

润滑油基础油类型对摩擦系数的影响分析

叶福帅 魏建宏 李稳刚 马奥婷

甘肃华电玉门风力发电有限公司，甘肃酒泉，735200；

摘要：摩擦系数是衡量润滑油润滑性能的核心指标之一，直接关联机械设备的运行效率、能耗与使用寿命。润滑油基础油作为配方的核心组分，其化学组成、分子结构与物理性质存在显著差异，进而对摩擦副间的摩擦系数产生决定性影响。本文系统梳理矿物基础油、合成基础油及生物基础油三大类基础油的分类与特性，从分子作用机制、润滑膜形成能力等角度，深入分析不同类型基础油对摩擦系数的影响规律，并探讨温度、载荷等工况因素的耦合作用，最后展望基础油在低摩擦润滑领域的发展方向，为高性能润滑油的配方设计与选型提供理论依据。

关键词：润滑油基础油；摩擦系数；润滑机制；矿物油；合成油；生物基础油

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.087

引言

在机械系统运行过程中，摩擦磨损是造成能量损耗、部件失效的主要原因之一，据相关数据统计，工业领域约 1/3 的能源消耗源于摩擦，超过 80% 的机械零部件失效由磨损引发。润滑油作为降低摩擦、减少磨损的关键介质，其性能优劣直接决定机械系统的运行可靠性与经济性。基础油是润滑油的主要成分，占比可达 70%~95%，其类型与特性是决定润滑油摩擦学性能的核心因素。

随着工业技术向高速、重载、高温等极端工况发展，对润滑油的低摩擦、高稳定性能提出了更高要求。不同类型的基础油在化学组成、分子链结构、极性基团分布等方面存在本质区别，导致其在摩擦副表面的吸附能力、润滑膜的强度与稳定性等方面表现各异，最终体现为摩擦系数的差异。目前，润滑油基础油主要分为矿物基础油、合成基础油和生物基础油三大类，各类基础油的摩擦学特性研究已成为摩擦学与润滑油领域的热点方向。

本文通过阐述不同类型基础油的结构与特性，结合润滑理论分析其对摩擦系数的影响机制，总结工况因素对基础油摩擦学性能的调控作用，旨在揭示基础油类型与摩擦系数的内在关联，为润滑油的配方优化与工程应用提供理论支撑。

1 润滑油基础油的分类及特性

润滑油基础油的分类方式多样，目前广泛采用的是 API（美国石油学会）分类法，该方法根据基础油的饱和烃含量、硫含量及黏度指数，将其分为 I~V 类，其中 I~III 类为矿物基础油，IV 类为聚 α -烯烃 (PAO) 合成油，V 类为除 I~IV 类以外的其他合成油及生物基础油等。不同类型基础油的结构与特性存在显著差异，这是其摩擦学性能分化的原因。

1.1 矿物基础油

矿物基础油以石油为原料，经蒸馏、精制等工艺制得，是目前应用最广泛的基础油类型。根据 API 分类，I 类矿物油采用溶剂精制工艺，饱和烃含量低于 90%，硫含量高于 0.03%，黏度指数为 80~120；II 类矿物油采用加氢精制工艺，饱和烃含量高于 90%，硫含量低于 0.03%，黏度指数为 80~120；III 类矿物油采用加氢裂化工艺，饱和烃含量高于 90%，黏度指数高于 120，部分 III 类基础油也被称为“合成型矿物油”。

矿物基础油的主要成分是烷烃、环烷烃和芳香烃，其中烷烃具有良好的润滑性能和氧化稳定性，环烷烃能提升基础油的黏度指数和低温流动性，芳香烃则具有较强的溶解能力，但氧化稳定性较差。I 类矿物油因精制程度较低，含有较多的硫、氮等杂原子化合物，这些杂质会影响其润滑性能与稳定性；II、III 类矿物油经加氢精制后，杂原子含量大幅降低，饱和烃含量显著提升，性能更优异。

1.2 合成基础油

合成基础油是通过化学合成方法制备的润滑油基础油，具有分子结构可控、性能优异的特点，主要包括聚 α -烯烃 (PAO)、酯类油、聚醚、硅油等，其中 PAO 和酯类油应用最为广泛。

聚 α -烯烃 (PAO) 是 IV 类基础油的代表，由 α -烯烃经聚合反应制得，分子结构为线性烷烃，具有优异的黏度指数、低温流动性和氧化稳定性。PAO 的分子链长度可通过聚合工艺调控，长链 PAO 黏度较高，适用于重载工况；短链 PAO 黏度较低，适用于低温工况。酯类油属于 V 类基础油，分为单酯、双酯和多元醇酯，其分子结构中含有酯基极性基团，能在金属摩擦副表面形成

