

## 结构与可靠性

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2022.01.006

## 低速柴油机气缸套和活塞环运行与维护

马帅, 彭卓荣, 吴春华

(玉柴船舶动力股份有限公司, 珠海 519100)

**摘要:** 针对某轮低速柴油机出现的气缸套/活塞环异常磨损故障, 结合气缸套结构特点、运行要求等对故障原因进行排查分析。结果表明: 此次缸套/活塞环异常磨损的主要原因为该轮使用了碱值严重不达标的劣质气缸润滑油; 次要原因是空冷器的冷凝水泄放不畅。在此基础上提出低速柴油机各阶段运行维护注意事项。

**关键词:** 低速柴油机; 气缸套; 异常磨损; 气缸润滑油

**中图分类号:** TK428 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-4357(2022)01-0024-06

## Operation and Maintenance of Cylinder Liner and Piston Ring of Low Speed Diesel Engine

MA Shuai, PENG Zhuorong, WU Chunhua

(Yuchai Marine Power Co., Ltd., Zhuhai 519100, China)

**Abstract:** Aiming at the abnormal wear of cylinder liner and piston ring in a marine low speed diesel engine, combined with the structural characteristics and operation requirements of cylinder liner, the fault causes were investigated and analyzed. The results show that: The main reason of the abnormal wear of cylinder liner and piston ring was the use of inferior cylinder lube oil with alkali value much higher than the standard; The secondary cause was that the condensate of the air cooler was not discharged smoothly. On this basis, the key points during each stage of operation and maintenance of low speed diesel engines are put forward.

**Key words:** low speed diesel engine; cylinder liner; abnormal wear; cylinder lube oil

## 0 引言

装备某型低速柴油机的某集装箱轮投入海上营运仅一年多(约运行8 000 h)就发生了多只缸套运行表面严重磨损的情况。在正常情况下, 缸套的运行寿命约为90 000 h。经主机厂售后服务工程师现场调查和技术分析, 认定为缸套/活塞环异常腐蚀磨损。

该型柴油机基本技术参数如表1所示。

表1 柴油机基本技术参数

项目	参数
型号	6RT-flex35
气缸直径/mm	350
气缸数	6
最大持续功率/kW@ (r·min <sup>-1</sup> )	5 220 @ 167
持续运行功率/kW@ (r·min <sup>-1</sup> )	4 176 @155
平均有效压力/MPa	2.1

本文针对该低速柴油机缸套/活塞异常磨损现象，结合缸套/活塞环结构特点、运行要求等，分析该机缸套/活塞环异常磨损的原因，并提出低速柴油机在各阶段的操作和运行维护措施，以确保缸套/活塞环的正常运行及柴油机的安全性。

## 1 故障原因排查及分析

### 1.1 现场检查和数据测量

(1) 吊缸检查3#缸套状态，发现3#缸套上部磨损严重、存在大量黑斑，如图1所示。缸套测量数据如表2所示。



图1 3#缸套磨损情况

表2 3#缸套内径测量数据

测量点	距缸套上平面的距离/mm	FE-DE <sup>①</sup> /mm	FS-EHS <sup>②</sup> /mm
1	72	353.07	352.82
2	116	351.92	351.59
3	185	350.78	350.58
4	383	350.14	350.16
5	465	350.08	350.10
6	725	350.14	350.13
7	1 025	350.17	350.21
8	1 325	350.22	350.29

注：

①FE-DE表示自由端（free end, FE）-驱动端（drive end, DE）方向。

②FS-EHS表示燃油侧（fuel side, FS）-排气侧（exhaust side, EHS）方向。

根据该型柴油机的规范，缸套磨损后最大允许内径为352.50 mm。由表2可见测量点1的数据已经超差。

(2) 检查辅助系统和管路，发现空冷器泄放管的阀处于半打开状态；进一步检查发现阀芯锈蚀，卡在1/3开度位置。如图2所示。



图2 泄放阀部分打开，阀芯锈蚀卡死

(3) 检查主机航行日志：主机日常巡航转速为140 r/min，功率约为50%最大持续功率，缸套水出口温度为89℃。

(4) 对船上的燃油和气缸润滑油取样，油样送专业机构检验。

(5) 鉴于缸套磨损严重，船东更换新的缸套和活塞环。柴油机制造厂要求船东在更换完新缸套后注意新缸套的磨合，在磨合过程中降低单缸功率，提高单缸注油率。

### 1.2 故障原因分析

#### 1.2.1 缸套磨损状态和磨损形式分析

磨损后的缸套内径数据及磨损情况分析如图3所示。从缸套各个位置的磨损数据可以看出：缸套上部磨损很大，下部磨损很小，表明缸套异常磨损发生在上部，缸套下部磨损正常。据此可以判断此次缸套磨损为腐蚀性磨损。

