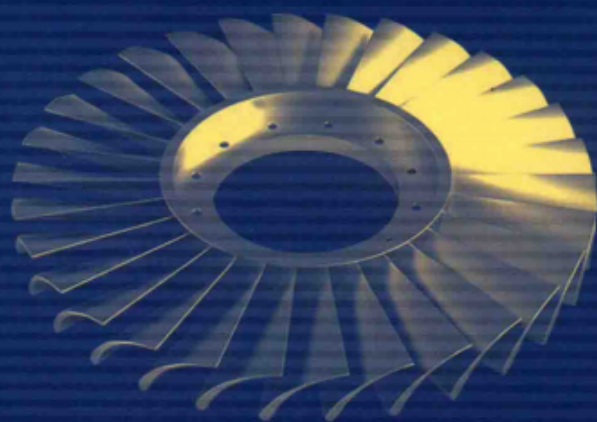




航空发动机 钛合金叶片制造技术及 失效分析

HANGKONG FADONGJI
TAIHEJIN YEPIAN ZHIZAO JISHU JI
SHIXIAO FENXI

刘庆琰 编著



航空工业出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

航空发动机钛合金 叶片制造技术及失效分析

刘庆琰 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书共分5章及5个附录,系统地阐述了航空发动机风扇/压气机叶片结构特点、工作状态,及其对钛合金和制造工艺的需求;详细介绍了钛合金叶片原材料、制造技术、质量控制、可靠性工程、失效模式、预防措施和失效典型案例;同时对大型空心风扇叶片制造技术做了深入分析。在总结经验教训的基础上,依据钛合金特性,对叶片设计、制造技术、质量控制、可靠性工程及使用维修等亟待解决的课题提出了独到的见解。本书内容丰富、翔实具体、信息量大,具有工程实用性和可操作性,不仅为从事航空发动机叶片设计人员、制造人员和修理维护人员提供借鉴和帮助,而且也为有关科研院所科技人员及高等院校师生提供一本工程实践性很强的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机钛合金叶片制造技术及失效分析/刘庆
琰编著. --北京:航空工业出版社,2018.9

ISBN 978-7-5165-1736-9

I. ①航… II. ①刘… III. ①航空发动机-钛合金-
叶片-制造②航空发动机-钛合金-叶片-失效分析
IV. ①V232.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第220666号

航空发动机钛合金叶片制造技术及失效分析

Hangkong Fadongji Taihejin Yepian Zhizao Jishu ji Shixiao Fenxi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018年9月第1版

2018年9月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:69.75

字数:1788千字

印数:1—2700

定价:398.00元

前 言

航空发动机叶片是工作环境最恶劣、使用条件最苛刻、技术要求最严格、制造技术最复杂，以及生产成本最高的零件之一，对发动机的推重比、寿命、可靠性、安全性、维修性等均具有直接的影响。在叶片研制、生产和使用过程中，存在各种各样复杂的技术问题和许多尚未被人们所认识的影响因素，因此，出现不同程度故障是难免的。据不完全统计，在发动机出现的故障中约 80% 是由于叶片失效引起的。

航空发动机叶片的设计与制造是多学科交叉、多部门参与、技术密集、综合性极强的系统工程，涉及到空气动力学、结构强度学、机械振动学、材料科学与工程、制造工艺科学与工程、表面防护科学与工程、特种工艺科学与工程、疲劳试验技术与设备、理化检测技术与仪器等。因此，航空发动机叶片设计与制造技术是航空工业的核心技术，是国防实力和国家科技发展水平的标志。

航空发动机叶片的质量、可靠性、安全性及其工作寿命取决于设计、材料、工艺、维修四者之间的有机配合、优势互补和大力协同。因此，航空发动机叶片的设计与制造必须实行“设计、材料、工艺”相结合，在叶片研制、生产、使用过程中互通情报，沟通信息，扬长避短，优化设计，使设计图样具有工程可行性；不断提高材料的综合性能，确保材料特性与叶片结构相适应；完善制造工艺，使工艺参数与材料特性相适应；合理维修，使叶片深度修理技术状态与设计图样保持一致，从而确保叶片的质量和可靠性。

航空发动机叶片的使用过程是综合考核叶片实际质量的过程，只有通过长时间的循环使用，叶片的设计水平、材料选择、制造工艺、维修质量等才能得以充分地暴露和验证。对于在使用过程中出现的叶片失效，应按规定的程序进行失效分析，通过综合分析，将得出的结论和相关质量信息反馈到各相关单位或部门，从而实现改进设计、正确选材、完善工艺与装备，提高制造技术，并严格做到对叶片正确使用、合理维护，以提高叶片的质量和可靠性。由此可见，叶片失效分析工作，既是叶片质量控制的归宿点，又是质量控制的出发点，把叶片的质量管理工作从生产过程延伸到使用过程，又从使用过程反馈到设计、材料、工艺、使用、维修等各个部门，形成质量闭环控制。这种闭环控制每循环一次，都伴随着叶片质量和可靠性的提高，使叶片设计和制造技术呈良性循环。

回顾过去，我国航空工业创建已 60 多年，目前已建成规模宏大的航空制造和修理工业体系，为我国高技术产业和国防建设增添了强大的军事实力。60 多年来，在技术创新和科技进步的推动下，航空发动机叶片制造技术在许多领域均获得长足进步和快速发展，建立了叶片专业化生产厂，依据航空发动机改进改型和新机研制的需要，“产、学、研”三结合，大胆稳妥地采用新材料、新工艺和新技术，研制出许多先进的精锻、精铸、定向凝固和单晶、高效冷却空心叶片等，为新机研制做出了贡献，为发展高推重比的新一代先

