

专家论文 9:

长寿命高可靠度轴承制造的关键技术

中国轴承工业协会 卢 刚

十五末期,中国轴协技委会明确提出行业技术攻关的重点在减振降噪和提高寿命与可靠性。经过全行业近十年的努力,已取得明显效果。但笔者认为,这些效果仍然是初步的,既具局限性、也缺乏稳定性。这是因为成果的基础不巩固,我们对轴承寿命与可靠性的认识还不够深入和精细。从整体上说,我们努力得还不够,全行业在突破轴承制造技术上并没有摆脱传统思维的束缚,实现长寿命高可靠度的技术基础和条件还不完全具备。正是基于这一认识,觉得有必要和大家一起来共同探讨长寿命高可靠度轴承制造的关键技术。

一、深入认识轴承制造技术的内涵

1、从传统制造技术说起

传统制造技术具有如下基本特征:

设计多以结构参数为基本内容。输出装配图、零件图、整理设计计算书就算完成了工作任务。只对重要构件、关键部位进行强度校核。在以安全性为目标做静力分析时,也考虑应力集中影响,但采用的参数和依据同样是建立在静弹性力学分析基础上的。强调保证实用性、工艺性、低成本的原则来决定结构型式和尺寸公差。设计方法则以类比、参照为主。移植引进的先进产品,多是急于求成、照猫画虎,很少做深入仔细的消化吸收,因而只能是外形模仿,缺少对细节、微观的认识和分析,也缺少实质内容的创新。

加工工艺基本立足于现有条件:现有原材料,现有设备,现有检测手段;毛坯成型以铸、锻、冲压为主;半精加工则以车、铣、刨、镗、钳为主;经过热处理改性再作精密加工,即使是精密磨削、超精研也都是以满足结构表面的技术

条件和要求为目的，即重在保证尺寸公差、形位公差、表面粗糙度等形貌特征符合设计图纸的规定，对适用性质量指标则未能足够关注。

检验、试验与实验研究是传统制造的薄弱环节，存在太多的侥幸心理和臆想成分，制造与使用之间的许多分歧和矛盾皆出于此，有些甚至长期得不到解决。明显是质量技术层面的问题，往往也因缺少数据分析与实证依据，不得不转化处理或不了了之。

由于传统制造重在表面的“型”和“貌”，重在几何精度，因而被我们称为“控形制造”。它只是通过表面的检测与评价来判断产品和构件有关使用性能及使用要求的满足与否，模糊、忽视了一些重要的内在因素，至使某些因素至今还没有被我们很好地认识，更不要说重视了。这也反映了传统制造的产品虽然可用、能用，但并不是很适用、很好用、很耐用。对传统制造产品的综合经济技术分析表明，至少从社会经济发展角度看，并不是优化的结果，更不是最佳的结果。

2、滚动轴承的失效分析

笔者在《滚动轴承的抗疲劳制造》一文中，曾阐述过疲劳是滚动轴承失效的典型形式及其失效特征，也分析了次表面和表面起源的疲劳失效。这里我们还要明确以下内容：

（1）次表面起源型疲劳主要归因于最大交变剪应力作用和该处材质缺陷，如气隙、夹杂、氧化物残留等；

（2）表面起源型疲劳主要是表面损伤导致应力集中、表面存在残余拉应力，引起次表面最大剪应力向表面转移；

（3）由于材料技术的进步和轴承制造过程对表面层的不够关注、对“表面完整性”的认识与实践还存在较大差距，使得工程实际中发生的滚动轴承疲劳失效，表面起源型比次表面起源型更为常见，这也被德国 Schaeffler 公司的统计数据所证实；

(4) 滚动轴承工作“表面层”的物理、化学、力学状态，冶金质量如显微结构变化、再结晶、晶间腐蚀、合金贫化等，是引起疲劳失效的重要因素，甚至是关键因素。实际上很多表面问题都已深入到了表面以下的“表面层”，按照 Hertzian 理论，这个“层”的厚度大约为接触面宽度的 0.8 倍。

