

907635

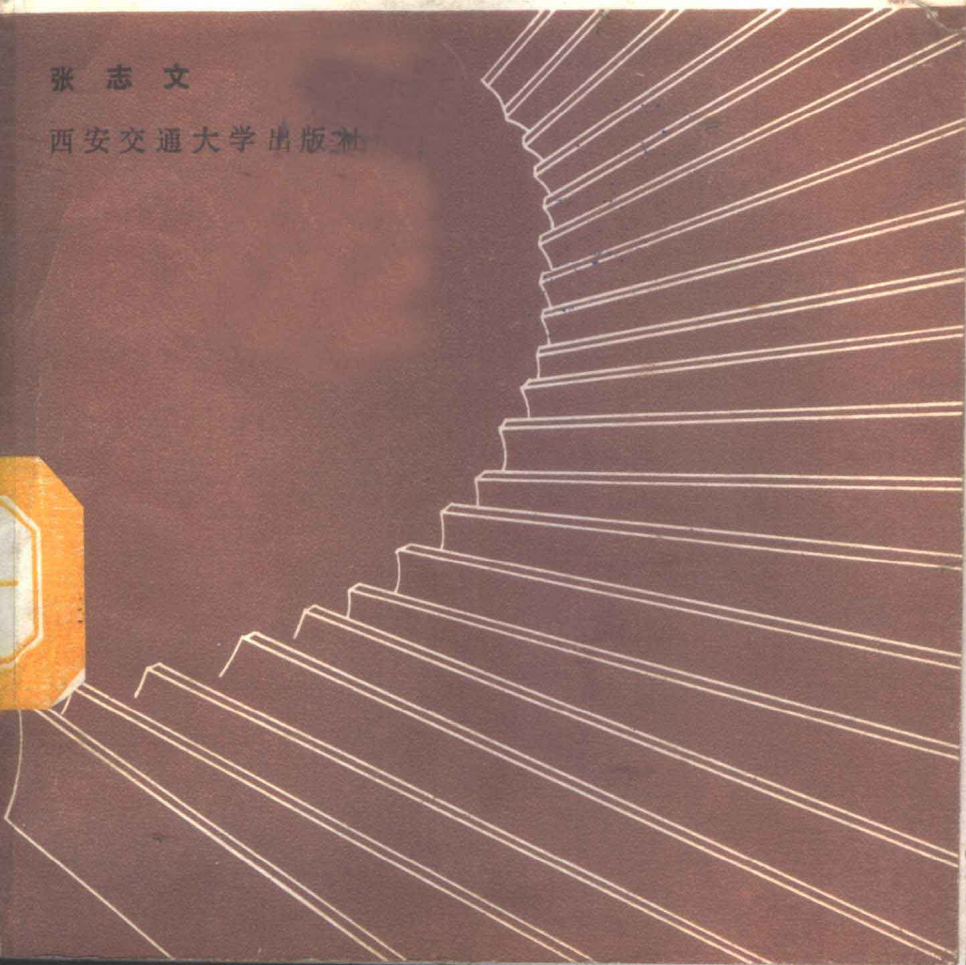
叶片 锻造

YEPIAN

DUANZAO

张 志 文

西安交通大学出版社



叶 片 锻 造

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书介绍叶片锻造工艺及其模具设计的基本知识。内容包括叶片锻造工艺、叶片锻件图设计、锻模设计、辅助模具设计、高速锤压叶片和计算机辅助设计，共六个部分。

在锻造领域，叶片锻造颇具特殊性，本书对此详加分析和论证。

编写本书主要是为了高等学校专业教学的需要，也可作为锻造技术人员的参考书。

叶 片 锻 造

张 志 文

责任编辑 潘瑞麟

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

陕西省印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经销

开本787×1092 1/32 印张8.125 字数172千字

1987年7月第1版 1987年12月第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN7—5605—0087—0/7G—4

