

# 金属表面自生强化技术机理研究及实践应用

曹琦

北京摩安迈特技术有限公司，北京，100071

曹琦，(1969--)，男，研究员，北京交通大学装备部件智能强化及再制造研发中心主任，金属部件摩擦磨损在线预防和治理专家，主要研究方向为金属表面自生强化技术、闪温熔覆、设备自润滑环境构建、设备延寿等。

## [摘要]

结合天然蛇纹石矿物粉体材料在工业减摩和在线磨损修复领域的实践应用，基于 Block 闪温理论和 Lewis 酸碱理论提出来“闪温熔覆”理论，并结合天然层状硅酸盐的摩擦学特性，提出来“金属表面自生强化技术”工程概念。在复合功能粉体材料介入的前提下，借助摩擦能，复合功能粉体材料会与运动副摩擦表界面发生一系列的物化反应，完成运动副摩擦表界面改性强化、动态抛光、自适应增材修复、固液多元润滑，构建来设备极低摩擦极少磨损的自润滑环境。提高设备效率，延长关键部件寿命，降低故障率，降低设备全寿命周期的运维成本，实现节能减排和降本增效。

## [关键词]

闪温熔覆、改性强化、自适应增材、在线修复、在线抛光、固液多元润滑、配合间隙优化、自润滑环境。

## 0 前言

常识告诉我们，金属表面磨损是不可逆的。在金属运动副相对运动的过程中，劣化的主要表现是运动副表面材料摩擦损耗和生成摩擦热，导致能量与材料的损耗，是设备劣化的主要原因，也是影响设备效率、故障率、能源消耗和运行成本的主要因素。摩擦过程中，微观表面凸起相互碰撞、挤压产生的热能和机械能可以统称为“摩擦能”，研究知道，摩擦产生的能量会使基体表面变得非常活跃，加剧运动副接触表面的磨损行为和能量损失。同时，在一定条件下，摩擦能也会成为催生其它各种物化反应的条件，在运动副表面产生一定的自组织、自适应、自生长和自修复功能。

早在 1942 年，国外已有偶然发现，在工作中的机器润滑介质中介入某些不同于传统润滑添加剂的有机材料、金属粉体、无机矿物粉体，能够出现减少摩擦和在线修复磨损现象[1]，但由于当时的理论研究和检测技术局限，这项技术的研究和产业化应用进展缓慢。到 2000 年，全球发现具有上述功能的摩擦学化合物已超过 200 多种，尤其是 80~90 年代，俄罗斯及其它欧洲国家对蛇纹石的摩擦学性能进行一系列的试验室验证和工业应用效果验证，使这项技术在欧美，包括日本、韩国的地区得到较为广泛的应用。我国技术和工业领域也进行来大量的研究试验和工业实践。

## 1、天然层状硅酸盐矿物复合粉体材料的摩擦学性能

### 1.1 天然层状硅酸盐粉体颗粒活性吸附

微纳米级的天然层状硅酸盐矿物复合粉体颗粒具有丰富的表面活性基团及较大的比表面积，分散在润滑介质中表现出极高的活性和吸附能力，极易在摩擦过程中吸附到金属表面，并把润滑介质中的其它微纳米颗粒一起吸附在金属表面并铺展。在利用振动磨与盘式磨制备蛇纹石粉体的过程中，均观察到大量粉体吸附于新鲜铁基摩擦表面的现象，盘式磨甚至出现

因吸附过多粉体导致无法正常运转的情况。分析认为，中性条件下，蛇纹石表面荷正电，八面体片基面存在 Mg 质点，是典型的 lewis 酸，而铁摩擦副新鲜磨损表面存在着大量的离域电子，为 Lewis 碱，粉体会通过吸附于摩擦表面而获得电子，使自身表面结构变得稳定。综上可知，“层状硅酸盐粉体与金属”表面 Lewis 酸碱位发生反应形成强作用力是天然层状硅酸盐粉体颗粒优良铁基吸附性能的本质[2]，是天然层状硅酸盐粉体颗粒在润滑介质中表现优秀摩擦学性能的前提条件。

## 1.2 天然固体润滑剂

天然层状硅酸盐矿物是天然的固体润滑剂，粉体颗粒具有类似于石墨及 MoS<sub>2</sub> 等常规固体润滑材料一样的层状结构，主要由 Si-O 四面体及 Mg-O 或者 Al-O 八面体组成，如图 1。层间相互作用类型为氢键与范德华力，在受到挤压及剪切应力作用时容易产生层间滑动，进而发生层间劈裂及解离，具有类似于传统层状固体润滑材料的润滑特点，有良好的抗极压和润滑效果。所以天然层状硅酸盐矿物粉体颗粒分散到润滑介质中，在摩擦过程中吸附到摩擦副接触表面，在摩擦副接触表面之间发生类似微滚珠效应，起到阻隔和润滑作用。同时高反应活性的硅酸盐矿物质具有催化作用，可促进润滑介质的碳链断裂，生成具有润滑作用的石墨，在硅酸盐颗粒表面包覆[3]。固体润滑剂和油液润滑形成正向耦合，构成了“油液多元复合润滑”，大大提高了润滑效果

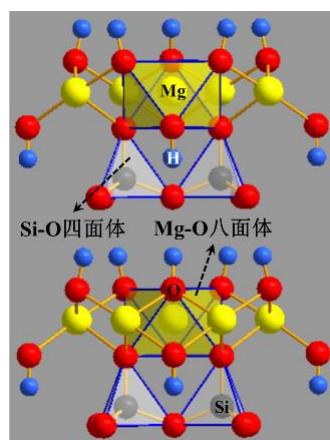


图 1 层状硅酸盐的理想晶体结构图

## 1.3 在线微抛光

天然层状硅酸盐微纳米粉体具有在线动态微抛光功能。功能粉体介入后，颗粒的硬度在 2-3.5，比较软，吸附在接触表面的功能粉体颗粒首先在运动副接触表面研磨细化，二次颗粒及微纳米金属颗粒也会再次吸附堆砌并参与研磨，在运动摩擦副之间起到支撑阻隔作用，减缓了微凸起相互碰撞和挤压，降低了摩擦磨损，同时粉体颗粒研磨过程中也会清理运动接触表面细缝、凹坑中的油污，吸附填补有益颗粒，填补不平，对金属表面进行微抛光修饰，削峰填谷，优化表面形貌，降低摩擦因数，起到了动态超精加工作用。在油润滑实验条件下进行铁基金属摩擦副摩擦磨损对比实验中[4]，原子力显微镜分析可以看出，添加功能粉体后，实验表面凸峰与凹谷大大减小，表面粗糙度大大降低。在新设备磨合期实施治理能够起到降低摩擦磨损、缩短磨合期和延长运动件寿命的作用。

