
MAT
摩安科技
Lorem Ipsum
dolor sit amet, consecte-
tur adipisicing elit, sed do
eiusmod tempor incidid.
Ut enim ad minim
veniam, quis nostrud
exercitation ullamco
laboris nisi ut aliquip ex.
MATechnology ® 北京摩安迈特技术有限公司
Beijing MoAnmaite Technology Co., Ltd.

MAT 摩安科技

在役微观再制造技术（MAT）

Microscopic Adaptive in-service Additive Remanufacturing Technology

构建设备全生命周期极低摩擦极少磨损超润滑环境

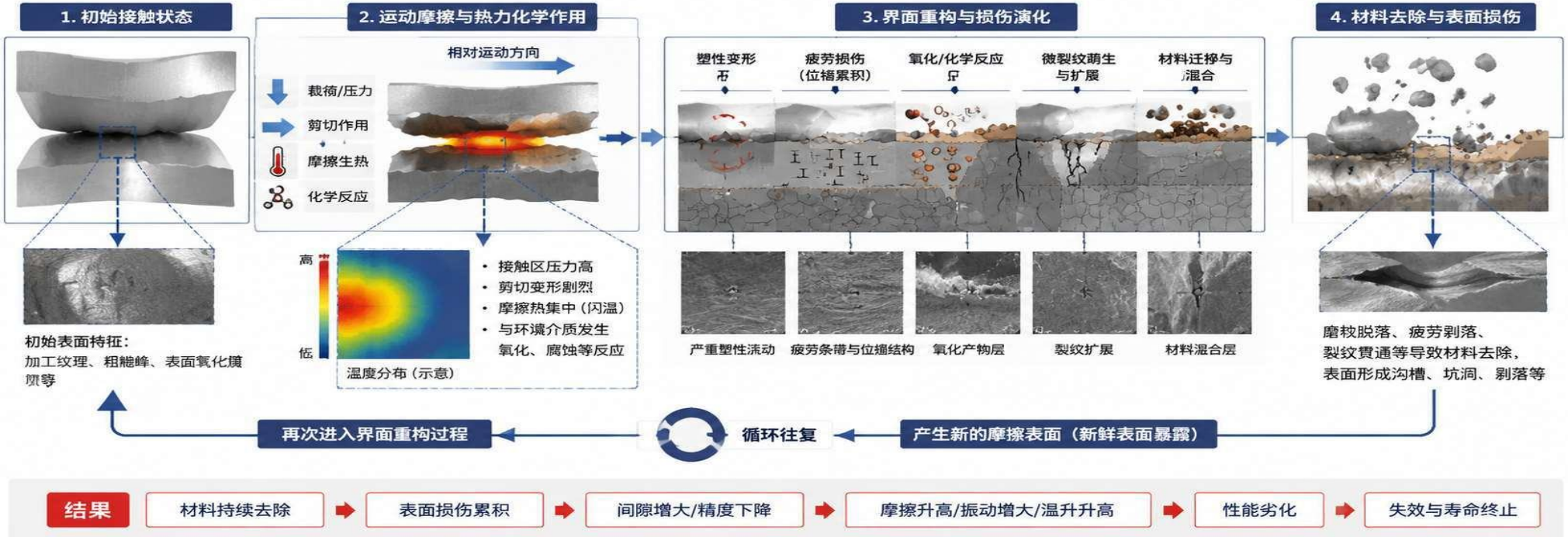
-------通过降低因摩擦磨损造成的一次性化石能源、电力、材料消耗，实现节能降碳。MAT技术

在役微观再制造+油膜络合导电智能材料

热、力及化学作用导致的界面劣化重构

表/界面重构与疲劳磨损

热力化学耦合下的摩擦副表/界面重构与疲劳磨损---是指摩擦副在持续服役过程中，热、力及化学作用相互耦合，在摩擦表面和近表层持续驱动能量、物质与结构演化，使表面发生膜重构、表层发生材料重构，并通过材料形成与去除的持续竞争，最终表现为疲劳磨损、组织演化及服役性能衰减的动态过程。



结果 → 材料持续去除 → 表面损伤累积 → 间隙增大/精度下降 → 摩擦升高/振动增大/温升升高 → 性能劣化 → 失效与寿命终止

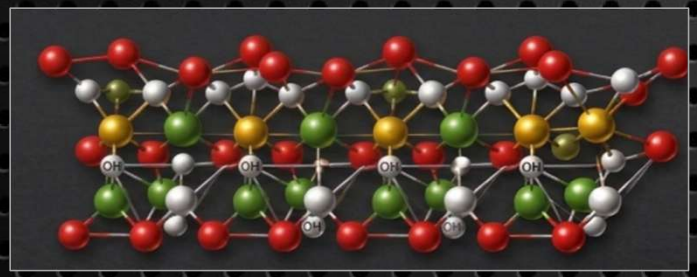
摩擦界面重构与界面重构调控功能材料（MAT材料）

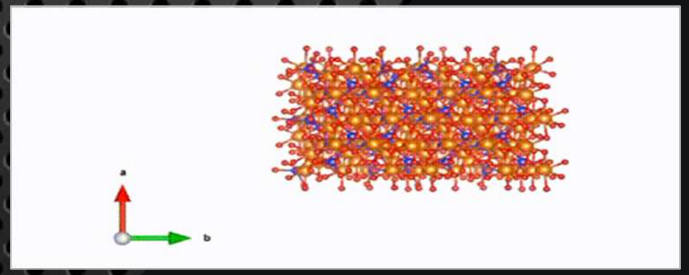


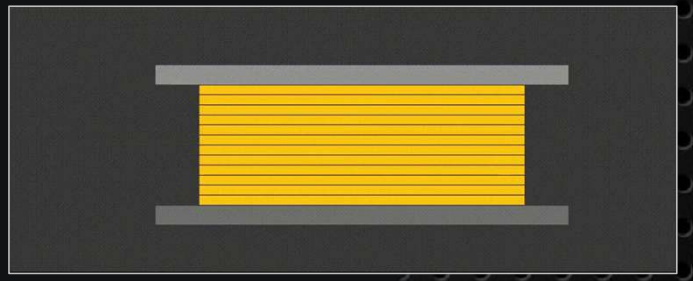
颠覆认知

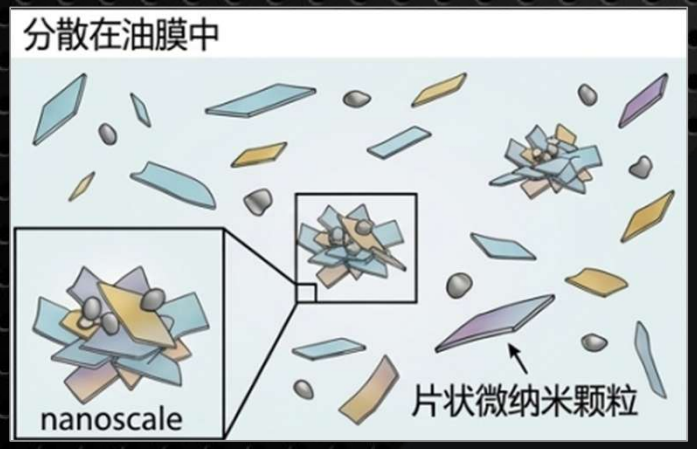
界面重构调控功能材料

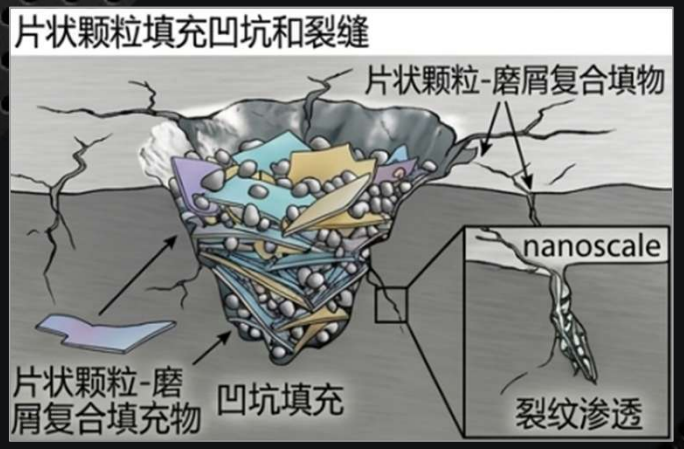
界面重构调控功能材料（**M**echanically **A**ctivated **T**ribointerfacial Material，**MAT材料**），是指能够进入摩擦副表/界面，并在服役过程中受到摩擦热、载荷和剪切作用被激活，通过界面吸附、填充、剪切滑动、研磨抛光、物质富集、结构活化、物质迁移及摩擦化学作用参与界面材料重构，从而调控摩擦界面材料演化和表面性能，并促进形成具有特定结构与性能的新界面层的一类功能材料。**恰到好处的晶体结构、硬度、吸附特性、活性和络合特性。**

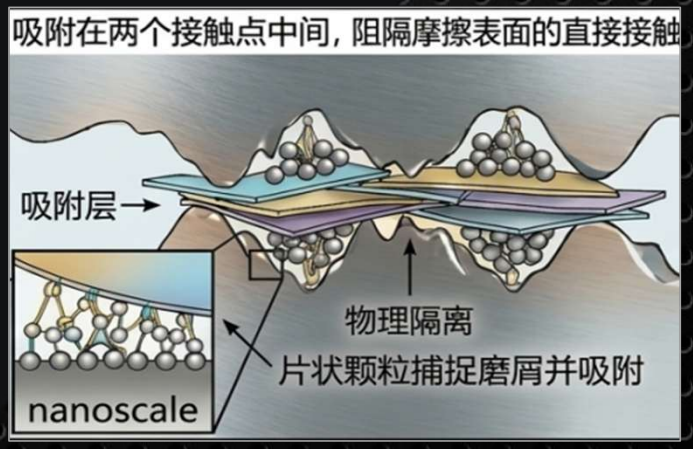












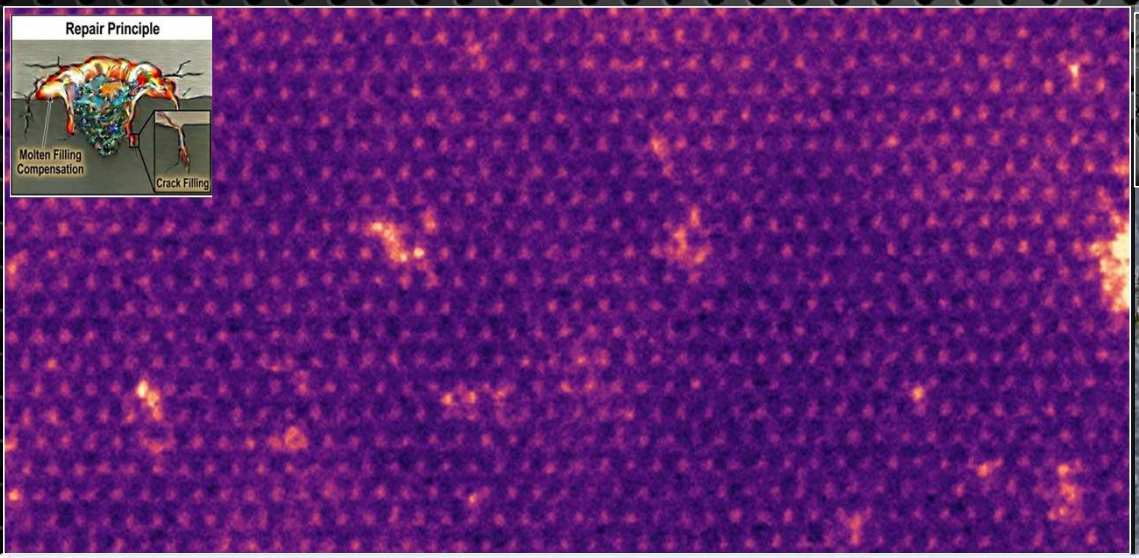
摩擦表/界面形貌及热力学特性与闪温熔覆



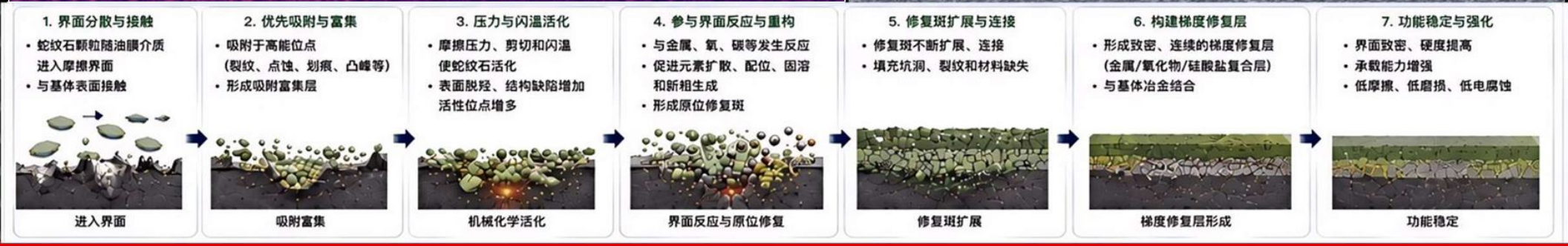
颠覆认知

闪温熔覆

闪温驱动原位熔覆--Flash-Temperature-Driven In-Situ Cladding（闪温熔覆，FTC）是指摩擦副在相对运动过程中，局部接触区域产生瞬态高温、高应力的闪温点，使富集于摩擦界面的功能材料及界面材料发生局部活化、软化、混合、迁移、反应、流动与再凝固，并在基体表面原位形成新的材料层的摩擦加工过程。







设备在役微观再制造技术（MAT技术）

微观摩擦环境

设备制造

设备运用

运维

制造周期

设备交付

停机维修

疲劳失效

常规服役周期结束

开始运动副表/界面形貌、强度和配合间隙继续在线优化制造周期

长服役周期×2

MAT 涂覆

在役微观再制造

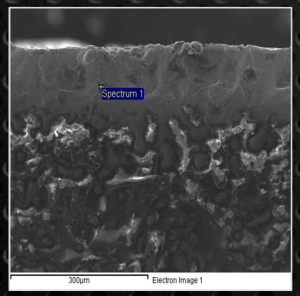
0. 初始状态 | 1. 常态磨损过程（未介入） | 2. MAT介入与活化过程 | 3. 界面重构过程（表面膜重构＋表层材料重构） | 4. 重构后的稳定状态

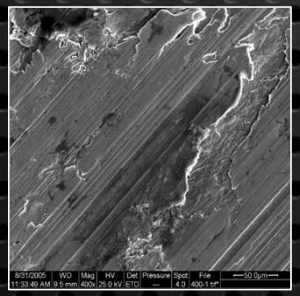
在役微观再制造--**M**icroscopic **A**daptive Tribological Remanufacturing **T**echnology for Online Additive Surface Regeneration，**MAT技术**），是利用设备服役运行过程中产生的摩擦能，通过功能材料介入，基于“闪温驱动原位熔覆（Flash-Temperature-Driven In-situ Cladding，简称闪温熔覆FTC）”理论，在实际摩擦区域实现微观尺度材料去除、抛光、补充、增材、改性和组织重建，对摩擦界面进行动态强化重构，编织摩擦界面二维固液多元润滑聚脂膜网络，实现界面磨损速度和微观增材补偿速度达到相对动态平衡状态，构建设备极低摩擦极少磨损超润滑环境。

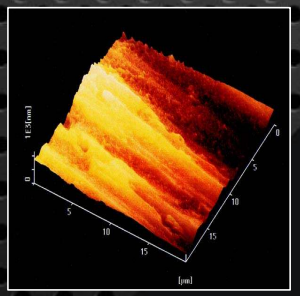
再制造强化层摩擦学性能评价

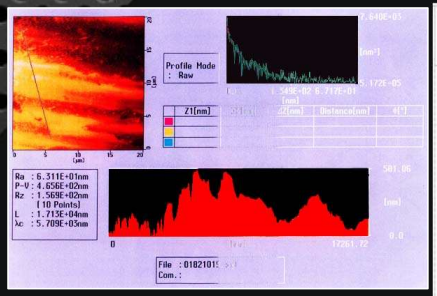
减摩+抗磨+耐磨+耐高温+高硬度+耐腐蚀+耐冲击+高阻抗

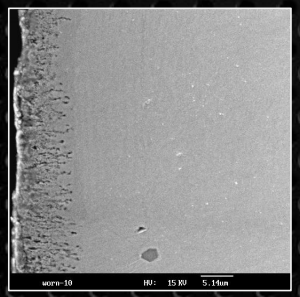
- 在持续的闪温熔覆作用下，界面经历结构重构与材料再分布过程，逐步形成具有非晶或微晶特征的复合层（金属陶瓷层）。该层通常表现出高硬度、高阻抗、耐腐蚀、高热稳定性及抗冲击性能，与基体是冶金结合，不会脱落，有助于提升界面整体稳定性并抑制电腐蚀损伤。
- 界面重构具有在线、原位、自适应、增材、陶瓷化和动态优化配合间隙的特性。

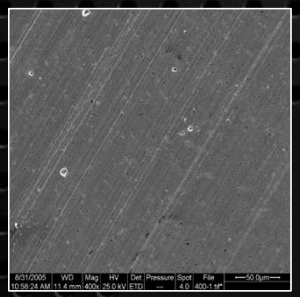


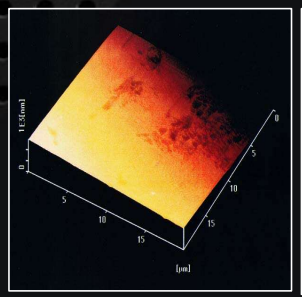


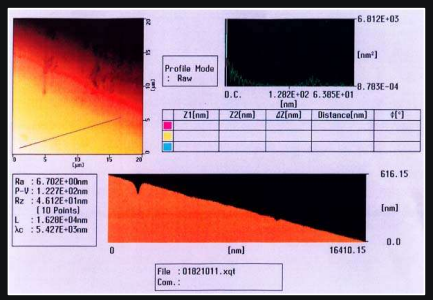










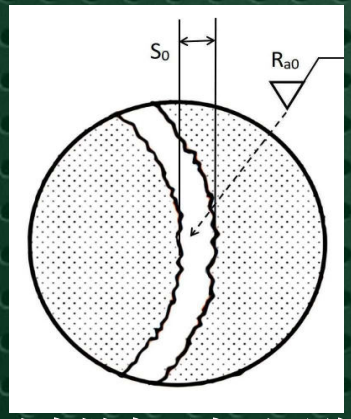


金属陶瓷层的力学和物理性能

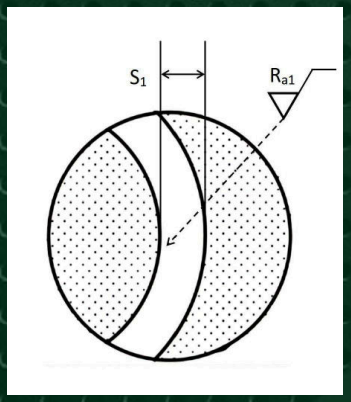
性能分项	性能参数	备注说明
表面粗糙度	属极光表面类中的亮光泽面	Ra=0.0649
摩擦因数	0.003～0.007	干摩擦
显微硬度	680～710HV	
电绝缘	0.1～10μm 的电绝缘层	
线胀系数	13.6～14.2×10-6	与钢的热胀相同系数，不脱落
冲击强度	500MP	抗压强度 50kg/cm²
耐高温	1575～1600℃	破坏温度
耐腐蚀	高湿度、海洋环境、酸碱介质中不腐蚀	

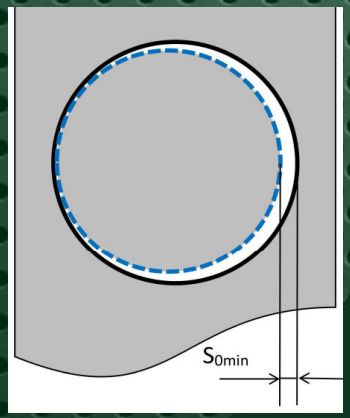
“换肤+养颜”

祢补制造零部件材料、加工精度和装配精度的不足，在设备运行过程中自行补强优化。

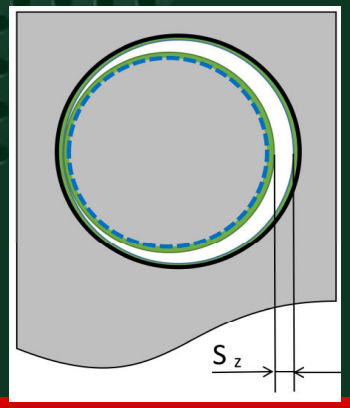


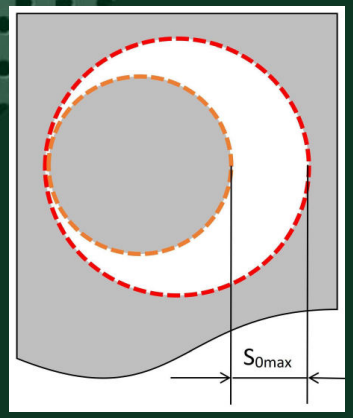
动态抛光（表面形貌）



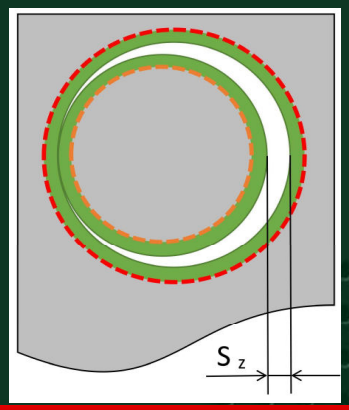


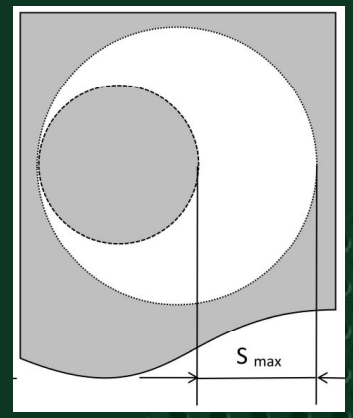
改性强化（表面性能）



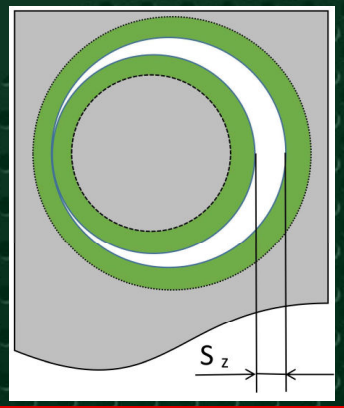


间隙优化（装配精度）



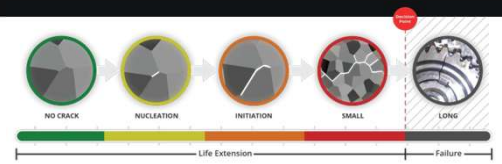


增材修复（免拆）



设备服役寿命

改变磨擦损耗曲线走势，直接影响运动件跑和方式的寿命

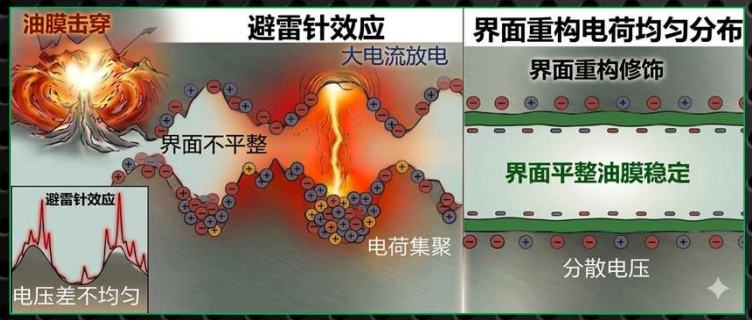


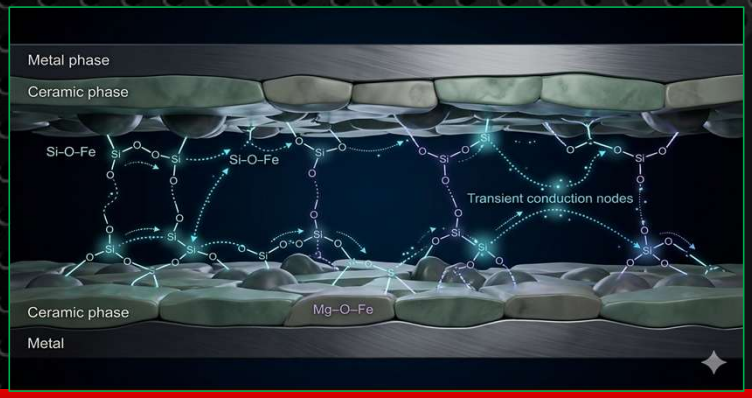
MAT--Mso的电腐蚀抑制与损伤修复特性

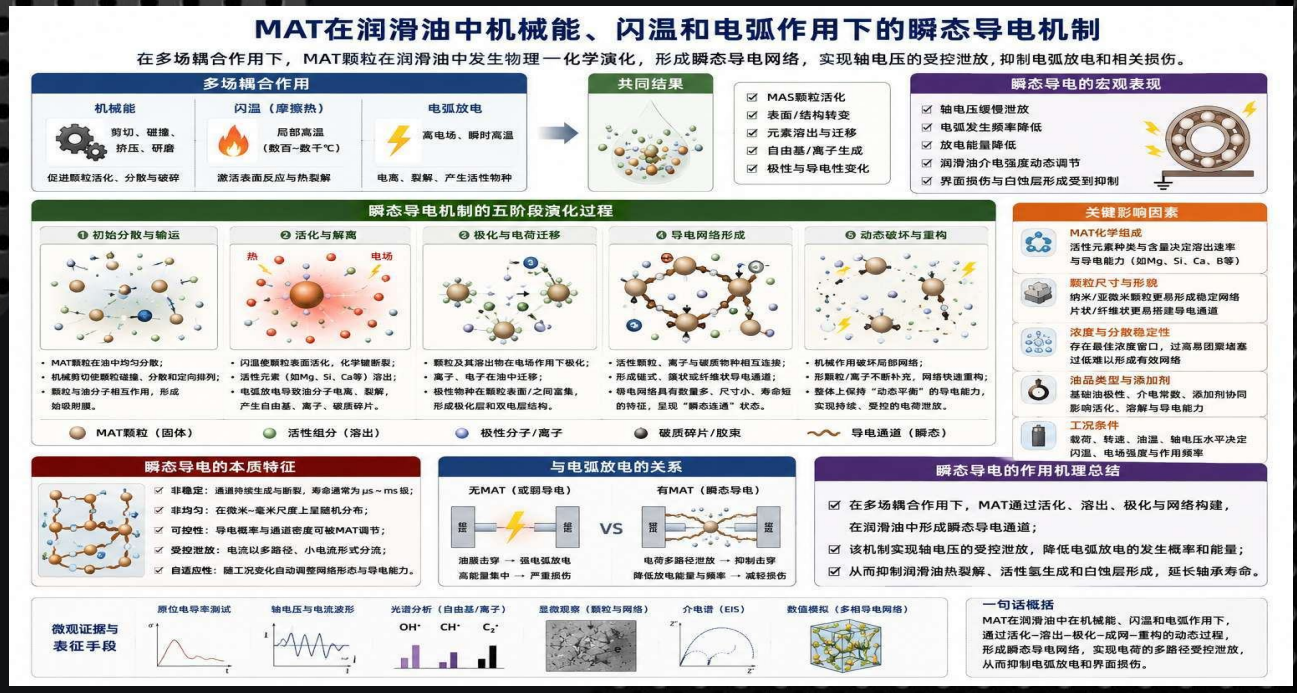
均衡电荷分布+高阻抗界面+瞬态导电网络+闪温熔覆

在界面重构与动态抛光过程中，表面粗糙度逐步降低，微观凸起被削弱，从而减缓电荷在尖端区域的集中效应。该过程有助于将局部增强电场转变为相对均匀的分布状态，降低局部击穿风险，避免避雷针效应。在摩擦与电场耦合作用下，智能微纳米颗粒Mso在闪温区域转化为无定形结构，并生成具有较高反应活性的组分。这些组分可与润滑介质中的分子及金属磨屑发生相互作用，形成具有一定连通性的微观网络结构。

该网络可提供多路径的电荷迁移通道，可能在界面与润滑介质中形成瞬态导电路径，与传统绝缘油膜不同，该瞬态导电行为并非持续存在，而是在高能区域短时出现，表现为界面电阻的瞬态降低及电流响应的非线性变化。由于瞬态导电路径的存在，界面电荷放电与导通之间的动态竞争和调节，部分电荷可在达到击穿条件之前通过导通路径释放，从而降低电荷积累。这一机制使界面电学行为从“累计放电”逐步转变为“低压疏散”状态。







MAT的电腐蚀抑制与损伤修复特性



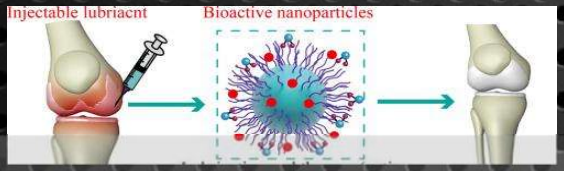
设备智能自愈--MAT.ai

智能健康监测报告+检修

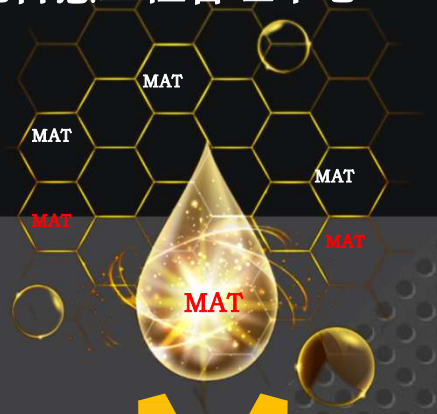
装备健康智能自愈工程管理中心

预警 停运 换件
维修

AI + MAT >>> 设备在线自愈



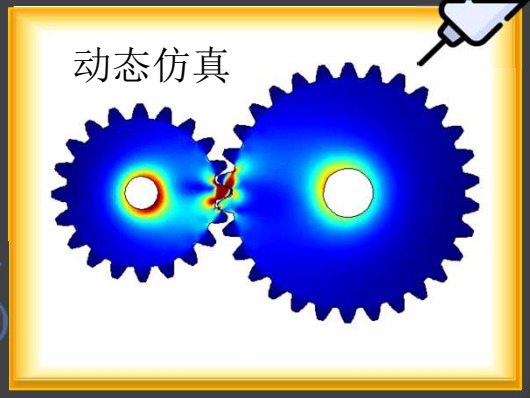
构建机械设备仿生再生机制



抗磨”疫苗“：改性强化









在线自愈

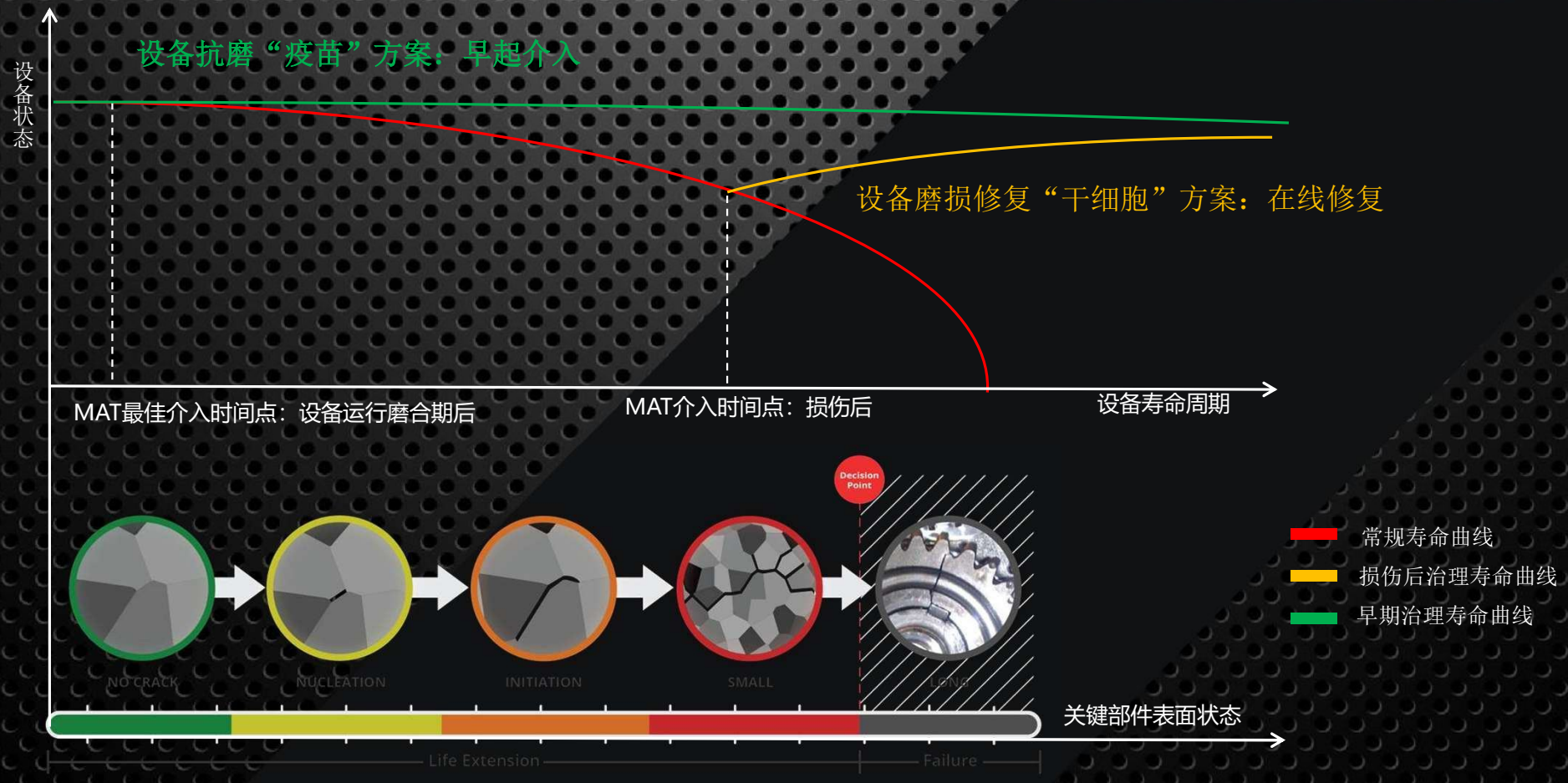
Ai故障诊断

设备“干细胞”：靶向修复

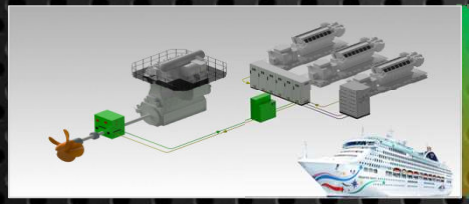
超润滑环境

风电机组传动链MAT摩擦治理最佳介入时间

设备全寿命周期保护



MAT应用场景



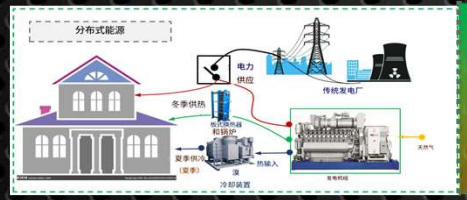
船舶动力及传动系统：

- 柴油机+传动系统
- 舵桨传动系统



公路运输动力及传动系统：

- 发动机
- 变速箱+减速器+差速器



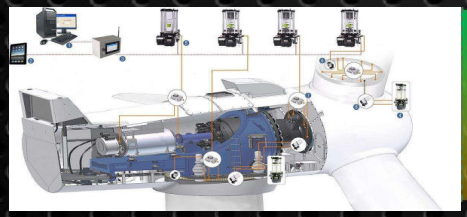
热电机组动及热处理系统：

- 热气轮机
- 冷凝系统
- 破碎设备



工程机械动力及传动系统：

- 发动机
- 变速箱+减速器+前后桥
- 液力传动



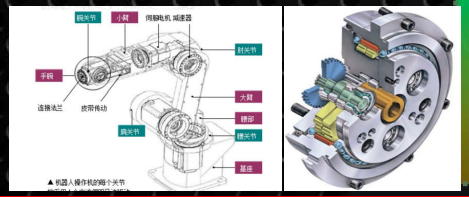
风电机组传动链：

- 轴承
- 齿轮箱



矿山机械动力及传动系统：

- 挖掘装备
- 运输装备
- 破碎装备



工业机器人关节模组：

- RV减速器
- 谐波减速器



铁路机车动力及传动系统：

- 柴油机动力传动
- 走行架传动
- 轮轨界面

MAT的国家意义---节能降碳新路径

摩擦磨损与一次性化石能源消耗

- 导致全球1/3一次性能源消耗
- 导致60%机器零部件失效
- 是50%机械事故诱因
- 5%的GDP浪费（>7万亿/年）



摩擦磨损对全球能源消耗、成本和排放的影响.