3、表面完整性概念

“表面完整性”是表面层的一种状态，是“通过控制加工工艺形成的、无损伤或被强化的表面层的预期状态”。作为“专有名词”，1964 年首次出现在美国金属切削研究会的会议资料中，1970 年以标准的形式提出《机械加工构件表面完整性指南》成为规范技术术语。随后被众多国家研究和采用。日本、欧洲和美国学者经过系统研究，于 20 世纪 90 年代形成了一系列全面、系统和深入的相关表面完整性规范和标准。以制造航空发动机称雄世界的罗·罗公司和通用电气公司从 20 世纪 70 年代在制造和质量规范中应用表面完整性技术，使航空发动机生产质量和性能得到了大幅提高。近年来日本和美国把加工零件的边、棱、角的几何形态、精度及力学性能也作为表面完整性要求进行系统研究，并取得了若干重要成果；至上世纪末，美国学者已开始拟订控制边棱质量的标准。表面完整性之所以倍受重视是因为它与加工零件的失效，尤其是疲劳失效密切相关，这也被无数重大失效事故所证实。

通常认为“表面完整性”包含的主要内容有：表面粗糙度、残余应力、加工硬化、表面形貌、表面缺陷、金相组织、边棱质量、特殊专业附加指标等 8 个方面，可按三个级别组进行评价，详见下表 1。

4、抗疲劳制造与经济可承受性

抗疲劳制造是技术概念，也是经济概念。研究“抗疲劳制造与经济可承受性”是从价值工程理论与应用角度对抗疲劳制造研究和实践的延伸与发展，以更好地协调抗疲劳产品或构件的研发与投入，更实际地评价抗疲劳技术目标和指

标。

实现抗疲劳制造的关键是保证构件的表面完整性要求,这是一项涉及基础理论、技术科学、产业实践全过程的系统工程,需要物理、化学、材料、冶金、力学、机械等多个学科知识的集成。表面层—更准确说是表面变质层,在加工过程中会发生极为复杂的物理、化学、力学(应力与变形)变化,材料本身的纯净度、化学成份的精确含量、夹杂物总量与弥散性都是引起构件疲劳的重要因素。研究这些因素与疲劳的定性定量关系需要大量的科学实验、经验积累和数理统计分析,以获取指导工程实践的正确结论。

在滚动轴承设计中,需对载荷传递过程作细致计算分析,需要对参与传递载荷零件的结构要素做精确设计,如近些年发展起来的“凸度”设计、表面粗糙度匹配、硬度匹配、弹性流体动力润滑设计等。

表面完整性指标内容及应用

表 1

| 组别 | 最少数据组 | 标准数据组 | | 广义数据组 | |
|------|--|--|--|----------------------------|---|
| | | 零件 | 装配件 | 动态指标 | 选择指标 |
| 指标内容 | 1、几何形状误差 表面粗糙度 R_a 及微观形貌 表面纹理 2、表面微观(低倍放大) 表面缺陷 (裂纹、擦伤、毛刺等) 化学痕迹 表面显微照片 切削瘤或残渣沉积 3、微观组织(高倍放大) 金相组织 微观裂纹 | 1、最少数据组指标 2、物理力学指标 表面残余应力状态 (大小、方向、分布) 强度试验(疲劳强度、极限强度等) | 1、轴承成品中偶合件的指标匹配 2、尺寸一致性 3、配合精度 4、配合应力 | 1、元件动态 2、配合动态 3、组合动态 | 1、标准数据组指标 2、特定环境下的应力腐蚀试验 3、各种附加试验 蠕变试验 裂纹扩展试验 扭矩试验 应力破坏试验 材料韧性试验 |

| | | | | | |
|----|--|------|--|--|----------------------------------|
| | 晶间腐蚀 微观缺陷(夹杂、皱折等) 表面腐蚀 再结晶 再沉积 变质层 4、热影响层 5、加工硬化 6、边、棱质量 | | | | 低频疲劳试验 抗拉试验 表面化学试验 其它试验 |
| 应用 | 试验研究 参考使用 | 工程实用 | | | 特殊应用 对口选择 |

即使如此，也不可能保证应力分布的绝对均匀。因为变质层的存在，加工误差的不可避免、热加工过程某些因素的难以精确控制、检测手段的局限都会使产品或构件的应力偏离设计时的假设。于是我们还要去研究这个“偏离”，评估其存在对疲劳失效的影响。

