

中国机械工程学会资助出版

21世纪的材料成形 加工技术与科学

柳百成 沈厚发 主编

中国机械工程学会资助出版

21 世纪的材料成形加工技术与科学

柳百成 沈厚发 主编



机械工业出版社

本书以中国工程院柳百成院士、阮雪榆院士及胡正寰院士为执行主席的香山科学会议第 184 次学术讨论会的报告内容为基础, 全面阐述制造业及材料成形加工技术在过去 20 多年发生的巨大变化, 信息技术对材料成形加工技术的重要促进及带动作用, 21 世纪高科技及新材料的出现对材料成形加工技术的进一步发展及变革。同时, 指出材料成形加工技术综合化、多样化、柔性化、信息化及多学科化的特征。

本书旨在通过揭示材料成形加工技术与科学的发展趋势和前沿课题, 指出我国制造业的基础共性技术领域——材料成形加工技术与科学的发展方向, 以推动该领域的发展和进步。通过对已有进展的总结和评论, 剖析关键的科学前沿问题及其解决方法, 并探讨学科的新生长点。

本书可供材料加工工程、材料成形工艺领域相关的科研、管理与决策人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

21 世纪的材料成形加工技术与科学/柳百成, 沈厚发主编.

—北京: 机械工业出版社, 2003.11

ISBN 7-111-13770-1

I. 2... II. ①柳 ... ②沈 ... III. 工程材料—成型

IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 126041 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 周国萍 加工编辑: 曾红

封面设计: 陈沛 责任印制: 施红

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16 · 14.75 印张 · 365 千字

0001—2000 册

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

21 世纪的材料成形加工技术与科学

编委会

主 任 柳百成

副主任 阮雪榆 胡正寰

委 员 关 桥 傅恒志 林尚扬 徐滨士

周尧和 潘健生 宋天虎

主 编 柳百成 沈厚发

前 言

制造业是提高国家工业生产率、经济增长、国家安全及生活质量的基础，是国家综合实力的重要标志。随着我国加入 WTO，我国制造业面临巨大挑战，因而加强材料成形加工技术与科学基础研究，大力采用先进制造技术，对国民经济的发展具有重要意义。

材料成形加工技术与科学既是制造业的重要组成部分，又是材料科学与工程的四要素之一，对国民经济的发展及国防力量的增强均有重要作用。“新一代材料精确成形加工技术”与“多学科多尺度模拟仿真”是 21 世纪两个重要学科研究前沿领域。高新技术材料的出现，将加速发展以“精确成形”及“短流程”为代表的材料加工工艺，包括：全新的成形加工方法与工艺，及传统成形加工方法的改进与工序综合。“模拟仿真”是产品计算机集成制造、敏捷制造的主要内容，是实现制造业信息化的先进方法。并行工程已成为产品及相关制造过程集成设计的系统方法，以计算机模拟仿真与虚拟现实技术为手段的虚拟制造技术将是先进制造技术的重要支撑环境。网络化、智能化是 21 世纪产品与工艺过程设计的趋势，绿色制造是 21 世纪材料加工技术的进一步发展方向。

面对市场经济、参与全球竞争，必须加强材料成形加工科学和技术的基础和应用研究。只有使用先进的材料加工技术，才能获得高质量产品的结构和性能，这些高性能的先进材料包括传统材料和新材料。发展材料成形加工技术对我国制造业以高新技术生产高附加值的优质零部件有积极作用，可扩大材料及制品范围、提高生产率、降低产品成本、增强企业国际竞争能力。

制造业在过去的 20 年发生了巨大变化，而 21 世纪高科技及新材料的出现将导致材料成形加工技术的进一步发展及变革，出现全新的成形加工方法与工艺，传统加工方法不断改进并走向工艺综合，材料成形加工技术则逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。

本书以香山科学会议第 184 次学术讨论会报告内容为基础，在材料成形加工的技术进步、新方法与新技术、多尺度模拟仿真、绿色制造与材料成形加工可持续发展战略等方面共收录学术论文 29 篇。通过揭示材料成形加工技术与科学发展趋势和前沿课题，旨在指出我国制造业中最基础的领域——材料成形加工技术与科学的发展方向，以推动该领域的发展和进步，促进我国早日实现制造强国的宏伟目标。

感谢中国机械工程学会为本书付梓提供的资助。

中国工程院院士 柳百成

目 录

前言

总 论

21 世纪的材料成形加工技术与科学	柳百成 沈厚发	1
21 世纪数字化塑性成形技术与科学	阮雪榆 娄臻亮	21
21 世纪的零件精确轧制成形技术	胡正襄	30
21 世纪的特种焊接技术与科学	关 桥	37
我国焊接生产技术的现状和发展中的几个问题	林尚扬	43

