
先进基础工艺

一、概述

我国制造业已是世界制造大国。根据世界银行统计，2013 年我国制造业增加值为 35066.3 亿美元^[1]，连续多年成为世界制造第一大国^[2]。美国制造业增加值为 19438.1 亿美元，位居第二，日本和德国分别为 9045.9 亿美元和 7602.6 亿美元，位居第三和第四^[1]。

新中国成立以来，特别是改革开放以来，我国制造业虽然取得了举世瞩目的成就，但是大而不强的问题十分突出，主要表现在以下几方面。

1. 创新能力薄弱，研发投入不足

2013 年我国研发投入占 GDP 的 2.08%^[3]，首次突破 2% 大关。但是，与工业发达国家大于 2.5% 相比，仍有差距。

我国制造企业的研发投入与销售收入之比，和工业发达国家相比，差距更大。2010 年，我国制造企业研究与开发投入仅占销售收入的 1.2%，而美、德、日则分别为 4.7%、2.9% 及 3.8%。

2. 关键核心技术没有掌握和共性基础技术薄弱

我国制造业及制造技术在总体上，仍处在中低端水平。同时，长期以来，“重产品，轻工艺”的现象十分突出。例如，我国自行研发的 C919 已经正式下线^[4]，但发动机全部靠引进。例如，近年来，我们加大了对高档数控机床的研发投入，在中低端数控机床领域有了突破。但是，高档数控机床仍依赖进口。又例如，我国的 80% 芯片仍依赖进口^[5]。

3. 资源浪费，污染严重

2010年，我国制造业增加值约占GDP的32.6%，而能耗占全国的58.0%。我国约58.3%的原油，58.5%的铁矿石依赖进口^[6]。

我国空气和水污染十分严重，雾霾天气已严重影响人民的健康，水污染事故占重大环境污染一半左右，根据监察部的统计分析，国内近几年每年水污染事故都在1700起以上^[7]。

我国制造业又面临新的挑战。

一是工业发达国家的“再工业化”造成的新冲击；

二是新科技及第三次工业革命引起的新变化；

三是经济全球化形成的新格局。

面临新形势，强化工业基础，发展先进基础工艺，是提升竞争力和自主创新能力的基础，是制造业结构调整和转型发展的基础，也是提升产品和装备质量的基础。因此，发展先进基础工艺已刻不容缓。

二、我国先进基础工艺现状

先进基础工艺是指工业装备和产品制造过程中量大面广、通用性强的关键的、共性的先进基础工艺^[8]。各行各业都有先进基础工艺，按行业应用特点，基础工艺可分为两类，即通用先进基础工艺和专用先进基础工艺。

通用先进基础工艺，将聚焦于装备制造业（包括机械、运载、航天、航空、轨道、船舶、汽车、能源、电子等）的先进制造工艺（包含加工制造、成形制造、增材制造及制造过程检测控制技术等）。专用先进基础工艺，将主要集中在钢铁、有色及化工等流程领域和纺织、轻工领域等。

本文重点讨论：装备制造基础工艺，电子装备制造基础工艺，纺织、轻工装备制造基础工艺，钢铁、有色及化工等流程基础工艺。

先进基础工艺现状

新中国成立以来，特别是改革开放以来，我国基础工艺发展迅速，基本形成了较完整的基础工艺体系，能满足中低端产品需求。在某些高端产品及装备领域中提供的先进基础工艺，也已达到国际先进水平。

我国已成为世界铸锻件生产第一大国。近年来，钢产量的快速发展，带动了整个焊接行业的快速发展。重大铸造、锻压、焊接装备不断出现、相应的先进基础工艺也不断提高。如德阳二重集团的 8 万吨模锻压机及 16000 吨水压机（图 1）、包二机的 3.6 万吨垂直挤压机、西安 4 万吨模锻压机、青岛青锻的 16000 吨数控电动螺旋压力机等均取得了重大进展。这些都为我国航空、航天、能源、化工、船舶、车辆等制造工艺技术提供了技术支撑。



图 1 中国二重集团公司的 8 万吨模锻设备及 16000 吨水压机

大型汽车覆盖件自动冲压线等多类设备已达到国际先进水平（图 2）并出口国外。



图 2 济南二机的大型汽车覆盖件自动冲压线

在加工制造领域，已进入到以发展高速切削、开发新的切削工艺和加工方法、提供成套加工技术为特征的发展新阶段。已经研制了龙门及卧式五轴加工中心等重点装备。研究先进加工制造技术中的多轴联动、高速切削加工工艺与编程等关键技术，为我国航空、航天、能源、化工、船舶、车辆等制造工艺技术提供了技术支撑。

先进基础工艺主要差距

但是，长期来政府部门及企业“重型号，轻工艺”、“重产品、轻工艺”，在工艺领域又“重冷（加工制造）轻热（成形制造）”。基础工艺薄弱，已成为建设制造强国的主要瓶颈之一。

总体而言，我国基础工艺仍停留在中低端水平，难以满足中高端制造产品的需求。现以若干案例来表述我国基础工艺存在的差距。



案例 1

航空发动机及重型燃气轮机热部件制造工艺，如高温合金定向和单晶叶片及涡轮盘等制造技术薄弱。

我国自行研制的 C919 大飞机的发动机全部依赖进口[9]（图 3、图 4），其中发动机热部件制造技术十分薄弱。



图 3 正式下线的 C919 飞机



图 4 C919 飞机依赖进口发动机

重型燃机的热部件问题更为突出，全部依赖进口（图 5）。航空发动机单晶叶片制造工艺十分复杂^[10]（图 6），需要国家加大投入。



图 5 航空发动机及重型燃机高温合金定向凝固叶片

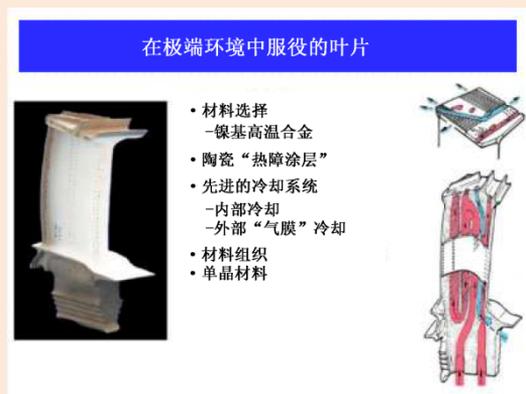


图 6 单晶叶片气道设计、定向凝固及涂层技术

案例 2

重型能源装备的特大型锻件工艺缺失。

部分能源及船舶装备的大型铸锻件（特别是特大型转子锻件）仍全部或部分依赖进口^[11]（图 7、图 8）。重型能源装备的特大型锻件工艺缺失，以锻件合格率为例，日本接近 100%，而国内仅 70%左右。又例如，核电站某锻件用钢锭，日本钢锭为 236 吨，而国内则需用 350 吨钢锭，材料利用率低。