进发动机奠定了技术基础。

但是,航空发动机叶片制造技术发展不平衡,如钛合金叶片的制造技术和工程应用远远落后于其他金属材料的叶片,如结构钢、不锈钢、高温合金叶片等。在国外,1950年,美国首次选用工业纯钛制造F-84飞机的机身隔热板、导风罩、机尾罩等非承力构件,开创了钛合金在航空工业应用的先例;1954年,选用Ti-6Al-4V钛合金制造的发动机压气机盘和转子叶片,揭开了钛合金在航空发动机上应用史的首页。在我国,钛合金自行研制起始于1957年,北京航空材料研究院颜鸣皋教授创建了我国第一个钛合金研究室,和曹春晓研究员等人一起,自行设计制造一台3kg非自耗电弧炉和一台7.5kg真空自耗电弧炉,熔炼出中国第一炉钛合金铸锭,从此这颗“钛合金”种子开始播种在航空工业肥沃的“土壤”中,生根发芽,茁壮成长,开花结果。60多年来,为航空工业结出累累钛合金硕果。

众所周知,早在1795年就发现了钛元素,但由于钛的熔点高,化学性质活泼、纯钛难以制取,钛锭的冶炼需在高真空下进行,钛材制造工艺复杂。因此,钛及其合金长期不能作为结构材料应用于工业生产。到了20世纪50年代,工业纯钛和钛合金先后问世,并首先在航空航天工业上获得工程应用。由于钛合金密度低(4.5g/cm^3),比强度高,抗腐蚀性能优良,具有优异的综合力学性能,是理想的航空航天结构材料,而且在造船、化工、医疗等领域得以广泛应用,显示出钛合金的重要性及其广阔的发展前景。

目前,钛合金在航空工业中较其他材料占有更多的优势,其用量与日俱增,如美国F-22飞机,钛合金用量占总体重量的40%,许多先进的航空发动机的风扇叶片和压气机转子叶片实现了全钛化,使压气机的重量降低30%~35%,显著提高了发动机性能。

但是,钛合金在工程应用中也存在不少风险和难题。耐磨性差是钛合金较突出的弱点,例如,当钛合金叶片叶尖与机匣摩擦时,可能引起钛火,烧伤发动机;在风扇叶片阻尼凸台啮合面上产生微动磨损,导致配合间隙不合适会引起叶片强烈振动,导致叶片疲劳断裂;钛合金叶片榫头与榫槽配合面容易产生微动损伤,诱发榫头发生微动疲劳断裂。为了防止钛合金零件接触面摩擦损伤,目前广泛采用镀银、喷涂二硫化钼、钎焊碳化钨涂层等。

钛合金最高允许工作温度取决于合金成分和零件的寿命。俄罗斯钛合金手册推荐热强钛合金可以在 500°C 以下工作6000h,在 550°C 以下工作3000h,在 600°C 以下工作不超过500h。工作温度和使用寿命的限度是由钛合金的热稳定性、合金元素扩散阻力(渗透性)以及氧化倾向所决定的。热稳定性是指钛合金在温度和应力长期作用下,合金保持塑性的能力。热稳定性与合金的化学成分有关,在使用过程中沉淀相(如 α_2 相)析出越少,热稳定性越高。钛与氧能形成固溶体,在高温下氧缓慢地向钛的内部扩散,形成富氧硬脆 α 层。在一定的温度和工作时间内,可能产生穿透性脆化,这对于型面较薄而受力较大的钛合金压气机叶片来说是特别危险的。“渗透性”氧化是钛合金工作温度不能继续提高的主要障碍,为此,必须采取防护涂层予以改善。

在设计和制造钛合金叶片时,必须充分考虑钛合金特性与叶片结构特点和制造工艺相适应,主要关注7个方面:其一,钛合金具有优良的抗腐蚀性能,在一般情况下不需要采用防护涂层。但是,当工作温度高于 300°C 时,在海洋性气候环境下,有可能产生热盐应力腐蚀。其二,在钛合金零件制造和工作过程中应防止与银、镉、铝等金属及其化合物接触,防止表面污染,在同一个部件中若有镀镉的零件,应尽量避免选用钛合金,若镀镉零

件与钛合金零件在一起,其工作温度不应超过 150°C ,防止脆断。其三,钛合金零件不允许与铝合金、结构钢零件直接接触,避免电极电位差引起的接触腐蚀。钛合金零件表面经阳极化处理后,可降低电偶电流,减缓接触腐蚀。其四,在钛合金零件配合面上,如叶片榫头与榫槽、风扇叶片阻尼凸台间配合等,若配合面接触不均匀,在振动和较高的局部接触应力作用下,会产生微动损伤,导致疲劳强度降低 $20\% \sim 30\%$,甚至会发生微动疲劳断裂。为了降低或避免微动损伤,可在啮合面上镀银、喷涂 Cu-Ni-In 、二硫化钼、固体干膜润滑剂等。其五,钛合金对表面缺陷非常敏感,合金强度愈高,敏感性愈大。对于钛合金转动件,表面粗糙度应优于 $Ra2.5\mu\text{m}$,过渡区转接 R 应提高到同类钢件的 1.5 倍。其六,钛合金在熔融状态下能溶解自身的氧化物,不能用氧化膜保护基体,与空气接触后容易自燃。在发动机实际工作条件下,由于钛合金薄壁件结构失稳,发生严重摩擦,有可能引发钛燃烧。因此,在设计钛合金薄壁结构件时,应采取有效的防止结构失稳摩擦着火措施。其七,钛合金对冶金质量要求很严,化学成分偏析、高低倍组织不均匀、高密度夹杂等冶金缺陷,均会明显降低疲劳抗力,特别是富间隙元素 (O 、 N 、 C) 的硬 α 偏析是不能接受的,应全熔炼炉批报废。