书号：15340·147 定价：1.35元

前 言

叶片锻件的生产量在锻造行业中是极为可观的，生产中许多工艺上的问题也亟需解决。但是，在锻压专业的教材中，国内还没有叶片锻造方面的书。为此，编著者在《叶片锻模设计》和《叶片精锻工艺》两种讲义的基础上，充实内容，编著了这本《叶片锻造》。期望此书不仅对专业教学，而且对有关技术人员有所帮助。由于学识浅薄、实践经验不足，书中必有不少缺点和错误，欢迎同志们批评指正。

在此，特别要对西安交通大学出版社受理出版这本书，表示衷心感谢。

张志文 1987年6月

概 述

在航空发动机、汽轮机和燃气轮机中，能量的转换，叶片起着关键的作用。所以，叶片的重要性是不言而喻的。叶片可分为动叶片和静叶片两大类，动叶片在运转过程中承受低温、常温或高温条件下的高速旋转气动力、离心力和振动负荷。静叶片的工作条件远不如动叶片的恶劣。总的说来，叶片材料应具有足够的强度、良好的塑性、高的蠕变抗力和抗应力腐蚀的能力；在高温条件下工作的叶片，还要求材料具有相应的热强性能。

很长时期以来，我国航空发动机的叶片生产基本上沿用五十年代形成的工艺方法。因此，叶片锻件有“肥头大耳”之称。至于汽轮机和燃气轮机的叶片，曾一度以方钢为坯，全靠机械加工成形。这样的叶片，无疑改变不了质量差、材料利用率低、成本高和生产率低的面貌。

近几年来，随着我国四个现代化建设的迅速发展，特别是吸收了外国同行的生产经验和技術，叶片锻件的生产技术获得了明显的发展和提高，出现了不少行之有效的新工艺，使叶片锻件生产推向精锻的新阶段。

国外的叶片生产行业，一直在积极地研究精锻工艺，例如西德和英美的一些厂家，已经可以锻压出叶身型面、榫头内缘板面和叶身阻尼台不需任何机械加工的精密叶片锻件。我国在这方面的技术水平与国外相比，差距仍然不小。六十年代以来，国内一些单位为实现叶片精锻，在高速锤上做了不少工作，也取得了一定的进展，获得了生产实践的经验。

但是，由于受到高速锤结构和锻模结构上的限制，精锻工艺的预期目标尚未实现。

最近以来，由于国外叶片精锻技术的影响，不少单位倾向采用螺旋压力机来解决叶片精锻问题，并且叶片生产开始由分散走向集中，以便采用先进的工艺和技术。叶片精锻，虽然难度大，但势在必行。多年来通过生产实践积累了不少经验，只要发挥创新精神，终将实现叶片的精锻。各种叶片材料都是质优而昂贵的，其中有铝合金，钛合金，不锈钢和耐热合金等。尤其是涡轮叶片，基本上都是使用镍基耐热合金，如GH33，GH37等。所以，尽力节省叶片材料，是降低叶片生产成本的有效措施。此外，在改善劳动条件方面，也要求实现精锻。大余量的叶片，机械加工量繁重，若以45号钢的切削性能为100%，则GH33为4%，GH37为2%。45号钢的机械加工性能比GH33高24倍，比GH37高49倍。叶片的抛光工序，劳动量大，操作不甚方便，对空气的污染也相当严重，通过精锻及锻后的化学铣削，可省去抛光工序。

回顾美国锻压生产的情况，从1960年到1965年各类叶片锻件的生产量占全美模锻件总生产量的16.5%，而同期汽车模锻件的生产量也不过占22.6%，这足以说明叶片锻件生产在锻造行业中占有多么重要的地位。

应当指出，精锻工艺的实现是有一定条件的：要求配备合适的锻压设备，还要有设计精良的锻模，能组成一条完善的工艺路线；从人力上来说，要有一支队伍，这支队伍由精明能干的技术人员和生产操作人员组成。他们应当熟悉工艺过程，具备足够的理论知识和丰富的生产经验。本书的出版希望能对从事这方面工作的技术人员有所帮助，为叶片锻造技术的发展作出贡献。

