

基于金属表面自生强化技术的 机车柴油机极低摩擦自润滑环境构建

曹琦¹, 白志民², 杨其明³, 祝胜利⁴, 邝平⁵

(1. 北京摩安迈特技术有限公司, 北京 100088;
2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 中国铁路北京局集团有限公司 北京科学技术研究所, 北京 100089;
4. 中国铁路上海局集团有限公司 杭州机辆段, 浙江 杭州 311199;
5. 中国铁路广州局集团有限公司 广州机务段, 广东 广州 510499)

摘要: 机械摩擦副的摩擦磨损是影响设备运行状况、使用效率、服役寿命、能源利用率以及排放物水平的重要因素。本文提出金属表面自适应增材强化技术工程概念, 可以实现机车柴油机金属摩擦副表面极低摩擦自润滑状态的在线自适应构建。将功能材料在线介入润滑介质, 借助材料活性, 在摩擦副运动过程中在摩擦接触区域吸附、叠加、堆积, 基于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, 发生闪温熔覆过程, 实现摩擦副接触表面的强化改性和自适应增材, 自动补偿磨损超差, 动态优化配副间隙, 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。在机车柴油机中应用表明, 金属表面自适应增材强化技术改变了摩擦副间的跑合方式和运动副间摩擦匹配性, 可明显降低摩擦副的摩擦磨损、提高设备运行效率、降低设备全生命周期能耗和运维成本, 降本增效、节能减排效果良好。

关键词: 机车柴油机; 摩擦磨损; 闪温熔覆; 自适应增材; 金属表面自生强化; 固液多元复合润滑; 极低摩擦; 自润滑环境; 靶向修复; 配合间隙优化; 节能减排; 降本增效

0 引言

在设备服役全生命周期中, 运动摩擦副的基础材料性能、加工精度、配副界面状态形貌、装配间隙、润滑环境直接影响摩擦和磨损速度, 是影响设备运行

状况、使用效率、服役寿命、能源利用效率以及排放物水平的重要因素。因此, 提高设备运动副材料表面抗磨强度, 控制配副的配合间隙以及表面形貌是机械设备减摩节能的关键。摩擦副的抗磨特征取决于基础材料属性及表面处理工艺、加工精度及配合间隙、润滑环境三大因素。配副装配间隙取决于零件的加工精度和装配精度以及设备的全生命周期运动副相对运动过程中的摩擦磨损和热变形造成的配副间隙增大。

第一作者简介: 曹琦 (1969—), 男, 研究生, 主要研究方向为金属表面自适应强化技术、在线摩擦治理、设备全生命周期降本提效。
联系人: E-mail: caoqi0511@gmail.com

在制造领域，受材料制造技术、金属表面处理工艺、制造精度及装配精度进一步提升的限制，在设备制造阶段实现运动副的最优配合状态难度加大。早在1942年，国外已有发现，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，可减少摩擦和在线修复磨损^[1]。20世纪70年代，前苏联在地质钻探过程中发现硅酸盐天然矿物的在线减摩修复功能，世界各国学术界和工程界就含硅酸盐天然矿物的在线减摩修复作用进行了大量科学的研究和工程实践。结合大量工程实践，进一步发现含硅酸盐天然矿物粉体在线减摩修复功能实现是利用摩擦闪温和功能材料的活性，将功能材料在线介入润滑介质，借助材料活性，在摩擦副运动过程中在摩擦接触区域吸附、叠加、堆积，基于闪温理论，借助摩擦闪温能量激发功能材料与运动副界面交互作用，发生闪温熔覆实现摩擦副接触表面的强化改性和自适应增材，自动补偿磨损超差，动态优化配副间隙，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，构建设备全生命周期极低摩擦自润滑环境，并提出金属表面自适应增材强化技术（Metal Surface Adaptive Additive Strengthening Technology，简称自生强化技术或MAT技术）工程概念。

本文简要介绍MAT技术机理，重点结合其在铁路机车柴油机中的应用，阐述MAT技术功能材料与摩擦副的交互作用机制、功能效果及工程价值，以期为MAT技术在更多热动力机械、高铁齿轮箱、风电齿轮箱等运用场景开始工程化应用提供指导与借鉴。

1 MAT技术机理

运动摩擦产生的机械能和热能，在造成磨损和能效损耗的同时，也是催生各种物理化学反应的条件。在一定条件下，利用摩擦能，摩擦副表面会产生一定的自组织、自适应增材和自修复过程。