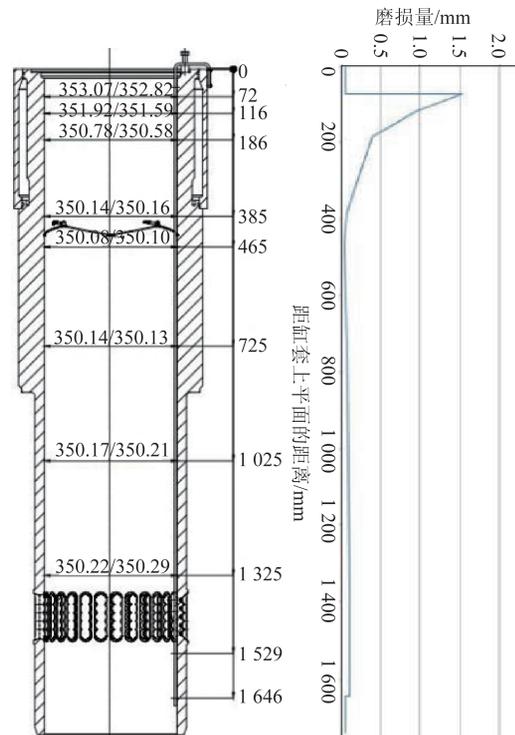


图3 缸套内径及磨损情况

腐蚀性磨损形成的原因是：燃油中的硫在燃烧过程中形成硫化物，硫化物与水汽反应形成硫酸，如气缸润滑油中的碱未能及时将硫酸中和，硫酸将对缸套形成酸性腐蚀<sup>[1]</sup>。因此腐蚀性磨损的根本原因是：(1) 气缸润滑油选用不恰当，未能完全中和生成的硫酸。(2) 缸套发生冷腐蚀。冷腐蚀程度主要由扫气空气的水汽含量和缸壁温度等因素决定。

### 1.2.2 缸套异常磨损原因分析

(1) 气缸润滑油碱值 (base number, BN) 和使用的燃油硫质量分数不匹配, 相关指标不符合要求。

从该轮取样的DCA5070气缸润滑油和120#燃料油的化学分析检测结果见表3, 表4, 可发现气缸润滑油及燃料油均存在质量问题。

表3 该轮DCA5070气缸润滑油化学分析检测结果

项目	检测结果
外观	棕色透明
运动黏度 (100 °C) / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	19.39
水分质量分数/%	<0.05
开口闪点/°C	226.0
碱值 / (mg·g <sup>-1</sup> ) <sup>①</sup>	1.09
倾点/°C	-15
硫酸盐灰分质量分数/%	0.17
正戊烷不溶物质量分数/%	0.09

注: ①碱值以在规定的条件下滴定时, 中和1g试样中全部碱性组分所需高氯酸的量的当量氢氧化钾 (KOH) 毫克数计。

表4 该轮120#燃料油化学分析检测结果

项目	参考值	检测结果
外观		黑色
密度 (15 °C) / (kg·m <sup>-3</sup> )	<991.0	985.9
运动黏度 (50 °C) / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	<120.0	130.0
闭口闪点/°C	>60	>70
倾点/°C	<30	-3
残碳质量分数/%	<15.00	2.53
灰分质量分数/%	<0.070	0.465
水分质量分数/%	<0.50	39.62
硫质量分数/%		1.53
机械杂质质量分数/%	<0.10	0.64
酸值 / (mg·g <sup>-1</sup> ) <sup>①</sup>	<2.568	8.780

注: ①酸值以中和1g试样所需的氢氧化钾 (KOH) 毫克数计。

气缸润滑油问题如下:

①气缸润滑油碱值严重偏低。实测值仅为1.09 mg/g, 按照牌号该种气缸油总碱值应不小于68 mg/g。

②硫酸盐灰分不达标。硫酸盐灰分质量分数实测值为0.17%, 而标准值应不小于8.0%。

可见气缸油中和作用失效, 缸套上部遭酸性物质腐蚀, 造成气缸套异常磨损。

燃料油问题如下:

