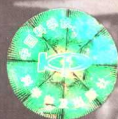


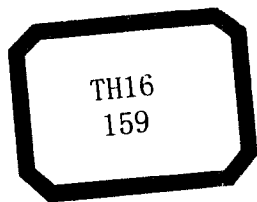
机械制造 技术基础

JIXIE ZHIZAO JISHU JICHU

卢波 董星涛◎主编
赵升吨 张澄◎主审



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



机械制造技术基础

卢波 董星涛 主编
赵升吨 张澄 主审



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS
· 北 京 ·
BEIJING

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术基础/卢波,董星涛主编. —北京:中国科学技术出版社,2006.5
ISBN 7-5046-4346-7

I. 机... II. ①卢... ②董... III. 机械制造技术—高等学校—教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 042559 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

策划编辑 林培 孙卫华 责任编辑 孙卫华

责任校对 林华 责任印制 安利平

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:19 字数:486千字

2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷 定价:26.60元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

“机械制造技术基础”课程是机械工程及自动化、过程装备及控制、工业工程等专业的学科基础必修课，为适应 21 世纪科技、经济与社会的飞速发展和日趋激烈的竞争，配合适应高等教育改革和“宽口径、重基础”的人才培养模式的需要，根据浙江工业大学教学改革和课程建设计划我们编写了本书。

目前，以先进制造技术为代表的新一代制造技术，及其相关的现代制造的战略、理念和模式，已经逐步成熟，并开始大举进入生产领域。机械制造已经不再局限于以局部工序和工艺技术问题为主要内容的传统的机械制造范畴，机械制造的范围已经覆盖到了从市场分析、产品开发、产品的生产技术准备（含产品设计、编制产品工艺、设计和制造工艺装备等），到产品的生产（指产品的零件加工和产品的装配过程）、产品的生产组织与计划管理（含物流控制和仓储）、产品的质量保证金以及产品的包装和发送等的全部活动和过程。先进制造技术是传统制造技术、信息技术、计算机技术、自动化技术与管理科学等多学科先进技术的综合，并应用于制造工程之中所形成的一个学科体系，并向精密化、柔性化、网络化、虚拟化、智能化、清洁化、集成化、全球化的方向发展，先进制造技术已成为世界各国制造业发展的核心。

本书在编写中广泛收集国内外资料，力求总体上把握和反映机械制造发展基础上突出本科学习的关键知识点，做到点面结构，合理控制教材难度，达到“宽口径、重基础”的教学要求。

本教材第一、第二、第四章及第三章的第三节由卢波编写，第五章由董星涛编写，第六章由胡晓东编写，第三章第一节由谢伟东和朱银法（丽水学院）合编，第三章第二节由卢波和翁泽宇合编。全书由西安交通大学赵升吨及浙江工业大学张澄主审。蔡旻先生负责本书的出版发行工作。

编 者

2006 年 3 月

目 录

第一章 机械制造技术基础概述	(1)
第一节 机械制造	(1)
第二节 机械制造技术及其发展	(3)
第三节 21 世纪制造业的主要特点与挑战	(11)
第四节 中国机械制造业的发展状况和战略	(13)
第五节 本课程学习目的、内容和方法	(17)
第二章 金属切削原理与刀具	(19)
第一节 金属切削的基本概念	(19)
第二节 刀具切削部分的几何角度	(21)
第三节 刀具材料	(23)
第四节 金属切削过程及切削参数选择	(32)
第五节 金属切削刀具的主要种类及应用	(49)
第六节 先进切削加工技术	(58)
第三章 金属切削方法及装备	(69)
第一节 金属切削的常用方法及普通机床	(70)
第二节 数控机床	(99)
第三节 机床夹具设计基础	(124)
第四章 机械零件加工质量及其控制	(162)
第一节 机械加工精度	(162)
第二节 机械加工表面质量	(192)
第五章 机械加工及装配工艺规程设计	(209)
第一节 机械加工工艺规程制订中的基本概念	(209)
第二节 机械加工工艺规程制订中的主要技术问题	(217)
第三节 工序尺寸和工艺尺寸链计算	(231)
第四节 计算机辅助工艺规程设计 (CAPP)	(239)
第五节 机械产品装配工艺规程设计	(249)
第六章 新一代制造技术	(278)
第一节 快速原型制造技术	(278)
第二节 虚拟轴机床技术	(283)
第三节 微型机械电子系统与微制造	(289)
参考资料	(296)

第一章 机械制造技术基础概述

第一节 机械制造

一、制造的概念

“制造”（manufacturing）的概念由来已久，在传统狭义上我们一般将“制造”从原材料转变为产品的工艺过程。但随着社会的发展，制造概念的内涵不断丰富，由广义，由局部到整体，由断续零散到成套系统，使制造的概念在“范围”和“内涵”方面逐步演变成为包含整个制造过程，从质量、效率、竞争力等方面满足现代制造发展要求。国际生产工程界在经历了十余年的论证后，就“制造”概念及其内涵取得了一致认识，于1990年由国际生产工程学会（CIRP）正式定义如下：

制造是指从市场分析、产品开发、产品的生产技术准备（含产品设计、材料选择、编制产品工艺、设计和制造工艺装备等）、到产品的生产（指产品的加工、装配和质量控制）、产品的生产组织与计划管理（含物流控制和仓储）、产品的质量保证金以及产品的包装和发送等的全部活动和过程。

现代的“制造”概念将产品的整个生命周期作为一个系统纳入制造的研究范畴，用系统观点来看待现代的制造过程，说明现代制造已不再局限于制造的工艺阶段，即是传统意义上的“生产（production）”，“生产”仅是产品制造活动中的一个组成部分，体现了当今市场对产品竞争的要求，是现代机械制造的特点之一。

二、制造系统的概念

“系统”是人类历史上较为古老的概念，《辞海》中将系统定义为“自成体系的组织，相同或相类似的事物按一定的秩序和内部联系组合而成的整体。”在科技领域中系统概念可以帮助研究人员将研究对象从环境中“分离”出来，准确地界定研究工作的边界和主题，全面地分析与归纳系统内各部分之间的关系，加强局部之间的联系与协调。