20 世纪 80 年代,根据贵州黎阳航空发动机有限公司(简称黎阳公司)公司研制某型发动机的需求,钛合金工程化应用在我国迈开了第一步。由于该发动机压气机和机匣基本上全钛化,钛合金用量占发动机总重量的 13%,因此,加速钛合金工程应用研究,形成批生产能力已迫在眉睫,刻不容缓。经过 20 年的努力,先后完成钛合金叶片用原材料(棒材)技术标准的制定,钛合金叶片模锻工艺、真空热处理、电解加工、机械抛光、蓝色腐蚀、精密抛光、振动光饰、喷丸强化、榫头镀银、喷涂固体干膜润滑剂等 10 余种制造工艺研究。随着新机研制的不断出现,又开展了钛合金叶片精锻、等温锻、尺寸化铣、超塑性成形/扩散连接(SPF/DB)等新工艺和测试方法研究,积累了丰富的工程经验,建立了一条完整的钛合金叶片生产线,具有国内最大的钛合金叶片生产制造能力。目前,生产工艺稳定,叶片质量逐年提高,合格率由原来的 45% 提高到 95% 以上。根据中法双方会签的技术协议,贵州新艺机械厂负责制造 CFM56-7B 型发动机 Ti-6Al-4V 钛合金第四级压气机转子叶片,按照适航试验要求“415E1005A”的规定,该叶片的室温一阶弯曲振动疲劳强度应达到或超过 450MPa (循环基数为 1×10^7),通过了适航试验,并交付法方装机使用,从而使国产钛合金叶片制造技术开始与国际接轨。在钛合金叶片工程应用研究中,始终得到北京航空材料研究院、西北工业大学、宝鸡钛业股份有限公司、抚顺钢厂、上海钢铁五厂、上海材料研究所等单位的大力支持和帮助;特别是在钛合金冶金质量和高低倍组织处理中,自始至终都得到北京航空材料研究院曹春晓院士的指导和帮助。

展望未来,任重而道远,我国航空发动机叶片制造技术和发达国家相比,还存在较大的差距,特别是在钛合金叶片制造技术方面显得更加突出,需加倍努力,尽快缩短这个差距,为此,要做好以下技术攻关工作:

(1) 开展新的熔炼工艺研究,提高钛合金纯洁度

目前国产钛合金全部采用真空自耗电弧熔炼工艺。对于压气机转子叶片和盘件用的原材料均选用三次自耗熔炼,但在生产过程中仍存在化学成分偏析、高密度夹杂等冶金缺陷。国外开发了多种新的钛合金熔炼工艺,如电子束/等离子体冷炉床熔炼、感应熔炼、凝壳自耗电弧炉熔炼等。美国通用电气(GE)公司要求钛合金转动件用的原材料必须经

过一次冷炉床熔炼,以提高钛合金的纯洁度,确保钛合金转动件(如叶片、盘件等)具有更高的疲劳抗力。

(2) 研制新的高温钛合金,为新机研制创造条件

从近百年来航空产品制造技术发展史中,可以清楚地看出先进的航空装备在很大程度上取决于材料的发展,因此,航空材料是发展航空制造技术的物质基础和先导。新材料和新工艺相继问世,以及测试技术的进步,又引发新的设计理念和新的设计结构,并推动其成为现实。如此,相互促进发展,形成不断创新的航空制造技术。

钛合金发展至今,最高工作温度已达到 600℃,如英国的 IMI834、美国的 Ti-1100、俄罗斯的 BT36、中国的 Ti60 等。国外新一代航空发动机的问世,都伴随着新型高温钛合金的工程应用,如 IMI829 和 IMI834 钛合金分别为 RB211-535E4、EJ200、PW300 系列、Trent 系列等发动机提供制造钛合金转动件的技术支持。工作温度超过 600℃,钛合金抗氧化性能急剧恶化,对合金的塑性,特别是疲劳抗力均会产生不利影响。因此,在 600℃使用的钛合金必须采用防护涂层,以改善合金的抗氧化性能。

钛合金新的发展方向主要有三个领域:

一是 Ti-Al 系金属间化合物为基体的高温钛合金。该类合金工作温度可达 650℃或更高,是非常有发展前途的结构材料。目前比较成熟的 Ti_3Al 基合金有美国的 Ti-24Al-11Nb 和 Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo;中国的 TD2(Ti-25Al-10Nb-10-3V)和 TD3(Ti-24Al-15Nb-1.5Mo)和 TD4 合金。 $TiAl$ 基合金具有优异的高温强度和抗氧化性能,美国研制的 Ti-48Al-2Nb-2Cr 和 Ti-47Al-2Mo-2Nb-0.8TiB₂ 合金,已开始获得工程应用。到目前为止,限制 Ti_3Al 和 $TiAl$ 基合金工程应用的主要障碍是该类合金的脆性。因此,解决 Ti_3Al 和 $TiAl$ 基合金的脆性问题是实现这两类材料工程应用的重点和难点。

二是钛基复合材料。主要有颗粒增强和纤维增强两类,前者颗粒品种多,制备工艺方便,具有广阔的发展前景;后者加工工艺复杂,价格昂贵。SiC 纤维增强的钛基复合材料在 F119 发动机上获得首次应用。北京航空材料研究院研制的陶瓷颗粒增强钛基复合材料 TMC-2,用于试制的某型发动机第四级压气机转子叶片,在室温下做一阶弯曲振动疲劳试验,循环基数取 1×10^7 ,疲劳极限(σ_{-1})为 431MPa。

三是阻燃钛合金,发展该合金的目的主要是防止发动机“钛火”。目前,美国的 Alloy C 阻燃钛合金已用于 F119 发动机;俄罗斯的 BTT-1 和 BTT-3 阻燃钛合金已用于制造机匣和叶片,并通过试车考核,我国已开始阻燃钛合金工程化应用研究。