卡车和公共汽车摩擦磨损导致的全球能源消耗

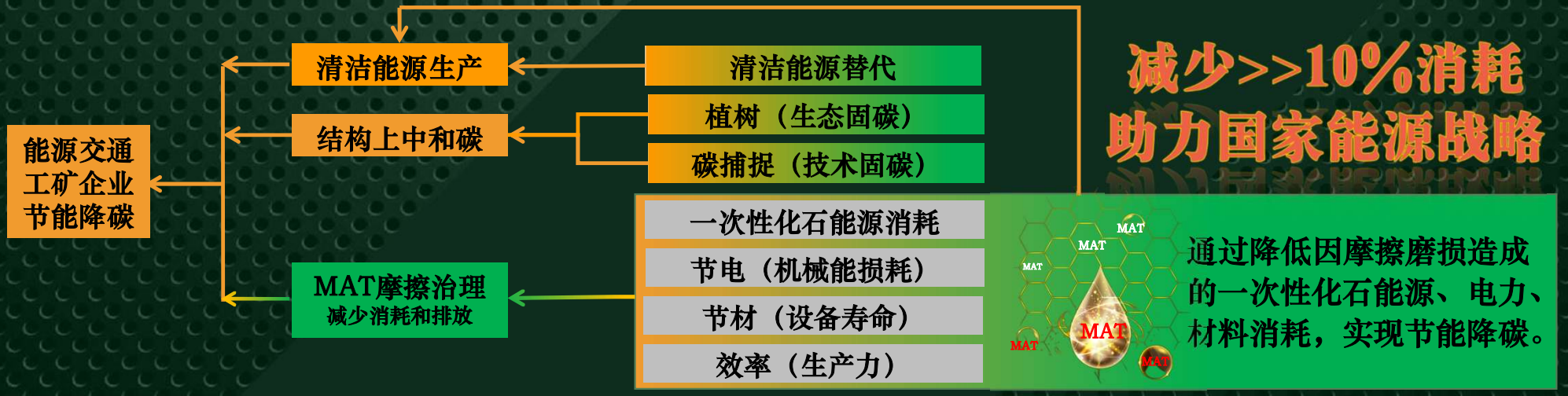


采矿业中摩擦磨损的能量损耗和成本



中国战略：能源结构

欧美战略：积极推进减少耗能设备摩擦磨损造成的浪费



MAT中国制造----源于一群科学家的不懈努力！



徐滨士

中国工程院院士
中国表面工程和再制造工程开拓者和创始人



杨其明

摩擦学专家
教授高级工程师，03院士候选人
国家津贴专家，摩擦学专家



易新乾

工程机械专家
国家津贴专家。中国工程机械学会维修与再制造分会创始人



白志民

材料学专家
博士教授，原中国地质大学材料学院院长，摩安首席科学家



许一

表面工程专家
“双百计划”青年科技英才，中国设备协会设备维修分会主任委员等



赵敬贤

机电工程专家
教授高级工程师，原航天工业部机械研究所所长



杨 超

热能动力专家
原北京交大机电工程学院院长，著名的铁路热能动力专家



李少华

能源与动力专家
东北电力大学原副校长，能源与动力工程学院教授、博导

MAT在中国



2002年，摩安科技引进前苏联技术，徐滨士院士接见了俄罗斯专家。



2004年，由白志民院长牵头，摩安科技会同北京交通大学、中国地质大学、装甲兵工程学院、北京铁路局科研所等启动国产金属减磨强化修复技术研



2009年通过了由徐滨士院士主持的科技成果鉴定。并获得发明专利。



2019年在风机齿轮箱挂机适用，2021年，十三五国家重点研究计划项目通过评审



2022年，曹琦提出闪温熔覆理论模型

1970

2002

2004

2007

2009

2011

2019-2021

2022

2025

2002年铁道部实车验证试验在哈密机务段开始



2007年，铁道部实车应用验证成功，发文推广



2011年，中央电视台《科技之光》频道全程报道了摩安科技汽车发动机无机油运行试验



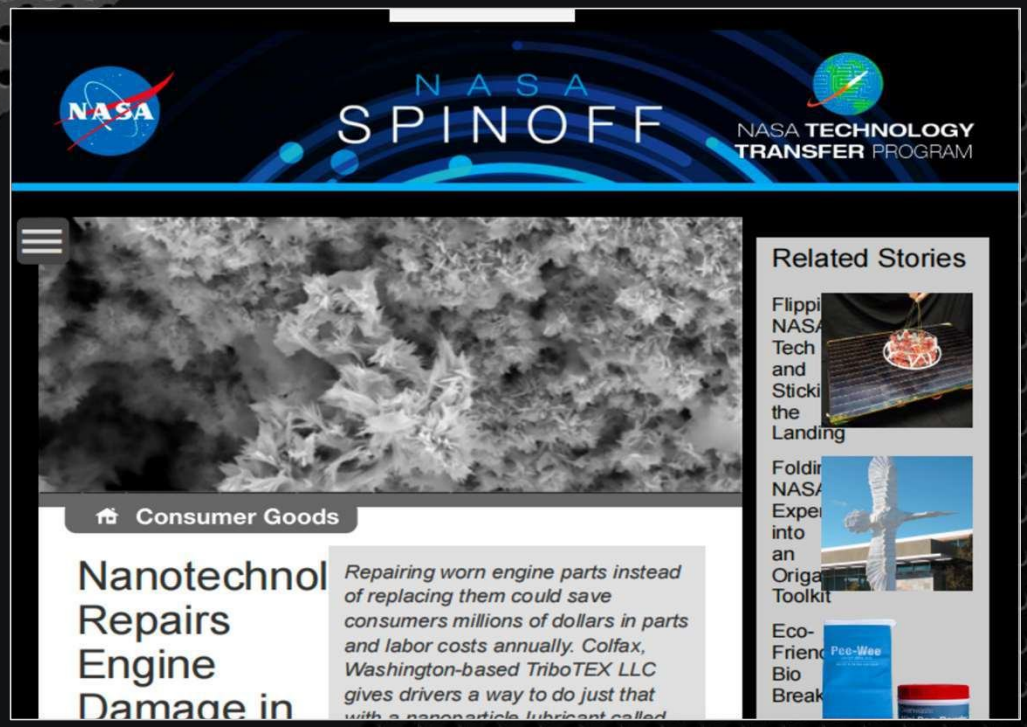
2025年，摩安科技入选央视《科创中国》并拍摄了10分钟纪录片在央视播出。



NASA、空军、国防部、能源部、能源发展基金等机构联合

美国以国家的力量开发，应用于航空航天和军工装备





全球减摩修复技术发展历程

中国摩安已进入世界赛道并领先

前苏联 NPC 1970年，前苏联军事研究科学家发现了能够在线修复磨损的天然矿物材料，199年苏联解体后，几个科学家开始民用开发，技术在全球引起关注，是减摩修复技术的源头。

俄罗斯 RVS TECHNOLOGY 1995年芬兰介入，加速了这项技术的发展，2001年全球第一款民用减摩修复产品RVS诞生，2002年在中国铁路应用。2007年RVS公司迁到芬兰，原材料继续来源于俄罗斯。

波　兰 CERAMIZER® 1996年成立，技术源于前苏联。号称行业全球最大。

中　国 MAT 摩安科技 2002年，摩安科技引进RVS技术，应用在铁路机车内燃机上，2004年开始摩安科技联合三所大学及原铁道部运输局、北京铁路局研究所开始国产化研发，目前是拥有自主知识产权，100%中国制造，徐滨士院士主持科技成果鉴定，铁道部应用验证，中央电视台两次专题报道。

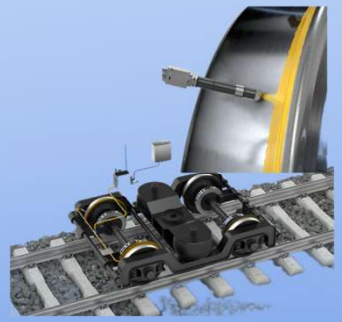
德　国 REWITEC® 德国Rewitec（2003，瑞威特），2019年被欧洲最大的化学品公司Croda International（禾大）收购，两所大学参与研发，2 2022 年 7 月随母公司克罗达（Croda）的工业业务板块一起被美国嘉吉公司收购。

美　国 TriboTEX TriboTEX（2009），美国国家·航空航天局NASA、能源部NSF、国家科学基金会DOE、美国空军、国防部DOD的支持下在国家实验室开发的。2015年获得国家科学基金投资，美国种子基金SBIR 的两轮投资

铁路机车动力及传动链全寿命周期超润滑场景构建

内燃机车摩擦损耗约占总能耗的约12%-15%，电力机车传动系统摩擦损耗占比约8%-10%。由于摩擦状态的劣化，磨损不可逆，齿轮箱在服役期效率会逐渐下降，从新车的98%，最多的时候会降到89%，造成能源浪费，尤其是轴承，疲劳磨损导致失效会严重影响行车安全。MAT通过动态补偿磨损，在设备全寿命周期保持关键零部件处于相对最优状态，可以减少能源浪费和行车安全，减少维护成本和工作强度。**MAT治理铁路机车超2000台次。**

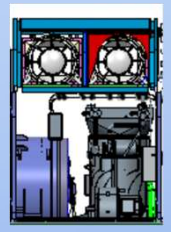
轮轨
- 轮缘减摩棒
- 无油轨侧减摩脂





冷却通风
- 轴承强化润滑脂
- 齿轮箱强化剂

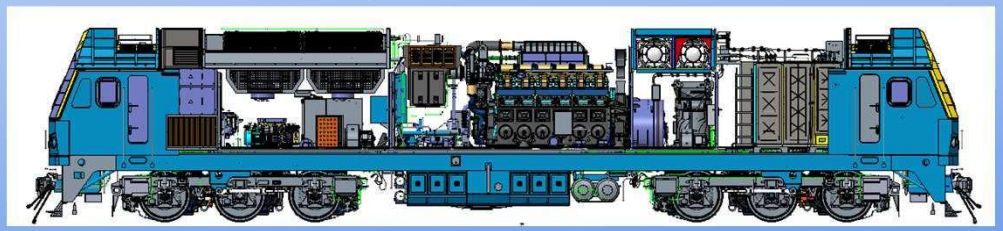




冷却塔
- 轴承强化润滑脂
- 齿轮箱强化剂



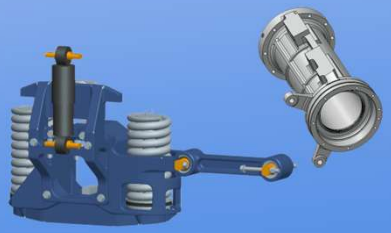
齿轮箱
- 齿轮箱再生强化剂
- 齿轮箱再生修复剂

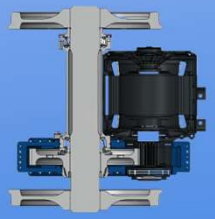




柴油机
- 柴油机再生强化剂
- 柴油机再生修复剂

轴承箱、抱轴箱
- 轴承强化润滑脂
- 轴承再生修复脂









齿轮箱
- 齿轮箱再生强化剂
- 齿轮箱再生修复剂

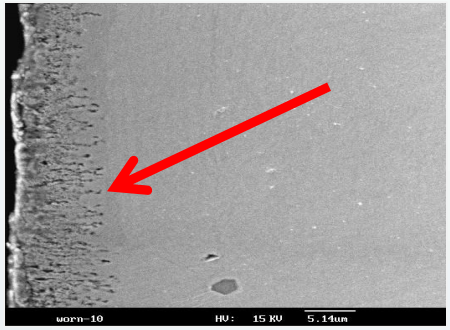
MAT铁路机车应用案例--哈密机务段铁路机车115.2万km应用考核

关键部件寿命延长4倍丨省油（↓5%）丨降碳（↓30%）丨延长修程1倍丨故障率降70%丨降维护成本

试验组织单位：**铁道部运输局装备部**
试验机车：DF8B型内燃机车16V280型柴油机
试验周期：2002.12-2007.11
累计试验里程：115.2万公里
试验检测阶段：60.9万公里、87.4万公里、115.2万公里
实施试验单位：铁道部乌鲁木齐铁路局原哈密机务段
检测单位：资阳机车厂、威墅堰机车车辆工艺研究所

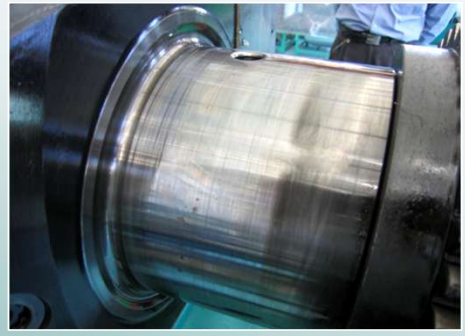
试验结论：
1）柴油机技术状态、润滑油理化性能、光谱铁谱监测等项考核指标在试验期内全部正常；
2）缸套在60、87、115万公里平均磨损量分别仅为到限值的23.0%、19.0%和0.24%，缸套寿命可延长三倍；
3）活塞环槽侧隙在60、87万公里平均增值分别仅为到限值的27.0%和1.9%；活塞寿命可延长两倍；
4）比较考核柴油机在运行60、90 和115万公里的缸套内径、活塞环槽侧隙磨损数据，确认对缸套内表面和活塞环槽有明显的“修复”效果；
5）与对比车（新车）平均燃油单耗相比，考核机车燃油节约率为2.2%；与全段同型号机车平均燃油单耗相比，考核机车燃油节约率为4.0%。



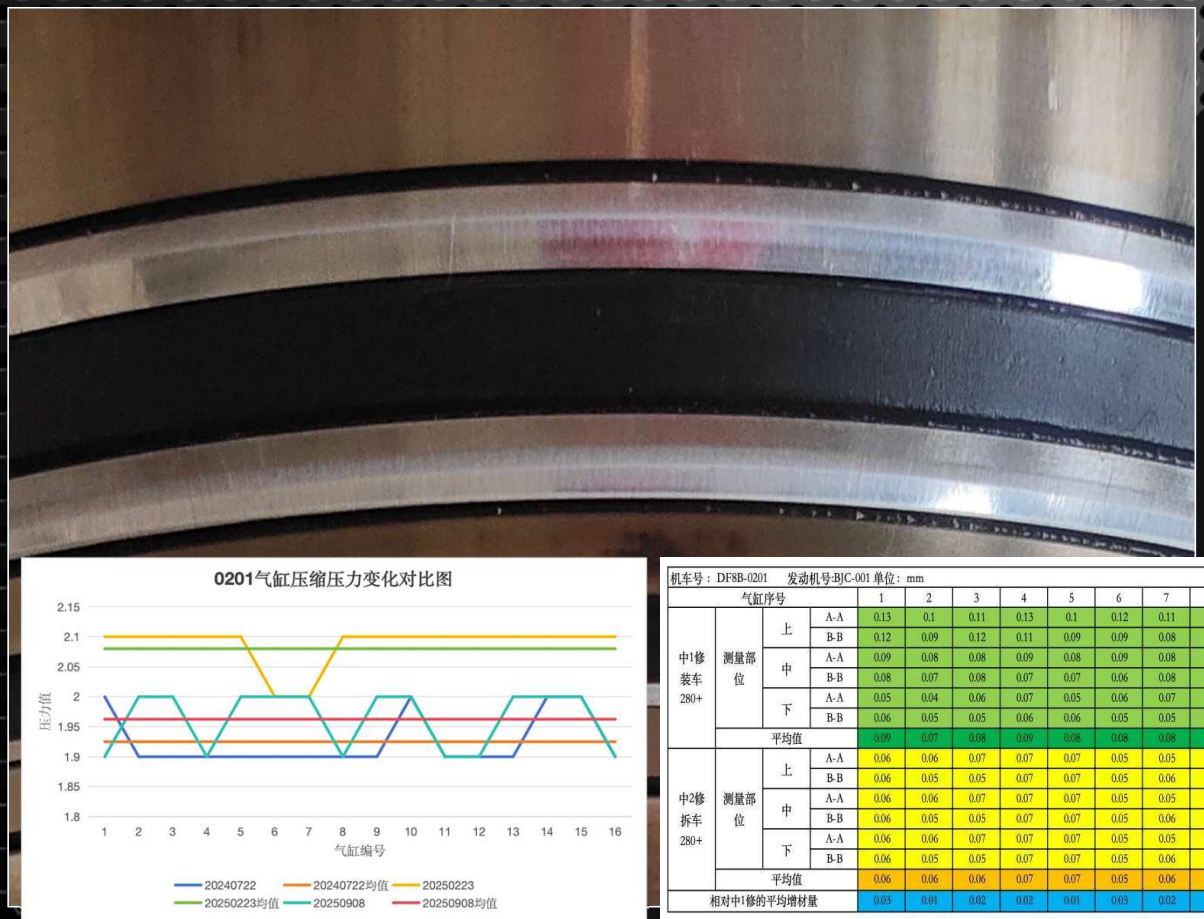







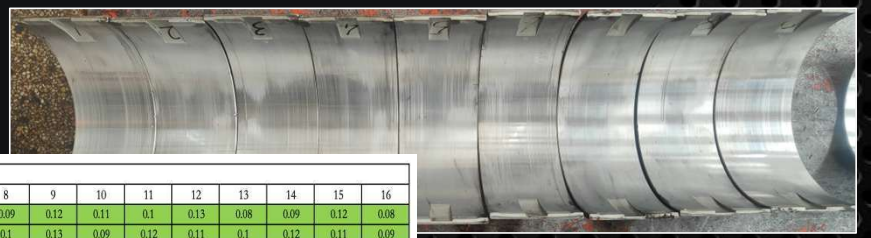


嘉峪关机务段DF8B-0201号机车柴油机（2025）











机车号：DF8B-0201　发动机号-BJC-001 单位：mm

气缸序号				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
中1修装车280+	测量部位	上	A-A	0.13	0.1	0.11	0.13	0.1	0.12	0.11	0.09	0.12	0.11	0.1	0.13	0.08	0.09	0.12	0.08
			B-B	0.12	0.09	0.12	0.11	0.09	0.09	0.08	0.1	0.13	0.09	0.12	0.11	0.1	0.12	0.11	0.09
		中	A-A	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07	0.09	0.06
			B-B	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07
		下	A-A	0.05	0.04	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.06	0.04	0.05
			B-B	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06
	平均值			0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07
中2修拆车280+	测量部位	上	A-A	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06
			B-B	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06
		中	A-A	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
			B-B	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
		下	A-A	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08
			B-B	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08
	平均值			0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
相对中1修的平均增材量				0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02	0	0.02	0.02	0

格尔木机务段DF8B-5136号机车（2026）

气缸套、曲轴径均出现了负磨损，压缩压力和均衡性得到了明显改善

主轴颈轴颈磨损对比表

DF8B-5316 柴油机编号：500 / 曲轴编号：QX10-74 / 单位：mm

尺 寸 偏 差 记 录

测量时间	检测部位		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2023.02 大修 主轴颈 229.6 -	Ⅰ-Ⅰ	A-A	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02
		B-B	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
		C-C									
		Ⅰ均									
	Ⅱ-Ⅱ	A-A	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02
		B-B	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03
		C-C									
		Ⅱ均									
	均值		-0.023	-0.023	-0.025	-0.028	-0.023	-0.023	-0.023	-0.025	-0.023
2026.04 大修 主轴颈 229.60-	Ⅰ-Ⅰ	A-A	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01
		B-B	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
		C-C									
		Ⅰ均									
	Ⅱ-Ⅱ	A-A	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01
		B-B	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
		C-C									
		Ⅱ均									
	均值		-0.01	-0.01	-0.01	-0.005	-0.01	-0.005	-0.01	-0.01	-0.01
磨损量			-0.013	-0.013	-0.014	-0.023	-0.022	-0.018	-0.022	-0.024	-0.022

全部出现负磨损，轴径平均增大 0.019mm，表面增材 0.01mm。主轴颈一个中修期磨损经验值一般约 0.02～0.06 mm。

连杆轴颈轴颈磨损对比表

机车编号：DF8B-5316 柴油机编号：500 曲轴编号：QX10-74 / 单位：mm

尺 寸 偏 差 记 录

测量时间	检测部位		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2023.02 中修 连杆轴颈 209.60	Ⅰ-Ⅰ	A-A	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	
		B-B	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	
		C-C									
		Ⅰ均									
	Ⅱ-Ⅱ	A-A	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.03	
		B-B	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	=0.03	-0.02	
		C-C									
		Ⅱ均									
	均值		-0.025	-0.025	-0.025	-0.023	-0.025	-0.025	-0.01	-0.025	
2026.04 大修 连杆轴颈 209.00-	Ⅰ-Ⅰ	A-A	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	
		B-B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	
		C-C									
		Ⅰ均									
	Ⅱ-Ⅱ	A-A	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	
		B-B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		C-C									
		Ⅱ均									
	均值		0	-0.005	0	-0.005	0	-0.005	0	-0.008	
磨损量			-0.025	-0.02	-0.025	-0.02	-0.025	-0.02	-0.01	-0.018	

全部出现负磨损，平均轴径增大 0.02mm，平均增材 0.01mm。连杆轴颈一个中修期磨损经验值一般约 0.03～0.08 mm。

汽缸套内径测量对比表

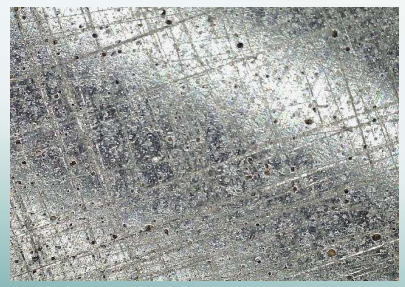
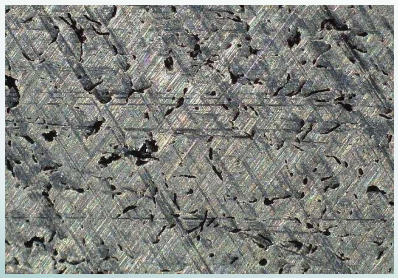
机车号 3516/ 柴油机编号：500 单位 mm

汽缸序号			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
缸套内径测量部位	中2装车 280.00+	上	A-A	0.04	0.04	0.05	0.04											
			B-B	0.04	0.03	0.04	0.04											
		中	A-A	0.03	0.03	0.03	0.03											
			B-B	0.02	0.03	0.03	0.03											
		下	A-A	0.02	0.02	0.03	0.03											
			B-B	0.01	0.02	0.02	0.02											
	大修解体 280.00+	上	A-A	0.03	0.04	0.08	0.04											
			B-B	0.06	0.03	0.06	0.05											
		中	A-A	0.03	0.05	0.09	0.03											
			B-B	0.04	0.02	0.04	0.05											
		下	A-A	0.04	0.03	0.08	0.03											
			B-B	0.04	0.03	0.03	0.05											
平均尺寸 (中2装车)		上																
		中																
		下																
		均	0.027	0.028	0.033	0.031	0.035	0.023	0.027	0.03	0.027	0.025	0.03	0.028	0.032	0.026	0.023	0.026
平均尺寸 (大修解体)		上																
		中																
		下																
		均	0.04	0.033	0.063	0.042	0.042	0.034	0.025	0.041	0.035	0.02	0.02	0.027	0.027	0.03	0.033	0.032
磨损量			-0.013	-0.005	-0.030	-0.011	-0.007	-0.011	0.002	-0.011	-0.008	0.005	0.01	0.001	0.005	-0.004	-0.01	-0.06



备 注：11 个出现刷磨损，最大增材 0.015，最大磨损 0.025（中修磨损限值=0.3mm，经验磨损值=0.1~0.2mm）



风电机组传动链全寿命周期MAT.ai智慧超润滑环境构建

风电机组运行环境受地域环境及设备特性影响，传动链关键部件需要承受突变载荷和电腐蚀损伤，严重影响主轴轴承及齿轮箱的寿命和稳定性，介入MAT摩擦治理，能够从源头延缓疲劳，抑制磨损和电腐蚀：

☐ 提高润滑介质的抗挤压性 ☐ 减少微动磨损 ☐ 强化摩擦副接触表面抗磨性能 ☐ 靶向修复磨损 ☐ 抑制电腐蚀 ☐ 延长关键部件寿命



突破设备制造与服役的界限，在运动件装配、台架跑合测试、整机运输、调试、并网待机过程中，介入MAT，避免早期的磨合磨损和假布氏损伤，为风机传动链全寿命周期极低摩擦极少磨损超润滑环境奠定基础。

齿轮箱内部磨损状态形貌

可恢复损伤：微磨损、表面塑性流变、微点蚀、滚道浅层疲劳、表面粗糙度恶化、摩擦界面几何退化、润滑膜失效

■ 磨损程度	■ 齿面形貌		■ 轴承形貌
重度磨损 **齿面**：齿面严重点蚀损 伤、胶合 **轴承**：滚子及滚道表面 大面积凹坑、剥落损伤			
中度磨损 **齿面**：齿面大面积点蚀、轻度胶合损伤 **轴承**：滚子及滚道表面 存在擦伤， 明显深度			
轻度磨损 **齿面**：齿面局部点蚀 **轴承**：滚子及滚道表面 存在少量点蚀损伤			

齿轮箱电腐蚀磨损状态形貌

可恢复损伤：微磨损、表面塑性流变、微点蚀、滚道浅层疲劳、表面粗糙度恶化、摩擦界面几何退化、润滑膜失效

■ 磨损程度	■ 齿面形貌		■ 轴承形貌
重度磨损 **齿面：** 齿面剥落或整个 齿面大面积电腐蚀形貌 **轴承：** 50%以上区域存在电腐蚀形貌			
中度磨损 **齿面：** 齿面局部剥落或 50%区域存在电腐蚀形貌 **轴承：** 20%~50%区域电腐蚀形貌			
轻度磨损 **齿面：** 齿面早期电腐蚀 白斑 **轴承：** 滚道面 20%以下区域电腐蚀形貌			

MAT产品在风力发电机组上的应用情况

风场	治理部位	台数	添加时间	备注
张北博得玉龙风电场	齿轮箱	14	19/23/25	
	主轴轴承	21	19/25	
	偏航齿圈	21	19/25	
	偏航减速器	3	25	
	变桨齿圈	20	25	
	变桨减速器	3	25	
	变桨轴承	20	25	
	电机轴承	20	25	
额尔敦风电场	齿轮箱	2	24	
喀左风电场	齿轮箱	3	24	
正蓝旗唐合风场	主轴轴承	1	24	
辽宁建平风场	齿轮箱	1	24	
大连庄河风场	齿轮箱	1	24	
海装某风场	齿轮箱	2	24	海上
承德某风场	齿轮箱	2	23	
乌兰察布某风场	齿轮箱	24	25	6MW
其它风场	齿轮箱	76	25	6MW
华电江西风场	齿轮箱	4	25	
大连重工	齿轮箱	2	25	

MAT在风电机组应用实践---挂机应用（2）

2019年9月MAT在风电主升速齿轮箱挂机试验

课题编号：2017YFB0310703　　密　级：公开

国家重点研发计划
课题任务书

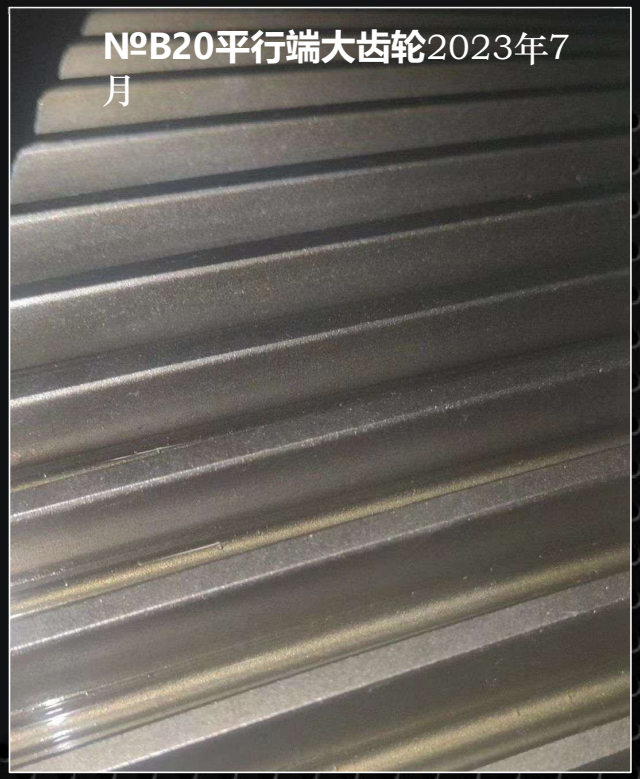
课题名称：重大装备用矿物减摩修复材料制备技术及应用示范
所属项目：节能非金属矿物功能材料制备技术及应用研究
所属专项：重点基础材料技术提升与产业化
项目牵头承担单位：咸阳非金属矿研究设计院有限公司
课题承担单位：中国地质大学（北京）
课题负责人：白志民
执行期限：2017年07月 至 2020年12月

中华人民共和国科学技术部制
2017 年 07 月 22 日

0003YF 2017YFB0310703 2017-07-22 11:07:42



№B20平行端大齿轮2019年9月

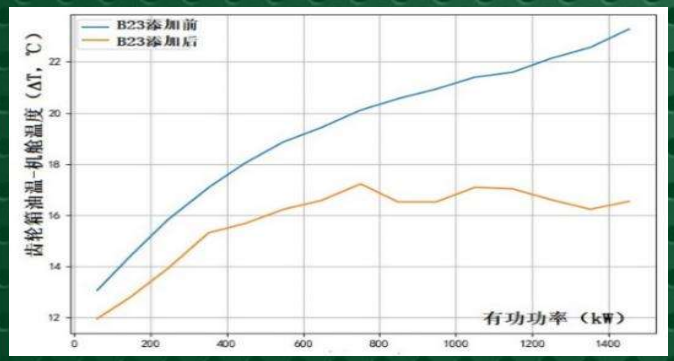


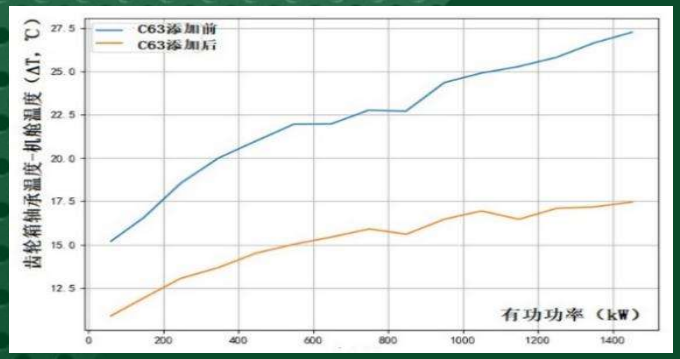
№B20平行端大齿轮2023年7月

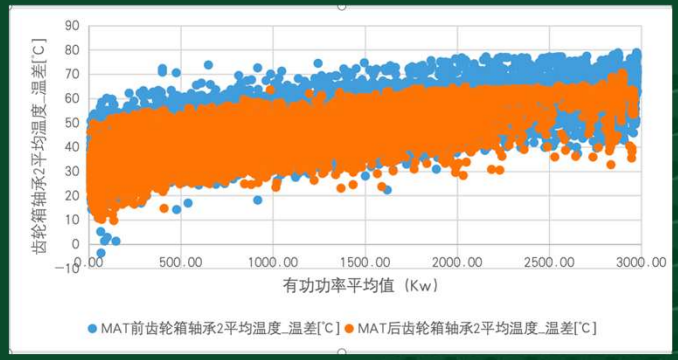
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（2）

