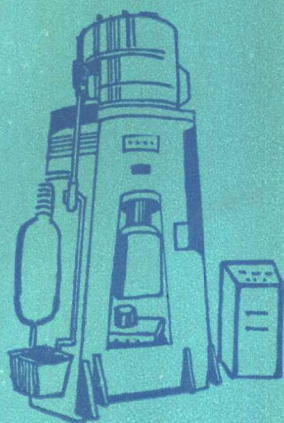


14

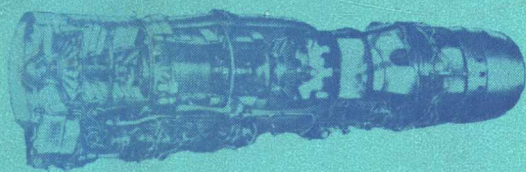
机械制造
实用新技术丛书



栗 枯 主编

叶 片 精 锻

谭杰巍 许日泽 刘侠夫 编著



国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之十四

叶片精锻

粟 枯 主编

谭杰巍 许日泽 刘侠夫 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍航空发动机叶片精锻技术。全书共分三个部分：一、叶片精锻工艺。包括设备选择、加热防护、模具预热与润滑、坯料准备与锻造成形、化铣技术、热处理及各种辅助工艺；二、精锻叶片的检测技术与冶金质量控制；三、精锻叶片图和各类模具的设计方法。

在锻造技术中，与一般锻造零件相比较，叶片锻造有特殊性，也有共同性。本书所介绍的技术，同样适用于所有现代锻造行业。它对从事锻造的工程技术人员、生产工人、大学与中专教师、学生都有参考与指导作用。

叶 片 精 锻

机械制造实用新技术丛书之十四

栗 祐 主编

谭杰巍 许日泽 刘侠夫 编著

贾狂编辑 宋桂珍

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印张8¹/₂ 223千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数：0,001— 5,600册

统一书号：15034·2803 定价：1.60元

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；
2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；
3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将对对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由粟枯同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等同志提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖治、陈少中、任家耕和贾克琴、张汉生等

同志。

叶片精锻技术是当前世界各国燃气轮机制造的新技术之一。本书着重介绍了叶片精锻工艺、检测技术与冶金质量控制以及精锻模具设计，力争较完善地介绍可以用于生产的成套技术。本厂马瑞崧、李明彦、盛时中、陶来根、徐瑞芳、蔡钧涛、郭耀祖、徐振国、徐步程、苏炎斌以及六二一所王均斌等同志为本书提供了资料，书稿由粟祜终审定稿。对本书编写和出版过程中给予支持和帮助的同志，在此表示感谢。

作者于西安国营红旗机械厂

目 录

第一章 概述	1
一、材料	3
二、制造工艺与检测技术	7
三、精度	8
四、叶片精锻的效益	11
五、叶片精锻的工艺流程	13
第二章 叶片精锻设备的选择	36
一、选择的原则	36
二、终锻设备的选择	38
三、制坯设备的选择	57
第三章 锻造毛坯加热时的表面保护与锻造温度控制	61
一、加热过程中金属表面保护	61
二、锻造温度的控制	81
第四章 模具及其预热与润滑	92
一、模具的表面处理	92
二、模具的预热	93
三、模具的润滑	96
第五章 精锻叶片的成形过程	100
一、坯料切割	100
二、坯料成形	105
三、叶片的预锻与终锻	111
第六章 叶片锻件的热处理	116
一、钛合金叶片的热处理	117
二、不锈钢叶片的热处理	122
三、铝合金叶片的热处理	124
四、镍基耐热合金涡轮叶片的热处理	124
第七章 叶片的化铣与校形	129
一、叶片的分组与化铣	129
二、精锻叶片的型面校正	134

