



航空制造工程手册

《航空制造工程手册》总编委会 主编

· 发动机叶片工艺 ·

航空工业出版社

航空制造工程手册

发动机叶片工艺

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

1997

内 容 提 要

叶片是航空发动机的关键零件之一,品种多、结构复杂、精度高,其加工工艺复杂、工作量大,在航空发动机制造中占有重要的地位。本手册结合我国航空发动机行业特点,对航空发动机叶片制造的工艺过程作了介绍,重点突出了叶片铸造工艺、锻造工艺、机械加工工艺和叶片检测技术;还重点介绍了新技术、新工艺在航空发动机叶片制造上的应用。本手册内容较为全面,注重数据和经验的积累与总结,力求实用性、综合性、系统性与先进性,特别适用于航空发动机叶片和非航空用动力装置叶片制造的工程技术人员、管理人员和技术工人查阅,也可供从事叶片设计的工程技术人员以及大专院校的教师与学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空制造工程手册:发动机叶片工艺/《航空制造工程手册》总编委会主编;
郭文有分主编.-北京:航空工业出版社,1997.12

ISBN 7-80134-236-4

I. 航… II. ①航… ②郭… III. ①航空工程-制造-手册
②航空发动机-叶片-制造-手册 IV. V 26-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 17353 号

责任编辑 程志远

航空工业出版社出版发行

(北京市安外小关东里 14 号 100029)

航空工业出版社印刷厂印刷 全国各地新华书店经售

1998年1月第1版 1998年1月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 . 印张:39 字数:998.4千字

印数:1—1000 定价:80.00元

序

我国航空工业已走过了四十余年的历程,从飞机的修理、仿制到自行研制,航空制造工程得到很大的发展。在航空高科技产业的大系统中,航空制造工程是重要的组成部分之一。航空工业,就其行业性来讲,属于制造业范畴。航空制造工程的技术状况,是衡量一个国家科学技术发展综合水平的重要标志。航空制造工程的发展水平,对飞机的可靠性和使用寿命的提高、综合技术性能的改善、研制和生产成本的降低、甚至总体设计思想能否得到具体实现等均起着决定性作用。

航空制造工程已成为市场竞争的重要基础,要发展航空工业、并有效地占领市场,不仅要不断地更新设计,开发新产品,更重要的是要具备一个现代化的航空制造工程系统。在发达国家中,均优先发展航空制造工程,很多新工艺、新材料、新设备、新技术都是在航空制造工程中领先使用的,因此必须从战略高度予以重视,并采取实际而有效的措施加速它的发展。编写《航空制造工程手册》,就是为实现航空制造工程现代化的战略目标,在制造工程领域进行的基础性工作。

四十年来,我国航空工业积累了大量经验,取得了丰硕的成果,特别是改革开放以来,开扩了视野并有可能汲取更多的新科技信息。但是如何将这些容量浩繁、层次复杂、学科众多的科学技术和经验汇集起来,使之成为我国航空工业、乃至国家的珍贵财富,是一项具有重大实用价值和长远意义的任务,为此航空航天部决定组织全行业的力量,统一计划、统一部署完成这项极其复杂的规模巨大的系统工程。大家本着继往开来的历史责任感和紧迫感,从1989年开始组织航空工业全行业制造工程方面造诣至深的专家、教授、学者,经过几年的努力陆续编写出版了这套基本覆盖航空制造工程各专业各学科的包括三十二个分册、几千万字的《航空制造

工程手册》。

编好这套手册是一项十分艰巨的工作。大家始终坚持求实、求新、求精、求是的原则，在确保鲜明航空特色的前提下，在总体内容上强调实用性、综合性、成套性；在表达形式上，以技术数据、图形表格、曲线公式为主；阐述扼要，结论严谨，力求使手册成为一部概念准确、数据可靠、文字简洁、编排合理、查阅方便，能为广大从事航空制造工程的科技人员提供有益指导和参考的工具书。

首次组织编纂大型手册，缺乏经验，还由于过去资料积累基础比较薄弱，新技术发展迅速和深度广度不断增加，使这项工作带有相当程度的探索性，因之错误与不足之处实为难免，恳切希望广大读者给予指正。对在这套手册编写过程中给予支持的单位和付出辛勤劳动，提供资料，参与编写，评审，出版的同志们表示衷心感谢。由于我国航空制造工程与世界水平尚存在较大差距，这套手册出版这后，还有不断求新、完善的必要，《航空制造工程手册》总编委会及其办公室是常设机构，将努力收集新的科技信息及这套工具书使用的情况和意见，为今后的修订提供依据，以求进一步完善和提高。

