高端轴承摩擦学技术与应用
国家地方联合工程实验室情况介绍

河南科技大学 张永振,杜三明,贺甜甜,宋晨飞,岳赟

一、实验室概况

河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室是由原洛阳工学院摩擦学团队（1986 年）发展而成。2008 年建立了中央地方共建高校优势特色学科实验室，2012 年组建了教育部摩擦学与材料防护教育部工程技术研究中心，2013 年经河南省科技厅验收，建立了河南省材料摩擦学重点实验室,2014 年成立了高端轴承摩擦学可靠性控制技术河南省工程实验室。经过近 30 年的积累与发展，2015 年与轴研科技股份有限公司共同提出高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室建设的申请并获批建设。2019 年 12 月 13 日，受国家发展和改革委员会委托，河南省发展和改革委员会组织有关专家进行验收，实验室成为河南省首个通过验收的国家地方联合工程实验室。

根据国家发展和改革委员会印发的《加强区域产业创新基础能力建设工作指导意见》（发改高技〔2010〕2455 号）、《国家工程实验室管理办法（试行）》对工程实验室的发展要求，经过建设单位的深入研究并在学术委员会和咨询委员会的充分论证，高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室的基本定位为“立足前沿，面向工程”。

高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室是全国 5 家拥有国家级平台的摩擦学研究单位之一，拥有材料干摩擦学、载流摩擦学、轴承摩擦学等优势方向，与清华大学、中科院兰州化学物理所及日本、美国、英国

等国内外多所高校、科研单位和企业有深度合作，在摩擦学研究的前沿领域为国内摩擦学研究的主导单位之一。同时实验室瞄准国家工程需求与河南省的重点发展方向，在高铁、军工、航空航天等相关领域开展了研究工作，并取得了一系列进展。在高铁领域，先后为高速列车五大关键技术中“制动系统”和“弓网系统”技术的自主知识产权形成进行了一系列研究工作，取得了关键性突破；在军工领域，开展的针对武器发射系统（弹带-身管）复杂体系的摩檫学等研究工作，为精准远程打击提供了技术支持；在航空航天领域，开展的直升机主旋翼、尾翼关节轴承的衬垫材料摩檫学性能评估工作，为我国“直十”“歼十”关键器件突破国外技术封锁、实现型号列装部队做出了应有的贡献。高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室的成立被评为 2016 年中国轴承行业十件大事之一，这既是对实验室的高度肯定，更是对未来工作的激励与鞭策。实验室将立足于轴承摩擦学技术中的关键科学问题，面向高端轴承工程化过程中的实际问题开展研究，为轴承选材、设计、制造及摩擦学原创性技术提供强有力的理论与技术支撑。

二、科学研究与进展简介

1. 关节轴承衬垫材料摩擦学设计与性能评估技术

（1）科学研究简介

关节轴承由固定于外圈内表面的衬垫与内圈外表面形成滑动摩擦副，实现了内外圈的相对运动，利用衬垫材料形成自润滑转移膜实现轴承的低摩擦与高承载。其中，衬垫材料的自润滑性能、承载性能及稳定性决定了整个关节轴承的使役性能和可靠性，衬垫材料的服役条件极限决定了关节轴承的使用范围，因此高性能衬垫材料是高端关节轴承研制的核心。目前，我国衬垫材料研究开发面临的挑战如下：（1）无油润滑条件下摩擦热对衬垫材料性能负面影响的控制。无油润滑下，摩擦热只能依靠热传导，高速重载条件下摩

擦热的影响更为显著；衬垫材料为编织复合材料，其性能对温度非常敏感；衬垫材料通过热固化粘接与轴承外圈结合，衬垫与外圈的热变形匹配难以保证。这不仅影响关节轴承的性能，而且还影响其性能的稳定性。因此必须在准确解析摩擦热对材料摩擦学性能作用机制的基础上，通过开发摩擦热快速与均匀耗散的关节轴承衬垫材料以及采用衬垫热固化新方法，破解低摩擦、长寿命、高可靠性的高端关节轴承衬垫制备的技术难题。（2）突破我国衬垫材料摩擦学性能评估体系缺失的瓶颈。国内高端衬垫材料的评价标准几乎是空白，国外衬垫材料评价标准是绝密，我国在对自主研发的衬垫材料进行评估时，缺少合理而可靠的评价体系和评估手段，被迫借鉴对标国内外公开的商业宽泛关节轴承标准（比如：AS81819、AS81820，EN2584、EN2585 等），导致衬垫材料的研制进展缓慢和生产评价可靠性低下。相关研究成果获得河南省技术发明一等奖。

