

高速重载轴承和自润滑涂层技术国际研讨会综述

李淑欣^{1,2}, 樊冬^{1,2}, 束学道^{1,2}, 余丰^{1,2}

(1.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 本文对 2019 高速重载轴承和自润滑涂层技术国际研讨会进行综述。来自中国和乌克兰的 30 余名专家学者出席了本次会议。会议围绕高速重载轴承和自润滑涂层技术进行研讨, 乌克兰科学院代表团的两位院士分别就超高温陶瓷和微波材料等新型材料的研发技术作了主题报告, 宁波大学代表团的两位教授也分别做了“滚动接触疲劳下轴承材料微观失效机理研究”和“轧机重载轴承微尺度控制延寿技术研究”等报告。本次会议展示了中乌专家在表面涂层技术和轴承延寿等方面的最新研究成果。

关键词: 高速重载轴承; 延寿; 自润滑涂层; 国际会议

中图分类号: TH133.33+4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 05-0042-04

轴承是航空发动机的重要基础性零部件, 而高温、高压、疲劳、磨损等复杂、严苛的环境严重影响轴承的使用寿命, 提高航空发动机轴承的使用寿命一直是科学研究的热点问题。本届高速重载轴承和自润滑涂层技术国际研讨会是中国和乌克兰的专家学者针对极端环境下的轴承失效机理及自润滑涂层技术进行的研讨交流会, 会议旨在为航空航天、机械工业的发展提供学术意见。

此次国际学术会议于 2019 年 6 月 10 日在宁波大学高等技术研究院顺利召开。会议由宁波大学主办, 宁波大学机械工程与力学学院承办, 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室、宁波市机械工程学会和宁波大学学报(理工版)协办。会议主席由宁波大学机械工程与力学学院副院长彭文飞副教授担任。

开幕式上, 宁波大学副校长邵千钧教授、机械工程与力学学院院长郑荣跃教授和宁波市科协学会部叶旭光主任分别致欢迎词, 对乌克兰专家的来访表示热烈欢迎。乌克兰国家科学院材料问题研究所中国研究中心主任叶宏光副教授也发表了热情洋溢的讲话。中乌双方专家学者在本次会议中针对表面涂层技术和轴承延寿等方面的合作发展交换了意见。

1 会议概述

1.1 超高温陶瓷

以硼化物、碳化硅或氮化物等耐火化合物作为主要成分的超高温陶瓷在极端条件下具有良好的抗冲击、耐磨损和抗高温氧化性能, 故其在核火箭发动机中扮演着反应堆容器的关键角色。因此, 超高温陶瓷材料的研发对我国具有重要的战略意义。

乌克兰格里戈利耶夫院士的研究表明超高温陶瓷的活化烧结是共晶体系的固相烧结。在高温下, 组分的热特性与单相状态的热特性显著不同, 并且原子间键显著弱化, 原子的热振动幅度增加。这种现象是共晶体系中边界体积扩散活性增加的主要原因, 并且使升温(粉末烧结、蠕变等)的速率增加。目前, 格里戈利耶夫院士已研发出一种通过真空烧结而不是通常的热压技术获得锆硼基化物的陶瓷新技术, 可以获得与高压所得陶瓷相同的机械性能, 并且温度相当低(1 900~1 950 ℃)。

他在超高温陶瓷的压缩实验中发现, 随着蠕变过程的进行, ZrB_2-SiC 陶瓷能保持 65% 压下量而不被破坏, 其活化能为 6.3 eV。另外, 在 1 800 ℃ 的温度下, 陶瓷发生高温强化, 强度达到 800~1 000 MPa^[1]。目前, 格里戈利耶夫院士开发的超高温陶

瓷已在涡轮发动机部件、航天器用材、玄武岩纤维、电站和热力厂的煤锅炉等领域广泛应用。

1.2 微波材料

微波材料应用于微波频段电路(主要是 UHF、SHF 频段, 300 MHz~300 GHz), 是作为介质材料并能完成一种或多种功能的陶瓷材料, 其广泛应用于卫星广播、雷达、军事战斗机等领域。