材料成形加工的技术进步

凝固研究与材料的制备成形	周尧和 杨根仓	45
铝、锡及镁合金的先进铸造和成形加工技术	胡邦红	47
镁合金及其成形技术的最新发展	王渠东 丁文江	56
半固态金属加工技术及其在工业中的应用	谢水生	74
温压成形关键技术及其研究进展	李元元 肖志瑜 倪东惠	88
铸造高温合金成形加工技术的进展	李嘉荣	97
TiAl 基合金熔铸技术研究现状与发展	苏彦庆 郭景杰 贾 均 傅恒志	101
用于严酷磨损工况的表面复合材料制备	邢建东 高义民 王恩泽 鲍崇高	109

材料成形加工新方法与新技术

材料定向凝固的前沿进展	傅恒志 刘 林	114
21 世纪材料成形加工技术的特征	李敏贤	118
兵器工业对新一代材料成形加工技术的展望	程 军 梁民宪	124
电磁凝固成形研究进展	杨院生 胡壮麒	131
消失模铸造先进技术	黄天佑 吕志刚 陈尧剑	136
光制造技术及其面向 21 世纪的发展趋势	左铁钊	144
先进陶瓷的精密注射成形	李建保 谢志鹏	152
生物制造的哲理、方法和体系	颜永年 王至尧	158

材料成形加工过程的多尺度模拟仿真

材料加工与新一代产品制造设计的建模与仿真	李 杰	169
材料热处理数值模拟中的科学问题	潘健生 张伟民 胡明娟 顾剑锋	177

精确铸造成形过程的宏观/微观数值模拟研究进展 ...	熊守美 许庆彦 董树勇 柳百成	184
铸造过程中凝固组织形成的数值模拟	许庆彦 柳百成 熊守美	193
汽车冲压零件成形模拟技术的应用	李飞鹏 欧阳可居 胡道钟 陈吕罡	201
新一代连铸连轧过程与计算机模拟仿真	沈厚发 柳百成	208

绿色制造与材料成形加工可持续发展战略

绿色再制造工程材料成形加工关键技术及其基础	徐滨士 朱 胜 梁秀兵	216
完善材料成形加工教育体系，重视培养不同层次的人才	林尚扬	228

21 世纪的材料成形加工技术与科学

100084 北京 清华大学 柳百成 沈厚发

摘 要: 材料成形加工技术与科学既是制造业的重要组成部分, 又是材料科学与工程的四要素之一, 对国民经济的发展及国防力量的增强均有重要作用。未来的制造企业将是以人、管理及技术三要素组成, 而以人为本。未来的制造模式将是小批量、高质量、低成本、交货期短、生产柔性、环境友好。新一代制造工艺及装备、建模与仿真及快速产品与工艺开发系统是面向 21 世纪的三项关键先进制造技术。

轻量化、精确化、高效化将是新一代成形加工技术的重要发展方向, 材料成形制造向更轻、更薄、更精、更强、更韧、成本低、周期短、质量高的方向发展。成形加工过程的计算机建模与仿真是先进制造技术的重要内容, 已在铸造及塑形加工等领域中得到广泛应用。多学科、多尺度、多性能及高精度、高效率是建模与仿真技术的努力目标, 而微观组织模拟(从微米到纳米尺度)则是近年来新的研究热点。现代产品与工艺开发系统是以设计与成形加工过程的建模与仿真为核心内容, 在产品零部件的设计过程中同时要进行影响产品及零部件性能的成形制造过程的模拟仿真。绿色制造是成形加工技术的进一步发展趋势。

关键词: 先进制造技术、材料成形加工、精确成形加工、建模仿真、并行工程、网络化制造、绿色制造

1 材料成形加工技术的作用及地位

我国已是制造大国, 仅次于美、日、德, 位居世界第四^[1]。材料成形加工行业则是制造业的重要组成部分, 材料成形加工是汽车、电力、石化、造船、机械等支柱产业的基础技术, 新一代材料加工技术也是先进制造技术的重要内容。铸造、锻造及焊接等材料加工技术是国民经济可持续发展的主体技术^[2~4]。据统计, 全世界 75% 的钢材经塑性加工, 45% 的金属结构用焊接得以成形。我国铸件年产量已超过 1 400 万 t, 超过美国成为世界铸件生产第一大国。目前, 在汽车工业中汽车重量的 65% 以上仍由钢铁、铝及镁合金等材料通过铸造、锻压、焊接等加工方法而成形。材料成形加工技术与科学又是材料科学与工程的四要素之一, 它不仅赋予零部件以形状, 而且给予零部件以最终性能及

使用特性。

我国虽是制造大国,但与工业发达国家相比,仍有很大差距,表现在:生产率低,人均劳动生产率不到美国的 1/20;技术含量低,CAD 停留在绘图功能;重要产品基本上没有自主产品创新开发能力。材料成形加工技术也不例外,例如:重大工程的关键铸锻件,如长江三峡水轮机第一个叶轮仍从国外进口(图 1);航空工业发动机及其他重要的动力机械的前沿核心成形制造技术尚有待突破(图 2)。因此,在振兴我国制造业的同时,要大大加强和重视材料成形加工技术与科学的发展。

