

玻纤增强塑料的摩擦学原理及技术研究

摩擦学 · 材料科学 · 表面工程

摘要

玻璃纤维增强塑料是以聚酰胺、聚甲醛、聚酯、聚碳酸酯/ABS、环氧树脂、不饱和聚酯等聚合物为基体，以短切玻璃纤维、连续玻璃纤维或玻璃纤维织物为增强相的一类重要工程复合材料。该类材料兼具聚合物轻量化、耐腐蚀和易成型优势，以及玻璃纤维高强度、高模量和尺寸稳定性优势，已广泛用于汽车零部件、齿轮、滑轨、卡扣、轴套、执行器、内饰机构和电气结构件。

玻璃纤维增强塑料在摩擦学服役中并非简单表现为“增强即耐磨”。玻璃纤维的引入一方面可提高材料承载能力、抗蠕变能力和耐热变形能力，另一方面也可能因纤维端部暴露、纤维拔出、纤维断裂和硬质磨粒形成而导致磨粒磨损、对偶件划伤、摩擦系数波动、粘滑和噪声。因此，理解玻璃纤维增强塑料的摩擦学原理，是开发适配润滑脂和摩擦改进技术的基础。

润滑脂通过基础油润滑、稠化剂保持、添加剂吸附或反应、固体润滑剂填充以及界面膜形成等方式，可显著改善玻璃纤维增强塑料摩擦副的减摩、抗磨、防粘滑和降噪性能。以MOLYKOTE为代表的汽车NVH润滑技术表明，成功的润滑脂设计已从单一减摩抗磨发展为低温性能、低分油、材料兼容、降噪、防粘滑和长期可靠性的综合设计。