(3) 开展叶片锻件精化工艺研究,提高合格率,降低制造成本

目前,航空发动机钛合金叶片锻件,主要采用普通模锻工艺制造。由于锻造毛坯加工余量大(2~3mm),原材料利用率较低,例如,某型发动机 TC11 钛合金第一级整流叶片材料利用率仅为 10%~15%。因此,开展钛合金叶片锻件精化工艺研究十分必要。通过技术攻关,某型发动机的 TA11 钛合金第一级~第三级高压压气机转子叶片采用精锻后,原材料可节省 42%;某型发动机的 TC6 钛合金第一级~第二级风扇叶片采用等温锻后,不但明显改善叶片的高低倍组织,而且原材料可节省 45%左右,锻件合格率也有显著提高。因此,钛合金叶片精锻和等温锻工艺在国内外获得迅速发展,在工程上得到广泛应用。

(4) 开展超塑性成形/扩散连接工艺研究,为制造大型空心钛合金风扇叶片创造条件

细晶钛合金在适宜的变形温度下,出现超塑性现象,延伸率(δ_s)可达到 500%。利

用这一特性,发展了钛合金超塑性成形(SPF)工艺。后来又发现在超塑性成形温度下,钛合金具有良好扩散连接(DB)特性。将这两种特性结合起来,便发展了钛合金超塑性成形/扩散连接组合工艺。该工艺在一次循环加热过程中可完成变形和连接两个过程。这种接近精锻的组合成形新工艺,用以制造大型空心钛合金风扇叶片具有很大的优势。据初步估计,采用此项新工艺制造钛合金空心叶片与常规工艺相比,可减轻重量40%左右(叶身上的阻尼凸台可以取消),并降低制造成本50%左右。可见,此项新工艺的推广和工程应用,为钛合金叶片压力加工和焊接开拓了一个新的工艺领域。

目前,美国普惠公司采用SPF/DB工艺制造叶身无阻尼凸台的“迷宫”型腔的Ti-6Al-4V钛合金空心风扇叶片,用于PW4000系列涡轮风扇发动机;英国罗罗公司也采用该新工艺制造出一种叶身无阻尼凸台,内腔具有波浪形桁架的Ti-6Al-4V钛合金风扇叶片,该叶片已在许多民航涡轮风扇发动机上获得广泛应用;我国有关航空院所和企业,根据国家研制大运飞机需求,对TC4钛合金对开式空心风扇叶片的研制工艺已经启动,并取得很大进展。

本书共分5章和5个附件。第1章主要对工业钛合金的晶体结构、化学成分、相变点、组织、性能、特点等做了概括介绍;对钛合金金属学基础、合金化理论、不同加热和冷却条件下的相变反应、不同显微组织对性能的影响等做了比较详细论述;对钛合金各种热处理工艺及其对钛合金组织和性能影响做了具体说明;对钛合金铸造、锻造、焊接、机加、抛光、电解等工艺性能做了简要介绍;最后对钛合金常用术语及其对应的金相组织做了解释。第2章主要对风扇/压气机叶片结构特点、工作状态、对钛合金性能数据要求、选材原则等做了详细描述;对钛合金在工程应用中的风险做了一般性分析;对钛合金熔炼、半成品制造工艺及其质量控制做了详细分析;对钛合金原材料入厂复验及冶金缺陷、工艺缺陷、产生原因等做了深入分析,并提出预防措施及供应商质保体系考核办法。第3章主要对钛合金风扇/压气机叶片制造技术现状及发展方向做了概括介绍,在此基础上分别对钛合金叶片现行的铸造、锻造、热处理、机械加工、磨削及抛光、焊接、表面处理及涂层、特种加工(电解、电火花、喷丸、振动光饰)等工艺的分类、适用范围、质量控制等做了详细说明;并对上述工艺与钛合金特性适应性进行系统分析,同时做了许多验证工作;在生产过程中,对叶片出现的各种材质缺陷和工艺缺陷做了深入分析并提出预防措施;该章提供的金相图片,充分显示钛合金不同组织类型、各种冶金缺陷和工艺缺陷的宏观和微观形貌。第4章主要内容包括航空装备可靠性工程基本概念;化学成分偏析、低密度和高密度夹杂、组织不均匀、表面污染、使用条件等对钛合金叶片使用性能的影响;钛合金叶片振动疲劳试验方法及试验结果;叶片表面完整性对叶片疲劳抗力的影响。第5章主要内容包括失效分析的工程概念,失效分析程序,钛合金叶片疲劳断裂、应力腐蚀开裂、氢脆断裂、液态金属致脆断裂、微动磨损、微动磨蚀、微动疲劳断裂的机理及断口特征;预防钛合金叶片失效的思路和技术途径;从收集到的31个钛合金叶片失效案例中,选取18个有代表性的典型案例,分别对每个案例的失效性质和产生原因做了详细分析,并提出预防措施,同时总结出经验和教训。

本书是近50年来我国航空发动机钛合金叶片制造技术、质量控制、失效分析、可靠性研究等方面的全面系统的总结,内容丰富,信息量大。从钛合金原材料研制、生产、工程应用开始,在总结经验教训的基础上,提出钛合金叶片设计、选材、制造技术的发展方

向,质量控制措施,以及使用风险、安全、维修性、可靠性工程和疲劳抗力提高等亟待解决的科研课题;同时也对钛合金叶片失效分析的共性问题、失效机理、失效模式、失效分析程序、断口分析做了比较深入的探讨,并提出预防钛合金叶片失效的思路和技术途径。

本书是国内第一部系统总结航空发动机钛合金叶片从选材、制造、使用直到维修、失效分析与预防的专著。学术思想新颖、富有创新性、求真务实,内容具体实用,具有可操作性。不仅为航空发动机叶片设计、制造和维修人员提供借鉴和帮助,而且也将为有关科研院所科技人员及高等院校师生提供一本工程实践性很强的重要参考书。本书也可作为钛合金材料、叶片制造技术、失效分析与预防等专业研究生的重要参考教材或辅导资料。

