

减摩涂层与竞争涂层的比较探讨

—— 技术论文 ——

17 页内容

低温固化 (<200°C)

高温烧结 (>380°C)

别再搞混了!

减摩涂层 vs. 高温不粘与硬质耐磨

MoS₂/石墨/粘结

Teflon/DLC/陶瓷

低温固化 (<200°C)

高温烧结 (>380°C)

减摩润滑派 (AF涂层)

MoS₂/石墨/粘结 AF Coating

NASA MoS₂ STUDY

NASA MoS₂ STUDY

高温不粘与硬质派

Teflon/DLC/陶瓷 Coating

The infographic is split into two main sections. The left section, with a blue background, features a large gear and a bearing. It highlights 'Low Temperature Curing (<200°C)' and 'Friction Reduction Lubrication School (AF Coating)'. It lists 'MoS₂/Graphite/Bonding AF Coating' and references the 'NASA MoS₂ STUDY'. The right section, with an orange background, features a piston and a cylinder. It highlights 'High Temperature Sintering (>380°C)' and 'High Temperature Non-stick and Hard/Wear-resistant School'. It lists 'Teflon/DLC/Ceramic Coating' and also references the 'NASA MoS₂ STUDY'. A central banner reads 'Don't mix anymore! Friction Reduction Coating vs. High Temperature Non-stick and Hard/Wear-resistant'. Logos for NASA and the European Union are present in both sections.



减摩涂层与竞争涂层的比较探讨

行业俗称 (常见误区)	基于机理的严格工程分类
特氟龙/铁氟龙涂层	烧结氟涂层 (主攻不粘/防腐, 极低承载)
特氟龙减摩涂层	减摩涂层 (主攻重载干摩擦, 防冷焊)

1. 行业常滥用特氟龙代指所有含氟或自润滑涂层
2. 烧结氟涂层靠树脂烘烤熔融, **机械承载力极差**
3. 减摩涂层本质是固体润滑剂加粘结剂的成膜体系
4. 减摩涂层设计的**核心使命**是在极端下**防止冷焊**
5. 两者均可含PTFE, 但配方逻辑与物理边界截然不同