制造产业具有设计、生产、发运和销售等多项功能，为了有效地完成特定的制造任务，制造公司必须将制造过程及其所涉及的硬件包括人员、生产设备、材料、能源和各种辅助装置以及有关软件包括制造理论、制造技术（制造工艺和制造方法等）和制造信息等组成了一个具有特定功能的有机整体，称之为制造系统（manufacturing system），而产品的制造则可看作是制造系统中各种因素组合并协同操作的结果。

国际生产工程学会（CIRP）1990年将制造系统定义为：制造系统是制造业中形成制造生产（简称生产）的组织形式。制造系统作为由人、工具、材料组成的有机整体，也存在狭义的制造系统概念和广义的制造系统概念。狭义的制造系统仅仅研究产品的设计、工艺、加工、装配等生产过程；而广义的制造系统除研究生产过程外，其研究内容还包括市场、经营、销售、售后服务、成本与财务等，即研究从经营决策开始直到售后服务、报废回收的产品生产整个生命周期过程。

以系统论的观点，现实社会中的制造型企业就是一个制造系统，可以抽象为一个利用系统资源，在满足系统约束和目标的前提下，从系统环境中获得的输入转换为输出的系统过

程。制造型企业根据订单和市场预测安排的生产计划，利用制造资源（包括人员、机床设备、刀量夹辅具、技术、相关的产品数据和计算机软、硬件等），在生产过程中采用相应技术实现产品的生产，以最适当的制造成本，在最适当的时间生产出客户需要的产品，以获取最大利润。为此，就必须对制造系统这个复杂大系统中各个过程或子系统所面临的各种复杂的决策问题实施最优决策，达到制造过程整体优化和提高制造企业综合效益的目的，可以这样讲现代产品的竞争是制造系统层次上的竞争，既不同制造系统之间的竞争。

在制造系统中引入工业工程（IE）、系统管理（SMI）和系统生产技术（SPT）的原理和方法，将生产过程的物流、能量流与信息流经过一定的系统化及某种形式和程度的结合，集成成为一种新的制造体制——机械制造系统，具有“自动化、柔性化和高效化”的综合效果特征。

三、机械制造在国民经济中的作用

制造是人类社会的最基本活动之一，也是国家经济实力的基础。在工业化国家中约70%~80%的物质财富来自制造业。

美国把制订制造业的发展战略列为重中之重。但在20世纪70年代，美国一度不重视制造业，美国社会学家托夫勒1980年在《第三次浪潮》中提出“后工业经济”（“Post-Industrial Society”）概念，认为他们已进入“后工业时代”，把制造业列为“夕阳工业”，主张经济重点应当由制造业转向信息、生物等高科技产业和第三产业，其结果导致美国80年代的经济衰退，许多产品的质量和性能落后于德国、日本等其他发达国家。

到80年代后期，美国政府认识到问题的严重性，一些国会议员、政府要员也纷纷要求政府出面协调和支持制造产业的发展，于是在1988年美国投资开展了大规模“21世纪制造业战略”研究，提出了“先进制造技术的发展目标”，制定并实施了“先进制造技术计划”和“制造技术中心计划”。

1991年乔治·布什政府期间，美国白宫科学技术政策办公室发表了总数为22项的“美国国家关键技术”，其中制造技术占4项，标志着美国科技政策的转变，确立了制造工业的地位，引发了美国与欧洲、日本在制造技术上的新一轮竞争。

克林顿执政后，对制造业大力支持，把先进制造技术列为六大国防关键技术之首，结果美国在机械工业、汽车工业、航空工业及信息产业等方面取得了明显的进展，使美国的经济连续8年取得了2%~3%的增长率，而且还同时保持低通胀率和低失业率。

在20世纪70~80年代，日本非常重视制造业，特别是汽车制造和微电子制造，结果是日本的汽车和家用电器占领了全世界的市场，特别是大举进入了美国市场。日本的微电子芯片已成为美国高技术产品的关键元件。

1998年爆发的东南亚经济危机，从另一个侧面反映了一个国家发展制造业的重要性。一个国家如果把经济的基础放在股票、旅游、金融、房地产、服务业上，而无自己的制造业，这个国家的经济就容易形成泡沫经济，一有风吹草动就会产生经济危机。而新加坡、台湾都有自己的制造业，因此受经济危机的影响小一些。

瑞士是一个仅700万人口的小国，但瑞士的制造业十分发达，瑞士的精密机械产品的出口量是我国的8倍，瑞士的手表产值居世界第一，连小小的军刀，也风靡全世界，在机械制造中瑞士机床和刀具制造技术也是居世界一流的。现在瑞士的年人均国民生产总值达到4.3万美元以上，居世界第一。

2001年中国工程院的调查结论表明中国制造业已占国民生产总值的1/3，占整个工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，贡献出口总额的90%，就业人员8043万。在

中国的制造业构成中，机械制造业占有特别重要的地位（图 1-1），它一方面创造价值，产生物质财富和新的知识，另一方面为国民经济各个部门提供机械装备，为国防和科学技术的进步与发展提供先进的手段和装备，是整个制造业的主要支柱，国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供装备的质量和可靠性。因此，提高国家机械制造业的生产力具有重要意义。

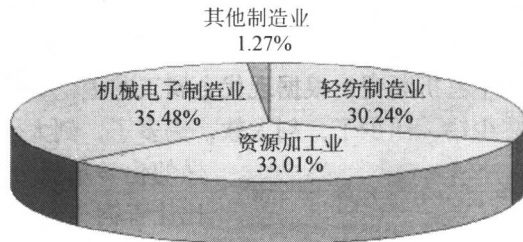


图 1-1 2002 中国制造业构成

第二节 机械制造技术及其发展

制造技术（manufacturing technology）就是按照人们所需的目的，运用知识和技能，利用客观物质工具，使原材料转变为产品的技术总称。制造技术的水平和实力反映一个国家的制造业的生产力水平，是国际间产品革新、生产发展、经济竞争的重要手段和最为活跃的领域。历史的经验表明，国家制造业的繁荣要依靠有竞争力的生产力，这个生产力不仅要有效率而且要有创新，对提高生产力的追求让人们创新了大量的制造技术，世界上各个国家的经济竞争主要反映为制造技术的竞争，因此，制造技术是制造系统中最核心的组成部分，在制造系统生产力构成的诸多因素中，制造技术的作用一般占了 60% 左右，是提高产品竞争力的关键，是制造业赖以生存和发展的主体。

