

# 减摩涂层对比研究

—— 技术研究论文 ——

## 摘要

减摩涂层 (AFC, anti-friction coating) 是一种类似工业涂料的产品, 然而它们当中包含的不是有色颜料, 而是分散于经过精心选择并混合的树脂与溶剂中的超微固体润滑颗粒。本文系统介绍了减摩涂层的基本成分、常见干膜涂层的比较、固体润滑剂的性能对比, 以及其在汽车、航空航天、铁路、3C电子等领域的应用。

关键词: 减摩涂层; 固体润滑剂; 二硫化钼; PTFE; 石墨; 干膜涂层

## 一、引言

摩擦是我们生活中不可避免的一部分，但在技术世界中，我们更希望将它降到最低，甚至完全消除。减摩涂层作为工业技术的一大革新，不仅可以降低设备的摩擦和磨损，还能延长寿命、提升性能。

减摩涂层（AFC）可用常规的涂装技术进行施工，包括喷涂、浸涂、刷涂和辊涂。本文将深入介绍减摩涂层的基本成分、常见类型对比及其应用领域。



图1 减摩涂层应用示意图

## 二、减摩涂层的基本成分

减摩涂层通常由四个主要组分构成：固体润滑剂、粘结剂、添加剂和溶剂。每个组分都在涂层的性能中发挥着关键作用。

### 1. 固体润滑剂 (Solid Lubricant)



图2 固体润滑剂示意图

这是AFC的核心。MoS<sub>2</sub>、石墨或PTFE等固体润滑剂通过在运动部件之间形成光滑的界面来减少摩擦。这些材料具有层状或分子结构，能够在接触表面形成低剪切强度的润滑膜。