适用: 在工程图纸上明确区分防腐不粘与承载减摩需求

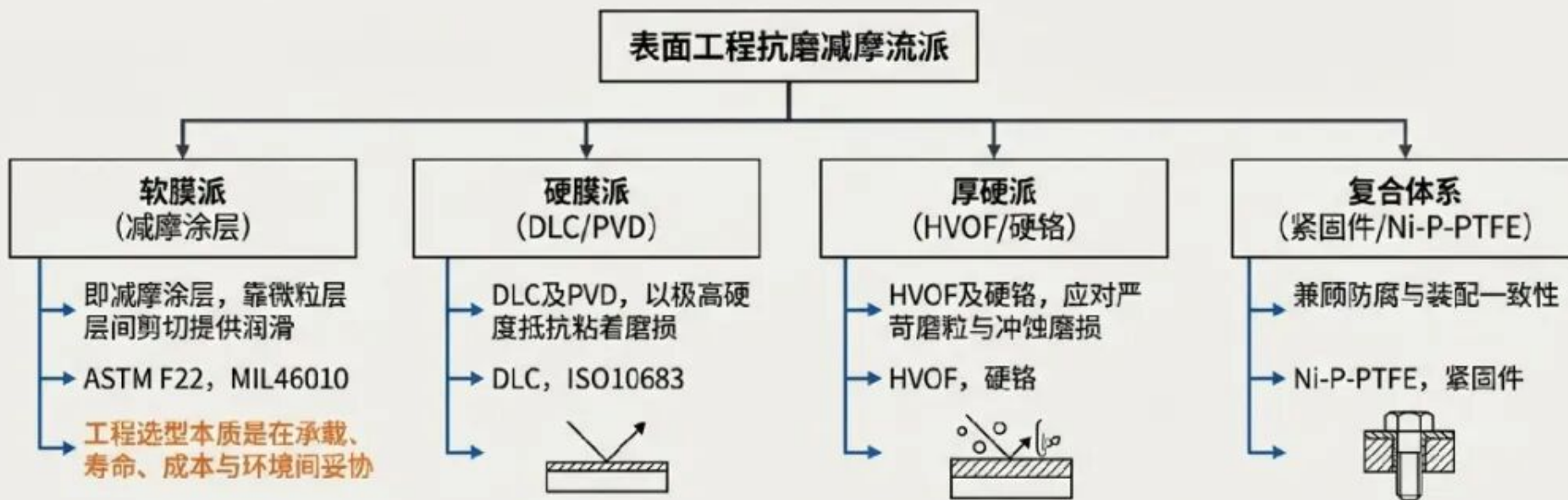
↳ MIL46010 → AS5272

不适用: 将高温不粘涂层错误指定给重载运动部件

↳ PRC8001 → TEFLON → MIL46010

表面工程门派地图：机理分类

摩擦学系统工程方案有且仅有四条主流解决路径。

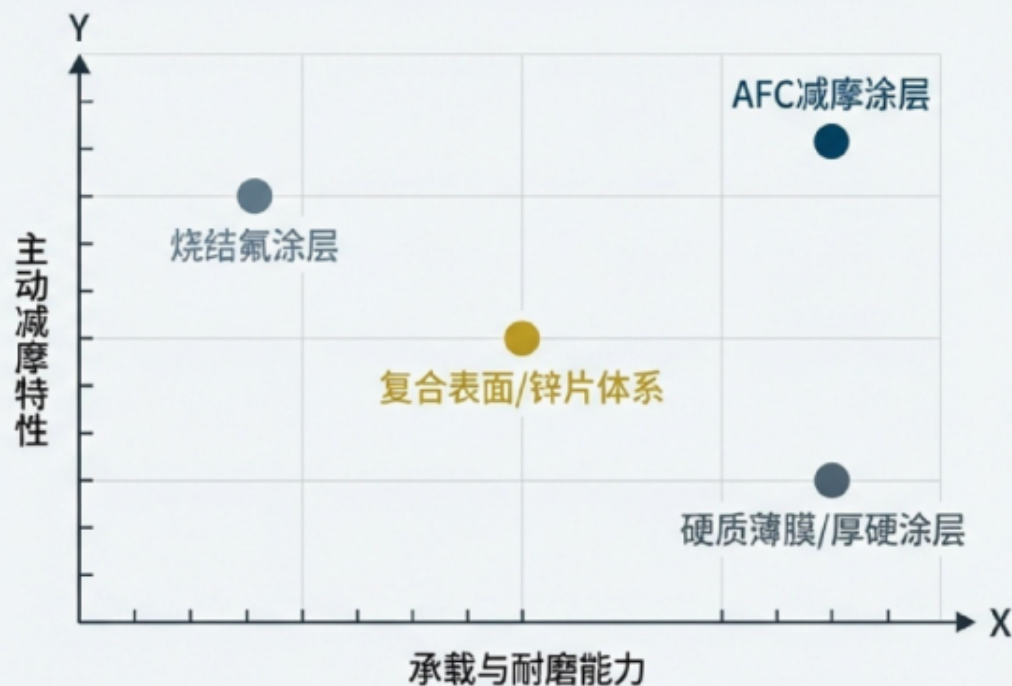


应用原则与数据参考						
适用： 基于零部件摩擦副的具体失效模式进行初步筛选	不适用： 脱离实际工况与环境载荷空谈涂层优劣	ASTM F22	MIL46010	DLC	HVOF	ISO10683
		33	0.3	0.42	0.26	1.9

低摩擦涂层门派与底层机理地图

机理决定边界，摩擦与耐磨往往难以绝对兼得。

- AFC主打重载且多为瞬态或边界干润滑
- 烧结氟高温熔融成膜，主打不粘与防腐
- 硬质薄膜与厚硬涂层强项承载低摩靠对偶
- 复合表面兼顾防腐与装配摩擦一致性



TEFLON, DLC, HVOF

减摩涂层定义：解决核心问题

以极薄的聚合物膜层提供终身重载的干摩擦润滑。

1. **核心架构**：固体润滑剂加树脂粘结剂
2. **成膜机理**：溶剂挥发后热固化交联形成致密网状结构
3. **润滑机制**：依靠润滑微粒在接触应力下的层间滑动
4. **填补空白**：解决常规流体润滑无法覆盖的干摩擦
5. **寿命基础**：随表面磨损全生命周期持续释放润滑剂