①燃料油水分质量分数严重超标, 实测值为39.62%, 标准值为不大于0.50%。

②酸值偏高, 实测值为8.78 mg/g, 标准值应不大于2.568 mg/g。

③运动黏度偏高, 实测值为130 mm<sup>2</sup>/s, 标准

值应不大于120 mm<sup>2</sup>/s。

④灰分偏高, 灰分质量分数实测值为0.465%, 标准值应不大于0.07%。

如长期使用这种燃料油将造成燃油泵、喷油器、油嘴、压力控制阀等燃油系统部件严重损伤和磨损<sup>[2]</sup>。

(2) 扫气空气水汽含量高, 加剧缸套冷腐蚀<sup>[2]</sup>。

从该轮的轮机日志得知, 该轮正常巡航时柴油机转速为140 r/min, 负荷约为50%最大持续功率, 属长期低负荷运行; 缸套水出口温度为89 °C, 属正常范围。但在现场检查时发现: 空冷器冷凝水泄放管阀门仅开1/3, 如此容易造成扫气空气中水汽含量增大。水汽与燃烧形成的硫化物反应形成硫酸, 而缸套上部为高压和高温环境, 若缸壁温度低于硫酸的露点, 硫酸将会冷凝附着在缸套壁上, 如果气缸润滑油中的碱无法中和掉附着在缸套壁上的硫酸, 残余硫酸将腐蚀缸套, 加速缸套的磨损。

综上, 此次缸套和活塞环异常磨损的主要原因是该轮使用了碱值严重不达标的劣质气缸润滑油, 空冷器冷凝水泄放不畅是次要原因。

## 2 二冲程低速柴油机气缸套和活塞环运行维护

### 2.1 气缸套/活塞环维护注意事项

活塞在气缸套中往复运动会造成一定的磨损, 气缸套运行表面因磨损形成的凸起台阶一般在活塞触及不到的气缸顶部和下部区域<sup>[2]</sup>。因为磨损的缘故, 气缸套内表面的滑油槽宽度会减小; 此外, 扫气口边缘的隅角半径也会变得更小、更尖。因此二冲程低速柴油机气缸套、活塞和活塞环的维护保养以及大修期间应注意以下事项:

(1) 去除磨损凸起的台阶。磨平气缸套因磨损而凸起的台阶时应极其小心, 不要损坏上止点至下止点间活塞和活塞环行程覆盖区域的缸套运行表面。必须按照柴油机使用说明书的要求对磨损凸起台阶进行加工 (图4)。柴油机厂家推荐使用的修磨设备如图4中工具号: 94299<sup>[1]</sup>。

(2) 修整气缸套内侧表面的滑油槽。如果气缸套滑油槽的宽度因磨损已减小至小于1.5 mm (新槽宽度为2.5 mm), 须将其修整至原来的宽度并用油石将边缘稍微倒圆。

(3) 修整气缸套扫气口部位的棱边锐角。修整气缸套扫气口部位的棱边使扫气口部位保持原形状。修整、加工时必须极其小心, 不要损坏气

缸套内侧的运行表面。气缸套扫气口的倒角修整应该按照维修保养手册的规定进行<sup>[1]</sup>。

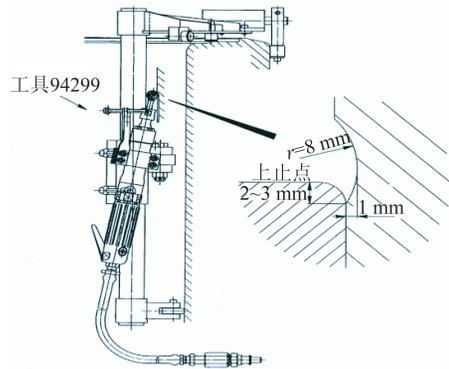


图4 气缸套内侧表面磨损台阶修磨示意图

(4) 气缸套维修保养结束后必须彻底清洁缸套内部表面，清除研磨时产生的金属磨屑或颗粒，特别是在滑油槽修整过程中产生的金属磨屑或颗粒<sup>[3]</sup>。

(5) 开启气缸润滑油泵直到润滑油从所有的润滑口流出，冲出残留的金属磨屑或颗粒。仔细清除可能通过扫气口进入扫气空间的金属磨屑或废弃颗粒。

(6) 活塞环必须按“顶部(top)”朝上记号安装，并检查活塞环在槽中的自由转动情况。各道活塞环开口应按180°错开，也就是相邻环的开口按向前与向后位置对准。

(7) 对活塞环槽与活塞环的要求：活塞环槽，包括槽内侧部的圆弧半径必须仔细清洁。如果发现曾有活塞环断裂情况应特别注意，很可能活塞环槽脊已损坏。损坏的槽脊(镀铬层)及活塞头部外侧表面也必须进行修整，最后用油石磨光<sup>[3]</sup>。

