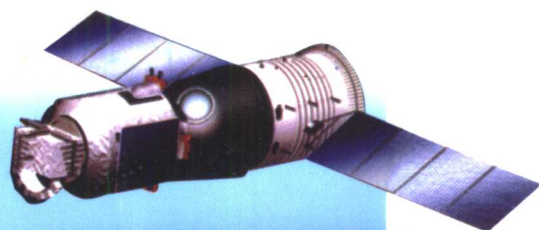


中国航天科技集团公司人力资源部组织编写



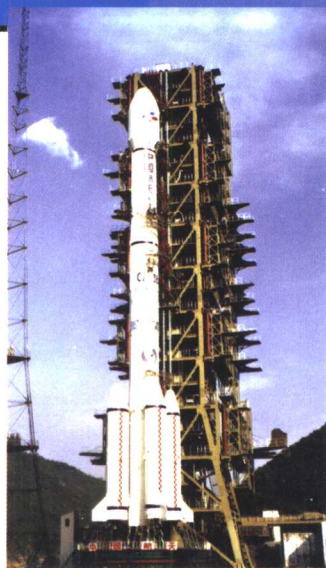
航天制造技术

高级技术工人四新知识培训教材



主 编 易维坤

副主编 杜 斌



中国宇航出版社

航天制造技术

高级技术工人四新知识培训教材

中国航天科技集团公司人力资源部组织编写

主 编 易维坤

副主编 杜 斌

中国宇航出版社

图书在版编目(CIP)数据

航天制造技术/易维坤主编. —北京:中国宇航出版社,2003.8
高级技术工人四新知识培训教材
ISBN 7-80144-654-2

I.航... II.易... III.航天工业—技术工人—技术培训—教材 IV.V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 069491 号

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 北京市和平里滨河路 1 号 邮编 100013
(010)68373103 (010)68373185(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
北京市阜成路 8 号 北京市海淀区海淀大街 31 号
(010)68371105 (010)62579190

承印 北京市社科印刷厂

版次 2003 年 8 月第 1 版
2003 年 8 月第 1 次印刷

开本 1 / 16

规格 787 × 1092

印张 20.5

字数 525 千字

印数 1~5000 册

书号 ISBN 7-80144-654-2 / V.074

定价 48.00 元

本书如有印装质量问题可与发行部调换

序

航天技术是探索、开发和利用宇宙空间的综合性工程技术,是当今世界高科技群体中最具影响力的科学技术之一。中国航天在高科技领域中率先跻身世界先进行列,是中国国际地位和综合国力不断提高的重要标志,有着巨大的国际影响。

航天制造技术是航天技术的重要组成部分,是发展航天事业的重要基础,也是提高航天产品性能、确保航天产品质量、实现航天科学研究和设计的根本保证,关系到航天事业的生存与发展。从事航天制造工作的工人是航天事业的宝贵财富。在工人队伍中进行专业技术培训,是提高工人队伍素质、完成航天产品制造任务的一项行之有效的措施。培养一批高素质的技能人才,不断提高航天制造技术的水平,始终是航天人为之奋斗的目标。

近期,航天科技集团公司人力资源部组织有关方面的专家编写出版了《航天制造技术——高级技术工人四新知识培训教材》,突出体现了航天科研生产的特色,集团公司将统一使用本教材开展培训工作,以满足航天技能人才培养的需求。

“宝剑锋从磨砺出,梅花香自苦寒来”。愿本书成为广大技术工人和工艺人员的良师益友,在学习和工作中发挥更大的作用。

吴卓

2003年9月

前 言

目前,根据世界航天工业技术飞速发展的现状,以及航天科研生产中的实际需求,在集团公司领导的关心支持下,我们组织有关方面的专家统一筹划,在原航天总公司 1994 年组织编写《工业制造技术纵横谈——四新知识讲座》一书的基础上进一步完善提高,编写出版了这本《航天制造技术——高级技术工人四新知识培训教材》。这本书的出版为工人队伍培训提供了很好的教材。以介绍新技术、新材料、新工艺、新设备为主要内容的“四新知识”培训,是最为广大工人和技术人员所熟悉并得到实践验证的教育方式,可以有效提高学员的技术理论和实践能力,更好地在工作中发挥关键作用。

为方便使用,这本教材在内容上包括了航天制造技术中所涉及的大部分门类,主要有机械制造、加工,电子产品装联,化工产品制造等,涵盖了航天制造技术大多数专业,基本可以满足各相关专业培训的要求。教材在体系结构的设计上,以技术为基线,紧密结合航天实际,融合国内外技术于一体加以介绍,基本反映了航天制造技术的体系。在编排上注重知识深度和广度的结合,国内与国外信息的有机结合,详略得当。本书具有较强的系统性、实用性和新颖性,是高级工人提高技术理论和实践能力的必读教材。

参加本书编写的主要人员有:第 1 讲易维坤,第 2 讲徐新京,第 3 讲张守诚,第 4 讲杨久强,第 5 讲、第 6 讲吴敏镜,第 7 讲王中阳,第 8 讲田继安,第 9 讲张益坤,第 10 讲陶永杰,第 11 讲肖国珍,第 12 讲、第 13 讲杜斌,第 14 讲陈尚达。主编易维坤,副主编杜斌,全书由易维坤统稿。参加本书审稿的有:顾兆旃、王志尧、胡新平、丁咸康、王铁良、吴东流、华菁。负责本书组织管理工作的有:李金生、王维俊、乔小明、田宪琴、王京京、胡哲、魏东明、张鸣、周大珍、喻才良、邢齐、冯合献、赵芬恋、张喜春、刘杭、艾小军等。在此,一并致以谢意。