何文治

1992年8月28日

《航空制造工程手册》

各分册名称

- | | |
|-------------|---------------|
| 《通用基础》 | 《非金属结构件工艺》 |
| 《热处理》 | 《飞机结构工艺性指南》 |
| 《特种加工》 | 《发动机械加工》 |
| 《表面处理》 | 《发动机装配与试车》 |
| 《焊接》 | 《发动机叶片工艺》 |
| 《特种铸造》 | 《燃油泵与调节器装配试验》 |
| 《金属材料切削加工》 | 《弹性元件工艺》 |
| 《齿轮工艺》 | 《电连接器工艺》 |
| 《工艺检测》 | 《机载设备精密加工》 |
| 《计算机辅助制造工程》 | 《光学元件工艺》 |
| 《飞机钣金工艺》 | 《框架壳体工艺》 |
| 《飞机机械加工》 | 《武器系统装配》 |
| 《飞机装配》 | 《电机电器工艺》 |
| 《飞机工艺装备》 | 《救生装备工艺》 |
| 《飞机模线样板》 | 《电子设备装配》 |
| 《金属结构件胶接》 | 《机载设备环境试验》 |

《航空制造工程手册》

总编委会、顾问及办公室组成名单

总编委会主任 何文治

总编委会副主任 (按姓氏笔划排列)

马业广	王云机	王敬堂	方裕成	刘多朴
朱伯贤	任家耕	李成功	李哲浩	李章由
吴复兴	易志斌	郑作棣	杨彭基	张彤
张士元	张钟林	周家骐	周砥中	周晓青
金德琨	姚克佩	顾元杰	徐秉铨	徐培麟
郭景山	程宝渠	屠德彰		

总编委会常务副主任 马业广

总编委会顾问 (按姓氏笔划排列)

马世英	于欣	于志耕	于剑辉	王英儒
冯旭	杨墉	杨光中	陆颂善	枉云汉
罗时大	荣科	邴少安	董德馨	程华明
廖宗懋	颜鸣皋	戴世然		

总编委会委员 (按姓氏笔划排列)

马业广	王广生	王云机	王国成	王喜力
王敬堂	方学龄	方裕成	刘多朴	刘树桓
刘盛东	刘瑞新	关桥	朱伯贤	孙国壁
任家耕	严世能	何文治	何恽晋	李成功
李秋娥	李哲浩	李章由	李德澄	杜昌年
沈昌治	陈于乐	陈进	陈积懋	陈德厚
余承业	杨彭基	吴志恩	吴复兴	张彤
张夏	张士元	张幼桢	张灵雨	张纯正
张钟林	张增模	周家骐	周砥中	周晓青

易志斌	郑作棣	林更元	林泽宽	林敦仪
金慧根	金德琨	国 岩	赵仲英	胡四新
胡建国	姜淑芳	姚永义	姚克佩	郝命麒
顾元杰	郭景山	晏海瑞	唐荣锡	唐瑞润
徐秉铨	徐培麟	常荣福	戚道纬	崔连信
屠德彰	程宝渠	熊敦礼	戴 鼎	

总编委会常委 (按姓氏笔划排列)

马业广	王云机	何恂晋	李成功	李哲浩
吴复兴	郑作棣	周家骐	戚道纬	崔连信
屠德彰	戴 鼎			

总编委会办公室主任

戚道纬

总编委会办公室副主任 (按姓氏笔划排列)

刘树桓 姜淑芳 崔连信

总编委会办公室成员 (按姓氏笔划排列)

丁立铭	王偌鹏	刘树桓	刘瑞麟	邵 箭
陈 刚	陈振荣	宋占意	张士霖	林 森
段文斌	贺开运	姜淑芳	莫龙生	徐晓风
戚道纬	崔正山	崔连信		

《发动机叶片工艺》分编委会组成名单

主 编:郭文有

副主编:廖华清

委员(按姓氏笔划为序)

丁雪明	万育贤	白新城	刘 湘	刘瑞麟
任耀文	吕辉深	时莲英	周大应	周诗文
周祯铨	周崇礼	单乃慈	杨业才	杨占尧
顿启彬	郭文有	陶来根	常书易	曹 泽
黄季双	廖华清			

《发动机叶片工艺》其他编写和统稿人员名单

编写人员名单(按姓氏笔划为序)

于乐华	王 昆	王保东	王 健	王维志
乔长焰	孙明仁	孙 超	阮国全	刘所利
刘建珺	刘树旺	刘荣菊	刘善臣	李文广
李永兴	李晓红	李桃英	李 路	宋世安
宋科民	吴志刚	沈连贵	张奕琦	金小波
金声涛	杨耀华	宫声凯	桂一青	徐立维
徐惠彬	徐理福	唐宏霞	郭应竹	郭耀祖
崔双全	黄玉珍	程小元	肇广为	