由于我国钛合金工程应用起步较晚,全面系统的工程实践经验较少,与制造技术相关的技术条件、工艺说明书、工艺流程、工艺规程不够齐全、配套、完整。本书的出版问世,将会填补这个“空缺”。对今后我国钛合金的发展和工程应用研究会起到推动作用。相信在不远的将来,我国在钛合金叶片设计、制造和应用领域,会有所发明,有所创造,有所前进,从必然王国走向自由王国,赶超世界先进水平。

在本书编写过程中,始终得到中国航发贵州黎阳公司历届领导王良、杜兵劳、牟欣、肖波、刘建平诸位同志的大力支持、帮助和指导。黎阳公司经理办公室丁光俊、涂婷主任为编写本书创造优良的工作平台,并组织精干的工作团队开展打印、排版等工作。黎阳公司科技委于芳、技术管理部田华部长、铸造叶片分厂臧川厂长、锻造叶片分厂赵松厂长给予大力支持和帮助,他们分别组织王丽华、李燕红、杨军、唐华、齐进等同志,参加文字图表录入、图表绘制、排版等繁重的工作,为本书编写付出巨大的劳动。作者向上述为本书编写做出贡献的领导和同志致以衷心的感谢和敬意。

全书由曾凡昌研究员和蔡建明博士主审,对本书提出许多修改意见和宝贵的补充内容,使本书内容更加充实,文理更加通顺;我国著名钛合金科学家、中国科学院院士、北京航空材料院研究员曹春晓为本书作序,对本书出版非常重视,给予很高的评价;空军装备研究院航空所、中国民航科学技术研究院、中国航发涡轮院、中科院金属研究所、空军修理厂、沈阳和世泰通用钛业公司等单位为本书编写给予大力支持和帮助,作者向上述专家、院士和单位表示崇高的敬意和感谢!

2016年5月21日中航发动机控股有限公司在北京组织召开了《航空发动机钛合金叶片制造技术/质量控制失效分析》出版评审会。出席会议的领导和专家有杜兵劳、王良、卢继斌、李文铮、刘大响院士、曹春晓院士、唐智明、曾凡昌、陈斌、陈荣、许亚平、武德安、唐海军、张卫方、蔡建明、钟燕、张溯、胡祥松、阎东辉、张延生、肖波、刘建平。在评审中,专家提出了许多宝贵意见,给予了大力支持和指导,在此,深表感谢和致意。

由于作者水平有限,错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正,愿本书出版能为我国广大从事航空发动机叶片设计、制造、材料、工艺、使用和维修的工程技术人员提供有益的帮助和借鉴。

刘庆琰
2018年5月

目 录

第1章 钛合金概论	(1)
1.1 工业纯钛	(1)
1.1.1 纯钛的晶体结构及其相变点	(1)
1.1.2 工业纯钛的特性、用途及组织结构	(1)
1.1.3 工业纯钛的化学成分和性能	(2)
1.2 钛合金的金属学基础	(4)
1.2.1 钛与合金元素的相互作用	(4)
1.2.2 合金元素对钛合金的强化作用	(7)
1.2.3 杂质对钛合金组织和性能的影响	(8)
1.3 钛合金的分类及其特点	(9)
1.3.1 钛合金的分类方法	(9)
1.3.2 α 钛合金	(9)
1.3.3 近 α 钛合金	(10)
1.3.4 $\alpha + \beta$ 钛合金	(10)
1.3.5 近 β 钛合金	(10)
1.3.6 β 钛合金	(11)
1.3.7 钛合金的特点	(11)
1.4 钛合金相变	(12)
1.4.1 β 相区加热快速冷却(淬火)产生的相变	(12)
1.4.2 β 相区加热缓慢冷却(炉冷)产生的相变	(13)
1.4.3 亚稳相在加热时的分解	(13)
1.5 钛合金显微组织及其对性能的影响	(14)
1.5.1 钛合金的基本相及其特性	(14)
1.5.2 钛合金的基本组织及其形成条件	(17)
1.5.3 钛合金显微组织与力学性能的关系	(20)
1.6 钛合金热处理	(23)
1.6.1 钛合金的退火	(23)
1.6.2 钛合金的强化热处理	(25)
1.6.3 钛合金的形变热处理	(29)
1.6.4 热处理工艺对钛合金组织和性能的影响	(32)
1.7 钛合金的工艺性能	(55)
1.7.1 钛合金铸造工艺性能	(55)

1.7.2 钛合金锻压工艺性能	(56)
1.7.3 钛合金焊接工艺性能	(56)
1.7.4 钛合金机加工工艺性能	(57)
1.7.5 钛合金特种加工工艺性能	(58)
1.8 钛合金术语及其金相图谱	(60)
1.8.1 钛及钛合金术语	(60)
1.8.2 合金化及其相变术语	(61)
1.8.3 显微组织术语及其金相图谱	(62)
第2章 航空发动机钛合金叶片选材、原材料材质分析及其金相图谱	(75)
2.1 航空发动机钛合金叶片选材	(76)
2.1.1 风扇/压气机叶片对钛合金材料的要求	(76)
2.1.2 风扇/压气机叶片对钛合金原材料性能测试要求	(78)
2.1.3 风扇/压气机叶片对钛合金性能数据的要求	(79)
2.1.4 风扇/压气机叶片材料选用原则	(79)
2.1.5 风扇/压气机叶片选材的代用原则	(80)
2.1.6 风扇/压气机叶片钛合金材料的技术管理	(81)
2.1.7 钛合金在工程应用中的风险分析	(83)
2.2 钛合金熔炼、半成品制造工艺及其质量控制	(87)
2.2.1 钛合金熔炼工艺简介及其质量控制	(87)
2.2.2 钛合金半成品制造工艺简介及其质量控制	(89)
2.2.3 钛合金半成品最佳组织的选择	(98)
2.3 钛合金入厂复验及原材料质量检验	(101)
2.3.1 钛合金原材料复验质量控制及材质信息反馈	(101)
2.3.2 钛合金原材料质量检验	(106)
2.4 钛合金原材料常见冶金缺陷分析与预防	(126)
2.4.1 来源于熔炼工艺的缺陷	(126)
2.4.2 来源于热机械变形工艺的缺陷	(204)
2.5 钛合金棒材高倍组织与超声波检验杂波超标相关性分析	(259)
2.6 钛合金棒材原始组织与叶片模锻件高低倍组织相关性分析	(276)
2.6.1 钛合金压气机叶片模锻工艺及质量控制	(276)
2.6.2 钛合金叶片模锻件高低倍组织分析	(276)
2.6.3 钛合金叶片模锻件超温过热、过烧组织分析	(324)
2.7 钛合金原材料裂纹分析	(337)
2.8 两相钛合金高低倍组织检验方法	(347)
2.8.1 钛合金低倍组织分析方法	(347)
2.8.2 钛合金高倍组织分析方法	(349)
2.8.3 两相钛合金金相组织分析	(356)
2.9 两相钛合金金相组织图谱	(357)