(8) 活塞环与环槽上表面间的垂直安装间隙，应用厚薄规(随机工具号：94122)测量。测量点处活塞环应垂直地推入活塞环槽中。如果下槽脊表面磨损测得的垂直间隙将是锥形的(测量点外侧值高于内侧值)，则必须记录较高的值。如果测得的数值超过维修保养手册规定的间隙，应该修整活塞头。应注意顶环的及时维护、更换，如对其质量存疑，应与质量合格的新活塞环作比较，尤其是开口间隙。

(9) 活塞环端部由于磨损呈尖锐棱边状，如果仍在允许的磨损范围内，则可不进行倒角，倒圆至0.5 mm的圆弧半径即可。一般这种活塞环还是安装在以前同一个环槽位置上为好。

(10) 如果活塞环只是稍微磨损还是可以装机(安装在下面几道环槽)使用的，但是其搭口间隙在

清洁的气缸套无磨损区域内测量时应不大于10 mm。

须注意：柴油机厂家不推荐对使用过的重新安装的活塞环端部做倒角，因为这有可能导致燃气窜缸、窜气<sup>[3]</sup>。

## 2.2 更换气缸套和活塞环后的磨合与初期运行注意事项

二冲程低速柴油机更换气缸套和活塞环后的维修保养、磨合与海上初期营运的过程控制非常重要，应关注并重视以下事项：

(1) 更换气缸套和活塞环后首次启动柴油机前的注意事项

①在活塞下方空间检查活塞环和气缸套内壁面的状况，如柴油机有一段时间没有启动，应检查是否有水凝结或泄漏迹象。

②检查扫气箱是否有污物，如来自焊接、喷砂等的金属磨屑或废弃颗粒，特别是新造船舶和进坞后。

③检查汽水分离器是否安装牢固，是否处于清洁状态，在汽水分离器侧是否有水汽旁通。

④检查扫气箱放泄水管是否开启，并检查其高液位报警器功能是否正常。

⑤暖缸，预热柴油机，要求气缸冷却水进口温度不低于60~90℃。

⑥按作业指导书及说明书关于最大持续功率工况的要求，将各单元气缸润滑油注油器的供油率设定值增至最大，为 $[(1.4\sim 1.6) \pm 0.1] \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

⑦对于多层润滑式气缸套，气缸润滑油的分配应按如下要求调节：在磨合开始时上排注油枪50%，下排注油枪50%。

⑧转动柴油机盘车机使柴油机曲轴至少转过1转，同时，启动气缸注油器为气缸套内侧表面滑油槽做预润滑。

⑨如气缸预润滑或过后润滑时间过长，会有多余的气缸润滑油泵入气缸燃烧室并流入活塞下部空间。其原因是当柴油机处于停机状态时，气缸注油器液压供油泵内的止回阀泄漏，或是预润滑阀发生故障或调整不当<sup>[3]</sup>。须注意的是：当柴油机首次启动时，这些多余的气缸润滑油将会被带入排气总管内，可能发生着火爆燃。爆燃也可能发生在活塞下部空间内，即所谓的“柴油机扫气系统及排气总管内的爆燃”。这些多余的气缸油还会造成活塞和活塞环槽不正常积炭，如任其发展将会造成活塞环在环槽内运动受阻，进而引发活塞环断裂，对此应高度重视。

(2) 更换气缸套和活塞环后初期磨合过程控制注意事项

① 磨合可以在燃用重质燃料油的情况下进行，但应对燃油做滤清和预热处理。

② 按柴油机维护保养说明书、作业指导书的规定，循序渐进升高柴油机负荷。

③ 经常检查气缸套冷却水温度波动情况（柴油机稳定运行时，温度波动应小于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）及温度值。

④ 关闭可变喷油定时。

⑤ 燃油质量设定应调节至“0”位。

⑥ 新气缸套和活塞环磨合期间，为了不使新更换的缸套或活塞环过载，可以通过降低单缸负荷的方式来保证气缸套和活塞环的磨合，通常可以将单缸负荷降低至80%。

(3) 正常运行期间气缸润滑油供油率的评估与设定

传统机型（例如RTA型）允许采用传统气缸注油器，通常推荐磨合期间气缸润滑油供给率为： $1.4\sim 1.6\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。在推荐的润滑油供给率下运行1000h后，在缸套、活塞环磨合效果良好的情况下，可考虑适当降低实际润滑油供给率。降低过程应循序渐进，例如，每运行500~1000h降低供给率 $0.1\sim 0.2\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。通常，在磨合充分或运行良好的情况下，气缸润滑油供给率的最终推荐值为 $0.80\sim 0.60\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ <sup>[1]</sup>。其间每间隔一定时间，通过扫气口观察气缸套和活塞环的工作表面，及时评估工作面的实际状况。