统稿人员 郭文有

《发动机叶片工艺》提供资料人员名单

李学潮	杨鸿耀	罗冠中
龙涌潮	张丽珠	林苏文

目 录

第 1 章 概论

1.1 叶片的作用及制造技术特点	(1)
1.2 叶片的分类及结构	(2)
1.2.1 叶片的分类	(2)
1.2.2 叶片的结构	(2)
1.2.2.1 叶身	(2)
1.2.2.2 榫头	(3)
1.2.2.3 叶冠	(4)
1.2.2.4 轴颈	(4)
1.2.2.5 阻尼台	(5)
1.2.2.6 叶片其他构造要素	(5)
1.3 叶片通用技术条件及技术术语	(6)
1.3.1 叶片通用技术条件	(6)
1.3.2 叶片技术术语	(6)
1.4 叶片的设计基准	(8)
1.4.1 叶身坐标系	(8)
1.4.2 三基准面体系的建立	(8)
1.5 叶型坐标转换及插值	(9)
1.5.1 叶型坐标转换	(9)
1.5.2 叶片型面插值	(10)

第 2 章 叶片材料及叶片热处理

2.1 叶片材料	(11)
2.1.1 铝合金	(11)
2.1.1.1 概述	(11)
2.1.1.2 叶片用铝合金简介	(12)
2.1.1.3 叶片用铝合金的物理和化学性能	(14)
2.1.1.4 叶片用铝合金的力学性能	(15)
2.1.1.5 叶片用铝合金的组织结构	(18)
2.1.1.6 叶片用铝合金的工艺性能	(19)
2.1.2 钛合金	(21)
2.1.2.1 概述	(21)
2.1.2.2 叶片用钛合金简介	(23)
2.1.2.3 叶片用钛合金的物理和化学性能	(25)
2.1.2.4 叶片用钛合金的力学性能	(26)
2.1.2.5 叶片用钛合金的组织结构	(32)
2.1.2.6 叶片用钛合金的工艺性能	(33)

2.1.3 不锈钢	(36)
2.1.3.1 概述	(36)
2.1.3.2 叶片用不锈钢简介	(37)
2.1.3.3 叶片用不锈钢的物理和化学性能	(41)
2.1.3.4 叶片用不锈钢的力学性能	(43)
2.1.3.5 叶片用不锈钢的组织结构	(50)
2.1.3.6 叶片用不锈钢的工艺性能	(51)
2.1.4 高温合金	(54)
2.1.4.1 概述	(54)
2.1.4.2 叶片用高温合金简介	(56)
2.1.4.3 叶片用高温合金的物理和化学性能	(64)
2.1.4.4 叶片用高温合金的力学性能	(70)
2.1.4.5 叶片用高温合金的组织结构	(84)
2.1.4.6 叶片用高温合金的工艺性能	(90)
2.2 叶片热处理	(95)
2.2.1 铝合金叶片的热处理	(95)
2.2.1.1 成形方法、使用状态和力学性能要求	(95)
2.2.1.2 工艺流程	(96)
2.2.1.3 热处理方法及其目的	(96)
2.2.1.4 热处理工艺参数对合金性能的影响	(97)
2.2.1.5 典型热处理制度	(97)
2.2.1.6 热处理实例	(98)
2.2.1.7 常见缺陷及其产生原因	(99)
2.2.2 钛合金叶片的热处理	(101)
2.2.2.1 成形方法、使用状态和力学性能要求	(101)
2.2.2.2 工艺流程	(101)
2.2.2.3 热处理方法及其目的	(101)
2.2.2.4 热处理工艺参数对合金性能的影响	(103)
2.2.2.5 典型热处理制度	(107)
2.2.2.6 热处理实例	(108)
2.2.2.7 常见缺陷及其产生原因	(108)
2.2.3 不锈钢叶片的热处理	(109)