由于时间仓促,书中还存在一些不足和缺憾,有待再版时进行修订。

中国航天科技集团公司人力资源部
2003 年 9 月

目 录

第 1 讲	
航天制造技术纵横谈.....	(1)
第 2 讲	
非金属材料、复合材料应用技术.....	(26)
第 3 讲	
毛坯精化技术	(54)
第 4 讲	
金属材料与热处理技术	(77)
第 5 讲	
切削工具技术.....	(102)
第 6 讲	
精密与超精密加工技术.....	(118)
第 7 讲	
计算机辅助制造技术.....	(136)
第 8 讲	
特种加工技术.....	(154)
第 9 讲	
特种焊接技术.....	(176)
第 10 讲	
高分子化学与精细化工技术.....	(196)
第 11 讲	
固体装药技术.....	(219)
第 12 讲	
几何量精密测量技术.....	(247)
第 13 讲	
理化试验与无损检测技术.....	(270)
第 14 讲	
电子装联技术.....	(296)

第 1 讲

航天制造技术纵横谈

易维坤□

1 制造技术发展的概况

1.1 二战以来制造技术的发展

制造技术常常受到战争的推动,随战争而发展。人类最早的战争是徒手的战争,后来发明了冶炼技术,就进入了冷兵器战争的时代,火药的出现带来了热兵器战争的时代。蒸汽机及大量机器的出现,特别是 19 世纪以后,由于技术的进步,使得战争的面貌大为改变,其规模和活动的空间迅速扩大。20 世纪以来,现代技术使兵器的发展突飞猛进。20 世纪初爆发的第一次世界大战,每天几乎要消耗数十万发炮弹。第二次世界大战的大规模战役中,双方往往投入上万架飞机(柏林战役中双方参战飞机达 10 830 架),数千辆坦克。一次作战中,损失飞机可达上千架,舰艇几十艘,火炮达数千门。100 多年前恩格斯指出:“暴力的胜利是以武器的生产为基础的,而武器的生产又是以整个生产力为基础,因而它是以经济力量、经济情况、以暴力所拥有的物质资料为基础的。”制造技术会受到战争的刺激而高速发展,其发展又会反过来支持战争规模的加大。

第二次世界大战给人类带来了极大的灾难,社会生产和生活受到了很大的破坏。但是从另一方面看,战争又为制造技术的发展带来了迫切的需求。二战中各国的国防工业高速发展,研制成功大量新武器。无论苏联、美国、英国或德、意、日等国,其国防工业都以很高的速度发展。飞机、大炮、坦克、汽车等武器装备的生产能力迅速地提高。以德国为例,第二次世界大战的后期,1944 年 6 月至 8 月,纳粹德国共向英国发射了 V-1 导弹 10 500 枚。能够以这样大数量生产对当时来说是很高技术水平的武器,可见其制造技术发展的速度之快了。

第二次世界大战后,大约每 10 年就要出现一次革命性的军事技术变革。20 世纪 80 年代以后,尤其苏联的解体,世界的政治、经济、军事力量失去了均势,形势变幻莫测。航空、航天、计算机、信息等一系列高技术的发展使得军事技术的发展节奏加快了步伐。在此期间,世界范围的战争虽然停止了,但是局部战争却从未间断。这种特殊的国际形势促成了为战争服务的军工制造业的发展非常迅速。与此同时由于世界各国进入了经济的恢复和发展时期,有两个重要的因素促进了制造技术的发展:

1) 军工制造技术向民用的转移。二战结束之后,世界各国都致力于修复战争的创伤,努力恢复被战争破坏的经济,改善人民生活。在战争中发展起来的军事技术很快地转向国民经济领域。强大的制造力量转变为发展国民经济的基本手段。例如半导体、原子能、航空、兵器

等的制造技术纷纷向民用领域转移。

2) 由于人们的社会生活需求不断提高,从而新产品不断涌现出来,各种新产品层出不穷。随着技术的不断发展,新产品越来越具有高、特、微的特点。高即高温、高压、高速、高精、高功率、高科技;特即特殊形状、特殊材料、特殊功能;微即微小化。这些新的特点自然要求新的制造技术出现。

1.2 新技术革命促进了先进制造技术的诞生

微电子技术、计算机技术、自动化技术的迅速发展,推动了制造技术向高质量生产和柔性生产的方向发展。从 20 世纪 70 年代开始,大批量的生产模式已不能适应新的市场特点,于是相继出现了计算机集成制造、丰田生产模式(精益生产)。也就是说受市场的多样化、个性化的牵引及商业竞争加剧的影响,制造技术进入了面向市场、柔性生产的新阶段,引发了生产模式和管理技术的革命。20 世纪 90 年代相继出现了智能制造、敏捷制造等新的制造理念。在这样的背景下,传统制造技术与以计算机为核心的信息技术和现代管理技术相结合,在 20 世纪 90 年代初形成了先进制造技术。其显著的特点是:

1) 以实现优质高效、低耗、清洁、灵活生产,提高产品对动态多变市场的适应能力和竞争能力为目标;

2) 不局限于制造工艺,而是覆盖了市场分析、产品设计、加工和装配、销售、维修、服务,以及回收再生的全过程;

3) 强调技术、人、管理和信息的四维集成,不仅涉及到物质流和能量流,还涉及信息流和知识流,即四维集成和四流交汇是先进制造技术的重要特点;

4) 更加重视制造过程组织和管理的合理化和革新,它是硬件、软件、人与组织的系统集成;

