

抗磨剂对军柴润滑性的提升作用

殷鹏翔 彭斌

军需能源质量监督总站, 北京, 100071;

摘要: 军用柴油机(简称军柴)作为特种装备的核心动力装置, 工作环境兼具高负荷、高转速、变工况等特点, 其润滑系统需持续为运动部件提供润滑保护, 避免金属直接接触引发磨损, 保障动力输出稳定与装备作战效能。当前, 军柴专用润滑油自身润滑性能, 难以完全应对极端工况下的抗磨需求, 抗磨剂作为关键添加剂, 可通过特定作用机制填补润滑短板。本文先阐述军柴润滑性的核心内涵与评价指标, 再分析抗磨剂提升军柴润滑性的作用机制, 最后梳理抗磨剂选用需关注的核心要点, 旨在为优化军柴润滑方案、强化抗磨保护提供思路。

关键词: 抗磨剂; 军用柴油机; 军柴; 润滑性; 抗磨机制

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.052

引言

军用柴油机和民用柴油机的运行工况差别很大, 因为它们的使用场景和功能需求完全不同。军用柴油机是装备的动力核心, 要适应复杂的机动情况: 频繁启动、加速、急停, 切换快、动力忽高忽低; 还要长期承受高负荷(如满载行军、越野)带来的冲击力, 载荷峰值高、持续久。润滑系统的核心作用是形成稳定油膜, 隔离开金属表面, 减少磨损和摩擦阻力, 还能带走热量和金属碎粒, 起到润滑、冷却、清洁的作用。但极端工况下, 油膜容易破裂: 高负荷时压力太大, 油膜变薄或破; 工况切换快, 油膜来不及适应; 温度高, 油变稀、油膜粘力差, 都可能导致油膜破。油膜一破, 就会从正常润滑变成边界润滑(只剩少量油膜), 甚至干摩擦(金属直接接触)。这时摩擦阻力大增, 磨损速度是正常的10倍以上; 还会产生大量热, 加速油老化, 让部件变软变形、精度下降; 长期下来, 部件尺寸超标、间隙异常, 可能卡死或断裂, 直接影响装备作战。抗磨剂能改善润滑效果: 一方面在金属表面形成更耐磨、耐高温的保护膜, 油膜破了也能隔离金属; 另一方面优化油的黏度和流动性, 让油膜更稳定。所以, 弄清楚抗磨剂对军柴润滑性的提升作用, 很重要, 能保障军柴可靠运行、延长部件寿命、提升装备战力。

1 军柴润滑性的核心内涵与评价指标

1.1 核心内涵

一是油膜稳定性: 油在高负荷、高转速、变温度下, 能在部件表面形成连续、均匀、够厚的油膜, 还能抵抗冲击不破裂, 这是润滑的基础。二是摩擦阻力控制能力:

能降低摩擦系数, 减少能量浪费, 还能控制摩擦生热, 避免油膜老化、部件变形, 既提升动力效率, 又保护膜。三是磨损抑制能力: 就算油膜局部破了, 也能减少划痕、剥落等磨损, 维持部件尺寸精度和间隙, 延长寿命, 应对润滑失效风险, 是核心目标。

1.2 评价指标

1.2.1 摩擦相关指标

用专用试验机模拟军柴工况检测, 包括摩擦系数和摩擦温升。摩擦系数越低越好, 高负荷下需 ≤ 0.08 , 加抗磨剂 ≤ 0.05 更优; 摩擦温升需 $\leq 40^{\circ}\text{C}$, 超 50°C 易出问题。

1.2.2 磨损相关指标

包括磨损量、表面粗糙度、磨损类型占比。磨损量用质量或尺寸变化衡量, 高负荷下小型部件磨损 $\leq 5\text{mg}$ 、精密部件尺寸变化 $\leq 0.005\text{mm}$; 表面粗糙度 R_a 值 $\leq 0.8\mu\text{m}$, $\leq 0.4\mu\text{m}$ 更优; 黏着和氧化磨损总占比 $\leq 20\%$, $\leq 10\%$ 更安全。

2 抗磨剂提升军柴润滑性的作用机制

2.1 优化油膜性能, 增强油膜稳定性

极端工况下, 军柴润滑油自己形成的油膜, 容易因为压力、温度变化破裂。抗磨剂能改善油膜的结构和受力性能, 让油膜更不容易失效, 从基础上强化润滑效果。一方面, 抗磨剂能通过分子间的相互作用, 改善油膜的黏度和黏度随温度变化的特性。有些抗磨剂分子能和润滑油基础油分子结合, 形成更稳定的分子团, 让润滑油在常温下更稠, 油膜承受压力的能力变强, 避免高负荷下油膜被挤薄。另一方面, 抗磨剂能在油膜里形成“支

撑结构”，让油膜受力更强。有些抗磨剂分子有特殊的极性基团，能在润滑油里整齐排列，形成像“分子骨架”一样的支撑结构，嵌在油膜里后，能增强油膜抵抗剪切的能力，避免高转速下油膜被剪得分层失效；而且这种支撑结构弹性好，当部件受冲击力让油膜暂时变形时，能快速恢复原来的厚度和形状，不让油膜破裂导致金属直接接触，进一步让油膜更稳定。