2.2.3.1 成形方法、使用状态和力学性能要求	(109)	3.2.3.5 涡轮叶片楔形块结构计算	(143)
2.2.3.2 工艺流程	(110)	3.3 叶片铸件浇注系统设计	(145)
2.2.3.3 热处理方法及其目的	(110)	3.3.1 设计原则	(145)
2.2.3.4 热处理工艺参数对钢的组织 and 性能的影响	(112)	3.3.2 凝固模数	(146)
2.2.3.5 典型热处理制度	(114)	3.3.3 模数计算方法	(146)
2.2.3.6 热处理实例	(115)	3.3.4 铸件模数计算实例	(148)
2.2.3.7 常见热处理缺陷及其产生原因	(115)	3.3.4.1 涡轮叶片模数计算	(148)
2.2.4 高温合金叶片的热处理	(116)	3.3.4.2 涡轮叶片浇冒口模数计算	(149)
2.2.4.1 成形方法、使用状态和力学性能要求	(116)	3.3.4.3 整体铸造涡轮浇冒口模数和 K 值补缩能力计算	(149)
2.2.4.2 工艺流程	(119)	3.3.4.4 典型涡轮导向器叶片浇注系统与 K 值	(150)
2.2.4.3 热处理方法及其目的	(119)	3.3.5 浇注系统种类	(150)
2.2.4.4 热处理工艺参数对合金组织和性能的影响	(120)	3.3.5.1 普通铸造叶片铸件浇注系统	(150)
2.2.4.5 典型热处理制度	(122)	3.3.5.2 定向凝固柱晶与单晶叶片浇注系统	(151)
2.2.4.6 热处理实例	(125)	3.3.6 典型叶片浇注系统实例分析	(152)
2.2.4.7 常见热处理缺陷及其产生原因	(125)	3.4 叶片模具设计	(154)
第 3 章 叶片熔模精密铸造		3.4.1 模具结构设计	(154)
3.1 叶片铸造工艺流程	(127)	3.4.2 叶片模具型腔尺寸计算	(156)
3.1.1 叶片分类	(127)	3.4.2.1 叶片型面尺寸误差分布规律	(156)
3.1.2 编制工艺流程的工作程序	(128)	3.4.2.2 型腔尺寸计算	(156)
3.1.3 主要工序要点	(128)	3.4.3 模具的技术要求	(160)
3.1.4 典型叶片铸造工艺流程	(129)	3.4.3.1 模具常用材料	(160)
3.2 叶片铸件图设计	(131)	3.4.3.2 模具尺寸精度及配合公差	(160)
3.2.1 工艺方案和工艺参数的确定	(132)	3.4.3.3 模具表面粗糙度	(160)
3.2.1.1 叶片铸件结构分析	(132)	3.5 空心叶片陶瓷型芯制造	(161)
3.2.1.2 壁厚	(132)	3.5.1 石英玻璃管型芯	(161)
3.2.1.3 铸造圆角和铸造斜度	(133)	3.5.2 陶瓷型芯	(161)
3.2.1.4 工艺筋	(133)	3.5.3 陶瓷型芯材料与矿化剂	(162)
3.2.1.5 尺寸精度和表面粗糙度	(134)	3.5.4 各种陶瓷型芯配方与性能	(162)
3.2.1.6 加工余量	(135)	3.5.4.1 石英玻璃基陶瓷型芯	(163)
3.2.2 定位基准	(135)	3.5.4.2 锆英石基陶瓷型芯	(163)
3.2.3 结构设计与测量点计算	(137)	3.5.4.3 氧化镁基陶瓷型芯	(164)
3.2.3.1 叶片喉道中心尺寸计算	(137)	3.5.4.4 氧化铝基陶瓷型芯	(164)
3.2.3.2 叶片两个定位点及 K 基准计算	(139)	3.5.5 中、外常用陶瓷型芯成分与性能	(165)
3.2.3.3 安装板上两定位中心尺寸计算	(139)	3.5.6 制芯工艺	(165)
3.2.3.4 导向器叶片楔形块及通道尺寸测量的计算	(141)	3.5.7 型芯修整及检验	(167)
		3.5.7.1 型芯修整	(167)
		3.5.7.2 型芯检验	(167)
		3.5.8 脱芯工艺	(168)