参考标准

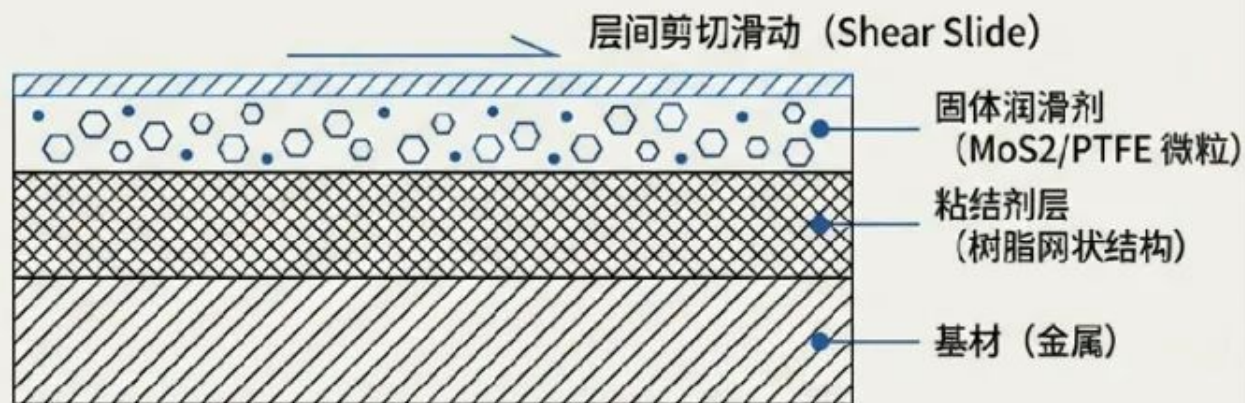
MIL46010, AS5272

参考标准

MIL46010, AS5272

适用：难以补充润滑脂或极端高低温环境的运动部件

不适用：需要流体带走大量摩擦热的高速连续运转工况



减摩涂层优势：风险更小的方案

不改变装配公差且终身免维护，是极具确定性的选择。

- 1.极薄涂层：厚度仅**0.008至0.013毫米**，不干涉公差
- 2.终身润滑：固化成一次性永久保护层，免除二次维护
- 3.杜绝冷焊：物理隔离金属基体，杜绝极压下金属粘结
- 4.宽广温域：工作温度覆盖**零下68度至204度**严苛环境
- 5.容错率高：涂层极软，可磨合自适应微小干涉

适用：精密配合、盲区隐蔽且要求免维护的滑动部件

不适用：试图利用涂层厚度来修补或补偿零件加工超差

MIL46010

MIL46010, D2510

减摩涂层边界：哪些工况不适合

高速流体冲刷与过大的对偶件粗糙度是其致命杀手。

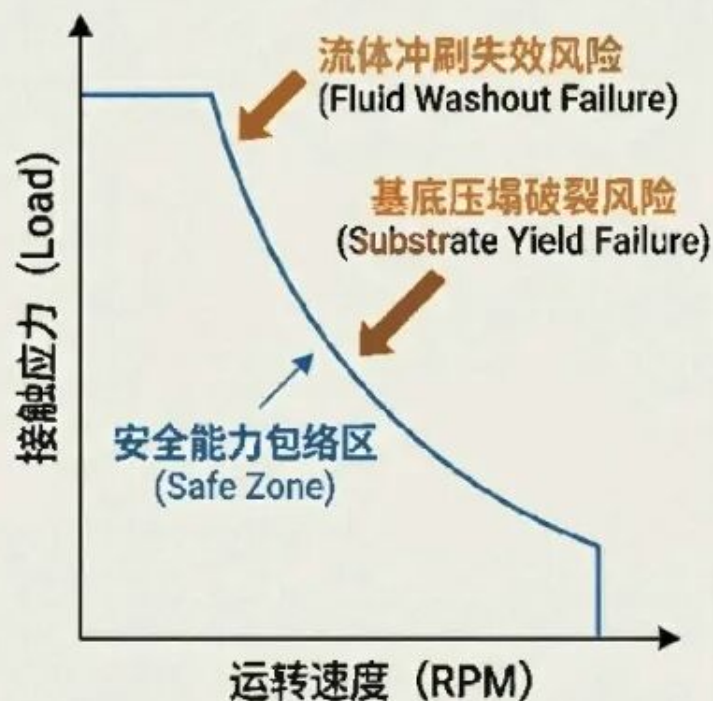
1. **速度禁区：** 一定速度的工况需要配合润滑油使用
2. **流体冲突：** 需要评估不同类型流体对涂层的破坏风险
3. **粗糙度敏感：** 对偶件过粗会像锉刀般快速刮除涂层
4. **热量累积：** 干摩擦产生的热量无法通过涂层被带走
5. **承载极限：** 接触应力超过基材屈服强度变形时即破裂