2.2 保护金属表面，抑制磨损发生

当油膜局部破裂，进入边界润滑状态时，金属表面直接接触的风险会大幅升高。抗磨剂能和金属表面发生物理或化学作用，形成保护膜，隔离开金属，从源头阻止磨损。一类是物理吸附膜保护。抗磨剂分子靠极性基团，和金属表面的极性位点结合，形成一层紧密的物理吸附膜。这层膜延展性好，能跟着金属部件运动一起变形，始终盖在金属表面，就算油膜破了，也能隔离开金属，避免直接摩擦；而且它的摩擦系数低，能减少摩擦阻力和热量，减缓自身磨损，要是局部膜坏了，周围的抗磨剂分子能快速补上来，修好膜层，保持保护效果。另一类是化学反应膜保护。在高负荷、摩擦生热的作用下，抗磨剂分子会和金属表面发生化学反应，生成一层和金属结合紧密的化学反应膜。这层膜比金属表面硬，还能抵抗黏着和磨损，能扛住高负荷下的压力和剪切力，避免金属表面黏着磨损；而且它化学性质稳定，不会因为温度升高或油老化分解，能在金属表面长期稳定保护，就算长时间高负荷运转，也能一直隔离开金属，大幅减少磨损。

2.3 调控磨损产物，减少二次磨损

军柴润滑时，就算有油膜和抗磨剂保护，还是会产生少量磨粒（比如金属碎屑、氧化产物）。这些磨粒如果飘在润滑油里，会跟着油循环粘在部件表面，引发“二次磨损”，让润滑系统变差。抗磨剂能调控这些磨损产物，打断二次磨损的链条。一方面，抗磨剂能“包裹分散”磨粒，不让磨粒聚在一起。有些抗磨剂分子有分散基团，能吸在磨粒表面，形成一层包裹膜，阻止磨粒因为静电或分子引力聚成大颗粒。另一方面，抗磨剂能“钝化处理”磨粒，降低磨粒的磨损能力。有些抗磨剂能和磨粒表面的活性位点反应，生成一层柔软的钝化层，盖在磨粒尖锐的棱角上，把“尖颗粒”变成“圆颗粒”；这种圆颗粒就算碰到金属表面，也很难划伤，大幅降低磨损能力，而且钝化层还能减少磨粒和油里其他成分反

应，避免生成更易腐蚀的物质，进一步保护金属表面和油膜，打断二次磨损的过程。

3 抗磨剂选用需关注的核心要点

3.1 兼顾军柴工况，确保作用机制适配

不同军柴的工况不一样，比如负荷大小、转速范围、工况切换的频率，这些差异会让它们对润滑性的需求、对抗磨机制的依赖也不同。所以选抗磨剂，要先匹配军柴的工况特点，确保抗磨剂的作用机制，能刚好解决实际润滑中的短板问题。如果军柴长期处于高负荷工况，比如重型装甲装备的军柴，要一直承受满载行军、越野的大载荷，摩擦面的压力常常超过 80MPa，它的润滑系统最核心的短板就是油膜容易被挤破，金属表面承受的压力大，还容易出现黏着磨损。如果军柴要频繁经历启动、急停这些变工况，比如轻型战术车辆的军柴，作战时要经常短途机动、躲障碍，工况切换间隔往往不到 5 分钟，它的润滑系统短板就是油膜不稳定，经常出现边界润滑的情况。比如工况切换时，部件速度和载荷突然变，油膜来不及适应就破了；启动时油膜没形成好，也会进入边界润滑，这些短暂的润滑失效，容易引发磨粒磨损和轻微的黏着磨损。这种情况下，要选“物理吸附膜保护+油膜优化”两种机制一起发挥作用的抗磨剂，比如酯类-硫磷复合抗磨剂。一方面，物理吸附膜能快速响应，抗磨剂分子靠极性基团，一下子就吸在金属表面，形成一层膜，就算油膜暂时破了，这层膜也能立刻隔离开金属，应对启动、工况切换时的临时润滑需求，而且膜坏了，周围的抗磨剂分子还能快速补好；另一方面，油膜优化能让油膜更稳定，改善油膜的黏度和抗剪切能力，减少工况切换时油膜破裂的概率，少出现边界润滑的情况，两种机制一起，既解决临时润滑失效，又改善油膜基础稳定性，刚好适配变工况的润滑需求。这类抗磨剂的好处很明显：一是能和基础油分子结合，形成稳定的分子团，让油膜更能扛剪切力，避免高转速下油膜被剪分层或破掉；二是能改善油膜的黏度，让油膜在高温下不会太快变稀，不会因为黏力不够失效；三是有些这类抗磨剂还能降低摩擦系数，减少摩擦产生的热量，进一步减少油膜被高温晒老的风险，既稳住油膜，又减少热量，刚好适配高转速工况的需求。