第八章 其他辅助工艺	140
一、三氯乙烯蒸气除油	140
二、腐蚀工艺	142
三、喷丸与吹砂	146
四、滚筒光饰	152
五、叶片抛修	153
六、防锈处理	155
第九章 精锻叶片的检测	157
一、两种常用的检测仪器	157
二、确定叶片加工和检验用叶型数据的基本规则	162
三、精锻叶片的主要检验项目与技术要求	168
四、叶片精锻工序中常出现的缺陷	179
第十章 精锻叶片的冶金质量控制	192
一、原材料的冶金质量控制	192
二、叶片锻造厂的批准与叶片锻件的冶金质量控制	194
三、批准程序和批生产过程中的几种典型试验方法	196
四、正常生产过程中对炉子和仪表的质量控制	201
第十一章 叶片锻件图的设计	205
一、平衡角计算和坐标变换	205
二、余量、圆角半径和模锻斜度	209
三、基准和定位凸台	215
四、公差	220
五、分模线	221
第十二章 锻模与切边模的设计	224
一、锻模压力中心的计算	224
二、终锻模设计	226
三、模座的设计	234
四、切边模的设计	235
五、预锻模的设计	244
第十三章 工序图及其模具设计	250
一、镦头毛坯图的设计	250
二、挤杆毛坯图的设计和下料尺寸计算	255
三、挤杆模的设计	257
四、镦头模的设计	260
五、顶锻模具的设计	263

第一章 概 述

精密锻造是当代工业中逐步发展起来的一项重要生产技术。特别是在飞机发动机、船用和陆用燃气轮机以及汽轮机是现代动力装置的制造时，由于主要零件叶片的品种多，数量大，材料贵，型面复杂，质量要求严格，而且机械加工难度很大，因此世界各

