

先进轴承与抗疲劳制造

中国工程院院士 赵振业

有机械运动的地方就有轴承。轴承是各种机械装备的关键基础构件，用以平衡运动、传递载荷、减少摩擦、降低能量消耗。从古代的纺纱车到现代航空发动机，见证了轴承的不可替代地位和作用。轴承遍及生产和生活，传承人类文明。轴承的性能直接关系到主机的功能，机械发展史在一定意义上可以说是一部轴承技术不断进步的历史。

一、主轴承是高技术装备的关键构件和“瓶颈”

在成千上万种轴承中，航空发动机主轴承可谓典型代表：体积小、载荷大、转速高、精度高、环境恶劣。主轴承承受很高的交变载荷，其主要失效模式是疲劳。其失效轻则发动机丧失功能，重则机毁人亡。我国主轴承主要存在三大问题：寿命短、可靠性差、结构重，已成为发动机设计发展和服役安全的主要制约因素。上个世纪 50 年代，美国客机涡轮喷气发动机曾受主轴承制约不能达到 Xh 寿命；80 年代因主轴承寿命短，FWP-13 发动机不能定寿 Xh。如今，不仅制约 FWP-13 发动机延寿第二个 Xh 服役寿命，还是高推（功）重比发动机的“瓶颈”。美国 A-7 型飞机因 TF41 发动机引起的 18 起事故中，有 5 起来自主轴承失效，占 27%。我国上个世纪 60~90 年代发生的重复三次的 13 起发动机事故中，主轴承失效重复 12 次之多。如今，风电机组、高速列车、轿车等机械装备主轴承不得不依赖进口。

主轴承的主要失效模式是接触疲劳。按照 Hertzian 理论，疲劳裂纹应首先从表面下深度为 $0.89a$ （ a 为接触面的半宽）的亚表面起始，那里的剪切应力最大，并在滚动载荷作用下向表面扩展，最终形成剥落失效。但据德国 Schaeffler 的统计，主轴承实际失效中，亚表面起

始裂纹的案例少见，多数是从表面起始，如表面裂纹、剥落或混合摩擦造成的微剥落等。表面起始裂纹降低了主轴承疲劳寿命和可靠性，其主要原因是“成形”制造。所谓“成形”制造是指满足诸如形位、表面粗糙度等设计图纸规定要求为已任的传统制造。

众所周知，主轴承服役行为主要决定于表面硬化层。但表面硬度高，达到 60HRC 以上，其疲劳强度对应力集中极为敏感。据报道，磨削表面划伤造成的应力集中可超过材料的抗拉强度，当然也就无疲劳寿命可言了。

由于“成形”制造缺少抗疲劳概念和表面完整性控制措施，主轴承制造中在表面留下不同程度的应力集中。表面应力集中使亚表面的最大 Hertzian 剪切应力向表面移动，极高的应力集中使最大剪切应力移至表面，甚至主应力成为拉应力，造成疲劳裂纹从表面起始。可见，与拉-压、弯曲疲劳强度不同，表面应力集中通过移动最大剪切应力到表面降低接触疲劳强度和寿命，表面应力集中引起裂纹起始“趋肤效应”是“成形”制造降低接触疲劳强度的基本模式。由于“成形”制造在表面造成的应力集中和位置是随机的，所以，可靠性变得很差。Schaeffler 的统计数据说明，主轴承的制造技术还未与表面高硬度相适应，尚未能抑制其极高的疲劳强度应力集中敏感，使之回归到 Hertzian 理论。“成形”制造是主轴承寿命短、可靠性差、结构重及疲劳失效的主要原因。因此，提高接触疲劳强度、寿命和可靠性的方法是提高表面完整性、降低表面应力集中。

二、先进轴承涉及一个复杂的技术体系

先进轴承涉及一个复杂的技术体系，包括设计技术体系、材料技术体系、制造技术体系及寿命评价与试验技术体系等。

设计技术体系主要包括形位、精度、装配及润滑等，其目标是体积小、结构轻、长寿命、高可靠，满足高载荷、高 DN 值要求。如今，高推重比发动机主轴承轴向、径向载荷已达到 4GPa 乃至 6GPa，DN

值达到 3.0×10^6 乃至 4.0×10^6 以上。所以，主轴承朝着表面超高硬度、心部超高强度、耐高温方向发展。轴承已采用安全寿命及损伤容限、耐久性设计技术。

材料技术体系主要包括高性能轴承钢及其高纯净度。轴承钢已发展三代：低合金钢 AISI52100 为代表的一代钢，二次硬化钢 M50NiL 为代表的二代钢和不锈钢 CSS-42L 为代表的三代钢。其可硬性分别达到 60~62HRC、62~64HRC、68~72HRC，耐温分别达到 150℃、350℃和 500℃。全部采用 VIM+VAR 双真空高纯熔炼，控制有害元素与夹杂物。长寿命主轴承对纯净度要求更高，氧含量要控制在很低的水平。据报导，AISI52100 钢中氧含量由 10ppm 降至 5ppm，夹杂物受到控制，接触疲劳寿命可提高 5~10 倍。因此，轴承公司都有各自的内控标准，以保障轴承更高的竞争力。与国际先进水平相比，我国还有一定差距。