（1）核心材料。MAT技术功能材料的核心组分是含具有特殊活性的微纳米羟基硅酸镁天然矿物复合粉体，粉体颗粒具有丰富的表面不饱和电荷，活性极强，极易吸附到金属基摩擦副表面并铺展，并可有

效吸附微纳米金属磨屑甚至是离子态物质共同参与摩擦反应^[2-4]。

（2）作用过程。功能粉体材料介入润滑介质，在摩擦副往复运动摩擦过程中，粉体颗粒进入金属摩擦副间隙，在运动副接触表面挤压、研磨、切削的过程中发生层间解离、原位相变和离子置换，同时层间解离释放出的高活性基团会与摩擦副表面的Fe元素反应，生成具有较大密度、高硬度、高熔点、良好热稳定性的镁铁硅酸盐、石英（ SiO_2 ）、氧化铁（ Fe_2O_3 ）、镁橄榄石 $[\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)]$ 以及顽辉石 $[\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_6)\text{Fe}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)]$ 、无定形碳等颗粒，在接触表面不断沉积、叠加堆积，进入金属表面凹缝、基体材料晶格或掺入晶界。MAT技术表面强化层生成示意见图1，摩擦副相互运动导致接触表面的微观凸起相互碰撞、切削、挤压，基于BLOK闪温理论，碰撞点周围会产生800~1200℃的瞬间高温〔见图1（a）〕，在闪温点周围会发生类似于激光熔覆的微冶炼增材过程（又称闪温熔覆），形成新的固熔体，与基体熔合生成新的改性抗磨强化层，国内外称其为金属陶瓷层〔见图1（b）〕。

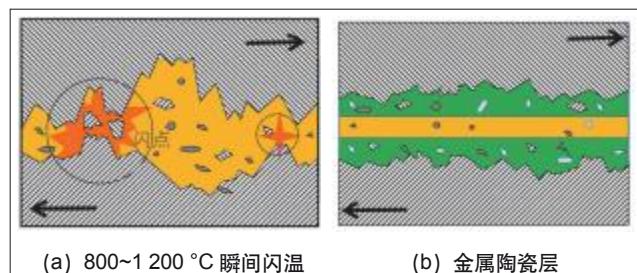


图1 MAT技术表面强化层生成示意

（3）强化层成分。MAT技术治理与未治理摩擦副表层横截面SEM图见图2，MAT技术治理后摩擦副表层的形貌、成分、结构、物相和理化性能变化，未治理摩擦副磨损面横截面的SEM图显示，层片状珠光体结构从基体深层延伸至距表面1μm处，表面未发现强化层；而治理的摩擦副磨损面横截面上出现了厚度5~10μm的非珠光层，是矿物功能材料与铁基摩擦副交互作用形成的强化层。强化层的EDS线扫描显示，从基体至强化层表面，Fe元素含量呈下降趋势，相应地O、Si和Mg的元素含量则逐步升高。

在微纳米增材强化、微抛光的过程中，MAT技术在微观上改变摩擦配副表面金相结构、化学成分、性能、强度和宏观尺寸形貌，生成具有非凡寻常力

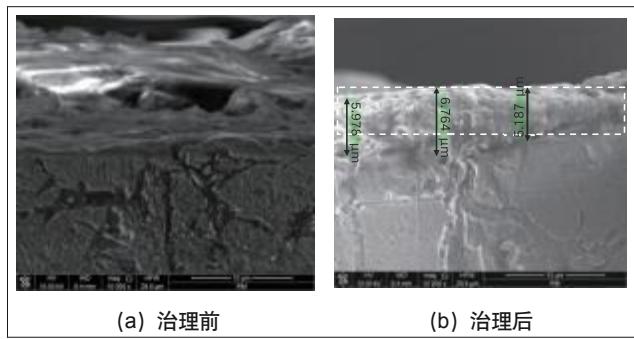


图2 摩擦副表层横截面SEM图

学和物理性能改性强化层，摩擦学性能优越，实现配副表面形貌、性能和配合间隙的微观优化，进而改变配副的摩擦配合状态，实现降低摩擦、振动、噪声，延长零部件使用寿命的目标。

2 工程应用

MAT技术是融合润滑工程和表面工程原理的多学科综合交叉新技术，在深入揭示物质介入条件下摩擦学微观过程的探索中，不断取得具有科学价值的理论进展同时，实践应用也采集了大量宝贵的实测评估数据，验证运用这项技术，可以使工作中机械零部件摩擦表面的宏观机械特性得到微观优化，从多维度解决设备制造材料性能不足、制造和装配精度不足、服役全生命周期摩擦耗能和磨损劣化三大难题，具有很高的工程应用价值。