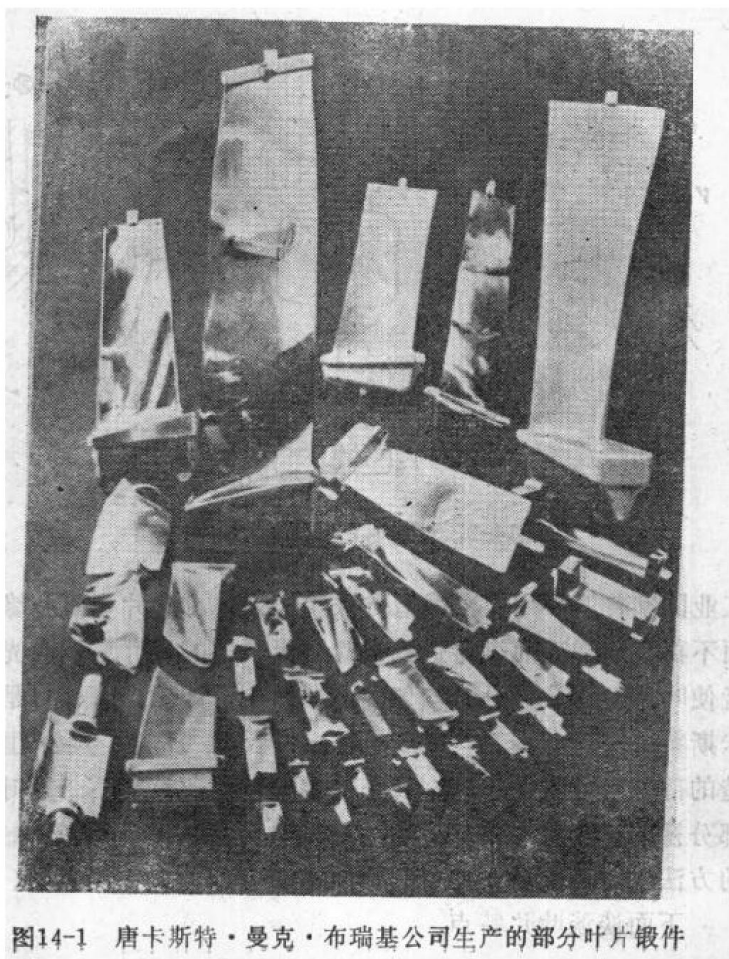


图14-1 唐卡斯特·曼克·布瑞基公司生产的部分叶片锻件

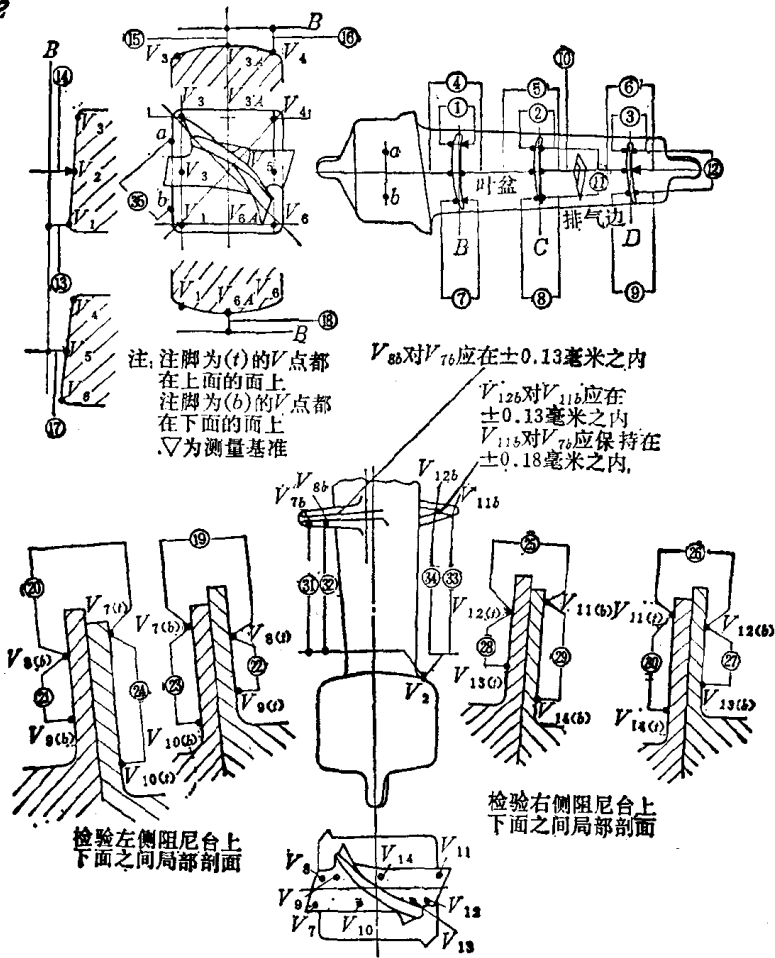


图14-2 带阻尼台叶片的全部测点图

工业国家普遍采用精密锻造方法生产锻件，叶片型面和缘板内侧面不再机械加工而直接达到设计图纸要求的尺寸精度和光度，或者使叶片型面余量分布均匀，以利于电解加工。图14-1是英国唐卡斯特·曼克·布瑞基 (Doncasters Monk Bridge) 公司精密锻造的部分叶片锻件。图14-3是航空发动机压气机不带冠叶片锻件部分视图。它采用精密锻造后进行全尺寸化学铣切(简称“化铣”)的方法制造而成。图14-2是带阻尼台叶片的全部测点图。

下面谈谈叶片特点。

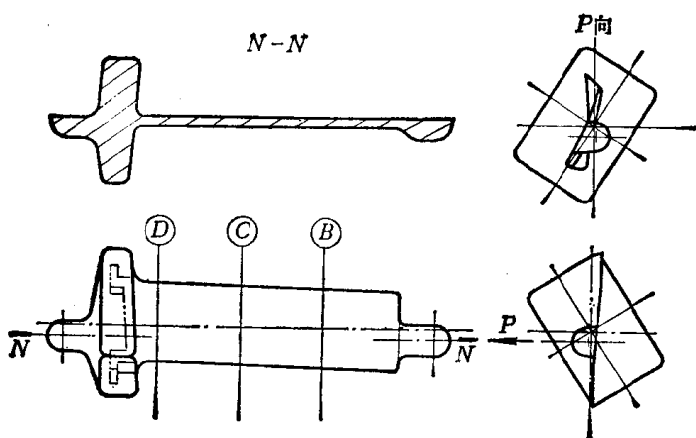


图14-3 不带冠叶片的部分视图

一、材 料

叶片是发动机的重要零件之一，在发动机工作过程中，叶片承受多种复杂的应力。制造叶片的材料，特别是航空叶片，必须具有高的抗拉强度、疲劳强度、断裂韧性、耐蠕变和抗蚀性能以及良好的塑性指标，同时，又要求具有尽可能轻的重量。因此，普遍选用合金化程度很高的耐热不锈钢、钛合金和少量中强度变形铝合金制造压气机叶片，用镍基或钴基高温耐热合金制造涡轮叶片。