在机械制造领域中，机械制造技术主要包括了机械设计技术、机械加工工艺技术、基础设施及其支撑技术等内容。其中，机械加工工艺技术是机械制造技术的核心，是指采用某种工具（包括刀具）或能量流通过变形、去除、连接或增加材料等将工件制成满足一定设计要求的半成品或成品的过程中所需技术的总称。随着社会对产品的迫切需要和机械制造业生产力的不断提高，机械制造技术正迅速从传统制造技术向先进制造技术的发展。

人类文明的发展是与机械制造活动及机械制造技术水平的发展密切相关的。制造是紧随着人类社会的产生与发展而产生与发展的，经历了原始制造、手工制造、机器生产、机械化生产、流水线生产、自动生产线并发展到今天的数字化制造、柔性制造、智能制造等模式。石器时代的各种石斧、石锤、木质和皮质的简单粗糙的工具是后来出现的机械制造的先驱，从制造简单工具和武器演进到制造由多个零件、部件组成的现代机械，机械制造技术的发展经历了漫长的过程。

15~16 世纪以前，机械制造技术发展缓慢，但在以千年计的劳动实践中，已积累了相当多的经验和知识，成为后来机械制造发展的重要潜力。

中国的金属切削加工工艺，从青铜器时代开始萌芽，并逐渐形成和发展。其中冶金铸造技术比西欧早一千多年，从殷商到春秋时期已经有了相当发达的青铜冶铸业，出现了各种青铜工具，如：青铜刀、青铜锉、青铜锯等。有记载表明早在三千多年前的商代已经有了旋转的加工工具，这也就是金属切削机床的前身，20 世纪 70 年代在河北满城一号汉墓出土的五铢钱，其

外圆上有经过车削的痕迹，刀花均匀，切削振动波纹清晰，椭圆度很小，有可能是将五铢钱穿在方轴上然后装夹在木质的车床上，用手拿着工具进行切削。同时，有出土文物与甲骨文记录表明，这个时期的生产的青铜工具和生活工具，在制造过程中大都要经过切削加工或研磨。

早期金属制造技术最重要的应用之一就是武器制造，如青铜剑的铸造。由于青铜材料容易折断，所以青铜剑一般都是短剑，形状普遍宽而短，60cm 似乎是青铜剑的极限。春秋战国时期，最负盛名的越王勾践剑，全长不过 55.6cm。但在 1974 年陕西兵马俑坑的黄土中，考古人员发现了一把完全不同的青铜剑，这把剑的长度竟然超过了 91cm（图 1-2）。人们猜想秦人用什么方法让长剑不易折断呢？根据现代金属工艺理论，铸剑的关键是掌握铜锡的比例，冶炼时向铜里加入多少锡。锡少了，剑太软，锡多了，剑太硬，容易折断。对秦剑所

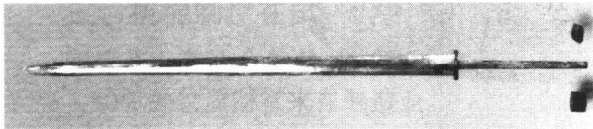


图 1-2 西安秦俑坑中出土的青铜秦剑

做的化学定量分析显示：秦剑的铜锡配比让青铜剑的硬度和韧性结合得恰到好处，含锡量为 21.3%，使得剑不仅韧性好，而且硬度接近调质后的中碳钢的硬度，所以非常锐利。19 世纪英国古兵器

学者理查·伯顿认为，在短兵器格斗中，刺要比砍更有优势，因为它更逼近对手。古罗马军团在血战中总结出—条规律：以相同的力量，刺比砍更致命。显然比对手的剑长出大约 30cm 的秦剑，在格斗中显然更容易刺到对方，这就是使秦剑加长的主要原因，长青铜剑增强了秦人在战斗中的攻击性。并且这些兵器大部分表面都经过了铬盐氧化处理，厚度深为 10~15 μm ，增强了武器的防腐抗锈能力，虽然经过两千多年的地下埋藏，但出土时仍异常锋利。秦剑是青铜剑铸造工艺的顶峰，它的长度、硬度和韧性达到了几乎完美的结合，尤其是秦俑坑中兵器的防锈技术，一直被人们津津乐道，成为中华民族的又一骄傲，但在汉朝之后似乎就失传了，西方国家是到了 20 世纪 30 年代才有了这项技术的专利。

同样，大马士革钢宝刀的历史故事可能向我们揭示了古阿拉伯文明的铁器制造技艺水平。早在 11 世纪末到 13 世纪末的 200 年里，剽悍的阿拉伯骑兵那闪闪发光、锋利无比的大马士革宝刀曾使东征的十字军闻风丧胆。锻打宝刀的铁坯原产于印度，在叙利亚可被工匠锻成削铁如泥的宝刀，但运至欧洲让最高明的工匠锻造时，却脆得无法成形，这是因为当含碳量高达 1.5% 时，虽可显著提高钢的强度和硬度，却因形成大量脆性的渗碳体网状组织而无法锻打。直到 20 世纪 60 年代，美国斯坦福大学的两位教授揭开了大马士革宝刀的秘密，原来高含量碳虽会导致脆性，但也能阻止晶粒长大而获得超细晶粒（平均直径为 9 μm ），从而在一定条件下使它处于超塑性状态。目前，采用这种新的经过超塑性加工的钢刀、钢剪已在美国和日本上市，人们在自己的厨房里就可—试大马士革宝刀的锋芒了。

标准化是现代机械制造业的基础，标准化生产使不同的供应商生产的零部件可以组装在一起，也使大规模的生产成为可能，从而实现了专业化生产。但在两千年前农业文明刚刚开始成熟的时代，中国古代的秦朝可能已开始将标准化的概念引入了军事兵器的生产。

秦国在消灭了中原六国之后，北方的游牧民族匈奴人就成了秦军主要的对手。当匈奴骑手高速冲锋的时候，传统的步兵很难抵挡。从历史记录来看，一种叫弩（图 1-3）的远射兵器很可能在秦军击溃匈奴的战斗中发挥了主导作用。在陕西兵马俑坑中，由于时间太过久远，弩的木制部分已经朽烂，在弩腐烂后留下的痕迹中，考古人员发现了青铜制作的小机械，这些小小的青铜构件就是弩用来发射的扳机，称为弩机（图 1-4）。秦军的弩机是通过—套灵巧的机械传递，让钩牙在放箭瞬间突然下沉，扣动扳机变得异常轻巧，从而保证了弩