## 1.4 摩擦表面改性强化和微观增材

### 1.4.1 闪温理论

“闪温理论”(flash temperatures)是荷兰知名摩擦学专家Harmen Block 1933年在壳牌工作时提出的[5]。显微镜下的光滑摩擦表面实际上是凹凸不平的,如图2,微观上外观光滑平整的表面实际是由无数个不同几何形状的凸峰和凹谷组成。运动副表面相互运动的过程中,微观凸起会相互碰撞挤压,产生800°C-1200°C左右的瞬间高温,即闪温。无数个闪温点释放热量,散发到基体和润滑介质中,导致背景温度升高,形成宏观摩擦热温度。设备的热量来自三个独立的热源,包括环境温度、基体温度和闪点温度。碰撞、挤压、摩擦所产生的摩擦能多数转化成了热能,即摩擦热,热量分布在两个摩擦表面之间,通过基体和润滑介质散发。

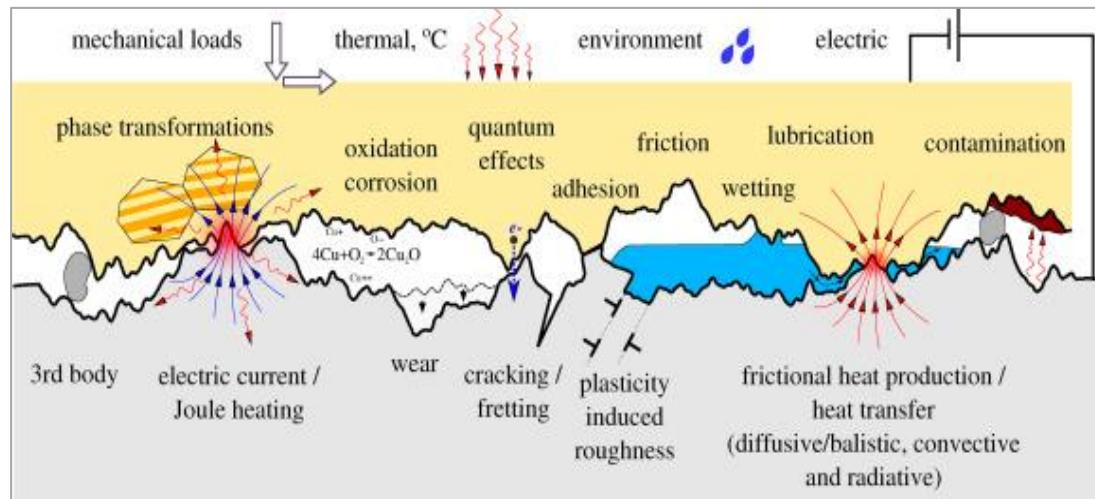


图2 运动副摩擦过程微观环境概念示意图

#### 1.4.2 改性强化层

摩擦产生的能量会使运动副基体表面变得非常活跃,加剧运动副接触表面的磨损行为和能量损失。同时,在一定条件下,摩擦能也会成为催生其它各种物化反应的条件,在运动副表面产生一定的自组织、自适应、自生长和自修复功能。在摩擦能的作用下,运动副基体表面的原子变得非常活跃,同时激发吸附在摩擦接触表面的天然层状硅酸盐微纳米颗粒发生脱水解离和原位相变,在接触表面发生一系列的物化反应,释放出镁离子、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、SiO和SiO<sub>x</sub>等颗粒。最终,摩擦表面形成了由Cu<sub>2</sub>O、CuO、SnO等氧化物,镁-铁硅酸盐、镁橄榄石、辉顽石、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、SiO和SiO<sub>x</sub>等硬质陶瓷相等二次颗粒[6]。层状硅酸盐颗粒、二次颗粒在摩擦能的作用下,进入表面凹缝、基体材料晶格或掺入晶界,会在摩擦表面发生与金属工件表面发生与金属表面渗碳、渗氮、渗硼相类似的工艺过程,在摩擦表面原位形成具有较大密度、高硬度、高熔点改性强化层,具有更好稳定性。与线下过程不同,只是这个过程在刚开始的时候相对要漫长一些,需要几十个甚至几百个小时,形成改性强化层后,在设备运行过程中是一个动态过程。

#### 1.4.3 闪温熔覆

在运动副相互运动的过程中,摩擦接触表面的微观凸起相互碰撞、切削、挤压,吸附在摩擦副表面的层状硅酸盐颗粒、相变二次颗粒以及分散在润滑介质中的微纳米金属颗粒,在接触表面不断吸附、沉积,叠加堆砌在微观凸体周围,进入表面凹缝、基体材料晶格或掺入晶界。基于Block闪温理论[5],在摩擦闪温(800°C-1200°C)的作用下,如图3,会发生类似于激光熔覆的微冶炼增材过程,表面微凸体周围发生熔融与塑性流变,发生微冶炼,形成新的固熔体,在摩擦副接触表面熔融堆积,与基体熔合生成摩擦学性能极佳的高熵

阶梯材料强化层，实现运动副表面的原位改性增材。这个微观制造过程我们概括谓“闪温熔覆”过程[7]。闪温熔覆的发现，为含天然层状硅酸盐复合功能材料的减摩、在线增材修复、运动副配合间隙和表面形貌优化功能提供了理论基础。对技术的工业化应用意义重大。

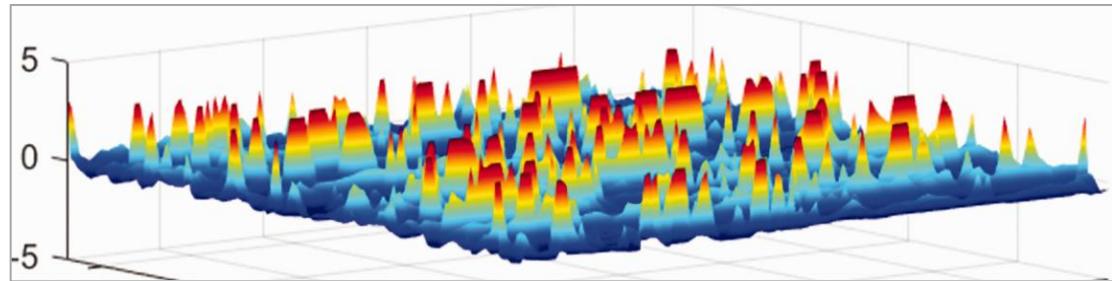


图 3 摩擦副表面闪温模型图

闪温熔覆产生新的固熔体在基体材料表面再结晶和烧结，逐层铺覆，形成摩擦学性能极强的高熵梯度异质材料强化层（国内外学术界又称其为钻石层、金属陶瓷层）。强化层与基体属冶金结合，没有明显界线，异质梯度纳米结构能够有效克服金属材料的机械不稳定性，实现“强度-塑性”协同效应[8]，所以永远不会脱落。