关键词：玻璃纤维增强塑料；摩擦学；润滑脂；磨粒磨损；粘滑；NVH；摩擦改进

1 引言

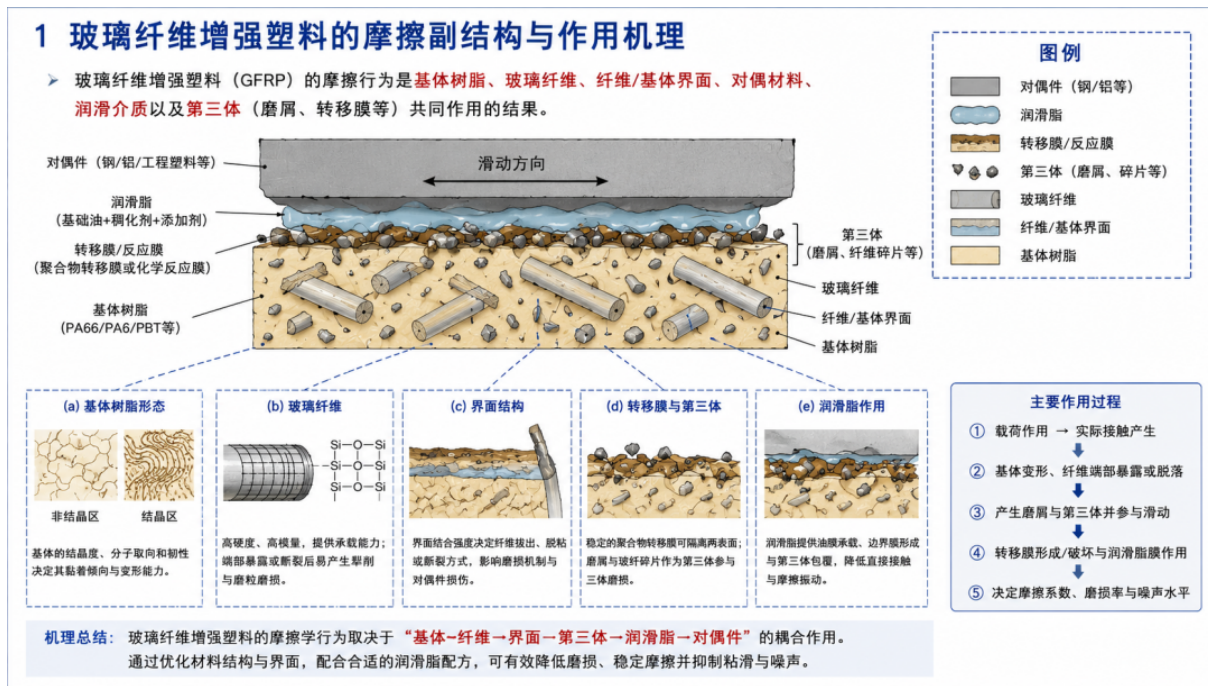


图1 玻璃纤维增强塑料的定义、分类与工程应用

玻璃纤维增强塑料（GFRP）是工程塑料和复合材料领域中应用最广的一类增强材料体系。根据基体树脂不同，可分为玻璃纤维增强热塑性塑料和玻璃纤维增强热固性塑料。前者主要包括玻璃纤维增强PA66、PA6、PBT、POM、PPS、PEEK、PC/ABS等；后者主要包括玻璃纤维增强环氧树脂、不饱和聚酯、乙烯基酯、酚醛树脂以及SMC/BMC模塑料等。

在汽车和机械领域，玻璃纤维增强塑料常用于承载、导向、传动和连接部件，例如齿轮、滑轨、轴套、导向块、卡扣、支架、执行器壳体、门锁机构、天窗机构、座椅调节机构、车窗升降机构和内饰运动部件。这些部件在服役过程中经常发生塑料-钢、塑料-塑料、塑料-橡胶或塑料-涂层之间的滑动和往复运动，因此摩擦、磨损、粘滑和噪声问题十分突出。

润滑脂是改善玻璃纤维增强塑料摩擦学性能的重要技术手段。与润滑油相比，润滑脂具有更好的保持性、密封性和抗流失能力，适合低速、间歇、往复、摆动和终身润滑场景。

2 玻璃纤维增强塑料的摩擦学原理

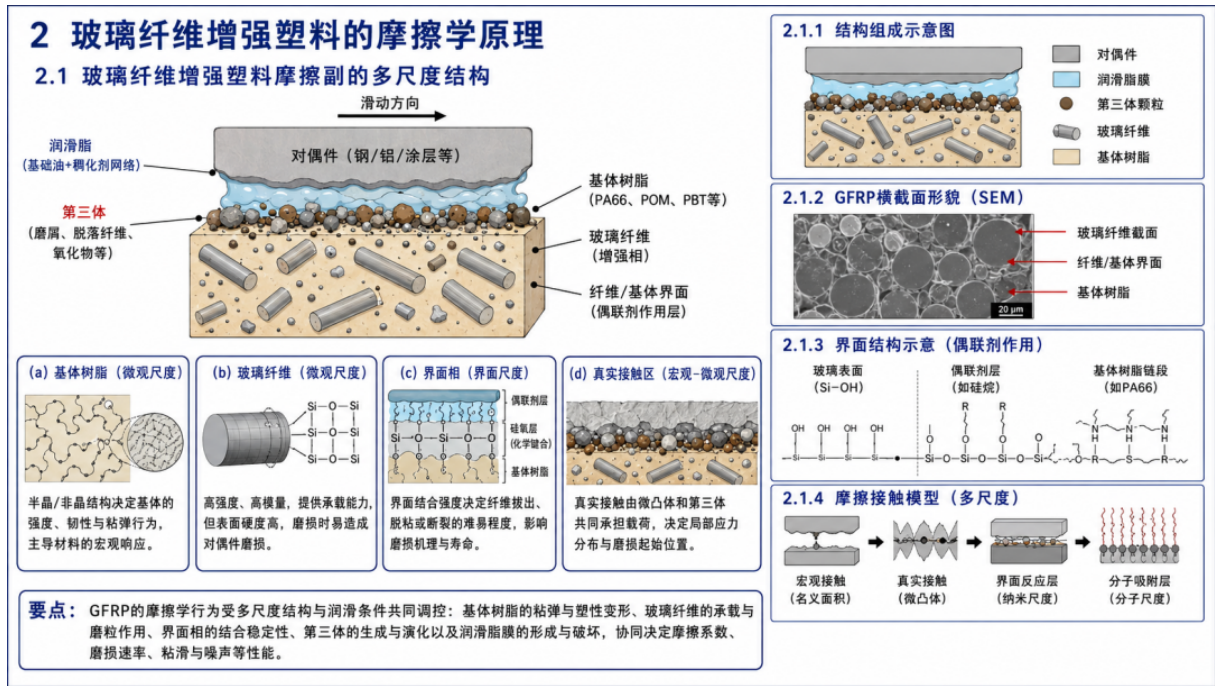


图2 玻璃纤维增强塑料的摩擦学原理

玻璃纤维增强塑料摩擦副通常由聚合物基体、玻璃纤维增强相、纤维/基体界面、对偶件材料、润滑介质与第三体共同构成。其中，基体决定材料的韧性、热稳定性、转移膜形成能力和与润滑剂的相容性；玻璃纤维决定材料的刚度、承载能力、抗蠕变能力和磨粒磨损倾向；纤维/基体界面则决定纤维在磨损过程中的保持能力、拔出行为和表层稳定性。