5) 多学科交叉融合。制造科学与信息学、生命科学、材料学、现代物理学等科学领域充分交叉融合、产生出一系列的新原理、新概念,并由此发展成新的先进制造技术领域。

1.3 先进制造技术促进了经济发展的全球化

制造技术是国民经济的基础,它创造了人类社会财富的 60%~80%。先进制造技术是高科技的产物,它已成为一个涵盖整个生产过程、跨多学科、高度集成的高新技术。已成为发展速度快、技术创新能力强、技术密集甚至是知识密集的部门。它以其先进性、广泛性、实用性、系统性、集成性、动态性以及与管理的紧密结合和优质、高效、低耗、清洁、绿色、灵活的工艺来适应当前世界经济的发展的多方面要求(产品生命周期缩短,用户需求多样化,大市场大竞争,信息化智能化,以及可持续发展)。它的建立在网络技术基础上的利用新的设计技术(数字化设计、并行设计、协同设计、综合智能优化设计等)、虚拟制造技术等特点,推动着世界经济的发展,促进了经济发展的全球化。

2 航天制造技术在航天工程中的作用和地位

军工制造业肩负着双重使命,既为国家安全与社会稳定服务,又为国民经济发展和国家的综合实力的提高服务。它具有军民结合的特点,成为衡量一个国家的综合实力和科技发展水平的重要标志。它是国家安全的保障和国防实力的标志,是高新武器装备发展和实现国防现

代化的基础,同时也是国民经济发展中的重要力量。武器装备发展出现的信息化、智能化、轻量化、小型化、精确化、一体化的趋势对军工制造业的生产能力和技术水平提出了更高的要求。航天工程是一门高技术,具有很强的系统性、综合性。它的科学研究意义是不言而喻的。几十年的实践证明,制造技术是航天工程的最广泛、最重要的基础之一。制造技术系统的能力、水平都在很大程度上决定了航天工程的发展和进步,从而对国家武器装备的水平和国防能力起到了关键的作用,成为一个重要的支撑力量。

2.1 为导弹武器系统的研制提供重要的技术支撑

航天制造技术是航天产品(包括武器系统)从原理变为真实产品的基础和手段。航天产品(包括各种类型的导弹武器系统、运载火箭和空间飞行器)与民用产品的主要区别是航天产品是技术非常先进、结构复杂的产品,其技术的综合程度最广、先进性要求最高、系统性最强。它需要通过工程领域的设计、材料和制造这三个基本环节产生出来。由于航天产品的科学技术综合性,它所含的科技门类十分广泛,而且它们之间还存在着大量的交叉、综合。因此其制造技术也就涉及更加广泛的专业门类,应用大量的复合制造技术。并且,由于航天产品的高性能和其功能的特殊性,使得其制造技术必须适应其很强的系统性、特殊的结构、特殊的材料、特殊的环境、特殊的功能和特殊的指标这样一系列的特点:

- 1) 针对特殊的结构,制造技术必须具有广泛内涵的技术能力;
- 2) 针对特殊的材料,制造技术必须具备众多的工艺门类;
- 3) 针对特殊的环境,制造技术必须保障十分可靠的质量;
- 4) 针对特殊的功能,制造技术必须涵盖更多的科技门类;
- 5) 针对特殊的指标,制造技术必须保障足够高的精度;
- 6) 针对产品的系统性,制造技术保证具备关键的工艺技术体系。

可以想像,能满足这些特点的制造技术,它的本身也就具有其特殊性。

2.2 武器系统研制成果转化为武器装备的重要条件

航天制造技术不仅要承担型号从设想到实物的转变,而且还要担负把研制的成果转变为装备部队的武器的任务。这就是说,不仅完成试制、试验,保证达到必要的战、技指标,而且还要实现批量生产。从使用部门来说,武器装备还应该满足便于使用、便于存储、便于维修、便于运输、性能稳定一致、成本低廉等这样一些要求。从生产部门来说,研制成果要转化为武器装备,必须是价廉物美的产品,其生产过程应是:1) 技术规范明确,生产工艺稳定;2) 工艺过程科学、合理、经济;3) 生产效率高、适应于批量生产。

航天武器研制的周期长,造价高,在和平时期生产、存储的量不可能很大,但是要求制造部门具有很强的研究试验和技术攻关能力,即创新能力,可以研制出性能很高、技术先进的产品样机,通过试验、改进使之定型。而在战时,航天武器消耗量又很大,这就要求制造部门能够适应快速批量生产,即生产线能够实现快速转换、扩充,还要保证质量,这就要求制造技术具有很高的柔性,是开放式的制造系统。没有这样的制造系统,即使有了先进的研制成果,也很难适应现代战争的需要。

2.3 确保武器系统性能和质量

航天制造技术的水平与航天产品的质量关系密切,产品质量的可靠性、稳定性在很大程度上由制造技术来保证。尤其是产品质量的稳定性,主要靠制造技术的稳定性来保证。

产品的可靠性,首先是设计出来的,它由设计的结构原理、材料选择和元器件的选用及其功能的发挥方式来决定。然而制造在很大程度上影响着产品的可靠性。制造过程中工艺路线的科学性、合理性,工艺方法采取的正确与否等多种因素都会影响产品的质量可靠性。大多数航天企业的生产是试制与批量生产两种不同性质的生产相结合,研制与生产两个不同阶段的生产相结合,技术攻关与稳定生产相结合。在这种特殊的生产模式下,产品质量的可靠性保证有其航天技术的特点。长期以来,航天企业在生产中积累了大量的经验,形成了自身行之有效的产品质量保障技术体系。它是航天产品性能和质量的前提。