2.1 运动副表层材料性能强化提升

(1) 改变运动副表层属性。分析风电齿轮箱齿面强化修复试验后的齿面成分，发现在齿轮咬合面形成了约 $140 \mu\text{m}$ 的强化修复层，并检测到镁和硅，说明羟基硅酸镁参与了表面反应，由于硅的存在，强化层的电磁学性能发生变化，表现为表面电阻值增加，所以通过运动副表面电阻值测量可以判断是否形成强化层，在机车柴油机主要运动副表面、重庆齿轮箱厂齿轮试验台及张北风场风力发电机主齿轮箱齿面均测到了10倍以上表面阻值增加。

中国地质大学和某装备再制造重点实验室^[5]，在摩擦磨损试验机上进行环盘摩擦磨损试验的结果表明，基础润滑油加入MAT技术复合功能材料后试样间的摩擦系数由0.11降低至0.04，表面硬度比实施前增加了约

30%，粗糙变为光滑，MAT技术治理前后试样表面形貌比较见图3。

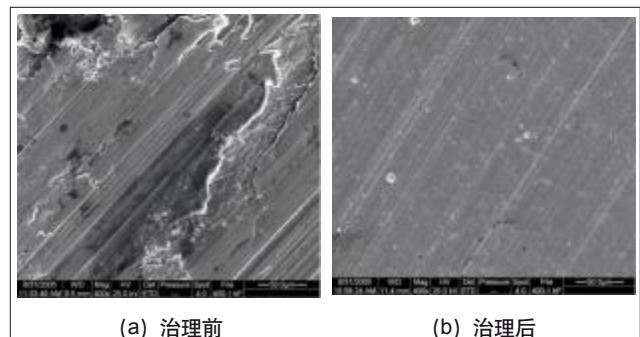


图3 MAT技术治理前后试样表面形貌

(2) 强化层抗磨性能。跟踪中国铁路广州局集团有限公司广州机务段（简称广州机务段）、中国铁路呼和浩特局集团有限公司大阪机务段（简称大阪机务段）、中国铁路上海局集团有限公司杭州机务段（简称杭州机务段）近千台次经MAT技术治理的机车柴油机主要运动副的磨损情况，发现曲轴颈表面、缸套内壁表面的磨损相对同型号、同线路机车柴油机，磨损大大降低。例如，跟踪广州机务段DF_{4B}型机车1050号柴油机的QS2008-10号曲轴时发现，在MAT技术治理前1个中修期，曲轴连杆颈的平均磨损量为0.02 mm，经MAT技术治理后，平均磨损量降至0.0001 mm，几乎没有磨损；跟踪7014号柴油机DL96-167号曲轴，对比主轴颈经历3个修程的磨耗，第1个修程表现出正常磨耗，平均磨耗值为0.027 mm，经MAT技术治理以后2个修程的磨耗值降至0.0012 mm和0.0027 mm。广州机务段7640号机车161号柴油机在运行1个中修期后，对拆下来的轴瓦进行观测和厚度测量，测量结果表明1个修程的轴瓦几乎没磨损，磨耗量几乎为0，与未治理过的轴瓦比较，表面光亮如镜，没有明显的磨痕和擦痕。

中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司哈密机务段对实施MAT技术治理的DF_{8B}型5380号内燃机车进行了长达5年的跟踪考核，机车在MAT技术治理后，柴油机气缸套在连续使用115.2万km后，平均磨耗量仅为0.007 mm，寿命延长了近3倍。考核行驶60万km主轴颈磨损速度为0.008 nm/万km，相对未治理机车的0.025 nm/万km，磨损速度降了68%。连杆颈磨损速度为0.04 nm/万km，相比未治理机车的

0.08 nm/万 km, 下降了 50%。

MAT 技术在诸多内燃机车的实车及风电主齿轮箱的示范应用, 治理后的摩擦副表面都可检测到强化层。通过磨损对比, 强化表面表现出非常突出的抗磨性能, 运动副接触表面由原来的金属-金属接触摩擦, 变成金属陶瓷-金属陶瓷接触摩擦, 这 2 种不同配副表面表现出完全不同的摩擦学性能, 弥补了摩擦件基体材料摩擦学性能的不足。

2.2 运动副表面形貌及配合间隙优化

运动副初始加工和装配精度影响设备磨合、寿命期内的摩擦及磨损速度。为实现相对运动, 运动副的间隙必须存在^[6-7], 配副间隙的存在让多体结构设备运动件有了自由度, 直接影响设备的动态特性, 间隙扩大会增加多体设备系统构件的应力, 引起振动、碰撞、接触噪声, 加速磨损, 降低效率和工作精度。