图7 特大型核电站转子锻件



图8 船用大型曲轴用锻件

案例 3

我国 04 重大科技专项支持多项高档数控装备研发，均因可靠性差、结合基础制造工艺不够而未能验收。无锡柴油机集团公司选用的国产数控流水线将近两年仍未正常运行。又例如，中国二重集团公司研发成功的 8 万吨模锻设备，因模锻工艺的模具未能同时开展研究等原因，开工率仅 20-30% 左右。

案例 4

汽车基础制造工艺数据缺失，无法满足汽车大规模、高效率、高品质、一致性的要求。

自 2001 年底加入 WTO 后，我国经历了汽车工业发展的黄金十年，并于 2009 年成为世界第一汽车产销大国。2014 年我国汽车产销量双双突破 2300 万辆，连续六年位居全球第一。但是，伴随产品的不断升级换代，国外高技术零部件优势凸显，国产工艺装备不能满足质量需求。致使本身技术竞争力就弱的自主品牌的成本优势也逐步消失。汽车用高精度、高稳定性多轴数控加工设备进口依存度达 90% 以上。中国汽车工业自主发展目前已到了十字路口，产业正处于向制造业高端转型的危急时刻。

案例 5

超精密光学磨床与国际相比仍然有较大差距。

超精密磨削技术是实现超光滑表面的最佳手段，对国防科技、航空航天、电子信息等领域的发展意义重大。英国克兰菲尔德大学精密工程公司研制出了 OAGM2500 大型 CNC 超精密磨床，如图 9 所示，其平面加工的精度可以达到 $1\mu\text{m}$ ，偏轴的非球面镜的加工精度是 $2.5\mu\text{m}$ ，表面的粗糙度可以达到 $2\sim 3\text{nm}$ 。相对而言，代表我国高精度平面磨床最高技术水平的 MG732、MGK7120x6 型精密数控平面磨床的加工精度为 $5\mu\text{m}/1000\text{mm}$ ，粗糙度为 $0.04\sim 0.08\mu\text{m}$ 。所以说，国内平面磨床目前尚限于精密级水平，与超精密磨削的精密要求还有非常大的差距。



图 9 大型数控超精密机床 OAGM

案例 6

钟表类精细制造工艺与相关精密加工设备与先进国家相比存在较大差距

尽管我国已成为世界钟表的制造大国，但在目前，我国中高档手表机芯主要还依赖于进口，主流产品的工艺质量、走时精度、走时稳定性和使用可靠性等基础指标与瑞士和日本先进国家相比还存在较大差距。例如，目前我国主夹板加工普遍沿用单一功能加工设备分多次切削成型，与瑞士同类产品相比，加工精度差距很大，产品走时稳定性和可靠性差；我国游丝发条制造设备、加工工艺落后，尺寸精度离散度大，不能满足高档表需求。特别是市场看好的高档表和女表用游丝加工技术，是瑞士企业的垄断技术（图 10）。由于技术难关不能突破，长期依赖进口，难以开成规模化生产，已成为制约我国高档表发展的瓶颈技术。

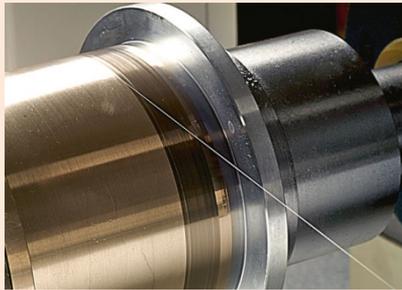


图 10 瑞士游丝加工技术

先进基础工艺存在主要问题

先进基础工艺的主要问题，可以归纳为以下 4 个方面。

1. 工艺技术落后，产品质量与寿命与发达国家有明显差距

我国中低端铸锻件的生产能力过剩，而高端铸锻件制造依然困难，如航空发动机、重型燃气轮机和核电等领域的关键铸锻件仍依赖进口。

我国热处理工艺与发达国家的差距，在产品质量上最为明显。如国产通用零部件产品寿命一般为国外同类产品寿命的 30%-60%。在热处理控制变形方面，我国 90%以上零件变形超差，而工业发达国家的热处理工艺则能做到无变形的先进水平^[12]。

在数控装备加工制造基础技术方面，缺乏进行制造工艺、装配工艺等方面的研究。例如，现代国防装备对零部件的材料、结构、加工工艺都有一定的特殊性和加工难度，用传统加工制造方法无法达到要求，必须采用多轴联动、高速、高精度的数控机床才能满足加工精度要求，高端设备加工工艺方法一直处于国外垄断。

同时，长期以来，企业基础工艺技术数据积累少、制度不完善。

2. 数字化水平薄弱

我国基础工艺的数字化水平仍然很低。部分产业，如铸造企业已采用工艺建模与仿真技术。但是，多数行业的基础工艺如热处理工艺仍停留在“试错法”水平，仅凭经验来提高产品质量。工艺专用的模拟仿真商品化软件的研究与开发远落后于工业发达国家，某些领域的商品化工业专用软件完全被国外所垄断。

3. 资源消耗高，环境污染严重

我国生产每吨合格铸铁件的平均排污（废渣、废砂、废气）是工业发达国家的 3~6 倍，单位产值能耗为发达国家 4 倍，单位产值消耗钢材为发达国家 1.5 倍。我国热处理企业平均单位能耗约 500kW·h，仍远落后于单位能耗 300~400kW·h 的国际先进水平，高污染、高危害、高危险的盐浴热处理在我国还大量存在^[13]。

