

探究航空轴承钢的发展及热处理技术

张同一

航天精工股份有限公司, 天津, 300000;

摘要: 航空轴承钢是航空发动机及其他关键零部件的核心材料, 其性能直接关系到飞行器的安全性和使用性能。本课题对航空轴承钢由早期传统钢材逐渐演化到现代高性能航空用新合金材料进行系统梳理, 分析各阶段技术突破和应用场景拓展。本项目针对航空轴承钢的强韧化和抗疲劳性差这一关键科学问题, 探索传统淬火、等温淬火、电磁辅助等热处理工艺对提高航空轴承钢强韧耐磨抗疲劳性能的作用机理、工艺要点和实际应用效果, 为航空轴承钢的研发、生产和性能优化提供技术参考。

关键词: 航空轴承钢; 发展历程; 热处理技术; 性能优化

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.020

引言

航空航天领域对材料性能的苛刻要求推动了材料学的不断创新, 航空轴承钢作为航空发动机轴承、起落架等关键零部件的制造材料, 在高温、高速度、高载荷和复杂应力环境中服役, 对其综合性能提出了更高的要求。它不仅要具有高强度和硬度, 能够承受大的载荷, 而且要有很好的韧性, 防止脆性断裂, 还要有良好的耐磨、抗疲劳和高温稳定性, 保证飞机在整个生命周期内的安全可靠运行。回顾航空轴承钢的发展历程, 从最初以普通轴承钢为基础, 到现在针对航空特殊工作条件开发特种合金, 每次突破都伴随着热处理工艺的协同发展。热处理是实现钢材组织和性能调控的重要手段, 通过对加热、保温和冷却等过程的精确调控, 可获得理想的力学性能。深入开展航空轴承钢及其热处理工艺研究, 对于提高我国航空材料的自主研发能力, 打破国外技术垄断, 促进我国航空工业的高质量发展具有重要意义。

1 航空轴承钢的发展历程

1.1 早期探索与基础建立

20世纪初期, 随着航空工业的兴起, 航空轴承钢的研究才刚刚起步, 主要是借鉴当时已有的通用轴承钢。到了那个时候, 高碳铬轴承钢以其高硬度和耐磨性能成为早期航空轴承的首选材料。高碳铬轴承钢在1901年首先出现在欧洲, 并于1913年被美国规定为标准钢。这种钢经过适当的热处理, 可以满足早期航空发动机低速载荷工况下的使用要求。但由于其洁净度和碳化物的均匀性较差, 在航空发动机服役过程中极易引起轴承磨损和疲劳剥落, 成为制约飞机性能提高的瓶颈。这段时间的研究重点集中在提高钢水质量、采用真空除气工艺、

减少钢液中的气体含量和减少内部缺陷等方面。炉外精炼可进一步除去杂质, 提高钢的纯净度, 为后续性能的优化打下基础。

1.2 适应高性能需求的材料改进

随着航空技术的快速发展, 航空发动机在推力重力比和可靠性等方面的要求越来越高, 传统的高碳铬轴承钢的性能逐渐显现出来。从20世纪中期开始, 世界各国都投入了大量的精力来研制新的航空轴承钢。为满足高温服役要求, 研制了以钴、钼、钒等合金元素为代表的高温轴承钢。合金元素的添加显著提高了钢的高温强度、硬度和蠕变抗力, 实现了300~500°C的稳定服役。同时, 针对航空发动机轻量化需求, 开展低密度、高强、耐腐蚀的低密度齿轮轴承钢研究。本项目将在航空轴承的成分设计和微观组织调控上实现重要突破, 为现代高性能航空轴承制造提供材料支持。

1.3 现代航空轴承钢的多元化发展

21世纪的航空工业对性能要求越来越高, 安全性和可靠性要求越来越高, 这对航空轴承钢的多样化发展起着重要的推动作用。一方面, 针对航空发动机高推力比(15~20)的需求, 国外对第二代轴承钢的研究也在不断深入。美国研制的500°C耐高耐蚀轴承钢CSS-42L和350°C抗高氮不锈钢X30(Cronidur 30)为代表。通过本项目的研究, 实现高温强度、耐腐蚀和抗疲劳性能的综合提高, 为我国新一代航空发动机的研制提供关键材料保障。另一方面, 随着航空航天领域对极端工作环境的适应需求不断增加, 无磁性材料等特种钢应运而生。河钢材料研究所研制的无磁粉轴承合金, 填补了我国在航空航天用特种材料领域的空白, 以满足复杂电磁