3.5.9 空心叶片内腔残余陶瓷型芯的检验	(168)	3.8.2 真空感应炉熔炼与浇注	(199)
3.6 叶片熔模制造	(169)	3.8.2.1 真空感应炉熔炼	(199)
3.6.1 叶片熔模的模料与性能	(169)	3.8.2.2 真空熔炼工艺	(202)
3.6.1.1 模料原材料技术要求	(169)	3.8.2.3 真空重熔浇注叶片工艺	(204)
3.6.1.2 叶片常用模料配方	(171)	3.8.3 叶片定向凝固铸造	(206)
3.6.2 模料制备	(171)	3.8.3.1 定向凝固原理	(206)
3.6.2.1 模料的熔制原则和工艺	(171)	3.8.3.2 定向凝固方法	(207)
3.6.2.2 模料回收处理	(172)	3.8.3.3 定向凝固炉及主要参数	(207)
3.6.3 叶片熔模压制工艺	(172)	3.8.3.4 定向凝固工艺及结晶组织	(209)
3.6.3.1 实心叶片熔模压制工艺	(173)	3.8.3.5 定向凝固工艺曲线	(209)
3.6.3.2 空心叶片熔模压制工艺	(174)	3.8.4 单晶叶片铸造	(209)
3.6.3.3 整体铸造涡轮、导向器的熔模 制造	(175)	3.8.4.1 单晶体叶片的获得	(210)
3.6.4 熔模组合与清洗	(175)	3.8.4.2 单晶铸造合金	(210)
3.6.4.1 单件叶片熔模组装焊接法	(176)	3.9 叶片铸件热等静压处理	(213)
3.6.4.2 整体涡轮熔模制造	(176)	3.9.1 热等静压设备及工作原理	(213)
3.6.4.3 熔模组合焊接工具	(178)	3.9.1.1 高温等静压工艺设备	(213)
3.6.4.4 联模夹具浇注法	(178)	3.9.1.2 热等静压工作原理	(213)
3.6.4.5 模组清洗	(178)	3.9.2 热等静压工艺	(214)
3.6.5 熔模质量控制	(178)	3.9.2.1 HIP 工艺参数	(214)
3.6.5.1 空心叶片熔模内腔型芯的控制	(178)	3.9.2.2 HIP 工艺参数对致密作用的影响	(214)
3.6.5.2 熔模尺寸检验	(178)	3.9.2.3 HIP 处理致密作用	(214)
3.6.5.3 熔模表面质量控制	(179)	3.9.2.4 HIP 处理对力学性能的影响	(215)
3.7 叶片型壳制造	(180)	3.10 叶片铸件质量控制	(216)
3.7.1 等轴晶叶片型壳	(180)	3.10.1 叶片铸件尺寸控制	(216)
3.7.1.1 型壳耐大材料	(180)	3.10.2 叶片铸件冶金质量控制	(217)
3.7.1.2 粘结剂	(182)	3.10.2.1 母合金料锭的质量控制	(217)
3.7.2 叶片型壳料浆配制	(187)	3.10.2.2 叶片铸件工艺审批程序	(218)
3.7.2.1 等轴晶叶片型壳表面层晶粒细化 处理	(187)	3.10.2.3 叶片铸件晶粒度与显微疏松的 控制	(219)
3.7.2.2 表面层料浆的配制	(187)	3.10.2.4 叶片显微组织	(220)
3.7.2.3 加固层料浆的配制	(188)	3.10.2.5 单晶叶片晶向测量技术与评定	(221)
3.7.2.4 制壳工艺	(189)	3.10.2.6 叶片铸件化学成分控制	(221)
3.7.2.5 涂层层次的确定	(189)	3.10.2.7 叶片铸件力学性能试验	(222)
3.7.3 定向凝固及单晶叶片型壳	(189)	3.11 叶片铸件无损检测	(223)
3.7.4 脱蜡与焙烧	(191)	3.11.1 荧光渗透检验	(223)
3.7.5 陶瓷过滤网的制造	(191)	3.11.1.1 涡轮叶片、导向器中片的荧光渗 透检验	(223)
3.8 叶片铸件熔炼与浇注	(192)	3.11.1.2 导向器三叶组电子束焊缝荧光渗 透检验	(224)
3.8.1 非真空感应熔炼与浇注	(192)	3.11.1.3 空心叶片堵板焊缝的荧光检验	(225)
3.8.1.1 感应炉熔炼	(192)	3.11.1.4 空心叶片输气管焊缝的荧光检验	
3.8.1.2 感应炉熔炼工艺	(196)		
3.8.1.3 非真空重熔与浇注	(198)		

..... (225) (245)
3.11.2 射线检验 (225)	4.3.4.2 前后缘弦向余量的加放方法 (245)
3.11.2.1 涡轮叶片和导向器叶片铸件的射线 检验 (225)	4.3.4.3 叶尖部余量的加放方法 (246)
3.11.2.2 空心叶片的陶瓷型芯射线检验 (226)	4.3.4.4 榫头和叶冠余量的加放方法 (246)
3.11.3 空心涡轮叶片工业 CT 测壁厚 (227)	4.3.4.5 阻尼台余量的加放方法 (247)
3.11.4 空心叶片超声波测厚 (227)	4.3.4.6 模锻叶片加工余量和公差 (248)
3.12 叶片铸件常见弊病及解决办法 (228)	4.3.5 模锻叶片的拔模斜度和圆角半径 (250)
3.12.1 表面粗糙及粘砂 (228)	4.3.6 基准和工艺定位凸台 (250)
3.12.2 渣孔、砂眼和夹杂 (228)	4.3.6.1 基准 (250)
3.12.3 气孔、针孔(麻点)和黑斑 (229)	4.3.6.2 工艺定位凸台设计 (250)
3.12.4 裂纹与冷隔 (230)	4.4 叶片模具设计 (252)
3.12.5 缩孔、疏松及氧化斑疤 (231)	4.4.1 锻模设计 (252)
3.12.6 叶片尺寸变形和壁厚不均 (232)	4.4.1.1 模具结构设计 (252)
第 4 章 叶片锻压	4.4.1.2 锻模型槽中心 (253)
4.1 叶片锻压工艺流程和工艺规程 (233)	4.4.1.3 锻模型槽热收缩量加放方法 (254)
4.1.1 工艺规程和工艺流程的作用 (233)	4.4.1.4 榫头在锻造平面内的投影 (255)
4.1.2 工艺规程和工艺流程设计的依据 (233)	4.4.1.5 前后缘边缘分模线的调整 (256)
4.1.3 工艺规程和工艺流程设计程序 (234)	4.4.1.6 叶片模锻毛边槽的选择 (257)
4.1.3.1 技术资料审查 (234)	4.4.1.7 叶片锻模设计的其他问题 (258)
4.1.3.2 综合分析 (234)	4.4.2 叶片切边模设计 (258)
4.1.3.3 确定主导工艺 (234)	4.4.2.1 阴模设计 (259)
4.1.3.4 工步设计 (234)	4.4.2.2 冲头设计 (260)
4.1.3.5 确定工艺流程 (234)	4.4.2.3 切边模具设计 (260)
4.1.3.6 工艺流程的调整 (234)	4.4.3 预锻模设计 (260)
4.1.3.7 编写工艺规程 (234)	4.4.3.1 预锻件设计 (261)
4.1.3.8 叶片锻件关键特性 (234)	4.4.3.2 预锻模设计 (263)
4.1.4 叶片锻造主要工序要点 (234)	4.5 叶片锻压制坯方法选择 (263)
4.2 叶片锻压设备选择 (236)	4.5.1 下料方法 (263)
4.2.1 设备参数对锻压过程的影响 (236)	4.5.2 叶片锻压的制坯方法 (264)
4.2.2 锻压设备选择原则 (236)	4.5.2.1 锻压设备与工艺特性 (264)
4.2.3 锻压设备选择 (237)	4.5.2.2 叶片锻压工艺与制坯方法的选择 (264)
4.3 叶片锻件图设计 (238)	4.6 模锻叶片 (265)
4.3.1 锻造平面的确定与坐标转换 (238)	4.6.1 铝合金叶片模锻 (265)
4.3.1.1 锻造平面的确定 (238)	4.6.1.1 铝合金材料特性 (265)
4.3.1.2 坐标转换 (239)	4.6.1.2 工艺参数对铝合金叶片锻件的 影响 (266)
4.3.2 分模线的确定 (241)	4.6.1.3 工艺要点 (266)
4.3.3 叶片锻件榫头尺寸计算 (242)	4.6.2 钛合金叶片模锻 (267)
4.3.4 叶片加工余量和公差 (245)	4.6.2.1 钛合金材料特性 (267)
4.3.4.1 叶身型面厚度余量的加放方法	