2.4 航天企业获得经济效益的主要手段

航天企业的资金利用率是很低的。按国家规定,企业的计划利润率为5%,然而在生产过程中,由于试制、试验、反复修改、技术攻关以及在协作过程中有很多难以预料的因素会造成企业的经费紧张,这也是航天企业经济效益不高的原因。由于资金的不足,企业在生产过程中有些应该进行的前期试验、应该买的仪器设备、应该准备的工艺装备都无法落实,这一方面是一些产品质量不稳定的一个原因,另一方面也是研制周期拖长的重要原因。但是在当前航天企业进入社会主义市场经济的情况下,要获得一定的经济效益,单纯靠减少部分辅助工作量是不行的,只有依靠科学管理和科技进步来提高劳动效率。航天企业几十年来实际上建成了科研生产实力相当强大的体系,可以依靠这些力量来提高自身的劳动效率和经济效益,减少对国家的依赖。

2.5 国防实力和制造水平的重要标志

在现代战争中,导弹武器及卫星的重要性越来越突出。而这些产品的水平又受到制造技术的极大制约,从而制造技术的水平也就成了一个国家能造出什么样水平的现代武器系统的一种标志。当然也就成了国防实力的标志。制造技术在这方面表现为:一是能否造出高水平的武器系统,包括其高质量和稳定性;二是能否迅速地为部队快速提供数量足够的武器装备。因此制造系统除了能制造之外,还要能够快速制造。过去评价制造水平高低,只是看产品的复杂程度和精密程度如何,看它的战术、技术指标;看这样复杂的产品能否做得出来,而不论你用什么方法。但是现在,评价制造水平的是劳动生产率 and 速度,要快速、大量地制造所需要的武器系统,这才是高水平的制造技术。

3 航天制造技术的内涵

航天制造技术的内涵可以从以下几方面来表达:航天型号产品特征性内涵、制造技术的专业性内涵、传统工艺技术的现代化以及工艺技术创新。

3.1 航天制造技术的型号产品特征性内涵

3.1.1 弹头制造技术

弹头结构是导弹战斗部的主体结构,它是把战斗部、弹头控制、导引等部件综合为一体的一个重要部分。在高技术条件下的现代化战争中,要用弹头实现对目标的有效毁伤。在弹头小型化的同时,还要实现隐身、抗激光武器攻击;要承受再入大气层过程中的气动力、气动热、粒子云、等离子壳、核爆尘埃的恶劣环境。弹头在再入大气层时,为了提高其生存能力,还要实行弹道机动、多弹头分导等。因此,它又可以说是具备了一枚导弹的大部分功能。此时弹头作为导弹的有效载荷,又应该有最小的质量,有最大的威力质量比,所以弹头制造有它的突出的特点。一般的弹头结构要安装内部众多的功能部件,所以是一个复杂的、精密的壳体和框架。它在结构上越来越复杂,对制造技术的要求也越来越高。它涉及的制造技术有:多种材料的结构制造技术和涂层技术(如高强高模轻质金属承力材料精密铸造、锻造)、整体数控加工成形技术、金属基复合材料精密成形技术、各种耐热复合材料(多向编织碳/碳端头帽、多功能多向编织碳/环氧端头体材料、法向增强碳/环氧耐热锥体材料、加钨丝的多向编织碳/碳端头帽)成形制造技术、高硅氧复合材料、陶瓷材料或陶瓷基复合材料头罩、耐高温光学头罩和多种涂层(雷达隐身与红外隐身涂层、抗激光涂层、抗核涂层)等的制造技术。

3.1.2 弹、星、箭结构制造技术

弹、星、箭的结构,都是系统的各个分系统部件的安装平台,既提供一个全系统的功能结构形状,又提供各个系统具有相互精确连接及位置。因此它们一般都是一些具有多结合面、多安装基准面的大型结构。其形状大部分为圆筒形、圆锥形或由杆系构成的轻型结构。例如液体推进剂贮箱、多级火箭的箭体和级间段、导弹的弹体、卫星的结构平台、宇宙飞船的舱段、火箭或导弹的整流罩等。其共同特点是大、薄、轻、精并且具有复杂、多加工面。多用铝或铝-锂合金、铝-镁合金以及部分复合材料制造。为了减轻质量,筒形构件用钣金来制造并采用数控或化学铣切加工出块状的坑槽。为了准确地连接或安装其他部件,必须要加工出大量精密的基准面。为了增强刚度,这些结构内表面具有许多加强框和加强筋并开有大小不同形状的窗口。所以它们的制造技术主要是采用钣金成形技术,数控加工技术,焊接、螺接及铆接等连接技术和大型复合材料构件制造技术。其中大型贮箱局部真空电子束焊接技术、钛合金结构真空钎焊等新的焊接技术也已开始应用。这些连接技术不仅要处理许多平面问题,而且还要处理大量的空间曲线之间的对接、连接,这就提出了连接技术的自动化技术的应用问题。所以一些利用计算机控制的机器人焊接系统、自动化铆接机械等技术逐渐扩大了应用的范围。由于技术的进步,制造系统对制造的效率和效益的要求日益迫切,毛坯精化问题也被提到议事日程,所以在一些大型的构件中,也开始应用铸造毛坯的技术。而卫星的大型复合材料承力筒、火箭的仪器舱、卫星支架及整流罩等都需要应用复合材料构件制造技术。

3.1.3 控制、导引、探测部件制造技术

控制、导引和探测系统部件在航天产品中有极其重要的作用。它们是实行精确打击、测量定位的基本功能部件,例如惯导设备、导引头、伺服控制驱动及高效率的物理量转换部件等设备,都是要求很高的精密部件。它们的加工精度高到亚微米甚至进入纳米量级,有的甚至很难有计量测试的仪器来对生产过程进行测量控制。有的部件结构还很特殊,具有薄壁、弹挠性结构;有的要求抗热力学环境及电磁环境,要求在存储条件下性能长期稳定,在强的辐射环境中