4. 生产效率及劳动生产率低

我国铸造企业人均年产量平均水平为 15~20 吨/年人,仅为国外的 1/4~1/6; 锻造工人平均产量为发达国家的 1/3; 热处理行业的全员劳动生产率仅达到世界先进水平的 1/6 左右。

三、国外强化基础制造工艺的经验

“他山之石,可以攻玉”。近年来,美国、德国、英国、韩国等工业发达国家在重振先进制造业的有些做法,值得我们重视和借鉴。

美国先进制造伙伴计划及国家制造创新网络

在美国虽然制造业仅占国内生产总值的 12%,但对于美国国家的经济建设和国家安全发挥着非常关键的作用。美国国内产业 70%的研发活动和 90%的企业专利都来自于制造业。

2011 年 6 月,美国政府正式启动了“先进制造伙伴计划”(Advanced Manufacturing Partnership)^[14]。2012 年 2 月,美国国家科技理事会发布《先进制造业国家战略计划》,正式将先进制造业提升为国家战略,以抢占新一轮全球制造业竞争的优势地位。2013 年 10 月总统办公室又发布“加快发展美国先进制造业”报告。

为贯彻和实施先进制造伙伴计划,美国政府专门成立“先进制造业伙伴计划”指导委员会(Advanced Manufacturing Partnership Steering Committee),以确保美国制造业在全球的竞争能力。委员会由著名企业家和学术界专家和教授组成,并由道化学公司首席执行官及麻省理工学院校长担

任主席。

先进制造业伙伴计划“指导委员会”提出要优先支持 11 项交叉、跨学科的先进制造技术，其中先进成形制造技术、可持续制造技术、先进制造装备及先进过程检测与控制等 4 项均属先进基础制造技术。

根据指导委员会的建议，2012 年 3 月，奥巴马总统提出《国家制造业创新网络计划》(National Network for Manufacturing Innovation, NNMI)。报告同时指出，美国有全世界都羡慕的基础研究及企业拥有很强的产业化能力，但是中间（技术成熟度 4-6 级）存在鸿沟，把它称之为“死亡谷”，如图 11 所示。为此，要建立一批从事竞争前关键共性技术研究的制造创新研究院，如图 12 所示，并组成国家制造创新网络。

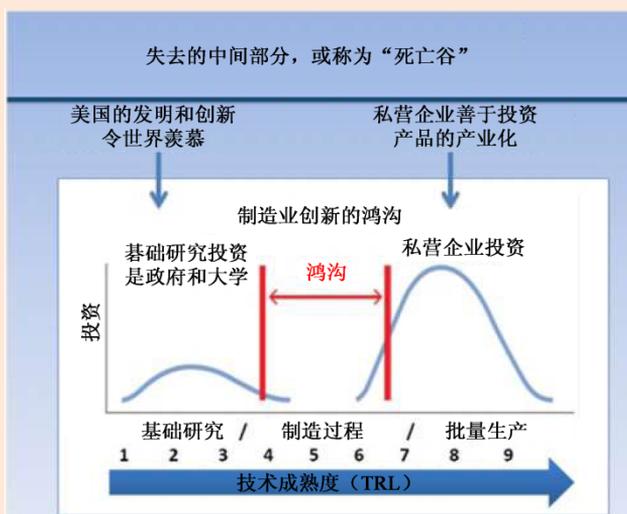


图 11 美国在全球竞争中的基础研究与成果产业化之间存在鸿沟

2013 年 1 月，美国总统执行办公室、国家科学技术理事会和先进制造业国家项目办公室 (AMNPO) 联合发布了《国家制造业创新网络：初步设计》。美国制造创新网络计划的核心是集中产学研力量推动数字化制造、新能源以及新材料应用等先进制造业的创新发展，从而使美国在全球制造业新一轮变革中抢占先机，继续保持领导者地位。



图 12 在基础研究与产业化间建设制造创新研究院

根据建议，第一批要建设 15 个独立、非营利的从事应用研究的制造创新研究院（Institute for Manufacturing Innovation）^[15]，如图 13 所示。长远计划要建立 45 个制造创新研究院。

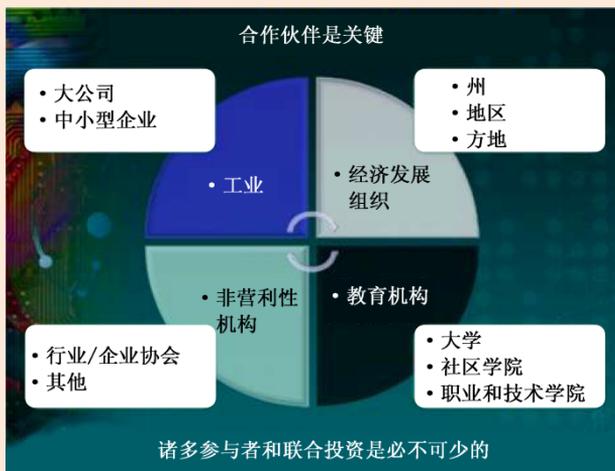


图 13 制造创新研究院由政、产、学、研等单位组成联盟

2013 年，已成立“增材制造”、“数字化制造与设计”、“轻量化材料制造”、“下一代电力电子制造”等 4 个创新研究院。对每个创新研究院政府平均投

入 7000 万美元，并组成政、产、学、研协同创新联盟（图 13），由联盟联合投入 7000 万美元。以增材制造创新研究院为例，由 85 家企业、13 家高校、9 家社区学院及 18 家非营利组织等单位组成协同创新联盟。

2014 年美国又新启动了 5 个制造业创新研究院。其中有“柔性混合电子（芯片）制造”（Flexible Hybrid Electronics Manufacturing），“集成光电子制造”（Integrated Photonics Manufacturing），“智慧制造”（Smart Manufacturing），先进复合材料制造（Advanced Composites manufacturing），新一代纤维和纺织（Revolutionary Fibers and Textiles）等创新研究院。

美国十分重视加强先进制造技术的竞争前共性技术的研究，认为这是国家应该支持和投入的重点。美国建立的九所制造创新研究院中，其中增材制造、数字化制造与设计、轻量化材料制造、先进复合材料及智能制造等五所创新研究院与基础工艺和基础材料密切相关。