射击的准确性。这恰恰是弩对弓的优势之一，秦军使用的弩机设计得非常精巧，制作得十分标准，使得它的部件是可以互换的。在战场上，秦军士兵可以把损坏的弩机中仍旧完好的部件重新拼装使用。青铜弩机的设计在当时是秦国的一个惊人的成就，对于匈奴人而言，这种机械装置太复杂了，他们很难装配或仿制，从而保证了秦军在军事武器上的技术领先。

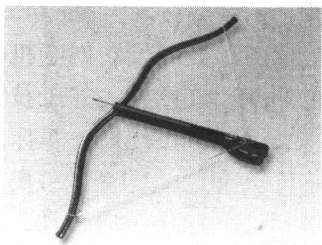


图 1-3 弩

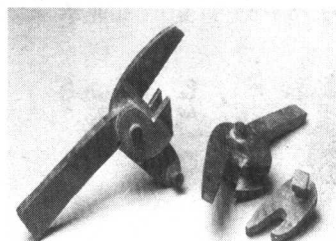


图 1-4 西安秦俑坑中出土的弩机

此外，秦军的其他兵器也依然施行了标准化制造。在兵马俑坑中发现的三棱箭头（铜镞）有 4 万多支（图 1-5），它们都制作得极其规整，箭头底边宽度的平均误差只有 $\pm 0.83\text{mm}$ 。重要的是若让某些天才的工匠制造出几件这样的兵器是可能的，但实际情况是，兵马俑坑中几万件铜镞几乎都是同样的质量。对箭头的金相分析的结果也显示它们的金属配比基本相同。数以万计的箭头是按照相同的技术标准铸造出来的，使得不论是在北方草原，还是在南方丛林的各个战场，秦军射向对手的所有箭头，都具有同样的作战质量。这说明在两千多年前，秦人执著于统一的武器制造标准，从而保证所有秦军战士使用的都是当时最优秀的兵器，在战场上应该有优异的表现。这些优秀的武器很可能是秦军从几百年的战争实践中优选出来的。专家推测，秦人很可能是在有意识地将优选兵器的技术标准固定，国家再通过法令将这些技术标准发放到所有的兵工厂，强制性地按照这个固定的技术标准生产兵器。可见中国秦朝的机械制造技术就远远地超越了自己的时代。

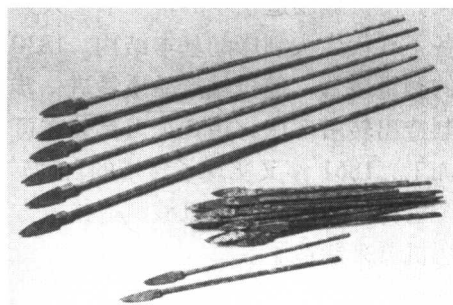


图 1-5 西安秦俑坑中出土的铜镞

早在西汉时期，中国就掌握了炼钢、淬火和渗碳技术，为制造坚硬锋利的工具提供了便利的条件。西汉（公元前 206 ~ 公元 24）中山靖王墓中出土的宝剑芯部含碳量为 0.15% ~ 0.4%，而表面含碳量却达 0.6% 以上，说明已应用了渗碳工艺，但当时作为个人“手艺”的秘密，不肯外传，因而发展很慢。

在西方工业革命以前，机械大都是木结构的，由木工用手工制成。金属（主要是铜、铁）仅用于制造仪器、锁、钟表、泵和木结构机械上的小型零件。金属加工主要靠机匠的精工细作，以达到需要的精度。在 17 世纪以后，资本主义在英、法和西欧诸国出现，商品生产开始成为社会的中心。许多高才艺的机械匠师和有生产观念的知识分子致力于改进各种产业所需的工作机械和研制新的动力机械，由此产生了蒸汽机。

18 世纪后期，蒸汽机已从最初的采矿业推广到纺织、面粉、冶金等行业。随着蒸汽机动力装置的推广，以及随之出现的矿山、冶金、轮船、机车等大型机械的发展，制作机械的主要材料逐渐从木材改用更为坚韧，难以用手工加工的金属，需要成形加工和切削加工的金属零件越来越多，越来越大，要求的精度也越来越高，加工的金属材料也从铜、铁发展到以

钢为主,要求机械制造业摆脱手工业模式,从而促进了以机械加工技术,如切削加工、铸造、锻压、钣金、焊接、热处理等及其装备工业(如机床、刀具、量具等)的发展。此时,机械制造业开始形成,成为一个重要产业。机械制造业逐步从分散性的、主要依赖匠师们个人才智和手艺的一种技艺,逐渐发展成为一门有理论指导的、系统的和独立的制造工程技术,并成为18~19世纪的工业革命以及资本主义机械大生产的主要技术因素。

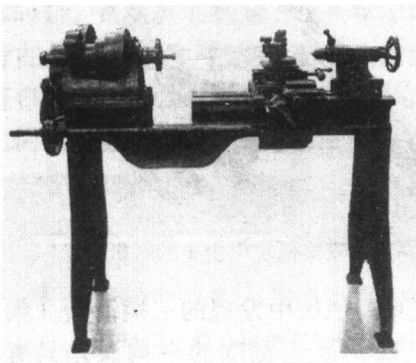


图1-6 19世纪早期车床

机械制造装备工业的形成和发展对于机械制造技术发展有非常重要的影响。在欧洲,加工技术的改进从17世纪就已经开始,到18世纪时,车床逐渐由木结构改为金属结构。1750年,法国A.蒂奥在车床上安装了一个刀架,用丝杠驱动作纵向移动,比过去手握车刀前进了一大步,提高了加工尺寸的精度及其稳定性。1774年J.威尔金森制造了一台新的炮筒镗床,可以加工直径为1.83m的内圆孔。1775年他曾为瓦特成功地制造出蒸汽机汽缸。1770年英国J.拉姆斯登首先用车床制造螺丝。1784年J.布拉默和H.莫兹利共同改进和制造了几种机床,莫兹利在机械制造方面的主要贡献是于1797年在车床上安装了丝杠、光杠和滑动刀架,能加工精密平面和精密螺丝,使机械制造技术的精度水平大为提高。1836年J.内史密斯制成刨床。这台刨床已经具备了现代牛头刨床的基本结构。1830~1850年间,J.B.惠特沃思利用螺纹微调原理制造的测量装置,使机械产品质量进一步提高,为后来的互换性生产创造了条件。1845年美国制造出转塔车床,用8个刀具装在可旋转塔形支架上,由一人操作轮流完成8种不同工种的加工,1861年又实现了转塔的自动转动。19世纪早期车床如图1-6所示。英国大约用了半个世纪的时间完成了机械制造技术方面的革命,到1861年所有的机械和机器基本上都可以用机器来制造了。