适用： 低速重载、间歇往复运动、摆动或静压过盈配合

不适用： 存在高压流体污染及高速连续旋转的轴承部件

MIL46010

MIL46010



减摩涂层关键纪律点：交付稳定

涂层质量三分靠材料，七分靠预处理与固化纪律执行。

1. 绝对清洁：表面需通过ASTM F22水膜连续不断裂检验
2. 附着基底：铝阳极氧化或钢材磷化打底是结合力保障
3. 膜厚控制：规范需严控在0.008至0.013毫米寿命窗口
4. 固化计时：计时必须从零件核心真正达到目标温度算起
5. 严禁接触：清洗后绝不允许作业员裸手接触待涂表面

适用：

建立严格的随炉温控记录
与首件水膜检验工序

不适用：

将烘箱设定时间直接等同于
零件实际固化时间

ASTM F22 | MIL46010, F22

Acceptaic Risk Table		
核心工序	常见违规动作	灾难性失效风险
表面清洁	省略F22水膜检验或裸手接触	附着力完全丧失，大面积起皮脱落
基材附着	省略磷化/阳极氧化打底	涂层极速磨穿露白
热固化交联	以入炉时间代替零件核心达温时间	交联度不足，耐流体污染能力崩溃

标准化验收框架：清洁与寿命

摒弃主观感官判断，用统一标准数据指标衡量涂层质量。

1. 清洁标准：采用F22检验，表面无挂水破裂现象即合格
2. 附着力测试：执行D2510规范的划格法与专用胶带剥离
3. 寿命验证：使用Falex试验机测定D2625标准耐磨时间
4. 承载下限：必须通过11120牛顿的极限极压负载测试
5. 环境抵御：强制进行热稳定与标准盐雾老化后附着复测

适用：

将标准化测试规范代号直接写入图纸表面要求栏

不适用：

仅依靠肉眼观察外观颜色深浅与平整度做验收

ASTM D2510, ASTM D2625 | MIL46010, D2510, D2625

Acceptance Standards Matrix		
验收维度	适用标准规范	合格基准线
表面绝对清洁度	ASTM F22	水膜连续不断裂 (无水珠聚集)
基底附着力	ASTM D2510	胶带撕扯无涂层剥落 (划格边缘无起皮)
极限极压与寿命	ASTM D2625	承载 > 11120N / 磨损寿命 > 450分钟

减摩涂层失效机理：三类根因

大面积脱落与极速磨穿通常源于工艺违规与超工况边界。

1. 灾难性剥离：预处理不良或服役中流体污染致附着丧失
2. 极速磨穿露白：膜厚过厚、基材受压变形或对偶件过粗
3. 高温软化降解：温度长期超260°C破坏树脂交联网络
4. **预防动作一**：强制引入进料水膜检验与标准化基材打底
5. **预防动作二**：优化表面粗糙度匹配并控制最高接触温度

适用：结合磨痕形貌的显微观察判定涂层失效物理根因

不适用：在未解决污染源与粗糙度失配前盲目二次重涂

Failure Root Cause and Prevention Matrix

典型失效形态 (Failure Mode)	物理根本原因 (Root Cause)	纠正与预防动作 (Corrective Action)
大面积起皮/片状剥落	基材油污残留或流体润滑剂化学渗入软化树脂	严格执行F22检验；隔离外部高压流体源
局部快速磨穿露白	对偶表面粗糙度过高(如钝刀效应)或基材屈服	抛光对偶件Ra<0.4；提升基材硬度防止压塌
涂层糊化/焦黑降解	干摩擦热量累积致局部瞬时接触温度超260°C	降低运转速度 (RPM) 或引入间歇性散热停机

