 594 h;吊缸均只更换活塞环,没有更换缸套;缸套测量报告显示当时的磨损很小,属于正常范围。在这次换用合规低硫燃油前,各缸运转参数基本一致。可以排除缸套磨合不充分和缺少吊缸检修的管理因素。

(2) 冷却水系统。低温冷却水系统运转正常,设定点在 32℃,其冷却的缸套水冷却系统运转正常,泵出口压力没有变化,各缸缸头冷却水出口温度前期均在设定值 85℃;近几天 4、5、6 号缸冷却水温度偏高,达到 89℃。缸套吊出后检查冷却

水腔，脏污程度在正常范围内，可以排除缸套冷却不良的原因。

(3) 活塞环。吊出来的活塞各活塞环在环槽中没有被粘住现象。

(4) 气缸油系统。管路上的阀开关状态正常，滤器拆检正常，气缸油注油模块后的管路没有泄漏。检查各缸 CLU4 气缸油注油单元上的储压罐压力，正常。手动泵气缸油，从扫气口检查，均可以看到足量气缸油进入气缸。吊缸时拆检气缸油注油器，没有发现异常现象。表明气缸油系统正常。

(5) 主机扫气、排气系统。主机空冷器在 4 年使用期内，虽然没有整体拆装清洗，但均定期按照说明书中的清洗方法正常保养，最近一次间隔为 20 天。扫气箱清洁间隔时间正常，出现拉缸时，扫气箱内的脏污程度也属正常范围。主机涡轮在一个月前由原厂家服务工程师上船拆检。废气锅炉使用效果正常，吹灰保养每天都做。表明扫气、排气系统不是导致这次拉缸的原因。

(6) 缸内燃烧情况。各缸油头使用时间都在检修周期内，为了排除油头密封不良、滴漏造成的影响，吊缸期间对 4、5、6 缸油头更换新备件。拆下来的油头在试验台上做泵压检查，没有异常现象。因此是否是缸内燃烧不良导致拉缸，无法直接作出判断。

由于出现拉缸现象的时间距更换合规低硫燃油的时间很短，燃油品质导致拉缸的可能性很大。虽然在加装燃油时，公司已将油样送相关单位进行了化验，化验报告显示各项主要指标都在正常范围之中，但有必要对燃油品质做进一步的深度化验。

3.2 岸基应急支持

公司的船舶管理部门为确保船舶动力能够及时恢复，并保证船舶的长航线安全航行，根据该船舶的具体情况，做出了一系列岸基应急支持。

(1) 补充必要的备件。6 号缸吊缸时缸套的测量数据显示缸套磨损量已经超出极限，同时，从扫气口检查 4、5 缸的磨损情况，基本和 6 缸一样。必须为船舶紧急补充新缸套。根据船位、航线和物流情况，安排船绕航东京湾接收备件。

(2) 添加燃油。当时船上仅剩余一个空燃油舱，在接收备件的同时，补充 400 t 合规低硫燃油。

(3) 取燃油油样做深度化验。在接收备件同时，将油样送岸。

3.3 吊缸修复主机

6 号缸活塞吊出后，测量缸套内径发现：缸套

已磨损超标，必须更换新缸套。在接收备件前后，对 4、5 缸也进行了吊缸，测量缸套内径确认：4、5 缸缸套也已磨损超标，遂也更换。1、2、3 号缸磨损没有加剧，在加大气缸油注油率后，活塞环表面光洁度恢复，可以继续使用。4、5、6 号缸缸套的测量数据见表 1（其中 A、B……I 分别表示缸套内到缸套顶部边缘不同距离的同心圆面）。

表 1 缸套测量数据

缸号	4		5		6	
吊缸时总运转时间/h	21 685		21 710		21 644	
距离上次吊缸间隔时间/h	1 683		1 309		3 553	
测量方向	前后	左右	前后	左右	前后	左右
A (95) /mm	0.30	0.40	0.31	0.23	0.08	0.14
B (130) /mm	1.70	1.93	1.17	0.88	1.05	0.95
C (180) /mm	2.74	2.54	2.37	1.71	2.23	2.16
D (230) /mm	3.41	3.18	3.44	2.66	2.65	2.48
E (455) /mm	1.97	1.46	2.03	1.93	3.26	3.18
F (685) /mm	1.50	1.50	1.68	1.55	2.55	1.75
G (910) /mm	0.91	0.88	1.11	1.04	1.36	1.41
H (1 360) /mm	0.64	0.57	0.45	0.66	1.12	1.06
I (1 810) /mm	0.24	0.19	0.23	0.18	0.95	0.85

3.4 燃油深度化验结果

燃油深度化验结果显示：燃油中含有对燃烧不利的成分，包括间苯二酚（resorcinol）、羰基（carbonyl）、脂肪酸（fatty acids）^[4]。而在常规化验报告中没有相关指标的数据。

间苯二酚含有燃烧发火性能非常差的苯（C₆H₆），其属于芳香烃。带有苯环的环状分子结构受热后很难破裂，自燃温度高，在燃烧过程中会产生后燃，并容易出现燃烧不完全现象，导致积炭。