3.2 考量与润滑油兼容性，避免性能冲突

抗磨剂不是单独在润滑系统里发挥作用，而是作为

添加剂,混在军柴专用润滑油里,和润滑油的基础油、其他添加剂(比如抗氧剂、防锈剂、清净剂)一起工作。所以选抗磨剂时,一定要做好和润滑油的兼容性验证,通过实验室模拟测试,确保抗磨剂和基础油、其他添加剂都能配合好,起到“1+1 大于 2”的效果,而不是互相拖后腿,具体要从两个方面做验证。验证抗磨剂和基础油的兼容性。军柴润滑油的基础油主要分两种:矿物基础油和合成基础油,这两种基础油的分子结构、化学特性不一样,比如极性强弱、溶解能力,对抗磨剂分子的吸附、溶解和散开能力也不同,直接影响抗磨剂能不能发挥作用。如果是矿物基础油,它的分子极性弱,溶解能力中等,要选分子里含有非极性烃基链的抗磨剂,比如烷基硫磷酯类抗磨剂。这类抗磨剂的非极性基团,能和矿物基础油的分子很好地融合,在基础油里散得均匀,不会出现分层、沉淀或析出来的情况,避免有的地方浓度太高,生成太多沉积物堵油路,或浓度太低,形成不了有效的保护膜。如果是合成基础油,比如合成烃基础油,它的分子极性更弱,耐热性更好,要选和它分子结构适配的抗磨剂,比如聚 α -烯烃基硫磷抗磨剂。确保这类抗磨剂在高温、高转速的工况下,还是能在基础油里散得均匀,不会分解或析出来,一直保持稳定的抗磨效果。验证兼容性的核心指标是“分散稳定性”,具体做法是:按推荐的添加量,把抗磨剂混进基础油里,在模拟军柴的油温(80℃-120℃)下搅拌均匀,然后放24小时,观察有没有分层、沉淀或东西析出来,要是没明显异常,就说明和基础油兼容合格。验证这种兼容性,核心方法是“协同性能测试”,具体做法是:按润滑油实际的配方比例,把抗磨剂和其他添加剂一起混进润滑油里,用四球摩擦磨损试验机模拟军柴的工况,检测混合后润滑油的摩擦系数和磨损量,要是摩擦系数、磨损量都比只用一种添加剂时好,或者没出现性能下降,就说明兼容合格,能确保各种添加剂一起增强润滑效果。

3.3 符合装备要求,保障使用安全性

军柴是军用特种装备的核心动力,它能不能可靠运行,直接关系到装备的作战能力和作战安全,所以对润滑系统的安全性要求,比民用柴油机高很多,主要体现在三个方面:部件材质安全、符合环保要求、适配使用周期。抗磨剂作为润滑系统的重要组成部分,选的时候要严格符合军柴的装备设计标准(比如军用装备润滑系

统的技术规范)和使用要求,别因为抗磨剂的特性,引发安全隐患,或影响装备作战、维护,确保用起来安全可靠。要符合环保和部件材质安全要求。有些抗磨剂里含有特定元素(比如氯元素)或杂质,长期用会出两个安全问题:一是腐蚀军柴里的有色金属部件,比如铜合金轴瓦、铝合金油箱,这些部件的化学性质比较活泼,抗磨剂里的腐蚀性成分(比如氯化物、酸性物质)容易和它们发生反应,破坏部件表面的保护层,导致生锈或被腐蚀磨损,缩短部件的寿命;二是在高温下生成有害的东西,比如有挥发性的有毒气体、固体污染物,这些东西不仅会污染润滑系统,堵滤清器、堵油路,还会在装备维护时伤害操作人员的健康,废弃润滑油处理时,还会污染环境。所以选抗磨剂时,要优先选经过“材质兼容性检测”的产品,具体检测方法是:把抗磨剂混进润滑油里,再把军柴常用的有色金属试片(比如铜片、铝片)放进去,在模拟军柴的工况下(温度100℃、时间24小时)接触,之后观察试片表面有没有生锈、变色,或质量有没有减少,要是试片没明显的腐蚀痕迹,就说明材质兼容性合格。同时,还要符合军用装备的环保要求,选没有有毒有害元素、高温下不会生成有害东西的抗磨剂,避免环保和健康隐患。

4 结语

抗磨剂通过优化油膜性能、保护金属表面、调控磨损产物三类核心机制,为军柴润滑性提供关键支撑,有效应对极端工况下的润滑短板,减少磨损、保障动力输出稳定,是军柴润滑系统不可或缺的组成部分。抗磨剂的价值发挥,并非依赖单一机制或高性能指标,而是源于与军柴工况、润滑油特性及装备要求的精准适配。因此,选用抗磨剂需兼顾工况适配性、与润滑油兼容性及使用安全性,通过科学选用与协同调控,最大化发挥其对军柴润滑性的提升作用,为军柴可靠运行、装备作战效能保障提供坚实的润滑支撑。

参考文献

- [1]周连运,赵丽娟.柴油抗磨剂的研究[J]辽宁化工2020.10(041).
- [2]李彦,杨栩,范峰,黄凤林.柴油抗磨剂对柴油质量影响研究[J]当代化工2019.11.
- [3]罗辉,范维玉,李阳.柴油抗磨剂对柴油质量影响研究动力学模拟[J].石油学报(石油加工),2019.03.