制造技术体系主要包括表层硬化、变形控制、制坯、机械加工及表层组织再造改性等。制造技术决定了主轴承的服役行为。

轴承寿命评价与试验技术体系比较复杂，有人说接触疲劳无规律可言。虽然人们力求作出一些条件疲劳性能，但确实分散性很大。因此，轴承定寿方法各不相同。基础数据积累是轴承公司竞争能力和地位的重要标志。

先进轴承是设计-材料-制造三位一体技术集成。三个要素同等重要，高性能轴承来自三类学科技术的高水平发展。因此，需要建立起制造为主体、设计和材料相协调的三位一体技术体系；设计为主体、材料和制造相协调的三位一体技术体系；材料为主体、制造和设计相协调的三位一体技术体系，然后集成制造出高性能轴承。但是，长期以来我国先进轴承发展中，制造技术很薄弱，基本停滞在“成形”制造水平上，导致企业难以升级高端制造和高端产品。

三、创新抗疲劳制造技术、发展先进轴承

经过几十年的发展，我国已成为轴承制造大国，不仅行业规模已居世界第三位，而且可制造上万种轴承，每年上亿套轴承出口，为国民经济和国防安全做出了重大贡献。但我国轴承还处于中低端制造，高性能主轴承还要依赖进口，尚处于国际竞争弱势。形成了高端轴承高价买进来、中低端轴承低价卖出去、核心技术长在国外、资源消耗和污染留在国内的局面。国外八大轴承公司到中国来设厂，而不允许中国企业染指他们的轴承行业。这种状况必须改变，中国一定要成为先进轴承制造强国。在发展轴承制造强国过程中，面临的主要挑战是自主知识产权、经济可承受性和先进制造技术。主轴承是高技术装备的核心构件、军事敏感构件。制造技术历来属于国家级核心技术和竞争能力，从国外拿不来、买不来、合作不来，只能靠自主创新。自主创新什么？当然是抗疲劳制造。

1、抗疲劳制造是新一代先进技术

抗疲劳制造是控制表面完整性、以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的制造技术。制造工艺的设计取决于轴承对疲劳性能的要求；轴承疲劳性能的优劣又受到制造工艺的影响。所谓表面完整性就是控制加工工艺形成的无损伤或强化表面状态。所以，抗疲劳制造具有抑制高硬度轴承疲劳强度应力集中敏感的功能，可以实现主轴承长寿命、高可靠、再减重。与“成形”制造不同，抗疲劳制造适应高硬度表面层，从而保障主轴承与设计性能一致。

2、“无应力集中”抗疲劳概念

“无应力集中”抗疲劳概念是说不同应力集中的构件具有无应力集中时材料固有疲劳强度。它是抗疲劳制造的理论基础和技术创新向导。“应力集中”是包括结构应力集中 K_t 、表面应力集中 SK_t 及均匀性应力集中 UK_t 等的广义概念。它从应力集中视角认识制造与疲劳行为，从降低应力集中入手解决疲劳强度和寿命降低问题。没有理论的实践是盲目的实践。

3、抗疲劳表面变质层

只要有加工，构件表面就会造成一个表面变质层。表面变质层深度虽然仅有几十微米、百微米，但它却决定了主轴承的服役行为。所以，抗疲劳制造的核心是形成一个抗疲劳表面变质层。构筑抗疲劳表面变质层需要掌握三类科学规律：形成抗疲劳表面变质层的科学规律；抗疲劳表面变质层在服役过程中的演化、重构科学规律；抗疲劳制造方法设计的控制表面变质层的科学规律。表面变质层是一个复杂的薄层，包括诸如表面吸附、变形、冶金直到基体材料等。主轴承表面还涉及硬化层、切削加工层、改性层的复合。它涉及物理、化学、冶金、力学、机械、材料等多种学科。所以，抗疲劳制造是多学科的集成技术，具有丰厚的科学底蕴和内涵。

4、抗疲劳制造技术体系

抗疲劳制造是轴承行业自主创新之所在。创新抗疲劳制造的目标在于建立抗疲劳制造技术体系，体系是生产力。

抗疲劳制造技术体系包括两大部分，即抗疲劳制造技术体系和相关技术体系。相关技术体系指的是高纯材料技术体系和抗疲劳细节设计技术体系，共同建立以抗疲劳制造为主体，材料、设计相协调的三位一体技术体系。不成体系的技术很难用于主轴承并实现效益最大化。多年来的单项技术和个案问题的研究发展教训应当汲取。

5、抗疲劳制造涉及三大制造领域

抗疲劳制造主要涉及表层硬化、机械加工和表层组织再造改性三大制造领域。

表层硬化是主轴承疲劳强度和寿命的主要来源。接触疲劳寿命与表面硬度直接相关。AISI 52100 钢制主轴承硬度为 60~62HRC，M50 钢制主轴承升至 62~64HRC，接触疲劳寿命随之提高 3.2 倍。CSS-42L 钢制主轴承表面硬度达到 68~72HRC，接触疲劳寿命为 M50 钢主轴承的 23 倍。伴随硬度升高还获得很高的表面残余压应力，

