

航空轴承制造技术与质量控制研究

马盈月

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 通过全面探讨航空轴承的制造技术与质量控制,概述了航空轴承的分类、性能要求及其制造与质量控制的重要性。详细分析了航空轴承的材料选择、精密加工、热处理与表面改性、装配与检测等关键技术。在质量控制方面,阐述了质量控制体系的建立、关键质量控制参数的确定以及质量检测与评价方法。另外,还讨论了基于数值模拟和试验设计的工艺优化方法,以及六西格玛和精益生产等质量改进策略。通过这些技术和策略,可有效提升航空轴承的制造质量和服役性能,为航空制造业的发展提供有力支撑。

关键词: 航空轴承; 制造技术; 质量控制; 精密加工; 材料技术

1 航空轴承概述

1.1 航空轴承的分类

航空轴承种类繁多,可依据不同标准进行分类。按结构类型划分,主要有滚动轴承和滑动轴承。滚动轴承凭借摩擦系数小、启动灵活、效率高等优势,在航空发动机高速旋转部件、飞机传动系统等部位广泛应用;滑动轴承则因其承载能力大、运行平稳、噪声低,常用于对稳定性要求较高的起落架等部位。从承载类型角度,可分为径向轴承和推力轴承。径向轴承主要承受垂直于轴承轴线的径向载荷,如支撑航空发动机转子的径向轴承,确保转子在高速旋转时的径向稳定性;推力轴承用于承受轴向载荷,像飞机发动机中承受燃气推力的推力轴承,保障发动机轴向位置的准确。不同部位的轴承因工作环境和受力特点不同,在设计和性能要求上也存在显著差异。例如,发动机轴承需在高温、高转速、高载荷的极端条件下工作,对耐高温、耐磨、抗疲劳性能要求极高;起落架轴承则要承受飞机起降时的巨大冲击和振动,强调高可靠性和良好的耐磨损性能。

1.2 航空轴承的性能要求

航空轴承的服役环境极为严苛,需在高速旋转、高温、高载荷、复杂振动等条件下稳定工作,这决定了其必须具备卓越的性能。在材料性能方面,要求具备高强度、高硬度,以承受巨大的载荷和摩擦力;良好的耐磨性,保证在长时间运转过程中尺寸稳定;优异的耐腐蚀性,抵御燃油、润滑油、潮湿空气等介质的侵蚀;出色的热稳定性,确保在高温环境下性能不发生显著下降。例如,航空发动机轴承常采用高温合金材料,其含有镍、铬、钼等合金元素,通过合理的成分设计和热处理工艺,可获得高强度、高硬度和良好的高温抗氧化性能;制造精度对航空轴承至关重要,尺寸精度要求严格

控制内外径、厚度等尺寸公差,确保与其他部件的精确配合;形状精度需保证轴承表面的圆度、圆柱度等,减少运行过程中的振动和噪声;表面粗糙度要达到极低水平,降低摩擦阻力,提高轴承效率和使用寿命。以精密磨削加工为例,通过优化磨削工艺参数,可使航空轴承表面粗糙度达到 $Ra0.1\mu m$ 以下,显著提升轴承的性能^[1]。另外,航空轴承还需具备长使用寿命,以减少航空装备的维护频次和成本;良好的动态性能,在高速旋转和复杂载荷变化下保持稳定运行;高可靠性,确保在各种极端条件下不发生失效,保障航空安全。

1.3 航空轴承制造与质量控制的重要性

从高性能材料的制备,到精密加工工艺的应用,再到表面处理技术的创新,每一个制造环节都直接影响着轴承的性能和质量。例如,采用粉末冶金技术制备轴承材料,可获得均匀的组织结构和优异的综合性能;超精密加工技术能够实现轴承高精度的尺寸和表面质量要求;完善的质量控制体系贯穿于原材料采购、加工制造、装配检测等全过程,通过对关键质量控制参数的严格监控和质量检测与评价,及时发现和解决质量问题,避免不合格产品流入市场。例如,在原材料质量控制环节,对每一批次的材料进行严格的化学成分分析和力学性能检测,确保材料符合设计要求;在加工过程中,运用在线检测技术实时监控加工精度,保证产品质量的一致性。

2 航空轴承制造技术

2.1 材料选择与技术

航空轴承常用材料包括高温合金、陶瓷材料、复合材料等。高温合金凭借良好的高温强度、抗氧化性和热稳定性,成为航空发动机轴承的首选材料。例如,镍基高温合金通过添加铝、钛等元素形成 γ' 相沉淀强化,显