(1) 自适应微观增材。MAT 技术具有微抛光和自适应微观增材功能, 微观增材可以在线对运动副配合间隙进行优化, 对磨损进行靶向修复。在材料表面性能、配副表面精度、配合间隙达到相对优化状态时, 摩擦能会降低, 增材过程降低或停止; 当材料性能、配副表面精度、配合间隙偏离优化状态时, 或者某些部位的磨损严重, 摩擦能会增加, MAT 技术的功能粉体颗粒与摩擦副表面成分活性增强, 继续发生微观增材, 使材料性能、配副表面精度、配合间隙趋向优化, 实现表面磨损和增材补偿动态平衡。

(2) 运动副表面微抛光。在自适应动态增材优化配合间隙的同时, MAT 技术的颗粒同时在配副表面进行研磨抛光, 吸附在运动副表面的 MAT 技术功能粉体颗粒在运动副间隙研磨过程中, 削峰填谷, 首先起到对摩擦表面微观抛光作用, 能够实现治理后的强化层表面达到极光表面效果, 降低运动副表面粗糙度, 优化表面形貌。

跟踪广州机务段、杭州机务段、大阪机务段机车柴油机主要运动副在经 MAT 技术治理后的表面形貌和几何尺寸对比数据发现, 曲轴轴颈、缸套内径及活塞销栓普遍出现负磨损, 即相对于拆车测量的装车数据, 主要摩擦副表面出现增长, 证明了 MAT 技术的微观增材功能。

(3) 运动副配合间隙优化。广州机务段 90S-12 号曲轴的主轴颈在 5 个修程(行驶 1 417 635 km) 内的轴颈变化, 第 1 个修程表现常规磨损状态, 主轴颈平均磨损量为 0.019 5 mm, 中 2 修后实施了 MAT 技术治理, 在剩下的 4 个修程中, 不仅没有继续磨损, 反而逆向增长, 均出现 0.001 5~0.004 4 mm 的负磨损, 说明治理后轴和瓦的配合间隙一直偏离 Sz 值状态, 所以一直处于增材优化状态, 证明了 MAT 技术的增材优化配合间隙功能(见图 4)。

广州机务段 DF_{4B} 型机车 130 号柴油机在厂修后实施 MAT 技术治理, 曲轴 DL94-409 经历 1 个中修后, 主轴颈平均磨损 0.007 5 mm, 连杆颈平均磨损 0.006 2 mm, 对比同样经历 1 个中修期的 1483 号柴油机 QS99-34 号曲轴主轴颈和连杆颈 0.02 mm 的磨损, 治理后的 DL94-409 曲轴表现出明显的微观增材, 优化了轴瓦的配合间隙。

在齿轮疲劳试验台对 1 副已经出现疲劳磨损的齿轮进行 MAT 技术治理, 300 h 后发现齿轮啮合面出现了连续的生长层, 通过齿面电阻测量即成分检测, 证明增长层为 MAT 技术强化层, 证明了 MAT 技术的微观增材功能(见图 5)。

杭州机务段 DF_{4B} 型 3885 号机车 1088 号柴油机的 DL96-305 号曲轴, 在大修出厂后中 1 修时曲轴的主轴颈平均磨损 0.04 mm, 连杆颈平均磨损 0.015 6 mm(见表 6)。在第 2 个修程期运行到 2/3 里程时, 实施了 MAT 技术治理, 中 2 修时曲轴主轴颈磨损-0.014 mm(负磨损), 连杆颈磨损-0.001 2 mm(负磨损), 对比第 1 个修程磨损速度, 运行到 2/3 里程, 主轴颈应该已经出现至少 0.026 mm 以上的磨损, 连杆颈应该出现 0.01 mm 以上的磨损, 实施 MAT 技术治理后, 主轴颈在 MAT 技术的颗粒作用下开始增材修复, 经过一段时间的修复, 主轴颈不仅恢复到出厂时尺寸, 还出现了负磨损, 即相对于出厂装车尺寸主轴颈又增长了 0.014 mm, 连杆颈增长了 0.001 2 mm。

跟踪杭州机务段 DF_{7C} 型 5023 号机车 021 柴油机 97-275-40 号曲轴、DF_{7C} 型 5074 号机车 0167 柴油机 0101002EQ 号曲轴、5189 号机车 222 号柴油机