在正常情况下，新型RT-flex柴油机采用新型气缸注油器系统，推荐的润滑油供给率设定与调整技术条件如表5所示。图5为新缸套活塞环磨合期间气缸润滑油供给率调整曲线<sup>[1]</sup>。

表5 RT-flex机气缸润滑油供给率设定与调整技术条件

气缸润滑油供给率/ ( $\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	调整技术条件
1.20	大约运行15h，在检查缸套和活塞环状态后
1.00	运行50h，在检查缸套和活塞环状态后
0.90	运行200h，在检查缸套和活塞环状态后
0.80	运行1000h，在检查缸套和活塞环状态后
0.70	磨合或良好运行情况下

基于低速柴油机运行与服务经验，对于一台经充分、良好磨合的柴油机，气缸润滑油供给率完全可以进一步降至低于目前发布的推荐数值。同时，柴油机厂家还推荐：通过对活塞下部润

油取样检测，判断缸套和活塞环的运行情况可作为气缸润滑油供给率是否匹配的依据。取样位置和方法如图6所示。取样时应先关闭泄放阀，然后打开取样阀取样。

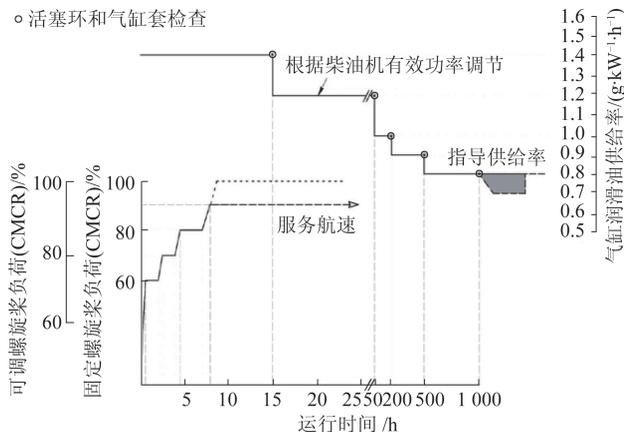
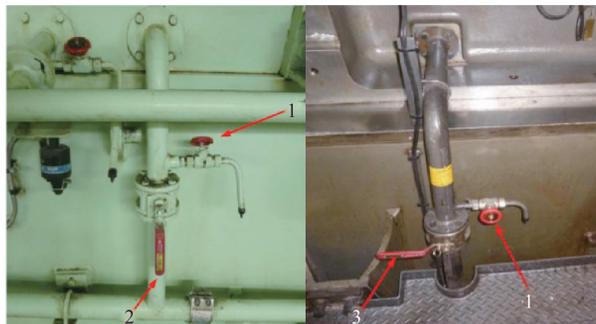


图5 新缸套活塞环磨合期间气缸润滑油供给率调整曲线



1-取样阀；2-正常运行时泄放阀位置；3-取样时泄放阀的位置

图6 活塞下部取样示意图

取样检测的残留碱值和含铁量指标是判断缸套和活塞环运行状态的重要依据。检测结果如图7所示，通常情况下，活塞下部滑油残留碱值为25~50mg/g，含铁量在200mg/kg以下，此时的气缸润滑油供给率较为合适，缸套和活塞环运行情况良好。如活塞下部润滑油残留碱值和含铁量不在安全范围内，则须进一步检查缸套和活塞环的运行情况，并综合残留碱值和含铁量来调整气缸润滑油供给率或更换合适碱值的气缸润滑油。

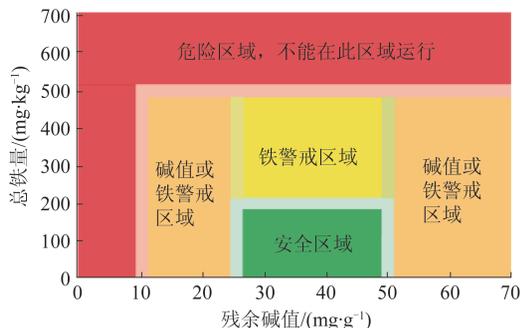


图7 活塞下部取样检测安全区域

### 2.3 气缸润滑油油品

燃用硫含量高的燃油（渣油）时应选用去垢力强的高碱值气缸润滑油。当前，二冲程柴油机功率输出设计越来越高，推荐使用相匹配的高质量气缸润滑油以满足柴油机海上实航运行要求。