牢固的吸附膜，润滑性能优异，且具有良好的生物降解性。

聚醚类合成油具有良好的高温稳定性和抗燃性，适用于高温、苛刻工况；硅油则具有极低的表面张力和优异的耐高低温性能，但润滑性能相对较弱，多用于特殊领域。

1.3 生物基础油

生物基础油是以植物油、动物脂肪等可再生资源为原料，经酯化、加氢等工艺改性制得的基础油，主要包括生物柴油、植物油基基础油等。生物基础油的主要成分是脂肪酸酯，分子结构中含有极性酯基和不饱和双键，具有良好的润滑性能、生物降解性和可再生性，是环保型润滑油的重要发展方向。

天然植物油因含有较多不饱和双键，氧化稳定性较差，限制了其在高温工况下的应用；经加氢改性后的植物油基基础油，不饱和双键被饱和，氧化稳定性显著提升，同时保留了良好的润滑性能，可满足多种工况需求。

2 不同类型基础油对摩擦系数的影响机制

摩擦系数是指两个相互接触的物体发生相对运动时，摩擦力与法向载荷的比值，其大小取决于摩擦副材料、表面状态、润滑介质特性及工况条件等。润滑油基基础油通过在摩擦副表面形成润滑膜，实现“液膜润滑”或“边界润滑”，从而降低摩擦系数。不同类型基础油的分子结构与特性不同，其润滑膜的形成方式、强度与稳定性存在差异，进而对摩擦系数产生不同影响。

2.1 矿物基础油对摩擦系数的影响

矿物基础油的润滑性能与其化学组成密切相关。在边界润滑状态下，摩擦副表面的粗糙度较高，基础油分子需通过物理吸附或化学吸附形成吸附膜，填补表面微凸体，减少直接接触。I类矿物油中含有一定量的芳香烃和杂原子化合物，这些极性物质能在金属表面形成吸附膜，但因杂质含量较高，吸附膜的均匀性和稳定性较差，导致摩擦系数相对较高；II、III类矿物油经加氢精制后，饱和烃含量提升，杂质减少，烷烃和环烷烃分子能更均匀地吸附在摩擦副表面，形成的润滑膜更稳定，摩擦系数显著低于I类矿物油。

从分子链结构来看，环烷烃分子的环状结构使其在摩擦副表面的吸附能力强于直链烷烃，能形成更厚的吸附膜，因此环烷烃含量较高的矿物基础油，摩擦系数更低。此外，矿物基础油的黏度对摩擦系数也有影响，黏度适中的基础油能在摩擦副间形成厚度适宜的液膜，避免因黏度过低导致液膜破裂，或黏度过高导致液体内摩擦增大，从而实现较低的摩擦系数。

2.2 合成基础油对摩擦系数的影响

合成基础油因分子结构可控，其润滑性能通常优于矿物基础油，对摩擦系数的调控能力更强。聚 α -烯烃（PAO）的分子结构为线性烷烃，分子链规整，无极性基团，主要通过物理吸附形成润滑膜。PAO的黏度指数高，在宽温度范围内黏度变化小，能在不同工况下保持稳定的液膜厚度，因此摩擦系数受温度影响较小。同时，PAO分子链的长度可调控，长链PAO的分子间作用力较强，形成的液膜强度高，适用于重载工况，能有效降低摩擦系数；短链PAO的低温流动性好，在低温工况下仍能快速形成润滑膜，避免摩擦副干摩擦。

酯类油的分子结构中含有酯基极性基团，能与金属摩擦副表面形成化学吸附膜，吸附膜的强度远高于物理吸附膜，因此在边界润滑状态下，酯类油的摩擦系数显著低于PAO和矿物基础油。酯基极性基团与金属表面的化学键合作用，使润滑膜在重载、高温工况下不易破裂，能保持良好的润滑效果。

聚醚类合成油的分子结构中含有醚键，具有一定的极性，能在金属表面形成吸附膜，同时其高温稳定性好，在高温工况下仍能保持较低的摩擦系数；硅油的分子间作用力弱，表面张力低，能在摩擦副表面形成极薄的润滑膜，但因吸附能力较弱，在重载工况下润滑膜易破裂，摩擦系数相对较高。

2.3 生物基础油对摩擦系数的影响

生物基础油的摩擦学性能主要取决于其脂肪酸酯的分子结构。分子中的酯基极性基团能在金属摩擦副表面形成化学吸附膜，不饱和双键则能提升吸附膜的柔韧性，因此生物基础油在边界润滑状态下具有较低的摩擦系数，润滑性能优于部分矿物基础油。

天然植物油因含有较多不饱和双键，氧化稳定性较差，在高温工况下易发生氧化聚合，导致润滑膜变质，摩擦系数升高；经加氢改性后的植物油基基础油，不饱和双键被饱和，氧化稳定性提升，同时保留了酯基的强吸附能力，在宽温度范围内能保持稳定的低摩擦系数。

3 工况因素对基础油摩擦系数的耦合影响

基础油类型是决定摩擦系数的核心因素，但温度、载荷、转速等工况因素会通过影响润滑膜的状态，与基础油类型产生耦合作用，进而改变摩擦系数的大小。

3.1 温度的影响

温度对基础油的黏度、吸附膜稳定性具有显著影响，进而影响摩擦系数。对于矿物基础油，尤其是I类矿物油，其黏度对温度敏感，低温时黏度增大，液体内摩擦增加，摩擦系数升高；高温时黏度降低，液膜厚度减小，