在摩擦过程中，接触表面并不是均匀受力，而是由大量微凸体承担载荷。玻璃纤维可承担部分载荷，降低聚合物基体局部变形；但当磨损深入到纤维附近时，玻璃纤维端部可能裸露在表面，形成硬质微凸体，对对偶件产生犁削和切削作用。

因此，玻璃纤维在摩擦学中同时具有“增强承载”和“磨粒磨损”双重角色。润滑脂的作用，就是通过油膜、边界膜、转移膜和第三体调控，尽量放大玻纤的承载优势，并抑制其磨粒磨损风险。

3 玻璃纤维增强塑料的主要磨损机制

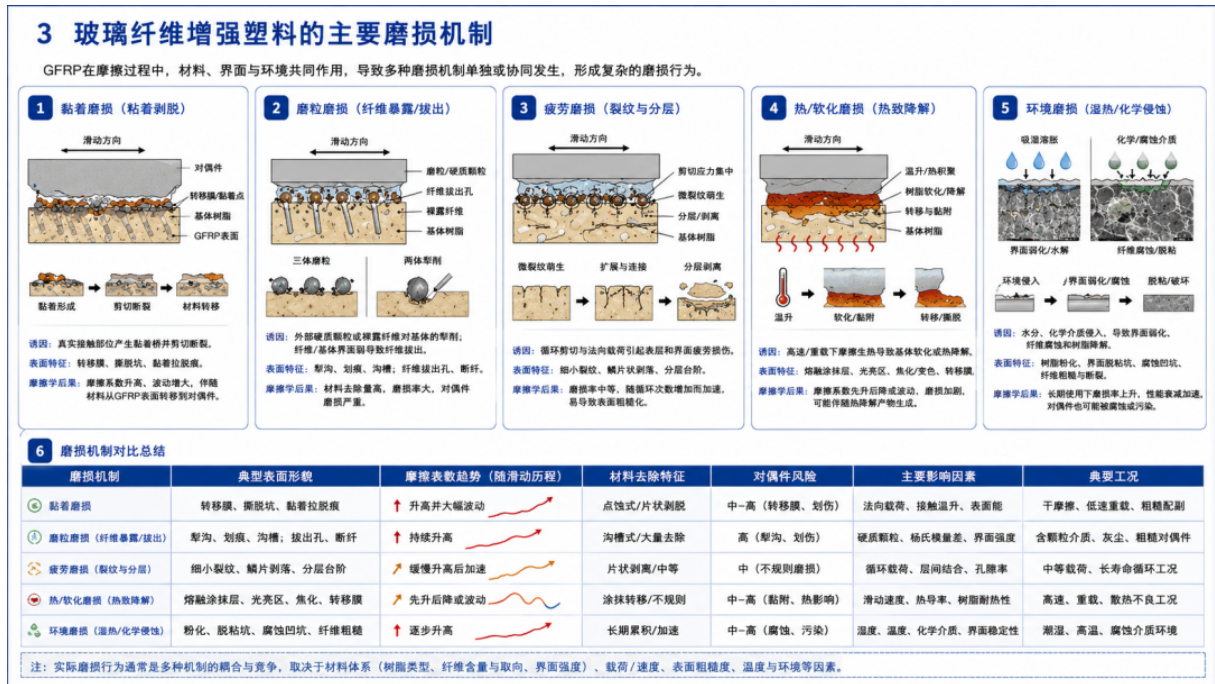


图3 玻璃纤维增强塑料的主要磨损机制

玻璃纤维增强塑料在实际工况下通常不是单一磨损机制起作用，而是黏着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、热/软化磨损和环境磨损共同发生，并随载荷、速度、温度、湿度、材料表面粗糙度和润滑状态变化而相互转化。