## 2. 粘结剂 (Binder)



图3 粘结剂示意图

粘结剂的作用就像胶水一样，将固体润滑剂颗粒固定在一起并将它们粘附到基材上。它确保涂层保持在原位并提供耐用的层。常用的粘结剂包括环氧树脂、酚醛树脂和有机硅树脂等。

## 3. 添加剂 (Additive)



图4 添加剂示意图

添加剂可增强涂层的特定性能。它们可以改善润湿性（涂层的扩散程度）、润滑剂的分散性、耐腐蚀性或其他所需的特性。常见添加剂包括防腐剂、流平剂和稳定剂等。

#### 4. 溶剂 (Solvent)

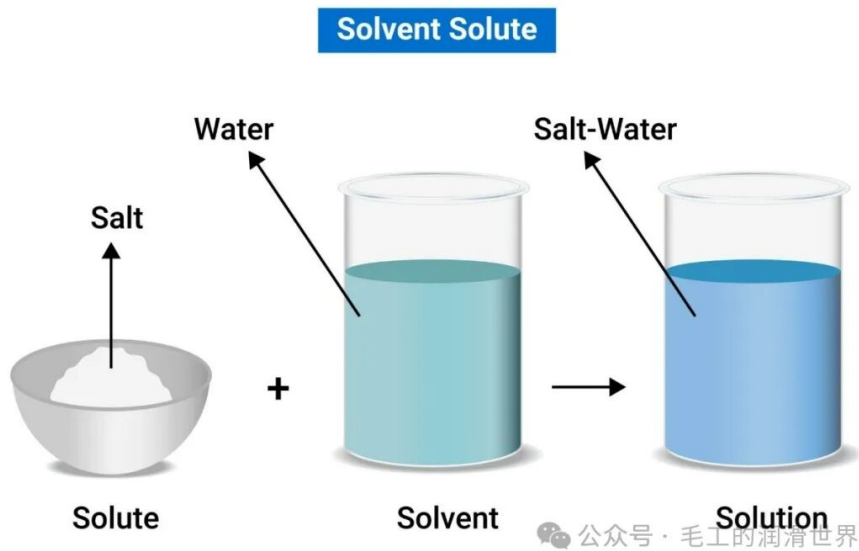


图5 溶剂示意图

溶剂是有助于涂覆涂层的液体载体。它在施工后蒸发，留下粘结剂、润滑剂和添加剂的固体薄膜。常用溶剂包括水、有机溶剂和混合溶剂等。

### 三、常见干膜涂层的比较

下表概述了不同干膜涂层的比较。每种涂层都有自己的优点和缺点，使其适用于不同的应用场景。

涂层类型	典型厚度	主要成分	加工温度	涂覆工艺	关键特性（特别是耐磨性）	典型应用
减摩涂层	3-25 微米	固体润滑剂、粘合剂、溶剂	150-220° C	适用于各种工业涂覆方法：喷涂、浸涂、辊涂、丝网印刷	极低摩擦系数，优异的耐磨性	汽车零部件、飞机、机车、一般工业应用
氟聚合物涂层（如 PTFE、FEP、PFA）	数十至数百微米	氟聚合物（如 PTFE、FEP、PFA）	高温（通常在 300° C 以上）	喷涂、浸涂、静电涂覆	耐磨性较低，但优异的化学惰性和低摩擦性有助于延长零件寿命	不粘炊具、化学加工设备、高温绝缘
类金刚石碳（DLC）	通常小于 5 微米	具有类金刚石性质的非晶碳	中温（约 200-300° C）	等离子增强化学气相沉积（PECVD）、溅射	极高的耐磨性、硬度和低摩擦性	切削工具、发动机部件、医疗植入物
电镀（如铬、镍、锌）	根据工艺差异很大	金属（如铬、镍、锌）	根据电镀工艺而定	电沉积	耐磨性因镀层金属和工艺参数而异，但通常具有良好的耐腐蚀性	汽车零部件、管道装置、电子产品

表1 常见干膜涂层性能对比表

### 四、减摩涂层的常用固体润滑剂

#### 1. 二硫化钼 (MoS<sub>2</sub>)

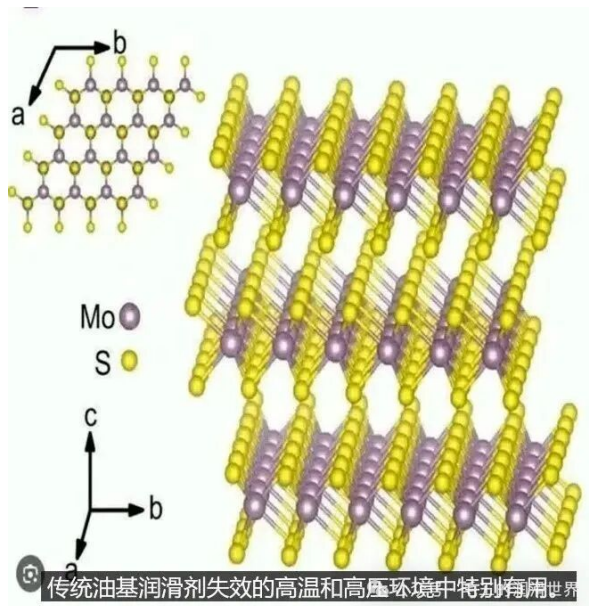
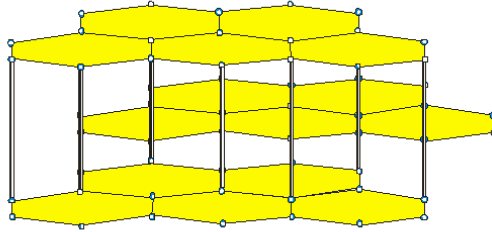


图6 二硫化钼 (MoS<sub>2</sub>) 示意图

一种固体润滑剂，具有低摩擦系数、优异的高温性能和良好的耐化学性。它在表面上形成一层薄而光滑的薄膜。MoS<sub>2</sub>具有层状结构，层间剪切强度低，适合真空和高载工况。

## 2. 石墨 (Graphite)



石墨

图7 石墨示意图

一种结晶形式的碳，由于其层状结构而表现出良好的润滑性能。它可以承受高温并且具有化学惰性。石墨需要水分才能发挥最佳润滑效果，因此在干燥环境或真空中性能有所下降。

## 3. 聚四氟乙烯 (PTFE)



图8 聚四氟乙烯 (PTFE) 示意图

PTFE通常被称为特氟龙，是一种合成含氟聚合物，具有非常低的摩擦系数。它很强的耐化学性，可以在很宽的温度范围内工作。PTFE的摩擦系数仅为0.04-0.1，是已知固体材料中最低的

之一。

## 五、固体润滑剂性能比较

属性	二硫化钼 (MoS <sub>2</sub> )	特氟龙 (PTFE)	石墨
摩擦系数	0.03-0.15	0.04-0.25	0.1-0.25
温度范围 (°C)	-200 至 +450 (在真空中)	-200 至 +260	最高 +500 (在惰性气氛中)
承载能力	高	低到中	中到高
耐磨性	优异	良好	良好
耐化学性	优异 (但不耐强酸和强碱)	优异	良好
真空兼容性	优异	良好	有限 (在真空中会释放气体)