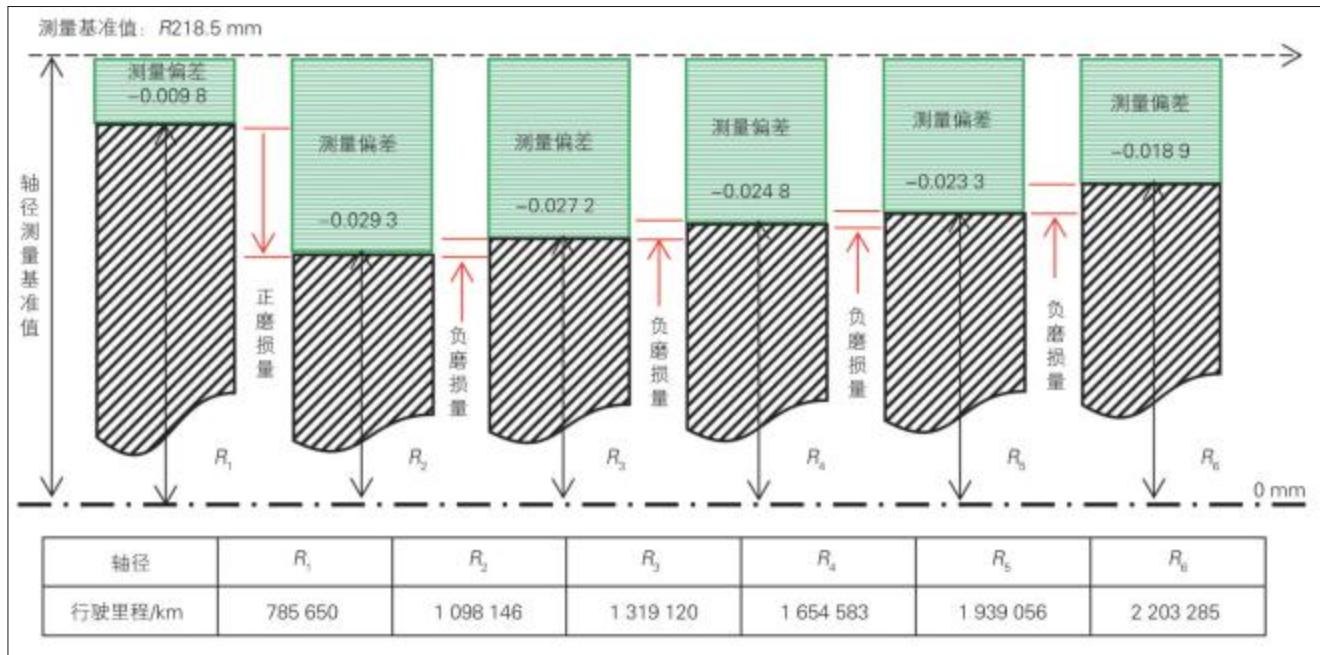


图4 90S-12号曲轴主轴颈配合间隙动态优化示意

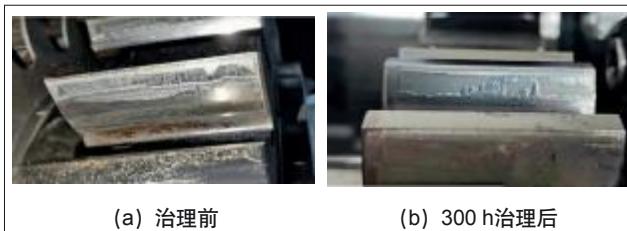


图5 齿轮300 h MAT技术治理前后齿面对比

9908060EQ号曲轴、5236号机车095号柴油机98275-46号曲轴，均出现了负磨损。分析是运行到2/3里程后，曲轴颈和轴瓦都出现了磨损，轴和瓦的配合间隙已经超过了装配时的配副间隙。实施MAT技术治理，因为MAT技术对钢背铝瓦修复不明显，给轴颈留下更大的增材修复空间，所以轴颈出现了相对较大的负磨损，证明了MAT技术的增材修复功能。