2.9.1 钛合金铸造组织形貌	(358)
2.9.2 钛合金锻造坯料组织形貌	(363)
2.9.3 钛合金不同热处理状态组织形貌	(382)
2.9.4 钛合金形变热处理组织形貌	(395)
2.9.5 钛合金热稳定组织形貌	(405)
2.9.6 钛合金重复热处理组织形貌	(406)
2.9.7 钛合金长期热暴露组织形貌	(407)
2.9.8 钛合金典型冶金缺陷组织形貌	(413)
第 3 章 航空发动机钛合金叶片制造技术、工艺缺陷分析及金相组织	(426)
3.1 钛合金叶片制造技术概述	(426)
3.1.1 钛合金工程应用现状	(426)
3.1.2 钛合金叶片制造技术简介	(434)
3.2 钛合金叶片铸造工艺	(436)
3.2.1 钛合金铸造工艺分类及其适用范围	(436)
3.2.2 铸造钛合金特性与铸造工艺适应性分析	(438)
3.2.3 钛合金铸造叶片在航空发动机上的应用	(440)
3.2.4 钛合金铸造工艺缺陷分析与预防	(445)
3.3 钛合金叶片锻造工艺	(450)
3.3.1 钛合金锻造工艺分类及其适用范围	(450)
3.3.2 钛合金特性与锻造工艺适应性分析	(455)
3.3.3 钛合金叶片锻造技术准备工作	(460)
3.3.4 钛合金叶片常规模锻工艺及其质量控制	(462)
3.3.5 钛合金叶片精锻工艺及其质量控制	(516)
3.3.6 钛合金叶片等温锻造工艺及其质量控制	(555)
3.3.7 钛合金叶片 β 锻造工艺及其质量控制	(571)
3.3.8 钛合金叶片超塑性成形工艺	(608)
3.3.9 钛合金锻造工艺缺陷分析与预防	(609)
3.4 钛合金叶片热处理工艺	(644)
3.4.1 钛合金叶片的退火	(644)
3.4.2 钛合金叶片的强化热处理	(646)
3.4.3 钛合金叶片真空热处理	(653)
3.4.4 钛合金叶片重复热处理	(654)
3.4.5 钛合金叶片热处理工艺质量控制	(665)
3.4.6 钛合金叶片热处理工艺缺陷分析与预防	(666)
3.5 钛合金叶片机械加工工艺	(675)
3.5.1 钛合金叶片机械加工工艺分类	(676)
3.5.2 钛合金特性与机械加工工艺适应性分析	(676)
3.5.3 钛合金叶片常规机械加工工艺	(677)

3.5.4 钛合金叶片磨削、抛光工艺试验研究	(680)
3.5.5 钛合金叶片缓进磨削工艺试验研究	(707)
3.5.6 钛合金叶片型面砂带磨削工艺	(711)
3.5.7 钛合金叶片机械加工工艺缺陷分析与预防	(712)
3.6 钛合金叶片特种加工工艺	(724)
3.6.1 电解加工工艺	(724)
3.6.2 电解钻孔工艺	(726)
3.6.3 电解磨削工艺	(727)
3.6.4 电火花加工工艺	(727)
3.6.5 钛合金叶片特种加工工艺缺陷分析与预防	(728)
3.7 钛合金叶片焊接工艺	(740)
3.7.1 钛合金常规焊接工艺	(740)
3.7.2 钛合金高能束焊接工艺	(741)
3.7.3 钛合金超塑性成形和扩散连接组合工艺	(741)
3.7.4 钛合金真空钎焊工艺	(757)
3.7.5 钛合金焊接工艺缺陷分析与预防	(758)
3.8 钛合金叶片表面处理工艺	(761)
3.8.1 钛合金叶片电镀工艺	(762)
3.8.2 钛合金渗氧、渗氮、渗氢工艺	(768)
3.8.3 钛合金叶片防护涂层工艺	(772)
3.8.4 钛合金叶片阳极化工艺试验研究	(778)
3.8.5 钛合金叶片表面强化工艺	(800)
3.9 钛合金叶片质量检验	(802)
3.9.1 原材料复验	(802)
3.9.2 钛合金叶片半成品及成品检验	(802)
3.9.3 我国钛合金材质检验与西方国家的差异	(805)

第4章 航空发动机钛合金叶片使用可靠性分析及其使用性能测试

4.1 航空装备可靠性基本概念	(806)
4.1.1 航空装备可靠性	(806)
4.1.2 航空装备可靠性工程	(806)
4.1.3 航空装备可靠性试验	(806)
4.1.4 航空装备可靠性系统工程	(806)
4.1.5 航空装备维修性	(807)
4.1.6 航空装备使用性能	(807)
4.2 原材料冶金质量对钛合金叶片使用性能的影响	(807)
4.2.1 化学成分偏析对钛合金叶片使用性能的影响	(807)
4.2.2 夹杂对钛合金叶片使用性能的影响	(819)
4.2.3 显微组织对钛合金叶片使用性能的影响	(825)