这些研究和实验大都是在探索一个未知的领域，需要大量的数据积累，大量的人力和物力来支持，甚至需要很长的时期，需要接受不成功乃至失败的考验。于是就有了经济可承受性问题，需要综合评价技术的先进性和经济性。显然，经济可承受性是一个与时俱进的概念。根据技术进步水平、技术成熟程度、社会经济发展水平、生产力水平等，在不同阶段会有不同的评价结果。

在先进性与经济性之间寻求一种最佳的结合是一个更为广阔的空间。确定合理的目标、不断降低高技术的成本、研究和设计一个可持续发展的长期规划、对计划的实施执行严格管理等将大大提高抗疲劳制造的经济可承受性，推动抗疲劳制造技术的发展，推动社会经济的发展。

二、无应力集中设计与制造

无应力集中只是一种期望的目标、一种理想的假设状态。严格地说应称之为低应力集中设计与制造。

1、滚动轴承的应力与变形

(1) 滚动轴承的设计载荷一般都不大,通常用额定动(静)载荷容量 $C(C_0)$ 的比例来描述。如寿命计算时,承载 $0.1C$ 以下为轻载;承载 $(0.1\sim 0.2)C$ 为中载;承载 $0.2C$ 以上便是重载。低载荷作用于高速运转的轴承上产生重复交变应力是轴承受力的主要特点之一。

(2) 滚动轴承的接触应力值非常高,这很容易从 $\sigma = Q/A$ 的公式中理解:尽管 Q 不大,但 A 很小。在滚动轴承中,作用于滚动体与滚道之间的载荷仅能在两者之间形成很小的接触面积。一般应用中, $\sigma \leq 1380\text{MPa}$;但在特殊情况下会有 $\sigma \geq 3449\text{MPa}$,如耐久试验、或某些特定场合。但滚动轴承的接触应力只影响接触处的局部范围,并随滚动表面下深度迅速衰减。这是轴承受力的又一特点。

(3) 滚动轴承应用中的应力集中现象十分普遍,尤其是滚子轴承。这主要是因为制造轴承的材料特性及轴承产品结构特征所致。如滚子轴承高速运转时产生的惯性力,导致滚子与滚道接触线两端附近出现极高的应力集中。这一现象与工程中常见的滚子轴承疲劳失效多发生在滚子与滚道接触线两端完全一致,也被多年来大量的试验研究数据所证实。

(4) 滚动轴承的变形量很小,一般小于 0.025mm ,且多在弹性范围内。由于接触应力的作用区域局限,变形区域也很小。应力、变形、失效的特征告诉我们:对于轴承,其工作表面层才是我们必须关注的重点,在设计、制造、检验、应用滚动轴承时,承受应力、变形、摩擦、密封等功能作用的部位都是不可忽视的结构要素。

2、无应力集中设计思想与原则

工程实践中要做到完全没有应力集中是不可能的,但实现应力的大致均布,将应力集中控制在工程许可范围内是完全能做到的。

(1) 设计时,选用应力集中敏感系数低的材料;避免易导致应力集中的结

构和表面形状；尽可能掌握产品失效分析的数据；对产品应用环境、工况条件有充分的量化分析参数；针对设计目标，关注细节，关注薄弱点，关注表面层的技术要求；模拟、仿真分析及验证。

制造过程要具备确保设计要求处于最佳状态的能力；所有过程都处于受控状态，包括加工（冷、热、坯、精）、检测（静态、动态）、试验（常规、模拟、台架）、装配、清洗、包装、物流、用户服务、使用过程、失效回收等；质量保证符合表面完整性指标体系要求。

（2）从现有条件起步，评审每一步的差距，改进和提高设计的精准水平，改进和提高制造工艺能力，改进和提高产品的抗疲劳性能，逐步实现滚动轴承的抗疲劳制造。

3、减少应力集中的措施

（1）材料、热处理与表面处理

轴承钢属特种钢，常用钢种总共不过十多个钢号，远不能满足工业应用的需求。抗疲劳制造要求钢材具有更低的应力集中敏感系数，对材料经热处理后的金相组织（如残余奥氏体等）、结构表层与芯部的要求、表面完整性指标的量化保障，在很大程度上都依赖于材料、热处理与表面处理，而这些内容又都影响应力集中的敏感程度。