黏着磨损发生在两个接触表面局部微凸体发生黏着并在相对滑动中被剪切时；磨粒磨损主要来源于暴露玻璃纤维端部、脱落玻璃纤维碎片和外界硬质污染物；疲劳磨损则与周期载荷、往复滑动和界面脱粘有关；热磨损与软化磨损主要由摩擦热积累导致基体软化、转移膜失稳和局部熔融引起。

润滑脂可以通过降低界面剪切、隔离硬接触、保护对偶件表面、悬浮或调控第三体行为来降低磨损，但若润滑脂黏度、稠化结构或材料相容性不合适，也可能造成磨粒滞留、表层软化或界面失稳。

4 润滑脂对玻璃纤维增强塑料摩擦副的作用机理

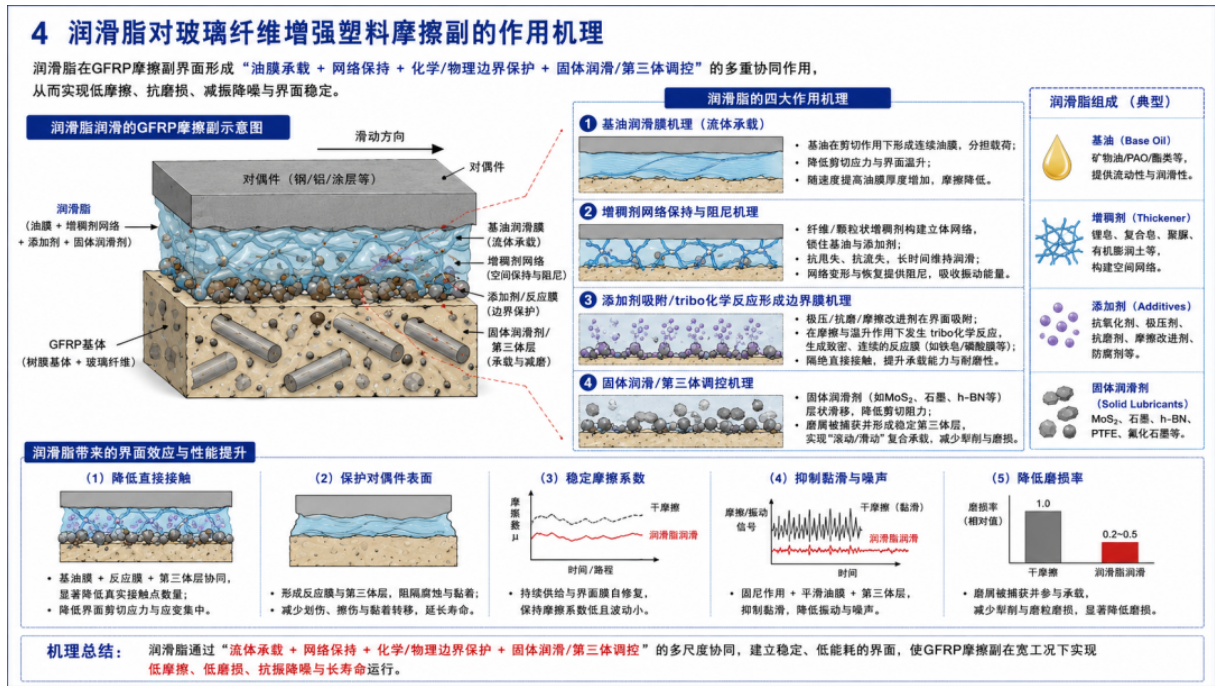


图4 润滑脂对玻璃纤维增强塑料摩擦副的作用机理

润滑脂通常由基础油、稠化剂、添加剂和固体润滑剂组成。基础油提供润滑性和流动性；稠化剂形成三维网络，使油保持在接触区域；添加剂通过吸附或摩擦化学反应形成边界膜；固体润滑剂则可参与第三体调控，形成低剪切界面。

对于玻璃纤维增强塑料，润滑脂选型不能照搬金属润滑体系。聚合物基体可能发生溶胀、应力开裂、吸油、软化或表面性能改变，因此材料相容性是塑料润滑脂设计的首要条件之一。

从作用机制看，润滑脂主要通过五个路径改善性能：降低真实接触面积，保护对偶件表面，稳定摩擦系数，抑制粘滑与噪声，降低磨损率。这些作用共同决定了玻璃纤维增强塑料摩擦副的寿命和NVH表现。