轴承端温度和齿轮箱油温下降

$T_{bearing}$降6.32%-32.42%，T_{oil}降3.53%-32.32%。





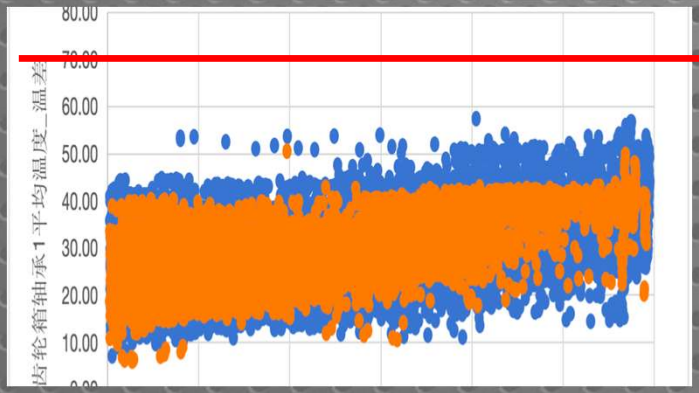


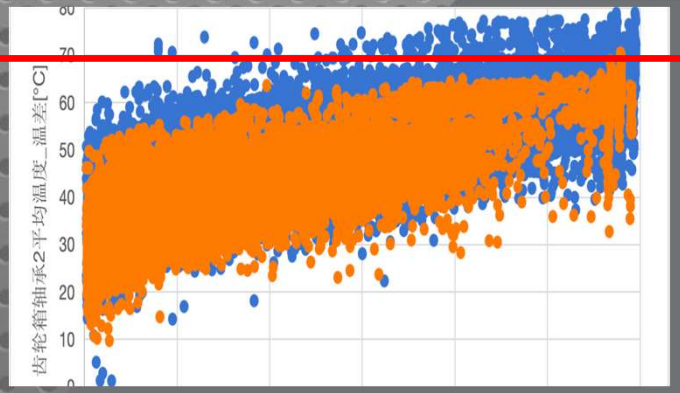
机组编号	状态	轴承端（$DT_{bearing}$，℃）	轴承端$DT_{bearing}$变化	齿轮箱油温（DT_{oil}，℃）	齿轮箱油温DT_{oil}变化
B5	添加前	16.57	-8.27%	14.46	-3.53%
	添加后	15.2		13.95	
B23	添加前	18.84	-11.89%	16.81	-15.59%
	添加后	16.6		14.19	
B25	添加前	16.92	-6.32%	17.2	-5.29%
	添加后	15.85		16.29	
C15	添加前	13.99	-8.22%	14.69	-7.15%
	添加后	12.84		13.64	
C29	添加前	14.72	-7.34%	14.83	-9.91%
	添加后	13.64		13.36	
C39	添加前	17.47	-8.36%	17.62	-8.97%
	添加后	16.01		16.04	
C63	添加前	19.06	-32.42%	19.03	-32.32%
	添加后	12.88		12.88	

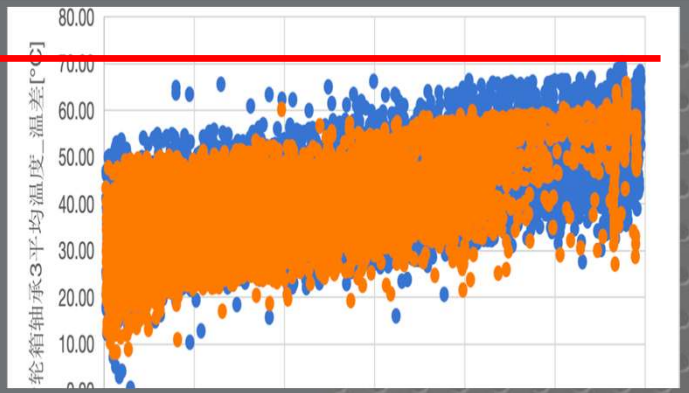
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（2）

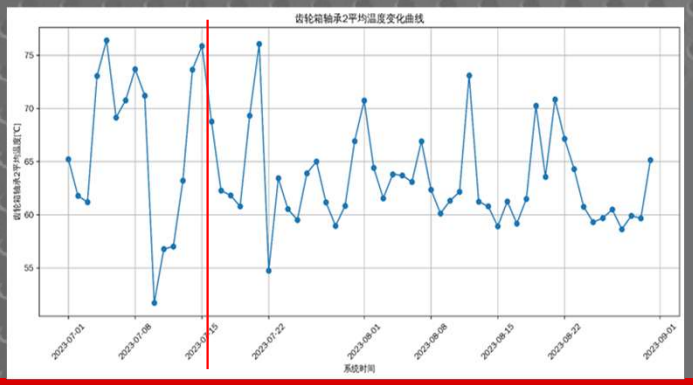
齿轮箱轴承损伤修复

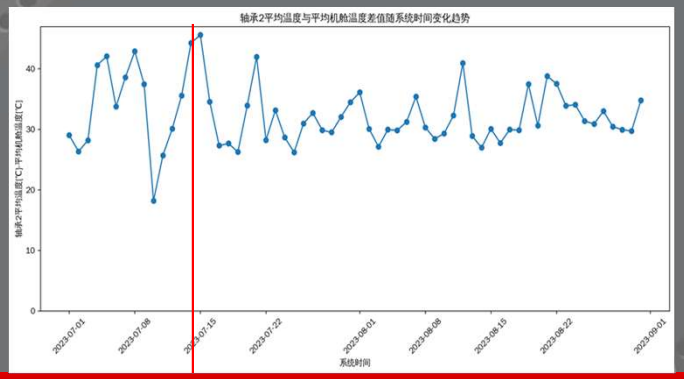
博得风场B5治理目的是轴承2频繁温度报警，经MAT治理后，报警消失，一年后温度分析，轴承2温度恢复正常，并且轴承1、3的温度也比前一年下降10%以上，表现出MAT的修复效果。

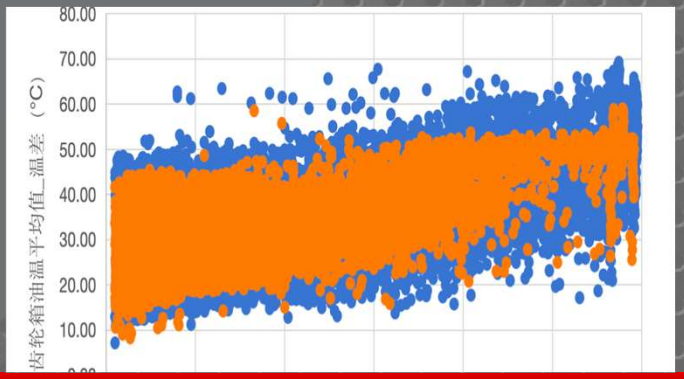






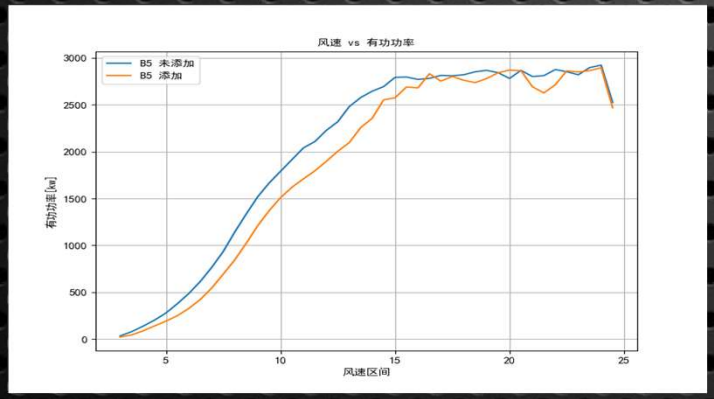


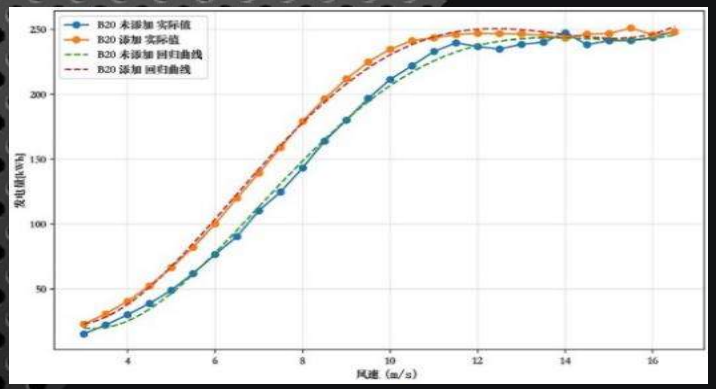




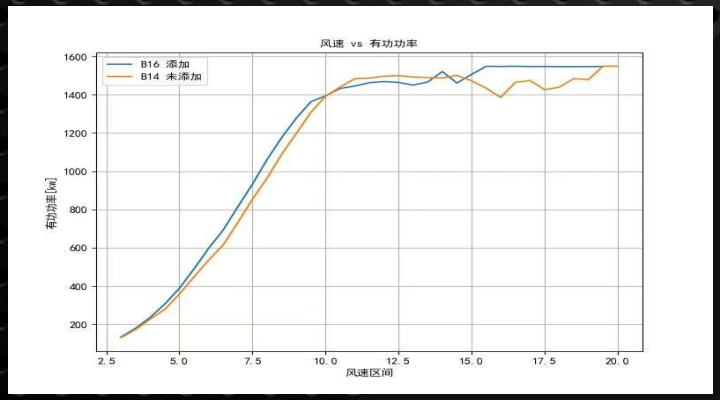
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（2）

效率修复

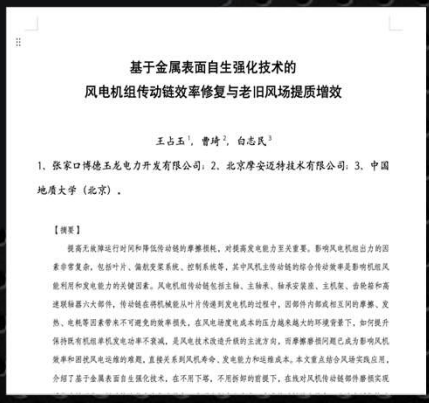












基于金属表面自生强化技术的
风电机组传动链效率修复与老旧风场提质增效

王占五[1]，曹琦[2]，白志民[3]

1. 张家口博德五龙电力开发有限公司；2. 北京摩安迈特技术有限公司；3. 中国地质大学（北京）。

【摘要】

传动链全生命周期效率衰减分析





authorId_7589831941

传动链效率衰减的行业认知与参考指标

- 汽车传动系统的能量损失约占发动机输出能量的15%-25%。其中，变速器是能量损失的主要部件之一。
- 龙门加工中心传动系统的能量损失约占伺服电机输入能量的12%-18%。
- 风电案例显示，15年后效率从96%降至92%。
- 振动降低50%可使轴承寿命延长高达300%。
- 过热是造成制造工厂设备过早失效的约 55% 的原因。
- 一台效率为 85% 的电机与一台效率为 95% 的电机相比，振动更大，轴承故障率高出3倍，联轴器磨损加速率达250%。
- 适当的润滑可以降低5%至15%的能耗，同时延长设备寿命50%甚至更多。
- 能源效率提高 10% 通常可以延长设备寿命 20-30%。
- 全面的节能方案平均可延长设备寿命20%至40%。平均故障间隔时间（MTBF）提高了50%甚至更多
- 功耗增加 5% 至 10% 通常表明存在潜在问题，如果不加以解决，将导致设备过早失效。
- 由于停机时间减少和设备性能提高，实施节能方案后产量提高了 5% 至 15%。在美国汽车行业，计划外停机每小时造成的损失高达 230 万美元，相当于每秒超过 600 美元。
- 矿山行业：某铁矿半自磨机的 B2SH06 齿轮箱运行 8 年后，齿面磨损量 0.18mm，效率从 95% 降至 91%，通过激光熔覆修复后恢复至 93%。
- 风电行业：金风科技 GW154-4.5MW 风机的 B2SH06 齿轮箱运行 15 年后，效率从 96% 降至 92%，更换轴承与密封件后回升至 94%。
- 冶金行业：某钢厂连铸机齿轮箱因冷却系统故障，运行 6 年效率下降 2.3%，修复后效率恢复至初始值的 98%。
- 精准齿面修复：采用激光熔覆技术（熔覆层硬度 HRC58~62）修复磨损齿面，可使啮合效率恢复90%~95%。某风电齿轮箱修复后，效率从 88% 回升至 93%。
- 轴承状态重构：更换陶瓷球轴承（Si3N4 材质）可使摩擦损失降低25%，配合油气润滑系统（油气流速 5~8m/s），效率提升1.2%~1.5%。
- 合成油再生处理：采用真空蒸馏 + 吸附过滤工艺，可使氧化油液的酸值≤0.08mgKOH/g，黏度恢复至标称值的95%，延长换油周期2~3 倍。
- 智能润滑管理：集成在线黏度传感器（精度 ±2%）与真空脱水装置，当油液水分 > 0.1% 时自动启动处理，可避免因油液劣化导致的效率下降0.5%~1%。
- 油液铁谱分析：当 > 5μm 磨粒浓度超 100ppm 或 > 20μm 切削磨粒出现，表明齿轮 / 轴承进入异常磨损阶段，效率下降速率将加快。
- 间接表征参数
- 振动频谱特征：齿轮啮合频率（(f_m)）的边带幅值增长 > 6dB，或轴承特征频率（如 BPFO）的能量占比 > 30%，提示效率下降1%~2%。
- 油温与噪声：润滑油温每升高 10℃，效率下降0.5%~0.8%；噪声从≤90dB 升至≥95dB，效率可能下降1%~1.5%。

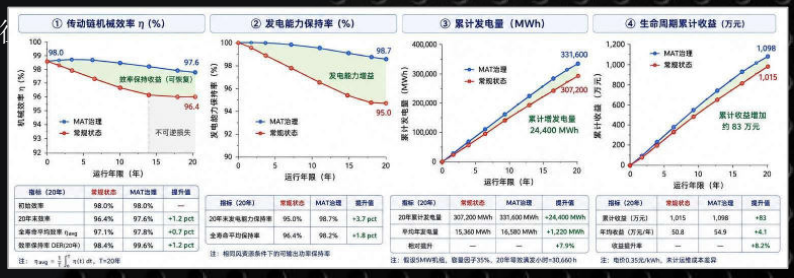
效率衰减的量化规律：

基于对大型齿轮箱（如B2SH06型号）的长期运行数据研究，传动链效率的衰减并非线性，而是呈现阶段性特征

- 初期阶段（0-5年）：效率年均下降约 0.5%~0.8%，主要由齿面跑合磨损和润滑脂轻微氧化引起。
- 中期阶段（5-10年）：效率年均下降加速至0.8%~1.2%，齿轮胶合、轴承疲劳和密封泄漏成为主要因素。
- 后期阶段（>10年）：效率年均下降可达 1.2%~1.5%，此时需通过大修或结构升级来延缓衰退。

关键部件的贡献度：效率下降主要由以下部件劣化导致：

- 齿轮啮合损失：占总效率下降的 50%~60%，是主要因素。
- 轴承摩擦损失：占 25%~30%。
- 搅油与风阻损失：占 10%~15%。



authorId_7589831941 勇俊Ǔ李小兰Ǔ贺Ǔ明Ǔ叶旭强，传动系统能量损失分析与效率提升方法，2026·第8卷·第3期·机械与电子控制工程

Alvin @曹琦, 2026/6/16

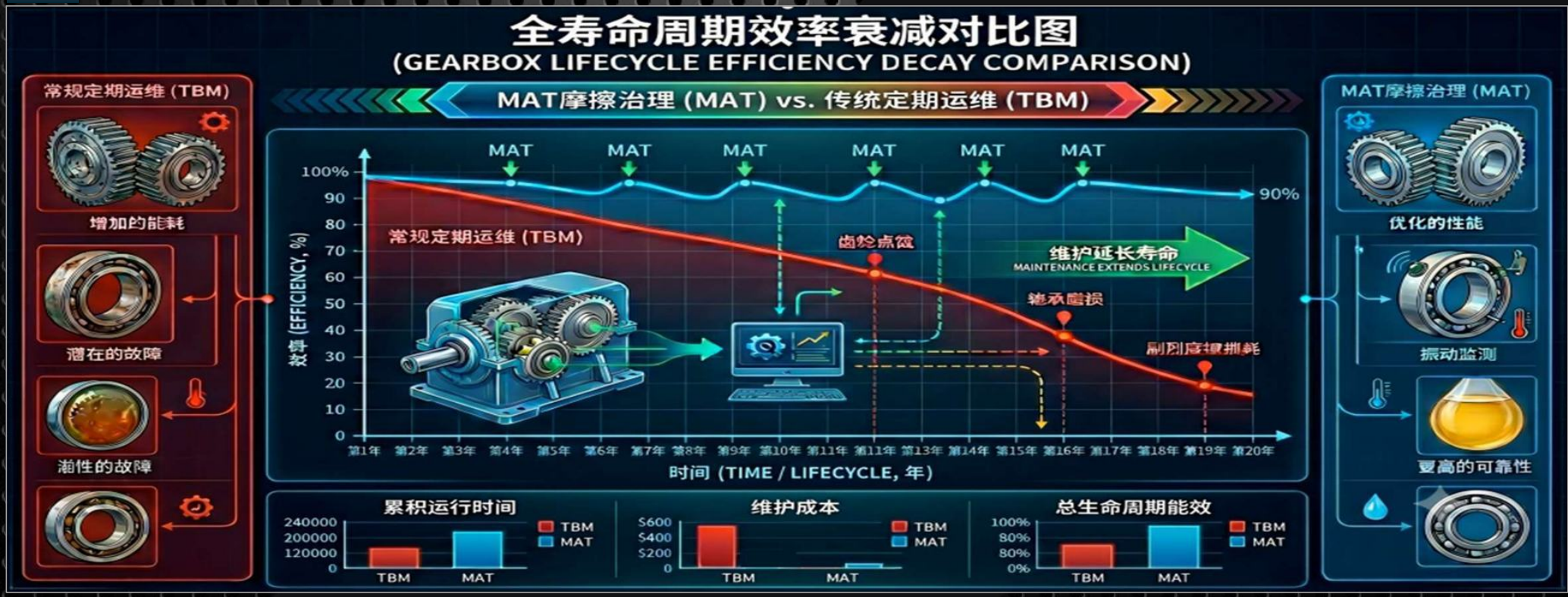
传动链效率修复

风电机组传动链效率η_{total}通常表示为：

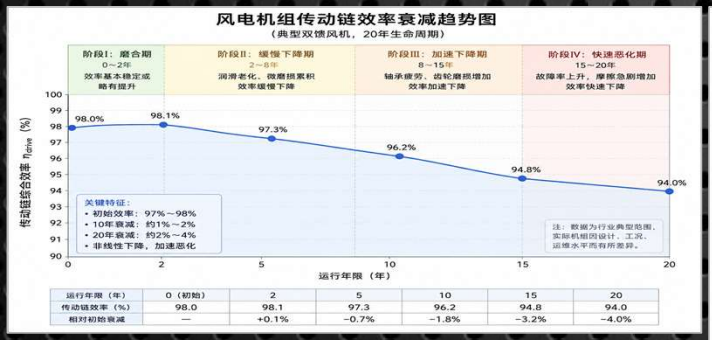
$$\eta_{total} = \eta_{gbox} \bullet \eta_{b1} \bullet \eta_{b2}$$

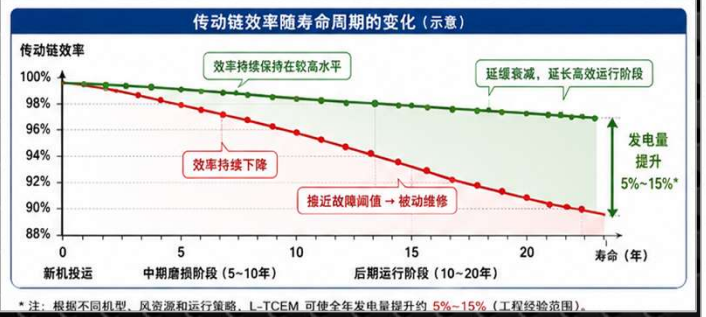
其中：$\eta_{gbox}=\eta_g \bullet \eta_{gb} \bullet \eta_s \bullet \eta_w$

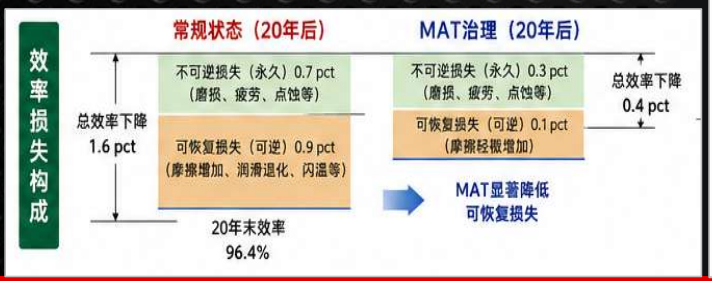
η_g为齿轮啮合效率，η_{gb}为齿轮箱轴承效率，η_{b1}为电机轴承效率，η_{b2}为抱轴轴承效率，η_s为密封效率，η_w为风阻与搅油效率。

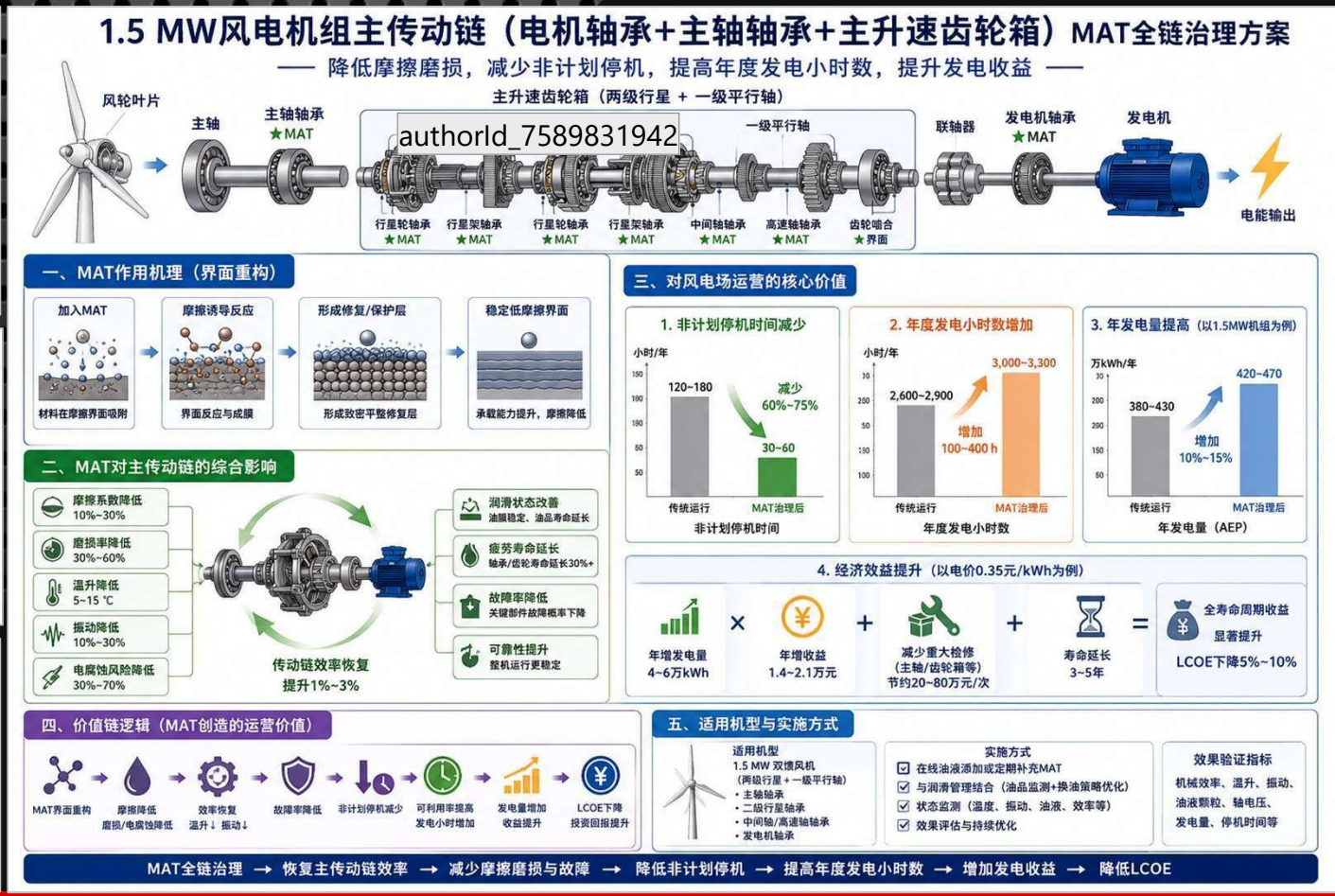


风电机组传动链效率修复









authorId_7589831942

authorId_7589831942 勇俊Ǔ李小兰Ǔ贺Ǔ明Ǔ叶旭强，传动系统能量损失分析与效率提升方法，2026·第8卷·第3期·机械与电子控制工程

Alvin @曹琦, 2026/6/16

MAT应用价值--在风力发电机组上应用效益分析

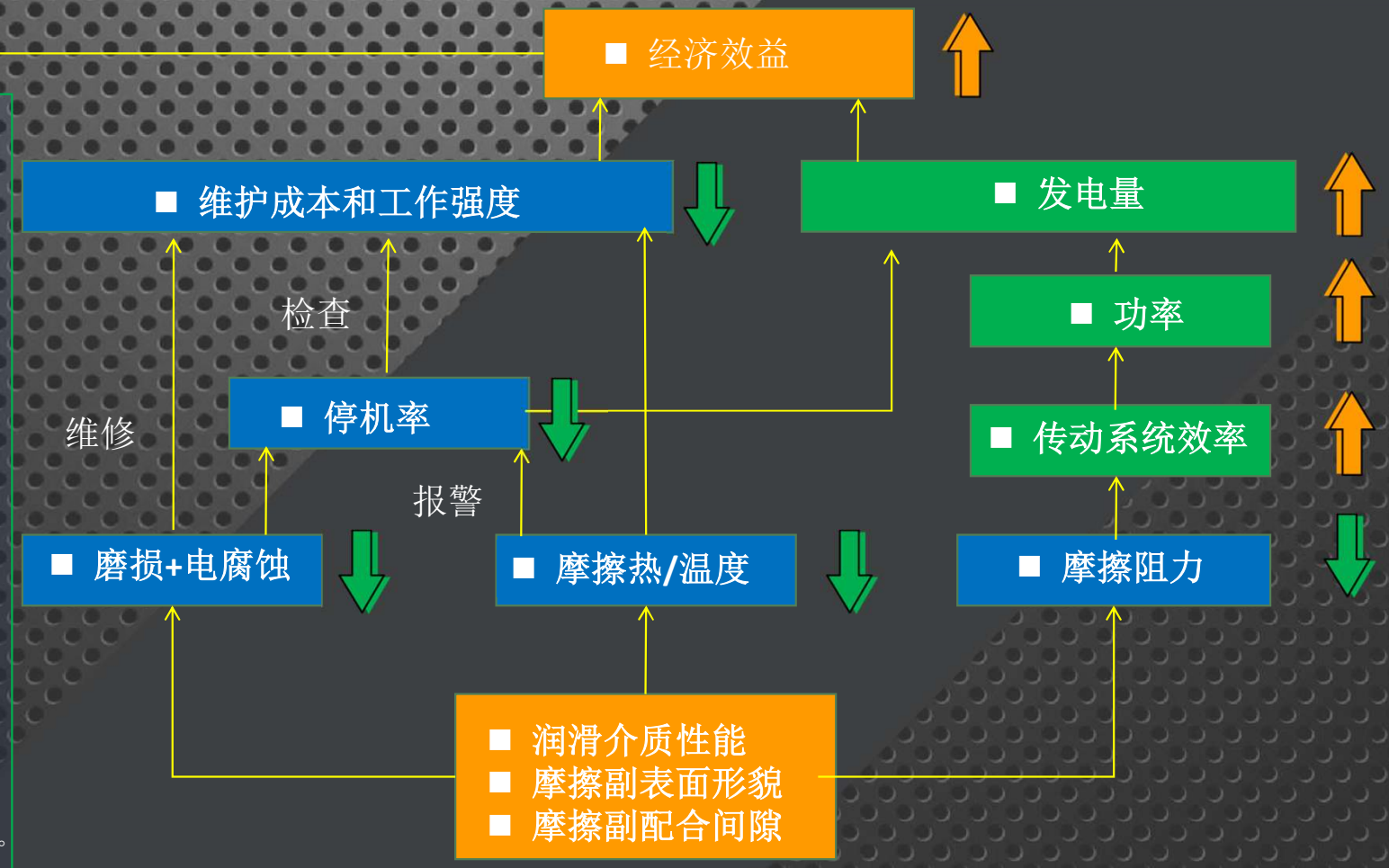
10年以上的风机经过MAT治理之后：

- 传动系统效率升≥10%
- 摩擦故障停机时间降≥50%
- 油温相对降≥15%
- 发电量相对升≥5%以上
- 运维成本降≥10%
- 关键运动件寿命延长≥1倍
- 润滑油寿命延长≥1倍
- 风场工作强度降低

经济效益测算：

1、主机厂：保证质保期内关键设备的稳定性，降低故障**下塔率**。

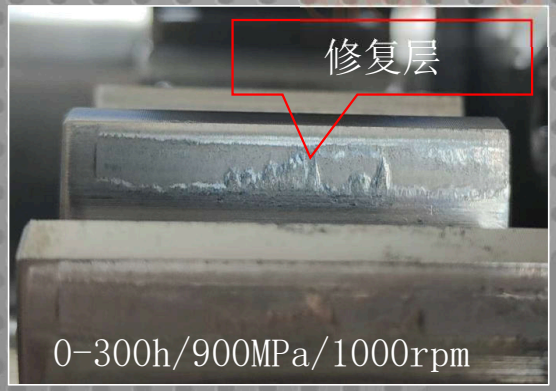
2、风场：并网运营10年以上的风场，风电机组传动链经MAT治理后，基于传动链传动效率提升、因摩擦诱发的故障停机时间减少、关键运动件寿命延长、维修成本降低等，平均发电能力提升5%，按1.5MW，2000小时/年，约增加15万度电，按0.2元计算，每年增加收入3万元/台，3年9万元/台，添加MAT成本30000元台（3-5年），**年收益**（9万元-3万元）/3年=**2.0万元/年**，投资回收期小于6个月。