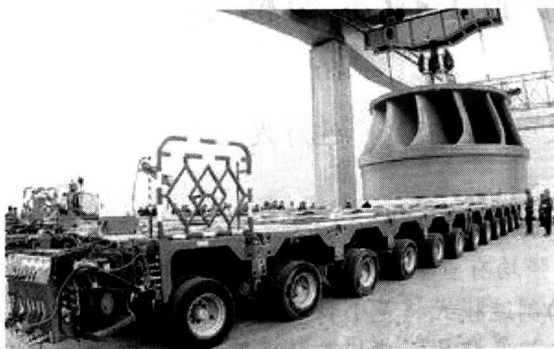


图 1 长江三峡第一台水轮机叶轮从加拿大进口(叶轮重 430t, 价值 960 万美元)

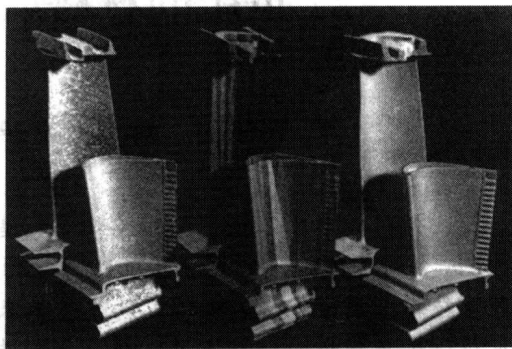


图 2 用定向凝固熔模铸造技术制造高温合金等轴晶(左)、柱状晶(中)及单晶体(右)三代航空燃气轮机叶片

制造业在过去的二十年中发生了巨大变化,这种变化还会延续。高速发展的工业技术要求材料加工产品精密化、轻量化、集成化;国际竞争更加激烈的市场要求产品性能高、成本低、周期短;日益恶化的环境要求材料加工原料与能源消耗低、污染少;另外材料成形本身要求制造性好、成品率高。为了生产高精度、高质量的产品,材料正由单一的传统型向复合型、多功能型发展;材料加工技术逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。21 世纪高新技术材料的出现将导致材料加工的科技进步与变革,包括:全新的加工方法与工艺,及传统加工方法的改进与工序综合。

面对市场经济、参与全球竞争,必须加强材料成形加工科学与技术的基础和应用研究。只有使用先进的材料加工技术才能获得高质量产品的结构和性能,这些高性能的先进材料包括传统材料和新材料。发展材料成形加工技术对我国制造业以高新技术生产高附加值的优质零部件有积极作用,尤其在我国加入 WTO、降低关税的情况下,可扩大材料及制品范围、提高生产率、降低产品成本、增强企业国际竞争能力。

2 材料成形加工技术的发展趋势

美国在“新一代制造计划(Next Generation Manufacturing)”中指出,未来的制造模式将是批量小、质量高、成本低、交货期短、生产柔性、环境友好^[5];未来的制造企业将以人、管理及技术三要素组成,而以人为本;未来的制造企业要掌握十大关键技术,其中包括快速产品与工艺开发系统、新一代制造工艺及装备及模拟与仿真三项关键技术,如图 3 所示。其中新一代制造工艺包括精确成形加工制造或称净终成形加工工艺(Net Shape

Process)。净终成形加工工艺要求材料成形加工制造向更轻、更薄、更精、更强、更韧及成本低、周期短、质量高的方向发展。

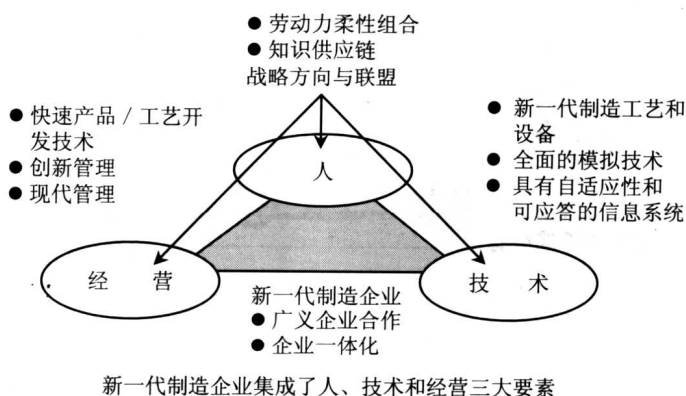


图3 美国“新一代制造计划 (NGM)”中提出的十大关键技术

轻量化、精确化、高效化将是未来材料成形加工技术的重要发展方向。以汽车制造为例，美国新一代汽车研究计划 (PNGV) 的目标是在 2003 年每 100km 油耗要减少到 3L。汽车重量减轻 10% 可使燃烧效率提高 7%，并减少 10% 的污染。为了达到这一目标，要求整车重量要减轻 40%~50%，其中车体和车架的重量要求减轻 50%，动力及传动系统必须减轻 10%。例如，美国福特汽车公司新车型中使用的主要材料如图 4 所示。从图 4 可以看出，新一代汽车中钢铁黑色金属用量将大幅度减少，而铝、镁合金用量将显著增加，铝合金将从 129kg (284lb) 增加到 333kg (733lb)，镁合金将从 4.5kg (10lb) 增加到 39kg (86lb)。美国在新一代铝合金轿车制造中提出了多项材料关键成形加工技术 (图 5)。