羰基是由碳和氧两种原子通过双键连接而成的有机官能团（C=O），是醛、酮、羧酸、羧酸衍生物等官能团的组成部分。

脂肪酸是由碳、氢、氧三种元素组成的一类化合物。正常情况下，燃油中不应该含有脂肪酸。脂肪酸的存在对燃油系统的金属偶件，及对燃烧室都会造成不同程度的影响。

由此，虽然不能说这批合规低硫燃油不符合标准，但是可以判断：这批燃油在加工、调和、存储、驳运的某一个环节中被带入了一定的污染物。燃油发火性能不好，产生后燃，使得燃烧室温度升高；在活塞下行过程中，没有完全燃烧的油雾继续燃烧，高温燃气破坏了缸套内上部的油膜；加上脂肪酸的存在，导致积炭并吸附在缸套内壁表面，最终导致快速而严重的拉缸。

4 继续使用问题燃油的应对方案

船舶还须继续安全航行, 船上的燃油除了这批含污染物的问题燃油, 还有在日本新加的 400 t 低硫燃油和 200 t 轻油, 总共 600 t 的安全燃料不足以续航到巴拿马, 只能想办法使用问题燃油。船在东京湾添加 400 t 低硫燃油后, 主机就更换使用此批低硫燃油。须要说明的是, 主机除了 4、5、6 缸换了新缸套, 其它系统和部件均和以前相同。连续使用此批低硫燃油几天后, 停车检查缸内情况, 没有发现任何磨损和异常现象。这就能进一步确认是问题燃油中的污染成分导致主机拉缸。

明确了问题燃油中有害物质的成分, 就可以寻求针对性的解决办法。减少后燃, 优化燃烧, 降低气缸内温度成为使用这批问题燃油的指导方向。

4.1 调整喷油定时

在喷油角允许范围内将喷油定时提前, 可减小后燃的影响。这台主机有 6 个缸, 不同的缸工况不一样, 具体怎样调, 调多少是关键。WinGD 6RT-Flex50D 主机是共轨电喷二冲程柴油机, 没有凸轮轴, 燃油喷油定时是靠喷油电磁阀打开时间点来控制的。

在主机控制系统 WECS-9520 中, 有一个名为智能燃烧控制 (Intelligent Combustion Control system, ICC) 的功能, 开启该功能时, 主机控制系统可以在设定范围内自动调整每缸的喷油定时和排气阀开关时间, 使得单缸最高燃烧压力保持在设定值; 同时还可以在各缸之间作平衡, 使得各缸的压缩压力和最高燃烧压力趋近于一致^[5]。当燃油由于燃烧性能不好, 出现后燃, 最高燃烧压力降低, 此时, 系统会自动调整, 将喷油定时提前以提高最高燃烧压力; 同时自动调整排气阀开关时间与之匹配。

针对此项功能, 安排船上进行测试。在使用在日本加装的 400 t 低硫燃油时, ICC 功能在开启和关闭状态下, 喷油定时和排气阀开关时间没有明显变化。而当更换使用问题燃油后, 开启 ICC 功能后发现: 喷油定时和排气阀开关时间发生了较大变化。如图 2 所示, 喷油定时改变最大的提前了 1.7°; 各缸的压缩压力 (图 3) 和最高燃烧压力 (图 4) 也明显调整到基本一致。

可以明确: 使用问题燃油时, ICC 功能发挥作用, 自动调整各缸的最高燃烧压力, 从而避免了燃烧性能差的燃油在缸内的不良燃烧; 比手动单缸调整喷油定时要合理、科学、可靠。ICC 功能对该问题燃油的继续使用有积极作用。



