

# 西安交通大学先进制造技术研究进展

卢秉恒<sup>1,2</sup>

(1.西安交通大学机械工程学院,西安 710049; 2.西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

**[摘要]** 针对中国制造业的第三次浪潮,高端装备的制造技术要求在逐年提高,以飞机为代表的装备制造技术研究是提升我国冷、热加工水平的有效途径。分别从切削加工技术、成形加工技术、增材制造技术阐述了西安交通大学近些年来开展的研究工作,部分研究成果为飞机零部件的加工和制造提供了良好的解决方案,最后回顾了在前沿制造领域如生物制造和微纳制造所开展的研究工作。

**[关键词]** 高速切削;渐进成形;增材制造

**[中图分类号]** TH16 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0004-05

## 1 前言

中国改革开放以来,制造业经历了3次发展浪潮。改革开放之初的家电制造业以引进国外制造技术与装备为主,形成了制造业发展的第一次浪潮;20世纪90年代以来,中国汽车工业以中外合资为主,引进与消化吸收相结合,逐渐形成自主技术,促进了中国汽车工业的大发展。这两次浪潮中,中国巨大的消费市场是制造业发展的最大推动力。据波音公司2010年市场预测报告显示,未来20年,全球商用飞机将新增30 900架,价值总额3.6万亿美元。其中,中国航空市场将需要4 330架新飞机,价值4 800亿美元,中国将成为美国之外全球最大的飞机市场,因此中国的飞机制造业迎来了最好的发展机遇。中国正在酝酿制造业的第三次浪潮,就是以飞机制造为代表的高端装备制造。前两次浪潮的技术特征是大规模生产,飞机制造集成了当代的各种先进制造技术,表现为复杂、精密、小批量等特色。

中国现已成为制造第一大国,但产品和技术基本上仍处于中低端,因此迫切需要走向高端,以在环境与资源的约束下实现可持续发展。而航空装备的制造不仅要求技术先进,还要能够与国外著名

企业抗衡,否则将来无法立足。飞机基本上是订单式生产,设计制造的数字化、柔性化和快速响应性是参与竞争的关键。无论飞机结构件还是飞机发动机中的关键零部件,都具有大型、复杂、精密、柔性等特点,而且材料以难加工材料为主,其切削和成形都存在巨大的技术挑战。加强飞机制造技术的研究,可以全面提升冷、热加工的技术水平,带动我国从制造大国走向制造强国。

## 2 切削加工技术

飞机的大型壁板加工需要高速、超高速加工技术(见图1),铝合金的切削速度现可达10 000 m/min,因而以钛合金为代表的一类难加工材料也需求高切削速度。在多数企业的加工现场中,钛合金的切削速度大多为30~60 m/min,由于它的强度高,导热性差等原因一般认为其加工速度不超过100 m/min。西安交通大学发明的超密齿刀具(见图2)实现了每齿小切削量,铣削线速度在390 m/min以上,实验表明可望1 000 m/min以上。飞机柔性件的材料去除率高达90%~97%,高速切削不仅大大提高了生产率,而且小切削量大大减小了切削力,从而使切削变形很小,保证了柔性件加工的几何精度。

**[收稿日期]** 2012-11-20

**[作者简介]** 卢秉恒(1945—),男,安徽亳州市人,中国工程院院士,教授,主要从事高速加工及装备、增材制造、微纳制造等方面的研究工作;  
E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn

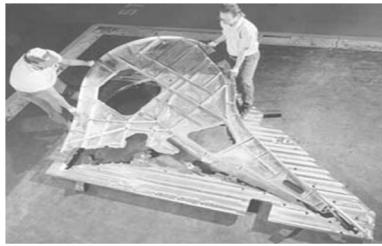


图1 飞机钛合金仓板

Fig.1 Titanium panel of aircraft



图2 超密齿刀具

Fig.2 Ultra dense teeth miller

加工过程中,机床的动态性能是非常重要的。动态性能有两层含义,其一是数控、电机、伺服系统与工作台或主轴系统的机械环节发生机电耦合现象,造成多个轴运动不一致,从而产生跟随(形状)误差;另一个是机电系统在切削力作用下发生切削颤振,从而造成表面振纹。在实际工作中,工作台、刀具或摆头处于不同位置,机械系统的刚度会发生变化。而被加工工件多种多样,工件与刀具接触点不同造成的系统刚度变化,使切削刚度处于时时变化的不可预测状态。编程人员在选择切削参数时,更难以做到优化,使数控机床切削只能达到最佳切削效率的10%~15%,不仅浪费了资源,还存在加工质量不合格的风险。