4.6.2.2 工艺参数对钛合金叶片锻件的影响	(268)	4.7.6.2 精锻叶片坯料加热中的保护	(313)
4.6.2.3 工艺要点	(269)	4.7.6.3 叶片精锻坯料表面防护	(313)
4.6.3 不锈钢叶片模锻	(269)	4.7.7 精锻叶片其他工艺	(320)
4.6.3.1 不锈钢材料特性	(269)	4.7.7.1 模具预热与模具润滑	(320)
4.6.3.2 工艺参数对不锈钢叶片锻件的影响	(269)	4.7.7.2 精锻叶片相关工艺	(321)
4.6.3.3 工艺要点	(271)	4.7.8 精锻叶片校形	(323)
4.6.4 高温合金叶片模锻	(271)	4.7.8.1 精锻叶片热校形	(323)
4.6.4.1 高温合金材料特性	(271)	4.7.8.2 精锻叶片冷校形	(324)
4.6.4.2 工艺参数对高温合金叶片锻件的影响	(271)	4.7.9 精锻叶片化学铣切	(325)
4.6.4.3 晶粒度对高温合金性能的影响	(273)	4.7.9.1 化学铣切的基本要求	(326)
4.6.4.4 工艺要点	(274)	4.7.9.2 化学铣切主要工艺	(326)
4.7 叶片精锻	(275)	4.8 叶片锻件无损检测	(327)
4.7.1 叶片精锻工艺条件	(275)	4.8.1 锻造用叶片棒材超声波检验	(327)
4.7.1.1 精锻叶片与模锻叶片	(275)	4.8.2 叶片精锻件荧光检验	(329)
4.7.1.2 叶片精锻工艺条件	(276)	第5章 叶片机械加工	
4.7.2 叶片精锻件图设计要点	(277)	5.1 叶片机械加工工艺路线和加工基准	(332)
4.7.2.1 叶片精锻件图设计程序	(277)	5.1.1 叶片机械加工工艺路线及工艺规程编制	(332)
4.7.2.2 叶片精锻件图设计要点	(277)	5.1.1.1 工艺路线编制依据	(332)
4.7.3 叶片精锻模具设计要点	(281)	5.1.1.2 工艺路线与工艺规程的编制程序	(332)
4.7.3.1 精锻叶片对模座设计的要求	(282)	5.1.1.3 毛坯类型选择及技术经济分析	(333)
4.7.3.2 叶片精锻模具设计要点	(287)	5.1.2 叶片加工基准	(335)
4.7.3.3 精锻叶片的预锻模设计	(287)	5.1.2.1 叶片机械加工基准的确定	(335)
4.7.3.4 精锻叶片切边模具设计	(288)	5.1.2.2 基准转换与叶型加工余量	(338)
4.7.4 叶片精锻制坯图与模具设计	(288)	5.2 叶片精密定位	(340)
4.7.4.1 镦头件毛坯图与模具设计	(289)	5.2.1 叶片精密定位的作用与方式	(340)
4.7.4.2 挤杆件毛坯图与模具设计	(292)	5.2.2 叶片粗密定位介质	(343)
4.7.4.3 双头叶片叶冠和叶片阻尼台顶锻模设计要点	(295)	5.2.3 精密定位的工艺过程	(344)
4.7.4.4 平锻机顶镦制坯及模具设计要点	(297)	5.2.4 精密定位工序的检验与鉴定	(345)
4.7.4.5 电热镦锻制坯要点	(299)	5.2.5 定位介质的去除	(348)
4.7.5 叶片精锻成形工艺	(301)	5.2.6 消除金属污染	(348)
4.7.5.1 叶片精锻毛坯准备	(301)	5.2.7 精密定位夹具的设计	(349)
4.7.5.2 预制坯成形工艺	(303)	5.2.7.1 夹具结构	(349)
4.7.5.3 精锻叶片的预锻	(307)	5.2.7.2 夹具定位销和定位面的精度要求	(351)
4.7.5.4 精锻叶片的终锻	(309)	5.2.7.3 夹具的冷却	(351)
4.7.5.5 精锻叶片切边	(312)	5.3 叶片榫头及安装板、叶冠的加工	(352)
4.7.6 叶片精锻坯料加热与防护	(312)	5.3.1 叶片榫头铣削加工	(352)
4.7.6.1 加热设备	(312)	5.3.1.1 叶片榫头铣削加工工艺特点	(352)