对于微波材料而言, 较高的相对介电常数能有效解决设备微小型化的问题; 高品质因数能有效增强通讯系统的敏感性; 谐振频率随温度变化幅度较小能提高器件的稳定性。基于微波材料的这些特性, 比罗乌斯院士研制了符合性能要求的单相和多相微波介质以及介质谐振器^[2]。他的相关研究成果已用于现代通信系统的器件中。另外, 在他的研究中, 利用水溶液沉淀法获得的纳米分散 M 型钡铁氧体 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 粒子在医学领域具有广阔的应用前景^[3]。与其相关的纳米热疗(HT)法能有效损伤恶性肿瘤细胞, 磁化粒子对于提高溃烂伤口的修复和牙周炎的治疗均有良好的功效。目前, 他的研究工作已被很多国家用来治疗恶性肿瘤。

1.3 电子辐射技术

随着现代技术的发展, 具有复杂特性的功能材料日渐重要。鉴于传统的材料制备工艺无法将不同特性的材料进行组合, 电子辐射技术填补了该领域的空白。研究者们可以有效地利用铝箔材料和蒸汽相涂层技术来制备多功能材料。

乌克兰 Pratt & Whitney 公司总经理、巴顿研究所所长乌斯季诺夫教授基于电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术研发了准晶体结构的 Al-Cu-Fe 合金^[4]。该合金具有高硬度、低热传导、低表面能量和较低摩擦系数等极不寻常的特性组合, 能在干燥摩擦区域减少表面磨损, 可防止真空冷焊。该项技术还可有效解决热压塑料产品制造过程中, 模具表面受损和产品几何尺寸改变等问题。

另外, 传统的融合技术难以获得跨金属连接的化合物, 这使得制造如管道连接中由钢铁和钛组成的结构变得很困难。乌斯季诺夫利用扩散焊接方法制备了钛-钢双金属化合物, 其可以满足安装连接的要求, 且具有高强度和可塑性的优点^[5]。

1.4 铜基自润滑耐磨材料

铜基自润滑耐磨材料的制备要求包括: (1)铜

基体可通过附加能承受载荷和高接触压力的材料来增加强度和硬度, 并降低铜的固有可塑性; (2)必须附加固体润滑剂, 使其在摩擦接触处形成保护层来减少磨损。

乌克兰基辅理工学院卡瓦里琴科教授在空气和真空中对比研究了不同温度下附加不同数量固体润滑剂(MoS_2 或 MoSe_2)的铜基复合材料对试样的磨损机理和特性的影响^[6]。他参与研发的自润滑复合摩擦材料 SKAM IPM-301 已确保“和平号”轨道空间站 R-400 超高频辐射测量系统摩擦单元在 5 a 内的可靠运行^[7]。

在无润滑条件下, 卡瓦里琴科教授对铝(1100)、钼、不锈钢(304)、钽、钛等金属材料和铜(182)相互滑动过程中的摩擦学行为进行了研究。发现铝的抗磨损能力最小, 可能是由于其与铜的亲合性、高延展性及低剪切强度造成的; 钼、不锈钢和钽的摩擦系数数值较大, 主要是由于氧化屑的堆积; 钛具有良好的溶解性, 易与铜发生磨损, 但其强度高, 不会造成严重的滑动损伤。

1.5 热涂层材料

在现代飞机的设计应用中, 极端条件下使用的特殊涂层材料发挥着重要的作用。乌克兰安东诺夫国有企业副总材料师安东纽克副教授比较研究了传统航空工业使用的电镀涂料和乌方新型研发的耐磨涂料材料(等离子体、离子-等离子体等)的摩擦学性能, 以及新旧涂层对钛合金疲劳性能的影响。结果表明, 新型涂层较传统涂层而言具有更优的耐磨性, 疲劳试验研究发现新型涂料能增加钛合金的疲劳强度, 如等离子体涂料能使试样的疲劳强度达到钛合金 BT22 的水平。

安东纽克副教授还介绍了具有高摩擦学性能和耐交变载荷的涂层制备技术。该技术可应用于不同的金属、非金属或高熔点材料, 应用效率高且孔隙率较低。该涂层具有高耐磨性和耐腐蚀性, 且对基材结构强度和疲劳性能的影响极小。