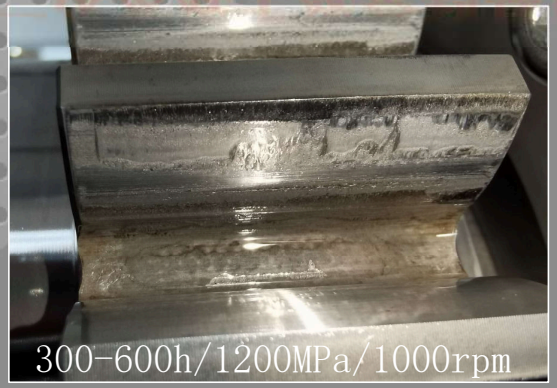


MAT在风电机组应用实践---风电齿轮疲劳磨损修复试验

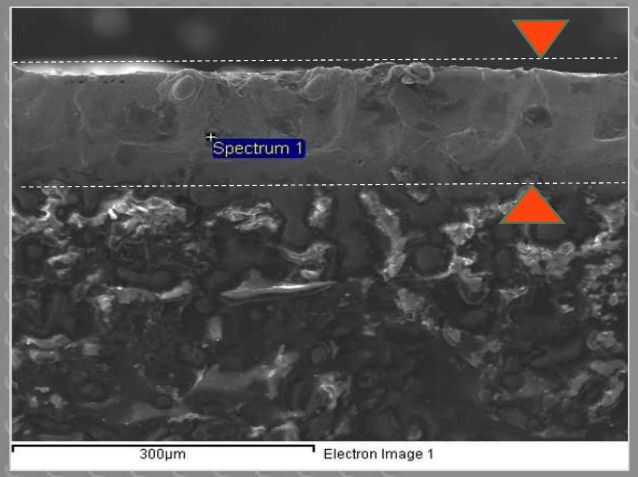
2023！第一次宏观上观察到真正意义的增材修复

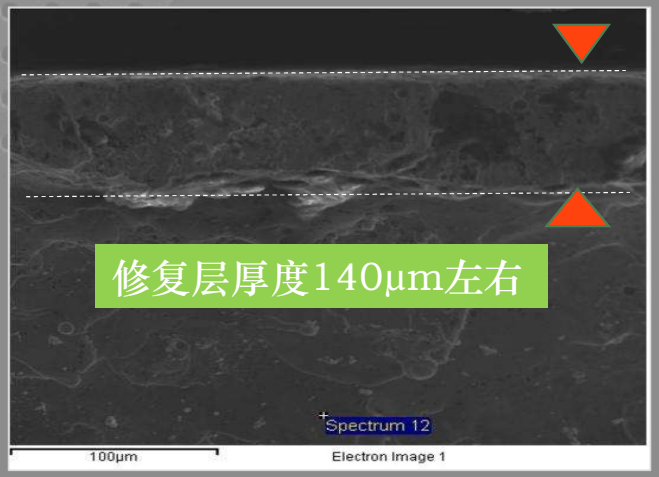


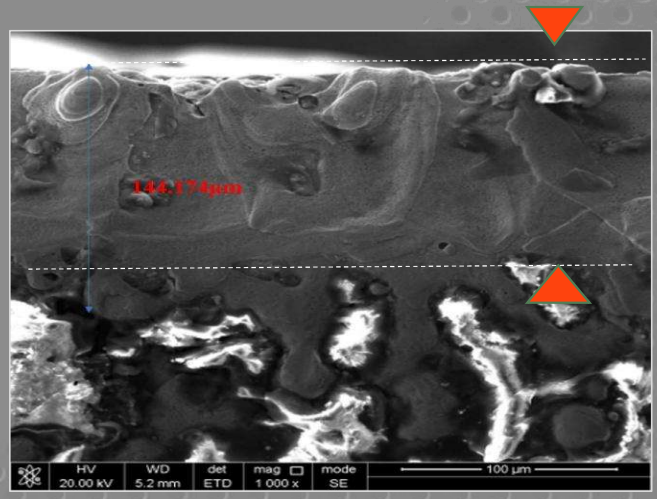






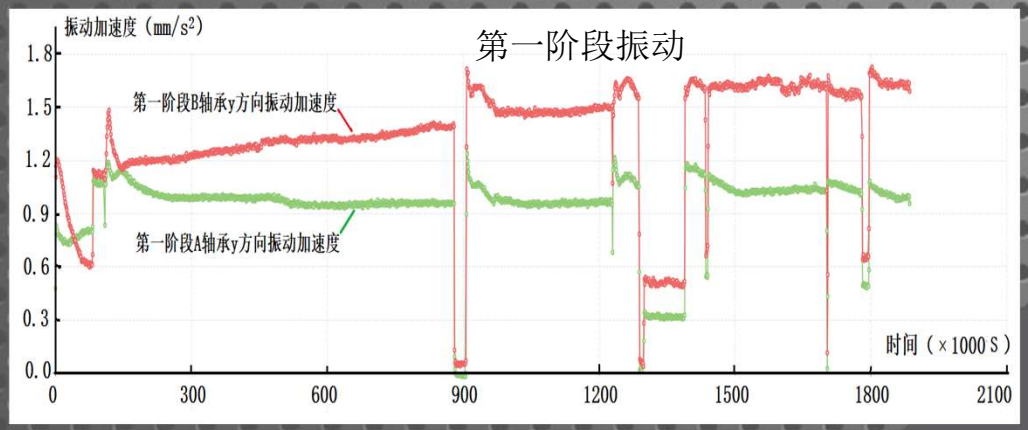


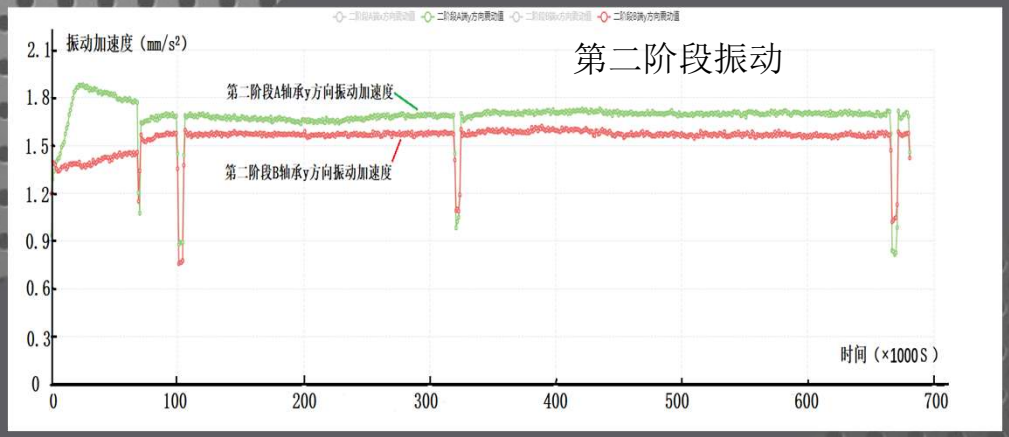




m1 mac, 2025/5/6

MAT在风电机组应用实践---风电齿轮疲劳磨损修复试验





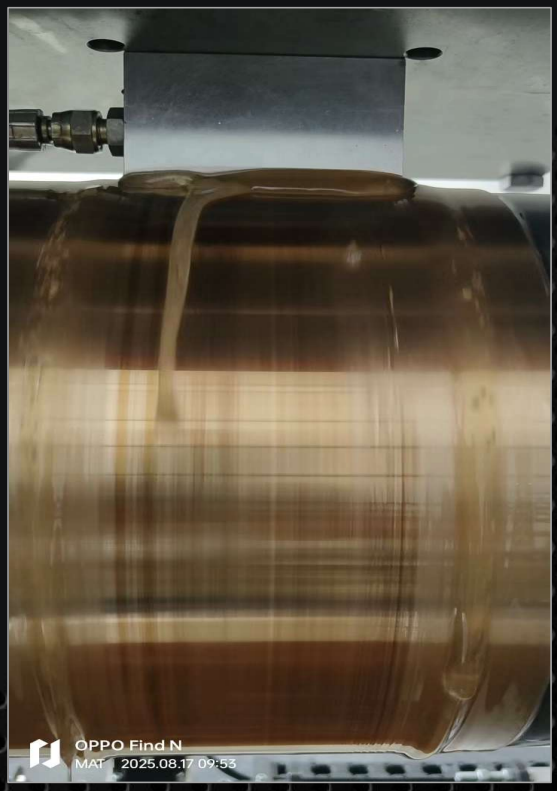
样品	部位		变化范围	平均值
加MAT	咬合面	前端残余修复层	0.170-0.27	0.217
		根部残余修复层	0.172-0.36	0.254
		根部咬合面	0.384-0.671	0.545
		修复层磨损后	2.524-3.773	3.186
	非咬合面（背面）	前端	0.488-0.876	0.607
		中部	0.367-0.564	0.417
		根部	0.630-0.717	0.675
对比齿轮	咬合面	前端	8.268-9.610	8.900
		中部	2.294-2.711	2.533
		根部	1.598-1.957	1.782



风电齿轮箱滑动轴承磨损修复台架试验

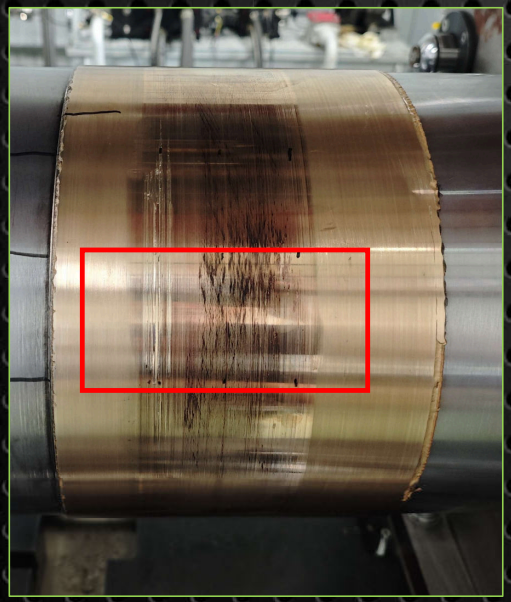
点击视频播放



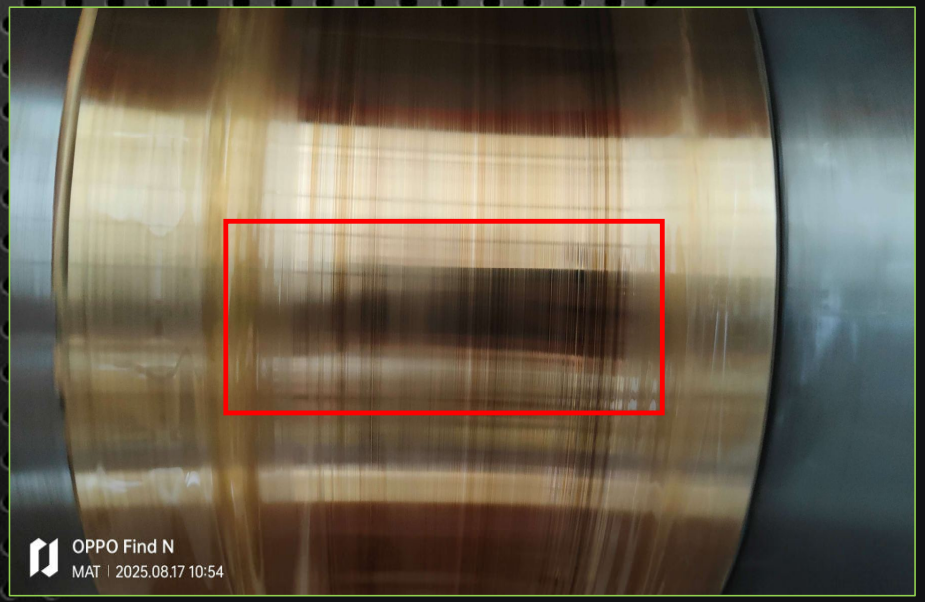


滑动轴承磨损修复台架试验

修复前轴表面



修复后的轴表面



修复前瓦表面



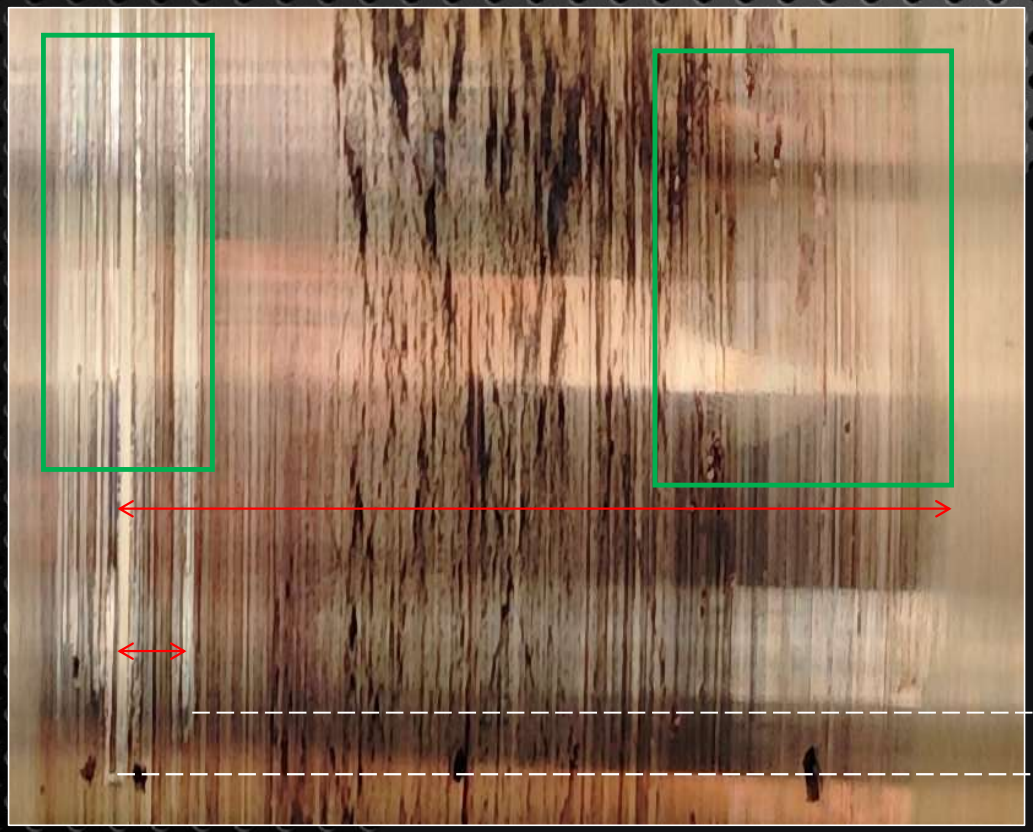
修复后的瓦表面

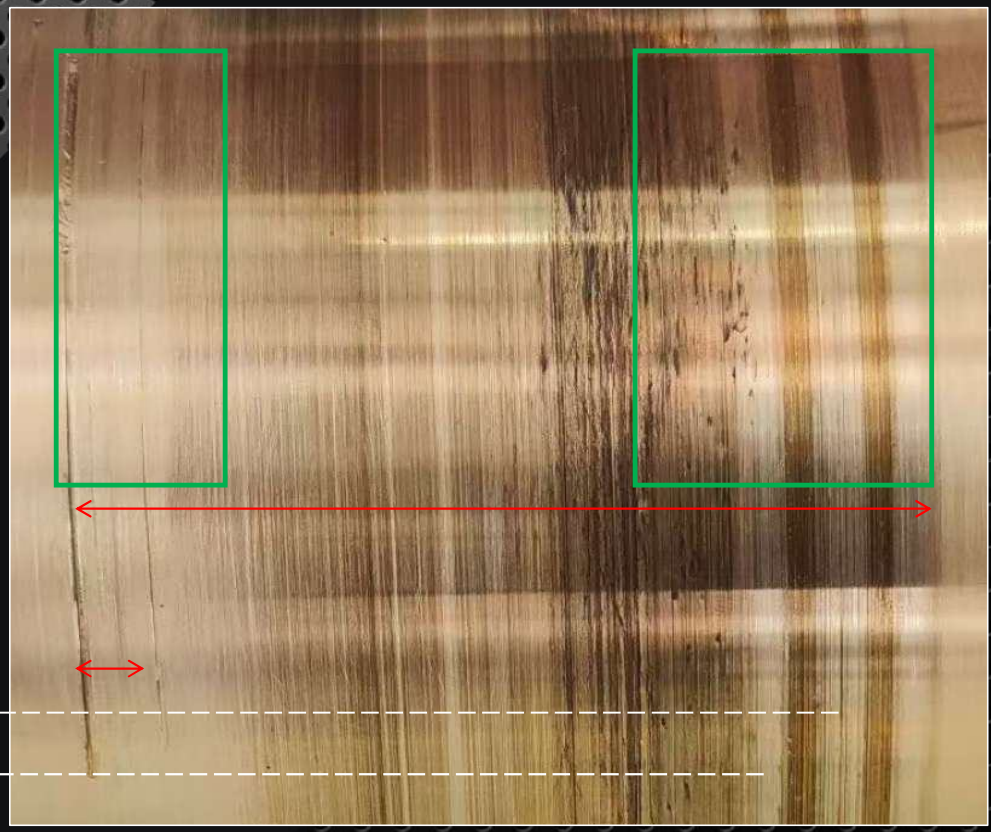


试验前后轴和瓦表面电阻都升高10倍以上，说明轴和瓦的表面已经改性。

滑动轴承磨损修复台架试验

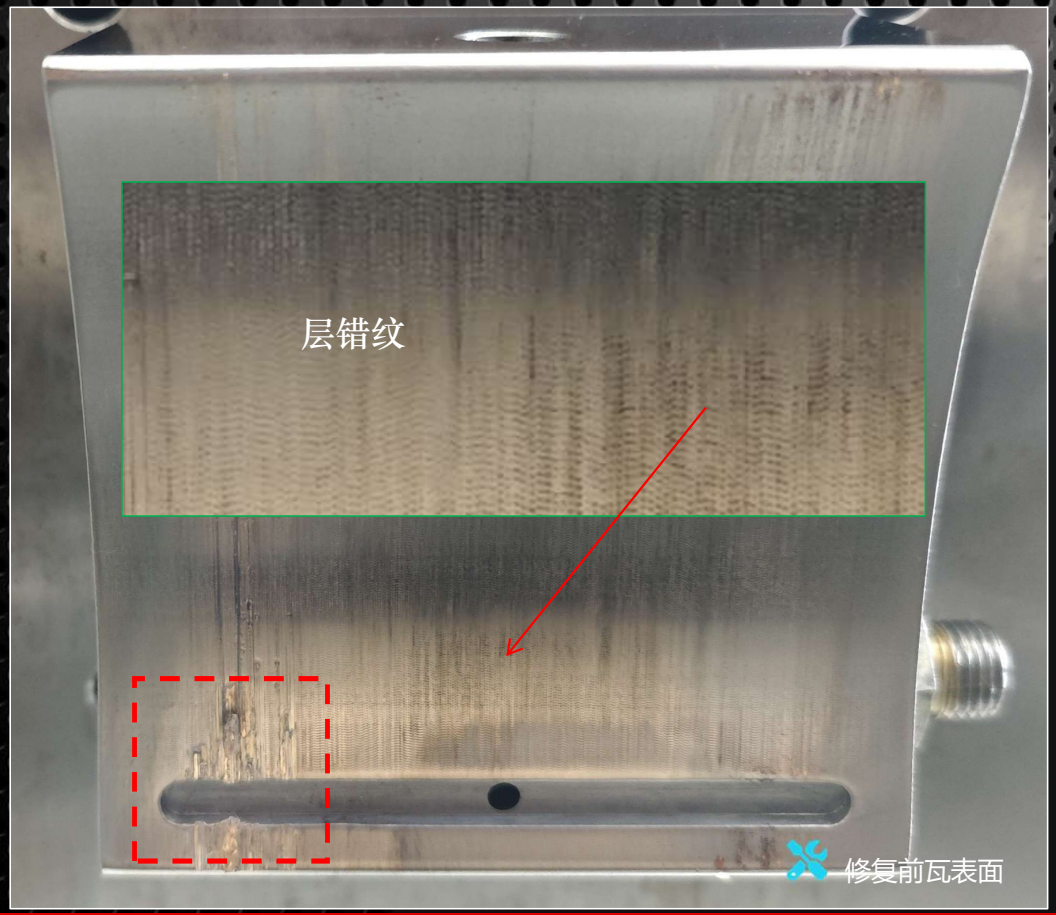
为了验证MAT对风电齿轮箱滑动轴承的修复效果，尤其是低速高载荷时的修复表现，选取一对滑动轴承副，在滑动轴承疲劳试验台，在无油润滑情况下，模拟风电齿轮箱载荷，把轴承副磨到失效。轴表面出现了大面积的层错纹及明显的划痕和剥落，凹坑最深有0.5mm以上。修复运行180h，轴表面多数划痕和凹坑消失，修复后的轴径相对试验前同位增加了20μm-40μm。轴瓦表面的层错纹全部消失，划痕和凹坑得到了修复，表面形貌得到了明显改善，验证了增材修复。





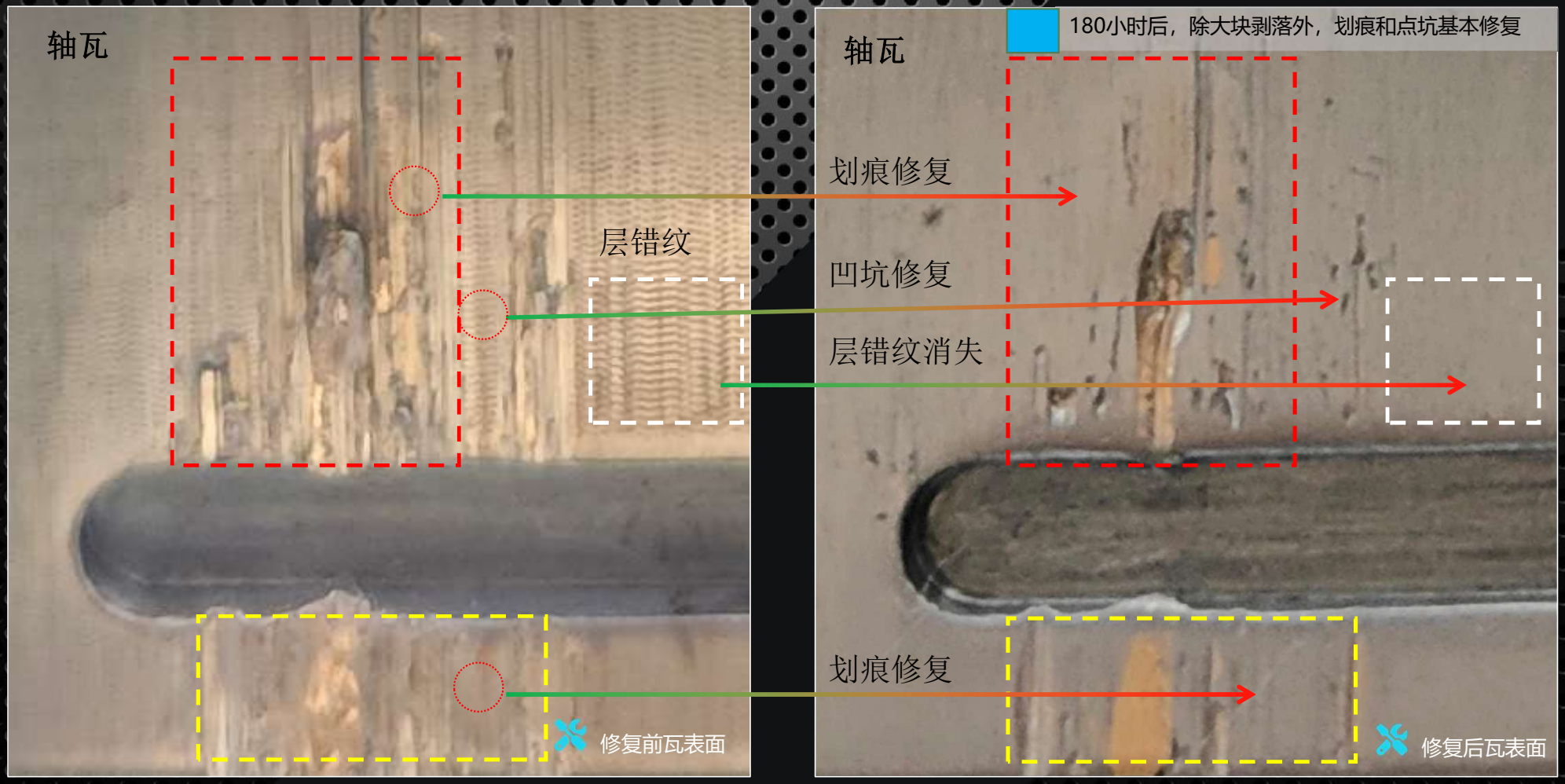
滑动轴承磨损修复台架试验

试验前无油干摩擦，瓦表面已经出现严重的剥落和划痕，能够清楚的观察到大面积的层错纹，修复后层错纹全部消失





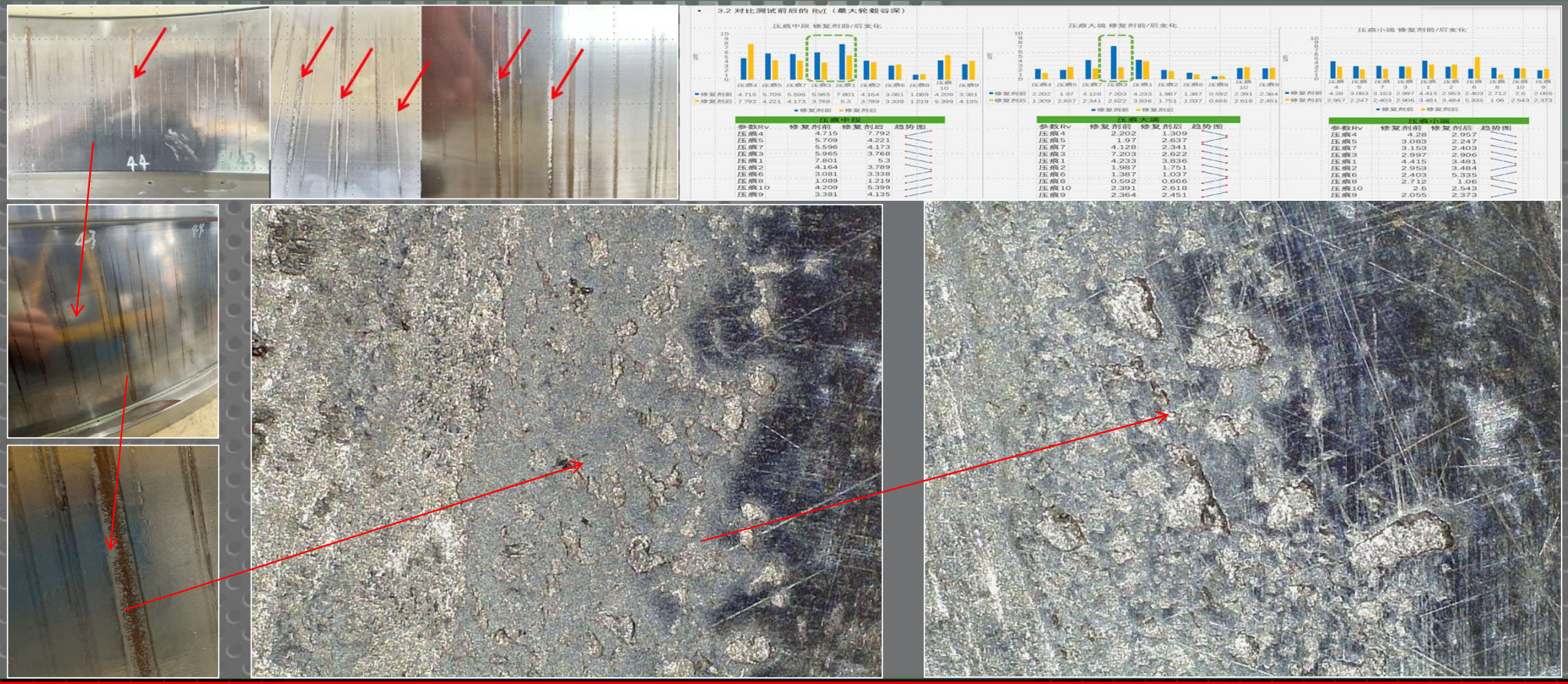
滑动轴承磨损修复台架试验



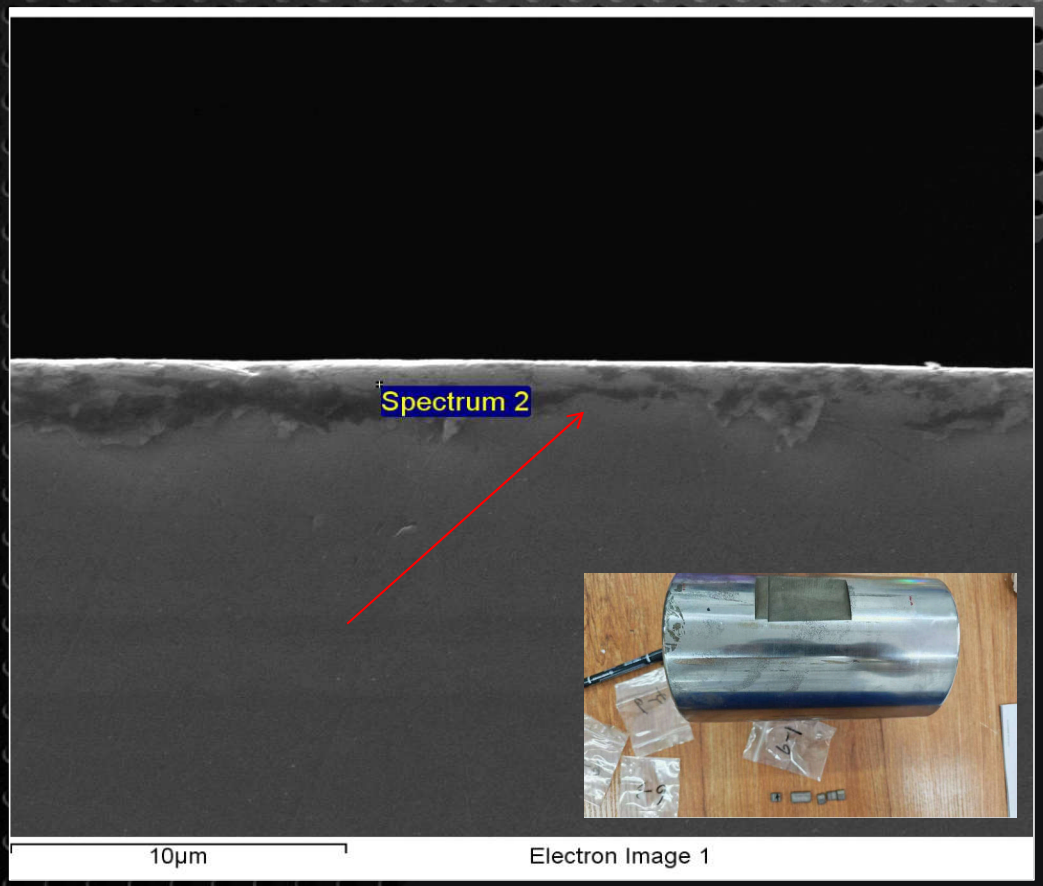
风电主轴轴承疲劳磨损修复台架试验

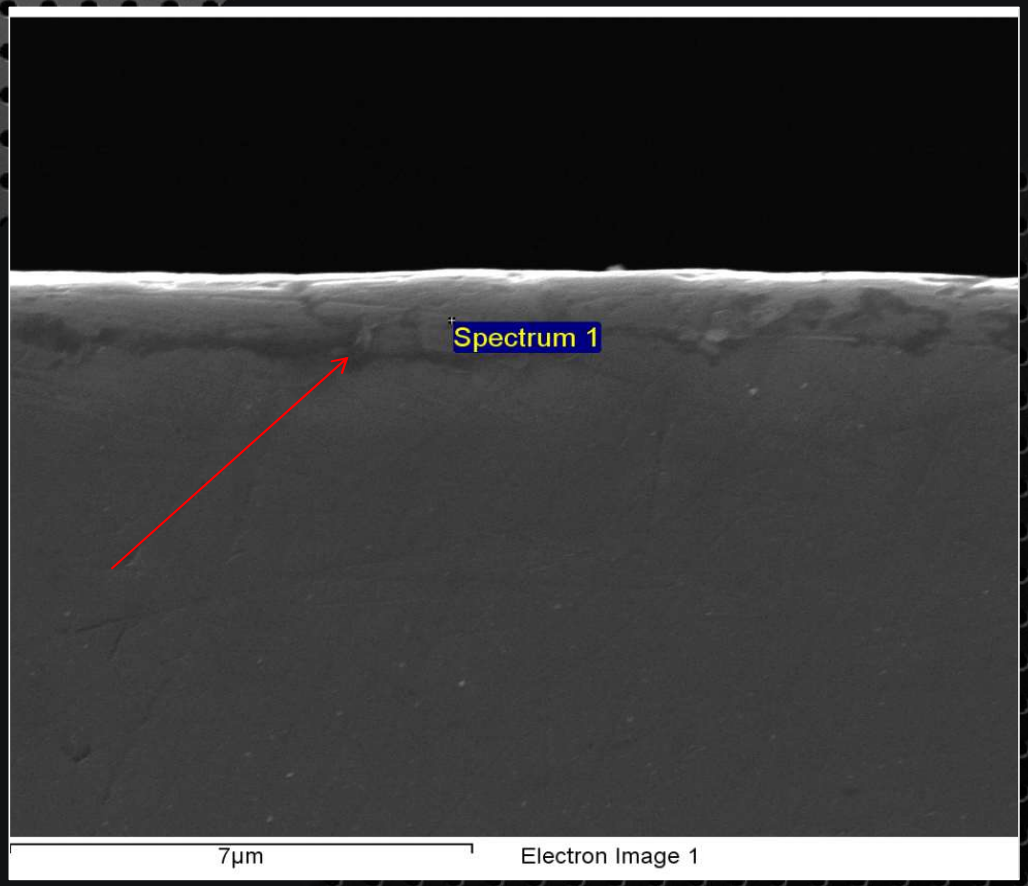
验证MAT对风电主轴轴承的修复效果，台架疲劳试验失效后的主轴轴承，表面出现明显压痕，最大深度7-8μm，添加MAT齿轮箱再生强化剂，转速15rpm，载荷1391-1397Mpa，连续运行20天。

- 表面电阻增加
- 划痕深度Rv呈现下降趋势
- 200倍电子显微镜能够明显观察到划痕和凹坑得到填充修复。



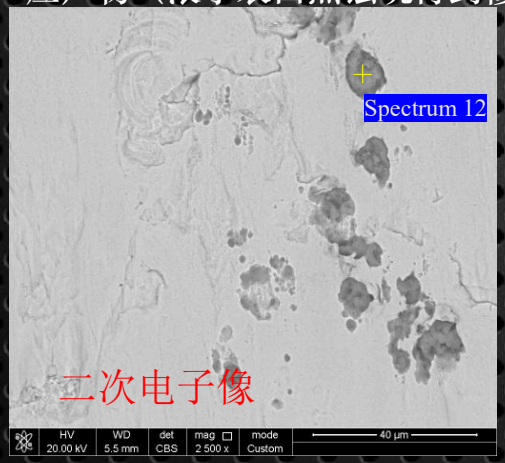
风电主轴轴承疲劳磨损修复台架试验

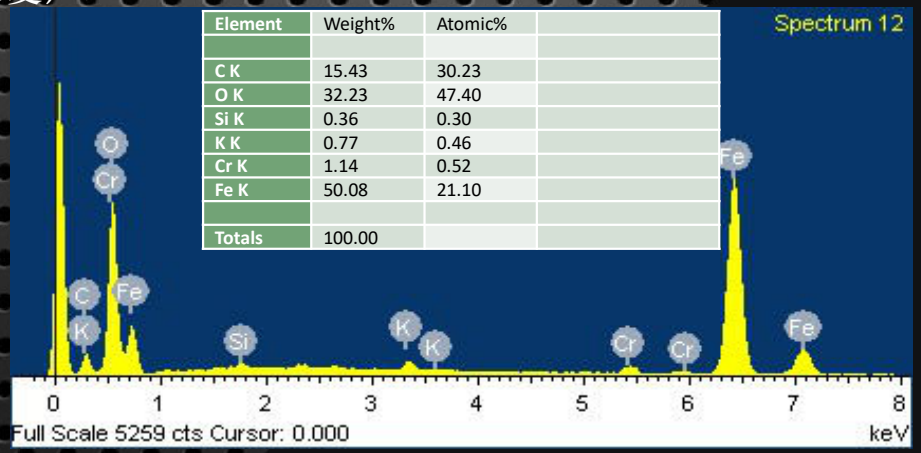




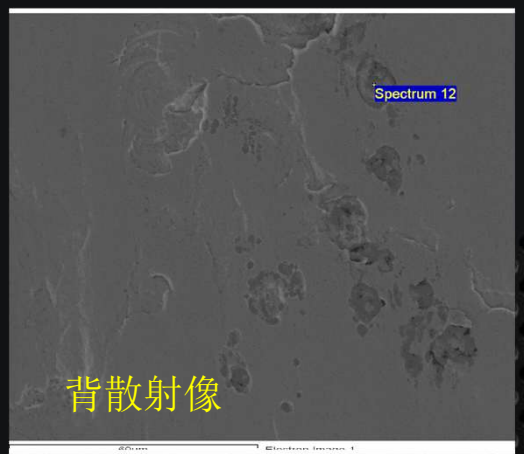
风电主轴轴承疲劳磨损修复台架试验

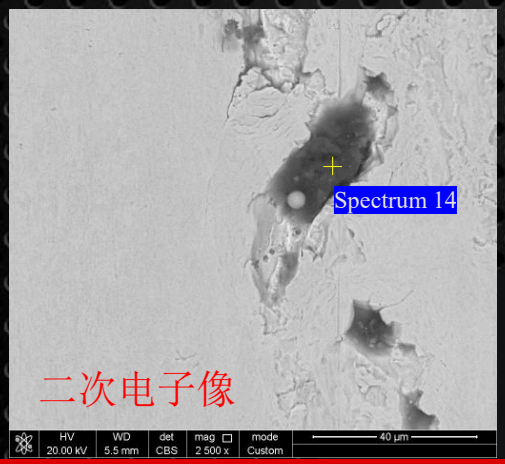
典型修复特征形貌一：磨损表面损伤的填充修复，在损伤区域填充了硅酸盐、金属氧化物和氧化物陶瓷构成的摩擦化学反应产物（滚子表面点蚀坑得到修复）。