5 面向玻璃纤维增强塑料的润滑脂摩擦改进技术

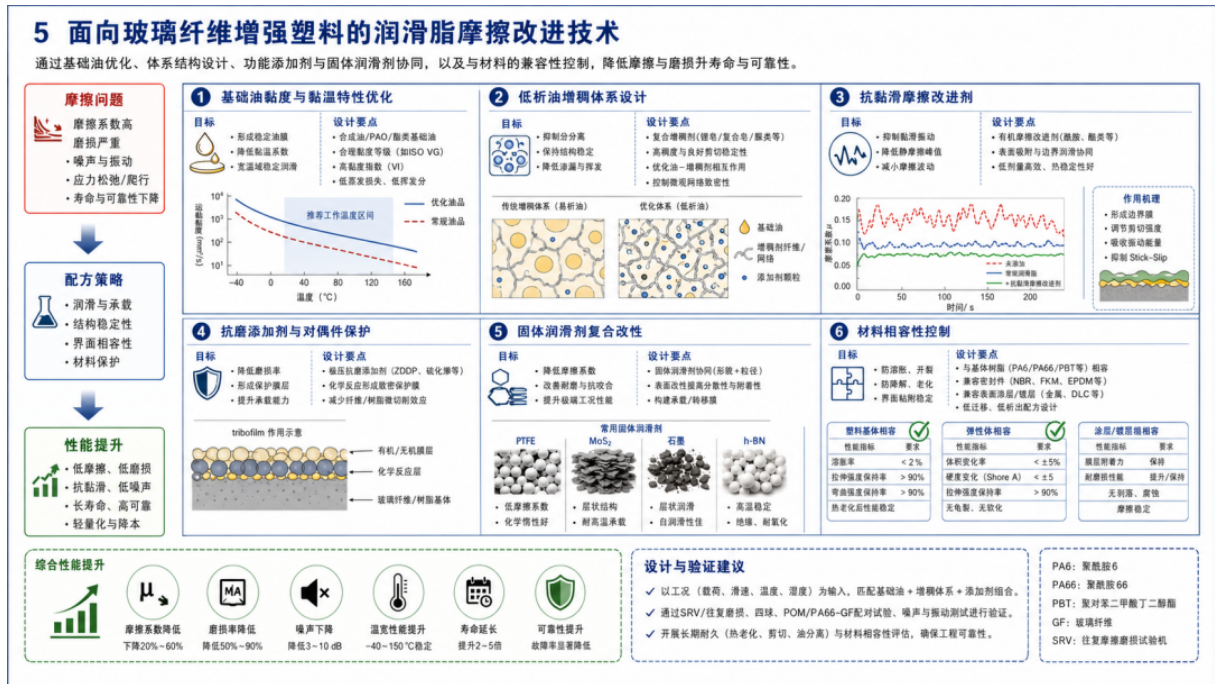


图5 面向玻璃纤维增强塑料的润滑脂摩擦改进技术

面向玻璃纤维增强塑料的润滑脂摩擦改进技术，目标不应局限于降低平均摩擦系数，而应同时关注降低磨损率、保护对偶件、稳定摩擦系数、防止粘滑、降低噪声、改善低温操作性能、降低分油污染以及提高材料相容性。

基础油黏度是润滑脂摩擦改进的首要参数。对于高载荷或高玻纤含量材料，适当提高基础油黏度有助于增强油膜承载能力；对于低温执行机构，则需要降低低温黏度，保证低温动作顺畅。稠化体系则决定润滑脂保持性、分油率、机械安定性和阻尼性能。

抗粘滑摩擦改进剂的关键不是简单追求最低摩擦系数，而是降低静摩擦与动摩擦之间的差异，使摩擦力更加平稳。抗磨添加剂用于形成保护膜，降低玻纤与硬质磨粒对金属或涂层对偶件的划伤。固体润滑剂如PTFE、MoS₂、石墨和氮化硼可形成低剪切界面，但其粒径、形貌和分散状态必须优化。