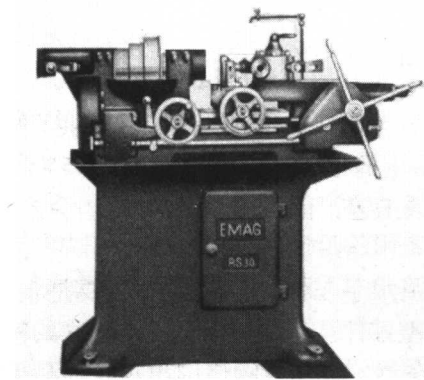


图1-7 1938年EMAG制造的卧式车床

促进机械制造装备工业发展的另一个因素是机床动力装置的进步。在19世纪的大部分年代里,机床的动力来源主要是蒸汽动力,车间顶棚布满纵横交错的轴和传动带。19世纪下半叶,新的动力源出现促进了机床的继续发展,1873年电动机成为机床的动力,开始了电力取代蒸汽动力的时代。最初,电动机安装在机床以外的一定距离处,通过传动带传动。后来把电动机直接安置在机床本身内部。19世纪末,已有少数机床使用两台或多台电动机,分别驱动主轴和进给机构等。由此,开始形成采用电动机作为机床动力源的机床,图1-7是1938年EMAG制造的卧式车床。

新的刀具材料改进也是促进机床发展的重要因素之一,1850年的碳素钢刀具只能在约12m/min以下的切削速度下工作。1868年R.穆舍特发明含有钨和钒的锰钢(合金工具钢)使切削速度提高到18.3m/min。1898年F.W.泰勒等人用含铬的高速钢把切削速度提高到36.6m/min。刀具切削速度的提高促进了机床在强度、轴承、变速机构的改进。至此,被称为

“机械工业的心脏”的机床工业已初具规模，形成了以机械电力技术为核心的各类技术相互联结和依存的传统机械制造业及其技术体系（图1-8）。

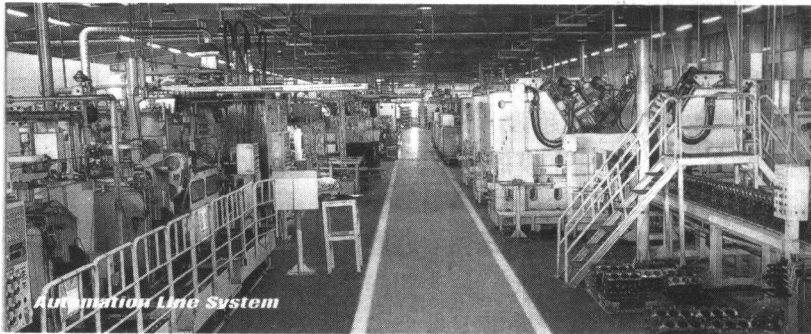


图1-8 机械电力技术为核心的制造生产线

第二次世界大战后，面对市场激烈竞争，不断变化的多产品变批量，企业无法沿用传统制造技术去面对严峻的生存环境的挑战。因此，必须研究和探索新的制造技术和新的制造模式，随着现代数学、系统论、控制论和信息论等理论和学科的创建和进展，新材料技术、数控技术、微电子技术、自动化技术和信息技术的提出和发展，使传统机械制造及其技术体系在20世纪开始向先进制造技术（advance manufacturing technology, AMT）及其技术体系发展，机械制造技术发展进入了新的发展阶段。1952年美国研制成第一台NC机床，60年代中期正式上市；1967年世界第一套FMS在英国首先研制，美国成功生产，70年代初逐渐形成工业应用产品；1963年美国推出几何造型CAD系统，60年代末开始研制CAPP；1968年IBM公司提出生产信息和管理系统“PICS”，其后出现了功能日益完善的制造信息系统；70年代以来，为了提高生产准备和生产过程的效率和效益，充分利用信息技术，实现单元技术间的集成，先后实现了CAD/CAM、CAD/MIS、CAPP/MIS等局部系统的集成。先进制造技术体系的建立满足了当代以知识为基础、以创新为动力的新经济体系中，迅速多变的市场需求和日趋激烈的市场竞争的需要。在80年代至90年代，计算机技术及信息技术全面进入机械制造业，在多个层面融入机械制造过程之中，推动了制造过程的柔性和敏捷性。图1-9为汽车零件柔性制造生产单元。迅速推动了以汽车工业、飞机工业和其他相关产业代表的机械制造业的发展，并使机械制造成为全球经济的重要组成部分。

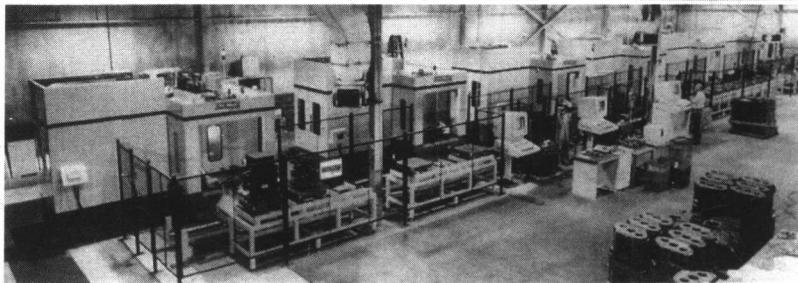


图1-9 柔性制造单元

总结近几十年机械制造的发展，可以发现在全球经济形势下，产品的市场竞争将更加激烈，机械制造技术也将面临越来越高的挑战，促使了机械制造技术向高精度、极限化和自动化的方向继续发展，归纳起来有五个方面，它们是：