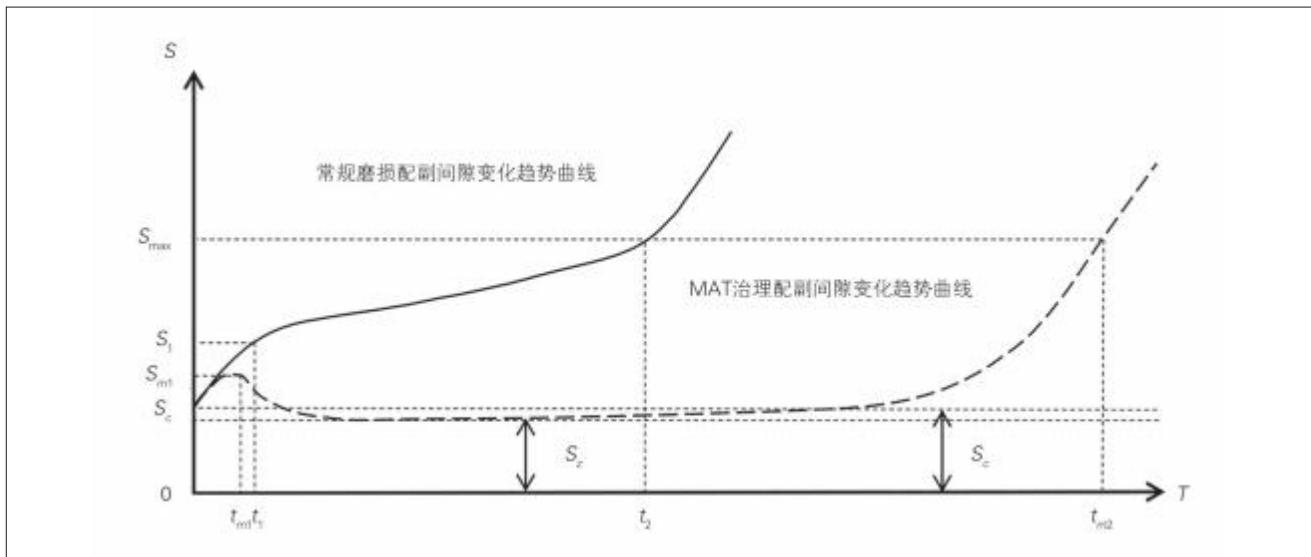
2.3 机车柴油机极低摩擦环境构建

(1) 固液多元复合润滑。在机械往复摩擦过程中，分散在润滑环境中MAT技术的颗粒随着介质循环流动，研磨过程中发生层间滑动，经历滚动—碎片化—层间滑动过程，在摩擦副间隙首先起类似于微轴承的支撑作用，阻隔摩擦副表面的直接接触，使MAT技术具有层状固体润滑材料的润滑特点，进一步提高润滑，降低磨损，增加了原润滑介质的润滑效果。

同时，高反应活性的硅酸盐矿物的催化作用，可促进润滑油(脂)碳链的分解，生成具有润滑作用的石墨，最后MAT技术的粉体颗粒、石墨与润滑油共同构建了固液多元自润滑环境。

(2) 自适应微观增材改变柴油机运动副磨损过程。在MAT技术功能粉体材料介入和摩擦能的作用下，催生金属摩擦副发生表面改性、微观增材、微抛光、靶向修复磨损的动态交互作用，在摩擦副表层形成高硬度、高弹性模量、耐高温、低粗糙度和低摩擦系数的抗磨表面，优化摩擦副的表面抗磨性能和配合间隙，降低了磨损，当表面磨损和增材补偿达到相对动态平衡，可以延长设备的服役寿命和全生命周期的运维成本，最终以减摩—降磨—增材—修复—降本—降耗—节能为综合体现。MAT技术治理前后的摩擦副全生命周期内磨损量变化趋势见图6。

由图6可知：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，



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 MAT 技术治理前后的摩擦副全生命周期内磨损量变化趋势

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。

(3) 柴油机极低摩擦环境构建。先后与广州机务段、中国铁路广州局集团有限公司怀化机务段(简称怀化机务段)、杭州机务段, 大板机务段等合作, 对近1000台DF₄、DF₈、DF₇、DF₁₁等多型机车实施 MAT 技术治理, 铁路内燃机车实车应用及检测考核结果说明, MAT 技术的介入, 通过对摩擦副表面材料的强化治理、装配间隙的动态优化控制、过程磨损的靶向性修复及复合功能粉体的固液多元润滑作用, 彻底改变了摩擦和润滑状态, 构建了机车柴油机极低摩擦环境。

在柴油机服役期内, 在 MAT 技术功能材料的作用下, 自适应增材过程和运动副表面摩擦损耗过程动态优化运动副间隙, 微观抛光过程动态优化运动副表面形貌, MAT 技术粉体的固体润滑剂功能改变了润滑状态, 三方面交互作用, 改变了柴油机原有的摩擦环境, 进入自润滑状态, 并在柴油机全生命周期中长期动态优化调整。