著提高了合金的高温强度和抗疲劳性能。陶瓷材料具有硬度高、耐磨性好、耐高温、化学稳定性强等优点,在航空轴承领域的应用日益广泛。常见的陶瓷材料有氮化硅(Si_3N_4)、碳化硅(SiC)等。氮化硅陶瓷轴承具有低摩擦系数、高耐磨性和良好的抗热震性能,适用于高速、高温、腐蚀等恶劣环境;复合材料结合了多种材料的优点,可根据轴承的性能需求进行设计。如纤维增强金属基复合材料,通过在金属基体中添加高强度纤维,提高了材料的强度、刚度和耐磨性;材料制备技术不断创新,粉末冶金技术通过将金属或合金粉末经压制、烧结等工艺制成轴承零件,可获得均匀的组织结构和精确的尺寸;喷射成型技术能够快速制备高性能的近净形轴承零件,减少材料浪费和加工成本^[2]。

2.2 精密加工技术

车削加工是航空轴承零件加工的基础工序,刀具材料的选择和切削参数的优化对加工精度和表面质量影响显著。采用高性能的硬质合金刀具或陶瓷刀具,并合理控制切削速度、进给量和切削深度,可有效提高车削加工精度和效率,降低表面粗糙度;磨削加工在航空轴承制造中起着重要作用,用于加工轴承的内外圈、滚动体等零件的表面。外圆磨削通过选择合适的砂轮粒度、硬度和磨削工艺参数,可精确控制轴承外径尺寸和表面质量;内圆磨削能够保证轴承内孔的尺寸精度和圆柱度;平面磨削用于加工轴承的端面,确保其平面度和表面粗糙度符合要求;超精密加工技术如研磨、抛光、珩磨等,可进一步提高航空轴承的表面质量和尺寸精度。研磨通过研磨剂和研磨工具的相互作用,去除零件表面的微小凸起,降低表面粗糙度;抛光能够使轴承表面达到镜面效果,减少摩擦阻力;珩磨可修正轴承内孔的形状误差,提高其圆度和圆柱度。

2.3 热处理与表面改性技术

热处理工艺对航空轴承材料的组织和性能有着决定性影响,淬火和回火处理可提高材料的强度和硬度,改善其韧性和疲劳性能。例如,对轴承钢进行淬火处理,使其获得马氏体组织,然后通过回火调整硬度和韧性,满足轴承的使用要求。渗碳、氮化等化学热处理技术可在轴承表面形成高硬度、高耐磨性的渗层,提高轴承的表面性能。渗碳处理能够增加轴承表面的碳浓度,经淬火和回火后,表面硬度和耐磨性显著提高,而心部仍保持良好的韧性;氮化处理在轴承表面形成硬度极高的氮化物层,具有优异的耐磨性、耐腐蚀性和抗咬合性能;表面改性技术如喷丸强化、激光冲击强化、离子注入等,可在不改变材料基体性能的前提下,显著提高轴承

表面的硬度、耐磨性和疲劳性能。喷丸强化通过高速弹丸撞击轴承表面,使表面产生塑性变形和残余压应力,抑制裂纹萌生和扩展;激光冲击强化利用高能激光产生的冲击波在轴承表面形成强化层,提高表面强度和疲劳寿命;离子注入将特定元素的离子注入轴承表面,改变表面化学成分和组织结构,提升表面性能。

2.4 装配与检测技术

航空轴承的装配过程需要严格控制,确保各零件之间的配合精度和装配质量。在装配前,对零件进行清洗和检查,去除表面的油污、杂质和缺陷;装配时,采用合适的装配方法和工具,保证零件的安装位置准确,避免产生装配应力。检测技术是保证航空轴承质量的重要手段。尺寸精度检测采用三坐标测量仪、圆度仪等设备,对轴承的内外径、厚度、圆度、圆柱度等尺寸进行精确测量;表面质量检测利用光学显微镜、扫描电子显微镜等观察轴承表面的形貌和缺陷;性能检测通过疲劳寿命测试、摩擦磨损测试、振动测试等,评估轴承的实际服役性能。

3 航空轴承质量控制

3.1 质量控制体系

航空轴承质量控制体系需遵循国际和国内相关标准,如ISO标准、航空行业协会标准以及我国的国家标准和航空企业标准。这些标准对航空轴承的材料、制造工艺、性能指标、检测方法等方面做出了明确规定。构建质量管理体系是确保航空轴承质量稳定的关键。明确质量方针与目标,制定质量策划方案,加强质量控制过程管理,建立质量保证体系,并持续进行质量改进。在质量策划中,对轴承制造的各个环节进行规划,确定关键质量控制点和控制方法;质量控制过程中,严格监控原材料质量、加工过程质量和成品质量;质量保证体系确保产品符合质量要求,满足客户需求;通过质量改进不断优化制造工艺和质量控制方法,提高产品质量。