1. 产品大型化

20 世纪 70 年代大型的工件已重达几百吨，因此，需要成套地发展大型毛坯制造、大型零件加工、大型整机装配和运输等所需的技术和装备。

例如航空构件的尺寸非常巨大，几何形状因考虑空气动力特性而型面复杂，对它的加工就需采用大型模锻、高性能构件制造设备和大型数控加工设备。图 1-10 是一台 4.5 万 t 的超精密模锻机床，专用于制造的超强、超轻、超大的波音 747 飞机整体框架。对于空客 A380 则需要更大的 7.5 万 t 超精密模锻机床。

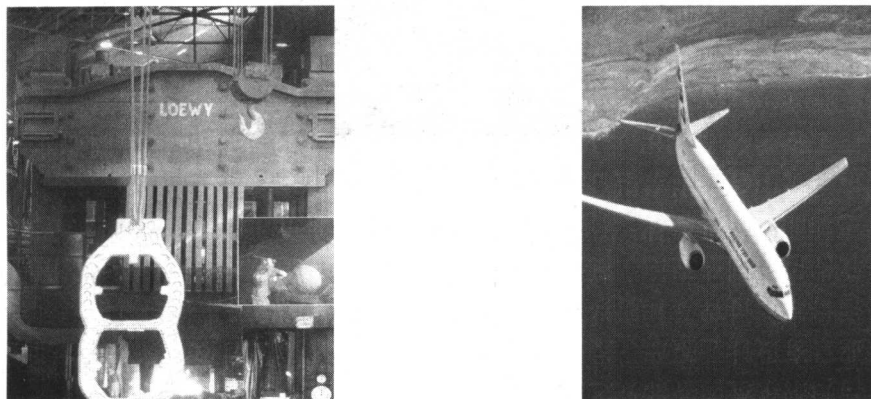


图 1-10 4.5 万吨超精密模锻机床和整体模锻后的波音 747 飞机框架

现代飞机广泛采用整体结构件，用整体铝合金坯料“掏空”制造飞机的机身和机翼等大型零件，以代替传统的拼装结构。这样既提高飞机结构抗疲劳能力，又减轻飞机重量，当代民用机约有 65% 的结构重量为整体结构件。图 1-11 是美国 CINCINNATI 公司生产的用于飞机构件切削加工的大型数控铣床。主轴转速为 60000r/min，功率为 80kW。该机床采用直线电机作为进给驱动系统，工作行程进给速度最大达 60 m/min，空行程快速达 100 m/min，加速度高达 2g，更加重要的是突破了传统丝杠驱动结构对机床长度的限制，理论上可以根据被加工产品长度需要，任意延长机床长度，满足加工要求。图 1-12 是整体铝合金铣削加工后的喷气客机舱门框架。

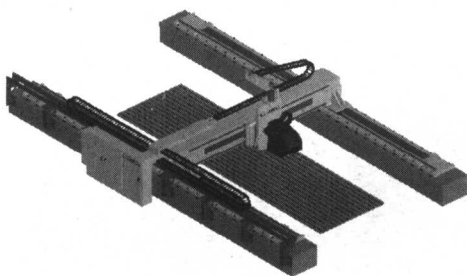


图 1-11 高速主轴 X 和 Y 轴直线电机直接驱动的龙门铣床 HyperMach R

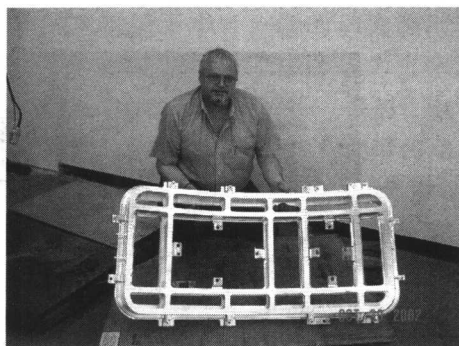


图 1-12 喷气客机舱门整体铝合金门框
尺寸：1.24m × 1m × 114.3mm；加工机床：
H-5 800 AP；刀具转速：15,000 RPM

2. 产品微纳化及细微加工

从集成电路的诞生算起，微细加工技术的历史还不到半个世纪，可是微细加工技术的发展却表现出惊人的速度。1965年，摩尔在发表的一篇极不起眼的文章里提出了一个由11个英文单词组成的定律，定律指出：集成电路上可容纳的晶体管数，每隔一年半左右就会增加一倍，性能也提高一倍。摩尔定律意味着纪录的不断被刷新，技术难关的不断攻克，不仅使集成电路的集成度越来越高，微电脑的功能越来越强大，满足了人们对许多工业产品功能集成化和外形小型化的不断需求。但同时促使集成电路制造向微细加工、亚微米加工和更大面积的晶片加工发展，技术难度迅速提高，造成使集成电路制造资金投入不断增加，集成电路设备制造费用呈指数增长，现在集成电路制造厂的投资费用每隔两年大约翻一翻。

微细加工技术由于其加工对象尺度小到微米级，所加工的尺寸公差及形位公差小至数十纳米；表面粗糙度则低达纳米级，所以它往往兼具微小和超精密加工的特征，和纳米加工正逐渐融合。微细加工技术的发展促进了微型机械的系统化，从而催生了微机电系统（MEMS）技术，微机电系统技术是在微尺物质结构形态上挖掘与寻求机械制造技术突破，是极限制造的一个主要方向。

在传感器制造中采用MEMS技术，将传感器和电路蚀刻在一起，不仅大大减少了其体积，而且可以大幅度降低加工成本。如汽车安全气囊中的传感器制造，采用MEMS技术后可将其成本降低到原来的40%。

图1-13是一个直径为1.3mm、高度为0.5mm的微型涡轮。图1-14为美国Cornell大学的Ricky K. Song等人把单个的生物分子电机和纳米尺度的无机系统集成起来，构成了用分子电机驱动的混合纳米机械器件。