1.6 滚动接触疲劳失效机理

轴承在高速列车、风力发电机、航空航天等领域中具有重要的作用。可以说, 轴承是机械工业的核心, 但是轴承发生故障的概率却很高。据报道, 风力发电机中近 40% 的故障与齿轮箱中的轴承有关, 更换或维修费用高昂。

宁波大学李淑欣教授研究发现轴承在滚动接触疲劳作用下失效表面的组织形貌不同. 轴承的失效模式主要归类为轴向裂纹、表面点蚀、表面白色蚀刻层和亚表面白色蚀刻区. 在历经数十万次循环后, 材料表面会出现大量点蚀凹坑. 李淑欣教授研究发现循环交变剪应力是造成点蚀的主要原因. 她首先对表面白色蚀刻层(WEL)进行了成分分析, 发现硬度有所增加, 但其主要成分仍是体心立方晶(BCC)马氏体, 组织并没有相变^[8]. 然后对亚表面的白色蚀刻区域(WEA)进行扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、透射电子显微镜(TEM)、聚焦离子束(FIB)等观察分析, 发现 WEA 组织发生了纳米晶化和马氏体向奥氏体相变. 她将纳米晶化归因于剪切大变形下的动态再结晶, 该转变过程主要包括塑性变形定位、晶粒伸长、亚晶粒和等轴晶的形成. 另外, 马氏体相变为奥氏体也是由剪切主导的大塑性变形导致, 使体心立方晶(BCC)发生了向面心立方晶(FCC)的转变^[9-10].

最后, 李淑欣教授指出虽然关于滚动接触疲劳下轴承材料微观失效机理的研究已有一些进展, 但是如何解决轴承微观结构改变问题还有待进一步研究.

1.7 轧机重载轴承

从宝钢、鞍钢、武钢、本钢等企业收集的信息发现轧机轴承存在使用寿命短、容易出现大面积疲劳剥落等问题; 在操作侧, 轴承的失效率明显高于驱动侧; 90%的轴承从辊体侧的第一排和第二排滚子及其对应的外滚子路径处产生疲劳剥落.

针对上述问题, 宁波大学束学道教授基于微尺度轧机控制理论, 对轧机系统, 包括构件的弹性变形和热变形以及运动副之间的间隙, 进行 1 mm 以下, 0.01 mm 甚至 0.001 mm 范围内的行为控制^[11]. 弹性微尺度行为控制理论是基于刚性构件的假设, 一般情况下, 在中、低载荷作用下, 构件刚度较大, 设计时作为刚体得到的结果与实际相符. 但对于重载机构或构件相对刚性的机构, 构件上发生的弹性变形远远超过刚度假定的允许极限, 影响或破坏了机构的静可靠性.

通过对轧机微尺度等效轧辊系统进行综合原理和机构在空载和重载下自由度的变化进行分析, 束学道教授阐明了轧机轴承、推力轴承和轧机轴向

调整螺纹的异常偏心加载机理, 为轧机微尺度可控静杆系统的研制和设计提供了科学的方法, 同时为有效解决轧机轴承等重大设备事故提供了新思路和新途径.

他在报告中分别对三脚架式高刚性轧机、方柱式高刚性轧机、空间自定位高刚性轧机、红环轧机、DANELI 卡盘轧机在空载和轧制状态时的微尺度行为和性能进行分析, 并采用自行开发的轴承边界元特殊计算程序计算了轴承的载荷特性. 在轧机设计中, 轧辊系统在轧制状态下具有自定位特性, 保证了轧机的微尺度行为可控. 轧机微尺度动态设计理论是对传统以强度和刚度要求为核心的轧机设计理论的新的补充, 对现代轧机设计具有重要的指导作用.

1.8 重载滑动轴承表面涂层

提高轴承使用寿命的常见表面处理工艺有电镀、磁控溅射、粘接自润滑衬垫、镶嵌固体自润滑物等, 但电镀污染环境, 磁控溅射薄膜生产效率低且靶材利用效率低, 由芳纶纤维组成的衬垫不耐高温, 镶嵌结构降低轴承结构强度. 轴承表面处理亟需一种新的满足绿色和大规模生产要求的材料.