应该指出，美国在应用基础研究与企业产业化之间，建立一批由国家支持的国家制造业创新研究院的做法，值得我们借鉴。前几年，我国大院、大所改制后，在应用基础研究与企业成果产业化之间，造成了共性基础研究缺位。引起了产、学、研、用之间的严重脱节。这一缺位现象急待解决，到了刻不容缓的时刻。

德国工业 4.0

德国是全球制造业最具竞争力的国家之一，为巩固其全球领先地位，在新一轮工业革命中占领先机，德国在 2013 年 4 月汉诺威工业博览会上正式提出“工业 4.0”战略。它是德国政府《高技术战略 2020》中确定的十大未来项目之一。“工业 4.0”实施的主要目的是确保德国成为智能制造技术的主要供应商和产品的主导市场，维持其在全球市场的领导地位，塑造其制造业在全球范围内的新的竞争优势。

工业 4.0 将工业发展分为 4 个阶段，也可称之为工业革命的 4 个阶段 [16,17]。

工业 4.0 的核心思想是将虚拟世界和现实世界联系在一起创建一个真实的网络世界。它通过确定和识别工厂中每个工作单元的活动，配置合理的选项和生产条件，为工厂提供最优化的生产过程。在生产系统中部署网络—实体物理融合系统，将实现单机智能设备的互联，不同类型和功能的智能单机设备的互联组成智能生产线，不同的智能生产线间的互联组成智能车间，智能车间的互联组成智能工厂，不同地域、行业、企业的智能工厂的互联组成一个制造能力无所不在的智能制造系统；这些单机智能设备、智能生产线、智能车间和智能工厂可以自由动态地组合，这一灵活的生产系统能够从根本上允许生产流程的实时自优化，以满足不断变化的制造需求。

英国制造的未来计划

近年来，为了重振制造业，英国政府发表了《**未来的制造 (The Future of Manufacturing)**》文件，副标题为“**英国面临机遇和挑战的新时代**” [18]。其任务是要加快研究成果的产业化，推进英国先进制造业的发展与成功。为此，提出要建设 7 项高价值制造研发促进中心 (**High Value Manufacturing Catapult Center**) [19]，其中主要有：先进成形研究中心 (AFRC)、先进制造研究中心 (AMRC)、过程创新 (CPI)、制造技术中心 (MTC)、国家复合材料中心 (NCC) 原子核先进制造研究中心 (Nuclear-AMRC) 等基础制造技术领域。

■ 韩国创新平台

近年来，韩国针对国际形势发展，深感要加强制造业的创新能力，提出“振兴韩国经济的创新平台计划（Innovation Platform for Revitalizing the Korean Economy）”^[20]。

工业创新的任务是：创建与新信息技术集成的包含制造业及服务业的新的工业结构。其目标是：建立具有全球创新优势的平台。

创新平台提出 8 项战略，其中之一就是要“转变制造业成为智能与服务集成的制造业”。

四、先进基础工艺发展趋势

基础工艺发展趋势可归纳为 4 个方面：一是基础工艺与高技术集成，二是基础工艺与信息化深度融合，三是在极端条件下的基础工艺技术，四是绿色基础工艺技术。也可细化归纳为“七化”，即高技术化、数字化、智能化、极端化、精密化、轻量化、绿色化。

■ 制造技术与高技术集成（高技术化）

航空发动机及重型燃汽轮机热部件制造技术是制造技术与高技术集成的典型案例。

航空发动机叶片已从第一代等轴晶发展到第二代柱状晶及第三代定向凝固单晶空心叶片^[21]（图 14）。定向凝固单晶叶片依赖于高温合金研发、叶

片创新设计、精密铸造和定向凝固技术及陶瓷材料涂层等多项高科技技术的集成（图 15）。我国在大尺寸重型燃机定向凝固叶片成形制造工艺方面仍是空白^[22]。



图 14 第一、二、三代航空发动机高温合金叶片

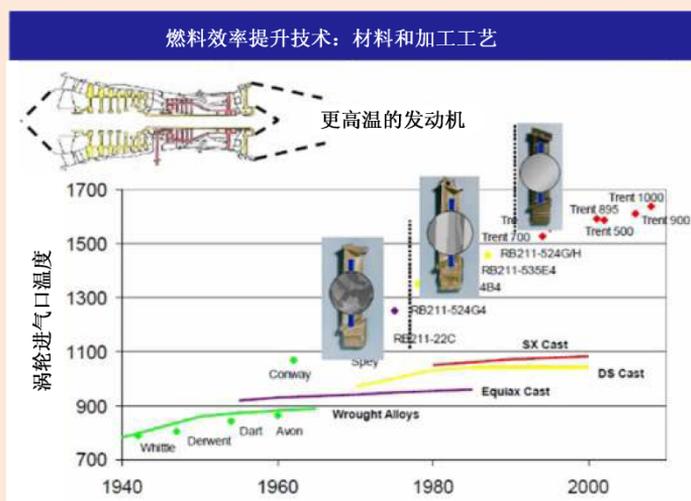


图 15 定向凝固叶片承温能力的提升依赖于高温合金定向凝固、热障涂层、冷却通道的设计等技术

数字化智能化技术深度融合(数字化、智能化)

1. 数字化制造

建模与仿真技术是数字化制造的核心技术^[23]。美国“先进制造伙伴计划(Advanced Manufacturing Partnership)”的目标之一,要求制造产品的研发周期和费用要降低一半(Half the time, half the cost)^[24]。

以美国研发波音 787 飞机为例,在数字化设计 777 的基础上,实现了设计、制造、研发及全寿命周期的 4 方面的数字化。加工制造行业已经实现了基于物理过程模拟的数字化加工技术。

建模与仿真正在从宏观发展到微观,美国启动的“材料基因组计划”,将集成计算材料工程(Integrated Computational Materials Engineering^[25])作为重要内容(图 16)。福特汽车公司提出“从原子到汽车(发动机)”的技术路线图(图 17)。