闪温熔覆增材过程具有自适应特性，当运动副配合间隙较大、磨损严重、表面形貌劣化相对严重时，摩擦严重，摩擦能高，表面吸附活性强，闪温熔覆增材速度大于磨损速度，会自动补偿磨损超差，这时摩擦副表面表现为微观增材制造过程，甚至表现为负磨损；当摩擦副配合状态趋于优化，摩擦磨损降低，摩擦能降低，闪温熔覆增材速度降低。在润滑介质中功能粉体材料浓度、载荷、相对运动速度及润滑环境一定的条件下，实施 MAT 摩擦治理能够实现表面磨损和增材补偿的相对动态平衡。

#### 1.4.4 含碳聚酯润滑膜

经过摩擦机械作用活化的层状硅酸盐粉体促进了润滑介质中有机碳链分解成石墨和含碳有机物，生成软质石墨和有机物构成的聚酯反应膜。推测聚酯膜的表面组成由石墨和金属氧化物为主，内部则以氧化物陶瓷相为主，从而形成了纳米硬度和弹性模量呈表面低、内部高的力学性能梯度变化。而根据现代摩擦学理论，外软内硬的表面复合结构有利于提高材料承载能力，便于磨粒通过，优化接触应力分布，改善材料的摩擦学性能[6]。

## 2、金属表面自生强化技术及工程价值

### 2.1 金属表面自生强化技术

“金属表面自生强化技术”(Metal surface Adaptive strengthening Additive manufacturing Technology, 简称“MAT 技术” ) 的“自生”是指“自适应”和“增材生长”，是在线表面改性强化、超精加工、微观增材、固液多元复合润滑环境多因素改善正向耦合的结果，颠覆了摩擦磨损不可逆性和耗散性困局。将含天然层状硅酸盐的复合粉材料在线介入润滑介质，基于摩擦学的 Lewis 酸碱理论 (Lewis acids and bases)，借助天然层状硅酸盐材料的活化特性，摩擦副运动过程中在摩擦接触区域表面吸附、叠加、堆积，根据 Blok 闪温理论，借助摩擦闪温能量激发功能材料与运动副界面交互作用并生成二次颗粒，在闪温点周围发生“闪温熔覆”过程，实现摩擦副接触表面的原位改性强化和自适应增材，自动补偿磨损超差，动态优化配副间隙和表面形貌，靶向修复磨损区域，在固液多元复合润滑状态下，实现表面磨损和靶向增材补偿的动态平衡，构建运动副间极低摩擦、极小磨损的自润滑运行状态。

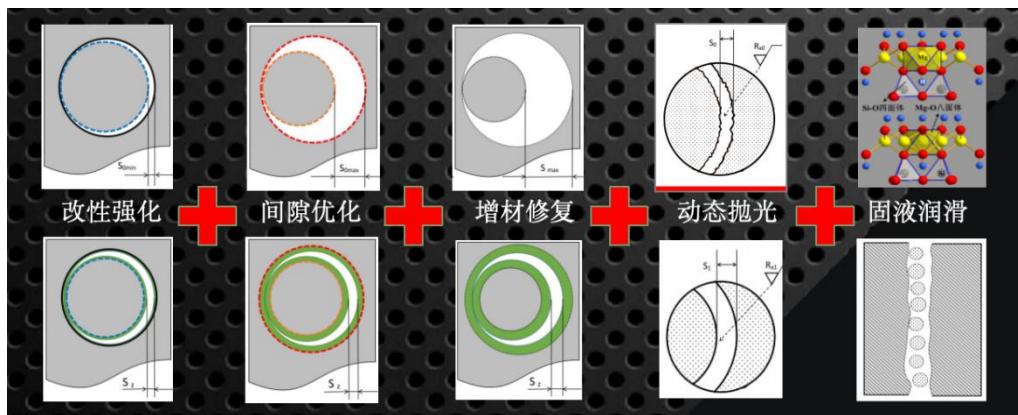


图 4 运动副摩擦过程中 5 个状态改变示意图

## 2.2 设备极低摩擦极少磨损自润滑环境构建

在功能物质材料在线介入润滑介质条件下[9], 在设备运行过程中, 摩擦副接触表面得到改性强化, 自适应增材动态优化运动副配合间隙, 动态靶向修复磨损区域, 粉体研磨物理削峰填谷, 动态抛光修饰运动副表面, 天然硅酸盐粉体颗粒加上润滑介质释放的碳和液态润滑介质构成了固液多元复合润滑聚酯膜, 如图 4, 实现表面磨损和增材补偿的动态平衡, 从而构建运动副间极低摩擦、极小磨损的运行状态, 构建了设备极低摩擦极少磨损自润滑环境, 如图 5。

## 2.3 MAT 技术的工业应用价值

MAT 技术的产业化应用, 可取得节能、减碳、降本、增效等综合效益, 提高设备的效率和运用率, 降低设备全寿命周期的运维成本:

- (1) 降低摩擦副的表面粗糙度, 摩擦系数降低至 0.003—0.007, 降低摩擦 30%以上;
- (2) 降低摩擦热, 齿轮箱和轴承温度可以下降 20%以上;
- (3) 提高热能动力机械燃烧和能效, 节约燃料 2.5—10%, CO 排放减少 30%以上;
- (4) 提高传动效率, 降低设备摩擦磨损的能耗, 节电 5-10%;
- (5) 增强抗磨能力, 延长机械零部件使用寿命 2-3 倍;
- (6) 靶向修复磨损, 在线动态优化运动副配合间隙, 降低振动 30%以上;
- (7) 降低故障率, 提高设备的效率和连续运行时间, 提高设备生产能力;
- (8) 延长润滑介质使用寿命 2 倍以上。