6 MOLYKOTE汽车NVH润滑技术的工程启示

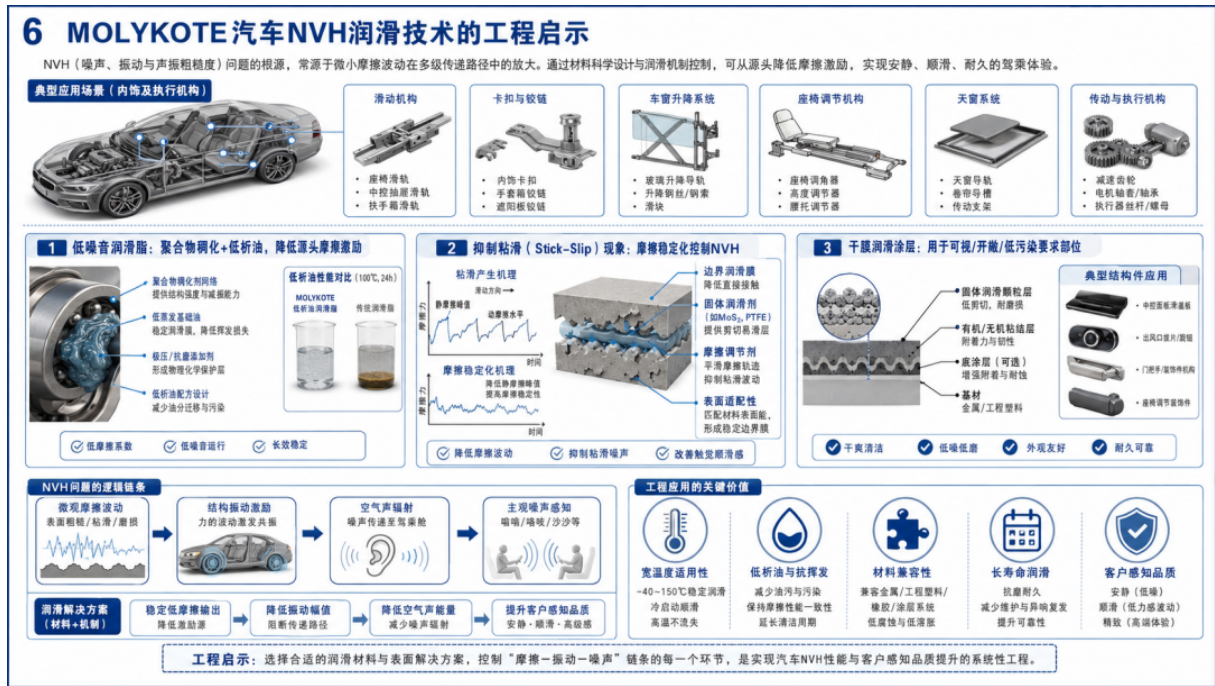


图6 MOLYKOTE汽车NVH润滑技术的工程启示

MOLYKOTE汽车NVH润滑技术是润滑脂摩擦改进商业化成功的重要案例。汽车行业对舒适性、安全性和自动驾驶功能的要求不断提高, NVH控制已成为汽车设计的重要指标。许多非功能性噪声来源于塑料、橡胶、皮革或复合材料之间的摩擦和滑动, 例如扶手、门板、开关、齿轮、卡扣和座椅滑轨等部件。

该技术资料强调, 润滑剂控制NVH的核心途径包括: 抑制噪声或振动, 降低静摩擦与动摩擦之间的差异以防止粘滑, 并保持一致摩擦力以实现平稳运动。这一思路与玻璃纤维增强塑料摩擦学高度相关, 因为玻纤增强件的高刚度、表面非均质性和纤维暴露风险, 均可能放大摩擦波动和噪声。

MOLYKOTE的低分油降噪润滑脂和干膜减摩涂层说明, 成熟润滑解决方案应从“减摩抗磨”转向“降噪、防粘滑、低分油、材料兼容和长寿命”的综合工程设计。

7 测试评价方法



图7 测试评价方法与机理表征

玻璃纤维增强塑料润滑脂体系可采用销盘、球盘、往复滑动、SRV试验、齿轮台架试验和PV极限评价等方法进行摩擦磨损测试。试验方法应根据实际应用选择：齿轮和传动件应关注滚滑复合、接触疲劳和温升；滑轨和卡扣应关注往复滑动、启动力和粘滑；轴套和导向件应关注PV极限和长期磨损。

润滑脂本体性能测试包括锥入度、滴点、分油率、低温扭矩、氧化安定性、机械安定性和材料相容性等。对于玻璃纤维增强塑料应用，分油率、低温扭矩、材料相容性和长寿命剪切稳定性尤为重要。