环境下航空发动机稳定运行的需要。

2 航空轴承钢的热处理技术

2.1 常规淬火与回火处理

2.1.1 工艺原理

传统的淬火方法是将航空轴承钢加热到奥氏体化温度区间，经过一段时间的奥氏体化，再经过快速冷却，促使奥氏体转变为马氏体，从而大幅度提高钢材的硬度和强度。回火是将淬火钢重新加热至奥氏体温度以下，再进行保温冷却，以消除淬火应力，调整马氏体组织，在保持一定强度和硬度的前提下，提高钢的韧性。如常用的航空轴承钢，通常采用油淬火冷却方式获得马氏体组织，淬火升温温度为820~860℃；回火温度一般为150~250℃，回火次数视需要而定。

2.1.2 对性能的影响

淬火可以显著提高航空轴承钢的硬度，使其具有较高的承载能力，但是过快冷却时容易产生过大的内应力，从而增加钢材的脆性。回火通过消除应力使淬火马氏体转变成回火马氏体，在降低硬度的同时显著提高韧性，使材料的综合性能达到最优。航空轴承钢经过合理的淬火和回火处理后，其硬度达到HRC60~65，既能满足轴承的高耐磨要求，又能保证工作过程中不发生脆性断裂。然而，传统的淬火-回火技术在提高钢材强韧化方面存在一定的局限性，如多次回火耗时耗力，残余奥氏体含量及分布难以精确控制，影响材料性能稳定性。

2.1.3 实际应用案例

传统淬火回火工艺在早期和一些对性能要求不高的航空轴承制造中得到了广泛的应用。某型小型航空发动机轴承经常规工艺处理后，在正常工作条件下可满足一定飞行时数，并能保证发动机正常运行。但是，随着发动机性能的提高，这种方法处理过的轴承在高温高载荷下，磨损加剧，疲劳寿命缩短，性能上的短板也暴露了出来。

2.2 等温淬火技术

2.2.1 工艺原理

等温淬火是航空轴承钢经奥氏体化后快速冷却到贝氏体转变温度区间（通常200~400℃），并在等温条件下保持奥氏体向下贝氏体转变。不同于传统淬火方式，等温淬火可避免因马氏体转变而引起的内应力集中，从而获得强度高、韧性好的下贝氏体。例如，航空轴承钢的等温淬火过程，首先将钢材加热到840℃奥氏体化，然后保温30分钟，再迅速投入300℃的等温盐浴，在此过程中，将奥氏体转变为贝氏体，再空冷到室温。

2.2.2 对性能的影响

航空轴承钢经等温淬火后，在保持韧性和塑性的前提下，获得了高强度和硬度。等温调质钢的冲击韧性比普通调质提高20%~30%，并明显延长了其疲劳寿命。这主要是由于碳化物在下贝氏体中均匀分布，位错密度适中，从而有效地抑制了裂纹的萌生和扩展。另外，等温淬火时的内应力较小，减小了变形和开裂的可能性，提高了制品的尺寸精度和质量稳定性。但是，等温淬火对设备的要求很高，需要对等温温度和时间进行精确的控制，而且生产效率也比较低，这就限制了它的大规模应用。

2.2.3 实际应用案例

等温淬火是航空发动机主轴轴承制造中广泛采用的一种工艺，它对疲劳寿命和可靠性有很高的要求。某航空发动机制造企业对新型航空轴承进行了等温淬火处理，经模拟飞行试验，其疲劳寿命可提高50%以上，有效降低了发动机失效风险，提高了飞行安全和可靠性。

2.3 电磁辅助热处理技术

2.3.1 工艺原理

电磁辅助热处理是在传统热处理工艺中引入交变电磁场，利用电磁场作用于钢铁材料内部结构，实现对材料微观结构的调控。以航空轴承钢为例，通过对钢材进行热处理，使其达到预先设定的奥氏体化温度、保温、奥氏体化，再进行盐浴等温淬火处理；淬火结束后放入电磁能发生器中，对其施加交变电磁场，最后再进行一次回火处理。在交流电磁场作用下，马氏体中的过饱和碳向残余奥氏体迁移，使残余奥氏体富碳，改善了材料的热稳定性和力学稳定性；同时，大块残留奥氏体在电磁场中继续形核，形成细小的片状贝氏体组织，细化钢的整体组织。

2.3.2 对性能的影响

电磁辅助热处理可显著提高航空轴承钢的残余奥氏体稳定性，并使回火后的强韧性达到较好的匹配。相较于传统的热处理方法，本方法可大大缩短热处理时间，降低能耗，使原需高温三次回火缩短为一次，大大提高了生产率。此外，电磁辅助还可以实现微观结构的精确调控，降低微观结构缺陷，提高材料性能的一致性和均匀性。然而，电磁辅助热处理工艺要求复杂，需要对电磁场参数进行精确控制，如电磁能加载模式（单电场、单磁场、电磁复合场）、加载频率、脉冲波形等。