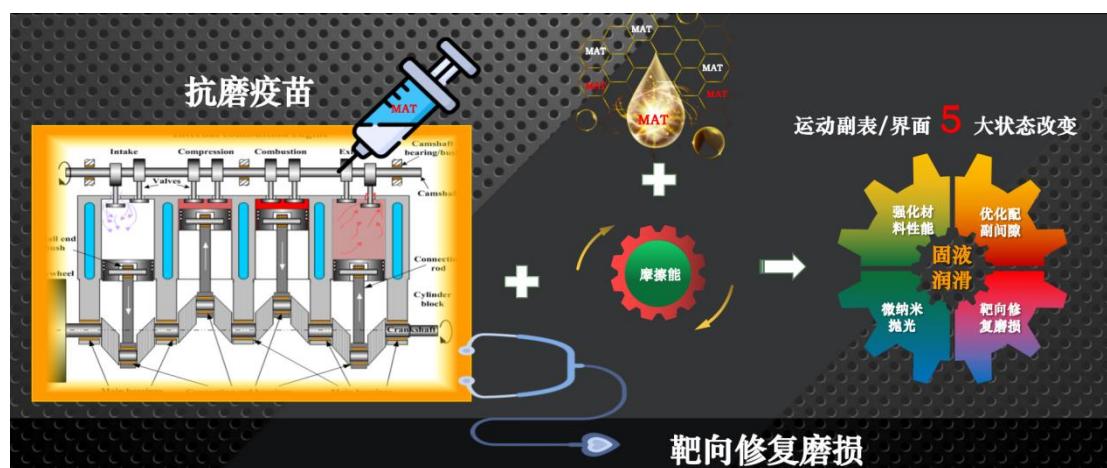
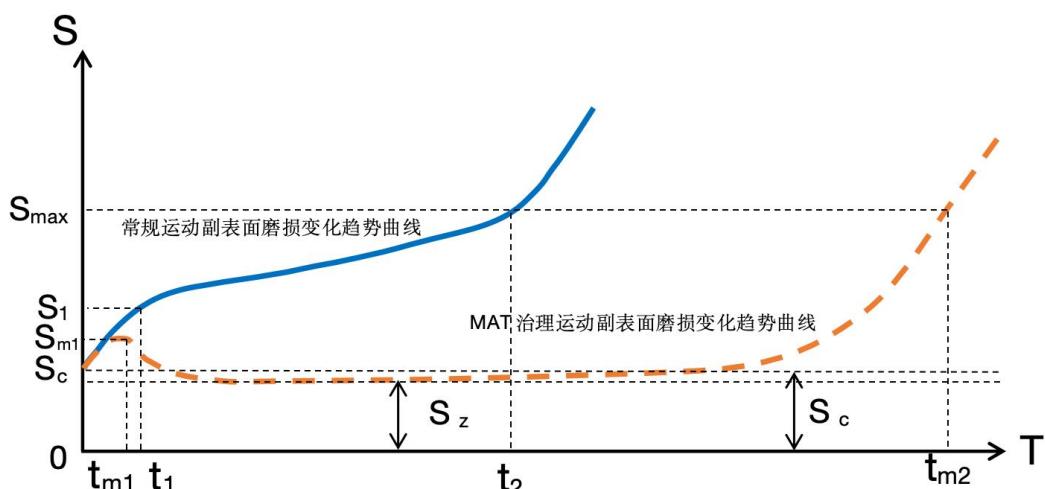


图 5 构建设备极低摩擦极少磨损自润滑环境

## 2.4 设备全寿命周期磨损曲线

实施 MAT 技术治理后的设备运动件在寿命周期的磨损曲线与常规磨损相比发生了巨大的变化。受加工精度和装配精度的影响，表面去残余毛刺和形貌配合优化，会使磨合期成为设备运动摩擦副磨损相对严重的阶段，直接影响设备全寿命周期的摩擦状态和寿命，含天然层状硅酸盐复合粉体在磨合期吸附在运动副表面，研磨抛光，阻隔摩擦副表面直接接触，减少磨损，提高表面光洁度，缩短了新设备的磨合周期和磨损，提高了磨合质量；实施 MAT 技术治理，设备在全寿命周期始终处于极低摩擦和极少磨损状态，磨损和微观增材处于一个相对动态平衡状态，延缓了摩擦劣化，大大延长了运动件的寿命。如图 6，未使用 MAT 技术，磨合阶段（ $t_1$  之前）时间相对较长，摩擦副磨损量 ( $S_1$ ) 相对较大；摩擦副的全生命服务周期 ( $t_2$  之前) 相对较短，整个服役周期内磨损量始终处于增长中 (曲线斜率较大)，且总 磨损量 ( $S_2$ ) 较高；使用 MAT 技术后，磨合阶段由  $t_1$  缩 减至  $t_{m1}$ ，摩擦副磨损量也由  $S_1$  缩减至  $S_{m1}$ ；更大的差异是：使用 MAT 技术且经过磨合阶段后，摩擦副较长时间处于低磨损甚至是负磨损过程，摩擦副服役周期也 延长至  $t_{m2}$ ，服役周期明显长于未使用 MAT 技术的服役周期。即 MAT 技术使摩擦副的表层长期处于磨损-补偿（负磨损） 的动态调整变化中，摩擦副的尺寸和配合间 隙在较长时间内始终处于理想状态，全生命服役周期明显变长。



注： $S_c$  为初装配间隙； $S_z$  为 MAT 技术动态优化装配间隙； $S_{m1}$  为 MAT 技术治理磨合后间隙； $S_2$  为常规磨合后间隙； $S_{max}$  为最大间隙； $t_1$  为常规磨合期； $t_2$  为常规寿命期； $t_{m1}$  为 MAT 技术治理磨合期； $t_{m2}$  为 MAT 技术治理寿命期。

图 6 设备全寿命周期 MAT 技术治理前后的磨损曲线概念图

## 3、金属表面自生强化技术的应用实践

### 3.1 MAT 技术在铁路机车上的应用

铁路内燃机车是各种摩擦配副构成最复杂的热动力装备，包含轴承副、滑动副、齿轮副、活塞缸套副、轮轨副等，如图 7，因此运动副的摩擦磨损状态是内燃机车低故障高效运行的关键因素。链条式配副组合决定了每一个配副的摩擦状态都会影响其它配副。目前技术领域在摩擦优化技术方案上多为单目标的，即以单个摩擦配副优化为研究目标，在不同边界条件下摩擦磨损优化，很难做到多目标整体优化。计算机仿真技术和数字孪生技术的进步，使多

目标优化逐渐成为可能，但限于算法等技术水平，目前关于整机摩擦磨损优化方案还很少。更关键的，即使通过仿真和数字孪生技术，也只能实现在设计阶段、装配阶段的参数更接近于优化，在运行阶段更好的检测预判摩擦磨损故障，在真正的超滑技术没有工程实现前，根本上逆转不了运动摩擦副部件在寿命周期内的摩擦磨损。

MAT 技术治理能够在线多目标优化设备运动摩擦副的配合状态和间隙，对配副接触表面进行在线微观制造，改变摩擦副的配合状态和摩擦环境，多目标延缓零部件和摩擦环境的劣化，实现设备寿命周期延长。