钛合金具有重量轻、比强度高以及较好的耐热强度、低温韧性、耐蚀性等优点，在航空和航天工业中得到了越来越广泛的应用。一些近代的发动机，如TF-39、JT-90、斯贝、奥林普斯593、飞马、RB-211、RB-199、F100、F404等，钛合金的用量大约占发动机总重量的1/3左右。三种纯钛和五种钛合金（Ti-5Al-2.5Sn、Ti-6Al-4V、Ti-8Al-1Mo-1V、Ti-6Al-6V-2Sn和Ti-13V-11Cr-3Al）占全部钛合金用量的85~90%。用量最多的是Ti-6Al-4V，约占钛合金用量的60~65%。由于这种合金具有较高的抗蠕变性能、抗疲劳强度以及优良的断裂韧性、较小的缺口敏感性，同时又具有好的低温性能，并能在含盐分的环境中工作而不要保护层。另外，它还具有良好的热加工性能。所以，不少发动机压气机叶片都选用它作材料，如美国的JT-3D发动机上近

2700个叶片中，Ti-6Al-4V叶片占22.4%。随着发动机性能的不 断提高，钛合金叶片材料也由过去的简单合金系统发展为多元 素的复杂合金系统，加入许多特殊元素以不断提高其强度。例 如Ti-679 (Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si) 和IMI-685 (Ti- 6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si)，由于加入0.2%的硅，提高了合金的抗 蠕变性。加入适量的铝、锡、铜、锆等元素，使热强性和热稳定 性比Ti-6Al-4V更高。在500°C长达300小时暴露后，组织不发生 变化。因此被广泛用来制造工作条件为500°C左右的高压压气机 转子叶片。但是，由于合金化元素增多，合金强度增加，锻造温度 升高，相变温度降低，使锻造温度范围变窄，增加了锻造的困难。

发动机压气机叶片的另一种材料是含铬12%左右的不锈钢。 这些合金中，较高的铬含量，改善了钢的抗蚀性能和抗氧化性 能，但同时又使钢的组织中产生很多三角形碳化物 Cr_7C_3 ，使抗 蠕变性能急剧下降。因此，合金中适当地降低了碳含量和增加了 铌、铜、锰、钒、钛等碳化物形成元素，使铬较多地保持在固溶 体中，以提高抗蠕变性能而又保持钢的抗腐蚀性。镍和钴的加 入，在于平衡铜、钒、铌等形成铁素体的元素，以减少钢中形成 自由的 δ 铁素体。

斯贝发动机部分高压压气机转子和定子叶片用的材料 S/SNV、S/SJ₂、S/SAV都属于这种类型的不锈钢。如S/SNV， 当镍含量少于1%时，就不能在1150°C锻造温度下保持好的锻 造性能，在该温度下，容易形成软的 δ 相，使锻件产生裂纹。而且 这种 δ 相冷却后还会继续保存下来，在显微镜下呈方形结构 (α 相呈圆形)，使机械性能明显降低。此外，合金中的锰、铜、钒、 铌等元素，使合金形成较稳定的化合物，提高了抗回火软化能 力，保持高温性能。铌还可以细化晶粒，铜、钒可以改善回火性 能，减少回火脆性。

航空发动机上铝合金叶片已逐渐减少，而且常用于低压压气 机。斯贝发动机低压压气机叶片用的铝合金为A/FLS，属于铝- 铜-镁-镍-铁系低硅锻造铝合金，具有中等强度、塑性以及较好

的抗蚀性能。合金中差不多一比一地同时加入 0.9~1.2% 铁和 1.0~1.4% 的镍，使铁镍相互作用形成难溶于 α (Al) 固溶体中的 FeNiAl_3 相，保证合金中的铜充分地 和铝、镁元素形成 $\text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 强化相。合金变形后，S 相成碎块分布在晶粒内部和晶界上，在高温下能阻碍合金变形，从而提高耐热性。但如果铁、镍含量较高而熔铸工艺不当时，就有可能产生粗大的 FeNiAl_3 初晶偏析，锻造时很难破碎，使合金的工艺性能和机械性能下降。同时，这种合金锻造后在低倍显微镜下进行断口检查时，有可能发现类似层状开裂现象。这是难溶于 α (Al) 中的 FeNiAl_3 以及 AlCuNi 、 CuFeAl_7 等相在合金锻造变形后形成的。硅在这种合金中，容易形成 MgSi 相，使 S 相数量减少。 MgSi 相在高温下有较大的过时效敏感性，容易引起高温瞬时强度和持久强度下降，所以作为一种杂质加以限制。