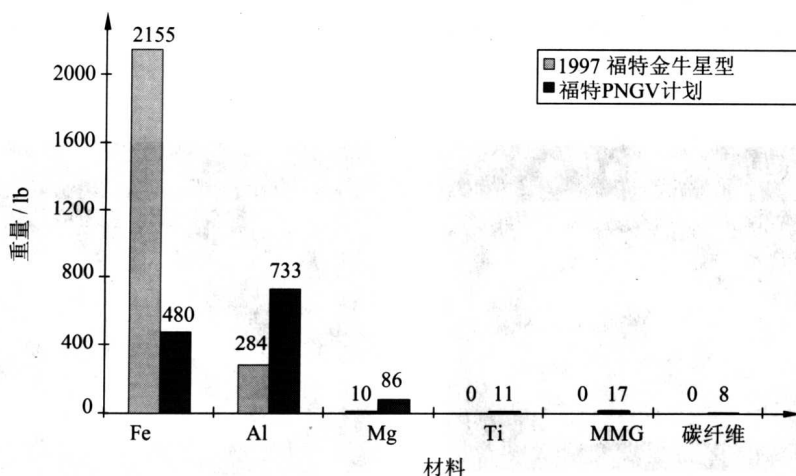


图4 福特新一代汽车主要材料用料

注：1lb=0.453 592 37kg。

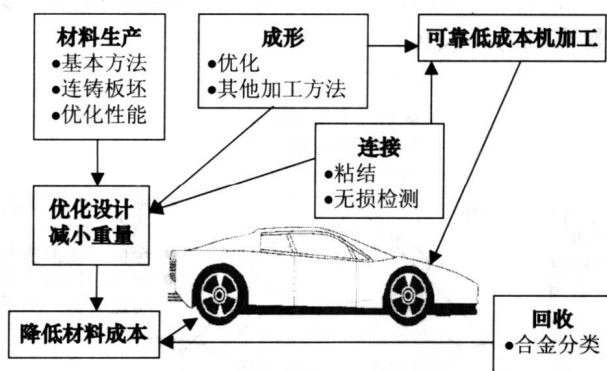


图5 未来铝汽车的关键成形技术

近年来,随着汽车工业和电子工业的迅速发展,对通过降低产品的自重以降低能源消耗和减少污染(包括汽车尾气和废旧塑料)提出了更迫切的要求,轻质、高质量的绿色环保材料将作为人们的首选。镁合金就是被世界各国材料界看好的最具有开发和应用发展前途的金属材料。镁合金产品具有以下优点:①轻量化,密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,是铁的 $1/4$,铝的 $2/3$,与塑料相近;②比强度高、刚性佳,优于钢、铝;③极佳的防振性,耐冲击、耐磨性良好;④优良的热传导性,改善电子产品散热问题;⑤非磁性金属,抗电磁波干扰,电磁屏蔽性佳;⑥加工成形性能好,成品外观美丽,质感佳,无可燃性(相对于塑料);⑦材料可 100% 回收,回收率高,符合环保法;⑧尺寸稳定,收缩率小,不易因环境温度变化而改变(相对于塑料)。

镁合金压铸件广泛应用于交通工业(汽车(图6)、摩托车及飞机零件等)、IT行业(手机、手提计算机(图7)等3C产品)、小型家电行业(摄像机、照相机及其他电子产品外壳等)。汽车离合器及变速箱壳体(图6)采用镁合金压铸件可比铝合金重量(7.9kg 及 7.7kg)分别减轻 2.6kg 及 2.5kg ^[6]。同时,压铸镁铝合金产品在体育运动(自行车架与踏板、滑雪板等)、手工工具(链锯、岩钻等)、国防建设(轻型武器、步兵装备)等领域亦有十分广阔的应用前景。

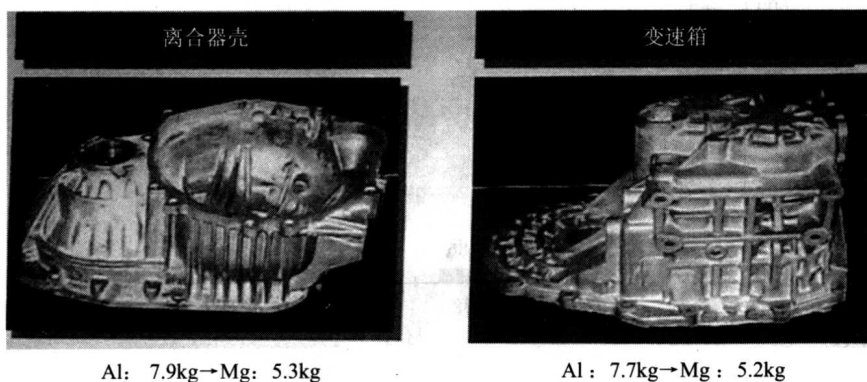


图6 汽车离合器及变速箱壳体镁合金压铸件

我国为金属镁资源大国，已探明的镁储量居世界首位。目前我国镁产量也是居世界首位，约占世界产量的 2/5。但国内在镁合金的应用方面与国外相比还存在较大的差距，限于技术开发能力，大多以原料镁出口，造成国内优势资源的极大浪费。