（2）研究工作进展

a)在准确解析摩擦热的产生、耗散与积累热体系状态与摩擦学服役条件相互作用的基础上，提出了依据摩擦系统 PV 值进行选材的材料设计准则。提出了材料干摩擦的 PV 特性理论，阐明了服役条件下材料干摩擦学性能的主要影响机制为摩擦热产生、耗散导致在摩擦面热积累形成的高温对材料组织状态的热弱化。材料组织发生显著变化时致使材料本构性能突变，其摩擦学性能也将发生明显变化，甚至发生热失稳。因此对于衬垫类干摩擦材料，其选材规范为材料服役条件的摩擦面温度必须低于材料本构性能的热失稳温度，见图 1。

图 1 衬垫材料控制性能热衰退的摩擦学设计模型

b) 发明了高导热与高热耗散的自润滑衬垫材料。由于衬垫材料组成主要为高分子聚合物，其对温度十分敏感，因此摩擦运动时所产生的摩擦热可以造成工作温度升高，会使聚合物出现从玻璃态到高弹态再到粘流态的转变，其硬度大幅度下降，转移膜的形成及承载会发生显著变化，导致衬垫材料摩擦磨损性能恶化。项目组基于控制摩擦热产生与高效摩擦热耗散的摩擦学设计策略，发明了低摩擦、长寿命的衬垫材料。利用石墨等高导热填料提高了衬垫本身的导热能力，降低了摩擦面温度，显著提高了材料的摩擦学性能；利用高热焓相变颗粒的相变潜热吸收摩擦热，实现了摩擦热的快速耗散，并通过相变颗粒含量、粒度与 PV 值的匹配设计使衬垫材料的摩擦学性能得到大幅改善（如图 2）。在低速重载下的耐磨性提高了 0.3~1.7 倍，在高速轻载下的耐磨性提高了 1.6~4.8 倍。

图 2 材料组分对摩擦磨损性能的影响

c）首次应用服役 PV 区间的摩擦磨损性能评价衬垫材料的关键性能。衬垫材料在使用过程中，其频率、摆角与载荷往往在一定区间内变化，轴承动态转动扭矩与使用寿命是一定 PV 区间内衬垫材料摩擦学性能的综合体现。本项目通过对整个使用区间内的摩擦学特性进行检测，获得衬垫材料摩擦系数、磨损率在检测区间的 PV 特性曲线。根据获得的 PV 曲线，应用公式(1)和(2)，获得了衬垫材料基础摩擦学性能—平均摩擦系数（$\overline{\mu}$）与平均磨损率（$\overline{w}_{\mathrm{r}}$）的评价测试结果；应用公式（3）和（4），获得了表征衬垫材料对服役条件变化敏感程度的稳定性（S_{μ}，S_{wr}）评估测试结果。

$$\overline{\mu}=\frac{\int_{P_0V_0}^{P_1V_1}\mu(PV)d(PV)}{P_1V_1-P_0V_0}\quad（式 1）\quad \overline{w}_{\mathrm{r}}=\frac{\int_{P_0V_0}^{P_1V_1}w_{\mathrm{r}}(PV)d(PV)}{P_1V_1-P_0V_0}\quad（式 2）$$

$$S_{\mu}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\mu_{\mathrm{P_iV_i}}-\mu_{\mathrm{P_{i-1}V_{i-1}}}}{P_{\mathrm{i}}V_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{i-1}}V_{\mathrm{i-1}}}\Big/n\quad（式 3）\quad S_{w_r}=\sum_{i=1}^{n}\frac{w_{\mathrm{r_{P_iV_i}}}-w_{\mathrm{r_{P_{i-1}V_{i-1}}}}}{P_{\mathrm{i}}V_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{i-1}}V_{\mathrm{i-1}}}\Big/n\quad（式 4）$$

上述采用整个检测区间的平均摩擦系数、平均磨损率、摩擦系数稳定性参数、磨损率稳定性参数对衬垫材料进行摩擦学性能表征，兼顾了整个服役区间内的材料整体性能，又克服了 PV 特性敏感材料性能表征时测试参数难以选择的困难。同时该参量也反映了衬垫材料摩擦磨损性能的服役条件随动特性。稳定性参数出现急剧增加，表征衬垫材料发生快速损伤，PV 条件已超出所评价衬垫材料的使用范围。该评价体系已作为国产航空关节轴承衬垫材料选材的评价规范得到了成功的应用（如图 3），有效支持了国家重大工程的顺利进展。

材料	$\overline{\mu}$	w_r ($\times 10^{-2}$mm/m)	S_μ	S_{wr}	综合评价
A	0.049	0.43	4.23	3.4	优
B	0.089	1.35	16.2	6.5	中
C	0.135	2.2	34.2	10.7	差
D	0.056	1.06	6.92	3.1	良