目 录

概 述

第一章 叶片锻造工艺	(1)
§ 1 叶片成形方法.....	(1)
§ 2 叶片材料.....	(3)
§ 3 毛坯准备.....	(6)
§ 4 加 热.....	(9)
§ 5 变形温度.....	(16)
§ 6 变形程度.....	(20)
§ 7 润滑剂.....	(24)
第二章 锻件图设计	(31)
§ 1 叶片分析.....	(31)
§ 2 榫头尺寸计算.....	(36)
§ 3 余量和公差.....	(47)
§ 4 型面余量.....	(51)
§ 5 圆角半径、模锻斜度和分模.....	(56)
§ 6 平衡角计算与坐标转换.....	(61)
§ 7 差分法检查新坐标.....	(68)
§ 8 工艺凸台.....	(76)
§ 9 毛坯计算.....	(79)
第三章 锻模设计	(83)
§ 1 模 块.....	(83)
§ 2 终锻型槽变形抗力中心计算.....	(85)

§ 3	变形力计算	(89)
§ 4	投影角、倾角及前倾后移量计算	(96)
§ 5	毛边槽	(102)
§ 6	进气边缘与排气边缘分模线调整	(105)
§ 7	预锻模设计	(108)
第四章	辅助模设计	(112)
§ 1	平锻模设计	(112)
§ 2	挤杆模设计	(127)
§ 3	镦头模设计	(132)
§ 4	弯杆模设计	(140)
§ 5	切边模设计	(141)
第五章	高速锤挤压叶片	(146)
§ 1	锻件设计	(148)
§ 2	毛坯计算	(153)
§ 3	模座	(157)
§ 4	模具设计	(159)
§ 5	变形温度	(173)
§ 6	润滑剂	(174)
§ 7	打击能量	(177)
第六章	电子计算机辅助设计	(180)
§ 1	叶片精锻件 CAD 中的几个基本问题	(183)
§ 2	叶身单位流动应力与载荷计算	(199)
§ 3	榫头的单位流动应力与载荷	(221)
§ 4	叶片锻造过程模拟	(236)
§ 5	平锻机聚积的 CAD 过程	(248)
参考文献		(251)

第一章 叶片锻造工艺

§ 1 叶片成形方法

航空喷气发动机、燃气轮机、汽轮机和工业压气机的叶片，从形状上分类，有无榫头叶片，单榫头叶片，带冠叶片和带阻尼台的叶片等。从材料上分类，有铝合金叶片，合金结构钢叶片，不锈钢叶片，钛合金叶片和耐热合金叶片等。总而言之，叶片是形状尺寸关系复杂、材料质量好和性能要求高的一类零件。

航空发动机的压气机叶片主要采用半精锻或精锻方法生产。钛合金风扇叶片和镍基耐热合金涡轮叶片目前仍然使用普通模锻生产。但是国外对各种叶片的锻压生产，都很注重精锻工艺。

除锻造方法外，也有一些叶片，如涡轮整流叶片主要采用铸造方法生产，汽轮机大叶片采用自由锻坯。

普通的叶片模锻件，叶身和榫头都带加工余量，虽然从工艺上看比较简单，但其缺点主要在于材料利用率低，机械加工量大，以及叶片内部流线容易外露而降低性能。

精锻的叶片除进排气边缘外，甚至连榫头内缘板面都不需要机械加工，这就可以克服上述那些缺点。不过精锻工艺难度大，对锻压设备要求吨位大、导向精确；锻模的设计和

制造要精确；检测方法和仪表要保证精度和迅速可靠。因此，精锻叶片的生产组织工作很复杂，不过其技术经济效益极富吸引力。

我国生产叶片的工厂，设有锻锤、热锻曲柄压力机、平锻机、螺旋压力机或高速锤等。所有这些设备，各具所长。曲柄压力机和平锻机用于精锻叶片，在国外甚为流行，因为生产率较高，也易于实现机械化生产。但生产实践表明，这类设备的精锻效果仍不理想，原因在于滑块行程固定，而各部件的配合间隙及其弹性变形随毛坯的变形抗力而变化，这就导致叶片锻件尺寸不稳定。此外，模具与毛坯接触的时间长，而且冷却条件差，因此模具工作寿命较低。