3 新一代材料成形加工技术

近年来出现了很多新的精确成形加工技术。例如，在精确铸造成形加工方面，汽车工业中 Cosworth 铸造（采用铅砂砂芯组合并用电磁泵控制浇注，如图 8 所示）、消失模铸造（图 9）及压力铸造已成为新一代汽车薄壁、高质量铝合金缸体铸件的三种主要精确铸造成形方法^[3、7]。消失模铸造新工艺具有高精度、短流程、洁净化等一系列的优点，因此许多国家预测消失模铸造将成为“明天的铸造新技术”。我国安徽合肥合力叉车集团公司生产的消失模铸件已达到国际先进水平。另外，用定向凝固熔模铸造生产的高温合金单晶体燃气轮机叶片也是精确成形铸造技术在航空、航天工业中应用的杰出体现（图 10）。从图 11 可以看出，燃气轮机的入口温度在不断地提高，而只有靠成形加工工艺的升级换代才能满足新产品的需求^[8、9]。

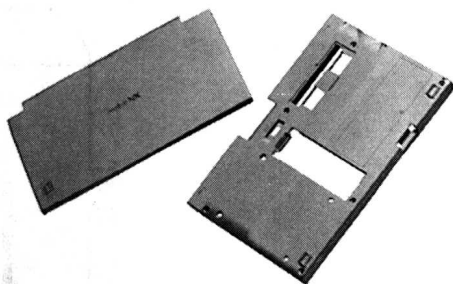


图 7 笔记本电脑壳体镁合金压铸件

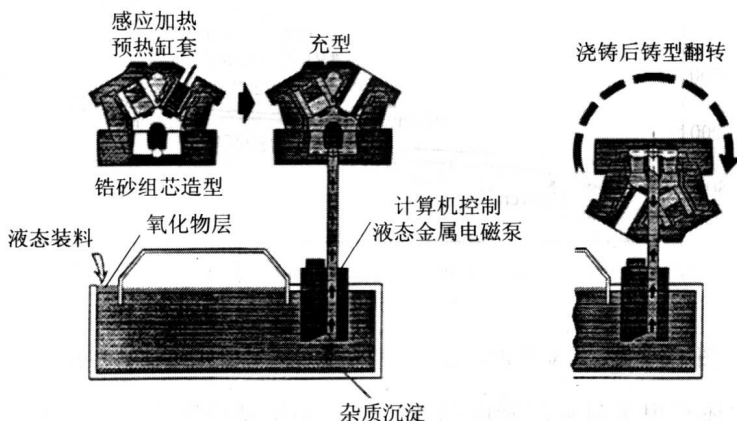


图 8 福特用 Cosworth 法铸造铝合金缸体

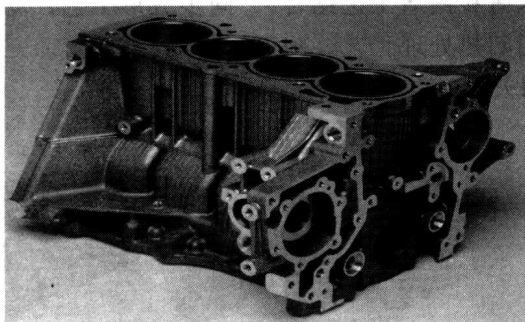


图 9 通用采用消失模新工艺铸造铝合金缸体

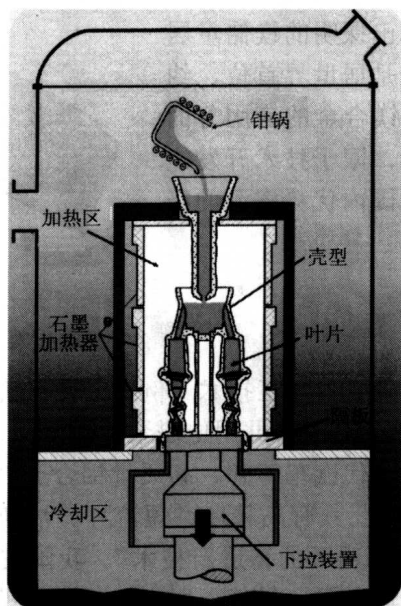


图 10 高温合金单晶体燃气轮机叶片真空熔化与定向凝固装置

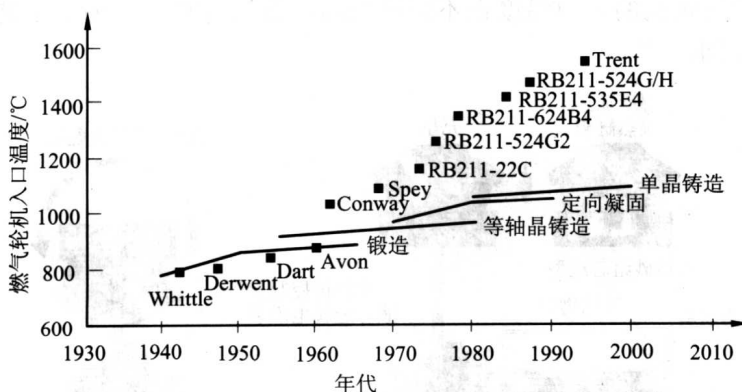


图 11 航空发动机进口温度与高温合金叶片制造技术的发展

在轿车工业中还有很多材料精确成形新工艺，如用精确锻造成形技术生产凸轮轴等零件，铝合金薄板复杂工件的连续加工工艺 AVT (Aluminum Vehicle Technology)、反压力液压成形、铸锻工艺（压铸和锻造工艺结合）、同步成形工艺、动态液压技术、变压力液压胀形技术（图 12）、回归热处理工艺（RHT）、半固态成形、三维挤压法等^[10]。摩擦压力焊新技术近来备受人们关注。



图 12 液压胀形新技术（来源：美国俄亥俄州立大学）