图 3 研制的***轴承衬垫材料性能评估结果

d) 研制了高可靠衬垫材料摩擦学性能检测平台。突破了衬垫材料检测条件与关节轴承主要服役条件的一致性瓶颈，实现了衬垫材料摩擦、磨损、温度等性能参量的动态实时检测，填补了国内衬垫材料评价装备的空白。批量生产的具有完全知识产权的评估检测装备基本覆盖了我国关节轴承研发与生产的主要单位，并形成了衬垫材料摩擦学性能评估网络体系。图 4 为试验机实物图及基于等应力和等热流密度设计的轴/瓦摩擦副结构。

图 4 试验机实物图及基于等应力和等热流密度设计的轴/瓦摩擦副结构

2. 轴承材料组织性能演变规律研究

（1）科学研究简介

轴承服役过程中，随着工况的改变，往往会出现急加速/减速、高速/变载、高温/低温、乏油等条件下的非稳态润滑情况，导致轴承过早失效，甚至出现突发性事故，造成严重的人身伤亡及经济损失。在非稳态润滑情况下，

往往涉及润滑介质、轴承材料组织变化等不同学科问题，国内外研究学者分别从润滑介质、轴承材料、服役条件进行了广泛的研究，但多考虑单一因素对轴承可靠性的影响，并未对各影响因素之间的耦合关联作用进行深入研究。对于这种复杂的耦合体系，需要从全局入手，综合考虑非正常润滑条件下材料组织、润滑介质的演变规律，以及二者与不同服役条件耦合作用下的轴承失效机理，并提出相应延寿措施及轴承可靠性提高方法。

（2）研究工作进展

a）获得了非稳态润滑下轴承材料失效早期过程的微观组织演变表征体系。非稳态润滑下轴承材料摩擦状态发生突变，从乏油到干摩擦材料摩擦学性能由润滑控制向复合控制、材料控制转变。从乏油阶段到干摩擦阶段轴承材料的摩擦系数和摩损率发生突变（图 5）。

图 5 不同载荷下 M50 轴承钢(a)摩擦系数和(b)磨损率对比

乏油区磨损表层马氏体发生塑性变形，随润滑状态变至过渡区和干摩擦区，塑性变形程度大幅加剧，表层形成非晶和纳米晶组织（图 6 和图 7）；摩擦磨损后试样表面萌生裂纹并扩展形成剥落坑，且从乏油到过渡、干摩擦区剥落坑尺寸显著增大；摩擦磨损后试样发生相变（残奥转变为马氏体），且从乏油到过渡、干摩擦区，残奥转变量大幅提升，表面残余压应力显著增加。

图 62GPa 下 M50 钢磨损截面组织:(a) (d)乏油；(b)(e)混合摩擦；(c) (f)干摩擦

图 7 2GPa 条件下 M50 轴承钢磨损截面 TEM 微观组织

相关研究成果发表在 Materials、MaterialsScienceandTechnology 等杂志。

b) 提出了非稳态条件下轴承材料失效早期判定方法。

根据非稳态润滑下轴承材料组织演变规律以及摩擦磨损行为，提出摩擦系数变化率$\triangle f'$ 和突变时间$\triangle t$ 作为非稳态润滑下轴承材料失效早期判据指标（图 8）。当$\triangle f' < \triangle f'_{临界}$时，磨痕表面磨损机制以磨粒磨损为主，磨痕表面仅存在部分黎沟；当$\triangle f' > \triangle f'_{临界}$，$\triangle t > \triangle t_{临界}$时，磨痕处组织发生变化，磨痕表面以及次表面产生微裂纹、小剥落坑，随着摩擦时间的延长或摩擦工况的加剧，裂纹不断延伸扩展从而形成大的剥落坑；当$\triangle f' > \triangle f'_{临界}$，$\triangle t < \triangle t_{临界}$时，磨痕表面氧化、粘着明显，轴承发生失效。摩擦系数变

化率 f' 越小，摩擦系数变化率突变时间△t 越大，轴承稳定性越高，从润滑不良至润滑失效的运行时间延长，轴承的安全使用时间越长。相关研究内容发表于 Journal of Materials Engineering and Performance，2022，31：7653-7661；轴承，2022，6：43-48。

图 8 轴承材料摩擦系数及其变化率随时间变化曲线

c)轴承延寿技术

利用表面织构化、表面激光冲击强化、表面碳氮共渗、表面黑化的方法对 GCr15 钢表面进行强化，研究表明：轴承延寿技术可以改善轴承材料的摩擦学性能，扩大安全使用区的范围，减小摩擦系数变化率△f′，增加摩擦系数变化率突变时间△t，延长材料的磨损寿命。图 9 为超音速微粒轰击强化后 GCr15SiMn 轴承钢组织演变及性能变化规律。强化后的 GCr15SiMn 轴承钢表面硬度显著提高，且在表层和次表层引入残余压应力。随着轰击时间的增加，组织细化效果显著，表面硬度和残余压应力数值增大，磨损率下降。超音速微粒轰击技术细化了组织，改善了材料表面的硬度与应力分布，提高了耐磨性。相关研究内容发表于表面技术（2022）。