2009 年以来，MAT 技术产品在国铁集团的广州局、上海局、郑州局、呼和浩特局、兰州局等超 1000 台次内燃机车上得到应用，为力跟踪治理效果，先后对乌鲁木齐局、广州局、上海局、集通铁路局的应用机车采取对比跟踪柴油机气缸压缩压力变化、拆车测量对比气缸套和曲轴颈磨损量、摩擦副表面电阻值，来考核 MAT 技术摩擦治理的减摩效果和增材修复效果。

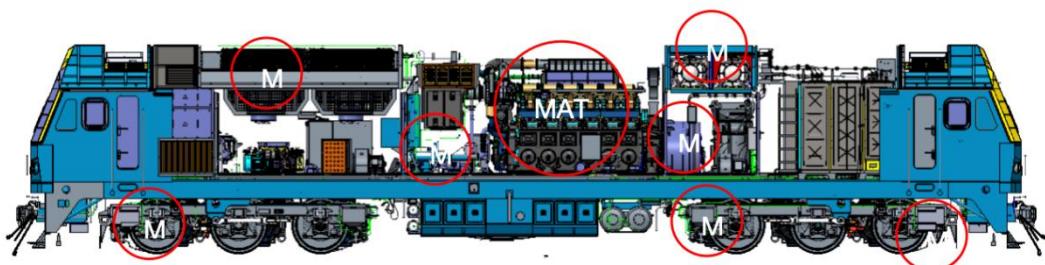


图 7 铁路内燃机车摩擦治理部位分布图

### 3.1.1 机车柴油机曲轴主轴颈磨损修复

跟踪广州局广州机务段 90S-12 号曲轴的主轴颈在 6 个修程（行驶 1417635km）内的轴径变化，图第一个修程属常规磨损状态，主轴颈平均正磨损量为 0.0195mm，从第二个中修开始，进行了一次 MAT 技术治理，在剩下的 5 个修程中，相对于上个修程，均出现 0.001mm-0.004mm 的负磨损，即相对于上一个修程不仅没有继续磨损，反而出现了几个微米的增材，磨损的增材修复效果非常明显，如图 8。

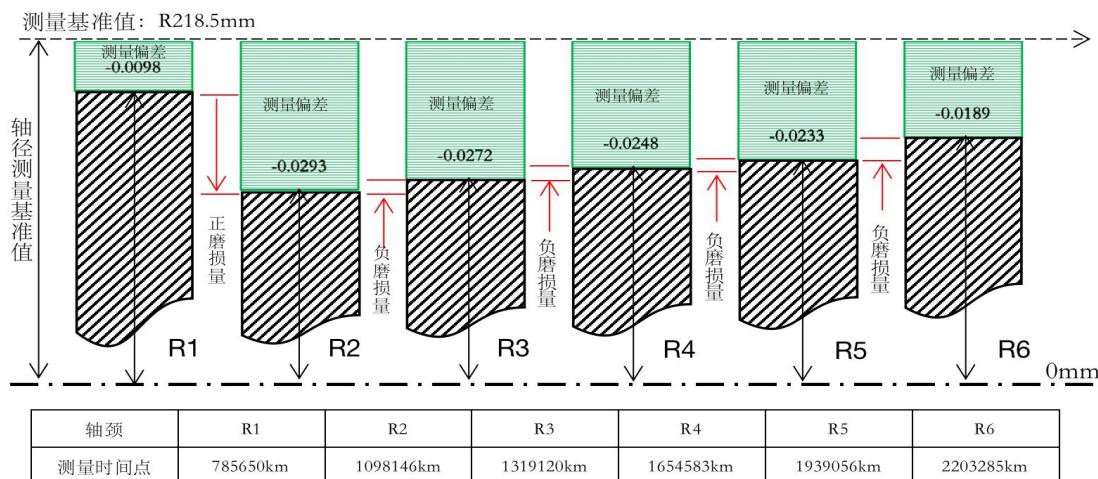


图 8 广州机务段 90S-12 号曲轴的主轴颈磨损修复过程

### 3.1.2 机车柴油机气缸套磨损修复

为了进一步考核 MAT 技术治理的磨损增材修复效果和修复周期，在上海局杭州机务段选择了 DF7C 型 5074 号内燃机车、DF4B 型 3885 号内燃机车两台上个修程后运行了 20 万 km 以上的机车，这个阶段的机车曲、缸套等摩擦副相对中修装车都已经产生了一定的常规磨损，柴油机气缸压缩压力相对于刚出厂时开始下降，压力均衡性差。MAT 治理后两台车继续运行了 8km 左右，其中 5074 号机车柴油机的气缸压缩压力明显提高，各气缸套压力均衡性得到了明显改善，如图 9，这是缸套与活塞环间摩擦学状态得到优化的表现。考核了两个修程曲轴的磨损情况，大 1 修到中修，轴颈出现常态磨损，主轴 0.021~0.028mm，连杆轴 0.001~0.016mm 之间。中修后实施了 MAT 技术，大 2 修解体检测，主轴颈全部出现 0.038~0.063mm 的“负磨损”，连杆颈 4 个现 0.004~0.046mm 的“负磨损”，即轴颈在中修后都得到大面积的修复。测量各摩擦副表面电阻，相对未治理机车，表面电阻值升高了 20 倍以上，阻值增加明显，说明摩擦副表面已经生成改性强化层。测量 DF4B 型 3885 号内燃机车 16 个缸套的磨耗情况，其中 5 个缸套磨损小于 0.1mm，7 个缸出现 0.078~0.217mm 的“负磨损”，即内径大尺度缩小，曲轴颈也同样普遍出现不同程度的副磨损，表现出明显的增材修复。