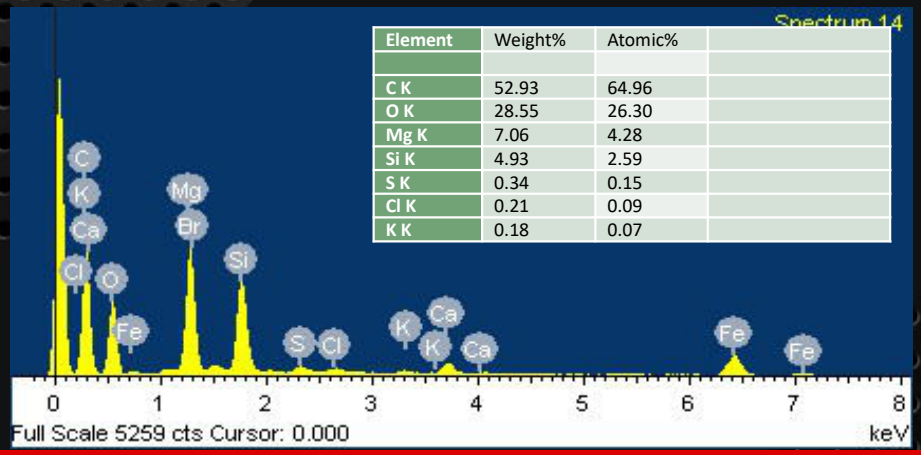




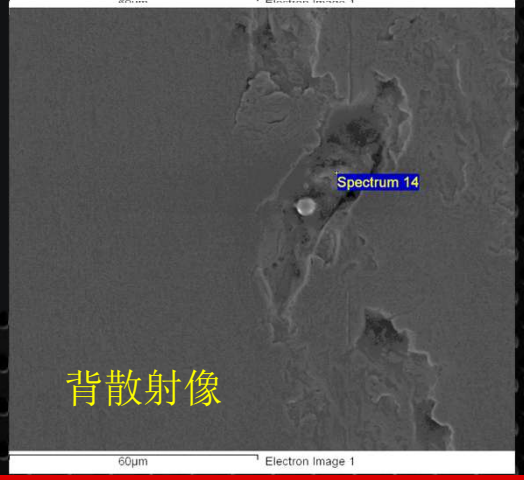
Element	Weight%	Atomic%
C K	15.43	30.23
O K	32.23	47.40
Si K	0.36	0.30
K K	0.77	0.46
Cr K	1.14	0.52
Fe K	50.08	21.10
Totals	100.00	





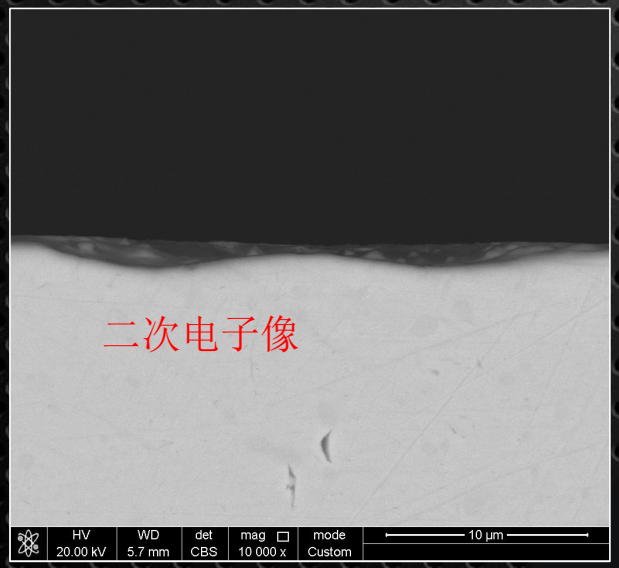


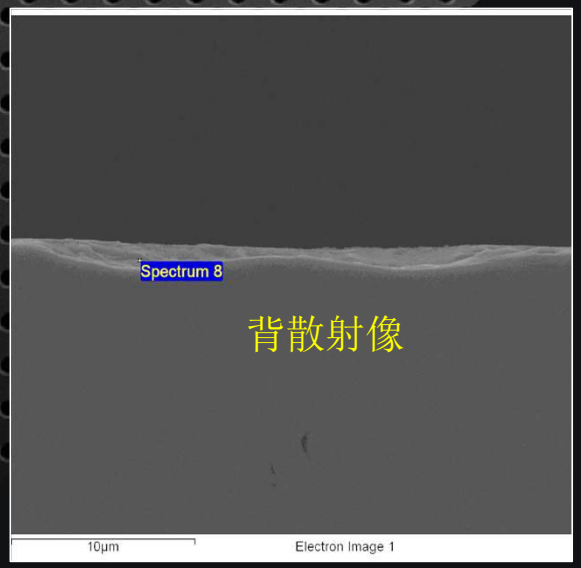
Element	Weight%	Atomic%
C K	52.93	64.96
O K	28.55	26.30
Mg K	7.06	4.28
Si K	4.93	2.59
S K	0.34	0.15
Cl K	0.21	0.09
K K	0.18	0.07

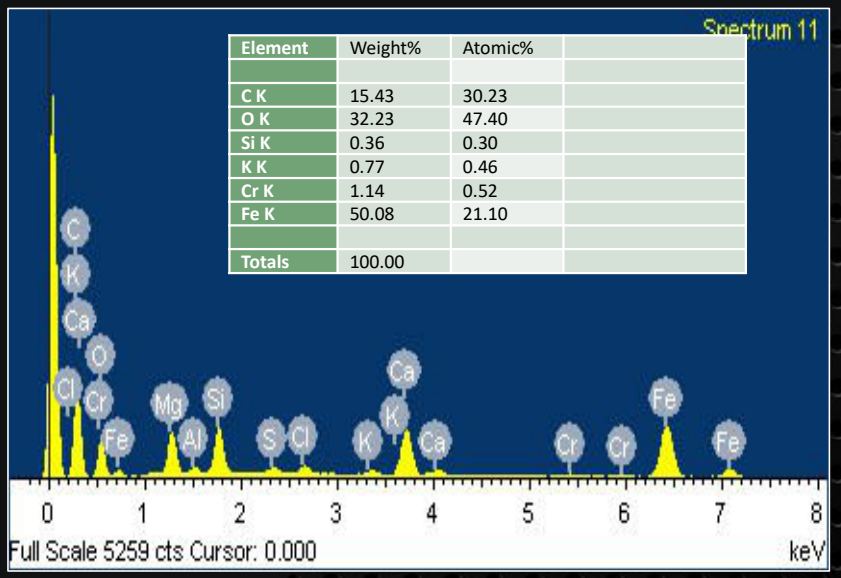


风电主轴轴承疲劳磨损修复台架试验

典型修复特征形貌二：磨损表面损伤的大面积修复，在损伤形成了界面结合良好的微米级修复层，使表面更加光滑平整。



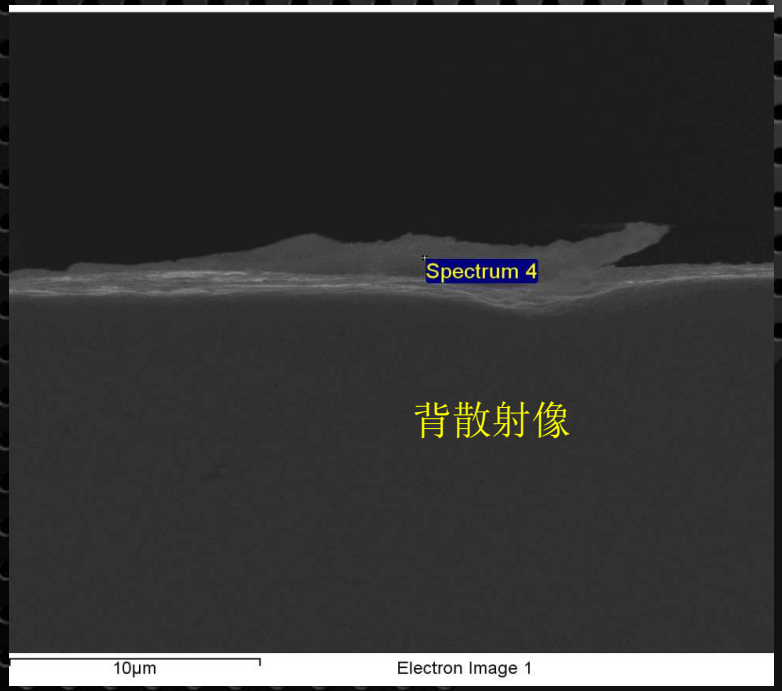


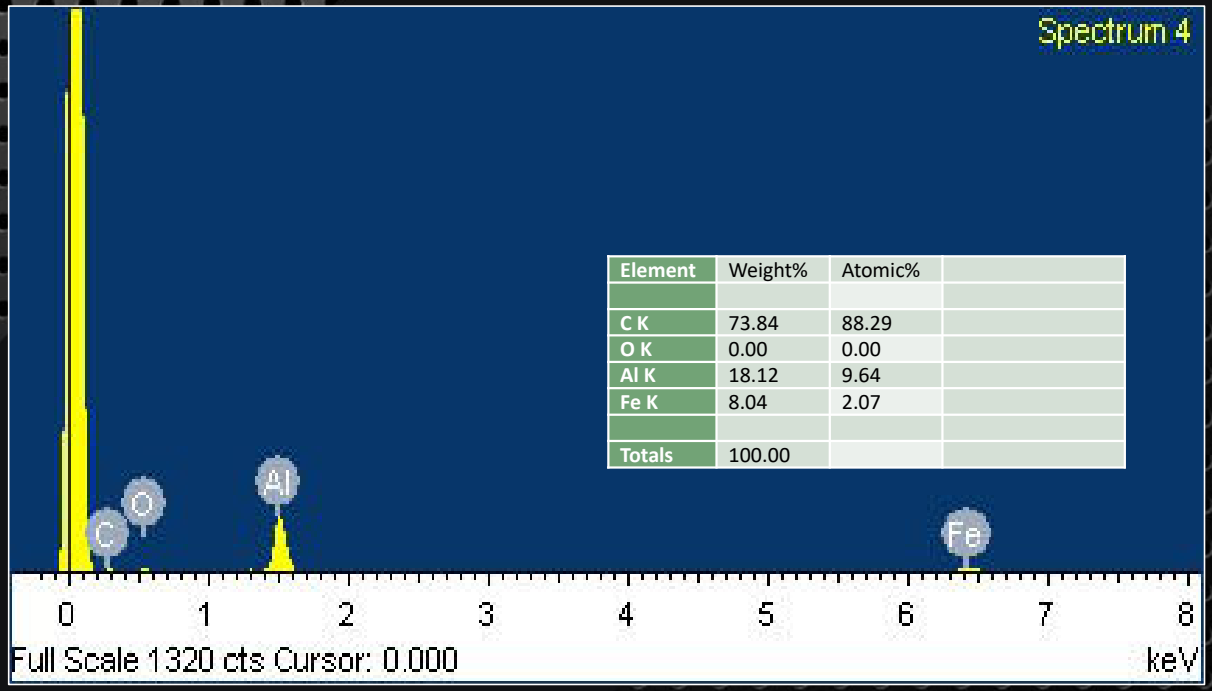


根据以往研究，此类修复层具有高硬度、低弹性模量，具有自润滑特性，表现出优异的抗磨减摩性能。
而通常所说的摩擦表面白层是在极端苛刻的干摩擦条件下形成的铁的氧化物，与自修复层成分、形成条件均不同。

风电主轴轴承疲劳磨损修复台架试验

此外，摩擦表面发现了片层状石墨碳，这是矿物自修复产品实现修复作用的重要标志，是矿物修复过程中促进润滑油脂中有机碳链分解并石墨化导致的。





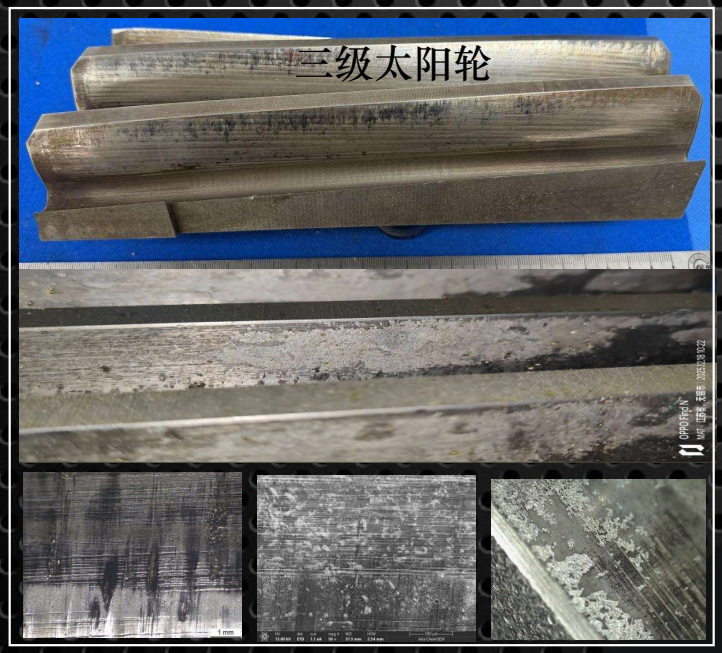
Element	Weight%	Atomic%
C K	73.84	88.29
O K	0.00	0.00
Al K	18.12	9.64
Fe K	8.04	2.07
Totals	100.00	

由以上结果可以得出，滚子表面在修复剂的作用下得到了一定程度的原位修复。

风电主升速齿轮箱失效救援案例

三级齿圈

结构性不可逆损伤：轴承滚动体破碎、齿轮断齿、大面积剥落、基体疲劳裂纹扩展到失效、保持架断裂、轴承座永久变形





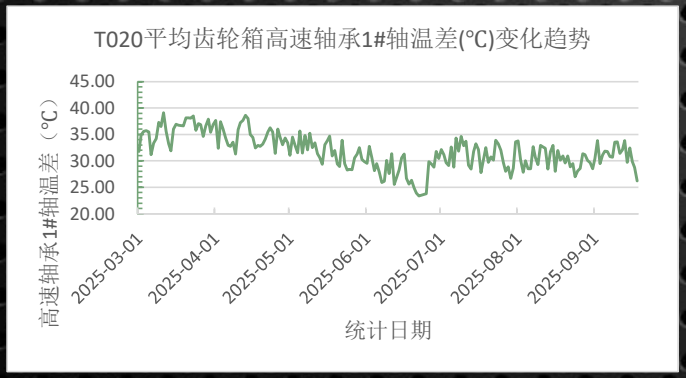


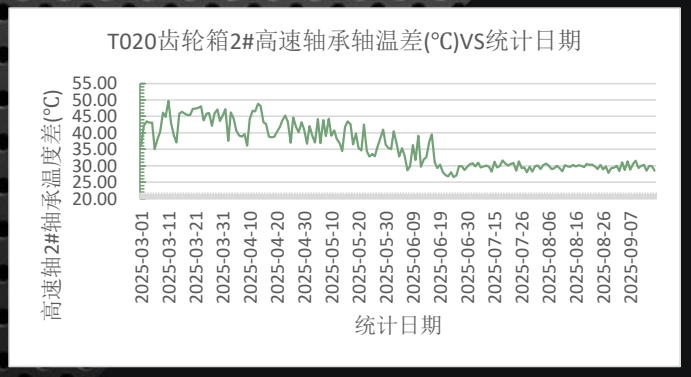
MAT介入，清理界面，降低摩擦热，减少磨损，延缓失效，为维修准备争取更多时间

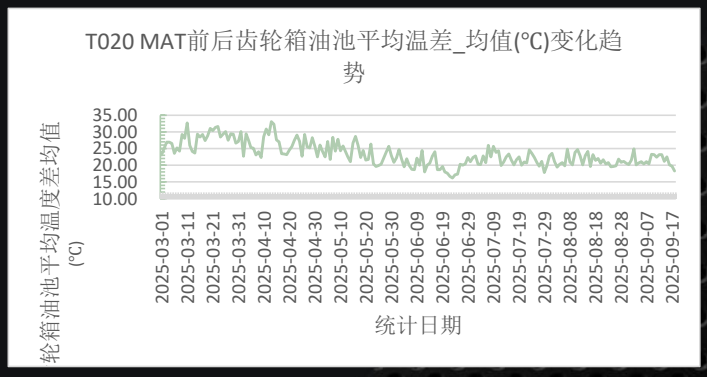
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

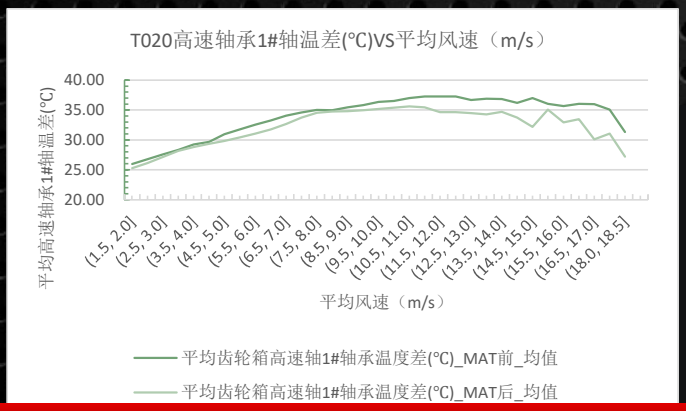
T020#齿轮箱及轴承温度

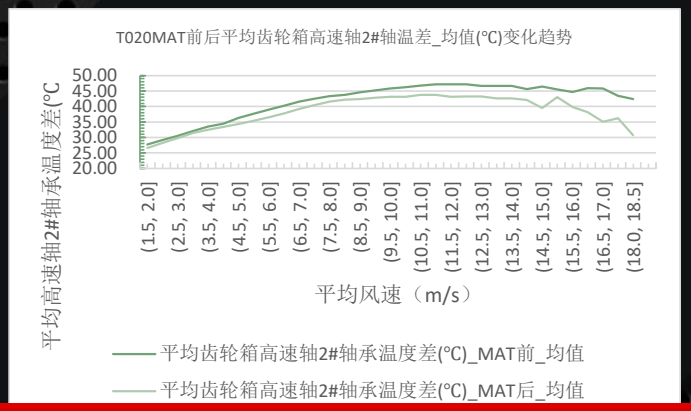
■ 在实施了MAT摩擦治理后，齿轮箱油池温度、轴承位温度都出现了相对明显的下降，轴承1#的损伤比轴承2#要严重的多，所以对比温度曲线后发现，虽然轴承1#的温度有明显的下降，但相对于轴承2#，温度的波动还是很大，轴承2#温度相对治理前下降而且相对稳定很多。齿轮箱油池的温度也明显下降，说明加入MAT后，齿轮箱摩擦副的摩擦磨损得到了改善。

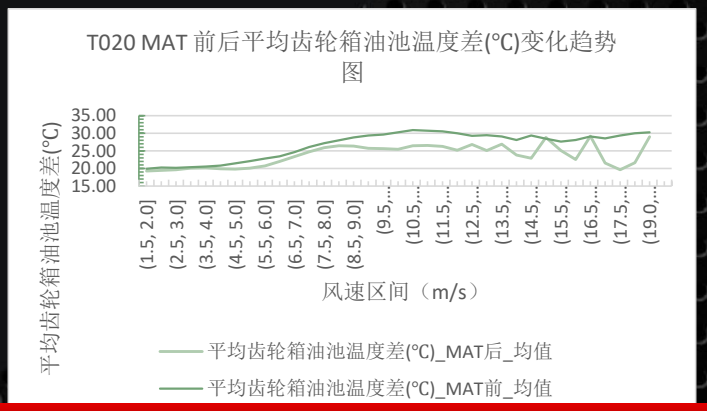












MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

T020＃3级太阳轮和1＃、2＃轴承表面电阻：表面电阻升高是判断改性层最直接的表现，测量发现T020＃的所有齿轮和轴承的电阻都明显升高，尤其是测量破碎轴承的最表层和损伤坑的电阻，差别非常明显。

表面电阻测量

- 测量修复表面两点之间的电阻，正常金属表面1cm两点之间的电阻值为0.2Ω-0.5Ω之间，且电阻表显示阻值稳定；改性增材层生成后，阻抗会明显增加，且改性层会与基体形成电容效应，所以测量时电阻表的显示阻值会出现明显的跳动，MAT治理时间不同，阻值会出现10-100倍的变化。

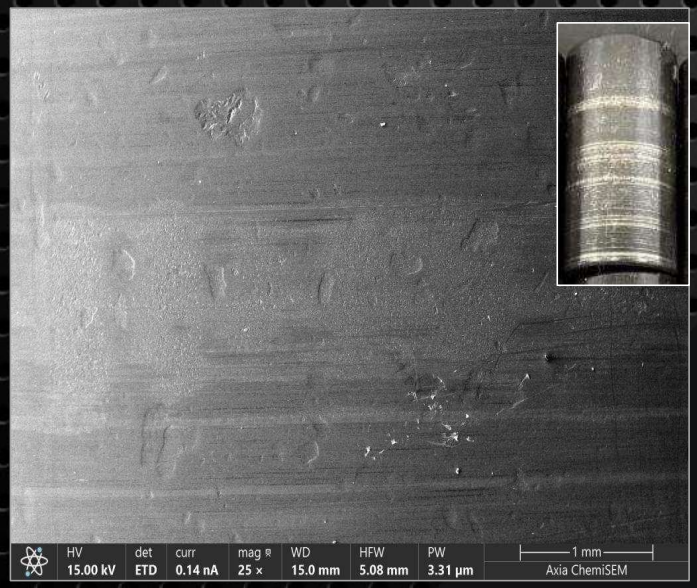


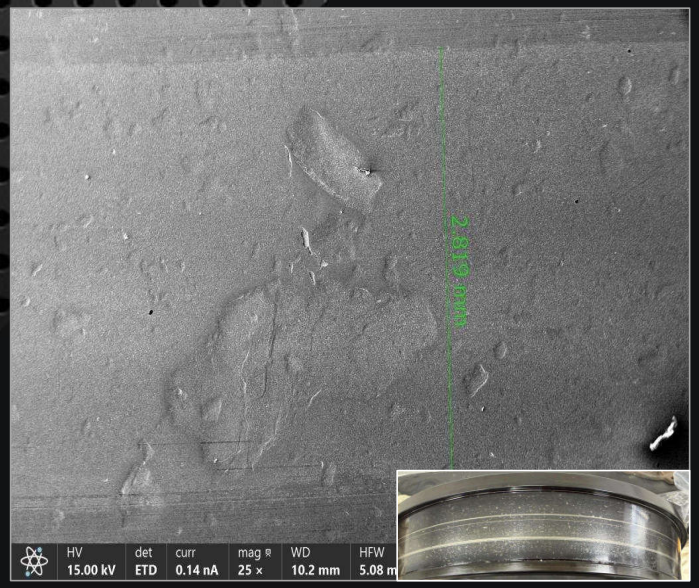


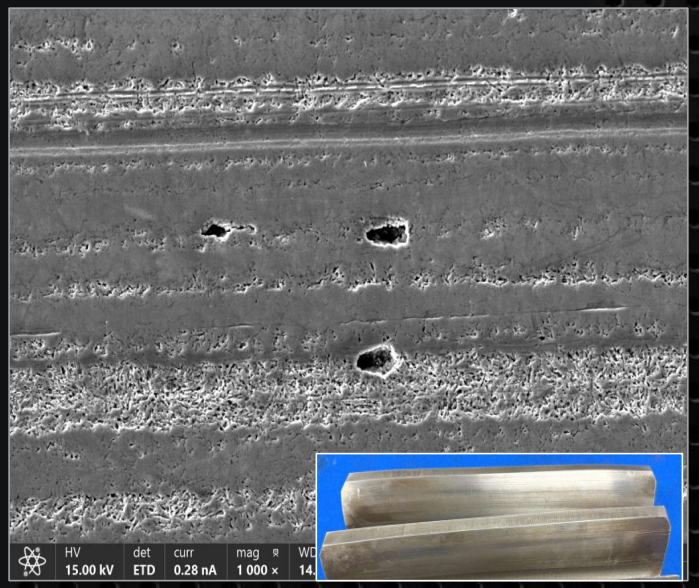
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

SEM表面微观形貌

■ 分析认为，虽让这台齿轮箱摩擦环境非常恶劣了，MAT无法制止损伤趋势，但同时摩擦闪温，尤其是电蚀闪温，为改性反应创造了条件，在轴承和齿轮局部表面生成了一定厚度的修复层，分析微观形貌，在太阳轮齿面、和轴承表面都存在修复层，观察轴承2＃滚道表面SEM形貌，可以发现凹坑轮廓边线与坑底过渡平滑，没有明显的断面和毛刺，表现出修复趋势。分析齿面SEM形貌发现，电蚀坑不是开放趋势，反而表现出明显的收缩趋势，这是MAT修复的明显特征。







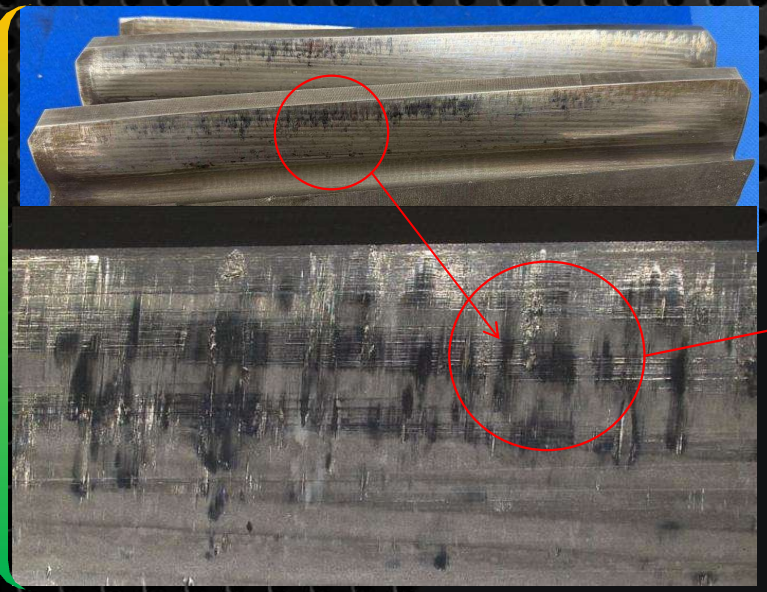
MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

表面损伤修复过程呈现

6V半直驱机组齿轮箱三级行星齿轮，电腐蚀造成轴承失效，在下塔前添加MAT验证修复，运行4个月后因三级高速端轴承失效下塔。

实施MAT救援治理前后的轴承位置和齿轮箱油的温度明显下降，齿轮和轴承表面电阻明显增加，说明表层得到了改性，200倍电子显微镜可以观察到熔覆填充斑，展示了增材修复过程。

SEM+EDS监测，可以观察到明显的层，C、Si、O元素明显增加，Fe占比下降，复合修复层特征。





MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

T020＃3级太阳轮和1＃、2＃轴承表层成分变化：相对基体，C、Si、O、Fe元素变化明显，这是判断改性层的明显特征

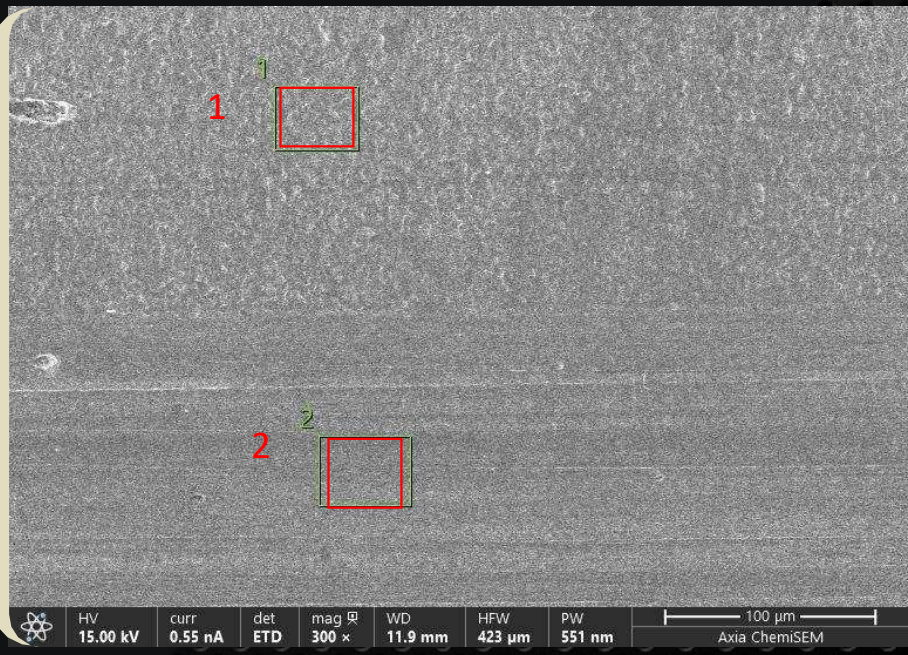
- MAT改性增材修复层的成分比例相对于基体会有变化，尤其是Fe、C、O、Mn、Si、Mg，需要对不同的位置进行对比分析。Fe含量下降、C、O、Mn、Si、Mg含量相对增加，都跟生成改性强化层相关。
- 通过齿面材料成分对比，MAT 修复后的工作面 C 含量提升了逾 40 倍，且 Si 元素呈现明显的增益趋势。这量化证实了蛇纹石在介入摩擦界面后，通过诱导润滑油裂解及自身组分迁移，成功在受损齿面上重建了一层化学组分截然不同于基体的改性强化层。
- SEM+EDS的测量深度大概在0.1μm--3μm之间，元素的浓度要大于0.1%（wt%），Mg和Si低于这个限值可能就检测不到。

表 1 化学成分分析结果 （%）

检验项目	C	S	P	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu
齿轮	0.19	0.005	0.007	0.26	0.58	1.72	0.29	1.58	0.086

元素	基体	齿面点1	齿面点2	演变趋势与机理
C (碳)	0.19	8.4	6.5	剧增 (34~44倍)：验证润滑油严重裂解
Si (硅)	0.26	0.3	0.5	小幅增加：证明蛇纹石 Si 元素的迁入
Mn (锰)	0.58	1.2	0.0	局部富集或缺失
Cr (铬)	1.72	1.4	1.8	维持基体水平
Ni (镍)	1.58	1.7	1.6	维持基体水平
Fe (铁)	基体	84.7	89.6	相对含量随杂质迁入而下降

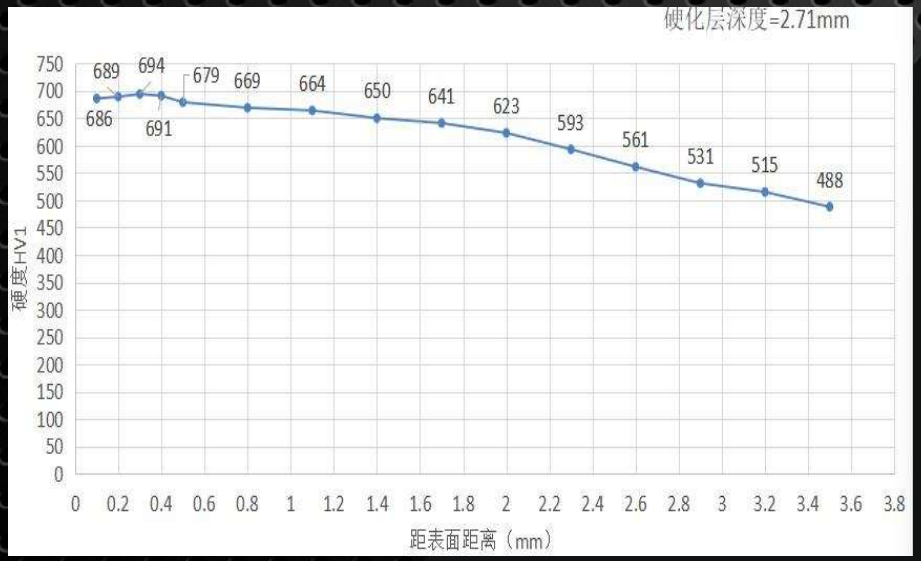


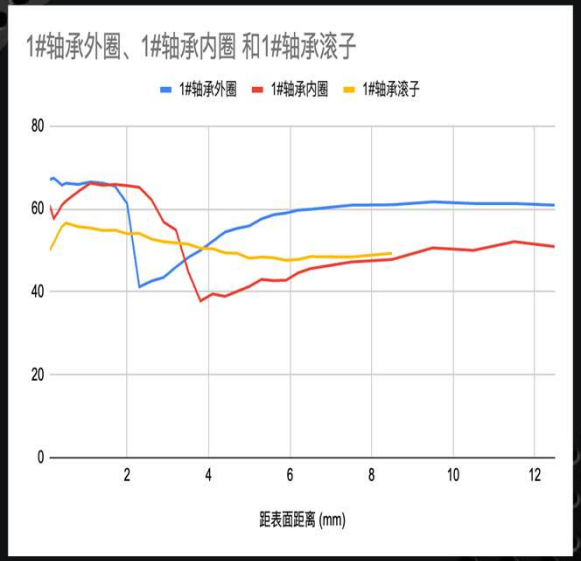


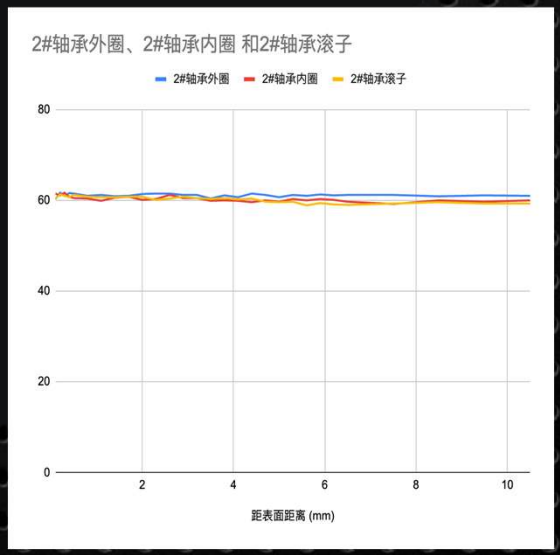
齿轮箱电腐蚀损伤挂机修复效果评价

表面硬度

- 从齿面节圆处进行显微硬度（HV1）测试值来看，完全复合MAT改性增材修复层的极薄最顶层硬度稍低，次表层硬度提高在阶梯下降到基体硬度。
- 分析轴承1#和轴承2#表层硬度，由于损伤程度相差很大，因为表层改性层很薄，轴承2#的硬度分布变化不明显；正如此前的分析，轴承1#的硬度分布出现了很大的变化，在2.3mm左右的深度硬度出现了大幅度下降，骤降并非材料原始缺陷，而是早期严重电腐蚀损伤的残留“足迹”。主要是因为1#轴承电腐蚀损伤严重，表层形成一定厚度的白蚀层，MAT介入后，改性修复是从白蚀层开始渗透覆盖的，复合表层组织结构和成分分布非常不均匀，所以会有一个历史热影响软化区，随着修复时间，会逐渐构成渐变梯度层。这种情况极少出现，只因为这台齿轮箱的特殊性。倒是给我们提供了一个非常难得的研究了解MAT修复机制的机会。







MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

通过SEM可以看到齿轮的工作面有一层白、棕、黑色阶梯过渡层，厚度约为 9.8μm~15.9μm，结合齿轮工作面电子显微表面形貌特点，表面光滑平整，表面能观察到明显的修复痕迹，由于在MAT介入治理前存在严重的电腐蚀磨损，表面存在较为严重的损伤，润滑环境较为恶劣，应为闪温熔覆对电腐蚀的治理是一个相对过程，时间较短，抑制、修复和损伤相互竞争的存在，与基体的界线不清晰，所以分析这个层是电蚀白蚀层和改性强化层复合的修复过渡层。在表面未观察到到较为严重开放式的电蚀该、坑和包块，反而修复斑块明显存在，认为MAT已经表现出了出色的抑制电腐蚀和修复作用。非工作没有看到改性修复层存在。

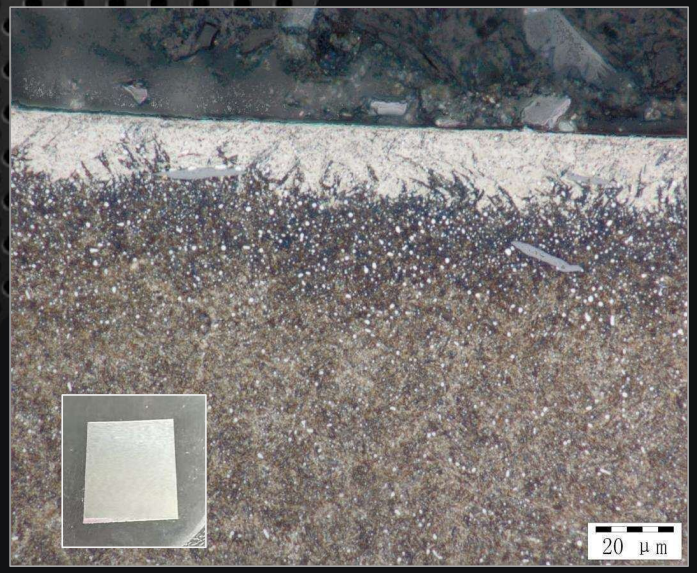


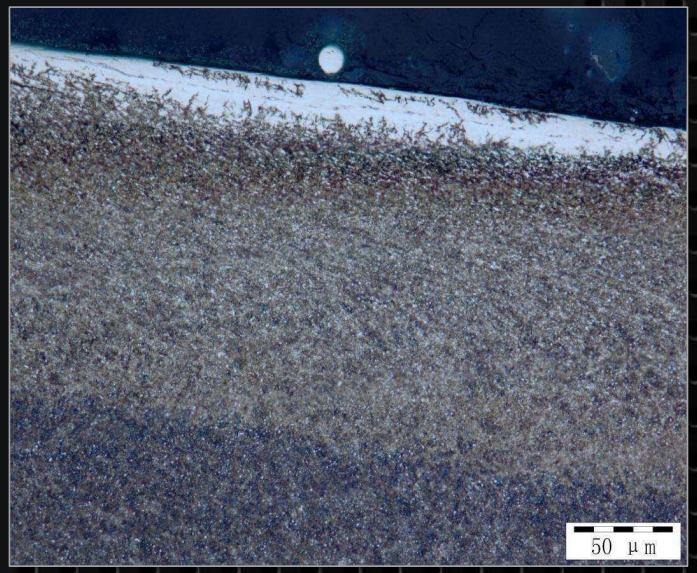


SEM侧切面形貌

■ T020＃三级行星组的轴承、齿轮侧切面都观察到明现的白色层，一是白色跟基体结合界线不明显，观察到明显渐变，这是MAT改性修复层的明显特征；二是白色层表面平整光滑，也是MAT改性修复层的明显特征；区别由于电腐蚀白层，电腐蚀白层跟基体界线清晰，结合力弱，脆硬，在应力作用下，会不断破碎剥落，表面不平整，有裂纹。分析认为，跟据损伤程度判断，齿轮和轴承2＃观察到的白色层是典型的改性修复层，轴承1＃损伤严重，电子显微镜观察表面构成复杂，侧切面观察到白色层结构复杂一些，表面亮白平整面和凹坑并存，凹坑周围能观到明显的熔覆斑，切硬度从表层到基体变化不规律，分析认为，轴承1＃SEM观察到的白色层是修复层和电腐蚀层的复合层。

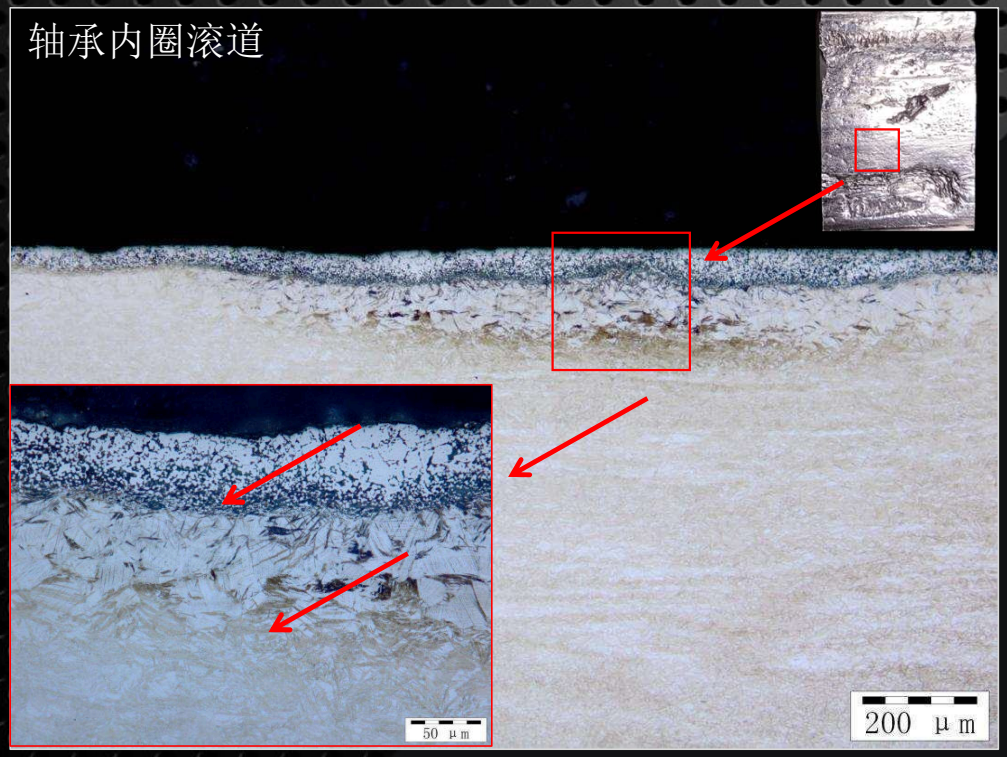


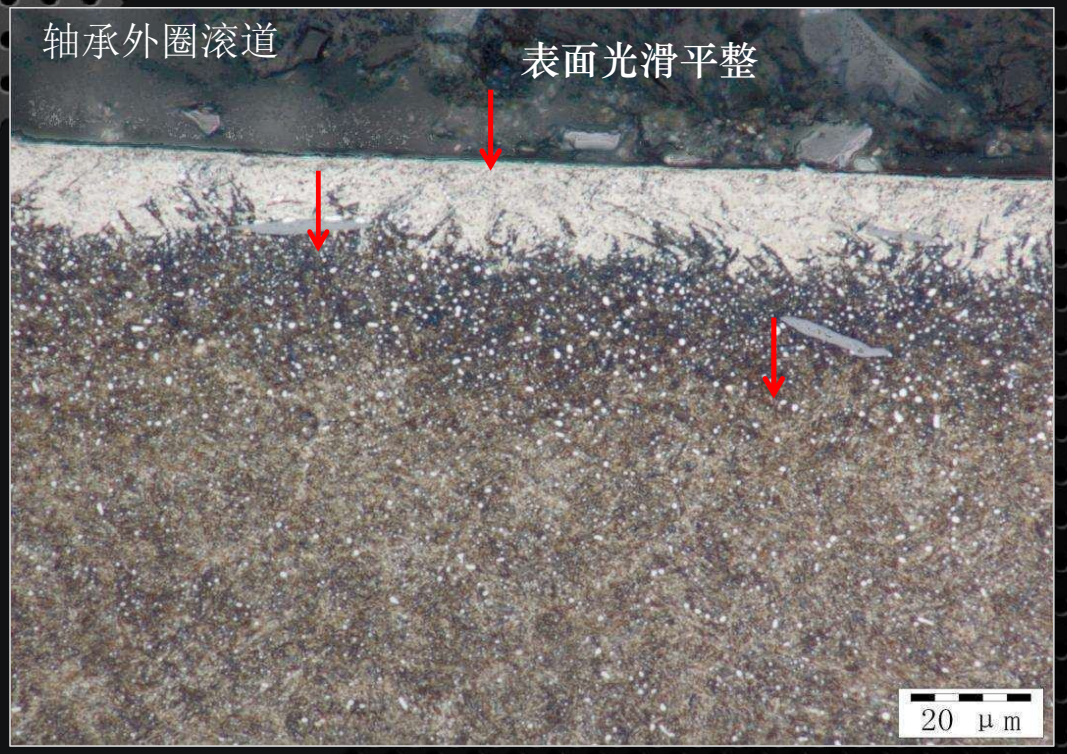




MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

分析电蚀损伤严重的轴承内外圈表面形貌，可以看到内圈滚道表面最表层出现了一层非常薄、致密且连续的亮白色/灰黑色沉积带，与下层界面不清晰，不同于传统白蚀层界面清晰、结构疏松以及由于H造成的脆裂，表现为冶金渗透型结合，是典型的改性增材修复层；在亮白层下方，可以看到一层颜色稍深、呈暗褐色的过渡区，这是早期电腐蚀形成的白蚀层；混合修复层与基体过渡区域，观察其流线，可以发现靠近表面的晶粒有明显的沿摩擦方向的塑性变形流变特征，这说明蛇纹石颗粒在微挤压过程中，确实带动了表层金属的流动，起到了类似“熨平”损伤的效果。

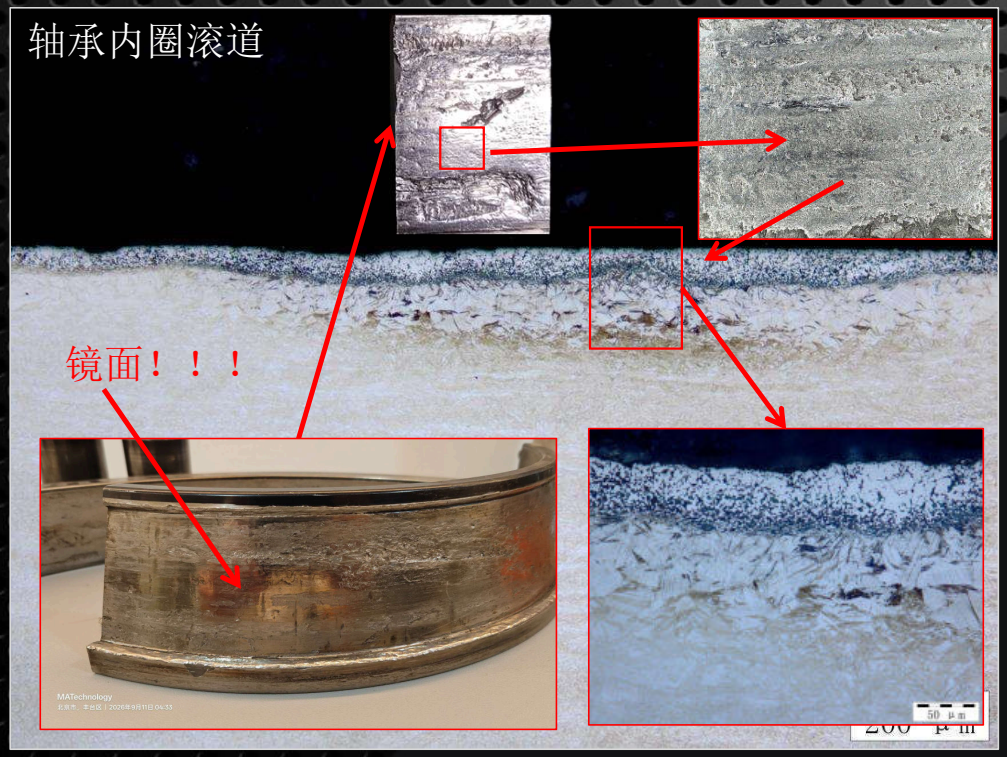


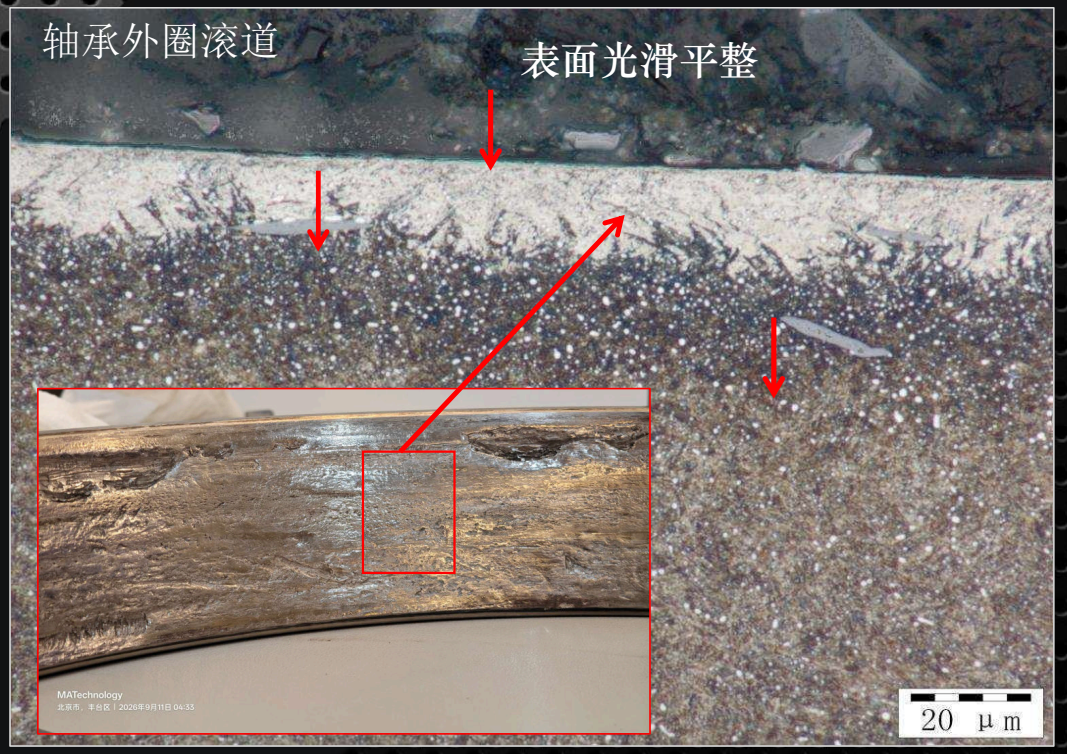


风电主升速齿轮箱失效救援案例

这么恶劣的磨损环境，轴承内圈竟然出现镜面，这是非常明显的MAT修复层特征！

分析电蚀损伤严重的轴承内外圈表面形貌，可以看到内圈滚道表面最表层出现了一层非常薄、致密且连续的亮白色/灰黑色沉积带，与下层界面不清晰，不同于传统白蚀层界面清晰、结构疏松以及由于H造成的脆裂，表现为冶金渗透型结合，是典型的改性增材修复层；在亮白层下方，可以看到一层颜色稍深、呈暗褐色的过渡区，这是早期电腐蚀形成的白蚀层；混合修复层与基体过渡区域，观察其流线，可以发现靠近表面的晶粒有明显的沿摩擦方向的塑性变形流变特征，这说明蛇纹石颗粒在微挤压过程中，确实带动了表层金属的流动，起到了类似“熨平”损伤的效果。

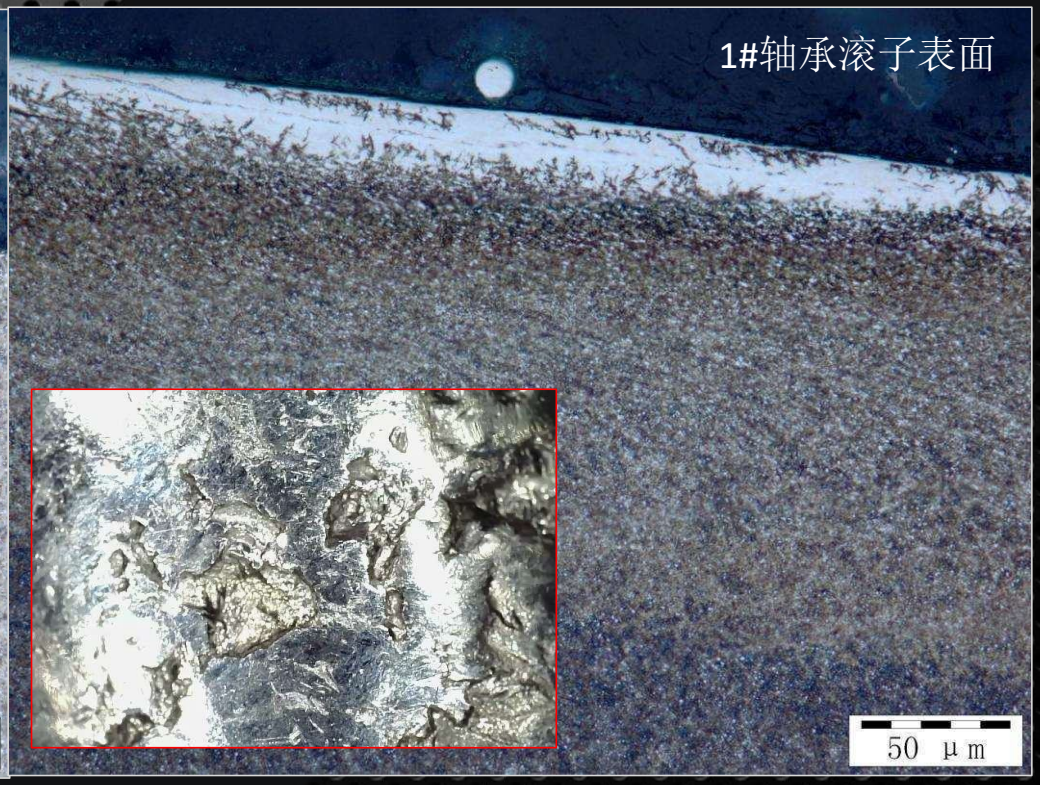




MAT在风电机组应用实践---挂机应用（1）

1#轴承滚子损伤严重，表面改性增材修复层清晰，厚且更致密，与基体层微冶炼结合明显，2#损伤相对轻了许多，表面修复层薄了许多，均匀平滑，结合电阻值和电子显微图片，可以确定滚子表面也正处于增材修复阶段，修复过程中。





洛轴风电主轴轴承失效救援案例

三级齿圈

MAT修复特征： 1、表面电阻增加；2、磨损严重的位置出现明显的岛式修复斑，修复斑表面平整，并呈现连片修复趋势；3、可以看到明显的流动熔斑；4、磨损相对不严重的位置由于剥落、压痕形成的坑边缘平滑无毛刺；5、表面凹坑相对无MAT磨损开放式，呈现明显的收缩。

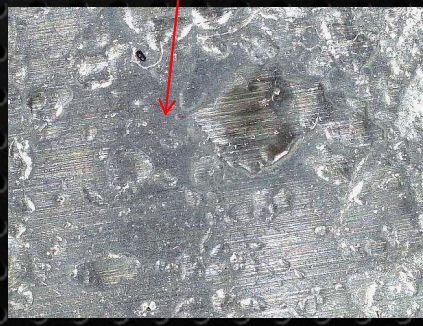










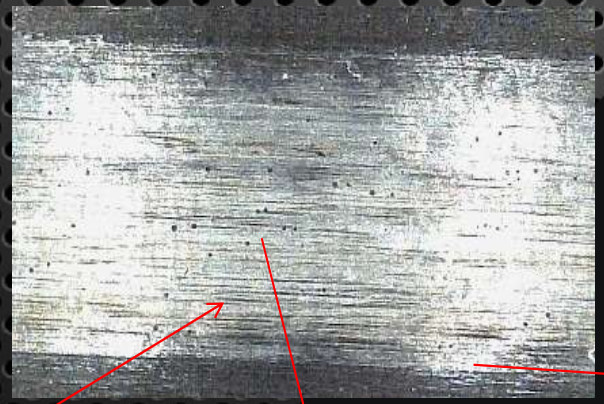


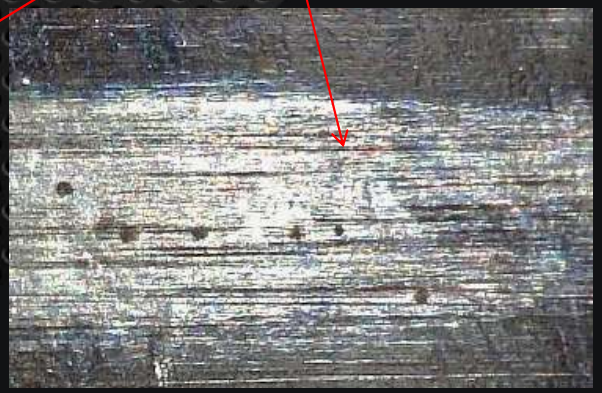
洛轴风电主轴轴承失效救援案例

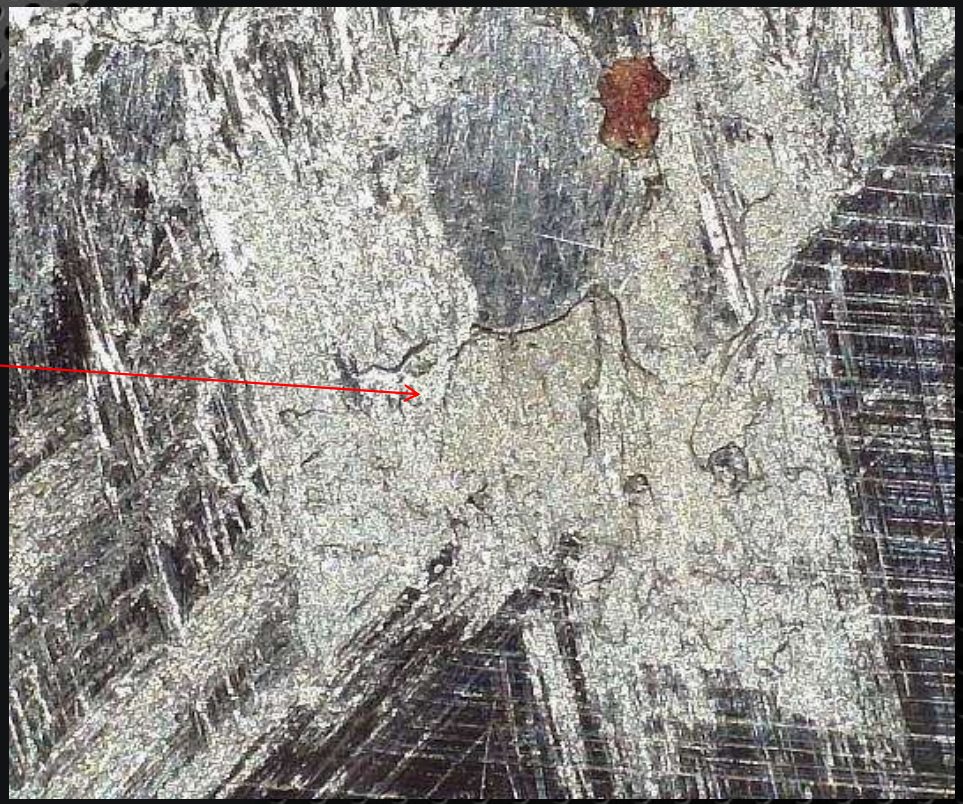
三级齿圈

MAT修复特征： 1、表面磨损相对严重的位置有明显的电腐蚀坑；2、磨损严重的位置出现明显的岛式修复斑，修复斑表面平整，并呈现连片修复趋势；3、可以看到明显的流动熔斑；4、电腐蚀形成的坑边缘平滑无毛刺；5、表面凹坑相对无MAT磨损开放式，呈现明显的收缩。







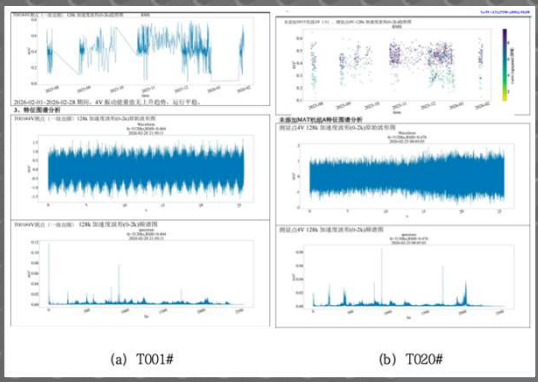


MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

齿轮箱内窥镜及振动频谱分析

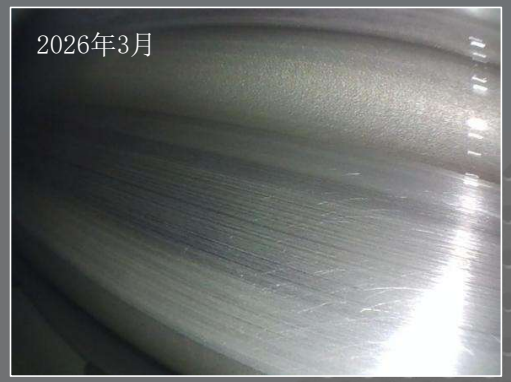
6V半直驱机组齿轮箱，电腐蚀造成齿面出现明显电腐蚀纹，实施MAT救援治理前后，不同阶段的内窥镜，齿轮表面形貌得到了明显的改善，电腐蚀纹消失，振动频谱分析，高频和低频振动都明显降低，齿面未发现新的电腐蚀痕迹，说明在修复的同时，电腐蚀也得到了抑制，验证了MAT再生强化剂对电腐蚀的抑制机制/

机组	频率	2025.9.18 前	2025.9.18-12.31	2026.12 后
T001#	高频能量	0.6-0.7m/s2	0.5-0.7m/s2	0.1m/s2 以下
	低频能量	0.045m/s2	0.02m/s2 左右	稳定在较低水平
	H/L 比值	13 - 15	25 - 35	5 - 8
	冲击状态	原始冲击高	低频冲击下降突出	开始进入稳定期
T002#	高频能量	~0.38m/s2	0.4 - 0.6 m/s2	~0.55m/s2
	低频能量	~0.04m/s2	~0.04m/s2	~0.045m/s2
	H/L 比值	9.5	10 - 15	12
	冲击状态	原始冲击相对 001#低	低频冲击稳定，高频冲击升高	高低频同时出现波动



(a) T001# (b) T020#







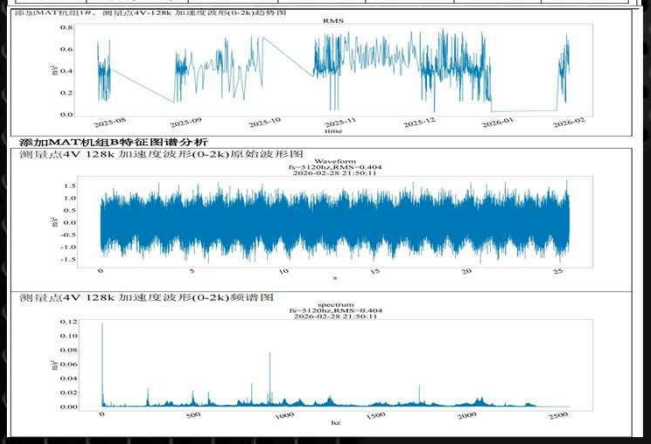
相对未添加，振动明显下降

机组1#（添加MAT）机组2#、机组3#（添加MAT）振动状态分析|MAT治理后的齿轮箱振动冲击指标明显降低！

能量值分析

添加MAT机组1#主要测点有效值统计

测点	类型	频率区间(hz)	有效值典型值	典型值占比	预警值	告警值
1V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.02	25.53%	0.3	0.5
1V	速度(mm/s)	10-1000	0.1	6.38%	2.0	3.2
2V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.01	24.47%	0.3	0.5
2V	速度(mm/s)	10-1000	0.13	5.32%	2.0	3.2
3A	加速度(m/s²)	0.1-10	0.07	12.5%	0.3	0.5
3A	加速度(m/s²)	10-2000	0.63	5.56%	7.5	12.0
3A	速度(mm/s)	10-1000	0.37	4.17%	3.5	5.6
3H	加速度(m/s²)	0.1-10	0.05	17.89%	0.3	0.5
3H	加速度(m/s²)	10-2000	0.23	6.32%	7.5	12.0
3H	速度(mm/s)	10-1000	0.21	7.37%	3.5	5.6
4V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.1	6.32%	0.3	0.5
4V	加速度(m/s²)	10-2000	0.48	7.37%	7.5	12.0
4V	速度(mm/s)	10-1000	0.16	6.32%	3.5	5.6
5V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.1	7.29%	0.3	0.5
5V	加速度(m/s²)	10-2000	1.06	6.25%	7.5	12.0
5V	速度(mm/s)	10-1000	0.3	9.38%	3.5	5.6
6V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	16.67%	0.3	0.5
6V	加速度(m/s²)	10-2000	0.91	3.12%	7.5	12.0
6V	速度(mm/s)	10-1000	0.42	5.21%	3.5	5.6
7V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	15.46%	0.3	0.5
7V	加速度(m/s²)	10-2000	1.92	5.15%	7.5	12.0
7V	速度(mm/s)	10-1000	0.45	3.09%	3.5	5.6

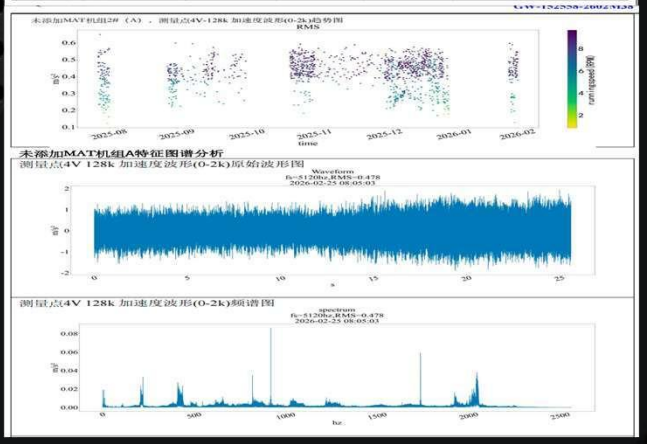


添加MAT机组B特征图谱分析

能量值分析

未添加MAT机组2#主要测点有效值统计

测点	类型	频率区间(hz)	有效值典型值	典型值占比	预警值	告警值
1V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	25.0%	0.3	0.5
1V	速度(mm/s)	10-1000	0.24	8.33%	2.0	3.2
2V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.03	28.87%	0.3	0.5
2V	速度(mm/s)	10-1000	0.23	7.22%	2.0	3.2
3A	加速度(m/s²)	0.1-10	0.1	7.22%	0.3	0.5
3A	加速度(m/s²)	10-2000	0.65	3.09%	7.5	12.0
3A	速度(mm/s)	10-1000	0.44	4.12%	3.5	5.6
3H	加速度(m/s²)	0.1-10	0.05	15.46%	0.3	0.5
3H	加速度(m/s²)	10-2000	0.34	7.22%	7.5	12.0
3H	速度(mm/s)	10-1000	0.25	7.22%	3.5	5.6
4V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.02	22.68%	0.3	0.5
4V	加速度(m/s²)	10-2000	0.39	8.25%	7.5	12.0
4V	速度(mm/s)	10-1000	0.29	7.22%	3.5	5.6
5V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	17.53%	0.3	0.5
5V	加速度(m/s²)	10-2000	0.62	5.15%	7.5	12.0
5V	速度(mm/s)	10-1000	0.31	5.15%	3.5	5.6
6V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	19.59%	0.3	0.5
6V	加速度(m/s²)	10-2000	1.84	5.15%	7.5	12.0
6V	速度(mm/s)	10-1000	0.41	4.12%	3.5	5.6
7V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	16.49%	0.3	0.5
7V	加速度(m/s²)	10-2000	1.44	4.12%	7.5	12.0
7V	速度(mm/s)	10-1000	0.37	4.12%	3.5	5.6