在这种形势下,智能制造应运而生。它用传感器时时监测机床的工作状态和零件的加工过程,采用智能数控系统实时对监控数据采样,调整其加工

参数(转速、进给及数控程序补偿),从而实现加工的最优化及工件质量可控,这就是智能制造装备的概念(传感器+工艺优化+智能控制软件)。智能控制软件可以成倍提高零件的加工效率,提高其型面精度和表面质量。

### 3 成形加工技术

由于钛合金等材料的变形抗力大,如用等温锻造、渐进成形技术,则可以实现用较小的压力成形,同时也保证了较高的精度,如发动机中的轴零件,其特点是细长型,内孔呈中凹形状,而且精度及直线度要求达到 $0.02\ \mu\text{m}$ 以内。西安交通大学和北京航空航天大学研发的内模具数控渐进成形技术(见图3)不仅可以解决切削加工难题,而且大大提高了效率,使加工时间由数天缩短到以分钟计。西安交通大学开展了成形过程仿真,指导毛坯设计和成形过程控制等研究工作,并研发了渐进成形装备。

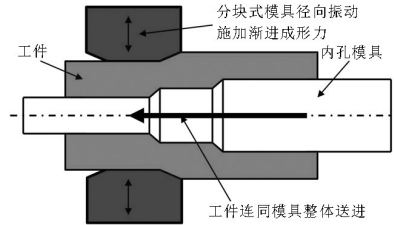


图3 数控渐进成形技术

Fig.3 Incremental forming technology

燃气轮机被誉为装备制造“皇冠上的明珠”,其中叶片产品的精密铸造合格率一直是我国的一个技术难题。西安交通大学开发了一种快速原型、内外一体化陶瓷型浇铸、冷冻成形、升华去水、一体化型壳烧制、消失法精密铸造的技术,如图4所示,该技术可以大大提高成品率,保证铸造精度。

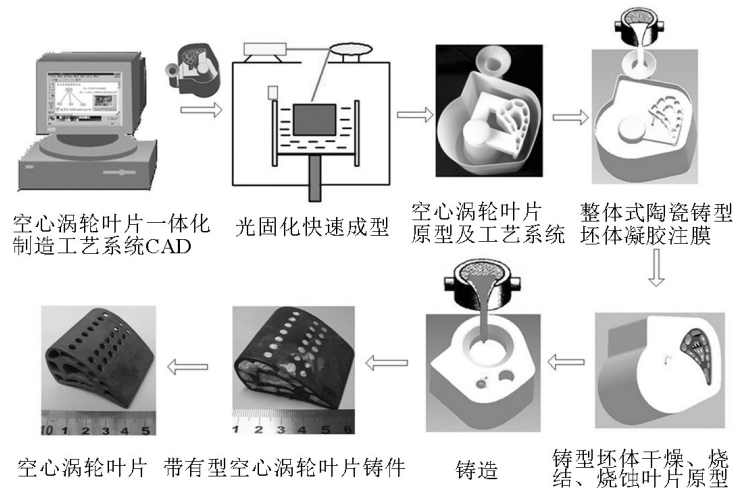


图4 基于快速原型(RP)的叶片快速精铸系统

Fig.4 Rapid precision cast system of blades based on rapid prototyping (RP)

注:CAD为计算机辅助设计

西安交通大学还将快速原型技术应用于制造腊芯模,提供批量制造的铸造腊芯。采用金属喷涂技术,将原型复形为冲压模具,实现了汽车覆盖件模具的开发。为了其成功应用,西安交通大学先进制造技

术研究所20世纪90年代发展了数据集成、工艺集成及精度集成等技术。复形技术理论为其精度集成提供了理论根据及工艺数据,支撑了这一产品快速开发系统在汽车、家电等产业的成功应用(见图5)。