4.3 钛合金叶片疲劳断裂及疲劳抗力指标	(850)
4.3.1 金属疲劳断裂的基本概念	(850)
4.3.2 叶片振动疲劳强度测试	(855)
4.3.3 叶片振动疲劳试验方法	(861)
4.3.4 航空发动机钛合金叶片振动疲劳试验及其检测结果	(863)
4.3.5 小结	(881)
4.4 表面完整性对钛合金叶片疲劳抗力的影响	(881)
4.4.1 表面完整性定义及其重要性	(881)
4.4.2 机械加工工艺对钛合金疲劳抗力的影响	(882)
4.4.3 磨烧对钛合金叶片疲劳抗力的影响	(883)
4.4.4 表面强化工艺对钛合金疲劳抗力的影响	(884)
4.4.5 圆角 R 尺寸对钛合金叶片疲劳抗力的影响	(887)
4.4.6 表面冶金缺陷对钛合金疲劳抗力的影响	(888)
4.4.7 表面机械损伤及残余应力对钛合金叶片疲劳抗力的影响	(889)
4.4.8 装配不当对钛合金疲劳抗力的影响	(894)
4.5 表面污染对钛合金叶片使用性能影响	(896)
4.5.1 钛合金的氧污染	(896)
4.5.2 钛合金的氮污染	(905)
4.5.3 钛合金的碳污染	(906)
4.5.4 钛合金的氢污染	(907)
4.5.5 钛合金的金属污染	(908)
4.6 使用条件对钛合金叶片组织和性能的影响	(910)
4.6.1 长时间加热对钛合金叶片组织和性能的影响	(910)
4.6.2 循环加热对钛合金叶片力学性能的影响	(916)
4.6.3 使用寿命对钛合金叶片组织和性能的影响	(917)
4.6.4 钛合金构件的失稳与预防	(918)
4.6.5 小结	(920)
第 5 章 航空发动机钛合金叶片失效模式、预防措施及典型失效案例分析	(921)
5.1 钛合金叶片失效分类	(922)
5.1.1 钛合金叶片断裂失效	(922)
5.1.2 钛合金叶片非断裂失效	(929)
5.2 钛合金叶片失效分析程序及内容	(929)
5.2.1 现场调查, 收集失效残骸及碎片	(929)
5.2.2 确认首要失效件 (肇事件)	(930)
5.2.3 复查原始资料	(930)
5.2.4 首要失效件 (肇事件) 的外观检查	(930)
5.2.5 首要失效件 (肇事件) 的材质分析	(930)
5.2.6 应力分析	(930)

5.2.7 断口分析	(930)
5.2.8 模拟试验	(931)
5.2.9 综合分析	(931)
5.2.10 失效分析报告	(931)
5.2.11 失效分析资料的管理	(933)
5.2.12 纠正和预防措施的验证与贯彻	(933)
5.3 预防钛合金叶片失效的技术措施	(933)
5.3.1 发动机叶片失效特点及其原因概述	(933)
5.3.2 提高叶片质量和预防叶片失效的思路	(934)
5.3.3 预防叶片失效的技术途径	(935)
5.3.4 小结	(940)
5.4 钛合金叶片失效典型案例分析	(942)
5.4.1 钛合金风扇叶片失效典型案例分析与预防	(942)
5.4.2 钛合金压气机叶片失效典型案例分析与预防	(971)
5.4.3 钛合金整体叶盘典型失效案例分析与预防	(1022)
5.4.4 钛合金叶片钛火失效案例分析与预防	(1054)
5.4.5 新增失效案例分析与预防	(1058)
5.5 航空发动机钛合金叶片失效分析小结	(1068)
5.5.1 钛合金叶片失效分析工作是发动机可靠性工程的重要组成部分	(1069)
5.5.2 失效分析为叶片使用发展和制造技术提供了依据和发展方向	(1069)
5.5.3 高瞻远瞩,加强失效分析工作,推动发动机研制快速发展	(1071)
附录 1 我国航空发动机钛合金叶片失效案例统计表	(1072)
附录 2 中国钛合金牌号与国外牌号对照表	(1077)
附录 3 BT3-1 钛合金风扇叶片阻尼凸台耐磨层真空钎焊修理工艺及耐磨层金相图 图谱	(1080)
附录 4 TC11 钛合金压气机盘高密度夹杂金相图谱	(1087)
附录 5 钛合金热加工用防护玻璃润滑剂	(1093)
参考文献	(1096)
作者简介	(1097)

第1章 钛合金概论

1795年发现了钛,但由于钛的熔点高,化学性质活泼,纯钛很难制取;钛锭的冶炼需在真空炉中进行,制造工艺复杂,因此,钛及其合金长期不能作为结构材料用于工业生产。从20世纪50年代开始,钛工业获得迅速发展,钛和钛合金作为新型的金属结构材料开始问世。由于它具有密度低,比强度高,抗腐蚀性好,在550℃以下热强度高优点,近50年来获得迅速发展。目前钛合金不仅是航空航天工业中十分重要的结构材料,而且在造船、化工、冶金、医疗等方面也具有日益广泛的应用。钛合金在航空发动机上已取代铝、镁合金及某些结构钢构件,主要用来制造压气机盘、风扇/压气机叶片、鼓筒、机匣等。在飞机上,钛合金可用做蒙皮及各种承力构件。我国钛合金自行研制始于1957年,北京航空材料研究所首先熔炼出钛合金铸锭(3kg),标志着我国从此有了自行研制的钛合金。20世纪70年代,我国引进某型发动机,该发动机用钛量高达13%,从此我国进入了钛合金工程应用研究阶段,40多年来,钛合金在航空发动机工程应用研究获得了丰硕的科技成果,研制出风扇/压气机叶片、盘、鼓筒、整体叶盘、机匣等零部件,积累了丰富的经验和技术资料,产品的质量逐年提高,如钛合金叶片的合格率由原来的50%,提高到95%以上。对钛合金的认识,开始从必然王国走向自由王国。