图 9 超音速微粒轰击强化后 GCr15SiMn 轴承钢组织演变及性能变化

3. 轴承电蚀机制研究

（1）科学研究简介

发电机和电动机离不开转子的连续旋转，而轴承的主要功能是支撑旋转体，降低摩擦系数，并保证其回转精度。随着风电、高速铁路、新能源汽车等行业的发展，轴承材料不可避免的工作于各种电场环境。电场环境下轴电流的出现使得轴承产生早期失效，造成轴承金属材料烧蚀和润滑材料功能衰退，并可能引起整机设备振动、停机、烧毁，严重影响电气设备的安全稳定运行。研究轴电流的产生机理及其对轴承的破坏机制，并提出适宜的预防措施具有重要的理论价值和工程意义。

（2）研究工作进展

a)交流轴电压下的轴承电损伤机制。以商用 61808 型轴承为样品，研究了不同转速下轴承的击穿特性和电损伤，从轴承的电击穿、润滑泄漏及损伤形式方面讨论了轴电压/电流的危害。研究表明：轴承的击穿电压可被定义为等效电阻一阶导数零点对应的瞬时电压。随着转速的增加和电压的升高，轴承的温升变得更加明显。在摩擦热和电热的共同作用下，润滑泄漏率和轴承温度之间的关系满足阿伦尼乌斯公式。由于温升导致绝缘润滑介质的减少，击穿电压随转速的增加降低（图 10）。击穿后，在滚道和滚子上开始形成电蚀现象。在轴承内、外滚道表面均发现有点蚀坑、颗粒、层状剥落以及搓衣板状损伤（图 11）。本成果发表在 Tribology International（2023, 177:108008）上。

图 10 轴承温升与润滑泄露速率

图 11 轴承电蚀形貌

b) 基于载流摩擦微区接触行为和载流摩擦学性能的关联，揭示了载流/摩擦性能耦合机制和载流/摩擦波动性耦合机制。宏观载流摩擦性能是大量微观接触状态的集合。通过统计微凸峰典型尺度范围的微观损伤机制，识别了

微观接触分区和接触状态，建立了载流摩擦微区（摩擦状态、导电状态）与载流摩擦性能的关联（图 12）。载流/摩擦共面接触决定了微区摩擦状态、导电状态的同步性，从而产生了宏观载流/摩擦性能的耦合关联。

图 12 载流/摩擦动态性能耦合机制

c)基于滚动接触的低摩擦特性，设计滚动载流摩擦副（图 13），滚环依靠弹性形变装卡入内外滚道。采用滚动方式代替滑动方式，降低摩擦系数、磨损率和摩擦热效应；自适应弹性力保证滚环与滚道可靠接触，避免产生放电间隙，减少电弧烧蚀和电弧热；多个弹性环并联可降低接触电阻和增大导热通道（多环之间绝缘隔离），进而降低电阻热效应；达到摩擦力降低、电流均布、导热分散的效果，实现接触区域力-热-电负荷均匀化，同步改善摩擦学性能和载流性能。成果推动形成我国航天领域电传输装置的“首台套”突破（空间机构用双层滚动式电旋转传输装置，GH-Z-16/HJX-Z-230A），其传输功率超过 50kW，寿命不低于 15 年。涉及滚动载流摩擦的成果主要发表在 Engineering Failure Analysis、Wear、Materials Letters、摩擦学学报、机械工程学报等期刊。

图 13 弹性滚动载流摩擦副

以上研究内容获得河南省 2022 年度自然科学二等奖。

三、未来规划

根据国家和产业发展的需求，实验室将围绕高端轴承共性技术提升中的关键摩擦学问题，针对国家、地方和行业的科研开发及工程化研究需求，开展产业关键共性技术开发与攻关，为行业提供技术开发及成果工程化的试验、验证环境；形成一批以摩擦学理论与技术为支撑的共性技术成果，逐步建立我国高端轴承设计、制造与应用的摩擦学基础数据库，填补我国高端轴承摩擦学技术研究的缺失。实验室工程化基地依托轴研科技股份有限公司建设将技术成果通过市场机制向行业转移和扩散，最终实现高端轴承制造摩擦学设计与结构设计、材料设计、工艺设计及维修保养设计的有机融合，起到科研与产业之间的桥梁和纽带作用。同时围绕轴承摩擦学技术与应用，实验室核心科研人员与教学研究人员以项目为纽带，以技术需求为牵引，充分发挥各自优势并形成合力，为轴承摩擦学行业培养一批有社会担当、创新精神和实践能力的高质量人才，为我国高端轴承行业的可持续发展贡献应有的力量。