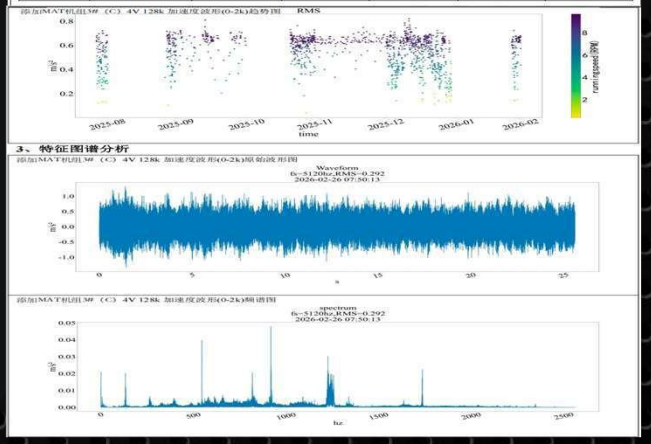


未添加MAT机组A特征图谱分析

添加MAT机组3#（C）能量值分析

（1）主要测点有效值统计

测点	类型	频率区间(hz)	有效值典型值	典型值占比	预警值	告警值
1V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.02	22.68%	0.3	0.5
1V	速度(mm/s)	10-1000	0.1	8.25%	2.0	3.2
2V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.01	24.74%	0.3	0.5
2V	速度(mm/s)	10-1000	0.22	8.25%	2.0	3.2
3A	加速度(m/s²)	0.1-10	0.11	10.31%	0.3	0.5
3A	加速度(m/s²)	10-2000	0.55	3.09%	7.5	12.0
3A	速度(mm/s)	10-1000	0.27	4.12%	3.5	5.6
3H	加速度(m/s²)	0.1-10	0.04	22.68%	0.3	0.5
3H	加速度(m/s²)	10-2000	0.39	6.19%	7.5	12.0
3H	速度(mm/s)	10-1000	0.61	6.19%	3.5	5.6
4V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.11	7.22%	0.3	0.5
4V	加速度(m/s²)	10-2000	0.6	9.28%	7.5	12.0
4V	速度(mm/s)	10-1000	0.15	9.28%	3.5	5.6
5V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.03	19.59%	0.3	0.5
5V	加速度(m/s²)	10-2000	0.92	5.15%	7.5	12.0
5V	速度(mm/s)	10-1000	0.2	6.19%	3.5	5.6
6V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.12	7.22%	0.3	0.5
6V	加速度(m/s²)	10-2000	0.38	3.09%	7.5	12.0
6V	速度(mm/s)	10-1000	1.28	4.12%	3.5	5.6
7V	加速度(m/s²)	0.1-10	0.06	13.4%	0.3	0.5
7V	加速度(m/s²)	10-2000	2.84	3.09%	7.5	12.0
7V	速度(mm/s)	10-1000	1.29	4.12%	3.5	5.6



3、特征图谱分析

MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

相对未添加，振动明显下降

机组1#（T001#）添加MAT前后振动状态分析|2025.9.18前| 2025.9.18-12.31|2026.1后 | MAT治理后振动冲击指标明显降低！

频率	2025.9.18前	2025.9.18-12.31	2026.1后
高频能量	0.6-0.7m/s²	0.5-0.7m/s²	0.1m/s² 以下
低频能量	0.045m/s²	0.02m/s²左右	稳定在极低水平
H/L比值	13 - 15	25 - 35	5 - 8
冲击状态	原始冲击高	低频冲击下降突出	开始进入稳定期

机组2#未添加MAT振动状态分析|2025.9.18前| 2025.9.18-12.31|2026.1后

频率	2025.9.18前	2025.9.18-12.31	2026.1后
高频能量	~0.38m/s²	0.4 - 0.6 m/s²	~0.55m/s²
低频能量	~0.04m/s²	~0.04m/s²	~0.045m/s²
H/L比值	9.5	10 - 15	12
冲击状态	原始冲击相对1#低	低频冲击稳定，高频冲击升高	高低频同时出现波动

机组3#添加MAT前后振动状态分析|2025.9.20前| 2025.9.20-12.31|2026.1后 | MAT治理后振动冲击指标明显降低！

频率	2025.9.20前	2025.9.20-12.31	2026.1后
高频能量	0.4 - 0.5m/s²	~0.38 m/s²	~0.21m/s²
低频能量	0.04m/s²	~0.025m/s²	~0.02m/s²
H/L比值	10 - 11	15	10
冲击状态	原始冲击相对1#低	低频高频冲击均下降	开始进入稳定期

MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

相对未添加，振动明显下降

齿轮箱RMS对比 | 取样时间：2026年2月

机组	fs（hz）	RMS（m/s^2）			是否添加MAT
		一级齿圈（4V）	二级齿圈（5V）	三级齿圈（6V）	
1#	5120	0.404		0.91	已经添加MAT
2#	5120	0.478		1.81	
3#	5120	0.292		1.28	已经添加MAT
4#	5120	0.465		1.308	已经添加MAT
5#	5120			1.505	
6#	5120			0.889	
9#	5120			1.95723	
12#	5120		1.475	2.44	
13#	5120			3.096	建议尽快添加MAT
14#	5120			3.14	建议尽快添加MAT
15#	5120		0.671	2.39	
16#	5120		0.657	0.3	已经添加MAT
17#	5120			4.829	建议尽快添加MAT
19#	5120	0.465		1.73	已经添加MAT
20#	5120			1.724	
23#	5120			4.415	建议尽快添加MAT
评价		添加MAT最低	添加MAT最低	添加MAT低	

MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

T001# | 一级齿圈 | 行与齿 | 修复效果对比明显

对比评价

- 一级齿圈在MAT治理前齿面出现轻微的沿齿高方向的擦伤；
- 经过5个月的治理，齿面出现清晰的纹理，未发现擦伤痕迹；
- 沿齿长方向均匀发白纹理，分析可能是沿表层加工波纹形成的改性层。
- 明显的修复效果，与振动报告结果相符。













MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

T001# | 三级行星轮2|修复效果明显

对比评价

- 三级行星轮修复效果对比明显；
- 2025年9月添加MAT，11月的内窥镜看不出明显的变化，2026年3月的内窥镜就看到了明显的修复效果，修复层沿齿长方向基本覆盖。













MAT在风电机组应用实践---挂机应用（3）

T001# | 三级太阳轮 | 修复效果对比明显

对比评价

- 三级太阳轮修复效果对比明显；
- 2025年9月添加MAT，11月的内窥镜看不出明显的变化，2026年3月的内窥镜就看到了明显的修复效果，修复层沿齿长方向基本覆盖。













MAT在风电机组应用实践---挂机应用（4）

风电齿轮箱磨损修复



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后

MAT在风电机组应用实践---挂机应用（4）

风电齿轮箱磨损修复



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后



MAT治理前



治理后







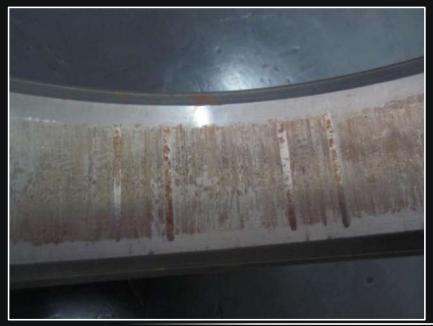


MAT实践与应用---钢铁轧线轧轮轴承

治理前







MAT治理200h







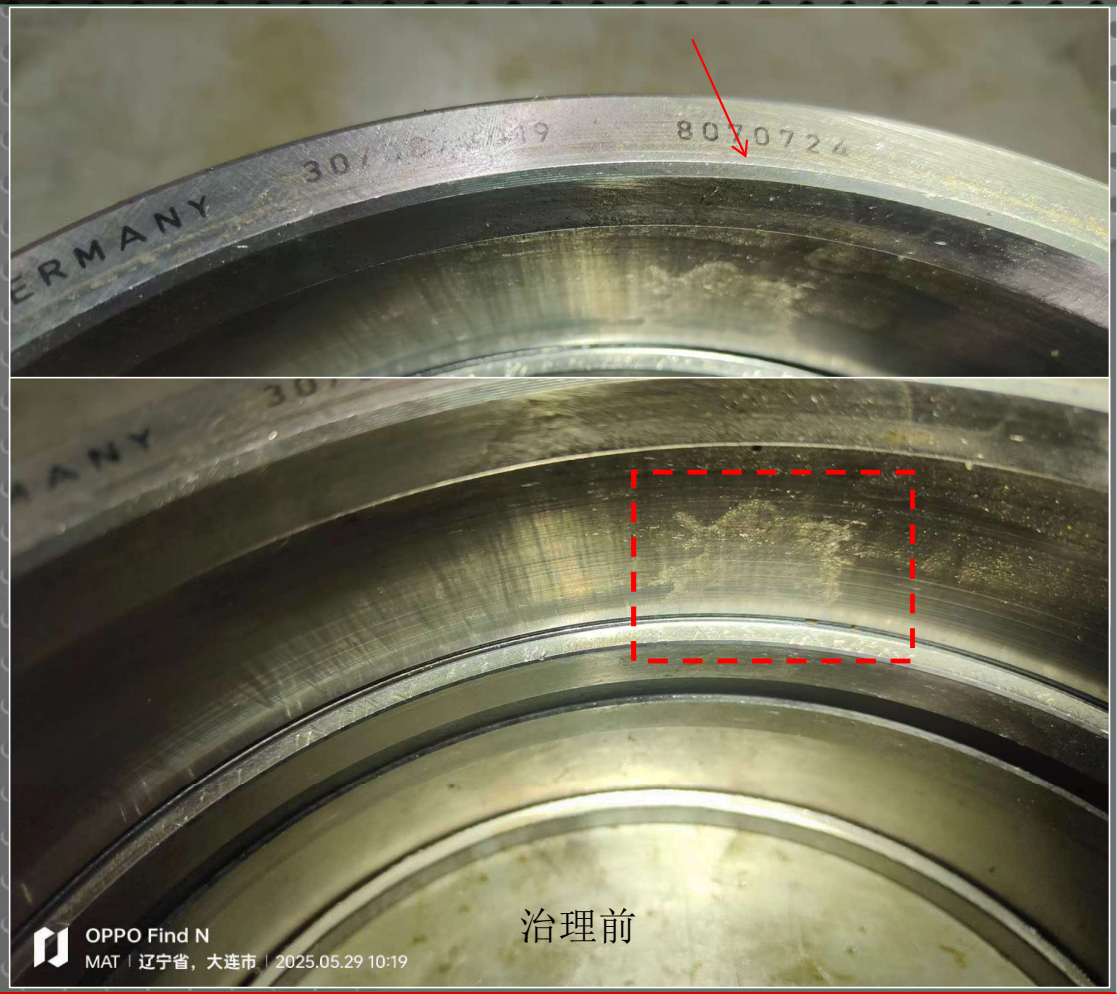
MAT治理1500h



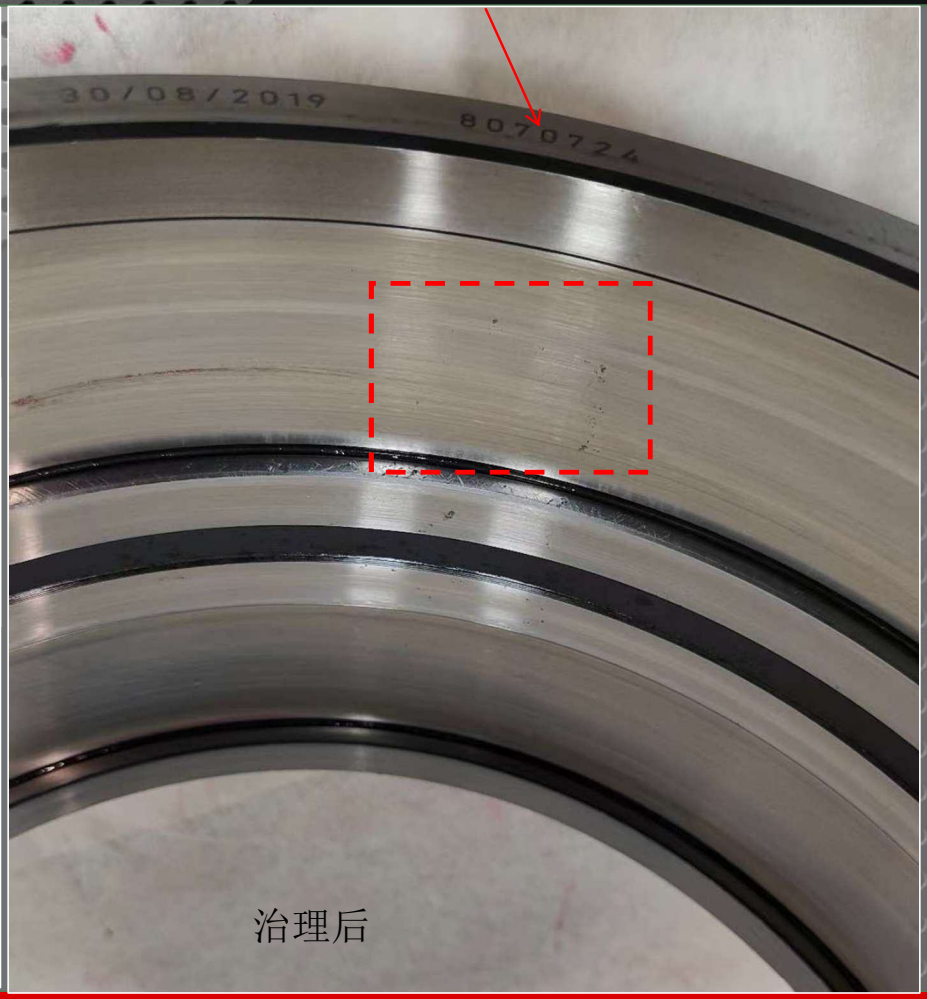




SKF机车轴箱轴承磨损修复台架试验--45000公里（260h）--176km/h



治理前

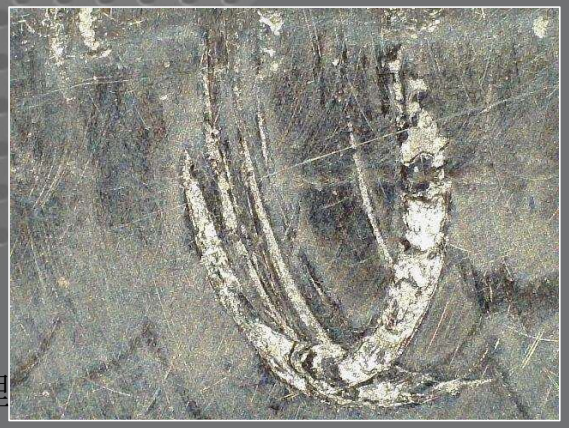


治理后

SKF机车轴箱轴承磨损修复台架试验--45000公里（260h）--176km/h

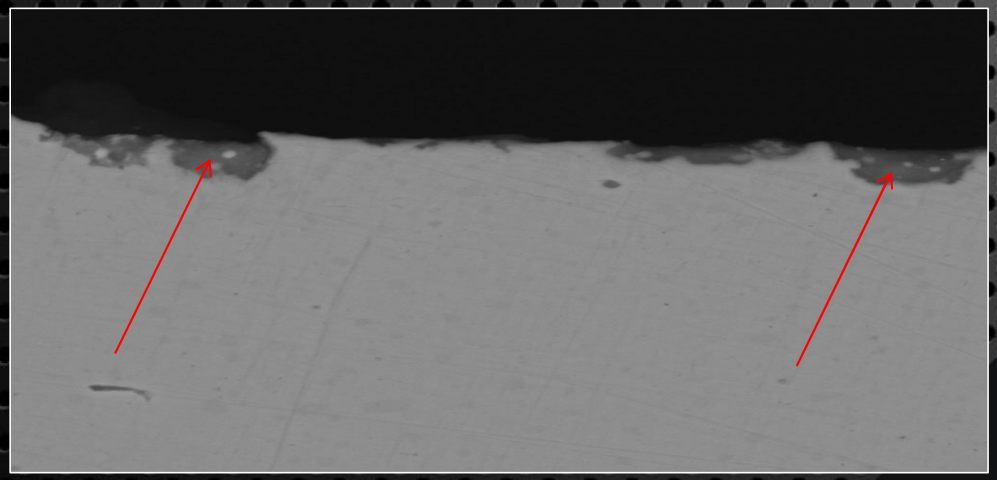


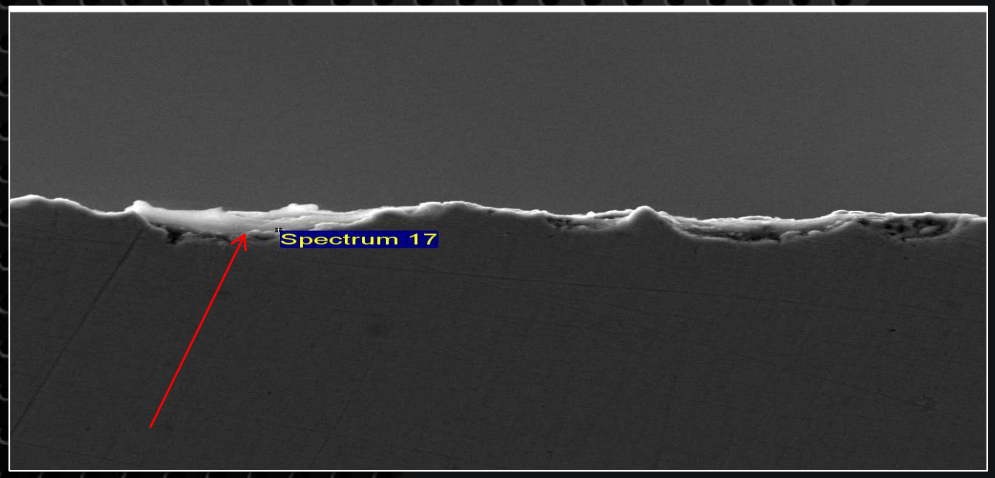


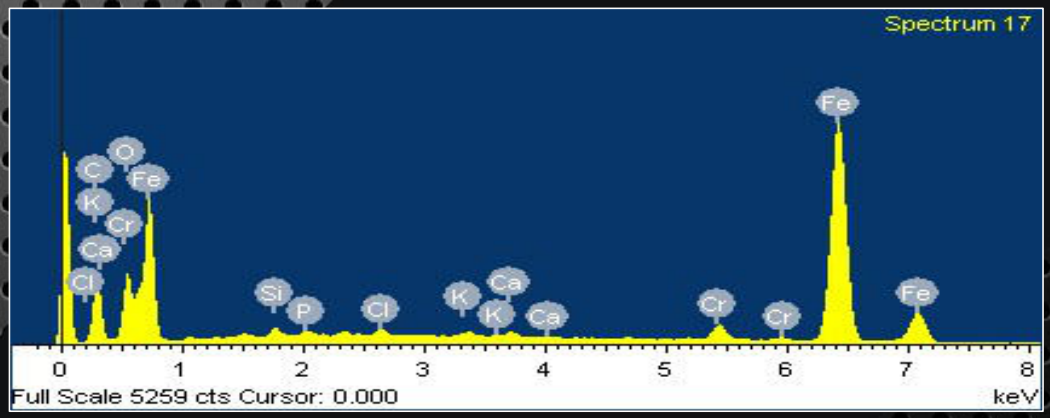





SKF机车轴箱轴承磨损修复台架试验--45000公里（260h）--176km/h







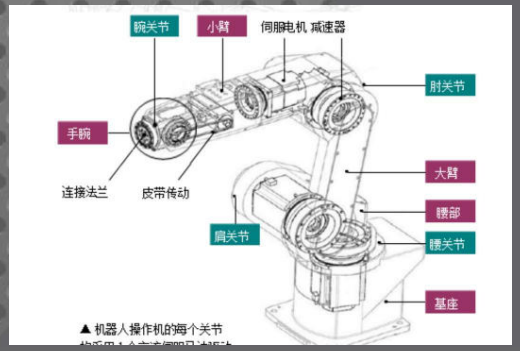
Element	Weight%	Atomic%
C K	21.63	51.18
O K	6.51	11.56
Si K	0.44	0.45
P K	0.28	0.26
Cl K	0.41	0.33
K K	0.29	0.21
Ca K	0.43	0.31
Cr K	2.28	1.25
Fe K	67.73	34.47
Totals	100.00	

MAT实践与应用---工业机器人

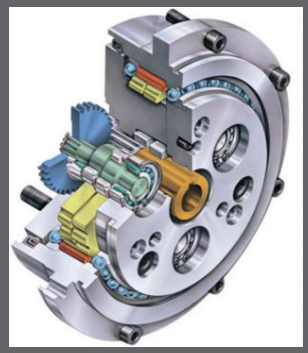
延长RV齿轮箱寿命和连续工作时间1倍以上

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。



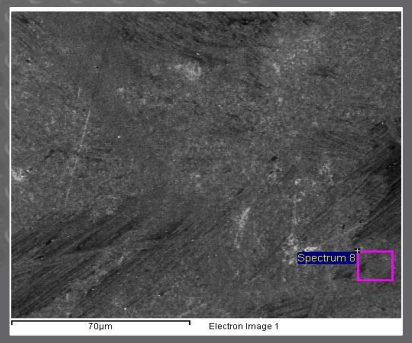


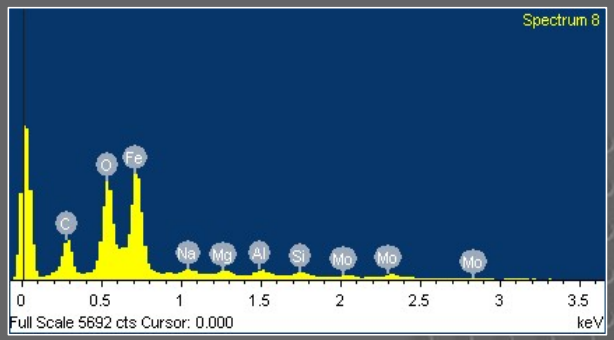
▲机器人操作机的每个关节







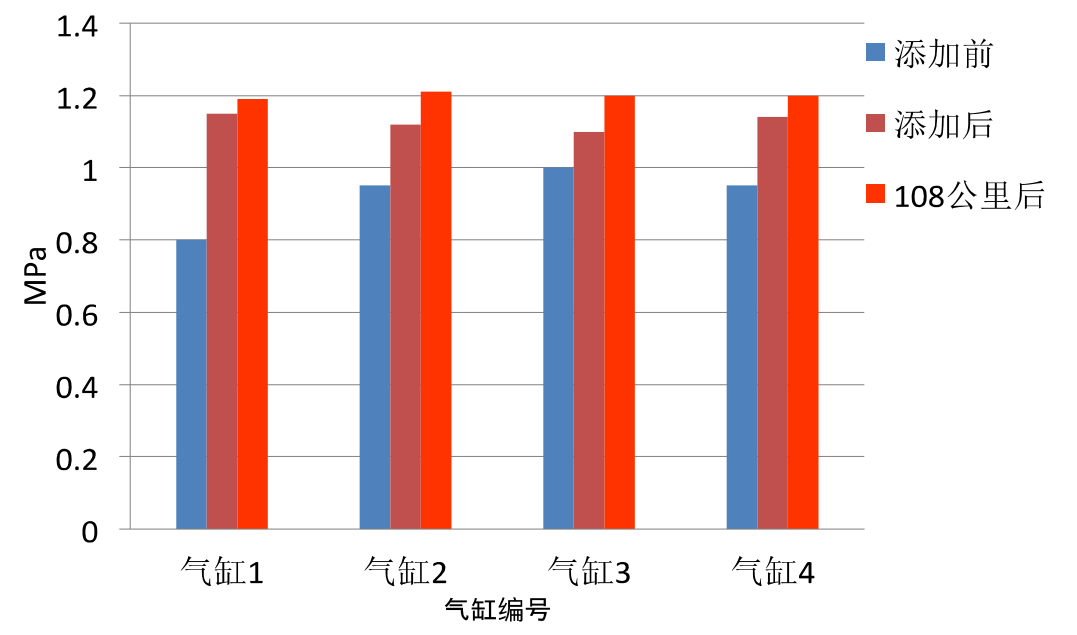




Element	Weight%	Atomic%
C K	7.40	21.19
O K	13.47	28.97
Na K	0.67	1.00
Mg K	0.66	0.94
Al K	1.02	1.30
Si K	1.00	1.23
Fe L	70.69	43.54
Mo L	5.08	1.82
Totals	100.00	

恢复原厂动力，省燃油、省润滑油

在青岛交运巴士公司的三台公交车进行了15000公里的应用试验，结果表明，使用该添加剂后可提高发动机输出功率2%~5%，节约燃油3%~6%，降低尾气排放30%~50%，达到了节省燃油、降低尾气排放的目的。



青岛交运巴士分公司现有车辆500余辆，按照每辆车每年行驶8万公里计算，则：

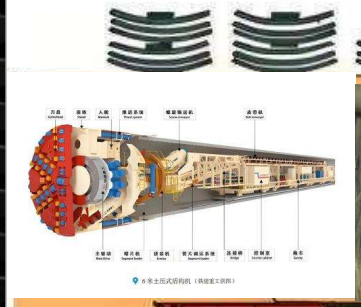
每年可节约燃油550吨，直接经济效益270万；减少一氧化碳排放330吨，减少CH排放200吨。

经济和社会效益显著!

MAT实践与应用---工程机械

2013年，中国中铁隧道集团立项，将MAT技术应用于正在施工的直径为9.33米的海瑞克土压平衡盾构机的两个关键部件上，以提高盾构机的使用效率，延长其使用寿命。与同型号、同标段、同施工量的另一台未盾构机相比：

- 主刀盘驱动齿轮箱的能量输出效率高于对比机18.6%
- 而润滑油温度低1.9℃
- 螺旋输送机齿轮箱的能量输出效率高于对比机8.3%
- 油温低5.3℃（降幅达10.5%）
- 改善了关键摩擦副的工作状态，整个润滑系统的故障率也随之下降，根据盾构机的自动报警系统统计，故障报警总数是试验前本机和对比机的二分之一
- 在油过滤和监测报警数量上低于对比机，低于试验前本机一个数量级









延长设备寿命和连续工作时间，省维修费，省电**5%-10%**以上。

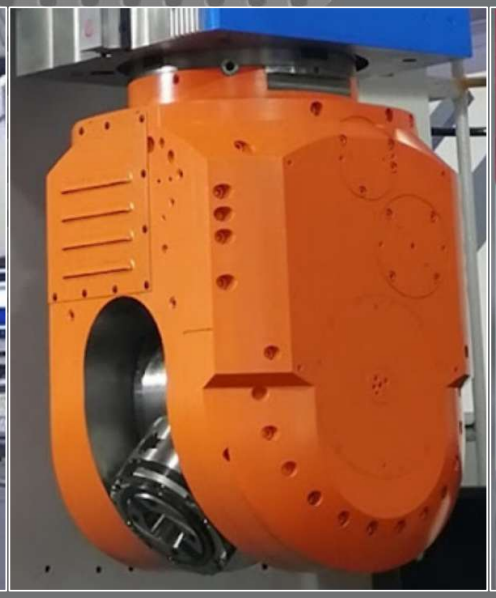
MAT实践与应用---精密机床

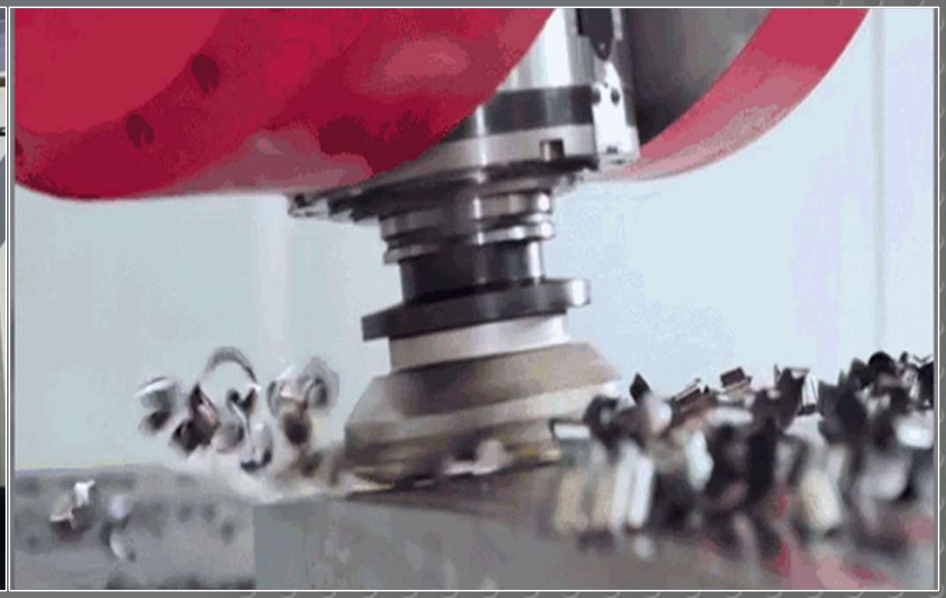
延长齿轮箱寿命和连续工作时间2-3倍，提高加工精度、传动效率和效能、节电、节材。

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，节省电耗2%以上。

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。



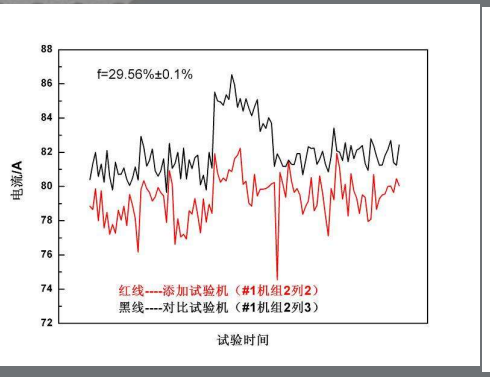


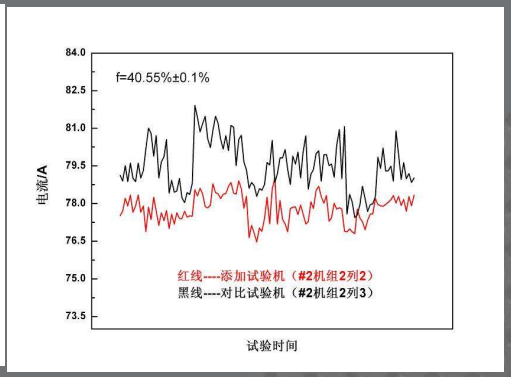


延长空冷岛齿轮箱和轴承寿命和连续工作时间、降低维护成本、节电2-10%。

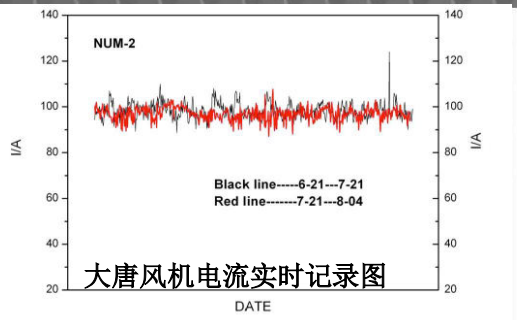


齿轮箱参量	#1-1-2（添加机）	#1-2-3（对比机）	#2-2-2（添加机）	#2-2-3（对比机）
平均电流/A	f=29.56%±0.1%		f= 40.55%±0.1%	
	79.31	81.07	77.79	79.31
降低值	2.1%		1.9%	
振动加速度	有效值		有效值	
	1.12	1.30	1.19	1.25
降低值	14.2%		4.6%	





神华电厂空冷岛风机齿轮箱应用**MAT**驱动电流和振动信号下降，两试验机驱动电流分别下降了**2.1%**和**1.9%**



大唐风机电流实时记录图

应用摩安前后风机驱动电流波动比较

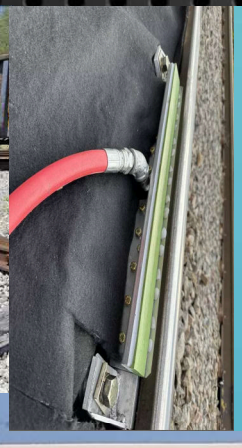
减速机	NUM-1	NUM-2	NUM-3	NUM-4	NUM-6	NUM-7
添加前标准差	2.907783551	3.435813222	3.586152213	3.330935	4.165879	3.8697
添加后标准差	2.31362628	2.815785909	2.501432678	2.172648	3.155046	3.0582
降低/%	20.4	18.1	30.3	57.5	24.3	21.0

应用摩安前后风机驱动电流比较

减速机	NUM-1	NUM-2	NUM-3	NUM-4	NUM-6	NUM-7
添加前	99.27336908	98.49222688	99.45746633	96.67385	99.66183	100.3153
添加后	97.78531205	96.91532153	98.91227	95.32642	98.2591	99.15314
降低/%	1.5	2.1	0.55	1.4	1.4	1.2

MAT产品展示









固态、液态、脂三大形态8个系列产品



功能粉体粒度报告（体积分布）及其在润滑脂中的分散状态分析

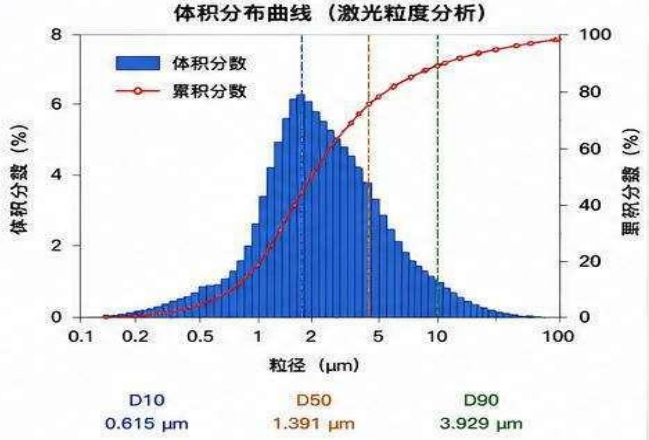
1. 粒度测试结果（体积分布）

体积平均径 D[4,3]	1.980 μm
中位径 D50	1.391 μm
D10 / D90	0.615 μm / 3.929 μm
D03 / D97	0.486 μm / 7.079 μm
SPAN（跨度）	2.38（较宽）
比表面积	1878 m²/kg
遮光率	7.06%（分散较好）

分布特征（体积分布）

- 细颗粒占比较高：D < 1 μm 体积分数约 33%
- 中等颗粒占比较大：1–3 μm 体积分数约 40%
- 粗颗粒占比较低：> 3 μm 体积分数约 27%
- 粒径分布宽，SPAN=2.38，呈连续多峰分布

体积分布曲线（激光粒度分析）



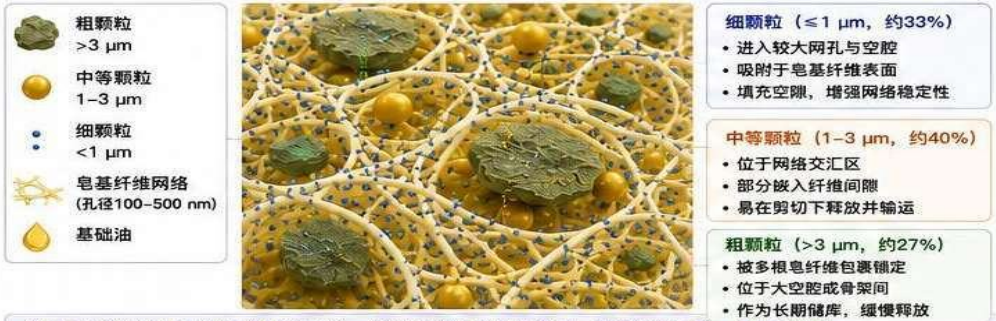
2. 不同粒径区间在润滑脂中的主要位置与作用

粒径区间（体积分布）	体积分数占比	在润滑脂中的主要位置与状态	主要作用
≤1 μm（细颗粒）	约33%	• 可进入较大网孔与网络空腔 • 部分吸附于皂基纤维表面 • 填充自由体积，改善网络均匀性	• 提高体系分散稳定性 • 抑制沉降与团聚 • 优先释放，快速参与界面反应
1–3 μm（中等颗粒）	约40%	• 位于网络交汇区或较大孔隙 • 部分嵌入皂纤维间隙 • 在剪切下逐步释放	• 主要输系与持续释放来源 • 参与界面重构 • 承担中期修复作用
>3 μm（粗颗粒）	约27%	• 被多根皂纤维包裹与机械锁定 • 位于网络骨架间大空腔 • 静止时基本不迁移	• 长期材料储库 • 在剪切与碰撞下逐步破碎 • 提供长期补充供给