保持高的生命力。这些特殊的要求使得其制造具有:

- 1) 能够对高速旋转的陀螺转子进行超精密加工和精密装配的技术;
- 2) 能够对具有精密垂直相交轴系的大小框架类零件进行数控加工的技术;
- 3) 能够对锥杆形、薄片、挠性梁等类弹挠性零件进行精密加工的复合加工技术;
- 4) 能够进行超精密的圆柱形、锥形、球形等偶件和密封件加工的技术;
- 5) 能够进行各种方向和深浅的孔系加工的技术;
- 6) 加工超精密轴对称、球或非球反射面的技术;
- 7) 对超精密特种液体或气体轴承进行超精加工的技术。

3.1.4 发动机制造技术

发动机是导弹、火箭和卫星的动力装置。按照其推进剂的类型,主要分为液体火箭发动机和固体火箭发动机两类。

液体火箭发动机是采用液体推进剂的发动机,其结构包括推力室、涡轮泵、自增压系统、燃气发生器、机架及各种阀门、导管等部件。推力室是一个薄壁、双层、异形的结构,高速旋转的涡轮泵也是一个具有复杂曲面的转子结构,它们都要承受高温高压的环境(温度高达数千 K,压力达 20 MPa),所以采用强度高、塑性好、耐腐蚀的材料制造。其中喷头的精密小孔有斜向、切向,有的要求两斜孔的轴线相交于固定的距离,孔的锐边不能有毛刺;有的密封面要求的加工精度非常高,达亚微米级的精度。还有空间形状的导管系统,它们是薄壁的管系;还有各种阀门,都是精密偶件,可以看出,这样一些构件的加工所需要的技术除了一般的基础工艺之外主要涉及钣金的旋压、超塑与爆炸成形;特种焊接(全位置气体保护焊、电子束焊、离子束焊等);以及精密数控加工和特种加工(电解加工、超声加工等)。此外复合材料的加工及成形技术和无损检测、精密轴系及其在高、低温下的润滑、涡轮转子的高速动平衡技术等,也是发动机制造技术的很重要的组成部分。

固体火箭发动机是采用固体推进剂的发动机。它与液体火箭发动机不同之处是采用的材料品种更加广泛,从超高强度钢、耐高温抗烧蚀材料到复合材料、绝热材料、密封材料、粘接材料等。从结构上看,固体火箭发动机是把推进剂的储存与燃烧结合在一起的,它的壳体既是推进剂的贮箱又是发动机的燃烧室,这就使得固体发动机制造技术上有两个特点:一是高温的燃气通过喉衬扩散到喷管,所以喉衬是一个高温环境下工作的典型构件,必须用非常耐高温的材料来制造,从而形成了喉衬材料和结构的一系列制造技术,例如钨渗铜的金属基复合材料、多向编织的非金属碳/碳复合材料喉衬的制造技术。二是壳体内表面要有隔热、耐烧蚀的绝热层结构,这一绝热层的制造和粘贴要求很高,不允许有任何脱粘,由于绝热层的粘贴是在发动机壳体的内表面进行,又受到发动机尺寸的制约,它的粘贴和无损检测都有很大的难度。除此之外,固体推进剂尤其高能固体推进剂的制造需要有防静电等极其安全的措施也是固体发动机在制造上的一个很有特点的技术。

3.1.5 地面设备制造技术

航天产品的地面设备是航天武器系统的重要组成部分,它包括雷达、特种车辆、各种导弹火箭及其分系统部件的大量发射及测试设备。它们涉及从机械、液压到电子、光学等各个领域的技术。存在着适应高精度安装、测试及各种复杂的环境条件的要求。从制造技术的角度看,无论其功能的重要性或技术复杂程度,都不亚于武器本身。其工艺的跨度几乎涵盖了整个制造技术的范围。目前航天系统已经形成了相应的设计能力和配套的制造系统。

3.2 航天技术的专业性内涵

3.2.1 快速研制技术

航天产品的研制历来都是以长周期为特点的。但近年来国际事务争端与发展进程日益证明,未来的战争本身已经具有不对称性、突发性。在这种情况下,我国航天制造技术系统必须要具备的基本素质就是快速研制能力。它必须建立在快速研制技术的基础上。快速研制的内涵包括制造自动化技术、系统集成技术和先进生产模式三方面的内容。

(1) 制造自动化技术

20 世纪 50~60 年代发展起来的 CAD/CAM 技术为产品的设计提供了有效的计算机辅助工具。至今这一技术在国内外都已经广泛应用,人们已经体会到 CAD/CAM, CAE 和 CAPP 等自动化技术在改变工作方式、工作环境和质量方面起到的巨大作用。

CAD 是计算机辅助设计技术,它包含计算机画图(包括各种视图、剖面图、尺寸标注及修改等),实体造型和几何模型的计算,实现三维模型的二维显示,计算物体的体积、表面积、质量、密度、重心、转动惯量、回转半径等几何特性。

CAM 是计算机辅助制造技术,它指应用计算机进行工艺准备工作的某些活动,主要是数控编程。数控编程有手动数据输入与人机对话交互编程等方式,后者可在计算机内逐步生成零件图形数据和刀具的走刀轨迹数据,并在屏幕上显示出来便于及时修改。

CAE 是指计算机工程分析技术。可以利用计算机对结构的动、静态特性,强度,震动,变形等进行分析。利用结构的数学模型对之进行优化和动力学分析,以避免在外部激励下发生位移、速度和加速度响应。

