

# 航空发动机制造表面完整性技术在特种工艺的研究与应用

孙宇飞<sup>1</sup> 唐晓辉<sup>2</sup> 齐野<sup>3</sup>

1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 辽宁 沈阳 110000
2. 空装驻沈阳地区第二军事代表室 辽宁 沈阳 110000
3. 空装驻沈阳地区第三军事代表室 辽宁 沈阳 110000

**摘要：**文章聚焦于航空发动机制造中表面完整性技术在特种工艺的研究与应用。通过深入分析喷丸处理、单晶高温合金铣削等特种工艺对零部件表面硬度、微观结构及完整性的影响，揭示不同工艺参数对表面质量的优化路径。研究表明，合理应用特种工艺可显著提升航空发动机零部件的抗疲劳性、耐腐蚀性和整体性能，为航空发动机的高效、可靠运行提供坚实保障。

**关键词：**航空发动机；表面完整性技术；特种工艺；应用

## 引言

航空发动机作为航空工业的核心部件，其性能与可靠性直接关乎飞行安全与效率。表面完整性作为评估零部件质量的重要指标，对航空发动机的性能有着深远影响。随着特种工艺在航空发动机制造中的广泛应用，如何有效控制和提升零部件的表面完整性成为研究热点。本文旨在探讨特种工艺在航空发动机制造中如何影响并优化表面完整性，为提升航空发动机性能提供理论依据和实践指导。

### 1 航空发动机制造表面完整性技术概述

表面完整性技术是指一系列旨在提升零部件表面质量及性能的工艺措施和方法的总称。它涵盖了从表面粗糙度、硬度、残余应力到微观组织结构等多个方面的控制与优化，旨在通过改善表面状态来增强零部件的耐磨性、抗疲劳性、耐腐蚀性等关键性能。航空发动机作为高度复杂且精密的机械系统，其制造过程具有极高的技术难度和精度要求。其零部件需在高温、高压、高转速及复杂载荷等极端工况下长时间稳定运行，因此对材料性能、加工精度及表面完整性等方面提出了极为严苛的要求。航空发动机制造不仅需要先进的材料技术、精密的机械加工能力，还依赖于表面完整性技术来确保零部件在极端环境下的可靠性和耐久性。表面完整性技术对航空发动机的性能、可靠性及使用寿命具有至关重要的影响。通过优化零部件的表面状态，可以有效提升其抗疲劳强度、耐腐蚀性能和耐磨性能，从而延长零部件的使用寿命，表面完整性技术还能提高航空发动机的整体效率，降低能耗和排放，对推动航空工业的可持续发展具有重要意义，在航空发动机制造中，表面完整性技术已成为不可或缺的关键技术之一。

## 2 航空发动机制造中的特种工艺的种类

### 2.1 精密加工工艺

在航空发动机制造中，精密加工工艺占据着举足轻重的地位。由于航空发动机对零部件的精度要求极高，传统加工方法往往难以满足其需求<sup>[1]</sup>。精密加工工艺通过采用高精度的机床、刀具和测量设备，结合先进的数控技术和加工工艺，实现对航空发动机零部件的高精度加工。这些工艺包括但不限于超精密车削、磨削、铣削、电火花加工（EDM）、激光加工等。精密加工工艺的应用，能够显著减少零部件的尺寸误差和形状误差，提高表面质量，确保航空发动机在高速、高温、高压等极端环境下稳定运行。

### 2.2 特种焊接工艺

特种焊接工艺是航空发动机制造中不可或缺的一环。由于航空发动机零部件材料多样、结构复杂，传统焊接方法往往难以保证焊接质量和性能。特种焊接工艺，如真空电子束焊、激光焊、钎焊、扩散焊等，凭借其高能量密度、低热输入、小变形量等优势，在航空发动机制造中得到了广泛应用。这些工艺能够在保证焊接接头强度的同时，有效控制焊接热影响区的宽度，减少焊接缺陷，提高焊接接头的耐腐蚀性和疲劳强度，从而满足航空发动机对零部件高性能、高可靠性的要求。

### 2.3 热喷涂工艺

热喷涂工艺是一种表面强化和修复技术，在航空发动机制造中同样具有重要地位。该技术通过高温热源将涂层材料熔化或软化，并以一定的速度喷射到基体材料表面，形成具有特定功能的涂层。热喷涂工艺不仅可以在航空发动机零部件表面形成耐磨、耐腐蚀、耐高温等特性的涂层，还可以对零部件进行尺寸修复和性能提