Roboto Mono: ASTM D2625 | MIL46010

竞争1 烧结氟涂层： 强项与代价

提供工业级极致不粘与防腐性能，但必须牺牲机械承载力。

- 1. 核心强项：高温烘烤熔融成膜，表观摩擦系数极低
- 2. 防腐优势：树脂化学惰性极强，全面阻绝腐蚀介质渗透
- 3. 最大代价：纯树脂材质软无耐磨骨架支撑，承载力极弱
- 4. 工艺代价：极高的烘烤温度极易破坏部分合金基体力学
- 5. 定位差异：本质为脱模防腐涂层，绝不等同重载减摩

适用：

化工防腐管道、模具强力脱模、无应力轻载导轨

不适用：

高接触应力、存在磨粒介入或高频高负载往复

TEFLON, PRC8001

竞争2 DLC涂层： 强项与代价

具备极高硬度与超低摩擦，但对基材条件和成本极度挑剔。

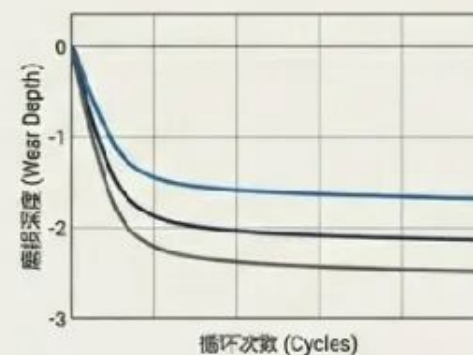
适用：

高附加值、形状简单、基体坚硬抛光优异的摩擦副

- 1. 核心强项：非晶碳网络提供类金刚石的高硬度与抗磨损
- 2. 超低摩擦：固有干摩擦系数极低，运转平稳降能耗
- 3. 致命代价：内应力大，对基材高硬度与极低粗糙度苛求
- 4. 几何限制：典型的视线沉积工艺导致深孔盲孔难以覆盖
- 5. 经济代价：依赖高真空镀膜设备导致加工成本极高

不适用：

硬度较低的软基材、高粗糙度或发生塑性变形差



DLC, NANOVEA

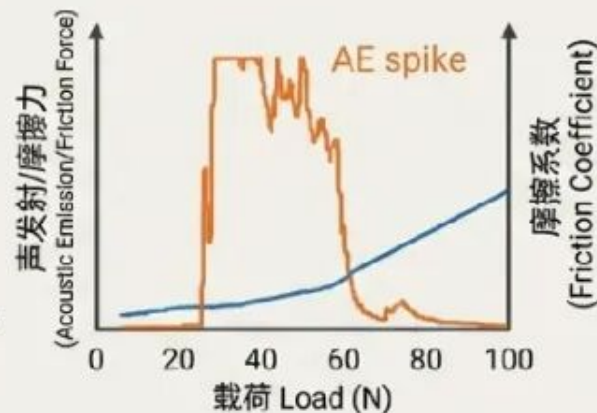
竞争3 PVD氮化物： 强项与代价

高温耐磨是主线防御能力，
但抗摩擦系数并不天然具
优势。

- 1. 核心强项：TiN或CrN提供极高表面硬度与抗粘着磨损
- 2. 高温稳定：复合氮化物在极高工作温度下抗氧化极佳
- 3. 附着代价：涂层脆，软基材发生轻微塑性变形时易崩落
- 4. 摩擦劣势：设计初衷是抗磨钝，摩擦系数远高于减摩膜
- 5. 对偶磨损：极高硬度在缺乏润滑时易像刀具切削对偶件

适用：高温模具、切削刀具
等需极高抗磨且抗氧化场景

不适用：具极低摩擦系数严
格需求或基体会弹性变形部件



N/A

PVD

竞争4 HVOF厚硬涂层 层代价

取代镀硬铬的寿命派终极方案，但粗糙度加工挑战极严重。

- 1. 核心强项：金属陶瓷极度耐受磨粒磨损与高压冲蚀磨损
- 2. 环保替代：机械性能媲美超越硬铬，完全消除六价铬
- 3. 寿命倍增：厚重致密的物理层屏障为重载部件提供超长寿命
- 4. 加工代价：喷涂后极度粗糙，必须依赖昂贵的后磨削
- 5. 匹配风险：过高表面粗糙度若处理不当灾难性磨损软对偶