（2）精细设计

现行的轴承设计指导文件虽然已经考虑到应力集中因素，但困于工艺、检验、管理、效率、成本等原因，很多细节要求尚处在概念阶段，如凸度的匹配、硬度的匹配、工作面和引导面（凸缘、挡边）的弹流压润滑设计等，某些特殊表面的技术要求长期达不到标准规定，只能让步接收，如引导挡边的凸度和表面粗糙度。

（3）表面层的检测与实验

由于抗疲劳制造更关注“表面层”，因而需要评判“表面层”的状况，如冶金质量、加工变质层、理化力学特性等。某些检验可能要细化深入到“晶粒”、“晶界”的层面。这些检验有的在轴承行业还是空白，有些只在院、校、所内。如何使“表面层的检测与实验”尽快推广应用到制造企业的现场，恐怕还有很长的路要走。

（4）加工过程内应力的释放

轴承制造工艺复杂，过程漫长，某些过程会导致轴承内部积聚大量的变形应力，如毛坯成形、热处理、车、磨削加工，尤其是热加工和粗加工过程。内应力的存在会加剧轴承后续加工、用户使用时的应力集中，因此在加工轴承零件时应尽可能避免一次变形量过大的工艺方法（采用多次变形），某些加工过程结束后应增加去应力工序，如时效、振动、回火等，使内应力及时释放。

（5）必须特别关注轴承结构和过程对应力集中敏感性的影响。

结构尺寸突变处因热处理过程不能均匀冷却会产生较大热应力集聚，如圆锥、圆柱滚子轴承内外圈凸缘（挡边）部位；沟槽结构的周边及拐角处，如密封槽、越程槽等；车削加工表面的尖锐刀纹、粗大刀纹；磨削表面二次淬火或可能存在的烧伤现象等都会增加轴承应力集中的敏感性。

三、表面完整性工艺保障

零件加工的表面完整性是由加工过程中作用在零件表面上的力载荷、热载荷、化学载荷等三种类型载荷共同决定的，受到零件材质、加工方式、切削规范、现场参数、操作者技能素养等众多因素的制约。一般说来，表面完整性的工艺保障需要具体问题具体分析。表1中列出的三组指标可依据不同加工过程增补和取舍。通常的步骤是

- 1.详细记录加工全过程的所有因素；
- 2.分析其对表面完整性的影响程度，确定主要因素与次要因素；

- 3.研究主要因素影响表面完整性的规律，从而确定并优化加工工艺参数；
- 4.经过多次、反复试验，产生出大量支撑数据，形成该加工过程的表面完整性评价指标体系；
- 5.应用评价指标体系指导、控制该加工过程。

四、检测、分析及实验验证

轴承的工作表面主要有套圈的滚（沟）道、引导挡边表面，滚动体的旋转表面、滚子的基准面。工作表面是滚动轴承工作时承受负荷、传递运动的功能表面，理应受到特别关注。尤其是轴承滚（沟）道的加工质量直接影响轴承使用时的服役性能和工作寿命。轴承滚（沟）道的接触疲劳破坏是其主要的破坏形式，其机理是微裂纹发生和扩展的结果。导致裂纹产生的主要原因是接触处表面完整性、表层材料缺陷及应力分布状态。针对轴承服役条件对轴承滚（沟）道基体组织和表面状态的要求，分析其服役过程中材料组织状态损伤演化、裂纹萌生扩展、疲劳断裂机制，阐明轴承滚（沟）道基体材料组织和表面状态与疲劳性能间的联系，建立高速重载条件下高疲劳性能的轴承滚（沟）道材料组织状态设计方法和准则；揭示轴承套圈制造过程中材料晶粒、碳化物组织状态与金属流线的遗传演化机理；建立滚道基体组织和表面状态的可控性与工艺规划；深入研究磨削加工中磨粒与滚道表面的微观作用机理及磨削热、力、金属相变耦合作用；探讨热、力、相变的耦合作用对滚道表层基体组织、金属流线和残余应力分布的影响规律；利用可控的冷却技术和磨削工艺参数，实现磨削比能、磨削力、磨削温度场和温度变化历程的可控磨削加工，抑制二次淬硬层和高温回火层的产生，实现滚（沟）道表层残余应力分布的可控磨削；研究磨粒冲击强化和工艺可控机理，获得理想的磨削强化表面；建立基于整个制造过程的轴承滚道基体材料微观组织和表面状态控制方法，为高速重载精密轴承控形控性制造技术提供基础理论与技术支撑。