模锻锤用于精锻，在国外不乏例证。至今苏联、英国和奥地利等国的一些厂家仍在利用大吨位的模锻锤从事叶片精锻。锻锤与曲柄压力机不同，它没有固定行程，毛坯与锻模的接触时间短，对提高叶片精度和锻模寿命有利。但是由于导向精度差、打击能量控制不稳定，再加以噪声和震动等固有缺陷，在锻锤上进行叶片精锻仍然是有争议的。

高速锤的应用，直到今天仍有不同的评价。尽管如此，高速锤的下列优点是公认的。

1. 打击速度高，有助于提高锻件精度；
2. 设备体积小，制造方便，占地面积小，对地基要求不高。

所以，高速锤可用于一些叶片的精锻。

螺旋压力机兼有上述各种设备的优点，最适宜叶片精锻。

叶片成形方法，如上所述有多种方案可供选择。影响叶

片锻压成形的因素很多，有材料性质，加热方法，制坯方法，制模水平以及现有锻压设备条件等。为此，锻压技术人员应了解或掌握的知识面是相当宽广的。即使是叶片普通模锻，其工艺过程至少包括这样一些工序：下料、表面质量检查、加热、毛坯局部顶锻、外表检查、打磨疵病、加热、顶锻成形、切边、打磨毛刺、加热、终锻成形、切边、腐蚀检查、表面热处理、加热、热精压、切毛边、校正、热处理、最终检测尺寸精度等。至于叶片精锻，则更为复杂，其工艺过程为：原材料表面质量检查、精确下料、三氯乙烯蒸汽清洗、表面酸蚀清理、浸涂润滑剂、表面检查、加热、挤压杆部、检查、吹砂、酸蚀处理、浸涂润滑剂、加热、锻粗毛坯端部、表面检查、抛光、超声波洗涤、酸蚀处理、静电喷涂玻璃润滑剂、检查、加热、预锻成形、检查外表、吹砂、酸蚀清理、静电喷涂、加热、终锻成形、检查外表、吹砂、滚光、加热、切边、检查、三氯乙烯蒸汽清洗、热处理、校正、时效、检查外表、抛光、滚光、吹砂、酸蚀清理、检验、入库等数十道工序。各道工序都在不同程度上影响锻件质量，因此，锻压技术人员没有多方面的知识和技能，是难以适应现代生产技术需要的。

§ 2 叶片材料

叶片材料取决于零件对机械性能的要求。

一、航空发动机叶片

发动机的压气机叶片要求高的持久强度、良好的抗腐蚀能力、高的抗疲劳强度和抗振性。工作温度在250℃以内，应

选用铝合金，因为在该温度区域内，铝合金具有高的比强。当工作温度为 250°C — 450°C 时，可选用钛合金，因为这时钛合金的比强最高。若工作温度高于 450°C 时，应选用不锈钢。

亚音速或低超音速飞行情况下的发动机，其压气机叶片通常采用铝合金，其中有LD 5、LD 6、LD 7、LD 8、LD 10和LY 2等。

钛合金在发动机中，越来越多地取代铝合金和不锈钢。常见的钛合金牌号有TA2、TA6、TA8、TC4和TC9等。

在高温下工作的压气机叶片，采用结构钢或不锈钢可保证较高的强度，其中有30CrA、30CrMnSiA、30CrNiMoA、Cr17Ni2、18CrNiWA、40CrNiMoA和13Cr14NiWVBA等。