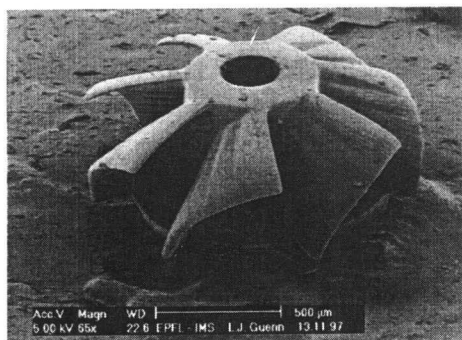


图1-13 微型涡轮



图1-14 生物微光机电系统

我国在微细加工技术方面也做了大量的研究工作，研制了微电泳芯片、DNA芯片、微光诺分析系统、微型机械光开关、压电致动微泵。清华大学1997年底研究成功扭摆式微加速度计，1998年和1999年又先后研究成功振动轮式微陀螺仪和梳齿式微加速度计。上海交通大学研制成功的1mm电磁微电机，可连续工作1h、力矩 $1.5\text{N} \cdot \mu\text{m}$ ，转速2000r/min、质量12.5g；上海大学研制了适于 $\phi 10\text{nm}$ 管道作业的微型机器人；清华大学、东南大学、复旦大学、上海大学等正在进行微加速度计、微陀螺仪、微型惯性测量组合、微型飞行器等的研制工作，南京航空航天大学在研制微型飞机方面取得了一定成果。

总之，微细加工技术作为一种高新技术在世界范围内得到了高度重视，它与纳米技术结合在一起将对未来科技的发展带来革命性的影响。

3. 产品加工精度超精密化

20 世纪初, 最精密零件尺寸精度为 0.01mm , 现代最精密的量块和航天陀螺仪零件的精度要求高达 $0.01\mu\text{m}$ 。硅基光刻芯片制造中, 要求光刻机的对准精度为 15nm , 定位精度为 2nm 。要求机械制造向超精密制造发展。

要满足航空和航天, 特别是微电子产品和光学产品性能的要求, 必须解决超精密加工技术问题, 其核心是要有超精密加工机床。美国 Pneumo 公司的 MSG-325 金刚石车床主轴回转精度可达 $0.025\mu\text{m}$, 加工形状精度为 $0.1\mu\text{m}$, 加工有色金属工件的表面粗糙度 R_a 为 $0.01\mu\text{m}$ 。

美国 1984 年研制的大型光学金刚石车床 LODTM, 可加工直径 1625mm , 质量为 1360kg 的工件。它的主轴分别采用空气轴承和高压液体静压轴承, 刚度高、动态特性好; 用精密数字伺服控制内装式 CNC 系统和激光干涉测长仪, 实现随机测量定位; 用压电式微位移机构以实现刀具的微量进给 (nm 级位移); 用恒温油淋浴系统, 使油温控制在 $(20 \pm 0.0005)^\circ\text{C}$; 为消除加工中机床的热变形, 还采用了压电晶体误差补偿技术。从而使得加工精度达到 $0.025\mu\text{m}$, 表面粗糙度达到 $0.0042\mu\text{m}$ 。英国 1991 年研制成功了 OAGM2500 大型超精密机床, 专门用于加工 X 射线天体望远镜的大型曲面反射镜。

4. 机械加工材料的多样化

在 20 世纪初, 机械工业的主要材料一般是钢铁。30 年代以后, 铝合金的应用增多。第二次世界大战后, 球墨铸铁、合金铸铁、耐热钢、耐磨钢、高强钢、镍合金、钛合金、硬质合金的用量不断增加。尤其是 20 世纪 60 年代以来, 工程塑料、复合材料、宝石、玻璃、陶瓷等非金属材料的应用也逐渐增加。

在航空工业中, 高超音速轰炸机制造对用材要求很高, 早期研制成功的 SR-71 高空高速侦察机 ($M=3$), 由于飞行时蒙皮温度已相当高, 故钛合金用量高达 93% 。当 $M>5$ 时, 飞机蒙皮温度将高达数千华氏度, 材料问题更加突出, 导致各种材料在飞机机体上的用量不断变化, 总的趋势是复合材料和钛合金的用量逐渐增多, 如先进战斗机制造中复合材料的应用量已经从过去的 3% 提高到 90% 。

由于新型材料力学性能如强度、硬度、韧性均有大幅度的提高, 使机械加工难度越来越大, 迫切需要产生一些新的和特殊的加工方法。

5. 制造敏捷化

20 世纪末, 产品交货时间成为产品竞争的重要影响要素, 要求制造业增加生产柔性、提高劳动生产率。20 世纪在这方面的主要进展是加工和检测过程的集约化、自动化和金属切削加工高速度化。

机床的自动化主要包括两个层次: 一个是大批量生产的自动化, 另一是中小批量生产的自动化。过去的自动化生产线早已解决了大批量生产的自动化。数控化是实现中小批量生产自动化最可行的办法。通过与数控技术的结合, 增强了机床柔性, 缩短了交货期, 同时扩大机床的使用范围和性能, 尤其是解决了复杂形状及复杂曲面零件的加工 (图 1-15)。这些零件的特殊加工要求对普通机床将是非常困难的。

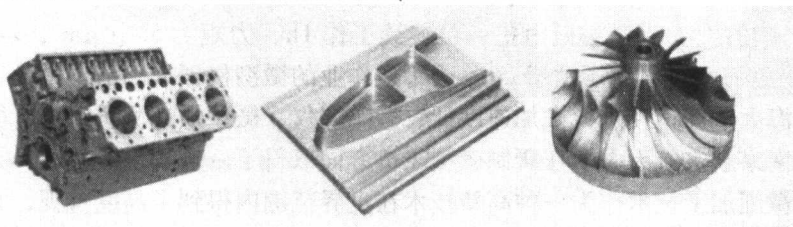


图 1-15 典型复杂零件

复合式机床概念的提出和实施，使零件生产实现了进一步的工序集中和生产效率的提高，目前复合加工技术已有很大发展，产品类型日益广泛。工序复合和工种复合是机床复合技术发展的基本点，而追求的则是在一次装卡下完成零件的全部加工，这是制造技术发展的总趋势，不但可以缩短加工时间，提高加工精度，而且能缩短生产周期，实现零库存，提高生产效率。比较典型的复合加工机床有日本 MAZAK 公司的 Integre x 200 - IIIST 五轴车铣复合加工机床（图 3 - 73），该机被称之为第二代复合加工机床。