解决这一系列问题的基础就是建设检测、实验与分析能力，包括仪器、装

置、实验室等硬件设施和检测实验规程、分析处理实验数据的软件、程序。主要的具体工作任务是：

- 1.轴承组件工作表面层的理化、力学、冶金检测与分析；
- 2.表面状态特征参数与加工工艺参数的对应分析；
- 3.磨削机理及磨削过程与工件表面完整性的关系；
- 4.磨削工艺参数对变质层和残余压应力形成的影响；
- 5.表面强化层的检验。

五、轴承制造技术要实现从“控制形状”向“控制性能”的深化和发展

很多高性能滚动轴承要求在高速重载条件下长期保持高精度和工作状态稳定性,这种高精度和工作状态稳定性取决于轴承组件几何精度及其稳定性和基体材料组织性能及其稳定性。所以,通过制造获得高精度、高性能和高稳定性的轴承组件,是轴承控形控性制造的目标。

轴承组件的基本制造工序有材料制备、塑性成形、热处理和磨削等,具体制造工艺流程由这些基本工序交叉复合而成,典型工艺流程为:材料制备—加热—锻造制坯—球化处理—车制或精密辗压成形—淬火回火—磨削—研磨。轴承组件在每步工序中都受到随时变化的热、力或热力耦合作用,这些非线性的温度场、应力场和复杂的温度变化历程与应力变化历程,使得轴承组件的宏观几何形态、微观金相组织状态、金属流线走向与残余应力分布等产生显著变化,进而导致轴承的几何精度、精度稳定性和抗疲劳性能等随之发生显著改变。因而,轴承组件几何精度、基体材料组织性能及其稳定性在各工序之间发生复杂的遗传和演化作用,这种遗传演化结果与原材料组织性能、制造工艺和过程的条件等因素密切相关,并且直接决定了轴承的服役性能和使用寿命。针对轴承组件的这些复合交叉工序全过程,开展轴承组件材料成份和组织设计,揭示在成形、车制、热处理、

磨削和精研等各工序中轴承组件的宏观几何精度变化机制、表面物理机械性能变化规律与微观材料组织状态遗传演化机理,建立基于整个制造过程的轴承组件基体材料微观组织和表面状态控制方法,这是高性能滚动轴承控形控性制造亟待解决的关键技术问题。

六、结束语

我国轴承制造经过了七十多年历程,制造技术基本局限在满足产品“结构形状”需要和“能用”的水平。要建设轴承强国,必须突破“形状”和“能用”的层次,掌握“控性”的关键技术—认识“表面完整性”对长寿命、高可靠度的重大、积极影响,从而开展全面深入研究和实践。

1.原材料的纯净度、杂质弥散度、微晶结构,成型与热处理技术必须适应轴承使用工况条件,重点产品应该是个性化的设计;

2.机械加工要尽可能实现被加工表面的完整性指标,更不应破坏被加工表面上已经形成的、适应轴承使用工况条件的状态,即确保“表面完整性”要求;

3.研究针对特殊应用的、个性化的“表面层”改性处理应用技术;

4.所有性能与改进均需通过检测、实验和试验确认,因而“检测、实验和试验技术”也是制造技术的重要构成,不应忽视或轻视;

5.轴承制造全过程的精细化思考、设计与管理技术。

这些技术的突破,依赖于企业、甚至全行业的共同努力和奋斗,依赖于全行业的技术改造和产业升级。行业龙头企业、特色企业应先行垂范、实现突破,为行业发展、为早日建成轴承强国作出新的贡献。

主要参考文献

- 1.《先进轴承与抗疲劳制造》赵振业院士报告稿
- 2.《高性能滚动轴承基础研究—973项目申报书》项目组

3. 《电火花加工表面完整性研究在大飞机发动机制造中的重要性》
韩 野等，航空制造技术 2012 年第 13 期
4. 《滚动轴承的抗疲劳制造》卢 刚，2009 中国轴承论坛论文集
5. 《SKF 工程研究中心访问记》滚动轴承标准化 2011 年第 3 期

作者简介：卢刚，高级工程师，中国轴承工业协会副秘书长，全国滚动轴承标准化技术委员会副主任委员，国家“973”项目制造与工程学科领域评估专家