以半固态铸造 (Semi-Solid Casting 或 Semi-Solid Forming) 为代表的精确成形技术由于熔体在压力下充型、凝固, 从而使铸件具有好的表面及内部质量。材料在压力作用下凝固可形成细小的球状晶粒组织 (图 13) [11~13]。半固态铸造技术最早在 20 世纪 70 年代由美国 MIT 凝固实验室研究开发, 分为流变铸造和触变铸造。20 世纪 90 年代中期因汽车的轻量化, 半固态铸造技术在汽车零部件的生产上得到了快速发展和应用 (图 14)。

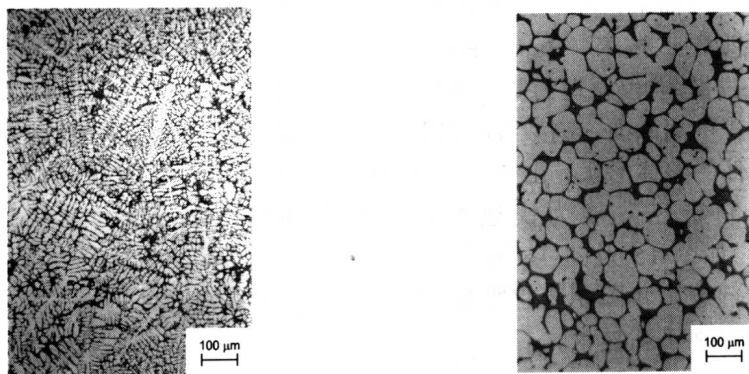


图 13 普通铸造的树枝状组织 (左) [13] 与半固态铸造的球状组织 (右)

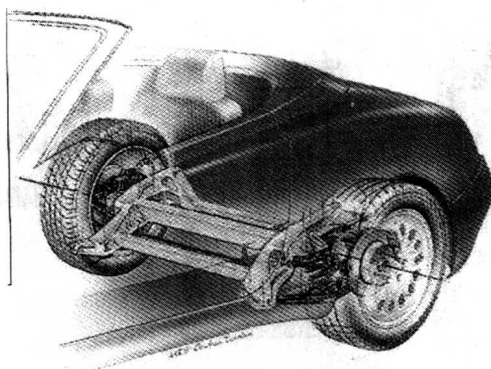


图 14 用在汽车上的半固态铸造铝合金多链节悬挂装置及侧支架铸件

连铸连轧是连续铸造与连续轧制复合的一项新型短流程成形技术[14]。薄板坯连铸连轧是一个连续过程, 缩短了从结晶器至热带卷取机之间的距离, 使由钢水至成卷的时间由传统生产的 5h 降至 15~30min。统计表明, 薄板坯连铸连轧可节省设备成本约 30%, 节约动力及能耗 50%。另外, 由于薄板坯的冷却强度远大于传统的板坯, 铸态组织晶粒细而均匀, 同时微观偏析也得到较大的改善, 从而产品质量好、性能稳定。薄板坯连铸连轧技术的关键是铸造无缺陷板坯, 因此生产中使用了许多新技术, 包括结晶器技术、电磁搅拌技术和液芯压下技术等连铸新技术。同样, 铝带坯连续铸轧技术在 20 世纪 90 年代也取得了重大进展。1997 年国际上已有 5 台商用高速铝带铸轧机, 可铸轧厚 1~10mm、宽 2m 左右的各种加工铝合金带坯, 铸轧速度高达 15m/min, 1mm 厚、1m 宽带坯的生产率为 3t/h。我国在薄带坯高速铸轧技术方面尚处于研制阶段。

喷射铸造是英国 Ospray 金属有限公司于 1974 年率先推出的一种铸造与粉末冶金工艺复合的快速凝固新技术[15]。该工艺将液态金属通过气体雾化成微细颗粒, 然后喷射在一

定形状的收集器上制成半成品金属。喷射铸造具有比其他快速凝固工艺更好的优点：组织细密均匀、工序简单，适合于不锈钢、高速钢、工具钢、铝合金、镁合金、铁基合金、镍基高温合金及磁性材料等的盘、块、环、管、板和棒材生产。自蔓延高温合成（SHS）熔铸技术同样也是一种制备金属基复合材料的新工艺^[16]。