这种合金的再结晶倾向比较大，热加工后容易得到完全的再结晶组织。锻件经淬火以后，在各个截面上可以获得比较粗大的等轴再结晶，使锻后机械性能无明显的各向异性。

镍基高温合金在高温条件下具有高的拉伸强度，持久强度和蠕变强度，同时具有良好的抗机械疲劳、热疲劳以及抗氧化和抗腐蚀性能，并有适宜的塑性。这些高的性能指标，是通过加入大量的 γ' 形成元素、碳化物形成元素、控制晶界状态和强化晶界的微量元素、碱土、稀土元素并通过合理的压力加工和热处理来实现的。

斯贝发动机涡轮叶片用的 NiMoNiC80A 和 NiMoNiC105 两种镍基高温合金中，铝、钛是 γ' 的主要形成元素。钴、钨、铬除了固溶强化外，主要作为碳化物形成元素而存在。铬还是稳定合金表面的重要元素，它在基体表面形成抗氧化和抗腐蚀的富 Cr_2O_3 保护层，阻止金属元素向外扩散和氧、氮、硫向内扩散。但过高的铬含量会降低 γ' 的固溶温度而使合金的高温持久强度降低。钴可以强化 γ' ，提高 γ' 相的固溶温度，降低钛、铝在基体中的溶解度，增加 γ' 相的数量并改善合金的热加工性能，提高

材料的塑性和冲击韧性。钼主要进入合金的固溶体，减慢铝、钛、铬的高温扩散速度，并能提高 γ' 相的溶解温度和增加固溶体中原子间结合力，减慢软化速度。合金中加入适量的硼、锆，能强化晶界，显著地提高合金的持久寿命、降低蠕变速率，延缓晶界裂纹发生，改善持久缺口敏感性、细化晶粒、提高合金的塑性和加工性能。但过高的硼含量，会在晶界上形成硬而脆的化合物，使塑性降低并在锻造过程中容易形成裂纹。在这些合金中， γ' 是合金的主要强化相。它在合金中的体积百分含量少于40%时， γ' 相的颗粒大小和间距对高温蠕变性能和强度会产生明显的影响。合金中碳化物的作用是复杂的和重要的。当碳化物处于有利分布的情况下，它能阻碍晶界的滑移或迁移，从而对高温持久、塑性、高温蠕变等性能起着重要的影响。但如果热处理工艺不当， $M_{23}C_6$ 型碳化物会以晶界薄片或平板状沉淀出现而使蠕变抗力和塑性下降。

合金中最有害的微量元素是铅、铋、银，这些元素不仅损害持久性能，而且使热加工性能恶化。在NiMoNiC105中，当铅含量接近0.0110%时，合金一锻就裂。铅和碲(Te)的存在，还会使蠕变破损过程随应变量增大而加速，显著降低合金在高温下的持久寿命和塑性。铈(Tl)则使缺口持久寿命显著恶化。

镍基合金的组织与性能，在很大程度上取决于它的热加工变形与热处理工艺。在材料一定的前提下，这些工艺不仅决定了与高温持久强度、疲劳强度、蠕变强度有直接关系的低倍晶粒大小，也决定了合金的 γ' 、碳化物等主要相的大小、分布状态及有害微量相的存在程度与分布情况。所以，镍基高温合金的热加工工艺是极为重要的。当然，锻造过程中的加工再结晶和热处理后低倍晶粒的大小与合金中的化学元素如碳、铬、铝、钛及其它杂质的含量也有一定的关系。实践证明，这些元素的含量偏上限时，在同样的锻造工艺条件下，更容易获得细小的晶粒组织。杂质的含量则有着不同的影响。一般含有较多杂质的材料，在锻造时，集中在晶粒边界的杂质阻碍了扩散过程的进行，因而当变形