3.2 关键质量控制参数

在航空轴承制造过程中,存在诸多关键质量控制参数。原材料质量控制参数包括化学成分、力学性能、物理性能等指标,确保原材料符合设计要求;加工过程质量控制参数涉及切削速度、进给量、磨削深度、热处理温度和时间等,这些参数直接影响零件的加工精度和表面质量;装配过程质量控制参数如配合间隙、装配力等,关系到轴承的运行性能和可靠性。例如,在热处理过程中,加热温度和保温时间对轴承材料的组织转变和性能影响极大。温度过高或保温时间过长,可能导致晶粒粗大,降低材料的强度和韧性;温度过低或保温时间

不足,则无法充分实现组织转变,达不到预期的性能要求^[3]。因此,必须严格控制这些关键质量控制参数,确保航空轴承的质量稳定。

3.3 质量检测与评价

质量检测是发现航空轴承质量问题的重要手段,通过多种检测技术对轴承进行全面检测。无损检测技术如超声检测、涡流检测等,可在不破坏轴承的前提下检测内部缺陷;理化检测包括化学成分分析、力学性能测试等,用于评估材料质量;性能检测则模拟轴承的实际工作条件,测试其疲劳寿命、摩擦磨损性能、振动特性等;质量评价依据相关标准和规范,对检测结果进行综合分析和判断。建立科学合理的质量评价指标体系,涵盖尺寸精度、表面质量、性能指标等方面,对轴承产品进行质量分级,确定产品是否合格,为产品改进和质量提升提供依据。

4 航空轴承制造工艺优化与质量改进

4.1 工艺优化方法

4.1.1 基于数值模拟的工艺优化

有限元分析(FEA)、计算流体动力学(CFD)等数值模拟技术在航空轴承制造工艺优化中发挥着重要作用。在锻造工艺优化中,通过有限元模拟可分析金属的流动规律、应力应变分布,预测锻造过程中可能出现的缺陷,如折叠、裂纹等,并优化锻造工艺参数,如模具形状、锻造温度、变形速率等,提高锻造质量和效率。在热处理工艺优化方面,利用有限元模拟温度场、组织场和应力场的变化,研究热处理过程中材料的组织转变和残余应力分布,为制定合理的热处理工艺提供依据。

4.1.2 基于试验设计的工艺优化

正交试验设计、响应面法等试验设计方法可系统地研究各因素对航空轴承性能的影响程度,确定最优工艺参数组合。在磨削工艺参数优化中,采用正交试验设计,选择磨削速度、进给量、磨削深度等因素作为试验因子,以表面粗糙度、尺寸精度等作为试验指标,通过较少次数的试验,分析各因素对指标的影响主次顺序,确定最优的磨削工艺参数。响应面法通过构建响应变量与多个因素之间的数学模型,直观地展示因素与响应变量之间的关系,进一步优化工艺参数。例如,在表面处

理工艺参数优化中,利用响应面法研究处理时间、温度、压力等因素对轴承表面硬度和耐磨性的影响,找到最佳的工艺参数组合,提高轴承的表面性能。

4.2 质量改进策略

六西格玛管理方法以数据为驱动,通过定义(Define)、测量(Measure)、分析(Analyze)、改进(Improve)、控制(Control)(DMAIC)流程,识别和消除质量缺陷,减少过程变异。在航空轴承制造企业中,运用六西格玛方法对加工过程中的关键质量指标进行分析,找出影响质量的关键因素,并采取改进措施,如优化工艺参数、改进设备性能、加强员工培训等,使产品质量达到六西格玛水平,即每百万个产品中缺陷数不超过3.4个。精益生产通过消除浪费、优化流程、提高效率,实现质量改进和成本降低^[4]。在航空轴承制造过程中,采用精益生产理念,优化生产布局,减少物料搬运和等待时间;推行标准化作业,提高生产过程的稳定性;实施看板管理,实现生产过程的可视化和精细化控制。

结束语

综上所述,航空轴承的制造技术与质量控制是一个复杂而系统的工程。通过不断探索和实践,我国航空轴承制造业在材料技术、精密加工、热处理与表面改性等方面取得了显著进展。未来,航空轴承制造业应进一步加强产学研合作,推动制造工艺和质量控制技术的不断升级,为我国航空装备的发展贡献力量。

参考文献

- [1]刘烨欣.航空机体轴承技术特点浅析[J].现代制造技术与装备,2020(3):124,126.DOI:10.3969/j.issn.1673-5587.2020.03.056.
- [2]刘乐平,李慧敏,陈金华,等.旋转隔离装置滚动轴承承载特性仿真分析[J].轴承.2022,(2).DOI:10.19533/j.issn1000-3762.2022.02.001.
- [3]徐瑞,张昊,李建伟.某直升机旋翼系统阻尼器杆端关节轴承轴向间隙超标问题分析[J].轴承.2022,(9).DOI:10.19533/j.issn1000-3762.2022.09.016.
- [4]杨海强,任超,赵喆,等.轴承制造技术综述[J].热加工工艺,2024,53(21):27-30.DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20223350.