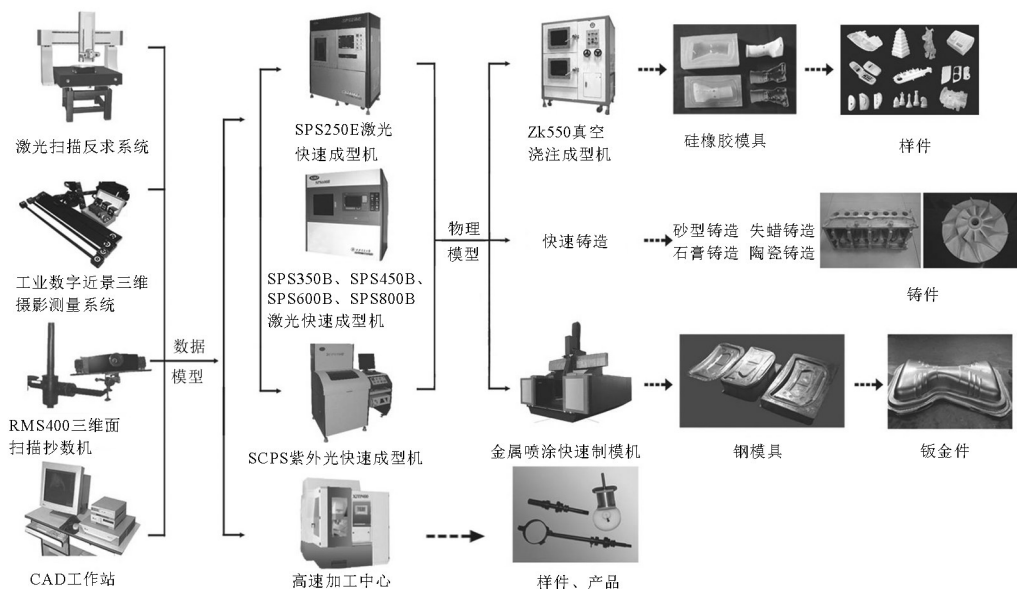


图5 CAD/RE/RT技术集成的产品快速开发系统

Fig.5 Rapid development system of products based on CAD/RE/RT

注:RE为逆向工程;RT为快速模具

#### 4 增材制造技术

如果说制造技术创新对航空工业具有重大意义,那么产品快速开发技术则是飞机制造业创新的一大源泉。目前兴起的增材制造技术(也称为“3D打印技术”)在飞机产品开发中是一项革命性技术,如图6所示。它是继切削和成形技术后,近20年来飞速发展的一项技术。它以点、线、面、体的叠加法最柔性地制造任意复杂形状的零件,而不需要工装夹具、复杂编程等生产准备工作,最适合个性化的制造。不仅如此,它还提供了制造功能梯度材料结构的可能,还可将许多零件集成变成一个零件,用在飞机制造上可减少其零件个数,大大提高飞行的可靠性。美国一个成功案例就是将300多个飞机零件缩减为3个。

增材制造从20世纪80年代的快速原型到20世纪90年代与传统制造技术结合的快速制造,再到当前被称为革命性技术的3D打印和金属材料直接制造,正在从一个产品快速开发技术走向一个生产技术,具有广阔的发展前景。当然,目前它还不能像

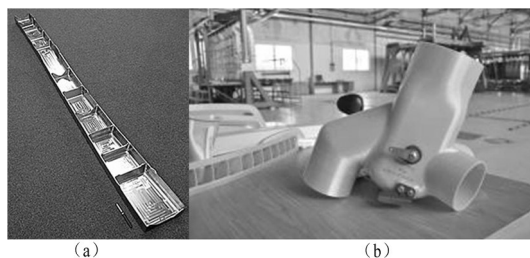


图6 增材制造(AM)的飞机结构件

Fig.6 Aircraft parts fabricated by additive manufacturing (AM) technology

切削和成形一样担负起主流制造技术,但它可以在批量制造技术的弱项——产品快速开发方面找到自己的定位,尤其在飞机研发中发挥日益重要的作用。由于其逐点控制而且冷却快速,使结构致密,成形件的强度远高于铸件,某些达到甚至超过锻件的标准,目前已有部分用于飞机承力结构件的制造。西安交通大学采用激光熔丝或喷粉法制造了叶片原型,最薄处可达0.8 mm,做出的叶片具有定向晶组织结构,可望成为叶片制造新工艺,如图7所示。但在金属直接成形中,其热过程造成的零件扭