最高可达到 1200MPa 以上。表层硬化赋予主轴承极高的内禀性能。研究和实践都证明，表层硬化较之全淬硬结构具有更高的疲劳强度。

机械加工是主轴承制造中延续最长的工艺链。请注意，机械加工引入的表面应力集中（粗糙度与损伤）引发了高硬度主轴承疲劳强度对应力集中极为敏感。机械加工表面变质层叠加在表面硬化层上，改变了组织结构和残余应力场，大幅度降低疲劳强度、寿命和可靠性。表面应力集中越高，疲劳强度、寿命和可靠性降低越严重。机械加工引入表面应力集中是不可避免的。“成形”机械加工与抗疲劳机械加工的区别在于后者引入的表面应力集中更低，趋近理论零值。所以，抗疲劳机械加工的主要目标在于建立一个与硬度相适应的表面完整性，获得主轴承制造高精度，达到制造高效率。

表层组织再造改性是采用机械或特种方法，在主轴承一定深度表层中造成形变硬化和残余压应力，降低表面应力集中，提高疲劳强度、寿命和可靠性。表层组织再造改性在机械加工和表层硬化复合表面变质层中又叠加了一层变质层。对主轴承疲劳行为的影响取决于对机械加工引入的表面应力集中的降低程度、机械加工-表层硬化复合变质层的形变-硬化效果和残余应力场改变。所以，表层组织再造改性的主要目标是建立与表层硬化水平相适应的方法，收到降低表面应力集中最大化效果。

抗疲劳制造自主创新主要集中于创新表层硬化、机械加工和表层组织再造改性技术。

6、应力集中检测技术

主轴承抗疲劳制造中，检测技术是一项十分重要的内涵，应力集中检测技术不仅重要，而且是世界级的难题。美国曾经提出了一个表面完整性制造检测项目。其中，最少数据组包括形位、表面粗糙度、硬度、…，即“成形”机械加工检测项目；标准数据组包括最小数据组、疲劳、应力腐蚀、残余应力和变形等，即抗疲劳制造检测项目；

扩充数据组包括标准数据组、拉伸性能、蠕变性能、设计数据等。还应当添加装配数据组，包括尺寸一致性、配合精度、配合应力等;动态数据组,包括元件动态、配合动态、组合动态等，即动态应力集中数据。仅有主轴承元件制造数据，固然可以保证零件性能，但没有装配配合数据和动态数据，很难保证主轴承的性能。

7、疲劳寿命评价与试验技术体系

疲劳寿命评价是一个未能很好解决的问题。主轴承定寿通常由试验器试验和发动机台架试车确定,还有视情维护定寿等。这些方法虽然使用多年，但缺少系统数据支持，科学性不足。依靠发动机试车定寿可行性较差，对于几千小时、几万小时长寿命轴承几乎不可操作。即使几百小时寿命的军用发动机轴承试车定寿也很难进行。但是，寿命是制造技术（以及设计技术、材料技术）的判据。所以，需要建立从工艺到轴承试验器试验寿命评价技术体系，用更真实地反映轴承寿命的制造过程控制获得的系统试验数据作为定寿的依据，建立制造工艺-疲劳寿命、元件疲劳寿命、装配疲劳寿命和轴承试验器疲劳寿命的主体定寿方法;发动机台架试车、服役、视情维护辅助定寿方法，以解决主轴承制造难、定寿更难的问题。

四、实现抗疲劳制造是一场革命

抗疲劳制造术的主要适应对象是主轴承等关键基础构件。实现抗疲劳制造将带动四种转变：

（1）观念转变

从引进、仿制、“解决有无”观念转变为自主创新、创造高附加值的经济可承受性观念。

（2）技术转变

“成形”制造技术转变为抗疲劳制造技术，建立适应先进设计和高硬度材料的制造技术，保障主轴承与设计性能一致，充分利用材料性能。

（3）管理转变

由标准技术指标终极检测控制制造质量转变为制造工艺过程控制主轴承性能，有效保证可靠性。

（4）人员素质转变

由低技能转变为高技能，由被动转变为主动。把从业人员由满足标准规定指标中解放出来，将主动性纳入制造过程中，实现人性化制造,达到更高的性能指标。

所以，实现抗疲劳制造是涉及轴承行业全局性的技术进步。抗疲劳制造将现代科学与制造技术、轴承产品连为一体，赋予抗疲劳制造技术与轴承无限创新活力和可持续发展后劲，把轴承带入到长寿命、高可靠、再减重、减免维修的新时代！将轴承制造业带入经济可承受性、低排放、绿色、环保和人性化的新时代！

实现抗疲劳制造将使我国建立起制造新理念，先进轴承寿命将提高几倍、几十倍乃至百倍，可靠性提高一个甚至几个数量级,走上制造强国，成为有实力的国际竞争者;加快转变轴承行业发展方式，建设创新型国家。

BEARING • 2010

2010 上海国际轴承峰会演讲之四（2010/9）