随着全球市场的激烈竞争，加快产品开发速度已成为竞争的重要手段之一。制造业要满足日益变化的用户需求，制造技术必须有较强的灵活性，能够以小批量甚至单件生产迎合市场。快速原型制造技术（Rapid Prototyping）就是在这样的社会背景下产生的。快速原型制造技术以离散/堆积原理为基础和特征，将零件的电子模型（CAD 模型）按一定方式离散成为可加工的离散面、离散线和离散点，而后采用多种手段，将这些离散的面、线段和点堆积形成零件的整体形状。由于工艺过程简单，因而制造速度比传统方法快得多。近年来，快速原型制造已发展为快速模具制造（Rapid Tooling）及快速制造（Rapid Manufacturing），如图 15 及图 16 所示。它能大大缩短产品的设计开发周期，解决单件或小批零件的制造问题。我国制造业要在国际市场竞争中赢得一席之地，就必须尽快掌握及应用这项材料成形加工新技术。

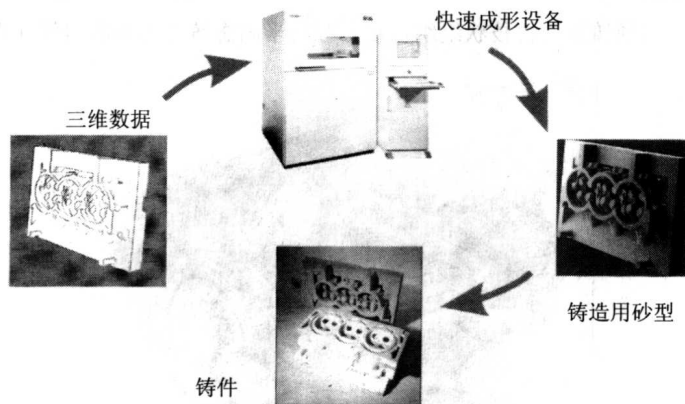


图 15 快速制造铸造砂型

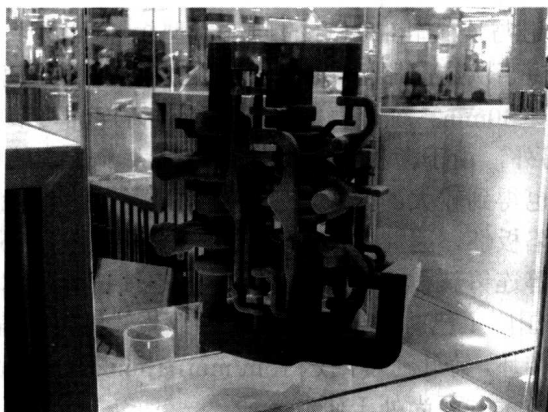


图 16 快速制造铸造砂芯

4 新材料及其成形加工方法

21 世纪将是一个以开发高新材料为前导、促成高技术群体超常发展的新世纪。信息技术、生物技术与制造业三个支柱性产业赖以发展的基础是材料,尤其是高新材料。当今任何工业发达国家都毫无例外地把开发新材料列入重点发展的高新技术领域,作为巩固国防、发展国民经济的重要手段^[17, 18]。如日本 20 世纪 90 年代提出的四大技术之一就是新材料,法国拟定的 20 项关键技术的第二项是材料科学,英国、德国投入新材料研究人员和经费约占整个科研人员和经费的一半,俄罗斯将材料科学纳入统一的国家计划并给予优先安排,美国国防部 1991 年公布的 20 项关键技术中,涉及材料科学的有 7 项,占三分之一,美国提出的“星球大战”计划和西欧联合制订的“尤里卡”计划都一致将先进材料技术当作 21 世纪高技术竞争的制高点。

高技术新材料是指新近研制成功或正在研制的、具有比传统材料更优异的特性和功能,能够满足高技术发展需要的新型材料。它具有多学科交叉和知识密集、技术密集的特点,是一类品种繁多、结构特性好、功能性强、附加值高、更新换代快的材料。目前全世界已经注册的新材料约有 30 万种,并且还以每年大约 5% 的速度迅速增长,其中相当一部分具有发展成为新材料产业的潜力。当代新材料的发展趋势主要表现在:结构材料的复合化和功能化,功能材料的多功能集成化,传统材料(金属、陶瓷、高分子材料)继续发展,材料设计与制备技术不断革新。新材料与现代科学技术特别是高技术联系密切,它们互相依存、互相促进,共同推动经济发展和社会进步。

随着金属间化合物材料、金属基复合材料、各种新型功能材料、超导材料等高新技术材料的不断出现,传统的加工方式或多或少地遇到了困难。与新的材料制备和合成技术相适应,新的加工方法成为材料加工研究开发的一个重要领域。材料制备和材料加工一体化是一个发展趋势。新材料的发展与新技术密切相关,因此,要使材料达到极端状态,往往要改变材料的原有属性。从新材料的合成与制造来看,往往利用极端条件作为必要的手段,如超高压、超高温、超高真空、极低温、超高速冷却及超高纯等。