表2 固体润滑剂性能对比表

上表展示了三种主要固体润滑剂的关键性能参数对比。MoS<sub>2</sub>在高载和真空环境中表现最优，PTFE具有最低的摩擦系数和最好的耐化学性，而石墨则在高温应用中表现突出。

## 六、减摩涂层的应用领域

### 1. 汽车工业

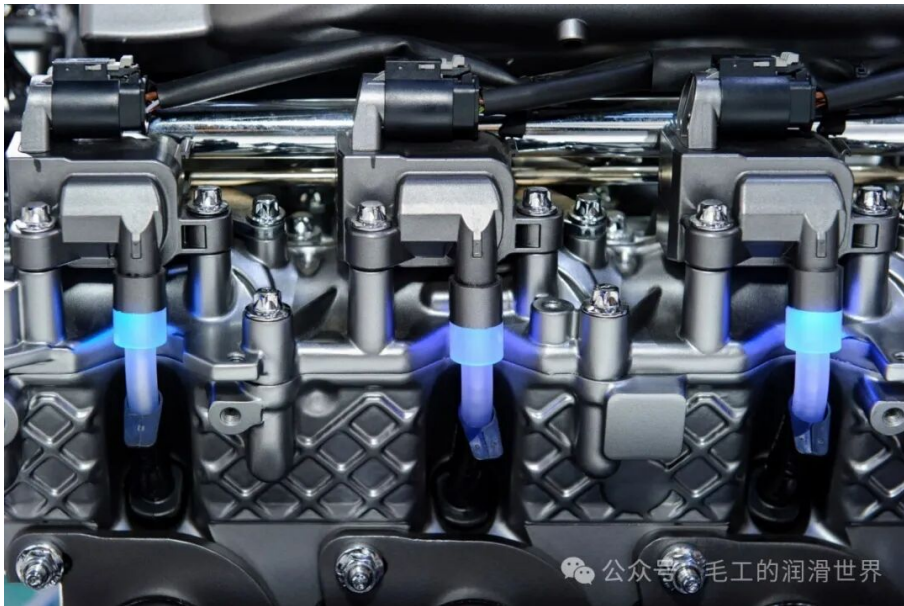


图9 汽车工业应用

发动机部件（活塞、轴承、气门机构）、传动部件、制动系统、门铰链和座椅机构，以减少磨损、摩擦和噪音。减摩涂层在汽车行业中的应用可显著提高燃油经济性和部件寿命。

### 2. 智能汽车



图10 智能汽车应用

电动机、电池组件、转向系统和传感器，可在苛刻的工作条件下提高效率、耐用性和可靠性。新能源汽车对减摩涂层的需求正在快速增长。

### 3. 航空航天

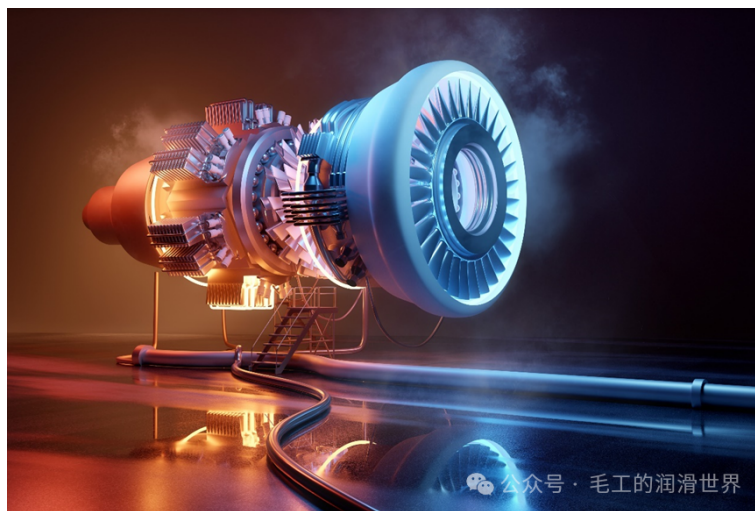


图11 航空航天应用

涡轮叶片、起落架、控制系统和紧固件，可承受极端温度、高负载和真空条件。航空航天领域对涂层的性能要求极高， $\text{MoS}_2$ 因其优异的真空性能而广受采用。