国产的几种航空发动机，其压气机工作叶片和整流叶片所用材料，见表1-1。

涡轮工作叶片处于很高温下运转，因此所用材料主要是镍基耐热合金和其它耐热合金，见表1-2和表1-3。

二、燃气轮机叶片

燃气轮机叶片的工作温度与燃料种类有关，可高达 700°C 以上。适合制造燃气轮机叶片的材料有不锈钢、耐热奥氏体钢、镍基和钴基合金等。镍基合金是沉淀硬化类热强材料，析出相为 $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$ 、 Ni_3Ti 和碳化物。钴基合金和奥氏体钢都是随碳化物析出而硬化，析出相为 Me_2C_3 型，这类材料具有很好的热强性。

合金的化学成分不同，对锻压的要求也有所区别，从下

表1-1

压气机叶片材料

零件	机种	8F1	811	815
	压气机工作叶片		1—6级 LY2 7~8级 13Cr14Ni WVBA	1级 Cr17Ni2 2—5级 LY2 6~9级 Cr17Ni2
压气机整流叶片		进口导流 LY2 1~7级 LY2 8级 4Cr14Ni 14W2Mo	1级 30CrMnSiA 2~5级 LY2 6~9级 Cr17Ni2	1级空心叶片 Cr17Ni2 1级实心叶片 Cr17Ni2 (铸) 2、4、5、6级 1Cr11Ni2W 2MoVA 3级 Cr17Ni2 (铸)

表1-2

涡轮叶片材料

零件	机种	850	851	811	815
	工作叶片	一级	GH33	GH37	GH37
二级		GH33		GH37	GH37
导向叶片	一级	K11 K12	K3	K1	K3
	二级		GH33	K2	K3

表1-3

常用的涡轮叶片材料

牌号	GH33	GH37	GH49	GH135	GH130	GH302	GH143	GH151	K1 K2 K3	K8
备注				铁基合金代替GH33	铁基合金代替GH37		温度高于900℃	温度高于950℃		代替K1 K2

料、加热到终锻成形都应分别对待，以便得到高质量的锻件。如均匀细密晶粒的锻件，其交变强度较高，所以应严守锻压规范，以免形成粗晶。镍基和钴基合金的变形抗力很大，变形温度范围较窄，应注意在不同的锻压设备上采用不同的锻压规范，确保锻件质量。

三、汽轮机叶片

由于工作温度和工作介质不同，汽轮机叶片对材料的要求也不一样。高压部分由于进汽温度高达600℃以上，汽流速度快，因而叶片受力大，应采用热强奥氏体钢。国内厂家一般用1Cr13和2Cr13。

汽轮机低压叶片，鉴于温度应力不明显，可选用高强度钢。但由于蒸汽腐蚀，多选用不锈钢。这类材料的塑性好，在锻压时没有特殊困难。目前，出现了以钛合金代替不锈钢来制造汽轮机叶片的趋势。

§ 3 毛坯准备

一、下料

将棒材分割成叶片毛坯，所用的基本方法与其它锻件所用的方法是一致的，其中有在车床、铣床或锯床上切割或压

力机上剪切等方法。切割不锈钢、钛合金或耐热合金时，速度不宜过快，圆盘锯片或铣刀的切向速度应小于15米/分钟。

叶片精锻对下料要求也很高，不仅尺寸要准确，而且端面应平整，毛刺等不允许存在。精锻毛坯的下料方法，一般是将棒料先切成一定长度的坯料，打磨或削去表层上的疵病后再按尺寸切割成单个毛坯。

不同的材料，其切割方法是有区别的。有色金属如铝合金和铜合金，在车床上，锯床上或铣床上切割都是允许的，唯独不宜用剪床下料，这是因为不但精度不足，而且剪切端面欠平整，还容易产生裂纹。如果用圆盘锯下料，虽然效率不低，尺寸精度也相当高，但是由于有色金属较软，锯割端面将留下毛刺，锯割损耗也比较大。