表面与界面分析可采用SEM、EDS、XPS、ToF-SIMS、三维轮廓仪、FTIR和Raman等技术。对于汽车玻纤增强塑料部件，还应引入粘滑与NVH测试，记录静摩擦系数、动摩擦系数、静动摩擦差、摩擦力波动、噪声强度和耐久循环后的性能变化。

8 现有问题与发展方向

8 现有问题与发展方向

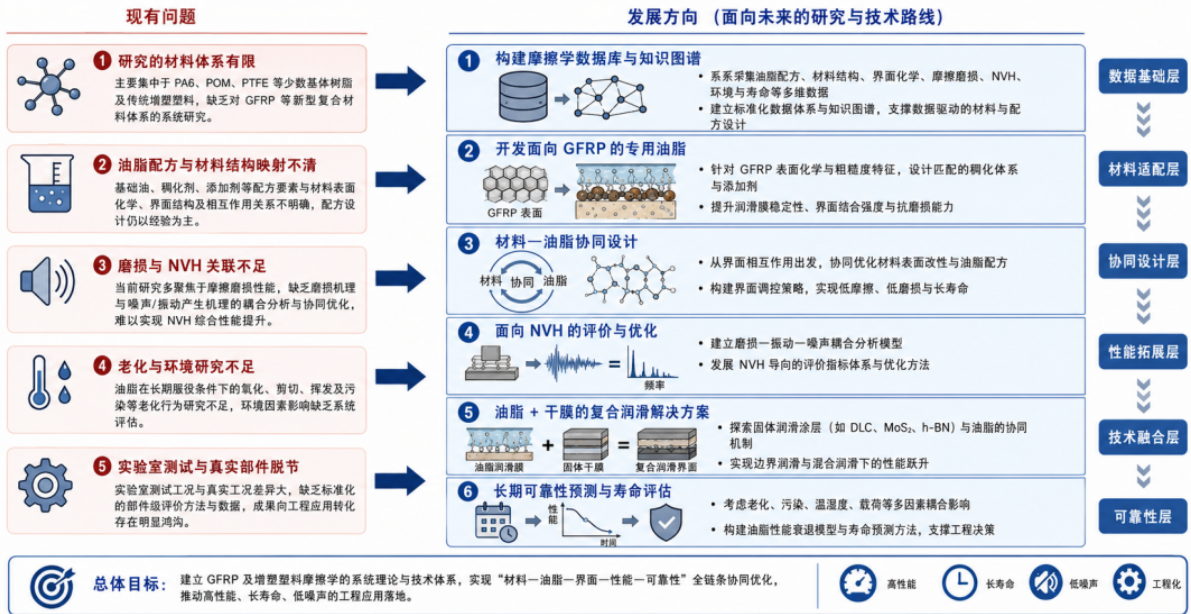


图8 现有问题与发展方向

当前玻璃纤维增强塑料润滑脂研究仍存在材料体系研究不均衡、润滑脂配方与材料结构对应关系不清晰、摩擦磨损与NVH关联不足、长期老化和环境影响研究不足、实验室测试与实际部件评价之间存在差距等问题。

未来研究应建立玻璃纤维增强塑料摩擦学数据库，系统比较不同基体、不同玻纤含量、不同纤维长度、不同界面处理和不同对偶件材料在润滑脂条件下的摩擦磨损行为。

同时，应发展面向玻纤增强塑料的专用润滑脂，开展材料-润滑脂协同设计，引入NVH导向评价，推动润滑脂与干膜涂层组合技术，并结合数字化建模、在线监测和寿命预测，实现从经验选型向机制驱动和智能决策转变。