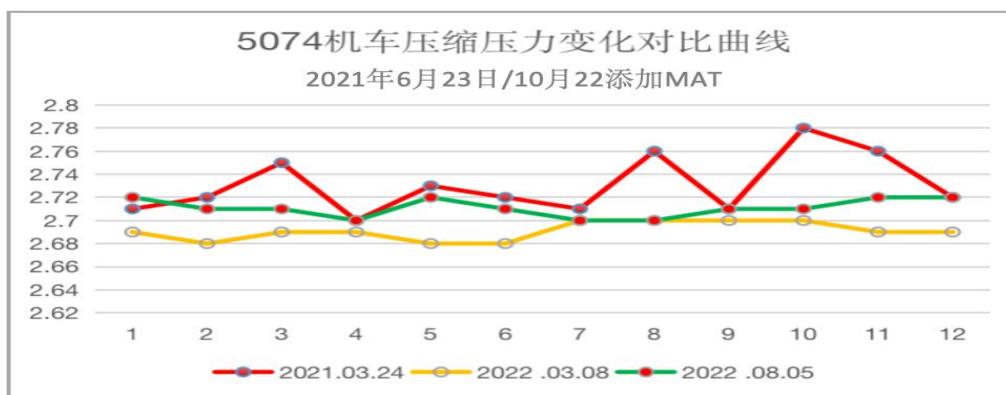


图 9 5074 号机车柴油机的气缸压缩压力恢复图

### 3.1.3 降低因摩擦磨损诱发的机车故障

极低摩擦极少磨损自润滑环境的构建，大大降低了内燃机的故障率，提高了机车的运用率的同时也节省了维护费用。据广州机务段统计数据显示，全段 DF4 机车共计 118 台，未治理过的机车 45 台，自 2012 年至 2022 年，全段 DF4 型机车因摩擦磨损引发的故障共 35 起，其中未经 MAT 治理的机车 33 起，占 94%，而治理过的机车只有 2 起，占到 6%，如图 10。

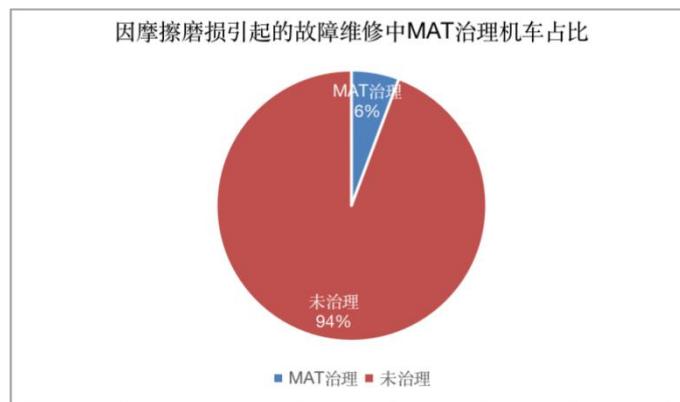


图 10 广州机务段因摩擦磨损引起的机车故障占比

### 3.2 MAT 技术在风力发电机上的应用

我国 2022 年新增风力发电装机 11098 台，累计装机量突破了 19 万台。随着早期投入运营的机组到达设计寿命期限，从 2022 年开始陆续有机组退役，2023 年退役机组 980 台，到 2025 年到限机组将达到 1800 多台，2030 年将超过 3.4 万台。这意味着未来 5-6 年将有 3 万多台机组处于设计寿命的中年期，关键部件的磨损劣化将严重影响生产效率、可靠性和发电量，维护成本将大幅增加。据统计，风机故障的 1/3 是由于摩擦引起的，摩擦管理是风电运维中最核心的部分。我国目前风电运维成本是 0.05 元/度电，规模在 400 亿左右，一个中等规模风场运维成本大概需要 400-500 万元/5 万千瓦。平均每年跟摩擦润滑相关的费用占到一台风机的运维费用的 1/5，对抗摩擦磨损的成本超 80 亿。

据风场反馈的信息，运行 10 年以上的机组发电效率开始下降，运维成本开始攀升，安全稳定性开始不足。目前运行 10 年以上的机组，每年以 20% 的基数往上增长，每年将有 1 万台次机组进入中年期。风力发电机组的运行环境相对复杂恶劣，各种因素可能会导致风电机组的主升速齿轮箱、主轴轴承和发电机轴承在出保修期前或是未来 20 年寿命周期内，出现因摩擦磨损造成的摩擦件表面劣化和故障，包括齿轮和轴承表面划伤、磨损、疲劳、点蚀、剥落等，会影响风机运行的稳定性，出现温度升高时，需要频繁停机监测修整，造成风机的发电效率降低和维护成本攀高。变速箱是影响风电机组运行稳定性的重要部件，变速箱油温的稳定性是机组发电能力的关键因素。风机组主齿轮箱的热量主要来自轴承齿轮的摩擦热和搅动热，当轴承齿轮因摩擦磨损导致配合精度下降，摩擦热会增加，导致齿轮箱工作温度超值，当齿轮箱油温超过 75℃，风机负荷自动减半，温度超过 80℃，负荷降至 1/5，甚至停机，严重影响影响机组的生产能力。目前基本采用的方法是物理降温和智能监测等手段，治标不治本。如何降低摩擦磨损，减少因摩擦热是关键。控制摩擦磨损可以提高发电效率、发电能力，提高工作的稳定性，降低运维成本。

为了验证 MAT 技术治理在风电齿轮箱上应用的安全性和有效性，重庆齿轮箱厂选择了一对在齿轮箱疲劳试验台上淘汰报废的齿轮与一对新齿轮进行对比试验，成功运行了 600 小时，齿轮箱运行状态正常。新齿轮箱加注新 P320 齿轮油，旧齿轮箱加注新 P320 齿轮油和 MAT 齿轮箱再生强化剂。第一阶段试验齿面载荷 900MPa，转速 1000 转/s，齿轮箱运行平稳，旧齿轮箱温度和振动参数与对比齿轮箱一致，未出现温度和振动异常。运行 300 小时后开箱观察齿面形貌，发现旧齿轮的齿面形貌不仅没有进一步劣化，对比试验前，齿面反而变得非常平整光滑，在试验前磨损严重的部位出现明显的修复，如图 11。齿面电阻由试验前  $0.4\Omega$ ，增加到最高  $11\Omega$ 。第二阶段试验把载荷加到 1200MPa，又成功运行了 300 小时，旧齿轮箱侧运行状态稳定，温度和振动未出现异常，齿面形貌平整，测得 Ra 值与对比齿轮相差 10 倍以上，见表一。试验验证了 MAT 技术治理的安全性和磨损修复功能。



图 11 A 试验前齿面形貌

B MAT 治理 300 小时齿面形貌

表一：

试验齿轮齿面 Ra 变化

样品	部位	Ra 变化范围/ $\mu\text{m}$	Ra 平均值/ $\mu\text{m}$
试验齿轮	咬合面	前端残余修复层	0.170-0.27
		根部残余修复层	0.172-0.36
		根部咬合面	0.384-0.671
		修复层磨损后	2.524-3.773
	非咬合面 (背面)	前端	0.488-0.876
		中部	0.367-0.564
		根部	0.630-0.717
对比齿轮	咬合面	前端	8.268-9.610
		中部	2.294-2.711
		根部	1.598-1.957