3 经济价值

(1) 延长运动零部件的使用寿命。MAT 技术改变了运动副的摩擦环境, 在设备全生命周期创建了动态自生极低摩擦环境, 降低了摩擦能耗, 据怀化机务段、广州铁路局集团有限公司龙川机务段及中国铁路郑州局集团有限公司新乡机务段统计^[8], 柴油机零部件的使用寿命延长, 其中气缸套寿命延长近3倍, 活塞寿命延长了2倍。

(2) 节省燃油和润滑油消耗。机车柴油机实施 MAT 技术治理, 摩擦损耗降低, 气缸套与活塞配合间隙得到优化, 气缸压缩压力得到提升和均衡, 燃烧更加充分, 燃油单耗下降2.0%以上, 节省润滑油30%以上^[9]。

(3) 减少有害气体排放。热动力机械运动副摩擦状态优化减少了摩擦损耗, 尤其是气缸套活塞配副间隙的优化, 稳定了气缸工作的压缩比、保证了燃油的充分燃烧, 提高能效的同时, 大大减少了废气排放量, 在各类公交车上应用发现, CO₂ 排放量经 MAT 技术治理可以减少30%以上^[10]。

(4) 降低故障率, 提高机车运用率。动态自生极低摩擦环境的形成, 大大降低了柴油机的故障率, 提高了机车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,

未治理过的机车不足 45 台，2012—2022 年^[11]，全段 DF₄型机车因摩擦磨损引发的故障共 35 起，其中未经 MAT 技术治理的机车 33 起，而治理过的机车只有 2 起，因摩擦磨损引起的故障维修中 MAT 技术治理机车占比见图 7。

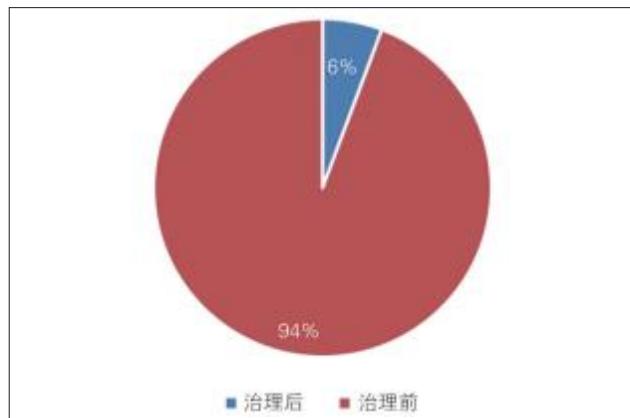


图7 因摩擦磨损引起的故障维修中MAT技术治理机车占比

内燃机车是我国干线铁路机车配属的重要车型，更是抵抗自然灾害和战争灾害不可或缺的应急车型，未来虽然机车配属比例会有变化，但作为铁路调车、工程机车及国家战略需要，在未来很长一段时间内，会维持 7 000 台左右的保有量不变，尤其在我国目前发展阶段，内燃动车组具有得天独厚的优势^[12]。因此，内燃机车的能耗及碳排放治理在全路低碳经济发展中起重要作用。综上所述，MAT 技术是铁路内燃机车降本提质、节能减排的有效解决方案。以 DF 系列内燃机车为例，通过治理，在 1 个大修周期内减少 1 次中修，则可以产生近 50 万元的直接经济效益，如果 1 台治理后的内燃机车在全生命周期内平均油耗下降 2%，按中国国家铁路集团有限公司 2021 年燃油消耗 231 万 t 计算，1 年可节省燃油 4.62 万 t，减少碳排放近 15 万 t，如果再考虑润滑油节省、运用率提高等，则在 1 个大修期内将会创造更可观的经济效益。

4 结束语

近 10 年以来，MAT 技术在美国、英国、德国及芬兰等欧美国家得到了广泛运用，尤其在风电、运输、工程机械、军工设备等领域。在核心技术掌握、机理研究、实践应用、检测技术、产品及治理工

艺方面，我国目前都不落后于欧美国家。科技部关于“十三五”大型装备应用减摩自修复材料产业化制备关键技术项目，于 2021 年通过评审和绩效评估。该国家项目融合了研究与应用，为 MAT 技术的深入发展，起到里程碑的推动作用。MAT 技术的应用场景广阔，除热动力机械设备，风力发电、热电及核电装备、工业机器人、航空航天、军事装备、公路及水路运输等领域都有非常好的应用需求，尤其是高铁齿轮箱的温度均衡，MAT 技术可降低齿轮箱的热量生成。在科学研究、技术创新、应用场景研究等方面都取得了巨大进步。