适用：航空起落架、大型油气液压杆等重载巨型部件

不适用：精密公差配合、内孔极小且无法二次磨削加工件

Capability Benchmarking Cross-Table

评估维度	HVOF (WC-Co-Cr)	传统镀硬铬 (Hard Chrome)
耐磨粒磨损性能 (Abrasive Wear)	极优 (Superior)	良好 (Good)
环保合规性 (Eco-Compliance)	无毒害 (Cr6+ Free)	严重六价铬污染 (High Toxic)
表面加工代价 (Machining Cost)	极高(必须后磨削)	低(电镀自流平)
摩擦系数对比 (Friction)	相当 (Similar)	相当 (Similar)

HVOF

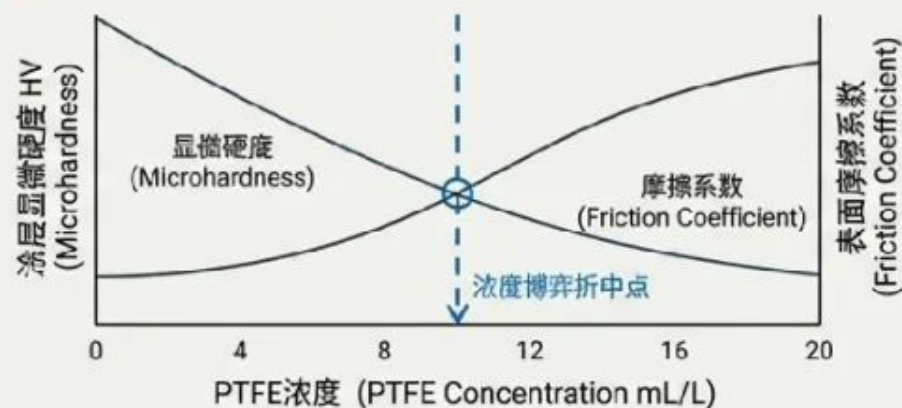
竞争5 复合表面工程：适用边界

防腐与自润滑兼顾的聪慧折中方案，
但基底硬度必然受损。

- 1. 核心强项：在化学镀镍磷或硬质阳极层中直接共沉积PTFE
- 2. 双效合一：底膜提供防腐支撑，PTFE微粒提供低摩擦力
- 3. 均匀覆盖：化学镀工艺不受形状限制，能完美覆盖盲孔
- 4. 核心代价：大量软质颗粒的加入显著降低原有表面硬度
- 5. 浓度博弈：高PTFE浓度带来更低摩擦，但牺牲沉积速率