2019年9月，对华锐风电张北风场B20机组主升速齿轮箱实施了MAT摩擦治理，到2023年3月，期间没有换润滑油，相对同型号机组，3年多时间，机组运行状态平稳，开箱观察齿面形貌，发现与同型号机组齿轮相比，表面光滑平整，未见划痕、点蚀、磨损、疲劳和剥落痕迹。见图12。对比MAT摩擦治理前一年和后两年的齿轮箱温度，在发电量增加30%的情况下，齿轮箱油温下降了12%，齿轮箱轴承端温度下降了14%。

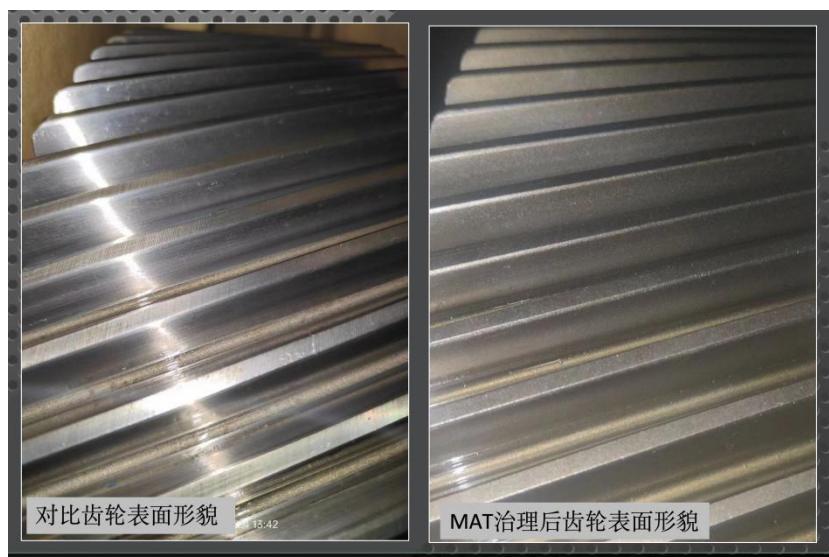


图 12 华锐风电张北风场 B20 机组主升速齿轮箱 MAT 摩擦治理齿面形貌对比

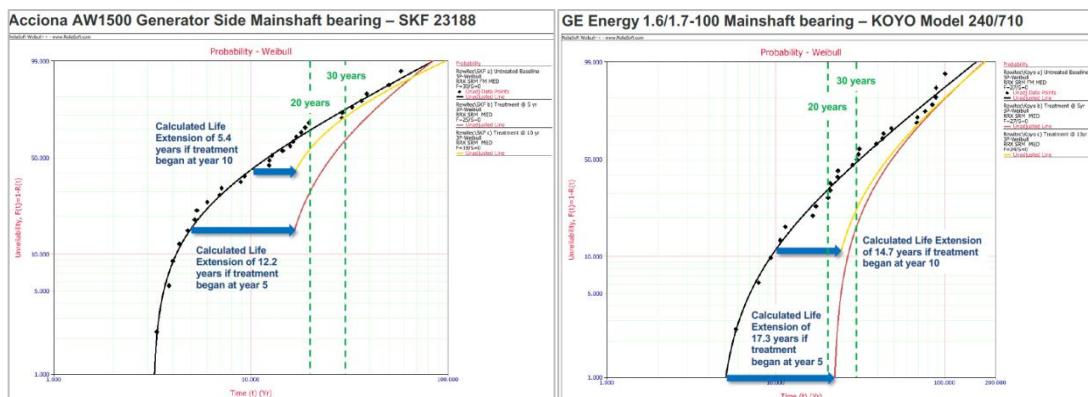


图 13 美国 Sentient Science 公司风机主轴寿命试验

美国 Sentient Science 公司进行了一项风力发电机主轴承使用寿命的研究，在不同阶段实施 MAT 治理，SKF 主轴承和 Koyo 主轴承的剩余使用寿命延长了 5.4--17.3 年，如图 13。德国吉森大学（University of Giessen）对五种在风能行业中特别常见的齿轮油进行对比试验，在实施 MAT 治理后，摩擦降低最高 70%，如图 14。

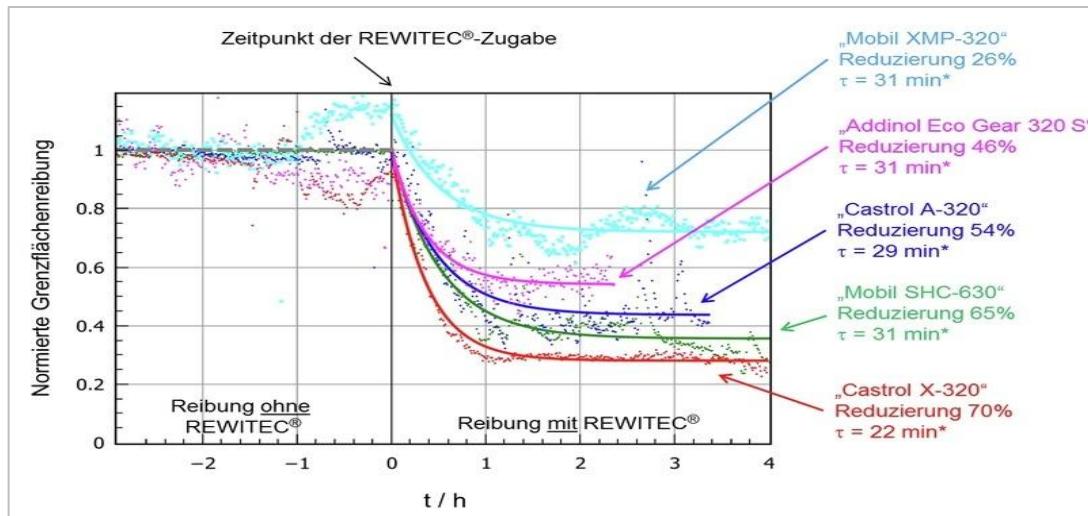


图 14 德国吉森大学（University of Giessen）润滑油添加 MAT 摩擦试验

### 3.3 MAT 技术在其它工业设备上的应用

在中船大连船用推进器有限公司，进口龙门数控铣床的铣头变速箱的平均维护周期是 6 个月，每次的维修成本是 40-60 万，。2022 年 10 月采用了 MAT 技术，运行到 2024 年 6 月，状态还非常稳定，节省维修费 80 多万，大大降低了维护成本，减少维修停机至少 2 个月，提高了生产效率。

中国电子集团公司某机械加工工厂在 C616-1 普通车床的润滑油箱内添加 MAT。经过两个月的正常使用后，噪声由 76.5db 降到 72.5db；振动烈度由 0.3mm/s 降到 0.2mm/s；主轴远端径向跳动由 0.025mm 降到 0.020mm，节省电耗 2% 以上。