### 4. 铁路交通



图12 铁路交通应用

车轮轴承、车轴、刹车片和受电弓，用于提高性能、减少维护和延长使用寿命。高铁等现代铁路交通对减摩涂层的需求日益增长。

## 5. 3C电子

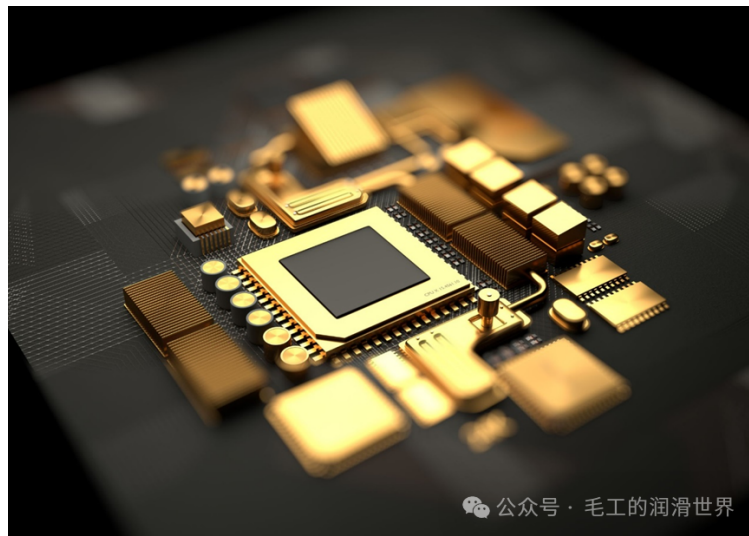


图13 3C电子应用

连接器、开关、键盘和散热风扇，用于减少微型组件中的摩擦、磨损和噪音。随着电子产品微型化趋势，减摩涂层在此领域的应用越来越广泛。

其他应用领域：减摩涂层还广泛应用于智能机器（机器人、无人机、飞行汽车）、医疗器械、制造业等领域。减摩涂层的多功能性和性能优势使其在广泛的工业和技术应用中至关重要。

## 七、结论

减摩涂层作为一种重要的表面工程技术，通过将固体润滑剂分散于树脂基体中，形成具有优异减摩性能的干膜涂层。本文系统介绍了减摩涂层的基本成分、常见类型的性能对比，以及其在各行各业的广泛应用。

不同的固体润滑剂具有各自的优势： $\text{MoS}_2$ 适合高载和真空环境，PTFE具有最低的摩擦系数，石墨则在高温应用中表现突出。选择合适的减摩涂层需要综合考虑工作环境、载荷条件、温度范围和成本因素。随着工业技术的不断进步，减摩涂层技术将在更多领域发挥其重要作用。

## 参考文献

- [1] Sullivan, J., & Brown, P. (2013). Development of Anti-Friction Coatings for Automotive Applications: A Dow Corning Study. *Journal of Tribology and Materials Science*, 58(2), 213-221.
- [2] Wong, L., & McDermott, R. (2015). Silicone-Based Anti-Friction Coatings for Aerospace: Dow Corning's Approach. *Aerospace Materials and Engineering Journal*, 32(1), 54-63.
- [3] Miller, C., & Wu, Z. (2017). PTFE-Based Anti-Friction Coatings: DuPont's Innovative Approach to Wear Resistance. *Tribology International*, 117, 289-296.
- [4] Harrison, R., & Thomas, J. (2014). DuPont's Fluoropolymer Coatings: Achieving Ultra-Low Friction in Industrial Applications. *Materials Performance and Characterization*, 3(4), 421-429.
- [5] Smith, T., & Lee, P. (2019). Solid Lubricants in Anti-Friction Coatings: Chemours' Contribution to Automotive and Aerospace Industries. *Lubrication Science*, 31(7), 1359-1372.
- [6] Green, D., & Fisher, H. (2018). Advanced Anti-Friction Coatings for High-Performance Applications: A Chemours Case Study. *Surface Coatings Technology*, 348, 157-165.
- [7] Kawasaki, S., & Kato, K. (2010). Anti-friction Coatings: A Review on Their Properties and Applications in Industrial Components. *Tribology International*, 43(3), 510-516.
- [8] Gao, W., & Zhang, L. (2018). The Impact of Solid Lubricant Coatings on the Wear Resistance of Automotive Components. *Wear*, 424, 28-35.
- [9] Chen, J., & Zeng, X. (2012). Properties and Performance of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Based Coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 530, 196-204.
- [10] Xu, Y., & Li, J. (2014). Recent Advances in Molybdenum Disulfide-Based Anti-Friction Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 258, 79-89.