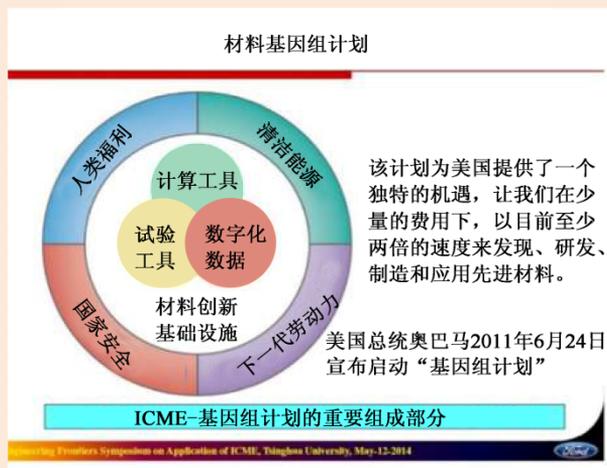


图 16 ICME 是材料基因组计划的重要内容

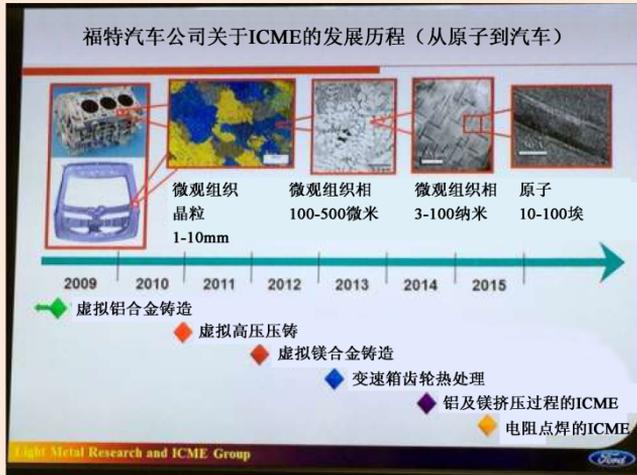


图 17 福特汽车公司关于 ICME 的技术路线图

英国航空发动机涡轮盘锻件实现全流程数字化建模与仿真 (图 18)。美国 GE 公司采用集成计算材料工程技术 (Integrated Computational Materials Engineering) 进行航空发动机叶片工艺-组织-性能预测建模与仿真 (图 19)。

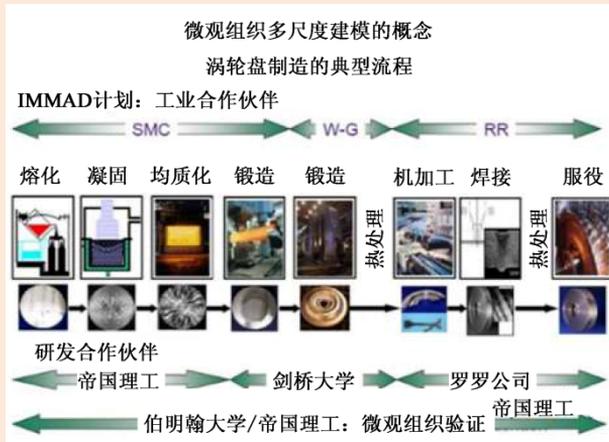


图 18 英国罗-罗公司航空发动机涡轮盘锻件全流程建模与仿真

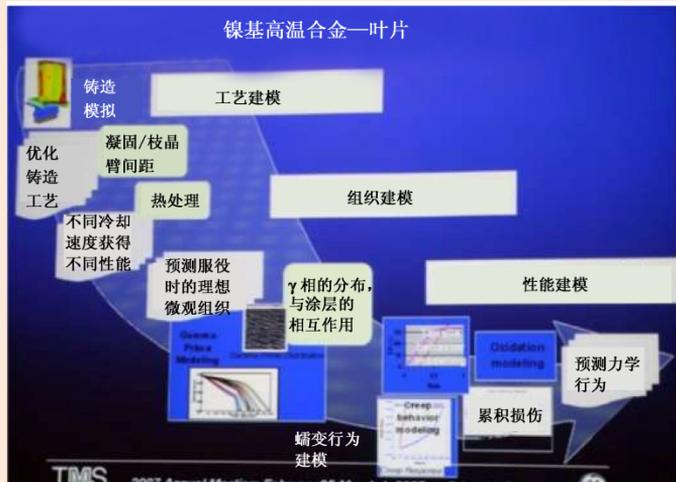


图 19 美国 GE 公司采用 ICME 技术进行航空叶片工艺-组织-性能预测

高性能计算机的发展，为大规模计算提供了条件。波音公司 2005 年研发 B767 时，要进行 77 次风洞实验；而现在研发 B787 时，只需进行 11 次实验，大大缩短研发周期，降低研发成本。美国通用电气公司采用由 10000 个处理器组成的高性能计算机 (HPC)，模拟和优化了发动机喷嘴设计 (图 20)，大大提高了发动机的效率，降低油耗，减少污染。



图 20 航空发动机喷嘴的建模与设计优化

2. 增材制造 (Additive manufacturing)

增材制造技术是数字化制造发展的又一重要方向。美国把数字化设计和

增材制造技术集成，成为加快研发周期、缩短研发成本的有效途径。GE 公司已正式采用“直接金属激光熔化（Direct Metal Laser Melting）技术”，批量制造航空发动机高温合金喷嘴(图 21、图 22)，提高了 5 倍的使用寿命^[26]。美国在航空工业钛合金的增材制造领域取得重要进展(图 23)，我国西北工业大学及北京航空航天大学也取得重要进展，采用增材制造研制的钛合金大型构件（5000*2500*600mm），已在飞机上应用^[27,28]。



图 21 航空发动机高温合金喷嘴



图 22 增材制造打印喷嘴（DMLM 技术）



图 23 激光快速成形制造的战机后机身隔框

3. 智能化制造

近年来，美国专门建立了“数字化制造与设计”及“智慧或智能制造（Smart Manufacturing）”二个国家级制造创新研究院。

美国提出数字化制造与设计创新研究院的主要任务是：全生命周期的数字化，从产品设计、产品试制、产品生产、产品检验到产品发货的全过程的数据采集、分析、优化和集成（图 24）。做到创新产品又好、又快、又省，并且更有效、更优化、更有竞争力。数字化制造与设计实际上是智能制造的核心内容，或称之为脊梁（backbone），将为未来的智能制造指引方向和途径。很多专家指出，实际上这也就是“智能制造”，或称之为工业 4.0。