曲变形,对避免缺陷和逐层成形的质量评价标准等还需要进一步研究。增材制造过程的研究涉及随着逐点融化、凝固的点热源时序形成的热影响,对非定常零件结构的影响历史作用叠加,对变形及组织结构的影响进行分析非常复杂,是一个极具挑战性的研究。

## 5 前沿制造研究

西安交通大学在开展切削加工、成形加工和增材制造等技术的同时,还在前沿制造领域开展了大量的研究工作。

1)生物制造技术。开展了以工程方法解决医学问题的生物制造技术研究,形成了定制化人工假体、活性人工骨和关节以及组织工程化肝脏等研究

方向,特别是定制化与个性化的人工假体的临床应用,为患者与医生提供了新的治疗手段(见图8和图9)。

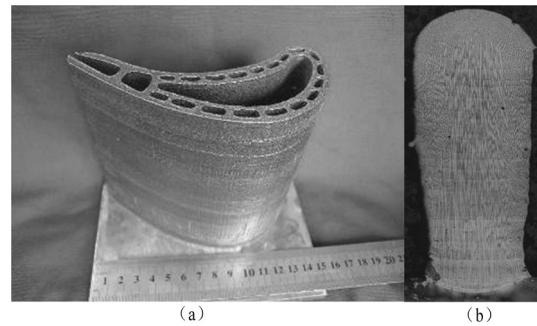


图7 增材制造叶片及其定向晶组织

Fig.7 Blades by AM technology and oriented crystallization

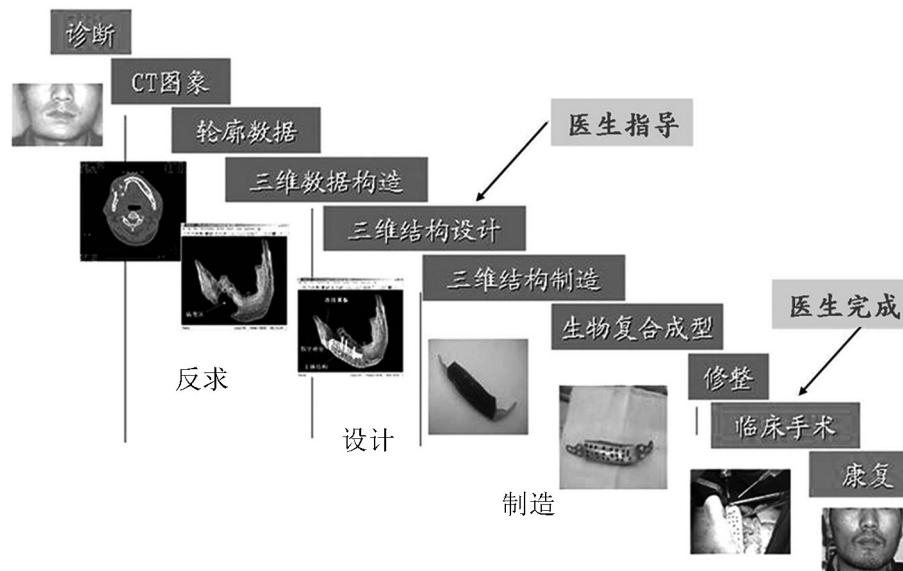


图8 快速成形应用于骨替代物个性化制造——颌面修复

Fig.8 Rapid prototyping technology for personalized bone substitution application, especially for maxillofacial prosthetics

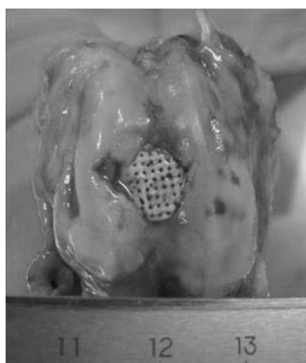


图9 可降解的生物材料制造实验——动物实验  
β-磷酸三钙(β-TCP)支架组(6个月)