量较大时再结晶过程才开始，临界变形范围增宽，再结晶图上曲线最大值增高，在同样条件下，可能造成粗大晶粒。但是，另一方面，杂质在再结晶温度下，能够成为再结晶核心。同时，分布在晶界上的杂质具有阻止晶粒长大的作用。

从以上几种材料的分析可以看出，材料的成分、特性与锻造、热处理工艺有着十分密切的关系。必须针对不同成分的材料制定合理的锻造、热处理工艺，才能充分发挥材料的特性，减少锻造、热处理过程中产生缺陷的危险。

二、制造工艺与检测技术

和普通的模锻件相比，叶片的制造工艺与检测技术要复杂和困难得多。

叶片材料的合金化程度很高，变形温度范围窄，对锻造、热处理工艺参数很敏感。过高或过低的锻造、热处理温度，都将给叶片的组织和性能带来明显的影响，因而给锻造和热处理过程造成很大的困难。叶片叶身很薄，型面复杂，锻造时变形抗力大。而且，操作过程坯料冷却较快，容易引起锻造压力的波动。这就要求锻造设备具有足够的打击能量、适宜的变形速度，以便减少锻件与模具的接触时间而又适应金属的流动特性和保证一定的生产速率。同时，要求锻造设备具有好的刚度和承受偏心载荷的能力以及尽可能少的弹性变形。设备能量的调整 and 锻件高度尺寸的控制也要方便。

叶片锻件的表面质量、内部组织、流线分布都要求十分严格，这就需要有最佳的锻造工艺，如加热保护、喷丸工艺、温度控制、模具润滑等等，对各种辅助工序的安排也必须是严格的、合理的。为了选择最佳的锻造工艺参数以便获得最优的机械性能，目前国内外已采用正交设计法，将所得的数据在综合研究的基础上进行极差分析，选出最优的工艺参数，并对试验数据用电子计算机进行回归分析，建立性能指标对工艺参数的回归方程。通过这一定量的关系，可以预报和控制工艺参数对叶片锻件性能

指标的影响。

除了锻造工艺外，叶片的检测技术与质量控制精密锻造时也具有特殊意义。由于叶片尺寸复杂，检测项目多，最终产品的各种技术要求，包括型面厚度公差、分散度、型面形状公差、扭曲公差、弯曲公差、缘板内侧面的相对位置公差、根块和冠的角度以及锻件错移公差等，都要进行精确的检查。测量尺寸一般在15~45个以上（参见图14-3）。在大批量生产的情况下，必须快速而准确地测量出每一个测量点的尺寸，这就要求检测设备必须具有高精度和高效率。同时，由于叶片型面薄、尺寸精度高，形位公差严、工序周转长、生产批量大等情况，在操作、周转、运输、储存过程中，容易变形和混料，因此管理制度必须严格。

三、精 度

采用精密锻造技术所生产的不锈钢、铝合金、钛合金和镍基合金叶片，具有相当高的精度。一般叶片的叶身型面和榫头内缘面不需要机械加工，只需留有化学铣切余量。也有部分工厂不采用化学铣切，而采用抛光和电解研磨方法，其所留余量，也远较采用普通锻造方法生产的叶片毛坯少而且均匀。

表14-1~14-6是国外各种精锻叶片在化铣或抛光前的型面和缘板内侧面的尺寸精度。

表14-1 英国罗尔斯-罗伊斯 (ROLLS-ROYES) 公司精锻 120 毫米长度以下不带冠叶片尺寸公差

叶片种类	检测项目 厚度公差带 (1~9点)	分散度 (1~9点)	弯曲	扭曲 (度)		根块 角度	缘板内 侧 (V 点)	错移	型面 形状
				尖 部	中 间				
不锈钢叶片	+0.30 ~-0.45	0.13	±0.20	±0°20'	±0°20'	0°20'	±0.15	0.076	0.076
钛合金叶片	+0.38 ~-0.60	0.08	±0.20	±0°20'	±0°20'	0°20'	±0.13	0.076	0.076