宁波大学曹均博士研发了宽温域、具有持续耐磨减摩性能的多聚物涂层材料, 并采用液体喷涂技术, 针对 MoS₂/PI 多聚物涂层的厚度、摩擦学性能和疲劳强度进行对比研究. 结果表明, MoS₂/PI 聚合物涂层的疲劳强度大于 97 MPa, 与无涂层轴承相比, 6 000 r·min⁻¹ 以下的使用寿命提高了 446.29%, 其摩擦学性能、力学性能和防腐性能均优于电镀层^[12]. 该项技术已在安徽美达机电实业有限公司、上海祥生贝克轴瓦有限公司推广使用.

2 总结

随着机械工业, 尤其是高速列车和航空航天工业的发展, 满足高速、重载等极端环境下服役要求的轴承技术研发对提高航空发动机的安全性、可靠性及寿命至关重要. 此次会议的召开为高温轴承材料的研究与应用发展, 以及选材、设计、寿命评估和结构完整性评定等提供了诸多具有重要参考价值研究成果与技术.

本次会议得到了宁波大学浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室、宁波大学科学技术处、宁波

市机械工程学会和宁波大学学报(理工版)的支持。

参考文献:

- [1] Grigoriev O N, Galanov B A, Kotenko V A, et al. Mechanical properties of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ (ZrSi_2) ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(11): 2173-2181.
- [2] Belous A, Ovchar O, Durilin D, et al. High-Q microwave dielectric materials based on the spinel Mg_2TiO_4 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(11): 3441-3445.
- [3] Belous A, Solopan S, Yelenich O, et al. Synthesis and properties of ferromagnetic nanoparticles for potential biomedical application[C]. Proceedings of the 2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology, 2014:245-249.
- [4] Ustinov A, Polishchuk S, Skorodzievskii V, et al. Structure and properties of quasicrystalline and approximant EBPVD coatings of Al-based systems[J]. Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials, 2009, 224(1/2):9-12.
- [5] Ustinov A, Falchenko Y, Melnichenko T, et al. Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al_2O_3 particles through an Al/Cu multilayer foil[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4):543-552.
- [6] Kovalchenko A, Fushchich O, Danyluk S. The tribological properties and mechanism of wear of Cu-based sintered powder materials containing molybdenum disulfide and molybdenum diselenite under unlubricated sliding against copper[J]. Wear, 2012, 290: 106-123.
- [7] Kostornov A, Simeonova Y M, Fushchich O, et al. Effect of factors governing dry friction on structure formation for the tribological synthesis zone in composites based on copper[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2006, 45(3/4):118-123.
- [8] Wan L B, Li S X, Lu S Y, et al. Case study: Formation of white etching layers in a failed rolling element bearing race[J]. Wear, 2018, 396:126-134.
- [9] Su Y S, Li S X, Lu S Y, et al. Deformation-induced amorphization and austenitization in white etching area of a martensite bearing steel under rolling contact fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105:160-168.
- [10] Li S X, Su Y S, Shu X D, et al. Microstructural evolution in bearing steel under rolling contact fatigue[J]. Wear, 2017, 380/381:146-153.
- [11] Shu X D, Jie H, Chao C, et al. The distribution law of microstructure evolution during stretching stage for cross wedge rolling of asymmetric shaft parts of 42CrMo steel [J]. Journal of Control & Systems Engineering, 2014, 2(2):10-17.
- [12] 曹均, 祝生祥, 王建荣, 等. 内燃机轴瓦喷涂工艺及检测方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(3):148-149; 153.

Review of 2019 international symposium on high-speed heavy-duty bearings and self-lubricating coating technology

LI Shuxin^{1,2}, FAN Dong^{1,2}, SHU Xuedao^{1,2}, YU Feng^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: This paper reviews the 2019 International Symposium on High-speed Heavy-duty Bearings and Self-lubricating Coating Technology. More than 30 experts and scholars from China and Ukraine attended this symposium. The delegation of the Ukrainian Academy of Sciences presented plenary speeches on the research and development of new materials such as ultra-high temperature ceramics and microwave materials, respectively. The delegation of Ningbo University also gave speeches on “Failures of bearings under rolling contact fatigue” and “Microscale control life extension technology of rolling mill burden bearing” respectively. This meeting presented the latest research results from both Chinese and Ukrainian experts in surface coating technology and bearing life extension.

Key words: high-speed heavy-duty bearing; life extension; self-lubricating coating; international conference

(责任编辑 韩 超)