■ 适用：纺织钢领、气动阀芯等兼具复杂几何与轻载润滑需求

■ 不适用：极端重压易致基体变形或对微硬度有极高要求工况



N/A

NIPPTFE

竞争6 紧固件体系：定位差异

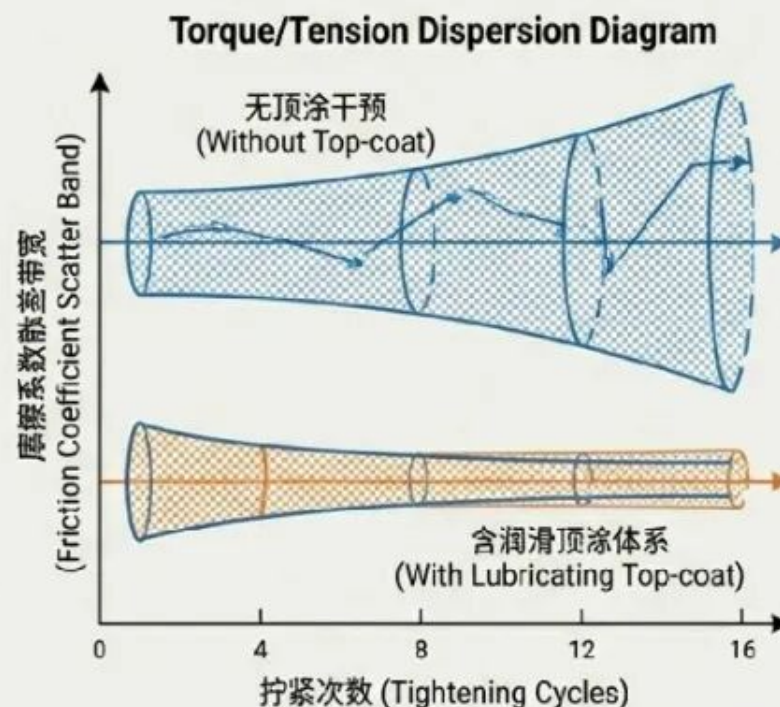
以极致防腐为基石，以摩擦系数一致性为核心装配使命。

1. 核心定位：锌片/磷化主防腐，附加顶涂润滑剂锁定摩擦
2. 装配一致：确保多次拧紧时扭矩与轴力关系的绝对稳定
3. 环境敏感：不同温湿度老化工况下摩擦衰减差异极大
4. 水分干扰：冷凝水介入会彻底改变局部微界面润滑状态
5. 应用焦点：不追求绝对低摩擦，只追求批次散差极致收敛

适用：汽车、航空螺栓等对扭矩轴力一致性要求严苛连接件

不适用：连续高频往复滑动的摩擦副，及非螺纹高压运动件

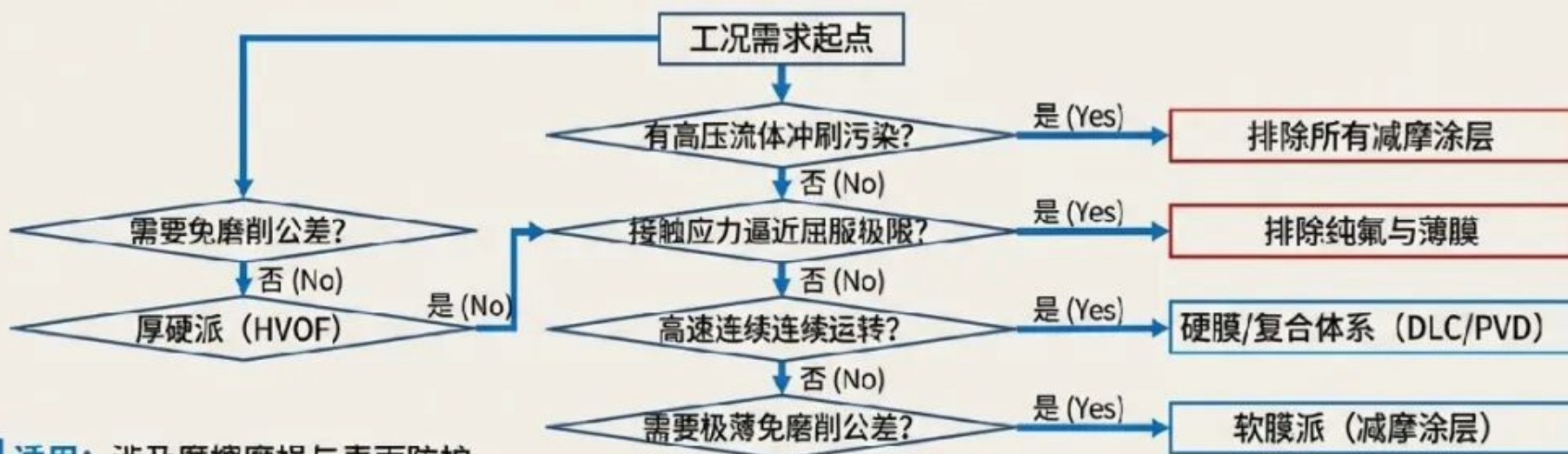
ISO10683 Roboto Mono
ISO10683 Roboto Mono





选型决策树：四问推荐门派

认清工况边界与技术代价，运用客观排除法精准工程选型。



适用：涉及摩擦磨损与表面防护系统的新产品设计初期图纸

不适用：脱离零件实际加工公差与制造链条的纸上谈兵

ASTM D2625, ASTM D2510
MIL46010, PVD, DLC, HVOF

1. 一问环境：有高压流体冲刷？是则避开所有减摩涂层
2. 二问载荷：接触应力逼近屈服？是则排除纯氟与薄膜
3. 三问运动：高速连续运转？是则必须转向硬膜或复合层
4. 四问公差：允许实施后道精密磨削？不允许则放弃厚硬
5. 决策收敛：锁定流派后，依托测试规范代号建立验证闭环