图 15 龙门铣头

工业机器人的工作寿命一般在 8-10 年，减速器作为传动、承重部件，磨损是不可逆的，使用寿命一般在 2 年左右。减速器轴承和齿轮摩擦磨损是机器人减速器寿命的关键因素，占到机器人零件故障的 80%。工业机器人关节紧凑，用于此处的 RV 减速机散热较差，且需要长时间的工作，摩擦件也长时间处于边界摩擦状态，造成工业机器人关节部位温度升高，对抗磨性能要求极高。一般来说，轴承是最先损坏的，额定寿命 6000 小时以上，就需要更滑减速器轴承，特别是高负荷机器人，提前磨损的情况一般会在数月到一年左右出现，中车戚

墅堰机车车辆工艺研究所工业机器人 RV 减速器事业部在研发国产 RV 减速器，轴承用的是日本进口轴承，但在装配到国产 RV 减速器中，寿命在 3000 小时一直无法突破，2024 年 2 月采用 MAT 技术后，实现了 6000 小时，达到了设计寿命标准。

中国大唐国际托克托发电有限责任公司在 60 万 kW 火力发电机组空冷岛的 6 台风机减速齿轮箱中添加了 MAT，以改善齿轮副的磨损状态，减少磨损故障。添加后仅两个月，6 台风机的驱动电流较添加前分别下降了 1.2—2.1%；电流波动幅度分别下降 18.1—57.5%。与同期未添加的风机齿轮箱相比较，驱动电流下降了 1.4%。神华集团神东电力热电公司上湾电厂和大柳塔电厂分别在空冷岛减速齿轮箱、二次风机、一次风机轴承添加了 MAT。与未在齿轮箱添加的空冷岛机组相比，电机同频驱动电流下降了 2.1%，齿轮箱振动加速度下降了 14.2%，说明齿轮啮合状态改善、能量损耗降低。二次风机轴承添加摩安后，在相同电机转速下，单位风压的驱动电流值下降了 13.5%、轴承油温降低了 12.8%，说明添加 MAT 减少了轴承的摩擦损耗、提高了电机效率。锅炉一次风机轴承添加 MAT 后，单位开度驱动电流值下降 7.6%，振动位移下降 22.5%。

#### 4. 结论

节能、节电、降排、降低生产成本、降低设备维护成本、降低故障率，提高设备利用率、提高生产效率、提高产能……，MAT 技术是一项高附加值工业生产性服务技术，整合实现了机械设备材料技术、加工技术、表面工程技术、工艺装配技术、润滑技术、运用维护技术等，几乎全产业链体系的颠覆性技术突破，弥补我国机械设备材料、制造精度和设备运用维护技术的短板，通过在线强化来提高设备抗磨性能，通过降低设备摩擦耗能来实现节能减排、降本提效，为实现碳达标、碳中和目标开拓了新的技术路径。科技含量高、资源消耗低、环境污染少，是赋能新制造、新服务、新业态的微纳米材料、智能运维、微观制造和表面工程领域的新兴技术，是实现我国制造业战略性提升和高质量发展的“新质生产力”。

作为降本增效和达成 30/60 降碳目标经济有效的实现路径，MAT 技术的工业应用价值借助微纳米技术、智能检测和监测技术的发展逐渐得到了技术、工业界和管理层的认可，应用场景不断扩大。MAT 技术研究及应用历程是一个逆向认知的过程，从发现到试验室验证、到工程验证、再到工程应用，其表现出违反常规认知的工程效果。MAT 技术机理解释需要整合物理学、化学、微纳米技术、新材料、表面工程、微观制造、摩擦学、智能运维等多学科多领域知识，系统全面的技术概括难度大。国内外科学界和工程界 20 多年的研究实践，在 MAT 机理认知上已经取得了突破性进展，国外工程应用已经进入到规模化、商品化阶段，并且已经开始布局中国市场。但在我国受制于多种因素，包括对传统技术的冲击、技术价值认知能力、能源节约意识、设备维修体制、短期意识等，虽然已经拥有了 100% 自主技术理论、知识产权和全产业链自主技术、产品及服务能力，但工程应用和商品化推广还处于艰难起步阶段，尤其是 MAT 技术跨多个学科，MAT 技术应用价值体现在设备全寿命周期，效果体现需要对设备全寿命周期的能耗、材料损耗、排放等进行检测评价，宏观效果呈现周期长，链条长，微观增材实现的几何数据变化测量和表面电阻值的测量，需要拆机才可以实现，技术验证周期长，边界条件复杂。尤其是还没引起国家层面管理部门和学界权威关注和支持，虽然在铁路系统、风电系统、机器人系统、机床上开始小规模示范应用，但缺乏官方和权威支持，应用企业存在技术认知壁垒。

#### 参考文献

- [1] Dunaev AV, Serpentine Tribotechnical Composition “Saranovsky”. Preparation and Comparative Tests [J] Global Journal of Engineering Sciences, April 30, 2019.
- [2] 李桂金, 蛇纹石表面特性, 硅酸盐学报, 第 45 卷第 8 期, 2017 年 8 月, 1207 页。

- [3] 张浩, 基于羟基硅酸镁的纳米颗粒制备及其摩擦学性能研究[D], 北京, 北京交通大学, 2021 年 12 月。
- [4] 白志民, 重大装备用矿物减摩修复材料制备技术及应用示范, 国家重点研发计划课题中期技术进展报告, 北京, 中国地质大学, 2019 年 4 月。
- [5] H. Blok, The flash temperature concept, Wear, Department of Mechanical Engineering, University of Technology, Delft The Netherlands, Volume 6, Issue 6, November – December 1963, Pages 483–494, Available online 10 February 2003.[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90283-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90283-7).
- [6] 伊艳丽等, 不同结构层状硅酸盐矿物作为润滑油添加剂的摩擦学性能, 硅酸盐学报 2020,0(2):299–308)
- [7] 曹琦等, 机车柴油机极低摩擦自润滑环境构建 [A] , 中国铁路, 1001-683X (2023) 08-0061-08。
- [8] Laser surface treatment-introduced gradient nanostructured TiZrHfTaNb refractory high-entropy alloy with significantly enhanced wear resistance,  
[/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030221009762/](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030221009762/)
- [9] 杨其明, 物质介入条件下摩擦学行为的工业试验 [J] . 润滑与密封, 2009, 34 (1) : 17-23.
- [10] ZHAO F Y, BAI Z M, FU Y. Tribological Properties of serpentinite , La (OH) 3 and Their Composite Particles as Lubricant Additives [J] . Wear , 2012 (2) : 72-77.