图 2 喷油定时和排气阀开关时间比较

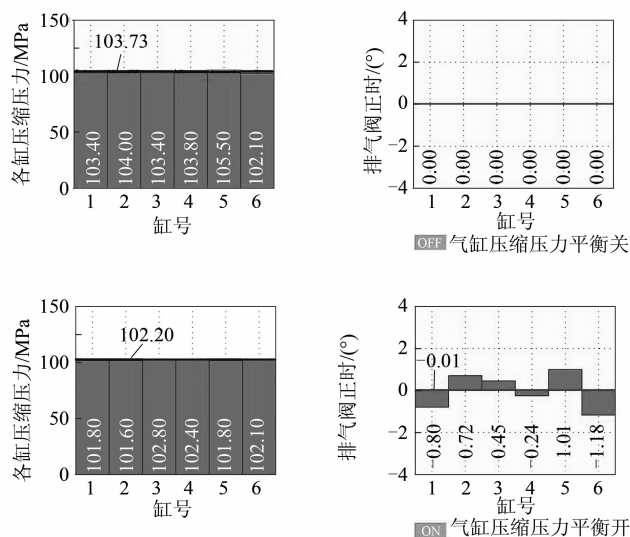


图 3 各缸压缩压力比较

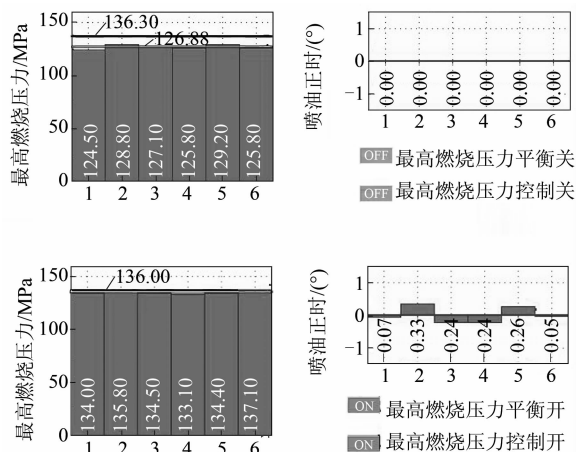


图 4 各缸最高燃烧压力比较

4.2 降低主机扫气温度, 确保换气质量良好

改善燃烧质量的另一个重要因素是确保换气质量良好, 也即保持增压器和空冷器在良好的工况下工作非常重要。基于船在太平洋上长航线航行, 能够做的就是调低扫气温度, 提高新鲜空气的密度, 使燃油燃烧时有足够的氧气, 从而优化燃烧。具体操作: 将冷却主机空冷器的低温水设定由 32 °C

调整到 30 ℃。由于海水温度在 25 ℃ 左右, 所以大幅度调低低温水温度不现实。

4.3 调低主机缸套水温度, 一定程度上降低气缸内壁温度

该主机说明书中缸套冷却水出口温度设定值为 85 ~ 95 ℃^[6], 比之前同品牌柴油机的推荐值高一些。以前船舶使用的燃油含硫量比较高, 为了避免硫化物在气缸套内发生低温腐蚀, 在设计上提高了缸套冷却水的设定温度值。而如今船舶使用的燃油含硫量已经非常低, 低温腐蚀问题可以不做重点考虑, 适当调低缸套冷却水温度, 能够改善缸套内壁的润滑效果。所以将缸套冷却水出口温度设定值由原来的 85 ℃ 调低到 80 ℃。

4.4 改用高碱值气缸油

发火性能不好的燃油燃烧不充分, 容易产生灰分, 在活塞环槽中积炭。当使用低碱值 TBN40 气缸油时, 由于其清洁、分散能力较差, 燃烧产生的灰分不能得到及时清除, 将会影响气缸表面润滑。而高碱值气缸油的清洁、分散能力较好, 因此在使用问题燃油时, 换用高碱值气缸油。更换使用 7 天后, 停车检查主机各缸情况, 发现: 积炭情况明显改善。如图 5 为 1 号缸在使用不同碱值气缸油前后, 活塞环的积炭情况对比。

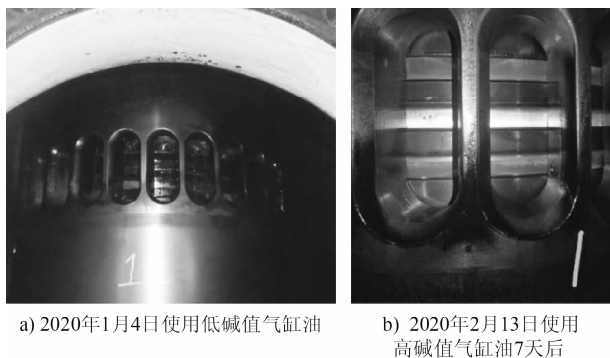


图5 使用不同碱值气缸油 1 号缸活塞环积炭情况对比

4.5 换新油头, 确保燃油雾化质量

油头是柴油机喷油雾化的重要元件, 其雾化效果直接影响燃烧性能。而油头的雾化效果取决于其

质量、寿命和调整手法等诸多因素。为避免油头因素的影响, 将所有缸的油头全部换新。换新前在试验台上做测试, 确认雾化效果。

5 结语

通过有针对性地采取一系列措施, 继续使用这批问题燃油没有再出现类似的拉缸现象。实践证明, 通过优化主机燃烧工况来应对发火性能较差的燃油是行之有效的办法。加强对主机相关部件的维修保养, 如及时拆检主机增压器、拆洗空冷器等也是非常重要的措施。

随着 2020 年全球限硫法规的生效, 合规低硫燃油开始全面供应。而油企在生产、调和合规低硫燃油时, 不可避免地会带入一些污染物^[7]。因此, 船舶在使用新的合规低硫燃油时, 对其物理特性和燃烧特性须不断关注和总结。由于不同港口加装的合规低硫燃油, 其组分和物理特性存在较大差异, 在使用中, 科学存储、加强净化、优化燃烧等非常重要, 以避免燃油对机器设备造成损伤, 确保船舶安全航行。

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 [R]. 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] 杜荣铭. 船舶柴油机 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [4] Lloyd's Register. FOBAS fuel quality investigation report [EB/DK]. 2020.
- [5] Wartsila. 2-stroke engine operator flex view manual [EB/DK]. 2012.
- [6] Wartsila. RT-flex50-D 2-stroke engine operating manual [EB/DK]. 2012.
- [7] ISO. International Standard. Petroleum products-fuels (class F) -specifications of marine fuels. Reference number, ISO 8217: 2017 [S]. 2017.