甚至出现液膜破裂，导致摩擦副直接接触，摩擦系数急剧升高。II、III类矿物油的黏度指数高于I类，温度对其黏度的影响较小，摩擦系数随温度的变化更平缓。

合成基础油的黏度指数普遍较高，PAO和酯类油在宽温度范围内黏度变化小，因此摩擦系数受温度影响显著小于矿物基础油。酯类油的吸附膜因化学键合作用，在高温下仍能保持稳定，摩擦系数不会随温度升高而大幅上升；生物基础油经加氢改性后，高温氧化稳定性提升，摩擦系数的温度敏感性也显著降低。

3.2 载荷的影响

载荷增大时，摩擦副间的接触压力升高，润滑膜易被压缩，甚至出现局部破裂，导致摩擦系数增大。对于矿物基础油，其润滑膜主要为物理吸附膜，强度较低，在重载工况下易破裂，摩擦系数随载荷增加的幅度较大；合成基础油中的酯类油，因化学吸附膜强度高，在重载工况下仍能保持完整的润滑膜，摩擦系数随载荷变化的幅度较小；PAO的分子链韧性好，形成的液膜具有一定的弹性，能承受较高载荷，摩擦系数的增幅也低于矿物基础油。

生物基础油的吸附膜强度与酯类油相近，在中低载荷下具有较低的摩擦系数，但在极高载荷下，吸附膜仍会发生破裂，摩擦系数升高。

3.3 转速的影响

转速升高时，摩擦副间的相对运动速度加快，基础油的带入量增加，液膜厚度增大，摩擦系数降低。在低转速工况下，基础油带入量不足，易形成边界润滑，摩擦系数较高；在高转速工况下，液膜润滑占主导，摩擦系数趋于稳定。

矿物基础油因黏度对转速的响应较慢，在低转速向高转速过渡时，摩擦系数的下降幅度较大；合成基础油的流动性好，能快速响应转速变化，在低转速下即可形成较厚的液膜，摩擦系数的下降幅度更平缓。

4 基础油在低摩擦润滑油领域的发展方向

4.1 矿物基础油的深度精制

通过优化加氢裂化、加氢异构等工艺，进一步提高矿物基础油的饱和烃含量和黏度指数，降低杂原子含量，提升其润滑性能和氧化稳定性，使其能满足更高工况要求，同时降低生产成本，保持其在中低端润滑油市场的主导地位。

4.2 合成基础油的分子设计

利用分子模拟与合成技术，设计具有特定分子结构

的合成基础油，如在PAO分子中引入极性基团，提升其吸附能力；调控酯类油的分子链长度和支链结构，优化其高低温性能，从而实现对摩擦系数的精准调控，满足极端工况下的润滑需求。

4.3 生物基础油的改性升级

针对天然植物油氧化稳定性差的问题，通过加氢改性、酯交换等工艺，进一步提升生物基础油的高温稳定性和抗磨损性能，同时开发可再生、可降解的新型生物基础油，降低对石油资源的依赖，实现润滑油的绿色化发展。

4.4 基础油的复配协同

将不同类型的基础油进行复配，利用其性能互补性，实现协同增效。例如，将酯类油与PAO复配，既能发挥酯类油的强吸附性能，降低边界润滑状态下的摩擦系数，又能利用PAO的高黏度指数，提升宽温度范围内的润滑稳定性，从而制备出综合性能优异的低摩擦润滑油。

5 结语

润滑油基础油的类型直接决定其分子结构与特性，进而通过润滑膜的形成机制影响摩擦系数。矿物基础油的摩擦学性能与其精制程度和化学组成密切相关，II、III类矿物油的摩擦系数显著低于I类；合成基础油因分子结构可控，具有更优异的润滑性能，酯类油在边界润滑下摩擦系数最低，PAO在宽温度范围内摩擦系数稳定性最好；生物基础油凭借极性酯基的强吸附作用，在中低工况下具有较低的摩擦系数，加氢改性后其高温性能显著提升。

温度、载荷、转速等工况因素与基础油类型存在耦合作用，影响润滑膜的状态与摩擦系数的大小。未来，通过矿物基础油的深度精制、合成基础油的分子设计、生物基础油的改性升级及基础油的复配协同，将进一步提升润滑油的低摩擦性能，满足工业领域节能降耗与环保的双重需求。

参考文献

- [1] 王伟, 李雪静, 郑丽君. 不同类型润滑油基础油对摩擦系数的影响分析[J]. 润滑与密封, 2021, 46(03): 45-49.
- [2] 张华, 丁文娟, 慕彦君. 润滑油基础油类型对摩擦学性能的影响研究[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(06): 67-72.
- [3] 刘洋, 王磊. 合成润滑油基础油对摩擦系数的影响及机理分析[J]. 润滑科学与技术, 2022, 35(02): 34-39.