基于燃料硫质量分数推荐使用气缸润滑油如下：

(1) 燃油质量分数为0.1%以下，推荐采用BN15~25气缸润滑油。

(2) 燃油质量分数为0.1%~1.5%，推荐采用BN40~60气缸润滑油。在极端情况下，BN40~60的气缸润滑油也可以在燃用硫质量分数低于0.1%的燃油时使用，此时高碱值的气缸润滑油能对燃烧室起到充分的清洁作用，可去除由于长时间使用低碱值气缸润滑油导致的积炭，但注意不得长时间使用。

(3) 燃油质量分数为0.5%~2.5%，推荐使用BN70~80气缸润滑油。

(4) 燃油质量分数为2.0%及以上，推荐使用BN100或以上气缸润滑油。

在燃用不同硫质量分数燃油时气缸润滑油的选用<sup>[1]</sup>见图8所示。

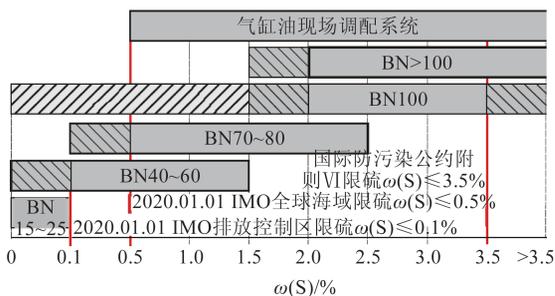


图8 在燃用不同硫质量分数燃油时气缸润滑油的选用

当前，BN40的气缸润滑油可供选择的有多种，这类润滑油均为专门配方精炼而成，含有中性添加剂（不含高碱），用以提高去污垢的能力和热稳定性，在特殊情况下，甚至可以达到BN70的使用效果。在使用BN40润滑油时，当燃油硫质量分数为1.5%以下时，一般不会造成气缸套的异常腐蚀或活塞环的异常磨损，至少不会有明显增加的

迹象。

最佳气缸润滑油供给率是随燃油硫质量分数变化而变化的。根据当前的运行经验，低碱值的气缸润滑油用于高硫燃油时，其持续供给率达不到理想的0.8 g/(kW·h)，此时，只能通过提高供油率来中和燃油中多余的硫。图9为各碱值气缸润滑油用于不同硫质量分数燃油的供给率曲线（根据实际运行的经验积累，供油率可略有变动）。

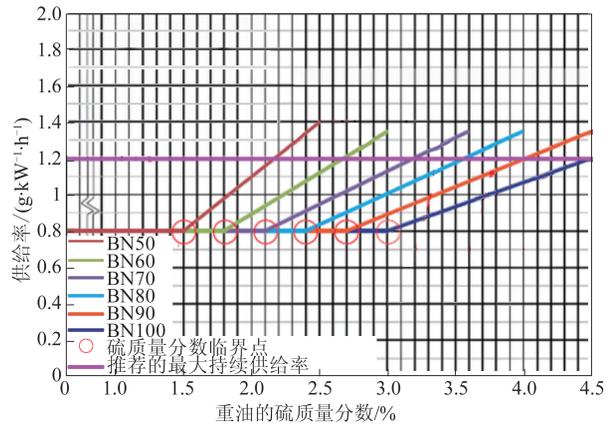


图9 不同碱值气缸润滑油的供给率曲线

## 3 结论

本文分析了船用低速柴油机气缸套和活塞环异常磨损的机理，提出了船舶柴油机在维修更换、维护保养中减少气缸套磨损的预防措施及工艺；提出了船舶柴油机海上初期运行或更换新的缸套和活塞环后的磨合规范要求，对于提高船舶柴油机的整机寿命和机械设备的使用效益有重要的意义。

### 参考文献

- [1] Wärtsilä. Guide for judging condition of relevant piston-running components: Version 2.0 [R]. Helsinki: Wärtsilä, 2014.
- [2] 林锦源. 浅析内燃机气缸套异常磨损原因及预防所示[J]. 现代农机装备, 2006.
- [3] 满一新. 船机维修技术[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2006.