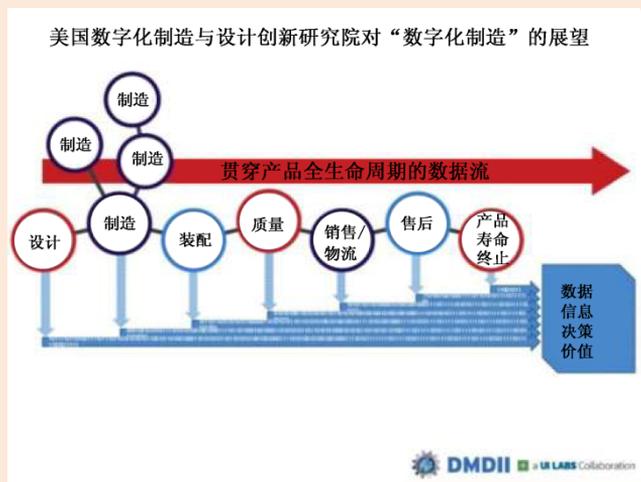


图 24 全生命周期的数字化（智能化）制造视野

美国智能制造创新研究院的全称是：基于智能制造的清洁能源创新研究院：先进传感器、控制、平台及制造过程模型，并提出智能制造的关键是：先进传感器，高级过程控制，制造工艺模型与工业分析软件及测试与实验平台。

根据美国企业界的调查，有约 81%的企业认为数字化制造与设计及智能制造智能化对提升未来的竞争能力十分重要，但是仅有约 14%的企业认为已完全具备开展此项研究的装备和条件。

因此，对发展智能制造要采取积极推进而又循序渐进的态度。

超常工作条件下的制造技术（大型化、微纳化、极端化）

现以大型化为例，我国已是铸造大国，生产的最大铸件重达 520 吨，需钢液 830 吨^[29]。但是，我国大型锻件工艺技术与质量与国外相比，仍有差距。日本大型锻件成品率接近 100%，而我国约为 70%左右。某些核电站锻件，日本采用 236 吨锻件，而我国则需要用 350 吨锻件^[30]。

重型和超重型机床是一个国家机床行业是否强大的标志。目前，中国自主开发研制的重型、超重型机床产品基本满足了一些国家重点工程需要^[31]。自主研制的 3.6 万吨黑色金属垂直挤压机（如图 25 所示）是世界上最大的挤压设备，标志着中国大口径厚壁无缝钢管制造技术达到世界领先水平^[32]。北京第一机床厂和北京工业大学等联合开发的数控重型桥式龙门五轴联动车铣复合机床龙门跨度达到目前世界最大的 10.5 米。武汉重型机床集团有限公司研制的超重型数控卧式镗车床最大工件回转直径为 6300mm，成功用于毛坯重量为 540 吨国产第一支 1100MW 核电半速转子的加工和重量为 450 吨国产第一支五米轧机超重型支撑辊的加工。



图 25 3.6 万吨黑色金属垂直挤压机

尽管中国重型机床行业在最近几年取得可喜的发展，但核心技术和基础研究仍显不足，机床可靠性、稳定性不高，机床整体制造工艺水平与质量有欠缺，高档重型数控机床仍需大量进口。比如：国产中高档重型机床的平均无故障工作时间不高于 1200 小时，而进口高档产品大多在 2000 小时以上^[33]。

轻量化、精密化、绿色化制造工艺

绿色制造要贯彻“3R”原则，即减量化、再利用、再循环 (Reduce, Reuse, Recycle)。而且，应该首先从减量化开始，减少材料及能源的消耗，如图 26 所示。其中，轻量化和精密化是主要发展趋势。

1. 轻量化和精密化

例如，2004 年美国通用汽车公司公布的汽车材料用量的百分比(图 27)，对比 1997 年和 2004 年的变化，可以清晰看出钢铁黑色材料的用量已从 71% 降低到 52%^[34]，汽车每降低重量 10%，可减少油耗 7%，减少污染排放 10%。

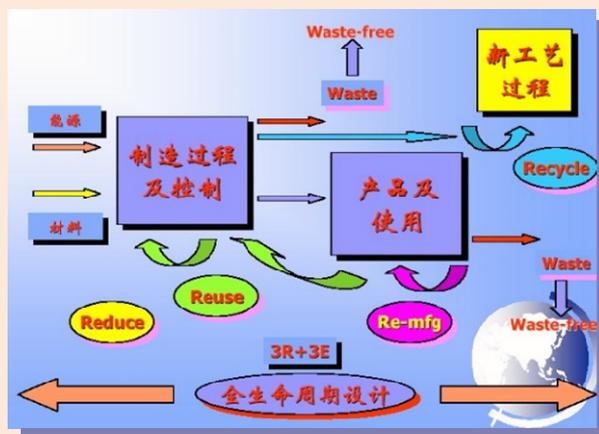


图 26 绿色制造的 3R 原则（减量化、再利用、再循环）

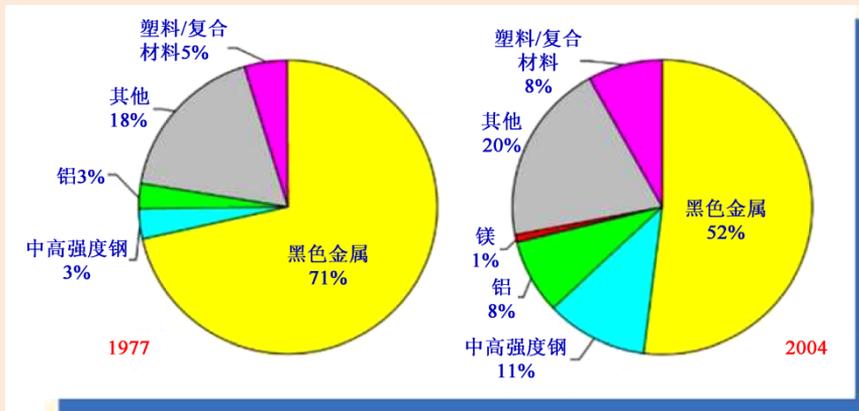


图 27 美国 GM 公司公布的汽车材料用量百分比 (1977 vs 2004)

2012 来, 中-美-加三国联合研发关于“镁合金前车架”项目, 预期可减重 44.5%, 减少零件 57.3% (图 28) [35]。工业发达国家汽车工业已广泛采用铝合金及镁合金精密成形制造工艺 (图 29)。