我国作为工业设备制造和使用大国，如何提高‘资源效率’，以最少的资源投入实现降本提效、节能减排，除大力推进新旧能源有序替代外，还可从产业能耗结构上创新路径。比如通过技术创新手段，推动设备绿色摩擦环境创建等先进技术研发和科技成果转化、提高工业设备的综合能效、延长装备的使用寿命、降低装备全生命周期的运维费用、提高装备的运用率等，都是有效的补强技术，可从结构上做减法，为“双碳”目标做贡献。虽然目前受到技术认知、固有设备维护制度等的制约，MAT 技术产业化应用还任重道远，但随着国家在工业制造和设备运用领域对降本增效、节能减排的不断重视，及对实现“双碳”目标工作的量化要求，相信 MAT 技术会受到能源管理部门和企业关注并得到广泛应用，为中国制造升级、为国民经济发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] DUNAEV A V. Serpentine Tribotechnical Composition “Saranovsky” Preparation and Comparative Tests [A]. Russia, 2018.
- [2] 李桂金, 白志民, 赵平. 蛇纹石对铁基金属摩擦副的减摩修复作用 [J]. 硅酸盐学报, 2018 (2):306-314.
- [3] 杨其明. 金属减摩修复技术及其在铁路柴油机车柴油机上的应用 [J]. 中国设备工程, 2007 (9): 59-61.
- [4] 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.
- [5] ZHAO F Y, BAI Z M, FU Y. Tribological Properties of

- Serpentine, $\text{La}(\text{OH})_3$, and Their Composite Particles as Lubricant Additives [J]. Wear, 2012 (2): 72-77.
- [6] 张桂楫. 含间隙机构运动副动力学模型研究 [C]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [7] 闫绍泽, 向吴维凯, 黄铁球. 涉及间隙的运动副和机械系统动力学的研究进展 [A]. 北京: 北京大学, 2020.
- [8] 杨其明, 林英, 陈建, 等. 杭州机辆段应用 MAT 考核报告 [R]. 杭州, 2023.
- [9] 吴铭. 怀化、大板、龙川、新乡机务段应用 MAT 报告 [R]. 广州, 2013.
- [10] 张博. 金属减摩修复材料在北京公交汽车上试用的阶段报告 [R]. 北京, 2002.
- [11] 杨其明, 李有, 陈建, 等. 广州机务段应用 MAT 考核报告 [R]. 广州, 2022.
- [12] 闫志强, 翟宏建. 未来 10 年铁道机车技术发展方向研究 [J]. 中国铁路, 2002 (5): 29-33.

Construction and Application of Extremely low Friction Environment for Locomotive Diesel Engine

CAO Qi¹, BAI Zhimin², YANG Qiming³, ZHU Shengli⁴, KUANG Ping⁵

(1. Beijing Moan Tianjie Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Beijing Science and Technology Research Institute, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100089, China;
4. Hangzhou Rolling Stock Depot, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311199, China;

5. Guangzhou Locomotive Depot, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510499, China)

Abstract: Friction and wear of mechanical friction pairs is an important factor affecting equipment operation status, service efficiency, service life, energy utilization rate and emission level. In this article, the engineering concept of metal surface self-adaptive additive strengthening technology is proposed, which can realize the online self-adaptive construction of extremely low friction state of locomotive diesel engine on metal friction pair surfaces. Functional materials are inserted online into the friction contact area, and the interaction between functional materials and kinematic pair interfaces is excited by friction energy. Through tribochemical reactions, physical peak shaving and mechanical polishing effects, the strengthening modification and self-adaptive additive of the contact surface of friction pairs are realized to automatically compensate for wear out-of-tolerance, dynamically optimize the clearance between matching pairs, repair the worn areas in a targeted manner, and realize the dynamic balance between surface wear and additive compensation under solid-liquid multi-component composite lubrication state. The operating status of extremely low friction and minimal wear between kinematic pairs is built. The application in locomotive diesel engine shows that the metal surface self-adaptive additive strengthening technology has changed the running mode between friction pairs and the friction matching between kinematic pairs, which can significantly reduce the friction and wear of friction pairs, improve the operation efficiency of equipment, reduce the energy consumption and O&M cost in the full life cycle of equipment, and have a good effect on cost reduction, efficiency increase, energy conservation and emission reduction.

Keywords: locomotive diesel engine; friction and wear; autogenous strengthening of metal surface; solid-liquid multi-component composite lubrication; flash cladding; adaptive talent enhancement; extremely low friction; matching clearance optimization; energy conservation and emission reduction; cost reduction and efficiency increase