注：叶片经化铣后，叶片厚度公差带和分散度分别为：

不锈钢±0.10和0.20；钛合金±0.075和0.15。

表14-2 英国精锻公司 (PRECISION FORGINGS LTD)
不锈钢、铝合金、钛合金、镍基合金精锻叶片尺寸公差

叶片种类	叶片长度	厚度公差带	型面分散度		弯曲公差	扭曲公差 (分)	根块角度 (分)	缘板内侧V点		错移
			单个截面	整个截面				单个模具表面 ^①	整个内侧内面	
不带冠叶片	~76	+0.15	0.076	0.13	0.13	20~30	20~30	0.076	0.15	0.13
	76~152	+0.20	0.13	0.13	0.15	20~30	20~30	0.076	0.15	0.13
	152~305	+0.30	0.18	0.25	0.25	20~30	20~30	0.15	0.30	0.25
带冠叶片								冠部整个截面	根部整个侧面	
	~76	+0.15	0.076	0.13	0.13	20~30	20~30	0.25	0.15	0.13
	76~130	+0.15	0.13	0.13	0.13	20~30	20~30	0.25	0.15	0.13
	130~180	+0.20	0.13	0.25	0.18	20~30	20~30	0.38	0.25	0.18

① 单个模具表面是指分模线上或下的缘板内侧面。

表14-3 西德蒂森公司 (THYSSEN
UMFORMTECHNIK) 精锻叶片尺寸公差

叶片种类	叶片长度	型面厚度	排气边缘	中间截面	型面形	总扭曲度 (分)	表面粗糙度 (微米)
		公差带	型面厚度	弯曲度	状公差		
燃气轮机叶片	16~40	0.08~0.10	0.10	0.10	0.04~0.05	±20	2.0
	40~63	0.10~0.16	0.15	0.15	0.05~0.08	±20	3.2
	63~100	0.16~0.20	0.20	0.20	0.08~0.10	±20	3.2
	100~160	0.20~0.25	0.30	0.20	0.10~0.12	±20	3.2
	160~250	0.25~0.40	0.50	0.25	0.12~0.20	±20	5.0
气轮机叶片	250~400	0.40~0.63	0.80	0.25	0.20~0.25	±30	6.3
	400~630	0.63~1.00	1.00	0.32	0.25~0.32	±30	10.0
	630~1000	1.00~1.60	1.25	0.40	0.32~0.40	±30	10.0
	1000~1600	1.60~2.50	1.50	0.50	0.40~0.50	±30	25.0

表14-4 西德蒂森公司精锻涡轮叶片公差

叶身长度	叶片最小厚度		型面形 状公差	型面厚度 公差带	中间平均 弯曲度	型面扭 曲度	表面粗 糙度
	最厚处	排气边缘					
~63	0.8	0.32	0.06~0.08	0.16~0.25	0.10	±15'	0.8
63~100	1.25	0.40	0.08~0.10	0.16~0.25	0.12	±15'	0.8
100~160	1.60	0.50	0.10~0.12	0.16~0.25	0.16	±20'	0.8
160~250	2.0	0.63	0.12~0.16	0.25~0.40	0.20	±30'	1.0
250~400	2.5	0.80	0.16~0.25	0.40~0.63	0.25	±30'	1.6
400~630	3.15	1.00	0.25~0.32	0.63~1.00	0.32	±30'	3.0
630~1000	4.00	1.25	0.32~0.40	1.00~1.60	0.40	±30'	3.0
1000~1600	5.00	1.60	0.40~0.50	1.60~2.50	0.50	±30'	4.0

表14-5 英国高能合金公司 (HIGH DUTE
ALLOYS LTD) 精锻叶片尺寸公差

尺寸公差	材料类型	镍基合金			不 锈 钢		
	最大投影面积(厘米 ²)		450	290	130	515	320
厚度公差		+1.25	+0.90	+0.75	+1.0	+0.70	+0.50
外形公差		$\frac{1}{12} \times T$					
角度位移		±30'					
尺寸公差	材料类型	钛 合 金			铝 合 金		
	最大投影面积(厘米 ²)		580	350	190	1600	780
厚度公差		+0.75	+0.50	+0.35	+1.5	+1.0	+0.40
外形公差		$\frac{1}{12} \times T$					
角度位移		±30'					