9 结论

9 结论：材料—润滑脂—界面膜—第三体—NVH—可靠性一体化设计

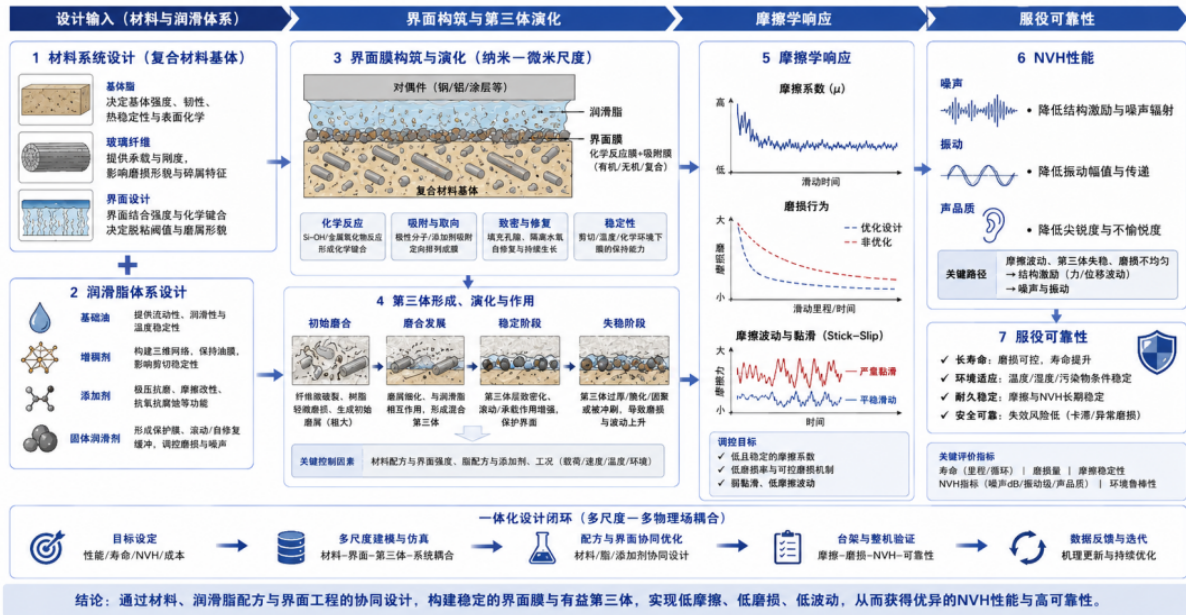


图9 材料-润滑脂-界面膜-第三体-NVH-可靠性一体化设计

玻璃纤维增强塑料的摩擦学行为由聚合物基体、玻璃纤维、纤维/基体界面、对偶件材料、工况和润滑状态共同决定。玻璃纤维的引入可提高材料承载能力、抗蠕变能力和尺寸稳定性, 但也可能因纤维端部暴露、纤维拔出和纤维断裂形成硬质磨粒, 从而导致磨粒磨损、对偶件划伤、摩擦波动、粘滑和噪声。

润滑脂是改善玻璃纤维增强塑料摩擦学性能的重要技术手段。基础油决定润滑膜和低温性能, 稠化剂决定保持性、分油和阻尼性能, 添加剂决定边界膜和抗磨性能, 固体润滑剂决定低剪切界面和防粘滑性能。

未来, 玻璃纤维增强塑料润滑研究应建立“材料-润滑脂-界面膜-第三体-NVH-可靠性”的一体化设计方法, 从而推动玻璃纤维增强塑料运动部件在汽车、机械和精密工程领域的高可靠应用。

参考文献

[1] Kunishima Y, et al. Tribological behavior of glass fiber reinforced-PA66 in contact with carbon steel under high contact pressure, sliding and grease lubricated conditions. *Wear*, 2020.

[2] Kunishima Y, et al. Effects of glass fiber properties and polymer molecular mass on the mechanical and tribological properties of a polyamide-66-based composite in contact with carbon steel under grease lubrication. *Wear*, 2020.

[3] Kunishima Y, et al. Comparison of the tribological properties of carbon/glass fiber reinforced PA66-based composites in contact with carbon steel under dry and grease lubricated conditions. *Wear*, 2021.

- [4] Li et al. Study on Tribological Properties of Gear Material PA66 Reinforced by Glass Fibers. Tribology Letters, 2024/2025.
- [5] Li D X, et al. Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced PA6 composites. Materials & Design, 2013.
- [6] Arun K V, Singh S. Friction and Wear Behaviour of Glass Fibre Reinforced Polymer Composite under Dry and Oil Lubricated Environmental Conditions. Materials Today: Proceedings, 2017.
- [7] Dow Silicones Deutschland GmbH. 汽车用润滑剂的降噪与减摩技术. Presented at ELGI AGM 2018.
- [8] DuPont MOLYKOTE. Noise-Dampening Greases and Stick-Slip Prevention Solutions.
- [9] VDA 230-206. Evaluation of stick-slip noise and friction coefficient between sliding material pairs.
- [10] The lubrication world of Mao Gong. Research progress on tribological principles of glass fiber reinforced plastics and friction-improving technology of lubricating grease. May 2026.