1.1 工业纯钛

1.1.1 纯钛的晶体结构及其相变点

钛和铁相似,具有同素异构转变,但钛只有两种同素异构体,在882℃以下为 α 钛,具有密排六方晶格;在882℃以上直到熔点(1668℃ $\pm$ 5℃)为 β 钛,具有体心立方晶格。纯钛在882℃以下, α 钛是稳定的,在882℃会发生 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 转变,因此,称 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 的转变温度为 β 相变点。 β 相变点温度对化学成分非常敏感,如纯钛的 β 相变点为882℃,若含有杂质元素氧和氮,当含量小于0.15%时,则 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 相变在885~920℃范围内进行。钛和钛合金在 β 相变点以上或以下进行变形加工和热处理,所得到的组织和性能差异很大,因此, β 相变点的温度是制定热加工工艺规范的重要依据。

1.1.2 工业纯钛的特性、用途及组织结构

工业纯钛系指具有不同杂质(如铁、碳、氧、氮、氢等)含量的非合金化钛。它不能进行热处理强化,具有高塑性、易成形、耐腐蚀等特性,并且易于熔焊和钎焊。焊缝强度可达基体的90%。长期工作温度为300℃,主要用于制造各种非承力航空结构件,如蒙皮、隔热板等。半成品有板材、棒材、管材、丝材、锻件和铸件。

工业纯钛 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度为 $885 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，其组织结构与加热温度和冷却方式有关。工业纯钛在 β 相区加热，保温后缓慢冷却可获得等轴 α 晶粒组织，如图 1-1 所示；在 β 相区加热，保温后快速冷却，可获得锯齿状和针状 α 组织，如图 1-2 所示。由于氢杂质的影响，在等轴 α 组织中析出针状的氢化钛（图 1-1 中（a））；由于少量铁的存在，在等轴 α 组织中析出稳定的球状 β 质点（图 1-1 中（b））。在工业纯钛和某些 α 型钛合金中，都有少量的 β 相。由于 β 质点的存在，可以阻止晶界移动，有助于细化晶粒； β 相还可以改善合金的成形性，增加工业纯钛和 α 型钛合金对氢的溶解度。

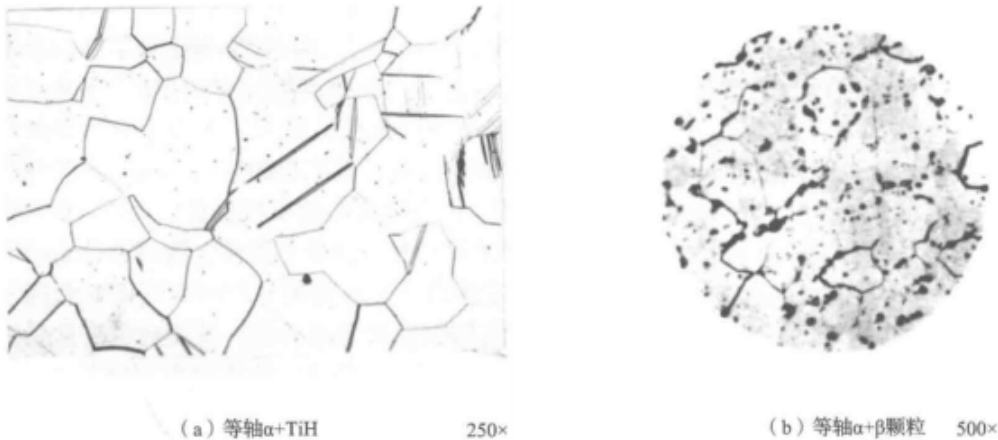


图 1-1 工业纯钛 $700^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 空冷后等轴组织

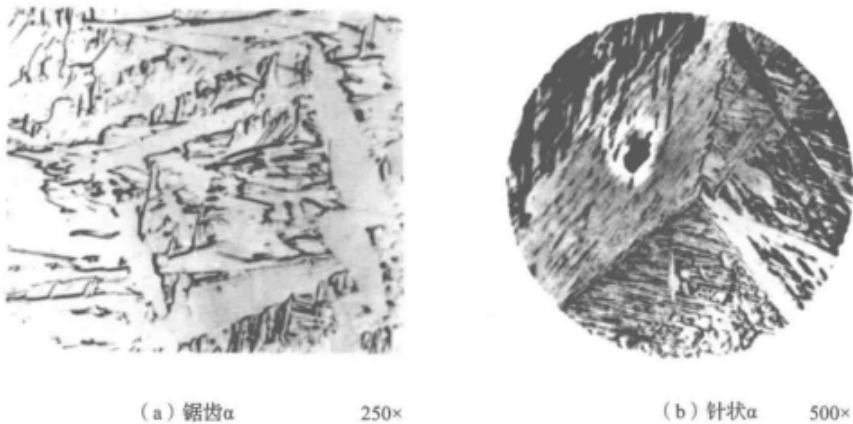


图 1-2 工业纯钛 $1000^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 水冷后组织

1.1.3 工业纯钛的化学成分和性能

有关工业纯钛的化学成分和力学性能详见 2002 年 1 月中国标准出版社出版的《中国航空材料手册》第 4 卷钛合金及铜合金，在此不再赘述。

钛的突出特点是抗腐蚀性能好，在海水和大气环境中，不发生局部腐蚀和晶间腐蚀。钛的抗腐蚀疲劳性能也较好。钛不仅密度低，而且线膨胀系数也小，因此在工作温度变化时，热应力也较小。钛的几个主要物理性能与铝、铁比较详见表 1-1。