机床的数控化率及数控化水平的高低已成为当今衡量一个国家制造技术水平高低的重要指标。20 世纪 80 年代发达国家机床的数控化率已达 10%；日本在 1994 年就达到了 20.8%，它的机床年产量的 70% 以上为数控机床；很多发达国家在航空、航天、造船、模具、机床制造业中机床数控化率高达 30% ~ 70%，五轴联动加工中心及车削中心（图 1 - 16）已广泛使用，制造业已发展到了一个很高水平。但我国 1995 年数控化率才只有 1.9%，1998 年机床总产值中数控机床产值只占 21%，即便在机床数控化率较高的飞机制造厂，其数控化率也只有 10% ~ 20%。

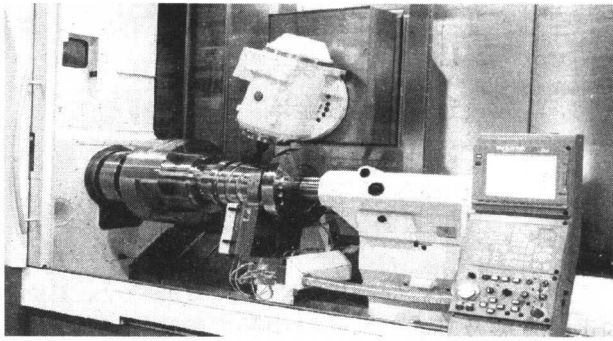


图 1 - 16 五轴联动车铣复合加工中心

第三节 21 世纪制造业的主要特点与挑战

纵观机械制造技术的发展，人们要问是什么因素在推动机械制造业不断发展？答案只能是一个：市场竞争。最近二十多年来，由于宏观环境因素，特别是经济、技术、自然和社会环境因素的影响，生产能力（包括资本、信息）在世界范围内迅速提高和扩散，世界机械制造业已进入了一个巨大变革时期，过去那种传统的相对稳定的市场已变成动态的多变的市场，已形成全球市场激烈竞争格局。先进生产技术的出现正在急剧地改变着现代制造业的产品结构和生产过程，传统的管理、劳动方式、组织结构和决策准则都在经历新的变化。这些既为制造业带来了市场竞争的压力，同时也带来了机遇，21 世纪制造业竞争的特点，将是知识为基础的新产品竞争，具体表现为：

一、制造企业竞争能力挑战

现代制造企业应具备赢得竞争和提高市场占有率的四种基本能力，它们是：

（1）时间竞争能力 21 世纪市场环境和用户消费观所要求的是产品生命周期缩短，产品更新加快和交货及时。时间是赢得竞争的关键所在。这一点从美国制造业策略的变化可以看出，美国制造业的策略从 20 世纪 50 年代的“规模效益第一”，经过 70 年代和 80 年代的“价格竞争第一”和“质量竞争第一”，发展到 90 年代的“市场速度第一”，时间因素被提

到了首要位置。统计表明如果开发费用超出预算 50% 产品寿命周期内的利润将减少 4%，但如果产品的开发周期太长，导致产品的上市时间推迟 6 个月，则利润要损失 30%，说明制造速度对企业的重要性。国际上机床产品招标中，一般数控机床交货期为 3 个月，高档数控机床为 5~6 个月，大型重型机床为 10~12 个月。国际招标条款规定，交货期延长 1 周增加投标价 0.5%，超过 2 个月将作为废标。由于国内比国外产品普遍长 2~3 个月，使得国内企业中标困难很大。

(2) 质量竞争能力 产品不仅可靠性高，而且使用户在各方面都满意。

(3) 价格竞争能力 产品生产成本低，销售价格具有竞争力。

(4) 创新竞争能力 产品有特色、生产有柔性、竞争有策略。创新竞争能力是指企业不仅在产品设计和生产工艺上的创新，还要包括制造观念的更新、组织的重构、经营的重组。历史证明，综合创新能力是推动企业发展的动力和最强大的竞争武器。

二、制造全球化和贸易自由化挑战

随着世界自由贸易体制的进一步完善以及全球交通运输体系和通信网络建立，国际经济技术合作交往日趋紧密，全球产业界进入了结构大调整的重要时期，世界正在形成一个统一的大市场，在全球范围内基于柔性、临时合作模式的格局正在逐步形成。制造产业、制造产品和制造技术走向国际化，导致制造业格局在全球的重新分布和组合，并使得经济竞争在国际范围内愈演愈烈，制造者面对全球竞争将承受巨大的竞争压力。为此，企业必须具有敏捷性，以保持对时间和技术的控制，把时间和技术视为对生产率的挑战。

三、信息技术对制造企业影响

以微电子、信息（计算机与通信、控制理论、人工智能等）、新材料、系统科学为代表的新一代科学与技术的迅猛发展及其在制造领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了制造活动的深度和广度，急剧地改变了现代制造业的设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织结构，产生了一大批新的制造技术和制造模式。现代制造业已成为发展速度快、技术创新能力强、技术密集甚至是知识密集部门。

四、环境保护意识的增强与可持续发展对制造企业要求

到 2020 年世界人口将从今天的 56 亿增至 80 亿，随着人口的增长以及目前技术的不断开发，制造业的副作用日益显现，体现在对有限性资源的过度消耗、全球生态系统的恶化和人类健康威胁三个方面，制造业发展将越来越受到环境方面的制约，如目前工业水污染造成的经济损失相当于 GDP 的 1.5%~3%，可持续发展成为整个制造业发展的必由之路。

解决环境的制约主要通过社会压力（整个社会和每一个公民都不会容忍浪费资源和污染环境的行为）、国家政策或立法以及经济手段具体体现，如安全标准不断提高、对废弃物的排放标准日趋严格、对能源更节约地使用、劳动者和公共健康的严格保护、“绿色”产品标志许可制度、废物污染记账制度等等。1996 年美国制造工程师学会（SME）发表了关于绿色制造的第一本蓝皮书 Green Manufacturing，引发了绿色加工技术的研究热潮。

可持续发展要求把生产中的废弃物及产品对环境的影响减少到“接近于零”，开发不影响环境的、成本低且有竞争力的产品和工艺，尽可能利用回收材料作原料，建立循环经济机制，在能源及材料资源各方面不造成大的浪费，为此，德国制定了《产品回收法规》；日本提出了减少、再利用及再循环的 3R 战略；美国提出了“再制造”及“无废弃物制造”的新理念，其新一代轿车将节能 40%~50%，减少材料消耗 40%~50%；欧盟颁布了“汽车材