5.3.1.2 棒头铣削设备	(353)	5.4.4 叶片电解加工	(405)
5.3.1.3 棒头铣削工装和铣削参数	(353)	5.4.4.1 叶片叶型电解加工	(405)
5.3.1.4 棒头铣削常见弊病及排除方法	(354)	5.4.4.2 整体叶轮叶型电解加工	(407)
5.3.2 拉削加工	(354)	5.4.5 叶型电火花成形加工	(410)
5.3.2.1 工艺要求	(354)	5.4.5.1 叶型电火花成形加工及加工参数	(410)
5.3.2.2 设备	(357)	5.4.5.2 叶型电火花加工设备	(411)
5.3.2.3 工艺装备	(357)	5.4.5.3 电极	(411)
5.3.2.4 拉削速度	(360)	5.4.5.4 夹具设计	(411)
5.3.2.5 切削液	(361)	5.4.5.5 电火花加工叶型常见弊病及解决 措施	(411)
5.3.2.6 拉削中常见弊病与排除方法	(361)	5.4.6 叶片抛光	(412)
5.3.3 缓进磨削加工	(362)	5.4.6.1 叶片抛光工艺特点	(412)
5.3.3.1 工艺特点	(362)	5.4.6.2 砂轮和抛光轮的选用	(412)
5.3.3.2 缓进磨削设备	(362)	5.4.6.3 抛光常见缺陷及排除方法	(413)
5.3.3.3 工装	(363)	5.4.7 叶片的光饰加工	(413)
5.3.3.4 工艺参数	(364)	5.4.7.1 滚动光饰	(413)
5.3.3.5 常见弊病及排除方法	(365)	5.4.7.2 振动光饰	(416)
5.3.4 叶片安装板、叶冠铣削加工	(366)	5.5 叶片阻尼台加工	(418)
5.3.4.1 安装板、叶冠的外侧面铣削加工	(366)	5.5.1 阻尼台加工的工艺特点	(418)
5.3.4.2 安装板、叶冠内侧面铣削加工	(366)	5.5.2 阻尼台加工工序的安排	(420)
5.3.4.3 安装板、叶冠前后端面、侧面铣削 加工	(367)	5.5.3 阻尼台上下侧面的加工	(420)
5.3.4.4 安装板槽铣加工	(368)	5.5.3.1 阻尼台上下侧面加工的特点	(420)
5.3.4.5 安装板 T 型面铣加工	(369)	5.5.3.2 阻尼台上下侧面加工的方法、设备 及加工参数	(420)
5.3.5 导向器叶片安装板加工	(369)	5.5.4 阻尼台前缘的加工	(422)
5.3.5.1 导向器叶片安装板加工中的数学 问题	(369)	5.5.5 阻尼台毗邻面的加工	(423424)
5.3.5.2 导向器叶片安装板成形磨削	(375)	5.5.6 叶片阻尼台加工工装	(424)
5.4 叶片型面加工	(387)	5.5.6.1 阻尼台加工的刀具和夹具	(424)
5.4.1 成形铣削	(387)	5.5.6.2 阻尼台测量及测具	(425)
5.4.1.1 成形铣削的叶片型面	(387)	5.5.7 阻尼台加工中的弊病	(426)
5.4.1.2 涡轮叶片叶盆型面横向成形铣削	(390)	5.6 叶片异型槽与小孔的加工	(426)
5.4.2 仿形铣削	(395)	5.6.1 电火花加工异型槽及小孔	(426)
5.4.2.1 机械仿形铣削	(395)	5.6.1.1 加工要求	(426)
5.4.2.2 液压仿形铣削	(398)	5.6.1.2 工艺参数	(426)
5.4.3 砂带仿形磨削	(400)	5.6.1.3 加工设备	(427)
5.4.3.1 砂带磨削设备	(400)	5.6.1.4 加工小孔、异型槽的电极设计	(427)
5.4.3.2 工装、磨削参数、常见加工疵病及 解决方法	(404)	5.6.1.5 常见加工弊病及解决措施	(427)
		5.6.2 小孔激光加工	(428)
		5.6.2.1 工艺要求	(428)
		5.6.2.2 加工设备	(428)
		5.6.2.3 工艺参数	(431)