CAPP 是指计算机辅助工艺设计。它是指利用计算机完成如毛坯设计、加工方法的选择、工序设计、工装设计、工艺参数确定、工艺路线的制定以及工时定额、材料定额计算等工作。CAPP 产生的数据是企业实现科学管理和自动化生产的基本依据。

CAD, CAPP, CAM 是随着计算机辅助技术的发展分别独立发展起来的。它们各自独立成为系统技术。在几十年的发展中,产生了很多性能优良的软件系统,使得工程设计、加工制造的各个阶段的自动化水平大为提高,但是这些技术系统的发展,只针对其本身的专业需求而进行,着重于解决系统内部关心的问题,而对于系统之间的连接、转换则未能解决。因为这些系统产生的结果都是输出纸面文件(产品图纸和技术文档、工艺规程、程序清单、纸带等),无法自动转换为下一步骤的输入,还需要由人工来实现这些转换,使得制造过程的自动化受到局限,因此被称为自动化孤岛。自 20 世纪 80 年代起,人们开始研究 CAD/CAPP/CAM 之间数据和信息的自动传递和转换问题(即集成),来使计算机自动化技术进一步发展。近 20 年的研究发展,已经产生了许多成果,在世界各地创建了许多高效的计算机集成系统,使得制造技术发生了很大的变化。目前在我国,这方面的研究仍然是先进制造技术发展的热门研究课题。在航天工业中“3C”(或“4C”)技术通过十几年来预先研究和购置了大量先进的硬、软件进行多项技术改造,其应用都已经比较普遍。目前各单位正在组织力量大力开发集成应用技术和相应的硬、软件建设。

(2) 系统集成技术

制造技术系统是一个包括从设计—加工—装配—试验这一全过程的各个阶段的技术的一个大系统。而广义的制造技术系统甚至包括从市场需求到产品销售以及售后服务的这样一个

全过程的内容。其中,各个环节的计算机辅助技术都已经产生许多性能优良的成果,但是由于各个阶段的优化不是全局的优化,有时不能为其他阶段所接受,而系统集成作用是将原来独立运行的多个单元系统组成又一个协同工作的、功能更强的新系统。它不是简单的自动联接,而是经过统一规划设计,分析原来单元的作用和相互关系,进行优化、重组而实现的,它使得产品的开发具有全局优化的可能。当前集成的范围已从车间集成(FMS)发展到企业的集成(CIMS),进而到社会(或企业间)的集成;集成的深度已从信息的集成、功能的集成发展到过程的集成;集成的内容已从单纯的技术集成发展到战略、组织、技术和行为的集成;集成的手段已从依赖接口、数据库发展到集成框架和网络、企业资源计划与产品数据管理系统的集成。

(3) 先进生产模式

由于市场形势的发展加上科学技术提供的可能,工业发达国家在制造系统的理论研究方面也不断取得成果。相继提出了一系列制造系统的新概念、新模式。诸如计算机集成制造(CIM)、精益生产(LP)、敏捷制造(AM)、并行工程(CE)、智能制造系统(IMS)、全能制造系统(HMS)、绿色制造(GM)、经营程序再造(BRP)等先进制造生产模式。其本质就是集成经营。它是将企业经营所涉及的各种资源、过程与组织进行一体化的并行处理,使企业具有了精细、敏捷、优质与高效的特征。

航天工业面对多品种、小批量的快速研制要求,单元系统的计算机辅助技术的应用,还不能有效地快速响应。制造业的全球化,使发展中国家面对严峻的挑战。中国企业管理的现代化是一个比纯技术与装备更新更加迫切的问题。必须解决组织的创新、集成经营、新的质量观(全面质量满意、适度质量、质量的时间性)、重组工程、以人为本、以分工协作代替全能、用并行交叉作业代替串行作业等。有专家把当今世界各国的企业正在经历的变革描述为以知识为基础的三大变革:

1) 增强协作。协作是当代企业活动中最重要的发展趋势,它使知识和构想得到更大范围的交换和共享,从而提高企业的活动效率。

2) 分散经营。是把企业分散成能够各自对经营结果负责的自我管理单位,对环境变化具有较强的适应能力。能够共同组成一个效率高的整体。

3) 建设智能基础设施,利用它来为整个企业系统服务,使企业系统能够进行有效的交流和工作。

未来的制造业在某种意义上将成为一种信息产业,用信息技术促进制造业的改造已经成为时代的潮流。2002年以来,国家科技部已经颁布了用信息化带动工业化发展纲要。航天科技集团也已经制定了以信息化带动工业化的发展纲要,决定了下一阶段航天制造技术发展的大方向。

3.2.2 精密和超精密加工技术

由于国防武器尤其是航天产品(导弹、火箭以及各种空间飞行器)的精度越来越高,例如一枚洲际导弹飞越上万千米要命中目标而其偏差只有几百米甚至几十米,那么与之相应,其加工精度当然就很高。精密和超精密加工的概念是随着技术的成熟程度而不断发展的,相对于不同的时期,由于技术的发展处于不同的阶段,加工所能够获得的精度是不同的。虽然各种加工方法都有加工精度问题,并且也都有精度高低,但是并不是任何相对较高的加工精度就叫精密加工。时至今日,精密和超精密加工已经成为一个具有比较确定内涵的技术领域。目前,精密、超精密加工技术是指加工精度进入微米或微米以内甚至纳米级的加工技术。它包括加工的工艺、设备、工具环境及计量手段,是航天产品制造技术中的一种重要工艺技术,是保证导