例如,材料电磁加工是一种既可控形又可控性的材料加工新方法,使用的电磁场主要有以下几种:① 由传统线圈产生的普通强度的直流磁场;② 由超导线圈产生的高强度的直流磁场;③ 频率从几赫兹到数十兆赫兹的交流磁场;④ 其他特殊磁场,如移动磁场、脉冲磁场、变幅磁场等^[19]。

激光加工技术多种多样,包括电子元件的精密微焊接、汽车和船舶制造中的焊接、切割与成形等^[20]。有不同种类的激光表面改性处理方法,如热处理、表面修整、表面熔覆、合金化及打标等。使用的激光器主要是大功率 CO₂ 激光器、YAG 激光器。近年来,激光加工自由成形技术成为重要的研究动向(图 17),国内在激光加工自由成形方面已经取得进展,已用激光熔覆柔性制造技术制造了硬 X 射线天体望远镜钨基合金准直器(图 18)。

纳米材料是现代材料科学的一个重要发展方向^[21]。作为新的结构功能材料的纳米材料,其未来的应用很大程度上取决于纳米粉末零件的成形技术的发展,以保证纳米材料微结构的稳定性,保留成形加工后的纳米固体材料良好的力学、磁学、催化性能等。

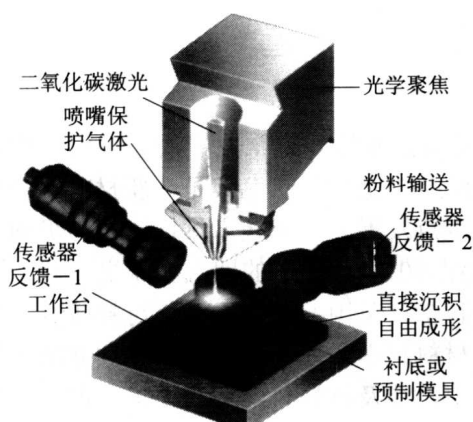
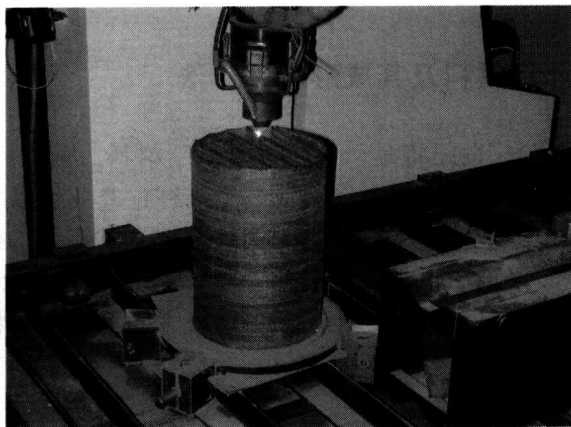


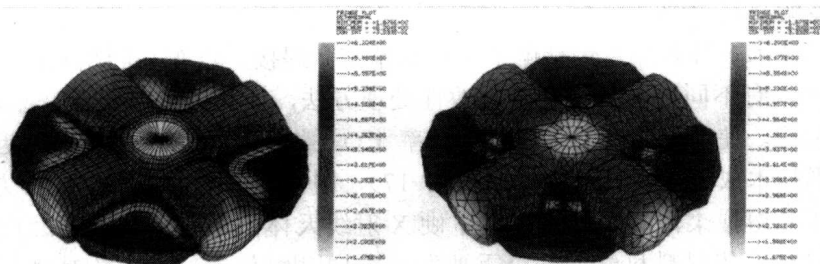
图 17 激光加工自由成形技术

图 18 激光熔覆精密柔性制造硬
X 射线天体望远镜钨基合金准直器
(来源：清华大学激光加工中心)

5 材料成形加工过程的建模与仿真 (Modeling and Simulation)

随着计算机技术的发展，计算材料科学已成为一门新兴的交叉学科，成为材料研究的重要手段，是除实验和理论外解决材料科学中实际问题的第三个重要研究方法。它可以比理论和实验做得更深刻、更全面、更细致，可以进行一些理论和实验暂时还做不到的研究。因此，基于知识的材料成形工艺模拟仿真是材料科学与工程学科的前沿领域及研究热点，而高性能、高保真和高效率则是模拟仿真的努力目标^[3、4、22~24]。根据美国科学研究院工程技术委员会的测算，模拟仿真可提高产品质量 5~15 倍，增加材料出品率 25%，降低工程技术成本 13%~30%，降低人工成本 5%~20%，增加投入设备的利用率 30%~60%，缩短产品设计和试制周期 30%~60%，增加分析问题广度和深度的能力 3~3.5 倍等。

1962 年丹麦学者首次用有限差分法计算了凝固过程温度场。此后，美国、日本、德国以及丹麦等国相继开展了铸造凝固过程数值模拟、软件开发及应用推广等工作。经过 40 多年的不断发展，铸造及锻造宏观模拟在工程应用中已是一项十分成熟的技术（图 19），而焊接过程的模拟仿真研究也已取得可喜的进展（图 20）。

图 19 锻造过程模拟
(来源：上海交通大学)