关键认识

① 约73% 的颗粒粒径 ≤ 3 μm，能够在剪切与油流作用下释放并参与界面修复；
② 粒径分布宽（SPAN=2.38），形成多尺度协同结构：细颗粒稳定网络，中等颗粒提供持续输运，粗颗粒构成长期储库；
③ 功能粉体不仅在摩擦界面发挥作用，还参与构建和稳定润滑脂的三维网络结构。

3. 功能粉体在润滑脂中的多尺度分散状态示意图（静止状态）



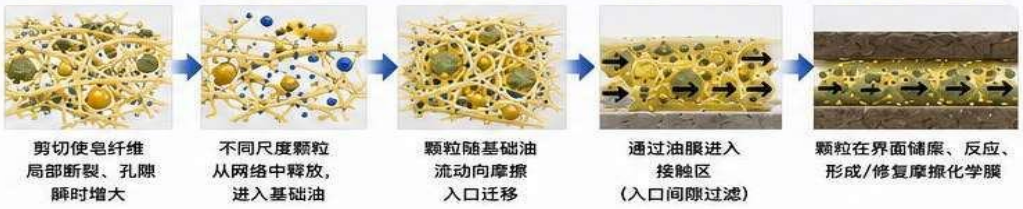
细颗粒（≤1 μm，约33%）
- 进入较大网孔与空腔
- 吸附于皂基纤维表面
- 填充空隙，增强网络稳定性

中等颗粒（1–3 μm，约40%）
- 位于网络交汇区
- 部分嵌入纤维间隙
- 易在剪切下释放并输运

粗颗粒（>3 μm，约27%）
- 被多根皂纤维包裹锁定
- 位于大空腔成骨架间
- 作为长期储库，缓慢释放

结果：功能粉体被三维网络机械束缚 + 部分吸附作用共同稳定，显著抑制沉降、团聚与分层。

4. 服役过程中的颗粒释放与输运机制（动态过程）



早期（细颗粒主导）

- 细颗粒（≤1 μm）优先到达界面
- 快速吸附与反应
- 形成初始保护层

中期（中等颗粒主导）

- 中等颗粒（1–3 μm）持续释放与输运
- 构建/增厚功能膜
- 稳定减摩与修复效果

后期（粗颗粒贡献）

- 粗颗粒（>3 μm）破碎产生细颗粒
- 长期补充活性物质
- 维持界面膜动态更新

多尺度颗粒协同：大颗粒储库（供给源）→ 中等颗粒输运（持续释放）→ 小颗粒反应（界面作用）
实现持续减摩、自修复与抗电腐蚀的长期效应

6. 功能粉体在润滑脂中的双重作用

（1）体系稳定作用（静止状态）



- 填充空隙，增强网络均匀性
- 提高屈服应力与剪切稳定性
- 抑制沉降、团聚与基础油析出
- 延长储存稳定性



（2）功能服役作用（工作状态）



- 颗粒释放并输运至界面
- 参与摩擦化学反应与膜形成
- 自修复磨损表面
- 抗电腐蚀与导电通路阻断

注：以上分析基于激光粒度仪体积分布结果，测试范围 0.10–1000 μm（Bettersize BT-9300SE）。实际在润滑脂中的分散状态受基础油、皂基类型、混炼工艺与添加量等因素影响。

MATai电机轴承智能强化系统应用



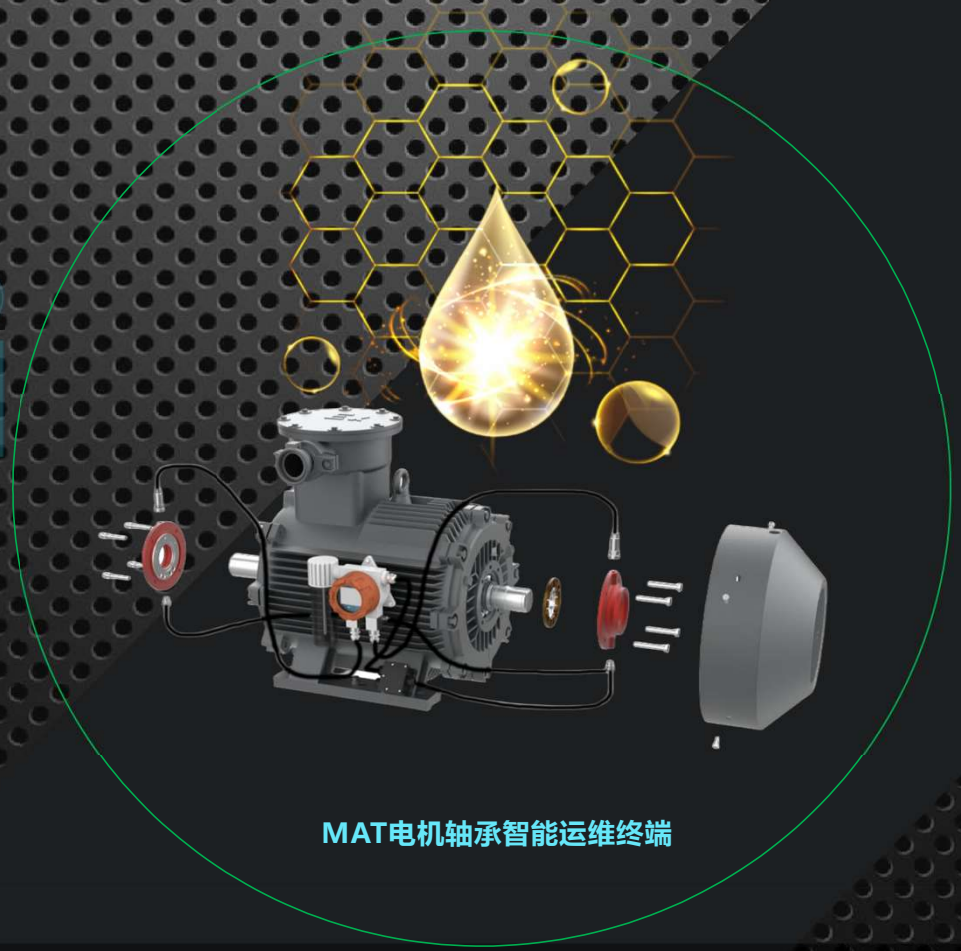
自发电供电

内置微型发电模块，利用旋转动能自供电，免布线，保障7×24小时持续运行。

界面重构智能修复

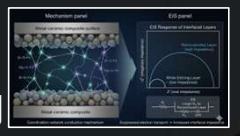
依据工况实时调节润滑周期与剂量，防堵塞设计，大幅延长轴承使用寿命。



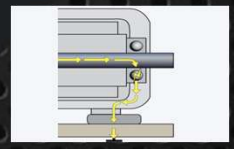


MAT电机轴承智能运维终端

轴电流抑制



界面重构、均衡电流与旁路接地协同，抑制避雷针效应，疏导高频轴电流，从根源杜绝电腐蚀。



实时监测

集成振动、温度多参数采集，内置故障特征库，实现实时监控与智能预警。



MAT电机轴承智能润滑终端--轴承润滑脂滴灌修复

技术原理

润滑脂在劣化过程中，基础油消耗最多，稠化剂和添加剂消耗很少，除了彻底清洗换脂，传统润滑脂补脂方式，新添加的润滑脂无法完全置换已硬化和氧化的润滑剂，也无法实现区别性组分补充，往往导致稠化剂和添加剂累积过量，导致硬化。受滴灌原理启发，借鉴“微量、精准、高效”的润滑哲学思想，开发了“润滑脂在线滴灌修复技术”，把补“脂”改成补“油”。

修复润滑脂

润滑脂中的基础油消耗掉以后，及时微量补充基础油，可以修复润滑脂的润滑性能。

精准加注MAT再生强化剂

通过智能加注系统，可以精准把有效成分介入到轴承滚子和滚道表面，一是大大提高了效果，二是减少了有效成分浪费。



MAT产品兼容性

与润滑介质兼容协同

MAT核心组分选自天然无机矿物，与润滑油（脂）不发生反应，分散性良好，不改变润滑介质的理化指标，-45℃保持流动性不变。


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告
Test Report


检 验 检 测 报 告
Test Report


检 验 检 测 报 告


检 验 检 测 报 告
Test Report


检 验 检 测 报 告
Test Report


检 验 检 测 报 告
Test Report


检 验 检 测 报 告
Test Report


取液观察

2025.8.18 16：00取液

2025.8.19 10：00取液/16:00取液

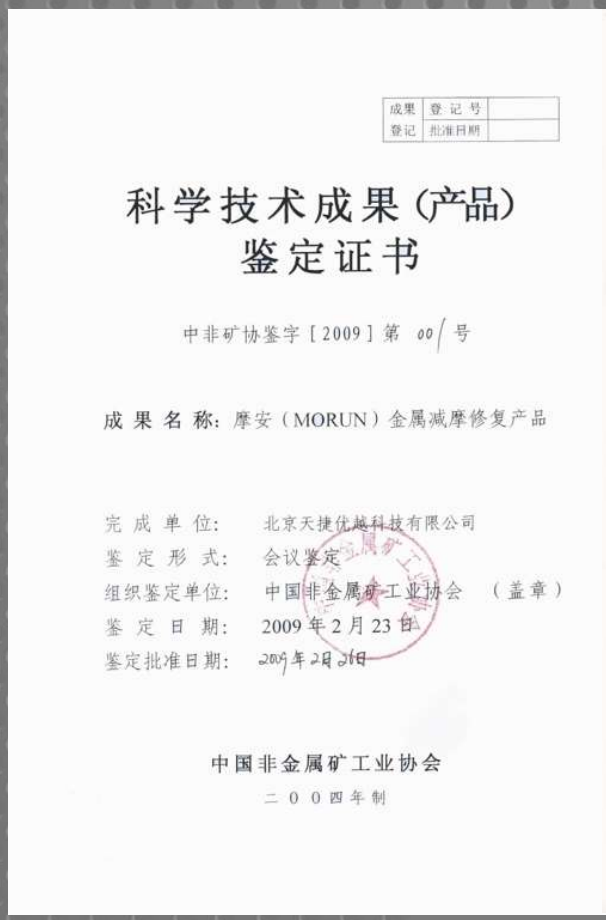
2025.8.20 10：00取液/16:00取液

2025.8.21 10：00取液/16:00取液

油液放入低温试验时候设置零下45度运行，运行时间：10:30-14:00

油液取出后仍未冻结，也未发现明显沉淀分层

发改委、国铁集团和设备协会发文推广MAT



成果登记	登记号	
	批准日期	

科学技术成果（产品）鉴定证书

中非矿协鉴字［2009］第 00/ 号

成果名称：摩安（MORUN）金属减摩修复产品

完成单位：北京天捷优越科技有限公司

鉴定形式：会议鉴定

组织鉴定单位：中国非金属矿工业协会 （盖章）

鉴定日期：2009年2月23日

鉴定批准日期：2009年2月26日

中国非金属矿工业协会

二００四年制



中华人民共和国铁道部运输局

运装机运〔2008〕643号

关于印发铁路内燃机车金属减磨修复技术推广应用现场会议纪要的通知

各铁路局：

现将铁路内燃机车金属减磨修复技术推广应用现场会议纪要发给你们，请各铁路局总结本局和借鉴广梅汕铁路公司龙川机务段的经验，扎实推进这项工作，为提高机车质量和节能降耗做出新的贡献。

二〇〇八年十一月二十七日

— 1 —



中国设备管理协

中设〔2010〕25号

关于推广应用金属减摩修复技

各省、自治区、直辖市、行业设备管理协会，会

单位：

贯彻科学发展观，建设资源节约型和环

经济发展战略的重大决策。为应对全球气

变暖的世界危机，中国以一个负责任大国的

到2020年将单位GDP二氧化碳排放减少4

诺。中国工程院的咨询研究报告指出，全国

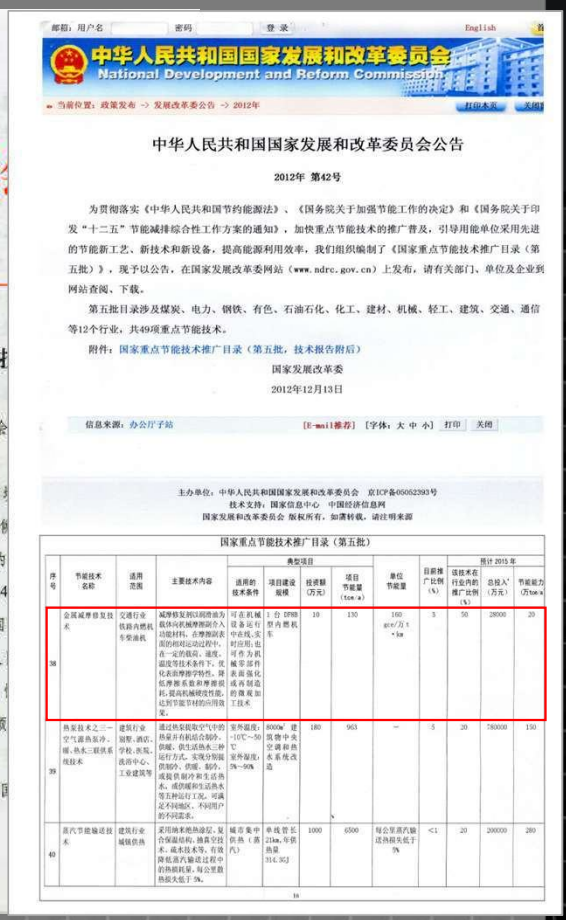
带来的能源、材料年消耗估计为9500亿元人

热能动力机械所带来的排放污染，更是触目

的形势和艰巨的任务，依靠节能降耗减排领

决这些迫在眉睫问题的重要途径。

金属减摩修复技术是进入新世纪以来国



中华人民共和国国家发展和改革委员会
National Development and Reform Commission

当前位置：政策发布 -> 发展改革委公告 -> 2012年

中华人民共和国国家发展和改革委员会公告

2012年 第42号

为贯彻落实《中华人民共和国节约能源法》、《国务院关于加强节能工作的决定》和《国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》，加快重点节能技术的推广普及，引导用能单位采用先进的节能新工艺、新技术和新设备，提高能源利用效率，我们组织编制了《国家重点节能技术推广目录（第五批）》，现予以公告，在国家发展改革委网站（www.ndrc.gov.cn）上发布，请有关部门、单位及企业到网站查阅、下载。

第五批目录涉及煤炭、电力、钢铁、有色、石油石化、化工、建材、机械、轻工、建筑、交通、通信等12个行业，共49项重点节能技术。

附件：国家重点节能技术推广目录（第五批，技术报告附后）

国家发展改革委

2012年12月13日

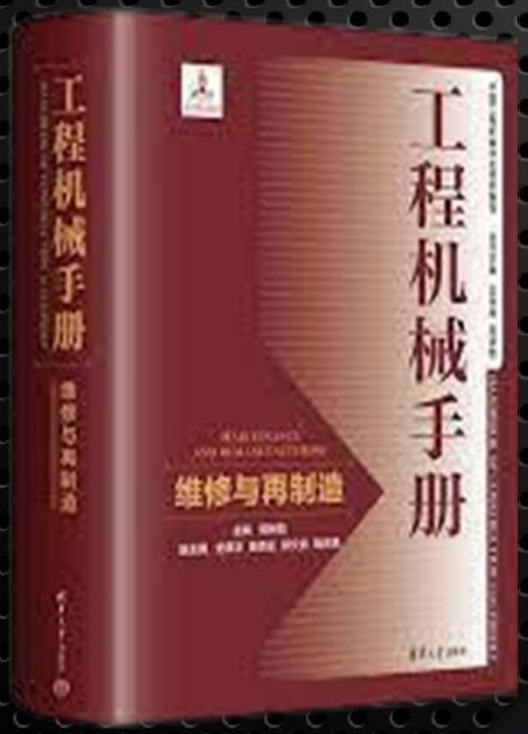
信息来源：办公厅子站 [E-mail推荐] [字体：大 中 小] 打印 关闭

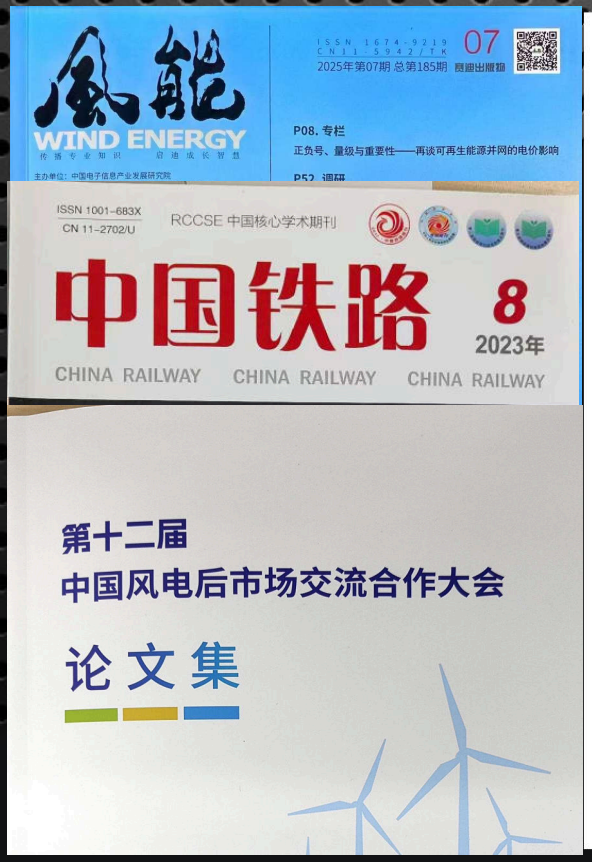
主办单位：中华人民共和国国家发展和改革委员会 京ICP备05052393号
技术支持：国家信息中心 中国经济信息网
国家发展和改革委员会 版权所有，如需转载，请注明来源

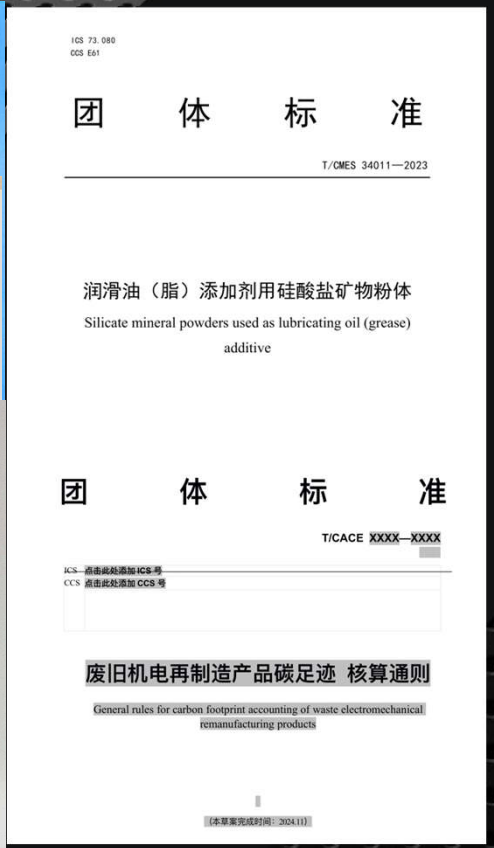
国家重点节能技术推广目录（第五批）

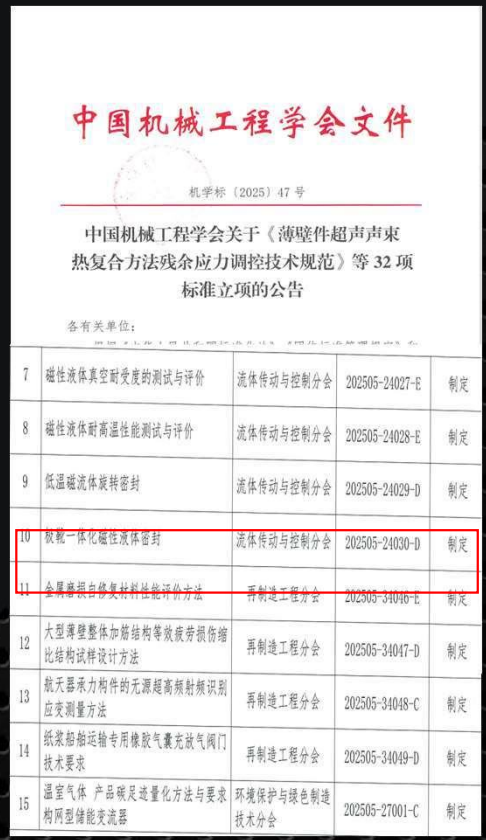
序号	节能技术名称	适用范围	主要技术内容	典型项目				单位节能量	目前推广比例（%）	预计2015年	
				适用的技术条件	项目建设规模	投资额（万元）	项目节能量（tce/a）			该技术在行业内的推广比例（%）	总投入（万元）	节能能力（万tce/a）
38	金属减摩修复技术	交通行业铁路内燃机车柴油机	减摩修复剂以润滑油为载体与机械摩擦副表个人功能材料，在摩擦副表面的相对运动过程中，在一定的载荷、温度、温度等技术条件下，使化表面摩擦学特性，降低摩擦系数和摩擦损耗，提高机械硬度性能，达到节能节材的应用效果。	可在机械设备运行中在线、实时应用；也可作为机械零部件表面强化或再制造的微观加工技术	1台DF8B型内燃机车	10	130	160 gce/万t·km	3	50	28000	20
39	热泵技术之二——空气源热泵冷、暖、热水二联供系统技术	建筑行业宾馆、酒店、学校、医院、洗浴中心、工业建筑等	通过热泵提取空气中的热量并在机组合制冷、供暖、供生活热水三种运行方式，实现分别提供制冷、供暖、制冷、或提供制冷和生活热水、或供暖和生活热水等五种运行工况，可满足不同地区、不同用户的不同需求。	室外温度：-10℃~50℃ 室外湿度：5%~90%	8000㎡建筑物中央空调和热水系统改造	180	963	—	5	20	780000	150
40	蒸汽节能输送技术	建筑行业城镇供热	采用纳米绝热涂层、复合保温结构，热真空技术，成本技术等，有效降低蒸汽输送过程中的热损耗量，每公里蒸热损失低于5%。	城市集中供热（蒸汽）	单线管长21km，年供热量314.3GJ	1000	6500	每公里蒸汽输送热损失低于5%	<1	20	200000	280

参与著作和行业标准起草工作









参与国家十三五、十四五国家重点科技项目

减摩修复分课题

课题编号：2017YFB0310703

国家重点研发计划
课题任务书

课题名称：重大装备用矿物减摩修复材料制备技
所属项目：节能非金属矿物功能材料制备技术及
所属专项：重点基础材料技术提升与产业化
项目牵头承担单位：咸阳非金属矿研究设计院有限公
课题承担单位：中国地质大学（北京）
课题负责人：白志民
执行期限：2017年07月 至 2020年12月

中华人民共和国科学技术部制
2017 年 07 月 22 日

0003YF 2017YFB0310703 2017-07-22 11:07:42

风电设备在役再制造分课题

课题编号：2024YFC3908104　　密　级：公开

国家重点研发计划
课题任务书

课题名称：风电机组传动部件纳米复合再制造成形及强韧化
所属项目：退役飞机起落架及风电机组再制造关键技术及装
所属专项：循环经济关键技术与装备
项目牵头承担单位：中国人民解放军陆军装甲兵学院
课题承担单位：中国人民解放军陆军装甲兵学院
课题负责人：于鹤龙
执行期限：2025 年 01 月 至 2027 年 12 月

中华人民共和国科学技术部制
2024 年 12 月 23 日

0003YF 2024YFC3908104 2024-12-23 12:24:03

中国设备管理协会

第七届全国设备管理与技术创新成果入选预通知

北京摩安迈特技术有限公司：

根据《第七届全国设备管理与技术创新成果推选活动的通知》（中设[2025]1号通知文件）要求和设备管理与技术创新成果审定办法，经专家组初审、复审，成果领导小组审定。贵单位推荐申报项目拟入选情况如下：

等级	类别	成果名称	完成单位	主要完成人
二等	技术类	基于金属表面自生强化技术的设备磨损在线自愈解决方案	广州铁路局集团有限公司广州机务段、北京摩安迈特技术有限公司	曹琦、白志民、王占玉、邢月胜

说明：1. 最终入选名单以正式通知文件为准；
2. 为深入学习本届创新成果的先进理念、典型经验与创新技术，建议每个项目选派两名及以上人员参加创新成果交流大会；
3. 请申报单位认真核对以上成果信息，反馈时间截止 6 月 30 日。

联系人：王志龙 15010986424　邮件：cape_2009@163.com

中国设备管理协会 专家工作委员会

2025 年 6 月 23 日

农业机械工业协会风能装备分会

第十二届中国风电后市场交流合作大会
优秀论文颁奖仪式邀请函

玉 曹琦 白志民：

专家评审，投稿《基于金属表面自生强化技术的风电机组传修复与风场提质增效》在第十二届中国风电后市场交流合作征集活动中获评为优秀论文。颁奖仪式将于 2025 年 8 月在江苏太仓召开的第十二届中国风电后市场交流合作大会期活动主办方诚挚邀请您到会并出席优秀论文颁奖仪式。

仪式时间：2025 年 8 月 15 日 18:00
仪式地点：苏州太仓华发铂尔曼酒店二层华发厅

中国农业机械工业协会风能装备分会
2025 年 7 月 30 日

MAT成果


发明专利证书
实用新型专利证书
北京市科学技术委员会
Beijing Municipal Science & Technology Commission
http://www.bjkw.gov.cn
和谐社会
创新发展
2009年度北京市科技型中小企业技术创新资金初创期小企业创新项目立项公告
北京市自主创新产品
证书
按照《北京市自主创新产品认定办法（修订）》，下列产品被认定为北京市自主创新产品。
摩安（MORUN）金属减摩修复剂
单位名称：北京天捷优越科技有限公司 证书编号： CX2010DZ0108 发证日期：2010年4月
批准机关：
中华人民共和国铁道部运输局
关于内燃机车选用金属减磨剂技术的通知
中国设备管理协会文件
国家自然科学基金委员会
资助项目计划书
副本
质量管理体系认证证书
北京天捷优越科技有限公司
科学技术成果（产品）
鉴定证书
中华人民共和国铁道部运输局
关于印发铁路内燃机车金属减磨修复技术
推广应用现场会议纪要的通知
科技型中小企业技术创新基金
立项证书
承担单位： 北京天捷优越科技有限公司
项目名称： 机械摩擦副抗磨修复材料
项目类别： 创业项目
立项代码： 09C26211102746
批准文号： 国科发计字[2009]579号
执行期限： 2009.05.05 至 2011.05.05
2009年11月11日
INNOFUND
创新基金支持项目
隧道建设
润滑与密封
LUBRICATION ENGINEERING
中国设备工程
摩安(MORUN)金属减摩修复剂
无机油行驶试验报告
汽车检测报告表
中国冶金报
人民铁道
中国经济导报
经济日报
财经周刊
摩擦学科学及工程
应用现状与发展战略研究
使用报告
摩安金属减摩修复技术使用报告

MAT成果



技术服务合同

合同名称：RVS金属摩擦表面改性修复工艺
技术产品添加服务合同

合同编号：〔2014〕广铁科字018号

委托方（甲方）：广深铁路股份有限公司

受托方（乙方）：北京天捷优越科技有限公司

甲方执行单位：广州机务段

签订时间：二〇一四年十一月 日

全线DF4b机车平均节油7471公斤，4台添加的机车比京版全线DF4b机车多节约燃油944.5公斤。应该说相比之下，添加RVS抗磨修复剂的机车在燃油使用方面有很大节约，能有效的降低燃油消耗，达到节约生产成本的目的。

8月25日，7151机车计划中一修程入丰台本段，届时将结合机车修程，由厂家的技术人员会同我段检修。技术等有关部门，共同对柴油机各摩擦部件的技术状态进行具体测量，以掌握试验机车的第一手技术数据，进一步对RVS抗磨修复剂在我段的试验使用情况进行深入分析。

丰台机务段技术科
2008年7月2日

证明了摩安具有修复功能。

（6）试用摩安的DF8B机车柴油机的燃油平均单耗较同型号对比机车同期燃油平均单耗降低了0.11 kg/10⁴ t·km，显示其节能效果。

（7）此次试用考核，是在铁道部运输局装备部主持俄罗斯金属减摩修复剂的应用试验取得成功、发文全路推广并直接指导国产化研发工作的大背景下进行的。以上数据表明具有自主知识产权的国产摩安金属减摩修复技术已取得比俄罗斯产品更好的试用结果，完全可以替代进口产品。

（8）为期两年的试用过程，验证了摩安（MORUN）金属减摩修复剂的安全性、适用性及减磨、修复、节能的有效性，应用实技术意义。在此次成功试用的基础上，加快应用摩安金技术步伐，扩大应用规模，将取得更好的节支降耗、提效益。

附件1 集通铁路（集团）公司内集机（2009）50号签报
附件2 关于对摩安（MORUN）金属减摩修复产品进行试验的实施
附件3 摩安（MORUN）金属减摩修复产品应用试验实施细则
附件4 参试机车柴油机解体检测原始数据
附件5 铁路内燃机车金属减摩修复技术推广应用现场会议纪要
[运装机运[2008]643号]

集团龙川机务段技术科
2012-03-20

托克托电厂空冷岛齿轮箱应用摩安技术产品
单台机组经济效益核算

一 核算对象
大唐国际托克托（厂）发电有限责任公司空冷岛齿轮箱（56台）

二 基本数据
1 厂方数据

六、结论
自2003年3月以来，全段至今已有73台机车应用了RVS金属减摩修复剂，形成了一定规模，这一大样本的整体效果足以充分对该项技术做出评价。采用不同方法对各种技术统计数据，包括柴油机技术状态、轮毂摩擦中修检测记录、曲修率、机破率、燃油消耗、润滑油理化指标等所得到的统计分析结果，都令人信服地说明采用RVS金属减摩修复剂技术不但会带来明显的经济、节油实际效果，而且具有适用性和经济性。如全面应用推广，会给我国铁路运输带来可观的经济和社会效益。

广州机务段技术科
2011-11-25

注：两台机车都是在修程后运用中期时段完成试验，试验结果能初步验证本文结论。但由于试验机车数据较少，我段为使试验结果能更好反映“摩安棒”的效果，将扩大装车数量，进一步有效分析验证。

附件1：试用与对比机车始末的轮缘测量数据
附件2：铁道部运输局《关于印发铁路内燃机车金属减摩修复技术推广应用现场会议纪要的通知》[运装机运[2008]643号]

关于摩安科技

北京天捷优越科技有限公司（2008）

北京摩安天捷科技有限公司（2021）

北京摩安迈特技术有限公司（2024）



统一社会信用代码
91110106MAD73DGT8K

营业执照

（副本）(1-1)

扫描市场主体身份码了解更多登记、备案、许可、监管信息，体验更多应用服务。

名　　称　北京摩安迈特技术有限公司
类　　型　其他有限责任公司
法定代表人　曹琦
经营范围　一般项目：技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；化工产品销售（不含许可类化工产品）；机械设备销售；五金产品零售；五金产品批发；电子产品销售；货物进出口；技术进出口。（除依法须经批准的项目外，凭营业执照依法自主开展经营活动）（不得从事国家和本市产业政策禁止和限制类项目的经营活动。）

注册资本　150万元
成立日期　2023年12月22日
住　　所　北京市丰台区南四环西路188号二区2号楼3层301内306室

登记机关　北京市丰台区市场监督管理局

2024 年 09 月 02 日

国家企业信用信息公示系统网址：http://www.gsxt.gov.cn　　市场主体应当于每年1月1日至6月30日通过国家企业信用信息公示系统报送公示年度报告。　　国家市场监督管理总局监制

北京摩安迈特技术有限公司（前身北京天捷优越科技有限公司），注册在中国北京，是一家以金属表面自生强化技术（Metal interface Adaptive strengthening and reconstruction Technology，简称MAT技术）应用开发为核心，提供设备摩擦治理和在线磨损修复系统解决方案，集技术研发、产品生产、应用服务为一体的生产服务型硬科技示范企业。

公司以打造机械装备全寿命周期高能效生态运维环境为目标，基于闪温熔覆理论和天然层状硅酸盐的摩擦学性能，研究在活性功能复合粉体介入润滑介质的前提下，借助“机械力化学”作用，与金属表面发生吸附和“闪温熔覆”过程，实现设备运动副在线精抛光、在线表面改性强化、在线磨损靶向修复、固液多元润滑，构建设备极低摩擦极少磨损的自润滑环境，创新金属表面在线强化工艺方法，提高金属零部件摩擦表面强度，为各类因金属磨损造成的设备故障、零部件劣化、能效降低、能耗增加等提供系统解决方案，业务涉及热能装备、风电机组传动系统、轨道机车、工业机器人RV减速器、精密机床主轴、轮轨减磨、工程机械、汽车、轮船、化工装备、冶金装备、矿山机械、纺织机械、印刷机械、军工装备等的摩擦磨损预防和在线治理，产品在民用和工业领域得到广泛应用。

近 20年来，公司秉承专业、专注、坚守、笃志的企业精神，坚持智慧创新，协作共赢，以助力中国制造为使命，与中国地质大学、北京交通大学、装备再制造技术国防科技重点实验室、北京铁路局等重点高等院校和学科重点实验室建立了长期的战略合作伙伴关系。拥有多项发明和实用新型专利，具备独立的研发中心、生产基地和多学科的高级专家团队，国家高新技术企业和ISO9001认证。


MATechnology™
摩安®科技
助力中国制造