弹、火箭和卫星控制系统中高精度惯性器件(陀螺仪、加速度计、动压马达、气浮轴承)、伺服机构、导引头部件制造质量的关键制造技术。

精密加工发展到超精密加工的阶段始于 20 世纪 60 年代,几十年来发展十分迅速,从机床、刀具、工艺、计量手段到环境的控制已经产生了配套完整的高水平技术系统。当前,纳米级精度的超精密机床以及计量工具和仪器已经商品化,加工的工艺已经能够达到皮米($1\text{ pm}=10^{-12}\text{ m}$)级的水平。航天工业是精密和超精密加工技术最主要的应用领域。在航天科技集团内一些单位在国内最早开始应用金刚石切削加工技术;最早开始研制并应用误差补偿的理论和实现用普通机床进行超精密加工;研制了回转精度达 $0.03\sim 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 的气浮主轴和导轨的超精密机床;刃口刃磨精度达 $0.025\text{ }\mu\text{m}$ 的超精密金刚石刀具及其刃磨装置;亚微米的在线、在位测量装置均已研制成功并投入应用。铝合金金刚石镜面切削的表面精度已达 $0.05\sim 0.03\text{ }\mu\text{m}$,精密研磨的表面粗糙度达 $0.01\sim 0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。可以加工具有厚度仅为 $20\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 的挠性梁的弹、挠性零件。

对于硬、脆材料而言,近年来发展了所谓塑性域加工的理论和方法。它是采用极细微的金刚石粉砂轮在纳米级的切深下的切削加工,可达镜面级的表面粗糙度水平。

随着航天型号产品研制的发展,超精密加工技术还在向纳米加工的方向前进。事实上激光陀螺仪中的反射镜就要求到亚纳米的表面粗糙度,微型器件和微小型机械的发展也要求超精密加工技术向纳米级精度迈进。扫描隧道显微镜、原子力显微镜技术、塑性域加工技术、离子加工技术等已经把加工的切除量减小到了纳米量级,甚至进行按原子的大小逐层切除材料。

3.2.3 表面工程技术

表面工程技术是对材料经表面预处理后,通过表面改性、表面镀膜、涂敷或多种表面技术复合处理,改变固体金属或非金属材料表面的形态、化学成分、组织结构或应力状态,以获得所需要的材料表面性能的一门系统工程。它是在表面物理和表面化学基础上融合了现代材料科学、现代工程物理和制造技术而发展起来的综合技术。表面工程的主要作用是以少量的改性层、膜层或涂层材料获得基材不具备而又希望具有的性能与功能,因而表面工程技术在有效延长零、部件的使用寿命、提高生产效率、降低材料与能源消耗,降低生产成本等方面具有很大的应用和增值潜力。其最大的优势是能够在不改变材料整体形状的条件下,以多种方法制备出优于本体材料性能的表面功能薄层,赋予零件耐高温、防腐蚀、耐磨损、抗疲劳、防辐射等特殊性能,而且改性层与制作部件的整体材料相比,厚度薄、体积小,但却承担着工作部件的主要功能。表面工程是近代武器装备发展的支撑技术,也是新武器研制的基础和保证技术,在航天武器系统和航天工程中有特殊的意义,应用十分广泛。它主要包括表面改性、薄膜技术和涂层技术三个方面。

(1) 表面改性

表面改性是借助电化学、激光或离子方法对工件表面进行快速或超快速、浅表层面的加热/冷却、氧化,能获得常规方法难以实现的表面处理条件,由此达到表面钝化、合金化、微晶化/非晶化等表面微形貌制作以及复杂结构膜系的制备的目的,对武器或航天器的精密摩擦件、电接触表面以及其他精密小型工件的表面处理具有很高的实用价值。利用离子注入工艺对材料表面进行改性,可以提高星、弹用陀螺、活动部件、轴承材料的抗磨性能,降低摩擦系数,提高惯性仪表的精度,使武器装备的战斗性能显著提高。

(2) 薄膜技术

薄膜技术是利用物理或化学的方法在工件或材料的表面沉积具有特殊性能的膜层。卫

星、飞船等航天器在空间特殊环境下要解决其温控、防静电、抗辐照、防原子氧侵蚀和防冷焊等问题,需要研制高性能的热控薄膜、柔性防静电薄膜、解决复合材料的表面金属化,以及固体润滑和防锈的膜层。利用薄膜技术制备红外焦平面阵列是制造红外探测器的主要工艺技术。在导弹的窗口制备金刚石薄膜可有效地散发热量保护它不受高速飞行导致的可达 5 000 K 的高温而致盲。

(3) 涂层技术

涂层技术是历史最悠久的表面处理方法,施镀简单、生产效率高,在航天工程中应用广泛。例如返回式航天器的碳/碳复合材料防烧蚀涂层,战术武器关键部件的耐高温、防氧化涂层以及导弹武器突防用的新型纳米吸波涂层等。

采用表面工程技术的费用虽然只占产品价格的 5%~10%,但却可以大幅度提高产品的性能和附加值,其平均效益可提高 5~20 倍以上。

3.2.4 固体发动机装药技术

固体发动机装药是固体发动机研制生产的关键制造技术之一。它主要由原材料准备,发动机壳体准备,推进剂制造及发动机总装药检测和主要推进剂、防护层、原材料性能分析等工艺组成。

1) 原材料准备就是对推进剂进行粉碎、过筛、烘干、组批、称量、混合。这些过程都具有危险性,其生产安全是这一工艺技术很重要的方面。

2) 推进剂混合工艺技术是把高能燃烧剂和氧化剂等均匀混合,一般采用立式混合机进行,目前加料仍然由人工进行,既不安全,劳动强度又大。混合机的搅拌桨叶摩擦或静电都可能引发爆炸。