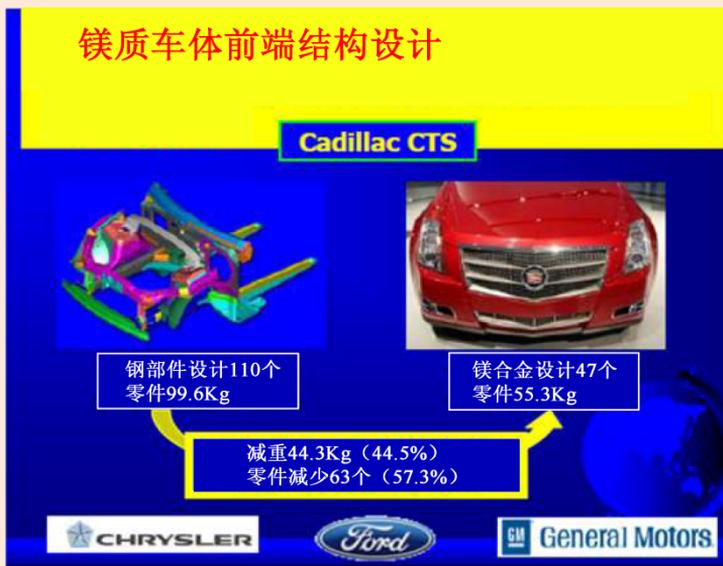


图 28 镁合金前车架部件减重 44.3 公斤, 减少零件 63 件



图 29 铝合金发动机支架代替钢支架重量从 27 减为 16 公斤

2. 再循环、再利用

再循环、再利用是绿色制造另一重要途径。镁合金被誉为“绿色材料”，因为它便于回收和再利用。美国 Meridian 压铸工厂专门建立了镁合金回收车间，如图 30 所示。



图 30 美国 Meridian 压铸工厂的镁合金再利用流程

五、先进基础工艺发展重点

工业强基是《中国制造 2025》的五大重要工程之一。发展先进基础工艺，要有所为、有所不为，要有重点。要按照：关键、共性、卡脖子、需国家层面支持的原则，要“凝练、聚焦”，要立足于提升先进基础工艺的可持续发展的创新能力（包含研究基地、平台和创新联盟），避免“碎片化”地全面铺开。

先进基础工艺发展重点

根据以上原则，要重点发展 14 项先进基础工艺，其中 10 项为通用先进基础工艺，4 项为专用先进基础工艺（表 1）。

表 1 十四项重点发展先进基础工艺

1	近净成形制造工艺	2	轻量化材料成形制造工艺
3	先进热处理及表面强化工艺	4	金属增材制造工艺
5	精密及超精密加工工艺	6	高效及复合加工工艺
7	特种成形及加工制造工艺	8	超大型零件成形及加工制造工艺
9	集成电路及半导体器件制造工艺	10	制造过程数字化、智能化技术
11	绿色钢铁流程基础工艺	12	资源节约、环境友好的石化流程基础工艺
13	纺织领域先进基础工艺	14	轻工领域先进制基础工艺

其中重点项目的有关技术内容如下。

1. 近净成形制造工艺

铸造、塑性加工、连接等成形工艺正在向近净成形（Near Net Shape Technology）方向发展。

发展重点：①航空发动机、重型燃机高温合金熔模铸造及定向和单晶铸造工艺，②航空发动机涡轮盘锻造及粉末冶金工艺，③精密高效塑性成形工艺，④高精度激光焊接工艺与相应高技术焊接材料技术，⑤精密注塑成形工艺。

2. 轻量化材料成形制造工艺

轻量化不仅是高端装备及产品的需求，也是绿色制造发展的重要方向。轻量化材料既包含铝、镁、钛等轻金属，也包含能减轻重量的超高强度钢等。

发展重点：①铝及镁合金压力下铸造成形工艺（低压、半固态、高真空压铸），②轻量化材料焊接工艺，③复合材料构件成形制造工艺，④铝及镁合金液压及塑性成形工艺，⑤超高强度钢成形工艺。

3. 先进热处理及表面强化工艺

热处理及表面强化是十分重要而又比较薄弱的基础工艺，而它很大程度上，决定了产品及零部件的最终寿命。

发展重点：①复杂结构零件性能及变形控制热处理工艺，②清洁热处理表层硬化工艺，③绿色高效真空热处理技术，④等离子喷涂及注入技术，⑤激光及电子束表面改性技术。

4. 金属增材制造工艺

增材制造又称 3D 打印。经过多年发展，已从原型制造发展为金属直接制造零件。增材制造与数字化制造相结合，将大大缩短研发周期和研发费用。

发展重点：①激光粉末烧结成形工艺，②选择性激光烧结工艺，③高能束流增材制造工艺，④增材制造用高性能金属粉末制备工艺。

5. 精密及超精密加工工艺

加工制造正在向精密及超精密方向发展，精密是指精度在 0.1~8 微米，超精密是指 0.1~100 纳米。当前精密加工工艺的关键问题是精度及可靠性差，难以满足用户，特别是汽车行业的需求。

发展重点：①精密及超精密装备（部件制造、整机装配）批产工艺，②精密及超精密加工（切削、磨削、研磨、抛光）工艺，③（超）微细加工及装配工艺，④加工工艺精度、可靠性分析、评价、实验及寿命预测。

6. 高效及复合加工工艺

高效及复合加工可以实现一次装夹，同时实现多工序或多面体加工。复合加工是经济可靠地实现高成形精度和极低的（可达 10nm 级）表面粗糙度，是航天航空行业、汽车工业发展的关键工艺。

发展重点：①高效及复合加工装备制造、装配及批产工艺，②高速及超高速切削加工与装配工艺，③复合材料切削加工工艺，④高效磨削加工工艺，⑤难加工金属材料（硬、脆、粘等）高效切削工艺。