阳极机械切割，其切口宽度一般不大于3毫米。不足之处主要是效率低，切割速度约为20平方厘米/分钟；端面质量较差，产生的多孔疏松层厚达1—2毫米，必须切除之后方可用于精锻。阳极切割后必须增加车端面工序，因而增大材料消耗。

砂轮切割法，生产效率高，切割表面也比较光整，尺寸精度较高。缺点主要是由于砂轮片与金属剧烈摩擦而产生很高的热效应，导致切割面上的金属过热，甚至过烧。特别是耐热合金，产生这种现象是不允许的。为此，应在切割过程中加以冷却，如可在充有液体冷却剂的容器中切割。还应指出，砂轮片的工作寿命较低，所以切割速度不宜太快，若控制在50米/秒的状态下，既可保证一定的工作寿命，砂轮切割效率也将达到10平方厘米/分钟。

轴向加压剪切是一种新工艺，可有效地提高坯料的剪切

精度和剪断面的平整度。尤其是对于有色金属，可得到形状畸变极小、断面粗糙度很小的剪切毛坯。这种方法在国内应用及研究的时间都不长，剪切情况如图 1—1 所示。

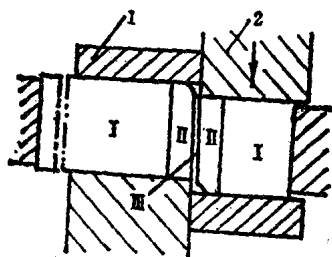


图 1-1 轴向加压剪切
1—定刀片；2—动刀片

在剪切过程中，棒料内部可分为三个区域，其中 I 区是弹性变形区，II 区是塑性变形区，III 区是剧烈剪切变形区。这种现象对一般剪切或轴向加压剪切都是共同的，但各区域特点不同对剪切质量影响很大。

二、毛坯表面清理

毛坯表面状况对精锻件的质量有着决定性的影响，因此必须将缺陷清除。

铝合金棒料常有粗晶环和表面发裂，下料前应先车去一层表皮。一般情况下，对于棒料可去除 1—3 毫米，对于铸锭至少应车削去除 5—8 毫米。

钛合金原材料的表皮粗糙并有发裂，下料前应车削表皮。直径小于 50 毫米的挤压棒料，削去 2 毫米；直径大于 50 毫米时，则应削去 3 毫米以上。自由锻钛合金坯料，直径小于 50 毫米时，削去 3 毫米；直径大于 50 毫米时，则应削去 5

毫米以上。

耐热合金叶片，对毛坯表皮质量的要求很高，锻造加热之前先经车削再磨削，去除表皮上的裂纹。

除上述途径外，还可以用电解加工、阳极机械加工方法去除毛坯的表面缺陷。

§ 4 加 热

在每一道加热工序中，都必须遵守加热规范，以免产生过热、过烧、燃气污染以及合金元素蒸发等现象。

毛坯加热方式，大体上有煤气或油炉加热、电阻炉加热、电感应加热、惰性气体（如分解氨、丙烷、锂蒸气等）保护加热和不完全燃烧保护加热等。我国普遍采用煤气或油炉、箱式电阻炉加热，少无氧化加热尚未得到广泛的采用。

英国GKN和DMB两公司采用煤气转炉加热，毛坯喷涂玻璃润滑剂，防氧化效果良好，所生产的叶片锻件精度高、粗糙度小。英国波列斯多尔叶片精锻厂采用电感应炉加热，并通以分解氨防护毛坯氧化。用马弗炉加热时，也通进分解氨防护。西德的厂家根据不同的叶片材料，用煤气炉、电感应炉或电热回转炉加热，都得到良好效果。英国的一些公司采用丙烷保护的回转电阻炉、氩气防护电阻炉或煤气炉加热，质量甚佳。

文献〔3〕介绍，为减少污染和元素蒸发，可采用图1-2的专用装置对毛坯作保护加热。其办法是，先把毛坯放入装置里，密封后一起送入高温电炉加热。该装置结构简