5.6.2.4 工艺质量与控制	(432)	5.7.5.3 叶片扩散焊设备	(456)
5.6.2.5 充填保护	(433)	5.7.5.4 叶片扩散焊的工艺参数和工艺 因素	(456)
5.6.3 电液流加工叶片小孔	(434)	5.7.5.5 叶片扩散焊常见缺陷及检测方法	(458)
5.6.3.1 工艺特点	(434)	5.7.6 叶片超塑成形——扩散连接简介	(459)
5.6.3.2 设备与工装	(434)		
5.6.3.3 加工参数及工作液	(435)		
5.6.3.4 常见加工弊病及解决方法	(435)		
5.6.4 磨粒流加工	(435)		
5.6.4.1 概述	(435)		
5.6.4.2 加工设备与工装	(435)		
5.6.4.3 介质类型和工艺参数选择	(436)		
5.6.4.4 加工中应注意的问题	(437)		
5.7 叶片焊接	(438)		
5.7.1 叶片火焰钎焊和钨极氩弧焊	(438)		
5.7.1.1 火焰钎焊	(438)		
5.7.1.2 钨极氩弧焊	(439)		
5.7.2 导向器叶片焊接组合件的电子束焊	(441)		
5.7.2.1 焊接工艺特点	(441)		
5.7.2.2 焊接设备	(443)		
5.7.2.3 焊接工艺参数	(443)		
5.7.2.4 叶片组合件焊接夹具	(444)		
5.7.2.5 叶片组合件焊接工艺	(444)		
5.7.2.6 叶片组合件焊接质量检查	(445)		
5.7.2.7 叶片组合件常见焊接缺陷及解决 措施	(445)		
5.7.3 叶片真空钎焊	(446)		
5.7.3.1 工艺特点	(446)		
5.7.3.2 真空钎焊设备	(446)		
5.7.3.3 叶片定位及夹具	(447)		
5.7.3.4 钎料及钎剂	(447)		
5.7.3.5 辅助材料	(449)		
5.7.3.6 工艺参数	(450)		
5.7.3.7 叶片真空钎焊实例	(450)		
5.7.3.8 钎缝缺陷分析、预防及补救	(450)		
5.7.4 叶片扩散钎焊	(452)		
5.7.4.1 叶片扩散钎焊工艺	(452)		
5.7.4.2 叶片扩散钎焊工艺过程	(453)		
5.7.4.3 叶片扩散钎焊设备	(453)		
5.7.4.4 叶片扩散钎焊工艺参数和工艺 因素	(454)		
5.7.5 叶片扩散焊	(455)		
5.7.5.1 叶片扩散焊工艺	(455)		
5.7.5.2 叶片扩散焊工艺过程	(455)		
		第6章 叶片表面防护	
		6.1 压气机叶片表面防护方法	(461)
		6.1.1 氧化法	(461)
		6.1.1.1 化学氧化	(461)
		6.1.1.2 铬酸阳极氧化	(461)
		6.1.2 涂料法	(462)
		6.1.2.1 涂 PL205	(463)
		6.1.2.2 涂 PL219 或 Sermetel" W"	(463)
		6.1.2.3 涂 PL101	(464)
		6.1.2.4 涂 PL94 干膜润滑剂	(464)
		6.2 涡轮叶片与导向器叶片表面防护方法	(464)
		6.2.1 热喷涂法	(464)
		6.2.1.1 热喷涂工艺流程	(465)
		6.2.1.2 热喷涂设备与工艺参数选择	(466)
		6.2.1.3 质量控制及验收标准	(469)
		6.2.1.4 典型零件热喷涂实例	(470)
		6.2.1.5 返修方法	(472)
		6.2.2 渗金属法	(473)
		6.2.2.1 渗金属的作用、要求及种类	(473)
		6.2.2.2 粉末法渗铝——AG-2 渗层	(474)
		6.2.2.3 粉末法渗铝钛	(480)
		6.2.2.4 料浆法渗铝硅——WL-1 渗层	(481)
		6.2.2.5 料浆法渗铝铬	(483)
		6.2.2.6 铂铝高温防护渗层	(485)
		6.2.2.7 典型的合金涂层——MCrAlY 溅 射涂层	(487)
		6.2.2.8 渗金属常见缺陷及预防补救 措施	(488)
		6.2.3 陶瓷热障涂层	(488)
		6.2.3.1 简介	(488)
		6.2.3.2 热障涂层的结构	(489)
		6.2.3.3 热障涂层的制备方法	(489)
		第7章 叶片检测	
		7.1 概述	(490)