7. 特种成形及加工制造工艺

发展重点：①碳纤维等复合材料成形及连接工艺，②激光、电子束、离子束、等离子弧等高能束加工工艺，③精密电火花加工工艺，④精密电解加工工艺。

8. 超大型零件成形及加工制造工艺

超大型装备及产品的制造工艺是极端制造的重要发展领域。

发展重点：①超大型铸锻件成形制造工艺，②超大型结构件焊接工艺，③超大型零件热处理工艺，④超大型零件切削加工工艺。

9. 集成电路及电子器件制造工艺

发展重点：①28~14nm 集成电路先进制造工艺，②集成电路高密度先进封装及 3D 微组工艺，③电子器件超精密加工工艺，④传感器等元器件超精密加工工艺。

10. 制造过程数字化、智能化技术

模拟仿真技术是制造过程数字化智能化的基础技术，正在从工艺仿真向工艺-组织-能预测，从宏观向微观、及多尺度，从单元工艺仿真向全流程模拟仿真技术发展。

发展重点：①先进成形及加工制造过程多学科、多尺度建模与仿真（工艺-组织-性能预测），②先进成形及加工制造过程的数字化、智能化技术，③智能柔性成形及加工制造过程及在线监控技术，④基于网络的设计-制造-服务一体化技术，⑤虚拟制造、装配及 3D 可视化技术。

11. 绿色钢铁流程基础工艺

资源节约、环境友好的可持续发展战略是钢铁流程制造的主要发展趋势。

发展重点：①低品位复杂成分铁矿深部无废采选成套工艺，②新型高效烧结生产与烟气治理协同控制工艺技术，③绿色、高效焦化工艺基础集成技术，④薄板坯高速连铸无头轧制基础工艺，⑤钢铁制造全流程物流高效运行、钢材组织性能及表面质量预报和在线监控基础工艺技术，⑥钢铁制造工艺流程中的能量流网络构建和集成优化基础技术。

12. 资源节约、环境友好的石化流程基础工艺

发展重点：①提高燃油经济性和油品质量的基础工艺，②重劣质原油资源最大化利用技术，③低成本低碳烯烃生产新工艺，④CO₂资源化利用技术，⑤绿色生态农药创新的关键工艺，⑥生物炼制关键技术。

13. 纺织领域先进基础工艺

发展重点：①新一代连续聚合纺丝工艺，②先进非织造加工工艺，③工业用纺织品特殊织造及多工艺复合加工工艺，④先进印染关键工艺。

14. 轻工领域先进制基础工艺

发展重点：①食品生物工程绿色制造工艺，②造纸清洁生产与节能减排降耗先进工艺，③水性生态聚氨酯合成革制备工艺。

先进基础工艺领域 12 项重点突破口

按照关键、共性、卡脖子、需国家层面支持的原则，要“凝练、聚焦”，要立足于提升先进基础工艺的可持续的创新能力的原则，可进一步再选择 12 项标志性的先进基础工艺（表 2）作为突破口，要集中优势力量，组织产学研用协同创新联盟，进行研究与开放和攻关，并建立相应的研究开发中心或基地。

表 2 十二项先进基础工艺重点突破口

1	航空发动机重型燃机高温合金熔模铸造及定向和单晶铸造工艺
2	铝及镁合金液压、冷弯等精密塑性成形工艺
3	增材制造用高性能金属粉末制备工艺
4	精密及超精密加工（切削、磨削、研磨、抛光）工艺
5	碳纤维等复合材料成形及连接工艺
6	超大型结构件成形、焊接、热处理及加工工艺
7	28-14nm 集成电路先进制造工艺
8	基于网络的设计-制造-服务一体化技术
9	钢铁制造全流程物流高效运行、钢材组织性能及表面质量预报和在线监控基础工艺
10	提高燃油经济性和油品质量的基础工艺
11	工业用纺织品特殊织造及多工艺复合加工工艺
12	造纸清洁生产与节能减排降耗先进工艺

六、先进基础工艺发展战略

发展目标

1. 2020 年

针对 14 个重点发展先进基础工艺领域，可选择 10~15 项具有战略性、带动性的关键先进基础工艺，进行研究与开发，技术上达到国际先进水平，并建成示范基地。

针对 14 个重点发展先进基础工艺领域，可以试点建立一批（5~10 个）国家级创新研究中心及一批（5~10 个）产、学、研、用协同创新联盟。

2. 2025 年

14 个重点发展先进基础工艺研究与开发全面取得进展，先进基础工艺总体上达到国际先进水平。

合理布局创新研究中心及协同创新联盟，建成 14 个（其中部分可整合现有国家级实验室或研究中心，部分可以试点新建）具有可持续创新和进一步提供先进基础工艺的能力和平台。

1. 加大研发投入、实施“工业强基工程”

长期来政府部门及企业“重型号，轻工艺”，在工艺领域又“重冷（加工制造）轻热（成形制造）”。建议要加强对基础工艺的重要作用的认识。

共性技术的研发，或竞争前技术的研发单靠企业无法完成，一定要靠政府部门加大对关键共性先进基础工艺的研发投入。应该设立“先进基础工艺研究基金”。

在《中国制造 2015》中实施“工业强基工程”时，要加强顶层设计，要站在战略高度，要从国家层面出发，制定有科学根据的实施计划，而不是一拥而上，伸手向国家要钱。

2. 建设 5~10 个独立、非营利的，能为跨行业、或全行业服务的先进的、关键的、竞争前共性基础工艺创新研究中心。

可以整合、重组已有研究平台及国家工程实验室，发挥已有国家工程实验室、国家工程技术研究中心，以及行业重点实验室与工程技术研究中心等的作用（前提是：非营利的、能为行业提供竞争前共性技术）。

在现国资委领导下的大型院所企业，可实行一院（所）两制，其中有部分专门从事共性基础研究部分及人员，不再用产值及利润来考核，而且要长期固定给予经费支持，鼓励他们安下心来，专门从事关键、先进共性技术研究。

考虑到科技发展的新趋势，要试点建立一批（5~10 个）非营利、独立法人的先进基础技术创新研究中心，如：近净成形制造、超精密加工制造、轻量化材料制造、金属增材制造、数字化设计与制造等创新研究中心。

3. 建设基础工艺共性技术创新体系及联盟

在国家级的层面上，组织建立一批独立、非营利的，包括相关企业、大

专院校和科研机构在内的多学科交叉的、关键的、先进基础工艺协同创新联盟。

4. 加强基础工艺（工程师、高级技工）人才的培养与引进

加强先进基础工艺研发的关键在于人才。不仅是需要有创新思维的领军人才，同时也需要脚踏实地的工程师和高级技工。高等学校不仅要培养科学家，也要培养工程师。