3) 推进剂浇注工艺技术。发动机的固体药柱,其内表面根据燃烧的需要具有不同的型面。因此浇注时需要设置芯模。考虑到生产的安全性,浇注、固化、芯模的脱模的生产过程一般远距离操作完成。

4) 绝热层工艺技术,包括绝热层的粘贴和衬层的喷涂。需要无缝和粘接紧密,不得有脱粘。但是由于粘贴是在壳体内部进行,尤其当壳体直径较小时,比较难操作,需要解决其机械化甚至自动化的技术问题。

5) 发动机的无损检测。从壳体到药柱有多层界面。都不得存有任何的脱粘。其检测的手段目前已经发展到采用超声、X 射线、激光全息和高能直线加速器等手段,分别应用于生产的不同工序和部位,具有不同的检测分辨率,但目前 10 mm 以下的缺陷仍然无法检测到。

固体发动机装药技术是航天制造技术中的重要组成部分,也是其关键环节,它的技术先进性和成熟程度,在很大程度上影响着航天产品尤其是大多数武器的生产和技术水平。当前国外固体发动机装药基本上实现了全自动控制、连续化、大批量生产,其特点是操作机械化、控制自动化、检测实时化、工艺一体化,而我国在这方面同国外相比还有一定的差距,有待进一步提高。

3.2.5 先进连接技术

连接技术是任何机械部件不可避免的制造技术。在航天产品中它包括螺、焊、胶、铆、销、压、封等多种工艺技术。而焊接和胶接是应用最为广泛的。

3.2.5.1 焊接

焊接是航天产品最主要的连接工艺技术。它是将待焊材料在热或压力(或二者并用)作用

下使用(或不用)填充材料,使材料之间达到原子间的冶金结合,形成永久性的连接接头的加工技术。大体上分为三类:钎焊、熔焊和压焊。

(1) 钎焊

钎焊是使被连接的构件之间填充熔点低于被焊材料材料并使之熔化,而在连接的界面上润湿和漫流,从而填充被焊接头的间隙,随后冷却结晶形成不可拆卸的冶金结合的连接方法。其加热的方式有火焰(氧-乙炔)、加热炉、感应盐浴等多种;环境可以是常规的也可以是真空或有保护气氛的。可以用于多种材料的焊接。钎焊连接根据焊料液相线温度高低分为“硬钎焊”与“软钎焊”两类。钎焊有许多与其他连接方式不同的特点:

- 1) 温度远低于母材的熔化温度,对母材性能没有明显的影响;
- 2) 可在焊料熔化温度下对焊件实行整体均匀加热,对全焊缝同时焊接,焊件的温度梯度小,应力变形小易保持焊件的精度;
- 3) 可实现多种异种金属、金属与非金属之间的连接;
- 4) 对热源的要求低,工艺简单,易于自动化,焊件相对具有较高的可靠性。

钎焊的质量与焊料对母材的润湿能力有关。即它与母材之间的互溶度、焊接温度、金属表面氧化物及母材表面粗糙度、表面活性物质及环境气氛等有关。同时钎料的成分和母材的相互关系也有重要影响。使用钎剂可以提高焊料对母材的润湿度,这种方法是人类最早使用的材料连接方法之一。早在公元前5世纪的战国初期,我国已经开始使用锡铅合金作为钎料来连接和修补青铜器和金银饰品。钎焊目前广泛应用于机械制造的各种结构的连接中,尤其在电气和仪表制造中的许多情况下,钎焊甚至是惟一可行的连接方法。在航天工程中某些场合也是不可替代的重要工艺方法,如它应用于液体火箭发动机波纹板夹层结构的低碳钢与不锈钢的钎焊、蜂窝夹层结构、发动机的延伸喷管、管束式燃烧室身部、燃烧室的喷注器蛇形导管、涡轮叶冠、铝波导管以及陀螺仪表许多部件的精密焊接中。

(2) 熔焊

熔焊是将材料加热至熔化,然后冷却结晶成一体,利用液相的相容而实现原子间的结合的连接方法。熔焊根据加热的热源可分为电弧焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊、气焊(利用化学热)等。熔焊的特点是:

- 1) 加热温度高。无论用不用焊料,都要把焊接的材料熔化。
- 2) 焊接伴有冶金过程。在焊接的熔池中,在熔化的金属、熔渣、气相之间存在着化学冶金反应。这些反应影响着焊缝金属的成分、组织与性能。
- 3) 焊件温度梯度大。因而焊件的变形也较大。
- 4) 焊缝金属组织存在着相变,母材与填充金属在焊缝及其附近发生扩散、迁移。

熔焊的质量与焊接接头的形式、金属材料的焊接性、焊接工艺及其规程的选择(焊接的加热方式、焊前焊后的处理、焊接工装的应用)、操作的技艺以及焊接过程的质量控制有关。焊接中容易产生的缺陷主要是裂纹、气孔及缩孔、夹杂和应力腐蚀。熔化焊接以其良好的适应性而在航天工业中得到了广泛的应用。航天产品应用最多的有不熔极惰性气体保护焊(TIG)、熔极惰性气体保护焊(MIG),它们主要应用于多种金属及合金材料(包括不锈钢、高温合金、高强及超高强钢,铝、镁、铜、钛等合金)的焊接,操作方便,没有熔渣,过程易于控制和实现机械化和自动化。等离子焊是一种压缩电弧焊,其功率密度比一般气体保护焊高,其焊缝的深宽比更高,热影响区也较小。真空电子束焊是以高密度的高速电子束加热焊件的焊接方法,其功率密度高达 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$,故其穿透力强,焊缝的深宽比更高,可以一次焊透几十到上百毫米厚的