2.3.3 实际应用案例

我国某航空材料研究所将电磁辅助热处理技术应用于航空轴承新产品的研制。将该技术应用于航空发动

机的高温、高速和高载荷条件下，其疲劳寿命比常规方法提高80%以上，具有广阔的应用前景，有望在未来航空发动机轴承的规模化生产中推广应用。

2.4 其他热处理技术

感应加热表面淬火技术通过对轴承钢表面进行快速奥氏体化，再经过急冷处理，获得表面硬度高、心部韧性好的组织，从而提高表面耐磨性和抗疲劳性能。渗碳和氮化是在钢表面加入碳、氮等元素，在保持心部韧性的前提下，使钢的表面硬度、耐磨性和抗咬合能力得到显著提高。如航空发动机的齿轮轴承，经渗碳处理后，其表面硬度达到HRC58~63。

3 航空轴承钢热处理技术的挑战与展望

3.1 当前面临的技术挑战

3.1.1 复杂工况下性能调控难题

现代航空发动机运行工况日趋复杂，如高温、高负荷、启停频繁等，对其性能提出了更高的要求。现有热处理工艺难以同时兼顾多工况条件下的综合性能，难以兼顾高温强度与低温韧性、抗疲劳与耐蚀性能的协同优化。如提高钢的强度，就会降低其低温韧性；提高耐蚀性能可能会对疲劳寿命产生影响，如何通过热处理实现多项性能的协同提高是亟需解决的关键科学问题。

3.1.2 工艺稳定性与一致性保障

航空轴承钢的热处理过程对设备的精度和运行控制有着非常高的要求，即使是最小的工艺参数的变化也会导致产品的性能发生变化。在实际生产过程中，由于设备老化和工人技术水平参差不齐，很难保证过程的稳定性和一致性。如淬火冷却速率的波动会引起马氏体的形貌和含量的改变，从而影响到钢的硬度和韧性；回火温度的变化会导致残余奥氏体的分解程度发生变化，影响产品的性能一致性，严重时会对航空轴承的质量和飞行安全产生不利影响。

3.1.3 环保与节能压力

传统热处理工艺（如多次回火、长期等温淬火）不仅能耗高，而且有些过程涉及到有害化学品（如盐浴淬火时产生的盐类），污染环境。在全球倡导绿色制造的大背景下，航空轴承钢的热处理工艺必须兼顾环保和节能两个方面的要求，开发低能耗、无污染的新型热处理技术是必然趋势。

3.2 未来发展趋势展望

为了突破目前的技术瓶颈，本项目拟进一步加强材料、物理、计算机等多学科的交叉融合。在此基础上，结合材料基因工程技术，结合大数据分析和计算模拟，快速筛选和设计新的合金成分和热处理工艺，缩短研发周期。在此基础上，采用电磁场、超声场等物理场与热处理的协同作用，对材料的微结构演化机理进行深入研究，发展更加高效精确的热处理调控技术。将计算机视觉和人工智能技术引入到热处理过程的实时监控和智能控制中，提高过程稳定性和产品质量的一致性。

4 结束语

综上所述，航空轴承钢由早期简单参照普通轴承钢发展到现在，经过一个多世纪的发展，已经形成了覆盖各种高性能特种钢的重要材料体系，材料每次性能的飞跃都离不开热处理工艺的革新。常规淬火、等温淬火、电磁辅助等热处理和各种表面处理工艺对提高航空轴承钢的强韧性、耐磨和疲劳性能具有重要意义。然而，目前航空轴承钢的热处理工艺仍面临着复杂工况下性能调控、过程稳定和环保节能的挑战。未来，随着多学科的交叉融合，热处理技术的不断创新，高性能化和绿色化的制造已是大势所趋，标准化和国际化的竞争格局正在逐渐形成。开展航空轴承钢及其热处理技术的深入研究，对于促进我国航空工业的自主创新和高质量发展，具有不可取代的重要作用，有助于提高我国在航空材料领域的国际领先地位，为建设航空强国提供重要的材料和技术支持。

参考文献

- [1] 杜宁宇. M50 轴承钢碳化物调控与疲劳性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2022.
- [2] 张晓静. 第二代航空轴承材料 M50 钢的研究现状与发展[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(09): 120~122.
- [3] 刘洪秀, 于兴福, 魏英华, 等. 航空轴承钢的发展及热处理技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(21): 94~101.
- [4] 周景欢, 王伟伟. 论航空轴承技术现状与发展[J]. 山东工业技术, 2019, (03): 62.
- [5] 马芳, 刘璐. 航空轴承技术现状与发展[J]. 航空发动机, 2018, 44(01): 85~90.

作者简介：张同一（1994.02-），男，汉族，山东东营人，本科，工程师，研究方向：轴承研发。