升。常见的热喷涂工艺包括火焰喷涂、等离子喷涂、超音速火焰喷涂等。这些工艺的应用，可以显著提高航空发动机零部件的表面质量和性能，延长其使用寿命，降低维护成本。

### 3 特种工艺在航空发动机制造中的应用

#### 3.1 电火花加工

电火花加工 (Electrical Discharge Machining, EDM) 作为一种非传统加工技术，在航空发动机制造中发挥着不可替代的作用。该技术利用电能和热能，通过脉冲放电在工件和电极之间产生高温高压的电火花，从而实现工件的加工。在航空发动机制造中，电火花加工主要应用于以下方面：(1) 复杂形状零件的加工：航空发动机中存在大量形状复杂、精度要求高的零部件，如涡轮叶片上的冷却气膜孔、火焰筒和隔热屏上的群孔等。这些零部件采用传统机械加工方法难以完成，而电火花加工由于其非接触式加工的特点，能够轻松应对这些复杂形状，实现高精度加工。(2) 硬质材料的加工：航空发动机零部件多采用高强度、高硬度的材料，如钛合金、高温合金等。这些材料在加工过程中容易对刀具造成磨损，甚至导致刀具损坏。电火花加工不受材料硬度的限制，能够轻松加工这些硬质材料，保证加工精度和表面质量。(3) 表面完整性控制：电火花加工过程中，由于脉冲放电的热熔作用，会在工件表面形成一层变质层。这层变质层虽然对工件的疲劳寿命等性能有一定影响，但通过优化加工参数和后续处理工艺，可以将其控制在合理范围内，电火花加工还可以实现微细加工和镜面加工，进一步提高工件的表面完整性和性能<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 电解加工

电解加工 (Electrochemical Machining, ECM) 是利用电解作用原理对工件进行加工的一种特种工艺。在航空发动机制造中，对于某些难加工材料，如镍基高温合金、钛合金等，电解加工能够展现出其独特的优势。这些材料在机械加工过程中容易产生硬化层、裂纹等缺陷，而电解加工则通过电化学溶解的方式去除材料，避免了这些缺陷的产生。电解加工不受刀具形状和尺寸的限制，能够加工出各种复杂形状的零件。在航空发动机制造中，电解加工常用于叶片、机匣等复杂形状零件的加工，保证了零件的精度和表面质量。电解加工具有较高的加工效率，能够大幅度缩短加工周期。在航空发动机制造中，时间就是成本，电解加工的高效性为制造商带来了显著的经济效益。

#### 3.3 激光加工

激光加工技术以其高精度、高效率和多功能性在航

空发动机制造中得到了广泛应用。该技术利用激光束作为热源或工具，对工件进行切割、焊接、打孔、表面处理等加工。在航空发动机制造中，激光加工主要应用于以下方面：(1) 精密切割：激光切割技术能够实现高精度、无接触的切割，特别适用于航空发动机中复杂形状零件的加工。(2) 微孔加工：航空发动机中存在大量微小孔结构，如冷却气膜孔等。这些微小孔的加工精度对发动机有重要影响。激光加工技术能够轻松实现微小孔的精确加工，保证孔径和孔位的一致性。(3) 表面处理：激光加工还可以用于航空发动机零部件的表面处理，如激光淬火、激光熔覆等。这些表面处理技术能够改善零部件的表面性能，提高其耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳性能。

#### 3.4 高压水射流加工

高压水射流加工技术是一种利用高压水流对工件进行切割、清洗、除锈等加工的新型工艺。在航空发动机制造中，高压水射流加工技术能够实现无热影响区的切割和打孔，特别适用于航空发动机中一些对热敏感或需要保持材料性能的零部件，该技术还能够实现复杂形状零件的精确切割和打孔。航空发动机零部件在使用过程中会积累污垢、积碳等杂质。高压水射流加工技术能够利用高压水流的冲击力对零部件进行彻底清洗和除锈，恢复其表面光洁度和性能。高压水射流加工技术还可以用于航空发动机零部件的表面强化处理。

### 4 表面完整性技术在特种工艺中的研究与应用

#### 4.1 喷丸处理技术研究

在航空发动机制造领域，喷丸处理技术作为一种重要的表面强化手段，对于提升零部件的表面完整性及整体性能具有显著效果。以转子部件为例，研究不同喷丸覆盖率对其表面硬度、微观结构及其完整性的影响，是表面完整性技术在特种工艺中应用的重要课题<sup>[3]</sup>。转子部件在高温、高压及高速旋转的环境下工作，对表面硬度和抗疲劳性能有着极高的要求。喷丸处理通过高速喷射的丸粒对工件表面进行撞击，从而在表面层引入残余压应力和微观组织变化，达到强化表面的目的。选取不同喷丸覆盖率（如50%、100%、150%等）对转子部件进行喷丸处理。利用显微硬度计测量处理前后的表面硬度变化，通过扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 观察表面及近表面的微观结构变化，如晶粒细化、位错密度增加等现象，结合疲劳试验评估不同喷丸覆盖率对转子部件疲劳寿命的影响。实验结果表明，随着喷丸覆盖率的增加，转子部件的表面硬度显著提高，微观结构发生明显变化，如晶粒细化、位错密度增加