Fig.9 Biodegradable material of β-TCP scaffold for animal defect repair (six months)

2)微纳压印技术。纳米压印技术被认为是大面积(米级)上制造微纳结构,应用于柔性显示、太阳能板、减阻结构等方面高效、低成本的制造技术。但尺度效应是制造大深宽比、纳米沟槽的障碍。液体的类固化现象及压印压力使模板变形等形成了微纳图形复形的困难。开展了电场诱导结构成形的工艺试验研究(见图10),进行了深亚微米结构的诱导成形实验,实现了线宽150 nm、深宽比大于10的大面积纳米结构复型制造(见图11),并探讨了电诱导微纳结构成型工艺在微透镜阵列及高亮度纳米结构化发光二极管(LED)制造中的应用。外场作用,弱化纳米尺度效应的流体阻力。

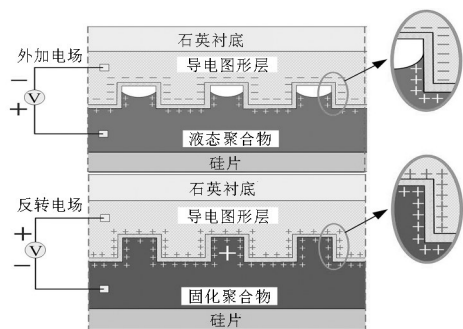


图 10 电毛细力驱动的纳米流变成形原理

Fig.10 Scheme of the nanopatterning by electrocapillary driven flows

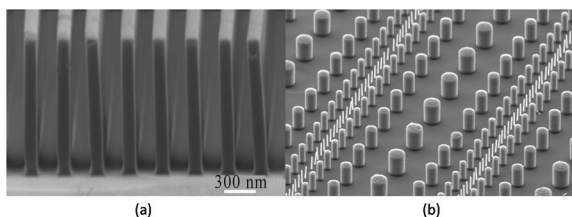


图 11 电驱动法实现了深宽比大于 10 的结构成形

Fig.11 Structures with aspect ratio over 10 by electro assisted nanoimprint process

在弱化纳米尺度效应使纳米制造变得容易的同时,还提出了一种利用纳米尺度效应,实现精确成形的技术方法。利用液体在微纳孔的张力,以纳

米孔阵列作为模板,实现如图 12 所示的微透镜阵列制造,还可以利用电场进一步诱导可控制透镜的高度和曲率,实现可控制造。

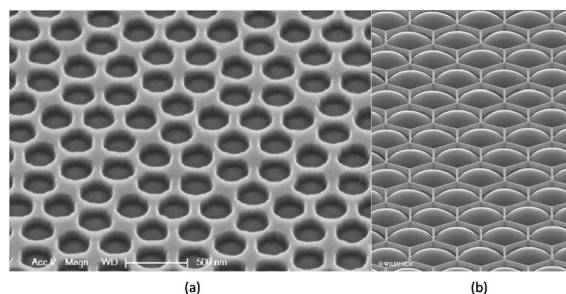


图 12 利用纳米尺度效应实现的微透镜阵列  
纳米结构模塑成形

Fig.12 Microlens array by nanoimprint process  
in nanoscale patterning

## 6 结语

本文总结了我国切削加工技术、成形加工技术和增材制造技术的研究现状,介绍了西安交通大学这些年在先进制造技术领域所取得的成果,这些成果在生物、医学、材料等前沿制造领域得到了很好的应用,部分研究成果也为飞机零部件的加工和制造提供了良好的解决方案。

# Research progress of advanced manufacturing technology in Xi'an Jiaotong University

Lu Bingheng

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** With the third development of manufacturing industry in China, the requirement of manufacturing technology for advanced equipments increases rapidly. Carrying out research on the manufacturing technology is an effective way to improve the cold and hot working in China. This paper presents the research progress on cutting technology, forming technology and additive manufacturing in Xi'an Jiaotong University in recent years. Some achievements are well suitable for the manufacturing of airplane parts. Other research work in frontier manufacturing, such as bio-fabrication and micro/nano fabrication, are finally reviewed.

**[Key words]** high speed machining; incremental forming; additive manufacturing