等。这些变化有助于在表面层形成一层致密的强化层，提高零部件的抗疲劳性能。此外，适当的喷丸覆盖率还能在表面引入有益的残余压应力，进一步延长零部件的使用寿命。本研究揭示了不同喷丸覆盖率对转子部件表面完整性及性能的影响规律，为优化喷丸处理工艺提供了理论依据。

#### 4.2 单晶高温合金铣削技术研究

单晶高温合金作为航空发动机叶片等关键部件的优选材料，其加工过程中的表面完整性控制对于保证零部件性能至关重要。单晶高温合金具有优异的高温力学性能，但其独特的晶体结构和材料特性使得加工过程中容易出现切削力波动大、表面质量难以控制等问题，研究单晶高温合金的铣削技术，优化加工参数，提高表面完整性，对于提升零组件性能具有重要意义<sup>[4]</sup>。采用高速切削技术对单晶高温合金进行铣削加工，通过改变切削速度、进给量、切削深度等参数，观察切屑形成过程，分析表面完整性（如表面粗糙度、残余应力、微观裂纹等）的变化规律，利用测力仪实时监测铣削过程中的切削力变化，探讨切削力变化与表面完整性之间的关系。实验结果表明，高速切削技术能够显著降低切削力波动，提高加工稳定性，通过优化切削参数，可以有效控制单晶高温合金的表面粗糙度和残余应力水平，减少微观裂纹的产生。这些措施有助于提升零部件的表面完整性和整体性能。本研究揭示了单晶高温合金在铣削过程中的切屑形成机理和表面完整性变化规律，为优化铣削工艺提供了实验依据。

#### 4.3 特种加工技术的表面完整性控制

特种加工技术以其独特的加工原理和广泛的应用范围，在航空发动机制造中发挥着重要作用，不同特种加工技术对表面完整性的影响各不相同，因此研究特种加工技术的表面完整性控制策略具有重要意义。针对不同类型的特种加工技术（如电火花加工、电解加工、激光加工等），需制定相应的表面完整性控制策略。例如，在电火花加工中，可通过优化电极材料、加工参数和脉冲波形等措施来降低表面粗糙度和热影响区宽度；在电

解加工中，则需控制电解液成分、温度、流速等参数以减少杂质沉积和表面腐蚀；在激光加工中，则需关注激光功率、扫描速度、光斑大小等参数对表面质量的影响。在特种加工过程中引入实时监测与反馈系统，对加工过程中的关键参数进行实时监控，并根据监测结果及时调整加工参数，以确保表面完整性的稳定控制。对于加工后表面质量仍不满足要求的零部件，可采用后处理与强化技术（如喷丸处理、热处理等）进一步改善表面完整性。这些技术能够有效消除加工过程中产生的缺陷和残余应力，提高零部件的疲劳强度和使用寿命。特种加工技术的表面完整性控制是一个复杂而系统的工程，需要综合考虑加工原理、材料特性、工艺参数等多个因素。通过制定综合控制策略、引入实时监测与反馈系统以及采用后处理与强化技术，可以实现对特种加工过程中表面完整性的有效控制，为航空发动机制造提供高质量、高性能的零部件。

#### 结束语

航空发动机制造中表面完整性技术的研究与应用对于提升零部件性能、保障发动机稳定运行具有重要意义。未来，随着特种工艺的不断发展和创新，表面完整性控制技术将更加精细化、智能化，为航空发动机制造业带来更加高效、环保、可持续的发展路径。期待通过持续的研究与实践，推动表面完整性技术在航空发动机制造中的广泛应用与深入发展。

#### 参考文献

- [1]赵春蓉.航空发动机制造表面完整性技术在特种工艺的研究与应用[J].内燃机与配件,2024(10):89-91. DOI:10.3969/j.issn.1674-957X.2024.10.029.
- [2]佚名.表面完整性抗疲劳制造技术精密加工团队[J].重庆理工大学学报(自然科学版).2021,(3).2,275-278.
- [3]陈泓昊.先进航空发动机关键制造技术[J].军民两用技术与产品,2018,(16):2.
- [4]尚鲜军,拜英梅,任燕飞.精密阀套零组件制造工艺探讨[J].航空精密制造技术,2018,54(3):52-55.